

水利科技图书出版

主编 陈德亮

Gates and Hoists

# 闸门与启闭设备

刘细龙 陈福荣 编著



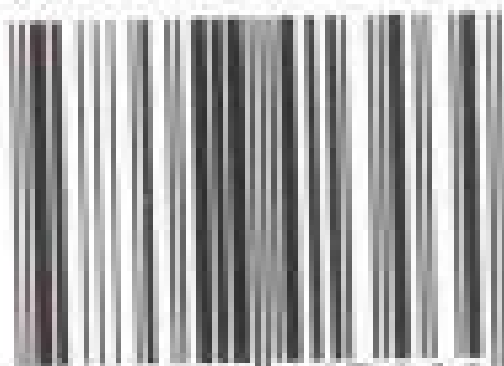
中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

丛书策划 王旭瑜  
责任编辑 李丽艳  
封面设计 王 鹏

# 取水输水建筑物 丛书

- |                          |                                                    |
|--------------------------|----------------------------------------------------|
| 倒虹吸管<br>Inverted Siphons | 取水工程<br>Water Diversion Projects                   |
| 渡槽<br>Aqueducts          | 桥梁与基础<br>Bridges and Foundations                   |
| 隧洞<br>Tunnel Conduits    | 跌水与陡槽<br>Drops and Steep Slopes                    |
| 泵站<br>Pumping Stations   | 量水技术与设施<br>Water Measurement Technique and Measure |

ISBN 7-5084-1346-6



9 787508 413464 >

ISBN 7-5084-1346-6 / TV · 288

定价 26.00元

## 内容提要

本书主要内容包括: 闸门及启闭设备的选型布置; 平面钢闸门的设计方法和实例; 弧形钢闸门的设计方法和实例; 其他类型钢闸门的介绍; 启闭设备类型和特性, 卷扬式和液压式启闭机的构造, 其他类型启闭设备的介绍; 拦污栅及清污设备的布置与选型等。

本书可供水工金属结构专业设计人员在设计中参考使用, 也可作为水利水电专业的学生学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

闸门与启闭设备/刘细龙, 陈福荣编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2002

(取水输水建筑物丛书/陈德亮主编)

ISBN 7-5084-1346-6

I. 闸… II. ①刘…②陈… III. ①闸门-基本知识②闸门启闭机-基本知识 IV. TV66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 099812 号

|                            |                            |                                                                                                                                                                    |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书<br>作<br>者<br>出版、发行       | 名<br>者<br>行                | 取水输水建筑物丛书 闸门与启闭设备<br>刘细龙 陈福荣 编著<br>中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sale@waterpub.com.cn<br>电话: (010)63202266(总机)、68331835(发行部) |
| 经<br>售                     | 售                          | 全国各地新华书店                                                                                                                                                           |
| 排<br>印<br>规<br>版<br>印<br>定 | 版<br>刷<br>格<br>次<br>数<br>价 | 中国水利水电出版社微机排版中心<br>北京密云红光印刷厂<br>850×1168 毫米 32 开本 10.375 印张 279 千字<br>2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第一次印刷<br>0001~4100 册<br>26.00 元                                    |

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 序

我国是一个人均水资源紧缺的国家,加之水资源在时间和空间上分布不均,导致水资源供需矛盾更加尖锐。缺水已成为我国经济和社会进步的重要制约因素。努力实现水资源的优化配置,满足经济社会对水资源的需求,以水资源的可持续利用来支撑经济社会的可持续发展,这是建设水利事业的根本目标和基本任务。

1949年新中国成立以来,我国的用水状况发生了很大变化。新中国成立初期,当时水利建设的主要任务是发展农业,解决粮食问题。1949年全国总供用水量仅1000余亿立方米,而当时农业用水就占全部用水量的90%以上,城镇工业用水比重很低。随着经济及社会的发展,特别是改革开放20年来,由于城市化进程的加快,这种用水状况有了很大变化。到1997年,全国总用水量已达5566亿 $\text{m}^3$ ,其中农业用水占70.4%,而城市生活和工业用水已占到总用水量的30%。这一趋势是改革开放以来经济社会发展的必然结果。从今后的发展看,农业虽是用水大户,但农业用水的重点是解决节水灌溉,提高用水效率的问题。据专家分析,如果将农业用水的平均有效利用系数从目前的0.43提高到0.55~0.60,则在不增加农业用水的情况下,完全能保证2030年人口达16亿时的粮食安全。如果再加上农业结构的调整等其他因素,农业用水总量将基本不会有大的改变。中国未来的供水矛盾将集中在城市,供水将主要用于发展城市、发展工业及保护生态与环境。例如,南水北调工程的供水原则就是以城市供水为主,兼顾生态及农业。

实现水资源的优化配置有各种手段,而工程手段就是其中之一。无论是资源性缺水还是工程性(经济性)缺水,其最主要的工

程手段都是在水源处修建取水工程，然后通过输水工程送到用水处。有时，为了把丰水地区的水资源调到缺水地区，还需要实施跨流域的远距离调水，对水资源进行地域上的再配置。在 21 世纪，跨流域调水将是中国水利建设的一大特点。国内外实践经验表明，采用调水工程这一工程手段来改善水资源的不利状况，是促进缺水地区经济发展的重要举措。大的调水工程往往还成为国家发展战略的重要组成部分。我国南水北调工程就是改善国家资源配置、支持经济社会发展的基础性战略工程。此外，为了提高用水效率，实施节约用水，合理计价收费，还需采取量水技术设施这一工程手段。针对上述形势发展的需要，我们特组织有关专家编写了这套《取水输水建筑物丛书》，以更好地为水资源的优化配置服务。

《取水输水建筑物丛书》(以下简称《丛书》)共十一个分册，分别为：介绍从天然水源或人工水源取水的《取水工程》、《泵站》(含输水渠道上的多级提水泵站)、《水闸》(含输水渠道上的节制闸、分水闸、退水闸等)及与之配套的《闸门与启闭设备》；为节约用水、科学用水、计价收费而设置的《量水技术与设施》；以及在输水渠道跨越天然或人工障碍时，在渠道上修建的一系列建筑物《渡槽》、《倒虹吸管》、《隧洞》、《涵洞》、《桥梁与基础》及《跌水与陡坡》等。以南水北调中线工程为例，该工程总干渠全长 1200 多公里，途经三省两市，横跨长江、黄河、淮河、海河四大流域，穿越大小河流 219 条，需修建各类取水及输水建筑物 960 多座，仅大型倒虹吸管就有 95 座，渡槽有 49 座；还有大量的涵洞、节制闸、分水闸、退水闸及与之配套的闸门和启闭设备；还有大批桥梁工程；总干渠上的排水建筑物即达 400 多座。如果加上输水分干渠、支渠上的建筑物，其数量十分可观。此外，在各级输水渠道上还有大量的量水技术设施。以上这些，均是我们这套《丛书》的服务范围。

本《丛书》的服务宗旨是：为水资源优化配置，为提高用水效率，为实现水资源的可持续利用服务。

本《丛书》的编写遵循以下基本原则：

1. 《丛书》的服务对象以大学本科毕业的水利工程技术人员为

主；讨论的工程规模以中型为主，兼顾大型（个别分册例外，如《跌水与陡坡》主要以中小型为主）；写法以“实用”为主。在扼要阐明基本原理的基础上，着重介绍工程的布置、结构形式、构造、计算公式的应用，并介绍一些工程实例，便于广大读者在设计中应用和参考。

2. 《丛书》在重点介绍目前常用的理论方法的同时，注意反映国内外的先进技术，用前瞻眼光预计未来经济社会可持续发展的重大决策走向；注意总结经过实践证明，技术上先进、经济上合理、运用安全可靠的先进经验。使《丛书》既具有现实指导性，又有前瞻性。

3. 为了反映计算机应用技术的发展，《丛书》在有关部分介绍计算机辅助设计或计算的有关内容，但不附源程序。

4. 《丛书》不介绍一般性的施工技术内容，但某些与设计关系密切的施工问题，有特色的施工内容或特殊的施工问题，对读者确有参考价值的，要适当编入。

5. 《丛书》面向全国，尽可能注意照顾地区特点。特别是寒冷地区的冻害及多沙地区的泥沙问题，在建筑物的布置、形式、构造及计算方面加以兼顾。

这套《丛书》在编写过程中得到了各方面的大力支持和真诚帮助，在此一并表示衷心感谢。对书中的缺点、疏漏和不妥，恳请读者批评指正。

陈德亮

2002年8月

# 前 言

水工金属结构设备是水利水电工程中的重要设备之一。近 20 年来我国兴建了大量的水利水电工程，水工金属结构设备的技术水平已有很大的提高，许多大孔口、高水头的闸门和大容量的门式启闭机、液压启闭机等设备相继制造、安装完毕并投入运行，标志着我国水工金属结构设备的技术参数、规模都上了一个台阶，基本达到了国际同类型设备的水平。

闸门与启闭设备作为主要的水工金属结构设备，广泛应用于各类水利水电工程中，对工程的正常运行和充分发挥效益起着十分重要的作用。在取水输水工程中，闸门与启闭设备大量应用在节制闸、分水闸、退水闸及涵洞的进出口等地方，通过闸门灵活可靠地启闭来发挥它们的功能与效益、维护建筑物的安全。

本书为《取水输水建筑物丛书》的《闸门与启闭设备》分册，主要内容包括：闸门及启闭设备的选型布置；平面钢闸门的设计方法和实例；弧形钢闸门的设计方法和实例；其他类型钢闸门的介绍；启闭设备类型和特性，卷扬式和液压式启闭机的构造，其他类型启闭设备的介绍；拦污栅及清污设备的布置与选型等。

本书由广东省水利电力勘测设计研究院刘细龙、陈福荣编著。全书共六章，其中第二章第六节由王远编写；第三章第四节由肖段龙编写；其余部分由刘细龙编写。全书由刘细龙、陈福荣统稿。

本书在编写过程中得到广东省水利电力勘测设计研究院领导

和机电室领导、本专业同事和技术质量部的有关人员的大力支持，  
在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，诚恳希望读者对书中错漏之处批评指正。

编者

2002 年 8 月

# 目 录

序

前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第一章 概述</b> .....      | 1   |
| 第一节 闸门的作用、组成和分类 .....    | 1   |
| 第二节 闸门的荷载和材料 .....       | 7   |
| 第三节 设计闸门的主要工作内容和方法 ..... | 22  |
| <b>第二章 平面钢闸门</b> .....   | 32  |
| 第一节 平面钢闸门的结构布置 .....     | 32  |
| 第二节 平面钢闸门的结构计算 .....     | 37  |
| 第三节 平面钢闸门的零部件设计 .....    | 59  |
| 第四节 平面钢闸门的门槽与通气孔 .....   | 86  |
| 第五节 平面闸门启闭力的计算 .....     | 97  |
| 第六节 平面钢闸门计算实例 .....      | 100 |
| <b>第三章 弧形钢闸门</b> .....   | 120 |
| 第一节 弧形钢闸门的结构布置 .....     | 120 |
| 第二节 弧形钢闸门的结构计算 .....     | 126 |
| 第三节 弧形钢闸门的零部件及启闭力 .....  | 139 |
| 第四节 弧形钢闸门计算实例 .....      | 153 |
| <b>第四章 其他形式的闸门</b> ..... | 178 |
| 第一节 人字闸门 .....           | 178 |
| 第二节 液压翻板闸门 .....         | 204 |
| 第三节 升卧式闸门 .....          | 209 |
| 第四节 铸铁闸门 .....           | 213 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>第五章 启闭设备 .....</b>    | <b>217</b> |
| 第一节 概述 .....             | 217        |
| 第二节 卷扬式启闭机 .....         | 228        |
| 第三节 液压式启闭机 .....         | 245        |
| 第四节 其他启闭设备 .....         | 260        |
| <b>第六章 拦污栅 .....</b>     | <b>270</b> |
| 第一节 拦污栅的布置及清污方式 .....    | 270        |
| 第二节 拦污栅的设计 .....         | 282        |
| 附录 A 型钢规格和截面特性 .....     | 286        |
| 附录 B 闸门止水橡皮定型尺寸及性能 ..... | 315        |
| 附录 C 摩擦系数 .....          | 318        |
| 参考文献 .....               | 319        |

# 第一章 概 述

## 第一节 闸门的作用、组成和分类

### 一、闸门的作用

闸门是水工建筑物的重要组成部分之一，它可以根据需要封闭建筑物的孔口，也可全部或局部开启孔口，用于调节上下游水位和流量，从而获得防洪、灌溉、供水、发电、通航、过木过筏等效益，还可用于排除漂浮物、泥沙、冰块等，或者为相关建筑物和设备的检修提供必要条件。闸门通常设置在取水输水建筑物的进、出水口等咽喉要道，通过闸门灵活可靠地启闭来发挥它们的功能与效益及维护建筑物的安全。

例如，在一些取水供水工程的输水管道上一般设置节制闸门，用于根据需要调节控制流量；在泵站进水口和一些隧洞、涵管、倒虹管等的进、出水口一般设置有检修闸门，为检修水工建筑物和泵组设备提供条件；在水库溢流坝或溢洪道上一般设置有泄洪工作闸门，用于控制水库的水位和泄往下游的洪水流量，最大限度地发挥水库的功能效益。

### 二、闸门的组成

从广义上讲，闸门包括闸门与阀门。闸门一般主要由活动部分、埋设部分、启闭设备三大部分组成。图 1-1 是以平面闸门为例的三大部分的示意图。

活动部分：是封闭孔口而又能根据需要开启孔口的闸门主体，一般称为门叶。

埋设部分：埋设在土建结构中的构件，主要是孔口的门楣、底槛和支承轨道等，通过这些构件将门叶承受的荷载（包括自重等）传递给土建结构，并与门叶一起形成闸门的止水结构及为门叶的活动

提供导向和限位。这部分一般称为门槽埋件。

启闭设备：是控制门叶开启、关闭的操作机械。

闸门的门叶一般由面板、构架、支承行走部件、吊具、止水部件等组成。图 1-2 是以滚轮式平面闸门为例的示意图。

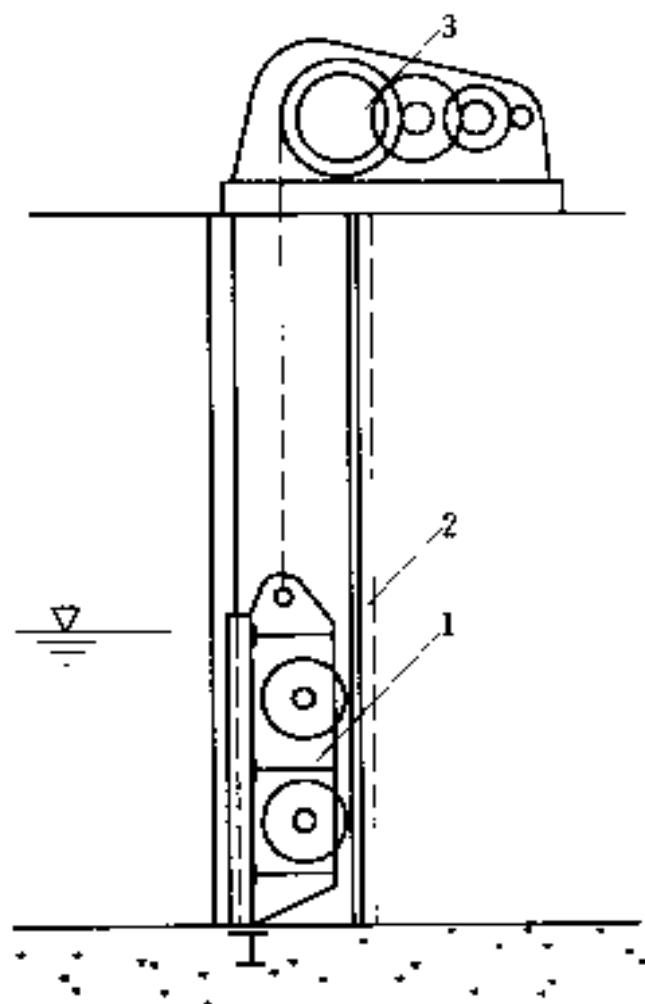


图 1-1 闸门的组成

1—活动部分；2—埋设部分；  
3—启闭设备

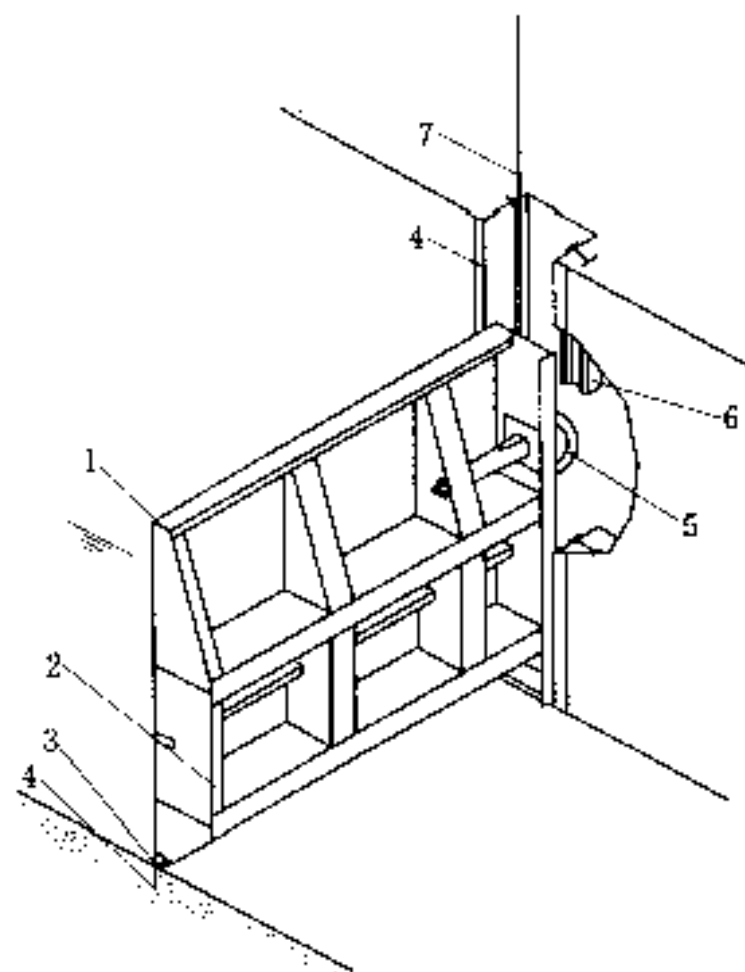


图 1-2 平面闸门的组成

1 面板；2—构架；3—止水部件；  
4—止水埋设件；5—支承行走装置；  
6 轨道；7—吊具

面板：封闭孔口的挡水部件，直接承受水压力，然后传给构架。

构架：由梁系组成的框架，有足够的强度和刚度，支撑面板，把面板传来的水压力传递到支承部件上。

支承行走部件：把构架传来的力传给土建基础，并保证闸门移动时灵活可靠。

吊具：与启闭设备相连接的部件。

止水部件：用于封闭闸门与埋设部分间隙的部件，使闸门封闭孔口时减少漏水或不漏水。

门槽埋件一般包括支承行走埋设件、止水埋设件、衬砌埋

设件。

启闭设备的形式多种多样，在水利工程中常用的有卷扬式、液压式和螺杆式启闭机等。启闭设备一般包括动力装置、传动装置、制动装置、连接装置、支承行走装置。本书第五章将作详细论述。

### 三、闸门的分类

闸门的种类繁多，分类方法也很多，一般可按闸门的工作性质、使用材料和制造方法、构造特征、孔口性质及规模来分类。

#### （一）按闸门的工作性质分类

按闸门的工作性质可分为工作闸门、事故闸门、检修闸门。

工作闸门是指水工建筑物正常运行时需要关闭孔口的闸门。这种闸门一般使用频繁，要求在动水条件下启闭，甚至部分开启以控制流量。但也有在静水条件下操作的工作闸门，如船闸通航孔的工作闸门。

事故闸门是指水工建筑物或有关设备发生事故时使用的闸门。为防止事故扩大，事故闸门一般要求在动水条件下关闭孔口，截断水流；在事故清除后，则可根据具体情况在动水或静水条件下开启。如果有快速关闭的要求，则称快速事故闸门。

检修闸门是指水工建筑物或有关设备检修时使用的闸门。一般在静水条件下操作。

#### （二）按闸门的使用材料分类

按闸门（主要指门叶结构）使用的材料可分为钢闸门、钢筋混凝土闸门、木闸门等。

##### 1. 钢闸门

钢闸门具有自重轻、承载能力大、性能和质量稳定、施工和维护简单、有一定的抗震性、可减少启闭设备的投资等优点。随着我国的综合国力和制造技术的不断发展，目前的大中型工程中均采用钢闸门。

为了保证安全，延长使用寿命，钢闸门须采取防腐蚀措施，通常采用热喷锌后涂封闭漆的方案，在选用涂料时应注意其化学成

分，尤其是在源水工程中，以避免对水造成污染。

钢闸门按制造方法的不同又可分为焊接闸门、铆接闸门、铸造闸门等。

焊接钢闸门有制造、安装简单，工期短等优点，在工程中使用最广泛。大、中型闸门中的长直焊缝还可以采用自动焊，以减轻劳动强度，加快生产速度，提高产品质量和降低生产成本。受运输尺寸和重量的限制，大、中型闸门制造时通常分解成几块，运到现场后再拼装焊接成整体。有时受安装现场条件限制，如在冬季气温低于 $-15^{\circ}\text{C}$ 的情况下，难以保证安装焊缝的焊接质量，闸门安装接缝可采用螺栓连接。

铆接闸门由于耗钢量大、工艺要求严格、制造费用高等缺点，目前已经很少采用。

铸造闸门用于孔口尺寸较小、结构复杂的情况，如平板闸阀、蝴蝶阀、针形阀等。铸造的劳动强度及加工工作量大，费用一般较高。目前国内已有大量专业制造厂家生产的系列定型产品，可根据需要选用。小型闸门也可用铸铁闸门，有布置简单紧凑、耐腐蚀等优点，现在国内一些企业，特别是环保行业的制造厂已经有一系列的定型产品。

## 2. 钢筋混凝土闸门与木闸门

钢筋混凝土闸门制造、维护较简单，造价低廉，适用于偏远地区的一些小型工程。但其自重偏大，加大了启闭设备的容量，并且混凝土有透水性，结构抗震性差，一般大、中型工程中不推荐使用。

木闸门适用于孔口和水头都很小的情况。但木材在水中易腐朽，使用寿命有限，需经常更换，故目前很少采用。

随着国民经济的发展，我国钢产量已位居世界前列，机械加工和焊接技术水平也不断提高，电力供应较充足。因此，在工程设计中应优先考虑采用钢闸门。

### （三）按闸门的构造特征分类

按闸门的构造特征可分为：平面闸门、弧形闸门、其他形式闸

门等。

### 1. 平面闸门

平面闸门是水工建筑物最常用的闸门，它的结构较为简单，操作运行方便可靠，对建筑物的布置也较易配合。简单的平面闸门只是一块平面的整板。比较复杂的则是梁格式的平面闸门，而其面板又可做成平面或曲面的形式。

平面闸门根据其移动方式不同，有直升式、横拉式、转动式、浮箱式等几种。

直升式平面闸门是使用最为广泛的门型，它是一块平板式门叶卡在门槽内而封闭孔口的。一般可按支撑行走部分的构造形式，分为滑动式、滚轮式、链轮式。门叶的结构形式也很多，如板梁形、拱形、壳形等。门叶的块数一般是一块，也有分成两块或多块的。还有一种闸门，升起后平卧在排架上，称为升卧式平面闸门，这类闸门适合用在地震烈度较大、启闭排架不宜太高的地区。

横拉式平面闸门是在平面闸门门叶的底部或顶部安设行走滚轮，可沿轨道横向移动，因它只能在静水条件下操作，故多用于船闸闸首工作门。

转动式平面闸门的形式比较多。横轴转动平面闸门按轴安设在底部、中部或顶部而分为舌瓣门、翻板门和拍门。竖轴转动的平面闸门有一字门和人字门。一字闸门是指绕端部竖轴转动的平面闸门，也称掩门。人字门是由左右两扇绕竖轴转动的闸门组成，在关闭位置时两扇闸门形成三铰拱形式，成“人”字形，故得名。一字门和人字门只能在静水条件下操作，一般用于船闸闸首工作门。

浮箱式平面闸门的门叶形如空箱，在水中可以浮动，而当在箱内充水时又能沉没在水中。它的用法是将空门拖运到门槽位置后，充水使门叶下沉就位。浮箱式平面闸门只能在静水条件下操作，一般用作检修闸门。

### 2. 弧形闸门

弧形闸门也是应用十分广泛的一种门型，它将一块弧形门叶用

支臂铰支于铰座上，一般铰心就是弧面中心，所以水压力总是通过铰心，运行时阻力矩较小。弧形闸门两侧的支臂一般做成双支臂的形式，对于高度较大的弧形闸门，其支臂也有做成三支臂的形式。根据支臂的布置，则有直支臂和斜支臂之分。弧形闸门的支承铰主要分为铰链和铰座两部分，它承受支臂的推力并传到基础上。但是，弧形闸门的设计、施工和安装一般比较复杂。它需要较长的闸墩和墩内承受集中推力的钢筋。

### 3. 其他形式的闸门

闸门的形式是多种多样的。例如：用于宽而浅露顶式孔口的有扇形闸门、鼓形闸门和屋顶式闸门等借水力自动启闭的闸门，还有在斜面上升降的圆辊闸门等；用于通航船闸的，除人字闸门、“一”字闸门、横拉闸门外，还有屋顶式闸门、竖轴弧形闸门和三角闸门等在静水中启闭的闸门；用于竖井中的有圆筒闸门等；用于压力管道中的闸门主要是阀门，有圆筒阀、平板闸阀、蝴蝶阀、球形阀、针形阀、锥形阀等，大多数阀门可以选用定型成熟的产品。这些闸门的形式虽然各异，但设计原理和门体构造等却基本类似。

本书主要介绍水工建筑物中用得比较多的平面钢闸门（包括人字门、升卧门等）和弧形钢闸门的设计。其他一些较特殊、运用范围不是很广的闸门，读者如需要可参考有关资料。

#### （四）按孔口性质分类

按孔口性质可分为：露顶式闸门和潜孔式闸门两类。

露顶式闸门是指当闸门关闭时，闸门门叶顶部高出上游正常高水位的闸门。露顶式闸门关闭时，闸门两侧和底缘与门槽埋件接触，一般设有侧止水和底止水装置。

潜孔式闸门在关闭孔口时，闸门门叶顶部低于上游正常高水位，此时闸门的四周与孔口周边接触，可封闭矩形或圆形孔口。这类闸门的止水要复杂一些，尤其是潜孔式弧形闸门的顶止水需慎重处理。

#### （五）按闸门的规模分类

根据《水工金属结构产品生产许可证实施细则》的规定，闸门

可根据孔口尺寸和挡水高度分为：超大型、大型、中型、小型闸门，具体划分见表 1-1。

**表 1-1**            平面滑动门、平面定轮门、平面链轮门、  
人字门、弧形闸门分档表

| 规    格                                               | 小型         | 中型       | 大型        | 超大型      |
|------------------------------------------------------|------------|----------|-----------|----------|
| $FH = \text{门叶面积 (m}^2\text{)} \times \text{水头 (m)}$ | $\leq 200$ | 200~1000 | 1000~5000 | $> 5000$ |

## 第二节 闸门的荷载和材料

### 一、闸门的荷载

#### (一) 荷载的种类和组合

作用在闸门上的荷载，按设计条件和校核条件划分为两大类，即设计荷载和校核荷载。

##### 1. 设计荷载

设计荷载是指闸门在正常工作条件下经常作用的荷载，或在运行期间常常不定期重复作用的荷载，包括以下各项：

- (1) 闸门自重（包括加重）。
- (2) 在设计水头下的静水压力。
- (3) 在设计水头下的动水压力。
- (4) 在设计水头下的波浪压力。
- (5) 在设计水头下的地震动水压力。
- (6) 在设计水头下的水锤压力。
- (7) 泥沙压力。
- (8) 风压力。
- (9) 启闭力。

##### 2. 校核荷载

校核荷载是指闸门在校核条件下承受的荷载，包括非运用情况下不经常作用的和偶然作用的荷载。校核荷载包括以下各项：

- (1) 闸门自重（包括加重）。
- (2) 在校核水头下的静水压力。
- (3) 在校核水头下的动水压力。
- (4) 在校核水头下的波浪压力。
- (5) 在校核水头下的地震动水压力。
- (6) 在校核水头下的水锤压力。
- (7) 泥沙压力。
- (8) 风压力。
- (9) 冰、漂浮物和推移物质的撞击力。
- (10) 温度荷载。
- (11) 启闭力。

闸门有特殊要求时，还应包括其他特殊荷载。如闸门前后有水下爆破时，应专门研究爆破产生的冲击波对闸门的影响等。

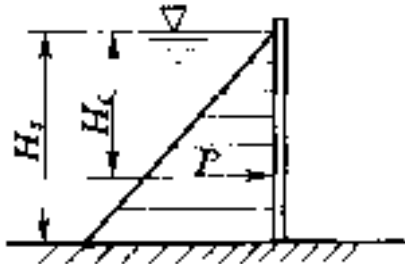
设计闸门时应根据闸门不同的应用情况和工作条件选取荷载及各荷载实际上可能同时出现的最不利的组合。

## (二) 荷载的计算

### 1. 静水压力

闸门的主要荷载为静水压力。当闸门处于封闭孔口的位置挡水时，作用在闸门挡水面上任何一点单位面积上的静水压力与该点在水面以下的深度成正比，压力方向则垂直该挡水面。露顶式和潜孔式平面闸门及弧形闸门在不同的上下游水位情况下的静水压力，可按表 1-2 中的公式计算。

表 1-2 静水压力计算

| 序号 | 水 压 力 图 形                                                                           | 计 算 公 式                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  |  | 总水压力：<br>$P = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 B$ $P \text{ 力作用点位置：}$ $H_c = \frac{2}{3} H_1$ |

极),另一个电极在底部。此时电泳作用即会使沉渣变浓。其作用可分三个阶段:第一步,颗粒下沉的速度将是重力与电泳力之和;第二步,沉渣将受重力压缩及电渗析而增浓;第三步,当重力作用已完成后,电渗析仍将继续起作用。

### 1.2.5 电场过滤

以上电泳及电渗析效应亦可用于促进过滤。把电极置于滤饼的两侧,通常滤饼内的固体颗粒总是带负电荷,则电场置于滤饼上面的是正极。这样粒子会向上移动而脱离溶液。如此电场可促使形成更疏松的滤饼。

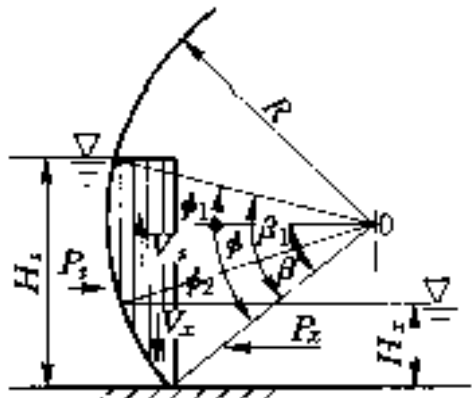
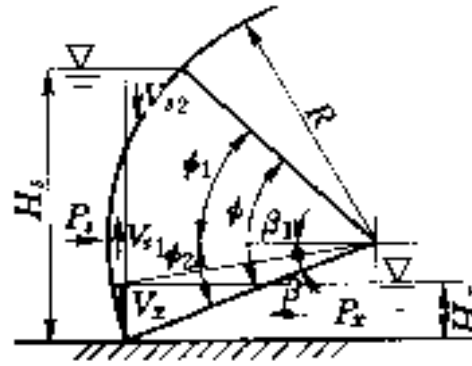
电场还可以使过滤的推动力增加一个附加值,以提高滤液流速(包括脱水亦然)。过滤理论系假设水力压差与静电位压差有加和作用。

近期,关于电场过滤的理论与实践有望在商业推广方面取得进展,据说已有两种商品面市。不论如何,电场过滤是一个有待发展的领域。

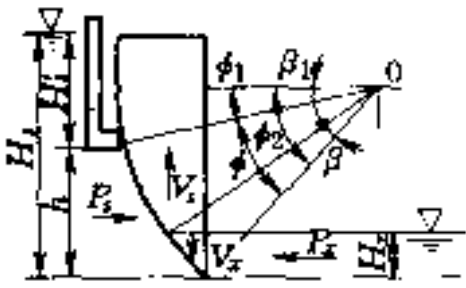
### 参 考 文 献

- 1 Svarovskyl. Solid-liquid Separation, 4th ed. Oxford: Butterworth/Heinemann, 2000, 4~26

续表

| 序号 | 水压力图形                                                                               | 计算公式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  |   | $P_y = \frac{1}{2} r H_1^2 B$ $V_y = \frac{1}{2} r R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2 \phi_2 - \sin 2 \phi_1) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} r H_2^2 B$ $V_x = \frac{1}{2} r R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2 \beta_1 + \sin 2 \phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_y - P_x)^2 + (V_y - V_x)^2}$                              |
| 8  |  | $P_y = \frac{1}{2} r H_1^2 B$ $V_y = \frac{1}{2} r R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - \sin 2 \phi_1 - \sin (\phi_1 - \phi_2) - 2 \sin \phi \sin^2 \left( \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} r H_2^2 B$ $V_x = \frac{1}{2} r R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2 \beta_1 + \sin 2 \phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_y - P_x)^2 + (V_y - V_x)^2}$ |

续表

| 序号 | 水压力图形                                                                              | 计 算 公 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9  |  | $P = \frac{1}{2} \gamma (H_1 + H'_1) h B$ $V_1 = \frac{1}{2} \gamma R^3 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2 \phi_1 + \sin 2 \phi_2) + \frac{2 H'_1}{R} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \right] B$ <p><math>P_x</math>、<math>V_x</math>、<math>P</math> 计算公式同 (6)</p> <p>式中: <math>P_1</math> 为上游水平分力, kN; <math>V_1</math> 为上游垂直分力, kN; <math>P_2</math> 为下游水平分力, kN; <math>V_2</math> 为下游垂直分力, kN; <math>H_1</math> 为上游水头, m; <math>H_2</math> 为下游水头, m; <math>R</math> 为弧门面板曲率半径, m; <math>\gamma</math> 为水重度 (一般对淡水可取 <math>10 \text{ kN/m}^3</math>; 对海水可取 <math>10.4 \text{ kN/m}^3</math>; 含沙水 <math>\gamma</math> 按试验确定), <math>\text{kN/m}^3</math>; <math>B_{1,2}</math> 为两侧止水间距, m; <math>B</math> 为孔口宽度, m; <math>h</math> 为闸门高度 (计算到顶止水), m</p> |

## 2. 动水压力

闸门在启闭过程中或闸门在局部开启的情况下工作时, 水处于流动状态而产生动水压力作用在闸门上。动水压力包括时均值及脉动值两部分。脉动压力会引起闸门的振动, 但大多数是属于轻微振动, 只有极少数工作条件恶劣的闸门在某些工况下, 会引起强烈的振动, 甚至造成闸门严重破坏, 如高水头动水启闭的工作闸门在某个特定小开度时易出现较强烈的振动。

影响动水压力的因素较多, 如与水流相接触的闸门底缘、门顶及止水的外形轮廓及门前水头、开度、门槽的形式和布置等, 而且动水压力的作用机理尚不完全清楚, 要定量计算比较困难, 只能具体情况具体分析。

对于水头不是很高且不经常局部开启运行的闸门, 只要门后通气充分, 门槽及闸门底缘形状合理, 一般可不考虑动水压力的脉动

对闸门造成的影响。在相同水头的情况下，由于一部分压力水头转化为流速水头，门上的动水压力略小于静水压力，因而垂直作用在闸门面板上的动水压力，一般按静水压力的分布规律计算即可。

对于高水头下经常动水操作的闸门或经常局部开启的工作闸门，设计时应考虑闸门各部件承受不同程度的动水压力。具体方法是，按闸门不同形式及其水流条件，将作用在闸门不同部件上的静水压力分别乘以不同的动力系数来考虑（动力系数取值范围为 1.0～1.2）。但进行闸门刚度验算时，不考虑动力系数。大型工程中水流条件复杂且又重要的工作闸门，其动力系数应做模型试验进行专门的研究。

水流从闸门底部流过，会在闸门底缘产生上托力（底止水的上游）和下吸力（底止水的下游，即底部真空而产生的大气压力）。其计算方法见第二章第六节。

### 3. 波浪压力

取水输水建筑物前水域一般不大，闸门设计时一般不考虑波浪压力。深孔取水口的闸门，由于水头较高，即使闸前水域比较大，其波浪压力对闸门的影响也比较小，也可不计波浪压力。少数水闸的闸门，当闸前为开阔的水域，需要计算波浪压力时，可参考建筑物所在地的有关资料，如无可靠资料，可根据有关规范进行计算。

### 4. 地震动水压力

地震对闸门结构起作用的力为地震动水压力，可根据现行 SL 203—97《水工建筑物抗震设计规范》的有关规定进行计算。对于下游无水的浅孔闸门，地震动水压力占静水压力的比值为

|          |        |
|----------|--------|
| 设计烈度 7 度 | 3.25%  |
| 设计烈度 8 度 | 6.50%  |
| 设计烈度 9 度 | 13.00% |

对于下游有水且为门高的一半的浅孔闸门，地震动水压力占静水压力的比值为

|          |       |
|----------|-------|
| 设计烈度 7 度 | 4.33% |
|----------|-------|

|          |        |
|----------|--------|
| 设计烈度 8 度 | 8.67%  |
| 设计烈度 9 度 | 17.33% |

对于潜孔闸门来说,各设计烈度地震动水压力占深孔闸门静水压力比值要小些。此外,地震动水压力对露顶式弧形闸门支腿影响较大,设计时不容忽视。

#### 5. 泥沙压力

当闸门前可能有泥沙淤积时,应考虑泥沙压力,其值可按下式计算:

$$P_n = \frac{1}{2} \gamma_n h_n^2 \lg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) B \quad (1-1)$$

$$\gamma_n = (\gamma_s - 1)(1 - \rho)$$

式中:  $P_n$  为泥沙压力, kN;  $\gamma_n$  为泥沙在水中的重度, kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma_s$  为泥沙颗粒重度, kN/m<sup>3</sup>;  $\rho$  为泥沙的空隙率;  $h_n$  为泥沙淤积高度, m;  $B$  为门上泥沙淤积宽度, m;  $\varphi$  为泥沙的内摩擦角。

#### 6. 漂浮物的撞击力

漂浮物撞击力可按下式计算:

$$P_x = W_p v / 9.81t \quad (1-2)$$

式中:  $P_x$  为漂浮物撞击力, kN;  $W_p$  为漂浮物重度, kN/m<sup>3</sup>, 根据河流漂浮物情况, 按实际调查确定;  $v$  为水流速度, m/s;  $t$  为撞击时间, s, 应根据实际资料估算。

流冰对闸门的撞击力, 按现行 DL 5077—1997《水工建筑物荷载设计规范》所列公式确定。

#### 7. 其他荷载

(1) 闸门自重: 在结构设计中一般可不予考虑。

(2) 闸门启闭力: 对门体部分的构件设计时可不予考虑, 但对吊耳、拉杆等有关部件则必须进行核算。

(3) 水锤压力: 可根据具体情况按水力学一般公式进行计算, 或采用相关专业的计算成果。

(4) 风压力: 可按现行 GBJ9—87《建筑结构荷载设计规范》有关规定进行计算。

(5) 人群荷载：闸门上设有交通桥或工作桥时，如船闸人字门，门上尚应考虑人群重量，一般可按  $2.5\text{kN/m}^2$  计。桥侧栏杆扶手的水平荷载可按  $0.75\text{kN/m}^2$  计。

## 二、闸门的材料

在设计闸门的承重结构和零部件时，应从工程的实际出发，合理选用材料。所选材料应能满足设计和制造工艺的要求，同时应特别注意节约材料。设计时首先考虑采用普通材料，因为一般来说普通材料的价格便宜，易于供货，而且制造工艺和技术比较普及，质量有保证，有利于降低造价。当普通材料不能满足设计强度要求，不能保证工作安全可靠时；或制造中可能遇到技术工艺困难时；或为了改善设备运行条件从而减少运行费用，减轻运行人员的劳动时；或工程有其他特殊要求时，才考虑采用特殊材料，但是其价格相对较高。例如，闸门孔口尺寸较大，要控制闸门的重量，降低设备或建筑物的总造价，承重结构可采用高强度材料。再例如，为了减少摩阻力从而减少甚至避免采用配重，使得闸门靠自重可以动水关闭，可以采用摩擦系数较小的钢基铜塑复合材料作支承滑块或轴套。

### (一) 常用材料

#### 1. 闸门承重结构的钢材

目前我国闸门承重结构的钢材，一般是平炉或氧气转炉 Q235、16Mn、16Mnq，其质量标准应分别符合现行标准 GB700《碳素结构钢》、GB1591《低合金结构钢》、GB714《桥梁建筑用热轧碳素钢》的规定要求，可根据不同情况按表 1-3 选用。

闸门承重结构的钢材应保证其抗拉强度、屈服点、伸长率和硫、磷的含量合乎要求，对焊接结构尚应保证碳的含量合乎要求。

主要受力结构和弯曲成形部分钢材应具有冷弯试验的合格保证。

承受动载的焊接结构钢材，应具有相应计算温度冲击试验的合格保证。Q235 各钢号的相应计算温度，见表 1-3。承受动载的非焊接结构钢材，必要时，也应具有冲击试验的合格保证。

表 1-3

闸门及埋件采用的钢号

| 项次 | 使用条件 |                                   | 计算温度<br>(°C)        | 钢 号                                    |            |
|----|------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------------|------------|
| 1  | 闸门部分 | 大型工程的工作闸门, 大型工程的重要事故闸门, 局部开启的工作闸门 | —<br>20<br>0<br>-20 | Q235A<br>Q235B<br>Q235C<br>Q235D       | 16Mn、16Mnq |
| 2  |      | 中、小型工程不作局部开启的工作闸门, 其他事故闸门         | 等于或低于<br>-20        | Q235A、Q235B、Q235C、<br>Q235D、16Mn、16Mnq |            |
| 3  |      |                                   | 高于-20               | Q235AF、16Mn                            |            |
| 4  |      | 各类检修闸门、拦污栅                        | 高于-30               | Q235AF、16Mn                            |            |
| 5  | 埋件部分 | 主要受力埋件                            | -                   | Q235AF                                 |            |
| 6  | 埋件部分 | 按构造要求选择的埋件                        | —                   | Q195                                   |            |

- 注 1. 当有可靠根据时, 可采用其他钢号。对无证明书的钢材, 经试验证明其化学成分和机械性能符合相应标准所列的要求时, 可酌情使用。
2. 低温地区的焊接结构采用沸腾钢时, 板厚不宜过大。
3. 非焊接结构的钢号, 可参照表 1-3 选用。
4. 计算温度应按现行 GBJ19-87《采暖通风和空气调节设计规范》中规定的冬季空气调节室外计算温度确定。
5. 所谓大型工程, 指一、二等工程; 中型工程指三等工程; 小型工程指四、五等工程, 下同。

## 2. 闸门机械零件的钢材

闸门支承结构, 包括平面闸门的滚轮与主轨, 弧形闸门的支铰, 人字门的支垫、枕垫、顶枢和底枢等的铸钢件一般可采用:

(1) 现行 GB11352《一般工程用铸造碳钢件》中规定的 ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570、ZG340-640 铸钢。

(2) 现行 JB/ZQ4297《合金铸钢》中规定的 ZG35CrMo、ZG50Mn2、ZG34CrNi3Mo 等合金铸钢。

闸门所采用的铸铁件, 应符合现行 GB9439《灰铸铁件》中规定的各项要求。闸门加重使用的铸铁件, 其牌号不限, 但应保证其重度。

闸门的吊杆轴、连接轴、主轮轴、支铰轴和其他轴, 可采用:

- (1) 现行 GB699《优质碳素结构钢》中规定的 35 号、45 号钢。
- (2) 现行 GB700《碳素结构钢》中规定的 Q275 钢。
- (3) 现行 GB3077《合金结构钢》中规定的 35Mn2、40Cr、34CrNi3Mo 等合金钢。

### 3. 耐磨材料与耐蚀材料

滚轮与支铰的轴套、顶枢与底枢的轴套及其他运转中受滑动摩擦的零件,可采用青铜,其性能应符合现行 GB1176《铸造铜合金技术条件》中规定的各项要求。

闸门支承可采用压合胶木、填充聚四氟乙烯板材、钢基铜塑复合材料等。

闸门支承滑道和止水座板所用的不锈钢材料,宜采用现行 GB4237《不锈钢热轧钢板》中规定的 1Cr18Ni9 和 1Cr18Ni9Ti。

人字闸门的底枢蘑菇轴头、与胶木滑道接触的轨道以及其他易于磨损和锈蚀的重要构件表面,可采用不锈钢焊条堆焊制成。

### 4. 连接材料

焊接闸门采用的焊条,因焊接方式及所焊构件的材料而异。

手工焊接用焊条应符合现行 GB5117《碳钢焊条》、GB5118《低合金钢焊条》、GB983《不锈钢焊条》中规定的要求。选择的焊条型号应与主体金属强度相适应。

自动焊和半自动焊应采用与主体金属强度相适应的焊丝和焊剂,并应符合现行 GB1300《焊接用钢丝》、GB5293《碳素钢埋弧焊用焊剂》中规定的要求。

普通螺栓、锚筋和锚板可采用现行 GB700《碳素结构钢》中规定的 Q235 钢。

高强螺栓连接副应符合现行 GB1228《钢结构用高强度大六角头螺栓》、GB1229《钢结构用高强度大六角螺母》、GB1230《钢结构用高强度垫圈》、GB1231《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》、GB3632《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副形式尺寸》、GB3633《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副技术条件》中规定的要求。

## 5. 止水及其他材料

闸门止水材料, 可根据运行条件采用橡皮止水或橡塑复合止水, 其性能指标参见附录 B。

埋设件二期混凝土的强度等级, 可采用 C20~C30, 同时应根据条件和地区温度提出抗渗和抗冻技术要求。

### (二) 材料的容许应力

1995 年水利部发布的 SL74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》, 仍然采用容许应力方法进行闸门结构的设计和计算。该规范中详细规定了闸门各种材料的容许应力并作了说明, 现摘录如下。

(1) 钢材的容许应力应根据表 1-4 的尺寸分组, 按表 1-5 采用。连接材料的容许应力按表 1-6、表 1-7 采用。

对下列情况, 表 1-5~表 1-7 的数值应乘以调整系数:

- 1) 大、中型工程的工作闸门及重要的事故闸门, 取 0.9~0.95。
- 2) 在高水头下经常局部开启的大型闸门, 取 0.85~0.9。
- 3) 规模巨大, 且在高水头下操作, 而工作条件又特别复杂的工作闸门, 取 0.8~0.85。
- 4) 上述系数不连乘。特殊情况另行考虑。

表 1-4 钢材的尺寸分组

| 组别 | 钢 材 尺 寸 (mm) |           |              |
|----|--------------|-----------|--------------|
|    | Q215、Q235    |           | 16Mn、16Mnq   |
|    | 钢材厚度 (直径)    | 型材和异型钢的厚度 | 钢材厚度 (直径)    |
| 1  | ≤16          | ≤15       | ≤16          |
| 2  | >16~40       | >15~20    | >16~25       |
| 3  | >40~60       | >20       | >25~36       |
| 4  | >60~100      | —         | >36~50       |
| 5  | >100~150     | —         | >50~100 方、圆钢 |
| 6  | >150         | —         | —            |

注 1. 型材包括角钢、工字钢和槽钢。  
2. 工字钢和槽钢的厚度系指腹板厚度。

表 1-5

钢材的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 钢 材        |                |    | 抗拉、抗压<br>和抗弯<br>[ $\sigma$ ] | 抗剪<br>[ $\tau$ ] | 局部<br>承压<br>[ $\sigma_{cl}$ ] | 局部紧<br>接承压<br>[ $\sigma_{cl}$ ] |
|------------|----------------|----|------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 钢种         | 钢号             | 组别 |                              |                  |                               |                                 |
| 碳素<br>结构钢  | Q215           | 1  | 145                          | 90               | 220                           | 110                             |
|            |                | 2  | 135                          | 80               | 200                           | 100                             |
|            |                | 3  | 125                          | 70               | 190                           | 95                              |
|            |                | 4  | 120                          | 65               | 180                           | 90                              |
|            |                | 5  | 115                          | 60               | 170                           | 85                              |
|            |                | 6  | 110                          | 55               | 160                           | 80                              |
|            | Q235           | 1  | 160                          | 95               | 240                           | 120                             |
|            |                | 2  | 150                          | 90               | 230                           | 115                             |
|            |                | 3  | 145                          | 85               | 220                           | 110                             |
|            |                | 4  | 135                          | 80               | 210                           | 105                             |
|            |                | 5  | 130                          | 75               | 200                           | 100                             |
|            |                | 6  | 125                          | 70               | 190                           | 95                              |
| 低合金<br>结构钢 | 16Mn、<br>16Mnq | 1  | 230                          | 135              | 350                           | 175                             |
|            |                | 2  | 220                          | 130              | 330                           | 165                             |
|            |                | 3  | 205                          | 120              | 310                           | 155                             |
|            |                | 4  | 190                          | 110              | 290                           | 145                             |
|            |                | 5  | 180                          | 105              | 270                           | 135                             |

注 1. 局部承压应力不乘调整系数。

2. 局部承压应力是指构件腹板的小部分表面受局部荷载的挤压或端面承压(磨平顶紧)等情况。

3. 局部紧接承压应力是指可动性小的铰在接触面的投影平面上的压应力。

表 1-6

焊缝的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 焊接方<br>法和焊<br>条型号                           | 构件钢材 |    | 对 接 焊 缝              |                    |                                  |              |                  | 贴角焊缝                           |
|---------------------------------------------|------|----|----------------------|--------------------|----------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------|
|                                             | 钢号   | 组别 | 抗压<br>[ $\sigma_c$ ] | 抗 拉 [ $\sigma_t$ ] |                                  |              | 抗剪<br>[ $\tau$ ] | 抗拉、抗<br>压和抗剪<br>[ $\sigma_t$ ] |
|                                             |      |    |                      | 1. 当用<br>自动焊<br>时  | 2. 当用半自动焊或<br>手工焊时, 焊缝质<br>量的检查为 |              |                  |                                |
|                                             |      |    |                      |                    | (1) 精确<br>方法                     | (2) 普通<br>方法 |                  |                                |
| 自动焊、<br>半自动焊<br>和用 E43<br>××型焊<br>条的手<br>工焊 | Q215 | 1  | 145                  | 145                | 145                              | 125          | 85               | 105                            |
|                                             |      | 2  | 130                  | 130                | 130                              | 110          | 75               | 95                             |
|                                             |      | 3  | 125                  | 125                | 125                              | 105          | 70               | 90                             |
|                                             | Q235 | 1  | 160                  | 160                | 160                              | 135          | 95               | 115                            |
|                                             |      | 2  | 150                  | 150                | 150                              | 120          | 90               | 105                            |
|                                             |      | 3  | 145                  | 145                | 145                              | 115          | 85               | 100                            |

续表

| 焊接方<br>法和焊<br>条型号                       | 构件钢材           |                  | 对 接 焊 缝                  |                          |                                 |                          | 贴角焊缝                           |                          |
|-----------------------------------------|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|
|                                         | 钢号             | 组别               | 抗压<br>[ $\sigma^p$ ]     | 抗 拉 [ $\sigma^p$ ]       |                                 | 抗剪<br>[ $\tau^p$ ]       | 抗拉、抗<br>压和抗剪<br>[ $\sigma^p$ ] |                          |
|                                         |                |                  |                          | 1. 当用<br>自动焊<br>时        | 2. 当用半自动焊或<br>手工焊时、焊缝质<br>量的检查为 |                          |                                |                          |
|                                         |                |                  |                          |                          | (1) 精确<br>方法                    |                          |                                | (2) 普通<br>方法             |
| 自动焊、半<br>自动焊和<br>用 E50×<br>×型焊条<br>的手工焊 | 16Mn、<br>16Mnq | 1<br>2<br>3<br>4 | 230<br>220<br>205<br>190 | 230<br>220<br>205<br>190 | 230<br>220<br>205<br>190        | 200<br>190<br>175<br>165 | 135<br>130<br>120<br>110       | 160<br>150<br>140<br>130 |

- 注 1. 检查焊缝质量的普通方法系指外观检查、测量尺寸、钻孔检查等方法, 精确方法是在普通方法的基础上, 用“X”射线、超声波等方法进行补充检查。
2. 仰焊焊缝的容许应力按上表降低 20%。
3. 安装焊缝的容许应力按上表降低 10%。

表 1-7 普通螺栓连接的容许应力 (单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 螺栓<br>的<br>钢号 | 构件钢材           |    | 精制螺栓       |             |              | 粗制螺栓       |          |              | 锚栓         |
|---------------|----------------|----|------------|-------------|--------------|------------|----------|--------------|------------|
|               | 钢号             | 组别 | 抗拉         | 抗剪<br>(I类孔) | 承压<br>(I类孔)  | 抗拉         | 抗剪       | 承压           | 抗拉         |
|               |                |    | $[\sigma]$ | $[\tau]$    | $[\sigma_c]$ | $[\sigma]$ | $[\tau]$ | $[\sigma_c]$ | $[\sigma]$ |
| Q235          |                |    | 125        | 130         | —            | 125        | 85       | —            | 105        |
| 16Mn          |                |    | 185        | 190         | —            | 185        | 125      | —            | 150        |
| 碳素<br>结构钢     | Q215           | 1  | —          | —           | 265          | —          | —        | 175          | —          |
|               |                | 2  | —          | —           | 240          | —          | —        | 160          | —          |
|               |                | 3  | —          | —           | —            | —          | —        | —            | —          |
|               | Q235           | 1  | —          | —           | 290          | —          | —        | 190          | —          |
|               |                | 2  | —          | —           | 275          | —          | —        | 185          | —          |
|               |                | 3  | —          | —           | —            | —          | —        | —            | —          |
| 低合<br>金钢      | 16Mn、<br>16Mnq | 1  | —          | —           | 420          | —          | —        | 280          | —          |
|               |                | 2  | —          | —           | 395          | —          | —        | 265          | —          |
|               |                | 3  | —          | —           | 370          | —          | —        | 250          | —          |
|               |                | 4  | —          | —           | 345          | —          | —        | 235          | —          |

- 注 1. 孔壁质量属于下列情况者为 I 类孔:
- (1) 在装配好的构件上按设计孔径钻成的孔。
- (2) 在单个零件和构件上按设计孔径分别用钻模钻成的孔。
- (3) 在单个零件先钻成或冲成较小的孔径, 然后在装配好的构件上扩钻至设计孔径的孔。
2. 当螺栓直径大于 40mm 时, 螺栓容许应力应降低, 对于 Q235 降低 4%, 对于 16Mn 降低 6%。

(2) 机械零件的容许应力按表 1-8 采用。机械零件系指吊耳、连接、支承部分的零部件和铸、锻件等。

(3) 铸铁件的容许应力按表 1-9 采用。

表 1-8 机械零件的容许应力 (单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 应力种类     | 符 号             | 碳素结构钢     |              | 低合金钢         | 优质碳素结构钢   |     |
|----------|-----------------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----|
|          |                 | Q235      | Q275         | 16Mn         | 35        | 45  |
| 抗拉、抗压和抗弯 | $[\sigma]$      | 100       | 120          | 140          | 130       | 145 |
| 抗剪       | $[\tau]$        | 65        | 75           | 90           | 85        | 95  |
| 局部承压     | $[\sigma_{cl}]$ | 150       | 180          | 210          | 195       | 220 |
| 局部紧接承压   | $[\sigma_{cj}]$ | 80        | 95           | 110          | 105       | 120 |
| 孔壁抗拉     | $[\sigma_k]$    | 120       | 145          | 180          | 150       | 170 |
| 应力种类     | 符号              | 铸 造 碳 钢   |              |              |           |     |
|          |                 | ZG230—450 | ZG270—500    | ZG310—570    | ZG340—640 |     |
| 抗拉、抗压和抗弯 | $[\sigma]$      | 115       | 120          | 140          | 150       |     |
| 抗剪       | $[\tau]$        | 85        | 90           | 105          | 115       |     |
| 局部承压     | $[\sigma_{cl}]$ | 170       | 180          | 200          | 220       |     |
| 局部紧接承压   | $[\sigma_{cj}]$ | 90        | 95           | 110          | 120       |     |
| 孔壁抗拉     | $[\sigma_k]$    | 130       | 140          | 155          | 170       |     |
| 应力种类     | 符号              | 合金铸钢      |              | 合金结构钢        |           |     |
|          |                 | ZG50Mn2   | ZG35CrMo     | 35Mn2        | 40Cr      |     |
| 抗拉、抗压和抗弯 | $[\sigma]$      | 190       | 170<br>(235) | 130<br>(280) | (320)     |     |
| 抗剪       | $[\tau]$        | 150       | 130<br>(180) | 85<br>(190)  | (215)     |     |
| 局部承压     | $[\sigma_{cl}]$ | 280       | 250<br>(345) | 195<br>(430) | (485)     |     |
| 局部紧接承压   | $[\sigma_{cj}]$ | 155       | 135<br>(190) | 105<br>(230) | (265)     |     |
| 孔壁抗拉     | $[\sigma_k]$    | 220       | 190<br>(265) | 150<br>(330) | (375)     |     |

- 注 1. 括号内为调质处理后的数值。  
 2. 孔壁抗拉容许应力系指固定结合的情况, 若系活动结合, 则应按表值降低 20%。  
 3. 表列“合金结构钢”的容许应力, 适用于截面尺寸为 25mm。如由于厚度影响, 屈服点有减少时, 各类容许应力可按屈服点减少比例予以减少。

表 1-9

灰铸铁的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 应力种类      | 符 号             | 灰 铸 铁 牌 号 |       |       |
|-----------|-----------------|-----------|-------|-------|
|           |                 | HT150     | HT200 | HT250 |
| 轴心抗压和弯曲抗压 | $[\sigma_c]$    | 120       | 150   | 200   |
| 弯曲抗拉      | $[\sigma_{bt}]$ | 55        | 45    | 60    |
| 抗剪        | $[\tau]$        | 25        | 35    | 45    |
| 局部承压      | $[\sigma_{cd}]$ | 170       | 210   | 260   |
| 局部紧接承压    | $[\sigma_{cj}]$ | 60        | 75    | 90    |

(4) 轴套的承压容许应力按表 1-10 采用。

(5) 埋设件一、二期混凝土的承压容许应力按表 1-11 采用。

(6) 木材横纹承压应力按表 1-12 采用。

(7) 钢材和钢铸件的物理性能按表 1-13 采用。

(8) 表 1-5~表 1-8 的容许应力值,在校核条件下提高 15%;在特殊情况下,除局部应力外,不超过  $0.85\sigma_s$ 。

表 1-10

轴套的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 轴和轴套的材料       | 符 号             | 径向承压 |
|---------------|-----------------|------|
| 钢对 10—1 铸锡磷青铜 | $[\sigma_{cg}]$ | 40   |
| 钢对 9—4 铸铝铁青铜  |                 | 50   |
| 钢对钢基铜塑复合材料    |                 | 40   |

表 1-11

混凝土的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 应力种类 | 符 号          | 混 凝 土 强 度 等 级 |     |     |     |
|------|--------------|---------------|-----|-----|-----|
|      |              | C15           | C20 | C25 | C30 |
| 承压   | $[\sigma_b]$ | 5             | 7   | 9   | 11  |

表 1-12

木材的容许应力

(单位:  $\text{N/mm}^2$ )

| 应力种类 | 符 号             | 针 叶 材 |     | 阔 叶 材  |     |
|------|-----------------|-------|-----|--------|-----|
|      |                 | 东北落叶松 | 红 松 | 木 (柞木) | 桦 木 |
| 横纹承压 | $[\sigma_{wt}]$ | 1.7   | 1.3 | 3      | 2.2 |

表 1-13

钢材和铸钢件的物理性能

| 材料名称   | 弹性模量<br>$E$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 剪切模量<br>$G$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 线胀系数<br>$\alpha$<br>(K <sup>-1</sup> ) | 质量密度<br>$\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 钢材、铸钢件 | $2.06 \times 10^5$                  | $0.79 \times 10^5$                  | $1.2 \times 10^{-5}$                   | 7850                                   |

### 第三节 设计闸门的主要工作内容和方法

设计闸门一般程序是收集和分析资料、闸门的选型和布置、门体布置和结构及零部件的设计计算、施工图的绘制。下面就各个程序介绍闸门设计的主要工作内容和方法。

#### 一、收集和分析资料

要进行一项闸门的设计工作，首先要收集和研究分析闸门设计的基本资料，包括枢纽的任务和水工建筑物的等级、形式与布置；闸门运用条件与相关尺寸；水文、泥沙、水质、漂浮物与气象方面的资料；有关闸门的材料、制造、运输和安装等方面的条件；地质、地震和其他特殊要求等。分析资料就是要分清闸门的各种工况及运行条件，确定闸门的荷载及具体的操作方式。

通过分析闸门所有可能的不同工况，找出最不利工况，并将该工况下闸门承受的荷载作为设计时的计算荷载。闸门在上下游水位不同的组合中，有时仅有上游一面的单向水头，有时兼有上下游两面的双向水头。有的闸门还承受波浪压力或泥沙压力，特殊情况还有地震动水压力、水锤压力等。可根据具体情况具体分析。

另外还要确定闸门的运行条件，从而计算闸门的启闭力和选用启闭机。根据建筑物的作用和运行要求，明确在哪些水位组合工况下闸门只挡水不操作，在哪些水位组合工况下闸门需要操作，有的闸门开启和关闭的工况还不一样。对于双向挡水的闸门和船闸的工作闸门要特别注意这一点。

## 二、闸门的选型和布置

在取水输水建筑物中，闸门（包括拦污栅）的种类繁多，闸门的选型布置直接关系到相关建筑物的布置和工程量，也就影响了工程的投资和施工进度，有时甚至是控制性的。闸门的选型布置合理，不仅会节约大量资金，而且还会取得安全可靠、操作灵活、维修方便等效果。忽视闸门选型布置，其后果将给整个工程带来这样或那样问题，影响工程发挥效益，甚至造成重大事故，给国家带来严重危害。闸门的选型与布置，应从全局出发、统筹兼顾，正确处理闸门设计与取水输水建筑物的关系，以满足工程的各种使用要求。大中型工程常需要做多种形式和布置的方案，与建筑物一起作技术经济比较，从而选定最优方案。

### （一）一般原则

闸门的选型与布置，主要是确定闸门与启闭机械的设置位置、孔口尺寸、闸门与启闭机械的形式、数量、运行方式，以及运行和检修有关的布置要求等。闸门设计还应提倡创新精神，要积极慎重地采用新技术、新材料、新门型、新结构、新工艺，力求闸门设计经济合理、技术先进、安全可靠、运用方便，从而使工程最大限度地发挥经济效益和社会效益。闸门选型布置只有经反复论证拟定之后，才可顺利地进行闸门的结构布置与结构计算。

闸门的设置位置，应特别注意闸门水力学问题，应使水流平顺，流态良好，避免门前横向流和旋涡的发生，在门后则应避免出现淹没出流与回流。对重要的闸门或水流条件复杂的闸门，应对运行中可能产生的空蚀、振动、启闭力和磨损等作专门研究，从通气孔的设计、门槽体型、底缘形式、止水形式、胸墙相关尺寸和操作方式等方面采取有效措施，以避免或减轻其不利影响。必要时应通过模型试验加以验证。

闸门孔口尺寸应满足过流能力或过船、过木、排冰或排沙的要求，还应考虑水工建筑物结构的情况及闸门本身的结构、材料、启闭设备、制造技术等。孔口尺寸宜按闸门孔口和设计水头系列标准选用，使闸门生产逐步走向标准化，以利于制造、安装、运

行和维护。一般来说采用大孔口尺寸闸门是比较经济的。

闸门应结构简单，便于制造、安装，并应符合当时当地的施工技术水平和条件。闸门的自重和启闭力要小，操作要简便灵活，降低造价。

启闭机是闸门的主要组成部分之一，其布置与选型在工程中甚为关键。应根据闸门的工作性质、操作方式以及有关水工建筑物等因素，尽可能按照标准系列选用，并经技术经济比较确定。在选定启闭机的形式与布置时，尚应考虑一机多用的可能性，如在施工期间可用作运输、安装吊运的设备，而在运行期间可兼作拦污栅的操作、吊运杂物以及检修其他设施的设施。

闸门的选型和布置应考虑门叶的运输尺寸和重量、安装吊运的方法和设施，还应考虑在安装、检修与运行时期工作人员的安全与便利，在供水、排水、通风、防潮、走梯栏杆、孔口盖板、交通道路等诸多方面采取相应措施。

在寒冷地区，应有防止闸门被冰冻的措施，如采用加热、通压缩空气、通压力水或其他方法，以利闸门冬季的运行并避免承受冰的静压力。

## （二）门型的选择

闸门的门型应根据工程对闸门的运行要求、闸门设置部位和启闭机形式，参照下述各种闸门的特点，通过技术经济比较选定。一般说，取水输水工程中平面闸门和弧形闸门应用最多，而船闸闸首的工作闸门则可考虑人字门。下面就几种常用的闸门来分别介绍它们的特点和适用范围。

### 1. 平面直升闸门

平面直升闸门是用得最为广泛的一种门型，因为它能满足各种类型泄水孔道的需要。它的优点如下：

- （1）可封闭相当大面积的孔口。
- （2）建筑物顺水流方向的尺寸较小。

（3）闸门结构比较简单，其制造、安装和运输工作相对来说比较简便。

(4) 门叶可移动至其他孔口，便于检修维护。

(5) 门叶可在孔口间互换，故孔口较多时可兼作其他孔的事故门或检修门。

(6) 门叶可沿高度分成数段，有利于排冰或排砂，也可以减轻起门力。

(7) 闸门的启闭设备比较简单，对移动式启闭机的适应性较好等。

(8) 潜孔式平面闸门有时可利用水柱压力闭门，减少门重或配重。

平面直升闸门的缺点如下：

(1) 需要较高和较厚的闸墩（但升卧式平面闸门并不需要很高的闸墩）。

(2) 具有影响水流的门槽，特别在水头较高的情况，门槽的存在会带来很多的不利。

(3) 所需启闭力较大，故需选用较大的启闭机等。

平面直升闸门根据支承行走部分构造形式不同，有滑动式、滚轮式、链轮式几种。

滑动式支承相对其他两种支承来说承载能力大，摩阻力也大，滑道材料有压合胶木、金属、复合材料等。早期因压合胶木结构简单，取材方便，应用比较普遍，但该材料有老化现象，摩擦系数不够稳定，并有膨胀和老化现象，在工程中使用也越来越少。用作滑道的金属有钢、铸铁、铜合金等。钢和铸铁滑道因摩擦系数大，一般用在静水启闭的闸门上。铜合金滑道可兼作止水，但其结构复杂，制造加工量大，造价高。近年来我国引进和自行研制了多种新型滑道材料，主要有钢基铜塑复合材料和填充聚四氟乙烯，这两种材料摩擦系数低、承载能力中等，但对埋件轨道接头错位要求较高，从近年来的一些工程实例来看，效果不错。另外有些科研单位已经研制出了一些承载能力较高的滑道材料，已在有些工程中进行试用。

滚轮式支承应用十分普遍，其最大的优点是摩阻力小，但结

构比较复杂，对埋件要求较高，造价也高。链轮式支承的摩阻力更小，但其零件多，制造复杂，维护要求较高，造价很高，所以应用较少。

平面直升闸门有时可按需要作特殊的考虑。例如：有些河道上的节制闸，由于排洪或排涝的需要，其孔口高度较大，但在一般泄水时，其所需开启的孔口则较小，这种情况可以考虑采用分别启闭的、有上下扇的双扉平面闸门。又如：在某些地震烈度较大的地区，启闭机排架不宜太高，则可考虑升卧式闸门。或者，有些船闸，为满足通航净空的要求，其通航孔工作闸门可采用提升横拉式平面闸门。

## 2. 弧形闸门

弧形闸门也是用得最为广泛的一种门型，因为它也能满足各种类型泄水孔道的需要。它的优点如下：

- (1) 可封闭相当大面积的孔口。
- (2) 所需闸墩高度和厚度较小。
- (3) 没有影响水流流态的门槽。
- (4) 所需的启闭力较小。
- (5) 埋设件较少等。

弧形闸门的缺点如下：

- (1) 需要较长的闸墩。
- (2) 闸门所占的空间位置较大。
- (3) 不能提出孔口以外进行检修维护，不能在孔口间互换。
- (4) 闸门承受的总水压力集中于支座处，对土建结构要求较高。

弧形闸门按承重结构不同，有主横梁式和主纵梁式两种。对宽扁型的孔口以采用主横梁式较好，对高窄型的孔口以采用主纵梁式较好。主横梁式弧形闸门的支臂布置应尽量采用使主横梁两端呈悬臂的形式，可减少闸门重量，降低造价。

弧形闸门一般总是把凸面布置在上游，这样门底出流比较平顺。但用在船闸输水廊道上的工作门，当水头较高时，则把凸面

布置在下游更为有利。

### 3. 人字闸门

人字闸门一般只能在静水中操作，普遍应用于单向水级船闸中的工作闸门，近年也有用在双向水级的船闸上。它的优点如下：

- (1) 可封闭相当大面积的孔口。
- (2) 闸门受力情况类似于三铰拱，对结构有利，比较经济。
- (3) 所需的启闭力较小。
- (4) 通航净空不受限制。

人字闸门的缺点如下：

- (1) 不能在动水中操作运行。
- (2) 门叶的抗扭刚度较小，长期操作运行容易发生扭曲变形，以至漏水较严重。
- (3) 闸门长期处于水中，其水下部分的检修维护比较困难。
- (4) 与直升式平面闸门或横拉式闸门比较，闸首较长。

人字闸门门叶的梁系布置有横梁式和竖梁式两种。一般当门叶是扁宽形时才采用竖梁式，其顶部应设一承重的横梁；大部分人字闸门均采用横梁式。大型人字闸门为了减少承重底枢的负荷，有将闸门水下部分设计成箱形，利用浮力抵消部分门重。

小型船闸有时不用人字形双扇闸门，而仅用单扇闸门，也就是一字门，其操作和布置与人字门类似。

### 4. 翻板闸门

翻板闸门早期是以水力自控翻板闸门的形式出现，因其具有不设启闭设备，根据特定水位自动开启、关闭，以及门体大多采用钢筋混凝土，节省钢材等优点，在钢材缺乏时期建设的中、小型水利工程中曾得到推广，但由于门体采用脆性材料，或者存在制造缺陷，在翻转过程中易发生振动、撞击，容易造成门叶受损而漏水以及无法人为控制调节流量等缺点，影响翻板闸门的推广应用。为克服这些缺点，逐渐发展为液压钢制翻板闸门，门体材料采用钢材，由固定支铰支承，配置液压启闭机作为控制设备。液压翻板闸门具有以下优点：

(1) 没有门槽，闸墩厚度较小，没有启闭机排架，坝面简洁、美观。

(2) 所需的启闭力较小。

(3) 液压启闭机有阻尼作用，可减少闸门振动。

(4) 相对平面直升式闸门来说，埋设件较少，节省钢材等。

液压翻板闸门的缺点如下：

(1) 闸门开启时，门叶在水流中，影响过流能力，并可能引起闸门震动。

(2) 闸门、启闭机布置在孔口中，检修维护困难。

(3) 闸门控制流量局部开度范围小，门叶顶、底都过流，流态较差。

液压翻板闸门在广东省起步较早，有些工程建成投入运行已十几年，运行安全可靠，国内其他地区也有不少建成的工程实例。

其他门型如横拉门、舌瓣门、浮箱式闸门等，取水输水建筑物中使用比较少，这里就不一一叙述了。

### 三、门体布置和结构、零部件设计计算

闸门的选型与布置方案确定后，就可以对所采用的闸门进行门体布置，然后才进行结构和零部件的设计计算。

门体布置就是根据闸门的型式、孔口尺寸和材料等情况来选择合理的门叶结构、零部件的形式和布置。门体布置应注意闸门的构造简单、安全可靠、节约材料以及便于制造、运输、安装与运行维护等方面的要求。闸门材料与零部件的种类应尽量少，尽可能采用标准化定型产品，尽可能采用普通钢材，以便于保证供货，也便于检修与维护。门体布置时需考虑运输条件，闸门应便于划分运输单元，应避免运输时尺寸超限、超重等情况。另外，与水工建筑物的配合也不容忽视。

门叶结构形式应考虑构件的布置和连接形式。钢闸门一般考虑采用焊接结构。门叶结构因闸门形式不同而不同，本书第二章至第四章将分别介绍几种常用闸门的结构形式和布置。

对于动水启闭的大、中型平面闸门和弧形闸门底缘形式的布

置也需予以重视。因为这些闸门的底缘形式对闸门泄流时的水力学因素比较敏感。若底缘形式布置不当,容易产生闸门的振动,或者是增加闸门的动水压力。

闸门零部件中的支承部分应特别注意,例如平面闸门,因为滑动支承和滚动支承在水压力作用下所产生的摩擦阻力差别很大,采用滑动支承还是滚动支承(包括门槽埋件)对启闭力的影响将是很大的。这些支承形式、材料以及与门体本身的配合等也有多种选择。又如弧形闸门,它的支承铰的布置和材料也很重要,往往决定闸门设计是否合理、运行是否方便等。这些都是需要仔细研究的。

吊耳的布置与启闭机的形式、规格及位置有关。此外如闸门的止水、反向支承、侧导向装置等零部件也应认真考虑。

在门体布置完后就可以进行闸门结构和零部件的设计计算。首先根据实际可能发生的最不利的荷载组合情况和选定的结构、零部件的布置和材料,确定荷载分配,然后进行各构件和零部件的设计计算。一般先选择各构件和零部件的规格,再进行强度、刚度、稳定性验算。有时需要经反复几次计算比较,才能确定较合理的方案。

前面提到,我国现行的钢闸门设计规范仍然采用容许应力方法进行闸门的设计和计算。而工业与民用建筑及水工建筑等专业的规范大都已采用可靠度设计法,1994年国家技术监督局和建设部还联合发布了GB50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》,该标准采用了极限状态设计原则。在这一点上,闸门的设计规范明显落后于形势了,要向可靠度设计过渡,还有大量工作要做,如:荷载的统计、分项系数的确定、安全度的规定等。目前河海大学机电工程学院等高校正在进行这方面的研究工作,为下次修订规范时采用可靠度设计方法提供理论基础。

目前,闸门结构力学计算模型主要还是采用平面体系,即把一个空间承重结构划分成几个独立的平面系统分别进行分析计算。实践证明,这种方法是偏安全的。闸门承重结构在分成平面

系统时，需考虑各个构件的相对刚度和这些构件的变形情况，同时应考虑整个结构总的变形情况，也就是使计算方法尽可能地符合结构的实际受力状况。

闸门实际上是空间结构，如果将闸门按空间结构系统进行计算，则更符合闸门工作的实际状况。但是，按空间结构进行分析相当繁杂，需要借助一些通用的结构分析软件并应用有限元理论来计算。目前，硬件和软件都已达到相当高水平，进行这方面的工作已经不存在技术问题，但闸门的空间结构理论还不普遍，国内还没有成熟的用于闸门计算的专业软件，这也是实际工作中仍沿用平面计算体系的重要原因之一。实际上，闸门结构的有限元计算的难点还是在于前处理这一关，也就是怎样把闸门结构离散化为单元，建立闸门的有限元模型。早期受硬件条件限制，单元数量不能太多，否则一般计算机要算上几个小时，所以把面板离散为板单元，梁系均离散为梁单元。近年来，随着硬件的日新月异，根据闸门结构形式和受力特点，把梁系离散得更细些，如实腹式结构，将闸门主梁、纵梁、边梁、支臂等主要结构都离散为板单元，型钢截面的水平次梁和背拉杆、支臂间连接杆等次要构件离散为梁单元。在有些工程闸门的安全鉴定中应用上述方法进行结构的有限元计算，结果与应力测试的实验数据对比，其应力分布规律基本符合，但数值还有些差别。闸门的有限元计算，不仅可以对闸门进行各种荷载组合的受力分析，还可以计算闸门的自振频率，为闸门的振动分析提供依据。随着对此问题的理论研究与大型模型的试验，加上计算机技术的高速发展，相信闸门按空间结构的计算方法将会有很大的发展。

#### **四、施工图的绘制**

在有关设计计算完成后，才能绘制施工图。施工图的绘制方法和要求，一般按现行有关机械制图的标准执行。

在闸门的施工图绘制中，一般应注意以下几个方面的问题：一是闸门总体尺寸和布置与建筑物有关部位之间，以及闸门门叶部分各构件之间的配合；二是各构件的截面尺寸、跨度及其相邻构

件在外形尺寸和连接上的配合；三是各构件本身的截面构造及零部件的加工精度和热处理等。

在 CAD 技术大力发展的今天，应尽可能采用成熟的符合我国国家标准的 CAD 软件，以减少重复劳动，提高工作效率和设计水平。

## 第二章 平面钢闸门

### 第一节 平面钢闸门的结构布置

#### 一、梁格

前面介绍了平面闸门门叶是由面板、构架、支承行走部件、吊具、止水部件等组成，构架与面板组成闸门的承重结构。构架是梁系组成的框架，又称梁格，一般由水平次梁、竖直次梁（或竖向隔板）、主梁、边梁组成。根据闸门的尺寸大小，也有不设置次梁的布置方式。

梁格支承面板并承受面板传来的水压力。梁格把面板分成许多矩形的区格，因此在钢闸门设计中，选择梁格的布置，不仅关系到梁系本身，而且与钢面板的设计密切相关。

梁格的连接形式是指面板、水平次梁、竖直次梁、主梁之间相互位置的形式，目前普遍采用的有等高连接和降低连接两种类型。

如图 2-1 (a) 所示，等高连接的特点是水平次梁、竖直次梁和主梁的前翼缘都直接与面板焊接相连，也称齐平连接。它的优点是梁格与面板可形成牢固的整体，整体刚度好；面板为四边支承，受力条件好；面板可作为梁截面的一部分参与梁格的抗弯工作，从而减少梁格的用钢量。这种连接的缺点是在水平次梁与竖直次梁相交处，水平次梁需要断开，构件多，施工麻烦。目前实腹式主梁的闸门中多数采用等高连接，并使用实腹式竖向隔板兼作竖直次梁，这样可在隔板上开孔，使水平次梁从中穿过而成为连续梁，如图 2-1 (c) 所示，从而简化了梁格接头的构造和制造工艺。

如图 2-1 (b) 所示，降低连接是主梁和水平次梁直接与面板

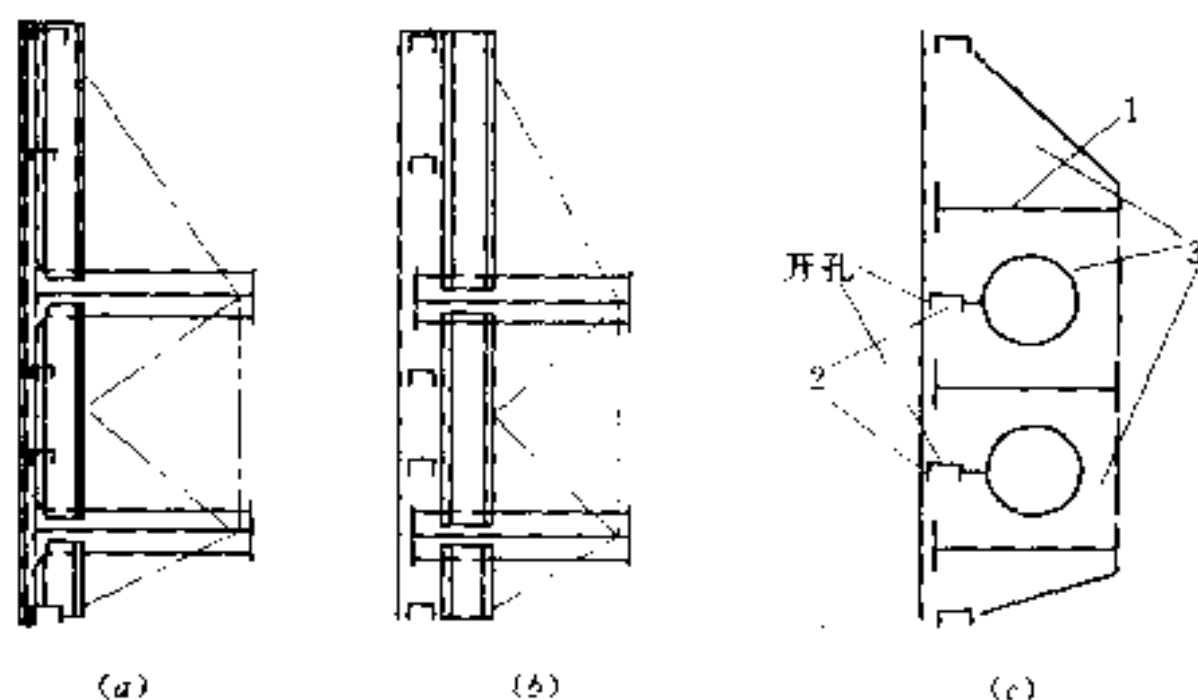


图 2-1 梁格的连接形式

1—主梁；2 水平次梁；3 竖直次梁

相连，而竖直次梁降到水平次梁的后面，使水平次梁可在面板与竖直次梁之间穿过而成为连续梁，此时面板为两边支承。但面板仍可作为主梁及水平次梁的一部分，参与它们的抗弯工作。

## 二、平面闸门的结构布置

### (一) 一般原则

平面闸门梁格宜采用等高连接，并应考虑制造、运输、安装和防腐等方面的要求。平面闸门可按孔口形式及宽高比布置成双主梁或多主梁形式。主梁布置应考虑下列因素：

- (1) 主梁宜按等荷载要求布置。
- (2) 主梁间距应适应制造、运输和安装的条件。
- (3) 主梁间距应满足行走支承布置的要求。

(4) 底主梁到底止水的距离应符合底缘布置的要求。工作闸门和事故闸门下游倾角应不小于  $30^\circ$ ；当闸门支承在非水平底槛上时，其夹角可适当增减。当不能满足  $30^\circ$  要求时，应采取适当补气措施。对于部分利用水柱的平面闸门，其上游面倾角不应小于  $45^\circ$ ，宜采用  $60^\circ$ ，见图 2-2。

### (二) 主梁位置与荷载

#### 1. 双主梁的布置

露顶式的双主梁平面闸门，主梁应布置在静水压力合力线上

下等距离的位置上，如图 2-3 所示。同时应注意：

(1) 两主梁的距离  $a_1 + a_2$  值要尽量大些，见图 2-3。

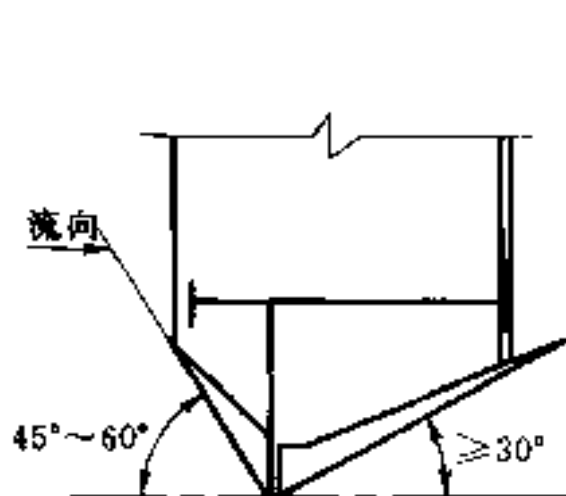


图 2-2 平面闸门底缘形式

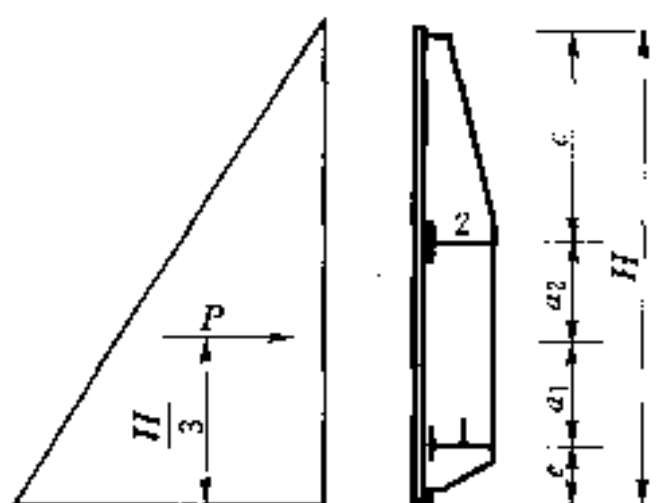


图 2-3 双主梁平面闸门的主梁布置

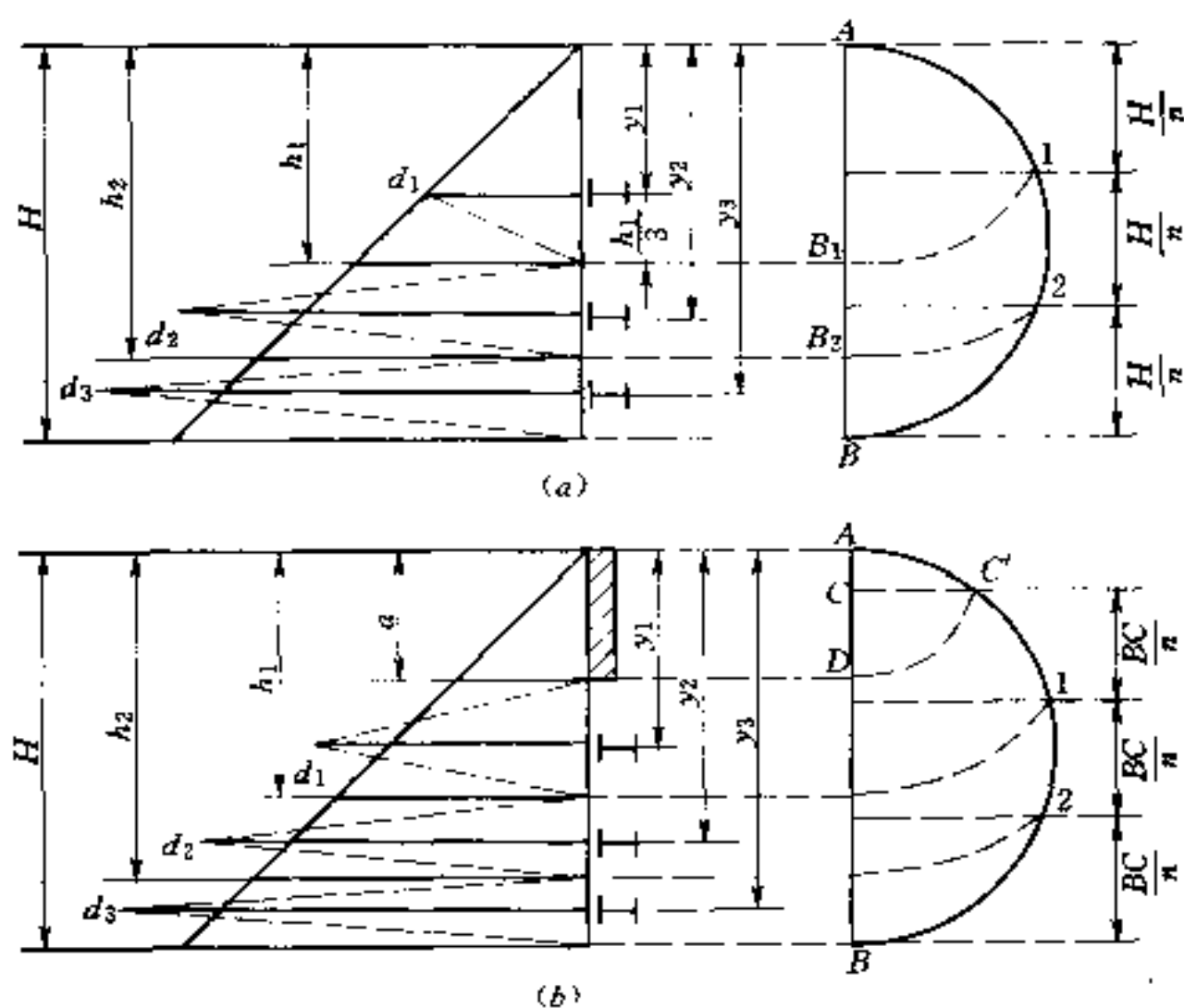


图 2-4 等荷载布置主梁的图解法

(a) 露顶闸门；(b) 潜孔闸门

(2) 上主梁到闸门顶缘的距离  $c$  小于  $0.45H$ ，且不宜大于  $3.6\text{m}$ 。

## 2. 多主梁的布置

多主梁闸门按等荷载原则确定主梁位置的方法有图解法、数解法、累积曲线法等。现介绍如下。

(1) 图解法。如图 2-4 (a) 所示的露顶闸式闸门，用图解法确定主梁位置的步骤如下：

以水头  $H$  为直径作一半圆，将直径  $AB$  分为  $n$  等份 ( $n$  为主梁根数)，从等分点作水平线交于圆弧上，然后以  $A$  点为圆心，至点 1、2、…距离为半径，分别做弧与直径相交。过这些交点引水平线，这些水平线便将三角形分布的水压力划分为面积相等的  $n$  等份。

为了求出每个等分面积的形心，可将每个梯形的斜边分作 3 等份，从每个梯形竖直边的顶、底两点分别作与斜边的上、下两个三分点的连线，从连线的交点  $d$  引水平线。这条水平线就通过梯形面积的形心，主梁的位置即在这条水平线上。

在水面以下深度为  $a$  的潜孔闸门如图 2-4 (b) 所示，确定主梁位置的方法与露顶闸门略有不同。不同之处仅在于以  $A$  为圆心，以水深  $a$  为半径画弧，与半圆相交于  $C'$ ，从  $C'$  引水平线交  $AB$  于  $C$ 。然后根据主梁数目来等分  $BC$ 。以下的步骤与露顶门相同。

(2) 数解法。露顶闸门各个等荷载面积的边界  $h_k$  与其形心到水面的距离  $y_k$  [图 2-4 (a)] 按下式确定：

$$h_k = H \sqrt{\frac{K}{n}} \quad (2-1)$$

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n}} [K^{1.5} - (K-1)^{1.5}] \quad (2-2)$$

式中： $n$  为主梁根数； $K$  为由门顶算起的主梁号数； $H$  为水面至门底的距离。

潜孔闸门的  $h_k$  与  $y_k$  [图 2-4 (b)] 按下式确定：

$$h_k = H \sqrt{\frac{K + \beta}{n + \beta}} \quad (2-3)$$

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n + \beta}} [(K + \beta)^{1.5} - (K + \beta - 1)^{1.5}] \quad (2-4)$$

式中,  $\beta = \frac{na^2}{H^2 - a^2}$ 。

(3) 累积曲线法。上述两种方法仅适用于闸门前有水的情况, 如果闸门前后有水的情况则可采用累积曲线法, 如图 2-5 所示, 其步骤如下:

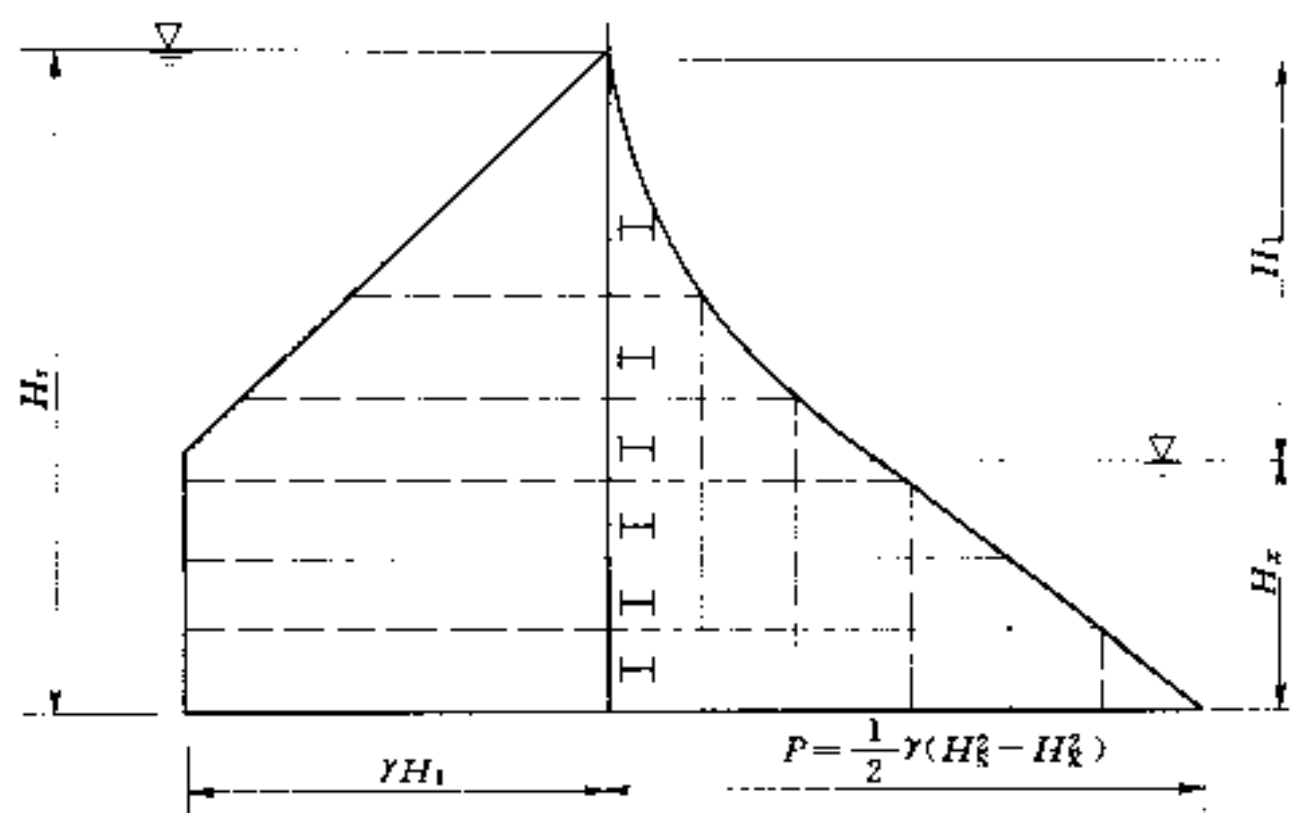


图 2-5 累积曲线法确定主梁的位置

先沿闸门高度按一定比例绘出水压力分布图及其面积的累积曲线, 纵坐标为水面以下的深度, 横坐标为该点以上部分的水压力, 将曲线的横坐标值  $P$  (即闸门沿单位跨度所承受的总水压力) 划分为  $n$  等分, 由各等分点作水平线即将水压力图划分为  $n$  等分, 主梁的位置即可布置于各等分面积的形心上。

### 3. 主梁的荷载

(1) 当按照等荷载原则布置主梁时, 每根主梁上的荷载为

$$P_i = \frac{P}{n} \quad (2-5)$$

式中:  $P$  为闸门上总的静水压力;  $n$  为主梁的数目。

(2) 主梁的荷载往往是不相等的, 当为双主梁时 (图 2-3), 由于  $a_1 \neq a_2$ , 则

$$p_1 = \frac{pa_2}{a_1 + a_2} \quad (2-6)$$

$$p_2 = \frac{pa_1}{a_1 + a_2} \quad (2-7)$$

(3) 多主梁闸门的主梁荷载计算, 实质上是一个超静定问题。因为每根主梁承受的荷载, 不仅与沿闸门高度布置的几何位置有关, 在很大程度上还取决于主梁和竖向隔板的相对刚度。但在平面假设体系中, 一般没有考虑竖向隔板对主梁荷载的均衡作用。常用的近似方法有力矩法和相邻间距和之半法。

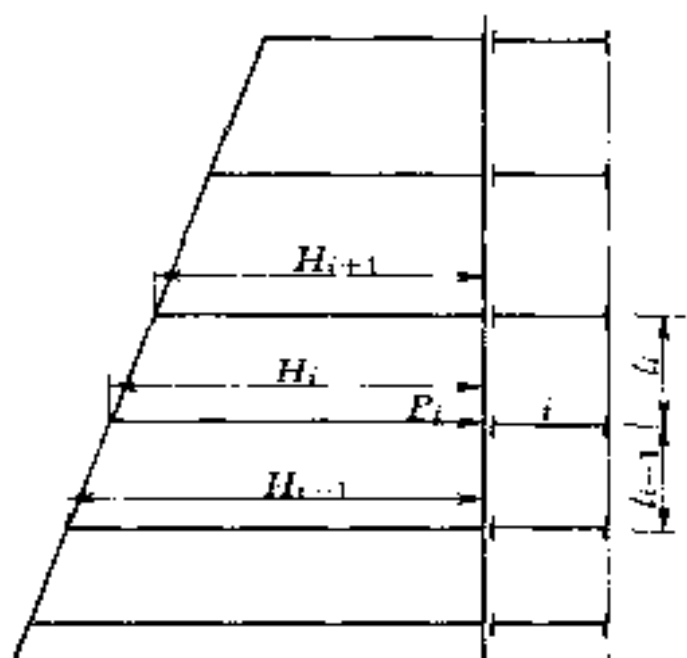


图 2-6 多主梁平面闸门  
主梁荷载计算示意图

1) 力矩法。如图 2-6 所示, 主梁上的荷载为

$$P_i = \frac{\gamma}{6} (l_i + l_{i-1}) (H_{i-1} + H_i + H_{i+1}) B_z \quad (2-8)$$

式中:  $B_z$  为侧止水之间的距离, 也称荷载跨度。

2) 相邻间距和之半法。相邻间距和之半法是假设主梁的承载宽度为上下两相邻梁间距和的一半。这种方法在实际工作中常用。现以图 2-6 所示为例, 主梁单位宽度上的荷载为

$$q_i = \frac{\gamma}{4} (H_{i-1} + 2H_i + H_{i+1}) \times \frac{1}{2} (l_{i-1} + l_i) \quad (2-9)$$

应注意的是顶主梁以上的面板宽度上的荷载全部由顶主梁承担, 底主梁以下的面板宽度上的荷载全部由底主梁承担。

## 第二节 平面钢闸门的结构计算

### 一、结构计算

平面体系分析结构的计算方法, 就是把一个空间承重结构划分成几个独立的平面系统, 即把平面闸门划分为面板、水平次梁、竖直次梁、主梁、边梁、支承等构件。图 2-7 所示为采用等高连接

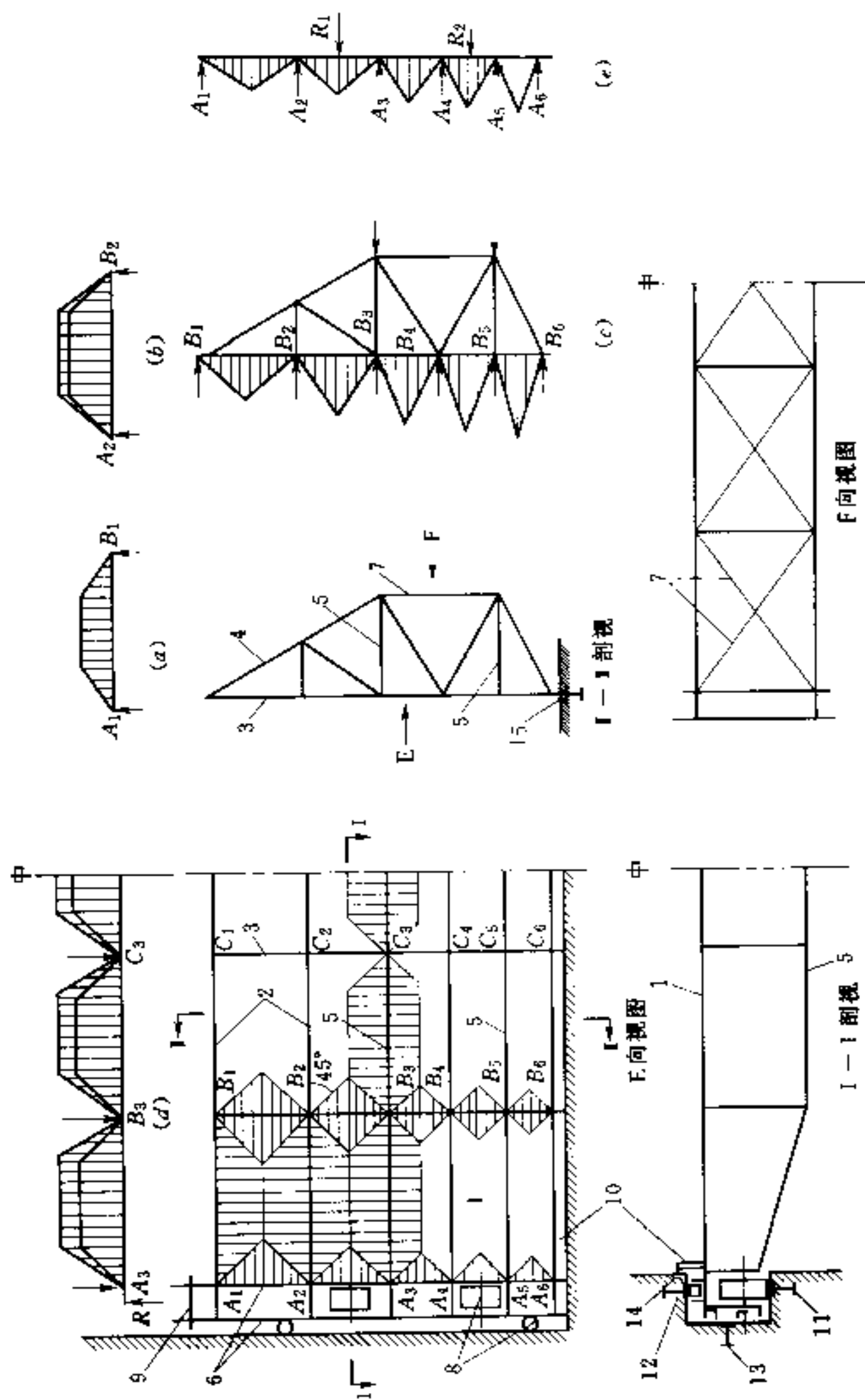


图 2-7 等高连接的露顶式平面闸门受力分析简图

1—面板；2—水平次梁；3—竖直次梁；4—竖向联结系；5—主横梁；6—边柱；

7—门背联结系；8—行走支承装置；9—吊耳；10—止水装置；11—主轨；

12—反轨；13—侧轨；14—止水座；15—底槛

的露顶式平面闸门的受力分析简图，其承受静水压力的假定计算模型是：面板承受作用在闸门上的静水压力，然后传给梁格的各个构件。梁格板四角上的荷载分配，按角 2 等分线计算，而梁格板中部的荷载分配，按 2 等分线计算。水平次梁承受上下两个梁格板传来的梯形荷载。竖直次梁一方面承受其两侧梁格板传来的三角形荷载，同时又承受由水平次梁传来的集中荷载。水平主梁承受直接由面板传来的梯形荷载和竖直次梁传来的集中荷载。边梁一方面直接承受由面板传来的荷载，同时又承受由水平次梁及主梁传来的集中荷载。最后，全部荷载由边梁传到支承部件上，再通过埋件传给闸墩或边墩。

为简化计算，通常把各构件承受的荷载折算为一种荷载，即各构件只计算两侧梁格板传来的水压力（如水平次梁、竖直次梁、主梁等）或只计算其他构件传来集中荷载（如边梁等）。

闸门的结构计算一般根据上面所述的荷载传递顺序，依次对闸门的构件进行计算。

闸门结构计算应按照实际可能发生的最不利的荷载组合情况，对闸门的设计条件和校核条件进行强度、刚度、稳定性验算。

强度验算：对于闸门承重构件和连接件，应验算正应力和剪应力，在同时受较大正应力和剪应力作用处，尚应验算折算应力。计算的最大应力不得超过容许应力的 5%。

刚度验算：应验算受弯构件的挠度。最大挠度与计算跨度之比，不应超过下列数值：

- (1) 潜孔式工作闸门和事故闸门的主梁：1/750。
- (2) 露顶式工作闸门和事故闸门的主梁：1/600。
- (3) 检修闸门和拦污栅的主梁：1/500。
- (4) 次梁：1/250。

稳定性验算：对受弯、受压和偏心受压构件，应验算整体稳定性和局部稳定性。闸门构件的长细比，不应超过下列数值：

- (1) 受压构件的容许长细比：

|      |     |
|------|-----|
| 主要构件 | 120 |
|------|-----|

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 次要构件            | 150 |
| 联系构件            | 200 |
| (2) 受拉构件的容许长细比: |     |
| 主要构件            | 200 |
| 次要构件            | 250 |
| 联系构件            | 350 |

闸门承重构件的钢板厚度或型钢截面不得小于:

- (1) 6mm 钢板;
- (2)  $\angle 50\text{mm} \times 6\text{mm}$  的等边角钢;
- (3)  $\angle 63\text{mm} \times 40\text{mm} \times 6\text{mm}$  的不等边角钢;
- (4) I 12.6 的工字钢;
- (5) [8 的槽钢。

但小型工程的闸门可不受此限。

## 二、面板

平面闸门的面板一般做成平面,也有做成波浪形或拱形的。面板与梁系连接在一起,而使闸门具有很大的刚度。面板一般设在闸门的上游面,如此可避免梁系和行走支承淹没在水中,也可减小门底过水而产生的振动。但采用下游止水、静水启闭的检修闸门,为了设置止水的方便及提高止水效果,面板可设在下游面。

为了结构布置和制造的方便,一扇闸门的面板厚度通常只采用一种规格,但当门的高度较大而闸门又分节,则可考虑沿门高按水头的大小而改变面板厚度。

为充分利用面板的强度,梁格布置时宜使面板的长短边比( $b/a$ )大于 1.5,并将长边布置在沿主梁轴线方向。当面板与主(次)梁相连接时,应考虑面板一部分宽度参与主(次)梁翼缘工作。

面板的局部弯曲应力,可视支承边界情况,按四边固定(或三边固定一边简支或两相邻边固定、另两相邻边简支)的弹性薄板承受均布荷载(对于露顶式闸门的顶区格按三角形荷载)计算。验算面板强度时,应考虑面板的局部弯曲应力与面板兼作主

(次) 梁翼缘的整体弯曲应力相叠加成的折算应力。

(一) 初选面板厚度

初选面板厚度  $\delta$  按下式计算：

$$\delta = a \sqrt{\frac{k_y q}{\alpha [\sigma]}} \quad (2-10)$$

式中： $k_y$  为弹塑性薄板支承长边中点弯曲应力系数，按表 2-1～表 2-3 采用； $\alpha$  为弹塑性调整系数 ( $b/a > 3$  时， $\alpha = 1.4$ ； $b/a \leq 3$  时， $\alpha = 1.5$ )； $q$  为面板计算区格中心的水压力强度， $\text{N/mm}^2$ ； $a$ 、 $b$  为面板计算区格的短边和长边长度， $\text{mm}$ ，从面板与主（次）梁的连接焊缝算起； $[\sigma]$  为钢材的抗弯容许应力，按表 1-5 采用。

表 2-1 四边固定矩形弹性薄板受均载的弯应力系数  $k$  ( $\mu = 0.3$ )

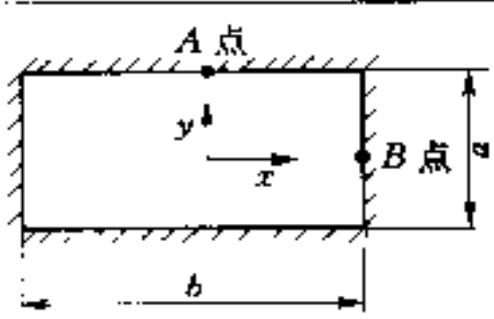
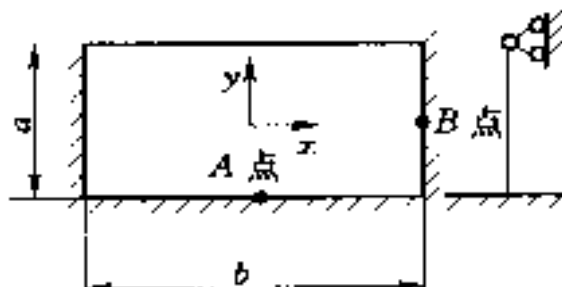
| 验 算 点              | $b/a$ |       |          |                                                                                       |       |
|--------------------|-------|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|                    | 1.0   | 1.1   | 1.2      | 1.3                                                                                   | 1.4   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.308 | 0.349 | 0.383    | 0.412                                                                                 | 0.436 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.308 | 0.323 | 0.332    | 0.338                                                                                 | 0.341 |
| 验 算 点              | $b/a$ |       |          |                                                                                       |       |
|                    | 1.5   | 1.6   | 1.7      | 1.8                                                                                   | 1.9   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.454 | 0.468 | 0.479    | 0.487                                                                                 | 0.493 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.342 | 0.343 | 0.343    | 0.343                                                                                 | 0.343 |
| 验 算 点              | $b/a$ |       |          | 示 意 图                                                                                 |       |
|                    | 2.0   | 2.5   | $\infty$ |                                                                                       |       |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.497 | 0.500 | 0.500    |  |       |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.343 | 0.343 | 0.343    |                                                                                       |       |

表 2-2 三边固定一边简支矩形弹性薄板受均载的弯应力系数  $k$   
( $\mu=0.3$ )

| 验 算 点              | $b/a$ |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 1.0   | 1.25  | 1.5   | 1.75  | 2.0   | 2.5   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.328 | 0.472 | 0.565 | 0.632 | 0.683 | 0.732 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.360 | 0.425 | 0.455 | 0.465 | 0.470 | 0.470 |

| 验 算 点              | $b/a$ |          | 示 意 图 1                                                                               |
|--------------------|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | 3.0   | $\infty$ |                                                                                       |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.740 | 0.750    |  |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.471 | 0.472    |                                                                                       |

| 验 算 点              | $b/a$ |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 1.0   | 1.25  | 1.5   | 1.75  | 2.0   | 2.5   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.360 | 0.448 | 0.473 | 0.489 | 0.500 | 0.500 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.328 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.342 | 0.342 |

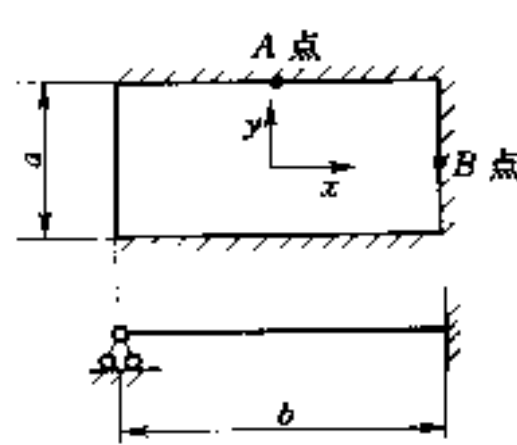
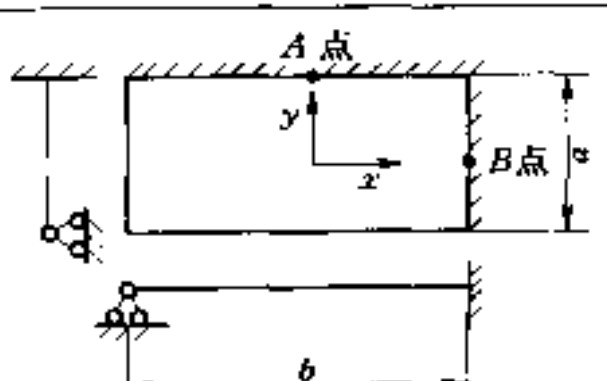
| 验 算 点              | $b/a$ |          | 示 意 图 2                                                                               |
|--------------------|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | 3.0   | $\infty$ |                                                                                       |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.500 | 0.500    |  |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.342 | 0.342    |                                                                                       |

表 2-3 两相邻边简支另两相邻边固定矩形弹性薄板  
承受均载的弯应力系数  $K$  ( $\mu=0.3$ )

| 验 算 点              | $b/a$ |                                                                                       |       |       |       |
|--------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                    | 1.0   | 1.1                                                                                   | 1.2   | 1.3   | 1.4   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.407 | 0.459                                                                                 | 0.506 | 0.549 | 0.585 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.407 | 0.425                                                                                 | 0.441 | 0.452 | 0.459 |
| 验 算 点              | $b/a$ |                                                                                       |       |       |       |
|                    | 1.5   | 1.6                                                                                   | 1.7   | 1.8   | 1.9   |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.616 | 0.640                                                                                 | 0.662 | 0.680 | 0.695 |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.463 | 0.467                                                                                 | 0.468 | 0.470 | 0.471 |
| 验 算 点              | $b/a$ | 示 意 图                                                                                 |       |       |       |
|                    | 2.0   |                                                                                       |       |       |       |
| 支承长边中点 (A 点) $k_y$ | 0.708 |  |       |       |       |
| 支承短边中点 (B 点) $k_x$ | 0.472 |                                                                                       |       |       |       |

计算所得厚度, 尚应根据工作环境的防腐条件等因素, 增加 1~2mm 腐蚀裕度。

## (二) 面板折算应力

(1) 当面板的边长比  $b/a > 1.5$ , 且长边布置在沿主梁轴线方向时 [图 2-8 (a)], 只需按下式验算面板 A 点的折算应力:

$$\begin{aligned}\sigma_{zh} &= \sqrt{(\sigma_{my})^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - (\sigma_{my})(\sigma_{mx} - \sigma_{ox}) \\ &\leq 1.1\alpha[\sigma]\end{aligned}\quad (2-11)$$

$$\sigma_{m_y} = k_y q a^2 / \delta^2$$

$$\sigma_{m_x} = \mu \sigma_{m_y}$$

式中： $\sigma_{m_y}$ 为垂直于主（次）梁轴线方向面板支承长边中点的局部弯曲应力； $\sigma_{m_x}$ 为面板沿主（次）梁轴线方向的局部弯曲应力； $\mu$ 为泊松比，取 0.3； $\sigma_{0x}$ 为对应于面板验算点的主（次）梁上翼缘的整体弯曲应力； $[\sigma]$ 为抗弯容许应力，按表 1-5 采用； $\alpha$ 为弹塑性调整系数（当  $b/a > 3$  时，取  $\alpha = 1.4$ ；当  $b/a \leq 3$  时，取  $\alpha = 1.5$ ）； $k_y$ 为支承长边中点弯应力系数，按表 2-1～表 2-3 采用； $\sigma_{m_y}$ 、 $\sigma_{m_x}$ 、 $\sigma_{0x}$ 均取绝对值。

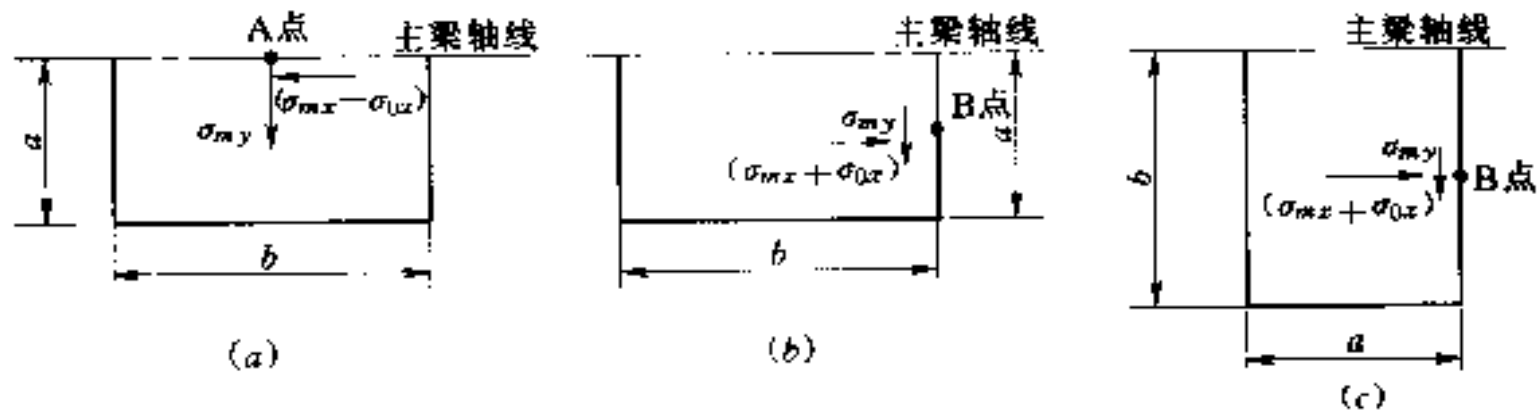


图 2-8 面板区格形式

(2) 当面板的边长比  $b/a \leq 1.5$  或面板长边方向与主梁轴线垂直时 [图 2-8 (b)、(c)]，应按下式验算面板 B 点的折算应力：

$$\begin{aligned} \sigma_{zh} &= \sqrt{(\sigma_{m_y})^2 + (\sigma_{m_x} + \sigma_{0x})^2 - (\sigma_{m_y})(\sigma_{m_x} + \sigma_{0x})} \\ &\leq 1.1\alpha[\sigma] \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\sigma_{0x} = (1.5\xi_1 - 0.5)M/W$$

式中： $\sigma_{m_x}$ 为面板沿主梁轴线方向面板的局部弯应力， $\sigma_{m_x} = k_x q a^2 / \delta^2$ ， $k$  值对图 2-8 (b) 取  $k_x$ ，对图 2-8 (c) 取  $k_y$ ； $\sigma_{m_y}$ 为垂直于主梁轴线方向面板的局部弯应力， $\sigma_{m_y} = \mu \sigma_{m_x}$ ， $\mu$  取 0.3； $\sigma_{0x}$ 为对应于面板验算点主梁上翼缘的整体弯应力  $\xi_1$  为面板兼作主（次）梁上翼缘的有效宽度系数，见表 2-4； $M$  为对应于面板验算点主梁的弯矩； $W$  为对应于面板验算点主梁的截面抵抗矩； $\sigma_{m_x}$ 、 $\sigma_{m_y}$ 、 $\sigma_{0x}$ 均取绝对值，其他符号意义同前。

表 2-4 面板的有效宽度系数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$

| $l_0/b$ | 0.5  | 1    | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 20   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_1$ | 0.2  | 0.40 | 0.58 | 0.70 | 0.78 | 0.84 | 0.90 | 0.94 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 1.00 |
| $\xi_2$ | 0.16 | 0.30 | 0.42 | 0.51 | 0.58 | 0.64 | 0.71 | 0.77 | 0.79 | 0.83 | 0.86 | 0.92 |

- 注 1.  $l_0$  为主（次）梁弯矩零点之间的距离，对于简支梁  $l_0=l$ ，对于连续梁的正弯矩段可近似地  $l_0=(0.6\sim0.8)l$ ；对于其负弯矩段可近似地取  $l_0=0.4l$ ，其中  $l$  为主（次）梁的跨度，见图 2-9。
2.  $\xi_1$  适用于梁的正弯矩图，为抛物线图形； $\xi_2$  适用于梁的负弯矩图，近似地取为三角形。

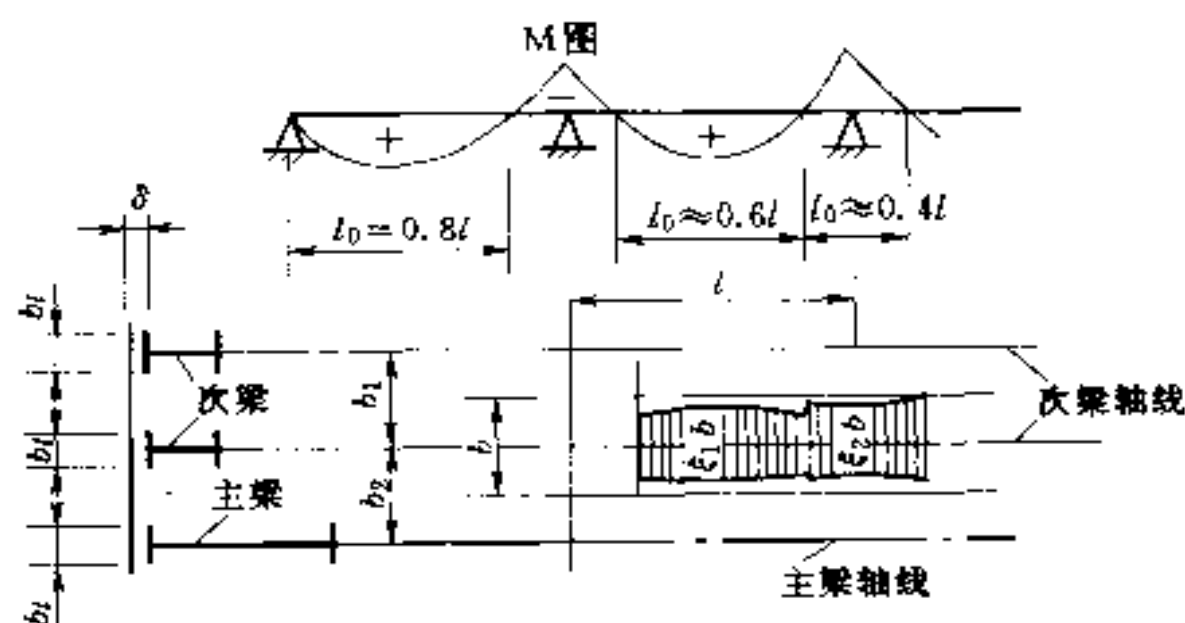


图 2-9 面板兼作主（次）梁翼缘的有效宽度

### (三) 面板参与梁系有效宽度的计算

(1) 面板兼作主（次）梁翼缘的有效宽度  $B$ ，对于简支或连续梁中正弯矩段，可按下列公式计算（式中符号见图 2-9），取其中较小值。

$$B = \xi_1 b \quad (2-13)$$

$$B \leq 60\delta + b_l (\text{Q235 钢})$$

或  $B \leq 50\delta + b_l (\text{16Mn 钢}) \quad (2-14)$

式中： $b$  为主、次梁的间距， $b = \frac{b_1 + b_2}{2}$ ； $\xi_1$  为有效宽度系数，按表 2-4 采用； $\delta$  为面板厚度； $b_l$  为梁肋宽度，当梁另有上翼缘时，为上翼缘宽度。

(2) 对于连续梁中负弯矩段或悬臂段, 面板的有效宽度应按式取用:

$$B = \xi_2 b \quad (2-15)$$

式中:  $\xi_2$  为有效宽度系数, 按表 2-4 采用。

### 三、水平次梁

在等高连接的梁格中, 水平次梁遇竖直次梁断开, 因此水平次梁按承受均布荷载的简支梁计算。在等高连接的梁格中多用实腹隔板代替竖直次梁, 以及在降低连接的梁格中, 水平次梁连续地支承在隔板或竖直次梁上, 此时水平次梁可按承受均布荷载的多跨连续梁计算。受力简图如图 2-10 所示。

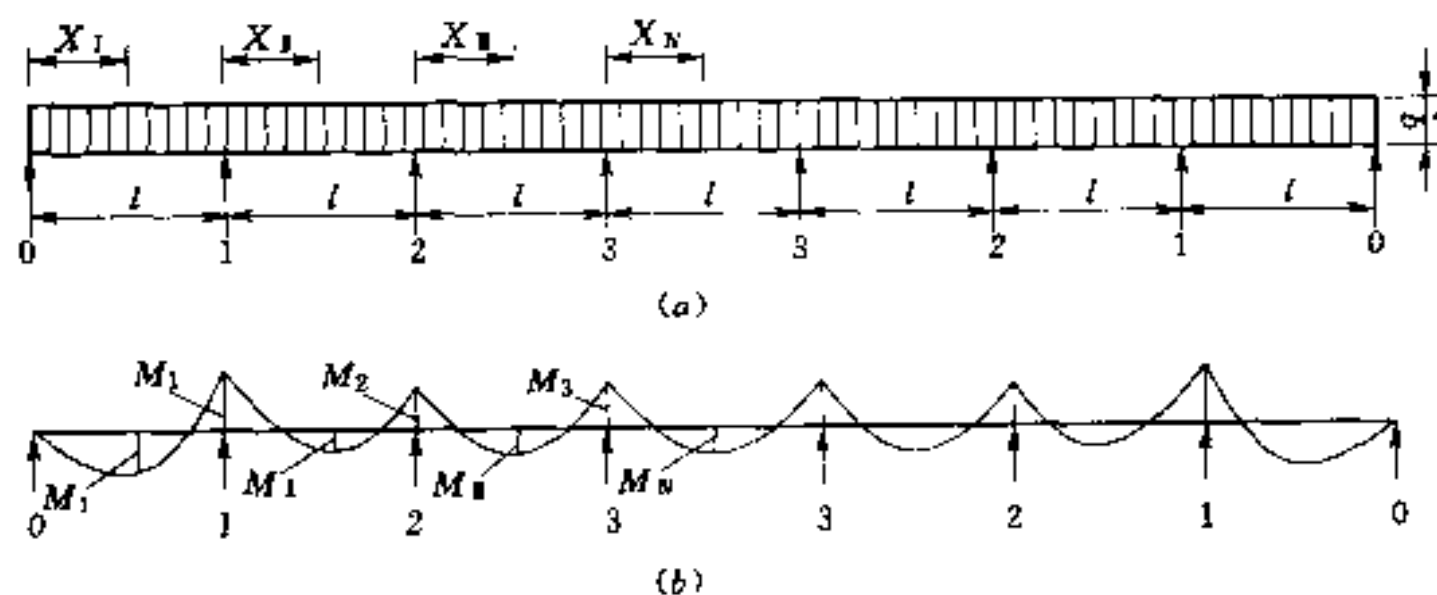


图 2-10 作为连续梁计算的水平次梁内力计算简图

水平次梁的常用截面形式: 承受荷载不大的水平次梁, 可用等边或不等边的角钢制造。荷载较大时, 可采用槽钢和工字钢或组合截面。水平次梁的形式及布置, 如图 2-11 所示。角钢和槽钢的肢宜向下, 以防积水和积尘。一个闸门的型钢规格不宜超过 2~3 种, 以便于加工制造。

#### 1. 内力计算

均布荷载的等跨连续梁内力及挠度计算:

$$\text{弯矩} \quad M = kql^2 \quad (2-16)$$

$$\text{剪力} \quad Q = kql \quad (2-17)$$

$$\text{挠度} \quad f = k \frac{ql^4}{100EI} \quad (2-18)$$

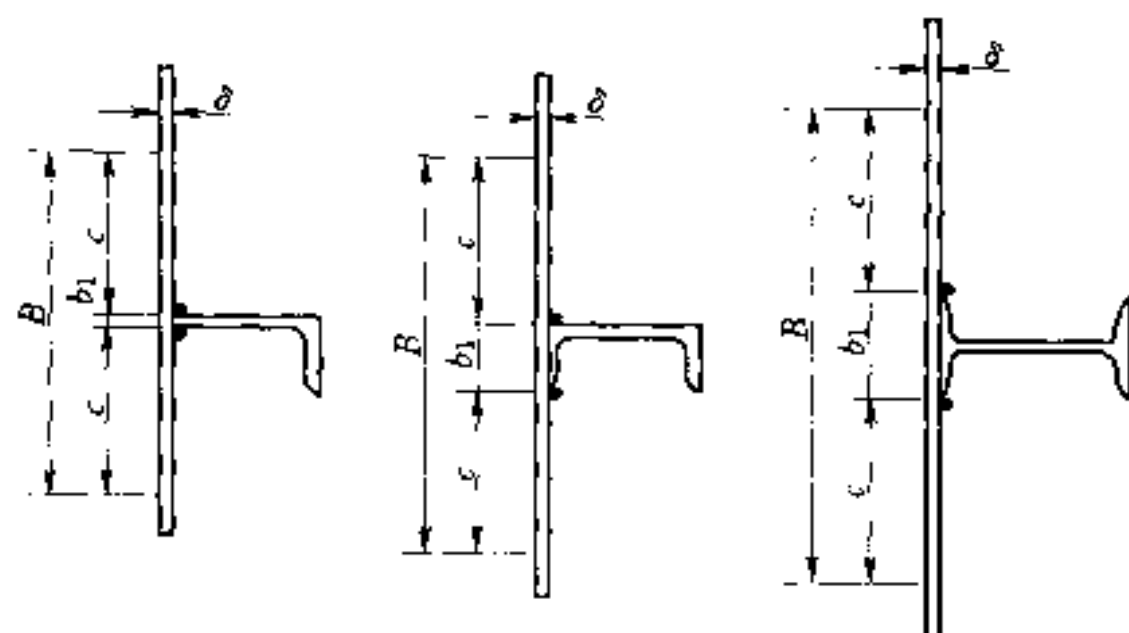


图 2-11 水平次梁的截面形式

式中： $k$  为系数，其值按图 2-10 中相应截面由表 2-5 查得； $l$  为两相邻支座的跨度； $q$  为分布荷载强度，可参照主梁相邻间距和之半法确定； $E$  为材料的弹性模量； $I$  为计算截面的惯性矩。

## 2. 强度计算

在一个主平面内受弯构件按下式验算相应截面的正应力和剪应力：

$$\text{正应力} \quad \sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma] \quad (2-19)$$

$$\text{剪应力} \quad \tau = \frac{QS}{I\delta} \leq [\tau] \quad (2-20)$$

式中： $M$ 、 $Q$  为所验算截面的弯矩和剪力； $I$  为所验算截面对中和轴的惯性矩； $W$  为所验算正应力截面的抗弯截面模量； $S$  为所验算剪应力截面处中和轴一侧截面面积对中和轴的面积矩； $\delta$  为腹板厚度； $[\sigma]$ 、 $[\tau]$  为钢材的抗弯、抗剪容许应力，按表 1-5 采用。

在组合梁中同时受较大正应力和剪应力作用处（如连续梁的支座处或梁截面改变处等），还应按第三强度理论验算折算应力，满足下式：

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1[\sigma] \quad (2-21)$$

## 3. 刚度计算

最大挠度按式 (2-18) 和表 2-5 中的系数计算，并满足下式：

表 2-5 均布荷载的等跨连续梁中的内力系数

| 序号 | 名称             | 符号    | 跨 数    |        |        |        |        |        |                      | 乘数       | 附 注      |
|----|----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------|----------|
|    |                |       | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |                      |          |          |
|    |                |       |        |        |        |        |        |        | 系 数 $k$              |          |          |
| 1  | 支点反力           | $A_0$ | 0.375  | 0.400  | 0.393  | 0.395  | 0.394  | 0.394  | $Q=ql$               | —        | —        |
| 2  |                | $A_1$ | 1.250  | 1.100  | 0.143  | 1.132  | 1.135  | 1.134  |                      |          |          |
| 3  |                | $A_2$ | —      | —      | 0.920  | 0.974  | 0.962  | 0.965  |                      |          |          |
| 4  |                | $A_3$ | —      | —      | —      | —      | 1.019  | 1.007  |                      |          |          |
| 5  | 支点弯矩           | $M_1$ | -0.125 | -0.100 | -0.107 | -0.105 | -0.106 | -0.105 | $Ql=ql^2$            | —        | —        |
| 6  |                | $M_2$ | —      | —      | 0.071  | -0.079 | -0.077 | 0.077  |                      |          |          |
| 7  |                | $M_3$ | —      | —      | —      | —      | -0.087 | -0.085 |                      |          |          |
| 8  | 跨中弯矩           | $M_1$ | -0.070 | +0.080 | -0.077 | +0.078 | +0.078 | +0.078 | $Ql=ql^2$            | —        | —        |
| 9  |                | $M_r$ | —      | +0.025 | -0.036 | -0.033 | +0.034 | +0.034 |                      |          |          |
| 10 |                | $M_s$ | —      | —      | —      | +0.046 | +0.034 | +0.044 |                      |          |          |
| 11 |                | $M_N$ | —      | —      | —      | —      | —      | +0.040 |                      |          |          |
| 12 | 最大跨中弯矩至相应支点的距离 | $X_1$ | 0.375  | 0.400  | 0.393  | 0.395  | 0.394  | 0.394  | /                    | 由支点 0 计起 | 由支点 0 计起 |
| 13 |                | $X_r$ | —      | 0.500  | 0.536  | 0.526  | 0.529  | 0.528  |                      |          |          |
| 14 |                | $X_s$ | —      | —      | —      | 0.500  | 0.490  | 0.493  |                      |          |          |
| 15 |                | $X_N$ | —      | —      | —      | —      | —      | 0.500  |                      |          |          |
| 16 | 跨中挠度           | $f_1$ | 0.521  | 0.677  | 0.633  | 0.644  | —      | —      | $\frac{ql^4}{100EI}$ | —        | —        |
| 17 |                | $f_r$ | —      | 0.052  | 0.186  | 0.151  | —      | —      |                      |          |          |
| 18 |                | $f_s$ | —      | —      | —      | 0.315  | —      | —      |                      |          |          |
| 19 |                | $f_N$ | —      | —      | —      | —      | —      | —      |                      |          |          |

$$f_{\max} \leq [f] \quad (2-22)$$

对于一般次梁，容许挠度  $[f] = \frac{l}{250}$ ， $l$  为计算跨度。

#### 4. 整体稳定性验算

当梁的受压翼缘与面板连接时，可不验算梁的整体稳定性。

#### 5. 局部稳定性验算

对受均布荷载的组合工字形截面，当符合下列条件时，可不验算腹板的局部稳定性：

$$\frac{h_0}{\delta} \leq 80 \sqrt{\frac{240}{\sigma_s}} \quad (2-23)$$

式中： $h_0$  为腹板计算高度； $\delta$  为腹板厚度； $\sigma_s$  为钢材屈服点。

型钢截面的次梁一般不需验算刚度和稳定性。

### 四、竖直次梁

在采用等高连接实腹式梁格结构，竖直次梁承受着由其两侧面板传来的水压荷载及水平次梁上传来的集中荷载。为使计算方便，竖直次梁的荷载可简化为三角形或梯形分布的水压荷载，这样简化对竖直次梁的最大弯矩的计算影响不大。如果采用降低连接，竖直次梁的荷载则是由水平次梁上传来的集中荷载。

对于双主梁闸门，竖直次梁可看作是支承在主梁上的双支点双悬臂梁，如图 2-12 所示；对于多主梁闸门，竖直次梁可分段按支承在主梁上的简支梁或悬臂梁进行计算，如图 2-13 所示。

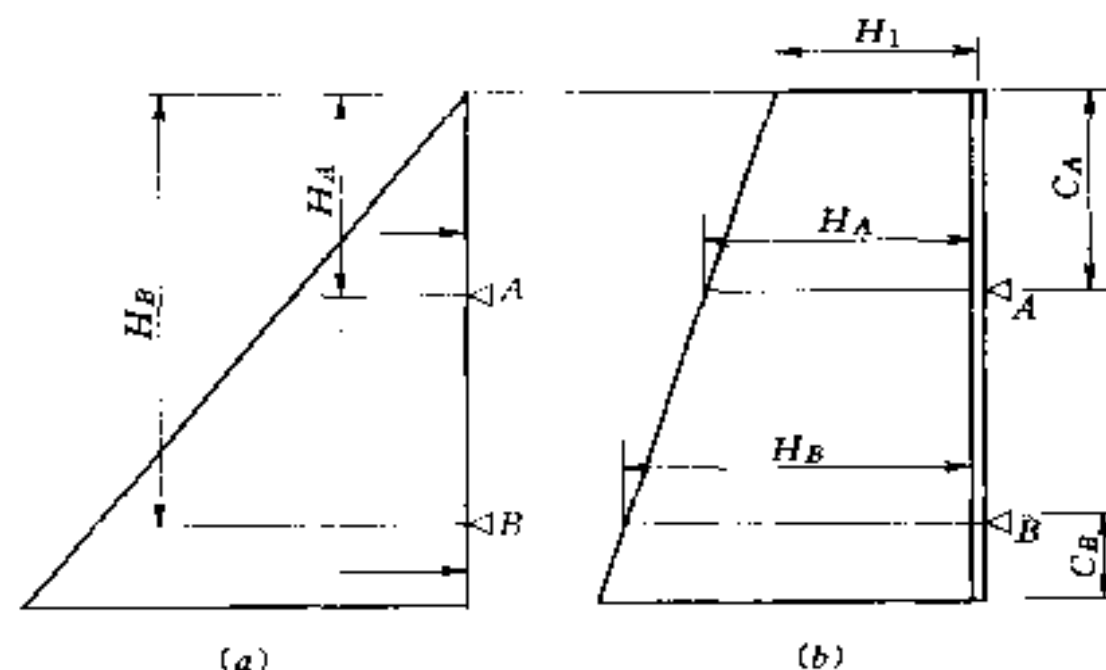


图 2-12 竖直次梁按双支点双悬臂梁计算的受力简图

竖直次梁常用的截面形式为型钢或组合工字或  $T$  形截面，其截面选择及面板有效宽度的确定与水平次梁相同。在等高连接的梁格中多用实腹隔板代替竖直次梁，此时，其截面按构造确定。在焊接结构中，隔板不需设前翼缘，而直接与面板和主梁的腹板焊牢，隔板一般设宽度不大的后翼缘。当闸门尺寸较大时，可在隔

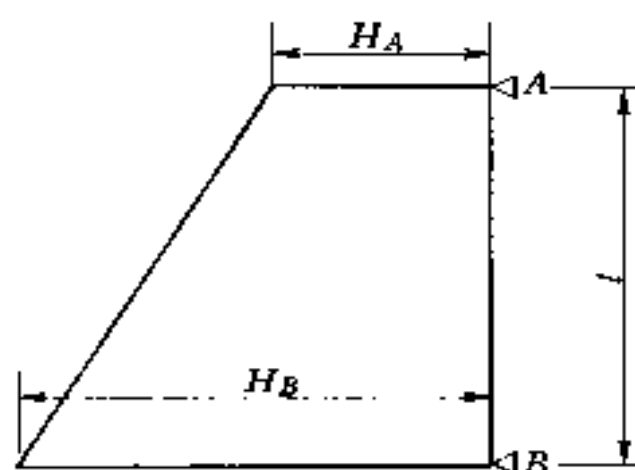


图 2-13 竖直次梁按简支梁计算的受力简图

板上开孔以减轻门叶重量。如果隔板截面尺寸较大，由静水压力产生的弯曲应力很小，则可不进行验算。

#### 1. 内力计算

当水压荷载为三角形分布时 [图 2-12 (a)]， $A$  断面上的弯矩为

$$M_A = \frac{\gamma H_A^3 b}{6} \quad (2-24)$$

式中： $H_A$  为上主梁以上的水头； $b$  为竖直次梁等间距分布时的间距； $\gamma$  为水的重度。

当水压荷载呈梯形分布时 [图 2-12 (b)]，支点  $A$  断面上的弯矩为

$$M_A = \gamma \alpha \frac{H_A + H_1}{2} C_A^2 b \quad (2-25)$$

式中： $H_1$  为竖直次梁顶端的水头； $C_A$  为上悬臂受水压作用部分的高度； $\alpha$  为系数，可按表 2-6 查出。

不论荷载是三角形分布还是梯形分布，支点  $B$  断面上的弯矩，都可近似地用下式计算：

$$M_B = \gamma \frac{H + H_B}{4} C_B^2 b \quad (2-26)$$

式中： $H$  为闸门的设计水头； $H_B$  为下主梁以上的水头； $C_B$  为下悬臂受水压作用部分的高度；其余符号意义同上。

表 2-6

系 数  $\alpha$  值

| $H_A/H_1$ | $\alpha$ | $H_A/H_1$ | $\alpha$ |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 1.0~1.06  | 0.50     | 1.74~1.98 | 0.45     |
| 1.07~1.19 | 0.49     | 1.99~2.27 | 0.44     |
| 1.20~1.35 | 0.48     | 2.28~2.63 | 0.43     |
| 1.36~1.53 | 0.47     | 2.64~3.09 | 0.42     |
| 1.54~1.73 | 0.46     | 3.10~3.66 | 0.41     |

当按简支梁计算时, 见图 2-13, 其弯矩和挠度为

$$M \approx 1/8Pl \quad (2-27)$$

$$f \approx \frac{5}{384} \frac{Pl^3}{EI} \quad (2-28)$$

式中:  $P = \frac{1}{2} \gamma (H_A + H_B) lb$ , 其余符号的意义同上。

## 2. 强度、刚度、稳定性验算

竖直次梁的强度、刚度、稳定性验算可参照一般水平次梁的方法进行。

## 五、主梁

平面钢闸门的主梁, 一般有实腹式和桁架式两种。实腹式主梁一般采用组合工字截面或箱形截面, 跨度小的闸门为制造方便可选用型钢, 如槽钢和工字钢。考虑面板部分参与主梁弯曲工作, 组合式主梁可设计成不对称截面。

对于主梁跨度较大的露顶门, 为减小门槽尺寸和节约钢材, 采用变截面的主梁。目前, 我国大中型水电工程中, 平面闸门的主梁, 绝大多数都采用组合梁。

对于主梁跨度超过 20m 的露顶门, 采用桁架式较为适宜。桁架比组合梁省料, 同时减轻了门重及启闭机容量。但是, 桁架制造费工, 维护比较麻烦。

### (一) 主梁内力计算及强度计算

根据止水与面板的布置不同, 主梁的受力有所不同, 内力计算和强度计算也不同。当面板与主梁直接相连时, 部分面板可以

作为主梁翼缘的一部分，参与主梁的整体弯曲工作。下面就几种常见的形式分别介绍。

### 1. 止水设置在闸门上游面

(1) 实腹式主梁。主梁一般按承受均布荷载的简支梁计算，计算简图见图 2-14，图中符号公式为

$$R_A = R_B = \frac{1}{2}ql_h \quad (2-29)$$

$$M_{\max} = \frac{ql_h}{4} \left[ l_0 - \frac{l_h}{2} \right] \quad (2-30)$$

式中： $q$  为作用于主梁上的均布荷载； $l_h$  为荷载跨度； $l_0$  为计算跨度； $M_{\max}$  为最大弯矩，发生在  $l_0/2$  处； $R_A$ 、 $R_B$  为支承反力。

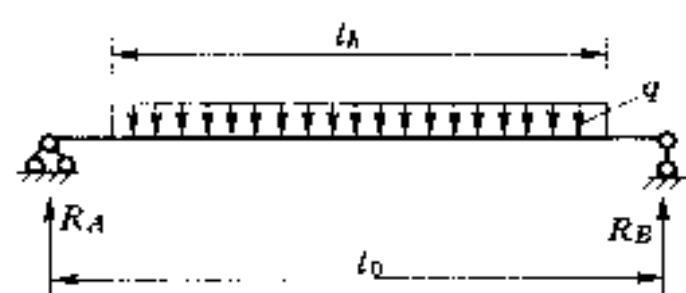


图 2-14 实腹式主梁的计算简图

(2) 桁架式主梁。桁架式主梁的计算简图见图 2-15。桁架高度通常

取为支承跨度的  $1/6 \sim 1/9$ ，如端部采用降低的桁架时，端部高度可取跨中高度的  $0.4 \sim 0.6$  倍。桁架节间数宜为偶数（一般可定为 8），使布置对称，也便于布置其他平面内的构件。作用在桁架上的荷载，一般按节点处集中荷载来考虑，即使在弦杆上作用有均布荷载，但在分析时，仍折算为节点集中荷载。

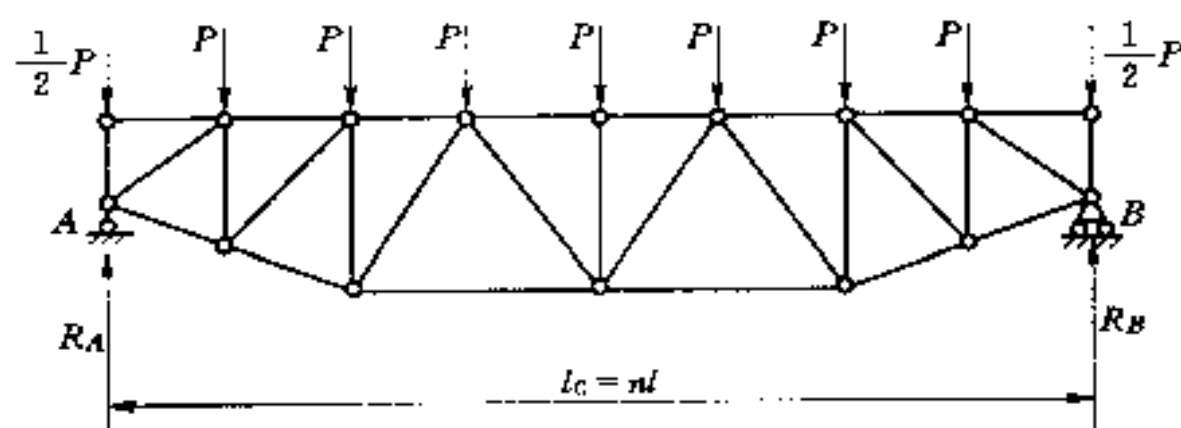


图 2-15 桁架式主梁计算简图

静定桁架的节点，在分析时假定为铰接，即假定仅承受轴向力。在节点上只考虑两个方向力的平衡，即  $\sum X = 0$  和  $\sum Y = 0$ ，具体可用数解法和图解法。对承受均布荷载的杆件，除计算轴向力

外，还应局部地按弯曲构件计算其弯矩和剪力。

(3) 强度计算。对于只承受弯矩构件，其强度计算与水平次梁相同。轴心受拉（压）构件强度按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad (2-31)$$

式中：\$N\$ 为作用于构件上的轴心拉（压）力；\$A\$ 为构件截面面积。

2. 止水设置在闸门的下游面，面板设在上游面

潜孔闸门平面闸门关闭时，往往因摩擦阻力大，闸门依靠自重难以关闭，需要加压或配重或利用水柱使闸门下落，见图 2-16。利用水柱，需要把顶、侧止水设置在闸门的下游面，面板设在上游面，此时，静水荷载不仅作用在面板上，还从两侧作用于边梁腹板和侧止水上，以及水柱垂直作用于上部主梁和顶止水上。利用水柱闭门的闸门主梁有承受水柱荷载和不承受水柱荷载两类。

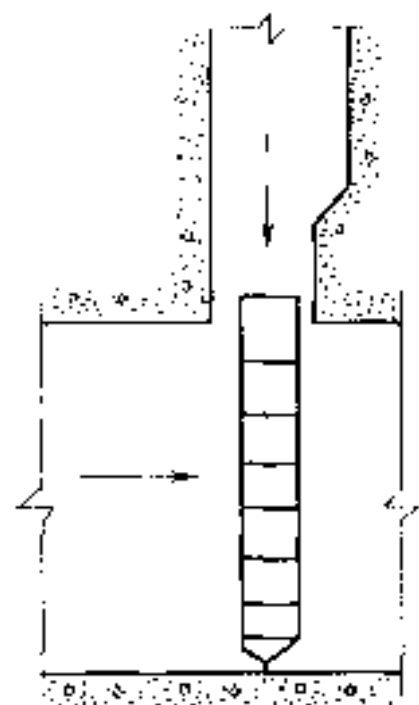


图 2-16 利用水柱下降的潜孔闸门

(1) 不承受水柱荷载主梁的内力和强度

计算。主梁承受的侧压力的合力 \$N\$，作用在面板与侧止水埋设座板之间的中点，合力的作用线与梁的横截面形心间有一偏心距 \$e\$。因此，在不受水柱荷载的主梁截面上，除了由门前水压荷载引起的弯矩 \$M\$ 之外，还受到方向相反的弯矩 \$Ne\$ 和压力 \$N\$ 的作用，见图 2-17。跨中截面上的应力为：

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} \mp \frac{Ne}{W} + \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad (2-32)$$

式中：\$W\$ 为主梁的截面抗矩；\$A\$ 为主梁的截面面积。

(2) 承受水柱荷载主梁的内力和强度计算。对于承受水柱荷载的主梁，由于承受双向水压及轴向力，可按双向偏心受压构件计算。计算水柱荷载分配时，可假设一半（以截面中和轴为界）由面板及部分腹板承担，另一半由主梁后翼缘及部分腹板承担，后

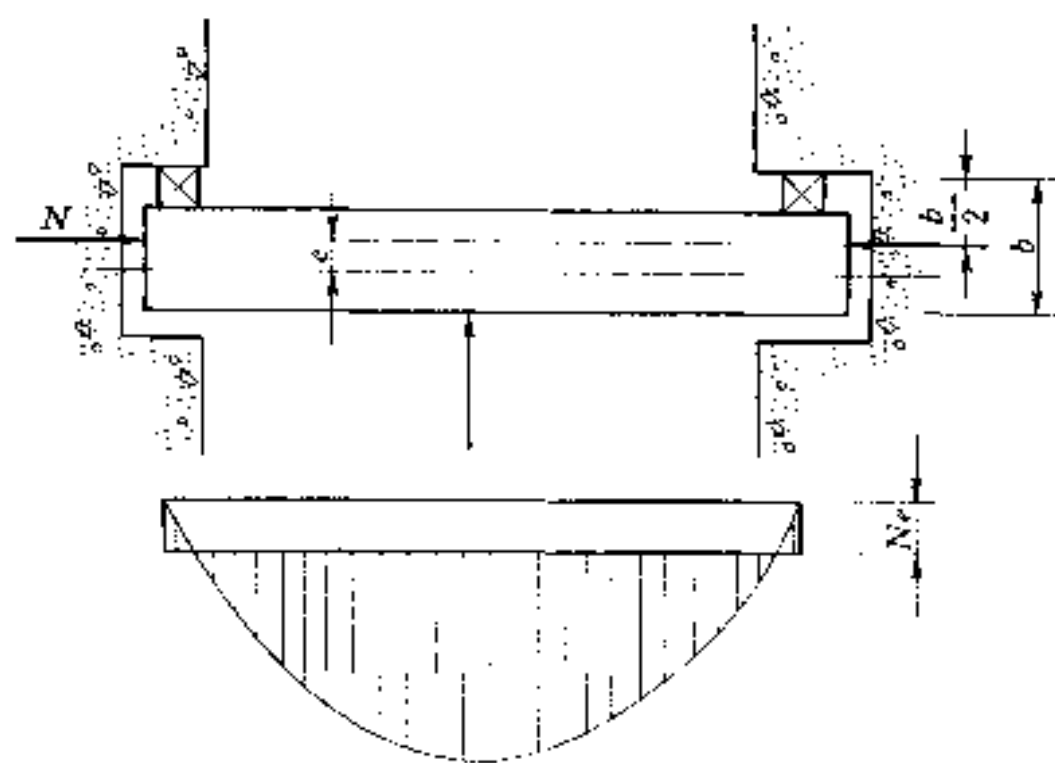


图 2-17 承受侧向水压力的  
潜孔闸门主梁计算简图

者可视作支承在隔板上的多跨连续梁计算。考虑到梁中部截面上，由水平荷载所引起的弯矩变化不大，以及由水柱荷载引起的全部计算的近似性质，因此主梁下翼缘上的总应力可认为是连续梁支座处最大弯曲应力、简支梁跨中最大弯曲应力以及侧部水压  $N$  产生的压应力之总和，忽略  $N_e$  产生的弯曲应力，即可按下式近似计算：

$$\sigma = \frac{M}{W_x} + \frac{M'}{W'_x} - \frac{N}{F} \leq [\sigma] \quad (2-33)$$

式中： $W'_x$  为顶主梁下翼缘对水平轴抗矩； $M'$  为由水柱荷载产生的弯矩。

对直接承受水压荷载的主梁腹板以及边梁腹板，都应按面板的计算方法进行强度验算。

## (二) 主梁刚度计算

主梁变形过大，会造成支座偏转而使零件磨损，使顶止水密封不严而漏水，甚至使动水中工作的闸门产生较严重的振动。因此，应限制主梁挠度不超过容许值。对于潜孔的工作闸门和事故闸门，其最大相对挠度为  $1/750$ ；对于露顶的工作闸门和事故闸门，则为  $1/600$ 。

(1) 闸门主梁刚度计算时可近似地认为计算跨度和荷载跨度相等。受均布荷载的等截面简支梁(图 2-18), 其最大相对挠度按下式计算:

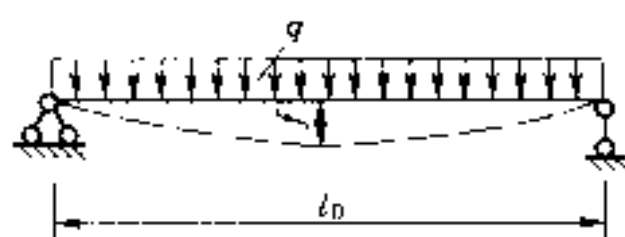


图 2-18 简支梁挠度  
计算简图

$$\frac{f_{\max}}{l} = \frac{5}{384} \frac{ql^3}{EI} \quad (2-34)$$

式中:  $q$  为梁的均布荷载;  $l$  为梁的计算跨度;  $I$  为等截面梁的截面惯性矩;  $E$  为弹性模量。

(2) 当采用变截面主梁时, 其端部梁高  $h_0 \approx (0.4 \sim 0.65) h$ ,  $h$  为主梁跨中高度。梁的截面变更通常在离支座  $(1/4 \sim 1/6) l$  处开始,  $l$  为主梁的跨度。这种受均布荷载的变截面简支梁, 在梁高改变而翼缘不变的情况下, 最大相对挠度按下式计算:

$$\frac{f_{\max}}{l} = \frac{5}{384} \frac{ql^3}{EI_m} (1 + k' \alpha) \quad (2-35)$$

其中

$$\alpha = \frac{I_m - I_0}{I_0}$$

式中:  $I_m$  为变截面梁跨中截面的惯性矩,  $I_0$  为变截面梁支座截面的惯性矩;  $k'$  为随变截面起始位置变化的系数, 见表 2-7。

表 2-7  $k'$  值 表

| 截面改变位置 | $l/4$  | $l/5$   | $l/6$   |
|--------|--------|---------|---------|
| $k'$   | 0.0175 | 0.00922 | 0.00544 |

### (三) 主梁的稳定性验算

#### 1. 整体稳定性验算

可参照次梁的计算。

#### 2. 局部稳定性验算

对受均布荷载的组合工字形截面, 应考虑组合梁腹板的稳定性, 可按其高厚比  $h_0/\delta$  的大小, 按下列几种情况配置加劲肋板:

(1) 当  $\frac{h_0}{\delta} \leq 80 \sqrt{\frac{240}{\sigma_s}}$  (其中:  $h_0$  为腹板计算高度;  $\delta$  为腹板厚

度； $\sigma_s$  为钢材屈服点）时，腹板厚度足以保证在强度破坏之前不会丧失局部稳定性，不需配置加劲肋板。

(2) 当  $80 \sqrt{\frac{240}{\sigma_s}} < \frac{h_0}{\delta} \leq 160 \sqrt{\frac{240}{\sigma_s}}$  时，腹板可能由于剪应力作用而失稳，应配置横向加劲肋板。等高连接的梁系一般可考虑竖直隔板作为横向加劲肋板。

(3) 当  $\frac{h_0}{\delta} > 160 \sqrt{\frac{240}{\sigma_s}}$  时，腹板将主要由于弯曲应力作用而失稳，除配置横向加劲肋板外，尚宜配置纵向加劲肋板。纵向加劲肋板宜布置在  $(0.2 \sim 0.25) h$  处。

梁的支座处和翼缘上有较大的固定集中荷载处，应设置支承加劲肋。

## 六、竖向联结系及门背联结系

### (一) 竖向联结系

竖向联结系（又称横向联结系）的作用，除传递由面板及水平次梁传来的水压力外，同时还起到均衡主梁荷载的作用，将某一超载主梁上的荷载传递于另外的主梁；竖向联结系能使闸门截面形状不变，从而保证了闸门的竖向刚度；它还能承受不在主梁平面内引起闸门空间结构扭转的偶然力，增加闸门的抗扭刚度。

竖向联结系分为竖向隔板和竖向桁架两类。竖向联结系一般可布置在竖直次梁所在的竖平面内，或每隔一根竖直次梁布置一个。因而，在竖向桁架中，竖直次梁就是桁架的上弦杆，而对于实体隔板来说，隔板本身也就是竖直次梁。竖向联结系的间距一般为  $1 \sim 4\text{m}$ ，常用的间距为  $1.5 \sim 3\text{m}$ 。在双主梁闸门中，其间距一般不超过主梁间距的 2 倍。其数目宜取单数。竖向联结系一般等距离布置，但有时为了设计计算的方便，两侧的竖向联结系与双腹板式边梁里侧腹板之间的距离小一些也是可以的。

在实腹式梁格中，由于竖向隔板本身就是竖直次梁，因而竖向隔板的计算方法与竖直次梁完全相同。但隔板截面尺寸较大，故一般也可不验算。

桁架式竖向联结系主要用于采用桁架结构的闸门梁系中。竖向桁架的计算，按支点在主梁后翼缘上的桁架考虑，其荷载有从水平次梁传来的集中荷载；当竖直次梁直接与面板相连时，还有从面板传来的均布荷载。当闸门的梁系采用桁架结构，一般应采用空间结构理论进行分析计算。

## (二) 门背联结系

闸门由于其自重及其他竖向荷载的作用，因而要求闸门在与跨度相平行的垂直平面内应具有足够的刚度，以使闸门在启闭时垂直变形小，各构件垂直应力也尽量小。因此，在面板相对的一面，即门的背部，应装有适当的联结系。这种联结系，称之为门背联结系，也称纵向联结系。事实上，闸门的前面，当钢面板与各主梁的前翼缘紧接相连时，也自然形成了一个联结系。因此应该说闸门具有两个纵向联结系，共同保证闸门的纵向垂直刚度。

门背联结系的形式有桁架式和框架式两种。对于采用桁架结构梁系的闸门，常采用桁架式。此时，主梁的下弦杆就是门背桁架的弦杆，竖向桁架的下弦杆就是它的竖杆，只有斜杆是另设的。对于采用多主梁实腹式梁系结构的闸门，其主梁和隔板的下翼缘构成门背联结系；当主梁间距较大时，可采用对角斜杆，见图 2-19 (a)；水头较高的深孔闸门，可采用在主梁与隔板相交处设置扩大的节点板而构成刚性节点，见图 2-19 (b)。

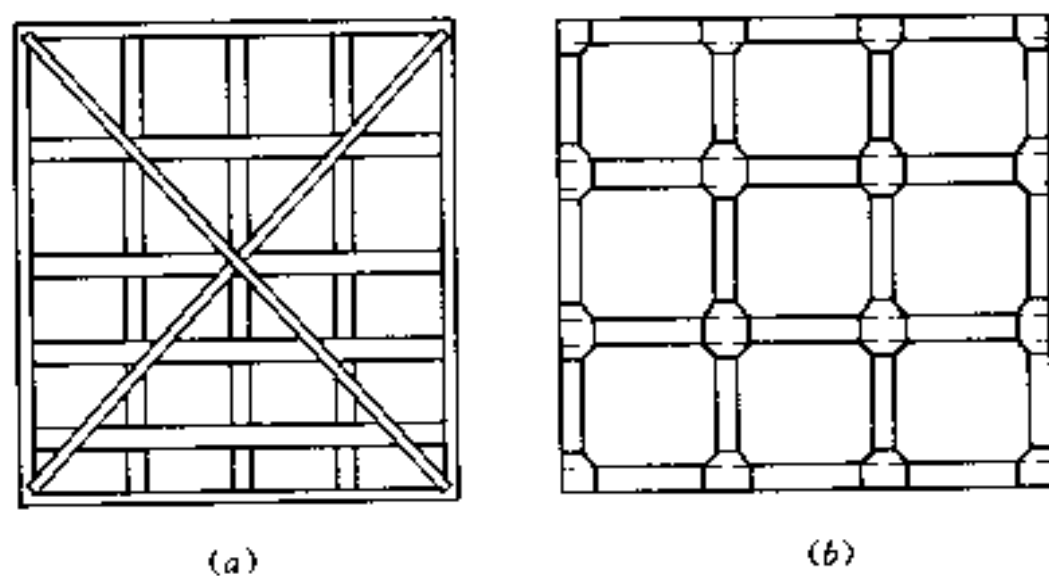


图 2-19 实腹式梁系门背联结系的形式

## 七、边梁

边梁位于闸门的两端，主要作用是支承主梁、水平次梁以及门背联结系，并在其上安置行走支承（滚轮或滑块）和吊耳。边梁设计与行走支承的布置和形式有关，应同时考虑。

边梁的截面有单腹板式和双腹板式两种形式。单腹板式边梁多用于采用滑道式支承或悬臂式定轮的闸门中。单腹板式边梁构造简单，便于与主梁连接，但抗扭刚度差，不利于承受因闸门弯曲变形、热胀冷缩以及其他偶然力而在边梁中产生的扭矩。双腹板边梁广泛用于跨度较大的表孔定轮闸门以及深孔闸门中。双腹板式边梁的抗扭刚度大，便于设置轮轴及悬吊轴，但构造较复杂，截面内焊接较困难。

边梁的截面尺寸一般是按构造要求确定的，边梁的高度与主梁端部等高，腹板厚度可参照主梁腹板厚度选择。前翼缘可另设，也可利用面板兼作前翼缘。双腹板的间距应根据定轮的尺寸确定。

边梁在水平方向承受主梁、水平次梁以及由面板传来的水压力和行走支承反力，为简化计算，边梁的水平荷载折算成主梁的集中荷载。在竖直方向，还承受门重、水柱重、启闭闸门时的启门力、下吸力、上托力以及行走支承与止水上的摩擦阻力等荷载。

根据支承形式和布置不同，边梁的计算简图有以下几类。

### 1. 边梁上为两个定轮

边梁按双支点的压弯构件（闸门处于关闭状态）或是拉弯构件（闸门处于开启状态）进行截面的强度校核，见图 2-20。

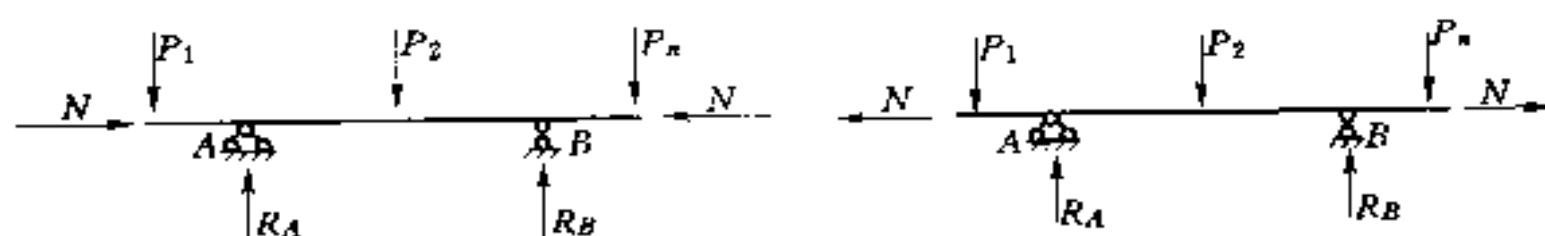


图 2-20 边梁计算简图

$P_1, \dots, P_n$ —由主梁传给边梁的荷载； $N$ —边梁承受的竖向荷载或作用力；

$R_A, R_B$ —支承反力

### 2. 边梁上为两个以上定轮

边梁上的定轮超过两个，其水平荷载引起的内力可按多跨连

续梁计算，然后考虑轴向荷载引起的内力。

### 3. 边梁上的支承为分段滑块

边梁上的支承为分段滑块时，在水平荷载的作用下，可近似地按支承反力作用于每段滑块的中心来计算边梁内力，然后考虑轴向荷载引起的内力。当闸门的滑道支承沿边梁全长布置时，边梁内力很小，可按构造选用边梁截面。

对于承受侧向水压力的边梁，还应考虑侧向荷载对边梁引起的内力，边梁腹板应按面板公式验算其应力。

边梁的强度、刚度及稳定性计算可参照次梁、主梁的有关部分。

## 第三节 平面钢闸门的零部件设计

### 一、行走支承装置

平面闸门的行走支承装置包括主行走支承装置和侧向、反向支承装置 3 部分。行走支承装置应能在闸门升降中连续不断地工作，同时其摩擦阻力要小。

主行走支承装置承担闸门上的全部水压力，然后通过埋设轨道将荷载传给闸墩，主行走支承按闸门移动时的阻力分滑动式行走支承与滚动式行走支承两大类。平面闸门主行走支承的形式，应根据工作条件、荷载和跨度选定。工作闸门和事故闸门宜采用滚轮或滑道支承。检修闸门和启闭力不大的工作闸可采用钢或铸铁等材料制造成滑块支承。

侧向、反向支承装置起导向作用，防止闸门在移动时前后碰撞、左右歪斜而受卡，以保证闸门在门槽中顺利启闭。侧、反向支承可根据闸门的尺寸、水压力大小、吊点、门槽形式以及采用滚轮或滑块等情况，按标准系列选用。

#### （一）滑动式行走支承

滑动式行走支承有金属滑块及压合胶木、填充聚四氟乙烯板材、填充尼龙和钢基铜塑复合板等高比压低摩阻材料的滑道。

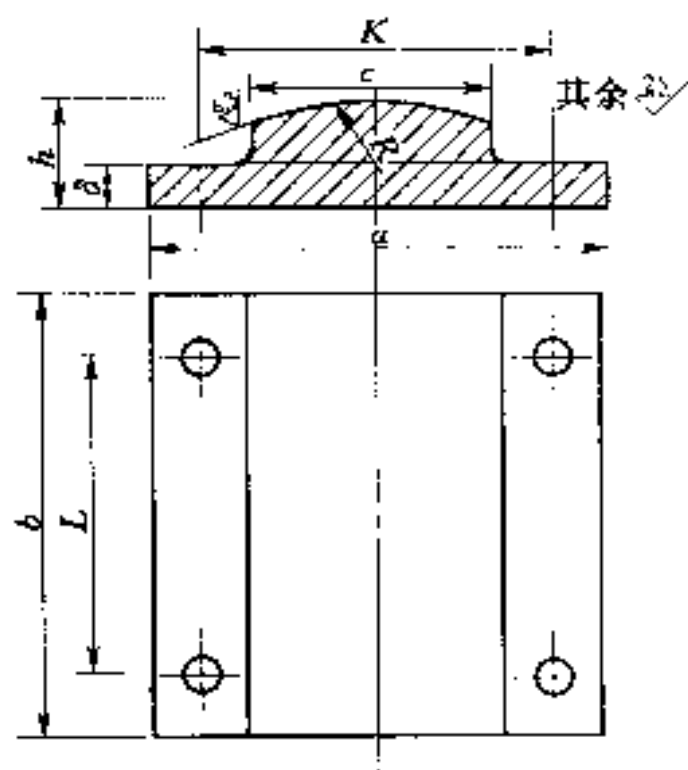


图 2 21 弧面滑块

### 1. 金属滑块

金属滑块按与轨道的接触条件可分弧面滑块和平面滑块两种。

(1) 弧面滑块。弧面滑块与平面轨道为线接触，其结构如图 2-21 所示，主要尺寸见表 2-8。

接触应力按下式计算：

$$\sigma = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{bR}} \leq 3.0\sigma_s \quad (2-36)$$

式中：P 为滑块上的设计荷载；E 为滑块材料的弹模；b 为滑块与轨道的接触长度；R 为滑块的弧面半径； $\sigma_s$  为屈服强度。

滑块底板与闸门边梁下翼缘间的压应力：

滑块底板与闸门边梁下翼缘间的压应力：

$$\sigma_1 = \frac{P}{ab} \leq [\sigma] \quad (2-37)$$

式中：a 为滑块底板宽度；其余符号意义同前。

表 2-8 弧面滑块的主要尺寸（材料：ZG310-570）

（单位：mm）

| 序号 | 最大荷载<br>(kN) | a   | b   | c   | h   | $\delta$ | R   | K   | L   | 重量<br>(kg) |
|----|--------------|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|------------|
| 1  | 500          | 222 | 200 | 100 | 60  | 16       | 250 | 150 | 150 | 12         |
| 2  | 1000         | 250 | 300 | 120 | 70  | 16       | 350 | 200 | 240 | 24         |
| 3  | 1500         | 300 | 400 | 140 | 90  | 20       | 400 | 240 | 340 | 49         |
| 4  | 2000         | 350 | 450 | 190 | 100 | 30       | 450 | 290 | 390 | 60         |
| 5  | 3000         | 350 | 500 | 190 | 110 | 35       | 600 | 290 | 440 | 70         |

由于底板压应力的作用，滑块沿轴线中间断面受到弯曲，其弯曲应力：

$$\sigma_2 = \frac{3Pa}{4bh^2} \leq [\sigma] \quad (2-38)$$

其端部厚度  $\delta$  按构造要求不小于 15mm。

(2) 平面滑块。平面滑块是一种与轨道平面接触的承压构件，适用于跨度及水头都较小的检修闸门上，其结构如图 2-22 所示，主要尺寸见表 2-9。

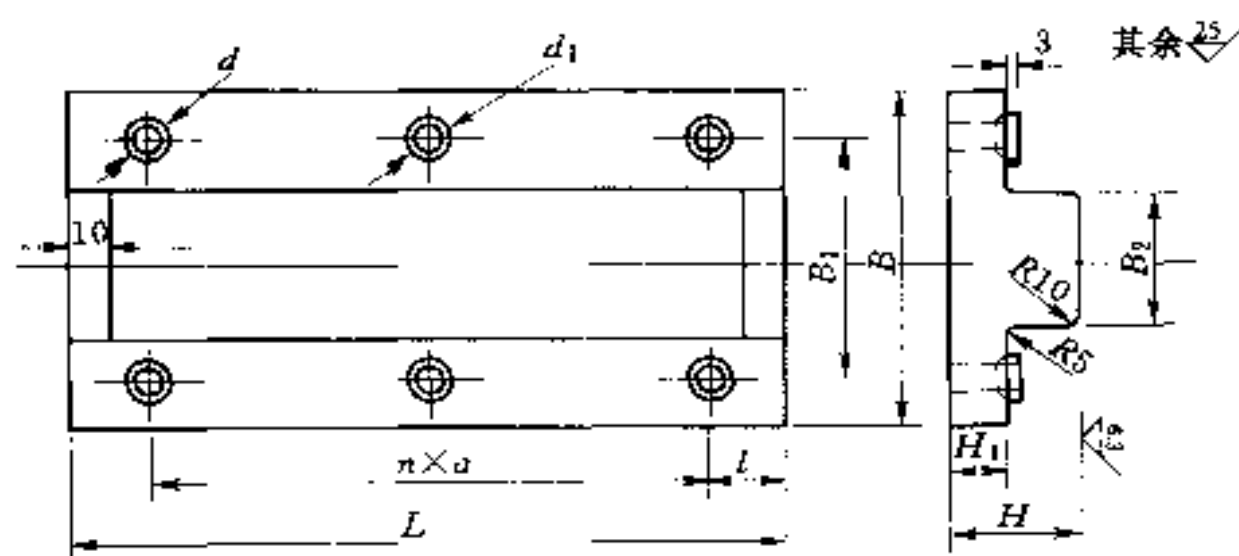


图 2-22 平面滑块

表 2-9 平面滑块的主要尺寸 (材料: HT150) (单位: mm)

| 序号 | 最大荷载 (kN) | L    | l   | n | a   | d  | d <sub>1</sub> | H  | H <sub>1</sub> | B   | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | 重量 (kg) |
|----|-----------|------|-----|---|-----|----|----------------|----|----------------|-----|----------------|----------------|---------|
| 1  | 1250      | 300  | 50  | 1 | 200 | 18 | 35             | 55 | 25             | 120 | 85             | 50             | 10      |
| 2  | 2500      | 600  | 50  | 2 | 250 | 18 | 35             | 55 | 25             | 120 | 85             | 50             | 20      |
| 3  | 2500      | 500  | 50  | 2 | 200 | 20 | 40             | 70 | 30             | 140 | 100            | 60             | 24      |
| 4  | 5000      | 1000 | 100 | 2 | 400 | 20 | 40             | 70 | 30             | 140 | 100            | 60             | 48      |

上述两种滑块，如在动水中启闭，则需要增设抗剪板。

## 2. 压合胶木滑道

压合胶木是用多层枫桦木薄片在酚甲醛树脂中浸渍后，经高温高压处理而得到的一种滑道材料，具有较高的抗压能力和较小的摩擦系数（与金属滑块相比），早期广泛使用于水工闸门上。压合胶木的特点之一，是其与钢轨间的摩擦系数随单位压强的增加而降低，故采用的线荷载不宜过低，一般选用 1.5~4kN/mm，而相应的摩擦系数为 0.10~0.17，见附录 C。

压合胶木的物理机械性能应符合表 2-10 的要求。

表 2-10

压合胶木性能表

| 指 标 名 称                            | 胶木板 (短层积板)  |            |             |            |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                                    | MCS-1       | MCS-2      | MCS-2-1     | MCS-3      |
| 1. 重度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )   | $\geq 1.33$ | $\geq 1.3$ | $\geq 1.23$ | $\geq 1.3$ |
| 2. 水分和挥发物质 (%)                     | $\leq 6$    | $\leq 7$   | $\leq 7$    | $\leq 7$   |
| 3. 24h 吸水率 (%)                     | —           | $\leq 5$   | —           | $\leq 5$   |
| 4. 极限吸水率 (%)                       | $\leq 20$   | $\leq 20$  | —           | —          |
| 5. 极限膨胀率 (%)                       | $\leq 22$   | $\leq 22$  | —           | —          |
| 6. 顺纹拉伸极限强度 (MPa)                  | —           | $\geq 260$ | $\geq 200$  | $\geq 140$ |
| 7. 顺纹压缩极限强度 (MPa)                  | $\geq 180$  | $\geq 160$ | $\geq 130$  | $\geq 125$ |
| 8. 静曲极限强度 (MPa)                    | —           | $\geq 280$ | $\geq 220$  | $\geq 180$ |
| 9. 冲击强度 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) | —           | $\geq 8$   | $\geq 6$    | $\geq 3$   |
| 10. 胶缝极限剪切强度 (MPa)                 | $\geq 15$   | $\geq 15$  | $\geq 12.5$ | $\geq 14$  |
| 11. 端面白氏硬度 (MPa)                   | $\geq 2.5$  | $\geq 2.5$ | —           | $\geq 2.5$ |

胶木滑道的轨道一般要求为不锈钢弧形工作轨面,可在普通钢轨面堆焊厚 3~5mm 不锈钢或直接用不锈钢板加工而成。轨头的设计宽度和轨顶弧面半径可根据滑道的单位压强,按表 2-11 确定。

表 2-11

轨道尺寸

| 滑道材料                               | 胶 木 滑 道    |         |         | 填充聚四氟乙烯板滑道 |         |
|------------------------------------|------------|---------|---------|------------|---------|
| 单位压强 $q$ ( $\text{kN}/\text{mm}$ ) | $\leq 1.0$ | 1.0~2.0 | 2.0~3.5 | $\leq 1.0$ | 1.0~2.0 |
| 轨头弧面半径 $R$ (mm)                    | 100        | 150     | 200     | 300        | 400     |
| 轨头宽度 $S$ (mm)                      | 25         | 35      | 40      | 40         | 50      |

胶木滑道分镶嵌式 (图 2-23) 和装配式 (图 2-24)。前者简单可靠,但加工量大;后者便于加工制造,但要保证滑块有一定的侧向挤压力较困难。一般说来,大型闸门多采用镶嵌式,而在中小型闸门上,则可采用装配式。

(1) 镶嵌式。镶嵌式滑道是利用胶木滑块压入夹槽中产生侧

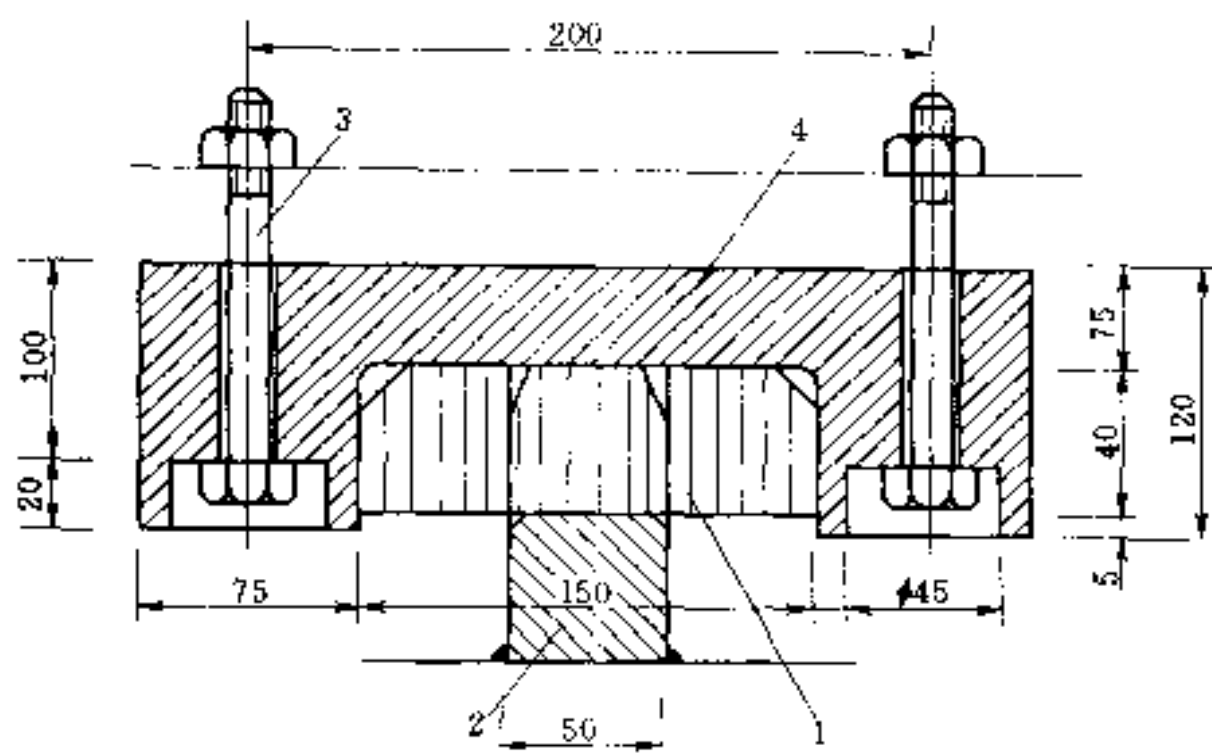


图 2-23 镶嵌式胶木滑道 (单位: mm)

1—胶木滑道; 2—轨道; 3—螺栓; 4—铸钢夹槽

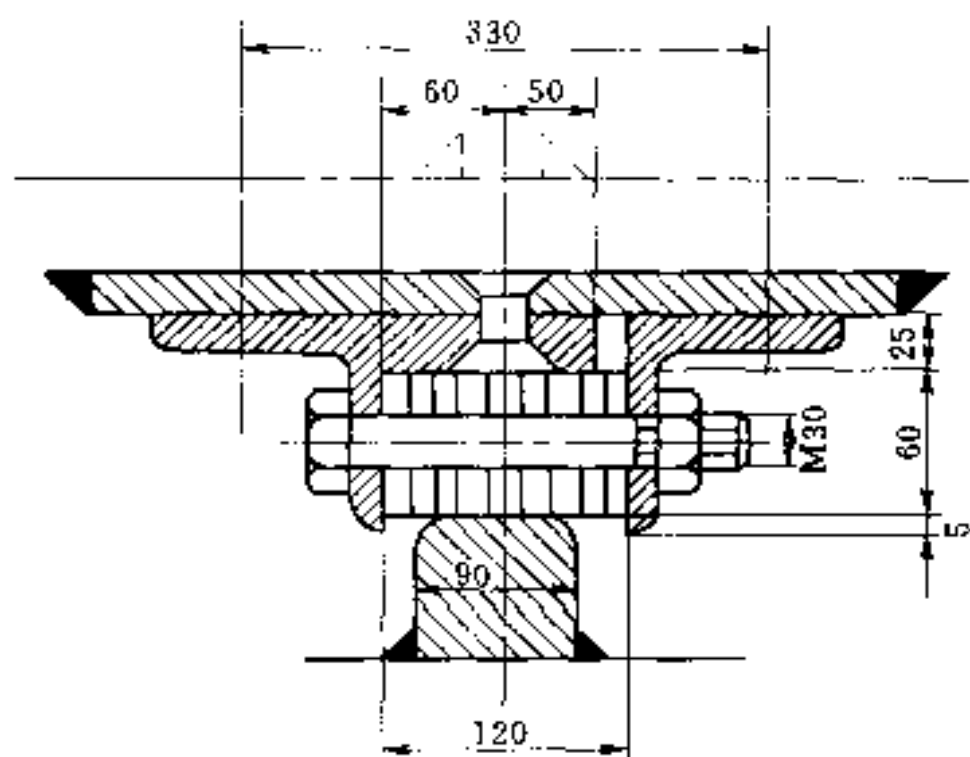


图 2-24 装配式胶木滑道 (单位: mm)

向压缩, 得到足够的侧向挤压力来提高承压面强度的。胶木压入夹槽前经干燥处理后, 其含水率不得大于 5%; 工作面应由 3 条压合胶木组成, 其总宽度宜为 100~150mm, 其承压方向应是胶木顺木纹方向的端面; 3 条胶木的总宽度应比夹槽宽度大 1.3%~1.7%, 胶木滑道夹槽与胶木配合公差可取 H8/s7; 压入夹槽后的胶木表面应略高于槽面, 然后加工, 粗糙度应达到  $R_a=3.2\mu\text{m}$ , 并使胶木表面比槽面低 2~4mm; 加工后表面用润滑脂保护。铸钢夹

槽用螺栓连接到边梁上。该螺栓承受启闭闸门时由滑道摩擦阻力而引起的剪应力。

压合胶木压入夹槽，在夹槽两侧产生侧压力，应对铸钢整体夹槽进行强度验算。

(2) 装配式。装配式滑道是靠拧紧图 2-24 中的螺栓所产生的侧向挤压力来工作的。力的大小可在扳手上加装测力器来控制。为避免过大的变形，夹持角钢要有一定的刚度。

压合胶木的缺点是机械性能不够稳定，使用寿命短，易老化、开裂，老化或磨损后摩擦系数增大，甚至由夹槽中脱落，以致发生启闭机械的超载现象。近年来，随着一些新型滑道材料的出现，胶木滑道有逐渐被淘汰的趋势。

### 3. 新型滑道材料

在闸门的启闭力中，支承摩擦阻力占有很大比重，在高水头闸门中甚至高达 70%。因此，降低支承摩擦阻力对降低启闭机械的容量，具有重大意义。

近十年来，我国研制和引进了不少机械性能稳定的高比压低摩阻的新型滑道材料，如填充聚四氟乙烯滑道、钢基铜塑复合材料和填充尼龙等。

填充聚四氟乙烯滑道主要用于操作不频繁的工作闸门上，单位压强一般为  $1\sim 2\text{kN/mm}$ 。填充聚四氟乙烯板材的物理机械性能应符合表 2-12 的要求。填充聚四氟乙烯板材的尺寸有两种：一为  $130\text{mm}\times 250\text{mm}$ ，厚 20mm；一为  $140\text{mm}\times 250\text{mm}$ ，厚 25mm。填充聚四氟乙烯板宽度应比夹槽宽度大 1.5%~2.0%。夹槽与填充聚四氟乙烯板材的配合公差可取 H7/p6。板材压入夹槽后表面加工粗糙度  $R_a$  应达到  $3.2\mu\text{m}$ 。

钢基铜塑复合材料，在操作不太频繁的条件下较适合，但对轨头要求较高，接头不能错牙。复合材料制造工艺应严格控制，铜球中必须充满塑料。钢基铜塑复合板材滑道的单位压强，宜选取  $1.5\sim 3.5\text{kN/mm}$ ，如超过  $3.5\text{kN/mm}$  时，应对材料、制造等作专门研究。钢基铜塑复合材料的性能见表 2-13。

表 2-12 填充聚四氟乙烯板材物理机械性能表

| 序号 | 指 标 名 称             | 单 位               | 指 标 值 |
|----|---------------------|-------------------|-------|
| 1  | 密度                  | g/cm <sup>3</sup> | 1.55  |
| 2  | 压缩强度                | MPa               | ≥43   |
| 3  | 冲击强度 (无缺口)          | kJ/m <sup>2</sup> | ≥3    |
| 4  | 布氏硬度 HB             | MPa               | ≥1.2  |
| 5  | 耐定荷变形率 (28MPa, 24h) | %                 | ≤2.0  |
| 6  | 耐定荷永久变形率 (卸荷 24h 后) | %                 | ≤1.5  |

表 2-13 钢基铜塑复合材料性能表

| 序号 | 指 标 名 称                   | 塑 料 层 材 料          |                      |
|----|---------------------------|--------------------|----------------------|
|    |                           | 聚四氟乙烯              | 聚甲醛                  |
| 1  | 复合层总厚度 (mm)               | 1.2~1.5            | 1.2~1.5              |
| 2  | 复合层厚度偏差 (mm)              | ≤0.20              | ≤0.20                |
| 3  | 结合强度 (MPa)                | ≥16                | ≥16                  |
| 4  | 抗压强度 (MPa)                | ≥200               | ≥300                 |
| 5  | 布氏硬度 HB (MPa)             | 3                  | 3                    |
| 6  | 线膨胀系数 (°C <sup>-1</sup> ) | 3×10 <sup>-5</sup> | 2.3×10 <sup>-5</sup> |
| 7  | 导热系数 [cal/(cm·s·°C)]      | 0.1                | 0.004                |
| 8  | 使用温度 (°C)                 | -200~+280          | -40~+100             |

填充尼龙有含油铸造尼龙、NL150 型增强尼龙等新材料, 适用于 2kN/mm 或更大压强的支承滑道。

## (二) 滚动式行走支承

为减小启闭力, 可采用滚动式行走支承。滚动式支承的形式有滚轮和链轮两种。滚轮式支承的综合摩擦系数仅为滑动式支承的 1/2~1/3, 而链轮式则更小。

常用的滚轮支承有悬臂轮、简支轮、多滚轮和台车式等类型, 见图 2-25。一般多采用简支轮, 其结构如图 2-26 所示。当荷载不

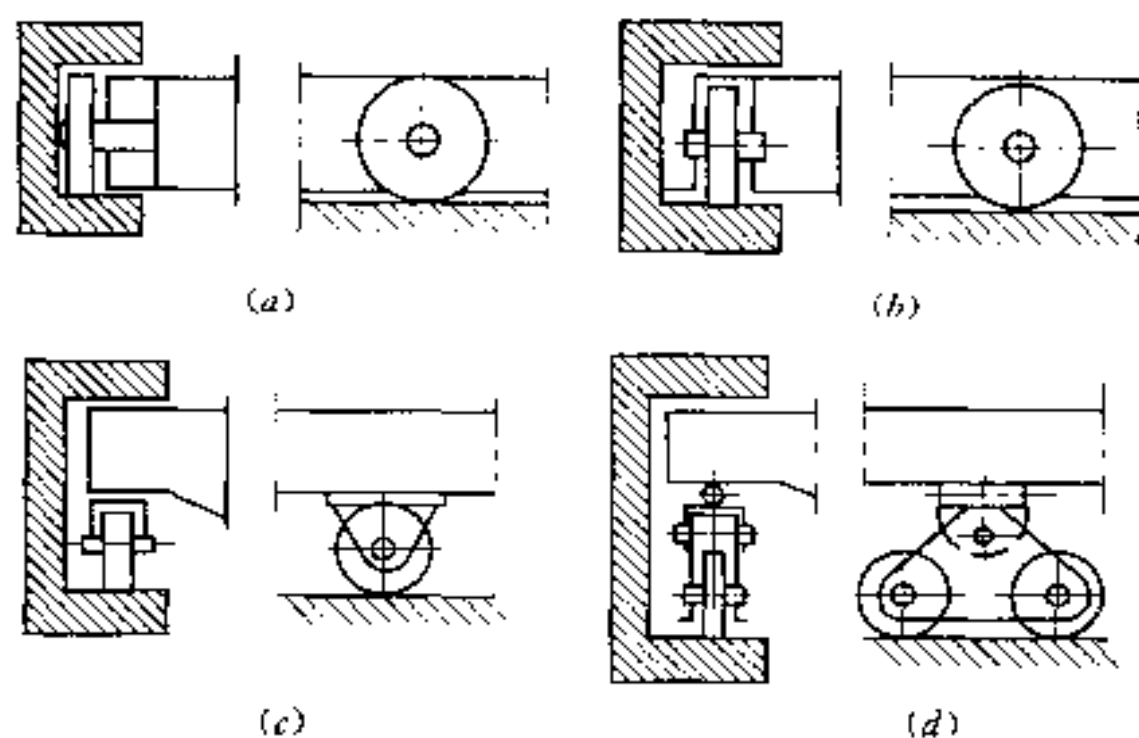


图 2-25 平面闸门的滚轮支承的布置

(a) 悬臂轮；(b) 简支轮 I；(c) 简支轮 II；

(d) 台车式滚轮支承

大时，可采用悬臂轮，见图 2-27；当支承跨度较大时，可采用台车或点接触式简支轮，以保证轮子与轨道的接触良好；当荷载较大时，也可采用多滚轮，此时，为调整滚轮踏面在同一平面上，宜采用偏心轴。

链轮式支承承载能力大，摩擦阻力很小，减少了启闭机的容量，另外支承部分尺寸较小，门槽宽度相应减小，这对水力条件和空蚀特性都较有利。但对链轮

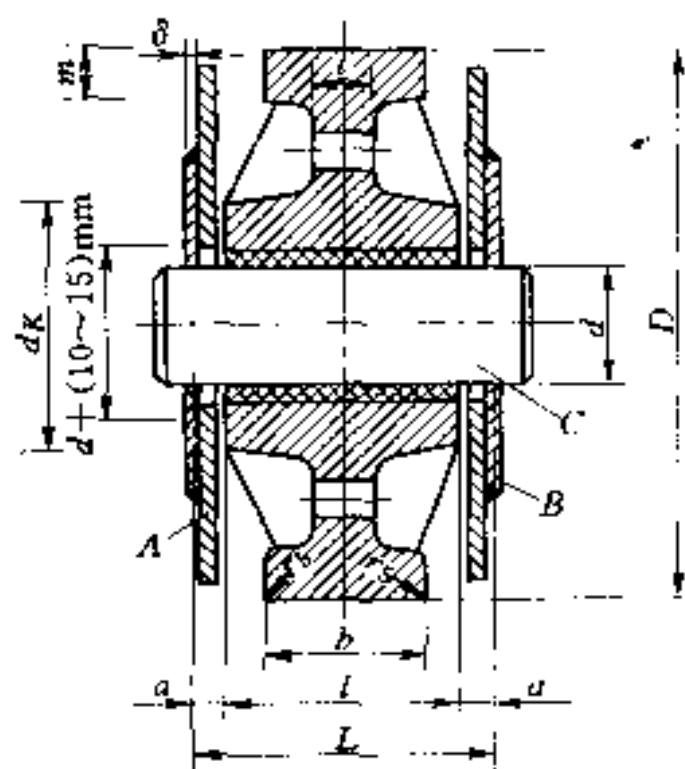


图 2-26 简支轮结构

闸门的刚度及轨道的平直度要求高、制造、安装难度大，造价昂贵，目前采用不多，一般只应用在布置多主轮非常困难的闸门上。作用在滚轮上的最大设计荷载，应按计算最大轮压考虑一定的不均匀系数，对于简支轮和设有偏心轴的多滚轮，不均匀系数可采用 1.1。当轮压较大时，应对滚轮、轨道的材料及其硬度和制造工艺进

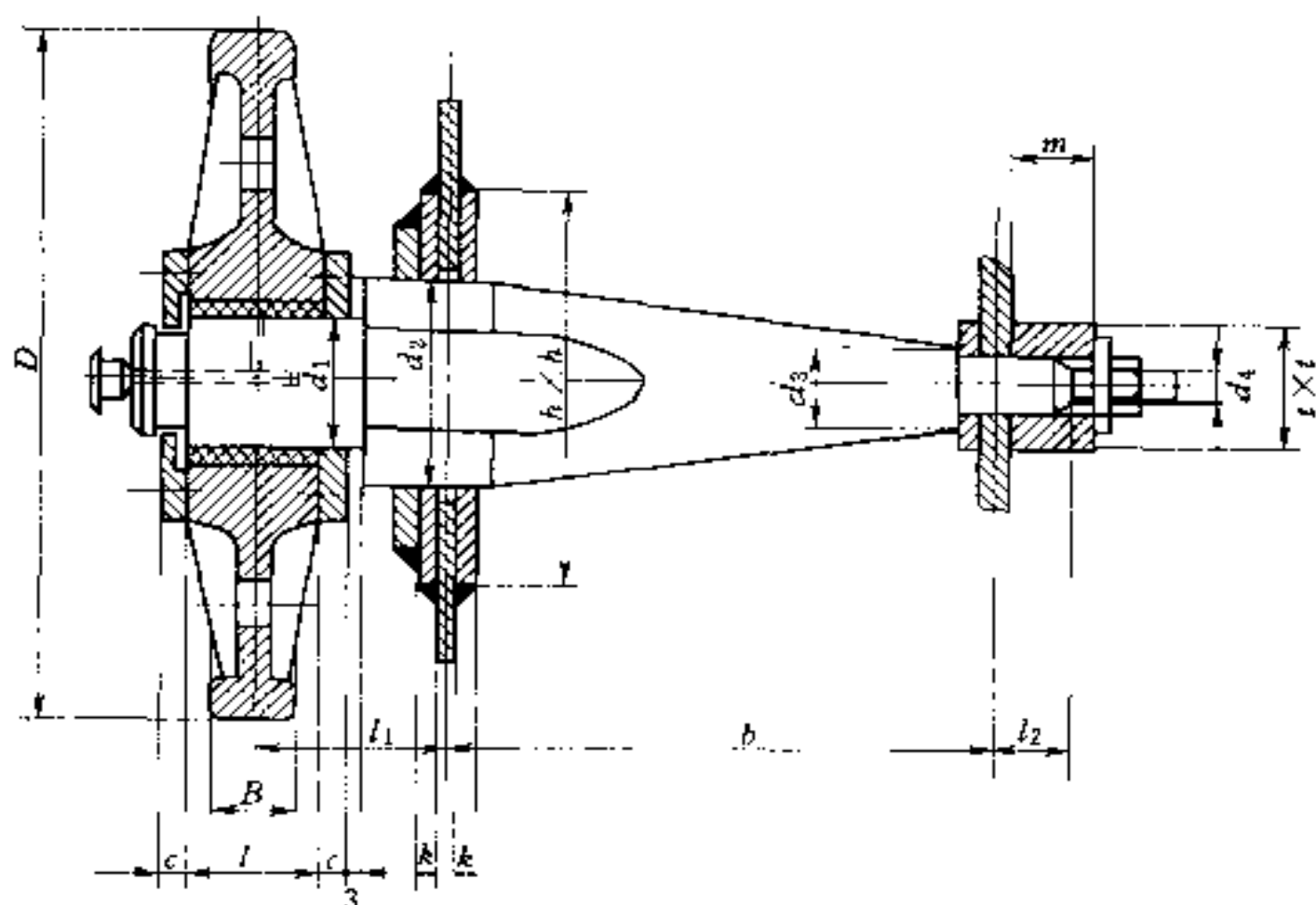


图 2-27 悬臂轮结构

行专门研究。

滚轮硬度应略低于轨道硬度。

### 1. 滚轮强度计算

水工钢闸门的滚轮通常有线接触式和点接触式。线接触常见的是圆柱形滚轮与平面轨头的轨道的接触；点接触是圆柱形或圆锥形滚轮与弧形轨头的轨道的接触和双曲滚轮与平面轨头的轨道的接触。滚轮强度验算主要计算其接触应力。

滚轮一般用铸钢或合金铸钢制造。常用铸钢有 ZG230—450、ZG270—500、ZG310—570、ZG340—640；合金铸钢有 ZG50Mn2、ZG35CrMo、ZG35CrMnSi 等。滚轮表面还可根据需要，进行表面热处理，以提高局部强度与硬度。荷载小的滚轮可采用铸铁。

滚轮直径  $D$  常用的数值为 300~1200mm，轮缘宽度  $b$  为 80~150mm，比值  $D/b \approx 4 \sim 6$ 。设计时轮径宜取得稍大些，如此可减小启闭闸门时的阻力。

(1) 圆柱形滚轮与平面轨道，接触情况是线接触，其接触应力可按下式验算：

$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{bR}} \leq 3.0\sigma_s \quad (2-39)$$

式中：\$P\$ 为滚轮上的设计荷载，N；\$b\$ 为轮缘宽度，mm；\$R\$ 为滚轮半径，mm；\$E\$ 为材料的弹性模量，N/mm<sup>2</sup>，若两种弹性模量不同的材料接触时，应采用合成弹性模量 \$E'\$ 来计算：\$E' = \frac{2E\_1E\_2}{E\_1+E\_2}\$；\$\sigma\_s\$ 为两种接触材料中较小的屈服强度，N/mm<sup>2</sup>，该值尚与材料表面热处理硬度有关。

式（2-39）可简化为下列形式，供初步设计选择滚轮尺寸时应用：

$$\sigma_r = \frac{P}{bD} \leq [\sigma_r] \quad (2-40)$$

式中：\$\sigma\_r\$ 为折算的径向压应力，其容许值 \$[\sigma\_r]\$ 可按表 2-14 查取；\$D\$ 为滚轮直径，mm。

表 2-14 铸钢的容许折算径向压应力 \$[\sigma\_r]\$

| 应 力<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 钢 号           |               |               |               |            |         |          |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|---------|----------|
|                             | ZG230<br>—450 | ZG270<br>—500 | ZG310<br>—570 | ZG340<br>—640 | ZG35CrMnSi | ZG50Mn2 | ZG35CrMo |
| \$\sigma_s\$                | 240           | 280           | 320           | 350           | 350        | 450     | 550      |
| \$[\sigma_r]\$              | 5             | 6.5           | 8.5           | 10            | 10         | 17      | 25       |

注 表中 \$[\sigma\_r]\$ 值是按 \$E=2.07 \times 10^5\$ N/mm<sup>2</sup> 简化而来。

（2）圆柱形或圆锥形滚轮与弧形轨头的轨道，双曲率的滚轮与平面轨头的轨道，接触情况是点接触，其接触应力可按下式验算：

$$\sigma = \xi \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R_1^2 R_2}} \leq 1.15\sigma_s \quad (2-41)$$

当 \$R\_1\$ 与 \$R\_2\$ 之比在 0.3~0.8 之间时，也可按下列近似公式计算：

$$\sigma_{\max} = 0.24 \sqrt{PE \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]^2} \leq 4.5\sigma_s \quad (2-42)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  为两接触面的半径, mm,  $R_2$  为大值;  $\xi$  为由比值  $R_1/R_2$  确定的系数, 按表 2-15 采用。

表 2-15  $\xi$  系 数 值

| $R_1/R_2$ | 1.00  | 0.90  | 0.80  | 0.70  | 0.60  | 0.50  | 0.40  | 0.30  | 0.20  | 0.15  | 0.10  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\xi_1$   | 0.078 | 0.084 | 0.092 | 0.101 | 0.112 | 0.122 | 0.139 | 0.162 | 0.215 | 0.256 | 0.330 |
| $\xi_2$   | 0.089 | 0.096 | 0.101 | 0.110 | 0.117 | 0.122 | 0.128 | 0.144 | 0.164 | 0.184 | 0.194 |

注  $\xi_1$  为接触面中心处的应力系数;  $\xi_2$  为接触面的椭圆长径末端处的应力系数。

## 2. 轮轴和轴套强度计算

轮轴常用的材料为 45 号优质碳素钢和普通碳素钢, 必要时也可用合金结构钢。

滚轮与轴之间的滑动轴套, 根据工作条件宜选用钢基铜塑复合板轴套、青铜轴套或其他高比压低摩阻材料的轴套。滚柱轴承由于其构造复杂、价格昂贵, 用得较少。

轮轴上应设油孔、油槽、油塞等润滑设施, 以保证轮轴上与轴套间有良好的润滑。

轮轴  $d$  与轮径  $D$  之比为  $0.15 \sim 0.30$ , 而常采用的范围是在  $0.2 \sim 0.25$  之间。轮轴应验算弯曲应力、剪应力、轴套的承压应力与轴承座板的局部紧接承压应力。

(1) 当为简支轴时, 假定荷载沿轴套长均匀分布 (图 2-28), 其计算如下:

1) 轮轴的弯曲应力:

$$\sigma = \frac{P(4a + l)}{0.785d^3} \leq [\sigma] \quad (2-43)$$

2) 轮轴的剪应力:

$$\tau = \frac{8P}{3\pi d^2} \leq [\tau] \quad (2-44)$$

3) 轴承的承压应力:

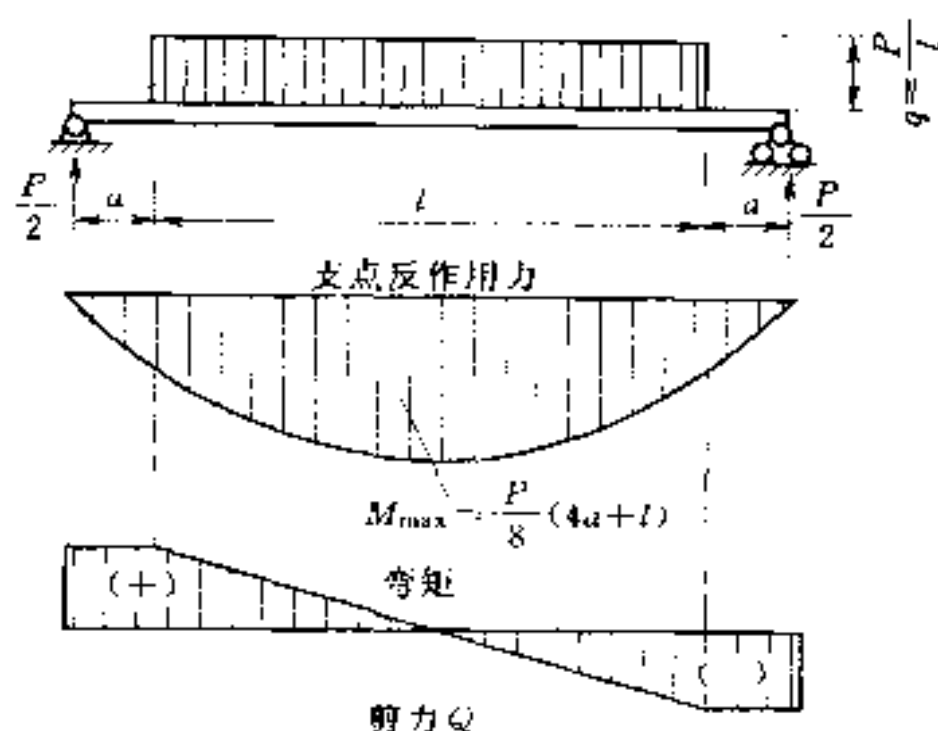


图 2-28 简支轮轴荷载及内力计算简图

$$\sigma_{ck} = \frac{P}{dl} \leq [\sigma_{ck}] \quad (2-45)$$

4) 轴承板的局部紧接承压应力:

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{2d\delta} \leq [\sigma_{cj}] \quad (2-46)$$

式中:  $P$  为滚轮上的设计荷载, kN;  $d$  为轴径, mm;  $l$  为轴套长度, mm;  $\delta$  为轴支承座板一侧的总厚度, mm。

(2) 当为悬臂轴时, 可根据其计算简图 (图 2-29) 进行相应的计算:

1) 轮轴的弯曲应力:

$$\sigma = \frac{P(2a + l)}{0.2d^3} \leq [\sigma] \quad (2-47)$$

2) 轮轴的剪应力 (当  $b \geq a + 0.5l$  时):

$$\tau = \frac{16P}{3\pi d^2} \leq [\tau] \quad (2-48)$$

3) 轴承的承压应力:

$$\sigma_{ck} = \frac{P}{dl} \leq [\sigma_{ck}] \quad (2-49)$$

4) 轴承板的局部紧接承压应力:

$$\sigma_{cj} = \frac{R_1}{d\delta} \leq [\sigma_{cj}] \quad (2-50)$$

式中： $R_A$  为  $A$  处轴承座的反力，其值为  $R_A = P(0.5l + a + b)/b$ ； $\delta$  为  $A$  处轴支承座板的总厚度；其余符号意义同前。

### (三) 侧向、反向支承装置

#### 1. 侧向支承

为了防止门叶侧向位移过大，需设置侧向支承，以保证门叶在门槽中平顺地启闭。侧向支承一般布置在闸门的两侧 [图 2-30 (b)、(c)、(e)]，称为槽外式，侧轨一般利用主（反）轨的护角；也有布置在两端的 [图 2-30 (a)、(d)]，称为槽内式，需另外专设侧轨。侧向支承与侧轨的间隙  $C$  一般取 5~20mm。

侧向支承有轮式和滑块式。滑块式结构简单，仅是在门叶上焊接一段角钢或钢管，一般仅用于小型检修闸门。较常用的侧向支承为轮式，有适合槽内式布置的简支式侧轮（图 2-31）和适合槽外式布置的悬臂式侧轮（图 2-32）之分。侧轮直径通常为 150~

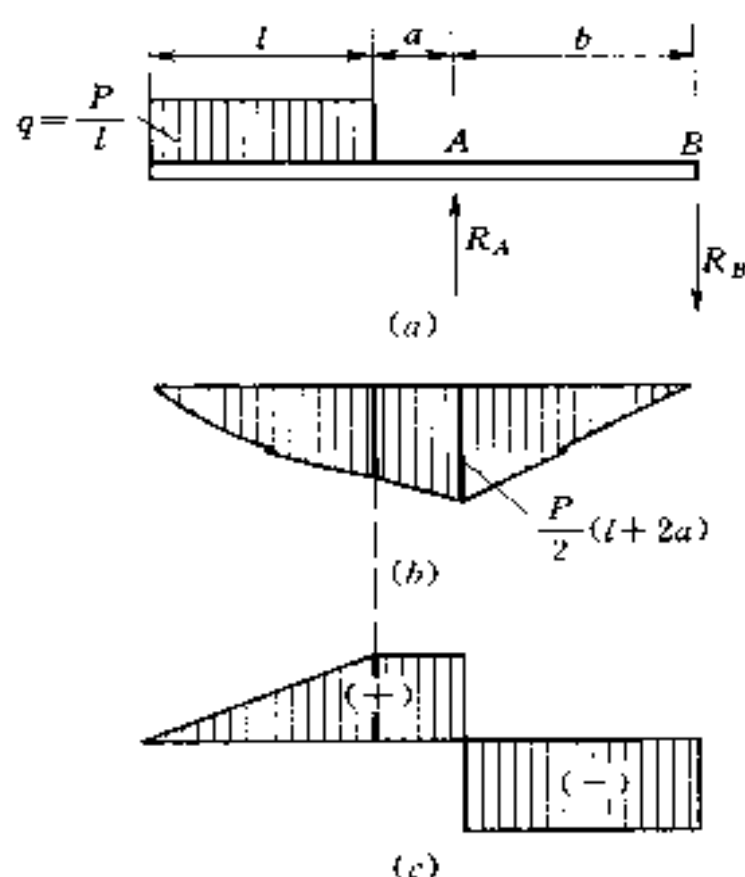


图 2-29 悬臂轮轴荷载及内力计算简图

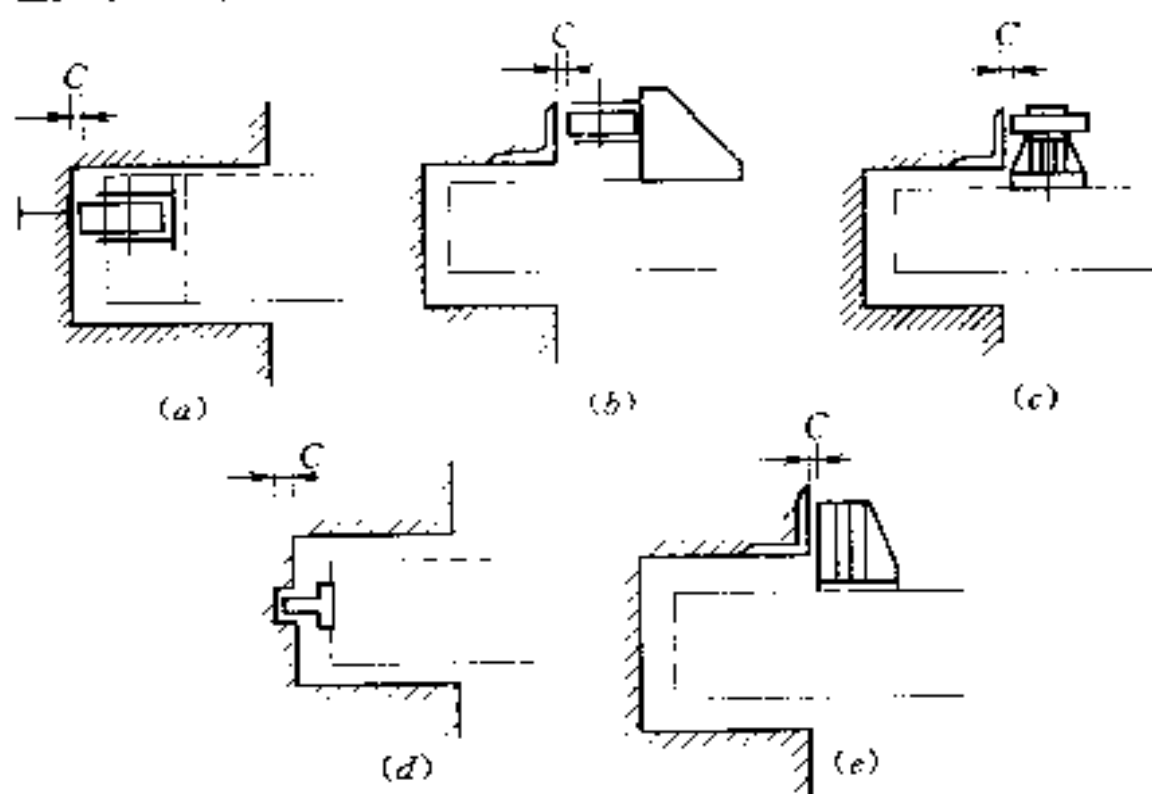


图 2-30 侧向支承布置形式

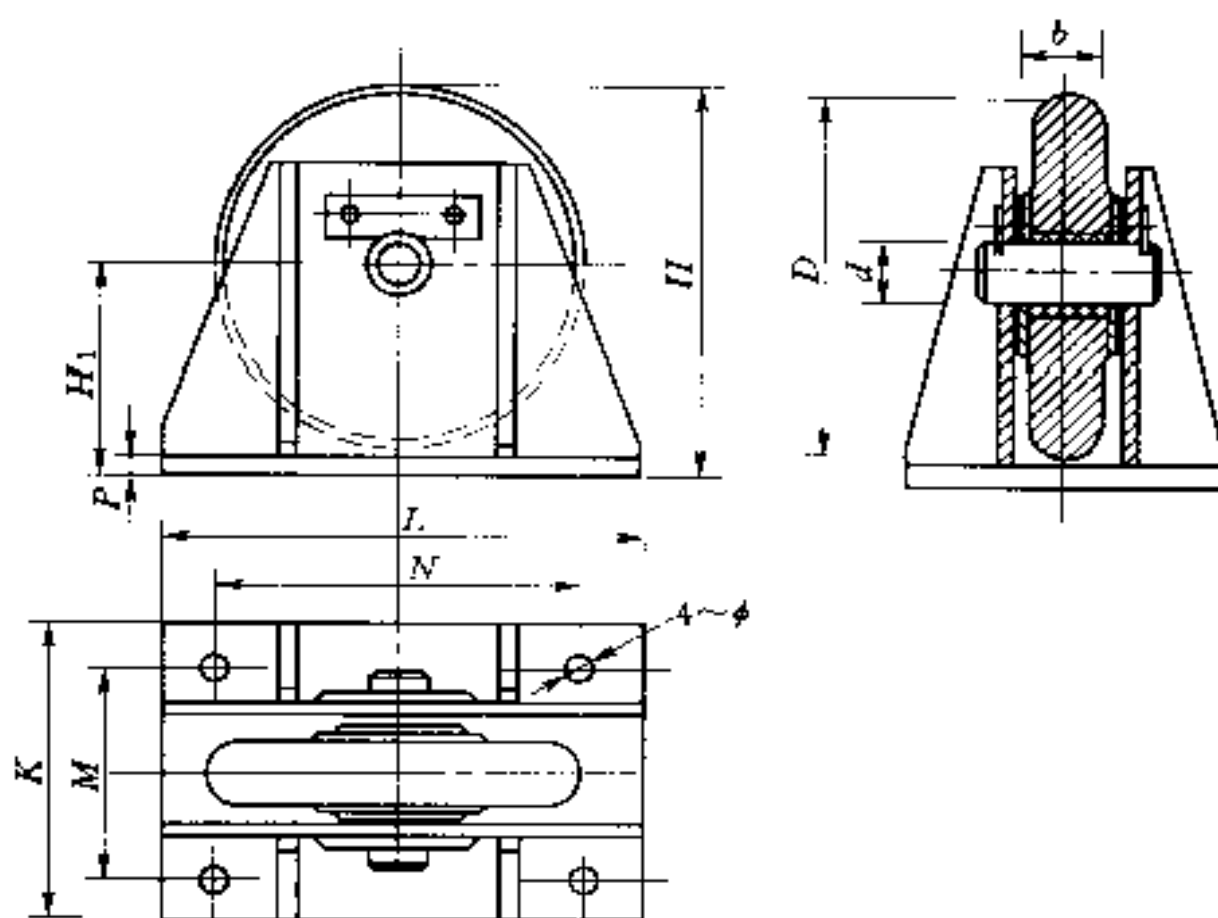


图 2-31 简支式侧轮

300mm，其宽度为 35~100mm。

## 2. 反向支承

平面闸门应设反向支承作导向装置。如果行走支承装置采用

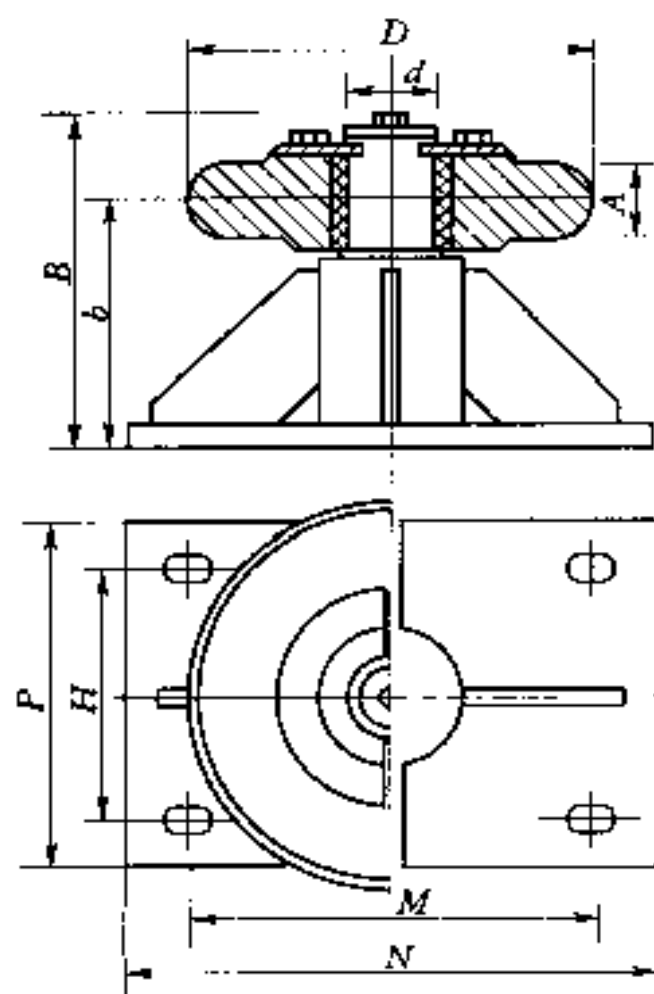


图 2-32 悬臂式侧轮

悬臂轮或简支轮，可考虑利用悬臂轮和简支轮兼起反向支承，否则需另设反向支承。反向支承设在主行走支承的对面，如图 2-33 所示，一般设置有反轨。

图 2-33 (a) 所示是一种反向滑块装置，用在跨度较小、水头较低，或静水中启闭的闸门上，其构造简单、制造方便。而跨度稍大些的露顶闸门，常用如图 2-33 (b) 所示的固定轴反轮。这两种形式的反向导向装置，与反轨间隙一般为 5~10mm。对跨度较大、水头较

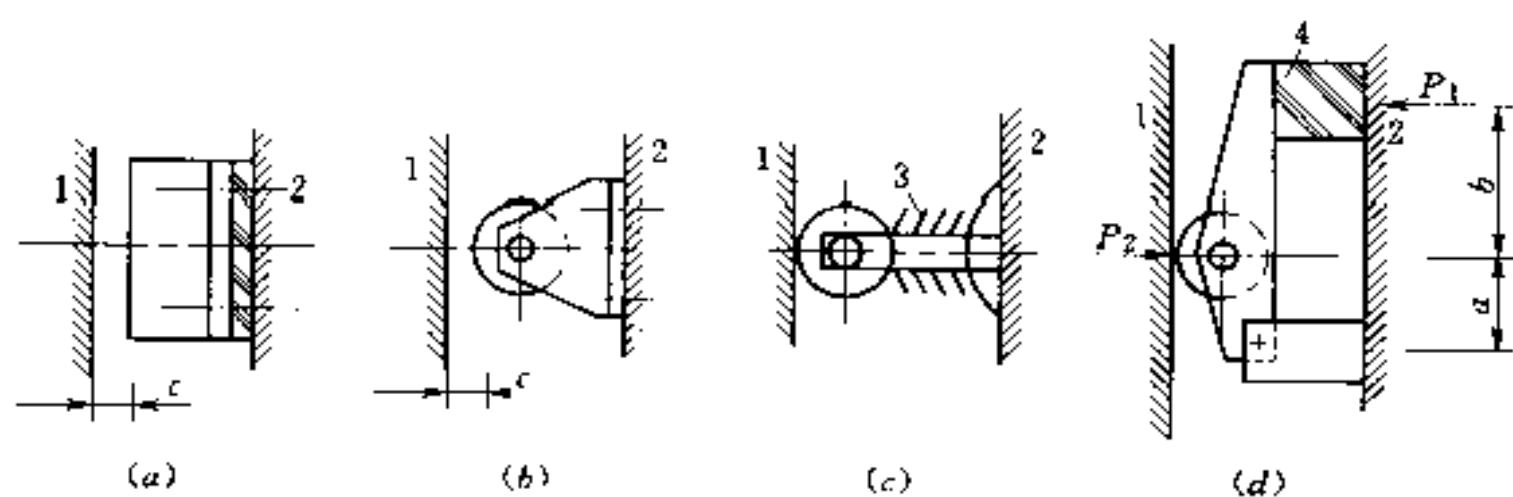


图 2-33 反向支承布置形式

1—闸墙；2 门叶；3—板弹簧；4—橡皮垫

高、动水启闭的闸门，则为了减少闸门振动，或止水布置在下游，为了提高止水效果，往往采用图 2-33 (c)、(d) 的形式，靠板弹簧或橡皮垫块的弹性将门叶挤压在反轨与主轨上。图 2-33 (d) 的反轮装置如图 2-34 所示，反轮的直径通常为 150~350mm，宽度为 60~80mm。

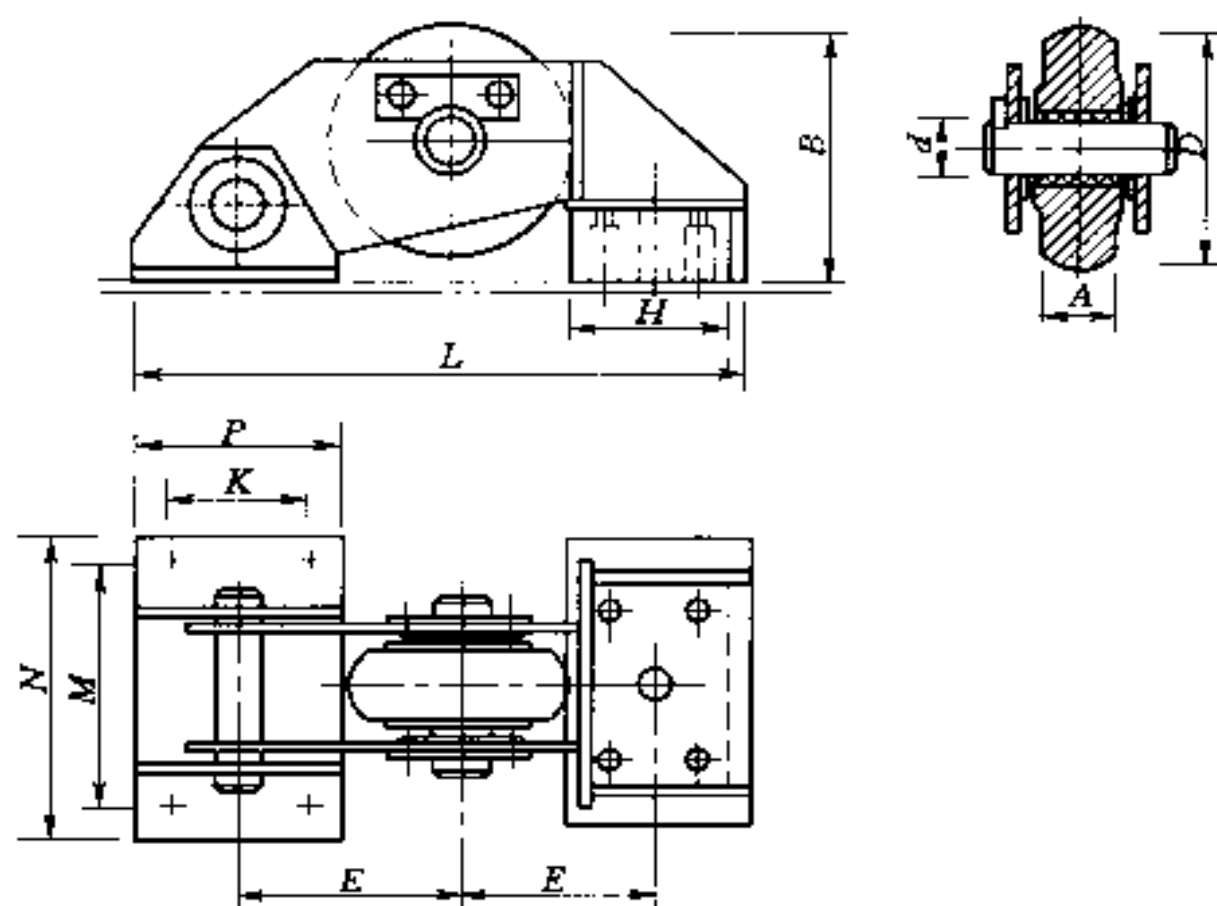


图 2-34 弹性反轮装置

反轮与侧轮的尺寸，一般都按构造选定，它们所受的荷载，大多都与偶然因素有关，难于准确地计算。可根据闸门的水头与荷载、闸门的尺寸以及运行情况因素，按水利水电规划设计总院编

写的《水工闸门侧反向装置定型设计图册》(1988 年出版)标准尺寸选用。

## 二、吊耳、吊杆、锁定

闸门门叶与启闭设备的连接,一般布置应设有吊耳、锁定装置,有的还有吊杆、自动抓梁等。

### (一) 吊耳

闸门采用单吊点和双吊点,应根据孔口大小、宽高比、启闭力、闸门及启闭机布置形式等因素综合考虑确定。当宽高比  $L/H \geq 1$  时,宜采用双吊点;宽高比  $L/H < 1$ ,可采用单吊点,但宽度的绝对值较大时,也应采用双吊点。当启门力较大,一个吊耳的强度不能满足要求时,也应采用双吊点。

闸门吊点与启闭机的吊具或吊杆相连接的地方,称为吊耳。有时分节闸门还设有连接吊耳或吊装吊耳。平面闸门的吊耳一般设置在边梁或竖向隔板的顶部,并应布置在闸门重心线上。电站尾水闸门的吊耳,可稍向止水侧偏移,以提高止水效果。

吊耳的结构包括吊耳轴、止轴板、吊耳板和加强板。在满足强度的条件下,可做成单吊耳板和双吊耳板两种。为便于吊耳轴的装卸,吊耳孔与轴的配合一般采用间隙较大的松配合;经常装卸的吊耳孔宜作梨形孔,如图 2-35 (a) 所示;闸门上设有充水阀时,吊耳的孔通常制成长形孔,以满足充水阀的开启行程,如图 2-35 (b) 所示。

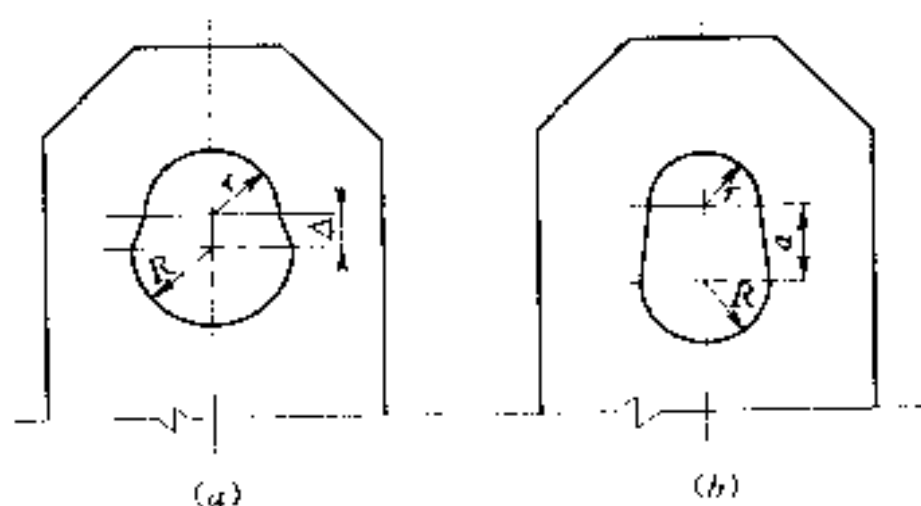


图 2-35 吊耳孔的结构

(a) 梨形孔; (b) 长形孔

吊耳轴与行走轮的轴的计算类同，也需计算弯曲应力、剪应力和承轴板的局部承压应力。吊耳板的尺寸（图 2-36），可按下列关系采用：

$$B \geq (2.4 \sim 2.6)d$$

$$\delta \geq B/20$$

$$a \geq (0.9 \sim 1.05)d$$

吊耳板按式（2-51）验算孔壁的局部承压应力，按式（2-52）验算孔壁的拉应力：

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{d\delta} \leq [\sigma_{cj}] \quad (2-51)$$

$$\sigma_K = \sigma_{cj} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \leq [\sigma_K] \quad (2-52)$$

式中：\$P\$ 为一个吊耳板所承受的荷载，该值若按启门力计算时，应乘以 1.1~1.2 的超载系数；\$d\$ 为吊耳轴的直径；\$\delta\$ 为吊耳板的厚度，为调整吊耳孔的位置而采用承轴板时，则两块承轴板的总厚度应不小于 \$1.2\delta\$；\$R\$、\$r\$ 分别为吊耳板孔中心到板边的最短距离和轴孔半径，见图 2-36，\$R\$ 取 \$B/2\$ 与 \$(r+a)\$ 二者中之小者；\$[\sigma\_{cj}]\$、\$[\sigma\_K]\$ 为容许的局部紧接承压应力和孔壁抗拉应力，见表 1-8。

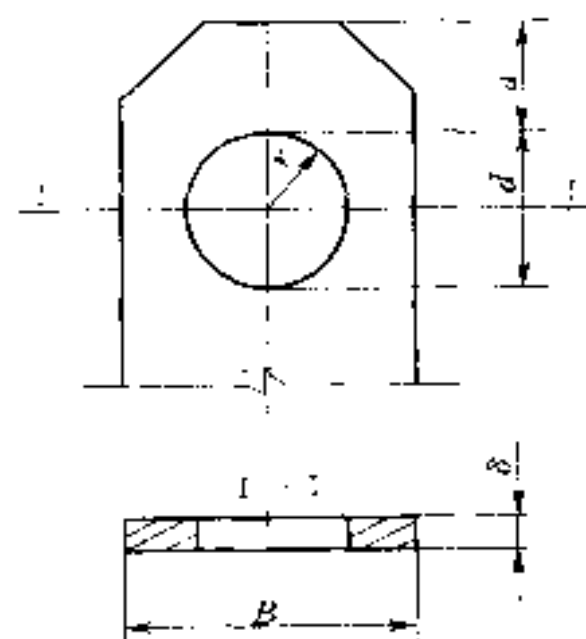


图 2-36 吊耳板的尺寸

## （二）吊杆

吊杆作为连接闸门与启闭机的部件，可有效地减少启闭机的扬程，避免启闭机的动滑轮与钢丝绳等部件长期浸水，广泛应用于闸门长期处于水中或采用液压式启闭机和螺杆式启闭机扬程不够的场合。吊杆结构笨重、装卸不方便，应尽量采用高扬程启闭机和自动挂脱梁代替吊杆。吊杆的分段长度，应按孔口高度、启闭机的扬程和对吊杆装拆、换向和本身运输单元等要求确定。

吊杆的结构如图 2-37 所示。吊杆由吊耳、锁定台肩及杆身组

成。吊杆吊耳包括吊耳轴、止轴板、吊耳板等，其尺寸及计算可参照闸门的吊耳。

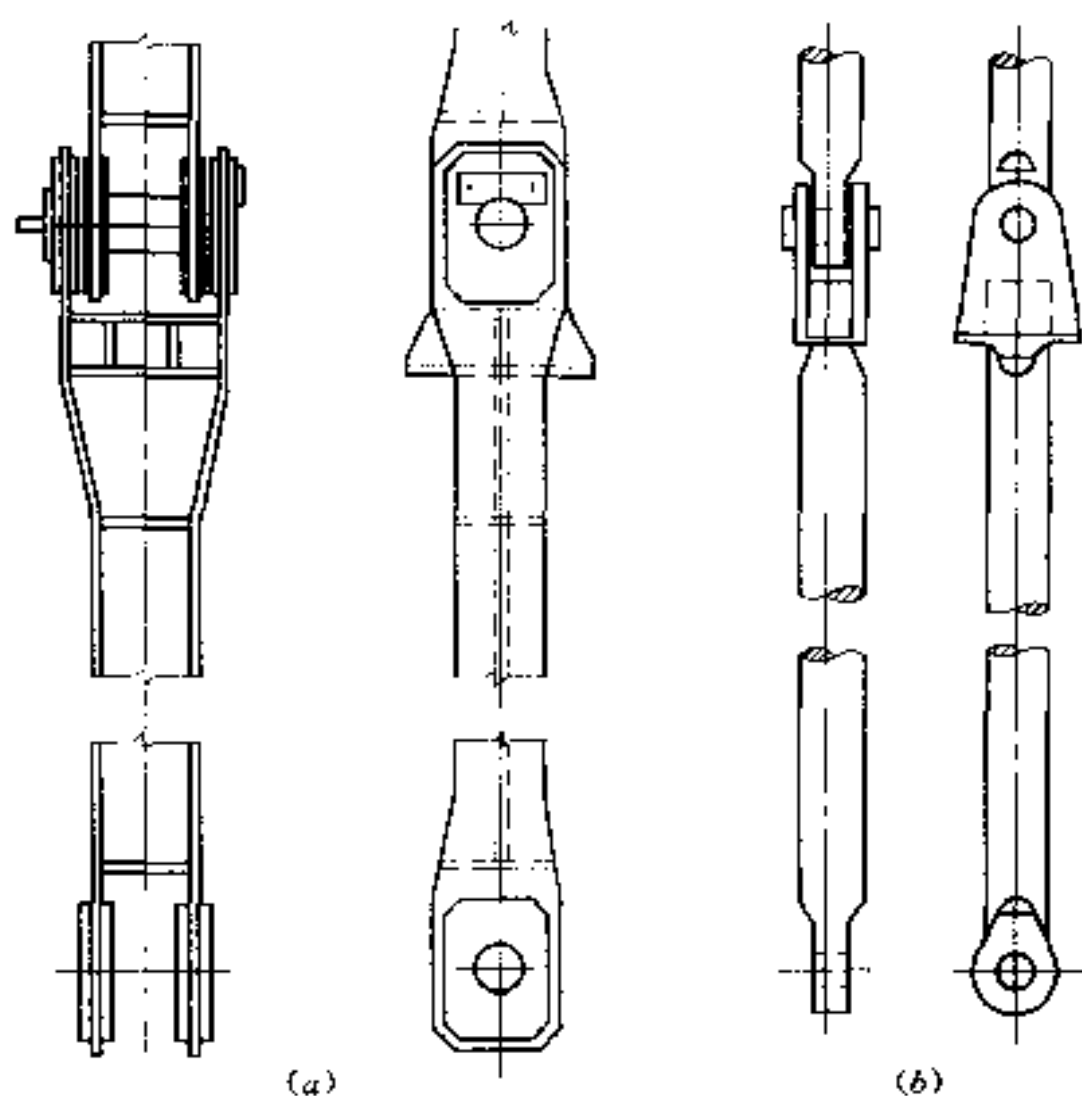


图 2 37 吊杆的结构

对吊杆杆身最弱断面应按下式进行拉应力验算：

$$\sigma = \frac{P}{A} \leqslant 0.9[\sigma] \quad (2-53)$$

式中：P 为闸门吊杆所承受的拉力，N；A 为吊杆体最弱断面面积（工字形截面一般不计腹板截面面积），mm<sup>2</sup>；[σ] 为容许拉应力，N/mm<sup>2</sup>，见表 1-5。

### （三）锁定装置

锁定装置是支承闸门或吊杆，使闸门固定在全开或某一开度位置的一种装置。锁定装置的构造应满足操作方便、安全可靠的要求。操作锁定一般应在锁定平台或检修平台上进行。有条件时，宜选用自动、半自动锁定器。锁定安装必须准确，左右齐平，操作时必须小心谨慎，确认锁定无误后，方可使启闭机械的牵引构件与闸门吊耳脱离或放松。

锁定装置的结构形式应按不同用途而进行设计。中小型闸门通常采用简支式锁定梁（图 2-38），其结构是采用槽钢或工字钢加肋板焊接而成。对于大型闸门，为减少操作人员的劳动强度，宜采用翻板式悬臂锁定梁（图 2-39）、连杆式锁定装置（图 2-40）、推移式锁定装置（图 2-41）以及自动锁定装置（图 2-42）等。需要自动化控制的比较重要的锁定装置可采用电力驱动。

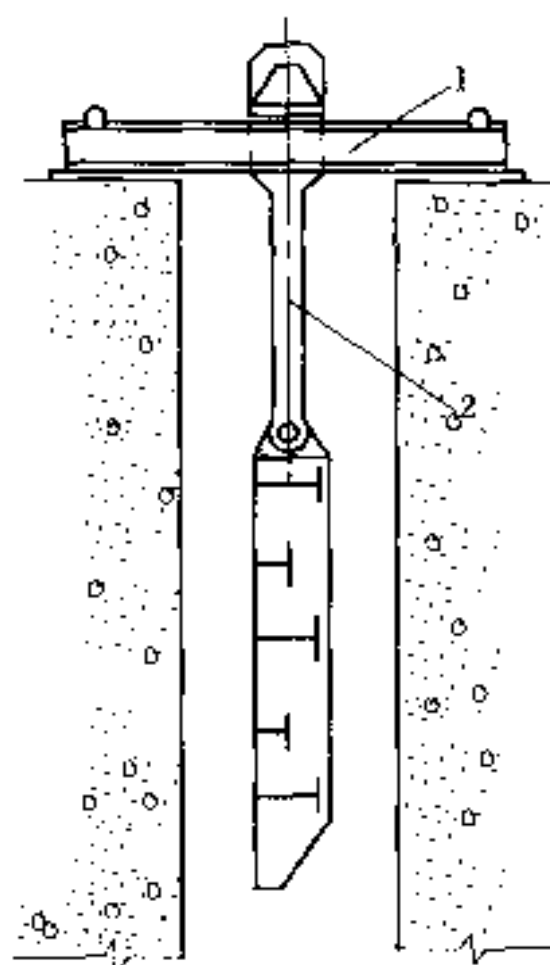


图 2-38 简支式锁定梁

1—简支梁；2—吊杆

作用在锁定装置上的荷载，应按其不同用途而定，供闸门检修或存放用的锁定，应考虑闸门自重、吊杆重、加重、风荷载以及操作时可能引起的荷载。对于供闸门局部开启用的锁定

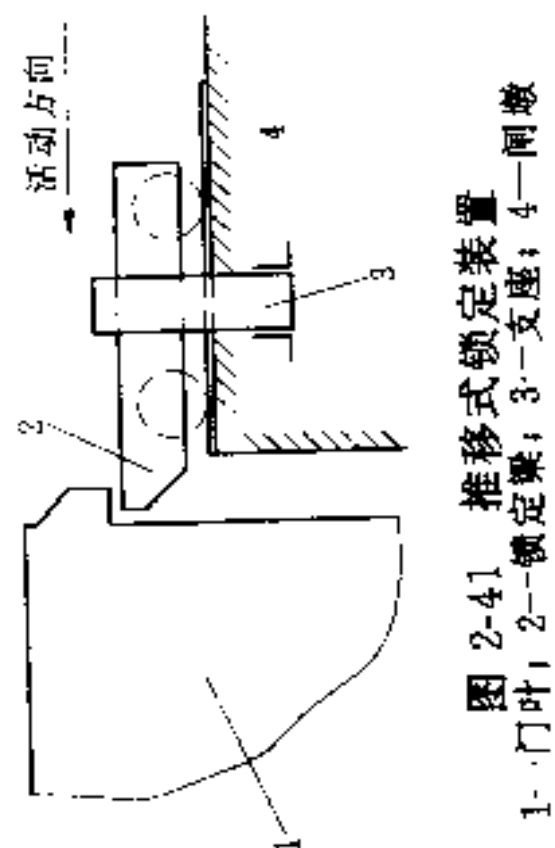
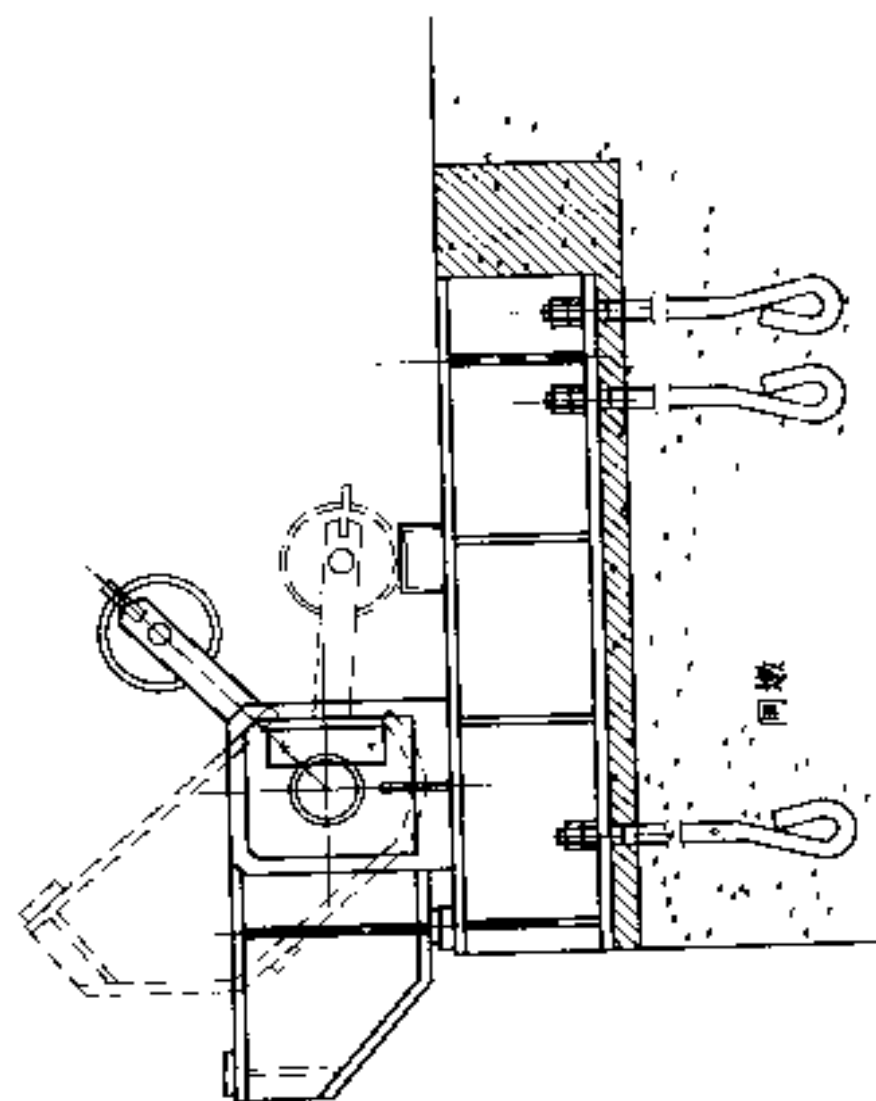
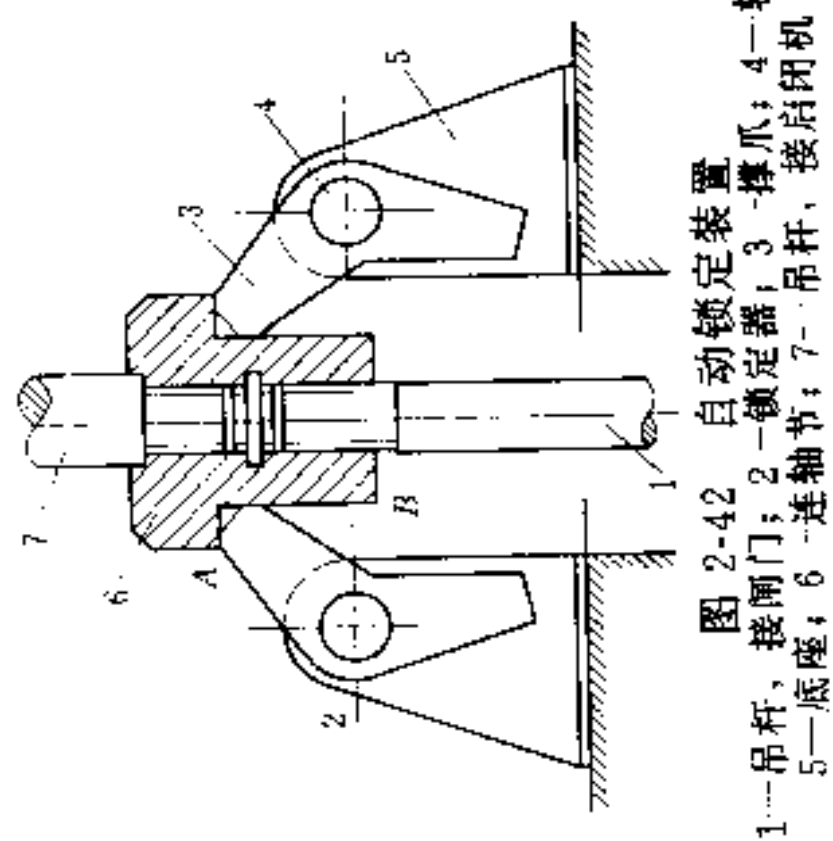
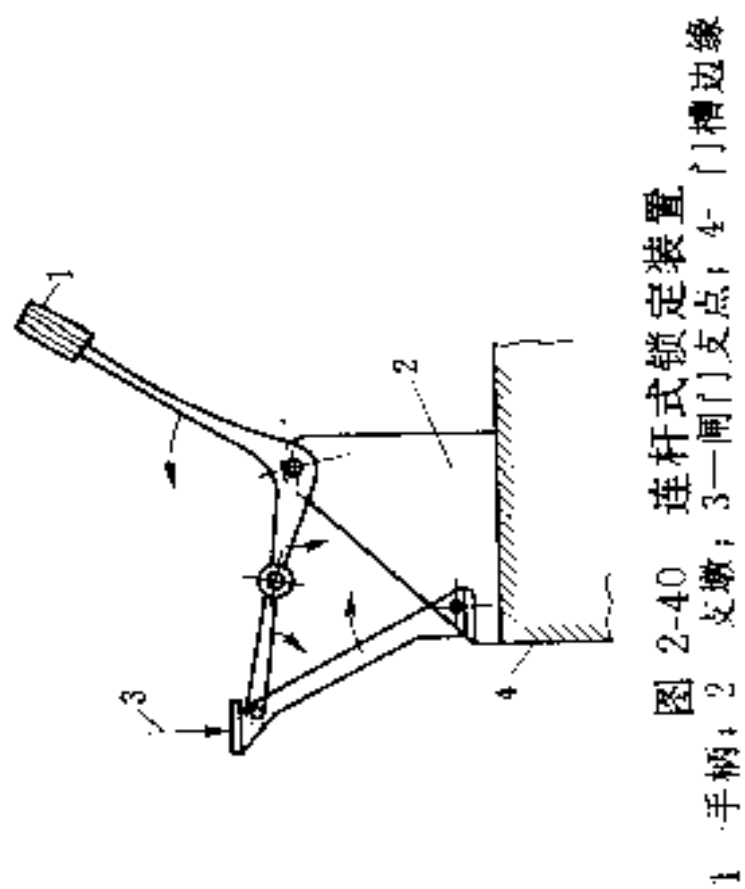
装置，尚应考虑闸门在动水中可能产生的下吸力和脉动荷载。锁定装置的活动和埋设部分，应按其受力及构造情况验算其强度、锚固及稳定性。

### 三、止水装置

止水的作用是在闸门关闭时或动水启闭过程中阻止闸门与门槽埋件之间漏水。止水装置一般设在闸门活动部分——门叶上，以便维修更换，如需将止水安设在埋件上，则应提供其维修更换的条件。

止水按装设部位可分为顶止水、侧止水、底止水和节间止水。露顶闸门上只有侧止水和底止水，潜孔闸门上则还需设顶止水，分节的闸门，在各节之间需设置节间止水。

闸门各部位的止水装置应具有连续性和严密性。止水效果不好，会造成闸门严重漏水，带来一系列的问题，如闸门全关时，漏水会导致闸门及埋件的空蚀及磨蚀，甚至引起闸门的振动，影响闸门的正常运行和建筑物的安全，在低温情况下漏水，会使闸门



结冰，冬季操作困难；又如水头较高潜孔闸门在动水启闭过程中门顶漏水，会影响启闭机和操作人员的安全；检修门漏水，会造成检修工作条件恶化，延长工期。因此对闸门的止水装置的设计应予以足够的重视，尤其是高水头工作闸门，对止水装置的要求就更高。止水装置的效果好坏，不仅与其结构的选型、布置有关，而且与闸门制造、安装的精度以及正确的运行都有很大的关系。

止水座板应与所在的埋件做成一个整体，其构造形式应满足止水座板焊接、加工等要求，采用不锈钢板制造顶、侧止水座板时，其加工后的厚度应不小于4mm。

止水材料要求富有弹性并有足够的强度，常用的有木材、橡皮、金属等。对止水要求不高的小型闸门可利用整条金属滑块兼作止水。木材止水的寿命有限，止水效果不理想。橡皮止水的弹性好，在工程实践中应用最为广泛。橡塑复合止水是将聚四氟乙烯贴合或喷涂在普通止水橡皮密封面上而成的止水，具有耐磨、低摩擦系数等优点，应用也越来越多。

止水橡皮一般可选用定型产品，其形状和尺寸可参照现行规范规定和厂家产品目录选用。闸门止水橡皮定型尺寸及性能见附录B。

#### （一）顶、侧止水构造与布置

##### 1. 顶止水

潜孔平面闸门要布置顶止水。顶止水一般以压板与垫板夹紧用螺栓固定在门叶或埋件上。止水橡皮的设置方向，应根据水压方向而定，一般要求止水橡皮在受水压后，能使其圆头压紧在止水座上，见图2-43。闸门的顶止水，可用圆头“P”或方头“P”形断面的橡皮。闸门顶止水橡皮应预留压缩量，一般为2~4mm；对于大跨度止水的闸门，顶主梁受力变形可能使顶止水脱离止水座板，其预留压缩量可取大些。也可采用图2-43(c)的形式，这种结构在水压力作用下可使止水转动而产生较大的位移。

止水压板的厚度不宜小于10mm，小型闸门可适当减薄。为避免橡皮圆头翻卷及压板边缘切割橡皮，可将橡皮止水的压板边缘

略加弯转，也可采用边缘为圆弧状的厚压板，此时应采用埋头螺栓，如图 2-44 所示。固定止水的螺栓间距宜小于 150mm，螺栓直径一般为  $\phi 12 \sim 20\text{mm}$ 。

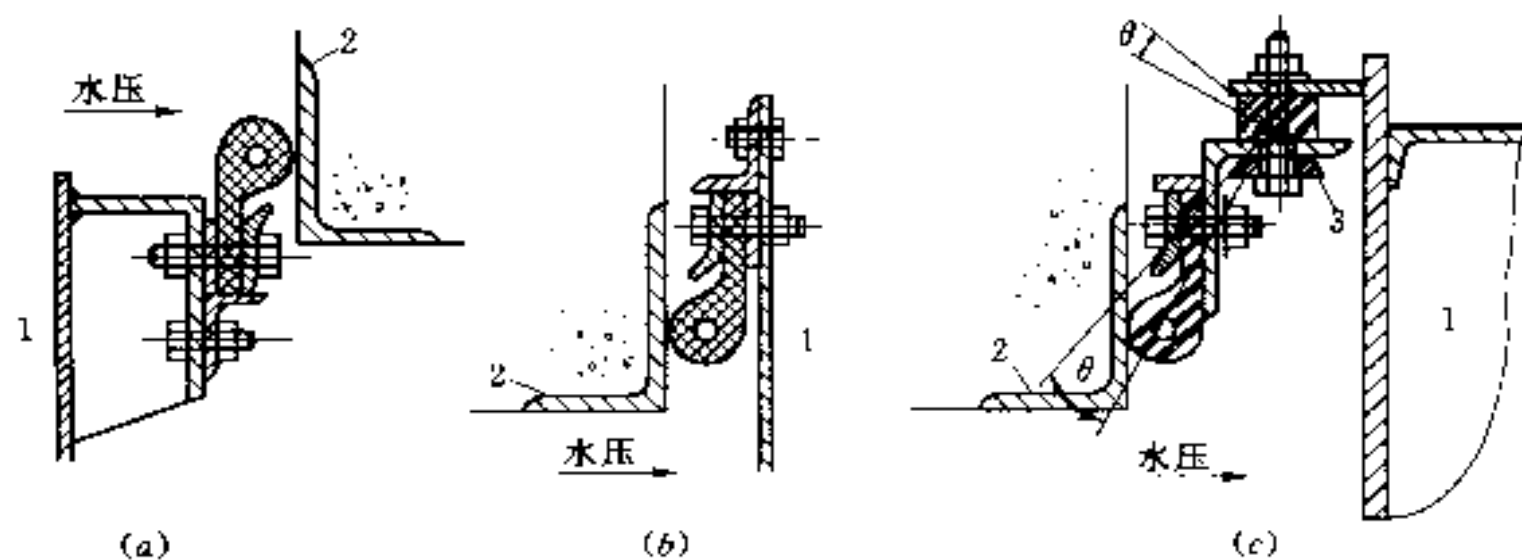


图 2-43 顶止水的布置  
1—门叶；2—止水座；3—弧面垫圈

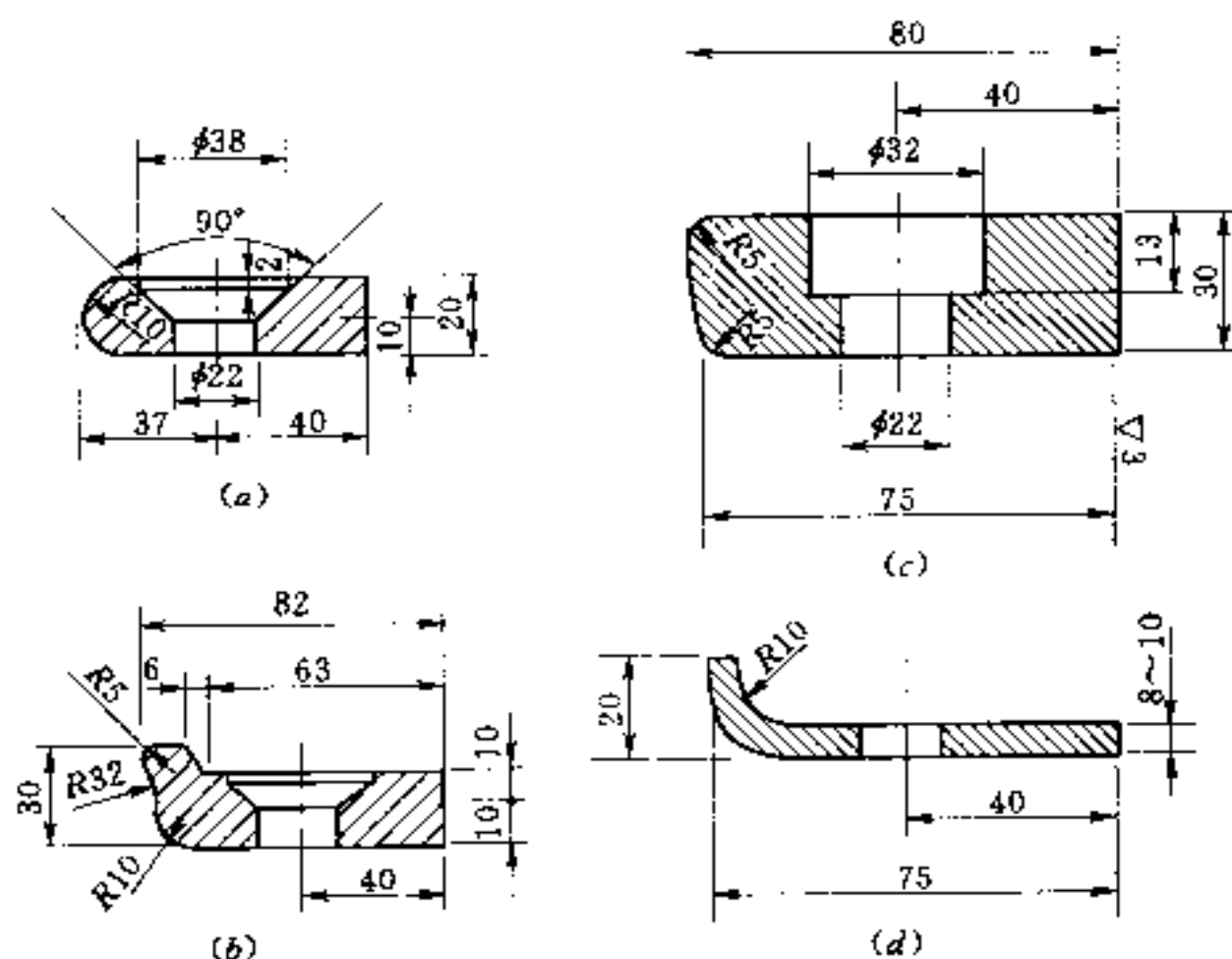


图 2-44 橡皮止水压板的形式

## 2. 侧止水

平面闸门的侧止水与顶止水构造形式相同，如图 2-45 所示。

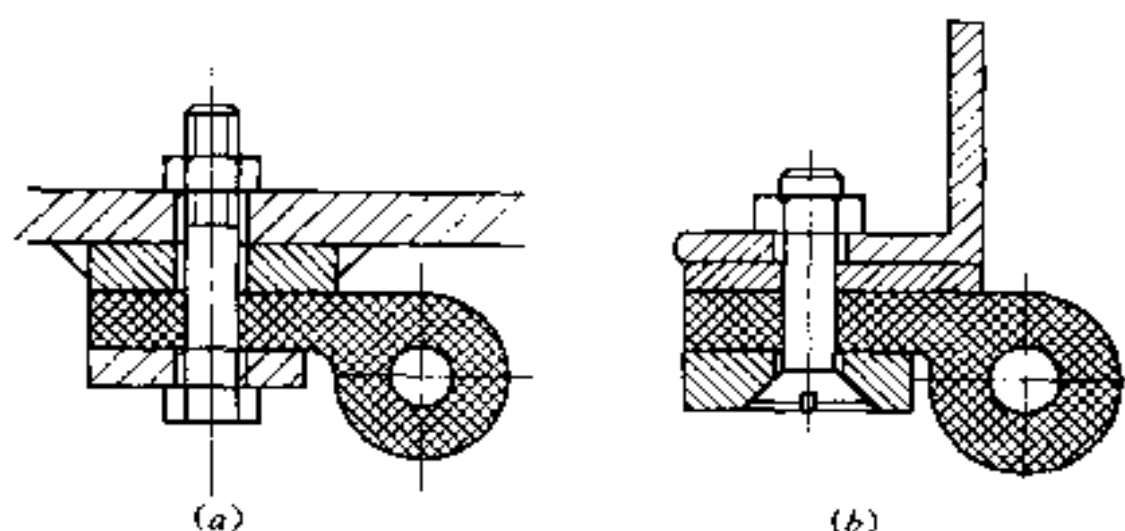


图 2-45 侧止水的布置

### (二) 底止水构造与布置

平面闸门底止水宜采用刀形橡皮，其布置如图 2-46 所示。通常底止水是利用门重压缩橡皮防漏的，压缩量一般为 5mm。

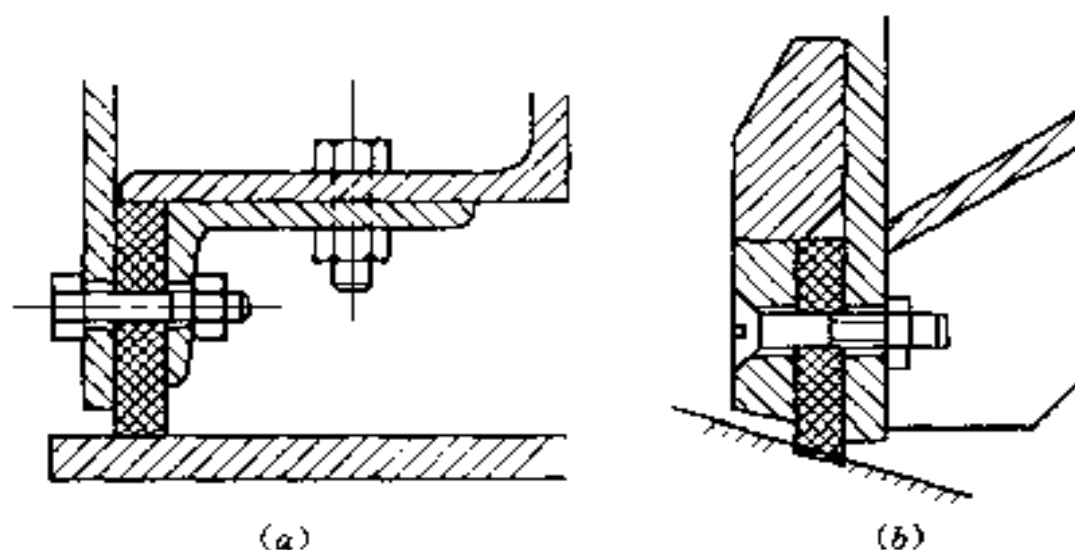


图 2-46 底止水的布置

### (三) 节间止水构造与布置

分节的平面闸门及叠梁闸门，要设置节间止水。常见的节间止水有三种构造形式，图 2-47 (a) 是一种与底止水相同的结构形式，图 2-47 (b) 是采用凹形橡皮，两者都是靠门重压缩而防漏的，适用于闸门节间采用活动连接的情况，如节间充水的平面闸门及叠梁闸门。图 2-47 (c) 的节间止水形式适用于闸门节间固定连接的情况，仅在闸门大修时，才需要将各节分开。节间止水应注意与各节闸门侧止水的连续性。

### (四) 侧止水与顶止水、底止水的连接

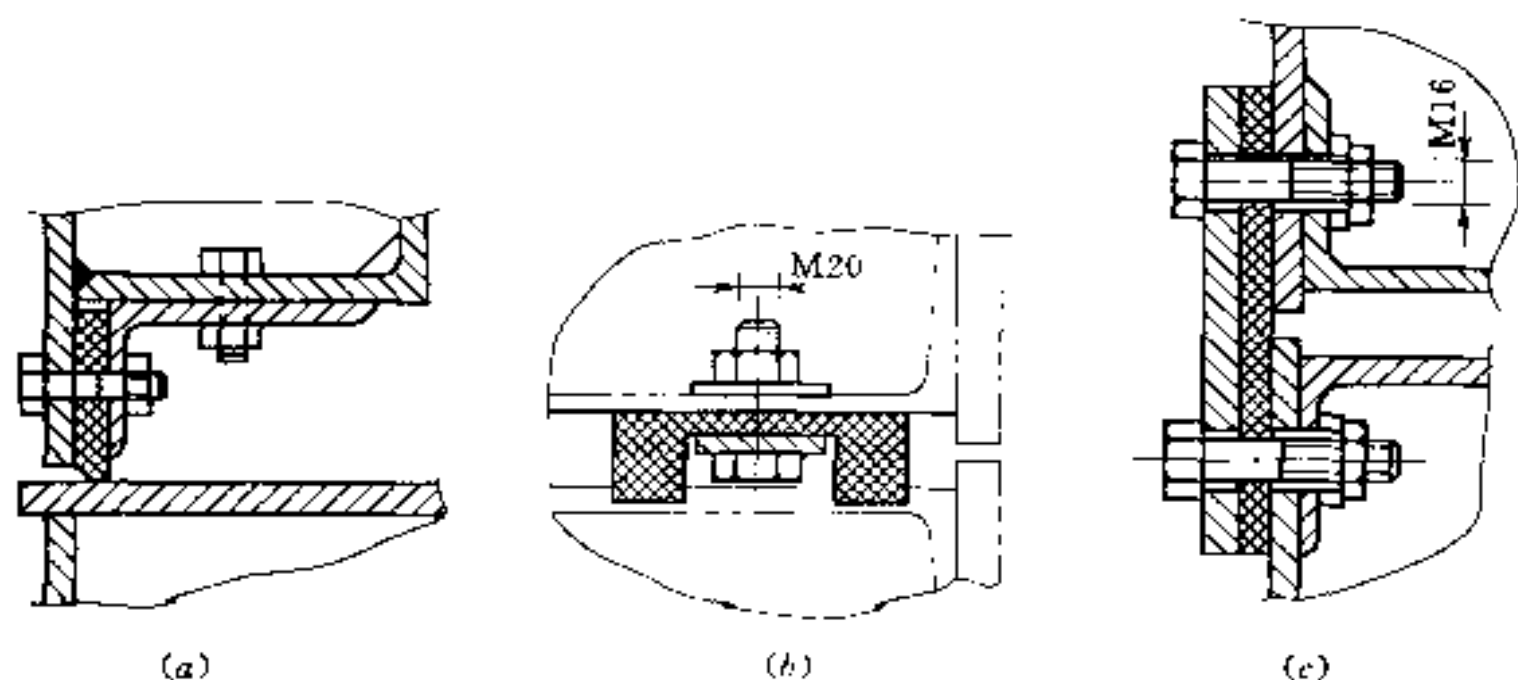


图 2-47 节间止水的布置

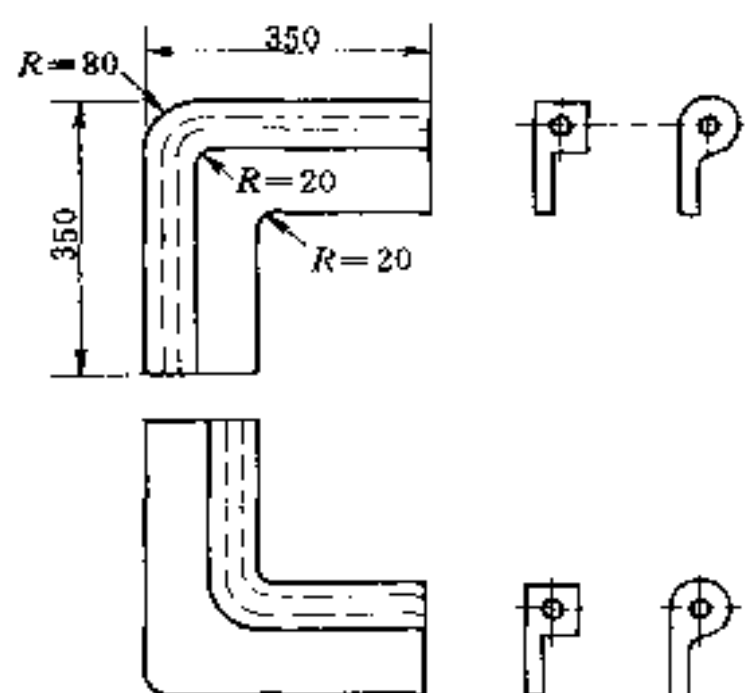


图 2-48 转角止水

闸门各部位止水应具有空间连续布置,且尽量布置在同一平面内。事实上,闸门漏水经常发生在止水装置转角处,即侧止水与顶、底止水的连接处。

平面闸门侧止水与顶止水的连接形式一般采用标准转角止水橡皮。根据止水布置位置的不同,转角止水又可分为内转角和外转角两种,如图 2-48 所示。

侧止水与底止水的连接方式,视侧止水垫板设置情况而有所不同。当侧止水与底止水均布置在同一平面内,底止水与侧止水的橡皮垫板需搭接,如图 2-49 (b) 所示;否则可采用如图 2-49 (a) 所示的连接方式。

#### (五) 侧止水压缩变形与压缩力的关系

闸门侧止水一般要求预压缩 2~4mm,计算摩阻力时,尚应将压缩橡皮而引起的摩阻力计入,有时对闸门启闭力计算影响比较大,尤其是自重小的闸门,有时可能因此需另加配重或下压力才能闭门。止水橡皮头部有一个  $\phi 16 \sim 20\text{mm}$  的圆孔,由于其受压条件的特殊性,计算压缩力不能按虎克定律计算,可参考表 2-16 的实验数据。

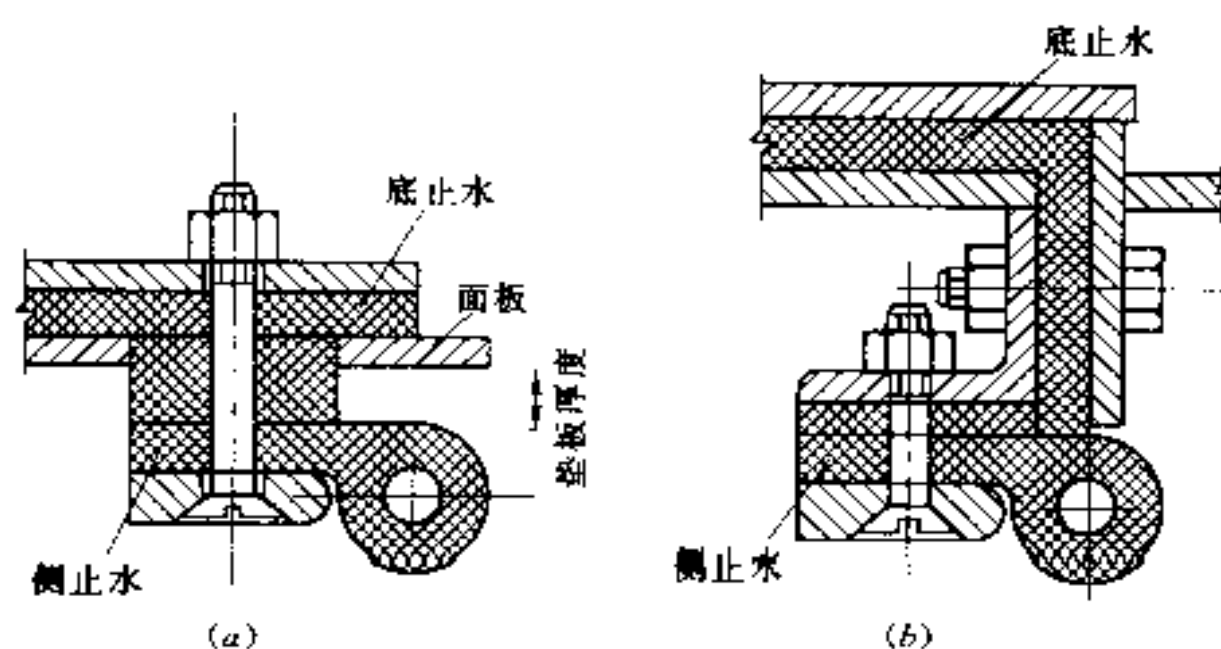


图 2-49 底、侧止水的连接

表 2-16 止水橡皮预压缩量与其压缩力关系的试验数据

| 绝对变形量<br>(mm) | 平均压力值 (10N)<br>止水橡皮长度为 200mm |       |       | 单位压缩力<br>(10N/cm) |       |       | P60—B<br>试验 E 值<br>(MPa) |
|---------------|------------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|--------------------------|
|               | P60—B                        | P60—A | P45—A | P60—B             | P60—A | P45—A |                          |
| 0.5           | 106                          | 32    | 47    | 5.3               | 2.6   | 2.35  | 10.6                     |
| 1.0           | 192                          | 62    | 53    | 9.6               | 3.1   | 2.65  | 9.6                      |
| 1.5           | 265                          | 72    | 58    | 13.2              | 3.6   | 2.90  | 8.8                      |
| 2.0           | 335                          | 81    | 63    | 16.7              | 4.1   | 3.15  | 8.35                     |
| 2.5           | 402                          | 90    | 68    | 20.1              | 4.5   | 3.4   | 8.05                     |
| 3.0           | 465                          | 100   | 73    | 23.2              | 5.0   | 3.65  | 7.75                     |
| 3.5           | 529                          | 111   | 78    | 26.5              | 5.5   | 3.90  | 7.55                     |
| 4.0           | 592                          | 117   | 85    | 29.6              | 5.8   | 4.25  | 7.40                     |
| 4.5           | 652                          | 135   | 89    | 32.6              | 6.7   | 4.45  | 7.25                     |
| 5.0           | 716                          | 145   | 96    | 35.8              | 7.3   | 4.80  | 7.15                     |
| 5.5           | 775                          | 155   | 100   | 38.7              | 7.8   | 5.00  | 7.05                     |
| 6.0           | 842                          | 165   | 106   | 42.1              | 8.3   | 5.3   | 7.05                     |
| 6.5           | 907                          | 176   |       | 45.3              | 8.8   |       | 6.95                     |
| 7.0           | 976                          | 185   |       | 48.8              | 9.3   |       | 6.95                     |
| 7.5           | 1044                         | 196   |       | 50.2              | 9.8   |       | 6.70                     |
| 8.0           | 1116                         | 200   |       | 55.8              | 10.0  |       | 6.95                     |

## 四、充水阀

### (一) 闸门的充水方式

在静水中开启的检修闸门和事故闸门一般需考虑充水平压措施，通常有旁通阀充水、小开度提门充水、节间充水、充水阀充水等方式。

旁通阀充水是在水工建筑物上设一条旁通管，设闸阀控制。此种充水方式操作不便，工作条件差，闸阀维修困难，很少采用。

小开度提门充水相当于动水启门，启闭机的启门力将随之加大。小型闸门，因启门力本身就不大，通常可采用小开度提门充水，但启闭机应设相应的行程控制装置。

对于分节的闸门，可采用节间充水，即提升上节闸门，使上下节闸门之间有一条几十毫米的缝隙可过流充水。其优点是结构简单，过流断面大，充水时间短。因只是动水开启上节闸门，对启闭机的启门力影响不大，也要求启闭机设相应的行程控制装置。

充水阀充水的方式是在门叶上设置充水阀，由启闭机通过担梁控制其打开、关闭。其优点是费用低廉，操作灵活简便。但应注意充水阀本身的漏水问题。该充水方式同样要求启闭机设相应的行程控制装置。

### (二) 充水阀

充水阀常用的有平盖式（图 2-50）、柱塞式（图 2-51）、闸阀式（图 2-52）三种。平盖式充水阀适合于设计水头低、不经常使用、下游止水的闸门；柱塞式充水阀适合于设计水头较高、下游止水的闸门；闸阀式宜用于上游止水的闸门。如果闸门前泥沙及污物较多，阀前钢管易堵塞，不宜用闸阀式。

充水阀应布置在最低水位以下，以免水位较低时无法充水。平盖式、柱塞式充水阀应布置在闸门上主梁腹板或中间主梁腹板上，闸阀式充水阀宜布置在闸门梁格内部。

充水阀的形式、尺寸应根据充水容积、漏水量、充水时间、设计水头、闸门止水方式、主梁腹板高度等条件，综合比较后确定。充水阀结构尺寸可按水利部 1999 年发布的 SL/T248—1999《水

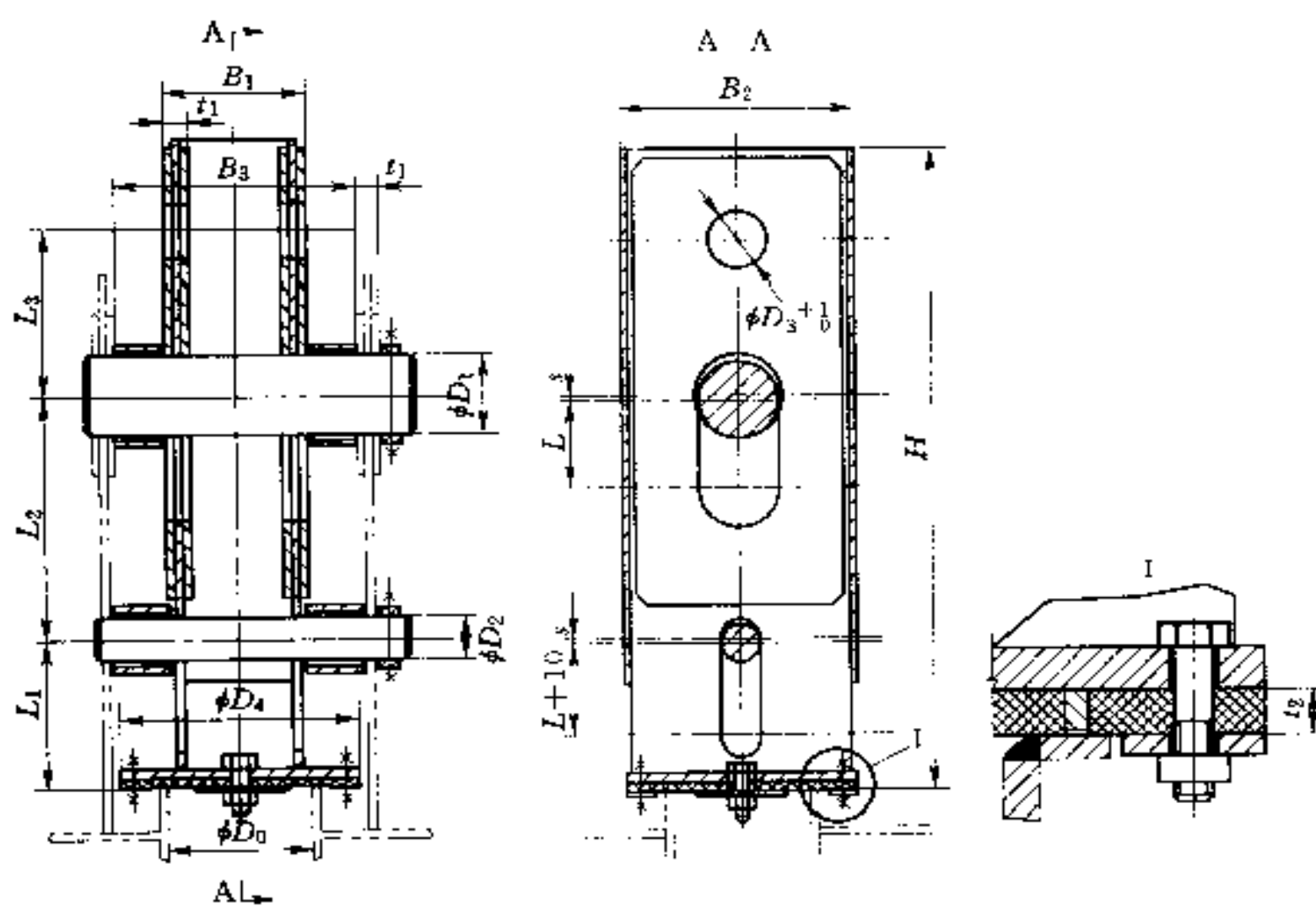


图 2-50 平盖式充水阀

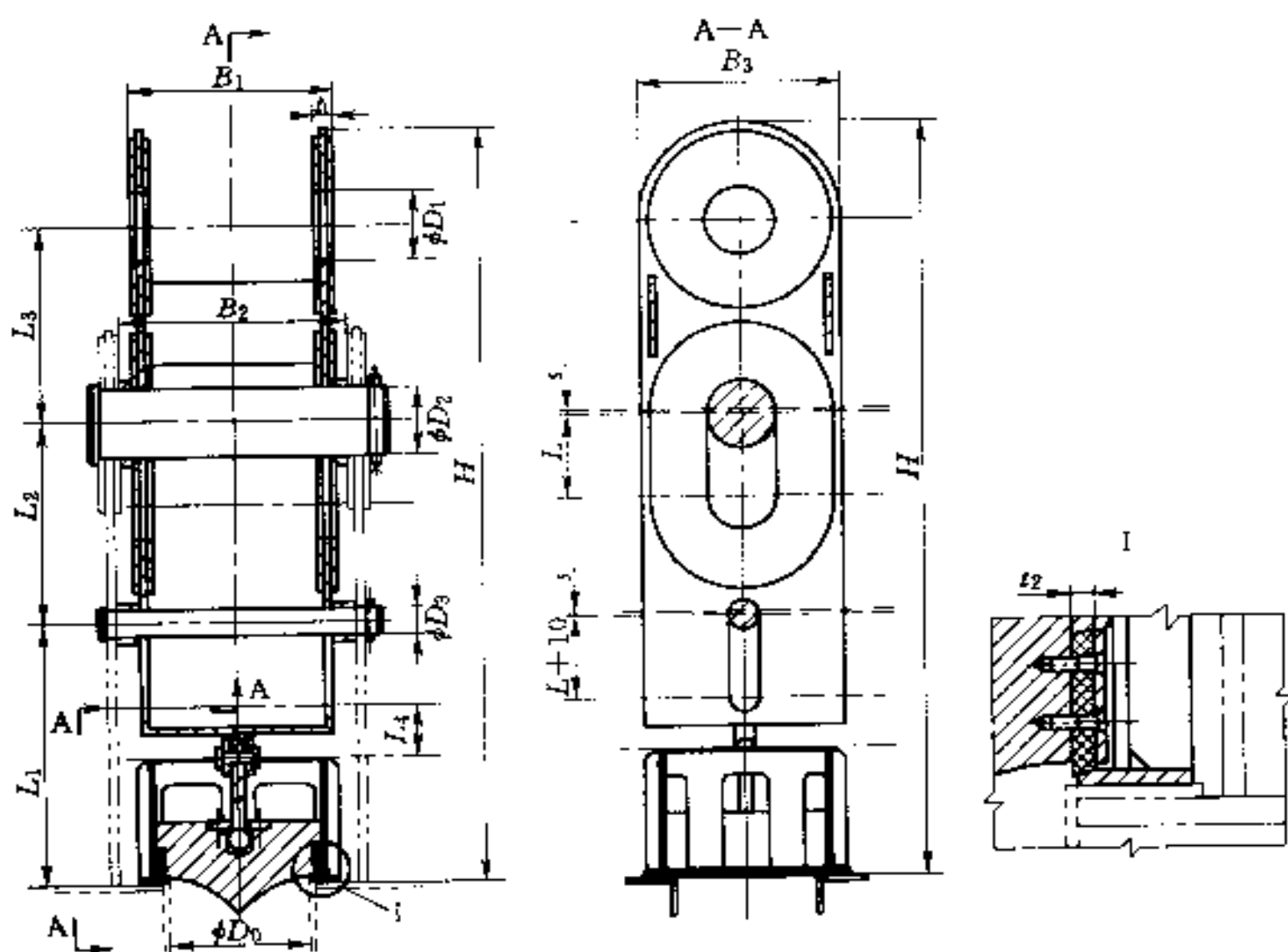


图 2-51 柱塞式充水阀

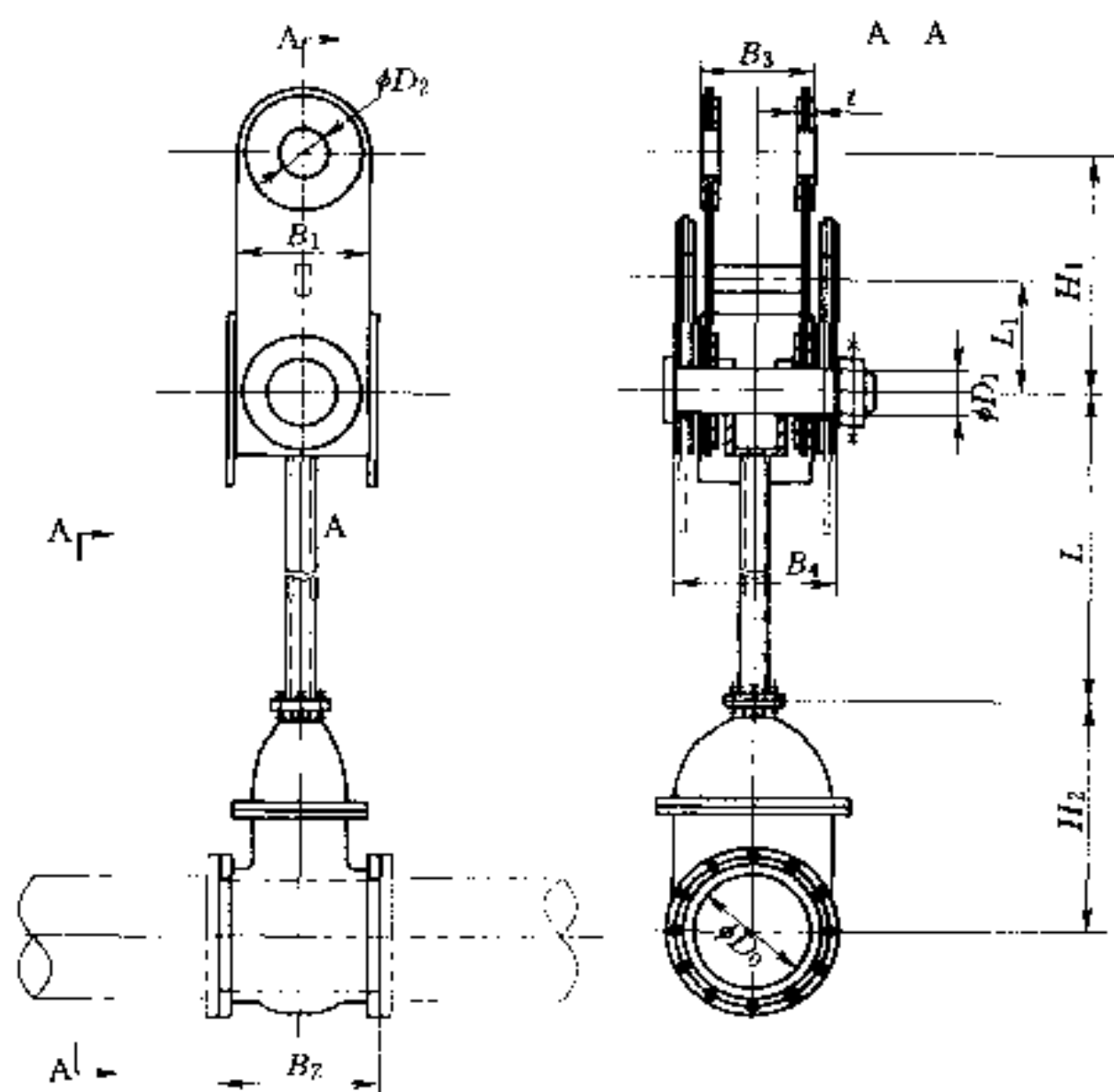


图 2-52 闸阀式充水阀

工钢闸门系列标准— 充水阀》中的标准尺寸选用。

## 第四节 平面钢闸门的门槽与通气孔

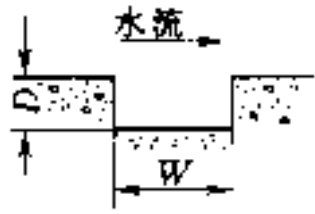
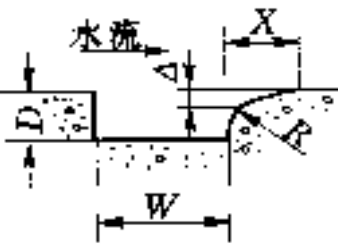
### 一、门槽形式

水流经过门槽段，由于门槽边界突变，引起水流压力的急剧变化，形成涡流，产生负压。当流速较高，达到一定条件会产生空穴现象，致使门槽及附近的边墙或底板发生空蚀，严重时将威胁工程的安全。平面闸门的门槽形式，可选用Ⅰ型及Ⅱ型槽，其适用范围和体形参数如表 2-17 所示。

取水输水工程中经过闸门门槽的水流速度一般不会太大（水头低于 30m，流速小于 20m/s），门槽的空蚀问题不太大，多采用Ⅰ型门槽。

表 2-17

门 槽 形 式

| 槽型 | 图 形                                                                                 | 门槽几何形状的参数                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 适 用 范 围                                                                                                                                                                                                                                      |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I  |    | <p>(1) 较优宽深比, <math>W/D=1.6\sim1.8</math>;</p> <p>(2) 合宜宽深比, <math>W/D=1.4\sim2.5</math>;</p> <p>(3) 门槽初生空穴数的经验公式为:</p> $K_i = 0.38 W/D$ <p>(公式适用范围为 <math>W/D=1.4\sim3.5</math>)</p>                                                                                                                         | <p>(1) 泄水孔事故门门槽和检修门门槽;</p> <p>(2) 水头低于 12m 的溢流坝堰顶工作闸门门槽;</p> <p>(3) 电站进水口事故、快速闸门门槽;</p> <p>(4) 泄水孔工作门门槽, 当水流空穴数 <math>K</math> 大于 1.0 (约相当于水头低于 30m 或流速小于 20m/s) 时</p>                                                                       |
| II |  | <p>(1) 合宜宽深比, <math>W/D=1.5\sim2.0</math>;</p> <p>(2) 较优错距比, <math>\Delta/W=0.05\sim0.08</math>;</p> <p>(3) 较优斜坡, <math>\Delta/X=1/10\sim1/12</math>;</p> <p>(4) 较优圆角半径, <math>R=30\sim50\text{mm}</math> 或圆角比 <math>R/D=0.10</math>;</p> <p>(5) 门槽初生空穴数 <math>K_i=0.4\sim0.6</math> (可根据已有科研成果及工程实例类比选用)</p> | <p>(1) 泄水孔工作门门槽, 其水流空穴数 <math>K&gt;0.6</math> (约相当于水头为 30~50m, 或流速为 20~25m/s) 时;</p> <p>(2) 高水头、短管道事故门门槽, 其水流空穴数 <math>1.0&gt;K&gt;0.4</math> 时;</p> <p>(3) 要求经常部分开启, 其水流空穴数大于 0.8 的工作门门槽;</p> <p>(4) 水头高于 12m, 其水流空穴数大于 0.8 的溢流坝堰顶工作门门槽</p> |

关于高水头闸门的门槽形式的确定, 读者可参考规范中的有关规定, 有条件的可通过水工模型试验和减压箱试验来确定有关参数。

## 二、门槽埋件

### (一) 埋件布置

平面闸门的埋件一般包括: 主轨、反轨、底槛、门楣、侧轨、止水座、门槽护角等。

图 2-53 所示为平面定轮闸门门槽的一般布置形式, 其门槽护

角兼作侧轨和止水座。在工程实践中，通常把上、下游护角分别与主、反轨连接在一起，以方便运输、安装，并有利于保证制造、安装的精度。

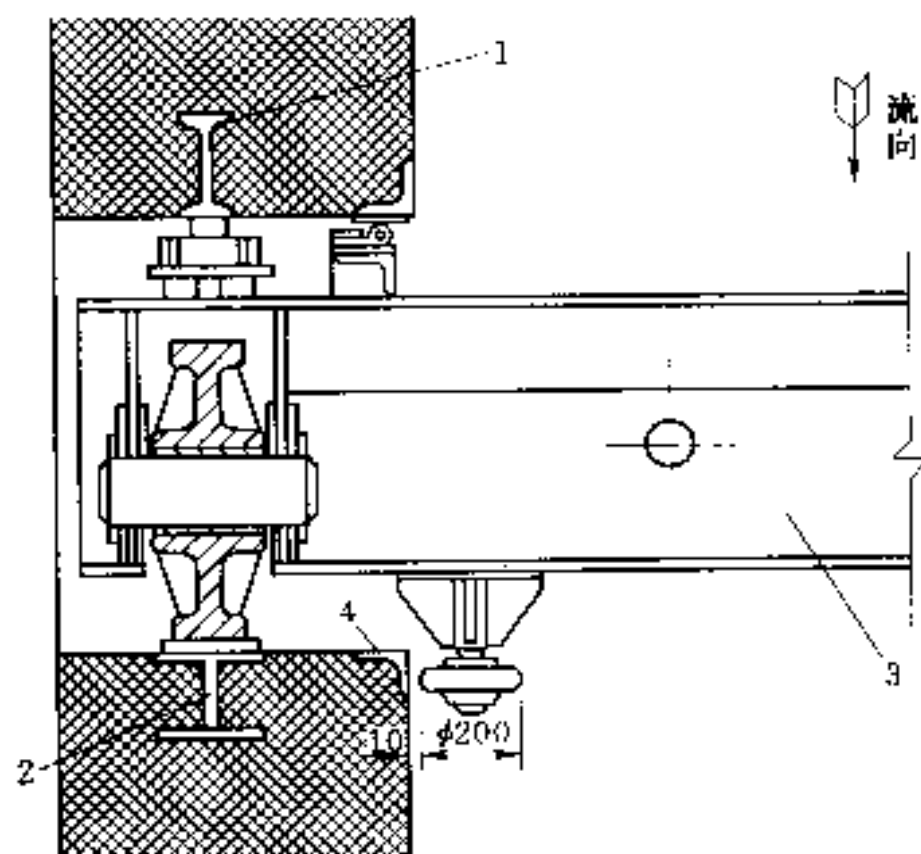


图 2-53 平面定轮闸门门槽的布置

1—反轨；2—主轨；3—门叶；4—侧轨（护角）

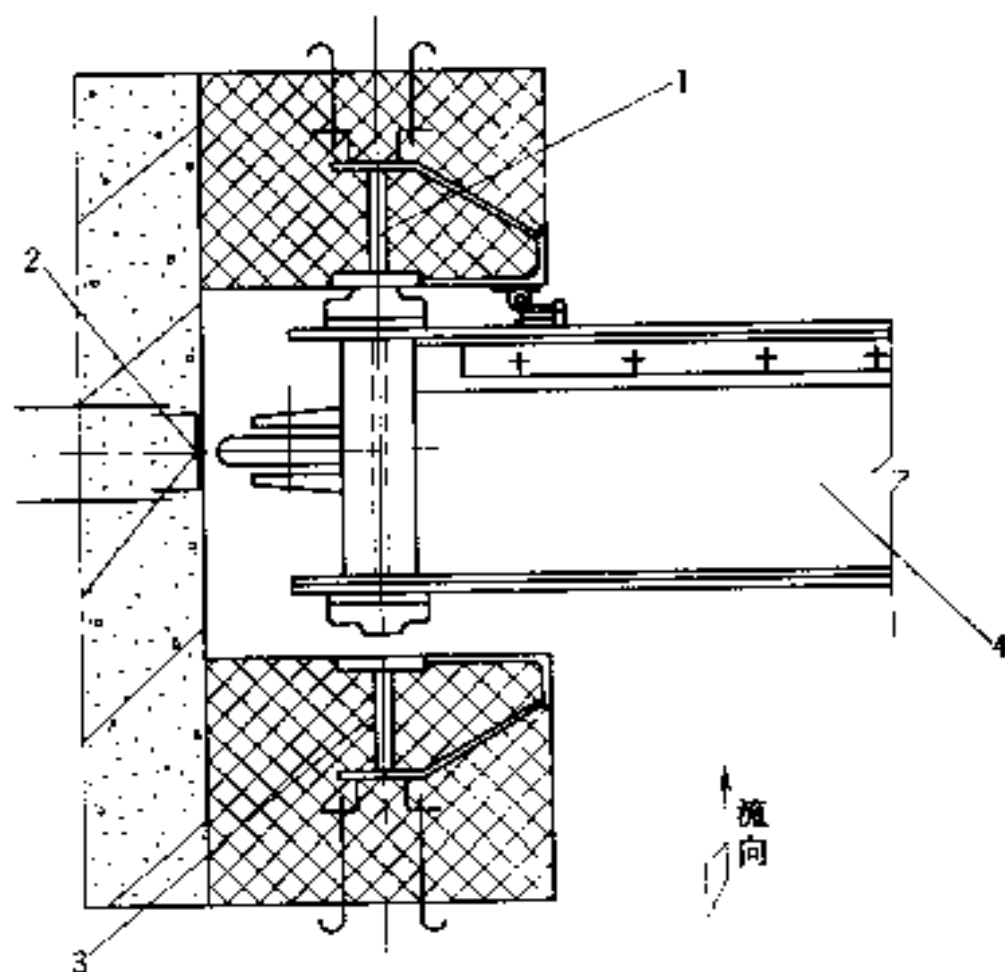


图 2-54 平面滑动闸门门槽的布置

1—主轨；2—侧轨；3—反轨；4—门叶

图 2-54 所示为平面滑动闸门门槽的一般布置形式。由于采用槽内式侧轮，故在门槽侧面专门埋设了侧轨。

闸门埋件必须能将闸门所承受的荷载安全地传递到混凝土（或其他材料）中去。为保证闸门启闭灵活，门槽混凝土面与门体间应有不小于 100mm 的距离。

为保证安装精度，闸门埋件应采用二期混凝土安装，二期混凝土宜有足够尺寸，以满足埋件安装和混凝土浇注施工的要求。有条件时，也可采用预制门槽安装。对用于安装埋件和锚固二期混凝土的锚筋，其直径不宜小于  $\phi 16\text{mm}$ ，伸出一期混凝土面的长度不宜小于 150mm。对于低水头小孔口闸门埋件所用锚筋，其直径及外伸长度可适当减小。为适应钢滑模板施工，一期锚筋也可采用锚板形式，但在构造上应加强锚板与二期混凝土的锚固措施。

多泥沙河流上的排沙泄水孔闸门门槽埋件及其附近的衬护，应结合抗磨损和抗空蚀的要求进行设计。当水流中有大量推移质过闸时，闸孔底部还应采取相应的衬护措施。大、中型工程施工导流孔闸门底槛及其附近的衬护，应根据导流期过闸水流流态、过流时间长短及推移质过闸情况等因素确定。必要时，可在其上、下游段各设宽为 800~1500mm 的衬护板，并加强锚固设计。

潜孔式平面工作闸门和事故闸门门槽主轨的高度，应根据使用条件确定，可按 1.5~2.0 倍的孔口高度选取。

埋件分段时应考虑制造、运输和安装对其长度的限制及其本身刚度的要求。

## （二）主轨

### 1. 滚轮的轨道

（1）轨道的形式。滚轮支承的轨道，根据轮压大小可选用焊接结构或铸造加工件。荷载不大时，可采用图 2-55 所示的两种形式。荷载较大时一般采用铸钢轨道。

铸钢轨道的设计应注意：轨头宽度比滚轮轮缘宽度宽 20~30mm，工作面的淬火硬度比滚轮工作面硬度 HB 值高 50，轨道各结构尺寸应满足强度要求和铸造的工艺要求，其一般比例如图 2-

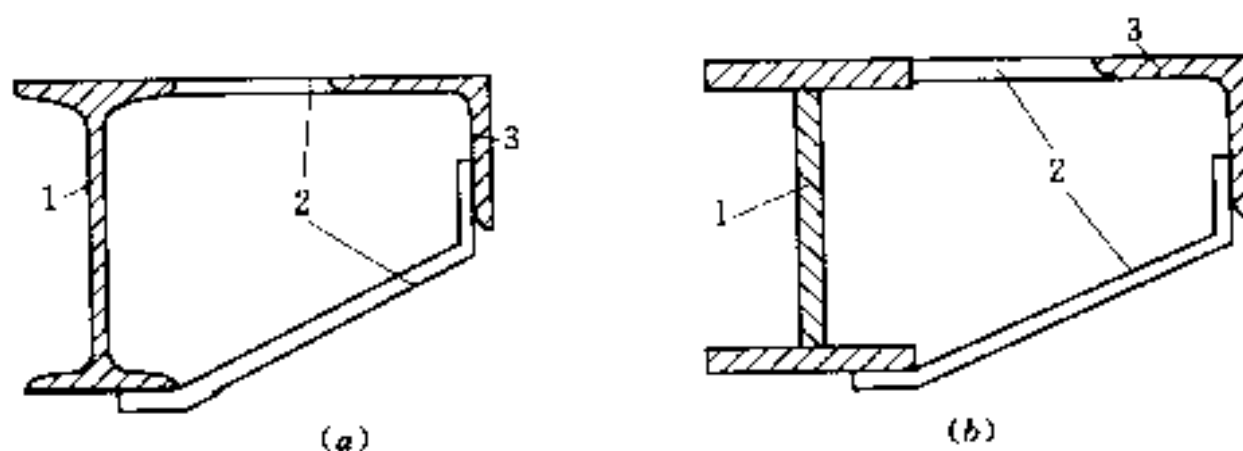


图 2-55 滚动支承轨道截面

(a) 型钢主轨; (b) 焊接组合主轨

1—主轨; 2—连接板; 3—护角

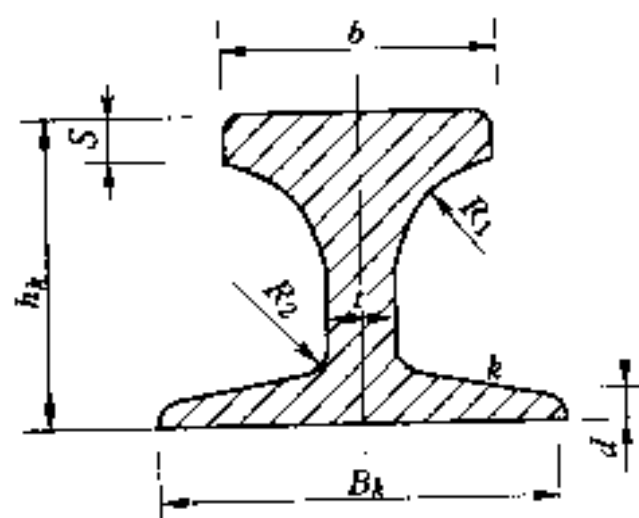


图 2-56 滚轮支承铸钢轨道尺寸

$b = b_0 + (20 \sim 30) \text{ cm}$  ( $b_0$  为滚轮翼缘宽度);  $h_k = (1.0 \sim 1.2) B_k$ ;  $B_k = (1.5 \sim 2.0) b$ ;  $t = (0.25 \sim 0.3) b$ ;  $S = (0.2 \sim 0.25) b$ ;  $d = 0.5t$ ;  $R_1 = 2S$ ;

$R_2 = 1.5S$ ;  $K = 1 : 5$

56 所示。

(2) 轨道的计算, 计算简图见图 2-57。

1) 轨道与滚轮的接触应力, 见本章滚轮行走支承部分。

2) 轨道底板混凝土承压力:

$$\sigma_h = \frac{P}{3h_k B_k} \leq [\sigma_h] \quad (2-54)$$

当相邻两滚轮中心距小于  $3h_k$  时, 可按下列近似公式计算:

$$\sigma_h = \frac{P}{B_k L} \leq [\sigma_h] \quad (2-55)$$

式中:  $P$  为滚轮的荷载, N;  $h_k$  为

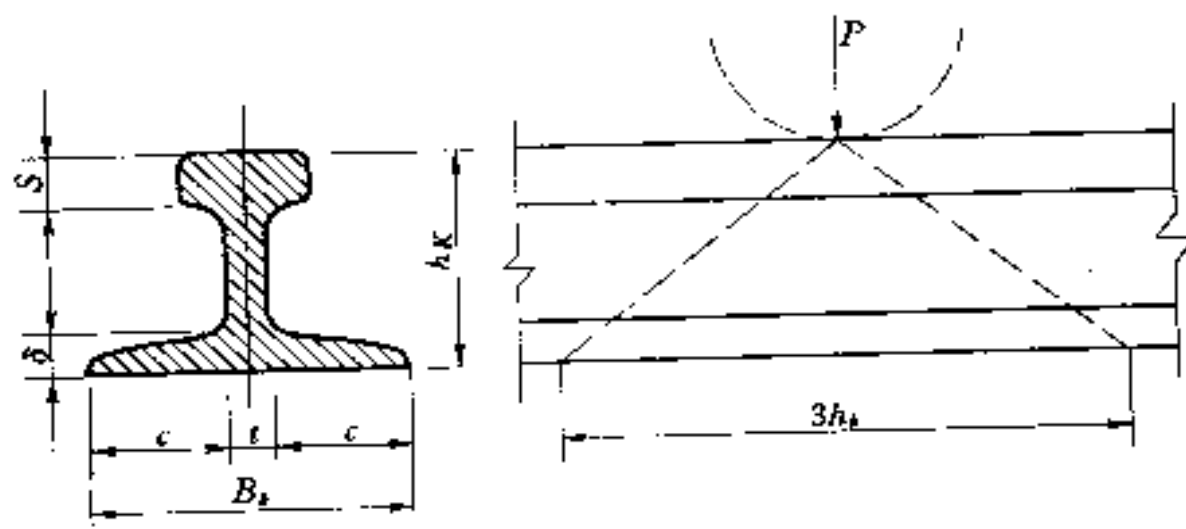


图 2-57 轨道计算简图

轨道高度, mm;  $B_k$  为轨道底板宽度, mm;  $L$  为相邻两滚轮的中心距, mm;  $[\sigma_k]$  为混凝土的容许承压应力, N/mm<sup>2</sup>, 按表 1-11 采用。

3) 轨道横断面弯曲应力:

$$\sigma = \frac{3Ph_k}{8W_k} \leq [\sigma] \quad (2-56)$$

式中:  $W_k$  为轨道截面抵抗矩, mm<sup>3</sup>;  $[\sigma]$  为抗弯容许应力, N/mm<sup>2</sup>, 对铸锻件按表 1-8 采用。

4) 轨道颈部的局部承压应力:

$$\sigma_{cd} = \frac{P}{3St} \leq [\sigma_{cd}] \quad (2-57)$$

式中:  $S$  为颈部到轨面的距离, mm;  $t$  为颈部厚度, mm;  $[\sigma_{cd}]$  为局部承压容许应力, N/mm<sup>2</sup>, 对铸锻件按表 1-8 采用。

5) 轨道板弯曲应力:

$$\sigma = 3\sigma_h \frac{c^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (2-58)$$

式中:  $c$  为底板悬臂段长度, mm;  $\delta$  为底板厚度, mm;  $[\sigma]$  为抗弯容许应力, N/mm<sup>2</sup>, 按表 1-8 采用。

## 2. 滑道支承轨道

(1) 滑道支承轨道的形式。滑道支承的轨道如图 2-58 所示。常用的为不锈钢板与厚钢板焊接的轨道 [图 2-58 (b)], 其轨头尺寸的选择见表 2-11。

(2) 滑道支承轨道的计算, 见图 2-59。

1) 底板的混凝土承压应力:

$$\sigma_k = q/B_k \leq [\sigma_k] \quad (2-59)$$

式中:  $q$  为滑道单位长度荷载, N/mm。

2) 轨道底板弯曲应力:

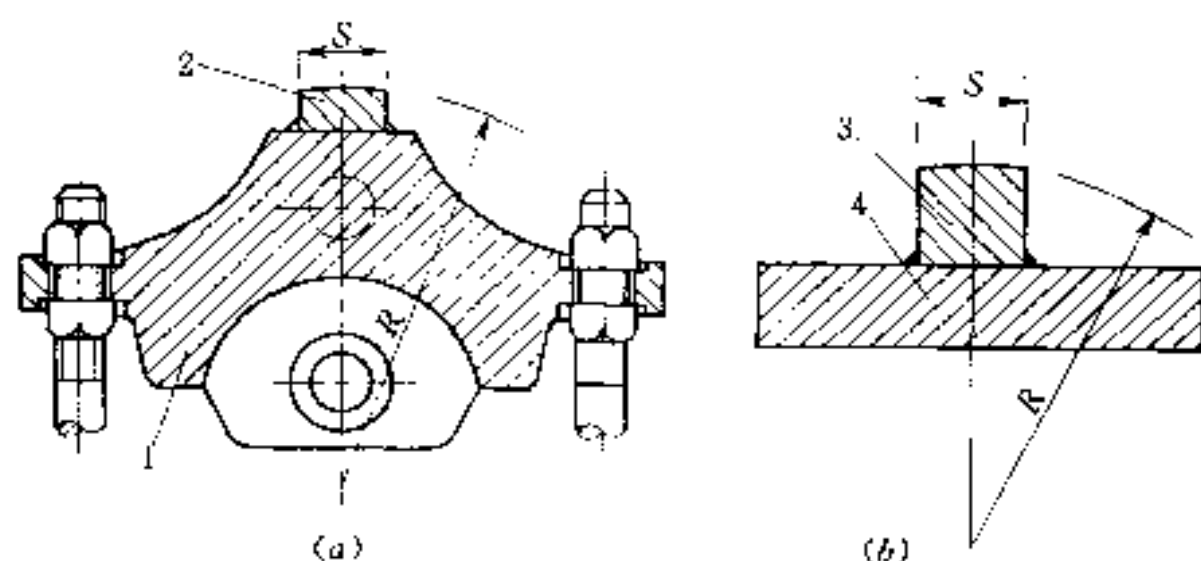


图 2-58 滑道支承轨道截面

1—主轨；2、3—不锈钢轨面；4—轨道座板

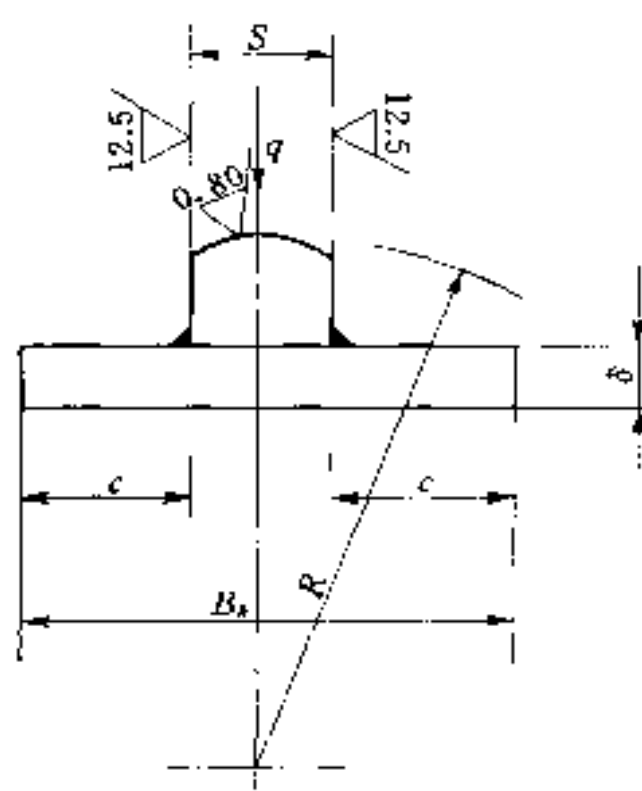


图 2-59 滑道支承  
轨道计算简图

$$\sigma = 3\sigma_h \frac{c^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (2-60)$$

### (三) 反轨、侧轨、底槛

#### 1. 反轨与侧轨

反轨与侧轨通常采用工字钢或槽钢制作，一般按构造选定，但要考虑其在运输、安装、浇注二期混凝土过程中有足够的刚度。为便于闸门的入槽，反轨与侧轨上端通常做成斜坡状，见图 2-60。

#### 2. 底槛

闸门底槛埋件宜采用工字形断面，一般采用 200~300mm 高的工字钢。低水头小孔口闸门的底槛埋件可采用槽钢。门槽段需要衬护时，可结合底部衬护板做成组合工字截面。常用底槛截面形式见图 2-61。

### (四) 门楣

潜孔式闸门需要设置门楣，作为顶止水的止水座，并兼作胸墙的护角。其构造一般如图 2-62 所示，图中隔板的横向间距一般为 500~1000mm，水头大的可取小值。其他尺寸一般取  $a=100\sim$

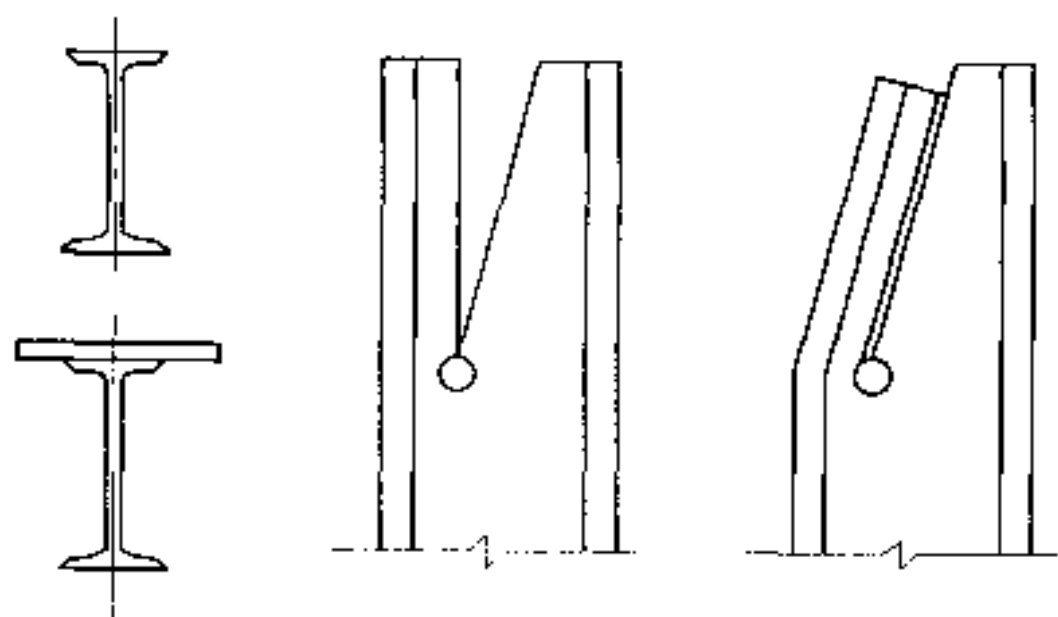


图 2-60 反轨与侧轨

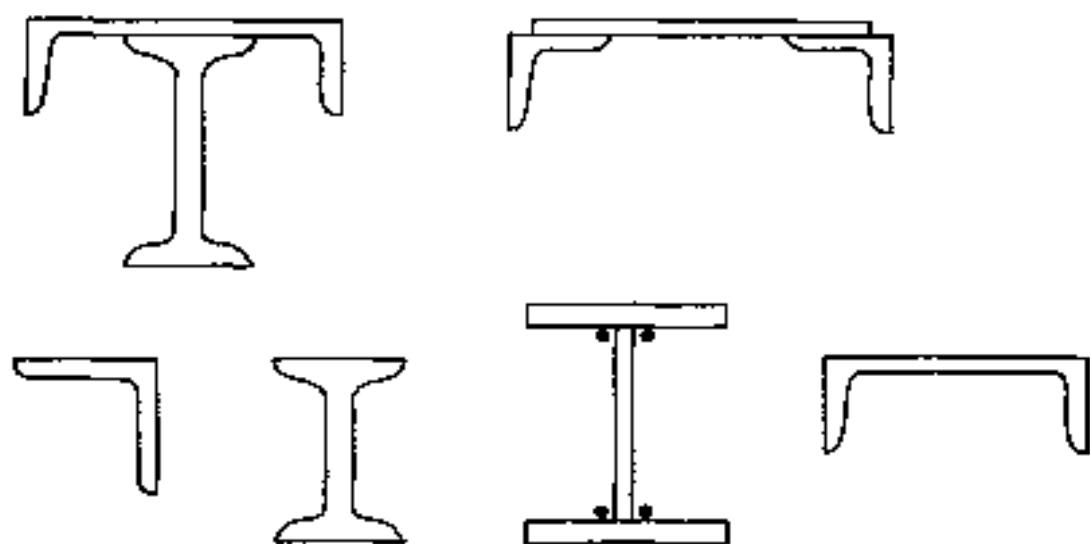


图 2-61 底槛截面形式

200mm,  $b_1 = 300 \sim 600\text{mm}$ ,  $b_2$  应不小于 300mm。

利用水柱下降的事故闸门, 胸墙和门楣的相关尺寸, 可按图 2-63 所示尺寸采用。对于大型电站的事故闸门, 宜通过模型试验确定胸墙和门楣的相关尺寸。

### 三、通气孔

对于潜孔式闸门, 包括工作闸门、事故闸门、检修闸门, 如门后不能充分通气时, 应在紧靠闸门下游处顶部设置通气孔。通气孔是保证闸门正常工作, 改善水流流态, 防止空蚀、振动, 减轻闸门启闭力的重要措施之一。实践证明: 门后管道因不设通气孔或通气孔面积偏小或位置

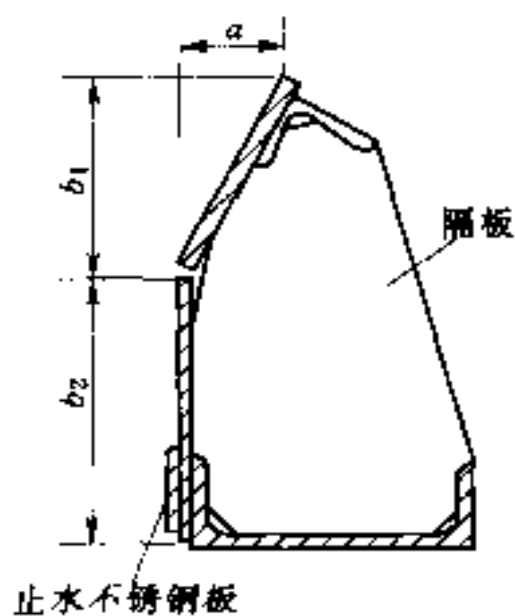


图 2-62 门楣截面形式

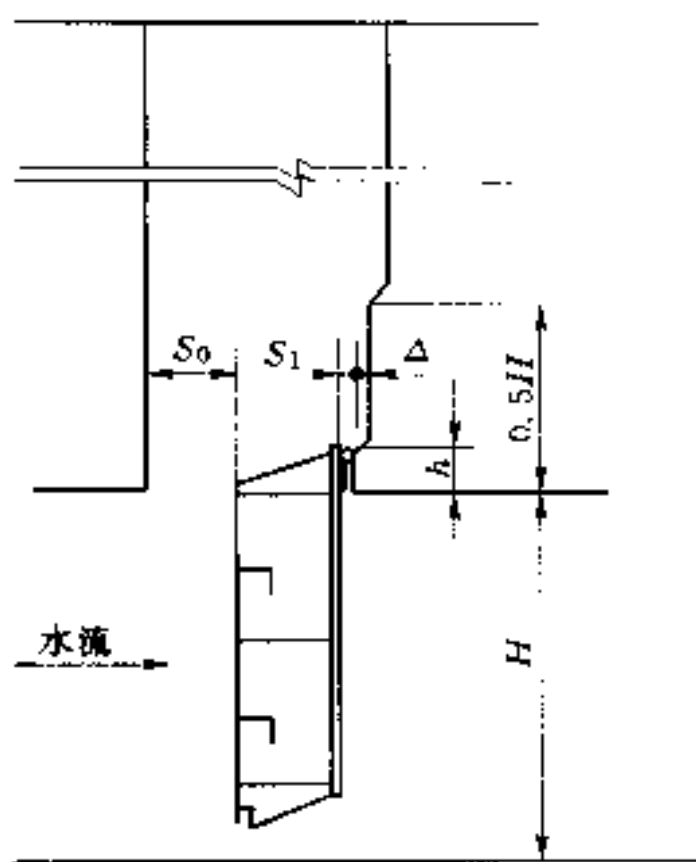


图 2-63 利用水柱关闭闸门门楣尺寸

$$S_0 \geq 5S_1; \Delta = 100\text{mm 或 } \Delta \approx S_1;$$

$$h = (0.05 \sim 0.1) H \text{ 但不小于 } 300\text{mm};$$

$$S_1 \text{ 尽量小}$$

不当，都会造成闸门操作故障，影响安全运行，或加剧空蚀、振动等问题。

#### (一) 通气孔的布置

通气孔的布置要保证闸门安全操作和正常运用，应注意以下各点：

(1) 每个泄水管道应有单独的通气孔，不宜共用。

(2) 通气孔下端应设置在紧靠闸门下游的孔口顶部，确保门后在任何流态下均能充分通气，以便有效地减小门后及底缘下游倾斜段的负压；同时也可避免门后在充水过程中形成压缩空气

气的骤然释放。

(3) 通气孔上端出口应远离行人处，并与启闭机室分开，以免在充、排气时影响安全操作。上端出口应有防护设施，以策人员安全及避免人员靠近或杂物进入通气孔内。

(4) 通气孔的管身应力求减少突变、弯头等，以减少通气时的阻力损失。为避免薄壁部分产生振动，裸露及悬臂管道部分不宜过长。

(5) 在气候寒冷地区应设置相应的防冻措施，使通气孔不致因冰冻而堵塞。

#### (二) 通气量分析

明流泄水管道的通气孔通气量问题是包含水相和气相的两相流问题，是多种因素造成的。一般可假定泄水管管道的通气量  $Q_a$  由水面以上的拖挟气量  $Q_{a1}$  和水面以下的掺气量  $Q_{a2}$  组成。水流与气流运动如图 2-64 所示。实际上水面以下的掺气量  $Q_{a2}$  非常小，可忽略不计。

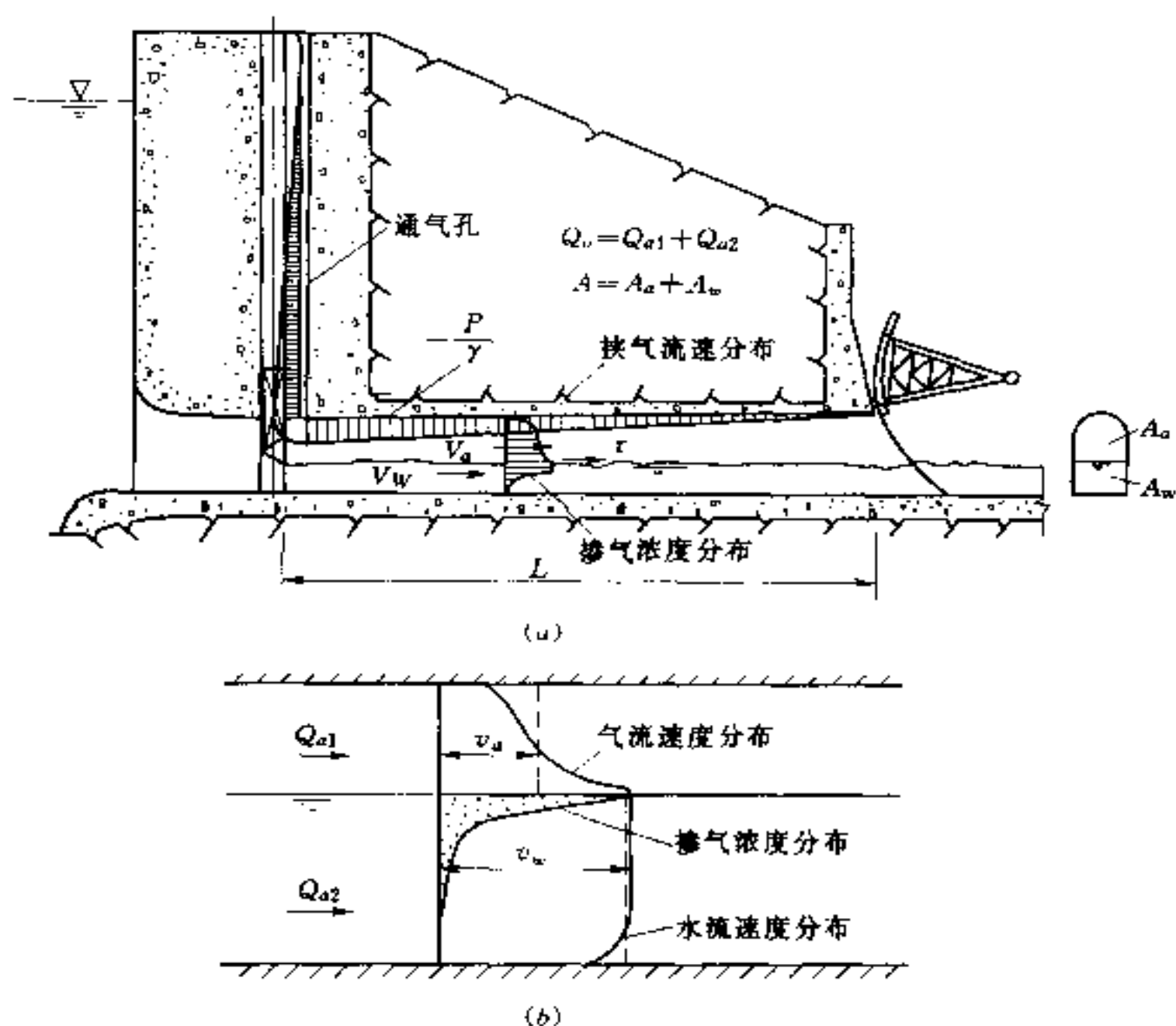


图 2-64 通气孔进气示意图

(a) 泄水管道掺气示意图；(b) 泄水管道横断面掺气示意图

### (三) 通气孔面积计算

#### 1. 泄水管道中的工作闸门或事故闸门

设于泄水管道中的工作闸门或事故闸门，其门后通气孔面积可按下列两种公式计算：

##### 1) 经验公式：

$$\left. \begin{aligned} a &\geq \frac{Q_a}{[v_a]} \\ Q_a &= 0.09 v_w A \\ \frac{a}{A} &= 0.09 \frac{v_w}{[v_a]} \end{aligned} \right\} \quad (2-61)$$

式中： $a$  为通气孔的断面面积， $m^2$ ； $Q_a$  为通气孔的充分通气量，

$\text{m}^3/\text{s}$ ;  $[v_a]$  为通气孔的允许风速,  $\text{m/s}$ , 采用  $40\text{m/s}$  (小型闸门可采用  $50\text{m/s}$ );  $v_w$  为闸门孔口的水流流速,  $\text{m/s}$ ;  $A$  为闸门后管道面积,  $\text{m}^2$ 。

2) 半理论半经验公式:

$$\beta = K(Fr_g - 1)^{[a \ln(Fr_g - 1) + b]} - 1 \quad (2-62)$$

$$Fr_g = \frac{v}{\sqrt{9.81e}}$$

式中:  $\beta$  为气水比,  $\beta = Q_a/Q_w$ ;  $Q_w$  为闸门一定开启高度下的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Fr_g$  为闸门孔口断面的弗劳德数;  $v$  为门后流速,  $\text{m/s}$ ;  $e$  为闸门开启高度,  $\text{m}$ ;  $K$ 、 $a$ 、 $b$  为各区间的系数, 见表 2-18。

表 2-18 半理论半经验公式系数表

| S          | 区间号 | L/h         | Fr <sub>g</sub> 的范围 | $\beta=K(Fr_g-1)^{[a\ln(Fr_g-1)+b]}-1$ |       |        |
|------------|-----|-------------|---------------------|----------------------------------------|-------|--------|
|            |     |             |                     | K                                      | a     | b      |
| A          | I   | 6.10~10.66  | 3.96~20.30          | 1.158                                  | 0.112 | -0.242 |
|            |     |             | 3.87~3.960          | 1.0154                                 | 0.000 | 0.000  |
|            | II  | 10.66~27.40 | 1.94~6.290          | 1.0150                                 | 0.035 | 0.004  |
|            |     |             | 1.61~1.940          | 1.0152                                 | 0.000 | 0.000  |
|            | III | 27.40~35.78 | 1.91~17.190         | 1.042                                  | 0.039 | 0.008  |
|            |     |             | 1.38~1.910          | 1.0413                                 | 0.000 | 0.000  |
|            | IV  | 35.78~77.00 | 1.08~15.670         | 1.1300                                 | 0.028 | 0.144  |
|            | B   | V           | 6.10~10.66          | 4.57~32.590                            | 1.342 | 0.173  |
| 3.49~4.570 |     |             |                     | 1.0153                                 | 0.000 | 0.000  |
| VI         |     | 10.66~27.40 | 1.70~18.06          | 1.0540                                 | 0.019 | 0.013  |
|            |     |             | 1.56~1.70           | 1.0515                                 | 0.000 | 0.000  |
| VII        |     | 27.40~35.78 | 2.45~10.81          | 1.073                                  | 0.053 | 0.070  |
| VIII       |     | 35.78~77.00 | 2.33~8.310          | 1.170                                  | 0.182 | -0.019 |

注 A 为平面闸门的压力管道; B 为弧形闸门的无压管道;  $L$  为闸后管道长度;  $h$  为管道净高度。

## 2. 引水发电管道快速闸门

引水发电管道快速闸门门后通气孔面积, 可按发电管道面积

的 3%~5% 选用；事故闸门的通气孔面积可酌情减少。

### 3. 检修闸门

检修闸门门后通气孔面积，可根据具体情况选定，宜大于或等于充水管面积。

## 第五节 平面闸门启闭力的计算

平面闸门的启闭力计算中，一般先计算出闭门力，确定是否需要加重。对于动水开启的闸门应计算启门力，对于动水关闭静水开启的闸门还应计算持住力。

对于自重小的闸门，在闭门力的计算中，应充分考虑止水橡皮预压力的摩阻力。

计算小型闸门的启闭力时，安全系数应适当加大。

### 一、动水中启闭的闸门启闭力计算

#### 1. 闭门力的计算

$$F_w = n_T(T_{zd} + T_{zs}) - n_G G + P_t \text{ (kN)} \quad (2-63)$$

计算结果为“正”值时，需要加重（加重方式有加重块、水柱或机械下压力等）；为“负”值时，依靠自重可以关闭。

#### 2. 持住力计算

$$F_T = n'_G G + G_j + W_s + P_r - P_t - (T_{zd} + T_{zs}) \text{ (kN)} \quad (2-64)$$

#### 3. 启门力计算

$$F_q = n_T(T_{zd} + T_{zs}) + G_j + W_s + P_r + n'_G G \text{ (kN)} \quad (2-65)$$

以上各式中： $n_T$  为摩擦阻力安全系数，可采用 1.2； $n_G$  为计算闭门力用的闸门自重修正系数，可采用 0.9~1.0； $n'_G$  为计算持住力和启门力用的闸门自重修正系数，可采用 1.0~1.1； $G$  为闸门自重，kN，当有拉杆时应计入拉杆重量；计算闭门力时选用浮重； $W_s$  为作用闸门上的水柱压力，kN； $P_t$  为上托力，kN，包括底缘上托力及止水上托力，底缘上托力见本节； $P_r$  为下吸力，kN，见本节；

$T_{zd}$ 为支承摩阻力, kN;  $T_z$ 为止水摩阻力, kN。  $T_{zd}$ 及  $T_z$ 分别按下式计算:

滑动轴承的滚轮摩阻力:

$$T_{zd} = \frac{P}{R}(f_1 r + f)$$

滚动轴承的滚轮摩阻力:

$$T_{zd} = \frac{Pf}{R} \left( \frac{R_1}{d} + 1 \right)$$

滑动支承摩阻力:

$$T_{zd} = f_2 P$$

止水摩阻力:

$$T_z = f_3 P_z$$

式中:  $P$  为作用在闸门上的总水压力, kN;  $r$  为滚轮轴半径, mm;  $R_1$  为滚动轴承的平均半径, mm;  $R$  为滚轮半径, mm;  $d$  为滚动轴承的滚柱直径, mm;  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  为滑动摩擦系数, 计算持住力应取小值, 计算启门、闭门力应取大值, 可参照附录 C 选用;  $f$  为滚动摩擦力臂, mm, 参照附录 C 选用;  $P_z$  为作用在止水上的压力, kN。

## 二、静水中启闭的闸门启闭力

静水中开启的闸门, 其启闭力计算除计入闸门自重和加重外, 尚应考虑一定的水位差引起的摩阻力。露顶式闸门和电站尾水闸门, 可采用不大于 1m 的水位差; 潜孔式闸门可采用 1~5m 的水位差。对有可能发生淤泥、污物堆积等情况时, 尚应酌情增加。

## 三、上托力和下吸力的计算

作用于闸门的水柱压力和闸门底缘的上托力、下吸力, 可参照式 (2-66) 和式 (2-67) 计算。

### 1. 上托力计算

当采用如图 2-65 所示之底缘形式时, 上托力按下式计算:

$$P_t = \gamma \beta_t H_s D_1 B_z \quad (2-66)$$

式中:  $P_t$  为上托力, kN;  $D_1$  如图 2-64 所示, m;  $B_z$  为两侧止水

距离, m;  $\gamma$  为水的重度, 可采用,  $10\text{kN/m}^3$ ;  $\beta_1$  为上托力系数(当验算闭门力时, 按闸门接近完全关闭时的条件考虑, 取  $\beta_1=1.0$ ; 当计算持住力时, 按闸门的开度考虑,  $\beta_1$  可参照表 2-19 取用)。

表 2-19 中  $\beta_1$  值适于闸后明流流态, 且在应用时: 对泄水道闸门  $0 < a < 0.5H$ ; 对电站快速闸门  $0 < a < a_k$ 。

$a_k$  为电站快速闸门关闭时闸后明、满流转换临界开度。关于临界开度的确定问题, 可根据已成工程类比或参考有关试验研究报告计算。必要时可通过水工模型试验确定。在一般情况下, 可暂按  $a_k=0.5H$  估算,  $H$  为引水道的孔高。

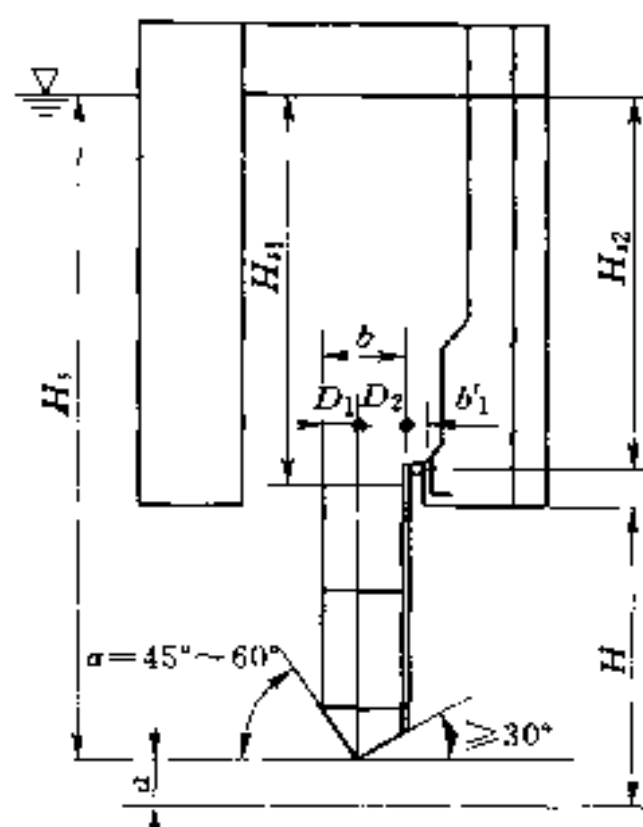


图 2-65 上托力计算简图

表 2-19 上托力系数  $\beta_1$

| $a/D_1$      | 2   | 4   | 8   | 12   | 16   |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|
| $\alpha$ (°) |     |     |     |      |      |
| 60           | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.4  | 0.25 |
| 52.5         | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.15 | —    |
| 45           | 0.6 | 0.4 | 0.1 | 0.05 | —    |

注  $a$  为闸门开启高度, m;  $D_1$  为闸门底止水至上游面板的距离, m;  $\alpha$  为闸门底缘的上游倾角 (参阅图 2-65)。

计算持住力过程线可在上述相对开度范围内进行, 特殊情况应通过水工试验论证。

## 2. 下吸力计算

$$P_s = p_s D_2 B_{zs} \quad (2-67)$$

式中:  $P_s$  为下吸力, kN;  $D_2$  为闸门底缘止水至主梁下翼缘的距离, m;  $p_s$  为闸门底缘  $D_2$  部分的平均下吸强度, 可按  $20\text{kN/m}^2$  计算, 当流态良好、通气充分并符合图 2-2 所示要求时, 可适当减少。

溢流坝闸门和坝内明流底孔闸门当下游倾角大于  $30^\circ$  及流态良好、通气充分时，可不计下吸力。

#### 四、其他

(1) 为防止闸门的底部渗漏，还应验算底止水在底槛上的压应力  $\sigma_y$ ：

$$\sigma_y \geq 0.0012\gamma H_s \text{ (MPa)} \quad (2-68)$$

式中： $\gamma$  为水的重度， $\text{kN/m}^3$ ，可取 10； $H_s$  为由底槛算起的水头，m。

(2) 在多泥沙水流中工作的闸门，计算启闭力时应做专门研究。除考虑水压力外，还应考虑泥沙影响，包括泥沙引起的支承、止水摩阻力；泥沙与闸门间的粘着力和摩擦力；门上淤积泥沙的重量等。粘着系数和摩擦系数可通过试验确定。此外，还应适当加大安全系数，以克服泥沙局部阻塞增加的阻力。

## 第六节 平面钢闸门计算实例

某供水工程，工程等级为 I 等 I 级，其某段渠道上设有节制闸。节制闸工作闸门操作要求为动水启闭，采用平面定轮钢闸门。本闸门结构设计按 SL74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》进行。

### 一、基本资料和结构布置

#### 1. 基本参数

孔口尺寸：6.0m×6.0m（宽×高）；

底槛高程：23.0m；

正常高水位：35.0m；

设计水头：12.0 m；

门叶结构材料：Q235A；

许用应力： $[\sigma] = 0.9 \times 160 = 144 \text{ MPa}$ ， $[\tau] = 0.9 \times 95 = 85.5 \text{ MPa}$ 。

## 2. 总水压力

闸门在关闭位置的总静水压力如图 2-66 所示, 其计算式为:

$$\begin{aligned} P_{\text{总}} &= 0.5 \gamma (2H_0 - h) h B_{\text{净}} \\ &= 0.5 \times 9.8 \times (2 \times 12.0 - 6.05) \times 6.05 \times 6.1 \\ &= 3246 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

## 3. 结构布置

根据孔口尺寸, 初步确定采用四根主梁、三条竖直次梁 (即隔板) 的结构布置, 横隔板间距约为 1.5m。边柱采用双腹板, 行走支承采用筒支轮。考虑闸门要求动水关闭, 故把面板布置在上游, 顶、侧止水布置在下游侧, 这样可以利用水柱关闭, 避免配重。

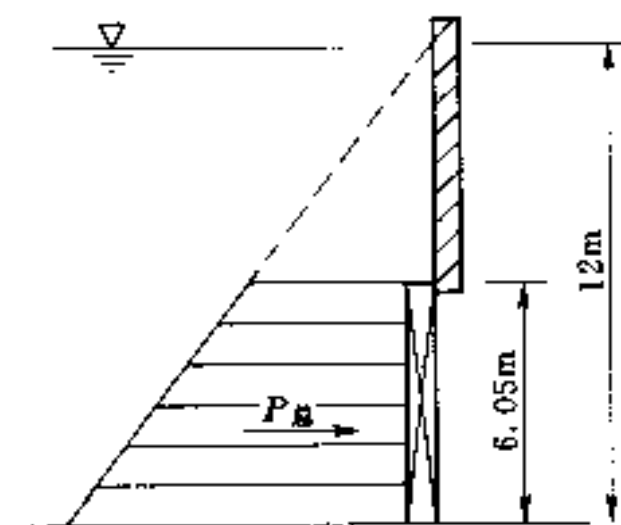


图 2-66 总水压力

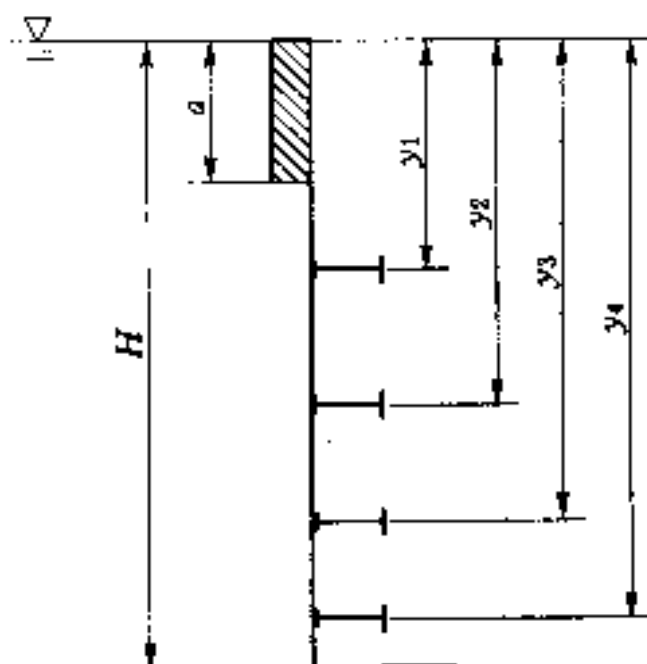


图 2-67 主梁位置

四根主横梁按等荷载原则布置, 见图 2-67, 其位置按下式计算 (数解法):

$$y_k = \frac{2H}{3 \sqrt{n+1}} [(k+\beta)^{1.5} - (k+\beta-1)^{1.5}]$$

$$\beta = \frac{na^2}{H^2 - a^2}$$

这里,  $H=12\text{m}$ ,  $n=4$ ,  $a=6.05\text{m}$ , 则

$$\beta = \frac{4 \times 6.05^2}{12^2 - 6.05^2} = 1.3633$$

$$y_1 = \frac{2 \times 12}{3 \times \sqrt{4 + 1.3633}} [(1 + 1.3633)^{1.5} - (1 + 1.3633 - 1)^{1.5}] = 7.05 \text{ (m)}$$

$$y_2 = \frac{2 \times 12}{3 \times \sqrt{4 + 1.3633}} [(2 + 1.3633)^{1.5} - (2 + 1.3633 - 1)^{1.5}] = 8.76 \text{ (m)}$$

$$y_3 = \frac{2 \times 12}{3 \times \sqrt{4 + 1.3633}} [(3 + 1.3633)^{1.5} - (3 + 1.3633 - 1)^{1.5}] = 10.18 \text{ (m)}$$

$$y_4 = \frac{2 \times 12}{3 \times \sqrt{4 + 1.3633}} [(4 + 1.3633)^{1.5} - (4 + 1.3633 - 1)^{1.5}] = 11.42 \text{ (m)}$$

根据计算结果，为制造方便，主梁的位置与梁格间距略有微调，闸门门叶结构布置如图 2-68 所示。

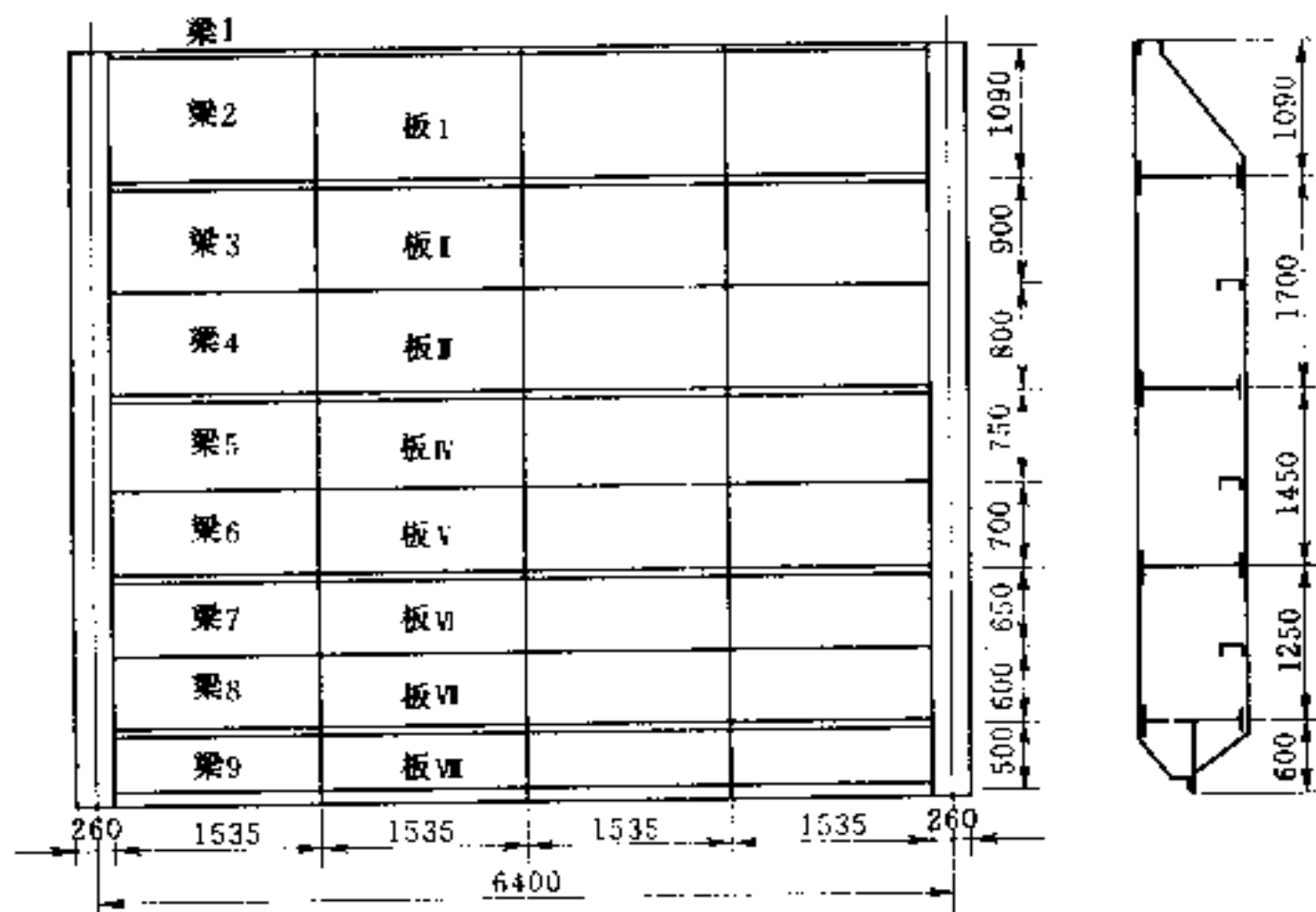


图 2-68 门叶结构简图 (单位: mm)

## 二、门叶结构计算

### (一) 面板

面板厚度按式 (2-10) 初选, 即

$$\delta = a \sqrt{\frac{k_y q}{\alpha [\sigma]}}$$

计算结果见表 2-20。

表 2-20 面板计算结果表

| 区格   | $a$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $b/a$ | $k_y$ | $p$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\alpha$ | $[\sigma]$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(mm) |
|------|-------------|-------------|-------|-------|-----------------------------|----------|------------------------------------|------------------|
| I    | 1010        | 1535        | 1.52  | 0.457 | 0.065                       | 1.5      | 144                                | 11.84            |
| II   | 800         | 1535        | 1.92  | 0.494 | 0.075                       | 1.5      | 144                                | 10.48            |
| III  | 637         | 1535        | 2.41  | 0.499 | 0.083                       | 1.5      | 144                                | 8.82             |
| IV   | 650         | 1535        | 2.36  | 0.499 | 0.091                       | 1.5      | 144                                | 9.42             |
| V    | 537         | 1535        | 2.86  | 0.500 | 0.098                       | 1.5      | 144                                | 8.09             |
| VI   | 550         | 1535        | 2.79  | 0.500 | 0.105                       | 1.5      | 144                                | 8.57             |
| VII  | 437         | 1535        | 3.51  | 0.500 | 0.111                       | 1.4      | 144                                | 7.25             |
| VIII | 400         | 1535        | 3.84  | 0.500 | 0.117                       | 1.4      | 144                                | 6.81             |

根据表 2-20 计算, 选用面板厚度  $\delta=12\text{mm}$  (其中区格 I 实际面板厚度为 20mm)。

## (二) 水平次梁

根据梁格布置, 按相邻间距和之半法计算每根梁上的线荷载, 见表 2-21。

根据表 2-21 计算结果, 由于水平次梁采用相同截面, 因此以线荷载最大的 5 号次梁来进行计算。水平次梁按承受均布荷载的四等跨连续梁计算, 计算简图见图 2-69。

### 1. 荷载与内力

$$q = 68.51 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= 0.077ql^2 = 0.077 \times 68.51 \times 1.535^2 \\ &= 12.43 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_B &= -0.107ql^2 = -0.107 \times 68.51 \times 1.535^2 \\ &= -17.27 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$M_{\max} = M_B = -17.27 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

表 2-21

水平次梁计算表

| 梁号    | 梁轴线处的水压强度 $p$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 梁间距 (m) | $\frac{a_{上}+a_{下}}{2}$ (m) | $q = p \frac{a_{上}+a_{下}}{2}$ (kN/m) |
|-------|------------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 (顶) | 59.1                               | 1.09    | 0.545                       | 32.21                                |
| 2 (主) | 70.0                               |         | 0.995                       | 69.65                                |
| 3     | 79.0                               | 0.9     | 0.85                        | 67.15                                |
| 4 (主) | 87.0                               | 0.8     | 0.775                       | 67.43                                |
| 5     | 94.5                               | 0.75    | 0.725                       | 68.51                                |
| 6 (主) | 101.5                              | 0.7     | 0.675                       | 68.51                                |
| 7     | 108.0                              | 0.65    | 0.625                       | 67.50                                |
| 8 (主) | 114.0                              | 0.6     | 0.55                        | 62.70                                |
| 9 (底) | 119.0                              | 0.5     | 0.35                        | 41.65                                |

注 表中主梁荷载为将主梁视为次梁的计算数据, 不作为主梁结构计算的依据。

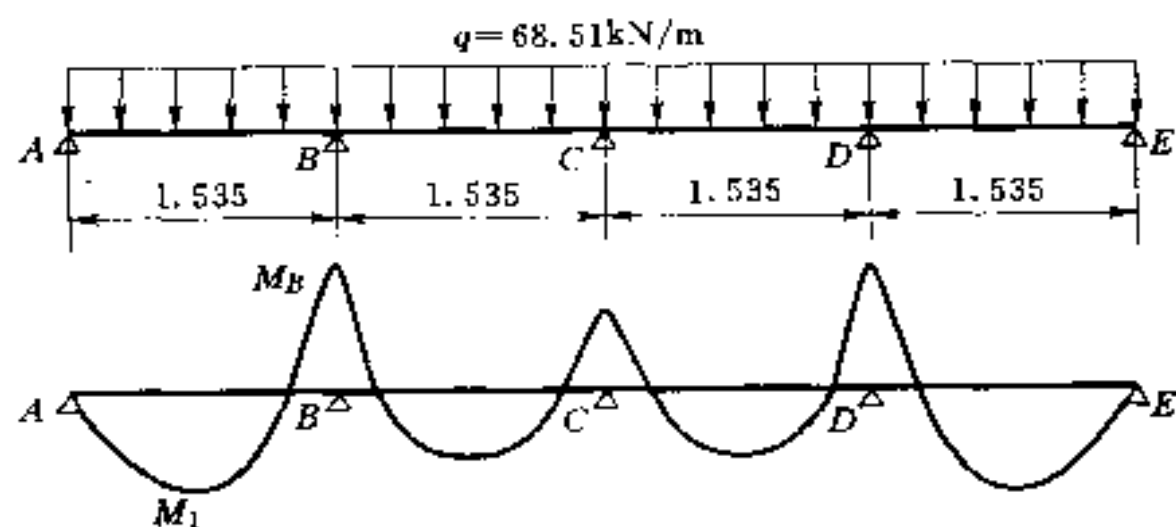


图 2-69 水平次梁计算简图 (单位: m)

## 2. 截面特性 (支座截面)

面板参与次梁作用的有效宽度  $B = \xi_2 b$ , 其中  $b = (b_1 + b_2) / 2 = (700 + 750) / 2 = 725$  mm。

弯矩零点间距  $l_0 \approx 0.4l = 0.4 \times 1535 = 614$  mm, 则  $l_0/b = 614/725 = 0.847$ , 查表得  $\xi_2 = 0.252$ , 则

$$B = \xi_2 b = 0.252 \times 725 = 183 \text{ mm}。$$

水平次梁采用 [16a;  $W_x = 108 \text{ cm}^3$ ,  $I_x = 866 \text{ cm}^4$ ,  $A = 21.962 \text{ cm}^2$ ,  $t = 10.0 \text{ mm}$ ,  $b = 63 \text{ mm}$ ,  $d = 6.5 \text{ mm}$ 。

支座 B 处截面 (图 2-70) 的截面特性:

$$A = 21.962 + 18.3 \times 1.2 = 21.962 + 21.96 \\ = 43.922 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\bar{y} = \frac{21.962 \times 8.6}{43.922} = 4.3 \text{ (cm)}$$

$$I_x = 866 + 21.962 \times 4.3^2 + 21.96 \times 4.3^2 \\ = 1678 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$W_{\max} = 1678 / 4.9 = 342 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_{\min} = 1678 / 12.3 = 136 \text{ (cm}^3\text{)}$$

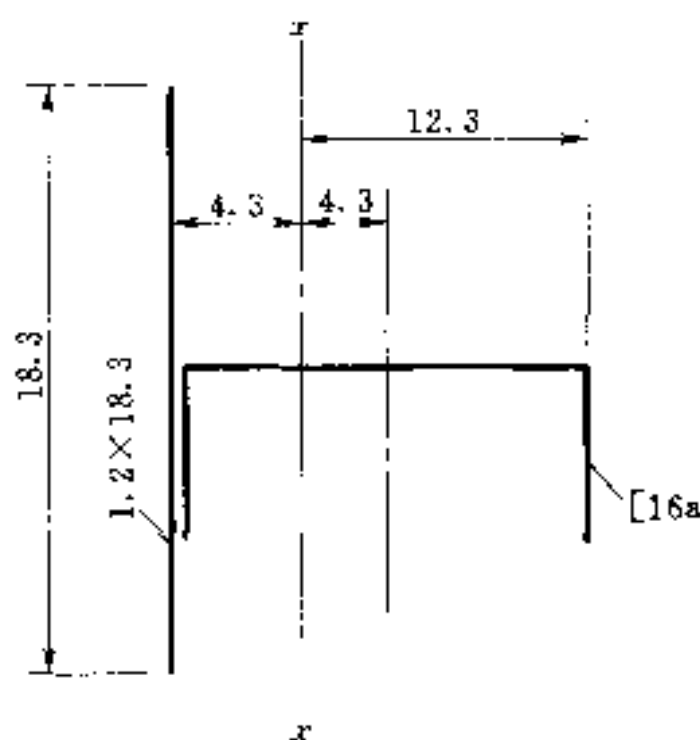


图 2-70 次梁截面 (单位: cm)

### 3. 强度验算

前翼缘正应力为

$$\sigma_1 = \frac{M_{\max}}{W_{\max}} = \frac{17.27 \times 10^6}{342 \times 10^3} = 50.5 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

后翼缘正应力为

$$\sigma_2 = \frac{M_{\max}}{W_{\min}} = \frac{17.27 \times 10^6}{136 \times 10^3} = 127.0 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

### 4. 挠度验算, 最大挠度 $f_{\max}$

$$f_{\max} = 0.632 \frac{ql^4}{EI} = 0.632 \times \frac{68.51 \times 1535^4}{100 \times 2.1 \times 10^5 \times 1678 \times 10^4} \\ = 0.68 \text{ (mm)}$$

$$[f] = \frac{1}{250}l = \frac{1535}{250} = 6.14 \text{ (mm)}$$

$$f_{\max} < [f]$$

### (三) 主梁

因面板布置在上游，止水布置在下游，主梁除承受均布荷载外，还承受侧向水压力作用在边柱腹板上引起的轴向力。主梁按简支梁计算，其计算简图见图 2-71。

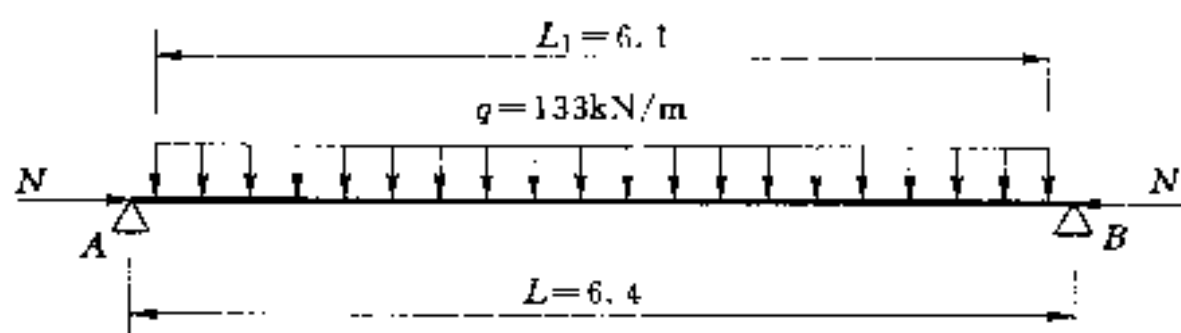


图 2-71 主梁计算简图 (单位: m)

#### 1. 荷载及内力

主梁为等荷载布置，其线荷载为

$$q = \frac{P_{\text{总}}}{4 \times 6.1} = \frac{3246}{4 \times 6.1} = 133 \text{ (kN/m)}$$

$q$  作用下的最大弯矩、剪力：

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{qL_1}{2} \left( \frac{L}{2} - \frac{L_1}{4} \right) = \frac{133 \times 6.1}{2} \times \left( \frac{6.4}{2} - \frac{6.1}{4} \right) \\ &= 680 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$Q = \frac{qL_1}{2} = \frac{1}{2} \times 133 \times 6.1 = 406 \text{ (kN)}$$

侧向水压力产生的轴向力  $N$  为

$$N = qh = 133 \times (0.7 + 0.05) = 100 \text{ (kN)}$$

#### 2. 截面特性

(1) 面板参与主梁作用的有效宽度  $B$  (按 6 号梁) 为

$$B = \xi_1 b$$

且  $B \leq 60\delta + b_l$ ,  $b = \frac{1}{2} \times (65 + 70) = 67.5 \text{ cm}$ ,  $l_0 = 640 \text{ cm}$ , 则  $l_0/b$

$l_0/b = 640/67.5 = 9.48$ , 查表得  $\xi_1 = 0.98$ , 则

$$B = 0.98 \times 67.5 \approx 66 \text{ (cm)}$$

$$\text{又} \quad B \leq 60\delta + b_t = 60 \times 1.2 + 20 = 92 \text{ (cm)}$$

所以取  $B=66\text{cm}$ 。

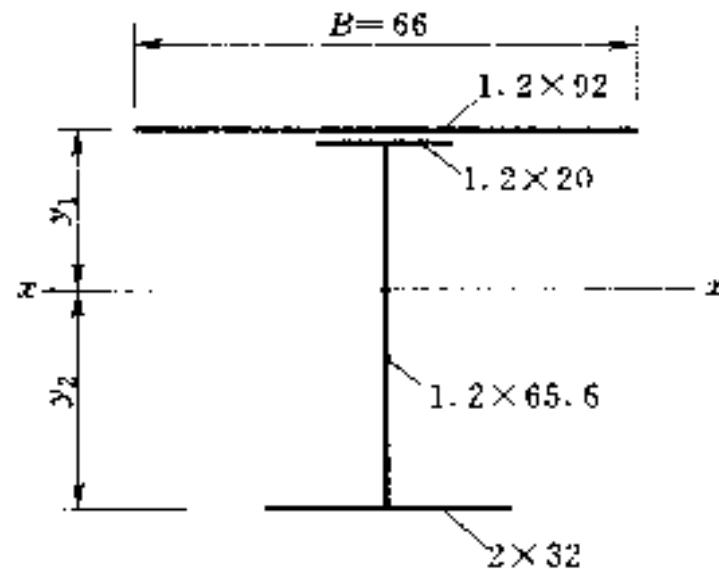


图 2-72 主梁截面 (单位: cm)

(2) 主梁截面如图 2-72 所示, 其截面特性为

$$A = 1.2 \times 66 + 1.2 \times 20 + 1.2 \times 65.6 + 2 \times 32$$

$$= 79.2 + 24 + 78.72 + 64 = 245.92 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$y_1 = (79.2 \times 0.6 + 24 \times 1.8 + 78.72 \times 35.2$$

$$+ 64 \times 69) / 245.92 = 29.6 \text{ (cm)}$$

$$y_2 = 70 - y_1 = 70 - 29.6 = 40.4 \text{ (cm)}$$

$$I_x = 79.2 \times 29.0^2 + 24 \times 27.8^2 + \frac{1.2 \times 65.6^3}{12}$$

$$+ 78.72 \times 5.6^2 + 64 \times 39.4^2$$

$$= 215205 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$W_{\max} = \frac{215205}{29.6} = 7270 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_{\min} = \frac{215205}{40.4} = 5327 \text{ (cm}^3\text{)}$$

中和轴处:

$$S = 2 \times 32 \times 39.4 + 1.2 \times 38.4^2 / 2 = 3406 \text{ (cm}^3\text{)}$$

3. 强度验算

主梁 6 属于偏心受压构件:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x}$$

轴向力  $N$  产生的偏心弯矩为  $M_1$ :  $M_1 = eN$ , 又  $e = (70 + 5) / 2 - 29.6 = 7.9\text{cm}$ , 所以有

$$M_1 = eN = 7.9 \times 100 = 790(\text{kN} \cdot \text{cm}) \approx 8(\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$M_x = M_{\max} - M_1 = 680 - 8 = 672(\text{kN} \cdot \text{m})$$

前翼缘正应力:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{100 \times 10^3}{245.92 \times 10^2} + \frac{672 \times 10^6}{7270 \times 10^3} \\ &= 96.5(\text{MPa})(\text{压}) < [\sigma]\end{aligned}$$

后翼缘正应力:

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \frac{100 \times 10^3}{245.92 \times 10^2} - \frac{672 \times 10^6}{5327 \times 10^3} \\ &= -122.1(\text{MPa})(\text{拉}) < [\sigma]\end{aligned}$$

剪应力:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{QS}{I\delta} = \frac{406 \times 10^3 \times 3406 \times 10^3}{215205 \times 10^4 \times 12} \\ &= 53.5(\text{MPa}) < [\tau]\end{aligned}$$

#### 4. 挠度

为了简化起见, 可将主梁视为在计算跨度的全跨内受均布水压力。受均布荷载的等截面简支梁, 其最大挠度:

$$\begin{aligned}f_{\max} &= \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{EI} = \frac{5 \times 133 \times 6400^4}{384 \times 2.1 \times 10^5 \times 215205 \times 10^4} \\ &= 6.43(\text{mm})\end{aligned}$$

$$[f] = \frac{l_0}{750} = \frac{6400}{750} = 8.53(\text{mm})$$

$$f_{\max} < [f]$$

#### 5. 稳定性

主梁腹板高度与厚度之比  $h_0/\delta < 80$ , 满足稳定性要求, 可不必配置加劲肋板。

#### 6. 面板局部弯曲与主梁整体弯曲的折算应力

从前面的面板计算可见区格 II 所需的板厚较大, 其  $b/a =$

1.7992 > 1.5, 只需按下式验算长边中点的折算应力:

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox})$$

$$\leq 1.1\alpha[\sigma]$$

其中  $\sigma_{my} = \frac{k_y p a^2}{\delta^2} = \frac{0.494 \times 0.075 \times 80^2}{1.2^2}$

$$= 164.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{mx} = \mu \sigma_{my} = 0.3 \times 164.7 = 49.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$\sigma_{ox}$  为对应于面板验算点的主梁上翼缘的整体弯曲应力, 根据前面的计算, 区格 I 长边中点处主梁  $M_1$  为

$$M_1 = \frac{q}{2} [lx - (x - a)^2]$$

$$= \frac{133}{2} \times [6.1 \times 2.43 - (2.43 - 0.15)^2]$$

$$= 640 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$\sigma_{ox} = \sigma_1 = \frac{M_1}{W_{\max}} = \frac{640 \times 10^6}{7270 \times 10^3}$$

$$= 88.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

则

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox})$$

$$= \sqrt{164.7^2 + (49.4 - 88.0)^2} - 164.7 \times (49.4 - 88.0)$$

$$= 187.0 \text{ (N/mm}^2\text{)} < 1.1\alpha[\sigma] = 1.1 \times 1.5 \times 144$$

$$= 237.6 \text{ (MPa)}$$

满足强度要求。

## 7. 顶主梁

由于顶主梁前、后翼缘均为面板, 垂直方向的承载能力较大, 水柱作用下主梁垂直方向的弯矩引起的应力不需要验算, 这里只计算顶主梁腹板在水柱作用下的强度。

按四边固接计算,  $a = 656 \text{ mm}$ ,  $b = 1535 \text{ mm}$ ,  $\delta = 12 \text{ mm}$ , 腹板上水压强度  $q = 0.07 \text{ N/mm}^2$ ,  $b/a = 2.34$ ,  $\alpha = 1.5$ , 查表得  $k_y =$

0.499, 则

$$\begin{aligned}\sigma_{my} &= \frac{k_y q a^2}{\delta^2} = \frac{0.499 \times 0.07 \times 656^2}{12^2} \\ &= 104.39 \text{ (MPa)} < 1.1\alpha[\sigma]\end{aligned}$$

#### (四) 竖直次梁 (隔板)

竖直次梁按承受梯形荷载的简支梁计算。根据分析, 主梁 2 与 4 之间的竖直次梁段承受的荷载最大, 其计算简图见图 2-73。

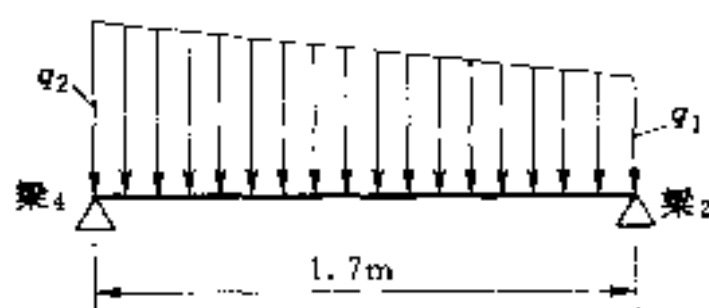


图 2-73 竖直次梁计算简图

#### 1. 荷载及内力

$$q_1 = 70.0 \times 1.535 = 107.45 \text{ (kN/m)}$$

$$q_2 = 87.0 \times 1.535 = 133.545 \text{ (kN/m)}$$

$$\begin{aligned}\bar{q} &= \frac{1}{2}(q_1 + q_2) = \frac{1}{2} \times (107.45 + 133.545) \\ &= 120.50 \text{ (kN/m)}\end{aligned}$$

跨中弯矩:

$$\begin{aligned}M_{\max} &= \frac{1}{8}\bar{q}l^2 = \frac{1}{8} \times 120.50 \times 1.7^2 \\ &= 43.53 \text{ (kN} \cdot \text{m)}\end{aligned}$$

支座剪力:

$$Q = \frac{1}{2}\bar{q}l = \frac{1}{2} \times 120.50 \times 1.7 = 102.43 \text{ (kN)}$$

#### 2. 截面特性

因为  $b=153.5\text{cm}$ ,  $l_0=170\text{cm}$ ,  $l_0/b=170/153.5=1.107$ , 查表得  $\xi_1=0.439$ , 面板参与竖直次梁作用的有效宽度  $B$  计算为

$$B = \xi_1 b = 0.439 \times 153.5 \approx 67 \text{ (cm)}$$

$$\text{又} \quad B \leq 60\delta + b_t = 60 \times 0.8 + 0.8 = 48.8 \text{ (cm)}$$

所以取  $B=48.8\text{cm}$ 。

截面如图 2-74 所示，形心轴位置：

$$y_1 = \frac{1.2 \times 48.8 \times 0.6 + 0.8 \times 66.8 \times 34.6 + 2 \times 20 \times 69}{1.2 \times 48.8 + 0.8 \times 66.8 + 2 \times 20} \\ = 30.6(\text{cm})$$

$$y_2 = 70 - y_1 = 39.4 \text{ cm}$$

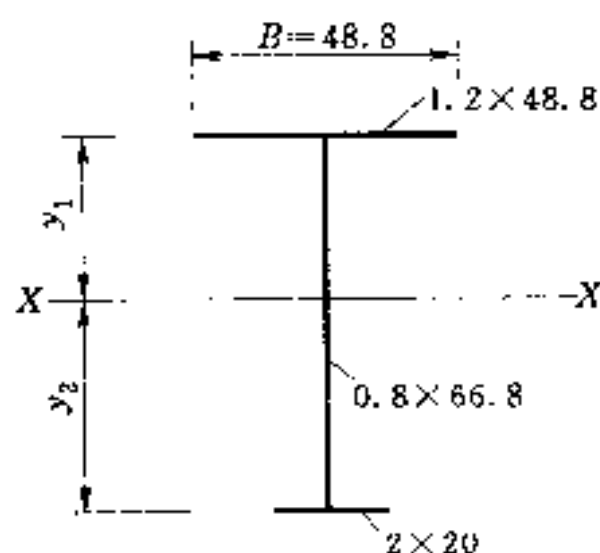


图 2-74 竖直次梁截面  
(单位: cm)

对  $x-x$  轴的惯性矩：

$$I_x = 1.2 \times 48.8 \times 30^2 + \frac{0.8 \times 66.8^3}{12} + 0.8 \times 66.8 \times 4.0^2 \\ + 2 \times 20 \times 38.4^2 = 132413 (\text{cm}^4)$$

前翼缘抗弯模数：

$$W_{\max} = \frac{132413}{30.6} = 4334 (\text{cm}^3)$$

后翼缘抗弯模数：

$$W_{\min} = \frac{132413}{39.4} = 3357 (\text{cm}^3)$$

中和轴一侧静面矩：

$$S_0 = 2 \times 20 \times 38.4 + 0.8 \times \frac{1}{2} \times 37.4^2 = 2095.5 (\text{cm}^3)$$

3. 强度验算

前翼缘正应力：

$$\sigma_1 = \frac{43.53 \times 10^6}{4334 \times 10^5} = 10.04 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

后翼缘正应力:

$$\sigma_2 = \frac{43.53 \times 10^6}{3357 \times 10^5} = 12.97 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

中和轴处剪应力:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{QS}{I\delta} = \frac{102.43 \times 10^3 \times 2095.5 \times 10^3}{132413 \times 10^4 \times 8} \\ &= 20.26 \text{ (MPa)} < [\tau] \end{aligned}$$

#### (五) 边梁

##### 1. 荷载与内力

边梁承受各主梁荷载传来的集中荷载及水柱引起的轴向力, 按偏心受压构件计算, 其计算简图见图 2-75。

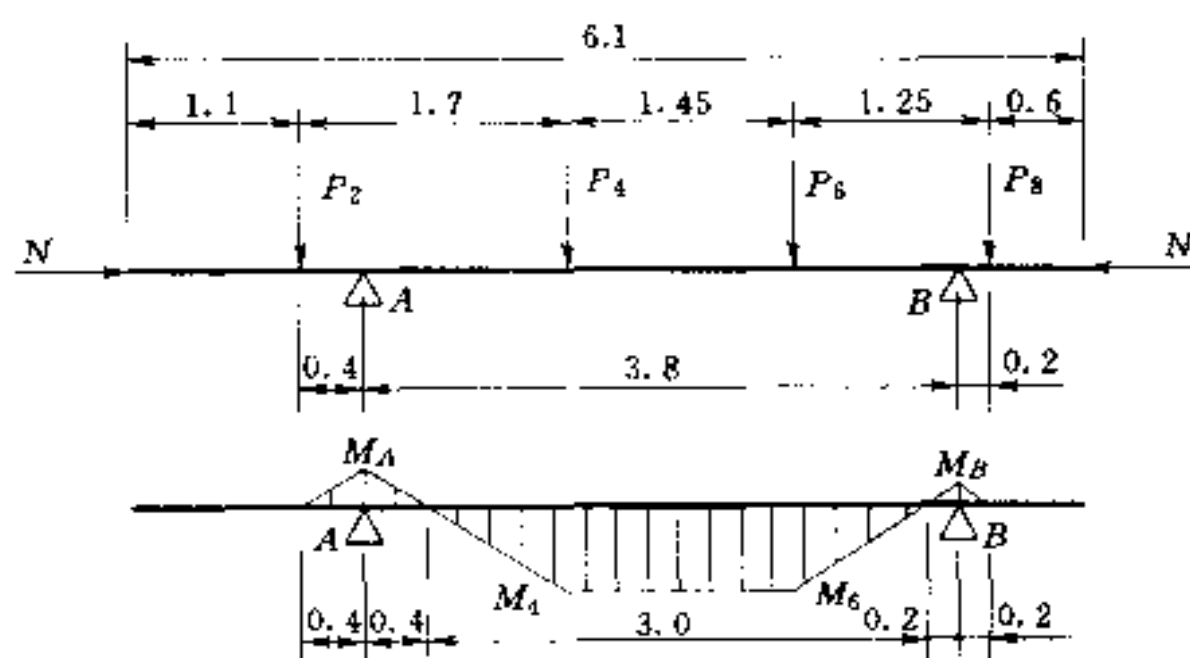


图 2-75 边梁计算简图及弯矩图 (单位: m)

主梁作用在边梁上的集中荷载:

$$P_2 = P_4 = P_6 = P_8 = P_{\text{总}} / 4 / 2 = 3246 / 4 / 2 = 405.75 \text{ (kN)}$$

$$R_A = 806.16 \text{ kN}$$

$$R_B = 816.84 \text{ kN}$$

水柱压力:

$$W = 0.75 \times 6.1 \times 7 \times 9.8 = 313.85 \text{ (kN)}$$

因此边梁在挡水时的轴向压力:

$$N = W/2 = 313.85/2 = 156.93 \text{ (kN)}$$

## 2. 边梁的内力

$$M_A = P_2 \times 0.4 = 405.75 \times 0.4 = 162.3 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= R_A \times 1.3 - P_2 \times 1.7 \\ &= 806.16 \times 1.3 - 405.75 \times 1.7 \\ &= 358.23 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_6 &= R_B \times 1.05 - P_8 \times 1.25 \\ &= 816.84 \times 1.05 - 405.75 \times 1.25 \\ &= 350.49 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$M_B = P_8 \times 0.2 = 405.75 \times 0.2 = 81.15 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$Q_{B右} = P_8 = 405.75 \text{ (kN)}$$

$$Q_{B左} = R_B - P_8 = 816.84 - 405.75 = 411.09 \text{ (kN)}$$

$$Q_{A右} = R_A - P_2 = 806.16 - 405.75 = 400.41 \text{ (kN)}$$

$$Q_{A左} = P_2 = 405.75 = 405.75 \text{ (kN)}$$

## 3. 截面特性计算

边梁截面见图 2-76，面板有效宽度：

$$B = B_1 + 26 + B_2$$

$$\text{自由端取 } B'_1 = 15\delta = 15 \times 1.2 = 18 \text{ (cm)}$$

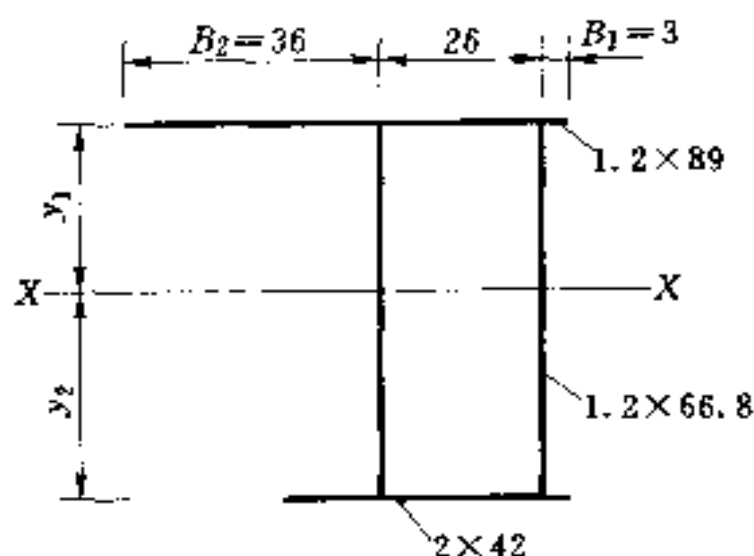


图 2-76 边梁截面 (单位: cm)

因为  $B_1 < B'_1$ ，所以  $B_1$  取实际宽度 3cm。又因为  $B_2 = \xi_1 \times b/2$ ， $b = 153.5 \text{ cm}$ ， $l_0 = 320 \text{ cm}$ ， $l_0/b = 2.08$ ，查表得  $\xi_1 = 0.71$ ，则

$$B_2 = 0.71 \times 153.5/2 = 54.5 \text{ cm}$$

又  $B_2 \leq 30\delta = 36 \text{ cm}$

取  $B_2 = 36 \text{ cm}$ , 所以

$$B = B_1 + 26 + B_2 = 3 + 26 + 36 = 65 \text{ (cm)}$$

截面特性:

$$A = 65 \times 1.2 + 2 \times 1.2 \times 66.8 + 2 \times 42$$

$$= 78 + 160.32 + 84 = 322.32 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$y_1 = \frac{78 \times 0.6 + 80.16 \times 2 \times 34.6 + 84 \times 69}{322.32}$$

$$= 35.3 \text{ (cm)}$$

$$y_2 = 70 - y_1 = 70 - 35.3 = 34.7 \text{ (cm)}$$

$$I_x = 78 \times 34.7^2 + 2 \times 80.16 \times 0.9^2 + \frac{2 \times 1.2 \times 66.8^3}{12}$$

$$+ 84 \times 33.7^2 = 249062 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$W_1 = \frac{I_x}{y_1} = \frac{249062}{35.3} = 7056 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_2 = \frac{I_x}{y_2} = \frac{249062}{34.7} = 7178 \text{ (cm}^3\text{)}$$

中和轴处的静面矩  $S$  为

$$S = 84 \times 33.7 + 2 \times \frac{1.2 \times 32.7^2}{2} = 4114 \text{ (cm}^3\text{)}$$

#### 4. 强度验算

按偏心受压构件计算, 偏心距  $e_y = 70/2 - 35.3 = -0.3 \text{ cm}$  比较小, 可忽略轴向力  $N$  产生的弯矩。

A 支座处有最大负弯矩:  $M_A = 162.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

4-4 断面 (即主梁 4 所在的位置) 有最大正弯矩:  $M_4 = 358.23 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

(1) A 支座断面:

前翼缘正应力:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{N}{A} - \frac{M_A}{W_1} = \frac{156.93 \times 10^3}{322.32 \times 10^2} - \frac{162.3 \times 10^6}{7056 \times 10^3} \\ &= -18.1 \text{ (MPa)} \text{ (拉)} \end{aligned}$$

后翼缘正应力:

$$\sigma_2 = \frac{N}{A_j} + \frac{M_A}{W_2} = \frac{156.93 \times 10^3}{322.32 \times 10^2} + \frac{162.3 \times 10^6}{7178 \times 10^3} \\ = 27.5 \text{ (MPa) (压)}$$

(2) 4-4 断面:

前翼缘正应力:

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M_1}{W_1} = \frac{156.93 \times 10^3}{322.32 \times 10^2} + \frac{358.23 \times 10^6}{7056 \times 10^3} \\ = 55.6 \text{ (MPa) (拉)}$$

后翼缘正应力:

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M_1}{W_2} = \frac{156.93 \times 10^3}{322.32 \times 10^2} - \frac{358.23 \times 10^6}{7178 \times 10^3} \\ = -45.0 \text{ (MPa) (拉)}$$

(3) 偏心受压的稳定计算。弯矩平面内的稳定性计算式为

$$\varepsilon = \frac{M}{N} \times \frac{A}{W}$$

因为  $M=M_1=358.23\text{kN} \cdot \text{m}$ ,  $W=7489\text{cm}^3$ ,  $N=160.13\text{kN}$ ,  $A=351.12\text{cm}^2$ , 所以

$$\varepsilon = \frac{358.23 \times 10^6}{156.93 \times 10^3} \times \frac{322.32 \times 10^2}{7056 \times 10^3} = 10.43 < 30$$

按  $\sigma = \frac{N}{\varphi_p A} < [\sigma]$  验算, 因为  $\lambda = \frac{l_0}{r_x}$ ,  $l_0=380\text{cm}$  (两端铰接  $l_0=l$ ),  $r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{249062}{322.32}} = 27.8 \text{ (cm)}$ ,  $\lambda = \frac{380}{27.8} = 13.67$ , 查表得

$\varphi_p=0.100$ , 所以

$$\sigma = \frac{156.93 \times 10^3}{0.100 \times 322.32 \times 10^2} = 48.7 \text{ (MPa)}$$

整体稳定。

边梁侧面受主梁、次梁及面板的支撑, 因此其弯矩平面外的稳定性无须验算。

### 三、简支轮计算

最大轮压:  $P=1.1R_B=1.1 \times 816.84 \approx 900 \text{ kN}$  (式中 1.1 为动

载系数); 轮直径:  $\phi 80\text{cm}$ ; 踏面宽度:  $b=12\text{cm}$ ; 轮轴:  $\phi 12\text{cm}$ 。

### 1. 轮子的接触应力

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= 0.418 \sqrt{\frac{PE}{bR}} = 0.418 \times \sqrt{\frac{900 \times 10^3 \times 2.06 \times 10^5}{12 \times 40 \times 10^2}} \\ &= 822 \text{ (MPa)}\end{aligned}$$

轮子材料选用 ZG310—570,  $\sigma_s=310\text{MPa}$ , 则

$$\sigma_{\max} \leq 3.0\sigma_s = 3.0 \times 310 = 930 \text{ (MPa)}$$

满足强度要求。

### 2. 轮轴的弯曲应力

轮轴的弯曲应力计算简图见图 2-77。

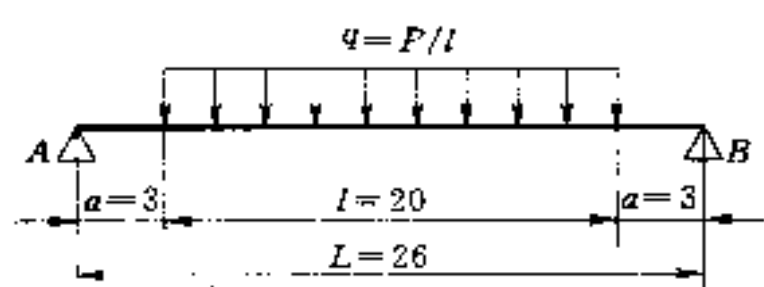


图 2-77 轮轴计算简图 (单位: cm)

轴径  $d=12\text{cm}$ , 支承跨距  $L=26\text{cm}$ , 轴套长度  $l=20\text{cm}$ , 则

$$a = \frac{L-l}{2} = \frac{26-20}{2} = 3 \text{ (cm)}$$

弯曲应力:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P(4a+l)}{0.785d^3} = \frac{900 \times 10 \times (4 \times 3 + 20)}{0.785 \times 12^3} \\ &= 212 \text{ (N/mm}^2\text{)}\end{aligned}$$

轮轴材料选用 40Cr (调质处理),  $[\sigma] = 320\text{MPa}$

### 3. 轮轴的剪应力

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{8P}{3\pi d^2} = \frac{8 \times 900 \times 10}{3 \times 3.14 \times 12^2} \\ &= 53.1 \text{ (N/mm}^2\text{)} < [\tau] = 215 \text{ MPa}\end{aligned}$$

### 4. 轴套的承压应力

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{dl} = \frac{900 \times 10}{12 \times 20}$$

$$= 37.5 (\text{N/mm}^2) < [\sigma_{cg}] = 40 \text{ MPa}$$

轴套用钢基铜塑复合材料。

5. 轴承座的局部紧接承压应力

$$\begin{aligned}\sigma_{cj} &= \frac{P}{2\delta d} = \frac{900 \times 10}{2 \times 5.2 \times 12} \\ &= 72.1 (\text{N/mm}^2) < [\sigma_{cj}] = 80 \text{ MPa}\end{aligned}$$

#### 四、轨道的计算

滚轮荷载  $P=900\text{kN}$ ，轨道材料为 ZG310—570，轨道截面尺寸如图 2-78 所示。

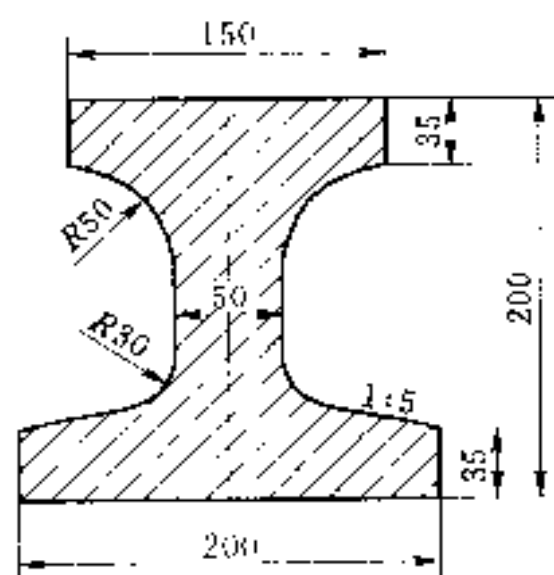


图 2-78 轨道截面尺寸  
(单位: cm)

1. 轨道底板混凝土承压应力

$$\sigma_h = \frac{P}{3h_k B_k} = \frac{900 \times 10}{3 \times 20 \times 20} = 7.5 (\text{N/mm}^2)$$

二期混凝土为 C25，其  $[\sigma_h] = 9 \text{ N/mm}^2$ 。

2. 轨道横断面弯曲应力

$$\sigma = \frac{3Ph_k}{8W_k}$$

$$\begin{aligned}I_k &\approx 3.5 \times 20 \times 7.45^2 + 3.5 \times 15 \times 9.05^2 \\ &\quad + 5 \times 13 \times 0.8^2 + 5 \times 13^3/12 \\ &= 9142 (\text{cm}^4)\end{aligned}$$

$$W_k \approx 9142/10.8 = 849 (\text{cm}^3)$$

$$\sigma = \frac{3Ph_k}{8W_k} = \frac{3 \times 900 \times 10 \times 20}{8 \times 849}$$

$$= 79.5 (\text{N/mm}^2) < [\sigma] = 140 \text{ N/mm}^2$$

3. 轨道颈部的局部承压应力

$$\sigma_{cd} = \frac{P}{3st} = \frac{900 \times 10}{3 \times 3.5 \times 5}$$

$$= 171 (\text{N/mm}^2) < [\sigma_{cd}] = 200 \text{ N/mm}^2$$

4. 轨道底板的弯曲应力

$$\sigma = 3\sigma_h \frac{c^2}{\delta^2} = 3 \times 7.5 \times \frac{(100 - 25)^2}{35^2}$$

$$= 103 (\text{N/mm}^2) < [\sigma] = 140 \text{ N/mm}^2$$

## 五、启闭力的计算

启闭力的计算简图见图 2-79。

总水压力  $P_{\text{总}} = 3246 \text{ kN}$ , 自重  $G = 145 \text{ kN}$ , 水封摩阻力:  $T_{zs} = f_3 P_{zs}$ 。

水封因预压而受到的压力:

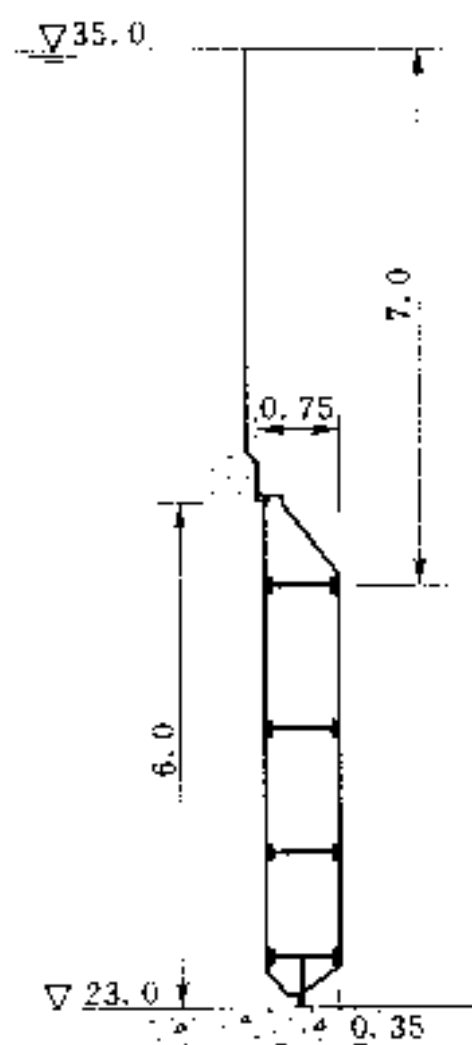


图 2-79 启闭力计算简图  
(单位: m)

$$P_{zs1} = 3.15 \times 6 \times 3 = 56.7 \text{ (kN)}$$

水封受到的水压力:

$$P_{zs2} = 0.55 \times (2 \times 6 \times 9 + 6 \times 6) = 79.2 \text{ (kN)}$$

则

$$\begin{aligned} T_{zs} &= f_3(P_{zs1} + P_{zs2}) = 0.5 \times (56.7 + 79.2) \\ &= 67.95 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

滑动轴承的滚轮摩阻力  $T_{zd} = P_{\Sigma} f$ 。

$$f = \frac{1}{400} \times \left( 0.14 \times \frac{120}{2} + 1 \right) \approx 0.025$$

$$T_{zd} = P_{\Sigma} f = 3246 \times 0.025 = 81.15 \text{ (kN)}$$

作用在闸门上的水柱压力  $W_s = F_{sz} - F_{\#}$ 。

$$F_{sz} = 0.4 \times 6.1 \times 7 \times 9.8 = 167.4 \text{ (kN)}$$

$$F_{\#} = 0.35 \times 6.1 \times 4.4 \times 9.8 = 92.1 \text{ (kN)}$$

$$W_s = F_{sz} - F_{\#} = 167.4 - 92.1 = 75.3 \text{ (kN)}$$

1. 闭门力的计算

$$\begin{aligned} F_w &= n_T(T_{zd} + T_{zs}) - n_G G - W_s \\ &= 1.2 \times (81.15 + 67.95) - 0.9 \times 145 - 75.3 \\ &= -26.9 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

2. 启门力的计算

$$\begin{aligned} F_q &= n_T(T_{zd} + T_{zs}) + n'_G G + W_s \\ &= 1.2 \times (81.15 + 67.95) + 1.1 \times 145 + 75.3 \\ &= 413.72 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

启闭机选用 QPQ2×250kN 型。

## 第三章 弧形钢闸门

### 第一节 弧形钢闸门的结构布置

弧形钢闸门是应用非常广泛的一种门型，具有结构简单、启闭力小、水流条件好等优点，适用于泄水建筑物上作为工作门之用。与平面钢闸门一样，它也是由门叶部分、门槽埋件与启闭机械三部分组成。

弧形闸门有潜孔式和露顶式两种。目前国内露顶式弧形闸门孔口尺寸达  $19\text{ m} \times 23\text{ m}$ （相应设计水头  $23\text{ m}$ ）；潜孔式弧形闸门封堵面积一般达  $48 \sim 63\text{ m}^2$ ，水头一般达  $80 \sim 90\text{ m}$ ，最大封堵面积达  $195\text{ m}^2$ （相应设计水头  $37\text{ m}$ ），最大设计水头达  $142\text{ m}$ 。

弧形闸门的门叶靠启闭机械的牵引可绕固定的水平铰轴转动，其启门时只需克服闸门自重以及止水与铰轴的摩阻力对轴心的阻力矩，因而弧形闸门启闭省力、迅速、运转可靠；由于弧形闸门不需门槽，泄流时水流流态良好。因此，弧形闸门普遍应用作高水头工作闸门及需要局部开启控制流量的工作闸门。

#### 一、总体布置

弧形闸门的铰轴一般布置在弧形面板的曲率中心，故作用在面板上的全部水压力通过铰轴中心。当孔口关闭时，水压力经门叶梁系及支臂而传给支铰，最后把水压力传到闸墩上。

露顶式弧形闸门面板曲率半径  $R$  一般可取门高  $H$  的  $1.0 \sim 1.5$  倍，潜孔式弧形闸门面板曲率半径  $R$  一般可取门高  $H$  的  $1.1 \sim 2.2$  倍。

弧形闸门支铰宜布置在过流时支铰不受水流及漂浮物冲击的高程上，溢流坝上的露顶式弧形闸门，支铰位置可布置在闸门底槛以上  $(0.50 \sim 0.75)H$  处；水闸的露顶式弧形闸门，支铰位置

可布置在闸门底槛以上  $(0.67 \sim 1.0) H$  处；潜孔式弧形闸门，支铰位置可布置在底槛以上大于  $1.1H$  处。支铰位置越高， $R$  值也应随着增大，否则静水压力会加大，门不稳定，底缘布置困难。当支臂加长时，闸墩也将相应地加长，但启闭力可以减小。

## 二、弧形闸门框架形式

弧形闸门根据主梁的布置可分为主横梁式和主纵梁式。

对宽高比较大的弧形闸门，宜采用主横梁式结构，见图 3-1。其主要由门叶、支臂、支铰及止水、吊耳等组成。水平主梁与左

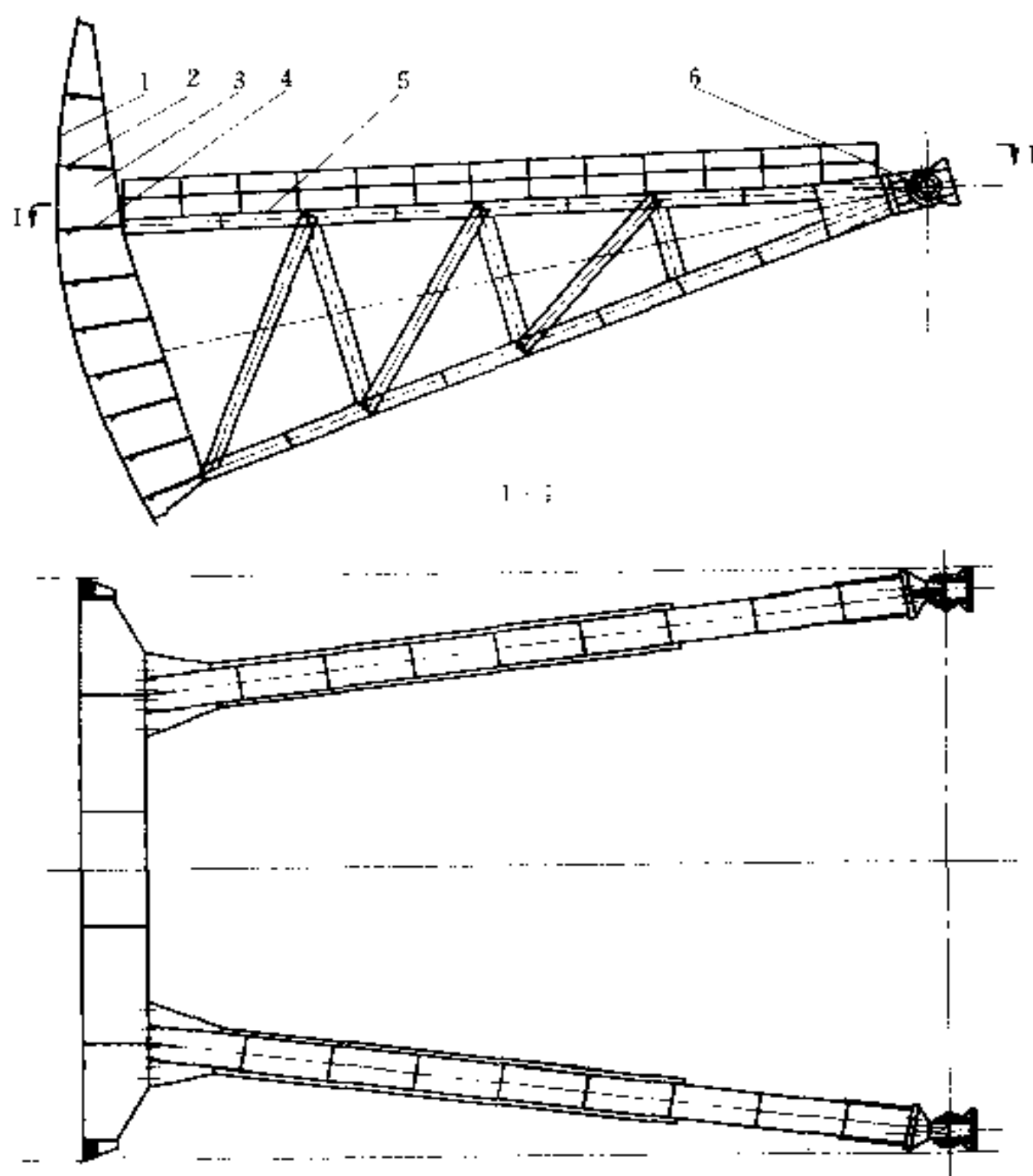


图 3-1 主横梁式弧形闸门结构  
1—面板；2—水平次梁；3—竖向次梁（隔板）；  
4—主横梁；5—支臂；6—支铰

右支臂相连，构成一刚性承重结构，称之为主框架。弧形闸门一般采用双主梁，而当门高较大时，才考虑采用三个主框架，但其结构复杂，制造安装难度大，很少采用。主横梁式弧形闸门门叶的梁系结构布置与平面闸门相似，由主梁、水平次梁、竖直次梁（隔板）、边梁等组成。实腹式结构一般采用等高连接，此时竖直次梁（即隔板）与面板接触的一边为圆弧形。主横梁与支臂之间一般用螺栓连接成刚性框架。

对宽高比较小的弧形闸门如果仍用主横梁式，其上悬臂部分过长，弧门整体刚度将较差，故可采用主纵梁式弧形闸门（图3-2）。主纵梁式弧形闸门的组成与主横梁式基本相同，但其主梁为竖向设置，主纵梁与上下两个支臂构成三角形主框架。一般与主纵梁平行设置有多根小纵梁。而与主纵梁垂直处，则布置有横向隔板。主纵梁式弧形闸门整体刚度较大，但主纵梁的制造加工要求较高。

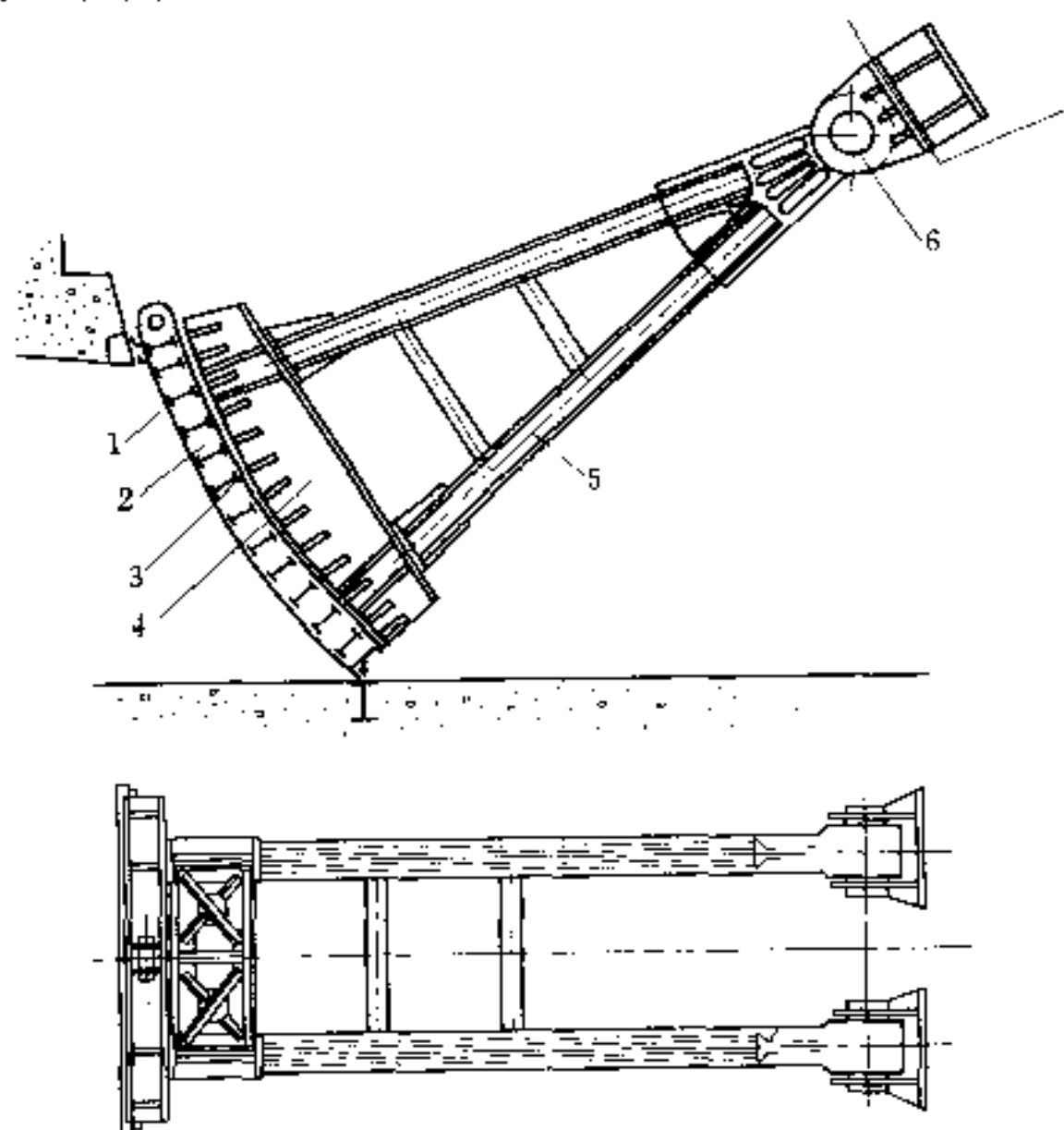


图 3-2 主纵梁式弧形闸门结构

1—面板；2—垂直次梁；3—水平次梁；4—主纵梁；5—支臂；6—支铰

当闸门纵向分块时，分缝的拼接比较困难。

本章主要介绍主横梁式弧形闸门的结构计算。

### 三、主横梁式弧形闸门结构布置

主横梁式弧形闸门多采用双主梁布置，其支臂布置数量与主梁数相对应。单支臂弧形闸门结构简单，但抗扭刚度较低，一般用在小孔口上。当闸门高度较大时，也有采用三支臂结构的，但其结构布置和制造均较复杂，工程中用得不多。

支臂和主横梁组成的主框架，其形式有直支臂 $\Gamma$ 形〔图 3-3 (a)〕和 $\Pi$ 形〔图 3-3 (c)〕、斜支臂 $\Lambda$ 形〔图 3-3 (b)〕三种形式。当支承条件许可时，宜采用 $\Pi$ 形，当支承在侧墙上时，应采用 $\Lambda$ 形， $l_1$  宜取  $0.2L$  左右，以减小主梁跨中截面的最大弯矩，从而能减小主梁截面，节省钢材。当孔口净空不适宜用 $\Pi$ 形或 $\Lambda$ 形时，可采用 $\Gamma$ 形。

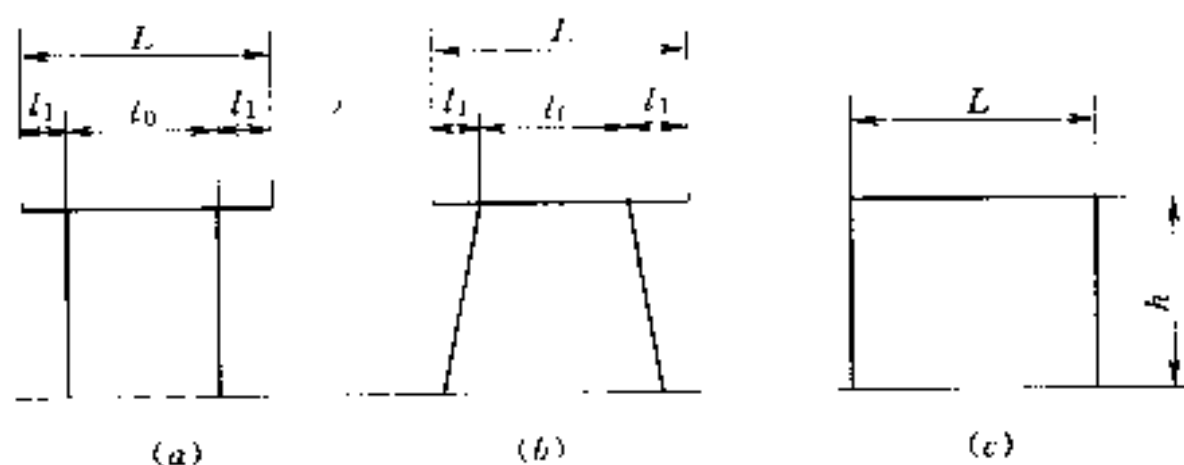


图 3-3 主横梁式弧形闸门主框架形式

弧形闸门的支臂与主横梁应保证刚性连接。斜支臂与主横梁如采用螺栓连接，宜设抗剪板。抗剪板与连接板两端面应保证接触良好（图 3-4）。

低水头弧形闸门的支臂，除满足强度要求外，还应考虑其动力稳定性。可根据具体工作条件，从结构上采取下列措施：

(1) 应充分注意主框架平面

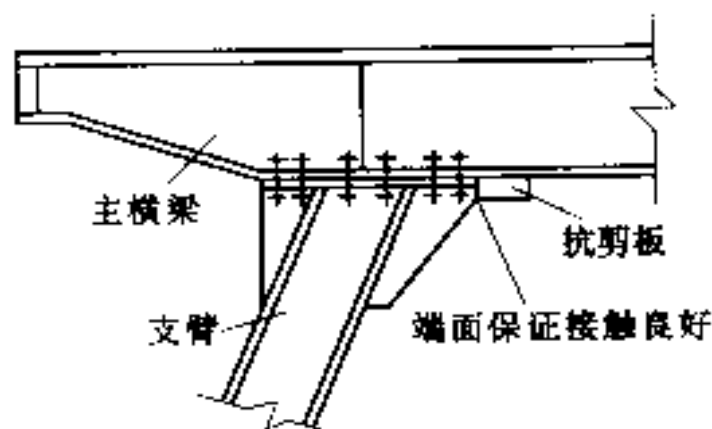


图 3-4 主横梁与斜支臂的连接构造

外的刚度，并从构造上予以保证，支臂端部作成较大的刚性节点，支臂中间连杆具有一定的刚度等。

(2) 适当考虑支铰摩阻力对支臂所引起的附加弯矩。

(3) 对于露顶式弧形闸门，由于门顶可能临时漂过水浪，或者受到各种漂浮物的冲击，所以上支臂宜适当加强。

弧形闸门实腹式的主横梁与支臂的单位刚度比  $K_0$  值，可取 3~11（斜支臂 3~7，直支臂 5~11）。 $K_0$  值按下式计算：

$$K_0 = \frac{I_{l0}h}{I_h l_0} \quad (3-1)$$

式中： $I_{l0}$ 、 $l_0$  为主横梁的截面惯性矩及计算跨度； $I_h$ 、 $h$  为支臂的截面惯性矩及长度。

斜支臂弧形闸门，当支臂与主横梁水平连接时，在支铰处两支臂夹角平分线的垂直剖面上形成扭角  $2\phi$ （图 3-5）。 $\phi$  角可用下式计算：

$$\phi = \lg^{-1} \left| \frac{\lg \theta \sin \alpha}{\sqrt{\cos^2 \theta - \sin^2 \alpha}} \right| \quad (3-2)$$

式中： $\alpha$  为斜支臂水平偏斜角度； $\theta$  为上下两支臂夹角的一半。

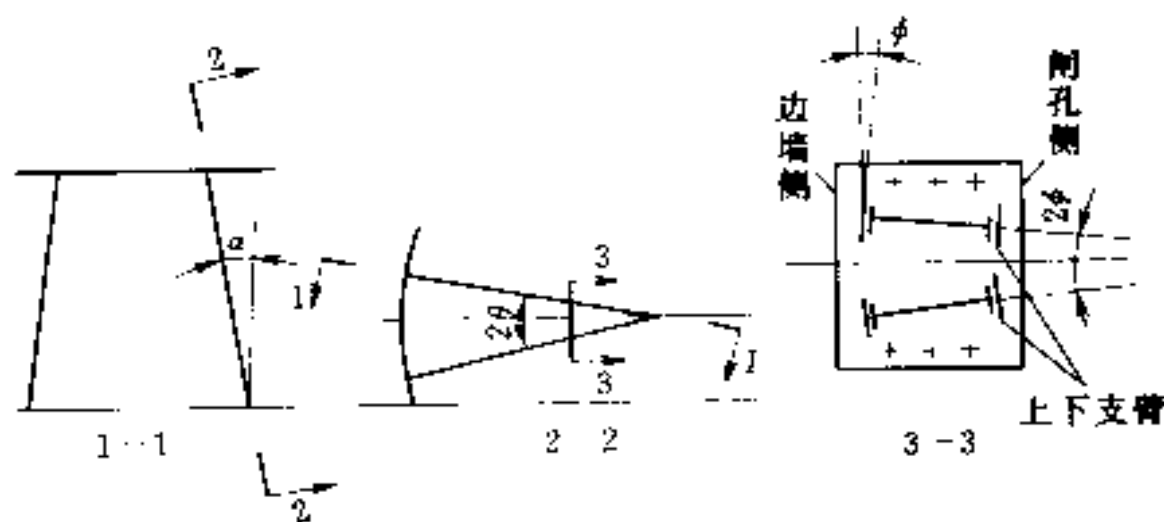


图 3-5 支臂的扭角

#### 四、主框架荷载分配

##### (一) 静水压力的分配

双主横梁弧形闸门的主梁位置一般按等荷载原则来布置，其位置一般对称于静水压力合力作用线（弧形闸门的总水压力及其作用线的计算见第一章）。为减小上悬臂段的高度，增加闸门的整

体刚度，双主横梁间距应尽量大些，并应考虑制造、安装、运输的要求。考虑到启门过程中，两主框架受力一为增载，一为减载，因而两主梁也可以不完全对称于合力作用线，如将上框架抬高些，不仅能使荷载均匀，而且可增加闸门刚度。

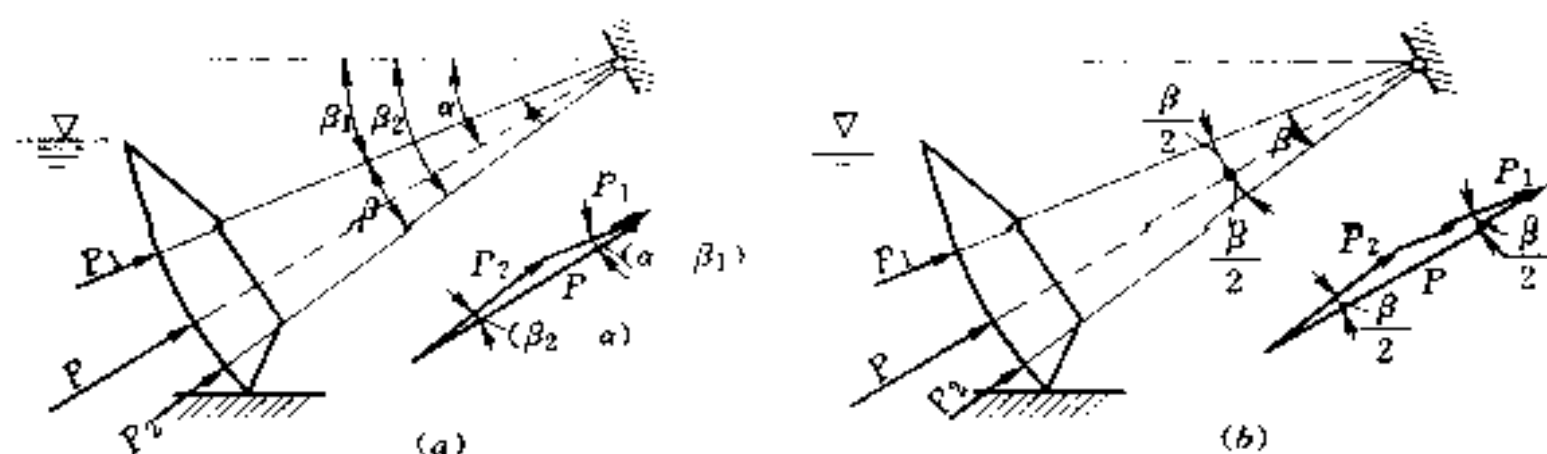


图 3-6 静水压力在两个主框架上的分配

如图 3-6 所示，总水压力  $P$  分配在两个主框架上的力  $P_1$  和  $P_2$  可按下式计算：

$$\frac{P_1}{\sin(\beta_2 - \alpha)} = \frac{P_2}{\sin(\alpha - \beta_1)} = \frac{P}{\sin\beta} \quad (3-3)$$

如果两个框架对称于总水压力作用线时，即  $\beta_2 - \alpha = \alpha - \beta_1 = \beta/2$ ，则每个主框架上的静水荷载为：

$$P_1 = P_2 = \frac{P}{2\cos\frac{\beta}{2}} \quad (3-4)$$

(二) 启门力在主框架上产生的力

采用前拉式卷扬式弧门启闭机的露顶式弧形闸门，启门时，启闭机的钢丝绳受拉力，致使闸门面板上游面与钢丝绳接触部位产生箍压力，其合力方向为径向并通过支铰中心，见图 3-7。

接触部位的压力可按下式

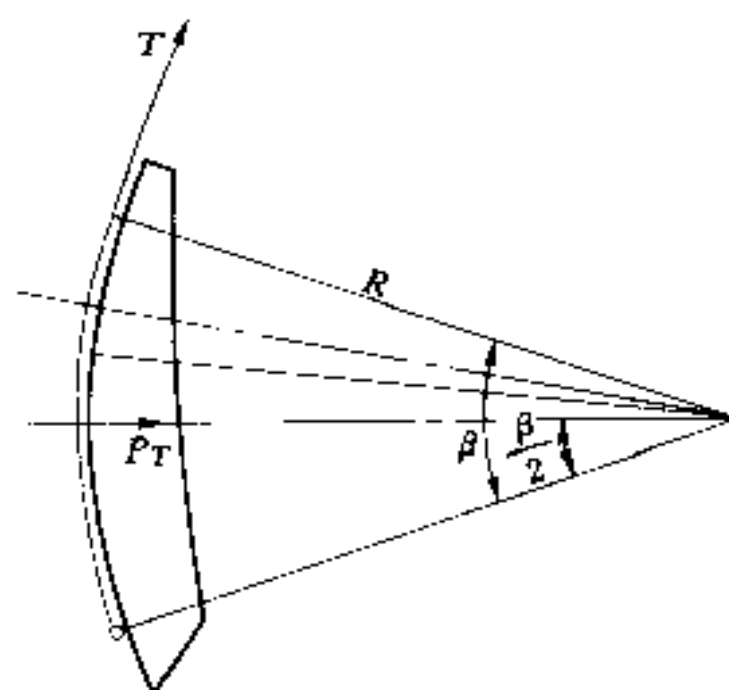


图 3-7 启门力在两个主框架上的分配

进行计算：

$$P_T = 2T \sin \frac{\beta}{2} \quad (3-5)$$

式中： $P_T$  为每侧因钢丝绳拉力引起的压力； $T$  为每侧钢丝绳所受拉力，即每侧启门力； $\beta$  为钢丝绳在弧面上的包角。

根据  $P_T$  的作用位置，将该力分配给上、下主框架。

对于采用后拉式卷扬式启闭机或液压式启闭机的弧形闸门，可根据闸门上吊耳的具体位置近似地按上述方法分配给上、下主框架。

## 第二节 弧形钢闸门的结构计算

弧形闸门结构的计算假定采用平面体系，与双主梁平面闸门类似。弧形闸门的面板和纵向梁系可忽略其曲率的影响，近似按平板和直梁计算，其面板、水平次梁、竖直次梁（隔板）等构件均可参照平面闸门相应构件计算。下面介绍主框架的计算方法。

### 一、框架内力分析

弧形闸门的支铰可以看作为铰支座，故主框架可按双铰支座的超静定结构计算。

#### （一）静水压力引起的框架内力

##### 1. 门形框架

图 3-8 (a) 所示框架所受的水压力为作用在主梁上的均布荷载。该均布荷载又可以等效地分解为如图 3-8 (b)、(c)、(d) 所示的三种荷载。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{qb}{2} + qc + 0 = \frac{qL}{2} \quad (3-6)$$

$$H' = H_1 + H_2 + H_3 = \frac{qb[b + 2a(2K_0 + 3)]}{4h(2K_0 + 3)} + \frac{qac}{h} - \frac{3qc^2}{2h(2K_0 + 3)} \quad (3-7)$$

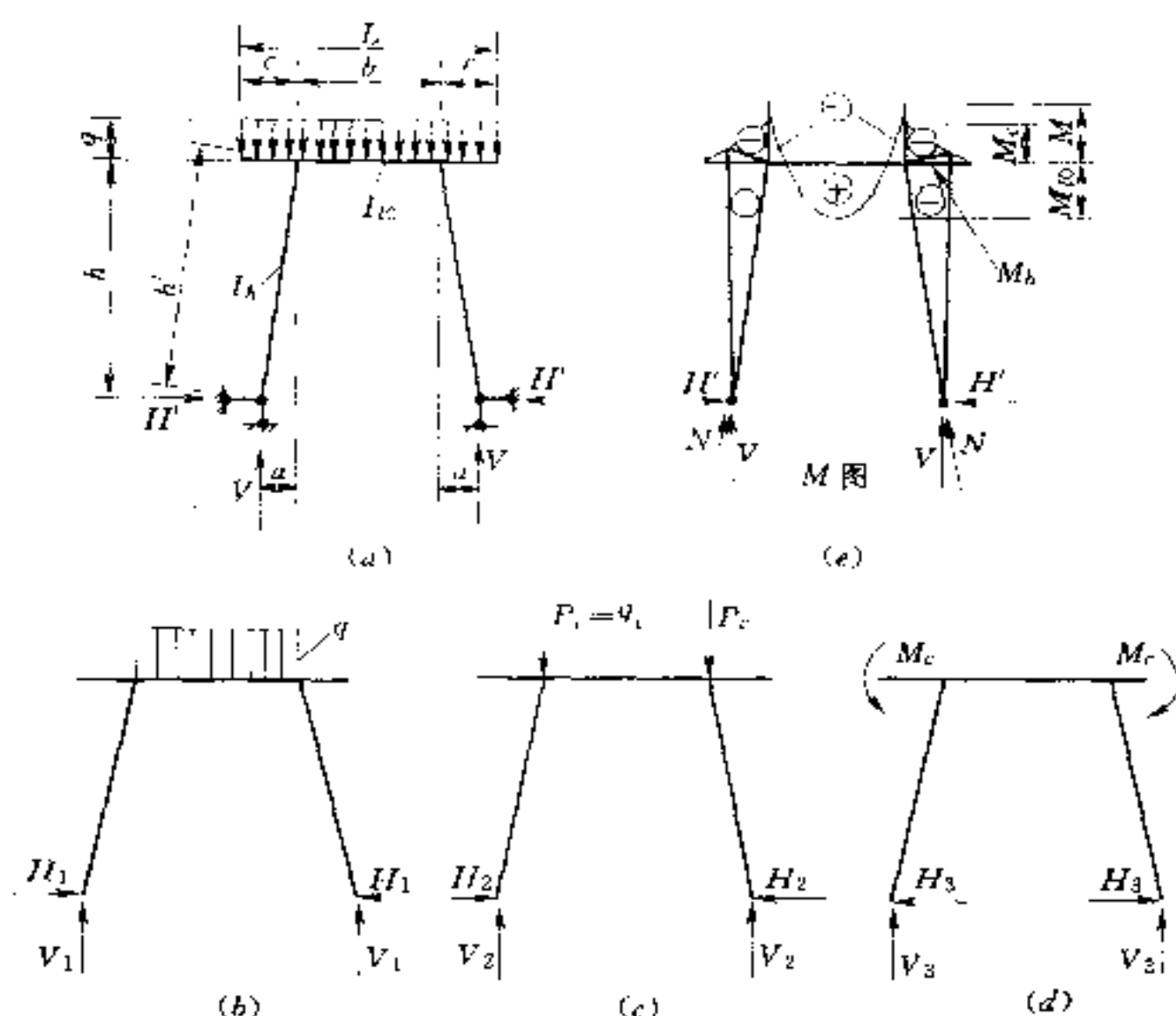


图 3-8 梯形框架计算简图

$$N = V \frac{h}{h'} + H' \frac{a}{h'} \quad (3-8)$$

$$M_c = -\frac{qc^2}{2} \quad (3-9)$$

$$M_h = Va - H'h \quad (3-10)$$

$$M = M_h + M_c \quad (3-11)$$

$$M_{l_0} = \frac{qb^2}{8} + M_c + M_h \quad (3-12)$$

$$K_0 = \frac{I_{l_0} h'}{I_h b} \quad (3-13)$$

式中：V 为支铰处垂直反力；H' 为支铰处水平反力；M 为主梁与支臂刚接点处负弯矩；M<sub>c</sub> 为主梁悬臂段负弯矩；M<sub>h</sub> 为支臂上之弯矩；M<sub>l<sub>0</sub></sub> 为主梁跨中弯矩；q 为均布荷载；L 为荷载宽度；l<sub>0</sub> 为框架主梁计算跨度；c 为主梁悬臂段长度；K<sub>0</sub> 为框架主梁单位刚度与支臂单位刚度的比值；b 为主梁计算跨度；h' 为斜支臂长度；N 为

斜支臂轴向压力。

## 2. 冂形框架

冂形框架计算如图 3-9 所示。

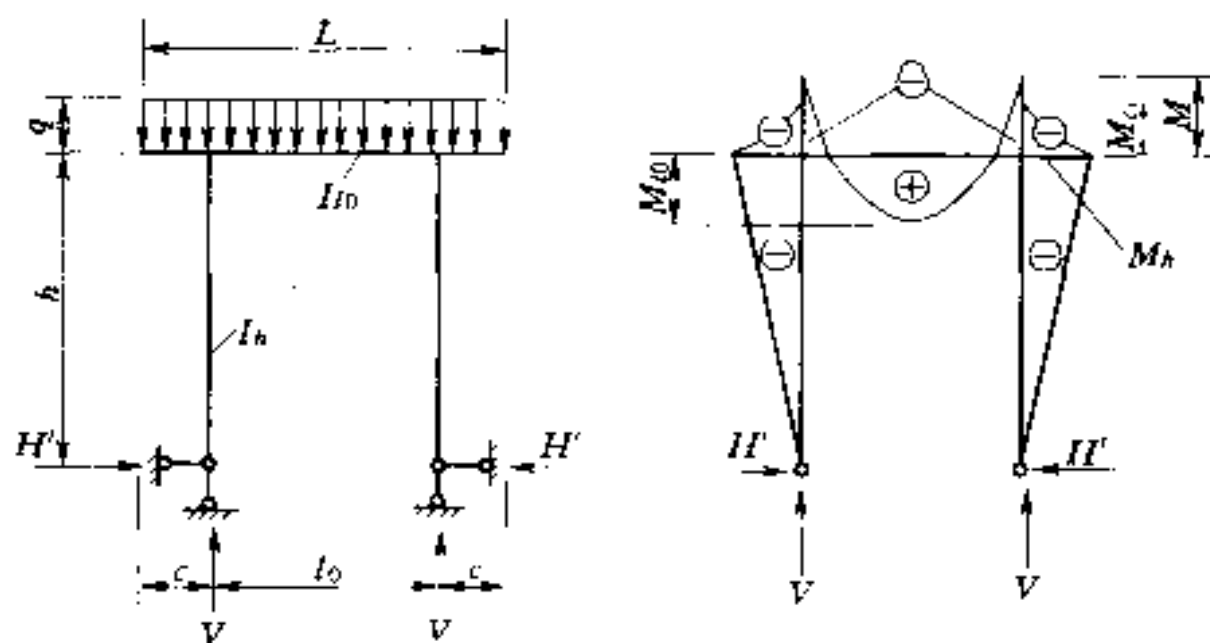


图 3-9 冂形框架计算简图

$$V = \frac{qL}{2} \quad (3-14)$$

$$H' = \frac{ql_0^2}{4h(2K_0 + 3)} - \frac{3qc^2}{2h(2K_0 + 3)} \quad (3-15)$$

$$M_c = -\frac{qc^2}{2} \quad (3-16)$$

$$M_h = -H'h \quad (3-17)$$

$$M = M_h + M_c \quad (3-18)$$

$$M_0 = \frac{ql_0^2}{8} + M_c + M_h \quad (3-19)$$

式中： $K_0$  为框架主梁单位刚度与支臂单位刚度的比值，按式(3-1)计算； $h$  为支臂长度，即铰点至主梁中和轴线的距离；其余符号意义同前。

## 3. 冂形框架

冂形框架计算见图 3-10。

$$V = \frac{qL}{2} \quad (3-20)$$

$$H' = \frac{ql_0^2}{4h(2K_0 + 3)} \quad (3-21)$$

$$M = -H'h \quad (3-22)$$

$$M_{l_0} = \frac{ql_0^2}{8} - H'h \quad (3-23)$$

符号意义同前。

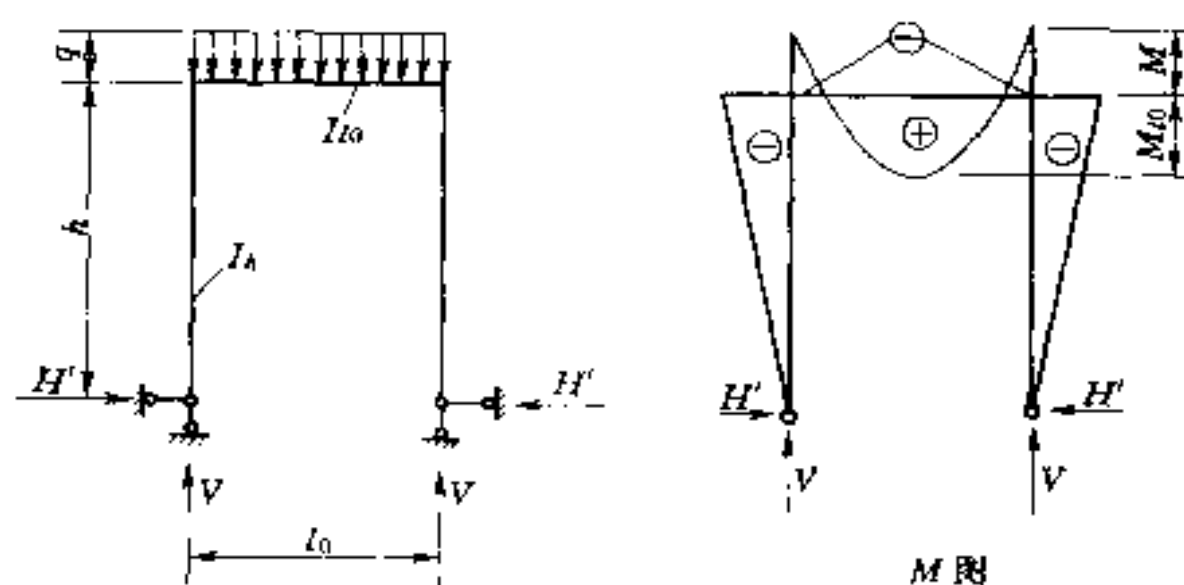


图 3-10 矩形框架计算简图

## (二) 启门力引起的框架内力

启闭力引起的框架内力计算简图见图 3-11，该图 (a) 中可作为节点集中力，该图 (b) 中为节点集中力和弯矩，其内力计算可参照静水压力的计算方法。

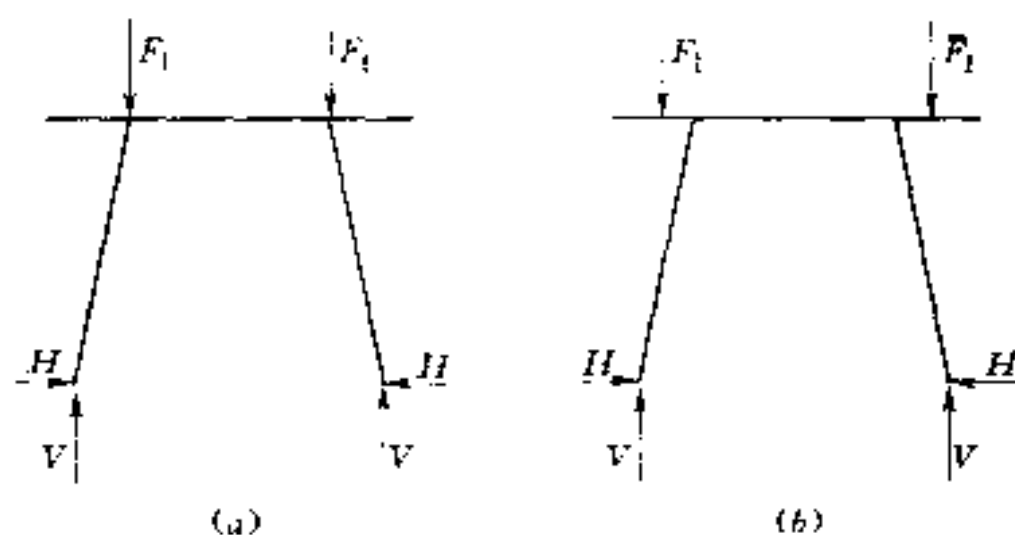


图 3-11 启闭力引起的框架内力计算简图

## (三) 温度变化引起的框架内力

### 1. 门形和口形框架

$$H' = \frac{3EI_{l_0}\alpha_t}{h^2(2K_0 + 3)} \quad (3-24)$$

$$M = -H'h \quad (3-25)$$

式中： $\alpha_t$  为钢的线膨胀系数，其值为  $1.2 \times 10^{-5}$ ； $t$  为温度变化值； $E$  为弹性模量，钢为  $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ； $K_0$  为框架主梁单位刚度与支臂单位刚度的比值。

## 2. 八形框架

$$H' = \frac{3EI_0\alpha_t t}{h^2(2K_0 + 3)} \frac{(b + 2a)}{b} \quad (3-26)$$

$$M = -H'h \quad (3-27)$$

符号意义同前。

温度变化引起的框架内力一般比较小，通常可忽略。

## 二、框架结构计算

### (一) 主横梁

实腹式框架主梁的形式类似平面闸门，闸门跨度较小而水头又不高时，可选用工字形截面轧成梁；当跨度大时，则采用工字形截面或箱形截面的焊接组合梁。主梁的悬臂段一般做成变截面的。

主梁除承受弯矩外，同时承受框架水平推力，可按偏心受压构件计算。

主梁跨中截面：

$$\text{正应力} \quad \sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \leq [\sigma] \quad (3-28)$$

式中： $N$  为主梁轴向压力，即框架水平推力  $H'$ ； $M$  为主梁跨中弯矩，即  $M_0$ ； $A$  为主梁跨中截面面积； $W$  为主梁跨中截面抗弯模量。

主梁支座截面：

$$\text{正应力} \quad \sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \leq [\sigma] \quad (3-29)$$

$$\text{剪应力} \quad \tau = \frac{QS}{I\delta} \leq [\tau] \quad (3-30)$$

式中： $M$  为主梁支座处弯矩； $I$  为主梁支座处截面对中和轴惯性矩； $S$  为主梁支座处截面对中和轴面积矩； $W$  为主梁支座处截面抗弯模量；其余符号意义同前。

$$\text{折算应力: } \sigma_{zh} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (3-31)$$

式中： $\sigma$ 、 $\tau$  为支座处主梁腹板高度边缘同一点上同时产生的正应力和剪应力。

主横梁的刚度、稳定性计算与平面钢闸门的主梁计算方法相同。

## (二) 支臂

支臂一般选用型钢或组合截面，可根据闸门的荷载、尺寸及主梁的截面形式而定。实践中往往将支臂截面的最大刚度平面布置在主框架平面内，而在上、下支臂间加设腹杆以缩短其在另一轴方向（框架平面外）的支撑长度，使两个平面内的稳定性基本相等。

支臂为偏心受压柱，除应进行强度验算外，还应特别注意验算支臂在框架平面内、外两个方向的稳定性。

### 1. 弯矩作用平面内的稳定性

当偏心率  $\epsilon \leq 30$  时，按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{\phi_p A} \leq [\sigma] \quad (3-32)$$

$$\epsilon = \frac{M}{N} \frac{A}{W}$$

$$\lambda = \frac{h_0}{r}$$

$$h_0 = \mu h$$

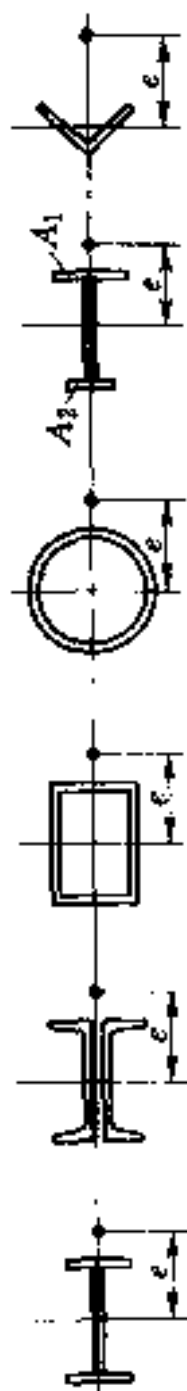
式中： $\epsilon$  为偏心率； $\lambda$  为支臂在弯矩作用平面内的长细比； $\phi_p$  为弯矩作用平面内的稳定系数，根据截面形式、偏心方向、偏心率  $\epsilon$  及长细比  $\lambda$  按表 3-1 选用； $N$  为支臂轴向力； $M$  为支臂最大弯矩； $A$  为支臂截面面积； $W$  为最大受压截面抗弯模量； $h_0$  为支臂的计算长度； $h$  为支臂长度； $\mu$  为计算长度系数，对圆柱铰和圆锥铰可取 1.2~1.5； $r$  为支臂在弯矩作用平面内的回转半径。

当偏心率  $\epsilon > 30$  时，不必进行稳定性计算。

### 2. 弯矩作用平面外的稳定性

当弯矩作用在最大刚度平面内时，弯矩作用平面外的稳定性

表 3-1 实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数  $\phi_p$



$$1.2 > \frac{A_2}{A_1} > 0.5$$

| $\lambda \backslash \epsilon$ | 0     | 0.2   | 0.4   | 0.6   | 0.8   | 1     | 1.2   | 1.4   | 1.6   | 1.8   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                             | 1     | 0.865 | 0.763 | 0.682 | 0.616 | 0.563 | 0.517 | 0.479 | 0.466 | 0.417 | 0.391 | 0.34  | 0.3   | 0.267 | 0.24  |
| 10                            | 0.995 | 0.848 | 0.743 | 0.666 | 0.601 | 0.548 | 0.503 | 0.467 | 0.434 | 0.406 | 0.382 | 0.332 | 0.294 | 0.263 | 0.237 |
| 20                            | 0.981 | 0.831 | 0.725 | 0.645 | 0.582 | 0.529 | 0.488 | 0.452 | 0.419 | 0.391 | 0.368 | 0.322 | 0.285 | 0.255 | 0.231 |
| 30                            | 0.958 | 0.812 | 0.705 | 0.623 | 0.56  | 0.509 | 0.469 | 0.433 | 0.402 | 0.377 | 0.355 | 0.311 | 0.275 | 0.247 | 0.224 |
| 40                            | 0.927 | 0.788 | 0.679 | 0.598 | 0.537 | 0.487 | 0.448 | 0.414 | 0.385 | 0.361 | 0.342 | 0.299 | 0.265 | 0.238 | 0.216 |
| 50                            | 0.888 | 0.76  | 0.65  | 0.571 | 0.512 | 0.465 | 0.426 | 0.395 | 0.367 | 0.345 | 0.327 | 0.287 | 0.255 | 0.229 | 0.208 |
| 60                            | 0.842 | 0.73  | 0.619 | 0.543 | 0.486 | 0.442 | 0.406 | 0.375 | 0.349 | 0.328 | 0.312 | 0.275 | 0.245 | 0.221 | 0.201 |
| 70                            | 0.789 | 0.693 | 0.586 | 0.513 | 0.461 | 0.419 | 0.385 | 0.356 | 0.332 | 0.312 | 0.297 | 0.263 | 0.235 | 0.212 | 0.193 |
| 80                            | 0.731 | 0.651 | 0.553 | 0.485 | 0.434 | 0.393 | 0.363 | 0.338 | 0.316 | 0.297 | 0.283 | 0.252 | 0.225 | 0.203 | 0.186 |
| 90                            | 0.669 | 0.602 | 0.515 | 0.455 | 0.409 | 0.373 | 0.344 | 0.32  | 0.299 | 0.282 | 0.267 | 0.24  | 0.215 | 0.195 | 0.178 |
| 100                           | 0.604 | 0.549 | 0.474 | 0.423 | 0.383 | 0.35  | 0.325 | 0.302 | 0.283 | 0.267 | 0.256 | 0.229 | 0.205 | 0.186 | 0.171 |
| 110                           | 0.536 | 0.494 | 0.434 | 0.39  | 0.356 | 0.328 | 0.306 | 0.285 | 0.268 | 0.253 | 0.243 | 0.218 | 0.196 | 0.178 | 0.164 |
| 120                           | 0.466 | 0.443 | 0.394 | 0.358 | 0.329 | 0.306 | 0.286 | 0.268 | 0.252 | 0.24  | 0.23  | 0.208 | 0.187 | 0.17  | 0.157 |
| 130                           | 0.401 | 0.397 | 0.358 | 0.328 | 0.303 | 0.284 | 0.266 | 0.251 | 0.237 | 0.226 | 0.219 | 0.199 | 0.179 | 0.163 | 0.152 |
| 140                           | 0.349 | 0.354 | 0.321 | 0.299 | 0.279 | 0.262 | 0.248 | 0.234 | 0.222 | 0.212 | 0.206 | 0.189 | 0.171 | 0.156 | 0.145 |
| 150                           | 0.306 | 0.306 | 0.294 | 0.274 | 0.257 | 0.242 | 0.229 | 0.218 | 0.208 | 0.2   | 0.194 | 0.179 | 0.163 | 0.15  | 0.139 |
| 160                           | 0.272 | 0.272 | 0.267 | 0.25  | 0.236 | 0.225 | 0.213 | 0.203 | 0.195 | 0.187 | 0.181 | 0.169 | 0.155 | 0.143 | 0.134 |
| 170                           | 0.243 | 0.243 | 0.243 | 0.229 | 0.217 | 0.207 | 0.197 | 0.189 | 0.182 | 0.177 | 0.172 | 0.16  | 0.147 | 0.136 | 0.128 |
| 180                           | 0.218 | 0.218 | 0.218 | 0.209 | 0.2   | 0.192 | 0.184 | 0.177 | 0.17  | 0.166 | 0.162 | 0.151 | 0.139 | 0.129 | 0.122 |
| 190                           | 0.197 | 0.197 | 0.197 | 0.193 | 0.184 | 0.177 | 0.17  | 0.164 | 0.158 | 0.156 | 0.152 | 0.142 | 0.132 | 0.123 | 0.116 |
| 200                           | 0.18  | 0.18  | 0.18  | 0.178 | 0.171 | 0.164 | 0.158 | 0.153 | 0.148 | 0.145 | 0.142 | 0.134 | 0.125 | 0.117 | 0.11  |

续表

| $\lambda \backslash \epsilon$ | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 25    | 30    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                             | 0.218 | 0.199 | 0.183 | 0.17  | 0.157 | 0.147 | 0.13  | 0.116 | 0.105 | 0.088 | 0.076 | 0.066 | 0.059 | 0.053 | 0.042 | 0.035 |
| 10                            | 0.215 | 0.196 | 0.181 | 0.168 | 0.156 | 0.146 | 0.129 | 0.115 | 0.104 | 0.087 | 0.075 | 0.066 | 0.059 | 0.053 | 0.042 | 0.035 |
| 20                            | 0.211 | 0.193 | 0.178 | 0.165 | 0.153 | 0.143 | 0.127 | 0.114 | 0.103 | 0.086 | 0.074 | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.041 | 0.035 |
| 30                            | 0.205 | 0.189 | 0.174 | 0.162 | 0.15  | 0.14  | 0.125 | 0.112 | 0.101 | 0.085 | 0.074 | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.041 | 0.034 |
| 40                            | 0.199 | 0.183 | 0.17  | 0.158 | 0.147 | 0.138 | 0.122 | 0.11  | 0.1   | 0.084 | 0.073 | 0.064 | 0.057 | 0.052 | 0.041 | 0.034 |
| 50                            | 0.192 | 0.177 | 0.165 | 0.154 | 0.144 | 0.135 | 0.12  | 0.108 | 0.098 | 0.083 | 0.072 | 0.063 | 0.056 | 0.051 | 0.04  | 0.033 |
| 60                            | 0.185 | 0.171 | 0.159 | 0.149 | 0.14  | 0.132 | 0.117 | 0.106 | 0.096 | 0.081 | 0.071 | 0.062 | 0.056 | 0.05  | 0.04  | 0.033 |
| 70                            | 0.178 | 0.165 | 0.154 | 0.144 | 0.136 | 0.128 | 0.114 | 0.103 | 0.094 | 0.08  | 0.07  | 0.061 | 0.055 | 0.049 | 0.039 | 0.033 |
| 80                            | 0.171 | 0.159 | 0.148 | 0.139 | 0.131 | 0.124 | 0.111 | 0.101 | 0.092 | 0.078 | 0.068 | 0.06  | 0.054 | 0.049 | 0.039 | 0.033 |
| 90                            | 0.164 | 0.153 | 0.143 | 0.134 | 0.127 | 0.12  | 0.108 | 0.099 | 0.09  | 0.077 | 0.067 | 0.059 | 0.053 | 0.048 | 0.038 | 0.032 |
| 100                           | 0.158 | 0.147 | 0.138 | 0.13  | 0.122 | 0.116 | 0.105 | 0.096 | 0.088 | 0.075 | 0.066 | 0.058 | 0.053 | 0.048 | 0.038 | 0.032 |
| 110                           | 0.152 | 0.142 | 0.133 | 0.125 | 0.118 | 0.112 | 0.102 | 0.093 | 0.086 | 0.074 | 0.065 | 0.057 | 0.052 | 0.047 | 0.037 | 0.031 |
| 120                           | 0.146 | 0.136 | 0.128 | 0.12  | 0.114 | 0.108 | 0.098 | 0.09  | 0.083 | 0.072 | 0.063 | 0.056 | 0.051 | 0.046 | 0.037 | 0.031 |
| 130                           | 0.14  | 0.131 | 0.123 | 0.116 | 0.11  | 0.104 | 0.095 | 0.088 | 0.081 | 0.07  | 0.062 | 0.055 | 0.05  | 0.045 | 0.037 | 0.03  |
| 140                           | 0.135 | 0.126 | 0.118 | 0.112 | 0.106 | 0.101 | 0.092 | 0.085 | 0.079 | 0.069 | 0.061 | 0.054 | 0.049 | 0.045 | 0.036 | 0.03  |
| 150                           | 0.13  | 0.121 | 0.114 | 0.108 | 0.102 | 0.097 | 0.089 | 0.082 | 0.076 | 0.067 | 0.059 | 0.053 | 0.048 | 0.044 | 0.036 | 0.03  |
| 160                           | 0.125 | 0.116 | 0.11  | 0.104 | 0.099 | 0.094 | 0.086 | 0.079 | 0.074 | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.047 | 0.043 | 0.035 | 0.029 |
| 170                           | 0.12  | 0.112 | 0.106 | 0.1   | 0.095 | 0.091 | 0.084 | 0.077 | 0.071 | 0.063 | 0.056 | 0.051 | 0.046 | 0.043 | 0.035 | 0.029 |
| 180                           | 0.115 | 0.108 | 0.102 | 0.097 | 0.092 | 0.088 | 0.081 | 0.075 | 0.069 | 0.061 | 0.055 | 0.05  | 0.045 | 0.042 | 0.034 | 0.028 |
| 190                           | 0.11  | 0.104 | 0.098 | 0.094 | 0.089 | 0.085 | 0.078 | 0.072 | 0.067 | 0.06  | 0.054 | 0.049 | 0.044 | 0.041 | 0.034 | 0.028 |
| 200                           | 0.105 | 0.099 | 0.094 | 0.09  | 0.086 | 0.083 | 0.076 | 0.07  | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.048 | 0.043 | 0.04  | 0.033 | 0.028 |

表 3-2 Q235 钢偏心受压构件在平面外的稳定系数  $\phi_1$

| $\lambda \backslash \epsilon$ | 0     | 0.2   | 0.4   | 0.6   | 0.8   | 1     | 1.2   | 1.4   | 1.6   | 1.8   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                             | 1     | 0.838 | 0.72  | 0.632 | 0.563 | 0.508 | 0.462 | 0.424 | 0.392 | 0.364 | 0.34  | 0.292 | 0.256 | 0.228 | 0.205 |
| 10                            | 0.995 | 0.83  | 0.713 | 0.626 | 0.557 | 0.503 | 0.457 | 0.42  | 0.388 | 0.361 | 0.337 | 0.289 | 0.253 | 0.226 | 0.203 |
| 20                            | 0.981 | 0.821 | 0.706 | 0.619 | 0.552 | 0.498 | 0.453 | 0.416 | 0.384 | 0.357 | 0.333 | 0.286 | 0.251 | 0.223 | 0.201 |
| 30                            | 0.958 | 0.813 | 0.698 | 0.613 | 0.546 | 0.493 | 0.448 | 0.411 | 0.38  | 0.353 | 0.33  | 0.283 | 0.248 | 0.221 | 0.199 |
| 40                            | 0.927 | 0.804 | 0.691 | 0.607 | 0.64  | 0.488 | 0.444 | 0.407 | 0.376 | 0.349 | 0.326 | 0.28  | 0.246 | 0.219 | 0.197 |
| 50                            | 0.888 | 0.786 | 0.684 | 0.6   | 0.535 | 0.483 | 0.439 | 0.403 | 0.372 | 0.343 | 0.323 | 0.277 | 0.243 | 0.217 | 0.195 |
| 60                            | 0.842 | 0.749 | 0.657 | 0.578 | 0.515 | 0.465 | 0.424 | 0.388 | 0.359 | 0.334 | 0.312 | 0.268 | 0.234 | 0.209 | 0.188 |
| 70                            | 0.789 | 0.709 | 0.63  | 0.555 | 0.495 | 0.446 | 0.407 | 0.374 | 0.346 | 0.322 | 0.3   | 0.258 | 0.226 | 0.202 | 0.181 |
| 80                            | 0.733 | 0.665 | 0.598 | 0.531 | 0.474 | 0.428 | 0.39  | 0.359 | 0.332 | 0.308 | 0.288 | 0.248 | 0.218 | 0.194 | 0.174 |
| 90                            | 0.669 | 0.615 | 0.561 | 0.507 | 0.454 | 0.41  | 0.374 | 0.344 | 0.318 | 0.296 | 0.276 | 0.238 | 0.208 | 0.186 | 0.167 |
| 100                           | 0.604 | 0.561 | 0.518 | 0.475 | 0.432 | 0.391 | 0.357 | 0.328 | 0.304 | 0.282 | 0.264 | 0.228 | 0.2   | 0.178 | 0.16  |
| 110                           | 0.536 | 0.505 | 0.474 | 0.442 | 0.411 | 0.372 | 0.34  | 0.312 | 0.289 | 0.27  | 0.252 | 0.217 | 0.19  | 0.17  | 0.153 |
| 120                           | 0.466 | 0.443 | 0.421 | 0.398 | 0.376 | 0.353 | 0.322 | 0.296 | 0.275 | 0.256 | 0.24  | 0.206 | 0.181 | 0.162 | 0.146 |
| 130                           | 0.401 | 0.384 | 0.367 | 0.35  | 0.333 | 0.316 | 0.299 | 0.276 | 0.256 | 0.239 | 0.224 | 0.194 | 0.171 | 0.153 | 0.138 |
| 140                           | 0.349 | 0.336 | 0.322 | 0.309 | 0.295 | 0.282 | 0.268 | 0.254 | 0.236 | 0.221 | 0.207 | 0.18  | 0.159 | 0.142 | 0.129 |
| 150                           | 0.306 | 0.295 | 0.284 | 0.273 | 0.262 | 0.251 | 0.24  | 0.229 | 0.214 | 0.2   | 0.189 | 0.164 | 0.146 | 0.131 | 0.119 |
| 160                           | 0.272 | 0.263 | 0.253 | 0.244 | 0.235 | 0.225 | 0.216 | 0.206 | 0.197 | 0.185 | 0.174 | 0.152 | 0.134 | 0.121 | 0.109 |
| 170                           | 0.243 | 0.235 | 0.227 | 0.219 | 0.211 | 0.203 | 0.195 | 0.187 | 0.179 | 0.168 | 0.158 | 0.138 | 0.123 | 0.11  | 0.1   |
| 180                           | 0.218 | 0.211 | 0.204 | 0.197 | 0.19  | 0.183 | 0.176 | 0.169 | 0.162 | 0.152 | 0.143 | 0.125 | 0.111 | 0.1   | 0.09  |
| 190                           | 0.197 | 0.19  | 0.183 | 0.177 | 0.17  | 0.164 | 0.157 | 0.15  | 0.143 | 0.135 | 0.127 | 0.111 | 0.099 | 0.089 | 0.081 |
| 200                           | 0.18  | 0.173 | 0.166 | 0.159 | 0.153 | 0.146 | 0.139 | 0.132 | 0.125 | 0.118 | 0.111 | 0.097 | 0.086 | 0.078 | 0.071 |

续表

| $\frac{\epsilon}{\lambda}$ | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 25    | 30    |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                          | 0.186 | 0.171 | 0.158 | 0.147 | 0.137 | 0.128 | 0.114 | 0.103 | 0.093 | 0.079 | 0.069 | 0.061 | 0.054 | 0.049 | 0.04  | 0.033 |
| 10                         | 0.184 | 0.169 | 0.156 | 0.146 | 0.136 | 0.127 | 0.113 | 0.102 | 0.092 | 0.078 | 0.068 | 0.06  | 0.053 | 0.049 | 0.039 | 0.033 |
| 20                         | 0.182 | 0.168 | 0.155 | 0.144 | 0.134 | 0.125 | 0.112 | 0.101 | 0.091 | 0.077 | 0.068 | 0.06  | 0.053 | 0.048 | 0.039 | 0.033 |
| 30                         | 0.18  | 0.166 | 0.153 | 0.143 | 0.133 | 0.124 | 0.111 | 0.1   | 0.09  | 0.077 | 0.067 | 0.059 | 0.052 | 0.048 | 0.038 | 0.032 |
| 40                         | 0.179 | 0.164 | 0.152 | 0.141 | 0.132 | 0.123 | 0.109 | 0.099 | 0.089 | 0.076 | 0.066 | 0.059 | 0.052 | 0.047 | 0.038 | 0.032 |
| 50                         | 0.177 | 0.162 | 0.15  | 0.14  | 0.13  | 0.122 | 0.108 | 0.098 | 0.089 | 0.075 | 0.066 | 0.058 | 0.051 | 0.047 | 0.038 | 0.032 |
| 60                         | 0.171 | 0.157 | 0.145 | 0.135 | 0.126 | 0.118 | 0.105 | 0.094 | 0.086 | 0.073 | 0.063 | 0.056 | 0.05  | 0.045 | 0.036 | 0.031 |
| 70                         | 0.165 | 0.151 | 0.14  | 0.13  | 0.121 | 0.114 | 0.101 | 0.091 | 0.083 | 0.07  | 0.061 | 0.054 | 0.048 | 0.044 | 0.035 | 0.029 |
| 80                         | 0.159 | 0.146 | 0.135 | 0.125 | 0.117 | 0.11  | 0.097 | 0.088 | 0.08  | 0.068 | 0.059 | 0.052 | 0.046 | 0.042 | 0.034 | 0.028 |
| 90                         | 0.152 | 0.14  | 0.129 | 0.12  | 0.112 | 0.105 | 0.094 | 0.084 | 0.077 | 0.065 | 0.056 | 0.05  | 0.044 | 0.04  | 0.033 | 0.027 |
| 100                        | 0.146 | 0.134 | 0.124 | 0.115 | 0.108 | 0.101 | 0.09  | 0.081 | 0.074 | 0.062 | 0.054 | 0.048 | 0.043 | 0.039 | 0.031 | 0.026 |
| 110                        | 0.14  | 0.128 | 0.118 | 0.11  | 0.103 | 0.096 | 0.086 | 0.077 | 0.07  | 0.06  | 0.052 | 0.046 | 0.041 | 0.037 | 0.03  | 0.025 |
| 120                        | 0.133 | 0.122 | 0.113 | 0.105 | 0.098 | 0.092 | 0.082 | 0.074 | 0.067 | 0.057 | 0.049 | 0.044 | 0.039 | 0.035 | 0.029 | 0.024 |
| 130                        | 0.126 | 0.115 | 0.107 | 0.099 | 0.093 | 0.087 | 0.078 | 0.07  | 0.064 | 0.054 | 0.047 | 0.042 | 0.037 | 0.034 | 0.027 | 0.023 |
| 140                        | 0.118 | 0.108 | 0.1   | 0.093 | 0.087 | 0.082 | 0.073 | 0.066 | 0.06  | 0.051 | 0.044 | 0.039 | 0.035 | 0.032 | 0.026 | 0.022 |
| 150                        | 0.109 | 0.1   | 0.093 | 0.086 | 0.081 | 0.076 | 0.068 | 0.062 | 0.056 | 0.048 | 0.042 | 0.037 | 0.033 | 0.03  | 0.024 | 0.02  |
| 160                        | 0.1   | 0.092 | 0.086 | 0.08  | 0.075 | 0.07  | 0.063 | 0.057 | 0.052 | 0.044 | 0.038 | 0.034 | 0.031 | 0.028 | 0.022 | 0.019 |
| 170                        | 0.092 | 0.084 | 0.078 | 0.073 | 0.068 | 0.064 | 0.057 | 0.052 | 0.047 | 0.04  | 0.035 | 0.031 | 0.028 | 0.025 | 0.021 | 0.017 |
| 180                        | 0.083 | 0.076 | 0.071 | 0.065 | 0.062 | 0.058 | 0.052 | 0.047 | 0.043 | 0.037 | 0.032 | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.019 | 0.016 |
| 190                        | 0.074 | 0.068 | 0.063 | 0.059 | 0.055 | 0.052 | 0.047 | 0.042 | 0.038 | 0.033 | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.021 | 0.017 | 0.014 |
| 200                        | 0.065 | 0.06  | 0.056 | 0.052 | 0.048 | 0.046 | 0.041 | 0.037 | 0.034 | 0.029 | 0.025 | 0.022 | 0.022 | 0.018 | 0.015 | 0.012 |

注 对工字形或T形截面构件,应按表中 $\phi_1$ 值取用;对闭合箱形截面构件,表中 $\phi_1$ 值采用下列增大系数:当 $\epsilon \geq 1$ 时,乘1.3;当 $\epsilon < 1$ 时,乘 $(1+0.3\epsilon)$ 。增大后的 $\phi_1$ 值,不应大于轴心受压的稳定系数 $\phi_y$ (即本表中 $\epsilon=0$ 一栏中的数值)。

表 3-3 16Mn 钢和 16Mn q 偏心受压构件在平面外的稳定系数  $\phi_1$

| $\lambda \backslash \epsilon$ | 0     | 0.2   | 0.4   | 0.6   | 0.8   | 1.0   | 1.2   | 1.4   | 1.6   | 1.8   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 4.0   |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                             | 1     | 0.833 | 0.714 | 0.625 | 0.556 | 0.500 | 0.455 | 0.417 | 0.385 | 0.357 | 0.333 | 0.286 | 0.250 | 0.222 | 0.200 |
| 10                            | 0.993 | 0.823 | 0.705 | 0.617 | 0.549 | 0.494 | 0.449 | 0.412 | 0.381 | 0.353 | 0.330 | 0.283 | 0.247 | 0.220 | 0.198 |
| 20                            | 0.973 | 0.812 | 0.697 | 0.610 | 0.543 | 0.488 | 0.444 | 0.407 | 0.376 | 0.350 | 0.326 | 0.280 | 0.245 | 0.218 | 0.196 |
| 30                            | 0.940 | 0.800 | 0.687 | 0.602 | 0.536 | 0.483 | 0.439 | 0.404 | 0.372 | 0.346 | 0.323 | 0.277 | 0.242 | 0.216 | 0.194 |
| 40                            | 0.895 | 0.787 | 0.678 | 0.595 | 0.530 | 0.477 | 0.434 | 0.398 | 0.368 | 0.342 | 0.319 | 0.274 | 0.240 | 0.214 | 0.192 |
| 50                            | 0.840 | 0.755 | 0.670 | 0.586 | 0.523 | 0.471 | 0.429 | 0.393 | 0.364 | 0.338 | 0.315 | 0.271 | 0.237 | 0.211 | 0.190 |
| 60                            | 0.776 | 0.720 | 0.629 | 0.556 | 0.496 | 0.447 | 0.406 | 0.374 | 0.345 | 0.321 | 0.300 | 0.257 | 0.225 | 0.200 | 0.181 |
| 70                            | 0.705 | 0.646 | 0.586 | 0.526 | 0.469 | 0.423 | 0.385 | 0.353 | 0.326 | 0.304 | 0.284 | 0.244 | 0.213 | 0.190 | 0.171 |
| 80                            | 0.627 | 0.581 | 0.535 | 0.488 | 0.441 | 0.398 | 0.363 | 0.333 | 0.308 | 0.286 | 0.268 | 0.230 | 0.201 | 0.179 | 0.161 |
| 90                            | 0.546 | 0.512 | 0.477 | 0.443 | 0.408 | 0.374 | 0.346 | 0.315 | 0.289 | 0.269 | 0.251 | 0.216 | 0.189 | 0.168 | 0.152 |
| 100                           | 0.462 | 0.438 | 0.414 | 0.390 | 0.366 | 0.342 | 0.318 | 0.291 | 0.270 | 0.251 | 0.235 | 0.202 | 0.177 | 0.157 | 0.142 |
| 110                           | 0.384 | 0.368 | 0.351 | 0.334 | 0.318 | 0.301 | 0.284 | 0.267 | 0.247 | 0.230 | 0.215 | 0.185 | 0.162 | 0.145 | 0.131 |
| 120                           | 0.325 | 0.313 | 0.301 | 0.289 | 0.276 | 0.264 | 0.252 | 0.240 | 0.223 | 0.208 | 0.194 | 0.168 | 0.147 | 0.131 | 0.119 |
| 130                           | 0.279 | 0.269 | 0.259 | 0.249 | 0.239 | 0.228 | 0.218 | 0.208 | 0.198 | 0.185 | 0.173 | 0.149 | 0.131 | 0.117 | 0.106 |
| 140                           | 0.242 | 0.233 | 0.224 | 0.216 | 0.207 | 0.198 | 0.190 | 0.181 | 0.172 | 0.160 | 0.151 | 0.130 | 0.115 | 0.102 | 0.093 |
| 150                           | 0.213 | 0.204 | 0.196 | 0.187 | 0.179 | 0.170 | 0.162 | 0.153 | 0.145 | 0.135 | 0.127 | 0.110 | 0.097 | 0.087 | 0.079 |
| 160                           | 0.188 | 0.181 | 0.174 | 0.168 | 0.161 | 0.154 | 0.148 | 0.141 | 0.134 | 0.126 | 0.118 | 0.102 | 0.091 | 0.081 | 0.074 |
| 170                           | 0.168 | 0.162 | 0.157 | 0.151 | 0.146 | 0.140 | 0.135 | 0.129 | 0.124 | 0.116 | 0.109 | 0.095 | 0.084 | 0.075 | 0.068 |
| 180                           | 0.151 | 0.146 | 0.141 | 0.136 | 0.131 | 0.127 | 0.122 | 0.117 | 0.112 | 0.105 | 0.099 | 0.086 | 0.077 | 0.069 | 0.063 |
| 190                           | 0.136 | 0.131 | 0.127 | 0.122 | 0.118 | 0.114 | 0.109 | 0.105 | 0.101 | 0.094 | 0.089 | 0.078 | 0.069 | 0.062 | 0.057 |
| 200                           | 0.124 | 0.119 | 0.115 | 0.110 | 0.106 | 0.101 | 0.097 | 0.092 | 0.088 | 0.083 | 0.078 | 0.069 | 0.061 | 0.055 | 0.050 |

续表

| $\lambda \backslash \epsilon$ | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 25    | 30    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0                             | 0.182 | 0.167 | 0.154 | 0.143 | 0.133 | 0.125 | 0.111 | 0.100 | 0.091 | 0.077 | 0.067 | 0.059 | 0.053 | 0.048 | 0.038 | 0.032 |
| 10                            | 0.180 | 0.165 | 0.152 | 0.141 | 0.132 | 0.124 | 0.110 | 0.099 | 0.090 | 0.076 | 0.066 | 0.058 | 0.052 | 0.047 | 0.038 | 0.032 |
| 20                            | 0.178 | 0.163 | 0.151 | 0.140 | 0.131 | 0.123 | 0.109 | 0.098 | 0.089 | 0.076 | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.047 | 0.038 | 0.032 |
| 30                            | 0.176 | 0.162 | 0.149 | 0.139 | 0.129 | 0.121 | 0.108 | 0.097 | 0.088 | 0.075 | 0.065 | 0.057 | 0.051 | 0.046 | 0.037 | 0.031 |
| 40                            | 0.175 | 0.160 | 0.148 | 0.137 | 0.128 | 0.120 | 0.107 | 0.096 | 0.087 | 0.074 | 0.064 | 0.057 | 0.051 | 0.046 | 0.037 | 0.031 |
| 50                            | 0.173 | 0.158 | 0.146 | 0.136 | 0.127 | 0.119 | 0.106 | 0.095 | 0.087 | 0.073 | 0.063 | 0.056 | 0.050 | 0.045 | 0.037 | 0.031 |
| 60                            | 0.164 | 0.151 | 0.139 | 0.129 | 0.121 | 0.113 | 0.101 | 0.090 | 0.082 | 0.070 | 0.060 | 0.053 | 0.048 | 0.043 | 0.035 | 0.030 |
| 70                            | 0.156 | 0.143 | 0.132 | 0.122 | 0.114 | 0.107 | 0.095 | 0.086 | 0.078 | 0.066 | 0.057 | 0.051 | 0.045 | 0.041 | 0.033 | 0.028 |
| 80                            | 0.147 | 0.135 | 0.124 | 0.115 | 0.108 | 0.101 | 0.090 | 0.081 | 0.074 | 0.062 | 0.054 | 0.048 | 0.043 | 0.039 | 0.031 | 0.027 |
| 90                            | 0.138 | 0.127 | 0.117 | 0.109 | 0.101 | 0.095 | 0.084 | 0.076 | 0.069 | 0.059 | 0.051 | 0.045 | 0.040 | 0.036 | 0.029 | 0.025 |
| 100                           | 0.129 | 0.118 | 0.109 | 0.102 | 0.095 | 0.089 | 0.079 | 0.071 | 0.065 | 0.055 | 0.048 | 0.042 | 0.038 | 0.034 | 0.026 | 0.023 |
| 110                           | 0.119 | 0.109 | 0.101 | 0.094 | 0.087 | 0.082 | 0.073 | 0.066 | 0.060 | 0.051 | 0.044 | 0.039 | 0.035 | 0.031 | 0.023 | 0.021 |
| 120                           | 0.108 | 0.099 | 0.092 | 0.085 | 0.080 | 0.075 | 0.067 | 0.060 | 0.055 | 0.046 | 0.040 | 0.035 | 0.032 | 0.029 | 0.019 | 0.019 |
| 130                           | 0.097 | 0.089 | 0.082 | 0.076 | 0.071 | 0.067 | 0.060 | 0.054 | 0.049 | 0.041 | 0.036 | 0.032 | 0.029 | 0.026 | 0.018 | 0.017 |
| 140                           | 0.084 | 0.078 | 0.072 | 0.067 | 0.063 | 0.059 | 0.052 | 0.047 | 0.043 | 0.037 | 0.032 | 0.028 | 0.025 | 0.023 | 0.017 | 0.015 |
| 150                           | 0.072 | 0.066 | 0.061 | 0.057 | 0.053 | 0.050 | 0.045 | 0.040 | 0.037 | 0.031 | 0.027 | 0.024 | 0.021 | 0.019 | 0.016 | 0.013 |
| 160                           | 0.067 | 0.062 | 0.057 | 0.053 | 0.050 | 0.047 | 0.042 | 0.038 | 0.035 | 0.029 | 0.025 | 0.023 | 0.020 | 0.018 | 0.015 | 0.012 |
| 170                           | 0.062 | 0.57  | 0.053 | 0.050 | 0.046 | 0.044 | 0.039 | 0.35  | 0.032 | 0.027 | 0.024 | 0.021 | 0.019 | 0.017 | 0.014 | 0.012 |
| 180                           | 0.057 | 0.053 | 0.049 | 0.046 | 0.043 | 0.040 | 0.036 | 0.033 | 0.032 | 0.025 | 0.022 | 0.019 | 0.017 | 0.016 | 0.013 | 0.011 |
| 190                           | 0.052 | 0.048 | 0.044 | 0.042 | 0.039 | 0.036 | 0.033 | 0.030 | 0.027 | 0.023 | 0.020 | 0.018 | 0.016 | 0.014 | 0.012 | 0.010 |
| 200                           | 0.046 | 0.042 | 0.039 | 0.037 | 0.034 | 0.032 | 0.029 | 0.026 | 0.024 | 0.020 | 0.018 | 0.016 | 0.014 | 0.013 | 0.010 | 0.009 |

注 对工字形或 T 形截面构件,应按表中  $\phi_1$  值取用;对闭合箱形截面构件,表中  $\phi_1$  值采用下列增大系数:当  $\epsilon \geq 1$  时,乘 1.3;当  $\epsilon < 1$  时,乘  $(1+0.3\epsilon)$ 。增大后的  $\phi_1$  值,不应大于轴心受压的稳定系数  $\phi_y$  (即本表中  $\epsilon=0$  一栏中的数值)。

按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{\phi_1 A} \leq [\sigma] \quad (3-33)$$

$$\epsilon = \frac{M}{N} \frac{A}{W}$$

$$\lambda_y = \frac{l_y}{r_y}$$

式中： $\lambda_y$  为支臂在弯矩作用平面外的长细比； $\phi_1$  为弯矩作用平面外的稳定系数，根据截面形式、偏心方向、偏心率  $\epsilon$  及长细比  $\lambda$  按表 3-2 和表 3-3 选用； $l_y$  为支臂两侧向固定点之间的长度； $r_y$  为支臂在弯矩作用平面外的回转半径。

### 3. 支臂的局部稳定性

当采用组合式工字钢截面尺寸时，翼缘外伸宽度一般小于其厚度的 15 倍，腹板高度一般小于其厚度的 60 倍，否则容易丧失局部稳定性。如果不能满足局部稳定要求，则应采用加劲肋板以加强。

### (三) 支臂与主横梁连接计算

支臂与主梁的交接处，一般用粗制螺栓联结（图 3-12），螺栓承受弯曲力矩，在受拉状态下工作，悬臂侧最外边的螺栓受到最大的拉力，小型闸门可采用焊接联结。此处还应设置抗剪板来承受剪力（即侧推力）。抗剪板与垫的接触面需刨平顶紧，并在工厂

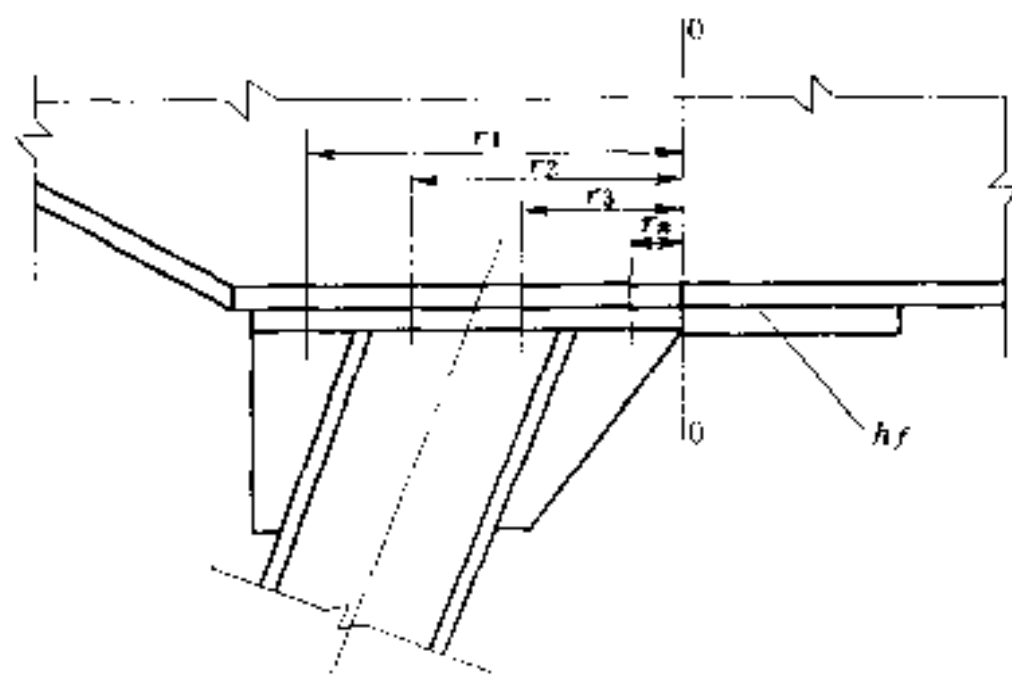


图 3-12 支臂与主横梁的连接计算图

内组装好螺栓后，用贴角焊缝焊在主梁的后翼缘上。

### 1. 螺栓联结计算

螺栓承受由弯矩产生的拉力，最大拉力为

$$N_{\max} = \frac{M_h r_1}{m \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (3-34)$$

式中： $m$  为螺栓排数； $r_i$  为螺栓中心离基准线 0—0 的距离； $M_h$  为支臂与主横梁连接处弯矩。

根据最大拉力和螺栓容许拉应力  $[\sigma_t]$  确定螺栓直径  $d$ ：

$$d \geq \sqrt{\frac{4N_{\max}}{\pi[\sigma_t]}} \quad (3-35)$$

式中： $[\sigma_t]$  为螺栓的容许拉应力。

### 2. 抗剪板焊缝计算

抗剪板承受框架水平推力所产生的剪应力应满足焊缝容许剪应力的要求，其焊缝高度  $h_f$  为

$$h_f \geq \frac{H'}{2 \times 0.7 l_f [\tau_t]} \quad (3-36)$$

式中： $H'$  为框架水平推力； $l_f$  为焊缝长度； $[\tau_t]$  为焊缝容许应力。

## 第三节 弧形钢闸门的零部件及启闭力

### 一、支铰

支铰承受弧形闸门全部水压力和启闭过程中的部分启闭力和闸门自重，并将荷载传递至闸墩上。支铰同时又是弧门的转动中心，使闸门绕铰轴转动。

支铰的形式有圆柱铰、球形铰、双圆柱铰及锥形铰，所有支铰都由铰链、铰轴及铰座三个主要部分组成。

圆柱铰结构简单、自重较轻、制造安装方便，因而造价低，应用最为广泛。如图 3-13 所示，铰链用螺栓连接在支承框架的垫板上，铰座用锚栓固定在闸墩的牛腿或支承梁上，铰座底板的布置方向通常与关门时的水压合力相垂直，铰轴通过轴端挡板使之固

定在铰座的承轴板上，轴套则压固在铰链孔内。考虑弧门有侧推力存在，因而需装设由耐磨材料制成的垫圈。

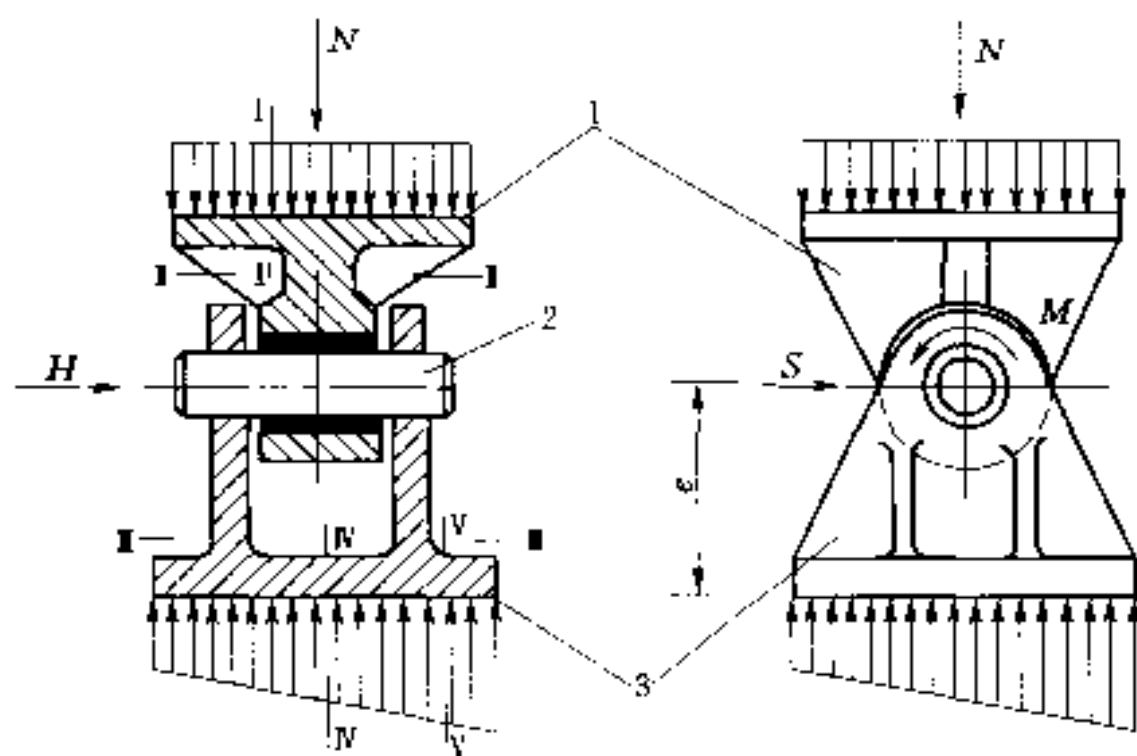


图 3-13 圆柱铰的结构和受力

1—铰链；2—轴；3—铰座

圆柱铰铰链和铰座常用铸钢 ZG230-450 制成，荷载较大时可用铸钢 ZG270-500 或 ZG310-570。铸件设计应注意铸件的工艺性能并符合铸件结构要素的要求，特别要注意结构的轮廓，厚薄均匀适当，肋板和顶、底板之间的连接要平缓。铰轴一般采用 35 号、45 号优质碳素钢锻制，荷载大的高水头弧门则用合金结构钢锻制，轴套采用青铜、复合材料等制成。

圆柱铰只能使闸门绕水平轴旋转。当弧形闸门承载使支臂末端发生与支铰轴线相垂直的角位移时，可增设一与支铰轴线垂直的圆柱形轴承或球形轴承，如图 3-14 所示。这样，弧形闸门的支铰更符合框架计算时铰接的假设，避免固端力矩发生，但因在支铰上会产生很大的摩擦力矩，完全避免固端力矩也是不可能的。双圆柱铰和球形铰构造复杂，造价高，一般只在大跨度的斜支臂弧形闸门中应用。目前，球形铰通常采用大型标准系列产品球形轴承。

跨度较大的斜支臂弧门，支臂的平面角度较大，水压力、侧推力也较大，用钢筋混凝土牛腿较困难时，可采用锥形铰，如图

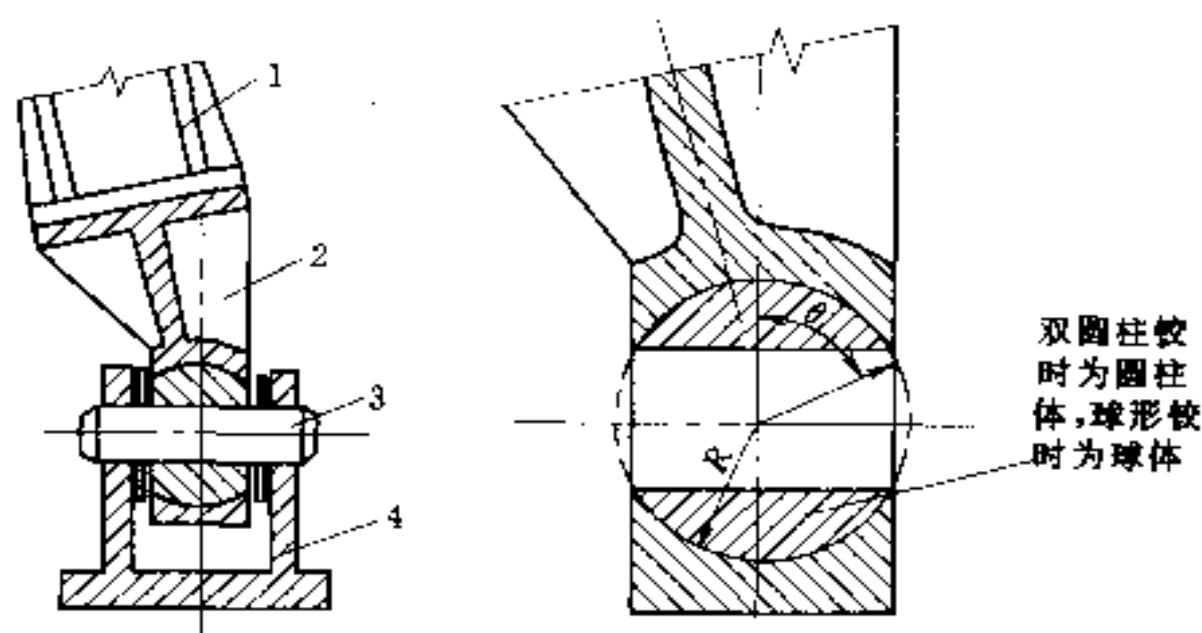


图 3-14 双圆柱铰或球形铰的结构

1—支臂；2—铰链；3—轴；4—铰座

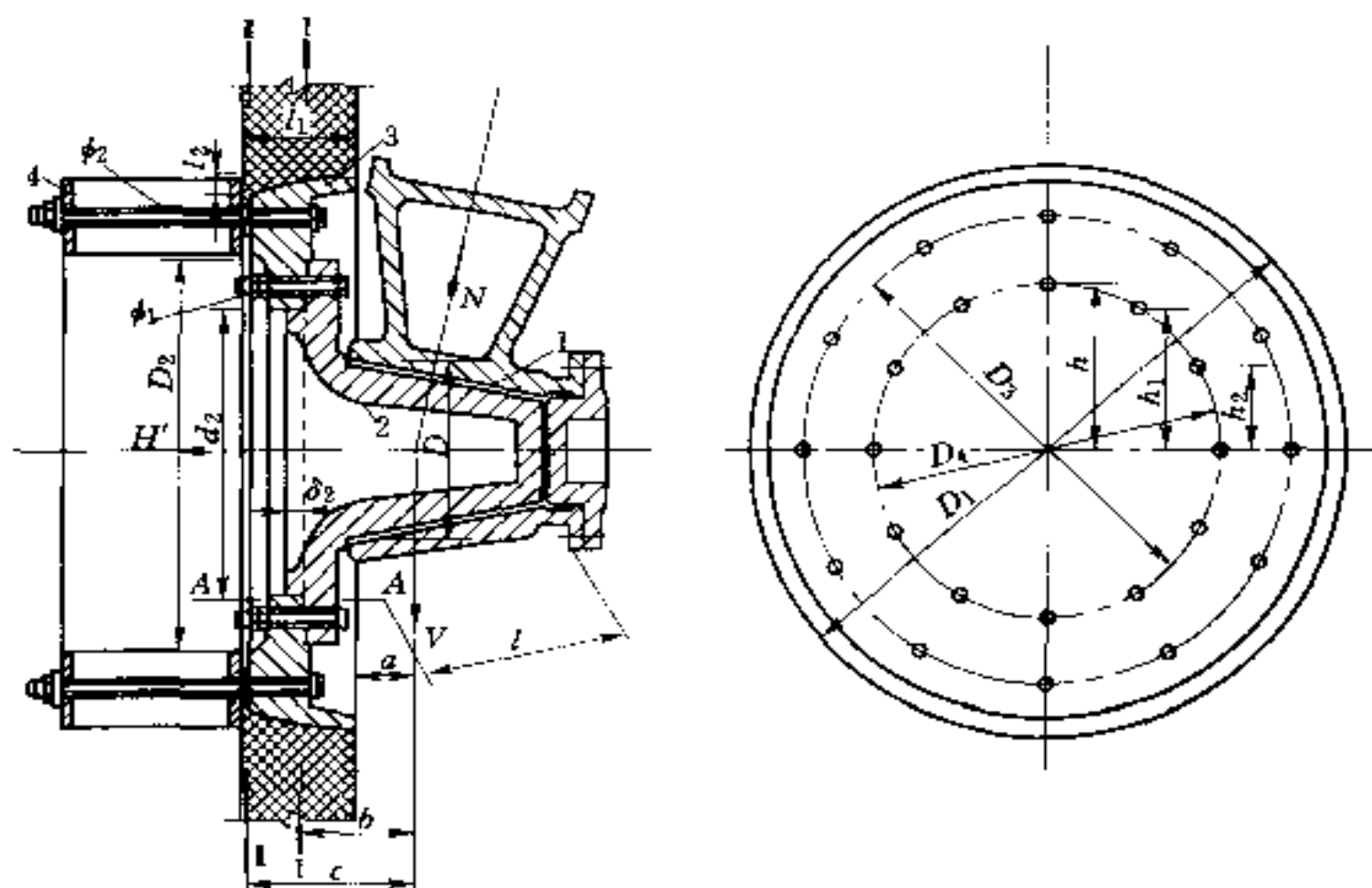


图 3-15 锥形铰的结构

1 轴套；2—轴；3—支撑环；4—基础环

3-15 所示。锥形铰的轴为圆锥形，其锥线与支臂轴线垂直。由支臂传来的力垂直于锥轴表面，锥面接触良好，受力均匀。力  $V$  对 I—I 和 II—II 断面的力矩全部由螺栓承受，侧推力  $H'$  则由锥轴通过锥面支承环直接传至闸墩。但锥形铰结构复杂、尺寸大、重

量大、制造安装难度大，造价高，且有固端力矩发生，工程实际中一般较少采用。

支铰上的荷载：图 3-16 所示为启门过程中作用在支铰上的荷载。 $P$  为总水压力的一半， $G$  为闸门自重的一半， $Q$  为启门力的一半， $R$  则为  $G$  和  $Q$  的合力， $P$  和  $R$  的合力为  $F$ ， $F$  可分解为垂直和平行铰座底面的分力  $N$  和  $S$ 。支铰承受的水平力  $H$  为上下框架侧向推力  $H'$  之和。除上述工况外，支铰零部件设计还应验算闸门关闭挡水不承受启闭力及安装等工况的荷载组合作用下的强度。

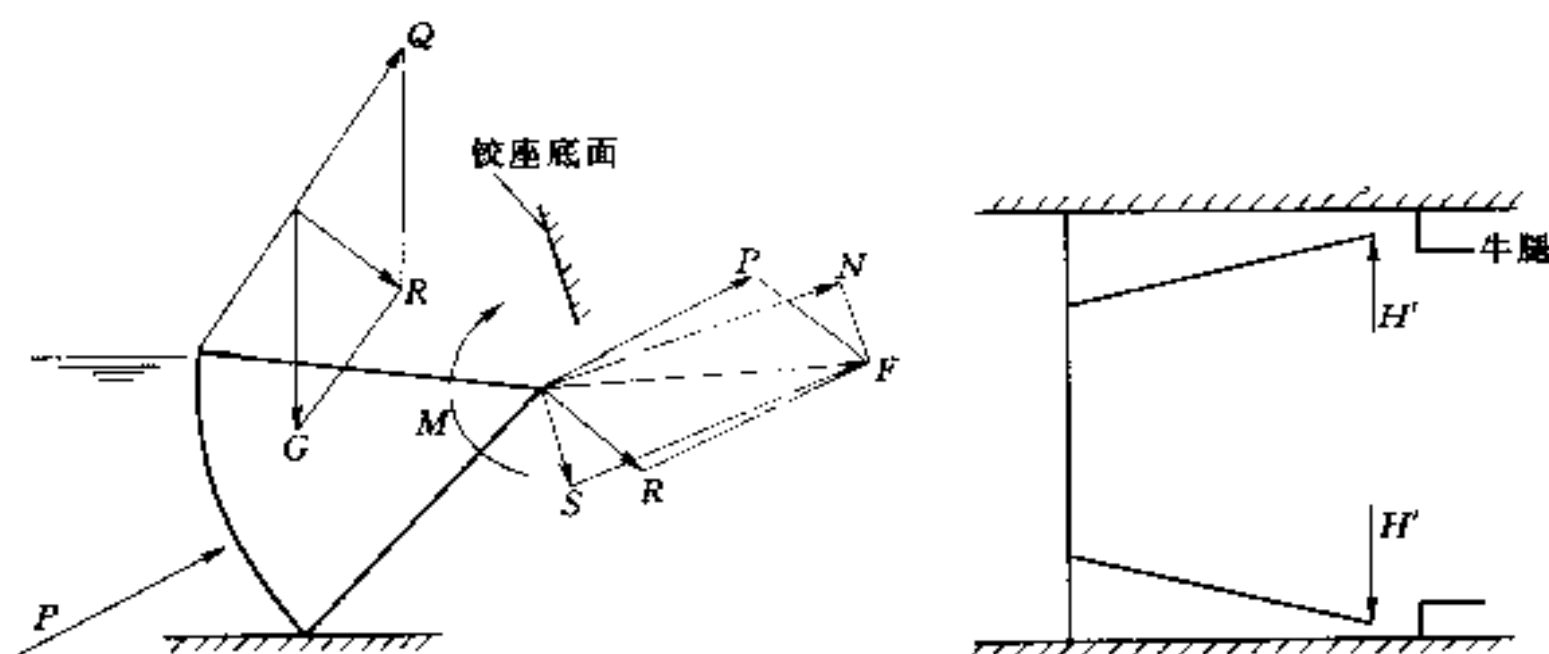


图 3-16 弧形闸门支铰受力简图

### (一) 圆柱铰的计算

#### 1. 铰轴的计算

铰轴和轴套的计算，可按平面闸门简支轮的轮轴的计算方法进行。

#### 2. 铰链的计算

铰链在轴孔处的厚度（即轴套长）应在铰轴计算中与轴径  $d_0$  同时确定。由轴孔孔壁至铰链端部的厚度不应小于  $0.65d_0$ 。当支臂受拉时，应验算孔端的拉应力。

铰链与支臂通常采用粗制螺栓相连，承受两个方向的偏心力矩所引起的拉力，其一是由于力  $N$  与力  $H'$  不通过螺栓群中心而产生的力矩；其二是由于力  $S$  所引起的偏心力矩。分别算出边缘螺栓的拉力  $N_1$  和  $N_2$ ，据此可计算螺栓直径。

图 3-17 所示为铰链支承板的受力情况, 其悬臂部分 A-A 截面的弯曲应力为

$$\sigma = \frac{M_A}{W_A} \leq [\sigma] \quad (3-37)$$

$$M_A = \frac{Na}{2}$$

$$W_A = \frac{B\delta^2}{6}$$

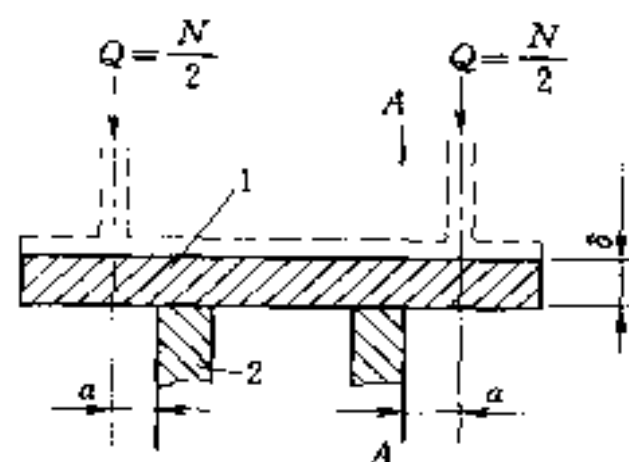


图 3-17 铰链支承板的受力情况  
1—支撑板；2—中间肋板

式中：B 为支承板的宽度。

### 3. 铰座的计算

(1) 铰座底板面积。当支铰埋设在混凝土牛腿上时，底板面积（图 3-18）应根据混凝土承压强度来决定。支铰底板在作用力 N、S 和 H 的共同作用下（图 3-13），其支承混凝土表面承压力应满足：

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{LB} + \frac{6Se}{LB^2} + \frac{6He}{L^2B} = \sigma_N + \sigma_S + \sigma_H \leq [\sigma_k] \quad (3-38)$$

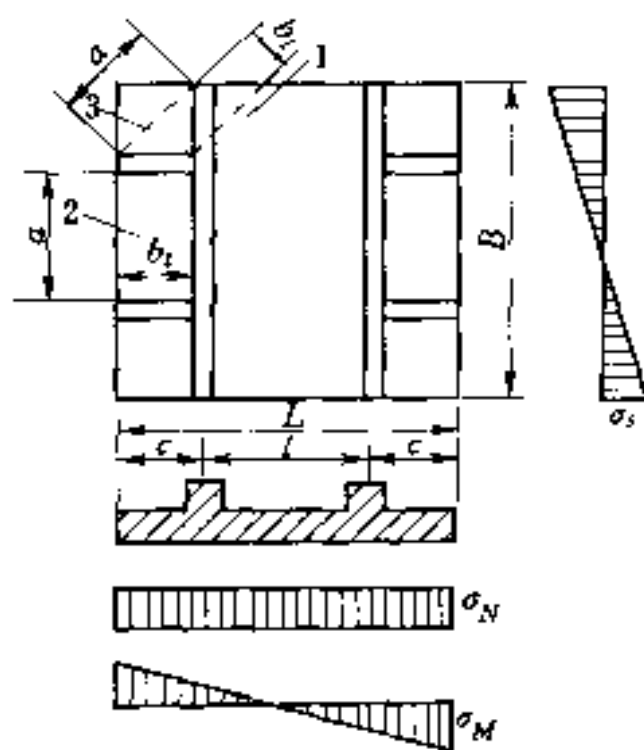


图 3-18 铰座底板的受力情况  
1—两边支承板；2—三边简支  
一边自由板；3—两相邻边简  
支另两边自由板

式中：e 为支铰轴中心（即 S 和 H 的作用点）到铰座底面的距离（图 3-13）；B、L 为底板的边长； $\sigma_N$ 、 $\sigma_S$ 、 $\sigma_H$  为分别由力 N、S 和 H 在底板上引起的承压应力； $[\sigma_k]$  为混凝土的容许承压应力。

(2) 铰座底板的厚度。如图 3-18 所示，底板厚度可分别按两边支承板；三边简支、另一边自由板；两相邻边简支、另两边自由的板来计算。其均匀荷载 q 可近似地认为等于  $\sigma_N$ 。则单位宽度的底板上所受的最大弯矩计算有以下两种形式。

当两边支承时：

$$M = \frac{ql^2}{8} - \frac{qc^2}{2} \quad (3-39)$$

当三边简支或两相邻边简支时：

$$M = \beta qa^2 \quad (3-40)$$

式中： $l$  和  $c$  为两边支承板的跨长与悬臂长； $\beta$  为系数，根据  $b_1/a$  值由表 3-4 查出，其中  $b_1$  和  $a$  的意义见图 3-18。

表 3-4  $\beta$  系 数 值

| $b_1/a$ | 0.50  | 0.60  | 0.70  | 0.80  | 0.90  | 1.00  | 1.20  | 1.40  | 2.00  | $>2.00$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| $\beta$ | 0.060 | 0.074 | 0.088 | 0.097 | 0.107 | 0.112 | 0.120 | 0.126 | 0.132 | 0.133   |

底板厚度可根据上述几种支承情况求得的最大弯矩来计算：

$$\delta = \sqrt{\frac{6M_{\max}}{[\sigma]}} \quad (3-41)$$

## (二) 球形铰和双圆柱铰的计算

### 1. 双圆柱铰的计算

双圆柱铰的铰链与双圆柱间的压应力按下式计算：

$$\sigma = m \frac{P}{Rl} \leq [\sigma] \quad (3-42)$$

$$m = \frac{1}{\sin\theta\cos\theta + \frac{\pi\theta}{180}} \quad (3-43)$$

式中： $P$  为双圆柱铰上的荷载； $R$  为双圆柱表面的半径； $l$  为圆柱衬套的长度； $m$  为与  $\theta$  角有关的系数， $\theta$  角为铰链与双圆柱衬套包角的一半（图 3-14）。

双圆柱铰的其他部分的计算与圆柱铰相同。

### 2. 球形铰的计算

球与球座间的压应力为

$$\sigma = m_1 \frac{P}{R^2} \leq [\sigma] \quad (3-44)$$

$$m_1 = \frac{3}{2\pi(1 - \cos^3\theta)} \quad (3-45)$$

式中：\$P\$ 为球形铰的荷载；\$R\$ 为球形衬套表面的半径；\$m\_1\$ 为与 \$\theta\$ 角有关的系数，\$\theta\$ 角为球与球座沿轴向包角的一半（图 3-14）。

其余计算同前。

## 二、止水及埋件

### （一）止水

#### 1. 侧止水

露顶式弧形闸门的侧止水，可采用如图 3-19 所示的布置方式。图 3-19 中，(a) 为“L”形橡皮止水；(b)、(c) 为圆头“P”形橡皮止水，安装时一般预留压缩量 3~5mm。

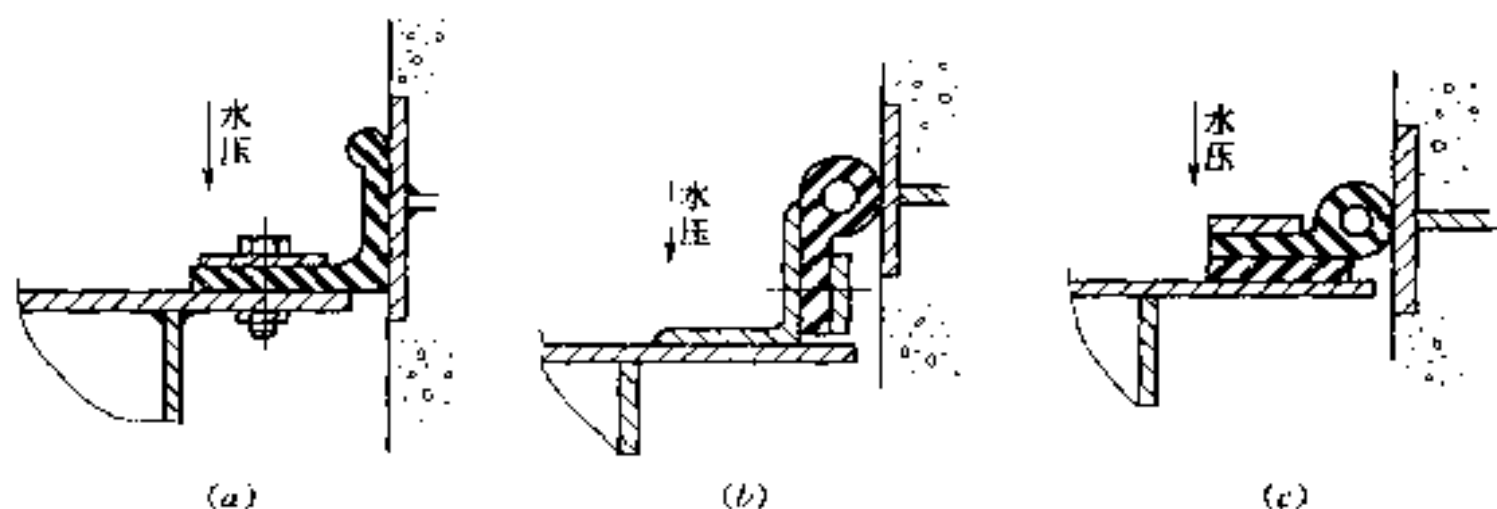


图 3-19 露顶式弧形闸门的侧止水

潜孔式弧形闸门的侧止水，一般采用方头“P”形橡皮（图 3-20），并使止水橡皮外侧面与面板形成同一弧面，以便与顶止水相配合。

#### 2. 底止水

露顶式弧形闸门的底止水，可采用如图 3-21 所示的橡皮止水。潜孔式弧形闸门，特别是采用双道顶止水的弧门，在闸门启闭过程中，固定在门楣上的顶止水始终要与面板接触，因此底止水的任何零件不能突出面板，故

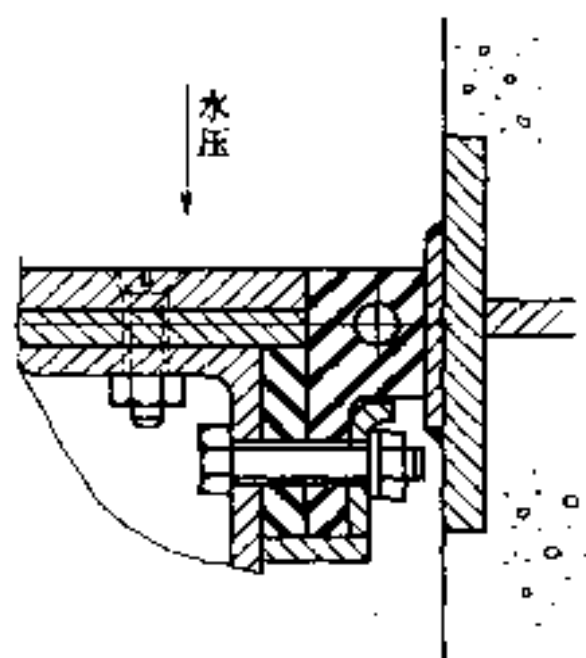


图 3-20 潜孔式弧形闸门的侧止水

其底止水设于面板下游面，并采用沉头螺栓连接（图 3-22）。这种结构往往要求弧形闸门的面板与底槛埋件接触，因此面板底部要加工成斜面。

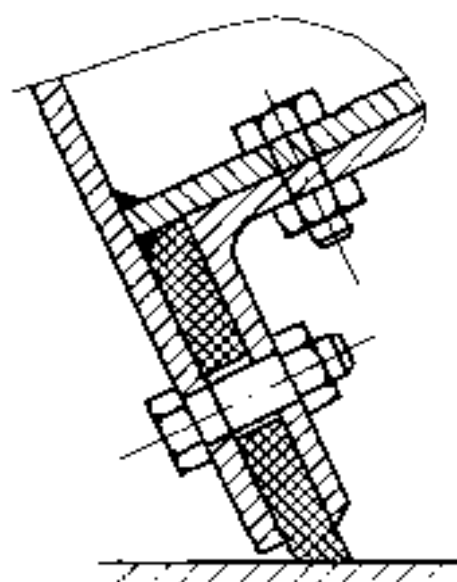


图 3-21 露顶式弧形  
闸门的底止水

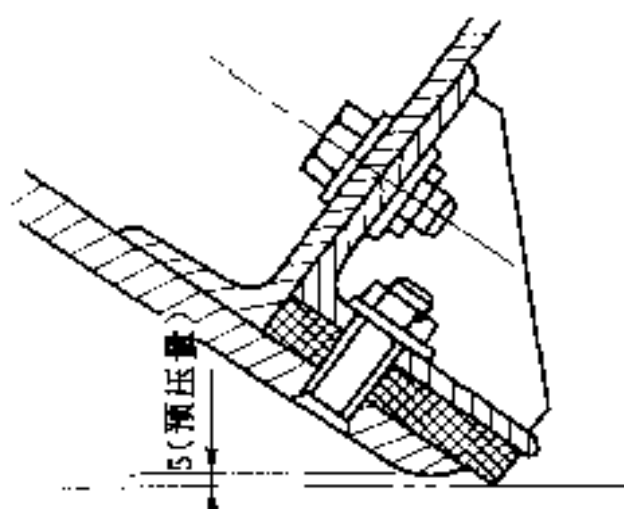


图 3-22 潜孔式弧形  
闸门的底止水

### 3. 顶止水

弧形闸门顶止水一般设在迎水面。由于弧形闸门面板和门楣埋件存在不同程度的制造安装误差，加上闸门承受水压后，门叶的弯曲变形与支臂的压缩变形累加，可使闸门径向变位较大，高水头弧形闸门可达到 20~30mm，因此弧形闸门的顶止水应具有较大的适应性能。否则，往往因为顶止水选型与布置不当而造成严重漏水及在闸门局部开启时门顶射流，进而造成止水橡皮的撕裂或引起闸门的振动，因此必须加以重视。

水头不高的小型潜孔弧形闸门及反向弧形闸门，其顶止水可参考平面闸门止水的布置。

高水头弧形闸门的顶止水宜设置两道，即门叶上和门楣上各一道。门楣上的止水和面板弧度的配合精度，应满足闸门启闭过程中的止水要求，这样闸门在任何开度时门顶都不致形成射流，而当门关闭后，门叶上的一道止水又紧靠埋件，发挥第二道止水作用。

由于比较重视，近年来国内外研究了多种止水形式。门叶上的止水大多采用圆头或方头“P”形止水橡皮，而门楣上的止水形

式变化较多, 常见的如图 3-23 所示。

图 3-23 (a) 为具有活动铰的顶止水结构, 顶止水支座通过多个同心的铰轴与固定在门楣上的铰座相连, 在水压的作用下, 止水始终紧贴在门叶面板上, 可避免闸门启闭过程中产生射流。但这种结构对铰轴的同轴度和面板弧面的精度要求较高, 而且与侧止水的连接也比较难处理。

图 3-23 (b) 为圆滚浮子式顶止水结构, (c) 为“Ω”形顶止水结构。利用上游水压力将其压紧于门叶上。其防漏效果一般都较好, 但要求弧形闸门的面板上游表面平整, 曲率半径正确, 闸门向下游的变形量不能太大。若加工与安装精度不良, 则可能造成失效, 而且由于启闭过程中总与面板接触, 故磨损较快。图

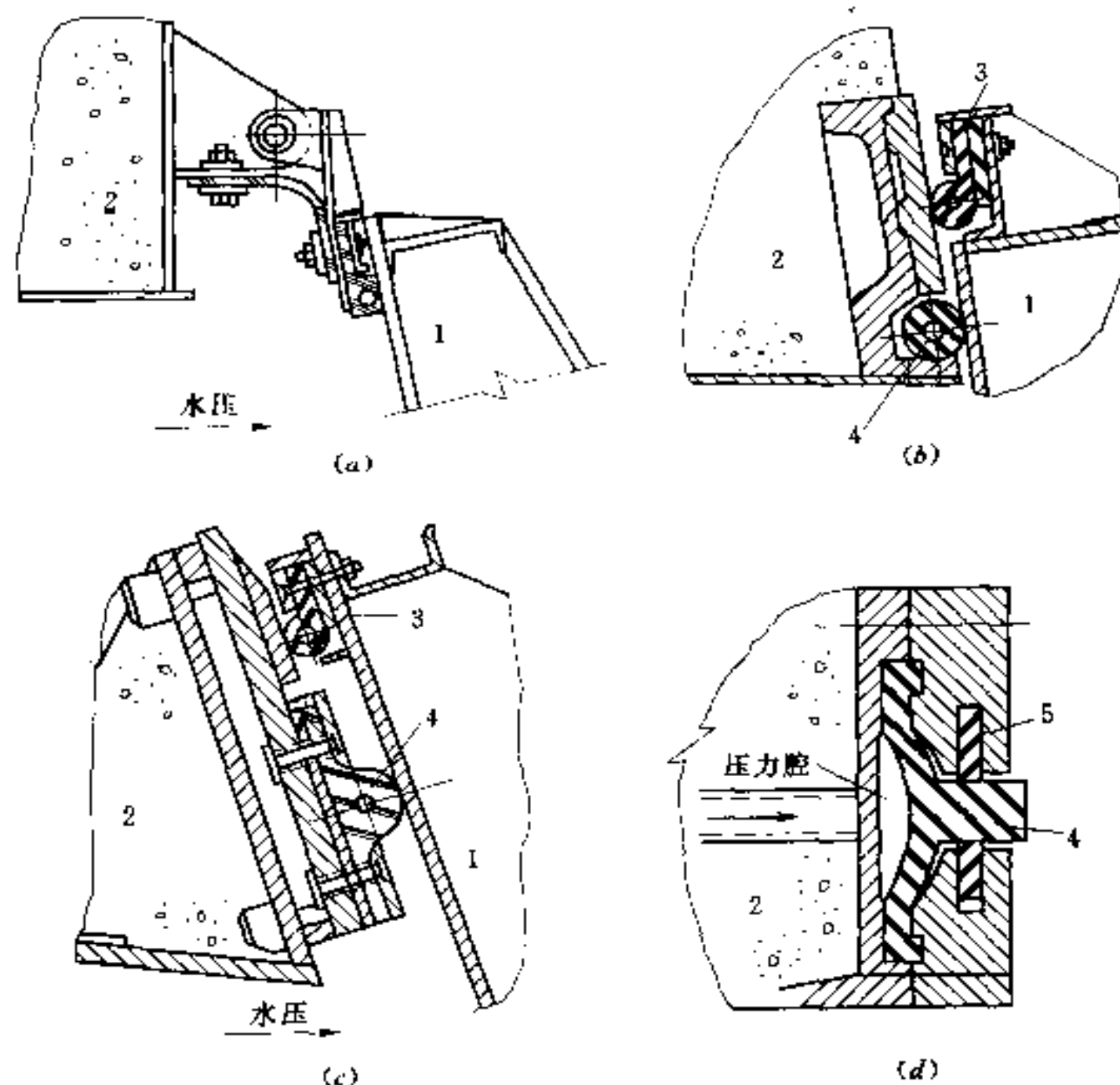


图 3-23 潜孔式弧形闸门的顶止水

1—门叶; 2—胸墙; 3—门叶止水; 4—胸墙止水; 5—密封圈

3-23 (b)中的浮子橡皮易扭曲变形,以至撕断损坏。图 3-23 (d)是一种伸缩式顶止水,也称液压变形止水,其工作原理是向止水橡皮背后压力腔内通以高压水或高压空气,使橡皮变形前伸来止水。而在启闭闸时,则通过降低压力腔内的压力,使止水弹回原来位置,以减少磨损和降低启闭力。其缺点是需要增加一套充泄压设施,结构复杂,造价高。

另外,深孔式弧形闸门也有采用偏心铰装置压紧式止水的,它利用支铰轴的偏心构造,采用液压启闭机转动拐臂使支铰轴转动,达到使弧形闸门前后微量移动一个止水压缩行程,以达到止水和减少止水磨损的目的。

需要注意的是,深孔弧形闸门的止水效果不仅与止水的结构形式有关,还与门叶结构的刚度、埋件的形式和制造安装精度有很大的关系。

## (二) 埋件

图 3-24 为采用圆柱铰的弧形闸门的埋件布置图。

门楣结构应根据顶止水的结构形式而定,见图 3-25。装设两道止水的闸门,其门楣埋件除设置门叶顶止水的止水座外,还设置有用安装门楣顶止水的支座。弧形闸门的底槛构造与平面闸门相同,一般用型钢制成,也有用钢板焊接而成的。

侧止水座板及侧轨:弧形闸门的侧止水沿弧形闸门面板的弧度而紧贴于门体两侧,因此其形状是弧线形的。相应地侧止水座板也应按止水形式布置,在设有侧轮的弧形闸门中,还需设置侧轨,侧轨的形式及构造也是按弧线形的运行轨迹设计,在设计时通常将侧轨与侧止水座板连接在一起,一般用型钢或钢板制作,表面焊不锈钢止水座板(图 3-24)。

弧形闸门支铰座的埋设件:为便于弧形支铰座的安装和施工,并提供较正确的基准面,一般在铰座混凝土支承处埋设定位座板或支承钢梁。前者一般用于露顶式或闸墩牛腿上的弧门支铰座;而后者则用于潜孔式或水头高的弧门支铰座,且其受力或传力状况都较好,定位也较准确。图 3-26 是设有定位座板的埋件结构形式。

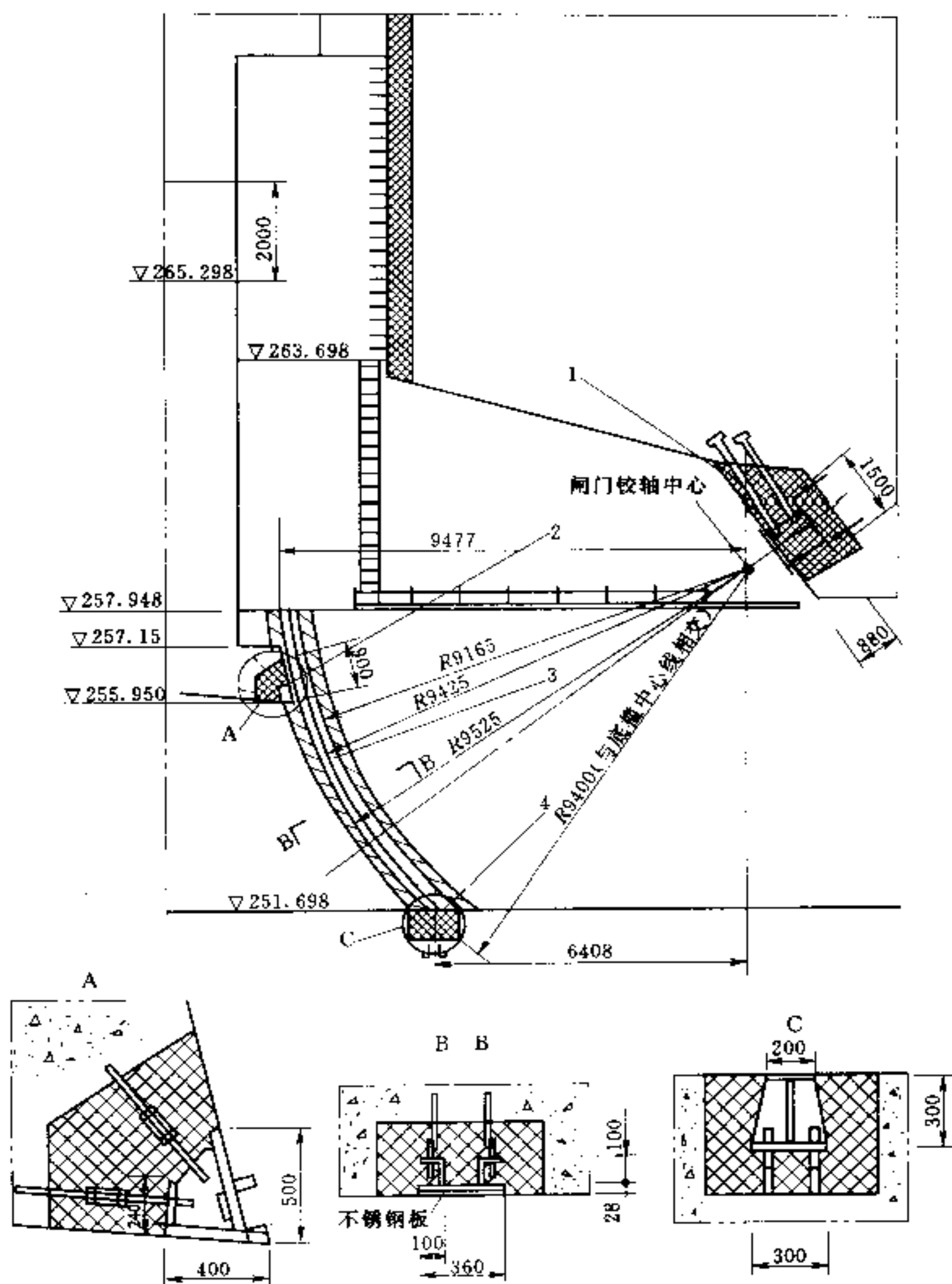


图 3-24 潜孔弧形闸门埋件布置图

1—支铰基础；2—门楣；3—侧轨（侧止水座及侧轮座）；4—底槛

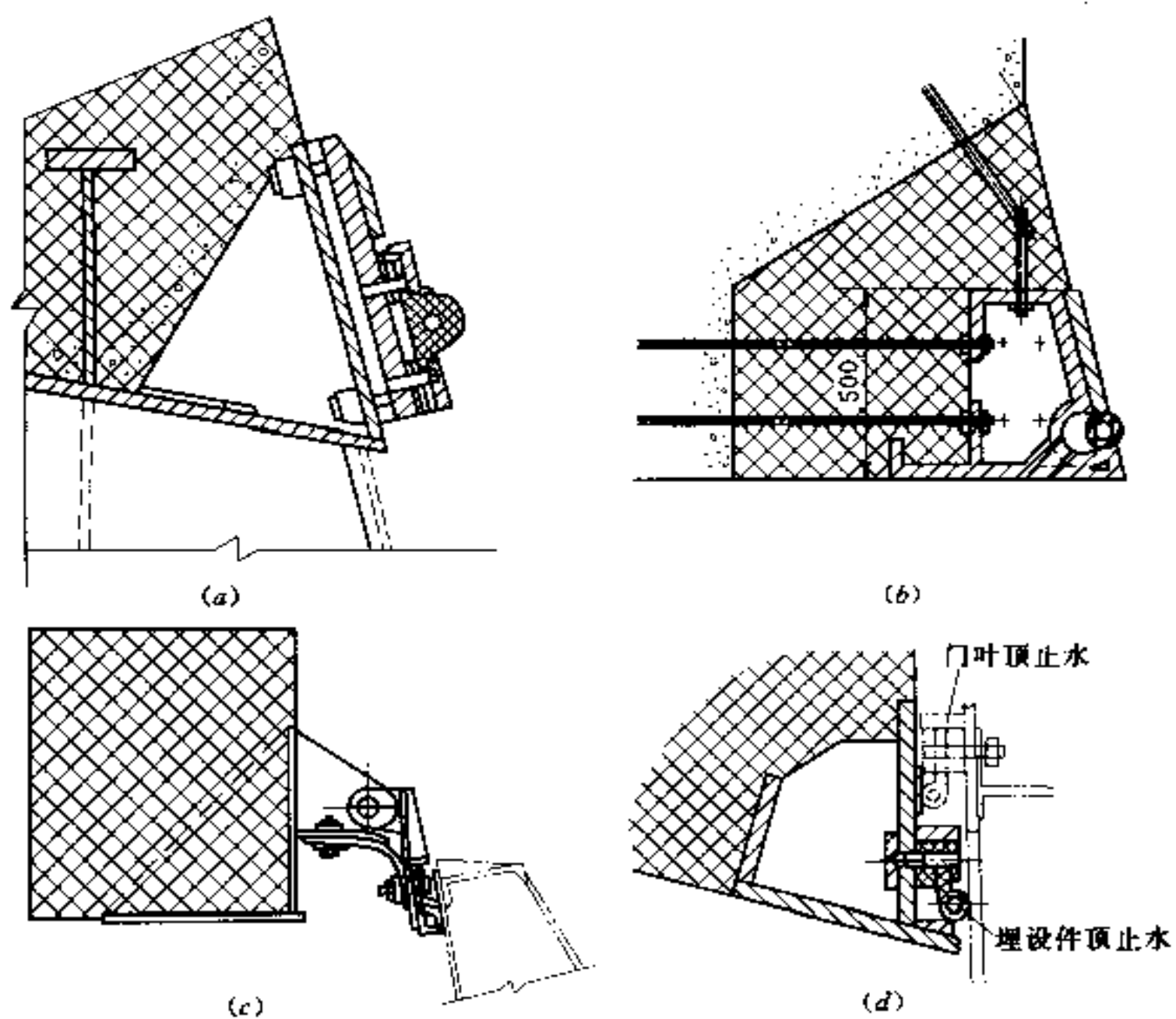


图 3-25 弧形闸门门楣结构

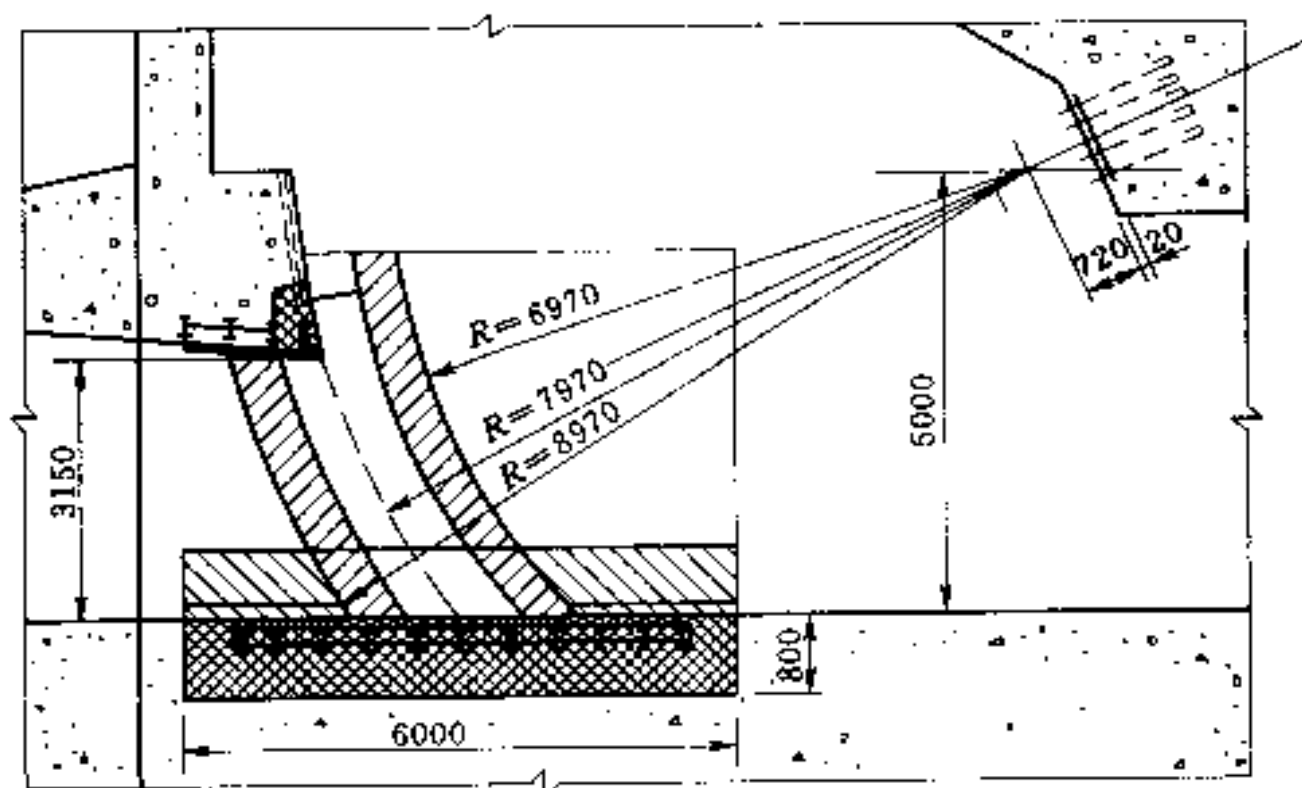


图 3-26 支铰座处埋设座板的结构形式

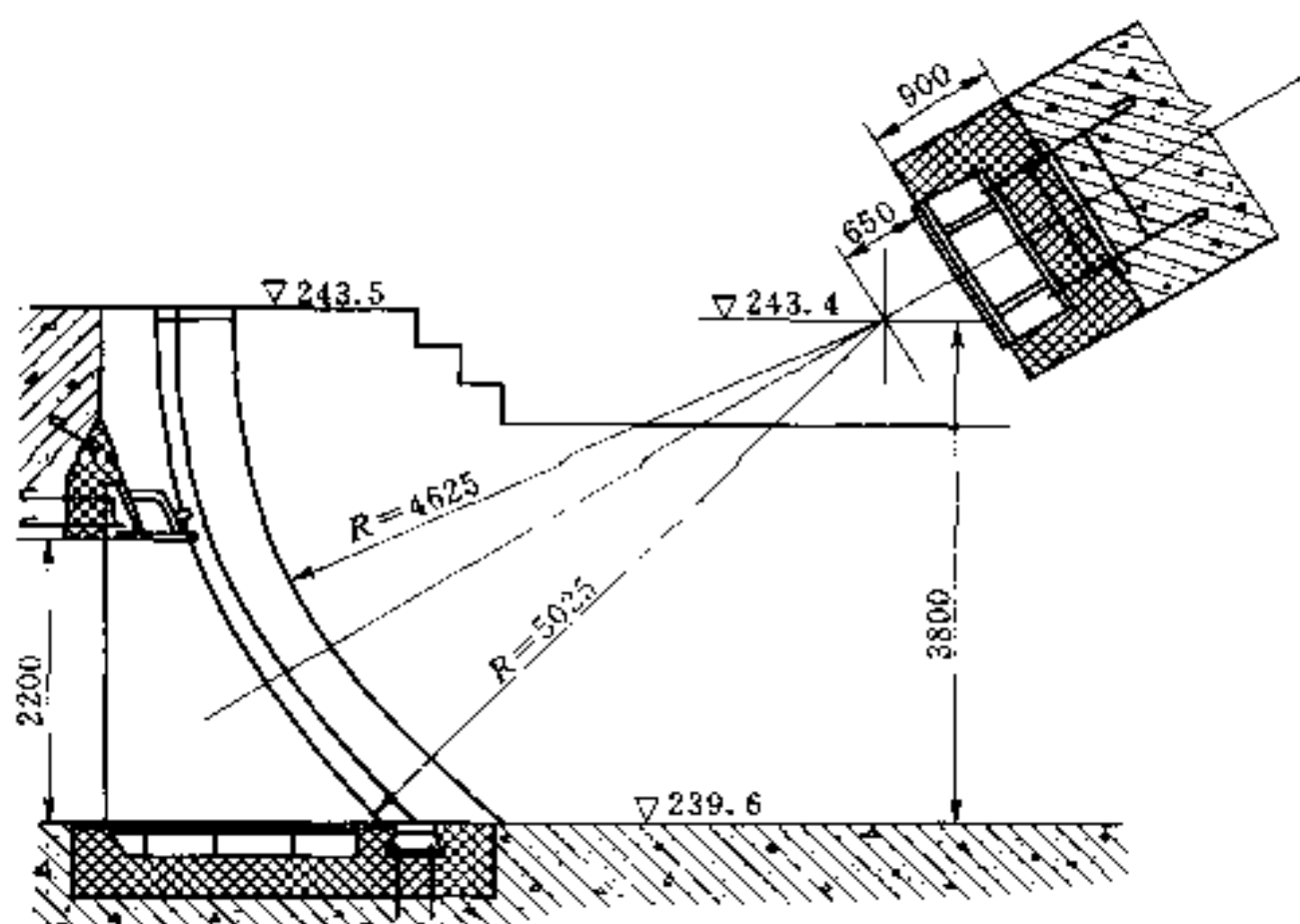


图 3-27 支铰座处埋设钢梁的结构形式

图 3-27 是设有支承钢梁的埋件结构形式。弧形闸门支铰座安装在支承钢梁上时，支承钢梁的埋固形式如图 3-28 所示。弧形闸门采用锥形铰时，需在闸墩中预埋支承环，其结构形式如图 3-29 所示。

### 三、启闭力

弧形闸门启闭力计算简图如图 3-30 所示。

#### 1. 闭门力 $F_w$ 的计算

$$F_w = \frac{1}{R_1} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + P_t r_2 - n_G G r_2] \quad (3-46)$$

计算结果  $F_w$  为正值时则需加重； $F_w$  为负值时，闸门依靠自重可以关闭。

#### 2. 启门力 $F_Q$ 的计算

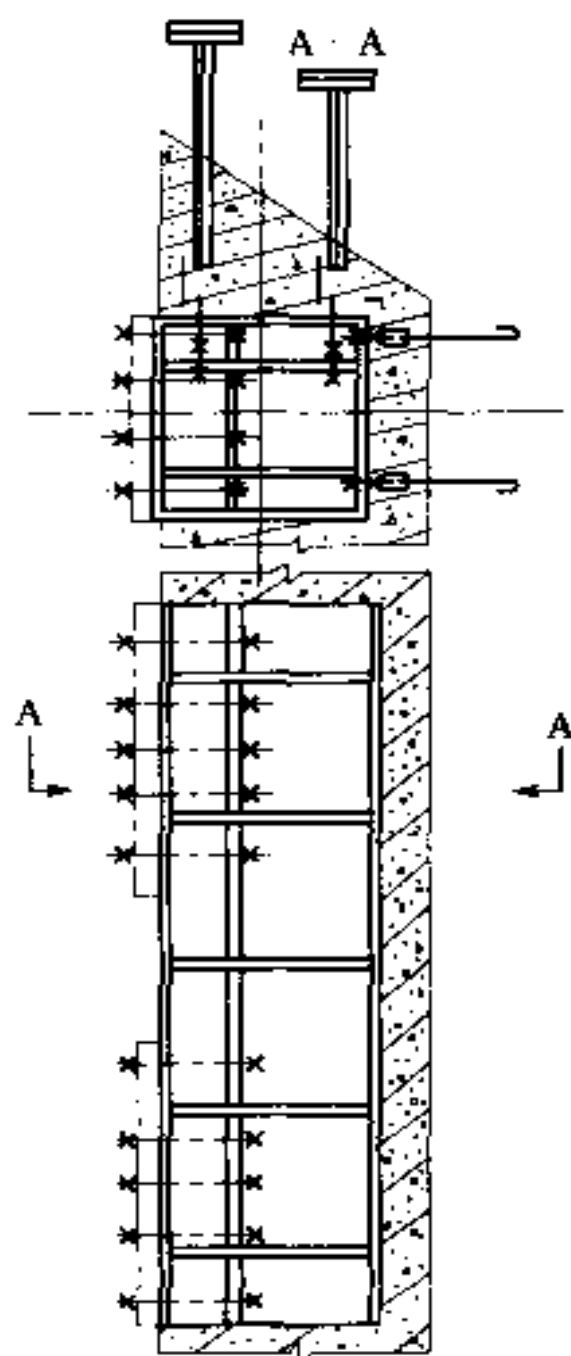


图 3-28 支承钢梁的埋固形式

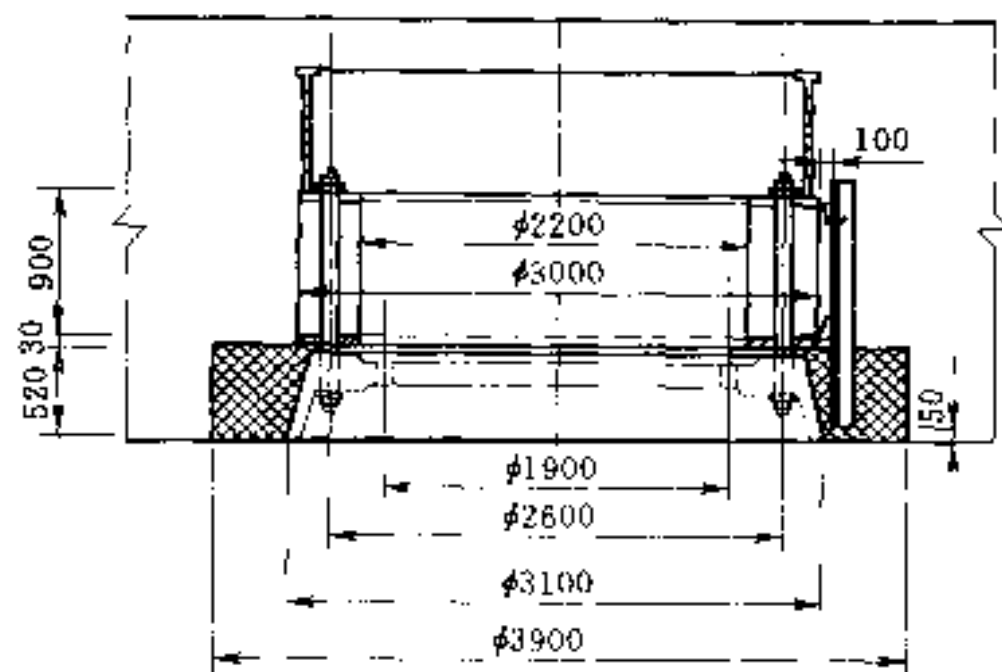


图 3-29 锥形铰预埋支承环的结构形式

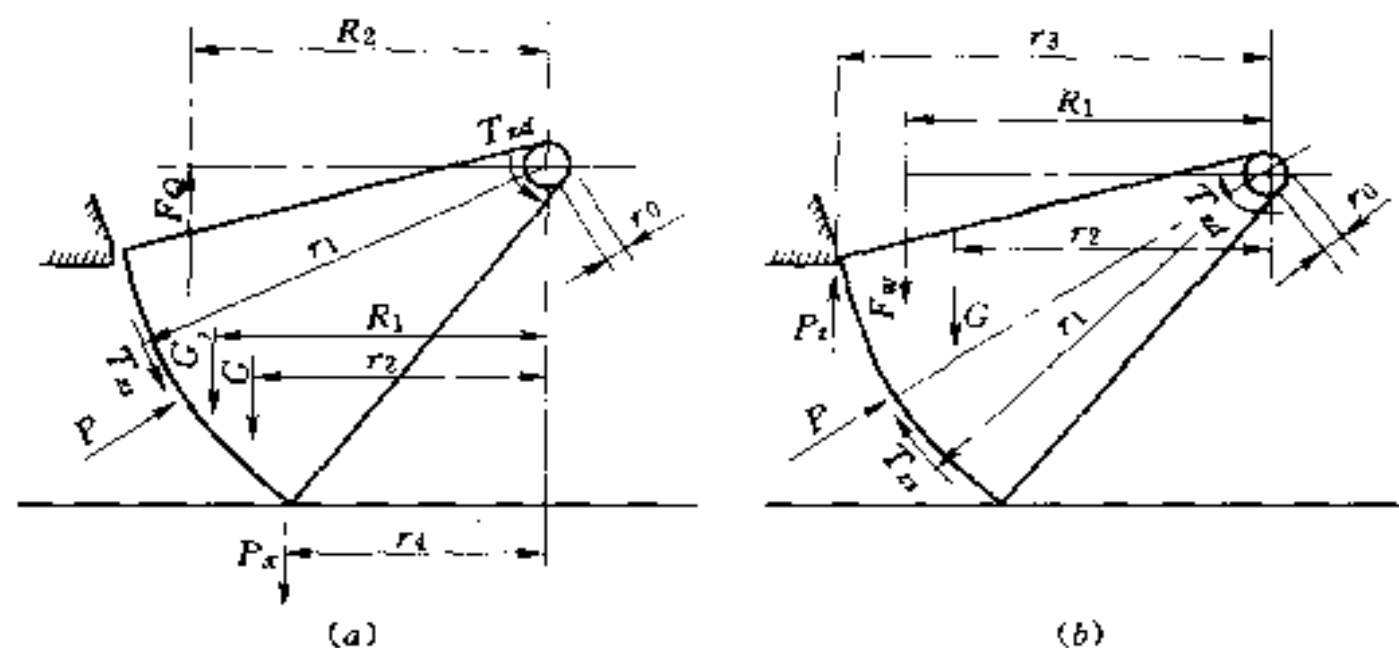


图 3-30 弧形闸门启闭力计算简图

(a) 启门力; (b) 闭门力

$$F_Q = \frac{1}{R_2} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + n'_G G r_2 + G_j R_1 + P_x r_4] \quad (3-47)$$

式中:  $n_G$  和  $n'_G$  分别为闭门和启门时的自重修正系数, 前者为 0.9~1.0, 后者为 1.0~1.1;  $n_T$  为摩擦阻力的安全系数, 一般为 1.2;  $T_{zd}$ 、 $T_{zs}$ 、 $P_t$ 、 $P_x$  分别为铰轴摩阻力、止水摩阻力、上托力和下吸力, 其计算参照平面闸门相关部分进行;  $G_j$  为加重或下压力;  $R_1$ 、 $R_2$  分别为加重 (或下压力) 和启门力对弧门转动中心的力臂;  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  分别为转动铰摩阻力、止水摩阻力、闸门自重、上

托力和下吸力对弧门转动中心的力臂。

弧形闸门在启闭过程中，力的作用点、方向和力臂，随闸门的开度而变化，因此必要时应绘制启闭力过程线，以决定最大值。

#### 第四节 弧形钢闸门计算实例

某中型水库溢流坝上的溢洪道工作闸门采用弧形钢闸门，闸门操作要求为动水启闭，水库设计水位以下局部开启闸门控制泄洪，当水位高于设计水位时则全部打开泄洪。

##### 一、基本资料和结构布置

###### 1. 基本参数

孔口形式：露顶式；

孔口宽度：12.0m；

底槛高程：323.865m；

检修平台高程：337.0m；

正常高水位（设计水位）：335.0m；

设计水头：11.135m；

闸门高度：11.5m；

孔口数量：3孔；

操作条件：动水启闭；

吊点间距：11.2m；

启闭机：后拉式固定卷扬机。

###### 2. 基本结构布置

闸门采用斜支臂双主横梁式焊接结构，其结构布置见图3-31。弧门半径  $R=15.0\text{m}$ ，支铰高度  $H_2=5\text{m}$ 。垂直向设置五道实腹板式隔板及两道边梁，区格间距为1.9m，边梁距闸墩边线为0.3m；水平向除上、下主梁及顶、底次梁外，还设置了11根水平次梁，其中上主梁以上布置4根，两主梁之间布置7根。支铰采用圆柱铰，侧水封为“L”形橡皮水封，底水封为“刀”形橡皮水封。在闸门底主梁靠近边梁的位置设置两个吊耳，与启闭机吊具通过吊

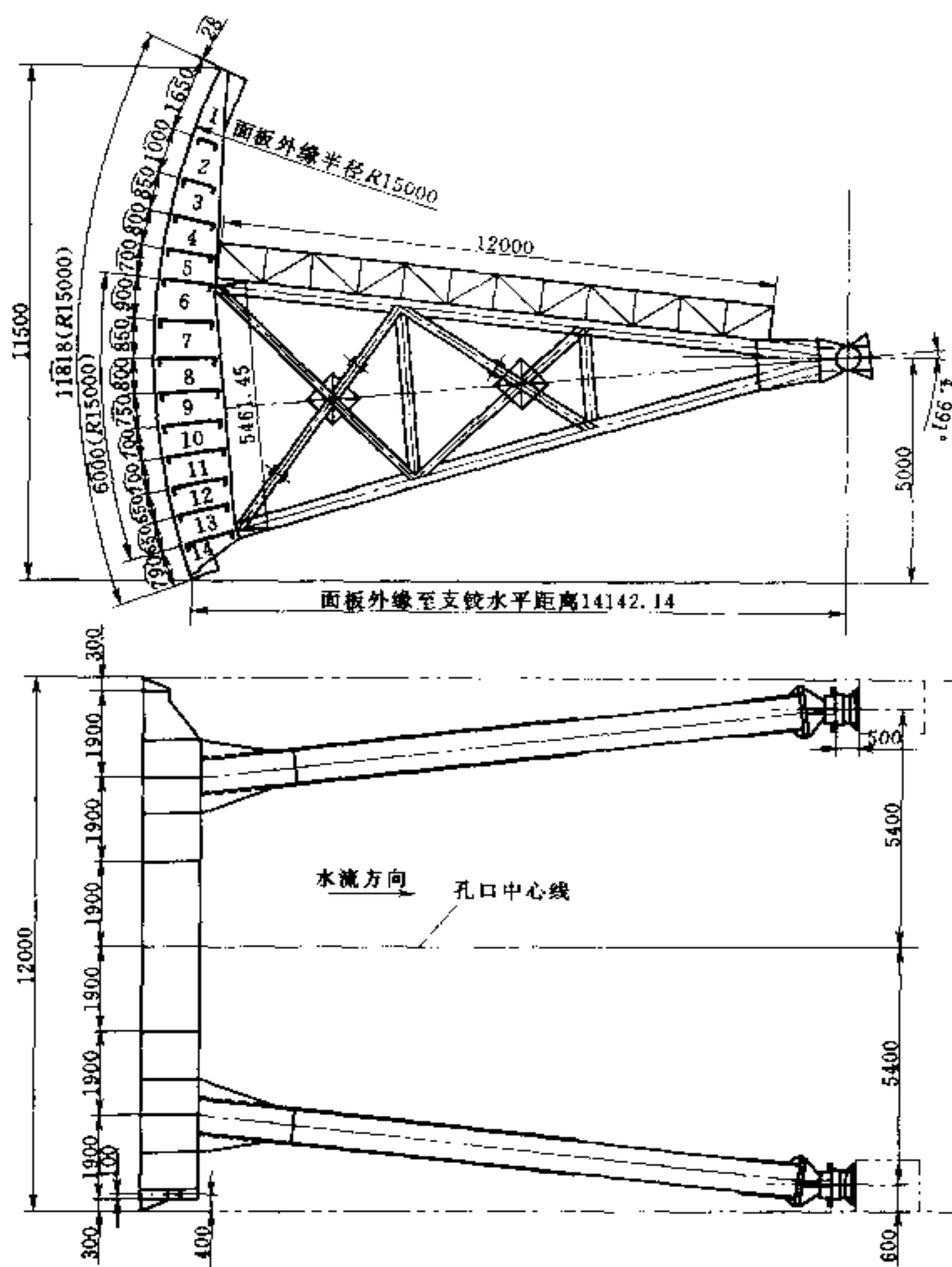


图 3-31 主横梁式弧形闸门结构简图 (单位: mm)

轴相连接。采用  $2 \times 500\text{kN}$  固定式卷扬机操作。

本闸门结构设计按 SL74—95 《水利水电工程钢闸门设计规范》进行。门叶结构材料采用 Q235, 支铰材料为铸钢 ZG310—570。

材料容许应力（应力调整系数 0.95）：

Q235 第 1 组： $[\sigma] = 150\text{MPa}$ ， $[\tau] = 90\text{MPa}$ ；

第 2 组： $[\sigma] = 140\text{MPa}$ ， $[\tau] = 85\text{MPa}$ ；

ZG310—570： $[\sigma] = 140\text{MPa}$ ， $[\tau] = 105\text{MPa}$ 。

### 3. 荷载计算

闸门在关闭位置的静水压力，由水平水压力和垂直水压力组成，如图 3-32 所示。

水平水压力：

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma H^2 B$$

$$= \frac{1}{2} \times 10 \times 11.135^2 \times 12.0 = 7439.3 \text{ (kN)}$$

垂直水压力：

$$V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 B \left\{ \pi \phi / 180 - \sin 2\phi_2 - \sin(\phi_1 - \phi_2) - 2 \sin \phi \sin^2 \left[ \frac{1}{2} (\phi_1 - \phi_2) \right] \right\}$$

式中： $\sin \phi_1 = H_1 / R = (11.135 - 5) / 15 = 0.409$ ，所以  $\phi_1 = 24.142^\circ$

$\sin \phi_2 = H_2 / R = 5 / 15 = 0.3333333$ ，所以  $\phi_2 = 19.471^\circ$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = 43.613^\circ$$

$$\pi \phi / 180 = 0.761$$

$$\sin(2\phi_2) = \sin 38.942^\circ = 0.629$$

$$\sin(\phi_1 - \phi_2) = \sin 4.671^\circ = 0.0815$$

$$\sin \phi = \sin 43.613^\circ = 0.690$$

$$\sin \left[ \frac{1}{2} (\phi_1 - \phi_2) \right] = \sin 2.3355^\circ = 0.041$$

$$\begin{aligned} \text{故 } V_s &= \frac{1}{2} \times 10 \times 15^2 \times 12 \times (0.761 - 0.629 - 0.0815 \\ &\quad - 2 \times 0.690 \times 0.041^2) \\ &= 649.7 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

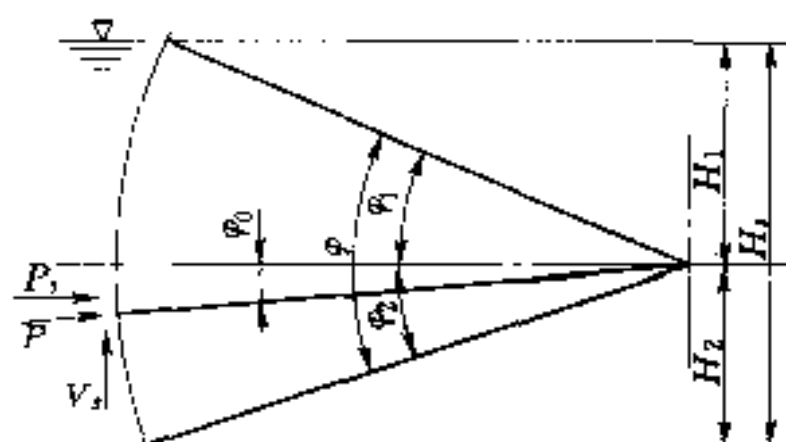


图 3-32 静水压力

总水压力:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{P_s^2 + V_s^2} = \sqrt{7439.3^2 + 649.7^2} \\ &= 7467.6 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

总水压力作用方向:

$$\operatorname{tg} \phi_0 = V_s / P_s = 649.7 / 7439.3 = 0.08734$$

所以  $\phi_0 = 4.991^\circ$

#### 4. 面板弧长

闸门门叶垂直高度为 11.5m, 支铰中心水平线以上弧形面板包角  $\phi'_1$  为

$$\phi'_1 = \sin^{-1}[(11.5 - 5)/15] = 25.679^\circ$$

总水压力作用线上、下的弧长  $L_{\text{上}}$ 、 $L_{\text{下}}$  分别为

$$\begin{aligned} L_{\text{上}} &= 0.01745r(\phi'_1 + \phi_0) = 0.01745 \times 15.0 \\ &\quad \times (25.679 + 4.991) \\ &= 8.028 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{\text{下}} &= 0.01745r(\phi_2 - \phi_0) = 0.01745 \times 15.0 \\ &\quad \times (19.471 - 4.991) \\ &= 3.79 \text{ (m)} \end{aligned}$$

面板总弧长  $L_{\text{总}}$  为

$$L_{\text{总}} = L_{\text{上}} + L_{\text{下}} = 8.028 + 3.79 = 11.818 \text{ (m)}$$

#### 5. 主框架位置

根据等荷载原则, 闸门上、下主梁与支臂组成的主框架平面布置应与总水压力作用线对称, 使两框架受力均匀。两主梁之间的弧长为 6.0m, 上、下主框架之间的夹角为  $2\theta$ , 即

$$2\theta = 180 \times l / (\pi R) = 57.296 \times 6 / 15 = 22.918^\circ$$

所以  $\theta = 11.459^\circ$

上、下框架与水平线的夹角(负号表示位于水平线的上方)为

$$\phi_{\text{上}} = \phi_0 - \theta = 4.991 - 11.459 = -6.468^\circ$$

$$\phi_{\text{下}} = \phi_0 + \theta = 4.991 + 11.459 = 16.45^\circ$$

## 二、结构计算

### (一) 面板

面板厚度按下列公式初选，并按表 3-5 计算。

$$\delta = a \sqrt{\frac{k_y q}{\alpha [\sigma]}}$$

表 3-5 面板厚度计算表

| 区格 | $a$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $b/a$ | $k_y$ | $q$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\alpha$ | $[\sigma]$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(mm) |
|----|-------------|-------------|-------|-------|-----------------------------|----------|------------------------------------|------------------|
| 1  | 1600        | 1900        | 1.19  | 0.383 | 0.0045                      | 1.5      | 150                                | 4.4              |
| 2  | 930         | 1900        | 2.04  | 0.497 | 0.0169                      | 1.5      | 150                                | 5.7              |
| 3  | 780         | 1900        | 2.44  | 0.5   | 0.0258                      | 1.5      | 150                                | 5.9              |
| 4  | 730         | 1900        | 2.60  | 0.5   | 0.0339                      | 1.5      | 150                                | 6.3              |
| 5  | 630         | 1900        | 3.02  | 0.5   | 0.0413                      | 1.4      | 150                                | 6.2              |
| 6  | 800         | 1900        | 2.38  | 0.499 | 0.0494                      | 1.5      | 150                                | 8.4              |
| 7  | 780         | 1900        | 2.44  | 0.5   | 0.0580                      | 1.5      | 150                                | 8.9              |
| 8  | 730         | 1900        | 2.60  | 0.5   | 0.0658                      | 1.5      | 150                                | 8.8              |
| 9  | 680         | 1900        | 2.79  | 0.5   | 0.0735                      | 1.5      | 150                                | 8.7              |
| 10 | 630         | 1900        | 3.02  | 0.5   | 0.0807                      | 1.4      | 150                                | 8.7              |
| 11 | 630         | 1900        | 3.02  | 0.5   | 0.0876                      | 1.4      | 150                                | 9.1              |
| 12 | 580         | 1900        | 3.28  | 0.5   | 0.0942                      | 1.4      | 150                                | 8.7              |
| 13 | 480         | 1900        | 3.96  | 0.5   | 0.1005                      | 1.4      | 150                                | 7.4              |
| 14 | 550         | 1900        | 3.45  | 0.5   | 0.1073                      | 1.4      | 150                                | 8.8              |

注 主梁前翼缘宽度取 100mm，次梁前翼缘宽度取 70mm。

根据表 3-5 的计算结果，面板厚度选定为  $\delta=10\text{mm}$ 。

### (二) 水平次梁

#### 1. 荷载及内力

水平次梁荷载按“近似取相邻间距和之半法”计算单位宽度荷载，见表 3-6。

表 3-6

水平次梁荷载计算表

|                              | 顶次梁   | 次梁    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 底次梁   |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |       |
| 承载宽度<br>(弧长)<br>(m)          | 0.451 | 1.325 | 0.925 | 0.825 | 0.750 | 0.875 | 0.825 | 0.775 | 0.725 | 0.700 | 0.675 | 0.650 | 0.395 |
| 中心水压<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 2.1   | 10.3  | 21.0  | 29.5  | 37.3  | 53.3  | 61.8  | 69.8  | 77.3  | 84.3  | 91.1  | 97.5  | 109.0 |
| 水压力<br>(kN/m)                | 0.9   | 13.7  | 19.5  | 24.4  | 27.9  | 46.6  | 51.0  | 54.1  | 56.0  | 59.0  | 61.5  | 63.4  | 43.1  |

全部次梁及顶、底次梁采用同一截面,按其中最大荷载的一根次梁(次梁 11)进行计算。水平次梁接受均布荷载的六跨连续梁计算,其计算简图见图 3-33。

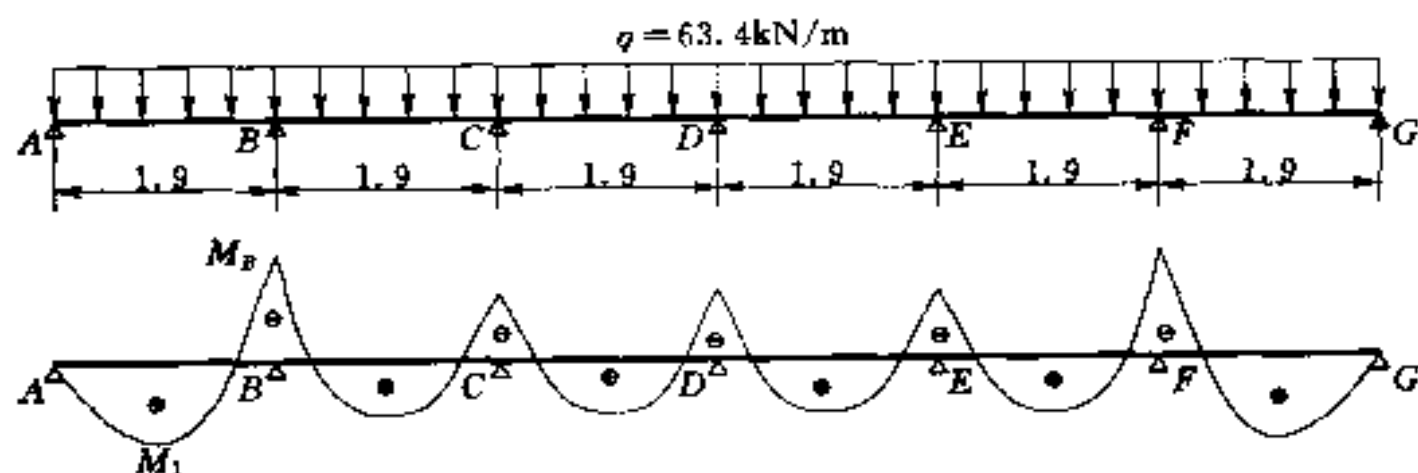


图 3-33 水平次梁计算简图 (单位: m)

水平次梁参数为:  $q = 63.4 \text{ kN/m}$ ,  $l = 1.9 \text{ m}$ 。

最大支座弯矩:

$$M_B = 0.106ql^2 = 0.106 \times 63.4 \times 1.9^2 = 24.3 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

最大跨中弯矩:

$$M_1 = 0.078ql^2 = 0.078 \times 63.4 \times 1.9^2 = 17.9 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

最大剪力:

$$Q_{BZ} = 0.606ql = 0.606 \times 63.4 \times 1.9 = 73.0 \text{ (kN)}$$

2. 次梁支座处截面特性

次梁选用 [20a, 参数如下:  $A_0 = 28.83 \text{ cm}^2$ ;  $d = 0.7 \text{ cm}$ ;  $I_0 =$

$1780.4\text{cm}^3$ ,  $b=7.3\text{cm}$ ,  $t=1.1\text{cm}$ 。

面板参与次梁作用的有效宽度

$$B=\xi_2 b:$$

$$b=\frac{1}{2}(b_1+b_2)=\frac{1}{2}\times(65+65)\\=65(\text{cm})$$

$$\frac{l_0}{b}=\frac{0.4l}{b}=\frac{0.4\times 190}{65}=1.17$$

根据  $l_0/b$  查得  $\xi_2=0.34$ , 则

$$B=0.34\times 65=22.2(\text{cm})$$

次梁截面如图 3-34 所示, 其截面特性为

$$A=1\times 22.2+28.83=51.03(\text{cm}^2)$$

$$A_y=1\times 22.2\times 0.5+28.83\times(10+1)\\=328.23(\text{cm}^3)$$

$$y_0=\frac{A_y}{A}=\frac{328.23}{51.03}=6.43(\text{cm})$$

$$I_x=22.2\times 1\times(6.43-0.5)^2+28.83\\ \times(10+1-6.43)^2+1780.4\\=3163.2(\text{cm}^4)$$

$$W_1=\frac{I_x}{y_0}=\frac{3163.2}{6.43}=492(\text{cm}^3)$$

$$W_2=\frac{I_x}{21-y_0}=\frac{3163.2}{21-6.43}=217(\text{cm}^3)$$

$$S_0=\frac{1}{2}\times 0.7\times(20+1-6.43)^2+1.1\\ \times(7.3-0.7)\times(20+1-6.43-0.55)\\=176(\text{cm}^3)$$

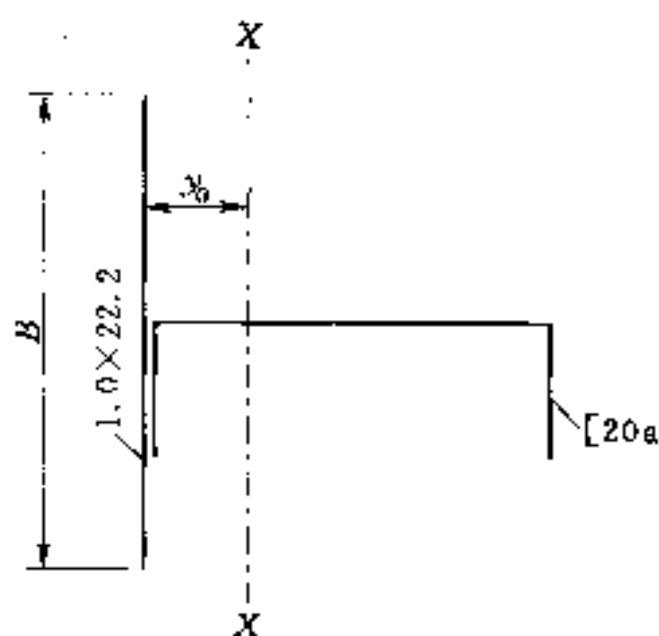


图 3-34 次梁截面尺寸  
(单位: cm)

### 3. 应力计算

弯曲应力:

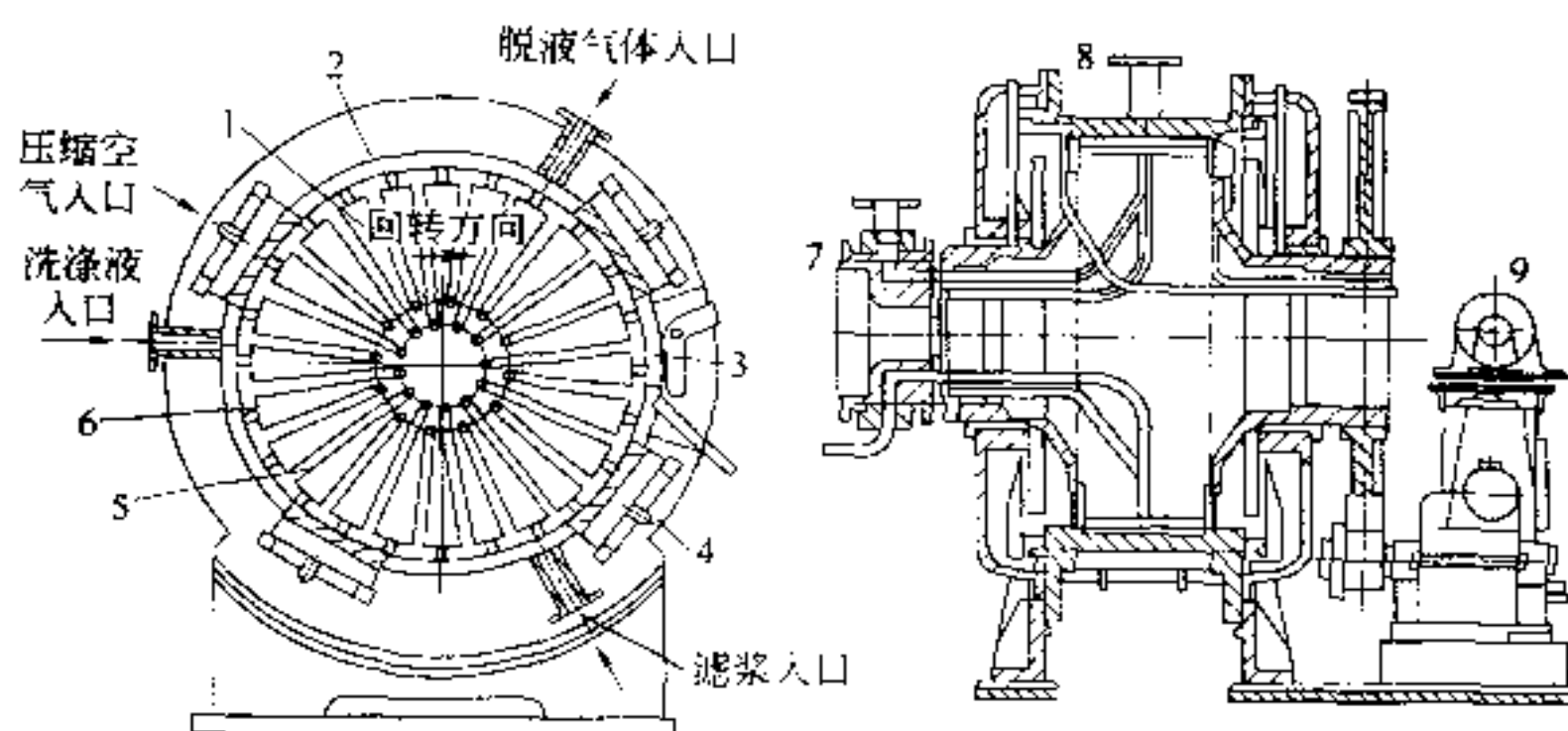


图 4-42 转鼓加压过滤机的结构

1—内筒;2—外筒;3—滤饼卸除处;4—隔板;5—滤液管;6—滤板;  
7—排液阀;8—压盖密封垫;9—电动机

态加压过滤的原理上发展而成的新机种。

动态加压过滤是 20 世纪 70 年代的过滤新技术,属于无滤饼层或薄滤饼层过滤,过滤阻力小,因而过滤速率高,洗涤效果好。

旋叶压滤机有多种类型:如图 4-43 所示为 J. 卡斯帕型动态过滤机

(J. Kaspar)。由图可见,它是利用流动剪切力“削除”滤饼,并利用滤饼的惯性离心力将其甩出。

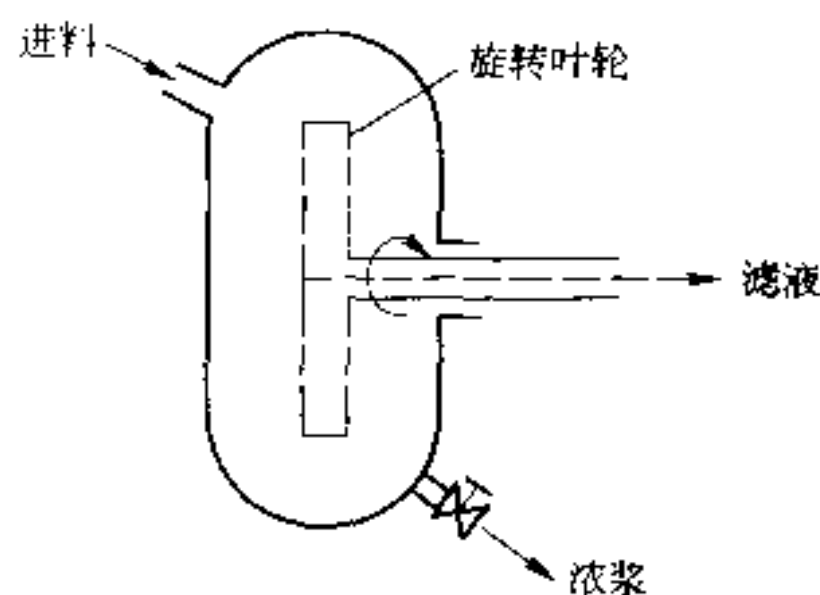


图 4-43 J. 卡斯帕型动态过滤机

图 4-44 所示为欧洲型卧式动态旋叶压滤机。在耐压容器里,交替排列着固定过滤圆盘和旋转过滤圆盘,两盘的间距很小(不超过 10mm),两种圆盘的表面都有滤布。固定圆盘下有滤液出口,旋转圆盘固定在高速旋转的中空轴上,圆盘的周边速度为 10~12m/s。这类压滤机,在产品滤饼水分相同的情况下,单位生产能

支座反力:

$$A = \frac{\frac{1}{2} \times 11.416 \times 211.57 \times \left( \frac{1}{3} \times 11.416 - 0.79 \right)}{6.0}$$

$$= 606.9 \text{ (kN)}$$

$$B = \frac{1}{2} \times 11.416 \times 211.57 - 606.9$$

$$= 600.7 \text{ (kN)}$$

剪力:

$$Q_{A1} = \frac{1}{2} \times 4.626 \times 84.44 = 195.3 \text{ (kN)}$$

$$Q_{A2} = A - Q_{A1} = 606.9 - 195.3 = 411.6 \text{ (kN)}$$

$$Q_{B3} = \frac{1}{2} \times 0.79 \times (197.26 + 211.57) = 161.5 \text{ (kN)}$$

$$Q_{B2} = B - Q_{B3} = 600.7 - 161.5 = 439.2 \text{ (kN)}$$

弯矩:

$$M_A = 195.3 \times \frac{1}{3} \times 4.626 = 301.2 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$M_B = 161.5 \times \frac{1}{3} \times 0.79 \times \frac{2 \times 211.57 + 197.26}{211.57 + 197.26}$$

$$= 64.5 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

跨中最大弯矩位置  $x$ :

$$\frac{x}{l_2 - x} = \frac{Q_{A2}}{Q_{B2}}$$

$$\frac{x}{6.0 - x} = \frac{411.6}{439.2} \quad \text{解得} \quad x = 2.9 \text{ m}$$

$$q_x = \frac{4.626 + 2.9}{11.416} \times 211.57 = 139.5 \text{ (kN/m)}$$

$$M_x = 606.9 \times 2.9 - \frac{1}{6} \times (4.626 + 2.9)^2 \times 139.5$$

$$= 443.1 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

2. 截面特性 (跨中截面)

面板参与隔板作用的有效宽度  $B = \zeta_1 b$ ,  $b = 1.9 \text{ m}$ 。

$$\frac{l_0}{b} = \frac{0.6l_2}{b} = \frac{0.6 \times 6.0}{1.9} = 1.895$$

查表得:  $\zeta_1 = 0.67$ , 则  $B = 0.67 \times 1.9 = 1.28 \text{ (m)}$

$$\text{又 } B \leq 60\delta = 60 \times 1.0 = 60 \text{ (cm)}$$

根据以上计算结果选取面板有效宽度为 60cm, 隔板截面尺寸见图 3-36, 截面特性如下:

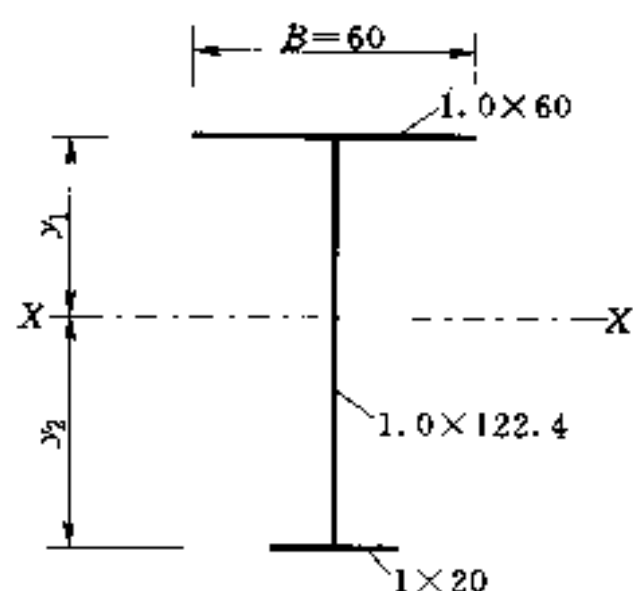


图 3-36 隔板截面尺寸  
(单位: cm)

$$A = 1 \times 60 + 1 \times 122.4 + 1 \times 20 = 202.4 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$A_y = 60 \times 0.5 + 122.4 \times 62.2 + 20 \times 123.9 = 10121.28 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$y_0 = \frac{10121.28}{202.4} = 50 \text{ (cm)}$$

$$I_x = 60 \times 1 \times 49.5^2 + 122.4 \times 1 \times 12.2^2 + \frac{1}{12} \times 1 \times 122.4^3 + 20 \times 1 \times 73.9^2 = 427271 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$W_1 = \frac{427271}{50} = 8545 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_2 = \frac{427271}{124.4 - 50} = 5742 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$S_0 = 20 \times 1 \times 73.9 + \frac{1}{2} \times 1 \times 73.4^2 = 4172 \text{ (cm}^3\text{)}$$

3. 应力验算:

弯曲应力:

$$\sigma_1 = \frac{443.1 \times 10^6}{8545 \times 10^3} = 51.9 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

$$\sigma_2 = \frac{443.1 \times 10^6}{5742 \times 10^3} = 77.2 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

剪应力:

$$\tau = \frac{Q_{\max} S_0}{I_x \delta} = \frac{439.2 \times 10 \times 4172}{427271 \times 1} = 42.9 \text{ (MPa)} < [\tau]$$

#### (四) 边梁

边梁受力情况与中部垂直隔板相同, 计算省略。

#### (五) 主框架

##### 1. 荷载

上、下主框架对称于总水压力作用线布置, 上、下主框架之间的夹角为  $2\theta = 22.918^\circ$  ( $\theta = 11.459^\circ$ , 见前面的计算), 则每个框架上的静水荷载为

$$\begin{aligned} Q_{\text{上}} = Q_{\text{下}} &= 1.1 \times \frac{P}{2\cos\theta} = 1.1 \times \frac{7467.6}{2 \times \cos(11.459^\circ)} \\ &= 4190.7 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

式中的 1.1 为动载系数。

主梁上的均布荷载为

$$q_l = \frac{Q_{\text{下}}}{L} = \frac{4190.7}{12.0} = 349.2 \text{ (kN/m)}$$

下框架还承受启闭机的启门拉力, 由于拉力相对比较小, 在此先忽略不计。

##### 2. 框架内力

(1) 主梁断面初选。面板参与主梁作用的有效宽度 (下主梁) 为

$$\begin{aligned} B &= \zeta_1 b \\ b &= \frac{1}{2}(b_1 + b_2) = \frac{1}{2} \times (69 + 65) \\ &= 67 \text{ (cm)} \\ l_0/b &= \frac{0.6 \times 760}{67} = 6.8 \end{aligned}$$

查表得  $\zeta_1 = 0.958$ , 所以  $B = 0.958 \times 67 = 64 \text{ cm}$ 。又

$$B \leq 60\delta + b_1 = 60 \times 1.0 + 10 = 70 \text{ (cm)}$$

所以面板有效宽度取  $B = 64 \text{ cm}$ 。

主梁截面尺寸见图 3-37, 截面特性如下:

$$\begin{aligned}
 A &= 1 \times 64 + 1.6 \times 10 + 1.0 \times 120.8 + 1.6 \times 35 \\
 &= 64 + 16 + 120.8 + 56 \\
 &= 256.8 \text{ (cm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_y &= 64 \times 0.5 + 16 \times 1.8 - 120.8 \times 63 + 56 \times 124.2 \\
 &= 14626.4 \text{ (cm}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

$$y_0 = \frac{14626.4}{256.8} = 57 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned}
 I_{y0} &= 64 \times 56.5^2 + 16 \times 55.2^2 + 120.8 \times 6^2 \\
 &\quad + \frac{1}{12} \times 120.8^3 + 56 \times 67.2^2 \\
 &= 657192 \text{ (cm}^4\text{)}
 \end{aligned}$$

$$W_1 = \frac{657192}{57} = 11530 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_2 = \frac{657192}{125 - 57} = 9665 \text{ (cm}^3\text{)}$$

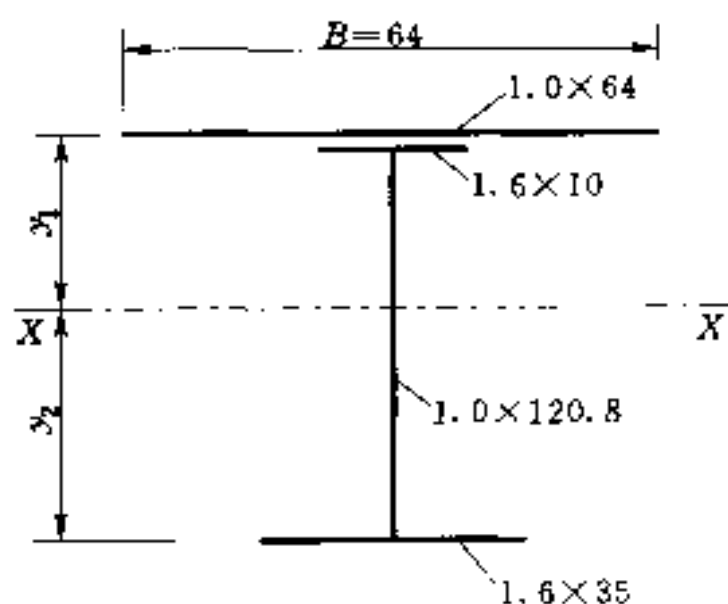


图 3-37 主梁跨中截面尺寸  
(单位: cm)

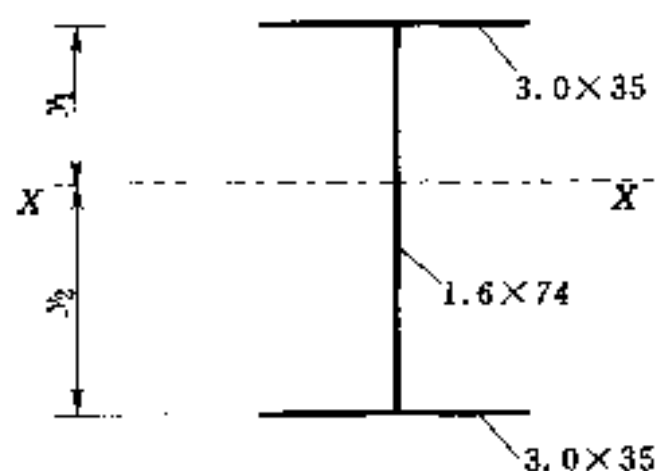


图 3-38 支臂截面尺寸  
(单位: cm)

(2) 支臂截面初选 (图 3-38)。支臂截面特性:

$$\begin{aligned}
 A_k &= 3 \times 35 + 1.6 \times 74 + 3 \times 35 \\
 &= 328.4 \text{ (cm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{kx} &= \frac{1}{12} \times (35 \times 80^3 - 33.4 \times 74^3) \\
 &= 365460 \text{ (cm}^4\text{)}
 \end{aligned}$$

$$I_{hy} = \frac{1}{12} \times (2 \times 3 \times 35^3 + 74 \times 1.6^3)$$

$$= 21463 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$W_x = \frac{365460}{40} = 9136.5 \text{ (cm}^3\text{)}$$

(3) 框架计算 (图 3-39);

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2200 - 600}{15000 - 1250} = 0.1164$$

所以  $\alpha = 6.64^\circ$

$$h = 15000 - 570 = 14430 \text{ (mm)}$$

$$a = 14430 \times 0.1164 = 1679.1 \text{ (mm)}$$

$$b = 12000 - 2 \times (1679.1 + 600) = 7441.8 \text{ (mm)}$$

$$c = 1679.1 + 600 = 2279.1 \text{ (mm)}$$

$$h' = \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{14430}{\cos 6.64^\circ} = 14527.4 \text{ (mm)}$$

$$K_0 = \frac{I_{t0}}{b} \frac{h'}{I_h} = \frac{657192}{7441.8} \times \frac{14527.4}{365460} = 3.51$$

支臂扭角 (图 3-40);

$$\phi = \sin^{-1}(\sin \theta \operatorname{tg} \alpha)$$

$$= \sin^{-1}(\sin 11.459^\circ \times \operatorname{tg} 6.64^\circ)$$

$$= 1.3253^\circ$$

(4) 框架内力。图 3-41 所示为主框架在水压力作用下的荷载示意图和弯矩图。

根据前面计算, 跨中均布荷载  $q = 349.2 \text{ kN/m}$ 。

内力计算如下:

$$V = \frac{1}{2} q l = \frac{1}{2} \times 349.2 \times 12$$

$$= 2095.2 \text{ (kN)}$$

$$H' = \frac{qb[b + 2a(2K_0 + 3)]}{4h(2K_0 + 3)} + \frac{qac}{h}$$

$$= \frac{3qc^2}{2h(2K_0 + 3)}$$

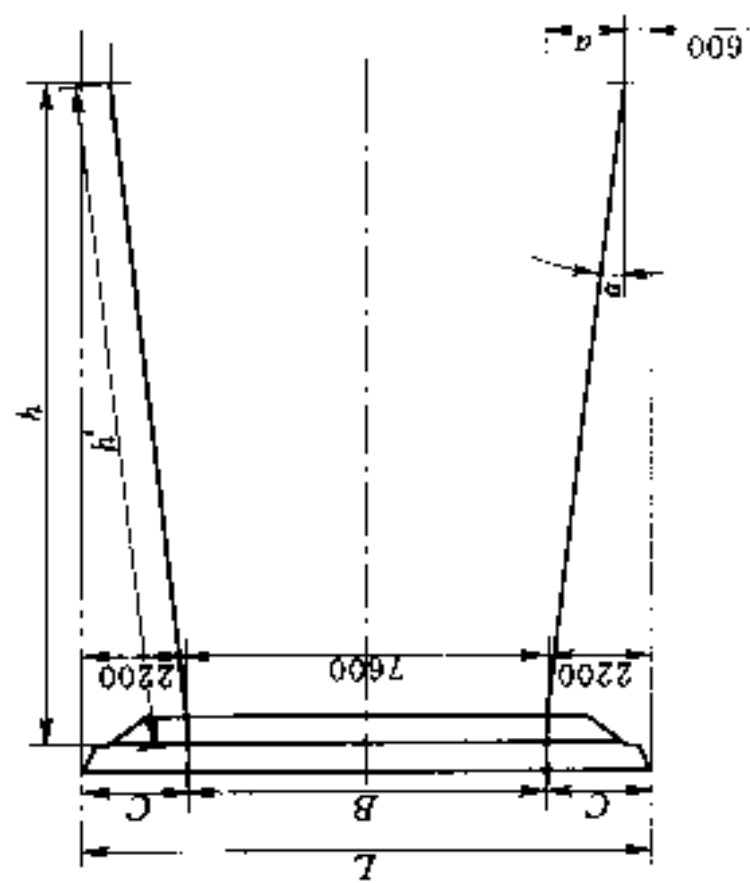


图 3-39 框架结构简图(单位:mm)

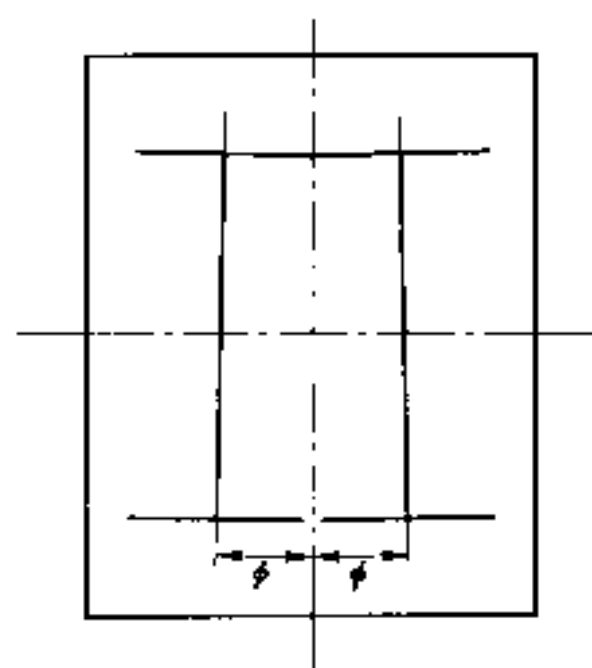


图 3-40 支臂扭角

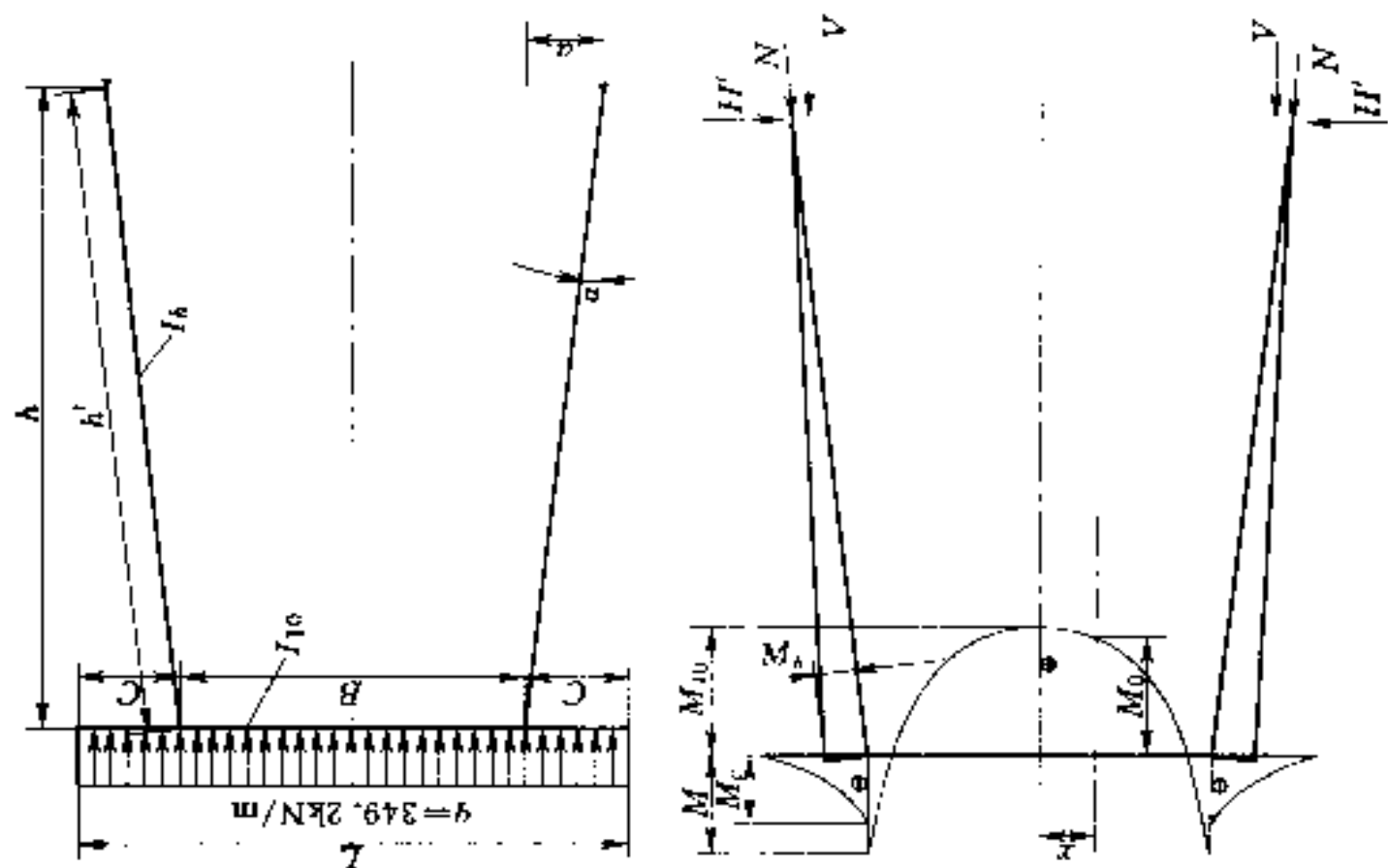


图 3-41 主框架荷载及内力分析图

$$\begin{aligned}
&= \frac{349.2 \times 7.4418}{4 \times 14.43} \times \frac{7.4418 + 2 \times 1.6791 \times (2 \times 3.51 + 3)}{3 + 2 \times 3.51} \\
&\quad + \frac{349.2 \times 1.6791 \times 2.2791}{14.43} - \frac{3 \times 349.2}{2 \times 14.43} \\
&\quad \times \frac{2.2791^2}{2 \times 3.51 + 3} = 258.4 \text{ (kN)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N &= V \frac{h}{h'} + H' \frac{a}{h'} \\
&= 2095.2 \times \frac{14.43}{14.5274} + 258.4 \times \frac{1.6791}{14.5274} \\
&= 2111.0 \text{ (kN)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_c &= -\frac{qc^2}{2} = -\frac{1}{2} \times 349.2 \times 2.2791^2 \\
&= -906.9 \text{ (kN} \cdot \text{m)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_h &= Va - H'h = 2095.2 \times 1.6791 - 258.4 \times 14.43 \\
&= -210.7 \text{ (kN} \cdot \text{m)}
\end{aligned}$$

$$M = M_h + M_c = -210.7 - 906.9 = -1117.6 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$\begin{aligned}
M_{I_0} &= \frac{qb^2}{8} + M_c + M_h = \frac{1}{8} \times 349.2 \times 7.4418^2 - 1117.6 \\
&= 1299.8 \text{ (kN} \cdot \text{m)}
\end{aligned}$$

### 3. 框架应力验算

#### (1) 主横梁:

1) 跨中截面应力。跨中截面正应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_{I_0}}{W}$$

前翼缘 (受压):

$$\sigma_1 = \frac{258.4 \times 10^3}{256.8 \times 10^2} + \frac{1299.8 \times 10^6}{11530 \times 10^3} = 122.8 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

后翼缘 (受拉):

$$\sigma_2 = \frac{258.4 \times 10^3}{256.8 \times 10^2} - \frac{1299.8 \times 10^5}{9665 \times 10^3} = -124.4 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

2) 支座截面特性。面板参与主梁作用的有效宽度  $B = \zeta_2 b$ ,  $b = \frac{1}{2} (b_1 + b_2) = \frac{1}{2} \times (69 + 65) = 67 \text{ cm}$ , 则

$$l_0/b = \frac{0.2 \times 760 + 220}{67} = 5.55$$

查表得  $\zeta_2 = 0.781$ , 则

$$B = 0.781 \times 67 \approx 52 \text{ (cm)}$$

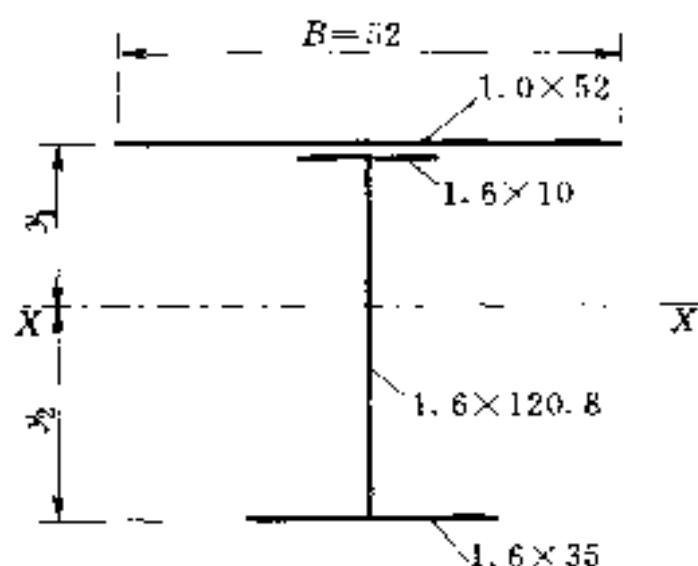


图 3-42 主梁支座截面尺寸  
(单位: cm)

主梁支座截面尺寸如图 3-42 所示, 截面特性:

$$\begin{aligned} A &= 1 \times 52 + 1.6 \times 10 + 1.6 \times 120.8 + 1.6 \times 35 \\ &= 52 + 16 + 193.28 + 56 \\ &= 317.28 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_y &= 52 \times 0.5 + 16 \times 1.8 + 193.28 \times 63 + 56 \times 124.2 \\ &= 19186.64 \text{ (cm}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$y_0 = \frac{19186.64}{317.28} = 60.5 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} I_0 &= 52 \times 60.0^2 + 16 \times 58.7^2 + 1.6 \times 120.8 \times 2.5^2 \\ &\quad + 56 \times 63.7^2 + \frac{1}{12} \times 1.6 \times 120.8^3 \\ &= 705808 \text{ (cm}^4\text{)} \end{aligned}$$

$$W_1 = \frac{705808}{60.5} = 11666 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W_2 = \frac{705808}{125 - 60.5} = 10943 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$S_0 = 56 \times 63.7 + \frac{1}{2} \times 1.6 \times 62.9^2 = 6732 \text{ (cm}^3\text{)}$$

3) 支座截面应力。正应力:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

前翼缘 (受拉):

$$\sigma_1 = \frac{258.4 \times 10^3}{317.28 \times 10^2} - \frac{1117.6 \times 10^6}{11666 \times 10^3} = -87.7 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

后翼缘 (受压):

$$\sigma_2 = \frac{258.4 \times 10^3}{317.28 \times 10^2} + \frac{1117.6 \times 10^6}{10943 \times 10^3} = -110.3 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

剪应力:

$$\tau = \frac{QS}{I\delta}$$

$$Q = \frac{1}{2}qb = \frac{1}{2} \times 349.2 \times 7.4418 = 1299.3 \text{ (kN)}$$

$$\tau = \frac{1299.3 \times 10^3 \times 6732 \times 10^3}{705808 \times 1.6 \times 10^5} = 77.5 \text{ (MPa)} < [\tau]$$

折算应力 (靠后翼缘腹板高度边缘处):

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{258.4 \times 10^3}{317.28 \times 10^2} + \frac{1117.6 \times 10^6 \times 62.9 \times 10}{707808 \times 10^4} \\ &= 107.7 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\tau = \frac{1299.3 \times 10^3 \times (56 \times 56.7) \times 10^3}{705808 \times 1.6 \times 10^5} = 41.0 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{zh} = \sqrt{107.7^2 + 3 \times 41.0^2} = 129.0 \text{ (MPa)}$$

$$1.1[\sigma] = 1.1 \times 150 = 165 \text{ (MPa)}$$

故  $\sigma_{zh} < [\sigma]$

4) 主梁局部稳定性计算。支座处:

$$\frac{h_0}{\delta} = \frac{1208}{1.6} = 75.5 < 80$$

所以，主梁支座处可以不配置横向加劲肋板。但为了支臂传力均匀，一般均按构造要求设置有横向肋板。

跨中：

$$\frac{h_0}{\delta} = \frac{120.8}{1.0} = 120.8$$

$$80 < \frac{h_0}{\delta} < 160$$

所以，跨中截面应设置横向加劲肋板，但由于该处剪力较小，考虑中部隔板作为横向加劲肋板，间距  $190\text{cm} < 2h_0$ ，不必另外设加劲肋板。

(2) 支臂：

1) 弯矩作用平面内的稳定验算：

$$\sigma = \frac{N}{\phi_p A}$$

偏心率：

$$\epsilon = \frac{M}{N} \frac{A}{W} = \frac{210.7 \times 10^3}{2111.0} \times \frac{328.4}{9136.5} = 0.359$$

长细比：

$$\lambda = \frac{\mu h'}{r}$$

$$h' = (1500 - 125) / \cos 6.64^\circ = 1384.29 \text{ (cm)}$$

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{365460}{328.4}} = 33.36 \text{ (cm)}$$

$$\lambda = \frac{1.3 \times 1384.29}{33.36} = 53.94$$

根据  $\epsilon$ 、 $\lambda$ ，查表得  $\phi_p = 0.66$ ，则

$$\sigma = \frac{2111.0 \times 10^3}{0.66 \times 328.4 \times 10^2} = 97.4 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

2) 弯矩作用平面外的稳定验算：

$$\sigma = \frac{N}{\phi_1 A}$$

$$\epsilon = \frac{M'}{N} \frac{A}{M} = \frac{210.7 \times 10^3}{2111.0} \times \frac{328.4}{9136.5} = 0.359$$

其中近似地取  $M' = M$ 。

长细比：

$$\lambda_y = \frac{l_y}{r_y}$$

其中  $l_y = 400 \text{ cm}$ 。

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{21463}{328.4}} = 8.08 \text{ (cm)}$$

$$\lambda_y = \frac{400}{8.08} = 49.5$$

根据  $\epsilon$ 、 $\lambda_y$  查表得  $\phi_1 = 0.706$ ，则

$$\sigma = \frac{2111.0 \times 10^3}{0.706 \times 328.4 \times 10^2} = 91.1 \text{ (MPa)} < [\sigma]$$

(3) 支臂与主横梁连接计算 (图 3-43)：

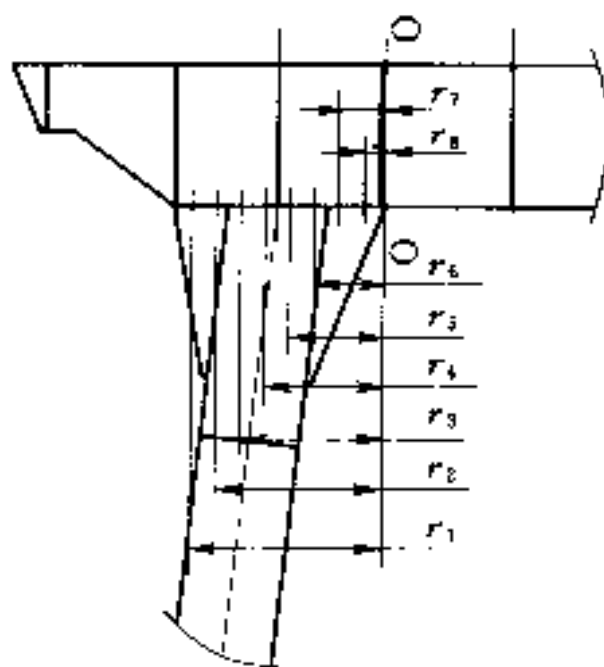


图 3-43 主梁与支臂的连接

1) 螺栓的最大拉力：

$$N_{\max} = \frac{r_1 M_k}{m(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \dots + r_n^2)}$$

其中  $r_1 = 1.55 \text{ m}$ ； $M_k = 210.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ； $m = 2$ ；螺栓每排数量为 8；

间距为 0.2m, 所以  $r_2=1.35\text{m}$ ,  $r_3=1.15\text{m}$ ,  $r_4=0.95\text{m}$ ,  $r_5=0.75\text{m}$ ,  $r_6=0.55\text{m}$ ,  $r_7=0.35\text{m}$ ,  $r_8=0.15\text{m}$ , 代入上式, 得

$$N_{\max} = \frac{1.55 \times 210.7}{2 \times (1.55^2 + 1.35^2 + 1.15^2 + 0.95^2 + 0.75^2 + 0.55^2 + 0.35^2 + 0.15^2)} \\ = 22.0 \text{ (kN)}$$

又螺栓选用 M36,  $A=7.88\text{cm}^2$ , 则

$$\sigma'_t = \frac{22.0 \times 10^3}{7.88 \times 10^2} = 28.0 \text{ (MPa)} < [\sigma'_t]$$

2) 抗剪板焊缝:

$$\tau = \frac{H'}{1.4H_fL_f} = \frac{258.4 \times 10^3}{1.4 \times 1.2 \times 30 \times 10^2} = 51.3 \text{ (MPa)} < [\tau]$$

其中焊缝高度  $H_f=1.2\text{cm}$ , 焊缝长度  $L_f=30\text{cm}$ 。

(六) 面板局部弯曲与主梁整体弯曲的折算应力

验算下主梁下部面板区格 (区格 14), 其  $b/a=3.65>1.5$ , 只需按下式验算长边中点的折算应力:

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma]$$

$$\text{其中 } \sigma_{my} = \frac{k_y p a^2}{\delta^2} = \frac{0.5 \times 0.1073 \times 520^2}{10^2} = 145.1 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{mx} = \mu \sigma_{my} = 0.3 \times 145.1 = 43.5 \text{ (MPa)}$$

其中  $\mu$  为泊松比,  $\mu=0.3$ 。

$$\sigma_{ox} = \frac{H}{A} + \frac{M_{ox}}{W_1}$$

$$M_{ox} = \left[ \frac{qb}{2} \left( \frac{b}{2} - x \right) - \frac{q}{2} \left( \frac{b}{2} - x \right)^2 \right] - M \\ = \frac{349.2}{2} \left[ 7.44 \times \left( \frac{7.44}{2} - 0.95 \right) - \left( \frac{7.44}{2} - 0.95 \right)^2 \right] - 1117.6 \\ = 1141.0 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$\sigma_{ox} = \frac{258.4 \times 10^3}{256.8 \times 10^2} + \frac{1141.0 \times 10^6}{11530 \times 10^3} = 109.0 \text{ (MPa)}$$

则

$$\begin{aligned}\sigma_{zh} &= \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2 - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox})} \\ &= \sqrt{145.1^2 + (43.5 - 109.0)^2 - 145.1 \times (43.5 - 109.0)} \\ &= 186.7 \text{ (MPa)}\end{aligned}$$

又  $1.1\alpha[\sigma] = 1.1 \times 1.4 \times 150 = 231 \text{ (MPa)}$

所以  $\sigma_{zh} < 1.1\alpha[\sigma]$

### 三、启闭力的计算

闸门采用后拉式起吊形式，启闭机采用固定卷扬式启闭机。

总水压力为  $P = 7467.6 \text{ kN}$ ，轴套采用 ZQA19-4，阻力系数为 0.3，阻力臂  $r_0 = 0.155 \text{ m}$ ，弯矩为

$$M_{zd} = f_1 P r_0 = 0.3 \times 7467.6 \times 0.155 = 347.2 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

侧止水采用 L 形弧形闸门橡皮止水，其摩擦系数为 0.5，弯矩为

$$\begin{aligned}M_{zs} &= f_2 P_{zs} r_1 = 0.5 \times 10 \times (11.416 \times 0.06 \times 11.135/2) \\ &\quad \times 2 \times 15.03 = 572.0 \text{ (kN} \cdot \text{m)}\end{aligned}$$

门叶重量及阻力臂参数如下：

面板  $G_1 = 11000 \text{ kg}$ ，力臂  $L_1 = 15.0 \text{ m}$ ；

主梁、水平次梁及隔板等  $G_2 = 24000 \text{ kg}$ ，力臂  $L_2 = 14.4 \text{ m}$ ；

支臂  $G_3 = 25000 \text{ kg}$ ，力臂  $L_3 = 8.2 \text{ m}$ 。

#### 1. 闸门闭门力的计算

$$\begin{aligned}\sum M_{\max} &= n_T (M_{zd} + M_{zs}) - n_G \sum G_i L_i \\ &= 1.2 \times (347.2 + 572.0) - 0.9 \\ &\quad \times (110 \times 15 + 240 \times 14.4 + 250 \times 8.2) \\ &= -5337.36 \text{ (kN} \cdot \text{m)}\end{aligned}$$

所以，闸门可以靠自重关闭。

#### 2. 闸门启门力的计算

总的阻力矩为

$$\begin{aligned}\sum M_{\max} &= n_T (M_{zd} + M_{zs}) + n_G \sum G_i L_i \\ &= 1.2 \times (347.2 + 572.0) + 1.1 \\ &\quad \times (110 \times 15 + 240 \times 14.4 + 250 \times 8.2)\end{aligned}$$

$$= 8975 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$Q_{\max} = \frac{\sum M_{\max}}{R_2} = \frac{8975}{11.5} = 780 \text{ (kN)}$$

式中:  $R_2$  为启闭力轴线到支铰转动中心的垂直距离,  $R_2 = 11.5\text{m}$ 。

启闭机容量选择为  $2 \times 500\text{kN}$ 。

#### 四、闸门支铰的计算

闸门支铰采用圆柱铰, 轴径为  $\phi 310\text{mm}$ , 铰链和铰座材料采用 ZG310—570, 轴采用 Q275, 轴套采用 ZQA19—4。

支铰受力简图见图 3-44, 图中  $Q$  为启门力的一半,  $Q = 390\text{kN}$ , 与垂直线夹角为  $20^\circ$ ;  $G$  为闸门重量的一半,  $G = 300\text{kN}$ ;  $P$  为总水压力的一半,  $P = 3733.8\text{kN}$ , 与水平线夹角  $\phi_0 = 4.991^\circ$ 。

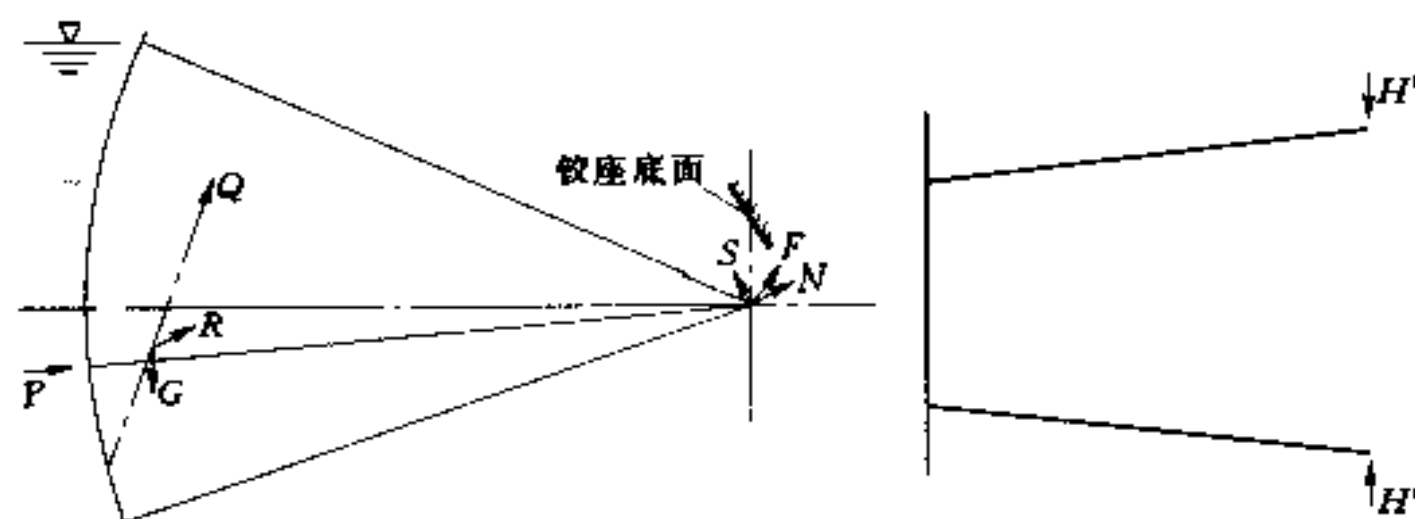


图 3-44 支铰受力示意图

##### 1. 荷载计算

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(Q \cos 20^\circ - G)^2 + (Q \sin 20^\circ)^2} \\ &= \sqrt{(390 \times \cos 20^\circ - 300)^2 + (390 \sin 20^\circ)^2} \\ &= 149 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

与水平线夹角:

$$\cos \alpha = \frac{Q \sin 20^\circ}{R} = 0.895$$

所以  $\alpha = 26.463^\circ$

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{(R \cos \alpha + P \cos \phi_0)^2 + (R \sin \alpha + P \sin \phi_0)^2} \\ &= 3873 \text{ kN} \end{aligned}$$

与水平线夹角：

$$\sin\beta = \frac{R\sin\alpha + P\sin\phi_0}{F} = 0.1010$$

所以  $\beta = 5.798^\circ$

可以分解成垂直和平行于铰座底面的分力  $N$ 、 $S$ ：

$$N = F\cos(\beta - \phi_0) = 3873 \times \cos 0.807^\circ = 3872.6 \text{ (kN)}$$

$$S = F\sin(\beta - \phi_0) = 3873 \sin 0.807^\circ = 54.5 \text{ (kN)}$$

弧形闸门在启闭过程中，轴上作用有摩擦力矩  $M$ ：

$$M = \frac{1}{2}fFd = \frac{1}{2} \times 0.3 \times 3873 \times 0.31 = 180.0 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

## 2. 铰轴计算

铰轴受力计算简图如图 3-45 所示。

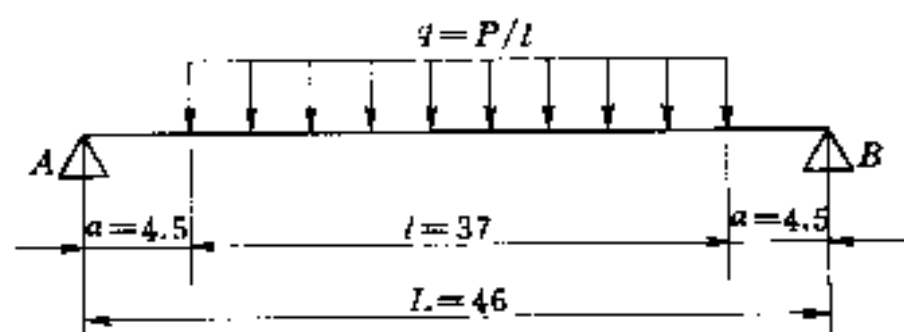


图 3-45 铰轴受力计算简图（单位：cm）

(1) 铰轴的弯曲应力：

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F(4a + l)}{0.785d^3} \\ &= \frac{3873 \times 10^3 \times (4 \times 0.045 + 0.37)}{0.785 \times 0.31^3 \times 10^6} \\ &= 91.1 \text{ (MPa)} < [\sigma] \end{aligned}$$

(2) 铰轴的剪应力：

$$\tau = \frac{8F}{3\pi d^2} = \frac{8 \times 3873 \times 10^3}{3 \times \pi \times 0.31^2 \times 10^6} = 34.2 \text{ (MPa)} < [\tau]$$

(3) 轴套的承压应力：

$$\sigma_{ck} = \frac{P}{dl} = \frac{3873 \times 10^3}{0.31 \times 0.37 \times 10^6} = 33.8 \text{ (MPa)} < [\sigma_{ck}]$$

(4) 轴承座的局部紧接承压应力：

$$\sigma_{ej} = \frac{P}{2d\delta} = \frac{3873 \times 10^3}{2 \times 0.31 \times 0.07 \times 10^6} = 89.2 \text{ (MPa)} < [\sigma_{ej}]$$

### 3. 铰链与支臂的连接计算

斜支臂与铰链用粗制螺栓连接, 由  $N$ 、 $S$ 、 $H'$  对铰链支承板产生两个方向的偏心力矩所引起的螺栓拉力  $N_1$ 、 $N_2$ :

$$M_1 = NZ - H'X = 3873 \times 0.73 \times \sin 6.64^\circ - 258.4 \times 0.73 \times \cos 6.64^\circ = 123.8 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$M_2 = SC = 54.5 \times 0.73 = 42.0 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$N_1 = \frac{M_1}{nb} = \frac{123.8}{4 \times 0.99} = 31.3 \text{ (kN)}$$

$$N_2 = \frac{M_2}{2K} = \frac{42.0}{2 \times 0.75} = 28.0 \text{ (kN)}$$

选用 M36 螺栓, 截面面积  $A = 7.88 \text{ cm}^2$ , 以一侧螺栓的最大受力为  $N_{\max} = N_1 + N_2$ , 验算螺栓强度:

$$N_{\max} = N_1 + N_2 = 31.3 + 28.0 = 59.3 \text{ (kN)}$$

所以 
$$\sigma = \frac{N_{\max}}{A} = \frac{59.3 \times 10}{7.88} = 75.2 \text{ (MPa)}$$

### 4. 铰座计算

铰座底板尺寸如图 3-46 所示。

(1) 铰座底板底面积。混凝土采用 C25,  $[\sigma_k] = 9.0 \text{ MPa}$ 。

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_N + \sigma_S + \sigma_H = \frac{N}{BL} + \frac{6h_1S}{B^2L} + \frac{6h_1H'}{BL^2} \\ &= \frac{3873 \times 10^{-3}}{1 \times 0.9} + \frac{6 \times 0.5 \times 54.5 \times 10^{-3}}{1^2 \times 0.9} \\ &\quad + \frac{6 \times 0.5 \times 258.4 \times 10^{-3}}{1 \times 0.9^2} \\ &= 5.4 \text{ (MPa)} < [\sigma_k] \end{aligned}$$

(2) 底板厚度。底板结构见图 3-46, 最大弯矩  $M_{\max}$  为区格 1 (三边简支):

$$M_{\max} = \beta \sigma_N a^2$$

由于  $b/a = 0.46/0.22 = 2.09$ , 查表得  $\beta = 0.133$ , 则

$$M_{\max} = 0.133 \times 4.3 \times 10^3 \times 0.22^2 = 27.7 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

底板的厚度为

$$\delta \geq \sqrt{\frac{6M_{\max}}{[\sigma]}} = \sqrt{\frac{6 \times 27.7 \times 10^3}{140}} = 34.5 \text{ (mm)}$$

取底板厚度为 70mm。

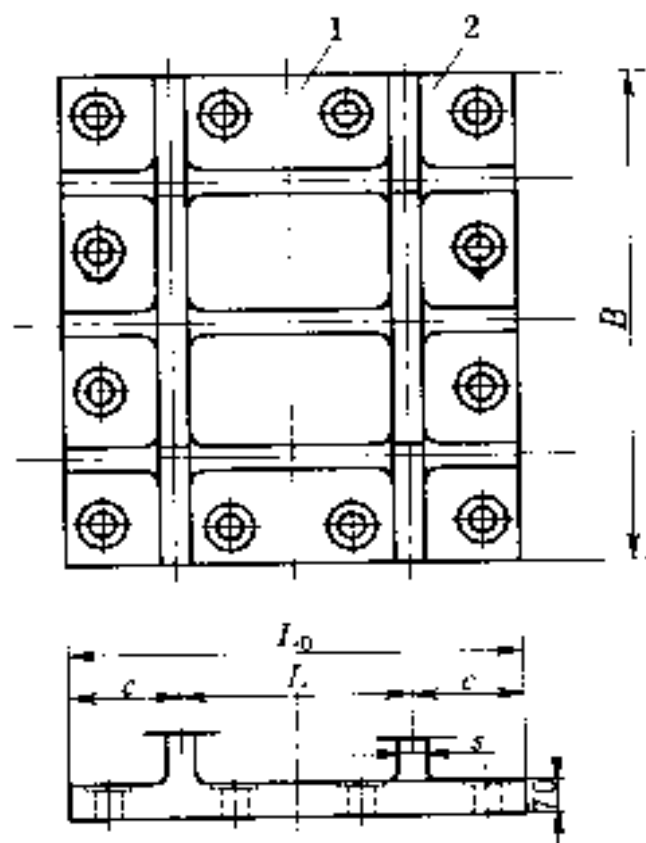


图 3-46 铰座底板计算简图

## 第四章 其他形式的闸门

本章简单介绍人字门、液压翻板闸门、升卧式闸门的布置特点和一般性设计方法。

### 第一节 人字闸门

#### 一、概述

##### (一) 人字闸门的形成和组成

船闸闸首工作闸门常采用的形式有人字闸门、上升式或下降式平面闸门、横拉式平面闸门、上升或下降式弧形闸门等，其中人字闸门应用最为广泛。人字门是由两扇各自绕其竖轴转动的门扇组成。在关闭位置时，两扇门在斜接柱上互相支承而形成三铰拱“ $\Lambda$ ”形（图 4-1），故有人字门之称。在门开启位置时，每扇门各自旋转到闸首两侧闸墙的门龕内，因而人字门对航道的通航净空尺寸毫无影响。

人字闸门的门扇结构有平面式和拱式两种。由于平面式的门扇与三铰拱的压力线不能一致，每一门扇将受到轴向压力和弯矩的联合作用。而拱式门扇的轴线与三铰拱的压力线形相重合，其门扇只承受轴向力而弯矩较小，因而可节省材料，但拱式人字门的制造、安装复杂，门龕较深，因而应用较少。

按照门扇梁系的布置形式，平面人字闸门又分为横梁式和竖梁式两种。横梁式适用于门宽小于或等于门高的情况 [图 4-2 (a)]，而当门高小于门宽时，可采用竖梁式梁系 [图 4-2 (b)]。由于人字门的结构特征，故其梁系多为水平主梁式。

如图 4-1 所示，横梁式人字门的每一门扇，是由承重结构、支承部件、止水、安全保护设施及工作桥等组成。承重结构包括面

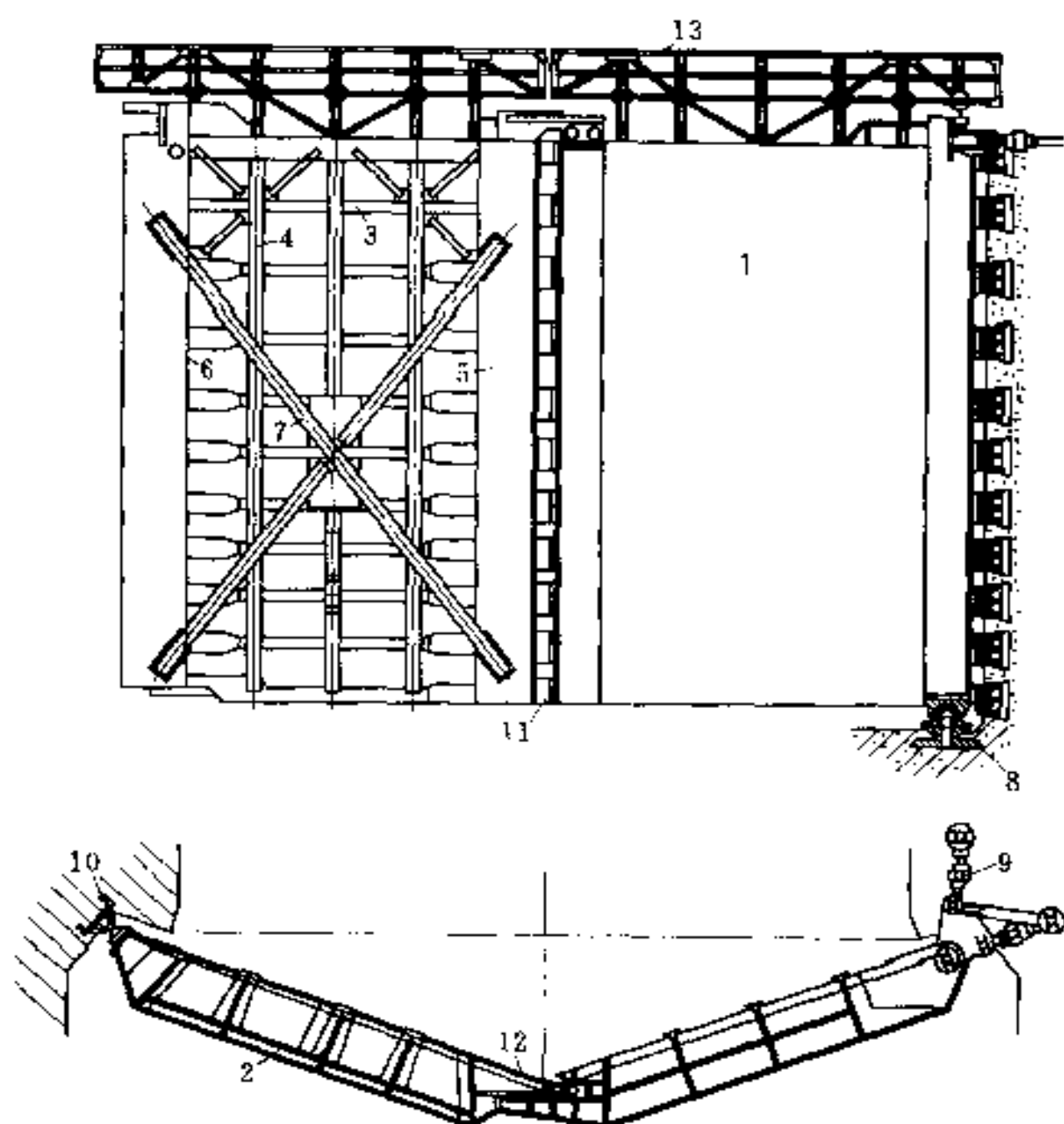


图 4-1 人字闸门的布置和组成

1—面板；2—次梁；3—主梁；4—隔板；5—斜接柱；  
6—门轴柱；7—背拉杆；8—底枢；9—顶枢；  
10—枕垫；11—支垫；12—导卡；13—工作桥

板、次梁、主梁、隔板、斜接柱、门轴柱及背拉杆等。

面板、次梁、主梁、隔板组成的梁系结构，承受水压产生的弯矩和三铰拱作用的轴向力。人字闸门的面板、次梁、门背联结系和竖向联结系与平面闸门类似。主梁是门扇的主要受力构件。主梁除了承受弯矩外，还承受三铰拱的轴向压力。

斜接柱和门轴柱将梁系连成整体，作为纵向梁参与传递轴向力，并与顶、底主横梁组成闭合框架，以保持门体具有足够的刚度。门轴柱的上、下端分别设置顶、底枢轴，门扇的启闭则绕顶枢和底枢中心连线转动。门轴柱外侧设置支垫，在闸门关闭挡水

时，支垫与埋设在闸墙上的枕垫共同起着支铰的作用，而将主梁的反力传递给闸首边墙。人字门通过设置在斜接柱外侧的斜接木、支垫或整体的金属承压条，以互相支承并传递中间铰的推力。

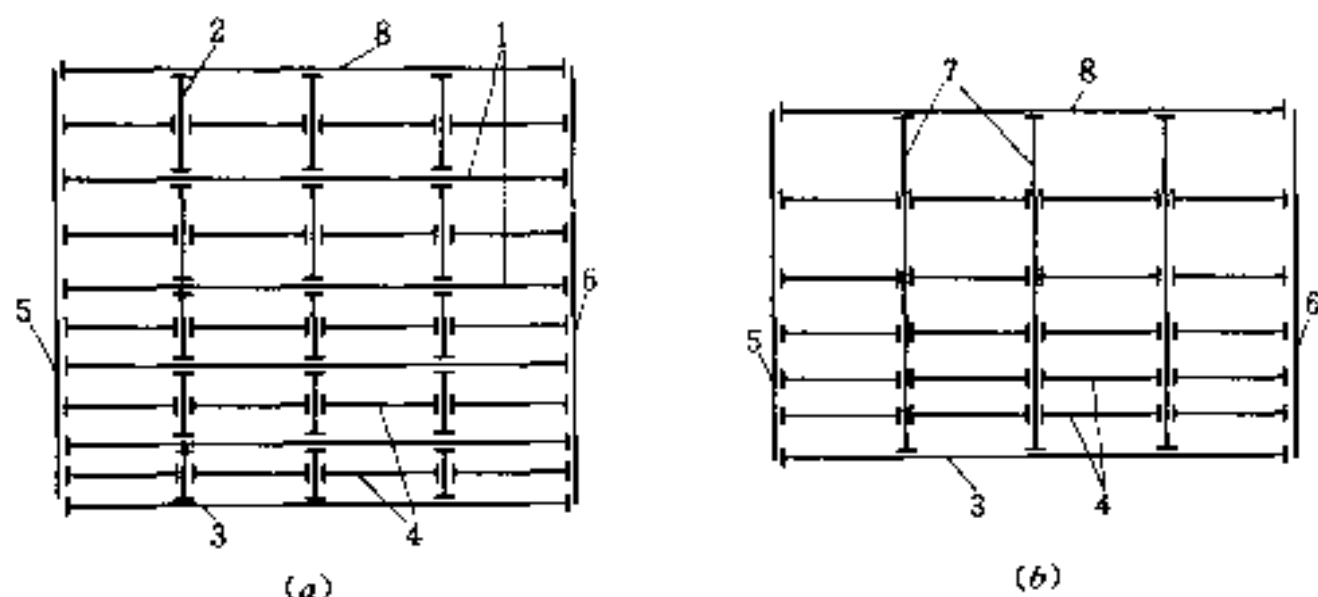


图 4-2 人字闸门梁格形式

1—水平主梁；2—竖直次梁；3—底梁；4—水平次梁；  
5—门轴柱；6—斜接柱；7—竖直主梁；8—顶梁

背拉杆是门扇中的重要构件，当闸门开启时，它可以减小门扇因门重而产生的下垂，从而保证门扇矩形轮廓不变。此外，还可增加门扇在开启时的抗扭刚度，因而对闸门的安全运转起着重要作用。近年来，国内大型人字闸门上采用了预应力背拉杆，大大加强了门扇的抗扭刚度。

人字闸门的止水，包括侧部止水、中间止水与底部止水，一般采用“P”形橡皮止水。有时也可根据门扇的大小及支承形式，利用斜接木或整体金属承压条，来做侧部止水与中间止水。

为了便于管理人员的工作和通行，在闸门顶部需设工作桥。为了使闸门准确地对中关闭，在门扇斜接柱顶部设置导卡装置。为了防止船只撞击，门上还设置缓冲装置。为限制闸门的转角，设置了限位装置等。

人字门的启闭机械一般采用卧式油压启闭机。

目前在建的三峡水利枢纽的双线五级船闸为国内最大船闸，通行 3000t 级船舶，闸首净宽 34m，单级最大水头达 45.2m，其工作闸门全部采用人字闸门，采用 2100/2700 kN 液压式启闭机

操作。

## （二）荷载组合

人字闸门的设计计算，应按闸门关闭挡水、闸门开启以及闸门安装或检修等 3 种不同的工况来分析。3 种工况分别作用在门上的设计荷载组合如下。

### 1. 闸门关闭挡水时的荷载组合

该工况是门扇承重结构的主要设计依据，此时的荷载有：作用于门扇挡水面板上的水平水压力、波浪压力、门扇自重、工作桥上的人群与设备重量、作用于底主梁垂直向上的水压力等。根据这些荷载，可以设计门扇的面板、主梁、次梁、竖向联结系与门背联结系、门轴柱和斜接柱以及支垫、枕垫等。

### 2. 闸门处于开启过程中的荷载组合

闸门处于开启过程中，门扇上的荷载有门扇自重、工作桥上的设备重量、由于水面壅高及残余水位差而产生的水压力、门扇上的风压力等。根据这些荷载，可设计门的背拉杆、顶枢与底枢等。而在计算启闭机械的启闭力时，还应计算顶枢、底枢上的摩擦阻力、门扇转动时的动水压力和惯性力等。

### 3. 闸门安装和检修时的荷载组合

闸门安装和检修时作用荷载有门重、风压力、工作桥上人群重量与设备重量、操作机械的牵引力等。根据安装和检修的荷载组合可校核计算顶枢、底枢与门的背拉杆等。

人字闸门的校核荷载除上述荷载外，还有闸门上部可能受到的船舶和漂浮物等的撞击力、地震荷载、温度荷载等。闸门的荷载计算可参照平面闸门的荷载计算。

## 二、结构设计

### （一）基本尺寸及结构布置

如图 4-3 所示，平面人字闸门在关闭位置时，门扇的轴线与闸室横轴线的夹角  $\theta$  一般可采用  $22.5^\circ$ 。 $\theta$  值的大小，不仅与门扇计算长度的大小有关，而且影响着三铰拱的轴向压力以及对闸首的水平推力的大小。我国已建的人字门  $\theta$  值多采用  $22.5^\circ$ ，也可采用

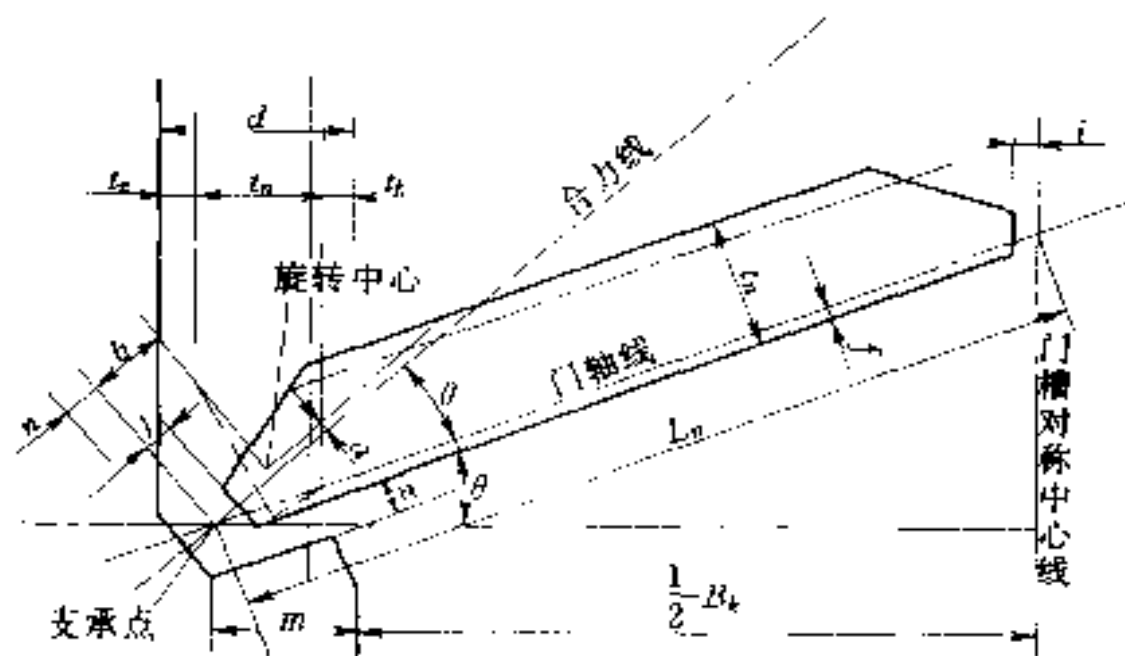


图 4-3 人字闸门的基本尺寸

20°或 18°26'。

旋转中心向上游偏离支承合力线的垂直距离  $a = 20 \sim 100\text{mm}$ ，一般取  $25 \sim 50\text{mm}$ 。旋转中心至支承点在合力线上的投影长度  $b = 200 \sim 750\text{mm}$ ，一般取  $500 \sim 600\text{mm}$ 。门轴线至横梁下游边距  $f = 66 \sim 192\text{mm}$ ，一般取  $120 \sim 150\text{mm}$ 。门轴柱端面至支承点在合力线上的投影长度  $j = 80 \sim 428\text{mm}$ ，一般取  $200 \sim 350\text{mm}$ 。

#### 1. 基本尺寸布置

(1) 门扇的计算长度。门扇计算长度  $L_n$ ，是门两端支承中心之间的距离，即门侧支垫与枕垫的支承中心至两门扇中缝的距离，其值为

$$L_n = \frac{B_k + 2m}{2\cos\theta} \quad (4-1)$$

式中： $B_k$  为闸首通航净宽； $m$  为门扇支垫与枕垫支承中心至闸室边墙的垂直距离，一般取  $m = (0.03 \sim 0.05) B_k$  或  $m = (0.4 \sim 0.5) d$ ， $d$  为门龕深度，按式 (4.4) 确定； $\theta$  为关门时的门轴线与闸室横轴线的夹角。

(2) 门扇的计算高度。如图 4-4 所示，门扇的计算高度  $h_n$  是门扇顶、底主梁之间的距离，包括工作桥的高度，其值为

$$h_n = H + h_k + a_s + a_d \quad (4-2)$$

式中： $H$  为水级，即闸门上游最高通航水位和下游最低通航水位

之差; $h_k$ 为闸门下游最低通航水位至门槛顶面的距离; $a_1$ 为顶主梁轴线高出上游水位的高度,一般采用 $0.1\sim 0.3\text{m}$ ; $a_2$ 为底主梁轴线与门槛顶面之高差,常用 $0.15\sim 0.25\text{m}$ 。

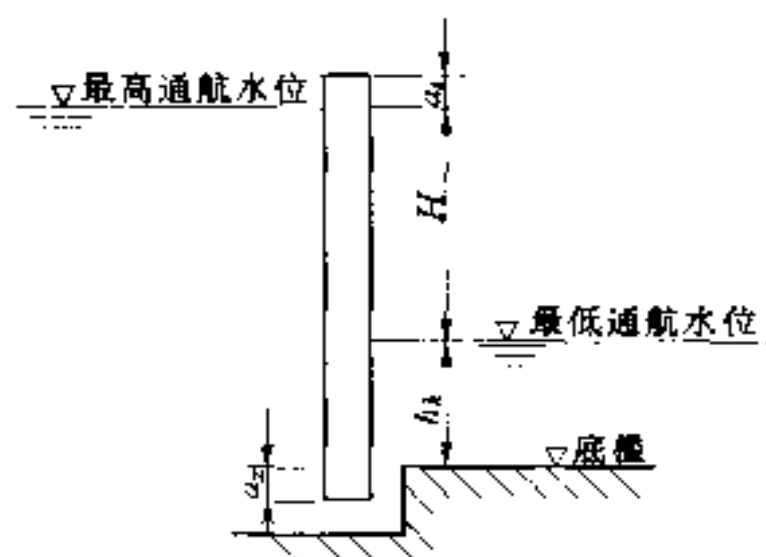


图 4-4 人字闸门的计算高度

(3) 门扇的厚度。门扇的厚度 $t_n$ 约为主梁的高度,可根据门扇的计算长度与高度来确定,一般采用:

$$t_n = (0.1 \sim 0.13)L_n \quad (4-3)$$

为保证门扇在关闭时的抗扭刚度,当门扇的计算高度 $h_n$ 较大时, $t_n$ 取大值; $h_n$ 较小时,可取小值。主梁腹板高度还可根据表4-1选用。

| 表 4-1            | 主梁腹板高度的取值 |     |      |      |      |      |      |      |      |      | 单位: mm |
|------------------|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 闸首通航净宽<br>(m)    | 8         | 10  | 12.4 | 15   | 18   | 20   | 21.5 | 25   | 30   | 34   |        |
| 门高 $>15\text{m}$ |           |     |      |      | 1300 | 1500 | 1600 | 1850 | 2200 | 2500 |        |
| 门高 $<15\text{m}$ | 700       | 850 | 1000 | 1100 | 1200 | 1350 | 1450 | 1700 | 1800 | 2300 |        |

(4) 门龕的深度与长度。门扇厚度 $t_n$ 确定后,门龕的深度 $d$ 即可相应求出:

$$d = t_n + t_s - t_h \quad (4-4)$$

式中: $t_h$ 为缓冲设备及护弦总厚度; $t_s$ 为安全裕量,一般可取 $100\sim 200\text{mm}$ 。

门龕的长度,除应满足轴柱一端布置支垫、枕垫与底枢要求外,还应考虑门全开时,斜接柱的一端应有 $200\sim 300\text{mm}$ 的安全裕量。

## 2. 结构布置

平面人字闸门的的面板与梁格结构与平面钢闸门大同小异。

平面人字闸门应采用多主梁，其数目和布置应根据闸门的高度和所受水压力大小来确定，一般按等荷载原则来进行，可采用前面介绍过的累积曲线法，但考虑到人字闸门构造要求，一般需要在门顶和门底设置主梁，以便在其上设置顶枢、底枢、底止水、工作桥以及启闭机的连接轴等。因此，各主梁不是位于水压力等面积和重心上，而应在上下等分面界线上，如图 4-5 所示。另外考虑制造与检修的方便，主梁的间距一般不应小于 0.8m，最大间距也不宜超过 2.5m。有时为了保证门扇转动的抗扭刚度，以及承受船舶或漂浮物的偶然撞击，主梁数目可适当增加，再适当调整主梁间距，使其上疏下密。

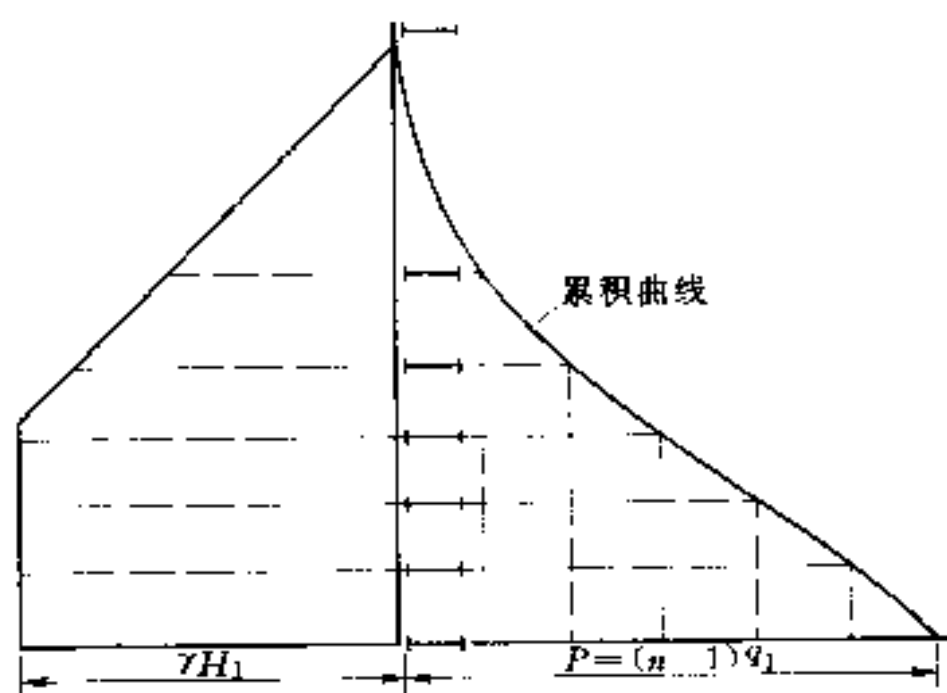


图 4-5 累积曲线法确定人字闸门的主梁布置

确定主梁间距时，还应考虑次梁的布置，并应使面板厚度适宜。面板区格，特别是门扇下部的梁格板，其长边应沿主梁轴线方向布置，并使长短边比值  $b/a \geq 1.5$ 。

人字闸门的结构计算与平面钢闸门一样，目前普遍采用平面假定体系，即各个构件的计算均简化为平面问题，其强度、刚度及稳定性计算可参照平面钢闸门进行。

## (二) 主梁计算

为减小门龛深度，人字闸门的主梁宜采用实腹式组合工字截面，并采用变截面，即其端部为折线形轮廓，端板垂直三铰拱的支承反力方向。闸门关闭挡水时，主梁可按承受弯矩和轴向压力

的简支梁进行计算,其受力简图如图 4-6 所示,均布荷载  $q$  的确定方法与平面闸门相同,作用在主梁上的均布水压力的合力为  $P$ 。

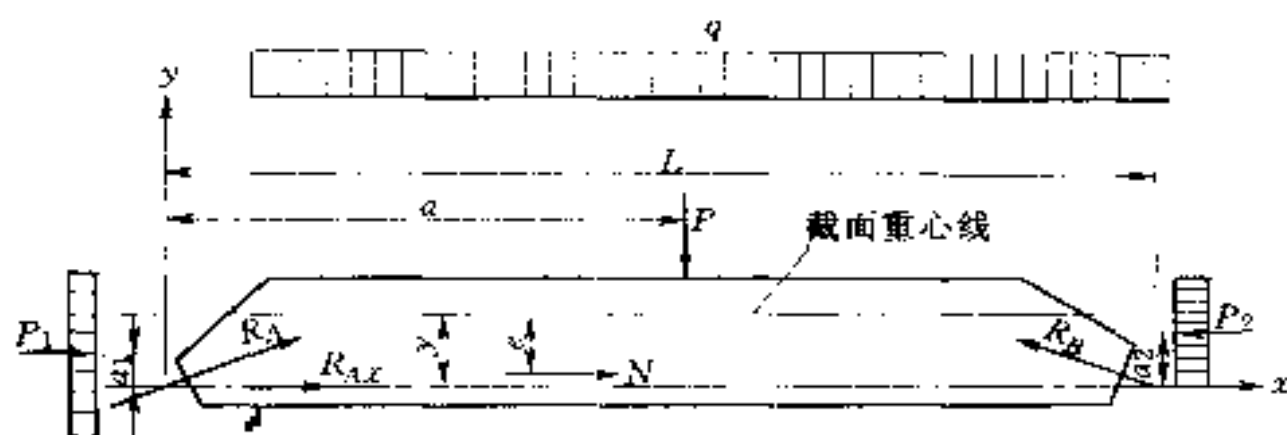


图 4-6 主梁受力简图

### 1. 主梁的内力计算

由力的平衡关系可求得反力  $R_A$  与  $R_B$ , 则轴向力  $N$  为

$$N = P_1 + R_{Ax} \quad (4-5)$$

$N$  对梁截面中和轴的偏心距为

$$e = y - \frac{P_1 a_1}{N} \quad (4-6)$$

主梁截面承受的弯矩为

$$M = M_p + Ne \quad (4-7)$$

求得主梁的轴向  $N$  与计算弯矩  $M$  之后,即可按偏心受压构件进行设计主梁。

### 2. 主梁的跨中挠度

主梁的跨中挠度,可按下式计算:

$$f = \frac{f_1}{1 - \frac{f_2}{K \alpha^2}} \leq [f] \quad (4-8)$$

$$f_1 = f_1 - f_2$$

$$\alpha^2 = \frac{NL_n^2}{\pi^2 EI}$$

式中:  $f_1$  为按简支梁承受均布水压荷载计算的跨中挠度;  $f_2$  为由轴向力产生的偏心弯矩所引起的挠度;  $K$  为支承情况系数,两端铰支时,  $K=1$ ;  $L_n$  为主梁的计算长度;  $I$  为主梁截面的惯性矩;  $[f]$  为船闸人字门主梁的容许挠度值,其值为  $[f] = L_n/750$ 。

### 3. 主梁计算应注意的问题

主梁计算时应注意以下几个问题：

(1) 主梁的计算应考虑面板的共同作用，面板的有效宽度的取值与平面闸门主梁相同。支承点的位置应偏于主梁截面的中和轴的下游侧，从而使支承反力对梁截面产生负弯矩，抵消一部分水压力产生的正弯矩，改善梁的工作条件，节省钢材。

(2) 在设计顶主梁时，除考虑水平方向水压荷载外，还应计算人群荷载以及桥重等产生的垂直荷载，需要时还应考虑船舶的撞击力。而在启闭时，则应计算门上的启闭力。

对于底主梁，还应考虑作用在腹板上的垂直浮托力，布置底止水时应使浮托力略小于门重，以免闸门上浮。浮托力使底主梁产生侧向弯曲并使腹板受到局部弯曲，因此需布置横向加劲肋，作为腹板的支承，以减小局部弯曲受力。此处的局部弯曲应力，可按四边简支在翼缘与加劲肋上的弹性薄板计算。

(3) 主梁端部的轮廓做成折线形，截面高度变小，而剪力和负弯矩逐渐加大，必须验算该处的正应力和剪应力及折算应力。如果强度不满足要求，则应加强主梁端部腹板的厚度。

(4) 人字门在关闭挡水时，两门扇的拱顶将沿水压力方向产生位移，称落拱现象。重要的大型船闸人字门，需验算三铰拱的拱高垂度  $\Delta$  值（图 4-7）。 $\Delta$  值不宜过大，否则将使支垫、枕垫、底枢等部件受力状况恶化，并可能导致底止水破坏。大型船闸人字闸门的斜接柱上，常采用耐磨损的钢支承（支垫或承压条），故其拱高垂度  $\Delta$  主要是由于主梁受水压力后的弹性压缩和温度变形而产生的。 $\Delta$  值的大小可按弹性力学有关变位公式计算，人字门的允许拱高垂度，可取 20~40mm，其下限适用于闸室宽为 15m 的

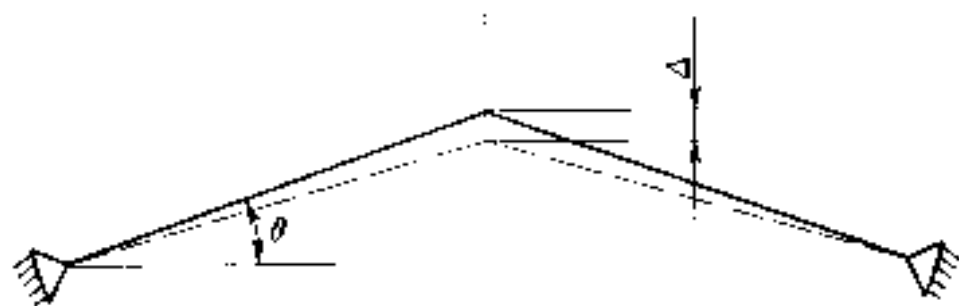


图 4-7 人字闸门的落拱现象

闸门，上限适用于闸室宽为 30m 的闸门。

### (三) 门轴柱和斜接柱

门轴柱和斜接柱的构造形式相同，当支承方式一致时，其工作状态相类似，只是门轴柱除传递三铰拱作用的推力给支垫座外，还将受底枢垂直反力的作用。中、小型人字闸门门轴柱一般采用型钢与端部面板构成，大型人字闸门的门轴柱一般的构造形式如图 4-8 所示，(a) 为闭合式框架断面，它由端板和竖向隔板的腹板组成柱的上、下翼缘，由面板和封板组成双腹板，端板焊接在主梁腹板和隔板上，这种结构适宜采用不连续支座，具有较大的抗扭刚度，但端部焊缝施焊困难；(b) 为开口式组合截面，它由端板和竖直腹板、竖向隔板的腹板及加劲肋板组成，多用于采用连续支承的闸门。

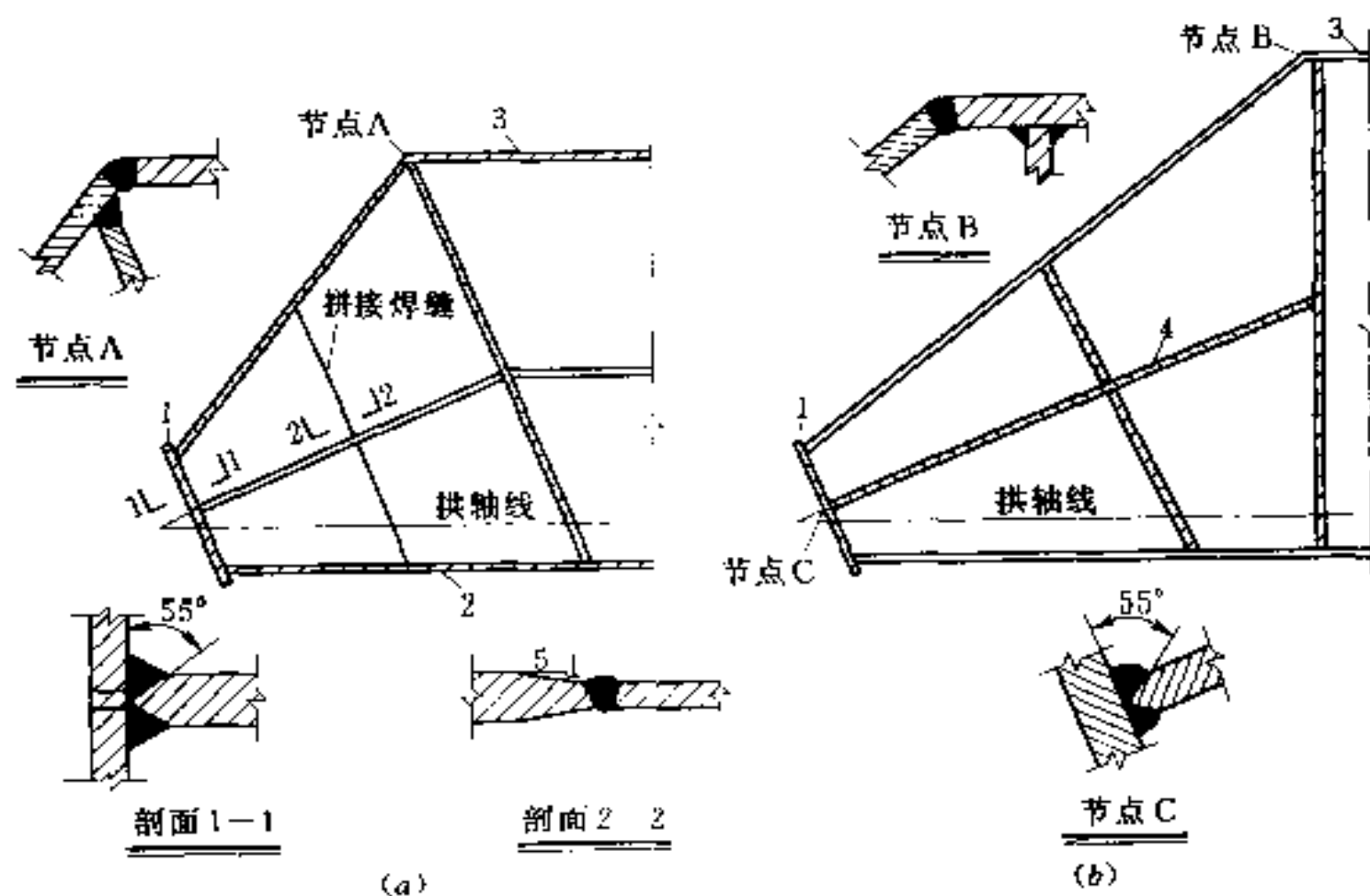


图 4-8 人字闸门的门轴柱及斜接柱

(a) 闭合式断面；(b) 开口式组合截面

1 - 端板；2 - 封板；3 - 面板；4 - 竖直腹板

门轴柱的计算与其支承形式有关。当采用支枕垫支承时，由于支垫是对应主梁端部而设置的，主梁反力通过支垫集中地传给枕垫，因而门轴柱和斜接柱基本没有弯矩作用。但是实际上由于

安装精度、变形以及磨损等原因，有可能某个中间支垫脱空，此时主梁反力分配至两相邻支垫上，因而门轴柱和斜接柱可按承受集中力的简支梁计算弯矩，同时承受门重和工作桥等垂直荷载，按偏心受压构件进行验算。当采用连续支承时，则主梁反力可简化为均布荷载，门轴柱可按连续梁计算，也可近似地取底部三跨段计算，小型闸门甚至可取其一段按简支梁计算。

#### (四) 背拉杆的计算

门扇在启闭过程中，在自重及外力作用下，将会产生相当大的扭转变位，因此人字闸门的设计中应注意竖向联结系和门背联结系的布置。为增加门的抗扭转刚度，竖向联结系多采用实腹式隔板，并较平面闸门布置得稍密些。而门背联结系一般考虑在主梁和隔板的下翼缘处设置扩大的节点板，构成刚性节点，一些大跨度的闸门中，也可在门扇的下部或上部两主梁间另设门背桁架。此外，还应在门扇的下游面设置背拉杆，减少门扇的扭转变位。有资料表明，有背拉杆时的变位比无背拉杆时约减小一半，而当增大背拉杆截面时，则变位更相应减小。

背拉杆通常采用扁钢、角钢或槽钢，在与主梁和隔板的下翼缘相交处，都采用贴角焊缝连接，使门扇具有较大的刚度。

背拉杆的计算按两种工况考虑：一是门叶启闭的情况，此时门叶水下部分承受水位差产生的水压力，门叶水上部分承受风压力；二是门叶安装或检修时，此时门叶只承受风压力。因第二种情况的荷载比较小，一般只计算第一种工况，其计算简图见图 4-9。

斜拉杆受力分析一般作如下假定：整个门叶看作为两边支承两边自由的板梁，在外荷载的作用下使门扇产生弯矩，并且视斜拉杆为梁的翼缘确定斜拉杆的内力及截面。

图 4-9 中，门扇在启闭过程中的水平荷载，有壅水压力和风压力，其值分别为

$$q_x = \Delta h h_x L_n \quad (4-9)$$

$$q_f = W h_f L_n \quad (4-10)$$

式中： $L_n$  为门扇的宽度； $\Delta h$  为壅水高差； $h_x$  如对上闸首的人字门，

为上游最高通航水位时的水深；而对下闸首人字门，则为下游最高通航水位时的水深； $h_f$  为承受风荷载的高度； $W$  为风压强度。

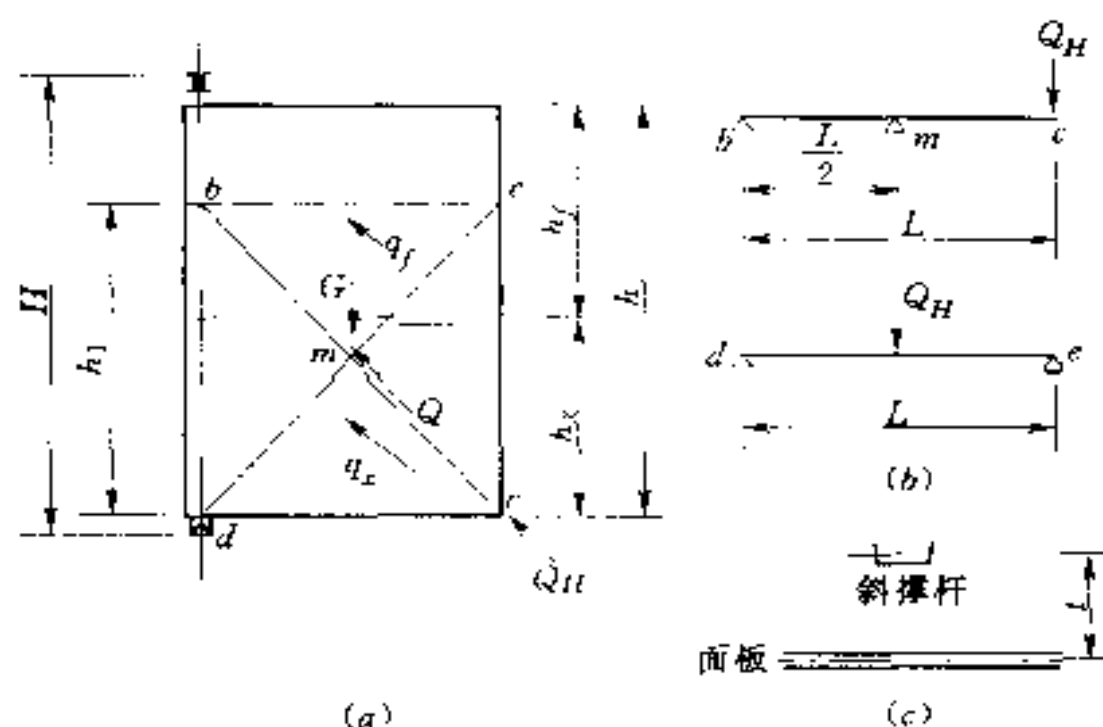


图 4-9 背拉杆计算简图

斜拉杆受力分析可作如下简化：上述水平荷载由门轴柱和斜接柱平均分配，斜接柱上的荷载又传至  $e$  点与  $d$  点。整个门扇视  $be$ 、 $bd$  两边为支承边，而  $ce$  与  $cd$  两边为自由边。因此，将斜拉杆  $de$  视为一简支梁，而斜杆  $bc$  则认为是支点为  $b$ 、 $m$  的悬臂简支梁，见图 4-9 (b)，因而斜接柱传至  $c$  点的集中荷载为

$$Q_H = \frac{\frac{1}{2}q_f \times \frac{1}{2}h_f + \frac{1}{2}q_x \left( h - \frac{1}{2}h_x \right)}{h} = \frac{q_f h_f + 2q_x h - q_x h_x}{4h} \quad (4-11)$$

而背拉杆  $ed$  和  $bc$  的弯矩则为

$$M_{ed} = M_{bc} = Q_H L / 2 \quad (4-12)$$

式中： $L$  为背拉杆的长度。

背拉杆的计算截面，可近似地取为如图 4-9 (c) 所示的虚腹板截面，上翼缘为面板，下翼缘为背拉杆截面。因此，背拉杆在水平荷载下的计算内力为

$$N_s = \pm \frac{M_{bc}}{t} = \pm \frac{Q_H L}{2t} \quad (4-13)$$

式中： $t$  为从拉杆截面形心至面板中心的距离。

除上述水平荷载外，背拉杆还承受自重等垂直荷载引起的内力，但一般较小，可以忽略不计。根据内力可选择背拉杆的截面。

此外，还有一种计算方法，就是把门叶视为一深而短的悬臂梁，在外力作用下，使门叶产生扭矩，然后根据变形条件，确定背拉杆的内力和截面。

### 三、零部件设计

#### (一) 支垫与枕垫

支、枕垫是人字闸门挡水时的主要支承部件，是人字闸门组成三铰拱结构的铰点，分别布置在门轴柱、斜接柱和闸墙上。

支、枕垫可分为分块式和连续式。分块式支、枕垫布置在主梁的端部，由于每根主梁端部设有支垫与枕垫，因而受力明确，接触良好，可保证三铰拱可靠地传递反力并减小门的落拱现象。大型人字闸门下部主梁间距较小，而支垫受力和尺寸均较大，一般采用连续式支、枕垫，可减小径向变位，简化底枢结构，并兼作侧止水。

支垫与枕垫的构造如图 4-10 所示，是在铸钢底座上设可调钢衬垫。铸钢底座（有时可采用铸铁或焊接结构）与柱端板和闸墙间都设有钢垫板，借此粗略地调整支、枕垫的位置。

钢衬垫宜采用高强度 45 号锻钢，并进行热处理以提高其耐磨

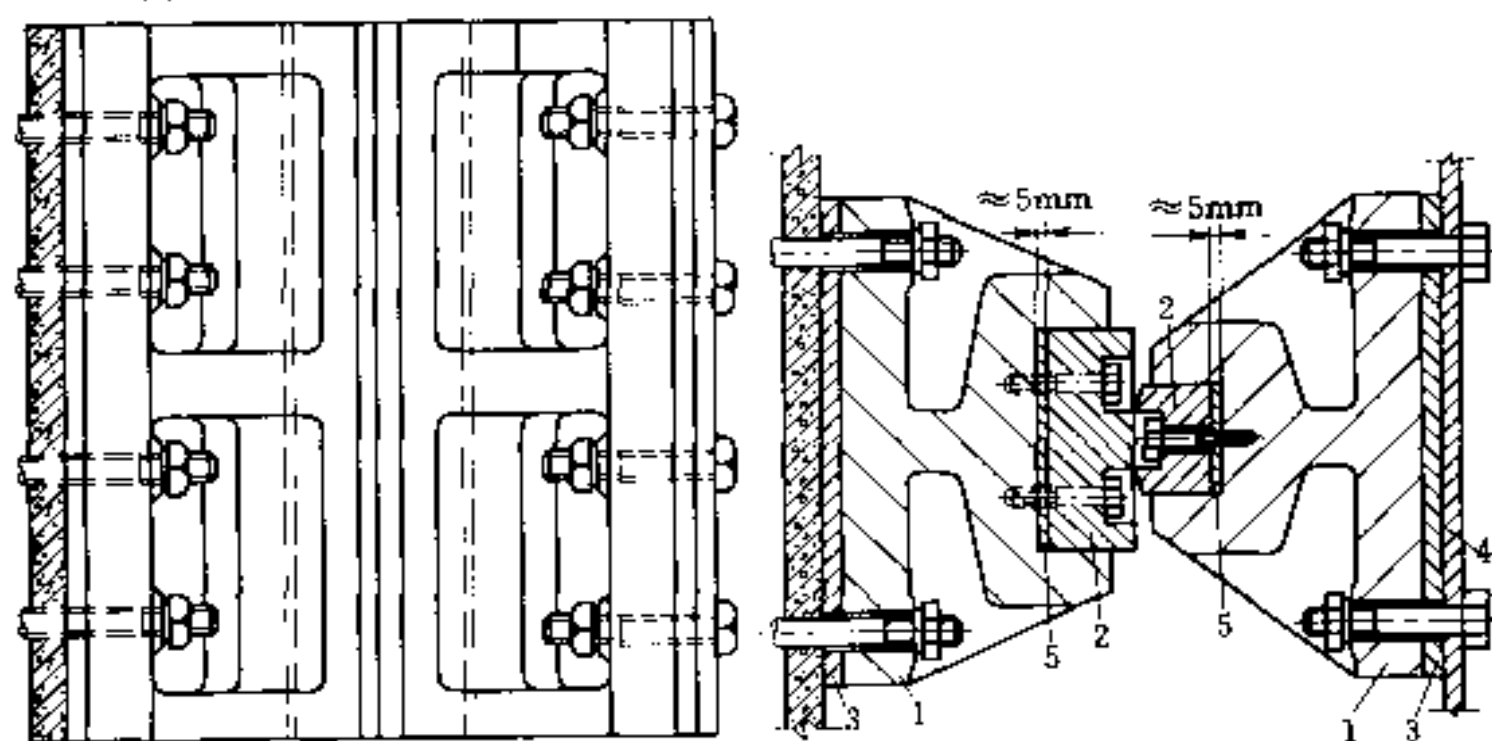


图 4-10 支、枕垫的构造

1—铸钢底座；2—钢衬垫；3—钢垫板；4—门轴柱端板；5—填料

性能，表面应镀铬，以防锈蚀，为了传力明确并便于启闭闸门，枕垫上的钢衬垫做成平面的，而支垫上的钢衬垫则应做成弧面的，圆弧面的中心应位于主梁反力的作用线上，可使反力符合计算假定。在钢衬垫与底座凹槽之间填充黄铜片或环氧砂浆，借以控制其精确位置，以使支垫与枕垫都能全部紧密接触，并使二者的接触线处在同一垂线上。

支、枕垫的计算荷载一般按三铰拱作用的最大支承反力乘以超载系数确定。分块式和连续式支、枕垫的超载系数可分别取 1.2 和 1.1，其计算可参考平面闸门的弧面支承滑块。

此外，还需验算填料的承压应力：

$$\sigma = \frac{1.1P}{b} \leq [\sigma] \quad (4-14)$$

式中： $b$  为承压条的宽度； $[\sigma]$  为填料的容许承压应力，如为环氧砂浆， $[\sigma] = 25\text{MPa}$ 。

## （二）顶枢与底枢

人字闸门启闭时，门扇围绕着由顶枢和底枢中心连线形成的垂直转轴而转动。作用在顶、底枢上的力，其最大值发生在下游最高水位时闸门处于启闭或正在转动的情况，其计算简图如图 4-11 所示，其中，水平荷载为  $P$  和  $T$ ， $P$  为壅水压力、风压力的合力； $T$  为启闭机的牵引力；垂直荷载  $G$  为门扇、工作桥及行人等重量。根据力的平衡计算出顶、底枢的反力。

### 1. 顶枢

顶枢是防止门扇倾斜的上部支承，利用顶枢可以调整门扇转动轴，使门扇保持垂直位置。因此，顶枢设计时应注意：顶枢拉杆必须是两根，拉杆长度应便于调整，并且使一根拉杆（一般称 A 杆）平行于门扇在开门位置的门轴线，一根拉杆（一般称 B 杆）平行于门扇在关门位置的门轴线，如果门扇在开门位置的门轴线与闸墙边线的距离比较小，不便于 A 杆锚固件的埋设，可将 A 杆向内倾斜  $5^\circ \sim 10^\circ$ 。另外，应尽可能避免门扇转动时拉杆承受由于扭转而产生的弯曲。

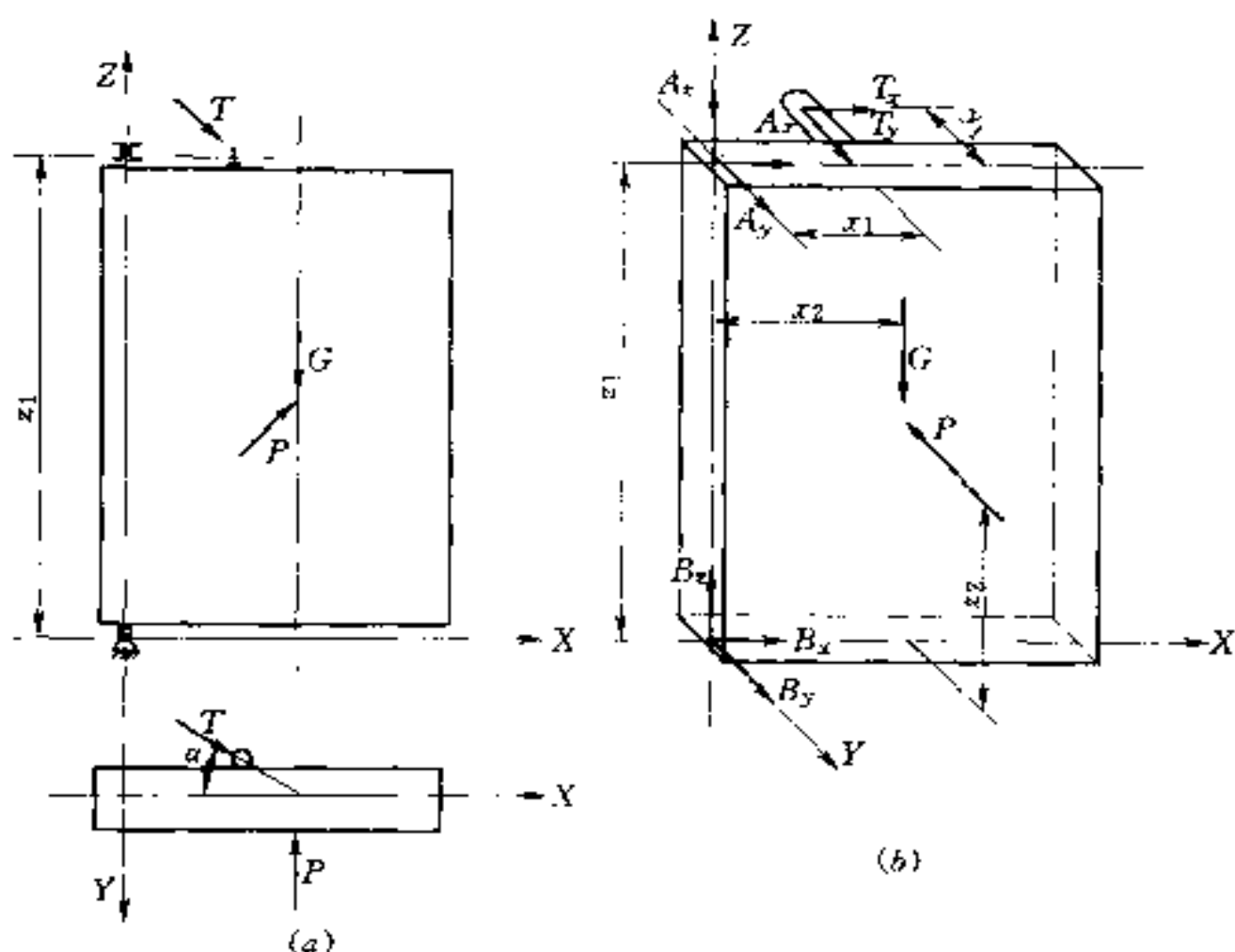


图 4-11 顶、底枢支承反力计算简图

(a) 作用在门扇上的荷载示意图；(b) 门扇关闭至关门位置

常用顶枢的形式如图 4-12、图 4-13、图 4-14 所示。顶枢一般由顶枢座、顶枢轴、拉杆及锚固构件所组成，顶枢轴受力后，通过拉杆、锚固构件传给闸墙。顶枢座安设在门扇门轴柱的顶端，顶枢座可用钢板焊成或用铸钢浇铸而成。顶枢轴多以简支方式固定于顶枢座中。拉杆的一端具有套环，环内设青铜衬套，门启闭时枢轴可在套环内转动。拉杆的另一端则通过销轴与锚固构件相连。锚固构件可采用型钢焊接埋设在闸墙内，也可采用铰座形式，用地脚螺栓固定。

中小型人字闸门的拉杆长度的调整装置可采用双向螺纹式（图 4-12），大型闸门由于拉杆调整力较大，采用双向螺纹调整较困难，宜采用楔块调节式顶枢（图 4-13），旋动楔块顶部的螺钉，使楔块上下移动，可使拉杆长度伸缩。

图 4-14 所示为三角形桁架式顶枢，拉杆轴与顶枢轴均连接在三角形刚性连接板上，并增设一连杆。当门扇转动时，摩擦力矩由刚性连接板承受，再以节点荷载的方式传到两根拉杆和连杆组成的铰接桁架

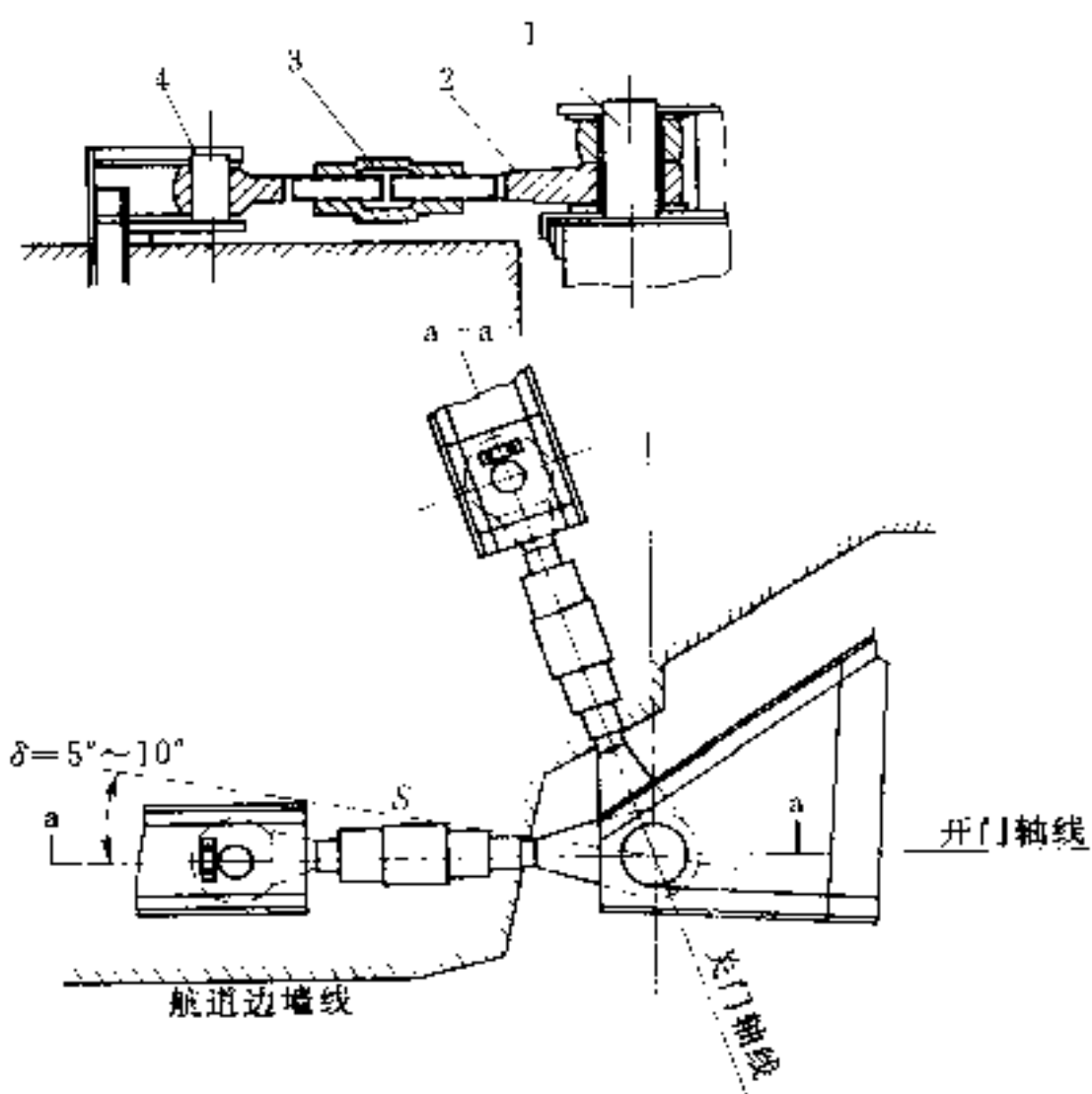


图 4-12 双螺纹调节的顶枢

1—顶枢座；2 拉杆；3 螺纹连接器；4—拉锚装置

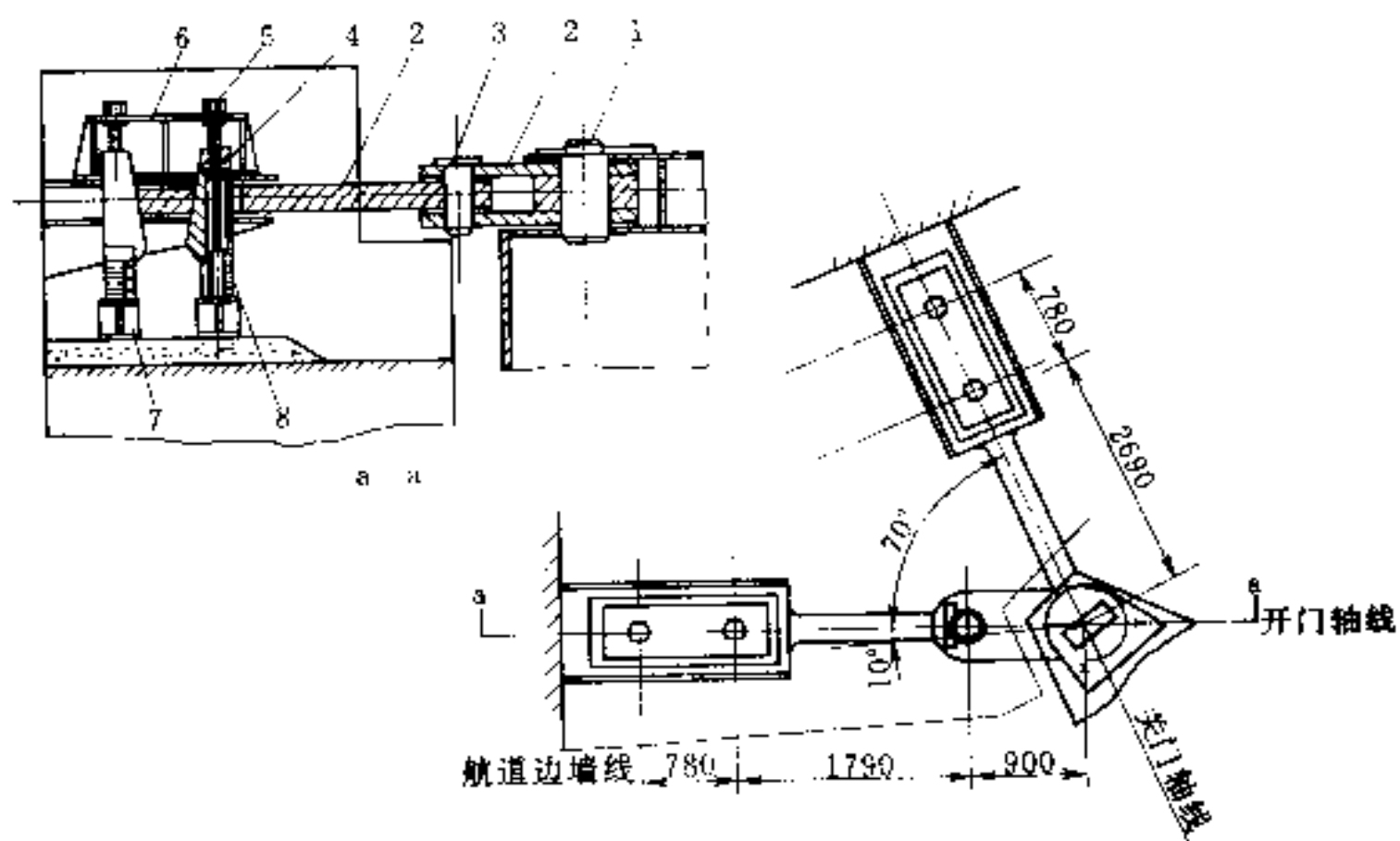


图 4-13 楔块调节的顶枢

1—销轴；2 拉杆；3—连接轴；4—楔形块；5—螺钉；  
6—楔盖；7—楔架；8—垫片

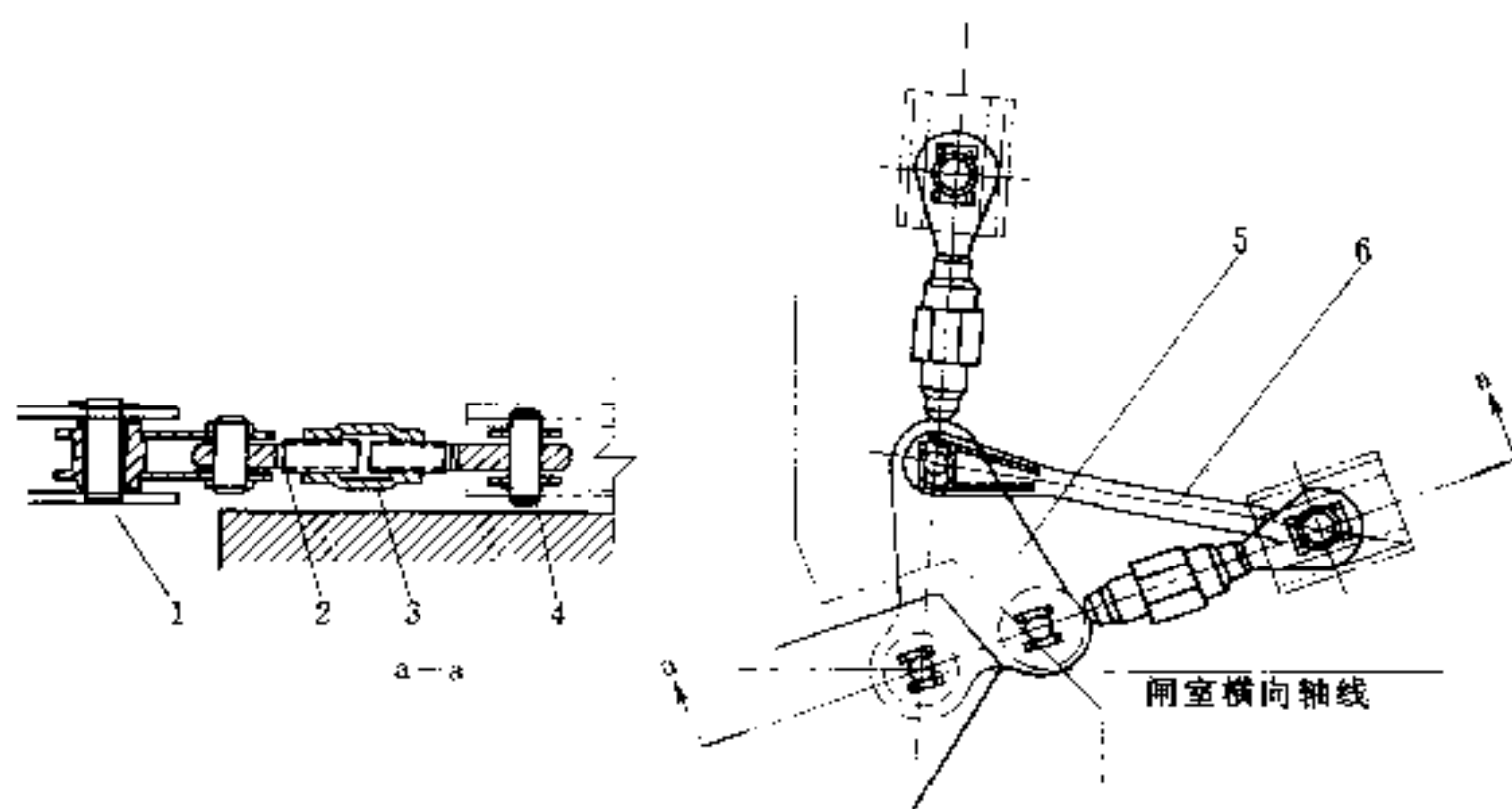


图 4-14 三角形桁架式顶枢

1—顶枢座；2—拉杆；3—螺纹连接器；4—拉锚装置；5—钢节板；6—连杆

上,从而拉杆不受弯矩作用,提高了拉杆的承载能力。

制造顶枢的材料:由于顶枢受力较大而且复杂,且是闸门安全运转的关键构件,故必须特别重视各个零件的材料选用与制造质量。顶枢轴、销轴和拉杆,一般采用 45 号优质锻钢,并表面镀铬  $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 。其余部分可用 Q235 钢或铸钢 ZG270-500。

顶枢的两根拉杆,随门扇启闭位置的不同而受力各不相同。门将要关闭时, B 杆承受拉力最大, A 杆可能受些压力;而当闸门全开时, A 杆受拉力最大,而 B 杆可能受些压力。因此,拉杆应按最大拉力和枢轴摩擦扭矩所引起的弯矩进行截面设计,并按偏心受压构件校核其稳定性。

根据顶枢反力,顶枢轴可按均布荷载的简支梁进行弯曲应力与剪应力的验算,同时应考虑扭矩的作用。此外,还须验算衬套的承压应力,顶枢座承轴板的局部紧接承压应力。顶枢其他构件可根据其受力和构造按机械零件验算其强度。

## 2. 底枢

底枢是人字闸门中的重要部件,主要承受门扇自重及由自重产生的水平推力。底枢长期处于水下面又频繁地运转,因而工作

条件异常恶劣。底枢设计时应注意：作用在门扇上的水压力只通过支、枕垫传递到闸墙上；由于闸门变形及零件磨损而产生拱高下垂时，要防止底枢受过大的水平荷载。

底枢一般由承轴巢、半球形轴及承轴台（又称底座）3部分所组成。

（1）承轴巢又称顶盖，一般常与底主梁的支垫铸成整体。承轴巢用螺栓固定于门轴柱下端底主梁腹板上，其材料可选用 ZG270—500 铸钢。为减小磨损，在承轴巢内穹形曲面上镶有青铜衬套。

（2）半球形轴又称蘑菇轴，其顶部与承轴巢的青铜轴衬接触，其下部固定在承轴台上。为防止锈蚀和减少磨损，轴头宜采用镍铬钢或采用 45 号优质钢制成。用碳素钢时，半球轴表面上应堆焊不锈钢或镀铬。

（3）承轴台又称底座，埋固在闸首底板的混凝土内，借以固定半球轴，一般可以 ZG270—500 铸钢制造。

下面介绍底枢的形式及其计算方法。

（1）底枢的形式。常用底枢的形式如图 4-15、图 4-16、图 4-

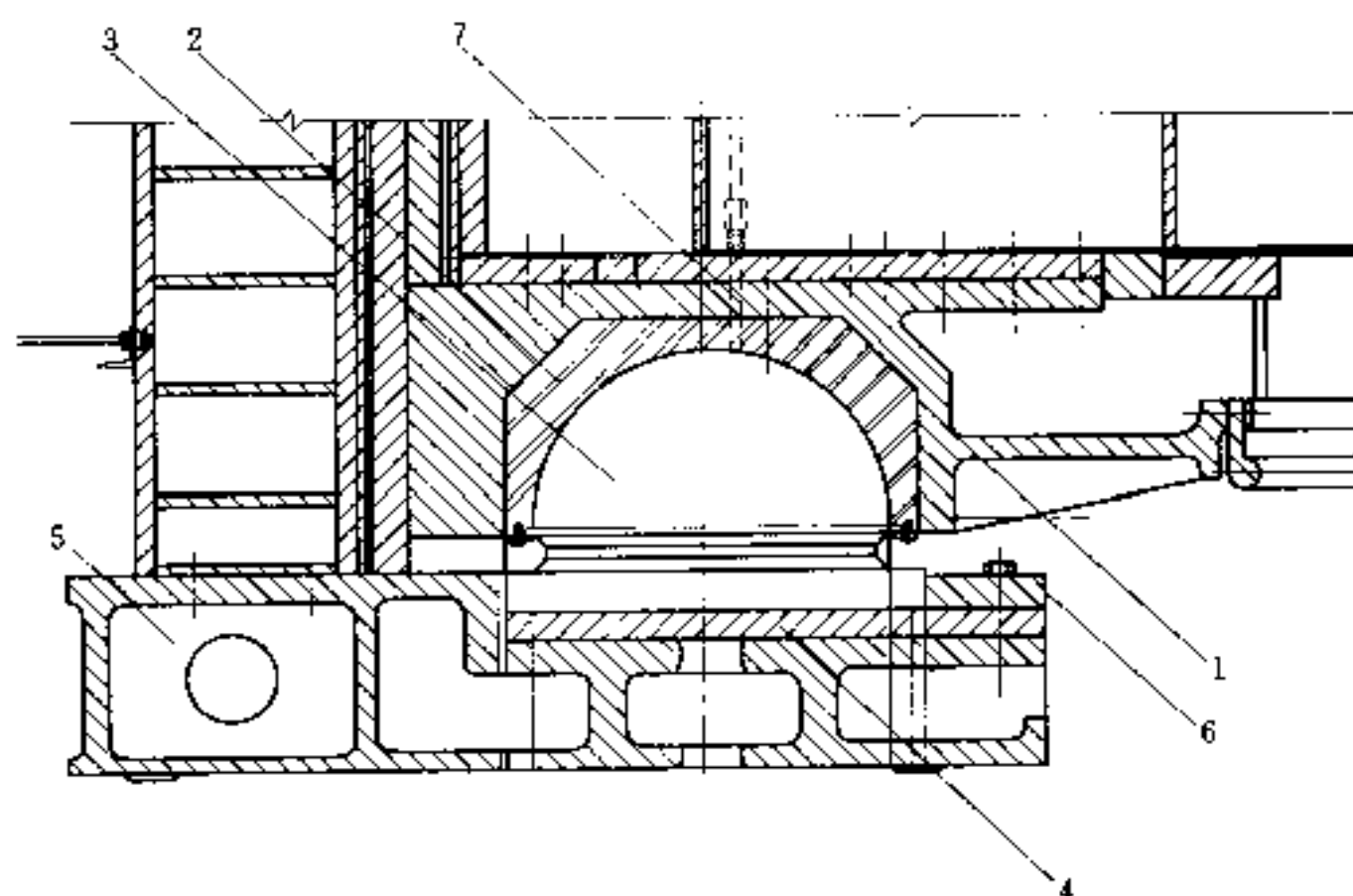


图 4-15 固定式底枢

1 承轴巢；2 轴套；3 半球形轴头；4 调节片；  
5 承轴台；6 环形挡块；7 润滑油管

17、图 4-18 所示。图 4-15 为固定底枢，其余为微动底枢。为使半球形轴头在任何情况下都不承受由水压力作用而产生的水平压力，而只承受门重等垂直荷载，可采用微动底枢形式。

大型人字闸门，由于采用连续钢支承，因而落拱小，承压条磨损也小，可采用固定式底枢结构（图 4-15）。它的半球轴直接支承在固定的承轴台上，轴与承轴台之间无间隙，不能微动。轴头与承轴台之间设有调节片，用以调整轴的安装高程。承轴巢与固定承压条的挡块铸成整体。这种底枢结构简单，便于水下检修和更换球轴衬套。

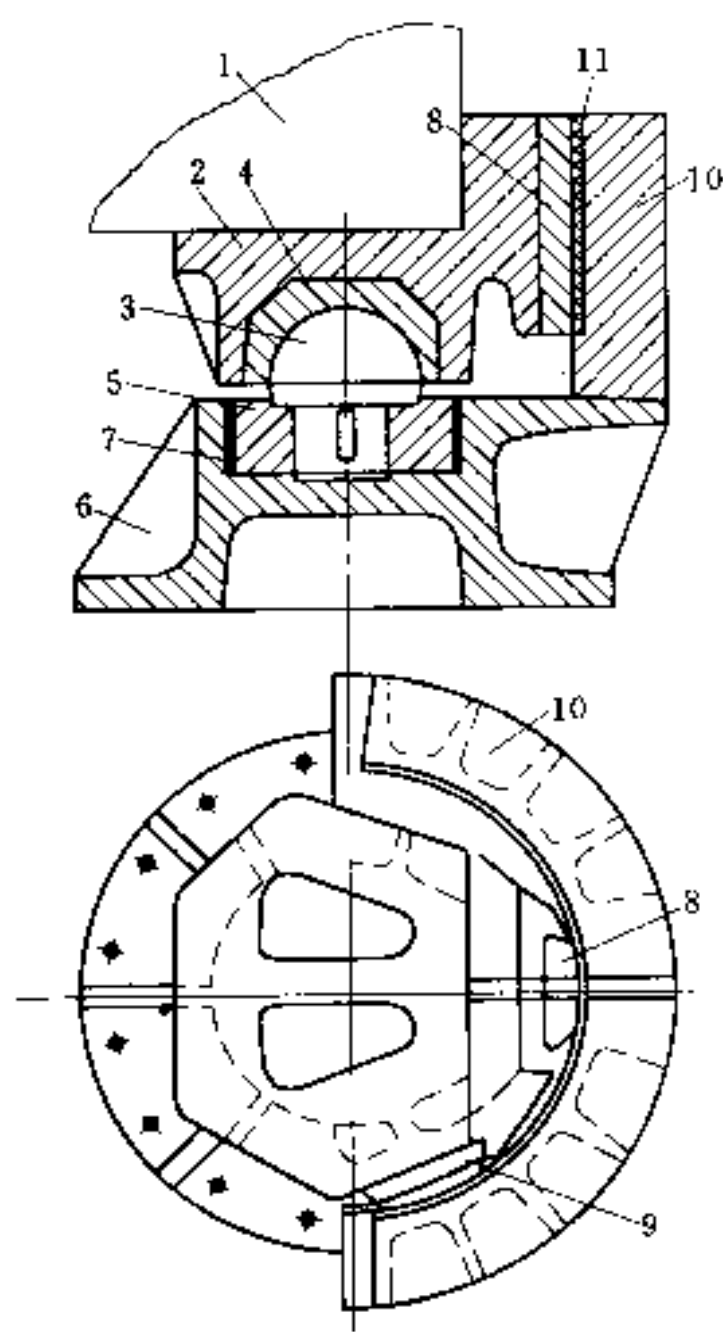


图 4-16 微动底枢（一）

1—门叶；2—承轴巢；3—半圆球轴；  
4—轴衬；5—承轴台可动部分；6—承  
轴台固定部分；7—橡皮圈；8—主  
支垫；9—辅助支垫；10—扇形  
枕垫；11—支撑衬垫

图 4-16 所示为采用比较多的一种微动底枢，其特点是底部支垫有主辅两个，对应的枕垫为扇形，辅助支垫可保证转轴的正确位置。闸门启闭过程中，水平反力通过与承轴巢铸成整体的主梁支垫传递给扇形枕垫。承轴台是由装着轴头的可动圆盘和固定支座两部分组成，它们之间留有 15mm 左右的缝隙，在缝隙中衬有尼龙垫圈，因而可使轴头与可动圆盘作任意方向的微小移动，故此半球轴只受垂直压力。为减小磨损，支垫可采用青铜垫块。实践证明，这种底枢运转灵活，安全可靠，轴头的青铜衬套磨损轻微。

图 4-17 是另一种微动底枢，承轴台也有可动部分和固定部分，二者留有 3~5mm 的间隙，并用导向键连接。导向键可使闸

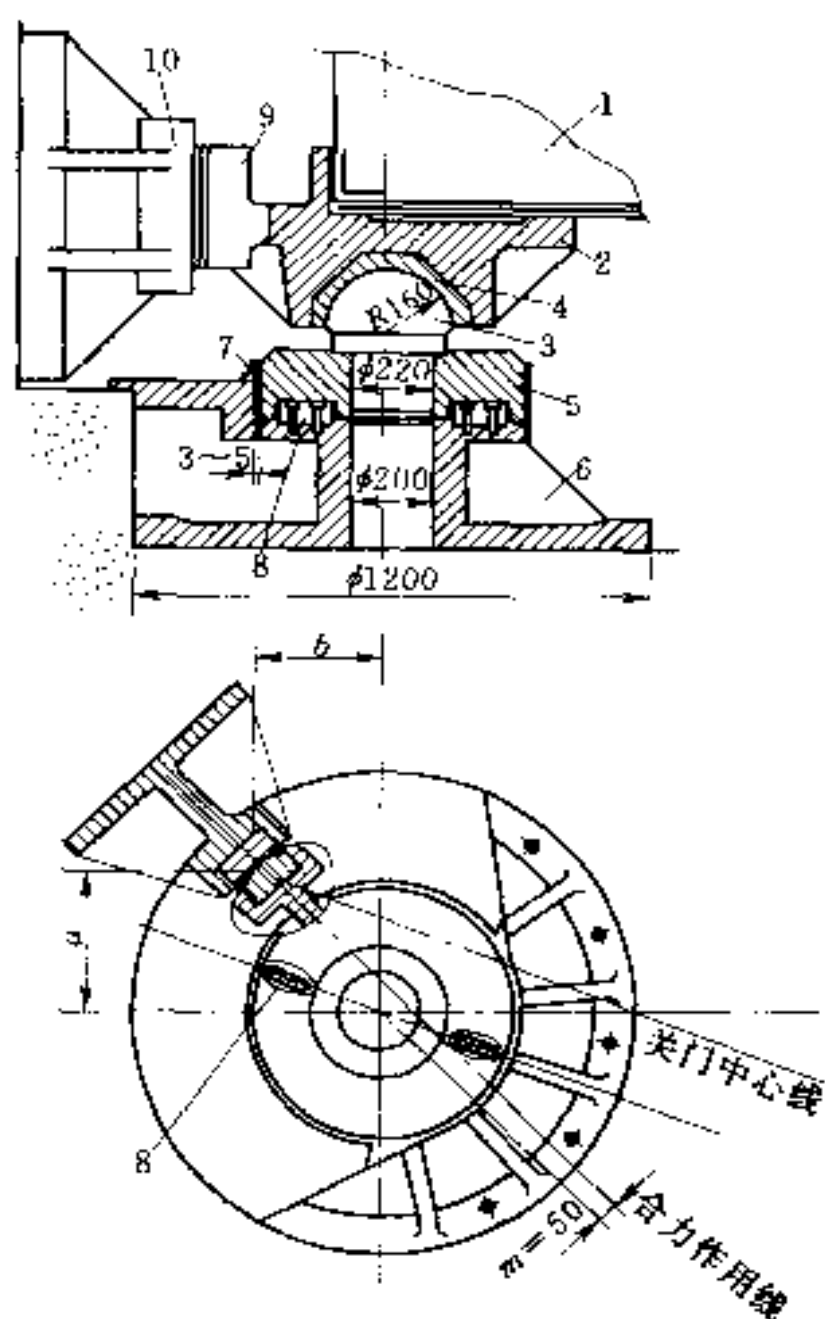


图 4-17 微动底枢 (二)

- 1—门叶；2—承轴巢；3—半圆球轴；4—轴衬；  
5—承轴台可动部分；6—承轴台固定部分；  
7—橡皮圈；8—导向键；9—支垫；10—枕垫

门在关闭时，沿门轴线方向微动，使支垫与枕垫靠紧，从而保证枢轴不受水平荷载。

图 4-18 微动底枢，在半球轴与台之间有 3 个垫圈，其中上、下两个外侧包有橡皮圈，允许球轴作少量移动。球轴移动时摩擦面有 3 个，增加了可动部分的摩阻力，使底枢能承受一些水平荷载，当荷载超过摩擦阻力时发生移动，卸荷后可回到原来的位置。

(2) 底枢的计算。如前所述，底枢的构造使得闸门在关闭位置时，半球轴不受底主梁的水平反力。因而，半球应按启闭过程中承受的作用力  $R$  计算(图 4-11)。 $R$  值及  $R$  与水平面所成的夹角  $\beta$  (图 4-19) 为

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \\ \beta &= \arctg \frac{R_2}{R_1} \end{aligned} \right\} \quad (4-15)$$

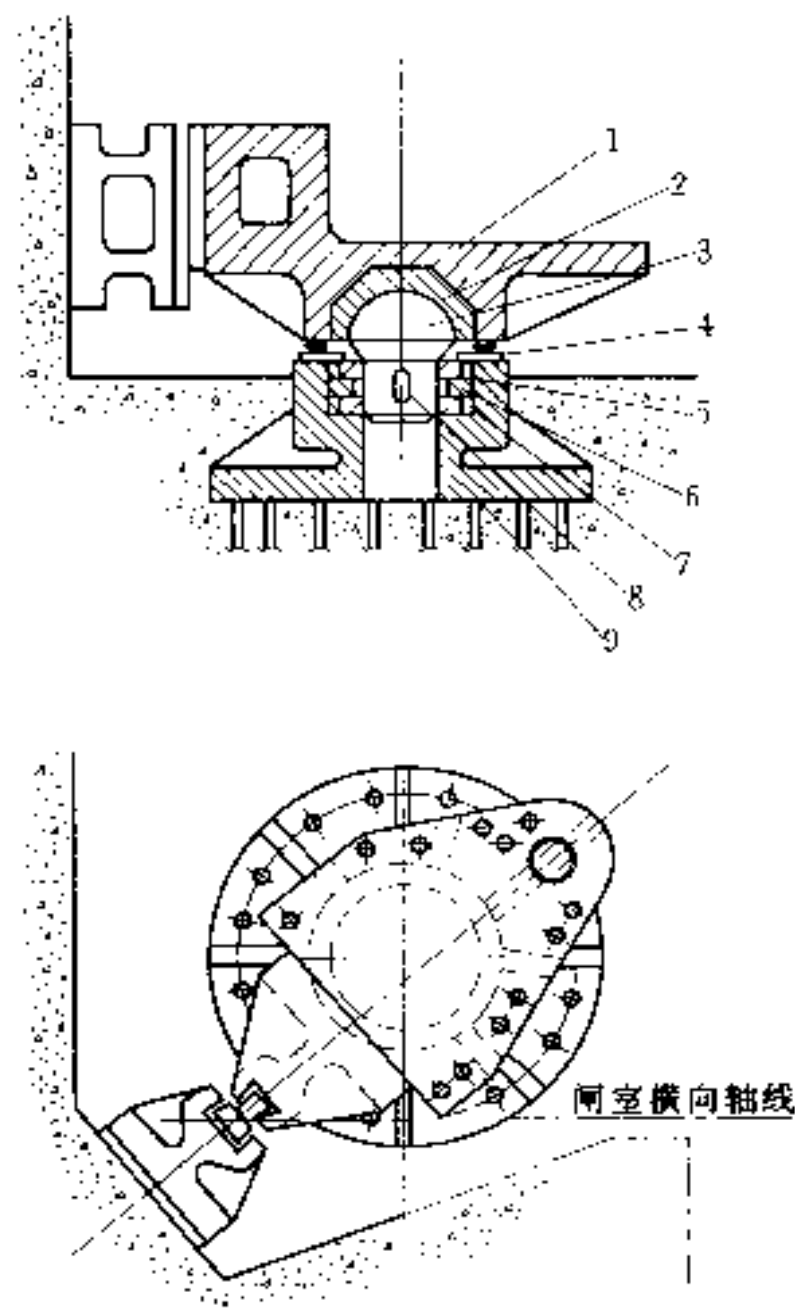


图 4-18 微动底板 (三)

1 承轴巢；2—轴衬；3—半圆球轴；4—压板；  
5、6—垫片；7—橡皮垫；8—键；9—承轴台

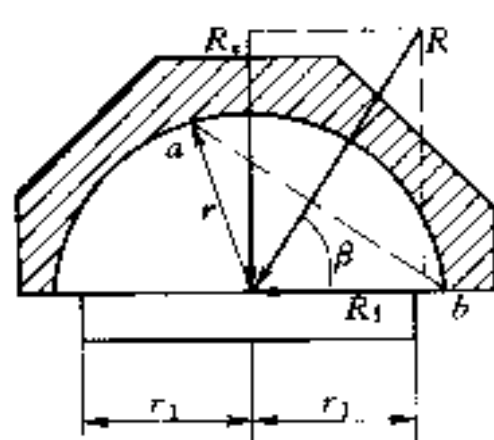


图 4-19 半圆球轴  
计算简图

半球轴的球面与承轴巢的衬套紧密接触，在  $a-b$  面上的径向承压应力  $\sigma_{cg}$  为：

$$\sigma_{cg} = \frac{R}{A_y} = \frac{R}{\pi(r \sin \beta)^2} \leq [\sigma_{cg}] \quad (4-16)$$

式中： $A_y$  为半球轴与合力  $R$  正交的圆截面积； $r$  为球面半径； $[\sigma_{cg}]$  为衬套的容许承压应力。

半球轴上的剪应力，应按水平反力  $R_1$  和摩擦扭矩  $M_{RN}$  来计算：

$$\tau = \frac{R_1}{A_1} + \frac{M_{RN}}{W_N} = \frac{R_1}{\pi r_1^2} + \frac{f R_1 \rho}{\frac{1}{2} \pi r_1^3} \leq [\tau] \quad (4-17)$$

式中： $r_1$  为半球轴轴颈的半径； $\rho$  为摩擦半径， $\rho = \frac{2}{3}r$ ； $[\tau]$  为半球轴钢材的容许剪应力。

当为带有扇形枕垫的微动底枢时，轴上不承受水平反力  $R_1$ ，此时  $R = R_s$ 。

人字闸门因变形和磨损而使顶枢与底枢受力复杂，而许多偶然因素又难以预料，加之顶、底枢对保证门扇安全运转、使交通要道畅通无阻的极端重要性，故在计算顶枢轴与底枢轴以及拉杆时，可将钢材的容许应力适当降低，或适当增大其截面尺寸。这样所耗钢材不多，而安全运行所带来的益处，是难以估量的。

### （三）止水及其他

#### 1. 止水

人字闸门的止水由底止水、侧止水及中间止水组成，止水的形式一般有橡皮止水和钢承压条止水等。

（1）底止水。图 4-20 是人字闸门底止水的一种常用的构造形式。止水与埋设在底槛立面上的止水座板接触，而“P”形橡皮则安设在底主梁腹板下面的槽钢或其他形式的构件上。这种结构的好处是门扇转动时，止水立即与底槛脱离，从而避免了止水的磨损，也不会被落在门槛上的污物所卡住，但闸门必须设限位装置，否则止水将因闸门关闭过头而遭受破坏。

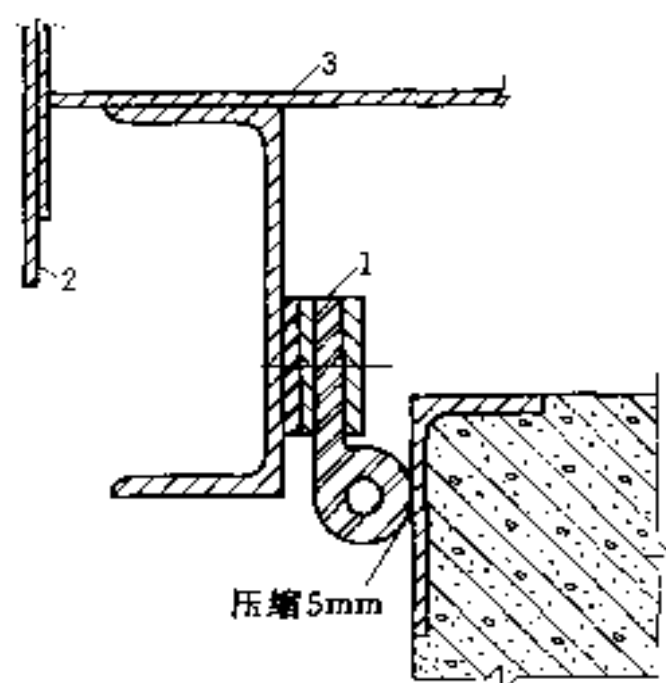


图 4-20 人字闸门的底止水  
1—橡皮底止水；2—面板；  
3—底主梁腹板

#### （2）侧止水与中间止水。当人字

闸门采用分段式支垫与枕垫时,在闸门与闸墙之间应设置侧止水,在两扇闸门之间的接缝处应设置中间止水。大、中型人字闸门的侧止水,一般采用橡皮止水,布置在门轴柱的下游,如图 4-21 所示,其位置应在门扇旋转中心至门龕垂直点的靠闸室侧,以使门扇开启时,侧止水不致被闸墙磨损或卡住。中间止水如图 4-22 所示,“P”形橡皮止水安装在一扇门扇上,与另一扇门扇上的止水座组成止水副。有些还设有第二道止水,为条形橡皮,两端用螺栓固定形成 U 形截面,起辅助止水之用。

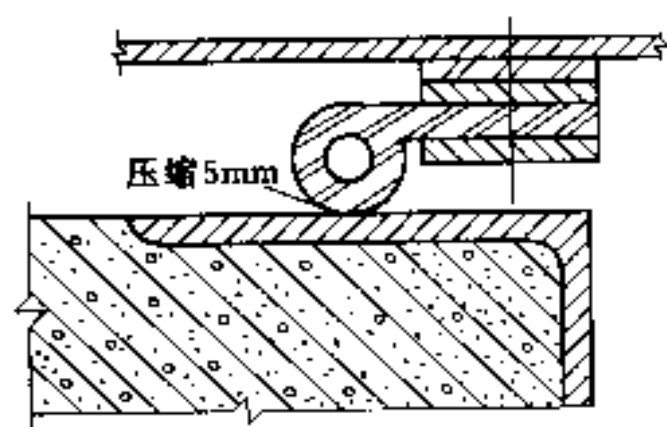


图 4-21 人字闸门的  
侧部橡皮止水

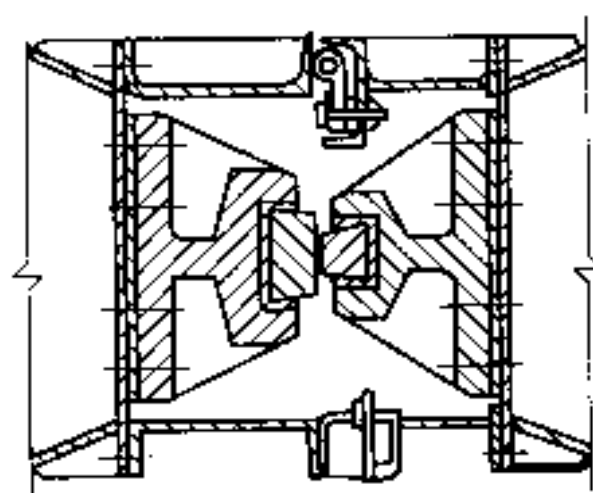


图 4-22 人字闸门的  
中间止水

当人字闸门采用连续式支垫与枕垫时,则可利用承压条的紧密接触,防止闸门漏水,起到侧止水和中间止水的作用,但对支、枕垫的制造、安装精度要求较高。

## 2. 人字闸门的导卡装置

要求较高的人字闸门,为了保证门扇关闭时斜接柱能互相对准,需在斜接柱上端设置导卡装置。常见的导卡有卡钳式(图 4-23)与导柄式(图 4-24)两种类型,一扇门上的导轮与另一扇门上的卡钳或支承板接触,并沿着卡钳唇的斜面或沿着支承板的立面滚动,直到门扇斜接柱上的支承部分互相抵紧为止。

## 3. 人字闸门的限位装置

门扇有时会遇到需要逐个关闭的情况,限位装置可限制门扇转向下游的角度,以免碰坏门扇上的底梁与底止水。限位装置安设在底梁靠近斜接柱的一端,其构造如图 4-25 所示。限位装置与

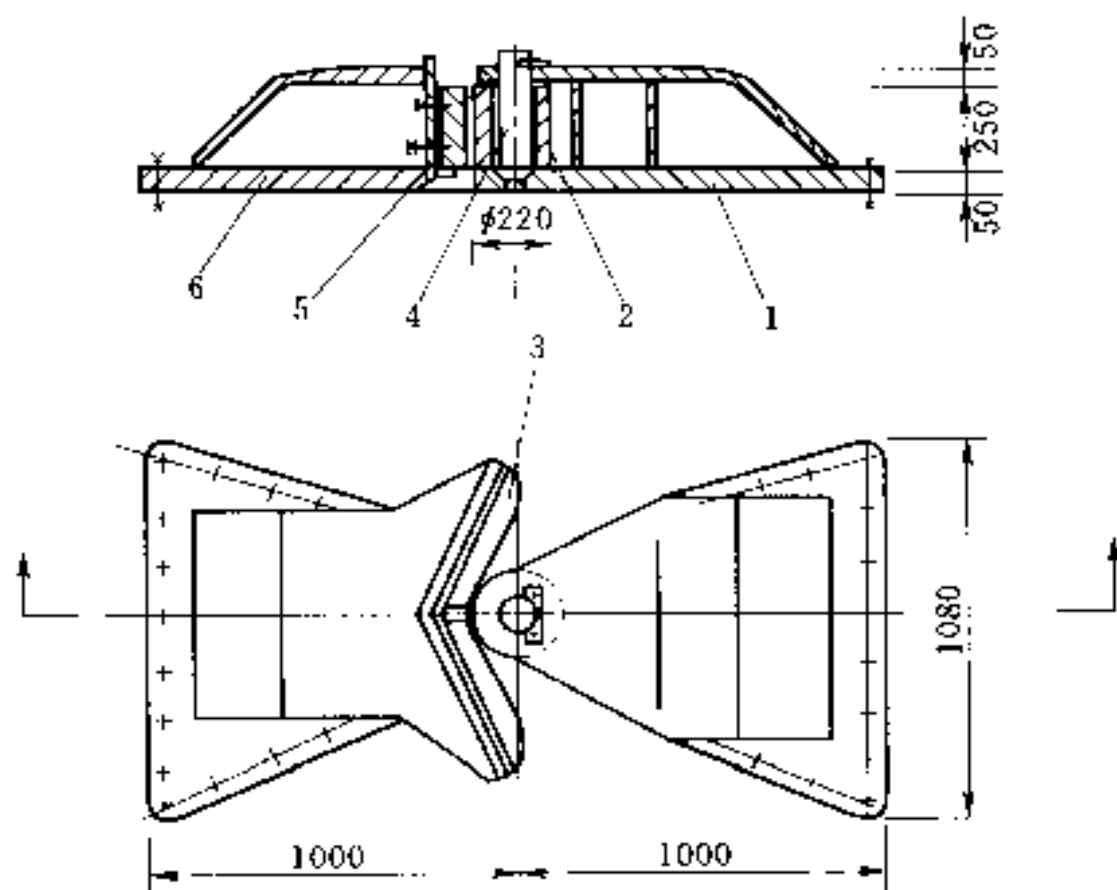


图 4-23 卡钳式导卡

1—导轮座；2—导轮；3 卡钳唇；4—导轮轴；  
5—调整垫（填料）；6—卡钳座

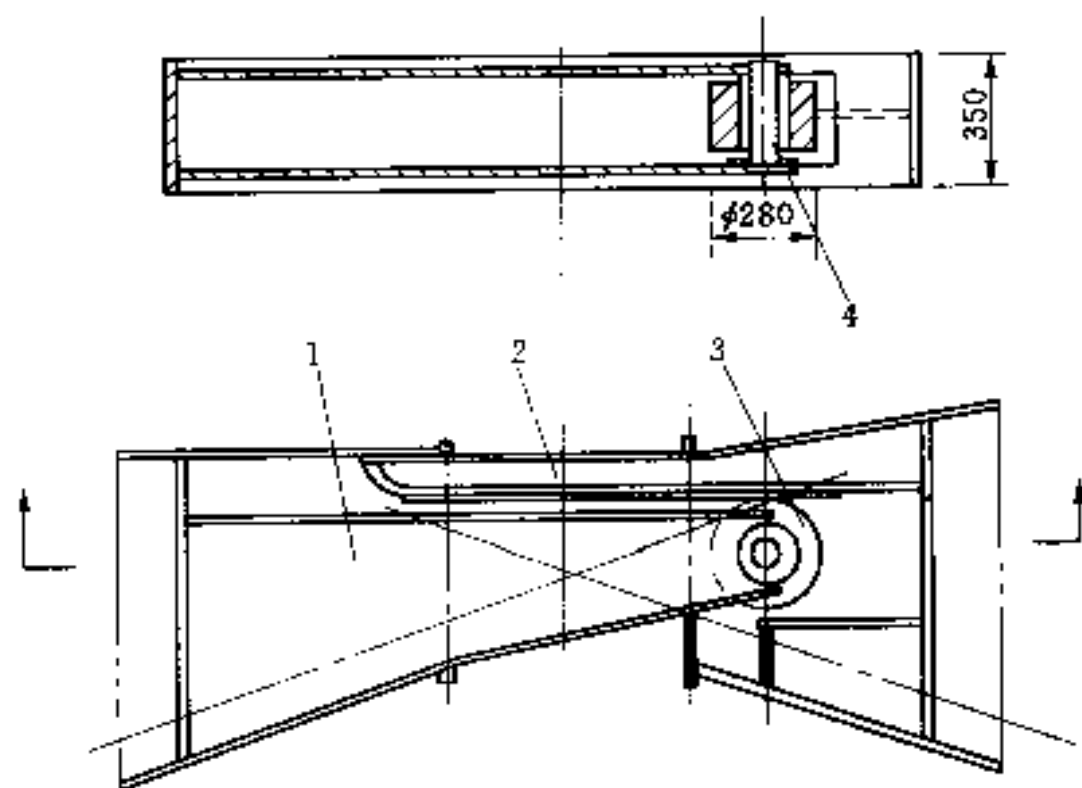


图 4-24 导柄式导卡

1—导轮架；2—支承板；3—导轮；4—导轮轴

底槛埋固构件之间应该留有间隙 $\Delta$ 。在闸门正常关闭位置时，限位装置不与埋设构件接触，借以保证门扇在水压荷载作用下的自由变位。间隙 $\Delta$ 可由闸门的最大容许挠度和落拱高度来决定。

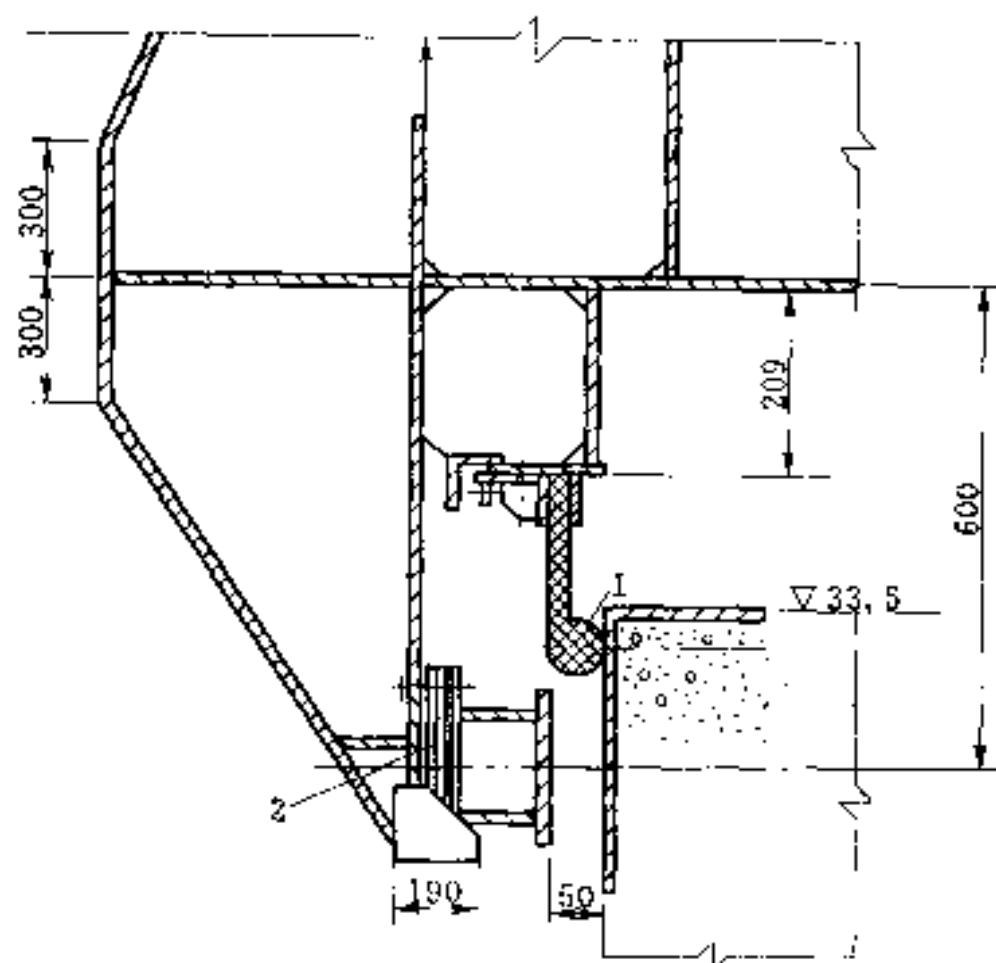


图 4 25 限位装置  
1—底止水；2—橡皮缓冲垫

#### 四、启闭力计算

人字闸门在静水中启闭，启闭力较小。人字门启闭力由闸门在水中转动时的最大阻力矩来确定，该力矩由下列几部分组成：

##### 1. 顶枢与底枢的摩擦阻力矩

$$M_1 = 0.5d_1Df + 0.25d_2G_0f \quad (4-18)$$

式中：\$f\$ 为摩擦系数，可采用 \$0.4 \sim 0.5\$；\$D\$ 为顶枢上的水平作用力，\$kN\$；\$d\_1\$ 为顶枢轴的直径，\$m\$；\$G\_0\$ 为工作桥与门重，\$kN\$；\$d\_2\$ 为底枢半球轴球面直径，\$m\$。

当为固定式底枢或受有水平反力的底枢，则式（4-18）为：

$$M_1 = 0.5d_1Df + \frac{1}{3}d_2Rf \quad (4-19)$$

式中：\$R\$ 为作用在底枢上的水平反力。

##### 2. 壅水压力阻力矩

$$M_2 = 0.5H_3L_n^2\Delta H \quad (4-20)$$

式中：\$H\_3\$ 为最高通航水位时的水深；\$\Delta H\$ 为壅水高差，可取 \$0.05\$

~0.15m;  $L_n$  为门叶宽度。

### 3. 动水压力阻力矩

$$M_3 = 0.075H_s L_n^2 v^2 \quad (4-21)$$

其中

$$v = \frac{\theta L_n}{2t}$$

式中:  $v$  为门扇转动的平均速度, m/s;  $\theta$  为门扇全开转动的角度, 以弧度计;  $t$  为开门或关门所需时间, s。

### 4. 风压力阻力矩

$$M_4 = 0.5W(H - H_s)L_n^2 \sin\beta \quad (4-22)$$

式中:  $W$  为风压强度, 一般可取  $W = (0.04 \sim 0.05) \times 10^4 \text{Pa}$ ;  $H$  为门扇高度;  $\beta$  为计算风向与门扇轴线的夹角。

### 5. 门扇惯性阻力矩

$$M_5 = I_P \omega = 0.126\theta \frac{G_0 L_n^2}{t^2} \cos \frac{\pi t_1}{t} \quad (4-23)$$

式中:  $I_P$  为门扇质量的极惯性矩;  $\omega$  为门扇转动的角加速度。

当开门的瞬间,  $t_1 = 0$ , 则  $\cos\theta = 1$ , 此时  $M_5$  最大, 其值为

$$M_{5\max} = 0.126\theta \frac{G_0 L_n^2}{t^2} \quad (4-24)$$

### 6. 静水压力阻力矩

$$M_6 = 0.5hL_n^2 Z \quad (4-25)$$

式中:  $Z$  为闸门开启前上、下游残余水位差, 一般取  $Z = 0.1 \sim 0.2\text{m}$ 。

### 7. 阻止门扇转动的总阻力矩

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 \quad (4-26)$$

因各力矩随开启时间和门的位置不同而变化, 应求出各力矩对时间变化的曲线, 再合成总阻力矩  $M = f(t)$  的曲线, 以求出最大总阻力矩  $M_{\max}$ 。由此开启闸门所需的牵引力为

$$T = \frac{n_T M}{R} \quad (4-27)$$

式中:  $n_T$  为安全系数, 一般取值为 1.2;  $R$  为启门力至旋转中心的力臂, m。

## 第二节 液压翻板闸门

翻板闸门是一种转动式平面闸门，早期多为利用水力自动操作，广泛应用在小型水利工程中，尤其适合用在来水较猛的山区河道上，以适应河水暴涨暴跌的运行特点。

翻板闸门的形式多种多样，图 4-26 为单铰翻板闸门，主要由活动门叶与固定水平铰组成，门铰设在设计水位时水压力合力作用点的位置。闸门在不超过设计水位时，门叶处于关闭位置挡水；当水位上涨高过设计水位以后，由于水压力合力作用点上移，形成开门力矩，当这个力矩增大到能够克服门重、止水及铰轴摩擦力等阻力矩时，门叶即绕铰轴开启并卧倒在与水平成一角度的位置；当水位下降，水压力合力作用点移动到铰轴之下某一位置时，门叶自行关闭。单铰

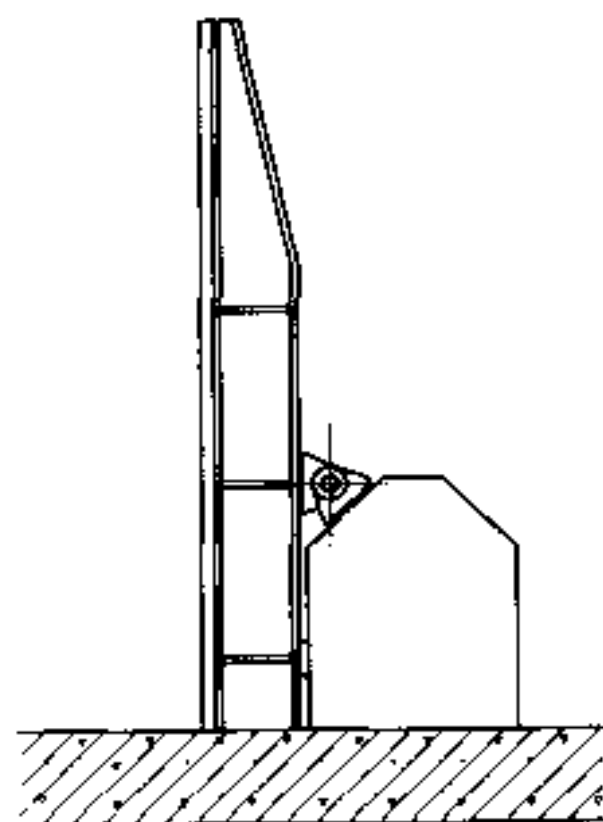


图 4-26 单铰翻板闸门

翻板闸门结构简单，无需启闭设备，但只能全开全关，不能调节上游水位，并且关门水位比较低，弃水量比较大，关门时如果下游无水或水深不大的情况下，门叶与门槽撞击比较严重。

单铰翻板闸门开启后，门叶重心移到铰轴下游的一边，不利于闸门关闭，因此国内研制了一种多铰翻板闸门（图 4-27），门叶可依次绕多个铰转动，门叶重心始终在支承铰的上游，使得闸门在水位下降到设计水位以下一点，就可关闭。

翻板闸门门叶材料早期大多采用钢筋混凝土，不设启闭设备，造价低，但由于门体采用脆性材料，或者存在制造缺陷，在翻转过程中发生拍打振动、撞击，容易造成门叶受损而漏水，以及无法人为控制调节流量等缺点，影响翻板闸门的推广应用。为克服

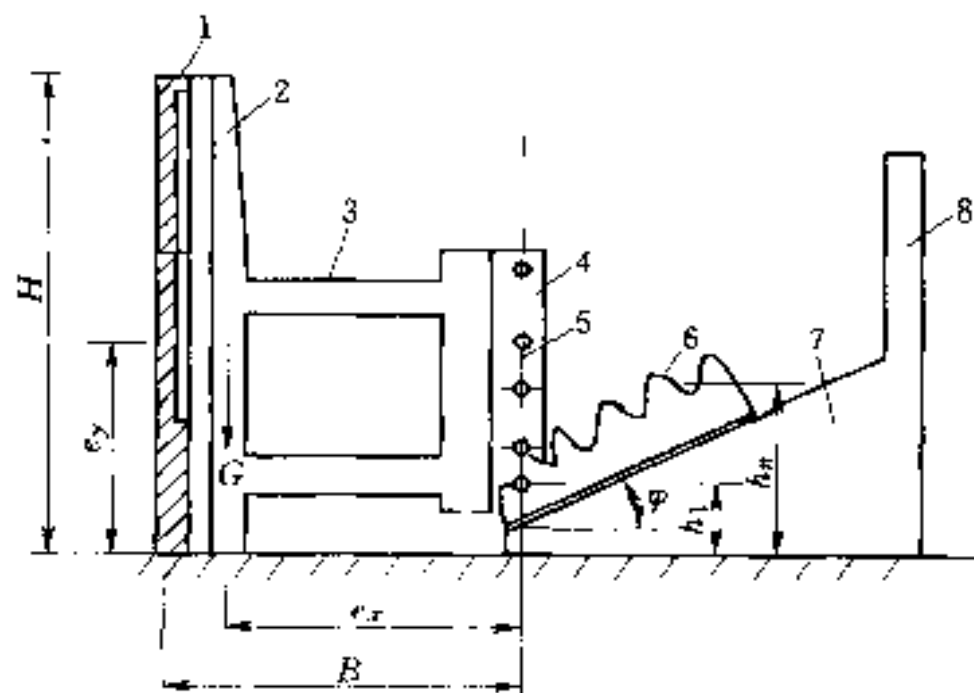


图 4-27 多铰翻板闸门布置图

1—面板；2—大纵梁；3—支撑框架；4—门铰座；  
5—铰轴；6—轴槽座；7—支墩；8—支柱

这些缺点，逐渐发展为液压钢制翻板闸门，门体材料采用钢材，由固定支铰支承，配置液压启闭机作为控制设备。

### 一、液压翻板闸门的布置

液压翻板闸门的布置如图 4-28 所示，主要由门叶、支铰、液

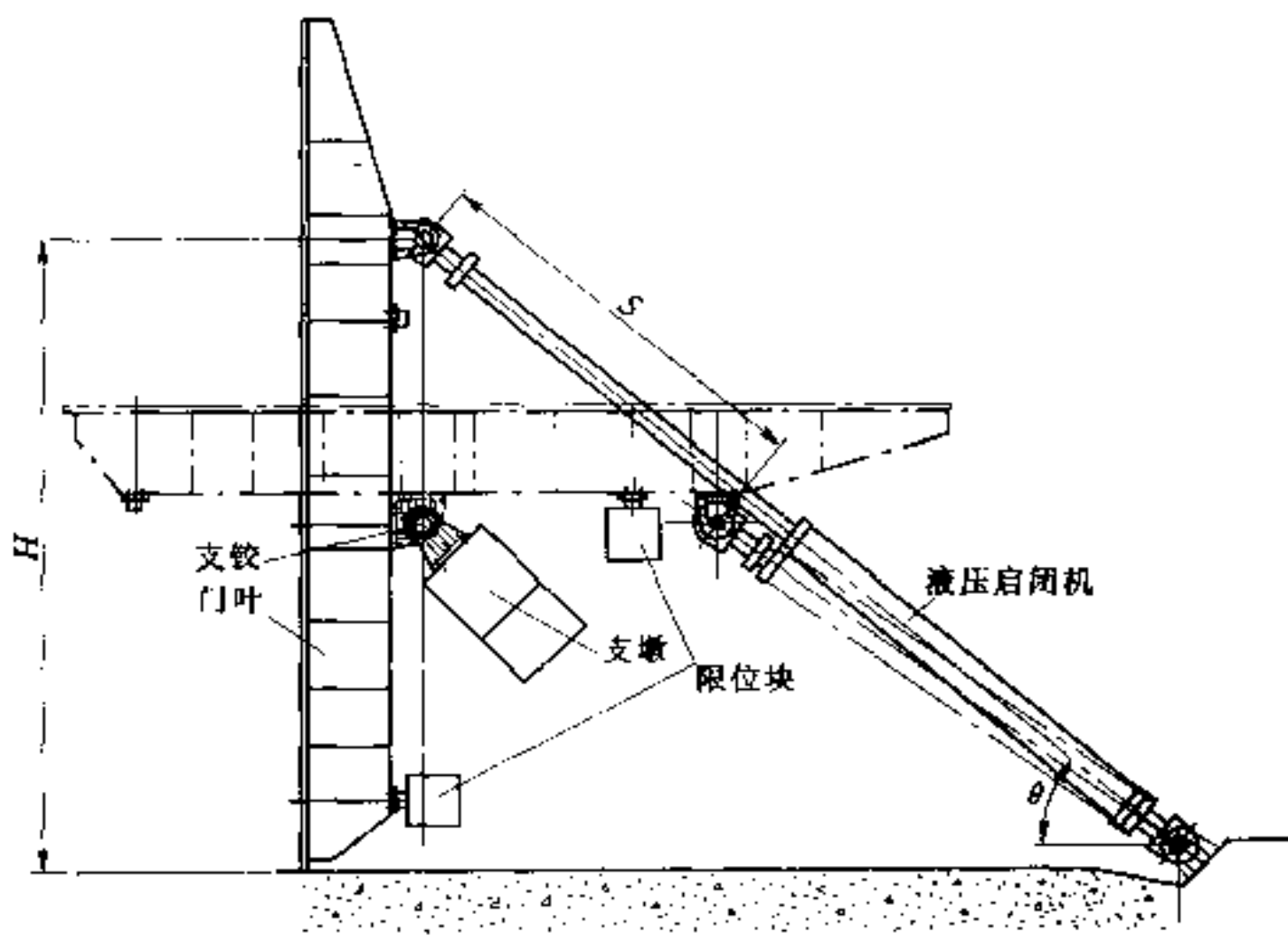


图 4-28 液压翻板闸门布置图

压启闭机及埋件等组成。

门叶采用平面闸门结构，是挡水活动结构物，它绕支铰中心作  $90^\circ$  转动，形成门叶的关闭挡水、开启泄流的过程。闸门在全开位置时，门叶处于泄水水流中，影响孔口过流能力，随着孔口宽度的加大，门叶厚度加大，其影响更为严重。当孔口跨度较宽时，也可选用双悬臂梁布置。在门叶边梁上支铰的上下各设置一个支承垫，分别在全关、全开时与支墩接触，起限位缓冲作用，并承受水压力。

支铰是门叶启闭时的转动中心。支铰固定件由地脚螺栓固定在闸墩的牛腿上，活动件由螺栓与门叶结构相连，承受总水压力、门叶的重量及开启过程中启闭力等外力，是翻板闸门启闭的关键部件。支铰设置的高度一般为  $(0.35 \sim 0.4)H$  ( $H$  为门叶的设计挡水高度)，它除了考虑门叶关闭时的稳定性外，尚与启闭机的启闭力计算有关。

· 液压启闭机的液压缸一端与门叶连接，一端支承在闸墩的牛腿上，通过液压活塞杆的伸缩，带动门叶结构绕支铰中心转动，实现闸门的启闭。启闭机的液压系统包括液压启闭机的动力装置和控制装置及油路等。

液压翻板闸门的埋件有底槛和侧止水座等，无需门槽。

液压翻板闸门有埋件少、闸墩薄、不需启闭机排架、工程造价低、施工工期短等优点，但其门叶处在水流中，影响过流能力和引起闸门的振动，检修维护不方便等缺点也不容忽视。

## 二、液压翻板闸门的构造

### 1. 门叶

由于闸门在启闭过程中，门叶需在闸孔内转动，故门叶的宽度应比闸孔净宽略小一些，一般每侧留  $10 \sim 20\text{mm}$  的空隙。门叶超高一般取  $100 \sim 300\text{mm}$ 。门叶梁系布置及设计计算与平面闸门相同，主梁一般按等荷载布置，边梁的设计除计算全关时受力情况外，还应计算启闭过程中启闭力产生的弯矩等荷载。

门叶绕定轴旋转，有侧止水及支铰限位，故不必设置侧向限

位的侧轮装置。由于比有门槽的平板门支承跨度小，也没有门槽的滑动或滚动的支承轨道，因此与相同尺寸的平面闸门相比可节省钢材，降低工程造价。

### 2. 支铰

支铰的最大荷载，应发生在闸门刚开启时，此时闸门承受水压力、启门力及闸门自重等外力全部由支铰承担。支铰设计和弧门支铰相同。因长期处于水下工作，支铰的轴承一般应采用自润滑型，孔口尺寸较大的还应采用球轴承，以适应闸门门叶的整体弯曲变形。为保证支铰铰心安装精度，使得门叶转动灵活，支铰基础应留设二期混凝土。

### 3. 止水及埋件

门叶的止水，如图 4-29 所示，根据水力特性和门叶旋转特点，一般侧止水和底止水采用同型号的“P”形止水或侧止水为“P”形、底止水为刀形，并要考虑安装维修的方便。

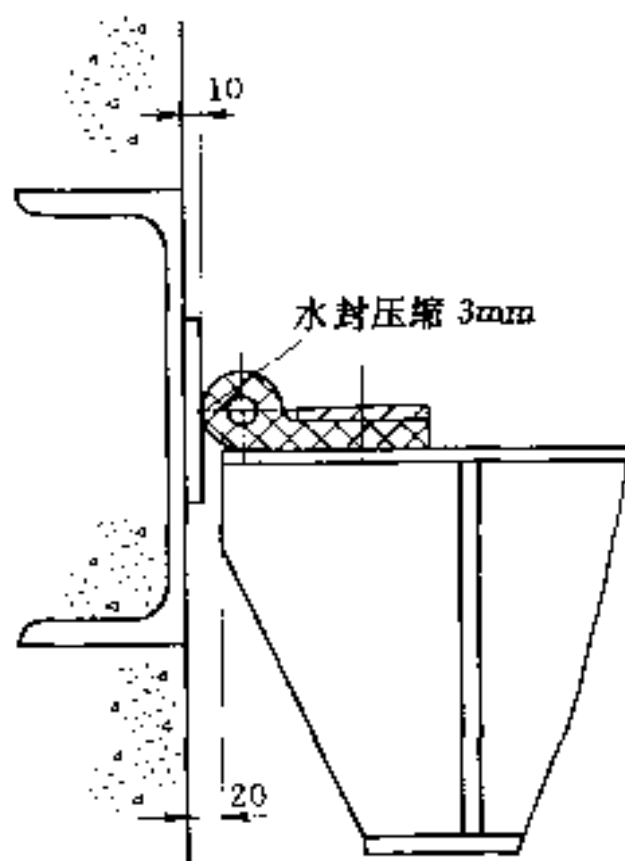


图 4-29 液压翻板闸门的侧止水

翻板闸门的埋件包括底槛与侧止水座，一般根据构造选定。由于闸门翻转过程中，侧止水将超出止水座板之外，为防止磨损止水橡皮，止水座板一般凸出闸墩混凝土面 5~10mm。

### 三、液压翻板闸门的启闭机

翻板闸门启闭力的计算由门重、止水阻力和止水预压力、支承转动摩擦阻力、总水压力等对支铰中心产生的转动平衡力矩来确定，最大的启闭力是闸门刚开启时的拉力，当闸门开至一定值时则转变成压力。要计算不同水位下的启门力矩，一般水位为较高的 2 倍时，启门力矩最大。

启门力矩确定后，可用图解法确定启闭机的主要参数，包括启闭机的启闭力、液压缸与门连接点高度  $H$ 、液压缸的倾角  $\theta$ 、液压缸的行程  $S$  等。这几个参数是相互影响的，需要综合考虑，优化选择。

根据启闭力的计算和启闭行程来选定液压机，尽量采用标准系列。启闭机应选用双作用的活塞液压缸。为防止启闭时的摆动和安装时出现的误差，液压缸与门叶连接杆头采用球轴承，以适应变位的要求。

### 四、液压翻板闸门应注意的问题

(1) 设置通气孔：翻板门泄流时门叶上下同时出流，闸门在局部开启状态下门后由水舌带走空气形成负压，造成门叶后面的压力波动，从而引起闸门的拍打振动。为有效防止出现这种情况，宜在孔口两边的闸墩侧面、门叶后面的位置各设置 2~3 个通气孔，以起到补气的作用，从而减少闸门的拍打振动。

(2) 下游消能：良好的下游消能工，是保证翻板门安全运转的重要保证，一般设计成出口有坡降的比平底堰为好。

(3) 设置检修闸门：由于闸门和启闭机都安装在闸孔中，为了闸门和液压缸的维修，应根据具体情况在翻板门转动范围之外的上、下游设置检修门，以便必要时进行维修。

(4) 根据某些工程的水工模型试验和实践经验表明，翻板闸门局部开启控制流量的范围有局限性，即闸门在小开度（相对开度不大于 0.15）时，流态稳定，水流衔接平顺，门叶稳定；当开度再大些时，落差较大，流态波动，门叶有拍打现象，会影响闸门安全，在开度大到一定值时，闸前出现旋涡，虽然未发现有导

致破坏的工程实例，但不容忽视，因为直径大而深的旋涡和强烈掺气会导致翻板闸门的振动，引起疲劳破坏。因此，设计时可根据具体参数和模型实验等规定翻板闸门的运行方式，应尽量避免翻板闸门在振动较大的开度区局部开启控制流量，如孔数超过三孔则宜采用几孔均匀开启，以避免出现不利安全的情况。

### 第三节 升卧式闸门

#### 一、升卧式闸门的布置

升卧式闸门是一种沿弧线轨道运动的平面闸门，在关闭状态时闸门直立挡水，启门时闸门先直升一段，然后边上升边转动（向上游或向下游），全开时闸门平卧于闸墩的顶部，如图 4-30 和图 4-31 所示。

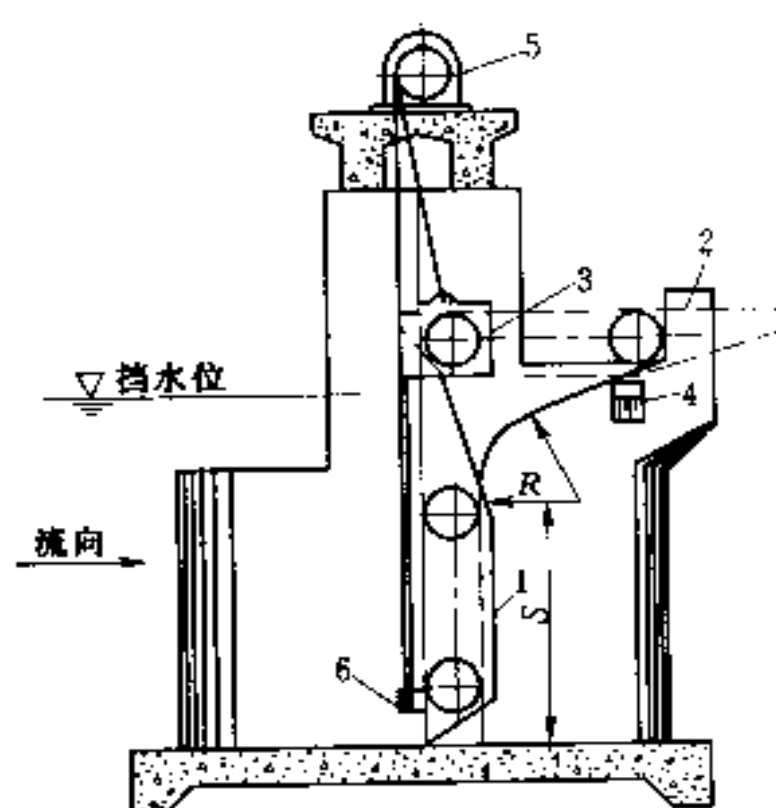


图 4-30 向下游转动的  
升卧式闸门

1—门叶；2—限位坎；3—检修孔；  
4—悬臂检修平台；5—启闭机；  
6—吊耳

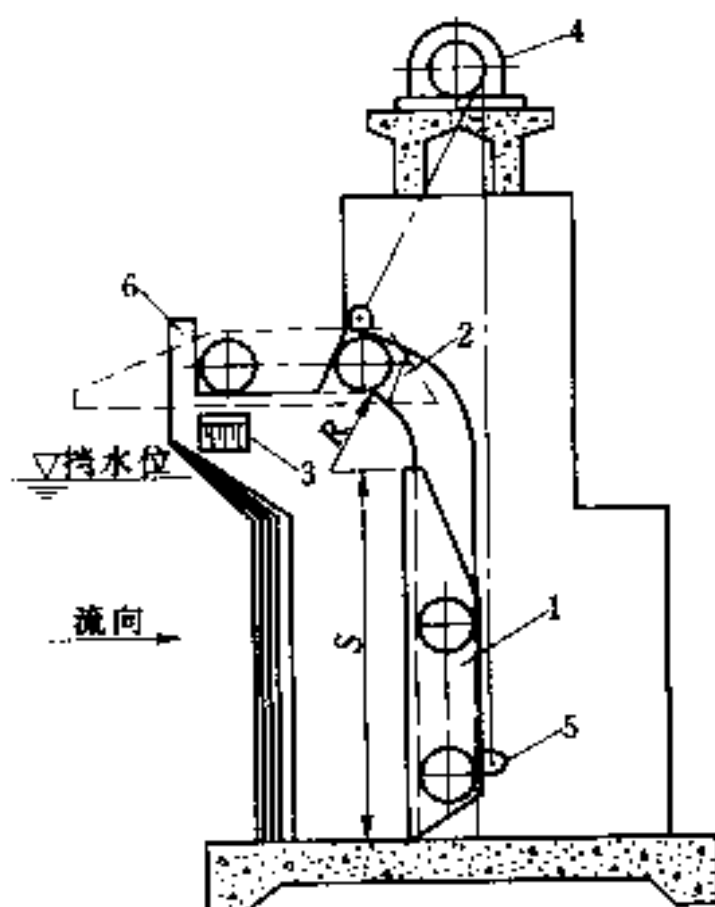


图 4-31 向上游转动的  
升卧式闸门

1—门叶；2—检修孔；3—悬臂检修  
平台；4—启闭机；5—吊耳；  
6—限位坎

升卧式闸门的优点是可大大降低启闭机的安装高度，从而提高了水工建筑物的抗震能力，降低了工程造价。其缺点是向下游

转动的升卧门，其启闭机吊具长期浸入水中，易于锈蚀；其次，这种闸门的检修与维护不甚方便。

图 4-30 所示为向下游转动的升卧式闸门，门槽的上游面（即反轨）从上到下都是垂直的，门槽的下游侧（即主轨）下部为铅直段，中部为弯向下游的弧形轨段，上部为斜坡段。门槽上端最大宽度应比上、下两主轮外缘的距离大 50mm 左右。斜坡段顶部高度应使闸门平卧后，高出最高行洪水位 0.3m 以上。这种布置方式的闸门，一般多布置于闸室段的后部，有利于闸室稳定。同时，闸门开始转动的高度较低，因而可使机架桥高度降得更多一些。

图 4-31 所示为向上游转动的升卧式闸门，其门槽的下部为铅直段，上部为弯向上游的弧形轨段。下游侧弧轨到一定长度为止，上游侧弧轨尾部与水平段相接，水平段的高度，使闸门全开后闸门下缘高出最高行洪水位 0.3m 以上。这种布置方式，可避免启闭机吊具浸入水中。由于闸门一般布置于闸室的首部，闸室的消能段较长，流态较好，有利于闸门局部开启，但架桥的高度要比前述布置方式稍高。

## 二、升卧式闸门的构造

升卧式闸门的结构与平面闸门基本相同，但有以下特点：

由于闸门在启闭过程中，门叶需在闸孔内转动，故门叶的宽度应比闸孔净宽略小一些，一般每侧留 20~40mm 的空隙。这种闸门只能采用悬臂轴轮式支承（图 4-32），每侧也仅能设置两个，因而闸门所能承受的荷载以及闸门的尺寸（尤其是门叶高度），尚受到一定限制。

向下游转动的升卧式平面闸门，其吊耳设置在门叶的上游面，而向上游转动的闸门，其吊耳设置于门叶的下游面。吊耳的高度一般均在门叶下主梁附近。吊耳轴中心至门体的距离，应能设置启闭机的吊具，并留 20~50mm 的裕度。由于吊点偏离闸门重心，启门时形成力偶矩，因而有利于门的翻转。

如图 4-32 所示，闸门的侧止水应布置于闸孔跨间，角钢与面板之间设有橡皮垫板，不仅可适应面板的不平度，同时也增加了

止水装置的弹性，因而提高了止水效果。角钢与面板连接的螺栓孔，应做成两端为圆形的水平向长形孔，以调整止水的间距。闸门的底止水与一般平面闸门相同，多为平板型止水橡皮。

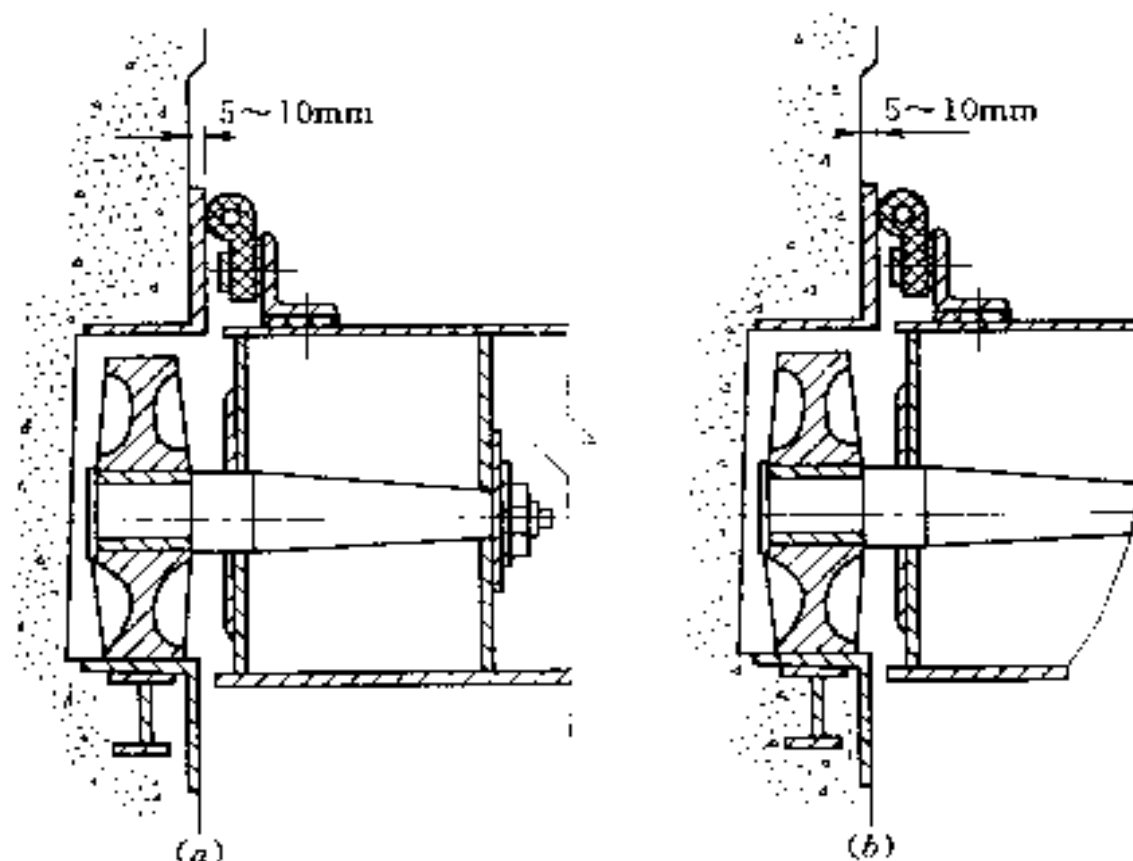


图 4-32 升卧式闸门的主轮和侧止水  
(a) 单向止水；(b) 双向止水

### 三、升卧式闸门的门槽尺寸

升卧式闸门门槽轮廓尺寸，是闸门能否顺利运行的关键，主要包括弧形轨道段的起点高度  $S$  及其半径  $R$  和门槽宽度等。铅直段门槽的宽度  $W$  应比主轮直径  $D$  大  $20 \sim 50\text{mm}$ ，其他尺寸一般可按表 4-2 采用。所选取尺寸是否满足要求，需进行核算闸门在各个位置时闭门力要小于零（即闸门能凭自重下落），且启门力大于零（即防止闸门上主轮运行到弧轨段时自动上滑，避免启闭机钢丝绳脱落等）。

### 四、升卧式闸门的启闭机

升卧式闸门的启闭力，可按一般平面闸门计算。升卧式闸门的操作机械一般可采用固定卷扬式启闭机，近年来也有些工程采用了摆动式液压启闭机。启闭机应适应闸门的吊耳轴在启闭过程中有一定的摆动幅度。

表 4-2

升卧式闸门的门槽尺寸

| 项 目       |     |                        | 向上游翻转的升卧式闸门                                                    | 向下游翻转的升卧式闸门                                              |
|-----------|-----|------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 铅直段高度 $S$ |     |                        | $S \geq H$                                                     | $S \geq 0.8H$                                            |
| 圆弧段       | 上游边 | 圆弧半径 $R$<br>圆心角        | $R \geq 0.3H$<br>$\alpha_1 \approx 90^\circ$                   | 铅直设置                                                     |
|           | 下游边 | 圆弧半径 $R$<br>圆心角        | $R \geq 0.3H + W$<br>$\alpha_1 \approx 60^\circ \sim 70^\circ$ | $R \geq 0.2H$<br>$\alpha$ 由计算定                           |
| 倾斜段       |     | 水平长度 $C$<br>倾角 $\beta$ | $C = M + D + \delta^{**}$<br>$\beta = 90^\circ - \alpha_2$     | $C = M + D + \delta^{**}$<br>$\beta = 90^\circ - \alpha$ |

\* 圆心角  $\alpha$  由圆心坐标和倾斜段上端点坐标相对位置，用几何公式计算，一般在  $50^\circ \sim 70^\circ$ ， $H$  为闸门挡水高度。

\*\*  $M$  为两主轮中心的距离； $\delta$  为安全裕量，一般为  $30 \sim 50\text{mm}$ 。

启闭机的启吊中心线和安装高程的确定，应根据闸门在关闭与全开时吊耳轴的位置及启闭机的死扬程来确定。向下游翻转的升卧式平面闸门，其启闭机的启吊中心线应略偏向闸门关闭状态时吊耳中心线的下游；而向上游转动的升卧式闸门，则应略偏向上游。另外，应注意闸门在启闭过程中不得使启闭机与基础相碰撞，应有  $200 \sim 300\text{mm}$  的安全间隙。

### 五、其他注意事项

为使升卧式平面闸门顺利运行，尚应注意以下问题：

(1) 在保证止水效果的前提下，止水橡皮与止水座板间的预压力应尽量小，以减小止水的摩阻力。闸门在弧轨段翻转过程中，侧止水将超出止水座板之外。为防止磨损止水橡皮，可将靠近止水座板的闸墩局部减薄  $5 \sim 10\text{mm}$  (图 4-32)。

(2) 为保证闸门启闭灵活无阻，除精心设计门槽轮廓尺寸之外，尚应严格控制门槽埋件的制造与安装质量。

(3) 为增加闸门在平卧状态和在弧轨段的下滑力，对于向上游转动的闸门，其水平段可略有倾斜，并使闸门重心尽量靠近下主轮。

(4) 悬臂轮应采用摩擦系数低的轴承，轴的工作表面宜镀硬铬。在设计中应考虑主轮的润滑措施以及整个闸门的检修条件。为此，需在闸墩上部开检修孔与设置检修平台等。

## 第四节 铸 铁 闸 门

### 一、铸铁闸门的特点

铸铁闸门是一种小型平板闸门,广泛使用于取水输水、市政建设、给水排水、农田灌溉等工程中,通常设置在渠道、涵管的进水口,用作工作闸门调节流量、控制水位,或用作检修闸门关闭孔口挡水。

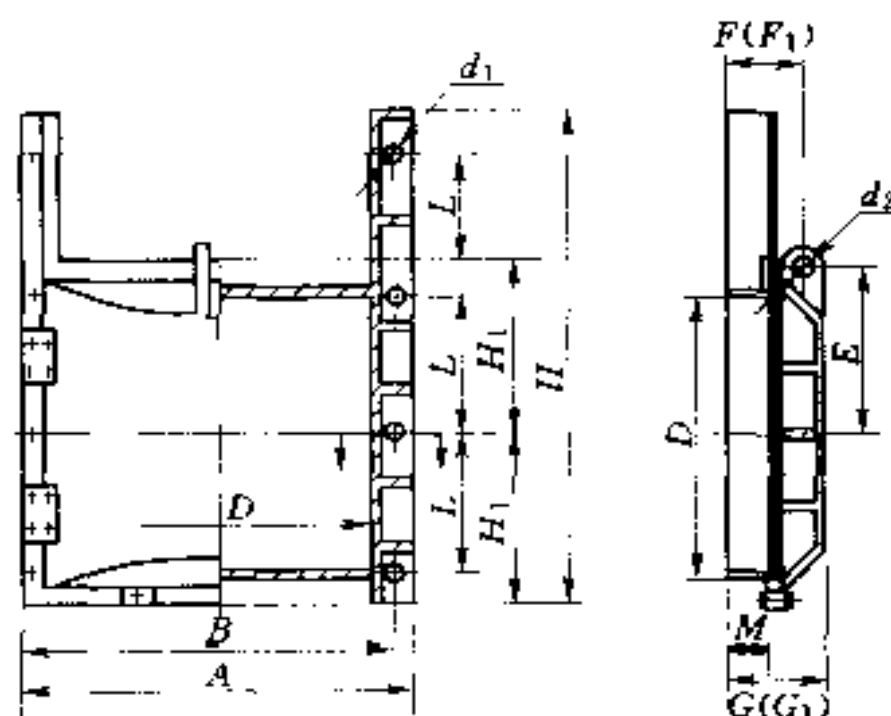


图 4-33 方形铸铁闸门

铸铁闸门有方形、圆形两种,见图 4-33 和图 4-34。铸铁闸门一般由门叶和门框两部分组成,门体和门框的材料为铸铁,一般整体铸造、整体加工。

#### (一) 门体

门体一般采用面板与加强肋的结构,面板可做成平面或拱形。门体一般整体铸造和机加工,但尺寸较大的可采用分块组装式。门体上一般采用整体式金属止水,兼作支承滑块。金属止水用同材料制作的沉头螺钉紧固在门体上,螺钉头部与止水工作面一起精加工。一些尺寸较大的也可采用“P”形橡皮止水。

#### (二) 门框

门框为铸铁闸门与基础之间的连接构件,相当于平面钢闸门的埋设部分。门框包括下部门框和上部导轨两部分。下部门框一

般整体铸造加工。导轨可用螺栓（螺钉）与门框相接，或与下部门框整体铸造，在门体开启到最高位置时，导轨的顶端应高于门体的水平中心线。

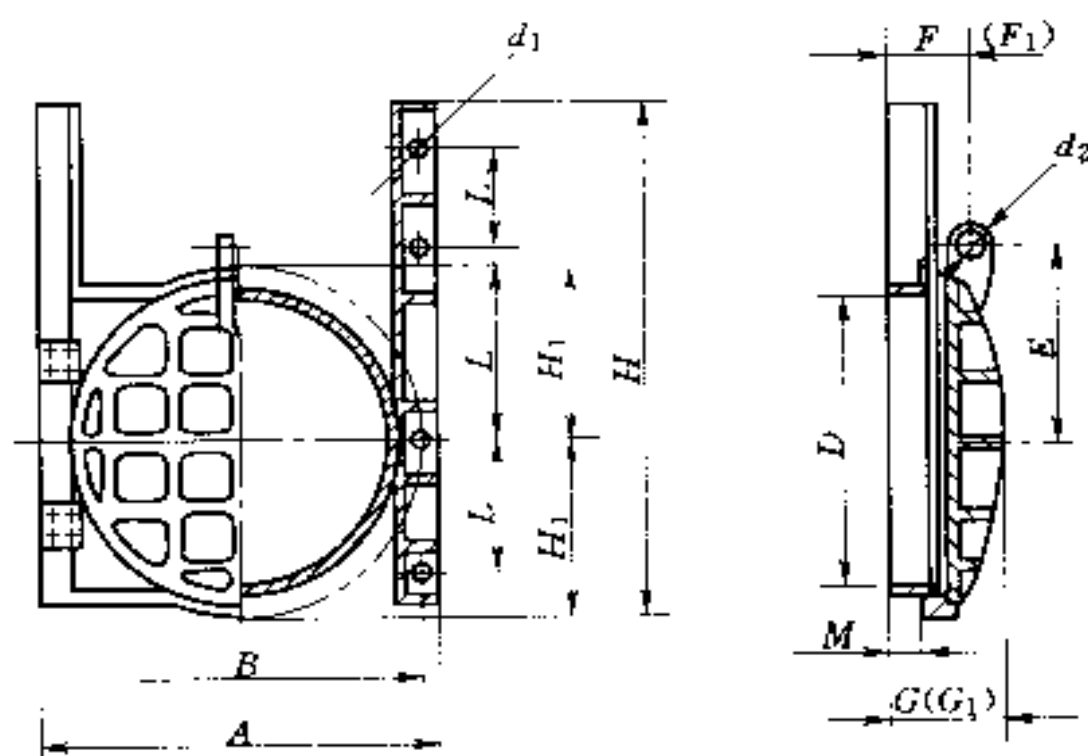


图 4 34 圆形铸铁闸门

### （三）特点

铸铁闸门一般设置有可调节的楔紧装置，楔紧副（如楔块与楔块、楔块与偏心销等）分别设在门体和门框上。调节楔紧装置，可使得闸门关闭时门体紧贴门框，达到止水要求。

铸铁闸门通常配置手动或电动螺杆式启闭机，用于操作闸门的启闭。

铸铁闸门有以下特点：

（1）布置简单，结构紧凑，节省空间；运行维护简单，减少运行费用。但铸铁闸门的造价比钢闸门略高一些。

（2）耐腐蚀性强。门体和门框的材料采用铸铁，止水面镶铜合金或不锈钢等耐腐蚀材料，防腐能力强，特别适用于污水或海水环境中。有特殊要求的地方还可采用镍铬合金铸铁等耐腐蚀性更强的材料。

（3）铸铁闸门的止水副采用整体加工，止水效果好，金属止水使用寿命长。

(4) 铸铁闸门在国内已经有系列化的成熟产品，国内有许多专业厂家生产，尤其是环保行业的企业。设计选型时可参照有关资料确定相关参数。

(5) 受材料和铸造工艺的限制，铸铁闸门的规格及使用水头一般比较小，一般不超过  $\phi 2.5\text{m}$ （圆形）或  $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ （方形），近年来有些生产制造厂采用组装式结构，门体最大尺寸也不超过  $5.0\text{m} \times 5.0\text{m}$ 。

## 二、铸铁闸门的布置和安装形式

铸铁闸门通常的布置形式如图 4-35 所示。

根据闸门的孔口尺寸、水头计算启门力和闭门力，选定启闭

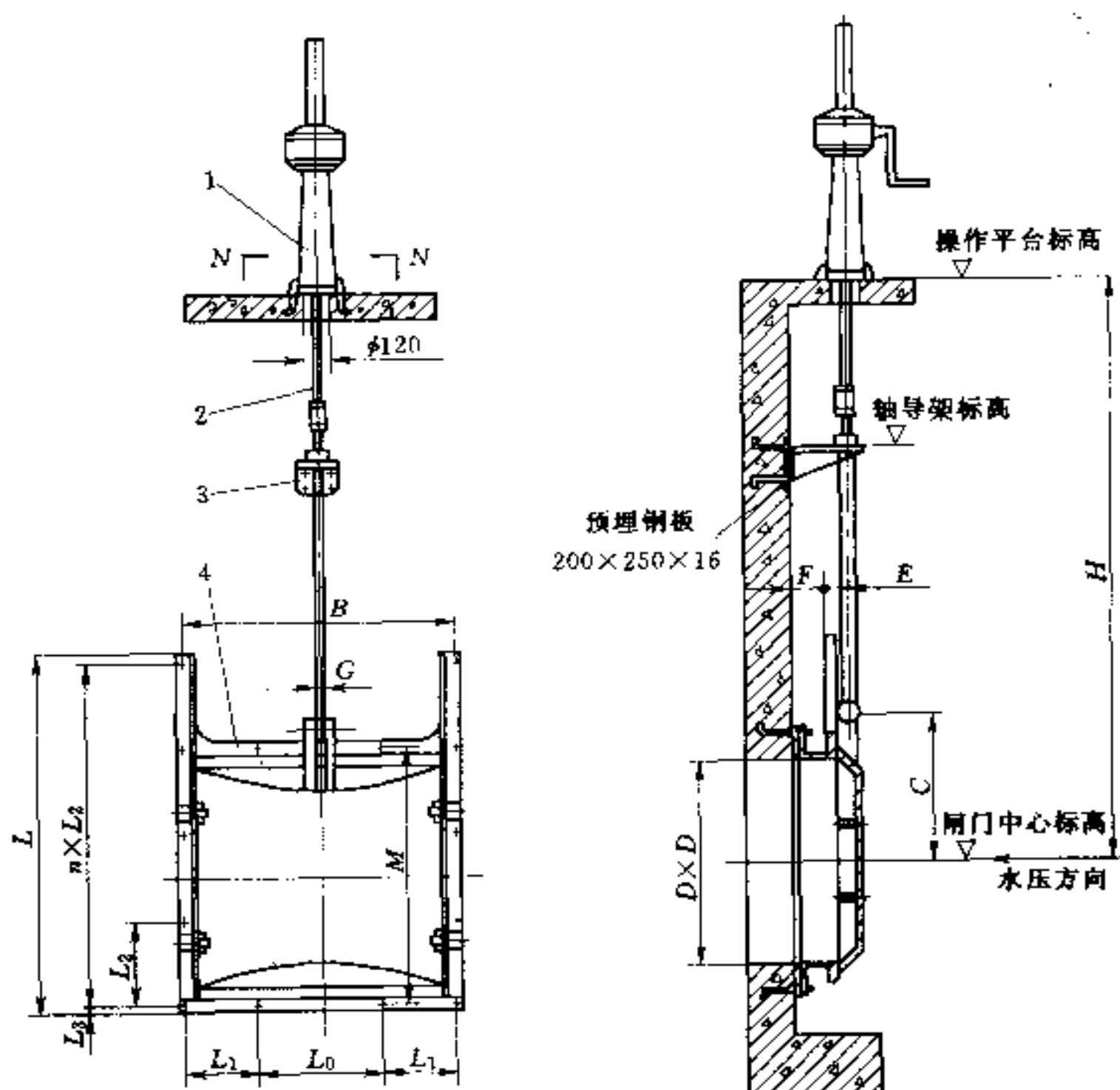


图 4-35 铸铁闸门的布置

1—启闭机；2—传动轴；3—轴导架；4—铸铁闸门

机的容量。当启闭机螺杆长细比较大时，应设置轴导架，其间距应保证启闭闸门时螺杆不弯曲和失稳，最下面的一个轴导架的位置应保证闸门门体能完全开启。

门框的正下方应留有 200~300mm 的空间，以保证闸门门体能完全关闭。

铸铁闸门门框与基础的安装形式有靠壁式、墙管式和法兰式等，见图 4-36。

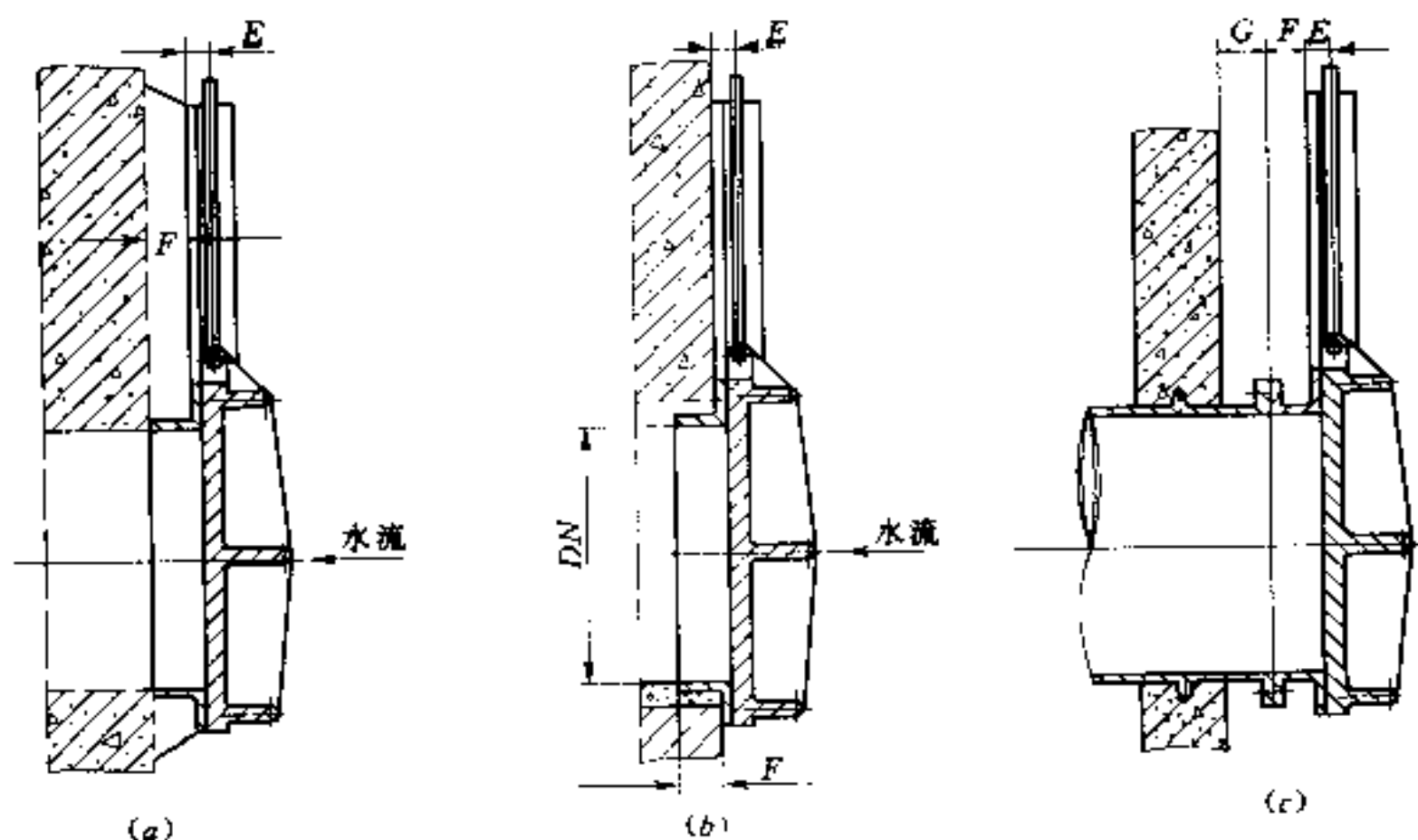


图 4-36 铸铁闸门门框与基础的连续形式

(a) 靠壁式；(b) 墙管式；(c) 法兰式

通常采用靠壁式，因其对基础要求不高，安装方便。靠壁式安装要求在基础上预埋螺栓或钢板，安装时调整门框达到要求后固定门框，再浇注二期混凝土或填灌水泥砂浆，保证门体与基础之间的结合面的密封，防止漏水。

墙管式安装方式是把门框用二期混凝土浇注在管道端部，但其浇注二期混凝土时施工不方便，一般只用于管道较短的情况。

法兰式安装方式是管道端部设置一与门框配对的法兰，一般使用于圆形铸铁闸门，但应注意门框与墙管的法兰对采用同一标准，法兰对之间应设有止水垫片。

## 第五章 启 闭 设 备

### 第一节 概 述

前面介绍了启闭设备作为闸门的一部分，用于操作门叶的移动，达到开启、关闭孔口的目的。在水利水电工程中，将启闭闸门用的起重机械统称为启闭设备，包括启闭闸门的启闭机、取水口拦污栅的清污机。本章主要介绍闸门的操作机械——启闭机，清污机在第六章将作简单介绍。

#### 一、启闭机的特点

启闭机是一种专门用来启闭水工建筑物中的闸门(拦污栅)用的起重机械。它与通用起重机一样，是一种循环间隔吊运机械。作为特种用途的起重机，启闭机有如下特点：

(1) 荷载变化大。前面各章介绍了闸门启闭力的计算，启闭力包括闸门门叶自重、行走摩阻力、配重或水柱压力、上托力、下吸力等，除自重外，后几种力都与闸门承受的水压力有关，而闸门承受的水压力是随门叶移动而变化的。因此，启闭机的载荷是在不断变化的，变化幅度很大且非常不均匀。例如，当闸门下落关闭时，作用在启闭机挠性构件上的载荷有可能下降为零，也就是说闸门及其附件的重力不足以克服摩擦阻力，只得添加配重或者采用刚性杆件施加闭门力把闸门压下去。而有时闸门提升过程中因意外原因出现卡阻，最大载荷有可能超过原先设计的额定载荷，所以中等以上容量的启闭机一般要求设置负荷指示和负荷限制器。

(2) 启闭速度低。多数启闭机工作速度是很小的，一般为  $1\sim 2\text{ m/min}$ ，通常启闭速度不超过  $5\text{ m/min}$ ，有的甚至只有  $0.1\text{ m/min}$ 。

(3) 工作级别一般较低, 但要求绝对可靠。除一些船闸以及泄洪用的闸门在特定时期内启闭较频繁外, 其余的闸门都比较少操作, 因此启闭机工作级别一般较低, 但是它在水工建筑物上的重要性却很高, 要求它的工作绝对可靠, 这就要求平时特别注意启闭机的保养维护。

(4) 双吊点要求同步。多数闸门、特别是大跨度闸门上具有两个吊点, 所以这类闸门的启闭机具有两套额定容量相同的起升机构, 为保证闸门的顺利启闭, 就要求保证双吊点同步, 特别在液压传动的启闭机中是一个重要的课题。

(5) 要适应闸门运行的特殊要求。例如快速事故闸门, 要求快速闭门, 但并不需要快速启门, 因此启闭机要求具有两种速度。又如带充水阀的闸门, 要求启闭机在开启充水阀后自动停机, 待充水平压后再提升闸门。

## 二、启闭机的类型

启闭机的类型也是多种多样的, 不同类型启闭机多数用它的机构特征来命名, 如固定卷扬式启闭机、液压式启闭机等。启闭机按传动形式分为机械传动的和液压传动的。机械传动的启闭机按布置形式分为固定式和移动式两大类。液压传动的启闭机一般只有固定式。

### (一) 固定式启闭机

通常一台固定式启闭机只用于操作一扇闸门, 启闭机只设置一个起升机构, 不必配置水平运动机构。固定式启闭机根据机械传动类型的不同, 有卷扬式、螺杆式、链式、连杆式等。

#### 1. 固定卷扬式启闭机

固定卷扬式启闭机最为常见, 广泛用于平面闸门和弧形闸门上。国内已有 QP、QPK、QPG 等系列化产品。一般在 400kN 以下的固定卷扬式启闭机, 可设手摇机构。

固定卷扬式启闭机, 如图 5-1 所示, 由于在启闭力和扬程方面有宽广的适应范围, 因此使用极其广泛, 主要用于靠自重、水柱或其他加重方式关闭孔口的闸门和要求在短时间内全部开启的闸

门。另外,固定卷扬式启闭机可增设飞摆调速器装置,闭门速度较快,用于启闭快速事故闸门。

卷扬式弧门启闭机主要用于操作露顶式弧形闸门,有两种形式。图 5-2 所示是吊点设置在面板前面的弧门启闭机的布置,为了适应弧门转动的需要,启闭机上一般不能采用滑轮装置,只能用多根钢绳自卷筒引出并直接连到闸门吊耳轴上的方式。这一做法使该类弧门启闭机的起重容量受到较大的限制。图 5-3 所示为另一种布置,吊点设置在门叶顶部或面板后面,采用平面闸门卷扬式启闭机替代或改装。另外出现一种所谓“盘香式启闭机”,用于启闭大型弧门,但其自重较大。

国内目前在工程实践中,固定卷扬式启闭机容量及扬程较大的有:天生桥一级水电站放空洞事故闸门启闭机,容量达  $2 \times 4000\text{kN}$ ,扬程

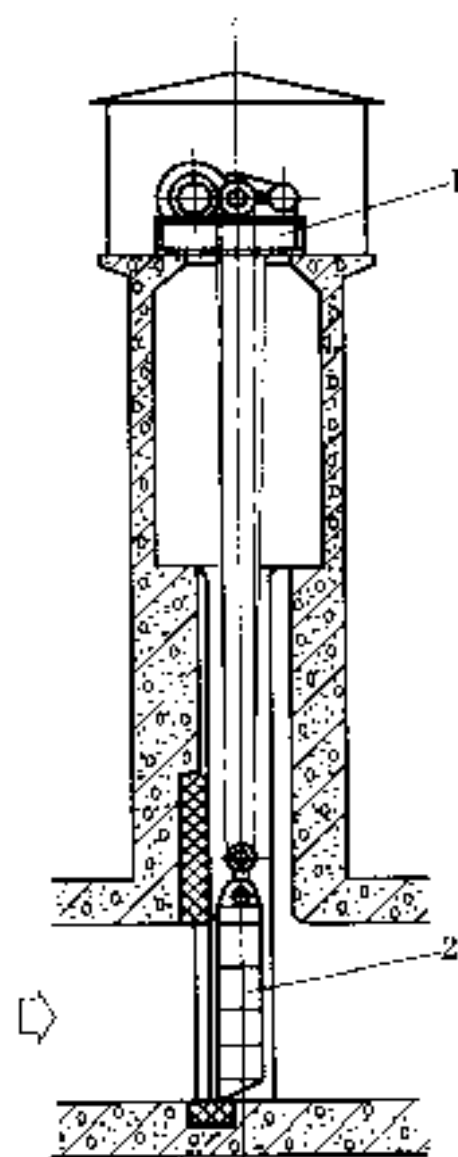


图 5-1 固定卷扬式启闭机

1—固定卷扬式启  
闭机; 2—闸门

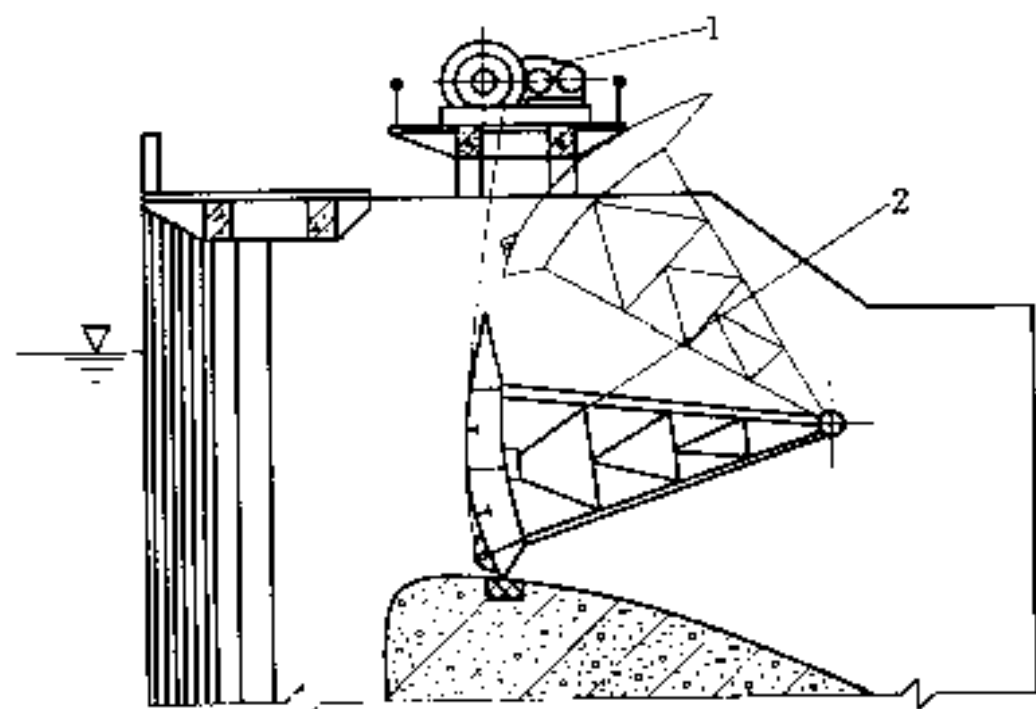


图 5-2 卷扬式弧门启闭机

1—卷扬式弧门启闭机; 2—弧形闸门

125m；小浪底水利枢纽工程中的  $1 \times 5000\text{kN}$  启闭机，扬程 90m；凌津滩水电站闸坝工作闸门启闭机采用盘香式，启门力达  $2 \times 2000\text{kN}$ ，扬程 27m。

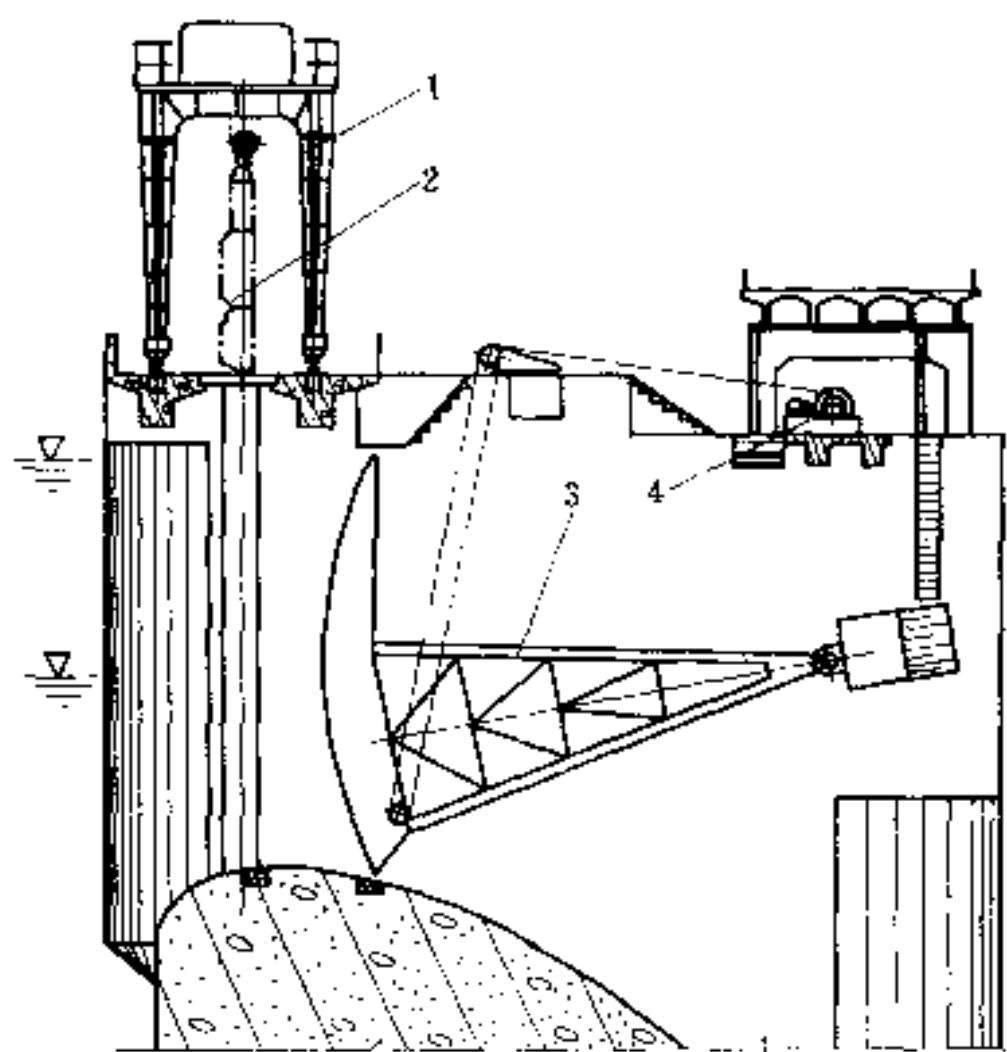


图 5-3 后拉式弧门启闭机和单向门式启闭机

1—单向门式启闭机；2—检修闸门；3—弧形工作闸门；4—后拉式弧门启闭机

## 2. 螺杆式启闭机

螺杆式启闭机如图 5-4 所示，主要用在需要下压力的闸门上。大型的螺杆启闭多用于操作深孔弧门，但需设置可摆动的支承或设置导轨、滑块及铰接吊杆与闸门连接。小型螺杆式启闭机一般用手摇或手、电两用。

螺杆式启闭机的闭门力，受其行程的限制。在使用中，常因超载而使螺杆弯曲，所以电动螺杆启闭机应设行程限位开关，手动螺杆启闭机应设安全联轴节。

螺杆式启闭机的缺点是启闭力不能太大，速度较低，行程也受限制。

### 3. 链式启闭机和连杆式启闭机

链式启闭机采用片式链条,早期主要用于露顶式工作闸门上。为防止链条在起门过程中与水接触,需设置收链装置。链式启闭机因机构复杂,自重大,未能推广使用。

连杆式启闭机主要用于人字闸门上,主要采用连杆机构传动,布置方式复杂,需要大的安装位置,近年来逐渐被卧式液压启闭机所取代。

#### (二) 移动式启闭机

移动式启闭机可以实行一机多门的操作方式。因此,除了起升机构,移动式启闭机还需配置水平移动的运行机构,其起升机构多用卷扬式。根据机架的结构形式和工作范围的不同,移动式启闭机可分为台车式(图 5-5)、单向门式(图 5-3)和双向门式(图 5-6)。双向门机除大车运行机构外,还有小车运行机构,门架和小车的走行方向互相垂直。另外有时电动葫芦也可作为移动式启闭机来启闭小闸门。

移动式启闭机多用于操作多孔共用的检修闸门,它的形式选择应根据水工建筑物的布置、闸门的运行要求以及启闭机的技术经济指标等因素确定,布置时需注意在其行程范围内与其他建筑物的关系。台车式启闭机和单向门式启闭机用于操作吊点位于与启闭机走行方向一致的同一轴线上的闸门。台车式启闭机一般要求水工建筑物上设置排架,或在启闭机下可提供闸门进行锁定、存放、维修等的空间。双向门机可操作吊点位于不同轴线上的几种闸门,或用于操作需要双向移动的闸门。采用门机时水工布置简洁美观,有时为降低门机高度,减少设备的造价,应考虑采取闸门分节等措施。另外,双向门机作为一种大型设备,除操作闸门外,尚需考虑其他用途,如满足其他机械设备检修时吊运要求等,

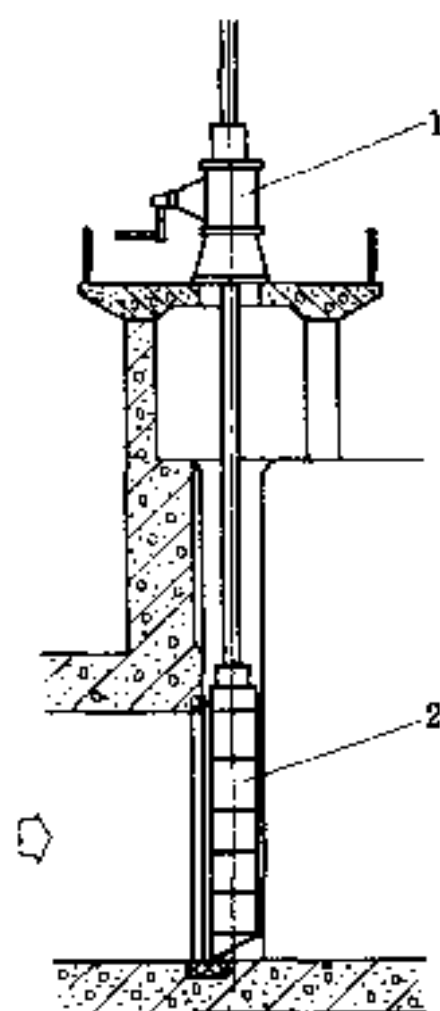


图 5-4 螺杆式启闭机

1—螺杆式启闭机;  
2—闸门

必要时可考虑设置回转吊臂。

目前国内工程实践中采用的最大门式启闭机容量达 5000kN，跨度为 24m。

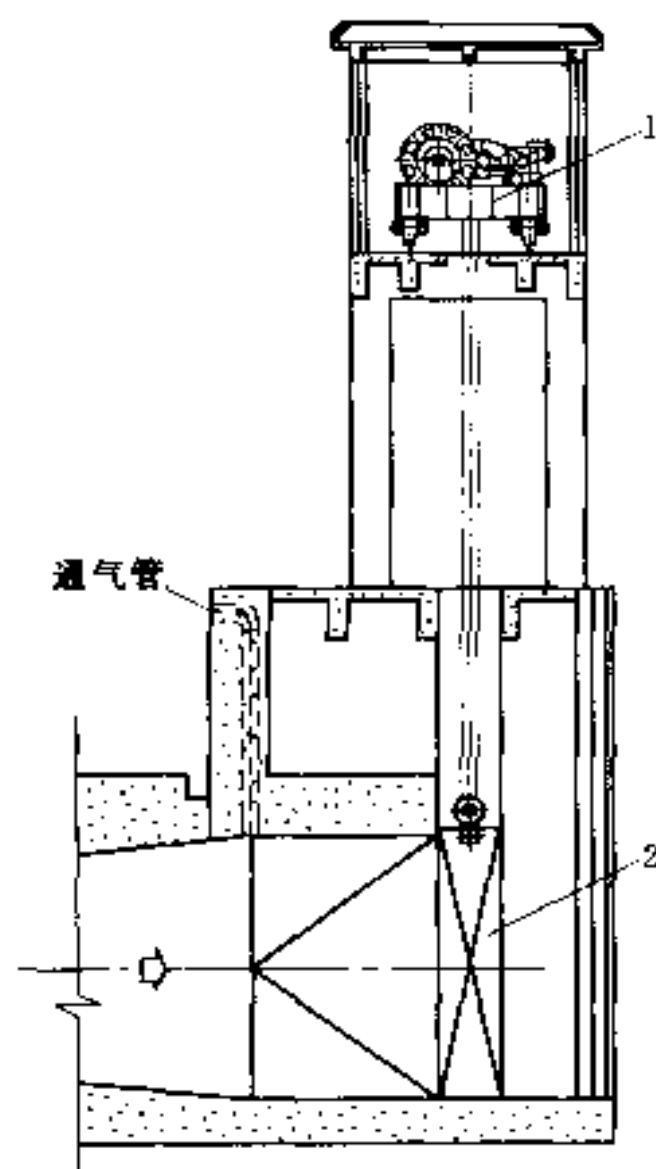


图 5-5 台车式移动启闭机  
1—台车式启闭机；2—检修闸门

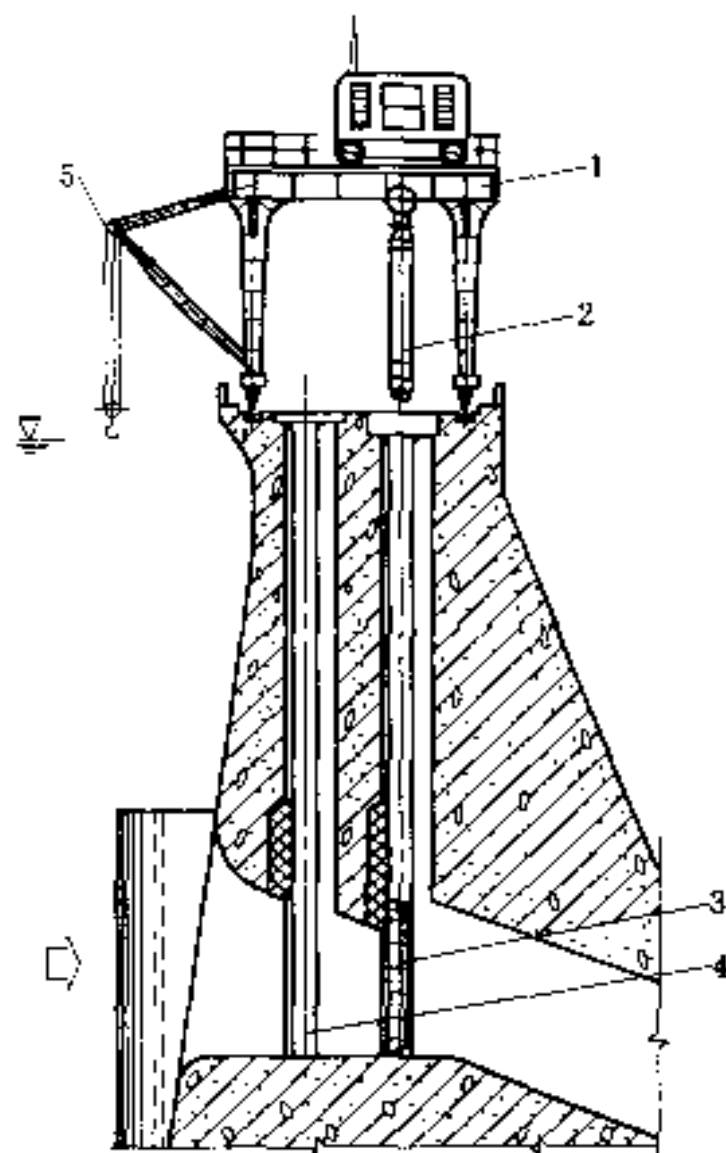


图 5-6 双向门式移动启闭机  
1—双向门式启闭机；2—吊杆；3—工作  
闸门；4—检修闸门门槽；5—回转吊

### （三）液压启闭机

液压启闭机根据液压缸的作用力分为单作用式、双作用式（图 5-7）。近年来，由于机械制造工艺水平和液压元件系列化、标准化水平的提高，启闭机液压化的趋势在国内外都是明显的，所以液压启闭机的地位越来越高。目前国内已有 QPPY、QPKY、QHLY 等系列化液压启闭机。

液压启闭机启闭力可以很大，但扬程却受加工设备的限制。双向作用的油压启闭机，多用于操作潜孔平面闸门和潜孔弧门。用于操作潜孔弧门时，需设置可转动支座或设置导轨及滑块及铰接

吊杆与闸门连接。

目前国内工程实例中, 液压启闭机容量较大的有: 五强溪水电站表孔弧形闸门液压启闭机, 启门力为  $2 \times 3850 \text{ kN}$ , 行程  $12.5 \text{ m}$ ; 岩滩水电站进水口快速闸门启闭机容量为  $8000/6000 \text{ kN}$  (持住力/启门力), 行程  $16.9 \text{ m}$ 。

### 三、启闭机的基本参数

#### 1. 启闭力

启闭力是启闭机的额定容量, 它相当于通用起重机的额定起重量, 单位为千牛 (kN), 如果是双吊点, 则称  $2 \times$  多少千牛 (kN)。启闭力是根据闸门的启门力、持住力和闭门力中的最大值来确定的。这三个力分别考

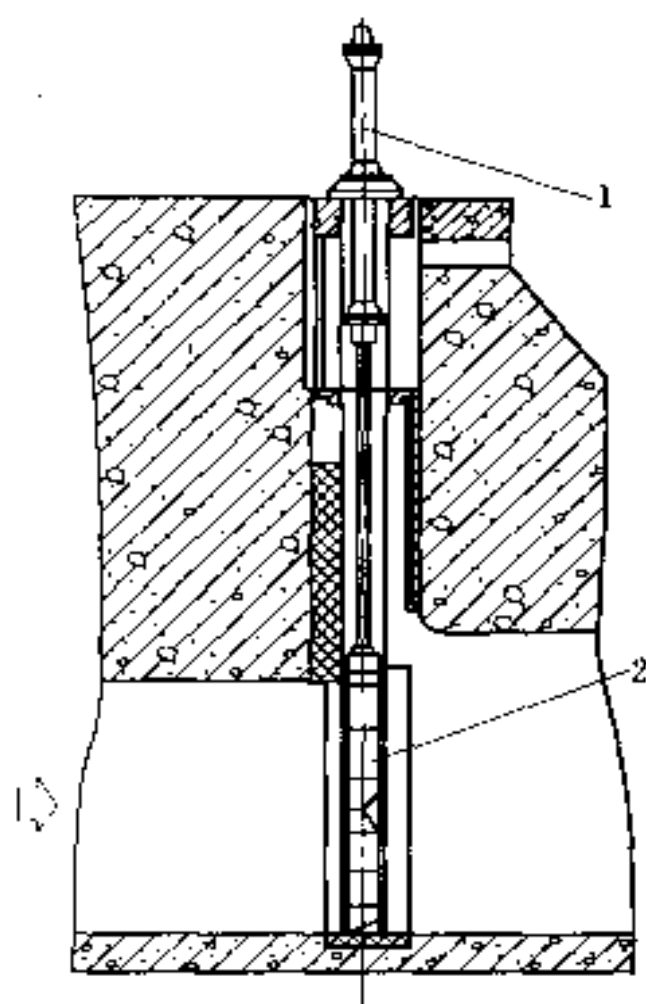


图 5-7 液压式启闭机  
1—液压式启闭机; 2—闸门

虑了闸门在启门和闭门时在动水或静水条件下的自身重力、加重块重力、摩擦力、水柱作用力、下吸力、上托力等因素的力学关系 (见前面各章)。启闭机的额定启闭力应采用 SL41—93《水利水电工程启闭机设计规范》中规定的标准系列, 见表 5-1。

表 5-1 启 闭 力 系 列 (单位: kN)

|      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6.3  | 8.0  | 10    | 12.5 | 16   | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   |
| 63   | 80   | 100   | 125  | 160  | 200  | 250  | 320  | 400  | 500  |
| 630  | 800  | 1000  | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3200 | 4000 | 5000 |
| 6300 | 8000 | 10000 |      |      |      |      |      |      |      |

#### 2. 工作速度

(1) 启闭速度: 在启闭机的起升机构中, 下降速度接近起升速度, 只需标出起升速度即可。但是在快速下降闸门的启闭机的

下降速度和起升速度不同,故需分别标出起门速度和闭门速度。螺杆式启闭机启闭速度一般为  $0.2\sim 0.5\text{m/min}$ , 卷扬式启闭机启闭速度一般为  $1\sim 2.5\text{m/min}$ , 大容量启闭机的启闭速度则低些。所有启闭机的速度在闸门接近底槛时应不大于  $5\text{m/min}$ 。

(2) 运行速度: 移动式启闭机的运行速度, 大车一般为  $10\sim 25\text{m/min}$ , 小车由于行走距离非常有限, 一般为  $5\sim 10\text{m/min}$ 。

(3) 旋转速度: 通常只限于门式启闭机的悬臂吊车, 旋转角度有限, 故旋转机构驱使臂架旋转速度控制在  $0.5\text{r/min}$  左右。

启闭机的速度应采用 SL41-93 规范中规定的标准系列, 见表 5-2。

表 5-2 速度系列 (单位:  $\text{m/min}$ )

|     |      |     |     |     |      |     |      |
|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| 0.2 | 0.3  | 0.5 | 0.8 | 1   | 1.25 | 1.6 | 2    |
| 2.5 | 3.15 | 4   | 5   | 6.3 | 8    | 10  | 12.5 |
| 16  | 20   | 25  |     |     |      |     |      |

### 3. 扬程

扬程是指启闭机的吊钩在闸门安装检修或运行过程中升降的最大高度, 与通用起重机械的起升高度是同一概念。对于弧形闸门, 则以吊钩在两个极限位置时, 起重元件长度的差值为定义。对于门式启闭机其扬程包括轨上扬程和轨下扬程。启闭机的扬程应根据闸门的运行条件决定, 应采用 SL41-93 规范中规定的标准系列, 见表 5-3。必要时可考虑用拉杆驳接以减小启闭机的扬程。

表 5-3 扬程系列 (单位:  $\text{m}$ )

|     |      |     |    |     |    |     |     |      |     |     |     |    |
|-----|------|-----|----|-----|----|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|
| 1.0 | 1.25 | 1.6 | 2  | 2.5 | 3  | 3.5 | 3.8 | 4    | 4.5 | 5   | 5.5 | 6  |
| 6.5 | 7    | 7.5 | 8  | 8.5 | 9  | 9.5 | 10  | 10.5 | 11  | 12  | 13  | 14 |
| 15  | 16   | 18  | 20 | 22  | 24 | 26  | 28  | 30   | 32  | 34  | 36  | 38 |
| 40  | 45   | 50  | 55 | 60  | 65 | 70  | 75  | 80   | 100 | 120 | 140 |    |

### 4. 跨度

跨度是指移动式启闭机的大车两侧走行轨道中心线之间的距

离，通常就是启闭机的轨距，但在弧形轨道上运行的启闭机有细微的差别，所以弧形轨道应标明最小弯曲半径。启闭机的轨距单位为 m。应采用 SL41—93 规范中规定的标准系列，见表 5-4。

表 5-4 移动式启闭机跨度系列 (单位: m)

|     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |
|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| 2.5 | 3  | 3.5 | 4  | 4.5 | 5  | 5.5 | 6  | 6.5 | 7  | 7.5 | 8  | 8.5 | 9  |
| 9.5 | 10 | 11  | 12 | 13  | 14 | 15  | 16 | 17  | 18 | 19  | 20 | 22  | 24 |

#### 5. 吊点间距

对于双吊点启闭机而言，由闸门上两个吊点的布置情况来确定。它等于起吊闸门在最高位置时，两个取物元件之间的水平间距，单位为 m。一般为闸门两个吊耳的距离。

#### 6. 工作级别

启闭机和通用起重机械一样，是一种循环间隔性工作的机械。除液压启闭机外，启闭机机构的工作级别按机构的设计寿命和荷载状态划分为 4 级（见表 5-5）。主起升机构的工作级别就是启闭机的工作级别。启闭机工作级别举例见表 5-6。

表 5-5 机构工作级别

| 工作级别 | 总设计寿命<br>(h) | 荷 载 状 态           |
|------|--------------|-------------------|
| Q1—轻 | 800          | 不经常使用，且很少启闭额定荷载   |
| Q2—轻 | 1600         |                   |
| Q3—中 | 3200         | 有时启闭额定荷载，一般启闭中等荷载 |
| Q4—重 | 6300         | 经常启闭额定荷载          |

#### 7. 分档

根据水利部 1992 年批准的《水利部启闭机产品等级评定暂行管理办法》规定，启闭机划分为小型、中型、大型、超大型几个档次，见表 5-7。

表 5-6

工作级别举例

| 启 闭 机 形 式 |                      |                      | 工 作 级 别   |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------|
| 卷扬式启闭机    | 启闭检修闸门               |                      | Q1—轻      |
|           | 启闭事故闸门               | Q2—轻                 | Q1—轻~Q2—轻 |
|           |                      | 扬程 $\geq 40\text{m}$ | Q2—轻~Q3—中 |
|           | 启闭工作闸门               | 扬程 $< 40\text{m}$    | Q2—轻~Q3—中 |
|           |                      | 扬程 $\geq 40\text{m}$ | Q3—中~Q4—重 |
| 螺杆式启闭机    | 启闭事故闸门               |                      | Q1—轻~Q2—轻 |
|           | 启闭工作闸门               |                      | Q2—轻      |
| 液压启闭机     | 启闭事故闸门               |                      | Q1—轻~Q2—轻 |
|           | 启闭工作闸门               |                      | Q2—轻~Q3—中 |
| 链式启闭机     | 启闭工作闸门               |                      | Q2—轻~Q3—中 |
| 移动式启闭机    | 扬程 $< 40\text{m}$    |                      | Q1—轻~Q3—中 |
|           | 扬程 $\geq 40\text{m}$ |                      | Q2—轻~Q4—重 |

表 5-7

启 闭 机 分 档 表

| 启 闭 力 (kN)<br>形 式 | 档 次 | 小 型     | 中 型      | 大 型       | 超大型      |
|-------------------|-----|---------|----------|-----------|----------|
|                   |     |         |          |           |          |
| 固定卷扬式、<br>移动式、液压式 |     | $< 250$ | 250~1000 | 1000~2500 | $> 2500$ |
| 螺杆式               |     | $< 250$ | 250~500  | $> 500$   |          |

\* 双吊点启闭机指一侧吊点的启闭力。

#### 四、启闭机的一般技术要求

启闭机的形式比较多,布置形式也不同,启闭机选型布置应根据水工布置、门型、孔数及操作运行、时间要求和各种常用启闭机在设计、制造和运行等方面的主要特点,经全面的技术经济论证后选定。启闭机的选型布置还必须满足技术先进、经济合理、操作可靠、安全运行、维修方便、景观协调和安全卫生等要求,并能尽量发挥启闭机在工程中的最大效益。

启闭机的选用应优先考虑现有系列化的产品。启闭机的启闭

力应大于或等于计算启闭荷载；也允许略小于计算启闭力，但不得超过 5%，同时还应符合启闭机系列标准规定。

启闭机扬程可根据运行条件决定，并应满足：

(1) 溢流闸门可提出溢流水面曲线以上 1~2m，以避免闸门受水面漂浮物的撞击。

(2) 快速闸门可提到孔口以上 0.5~1.0m。

(3) 闸门检修时可提到检修平台以上 0.5~1.0m。

启闭机除满足启闭闸门的最大工作扬程要求外，还应留有适当的裕度。

为了保证启闭机安全可靠地工作，不同形式的启闭机应装设相应的安全装置，如制动器、荷载限制器、力矩限制器、升降的限位装置、行程限制器、缓冲器、防风夹轨器、锚定装置、液压系统保护装置（溢流阀、压力继电器等）以及电气保护装置等。启闭机还应采取防潮通风、防腐蚀和防风沙等保护措施。

启闭机应安装在最高水位以上，防止启闭机被淹，并应便于闸门、门槽及启闭机部件等正常检修。根据气候、风沙情况，考虑检修人员的工作等条件，固定式启闭机可以设置在机房内，也可布置在室外。设置机房时应与闸门通气孔分开，其平面尺寸除机器靠机房一侧应留有必要的检修、安装空间外，其余与墙壁之间应留有人行通道，其宽度不应小于 0.8m。布置在室外的启闭机应加设活动机罩和栏杆。

在严寒地区，且在冬季有运行要求的启闭机，其机房应有保温设施，选择工作油或润滑油的牌号应考虑工作地区的气温条件。

根据启闭机工况条件和技术经济指标，有条件时可采用高扬程启闭机，以避免拆卸吊杆。布置高扬程启闭机时要防止动滑轮组、钢丝绳与闸门门槽的干扰。动滑轮组应设置防止钢丝绳脱槽的防护措施。对于浸入水中的动滑轮组，宜采用滑动轴承，轴表面应采取防腐措施，采用滚动轴承时应设密封装置。对于经常浸入水中的钢丝绳应选用镀锌钢丝绳。

启闭机起吊平面闸门时的起吊中心线应与闸门起吊中心线一

致。对于启闭力大的移动式启闭机，其吊具与闸门（或吊杆）吊耳连接时，宜采用自动挂脱梁或手摇联轴装置。对固定式启闭机，当连接轴重量较大而操作困难时，也宜设置手摇联轴装置。

对用以操作泄洪及其他应急闸门的启闭机，必须设置可靠的备用电源。启闭力小的启闭机必要时可以设置手摇机构。

双吊点闸门的启闭机，应设置同步装置。在启闭过程中，不应因各部分误差而影响闸门运行。对于闸门前有泥沙淤积的双吊点启闭机，其启闭力的确定应考虑两个吊点启闭荷载的不均匀系数。

有小开度充水要求的闸门，启闭机应设有能满足小开度精度的行程开关或其他措施。

## 第二节 卷扬式启闭机

### 一、固定卷扬式启闭机

#### （一）机构组成和工作原理

固定卷扬式启闭机一般由起升机构、机架及电气控制系统组成。起升机构主要由滑轮组、卷筒组、驱动装置（包括开式齿轮副、减速器、制动器、电动机等）及安全装置等部件组成，如图5-8所示。启闭机通过滑轮组的动滑轮的吊具与闸门相连。其工作原理是：由电动机通过带动制动轮联轴器和减速器带动开式齿轮副和卷筒转动，卷筒上钢丝绳又通过动滑轮和平衡滑轮实现吊具的升降。

滑轮组包括动滑轮组与定滑轮组。启闭机上一般不宜采用单联滑轮组。因为单联滑轮组在提起或下放闸门的过程中，会使闸门产生水平位移，从而引起闸门晃动。双联滑轮组在工作时无此现象发生。另外滑轮组的倍率宜采用偶数，可避免因钢丝绳的张力使动滑轮组产生扭转，而且平衡滑轮布置在定滑轮上，可用来操纵荷载限制器。

卷筒用来卷绕钢丝绳，通常为圆柱形，一端用螺栓固定在大齿轮上。为与双联滑轮组配套，启闭机应采用双联卷筒。卷筒有

单层卷绕和多层卷绕之分，高扬程启闭机为减少卷筒长度，通常采用双层或多层卷绕，但采用多层卷绕时，应注意钢丝绳绕入绕出卷筒时偏离螺旋两侧的角度不宜大于  $2^\circ$ 。

驱动装置中的减速器、制动器、电动机一般都采用通用标准系列产品。电动机一般采用三相交流起重用电动机，电动机轴上所装的制动器应采用常闭式，以便闸门能停在任意不同开度。起重容量较小（400kN 以下）的启闭机，除所装的电动机外，尚可在电动机或减速机轴的另一端增设手摇机构。开式齿轮副的传动比一般小于 6.3。

安全装置一般包括荷载限制器、行程限制器等。启闭机的容许超载值一般定为不得大于额定起重容量的 10%。因此，在实际负荷达到额定起重量的 110% 时，荷载限制器应自动切断电源，使电动机停止转动。上、下行程限位一般采用行程开关或主令控制器。启闭机通常还设置高度指示装置。

机架主要用于安装起升机构的各部件，并将荷载传递给基础，保证启闭机正常运行。机架一般均做成整体式结构，小容量启闭机的机架梁多用型钢，大中容量的机架则用焊接工字梁或箱形梁。

## （二）特点和机构布置

固定卷扬式启闭机有结构紧凑、承载能力大、运行平稳可靠、安装维护方便等优点，而且在启闭力和扬程方面有宽广的适应范围，因此使用最为广泛，主要用于靠自重、水柱或其他加重方式关闭孔口的闸门。其缺点就是不能产生下压力，自重相对较大，尤其是大容量的固定卷扬式启闭机更是如此。

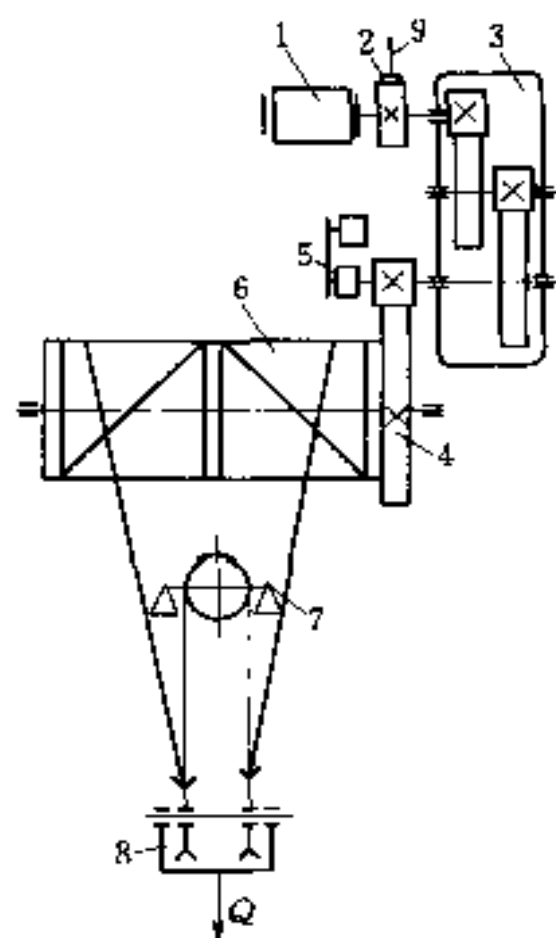


图 5-8 固定卷扬式  
启闭机卷扬机构

1—电动机；2—带制动轮的联轴器；3—减速器；4—开式齿轮；5—行程限制器；6—卷筒组；7—荷载限制器；8—吊具；9—制动器

固定卷扬式启闭机的机构布置形式根据具体情况，可以有多种变化。

### 1. 单吊点和双吊点启闭机

闸门采用单吊点或双吊点，应根据孔口大小，宽高比、启闭力、闸门及启闭机布置形式等因素综合考虑确定。当宽高比大于1.0时，宜采用双吊点。

单吊点启闭机将所有部件布置在一个机架上，如图5-9所示。

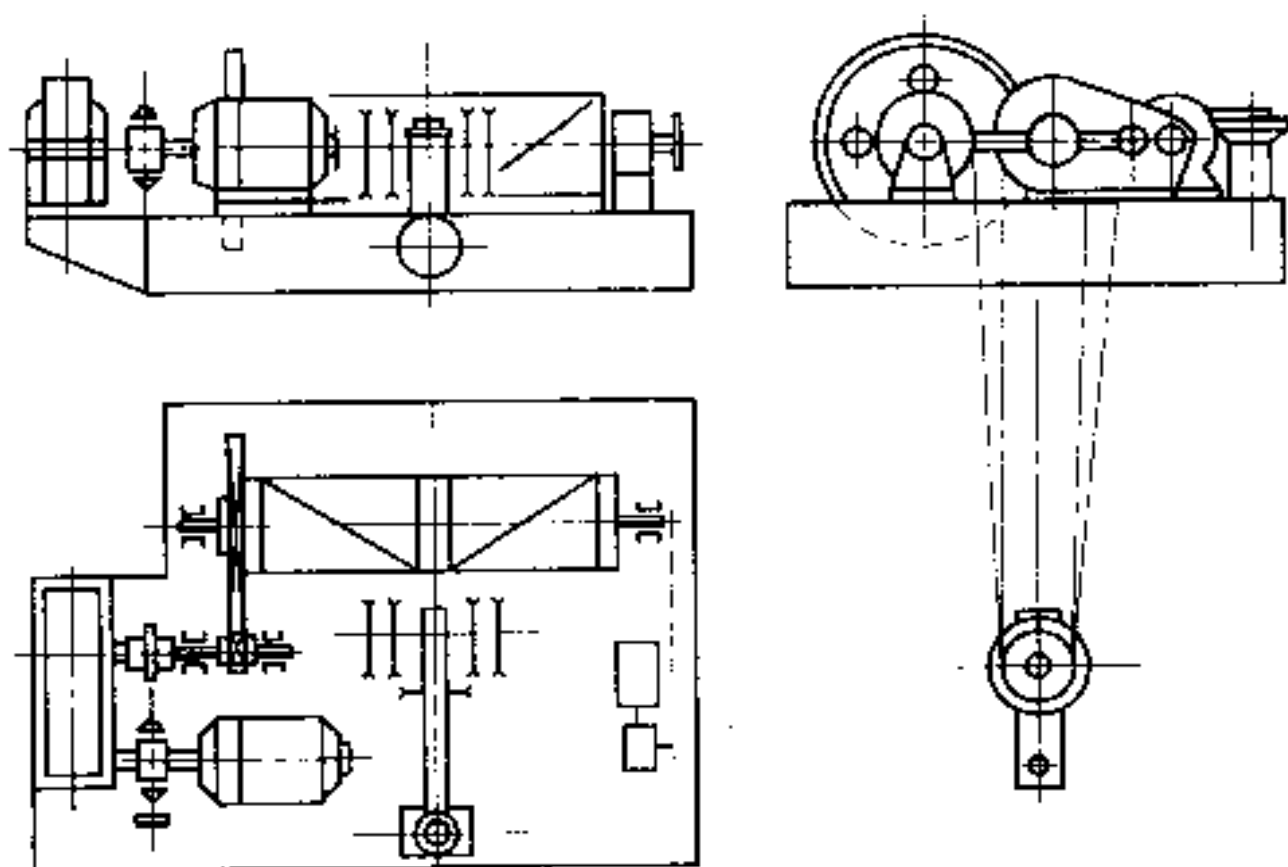


图 5-9 单吊点固定卷扬式启闭机

双吊点启闭机通常将两个滑轮组和两个卷筒组对称地布置在两个分离的机架上，并用机械措施来实现同步。驱动装置既可布置在分离机架上而形成分别驱动（见图5-10，适用于大、中容量的启闭机），也可布置在单侧机架上而形成集中驱动（见图5-11，适用于小容量的启闭机）。如果大容量启闭机采用集中驱动，或吊点间距比较大的启闭机可采用三机架的布置形式，见图5-12。图5-13所示为单卷筒双出绳的双吊点启闭机，这种布置适用于吊点间距较大、闸墩较薄的情况，但应注意钢丝绳进出卷筒的偏角。

### 2. 高扬程启闭机

常用的固定卷扬式启闭机的扬程不超过20m。如果闸门的起

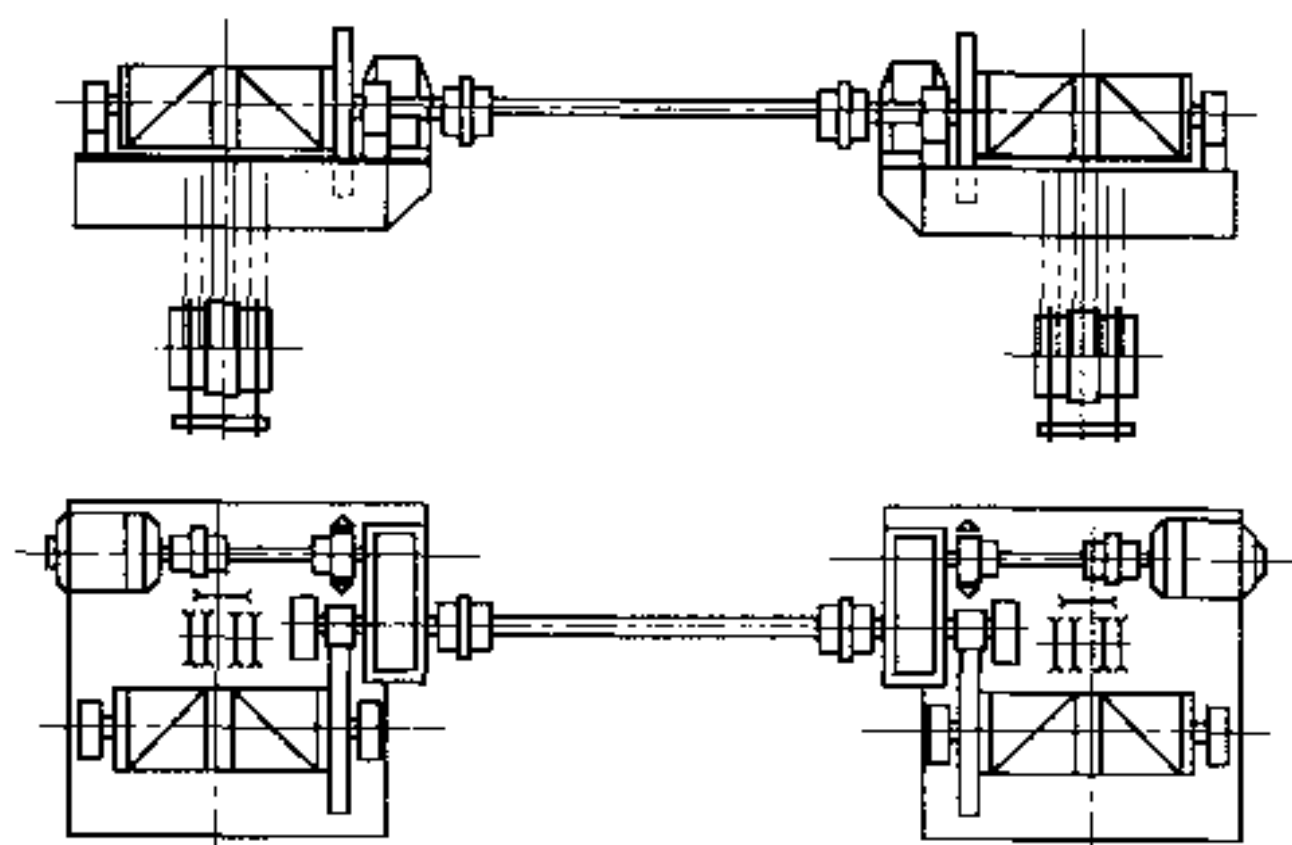


图 5-10 分别驱动的双吊点固定卷扬式启闭机

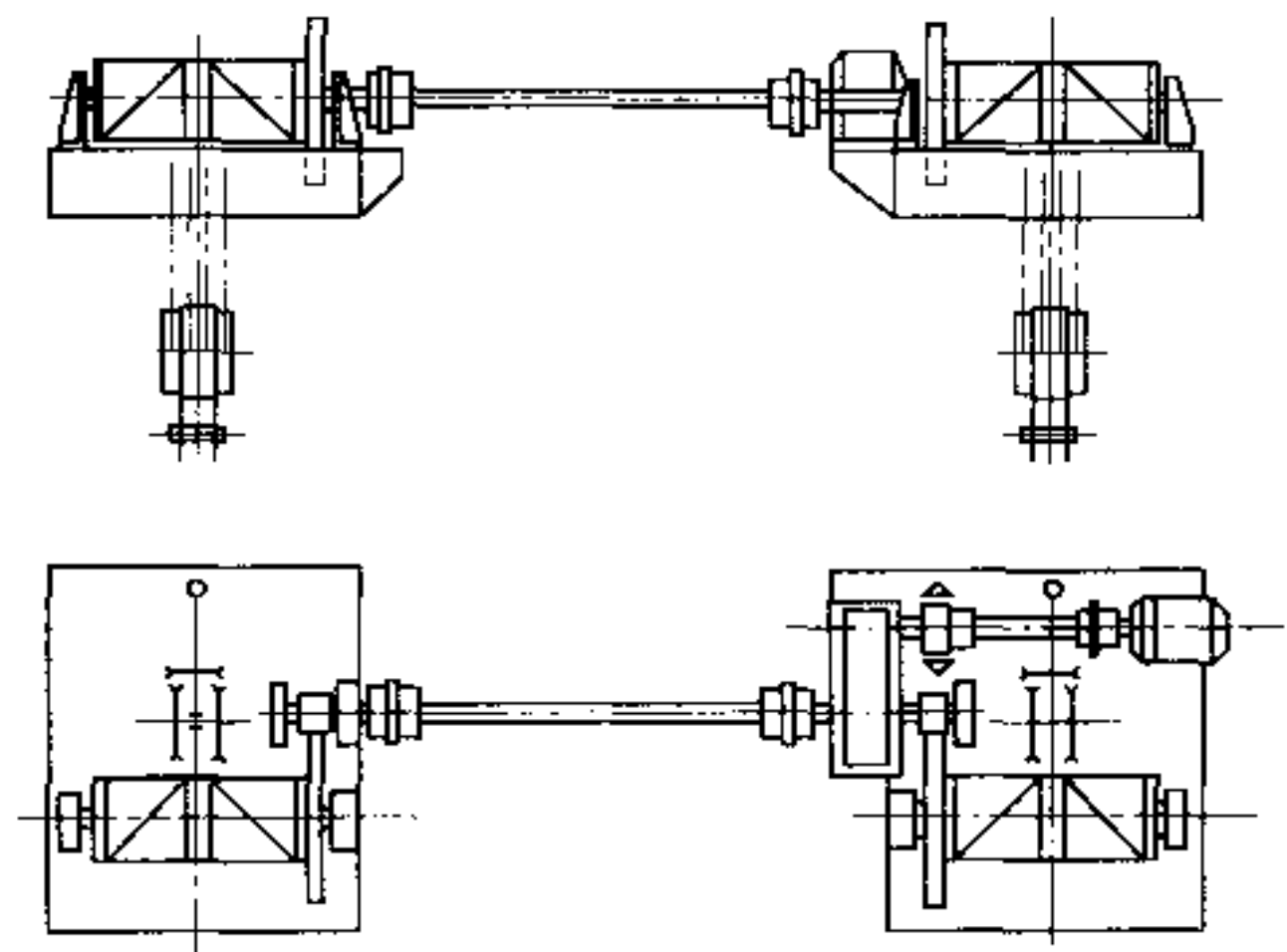


图 5-11 集中驱动的双吊点固定卷扬式启闭机

吊高度较大，在工程实践中通常采用低扬程启闭机加中间拉杆驳接的布置方式，这样闸门检修时需分段起吊，装拆拉杆的时间长，工作人员的劳动强度大，但可以避免动滑轮组和钢丝绳长期浸泡在水中。近年来我国设计了不少高扬程启闭机，有的扬程已达

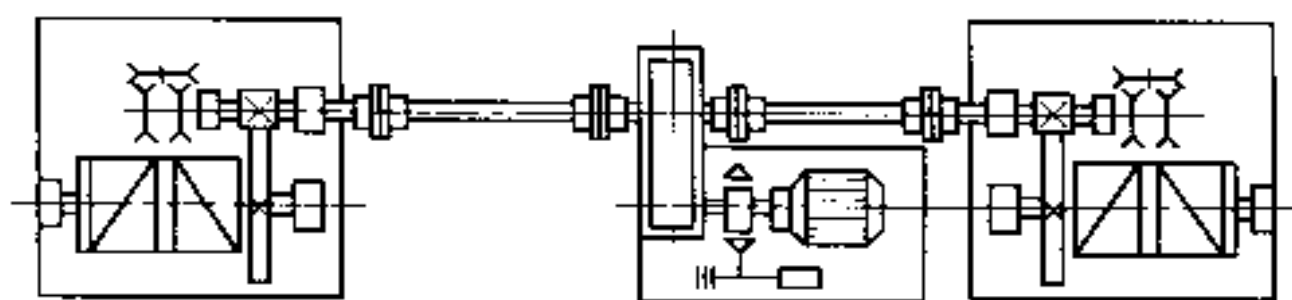


图 5-12 三机架集中驱动的双吊点固定卷扬式启闭机

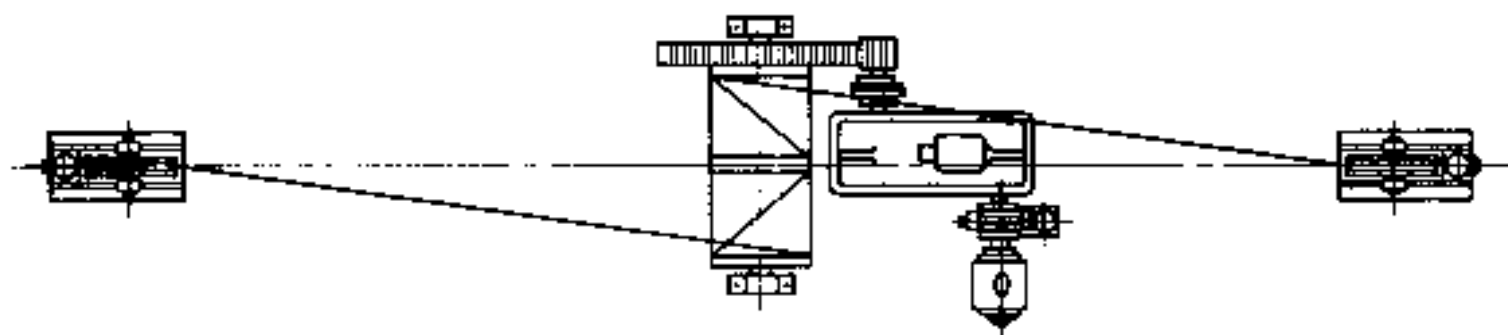


图 5-13 单卷筒双吊点固定卷扬式启闭机

100m。

为了减小卷筒长度和整个启闭机的尺寸，高扬程卷扬式启闭机通常采用钢丝绳在卷筒上双层卷绕或多层卷绕的方式，也可以减小滑轮组倍率或采用双双联滑轮组等。采用双层卷绕的卷筒需在钢丝绳返回处设有返回凸缘，并控制第二层钢丝绳偏离时与卷筒轴垂直的平面夹角；采用双层卷绕一般还需要设置排绳装置。

### 3. 弧门启闭机

前拉式弧门启闭机（图 5-2）除不设滑轮组外，与平面闸门的固定卷扬式启闭机基本相同。因没有滑轮组的倍率，其驱动装置的传动比需要大一些，而且钢丝绳直径较大，进而使得卷筒及整个启闭机尺寸较大。自重大、造价高是前拉式弧门启闭机明显的缺点，这一点也限制了其容量方面的发展。

后拉式弧门启闭机如图 5-14 所示，是把平面闸门的固定卷扬式启闭机的定滑轮组布置在闸墩上起转向作用，用来起吊弧门，有减轻启闭机自重、简化坝顶布置等优点，在国内被广泛采用。

盘香式启闭机的出现增加了弧形门启闭机的起重容量，满足了水利水电事业日益发展的需要。盘香式启闭机如图 5-15 所示，是用串成一体绳轮组来代替卷筒，使原来集中绕于卷筒上的各

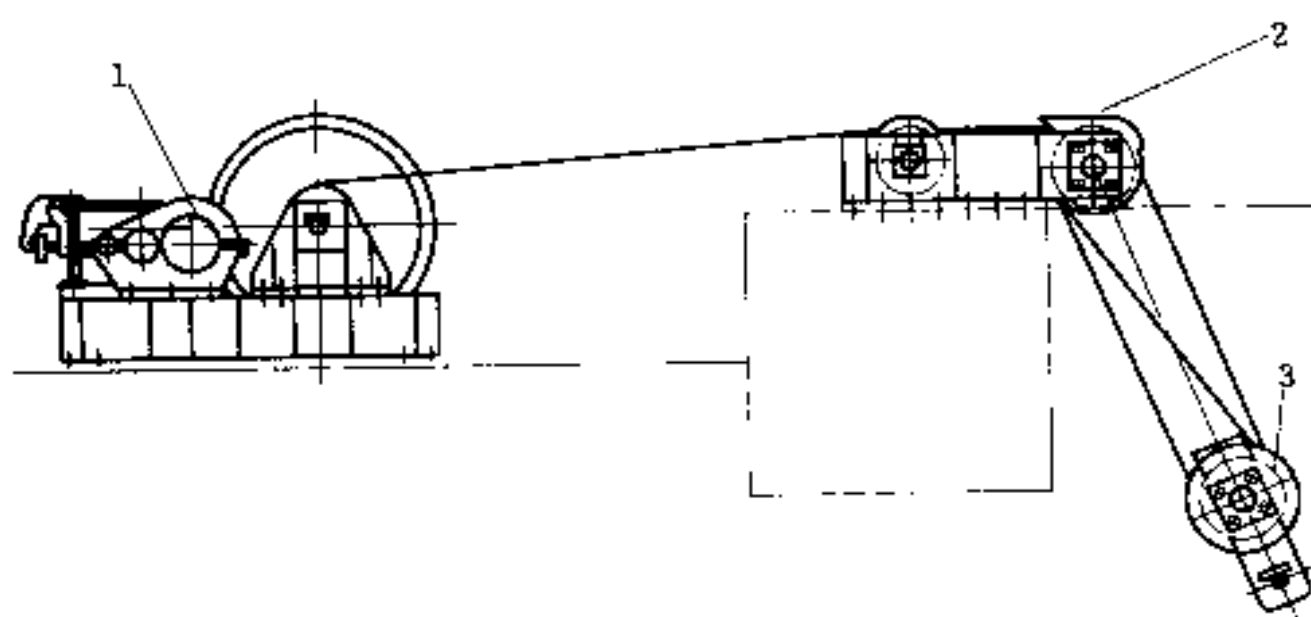


图 5-14 后拉式弧门启闭机

1—卷扬机构；2—定滑轮组；3—动滑轮组

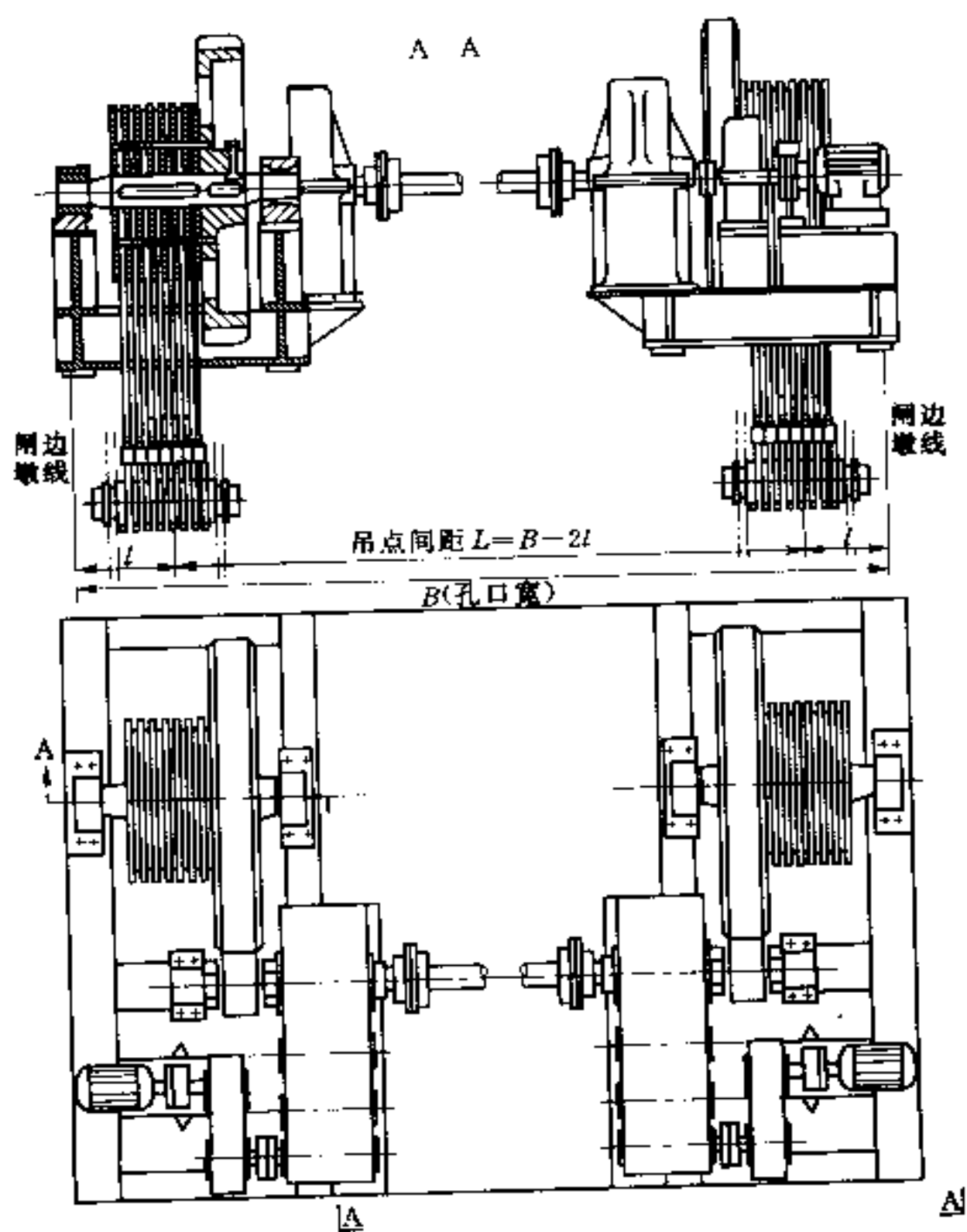


图 5-15 盘香式启闭机

钢绳改为分别绕于每个绳轮上，由于钢绳像盘香一样叠绕于绳轮上的绳槽内，所以称为“盘香式”弧门启闭机。该机的特点是：每根钢绳所需的固定绳圈和工作用绳圈都是径向布置在绳轮上的，比卷筒上的轴向排列布置，节省不少位置，因此有可能使悬吊闸门的钢绳根数增多，长度加大，从而增加启闭机的起重容量和起吊扬程。

### （三）QP、QPK 系列启闭机的技术特性

固定卷扬式启闭机应用最为广泛，其变化也比较多，启闭机的标准化和系列化，可以避免低水平的重复劳动，大大提高设计和生产的效率和质量，满足日益发展的水利水电工程的建设。我国至今已颁发了 SD296—88《QP 型卷扬式启闭机系列参数》、JB3094—82《QPK 卷扬式快速闸门启闭机形式、基本参数和尺寸》、SL40—92《QPG 型卷扬式高扬程启闭机系列标准》等标准。

平面闸门的启闭机，长期采用 QPQ 系列启闭机，由于不够完善和统一，一直没有正式批准为部颁标准，所以在 1989 年，水利部和原能源部共同批准颁发了 QP 系列替代 QPQ 系列，最大启闭力提高到 5000kN 和  $2 \times 5000\text{kN}$ ，扬程有低扬程系列和中扬程系列，见表 5-8。但是，QPQ 作为一种通用的平面闸门启闭机，国内还普遍在采用，表 5-9、表 5-10 和表 5-11 列出了通用 QPQ 系列（上海重型机械厂系列）启闭机的技术特性、外形和基础布置的主要尺寸。

QPK 系列为卷扬式快速闸门启闭机，其基本参数见表 5-12，适用于水利水电工程中的快速事故闸门。QPK 系列是在 QPQ 系列的基础上改进的，其机械强度按持住力设计，电动机容量按启门力设计，并在传动机构上设置调速器，如图 5-16 所示。该系列的启闭机设有两种速度，慢速是正常工作情况下的启闭速度，是在电动机驱动下运转的；快速只用在事故工况下闭门，此时电动机不通电，靠闸门自重（含加重）的作用，带动机构运行，快速下降，其下降速度受调速器控制，不超过 5m/min。

表 5-8

QP 型卷扬式启闭机系列参数

| 启 闭 机       |                  | 启门力<br>(kN)     | 启闭扬程<br>(m) | 启闭速度<br>(m/min) | 吊点中心距<br>(m) |          |
|-------------|------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|----------|
| 类 别         | 型 号              |                 |             |                 |              |          |
| 单<br>吊<br>点 | 单<br>独<br>驱<br>动 | QP—63—8/14      | 63          | 8/14            | 2.0~2.5      |          |
|             |                  | QP—100—8/14     | 100         | 8/14            | 2.0~2.5      |          |
|             |                  | QP—160—8/14     | 160         | 8/14            | 2.0~2.5      |          |
|             |                  | QP—250—9/16     | 250         | 9/16            | 2.0~2.5      |          |
|             |                  | QP—400—9/16     | 400         | 9/16            | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—630—10/18    | 630         | 10/18           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—800—10/18    | 800         | 10/18           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—1000—11/20   | 1000        | 11/20           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—1250—12/22   | 1250        | 12/22           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—1600—13/24   | 1600        | 13/24           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—2000—14/26   | 2000        | 14/26           | 1.5~2.0      |          |
|             |                  | QP—2500—15/28   | 2500        | 15/28           | 1.0~1.5      |          |
|             |                  | QP—3200—15/28   | 3200        | 15/28           | 1.0~1.5      |          |
|             |                  | QP—4000—18/34   | 4000        | 18/34           | 1.0~1.5      |          |
|             |                  | QP—5000—18/34   | 5000        | 18/34           | 1.0~1.5      |          |
| 双<br>吊<br>点 | 集<br>中<br>驱<br>动 | QP—2×63—8/14    | 2×63        | 8/14            | 2.0~2.5      | 1.8~7.0  |
|             |                  | QP—2×100—8/14   | 2×100       | 8/14            | 2.0~2.5      | 1.8~7.0  |
|             |                  | QP—2×160—8/14   | 2×160       | 8/14            | 2.0~2.5      | 2.1~8.0  |
|             |                  | QP—2×250—9/16   | 2×250       | 9/16            | 2.0~2.5      | 2.4~9.0  |
|             |                  | QP—2×400—9/16   | 2×400       | 9/16            | 1.5~2.0      | 3.1~10.0 |
|             | 单<br>独<br>驱<br>动 | QP—2×630—10/18  | 2×630       | 10/18           | 1.5~2.0      | 4.1~11.0 |
|             |                  | QP—2×800—10/18  | 2×800       | 10/18           | 1.5~2.0      | 4.2~12.0 |
|             |                  | QP—2×1000—11/20 | 2×1000      | 11/20           | 1.5~2.0      | 4.4~12.5 |
|             |                  | QP—2×1250—12/22 | 2×1250      | 12/22           | 1.5~2.0      | 4.7~13.0 |
|             |                  | QP—2×1600—13/24 | 2×1600      | 13/24           | 1.5~2.0      | 5.2~13.5 |
|             |                  | QP—2×2000—14/26 | 2×2000      | 14/26           | 1.5~2.0      | 5.7~14.0 |
|             |                  | QP—2×2500—15/28 | 2×2500      | 15/28           | 1.0~1.5      | 5.8~14.0 |
|             |                  | QP—2×3200—15/28 | 2×3200      | 15/28           | 1.0~1.5      | 5.8~14.0 |
|             |                  | QP—2×4000—18/34 | 2×4000      | 18/34           | 1.0~1.5      | 7.9~15.0 |
|             |                  | QP—2×5000—18/34 | 2×5000      | 18/34           | 1.0~1.5      | 8.5~16.0 |

- 注 1. 启闭机速度给出一个范围, 其启闭速度一定要符合 SD296—88 标准范围。  
 2. SD296—88 标准中的吊点中心距最大值是启闭机低速同步轴在无中间支承时的允许值。

表 5-9

QPQ 系列卷扬式启

| 类别          | 启闭机型号            | 启闭力<br>(kN) | 启闭扬程<br>(m) |       | 启闭<br>速度<br>(m/min) | 吊点<br>中心距<br>(m) | 滑<br>轮<br>组<br>倍<br>率 | 钢丝绳型号及规格<br>GB1102—74 |                    |
|-------------|------------------|-------------|-------------|-------|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
|             |                  |             | $H_1$       | $H_2$ |                     |                  |                       |                       |                    |
| 单<br>点<br>吊 | 独<br>驱           | QPQ—50      | 50          | 8     | 13                  | 2.23             |                       | 2                     | 6×19—11—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—80      | 80          | 8     | 13                  | 2.27             |                       | 2                     | 6×37—13—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—125     | 125         | 8     | 13                  | 2.25             |                       | 2                     | 6×19—17—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—160     | 160         | 8     | 13                  | 2.30             |                       | 2                     | 6×19—20—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—250     | 250         | 9     | 13                  | 2.20             |                       | 2                     | 6×37—24.5—170—光—右交 |
|             |                  | QPQ—400     | 400         | 9     | 13                  | 1.35             |                       | 4                     | 6×19—21.5—170—光—右交 |
|             |                  | QPQ—630     | 630         | 10    | 16                  | 1.23             |                       | 6                     | 6×19—21.5—180—光—右交 |
|             |                  | QPQ—800     | 800         | 10    | 16                  | 1.48             |                       | 6                     | 6×19—26—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—1000    | 1000        | 11    | 16                  | 1.4              |                       | 6                     | 6×19—28—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—1250    | 1250        | 12    | 16                  | 1.19             |                       | 6                     | 6×37—32.5—170—光—右交 |
| 双<br>点<br>吊 | 集<br>中<br>驱<br>动 | QPQ—2×50    | 2×50        | 8     | 13                  | 2.27             | 1.8~6                 | 2                     | 6×19—11—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×80    | 2×80        | 8     | 13                  | 2.34             | 1.8~6.5               | 2                     | 6×37—13—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×125   | 2×125       | 8     | 13                  | 2.30             | 1.8~7                 | 2                     | 6×19—17—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×160   | 2×160       | 8     | 13                  | 2.26             | 2.1~7.5               | 2                     | 6×19—20—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×250   | 2×250       | 9     | 13                  | 1.68             | 2.5~8                 | 2                     | 6×37—24—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×400   | 2×400       | 9     | 13                  | 1.39             | 3.1~8                 | 4                     | 6×19—21.5—170—光—右交 |
|             | 单<br>独<br>驱<br>动 | QPQ—2×630   | 2×630       | 10    | 16                  | 1.23             | 4~11                  | 6                     | 6×19—21.5—180—光—右交 |
|             |                  | QPQ—2×800   | 2×800       | 10    | 16                  | 1.48             | 4.1~12                | 6                     | 6×19—26—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×1000  | 2×1000      | 11    | 16                  | 1.4              | 4.4~12.5              | 6                     | 6×19—28—170—光—右交   |
|             |                  | QPQ—2×1250  | 2×1250      | 12    | 16                  | 1.19             | 4.7~13                | 6                     | 6×37—32.5—170—光—右交 |

注  $H_1$  为卷筒单层绕绳值,  $H_2$  为卷筒双层绕绳值。

闭机技术特性表

| 电 动 机                   |            |               | 减 速 器 |       | 制 动 器                    |               | 开式<br>齿轮 | 卷筒<br>直径<br>(mm) |
|-------------------------|------------|---------------|-------|-------|--------------------------|---------------|----------|------------------|
| 型 号                     | 功率<br>(kW) | 转速<br>(r/min) | 型 号   | 传动比   | 型 号                      | 制动力矩<br>(N·m) | 传动比      |                  |
| YZ132 M <sub>1</sub> —6 | 2.5        | 920           | ZQ—25 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 4.6      | 300              |
| YZ132 M <sub>2</sub> —6 | 3.7        | 912           | ZQ—25 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 4.61     | 300              |
| YZ160 M <sub>1</sub> —6 | 5.5        | 933           | ZQ—35 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 5.1      | 400              |
| YZ160M <sub>2</sub> —6  | 7.5        | 948           | ZQ—35 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300/200 | 240           | 5.1      | 400              |
| YZ160L—6                | 11         | 953           | ZQ—40 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 5.1      | 400              |
| YZ180L—8                | 11         | 694           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 4.75     | 600              |
| YZ200L—8                | 15         | 710           | ZQ—50 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 4.4      | 600              |
| YZ225M—8                | 26         | 701           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 3.9      | 800              |
| YZ250 M <sub>1</sub> —8 | 30         | 694           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 5.06     | 800              |
| YZ250 M <sub>1</sub> —8 | 30         | 694           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 5.38     | 900              |
| YZ132M <sub>2</sub> —6  | 4          | 912           | ZQ—25 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 4.6      | 300              |
| YZ160M <sub>2</sub> —6  | 7.5        | 948           | ZQ—25 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 4.61     | 300              |
| YZ160L—6                | 11         | 953           | ZQ—35 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —200     | 160           | 5.1      | 400              |
| YZ160L—6                | 13         | 936           | ZQ—35 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300/200 | 240           | 5.1      | 400              |
| YZ200L—8                | 18.5       | 697           | ZQ—40 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 5.1      | 400              |
| YZ225M—8                | 22         | 712           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 500           | 4.75     | 600              |
| YZ200L—8                | 2×15       | 710           | ZQ—50 | 39.23 | TJ <sub>2</sub> —300     | 2×500         | 4.4      | 600              |
| YZ225M—8                | 2×26       | 701           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 2×500         | 3.9      | 800              |
| YZ250M—8                | 2×30       | 694           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 2×500         | 5.06     | 800              |
| YZ250M—8                | 2×30       | 694           | ZQ—50 | 51.71 | TJ <sub>2</sub> —300     | 2×500         | 5.38     | 900              |

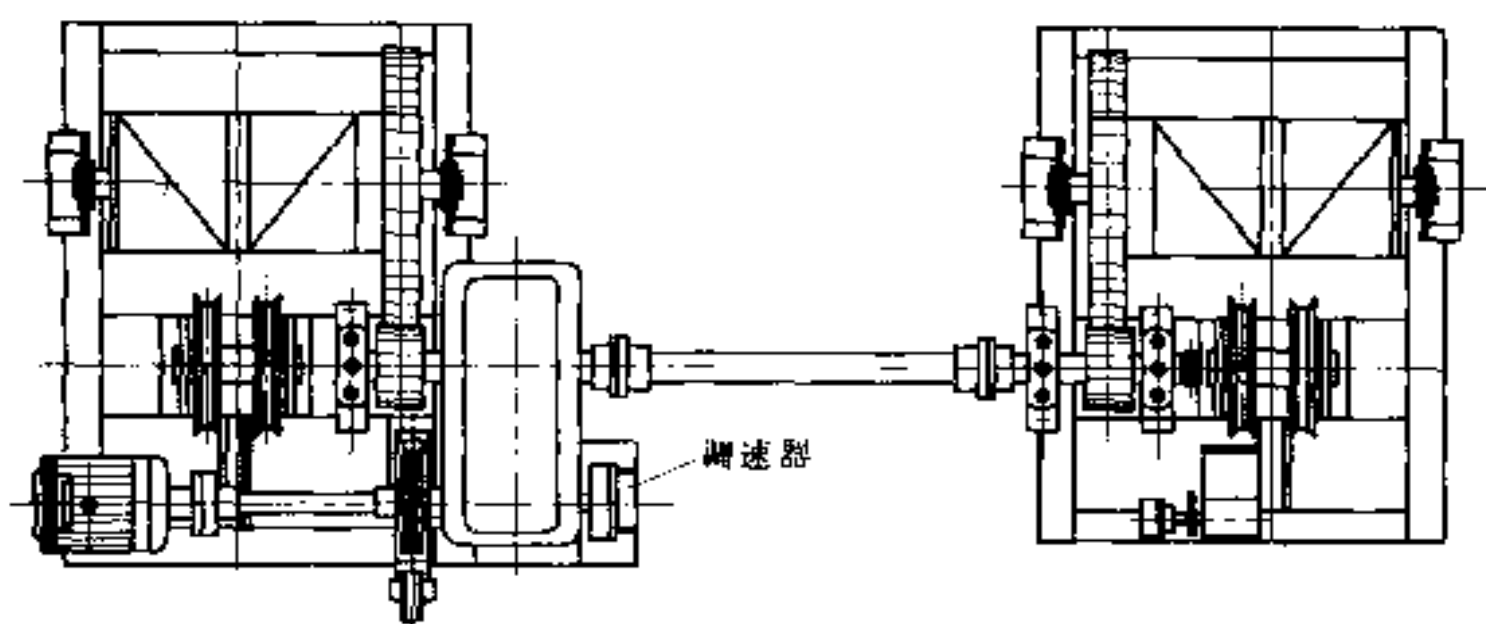


图 5-16 QPK 卷扬式快速闸门启闭机

QPG 系列作为高扬程平面闸门启闭机，与 QP 系列相衔接，其扬程系列有 30m、40m、50m、60m、80m 等几种，SL40-92 标准中对其速度规定了一个范围。

## 二、移动式启闭机

移动式启闭机主要用于操作水工建筑物上多孔共用的闸门或需要移动存放的闸门，其参数除固定式启闭机的参数外，还有轨距、轮距、轨上扬程和轨下扬程（对门式启闭机而言）等，应根据水工建筑物的布置、闸门的运行要求以及启闭机的技术经济指标等因素确定。移动式启闭机的参数和布置变化繁多，难以形成标准系列，这里仅简单介绍其一般机构组成。

移动式启闭机一般由起升机构、运行机构、安全装置、机架、轨道等组成，见图 5-17。

### 1. 起升机构

门式和台车式启闭机起升机构的设计一般与卷扬式启闭机相同。当用一台门机操作数种闸门，而各闸门的启闭力又相差悬殊时，宜设置超载安全装置。起重量在 100kN 以下的小型门机，其起升机构可采用电动葫芦。为便于起吊拉杆、锁锭、机罩和盖板等附属设施，大型门机通常设置副钩，副钩亦可采用电动葫芦。

### 2. 运行机构

移动式启闭机的运行机构有大车运行机构和小车运行机构，

它们都是由电动机、联轴器、制动器、传动轴、减速器、车轮组等零部件组成的。

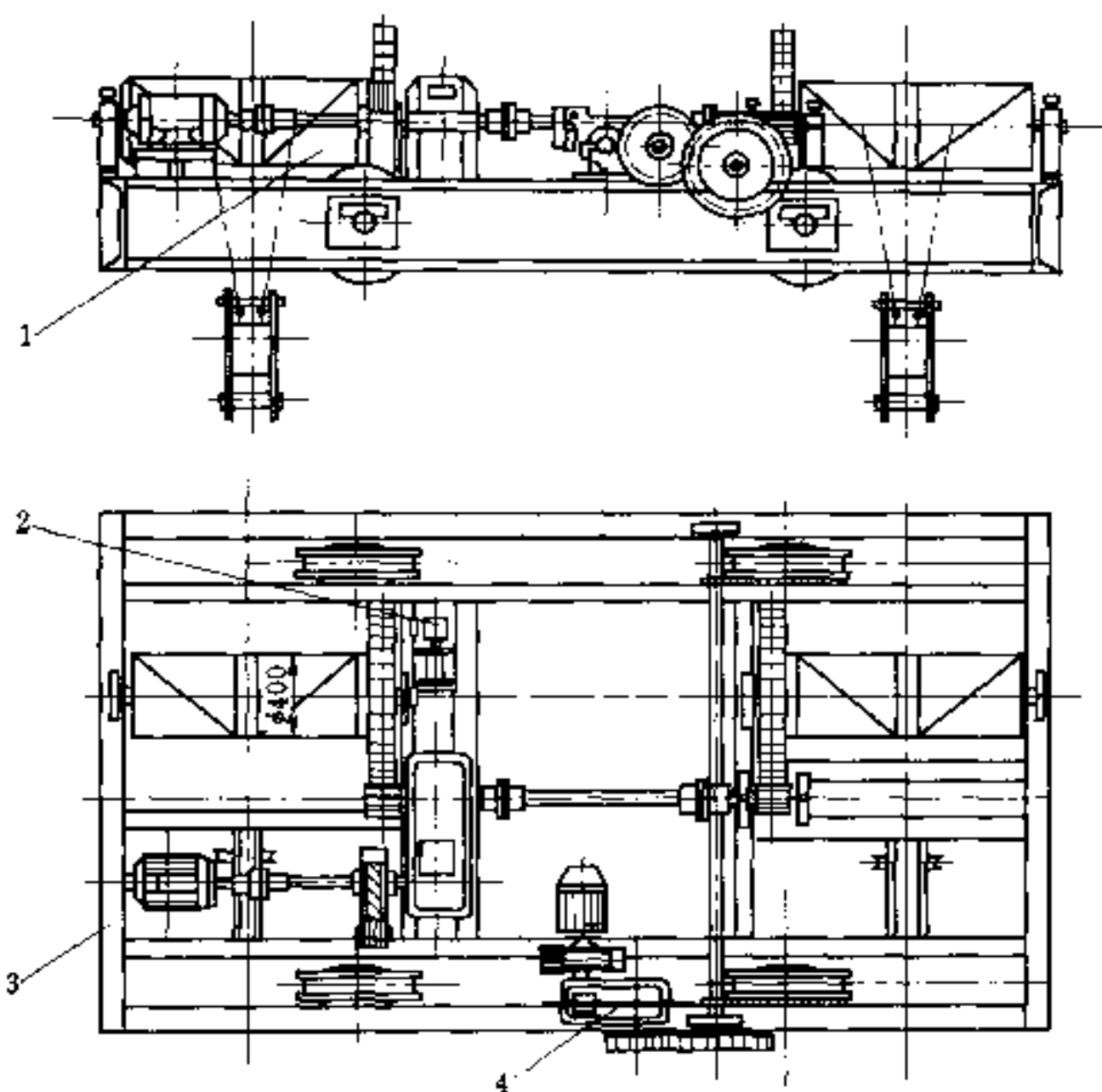


图 5-17 移动式启闭机

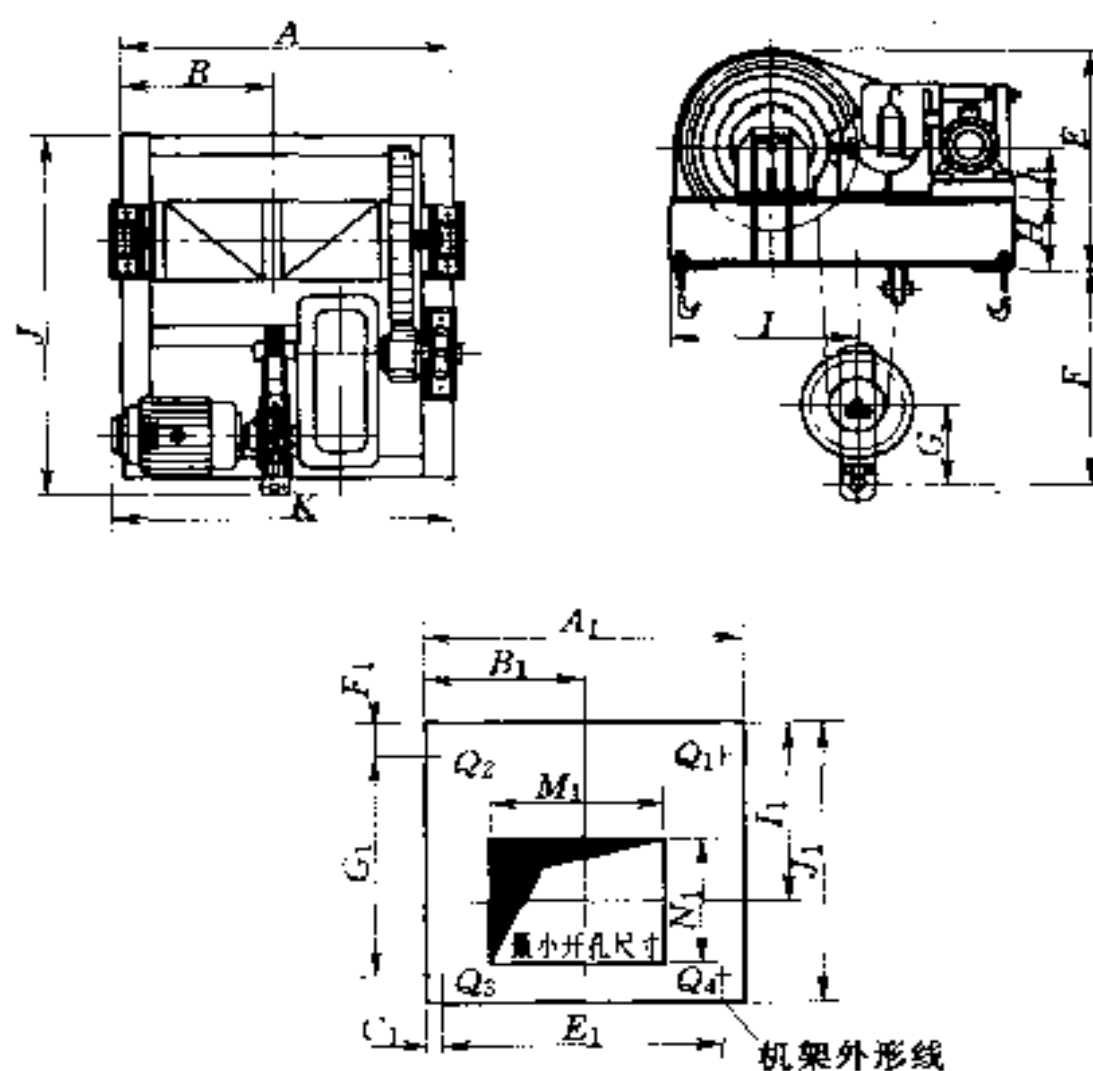
1—起升机构；2—行程指示装置；3—机架；4—运行机构

小车运行机构通常采用集中驱动，大车运行机构一般采用分别驱动，驱动形式通常都是自行式，很少用牵引式。分别驱动的运行机构电动机宜用绕线式，以起到一定的调节作用，保证两侧车轮同步。

运行机构的车轮通常为四个，采用四个以上车轮则应考虑台车等布置措施以使轮压均匀分布。车轮材料多用铸钢制造，轮压大的车轮可用合金铸钢。车轮踏面一般采用双轮缘的圆柱形。有驱动机构的车轮称为主动轮，无驱动机构的车轮称为从动轮，主动轮的数量应不少于从动轮的数量。

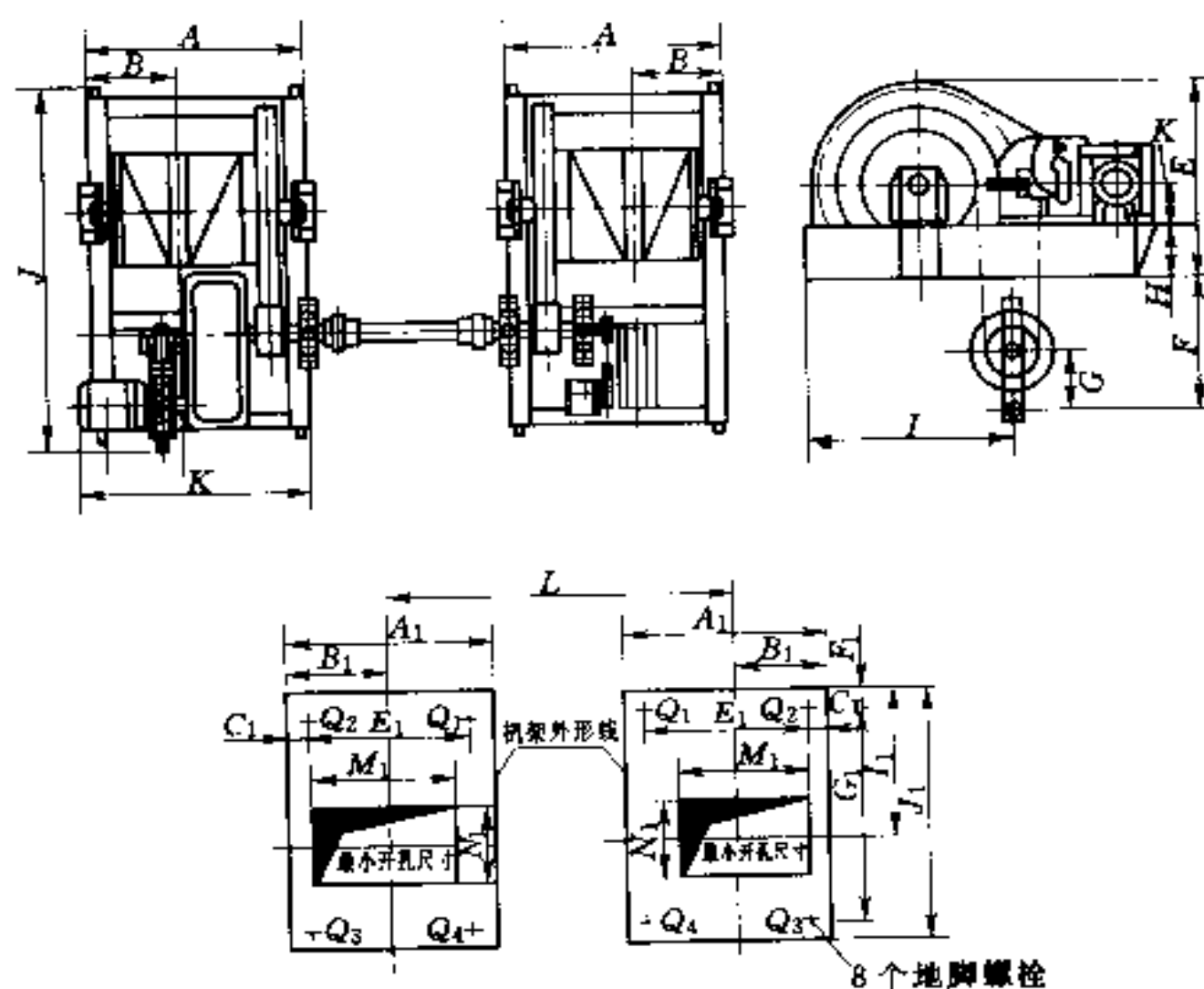
表 5-10

QPQ—50~400 型、QPQ—2×50



(a) QPQ 50~400 型

| 尺寸<br>型号  | A    | B     | E    | F    | G   | H   | h   | I    | J    | K    | A <sub>1</sub> | B <sub>1</sub> |
|-----------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|----------------|----------------|
| QPQ—50    | 989  | 465   | 810  | 950  | 290 | 250 | 180 | 712  | 1473 | 1220 | 989            | 465            |
| QPQ—80    | 1132 | 535.5 | 845  | 1000 | 310 | 275 | 180 | 740  | 1473 | 1220 | 1132           | 536            |
| QPQ—125   | 1258 | 594   | 970  | 1000 | 350 | 300 | 225 | 884  | 1743 | 1340 | 1258           | 594            |
| QPQ—160   | 1308 | 617   | 1070 | 1200 | 380 | 350 | 250 | 990  | 1772 | 1538 | 1308           | 617            |
| QPQ—250   | 1486 | 696   | 1265 | 1200 | 460 | 400 | 280 | 1090 | 2037 | 1766 | 1486           | 696            |
| QPQ—400   | 1682 | 790   | 1373 | 1200 | 500 | 500 | 320 | 1254 | 2273 | 2081 | 1682           | 790            |
| QPQ—2×50  | 989  | 465   | 810  | 950  | 290 | 250 | 180 | 712  | 1473 | 1220 | 989            | 465            |
| QPQ—2×80  | 1132 | 535.5 | 845  | 1000 | 310 | 275 | 180 | 740  | 1473 | 1220 | 1132           | 536            |
| QPQ—2×125 | 1258 | 594   | 970  | 1000 | 350 | 300 | 225 | 884  | 1743 | 1340 | 1258           | 594            |
| QPQ—2×160 | 1308 | 617   | 1070 | 1200 | 380 | 350 | 250 | 990  | 1772 | 1538 | 1308           | 617            |
| QPQ—2×250 | 1486 | 696   | 1265 | 1200 | 460 | 400 | 280 | 1090 | 2037 | 1766 | 1486           | 696            |
| QPQ—2×400 | 1682 | 790   | 1373 | 1200 | 500 | 500 | 320 | 1254 | 2273 | 2081 | 1682           | 790            |

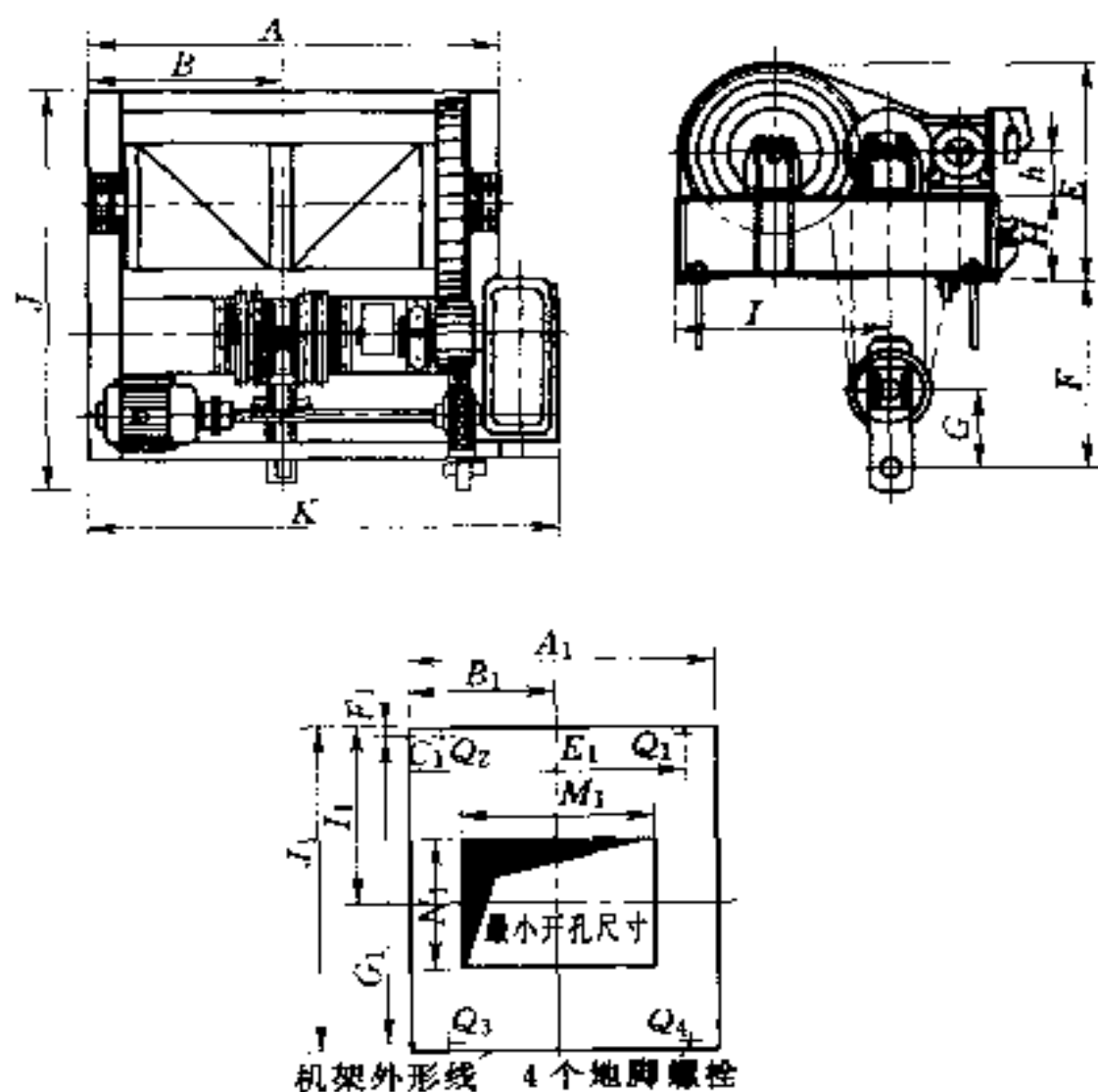


(b) QPQ-2×50~2×400型

| $C_1$ | $E_1$ | $F_1$ | $G_1$ | $I_1$ | $J_1$ | $M_1$ | $N_1$ | $Q_1$ | $Q_2$  | $Q_3$ | $Q_4$ | 地脚螺栓      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|
| 110   | 769   | 25    | 1155  | 712   | 1205  | 620   | 500   | 11.23 | 12.79  | 17.86 | 15.60 | 4—M20×400 |
| 125   | 882   | 30    | 1180  | 740   | 1240  | 700   | 550   | 17.30 | 19.46  | 28.17 | 24.83 | 4—M20×400 |
| 140   | 978   | 30    | 1455  | 884   | 1515  | 860   | 650   | 28.20 | 33.80  | 46.31 | 40.70 | 4—M24×500 |
| 25    | 1258  | 130   | 1414  | 990   | 1674  | 890   | 700   | 36.50 | 39.20  | 58.50 | 52.80 | 4—M24×500 |
| 130   | 1226  | 35    | 1825  | 1090  | 1895  | 950   | 800   | 57.80 | 65.80  | 85.90 | 74.28 | 4—M24×500 |
| 180   | 1322  | 30    | 2000  | 1254  | 2060  | 1300  | 1000  | 92.0  | 104.70 | 143.0 | 124.0 | 4—M30×600 |
| 110   | 769   | 25    | 1155  | 712   | 1205  | 620   | 500   | 11.23 | 12.79  | 17.86 | 15.60 | 8—M20×400 |
| 125   | 882   | 30    | 1180  | 740   | 1240  | 700   | 550   | 17.30 | 19.46  | 28.17 | 24.83 | 8—M20×400 |
| 140   | 978   | 30    | 1455  | 884   | 1515  | 860   | 650   | 28.20 | 33.80  | 46.31 | 40.70 | 8—M24×500 |
| 25    | 1258  | 130   | 1414  | 990   | 1674  | 890   | 700   | 36.50 | 39.20  | 58.50 | 52.80 | 8—M24×500 |
| 130   | 1226  | 35    | 1825  | 1090  | 1895  | 950   | 800   | 57.80 | 65.80  | 85.90 | 74.28 | 8—M24×500 |
| 180   | 1322  | 30    | 2000  | 1254  | 2060  | 1300  | 1000  | 92.0  | 104.70 | 143.0 | 124.0 | 8—M30×600 |

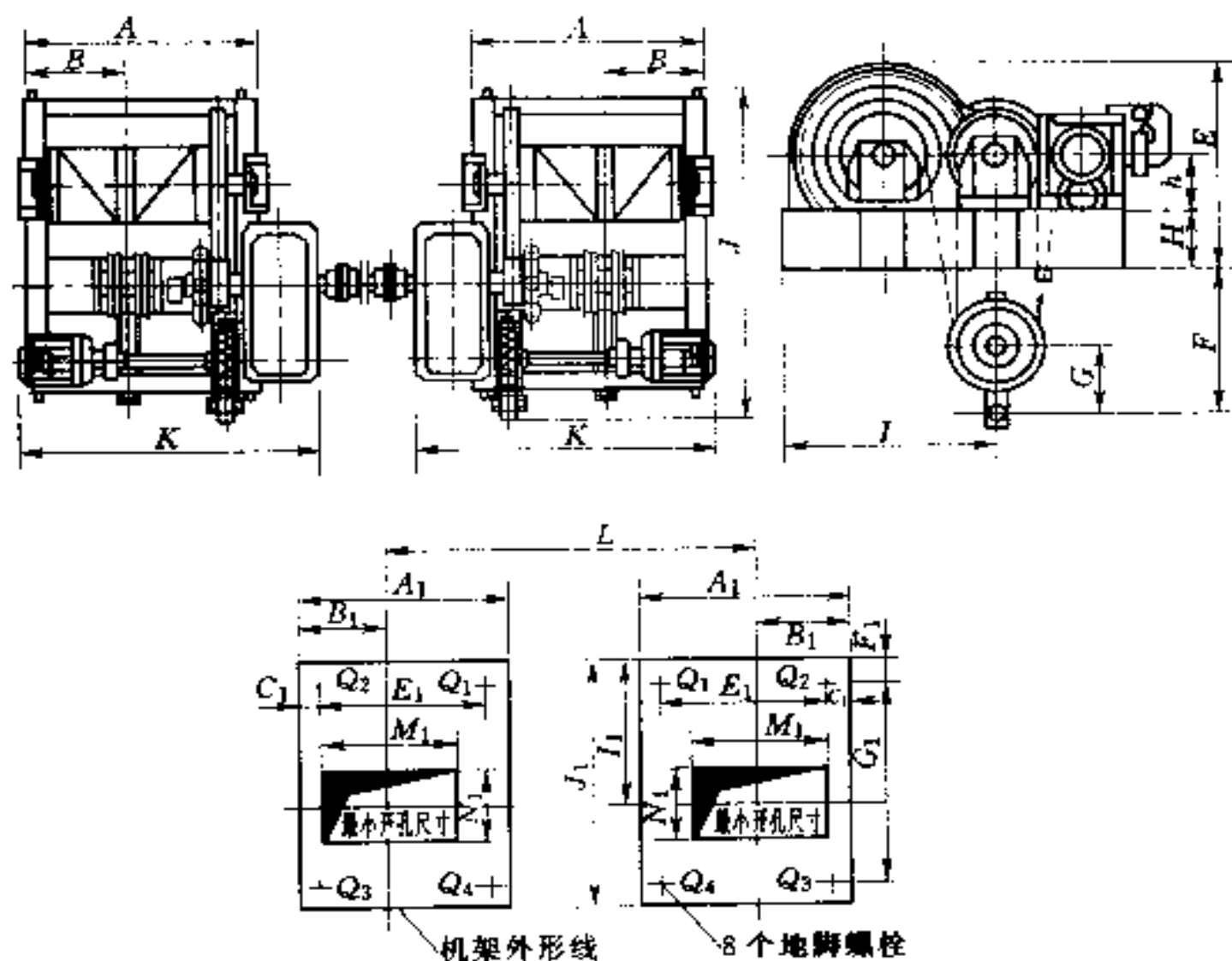
表 5-11

QPQ—630~1250 型及



(a) QPQ—630~1250 型

| 尺寸<br>型号   | A    | B    | E    | F    | G   | H   | h   | I    | J    | K    | A <sub>1</sub> | B <sub>1</sub> |
|------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|----------------|----------------|
| QPQ—630    | 2442 | 1163 | 1580 | 1450 | 550 | 600 | 325 | 1456 | 2475 | 2767 | 2442           | 1163           |
| QPQ—800    | 2540 | 1200 | 1645 | 2400 | 600 | 620 | 315 | 1550 | 2569 | 2860 | 2540           | 1200           |
| QPQ—1000   | 2895 | 1378 | 1875 | 2600 | 660 | 820 | 315 | 1585 | 2604 | 3215 | 2895           | 1378           |
| QPQ—1250   | 3155 | 1514 | 1965 | 2800 | 750 | 820 | 315 | 1785 | 2814 | 3475 | 3155           | 1514           |
| QPQ—2×630  | 2442 | 1163 | 1580 | 1450 | 550 | 600 | 325 | 1456 | 2475 | 2767 | 2442           | 1163           |
| QPQ—2×800  | 2540 | 1200 | 1645 | 2400 | 600 | 620 | 315 | 1550 | 2569 | 2860 | 2540           | 1200           |
| QPQ—2×1000 | 2895 | 1378 | 1875 | 2600 | 660 | 820 | 315 | 1585 | 2604 | 3215 | 2895           | 1378           |
| QPQ—2×1250 | 3155 | 1514 | 1965 | 2800 | 750 | 820 | 315 | 1785 | 2814 | 3475 | 3155           | 1514           |



(b) QPQ2×630~2×1250 型

| $C_1$ | $E_1$ | $F_1$ | $G_1$ | $I_1$ | $J_1$ | $M_1$ | $N_1$ | $Q_1$  | $Q_2$  | $Q_3$  | $Q_4$  | 地脚螺栓      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 56    | 2330  | 76    | 2060  | 1456  | 2211  | 1800  | 1050  | 123.8  | 134.12 | 238.5  | 225.5  | 4—M30×600 |
| 60    | 2420  | 190   | 1955  | 1550  | 2335  | 1700  | 1000  | 154.30 | 172.30 | 333.20 | 277.20 | 4—M36×630 |
| 60    | 2775  | 190   | 2010  | 1585  | 2390  | 2000  | 1100  | 193.80 | 213.80 | 413.70 | 373.70 | 4—M36×630 |
| 50    | 3055  | 190   | 2220  | 1785  | 2600  | 2300  | 1100  | 229.30 | 247.30 | 529.20 | 486.20 | 4—M36×630 |
| 56    | 2330  | 76    | 2060  | 1456  | 2211  | 1800  | 1050  | 123.8  | 134.12 | 238.5  | 225.5  | 8—M30×600 |
| 60    | 2420  | 190   | 1955  | 1550  | 2335  | 1700  | 1000  | 154.30 | 172.30 | 333.20 | 277.20 | 8—M36×630 |
| 60    | 2775  | 190   | 2010  | 1585  | 2390  | 2000  | 1100  | 193.80 | 213.80 | 413.70 | 373.70 | 8—M36×630 |
| 50    | 3055  | 190   | 2220  | 1785  | 2600  | 2300  | 1100  | 229.30 | 247.30 | 529.20 | 486.20 | 8—M36×630 |

表 5-12 QPK 型卷扬式快速闸门启闭机基本参数

| 启 闭 机       |                  | 持住力/启门力<br>(kN)       | 快速闭<br>门高度<br>/启门<br>高度<br>(m) | 快速闭门<br>速度/启门<br>速度<br>(m/min) | 吊 距<br>(m) | 整机重<br>(不大于)<br>(kg) |
|-------------|------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|----------------------|
| 类别          | 型 号              |                       |                                |                                |            |                      |
| 单<br>吊<br>点 | 单<br>独<br>驱<br>动 | QPK—6/6—8/8           | 60/60                          | 8/8                            | 4.0/2.2    | 750                  |
|             |                  | QPK—10/10—8/8         | 100/100                        | 8/8                            | 4.0/2.2    | 1080                 |
|             |                  | QPK—16/16—8/8         | 160/160                        | 8/8                            | 4.0/2.2    | 1810                 |
|             |                  | QPK—25/25—8/9         | 250/250                        | 8/9                            | 4.0/2.1    | 2610                 |
|             |                  | QPK—40/40—8/9         | 400/400                        | 8/9                            | 4.0/1.8    | 4110                 |
|             |                  | QPK 63/30—8/10        | 630/300                        | 8/10                           | 4.0/2.1    | 6180                 |
|             |                  | QPK—80/40—9/10        | 800/400                        | 9/10                           | 4.5/2.4    | 7850                 |
|             |                  | QPK—100/50—9/11       | 1000/500                       | 9/11                           | 4.5/2.4    | 10100                |
|             |                  | QPK—125/63—9/12       | 1250/630                       | 9/12                           | 4.5/2.6    | 12430                |
|             |                  | QPK—160/80 10/13      | 1600/800                       | 10/13                          | 5.0/2.4    | 17800                |
|             |                  | QPK—200/100—10/14     | 2000/1000                      | 10/14                          | 5.0/2.4    | 21950                |
| 双<br>吊<br>点 | 集<br>中<br>驱<br>动 | QPK—2×6/2×6—8/8       | 2×60/2×60                      | 8/8                            | 2.0~2.5    | 1500                 |
|             |                  | QPK 2×10/2×10—8/8     | 2×100/2×100                    | 8/8                            | 2.0~2.5    | 2160                 |
|             |                  | QPK—2×16/2×16—8/8     | 2×160/2×160                    | 8/8                            | 2.0~2.5    | 3620                 |
|             |                  | QPK—2×25/2×25 8/9     | 2×250/2×250                    | 8/9                            | 2.0~2.5    | 5300                 |
|             |                  | QPK—2×40/2×40 8/9     | 2×400/2×400                    | 8/9                            | 1.5~2.0    | 8220                 |
|             | 单<br>独<br>驱<br>动 | QPK—2×63/2×30—8/10    | 2×630/2×300                    | 8/10                           | 1.5~2.0    | 12370                |
|             |                  | QPK—2×80/2×40—9/10    | 2×800/2×400                    | 9/10                           | 1.5~2.0    | 15700                |
|             |                  | QPK—2×100/2×50—9/11   | 2×1000/2×500                   | 9/11                           | 1.5~2.0    | 20200                |
|             |                  | QPK—2×125/2×63—9/12   | 2×1250/2×630                   | 9/12                           | 1.5~2.0    | 24860                |
|             |                  | QPK 2×160/2×80—10/13  | 2×1600/2×800                   | 10/13                          | 1.5~2.0    | 35600                |
|             |                  | QPK—2×200/2×100—10/14 | 2×2000/2×1000                  | 10/14                          | 1.5~2.0    | 44500                |

### 3. 安全保护装置

移动式启闭机的安全保护装置除固定式启闭机所有的电器保护装置、制动装置、荷载限制器、行程限制器外,还包括缓冲器、夹轨器、锚定装置、风速仪等。

缓冲器用来缓和启闭机与轨道终端挡板或轨道上的其他启闭机相碰撞时的冲击,起到吸能作用,运行速度小的启闭机一般采用橡胶缓冲器,速度快或自重较大的启闭机可采用弹簧缓冲器。

室外作业的移动式启闭机应装设夹轨器和锚定装置。夹轨器用于防止启闭机在工作时受风荷载或其他荷载的作用而移动，通常采用的有手动式、电动弹簧式和重锤式等。锚定装置用于防止启闭机在非工作时受风荷载或其他荷载的作用而移动，锚定装置应设电气保护装置，在锚定启闭机时切断电源，防止误操作。

风速仪设在室外作业的移动式启闭机的上部不挡风处。当风速大于工作极限风速时，发出停止作业的警报，并切断运行机构的电源。

#### 4. 机架和轨道

机架用于安装各机构的部件，并具备足够的强度和刚度，保证启闭机正常运行。机架一般做成整体式结构，小容量启闭机的机架多用型钢，大、中容量的机架则用焊接工字梁或箱形梁。门式启闭机的机架又称门架，其主框架通常采用封闭箱形截面，使其造型美观，工艺性好。门架的重量占整台启闭机自重的大部分，因此在满足使用要求和安全的情况下，应尽量减少门架的尺寸，如采取闸门分节出槽以降低门架高度等。

轨道通常采用轻型钢轨和起重机专用钢轨，小容量的小车也可采用方钢。轨道一般是直线布置，但根据建筑物的要求也可布置成曲线轨道。

### 第三节 液 压 式 启 闭 机

#### 一、液压启闭机的组成和工作原理

液压启闭机一般由液压系统和液压缸组成。在液压系统的控制下，液压缸内的活塞沿缸体内壁做轴向往复运动，从而带动连接在活塞上的连杆和闸门做直线运动，以达到开启、关闭孔口的目的。

液压系统包括动力装置、控制调节装置、辅助装置等，见图5-18。多套启闭机可共用一个液压系统。

动力装置一般为液压泵，它把机械能转化为液压能。液压泵

一般采用容积式泵，如叶片泵和柱塞泵。叶片泵和柱塞泵有结构紧凑，运转平稳，噪音较小，使用寿命长等优点。柱塞泵虽然价格较高，但可以得到高压、大流量，且流量可调。近年来国内液压启闭机普遍采用中高压，所以大多数采用柱塞泵。另外，因其重要性，液压启闭机的液压系统一般设置两套液压泵，互为备用。

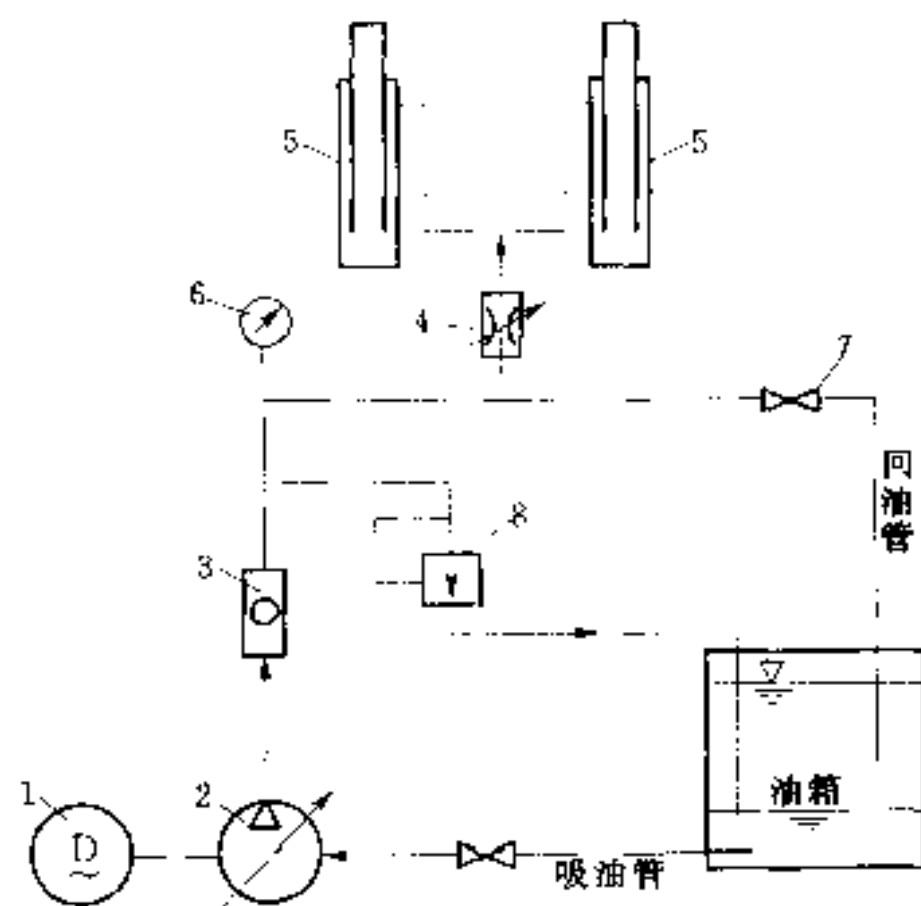


图 5 18 简单的液压系统

1—电动机；2—液压泵；3—止回阀；4—节流阀；  
5—液压缸；6—压力表；7—截止阀；8—溢流阀

控制调节装置是指液压控制阀组，包括节流阀、换向阀、溢流阀等阀组，其作用是对液压油的流量、方向、压力等方面各自起控制调节作用，以实现对液压系统的各种性能要求。启闭机上液压控制阀大多数是标准元件，并普遍采用插装技术。插装阀具有组合机能强，集成度高，噪音低，密封性好，机构紧凑，便于维护等优点。选择不同结构及形式的先导控制阀、控制盖及集成块与插装件组合，便可获得具有换向、调压、调速等功能的插装阀组。双吊点的液压启闭机因不能像卷扬式启闭机一样采用机械同步，故控制阀组需考虑同步措施。

辅助装置包括油箱、油管、管接头、压力表、滤油器等。油箱的用途是储油和散热，并能沉淀油中杂质，分离油中的空气和水分等。油管、管接头把动力装置、调节控制装置、液压缸连接起来，组成一个完整的液压回路。液压油中杂质会使运动零件磨损，增加泄露和减少元件的寿命，甚至堵塞阀组等，影响液压系统的使用，设置滤油器对液压油进行过滤是十分必要的。

液压缸是液压传动中的执行元件，把液压油的液压能转化为机械能。液压缸由缸体、端盖、活塞、活塞杆、吊头等零件组成，见图 5-19。根据液压缸内压力油的作用方向可分单作用液压缸和双作用液压缸两类。单作用液压缸通常是柱塞式或者套筒式，也可以是活塞式。双作用液压缸只有活塞式，活塞式液压缸形成两个油腔，两个油腔都可以进出压力油。

## 二、特点

液压传动是利用液体的压力能来传递能量的一种传动方式。与其他启闭机相比，采用液压传动的液压启闭机有以下优点：

- (1) 油缸结构简单，传动平稳，液压传动与电气控制结合，便于实现自动化。
- (2) 液压系统中的液压元件有标准化、系列化产品，可供选用。元件自动润滑，磨损小，效率高，寿命长。
- (3) 启闭机结构紧凑，体积小，承载能力却很大，重量与同等承载能力的机械传动的启闭机相比明显减轻。
- (4) 易于防止过载，可实现无级调速。
- (5) 启闭机具有缓冲性能，可减小闸门的振动。

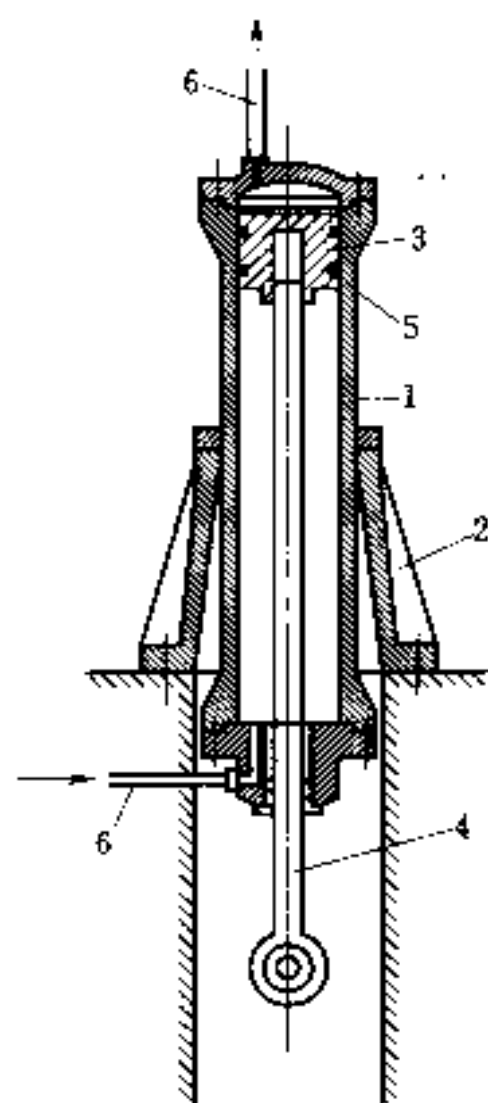


图 5-19 液压缸示意图

1—缸体；2—支座；3—活塞；  
4—活塞杆（接闸门）；5—油封；6—油管（接液压系统）

(6) 在失去电源的事故情况下, 可使闸门快速下降, 并比用飞摆调速器的 QPK 型卷扬式启闭机更安全可靠。

液压启闭机还有以下缺点:

(1) 在液压元件与油缸的相对运动表面, 不可避免地会有泄漏。因此对加工精度要求较高。

(2) 双吊点的启闭机的吊点同步性相对差一些。

(3) 对于启门高度大的启闭机, 油缸行程较大, 缸体及活塞杆都比较长, 需要专用机床锻造和加工, 一般工厂有困难。特别是对于大容量长行程的油缸更是如此。在目前国内的制造水平下造价相对略高些。

### 三、液压启闭机系列及布置形式

液压启闭机由于其传动效率高、运行平稳、启闭容量大、结构紧凑及用钢量少等优点得到日益广泛的应用。在国外, 发达国家由于人力资源相对有限, 液压启闭机机械加工量相对少, 产品质量好, 水利工程中液压启闭机应用非常普遍。在国内, 已经有几家专业生产厂, 经过近 30 年的发展, 技术日渐成熟, 产品质量进一步提高, 系列发展日趋完善, 与国外产品的差距相对缩小, 液压启闭机的优势越来越明显, 在水利水电工程中应用日渐普遍。近期国内大型水利水电工程普遍采用液压启闭机, 如三峡水利枢纽、小浪底水利枢纽等。

采用双吊点液压启闭机必须考虑同步的问题。一般应从以下几个方面考虑:

(1) 液压启闭机的液压系统采用同步装置和同步措施, 如油路对称布置、增加同步阀、采用精密行程测量系统和流量控制阀组等。

(2) 加强闸门自身及吊梁的刚度, 采用较好的导向装置及合理的间隙等, 可保证闸门在门槽中升降顺畅, 减少卡阻现象, 并可机械强迫双吊点同步。

(3) 保证制造安装的精度也很重要, 尤其是两侧液压缸的相对误差。

液压启闭机的广泛使用,推动了启闭机的标准化和系列化,我国相继颁发了 SD113—83《水利平面闸门液压启闭机基本参数》、SD114—83《水利平面快速闸门液压启闭机基本参数》、SD207—87《QPPY 系列液压启闭机》、SL39—92《露顶式弧形闸门液压启闭机系列标准》等标准。

QPPY 系列和 QPKY 系列分别为普通平面闸门液压启闭机系列和快速平面闸门液压启闭机系列,属中小型系列,其工作压力也偏低。大型启闭机系列也在拟议中,其中许多型号已经在工程中使用过。目前国内液压启闭机最大容量已达 8000N。另外,深孔式弧形闸门液压启闭机(QHISY 系列)、人字闸门卧式液压启闭机(QRWY 系列)等在工程实践中已大量使用,其标准也正在修订中。

#### (一) 平面闸门液压启闭机 QPPY 系列

QPPY 系列为平面闸门液压启闭机系列,按液压缸的结构形式和安装方式可分为 QPPY I 型和 QPPY II 型。

##### 1. QPPY I 型

QPPY I 型为柱塞式液压缸,适用于依靠自重(或加重)关闭的闸门,一般为双吊点顶升式布置,其液压缸一般安装在闸墩的预留孔内,见图 5-20。对于多孔闸的中墩,需要安装两条液压缸,如图 5-21(a)所示。有时为减少中墩的厚度,可以将闸门交错布置,如图 5-21(b)所示,但闸墩长度需加长。液压缸与闸门的连接可根据具体情况,选用铰接和固接两种方式,铰接时液压缸柱塞头采用球形轴承或铰形螺母与闸门吊梁连接,以适应安装误差;固接时,柱塞头部加工成螺纹,用螺母固定在闸门吊梁上。

QPPY I 型液压启闭机由于不需要启闭机工作排架,其液压缸加工相对较简单,可降低造价,此外还具有安装方便、维护容易等优点。

QPPY I 型液压启闭机基本参数和安装尺寸见表 5-13、表 5-14。

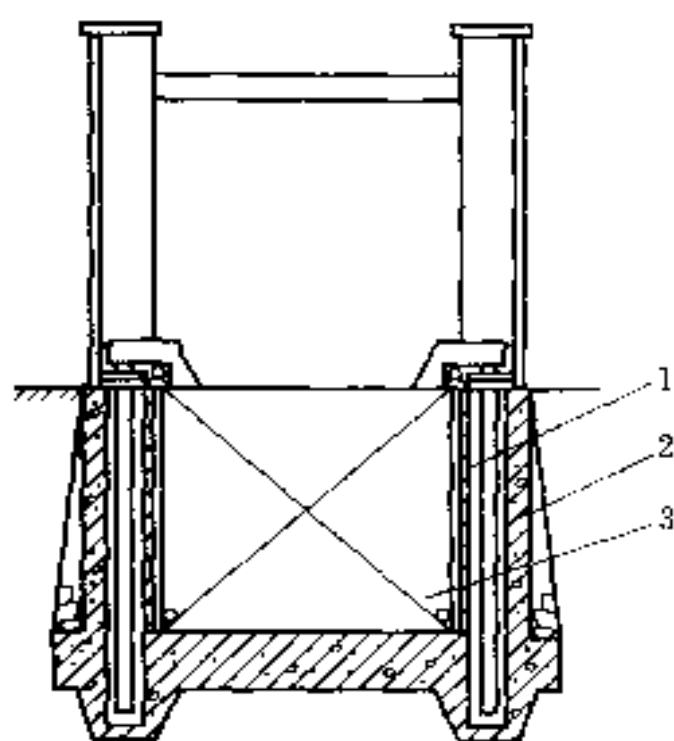


图 5-20 QPPY I 型液压  
启闭机布置图

1—液压缸；2—安装孔；3—闸门

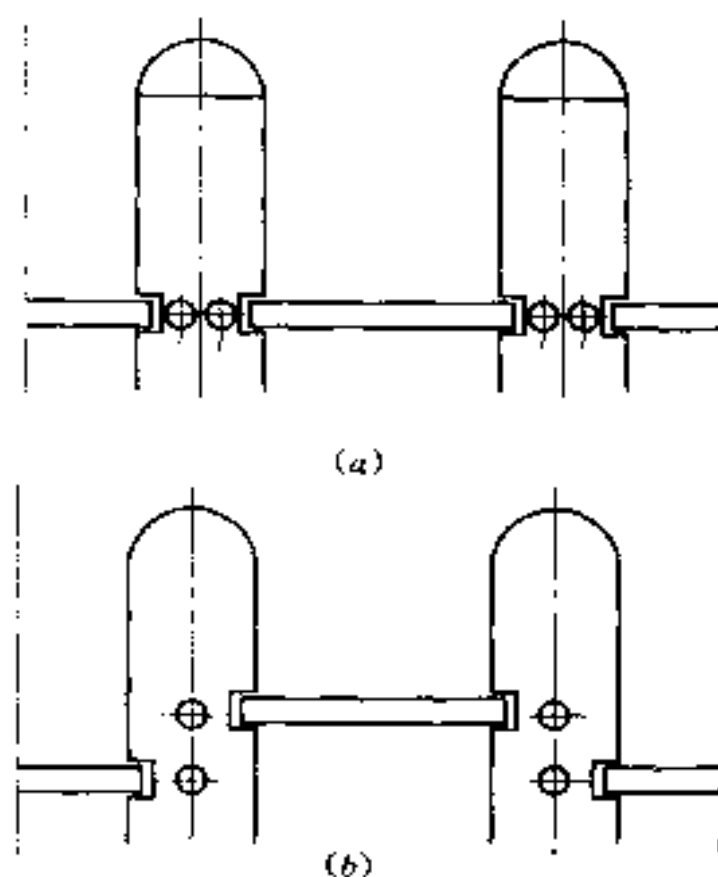


图 5-21 QPPY I 型液压启闭机  
安装排列示意图

表 5-13 QPPY I 系列水利平面闸门液压启闭机基本参数

| 启闭机型号              | 启门力<br>(kN) | 启门扬程<br>(m) | 柱塞直径<br>(mm) | 工作压力<br>(MPa) | 启门速度<br>(m/min)                                  |
|--------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------|
| QPPY I —2×6—8      | 2×60        | 2~8         | 80           | 11.69         | 由配套油<br>泵的规格和<br>同时起升的<br>闸门数量决<br>定，一般不<br>大于 5 |
| QPPY I —2×8—8      | 2×80        | 2~8         | 90           | 12.33         |                                                  |
| QPPY I —2×10—8     | 2×100       | 2~8         | 100          | 12.47         |                                                  |
| QPPY I —2×12.5—8   | 2×125       | 2~8         | 120          | 10.83         |                                                  |
| QPPY I —2×16—8     | 2×160       | 2~8         | 140          | 10.19         |                                                  |
| QPPY I —2×20—8     | 2×200       | 2~8         | 150          | 11.09         |                                                  |
| QPPY I —2×25—8     | 2×250       | 2~8         | 160          | 12.19         |                                                  |
| QPPY I —2×32—8     | 2×320       | 2~8         | 180          | 12.32         |                                                  |
| QPPY I —2×40—8     | 2×400       | 2~8         | 210          | 11.32         |                                                  |
| QPPY I —2×50—8     | 2×500       | 2~8         | 230          | 11.79         |                                                  |
| QPPY I —2×63—11.5  | 2×630       | 3~11.5      | 260          | 11.63         |                                                  |
| QPPY I —2×80—11.5  | 2×800       | 3~11.5      | 280          | 12.73         |                                                  |
| QPPY I —2×100—11.5 | 2×1000      | 3~11.5      | 300          | 13.86         |                                                  |

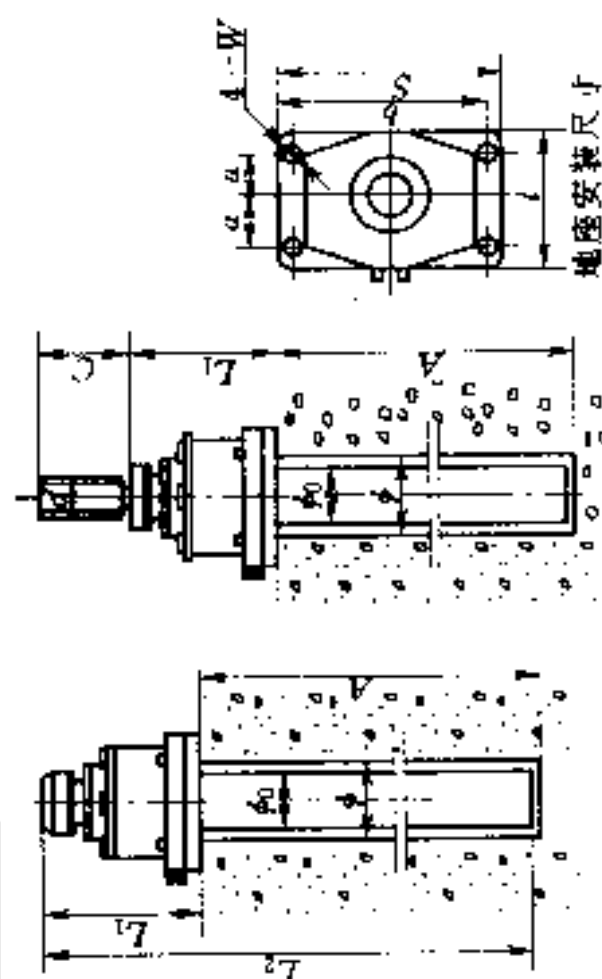
## 2. QPPY II 型

QPPY II 型为活塞式液压缸，可双向作用，既可提供启门力，又可产生闭门力。一般为单吊点布置，也可双吊点布置，其吊点

表 5-14

QPPY I 系列水利平面闸门液压启闭机液压缸安装尺寸

尺寸单位: mm



| 启闭机型号               | $L_1$ | $L_2$    | $A$      | $\phi_0$ | $\phi$ | $2a$ | $b$ | $L$ | $S$ | $W$ | 地脚螺栓<br>GB799—76 | $C$ | $d$    |
|---------------------|-------|----------|----------|----------|--------|------|-----|-----|-----|-----|------------------|-----|--------|
| QPPY I - 2×6—8      | 390   | 355+ $L$ | 265+ $L$ | 127      | 180    | 170  | 320 | 270 | 380 | φ24 | M20×300          | 300 | M30×2  |
| QPPY I - 2×8—8      | 415   | 385+ $L$ | 270+ $L$ | 140      | 190    | 180  | 330 | 280 | 390 | φ24 | M20×300          | 300 | M30×2  |
| QPPY I - 2×10—8     | 436   | 416+ $L$ | 280+ $L$ | 152      | 200    | 190  | 340 | 290 | 400 | φ24 | M20×300          | 360 | M30×3  |
| QPPY I 2×12.5—8     | 462   | 442+ $L$ | 280+ $L$ | 168      | 220    | 210  | 360 | 310 | 420 | φ24 | M20×300          | 400 | M50×3  |
| QPPY I - 2×16—8     | 518   | 468+ $L$ | 250+ $L$ | 194      | 240    | 235  | 385 | 335 | 445 | φ24 | M20×300          | 490 | M60×3  |
| QPPY I - 2×20—8     | 528   | 478+ $L$ | 250+ $L$ | 203      | 250    | 265  | 425 | 365 | 495 | φ28 | M24×300          | 520 | M60×3  |
| QPPY I - 2×25—8     | 549   | 499+ $L$ | 250+ $L$ | 219      | 270    | 275  | 435 | 375 | 505 | φ28 | M24×300          | 560 | M80×3  |
| QPPY I - 2×32—8     | 618   | 568+ $L$ | 250+ $L$ | 245      | 300    | 330  | 490 | 430 | 560 | φ28 | M24×300          | 560 | M80×3  |
| QPPY I - 2×40—8     | 625   | 595+ $L$ | 270+ $L$ | 273      | 320    | 360  | 520 | 460 | 590 | φ28 | M24×300          | 600 | M90×3  |
| QPPY I - 2×50—8     | 655   | 625+ $L$ | 270+ $L$ | 299      | 350    | 400  | 560 | 500 | 630 | φ28 | M24×300          | 600 | M100×3 |
| QPPY I - 2×63—11.5  | 749   | 789+ $L$ | 340+ $L$ | 325      | 380    | 440  | 610 | 540 | 690 | φ35 | M30×400          | 600 | M110×3 |
| QPPY I - 2×80—11.5  | 762   | 802+ $L$ | 340+ $L$ | 351      | 400    | 520  | 690 | 620 | 770 | φ35 | M30×400          | 720 | M110×3 |
| QPPY I - 2×100—11.5 | 768   | 813+ $L$ | 345+ $L$ | 377      | 430    | 530  | 710 | 630 | 780 | φ35 | M30×490          | 720 | M110×3 |

距一般无严格的限制。

QPPY I 型液压缸一般采用地脚螺栓固定在启闭机工作排架上，见图 5-22。

液压缸通过活塞杆、吊杆与闸门的吊耳用销轴连接。有时为了补偿安装调整的误差，改善油缸受力条件，可在活塞杆的吊头与闸门连接处采用球形轴承。

QPPY I 型液压启闭机基本参数和安装尺寸见表 5-15、表 5-16。

还有一种把液压缸的缸体与闸门连接，活塞杆铰接在上部基础上的机座上，即所谓的倒挂式布置，见图 5-23，其液压缸的形式与 QPPY I 型相同，又称为 QPPYD 型。这种布置把缸体的部分长度布置在闸门内，避免像 QPPY I 型那样液压缸高出启闭机排架，适用于空间尺寸受限制的场所，但其检修和安装不太方便。

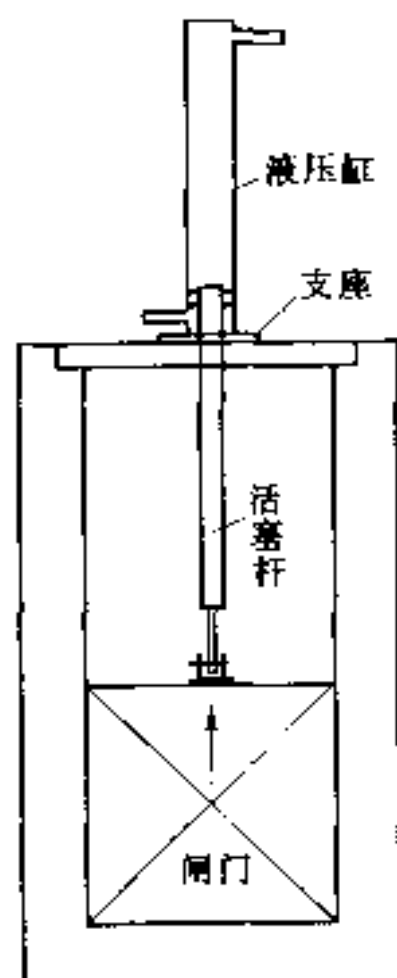


图 5-22 QPPY I 液压  
启闭机布置图

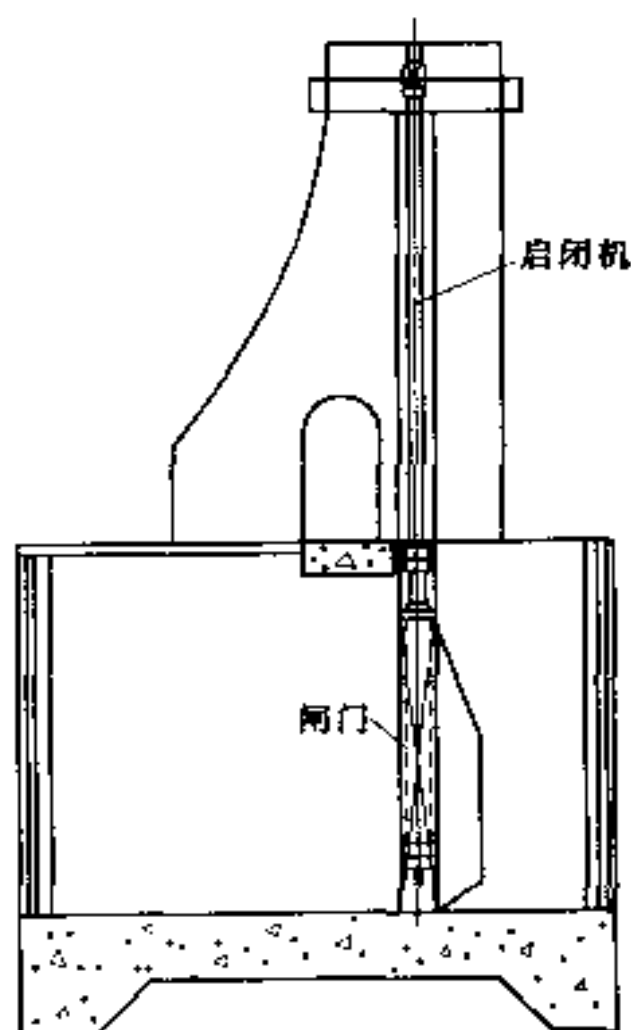


图 5-23 QPPYD 液压  
启闭机布置图

表 5-15 QPPY II 系列水利平面闸门液压启闭机基本参数

| 启闭机型号                                     | 启门力<br>(kN)                  | 启门<br>扬程<br>(m) | 活 塞<br>杆 径<br>(mm) | 油缸<br>内 径<br>(mm) | 工 作<br>压 力<br>(MPa) | 最大闭门力<br>最小闭门力<br>(kgf) | 启门<br>速 度<br>(m/min) |
|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| QPPY I — $\frac{6}{2 \times 6}$ — 8       | $\frac{60}{2 \times 60}$     | 2~8             | 50                 | 100               | 9.99                | $\frac{6655}{5800}$     | ≤5                   |
| QPPY I — $\frac{8}{2 \times 8}$ — 8       | $\frac{80}{2 \times 80}$     | 2~8             | 50                 | 110               | 10.39               | $\frac{6532}{580}$      |                      |
| QPPY I — $\frac{10}{2 \times 10}$ — 8     | $\frac{100}{2 \times 100}$   | 2~8             | 63                 | 125               | 10.70               | $\frac{13376}{1452}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{12.5}{2 \times 12.5}$ — 8 | $\frac{125}{2 \times 125}$   | 2~8             | 70                 | 140               | 10.60               | $\frac{16625}{2180}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{16}{2 \times 16}$ — 8     | $\frac{160}{2 \times 160}$   | 2~8             | 70                 | 160               | 9.070               | $\frac{20106}{2180}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{20}{2 \times 20}$         | $\frac{200}{2 \times 200}$   | 2~8             | 90                 | 180               | 10.29               | $\frac{26719}{5924}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{25}{2 \times 25}$         | $\frac{250}{2 \times 250}$   | 2~8             | 100                | 200               | 10.4                | $\frac{3330}{8873}$     |                      |
| QPPY I — $\frac{32}{2 \times 32}$         | $\frac{320}{2 \times 320}$   | 2~8             | 100                | 220               | 10.33               | $\frac{40294}{8780}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{40}{2 \times 40}$         | $\frac{400}{2 \times 400}$   | 2~8             | 110                | 250               | 10.00               | $\frac{50069}{12734}$   |                      |
| QPPY I — $\frac{50}{2 \times 50}$         | $\frac{500}{2 \times 500}$   | 2~8             | 120                | 300               | 8.30                | $\frac{59871}{17702}$   |                      |
| QPPY I — $\frac{63}{2 \times 63}$         | $\frac{630}{2 \times 630}$   | 3~11.5          | 120                | 300               | 10.39               | $\frac{74927}{9105}$    |                      |
| QPPY I — $\frac{80}{2 \times 80}$         | $\frac{800}{2 \times 800}$   | 3~11.5          | 140                | 320               | 12.10               | $\frac{99325}{16718}$   |                      |
| QPPY I — $\frac{100}{2 \times 100}$       | $\frac{1000}{2 \times 1000}$ | 3~11.5          | 140                | 320               | 15.09               | $\frac{123854}{16718}$  |                      |

注 启门扬程按差级 0.5m 分档；最大闭门力按最小扬程计算，最小闭门力按最大扬程计算。

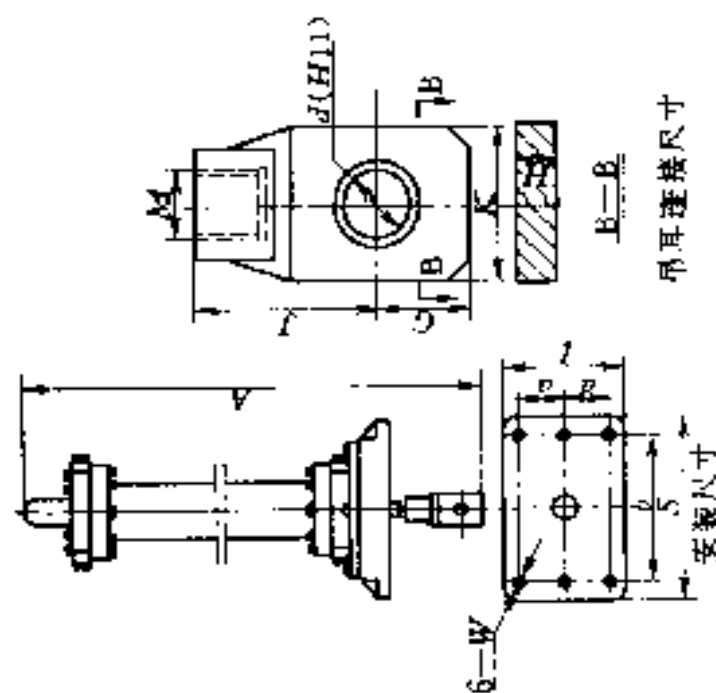
## (二) 快速闸门液压启闭机 QPKY 系列

QPKY 系列为快速平面闸门液压启闭机系列，一般为单吊

表 5-16

QPPY II 系列水利平面闸门液压启闭机液压缸安装尺寸

(单位: mm)



| 启闭机型号             | A      | a   | b    | S    | l   | K   | G   | H   | M      | d   | 地脚螺栓<br>GB799 · 76 | W   |
|-------------------|--------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|--------------------|-----|
| QPPY I - 6-8      | 903+L  | 150 | 520  | 570  | 350 | 104 | 60  | 40  | M40×2  | 40  | M20×300            | φ19 |
| QPPY I - 8-8      | 945+L  | 160 | 550  | 600  | 370 | 130 | 70  | 50  | M40×2  | 50  | M20×300            | φ19 |
| QPPY I - 10-8     | 978+L  | 170 | 568  | 628  | 400 | 130 | 70  | 50  | M50×2  | 50  | M20×300            | φ24 |
| QPPY I - 12.5-8   | 1077+L | 182 | 636  | 692  | 420 | 156 | 85  | 50  | M50×2  | 60  | M20×300            | φ24 |
| QPPY I - 16-8     | 1095+L | 195 | 674  | 738  | 500 | 156 | 85  | 50  | M50×2  | 60  | M20×300            | φ28 |
| QPPY I - 20-8     | 1160+L | 215 | 760  | 830  | 500 | 182 | 100 | 60  | M60×2  | 70  | M24×300            | φ28 |
| QPPY I - 25-8     | 1273+L | 225 | 830  | 930  | 550 | 208 | 115 | 70  | M70×3  | 80  | M24×300            | φ35 |
| QPPY I - 32-8     | 1354+L | 250 | 900  | 1000 | 600 | 234 | 125 | 80  | M80×3  | 90  | M24×300            | φ42 |
| QPPY I - 40-8     | 1423+L | 270 | 940  | 1040 | 640 | 260 | 140 | 90  | M90×3  | 100 | M24×300            | φ42 |
| QPPY I - 50-8     | 1623+L | 300 | 1000 | 1100 | 700 | 288 | 170 | 100 | M100×3 | 120 | M24×300            | φ48 |
| QPPY I - 63-11.5  | 1623+L | 300 | 1000 | 1100 | 700 | 288 | 170 | 100 | M110×3 | 120 | M30×400            | φ48 |
| QPPY I - 80-11.5  | 1882+L | 350 | 1150 | 1250 | 800 | 330 | 210 | 120 | M110×3 | 150 | M30×400            | φ56 |
| QPPY I - 100-11.5 | 1882+L | 350 | 1150 | 1250 | 890 | 330 | 210 | 120 | M110×3 | 150 | M30×490            | φ56 |

表 5-17 QPKY 系列水利平面快速闸门液压启闭机基本参数

| 启闭机型号                        | 启门力<br>(kN)        | 启门<br>扬程<br>(m) | 活塞杆<br>直径<br>(mm) | 油缸<br>内径<br>(mm) | 持住压力<br>启门压力<br>(MPa) | 启门<br>速度<br>(m/min) | 快速关闭<br>速 度<br>(m/min)             |
|------------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------|
| QPKY— $\frac{6}{6}$ —8       | $\frac{60}{60}$    | 2~8             | 50                | 100              | $\frac{9.99}{9.99}$   | 0.3~0.5             | 速度可<br>调节, 满<br>足快速关<br>闭孔口的<br>要求 |
| QPKY— $\frac{8}{8}$ —8       | $\frac{80}{80}$    | 2~8             | 50                | 110              | $\frac{10.39}{10.39}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{10}{10}$ —8     | $\frac{100}{100}$  | 2~8             | 63                | 125              | $\frac{10.70}{10.70}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{12.5}{12.5}$ —8 | $\frac{125}{125}$  | 2~8             | 70                | 140              | $\frac{10.60}{10.60}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{16}{16}$ —8     | $\frac{160}{160}$  | 2~8             | 70                | 160              | $\frac{9.70}{9.70}$   | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{20}{20}$ —8     | $\frac{200}{200}$  | 2~8             | 90                | 180              | $\frac{10.29}{10.29}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{25}{25}$ —8     | $\frac{250}{250}$  | 2~8             | 100               | 200              | $\frac{10.40}{10.40}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{32}{32}$ —8     | $\frac{320}{320}$  | 2~8             | 100               | 220              | $\frac{10.33}{10.33}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{40}{40}$ —8     | $\frac{400}{400}$  | 2~8             | 110               | 250              | $\frac{10.00}{10.00}$ | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{50}{25}$ —8     | $\frac{500}{250}$  | 2~8             | 120               | 300              | $\frac{8.30}{4.15}$   | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{63}{32}$ —11.5  | $\frac{630}{320}$  | 3~11.5          | 120               | 300              | $\frac{10.39}{5.28}$  | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{80}{40}$ —11.5  | $\frac{800}{400}$  | 3~11.5          | 140               | 320              | $\frac{12.10}{6.05}$  | 0.3~0.5             |                                    |
| QPKY— $\frac{100}{50}$ —11.5 | $\frac{1000}{500}$ | 3~11.5          | 140               | 320              | $\frac{15.09}{7.55}$  | 0.3~0.5             |                                    |

注 启门扬程按差级 0.5m 分档。

点, 其基本参数见表 5-17。QPKY 系列一般采用单作用式液压缸, 其外形安装尺寸与 QPPY I 系列相同, 只是液压系统采用快速阀

组控制。

QPKY 系列液压启闭机通常采用布置形式如图 5-24 (a) 所示。其支座可设在液压缸缸体的端部或中部，支座的形式有浮动式和固定式，见图 5-24 (b)、(c)。浮动式是缸体上的支承具有球形的底面，垂直置放于球面或锥面底座上，这样液压缸的轴线可以作微小摆动，以补偿安装误差及闸门槽偏差。固定式是液压缸的中部或下部设有法兰，固定安装在基础或机架上。

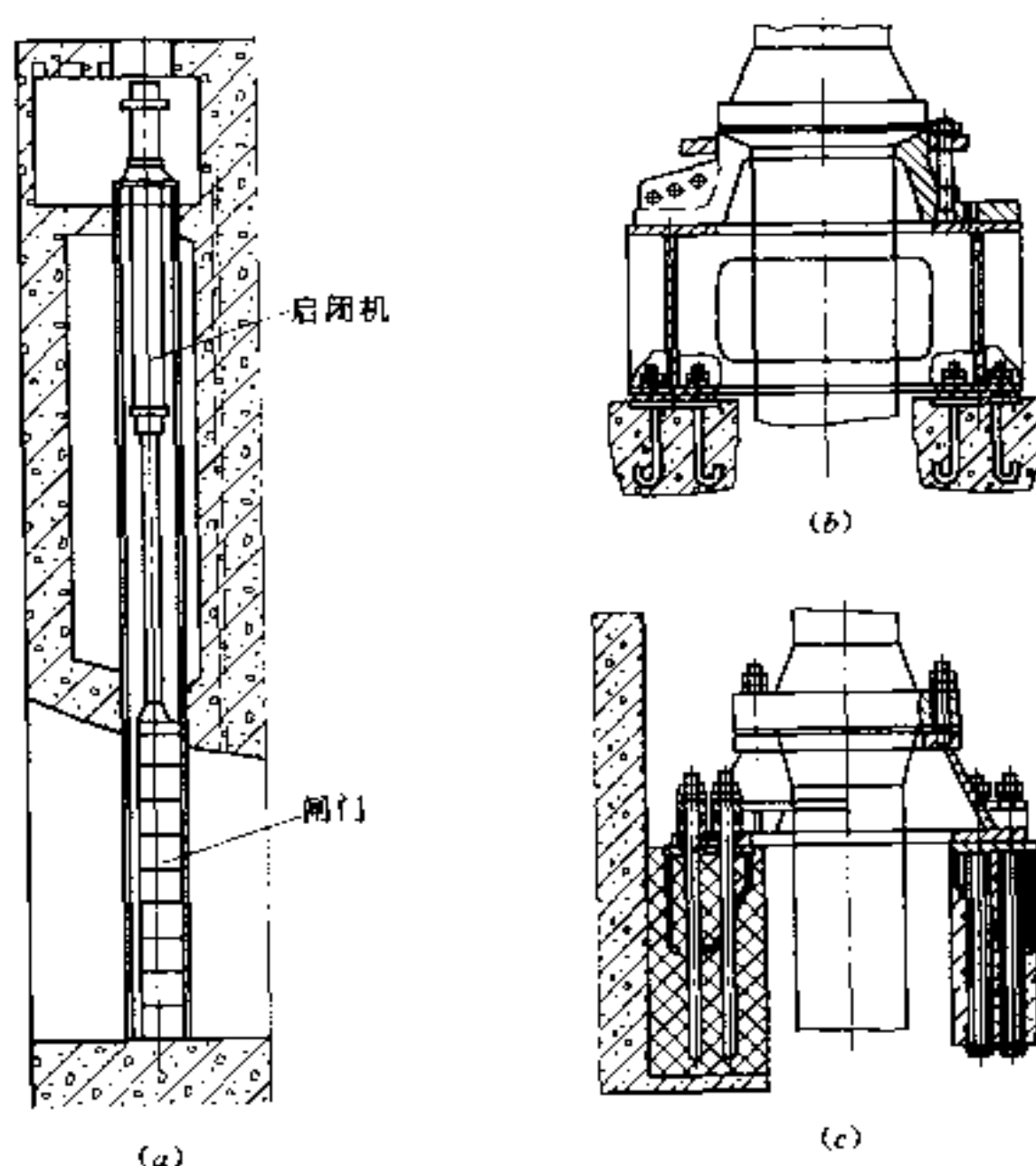


图 5-24 QPKY 型液压启闭机布置及支座形式  
(a) 布置图；(b) 浮动式支座；(c) 固定式支座

### (三) 露顶式弧形闸门液压启闭机 QHLY 系列

QHLY 系列液压启闭机适用于启闭露顶式弧形闸门，也可用于依靠自重（加重）关闭的低水头的潜孔式弧形闸门。一般为双吊点布置，其基本参数见表 5-18。

表 5-18 露顶式弧形闸门液压启闭机基本参数

| 编号 | 型 号              | 启门力<br>$F_q$<br>(kN) | 最大行程<br>$L_{\max}$<br>(m) | 液压缸<br>内径 $D$<br>(mm) | 活塞杆<br>直径 $d$<br>(mm) | 缸内计<br>算压力<br>$p$ (MPa) | 活塞<br>速度 $V$<br>(m/min) | 最大吊<br>点距离<br>$A_{\max}$<br>(m) |
|----|------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1  | QHLY-2×100-3.0   | 2×100                | 3.0                       | 125                   | 80                    | 13.8                    | 0.25<br>~2.0            | $B-0.4$                         |
| 2  | QHLY-2×160-3.0   | 2×160                | 3.0                       | 140                   | 80                    | 15.43                   |                         | $B-0.4$                         |
| 3  | QHLY-2×200-3.5   | 2×200                | 3.5                       | 160                   | 100                   | 16.33                   |                         | $B-0.4$                         |
| 4  | QHLY-2×250-4.5   | 2×250                | 4.5                       | 180                   | 125                   | 18.98                   |                         | $B-0.5$                         |
| 5  | QHLY-2×320-4.5   | 2×320                | 4.5                       | 200                   | 125                   | 16.72                   |                         | $B-0.5$                         |
| 6  | QHLY-2×400-5.0   | 2×400                | 5.0                       | 220                   | 140                   | 17.68                   |                         | $B-0.6$                         |
| 7  | QHLY-2×500-6.5   | 2×500                | 6.5                       | 250                   | 160                   | 17.25                   |                         | $B-0.6$                         |
| 8  | QHLY-2×630-7.0   | 2×630                | 7.0                       | 280                   | 180                   | 17.44                   |                         | $B-0.7$                         |
| 9  | QHLY-2×800-7.0   | 2×100                | 7.0                       | 300                   | 180                   | 17.68                   |                         | $B-0.7$                         |
| 10 | QHLY-2×1000-8.0  | 2×1000               | 8.0                       | 320                   | 200                   | 20.40                   |                         | $B-0.8$                         |
| 11 | QHLY-2×1250-8.0  | 2×1250               | 8.0                       | 340                   | 200                   | 21.05                   |                         | $B-0.9$                         |
| 12 | QHLY-2×1600-9.0  | 2×1600               | 9.0                       | 400                   | 220                   | 18.25                   |                         | $B-1.0$                         |
| 13 | QHLY-2×2000-10.0 | 2×2000               | 10.0                      | 420                   | 220                   | 19.89                   |                         | $B-1.1$                         |
| 14 | QHLY-2×2500-10.0 | 2×2500               | 10.0                      | 450                   | 220                   | 20.66                   |                         | $B-1.2$                         |
| 15 | QHLY-2×3200-11.0 | 2×3200               | 11.0                      | 500                   | 250                   | 21.73                   |                         | $B-1.3$                         |

注 表  $B$  为闸门孔口宽度, m。

QHLY 系列液压启闭机一般采用活塞式液压缸,其布置形式有几种,见图 5-25。因液压缸需随着闸门的启闭而摆动,故进出油管需用软管或铰接头。为了补偿安装调整的误差,改善油缸受力条件,油缸与闸门和基础支座轴连接处均应采用球形轴承。

#### (四) 深孔式弧形闸门液压启闭机

深孔式弧形闸门采用液压启闭机(QHSY 系列)时,其布置一般如图 5-26(a)所示。启闭机一般为单吊点,采用活塞式液压缸,中部铰支,其支座如图 5-26(b)所示。当闸门靠自重不能关闭时,可由液压启闭机产生下压力,避免加重。

#### (五) 人字闸门的液压启闭机

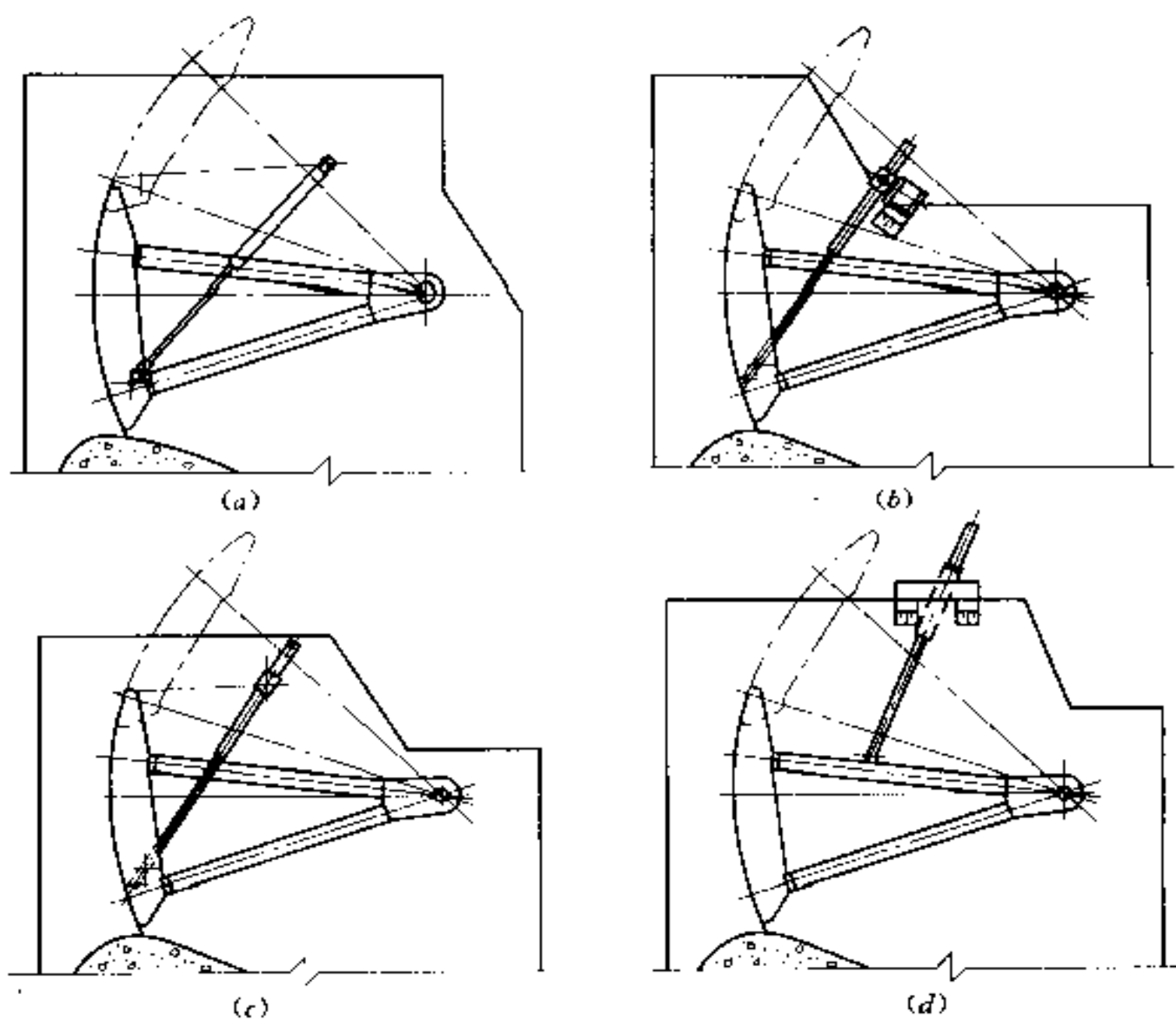


图 5-25 QHLY 型液压启闭机布置形式

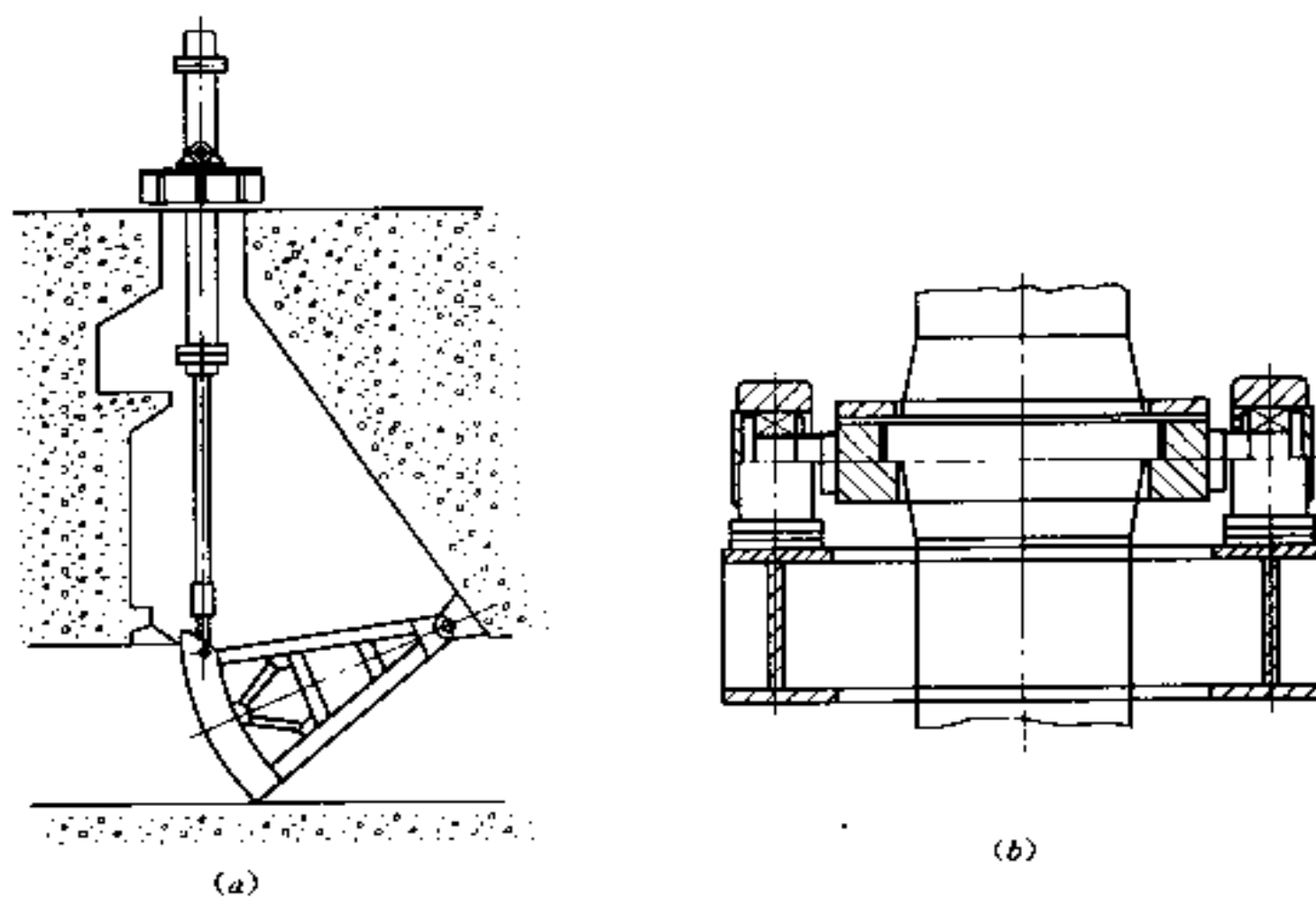


图 5-26 QHSY 型液压启闭机布置及支座

船闸闸室的人字闸门使用的卧式液压启闭机(QRWY 系列), 采用双作用活塞式液压缸, 液压缸随闸门启闭而水平摆动, 其布置如图 5-27 (a)、(b) 所示。

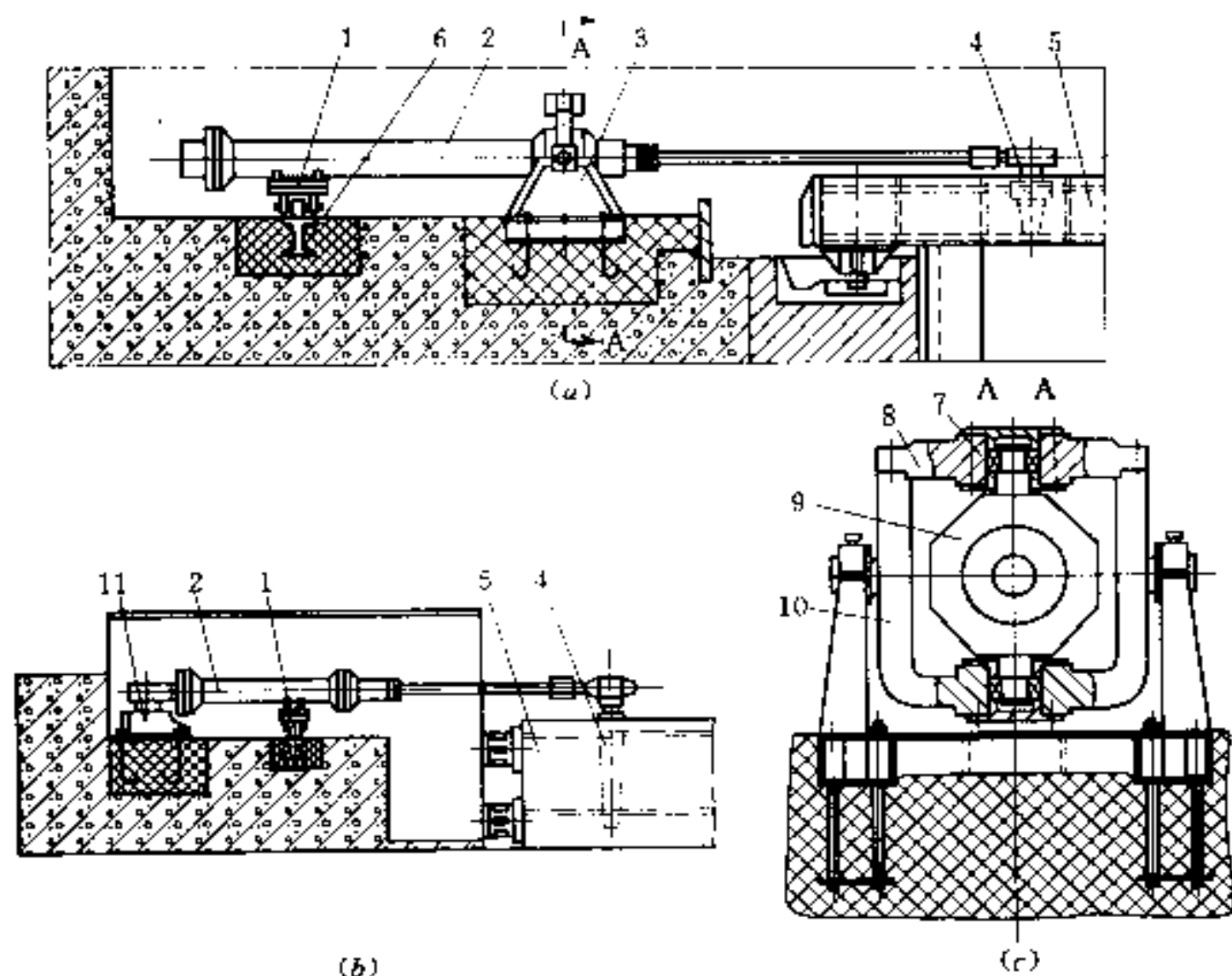


图 5-27 QRWY 型液压启闭机布置及支座

(a) 中间铰支式布置; (b) 尾部铰支式布置; (c) 方向铰支座

1—托架; 2—液压缸; 3—方向铰支座; 4—闸门连接轴;

5—人字闸门; 6 弧形轨道; 7—轴承; 8—上横梁;

9—支柱; 10—U 形框架; 11—耳环支座

图 5-27 (a) 所示液压缸支持在方向铰支座 [图 5-27 (c)] 上, 其作用是使缸体除水平面可转动外, 在垂直面上也可自动调整, 进出油管需用软管或铰接头。其支铰可布置在液压缸的头部和中部。图 5-27 (b) 所示液压缸支持尾部耳环支座上。

大型卧式液压启闭机, 一般在液压缸的头部或尾部设有托架, 以支承液压缸, 托架可在弧形轨道上行走。这种具有三点支承的液压缸, 可以避免因液压缸自重引起活塞杆的弯曲, 但对闸门连接轴的安装精度要求较高。对于中小型卧式液压启闭机, 把支座

布置在液压缸的重心部位，可不设托架。

## 第四节 其他启闭设备

### 一、螺杆式启闭机

#### (一) 机构组成和特点

螺杆式启闭机由起重螺杆、承重螺母、传动机构、机架及安全保护装置等部分组成。螺杆支承在承重螺母内，螺母固定在传动机构的齿轮或蜗轮上，螺杆下端通过吊头与闸门相连。传动机构通过齿轮或蜗轮驱动承重螺母转动，使起重螺杆作升或降的直线运动，从而达到闸门开启或关闭的目的。

起重螺杆和承重螺母上的螺纹一般采用单线梯形螺纹。螺杆的材料通常是 35 号或 45 号优质碳素结构钢，小型启闭机的螺杆可采用普通碳素结构钢 Q235 或 Q275 制造。螺母的材料通常采用铸造青铜，小容量则可用球墨铸铁。

螺杆启闭机的传动机构可分为手动式、电动式和手电两用式三种。手动式构造简单，有的甚至不设减速装置，主要适用于 100kN 以下的很少使用的螺杆启闭机。电动式和手电两用式传动机构一般采用蜗轮传动，有时还增加一对皮带轮减速。

螺杆启闭机的布置形式有固定式和摆动式两种。图 5-28 (a) 所示为固定式螺杆启闭机，大多用于平面闸门的启闭。若在起重螺杆的下端增添能沿滑槽（埋设于闸门的胸墙壁）滑动的滑块及连接闸门吊耳与滑块的连杆 [图 5-28 (b)] 后，则固定式螺杆启闭机也可用来操作弧形闸门。图 5-28 (c) 为摆动式螺杆启闭机的示意图。为使启闭机能够摆动，机架应由机身和机座两部分组成，装有起重螺杆和承重螺母等主要部件的机身应与固定于基础混凝土上的机座进行铰接。这种形式的启闭机多用于操作弧形门。

#### (二) 螺杆式启闭机的应用

1989 年我国有关部门批准实施了 SD297--88《QL 型螺杆式启闭机系列参数》，适用于中小型水利水电工程中启闭平面闸门的

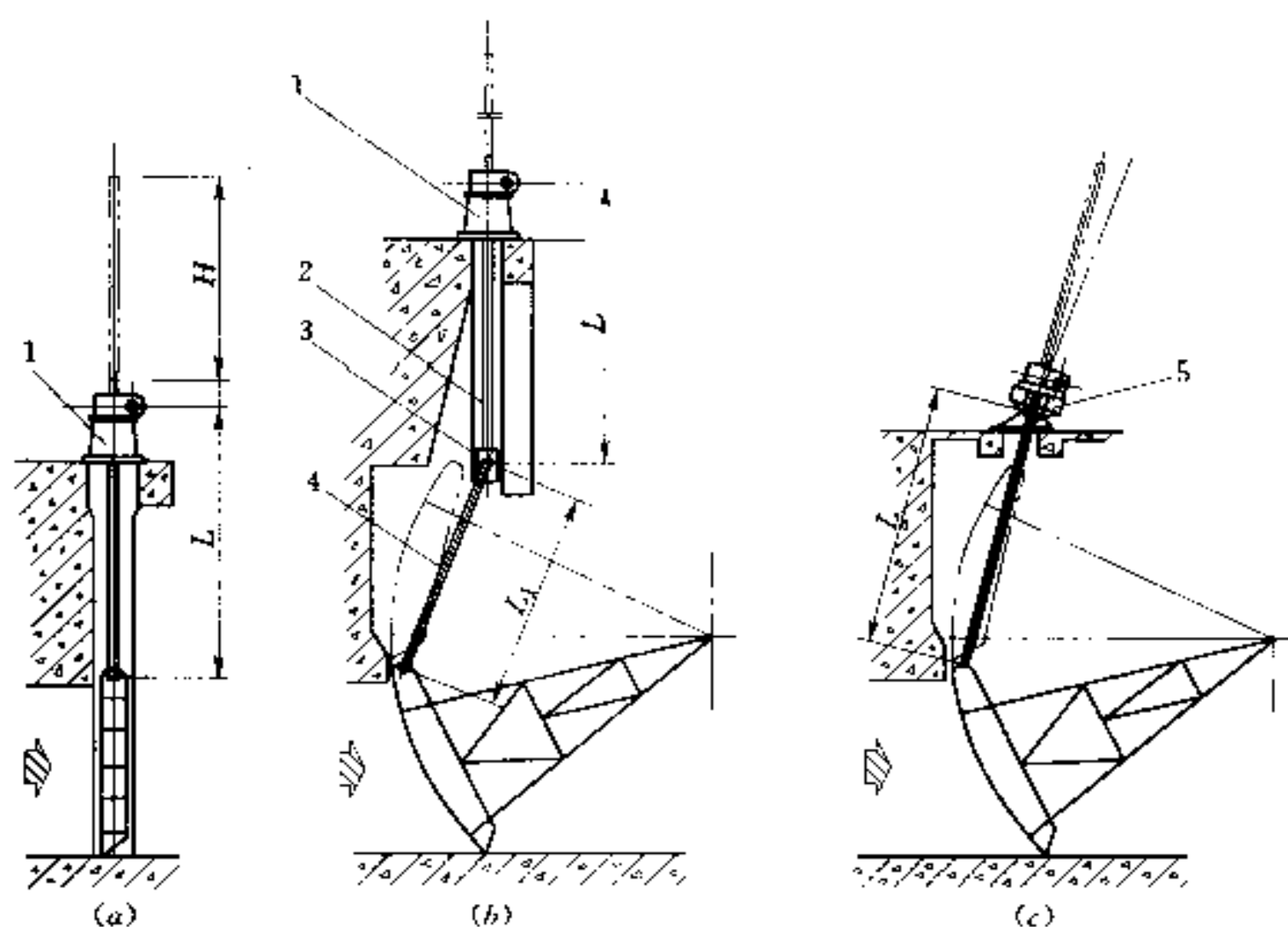


图 5-28 螺杆式启闭机的布置

(a) 固定式; (b) 固定式 (加滑块); (c) 摆动式

1—固定式螺杆启闭机; 2—滑槽; 3—滑块; 4—连杆; 5—摆动式螺杆启闭机

螺杆式启闭机。

螺杆式启闭机的起重螺杆在下降过程中, 能对闸门施加一定的下压力, 帮助闸门降落, 因此, 这种启闭机比较适合用在靠自重不能下降而需要加下压力的闸门上。螺杆启闭机有结构简单、造价低廉以及操作方便等优点, 早期广泛应用于小型水利水电工程上, 启闭力一般为  $30 \sim 200 \text{ kN}$ , 大容量的有  $750/400 \text{ kN}$  (启门力/闭门力), 扬程通常在  $5 \text{ m}$  以内, 最大不超过  $7 \sim 8 \text{ m}$ , 但需由螺杆的稳定性来确定。

因螺杆启闭机有传动效率低、启闭力和扬程均不能太大、启闭速度慢等缺点, 加上液压启闭机的不断发展, 近年来螺杆启闭机的应用越来越少, 一般用在某些特殊的场合, 如作为一些铸铁闸门定型产品的配套启闭设备。

国内许多厂家各自设计生产了一系列螺杆式启闭机, 规格参

表 5-19 某些螺杆式启闭机的技术特性

| 型 号         | 技术参数  |       | 启闭力 (kN) |       | 扬程 (m) | 启门速度 (m/min) |    | 电动机型号 / 功率 (kW) | 手动人数 |    | 螺杆 (mm) | 吊距 (m)  |
|-------------|-------|-------|----------|-------|--------|--------------|----|-----------------|------|----|---------|---------|
|             |       |       |          |       |        |              |    |                 |      |    |         |         |
|             | 启     | 闭     | 启        | 闭     |        | 手动           | 电动 |                 | 上升   | 下降 |         |         |
| QL-10-S     | 10    | 5     | 1.5      | 0.18  |        |              |    |                 | 1    | 1  | T28×6   |         |
| QL-20-S     | 20    | 16    | 1.5      | 0.18  |        |              |    |                 | 1    | 1  | T38×6   |         |
| QL-30-S     | 30    | 16    | 2.5      | 0.24  |        |              |    |                 | 1    | 1  | T48×12  |         |
| QL-50-SD    | 50    | 20    | 3.5      | 0.12  | 0.16   | Y90L-6/1.1   |    |                 | 1    | 1  | T58×12  |         |
| QL-100-SD   | 100   | 35    | 4.0      | 0.012 | 0.16   | Y112M 6/2.2  |    |                 | 1    | 1  | T68×12  |         |
| QL-160-SD   | 160   | 56    | 4.5      | 0.012 | 0.16   | Y132M1 6/4   |    |                 | 1    | 1  | T78×12  |         |
| QL-200-SD   | 200   | 100   | 4.5      | 0.012 | 0.11   | Y132M1 6/4   |    |                 | 1    | 1  | T88×12  |         |
| QL-300-SD   | 300   | 200   | 4.5      | 0.012 | 0.16   | Y132M2 6/5.5 |    |                 | 2    | 1  | T128×12 |         |
| QL-500-SD   | 500   | 400   | 5.0      | 0.007 | 0.35   | Y225S-8/18.5 |    |                 | 4    | 2  | T148×14 |         |
| QL-750-SD   | 750   | 500   | 5.5      | 0.01  | 0.30   | Y225M-8/22   |    |                 | 4    | 2  | T178×24 |         |
| QL-2×50-SD  | 2×50  | 2×20  | 3.5      | 0.012 | 0.16   | Y112M 6/2.2  |    |                 | 2    | 2  | T58×12  | 1.0~3.0 |
| QL-2×100-SD | 2×100 | 2×35  | 4.0      | 0.012 | 0.16   | Y132M1-6/4   |    |                 | 2    | 2  | T68×12  | 1.0~3.0 |
| QL-2×160-SD | 2×160 | 2×56  | 4.5      | 0.012 | 0.16   | Y160M 6/7.5  |    |                 | 2    | 2  | T78×12  | 1.0~4.0 |
| QL-2×200-SD | 2×200 | 2×100 | 4.5      | 0.012 | 0.11   | Y160M 6/7.5  |    |                 | 2    | 2  | T88×12  | 1.5~5.0 |
| QL-2×320-SD | 2×320 | 2×200 | 4.5      | 0.012 | 0.16   | Y180L-6/11   |    |                 | 4    | 2  | T128×12 | 2.0~5.0 |

注 1. 表中启门力是根据扬程计算而定, 如超过表中扬程值则需重新计算。

2. 吊距为双吊点启闭机中间轴未加支座时的允许值, 加支座时可增大。

数难以统一。表 5-19 列出某些螺杆式启闭机的技术特性。

## 二、电动葫芦

机构组成和工作原理：电动葫芦是一种使用面非常广泛的轻小型通用起重设备。我国目前生产、使用得最多的电动葫芦是  $CD_1/MD_1$  型。 $CD_1/MD_1$  工作制度采用中级， $CD_1$  为单速， $MD_1$  为双速。表 5-20 列出了  $CD_1/MD_1$  型电动葫芦中常用规格的基本参数。

表 5-20  $CD_1/MD_1$  电动葫芦性能参数表

|             |     |           |         |          |         |          |         |          |         |
|-------------|-----|-----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 起重量(kN)     |     | 2.5       | 5       | 10       | 20      | 30       | 50      | 100      |         |
| 起升高度(m)     |     | 3~12      | 6~18    | 6~30     |         |          |         | 9~30     |         |
| 起升速度(m/min) |     | 8         | 8:8/0.8 |          |         |          |         | 7:7/0.7  |         |
| 运行速度(m/min) |     | 20;30     |         |          |         |          |         |          |         |
| 机构工作级别      |     | M3        |         |          |         |          |         |          |         |
| 电 动 机       | 起 升 | 型 号       | ZD112-4 | ZD121-4  | ZD122-4 | ZD131-4  | ZD132-4 | ZD141-4  | ZD151-4 |
|             |     | 功率(kW)    | 0.4     | 0.8      | 1.5     | 3        | 4.5     | 7.5      | 13      |
|             |     | 转速(r/min) | 1380    |          |         |          |         | 1400     |         |
|             | 运 行 | 型 号       | AOZ5024 | ZDY111-4 |         | ZDY112-4 |         | ZDY121-4 |         |
|             |     | 功率(kW)    | 0.06    | 0.2      |         | 0.4      |         | 0.8      | 0.8×2   |
|             |     | 转速(r/min) | 1380    |          |         |          |         |          |         |

$CD_1$  型电动葫芦的机构组成如图 5-29 所示，其起升机构采用  $ZD_1$  型三相交流锥形转子电动机，经圆柱斜齿轮三级减速器减速后驱动卷筒装置转动，卷筒收放钢丝绳，从而升降吊钩装置。锥形转子电动机的结构具有产生轴向磁拉力的特点，制动轮固定于电机转子轴后端。起动时磁拉力克服弹簧的压力，使转子和与转子连接一体的风扇制动轮产生轴向位移，与锥形制动器上的制动环脱开，转子自由转动（即工作状态）。断电后，磁拉力消失，在压力弹簧的作用下，风扇制动轮与制动环刹紧，依靠锥形环面产生的摩擦力，获得制动作用。起升机构还设有导绳装置以保证钢丝绳顺利进出卷筒。 $MD_1$  型电动葫芦除起升机构换成双电机组

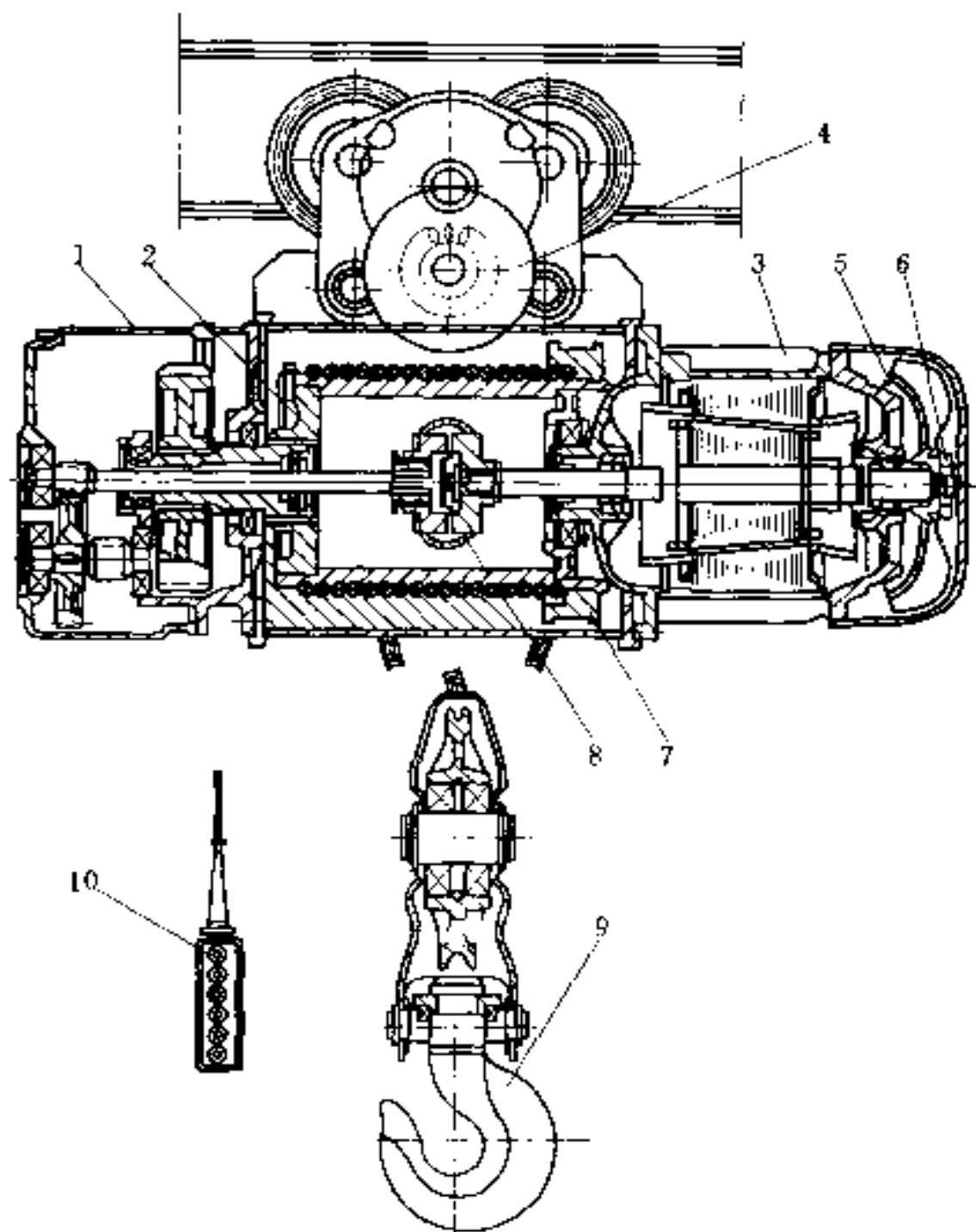


图 5-29 CD<sub>1</sub> 型电动葫芦

- 1—减速器；2—卷筒装置；3—电动机；4—电动小车；  
5—锥形制动器；6—制动器调整螺母；7—导绳器；  
8—弹性联轴器；9—吊钩装置；10—控制按钮

(图5-30)外，其余与CD<sub>1</sub>型电动葫芦相同。

CD<sub>1</sub>/MD<sub>1</sub>型电动葫芦的运行机构采用电动小车(图5-29)，其轨道为普通工字钢。

CD<sub>1</sub>/MD<sub>1</sub>型电动葫芦可固定安装，其安装形式如图5-31所示。

CD<sub>1</sub>/MD<sub>1</sub>作为成熟的定型产品，广泛使用于工厂、矿山、铁路、码头、仓库等地方，有布置简单、结构紧凑、体积小、自重轻、安装方便、造价低等优点。电动葫芦在水工建筑物中用作启

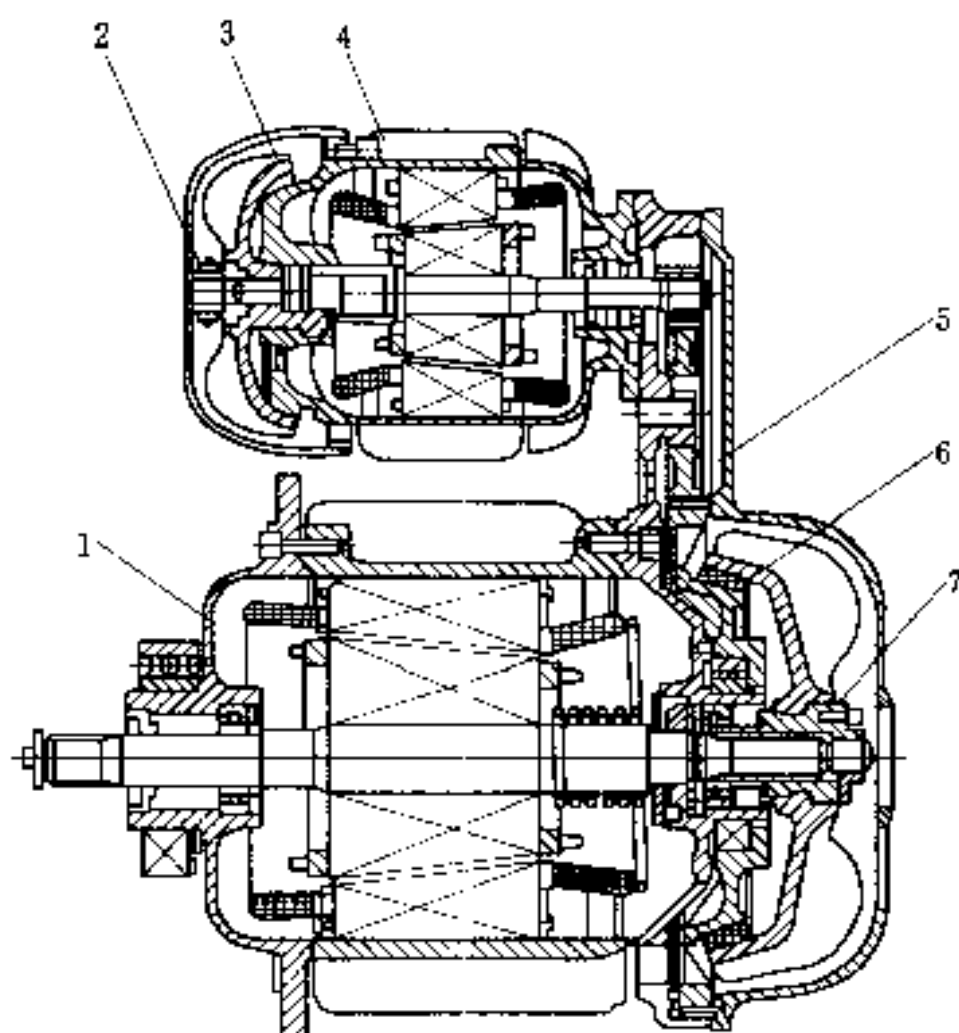


图 5-30 MD<sub>1</sub> 型电动葫芦双电机组

1—主起升电机；2—制动器调整螺母；3 锥形制动器；  
4—慢速起升电机；5—慢速驱动装置；6 锥形制动器；  
7· 制动器调整螺母

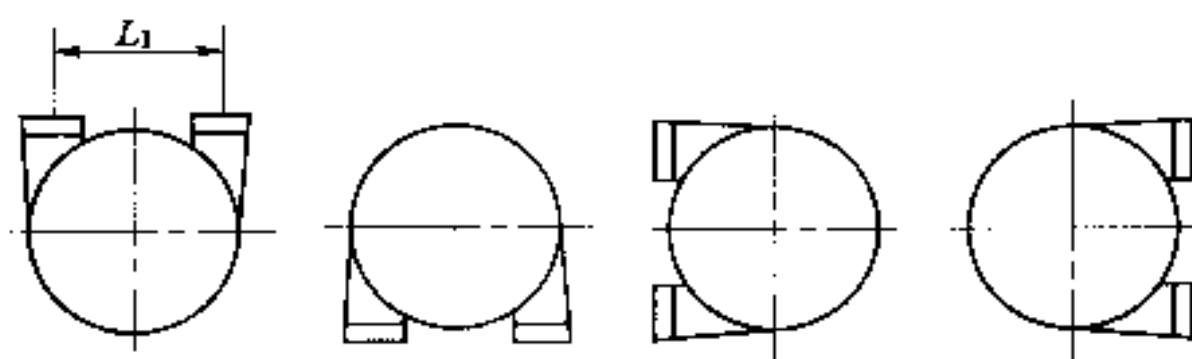


图 5-31 固定式电动葫芦的安装形式

闭机的也比较多，一般用于启闭小型检修闸门。

但电动葫芦用作启闭机有以下一些缺点：

(1) 起重量相对较小，单台电动葫芦的最大容量为 100kN，在启闭机的系列中算小型。

(2) 速度选择余地小，双速电动葫芦的起升速度为 8.0m/min 和 0.8m/min，快速档速度过高，不适合启闭闸门，只能采用其低速档。

(3) 双吊点的问题。水工闸门多采用双吊点，如果采用两台电动葫芦一起启闭，就有双吊点同步及偏移的问题。

针对以上问题，有时可采用以电动葫芦为传动机构，增加机架和滑轮组的方法改变其容量和速度。目前国内有些专业厂家已经研制生产出大容量、高扬程的电动葫芦，最大容量可达 630kN，最大扬程可达 100m。而且出现一些专用于水利工程的双吊点电动葫芦，采用机械传动轴连接，解决双吊点同步的问题。

### 三、自动挂脱梁

当采用移动式启闭机操作多孔口闸门或闸门在操作过程中，吊杆装卸频繁时，宜采用自动挂脱梁。

为改善自动挂脱梁的使用条件，提高挂脱闸门的准确性，应注意以下情况：

(1) 闸门应尽量采用上游止水。如闸门设置下游止水时，应注意自动挂脱梁在水下工作的可靠性。

(2) 自动挂脱梁入水工作时，应注意水流扰动对其稳定性的影响。

(3) 应注意门槽施工安装精度，以适应自动挂脱梁能在多孔口门槽内使用。

(4) 自动挂脱梁应做静平衡试验，以便操作平稳，入槽前不应有倾斜、阻卡等现象。

(5) 动轴和销轴应设置轴套，并应采取润滑、防腐蚀等措施。

(6) 自动挂脱梁应设导向、定位、安全装置和排气（水）孔，以保证机构灵活可靠。

(7) 当工作温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时，尚应有防止操作时或入水后挂脱部件结冰的设施。

自动挂脱梁的形式有机械式和液压式等，可根据工作条件选用。

#### (一) 机械式自动挂脱梁

机械式自动挂脱梁有许多种形式，大致可以分为三种类型：

(1) 重锤式。即在自动抓梁上搬动重锤，借助与重锤相连的

杠杆传动，开启或闭合挂勾；或者是转动挂勾，以启闭闸门。重锤式的缺点是操作重锤劳动强度大，杠杆的传动关节较多，易生卡阻。其结构布置也是比较复杂的。

(2) 穿轴式。采用手动或机械装置，利用杠杆传动推动销轴，穿进或推出销轴，以挂上或松开闸门上的吊耳来启闭闸门。手动穿轴式适用于中小型启闭机。

(3) 钩环式。利用安设在自动抓梁下端的挂钩、吊环或卡体，在梁的升降过程中自动挂上或松开闸门吊头以启闭闸门。这种类型的结构比较简单，操作也较便易，特别适用于启闭中小型闸门。

图 5-32、图 5-33 所示为卡体式机械自动挂脱梁，其动作原理如下：

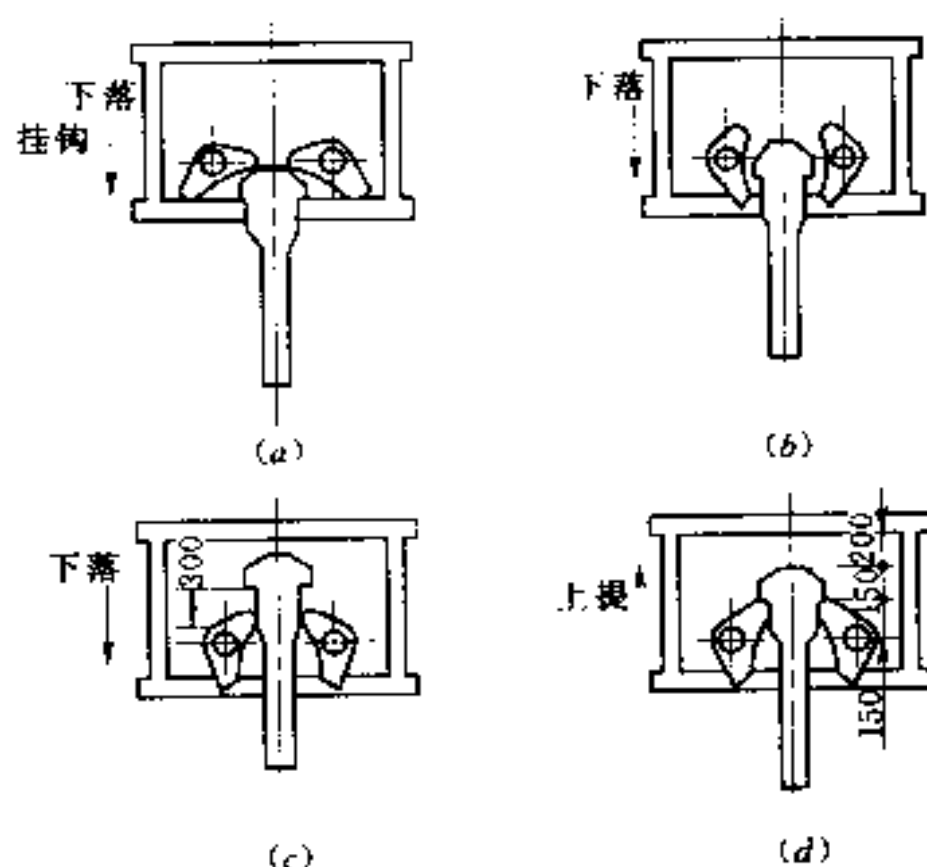


图 5-32 卡体式自动挂脱梁的挂钩过程 (单位: mm)

(a) 钩子碰上卡体; (b) 钩子张开; (c) 钩子滑过

卡体头部; (d) 钩子卡住卡体

提起闸门时，挂脱梁沿导向装置进入门槽，直至平衡状态的钩子碰及闸门上的卡体顶部，钩子张开，让卡体头部穿过，当钩子处在卡体的第一个台阶时，钩子靠自身重量平衡的作用，与卡体侧面相靠，这时若挂脱梁变下落为向上提起，则挂脱梁钩子便与卡体挂上。继续提升挂脱梁便可将闸门提起。与此相反，下降

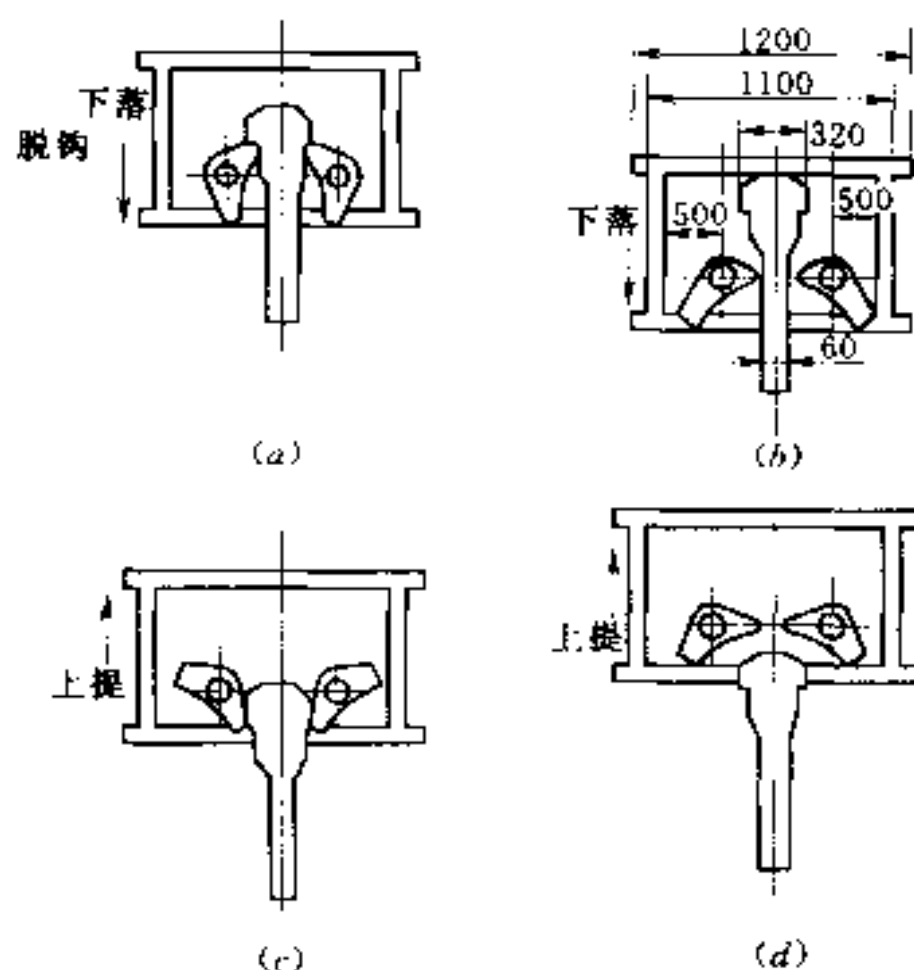


图 5-33 卡体式自动挂脱梁的脱钩过程 (单位: mm)

(a) 钩子在卡体第一台阶; (b) 钩子在卡体第二台阶;

(c) 钩子翻转; (d) 钩子与卡体脱开

挂脱梁, 又将闸门放回底槛, 继续下放挂脱梁, 钩子通过卡体第二个台阶, 钩子又处于平衡状态, 这时提升挂脱梁就脱钩了。

## (二) 液压式自动挂脱梁

液压式自动挂脱梁是利用小型液压缸来推动销轴, 以挂上或

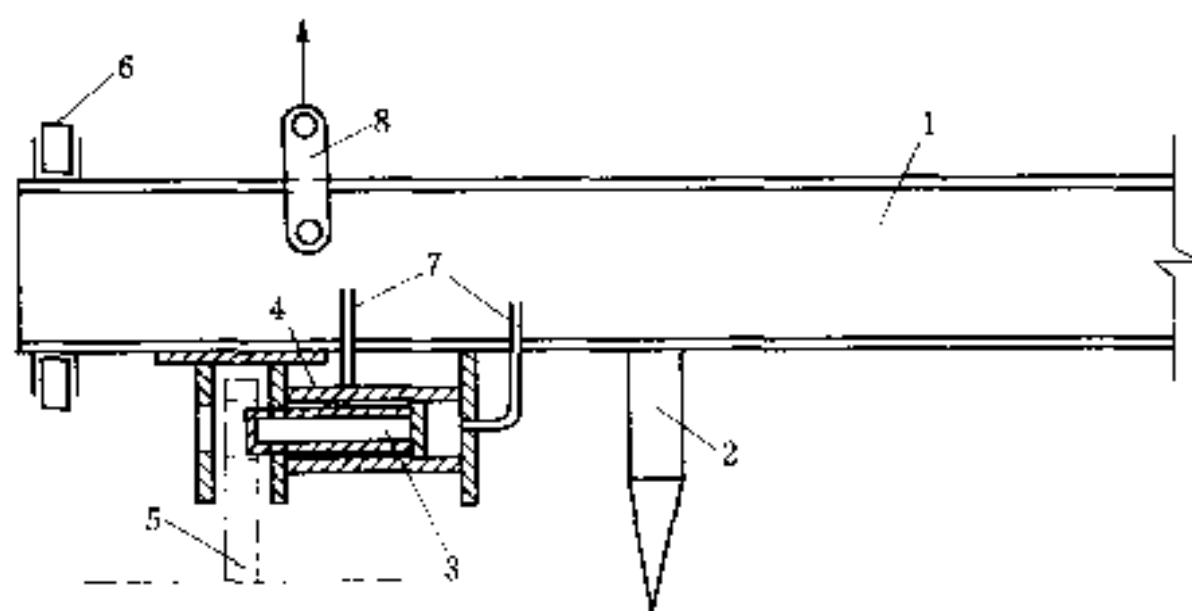


图 5-34 液压式自动挂脱梁

1—梁体; 2—对位装置; 3—吊轴; 4—液压缸;

5—闸门吊耳; 6—导轮; 7—油管; 8—吊杆

松开闸门上的吊耳来启闭闸门。其构造比较复杂，造价较高，适用于大中型启闭机。

图 5-34 所示为液压式自动挂脱梁。液压系统布置在梁内的密封容器中，其控制电缆通过电缆卷筒与起升机构同步收放。这种启闭机应配置准确的扬程及荷重显示装置，以便准确知道自动挂脱梁的位置。

## 第六章 拦污栅

取水输水建筑物中，拦污栅是不可缺少的设备。在泵站、水电站和船闸输水廊道的进水口一般设置拦污栅，用以拦阻水流中所挟带的污物（树枝、树叶、杂草和浮冰等），使污物不易流入引水道内，以保护机组、闸门、阀及管道不受损害，保证机组等设备、结构的安全运行；在倒虹吸、隧洞、压力箱涵等的进口处一般也设置拦污栅。

### 第一节 拦污栅的布置及清污方式

#### 一、一般要求

拦污栅的布置得当与否，对建筑物和拦污栅自身的安全运行是非常重要的。如果布置不妥当，会在经济上、运行管理上造成很大的损失和不便。

影响拦污栅布置的主要因素有：

- (1) 工程的大小、建筑物的等级及引水方式。
- (2) 进水口的形式、用途、位置及其在水下的深度。
- (3) 管道的引用流量及允许过栅流速。
- (4) 水流所挟污物的性质、大小及数量、机组、闸门或阀的类型尺寸等。
- (5) 当地气候条件及水库水位的变化情况。
- (6) 清污方式。
- (7) 制造、安装及运输条件。

布置和设计拦污栅时，应尽可能地利用水流流向及地形等有利条件，尽量避免污物进入进水口，以减轻对拦污栅的威胁；要求过栅水流平顺，水头损失小；此外，应考虑清污方便，便于安

装、检修及更换。在寒冷地区，必要时应采取有效措施，以防止拦污栅结冰或被冰屑堵塞。拦污栅宜设置清污平台。

对于污物严重的河流，在做枢纽整体模型试验时，应对拦污栅进行定性观测和试验。

## 二、拦污栅的布置形式

拦污栅的布置形式，应根据河流中污物的性质、数量以及对清污的要求等来确定，在污物较少的地区，可设置一道拦污栅，在污物较多的地区，宜考虑排污设施，并宜考虑设两道拦污栅或采用连通式布置，此外尚应设置有效的清污及卸污设施。

拦污栅在平面上的布置形状有直线、折线、曲线、多边形布置等形式（图 6-1）。当污物不多而进水口过流面积足够大时，一般采用直线布置；当污物较多，进水口为了获得较大的过水面积和降低过栅流速，可采用折线、曲线布置；当进水口为伸入水库中的塔式结构时，拦污栅则沿塔身周围布置，在平面上呈多边形。

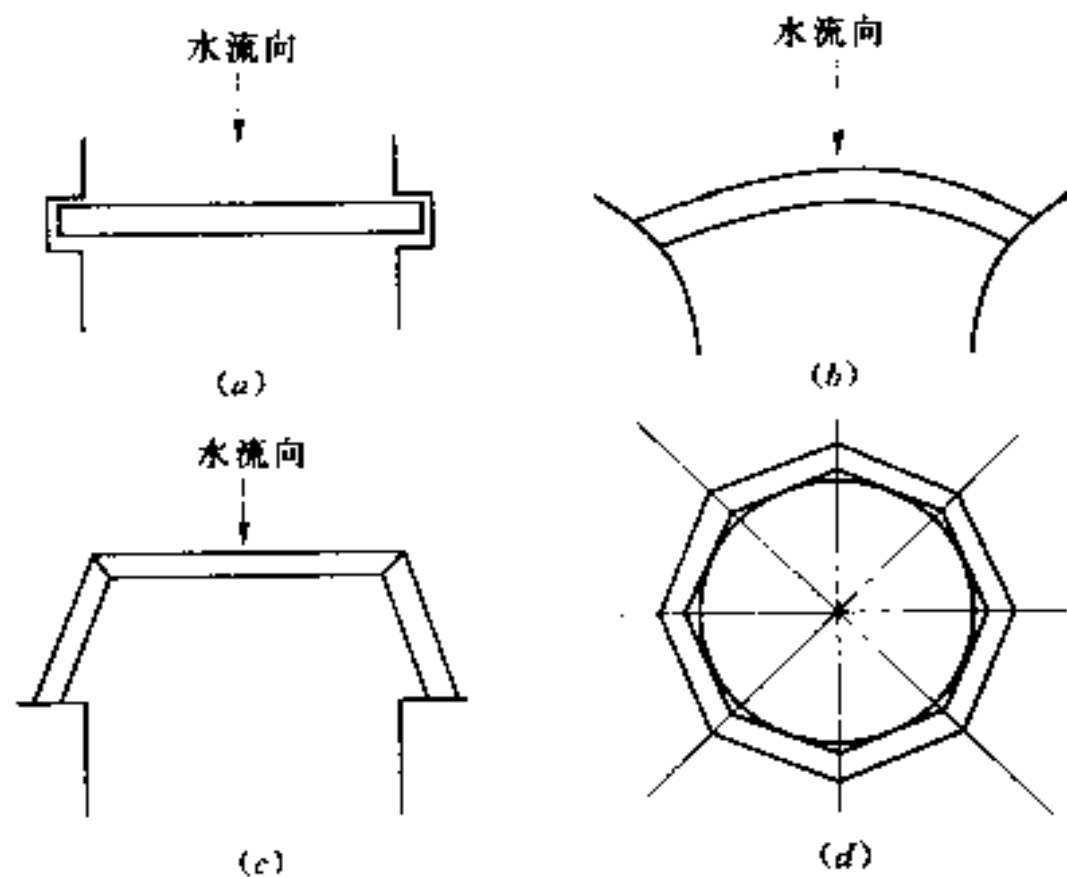


图 6-1 拦污栅的平面布置

(a) 直线布置；(b) 曲线布置（拱形）；  
(c) 折线布置；(d) 多边形布置

拦污栅在立面上有垂直置放和倾斜置放。垂直置放可以缩短进水口建筑物的长度，减少建筑物的投资，平面上采用折线、曲

线、多边形布置的一般采用垂直置放；对于位于深水之下的进水口，其拦污栅受冰冻和污物堵塞的机会相对较少，一般不要求机械清污，其拦污栅一般垂直置放。高度不是太大的进水口的拦污栅，可采用倾斜置放，拦污栅与水平面的夹角一般可采用 $\alpha=70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 左右，拦污栅倾斜置放较垂直置放扩大了栅面，因而降低了流速，减少了水头损失，并可提高清污机的清污效果。

拦污栅一般设置在进水口检修闸门和工作闸门的上游。有时也可将拦污栅设置在工作闸门和检修闸门之间，这时因受空间尺寸限制，拦污栅一般只能垂直置放，这种布置拦污栅可在孔口内检修。由于拦污栅和检修闸门不同时使用，为布置紧凑，有的进水口两者共用一个闸槽，这种布置形式虽节省了一道栅槽，但也增大了检修闸门的尺寸，其操作也不方便。

在污物较多而又不便于设置机械清污的进水口，可设置两道拦污栅，以便于轮换提出水面清除污物。在污物特别严重的大中型电站中，可将进水口布置成连通式或分段连通式。当某孔拦污栅被污物局部堵塞时，其他孔口可向该孔口补充水流，以保证机组的正常运行。

拦污栅可做成固定的或活动的。固定式拦污栅是用地脚螺栓将栅叶固定在栅槽内，但固定式拦污栅检修和清污困难，出现事故也不易处理，因此，拦污栅宜做成活动式的，以便提出孔口来维修、更换。

### 三、拦污栅结构

拦污栅包括栅叶和栅槽埋件两部分。栅叶是由栅面和支承框架构成，栅面是数块栅片连接排列而成，栅片由平行置放的金属栅条连接而成，连接的方式有螺栓连接和焊接两种。

螺栓连接的拦污栅，是一种栅片和栅条均可拆卸和更换的拦污栅（图 6-2），其栅片是用长螺栓将平行置放的栅条贯穿于一起。为了保持栅条间距，在栅条间设置等距的间隔环，长螺栓两端用螺帽旋紧。栅片用 U 形螺栓固定在支承框架上。

焊接连接的拦污栅是不可拆卸的焊接结构（图 6-3），其栅条

与肋板焊接在一起构成栅片，栅片上的栅条则直接焊在支承框架上，形成了栅面。这种结构形式的拦污栅不仅可以加强拦污栅的整体刚度，同时也简化了制造拦污栅的工艺流程，在工程实践中较常用。

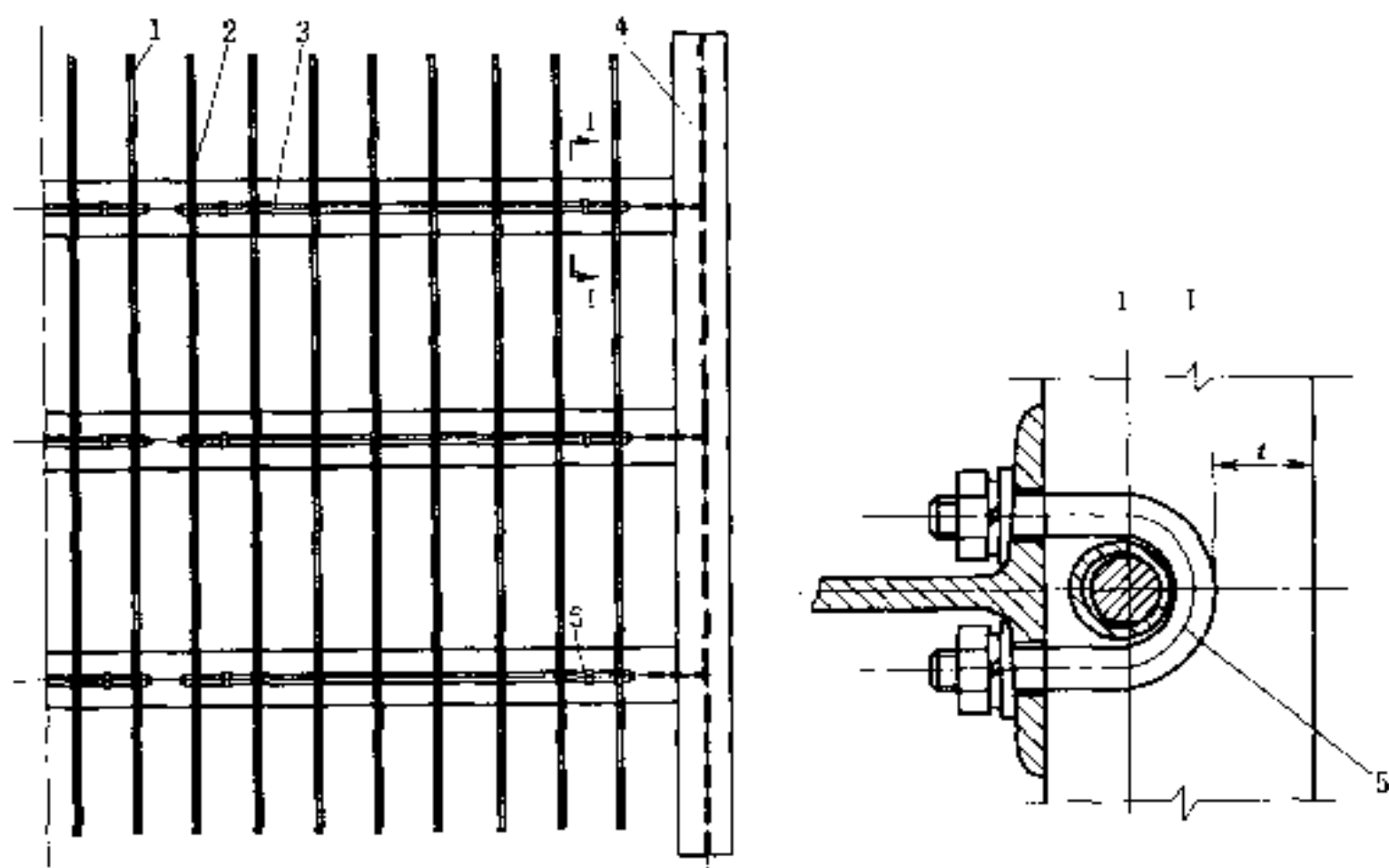


图 6-2 螺栓连接的拦污栅

1—栅条；2—长螺栓；3—间隔环；4—框架；5—U形螺栓

栅条一般用扁钢制成，其截面常为矩形，有时为了减小水头损失，可采用流线形截面。对于矩形截面的栅条，其高度不宜大于 12 倍厚度，也不宜小于 50mm；栅条的侧向支承间距不宜大于 70 倍栅条厚度。有清污要求的拦污栅，应满足耙齿进入栅面的要求。

拦污栅支承框架的结构与平面闸门一样，由主梁、边梁、纵向联结系和支承等组成（图 6-4），但构件较轻。当主梁高度较大时，为了增加拦污栅的横向刚度，可在主梁之间加设横向联系构件。对于高度大的拦污栅，为了便于安装及运输，可以分节设置，分节的高度一般在 3.5m 以下。节与节之间的连接可在边梁腹板上用连接板和轴相连，并应考虑起吊拦污栅时的锁定装置；为减

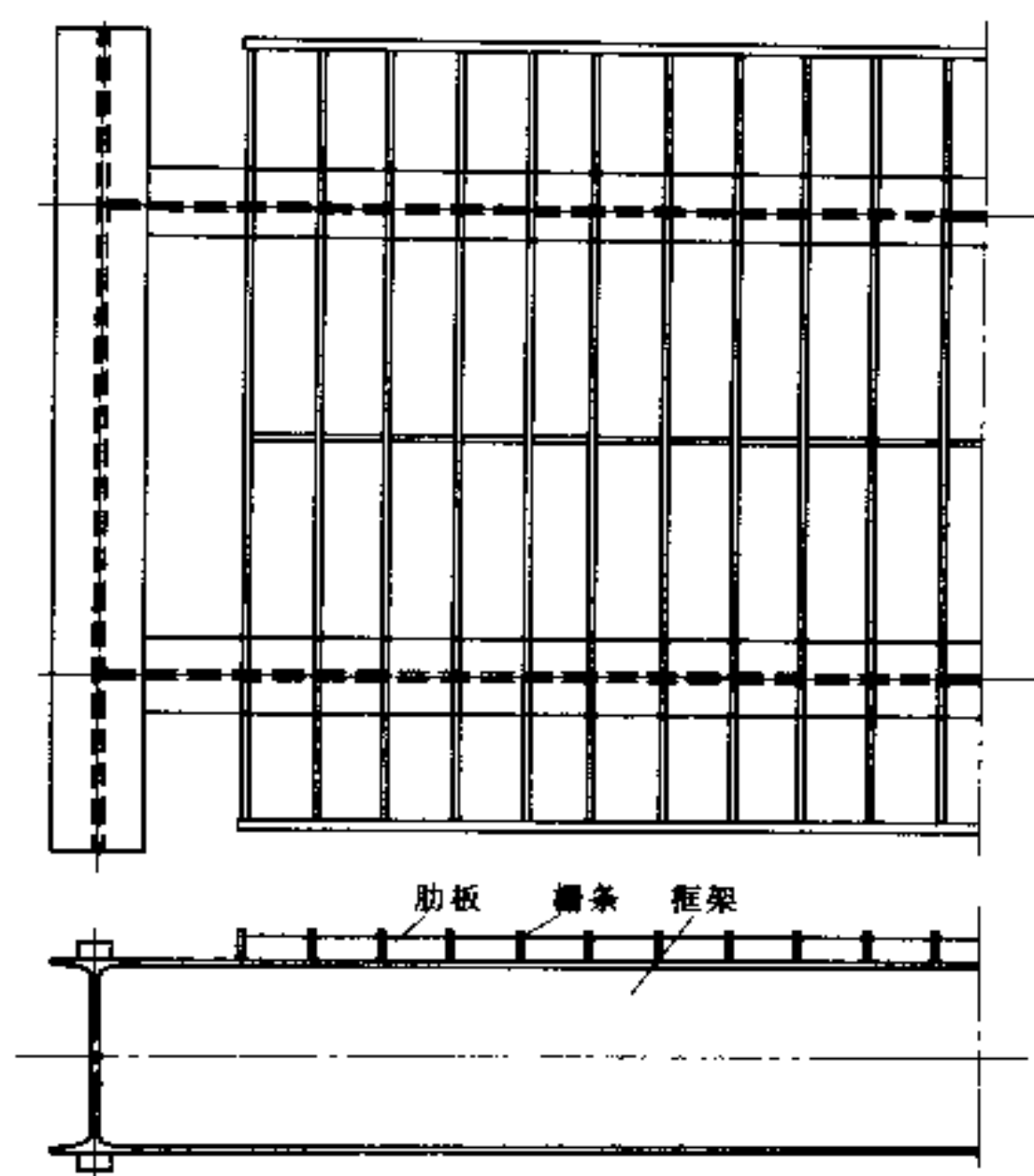


图 6-3 焊接连接的拦污栅

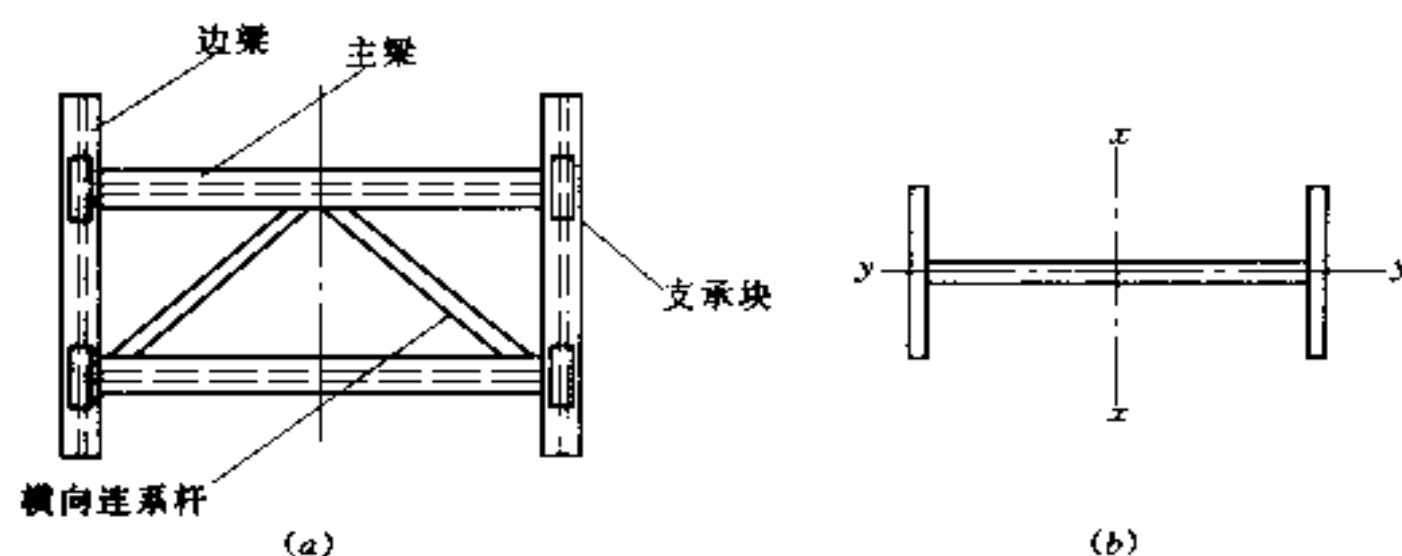


图 6-4 拦污栅的支承框架结构

(a) 支承框架；(b) 对称截面的焊接主梁

小起吊设备的容量，节与节之间可不设连接装置，但起吊设备应配置自动挂脱梁，如果拦污栅有机械清污的要求，节与节之间应设导向定位装置，使得节间栅条对齐，以免卡阻清污机的清污耙。

框架的主梁与边梁应等高布置，主梁的间距应按等荷载要求确定，并应考虑栅条的强度与稳定。主梁的形式应根据跨度及荷载而采用轧成梁、组合梁或桁架。当主梁跨度较小时采用轧成梁，对于中等跨度的拦污栅一般采用工字形组合梁，对于跨度较大的拦污栅可以采用桁架式主梁。桁架式梁多用平行弦桁架，节间数目为偶数，跨中对称，桁架高度一般为桁架跨度的  $1/7 \sim 1/8$ 。为减少水头损失，主梁可采用流线形轮廓。

拦污栅的支承一般采用滑动支承，当要求在一定水头下动水提栅时，为了减少启闭力，也可采用轮式支承。

拱形拦污栅的栅面结构与普通拦污栅相同，其支承框架采用拱形结构。

拦污栅槽埋件由主轨、反轨、侧轨和护角等构成，其结构形式及作用与平面闸门类似，但不需设置止水座板。

#### 四、拦污栅的水头损失和过栅流速

##### (一) 水头损失

水流通过拦污栅，入口水流或多或少都有撞击损失，过流断面也有一个收缩和扩散的过程（图 6-5），由此产生的水头损失，与流速、栅条的形状及水流方向等有关，可按下列公式计算：

$$h_w = \xi \frac{v^2}{2g} = \beta \sin \alpha \left( \frac{\delta}{b} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \quad (6-1)$$

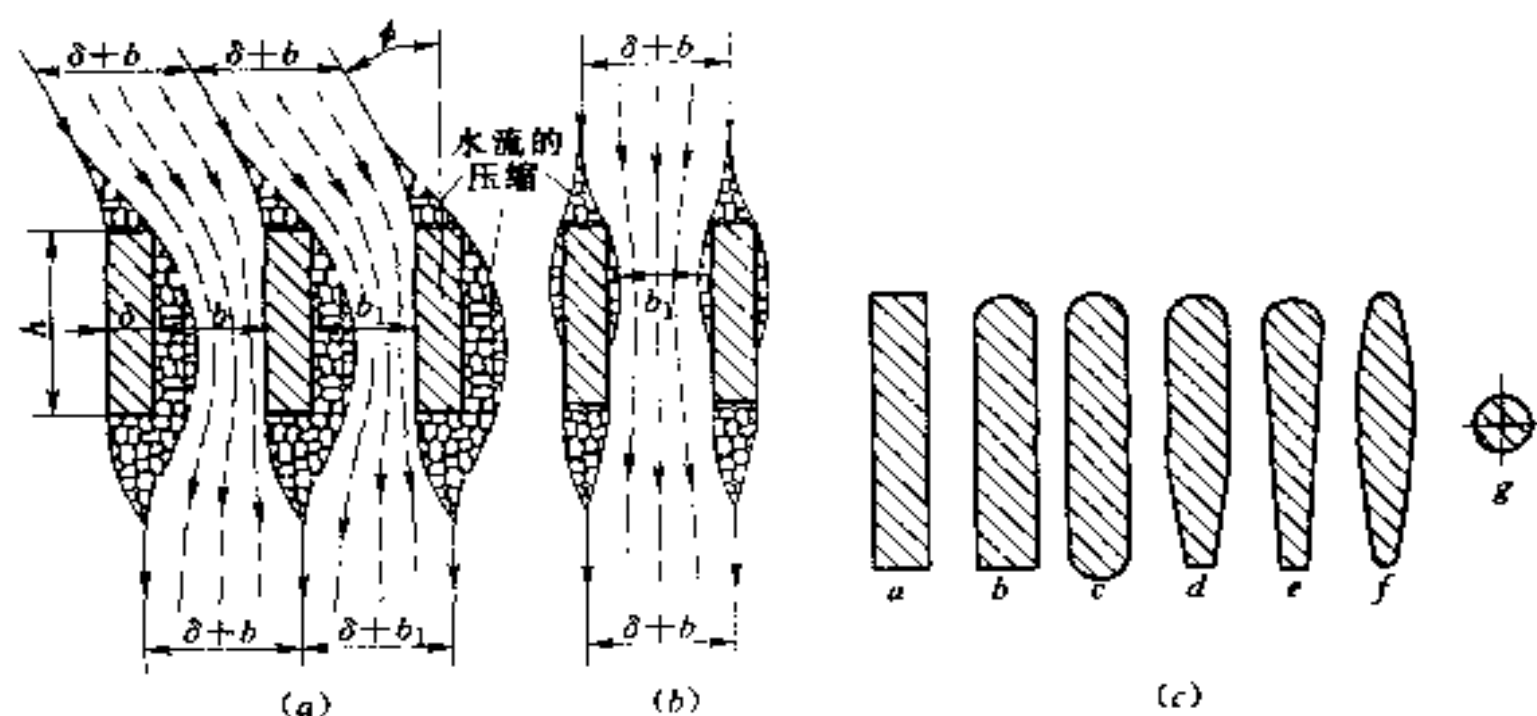


图 6-5 拦污栅栅条的水头损失及栅条典型断面

$$\xi = \beta \sin \alpha \left( \frac{\delta}{b} \right)^{4/3}$$

式中： $\xi$  为水流阻力系数； $\delta$  为栅条厚度； $b$  为栅条净间距； $\alpha$  为栅面与水平面所成的夹角； $\beta$  为栅条断面形状系数，见表 6-1。

表 6-1 栅条形状系数

| 栅条形状           | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 系数 $\beta$ 值   | 2.42     | 1.83     | 1.67     | 1.03     | 0.92     | 0.76     | 1.79     |
| 系数 $\beta_f$ 值 | 1.000    | 0.735    | 0.635    | 0.416    | 0.356    | 0.298    | 0.715    |

注 表中“栅条形状”中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$  见图 6-5 (c)。

如果流向拦污栅的水流与栅条横断面的轴线成倾斜状态，则过栅水头损失还要增加。当水流倾斜角为  $\phi$  时，则

$$h_w = \xi \frac{v^2}{2g} = \sigma \beta_f \sin \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (6-2)$$

式中： $\sigma$  为计及水流倾斜影响的系数，可由表 6-2 查出； $v$  为栅条行近流速； $\beta_f$  为栅条断面形状系数，见表 6-1。

表 6-2 计及水流倾斜影响的系数  $\sigma$

| $\frac{b}{b+\delta}$ | 进 流 倾 斜 角 $\phi$ |      |      |      |      |      |       |      |      |      |
|----------------------|------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|                      | 0°               | 5°   | 10°  | 15°  | 20°  | 25°  | 30°   | 40°  | 50°  | 60°  |
| 0.50                 | 2.34             | 2.40 | 2.48 | 2.57 | 2.68 | 2.80 | 2.95  | 3.65 | 4.00 | 4.70 |
| 0.55                 | 1.75             | 1.80 | 1.85 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.285 | 2.68 | 3.55 | 4.50 |
| 0.60                 | 1.35             | 1.38 | 1.42 | 1.48 | 1.55 | 1.65 | 1.79  | 2.19 | 3.00 | 4.35 |
| 0.65                 | 1.00             | 1.05 | 1.08 | 1.12 | 1.20 | 1.30 | 1.40  | 1.77 | 2.56 | 4.25 |
| 0.70                 | 0.78             | 0.80 | 0.85 | 0.89 | 0.95 | 1.05 | 1.17  | 1.52 | 2.30 | 4.10 |
| 0.75                 | 0.6              | 0.62 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.85 | 0.95  | 1.30 | 2.05 | 3.90 |
| 0.80                 | 0.37             | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.64 | 0.75  | 1.06 | 1.75 | 3.70 |
| 0.85                 | 0.24             | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.42 | 0.50 | 0.60  | 0.88 | 1.40 | 3.50 |

由此可知，水流进流条件对拦污栅的水头损失有很大影响。所以，拦污栅的布置应尽量垂直水流流向，也就是使水流倾斜角为  $\phi=0$ 。

上述公式考虑了栅条引起的水头损失。拦污栅总的水头损失

尚应包括支承构架以及污物所造成的水头损失，后者的损失较栅条要大，应将上述公式的计算值酌情增大，一般情况可达计算值的3倍，特殊情况应具体考虑。对于重要的大型工程，拦污栅的水头损失可通过模型试验确定。

## （二）拦污栅的过栅流速

当引用流量一定时，拦污栅孔口尺寸决定过栅流速。水流速度大，水头损失也大，清污较困难，但拦污栅孔口尺寸可减小，造价可降低。相反，水流速度小，拦污栅孔口尺寸将增大，则造价提高。对于泵站、水电站进水口的拦污栅，其过栅流速可参考下列数值：

采用人工清污时，宜取  $0.6 \sim 0.8 \text{ m/s}$ ；采用机械清污时宜取  $0.8 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ；不考虑清污时宜取  $0.5 \text{ m/s}$ 。

对于高水头坝后式水电站，拦污栅一般布置在水下较深处，通常没有水下清污要求，与低水头电站相比，其过栅水头损失在总水头中所占比例较小，因而可适当选用较高的过栅流速。

## 五、清污方式及清污机

设置拦污栅后，污物容易积聚在拦污栅前，造成拦污栅被堵塞，增加了水头损失，甚至压垮拦污栅，影响建筑物及设备的安全。为防止污物堵塞拦污栅，一般需要考虑清污措施。

### （一）清污方式

拦污栅的清污主要有手工清污、提栅清污和机械清污。

#### 1. 人工清污

一般栅前水位较浅，过栅流速不太大的小型工程的拦污栅，由人工使用齿耙直接在拦污栅上将污物捞起或用竹筏、木船下到栅前清理污物。但在一些大中型工程中，由于没有有效的清污设备，也采用人工清污。当水深大于  $5 \text{ m}$ ，污物数量较多时，水面清污有困难，有的电站派潜水员潜入栅前清理污物。人工清污劳动强度大，工作条件差，特别是水下工作情况复杂，清理出来的污物十分有限。另外人工清污通常需要停机操作，显然很不经济。

#### 2. 提栅清污

污物较多的电站、泵站，可在进水口设置前后两道垂直式拦污栅。第一道是经常工作的主栅，第二道是经常放置在平台上的副栅，当主栅需要提出来清污时，副栅下水工作后，主栅提升至平台清污，由人工清除污物后再下水，然后提升副栅至平台清污，如此完成一次清污过程。为使栅叶提出水面时污物不易掉落，沿拦污栅高度设一至数道悬臂长度为 200~400mm 的集污钩。由于拦污栅是在动水中提升和降落，所以拦污栅可设置悬臂式或简支式主轮。实践证明，两道拦污栅可不停机清污，清污效果良好。但也有不足之处，当污物来量大时，清污频繁，工人劳动强度大。

### 3. 机械清污

机械清污是使用清污机将污物从栅面捞起来。它适用于各种类型的电站和不同种类的污物，效率高，能节省大量的劳动力并降低工人的劳动强度，改善劳动条件，尤其能在动水情况下工作，是人工清污无法比拟的。

#### (二) 清污机

##### 1. 清污机的形式

目前，国内使用较多的清污机有耙斗式、悬吊式、回转式。

(1) 耙斗式清污机（图 6-6）。耙斗式清污机一般要求拦污栅

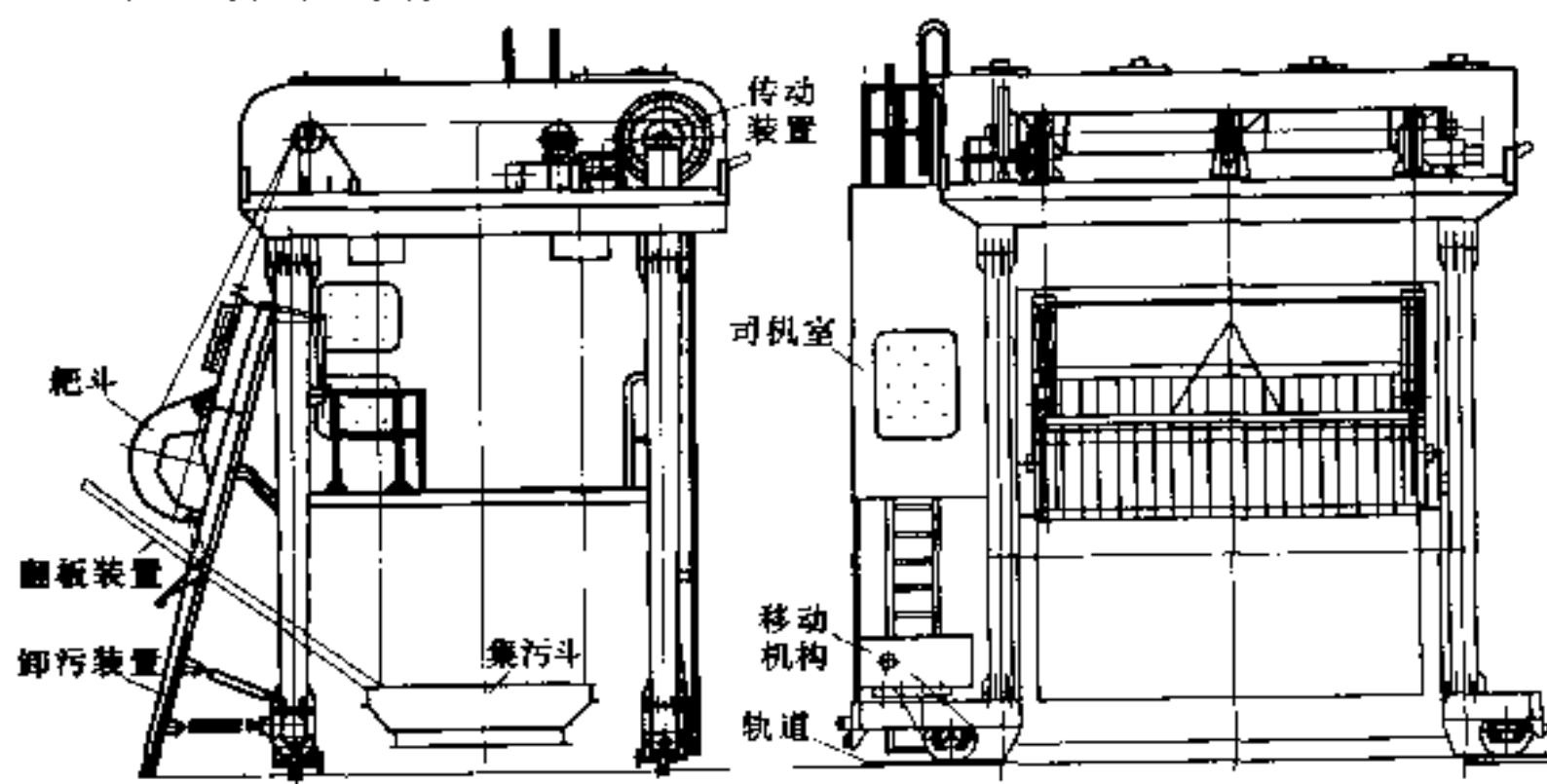


图 6-6 耙斗式清污机

倾斜布置，角度为  $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。清污机一般由机架、传动装置、行走机构、耙斗组成。传动装置安装在机架上，机架由行走机构驱动，沿平行拦污栅宽度方向的轨道移动。传动装置包括起升机构和开合机构。机架有门式、三角式或台车加混凝土排架式。耙斗可以是斗状和齿耙状，由活动部分和固定部分组成，活动部分在开合机构的控制下张开和闭合，整个耙斗可依靠自重沿着拦污栅的斜面上下行，有的工程还在拦污栅上设置耙斗导向装置。

清污机工作原理：在机架横向移动时，耙斗停靠在机架的导向斜板上。清污时耙斗为张开状态，在起升机构的牵引下沿着拦污栅的斜面下行，至污物聚集处，起升机构停止，开合机构启动，闭合耙斗抓取污物；抓取污物后耙斗在起升机构的牵引下上行至清污平台高程以上；待机构起升停止后，机架横向移动至清污平台；开合机构启动，张开清污耙，污物从耙斗中卸出，滑落到集污箱中。如此为一个清污循环。

拦污栅倾斜布置时耙斗可依靠自重沿着拦污栅的斜面上下行。受整机总重和轨距的限制，倾覆力矩不能过大，耙斗的宽度和容积不可能太大。为增加耙斗的工作效率，开合机构有时选用液压装置。这类清污机清污能力和效率较高，但因为有机架和轨道，设备造价较高，适用于孔口数量多、宽度较大的工程。

(2) 悬吊式清污机(图 6-7)。悬吊式清污机一般由传动装置、行走小车和耙斗等组成。传动装置包括起升机构和开合机构。行走小车悬吊在拦污栅上方的工字梁轨道上。通常传动装置和行走小车的行走机构采用电动葫芦改装而成。耙斗为斗状的，一般在拦污栅和栅槽上设置耙斗导向装置。

悬吊式清污机工作原理与耙斗式清污机相同。

悬吊式清污机可用于拦污栅垂直和倾斜两种布置方式的孔口。如果拦污栅倾斜布置，其顶部需要设置引导架，以利于清污机进入孔口，但清污机抓取污物后脱离拦污栅引导架的瞬间有个振动，污物容易重新掉落在拦污栅前，再者，清污机悬吊在单轨

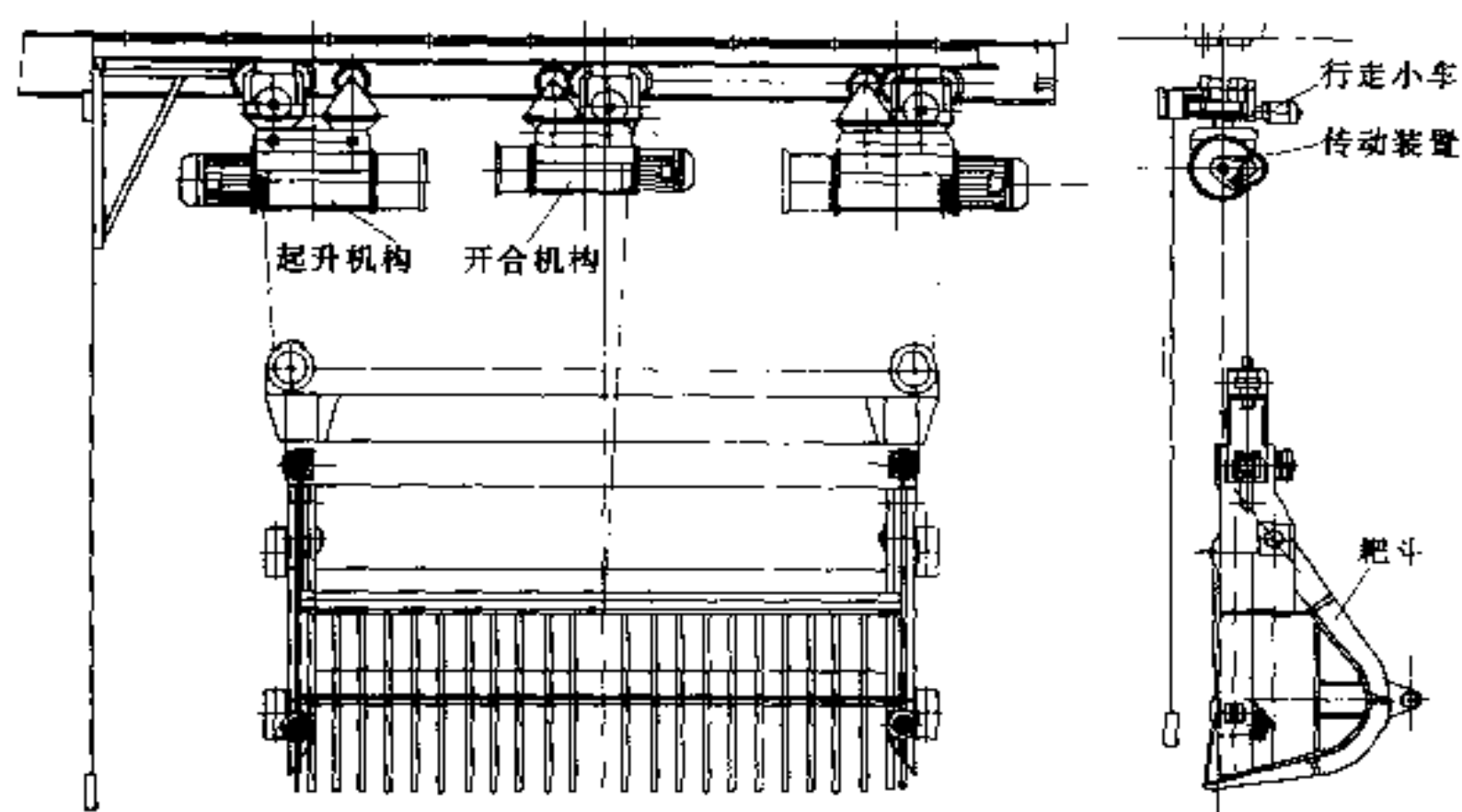


图 6-7 悬吊式清污机

上的话，倾斜角不能超过  $10^\circ$ 。如果拦污栅垂直布置，为保证清污机与拦污栅的接触，必须在拦污栅和栅槽上设置清污机的导向轨道，所以耙斗一般与孔口等宽，但受启闭力的限制，耙斗的宽度和容积也不能太大。这类清污机清污能力和效率一般，需要增加一个混凝土排架，总的造价相对较低，适用于孔口数量少、宽度较小的工程。

(3) 回转式清污机（图 6-8）。回转式清污机是把清污机和拦污栅结合在一起，有回转栅式和回转耙式两种。在平台以上的布置有支承架，支承架上一般设置有刮污装置，驱动装置安装在支承架上，两侧设置有链轮，在孔口宽度两边的支承架设置带滚轮的传动链条，在拦污栅底部设置导向轮，链条绕在链轮和导向轮上，可回转的短片状栅条或齿耙固定在链条上，栅条（齿耙）带有固定的耙齿。

回转式清污机工作原理：驱动装置驱动链轮旋转，链轮带动链条绕导向轮回转，使得栅条或齿耙沿拦污栅框架作回转运动，这样停靠在清污机前面的污物被栅条或耙上的固定的耙齿钩挂住，

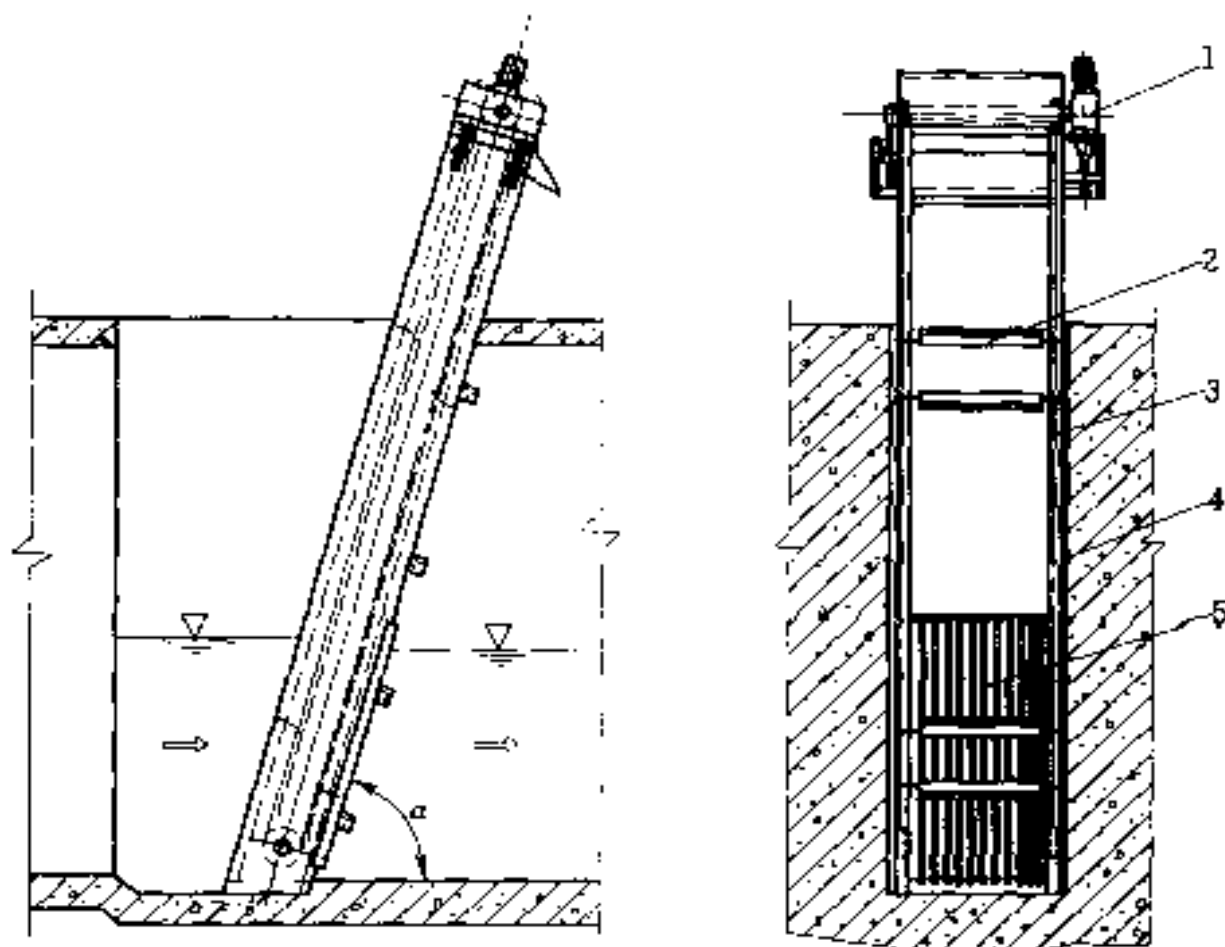


图 6-8 回转式清污机

1—驱动装置；2—清污耙；3—传动链条；4—机架；5—栅条

并随耙齿上行至平台，利用污物的自重和刮污装置的作用，污物掉落在平台上。

回转式清污机把拦污栅和清污机合二为一，可垂直布置和倾斜布置。回转栅式的结构自重大，需要的传动装置庞大，较少采用。常用的是回转耙式，链条一般采用不锈钢或氮化钢。这类清污机整体布置简洁美观，自动化程度高。缺点之一是造价高，尤其是在孔口数量多及孔口尺寸大时，更是如此；缺点之二是检修困难，孔口高度不大的可整体翻转至水面以上检修，孔口高度大的可设检修闸门，抽干水后检修；缺点之三是耙齿较短，不能清理体积较大的污物。这类清污机适用于泵站、污水处理厂之类的工程。

## 2. 清污机的选型

在设计中应根据工程的实际情况，具体分析，充分论证，综合比较，根据总体布置和污物情况，选择合适的清污机，做到既满足使用要求，保证工程的正常运行，又安全可行，经济合理。

对于进水口布置在拦河闸坝上的工程,在汛期一般污物较多,发电或抽水时,大部分污物顺水流积聚在拦污栅前,主要是大的竹木和农作物之类的东西,较难排走,一般应选用清污能力较好的耙斗式清污机。

对于进水口布置在河岸一侧的引水式、有拦河闸坝的工程,大部分污物积聚在拦河坝前,可以利用排污孔溢洪道排走,小部分污物积聚在拦污栅前,污物主要是树枝、水草之类的东西,一般可选用造价低的悬吊式清污机进行清理。

耙斗式清污机和悬吊式清污机通常兼作拦污栅的起吊设备。

对于进水口布置在河岸一侧的引水式、无拦河闸坝的泵站之类的工程,因进水口流速和流量远远小于主河道的流速和流量,其大部分污物顺主河道水流流走,漂浮到拦污栅前的污物主要是水草、编织袋和一些生活垃圾之类的东西,体积小,数量少,一般选用回转式清污机。

## 第二节 拦污栅的设计

### 一、拦污栅栅条间距

拦污栅栅条间距不宜过大,过大则会通过有害污物,起不到保护机组的作用;也不宜过小,过小则易于堵塞,加大水头损失。因此栅条的间距应根据水泵、水轮机的形式及转轮直径以及污物性质、数量等选择最大允许值。拦污栅栅条间距一般大于 50 mm,小于 200mm。

电站进水口的拦污栅栅条间距可参考表 6-3 初步选定。一般大型混流式和轴流式水轮机的导叶间隙较大,较大的污物可以通过;而小型的,尤其是冲击式水轮机,只有细小的污物才能穿行。

泵站进水口的拦污栅栅条间距:对于轴流泵,可取  $D/20$ ;对于混流泵和离心泵,可取  $D/30$ 。

表 6-3 水轮机转轮直径与栅条间距的关系

| 水轮机的形式及代号 |          | 栅条间距<br>(mm)               |
|-----------|----------|----------------------------|
| 轴流式       | 轴流转桨式 ZE | $D/20$                     |
|           | 轴流定桨式 ZD |                            |
| 混流式       | 混流式 HL   | $D/30$ (不超过转轮叶片之间出口的最小间距)  |
|           | 斜流式 XL   |                            |
| 贯流式       | 贯流转桨式 GZ | 参照轴流式规定                    |
|           | 贯流定桨式 GD |                            |
| 冲击式       | 水击式 CJ   | 根据喷出口尺寸确定, 一般约在 20~65mm 之间 |

注  $D$  为水轮机转轮直径。在工程设计中, 需与有关专业商定, 此表仅作参考。

## 二、拦污栅的结构计算

### 1. 荷载

作用在拦污栅上的荷载包括: 作用在栅面上的水压力, 流水及原木对栅面的撞击力, 机械清污机具作用在栅面上的附加荷载, 以及拦污栅的自重等。拦污栅设计荷载主要决定于栅面的水压差。在正常工作状态下 (没有堵塞的情况), 作用在拦污栅上的荷载是水通过拦污栅时所形成的上下游水位差, 其数值常为几厘米至几十厘米。如果存在污物, 则压差将增加。当拦污栅被污物和冰冻完全封堵时, 拦污栅将承受单方向的全部水头。这在电站运行上及拦污栅受力上是不允许的。所以必须采取有效的清污及防冻措施, 来保证拦污栅不被完全封堵。

引水发电系统的拦污栅的设计荷载, 应按栅面局部堵塞考虑, 设计水位差一般采用 2~4m。对于河床式和引水式电站的拦污栅, 一般可选取较大的水头差; 高水头坝后式电站的拦污栅, 则可选取较小的压差。特殊情况应具体分析确定, 水头差可适当加大, 但不宜超过 6m。

泵站的拦污栅设计水位差一般采用 1~2m, 特殊情况酌情增减。

### 2. 栅条的稳定性计算

平面式拦污栅与拱形拦污栅，其荷载分配及支承框架各构件的计算，与平面闸门、拱形闸门的相应构件的计算类似。栅条的强度计算，也与一般梁的计算相同。下面仅对栅条的稳定性计算作简要介绍。

(1) 荷载。设计水头下栅条单位长度所受的荷载：

$$q = 9.81 \rho_w H (\delta + b) \quad (6-3)$$

式中： $\rho_w$  为水的密度， $\text{kg}/\text{cm}^3$ ； $H$  为设计水头， $\text{m}$ 。

在漂木、杂物众多的地方，如果考虑可能的漂浮或潜没物体对拦污栅的撞击力时，撞击力视漂浮或潜没物体的尺寸大小来确定，该力作用于栅条的位置，应是简支梁的中央、悬臂梁的端部等不利处。

计算时应将设计水头下的均匀荷载与撞击集中荷载叠加。

(2) 栅条稳定计算。栅条一般采用狭长的矩形截面，比较容易失稳。所以不仅要对栅条进行强度计算，还要验算其稳定性。栅条的稳定计算，按悬臂和跨中分别进行。悬臂部分用悬臂梁的稳定计算公式验算，跨中部分用简支梁的计算公式计算。按荷载类型的不同，矩形截面的临界荷载  $P_K$  用下列公式计算。

当简支梁上作用均布荷载时：

$$P_K = \frac{28.3}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (6-4)$$

当简支梁跨中央作用集中荷载时：

$$P_K = \frac{16.93}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (6-5)$$

当悬臂梁上作用均布荷载时：

$$P_K = \frac{12.35}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (6-6)$$

当悬臂梁端作用集中荷载时：

$$P_K = \frac{4.01}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (6-7)$$

上四式中： $P_K$  为栅条整体稳定的临界荷载 ( $P_K \geq kQ_K$  或  $P_K \geq$

$kql$ ), N;  $Q_K$  为作用在栅条上的集中荷载, N;  $l$  为栅条跨度, cm;  
 $E$  为钢材的弹性模量, N/cm<sup>2</sup>;  $G$  为钢材的剪切弹性模量, N/cm<sup>2</sup>;  
 $I_y$  为栅条的惯性矩  $\left[ I_y = \frac{h\delta^3}{12} \right]$ , 当栅条截面中间开有螺栓孔时, 则  $I_y$   
 $= \frac{(h-d)\delta^3}{12}$ , cm<sup>4</sup>;  $I_d$  为栅条截面的抗扭惯性矩  $\left[ I_d = \frac{h\delta^3}{3} \right]$ , cm<sup>4</sup>;  
 $h$  为栅条断面高度, cm;  $\delta$  为栅条断面厚度, cm;  $d$  为螺栓孔直径,  
 cm;  $k$  为整体稳定安全系数, 可取 2。

### 三、拦污栅的起吊力计算

拦污栅的起吊一般是在无水或静水状态下进行, 其起吊力可按下列公式进行计算:

$$T = n_G G + n_m m \quad (6-8)$$

式中:  $G$  为拦污栅自重;  $n_G$  为自重安全系数, 一般采用 1.1;  $m$  为污物的重量, 按栅面部分堵塞考虑, 堵塞的面积按污物的分布情况假定;  $n_m$  为污物超载系数, 一般采用 1.2。

设置双道拦污栅时, 要在动水情况下提起拦污栅进行清污, 除按式 (6-8) 计算外, 尚应考虑拦污栅部分堵塞后所形成的最大水头差, 一般不大于 2m。则

$$T = n_G G + n_m m + Pf \quad (6-9)$$

式中:  $P$  为由水压力差所形成的荷载;  $f$  为滑动支承摩擦系数。

当拦污栅倾斜放置时, 应考虑倾斜角对起吊力的影响。

# 附录 A 型钢规格

表 A1

热轧钢板的

| 钢板<br>公称<br>厚度<br>(mm) | 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.90, 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 150, 160, 165, 170, 180, 185, 190, 195, 200 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |                 |      |      |      |      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----------------|------|------|------|------|
| 钢板<br>宽度<br>(m)        | 0.60                                                                                                                                                                                                           | 0.65 | 0.70 | 0.71 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.0  | 1.1 | 1.25            | 1.40 | 1.42 | 1.50 | 1.60 |
| 公称<br>厚度<br>(mm)       | 长 度                                                                                                                                                                                                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |                 |      |      |      |      |
| 0.50<br>~<br>0.60      | 1.2                                                                                                                                                                                                            | 1.4  | 1.42 | 1.42 | 1.50 | 1.50 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | —   | —               | —    | —    | —    | —    |
| 0.65<br>~<br>1.00      | 2.00                                                                                                                                                                                                           | 2.00 | 1.42 | 1.42 | 1.50 | 1.50 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | —   | —               | —    | —    | —    | —    |
| 1.20<br>~<br>1.40      | 2.0                                                                                                                                                                                                            | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0 | 2.5<br>~<br>3.0 | —    | —    | —    | —    |
| 1.50<br>~<br>1.80      | 2.0                                                                                                                                                                                                            | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0 | 2.0             | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  |
| 2.0<br>~<br>2.2        | 2.0                                                                                                                                                                                                            | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0 | 2.0             | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  |
| 2.5<br>~<br>3.9        | 2.0                                                                                                                                                                                                            | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0 | 2.0             | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  |

# 和截面特性

## 规格 (GB709—88)

2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 3.9, 4.0, 4.5, 5.0, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 45, 48, 50, 52, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 100, 105, 110, 120, 125, 130, 140,

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.50 | 2.60 | 2.70 | 2.80 | 2.90 | 3.00 | 3.20 | 3.40 | 3.60 | 3.8 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|

(m)

|     |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| —   | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| —   | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| —   | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| —   | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2.0 | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ~   | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6.0 | —   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2.0 | 2.0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ~   | ~   | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6.0 | 6.0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

|                        |                                                                                                                                                                                                                |        |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 钢板<br>公称<br>厚度<br>(mm) | 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.90, 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 150, 160, 165, 170, 180, 185, 190, 195, 200 |        |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |
| 钢板<br>宽度<br>(m)        | 0.60                                                                                                                                                                                                           | 0.65   | 0.70            | 0.71            | 0.75            | 0.80            | 0.85            | 0.90            | 0.95            | 1.0             | 1.1             | 1.25             | 1.40             | 1.42             | 1.50             | 1.60             |
| 公称<br>厚度<br>(mm)       | 长 度                                                                                                                                                                                                            |        |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |
| 4.0<br>~<br>5.0        | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  |
| 6<br>~<br>7            | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  |
| 8<br>~<br>10           | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 3.0<br>~<br>12.0 |
| 11<br>~<br>12          | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0 | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>6.0  | 2.0<br>~<br>12.0 | 3.0<br>~<br>12.0 |
| 13<br>~<br>25          | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | 2.5<br>~<br>6.5 | 2.5<br>~<br>6.5 | 2.5<br>~<br>12.0 | 2.5<br>~<br>12.0 | 3.0<br>~<br>12.0 | 3.0<br>~<br>12.0 | 3.5<br>~<br>12.0 |
| 26<br>~<br>40          | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | 2.5<br>~<br>12.0 | 2.5<br>~<br>12.0 | 2.5<br>~<br>12.0 | 3.0<br>~<br>12.0 | 3.0<br>~<br>12.0 |
| 42<br>~<br>190         | —<br>—                                                                                                                                                                                                         | —<br>— | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—          | —<br>—           | —<br>—           | 2.5<br>~<br>9.0  | 2.5<br>~<br>9.0  | 3.0<br>~<br>9.0  |

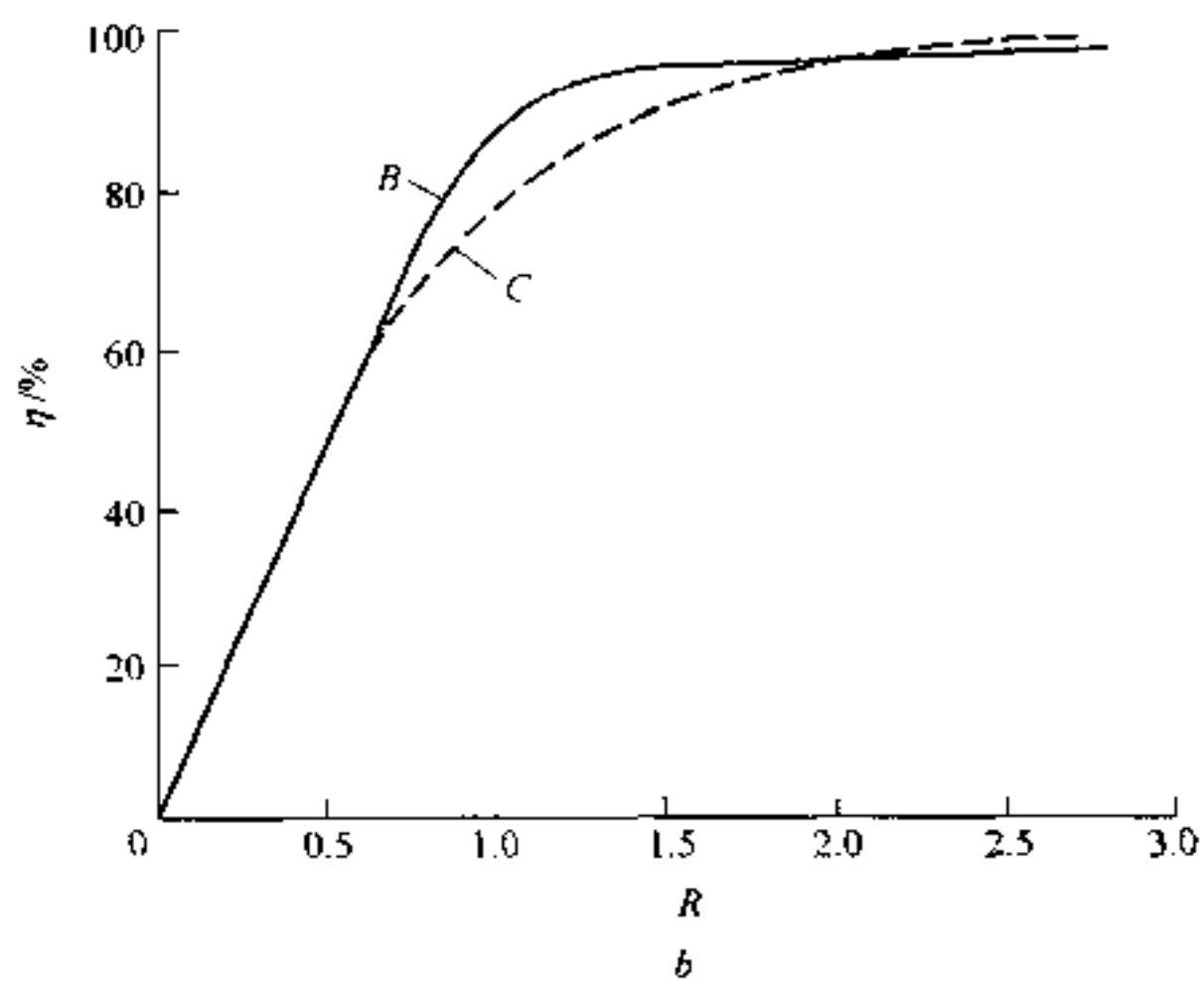
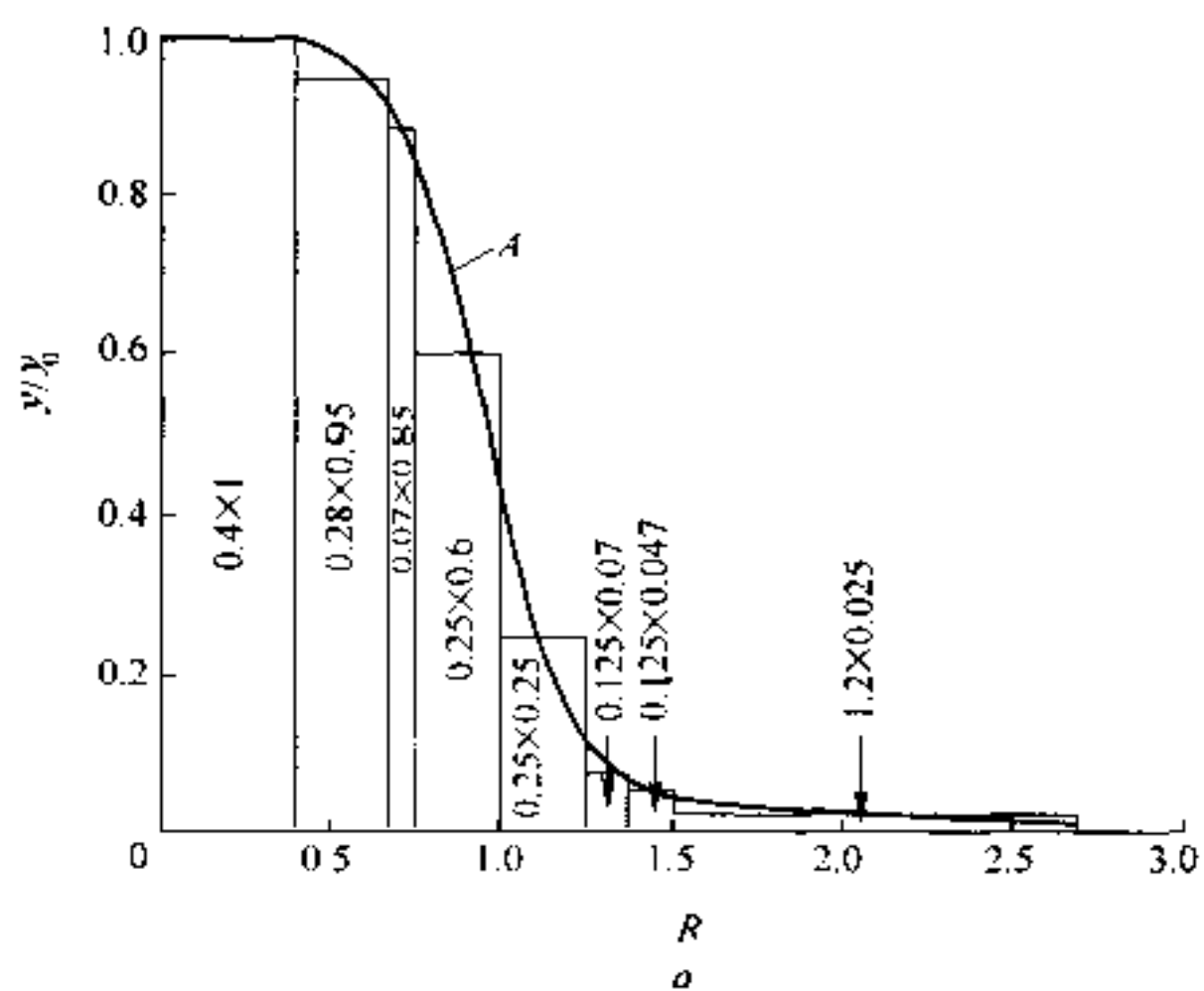


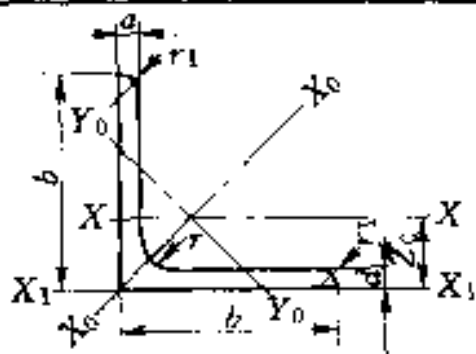
图 6-20 例 6-4 的解

A— $v/v_0$ - $R$  曲线; B— $\eta$ - $R$  曲线(实验值);

C— $\eta$ - $R$  曲线, 式(6-63)模拟值

表 A2

热轧等边



| 角钢号数 | 尺 寸<br>(mm) |       |       | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理论<br>质量<br>(kg/m) | 外表<br>面积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                  |                        |                                      |                                       |
|------|-------------|-------|-------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|      | b           | d     | r     |                                |                    |                                 | X—X                                  |                        |                                      | I <sub>X0</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |
|      |             |       |       |                                |                    |                                 | I <sub>X</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>X</sub><br>(cm) | W <sub>X</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) |                                       |
| 2    | 20          | 3     | 3.5   | 1.132                          | 0.889              | 0.078                           | 0.40                                 | 0.59                   | 0.29                                 | 0.63                                  |
|      |             | 4     |       | 1.159                          | 1.145              | 0.077                           | 0.50                                 | 0.58                   | 0.36                                 | 0.78                                  |
| 2.5  | 3           | 1.432 |       | 1.224                          | 0.098              | 0.82                            | 0.76                                 | 0.46                   | 1.29                                 |                                       |
|      | 4           | 1.859 |       | 1.459                          | 0.097              | 1.03                            | 0.74                                 | 0.59                   | 1.62                                 |                                       |
| 3.0  | 30          | 3     | 4.5   | 1.749                          | 1.373              | 0.117                           | 1.45                                 | 0.91                   | 0.65                                 | 2.31                                  |
|      |             | 4     |       | 2.276                          | 1.786              | 0.117                           | 1.84                                 | 0.90                   | 0.87                                 | 2.92                                  |
| 3.6  | 3           | 2.109 |       | 1.656                          | 0.141              | 2.58                            | 1.11                                 | 0.99                   | 4.09                                 |                                       |
|      | 4           | 2.756 |       | 2.163                          | 0.141              | 3.29                            | 1.09                                 | 1.28                   | 5.22                                 |                                       |
|      | 5           | 3.382 | 2.654 | 0.141                          | 3.95               | 1.08                            | 1.56                                 | 6.24                   |                                      |                                       |
| 4    | 40          | 3     | 5     | 2.359                          | 1.852              | 0.157                           | 3.59                                 | 1.23                   | 1.23                                 | 5.69                                  |
|      |             | 4     |       | 3.086                          | 2.422              | 0.157                           | 4.60                                 | 1.22                   | 1.60                                 | 7.29                                  |
|      |             | 5     |       | 3.791                          | 2.976              | 0.156                           | 5.53                                 | 1.21                   | 1.96                                 | 8.76                                  |
| 4.5  | 45          | 3     |       | 2.659                          | 2.088              | 0.177                           | 5.17                                 | 1.40                   | 1.58                                 | 8.20                                  |
|      |             | 4     | 3.486 | 2.736                          | 0.177              | 6.65                            | 1.38                                 | 2.05                   | 10.56                                |                                       |
|      |             | 5     | 4.292 | 3.369                          | 0.176              | 8.04                            | 1.37                                 | 2.51                   | 12.74                                |                                       |
|      |             | (6)   | 5.076 | 3.985                          | 0.176              | 9.33                            | 1.36                                 | 2.95                   | 14.76                                |                                       |
| 5    | 50          | 3     | 5.5   | 2.971                          | 2.332              | 0.197                           | 7.18                                 | 1.55                   | 1.96                                 | 11.37                                 |
|      |             | 4     |       | 3.897                          | 3.059              | 0.197                           | 9.26                                 | 1.54                   | 2.56                                 | 14.70                                 |
|      |             | 5     |       | 4.803                          | 3.770              | 0.196                           | 11.21                                | 1.53                   | 3.13                                 | 17.79                                 |
|      |             | (6)   |       | 5.688                          | 4.465              | 0.196                           | 13.05                                | 1.52                   | 3.68                                 | 20.68                                 |
| 5.6  | 56          | 3     | 6     | 3.343                          | 2.624              | 0.221                           | 10.19                                | 1.75                   | 2.48                                 | 16.14                                 |
|      |             | 4     |       | 4.390                          | 3.446              | 0.220                           | 13.18                                | 1.73                   | 3.24                                 | 20.92                                 |
|      |             | 5     |       | 5.415                          | 4.251              | 0.220                           | 16.02                                | 1.72                   | 3.97                                 | 25.42                                 |
|      |             | (8)   |       | 8.367                          | 6.568              | 0.219                           | 23.63                                | 1.68                   | 6.03                                 | 37.37                                 |

# 角 钢 (GB9787—88)

符号意义:

$b$ ——边宽;  $r_1$ ——边端内弧半径;

$r$ ——内圆弧半径;  $r_0$ ——顶端圆弧半径;

$I$ ——惯性矩;  $i$ ——惯性半径;

$W$ ——截面系数;  $Z_0$ ——重心距离;

$d$ ——边厚

| 数 值              |                                |                                |                  |                                |                                | $Z_0$<br>(cm) | 允许偏差<br>(mm) |      | 长度<br>(m) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------|------|-----------|
| $X_0-X_0$        |                                | $Y_0-Y_0$                      |                  |                                | $X_1-X_1$                      |               | 边宽           | 边厚   |           |
| $i_{X0}$<br>(cm) | $W_{X0}$<br>(cm <sup>3</sup> ) | $I_{Y0}$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $i_{Y0}$<br>(cm) | $W_{Y0}$<br>(cm <sup>3</sup> ) | $I_{X1}$<br>(cm <sup>4</sup> ) |               |              |      |           |
| 0.75             | 0.45                           | 0.17                           | 0.39             | 0.20                           | 0.81                           | 0.60          |              |      |           |
| 0.73             | 0.55                           | 0.22                           | 0.38             | 0.24                           | 1.09                           | 0.64          |              |      |           |
| 0.95             | 0.73                           | 0.34                           | 0.49             | 0.33                           | 1.57                           | 0.73          |              |      |           |
| 0.93             | 0.92                           | 0.43                           | 0.48             | 0.40                           | 2.11                           | 0.76          |              |      |           |
| 1.15             | 1.09                           | 0.61                           | 0.59             | 0.51                           | 2.71                           | 0.85          |              |      |           |
| 1.13             | 1.37                           | 0.77                           | 0.58             | 0.62                           | 3.63                           | 0.89          |              |      |           |
| 1.39             | 1.61                           | 1.07                           | 0.71             | 0.76                           | 4.68                           | 1.00          |              |      |           |
| 1.38             | 2.05                           | 1.37                           | 0.70             | 0.93                           | 6.25                           | 1.04          |              |      |           |
| 1.36             | 2.45                           | 1.65                           | 0.70             | 1.09                           | 7.84                           | 1.07          |              |      |           |
| 1.55             | 2.01                           | 1.49                           | 0.79             | 0.96                           | 6.41                           | 1.09          |              |      |           |
| 1.54             | 2.58                           | 1.91                           | 0.79             | 1.19                           | 8.56                           | 1.13          |              |      |           |
| 1.52             | 3.10                           | 2.30                           | 0.78             | 1.39                           | 10.74                          | 1.17          | ±0.8         | ±0.4 | 4~12      |
| 1.76             | 2.58                           | 2.14                           | 0.90             | 1.24                           | 9.12                           | 1.22          |              |      |           |
| 1.74             | 3.32                           | 2.75                           | 0.89             | 1.54                           | 12.18                          | 1.26          |              |      |           |
| 1.72             | 4.00                           | 3.33                           | 0.88             | 1.81                           | 15.25                          | 1.30          |              |      |           |
| 1.70             | 4.64                           | 3.89                           | 0.88             | 2.06                           | 18.36                          | 1.33          |              |      |           |
| 1.96             | 3.22                           | 2.98                           | 1.00             | 1.57                           | 12.50                          | 1.34          |              |      |           |
| 1.94             | 4.16                           | 3.82                           | 0.99             | 1.96                           | 16.69                          | 1.38          |              |      |           |
| 1.92             | 5.03                           | 4.64                           | 0.98             | 2.31                           | 20.90                          | 1.42          |              |      |           |
| 1.91             | 5.85                           | 5.42                           | 0.98             | 2.63                           | 25.14                          | 1.46          |              |      |           |
| 2.20             | 4.08                           | 4.24                           | 1.13             | 2.02                           | 17.56                          | 1.48          |              |      |           |
| 2.18             | 5.28                           | 5.46                           | 1.11             | 2.52                           | 23.43                          | 1.53          |              |      |           |
| 2.17             | 6.42                           | 6.61                           | 1.10             | 2.98                           | 29.33                          | 1.57          |              |      |           |
| 2.11             | 9.44                           | 9.89                           | 1.09             | 4.16                           | 47.24                          | 1.68          |              |      |           |

| 角<br>钢<br>号<br>数 | 尺 寸<br>(mm) |      |    | 截 面<br>面 积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理 论<br>质 量<br>(kg/m) | 外 表<br>面 积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                  |                        |                                      |                                       |
|------------------|-------------|------|----|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                  | b           | d    | r  |                                  |                      |                                   | X—X                                  |                        |                                      | I <sub>X0</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |
|                  |             |      |    |                                  |                      |                                   | I <sub>X</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>X</sub><br>(cm) | W <sub>X</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) |                                       |
| 6.3              | 63          | 4    | 7  | 4.978                            | 3.907                | 0.248                             | 19.03                                | 1.96                   | 4.13                                 | 30.17                                 |
|                  |             | 5    |    | 6.143                            | 4.822                | 0.248                             | 22.17                                | 1.94                   | 5.08                                 | 36.77                                 |
|                  |             | 6    |    | 7.288                            | 5.721                | 0.247                             | 27.12                                | 1.93                   | 6.00                                 | 43.03                                 |
|                  |             | (8)  |    | 9.515                            | 7.469                | 0.247                             | 34.46                                | 1.90                   | 7.75                                 | 54.56                                 |
|                  |             | (10) |    | 11.657                           | 9.151                | 0.246                             | 41.09                                | 1.88                   | 9.39                                 | 64.85                                 |
| 7                | 70          | 4    | 8  | 5.570                            | 4.372                | 0.275                             | 26.39                                | 2.18                   | 5.14                                 | 41.80                                 |
|                  |             | 5    |    | 6.875                            | 5.397                | 0.275                             | 32.21                                | 2.16                   | 6.32                                 | 51.08                                 |
|                  |             | 6    |    | 8.160                            | 6.406                | 0.275                             | 37.77                                | 2.15                   | 7.48                                 | 59.93                                 |
|                  |             | 7    |    | 9.424                            | 7.398                | 0.275                             | 43.09                                | 2.14                   | 8.59                                 | 68.35                                 |
|                  |             | 8    |    | 10.667                           | 8.373                | 0.274                             | 48.17                                | 2.12                   | 9.68                                 | 76.37                                 |
| (7.5)            | 75          | 5    | 9  | 7.367                            | 5.818                | 0.295                             | 39.97                                | 2.33                   | 7.32                                 | 63.30                                 |
|                  |             | 6    |    | 8.797                            | 6.905                | 0.294                             | 46.95                                | 2.31                   | 8.64                                 | 74.38                                 |
|                  |             | 7    |    | 10.160                           | 7.976                | 0.294                             | 53.57                                | 2.30                   | 9.93                                 | 84.96                                 |
|                  |             | 8    |    | 11.503                           | 9.030                | 0.294                             | 59.96                                | 2.28                   | 11.20                                | 95.07                                 |
|                  |             | (10) |    | 14.126                           | 11.089               | 0.293                             | 71.98                                | 2.26                   | 13.64                                | 113.92                                |
| 8                | 80          | 5    | 9  | 7.912                            | 6.211                | 0.315                             | 48.79                                | 2.48                   | 8.34                                 | 77.33                                 |
|                  |             | 6    |    | 9.397                            | 7.376                | 0.314                             | 57.35                                | 2.47                   | 9.87                                 | 90.98                                 |
|                  |             | 7    |    | 10.860                           | 8.525                | 0.314                             | 65.58                                | 2.46                   | 11.37                                | 104.07                                |
|                  |             | 8    |    | 12.303                           | 9.658                | 0.314                             | 73.49                                | 2.44                   | 12.83                                | 116.60                                |
|                  |             | (10) |    | 15.126                           | 11.874               | 0.313                             | 88.43                                | 2.42                   | 15.64                                | 140.09                                |
| 9                | 90          | 6    | 10 | 10.637                           | 8.350                | 0.354                             | 82.77                                | 2.79                   | 12.61                                | 131.26                                |
|                  |             | 7    |    | 12.301                           | 9.656                | 0.354                             | 94.83                                | 2.78                   | 14.54                                | 150.47                                |
|                  |             | 8    |    | 13.944                           | 10.946               | 0.353                             | 106.47                               | 2.76                   | 16.42                                | 168.97                                |
|                  |             | 10   |    | 17.167                           | 13.476               | 0.353                             | 128.58                               | 2.74                   | 20.07                                | 203.90                                |
|                  |             | (12) |    | 20.306                           | 15.940               | 0.352                             | 149.22                               | 2.71                   | 23.57                                | 236.21                                |
| 10               | 100         | 6    | 12 | 11.932                           | 9.366                | 0.393                             | 114.95                               | 3.10                   | 15.68                                | 181.98                                |
|                  |             | 7    |    | 13.796                           | 10.830               | 0.393                             | 131.86                               | 3.09                   | 18.10                                | 208.97                                |
|                  |             | 8    |    | 15.638                           | 12.276               | 0.393                             | 148.24                               | 3.08                   | 20.47                                | 235.07                                |
|                  |             | 10   |    | 19.261                           | 15.120               | 0.392                             | 179.51                               | 3.05                   | 25.06                                | 284.68                                |
|                  |             | 12   |    | 22.800                           | 17.898               | 0.391                             | 208.90                               | 3.03                   | 29.48                                | 330.95                                |
|                  |             | 14   |    | 26.256                           | 20.611               | 0.391                             | 236.53                               | 3.00                   | 33.73                                | 374.06                                |
|                  |             | 16   |    | 29.627                           | 23.257               | 0.390                             | 262.53                               | 2.98                   | 37.82                                | 414.16                                |

续表

| 数 值                            |                                       |                                       |                         |                                       |                                       | Z <sub>0</sub><br>(cm) | 允许偏差<br>(mm) |       | 长度<br>(m) |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------|-------|-----------|
| X <sub>0</sub> —X <sub>0</sub> |                                       | Y <sub>0</sub> —Y <sub>0</sub>        |                         |                                       | X <sub>1</sub> —X <sub>1</sub>        |                        | 边宽           | 边厚    |           |
| i <sub>X0</sub><br>(cm)        | W <sub>X0</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>Y0</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>Y0</sub><br>(cm) | W <sub>Y0</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>X1</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |                        |              |       |           |
| 2.46                           | 6.78                                  | 7.89                                  | 1.26                    | 3.29                                  | 33.35                                 | 1.70                   | ±1.2         | ±0.6  | 4~12      |
| 2.45                           | 8.25                                  | 9.57                                  | 1.25                    | 3.90                                  | 41.73                                 | 1.74                   |              |       |           |
| 2.43                           | 9.66                                  | 11.20                                 | 1.24                    | 4.46                                  | 50.14                                 | 1.78                   |              |       |           |
| 2.40                           | 12.25                                 | 14.33                                 | 1.23                    | 5.47                                  | 67.11                                 | 1.85                   |              |       |           |
| 2.36                           | 14.56                                 | 17.33                                 | 1.22                    | 6.36                                  | 84.31                                 | 1.93                   |              |       |           |
| 2.74                           | 8.44                                  | 10.99                                 | 1.40                    | 4.17                                  | 45.74                                 | 1.86                   |              |       |           |
| 2.73                           | 10.32                                 | 13.34                                 | 1.39                    | 4.95                                  | 57.21                                 | 1.91                   |              |       |           |
| 2.71                           | 12.11                                 | 15.61                                 | 1.38                    | 5.67                                  | 68.73                                 | 1.95                   |              |       |           |
| 2.69                           | 13.81                                 | 17.82                                 | 1.38                    | 6.34                                  | 80.29                                 | 1.99                   |              |       |           |
| 2.68                           | 15.43                                 | 19.98                                 | 1.37                    | 6.98                                  | 91.92                                 | 2.03                   |              |       |           |
| 2.92                           | 11.94                                 | 16.63                                 | 1.50                    | 5.77                                  | 70.56                                 | 2.04                   |              |       |           |
| 2.90                           | 14.02                                 | 19.51                                 | 1.49                    | 6.67                                  | 84.55                                 | 2.07                   |              |       |           |
| 2.89                           | 16.02                                 | 22.18                                 | 1.48                    | 7.44                                  | 98.71                                 | 2.11                   |              |       |           |
| 2.88                           | 17.93                                 | 24.86                                 | 1.47                    | 8.19                                  | 112.97                                | 2.15                   |              |       |           |
| 2.84                           | 21.48                                 | 30.05                                 | 1.46                    | 9.56                                  | 141.71                                | 2.22                   |              |       |           |
| 3.13                           | 13.67                                 | 20.25                                 | 1.60                    | 6.66                                  | 85.36                                 | 2.15                   |              |       |           |
| 3.11                           | 16.08                                 | 23.72                                 | 1.59                    | 7.65                                  | 102.50                                | 2.19                   |              |       |           |
| 3.10                           | 18.40                                 | 27.09                                 | 1.58                    | 8.58                                  | 119.70                                | 2.23                   |              |       |           |
| 3.08                           | 20.61                                 | 30.39                                 | 1.57                    | 9.46                                  | 136.97                                | 2.27                   |              |       |           |
| 3.04                           | 24.76                                 | 36.77                                 | 1.56                    | 11.08                                 | 171.74                                | 2.35                   |              |       |           |
| 3.51                           | 20.63                                 | 34.28                                 | 1.80                    | 9.95                                  | 145.87                                | 2.44                   |              |       |           |
| 3.50                           | 23.64                                 | 39.18                                 | 1.78                    | 11.19                                 | 170.30                                | 2.48                   |              |       |           |
| 3.48                           | 26.55                                 | 43.97                                 | 1.78                    | 12.35                                 | 194.80                                | 2.52                   |              |       |           |
| 3.45                           | 32.04                                 | 53.26                                 | 1.76                    | 14.52                                 | 244.07                                | 2.59                   |              |       |           |
| 3.41                           | 37.12                                 | 62.22                                 | 1.75                    | 16.49                                 | 293.76                                | 2.67                   |              |       |           |
| 3.90                           | 25.74                                 | 47.92                                 | 2.00                    | 12.69                                 | 200.07                                | 2.67                   | ±1.8         | ±0.70 | 4~19      |
| 3.89                           | 29.55                                 | 54.74                                 | 1.99                    | 14.26                                 | 233.54                                | 2.71                   |              |       |           |
| 3.88                           | 33.24                                 | 61.41                                 | 1.98                    | 15.75                                 | 267.09                                | 2.76                   |              |       |           |
| 3.84                           | 40.26                                 | 74.35                                 | 1.96                    | 18.54                                 | 334.48                                | 2.84                   |              |       |           |
| 3.81                           | 46.80                                 | 86.84                                 | 1.95                    | 21.08                                 | 402.34                                | 2.91                   |              |       |           |
| 3.77                           | 52.90                                 | 99.00                                 | 1.94                    | 23.44                                 | 470.75                                | 2.99                   |              |       |           |
| 3.74                           | 58.57                                 | 110.89                                | 1.94                    | 25.63                                 | 539.80                                | 3.06                   |              |       |           |

| 角<br>钢<br>号<br>数 | 尺 寸<br>(mm) |    |    | 截 面<br>面 积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理 论<br>质 量<br>(kg/m) | 外 表<br>面 积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                  |                        |                                      |                                       |
|------------------|-------------|----|----|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                  | b           | d  | r  |                                  |                      |                                   | X—X                                  |                        |                                      | I <sub>X0</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |
|                  |             |    |    |                                  |                      |                                   | I <sub>X</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>X</sub><br>(cm) | W <sub>X</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) |                                       |
| 11               | 110         | 7  | 12 | 15.196                           | 11.928               | 0.443                             | 177.16                               | 3.41                   | 22.05                                | 280.94                                |
|                  |             | 8  |    | 17.238                           | 13.532               | 0.443                             | 199.46                               | 3.40                   | 24.95                                | 316.49                                |
|                  |             | 10 |    | 21.261                           | 16.690               | 0.432                             | 242.19                               | 3.38                   | 30.60                                | 384.39                                |
|                  |             | 12 |    | 25.200                           | 19.782               | 0.431                             | 282.55                               | 3.35                   | 36.05                                | 448.17                                |
|                  |             | 14 |    | 29.050                           | 22.809               | 0.431                             | 320.71                               | 3.32                   | 41.31                                | 508.01                                |
| 12.5             | 125         | 8  | 14 | 19.750                           | 15.504               | 0.492                             | 297.03                               | 3.88                   | 32.52                                | 470.89                                |
|                  |             | 10 |    | 24.373                           | 19.133               | 0.491                             | 361.67                               | 3.85                   | 39.97                                | 573.89                                |
|                  |             | 12 |    | 28.912                           | 22.696               | 0.491                             | 423.16                               | 3.83                   | 41.17                                | 671.44                                |
|                  |             | 14 |    | 33.367                           | 26.193               | 0.490                             | 481.65                               | 3.80                   | 54.16                                | 763.73                                |
| 14               | 140         | 10 | 16 | 27.373                           | 21.488               | 0.551                             | 514.65                               | 4.34                   | 50.58                                | 817.27                                |
|                  |             | 12 |    | 32.512                           | 25.522               | 0.551                             | 603.68                               | 4.31                   | 59.80                                | 958.79                                |
|                  |             | 14 |    | 37.567                           | 29.490               | 0.550                             | 688.81                               | 4.28                   | 68.75                                | 1093.56                               |
|                  |             | 16 |    | 42.539                           | 33.393               | 0.549                             | 770.24                               | 4.26                   | 77.46                                | 1221.81                               |
| 16               | 160         | 10 | 16 | 31.502                           | 24.729               | 0.630                             | 779.53                               | 4.98                   | 66.70                                | 1237.30                               |
|                  |             | 12 |    | 37.441                           | 29.391               | 0.630                             | 916.58                               | 4.95                   | 78.98                                | 1455.68                               |
|                  |             | 14 |    | 43.296                           | 33.987               | 0.629                             | 1048.36                              | 4.92                   | 90.95                                | 1665.02                               |
|                  |             | 16 |    | 49.067                           | 38.518               | 0.629                             | 1175.08                              | 4.89                   | 102.63                               | 1865.57                               |
| 18               | 180         | 12 | 16 | 42.241                           | 33.159               | 0.710                             | 1321.35                              | 5.59                   | 100.82                               | 2100.10                               |
|                  |             | 14 |    | 48.896                           | 38.383               | 0.709                             | 1514.48                              | 5.56                   | 116.25                               | 2407.42                               |
|                  |             | 16 |    | 55.467                           | 43.542               | 0.709                             | 1700.99                              | 5.54                   | 131.13                               | 2703.37                               |
|                  |             | 18 |    | 61.955                           | 48.634               | 0.708                             | 1875.12                              | 5.50                   | 145.64                               | 2988.24                               |
| 20               | 200         | 14 | 18 | 54.642                           | 42.894               | 0.788                             | 2103.55                              | 6.20                   | 144.70                               | 3343.26                               |
|                  |             | 16 |    | 62.013                           | 48.680               | 0.788                             | 2366.15                              | 6.18                   | 163.65                               | 3760.89                               |
|                  |             | 18 |    | 69.301                           | 54.401               | 0.787                             | 2620.64                              | 6.15                   | 182.22                               | 4164.54                               |
|                  |             | 20 |    | 76.505                           | 60.056               | 0.787                             | 2867.30                              | 6.12                   | 200.42                               | 4554.55                               |
|                  |             | 24 |    | 90.661                           | 71.168               | 0.785                             | 3338.25                              | 6.07                   | 236.17                               | 5294.97                               |

注 1. 等边角钢计算理论重量时, 钢的密度为 7.85g/cm<sup>3</sup>。

2. 标记示例: 普通碳素钢 Q235A 级镇静钢, 尺寸为 160mm×160mm×16mm 的

热轧等边角钢  $\frac{160 \times 160 \times 16 - \text{GB9787-88}}{\text{Q235A - GB700-88}}$

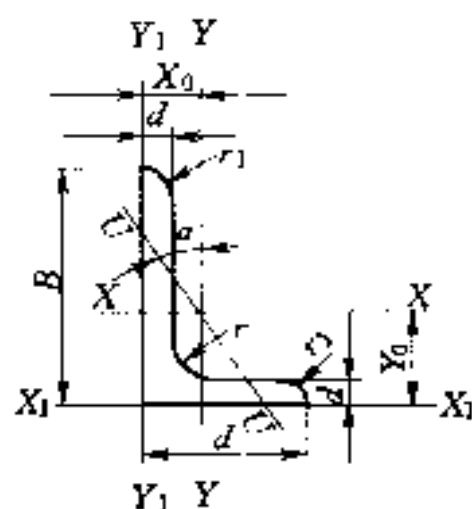
续表

| 数 值                             |                                       |                                       |                         |                                       |                                       | Z <sub>0</sub><br>(cm) | 允许偏差<br>(mm) |       | 长度<br>(m) |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------|-------|-----------|
| X <sub>0</sub> --X <sub>0</sub> |                                       | Y <sub>0</sub> -Y <sub>0</sub>        |                         |                                       | X <sub>1</sub> -X <sub>1</sub>        |                        | 边宽           | 边厚    |           |
| i <sub>x0</sub><br>(cm)         | W <sub>x0</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>y0</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y0</sub><br>(cm) | W <sub>y0</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>x1</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |                        |              |       |           |
| 4.30                            | 36.12                                 | 73.38                                 | 2.20                    | 17.51                                 | 310.64                                | 2.96                   | ±1.8         | ±0.70 | 4~19      |
| 4.28                            | 40.69                                 | 82.42                                 | 2.19                    | 19.39                                 | 355.20                                | 3.01                   |              |       |           |
| 4.25                            | 49.42                                 | 99.98                                 | 2.17                    | 22.91                                 | 444.65                                | 3.09                   |              |       |           |
| 4.22                            | 57.62                                 | 116.93                                | 2.15                    | 26.15                                 | 534.60                                | 3.16                   |              |       |           |
| 4.18                            | 65.31                                 | 133.40                                | 2.14                    | 29.14                                 | 625.16                                | 3.24                   |              |       |           |
| 4.88                            | 53.28                                 | 123.16                                | 2.50                    | 25.86                                 | 521.01                                | 3.37                   |              |       |           |
| 4.85                            | 64.93                                 | 149.46                                | 2.48                    | 30.62                                 | 651.93                                | 3.45                   |              |       |           |
| 4.82                            | 75.96                                 | 171.88                                | 2.46                    | 35.03                                 | 783.42                                | 3.53                   |              |       |           |
| 4.78                            | 86.41                                 | 199.57                                | 2.45                    | 39.13                                 | 915.61                                | 3.61                   |              |       |           |
| 5.46                            | 82.56                                 | 212.04                                | 2.78                    | 39.20                                 | 915.11                                | 3.82                   |              |       |           |
| 5.43                            | 96.85                                 | 248.57                                | 2.76                    | 45.02                                 | 1099.28                               | 3.90                   |              |       |           |
| 5.40                            | 110.47                                | 284.06                                | 2.75                    | 50.45                                 | 1284.22                               | 3.98                   |              |       |           |
| 5.36                            | 123.42                                | 318.67                                | 2.74                    | 55.55                                 | 1470.07                               | 4.06                   |              |       |           |
| 6.27                            | 109.36                                | 321.76                                | 3.20                    | 52.76                                 | 1365.33                               | 4.31                   | ±2.5         | ±1.0  | 6~19      |
| 6.24                            | 128.67                                | 377.49                                | 3.18                    | 60.74                                 | 1639.57                               | 4.39                   |              |       |           |
| 6.20                            | 147.17                                | 431.70                                | 3.16                    | 68.24                                 | 1914.68                               | 4.47                   |              |       |           |
| 6.17                            | 164.89                                | 484.59                                | 3.14                    | 75.31                                 | 2190.82                               | 4.55                   |              |       |           |
| 7.05                            | 165.00                                | 542.61                                | 3.58                    | 78.41                                 | 2332.80                               | 4.89                   |              |       |           |
| 7.02                            | 189.14                                | 621.53                                | 3.56                    | 88.38                                 | 2723.48                               | 4.97                   |              |       |           |
| 6.98                            | 212.40                                | 698.60                                | 3.55                    | 97.83                                 | 3115.29                               | 5.05                   |              |       |           |
| 6.94                            | 234.78                                | 762.01                                | 3.51                    | 105.14                                | 3502.43                               | 5.13                   |              |       |           |
| 7.82                            | 236.40                                | 863.83                                | 3.98                    | 111.82                                | 3734.10                               | 5.46                   |              |       |           |
| 7.79                            | 265.93                                | 971.41                                | 3.96                    | 123.96                                | 4270.39                               | 5.54                   |              |       |           |
| 7.75                            | 294.48                                | 1076.74                               | 3.94                    | 135.52                                | 4808.13                               | 5.62                   |              |       |           |
| 7.72                            | 322.06                                | 1180.04                               | 3.93                    | 146.55                                | 5347.51                               | 5.69                   |              |       |           |
| 7.64                            | 374.41                                | 1381.53                               | 3.90                    | 166.65                                | 6457.16                               | 5.87                   |              |       |           |

热轧等边角钢标记如下:

表 A3

热轧不等边



| 角<br>钢<br>号<br>数 | 尺 寸<br>(mm) |    |   |     | 截<br>面<br>面<br>积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理<br>论<br>质<br>量<br>(kg/m) | 外<br>表<br>面<br>积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                  |                        |                                      |                                      |                        |
|------------------|-------------|----|---|-----|----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
|                  | B           | b  | d | r   |                                        |                            |                                         | X—X                                  |                        |                                      | Y—Y                                  |                        |
|                  |             |    |   |     |                                        |                            |                                         | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) |
| 2.5/1.6          | 25          | 16 | 3 | 3.5 | 1.162                                  | 0.912                      | 0.080                                   | 0.70                                 | 0.73                   | 0.43                                 | 0.22                                 | 0.44                   |
|                  |             |    | 4 |     | 1.499                                  | 1.176                      | 0.079                                   | 0.88                                 | 0.77                   | 0.55                                 | 0.27                                 | 0.43                   |
| 3.2/2            | 32          | 20 | 3 | 4   | 1.492                                  | 1.171                      | 0.102                                   | 1.53                                 | 1.01                   | 0.72                                 | 0.46                                 | 0.55                   |
|                  |             |    | 4 |     | 1.939                                  | 1.522                      | 0.101                                   | 1.93                                 | 1.00                   | 0.93                                 | 0.57                                 | 0.54                   |
| 4/2.5            | 40          | 25 | 3 | 4   | 1.890                                  | 1.484                      | 0.127                                   | 3.08                                 | 1.28                   | 1.15                                 | 0.93                                 | 0.70                   |
|                  |             |    | 4 |     | 2.467                                  | 1.936                      | 0.127                                   | 3.93                                 | 1.26                   | 1.49                                 | 1.18                                 | 0.69                   |
| 4.5/2.8          | 45          | 28 | 3 | 5   | 2.149                                  | 1.687                      | 0.143                                   | 4.45                                 | 1.44                   | 1.47                                 | 1.34                                 | 0.79                   |
|                  |             |    | 4 |     | 2.806                                  | 2.203                      | 0.143                                   | 5.69                                 | 1.42                   | 1.91                                 | 1.70                                 | 0.78                   |
| 5/3.2            | 50          | 32 | 3 | 5.5 | 2.431                                  | 1.908                      | 0.161                                   | 6.24                                 | 1.60                   | 1.84                                 | 2.02                                 | 0.91                   |
|                  |             |    | 4 |     | 3.177                                  | 2.494                      | 0.160                                   | 8.02                                 | 1.59                   | 2.39                                 | 2.58                                 | 0.90                   |
| 5.6/3.6          | 56          | 36 | 3 | 6   | 2.743                                  | 2.153                      | 0.181                                   | 8.88                                 | 1.80                   | 2.32                                 | 2.92                                 | 1.03                   |
|                  |             |    | 4 |     | 3.590                                  | 2.818                      | 0.180                                   | 11.45                                | 1.79                   | 3.03                                 | 3.76                                 | 1.02                   |
|                  |             |    | 5 |     | 4.415                                  | 3.466                      | 0.180                                   | 13.86                                | 1.77                   | 3.71                                 | 4.49                                 | 1.01                   |
| 6.3/4            | 63          | 40 | 4 | 7   | 4.058                                  | 3.185                      | 0.202                                   | 16.49                                | 2.02                   | 3.87                                 | 5.23                                 | 1.14                   |
|                  |             |    | 5 |     | 4.993                                  | 3.920                      | 0.202                                   | 20.02                                | 2.00                   | 4.74                                 | 6.31                                 | 1.12                   |
|                  |             |    | 6 |     | 5.908                                  | 4.638                      | 0.201                                   | 23.36                                | 1.96                   | 5.59                                 | 7.29                                 | 1.11                   |
|                  |             |    | 7 |     | 6.802                                  | 5.339                      | 0.201                                   | 26.53                                | 1.98                   | 6.40                                 | 8.24                                 | 1.10                   |
| 7/4.5            | 70          | 45 | 4 | 7.5 | 4.547                                  | 3.570                      | 0.226                                   | 23.17                                | 2.26                   | 4.85                                 | 7.55                                 | 1.29                   |
|                  |             |    | 5 |     | 5.609                                  | 4.403                      | 0.225                                   | 27.95                                | 2.23                   | 5.92                                 | 9.13                                 | 1.28                   |
|                  |             |    | 6 |     | 6.647                                  | 5.218                      | 0.225                                   | 32.54                                | 2.21                   | 6.95                                 | 10.62                                | 1.26                   |
|                  |             |    | 7 |     | 7.657                                  | 6.011                      | 0.225                                   | 37.22                                | 2.20                   | 8.03                                 | 12.01                                | 1.25                   |

# 角 钢 (GB9788—88)

符号意义:

$B$ ——长边宽度;       $b$ ——短边宽度  
 $d$ ——边厚;       $r$ ——内圆弧半径;  
 $r_1$ ——边端内弧半径;       $I$ ——惯性矩;  
 $r_0$ ——顶端圆弧半径;       $W$ ——截面系数;  
 $i$ ——惯性半径;       $Y_0$ ——重心距离;  
 $X_0$ ——重心距离

| 数 值                         |                                |               |                                |               |                             |               |                             |       | 允许偏差<br>(mm) |      | 长度<br>(m) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-------|--------------|------|-----------|
| $X_1-X_1$                   |                                |               | $Y_1-Y_1$                      |               | $U-U$                       |               |                             |       | 边宽           | 边厚   |           |
| $W_y$<br>(cm <sup>3</sup> ) | $I_{x1}$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $Y_0$<br>(cm) | $I_{y0}$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $X_0$<br>(cm) | $I_u$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $i_u$<br>(cm) | $W_u$<br>(cm <sup>3</sup> ) | tgα   |              |      |           |
| 0.19                        | 1.56                           | 0.86          | 0.43                           | 0.42          | 0.14                        | 0.34          | 0.16                        | 0.392 | ±0.8         | ±0.4 | 3~9       |
| 0.24                        | 2.09                           | 0.90          | 0.59                           | 0.46          | 0.17                        | 0.34          | 0.20                        | 0.381 |              |      |           |
| 0.30                        | 3.27                           | 1.08          | 0.82                           | 0.49          | 0.28                        | 0.43          | 0.25                        | 0.382 |              |      |           |
| 0.39                        | 4.37                           | 1.12          | 1.12                           | 0.53          | 0.35                        | 0.42          | 0.32                        | 0.374 |              |      |           |
| 0.49                        | 6.39                           | 1.32          | 1.59                           | 0.59          | 0.56                        | 0.54          | 0.40                        | 0.386 |              |      |           |
| 0.63                        | 8.53                           | 1.37          | 2.14                           | 0.63          | 0.71                        | 0.54          | 0.52                        | 0.381 |              |      |           |
| 0.62                        | 9.10                           | 1.47          | 2.23                           | 0.64          | 0.80                        | 0.61          | 0.51                        | 0.383 |              |      |           |
| 0.80                        | 12.13                          | 1.51          | 3.00                           | 0.68          | 1.02                        | 0.60          | 0.66                        | 0.380 |              |      |           |
| 0.82                        | 12.49                          | 1.60          | 3.31                           | 0.73          | 1.20                        | 0.70          | 0.68                        | 0.404 |              |      |           |
| 1.06                        | 16.65                          | 1.65          | 4.45                           | 0.77          | 1.53                        | 0.69          | 0.87                        | 0.402 |              |      |           |
| 1.05                        | 17.54                          | 1.78          | 4.70                           | 0.80          | 1.73                        | 0.79          | 0.87                        | 0.408 |              |      |           |
| 1.37                        | 23.39                          | 1.82          | 6.33                           | 0.85          | 2.23                        | 0.79          | 1.13                        | 0.408 |              |      |           |
| 1.65                        | 29.25                          | 1.87          | 7.94                           | 0.88          | 2.67                        | 0.78          | 1.36                        | 0.404 |              |      |           |
| 1.70                        | 33.30                          | 2.04          | 8.63                           | 0.92          | 3.12                        | 0.88          | 1.40                        | 0.398 | ±1.5         | ±0.6 | 4~12      |
| 2.71                        | 41.63                          | 2.08          | 10.86                          | 0.95          | 3.76                        | 0.87          | 1.71                        | 0.396 |              |      |           |
| 2.43                        | 49.98                          | 2.12          | 13.12                          | 0.99          | 4.34                        | 0.86          | 1.99                        | 0.393 |              |      |           |
| 2.78                        | 58.07                          | 2.15          | 15.47                          | 1.03          | 4.97                        | 0.86          | 2.29                        | 0.389 |              |      |           |
| 2.17                        | 45.92                          | 2.24          | 12.26                          | 1.02          | 4.40                        | 0.98          | 1.77                        | 0.410 |              |      |           |
| 2.65                        | 57.10                          | 2.28          | 15.39                          | 1.06          | 5.40                        | 0.98          | 2.19                        | 0.407 |              |      |           |
| 3.12                        | 68.35                          | 2.32          | 18.58                          | 1.09          | 6.35                        | 0.98          | 2.59                        | 0.404 |              |      |           |
| 3.57                        | 79.99                          | 2.36          | 21.84                          | 1.13          | 7.16                        | 0.97          | 2.94                        | 0.402 |              |      |           |

| 角<br>钢<br>号<br>数 | 尺 寸<br>(mm) |    |    |    | 截 面<br>面 积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理 论<br>质 量<br>(kg/m) | 外 表<br>面 积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                        |                              |                                            |                                            |                              |
|------------------|-------------|----|----|----|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|
|                  | B           | b  | d  | r  |                                  |                      |                                   | X—X                                        |                              |                                            | Y—Y                                        |                              |
|                  |             |    |    |    |                                  |                      |                                   | <i>I<sub>x</sub></i><br>(cm <sup>4</sup> ) | <i>i<sub>x</sub></i><br>(cm) | <i>W<sub>x</sub></i><br>(cm <sup>3</sup> ) | <i>I<sub>y</sub></i><br>(cm <sup>4</sup> ) | <i>i<sub>y</sub></i><br>(cm) |
| (7.5/5)          | 75          | 50 | 5  | 8  | 6.125                            | 4.808                | 0.245                             | 34.86                                      | 2.39                         | 6.83                                       | 12.61                                      | 1.44                         |
|                  |             |    | 6  |    | 7.260                            | 5.699                | 0.245                             | 41.12                                      | 2.38                         | 8.12                                       | 14.70                                      | 1.42                         |
|                  |             |    | 8  |    | 9.467                            | 7.431                | 0.244                             | 52.39                                      | 2.35                         | 10.52                                      | 18.53                                      | 1.40                         |
|                  |             |    | 10 |    | 11.590                           | 9.098                | 0.244                             | 62.71                                      | 2.33                         | 12.79                                      | 21.96                                      | 1.38                         |
| 8/5              | 80          | 50 | 5  | 8  | 6.375                            | 5.005                | 0.255                             | 41.96                                      | 2.56                         | 7.78                                       | 12.82                                      | 1.42                         |
|                  |             |    | 6  |    | 7.560                            | 5.935                | 0.255                             | 49.49                                      | 2.56                         | 9.25                                       | 14.95                                      | 1.41                         |
|                  |             |    | 7  |    | 8.724                            | 6.848                | 0.255                             | 56.16                                      | 2.54                         | 10.58                                      | 16.96                                      | 1.39                         |
|                  |             |    | 8  |    | 9.867                            | 7.745                | 0.254                             | 62.83                                      | 2.52                         | 11.92                                      | 18.85                                      | 1.38                         |
| 9/5.6            | 90          | 56 | 5  | 9  | 7.212                            | 5.661                | 0.287                             | 60.45                                      | 2.90                         | 9.92                                       | 18.32                                      | 1.59                         |
|                  |             |    | 6  |    | 8.557                            | 6.717                | 0.286                             | 71.03                                      | 2.88                         | 11.74                                      | 21.42                                      | 1.58                         |
|                  |             |    | 7  |    | 9.880                            | 7.756                | 0.286                             | 81.01                                      | 2.86                         | 13.49                                      | 24.36                                      | 1.57                         |
|                  |             |    | 8  |    | 11.183                           | 8.779                | 0.286                             | 91.03                                      | 2.85                         | 15.27                                      | 27.15                                      | 1.56                         |
| 10/6.3           | 100         | 63 | 6  | 10 | 9.617                            | 7.550                | 0.320                             | 99.06                                      | 3.21                         | 14.64                                      | 30.94                                      | 1.79                         |
|                  |             |    | 7  |    | 11.111                           | 8.722                | 0.320                             | 113.45                                     | 3.20                         | 16.88                                      | 35.26                                      | 1.78                         |
|                  |             |    | 8  |    | 12.584                           | 9.878                | 0.319                             | 127.37                                     | 3.18                         | 19.08                                      | 39.39                                      | 1.77                         |
|                  |             |    | 10 |    | 15.467                           | 12.142               | 0.319                             | 153.81                                     | 3.15                         | 23.32                                      | 47.12                                      | 1.74                         |
| 10/8             | 100         | 80 | 6  | 10 | 10.637                           | 8.350                | 0.354                             | 107.04                                     | 3.17                         | 15.19                                      | 61.24                                      | 2.40                         |
|                  |             |    | 7  |    | 12.301                           | 9.656                | 0.354                             | 122.73                                     | 3.16                         | 17.52                                      | 70.08                                      | 2.39                         |
|                  |             |    | 8  |    | 13.944                           | 10.946               | 0.353                             | 137.92                                     | 3.14                         | 19.81                                      | 78.58                                      | 2.37                         |
|                  |             |    | 10 |    | 17.167                           | 13.476               | 0.353                             | 166.87                                     | 3.12                         | 24.24                                      | 94.65                                      | 2.35                         |
| 11/7             | 110         | 70 | 6  | 10 | 10.637                           | 8.350                | 0.354                             | 133.37                                     | 3.54                         | 17.85                                      | 42.92                                      | 2.01                         |
|                  |             |    | 7  |    | 12.301                           | 9.656                | 0.354                             | 153.00                                     | 3.53                         | 20.60                                      | 49.01                                      | 2.00                         |
|                  |             |    | 8  |    | 13.944                           | 10.946               | 0.353                             | 172.04                                     | 3.51                         | 23.30                                      | 54.87                                      | 1.98                         |
|                  |             |    | 10 |    | 17.167                           | 13.476               | 0.353                             | 208.39                                     | 3.48                         | 28.54                                      | 65.88                                      | 1.96                         |

续表

| 数 值                         |                                |               |                                |               |                             |               |                             |         | 允许偏差<br>(mm) |       | 长度<br>(m) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|---------|--------------|-------|-----------|
|                             | $X_1-X_1$                      |               | $Y_1-Y_1$                      |               | $U-U$                       |               |                             |         | 边宽           | 边厚    |           |
| $W_Y$<br>(cm <sup>3</sup> ) | $I_{X1}$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $Y_0$<br>(cm) | $I_{Y0}$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $X_0$<br>(cm) | $I_u$<br>(cm <sup>4</sup> ) | $i_u$<br>(cm) | $W_u$<br>(cm <sup>3</sup> ) | $\lg a$ |              |       |           |
| 3.30                        | 70.00                          | 2.40          | 21.04                          | 1.17          | 7.41                        | 1.10          | 2.74                        | 0.435   | ±1.5         | ±0.6  | 4~12      |
| 3.88                        | 84.30                          | 2.44          | 25.37                          | 1.21          | 8.54                        | 1.08          | 3.19                        | 0.435   |              |       |           |
| 4.99                        | 112.50                         | 2.52          | 34.23                          | 1.29          | 10.87                       | 1.07          | 4.10                        | 0.429   |              |       |           |
| 6.04                        | 140.80                         | 2.60          | 43.43                          | 1.36          | 13.10                       | 1.06          | 4.99                        | 0.423   |              |       |           |
| 3.32                        | 85.21                          | 2.60          | 21.06                          | 1.14          | 7.66                        | 1.10          | 2.74                        | 0.388   |              |       |           |
| 3.91                        | 102.53                         | 2.65          | 25.41                          | 1.18          | 8.85                        | 1.08          | 3.20                        | 0.387   |              |       |           |
| 4.48                        | 119.33                         | 2.69          | 29.82                          | 1.21          | 10.18                       | 1.08          | 3.70                        | 0.384   |              |       |           |
| 5.03                        | 136.41                         | 2.73          | 34.32                          | 1.25          | 11.38                       | 1.07          | 4.16                        | 0.381   |              |       |           |
| 4.21                        | 121.32                         | 2.91          | 29.53                          | 1.25          | 10.98                       | 1.23          | 3.49                        | 0.385   |              |       |           |
| 4.96                        | 145.59                         | 2.95          | 35.58                          | 1.29          | 12.90                       | 1.23          | 4.13                        | 0.384   |              |       |           |
| 5.70                        | 169.00                         | 3.00          | 41.71                          | 1.33          | 14.67                       | 1.22          | 4.72                        | 0.382   |              |       |           |
| 6.41                        | 194.17                         | 3.04          | 47.93                          | 1.36          | 16.34                       | 1.21          | 5.29                        | 0.380   |              |       |           |
| 6.35                        | 199.71                         | 3.24          | 50.50                          | 1.43          | 18.42                       | 1.38          | 5.25                        | 0.394   | ±2.0         | ±0.75 | 4~19      |
| 7.29                        | 233.00                         | 3.28          | 59.14                          | 1.47          | 21.00                       | 1.38          | 6.62                        | 0.393   |              |       |           |
| 8.21                        | 266.32                         | 3.32          | 67.88                          | 1.50          | 23.50                       | 1.37          | 6.78                        | 0.391   |              |       |           |
| 9.98                        | 333.06                         | 3.40          | 85.73                          | 1.58          | 28.33                       | 1.35          | 8.24                        | 0.387   |              |       |           |
| 10.16                       | 199.83                         | 2.95          | 102.68                         | 1.97          | 31.65                       | 1.72          | 8.37                        | 0.627   |              |       |           |
| 11.71                       | 233.20                         | 3.00          | 119.98                         | 2.01          | 36.17                       | 1.72          | 9.60                        | 0.626   |              |       |           |
| 13.21                       | 266.61                         | 3.04          | 137.37                         | 2.05          | 40.58                       | 1.71          | 10.80                       | 0.625   |              |       |           |
| 16.12                       | 333.63                         | 3.12          | 172.48                         | 2.13          | 49.10                       | 1.69          | 13.12                       | 0.622   |              |       |           |
| 7.90                        | 265.78                         | 3.53          | 69.08                          | 1.57          | 25.36                       | 1.54          | 6.53                        | 0.403   |              |       |           |
| 9.09                        | 310.07                         | 3.57          | 80.82                          | 1.61          | 28.95                       | 1.53          | 7.50                        | 0.402   |              |       |           |
| 10.25                       | 354.39                         | 3.62          | 92.70                          | 1.65          | 32.45                       | 1.53          | 8.45                        | 0.401   |              |       |           |
| 12.48                       | 443.13                         | 3.70          | 116.83                         | 1.72          | 39.20                       | 1.51          | 10.29                       | 0.397   |              |       |           |

| 角<br>钢<br>号<br>数 | 尺 寸<br>(mm) |     |    |    | 截 面<br>面 积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理 论<br>质 量<br>(kg/m) | 外 表<br>面 积<br>(m <sup>2</sup> /m) | 参 考                                  |                        |                                      |                                      |                        |
|------------------|-------------|-----|----|----|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
|                  | B           | b   | d  | r  |                                  |                      |                                   | X—X                                  |                        |                                      | Y—Y                                  |                        |
|                  |             |     |    |    |                                  |                      |                                   | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) |
| 12.5/8           | 125         | 80  | 7  | 11 | 14.096                           | 11.066               | 0.403                             | 227.98                               | 4.02                   | 26.86                                | 74.42                                | 2.30                   |
|                  |             |     | 8  |    | 15.989                           | 12.551               | 0.403                             | 256.77                               | 4.01                   | 30.41                                | 83.49                                | 2.28                   |
|                  |             |     | 10 |    | 19.712                           | 15.474               | 0.402                             | 312.04                               | 3.98                   | 37.33                                | 100.67                               | 2.26                   |
|                  |             |     | 12 |    | 23.351                           | 18.330               | 0.402                             | 364.41                               | 3.95                   | 44.01                                | 116.67                               | 2.24                   |
| 14/9             | 140         | 90  | 8  | 12 | 18.038                           | 14.160               | 0.453                             | 365.64                               | 4.50                   | 33.48                                | 120.69                               | 2.59                   |
|                  |             |     | 10 |    | 22.261                           | 17.475               | 0.452                             | 445.50                               | 4.47                   | 47.31                                | 146.03                               | 2.56                   |
|                  |             |     | 12 |    | 26.400                           | 20.724               | 0.451                             | 521.59                               | 4.44                   | 55.87                                | 169.79                               | 2.54                   |
|                  |             |     | 14 |    | 30.456                           | 23.908               | 0.451                             | 594.10                               | 4.42                   | 64.18                                | 192.10                               | 2.51                   |
| 16/10            | 160         | 100 | 10 | 13 | 25.315                           | 19.872               | 0.512                             | 668.69                               | 5.14                   | 62.13                                | 205.03                               | 2.85                   |
|                  |             |     | 12 |    | 30.054                           | 23.592               | 0.511                             | 784.91                               | 5.11                   | 73.49                                | 239.06                               | 2.82                   |
|                  |             |     | 14 |    | 34.109                           | 27.247               | 0.510                             | 896.30                               | 5.08                   | 84.58                                | 271.20                               | 2.80                   |
|                  |             |     | 16 |    | 39.281                           | 30.835               | 0.510                             | 1003.04                              | 5.05                   | 95.33                                | 301.60                               | 2.77                   |
| 18/11            | 180         | 110 | 10 | 14 | 28.373                           | 22.273               | 0.571                             | 956.25                               | 5.80                   | 78.96                                | 278.11                               | 3.13                   |
|                  |             |     | 12 |    | 33.712                           | 26.464               | 0.571                             | 1124.72                              | 5.78                   | 93.53                                | 325.03                               | 3.10                   |
|                  |             |     | 14 |    | 38.961                           | 30.589               | 0.570                             | 1286.91                              | 5.75                   | 107.76                               | 369.55                               | 3.08                   |
|                  |             |     | 16 |    | 44.139                           | 34.649               | 0.569                             | 1443.06                              | 5.72                   | 121.64                               | 411.85                               | 3.06                   |
| 20/12.5          | 200         | 125 | 12 | 14 | 37.912                           | 29.761               | 0.641                             | 1570.90                              | 6.44                   | 116.73                               | 483.16                               | 3.57                   |
|                  |             |     | 14 |    | 43.867                           | 34.436               | 0.640                             | 1800.97                              | 6.41                   | 134.65                               | 550.83                               | 3.54                   |
|                  |             |     | 16 |    | 49.739                           | 39.045               | 0.639                             | 2023.35                              | 6.38                   | 152.18                               | 615.44                               | 3.52                   |
|                  |             |     | 18 |    | 55.526                           | 43.588               | 0.639                             | 2238.30                              | 6.35                   | 169.33                               | 677.19                               | 3.49                   |

注 1.  $r_1 = \frac{1}{3}d$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_0 = 0$ .

2. 普通碳素钢、优质碳素结构钢、低合金结构钢等热轧不等边角钢的钢号、机钢号: Q215、Q235、Q275、16Mn、15MnTi。

3. 标记举例: 用45号钢轧成100×63×8mm 不等边角钢 [热轧不等边角钢

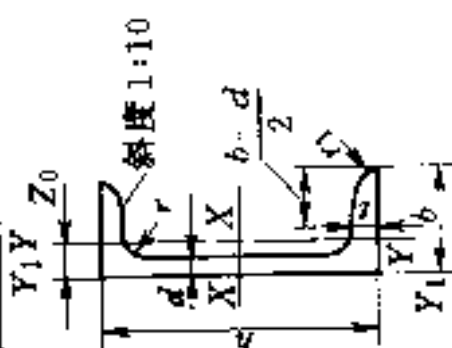
续表

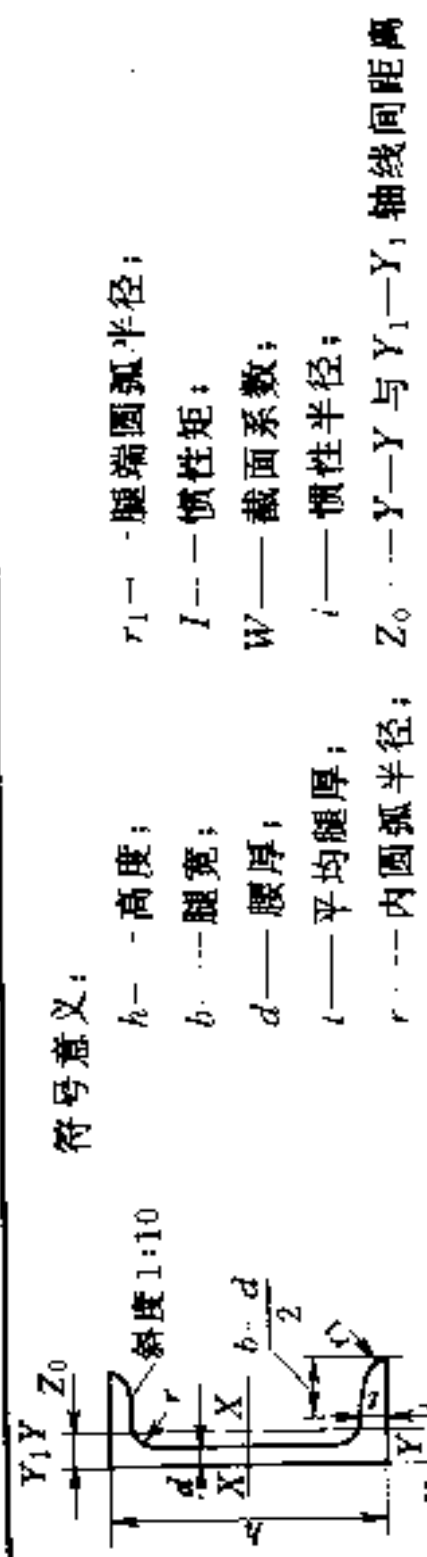
| 数 值                        |                               |               |                               |               |                            |               |                            |                   | 允许偏差<br>(mm) |            | 长度<br>(m) |
|----------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|-------------------|--------------|------------|-----------|
|                            | $X_1-X_1$                     |               | $Y_1-Y_1$                     |               | $U-U$                      |               |                            |                   | 边宽           | 边厚         |           |
| $W_Y$<br>( $\text{cm}^3$ ) | $I_{X1}$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $Y_0$<br>(cm) | $I_{Y0}$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $X_0$<br>(cm) | $I_x$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $i_x$<br>(cm) | $W_x$<br>( $\text{cm}^3$ ) | $\text{tg}\alpha$ |              |            |           |
| 12.01                      | 454.99                        | 4.01          | 120.32                        | 1.80          | 43.81                      | 1.76          | 9.92                       | 0.408             | $\pm 2.0$    | $\pm 0.75$ | 4~19      |
| 13.56                      | 519.99                        | 4.06          | 137.85                        | 1.84          | 49.15                      | 1.75          | 11.18                      | 0.407             |              |            |           |
| 16.56                      | 650.09                        | 4.14          | 173.40                        | 1.92          | 59.45                      | 1.74          | 13.64                      | 0.404             |              |            |           |
| 19.43                      | 780.39                        | 4.22          | 209.67                        | 2.00          | 69.35                      | 1.72          | 16.01                      | 0.400             |              |            |           |
| 17.34                      | 730.53                        | 4.50          | 195.79                        | 2.04          | 70.83                      | 1.98          | 14.31                      | 0.411             | $\pm 2.0$    | $\pm 0.75$ | 4~19      |
| 21.22                      | 913.20                        | 4.58          | 245.92                        | 2.12          | 85.82                      | 1.96          | 17.48                      | 0.409             |              |            |           |
| 24.95                      | 1096.09                       | 4.66          | 296.89                        | 2.19          | 100.21                     | 1.95          | 20.54                      | 0.406             |              |            |           |
| 28.54                      | 1279.26                       | 4.74          | 348.82                        | 2.27          | 114.13                     | 1.94          | 23.52                      | 0.403             |              |            |           |
| 26.56                      | 1362.89                       | 5.24          | 336.59                        | 2.28          | 121.74                     | 2.19          | 21.92                      | 0.390             | $\pm 2.5$    | $\pm 1.0$  | 6~19      |
| 31.28                      | 1635.56                       | 5.32          | 405.94                        | 2.36          | 142.33                     | 2.17          | 25.79                      | 0.388             |              |            |           |
| 35.83                      | 1908.50                       | 5.40          | 476.42                        | 2.43          | 162.23                     | 2.16          | 29.56                      | 0.385             |              |            |           |
| 40.24                      | 2181.79                       | 5.48          | 548.22                        | 2.51          | 182.57                     | 2.16          | 33.44                      | 0.382             |              |            |           |
| 32.49                      | 1940.40                       | 5.89          | 447.22                        | 2.44          | 166.50                     | 2.42          | 26.88                      | 0.376             | $\pm 2.5$    | $\pm 1.0$  | 6~19      |
| 38.32                      | 2328.38                       | 5.38          | 538.94                        | 2.52          | 194.87                     | 2.40          | 31.66                      | 0.374             |              |            |           |
| 43.97                      | 2716.60                       | 6.06          | 631.95                        | 2.59          | 222.30                     | 2.39          | 36.32                      | 0.372             |              |            |           |
| 49.44                      | 3105.15                       | 6.14          | 726.46                        | 2.67          | 248.94                     | 2.38          | 40.87                      | 0.369             |              |            |           |
| 49.99                      | 3193.85                       | 6.54          | 787.74                        | 2.83          | 285.79                     | 2.74          | 41.23                      | 0.392             | $\pm 2.5$    | $\pm 1.0$  | 6~19      |
| 57.44                      | 3726.17                       | 6.62          | 922.47                        | 2.91          | 326.58                     | 2.73          | 47.34                      | 0.390             |              |            |           |
| 64.69                      | 4258.86                       | 6.70          | 1058.86                       | 2.99          | 366.21                     | 2.71          | 53.32                      | 0.388             |              |            |           |
| 71.74                      | 4792.00                       | 6.78          | 1197.13                       | 3.06          | 404.83                     | 2.70          | 59.18                      | 0.385             |              |            |           |

机械性能、化学成分及技术条件分别按 GB700、GB699、GB1591 的规定（一般常用的

$\frac{100 \times 63 \times 8 - \text{GB9787} - 88}{45 - \text{GB699} - 88}$  ]。

表 A4 热轧普通槽钢 (GB707—88)

| 符号意义:                                                                               |          |    |          |     |     |                                                          |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|----|----------|-----|-----|----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|
|  |          |    | h—高度;    |     |     | r <sub>1</sub> —腿端圆弧半径;                                  |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|                                                                                     |          |    | b—腿宽;    |     |     | I—惯性矩;                                                   |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|                                                                                     |          |    | d—腿厚;    |     |     | W—截面系数;                                                  |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|                                                                                     |          |    | t—平均腿厚;  |     |     | i—惯性半径;                                                  |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|                                                                                     |          |    | r—内圆弧半径; |     |     | Z <sub>0</sub> —Y—Y与Y <sub>1</sub> —Y <sub>1</sub> 轴线间距离 |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
| 型号                                                                                  | 尺 寸 (mm) |    |          |     |     |                                                          | 理论<br>质量<br>(kg/m) | 参 考 数 值                              |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                               |                        |
|                                                                                     |          |    |          |     |     |                                                          |                    | X—X                                  |                                      |                        | Y—Y                                  |                                      |                        | Y <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> | Z <sub>0</sub><br>(cm) |
|                                                                                     |          |    |          |     |     |                                                          |                    | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | W <sub>y</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) |                               |                        |
| 5                                                                                   | 50       | 37 | 4.5      | 7   | 7   | 3.5                                                      | 10.4               | 26                                   | 1.94                                 | 3.55                   | 8.3                                  | 1.1                                  | 20.9                   | 1.35                          |                        |
| 6.3                                                                                 | 63       | 40 | 4.8      | 7.5 | 7.5 | 3.75                                                     | 16.123             | 50.786                               | 2.453                                | 4.50                   | 11.872                               | 1.185                                | 28.38                  | 1.36                          |                        |
| (6.5)                                                                               | 65       | 40 | 4.8      | 7.5 | 7.5 | 3.75                                                     | 17.0               | 55.2                                 | 2.54                                 | 4.59                   | 12.0                                 | 11.19                                | 28.3                   | 1.33                          |                        |
| 8                                                                                   | 80       | 43 | 5        | 8   | 8   | 4                                                        | 25.3               | 101.3                                | 3.15                                 | 5.79                   | 16.6                                 | 1.27                                 | 37.4                   | 1.43                          |                        |
| 10                                                                                  | 100      | 48 | 5.3      | 8.5 | 8.5 | 4.25                                                     | 39.7               | 198.3                                | 3.95                                 | 7.8                    | 25.6                                 | 1.41                                 | 54.9                   | 1.52                          |                        |
| (12)                                                                                | 150      | 53 | 5.5      | 9.0 | 9.0 | 4.5                                                      | 57.7               | 346.1                                | 4.75                                 | 10.2                   | 37.4                                 | 1.56                                 | 77.7                   | 1.62                          |                        |
| 12.6                                                                                | 126      | 53 | 5.5      | 9.0 | 9.0 | 4.5                                                      | 62.137             | 391.466                              | 4.953                                | 10.242                 | 37.99                                | 1.567                                | 77.09                  | 1.59                          |                        |
| 14 <sup>a</sup>                                                                     | 140      | 58 | 6        | 9.5 | 9.5 | 4.75                                                     | 80.5               | 563.7                                | 5.52                                 | 13.01                  | 53.2                                 | 1.7                                  | 107.1                  | 1.71                          |                        |
| 14 <sup>b</sup>                                                                     | 140      | 60 | 8        | 9.5 | 9.5 | 4.75                                                     | 87.1               | 609.4                                | 5.35                                 | 14.12                  | 61.1                                 | 1.69                                 | 120.6                  | 1.67                          |                        |



符号意义：  
 h——高度；  
 b——腿宽；  
 d——腿厚；  
 t——平均腿厚；  
 r——内圆弧半径；  
 r<sub>1</sub>——腿端圆弧半径；  
 I——惯性矩；  
 W——截面系数；  
 i——惯性半径；  
 Z<sub>0</sub>——Y—Y与Y<sub>1</sub>—Y<sub>1</sub>轴线间距离

续表

| 型号    | 尺 寸 (mm) |    |      |      |      |                | 理论<br>质量<br>(kg/m) | 参 考 数 值                              |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                                       |                        |  |       |
|-------|----------|----|------|------|------|----------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|-------|
|       |          |    |      |      |      |                |                    | X—X                                  |                                      |                        | Y—Y                                  |                                      |                        | Y <sub>1</sub> —Y <sub>1</sub>        |                        |  |       |
|       |          |    |      |      |      |                |                    | W <sub>X</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>X</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>X</sub><br>(cm) | W <sub>Y</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>Y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>Y</sub><br>(cm) | I <sub>Y1</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | Z <sub>0</sub><br>(cm) |  |       |
|       | h        | b  | d    | t    | r    | r <sub>1</sub> |                    |                                      |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                                       |                        |  |       |
| 16a   | 160      | 63 | 6.5  | 10   | 10   | 5              | 17.23              | 108.3                                | 856.2                                | 6.28                   | 16.3                                 | 73.3                                 | 1.83                   | 144.1                                 |                        |  | 1.8   |
| 16    | 160      | 65 | 8.5  | 10   | 10   | 5              | 19.74              | 116.8                                | 934.5                                | 6.1                    | 17.55                                | 83.4                                 | 1.82                   | 160.8                                 |                        |  | 1.75  |
| 18a   | 180      | 68 | 7    | 10.5 | 10.5 | 5.25           | 20.17              | 141.4                                | 1272.7                               | 7.04                   | 20.03                                | 98.6                                 | 1.96                   | 189.7                                 |                        |  | 1.88  |
| 18    | 180      | 70 | 9    | 10.5 | 10.5 | 5.25           | 22.99              | 152.2                                | 1369.9                               | 6.84                   | 21.52                                | 111                                  | 1.95                   | 210.1                                 |                        |  | 1.84  |
| 20a   | 200      | 73 | 7    | 11   | 11   | 5.5            | 22.63              | 178                                  | 1780.4                               | 7.86                   | 24.2                                 | 123                                  | 2.11                   | 244                                   |                        |  | 2.01  |
| 20    | 200      | 75 | 9    | 11   | 11   | 5.5            | 25.77              | 191.4                                | 1913.7                               | 7.64                   | 25.88                                | 143.6                                | 2.09                   | 268.4                                 |                        |  | 1.95  |
| 22a   | 220      | 77 | 7    | 11.5 | 11.5 | 5.75           | 24.99              | 217.6                                | 2393.9                               | 8.67                   | 28.17                                | 157.8                                | 2.23                   | 298.2                                 |                        |  | 2.1   |
| 22    | 220      | 79 | 9    | 11.5 | 11.5 | 5.75           | 28.45              | 233.8                                | 2571.4                               | 8.42                   | 30.05                                | 176.4                                | 2.21                   | 326.3                                 |                        |  | 2.03  |
| (24a) | 240      | 78 | 7    | 12   | 12   | 6              | 26.55              | 254                                  | 3050                                 | 9.45                   | 30.5                                 | 174                                  | 2.25                   | 325                                   |                        |  | 2.10  |
| (24b) | 240      | 80 | 9    | 12   | 12   | 6              | 30.62              | 274                                  | 3280                                 | 9.17                   | 32.5                                 | 194                                  | 2.23                   | 355                                   |                        |  | 2.03  |
| (24c) | 240      | 82 | 11   | 12   | 12   | 6              | 34.39              | 293                                  | 3510                                 | 9.96                   | 34.4                                 | 213                                  | 2.21                   | 388                                   |                        |  | 2.00  |
| a     | 250      | 78 | 7    | 12   | 12   | 6              | 27.47              | 269.597                              | 3369.62                              | 9.823                  | 30.607                               | 175.529                              | 2.243                  | 322.256                               |                        |  | 2.065 |
| 25b   | 250      | 80 | 9    | 12   | 12   | 6              | 31.39              | 282.402                              | 3530.04                              | 9.405                  | 32.657                               | 196.421                              | 2.218                  | 353.187                               |                        |  | 1.982 |
| c     | 250      | 82 | 11   | 12   | 12   | 6              | 35.32              | 295.236                              | 3690.45                              | 9.065                  | 35.926                               | 218.415                              | 2.206                  | 384.133                               |                        |  | 1.921 |
| (27a) | 270      | 82 | 7.5  | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 30.83              | 323                                  | 4360.0                               | 10.5                   | 35.2                                 | 216                                  | 2.34                   | 393                                   |                        |  | 2.13  |
| (27b) | 270      | 84 | 9.5  | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 35.07              | 347                                  | 469.1                                | 10.3                   | 37.7                                 | 239                                  | 2.31                   | 428                                   |                        |  | 2.06  |
| (27c) | 270      | 86 | 11.5 | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 39.30              | 372                                  | 5020.1                               | 10.1                   | 39.8                                 | 261                                  | 2.28                   | 467                                   |                        |  | 2.03  |
| a     | 280      | 82 | 7.5  | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 31.42              | 340.328                              | 4764.59                              | 10.91                  | 35.718                               | 217.989                              | 2.333                  | 387.566                               |                        |  | 2.097 |
| 28b   | 280      | 84 | 9.5  | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 35.81              | 366.46                               | 5130.45                              | 10.6                   | 37.929                               | 242.144                              | 2.304                  | 427.589                               |                        |  | 2.016 |
| c     | 280      | 86 | 11.5 | 12.5 | 12.5 | 6.25           | 40.21              | 392.594                              | 5496.32                              | 10.35                  | 40.301                               | 267.602                              | 2.286                  | 426.597                               |                        |  | 1.951 |

| 型号    | 尺 寸 (mm) |     |      |      |      |      | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理论<br>质量<br>(kg/m) | 参 考 数 值                              |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                                       |                        |
|-------|----------|-----|------|------|------|------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
|       |          |     |      |      |      |      |                                |                    | X-X                                  |                                      |                        |                                      | Y-Y                                  |                        |                                       |                        |
|       |          |     |      |      |      |      |                                |                    | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | W <sub>y</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) | I <sub>y1</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | Z <sub>0</sub><br>(cm) |
| (30a) | 300      | 85  | 7.5  | 13.5 | 13.5 | 6.75 | 43.89                          | 34.45              | 403                                  | 6050                                 | 11.7                   | 41.1                                 | 260                                  | 2.43                   | 467                                   | 2.17                   |
| (30b) | 300      | 87  | 9.5  | 13.5 | 13.5 | 6.75 | 49.59                          | 39.16              | 433                                  | 6500                                 | 11.4                   | 44.0                                 | 289                                  | 2.41                   | 515                                   | 2.13                   |
| (30c) | 300      | 89  | 11.5 | 13.5 | 13.5 | 6.75 | 55.89                          | 43.81              | 463                                  | 6950                                 | 11.2                   | 46.4                                 | 316                                  | 2.38                   | 560                                   | 2.09                   |
| a     | 320      | 88  | 8    | 14   | 14   | 7    | 48.7                           | 38.22              | 474.879                              | 7598.06                              | 12.49                  | 46.473                               | 304.787                              | 2.502                  | 552.31                                | 2.242                  |
| 32b   | 320      | 90  | 10   | 14   | 14   | 7    | 55.1                           | 43.25              | 509.012                              | 8144.2                               | 12.15                  | 49.157                               | 336.332                              | 2.471                  | 592.933                               | 2.158                  |
| c     | 320      | 92  | 12   | 14   | 14   | 7    | 61.5                           | 48.28              | 543.145                              | 8690.33                              | 11.88                  | 52.642                               | 374.175                              | 2.467                  | 643.299                               | 2.092                  |
| a     | 360      | 96  | 9    | 16   | 16   | 8    | 60.89                          | 47.8               | 659.7                                | 11874.2                              | 13.97                  | 63.54                                | 455                                  | 2.73                   | 818.4                                 | 2.44                   |
| 36b   | 360      | 98  | 11   | 16   | 16   | 8    | 68.09                          | 53.45              | 702.9                                | 12651.8                              | 13.63                  | 66.85                                | 496.7                                | 2.7                    | 880.4                                 | 2.37                   |
| c     | 360      | 100 | 13   | 16   | 16   | 8    | 75.29                          | 50.1               | 746.1                                | 13429.4                              | 13.36                  | 70.02                                | 536.4                                | 2.67                   | 947.9                                 | 2.34                   |
| a     | 400      | 100 | 10.5 | 18   | 18   | 9    | 75.05                          | 58.91              | 878.9                                | 17577.9                              | 15.30                  | 78.83                                | 592                                  | 2.81                   | 1067.7                                | 2.49                   |
| 40b   | 400      | 102 | 12.5 | 18   | 18   | 9    | 83.05                          | 65.19              | 932.2                                | 18644.5                              | 14.98                  | 82.52                                | 640                                  | 2.78                   | 1135.6                                | 2.44                   |
| c     | 400      | 104 | 14.5 | 18   | 18   | 9    | 91.05                          | 71.47              | 985.6                                | 19711.2                              | 14.71                  | 86.19                                | 687.8                                | 2.75                   | 1220.7                                | 2.42                   |

注 1. 槽钢长度: 型号 5~8 号 > 8~18 号 > 18~40 号

长度 5~12m 5~19m 6~19m

2. 标记举例: 普通碳素钢 Q235A 镇静钢 180×68×7mm 的热轧普通槽钢的标记为:

热轧普通槽钢  $\frac{180 \times 68 \times 7 - \text{GB707-88}}{\text{Q235A-GB700-88}}$

3. 经供需双方协议可供应有括弧的 6.5、12、24a、24b、24c、27a、27b、27c、30a、30b、30c 型号槽钢。

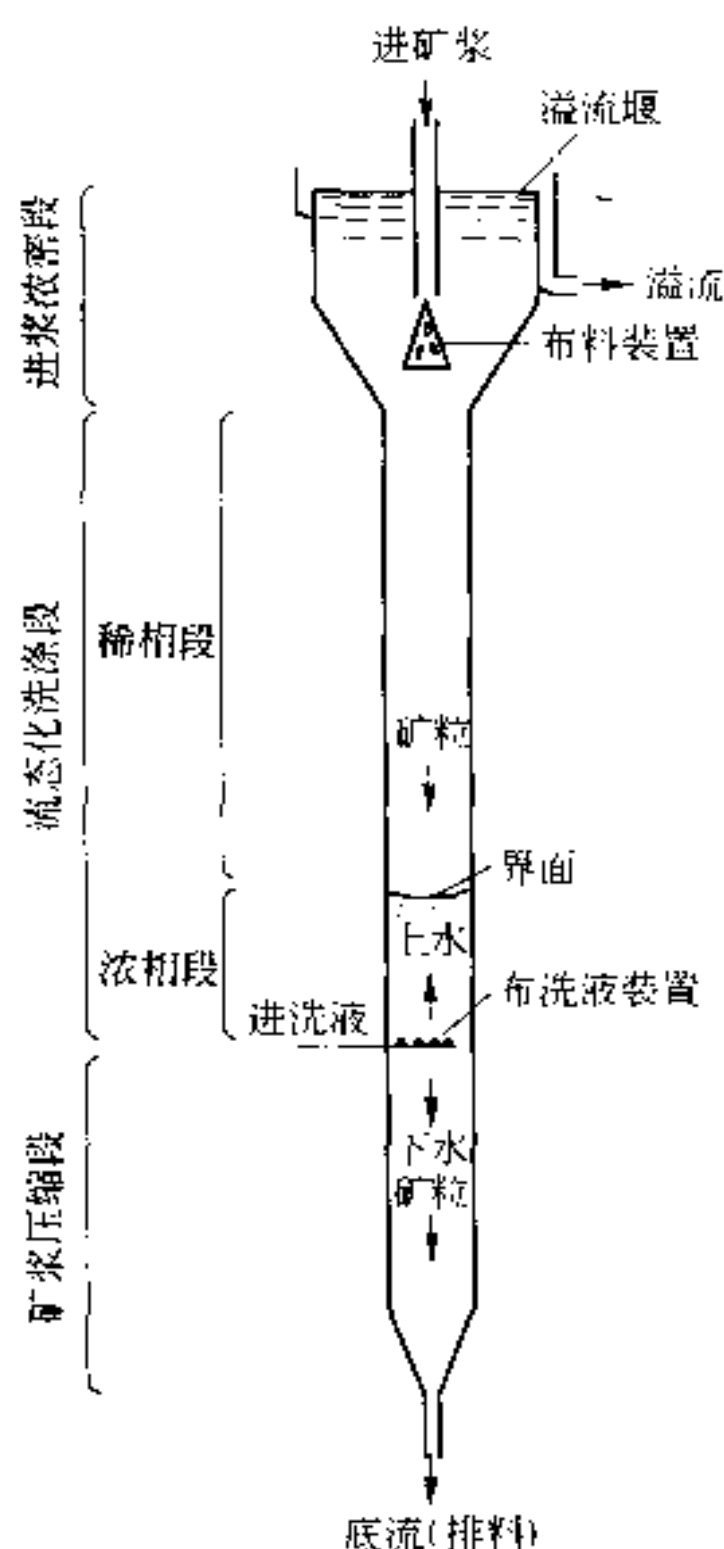


图 6-31 液固流态化床

态化床的性质,才能对流态化设备作出最好的设计,也才能最有效的制定工艺条件,以获得最佳的效果。

### 6.3.2.1 液固流化床的基本性质

图 6-31 为典型的液固流态化床。矿浆经过一个适当的进料装置,加入到顶端的浓密段,将大部分水分分离。从溢流堰排走。浓密后的矿浆,靠重力下沉,在流化床的上部形成稀相区,固体含量低,即空隙率大,沉降速度快(接近自由沉降)。此后即沉入浓相区,其空隙率低,固体浓度高,沉降速度慢,属于干涉沉降。稀相与浓相之间有一个明显的界面。界面的位置,浓相的空隙率均随上升水的流速而改变。在布液装置以上,水向上流,颗粒下沉。而在布液装置以下,颗粒与液体同时向下流动,颗粒不再处于流化状态,并不断浓缩,并以移动床的形式下降,最后经底流口排出。

对流化床而言,下降的颗粒与上升的水流之间的相对速度取决于床层的空隙率。对于一个已知的进矿量,床内的空隙率与进水量有相应的关系。若增加进浆或进水量,稀相会增稠,浓相会稀释,直到“泛滥点”,稀相与浓相的界限消失。若再进浆或进水,均将使流化床泛滥溢出。

对流化床而言,下降的颗粒与上升的水流之间的相对速度取决于床层的空隙率。对于一个已知的进矿量,床内的空隙率与进水量有相应的关系。若增加进浆或进水量,稀相会增稠,浓相会稀释,直到“泛滥点”,稀相与浓相的界限消失。若再进浆或进水,均将使流化床泛滥溢出。

图 6-32 为试验型液固流化床的操作状态图。图中虚线为泛

溢线。从图中可以看出,干矿的进料量与上升水的流量必须匹配恰当。例如干矿加料量为  $1\text{t/h}$ ,当上升水为  $1\text{t/h}$  时床内上层为稀相,空隙率约为  $0.98$ ,下层浓相空隙率为  $0.66$ ,可以稳定操作。当上升水增至  $2\text{t/h}$ 、 $3\text{t/h}$ 、 $4\text{t/h}$  时均可稳定操作,床内仍保持上稀下浓状态。但当上升水达  $4.4\text{t/h}$  时,即达到泛滥点。再增加水流即会溢出。当上升水不变,例如为  $1\text{t/h}$ ,干矿加料量增至  $2\text{t/h}$  仍可保持上稀下浓的稳定操作,但稳定性变差。若干矿加料量增至  $3\text{t/h}$ ,即会达到泛滥点。因此干矿处理量不宜太大是保持操作稳定的首要条件。

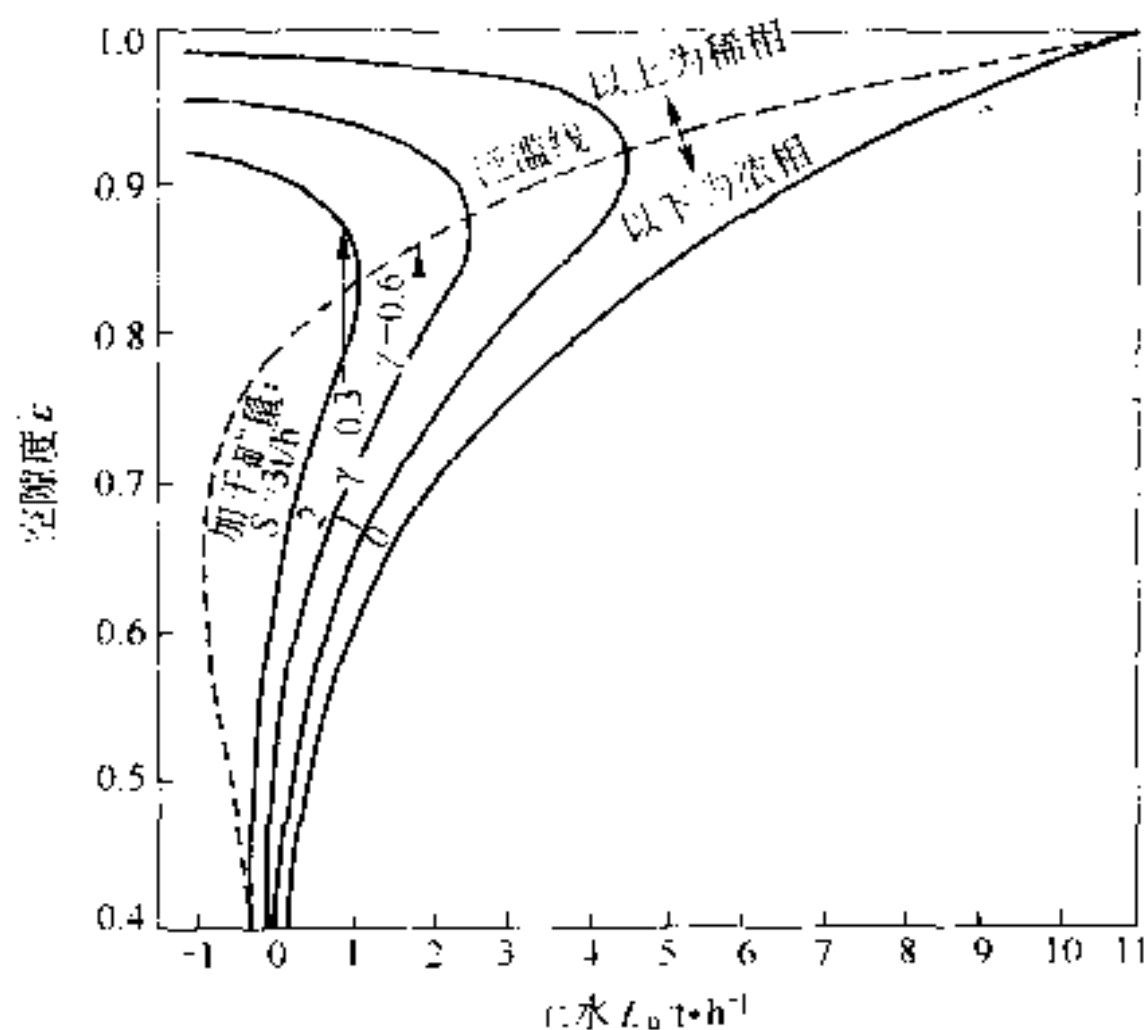


图 6-32 液固流态化床操作图

$\rho_s = 4.2\text{g/cm}^3$ ;  $\rho_f = 1.0\text{g/cm}^3$ ;  $A = 0.5\text{m}^2$ ;  
 $n = 4.7$ (定义见式(6-89));  $u_f = 6\text{mm/s}$

图 6-33 为直径  $1\text{m}$  的试验型液固流化床内含矿浓度沿柱高的分布图。

#### 6.3.2.2 散式流态化

液固流态化床的运动体系属于散式流态化。散式流态化中,

续表

| 型号    | 尺 寸 (mm)                       |     |      |      |                |                                      | 理论质量<br>(kg/m) | 参 考 数 值                              |                        |                                 |                                      |                                      |                        |
|-------|--------------------------------|-----|------|------|----------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
|       | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) |     |      |      |                |                                      |                | X-X                                  |                        |                                 | Y-Y                                  |                                      |                        |
|       | b                              | d   | t    | r    | r <sub>1</sub> | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |                | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | I <sub>x</sub> : S <sub>x</sub> | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | W <sub>y</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) |
| 45a   | 450                            | 150 | 18   | 13.5 | 6.8            | 80.4                                 | 32240          | 1430                                 | 17.7                   | 38.6                            | 855                                  | 114                                  | 2.89                   |
| 45b   | 450                            | 152 | 18   | 13.5 | 6.8            | 87.4                                 | 33760          | 1500                                 | 17.4                   | 38                              | 894                                  | 118                                  | 2.84                   |
| 45c   | 450                            | 154 | 18   | 13.5 | 6.8            | 94.5                                 | 35280          | 1570                                 | 17.1                   | 37.6                            | 938                                  | 122                                  | 2.79                   |
| 50a   | 500                            | 158 | 20   | 14   | 7              | 93.6                                 | 46470          | 1860                                 | 19.7                   | 42.8                            | 1120                                 | 142                                  | 3.07                   |
| 50b   | 500                            | 160 | 20   | 14   | 7              | 101                                  | 48560          | 1940                                 | 19.4                   | 42.4                            | 1170                                 | 146                                  | 3.01                   |
| 50c   | 500                            | 162 | 20   | 14   | 7              | 109                                  | 50640          | 2020                                 | 19.0                   | 41.8                            | 1220                                 | 151                                  | 2.96                   |
| (55a) | 550                            | 166 | 21.0 | 14.5 | 7.3            | 125                                  | 62870          | 2290                                 | 21.6                   | 46.9                            | 1370                                 | 164                                  | 3.19                   |
| (55b) | 550                            | 168 | 21.0 | 14.5 | 7.3            | 114                                  | 63640          | 2390                                 | 21.2                   | 46.4                            | 1420                                 | 170                                  | 3.14                   |
| (55c) | 550                            | 170 | 21.0 | 14.5 | 7.3            | 123                                  | 68410          | 2490                                 | 21.9                   | 45.3                            | 1480                                 | 175                                  | 3.08                   |
| 56a   | 560                            | 166 | 21   | 14.5 | 7.3            | 106.2                                | 65600          | 2340                                 | 22.3                   | 47.7                            | 1370                                 | 165                                  | 3.18                   |
| 56b   | 560                            | 168 | 21   | 14.5 | 7.3            | 115                                  | 68500          | 2450                                 | 21.6                   | 47.2                            | 1490                                 | 174                                  | 3.16                   |
| 56c   | 560                            | 170 | 21   | 14.5 | 7.3            | 123.9                                | 71400          | 2550                                 | 21.3                   | 46.7                            | 1560                                 | 183                                  | 3.16                   |
| 63a   | 630                            | 176 | 22   | 15   | 7.5            | 121.6                                | 93900          | 2980                                 | 24.6                   | 54                              | 1700                                 | 193                                  | 3.31                   |
| 63b   | 630                            | 178 | 22   | 15   | 7.5            | 131.5                                | 98100          | 3160                                 | 24.2                   | 53                              | 1810                                 | 204                                  | 3.29                   |
| 63c   | 630                            | 180 | 22   | 15   | 7.5            | 141                                  | 102000         | 3300                                 | 23.8                   | 52                              | 1920                                 | 214                                  | 3.27                   |

注 1. 工字钢长度: 型号 10~18 号 20~63 号

长度 5~19m 6~19m

2. 目前生产常用材料: Q235、Q275、16Mn。

3. 标记举例: 普通碳素钢 Q235A 沸腾钢 400×144×12.5mm 的热轧普通工字钢的标记为:

热轧普通工字钢 400×144×12.5---GB706--88

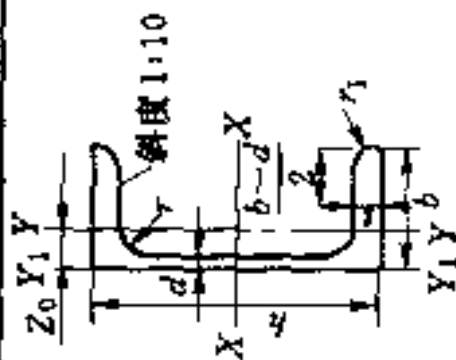
Q235A-GB700--88

4. 经供需双方协议, 可供应有括弧的 12、24a、24b、27a、27b、30a、30b、30c、55a、55b、55c 型号工字钢。

表 A6

热轧轻型槽钢

符号意义:



$h$ ——高度;  
 $d$ ——腰厚;  
 $r$ ——内圆弧半径;  
 $W$ ——截面系数;  
 $r_1$ ——腿端圆弧半径;  
 $S_x$ ——半截面的静力矩

$b$ ——腿宽;  
 $t$ ——平均腿厚;  
 $I$ ——惯性矩;  
 $i$ ——惯性半径;  
 $Z_0$ ——重心距离;

| 型号  | 尺 寸 (mm) |     |     |      |      |                | 理论<br>质量<br>(kg/m) | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 参 考 数 据                              |                                      |                        |                                      |                                      |                        |                                      |                        |                                       |
|-----|----------|-----|-----|------|------|----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
|     | X-X      |     |     |      |      |                |                    |                                | Y-Y                                  |                                      |                        | Y <sub>1</sub> -Y <sub>1</sub>       |                                      | Z <sub>0</sub><br>(cm) |                                      |                        |                                       |
|     | h        | b   | d   | t    | r    | r <sub>1</sub> |                    |                                | W <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | I <sub>x</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>x</sub><br>(cm) | S <sub>x</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) | W <sub>y</sub><br>(cm <sup>3</sup> ) |                        | I <sub>y</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) | i <sub>y</sub><br>(cm) | I <sub>y1</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |
| 10Q | 100      | 45  | 4.0 | 6.7  | 6.7  | 2.5            | 7.56               | 9.63                           | 31.0                                 | 155                                  | 4.01                   | 18.14                                | 5.66                                 | 17.65                  | 1.35                                 | 36.00                  | 1.38                                  |
| 12Q | 120      | 55  | 4.2 | 7.2  | 7.2  | 2.5            | 9.83               | 12.52                          | 49.4                                 | 297                                  | 4.87                   | 28.55                                | 8.95                                 | 34.26                  | 1.65                                 | 69.18                  | 1.67                                  |
| 14Q | 140      | 60  | 4.4 | 7.5  | 7.5  | 2.5            | 11.52              | 14.68                          | 67.4                                 | 472                                  | 5.67                   | 38.88                                | 11.18                                | 47.41                  | 1.80                                 | 92.88                  | 1.76                                  |
| 16Q | 160      | 65  | 4.6 | 7.8  | 7.8  | 3.0            | 13.32              | 16.97                          | 88.7                                 | 710                                  | 6.47                   | 51.13                                | 13.66                                | 63.51                  | 1.94                                 | 121.59                 | 1.85                                  |
| 18Q | 180      | 70  | 4.8 | 8.2  | 8.2  | 3.0            | 15.34              | 19.54                          | 114.4                                | 1030                                 | 7.26                   | 66.08                                | 16.66                                | 83.97                  | 2.07                                 | 159.03                 | 1.96                                  |
| 20Q | 200      | 75  | 5.0 | 9.0  | 9.0  | 3.0            | 17.94              | 22.86                          | 149.9                                | 1500                                 | 8.10                   | 86.17                                | 21.13                                | 113.90                 | 2.23                                 | 215.67                 | 2.11                                  |
| 22Q | 220      | 80  | 5.4 | 9.7  | 9.7  | 3.5            | 20.91              | 26.64                          | 191.1                                | 2102                                 | 8.88                   | 110.02                               | 25.97                                | 149.85                 | 2.37                                 | 282.33                 | 2.23                                  |
| 25Q | 250      | 85  | 5.8 | 10.5 | 10.5 | 3.5            | 24.71              | 31.48                          | 254.1                                | 3176                                 | 10.05                  | 146.65                               | 32.20                                | 198.97                 | 2.51                                 | 368.40                 | 2.32                                  |
| 28Q | 280      | 90  | 6.0 | 10.8 | 10.8 | 3.5            | 27.73              | 35.32                          | 316.7                                | 4434                                 | 11.21                  | 183.03                               | 37.41                                | 247.63                 | 2.65                                 | 447.70                 | 2.38                                  |
| 32Q | 320      | 95  | 6.2 | 11.2 | 11.2 | 4.0            | 31.49              | 40.12                          | 406.5                                | 6504                                 | 12.73                  | 235.49                               | 43.34                                | 306.45                 | 2.76                                 | 543.35                 | 2.43                                  |
| 36Q | 366      | 105 | 6.5 | 11.7 | 11.7 | 4.0            | 36.80              | 46.88                          | 534.1                                | 9614                                 | 14.32                  | 309.20                               | 55.87                                | 439.72                 | 3.06                                 | 763.98                 | 2.63                                  |
| 40Q | 400      | 115 | 7.0 | 12.6 | 12.6 | 4.0            | 43.74              | 55.72                          | 704.3                                | 14086                                | 15.90                  | 407.80                               | 71.38                                | 617.46                 | 3.29                                 | 1070.05                | 2.85                                  |

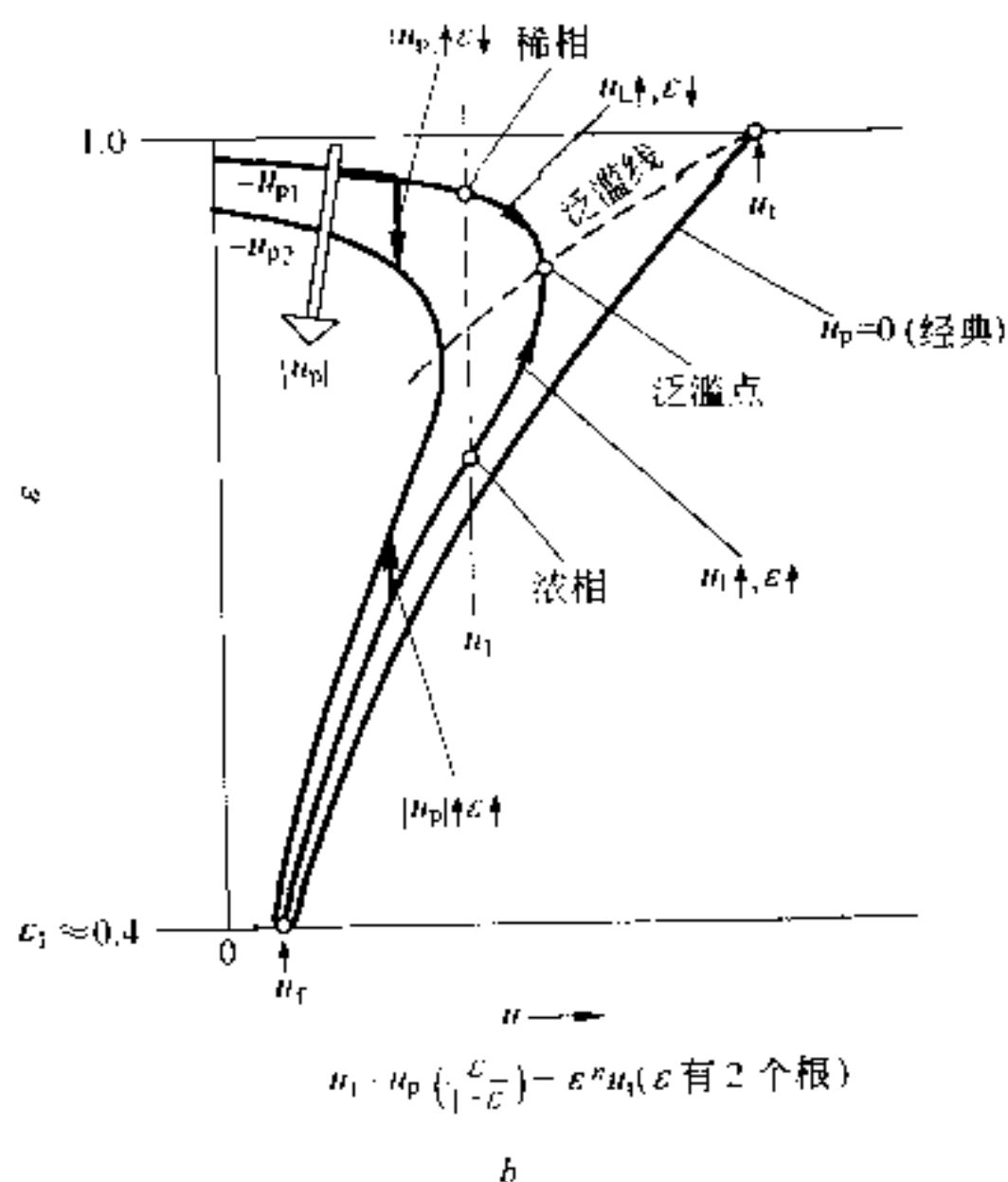
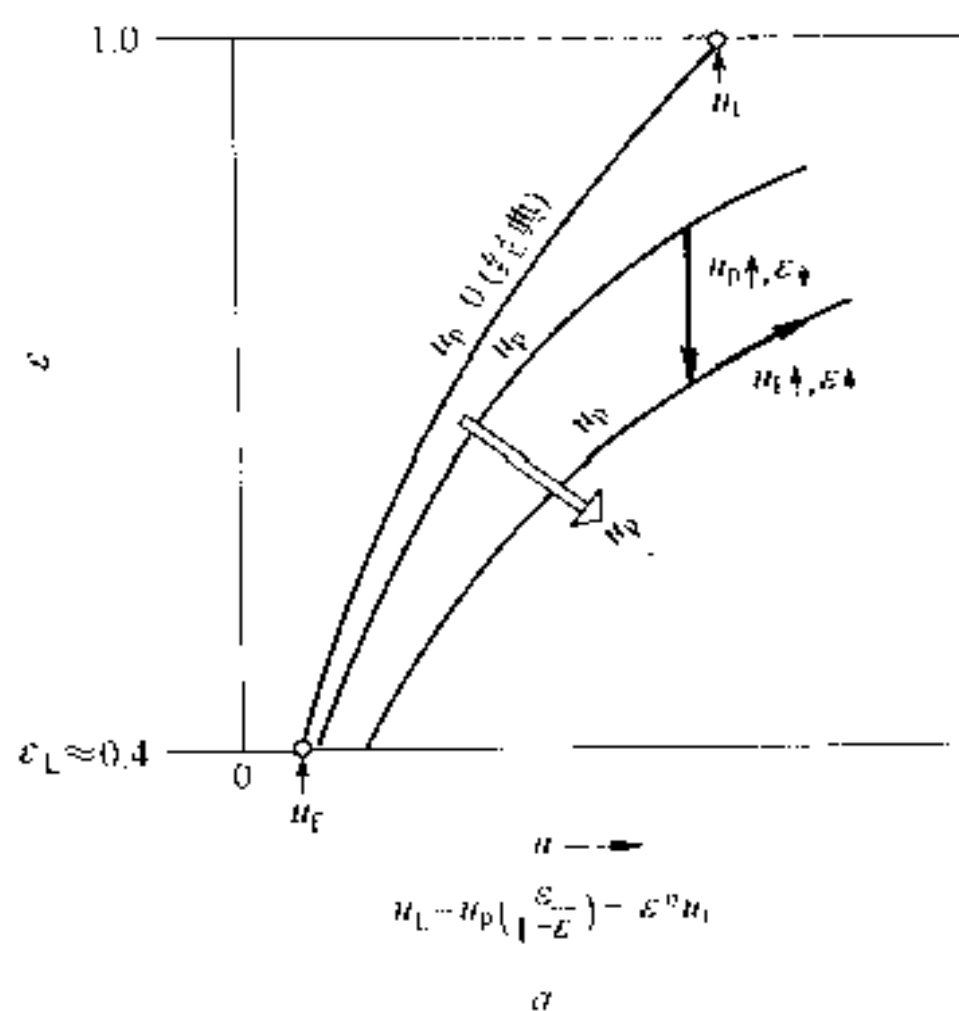


图 6-34 广义流态化图

a—流体与颗粒同时向上的广义流态化；  
b—流体向上、颗粒向下的广义流态化

表 A8 热轧扁钢尺寸和允许偏差 (GB704—88) (mm)

|       |                                                                                                                                        |         |      |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|
| 宽 度   | 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 125, 130, 140, 150 |         |      |
| 厚 度   | 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45                                                        |         |      |
| 宽 度   | 厚 度                                                                                                                                    | 宽 度     | 厚 度  |
| 10~14 | 3~8                                                                                                                                    | 45~50   | 3~36 |
| 16~18 | 3~10                                                                                                                                   | 55      | 4~36 |
| 20~22 | 3~12                                                                                                                                   | 60~80   | 4~45 |
| 25~28 | 3~16                                                                                                                                   | 85~120  | 5~45 |
| 30~32 | 3~20                                                                                                                                   | 125~130 | 6~45 |
| 35~40 | 3~28                                                                                                                                   | 140~150 | 7~45 |

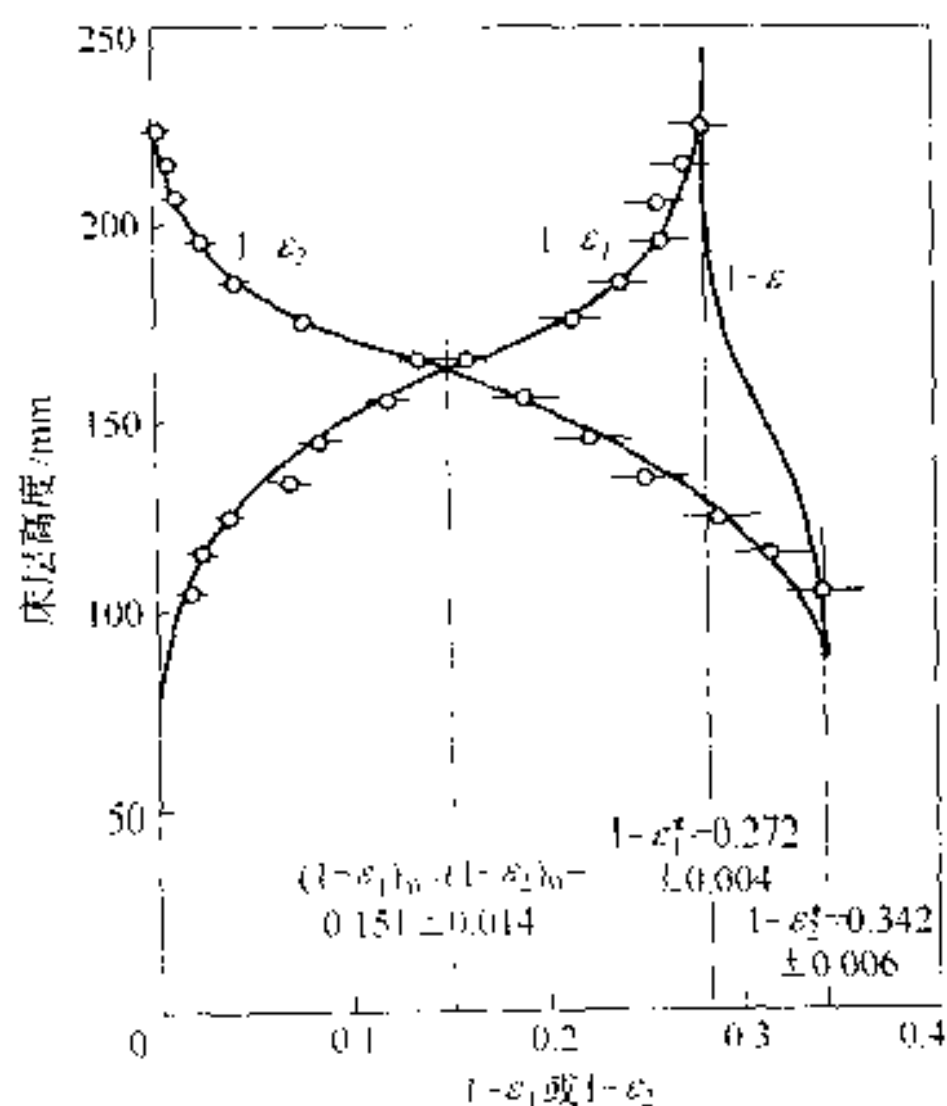


图 6-35 散式流态化床中双粒度分级图  
(○为实验平均值,两侧水平线为数据偏差;  
曲线为计算结果)

度差 $[\Delta\rho(1-\epsilon)-\Delta\rho(1-\epsilon_1^*)]$ 为推动力的浮力差而返回向上,其向上返回的细粒的通量 $J_{sl}$ 既与此浓度差成比例,也与该处细粒的浓度 $(1-\epsilon_1)$ 成比例,即

$$J_{sl} = \sigma_1 [\Delta\rho(1-\epsilon) - \Delta\rho(1-\epsilon_1^*)] (1-\epsilon_1) \quad (6-93)$$

式中, $\sigma_1$ 可称为细颗粒的分级常数。在动态平衡下, $J_{ml} = J_{sl}$ ,即

$$d\epsilon_1/dz = q_1(\epsilon - \epsilon_1^*)(1-\epsilon_1)$$

式中, $q_1 = \sigma_1 \Delta\rho / \mu_1 \rho_s$ 称为细粒的交换系数。同样对粗粒亦有

$$d\epsilon_2/dz = q_2(\epsilon - \epsilon_2^*)(1-\epsilon_2)$$

流态化床中颗粒的总浓度为

$$(1-\epsilon) = (1-\epsilon_1) + (1-\epsilon_2) \quad (6-94)$$

对式(6-94)~式(6-96)联合求解,其数值解如图 6-35 中的计算曲线。图中可以看出,模型计算结果与实验结果基本一致。

### 6.3.2.5 分级指标

对分级指标可以确定两个层次。第一个是回收率,即原料被分离后,从原料到粗粒产品和细粒产品各回收了多少。另一个为精确度,或称其为纯度或品位,即在粗粒产品中包含了多少不应属于粗粒级的颗粒。对细粒产品亦然。

要阐明分级标准,首先应知道进料、粗粒底流及细粒溢流的粒度分布。如图 6-36 所示。图中  $f_F(d)$ 、 $f_u(d)$ 、 $f_o(d)$  分别代表进料、底流产品及溢流产品的粒度分布频率曲线。设  $R_F(d)$ 、 $R_u(d)$ 、 $R_o(d)$  分别代表进料、底流及溢流的负累计粒度分布。设底流、溢流的收率各为  $g$ 、 $f$ ,则有

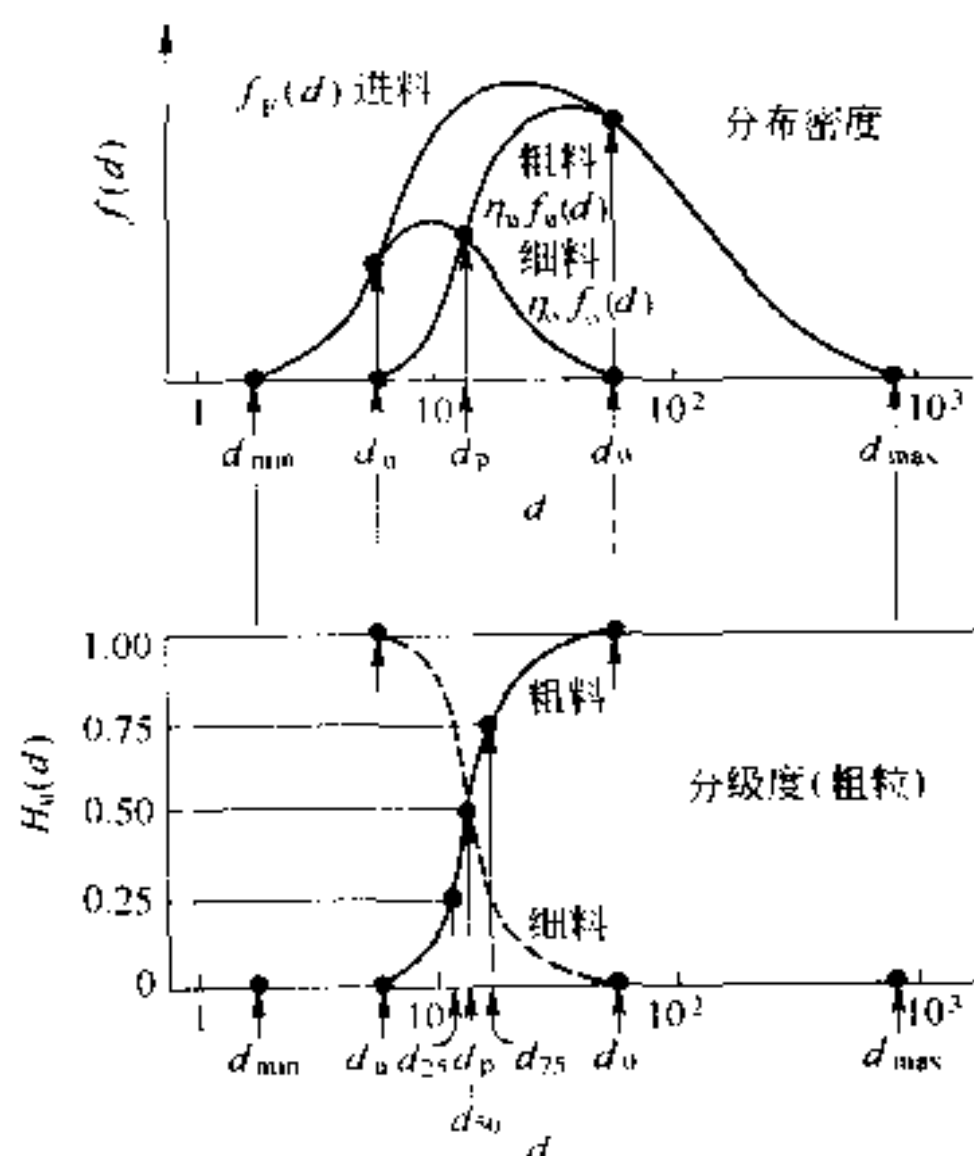


图 6-36 分级过程及粒度分布

$$g + f = 1 \quad (6-95)$$

表 A10

马钢热轧 H 型钢产品目录 (2)

| 类别                | 型号<br>(高度×宽度) | 截面尺寸 (mm) |                |                |    | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理论<br>重量<br>(kg/m) | 截面特性参数                 |                |                |                |                         |                |
|-------------------|---------------|-----------|----------------|----------------|----|--------------------------------|--------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|
|                   |               | H×B       | t <sup>1</sup> | t <sup>2</sup> | r  |                                |                    | 惯性矩 (cm <sup>4</sup> ) |                | 惯性半径 (cm)      |                | 截面模数 (cm <sup>3</sup> ) |                |
|                   |               |           |                |                |    |                                |                    | I <sub>x</sub>         | I <sub>y</sub> | i <sub>x</sub> | i <sub>y</sub> | W <sub>x</sub>          | W <sub>y</sub> |
|                   |               |           |                |                |    |                                |                    |                        |                |                |                |                         |                |
| HN<br>窄翼缘<br>H 型钢 | 175×90        | 175×90    | 5              | 8              | 10 | 23.21                          | 18.2               | 1220                   | 97.6           | 7.26           | 2.05           | 140                     | 21.7           |
|                   | #200×100      | 198×99    | 4.5            | 7              | 13 | 23.59                          | 18.5               | 1610                   | 114            | 8.27           | 2.20           | 163                     | 23.0           |
|                   |               | 200×100   | 5.5            | 8              | 13 | 27.57                          | 21.7               | 1880                   | 134            | 8.25           | 2.21           | 188                     | 26.8           |
|                   | 250×125       | 248×124   | 5              | 8              | 13 | 32.89                          | 25.8               | 3560                   | 253            | 10.4           | 2.78           | 287                     | 41.1           |
|                   |               | 250×125   | 6              | 9              | 13 | 37.87                          | 29.7               | 4080                   | 294            | 10.4           | 2.79           | 326                     | 47.0           |
|                   | 300×150       | 298×149   | 5.5            | 8              | 16 | 41.55                          | 32.6               | 6460                   | 443            | 12.4           | 3.26           | 433                     | 59.4           |
|                   |               | 300×150   | 6.5            | 9              | 16 | 47.53                          | 37.3               | 7350                   | 508            | 12.4           | 3.27           | 490                     | 67.7           |
|                   | 350×175       | 346×174   | 6              | 9              | 16 | 53.19                          | 41.8               | 11200                  | 792            | 14.5           | 3.86           | 649                     | 91.0           |
|                   |               | 350×175   | 7              | 11             | 16 | 63.66                          | 50.0               | 13700                  | 985            | 14.7           | 3.93           | 782                     | 113            |
|                   | 400×150       | 400×150   | 8              | 13             | 16 | 71.12                          | 55.8               | 18800                  | 734            | 16.3           | 3.21           | 942                     | 97.9           |
|                   | 400×200       | 396×199   | 7              | 11             | 16 | 72.16                          | 56.7               | 20000                  | 1450           | 16.7           | 4.48           | 1010                    | 145            |
|                   |               | 400×200   | 8              | 13             | 16 | 84.12                          | 66.0               | 23700                  | 1740           | 16.8           | 4.54           | 1190                    | 174            |
|                   | 450×150       | 450×150   | 9              | 14             | 20 | 83.41                          | 65.5               | 27100                  | 793            | 18.0           | 3.08           | 1200                    | 106            |

续表

| 类别                | 型 号<br>(高度×宽度) | 截面尺寸 (mm) |                |                |    | 截面<br>面积<br>(cm <sup>2</sup> ) | 理论<br>重量<br>(kg/m) | 截面特性参数                 |                |                |                |                         |                |
|-------------------|----------------|-----------|----------------|----------------|----|--------------------------------|--------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|
|                   |                | H×B       | t <sup>1</sup> | t <sup>2</sup> | r  |                                |                    | 惯性矩 (cm <sup>4</sup> ) |                | 惯性半径 (cm)      |                | 截面模数 (cm <sup>3</sup> ) |                |
|                   |                |           |                |                |    |                                |                    | I <sub>x</sub>         | I <sub>y</sub> | i <sub>x</sub> | i <sub>y</sub> |                         | W <sub>x</sub> |
| HN<br>窄翼缘<br>H 型钢 | 450×200        | 446×199   | 8              | 12             | 20 | 84.95                          | 66.7               | 29000                  | 1580           | 18.5           | 4.31           | 1300                    | 159            |
|                   |                | 450×200   | 9              | 14             | 20 | 97.41                          | 76.5               | 33700                  | 1870           | 18.6           | 4.38           | 1500                    | 187            |
|                   | 500×150        | 500×150   | 10             | 16             | 20 | 98.23                          | 77.1               | 38500                  | 907            | 19.8           | 3.04           | 1540                    | 121            |
|                   | 500×200        | 496×199   | 9              | 14             | 20 | 101.3                          | 79.5               | 41900                  | 1840           | 20.3           | 4.27           | 1690                    | 185            |
|                   |                | 500×200   | 10             | 16             | 20 | 114.2                          | 89.6               | 47800                  | 2140           | 20.5           | 4.33           | 1910                    | 214            |
|                   | 600×200        | 506×201   | 11             | 19             | 20 | 131.3                          | 103                | 56500                  | 2580           | 20.8           | 4.43           | 2230                    | 257            |
|                   |                | 596×199   | 10             | 15             | 24 | 121.2                          | 95.1               | 69300                  | 1980           | 23.9           | 4.04           | 2330                    | 199            |
|                   |                | 600×200   | 11             | 17             | 24 | 135.2                          | 106                | 78200                  | 2280           | 24.1           | 4.11           | 2610                    | 228            |
|                   | 700×300        | 606×201   | 12             | 20             | 24 | 153.3                          | 120                | 91000                  | 2720           | 24.4           | 4.21           | 3000                    | 271            |
|                   |                | 692×300   | 13             | 20             | 28 | 211.5                          | 166                | 172000                 | 9020           | 28.6           | 6.53           | 4980                    | 602            |
|                   |                | 700×300   | 13             | 24             | 28 | 235.5                          | 185                | 201000                 | 10800          | 29.3           | 6.78           | 5760                    | 722            |

注 1. “#”表示的规格为非推荐使用规格。

2. 其他规格 H 型钢也可协议供货。

## 附录 B 闸门止水橡皮定型尺寸及性能

一、止水橡皮的定型设计各部尺寸,如表 B1(参见图 B1)所示。

**表 B1 止 水 橡 皮 尺 寸**

| 闸门类别        | 止水部位 | 型号      | 各部尺寸 (mm) |       |       |       |     |       |       |      |       |     |     | 应用范围                                                                                                  |
|-------------|------|---------|-----------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|------|-------|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |      |         | $L$       | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $b$ | $b_1$ | $b_2$ | $R$  | $R_1$ | $r$ | $D$ |                                                                                                       |
| 平面闸门和潜孔弧形闸门 | 顶侧止水 | P60—A   | 110       | 40    | 6     | —     | 20  | 6     | 8     | 30   | 24    | 10  | 20  | 1. P60—A 适用于孔口大的闸门;<br>2. P45—A 适用于孔口中、小的闸门;<br>3. P60—B 及 P45—B 适用于潜孔弧门;<br>4. P60—A 及 P60—B 内有帆布共三层 |
|             |      | P60—B   | 110       | 40    | 6     | 60    | 20  | 6     | 8     | —    | 24    | 10  | 20  |                                                                                                       |
|             |      | P45—A   | 100       | 31    | 5     | —     | 16  | 5     | 6     | 22.5 | 18    | 8   | 20  |                                                                                                       |
|             |      | P45—B   | 100       | 31    | 5     | 45    | 16  | 5     | 6     | —    | 18    | 8   | 20  |                                                                                                       |
|             | 转角止水 | P∠60—A  | 350       | 140   | —     | —     | —   | —     | —     | 8    | 20    | 20  | —   | 1. P∠60—A、P∠45—A、P∠60—B、P∠45—B 适用于下游止水的转角;<br>2. P∠60—A'、P∠45—A'、P∠60—B'、P∠45—B' 适用于上游止水的转角           |
|             |      | P∠60—A' | 350       | 140   | —     | —     | —   | —     | —     | 20   | 80    | 20  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠60—B  | 350       | 140   | —     | 60    | —   | —     | —     | 80   | 20    | 20  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠60—B' | 350       | 140   | —     | 60    | —   | —     | —     | 20   | 80    | 20  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠45—A  | 350       | 122.5 | —     | —     | —   | —     | —     | 55   | 10    | 10  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠45—A' | 350       | 122.5 | —     | —     | —   | —     | —     | 10   | 55    | 10  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠45—B  | 350       | 122.5 | —     | 45    | —   | —     | —     | 55   | 10    | 10  | —   |                                                                                                       |
|             |      | P∠45—B' | 350       | 122.5 | —     | 45    | —   | —     | —     | 10   | 55    | 10  | —   |                                                                                                       |
|             | 底止水  | I130—20 | 130       | —     | —     | —     | 20  | 10    | —     | —    | —     | —   | —   | 适用于孔口大的闸门 (无帆布)                                                                                       |
|             |      | I110—16 | 110       | —     | —     | —     | 16  | 8     | —     | —    | —     | —   | —   | 适用孔口中、小的闸门 (无帆布)                                                                                      |
|             | 橡皮垫  | I60—75  | 75        | —     | —     | —     | 20  | —     | —     | —    | —     | —   | —   | 适用于 P60—A                                                                                             |
|             |      | I45—75  | 75        | —     | —     | —     | 16  | —     | —     | —    | —     | —   | —   | 适用于 P45—A                                                                                             |
| 露顶式弧门       | 侧止水  | L8—A    | 80        | 60    | 6     | 12    | 6   | 3     | —     | 8    | —     | 5   | —   |                                                                                                       |

注 橡塑复合止水型号尺寸同本表。

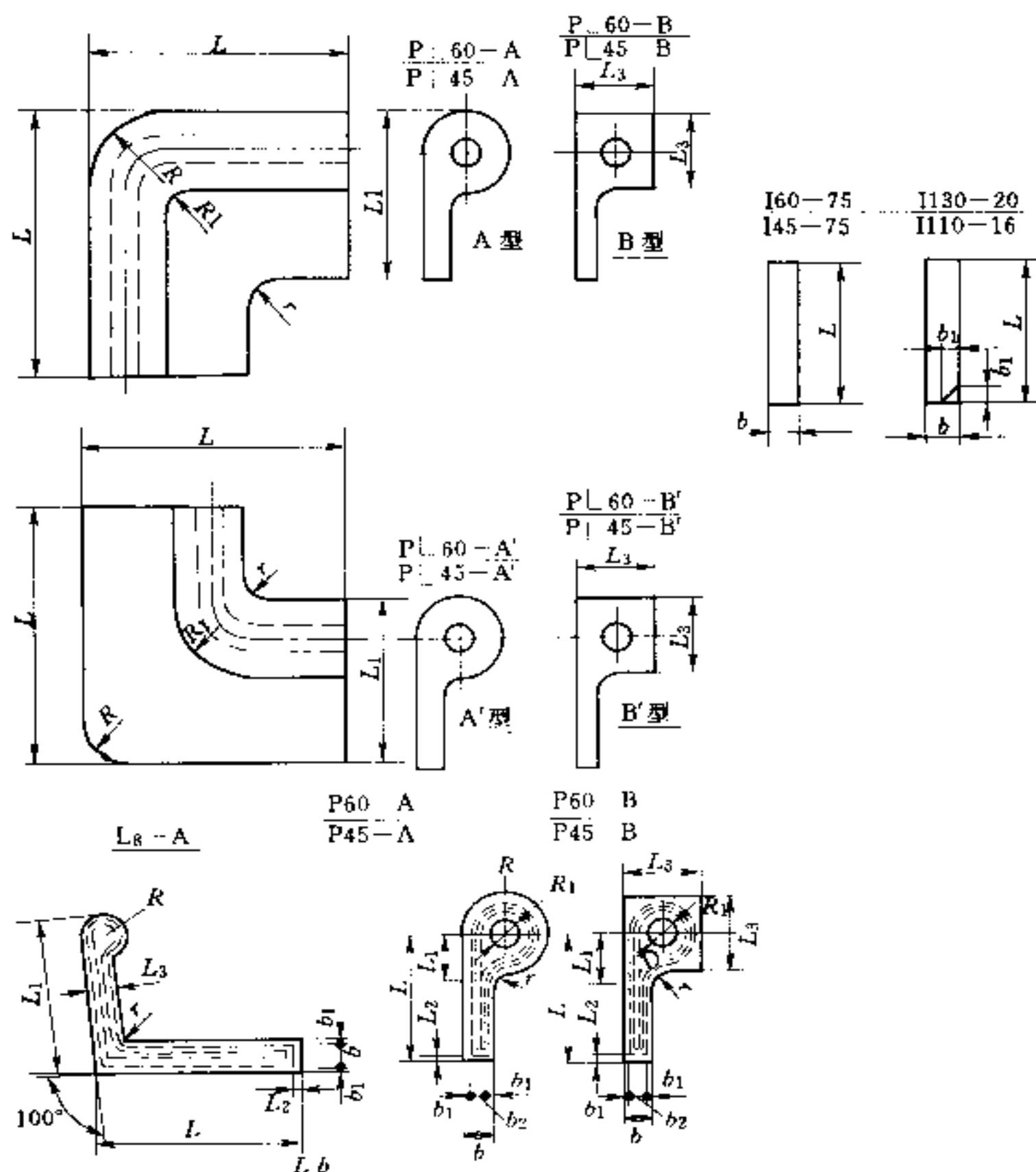


图 B1

## 二、闸门普通止水橡皮物理机械性能

普通止水橡皮物理机械性能见表 B2。

## 三、闸门橡塑复合止水的物理机械性能

橡塑复合止水系将聚四氟乙烯贴合或喷涂在普通止水橡皮密封面上而成的止水，前者为“多节型”，后者为“无节型”，其性能见表 B3。

**表 B2 普通止水橡皮物理机械性能表**

| 序 号 | 指 标 名 称                 | 指 标 值    |
|-----|-------------------------|----------|
| 1   | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.2~1.5  |
| 2   | 含胶量 (新胶) 不小于 (%)        | 60       |
| 3   | 拉伸强硬度 (MPa)             | 13~22    |
| 4   | 肖氏硬度 HS                 | 50~70    |
| 5   | 延伸率 (%)                 | 400~500  |
| 6   | 拉伸弹性模量 (MPa)            |          |
|     | 当 100% 时                | 1.6~2.0  |
|     | 当 200% 时                | 1.8~2.5  |
| 7   | 压缩弹性模 (MPa)             |          |
|     | 当 20% 时                 | 5.5~6.0  |
|     | 当 30% 时                 | 5.6~6.0  |
|     | 当 40% 时                 | 6.2~6.8  |
| 8   | 在 -40~40℃ 温度环境下工作       | 不发生冻裂或硬化 |

**表 B3 橡塑复合止水的物理机械性能表**

| 序 号 | 指 标 名 称                              | 指 标 值                    |
|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1   | 肖氏硬度 HS                              | 65±5                     |
| 2   | 拉伸强度 (MPa)                           | 16~26                    |
| 3   | 扯断延伸率 (%)                            | 450~500                  |
| 4   | 粘着强度 (F4 与橡胶同) (kN/m)                | 6~15                     |
| 5   | 聚四氟乙烯层厚度 (mm)                        | 黏合层 1.0~1.2, 喷涂层 0.5±0.1 |
| 6   | 喷涂层磨损厚度 (止水预压缩 3mm, 运行行程 3000m) (mm) | 0.11~0.21                |

## 附录 C 摩 擦 系 数

**表 C1 摩 擦 系 数 表**

| 种 类      | 材 料 及 工 作 条 件                                     | 系 数 值     |       |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|-------|
|          |                                                   | 最大        | 最小    |
| 滑动摩擦系数   | 1. 钢对钢 (干摩擦)                                      | 0.5~0.6   | 0.15  |
|          | 2. 钢对铸铁 (干摩擦)                                     | 0.35      | 0.16  |
|          | 3. 钢对木材 (有水时)                                     | 0.65      | 0.3   |
|          | 4. 胶木滑道, 胶木对不锈钢在清水中 <sup>①</sup>                  |           |       |
|          | 压强 $q < 2.5 \text{ kN/mm}$                        | 0.10~0.1  | 0.06  |
|          | 压强 $q = 2.5 \sim 2.0 \text{ kN/mm}$               | 0.11~0.13 | 0.065 |
|          | 压强 $q = 2.0 \sim 1.5 \text{ kN/mm}$               | 0.13~0.15 | 0.075 |
|          | 压强 $q > 1.5 \text{ kN/mm}$                        | 0.17      | 0.085 |
|          | 5. 钢基铜塑三层复合材料滑道及填充聚四氟乙烯板滑道对不锈钢, 在清水中 <sup>①</sup> |           |       |
|          | 压强 $q > 2.5 \text{ kN/mm}$                        | 0.09      | 0.04  |
|          | 压强 $q = 2.5 \sim 2.0 \text{ kN/mm}$               | 0.09~0.11 | 0.05  |
|          | 压强 $q = 2.0 \sim 1.5 \text{ kN/mm}$               | 0.11~0.13 | 0.05  |
|          | 压强 $q = 1.5 \sim 1.0 \text{ kN/mm}$               | 0.13~0.15 | 0.06  |
|          | 压强 $q < 1.0 \text{ kN/mm}$                        | 0.15      | 0.06  |
| 滑动轴承摩擦系数 | 1. 钢对青铜 (干摩擦)                                     | 0.30      | 0.16  |
|          | 2. 钢对青铜 (有润滑)                                     | 0.25      | 0.12  |
|          | 3. 钢基铜塑复合材料对镀铬钢 (不锈钢)                             | 0.12~0.14 | 0.05  |
| 止水摩擦系数   | 1. 橡皮对钢                                           | 0.70      | 0.35  |
|          | 2. 橡皮对不锈钢                                         | 0.50      | 0.20  |
|          | 3. 橡塑复合止水对不锈钢                                     | 0.20      | 0.05  |
| 滚动摩擦力臂   | 1. 钢对钢                                            | 1 mm      |       |
|          | 2. 钢对铸铁                                           | 1 mm      |       |

- ① 工件表面粗糙度: 轨道工作面应达到  $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ ; 胶木 (填充聚四氟乙烯) 工作面应达到  $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ 。
- ② 表中胶木滑道所列数值适用于事故闸门和快速闸门, 当用于工作门时, 尚应根据工作条件专门研究。

## 参 考 文 献

- 1 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册: 金属结构 (一)、(二). 北京: 水利电力出版社, 1988
- 2 杨兆福. 水工金属结构. 北京: 水利电力出版社, 1989
- 3 胡孝良. 水工起重机械. 北京: 水利电力出版社, 1989
- 4 中国电力企业联合会标准化部. 电力工业标准汇编 水电卷: 金属结构. 北京: 水利电力出版社, 1995
- 5 蔡正坤, 霍尔仁. 灌区水工建筑物丛书: 闸门与启闭机. 第2版. 北京: 水利电力出版社, 1988
- 6 安徽省水利局勘测设计院. 水工钢闸门设计. 北京: 水利出版社, 1980
- 7 黄希元, 唐怡生. 小型水电站机电设计手册: 金属结构. 北京: 水利电力出版社, 1991

## 《取水输水建筑物丛书》

### 编辑出版工作人员

总 编 辑 王国仪

丛书策划 王照瑜

责任编辑 李丽艳

正文设计 王国华

责任校对 张 莉

封面设计 王 鹏

责任印制 刘 萍

 您对《丛书》有何建议，欢迎来函（电）赐教，我们将会认真汲取，以便今后修订重版。

E-mail: wzyu@waterpub.com.cn; lly@waterpub.com.cn

Tel: 010 · 63202266-2506, 2607

## 《取水输水建筑物丛书》

### 编辑出版工作人员

总 编 辑 王国仪

丛书策划 王照瑜

责任编辑 李丽艳

正文设计 王国华

责任校对 张 莉

封面设计 王 鹏

责任印制 刘 萍

 您对《丛书》有何建议，欢迎来函（电）赐教，我们将会认真汲取，以便今后修订重版。

E-mail: wzyu@waterpub.com.cn; lly@waterpub.com.cn

Tel: 010 · 63202266-2506, 2607