

气动执行器与电动执行器的运行能耗分析

张业明 蔡茂林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 分析了气动执行器和电动执行器能量消耗过程,建立了气动执行器运行能耗计算模型,搭建了气动执行器和电动执行器的运行能耗实验系统.通过实验数据分析,得出两种执行器运行能耗的结论:①在长时间保持负载或作动不频繁的工况下,气动执行器比电动执行器更节能,在频繁作动的工况下,电动执行器比气动执行器更节能;②在各种工况下,气动执行器的运行功率波动不大,电动执行器的运行功率波动较大.

关键词: 气动执行器; 电动执行器; 运行能耗; 比能量

中图分类号: TH 138; TP 271.4

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2010)05-0560-04

Energy consumption analysis for pneumatic actuator and electric actuator

Zhang Yeming Cai Maolin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The energy consumption processes of pneumatic actuator and electrical actuator were analyzed. A calculation model of the energy consumption for pneumatic actuators was proposed. And two sets of actuators experimental system for pneumatic actuator and electrical actuator were built up. The large quantities of the experimental data were received from the energy consumption experiments of two types of actuator. The main results were gained through the analysis experimental data : ①The pneumatic actuator is more energy-efficient than the electrical actuator on the condition of maintaining the load for a long time or the condition of unfrequent actuation. However, the electrical actuator is more energy-efficient than the pneumatic actuator on the condition of frequent actuation. ②In a variety of operating conditions, the running power of the pneumatic actuator fluctuates slightly and the running power of the electric actuator has a great fluctuation.

Key words: pneumatic actuator; electrical actuator; operating energy consumption; ratio energy

气缸驱动系统自20世纪70年代以来就在工业化领域得到了迅速普及.气缸适用于作往复直线运动,尤其适用于工件直线搬运的场合.现在,气缸已成为工业生产领域中PTP(Point to Point)搬运的主流执行器^[1].20世纪90年代开始,电机和微电子控制技术迅速发展,使电动执行器的应用迅速扩大.然而,到现在来看,电动执行器在工业现场并未得到普及,而近几年,在中国气缸销量的年增长速度一直维持20%以上^[2].

电动执行器主要用于旋转和摆动工况,用于直线工况的电动执行器逐渐增多.电动执行器可实现高精度多点定位,气动执行器很难做到^[3].

在气动执行器和电动执行器的选择上,特别是在工业自动化需求最多的PTP输送场合,一直没有充足的数据来论述两者选择标准.本文从运行能耗的角度探讨两种执行器的能量消耗问题.

1 两种执行器能量消耗

1.1 气动执行器的能量消耗

气动执行器的能量转换和空气状态变化如图1^[4].气动执行器运行消耗的是压缩空气.压缩空气输送过程中,经过节流阀、管道弯头等阻性元件后,会有一定的压力损失.另外由于工厂普遍存在接头、气缸或电磁阀处的空气泄露.尽管安装时

的泄漏量标准低于5%,但很多工厂的泄漏量高达10%~40%^[5].泄露也将导致一定的压力损失^[6].

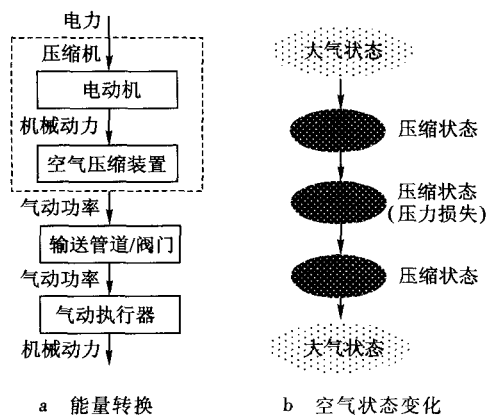


图1 气动执行器能量转换及空气状态变化

1.2 电动执行器的能量消耗

电动执行器运行消耗的是电力.它通过电动机(伺服电动机、步进电动机等)驱动滑动丝杠或滚珠丝杠旋转,带动丝杠上的螺母转化为直线运动,并推动滑台沿导轨做旋转或直线运动^[7].

电动执行器的系统结构如图2所示.由控制器发出运动指令给电动执行器,实现既定运动.

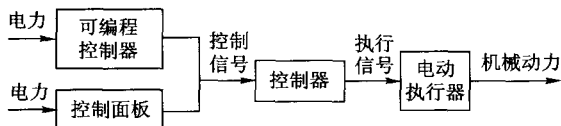


图2 电动执行器的系统构成

2 运行能耗评价标准

气动执行器消耗的是压缩空气,需要将消耗压缩空气转化为压缩机的耗电.而电动执行器可采用直接测量得到耗电量^[8],因此可将两种执行器在相同工况下的耗电量作为能耗评价依据.

2.1 气动执行器空气消耗量的测量

在气动实验系统中,采用先储气后供气的方式:先启动压缩机向储气罐中充气,待压缩空气达到一定压力后停止压缩机,由储气罐对外供气.

气动执行器的空气消耗量测量流程:①打开截止阀,向储气罐中充满0.75 MPa的压缩空气;②关闭截止阀,读取储气罐的压力,检查是否压力下降,以防空气泄露;③设定减压阀的压力为0.5 MPa,气动执行器往复动作20次;④读取储气罐的最终压力,结束测量.

系统中压缩空气消耗是一个固定容腔充放气的过程,可利用差压法来计算压缩空气的消耗量.

将理想气体状态方程两边取微分得

$$dpV = dmRT \quad (1)$$

式中, p 为压力(Pa); V 为气罐和管路的所有容积(m^3); m 为压缩空气的质量(kg); T 为室温(K); R 为气体常数,对空气 $R = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

$$Q_m = dm/dt \quad (2)$$

$$Q = Q_m/\rho_0 \quad (3)$$

式中, Q_m 为质量流量(kg/s); Q 为体积流量(m^3/s); ρ_0 为标准状况下空气的密度.

联立式(1)~式(3)得流量计算公式:

$$Q = \frac{V}{RT\rho_0} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

对式(4)积分得

$$V' = \frac{(p_1 - p_2)V}{RT\rho_0} \quad (5)$$

式中, V' 为气动执行器的空气消耗量(m^3); p_1 为气罐的初始压力(Pa); p_2 为气罐的最终压力(Pa).气动执行器单次往复的空气消耗量平均值可通过 V' 除以作动次数 n 计算出来.

2.2 气动执行器的运行能耗计算模型

设空压机组(含冷干机)的实际运行功率为 $P_c(\text{W})$,空压机组的输出流量为 $Q_c(\text{m}^3/\text{s})$,则空压机组的比能量为

$$\alpha = \frac{P_c}{Q_c} \quad (6)$$

则气动执行器每次往复作动耗气折算成压缩机的能耗 W 和平均消耗功率 P 为

$$W = \frac{\alpha V'}{1 - \beta} \quad (7)$$

$$P = Wf \quad (8)$$

式中, β 为空气泄漏率; f 为执行器往复作动频率.

2.3 运行能耗评价标准

1) 以两种执行器在相同工况下工作时的耗电量作为评价基准;

2) 承载能力要求相同或相近;

3) 水平方向搬运工件时,在相同频率下测量搬运相同的工件移动相同位移、末端位置保持相同时间往复一次的能耗;

4) 垂直方向搬运工件时,由于工件借助自身重力的影响会向下运动,在相同频率下测量向上提升相同工件、移动相同位移、末端位置保持一定时间、向下放回工件的能耗.

3 运行能耗实验

3.1 气动执行器

气动执行器运行能耗的实验系统如图3.

1) 实验条件.压缩机采用型号为 Kobelion-

AG370AH 的神钢压缩机. 轴功率 22.5 kW, 额定排气量 $3.2 \text{ m}^3/\text{min}$; 储气罐为 SMC 的两个 10 L 气罐; 电磁阀选用 SMC 的 SY5120; 压力传感器采用日本长野计器的 KH15-824; 可编程控制器选用 OMRON 的 CPM2A; 室温为 30°C .

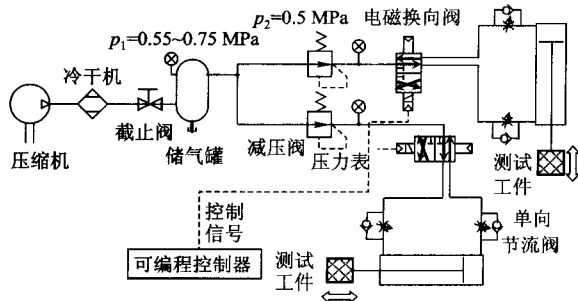


图3 气动执行器运行能耗实验系统

2) 负荷以及作动条件. 气动执行器的实验内容有水平搬运和垂直搬运. 其负载和作动条件如表1~表3所示.

表1 气动执行器的试样与负荷

类型	内径-行程/mm	型号	水平 负荷/kg	垂直 负荷/kg	两侧 配管/mm
A	$\Phi 10 \sim 30$	CDJ2L10-30A	5	2	$\Phi 2.5 \sim 2000$
B	$\Phi 25 \sim 300$	MY1B25-300H	25	12	$\Phi 4 \sim 2000$
C	$\Phi 32 \sim 100$	CDM2L32-100A	40	20	$\Phi 4 \sim 2000$

注: 水平搬运负荷率为 100%, 垂直搬运负荷率 50% ($p = 0.5 \text{ MPa}$).

表2 气动执行器水平作动条件

类型	行程/mm	时间/s	$f/(\text{次} \cdot \text{min}^{-1})$
A	30	0.2	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50, 100
B	300	0.5	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50
C	100	0.4	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50

表3 气动执行器垂直作动条件

类型	行程/mm	时间/s	$f/(\text{次} \cdot \text{min}^{-1})$
A	30	0.2	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50, 100
B	300	0.5	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50
C	100	0.4	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50

3) 实验数据. $V'-f$ 曲线如图4. 从图中可以看出, V' 几乎不依赖于 f , 近似成直线状. 但有时有大的倾斜, 这是因为 f 过高, 未到达执行器末端就返回, 造成 V' 减少的缘故.

4) 实验结果分析. 以气动执行器 B 为例, 在水平方向 f 为 15 次/min 时 B 往复作动一次 V' 为 2.1957 dm^3 . 由理性气体状态方程得

$$V_1 = \frac{p_0 V_0 T_1}{T_0 P_1} = \frac{0.1 \times 2.1957 \times 303}{293 \times 0.6013} = 0.3776 (\text{dm}^3) \quad (9)$$

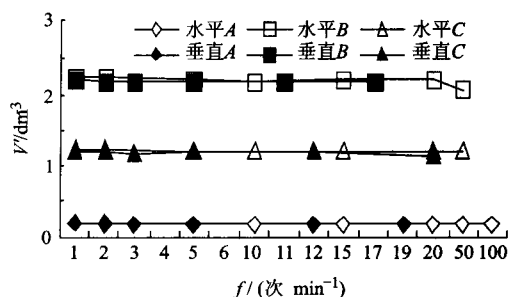


图4 气动执行器 $V'-f$ 曲线

通过计算, 气动执行器 B 在 $P_1 = 0.6013 \text{ MPa}$ 时的空气消耗量为 0.3776 dm^3 , 其中往复容积 0.2944 dm^3 , 管路容积为 0.05024 dm^3 , 电磁阀容积 0.004609 dm^3 , 死区容积为 0.02840 dm^3 .

5) 气动执行器的能量消耗. 利用(6)式得

$$\alpha = \frac{P_c}{Q_c} = \frac{22500}{3.2/60} = 421875 (\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})) \quad (10)$$

当 β 取 5%, f 为 15 次/min, 利用式(7)、式(8)得气动执行器每一次往复平均能耗和平均消耗功率为

$$W_B = \frac{\alpha V'}{1 - \beta} = \frac{421875 \times 2.1957 \times 10^{-3}}{1 - 0.05} = 975.0649 (\text{J}) \quad (11)$$

$$P_B = Wf = 975.064 \times \frac{15}{60} = 243.766 (\text{W}) \quad (12)$$

3.2 电动执行器

电动执行器运行能耗实验系统如图5所示.

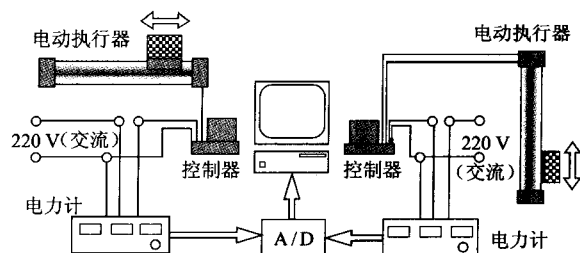


图5 电动执行器运行能耗实验系统

1) 实验条件. PC 主机采用 IBM 的 Thinkpad; A/D 板卡采用 Interface 株式会社 GSI-320416; 电力测量采用日置电机株式会社的 3168 型电力计.

2) 测定方法. 利用电力计测量电动执行器和控制器在工作时每秒钟的功率. 测量结果通过 A/D 板卡传送到 PC 并保存起来, 利用积分的方法, 将工作时间内的功率曲线进行积分就得到电动执行器工作这段时间所消耗的电量.

3) 负荷与作动条件. 电动执行器的负荷和作动条件如表 4 ~ 表 6.

表 4 电动执行器和气动执行器对照表

气动类型	电动类型	型号	功率/W	额定推力/N
A	A	RCS2-RA4C-A-20-6-50-T2-S	20	37.7
	B _h	RCS2-SS8C-A-150-20-300-T2-S	150	128
B	B _v	RCS2-SS8C-A-150-10-300-T2-S	150	256
	C	RCS2-RA7BD-I-100-4-100-T2-S	100	424

注: B_h, B_v 分别为电动执行器 B 的水平、垂直类型.

表 5 电动执行器水平方向负载和作动条件

类型	负荷设定/kg	负荷实测值/kg	行程/mm	伸出时间/s	f/(次·min ⁻¹)
A	5	4.78	30	0.2	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50, 100
B _h	25	24.06	300	0.5	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50
C	40	38.52	100	0.4	1, 2, 5, 10, 15, 20, 50

表 6 电动执行器垂直方向负载和作动条件

类型	负荷设定/kg	负荷实测值/kg	行程/mm	伸出时间/s	f/(次·min ⁻¹)
A	2	1.93	30	0.6	1, 2, 3, 5, 12, 19
B _v	12	11.57	300	0.8	1, 2, 3, 5, 11, 17
C	20	19.24	100	0.5	1, 2, 3, 5, 12, 20

4) 实验数据. 电动执行器 B 水平和垂直的功率曲线如图 6.

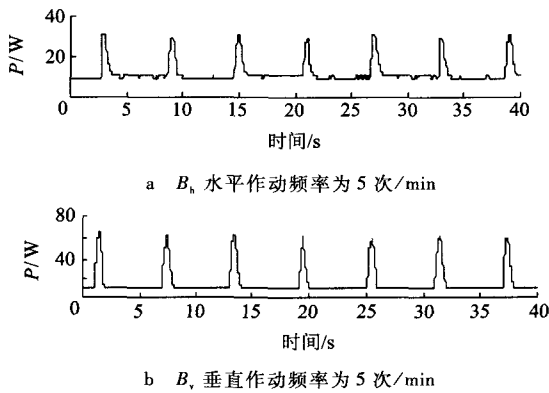


图 6 电动执行器 B_h 和 B_v 功率曲线

电动执行器水平或垂直方向作动过程包含作动阶段和保持阶段(或待机阶段). 电动执行器在作动阶段, P 成尖峰脉冲状态; 在保持阶段存在一定的消耗. 例如图 6a 中, 在水平作动时, 保持阶段消耗的功率为 10 W 左右.

数据传送到 PC 机后, 通过数值积分方法就可以得到电动执行器每次往复能耗, 如图 7 所示.

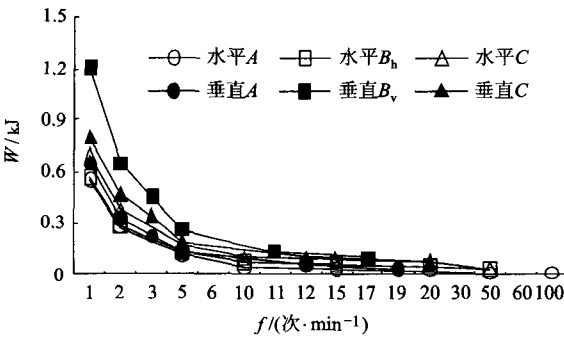


图 7 电动执行器 W - f 曲线

4 两种执行器的运行能耗分析

通过计算就可以得出两种执行器每次往复的能耗对比曲线, 如图 8、图 9 所示.

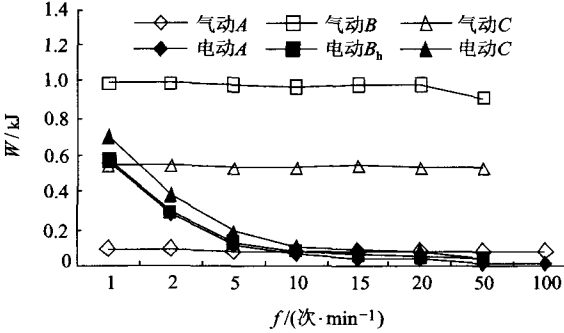


图 8 气动和电动执行器水平方向作动时 W 曲线

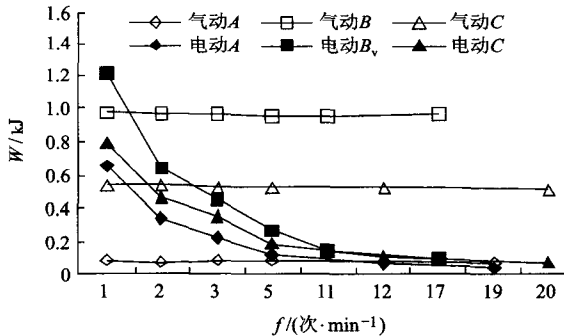


图 9 气动和电动执行器垂直方向作动时 W 曲线

从图 8、图 9 中可以看出, 在水平和垂直方向, 气动执行器搬运工件时, W 几乎不依赖于 f , 各测试点的连线接近水平直线. 由于它的能耗只与 V' 有关, 它在待机或保持压力时除少许泄露外没有消耗, 每次消耗量近似相等, 因此, 气动执行器每次往复能耗在各种频率下近似相等.

电动执行器在水平和垂直方向 W 受 f 影响很大, 各测试点的连线成倾斜向下曲线. 随着 f 的增加, W 减少. 从图 6 可知, 电动执行器在待机状态也有消耗, f 越高, 待机能耗越少, 电动执行器的效率就越高.

(下转第 569 页)

本文仅从模糊函数角度初步研究了完全互补序列用于 MIMO 雷达的可行性,在此基础上,如何解决完全互补序列的多普勒容限问题,以及基于完全互补序列的 MIMO 雷达信号检测、参数估计以及成像等关键技术还需开展进一步的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] D J Rabideau, P Parker, D Rabideau. Ubiquitous MIMO digital array radar [C]//Conference Record of the 37th Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers. Pacific Grove, CA: IEEE, 2003: 1057 - 1064
- [2] Fishler E, Haimovich A, Blum R A, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Radar. Philadelphia, Pennsylvania, USA: IEEE, 2004: 71 - 78
- [3] Stoica P, Li J, Xie Y. On probing signal design for MIMO radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55 (8): 4151 - 4161
- [4] Yang Yang, Blum R S. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square error estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 52 (1): 330 - 343
- [5] Friedlander B. Waveform design for MIMO radars [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43 (3):

1227 - 1238

- [6] Suehiro N. A signal design without Co-channel interference for approximately synchronized CDMA Systems [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 1994, 12 (5): 837 - 841
- [7] Suehiro N, Kuroyanagi N, Imoto T, et al. Very efficient frequency usage system using convolutional spread time signals based on complete complementary code [C]//Proceedings of PIMRC. London: IEEE, 2000: 1567 - 1572
- [8] Deng H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52 (11): 3126 - 3135
- [9] Deng H. Synthesis of binary sequences with good autocorrelation and cross-correlation properties by simulated annealing [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32 (1): 98 - 107
- [10] Li S F, Chen J, Zhang L Q. Construction of quadri-phase complete complementary pairs applied in MIMO radar systems [C]//The 9th International Conference on Signal Processing Proceedings. Beijing: IEEE, 2008: 2298 - 2301
- [11] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- Lin Maoyong, Ke Youan. Radar signal theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984 (in Chinese)

(编辑:赵海容)

(上接第 563 页)

5 结 论

通过对两种执行器的能耗分析,得出结论:
①气动执行器每一次往复的能耗与作动频率几乎无关,而电动执行器由于其内部的电机性质,每一次往复的能耗与作动频率成反比;②气动执行器和电动执行器的能耗与工况有关.作动频率要求越高,采用电动执行器更节能,反之,气动执行器更节能;③气动执行器更适合于长时间保持负载的场合,电动执行器更适合于频繁作动的场合。

参考文献 (References)

- [1] 蔡茂林, 香川利春. 气动系统的能量消耗评价体系及能量损失分析 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (9): 69 - 74
- Cai Maolin, Kagawa T. Energy consumption assessment and energy loss analysis in pneumatic system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (9): 69 - 74 (in Chinese)
- [2] 蔡茂林, 陈响宇, 王雄耀, 等. 气缸与电动执行器的竞争与互补 [J]. 现代制造, 2009 (4): 24 - 27
- Cai Maolin, Chen Xiangyu, Wang Xiongyao, et al. Cylinder and electric actuator's competition and complementarity [J]. Modern Manufacturing, 2009 (4): 24 - 27 (in Chinese)
- [3] 柏艳红, 李小宁. 气动位置伺服系统的 T-S 型模糊控制研究 [J]. 中国机械工程, 2008 (2): 150 - 154

Bai Yanhong, Li Xiaoning. Study on T-S fuzzy control for pneumatic position servo system [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008 (2): 150 - 154 (in Chinese)

- [4] 蔡茂林. 现代气动技术理论与实践第四讲: 压缩空气的能量 [J]. 液压气动与密封, 2007 (5): 54 - 59
- Cai Maolin. Theory and practice of modern pneumatics fourth lecture: compressed air's energy [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2007 (5): 54 - 59 (in Chinese)
- [5] Dutch National Team. Compressed air: savings of 30% are quite normal [J]. CADDET Energy Efficiency, Newsletter, 1999 (3): 14 - 16
- [6] 蔡茂林, 藤田壽憲, 香川利春. 空気圧駆動システムにおけるエネルギー消費とその評価 [J]. 日本油空圧学会論文集, 2001, 32 (5): 118 - 123
- Cai Maolin, Hisashi Ken Fujita, Kagawa T. Energy consumption assessment of compressed air driven system [J]. Proceedings of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, 2001, 32 (5): 118 - 123 (in Chinese)
- [7] 徐文灿. 电动缸与气缸 [J]. 液压气动与密封, 2006 (2): 19 - 24
- Xu Wencan. Electric actuator and cylinder [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2006 (2): 19 - 24 (in Chinese)
- [8] Cai Maolin, Kawashima K, Kagawa T. Power assessment of flowing compressed air [J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2006, 128 (2): 402 - 405

(编辑:刘登敏)