

平板状电流变阀压力差理论与实验分析

焦晓阳, 刘建芳, 刘国君, 李晓韬, 刘建朋, 刘晓论

(吉林大学机械科学与工程学院, 130022, 长春)

摘要: 利用电流变技术, 基于电流变阀的工作机理, 设计了单通道平板状电流变阀和双通道平板状电流变阀样机. 分析了两种平板状电流变阀压力-流量方程, 并通过有限元方法理论分析了平板状电流变阀的强度. 在理论分析的基础上, 制作了两种平板状电流变阀样机并建立了实验系统, 对影响平板状电流变阀性能的关键参数进出口压力差进行了实验研究. 实验结果表明, 平板状电流变阀的进出口压力差随流量增加而增大, 还随着输入电压的提高而线性增大. 当电压为 110 kV、流量为 211.2 mL/min 时, 单通道平板状电流变阀进出口压力差达到 0.12 MPa.

关键词: 平板状电流变阀; 压力差; 结构分析; 压力差实验

中图分类号: TH11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0128-06

Theoretic and Experimental Analysis for Pressure Difference of Flat-Shape Electrorheological Valve

JIAO Xiaoyang, LIU Jianfang, LIU Guojun, LI Xiaotao, LIU Jianpeng, LIU Xiaolun

(College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Two kinds of flat electrorheological valve (ER-valve) prototypes, single-channel and double-channel ER-valve, are designed with electrorheological technology. Pressure-flow equations of the two kinds of flat ER-valves are analyzed, and the intensity of the flat ER-valves is also solved by finite element method. Following the theoretical analysis, the two kinds of flat ER-valves and the corresponding experimental system are manufactured. The key parameter, pressure difference between entrance and exit affecting ability of flat ER-valves, is experimentally investigated. It shows that pressure difference increases with raising flow and increases linearly with heightened input voltage. The pressure difference of the single-channel ER-valve gets 0.12 MPa as the voltage is 110 kV and flow is 211.2 mL/min.

Keywords: flat-shape electrorheological valve; pressure difference; structure analysis; pressure difference experiment

随着现代科学和技术的发展, 利用电流变液和电流变技术实现精密驱动的研究已经成为热点. 电流变液的黏性随着外加电场的增加而增大, 当电场强度达到某一临界值时, 电流变液可在瞬间迅速固化, 且该过程有可逆性. 基于电流变液的这一特性, 电流变技术在减振器^[1]、液压阀^[2]、离合器^[3]、联轴器^[4]、阻尼器^[5]、超精密研磨技术^[6]、机器人^[7]和光

子能隙材料^[8]等工程领域有着广泛的应用.

相对于传统的液压控制阀具, 电流变阀有很多优势: ①电流变阀能够直接用电信号控制液体的压力和流量^[9-10]; ②由于电流变阀内无金属件的运动及相互摩擦, 惯性小, 响应快; ③电流变阀结构简单, 加工精度要求不高^[11].

文献[12]设计了圆筒状电流变阀, 并将 4 个圆

筒状电流变阀组成桥式结构来控制操作平台,实现了升降、旋转和偏转运动;文献[13]研制了以电流变阀为主要部件的缓冲器样机,有效地控制了机车的连接;文献[14]研究了利用电流变阀的汽车防抱死制动系统,通过控制外加电场强度可连续调节制动力,提高了制动性能;文献[15]设计了利用电流变阀控制墨水喷射的打印机,使墨水的喷出量可以通过电压来控制;文献[16]将电流变阀用于流式细胞仪的设计中,并对其结构和机理进行了分析;文献[17]对圆筒形和平板状电流变阀进行了对比分析,分别建立了各自的理论数学模型,并通过理论数学模型对两种电流变阀的压降和反应时间进行了理论预测及对比。

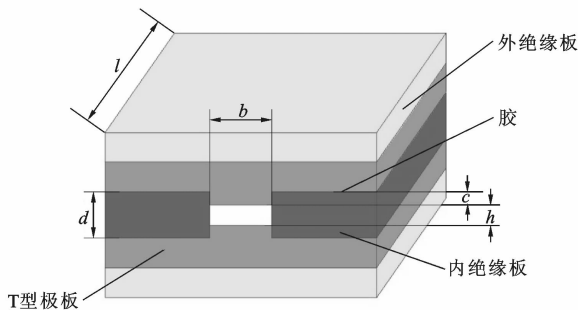
电流变阀的研究日益深入,以往的研究多集中在电流变阀的应用,关于电流变阀本身的研究相对较少。本文自主设计了单通道平板状电流变阀和双通道平板状电流变阀,通过理论分析和实验验证,确定了其结构的合理性,得出了影响电流变阀性能的若干因素,并对单、双通道平板状电流变阀的实验结果进行了对比。

1 单通道电流变阀结构设计及分析

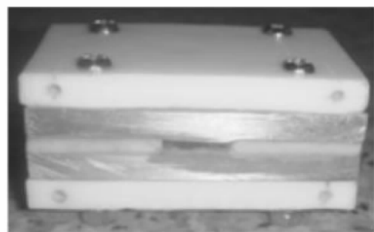
1.1 结构设计

图 1a 是单通道平板状电流变阀的结构图。其中,2 个 T 型极板分别接高压电源的正负极,电极从极板侧面引出,内绝缘板用来隔离 2 个 T 型极板,组合后形成了缝隙流道,缝隙流道的宽度由 T 型极板凹槽深度 c 和内绝缘板的厚度 d 来决定,缝隙流道宽度 $h=d-2c$,外绝缘板用来隔离带电的 T 型极板和外部环境。

单通道平板状电流变阀的主要结构参数包括电极间距 h 、T 型极板长度 l 和有效宽度 b 。施加过高的电压会给绝缘和安全带来问题,所以要使电极间距尽可能小,以便得到较大的电场强度。对极板长度和有效宽度的选择没有特殊要求,但是对于太长的流道,容易产生较高的热量。本文设计了流道缝隙为 0.8、1.0 和 1.2 mm 的单通道平板状电流变阀,图 1b 是流道缝隙为 1 mm 的单通道平板状电流变阀的实物图。3 种单通道平板状电流变阀的主要结构参数为长度 $l=30$ mm、宽度 $b=10$ mm、T 型极板凹槽深度 $c=1$ mm、内绝缘板的厚度 $d=2.8$ (流道缝隙 0.8 mm),3 (流道缝隙 1 mm),3.2 mm (流道缝隙 1.2 mm)。



(a)单通道平板状电流变阀结构示意图



(b)单通道平板状电流变阀实物图

图 1 单通道平板状电流变阀

1.2 单通道电流变阀的理论分析

单通道电流变阀的压力流量方程^[18]

$$\Delta P = \frac{12\eta_0 l}{bh^3} Q + \frac{2l}{h} \tau_{\text{EY}} \quad (1)$$

式中: ΔP 为电流变阀进出口的压力差; Q 为通过阀的流量; η_0 为施加电场前电流变液体的黏度; $\tau_{\text{EY}} = \alpha E^\beta$ 为电致抗剪屈服应力, α 和 β 由电流变液体的固有性质决定。

从式(1)可知:电流变阀的总压力差由两部分组成,前一部分是由单通道电流变阀的结构参数决定的基本压力差,它的大小只随流量变化;后一部分是由外加电场作用在电流变液两端时产生的电致压力差,它与电流变阀的结构参数(电流变阀的长度 l 和缝隙流道的宽度 h)和电致抗剪屈服应力有关;当流量一定时,通过控制电场强度 E ,可实现无级调节电流变阀两端的压力差。

1.3 单通道平板状电流变阀材料的选择

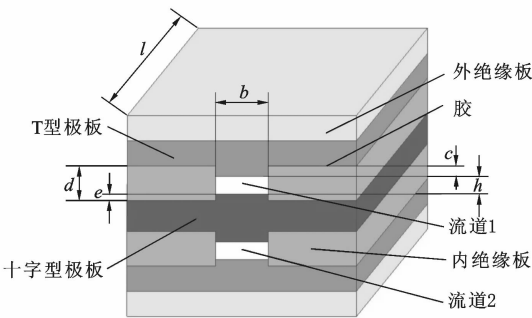
T 型极板是单通道平板状电流变阀的主体,要求具有良好的导电性和一定的强度,因此 T 型极板的材料选择铝合金。

由于单通道平板状电流变阀施加的电压达到千伏级,所以绝缘问题十分重要。聚四氟乙烯具有优良的密封性、电绝缘性,因此内、外绝缘板的材料选择聚四氟乙烯。

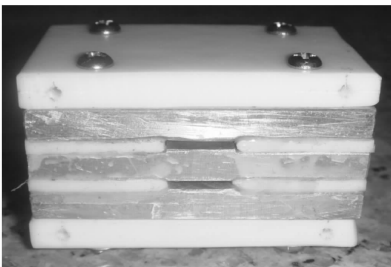
2 双通道电流变阀的结构设计及分析

2.1 结构设计

图 2a 是双通道平板状电流变阀的结构图. 其中,2 个 T 型极板的引出电极用导线连接在一起,与十字型极板分别接高压电源的正负极. 内绝缘板用来隔离 T 型极板和十字型极板,组合后形成了 2 个缝隙流道. 这两个缝隙流道有相同的宽度 h ,由内绝缘板的厚度 d 、T 型极板的凹槽深度 c 和十字型极板的凹槽深度 e 来决定, $h=d-c-e$. 外绝缘板用来隔离带电的 T 型极板和外部环境.



(a)双通道平板状电流变阀结构图



(b)双通道电流变阀实物图

图 2 双通道平板状电流变阀

设计了两个流道缝隙均为 1 mm 的双通道平板状电流变阀,其主要结构参数为 $l=30\text{ mm}$ 、 $b=10\text{ mm}$ 、 $c=1\text{ mm}$ 、 $e=1\text{ mm}$ 、 $d=3\text{ mm}$ 、 $h=1\text{ mm}$. 与单通道平板状电流变阀相比,结构上增加了十字型极板(见图 2a). 从图 2b 可以看出,十字型极板是两个流道的共用电极,两块 T 型极板由侧面电极引出后,由导线连接在一起共接正(负)极,十字型极板接负(正)极.

2.2 双通道电流变阀的理论分析

双通道电流变阀的压力流量方程

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{single}} = \frac{12\eta_0 l}{bh^3 n} Q + \frac{2l}{h} \tau_{\text{EY}} \tag{2}$$

式中: ΔP_n 为系统总压力差; ΔP_{single} 为单个通道进出口的压力差; n 为通道个数,双通道时 $n=2$.

对比式(2)和式(1)可以看出,在总流量一定的情况下,双通道电流变阀的进出口压力差小于单通道电流变阀进出口的压力差. 在压力流量方程中,双通道电流变阀的电致压力差和单通道电流变阀的电致压力差相等. 双通道电流变阀受流量影响的基本压力差是单通道电流变阀的 1/2. 所以,综合基本压力差和电致压力差,在流量相等的情况下,双通道电流变阀的压力差小于单通道电流变阀的压力差,而大于单通道电流变阀的 1/2.

3 电流变阀的结构有限元分析

T 型极板与内绝缘板共同构成了单通道电流变阀的缝隙流道,本节将对这两部分进行应力分析. 本文所设计的电流变阀液压系统是个小型系统,最高压强不超过 1 MPa. 通过有限元分析,得到图 3 所示的应力图. 从图中可以看出,最大应力值出现在 T 型极板上,最大应力为 3.513 MPa,小于铝的屈服强度 90 MPa,内绝缘板的应力也小于聚四氟乙烯的屈服强度 129 MPa,因此阀的结构满足强度要求.

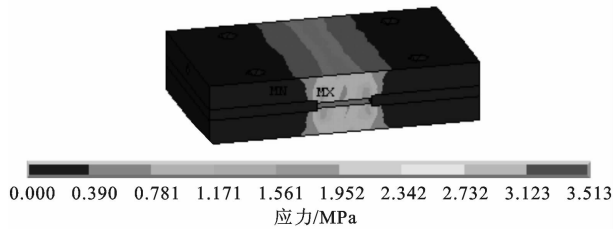


图 3 流道缝隙为 1 mm 的阀体的应力图

4 电流变阀压力差实验系统

4.1 实验系统组成

如图 4 所示,电流变阀实验系统的组成为:压电叠堆泵,HPV 系列压电陶瓷驱动电源,SP1641B 型函数信号发生器,DW-P502-5ACC6 型高压直流电源,压力传感器(测量精度为 $1\times 10^3\text{ Pa}$),智能数显仪,开关电源和量筒(测量精度为 $\pm 0.5\text{ mL}$)等辅助装置.

4.2 实验方案

电流变液体从油箱中依靠压电叠堆泵的输送,通过电流变阀进入量筒. 由于电流变阀的出口直接通空气,所以只用一个压力传感器接在电流变阀的进口,智能数显仪显示的值就是电流变阀进出口的压力差. 由于压电叠堆泵是定流量泵,用秒表测试在一定时间内电流变液体流入量筒的体积,从而测得通过电流变阀的流量. 这样在固定流量下,改变加在

电流变阀上的电压,就能得到在不同电压下的压力差.为了减小系统及人为因素带来的误差,每个数据均测量3次,然后取其平均值,最大限度地降低误差对实验结果的影响.图5为电流变阀压力差实验系统照片.

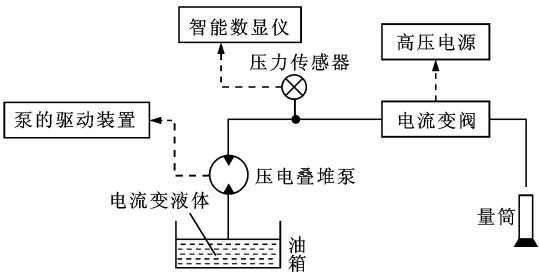
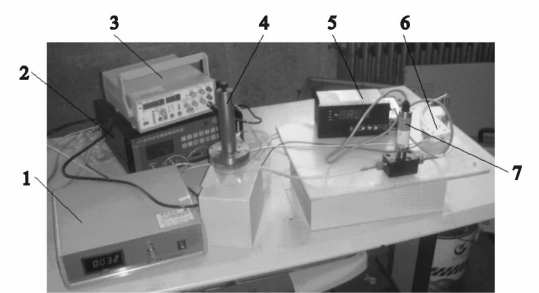


图4 实验系统示意图



1:高压直流电源;2:HPV系列压电陶瓷驱动电源;3:函数信号发生器;4:压电叠堆泵;5:智能数显仪;6:电流变阀;7:压力传感器

图5 实验系统照片

5 实验结果及分析

5.1 不同缝隙流道的单通道电流变阀的对比实验

分别加工了流道缝隙为0.8、1.0和1.2 mm的单通道电流变阀,调整压电叠堆泵的流量分别为172.8、211.2 mL/min,在上述各定流量下,分别测量流道缝隙为0.8、1.0和1.2 mm的单通道电流变阀的进出口压力差与施加在其两端的电压的关系,见图6和图7.

5.2 单、双通道电流变阀的对比实验

加工了流道缝隙为1 mm的双通道电流变阀,调整压电叠堆泵的流量分别为96、134.4、172.8和211.2 mL/min.在上述各定流量下,分别测量流道缝隙为1 mm的单、双通道电流变阀进出口压力差与电压的关系,见图8和图9.

5.3 实验结果分析

(1)误差分析.选择流道缝隙为1 mm的单通道电流变阀为误差分析的对象,当流量为211.2 mL/min时,将实验得到的电流变阀两端的压力差同理

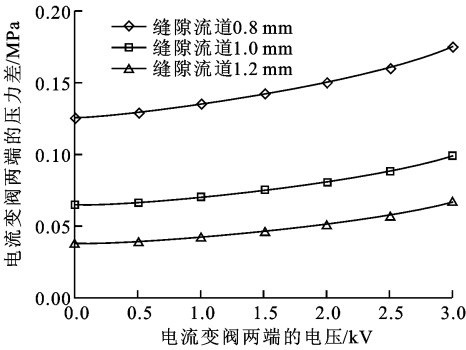


图6 流量为172.8 mL/min时的电流变阀压力差与电压的关系

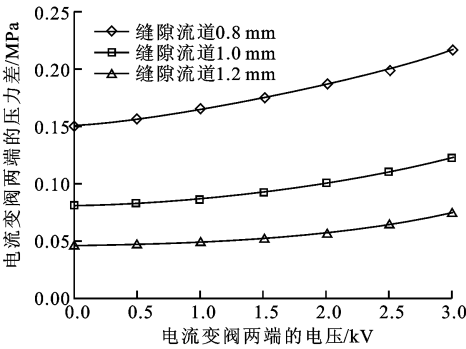


图7 流量为211.2 mL/min时的电流变阀压力差与电压的关系

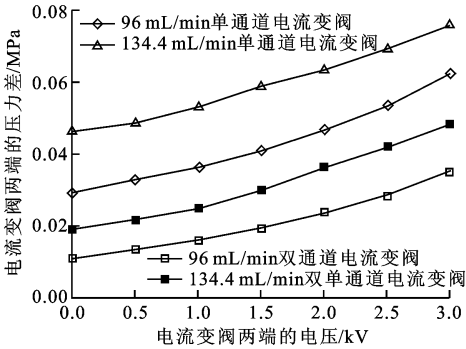


图8 流量为96、134.4 mL/min时的单、双通道电流变阀进出口压力差的对比

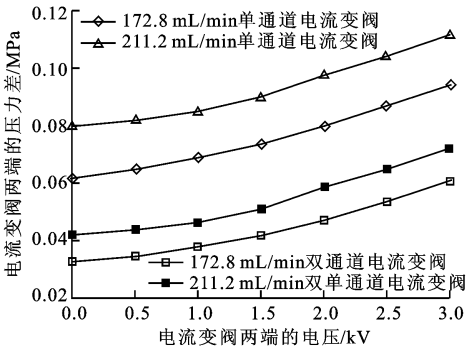


图9 流量为172.8、211.2 mL/min时的单、双通道电流变阀进出口压力差的对比

论计算的结果进行比较,见图10.从图中可以看到,实验结果比较符合理论计算,稍小于理论计算的结果.这主要是由于实际配置的电流变液的性能同理论上存在差异,但两条曲线的走势是相同的,且误差很小,所以不会妨碍对实验数据的分析.

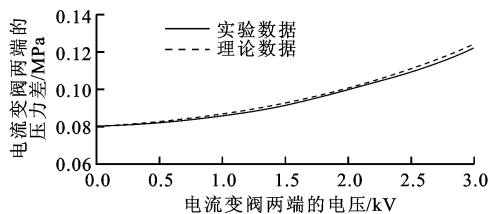


图10 实验数据同理论数据的比较

(2)从图6~图9中均可以看出,在定流量下,单、双通道电流变阀的进出口压力差随着其两端电压的增加而增大.当电流变阀两端的电压越高时,增加单位电压,电流变阀两端的压力差增加得越大,电流变效应也就越明显.根据式(1)或式(2),进出口压力差增大的部分是电致压力差,电致压力差随着电压的增加而增大,而基本压力差不变.

(3)压力差-电压的曲线大致符合幂函数关系,这与式(1)或式(2)的压力-流量方程是相符的,其曲线的形状取决于电流变液体的固有性质 α 和 β .对于不同的电流变液体,有不同的 α 和 β .本文还给出了测定 α 和 β 的一种方法:将实验得到的数据通过最小二乘法进行曲线拟合,从而得出比较精确的 α 和 β 值.

(4)从图6和图7可以看到,在其他因素相同的情况下,电流变阀的缝隙流道越小,其两端的压力差越大.由式(1)或式(2)可以看到,电流变阀两端的压力差与极板间距 h (缝隙流道)的立方成反比,所以缝隙流道越小,电流变阀两端的压力差越大.电流变阀两端的压力差对于缝隙流道 h 的变化是极其敏感的,若 h 有微小的波动,压力差将会有较大的变化量.尤其是当 $h < 1$ 时,虽然 h 的变化量都为0.2 mm,相对于 $h = 1$ mm的电流变阀的压力差, $h = 0.8$ mm的电流变阀的压力差的变化量远远大于 $h = 1.2$ mm的电流变阀的压力差的变化量,如图6和图7所示.对于平板状电流变阀来说,应严格控制缝隙流道 h 的公差.

(5)在施加电场前,与单通道电流变阀相比,双通道电流变阀的进出口压力差减少了大约一半.由式(1)和式(2)对比可以看出,在相同的电压下,单、双通道电流变阀的电致压力差相同,双通道电流变阀的基本压力差是单通道电流变阀基本压力差的

1/2,而电致压力差由电流变液体的固有性质和电压决定.当电压为0时,单、双通道的电致压力差均为0,双通道电流变阀进出口的压力差刚好是单通道电流变阀进出口压力差的一半.在定流量下,电致压力差随着电压的增加而增大,而基本压力差不变,基本压力差只与流量有关系.所以,双通道电流变阀进出口压力差小于单通道电流变阀的进出口压力差,但大于单通道电流变阀进出口压力差的1/2,差值为 $l\tau_{\text{EY}}/h$.图8和图9也很好印证了这一点.

(6)施加电场后,单、双通道电流变阀的进出口压力差随电压的增加是相等的.由式(1)或(2)可以看出,在定流量下,基本压力差是一个固定的值,单、双通道电流变阀进出口压力差的增加只与电致压力差相关,两者的压力流量方程的电致压力差相同.从图8和图9也可以看出,对于相同流量的单、双通道电流变阀,曲线在纵坐标方向的间距基本是不变的.

(7)当电流变阀施加电压一定时,通过阀的流量越大,压力差就越大.

6 结 论

根据电流变阀的工作原理,设计制造了流道缝隙为0.8、1.0和1.2 mm的单通道平板状电流变阀和流道缝隙为1 mm的双通道平板状电流变阀.在设计流量为96、134.4、172.8和211.2 mL/min的情况下,对单、双通道电流变阀的进出口压力差与电压的关系进行了实验研究.在定流量下,电流变阀的进出口压力差随着电压的增加而增大,其关系为幂函数关系.对比分析了单、双通道电流变阀的差异,当流量一定时,双通道电流变阀的进出口压力差小于单通道电流变阀的进出口压力差,而大于单通道电流变阀进出口压力差的1/2.实验结果与理论分析一致,使我们对电流变阀有了更进一步的认识.

参考文献:

- [1] LINDLER J E, WERELEY N M. Double adjustable shock absorbers using electrorheological fluid [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 10(8): 652-657.
- [2] GEORGIADES G, OYADIJI S O. Voltage control characteristics of electrorheological fluid valves [J]. International Journal of Vehicle Design, 2003, 33(1/2/3): 218-238.
- [3] LIU Liyu, HUANG Xixiang, SHEN Cai, et al. Parallel-field electrorheological clutch Enhanced high shear rate performance [J]. Applied Physics Letters,

- 2005,87(10):1-3.
- [4] TIAN Y, JI H, MENG Y. Investigation of characteristics of electro-rheological fluid couplings [C]// Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. Chongqing, China: Chinese Machine Press, 2001:661-663.
- [5] ZHAO X P, LIU S, TANG H, et al. A new kind of self-coupled electrorheological damper and its vibration character [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(1):57-65.
- [6] ZHANG Lei, KURIYAGAWA T, KAKU T, et al. Investigation into electro-rheological fluid-assisted polishing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12/13): 1461-1467.
- [7] TAN K P, SAMWAU R, BULLOUGH W A. Shear mode ER transfer function for robotic applications [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2005, 38(11):1838-1852.
- [8] HOU Bo, XU Gu, WONG Hon Kwan, et al. Tuning of photonic bandgaps by a field-induced structural change of fractal metamaterials [J]. Optics Express, 2005, 13(23): 9149-9154.
- [9] KLASS D L, MAITTINEK T W. Electroviscous fluids; I Rheological properties[J]. Journal of Applied Physics, 1967, 38 (1):67-74.
- [10] KLASS D L, MAITTINEK T W. Electroviscous fluids; II Electrical properties[J]. Journal of Applied Physics, 1967,38 (1):75-80.
- [11] 胡友民. ER 阀:一种新型液压阀[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 1999,14(3/4):62-64.
- [12] CHOI S B, PARK D-W, CHO M-S. Position control of a parallel link manipulator using electro-rheological valve actuators[J]. Mechatronics, 2001, 11(2):157-181.
- [13] 张志宇,吴博达,刘建芳. 电流变技术的发展与应用[J]. 机床与液压,2007,35(6): 203-207.
- ZHANG Zhiyu, WU Boda, LIU Jianfang. Development and application of electrorheological technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007,35(6): 203-207.
- [14] CHOI S B, LEE T H, LEE Y S, et al. Control performance of an electrorheological valve based vehicle anti-lock brake system, considering the braking force distribution [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(6): 1483-1492.
- [15] LEE C Y, TSENG C Y. The droplet ejection of an inkjet mechanism controlled by electrorheological fluid [J]. Materials and Design, 2002, 23(8):727-739.
- [16] LING Yunyang, ZHANG Yechi, WEN Weijia, et al. Integrated microgiant electrorheological fluid valves for microflow cytometry[J]. Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS,2009, 8(2): 1-7.
- [17] HAN Y M, SUNG K G. Performance comparison of electrorheological valves with two different geometric configurations; cylinder and plate[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(3): 573-581.
- [18] 陈淑梅,戴俊群,祝榕生,等. 基于电流变效应的阀控系统研究[J]. 中国机械工程,2004, 15(4):290-294.
- CHEN Shumei, DAI Junqun, ZHU Rongsheng, et al. Study on valve control system based on electrorheological effect [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004, 15(4): 290-294.

(编辑 杜秀杰)