

# 高频电气喷射阀优化设计与试验<sup>\*</sup>

向忠 刘昊 陶国良

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

**【摘要】** 建立了高频电气喷射阀电磁铁的有限元分析模型。在静态有限元分析基础上,通过减小喷射阀衔铁外径及在其中心钻孔对电磁铁结构进行了优化设计。优化后模型的结构尺寸及提供的稳态电磁力均与优化前相当,而衔铁质量下降71%,故其加速度大幅上升,使得优化后模型的动态响应时间在各工作状况下均约缩短8%。最后,根据优化后电磁铁模型加工制造了电气喷射阀样机,并研制了其动态性能测试系统。试验与仿真结果吻合,验证了仿真模型的有效性。

**关键词:** 高频喷射阀 优化设计 仿真 试验

**中图分类号:** TH138.52; TM15 **文献标识码:** A

## Optimal Design and Test of High-speed Electro-pneumatic Ejector Valve

Xiang Zhong Liu Hao Tao Guoliang

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

### Abstract

A finite element simulation model of the high-speed electro-pneumatic ejector valve actuator was built to analyze its steady state and transient performances. Optimal design was implemented by turning the fringe part and boring the center part of the armature base on steady state finite element analysis. Comparing with the original actuator, the optimized actuator has an almost 71% reducing in the armature weight whilst without significant steady state solenoid force loss in the actuator and without significant increase in structure dimensions that it gets a considerable improvement in armature acceleration, so the response times decrease by typically 8% under different work conditions. Finally, prototype electro-pneumatic ejector valves were fabricated according to the optimized actuator model, and a test facility was also built up to obtain the valve's dynamics. The agreement between the simulation results and the experimental data proves the effectiveness of the simulation model.

**Key words** High-speed ejector valve, Optimal design, Simulation, Test

### 引言

农产品色选设备用高频电气喷射阀工作频率为150~300 Hz,工作压力范围为0.2~0.55 MPa,阀用电磁铁工作行程一般为0.05~0.1 mm<sup>[1]</sup>。为提高设备工作效率及维持其操作稳定性、准确性,要求进一步提高喷射阀的响应特性、寿命特性及稳定性<sup>[2]</sup>。虽然文献[3~6]中提出了大量实用的电磁

铁结构以提高阀的响应特性,但这些电磁铁的结构往往过于复杂而难以加工,且其成本高,因此在电气喷射阀中并未获得广泛应用,而传统的E型、C型电磁铁仍是被普遍采用的结构。Seilly曾指出,对于E型(C型)电磁铁,所需电磁力越大,电磁铁运动部件(衔铁)的加速度越小<sup>[3]</sup>。该特性加大了提高喷射阀响应特性的难度。

本文以有限元方法为基础,以E型电磁铁为对

收稿日期: 2008-05-23 修回日期: 2008-06-27

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50805128)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070335133)和浙江省教育基金资助项目(20070057)

作者简介: 向忠, 博士生, 主要从事气动元件及气动电子控制研究, E-mail: zju\_xiang@hotmail.com

象,建立仿真模型。通过分析电磁铁结构参数对其静态性能的影响,对该电磁铁进行优化设计。最后,根据优化模型设计制作高频电气喷射阀,并完成样机的动态特性测试,以验证仿真模型的有效性。

## 1 有限元分析及建模

### 1.1 电磁铁结构及工作原理

高频电气喷射阀用电磁铁轴对称参数化模型如图1所示。该电磁铁结构本质上为E型结构,其静铁芯、气隙、衔铁构成磁回路,通过控制线圈所受外部电压激励的通断可以控制衔铁的吸合或释放,从而控制通过喷射阀压缩气流的导通或截止。电磁铁用材料的  $B-H$  特性曲线如图2所示;电磁铁实际结构参数如表1所示。

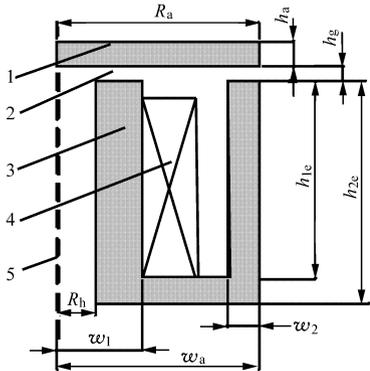


图1 电气喷射阀用电磁铁轴对称参数化模型

Fig.1 Axisymmetric parameterized model of the solenoid actuator of one of electro-pneumatic ejector valves

1. 衔铁 2. 气隙 3. 静铁芯 4. 线圈 5. 对称轴

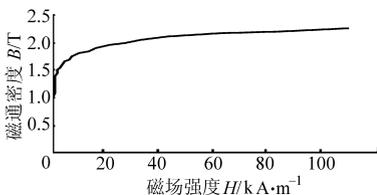


图2 电磁铁用材料磁化曲线

Fig.2 Initial magnetization curves for solenoid actuator

表1 电磁铁主要结构参数

Tab.1 Partial structure parameters of the solenoid actuator

参数	数值	参数	数值
$R_h/mm$	2	$h_{1c}/mm$	11.5
$w_1/mm$	4	$h_{2c}/mm$	13
$w_a/mm$	9.5	$h_a/mm$	1.5
$w_2/mm$	1.5		

### 1.2 电磁场模型

根据电磁铁的结构对称性,采用圆柱坐标系内二维轴对称模型对其进行建模,以降低模型复杂度、减少分析计算时间。忽略位移电流影响并假设材料

的导磁特性不受温度影响,基于磁向量位法建立有限元求解模型时,麦克斯韦方程可表示为<sup>[7]</sup>

$$\nabla \times \mathbf{B}(r, t) = \mu \mathbf{J}(r, t) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(r, t) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(r, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(r, t) = \frac{\rho(r, t)}{\epsilon_0} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

式中  $\mathbf{B}$ ——磁感应强度向量

$\mu$ ——自由空间磁导率

$\mathbf{J}$ ——电流密度向量  $\sigma$ ——电导率

$\mathbf{E}$ ——电场强度向量  $\rho$ ——体电荷密度

$\epsilon_0$ ——自由空间介电常数

采用有限元法分析电磁场时,通过引入向量磁位  $\mathbf{A}$  与标量电位  $\varphi$  可减少变量数目和提高计算效率。结合式(1)~(4)与库伦规范,有

$$-\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}(r, t) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{d\delta}{dt} \sigma \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (7)$$

式中  $\delta$ ——衔铁位移

考虑衔铁运动特性,进行瞬态电磁场分析时,电磁场之间耦合特性通过电路电压特性方程描述为<sup>[8]</sup>

$$U(t) = IR + \frac{d\lambda}{dt} \quad (8)$$

式中  $U$ ——线圈所受外部电压激励

$I$ ——线圈中电流  $R$ ——线圈总阻抗

$\lambda$ ——通过线圈的磁链数

通过对 Maxwell 应力张量  $\mathbf{T}$  进行面积分,可得到衔铁在电磁场中所受到的总电磁力为

$$\mathbf{F}_{mag} = \oint_S \mathbf{T} n dS \quad (9)$$

式中  $S$ ——环绕衔铁的空气包络面

$\mathbf{n}$ ——包络面  $S$  的法向分量

### 1.3 衔铁运动特性模型

由牛顿运动定律及电磁学知识可得

$$\ddot{\delta} = (F_{mag} - f)/m \quad (10)$$

$$f = mg + C \dot{\delta} + F_p \quad (11)$$

其中

$$m = \rho_m V$$

式中  $f$ ——衔铁运动所受阻力

$m$ ——衔铁质量  $\rho_m$ ——材料密度

$V$ ——衔铁体积  $g$ ——重力加速度

$C$ ——空气阻尼系数

$F_p$ ——衔铁所受气压力,取决于阀结构

## 2 仿真分析

表2为计算时所用到的部分参数,其他参数值在具体计算时给出。

表2 仿真计算参数

Tab.2 Parameters for simulation

参数	数值
介电常数 $\epsilon_0/\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	$8.85 \times 10^{-12}$
材料电导率 $\sigma/\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	$1 \times 10^6$
线圈电阻 $R/\Omega$	18
材料密度 $\rho_m/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$7.65 \times 10^3$
空气阻尼系数 $C/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	$1.8 \times 10^{-5}$

### 2.1 电磁阀静态特性分析

气隙长度等于0.05 mm时,电磁铁在外加激励等于1 330安匝时的稳态磁通密度云图如图3所示。从图中可看出磁通密度在衔铁中央与边沿区域的分布值要明显低于其他区域,即衔铁材料在这些区域的利用率较低。由于衔铁质量与其半径  $R_a$  平方成正比,故通过减小衔铁半径和在其中心钻孔可减小其质量。若通过这些尺寸缩减而能维持电磁力大小不变,衔铁的加速度可得到很大的提升。

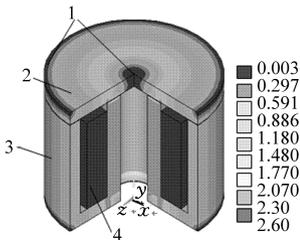


图3 电磁铁磁通密度矢量云图

Fig.3 Magnetic flux density contour of the actuator

1. 低磁通密度区 2. 衔铁 3. 静铁芯 4. 线圈

稳态电磁力及衔铁加速度与衔铁半径  $R_a$  的关系曲线如图4所示,为描述  $R_a$  变化趋势对电磁铁性能的影响及为不同尺寸电磁铁提供设计标准,横坐标以无量纲形式表述。图示加速度在忽略所有外部阻力( $f=0$ )作用情况下计算而得。

由图4可知,气隙长度  $h_g$  处于0.05~0.10 mm范围内时,电磁力与衔铁加速度均先随  $R_a$  的变小而递增,而当  $(\omega_a - R_a)/\omega_2 > 0.67$  后电磁力开始急剧下降到初始值以下。由于衔铁质量以  $R_a^2$  下降,衔铁加速度能维持在初始水平。综合考虑电磁铁性能可见,该电磁铁结构下无法通过进一步缩小  $R_a$  来提升电磁铁的动态响应性能。

改进后的电磁铁结构如图5所示。该结构在维持原结构基础上,通过引入参数  $R_\epsilon$  局部放大静铁芯壁厚  $\omega_2$ ,并引入参数  $R_k$  表示衔铁中心钻孔半

径。由于  $R_\epsilon$  的引入产生了非工作气隙  $h_{gu}$ ,为降低非工作气隙的影响, $h_{gu}$ 取值应远大于工作气隙长度(0.05~0.1 mm),本文中设置为1 mm。表3所示为改进后模型的结构参数。

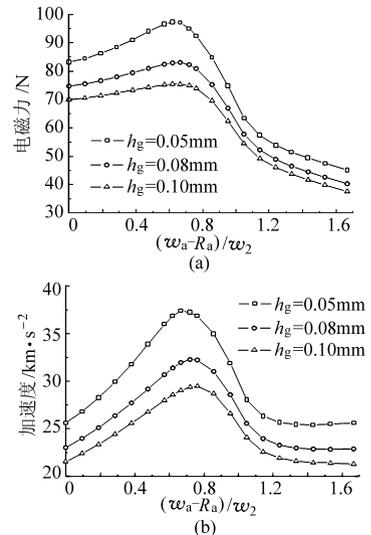


图4 不同气隙下  $R_a$  对电磁力和衔铁加速度的影响  
Fig.4 Simulated solenoid force and armature acceleration versus  $R_a$  for various air gap lengths  
(a) 电磁力 (b) 衔铁加速度

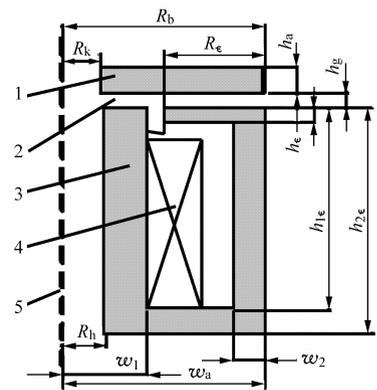


图5 改进后电磁铁轴对称参数化模型

Fig.5 Improved actuator axisymmetric parameterized model  
1. 衔铁 2. 气隙 3. 静铁芯 4. 线圈 5. 对称轴

表3 优化后电磁铁主要结构参数

Tab.3 Optimized parameters of the solenoid actuator

参数	数值	参数	数值
$R_b/\text{mm}$	2	$h_{1e}/\text{mm}$	12.4
$w_1/\text{mm}$	4	$h_{2e}/\text{mm}$	13.9
$w_a/\text{mm}$	9.5	$h_a/\text{mm}$	1.5
$w_2/\text{mm}$	1.5	$R_\epsilon/\text{mm}$	4.5

稳态电磁力及衔铁加速度与衔铁半径  $R_b$  的关系曲线如图6所示。曲线的变化趋势与改进前相似,稳态电磁力与衔铁加速度在曲线拐点处获得最大值。以电磁力最大值处( $(\omega_a - R_b)/\omega_2 \approx 0.87$ )

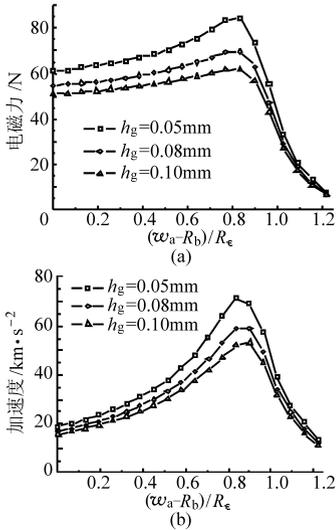


图6 不同气隙下  $R_b$  对电磁力和衔铁加速度的影响  
Fig.6 Simulated solenoid force and armature acceleration versus  $R_b$  for various air gap lengths  
(a) 电磁力 (b) 衔铁加速度

为参考点, 衔铁半径  $R_b$  取值为 5.7 mm。

稳态电磁力及衔铁加速度随钻孔半径  $R_k$  变化的趋势如图7所示。由图可知,  $R_k/\omega_1 < 0.6$  时, 电磁力基本维持不变, 随后开始快速下降。同上, 钻孔半径取值为 2.5 mm。

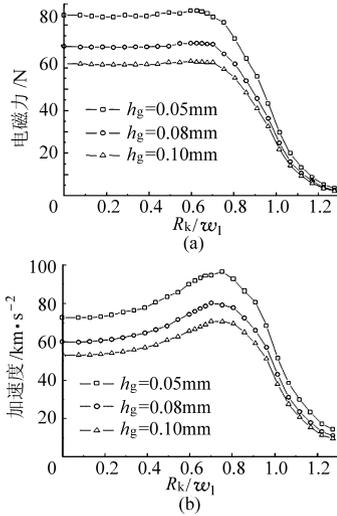


图7 不同气隙下  $R_k$  对电磁力和衔铁加速度的影响  
Fig.7 Simulation solenoid forces and armature accelerations versus  $R_k$  for various air gap lengths  
(a) 电磁力 (b) 衔铁加速度

通过上述优化, 衔铁质量由优化前 3.245 g 变为 0.943 g, 下降幅度达 71%。表4为优化前后稳态电磁力及衔铁加速度的对比。由表4可知, 优化后各工作气隙长度下, 电磁铁稳态电磁力与优化前相当, 但由于衔铁质量被大幅度减小, 故稳态加速度提高了3倍多。

### 2.2 电磁阀动态特性分析

不同气隙长度、外加负载及电压激励下衔铁的

位移特性曲线如图8所示。

表4 优化前后稳态电磁力与衔铁加速度对比

Tab.4 Comparison of steady state solenoid forces and armature accelerations before and after optimization

气隙长度/ mm	电磁力/N		衔铁加速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-2}$	
	优化前	优化后	优化前	优化后
0.05	83.1	86.8	26	92
0.08	74.7	71.5	23	76
0.1	69.9	63.1	22	66

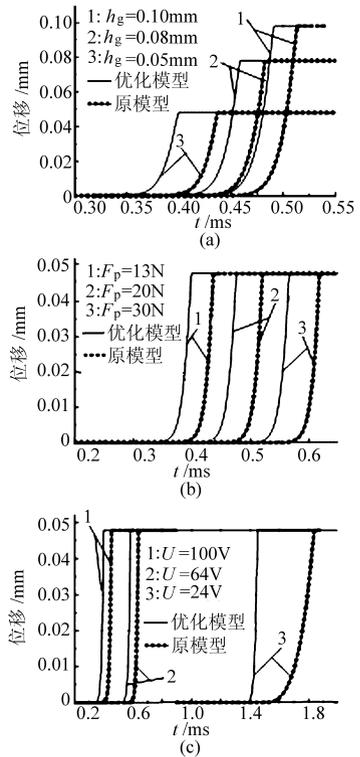


图8 不同气隙长度、外负载、激励对优化模型与原模型衔铁位移特性的影响对比  
Fig.8 Simulated displacement curves for optimized actuator and conventional actuator used for comparing the effects of air gap length, preload force and external exciting voltage on actuator dynamics

由图8a可知, 在电压激励为 100 V, 外加负载为 13 N, 气隙长度分别为 0.05、0.08、0.10 mm 时, 衔铁的动态响应时间分别缩短 8.8%、8.2%、7.6%; 由图8b可知, 在电压激励为 100 V, 气隙长度为 0.05 mm, 外加负载分别为 13、20、30 N 时, 衔铁的动态响应时间分别缩短 8.8%、8.5%、8.2%; 由图8c可知, 在外加负载为 13 N, 气隙长度为 0.05 mm, 激励分别为 100、64、24 V 时, 衔铁的动态响应时间分别缩短 8.8%、9.4%、2.7%。优化后模型在各种情形下均优于优化前模型, 动态响应时间均缩短约 8%。

### 3 试验分析

根据优化模型加工而成的二位二通气动复位式喷射阀如图9所示,建立的喷射阀动态性能测试系统功能框图如图10所示。该测试系统下,通过精密减压阀可调节测试系统压力,从而控制喷射阀衔铁受气压力;喷射阀驱动电压由直线性可调电源调节;脉宽调制(PWM)信号由NI PCI6251多功能板卡发出后,经信号放大板卡与喷射阀电磁铁线圈相连,控制衔铁的开启与关闭;衔铁位移经LK-G150型非接触式高精度激光位移传感器感知后输入测试系统软件。

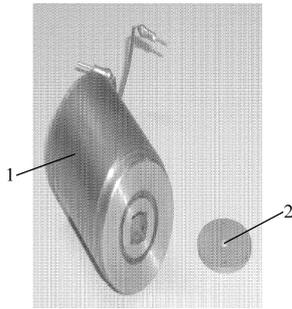


图9 加工制造的喷射阀

Fig.9 Fabricated ejector valve

1.静铁芯 2.衔铁

电压(脉冲周期 2 ms, 占空比 18%),为防止电磁铁过热,电磁阀开启后由保持电压保持,保持信号脉冲为 10 kHz, 占空比为 18%,该信号可通过NI PCI6251板卡PWM发生器直接产生。

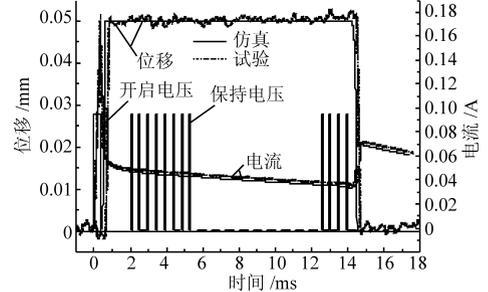


图11 喷射阀控制电压、衔铁位移、线圈电流仿真与试验结果

Fig.11 Simulated (dash lines) and experimental (solid lines) results of coil current and armature displacement

由图可知,仿真与试验结果基本吻合,这验证了仿真模型的有效性。喷射阀的开启总延迟时间为 0.61 ms,关闭总延迟时间为 0.72 ms,实测最高动作频率为 700 Hz。

### 4 结论

(1) 建立了高频电气喷射阀电磁铁稳态、瞬态特性有限元分析模型,并建立了喷射阀动态位移性能测试系统以验证仿真模型的有效性。

(2) 在静态有限元分析基础上,通过引入结构参数  $R_e$  对传统 E 型电磁铁结构进行了优化设计。由于  $R_e$  的引入产生了非工作气隙  $h_{gu}$ ,实际设计时应确保非工作气隙长度远大于衔铁有效行程范围(工作气隙)的最大值,从而降低非工作气隙对电磁铁性能的影响。

(3) 优化后模型结构尺寸及产生的稳态电磁力与优化前相当,但衔铁质量大幅度降低(本文中为 71%),且受静铁芯结构尺寸影响较小。其动态响应时间在不同工作状况下均有不同程度的缩短(文中约为 8%)。

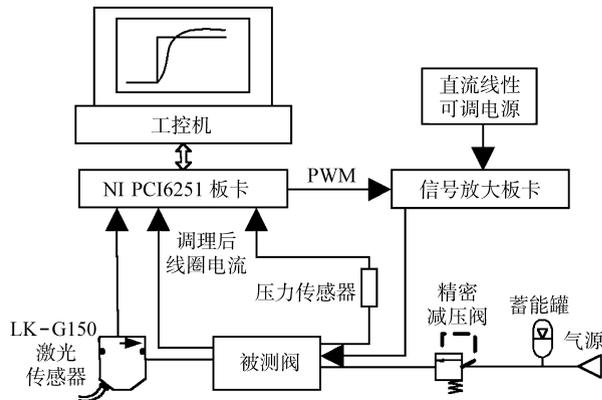


图10 喷射阀动态性能测试系统框图

Fig.10 Experimental setup for ejector valve's dynamics

喷射阀在典型工况下的衔铁位移及电磁铁线圈电流试验与仿真曲线对比如图11所示。该工况下,系统压力为 0.25 MPa(衔铁受气压力约为 13 N),电磁阀驱动电压为 100 V。PWM 控制信号波形如图中电压曲线所示,开启电压为 0.36 ms 脉冲直流

### 参 考 文 献

- 1 Bee S C, Honeywood M J. Colour sorting for the bulk food industry[M]//MacDougall D B. Colour in food: improving quality". Cambridge, U K: Woodhead Publishing Limited, 2002.
- 2 Khan S H, Cai M, Grattan K T V, et al. Computation of 3-D magnetic field distribution in long lifetime electromagnetic actuators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4):1 161~1 164.
- 3 Seilly A H. Helonoid actuators—a new concept in extremely fast acting solenoids [C]. SAE Paper 790779, 1979.
- 4 Schechter M M. Fast response multipole solenoids [C]. SAE Paper 820203, 1982.
- 5 Kushida T. High speed powerful and simple solenoid actuator "DISOLE" and its dynamic analysis results [C]. SAE Paper 850373, 1985.

振动依次呈现软自激振动、1周期硬自激振动、2周期振动、4周期振动直至振动衰减至平衡位置;随着 $p_0$ 的增加,振动频率下降,振幅上升。

## 5 结论

(1) 当工作流量较小、工作压力较低时,电磁阀系统平衡点不稳定,任意微小的扰动都将使系统各参数产生稳定的周期振荡,阀芯产生软自激振动。

(2) 随着工作流量、工作压力的逐渐增加,电磁阀系统平衡点稳定,电磁阀阀芯由软自激振动过渡到硬自激振动;随着工作流量、工作压力的进一步增加,系统在平衡点出现分岔,阀芯依次出现2周期振动、4周期振动。当工作流量、工作压力继续增加,阀芯振动将衰减,电磁阀工作稳定。

(3) 电磁阀进口压力、进口流量的增加将降低阀芯自激振动频率,增大自激振动振幅。

## 参 考 文 献

- 1 Dasgupta K, Watton J. Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bondgraph[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2005, 13(1): 21~38.
- 2 Dasgupta K, Karmakar R. Modelling and dynamics of single-stage pressure relief valve with directional damping[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2002, 10(1): 51~67.
- 3 Maiti R, Saha R, Watton J. The static and dynamic characteristics of a pressure relief valve with a proportional solenoid-controlled pilot stage[J]. IMechE, Part I, J. Syst. Control Eng., 2002, 216(2): 143~156.
- 4 Watton J. The design of a single-stage relief valve with directional damping[J]. Journal of Fluid Control Including Fluidics Quarterly, 1988, 18(2): 22~35.
- 5 Davies R. A real-time approach to load adaptive electro-hydraulic motor speed control[D]. Cardiff: University of Wales, 1994.
- 6 Hayashi S, Ohi K. Global stability of a poppet valve circuit[J]. Journal of Fluid Control, 1993, 21(4): 48~63.
- 7 Hayashi S, Hyase T. Chaos in a hydraulic control valve[J]. Journal of Fluids and Structures, 1997, 11(6): 693~716.
- 8 Misra A, Behdinanb K, Cleghorna W L. Self-excited vibration of a control valve due to fluid-structure interaction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 16(5): 649~665.
- 9 陶玉静, 范才智. 两位五通电动气阀动态特性研究[J]. 推进技术, 2006, 27(6): 542~545.
- 10 Merritt H E. Hydraulic control systems[M]. New York: John Wiley, 1967.

(上接第 214 页)

- 6 Zhao Y, Jones B. A power air-jet actuator with piezotranslator drive stage [J]. Mechatronics, 1991, 1(2): 231~243.
- 7 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- 8 Pawlak A M, Nehl T W. Transient finite element modeling of solenoid actuators the coupled power electronics, mechanical, and magnetic field problem [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 270~273.