

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.043

## 超磁致伸缩致动器式脉冲喷射开关阀性能研究\*

孟爱华<sup>1</sup> 李明范<sup>2</sup> 潘玉良<sup>1</sup> 周建军<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 杭州浙大精益机电技术工程有限公司, 杭州 310027)

**【摘要】** 鉴于超磁致伸缩致动器(GMA)的脉冲喷射开关阀性能受致动器结构参数的影响,建立了基于GMA的脉冲喷射开关阀流量与驱动电流之间的物理模型,并采用Matlab进行系统仿真。对比分析了开关阀中不同驱动线圈匝数、涡流时间常数、等效质量对开关阀频响伯德图和时域阶跃响应的影响,从而得到不同参数引起的开关阀工作带宽、响应时间等性能的变化规律,试验表明致动器结构引起的涡流时间常数是影响开关阀工作性能的主要因素,通过减小线圈匝数、缩短涡流时间常数可扩大致动器的频响范围,缩短响应时间。

**关键词:** 超磁致伸缩致动器 脉冲喷射开关阀 性能分析

**中图分类号:** TP271<sup>+</sup>.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0211-05

## Performance of Pulsed Jet On-off Valve Based on Giant Magnetostrictive Actuator

Meng Aihua<sup>1</sup> Li Mingfan<sup>2</sup> Pan Yuliang<sup>1</sup> Zhou Jianjun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. Hangzhou Zhejiang University Jingyi Electromechanical Technology Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310027, China)

### Abstract

The performances of pulsed jet on-off valve based on giant magnetostrictive actuator (GMA) are affected by structure parameters of actuator. The physical model between flux and driving current of the valve was built, and their relationship was simulated by Matlab. The response of different parameters, such as number of solenoids, eddy current time constant, effective mass of actuator, effect on the valve flux in frequency domain and time domain were analyzed respectively. The trends of flux with actuator parameters were abstracted from the simulation results. The eddy current time constant was the main factor which confirmed by experiments. To enlarge the response frequency band and shorten the response time, the number of the solenoid and the eddy current time constant should be decreased.

**Key words** Giant magnetostrictive actuator, Pulsed jet on-off valve, Performance analysis

### 引言

在汽车燃油喷射系统、离合器自动控制系统等领域中都需要一种可实现快速、定量、均匀喷射的微量流体控制装置。脉冲喷射开关阀(以下简称开关阀)利用高速开关阀高速开、关控制流体的特性和现有喷射装置的结构特点,实现流体的脉冲喷射,可满足以上应用要求。它主要由阀体和致动器两部分

组成,其中致动器的性能是影响喷射性能的关键。为了改善脉冲喷射开关阀的流量和工作频带范围,采用超磁致伸缩致动器(GMA)作为脉冲喷射开关阀的致动元件。GMA以稀土超磁致伸缩材料(GMM)为功能材料,具有响应频率高(20 000 Hz)、动态应变量大(大于 $3 \times 10^{-3}$ )的优点,有助于扩大开关阀的工作适用范围<sup>[1]</sup>。

近年来,利用GMM的特性,设计开发出了各种

收稿日期: 2009-07-22 修回日期: 2009-10-28

\* 国家自然科学基金资助项目(50905051)和浙江省自然科学基金资助项目(Y1080004)

作者简介: 孟爱华,副教授,博士,主要从事智能材料及器件性能分析及应用、机电一体化装备设计研究, E-mail: tulipmah@163.com

流体控制阀,如磁致伸缩伺服阀<sup>[2-3]</sup>、喷嘴挡板阀<sup>[4-5]</sup>、开关阀<sup>[6-7]</sup>、强力电磁阀<sup>[8-9]</sup>等,文献中对阀的结构设计、动态特性分析、控制设计、致动器设计等方面进行了研究,而对于基于 GMA 的阀的设计依据、对阀性能的影响规律缺少系统的分析。本文以脉冲喷射开关阀为设计实例,分析 GMA 参数对阀的性能影响。

考虑到 GMA 的脉冲喷射开关阀的喷射性能受致动器性能的影响和致动器在超磁致伸缩材料的驱动下工作,因此,致动器的电磁性能、动态结构都会改变开关阀的喷射流量和喷射速度。为了建立开关阀的优化结构,需分析开关阀的各种工作参数和结构参数对开关阀喷射性能的影响,寻求其性能变化规律。本文将在开关阀动态模型的基础上,采用 Matlab 进行仿真分析,寻找影响阀控制性能的主要因素。

### 1 系统建模

致动器的机械运动部分可简化为质量-弹簧-阻尼系统。致动器中的超磁致伸缩材料在驱动线圈的磁场作用下产生推动力,推动致动器和阀芯运动,从而实现流体的脉冲喷射控制,工作原理模型如图 1 所示。

图中  $x$  为阀芯位移,  $m$ 、 $k$ 、 $b$  分别为开关阀的等

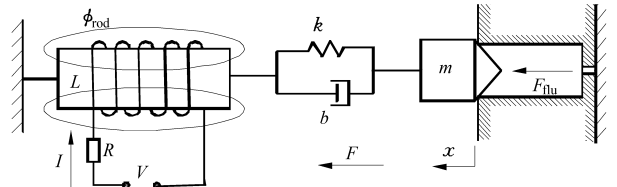


图 1 开关阀工作原理模型

Fig. 1 Theoretical model of pulsed jet on-off valve

效质量、等效刚度系数和等效阻尼系数,  $V$ 、 $I$ 、 $R$ 、 $L$  分别为致动器线圈驱动电压、电流、线圈电阻和电感,  $\Phi_{rod}$  为致动器中的磁通量,  $F_{flu}$  为阀内的液动力,  $F$  为磁致伸缩力。由阀的受力平衡、磁场关系<sup>[10]</sup>、GMM 特性<sup>[11]</sup>可知开关阀系统满足

$$NI = (\tau s + 1) R_m \Phi_{rod} \tag{1}$$

$$F = (ms^2 + bs + k) X - F_{flu} A_{room} \tag{2}$$

$$F = \frac{\Phi_{rod}}{d_{33}} \tag{3}$$

式中  $N$ ——线圈匝数  $R_m$ ——GMM 棒的磁阻  
 $\tau$ ——线圈涡流时间常数  $d_{33}$ ——压磁系数  
 $A_{room}$ ——阀腔的作用面积  
 $s$ ——拉普拉斯变换算子  
 $X$ —— $x$  的拉普拉斯变换象函数

根据 GMA 的动态工作特性和开关阀内流体受力动态平衡分析,可确定基于 GMA 开关阀的函数传递框图<sup>[12]</sup>,如图 2 所示。

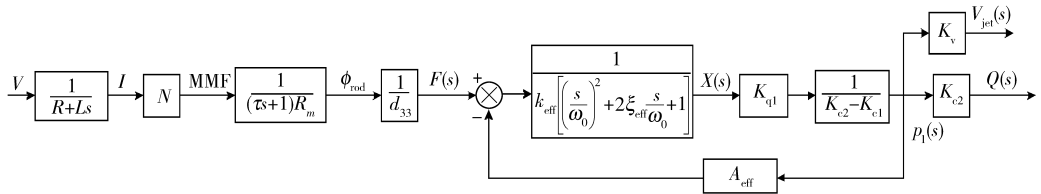


图 2 基于 GMA 开关阀的系统框图

Fig. 2 Block diagram of pulsed jet on-off valve based on GMA

图中  $k_{eff}$  为开关阀的等效刚度,有

$$k_{eff} = k + k_{flu}$$

式中  $k_{flu}$ ——流体的液刚度

图中  $A_{eff}$  为开关阀等效作用面积,有

$$A_{eff} = A_{room} + A_{flu}$$

式中  $A_{flu}$ ——喷射等效作用面积

图中  $\omega_0$  为开关阀的固有频率;  $\xi_{eff}$  为开关阀的阻尼比;  $K_{q1}$  为节流口的流量增益;  $K_{c1}$ 、 $K_{c2}$  分别为节流口和喷嘴的流量-压力系数;  $Q$  为开关阀流量;  $p_1$  为阀腔压力;  $V_{jet}$  为喷射速度;  $K_v$  为喷射速度放大系数。

### 2 仿真分析

由于影响开关阀性能的主要因素是响应频率和响应时间,而系统的带宽决定开关阀的最高工作频

率,开关阀性能仿真中要考察各参数变化对系统带宽和响应时间的变化规律。开关阀的动态响应时间可通过考察开关阀流量的阶跃响应进行分析。

为了探求开关阀在不同频率范围内的动态性能变化规律,采用 Matlab 系统仿真的方式进行分析。

#### 2.1 线圈匝数的影响

驱动电流不变时,线圈匝数影响开关阀致动器的磁场生成能力,影响致动器的输出力,从而影响开关阀的流量和喷射速度。在开关阀的传递函数中,线圈匝数是影响流量和喷射速度放大系数的重要因素,它的值会改变系统的控制精度。保持其他参数不变,匝数  $N$  分别选取 750、1 500、3 000,分析其对系统频域和时域的影响。图 3 为线圈匝数对开关阀流量响应的伯德图,图 4 为线圈匝数对开关阀流量输出阶跃响应的影响。

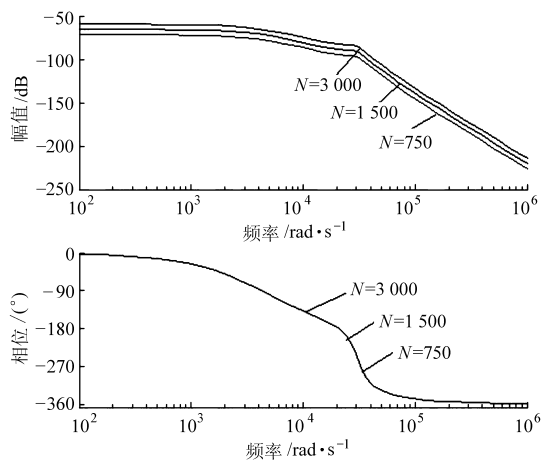


图 3 线圈匝数对开关阀流量影响的伯德图

Fig. 3 Bode diagrams of different numbers of solenoids to valve flux

由图 3 可以看出,随线圈匝数的增加,开关阀流量的频响函数的幅值增加,但共振频率没有改变。这是由于线圈匝数的变化只改变了频响函数的放大系数,引起频响函数的幅值变化;由于没有改变  $k$  和  $m$  之间的比值关系,对共振频率没有影响。不同线圈匝数对应系统的带宽相等。

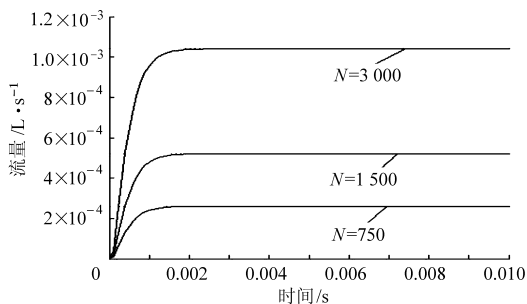


图 4 不同匝数的开关阀流量阶跃响应图

Fig. 4 Step response diagrams of different numbers of solenoids to valve flux

由图 4 可以看出,随线圈匝数的增加,开关阀的流量增加,而且阶跃响应的上升时间也略有增加。当线圈匝数在 750 ~ 3 000 匝之间变化时,开关阀上升时间最长为 0.938 ms。

线圈匝数的改变还会影响线圈电阻和电感,增大线圈匝数,线圈电阻和电感也增大。电感增加会延长驱动线路中电压与电流的转换时间,而电阻的增加则会增大驱动电压。增大线圈电阻还会增加线圈的能量损耗,使线圈发热,不利于 GMA 性能的发挥,因此对开关阀驱动线圈的设计应在满足致动器驱动安匝数的前提下,减小线圈匝数,减小电阻和电感,以利于开关阀响应速度的提高。

## 2.2 涡流时间常数的影响

涡流时间常数  $\tau$  表示开关阀致动器中涡流对响应时间的影响,它的大小对开关阀的响应时间影响

较明显,图 5 为  $\tau$  对开关阀流量频响函数的影响,图 6 显示了  $\tau$  对开关阀阶跃响应的影响。

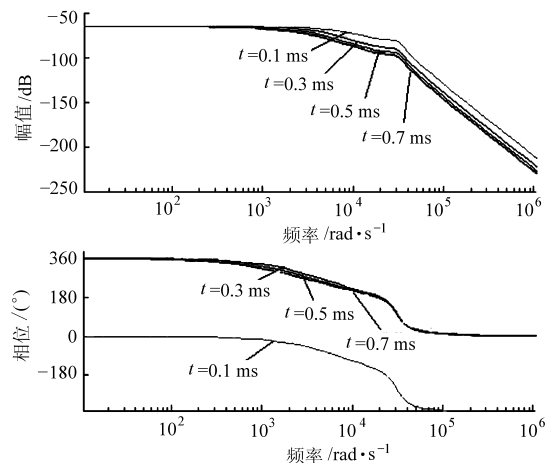
图 5 涡流时间常数  $\tau$  对开关阀流量影响的伯德图

Fig. 5 Bode diagrams of different eddy current time constants to valve flux

由图 5 可以看出,随涡流时间常数的增大,开关阀流量频响函数的共振峰值减小,相位衰减速度提高。涡流对开关阀的流量起制约作用。而且系统的带宽随涡流时间常数的增加而减小,当  $\tau = 0.1$  ms 时,系统的带宽为 829 Hz;当  $\tau = 0.7$  ms 时,系统的带宽仅有 219 Hz。因此对高速开关阀的设计,要优化开关阀致动器结构,减小涡流的影响,使其满足开关阀带宽的要求。

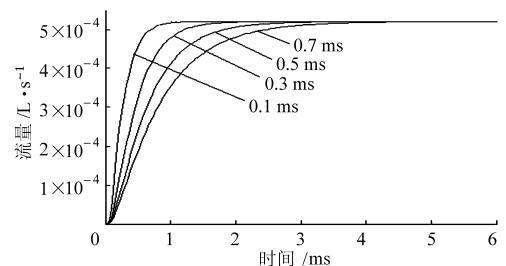
图 6 涡流时间常数  $\tau$  对开关阀流量影响的阶跃响应图

Fig. 6 Step response diagrams of different eddy current time constants to valve flux

由图 6 可以看出,随涡流时间常数的增大,开关阀的阶跃响应上升时间增加。当涡流时间常数由 0.1 ms 增加到 0.7 ms 时,开关阀的阶跃上升时间由 0.498 ms 增加到 1.81 ms。为了提高开关阀的响应频率应减小致动器的涡流时间常数,也就是要优化设计开关阀致动器,减小涡流影响。

## 2.3 等效质量的影响

开关阀的等效质量是 GMM 棒的等效质量与阀帽、阀芯质量的总和,可影响开关阀的共振频率和开关阀的位移输出。分别选取运动等效质量为 4 g、8 g、12 g,分析其对输出的影响。图 7 为不同等效质量对开关阀流量的频响伯德图,图 8 为阶跃响应时

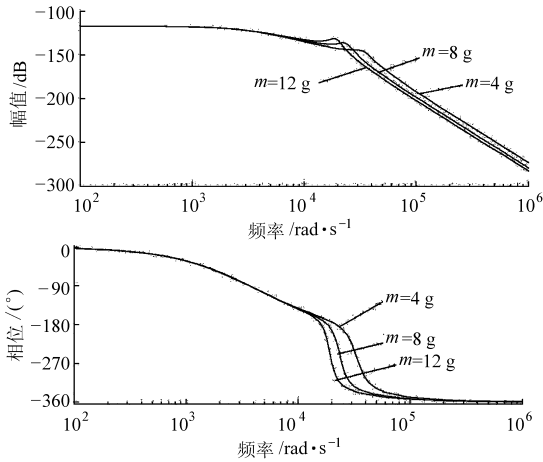


图7 等效质量对开关阀流量影响的伯德图

Fig. 7 Bode diagrams of different effective masses to valve flux

间分析。

由开关阀的传递函数伯德图中可以看出,不同等效质量开关阀的共振频率不同,质量越小,共振频率越高。为了提高开关阀的共振频率需减小致动器的等效质量。但在开关阀带宽范围内,等效质量的影响可以忽略。由于致动器的体积小,等效质量数值较小,不同质量的阶跃响应曲线几乎重合,可见,等效质量对开关阀阶跃响应曲线影响不大。

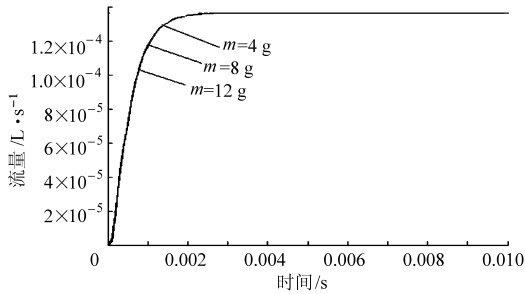


图8 等效质量对开关阀流量影响的阶跃响应图

Fig. 8 Step response diagrams of different effective masses to valve flux

### 3 试验分析

为了分析基于GMA的脉冲喷射开关阀的动态性能变化规律,将开关阀置于以NI的数据采集系统为核心的试验平台上进行验证。试验采用两个开关阀进行对比,开关阀致动器A中的GMM棒的内、外径分别为2.2 mm、5 mm,长40 mm,GMM棒沿轴线方向开槽,线圈1500匝,等效质量9.1 g;致动器B的GMM棒长度和内径与A相同,外径6 mm,线圈1180匝,GMM棒没有开槽,等效质量为11.8 g。为了分析线圈匝数、涡流时间常数、等效质量对开关阀动态特性的影响,采用阶跃响应试验和扫频试验研究开关阀的时域和频域动态特性变化。由于开关阀

的流量难以测量,且其变化规律与开关阀阀芯的规律相同,故以开关阀的阀芯运动响应代替流量特性加以分析。

为了得到开关阀的幅相频响应曲线,系统驱动电流采用100~5000 Hz扫频的方式输入,电流强度0.3 A,由加速度传感器测得致动器的加速度输出,然后运算得到开关阀阀芯的位移频谱,如图9所示。

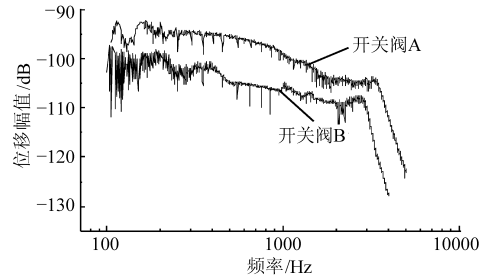


图9 开关阀扫频试验结果

Fig. 9 Sweep frequency of valves

由图9可以看出,开关阀A频响幅值和带宽都大于开关阀B,主要由于开关阀A中的GMM棒采用开槽的结构,并且棒的截面积小,大大减小了涡流的影响,有利于开关阀带宽的提高。而且线圈匝数的增加,增大了致动器的驱动磁场,更有利于GMM棒性能的发挥。

为了分析开关阀的时域响应特性,对两个开关阀致动器中输入阶跃信号,电流强度1 A,由LVDT采集阀芯的位移输出信号,结果见图10。

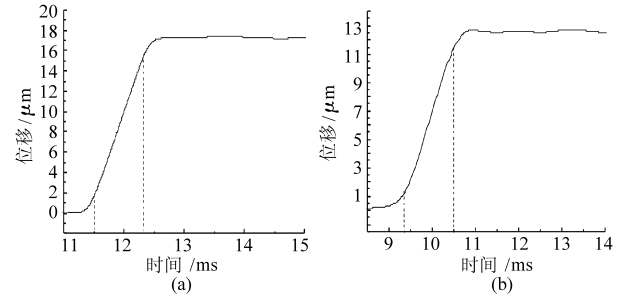


图10 开关阀阶跃响应试验结果

Fig. 10 Step response of valves

(a) 开关阀A (b) 开关阀B

由试验数据可以分析得出,开关阀A的位移输出稳态值为17.6 μm,上升时间为0.81 ms;致动器B位移输出稳态值为12.7 μm,上升时间为1.1 ms,比开关阀致动器A的性能较差。由此可见,开关阀致动器结构形状引起的涡流效应会影响开关阀的响应时间,线圈匝数和质量的变化影响较小。

### 4 结论

在开关阀各性能参数设计值附近的变化范围内,开关阀的等效质量对开关阀工作性能影响较小,主要受涡流时间常数和线圈匝数的影响。

(1) 线圈匝数的增加可提高开关阀的流量,略微增加系统的响应时间。但由于线圈匝数的变化会影响线圈的电阻和电感,综合线圈对致动器的影响,设计中应在满足驱动要求的前提下尽量减小线圈匝数,提高开关阀的响应特性。

(2) 致动器的涡流时间常数对致动器的阶跃响应影响显著,随涡流时间常数的增加,开关阀的阶跃

上升时间迅速增加,带宽减小。为提高开关阀的动态性能,应优化设计开关阀的致动器,减小涡流的影响。

(3) 为了提高开关阀的工作频率范围,减小响应时间,可在开关阀的设计参数值附近进行优化设计。应减小线圈匝数;优化设计致动器驱动线圈和 GMM 棒,减小致动器涡流影响,使其涡流时间常数小于或等于 0.3 ms。

### 参 考 文 献

- Clark A E. Magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds [M] // Wohlfarth E P. Fenomagnetic Materials: Vol. 1. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1980:531 ~ 588.
- 朱玉川, 鲍和云, 王传礼. 超磁致伸缩伺服阀的参数设计与优化研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2 403 ~ 2 406.  
Zhu Yuchuan, Bao Heyun, Wang Chuanli. Parameter design and optimization of GMM servo valve[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2 403 ~ 2 406. (in Chinese)
- Takahiro U. Development of a valve using a giant magnetostrictive actuator[C] // Proceeding of the Second JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 1993: 131 ~ 135.
- 王传礼, 丁凡, 张凯军. 基于超磁致伸缩转换器的流体控制阀及其技术[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 164 ~ 167.  
Wang Chuanli, Ding Fan, Zhang Kaijun. Fluid control valve based on GMA and its key techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 164 ~ 167. (in Chinese)
- 于宗保. 超磁致伸缩材料转换器喷嘴挡板伺服阀的热变形补偿研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 396 ~ 400.  
Yu Zongbao. Study on thermal deformation compensation based on giant magnetostrictive material actuator for servo valve[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 396 ~ 400. (in Chinese)
- 孟爱华, 周建军, 潘玉良, 等. GMA 在脉冲喷射开关阀中的应用[J]. 工程设计学报, 2008, 15(2): 109 ~ 113.  
Meng Aihua, Zhou Jianjun, Pan Yuliang, et al. Application of GMA in pulsed jet on-off valve[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(2): 109 ~ 113. (in Chinese)
- 石延平, 刘成文, 张永忠. 一种大流量高速开关阀的研究与设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 195 ~ 198.  
Shi Yanping, Liu Chengwen, Zhang Yongzhong. Design and study of a new kind of larger flow rate high-speed on-off valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 195 ~ 198. (in Chinese)
- 吕福在, 项占琴, 程耀东. 稀土超磁致伸缩材料高速强力电磁阀的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(4): 199 ~ 202.  
Lü Fuzai, Xiang Zhanqin, Cheng Yaodong. The design of high-speed powerful solenoid based on giant magnetostrictive material and analysis of its control method[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(4): 199 ~ 202. (in Chinese)
- 孟爱华, 项占琴, 吕福在. 微型超磁致伸缩高速阀致动器的优化设计[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(2): 216 ~ 220.  
Meng Aihua, Xiang Zhanqin, Lü Fuzai. Optimization design of giant magnetostrictive micro high-speed valve actuator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(2): 216 ~ 220. (in Chinese)
- Dozor D M, Shankar Jagannathan, Gerver M J, et al. High force-to-volume Terfenol-D reaction mass actuator: modeling and design[C] // Proc. SPIE, Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integratual Systems, 1996, 2717: 576 ~ 586.
- Bryant M D, Wang N. Audio range controllability of linear motion terfenol actuators[J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 1994, 5: 431 ~ 436.
- 孟爱华, 吕福在, 程耀东. 基于超磁致伸缩致动器的脉冲喷射开关阀建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 303 ~ 307.  
Meng Aihua, Lü Fuzai, Cheng Yaodong. Modeling and simulation of pulsed jet on-off valve based on GMA[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 303 ~ 307. (in Chinese)