

射流伺服阀用超磁致伸缩执行器磁场建模与分析

李跃松¹, 朱玉川¹, 吴洪涛¹, 田一松², 牛世勇²

(1. 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016; 2. 西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 提出了射流伺服阀用超磁致伸缩执行器结构, 采用磁场有限元法分析了超磁致伸缩执行器结构参数对超磁致伸缩棒内磁场分布的影响机理, 给出了超磁致伸缩执行器结构设计的原则。推导出考虑超磁致伸缩棒内磁场分布不均匀时驱动磁场与执行器输出位移的关系方程式, 并通过仿真与实验研究揭示了超磁致伸缩棒内磁场分布不均匀性对超磁致伸缩执行器位移输出的影响规律, 最后求出所设计超磁致伸缩执行器漏磁系数约为 1.4。

关键词: 电子技术; 超磁致伸缩执行器; 磁场有限元分析; 磁场不均匀度; 漏磁系数

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2010)12-1587-06

The Magnetic Field Modeling and Analysis of Giant Magnetostrictive Actuator for Jet Servo Valve

LI Yue-song¹, ZHU Yu-chuan¹, WU Hong-tao¹, TIAN Yi-song², NIU Shi-yong²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: On the basis of introducing the structure of the giant magnetostrictive actuator for jet servo valve, giant magnetostrictive actuator structural parameters' influences on magnetic field distribution of the giant magnetostrictive rod is analyzed by the finite element methods, then the principles of structural design of the giant magnetostrictive actuator are given. Considering the heterogeneous magnetic fields in the giant magnetostrictive rod, after getting the relationship between driving magnetic fields and the output displacement in giant magnetostrictive rod, the heterogeneous degree of the magnetic field distribution's influence on the output displacement is gained by simulation and experiment. Finally, the magnetic-leakage coefficient of the designed giant magnetostrictive actuator is given, which is 1.4.

Key words: electron technology; giant magnetostrictive actuator; magnetic field finite element; the heterogeneous degree of the magnetic field distribution; magnetic-leakage coefficient

0 引言

稀土超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, 简称 GMM) 是近年来发展起来的一种新型功能材料, 具有磁致伸缩应变大、输出力大、磁机耦合系数高、响应速度快、能量密度高等优点, 可精确、

快速定位, 已在精密和超精密驱动、微定位机构、微位移执行器以及纳米技术领域显示出良好的应用前景^[1-2]。

采用 GMM 开发的新型射流伺服阀与传统伺服阀相比, 具有响应快、精度高、抗污染等优点。射流伺服阀超磁致伸缩执行器(Giant Magnetostrictive

收稿日期: 2009-12-10

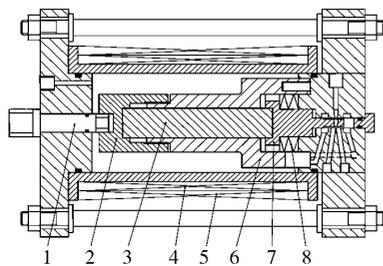
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805080); 航空科学基金资助项目(20090752008); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研资助项目(NS2010150)

作者简介: 李跃松(1985—), 博士研究生。E-mail: liyaosong707@163.com

Actuator,简称 GMA)对新型射流伺服阀的这些优良性能的发挥具有至关重要的作用,而 GMM 棒上磁场分布是否均匀又对 GMA 位移输出特性具有直接影响^[1]。但目前关于 GMA 结构参数对 GMM 棒上磁场分布均匀性的影响以及 GMM 棒上磁场分布均匀性对 GMA 位移输出性能的影响研究较少。本文采用有限元法分析了线圈结构、阀体材料等 GMA 结构参数对 GMM 棒上磁场均匀性及其强度的影响,为 GMA 结构设计提供了依据。并基于无磁滞非线性压磁方程,得到了考虑 GMM 棒上磁场分布不均匀时的 GMA 位移输出公式,并通过实验与仿真分析了 GMM 棒磁场分布不均匀对 GMA 位移输出特性的影响。

1 射流伺服阀 GMA 结构

如图 1 所示为射流伺服阀用 GMA 结构,其驱动部分由驱动线圈和偏置线圈构成,闭合磁路由前后端盖、调节螺钉、热补偿模块、超磁致伸缩棒、输出模块构成。



1—调节螺钉;2—热补偿模块;3—GMM 棒;4—偏置线圈;5—驱动线圈;6—热补偿罩;7—输出模块;8—预压碟簧

图 1 射流伺服阀用 GMA 结构

Fig. 1 Structure of jet-pipe servo valve driven by GMA

2 GMA 驱动磁场有限元分析

2.1 磁场有限元法与驱动磁场均匀性分析

在驱动电流磁场变化缓慢时,驱动磁场满足如下定常的 Maxwell 方程^[3-4]:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度; μ 为材料磁导率; 电流密度 $\mathbf{J} = NI/(lh)$; N 为线圈匝数; I 为驱动电流; l 为线圈轴向长度; h 为线圈厚度。

由于 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, 故存在一个静磁矢势 A , 使得

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}. \quad (3)$$

平面问题中假设电流平行于 z 轴 \mathbf{A} 只有 z 分量

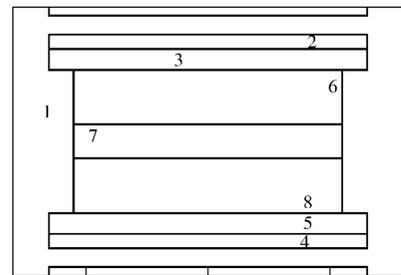
$$\mathbf{A} = (0 \ 0 \ A_z), \quad \mathbf{J} = (0 \ 0 \ J_z). \quad (4)$$

从而,上述方程可以简化为椭圆型偏微分方程

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla A \right) = -J, \quad (5)$$

式中,边界根据具体实际可设为: $A = 0$; $\partial A / \partial z = 0$ 。

GMA 驱动磁场有限元分析时模型简化见图 2。



1. 阀体;2、6、4、8. 气隙;3、5. 驱动线圈;7. GMM 棒

图 2 GMA 有限元分析模型

Fig. 2 Finite element model of GMA

取驱动电流 $I = 0.25 \text{ A}$, GMA 驱动磁场有限元分析结果如下(图 4 中磁场强度 H 单位: A/mm):

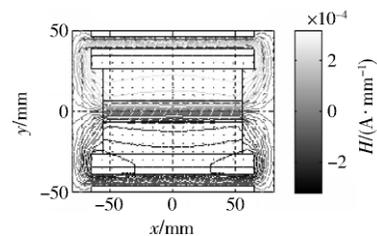


图 3 GMA 内部磁势与磁感分布

Fig. 3 Distribution of magnetic flux density and magnetic vector potential in GMA

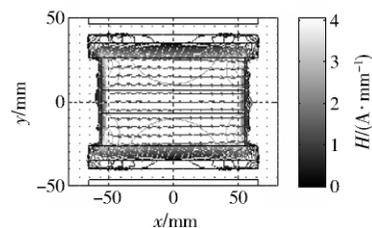


图 4 GMA 内部磁场强度分布

Fig. 4 Distribution of magnetic field intensity in GMA

从图 3 和图 4 可看出,线圈内磁场强度较大。由于 GMA 位移输出特性主要决定于 GMM 棒内轴向和径向磁场分布,为便于分析和计算,提取出 GMM 棒轴线上和端面直径上的磁场强度,如图 5 ~

图 6 所示。 x_L 分析点到 GMM 棒轴线中点的位置坐标; x_r 是分析点到 GMM 棒端面圆心的位置坐标。

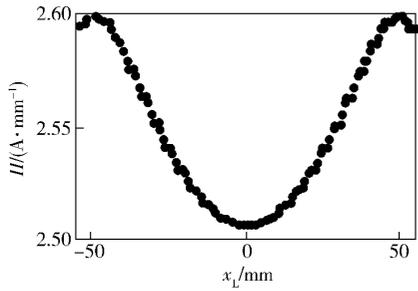


图 5 GMM 棒轴线磁场强度分布

Fig. 5 Distribution of magnetic field intensity in axis of GMM

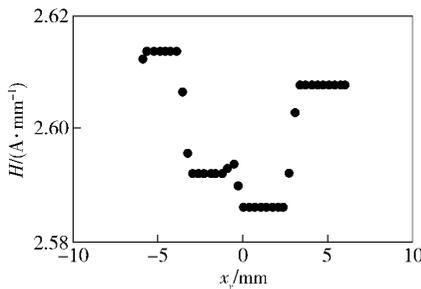


图 6 GMM 棒端面径向磁场强度分布

Fig. 6 Distribution of magnetic field intensity in butt of GMM

定义磁场不均匀度如下:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n [H_i - \max(H)]}{n \max(H)} \quad (6)$$

式中: n 为分析点的个数; $\max(H)$ 为最大磁场强度。

将有限元分析结果代入式(6),可求得 $I=0.25$ A 时,GMM 棒轴线上的磁场不均匀度为 5%;GMM 棒端面上磁场不均匀度为 0.3%;GMM 棒中点截面上磁场不均匀度为 0.04%;可见 GMM 棒径向磁场不均匀度较小且远小于轴向磁场不均匀度,对 GMA 性能的影响轴向磁场不均匀度是主要的,因此下文所指磁场不均匀均指轴向磁场不均匀。

2.2 GMA 结构参数对其磁场均匀性的影响

为了提高 GMA 性能,在 GMA 结构设计中必须考虑 GMA 结构参数对 GMM 棒磁场均匀性和强度的影响。下面就线圈与 GMM 棒长度的差值、驱动线圈内径(含骨架壁厚)、阀体材料对 GMM 棒轴向外场的均匀性和强度的影响分别进行分析。

在驱动电流取 0.25 A,线圈长度 130 mm,GMM 棒长度分别取 110 mm,100 mm,90 mm 时,得 GMM

棒轴线上磁场分布如图 7 所示。线圈内径分别取 33 mm、53 mm、73 mm,GMM 棒轴线上磁场分布如图 8 所示。

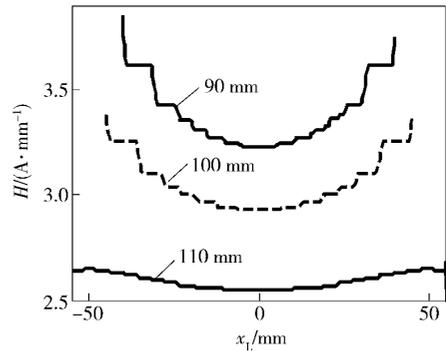


图 7 GMM 棒长度与其磁场分布关系

Fig. 7 The relation between the length of GMM and the distribution of magnetic field intensity

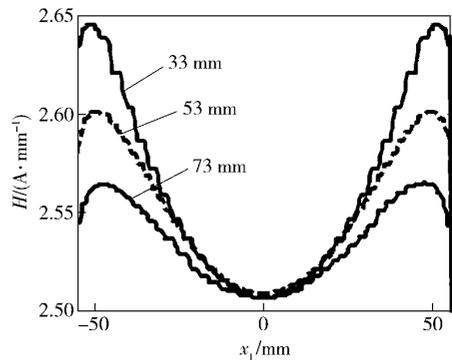


图 8 线圈内径与其磁场分布关系

Fig. 8 The relation between the bore diameter of coil and the distribution of magnetic field intensity

由图 7 可知,GMM 棒长度减少(即线圈与 GMM 棒的长度差值加大)相同电流在 GMM 棒上产生的磁场强度变大,但磁场不均匀性并不一直变大。由图 8 可知,线圈距离 GMM 棒越近,磁场越不均匀,但相同电流下产生的磁场强度变大。

取阀体材料^[5]分别为:A3 钢(相对磁导率 300) 20 钢(相对磁导率 800),硅钢(相对磁导率 3 000)进行磁场分析,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出随着阀体材料相对磁导率加大,GMM 棒上磁场强度也在变大,磁场不均匀性变化不大,当阀体材料的相对磁导率大于一定值后,GMM 棒上磁场强度随阀体材料的相对磁导率加大增加量较小。

通过以上分析可知,从磁场均匀性与充分利用磁场能角度出发,在 GMA 结构设计过程中,应当做到线圈长度要大于 GMM 棒长度,GMM 棒内径(含

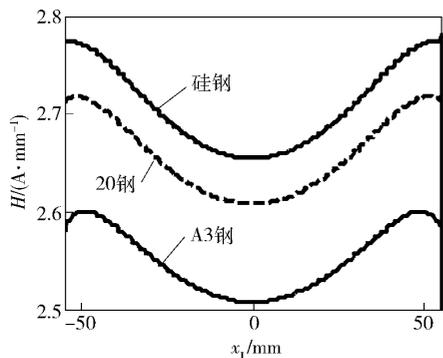


图 9 阀体材料与其磁场分布关系

Fig. 9 The relation between materials of the valve body and the distribution of magnetic field

骨架壁厚) 尽可能接近 GMM 棒直径, 阀体材料选取较大磁导率的材料。

3 磁场不均匀对 GMA 输出位移的影响

3.1 无磁滞非线性压磁方程

在不考虑磁滞和涡流影响的情况下, 无磁滞非线性压磁方程如下^[6-8]:

$$\varepsilon = \sigma/E^H + \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2, \quad (7)$$

$$M = \frac{M_s}{3a - M_s \tilde{\alpha}} H, \quad (8)$$

$$\tilde{\alpha} = \alpha + 9\lambda_s \sigma_0 / (2\mu_0 M_s^2). \quad (9)$$

式中: ε 、 E^H 、 σ 、 d 、 H 、 λ_s 、 M_s 、 a 、 μ_0 、 α 、 σ_0 、 M 分别为 GMM 棒轴向的应变、杨氏模量、应力、磁耦合系数、磁场强度、饱和磁致伸缩、饱和磁化强度、无磁滞磁化强度形状系数、真空磁导率、磁矩相互作用的分子场参数、预压应力、磁化强度。

在通入直流电且达到稳态后, GMM 棒所受外力可由胡克定律求得,

$$F = -(F_l + \sigma_0 A_r) = -(K_l y + \sigma_0 A_r) = \sigma A_r, \quad (10)$$

式中: K_l 为 GMA 等效刚度, 为负载刚度与 GMM 棒刚度之和; y 为 GMM 棒在施加预压力后, 由磁场所产生的形变, 也即 GMA 工作位移。

3.2 GMA 位移输出方程

由式(7) ~ 式(10) 可得下列公式:

在不考虑 GMM 内部磁场不均匀的情况下:

$$y = \int_0^L \varepsilon dl = K_1 K_2 L H^2, \quad (11)$$

式中: H 取 GMM 棒平均磁场强度^[1] $H \approx NI / (kL)$ L 为 GMM 棒的长度 k 为漏磁系数; K_1 K_2 如下

$$K_1 = \frac{AE^H}{AE^H + K_l L} \quad K_2 = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{(3a - M_s \tilde{\alpha})^2}. \quad (12)$$

在无外负载时, 由 $K_l = AE^H / L$ 知 $K_1 = 0.5$ 。

在考虑 GMM 内部磁场分布不均匀的情况下

$$y = \int_0^L \varepsilon dl = K_1 K_2 \int_0^L H^2 dl. \quad (13)$$

3.3 GMA 位移输出方程离散化

由于有限元分析出的为离散点, 为便于数值模拟与计算机仿真, 将式(13) 中积分项离散化如下

$$\int_0^L H^2(z) dl \approx \sum_{i=1}^n H_i^2 \Delta l_i, \quad (14)$$

代入式(13) 可得 GMA 工作位移

$$y = K_1 K_2 \sum_{i=1}^n H_i^2 \Delta l_i. \quad (15)$$

4 模型仿真与实验

为了得到 GMM 磁场分布均匀性对 GMA 输出位移的影响, 采用表 1 所列参数(部分参数取自参考文献[7-9]) 进行仿真与实验验证。

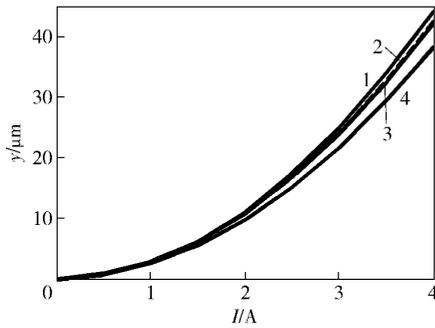
表 1 GMA 模型中相关参数取值

Tab. 1 The values of parameters of GMA

名称	取值	符号
GMM 棒直径/mm	12.7	D
GMM 棒长度/mm	80	L
饱和磁化强度/($A \cdot m^{-1}$)	7.65×10^5	M_s
无磁滞磁化强度形状系数/($A \cdot m^{-1}$)	7 012	a
激励线圈匝数	750	N
参数 $\tilde{\alpha}$	-0.01	
饱和磁致伸缩系数	$1 005 \times 10^{-6}$	λ_s
外负载等效刚度系数/($N \cdot m^{-1}$)	0	
GMM 磁导率/($N \cdot m^{-1}$)	$10 \times 4\pi \times 10^{-7}$	μ
预压应力	0	σ_0

为了分析磁场不均匀对 GMA 位移输出的影响, 以及为利用应变片测位移和求 GMM 棒平均磁场强度提供指导, 取 GMM 棒中点处磁场强度、四等分点处磁场强度平均值、五等分点处磁场强度平均值分别代入式(11) 与式(15) 所得 GMA 输出位移作对比, 结果如下:

由图 10 可知, 不考虑磁场不均匀且以中点磁场强度作为整个 GMM 棒所受的平均磁场强度, 所求位移小于考虑磁场不均匀所得位移; 随着取 GMM 棒上磁场点的增加, 所得结果接近式(15) 所求的结果。由于采用 4 等分点处平均磁场与采用五等分点处平均磁场所得结果接近, 且都接近式(15) 所求结



1—磁场不均匀; 2—五等分结果; 3—四等分结果; 4—仅考虑中点
图 10 磁场均匀性对 GMA 位移影响

Fig. 10 The influences of the heterogeneous degree of the magnetic field distribution on the displacement of the actuator

果,因此采用应变片测量 GMA 输出位移时,只需测出 4 等分点处应变,就可以近似得到磁场不均匀的情况下 GMA 输出位移;同理,求 GMM 棒上平均磁场强度时,只需测 4 等分点处磁场强度。

为了实验验证磁场均匀性对 GMA 输出位移所造成的影响以及式(11)的准确度,做以下对比实验与仿真:1) 将应变片贴于 GMM 棒中点,令所测应变与 GMM 棒长度的乘积作为磁场均匀时的 GMA 输出位移;2) 将电涡流传感器实测 GMA 输出端位移作为磁场不均匀时的 GMA 输出位移;3) 分别取磁漏系数 $k = 1, 1.3, 1.5, 1.7$ 代入式(11)进行仿真。仿真与实验结果如下:

图 11 中黑点为磁场不均匀性时的 GMA 输出位移量即实验(2)所得数据点。由图可知所设计 GMA 的漏磁系数在 1.3 ~ 1.5 之间,磁能利用率较高;公式(11)在 GMA 直流驱动且处于上升段时与实际输出误差不大,因此和公式(11)推导过程相似的公式(15)在 GMM 棒上各点磁场已知时,可以精确反映 GMA 实际输出位移。

由图 12 所示,实验 1 为磁场均匀时的 GMA 输出位移,实验 2 为磁场不均匀时的 GMA 输出位移。在 GMA 位移输出量方面,在驱动电流 0 ~ 2 A 时,磁场均匀性对 GMA 位移输出影响不显著;在驱动电流 2 ~ 3.5 A 时,GMA 位移输出量为磁场不均匀时略大于磁场均匀时;但在驱动电流大于 3.5 A 时,磁场不均匀时的 GMA 输出位移量远小于其磁场均匀时的输出位移量;在 GMA 位移输出线性度方面,磁场不均匀时的 GMA 位移输出线性度明显小于磁场均匀时的 GMA 位移输出线性度。因此在 GMA 结构设计时,在保证充分利用磁场能的前提下,尽量保证

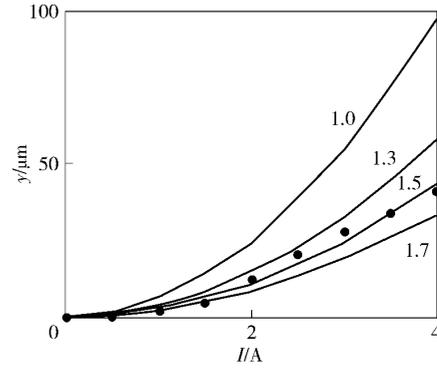


图 11 不同漏磁情况下,GMA 位移输出仿真结果与实验比较

Fig. 11 Simulation and experimental results of the displacement of GMA under different magnetic-leakage coefficient

GMM 棒上磁场分布均匀,对提高大电流驱动时 GMA 位移输出量与 GMA 位移输出线性度具有重要意义。

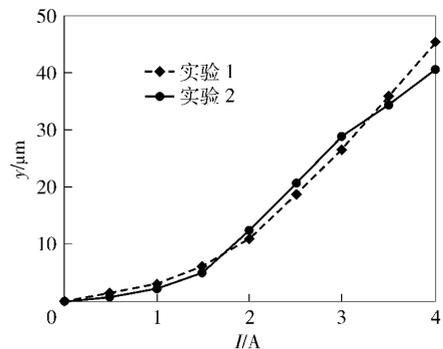


图 12 磁场均匀性对 GMA 位移输出影响的实验结果
Fig. 12 Experimental results of the heterogeneous degree of the magnetic field distribution's influence on the output displacement

5 结论

本文以射流伺服阀用新型超磁致伸缩执行器内部磁场有限元分析为基础,给出了 GMA 结构参数对 GMM 棒磁场分布的影响,分析与验证了 GMM 棒上磁场分布均匀性对 GMA 执行器输出位移的影响,得到如下结论:

- 1) 射流伺服阀用新型 GMA 内部 GMM 棒上存在磁场不均匀分布的问题,且其轴向磁场分布不均匀度远大于径向磁场分布不均匀度;
- 2) GMM 棒上轴向磁场分布强度与均匀性与线圈和 GMM 棒长度之差、驱动线圈内径以及磁路结构中阀体材料的选择有关,且通过减小 GMM 棒长度或加大线圈长度、减小驱动线圈内径、选择导磁性

能好的阀体材料,可以获得较大的磁场强度与较好的磁场均匀度;

3) GMM 棒轴向磁场分布均匀性对 GMA 位移输出的大小与线性度有影响,大电流驱动时磁场不均匀时的 GMA 的位移输出量远小于其在磁场均匀时的位移输出量,且磁场均匀时 GMA 的位移输出曲线线性度较好。

参考文献(References)

- [1] 王传礼. 基于 GMM 转换器喷嘴挡板阀伺服阀的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 2-3.
WANG Chuan-li. Research on the nozzle flapper servo valve driven by GMM actuator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 2-3. (Chinese)
- [2] 贾振元, 郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 50-61.
JIA Zheng-yuan, GUO Dong-ming. Theory and applications of giant magnetostrictive microdisplacement actuator [M]. Beijing: Science Press, 2008: 50-61. (Chinese)
- [3] 陆君安, 尚涛, 谢进. 偏微分方程的 MATLAB 的解法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001: 53-61.
LU Jun-an, SHANG Tao, Xie Jin. Use MATALAB to solve partial differential equation [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 53-61. (Chinese)
- [4] The Math Works. Partial differential equation toolbox for use with MATLAB [M]. The Math Works, 2007.
- [5] 柯松. 常用钢材磁性曲线速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 14-16.
KE Song. Characteristic curve of magnetic steel used manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003: 14-16. (Chinese)
- [6] 王博文, 曹淑英, 黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 244-249.
WANG Bo-wen, CAO Shu-ying, WANG Wen-mei. Magnetostrictive materials and devices [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2008: 244-249. (Chinese)
- [7] 胡爱娣. 超磁致伸缩致动器的输出特性模型与虚拟测试技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007: 11-19.
HU Ai-di. Output property model of GMM actuator and virtual instrument testing technology research [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007, 11-19. (Chinese)
- [8] Carman G P, Mitovoc M. Nonlinear constitutive relation for magnetostrictive materials with application to 1-D Problems [J]. J Intelligent Mat Syst & Stru, 1995(6): 673-684.
- [9] Marcelo Jorge Dapino. Nonlinear and hysteretic magnetomechanical model for magnetostrictive transducers [D]. Iowa: State University, 1999: 196-197.