

超磁致伸缩泵驱动磁路建模及数值分析

陈 龙 朱玉川 杨旭磊 徐鸿翔

南京航空航天大学, 南京, 210016

摘要:提出了一种面向固液混合作动器的新型超磁致伸缩泵结构。对超磁致伸缩泵驱动磁路进行了数学建模, 采用有限元法对其磁场分布进行了数值模拟, 并与理论计算结果进行对比, 发现超磁致伸缩棒上磁感应强度的理论计算值与仿真结果基本吻合。采用磁场有限元法分析了超磁致伸缩棒的轴向磁场与径向磁场均匀性, 发现径向磁场均匀性明显高于轴向; 针对不同长度的棒进行了轴向磁场均匀性分析, 揭示了其影响与作用规律; 在此基础上对驱动磁场进行了动态数值模拟, 发现在输入电压恒定时超磁致伸缩棒内的磁感应强度随着输入信号频率的提高而衰减, 实验与仿真结果的对比较验证了仿真的正确性。

关键词:超磁致伸缩泵; 有限元法; 磁感应强度; 均匀性; 衰减

中图分类号:TH137

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.06.002

Driving Magnetic Path Modeling and Numerical Analyses in Giant Magnetostrictive Pump

Chen Long Zhu Yuchuan Yang Xulei Xu Hongxiang

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: A novel structure of the GMP for the hybrid solid fluid actuator was designed herein. The magnetic circuit was modeled and then the numerical simulation of driving magnetic field distribution of the GMP was performed by FEM. The results of flux density in the giant magnetostrictive by emulating are similar to the results of theoretical calculation when they were compared with each other. The magnetic field uniformity of giant magnetostrictive rod was analysed by the FEM, and the results show that uniformity of radial magnetic field are higher than that of axial magnetic field. The influences of the size of giant magnetostrictive rod on the uniformity of axial magnetic field was also analysed. The roll-off in the driving flux density is observed by dynamic numerical simulation, and the validity of simulation results was validated by comparing the simulation results with the experimental ones.

Key words: giant magnetostrictive pump (GMP); finite element method (FEM); flux density; uniformity; roll-off

0 引言

基于智能材料的固液混合作动器为实现如无人战斗机以及旋翼直升机等需要结构紧凑而高频宽的作动系统提供了有效的途径^[1]。目前, 国外已经将压电-液压作动器应用到智能旋翼机中。但有研究发现在高频工作时, 压电叠堆由于磁滞损耗而产生的大量热量会影响其工作并可能永久破坏压电材料。相反, 超磁致伸缩材料 (giant magnetostrictive material, GMM) 在高温下就显示出其优越性, 相比压电材料, 它不仅可以提供同

样的频宽和更高的应变, 而且在一个特有的频率范围内磁滞损耗很小, 产生的热量也相对较小^[2-3]。

超磁致伸缩泵 (giant magnetostrictive pump, GMP) 是作动器的核心部分, 泵的性能直接影响作动器的工作性能。而泵驱动磁场的分布及其均匀性将直接影响 GMM 棒的输出力与位移, 进而影响泵的工作性能。本文采用磁场有限元分析的方法, 对 GMP 的驱动磁场进行了数值模拟与分析, 为超磁致伸缩泵的优化与作动器的设计提供了依据。

1 作动器与泵的结构及其工作原理

新型固液混合作动器由四部分组成: 超磁致伸缩泵、液压缸、蓄能器、管道及配件^[4] (图 1)。

收稿日期: 2012-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175243); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20131359); 航空科学基金资助项目 (20130652011); 南京航空航天大学基本科研业务费资助项目 (NS2013046)

超磁致伸缩泵的具体结构如图 2 所示^[5-6]，其中泵体的相关结构参数见表 1。

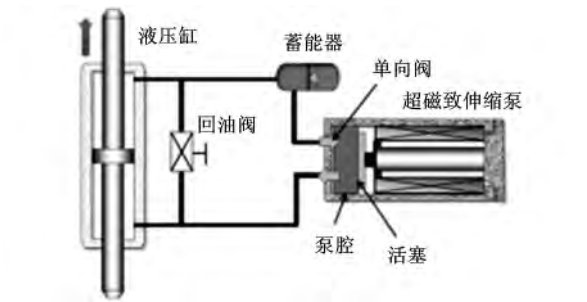
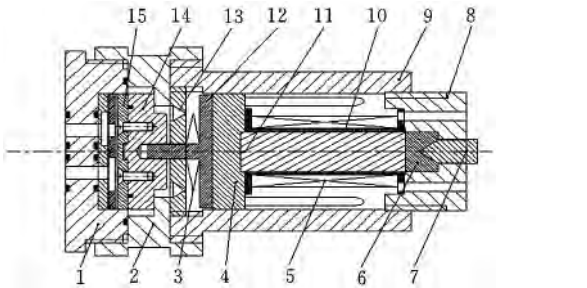


图 1 超磁致伸缩固液混合驱动原理图



- 1. 泵头 2. 连接罩 3. 碟簧 4. 导磁块 5. 线圈 6. 滑块
- 7. 顶针 8. 阀体 9. 活塞 10. 上端盖 11. 输出杆
- 12. GMM 棒 13. 线圈骨架 14. 外罩 15. 底座

图 2 超磁致伸缩泵结构

表 1 泵体的相关结构参数及材料属性

GMM 棒尺寸(mm)	$\phi 13 \times 60$	导磁块材料	Q235
驱动线圈匝数	1200	底座材料	Q235
线圈骨架材料	铝	外罩材料	Q235

超磁致伸缩泵驱动磁场的闭合磁路由顶针、滑块、外罩、导磁块、GMM 棒和底座构成。碟簧和顶针用来给 GMM 棒施加一定的预压力，通过调节顶针使预压力达到一个合适的值，可以增大 GMM 棒的输出位移和磁机耦合系数。给线圈通入驱动电流，在磁场作用下 GMM 棒产生一定伸缩位移，带动输出杆及其连接的活塞做往复运动。当输出杆左移时，泵腔容积减小，在压力的作用下排油单向阀打开，油液通过管道流入液压缸下端，推动液压缸活塞向上运动。输出杆右移时，泵腔容积增大，蓄能器压力大于泵腔中的压力，吸油单向阀打开，油液进入泵腔，此时排油单向阀关闭。

2 磁路的数学建模与理论计算

由于 GMM 棒的磁导率很低，所以磁路的设计要尽可能达到最大利用效率。预压后的泵体是轴对称的，其理论模型的二维截面如图 3 所示^[5]。理论计算中 GMM 棒的相对磁导率设为 8，上下端盖与外罩的磁导率设为 400；假定磁通在所穿过的横截面上是均匀分布的。

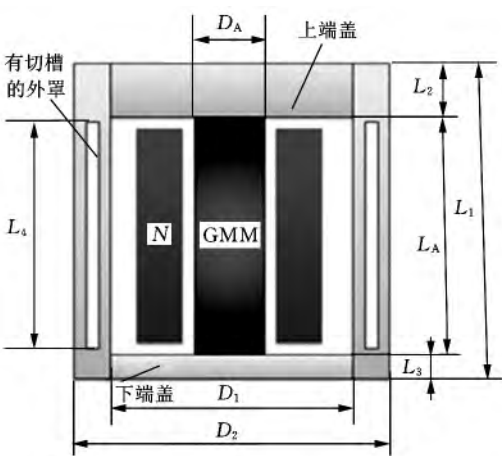


图 3 泵体理论模型二维截面图

泵体各部分的磁阻如下：

(1)GMM 棒。泵体核心材料的磁阻 R_{mA} 取决于棒的长度 L_A 和横截面的面积 A_A ，即

$$R_{mA} = \frac{L_A}{\mu_0 \mu_{rA} A_A}$$
 (1)

式中， μ_0 为真空的磁导率； μ_{rA} 为 GMM 棒的相对磁导率。

(2) 上下端盖。假定磁通线通过上下端盖时是完全沿径向穿过的。设半径为 r 的地方环形微元厚度为 dr (图 4)^[5]，则微元磁阻为

$$dR_{m\Lambda} = \frac{dr}{\mu_0 \mu_r (2\pi r t)}$$
 (2)

式中， μ_r 为微元的相对磁导率； t 为微元的厚度。

对半径从 R_1 到 R_2 积分，得

$$R_m = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{\mu_0 \mu_r (2\pi r t)} = \frac{1}{2\pi \mu_0 \mu_r t} \ln \frac{R_2}{R_1}$$
 (3)

则上下端盖磁阻分别为

$$R_{m\text{top}} = \frac{1}{2\pi \mu_0 \mu_{rS} L_2} \ln \frac{D_2}{D_A}$$
 (4)

$$R_{m\text{bottom}} = \frac{1}{2\pi \mu_0 \mu_{rS} L_3} \ln \frac{D_2}{D_A}$$
 (5)

式中， μ_{rS} 为端盖的相对磁导率。

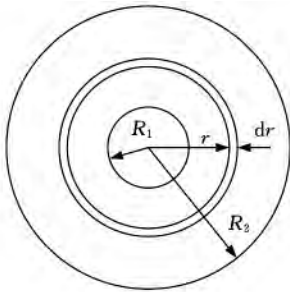


图 4 上下端盖简化平面图

(3) 外罩。外罩内径为 D_1 ，外径为 D_2 。总长可以分为两部分：长 L_t 部分的切槽是用来减少涡流和便于散热的，切槽的横截面积可以认为是这部分面积的一半。则外罩磁阻为

$$R_{mB} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{rS}} \frac{L_1 + L_t}{A_B}$$
 (6)

式中， A_B 为外罩环形截面面积。

设 N 为线圈匝数, I 为驱动电流, 则整个磁路的磁通为

$$\Phi = \frac{NI}{R_m + R_{m\text{top}} + R_{m\text{bottom}} + R_{mB}} \quad (7)$$

GMM 棒上的磁感应强度为

$$B_A = \frac{\Phi}{A_A} \quad (8)$$

当驱动电流为 1A 时, GMM 棒上的磁感应强度约为 0.2T。

3 GMP 驱动磁场有限元分析

3.1 GMP 的静态磁场有限元与均匀性分析

泵体磁路结构的轴对称有限元模型如图 5 所示, 泵体材料的相关参数见表 2^[7-8]。

在 1A 直流驱动下求解得到的泵体磁力线分布如图 6 所示, 它反映了泵体轴对称磁场磁力线分布的基本形态。由图 6 可以看出, 泵体的磁力线主要沿着外罩、导磁块、底座、GMM 棒形成闭合磁路, 达到了磁路结构设计的要求; 从图 6 还可以看出, 在 GMM 棒上沿径向越靠近线圈处磁力线越密, 说明 GMM 棒上的磁感应强度越靠近线圈处越大。

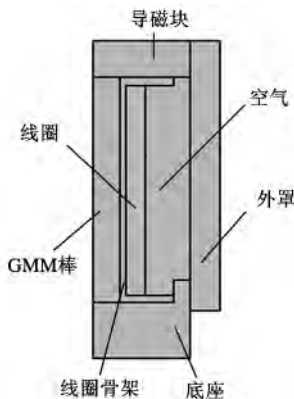


图 5 泵体有限元模型



图 6 泵体磁力线分布情况

表 2 泵体材料的相关参数

	相对磁导率	电导率(S/m)	相对介电常数
GMM	8	1.667×10^6	1
Q235	200~400	4×10^6	1
空气	1	0	1
铝	1	2.326×10^7	1

圆柱型线圈磁场沿轴向和径向分布是不均匀的, 由于 GMM 棒具有一定的体积, 这就要求驱动磁场在其长度和直径范围内保持一定的均匀性^[9-10]。分布均匀的磁场对充分发挥 GMM 的特性、提高泵的工作性能无疑是有利的。

图 7 所示为 GMM 棒中部径向磁感应强度分

布曲线, 图 8 所示为 GMM 棒轴向的磁感应强度分布曲线。

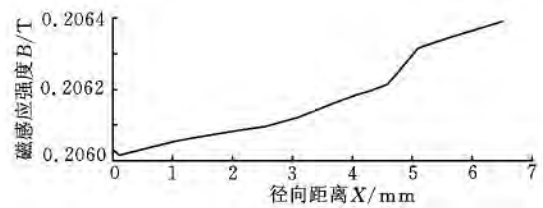


图 7 GMM 棒中部径向磁感应强度分布

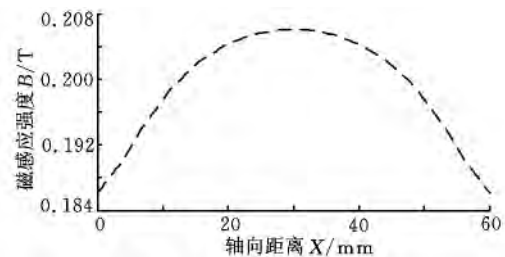


图 8 GMM 棒沿轴向的磁感应强度分布

由图 7 可知, GMM 棒中部磁感应强度沿半径增大, 与图 6 的磁力线密度分布规律具有一致性。虽然 GMM 棒上磁感应强度沿半径增大, 但是径向磁感应强度最大值与最小值的差仅在 10^{-4} 数量级, 说明径向磁场的均匀度很小, 在近似计算时, 基本可以认为是均匀的。由图 8 可知, GMM 棒轴线中部的磁感应强度高于两端, 轴向磁感应强度的最大值与最小值的差值在 10^{-2} 数量级, 其不均匀度明显高于径向。从图 7 和图 8 整体可以看出 GMM 棒上的磁感应强度约为 0.186~0.206T, 与理论计算值 0.2T 基本吻合, 说明仿真具有一定的可预测性。

3.2 GMM 棒轴向长度对其磁场均匀性的影响

为了提高 GMM 棒轴向磁场的均匀性, 采用磁场有限元法研究泵体其他结构参数保持不变时不同长度的 GMM 棒(52mm、56mm、60mm)对其轴向磁场均匀性及其磁感应强度大小的影响, 其结果如图 9 所示。由图 9 可知, 当驱动电流不变时, 改变 GMM 棒的长度, 产生的磁感应强度是不同的。GMM 棒越短, 其轴向的磁感应强度就越大, 但是 56mm 长的 GMM 棒轴向的磁感应强度均匀性最好, 此时棒与驱动线圈等长。

3.3 GMP 的动态磁场有限元分析

图 10 是三种不同输入电压下 GMM 棒上的磁感应强度随频率变化的曲线图; 图 11 是三种不同输入电压下线圈电流随频率变化的曲线图^[11-12]; 图 12 是不同频率下驱动线圈的感抗和阻抗随频率变化的曲线图。

由图 10 可以看出, 在同一输入电压下, GMM 棒上的磁感应强度随着输入信号频率的提

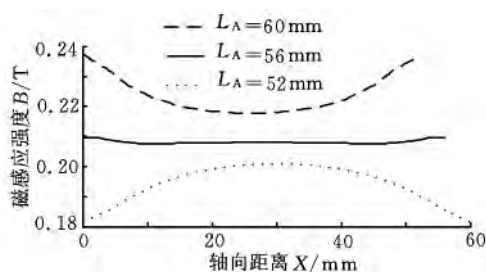


图9 不同长度 GMM 棒轴向磁感应强度分布

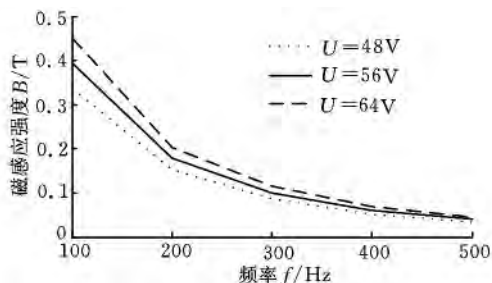
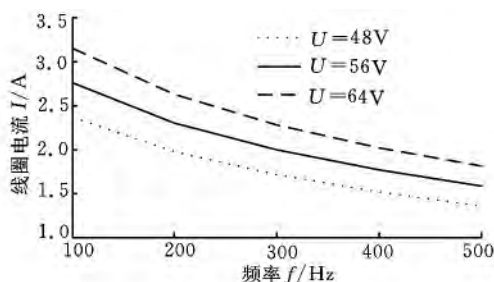
图10 GMM 棒中部截面
轴心磁感应强度-频率曲线

图11 驱动电流-频率曲线

高而衰减,而且频率越高衰减就越大,这一特性不可避免地会影响泵的工作性能,限制泵的最大工作频率。磁感应强度随着输入信号频率的提高而衰减的主要原因如下:

(1)线圈电感。驱动线圈电路可以视作 R-L 电路(低通滤波电路),在保持电压恒定而提高输入信号频率的情况下,因为驱动线圈的感抗和阻抗会随着频率的提高而变大(由图 12 可知),导致驱动电流随之减小(由图 11 可知),由驱动线圈产生的磁场随之减弱,最终导致 GMM 棒输出位移减小。故可以通过高容量功率放大器提供在高频工作时所需的驱动电流来增大泵的工作频宽。

(2)涡流效应。由于涡流具有去磁作用,大量的磁通线拥挤于磁通回路的外表面,导致磁通线沿轴向穿过 GMM 棒的有效横截面积减小,进而影响磁感应强度在 GMM 棒横向截面上的分布。为减小涡流的影响程度,在设计时将 GMM 棒沿轴向切成多片,减小切片厚度,降低电导率,并在外罩上切槽^[5,13]。

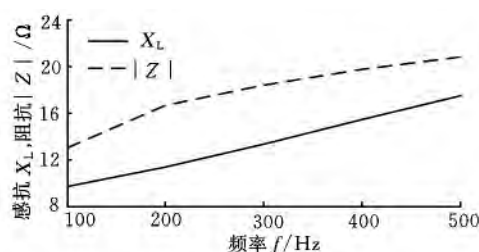


图12 不同频率下的驱动线圈阻抗与感抗幅值

4 实验研究

为了验证动态磁场仿真的正确性,设计了图 13 所示的测试原理图。为验证涡流对磁感应强度的影响,排除线圈电感的影响,实验时在驱动线圈输入峰值电流不变的情况下改变输入信号频率,通过感应线圈测得超磁致伸缩棒上的磁感应强度变化情况。

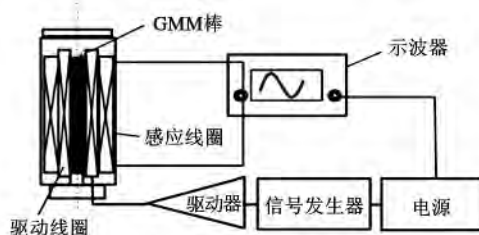


图13 磁感应强度测试原理图

图 14 是不同频率下有棒线圈骨架中 GMM 棒上磁感应强度的实验值与仿真值,以及无棒线圈骨架内部空气中磁感应强度实验值的动态幅值变化曲线图。因为超磁致伸缩泵的正常工作频率在 100Hz 以上,故图 14 中只考虑 100~1000Hz 的磁感应强度变化情况(B_0 为频率为 100Hz 时的磁感应强度)。

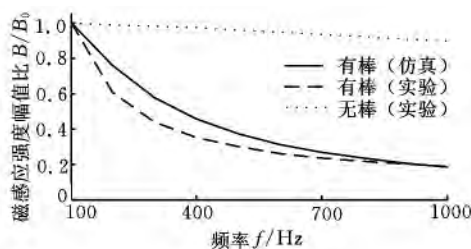


图14 动态磁感应强度变化曲线

由图 14 可以看出,无棒线圈骨架内部空气的磁感应强度也会随频率的提高而衰减,但是衰减程度很小,而且 100~1000Hz 都在通频带范围内,基本上可以认为无棒线圈骨架内部空气中的磁感应强度在 100~1000Hz 内是不衰减的。在不同频率下有棒线圈骨架中 GMM 棒上的磁感应强度的有限元仿真结果与实验结果虽然有差异,但是磁感应强度随频率的提高而衰减的趋势是一致的,证明了仿真结果的正确性,同时也验证了有限

元建模和网格剖分的合理性,间接说明了动态磁场的有限元仿真具有一定的可预测性。不同频率下 GMM 棒上的磁感应强度的有限元仿真结果与实验结果之所以有差异,是因为有限元仿真中只考虑了涡流损耗的影响,而实际工作中 GMM 棒的磁滞损耗以及机械损耗都会对磁感应强度的变化造成影响。从图 14 还可以看出,铝制的线圈骨架在高频(大于 100Hz)时也会产生一定的涡流,但这不是超磁致伸缩(GMM)棒上的磁感应强度衰减的主要原因;在峰值恒定的正弦电流驱动下 GMM 棒上的磁感应强度随频率的提高而衰减的主要原因是高频时 GMM 棒内涡流的去磁作用,从而使磁通拥挤于 GMM 棒的圆周表层,使 GMM 棒的导磁性能下降。

5 结论

(1)GMM 棒上的磁感应强度理论计算结果与仿真结果接近,说明了静态磁场仿真具有一定的可预测性。

(2)超磁致伸缩泵内部的核心材料 GMM 棒上的磁场分布并不均匀,轴向磁场不均匀性远高于径向,径向磁感应强度最大值与最小值的差在 10^{-4} 数量级,近似计算时基本可以认为径向是均匀的。

(3)GMM 棒越短,其轴向的磁感应强度就越大;线圈与超磁致伸缩棒等长时,GMM 棒轴向均匀性最高,此时轴线磁感应强度最大值与最小值的差在 10^{-2} 数量级。

(4)在恒压输入下,GMM 棒上的磁感应强度随着输入信号频率的提高而衰减,主要原因一是线圈电感随电流频率增大而变大,导致驱动电流减小;二是涡流的去磁作用。

(5)铝制的线圈骨架在高频(大于 100Hz)时也会产生一定的涡流,但这不是导致 GMM 棒上的磁感应强度衰减的主要因素;GMM 棒上的磁感应强度随频率的提高而衰减的最主要原因是高频时 GMM 棒内涡流的去磁作用。

参考文献:

- [1] Chaudhuri A, Yoo J H, Wereley N M. Dynamic Modeling of a Magnetostrictive Hydraulic Pump [C]//2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, 2006: 331-338.
- [2] Mauck L D, Lynch C S. Piezoelectric Hydraulic Pump Development[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(10): 758-764.

- [3] Chaudhuri A, Yoo J H, Wereley N M. Design, Test and Model of a Hybrid Magnetostrictive Hydraulic Actuator [J]. Smart Mater. and Struct., 2009, 18(8): 1-21.
- [4] Tan H, Hurst W, Leo D. Performance Modeling of a Piezohydraulic Actuation System with Active Valves [J]. Smart Mater. and Struct., 2005, 14(1): 91-110.
- [5] Chaudhuri A. Self-contained Hybrid Electro-hydraulic Actuators Using Magnetostrictive and Electrostrictive Materials[D]. Maryland: University of Maryland, 2008.
- [6] Dapino M J. On Magnetostrictive Materials and Their Use in Adaptive Structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(3/4): 303-329.
- [7] 程清风,朱玉川,王晓露,等.超磁致伸缩伺服阀电机转换器磁场分析与优化[J].机械科学与技术, 2012, 31(7): 1066-1070.
Cheng Qingfeng, Zhu Yuchuan, Wang Xiaolu, et al. Optimizing Magnetic Field of Giant Magnetostrictive Microdisplacement for Jet Servo Valve[J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(7): 1066-1070.
- [8] 李跃松,朱玉川,吴洪涛,等.射流伺服阀用超磁致伸缩执行器磁场建模与分析[J].兵工学报, 2010, 31(12): 1587-1592.
Li Yuesong, Zhu Yuchuan, Wu Hongtao, et al. The Magnetic Field Modeling and Analysis of Giant Magnetostrictive Actuator for Jet Servo Valve[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(2): 1587-1592.
- [9] 王传礼.基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究[D].杭州:浙江大学, 2005.
- [10] 贾振元,郭东明.超磁致伸缩材料微位移执行器原理应用[M].北京:科学出版社, 2008.
- [11] Ellison J. Investigation of Active Materials as Driving Elements in a Hydraulic-hybrid Actuator[D]. Maryland: University of Maryland, 2004.
- [12] Bottauscio O, Chiampi M, Rege L. Influence of Skin Effect on Magnetic Flux Distribution in Voltage Driven Devices with Laminated Cores[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254/255: 234-236.
- [13] Kendall D, Piercy A R. The Frequency Dependence of Eddy Current Losses in Terfenol-D[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(10): 6174-6176.

(编辑 陈勇)

作者简介:陈龙,男,1988年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。研究方向为流体传动与控制、机电控制及其自动化。朱玉川(通信作者),男,1974年生。南京航空航天大学机电学院副教授。杨旭磊,男,1989年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。徐鸿翔,男,1989年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。