



程清风

超磁致伸缩伺服阀电-机转换器磁场分析与优化

程清风¹, 朱玉川^{1,2}, 王晓露¹, 田一松³, 牛世勇³¹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, 南京 210016;²浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027³西安飞行自动控制研究所, 西安 710065

摘 要: 提出一种面向高频伺服阀的新型超磁致伸缩执行器驱动结构。采用有限元法对所设计超磁致伸缩执行器磁场分布进行了数值模拟, 分析了驱动与偏置电流、超磁致伸缩棒尺寸、永磁体及输出杆结构形式等因素对执行器磁场分布的影响, 揭示了其影响与作用规律。以数值模拟结果为依据对执行器结构形式与设计参数进行了优化, 数值模拟及其优化结果与实验曲线基本吻合。

关 键 词: 超磁致伸缩执行器; 有限元分析; 优化

中图分类号: TH137

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2012)07-1066-05

Optimizing Magnetic Field of Giant Magnetostrictive Actuator for Servo Valve

Cheng Qingfeng¹, Zhu Yuchuan^{1,2}, Wang Xiaolu¹, Tian Yisong³, Niu Shiyong³

(¹ Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

² State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

³ Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065)

Abstract: We design a novel structure of the giant magnetostrictive actuator (GMA) for high-frequency servo-valve and then use the FEM to perform the numerical simulation of the magnetic field distribution of the GMA we designed. We analyze the effects of drive and bias currents, the size of giant magnetostrictive rod, the structural form of permanent magnet and its output rod on the magnetic field distribution. Finally, we use the numerical simulation results to optimize the structural form and design parameters of the GMA. The simulation results are in agreement with optimization results and experimental curves, thus providing a theoretical basis for designing a high-performance GMA.

Key words: giant magnetostrictive actuator (GMA); finite element method (FEM); optimization; magnetic field

超磁致伸缩执行器 (giant magnetostrictive actuator, GMA) 具有输出力大、响应快、控制精度高等优点, 以其为电-机转换器的伺服阀在响应速度、驱动频宽、控制精度等方面均明显优于传统结构伺服

阀^[1,2]。超磁致伸缩 (giant magnetostrictive material, GMM) 棒作为 GMA 的核心部件, 其上的磁场分布大小及均匀性直接影响 GMA 的输出位移与线性度。因此, 在对 GMA 驱动的伺服阀电-机转换器进行结构优化时, 需要对不同结构参数下 GMM 棒上磁场的分布情况进行分析。文中采用磁场有限元分析的方法, 对不同结构和尺寸下, GMM 棒上的磁场分布进行了数值模拟与分析, 为超磁致伸缩伺服阀电-机转换器的设计与优化提供了依据。

收稿日期: 2011-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51175243, 50805080), 航空科学基金项目 (20110752006, 20090752008) 和流体动力与机电系统国家重点实验室 2011 年度开放基金项目 (GZKF-201116) 资助

作者简介: 程清风 (1985 -), 硕士研究生, 研究方向为流体传动与控制 and 机电一体化, chengqingfeng8503@163.com; 朱玉川 (联系人), 副教授, 博士, meeyczhu@nuaa.edu.cn

1 GMA 的结构与工作原理

根据伺服阀用电-机转换器所要满足的性能要

求及技术指标,结合 GMM 的基本理论和磁路驱动原理,设计了如图 1 所示的 GMA 基本结构。其中 GMA 的闭合磁路由前端盖、输出杆、GMM 棒、滑块、调节螺钉、外罩、底座等构成^[3]。执行器设计时的主要结构参数如表 1 所示。

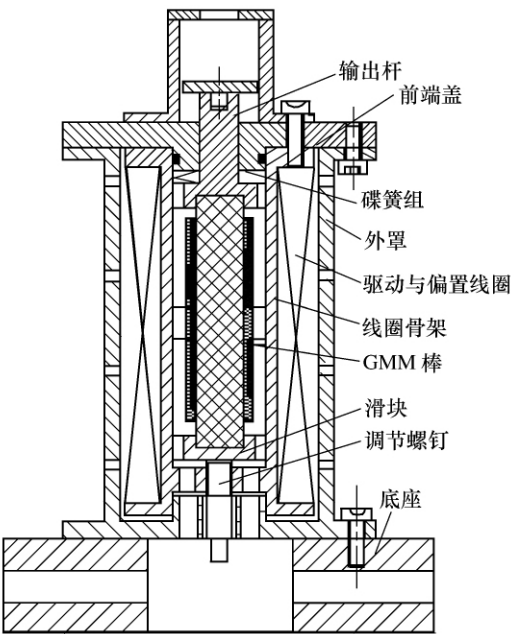


图 1 GMA 的结构原理图

图 1 所示 GMA 的工作原理为:通过调节调节螺钉给 GMM 棒提供合适的预压力,可以增大执行器的输出位移和提高磁机耦合系数;向偏置线圈中通入直流电,给 GMM 棒提供偏置磁场,一方面使其工作在线性区,另一方面消除“倍频”现象;驱动线圈通入交流电,产生驱动磁场,从而驱动 GMM 棒伸长或者缩短,推动输出杆工作,对外输出力或者位移。

表 1 执行器设计的相关参数与材料属性

参数名称	规格型号	参数名称	规格型号
GMM 棒	∅12 mm × 80 mm	滑块	Q235 A
驱动线圈匝数	1 200 匝	调节螺钉	Q235 A
偏置线圈匝数	1 000 匝	外罩	Q235 A
输出杆	Q235 A	线圈骨架	1Cr18Ni9
前端盖	Q235 A	底座	Q235 A

2 GMA 驱动磁场数学模型

2.1 麦克斯韦方程组

假定驱动电流密度均匀,其方向与对称轴成右

手关系,线圈磁场为稳态场,线圈匝均为同轴圆环回路,忽略线圈骨架与线圈材料本身对磁路影响,根据 GMA 的结构分析,所设计 GMA 有限元模型为轴对称模型。

麦克斯韦方程组是研究宏观电磁场问题的基础,也是电磁场有限元分析的依据和出发点,其微分形式为^[4]

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times E = \rho \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度矢量; J 为传导电流密度矢量; B 为磁感应强度矢量; D 为电位移矢量; E 为电场强度矢量; ρ 为自由电荷体密度。为保证以上方程有确定解,还必须引入本构方程

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon E, \quad B = \mu H, \\ J &= \sigma E \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ε 为介电常数; μ 为磁导率; σ 为电导率。在线性、均匀、各向同性的媒介中, ε 、 μ 、 σ 为恒定不变的常数。

2.2 GMA 平面非线性磁场的数学模型

在建立非线性磁场的基本方程时,需引入以下假设:

- 1) 忽略超磁致伸缩材料的磁滞效应;
- 2) 忽略位移电流和超磁致伸缩材料的涡流效应;
- 3) 将实际 GMA 三维电磁场问题,理想化为二维平面场或轴对称场;
- 4) 超磁致伸缩材料为各向同性。这样平行平面场与轴对称场特征的非线性边值问题可以统一表述为如下的数学模型,即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -f(x, y) \in \Omega \quad (3)$$

$$\beta_1 \frac{\partial u_1}{\partial n} \Big|_L = \beta_2 \frac{\partial u_2}{\partial n} \Big|_L \quad (4)$$

$$u_1 \Big|_{L'} = u_2 \Big|_{L'} \quad (5)$$

$$u \Big|_{L_1} = u_0(r_0) \quad (6)$$

$$\beta \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{L_2} = q(r_b) \quad (7)$$

式(4)和式(5)描述了 GMA 在不同媒质分界面上的边界条件。另外,在数学模型中这两类场的场量与参数间的类比关系如表 2 所示。

表2 二维平面场与轴对称场的场量与参数间关系

名称	坐标	μ	f	β'	μ_0	q
二维磁场	(x, y)	A_z	J_z	$v = \frac{1}{\mu}$	Az_0	$-H_t$
轴对称磁场	(r, z)	rA	J_θ	$v' = \frac{v}{\rho}$	ρA_0	$-H_t$

2.3 GMA 二维平面轴对称磁场模型

引入矢量磁位 A , 并定义 $B = \nabla \times A$, 假定 $\nabla \times A = 0$, 代入式(1)和式(2), 可得到磁场的基本微分方程

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (8)$$

在圆柱坐标系 (r, θ, z) 中有

$$\nabla \times A = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} r_0 & r\theta_0 & z_0 \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & rA_\theta & A_z \end{vmatrix} \quad (9)$$

对于轴对称磁场有

$$\begin{cases} A_r = A_z = 0, A = A_\theta \\ J_r = J_z = 0, J = J_\theta \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)~式(10)合并, 以上方程变为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \right) = -J_\theta \quad (11)$$

$$J(rA_\theta) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\frac{1}{r\mu} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r\mu} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \right)^2 - 2J_\theta rA_\theta \right] drdz \quad (12)$$

式(12)是式(11)的变分, Ω 为磁场的计算区域。将其离散化之后, 可导出有限元方程(13)

$$[K][A] = [J] \quad (13)$$

式中: K 为系数矩阵; A 为磁矢量矩阵; J 为电流密度矢量矩阵。

另外, 对于设计的 GMA 磁场分布的具体情况, 设定了两类边界条件: 狄利克雷条件(Dirichlet) $A = 0$; 诺埃曼条件(Nuemann) $\frac{\partial A}{\partial z} = 0$ 。

3 GMA 驱动磁场有限元建模与分析

3.1 GMA 磁路结构的轴对称有限元模型

GMA 的闭合磁路由前端盖、输出杆、GMM 棒、滑块、调节螺钉、外罩、底座等共同构成(如图1所示), 由于其结构是轴对称结构, 所以建模时, 所建有限元模型是一个轴对称模型。在 COMSOL Multiphysics 软件中建模^[5], 如图2所示。其中 r_1 是前

端盖 r_2 是输出杆 r_4 是 GMM 棒, r_5 是线圈骨架 r_6 是调节螺钉 r_7 是后端盖 r_8, r_9 是线圈 r_{10} 是外罩, r_3, r_{11} 是空气。

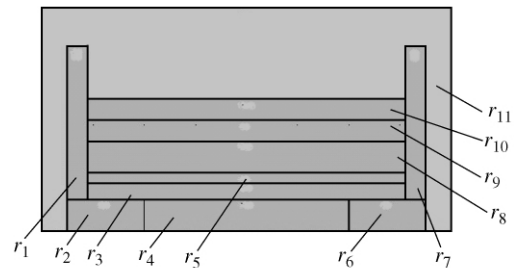


图2 GMA 有限元模型

根据材料的相关参数(表3), 并设置两类边界条件, 对模型进行网格划分, 特别地, 对于空气气隙需单独划分网格以提高计算精度, 网格划分如图3所示。

表3 GMA 的相关参数

材料	相对磁导率	电导率/($s \cdot m^{-1}$)	相对介电常数
GMM	8	16.67×10^6	1
Q235	200~400	4×10^6	1
空气	1	0	1
1Cr18Ni9	1	4×10^6	1

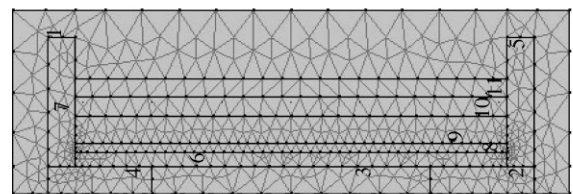


图3 GMA 模型网格划分

3.2 GMA 磁场数值模拟结果分析与优化

3.2.1 GMA 磁场数值模拟结果分析

为使 GMM 棒工作在较好的线性范围内, 需要通过偏置线圈预先施加一定的磁场。根据所购买 GMM 棒的性能测试结果, 在这里选择输入偏置电流 1.5 A。

通过 COMSOL Multiphysics 软件对 GMA 进行磁场仿真求解, 得到超磁致伸缩执行器的磁场强度等值线和磁力线分布如图4和图5所示。

当驱动线圈中通入电流时, GMA 轴线上的磁感

应强度变化曲线如图6所示。它反映了磁感应强度分布的基本特征。从图6可以看出,GMA轴线上的磁感应强度不均匀且呈“马鞍型”分布^[6]。

3.2.2 GMA 磁场数值模拟结果优化

1) GMM 棒长度与偏置电流对 GMM 棒磁感应强度分布的影响

GMM 棒长度分别选取 80 mm 和 100 mm,仿真结果如图7所示。在驱动线圈和偏置线圈通入电流不变时,改变 GMM 棒的长度,产生的磁感应强度分布均匀性不同。GMM 棒直径一定时,GMM 棒越长,产生的磁感应强度越均匀。

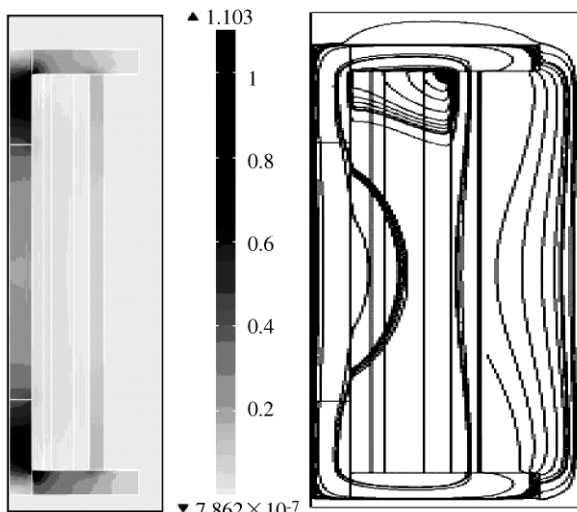


图4 GMA 的磁场强度等值线

图5 GMA 磁力线分布情况

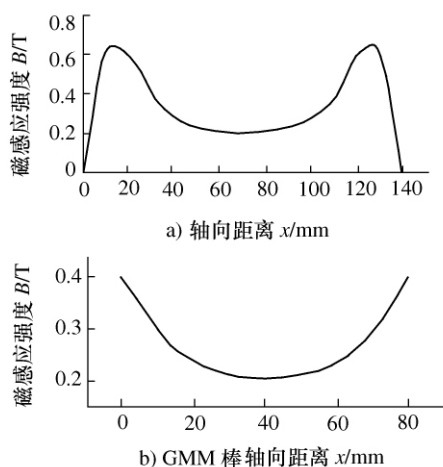


图6 GMA 及 GMM 棒轴向产生的磁感应强度

图8是向驱动线圈输入不同偏置电流 I_p 时,GMA 轴线上的磁感应变化曲线。在驱动线圈电流保持不变时,改变通入偏置线圈的电流,磁路产生的磁感应强度也随着发生变化,且偏置电流越大,磁感

应强度越大,从而可以为偏置电流的选取提供依据。

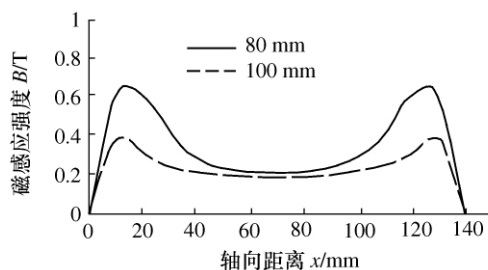


图7 GMM 棒长度与磁感应强度

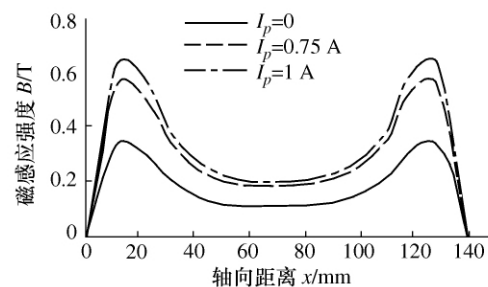


图8 偏置电流与磁感应强度

2) 输出杆凹槽深度对磁感应强度的影响

改变 GMM 棒两端导磁体凹槽深度,即使 GMM 棒分别嵌入深度为 2 mm 和 5 mm 的凹槽之中,模型结构如图9所示,图10是两种不同凹槽深度下产生的磁感应强度曲线,从图9中可以看出,虽然凹槽深度增大,产生的磁感应强度也增大,但 GMM 棒轴向磁感应强度不均匀性也越大。

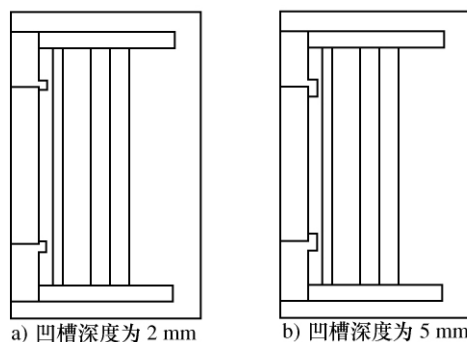


图9 凹槽深度分别为 2 mm 和 5 mm 的建模

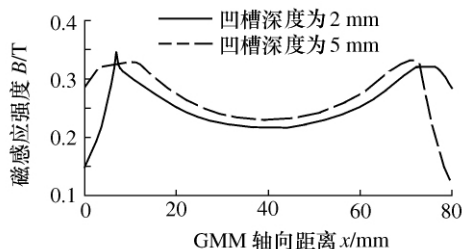


图10 输出杆与磁感应强度

3) 采用永磁体提供偏置电流

设置偏置线圈匝数 $N = 1\,000$ 匝, 线圈电流 $I = 1\text{ A}$, 线圈骨架长度 $L = 124\text{ mm}$, 从而可得知等效磁场强度 $H = NI/L = 1\,000 \times 1/124 = 8\text{ kA/m}$ 。采用永磁体和偏置线圈的仿真结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 在等效磁场强度相同的情况下, 永磁体产生的磁感应强度要略大于由偏置线圈产生的磁感应强度。这是因为永磁体和外壳共同组成了闭合磁路, 减小了磁路上的磁阻。

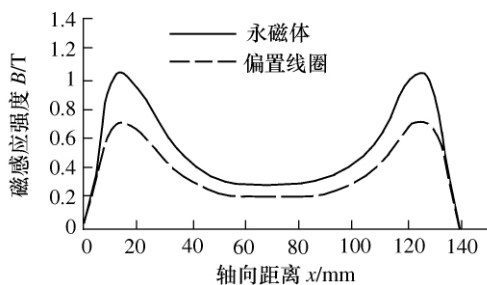


图 11 驱动形式与磁感应强度

3.3 GMA 磁场分布的实验测试

为了验证模拟仿真优化后 GMA 执行器结构的磁场性能, 我们设计了如图 12 所示的试验装置。实验中采用特斯拉计测量 GMA 产生的磁感应强度。

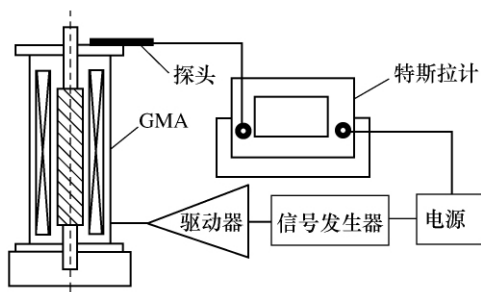


图 12 GMA 磁场测试原理图

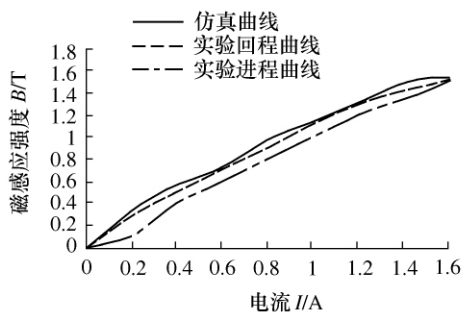


图 13 不同电流时实验结果与仿真对比

试验时向线圈通入不同的驱动电流, 电流大小每间隔 0.2 A , 记录特斯拉计的读数。试验测试得到的 GMA 磁感应强度结果与磁场有限元计算结果如图 13 所示。结果表明: 实验结果和仿真结果虽有差异, 但基本吻合, 这说明有限元分析与优化的准确性。同时, 试验曲线有明显的滞环, 主要是 GMM 的磁滞特性和涡流等引起的。

4 结论

本文针对新型射流伺服阀用超磁致伸缩执行器驱动磁场进行了磁路结构设计、磁场数学建模、磁场数值模拟与实验测试, 主要结论如下:

1) 通过改变超磁致伸缩执行器的结构和尺寸等参数, 对磁路仿真对比可知, GMM 棒上的磁感应强度是不均匀的, 呈“马鞍型”分布。

2) 超磁致伸缩执行器驱动电流相同时, 偏置电流越大, GMM 棒上的磁感应强度也越大, 该仿真结果对选择 GMM 材料的工作线性段及偏置电流的选取提供了依据。

3) GMM 棒的长度尺寸影响超磁致伸缩执行器磁感应强度分布的均匀性, 同时也影响其输出位移, 因此在进行执行器结构优化时, 应综合考虑磁场强度和输出位移来进行棒长度的选择。

4) 超磁致伸缩执行器可采用永磁体代替偏置线圈以降低磁路热效应, 但偏置磁场大小不易调节, 在具体设计时, 应根据具体需要对偏置驱动进行选择。

[参考文献]

- [1] 胡明哲, 李强, 李银祥等. 超磁致伸缩材料的特性及应用研究[J]. 稀土金属材料与工程, 2000, 29(6): 366~369
- [2] Jenner A G, Smith R J E, Wilkinson A J, et al. Action and transduction by giant magnetostrictive alloys[J]. Mechatronics, 2000, (4-5): 457~466
- [3] 贾振元, 杨兴, 郭东明等. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报, 2001, (2): 3~5
- [4] 王传礼, 丁凡, 许贤良. 基于 GMM 转化器喷嘴挡板伺服阀的研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 93~95
- [5] William B J Zimmerman. Comsol Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007
- [6] 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, (12): 1587~1592