用于 GMA 的新型永磁偏置闭合磁路

杨远飞 张天丽 蒋成保

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用 ANSYS 有限元软件进行仿真模拟,对超磁致伸缩执行器(GMA,Giant Magnetostrictive Actuator)的磁路结构进行了分析和优化. 根据磁致伸缩棒内磁场均匀性好,场外漏磁小的设计目标,利用极性相反的双永磁补偿原理,提出了一种新型的内置式永磁组合偏置结构,使得沿磁致伸缩棒长方向磁场分布均匀的同时,偏置磁场和激励磁场都形成良好的闭合磁路. ANSYS 分析结果表明,棒中偏置磁场不均匀度为 3.51%,激励磁场不均匀度为 8.73%,均满足不均匀度小于 10% 的设计目标;在执行器指定位置(距离 GMA 7 cm)的总漏磁场强度为 30.4 A/m,符合实际应用的标准要求(<80 A/m).

关 键 词: 磁致伸缩; 磁路结构; 漏磁; ANSYS

中图分类号: TG 132.2^{+}7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)12-1682-04

Novel closed magnetic circuit with permanent magnet biased for giant magnetostrictive actuator

Yang Yuanfei Zhang Tianli Jiang Chengbao

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The magnetic circuit of giant magnetostrictive actuator (GMA) was analysed and optimized with finite element software ANSYS. According to the design goals of high homogeneity of magnetic field and low magnetic flux leakage, a novel magnetic circuit biased by the combination of built-in permanent magnets was proposed in the base of compensation principle of dual-permanent magnets with contrary polarity. Magnetic field along the direction of the length of giant magnetostrictive rod was homogeneous, while well-closed magnetic circuits were informed in both biased magnetic field and driving magnetic field. According to the results from ANSYS analysis, the unevenness of the bias magnetic field and driving magnetic field is 3.51% and 8.73% respectively, which are less than 10%. The total magnetic leakage in the specified location (7 cm from the GMA) is 30.4 A/m , meeting the standard of practical application(<80 A/m).

Key words: magnetostriction; magnetic circuit; magnetic leakage; ANSYS

超磁致伸缩材料(GMM,Giant Magnetostrictive Material)相比于压电材料、形状记忆合金、电致伸缩材料等其它智能材料而言,具有响应速度快、工作频带宽、驱动电压低等优点,所以利用磁致伸缩材料研制的超磁致伸缩执行器(GMA,Giant Magnetostrictive Actuator)在精密加工、精确定位、振动主动控制等领域具有重要的应用前景[1-3].

GMM 的工作原理是在磁场作用下产生伸长或缩短,因此 GMA 的驱动磁场设计对其性能的发挥至关重要. 超磁致伸缩执行器的磁场包括激励磁场和偏置磁场两部分. 由于超磁致伸缩材料本身磁导率较低,使 GMA 的磁路尤其是永磁偏置磁路在应用过程中出现漏磁较大,GMM 棒中磁

收稿日期: 2011-09-30; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1104.010.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91016006); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目

作者简介: 杨远飞(1988-),男,安徽六安人,硕士生,yangyuanfei2005@163.com.

场强度分布不均匀等问题,从而限制了 GMM 执行器的广泛应用,因此基于超磁致伸缩材料执行器的磁路优化成为当前国内外相关领域学者的研究热点. 如 S. Karunanidhia 等采用了圆筒式永磁体提供偏场[4];A. Lovisolo 等设计了三分段的永磁偏置磁路[5];唐志峰[6]、杨斌堂[7]等分别对激励磁路进行了优化设计,均取得了有益的结果.

本文在分段补偿均匀磁路的研究基础[8]上,根据磁场均匀性高和场外漏磁小的设计目标,分别对 GMA 的偏置磁场和激励磁场磁路进行了优化设计,提出一种新型内置永磁偏置的双磁体组合补偿磁路.

1　超磁致伸缩执行器磁路设计

图 1 为 TbDyFe 超磁致伸缩材料的典型磁致伸缩曲线. 根据曲线的线性情况,可以分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ 3 个阶段. 其中,第Ⅰ阶段为磁致应变起始段,第Ⅲ阶段为磁致应变饱和段,皆存在较强的非线性,只有在第Ⅱ阶段时磁致应变与外加磁场呈现较好的线性关系. 因此,用于微位移与微振动主动控制应用的 GMA,一般都设计一个偏置磁场,使 GMM 棒产生一预应变,将执行器的初始工作点移到线性度较好区域的中心点,使执行器的位移输出与输入电流成近似线性关系,同时又消除了 GMM 在正负磁场下均随磁场增大而伸长所导致的倍频现象[9],使执行器产生伸缩对称且线性度较好的磁致应变输出,以利于对执行器输出位移的精确控制.

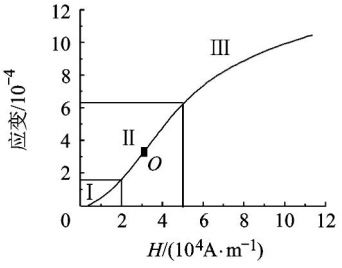


图 1　TbDyFe 超磁致伸缩材料的磁致伸缩曲线

激励磁场主要提供 GMM 棒发挥应用中所需大小磁致伸缩性能的外磁场,是执行器的控制驱动磁场. 激励磁场的线性段是在一个范围内,由于偏置磁场的存在,激励磁场是关于零点对称的交变磁场. 激励磁场通常由通电螺线管提供,在螺线管中通入可控的交变电流即可产生相应的交变磁场,从而获得所需的应变输出.

磁致伸缩材料内部磁通量分布均匀与否将影响执行器的磁致伸缩效果. 由前期研究结果可知,GMM 棒中磁场分布越均匀,GMA 输出的磁致应变曲线越规则,否则会出现较多的毛刺谐波[10]. 因此,超磁致伸缩执行器磁路设计目标之一就是使超磁致伸缩材料在驱动时其内部具有尽可能均匀的磁场分布.

由于超磁致伸缩材料的磁导率偏低($\mu_r = 3 \sim 5$),而材料棒一般尺寸较大,远大于普通磁路的狭小工作气隙,因此漏磁不可避免. 较大的漏磁一方面会损失磁能,降低磁能利用率,另一方面在 2 个以上执行器紧密布置的系统中,执行器的漏磁场会相互影响,不但会使执行器的最终性能偏离设计值,甚至可能会影响整个系统的工作稳定性. 因此减小场外漏磁是超磁致伸缩执行器磁路设计的另一个重要目标.

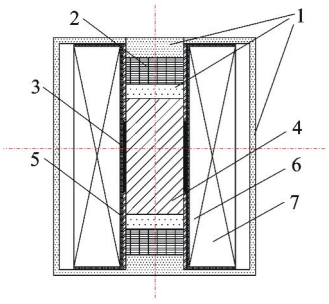
综上所述,GMM 执行器磁路设计的原则,即是使超磁致伸缩材料在应变方向的磁场分布尽可能均匀,且执行器的场外漏磁尽可能小.

1.1　偏置磁路设计

常用的偏置磁场可由永久磁铁和螺线管提供,对于螺线管提供偏置磁场的磁路而言,偏置磁场大小可通过调节线圈中的电流而很方便地改变,但由于偏置线圈需要长期通入较大电流,电流产生的热效应会对超磁致伸缩材料的磁致伸缩性能产生较大影响,而采用永磁体提供偏置磁场则可以避免这个问题. 故本文针对永久磁铁偏置的磁路结构进行了优化设计.

在 GMA 中,磁导率较低的超磁致伸缩棒可看作磁路的工作气隙. 形成闭合磁路是减小漏磁的有效方法,因此采用内置式永磁偏置,以便外置磁导率高的软磁材料以闭合磁回路. 首先,在磁致伸缩棒的两端放置 2 片柱状永磁体提供沿磁致伸缩棒长方向的磁场;其次,为降低磁路工作气隙的磁阻,在棒与永磁体之间加入导磁材料,使更多的磁通导入棒中;进而在 2 块永磁体的上下端均设有磁轭,与激励线圈外的软磁套筒一起,形成完整的闭合磁路进行磁屏蔽,从而有效减小漏磁.

利用 ANSYS 有限元对磁路进行分析发现,由于 GMM 棒的磁导率较低,当在棒两端加入永磁体后,棒中的偏置磁场强度分布呈现“两边高、中间低”的态势. 因此,为了改善磁场分布的均匀性,在磁场较弱的棒的中间区域,增设了一个永磁套筒进行补偿,其与纵向的柱状永磁体极性相反,一方面可提高中间部分的磁场强度,同时抵消棒两端部分较高的磁场强度,从而使整个棒的偏置磁场的强度分布趋于均匀. 总体磁路结构如图 2 所示.



1—导磁柱和导磁套筒;2—永磁 1;3—永磁 2;4—GMM 棒;
5—不导磁不锈钢;6—线圈骨架;7—线圈.

图 2 磁路结构简图

1.2 激励磁路设计

不同长径比 β ($\beta=l_c/d_c$, l_c 和 d_c 分别为螺线管的轴向长度和外径)的螺线管内部的磁场分布不同[11],图 3 为不同长径比下螺线管内部的磁场分布. 可以看出:①长径比 β 很小时,螺线管内部的磁场很不均匀,中间偏高,两端偏低;当长径比 β 逐渐增大时,磁场分布逐步变得均匀,中间均匀区域变大,之后磁场分布随着长径比的增大变化不明显. ②从单个螺线管的内部磁场的分布曲线上可以看出,处于螺线管两端的部分漏磁较大,磁场强度降低明显,所以螺线管内部的磁场分布呈现明显的“中间高、两边低”的现象.

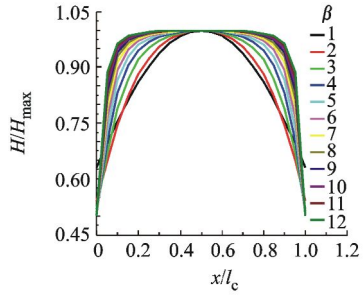


图 3 不同长径比的螺线管内部的磁场分布

设计时,首先根据磁场强度及尺寸要求,选取合适长径比的螺线管尺寸,使螺线管中间的磁场分布较为均匀. 为改善螺线管两端磁场偏低的现象,获得沿棒长方向磁场的均匀分布,在棒的两端加入软磁材料的同时,在永磁体的外围加磁轭及软磁套筒,使偏置磁路和激励磁路同时形成一个整体的闭合磁路,提升激励磁场两端磁场强度并减小漏磁.

2 ANSYS 有限元仿真计算

2.1 偏置磁路仿真计算

由于 GMA 的轴对称性,取磁路结构的一半进行建模[12],经过 ANSYS 有限元分析计算可得磁路中的磁力线分布,如图 4 所示.

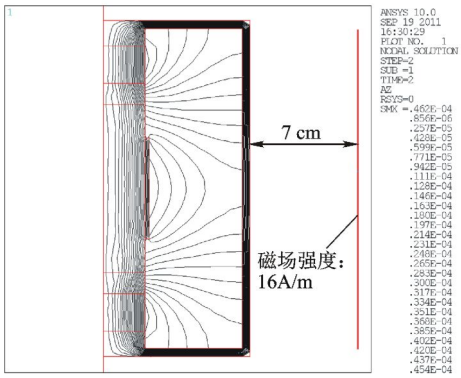
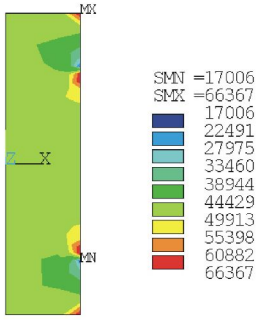


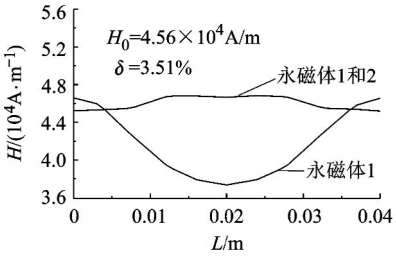
图 4 偏置磁路的磁力线分布图

从图 4 中可看出 TbDyFe 棒中磁力线较密,磁能利用率较高. 另外由于软磁的磁轭和套筒的磁屏蔽作用,执行器外无明显的磁力线分布. 在指定位置(距离执行器 7 cm)处,由 ANSYS 分析计算的漏磁场强度为 16 A/m.

图 5a 所示为经过 ANSYS 计算后棒中的偏置磁场强度分布云图,可以看出表示棒中心的磁场强度的颜色相同且棒的总体磁场强度也较均匀;图 5b 所示为棒中心的偏置磁场强度分布曲线.



a 棒的磁场强度分布云图(单位:A/m)



b 棒中心的磁场强度分布曲线

图 5 超磁致伸缩棒的偏置磁场分布

为了表征磁场均匀性,定义磁场不均匀度为 $\delta=|(H-H_0)/H_0|$ 的最大值(H_0 为磁场分布的平均值),实际应用中 δ 一般应小于 10%. 图 5b 可见,当磁路中只有永磁体 1 时,棒总体的磁场强度较低而且磁场均匀性较差,此时 $\delta=21.3\%$,当加入极性相反的永磁体 2 时,棒两端的磁场强度略有降低,中间部分的磁场强度得到了提高,总的磁场均匀性有了明显的改善,此时 $\delta=3.51\%$.

2.2　激励磁路仿真计算

图 6 为经计算后磁路中激励磁场的磁力线分布,可看出由于软磁的磁轭和套筒的磁屏蔽作用,执行器外磁力线很少,由 ANSYS 计算结果可得在场外指定位置(距离执行器 7 cm)处的漏磁场强度为 14.4 A/m. 且 TbDyFe 棒中磁通密度强,表明具有较高的磁能利用率. 如图 7 所示为超磁致伸缩棒的激励磁场强度分布曲线,棒中心部分的激励磁场约为 44 000 A/m,在超磁致伸缩材料的应变方向上的磁场强度与偏置场相当;磁场分布不均匀度 $\delta=8.73\%$,较好地满足了设计要求.

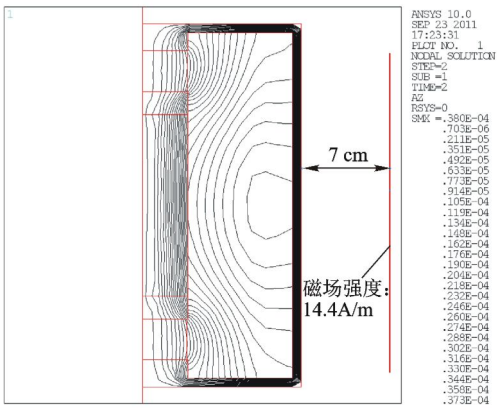


图 6　激励磁路的磁力线分布图

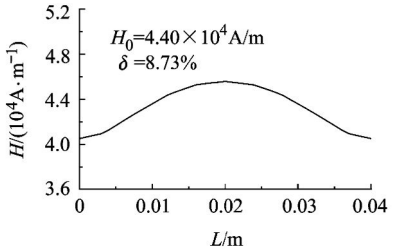


图 7　超磁致伸缩棒的激励磁场分布

3　结　论

本文提出了一种适用于超磁致伸缩材料执行器的新型内置式永磁偏置闭合磁路,并采用双磁体补偿组合结构,实现了磁场分布均匀、漏磁小的设计目标. 经过优化设计后,通过 ANSYS 模拟计算,沿磁致伸缩棒长方向偏置磁场不均匀度 $\delta<5\%$,激励磁场不均匀度 $\delta<10\%$,执行器场外指定位置的漏磁<80 A/m,符合了实际应用要求,为超磁致伸缩材料执行器在各种高科技领域的应用奠定了重要基础.

参考文献(References)

[1] Grunwald A, Olabi A G. Design of a magnetostrictive (MS) actuator[J]. Sensor and Actuators, 2008, 144: 161-175

[2] 马志新,周志平. 基于超磁致伸缩材料微位移驱动器的原理及实验研究[J]. 现代机械,2009(2):19-21
Ma Zhixin, Zhou Zhiping. Design and experimental analysis of a micro-displacement actuator based on giant magnetostrictive material[J]. Modern Machinery, 2009(2): 19-21 (in Chinese)

[3] 张旭辉,刘永光,付永领. 磁致伸缩作动器结构优化设计[J]. 压电与声光,2009,31(3):377-380
Zhang Xuhui, Liu Yongguang, Fu Yongling. Optimum design of the magnetostrictive actuator[J]. Piezoelectectrics & Acoustooptics, 2009, 31(3): 377-380 (in Chinese)

[4] Karunanidhia S, Singaperumal M. Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2010, 157(2): 185-197

[5] Lovisolo A, Roccato P E, Zucca M. Analysis of a magnetostrictive actuator equipped for the electromagnetic and mechanical dynamic characterization[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(20): 915-919

[6] 唐志峰,项占琴,吕福在. 磁致伸缩执行器的优化设计和控制模型[J]. 中国机械工程,2005,16(9):753-756
Tang Zhifeng, Xiang Zhanqin, Lü Fuzai. Optimal design of magnetostrictive actuator and its control model [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2005, 16(9): 753-756 (in Chinese)

[7] 杨斌堂,陶华,Bonis M,等. Tefeno1-D 磁致伸缩微小驱动器磁路设计[J]. 机械科学与技术,2005,24(3):293-296
Yang Bintang, Tao Hua, Bonis M, et al. Magnetic circuit design for Tefeno1-D driven magnetostrictive mini-actuator[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(3): 293-295 (in Chinese)

[8] Zhang Tianli, Jiang Chengbao, Xu Huibin, et al. Permanent-magnet longitudinal fields for magnetostrictive devices[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(3): 034511

[9] 朱金才,顾仲权. 磁致伸缩作动器的设计及其动态特性研究[J]. 南京航空航天大学学报,2006,30(4):413-418
Zhu Jincai, Gu Zhongquan. Design of magnetostrictive actuator and research of its dynamic characteristics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 30(4): 413-418 (in Chinese)

[10] 徐峰,张虎,蒋成保,等. 超磁致伸缩材料作动器的研制及特性分析[J]. 航空学报,2007,33(12):1436-1439
Xu Feng, Zhang Hu, Jiang Chengbao, et al. Designing and performance research of giant magnetostrictive actuator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 33(12): 1436-1439 (in Chinese)

[11] Raghavendra A. High frequency high amplitude magnetic field driving system for magnetostrictive actuators [D]. Baltimore County Baltimore, MD: Mechanical Engineering, University of Maryland, 2009

[12] 孙明礼,胡仁喜,崔海蓉,等. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京:中国机械出版社,2007:17-63
Sun Mingli, Hu Renxi, Cui Hairong, et al. Examples tutorials of ANSYS10.0 electromagnetic finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 17-63 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)