

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.014

稀土超磁致伸缩致动器水浸式冷却技术研究^{*}

薄少军, 张 瞻, 闫洪波

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:针对磁致伸缩致动器工作时的发热问题,对其内部冷却系统中冷却液流速、压强等方面进行了研究,通过理论分析方法对现有冷却系统进行了分析与总结。提出了一种水浸式新型冷却系统,使空间利用率提高了约5%,增大有效接触空间约4.32 ml,利用ANSYS Workbench软件对新型冷却系统冷却液的各物理量进行了热流耦合仿真分析,并利用SPSS软件对冷却方案模型中冷却液各物理参数的数据进行了正交实验。研究结果表明:该冷却系统中冷却液流速对致动器温度有明显抑制作用,冷却液出入口处压强与致动器温度基本无抑制作用,并通过实验设计方法验证了这一结论。

关键词:磁致伸缩致动器温控;发热;热效应;水浸式冷却;模型仿真

中图分类号:TH-39;O482.52⁺⁶

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0842-04

Water immersion cooling technology of rare earth giant magnetostrictive actuator

BO Shao-jun, ZHANG Zhan, YAN Hong-bo

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Aiming at the heat problem of magnetostrictive actuator when it works, the velocity and pressure of coolant in its internal cooled system was studied. The existed cooled system was analyzed through theoretical analysis method. A new type of water immersion cooled system was proposed, which improves the space utilization rate by about 5% and enlarges the effective contact space by about 4.32 ml. The physical parameters of the cooled fluid in the new cooled system was simulated and analyzed by ANSYS Workbench software, and orthogonal experiments on the data of the physical parameters of the cooled fluid in the cooled scheme model was carried out by SPSS software. The results indicate that the velocity of coolant in the cooling system has obvious restraint effect on the temperature of the actuator. The pressure at the inlet and outlet of the coolant has no restraint effect on the temperature of the actuator. This conclusion is verified by the experimental design method.

Key words: magnetostreictive actuator(MA); heat; thermal effect; water immersion cooling; model simulation

0 引 言

超磁致伸缩致动器是利用磁致伸缩材料(GMM),在交变磁场作用下产生磁致伸缩效应,对外做功的微小位移输出装置。GMA工作时具有伸缩量大、反应速度快等优点,被广泛用于工业和军事领域^[1-11]。GMA存在诸多技术难题还有待突破,其中发热是较为重要的研究课题。已有的研究发现,现有冷却系统存在结构

设计不合理、冷却面积小和冷却状态不稳定等问题。

本文将针对这些问题设计出新型冷却模型,提出一种水浸式冷却系统,利用ANSYS Workbench仿真软件对该系统进行热流耦合仿真分析,并通过SPSS软件对仿真数据进行正交实验设计。

1 温度对GMA的影响

温度的升高对GMA工作系统有较大的影响,其

收稿日期:2019-01-11

基金项目:科技部创新方法工作专项资助项目(2017M010660)

作者简介:薄少军(1974-),男,天津人,工学硕士,副教授,主要从事机械动力学方面的研究。E-mail:bsjsdkd@163.com

中主要表现在温度对 GMM 棒的影响。较高的温度导致 GMM 棒发生热膨胀产生热变形,使其中心轴位置产生相应的偏移导致 GMA 的输出位移精度下降。此外,温度的变化导致 GMM 棒磁致伸缩系数发生改变。

13.8 MPa 作用下温度对 GMM 磁致伸缩系数 λ 的影响如图 1 所示^[12]。

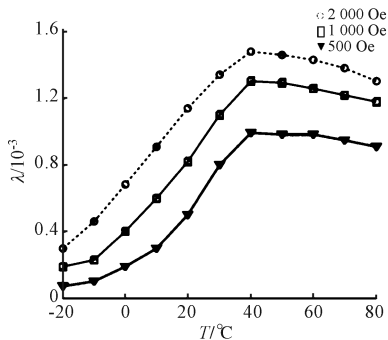


图 1 13.8 MPa 作用下温度对 GMM 的影响

由图 1 知:随着温度升高 GMM 棒磁致伸缩系数 λ 也会随之升高,温度在 40 °C 左右时 λ 值达到最大值。温度继续升高, λ 值会随温度的升高而下降。分析得到,在 40 °C 时的材料伸缩系数比初始值增大了 1.5 倍;超过 40 °C 时 λ 值以 0.5% 的速率下降,最终影响 GMA 的工作效率和稳定性。

2 冷却系统分析

LI J Q 等人^[13]在 GMM 棒与线圈骨架之间设计了冷却腔,通过冷却水流经冷却腔,使发热线圈通过冷却腔壁与冷却水进行热交换,将线圈产生的热量带出,实现了温度控制;武汉理工大学明廷鑫等人^[14]在线圈内外分别放置了冷却管。

冷却腔或冷却管的结构设计使 GMA 存在内部结构复杂、温度控制的精度低等问题。通过拆解可知线圈所产生的热量对尼龙骨架、GMM 棒和冷却系统都有热影响,其中线圈与线圈骨架、冷却管(腔)壁直接接触,所产生的热量直接对骨架和冷却腔壁进行了热传递,而与冷却液无直接接触,即线圈、腔壁、冷却液 3 者之间存在无效接触和无效空间。对 GMM 棒而言,不仅存在骨架的热传递,还有线圈所发出热辐射的作用,在双重热作用下控制 GMM 棒的温度就显得极为棘手。

本文通过对 GMA 结构分析,发现导致冷却效率低的原因在于系统内部结构设计的不合理性。GMA 中偏置线圈与激励线圈叠加缠绕在一起,不利于内层和中间层线圈散热,导致内部温度持续上升。另外冷却腔壁与线圈存在接触不足的情况,由于线圈缠绕的

紧密性和不均匀性,最外层线圈横截面的垂直度精度低,使线圈与腔壁接触不足产生无效空间。这些空间充斥着大量空气,很大程度上降低冷却液的冷却效率。深入分析发现:线圈与冷却系统接触的方式属于点与面接触或点与点接触,会导致冷却效率的降低。

冷却腔和冷却管冷却示意图如图 2 所示。

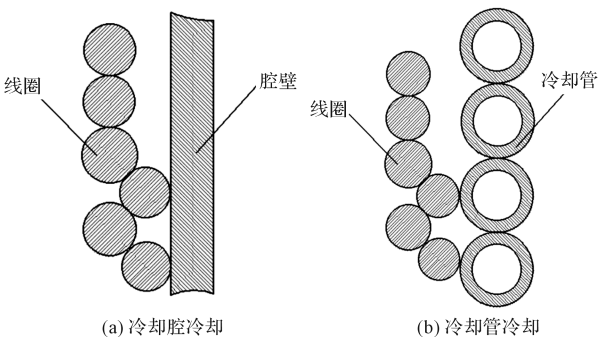


图 2 冷却腔和冷却管冷却示意图

图 2 表明:冷却系统对线圈的最内层或最外层的线圈进行冷却,对线圈中间层无法冷却,会导致冷却不均匀的情况;冷却系统中空腔或管道存在壁厚,使热量需要用冷却壁与内部的冷却液进行热交换,会导致冷却效率低且不稳定的情况。

3 冷却结构设计

本文方案建模时只保留冷却系统,GMM 棒单独放置在骨架内,即除 GMM 棒外的其他构件放置在密闭壳体内,向其中通入具有绝缘性质的纯水进行冷却,使线圈完全浸入到冷却液中,以一定流速流经密闭壳体带走线圈产生的热量,保证装置内部温度热平衡。

本文考虑到线圈与永磁体距离较近,设计骨架时线圈与永磁体之间留有 1 mm ~ 2 mm 间隙。为提高 GMA 冷却液的流动均匀性,冷却液入口设计成与 GMA 轴线成 45° 夹角方向。

GMA 冷却系统示意图如图 3 所示。

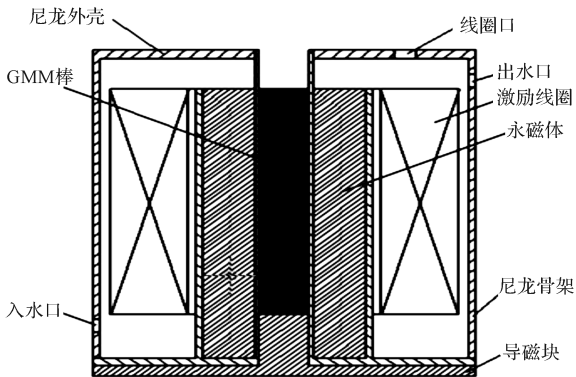


图 3 GMA 冷却系统示意图

GMA 结构参数如表 1 所示。

表 1 GMA 结构参数

名称	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热/($\text{J} \cdot$ $\text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
线圈	漆包线	8 900	390	386
永磁体	钕铁硼	7.5	0.12	6
骨架	尼龙	0.012 4	0.3	0.293 9
冷却液	纯水	1 000	60	4 180
空气		1.184	0.023	1 000
伸缩棒	Terfenol-D	0.925	0.02	2
导磁块	DT4	7 860	36	460

该结构设计使冷却液与线圈的无效接触改为有效接触,增大冷却液与线圈接触面积。经过计算与冷却腔和冷却管冷却相比,增大有效接触空间约为冷却液 4.32 ml 的容量,首次将接触空间提高了约 5% 的效果,与现有冷却系统比增加了冷却面积。

4 GMA 温度场分析

本研究利用 Workbench 设定材料和边界条件。初始条件设定线圈温度为 95 ℃ 时进行冷却,环境温度设置为 20 ℃,边界条件选择冷却液流速,初始冷却液流速设置为 0.1 m/s,水力直径为 0.002 m。液体流动方向为螺旋上升,可有效提高冷却液在 GMA 内部的流动性。

通过热分析查看局部温度的细节,1.2 m/s 流速下伸缩棒与永磁体的温度如图 4 所示。

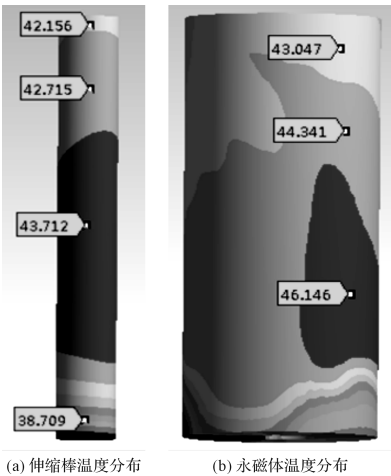
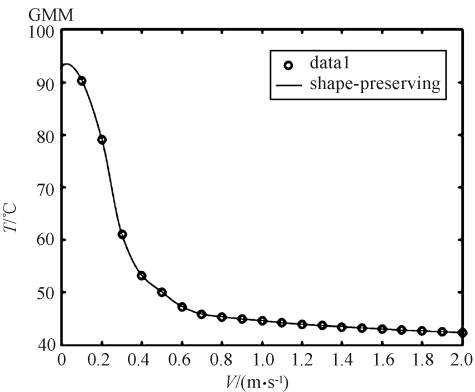


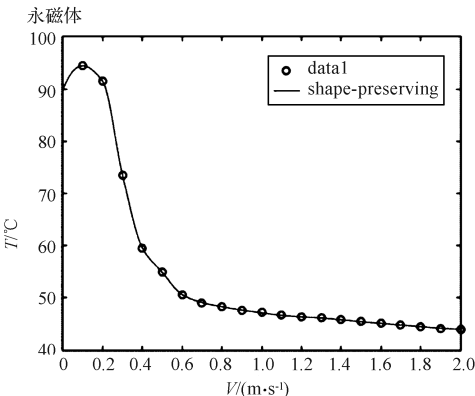
图 4 1.2 m/s 流速下伸缩棒与永磁体的温度

由图 4 可知:GMA 内部的冷却液流速不相同,导致流速较慢的区域温度较高,流速较快的区域温度较低。

本研究通过变换冷却液流速进行仿真,流速范围为 0.1 m/s ~ 2.0 m/s,记录温度数据,测得 GMM 棒和永磁体在不同流速下的最高温度,利用 Matlab 进行曲线拟合得到 GMM 棒和永磁体速度-温度曲线图,如图 5 所示。



(a) GMM棒温度曲线



(b) 永磁体温度曲线

图 5 GMM 棒和永磁体速度-温度曲线图

由图 5 可知:冷却液流速由 0.1 m/s 增加到 2.0 m/s过程中,GMM 棒和永磁体的温度下降的速度较快。冷却液流速在 0.5 m/s 时,GMM 棒温度变化逐渐变小,永磁体在 0.6 m/s 流速时开始趋于平稳,使系统在 0.6 m/s 流速时开始逐步趋于热平衡,GMA 温度可控制在 45 ℃ 以下。

根据实际情况和能源节省角度,结合 GMM 棒工作效率最高温度域,在冷却液流速为 1.2 m/s 时,冷却效率最高,能量消耗最低。

保持冷却液流速不变,改变装置冷却液入口处的压强,初始压强为 100 Pa,测试范围为 100 Pa ~ 2 000 Pa。可以得出:增大入口处压强时,GMM 棒和永磁体最高温度变化不超过 0.01 ℃。原因在于线圈缠绕的紧密度较强,加压的冷却液无法进入线圈的中层,导致冷却液对温度的影响可以忽略不计。

5 实验结果及分析

本研究利用 SPSS 19.0 软件对所得数据进行正交实验的设计,在上述内容中可以看到,流速为 1.2 m/s 时,可以使 GMM 棒工作时的伸缩率达到较好的状态。所以,为了在试验次数最少的情况下达到较好的实验效果,在选取数据时,可选 1.1 m/s ~ 1.3 m/s 的 3 组数据,压强可选择 900 Pa ~ 1 100 Pa 的 3 组数据进行

正交实验,采用 GMM 棒在仿真分析时得到的最低温度作为正交实验设计中的结果进行实验和论证。

通过数据的分析可知,正交实验可以设计为二因素三水平的实验组合,查阅正交表可知:需要做 9 次实验,表头即为。

因素与水平数的确定如表 2 所示。

表 2 因素与水平数的确定

因素	水平		
	1	2	3
流速 $A/(m \cdot s^{-1})$	1.1	1.2	1.3
压强 B/Pa	900	1 000	1 100

将表 2 中的数据导入到 SPSS 软件中,根据表格中的数据进行实验,并将实验结果导入到表格中,通过计算实验得到正交实验结果,如表 3 所示。

表 3 正交实验结果

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	44.000 ^a	4	11.000	2.750	.175
截距	225.000	1	255.000	56.250	.002
A	38.000	2	19.000	4.750	.038
B	6.000	2	3.000	.750	3.25
误差	16.000	4	4.000		
总计	285.000	9			
校正总计	60.000	8			

表 3 中的 Sig 值和方差值显示,流速 A 的值小于 0.05,二压强 B 的值大于 0.05。这表明在整组实验中,因素 A 对整个系统温度有较大影响,因素 B 对系统温度影响较小。

6 结束语

本研究介绍了稀土超磁致伸缩致动器的发热及冷却问题,并通过理论分析、热流耦合仿真分析和正交实验等方法进行了具体研究。

实验结果表明:流速的变化对整个系统的温度有较大影响,入口处压强变化对系统温度影响较小;仿真与实验结果基本一致。

参考文献 (References) :

[1] YANG Z S, HE Z B, LI D W. Hydraulic amplifler design and its application to direct drive valve based on magnetos-
trictive actuator[J]. **Sensors and Actuators A: Physical**,

2014(216):52-63.
[2] 殷 毅. 稀土超磁致伸缩材料及其应用研究现状[J]. 磁性材料及器件,2018,49(3):57-60.
[3] JIA Z Y, LIU H F, WANG F J. Research on a novel force sensor based on giant magnetostrictive material and its model[J]. **Journal of Alloys & Compounds**,2011,509(5):1760-1767.
[4] 李鹏阳,刘 强,周玲霞. 超磁致伸缩超声换能器设计分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(5):1065-1075.
[5] GAO Jia-wei, HUANG Wen-mei, WANG Chao, et al. Giant magnetostrictive material stack structure dynamic model and performance analysis of eddy current loss[J]. **Micro motor**, 2017,45(8):24-27.
[6] 李立毅,严柏平,张成明. 驱动频率对超磁致伸缩致动器的损耗和温升特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2011,31(18):124-129.
[7] HO K. A constitutive model for magnetostriction based on thermodynamic framework [J]. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, 2016(412):250-254.
[8] 于文鑫,丁艳春,谭洪武,等. 基于 ATILA 的 Terfenol-D 棒输出特性分析[J]. 现代制造工程,2018(7):7-11.
[9] YANG J S, HE Z. Direct drive servo valve based on magnetostrictive actuator: multi-coupled modeling and its compound control strategy[J]. **Sensors and Actuators A Physical**, 2015(235):119 - 130.
[10] WANG W J, WANG T Q, TANG J. Design of thin low-frequency smart material based on giant magnetostrictive actuator[J]. **Materials Research Innovations**, 2014, 115(17):299-303.
[11] ZHU Y C, LI Y S. Development of a deflector-jet electrohydraulic servo-valve using a giant magnetostrictive material [J]. **Smart Materials and Structures**, 2014,11(23):1-19.
[12] 纪 良. 超磁致伸缩电静液作动器温度场分布与热位移特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电工程学院,2016.
[13] LI J Q, WU Y J, ZHANG L. Research on temperature controlling for gma based on direct liquid cooling[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**,2011,28(7):779.
[14] 明廷鑫,陶孟仑,黄志威,等. 一种超磁致伸缩致动器温度控制系统的设计与分析[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(9):106-112.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式: