

文章编号: 0253-9993(2006)03-0396-05

# 超磁致伸缩材料转换器喷嘴挡板 伺服阀的热变形补偿研究

于宗保

(安徽理工大学 机械工程系, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 介绍了 GMM (超磁致伸缩材料) 转换器热变形抑制的常用两种方法: 冷却和补偿方法, 分析了 GMM 转换器及喷嘴挡板阀的结构组成和工作原理. 针对伺服阀用 GMM 转换器的具体特点, 提出了一种新型的热变形补偿机构. 构建了基于 GMM 转换器喷嘴挡板阀的控制压力测试系统, 研究了基于 GMM 转换器的喷嘴挡板阀补偿机构的有效性和实用性. 结果表明, 提出的补偿机构能有效地补偿 GMM 棒的热变形, 提高了 GMM 转换器喷嘴挡板阀控制压力的输出精度.

**关键词:** 超磁致伸缩转换器; 伺服阀; 热变形补偿

中图分类号: TH137.52

文献标识码: A

## Study on thermal deformation compensation based on giant magnetostrictive material actuator for servo valve

YU Zong-bao

(Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Two common methods of thermal deformation compensation of the GMM (Giant Magnetostrictive Material) actuator, the compulsive cooling methods and the thermal compensation methods, were introduced. And the structure and work principle of the GMM actuator and the nozzle flapper valve were analyzed. A new thermal compensation mechanism was offered as well, considering the specific feature of the GMM actuator for the servo valve. Moreover the experimental system testing the control pressure was also constructed. The affectivity and practicability of the compensation mechanism was investigated. The results show that the thermal compensation mechanism can efficiently compensate for the thermal deformation of the GMM rod, and the accuracy of the control pressure of the GMA nozzle flapper valve is improved.

**Key words:** giant magnetostrictive material actuator; servo valve; thermal compensation

超磁致伸缩材料 (Giant Magnetostrictive Material, 简称为 GMM) 是一种能有效地实现电-磁-机械能 (信息) 转换的新型功能材料, 它的应用越来越受到国内外研究人员的关注. 具有磁致伸缩应变大、响应速度快、输出力大、带载能力强、磁-机耦合系数大、居里点温度高、工作性能稳定等优点<sup>[1]</sup>. 但 GMM 最大输出位移仅为数十微米, 而驱动线圈发热引起的 GMM 热变形量与转换器可控位移输出将处于同一数量级, 因此必须对热变形进行补偿, 使输出的可控位移不受热变形的影响, 以提高 GMM 转换器的输出精度. 结合伺服阀用 GMA (超磁致伸缩转换器, Giant Magnetostrictive Actuator, 简称为 GMA) 的结构特点, 提出了自适应温度实时补偿机构, 试验研究了基于 GMM 转换器喷嘴挡板阀补偿机构的实际补偿效果, 结

收稿日期: 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59835160); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目 (2003kj109)

作者简介: 于宗保 (1955-), 男, 安徽砀山人, 副教授. Tel: 0554-6668848, E-mail: yuzb@ aust. edu. cn

果表明,这种补偿机构能有效地提高 GMM 喷嘴挡板阀控制压力的输出特性,对于提高 GMM 电液伺服阀的控制压力精度具有重要意义。

## 1 热变形抑制方法

GMM 转换器中线圈发热及涡流、磁滞等损失导致 GMM 棒发热。GMM 对温度较为敏感,因总体变形量小,温度引起的变形不能忽视。因此必须采取有效措施减小发热,抑制热变形输出,这对提高 GMM 转换器乃至整个系统的精度至关重要。抑制热变形的方法有 2 种:①强制冷却方法。对大功率、超高精度系统,采用强制冷却的方法如水冷或油冷。冷却幅度、冷却管的布置须结合驱动线圈型式、GMM 转换器结构及功率损耗等而定。

图 1 为采用水冷的 GMM 转换器的结构<sup>[2,3]</sup>。这种冷却方式能精确地控制 GMM 棒的温度,基本保持 GMM 热变形不变,但它需要单独的冷却系统,水温控制系统比较复杂,成本高;同时液体长时间密封也是一个技术难题。②热补偿方法。对中、小功率系统而言,受空间和成本等因素限制,常采用特殊的补偿机构。其原理一般是利用 GMM 转换器中热胀系数与 GMM 大致相同的其它部件的热变形来补偿 GMM 棒的热变形输出,以消除或减小 GMM 棒的热变形对转换器输出的影响。

文献[4]介绍了一种利用 GMM 转换器外套的热致伸长,来抵消超磁致伸缩棒的热变形,减小因发热导致的 GMA 热变形输出。该方法结构简单,但由于外壳与 GMM 棒的温升相差较大,较难完全实现补偿,补偿量也不便控制。

文献[5]介绍了一种柔性支撑热补偿机构。如图 2 所示,其设计思路是利用线圈骨架的热变形,驱动补偿机构实时地调整超磁致伸缩棒一端支撑点的位置,位置的改变量与 GMM 棒热变形相当,从而在转换器趋近热平衡的过程中,抑制转换器的热输出。根据不同的工况,调整补偿机构,能最大限度地减小热变形输出,但这种补偿机构结构较复杂,径向体积大,零件数目多。

文献[6]介绍了一种双套的热补偿机构,其结构原理如图 3 所示。内套是导磁率很低的不锈钢材料,因其热胀系数与 GMM 相当,GMM 棒热变形由内套热致伸长补偿;外套是热胀系数很小的超因瓦低胀系数合金钢,其热胀系数仅为铁的 1/100,可看作是没有热变形的“固定”件。在超因瓦合金钢外套的固定下,内套和 GMM 棒产生大小基本相等,方向均朝驱动器内部的热变形,从而保证输出位移不受热变形的影响,提高了转换器的精度。

## 2 GMM 转换器结构与热补偿原理

综合 GMM 基本特性以及 GMA 设计理论,兼顾在电液伺服阀的实际结构,将 GMA 与喷嘴挡板阀设计为一体,这种结构形式更为紧凑且便于控制。GMA 喷嘴挡板阀结构原理如图 4 所示。预压力机构由前端盖、预压弹簧、调节螺钉等组成,作用是给 GMM 棒施加一定的预压力,以使其工作在线性段。同时,调节螺钉可以方便地对喷嘴与挡板之间的零位间隙进行调节。前端盖、后端盖、热补偿管、GMM 棒、输出

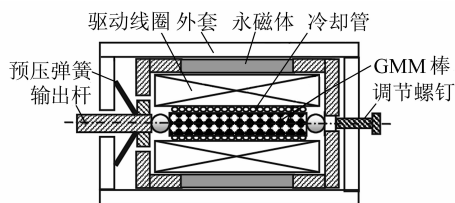


图 1 采用水冷的转换器结构原理  
Fig. 1 The structure principle of GMA cooled with water

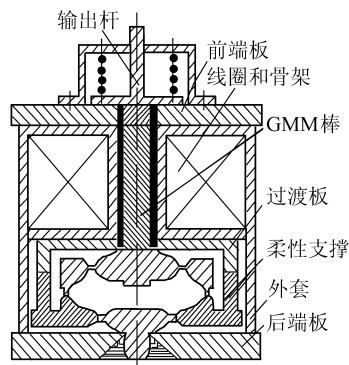


图 2 柔性支撑热补偿机构的结构  
Fig. 2 Schematic of thermal mompensation with resilient mounting

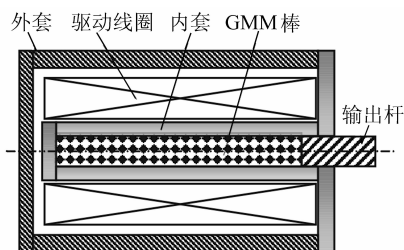


图 3 GMM 转换器内外套补偿机构  
Fig. 3 The thermal compensation structure of GMA with inner and outer coating

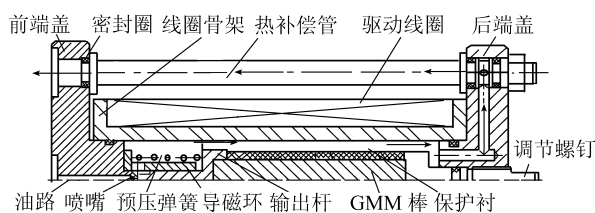


图 4 GMM 喷嘴挡板阀结构

Fig. 4 Structure of GMA nozzle valve

GMM 棒产生伸缩位移时与其所处的孔壁也要发生摩擦而产生热量。热变形实时补偿机构由热补偿管、后端盖及输出杆、线圈架与保护衬间的油液通道组成，其基本原理是利用喷嘴阀的泄漏油液流过 GMM 棒和热补偿管，一方面使转换器内部与热补偿管的温度基本相同；另一方面用泄漏油液冷却 GMM 棒。即用热补偿管的热致变形，抵消因油液温度的升高而使 GMM 棒热伸长，达到减小热变形对可控位移输出的影响，提高其精度，改善其综合性能的目的。选择与 GMM 热膨胀系数基本相同的材料作热补偿管，热补偿管的长度与 GMM 棒、导磁环、输出杆及其附件的总长基本相等。

### 3 理论基础

如同其它电子元器件相类似，GMM 转换器内部的发热、导热过程比较复杂，假设材料各向同性，其温度分布可根据带热源的非稳态导热微分方程进行计算，即

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{I^2(t)R}{\lambda V}, \quad (1)$$

式中， $\alpha$  为热扩散率； $t$  为温度； $I$  为驱动线圈电流； $\tau$  为时间； $R$  为驱动线圈电阻； $\lambda$  为热导率； $V$  为导热体体积； $r, z, \theta$  为圆柱坐标。

从 GMM 转换器及喷嘴挡板阀的工作过程看：发热由电机和液压阻力损失引起，因此理论计算非常复杂。从 GMM 转换器及喷嘴挡板阀的结构原理可知，驱动线圈产生的热量一部分由线圈外表面及两端面传向周围环境；另一部分通过线圈的内表面传向 GMM 棒，这部分热量对 GMM 棒的热变形才有影响。油液经 GMM 喷嘴挡板阀的喷嘴引起功率损失而产生的温度变化量可按下式计算，即

$$(p_c - p_0)Q = cm\Delta T, \quad (2)$$

式中， $p_c$  为控制压力； $Q$  为油液经喷嘴的流量； $c$  为油液比热容， $c = 0.188 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； $m$  为单位时间的油液质量， $m = Q\rho$ ； $\rho$  为油液密度， $\rho = 850 \text{ kg}/\text{m}^3$ ； $\Delta T$  为温度变化量； $p_0$  为喷嘴出口压力，包括油液流经 GMM 转换器内、外管路而引起的沿程压力损失和各类局部压力损失，即

$$p_0 = \left(\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} + \sum \xi_1\right) \frac{\rho v_1^2}{2} + \left(\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \xi_2\right) \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (3)$$

代入相关数据，将式 (2) 整理可得

$$\Delta T = (p_c - p_0)/c\rho = 0.06 \times 10^{-5} (p_c - p_0). \quad (4)$$

线圈骨架和 GMM 棒的轴向热变形量  $\Delta L$  的近似计算为

$$\Delta L = \frac{2La}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} (T_2 - T_1) r dr, \quad (5)$$

式中， $L$  为材料的轴向长度； $a$  为材料的线膨胀系数，GMM 棒为  $12.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ ，Q235 钢为  $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ ； $r_1, r_2$  分别为柱形材料的内、外半径； $T_1, T_2$  分别为柱形材料的起始温度。

利用式 (5) 对应不同温升，可计算 GMM 转换器内部的相应热变形量，从而作为确定热补偿管及相关结构参数的初步设计依据。若假设 GMM 转换器内部与外部油液温升相同，且已知 GMM 棒、输出杆等的长度，则外部热补偿管的长度应满足

$$L_1\alpha_1 = L_2\alpha_2 + L_3\alpha_3 + L_4\alpha_4, \quad (6)$$

式中,  $\alpha_1 \sim \alpha_4$  为热补偿管、GMM 棒、输出杆和前端盖的轴向线膨胀系数;  $L_1 \sim L_4$  为热补偿管、GMM 棒、输出杆和前端盖的轴向长度。

线圈发热还引起线圈漆包线电阻增加, 这导致输入电流下降。漆包线中的铜线可看成纯铜, 其电阻值随温度变化的关系式为

$$R_2 = R_1(1 + K_1\Delta T), \quad (7)$$

式中,  $R_1, R_2$  为温度变化前后的电阻,  $R = \rho L/S$ ,  $S$  为导线面积;  $K_1$  为电温系数,  $K_1 = 3.93 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 测试系统

GMA 喷嘴挡板阀控制压力的测试系统如图 5 所示。油液经精滤油器过滤后由油泵供给, 油泵由 3 kW 电机驱动, 供油压力由精密压力阀设定, 压力调节范围为 0 ~ 16 MPa。油液经换向阀向 GMA 喷嘴挡板阀 (由图 3 的阀块和 GMM 转换器组成) 供液。为减小压力损失, 提高压力灵敏度, 压力传感器与控制腔紧密相连。压力传感器测得的压力由数字示波器显示。GMA 的输出杆为挡板, 当输入不同的电流信号时, 喷嘴和挡板间的距离随之改变, 从而达到调节控制腔压力的目的。

### 4.2 试验结果分析

试验时, 喷嘴和挡板间的零位间隙  $x_0 = 0.1 \text{ mm}$ ,  $x_0/D_N = 1/12$  ( $D_N$  为喷嘴直径),  $p_c/p_s = 0.65 \sim 0.80$  ( $p_s$  为供油压力), 以获得最佳的控制压力输出。给偏置线圈加一固定电流, 给激励线圈加一可调电流且最大输入电流为 1.5 A, 研究不同输入电流时, GMA 喷嘴挡板阀补偿机构的热补偿实际效果。分别在冬天和夏天, 对不同供油压力时的 GMA 喷嘴挡板阀控制压力进行测定, 以验证补偿机构的有效性和实用性。在实验初期温度上升较快, 但当温度达到一定值时, 温度上升则很慢。转换器、管路及油箱外壁的散热, 最终与驱动线圈、电机和液压阻力损失等引起的发热达到热平衡, 这时温度不再升高。图 6 为冬天和夏天时, 温度与 GMA 喷嘴挡板阀控制压力的关系曲线。

由图 6 可以看出, 温度变化试验测定的控制压力与理想值虽有差异但基本相同, 这表明

因温度变化而引起的热致变形对控制压力无明显变化, 即无论是冬天还是夏天, GMA 喷嘴挡板阀的温度实时补偿机构都能有效地补偿 GMM 棒的热变形, 因此这种结构形式的补偿机构是切实可行的。

## 5 结 语

针对 GMM 转换器热变形输出严重影响驱动器输出精度的问题, 结合伺服阀用转换器的具体特点, 提

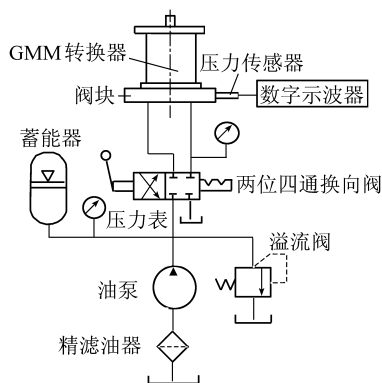


图5 GMA 喷嘴挡板阀液压及测试系统

Fig. 5 The hydraulic and test system with GMA nozzle valve

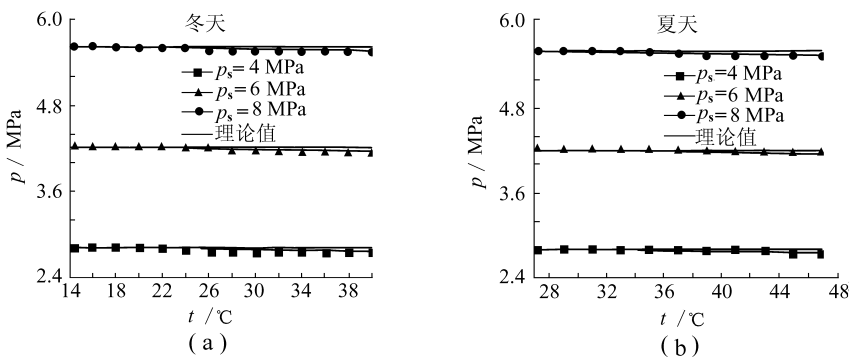


图6 控制压力试验曲线

Fig. 6 The experimental curves of control pressure

出了一种新型的热变形补偿机构即温度实时补偿机构, 试验研究了基于 GMM 转换器的喷嘴挡板阀补偿机构的有效性和实用性. 试验结果表明, 提出的补偿机构能有效地补偿 GMM 棒的热变形, 提高了 GMM 转换器喷嘴挡板阀的控制压力的输出精度.

### 参考文献:

- [1] 王传礼, 丁凡, 张凯军. 基于超磁致伸缩转换器的流体控制阀及其关键技术 [J]. 农业机械学报, 2003, 34 (5): 164 ~ 167.
- [2] 贾宇辉, 谭久彬. 超磁致伸缩材料微位移驱动系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 21 (1): 38 ~ 41.
- [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, 37 (11): 46 ~ 49.
- [4] Takahiro U. Development of a valve using a giant magnetostrictive actuator [A]. Proceeding of the Second JHPS International Symposium on Fluid Power [C]. Edited by T Maeda. Tokyo, 1993. 131 ~ 135.
- [5] 夏春林, 丁凡, 路雨祥. 超磁致伸缩电机转换器的热补偿的实验研究 [J]. 中国机械工程, 1999, 10 (5): 563 ~ 565.
- [6] Yoshio Y, Hiroshi E, Jun S. Micro positioning and actuation devices using giant magnetostrictive materials [A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics [C]. San Francisco, USA, 2000. 3 635 ~ 3 640.
- [7] 孟庆龙, 颜威利. 电器数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

## “2006 年煤矿灾害事故预测、预警及控制技术学术研讨会” 征文启事

为深入贯彻全国安全生产工作会议精神, 全面落实“安全第一、预防为主、综合治理”的工作方针, 《煤炭科学技术》杂志社、《煤炭学报》编辑部联合国家安全生产专家组煤矿组将于 2006 年第 3 季度举办“2006 年煤矿灾害事故预测、预警及控制技术学术研讨会”(会议地点、时间另行通知), 现征集有关论文.

### 1 征文内容

(1) 煤矿灾害事故隐患诊断与评价. 煤矿主要灾害、隐患的辨识, 风险评价, 危险分析、分级、管理等; (2) 煤矿灾害事故监测预警技术. 煤与瓦斯突出, 冲击地压, 瓦斯、煤尘爆炸, 煤炭自燃, 矿井突水等灾害的预测预报技术, 数字化煤矿安全监测监控与联网技术等; (3) 煤矿灾害事故防治技术. 煤与瓦斯突出, 瓦斯、火灾, 水害, 动力灾害(含顶板)等主要自然灾害防治所取得的技术成果、治理经验、管理措施等; (4) 煤矿灾害事故应急救援技术. 煤与瓦斯突出, 瓦斯、粉尘爆炸, 火灾、水灾等煤矿灾害的应急救援技术等; (5) 其他. 煤矿职业安全健康管理体系、安全文化与安全文化建设等.

论文字数以不超过 6 000 字为宜, 研讨会组委会将邀请有关专家对论文进行评审, 评选出优秀论文一等奖 2 篇, 二等奖 4 篇, 三等奖 6 篇, 对获奖优秀论文将推荐到《煤炭科学技术》或《煤炭学报》杂志上发表, 并对优秀论文作者颁发证书及奖金. 另外, 此次通过评审的会议论文将正式出版.

### 2 会议主办单位

国家安全生产专家组煤矿组; 《煤炭科学技术》杂志社; 《煤炭学报》编辑部.

征文截止时间: 2006 年 7 月 31 日. 投稿可通过邮寄或电子邮件, 不论采用哪种方式都请在明显处标明“研讨会征文”字样. 投稿时请附“电话、手机、详细通信地址和作者简介”.

邮 寄: 北京市和平里青年沟路 5 号《煤炭科学技术》编辑部 邮 编: 100013

电子信箱: cst410@china.com, mtxbhjp@126.com 联系人: 赵瑞, 韩晋平

电 话: 010-84262926, 010-84262930