

文章编号:1000-8055(2017)05-1066-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.05.006

## 超磁致伸缩执行器热损耗模型与实验

纪良, 朱玉川, 杨旭磊, 费尚书, 郭亚子

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘 要:** 针对高频大电流驱动下超磁致伸缩执行器发热严重影响其有效位移输出精度的问题, 采用管式冷却结构措施以抑制执行器温升. 根据欧姆定律建立交流(AC)与直流(DC)电同时作用下执行器电阻损耗理论模型, 基于麦克斯韦方程推导出磁致伸缩棒内部磁场方程及涡流损耗模型, 从复数磁导率虚部出发得出磁致伸缩棒磁滞损耗模型. 求解上述模型可知: 当驱动频率达到 50 Hz 时, 磁致伸缩棒损耗占执行器总损耗 5%. 通过搭建执行器热特性测试实验台, 实验测得执行器损耗与理论计算结果吻合良好; 管式冷却具有较好的冷却效果, 可将磁致伸缩棒温度控制在 50 °C 以内, 其实验结果与有限元仿真结果最大误差为 3 °C 以内, 进一步验证热损耗计算公式有效性并为精密超磁致伸缩执行器的设计和应用提供了理论支持.

**关键词:** 超磁致伸缩执行器; 热损耗; 电阻损耗; 涡流损耗; 磁滞损耗; 有限元

中图分类号: V227; TH137

文献标志码: A

### Theoretical analysis and experiment of power loss in giant magnetostrictive actuator

JI Liang, ZHU Yu-chuan, YANG Xu-lei, FEI Shang-shu, GUO Ya-zi

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The performance of giant magnetostrictive actuator (GMA) is seriously affected by temperature rising under high frequency large current. In order to reduce GMA's temperature, pipe cooling was presented and its working principle was introduced. According to Ohm's law, coil loss was obtained under the action of alternating current (AC) and direct current (DC). Based on Maxwell equation and imaginary part of complex permeability, the eddy current loss and hysteresis loss of GMM were deduced, respectively. Then, it was found that GMM power loss accounted for 5% of GMA power loss when the drive frequency reached 50 Hz. Finally, the experiment platform of GMA thermal characteristic was built and the result indicated that the calculation of GMA power loss was in good agreement with that of theory. And the pipe cooling had good cooling effect on GMA temperature. GMM rod temperature could be controlled within 50 °C. The maximum error of the experiment and simulation was within 3 °C. The research result further indicates the calculation of GMA power loss is valid and has a significant guidance for the design and application of GMA.

**Key words:** giant magnetostrictive actuator; power loss; coil loss; eddy current loss; hysteresis loss; finite element method

收稿日期: 2015-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51575258); 江苏省自然科学基金(BK20131359); 航空科学基金(20130652011)

作者简介: 纪良(1990-), 男, 硕士生, 主要从事智能材料电液控制技术研究.

引用格式: 纪良, 朱玉川, 杨旭磊, 等. 超磁致伸缩执行器热损耗模型与实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1066-1073. JI Liang, ZHU Yuchuan, YANG Xulei, et al. Theoretical analysis and experiment of power loss in giant magnetostrictive actuator [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1066-1073.

作为新型功能材料,超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material, GMM)具有输出应变大、响应速度快、位移分辨率高等特点<sup>[1]</sup>. 美国马里兰大学 John, Ellison 等<sup>[2-3]</sup>利用 GMM 磁致伸缩效应制成了超磁致伸缩执行器(giant magnetostrictive actuator, GMA)并用于直升机旋翼的自动变距拉杆中;法国 Cedrat 技术公司<sup>[4]</sup>利用 GMA 制成电静液作动器并配以主动阀用于多电飞机中;俄亥俄州立大学 Rupinsky 等<sup>[5]</sup>基于 GMA 研制出了一种用于飞机机翼控制的新型电静液作动器. 其中, GMA 工作性能主要由 GMM 棒的输出位移精度决定,但在高频大电流工作条件下,由于 GMM 电阻率较小使 GMM 棒产生较大的涡流损耗;同时, GMM 棒在磁化过程中存在磁滞现象,不仅使 GMA 位移输出呈非线性还会产生磁滞损耗;此外, GMA 驱动线圈也会产生大量焦耳热<sup>[6-7]</sup>. 由于执行器内部空间较为封闭散热性能差,这些损耗最终转化成热量使 GMA 内部温度快速上升. 而 GMM 对温度变化比较敏感, Clark 等<sup>[8]</sup>实验测得在 30~50℃ 范围内 GMM 的磁致伸缩系数较大且较稳定;其次, GMM 棒热膨胀位移与磁致应变位移属同一个数量级<sup>[9]</sup>. 因此,为保证 GMA 位移输出精度,必须采取有效措施对 GMA 进行温度控制,而对 GMA 温度控制的前提是对其热功率损耗进行准确建模与计算,以为温控系统的设计提供理论指导.

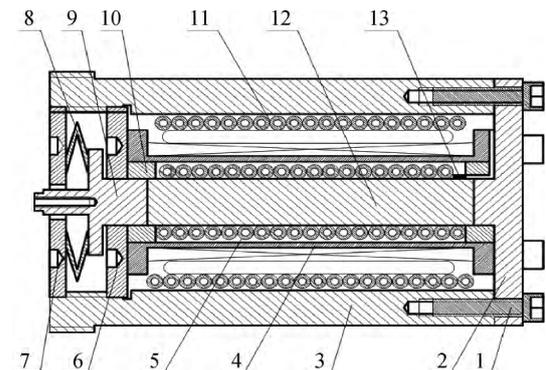
Takahashi 等<sup>[10]</sup>通过测量稳态时 GMA 温度计算出 GMA 的总损耗,并对不同频率下 GMA 总损耗进行曲线拟合得到线圈电阻损耗和 GMM 棒损耗; Engdahl 等<sup>[11]</sup>对 GMA 损耗进行数值模拟分析,得到不同工况下线圈电阻损耗、GMM 棒中涡流和磁滞损耗;朱玉川等<sup>[12]</sup>通过求解准静态时 GMA 损耗,建立基于腔式冷却的 GMA 传热模型,实验结果与理论模型吻合较好;李立毅等<sup>[7]</sup>通过求解磁弹性力作用下 GMM 棒内磁场表达式,进而求得 GMM 棒内的涡流、磁滞损耗并分析了这些损耗的频率特性;曾海泉等<sup>[13]</sup>在考虑涡流和附加损耗的 Jiles-Atherton 模型基础上,计算出 GMM 棒在考虑了涡流损耗及附加损耗后的磁滞总损耗及线圈电阻损耗,但上述损耗计算模型较复杂所需辨识参数较多且较难测定.

本文根据欧姆定律和集肤效应计算出 GMA 驱动线圈的电阻损耗. 同时,基于麦克斯韦方程推导了 GMM 棒内部磁场方程并得出 GMM 棒涡流损耗计算公式,由复数磁导率虚部出发推出磁

滞损耗公式;分析了驱动频率对线圈损耗, GMM 棒中涡流、磁滞损耗以及 GMA 总功率损耗的影响;然后对 GMA 传热与 GMM 棒温升进行了有限元数值模拟. 最后实验测得不同工作频率下 GMM 棒和 GMA 功率损耗,对理论建模结果进行了验证. 为提高 GMA 精度,采用内外冷水管式冷却结构对 GMA 进行冷却,其实验结果与有限元模拟结果相吻合,进一步验证了 GMA 功率损耗计算公式的有效性并为基于 GMM 的精密执行器的设计和应用提供了热结构设计参考理论与依据.

## 1 管式冷却 GMA 结构及原理

管式冷却 GMA 结构如图 1 所示,预紧端盖压缩碟簧为执行器提供预压力使其工作在最佳状态. 驱动线圈通入偏置直流电使其产生偏置磁场以防止 GMM 棒出现倍频现象. 外壳、导磁块、输出杆、GMM 棒和底座构成闭合磁路,励磁线圈通入交流电产生交变磁场以驱动 GMM 棒轴向伸缩运动并由输出杆输出位移;在 GMM 棒外侧粘贴 Pt100 温度传感器以实时监测其工作温度,采用尼龙材质的线圈骨架可抑制线圈电阻热传导到 GMM 棒上. 同时,在 GMM 棒和线圈外侧分别缠绕冷水管以及时转移线圈和 GMM 棒产生的热量从而降低温度对执行器输出性能的影响.



1 螺栓; 2 底座; 3 外壳; 4 线圈骨架; 5 内冷水管;  
6 导磁块; 7 预紧端盖; 8 碟簧; 9 输出杆;  
10 GMM 棒; 11 外冷水管; 12 固定环

图 1 管式冷却 GMA 结构原理示意图

Fig. 1 Structure diagram of pipe cooling GMA

## 2 GMA 热功率损耗理论模型

### 2.1 线圈电阻损耗

GMA 驱动线圈通电产生磁场以驱动 GMM 棒工作时会产生大量的线圈电阻损耗,这些损耗最终转换成热量传递至 GMM 棒,促使 GMM 棒

发生热变形从而降低 GMA 位移输出精度. 线圈电阻损耗主要包括偏置电流产生的直流损耗和高频工况下考虑线圈集肤效应对电阻影响的交流损耗. 驱动线圈基本机构尺寸如图 2 所示.

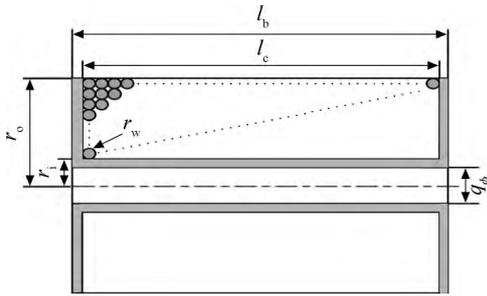


图 2 GMA 驱动线圈结构图

Fig. 2 Structure diagram of exciting coil

漆包线长度

$$l_{cu} = \pi(r_i + r_o)N \quad (1)$$

式中  $r_i$  为线圈内径,  $r_o$  为线圈外径,  $N$  为线圈匝数.

线圈电阻

$$R_{dc} = \rho_{cu} \frac{l_{cu}}{A_{cu}} \quad (2)$$

式中  $A_{cu} = \pi r_w^2$  为漆包线截面积,  $r_w$  为漆包线内径,  $\rho_{cu}$  为线圈电阻率.

由偏置电流引起的电阻损耗

$$P_{c1} = I_d^2 R_{dc} = \frac{\rho_{cu}(r_i + r_o)N}{r_w^2} I_d^2 \quad (3)$$

式中  $I_d$  为偏置电流.

在高频工况下, 交变电流通过线圈会产生集肤效应, 由集肤效应产生的电阻<sup>[14]</sup>

$$R_{ac} = \frac{l_{cu}}{2\pi r_w} \cdot \sqrt{\pi f \mu_{cu} \rho_{cu}} \quad (4)$$

式中  $f$  为电流驱动频率,  $\mu_{cu}$  为线圈磁导率.

则由交变电流引起的电阻损耗

$$P_{c2} = I_m^2 \cdot \sqrt{R_{dc}^2 + R_{ac}^2} = \frac{(r_i + r_o)N \cdot I_m^2}{4r_w^2} \sqrt{4\rho_{cu}^2 + \pi f \mu_{cu} \rho_{cu} r_w^2} \quad (5)$$

式中  $I_m$  为驱动电流幅值.

由式(3)和式(5)可算出驱动线圈产生的电阻损耗为

$$P_c = P_{c1} + P_{c2} \quad (6)$$

## 2.2 GMM 棒涡流损耗

除了 GMA 驱动线圈产生的电阻损耗外, 由于 GMM 棒电阻率较小, GMM 棒本身在交变磁场作用下会产生涡流损耗. 尤其是在高频驱动工况下, GMM 棒内部的涡流损耗将是 GMA 中不可忽略的热源<sup>[15]</sup>.

在 GMM 棒中, 励磁磁场主要集中在轴线方向. 根据麦克斯韦方程并忽略位移电流的影响, GMM 棒中磁场方程可简化为

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} = j\omega \sigma_{gmm} \mu H \quad (7)$$

式中  $H$  为磁场强度;  $r$  为 GMM 棒径向坐标参量;  $\omega$  为线圈驱动角频率;  $\sigma_{gmm}$  为 GMM 棒电导率,  $\sigma_{gmm} = 1/\rho_{gmm}$ , 其中  $\rho_{gmm}$  为 GMM 棒电阻率; GMM 棒磁导率  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ , 其中  $\mu_r$  为 GMM 棒相对磁导率,  $\mu_0$  为真空磁导.

磁场强度幅值<sup>[16]</sup>

$$H_m = \frac{NI_m}{K_f l_{gmm}} \quad (8)$$

式中  $l_{gmm}$  为 GMM 棒长度,  $K_f$  为漏磁系数.

联立边界条件  $|H(r_i)| < +\infty$ ,  $H(r_{gmm}) = H_m$  可得 GMM 棒轴心  $r$  处的磁场方程<sup>[17]</sup>

$$H(r, t) = H_m \frac{J_0(r\beta)}{J_0(r_{gmm}\beta)} e^{j\omega t} \quad (9)$$

式中  $\beta = \sqrt{-j\omega \sigma_{gmm} \mu}$ ,  $r_{gmm}$  为 GMM 棒半径,  $r$  为  $(0, r_{gmm})$  内的任意参量,  $J_0$  为 0 阶第一类柱贝塞尔函数.

由式(9)得, 在半径为  $r$  区域内磁通量为

$$\Phi = \int_0^r B \cdot 2\pi r dr = \int_0^r \mu H(r, t) \cdot 2\pi r dr \quad (10)$$

由于磁通量是随时间变化的, 因此将在 GMM 棒内部产生感应电动势

$$E = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -2\pi \mu \int_0^r r \frac{\partial H}{\partial t} dr \quad (11)$$

在励磁磁场  $H = H_m e^{j\omega t}$  作用下, 由式(9)~式(11)得 GMM 棒内涡流密度

$$\Delta(r, t) = \sigma \frac{E}{2\pi r} = \frac{\beta H_m e^{j\omega t} J_1(r\beta)}{J_0(r_{gmm}\beta)} \quad (12)$$

式中  $J_1$  为 1 阶第一类柱贝塞尔函数.

由于实际采用的磁致伸缩棒长径比较大 ( $>6$ ), 假设材料内部磁场分布均匀, 则 GMM 棒内的涡流密度为

$$\Delta(t) = \frac{\beta H_m e^{j\omega t} J_1(r_{gmm}\beta)}{J_0(r_{gmm}\beta)} \quad (13)$$

由式(13)可知单位时间内 GMM 棒上的涡流损耗

$$P_e = f \int_0^{1/f} \int_0^{r_{gmm}} \frac{|\Delta(t)|^2}{\sigma_{gmm}} 2\pi r l_{gmm} dr dt = \frac{\pi l_{gmm} r_{gmm}^2 \omega^2 B_m^2 J_1^2}{2\beta^2 \rho_{gmm} J_0^2} \quad (14)$$

式中  $B_m$  为磁感应强度幅值.

由式(14)可知, GMM 棒涡流损耗与频率呈二次函数关系, 随着频率增大 GMM 棒涡流损耗

迅速增加;驱动电流越大产生的交变磁场越强,GMM 棒的涡流损耗越大;同时,涡流损耗还与材料电阻率成反比.

### 2.3 GMM 棒磁滞损耗

在交变磁场作用下,GMM 棒不仅产生涡流损耗.同时,GMM 棒内部磁畴在转向磁场方向因克服摩擦而产生磁滞损耗<sup>[18]</sup>.由式(9)可知,复数  $J_0(r\beta)/J_0(r_{gmm}\beta)$  表明在外磁场作用下磁感应强度  $B$  与磁场  $H$  之间存在相位角  $\alpha$ ,即损耗角<sup>[1]</sup>.损耗角的存在使得 GMM 在磁化和退磁过程中产生磁滞损耗,此时磁感应强度为

$$B = B_m e^{j(\omega t - \alpha)} \quad (15)$$

在交变磁场中,GMM 复数磁导率为

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} e^{-j\alpha} = \mu_r - j\mu_i \quad (16)$$

式中相对磁导率  $\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \cos \alpha$ , 虚部磁导率

$$\mu_i = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \sin \alpha$$

则单位时间内 GMM 磁滞损耗为

$$P_h = V \frac{1}{T} \int_0^T H dB = \frac{\pi}{2} l_{gmm} \omega \mu_i \mu_0 r_{gmm}^2 H_m^2 \quad (17)$$

由式(17)可知,GMM 磁滞损耗与驱动频率成正比,与复数磁导率实部无关只与虚部有关,与磁场强度幅值以及 GMM 棒的半径呈二次函数关系.

由式(14)和式(17)可得 GMM 棒损耗为

$$P_{gmm} = P_e + P_h \quad (18)$$

由式(6)、式(14)和式(17)可得 GMA 总功率损耗为

$$P_{gma} = P_c + P_e + P_h \quad (19)$$

结合表 1 中的 GMA 参数,根据式(6)、式(14)和式(17)可得驱动电流幅值为 1A 时,线圈电阻损耗、GMM 棒涡流和磁滞损耗的频率特性如图 3 所示.线圈电阻损耗随频率变化较小,而 GMM 棒的涡流和磁滞损耗随着频率的增加而增大,当驱动频率超过 800 Hz 时,GMM 棒上的涡流损耗超过磁滞损耗,且其值随着驱动频率的增加而快速增大.

根据式(18)、式(19)和表 1 中 GMA 参数可得不同驱动电流下 GMM 棒损耗和 GMA 总损耗与驱动频率的关系分别如图 4 和图 5 所示,GMM 棒损耗和 GMA 总损耗随着驱动频率的增加不断增大,驱动电流越大产生的磁场越强,致使 GMM 棒上的涡流损耗和磁滞损耗越严重.由图 4 可知,

表 1 GMA 基本参数

Table 1 Basic parameters of GMA

参数	数值
线圈内径 $r_i$ /mm	12.6
线圈外径 $r_o$ /mm	19.2
线圈长度 $l_c$ /mm	80
线圈匝数 $N$	800
漆包线内径 $r_w$ /mm	0.35
漆包线电阻率 $\rho_{cu}/10^{-8}(\Omega \cdot m)$	1.7
漆包线磁导率 $\mu_{cu}/10^{-7}(H/m)$	$4\pi$
线圈骨架内径 $\phi_b$ /mm	21
线圈骨架长度 $l_b$ /mm	90
GMM 棒半径 $r_{gmm}$ /mm	6.5
GMM 棒长度 $l_{gmm}$ /mm	80
GMM 电导率 $\sigma_{gmm}/10^6(S/m)$	1.67
GMM 相对磁导率 $\mu_r$	3
GMM 虚部磁导率 $\mu_i$	2
漏磁系数 $K_f$	1.4

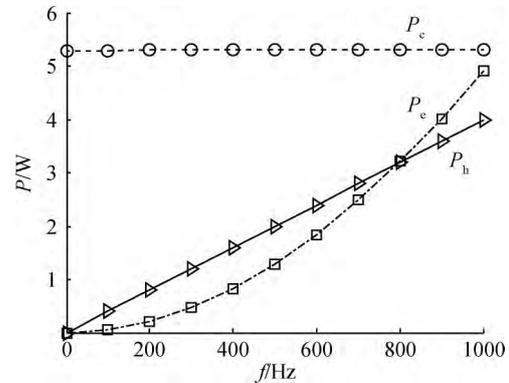


图 3 线圈、GMM 棒涡流和磁滞损耗的频率特性

( $I_m = 1 A$ )

Fig. 3 Frequency character of coil loss, eddy current loss and hysteresis loss of GMM rod

( $I_m = 1 A$ )

低频驱动时( $<50 Hz$ ),GMM 棒上的涡流损耗和磁滞损耗较小,此时 GMA 功率损耗主要以线圈电阻损耗为主;当高频驱动时( $>50 Hz$ ),GMM 棒中的涡流损耗和磁滞损耗快速增大,此时 GMA 功率损耗除了线圈电阻损耗还包括 GMM 棒上的涡流损耗和磁滞损耗.由于线圈电阻损耗随频率变化较小.因而,由图 5 可知,当驱动频率达到 50 Hz 时,GMM 棒损耗占 GMA 总功率损耗 5%,且该比例随着驱动频率的增加而快速增大.这些损耗最终转换成热量影响 GMA 位移输出精度.因此,GMA 在长时间工作时需要采取一定的

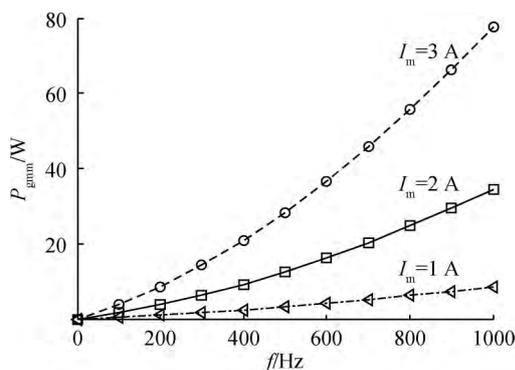


图 4 GMM 棒功率损耗的频率特性

Fig. 4 Frequency character of power loss in GMM rod

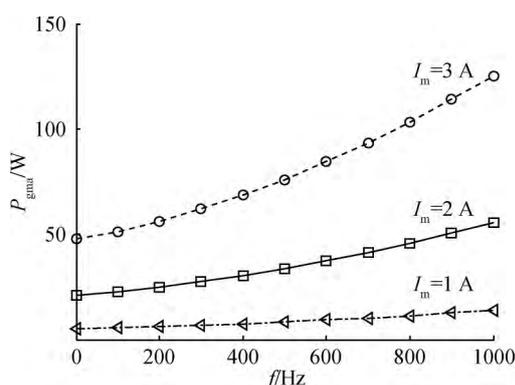


图 5 GMA 总能量损耗的频率特性

Fig. 5 Frequency character of total loss in GMA

冷却措施来对其进行冷却以保证其工作性能。

### 3 GMA 传热与 GMM 棒温升模拟

采用 ANSYS 14.0 有限元仿真软件对 GMA 冷却进行仿真与分析。由图 5 可知驱动频率为 100 Hz, 电流幅值分别为 1, 2, 3 A 时对应的 GMA 总损耗分别为 6.0, 24.1, 54.2 W, 将其作为有限元仿真热源的输入值, 在 GMM 棒和线圈内外侧分别缠绕冷水管对 GMA 进行强制冷却, 冷却液温度为 26 °C, 流速为 0.2 m/s, 冷却管与热源接触部分服从第二类边界条件, 冷却管内壁服从第三类边界条件, 其稳态温度分布云图如图 6 所示。

由图 6(a)~图 6(c)可知: 驱动电流幅值分别为 1, 2, 3 A 时, 可将 GMM 棒温度控制在 31, 40, 50 °C 左右, 而线圈最高温度可分别控制在 51, 62, 69 °C 左右。采用管式冷却能够及时的将 GMM 棒和线圈产生的热量转移出去, 因此, 该冷却方式具有较好的冷却效果。同时, 采用尼龙制成的线圈骨架具有较好隔热作用, 能减少线圈向 GMM 棒以及执行器的上、下端盖传热。

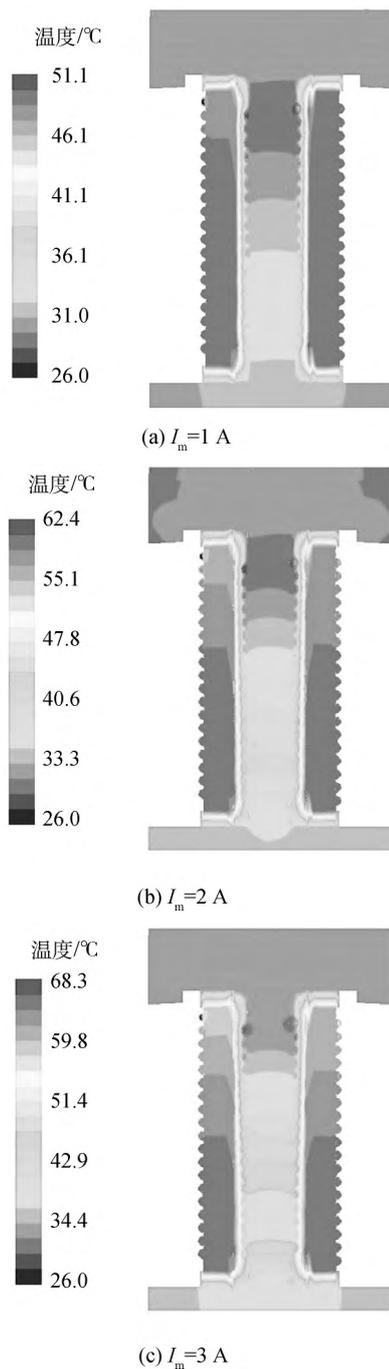


图 6 不同驱动电流时 GMA 强制冷却温度分布云图 (100 Hz)

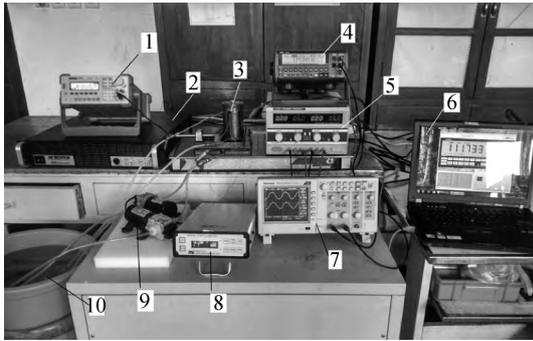
Fig. 6 Temperature distribution of GMA under different drive current at 100 Hz

## 4 实验

### 4.1 GMA 热特性测试实验台构建

为获取试验所需数据, 搭建 GMA 热特性测试实验台如图 7 所示。

图 7 中信号发生器通过功率放大器为执行器提供频率与幅值均可调节的驱动电流, 在 GMM



1 信号发生器; 2 功率放大器; 3 GMA 执行器;  
4 万用表; 5 直流电源; 6 计算机; 7 示波器;  
8 磁通计; 9 隔膜水泵; 10 冷却水

图 7 GMA 热特性测试热实验台

Fig. 7 Thermal characteristics experiment platform of GMA

棒外表面粘贴 Pt100 温度传感器,利用万用表测量 Pt100 电阻值并由计算机每隔 2 min 记录一次万用表所测值,示波器用来测量信号发生器和磁通计输出的信号,直流电源驱动水泵抽取冷却水对 GMM 棒和线圈进行冷却.

4.2 GMA 热功率损耗实验

由实验获得 GMM 棒中磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$ ,并计算  $B-H$  滞环面积,将所得面积乘以 GMM 棒体积及相应的驱动频率得到单位时间内 GMM 棒的功率损耗,图 8 为实验测得 GMM 棒损耗与理论计算结果的对比,将 GMM 棒损耗与单位时间内线圈电阻损耗叠加即可得 GMA 总功率损耗  $P_{gma}$ .图 9 为实验测得 GMA 总功率损耗与理论计算损耗的对比.由图 8 和图 9 可知,GMM 棒功率损耗和 GMA 总功率损耗随着驱动频率的增加呈二次函数关系变化,由于磁致伸缩材料的磁导率较小且在理论计算过程中假设了材料内部磁场分布均匀,同时,GMA 存在一

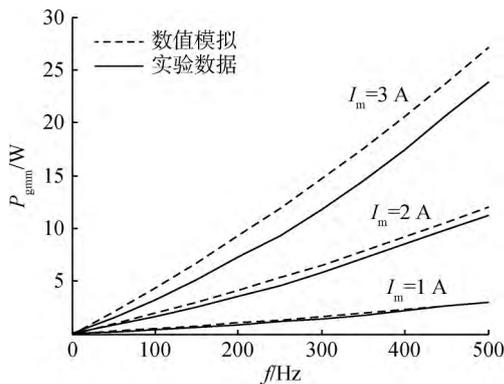


图 8 GMM 棒功率损耗

Fig. 8 Power consumption in GMM rod

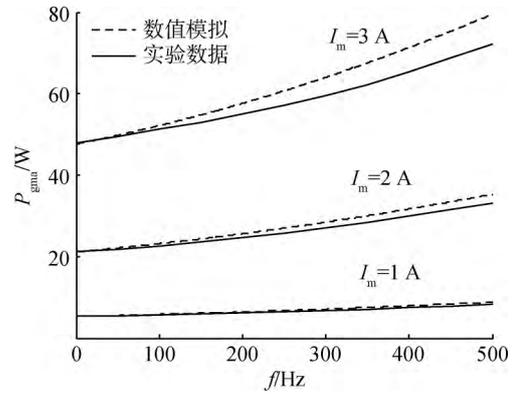


图 9 GMA 总功率损耗

Fig. 9 Power consumption in GMA

定的漏磁现象从而削弱了 GMM 棒中的有效磁场,冷却管的使用进一步削弱了 GMM 棒中的有效磁场,因而,理论计算得到的 GMA 总损耗数据要大于实验测得的数据,在低频驱动时,理论计算结果与实验结果较吻合,但随着驱动频率增加,两者损耗的数据偏差也将增大.所以公式适合于中低频下 GMA 功率损耗的计算.

4.3 GMA 传热与 GMM 棒温升实验

图 10 为驱动电流频率为 100 Hz,驱动电流幅值分别为 1,2,3 A 时 GMM 棒表面温度 ( $t_{gmm}$ ) 变化图.其中图 10(a)为无任何冷却措施时 GMM 棒表面温度随时间变化图,图 10(b)为采用管式冷却时 GMM 棒表面温度随时间变化图.由图 10(a)可知,没有冷却措施时 GMM 棒表面温度随时间增加迅速增大,同时,驱动电流越大 GMA 产生的热量也越多使得 GMM 棒表面温度也越高,驱动电流为 3 A 时,通电 14 min 后 GMM 棒的温度可迅速达到 100℃ 已严重影响 GMA 工作性能.因此,GMA 长时间工作时必须采取必要的冷却措施.由图 10(b)可知,采用冷水管通水强制冷却具有较好的冷却效果,驱动电流幅值分别 1,2,3 A 时,强制冷却 80 min 后骨架内腔温度趋于热平衡,GMM 棒表面温度波动较小,此时 GMM 棒表面温度分别为 30,38,48℃.同时,从图 10(b)可知,电流越大 GMA 产生的热量越多 GMM 棒表面温度也越高,GMA 达到热平衡所需的时间也越长.

表 2 为稳态时 GMM 棒表面温度有限元仿真值与实验测得值的对比.

由表 2 可知,实验冷却结果与仿真冷却结果较为接近其最大误差为 3℃ 以内,从而验证有限元仿真的正确性并进一步验证了 GMA 热功率损耗计算公式的有效性.同时,该冷却系统能将

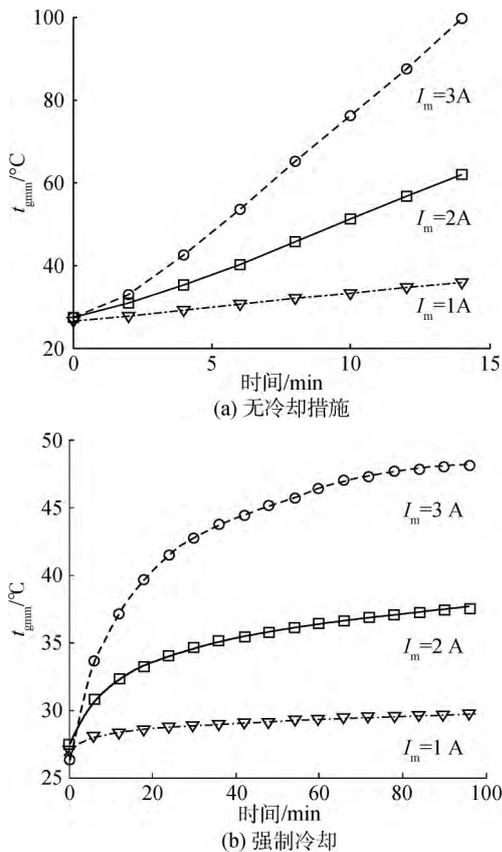


图 10 100 Hz 时不同驱动电流下 GMM 棒温度  
Fig. 10 Temperature of GMM rod under different drive current at 100 Hz

GMM 棒温度控制在  $50^{\circ}\text{C}$  以内,使得 GMM 棒的磁致伸缩率能在较好的范围内<sup>[8]</sup>,故该冷却系统满足冷却要求。

表 2 GMM 棒表面温度仿真与实验对比

Table 2 Results of simulation and experiment of GMM rod temperature

参数	电流/A		
	1	2	3
表面温度仿真值/ $^{\circ}\text{C}$	31	36	45
表面温度实验值/ $^{\circ}\text{C}$	30	38	48

## 5 结 论

1) 在交变电流驱动下 GMA 热源主要来自两方面,低频驱动时( $<50\text{ Hz}$ ),GMA 热源主要以线圈电阻损耗产生的热为主;高频驱动时( $>50\text{ Hz}$ ),GMA 热源不仅包括线圈电阻产生的焦耳热还包括 GMM 棒上涡流和磁滞损耗产生的热,当驱动频率达到  $50\text{ Hz}$  时,GMM 棒损耗占 GMA 总功率损耗  $5\%$ ,且该比例随着驱动频率的增加而快速增大。

2) 理论推导得到适用于中低频驱动下 GMA 热功率损耗计算公式并通过实验验证了计算公式的有效性.由于执行器内部空间狭小散热性能差,高频驱动下易导致 GMA 内部热沉积,使得 GMM 棒温度急剧上升进而影响 GMA 输出位移精度,因此需要对 GMA 采取一定的冷却措施。

3) 采用内外冷水管式冷却结构对 GMA 进行冷却,在驱动电流为  $3\text{ A}$  时,可将 GMM 棒表面温度控制在  $50^{\circ}\text{C}$  以内.该冷却方式具有较好的冷却效果,其实验结果与有限元仿真结果较为吻合,其最大误差为  $3^{\circ}\text{C}$  以内,进一步验证了热功率损耗计算公式的有效性,并为基于 GMM 的精密执行器设计和应用提供了热结构设计参考理论与依据。

## 参考文献:

- [1] 贾振元,郭东明.超磁致伸缩材料位移执行器原理与应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] John S, Sirohi J, Wang G, et al. Comparison of piezoelectric, magnetostrictive, and electrostrictive hybrid hydraulic actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(10): 1035-1048.
- [3] Ellison J. Investigation of active materials as driving elements in a hydraulic hybrid actuator[D]. Maryland: University of Maryland, 2004.
- [4] Lhermet N, Claeysen F, Fabbro H. Electro fluidic components based on smart materials for aircraft electro-hydraulic actuators[R]. Bremen: The 9th International Conference on New Actuators, 2004.
- [5] Rupinsky M J, Dapino M J. Smart material electro-hydrostatic actuator for intelligent transportation systems[R]. ASME Paper IMECE2006-14542, 2006.
- [6] YAN Ming, ZHENG Peng, GAO Xiufeng, et al. Temperature field computation of giant magnetostrictive transducers[J]. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010, 2(1): 244-247.
- [7] 李立毅, 严柏平, 张成明. 驱动频率对超磁致伸缩制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.  
LI Liyi, YAN Baiping, ZHANG Chengming. Influence of frequency on characteristic of loss and temperature in giant magnetostrictive actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 124-129. (in Chinese)
- [8] Clark A E, Crowder D H. High temperature magnetostriction of  $\text{TbFe}_2$  and  $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$  [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21(5): 1945-1497.
- [9] 李跃松, 朱玉川, 吴洪涛, 等. 超磁致伸缩伺服阀用电机转换器传热及热误差分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 343-350.  
LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Modeling of heat transfer and displacement error from heat of giant magnetostrictive actuator applied in servovalve[J]. Trans-

- actions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 343-350. (in Chinese)
- [10] Takahashi R, Moongki C, Tashiro K, et al. Power loss analysis by measuring temperature rise in T-GMA[J]. 日本 AEM 学会誌, 2011, 19(3): 503-508.
- [11] Engdahl G, Bergqvist A. Loss simulations in magnetostrictive actuators[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 4689-4691.
- [12] ZHU Yuchuan, JI Liang. Theoretical and experimental investigations of the temperature and thermal deformation of a giant magnetostrictive actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 218(1): 167-178.
- [13] 曾海泉, 曾庚鑫, 曾建斌, 等. 超磁致伸缩功率超声换能器热分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 116-120.  
ZENG Haiquan, ZENG Gengxin, ZENG Jianbin, et al. Thermal analysis of giant magnetostrictive high power ultrasonic transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 116-120. (in Chinese)
- [14] Angara R. High frequency high amplitude magnetic field driving system for magnetostrictive actuators[D]. Lincoln: University of Nebraska, 2009.
- [15] 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.
- [16] 李跃松, 朱玉川, 吴洪涛, 等. 超磁致伸缩电机转换器位移感知模型及滞环分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 169-174.  
LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Research on displacement-sensing model and hysteresis loop of giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 169-174. (in Chinese)
- [17] Giorgio B. Hysteresis in magnetism[M]. California: Academic Press Inc, 1998.
- [18] Bergqvist A, Engdahl G. A model for magnetomechanical hysteresis and losses in magnetostrictive materials [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 6476-6478.

(编辑:叶 青)