

文章编号:1000-8055(2016)09-2210-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2016.09.021

# 超磁致伸缩电静液作动器磁场 分析与优化

杨旭磊, 朱玉川, 费尚书, 纪良, 郭亚子  
(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘 要:** 提出一种超磁致伸缩电静液作动器(GMEHA)结构,采用永磁体与控制线圈组合提供驱动磁场.首先建立了该组合磁路数学模型,并给出了超磁致伸缩棒内磁感应强度计算解析式;其次,对以上结构进行了有限元分析(FEA),得出了磁路主要结构参数与磁场分布均匀性之间映射规律;最后进行了作动器磁场试验研究并与有限元分析结果进行了对比,验证了理论与有限元模型的可预测性,给出了该电静液作动器结构设计方法.结果表明:该电静液作动器的最佳驱动频率为 250 Hz,最大无负载体积流量为 0.85 L/min,最大阻断力达到了 120 N.

**关键词:** 电静液作动器(EHA); 超磁致伸缩棒; 磁场; 有限元方法; 均匀度  
**中图分类号:** V231; TH137 **文献标志码:** A

## Magnetic field analysis and optimization of giant magnetostrictive electro-hydrostatic actuator

YANG Xu-lei, ZHU Yu-chuan, FEI Shang-shu, JI Liang, GUO Ya-zi  
(College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A structure of giant magnetostrictive electro-hydrostatic actuator (GMEHA) was designed. The control coil was combined with permanent magnet to provide driving magnetic field. Mathematical model of the magnetic circuit was established, and the analytical calculation of magnetic flux density inside giant magnetostrictive rod was performed. Secondly, finite element analysis (FEA) for the above structure was conducted, and the mapping principle between the main parameters of the structure and the magnetic field uniformity was got. Finally, the study of actuator magnetic field experiment was conducted, the result of the study was compared with the result of FEA, verifying the predictability of theory and finite element model, then the structure design method of this electro-hydrostatic actuator was presented. Results show that the maximum no-load output volume flow is 0.85 L/min around 250 Hz of the best driving frequency, while the maximum blocked force was close to 120 N.

**Key words:** electro-hydrostatic actuator(EHA); giant magnetostrictive rod;  
magnetic field; finite element method; uniformity

固定翼以及旋翼飞机对于结构紧凑且高频宽驱动系统的需求正在不断增长,基于智能材料的固液混合作动器的发展为其提供了有效途径<sup>[1-6]</sup>.

目前,国外已经将压电-液压作动器应用到智能旋翼飞机<sup>[7]</sup>.超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material, GMM)是一种新型功能材料,利用

收稿日期:2014-12-11

基金项目:国家自然科学基金(51175243);江苏省自然科学基金(BK20131359);航空科学基金(20130652011)

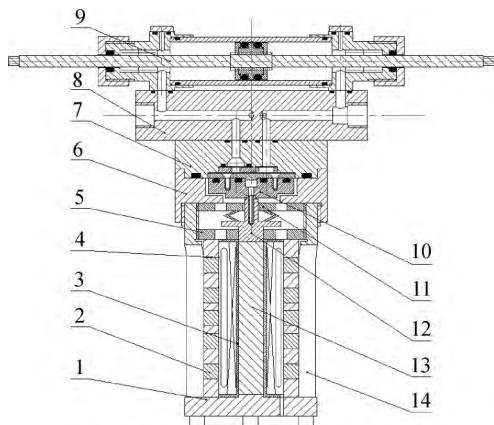
作者简介:杨旭磊(1989-),男,山东莱阳人,硕士生,主要从事智能材料电液控制技术方面的研究.

这种材料研制的电-机转换器不仅具有输出力大、响应速度快、控制精度高、抗干扰能力强等优点,而且相对于压电致动器有着更小的磁滞损耗,不会因热影响而永久失效<sup>[8-9]</sup>。

相比于液压系统管路以及附件遍布全机的传统机载液压系统,超磁致伸缩电静液作动器(Giant magnetostrictive electro-hydrostatic actuator, GMEHA)具有体积小、质量轻、输出力大、抗污染能力强、阀泵缸高度集成化等优点。GMM棒作为 GMEHA 的核心,其均匀合理的磁场分布对 GMEHA 输出性能起着至关重要的作用。文中选用永磁体提供偏置磁场,通电线圈提供控制磁场,根据 GMEHA 的具体结构对其驱动磁路进行了数学建模,并通过磁场有限元法结合试验分析了磁场均匀性及其分布对 GMEHA 性能的影响,为 GMEHA 的结构优化提供了依据。

### 1 GMEHA 的结构与工作原理

图 1 为所设计 GMEHA 的结构,主要包括超磁致伸缩泵、蓄能器、液压缸和歧管及其他配件<sup>[7,9]</sup>,其驱动部分由控制线圈和永磁体组成。由于磁致伸缩材料的磁导率很低,设计时通过使 GMM 棒、底座、永磁体、导磁块、输出杆形成闭合磁路,以提高 GMM 棒内的磁场强度。



1 底座; 2 永磁体; 3 线圈骨架; 4-5 导磁块; 6 泵罩; 7 泵头; 8 歧管; 9 液压缸; 10 活塞; 11 端盖; 12 输出杆; 13 GMM 棒; 14 外壳

图 1 超磁滞伸缩电静液作动器结构  
Fig. 1 Structure diagram of GMEHA

如图 2 所示, GMM 棒驱动活塞运动作为 GMEHA 工作的发起点。控制线圈在通电的情况下能够产生交变磁场,磁场的变化引起了 GMM 棒的伸长缩短,从而推动活塞周期性的压缩泵腔内的流体,被压缩的流体经过单向阀的整合配流,

进入液压缸推动输出杆进行单向运动<sup>[11-13]</sup>。

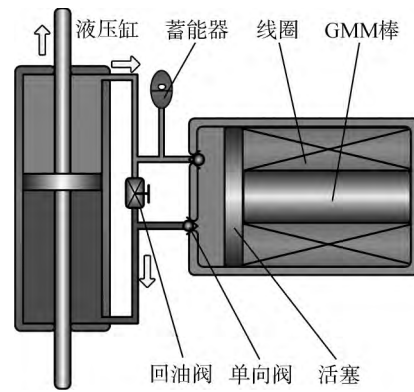


图 2 超磁致伸缩电静液作动器原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of GMEHA

### 2 磁路的数学模型

在对磁路的理论计算时类似于基尔霍夫两大定律,以此写出磁路的两大方程。

磁路第一方程:穿出任意封闭面的磁通量恒等于穿入该封闭面的磁通量,即

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 0 \tag{1}$$

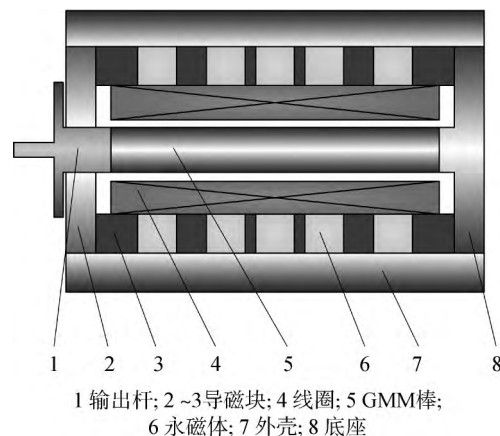
磁路第二方程:任意闭合磁路上的磁动势代数和恒等于磁压降代数和,即

$$\sum Hl = Ni \tag{2}$$

式中  $H, l, N, i$  分别表示磁场强度、线圈长度、控制线圈匝数和控制电流。

由图 1 可得作动器的驱动磁路结构简图如图 3 所示。通过图 3 可以建立如图 4 的磁路模型<sup>[14]</sup>。

图 4 中实线代表控制磁场磁路,虚线代表偏置磁场磁路。其中  $U_p$  和  $Ni$  表示永磁体和控制线



1 输出杆; 2~3 导磁块; 4 线圈; 5 GMM 棒; 6 永磁体; 7 外壳; 8 底座  
图 3 超磁致伸缩电静液作动器磁路简图  
Fig. 3 Magnetic circuit diagram of GMEHA

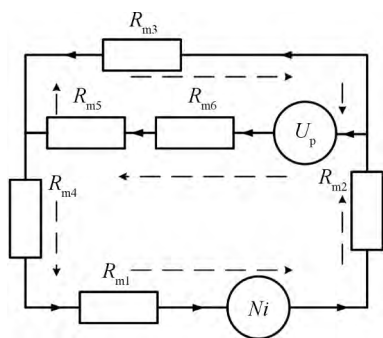


图 4 超磁致伸缩电静液作动器磁路模型  
Fig. 4 Magnetic circuit model of GMEHA

圈的磁动势,  $R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}, R_{m4}, R_{m5}, R_{m6}$  分别是 GMM 棒、底座、外壳、上导磁块和输出杆、导磁块、永磁体的等效磁阻(忽略零件之间的气隙磁阻), 这些零件的轴向等效磁阻表示为

$$R_{mj} = \frac{L_j}{\mu_j A_j} \quad (3)$$

式中  $L_j, \mu_j, A_j$  分别表示各零件的长度、磁导率和横截面积。

假定磁通量线通过上导磁块以及底座时是完全沿着径向穿过. 考虑  $r$  处的环形微元厚度为  $dr$ , 则该微元磁阻如下<sup>[12]</sup>:

$$dR = \frac{dr}{\mu(2\pi rh)} \quad (4)$$

式中  $h$  表示零件的厚度. 当从内径  $r=R_1$  到外径  $r=R_2$  积分得到该零件的径向磁阻为

$$R_m = \int dR = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{2\pi\mu hr} = \frac{1}{2\pi\mu h} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5)$$

在通电线圈所产生的控制磁场作用下, 由磁路的基尔霍夫定律可得, 通过 GMM 棒的控制磁通量

$$\varphi_{1c} = \frac{Ni}{R_c} \quad (6)$$

式中  $R_c$  表示控制磁路的磁阻. 表示为

$$R_c = R_{m1} + R_{m2} + R_{m4} + \frac{R_{m3}(R_{m5} + R_{m6})}{R_{m3} + R_{m5} + R_{m6}} \quad (7)$$

在永磁体作用下通过 GMM 的偏置磁通量表示为

$$\varphi_{1p} = \frac{R_{m3}}{\sum_{j=1}^4 R_{mj}} \varphi_p \quad (8)$$

式中  $\varphi_p$  为永磁体产生的磁通量.

由叠加原理可知, 作用在 GMM 棒上的总磁通量为

$$\varphi_1 = \varphi_{1c} + \varphi_{1p} = \frac{Ni}{R_c} + \frac{R_{m3}}{\sum_{j=1}^4 R_{mj}} \varphi_p \quad (9)$$

由式(7)可知当外壳选用高导磁率的材料时, 其磁阻  $R_{m3}$  将会很小, 这虽然在一定程度上能够降低控制磁路的磁阻  $R_c$ , 提高控制磁场, 但是由式(8)可知这也将会使作用在 GMM 棒上的偏置磁场大大减小甚至失去效果. 综合以上两方面考虑, 外壳要选用导磁率比较低甚至不导磁的材料, 与此同时在永磁体之间加入高导磁率的导磁块以减少漏磁. 这种方式既能保证永磁体有较好的作用效果, 又可以在一定的程度上减少因为使用永磁体而产生的漏磁. 在考虑漏磁的情况下, 式(9)可修正如下:

$$\varphi_1 = \frac{1}{k_{f1}} \cdot \frac{Ni}{R_c} + \frac{1}{k_{f2}} \cdot \frac{R_{m3}}{\sum_{i=1}^4 R_{mi}} \varphi_p \quad (10)$$

式中  $k_{f1}, k_{f2}$  分别表示控制磁路的漏磁系数和偏置磁路的漏磁系数.

因此在控制线圈跟永磁体共同作用下, GMM 中的磁感应强度为

$$B_g = \frac{\varphi_1}{A_g} \quad (11)$$

式中  $A_g$  为 GMM 棒的截面积.

### 3 GMEHA 磁场的有限元分析

#### 3.1 GMEHA 磁场有限元模型的建立

GMEHA 驱动部分磁路结构的模型材料相关参数见表 1<sup>[10,15]</sup>, 有限元模型如图 5 所示. 模型采用永磁体提供偏置磁场, 并在永磁体之间加入导磁块以减少漏磁.

在  $i=3$  A 直流驱动下, 驱动磁场磁力线分布如图 6 所示, 通过磁力线分布的基本形态, 可以发现大部分的磁力线通过 GMM 棒、导磁块、永磁体、导磁块和底座形成闭合磁路, 已符合磁路结构设计的基本要求. 对于使用永磁体提供偏置磁场会产生漏磁并对周围设备产生电磁干扰的问题, 本文中通过在永磁体之间加入导磁块的方法使这一情况得到明显改善.

表 1 模型材料的相关参数

Table 1 Related parameters in the model material

参数	数值
GMM 棒尺寸/mm×mm	φ13×80
GMM 相对磁导率	7
工业纯铁相对磁导率	11 947
线圈匝数/匝	1 000

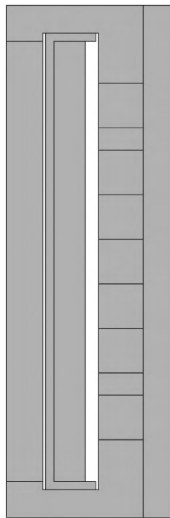


图 5 有限元模型  
Fig. 5 Finite element model

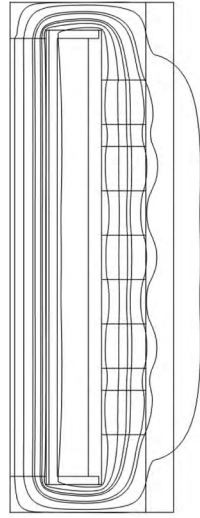


图 6 磁力线分布  
Fig. 6 Magnetic line distribution

### 3. 2 GMEHA 控制磁场均匀性分析

GMM 棒的输出性能的好坏对 GMEHA 工作性能的优劣起着至关重要的作用,而均匀的磁场是 GMM 棒充分发挥性能的关键<sup>[8-9]</sup>.

为提高 GMM 棒磁场的均匀性进而提高 GMEHA 的性能,就必须考虑相关参数对 GMM 棒磁场均匀性的影响.通过其他结构参数保持不变,考察不同长度  $l$  的线圈(74, 80, 86 mm)对 GMM 棒轴向均匀性的影响及其不同轴向位置(10, 20, 30, 40 mm)的径向磁场分布规律,其结果如图 7、图 8 所示.

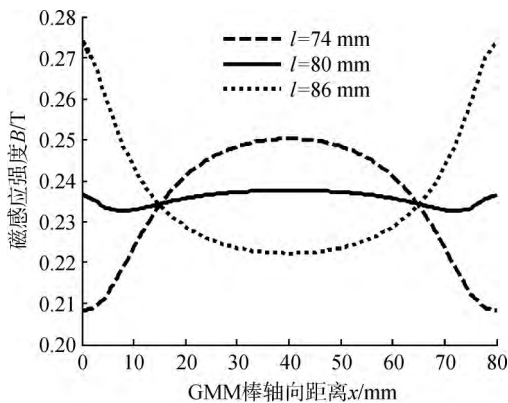


图 7 GMM 棒轴线上磁感应强度分布  
Fig. 7 Magnetic flux density in axis of GMM rod

由图 7 可知,在控制电流保持不变时,改变线圈的长度,产生的磁感应强度是不同的,但是不同长度线圈产生磁感应强度的均值相差不大;而且当线圈长度等于 80 mm 时,作用在 GMM 棒的轴线方向的磁感应强度变化最小,均匀性最好,而

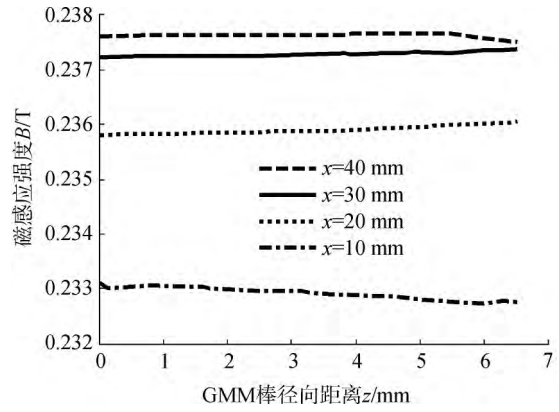


图 8 GMM 棒径向磁感应强度分布  
Fig. 8 Magnetic flux density in radial direction of GMM rod

此时 GMM 棒与线圈等长.因此设计时,应该选择与 GMM 棒长度接近的线圈以此能够产生相对均匀的磁场.由图 8 可知,GMM 棒不同位置的径向磁感应强度均匀度都很高.通过式(12)<sup>[16]</sup>分别求得轴向与径向磁场的均匀度分别低于 3% 和 0.05%,由此可知 GMM 棒径向磁感应强度均匀度远好于轴向的,因此设计时,可以近似认为径向磁场是均匀的,主要考虑提高轴向磁场的均匀度  $\delta_b$ .

$$\delta_b = \frac{\sum_{j=1}^n |B_j - \bar{B}|}{n\bar{B}} \quad (12)$$

式中  $\bar{B}$  表示平均磁感应强度.

由于永磁体不导磁,所以在使用永磁体提供偏置磁场时不能完全形成闭合磁路.由图 9 可知,磁路不能完全闭合虽然对于作用在 GMM 棒上的磁感应强度大小有一定的影响,但是其均匀性主要是由 GMM 棒两端导磁块所决定的.因此,

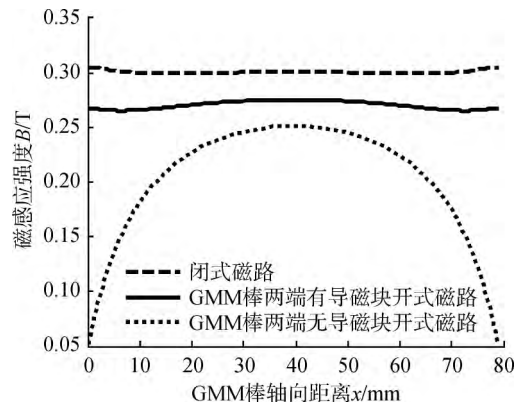


图 9 不同形式磁路 GMM 棒轴向磁感应强度分布  
Fig. 9 Magnetic flux density in axis of GMM rod in the different forms of magnetic circuit

在 GMM 棒两端安装高导磁率的软磁体,有利于改善 GMM 棒上的磁场均匀度,提高 GMM 棒利用率.

### 3.3 GMEHA 偏置磁场有限元分析

为了减少发热,提高控制精度,该 GMEHA 采用永磁体之间加入导磁块的方式提供偏置磁场.如图 10 为使用永磁体之间加入导磁块的方式提供偏置磁场与永磁体不加导磁块的方式提供偏置磁场的比较.相比于后者,加入导磁块的方式在保证产生的平均磁感应强度相差不大的情况下能够提供更好的均匀性(不均匀度仅为 5%).其较好的均匀性正是 GMM 棒充分发挥其性能所需要的,而且这种组合方式也能够有效地减少漏磁以降低电磁干扰.

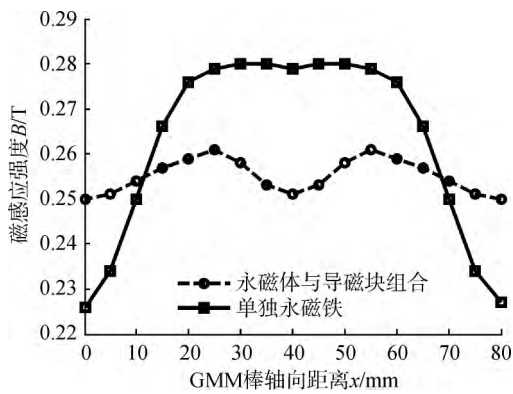


图 10 永磁体产生的 GMM 棒轴向磁感应强度的分布  
Fig. 10 Magnetic flux density in axis of GMM rod by permanent magnets

## 4 试验研究与分析

### 4.1 GMM 棒输出性能试验研究

为了进一步研究 GMM 输出性能的影响因素,根据 GMEHA 的工作原理搭建了其磁场测试试验平台(如图 11 所示).试验中通过激光位移传感器(CD5-30(A),精度为  $0.2 \mu\text{m}$ )测量 GMM 棒的输出位移,磁通计(Model 2130 Fluxmeter)测试不同频率下 GMM 棒的磁感应强度.

测试时在保证相同的输入以及线圈匝数的条件下,首先通过比较不同频率下 GMM 棒的峰值位移来研究磁场均匀度对 GMM 棒性能的影响;其次通过比较永磁体提供偏置磁场与直流线圈提供偏置磁场对 GMM 棒输出性能的影响,来研究永磁体提供偏置磁场的优缺点;最后通过改变驱动频率,测量 GMM 棒的磁感应强度来分析 GMM 棒、线圈

骨架以及外壳等对 GMM 棒输出性能的影响.

通过比较不同频率及不同长度线圈驱动下 GMM 棒的峰值位移(如图 12),可以发现 74 mm 线圈驱动 GMM 棒的峰值位移始终小于 80 mm 线圈的.结合前面仿真可以知道,当线圈的长度与 GMM 棒接近时均匀性最好,不仅体现了均匀性好的磁场有利于充分发挥 GMM 棒的性能,也可以说明磁场有限元仿真有一定的可预测性.

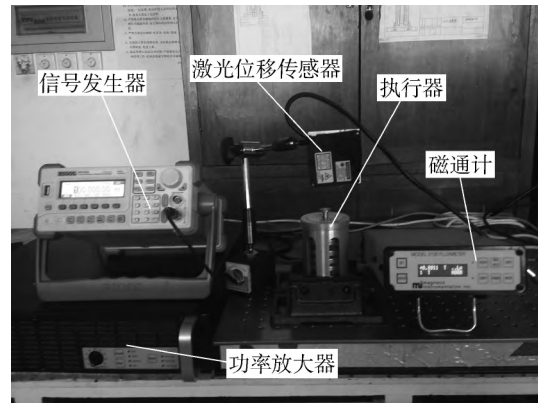


图 11 磁场测试试验台  
Fig. 11 Test bench of magnetic field

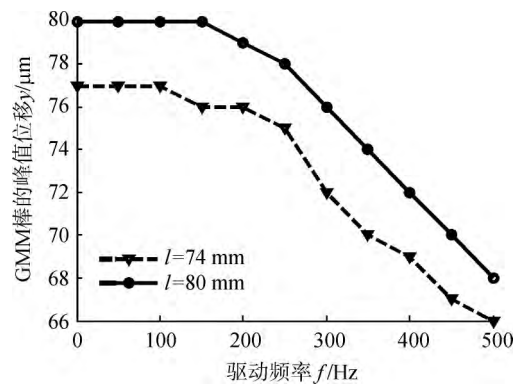


图 12 不同线圈下 GMM 棒的峰值位移  
Fig. 12 Peak displacement of the GMM rod by different coils

由图 13 可知相比于直流线圈提供偏置磁场,在使用永磁体提供偏置磁场的情况下,GMM 棒的峰值位移略低,但是相差不大.使用永磁体提供偏置磁场使 GMM 棒的输出性能略低于使用直流线圈提供偏置磁场,主要因为永磁铁不导磁,会造成一定的漏磁,降低驱动磁场的利用率;然而相差不大,也说明了偏置磁场设计的合理性以及在永磁体之间加入导磁块一定程度上减小了因为使用永磁体而产生的漏磁.相比于直流线圈提供偏置磁场,使用永磁体提供偏置磁场可以很大程度

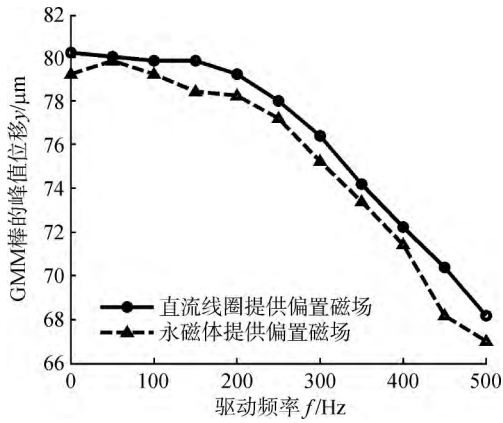


图 13 不同偏置磁场下 GMM 棒的峰值位移  
Fig. 13 Peak displacement of the GMM rod by different bias magnetic fields

上减少发热,利于提高 GMEHA 控制精度及长时间工作.

为了直观清楚显示磁感应强度随驱动频率的变化趋势,如图 14、图 15 所示,利用每组测得的最大磁感应强度  $B_0$  进行归一化. 由图 14(a)可知, GMM 棒是否切片与线圈骨架的材料对

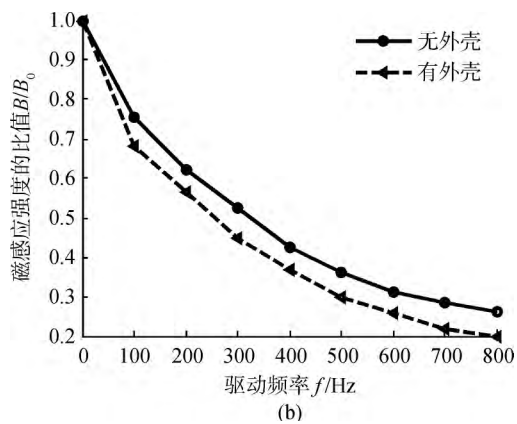
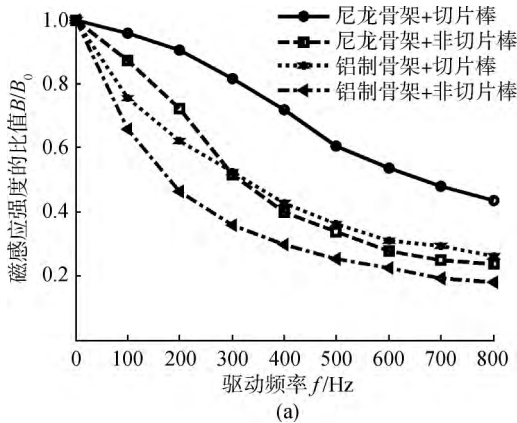


图 14 不同驱动频率下的磁感应强度的变化曲线  
Fig. 14 Change of the magnetic flux intensity under different driving frequencies

GMM 棒的输出性能都有很大的影响,而且随着频率的升高影响越来越大.这是因为在高频交变磁场的作用下,导电的线圈骨架与 GMM 棒都会产生一定的涡流,由于涡流的去磁作用,使磁通量拥挤于 GMM 棒的圆周表层,导致 GMM 棒的导磁性能下降,而且随着频率的升高而影响增大.由图 14(b)可以看出外壳等零件对 GMM 的输出性能也有一定的影响,说明在外壳上也会产生涡流,但是由于外壳已经切槽<sup>[11,17]</sup>,所以影响不大.虽然影响 GMM 棒输出性能的因素包括涡流、集肤效应、临近效应以及磁滞损耗,然而在中低频下, GMM 棒的磁感应强度随着频率升高而不断下降主要是由于涡流的去磁作用<sup>[17-18]</sup>.为了减小涡流的去磁作用,提高 GMM 棒的输出性能,对 GMM 棒进行切片处理、使用不导电材料加工线圈骨架以及对外壳进行切槽处理是很有效的方法.

为进一步验证试验数据的可靠性,对铝制线圈骨架的结构进行有限元仿真.如图 15 所示,试验与仿真基本一致,充分证明了试验数据的正确性和可靠性,也从侧面反映了有限元软件的可预测性.

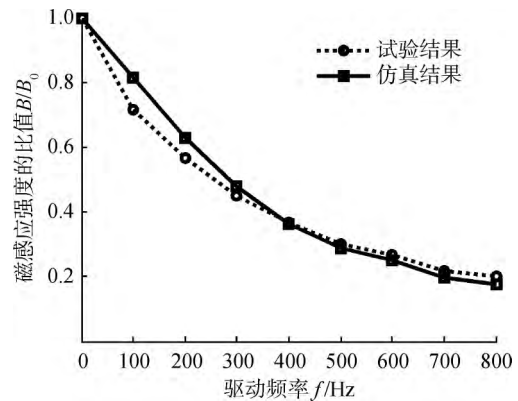


图 15 动态磁感应强度的变化曲线  
Fig. 15 Change of dynamic magnetic flux intensity

#### 4.2 GMEHA 输出性能试验测试

在对 GMEHA 磁场特性充分研究的基础上研究 GMEHA 的实际输出性能,测试时,给定输入幅值为 3 A 的正弦电流,试验测试平台如图 16 所示.

试验中通过激光位移传感器测试 GMEHA 液压缸的输出位移,将所测数据经过软件 MATLAB 处理得到 GMEHA 的输出体积流量(下文简称流量),通过使用标准砝码测试 GMEHA 的带负载能力.

GMEHA 空载情况下的流量特性以及带负载能力特性分别如图 17、图 18 所示。

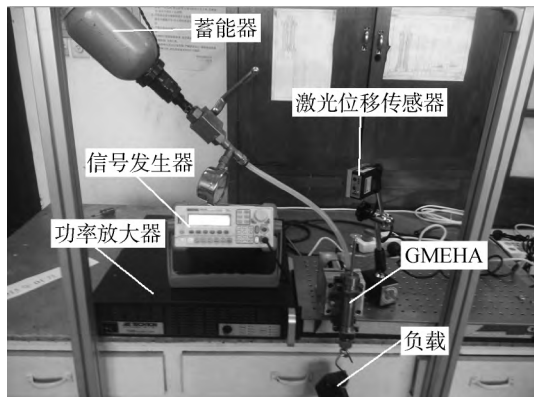


图 16 GMEHA 测试试验台  
Fig. 16 Test bench of GMEHA

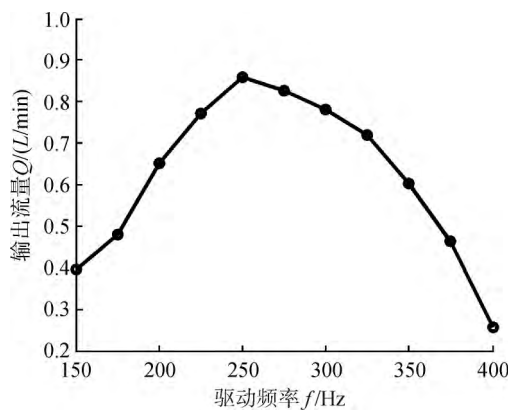


图 17 GMEHA 空载输出流量与驱动频率关系曲线  
Fig. 17 Relationship of no-load output flow rate of GMEHA and driving frequency

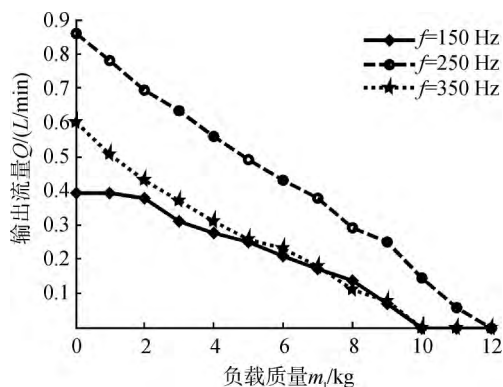


图 18 GMEHA 输出流量与负载关系曲线  
Fig. 18 Relationship of output flow rate of GMEHA and load

由图 17 可知,在幅值为 3A 的恒定正弦电流输入下,GMEHA 空载输出流量随着驱动频率的

增加是先增大后减小;在 250 Hz 时,其输出性能达到最佳,其最大无负载输出流量为 0.85 L/min. 由图 18 可知,不同驱动频率下,GMEHA 的带负载能力不同,但其输出流量都会随着负载的增加而减小;在 250 Hz 时,其最大阻断力能够达到 120 N.

## 5 结 论

1) 作用在 GMM 棒上的磁场分布不均匀,而且轴向的不均匀度远大于径向的.线圈的长度对 GMM 磁场的均匀度有影响,线圈长度接近 GMM 棒的长度时,作用在 GMM 棒上的磁场最均匀.

2) 磁路是否闭合会影响作用在 GMM 棒上的磁感应强度,但不影响作用在 GMM 棒上磁感应强度的均匀性.磁场的均匀性主要是由两端的导磁块所决定的.

3) 通过在永磁体之间加入高导磁率的导磁块的方式提供偏置磁场可以达到较好的均匀性,而且有利于减少产热和降低电磁干扰.

4) GMM 棒、线圈骨架外壳等对 GMM 棒的输出性能的影响主要表现在这些零件在交变磁场下产生涡流的去磁作用.对 GMM 棒进行切片,选用不导电的材料加工线圈骨架,以及对外壳进行切槽处理都能有效地减少涡流的作用,提高 GMM 棒的输出性能.

5) 试验测试 GMEHA 的最佳驱动频率为 250 Hz,最大输出流量为 0.85 L/min,最大阻断力达到了 120 N.

## 参考文献:

- [1] Chaudhuri A, Wereley N. Compact hybrid electrohydraulic actuators using smart materials: a review[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(6): 597-634.
- [2] Chaudhuri A, Yoo J, Wereley N M. Dynamic modeling of a magnetostrictive hydraulic pump [C] // Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress And Exposition. Chicago: ASME, 2006: 331-338.
- [3] Lhermet N, Claeysen F, Fabbro H. Electro-fluidic components based on smart materials for aircraft electrohydraulic actuators[C] // Proceedings of the 9th International Conference on New Actuators. Bremen, Germany: [s. n.], 2004: 718-721.
- [4] Alfayad S, Ouezdou F, Gheng G. High performance integrated electro-hydraulic actuator for robotics: Part I principle, prototype design first experiments[J]. Sensors and

- Actuators A:Physical,2011,169(1):115-123.
- [5] Larson J. Design of amagnetostrictive-hydraulic actuator considering nonlinear system dynamics and fluid-structure coupling[D]. Ohio:The Ohio State University,2014.
- [6] Janker P,Claeyssen F,Grohmann B, et al. New actuators for aircraft and space applications[C]//Proceedings of the 11th International Conference on New Actuator, Bremen, Germany:[s. n.],2008:346-354.
- [7] 陈龙,朱玉川,杨旭磊,等.超磁致伸缩泵驱动磁路建模及数值分析[J].中国机械工程,2014,25(6):718-722.  
CHEN Long,ZHU Yuchuan,YANG Xulei, et al. Driving-magnetic path modeling and numerical analysis in giant magnetostrictive pump[J]. China Mechanical Engineering, 2014,25(6):718-722. (in Chinese)
- [8] 王传礼.基于GMM转换器喷嘴挡板阀伺服阀的研究[D].杭州:浙江大学,2005.  
WANG Chuanli. Research on the nozzle flapper servo valve driven by GMM actuator[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2005. (in Chinese)
- [9] 贾振元,郭东明.超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [10] Tan H,Hurst W,Leo D. Performance modeling of a piezo-hydraulic actuation system with active valves[J]. Smart Materials and Structures,2005,14(1):91-110.
- [11] Larson J P,Dapino M J. High frequency valve development for smart material electro-hydraulic actuators [C]//Proceedings of Conference on Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. [S. l.]:Society of Photo-optical Instrumentation Engineers,2011:843-845.
- [12] Chaudhuri A. Self-contained hybrid electro-hydraulic actuators using magnetostrictive and electrostrictive material [D]. Baltimore,Maryland:University of Maryland,2008.
- [13] XUAN Zhefeng,JIN Tailie,Sanha N, et al. Performance of piezo-stacks for a piezoelectric hybrid actuator by experiments[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2014,25(18):2212-2220.
- [14] 李跃松.超磁致伸缩射流伺服阀的理论及实验研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.  
LI Yuesong. Theoretical and experimental research on jet servovalve driven by giant magnetostrictive actuator[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2014. (in Chinese)
- [15] 程清风,朱玉川,王晓露,等.超磁致伸缩伺服阀电-机转换器磁场分析与优化[J].机械科学与技术,2012,31(7):1066-1070.  
CHENG Qingfeng,ZHU Yuchuan,WANG Xiaolu, et al. Optimizing magnetic field of giant magnetostrictive micro-displacement for jet servo valve[J]. Mechanical Science and Technology,2012,31(7):1066-1070. (in Chinese)
- [16] 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,2010,31(12):1587-1592.  
LI Yuesong,ZHU Yuchuan,WU Hongtao et al. The magnetic field modeling and analysis of giant magneto-strictive actor for jet servo valve[J]. Acta Armamentarii,2010,31(2):1587-1592. (in Chinese)
- [17] Kendall D,Piercy A. The frequency dependence of eddy current losses in terfenold[J]. Journal of Applied Physics, 1993,73(10):6174-6176.
- [18] Nan X,Sullivan C R. Simplified high-accuracy calculation of eddy-current loss in round-wire windings[C]//Proceedings of Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany:IEEE,2004:873-879.

(编辑:秦理曼、王碧珺)