

超磁致伸缩致动器结构分析及输出力特性研究^{*}

鞠晓君, 林明星, 范文涛, 马高远

(山东大学机械工程学院 济南 250061)

摘要:在超磁致伸缩致动器(GMA)工作原理的基础上,完成了具有分段式偏置磁场和油冷散热系统的GMA机械结构设计;建立了GMA的3D模型,利用有限元分析软件对其磁场和温度场进行了仿真研究,结果表明分段式偏置磁场有较好的偏置效果,油冷散热方式冷却效果明显;搭建了GMA输出力特性测试平台,分别对直流激励下GMA的静态输出力特性和低频交流激励下动态输出力特性进行了研究;实验表明GMA的输出力与激励电流正相关,在直流激励下,输出力具有磁滞非线性,且受温度影响较大,受外部约束力影响较小;在交流激励下,输出力能很好地跟踪交流信号频率,未出现倍频效应,说明分段式偏置效果较好,GMA具有较高的精度和动态响应速度。

关键词:超磁致伸缩致动器;分段式偏置磁场;油冷散热系统;仿真;输出力特性

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.35

Structure analysis and output force characteristic study of giant magnetostrictive actuator

Ju Xiaojun, Lin Mingxing, Fan Wentao, Ma Gaoyuan

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on the working principle of giant magnetostrictive actuator (GMA), a mechanical structure with segmented bias magnetic field and oil cooling system is designed. The 3D model of the GMA is established and its magnetic field and temperature field are simulated with finite element analysis software. The simulation results show that the segmented bias magnetic field method can obtain better bias performance, the oil cooling system can greatly lower the GMA's temperature. A force test platform is set up, then the static and dynamic output force characteristics of the GMA are studied, respectively. The experimental results indicate that the output force has positive correlation with the driving current. Excited by DC, the output force of the GMA has hysteresis nonlinearity and is greatly influenced by the GMA's temperature but slightly influenced by the external mechanical constraint force. Meanwhile, the GMA can accurately track the signals without double-frequency effect when driven by AC. This represents that segmented bias magnetic field has excellent bias effect, high precision and fast dynamic response speed.

Keywords: giant magnetostrictive actuator (GMA); segmented bias magnetic field; oil cooling system; simulation; output force characteristic

1 引言

超磁致伸缩材料(例如 Terfenol-D 棒)具有优异的磁致应变特性和较高的磁-机转换效率,利用该材料开发的超磁致伸缩致动器(giant magnetostrictive actuator, GMA)具有体积小、驱动力大、位移大、响应速度快等优点^[1],在

有源减振、超精密加工、航空航天智能结构等领域取得了广泛的应用^[2-5]。Filipovi A. J. 等人^[6]将 GMA 集成在刀柄内产生振动,调制钻尖的轴向位置来改变切屑尺寸,使产生的小尺寸切屑能够容易地通过钻沟排出;Moon J 等人^[7]研制了一种用于振动控制的线性磁致伸缩执行器,其线性位移范围可达 27 μm ;Sadighi A 等人^[8]成功完成线性磁致伸缩电机的闭环无传感控制,其位置估计能力

最大误差为 $\pm 1 \text{ mm}$; Zhu Y. CH. 等人^[9]开发了一种由 GMA 驱动的新型射流伺服阀,其输出压力范围大、响应快、带宽高;贾丹平等^[10]基于超磁致伸缩材料研制了可探测母线电流的光纤光栅传感器,分辨率可达 1 pm/A ;翟鹏等人^[11]将 GMA 引入非对称性销孔的镗削加工,为高负荷异形孔的精密加工提供新的方法;Xu A. Q. 等人^[12]采用 GMA 控制高频制动机构,为提高制动系统性能开辟了新的途径。

上述超磁致伸缩致动器的结构设计及特性研究主要围绕位移和频率特性进行,目前国内外对超磁致伸缩致动器输出力的特性研究相对较少。本文基于超磁致伸缩致动器工作原理,提出了具有分段式偏置磁场和油冷散热系统的 GMA 机械结构,利用有限元分析软件对其磁场和温度场进行了仿真分析;采用自行研制的超磁致伸缩致动器搭建了 GMA 输出力特性测试平台,分别对 GMA 的静态力和动态力特性进行了实验研究。

2 超磁致伸缩致动器的总体结构及工作原理

本文设计的 GMA 总体结构如图 1 所示。Terfenol-D 棒置于激励线圈中间,偏置磁场由分段式永磁体提供;预紧结构采用碟形弹簧,通过调节端盖螺母调整预紧力;工作时,激励线圈通入适当的电流产生驱动磁场,由磁轭与 Terfenol-D 棒组成闭合磁路,在驱动磁场作用下, Terfenol-D 棒产生形变,推动输出杆产生输出力,实现电磁能到机械能的转换;为减小线圈发热,本文采用冷却通道对致动器强制降温,使其工作在合适的温度范围内。

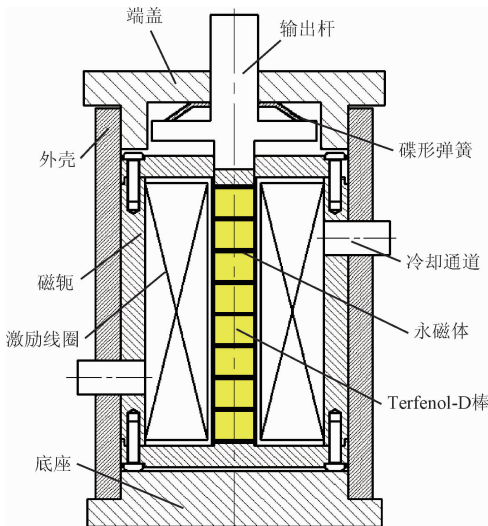


图1 超磁致伸缩致动器结构
Fig.1 Structure diagram of GMA

Terfenol-D 棒是 GMA 的核心部件,其电、磁、机械及温度互相耦合的数值关系可以通过压磁方程表示^[13],如式(1)所示。其中, ε 、 B 分别为磁致伸缩应变和磁场强度, σ 、 H 、 T 分别为外在输入的压力、磁场及温度, d_{33} 、 S^H 、 μ^σ 为压磁系数、柔顺系数、材料磁化率,代表材料中能量的转换。由式(1)可知,在尺寸和预紧力一定的情况下, Terfenol-D 棒的磁场强度和温度决定了磁致伸缩应变的大小,也就决定了输出位移和输出力的大小。另外,在交流激励下 Terfenol-D 棒的输出具有倍频效应,为消除倍频,提高其输出位移与力的线性特性,需施加偏置磁场。由此可见,磁场与温度场是影响 GMA 输出特性的重要因素。

$$\begin{cases} \varepsilon = S^H \sigma + d_{33} H + \alpha T \\ B = d_{33} \sigma + \mu^\sigma H + \rho T \end{cases} \quad (1)$$

3 GMA 磁场与温度场分析

3.1 GMA 磁场分析与仿真

超磁致伸缩致动器中磁场分析的方法有基于“路”和“场”两种方法。采用回路分析法时,将 GMA 分为一个或多个单元,每个单元包括两段永磁体和一段 Terfenol-D 棒,将每个单元中的 Terfenol-D 棒平均分为 3 个部分,在文献[14-15]中将每个单元磁路模型分为 3 个回路,本文将每个单元分为 5 个回路,磁路模型如图 2 所示。其中, F_{M1} 、 F_{M2} 、 F_{M3} 、 F_{M4} 、 F_{M5} 为磁回路中的磁动势, R_{PM} 为永磁体的磁阻, R_T 为分段后 Terfenol-D 棒的磁阻, R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 、 R_{L4} 为每个磁回路中的漏磁阻, R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_{C3} 、 R_{C4} 、 R_{C5} 为每个磁回路中磁轭的等效磁阻, ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 、 ϕ_5 分别表示五个回路中的磁通。基于安培定律、磁路基尔霍夫定律,根据网孔分析法可得方程组如下:

$$\begin{cases} (R_{PM} + R_{C1})\phi_1 + R_{L1}(\phi_1 - \phi_2) = F_{M1} \\ (R_T + R_{C2})\phi_2 + R_{L1}(\phi_2 - \phi_1) + R_{L2}(\phi_2 - \phi_3) = F_{M2} \\ (R_T + R_{C3})\phi_3 + R_{L2}(\phi_3 - \phi_2) + R_{L3}(\phi_3 - \phi_4) = F_{M3} \\ (R_T + R_{C4})\phi_4 + R_{L2}(\phi_4 - \phi_3) + R_{L4}(\phi_4 - \phi_5) = F_{M4} \\ (R_{PM} + R_{C5})\phi_5 + R_{L4}(\phi_5 - \phi_4) = F_{M5} \end{cases} \quad (2)$$

方程组(2)中各参数值由式(3)确定。其中, H_c 为永磁体的磁场, N 为线圈匝数, I 为驱动电流, l_{PM} 、 l_d 、 l_T 、 l_C 分别为永磁体长度、驱动线圈的总长度、每段 Terfenol-D 棒长度、每段磁轭长度, μ_0 为空气磁导率, μ_{rPM} 、 μ_{rT} 、 μ_{rC} 分别为永磁体、Terfenol-D 棒、磁轭的相对磁导率, A_{PM} 、 A_T 、 A_C 分别为永磁体、Terfenol-D 棒、圆筒磁轭的截面积, t_l 、 t_C 为空气、盘形磁轭厚度, r_1 、 r_2 为 Terfenol-D 棒、盘形磁轭半径。

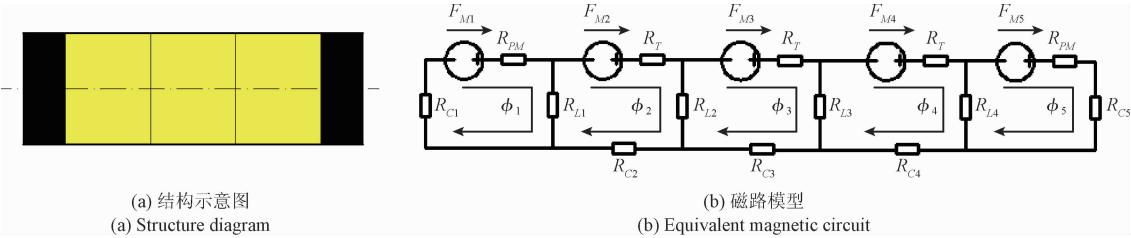


图 2 分段式永磁偏置结构某一单元的等效磁路模型

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit of an element for segmented permanent magnet bias structure

$$\begin{cases} F_{M1} = F_{M5} = H_C l_{PM} + \frac{l_{PM}}{l_d} NI \\ F_{M2} = F_{M3} = F_{M4} = \frac{l_T/3}{l_d} NI \\ R_{PM} = \frac{l_{PM}}{\mu_0 \mu_{r_{pm}} A_{PM}} \\ R_T = \frac{l_T/3}{\mu_0 \mu_{r_T} A_T} \\ R_{Ci} = \frac{l_C}{\mu_0 \mu_{r_C} A_C} \quad i = 2, 3, 4 \\ R_{Li} = \int \frac{dl}{\mu A} = \frac{1}{2\pi\mu_0 t_l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ R_{Ci} = \int \frac{dl}{\mu A} = \frac{1}{2\pi\mu_0 \mu_{r_C} t_C} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad i = 1, 5 \end{cases} \quad (3)$$

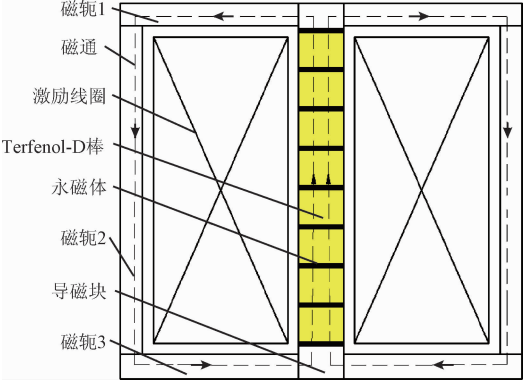


图 3 磁场建模示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic circuit structure

表 1 不同分段结构的偏置磁场

Table 1 Bias magnetic field of different segmented structure

单元数	分段永磁体长 l_{PM}/mm	Terfenol-D 棒长 l_T/mm	偏置磁场 $H_B/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$
1	6.75	120	15.785 3
2	4.5	60	24.887 6
3	3.375	40	27.987 1
4	2.7	30	31.807 2
5	2.25	24	35.041 9
6	1.93	20	37.071 8
7	1.69	17.14	38.689 5
8	1.5	15	40.190 5
9	1.35	13.33	41.334 0
10	1.23	12	42.468 2

由方程组(2)可以求出每个网孔中磁通大小,进而计算出磁场的大小。由以上分析可以看出,由“路”的方法分析磁场大小,计算简单,但是因磁阻大小难以准确获得,精确度差。为精确分析磁场分布,常选用基于麦克斯韦方程组的“场”的分析方法,该方法采用电磁场有限元分析软件 Ansoft Maxwell 对致动器静态磁场进行仿真分析。在 Ansoft Maxwell 16 中建立 GMA 的 3D 模型,忽略和磁场关系不大的输出杆、预紧结构等因素,其建模如图 3(永磁体与 Terfenol-D 棒分段数 n 未知)。该模型为轴对称结构,导磁块和磁轭的材质设置为纯铁(相对磁导率为 4 000),偏置磁场由多层分段式永磁体提供,永磁体材料设置为 NdFe35。

本文中 GMA 的工作场合要求其最大输出力大于 1 100 N,最大输出位移大于 100 μm ,Terfenol-D 棒与永磁体轴向总长度介于 130 ~ 140 mm。因此,在磁场仿真时设定 Terfenol-D 棒直径 $d = 10 \text{ mm}$,棒长 $nl_T = 120 \text{ mm}$,永磁体与 Terfenol-D 棒的总长度 $l_d = 133.5 \text{ mm}$,根据甘肃天星稀土材料有限公司提供的电磁学参数,Terfenol-D 棒的最佳偏置磁场为 40 kA/m。在以上约束条件下,设置激励电流为 0,只考虑永磁偏置,仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可见,分段式永磁偏置结构在单元数为 8 时偏置磁场大小最接近最佳偏置磁场 40 kA/m,因此,综合考虑偏置磁场大小和实际加工尺寸,确定 GMA 中 Terfenol-D 棒的分段数为 $n = 8$,分段永磁体的长度 $l_{PM} = 1.5 \text{ mm}$,分段 Terfenol-D 棒长度 $l_T = 15 \text{ mm}$,线圈匝数 $N =$

1 200。在以上条件下,永磁偏置和组合磁场云图及磁场强度曲线如图4、5所示。图4(a)所示为GMA在分段永磁体偏置磁场下的磁场分布云图,由图可知在永磁偏置磁场作用下, Terfenol-D 棒的磁场分布均匀;图5(a)所示为GMA在永磁偏置下中心轴线磁场强度的分布情况, Terfenol-D 棒轴线上偏置磁场的最小值大于33 kA/m, 平均值在40 kA/m左右;图4(b)所示为GMA在永磁偏置和直流线圈共同作用下的磁场分布云图,由图可知在组合式驱动磁场作用下, Terfenol-D 棒的磁场分布更加均匀, 磁场强度明显增强;图5(b)所示为GMA在组合式驱

动磁场作用下中心轴线磁场大小的分布情况,由图可知, Terfenol-D 棒轴线上磁场的均匀度增加, 平均值在60 kA/m左右, 在激励线圈的作用下, 磁场增强。

仿真结果表明, 将 Terfenol-D 棒分为8段时, 产生的偏置磁场平均值为40 kA/m左右, 可以取得较好的偏置效果;此时在永磁偏置和电磁驱动磁场的共同作用下, Terfenol-D 棒的磁场分布均匀, 满足工作场合需求。组合式磁场驱动减小了激励线圈的体积, 使GMA结构紧凑、发热减小、降低了温升对致动器性能的影响。

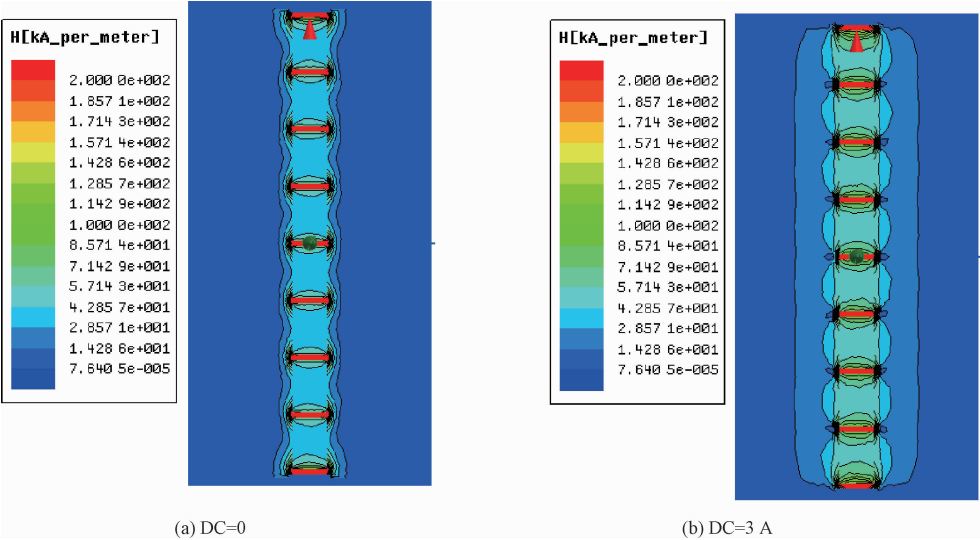


图4 磁场强度分布云图
Fig.4 Distribution of magnetic field intensity

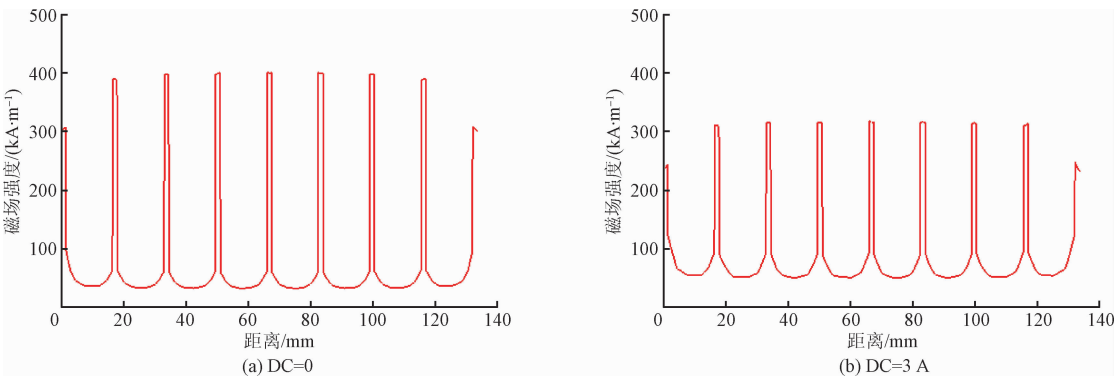


图5 中心轴线磁场强度大小分布
Fig.5 Central axis distribution of magnetic field intensity

3.2 温度场分析与仿真

GMA工作时,激励线圈产生的热量使致动器温度升高,其影响主要包括3个方面^[16-18]:1)影响磁致伸缩系数,由文献[16]可知磁致伸缩系数在40℃以下随温度的升高而增大,在40~50℃,较为稳定,超过50℃时,随温

度升高而缓慢减小。2)影响热膨胀长度,热变形量 S 大小按式(4)计算,其中, α 为超磁致伸缩材料的热膨胀系数, ΔT 为温度变化量, l 为棒的长度。本文选用120 mm的Terfenol-D棒,材料的 $\alpha = (8 \sim 12) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,当温度变化10℃时热变形量为 $(9.6 \sim 14.4) \mu\text{m}$ 。3)影响底座、

输出杆等部件的热膨胀长度。

$$S = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \tag{4}$$

为了减小温度的影响,常采用强制冷却方式,常见的方式为风冷和油冷。本文采用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对致动器的温度场进行稳态热力学分析,为方便分析,适当简化 GMA 的结构,忽略螺钉等因素。根据本文致动器工作的场合,电磁线圈中的工作电流是静

态电流,在对 GMA 选择热力学分析方式及加载热源时,确定主要的传热方式为对流传热,主要热源为线圈通电产生的焦耳热,线圈的电阻 $R = 3 \, \Omega$,由最大工作电流 $5 \, \text{A}$ 计算热源的功率为 $P = 75 \, \text{W}$;设定环境温度为 $t = 22^\circ\text{C}$ 。在以上边界条件下,分别对工作在自然对流方式、风冷方式及油冷方式下 GMA 温度场进行仿真分析,温度分布云图如图 6 所示,其中, h 代表对流传热系数。

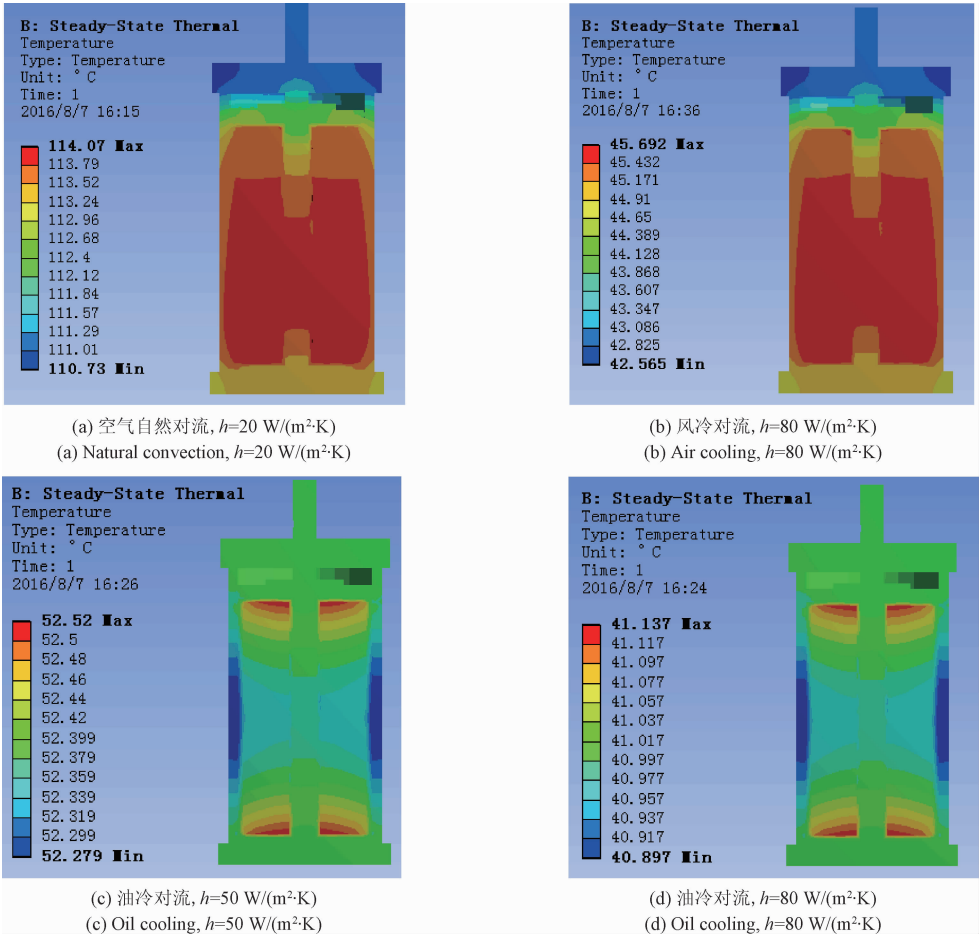


图 6 温度场仿真结果
Fig. 6 Simulation results of temperature field

由图 6(a)可知,无冷却时,当致动器达到热平衡状态,其内部温度超过 100°C ,温度过高影响超磁致伸缩系数,缩短致动器工作寿命;根据图 6(b),在风冷方式下, GMA 的温度明显降低,温度介于 $40 \sim 50^\circ\text{C}$,但是温度分布不均匀,且风冷降温受外部环境影响较大,不易实现精确控制;根据图 6(c) ~ (d),在油冷方式下,当 $h = 50 \, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 为强制油冷最小对流换热系数时,制冷温度为 52°C 左右,接近稳定温度工作范围,当 $h = 80 \, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,致动器温度在 41°C 左右,且致动器各部件温度分布均匀,温度变化小于 0.5°C ,制冷效果明显。基于以上分析, GMA 的制冷方式选择油冷,能够使 Terfenol-D

棒工作在最佳的温度范围, GMA 其他部件温度分布均匀,热变形小,使温度对输出精度影响小;在工作过程中,制冷油在致动器内部循环,受外部影响小,易实现控制。

4 输出力特性研究

本文设计的超磁致伸缩致动器主要用来输出力,因此,本部分主要分析不同直流驱动电流、夹持力、工作温度下 GMA 静态输出力的变化,以及在交流激励电流下 GMA 动态力的输出特性,为 GMA 在不同条件下输出力的实际应用提供依据。

4.1 实验平台

超磁致伸缩致动器输出力的实验测试平台如图 7 所示,主要包括超磁致伸缩致动器、数控恒流源、力传感器、电荷放大器、夹持设备、数据采集模块、主机控制器及冷却系统。GMA 主要参数如表 2 所示;数控恒流源采用可编程双极性电源 YL2410,输出最大电流为 $\pm 10\text{ A}$,最大电压 $\pm 30\text{ V}$,电源控制与数据采集界面采用 C++ 软件编制;静态力的测量选用 JHBR-300 kg 应变式传感器,可直接将力转换为电压输出,对应关系为 $2\,000\text{ N/V}$,数据采集模块采用台湾研华 USB-4711A-AE,其分辨率为 12 位;动态力测量采用 YD-305 压电传感器,量程为 $0\sim 50\text{ kN}$,灵敏度为 4.04 PC/N ,电荷处理设备采用 CA-2 电荷放大器,动态力信号采集模块采用 INV-3018A;输出力实验结果通过 MATLAB 中的滤波程序进行高频去噪处理。

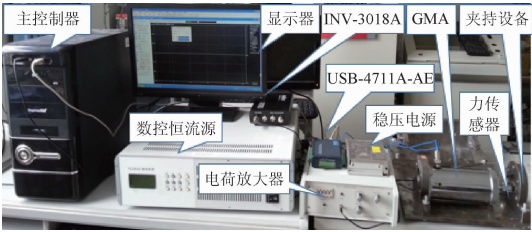


图 7 实验测试系统
Fig.7 The experimental test system

表 2 GMA 的参数
Table 2 Parameters of GMA

参数	取值
Terfenol-D 棒直径/mm	10
分段 Terfenol-D 棒长/mm	15
Terfenol-D 棒段数	8
超磁致伸缩系数	$\geq 1\,000 \times 10^{-6}$
热膨胀系数	$(8 \sim 12) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
碟簧预紧力/MPa	10
永磁体直径/mm	10
分段永磁体长/mm	1.5
永磁体段数	9
线圈匝数	1 200
线圈直流电阻/ Ω	3

4.2 GMA 静态输出力特性

由于实际应用中不可能限制 GMA 输出位移为 0,本文设计约束力可调的夹持设备,分别研究不同约束力下 GMA 的输出力特性。为研究驱动电流与输出力之间的

关系,固定初始机械约束力 600 N ,改变激励线圈中直流驱动电流大小,电流-输出力对应关系如图 8 所示。其中,图 8(a)所示为当电流大小分别在 $-1\sim +1\text{ A}$ 、 $-1.5\sim +1.5\text{ A}$ 、 $-2\sim +2\text{ A}$ 及 $-3\sim +3\text{ A}$ 四个范围内循环变化时输出力的变化;图 8(b)所示为电流的变化量对应的输出力的变化量。由图 8(a)可知,在直流激励下,输出力具有磁滞非线性,电流变化范围越大,其磁滞越大,输出力曲线线性度越差。由图 8(b)可知,当电流变化量为 6 A 时,输出力变化量可达 300 N 以上,在 4 个电流范围的上升过程中,相同的电流变化量对应的力的变化有一定的偏差,这种偏差主要由 GMA 的核心元件 Terfenol-D 棒本身特性及外界工作环境变化引起。

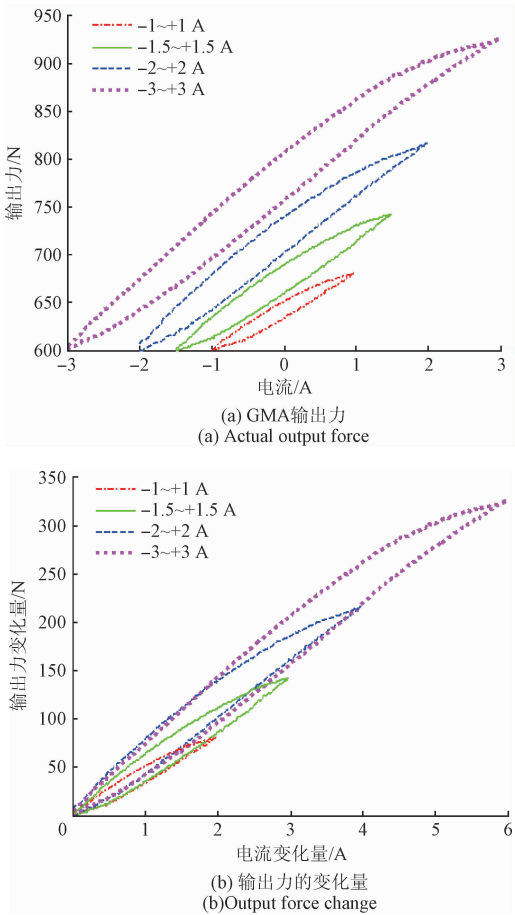


图 8 直流驱动电流对 GMA 静态输出力的影响
Fig.8 Effect of different DC on the static output force of the GMA

对 GMA 分别施加 400 N 、 600 N 和 800 N 的约束力时,输出力与电流的关系如图 9 所示。其中,图 9(a)所示为当电流从 $-3\sim +3\text{ A}$ 循环变化时 GMA 输出力的情况;图 9(b)所示为电流的变化量对应的不同机械约束力下

输出力的变化情况。由图 9 可知,当对 GMA 施加 800 N 约束力,GMA 的输出力大于 1 100 N,在不同的外部机械约束力作用下,GMA 磁滞非线性变化量基本一致,外部机械约束对本文设计 GMA 的磁滞非线性影响较小。

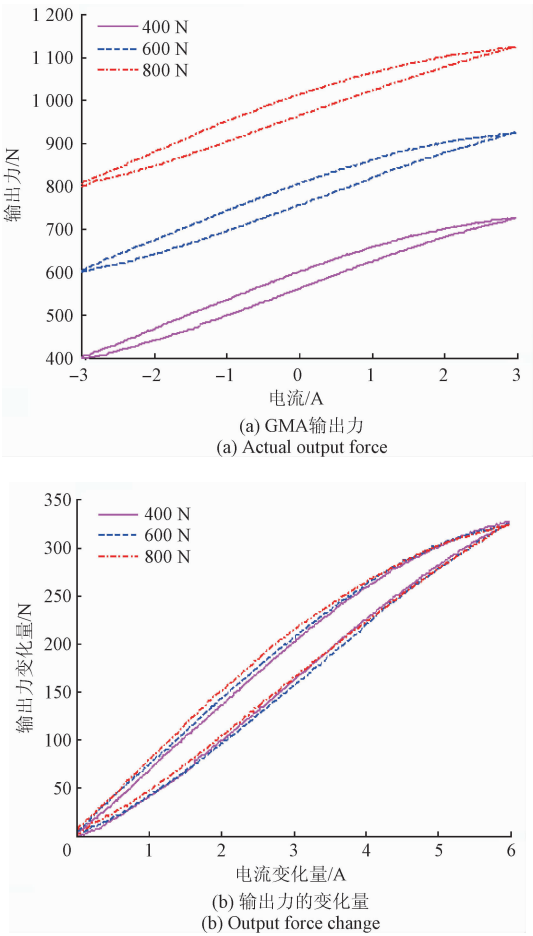


图9 不同机械约束力对静态输出力的影响
Fig.9 Effect of different mechanical constraint force on static output force of the GMA

为研究温度对 GMA 输出力特性的影响,本文设计了不同温度下 GMA 的输出力特性实验。图 10(a)所示为电流由 -5 A 增加到 +5 A,工作温度分别为 30℃、40℃、50℃ 和 60℃ 时 GMA 的输出力情况;图 10(b)所示为 GMA 50℃ 时,电流从 -5 ~ +5 A 循环变化时输出力情况。由图 10(a)可知,随温度升高,相同电流下的 GMA 输出力变大,但输出力的变化量基本不变:温度每升高 10℃,GMA 输出力特性曲线整体上移,温度由 40℃ 变化到 50℃ 时,力的变化相对较小,输出特性相对稳定。GMA 采用油冷降温时,温度可保持在 50℃ 左右,由图 10(b)可知,在 -3 ~ +3 A 工作范围内 GMA 输出力线性好、稳定性好。

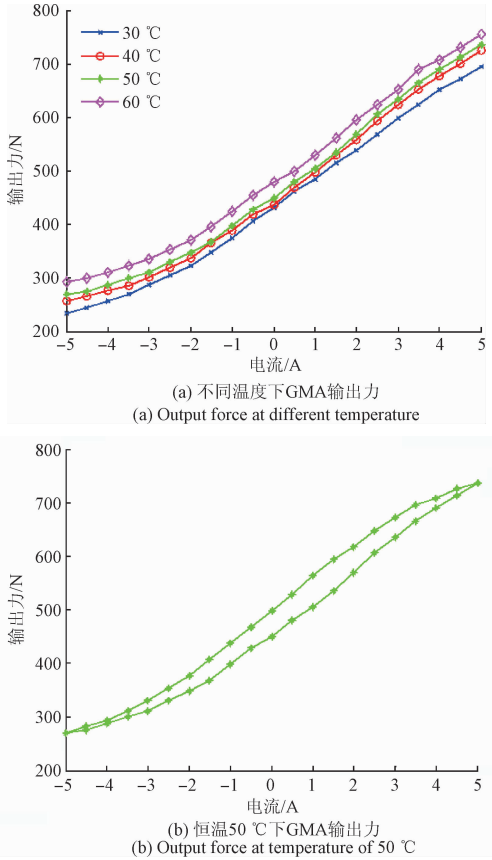


图 10 温度对静态输出力的影响
Fig.10 Effect of temperature on the static output force of the GMA

4.3 GMA 动态输出力特性

本文设计的超磁致伸缩致动器主要应用于滚珠丝杠预紧力的动态调整,因工作场合一般在低频段,因此,以下仅讨论 GMA 在低频状态下(100 Hz 以下)的动态输出力特性。在 600 N 约束力作用下,分别给 GMA 施加幅值为 2.5 A,频率 1 ~ 100 Hz 正弦交流信号,输出力对输入电流正弦信号的跟踪性能如图 11 所示,根据实验测量值绘制的频率响应特性曲线如图 12 所示。因为动态特性研究讨论的主要是输入输出波形的相互关系,与坐标轴单位无关,为了提高显示效果,图 11 中采用电压-时间表现形式,纵坐标为与输入电流、输出力大小对应的测量电压值。由图 11 可知,当输入信号频率为 20、40 和 80 Hz 时,GMA 输出力没有出现倍频效应能很好地跟踪交流信号频率,但随着频率增加滞后误差也有所增大。由图 12 可看出,在工作频段内,幅值与相位随频率变化较小,经计算幅值变化小于 1 dB,相位滞后的相对误差小于 3%,说明输出力大小受频率影响较小。综上可见,在低频交流激励作用下,GMA 输出力能很好地跟踪交流信号频率,分段式偏置磁场可以提供较好的偏置效果,设计的 GMA 具有较高的精度和较好的动态响应特性。

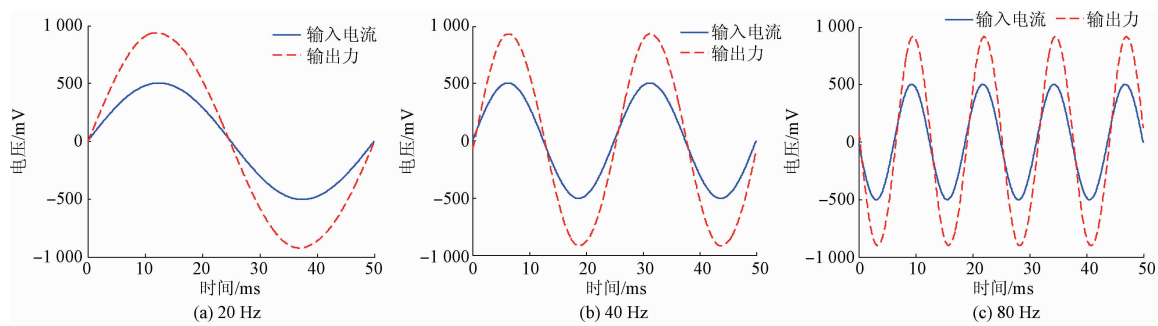


图 11 正弦输入信号跟踪性能

Fig. 11 The tracking performance of sine input signals

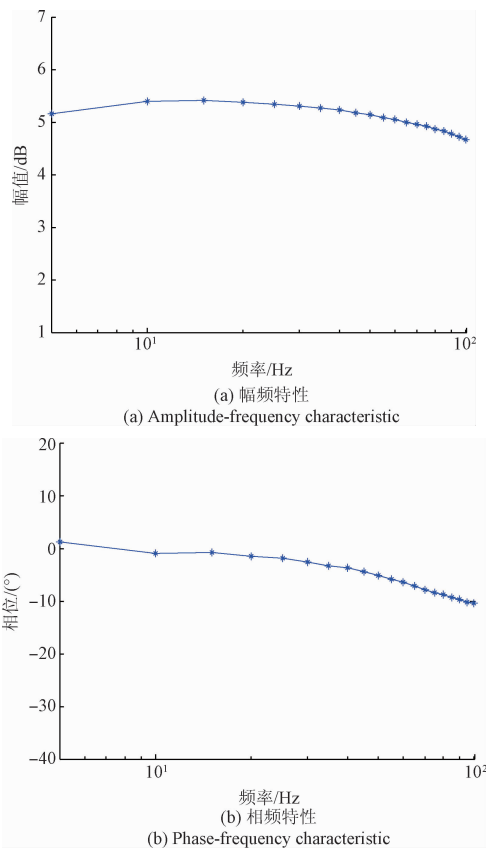


图 12 频率响应特性

Fig. 12 Frequency response characteristics

为分析致动器在其工作频率内的失真情况,本文采用时频法,即总谐波失真加噪声 (total harmonic distortion + noise, THD + N) 技术,测量了不同频率下 GMA 输出信号的失真度,该方法结合时域和频域信号进行计算,将基频以外的所有成分作为总失真,其优点是能很好地反映系统的保真度,且不受频谱精度影响,在测量波形较短的情况下,也能准确计算信号的失真度。在 1 ~ 100 Hz 正弦交流激励作用下,失真度测量结果如图 13 所示。可看出,工作频段内 GMA 输出信号失真较小,失真度小于 1.8%,满足应用场合动态力调整需要。

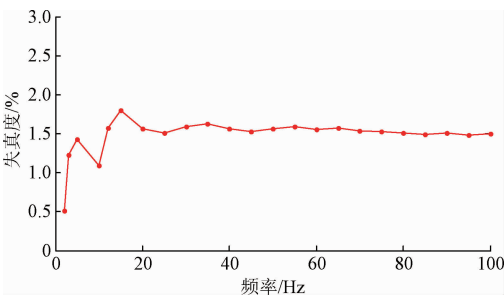


图 13 失真度-频率曲线

Fig. 13 Distortion-frequency curve

5 结 论

本文首先分析了 GMA 的工作原理与机械结构,采用 Ansoft Maxwell 16 对 GMA 的磁场进行仿真研究,结果表明分段式偏置磁场可以取得较好的偏置效果,组合式磁场驱动结构减小了激励线圈的体积,降低了温升对致动器性能的影响;分析了温度对 GMA 性能的影响,采用 ANSYS 有限元分析软件对风冷与油冷方式的冷却效果进行对比研究,从而确定了油冷散热方式。自行研制 GMA 并搭建输出力测试平台,分别对 GMA 的静态输出力与动态输出力特性进行了研究。实验结果表明 GMA 的输出力能够满足设计要求,GMA 静态输出力具有磁滞非线性且磁滞和激励电流范围正相关,输出力特性受外部约束力影响较小但受温度影响较大;油冷散热方式效果明显;在低频正弦激励下,GMA 动态输出力跟踪误差较小,没有出现倍频效应,输出信号失真较小。本文研究内容为 GMA 在实际中的应用提供了理论支持和实验依据,具有重要的参考意义。

参考文献

[1] 夏春林,丁凡,路甬祥. 超磁致伸缩材料的特性参数测量及其应用研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(4):368-370.

XIA CH L, DING F, LU Y X. The measurement of features of magnetostrictive material and its

- application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(4):368-370.
- [2] 梅德庆, 浦军, 陈子辰. 用于超精密隔振的稀土超磁致伸缩致动器设计[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(6):766-769.
- MEI D Q, PU J, CHEN Z CH. Design of rare earth giant magnetostrictive actuator for ultra-precision vibration isolation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(6):766-769.
- [3] YOSHIOKA H, SHINNO H, SAWANO H. A newly developed rotary-linear motion platform with a giant magnetostrictive actuator [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1):371-374.
- [4] XUE G J, ZHANG P L, HE Z B, et al. Design and experimental study of a novel giant magnetostrictive actuator [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016, 420(15):185-191.
- [5] ZHANG T, YANG B T, LI H G, et al. Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 190(2):96-105.
- [6] FILIPOVIC A J, SUTHERLAND J W. Assessing the performance of a magnetostrictive-actuated tool holder to achieve axial modulations with application to dry deep hole drilling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2007, 9(2):75-86.
- [7] MOON S J, LIM C W, KIM B H, et al. Structural vibration control using linear magnetostrictive actuators [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4-5):875-891.
- [8] SADIGHI A, KIM W J. Sensorless control of a novel linear magnetostrictive motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 47(2):1726-1731.
- [9] ZHU Y CH, LI Y S. Development of a deflector-jet electrohydraulic servovalve using a giant magnetostrictive material [J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(11):115001.
- [10] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(12):1806-1812.
- JIA D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015(12):1806-1812.
- [11] 翟鹏, 肖博涵, 贺凯, 等. 超磁致伸缩致动器的复合反馈控制及其在变椭圆销孔精密加工中的应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6):1389-1398.
- ZHAI P, XIAO B H, HE K, et al. Composite backward control for GMA and its application in high precision machining of variable ellipse pinhole [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6):1389-1398.
- [12] XU A Q. Study on the dynamic characteristics of a high frequency brake based on giant magnetostrictive material [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(6):065001.
- [13] DAPINO M J. Nonlinear and hysteretic magnetomechanical model formagnetostrictive transducers [D]. Ames; Iowa State University, 1999.
- [14] NOH M D, PARK Y W. Topology selection and design optimization for magnetostrictive inertial actuators [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7):07E715 - 07E715-3.
- [15] YANG ZH SH, HE ZH B, LI D W, et al. Bias magnetic field of stack giant magnetostrictive actuator: design, analysis, and optimization [J]. Advances in Material Science and Engineering, 2016:1-13, doi:10.1155/2016/1704594.
- [16] CLARK A E, CROWDER D. High temperature magnetostriction of TbFe₂ and Tb. 27 Dy. 73 Fe₂ [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21(5):1945-1947.
- [17] 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, 2000, 21(1):38-41.
- JIA Y H, TAN J B. Study on micro-position actuator system of giant magnetostriction materials [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1):38-41.
- [18] 卢全国, 陈定方, 钟毓宁, 等. 超磁致伸缩致动器热变形影响及温控研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(1):16-19.
- LU Q G, CHEN D F, ZHONG Y N, et al. Research on thermal deformation and temperature control of giant magnetostrictive actuator [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(1):16-19.

作者简介



鞠晓君, 2007 年于山东科技大学获得硕士学位, 现为山东大学博士研究生, 主要研究方向为机电一体化技术。

E-mail: juxiaojun123@sina.com

Ju Xiaojun received her M. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2007. Now she is a Ph. D. candidate in Shandong University. Her main research interest is mechatronics technology.



林明星 (通讯作者), 1999 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为山东大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机电一体化技术。

E-mail: mxlin@sdu.edu.cn

Lin Mingxing (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 1999 from China University of Mining and Technology. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Shandong University. His main research interest is mechatronics technology.