

强偏置超磁致伸缩致动器准静态位移建模与试验*

薛光明¹ 张培林¹ 何忠波¹ 曾 威² 李冬伟¹

(1. 机械工程学院车辆与电气工程系, 石家庄 050003; 2. 广州军区综合训练基地三大队, 衡阳 421000)

摘要: 为满足电控喷油器球阀开闭的要求, 设计了强偏置超磁致伸缩致动器。阐述了强偏置超磁致伸缩致动器的工作原理, 基于其偏置特征分析了致动器适用的正弦波信号。根据磁阻理论、J-A 模型、二次畴转模型和线性系统理论建立了强偏置致动器的准静态位移模型, 计算了此模型致动器方波输入时位移幅值和电流幅值的关系, 正弦波输入时位移-电流滞环曲线, 幅值为 3 A 的方波电流输入时的致动器位移输出。设计了强偏置致动器的试验系统, 通过同幅值反向的方波信号辨别输入方向, 并进行了致动器的方波和正弦波测试。结果表明: 模型计算得到的方波位移幅值特性以及谐波位移-电流滞环与试验结果吻合, 由此验证了模型的准确性; 强偏置致动器在 3 A 方波电流输入时位移超过 30 μm, 响应时间约为 10 μs, 超调量为零, 具有较好的驱动性能。

关键词: 超磁致伸缩致动器 强偏置磁场 准静态位移模型 方波响应 正弦波响应 电控喷油器

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0318-07

Modelling and Experiment of Strong Bias Giant Magnetostrictive Actuator's Semi-static Displacement

Xue Guangming¹ Zhang Peilin¹ He Zhongbo¹ Zeng Wei² Li Dongwei¹

(1. Department of Vehicles and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

2. The Third Brigade Comprehensive-training-base, Guangzhou Military Region, Hengyang 421000, China)

Abstract: Giant magnetostrictive actuator characterized with strong bias magnetic field was designed to control the injector bullet valve opening and closing. Working principle of the actuator was described and suitable sinusoidal signals were analyzed by its bias characteristics. Semi-static model of the actuator displacement was established through reluctance theory, J - A model, quadratic domain-transfer model and linear system theory. Based on the model, the relationship between displacement and current amplitude under square signal was achieved, so did the displacement-current curve under sinusoidal signal and the displacement-time curve under square signal with the amplitude of 3 A. Experimental system for the actuator was established, and the signal directions were recognized by testing under square signals with the same value while opposite directions. The testing displacements under sinusoidal and square signals were acquired. From the results, the displacement amplitudes under square signals and displacement-current curves under sinusoidal signals, calculated through the model, were similar to the testing results. Then the validation of the semi-static model was verified. The simulation of the actuator with an ordinary electrical injector input was done. With the square signal input in the amplitude of 3 A, the steady-state displacement of the actuator was above 30 μm, responding time was about 10 μs, and overshoot was 0. The simulating results showed good performance of the actuator.

Key words: Giant magnetostrictive actuator Strong bias magnetic field Semi-static displacement model Square response Sinusoidal response Electrical injector

收稿日期: 2014 - 09 - 15 修回日期: 2014 - 10 - 19

* 国家自然科学基金资助项目(51275525)

作者简介: 薛光明, 博士生, 主要从事基于高压共轨系统的超磁致伸缩喷射阀研究, E-mail: yy0youxia@163.com

引言

超磁致伸缩材料 (Giant magnetostrictive material, GMM) 具有响应速度快、输出力大和磁机转换系数高等优良特性^[1]。超磁致伸缩致动器 (Giant magnetostrictive actuator, GMA) 是 GMM 的主要应用形式, 可作为减振降噪、精密加工、流体器件设计等领域的驱动器, 展现了优良的输出特性^[2-6]。

GMA 一般包括磁场施加系统、预压机构和冷却系统, 其中生磁器件的激励线圈和偏置磁铁 (或直流线圈) 为 GMM 提供一定强度的磁场。为适应一定的工作要求, 不同学者设计了不同形式的致动器结构, 如不设计冷却水道以缩减致动器体积、不施加偏磁以利用倍频特性、采用薄膜式的 GMM 等^[7-10]。这些新型致动器的输出特性与传统致动器有所不同。

高压共轨喷油器的球阀开闭对驱动器的高响应速度和大位移等方面有较高要求, 一般由电磁式或压电式驱动器控制, 然而电磁式响应较慢, 压电式需额外设定强电流输入等问题使得其性能提升存在瓶颈^[11-14]。本文拟设计超磁致伸缩式致动器以满足该驱动需求。由于驱动器输出端顶住喷油器部件, 外壳又与喷油器体刚性连接, 若 GMM 棒伸长, 致动器的大输出力将会损坏连接件并造成断电后的间隙, 致使球阀无法稳定关闭。为避免此现象, 拟施加强偏置磁场使 GMM 棒在不加磁场时即处于较长状态, 通入一定方向的电流后 GMM 棒缩短而球阀开启。本文以强偏置 GMA 为研究对象, 分析其输出特性, 建立准静态^[15] (输入信号频率低于 100 Hz, 系统高频特性不明显) 位移模型, 并通过试验验证模型的准确性。

1 强偏置 GMA 工作原理

对于高压共轨系统, 要求球阀驱动器输出位移不小于 30 μm , 响应时间不大于 1 ms, 为此设计强偏置 GMA 结构如图 1 所示^[16]。

为缩减致动器的体积, 强偏置致动器采用组合式驱动结构, 即由永久磁铁提供偏置磁场, 电磁线圈提供驱动磁场。永磁体采用圆筒形式, 保证施加在 GMM 棒上的磁场强度较大且均匀, 且较易设计闭合磁路。采用碟簧为 GMM 棒提供预压力, 能够以较小的尺寸提供足够大的刚度, 而且碟簧存在刚度变化较小的区间, 通过调整端盖和外壳间的螺纹, 可使碟簧在保持恒定压力的同时刚度几乎不变, 这利于 GMM 棒工作状态的稳定。

如图 2 所示, 强偏置 GMA 初始状态与一般偏置

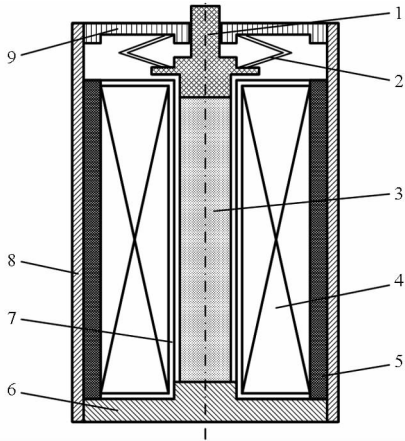


图 1 强偏置超磁致伸缩致动器结构图

Fig. 1 Structure diagram of strong bias GMA

1. 输出杆 2. 碟簧 3. GMM 棒 4. 线圈 5. 偏置磁铁 6. 底座
7. 线圈骨架 8. 外壳 9. 端盖

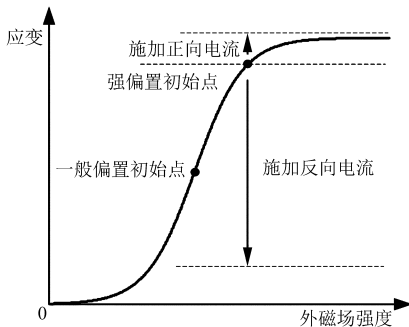


图 2 强偏置 GMA 工作状态

Fig. 2 Working states of strong bias GMA

的 GMA 不同, 为保证致动器正常输出, 输入信号需指定方向。

由于偏置较大, GMM 棒一开始便处于较长状态, 若通入正向电流, 电流产生的磁场与偏置磁场方向相同, 由于 GMM 棒已趋于磁饱和, 棒应变增大很小, GMA 输出位移较小。若通入反向电流, 电流产生的磁场与偏置磁场方向相反, GMM 棒缩短, GMA 输出位移较大。

因此若要进行正弦波信号测试, 为避免 GMA 位移在电流小于零段截止, 需将正弦信号与等幅值的直流信号叠加再输入, 如图 3 所示。相应地, 输出也近似为叠加了直流的正弦形式。

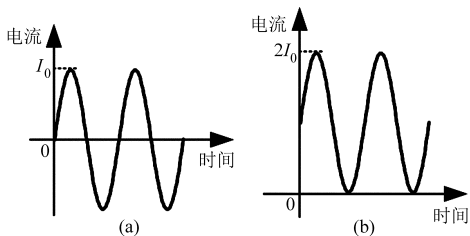


图 3 适用于强偏置 GMA 的正弦信号

Fig. 3 Sinusoidal signal suitable for strong bias GMA

- (a) 普通正弦信号 (b) 叠加了等幅值直流的正弦信号

2 强偏置 GMA 输出位移建模

建立强偏置 GMA 的位移模型是指建立电流-磁场强度-磁化强度-磁致伸缩应变-位移的模型。

强偏置 GMA 磁路为闭合磁路,且总磁阻为 GMM 棒磁阻与轭铁(包括端盖、外壳和底座)、空气隙(输出杆和端盖之间)磁阻之和。磁阻与磁路长度成正比,与材料磁导率成反比,由于轭铁的磁导率远大于 GMM,且空气隙的长度很小,因此这两段磁路磁阻远小于 GMM 棒磁阻,回路磁阻约等于 GMM 棒磁阻,磁动势主要位于 GMM 棒上,即

$$Hl \approx NI \tag{1}$$

式中 H ——激励电流产生的磁场强度,A/m
 l ——棒长,m N ——线圈匝数
 I ——线圈电流,A

为补偿轭铁和气隙的磁阻,可在式(1)右侧添加小于1的磁阻系数 C ,整理即^[17]

$$H = C \frac{NI}{l} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \frac{dM}{dH} = \frac{M_s c (1/z^2 + 1 - \coth^2 z) + \frac{a [M_s (\coth z - 1/z) - M]}{\delta k - \tilde{\alpha} [M_s (\coth z - 1/z) - M] / (1 - c)}}{a - M_s c \tilde{\alpha} (1/z^2 + 1 - \coth^2 z)} \\ z = \frac{H_b - H + \tilde{\alpha} M}{a} \end{cases} \tag{4}$$

式中 α ——与分子场和预应力相关的磁化参数
 M_s ——饱和磁化强度 c ——可逆系数
 a ——无磁滞形状系数
 k ——不可逆损耗系数
 δ ——符号参数

需要说明的是,式(4)确定的 M - H 曲线包括 δ 分别取 -1 和 1 两条,当电流增大时,激励磁场 H 增大,外磁场 $H_b - H$ 减小, $\delta = -1$;当激励磁场 H 减小时, $\delta = 1$,这与一般偏置 GMA 相反。

GMM 轴向磁致伸缩应变 λ 与磁化强度 M 的关系可由二次畴转模型给出

$$\lambda = \frac{3\lambda_s}{2M_s^2} M^2 \tag{5}$$

式中 λ_s ——饱和磁致伸缩应变

根据磁致伸缩应变建立致动器位移模型,基于以下假设^[15]:①GMM 棒内的磁场强度 H 、磁化强度 M 、轴向应变 ε 和应力 σ 分布均匀。②碟簧响应速度足够快,输出端与连接负载始终具有相同的位移。③动力学分析时,GMM 棒在轴向上表现为均质弹性杆。④负载(空载时为输出杆)为质量-弹簧-阻尼型负载。GMA 可简化为如图 4 所示的线性定常系

低频信号输入时,GMM 棒涡流损耗较小,Jiles - Atherton 模型是描述准静态磁滞特性的常用模型。J - A 模型是基于畴壁理论的磁化强度磁滞模型,采用 5 个方程建立 GMM 棒外加磁场(包括偏置磁铁和激励线圈产生的磁场)、有效磁场 H_e 、无磁滞磁化强度 M_{an} 、不可逆磁化强度 M_{irr} 、可逆磁化强度 M_{rev} 和总磁化强度 M 之间的关系。由第 1 节分析可知,GMM 棒上外加磁场为偏置磁场 H_b 与式(2)计算的驱动磁场 H 之差,代入 J - A 模型即得磁化强度与磁场强度之间的关系

$$\begin{cases} H_e = H_b - H + \tilde{\alpha} M \\ M_{an} = M_s (\coth(H_e/a) - a/H_e) \\ \frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \tilde{\alpha} (M_{an} - M_{irr})} \\ M_{rev} = c (M_{an} - M_{irr}) \\ M = M_{irr} + M_{rev} \end{cases} \tag{3}$$

整理式(3)可得

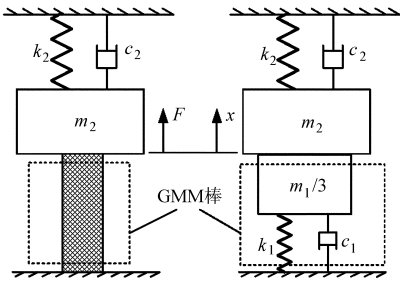


图 4 超磁致伸缩致动器等效模型

Fig. 4 Equivalent model of strong bias GMA

统,以系统静平衡位置为位移坐标原点,系统运动微分方程为

$$\left(m_2 + \frac{m_1}{3}\right) \frac{d^2x}{dt^2} + (c_2 + c_1) \frac{dx}{dt} + (k_2 + k_1)x = F \tag{6}$$

式中 m_1 ——GMM 棒等效质量(均匀弹性元件在棒端的等效质量为棒质量的 1/3)
 m_2 ——输出杆质量
 k_1 ——GMM 棒等效刚度
 k_2 ——碟簧刚度
 c_1 ——GMM 棒等效阻尼系数
 c_2 ——碟簧阻尼系数

x ——致动器输出位移
 F ——磁致伸缩应变对应的驱动力
 k_1 和 F 表达式为

$$\begin{cases} k_1 = E^H A / l \\ F = k_1 l (\lambda_0 - \lambda) = E^H A (\lambda_0 - \lambda) \end{cases} \quad (7)$$

式中 E^H ——GMM 棒弹性模量
 A ——横截面积
 λ_0 ——磁致伸缩应变初值
联立式(2)、(4)、(5)、(6)和(7)即得基于电流的强偏置 GMA 准静态输出位移模型。

3 试验测试

3.1 试验系统

用于测试强偏置 GMA 位移的试验系统如图 5 所示。试验过程为：计算机产生的数字信号经 PS2000 型数字示波器转化为模拟信号，模拟信号经 GF800 型功率放大器放大输入强偏置 GMA，GMM 棒伸长或缩短，GMA 输出位移，采用 HN808 型电涡流传感器测量 GMA 动态位移，并将测得的位移数据输入计算机进行处理。计算机使用 Visual Basic 6.0 编制软件产生数字信号并记录致动器的位移。

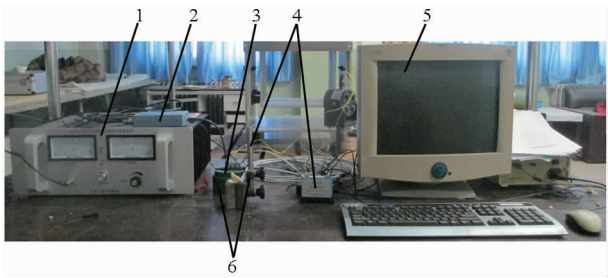


图 5 试验系统
Fig.5 Experimental system

1. 功率放大器 2. 数字示波器 3. 致动器 4. 电涡流传感器及其探头 5. 计算机 6. 夹持机构

为保证较大磁致伸缩应变,GMM 棒采用定向凝固法制备;偏置磁铁由 3 块圆柱形永磁体线切割为圆筒,再采用磁铁粘结剂粘结;输出杆、端盖、外壳和底座均采用高磁导率的 15 号低碳钢。致动器主要参数如表 1 所示。

3.2 输入信号方向检测

试验时,首先为致动器输入幅值相同、方向相反的方波信号,对比这两种情况下致动器位移幅值,幅值较大则说明输入方向为反向。

输入电流幅值为 1.2 A、频率为 20 Hz、PS2000 始终产生正向的方波信号,通过变换 GMA 接头与功率放大器接线柱的接线位置实现方波信号方向的变换。两种接线形式分别设定为 a、b,测得致动器位移输出响应如图 6 所示。

表 1 GMA 主要参数
Tab.1 Specifications of GMA

参数	取值
GMM 棒长度/mm	35
GMM 棒直径/mm	5
GMM 棒密度/(kg·m ⁻³)	9 500
输出杆质量/g	10
碟簧刚度/(N·m ⁻¹)	2.3 × 10 ⁵
GMM 棒弹性模量/(N·m ⁻²)	3 × 10 ¹⁰
饱和磁化强度/(A·m ⁻¹)	8.0 × 10 ⁵
饱和磁致伸缩应变	8 × 10 ⁻⁴
偏置磁场强度/(A·m ⁻¹)	5.45 × 10 ⁵
线圈匝数	900
线圈常数	0.9
负载等效阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)	560
磁化参数	-0.01
无磁滞形状系数/(A·m ⁻¹)	7 050
不可逆损耗系数/(A·m ⁻¹)	3 208
可逆系数	0.18
GMM 棒等效阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)	1.12 × 10 ³
磁致伸缩应变初值	1.0 × 10 ⁻³

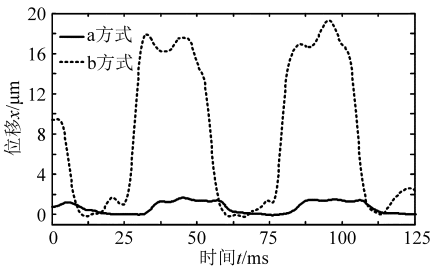


图 6 致动器方波响应
Fig.6 Square responses of GMA

由试验结果可知,若采用 a 方式接线,致动器输出幅值仅约为 1.5 μm,而采用 b 方式的致动器输出幅值约为 17 μm。因此,b 方式可保证 GMA 正常工作,此时,PS2000 应输出数值为正的电信号,为致动器输入反向电流。

3.3 位移幅值特性结果对比

输入信号为方波信号,电流频率为 20 Hz,幅值分别为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 A 时,获取位移试验结果,并采用第 2 节模型进行计算,幅值特性曲线如图 7 所示。由于位移试验结果

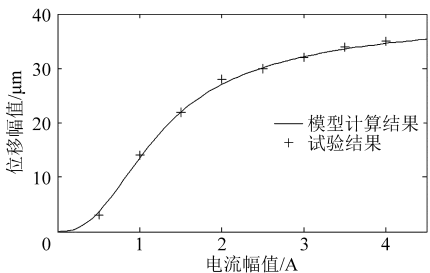


图 7 方波响应结果对比
Fig.7 Contrast of square responses

并非标准的方波曲线,采用取平均值的方法确定方波幅值。试验结果为数值点,截取高电流时的位移极小值(若有多个取最小)和极大值(若有多个取最大),提取所有处于极小值和极大值之间的位移数值点,计算其平均值作为该周期的位移幅值。依此方法计算 5 个周期幅值取平均作为该电流幅值下的位移幅值。

由试验结果可知,模型最大误差为 0.9 μm ,出

现在电流幅值为 2.0 A 处,此处位移幅值为 28 μm ,误差约占幅值的 3.2%,表明模型较为准确。

3.4 位移-电流滞环结果对比

采用 b 方式接线,PS2000 提供叠加过直流的正弦信号,经功率放大器放大输入致动器,输入电流频率分别设定为 25、50、75、100 Hz,每个频率下电流峰值分别为 0.5、1.5、2.5、3.5 A,每隔 0.204 8 ms 进行一次采样,试验及模型计算结果如图 8 所示。

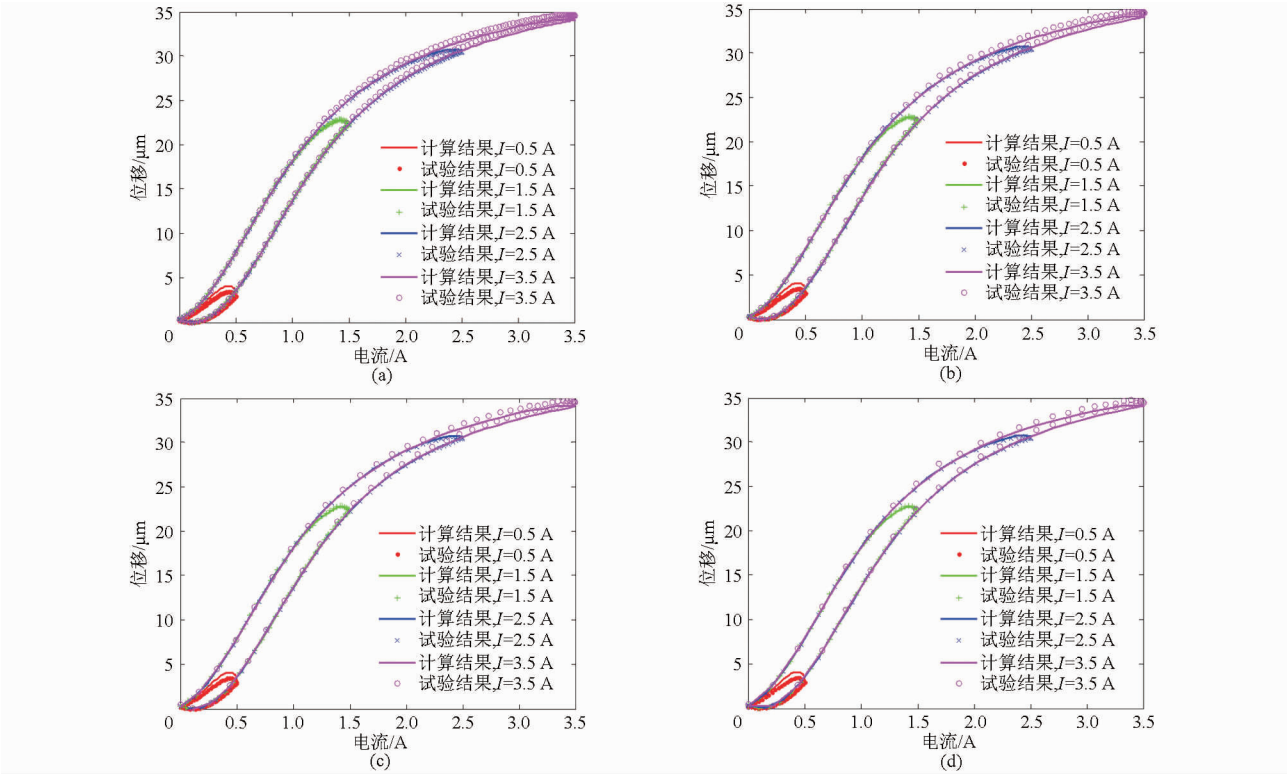


图 8 致动器正弦响应结果对比
Fig.8 Contrast of sinusoidal responses
(a) $f=25\text{ Hz}$ (b) $f=50\text{ Hz}$ (c) $f=75\text{ Hz}$ (d) $f=100\text{ Hz}$

位移试验结果为时域数据点,采用 Matlab 中的 SPTool 工具箱进行高频滤噪,滤噪截止频率下限设定为信号频率的 2 倍(40 Hz)。滤噪后,提取 10 个周期的数据点并取平均作为一次试验的位移。

模型计算结果包括电流增大和减小两部分,首先计算电流增大部分的位移结果,其位移终值作为下降部分的位移初值进行计算。

由试验及模型计算结果可知,输入信号频率不高于 100 Hz 时,试验结果变化较小(由于模型没有考虑高频损耗,计算结果不受频率影响);而且无论是低幅值电流还是高幅值电流输入,由本文准静态模型计算得到的位移-电流曲线与试验结果基本吻合,再次验证了模型的准确性。

4 方波响应分析

输入电控喷油器驱动器的主喷脉宽为改进的方

波信号,喷油器性能与驱动器的方波信号响应直接相关。下面通过第 2 节模型研究强偏置 GMA 的响应速度及输出位移。

输入电流信号如图 9 所示,上升和下降时刻分别为 1 ms 和 3 ms 处,阶跃时间为 0.01 ms,电流幅值为 3 A。强偏置 GMA 线圈静态阻抗为 7.9 Ω ,常用车载电压为 24 V,因此输入电流幅值设定为 3 A 更符合实际。

输入信号可分为如图 9 所示的 1~5 共计 5 段,建模时,以 3 ms 处为分界点,1、2、3 段为上升段,式(4)取 $\delta = -1$;4、5 段为下降段,取 $\delta = 1$,其初值为上升段终值。

模型计算的方波响应如图 10 所示。由计算结果可知,强偏置 GMA 稳态位移较大,约为 32.5 μm ,位移上升时间(零至最大位移)及下降时间(最大位移至零)均约为 10 μs ,系统超调量为零。

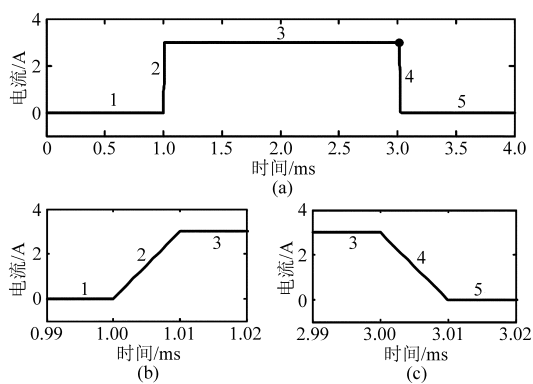


图9 输入的方波电流信号

Fig.9 Square current input for GMA

(a) 方波电流分段 (b) 上升段 (c) 下降段

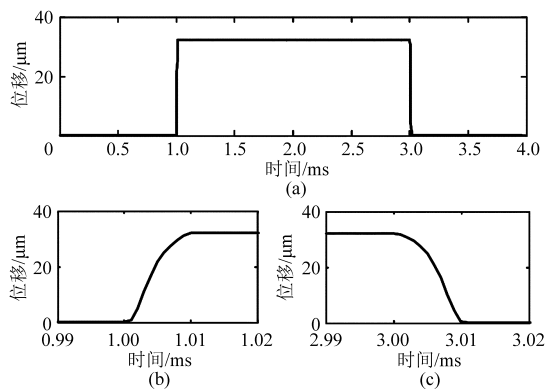


图10 方波响应仿真结果

Fig.10 Square responses of simulation

(a) 方波响应 (b) 上升段 (c) 下降段

采用3.1节的试验系统进行测试,测得致动器稳态位移为0.032 mm,超调量为零,验证了模型计

算结果的准确性。对于响应时间,由于信号源输出的是电压信号,可根据电流曲线和位移曲线得到电流和位移的响应时间,分别约为0.660、0.674 ms,则基于电流估算的致动器响应时间为二者的差值,约为14 μs,与仿真结果接近,产生误差的原因可能是式(6)中GMM棒的等效阻尼系数 c_1 取值偏小。

综合模型及试验结果可知,强偏置致动器输出位移较大,响应速度很快,输出平稳,优于传统的电磁式驱动器,能够满足第1节提出的电控喷雾器性能需求。

5 结论

(1) 设计了喷雾器用的强偏置超磁致伸缩致动器,其特征为偏置磁铁将GMM偏置于大应变位置,GMM棒处于最长状态。施加反向电流后,GMM棒上磁场强度减小而缩短,致动器输出位移,断电后致动器恢复长度。

(2) 基于磁阻理论、J-A模型、二次畴转理论和线性系统理论建立了强偏置GMA的准静态位移-电流模型,并计算了致动器的方波幅值特性和正弦波位移-电流滞环特性,模型结果与试验结果比较吻合,验证了模型的准确性。

(3) 根据建立的模型分析了指定信号强度下强偏置GMA的方波时域响应,并用试验结果进行了部分验证。结果表明,所设计的致动器位移幅值、响应速度、超调量表现优良。

参 考 文 献

- 1 卢全国,陈定方,魏国前,等. GMM的发展现状及其在精密致动器件中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2006, 21(3): 92-94.
Lu Quanguo, Chen Dingfang, Wei Guoqian, et al. Development of giant magnetostrictive materials and its application in the field of precision actuators[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2006, 21(3): 92-94. (in Chinese)
- 2 薛光明,何忠波,李冬伟,等. 超磁致伸缩材料在液压阀中的应用现状[J]. 液压与气动, 2013(4): 94-98.
Xue Guangming, He Zhongbo, Li Dongwei, et al. Application of giant magnetostrictive material in hydraulic valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(4): 94-98. (in Chinese)
- 3 Wang Chuanli, Ding Fan, Li Qipeng. Study on driving magnetic field and performance of GMA for nozzle flapper servo valve[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2007, 13(2): 207-210.
- 4 Vranish J M, Naik D P, Restorff J B, et al. Magnetostrictive direct drive rotary motor development[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1991, 27(6): 5355-5357.
- 5 Sahashi M, Kobayashi T, Domon T. A new contact amorphous torque sensor with wide dynamic range and quick response[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1987, 23(5): 2194-2196.
- 6 Claeysen F, Lhermet N, Letty R L, et al. Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1997, 258(1): 61-73.
- 7 李超,李琳. 磁致伸缩材料作动器用于主动振动控制的实验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 134-139.
Li Chao, Li Lin. Active vibration control using magnetostrictive material[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 134-139. (in Chinese)
- 8 张雷,邬义杰,刘孝亮,等. 嵌入式超磁致伸缩构件多场耦合优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 190-196.
Zhang Lei, Wu Yijie, Liu Xiaoliang, et al. Multi-field coupling model of embedded giant magnetostrictive components optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 190-196. (in Chinese)
- 9 Hirohisa T, Yasukazu S, Takahiro U. Development of a common-rail proportional injector controlled by a tandem arrayed giant magnetostrictive actuator[J]. JSAE Review, 2001, 22(3): 369-371.

10 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 modelling and analysis of giant magnetostrictive actuator for jet servo valve[J]. Journal of China Ordnance, 2010, 31(12): 1587 – 1592. (in Chinese)

11 李育学, 张静秋, 欧阳光耀. 电控喷油器的优化设计[J]. 内燃机学报, 2006, 24(3): 270 – 275.
Li Yuxue, Zhang Jingqiu, Ouyang Guangyao. Optimization designing of electronically controlled injector[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(3): 270 – 275. (in Chinese)

12 樊艮, 王建平, 曹诚, 等. 柴油机高压共轨系统仿真研究[J]. 内燃机, 2011, 2(1): 39 – 41.
Fan Gen, Wang Jianping, Cao Cheng, et al. Simulation research on high-pressure common rail injection system for diesel engines [J]. Internal Combustion Engines, 2011, 2(1): 39 – 41. (in Chinese)

13 苏海峰, 张幽彤, 王尚勇, 等. 高压共轨喷油器喷射特性实验与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 22 – 26, 30.
Su Haifeng, Zhang Youtong, Wang Shangyong, et al. Numerical-experimental investigation of injection characteristics of high pressure common rail injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 22 – 26, 30. (in Chinese)

14 袁方恩, 林学东, 黄丫, 等. 高压共轨喷射系统参数对柴油机性能影响的研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(2): 11 – 18.
Yuan Fang'en, Lin Xuedong, Huang Ya, et al. Investigation on effect of high pressure common rail injection system parameters on diesel engine performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2): 11 – 18. (in Chinese)

15 刘孝亮, 邬义杰, 章一智, 等. 超磁致伸缩执行器率相关迟滞混合模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 286 – 291.
Liu Xiaoliang, Wu Yijie, Zhang Yizhi, et al. Hybrid rate dependent hysteresis model in giant magnetostrictive actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 286 – 291. (in Chinese)

16 邓东密, 邓萍. 柴油机喷油系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

17 薛光明, 何忠波, 李冬伟, 等. 超磁致伸缩棒磁场强度建模及线圈优化分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(2): 85 – 90.
Xue Guangming, He Zhongbo, Li Dongwei, et al. Magnetic field intensity model for giant magnetostrictive rod and coil optimization analysis [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(2): 85 – 90. (in Chinese)