

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2017. 11. 025

超磁致伸缩执行器位移测试系统的误差分析

李跃松^{1,2}, 朱玉川²

(1. 河南科技大学机电工程学院, 河南洛阳 471003;
2. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016)

摘要: 超磁致伸缩执行器位移测试系统是其性能研究的基础。为提高测试数据的准确性, 以常用超磁致伸缩执行器位移测试系统为基础, 给出了测试系统的误差来源, 建立了温升、电源、测量、采集等因素的误差模型以及多因素影响下的误差合成模型。实验与计算结果表明: 所设计超磁致伸缩执行器在输出位移为 $18\ \mu\text{m}$ 时, 位移采集、超磁致伸缩执行器驱动与温升造成的相对误差分别为 0.56%、2.83%、3.28%, 各因素合成后的相对误差为 4.37%。

关键词: 超磁致伸缩执行器; 误差分析; 误差合成; 热误差

中图分类号: TN384 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2017) 11-108-3

Error Analysis for Displacement Measuring System of Giant Magnetostrictive Actuator

LI Yuesong^{1,2}, ZHU Yuchuan²

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: The displacement measuring system of giant magnetostrictive actuator is the basis of the study on its performance. In order to improve the accuracy of the test data, after building a displacement measuring system, the error models caused by the temperature changing, driver, displacement measuring system and acquisition subsystem were derived. The error synthesis model under these factors effect was given. The results of experiment and simulation show that when the displacement of giant magnetostrictive actuator is $18\ \mu\text{m}$, the relative errors of displacement acquisition subsystem, the subsystem used for driving actuator and the temperature changing is 0.56%, 2.83%, 3.28%, and the relative error of displacement measuring system is 4.37%.

Keywords: Giant magnetostrictive actuator; Error analysis; Error synthesis; Thermal error

0 前言

超磁致伸缩执行器 (Giant Magnetostrictive Actuator, GMA) 在精密与超精密加工、微机电产品的装配、高速阀门控制、主动减振等需要快速、精确定位的控制系统中有着广阔的应用前景^[1], 其结构的优化、模型的建立及性能的获取是其应用的基础, 这些又都是以位移特性的准确可靠、测量为基础的^[2]。然而仪器误差及环境温度对测试结果的影响较大, 因此对位移测试系统的误差来源及这些误差对测试的影响进行分析是十分必要的^[3]。本文作者从 GMA 位移测试系统的原理出发, 对测试系统的误差来源进行分析, 并研究了误差来源对 GMA 输出位移的影响程度, 为搭建高性价比的 GMA 位移测试系统和对测试结果的修正提供了基础。

1 GMA 位移测试系统建立

GMA 位移特性测试系统由位移采集子系统和

GMA 驱动子系统构成, 其中位移采集子系统由位移传感器、数据采集卡及上位机显示构成的; GMA 驱动子系统由上位机控制系统、数据采集卡及驱动电源构成, 如图 1 所示。

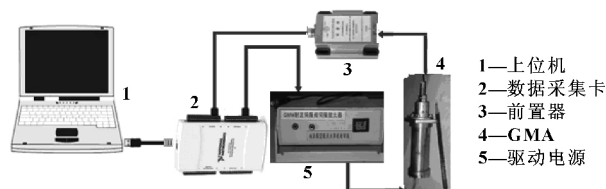


图 1 GMA 位移测试系统原理图

数据采集卡中的数-模转换器 (Digital-Analog Converter, DAC) 将上位机的指令转化为电压信号, 控制驱动电源输出驱动电流, GMA 在驱动电流驱动下产生位移; GMA 输出的位移经位移传感器转换为对应的电压信号, 数据采集卡的模-数转换器 (Analog-Digital Converter, ADC) 再将与位移对应的电压

收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605145); 河南科技大学青年科学基金资助项目 (2015QN013)

作者简介: 李跃松 (1985—), 男, 博士, 讲师, 从事机电系统控制与自动化, 智能材料与结构方面的研究。E-mail: yuesongli@haust.edu.cn。

信号转换为对应的数字信号, 传送给上位机显示。

2 GMA 位移测试的误差来源及分析

2.1 GMA 位移测试系统误差来源

由图 1 的 GMA 位移测试系统原理图可知, 测试系统的误差主要来源于 3 个方面: (1) 由位移传感器的非线性误差及 ADC 的转换精度造成的位移采集误差; (2) 驱动电源电压到电流转换的非线性误差和 DAC 数字量到控制电压转换误差造成的 GMA 驱动误差; (3) 在测试过程中, 因 GMA 的温升导致超磁致伸缩棒及输出杆热膨胀造成的热误差。

2.2 GMA 位移测试系统误差分析

测试系统所用位移传感器为电涡流位移传感器测量范围为 $-250 \sim 250 \mu\text{m}$, 输出电压为 $-5 \sim 5 \text{ V}$, 线性误差为 0.5% , 当测得的 GMA 位移为 y 时, 由位移传感器引起的误差值 $0.005y$ 。

而所用 ADC 的分辨率为十六位精度, 输入电压范围为 $\pm 5 \text{ V}$, 其输入电压的分辨率为

$$\frac{10}{2^{16}-1} \text{ V} = 0.1526 \text{ mV} \quad (1)$$

由位移传感器所测位移与输出电压的对应关系可知, 0.1526 mV 对应的位移为

$$\frac{500}{10} \times 1.526 \times 10^{-4} \mu\text{m} = 0.0076 \mu\text{m} \quad (2)$$

因此, 位移传感器测试误差及 ADC 转换精度所引起的位移采集误差为

$$\delta y_1 = 0.005y + 0.0076 \mu\text{m} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 位移采集误差随传感器所测位移增加而增加, 当所测位移较大时, 位移采集子系统的相对误差约为 0.5% 。

由图 1 可知, GMA 的驱动也分为两部分, 上位机发出数字指令, 数据采集卡中的 DAC 将数字指令转换为模拟电压信号, 模拟电压信号经驱动电源的转换为电流, 驱动 GMA 输出位移, 因此 GMA 驱动过程的误差来源于 DAC 的转换误差和电压到电流的转换误差。

GMA 驱动电源电路图如图 2 所示。

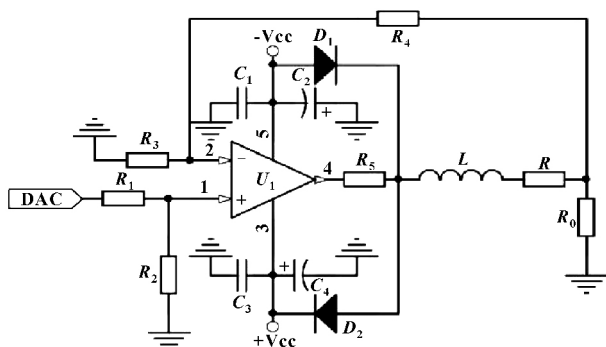


图 2 GMA 驱动电源电路图

为使 GMA 驱动电源的输出电流不受驱动频率、负载线圈及外界温度的影响, GMA 驱动电源要求是具有负反馈的恒流型电源^[4]; 为降低驱动电源复杂度, 选用功率运算放大器作为电路核心元件, 所设计 GMA 驱动电源电路如图 2 所示。

若 DAC 输出电压为 U_r , 采样电阻 R_0 中的电流为 I_r , GMA 的线圈等效为电阻 R 与电感 L 串联, 过其中的电流为 I_o , 由运算放大器的特性可知:

$$U_- \approx U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_r \quad (4)$$

$$\frac{R_3 + R_4}{R_3} U_- = I_r R_0 \quad (5)$$

联立式 (4)、(5) 可得,

$$I_r \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3} \frac{U_r}{R_0} \quad (6)$$

选取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, 又因 $I_o \approx I_r$, 因此 GMA 线圈中电流与 DAC 输出电压的关系为

$$I_o \approx I_r = \frac{U_r}{R_0} \quad (7)$$

但由于电路电阻存在误差及运算放大器特性非理想特性, 在选取 $R_0 = 0.5 \Omega$ 后, 电路实际输入电压与输出电流关系实测曲线如图 3 所示。

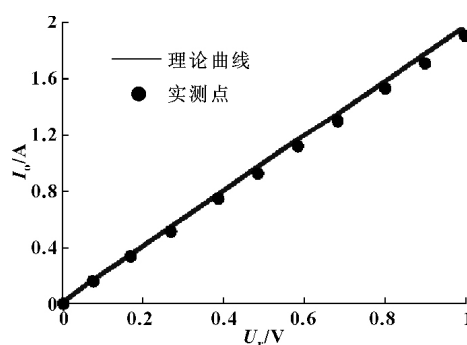


图 3 GMA 驱动电源输入与输出的实测值

由图 3 可知, 所采用的 GMA 驱动电源在输入电压较高时, 输出电流与理论值存在误差, 线性误差约为 2.9% , 因此驱动电源引起的电流误差值为

$$\delta I_1 = 0.029I \quad (8)$$

DAC 的转换误差直接影响 GMA 驱动电源输出电流的精度, 因所测试系统所用采集卡中 DAC 为十六位精度, 输出为 $\pm 5 \text{ V}$, 因此输出电压的分辨值为 0.1526 mV , 代入式 (7) 得分辨电流 δI_2 为 0.3 mA 。

GMA 在偏置磁场作用下, 其电流-位移曲线在较宽的范围内呈线性^[5], 因此 GMA 输出位移满足

$$y = Hd_{33} = \frac{Ni}{\alpha L} d_{33} = Ki \quad (9)$$

式中: N 为驱动线圈匝数; i 为驱动电流; L 为超磁

致伸缩棒长度; α 为漏磁系数; d_{33} 为磁致伸缩系数。

将 δI_1 及 δI_2 之和代入式 (9) 可得, 由驱动电源电压到电流的线性误差及 DAC 转换精度所引起的驱动误差为

$$\delta y_2 = K(\delta I_1 + \delta I_2) \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 驱动误差随 GMA 驱动电流的增大而增大, 当所驱动电流较大时, 驱动子系统的相对误差约为 2.9%。

线圈发热、磁滞损耗等发热因素会导致超磁致伸缩棒产生热变形, 此热变形将使 GMA 输出不可控的位移, 此部分输出位移属于 GMA 的测试误差的一部分。

若 GMA 测试过程中, 超磁致伸缩棒的温度变化为 ΔT_1 , 输出杆温升 ΔT_2 , 则引起的热误差为

$$\delta y_3 = \Delta T_1 l \alpha_1 + \Delta T_2 l \alpha_2 \quad (11)$$

式中: l 为输出杆的长度; α_1 为超磁致伸缩棒的线膨胀系数; α_2 为输出杆的线膨胀系数。

输出杆与超磁致伸缩棒紧贴端温度与超磁致伸缩棒温度相等, 与空气接触端可认为无温升, 由温度的连续性分布, 可得

$$\Delta T_1 = 0.5 \Delta T_2 \quad (12)$$

由式 (11) 可知, 在 GMA 结构确定的情况下, 热误差仅与 GMA 的温升有关, 因此限制 GMA 温升或在其温升较小时, 完成测试, 都将降低热误差。

由误差合成理论可得, GMA 的测试误差为^[3]

$$\delta y = \sqrt{(\delta y_1)^2 + (\delta y_2)^2 + (\delta y_3)^2} \quad (13)$$

3 GMA 位移测试实验及误差计算

按图 1 所示的 GMA 位移测试原理图搭建 GMA 位移测试系统, 通过上位机发出指令, 改变 GMA 的驱动电流, 并记录驱动电流与 GMA 输出位移的关系, 测得电流与 GMA 输出位移的关系如图 4 所示。

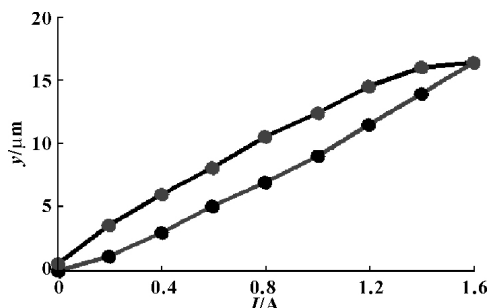


图 4 GMA 位移的静态特性实验

GMA 的线圈骨架与超磁致伸缩棒紧贴, 线圈骨架的温升可由驱动线圈的电阻的变化量求出, 由于驱动电流不变, 通过测量驱动线圈的电压即可间接求出超磁致伸缩棒的温升。由 GMA 的结构参数及其位移, 可得误差分析所需参数取值如表 1 所示。

表 1 GMA 的结构参数取值

超磁致伸缩棒长度 L/mm	80
等效参数 $K/(\text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	10.3×10^{-6}
输出杆长度 l/mm	25
超磁致伸缩棒线膨胀系数 $\alpha_1/(\text{℃} \cdot \text{m}^{-1})$	12.9×10^{-6}
输出杆线膨胀系数 $\alpha_2/(\text{℃} \cdot \text{m}^{-1})$	12×10^{-6}
GMA 温度变化 $\Delta T/\text{℃}$	0.5

将表 1 参数代入式 (3)、式 (10)、式 (11) 及式 (13) 可得, 在 GMA 输出位移为 $18 \mu\text{m}$ 时, GMA 测试系统的误差如表 2 所示。

表 2 误差项及其所占比重

误差项	误差/ μm	相对误差/%
位移采集误差 δy_1	0.1	0.56
GMA 驱动误差 δy_2	0.51	2.83
热误差 δy_3	0.59	3.28
测试系统误差 δy	0.786	4.37

由表 2 可知, 所设计 GMA 在输出位移为 $18 \mu\text{m}$ 时, $\delta y_1 < \delta y_2 < \delta y_3$, 即 GMA 输出位移的误差因素由小到大依次为: 位移采集误差、GMA 驱动误差、热误差。

4 结论

GMA 位移测试系统的误差主要由位移采集误差、GMA 驱动误差及 GMA 温升造成的热误差等三部分构成, 位移采集误差由 ADC 转换精度及位移传感器的误差构成, GMA 驱动误差由 DAC 转换精度及驱动电源的线性误差构成, 当 GMA 输出位移较大时, 位移采集误差约为位移传感器的误差, GMA 驱动误差约为驱动电源的线性误差。对所设计的 GMA 测试表明, 误差因素由小到大依次为: 采集误差、GMA 驱动误差、热误差, 因此在测试时需要热误差进行降低。

参考文献:

- [1] 王博文, 曹淑瑛, 黄文美. 磁致伸缩材料与器件 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王传礼. 基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] JIA Zhenyuan, LIU Huifang, WANG Fuji. Researches on the Computer Digital Control System of Giant Magnetostrictive Actuator [J]. Mechatronics, 2009(19): 1191-1196.
- [6] ZHU Yuchuan, LI Yuesong. Development of a Deflector-jet Electrohydraulic Servo Valve Using a Giant Magnetostrictive Material [J]. Smart Mater. Struct., 2014(23): 115001.