

喷油器用超磁致伸缩致动器设计方法和驱动波形研究

薛光明¹ 张培林¹ 何忠波¹ 李冬伟^{1,2} 黄英捷¹ 张磊³

(1. 军械工程学院车辆与电气工程系, 石家庄 050003; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081;

3. 军械工程学院火炮工程系, 石家庄 050003)

摘要: 将超磁致伸缩材料的输出特点和喷油器的驱动需求相结合, 设计并驱动适用于电控喷油器的超磁致伸缩致动器。针对常闭式电控喷油器仅需要单向和缩短位移的特点, 结合超磁致伸缩材料在不同偏置磁场强度输出特性, 提出了2种不同偏置磁场的致动器结构并分析了各自适用的电流输入方向; 借助实验系统测试了2种致动器的稳态位移和响应时间, 并分析了二者输出性能。针对传统直流方波驱动时致动器响应过慢的问题, 借鉴电磁铁大电压快速开启的方法, 设计了喷油器用超磁致伸缩致动器的驱动波形, 并测试了该设计波形对强偏置致动器的驱动性能。研究表明, 采用所设计的驱动电压, 可将超磁致伸缩致动器的响应时间由4 ms降至1 ms, 极大地提升了致动器的瞬态响应速度, 同时, 超磁致伸缩致动器可输出12~33 μm的连续稳态位移, 提供了更多的驱动效果。

关键词: 超磁致伸缩致动器; 喷油器; 偏置磁场; 驱动电压; 性能

中图分类号: TH703.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0365-08

Design Method and Driving Voltage Waveform of Giant Magnetostrictive Actuator Used on Electronic Controlled Injector

XUE Guangming¹ ZHANG Peilin¹ HE Zhongbo¹ LI Dongwei^{1,2} HUANG Yingjie¹ ZHANG Lei³

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

2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

3. Artillery Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Combining the output characteristics of giant magnetostrictive material with the driving requirements of an electronic controlled injector, the structure design and driving method of giant magnetostrictive actuator suitable to the injector were proposed. The electronic controlled injector required the displacement in only one direction and the displacement should be shortened at the same time. Then two types of giant magnetostrictive actuators were presented by considering the impact of the bias magnetic field on the actuator's output, and the applicable currents in different bias fields were analyzed. Steady-state displacements and responding time of the two kinds of actuators were measured with the help of an experimental system. And the performance differences of the two actuators, accompanied by the reasons leading to them, were pointed out. As the traditional driving voltage for the giant magnetostrictive actuator, direct voltage in square waveform would cause quite long time in raising the coil current, which occupied most of the whole responding time of the actuator. To save responding time, a fast driving wave was designed with referring the high-voltage opening method used in an electromagnetic actuator. And the output performance of the actuator, strongly biased actuator taken as an example, under designed driving wave was measured and analyzed simultaneously. The results showed that designed driving voltage could reduce the responding time quite effectively from 4 ms to 1 ms. In addition, as the giant magnetostrictive actuator could output continuous displacements from 12 μm to 33 μm, the designed actuator supported more driving effects than the electromagnetic actuator.

Key words: giant magnetostrictive actuator; injector; bias magnetic field; driving voltage; performance

收稿日期: 2016-09-21 修回日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275525)

作者简介: 薛光明(1990—),男,博士生,主要从事高压共轨系统的超磁致伸缩喷射阀研究, E-mail: yy0youxia@163.com

通信作者: 何忠波(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事磁致伸缩材料基础理论及应用研究, E-mail: hzb_hcl_xq@sina.com

压力变化较小。如果驱动器响应时间过长,储油腔和控制腔的压力均会大幅降低而无法形成有效压差,针阀无法移动而喷油器无法正常工作。压电致动器由于其超快速响应特性不会面对此问题,而对于电磁式或超磁致伸缩式致动器,由于引入了线圈作为驱动元件,电流上升时间十分长(几毫秒),导致整个致动器的响应速度十分缓慢。

为使喷油器正常工作,必须采用高电压开启技术减小驱动线圈的电流上升时间。而且对于超磁致伸缩致动器而言,由于不含有限位元件,为减小压力波动,其驱动波形中不能含有高频 PWM 波。因此,除有效的结构设计外,还需对超磁致伸缩致动器的驱动波形进行设计以提升致动器响应速度。

2 结构设计

2.1 偏置磁场设计

偏置磁场对超磁致伸缩材料的初始应变和位移输出方向具有决定性影响,设定不同强度的偏置磁场可获得不同的致动器输出效果。超磁致伸缩材料的应变-磁场强度曲线如图 2 所示。定义电流正向为加强材料外磁场强度的方向,而反向为减小总外磁场强度的方向。

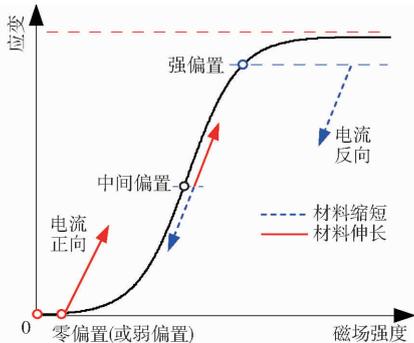


图 2 超磁致伸缩材料应变-磁场强度曲线

Fig. 2 Magnetostrictive strain - magnetic field curve of GMM

传统致动器采用中间偏置状态,输入交流电时材料既可伸长又可缩短,材料总变形量较大,然而单个伸长或缩短方向的输出应变仅能达到输出能力 1/2。电控喷油器用超磁致伸缩致动器仅需单方向位移,采用该偏置方式会浪费材料并增大致动器尺寸。

为最大限度地利用超磁致伸缩材料的输出能力,获取单方向最大应变,只能采用强偏置或零偏置(弱偏置)磁场的形式。采用强偏置形式时,超磁致伸缩材料处于最长状态,应输入反向电流使总外磁场减小,材料可输出最大(接近最大)的缩短应变。采用零偏置(或弱偏置)形式时,超磁致伸缩材料处于最短状态,应输入正向电流增大外磁场,材料可输

出最大的伸长应变。

2.2 输出形式转换

超磁致伸缩材料仅输出单方向的最大应变还不够,由第 1 节分析可知,致动器还应将材料应变转换为整个致动器尺寸的缩短。因此不同偏置形式的超磁致伸缩致动器需设计不同结构形式以满足此要求。

对于强偏置致动器,由于材料在通电后缩短,故直接采用传统结构即能满足致动器尺寸缩短的需求,其结构如图 3a 所示。线圈为驱动元件,将输入电信号转换为磁场以驱动超磁致伸缩材料;预压弹簧使超磁致伸缩棒处于受压状态,可避免超磁致伸缩棒内部出现拉应力,还可使超磁致伸缩材料获取更大的伸长应变;强偏置磁铁为超磁致伸缩材料提供了较大的偏置磁场,使材料一开始即处于较长状态。为保证致动器正常工作,输入电信号产生的磁场方向应与偏置磁场的方向相反,应对正确的电信号输入方向(输入等幅值反向的电流,致动器输出较大位移的方向)进行辨别。

对于零偏置(或弱偏置)致动器,材料在通电后伸长,致动器应借助一定结构将该材料伸长转化为整个致动器尺寸的缩短,其设计原理如图 3b 所示。超磁致伸缩材料做成筒状(或起到筒功能的棒形式),配合一个 T 型杆件,可将超磁致伸缩筒的伸长

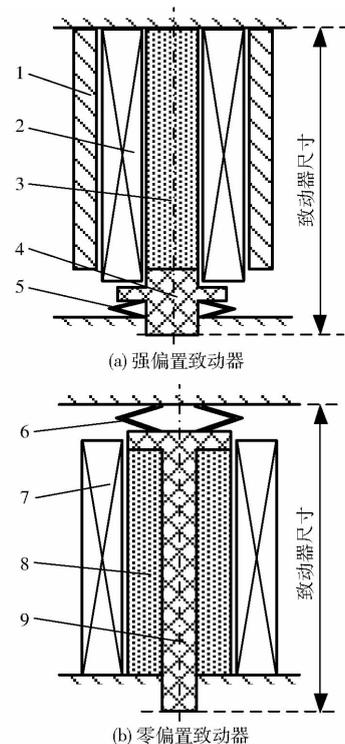


图 3 不同偏置磁场的致动器结构设计原理

Fig. 3 Structure design principle of actuator in different bias magnetic fields

1. 强偏置磁铁 2、7. 线圈 3. 超磁致伸缩棒 4、9. 输出杆
- 5、6. 预压弹簧 8. 超磁致伸缩筒或仿筒结构

转换为整个致动器尺寸的缩短。

2.3 尺寸及电磁参数设计

车载工作电压为 24 V, 喷油器用 GMM 应在此电压下输出不小于 30 μm 的位移。为达到此要求, 超磁致伸缩材料的长度一般不小于 25 mm (材料最大磁致伸缩系数为 1.2×10^{-3}), 驱动线圈应能将 GMM 磁化至饱和位置或近似饱和。

由于所需磁场强度随 GMM 棒的横截面积增大而迅速增大, 为缩减线圈厚度, 应在满足抗压强度的前提下尽可能地减小 GMM 棒直径。而且就螺线管线圈产生的磁场而言, 越接近线圈轴线, 径向磁场分量越小, 轴向磁场分量分布越均匀, 为实现更好的磁化效果, GMM 应尽可能地靠近线圈的轴线位置。因此, 前文设计的零偏置致动器中, 可依旧采用 GMM 棒式结构置于线圈中心, 将输出杆设计成筒式并具有 T 型结构功能即可。

对于线圈设计, 应尽可能地提高线圈产生的磁势, 即线圈匝数与电流的乘积。当输入电压确定且尺寸有所限定时, 线圈匝数越多意味着线径越小, 线圈电阻越大、电流则越小, 为增大输出磁势, 以线圈匝数和电流乘积最大为设计目标。

除 GMM 棒和线圈外, 应尽可能缩减致动器其他部件的尺寸, 并使整个致动器的磁路大致闭合以增大 GMM 棒上的磁场强度, 亦即增大 GMM 棒上分配的磁势。为此, 应减小与 GMM 棒串联的磁阻而增大与其并联的磁阻, 而部件磁阻与材料磁导率呈反比, 因此, 应增大与 GMM 棒构成串联磁路部件的磁导率, 如输出杆、外壳等, 而减小与 GMM 棒构成并联形式的部件的磁导率^[21-22]。

3 性能对比

3.1 器材及实验系统

输出位移 (或力) 和响应时间是电控喷油器使用驱动器的 2 个性能指标, 虽然强偏置和零偏置超磁致伸缩致动器均能满足喷油器球阀的驱动需求, 但 2 种致动器的驱动性能略有不同。设计 2 种形式超磁致伸缩致动器, 其实物图分别如图 4a 和图 4b 所示, 2 个致动器的关键参数如表 1 所示。表中所述线圈电阻和电感并不是单独测试励磁线圈的阻抗, 而是整个致动器的阻抗。由于致动器其他部件对线圈阻抗有影响, 整个致动器的阻抗与单一的线圈阻抗不相等, 测量时应将端口接在致动器两端, 而不能将线圈拆出测量。根据 3.2 节的分析, 零偏置致动器采用超磁致伸缩棒结构, 可获得更加均匀的轴向磁场强度, 借助一个畸形输出杆实现如图 3b 所示的设计方法^[20-22]。

致动器性能测试原理如图 5 所示。波形信号发生器用于输出所需电压波形, 可输出 0 ~ 24 V 连续的稳态电压及 35 ~ 100 V 的短暂高压; 电流钳检测输入致动器线圈的瞬时电流 (不同于单独测量线圈时的电流), 激光位移传感器用于测量致动器位移, 线圈电流、致动器位移与两端电压的测试结果将输入示波器予以显示。

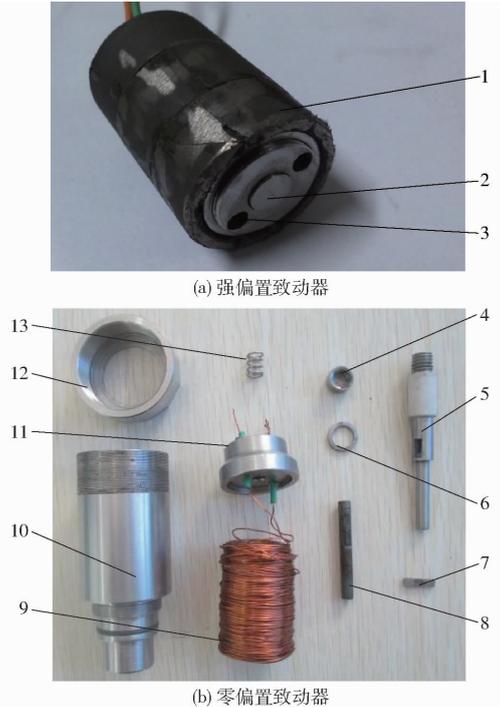


图 4 致动器实物图

Fig. 4 Prototypes of two actuators

1. 永磁体 2. 推杆 3. 盖帽 4. 螺盖 5. 输出杆 6. 垫圈
7. 顶块 8. 超磁致伸缩棒 9. 线圈 10. 外壳 11. 压块 12. 调节螺塞 13. 压簧

表 1 强偏置和零偏置致动器参数

Tab. 1 Parameters of strongly and weakly biased actuators

参数	强偏置	零偏置
GMM 棒长度/mm	35.0	39.5
GMM 棒直径/mm	5	5
线圈匝数	980	1 030
线圈电阻/ Ω	6.43	6.57
线圈电感/H	6.75	6.93
预紧压力/MPa	13	15
初始偏置磁场强度/ $(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	70	0

3.2 稳态幅值

2 种致动器采用相同材料, 但长度不同。强偏置致动器使用的棒料长度为 35 mm, 零偏置致动器棒料长度为 39.5 mm, 为达到同等对比效果, 强偏置致动器位移需乘以比例系数 $39.5/35 = 1.1286$ 。输入脉宽为 20 ms 的直流方波电压, 2 种致动器稳态位移测试结果如图 6 所示。

由测试结果知, 稳态电压幅值低于 30 V 时, 强

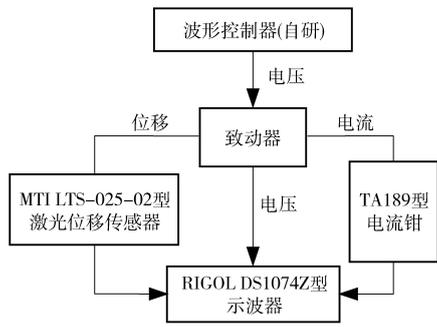


图5 致动器测试方案

Fig.5 Measuring method for designed actuators

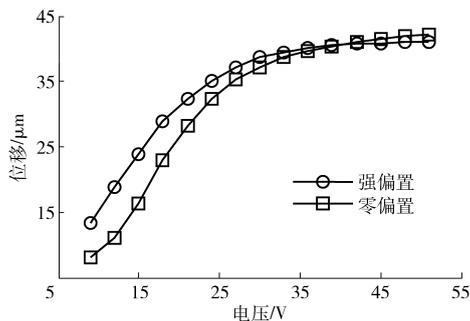


图6 致动器稳态位移对比

Fig.6 Contrast of steady-state response for actuator

偏置致动器的输出位移总是大于零偏置致动器,也就是说,强偏置致动器需要更小的输入电压即能达到所需位移;而且输入电压小于25 V时,强偏置致动器位移与输入电压之间的线性关系优于零偏置致动器。这些测试结果与强偏置致动器的偏置磁场有关。由图2可知,输入电压不是特别大时,强偏置致动器中材料应变与外加磁场强度之间的线性关系比零偏置致动器好,而且应变-磁场强度曲线斜率也大于零偏置致动器,这使得强偏置致动器位移相对电压的上升速度(电压由零增大至所需幅值)需大于零偏置致动器。零偏置致动器的优势在于电压很大时可以输出更大的位移,最大限度地发挥材料的伸长极限。

3.3 响应时间

输入信号依旧为直流方波电压信号,位移(电流)响应时间定义为从输入电信号开始至致动器位移(线圈电流)达到稳态的时间。由表1可知,为产生足够磁场强度,2种致动器所使用的线圈具有较大的电感,经过测试,2种致动器的线圈电流和位移响应时间如图7所示。

由测试结果可知,线圈电流和致动器位移的响应时间与输入电压的幅值无关;零偏置致动器线圈电流的响应时间比强偏置致动器线圈要长0.05 ms左右,说明零偏置致动器线圈电感更大,电流上升延时较高;零偏置致动器位移响应时间比强偏置致动器要长0.1 ms,其中一部分是电流响应时间较大,另

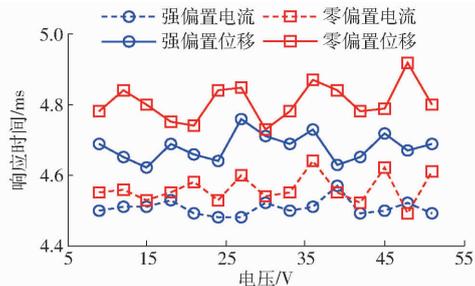


图7 响应时间对比

Fig.7 Contrast of responding time

一部分是零偏置致动器的复杂机械结构带来了更大的机械阻尼或延时;无论是强偏置致动器还是零偏置致动器,电流响应时间均占据了位移响应时间的绝大多数,虽然材料响应可达微秒级,整个致动器的响应速度十分缓慢,这一结论与文献[1,11,16]相一致。

由以上性能分析可知,在仅需达到指定输出位移的前提下,强偏置致动器无疑是最佳选择,而且由2个致动器的结构形式来看,强偏置致动器在机械结构上更容易加工制作。然而遗憾的是,偏磁场的施加总是难以保持特别准确,更换偏置磁铁或者再次设计加工时致动器性能一致性较差。相比较而言,零偏置致动器具有更加稳定的输出性能,更换部件或再加工几乎能保持原有的输出特性,这对器件的大量生产是有利的。

4 驱动波形设计及性能测试

由3.3节的分析可知,由于大电感线圈的存在,较长的电流上升时间极大地拖慢了整个致动器的响应速度,使致动器位移的响应时间在4 ms以上。而喷油器用致动器的工作脉宽一般仅为2.5 ms,4 ms以上的响应时间甚至不能使致动器输出到达稳态,自然无法满足电控喷油器球阀的正常工作需求。因此加快致动器响应速度,提升线圈电流的响应速度是关键。

4.1 波形设计

大电压开启技术是电磁式致动器常用的也是有效的加速手段,能快速提升线圈电流的响应速度几倍以上。电磁式驱动器波形如图8所示,信号初期电压较高,线圈电流和电磁力迅速上升,使电磁式致动器快速到达稳态,然后再输入较低的维持电压(24 V)维持电磁力即可,较低的电压可使电流下降时间缩短。电磁式致动器在稳态采用高频PWM(Pulse width modulation)波,线圈电流存在波动,电磁铁致动器设计有限位块,其输出位移不会出现波动。但超磁致伸缩致动器中没有限位机构,若采用电磁式致动器的波形进行驱动,位移在维持电压段

会发生波动。为避免电压波动,应将高频 PWM 波改为平直波。而且超磁致伸缩材料响应较快,位移与线圈电流几乎同步响应,因此电流超调量不宜过大。

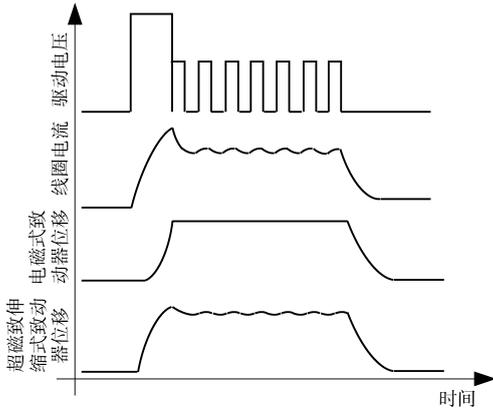


图8 电磁式致动器驱动波形及响应

Fig. 8 Driving waveform and response for an electromagnetic actuator

适用于超磁致伸缩式致动器的驱动波形如图9所示,采用高开启电压使线圈电流和致动器位移迅速增大至目标值,再输入维持电压维持目标值,维持电压采用平直波形,高压和维持电压之间可预留间隔时间以针对高压持续时间过长或过短的情况。最合理的情况为:经过高压持续时间,线圈电流(或致动器位移,二者相差不大)恰能增长至电流(或位移)稳态值,此时,致动器位移没有额外的调节时间,间隔时间可设定为零。

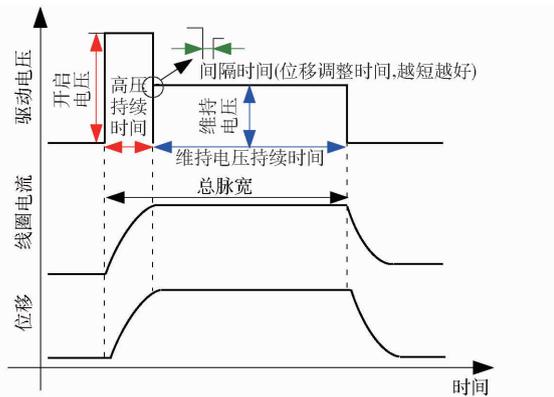


图9 超磁致伸缩致动器适用的驱动方案

Fig. 9 Driving waveform suitable to GMA

4.2 驱动效果

对所设计波形的驱动效果与传统直流方波输入的驱动效果进行对比。直流方波脉宽为 4 ms,电压维持为 24 V,输入电压、线圈电流和致动器位移的测试结果如图 10a 所示;所设计的驱动电压总脉宽为 4 ms,开启电压为 76 V,稳态幅值为 24 V;调整高压持续时间使位移最快达到稳态,高压持续时间恰为电流上升时间,约为 0.5 ms,测试

结果如图 10b 所示。

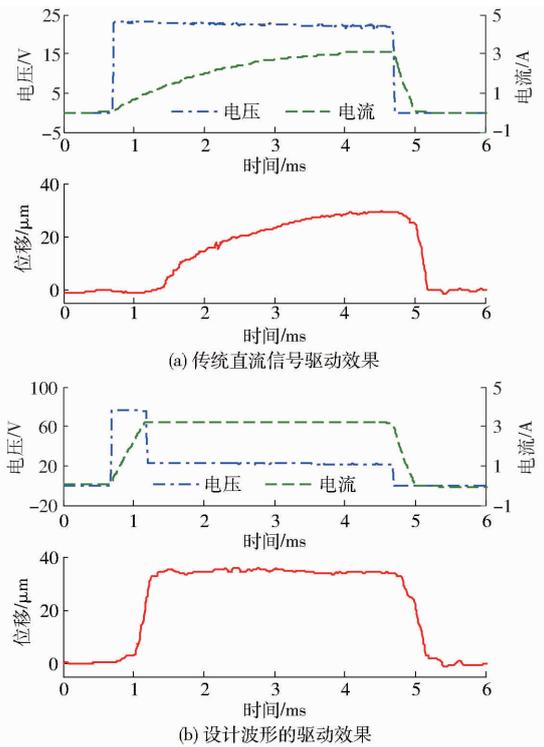


图10 不同波形下致动器响应

Fig. 10 Actuator response under different driving waveforms

由测试结果可知,采用传统直流方波,线圈电流和致动器位移的响应速度极为缓慢,在 4 ms 的总脉宽时间内,二者甚至没有达到最大位移;而采用 3.1 节设计的驱动波形能有效地加快致动器响应速度,将电流上升时间控制在 0.5 ms 左右。

4.3 性能测试

使用 4.1 节设计的波形驱动喷油器用超磁致伸缩致动器,测试零偏置致动器响应时间和稳态位移 2 个性能指标,其结果如图 11 所示。

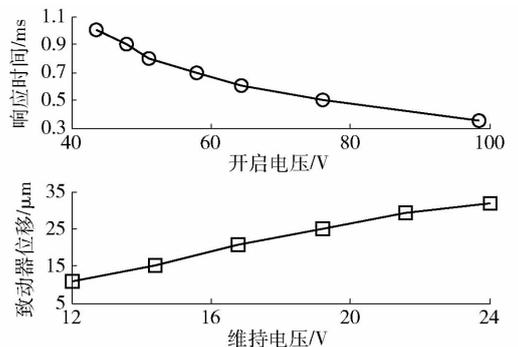


图11 致动器输出性能的测试结果

Fig. 11 Measured results of output performance for GMA

响应时间与开启电压幅值有关,当开启电压由 43 V 增至 98 V 时,位移响应时间由 1 ms 降至 0.35 ms。这是由于开启电压越高,致动器位移到达指定值所需的上升时间(高压持续时间)就越短,因此通过增大开启电压(在电子元器件的承压范围

内)可有效加快致动器位移的响应速度。

稳态输出位移与维持电压幅值有关,维持电压由 24 V 降至 12 V 时,致动器可获得 12 ~ 33 μm 的连续位移。对比电磁式致动器只能输出一个位移幅值而无法实现更多的位移输出,超磁致伸缩致动器能提供更多的输出位移选择,这对喷油器实现更多的喷油效果是十分有利的。经测试,超磁致伸缩致动器驱动的电控喷油器展现了较好的喷油效果。致动器快响应、输出大位移时,喷油器喷油量和贯穿深度均较大,致动器较慢响应且输出小位移时,喷油器的喷油量较小且喷油贯穿深度低,但喷油雾化程度较高。

5 结论

(1)强偏置磁场强度配合反向输入信号,和零偏置(或弱偏置)磁场配合正向输入信号能满足电

控喷油器的驱动需求;强偏置致动器可采用传统结构形式,而零偏置致动器需借助 T 型杆将超磁致伸缩材料的伸长转换为整个致动器尺寸的缩短。

(2)强偏置与零偏置致动器的输出位移和响应时间存在差距。电压不是特别大时,强偏置致动器可获得更大的输出位移,且位移与输入电压之间的关系近似为线性;零偏置致动器的优势是在电压很大时可发挥超磁致伸缩材料的输出极限,再加工性能具有一致性。

(3)大电压开启的驱动方案可有效提升电控喷油器用 GMA 的瞬态响应速度。经测试,提升开启电压幅值可使致动器位移的响应时间由 4 ms 降至 1 ms,展现了设计波形良好的驱动效果;调整驱动波形中的维持电压幅值可使超磁致伸缩致动器输出位移在 12 ~ 33 μm 连续变化,对比电磁式致动器,超磁致伸缩致动器可提供更多的输出选择。

参 考 文 献

- OLABI A G, GRUNWALD A. Design and application of magnetostrictive materials[J]. *Materials and Design*, 2008, 29(2): 469 - 483.
- 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.
- 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: 冶金工业出版社, 2008.
- 卢全国, 陈定方, 魏国前, 等. GMM 的发展现状及其在精密致动器中的应用[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)
- 舒亮, 李传, 吴桂初, 等. Fe - Ga 合金磁致伸缩力传感器磁化模型建立与特性分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 344 - 349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150548&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.048.
SHU Liang, LI Chuan, WU Guichu, et al. Magnetization model of Fe - Ga magnetostrictive force-sensor and its characteristics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 344 - 349. (in Chinese)
- 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 343 - 350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150251&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.051.
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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 343 - 350. (in Chinese)
- 孟爱华, 吕福在, 程耀东. 基于超磁致伸缩致动器的脉冲喷射开关阀建模与仿真[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(8): 303 - 307.
MENG Aihua, LÜ Fuzai, CHENG Yaodong. Modeling and simulation of pulsed jet on-off valve based on GMA [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 303 - 307. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 张雷, 郭义杰, 刘孝亮, 等. 嵌入式超磁致伸缩构件多场耦合优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 190 - 196. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120533&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.033.
ZHANG Lei, WU Yijie, LIU Xiaoliang, et al. Multi-field coupling model of embedded giant magnetostrictive components optimization[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 190 - 196. (in Chinese)
- BRIGHT C, FAIDLEY L, WITTHAUER A, et al. Programmable diesel injector transducer test results[C]. *SAE Paper 2011 - 01 - 0381*, 2011.
- 吕福在, 项占琴, 戚宗军, 等. 稀土超磁致伸缩材料高速强力电磁阀的研究[J]. *内燃机学报*, 2000, 18(2): 199 - 202.
LÜ Fuzai, XIANG Zhanqin, QI Zongjun, et al. The design of high-speed powerful solenoid based on giant magnetostrictive

- material and analysis of its control method[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(2): 199 - 202. (in Chinese)
- 13 WANG Wenguo, HAN Hui, HAN Lu, et al. A model of giant magnetostrictive actuator used in automobile engine fuel injection system[J]. International Journal of Service and Computing Oriented Manufacturing, 2013, 1(2): 154 - 166.
- 14 YAN Rongge, WANG Zhijuan, ZHU Lihua. Research of the giant magnetostrictive fuel injector[J]. Advanced Materials Research, 2014, 889 - 890: 916 - 919.
- 15 DANESCU P, MOREGA A M, Morega M. A novel magnetostrictive injection actuator based on new giant magnetostrictive materials[C]//2011 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, 2011:1 - 6.
- 16 LI Liyi, ZHANG Chengming, KOU Baoquan, et al. Design of giant magnetostrictive actuator for fuel injector[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008:1 - 4.
- 17 TANAKA H, SATO Y, URAI T. Development of a common-rail proportional injector controlled by a tandem arrayed giant magnetostrictive actuator[J]. JSAE Review, 2001, 22(3): 369 - 371.
- 18 XUE Guangming, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Analysis of the giant magnetostrictive actuator with strong bias magnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 394: 416 - 421.
- 19 薛光明, 张培林, 何忠波, 等. 强偏置超磁致伸缩致动器准静态位移建模与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 318 - 324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150745&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.045.
- XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Modelling and experiment of strong bias giant magnetostrictive actuator's semi-static displacement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 318 - 324. (in Chinese)
- 20 薛光明, 张培林, 何忠波, 等. 喷油器用超磁致伸缩致动器多自由度模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 97 - 104.
- XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Multiple degrees of freedom model of giant magnetostrictive actuator used on high-pressure-common-rail injector[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 97 - 104. (in Chinese)
- 21 XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Displacement model and driving voltage optimization for a giant magnetostrictive actuator used on a high-pressure common-rail injector[J]. Materials and Design, 2016, 95: 501 - 509.
- 22 薛光明, 张培林, 何忠波, 等. 超磁致伸缩致动器的等效电路研究及驱动波形设计[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(3): 20 - 28.
- XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Equivalent circuit and driving voltage suitable for giant magnetostrictive actuator in electric injector[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(3): 20 - 28. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 295 页)

- 15 周金和, 彭福堂. 一种有选择的图像灰度化方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 198 - 200.
- ZHOU Jinhe, PENG Futang. A method of selective image graying[J]. Computer Engineering, 2006, 32(20): 198 - 200. (in Chinese)
- 16 王晓凯, 李锋. 改进的自适应中值滤波[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(3): 175 - 176, 218.
- WANG Xiaokai, LI Feng. Improved adaptive median filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(3): 175 - 176, 218. (in Chinese)
- 17 刘东菊. 基于阈值的图像分割算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- LIU Dongju. The research of image segmentation based on thresholds[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- 18 SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32 - 46.
- 19 ALVAREZ L, SALGADO A, SANCHEZ J. Robust detection and ordering of ellipses on a calibration pattern[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2007, 17(4): 508 - 522.
- 20 ALEMAN-FLORES M, ALEMAN-FLORES P, ÁLVAREZ-LEON L, et al. Computational techniques for the support of breast tumor diagnosis on ultrasound images[J]. Cuadernos del Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Cibernéticas, ULPGC, 2003, 27: 1 - 12.
- 21 TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986.
- 22 [美] 罗伯特·卡弗. 探索性数据分析[M]. 上海财经大学统计与管理学院, 译. 上海: 上海财经大学出版社, 2013.
- 23 王玉梅. 线性回归模型中的异常点分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- WANG Yumei. Outlier analysis of linear regression model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- 24 广东省饲料工业协会. 出口禽肉的分级标准[R]. 肇庆: 南方饲料快讯, 2001.