

文章编号 1004-924X(2016)增-0454-07

压电式高精度位移微扫描控制系统设计

黄 燕¹, 沈 飞^{2,3}, 黄整章¹, 王红雨^{1*}, 鹿存跃¹

(1. 仪器科学与技术系, 上海交通大学, 上海 200240;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

3. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘要: 为了实现对微扫描系统的超分辨率成像, 基于压电叠堆致动器, 在现有微位移驱动平台的基础上设计了一种高精度位移控制系统。压电叠堆致动器材料本身的迟滞特性影响了系统的精度及稳定性, 对其迟滞非线性的建模与补偿方法进行了研究。采用改进的 Prandtl-Ishlinskii 迟滞非线性模型的逆模型作为前馈控制器对其迟滞非线性进行补偿。通过测试微位移驱动平台的输出特性确定逆补偿模型的参数, 逆模型结构简洁, 系统的响应速度快, 利于实时控制。实验结果表明该迟滞逆补偿控制系统能明显减小系统的迟滞非线性, 最大的非线性误差为 $0.4 \mu\text{m}$ 。系统在微扫描驱动平台微位移放大的基础上实现了精确的二维定位。

关键词: 压电致动器; 位移微扫描; 迟滞非线性; 逆补偿

中图分类号: V445.8 文献标识码: D doi: 10.3788/OPE.20162413.0454

Micro-scanning control system design for piezoelectric high-precision displacement

HUANG Yan¹, SHEN Fei^{2,3}, HUANG Zheng-zhang¹, WANG Hong-yu^{1*}, LU Cun-yue¹

(1. Department of Instrument Science and Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

3. Infrared Detection Technology Research & Development Center, CASC, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: redrain@sjtu.edu.cn

Abstract: To realize super-resolution imaging to micro-scanning system, a high-precision displacement control system is designed on the basis of piezoelectric stack actuator and existing micrometric displacement drive platform. Hysteresis characteristic of piezoelectric stack actuator material affects accuracy and stability of system, and research is performed to modeling and compensation method of its hysteretic nonlinearity. Adopt advanced inverse model of Prandtl-Ishlinskii hysteresis nonlinearity model as feedforward controller to compensate for its hysteretic nonlinearity. Confirm parameter of inverse compensation model by testing output characteristics of micrometric displacement drive platform. Structure of inverse model is simple, and response speed of system is quick, which is beneficial

收稿日期: 2016-05-07; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11174206; No. 61471237); 上海航天创新基金资助项目 (No. SAST201347); 国家海洋工程重点实验室重点开放课题资助项目 (No. 0507)

to real-time control. Experimental result shows that the hysteretic inverse compensation control system can obviously decrease hysteretic nonlinearity of system and the maximum nonlinear error is $0.4\mu\text{m}$. System realizes accurate two-dimension positioning on the basis of micrometric displacement amplification of micro-scanning drive platform.

Key words: piezoelectric actuator; displacement micro-scanning; hysteretic nonlinearity; inverse compensation

1 引 言

微扫描成像技术是对同一场景进行多次采样,利用多幅相互之间存在微小位移的时间序列低分辨率图像重建一幅高分辨率图像^[1-4]。微扫描成像技术采用现有的成像探测器,不增加成像探测器的像素尺寸,通过扫描的方法减少图像的频率混叠,提高成像系统的空间采样率,明显提高成像系统的分辨力。国外已将微扫描技术广泛应用于红外成像和可见光成像等领域,也在探索其在合成孔径成像等领域的应用。近年来,国内的微扫描算法研究正在逐渐活跃,但实际研究出的微扫描成像系统尚未见报道,研究水平与国外存在较大差距。高性能、高精度的致动器技术仍是迫切需要解决的核心技术之一。开展对高精度位移致动器及其驱动控制系统的研制,有助于提升国内微扫描成像的技术水平。

微位移致动器能够提供纳米级的位移输出,满足微扫描成像系统的位移精度需求。与其他微位移致动器相比,压电叠堆致动器具有体积小、重量轻、变形量大,出力大等优点,适合作为航空用微扫描成像平台的驱动元件。但压电叠堆致动器存在压电材料固有的迟滞非线性^[5],压电叠堆致动器的迟滞非线性会使系统精度降低,严重时会产生系统不稳定,改善迟滞非线性是压电精密控制系统的主要研究目标^[6]。

关于迟滞非线性的建模, Madelung 通过实验,总结了迟滞曲线复杂性的 Madelung 规则^[7]。Mayergoyz 给出了一种基于实验现象的迟滞系统,把迟滞非线性系统看作一个迟滞转换器,当输入信号达到极值点后,会出现输出曲线在不同分支间的过渡。Jiles-Atherton 模型^[8]用于描述铁磁体迟滞非线性,Smith 和 Ounaies^[9]根据 Jiles-Atherton 模型提出了描述压电材料迟滞特性的模型,这两种模型都是物理迟滞模型的代表。此

外,典型的微分方程迟滞非线性模型包括 Duhem 模型^[10]、Backlash-like 模型^[11]和 Bouc-Wen 模型^[12-13]等。典型的算子迟滞非线性模型包括 Preisach 模型、Krasnosel'skii-Pokrovki 模型和 Prandtl-Ishlinskii 模型等。Preisach 模型是用于研究磁化现象中迟滞非线性物理原理的模型,由德国物理学家 F. Preisach 在 20 世纪 30 年代首先提出。20 世纪 70 年代,苏联科学家 Krasnosel'skii 分离出 Preisach 模型的物理含义,给该模型一种纯数学的模型定义,拓展了其应用领域。如今,Preisach 模型已被广泛应用于迟滞非线性控制系统中。Prandtl-Ishlinskii 模型(以下简称 PI 模型)是用于描述物体变形特性的模型,由 Prandtl 在 1928 年提出。除了上述介绍的模型外,还有多种针对智能材料致动器迟滞非线性的建模方法,如神经网络模型,模糊系统模型等^[14-20]。

传统的 PI 模型只能用来描述中心对称的迟滞模型。本文采用改进的 PI 迟滞模型的逆模型作为前馈控制器,在压电控制器的前端串入迟滞非线性逆模型对系统的迟滞非线性进行补偿。设计逆补偿模型的算法,通过测试微位移驱动平台的特性确定逆补偿模型的参数,改善微扫描控制系统的迟滞非线性,为微扫描成像技术在航天领域的应用提供基础。

2 微位移驱动平台及测量系统

2.1 微位移驱动平台的整体结构

微扫描成像系统需要微位移驱动平台实现 2 个方向的位移定位,且要求定位精度高,响应快。为了保证负载平台在平面两个方向上的位移互不干涉,采用 4 个位移放大机构十字对称分布,位移放大机构通过解耦柔性铰链与负载平台连接,保证整个机构的对称性,进一步减小负载平台在两个方向上的位移干涉。微位移驱动放大平台如

图 1 所示,其中负载平台尺寸为 30 mm×30 mm,整个微位移驱动平台的尺寸为 80 mm×80 mm。

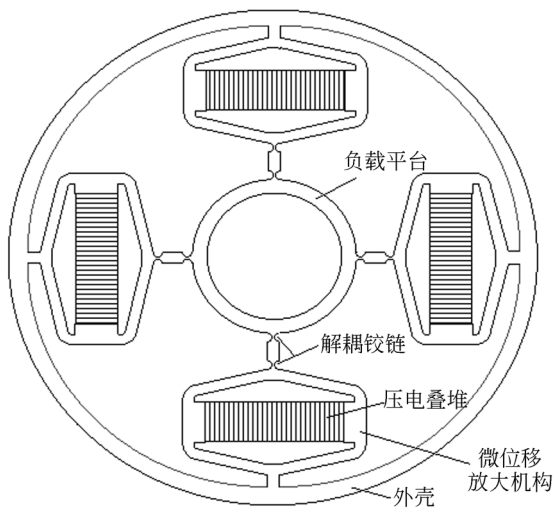


图 1 微位移驱动平台结构

Fig. 1 Structure of micro displacement driving platform

2.2 微位移驱动平台特性的测试

由微位移驱动平台,压电驱动控制器及激光微位移传感器组成微位移驱动平台测试系统,如图 2 所示。

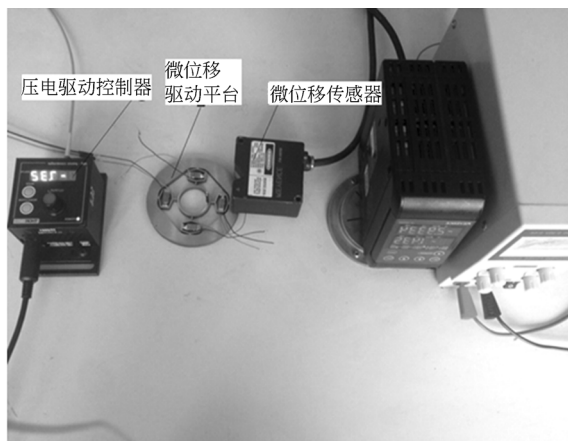


图 2 驱动平台的测试系统

Fig. 2 Driving platform testing system

采用 Thorlab 公司生产的 PK2FMP1 型压电叠堆致动器,采用 Thorlab 公司 TPZ001 型压电驱动控制器进行驱动,该压电控制器输出为 0~150 V,可用计算机通过 USB 口对其进行控制,具有可编程的波形发生能力,可通过接口软件 APT 与其他软件如 Matlab 等进行无缝对接。采

用基恩士公司 LK-G5000 系列的 CMOS 激光位移传感器对负载平台的微位移进行测量。

2.3 微位移驱动平台的电压-位移特性

单个驱动负载平台,将驱动电压从 0 升~75 V,再从 75 V 下降到 0,测试负载平台的电压-位移关系曲线如图 3 所示,其具有复杂的迟滞非线性,需要对系统的迟滞非线性进行补偿。单个驱动时载荷平台最大位移为 18.2 μm ,同一方向上的两个压电致动器运动时,则微扫描系统负载平台的行程为 $\pm 18.2 \mu\text{m}$ 。

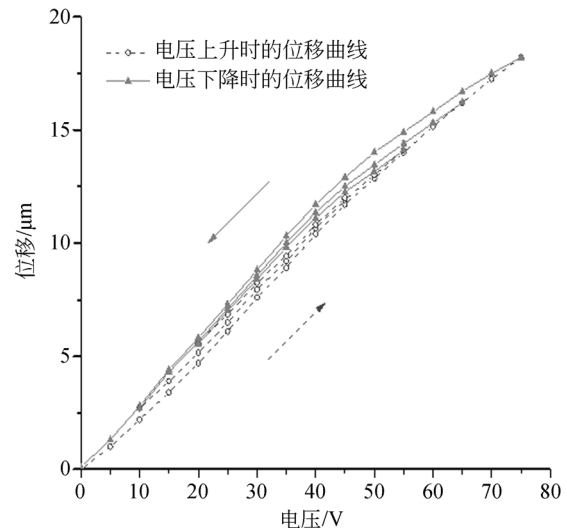


图 3 负载平台的电压-位移关系曲线

Fig. 3 Voltage-displacement curve of load Platform

3 微位移驱动器控制策略

3.1 传统的 PI 模型及其参数辨识

传统 PI 模型是一种基于 Play 或 Stop 迟滞非线性算子的迟滞非线性模型,与 Preisach 模型的定义类似,PI 模型的输出可以看成迟滞算子和权重函数的叠加。采用 Play 算子时,在实际系统中 PI 模型的输出特性为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i F_{r_i}[u, x_0](t) \quad , \quad (1)$$

$$= w F_{r_i}[u, x_0_i](t), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

其中:传统 PI 模型的权值向量、初始状态向量、单向 Play 算子阈值向量、单向 Play 算子向量分别为: $w = [\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n]$; $x_0_i = [x_0, x_{0_1}, x_{0_2}, \dots, x_{0_i}, \dots, x_{0_n}]^T$; $r = [r_0, r_1, r_2, \dots, r_i,$

$$\dots, r_n]^T, t_i < t ? t_{i+1}, 0 ? i ? n - 1; F_{r_i}[u, x_{0_i}](t) = \begin{bmatrix} F_{r_0}[u, x_{0_0}](t) \\ F_{r_1}[u, x_{0_1}](t) \\ F_{r_2}[u, x_{0_2}](t) \\ \vdots \\ F_{r_i}[u, x_{0_i}](t) \\ \vdots \\ F_{r_n}[u, x_{0_n}](t) \end{bmatrix}.$$

传统 PI 模型的参数辨识过程就是求出权值向量 w 中每个元素的值。PI 模型的优点就是无需考虑实际系统的物理特性,只需检测系统的响应就可识别系统的参数,并且其逆模型有解析解,可直接求出 PI 模型的逆模型。为了直接获得迟滞逆模型,以负载平台的位移作为模型辨识的目标输入,以压电叠堆致动器作为模型的目标输出。

3.2 改进的 PI 模型及其参数辨识

传统的 PI 模型只能用来描述中心对称的迟滞模型,微位移驱动平台的输入输出特性曲线是不对称的,因此需要将传统的 PI 迟滞模型进行适当的改进,使其能比较准确地描述非对称的迟滞非线性系统,由于迟滞模型的上升阶段和下降阶段的表现是不一样的,因此需定义上升算子和下降算子,表征其在上升阶段和下降阶段的特性。上升算子 $U_r[u, x_0](t)$ 和下降算子 $D_r[u, x_0](t)$ 是由传统的 Play 算子与一个实时响应的因子 $\delta(t)$ 组成,因此其具备传统 Play 算子的基本特性。

上升阶段的算子定义为:

$$U_r[u, x_0](t) = \delta_u F_r[u, x_0](t). \quad (2)$$

下降阶段的算子定义为:

$$D_r[u, x_0](t) = \delta_d F_r[u, x_0](t), \quad (3)$$

改进的 PI 模型求和形式的数学表达为:

$$y(t) = \omega_0 F_0[u, x_{0_0}](t) + \sum_{i=1}^n [\omega_{u_i} \delta_{u_i}(t) + \omega_{d_i} \delta_{d_i}(t)] F_{r_i}[u, x_{0_i}](t). \quad (4)$$

当 $\omega_{u_i} = \omega_{d_i}$ 时,改进的 PI 模型就变成传统的 PI 模型。

改进的 PI 模型上升阶段的输出表达式:

$$y(t) = \omega_0 u_j + \sum_{k=1}^{i-1} 2\omega_{u_k} r_k (u_j - r_k) + \sum_{k=i}^n \omega_{u_k} u_j r_k + \sum_{k=1}^{i-1} \omega_{d_k} 0 + \sum_{k=i}^n \omega_{d_k} (2r_k - u_j) r_k. \quad (5)$$

改进的 PI 模型下降阶段的输出表达式为:

$$y(t) = \omega_0 u_j + \sum_{k=1}^{i-1} \omega_{u_k} 0 + \sum_{k=i}^{n-1} \omega_{u_k} (u_j - 1 + 2r_k)(1 - r_k) + \sum_{k=1}^{i-1} 2\omega_{d_k} r_k (r_k + u_j) + \sum_{k=i}^{n-1} \omega_{d_k} (1 - u_j)(1 - r_k) + 0.5\omega_n. \quad (6)$$

改进 PI 模型的参数辨识过程就是求出模型的权值 ω_0 、 w_u 及 w_d 。

微扫描平台控制系统的迟滞非线性可用改进的 PI 模型进行建模,通过测试得到实验数据后,以负载平台的位移为输入信号,以电压为输出信号,用改进的 PI 模型算法直接求出系统的迟滞逆模型的参数,从而对微扫描平台进行逆迟滞补偿,改善系统的非线性。

3.3 微扫描平台控制系统的前馈控制

采用改进的 PI 迟滞模型的逆模型作为微扫描系统的前馈控制器。改进的 PI 迟滞模型数学表达形式简洁,其逆迟滞模型具有解析的表达形式。因此可直接通过算法分析试验数据,确定微扫描控制系统的迟滞特性逆模型参数,逆模型结构简单,系统的响应速度也快,利于实时控制。图 4 所示为微扫描平台控制系统的逆迟滞补偿前馈控制图。若想进一步减小系统的非线性误差,可以在此基础上引进闭环控制。

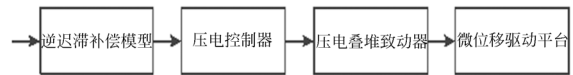


图 4 逆迟滞补偿前馈控制图

Fig. 4 Inverse hysteresis compensation feedforward control

4 微扫描平台控制系统的实验验证

通过 Matlab 软件设计逆迟滞模型的算法,将实验检测到的微扫描平台控制系统的电压位移关系实验数据代入改进的 PI 模型算法中,得出逆迟滞模型的参数。将系统的迟滞逆模型导入到压电控制器 TPZ001 的接口软件 APT 中,控制压电叠堆致动器,减小系统的迟滞非线性误差。

在控制系统中输入期望位移,用微位移传感器检测经过逆迟滞补偿前馈控制的微扫描系统输

出,通过比较系统实际输出位移与期望位移的误差,就可以验证前馈控制是否有效。将输入期望位移从 0 增大至 $18\ \mu\text{m}$,再从 $18\ \mu\text{m}$ 减小到 0,检测微扫描系统负载平台的实际输出位移,经过多次测量,观察期望位移与实际输出位移的误差。图 5 所示为期望位移与测量位移的误差。可知经过迟滞模型的开环前馈控制,无论在输入位移

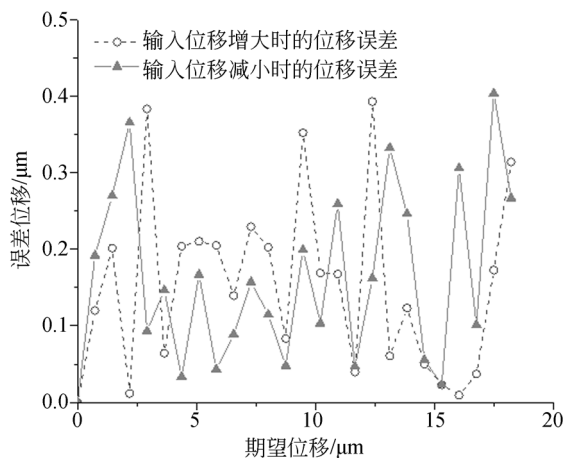


图 5 微扫描系统的期望位移与测量位移的误差

Fig. 5 Displacement error between expected displacement and measuring displacement

增大过程中还是输入位移减小过程中,微扫描控制系统迟滞非线性得到明显的改善,最大的非线性误差为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

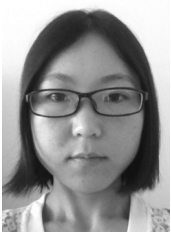
本文根据微扫描系统微位移定位的要求,在现有微位移驱动平台的基础上,组成微位移驱动平台测试系统。通过微位移驱动平台的输出特性,设计符合该输出特性的改进的 PI 逆模型,以迟滞模型作为微扫描控制系统的前馈控制器,实现控制精度的提高。通过 Matlab 软件设计迟滞模型的算法,求出改进的 PI 迟滞模型的参数,将系统的迟滞逆模型导入到压电控制器 TPZ001 的接口软件 APT 中,适时控制压电叠堆致动器,经过前馈控制后系统的最大非线性误差为 $0.4\ \mu\text{m}$,系统的迟滞非线性得到明显的改善,基本能够实现微扫描控制系统微位移的精确定位。若想进一步减小系统的非线性误差,可以在此基础上利用微位移传感器构成闭环控制。对微扫描成像的微位移驱动平台及其控制系统的研究,有助于提升国内微扫描成像的技术水平。

参考文献:

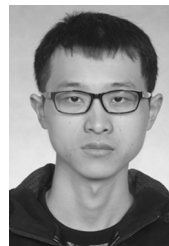
- [1] 徐超,金伟其,李雅琼. 光学微扫描器技术及其实现方式[J]. 红外技术, 2006,28(6): 338-342.
XU CH, JIN W Q, LI Y Q. Optical micro-scanner technology and its implementation [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(6): 338-342. (in Chinese)
- [2] 张良,仇振安,杨小儒. 红外系统微扫描技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012,49(4): 137-142.
ZHANG L, QIU ZH A, YANG X R. Micro scanning infrared system technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 137-142. (in Chinese)
- [3] CHEN Y, JIN WQ, WANG LX. Multi-frame sub-pixel processing algorithm based on uncontrolled micro-scanning [J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, 122(15): 1341-1348.
- [4] SCIAU P, GOUDEAU P, TAMURA N. Micro scanning X-ray diffraction study of Gallo-Roman Terra Sigillata ceramics[J]. *Applied Physics A*, 2006, 83(2): 219-224.
- [5] 张栋,张承进,魏强. 压电微动工作台的动态磁滞模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 549-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of Piezopositioning platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 549-556. (in Chinese)
- [6] 李朋志. 压电驱动器磁滞补偿的模糊控制方法及应用[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
LI P ZH. *Fuzzy Control and its application of hysteresis compensation about piezoelectric actuator* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [7] 谷国迎. 压电陶瓷驱动微位移平台的磁滞补偿控制理论和方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
GU G Y. *Study on theory and method of hysteresis compensation about PZT micro-displacement control platform* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [8] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. *Journal of Magnetism*

- and *Magnetic Materials*, 1986, 61(1-2):48-60.
- [9] SMITH R, OUNAIE Z. A domain wall model for hysteresis in piezoelectric materials [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(1): 62-79.
- [10] MACHI J W, NISTBI P, ZECCA P. Mathematical models for hysteresis [J]. *SIAM Review*, 1993, 35(1): 94-123.
- [11] SU C Y, STEPANENKO Y, SVOBODA J. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(12): 2427-2432.
- [12] EKANAYAKE D B, IYER R V. Study of a play-like operator [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2008, 403(2-3): 456-459.
- [13] ZHOU J, WEN C, ZHANG C. Adaptive backstepping control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown Backlash-like hysteresis [J]. *Automatica*, 2004, 49(10): 1751-1759.
- [14] SU C Y, WANG Q Q, CHEN X K. Adaptive variable structure control of a class of nonlinear systems with unknown Prandtl-ishlinskii hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(12):2069-2074.
- [15] 杨斌堂, 赵寅, 彭志科. 基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 124-130.
- YANG B T, ZHAO Y, PENG ZH K. Real-time hysteresis compensation control of giant magnetostrictive actuator based on Prandtl-Ishlinskii Model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):124-130. (in Chinese)
- [16] OH J, BERNSTEIN D S. Semilinear duhem model for rate-independent and rate-dependent hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(5): 631-645.
- [17] TAN U X, LATT W T, SHEE C Y. Feedforward controller of ill-conditioned hysteresis using singularity-free prandtl-ishlinskii model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(5): 598-605.
- [18] YI J, CHANG S, SHEN Y. Disturbance-observer-based hysteresis compensation for piezoelectric actuators [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(4): 456-464.
- [19] JIANG H, JI H, QIU J. A modified Prandtl-Ishlinskii model for modeling asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(5): 1200-1210.
- [20] LI Q, CHEN W, WANG Y. Parameter identification for PEM fuel-cell mechanism model based on effective informed adaptive particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(6):2410-2419.

作者简介:



黄 燕(1991—),女,河南驻马店人,硕士研究生,2014 年于天津科技大学获得学士学位,主要从事精密驱动以及超声电机和压电致动器等方面的研究。E-mail: xiaopang123@sjtu.edu.cn



黄整章(1989—),男,广西南宁人,硕士,2012 年于上海交通大学获得学士学位,2016 年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事压电制动器应用方面的研究。E-mail: huangzhengzhang@126.com



沈 飞(1979—),男,江苏泰兴人,硕士,高级工程师,2002 年于北京理工大学获得学士学位,2005 年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统、光电探测方面的研究。E-mail: sacysf@126.com



王红雨(1976—),男,山东青岛人,博士后,硕士生导师,2003 年于西安交通大学获得硕士学位,2008 年于上海交通大学获得博士学位并继续从事博士后研究工作,现为上海交通大学仪器科学与工程系导航与无人机技术研究所所长,主要从事卫星导航、微小型无人飞行器和智能控制等方面的研究。Email:redrain@sjtu.edu.cn



鹿存跃(1971—),男,江苏徐州人,副教授,硕士生导师,1993年于中国矿业大学获得学士学位,2000年于北京理工大学获得硕士学位,2004年于南京航空航天大学获得博士学位,2004年至2006年于清华大学从事博士后研究工作,现为上海交通大学仪器科学与工程系副教授,主要从事精密驱动以及超声电机和压电制动器的研究。
Email:lucunyue@sjtu.edu.cn