

文章编号 1004-924X(2016)05-1112-06

压电陶瓷驱动器的迟滞特性

范 伟*, 林瑜阳, 李钟慎

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:针对压电陶瓷固有的迟滞现象对其定位控制精度的影响,对迟滞进行了特征分析和实验验证。基于微观极化机理和机电耦合效应分析了迟滞的成因,分别对不同驱动行程,全行程不同位置和不同起始电压下的迟滞特性进行了对比实验。结果表明:对 10 V 行程的驱动,随着电压区间的递增,平均位移输出先增大后减小,平均迟滞误差从 $0.4193\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.1589\ \mu\text{m}$;对 100 V 行程的驱动,随着起始电压的增大,平均位移输出从 $42.8825\ \mu\text{m}$ 减小到 $25.92\ \mu\text{m}$,平均迟滞误差从 $3.9993\ \mu\text{m}$ 减小到 $1.6923\ \mu\text{m}$;起始电压每增加 15 V,位移输出减小 $5.6542\ \mu\text{m}$,迟滞误差减小 $0.769\ \mu\text{m}$ 。实验结果反映了电畴翻转状况对驱动过程机电耦合效率的影响,有效验证了电畴翻转理论。实验也表明:针对电畴翻转不同阶段所表现的迟滞特征对压电陶瓷驱动器的迟滞误差进行补偿,可修正或减小迟滞误差带来的影响,为提高系统定位控制精度提供科学的参考依据。

关键词:压电陶瓷驱动器;迟滞;电畴翻转;迟滞特性曲线;定位控制

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1112

Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators

FAN Wei*, LIN Yu-yang, LI Zhong-shen

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: fanwei@hqu.edu.cn

Abstract: As the inherent hysteresis phenomena of a piezoelectric ceramic actuator affects its positioning accuracy badly, this paper analyzes and verifies the characteristics of the hysteresis phenomena. The causes of hysteresis were analyzed through microscopic polarization mechanism and electromechanical coupling effects. Some experiments were designed to compare the hysteresis characteristics under different travels, different positions of the whole travel and different initial voltages. The experimental results indicate that: for the driving travel of 10 V, the output of average displacement increases at first then decreases and the average hysteresis error decreases from $0.4193\ \mu\text{m}$ to $0.1589\ \mu\text{m}$ as the increases of voltage intervals; for the driving travel of 100 V, the output of average displacement decreases from $42.8825\ \mu\text{m}$ to $25.92\ \mu\text{m}$ and the average hysteresis error decreases from $3.9993\ \mu\text{m}$ to $1.6923\ \mu\text{m}$ as the increases of initial voltages. Moreover, when the initial voltage increases by 15 V, the output of displacement decreases by $5.6542\ \mu\text{m}$ on average, and the hysteresis error decreases by $0.769\ \mu\text{m}$ on average. These results reflect the influence of domain switching status in the initial phase on electromechanical coupling efficiency in the driving

收稿日期:2016-01-20;修订日期:2016-02-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475176);2013 年福建省自然科学基金资助项目(No. 2013J05077);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 11J0234)

process and also verify the domain switching theory effectively. The experiments suggest that the compensation for hysteresis errors of the piezoelectric ceramic actuator according to the hysteresis characteristics of domain switching in different steps can correct or reduce the effects by hysteresis errors, and can provide scientific reference for improving the control accuracy of positioning systems.

Key words: piezoelectric ceramic actuator; hysteresis; domain switching; hysteresis characteristic curve; positioning and control

1 引言

微位移技术是精密机械与精密仪器的关键技术之一。微位移机构由驱动装置和导向装置组成,其中驱动装置多采用压电陶瓷驱动器。压电陶瓷能够将机械能和电能相互转换,具有机电耦合效率高、位移分辨率高、响应速度快、稳定性好、无噪声等优点,是一种理想的驱动器,在微机械、微电子、精密加工、生物医学、机器人和航空航天等领域得到广泛应用^[1-4]。

由于压电陶瓷存在迟滞、蠕变、非线性等特性,直接影响到微位移系统性能的提高^[5-7]。其中迟滞特性是指压电陶瓷升压曲线和降压曲线不重合,它们之间存在位移差,其主要特点是:系统下一时刻的输出不仅取决于当前时刻的输入和输出,还取决于输入的历史(经过非转折点的迟滞曲线的走向由相应的输入历史决定);压电陶瓷的迟滞环是不对称的,即上升轨迹和下降轨迹之间没有对称轴。

目前,国内外学者对压电陶瓷迟滞的研究主要集中在建模与控制。迟滞建模方面,较为成熟的迟滞模型主要有三类:(1)数学模型,如Preisach模型^[8]、Krasnoselskii-Pokrovskii模型^[9]、Prandtl-Ishlinskii模型^[10]等;(2)物理模型:如Maxwell模型^[11]、Duhem模型^[12]等;(3)基于智能计算的模型:如人工神经网络模型^[13]、支持向量机^[14]等。迟滞控制方面,在迟滞模型的基础上,通过逆模型前馈补偿快速减小迟滞误差,为减小开环逆补偿下各种扰动的影响,可在逆模型基础上采用如下方法进行控制:PID反馈复合控制^[15]、鲁棒控制^[16]、滑模控制^[17]、自适应控制^[18]等。

压电陶瓷迟滞特性的研究是迟滞建模与控制的基础。本文从微观极化机理和机电耦合效应出发,对压电陶瓷迟滞的成因及特性进行分析,并根据迟滞机理,设计实验,分别对不同驱动行程、全

行程不同位置 and 不同起始电压下的迟滞特征进行对比研究,验证了迟滞特性,同时为进一步修正或减小迟滞误差的影响,提高压电陶瓷驱动器控制精度,提供了科学的参考依据。

2 压电陶瓷迟滞机理

压电陶瓷由铁电陶瓷经极化处理得到,具有电畴结构。电畴是当晶体处于铁电相时,为了保持最小总自由能状态,会形成自发极化方向不同的若干小区域^[19]。压电陶瓷因电畴取向的完全任意性,不表现极性,当在压点晶体上施加足够高的直流电场时,电畴能够运动,与电场方向一致的电畴逐渐增加,这个过程称为电畴翻转,表现在铁电材料上即为电极化强度。为描述材料极化强度与外加电场强度之间的非线性关系,Miller等提出具有双曲线形状的电滞回线经典模型^[20]:

$$P = P_s \tanh[(E \pm E_c)/2\delta], \quad (1)$$

其中: $\delta = E_c [\ln((1 + P_r/P_s)/(1 - P_r/P_s))]^{-1}$, P_s 为饱和极化强度, P_r 为剩余极化强度, E_c 为矫顽场。电滞回线如图1所示。

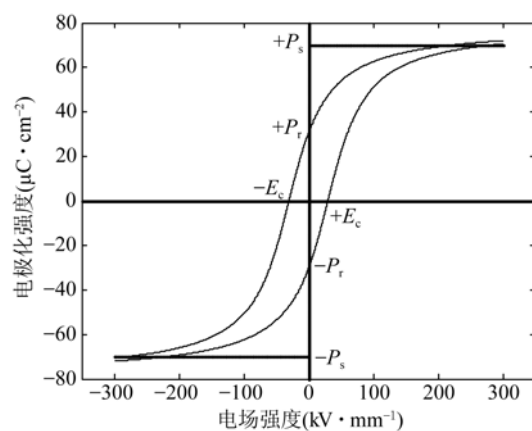


图1 电滞回线

Fig.1 Hysteresis loop

压电陶瓷体积效应的本质是电畴的非 180°

翻转^[21-22]。电滞回线可用于描述电畴翻转状况。当场强超过临界场强时,电畴开始转向,场强越高,转向电畴越多,体积效应越明显,随着场强的继续增加,部分电畴翻转达到饱和,停止翻转,电极化强度接近 P_s , 体积效应减弱。因压电陶瓷晶体中障碍物及晶格间摩擦的原因,电畴翻转将产生不可逆的能量损失。因此,当场强由高降低时,一部分作非 180° 旋转的电畴不能恢复到场强增加时同一电平下的状态,这部分不可逆的非 180° 电畴便造成了压电陶瓷驱动器的迟滞特性。迟滞的本质在于电畴转向过程中能量的不完全可逆损耗。

3 迟滞特性研究实验设计

3.1 实验目的

根据压电陶瓷迟滞机理,为掌握压电陶瓷驱动器的迟滞特性,从驱动行程、驱动位置、起始电压等方面进行研究,判断驱动器的迟滞特性是否具有较好重复性。在此基础上,研究驱动器在不同驱动行程、全行程不同位置和不同起始电压下的迟滞特性,验证电畴翻转规律,从而为进一步提高压电陶瓷驱动器控制精度提供科学的参考依据。

3.2 实验装置

实验装置如图 2 所示。驱动电源采用 HPV 系列压电陶瓷驱动电源。该电源能为压电陶瓷提供高稳定性、高分辨率的电压,并且具有优良的频率响应和极低的静态纹波。压电陶瓷驱动器型号为 SZBS 150/10/50 VS15,长度为 52 mm,标称位移为 $50 \mu\text{m}$ 。位移测量系统选用 TESA 公司的 TT80 型电感测微仪,其主要技术指标为:分辨率 $0.01 \mu\text{m}$;零点漂移小于 $\pm 0.005\% / ^\circ\text{C}$;仪表的指示误差小于 0.15% 。

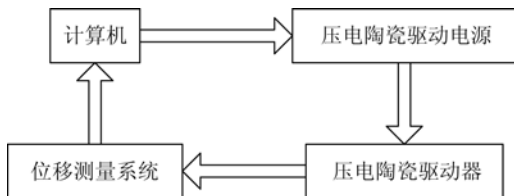


图 2 实验装置系统

Fig. 2 Experiment equipment system

3.3 实验控制及数据处理软件

Visual Basic 能迅速编制程序界面,具有快速的程序开发环境,这在界面设计和程序开发上十

分有效。采用 Visual Basic6.0 编写 HPV 型压电陶瓷驱动电源的控制程序。Matlab 语言具有简洁紧凑、语法限制不严、程序设计自由度大、可移植性好、运算符和库函数丰富、图形功能强等优点。因此采用 Matlab 语言进行数据处理和曲线拟合。控制流程如图 3 所示。

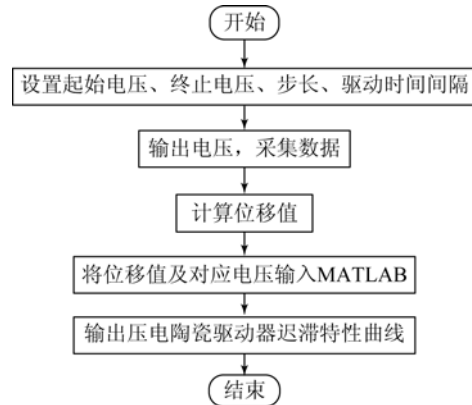


图 3 实验控制流程图

Fig. 3 Experiment control flow chart

3.4 实验内容

3.4.1 不同驱动行程下的迟滞特性研究

压电陶瓷驱动器在不同驱动行程下的迟滞特性反映了电畴的翻转规律。为研究压电陶瓷驱动器在不同驱动行程下的迟滞特性,进行如下实验:选取 $0\sim 10 \text{ V}$ 、 $0\sim 100 \text{ V}$ 、 $0\sim 150 \text{ V}$ 3 个行程分别进行等步长驱动,步长均为行程的 $1/10$,每隔 2 s 给一个电压输入,检测其输出位移。各行程均往返驱动 4 次,测量结果如图 4 所示。

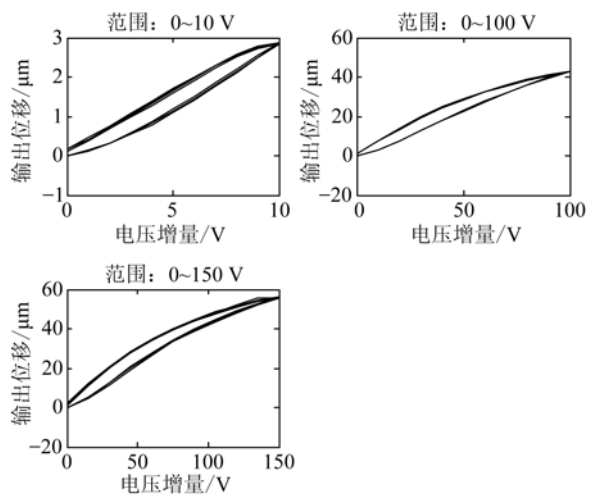


图 4 不同驱动行程迟滞曲线

Fig. 4 Hysteresis curves in different driving travels

经计算,3 组实验采样点的最大偏差仅为总驱动位移量的 3.14%、1.17%、2.84%,可见具有较好重复性。在行程 0~10 V 下,起始阶段位移变化较小,其余阶段变化较为稳定,具有较好的线性度,迟滞误差在行程中点达到最大;在行程 0~100 V 和 0~150 V 下,升压曲线起始阶段和高电压阶段相对中间阶段位移变化较小,即呈 S 形曲线特征,降压曲线初始阶段位移变化较小,全程均为凸曲线,迟滞误差最大值在全行程 1/3 处附近,迟滞环曲线斜率变化较大。

实验结果符合 Miller 模型,能较好描述电畴翻转规律。当电场强度达到翻转临界场强后,体积变化速率随着场强增加呈现先增大后减小的趋势,在驱动末期因接近剩余极化强度 P_s ,体积变化速率达到最小。

3.4.2 全行程不同位置时的迟滞特性研究

根据全行程下的迟滞曲线特征,可推测在全行程不同位置压电陶瓷具有不同的形变阻力。在驱动器全行程的起点、1/3 处、2/3 处、终点施加相同驱动,通过分析其位移输出可比较不同位置的形变阻力大小。为此,进行如下实验:步长取 1 V,电压区间分别为[0 V,10 V]、[40 V,50 V]、[90 V,100 V]、[140 V,150 V],每隔 2 s 输入一个电压,检测其输出位移。测量结果如图 5 和表 1 所示。

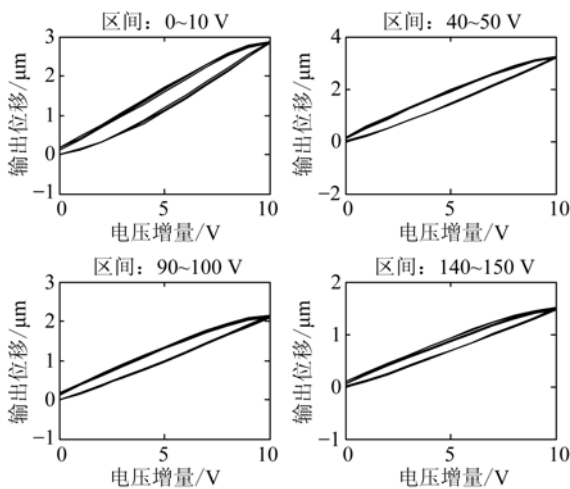


图 5 全行程不同位置的迟滞曲线

Fig. 5 Hysteresis curves in different positions of whole travel

表 1 全行程不同位置的平均位移输出和迟滞误差
Tab.1 Outputs of average displacement and hysteresis errors in different positions of whole travel

电压区间/V	[0,10]	[40,50]	[90,100]	[140,150]
平均位移变化量/ μm	2.862 5	3.212 5	2.11	1.482 5
平均迟滞误差/ μm	0.419 3	0.349 3	0.244 1	0.158 9

比较图 5 和表 1,在压电陶瓷全行程范围内,初始阶段位移输出相对较小;1/3 处场强下的体积效应最为明显;之后体积效应逐渐减小,在全行程终点处达到最小。结合电畴翻转规律可知,初始阶段尚未达到翻转临界场强,因存在静止惯性和晶格间摩擦,还有部分电畴尚未翻转;1/3 处场强下已有大部分电畴实现翻转且未到饱和状态;随着场强的增大,已完成翻转的电畴增多,场强变化对其不起作用,在全行程终点处翻转电畴数达到最多,电极化强度达到 P_s 。此外,迟滞误差随着电压的增大,逐渐减小,说明低电压下电畴翻转克服摩擦等外界因素的能量损耗更大。

3.4.3 不同起始电压下的迟滞特性研究

由压电陶瓷迟滞机理可知,驱动初始状态的极化程度对驱动过程的体积效应有一定影响。为研究不同起始电压下压电陶瓷驱动器的迟滞特征,进行如下实验:以步长 10 V 驱动 10 次,起始电压分别取 0 V、15 V、30 V、45 V,每隔 2 s 给一个电压输入,检测其输出位移。测量结果如图 6 和表 2 所示。

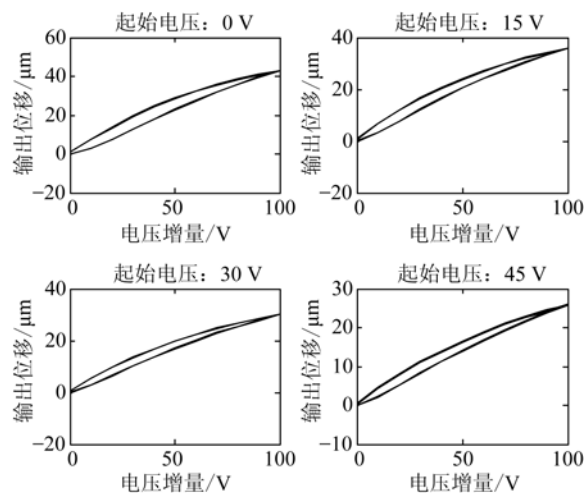


图 6 不同起始电压下的迟滞曲线

Fig. 6 Hysteresis curves in different initial voltages

表 2 不同起始电压下的平均位移输出和迟滞误差

Tab. 2 Outputs of average displacement and hysteresis errors in different initial voltages

起始电压/V	0	15	30	45
平均位移 变化量/ μm	42.882 5	35.752 5	30.19	25.92
平均迟滞 误差/ μm	3.999 3	2.562 7	1.946 8	1.692 3

比较图 6 和表 2, 可以发现: 在大行程驱动下, 初始电压越大, 平均位移输出越小。结合电畴翻转规律, 初始阶段压电陶瓷带电量越多, 极化程度越高, 驱动过程电畴的总翻转量越少, 同时, 随着初始场强的增加, 电极化强度更早接近 P_s , 进一步抑制了压电陶瓷的体积效应。迟滞误差随着初始电压的增大逐渐减小, 说明电畴翻转在较大初始电压下的能量利用率更高。

4 结 论

本文通过大量实验, 可以发现: (1) 压电陶瓷驱动器的迟滞反映了在一定电场能量供给下, 其内部电畴翻转的状况, 是按照一定规律变化的, 多次驱动偏差最大仅为总驱动位移量的 3.14%, 具有良好的重复性。(2) 在不同驱动行程的迟滞曲

线特性不一样, 电畴翻转程度与能量供给有关。(3) 在压电陶瓷全行程不同位置施加相同电场, 电畴翻转程度不一样。其中, 不带电状态时的能量多用于克服电畴翻转前的静止惯性和晶格间静摩擦, 电畴总体翻转效果较不明显, 0~10 V 的平均位移输出仅有 2.862 5 μm ; 当带有一定电量时, 已有部分电畴正处于翻转阶段且翻转尚未完成, 此时施加的能量一方面促进已翻转电畴的进一步翻转, 另一方面使静止电畴开始翻转, 此时电畴总体翻转效果最为明显, 40~50 V 平均位移输出达到 3.212 5 μm ; 当压电陶瓷处于全行程末期, 大部分电畴已完成翻转, 此时能量利用率最低, 140~150 V 的平均位移输出仅有 1.482 5 μm 。(4) 初始电压越高, 已经完成翻转的电畴数量越多, 驱动过程翻转的电畴越少, 且电畴翻转将更早进入饱和状态, 压电陶瓷平均位移输出越小。驱动过程 0~100 V 与 45~145 V 相比, 起始电压平均每升高 15 V, 压电陶瓷驱动器平均位移输出减小 5.654 2 μm 。(5) 迟滞误差随着电压的增大逐渐减小, 说明电畴翻转在大电压下的能量利用率更高。

上述结论表明: 根据压电陶瓷驱动器在不同驱动行程、全行程不同阶段和不同起始电压下的迟滞特征, 采用合适的控制方法进行修正, 可有效提高压电陶瓷驱动器的控制精度。

参考文献:

- [1] RANGASAMY M. Nano technology: review [J]. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2011, 1(2): 8-16.
- [2] 李伟, 高思田, 卢明臻, 等. 计量型原子力显微镜的位移测量系统[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(4): 796-802.
LI W, GAO S T, LU M ZH, et al.. Position measuring system in metrological atomic force microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 796-802. (in Chinese)
- [3] KOMMEPALLI H K R. *Design, Modeling and Optimization of Piezoelectric Actuators* [D]. Commonwealth of Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2010.
- [4] BAHRAMI A, TAFALI-MASOULE M, BAHRAMI M N. Active vibration control of piezoelectric stewart platform based on Fuzzy Control [J]. *International Journal of Material and Mechanical Engineering*, 2013, 2(1): 17-22.
- [5] QIN Y, TIAN Y, ZHANG D, et al.. A novel direct inverse modeling approach for hysteresis compensation of piezoelectric actuator in feedforward applications[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3): 981-989.
- [6] RAKOTONDRABE M. Bouc-Wen modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis nonlinearity in piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on automation Science and Engineering*, 2011, 8(2): 428-431.
- [7] JUHASZ L, MAAS J, BOROVAC B. Parameter identification and hysteresis compensation of Embedded Piezoelectric stack actuators [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(1): 329-338.
- [8] WANG X, REYSETT A, POMMIER-BUDINGER V, et al.. A modified Preisach model and its inver-

- sion for hysteresis compensation in piezoelectric actuators [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials & Structures (Emerald Group Publishing Limited)*, 2014, 122-142.
- [9] ZHOU M L, HE SH B, HU B, *et al.*. Modified KP model for hysteresis of magnetic shape memory alloy actuator [J]. *IETE Technical Review*, 2015, 32 (1): 29-36.
- [10] WANG D, YU P, WANG F F, *et al.*. Improving atomic force microscopy imaging by a direct inverse asymmetric PI hysteresis model [J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 3409-3425.
- [11] 曹荣, 秦岚, 夏含信, 等. PID 控制技术在压电陶瓷精密定位过程的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 33 (2): 18-21.
- CAO R, QIN L, XIA H X, *et al.*. The application of PID controlling technique in PZT precision positioning [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 33(2): 18-21. (in Chinese)
- [12] 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 88-95.
- CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, *et al.*. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (1): 88-95. (in Chinese)
- [13] CHENG L, LIU W CH, HOU Z G, *et al.*. Neural network-based nonlinear model predictive control for piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62 (12): 7717-7727.
- [14] WONG P, XU Q S, VONG C, *et al.*. Rate-dependent hysteresis modeling and control of a piezostage using online support vector machine and relevance vector machine [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4): 1988-2001.
- [15] 刘红军, 刘洁, 叶芳. 用于超磁致伸缩作动器的一种改进的控制方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(9): 91-95.
- LIU H J, LIU J, YE F. An improved control method for the giant magnetostrictive actuator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(9): 91-95. (in Chinese)
- [16] YANG L, LI J. Robust output feedback control with disturbance estimation for piezoelectric actuators [J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 2129-2135.
- [17] 赖志林, 刘向东, 耿洁, 等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 219 (6): 1281-1290.
- LAI ZH L, LIU X D, GENG J, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse Preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 219(6): 1281-1290. (in Chinese)
- [18] ESCARENO J A, RAKOTONDRABE M, HABIN-EZA D. Backstepping-based robust-adaptive control of a nonlinear 2-DOF piezoactuator [J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 41: 57-71.
- [19] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 378-394.
- YIN ZH W. *Dielectric Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 378-394. (in Chinese)
- [20] MILLER S L, NASBY R D, *et al.*. Device modeling of ferroelectric capacitors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68: 6463.
- [21] 张福学, 王丽坤. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 93-97.
- ZHANG F X, WANG L K. *Modern Piezoelectric* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 93-97. (in Chinese)
- [22] 范伟. 六自由度纳米工作台驱动控制方法及系统研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2009.
- FAN W. *Research on the Drive System and Control Method for Nano-table With Six Degrees of Freedom* [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介:



范伟(1980—),男,甘肃玉门人,博士,讲师,2002年、2009年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事精密测试技术及仪器的研究。E-mail: fanwei@hqu.edu.cn



林瑜阳(1991—),男,福建泉州人,硕士研究生,2014年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事压电陶瓷迟滞建模与控制方面的研究。E-mail: 315581759@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)