

文章编号 1004-924X(2019)08-1793-07

## 压电陶瓷驱动器的迟滞非线性规律

范 伟\*, 傅雨晨, 于欣妍

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**探究压电陶瓷的迟滞非线性规律,为进一步修正迟滞非线性提供参考依据和理论基础。通过实验测量得到迟滞模型并对实验数据分析,拟合出上升轨迹的修正直线,求出其在相同位移下与上升、下降轨迹的电压差作为补偿电压,发现两条轨迹采样点上的输入电压与补偿电压满足近似多项式关系;分别选定 5, 10 和 15 V 不同步长进行驱动实验。实验结果:上升轨迹(下降轨迹)多项式参数  $R\text{-square}=0.999\ 2(0.999\ 9)$ ,  $RMSE=0.083(0.080\ 86)$ ;  $R\text{-square}=0.999\ 7(0.999\ 9)$ ,  $RMSE=0.057\ 39(0.094\ 99)$ ;  $R\text{-square}=0.995\ 2(0.999\ 8)$ ,  $RMSE=0.291\ 6(0.165\ 5)$ 。实验结论:两条轨迹的  $R\text{-square}$  近似为 1,  $RMSE$  较接近 0, 重复性误差在 1.13%~2.63%, 输入电压与补偿电压满足近似多项式关系, 拟合程度和匹配性较高, 且重复性较好, 具有可预测性, 从而为进一步修正压电陶瓷驱动器的迟滞非线性提供了参考依据和理论基础。

**关键词:**压电陶瓷驱动器;迟滞非线性规律;多项式关系;重复性;可预测

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1793

## Hysteresis nonlinear law of piezoelectric ceramic actuator

FAN Wei\*, FU Yu-chen, YU Xin-yan

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

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

**Abstract:** In this study, the hysteresis nonlinear law of piezoelectric ceramics was explored to provide a reference and theoretical basis for further correction of hysteresis nonlinearity. A hysteresis model was obtained through experimental measurements, and experimental data were analyzed. The corrected straight line of the rising trajectory was fitted; the voltage difference between the rising and falling trajectories at the same displacement was obtained as the compensation voltage; and the input voltage at the sampling points of the two trajectories was determined. The compensation voltage was found to satisfy an approximately polynomial relationship, where 5-, 10-, and 15-V asynchronous lengths were selected for driving experiments. Experimental results show that the rising trajectory (falling trajectory) polynomial parameters are  $R\text{-square}=0.999\ 2(0.999\ 9)$ , root mean square error ( $RMSE$ )= $0.083(0.080\ 86)$ ;  $R\text{-square}=0.999\ 7(0.999\ 9)$ ,  $RMSE=0.057\ 39(0.094\ 99)$ ; and  $R\text{-square}=0.995\ 2(0.999\ 8)$ ,  $RMSE=0.291\ 6(0.165\ 5)$ . The experimental results also show that the  $R\text{-square}$  of the two trajectories is approximately 1; the  $RMSE$  is closer to 0; and the repeatability error is between 1.13% and 2.63%. The input and compensation voltages satisfied the approximately

收稿日期:2018-12-28;修订日期:2019-02-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51505161);福建省自然科学基金资助项目(No. 2017J01086);泉州市科技计划项目(No. 2018Z001)

polynomial relationship, and the degree of fit and matching are high and repeated. The hysteresis model is proven to have good performance and predictability, thus providing a reference and theoretical basis to further correct the hysteresis nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators.

**Key words:** piezoelectric ceramic driver; hysteresis nonlinear law; polynomial relationship; repeatability

## 1 引言

微位移技术是现代精密仪器和精密机械的核心技术之一,压电陶瓷驱动器作为微位移机构的主要驱动装置,是实现位移驱动的关键。压电陶瓷是铁电材料,具有铁电效应以及在电场作用下的电致伸缩效应和压电效应<sup>[1]</sup>,同时也是一种将电能转换为微位移的新型功能型智能材料<sup>[2]</sup>,具有机电耦合效率高、位移分辨率高、响应速度快、稳定性好以及无噪声等优点,被广泛应用于微机械、微电子、精密加工、生物医学、机器人和航天领域<sup>[3-5]</sup>。

由于压电陶瓷这种智能材料固有的迟滞、蠕变、非线性等特性<sup>[6]</sup>,导致系统输出位移的不确定性,对控制系统的设计带来较大影响<sup>[7]</sup>,直接影响了微位移系统的控制精度和稳定性<sup>[8-9]</sup>,其中的迟滞非线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。因此,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<sup>[10]</sup>。

当前,国内外学者对压电陶瓷迟滞特性的研究主要集中在建模与控制两大方面。迟滞建模方面,Preisach 模型<sup>[11]</sup>和 PI(Prandtl-Ishlinskii)模型<sup>[12]</sup>原理简单,应用较为广泛,但实现形式较为复杂且难以实现在线控制<sup>[13]</sup>;广义 Bouc-Wen 模型结构简单,可以较好的描述非对称的迟滞环且其解析逆模型易于求取<sup>[14]</sup>;基于神经网络方法的迟滞建模<sup>[15]</sup>和基于支持向量机的迟滞建模<sup>[16]</sup>等;为了描述模型非对称的迟滞特性及静态非线性部分,可采用 Backlash-Like 分段辨识模型进行建模<sup>[17]</sup>;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<sup>[18]</sup>、鲁棒控制<sup>[19]</sup>、自适应控制<sup>[20]</sup>、智能控制<sup>[21-22]</sup>等,也可采用控制理论中最常用的 PID 控制算法建立实验系统,进行闭环控制测试<sup>[23]</sup>。

综合上述关于压电陶瓷非线性建模与控制补

偿的方法,首先进行实验测量得到迟滞模型;通过对实验数据的分析,拟合出上升轨迹的修正直线,求出其在相同位移下与上升、下降轨迹的电压差作为补偿电压,发现两条轨迹采样点的输入电压与补偿电压满足近似多项式关系;根据上述发现,选定 20  $\mu\text{m}$  行程的压电陶瓷驱动器,分别进行 5, 10 和 15 V 步长驱动实验,证明了上升、下降轨迹各采样点的输入电压与补偿电压满足近似五次多项式关系,且拟合程度较高、重复性较好、匹配性较高、可被预测,为进一步修正迟滞非线性提供参考依据和理论基础。

## 2 迟滞非线性规律研究实验设计

### 2.1 实验目的

针对压电陶瓷所固有的迟滞非线性,探究其迟滞非线性规律,对迟滞模型中各采样点的输入电压与补偿电压的关系进行研究,判断两者之间近似多项式的关系是否满足且具有较好的重复性。在此基础上,验证压电陶瓷驱动器在不同步长驱动下的输入电压与补偿电压之间的多项式关系及其重复性,为进一步修正迟滞非线性提供参考依据和理论基础。

### 2.2 实验装置系统

实验装置系统如图 1、实物装置系统如图 2 所示。实验采用 HPV 系列 C 型压电陶瓷驱动电源,该系列驱动电源的 SPP(并口)可与计算机连接实现串口通信,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 PZT/7  $\times$  7/20,长度为 42 mm,标称位移行程为 20  $\mu\text{m}$ 。气浮隔振平台采用 GJ-II-ZDT-P 型气浮精密光学隔振平台,固有频率垂直方向小于 2 Hz,水平方向小于 2 Hz,重复定位精度  $\pm 0.1$  mm,减小了振动等不确定因素对实验结果的影响。微位移测量装置为瑞士 TESA 公司的 TT80 型电感测微仪,其主要技术指标为:分辨率 10 nm;零点漂移小于  $\pm 0.005\%$ ;测微仪的指示误差小于 0.15%,为实验提供了高精度测量的条件。

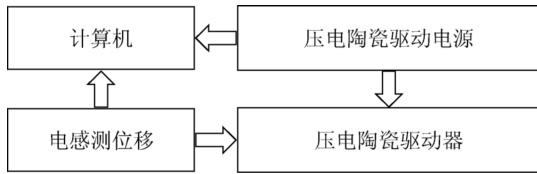


图 1 实验装置系统

Fig. 1 Experimental equipment system



图 2 实物装置系统

Fig. 2 Physical device system

2.3 实验控制及数据处理软件

C#是一种简单的面向对象的编程语言,综合了 Visual Basic 简单的可视化操作和 C++的高运行效率,具有强大的操作能力、程序开发和界面设计功能。实验中压电陶瓷驱动电源控制系统的运行界面由 C# 编程进行控制。Excel 拥有数据整理和图像基础处理功能;MATLAB 具有简便易操作、程序设计自由度大、运算符和库函数丰富、图像处理功能强大等优点,因此本实验采用 Excel 分析处理数据、MATLAB 进行对数据的图像处理 and 曲线拟合,控制流程图如图 3 所示。

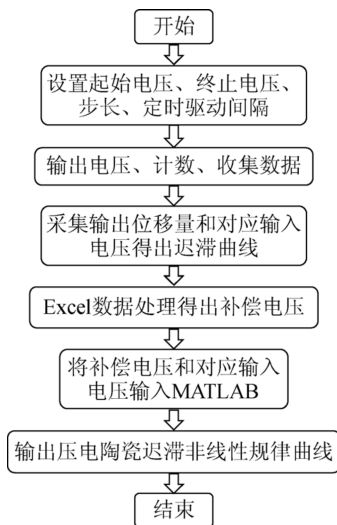


图 3 实验控制流程图

Fig. 3 Flow chart of experimental control

2.4 实验内容

压电陶瓷驱动器在不同步长驱动下的输入电压与补偿电压的关系反映了迟滞模型的迟滞非线性规律。首先分别将测得的 5,10 和 15 V 三种步长驱动下的输入电压与对应位移在 Excel 中进行数据处理得出各自的迟滞模型、修正直线和补偿电压,然后将输入电压与补偿电压导入 MATLAB 进行图像分析和曲线拟合,最后将拟合出的多项式关系曲线中的重要参数导出进行分析,得出压电陶瓷迟滞非线性规律。

2.4.1 20 μm 行程压电陶瓷 5 V 步长驱动电压的实验

为研究迟滞曲线的迟滞非线性规律及重复性,进行如下实验:选取 20 μm 行程的压电陶瓷驱动器,控制系统设置为 5 V 等步长电压驱动,控制电压输出间隔为 2 s,电压变化范围设置为 0~150 V,驱动器末端连接电感测微仪,时时检测输出位移,往返重复驱动 3 次并求出平均值;重复实验 5 次,求得重复性误差,实验测量结果如图 4、图 5 和表 1 所示。

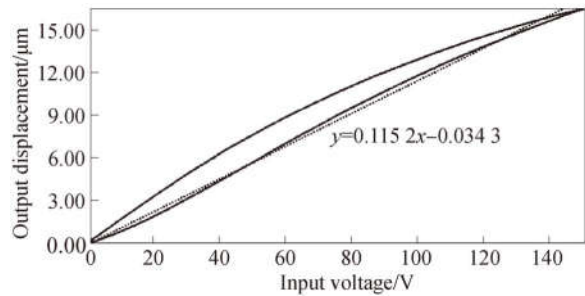


图 4 5 V 步长驱动迟滞曲线及修正直线

Fig. 4 5 V step driving hysteresis curve and corrected line

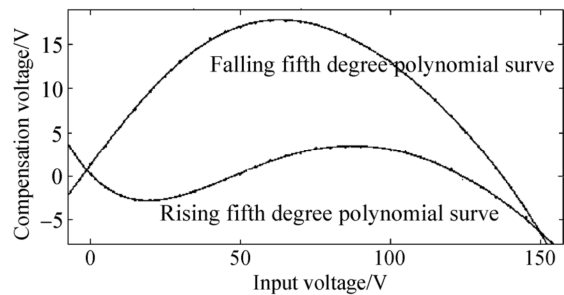


图 5 迟滞非线性规律曲线

Fig. 5 Hysteresis non-linear regular curve

表 1 输入电压与补偿电压表

Tab. 1 Input voltage and compensation voltage (V)

输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压	输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压
5	-1.23	3.46	80	3.28	16.65
10	-2.51	5.71	85	3.32	16.04
15	-2.68	7.69	90	3.40	15.07
20	-2.78	9.64	95	3.35	14.02
25	-2.61	11.37	100	2.99	12.84
30	-2.18	13.14	105	2.72	11.62
35	-1.67	14.34	110	2.23	10.18
40	-1.07	15.64	115	1.53	8.69
45	-0.34	16.41	120	0.83	6.90
50	0.25	16.96	125	-0.27	5.03
55	1.07	17.43	130	-1.27	3.02
60	1.76	17.69	135	-2.37	0.93
65	2.36	17.63	140	-3.59	-1.29
70	2.65	17.45	145	-4.73	-3.77
75	3.21	17.23	150	-6.47	-6.52

如图 4 所示,将上升轨迹的拟合直线作为修正直线求得相同输出位移下两条轨迹与修正直线的电压差作为补偿电压如表 1 所示;如图 5 所示,两条轨迹采样点上的输入电压与补偿电压满足近似五次多项式关系,且上升轨迹(下降轨迹)拟合多项式的重要参数 R-square=0.999 2(0.999 9), RMSE=0.083(0.080 86),其中 R-square 为多重测定系数,越接近 1,拟合程度越高;RMSE 为均方根误差,越接近 0 匹配性越高。由实验数据可知:5 V 驱动实验下的输入电压与补偿电压满足近似五次多项式关系,且拟合化程度在 99% 以上,匹配性在 80% 以上,同时将五次重复实验的数据导入 MATLAB 进行重复性误差计算,求得上升轨迹和下降轨迹的重复性误差分别为 1.13%,1.85%,说明曲线具有较好的重复性,满足实验讨论的迟滞非线性规律。

#### 2.4.2 20 $\mu\text{m}$ 行程压电陶瓷 10 V 步长驱动电压的实验

选取 20  $\mu\text{m}$  行程的压电陶瓷驱动器,控制系统设置为 10 V 等步长电压驱动,设置相同的系统

参数,往返重复驱动 3 次并求出平均值;重复实验 5 次,求得重复性误差,实验测量结果如图 6、图 7 和表 2 所示。

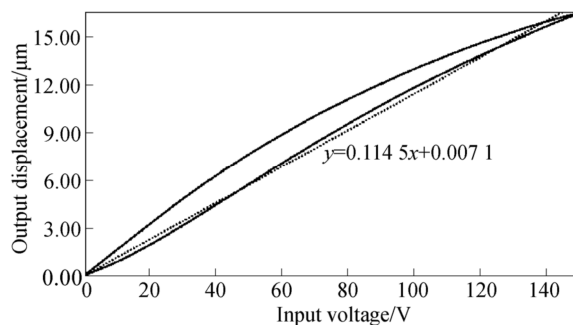


图 6 10 V 步长驱动迟滞曲线及修正直线

Fig. 6 10 V step driving hysteresis curve and corrected line

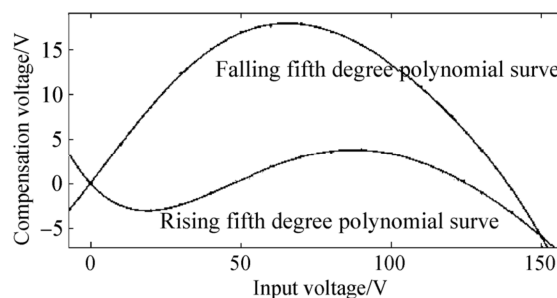


图 7 迟滞非线性规律曲线

Fig. 7 hysteresis nonlinear regular curve

表 2 输入电压与补偿电压表

Tab. 2 Input voltage and compensation voltage (V)

输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压	输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压
10	-2.41	4.40	90	3.79	15.50
20	-2.98	8.55	100	3.40	13.44
30	-2.32	12.35	110	2.31	10.78
40	-1.05	15.02	120	0.95	7.59
50	0.39	16.89	130	-1.01	3.71
60	1.92	17.64	140	-3.15	-0.62
70	3.01	17.85	150	-5.90	-5.90
80	3.57	16.94			

采用实验方案同上,以 10 V 步长驱动为修改条件,如图 6、表 2 和图 7 所示,得到的结果与 5 V

步长驱动实验类似,其中上升轨迹(下降轨迹)拟合多项式的 R-square=0.999 7(0.999 9),RMSE =0.057 39(0.094 99),实验数据表明:10 V 驱动实验相较 5 V 驱动方案,步长增大,采样点减小,拟合参数减小,两条轨迹的 R-square 几乎无变化,拟合程度保持在 99%以上,但 RMSE 分别增大了 30.855%、减小了 14.875%,说明采样步长的增加对匹配性有一定影响,但对拟合性几乎无影响。同时将所测的实验数据导入 MATLAB 进行重复性误差计算,发现两条轨迹的重复性误差分别为 1.32%、2.14%,是 5 V 实验的 1.17 和 1.16 倍,说明采样步长的增加可能会影响拟合曲线的重复性,但曲线仍然具有较好的重复性,满足实验讨论的迟滞非线性规律。

2.4.3 20 μm 行程压电陶瓷 15 V 步长驱动电压的实验

选取 20 μm 行程的压电陶瓷驱动器,控制系统设置为 15 V 等步长电压驱动,设置相同的系统参数,往返重复驱动 3 次并求出平均值;重复实验 5 次,求得重复性误差,实验测量结果如图 8、图 9 和表 3 所示。

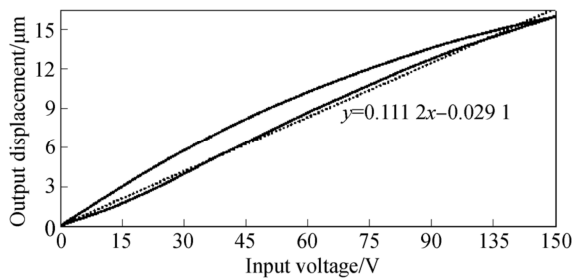


图 8 15 V 步长驱动迟滞曲线及修正直线

Fig. 8 15 V step driving hysteresis curve and corrected line

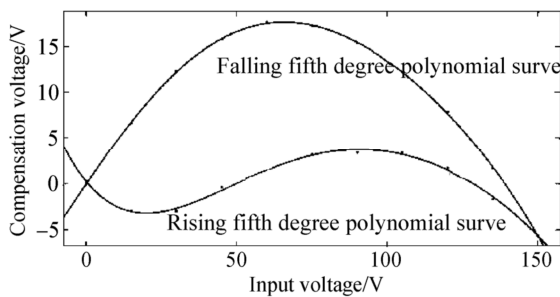


图 9 迟滞非线性规律曲线

Fig. 9 Hysteresis nonlinear regular curve

表 3 输入电压与补偿电压表

Tab. 3 Input voltage and compensation voltage (V)

输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压	输入电压	上升轨迹补偿电压	下降轨迹补偿电压
15	-2.96	6.66	90	3.43	15.39
30	-2.94	12.35	105	3.36	12.26
45	-0.40	15.78	120	1.75	7.87
60	1.41	17.69	135	-1.64	1.68
75	3.14	17.26	150	-5.58	-5.58

采用实验方案同上,以 15 V 步长驱动为修改条件,如图 8、表 3、图 9 所示,得到的实验结果与 5 V 和 10 V 驱动实验相似,其中上升轨迹(下降轨迹)拟合多项式的 R-square=0.995 2(0.999 8),RMSE 为 0.291 6(0.165 5),实验数据表面:相较于 5 V 驱动方案,两条轨迹的 R-square 仍然没有太大的变化,依旧保持在 99%以上。但 RMSE 明显增大,两条轨迹的增率分别为 2.51 倍和 1.04 倍,说明采样点的继续减少,拟合曲线所需要的拟合参数继续减小对 RMSE 的影响会继续增大。最后将测量所得的实验数据导入 MATLAB 进行重复性误差计算,计算出两条轨迹的重复性误差分别为 1.86%、2.63%,重复性误差继续增大,变化幅度为 10 V 实验的 1.63 倍和 1.23 倍,说明采样点的减小对重复性误差的影响较大,可能与拟合曲线的匹配性减弱有关,但最终的拟合曲线仍然可以认为具有较好的重复性,依旧满足实验讨论的迟滞非线性规律。

3 结 论

针对压电陶瓷驱动器的迟滞非线性,通过大量实验对其迟滞非线性规律进行研究,可以发现:压电陶瓷迟滞模型曲线存在一定规律,由输入电压和补偿电压体现;压电陶瓷驱动器在 5, 10 和 15 V 三种不同步长驱动下,上升轨迹均存在一条修正直线,且上升轨迹补偿电压均先变小后变大再变小,下降轨迹补偿电压均先变大后变小;三种步长驱动下的规律曲线均满足近似五次多项式关系,上升轨迹(下降轨迹)多项式参数 R-squar 在 0.999 2~0.999 9 之间浮动,整体都在 99%以上,

拟合程度较高, RMSE 随着驱动步长的增加、采样次数减小而增加, 匹配性变低, 且重复性误差随之增大, 两者具有一定关系; 上述压电陶瓷驱动器迟滞非线性规律存在较好的重复性, 重复性误差在 1.13%~2.63% 之间, 重复性较好, 可被定量成多项式关系式预测, 可运用到迟滞非线性曲线的修正方法中, 算法简单, 便与实现。

### 参考文献:

- [1] 范占斌, 戴一帆, 铁贵鹏, 等. 横向压电驱动变形镜的迟滞特性及其闭环校正 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 261-266.  
FAN ZH B, DAI Y F, TIE G P, *et al.*. Hysteresis characteristics of transverse piezoelectric driven deformable mirror and its closed-loop correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 261-266. (in Chinese)
- [2] 李庭树. 压电超精密定位台迟滞非线性建模与控制研究[D]. 云南: 昆明理工大学, 2018.  
LI T SH. *Research on Hysteresis Nonlinear Modeling and Control of Piezoelectric Ultra-precision Positioning Table* [D]. Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] RANGASAMY M. Nano technology: review [J]. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2011, 1(2): 8-16.
- [4] 李伟, 高思田, 卢明臻, 等. 计量型原子力显微镜对的位移测量系统 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(4): 796-802.  
LI W, GAO S T, LU M CH, *et al.*. Displacement measuring system for measuring atomicforce microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 796-802. (in Chinese)
- [5] KOMMERPALLI H K R. Design, modeling and optimization of pennsylvania [J]. *The Pennsylvania State University*, 2010.
- [6] 姜慧斌. 高精度定位系统迟滞非线性建模与控制方法研究[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2017.  
JIANG H B. *Research on Hysteresis Nonlinear Modeling and Control Method for High Precision Positioning System* [D]. Zhejiang: Zhejiang Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 李东明, 罗姜, 李丽, 等. 压电陶瓷驱动微进给刀架的迟滞建模 [J]. 压电与声光, 2018, 40(5): 776-779.  
LI D M, LI J, LI L, *et al.*. Hysteresis modeling of piezoelectric ceramic driven micro-feed tool holder [J]. *Piezoelectric and Acoustic*, 2018, 40(5): 776-779. (in Chinese)
- [8] QIN Y, TIAN Y, ZHANG D, *et al.*. A novel direct inverse modeling approach for hysteresis compensation of piezoelectric actuator in feed forward applications [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3): 981-989.
- [9] RAKOTONDRABE M. Bocu-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.
- [10] 范伟, 林瑜阳, 李钟慎. 压电陶瓷驱动器的迟滞特性 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(5): 1112-1117.  
FAN W, LIN Y Y, LI ZH SH. Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1112-1117. (in Chinese)
- [11] KLAUS K, PAVEL K. Compensation of complex hysteresis greep effects in piezoelectrically actuated systems—a new preisach modeling approach [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2009, 54(3): 537-550.
- [12] TAN U X, WIN T L, ANG W T. Modeling piezoelectric actuator hysteresis with singularity free prandtl-ishlinskii model [J]. *Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and BIomimetics, December 17-20, 2006*: 251-256.
- [13] 许素安, 金玮, 梁宇恩, 等. 压电陶瓷迟滞神经网络建模与线性补偿控制 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(12): 1884-1889.  
XU S A, JIN W, LIANG Y E, *et al.*. Modeling and linear compensation control of piezoelectric ceramic hysteretic neural networks [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2017, 30(12): 1884-1889. (in Chinese)
- [14] 王贞艳, 贾高欣. 压电陶瓷作动器非对称迟滞建模

- 与内模控制 [J]. 光学 精密工程, 2018, 26(10): 2485-2492.
- WANG ZH Y, JIA G X. Asymmetric hysteresis modeling and internal model control of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2485-2492. (in Chinese)
- [15] LIU D, FU JIA F. Adaptive internal model control design for positioning control of a piezoceramic actuator with rate-dependent hysteresis [J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2015, 2(6): 15-00190.
- [16] 宋召青, 龙玉峰, 王康. 基于支持向量机的迟滞系统建模及性能研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(3): 398-402.
- SONG ZH Q, LONG Y F, WANG K. Modeling and performance study of hysteresis system based on support vector machine [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(3): 398-402. (in Chinese)
- [17] 杨晓京, 胡俊文, 李庭树. 压电微定位台的率相关动态迟滞建模及参数辨识 [J]. 光学 精密工程, 2019, 27(3): 610-618.
- YANG X J, HU J W, LI T SH. Rate-dependent dynamic hysteresis modeling and parameter identification of piezoelectric micropositioning platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 610-618. (in Chinese)
- [18] 刘红军, 刘浩, 叶芳. 用于超磁致伸缩驱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 giant magnetostrictive actuator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(9): 91-95. (in Chinese)
- [19] YANG L, LI J. Robust output feedback control with disturbance estimation for piezoelectric actuator [J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 2129-2135.
- [20] ESCARENO J A, RAKOTONDRABE M, HABINEZA D. Backstepping-based robust-adaptive control of a nonlinear 2-DOF piezo actuator [J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 41: 57-71.
- [21] 孟爱华, 刘成龙, 陈文艺, 等. 超磁致伸缩驱动器的小脑神经网络前馈逆补偿-模糊 PID 控制 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 753-759.
- MENG A H, LIU CH L, CHEN W Y, et al.. Cerebellar neural network feedforward inverse compensation-fuzzy PID control of giant magnetostrictive actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 753-759. (in Chinese)
- [22] CENG L, LIU W, YANG C, et al.. A neural-network-based controller for piezoelectric-actuated stick-slip devices [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2017(99): 1-1.
- [23] 胡亮亮, 米凤文, 金伟其, 等. 基于 PI 逆模型的快速微摆反射镜的开环控制 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0818001.
- HU L L, MI F W, JIN W Q, et al.. Open loop-control of fast steering mirror based on PI inverse model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818001. (in Chinese)

#### 作者简介:



范 伟(1980—),男,甘肃玉门人,博士,讲师,硕士生导师,2002年、2009年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事微纳驱动控制技术、压电陶瓷特性领域的研究。E-mail: fanwei@hqu.edu.cn



傅雨晨(1996—),男,浙江湖州人,硕士研究生,2019年于华侨大学获得学士学位,主要从事压电陶瓷迟滞非线性和控制方面的研究。E-mail: 1637749097@qq.com