

基于PI逆模型的压电执行器复合控制

江国栋^{1,2}, 王晓东¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 大学, 北京 100039)

摘要:在利用腔衰荡光谱技术分析痕量气体时, 压电陶瓷执行器常用来调节光学谐振腔的长度。为了提高压电陶瓷执行器的定位精度, 针对压电陶瓷执行器的迟滞非线性, 利用 Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型对执行器迟滞进行建模, 分别采用最小二乘法和梯度下降法对模型参数进行辨识, 同时, 由于执行器迟滞曲线的非对称性, 针对上升和下降过程分别进行辨识。结果表明, 相比于最小二乘法, 梯度下降法辨识的模型参数能更好地拟合执行器实际迟滞曲线, 平均绝对误差减小了 67.6%。设计基于 PI 逆模型的复合控制方法, 并进行实验验证, 采用在线参数辨识来实时更新模型参数。试验结果表明, 在正弦波和三角波信号输入下, 执行器的平均跟踪误差分别为 0.035 μm 和 0.028 μm , 该复合控制法可有效提高执行器定位精度。

关键词:腔衰荡光谱; 压电陶瓷; 迟滞非线性; Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型; 复合控制

中图分类号: TP273.5; TN384

文献标识码: A

Compounding Control of Piezoelectric Actuators Based on Inverse PI Model

JIANG Guodong^{1,2}, WANG Xiaodong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The piezoelectric actuator is often used to adjust the length of optical cavity in the cavity ring-down spectroscopy for the trace gas analysis. In order to improve the precision of the actuator, a PI model is used to establish the hysteresis model of the actuator aiming at the hysteresis non-linearity, and the least square method and gradient descent method are used to identify the model parameters, meanwhile, the parameters were identified respectively in the rising and falling process due to the asymmetric of hysteresis. The results show that, comparing to the least square method, the parameters identified by the gradient descent method can reflect the hysteresis better, and the average absolute error decreased by 67.6%. A compounding control method based on the inverse PI model is designed and verified experimentally, and the online parameter identification is adopted to update the model parameters at real-time. The results indicate that, under the sine and triangle signals, the average tracking errors of the actuator are 0.035 μm and 0.028 μm , and the proposed method can improve the positioning accuracy effectively.

Key words: cavity ring-down spectroscopy; piezoelectric ceramic; hysteresis non-linearity; PI model; compounding control

0 引言

腔衰荡光谱(CRDS)技术是近年来发展起来的一种具有高灵敏度和高分辨率的新型吸收光谱检测技术^[1]。最初用来检测镜片的反射率, 经过不断地发展, CRDS 技术已成为各种痕量物质检测的有力工具。在利用 CRDS 技术检测大气中微量气体时, 光学谐振腔长度的精度和稳定性对最终测量结果有很大影响, 因此需要对腔长进行精密调节。在精密

定位系统中, 压电陶瓷执行器因其体积小, 定位精度高及响应快等特点而被广泛使用^[2]。在利用电压方式驱动压电陶瓷时, 由于压电陶瓷本身的特性, 使压电陶瓷执行器的输入电压与输出位移之间存在迟滞非线性, 降低了执行器的定位精度^[3]。为了减小迟滞对定位精度的影响, 目前最常用的方法是通过建立压电陶瓷执行器的迟滞模型, 将迟滞逆模型作为前馈补偿单元串入到压电陶瓷执行器闭环控制中,

收稿日期: 2015-10-07

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项支持基金资助项目(2012YQ160185)

作者简介: 江国栋(1990-), 男, 江西九江人, 硕士生, 主要从事光电探测与检测及信息处理的研究。E-mail: jiangguodong2009@126.com。
王晓东(1970-), 男, 吉林白山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电探测与检测及信息处理的研究。

进而提高执行器的控制精度^[4]。

目前针对压电陶瓷迟滞特性的模型分为两种类型:

1) 基于物理机制的迟滞模型。它是从压电陶瓷材料本身的物理性质出发,通过能量、位移或应力、应变的关系得到的迟滞模型,如 Jile-Atherton (JA)模型^[5]、Bouc-Wen 模型^[6]等。

2) 基于现象的迟滞模型。它是根据实际的迟滞曲线,采用现有的数学模型来表示迟滞曲线,而不需要考迟滞系统的物理特性,如 Preisach 模型^[7]、Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型、Duhem 模型^[8]等。Preisach 模型因其能很好地表现压电陶瓷迟滞特性而被广泛使用,但由于其模型参数多,且含有双重积分,计算过程复杂,使其难以与控制器的设计结合^[9]。PI 模型属于 Preisach 模型的一个分支,它可以用较少的参数表述出压电陶瓷的迟滞特性,且不会有误差累计,目前应用越来越广泛。

1 PI 模型

经典的 PI 模型是基于 Play 算子或 Stop 算子的迟滞模型(本文以 Play 算子为例),通过一系列算子加权叠加而得到迟滞模型。将输入 $u(t)$ 在时间域上 N 等分, $u(t)$ 在每个子时间域 $[t_i, t_{i+1}]$ ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$) 上单调且连续,则线性 Play 算子可表述^[10]为

$$y(t) = P_r[u, y](t) = \max\{u(t) - r, \min\{u(t) + r, y(t_i)\}\} \quad (1)$$

式中: $t_i < t < t_{i+1}$, $0 \leq i \leq N-1$; $y(t)$ 为算子输出; r 为算子阈值。初始输出值 $y(0)$ 可表述为

$$y(0) = \max\{u(0) - r, \min\{u(0) + r, y(0)\}\} \quad (2)$$

PI 模型是通过上述 Play 算子经过加权叠加而得到,数学表述^[11]为

$$F(t) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{Y}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}$ 为权重函数构成的向量; $\mathbf{Y}(t)$ 为 Play 算子输出构成的向量。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \max\{u(t) - r_1, \min\{u(t) + r_1, y_1(t_i)\}\} \\ \max\{u(t) - r_2, \min\{u(t) + r_2, y_2(t_i)\}\} \\ \vdots \\ \max\{u(t) - r_n, \min\{u(t) + r_n, y_n(t_i)\}\} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将其离散化后,可得

$$\mathbf{Y}(k) = \begin{bmatrix} \max\{u(k) - r_1, \min\{u(k) + r_1, y_1(k-1)\}\} \\ \max\{u(k) - r_2, \min\{u(k) + r_2, y_2(k-1)\}\} \\ \vdots \\ \max\{u(k) - r_n, \min\{u(k) + r_n, y_n(k-1)\}\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则 k 时刻 PI 模型的输出为

$$F(k) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{Y}(k) = \sum_{i=1}^n w_i \{\max\{u(k) - r_i, \min\{u(k) + r_i, y_i(k-1)\}\}\} \quad (7)$$

式中: n 为 Play 算子的数量; w_i 为每个 Play 算子的权重系数; r_i 为每个算子的阈值。对于式(7),只要确定了 w_i 和 r_i ,即可得到 PI 模型。

2 模型参数辨识

经典 PI 模型的辨识过程,就是求解权重系数的过程^[12]。对于 PI 模型,算子的数量越多,模型越准确,但运算量也随着增大,因此必须综合考虑。本文以德国 PI 公司生产的 P841.1 型压电陶瓷执行器作为实验对象,利用 PIMikroMove 软件产生一个三角波信号驱动执行器,并采集位移信息,以便后期用于参数辨识。

2.1 最小二乘辨识

最小二乘法是通过最小化误差的平方来寻求数据的最佳函数匹配的方法,其目标函数^[13]为

$$J = \sum_{i=1}^k e^2(k) = \sum_{i=1}^k \{\varphi(i) - \mathbf{W}^T \times \mathbf{Y}(k)\}^2 \quad (8)$$

式中 $\varphi(i)$ 为实际输出。

由递推最小二乘法的递推公式可得辨识参数的递推公式为

$$\hat{\mathbf{W}}(k) = \hat{\mathbf{W}}(k-1) + \mathbf{R}(k) [\varphi(k-1) - \hat{\mathbf{W}}(k-1)^T \mathbf{Y}(k-1)] \quad (9)$$

$$\mathbf{R}(k) = \frac{P(k) \mathbf{Y}(k-1)}{1 + \mathbf{Y}(k)^T P(k-1) \mathbf{Y}(k)} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(k) = [I - \mathbf{R}(k) \mathbf{Y}(k)^T] P(k-1) \quad (11)$$

实验中,选取 $n=10$;阈值的选取按照 $r_i = \frac{i}{n} \times |V_{\max} - V_{\min}|$,其中 $i=1, 2, \dots, n$; $V_{\max}$, $V_{\min}$ 分别为压电陶瓷执行器的最大和最小电压。由于压电陶瓷执行器的迟滞曲线不对称,使算子的权重系数在上升和下降过程中不同,所以需要对电压上升和下降的过程分别进行辨识,两个辨识过程递推公式相同。利用采集的数据进行参数辨识,得到的权重系数如表 1 所示。

表1 最小二乘法参数辨识结果

序号	r_i	上升过程 τ_i	下降过程 τ_{1i}
1	0	0.076 040	0.173 465
2	11	0.050 883	0.002 685
3	22	0.010 628	-0.011 630
4	33	0.011 126	-0.009 542
5	44	0.006 458	-0.010 985
6	55	0.005 648	-0.010 891
7	66	0.001 744	-0.010 935
8	77	0.001 122	-0.013 503
9	88	-0.002 287	-0.020 480
10	99	0.090 738	-0.055 479

根据表1可得模型输出曲线,与实际的迟滞曲线对比如图1所示,拟合误差如图2所示。

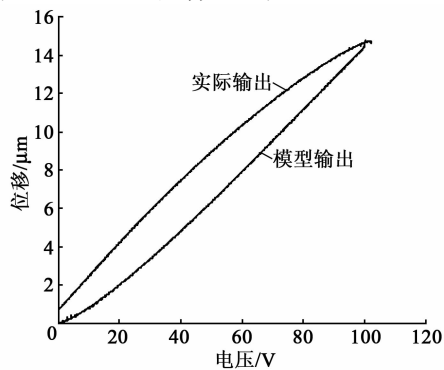


图1 实际输出与模型输出对比图

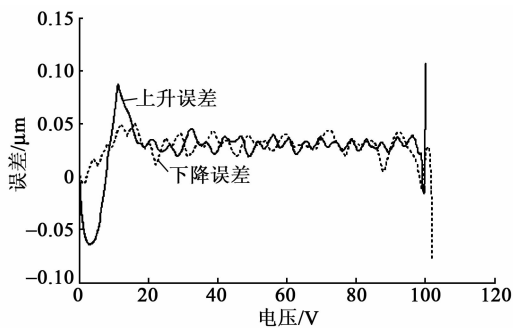


图2 输出误差图

由图1,2可知,利用递推最小二乘法辨识出的模型参数可以很好地表述执行器的迟滞特性,除最大电压和最小电压位置外,其余电压区域内,模型输出与实际输出的误差基本都在 $0.04 \mu\text{m}$ 内。平均绝对误差 $\Delta=0.031 2$,均方根误差 $\sigma=0.033 5$ 。

2.2 梯度下降法

梯度下降法是在负梯度方向上对估计值进行修正,使目标函数达到最小,对于给定的目标函数:

$$J(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k e^2(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \{[\varphi(i) - \mathbf{W}^T \times \mathbf{Y}(k)]^2\} \quad (12)$$

其递推公式为

$$\hat{\mathbf{W}}(k) = \hat{\mathbf{W}}(k-1) - \mathbf{R}(k) \text{grad}[J(\omega)]|_{\hat{\mathbf{W}}(k)} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{R}(k)$ 为 $N \times N$ 的对称矩阵,称为权矩阵; $\hat{\mathbf{W}}(k)$ 为 k 时刻权重向量的估计值。对目标函数 $J(\omega)$ 求导可得

$$\frac{\partial J(\omega)}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k [\varphi(i) - \mathbf{W}^T \times \mathbf{Y}(k)]^2 = -[\varphi(i) - \mathbf{W}^T \times \mathbf{Y}(k)] \mathbf{Y}(k) \quad (14)$$

所以,梯度下降算法的递推公式为

$$\hat{\mathbf{W}}(k) = \hat{\mathbf{W}}(k-1) + \mathbf{R}(k) \mathbf{Y}(k) [\varphi(i) - \mathbf{W}^T \times \mathbf{Y}(k)] \quad (15)$$

其中

$$\mathbf{R}(k) = \frac{I}{\|\mathbf{Y}(k)\|^2} \quad (16)$$

参数选取与最小二乘法相同,利用采集的输入、输出数据,同样经过上升和下降两次辨识,得到的权重系数如表2所示。

表2 梯度下降法参数辨识结果

序号	r_i	上升过程 τ_i	下降过程 τ_{1i}
1	0	0.093 101	0.184 236
2	11	0.026 633	-0.009 828
3	22	0.020 414	-0.010 687
4	33	0.006 722	-0.007 849
5	44	0.010 120	-0.012 899
6	55	0.002 074	-0.008 435
7	66	0.004 442	-0.011 955
8	77	-0.000 775	-0.015 977
9	88	-0.001 489	-0.015 991
10	99	0.145 002	-0.092 301

根据表2可得模型输出曲线,与实际迟滞曲线对比图如图3所示,拟合误差如图4所示。

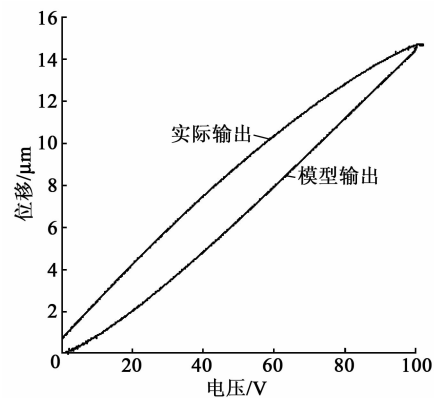


图3 实际输出与模型输出对比图

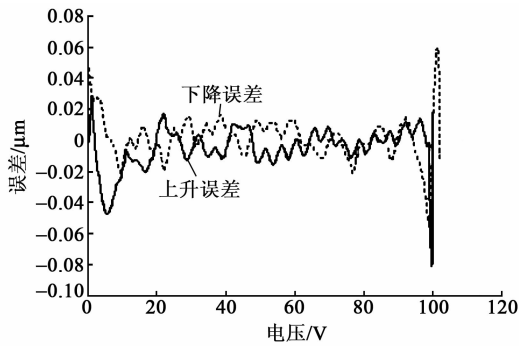


图4 输出误差图

由图3,4可知,利用梯度下降法辨识出的PI模型与实际迟滞曲线对比,最大绝对拟合误差为 $0.08 \mu\text{m}$, $\Delta=0.0101$, $\sigma=0.0152$,与最小二乘法相比,梯度下降法的 Δ 和 σ 分别减小了 67.6% 和 54.6%。

3 压电陶瓷逆控制

在压电陶瓷执行器控制中,最常用的方法是基于逆模型补偿法^[14]。逆模型补偿控制法是在压电陶瓷执行器闭环控制系统中串入执行器迟滞逆模型,以此来补偿执行器的非线性。PI模型相对于经典的 Preisach 模型来说,其优点是PI模型存在解析逆,且其逆模型与正模型有相同的结构,只是算子的阈值和权重不同,因此,只要得到执行器的逆模型,就可将其作为控制器来补偿执行器的迟滞。

由PI模型的定义可知,PI模型的逆模型可表示为

$$u(k) = P_r^{-1}[y(k), u(k-1)] = \sum_{i=1}^n w'_i \max\{y(k) - r'_i, \min\{y(k) + r'_i, u(k-1)\}\} \quad (17)$$

其中

$$w'_1 = \frac{1}{w_1} \quad (18)$$

$$w_i = \frac{-w_i}{(\sum_{j=1}^i w_j)(\sum_{j=1}^{i-1} w_j)} \quad (19)$$

$$r'_i = \sum_{j=1}^i w_j (r_i - r_j) \quad (20)$$

$$u_i(0) = \sum_{j=1}^{i-1} w_j y_i(0) + \sum_{j=i}^n w_j y_j(0) \quad (21)$$

$i=1, 2, \dots, n$

式中 w'_i 为逆模型中算子的权重系数。

利用逆模型补偿法,理论上可消除执行器的迟滞非线性,但由于周围环境的影响,导致执行器的输

入、输出仍存在一定的偏差,因此采用复合控制法,在逆模型补偿的基础上,加入传统比例-积分-微分(PID)控制算法,对执行器的输出误差进行修正。同时为了能更好地实时跟踪执行器在不同输入状态下的输出,采用在线辨识的方法对模型参数进行辨识,实时更新模型参数,改善执行器输入变化对模型参数造成的影响^[15]。控制方案图如图5所示。图中, $y_0(t)$ 为系统的输入, $y(t)$ 为系统的输出, $e(t)$ 为输入与输出的偏差,即 $y_0(t) - y(t)$ 。

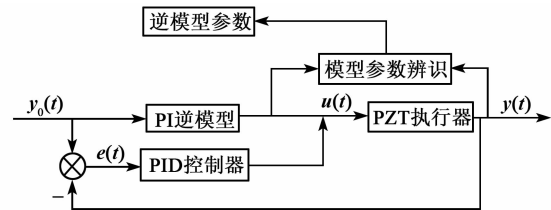


图5 控制方案图

为了验证试验方案的有效性,本文利用德国PI公司生产的P841.10型压电陶瓷执行器作为实验对象,控制电压范围为 $0 \sim 100 \text{ V}$,输出位移范围为 $0 \sim 15 \mu\text{m}$,采用PI公司的E517.i3控制器,通过RS232与上位机进行通讯,实验实物图如图6所示。

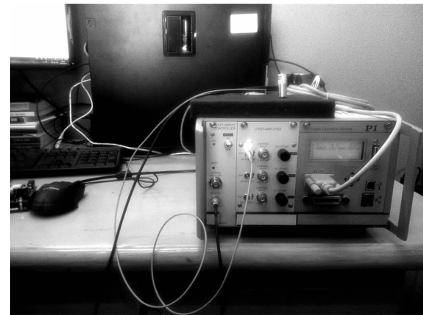


图6 实验实物图

利用所得的PI逆模型搭建闭环控制系统,以正弦波和三角波作为输入,其输入范围为 $0 \sim 15 \mu\text{m}$,利用上位机采集输出位移,得到的跟踪情况如图7、8所示。

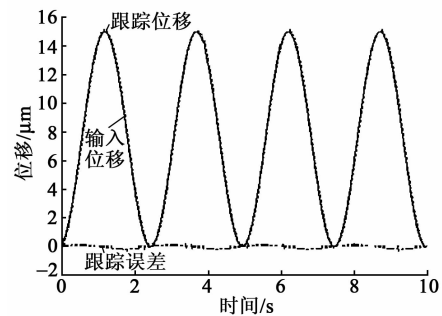


图7 正弦输入下跟踪效果图

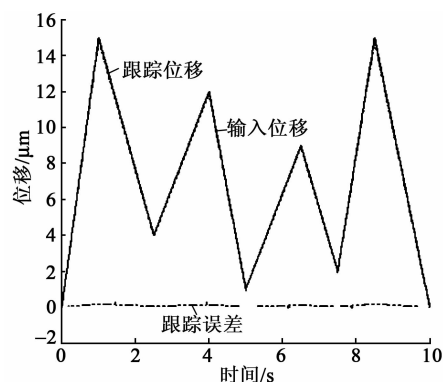


图8 三角波输入下跟踪效果图

由图7、8可知,在正弦波输入下,执行器的最大绝对跟踪误差为 $0.083\ \mu\text{m}$,平均跟踪误差为 $0.035\ \mu\text{m}$;在三角波输入下,执行器的最大绝对跟踪误差为 $0.067\ \mu\text{m}$,平均跟踪误差为 $0.028\ \mu\text{m}$ 。

4 结束语

针对压电执行器在定位过程中存在迟滞现象,严重影响其定位精度。采用最小二乘法和梯度下降法分别建立其PI模型,结果表明,梯度下降法所建立的模型更接近其实际曲线,模型误差减小了67.6%。利用得到的PI逆模型建立压电执行器闭环复合控制,同时,采用在线辨识的方式实时更新模型参数。以PI公司的P-841.01型压电陶瓷执行器作为控制对象,采用正弦波和三角波输入,其平均跟踪误差分别为 $0.035\ \mu\text{m}$ 和 $0.028\ \mu\text{m}$,从而验证了该模型及该复合控制法的有效性,为工程应用提供了参考。

参考文献:

- [1] CHEN B, SUN Y R, ZHOU Z Y, et al. Ultrasensitive, self-calibrated cavity ring-down spectrometer for quantitative trace gas analysis[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(32): 7716.
- [2] 谢国兵, 刘卫国, 高爱华. 基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(3): 75-78.
XIE Guobin, LIU Weiguo, GAO Aihua. Laser resonant cavity length regulation technology based on piezoelectric ceramic[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2012, 31(3): 75-78.
- [3] RU Changhai, CHEN Liguang, SHAO Bing, et al. A new amplifier for improving piezoelectric actuator linearity based on current switching in precision positioning[J]. *Meas Sci Technol*, 2008, 19(1): 203-209.
- [4] CHEN Yuansheng, QIU Jinhao, SUN Hongjun. A hybrid model of Prandtl-Ishlinskii operator and neural network for hysteresis compensation in piezoelectric actuators[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2013, 41(3): 335-347.
- [5] MALCZYK R, IZYDORCZYK J. The frequency dependent Jiles-Atherton hysteresis model[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2015, 463: 68-75.
- [6] CHARALAMPAKIS A E, DIMOU C K. Comparison of evolutionary algorithms for the identification of bouc-wen hysteretic systems[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(3): 04014053-1-11.
- [7] BERNARD Y, MAALEJ A H, LEBRUN L, et al. Preisach modelling of ferroelectric behaviour[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2007, 25(1/4): 729-733.
- [8] 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷驱动器的动态模型辨识与控[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 88-95.
CHEN Hui, TAN Yonghong, ZHOU Xingpeng, et al. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 88-95.
- [9] QIN Yanding, TIAN Yanling, ZHANG Dawei, 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.
- [10] 田艳兵, 王涛, 王美玲. 基于广义PI逆模型的超精密定位平台复合控制[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(2): 198-206.
TIAN Yanbing, WANG Tao, WANG Meiling. Compounding control of ultra-precision positioning stage based on inverse generalized PI model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 198-206.
- [11] JANAIDEH M A, BERNSTEIN D S. Adaptive control of Hammerstein systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering*, 2014, 229(2): 149-157.
- [12] GU Guoying, ZHU Limin, SU Chunyi, et al. Motion control of piezoelectric positioning stages: modeling, controller design and experimental evaluation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(5): 1459-1471.
- [13] 徐运扬, 徐康康, 沈平. AFM压电陶瓷驱动器类 Hammerstein建模与参数辨识[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(1): 23-27.
XU Yunyang, XU Kangkang, SHEN Ping. Hammerstein based modeling approach and parameter identification method for AFM piezoelectric actuator[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(1): 23-27.
- [14] CHEN Yuansheng, QIU Jinhao, JI Hongli, et al. Tracking control of piezoelectric actuator system using inverse hysteresis model[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(3): 1555-1564.
- [15] GU Guoying, YANG Meiju, ZHU Limin. Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 065106. 1-065106. 8.