

文章编号 1004-924X(2012)06-1265-07

## 压电陶瓷微动台的复合控制

王 俐<sup>1,2,3\*</sup>, 饶长辉<sup>1,2</sup>, 饶学军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院 研究生院 北京 100049)

**摘要:** 压电陶瓷微动台的迟滞非线性严重影响其动态定位精度, 为了解决这一问题, 采用一种改进的 PI 模型对微动台的迟滞非线性进行了建模。为了提高传统 PID 算法对压电陶瓷微动台的动态定位性能, 将改进的 PI 模型与传统 PID 算法组合构成前馈复合控制算法, 并进行了微动台的慢速与快速动态定位实验。结果表明, 对同频曲线定位时, 前馈 PID 复合算法的最大误差为传统 PID 算法的 40% 左右, 平均误差为传统算法的 20%~30% 左右; 对多频曲线定位时, 前馈 PID 复合算法的最大误差和平均误差为传统 PID 算法的 33% 左右。数据表明前馈 PID 复合算法的动态定位性能明显优于传统 PID 算法。

**关键词:** 压电陶瓷; 迟滞特性; 改进的 PI 迟滞模型; 前馈控制; 动态定位精度

**中图分类号:** TP273; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1265

## Feed-forward control of piezoelectric ceramic positioning stage

WANG Li<sup>1,2,3\*</sup>, RAO Chang-hui<sup>1,2</sup>, RAO Xue-jun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangli9613@126.com

**Abstract:** As the nonlinear hysteresis of a piezoelectric ceramic positioning stage affects its dynamic positioning precision badly, this paper proposes a model for the piezoelectric ceramic hysteresis based on a modified PI hysteresis model. In order to improve the dynamic positioning precision of the piezoelectric ceramic positioning stage based on traditional PID algorithm, the feed-forward control is constituted with the modified PI inverse hysteresis model and a traditional PID, and the experiments on slow speed and high speed positionings are performed. Experimental results show that the maximal error and mean error of the feed-forward controller are 40% and 20%–30% that of traditional PID algorithm for tracking single frequency trajectory. For multi-frequency trajectory tracking, the feed-forward controller has better dynamic control effect, and both maximal error and mean error are almost 33% that of traditional one. These data indicate the availability of the feed-forward control algorithm.

收稿日期: 2012-02-10; 修订日期: 2012-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 11178004)

**Key words:** piezoelectric ceramic; hysteresis characteristic; modified PI hysteresis model; feed-forward controll; dynamic positioning precision

## 1 引言

压电陶瓷微动台因其定位精度高、带宽大、响应时间快而被广泛应用于各种精密定位系统中,在超精密加工、半导体光刻、微型机械、精密测量、生物工程、光纤对接等领域发挥着至关重要的作用。然而,实际应用中的压电陶瓷微动台具有迟滞、蠕变等固有特性,给精密定位控制带来一定影响,其中迟滞特性作为最主要的非线性严重限制了压电陶瓷微动台的应用。国内外很多学者应用能够描述迟滞非线性的数学模型对迟滞特性进行补偿,如 Maxwell<sup>[1-2]</sup>模型、Duhem<sup>[3]</sup>模型、Bouc-Wen 模型<sup>[4]</sup>、Preisach<sup>[5-6]</sup>模型及其发展而来的 KP 模型<sup>[7]</sup>与 Prandtl-Ishlinskii(PI)<sup>[8-10]</sup>模型。PI 模型结构简单、参数少,易得到具有解析形式的逆模型,方便控制器在实时控制中的应用。但是传统 PI 模型的迟滞算子关于算子中心点奇对称,而大多数实际应用中的压电陶瓷微动台的迟滞环却是非对称的,这就使得传统 PI 模型的模型精度与适用性降低。为了克服传统 PI 模型的局限性,有必要对其进行改进,以使改进后的 PI 模型<sup>[11-12]</sup>(Modified Prandtl-Ishlinskii,简称 MPI 模型)能更精确实时地对复杂迟滞非线性建模。

基于迟滞逆模型的开环控制可以消除迟滞非线性引起的定位误差,但是由于不存在反馈回路,因而定位精度相对较低,主要取决于所采用数学模型的精度。传统上采用比例-积分-微分(PID)算法可以得到纳米级的定位精度,但是该方法适宜用在静态定位上,对于动态定位仍会有明显的迟滞非线性出现。为了提高微动台的动态定位精度,本文在改进 PI 迟滞模型的基础上,把改进的 PI 迟滞逆模型与 PID 算法相结合构成前馈 PID 复合算法。将前馈 PID 复合算法应用于压电陶瓷微动台的动态定位控制中进行微动台的慢速和较快速动态定位性能的研究,并与 PID 算法的动态定位效果进行比较。

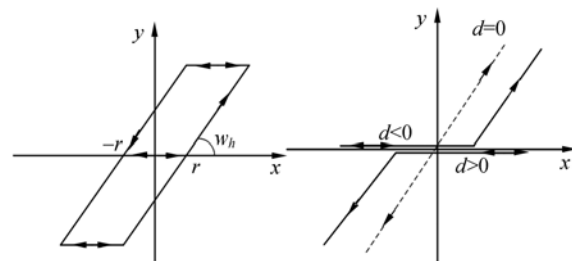
## 2 改进的 PI 迟滞模型建模与控制算法

### 2.1 PI 模型的迟滞算子与叠加算子

传统 PI 模型通过带有权重的迟滞算子  $H_r$  的线性叠加来描述压电陶瓷的迟滞非线性,迟滞算子  $H_r$  为 backlash 算子,如图 1(a)所示,其定义如下:

$$y(t) = H_r[x, y_0](t) = \max\{x(t) - r, \min[x(t) + r, y(t - T)]\}, \quad (1)$$

其中,  $x$  表示控制输入,  $r$  是控制输入阈值,  $y(t)$  是响应输出,  $T$  为采样周期。



(a) backlash 算子

(b) 死区算子

(a) Backlash operator (b) Dead zone operator

图 1 模型的算子

Fig. 1 Operators of model

公式(1)的初始相容条件由下式给出

$$y(0) = \max\{x(0) - r, \min[x(0) + r, y_0]\}, \quad (2)$$

其中,初始  $y_0 \in \mathbf{R}$ ,并且通常初始值为 0,backlash 算子  $H_r$  与一个权重值  $\omega_h$  相乘,就可以得到广义的 backlash 算子

$$y(t) = \omega_h \cdot H_r[x, y_0](t). \quad (3)$$

迟滞非线性就可以通过一系列带有阈值和权重的 backlash 算子  $H_r$  的线性叠加来描述

$$y(t) = \omega_h^T \cdot H_r[x, y_0](t), \quad (4)$$

其中,权重  $\omega_h^T = [\omega_{h_0} \cdots \omega_{h_n}]$ ,  $H_r[x, y_0](t) = [H_{r_0}[x, y_{0_0}](t) \cdots H_{r_n}[x, y_{0_n}](t)]^T$ , 阈值  $r = [r_0 \cdots r_n]$ , 此时  $0 = r_0 < \cdots < r_n < +\infty$ ,  $r$  一般取等间

隔,初始状态  $y_0 = [y_{00} \cdots y_{0n}]^T$ 。

传统 PI 模型的迟滞算子关于算子中心点不对称,而大多数压电陶瓷微动台的迟滞环却是非对称的,这就使得 PI 模型的模型精度降低。为了克服此局限性,将传统 PI 模型的迟滞算子与一种具有连续、非奇对称、非凸、无记忆性等性质的叠加算子相串连,从而使得改进后的 PI 模型具有非局部记忆性与非奇对称等特性。叠加算子  $S_d$  采用死区算子来表示,死区算子如图 1(b),其定义为

$$S_d[x](t) = \begin{cases} \max\{x(t) - d, 0\}, & d > 0 \\ x(t), & d = 0 \\ \min\{x(t) - d, 0\}, & d < 0 \end{cases} \quad (5)$$

不同阈值的死区算子的加权叠加为

$$y(t) = \omega_s^T \cdot S_d[x](t), \quad (6)$$

其中,  $x$  为输入信号,  $y$  为响应输出信号,权重  $\omega_s^T = [\omega_{s-m} \cdots \omega_{s0} \cdots \omega_{sm}]$ ,  $S_d[x](t) = [S_{d-m}[x](t) \cdots S_{d0}[x](t) \cdots S_{dm}[x](t)]^T$ , 且阈值  $d = [d_{-m} \cdots d_0 \cdots d_m]^T$ , 此时  $d_{-m} < \cdots < d_0 = 0 < r_n < \cdots < d_m$ 。

### 2.2 改进的 PI 模型

将传统 PI 模型中的迟滞算子  $H_r$  与叠加算子  $S_d$  相串连,因此改进的 PI 模型为

$$\Gamma[x](t) = \omega_s^T \cdot S_d\{\omega_h^T \cdot H_r[x, y_0]\}(t). \quad (7)$$

而改进的 PI 逆模型为传统 PI 模型的迟滞算子  $H_r$  与叠加算子  $S_d$  的逆相串连,如下

$$\Gamma^{-1}[y](t) = \omega_h'^T \cdot H_r[\omega_s'^T \cdot S_d[y], y_0'](t). \quad (8)$$

由于改进的 PI 模型是纯现象模型,参数与内部物理结构无关,参数的辨识只能通过实验获得,首先给压电陶瓷微动台输入周期控制电压  $x(t)$  得到输出位移响应  $y(t)$ , 然后由输入电压与输出位移响应的最大值分别得到阈值  $r$  和  $d'$ , 而权重  $\omega_h$  与  $\omega_s'$  则由误差函数  $L_2^2$  范数最小原则获得,误差函数为

$$E[x, y](t) = (\omega_h^T \quad \omega_s'^T) \cdot \begin{pmatrix} H_r[x, y_0](t) \\ -S_d'[y](t) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

### 2.3 前馈 PID 复合算法

前馈 PID 复合算法<sup>[12-13]</sup>采用压电陶瓷驱动器的迟滞逆模型作为前馈,而基于改进的 PI 迟滞逆模型的前馈 PID 复合算法如图 2 所示,该算法由前馈控制环和 PID 控制环两部分组成。在前馈环中,基于改进的 PI 迟滞逆模型获得前馈补偿

电压  $u_h$ , 驱动压电陶瓷微动台,由位移传感器得到此时微动台的输出位移并与期望输入位移相比较得到误差  $e$ ;在 PID 反馈环中,误差  $e$  作为 PID 控制输入,获得补偿电压  $u_c$  驱动微动台达到更高的精度。此时基于改进的 PI 迟滞逆模型的前馈 PID 复合算法输出的驱动电压  $u = u_h + u_c$ 。

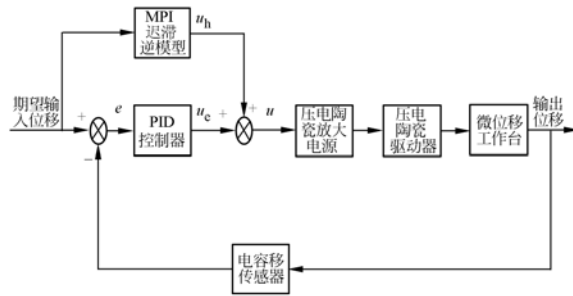


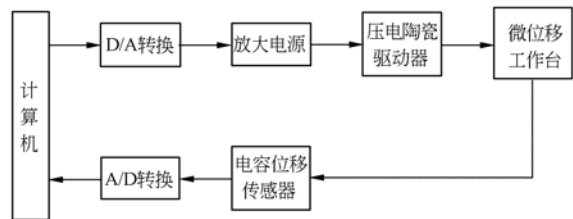
图 2 基于改进的 PI 迟滞逆模型的前馈 PID 复合控制算法

Fig. 2 Feed-forward controller of PID based on modified PI inverse hysteresis model

## 3 实验验证

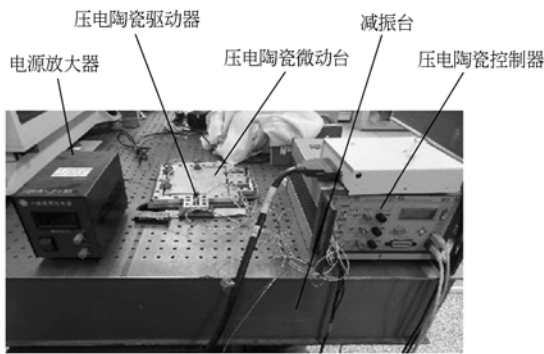
### 3.1 实验装置

为了验证压电陶瓷微动台的改进 PI 模型与其参数辨识方法的有效性,建立了微动台的实验系统,其组成原理与实验装置如图 3(a)、(b)所示。实验平台中的放大电源与压电陶瓷驱动器件为自行研制,其中放大电源放大倍数为 100 倍,驱动器工作电压为 0~500 V;电容位移传感器采用 D-050.00 型(PI 公司),位移分辨率为 0.01 nm;数据采集卡使用 PCI6259 型(NI 公司,含 D/A 和 A/D 模块),其转换位数 16 位。



(a) 实验系统

(a) Experiment test system



(b) 实验装置

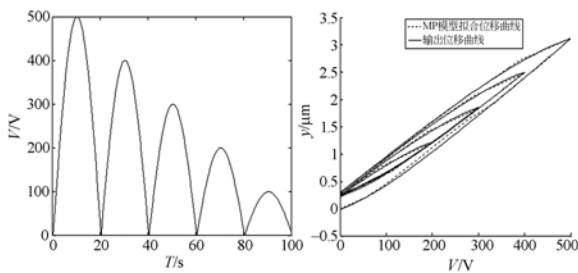
(b) Experiment equipment

图 3 实验系统

Fig. 3 Experiment system

### 3.2 改进的 PI 模型参数辨识

对压电陶瓷微动台输入电压  $0 \sim 500 \text{ V}$  振幅衰减的正弦波电压,如图 4(a)所示,采集微动台的输出位移,并绘制实验位移输出曲线。在用改进的 PI 模型拟合迟滞曲线时,拟合误差主要与迟滞算子和叠加算子的个数选取相关,算子数目选择不当,容易造成算法不收敛,导致拟合误差变大。因此需要对选取不同算子个数的拟合精度进行计算,从中选取效果最佳的迟滞算子和叠加算子数目。迟滞算子与叠加算子分别选取  $n=50, m=11$ ,利用公式(9)优化得到最佳的算子权重  $\omega_h$  与  $\omega_s'$ ,用改进的 PI 模型将采集到的微动台输出位移进行拟合,其实验迟滞曲线与拟合曲线的比较如图 4(b)所示,改进的 PI 模型拟合曲线与实线曲线之间的最大误差为  $0.087 \mu\text{m}$ 。



(a) 输入电压

(b) 实验曲线与改进的 PI 模型拟合曲线

(a) Input voltage

(b) Experiment and fitting

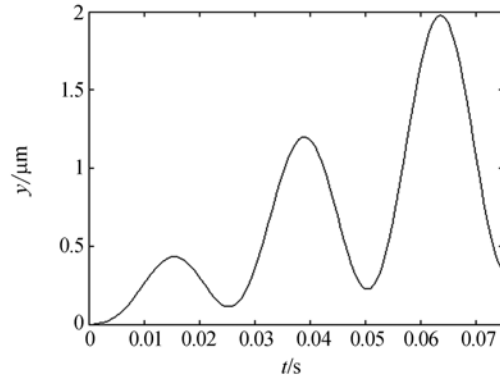
results of modified PI model

图 4 微动台实验曲线与改进的 PI 模型曲线比较

Fig. 4 Comparison between experiment and modified PI models

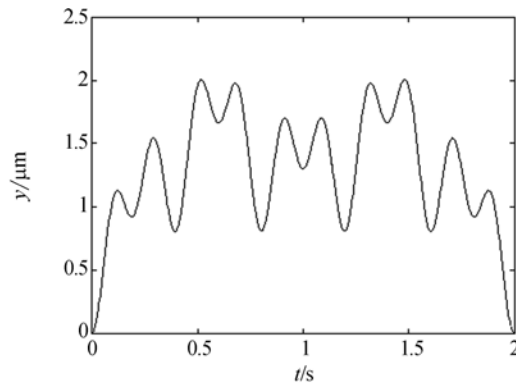
### 3.3 算法的实验验证

为了对 PID 算法与前馈 PID 复合算法的慢速与快速动态定位性能进行分析,输入位移曲线分别为同频曲线如图 5(a),频率分别取为 5, 10, 20 和 40 Hz; 多频任意曲线如图 5(b)、(c), 其中



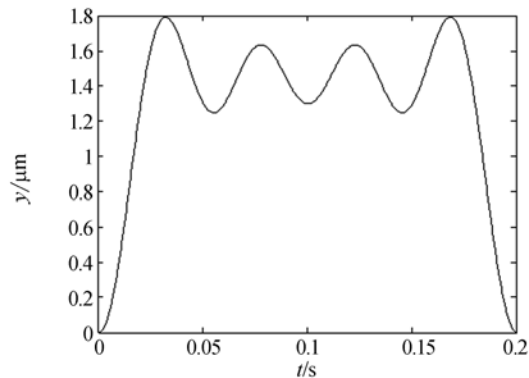
(a) 同频曲线

(a) Single frequency trajectory



(b) 最高调制频率 5 Hz 的多频任意曲线

(b) Multi-frequency trajectory modulated 0.5, 1, 2, 5 and 5 Hz sinusoids



(c) 最高调制频率 20 Hz 的多频任意曲线

(c) Multi-frequency trajectory modulated 5, 10, 15 and 20 Hz sinusoids

图 5 输入位移曲线

Fig. 5 Input displacement curves

由频率 0.5, 1, 2.5 和 5 Hz 调制, 为慢速曲线, (c) 由频率 5, 10, 15 和 20 Hz 调制, 为快速曲线。

对于同频曲线的动态定位, 传统 PID 算法与前馈 PID 复合算法的跟踪误差分别如图 6 与图 7

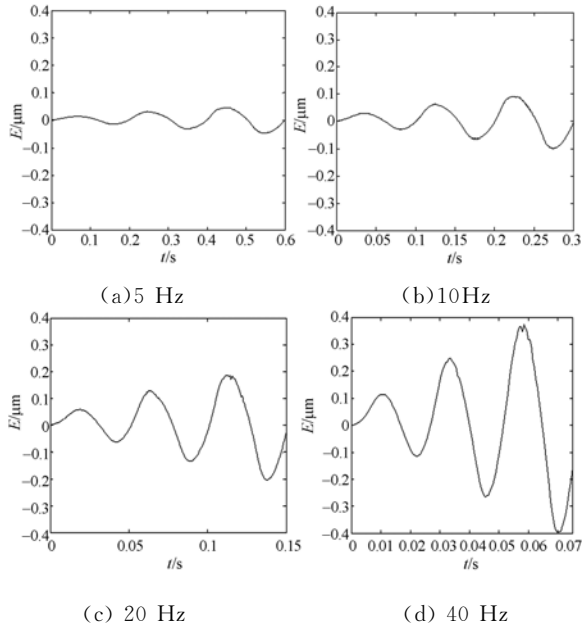


图 6 PID 算法的同频曲线跟踪误差

Fig. 6 Single frequency trajectory tracking errors of PID

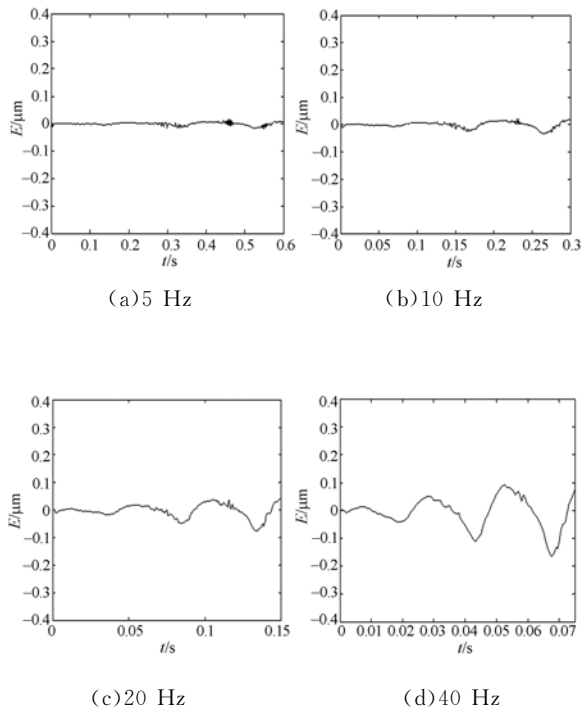


图 7 基于改进的 PI 逆模型的前馈 PID 复合算法的同频曲线跟踪误差

Fig. 7 Single frequency trajectory tracking errors of feed-forward controller based on modified PI inverse hysteresis model

(b) 所示。随着输入曲线频率增大, 两种算法的最大误差与平均误差均变大, 动态定位精度降低。从表 1 中可以看出针对 4 种同频曲线, 前馈 PID 算法的动态定位精度远优于传统 PID 算法, 其中前馈 PID 复合算法的最大误差为传统 PID 算法的 40% 左右, 平均误差为 20%~30%。

表 1 同频曲线的跟踪误差

Tab. 1 Single frequency trajectory tracking errors

控制算法	频率/Hz	最大误差/%	平均误差/%
PID	5	2.41	0.98
	10	4.94	1.98
	20	10.22	3.995
	40	19.86	7.725
前馈 PID	5	0.985	0.195
	10	1.71	0.405
	20	3.78	0.925
	40	8.26	2.14

对于多频任意曲线的动态定位, PID 算法与前馈 PID 复合算法的跟踪误差分别如图 8 与图 9 所示, 数值如表 2 所示。两种算法的最大误差与平均误差均与输入的多频任意曲线所包含的频率有关。在慢速多频任意曲线跟踪中, 前馈 PID 复合算法的最大误差为传统 PID 算法的 50% 左右, 平均误差为 30% 左右; 而在快速多频任意曲线跟踪中, 前馈 PID 复合算法的最大误差和平均误差为传统 PID 算法的 33% 左右。结果说明在快速动态定位控制时, 前馈 PID 复合算法相对于 PID 算法对微动台动态控制性能的优势更为突出。

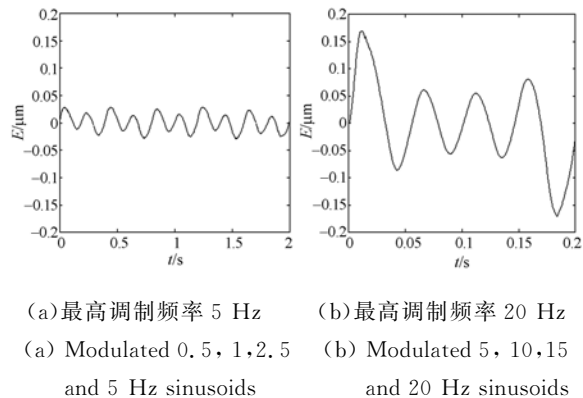
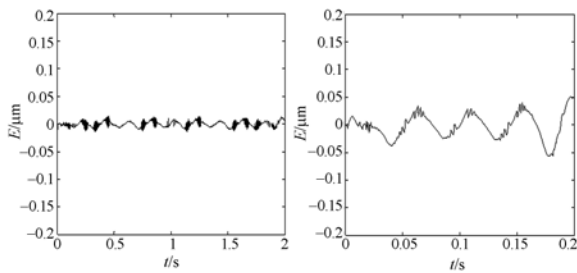


图 8 PID 控制的多频任意曲线跟踪误差

Fig. 8 Multi-frequency trajectory tracking errors of PID



(a) 最高调制频率 5 Hz (b) 最高调制频率 20 Hz  
(a) Modulated 0.5, 1, 2.5 and 5 Hz sinusoids (b) Modulated 5, 10, 15 and 20 Hz sinusoids

图 9 基于改进的 PI 逆模型的前馈 PID 复合控制的多频任意曲线跟踪误差

Fig. 9 Multi-frequency trajectory tracking errors of feed-forward controller based on modified PI inverse hysteresis model

表 2 多频任意曲线的跟踪误差

Tab. 2 Multi-frequency trajectory tracking errors

控制算法	最高调制频率/Hz	最大误差/%	平均误差/%
PID	5	1.465	0.68
	20	9.617	3.344
前馈 PID	5	0.7	0.215
	20	3.217	0.978

#### 参考文献:

- [1] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation[J]. *IEEE Control system*, 1997, 17(3): 69-79.
- [2] 李黎, 刘向东, 候朝桢, 等. 混合 Preisach 迟滞模型及其性质研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(2): 279-284.  
LI L, LIU X D, HOU CH ZH, *et al.*. Mixed Preisach hysteresis model and its properties[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 279-284. (in Chinese)
- [3] COLEMAN B D, HODGDON M L. A constitutive relation for rate independent hysteresis in ferromagnetically soft materials[J]. *Int. J. of Engineering Science*, 1986, 24(6): 897-919.
- [4] 王代华, 朱炜. WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性建模与实验验证[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(1): 205-211.  
WANG D H, ZHU W. Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 205-211. (in Chinese)
- [5] SONG G, ZHAO J Q, ZHOU X Q, *et al.*. Tracking control of a piezoceramic actuator with hysteresis compensation using inverse Preisach model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2): 198-209.
- [6] 耿浩, 刘向东, 陈振, 等. Preisach 迟滞逆模型的神经网络分类排序[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(4): 855-862.  
GENG J, LIU X D, CHEN ZH, *et al.*. Realization of sorting & taxis of Preisach inverse hysteresis model using neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 855-862. (in Chinese)
- [7] 王湘江, 王兴松. 迟滞动态模型辨识[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(5): 1042-1048.  
WANG X J, WANG X S. Identifying dynamic hysteresis model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(5): 1042-1048. (in Chinese)
- [8] TAN U X, WIN T L, ANG W T. Modeling piezoelectric actuator hysteresis with singularity free Prandtl-Ishlinskii model [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December*

## 4 结论

压电陶瓷微动台的迟滞非线性会使得其定位性能受到影响, 为了提高压电陶瓷微动台的定位精度, 对迟滞非线性模型进行了建模。在传统 PI 迟滞模型的基础上, 采用一种改进的 PI 迟滞模型, 将它与传统 PID 算法相结合, 构成基于改进的 PI 迟滞逆模型的前馈 PID 复合算法, 并应用于压电陶瓷微动台的慢速与快速动态定位控制。实验结果表明, 对同频曲线定位时, 前馈 PID 复合算法的最大误差为传统 PID 算法的 40% 左右, 平均误差为 20%~30%; 对多频曲线定位时, 前馈 PID 复合算法的最大误差和平均误差为传统 PID 算法的 33% 左右。实验显示, 前馈 PID 复合算法具有更好的动态控制效果, 提高了定位精度, 并且动态定位性能明显优于传统 PID 算法。

- 17-20, 2006, Kunming, China. 2006:251-256.
- [9] KUHNEN K, JANOCHA H. Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart-material systems[J]. *Control Intell. Syst.*, 2001, 29(3):74-83.
- [10] KUHNEN K, JANOCHA H. Compensation of creep and hysteresis effects of piezoelectric actuators with inverse systems [C]. *Proceedings of Actuator 98 6th International Conference on New Actuators Germany*:1998.
- [11] KUHNEN K. Modeling identification and compensation of complex hysteresis nonlinearities a modified Prandtl-Ishlinskii approach [J]. *Euro Pen Journal of Control*, 2003, 9(4):407-418.
- [12] 王希花, 郭书祥, 叶秀芬, 等. 压电陶瓷迟滞特性的建模及复合控制[J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(5):766-771.  
WANG X H, GUO SH X, YE X F, et al.. Modeling and feed-forward control based on piezoelectric ceramic hysteretic[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(5):766-771. (in Chinese)
- [13] 党选举, 陈辉. 非线性动态迟滞压电陶瓷的实时控制[J]. *压电与声光*, 2008, 30(3):353-355.  
DANG X J, CHEN H. Real-time control of nonlinear dynamic hysteresis piezoceramic[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, 30(3):353-355. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 俐(1977—),女,四川成都人,博士研究生,2000年于西安工业学院获得学士学位,2007年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事光学检测及精密定位技术方面的研究。E-mail: wangli9613@126.com



饶学军(1967—),男,四川人,硕士,研究员,硕士生导师,1989年于北京理工大学获得学士学位,2003年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事哈特曼传感器波前探测及人眼像差测量方面的研究。E-mail: xjrao@ioe.ac.cn

#### 导师简介:



饶长辉(1971—),男,江西南昌人,博士,研究员,博士生导师,1993年于武汉测绘科技大学获学士学位,1997年、2001年于中国科学院光电技术研究所分别获得硕士和博士学位,主要从事自适应光学技术与系统研制方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn