

文章编号 1004-924X(2014)02-0414-06

压电驱动器的开闭环迭代学习控制

李朋志*, 闫 丰, 葛 川, 李佩玥, 隋永新, 杨怀江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于开闭环迭代学习控制方法能在加快收敛速度的情况下降低跟踪误差, 本文利用该控制方法来提高压电驱动器 (PZT) 的高频轨迹跟踪精度。首先, 提出了离散时间下的开环 P 型结合闭环 PI 型的迭代学习律, 并且给出了基于该学习律的收敛性条件。然后, 设计了用于 PZT 系统的离散开闭环迭代学习控制器。最后, 针对 50 Hz 单频和 25 Hz+50 Hz 复频三角波轨迹进行了跟踪控制实验。实验结果表明: 所提出的迭代学习控制器对上述 2 种轨迹的最大跟踪误差分别为 10.6 nm 和 12.5 nm, 相对于 PID 控制器, 分别降低了 96.25% 和 95.62%。结果显示: 提出的控制方法易于实现, 无需准确的 PZT 迟滞和系统模型就可以获得很高的跟踪精度, 能有效地满足高频和复频轨迹跟踪的精度要求。

关键词: 压电驱动器; PZT; 开闭环; 迭代学习控制; 迟滞

中图分类号: TP273.1; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0414

Open-closed loop iterative learning control of piezoelectric actuators

LI Peng-zhi*, YAN Feng, GE Chuan, LI Pei-yue, SUI Yong-xin, YANG Huai-jiang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: kindrobot@163.com

Abstract: As open-closed loop iterative learning control scheme can up the convergence and reduce the tracking error, this paper uses the scheme to improve high frequency trajectory tracking accuracy of a piezoelectric actuator (PZT). First, a discrete-time open-loop P-type with closed-loop PI-type iterative learning law was proposed and its convergence condition was given. Then, a discrete-time open-closed loop iterative learning controller was designed for the PZT system. Finally, as to 50 Hz and 25Hz+50Hz triangular desired trajectories with single and compound frequencies, the tracking control experiment was performed. Experimental results indicate that the proposed iterative learning controller can achieve 10.6 nm and 12.5 nm maximum tracking errors for the 2 kinds of trajectories, which are 96.25% and 95.62% less than that of the PID controller. It concludes that the proposed control scheme can be easily implemented and can obtain the high accuracy of trajectory tracking without precise hysteresis and PZT system models. It meets both the requirements of single and compound frequency trajectory tracking for high tracking accuracy.

Key words: piezoelectric actuator; PZT; open-closed loop; iterative learning control; hysteresis

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-11-30.

基金项目: 02 重大专项资助项目 (No. 2009ZX02205)

1 引言

晶体在施加电场后会引引起机械变形,去掉电场后,其机械变形随之消失的现象称为逆压电效应。压电驱动器(Piezoelectric Actuator, PZT)就是利用逆压电效应而产生微位移的。由于有高刚度、高分辨率、无摩擦和响应速度快等优点,被广泛应用于各种超精密平台中。干涉仪中的移相器和光刻机中物镜光学元件的位置调整也需要PZT来实现。但其自身固有的非线性特征尤其是迟滞的多值映射性和频率依赖性会严重影响PZT系统的控制精度,甚至会导致系统的不稳定。因此,国内外相继有人提出了相关的迟滞建模和PZT跟踪控制方法^[1-7]。

迭代学习控制的概念最早于1984年提出^[8],它可以利用先前的控制经验和已有的测量误差量,通过一定的学习律对下一次的控制量进行修正,进而趋近一个理想的控制输入信号,使被控系统在有限时间内高精度地跟踪期望轨迹。开环迭代对每次的初始误差较为敏感,而闭环迭代则容易引起振荡。开闭环迭代学习控制方法则能在加快收敛速度的情况下降低跟踪误差^[9-12]。

本文基于开环P型结合闭环PI型的迭代学习律,设计了收敛稳定的离散开闭环迭代学习控制器,应用于PZT系统,对50 Hz单频和25 Hz+50 Hz复频三角波轨迹进行了跟踪控制实验,达到了较高的跟踪精度。

2 开闭环迭代学习控制器

2.1 开闭环迭代学习控制器的收敛性

如果把PZT系统看作常规的线性系统,所设计的控制器将很难达到较高的跟踪精度,且可能会导致系统的不稳定。这是因为PZT具有较强的迟滞非线性。借鉴文献^[10]中被控系统模型的形式,不失一般性,以下离散非线性系统可以用来描述PZT系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[k, \mathbf{x}(k), u(k)] \\ y(k) = g[k, \mathbf{x}(k)] + d \cdot u(k) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}(k) \in R^{n \times 1}$, $u(k)$, $y(k)$ 分别为系统在 k 时刻的状态、输入和输出值; $\mathbf{f}(\cdot) \in R^{n \times 1}$, $g(\cdot)$, d 分别为 n 维函数向量、某一函数和某一线性常

数值。

离散时间下的开环P型结合闭环PI型的迭代学习律为:

$$u_j(k) = u_{j-1}(k) + k_{po}e_{j-1}(k) + k_{pc}e_j(k) + k_{ic} \sum_{m=0}^k e_j(m), \quad (2)$$

式中:下标 j 表示迭代次数; k_{po} , k_{pc} , k_{ic} 分别表示开环学习律比例增益、闭环学习律比例增益和闭环学习律积分增益; $e_j(k) = y_d(k) - y_j(k)$ 表示第 j 次迭代时 k 时刻的误差量,其中 $y_d(k)$ 表示 k 时刻的期望位移。在第 j 次迭代时,开环P型学习律 $k_{po}e_{j-1}(k)$ 只使用了系统前次(第 $j-1$ 次)运行时的误差量,而闭环PI型学习律 $k_{pc}e_j(k) + k_{ic} \sum_{m=0}^k e_j(m)$ 则使用了系统当前(第 j 次)运行时的误差量,两者结合,可以进一步改善迭代学习控制的性能。

假设系统满足以下条件^[9-10]:

- (1) $f(\cdot) \in R^{n \times 1}$, $g(\cdot)$ 连续, $d \neq 0$ 。
- (2) 存在唯一的期望控制 u_d 使得系统的状态和输出为期望值 x_d, y_d 。
- (3) 每次迭代时的初始状态误差收敛到零。
- (4) $1 + k_{pc}d \neq 0$ 。

基于式(2)的学习律,可以得到开闭环迭代学习控制收敛性条件:

$$\left| \frac{1 - k_{po}d}{1 + k_{pc}d} \right| < 1. \quad (3)$$

若 $k_{po} > 0$, $k_{pc} > 0$,则可以进一步得到收敛性条件为:

$$k_{po} - k_{pc} < \frac{2}{d}. \quad (4)$$

2.2 开闭环迭代学习控制器的设计

针对实际的PZT系统,所设计的离散开闭环迭代学习控制器如图1所示。

图1中的 $N_p = T_N/T_s$ 表示一次迭代过程中的采样数, T_N 表示迭代一次所运行的时间, T_s 表示采样周期。模块 Z^{-N_p} 表示 N_p 个采样周期的纯延迟,即 $e_j(k) \cdot Z^{-N_p} = e_{j-1}(k)$, $u_j(k) \cdot Z^{-N_p} = u_{j-1}(k)$ 。

上述控制器的特点可作如下说明:

- (1) 不需要对PZT的迟滞特性建模,也不需要整个PZT系统的精确模型,通过控制器的开闭环迭代学习律就可以获得很好的跟踪性能。
- (2) 系统中的条件“每次迭代时的初始状态误

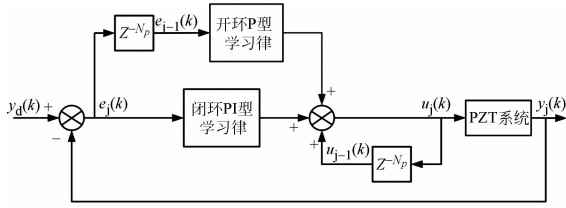


图 1 开闭环迭代学习控制框图

Fig. 1 Block diagram of open-closed loop iterative learning control

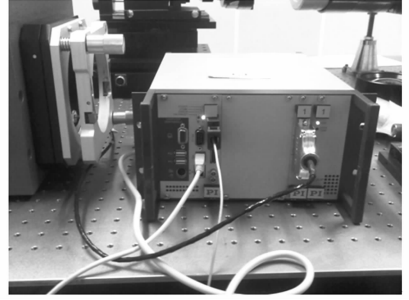


图 2 实验实物图

Fig. 2 Experimental equipments

差收敛到零”对于实际应用中的控制器性能影响较大,所以应该严格满足该条件。实际应用时,在每次迭代开始之前,可以先通过 PID 控制方法使 PZT 系统定位到初始的期望位置上(即 $y(0) = y_d(0)$),然后再开始该次迭代控制。

(3) 实际应用时,图 1 中的 2 个模块 Z^{-N_p} 意味着 $2N_p$ 个记忆存储空间。相比常规的 PID 控制器,图 1 中的控制器硬件上至少需要额外的 $2N_p$ 个存储单元。

(4) 在式(1)系统中的 d 不能精确获知的情况下,也可以根据式(4)的收敛性条件通过合理选择 k_{po}, k_{pc} 来保证迭代控制器的收敛性和良好的跟踪性能。即本文所设计的开闭环迭代学习控制器对 PZT 系统的参数变化不敏感,具有良好的鲁棒性。

3 实验结果与分析

为了验证上述开闭环迭代学习控制方法的可行性,针对自研干涉仪中的 PZT 移相器进行控制。控制实验在精密环控实验室中进行,移相器放置在光学隔振平台上,型号为德国 Physik Instrumente 公司的 S-900K131,标称行程为 $10 \mu\text{m}$,放大器的输出电压为 $-35 \sim 135 \text{ V}$,D/A 转换器为 20 位。平台位移由内置的电容位移传感器获得,其分辨率小于 0.5 nm ,A/D 转换器为 16 位。实物如图 2 所示。

所设计的开闭环迭代学习控制器的参数为 $k_{po} = 0.6, k_{pc} = 0.1, k_{ic} = 0.1$,对比实验中的 PID 控制器参数为 $k_p = 0.2, k_i = 1.0, k_d = 0.1$,系统采样周期 T_s 为 0.001 s 。

为了验证所设计控制器的跟踪性能及对

PZT 迟滞特性的补偿效果,分别针对单频和复频三角波期望轨迹进行了跟踪控制实验。

定义周期性三角函数 $\text{tri}[a, b, f_d](\cdot)$ 为:

$$\text{tri}[a, b, f_d](t) = \begin{cases} 2f_d t(b-a) + a, & 0 \leq t < 1/(2f_d) \\ -2f_d t(b-a) + 2b - a, & 1/(2f_d) \leq t < 1/f_d \end{cases} = \text{tri}[a, b, f_d](t + (1/f_d)), \quad (5)$$

则 $\text{tri}[1, 3, 50](kT_s) \mu\text{m}$ 可以表示频率为 50 Hz , 起始值为 $1 \mu\text{m}$,最大值为 $3 \mu\text{m}$ 的离散三角波信号。

定义绝对误差 $e_a = |y_d - y|$, 相对误差 $e_r = |y_d - y| / \max(y_d) \times 100\%$, 均方根误差 $e_{\text{rms}} = \sqrt{(\sum (y_d - y)^2) / N_p}$ 。

3.1 50 Hz 单频三角波轨迹跟踪实验

期望轨迹为 $y_d(k) = \text{tri}[1, 3, 50](kT_s) \mu\text{m}, k = 0, 1, \dots, 40$ 。

PID 和开闭环迭代学习控制的轨迹跟踪效果分别如图 3 和图 4 所示。PID 控制器起始阶段的跟踪误差较大,所以评价其性能时,只取其稳定阶段 ($0.02 \leq kT_s \leq 0.04$) 的跟踪误差。迭代学习控制的运行次数为 10 次,虽然前 3 次迭代控制的跟踪误差较大,但随着迭代次数的增加,第 10 次迭代时其跟踪误差明显降低,如图 4(b) 所示。PID 控制的最大跟踪绝对误差为 283.0 nm ,最大跟踪相对误差为 9.43% ,而本文所设计的开闭环迭代学习控制器经过 10 次迭代后,其最大跟踪绝对误差为 10.6 nm ,最大跟踪相对误差为 0.35% 。相比 PID 控制,迭代学习控制对 50 Hz 三角波轨迹的最大跟踪误差减少了 96.25% 。

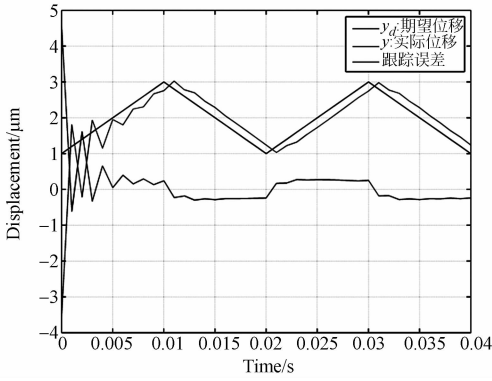
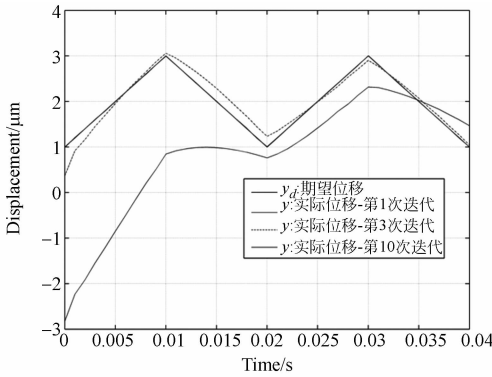


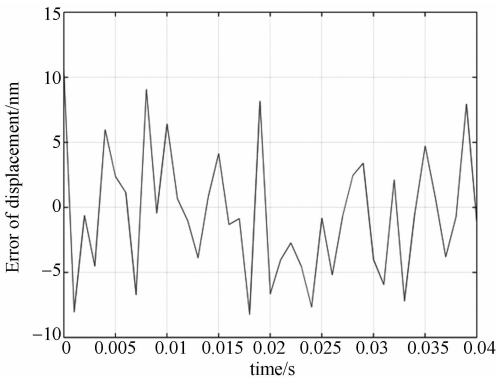
图 3 50 Hz 三角波轨迹跟踪 PID 控制结果

Fig. 3 Results of 50 Hz triangular trajectory tracking via PID control



(a) 期望轨迹与实际轨迹

(a) Desired and actual trajectories



(b) 第 10 次迭代控制的跟踪误差

(b) Tracking errors via 10th iterative learning control

图 4 50 Hz 三角波轨迹跟踪开闭环迭代学习控制结果

Fig. 4 Results of 50 Hz triangular trajectory tracking via open-closed loop iterative learning control

图 5 给出了第 10 次迭代控制的迟滞补偿效果。由图 5 可见,迭代学习控制极大地消除了 PZT 迟滞特性对高频轨迹跟踪精度的影响,并且取得了很高的线性度。

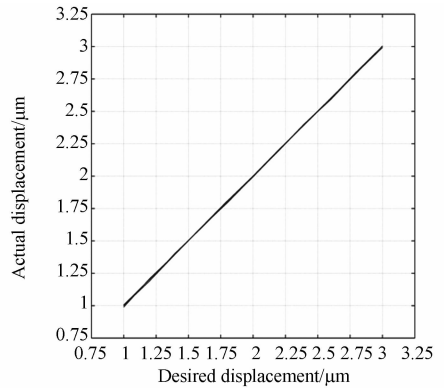


图 5 50 Hz 三角波轨迹跟踪第 10 次迭代控制的迟滞补偿效果

Fig. 5 Hysteresis compensation results of 50 Hz triangular trajectory tracking via 10th iterative learning control

3.2 25 Hz+50 Hz 复频三角波轨迹跟踪实验

该实验所采用的复频三角波期望轨迹为 $y_d(k) = tri[0.5, 1.5, 25](kT_s) + tri[0.5, 2.0, 50](kT_s) \mu m, k = 0, 1, \dots, 80$ 。

图 6 中 PID 控制的最大跟踪绝对误差为 285.1 nm, 最大跟踪相对误差为 9.50%。开闭环迭代学习控制器经过 10 次迭代后,其最大跟踪绝对误差为 12.5 nm, 最大跟踪相对误差为 0.42%, 如图 7 所示。相比 PID 控制,迭代学习控制对 25 Hz+50 Hz 复频三角波轨迹的最大跟踪误差减少了 95.62%。

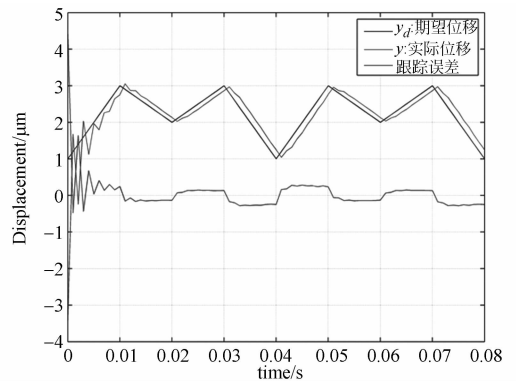
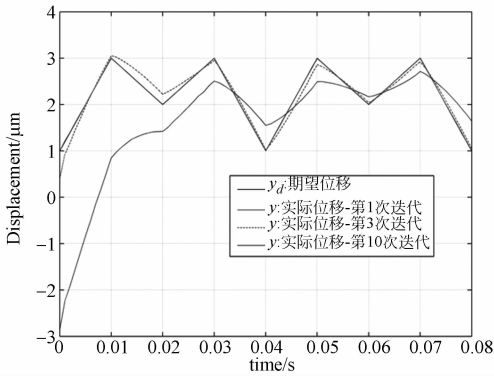


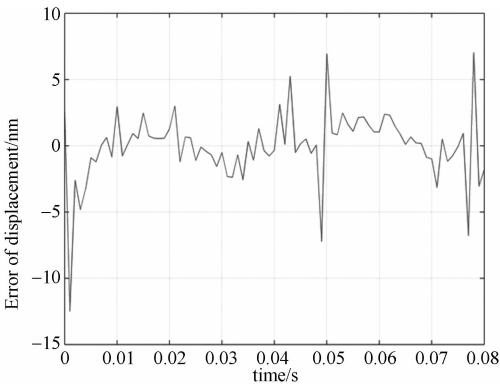
图 6 25 Hz+50 Hz 三角波轨迹跟踪 PID 控制结果

Fig. 6 Results of 25 Hz+50 Hz triangular trajectory tracking via PID control



(a) 期望轨迹与实际轨迹

(a) Desired and actual trajectories



(b) 第 10 次迭代控制的跟踪误差

(b) Tracking errors via 10th iterative learning control

图 7 25 Hz+50 Hz 三角波轨迹跟踪开闭环迭代学习控制结果

Fig. 7 Results of 25 Hz+50 Hz triangular trajectory tracking via open-closed loop iterative learning control

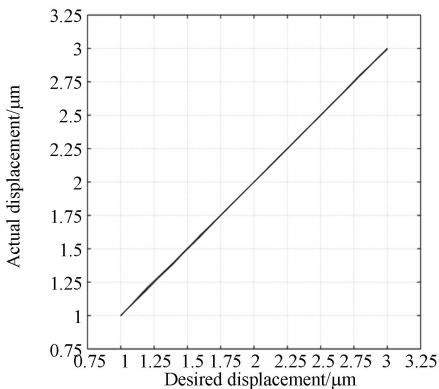


图 8 25 Hz+50 Hz 三角波轨迹跟踪第 10 次迭代的迟滞补偿效果

Fig. 8 Hysteresis compensation results of 25 Hz+50 Hz triangular trajectory tracking via 10th iterative learning control

对于 PZT 系统,复频轨迹一方面表明了多种跟踪速度,另一方面则意味着迟滞特性的多环性。图 8 给出了第 10 次迭代控制对复频三角波轨迹的迟滞补偿效果。由图 8 可见,迭代学习控制很好地补偿了高速复频轨迹跟踪的 PZT 多环迟滞影响。

表 1 所示为 PID 和迭代学习控制对 2 种三角波轨迹的跟踪性能。可见,相对于 PID 控制,开环 P 型结合闭环 PI 型迭代学习控制方法能有效提高 PZT 系统的高频和复频轨迹跟踪精度。

表 1 PID 和迭代学习控制的轨迹跟踪性能

Tab.1 Trajectory tracking performances of PID and iterative learning controls

期望轨迹 / μm	控制方法	e_a / nm	e_r / $\%$	e_{rms} / nm
$y_d(k) = \text{tri}[1, 3, 50](kT_s)$	PID	283.0	9.43	246.0
	迭代学习控制(10次)	10.6	0.35	4.9
$y_d(k) = \text{tri}[0.5, 1.5, 25](kT_s) + \text{tri}[0.5, 2.0, 50](kT_s)$	PID	285.1	9.50	198.2
	迭代学习控制(10次)	12.5	0.42	2.6

4 结 论

本文提出了离散时间下的开环 P 型结合闭环 PI 型的迭代学习律,并且给出了基于该学习律的收敛性条件。然后,针对 50 Hz 单频和 25 Hz+50 Hz 复频三角波轨迹对 PZT 系统进行了开闭环迭代学习跟踪控制实验。实验结果表明:所提出的迭代学习控制器对上述 2 种轨迹的最大跟踪误差分别为 0.35% 和 0.42%。相对于 PID 控制器,最大跟踪绝对误差分别降低到 10.6 nm 和 12.5 nm,分别降低了 96.25% 和 95.62%。因此,这种控制方法能有效地满足高频和复频轨迹跟踪的精度要求。

参考文献:

- [1] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于PZT的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 55-59.
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 55-59. (in Chinese)
- [2] 贾宏光, 郑岩, 吴一辉, 等. 非线性模型的压电元件复合控制方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1547-1552.
JIA H G, ZHENG Y, WU Y H, *et al.*. PZT actuator control complex arithmetic based on nonlinear model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1547-1552. (in Chinese)
- [3] YONG Y K, APHALE S, MOHEIMANI S O R. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(1): 46-54.
- [4] LI Y M, XU Q S. Development and assessment of a novel decoupled XY parallel micropositioning platform [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(1): 125-135.
- [5] ZHANG X L, TAN Y H, SU M Y, *et al.*. Neural networks based identification and compensation of rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [J]. *Physica B*, 2010, 405: 2687-2693.
- [6] LI P Z, GU G Y, LAI L J, *et al.*. Hysteresis modeling of piezoelectric actuators using the fuzzy system [C]. *The 3rd International Conference on Intelligent Robotics and Applications, LNAI*, 2010, 6424(1): 114-124.
- [7] 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, 19(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, 19(6): 1281-1290. (in Chinese)

- [8] ARIMOTO S, KAWAMURA F, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1984, 1(2): 123-140.
- [9] 皮道映, 孙优贤. 非线性时变系统开闭环P型迭代学习控制的收敛性[J]. 自动化学报, 1999, 25(3): 351-354.
PI D Y, SUN Y X. The convergence of iterative learning control with open-closed-loop P-type scheme for nonlinear time-varying systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(3): 351-354. (in Chinese)
- [10] 皮道映, 孙优贤. 离散非线性系统开闭环P型迭代学习控制律及其收敛性[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(2): 157-161.
PI D Y, SUN Y X. On the convergence of open-closed-loop P-type iterative learning control scheme for nonlinear discrete systems [J]. *Control Theory and Applications*, 1997, 14(2): 157-161. (in Chinese)
- [11] 于少娟, 冯冬梅, 吴聚华. 2-D系统理论在开闭环迭代学习控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 402-404.
YU SH J, FENG D M, WU J H. Application of 2-D system theory in the design of open-closed-loop iterative learning control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(3): 402-404. (in Chinese)
- [12] 魏燕定, 黄金永, 董春兵. 基于ILC的压电微位移驱动器电源线性化研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 570-573.
WEI Y D, HUANG J Y, DONG CH B. Linearization of supply power to piezoelectric actuator based on iterative learning control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 570-573. (in Chinese)

作者简介:



李朋志(1983-),男,安徽阜阳人,助理研究员,2011年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事微定位平台设计、PZT迟滞非线性系统的建模和控制方面的研究。E-mail: kindrobot@163.com

导师简介:



隋永新(1970-),吉林长春人,研究员,硕士生导师,分别于1993年、1996年于长春理工大学获得学士、硕士学位,2002年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光刻物镜中光学元件超高精度检测技术方面的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn