

文章编号 1004-924X(2015)08-2273-07

堆叠型压电执行器的动态蠕变补偿

张承进^{1,3*}, 赵学良^{1,2}, 刘红波¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 济南 山东 250061;

2. 泰山医学院 信息工程学院, 泰安 山东 271016;

3. 山东大学 威海校区 机电与信息工程学院, 威海 山东 264209)

摘要: 在实验的基础上证实了压电执行器动态蠕变现象的存在。考虑到压电执行器的高频响特点和PID在高实时性要求场合的应用, 构建了复合控制器来抑制动态蠕变。该复合控制器由具有Prandtl Ishlinskii类型的迟滞直接逆作为前馈控制器, 由根据在线测试结果和实时性要求选择的增量式PI作为反馈控制器, 其中增量式PI的参数由模糊逻辑控制器在线调节。通过实验验证了复合控制器抑制动态蠕变的有效性。结果表明, 当同幅值的0.1 Hz正弦信号在一个周期内被离散化为20台阶, 40台阶, 80台阶时, 相等电压台阶对应的蠕变过程和范围都是不同的。本文构建的复合控制器能够对不同台阶的动态和静态蠕变进行有效抑制, 补偿后蠕变的均方根误差(RMSE)分别降低为补偿前的28.6%, 31.0%和35.4%。

关键词: 压电执行器; 动态蠕变; 迟滞补偿; 模糊PI控制器

中图分类号: TN384; TP271 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2273

Compensation for dynamic creep of stack piezoelectric actuator

ZHANG Cheng-jin^{1,3*}, ZHAO Xue-liang^{1,2}, LIU Hong-bo¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2 School of Information Engineering, Taishan Medical University, Taian 271016, China;

3 School of Mechanical, Electrical & Information Engineering,
Shandong University at Weihai, Shandong 264209, China)

* Corresponding author, E-mail: cjzhang@sdu.edu.cn

Abstract: The dynamic creep phenomenon of a piezoelectric actuator was confirmed by experiments. Based on the high frequency response of the piezoelectric actuator and the higher real time ability of the PID, a composite controller was proposed to compensate the dynamic creep. The composite controller used a direction inverse controller with Prandtl Ishlinskii operators as the feed-forward controller, and an increment PI as the feed-backward controller based on the online test results and demanded real time abilities, in which the parameters of PI were tuned by a fuzzy logic controller. The validity of compensating dynamic creep phenomenon of the piezoelectric actuator by the composite controller was verified. The results show that when a 0.1 Hz sine-wave is discretized into 20, 40, 80 stairs re-

收稿日期: 2014-12-23; **修订日期:** 2015-02-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61174044); 山东省科技发展计划政策引导类资助项目 (No. 2013YD01049)

spectively, the dynamic creep corresponding the equal voltages has different creep processing and different creep ranges. It verifies that the dynamic creep is complex nonlinearity. It concludes that the proposed controller compensates both static creep and dynamic creep in different discretization stairs and the root-mean square errors(RMSE) of compensated creep have decreased by 71.4%, 69.0% and 64.6% respectively.

Key words: piezoelectric actuator; dynamic creep; hysteresis compensation; fuzzy PI controller

1 引言

堆叠型压电执行器作为高速、高精度、大推力的纳米级执行器,被广泛应用于高精定位尤其是纳米级定位等场合,如原子力显微镜、纳米操纵、微抓、光刻机等。但是,其迟滞和蠕变两种非线性使得其定位精度受到严重影响,其中迟滞占整个位移量的 10%~15%,而蠕变占整个位移量的 1%~5%。近年来,学者们对其本身具有的这两种非线性进行了深入的研究,并在迟滞的率无关和率相关特性以及静态蠕变的研究方面取得大量的成果^[1-4]。迟滞的率相关是指迟滞与作用于执行器之上的电压信号输入速率有关,当电压信号输入速率增加时,迟滞环会变得更大、更圆^[5]。

目前对于压电执行器的蠕变特性进行有模型研究时,大多文献把蠕变处理为迟滞基础上的非线性^[6,7],因此采用的方法是先辨识迟滞,再利用迟滞来补偿蠕变。文献[8]把蠕变定义为处在形变的稳态阶段,文献[9]把 0.1 s 后发生的形变认为是蠕变并加以补偿。当输入电压速率不变,离散化电压台阶使蠕变模型参数有复杂非线性^[10],因此构建不同离散化台阶对应的蠕变模型目前还没有解决。低频下,当台阶的压差和间隔改变时都会对蠕变产生影响,这使得蠕变模型的构建变得更加困难。研究表明,随着压差减少和间隔变短,蠕变不断减少^[11];但极高频的控制和极短的算法执行时间,对于硬件投资是极其昂贵的,甚至难以实现。

相比蠕变的补偿,迟滞补偿的研究相对成熟。前馈控制器,如迟滞逆模型^[12]、IIL^[13]等都在应用中取得了较好的效果。文献[14]采用 Prandtl-Ishlinskii 算子形式的直接逆方式来抑制迟滞,实现了对率相关和率无关特性的同时抑制,此方法简单直观。考虑到压电执行器的高频响特点和 PID 被广泛用于高实时性要求的场合^[15,16],本文

采用直接逆用作前馈控制器补偿迟滞,再用模糊 PI 控制器构成反馈控制器来进行蠕变补偿。

2 动态蠕变的产生及影响

当有阶跃电压作用于压电执行器后,执行器的响应过程分为暂态和稳态过程。暂态过程时间较短,稳态过程一直持续到作用完成。形变过程如图 1 所示,横坐标的 Index 表示采样点序列,纵坐标为蠕变位移值。前 5 ms 的蠕变速率都大于 20 nm/ms,从第 6 ms 开始远小于这一数值,因此可以把前 5 ms 定义为蠕变的暂态区,从 6 ms 开始进入稳态区。暂态区发生的蠕变之和大于稳态区蠕变之和。尽管很多模型都可以很好地描述稳态阶段的蠕变,但随着执行器控制间隔的缩短,需要把时间尺度定义在毫秒级别,台阶电压初始形变就有可能进入蠕变的暂态阶段,这个阶段蠕变所占的非线性形变会急剧上升。当进入亚毫秒级别时就进入了压电执行器的新的暂态阶段,但这个阶段的迟滞和蠕变发展变化过程目前还不是很清楚。

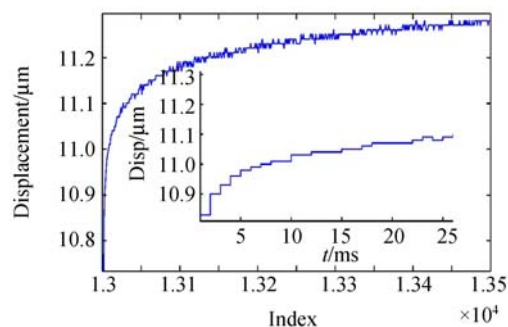


图 1 蠕变在阶跃信号下的形变过程

Fig. 1 Creep distribution in different stages under step voltages

在同一个电压信号不同离散化时,由于电压台阶和控制间隔的变化会使蠕变有不同的响应曲线。图 2 所示为 0.1 Hz 正弦信号分别离散化成

20,40,80 个台阶,横坐标的 Index 表示采样点序列,纵坐标表示产生的蠕变电压。当相等电压对应的迟滞不变时,蠕变的变化分布情况如下:20 个台阶的蠕变变化区间为 $[-0.157\ 0.214]$ V,40 个台阶变化区间为 $[-0.163\ 0.186]$ V,80 个台阶变化区间为 $[-0.163\ 0.165]$ V。

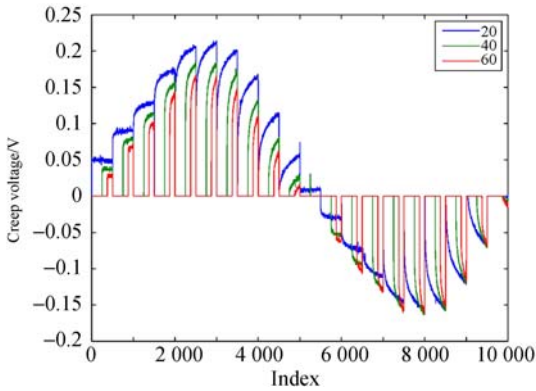


图 2 同一信号不同离散化台阶下的蠕变

Fig. 2 Creep distribution under different discretizations

可见,蠕变在不同离散化情况下是不同的,并且越靠近阶跃初始点时其变化越剧烈。蠕变范围会随着台阶电压的升高和台阶间隔时间的改变而改变的现象被称为动态蠕变。控制动态蠕变的目的是把蠕变随台阶电压压差和间隔的影响降低到最小,并使有效控制时间尽可能靠近阶跃的初始点。尽管对动态蠕变的特性已经进行了初步的研究^[11-17],但是对于动态蠕变控制方面的研究才刚刚开展。

3 控制算法

3.1 迟滞控制

迟滞的直接逆方法^[14]是通过使用多个 Backlash 算子并联,使用有正有负的权重 ω_{hi} 串联形成了 Prandtl Ishlinskii 类型的直接逆。这种直接逆

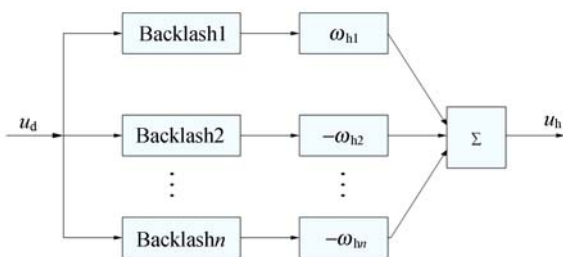


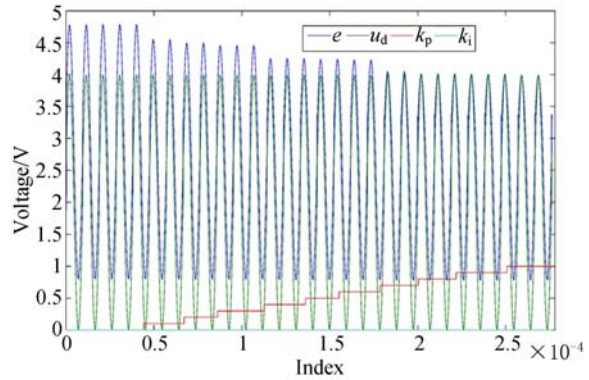
图 3 直接逆 Prandtl-Ishlinskii 的结构

Fig. 3 Structure of direct inverse Prandtl-Ishlinskii

可以避免大量迟滞逆的计算时间,有利于提高控制的实时性。Prandtl Ishlinskii 类型算子的及权重关系如图 3 所示。

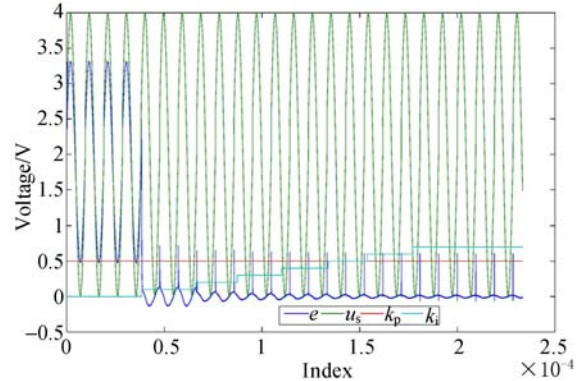
3.2 增量式 PI 控制及模糊调节

压电执行器是高响应的器件,响应时间为 μs 级,因此不需要通过控制器来增加系统动态。通



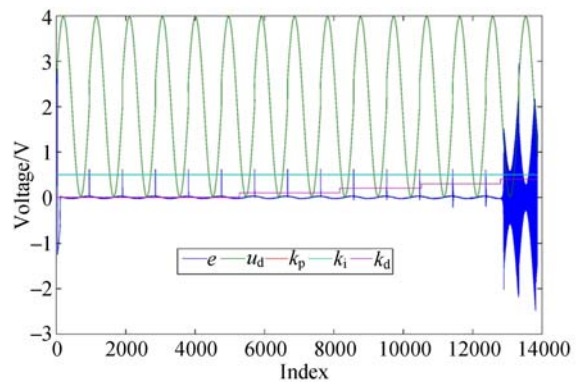
(a) $k_i = k_d = 0$, 调节比例系数 k_p 时误差的变化

(a) $k_i = k_d = 0$, k_p is adjustable



(b) $k_d = 0$, 固定 k_p , 调节 k_i 时误差的变化

(b) $k_d = 0$, k_p is a constant, k_i is adjustable



(c) 固定 k_p, k_i , 调节 k_d 时误差的变化

(c) Both k_p and k_i are constants, k_d is adjustable

图 4 PID 参数调整对执行器跟踪效果的影响

Fig. 4 Effect of tuning PID parameters on tracking performance

过实验发现,仅由 PID 控制器构成的闭环回路中,压电执行器对比比例系数 k_p 、积分系数 k_i 参数调节敏感,而对微分系数 k_d 的变化不敏感。如图 4(a)、(b)所示,在给定信号为 1 Hz 正弦信号时,在线增大 k_p 、 k_i 会使跟踪误差很快的减少;在线调节 k_d 参数,如图 4(c)所示,对跟踪误差的减少贡献很小,可调节范围极小,并容易造成系统震荡,所以选用增量式 PI 控制器。增量式 PI 控制器采用式(1)形式来抑制动态蠕变。

$$u(k) = u(k-1) + k_p \times (e(k) - e(k-1)) + k_i \times e(k), \quad (1)$$

其中: $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 分别表示 k 和 $k-1$ 时刻施加于压电执行器的电压值;电压 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别表示 k 和 $k-1$ 的跟踪误差。

3.3 复合控制器

离散电压信号的台阶数不同、对应电压不同蠕变都会发生改变,因此需要对线性本质的增量式 PI 参数进行在线调节。模糊控制器是非线性控制器,两输入单输出的模糊控制器具有类似 PI 的特性。所构建的复合控制如图 5 所示给定输入 y_d 和测量输出 y ,模糊控制器输入为跟踪误差 e 以及误差的变化 e_c 。

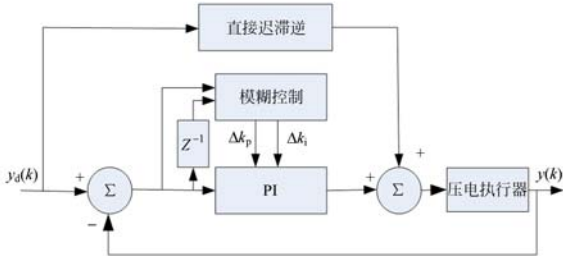


图 5 复合控制器框图

Fig. 5 Diagram of composite controller

4 实验结果与分析

在搭建的实验平台上^[17],对作用于压电执行器上的同幅值的 0.1 Hz 正弦波进行不同的离散化,分别离散成具有 20,40 和 80 个台阶的电压信号。均方根误差 $e_{rms} = \sqrt{\sum(u_{d_i} - u_s)^2 / N}$,其中 u_{d_i} 是给定电压, u_s 是对应的位移电压。为了显示方便和清晰,下面所有的图中所示电压未进行标度变换。为去除初始化影响,所用数据均取自第二个工作周期。

4.1 直接逆

选择 Prandtl-Ishlinskii 类型直接逆作为前馈控制器,然后结合 PI 构成复合控制器,对 20 个台阶 0.1 Hz 正弦电压信号进行跟踪。直接逆阈值为 $r=[0 \ 0.1 \ 0.3 \ 0.6 \ 1]$,对应的权重系数 $\omega_{hi}=[1.5 \ -0.2 \ -0.15 \ -0.13 \ -0.13]$, k_p 等于 0.54, k_i 等于 0.5。跟踪结果如图 6 所示,其中 e 为跟踪误差, u_{d_i} 为给定的电压信号, u_s 压电执行器实际位移跟踪电压信号可以得到如下结论:

- a) 回路对迟滞和蠕变都有一定的抑制作用;
- b) 蠕变误差被抑制到 (0.1 ± 0.05) V 内;
- c) 台阶蠕变速率很小,但蠕变值有类似正弦的变化轨迹,跟随输入台阶电压的值上下波动;
- d) 在台阶电压跳变的开始处有快速抖动的现象。

直接逆构成单位闭环跟踪误差区间 $[-0.553 \ 0.724]$ V, RMSE=0.100 2 V,稳定时间为 8~10 ms。

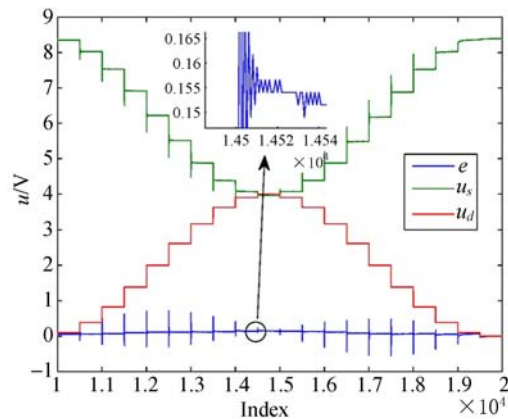


图 6 直接逆闭环跟踪

Fig. 6 Tracking performance of direct inverse

4.2 复合控制器对动态蠕变的抑制

实验发现,仅使用增量式 PI,无论如何调节 PI 参数都无法完全消除迟滞和蠕变;使用直接逆和 PI 构成的闭环时,无法保证 20,40 和 80 个台阶的跟踪误差都同时最小,因此构建了增量式 PI 控制器,其参数使用两输入两输出的模糊规则来在线调节。误差基本论域为 $E=[-0.05 \ 0.05]$ V,单位误差变化的基本论域为 $EC=[-0.02 \ 0.02]$ V,输入输出的模糊子集为 $[NB, ZE, PB]$ 。通过在线实验还发现当使用模糊子集为 $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$ 时,在线控制系统会因

计算时间过长而无控制量输出。模糊调整规则如图 7 所示。

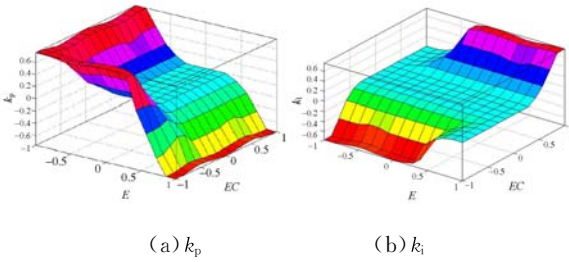
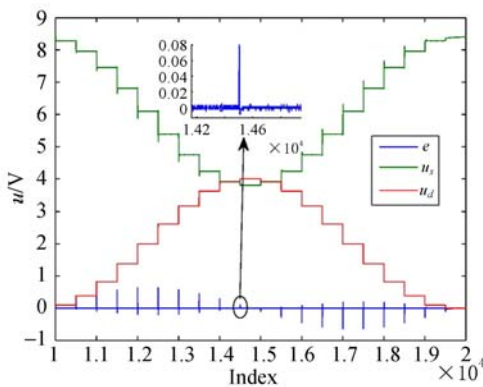


图 7 模糊控制器调整规则

Fig. 7 Fuzzy rules

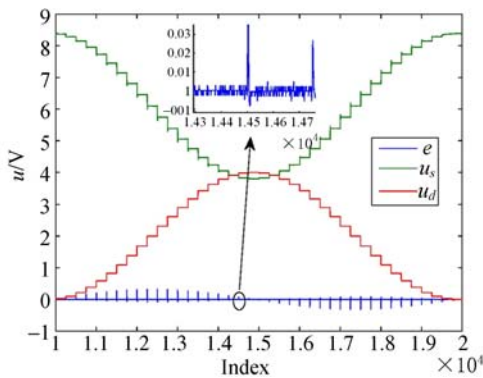
直接逆的阈值 $r=[0 \ 0.1 \ 0.3 \ 0.6 \ 1]$, 对应的权重系数 $\omega_h=[0.3 \ -0.2 \ -0.05 \ -0.05 \ -0.01]$, k_p 等于 0.54, k_i 等于 0.5, 得到的实验结果如图 8 所示, 其中 e 为跟踪误差, u_i 为给定的电压信号, u_e 压电执行器实际位移跟踪电压信号。

20 个台阶时, 误差变化为 $[-0.637 \ 0.638]$ V, $RSME=0.033 \ 5$ V。40 个台阶时误差变化为



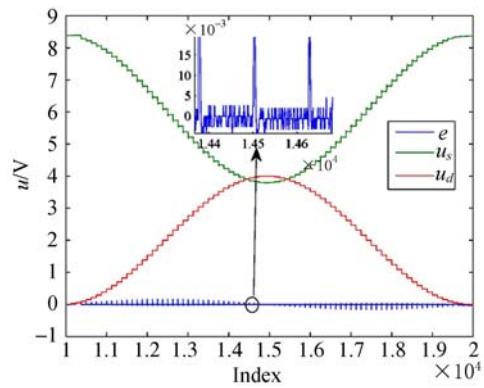
(a) 离散成 20 个台阶时

(a) Discretized into 20 steps



(b) 离散成 40 个台阶时

(b) Discretized into 40 steps



(c) 离散成 80 个台阶

(c) Discretized into 80 steps

图 8 不同离散化下对台阶蠕变的抑制

Fig. 8 Creep suppression with different discretizations

$[-0.321 \ 0.323]$ V, $RSME=0.023 \ 7$ V, 80 个台阶时误差变化为 $[-0.163 \ 0.162]$ V, $RSME=0.018 \ 1$ V。稳定时间: 20 个台阶时, 上升段 4 ms 正值, 7 ms 负值, 下降段 4 ms 负值, 7 ms 正值, 共需 11 ms 进入稳定状态; 40 个台阶时, 上升段 4 ms 正值, 7 ms 负值, 下降段 4 ms 负值, 7 ms 正值, 共需 11 ms 的稳定时间; 80 个台阶时, 上升段 5 ms 正值, 6 ms 负值, 下降段 5 ms 负值, 6 ms 正值, 共需 11 ms 的稳定时间。而无补偿前对应 20、40 和 80 个台阶的 RMSE 分别为 0.116 9、0.076 5 和 0.051 1 V。从实验结果可以看出, 使用复合控制器把不同离散台阶的蠕变都进行补偿, 随着台阶数的增加, 蠕变的增量不断减少, 控制器输入的电压尖峰也随之减少, 因此误差的尖峰相应的减少。相比较无补偿的动态蠕变, 其误差变化由于尖峰的存在, 20 个台阶时放大了 3.5 倍, 40 个台阶时放大了 1.85 倍, 80 个台阶基本持平, 为 0.98 倍; 而 RMSE 在 20 个台阶时缩小为原来的 28.6%, 40 个台阶时缩小为原来的 31.0%, 80 个台阶时缩小为原来的 35.4%。

5 结 论

本文通过实验验证了 PI 控制的合理性, 采用了无逆计算的迟滞直接逆和实时性高的模糊 PI 的控制方法, 通过实验验证了其对动态蠕变抑制的有效性。本文方法能使零蠕变进入的稳定时间都不超过 11 ms; 能对静态和动态蠕变都有很好的补偿作用, 其 RMSE 都缩小为未补偿的 1/3 左

右。通过实验研究发现,对补偿作用影响最大的是台阶电压开始作用时控制器产生的电压尖峰,

因此下一步要减少控制电压尖峰产生的位移尖峰幅值和进一步减少稳定时间。

参考文献:

- [1] 陈远晟, 裘进浩, 季宏丽, 等. 基于双曲函数的 Preisach 类迟滞非线性建模与逆控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1205-1212.
CHEN Y SH, QIU J H, JI H L, *et al.*. Modeling and inverse control of preisach type hysteresis non-linearity using hyperbola functions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1205-1212. (in chinese)
- [2] 李朋志, 闫丰, 葛川, 等. 压电驱动器的开闭环迭代学习控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 414-419.
LI P ZH, YAN F, GE CH, *et al.*. Open closed loop iterative learning control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 414-419. (in chinese)
- [3] 王钰锋, 郭咏新, 毛剑琴. 压电作动器的率相关迟滞建模与跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 616-625.
WANG Y F, GUO Y X, MAO J Q. Rate dependent modeling and tracking control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 616-625. (in chinese)
- [4] 张桂林, 张承进, 赵学良. 压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 996-1001.
ZHANG G L, ZHANG CH J, ZHAO X L. Modeling of nonlocal memory hysteresis in piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 996-1001. (in chinese)
- [5] XIAO SH L, LI Y M. Modeling and High Dynamic Compensating the Rate-Dependent Hysteresis of Piezoelectric Actuators via a Novel Modified Inverse Preisach Model [J]. *IEEE T. Cont. r Syst. T.*, 2013, 22(5): 1549-1557.
- [6] JANOCHA H, KUHNEN K. Real-time compensation of hysteresis and creep in piezoelectric actuators [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2000, 79(2): 83-89.
- [7] WOLF F, SUTOR A, RUPITSCH S J, *et al.*. Modeling and measurement of creep- and rate-dependent hysteresis in ferroelectric actuators [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2011, 172(1): 245-252.
- [8] JUNG H, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, 71(4): 1896-1900.
- [9] RU CH H, SUN L N. Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuator in open-loop operation [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2005, 122(1): 124-130.
- [10] MA Y T, HUANG L, LIU Y B, *et al.*. Note: creep character of piezoelectric actuator under switched capacitor charge pump control [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, 82(4): 046106.
- [11] ZHAO X L, ZHANG CH J, LIU H B, *et al.*. Analysis of Hysteresis-free creep of the stack piezoelectric actuator [J]. *Math. Probl. Eng.*, 2013: 187262.
- [12] GU G Y, ZHU L M, SU CH Y. Modeling and compensation of asymmetric hysteresis nonlinearity for piezoceramic actuators with a modified prandtl ishliinskii model [J]. *IEEE T Ind. Electron.*, 2014, 61(3): 1583-1595.
- [13] CLAYTON G M, TIEN S, LEANG K K, *et al.*. A review of feedforward control approaches in nanopositioning for high-speed SPM [J]. *J. Dyn. Syst. - T ASME*, 2009, 131(6): 061101.
- [14] QIN Y D, TIAN Y L, ZHANG D W, *et al.*. A novel direct inverse modeling approach for hysteresis compensation of piezoelectric actuator in feedforward applications [J]. *IEEE-ASME T. Mech.*, 2013, 18(3): 981-989.
- [15] CHOI G S, LIM Y A, CHOI G H. Tracking position control of piezoelectric actuators for periodic reference inputs [J]. *Mechatronics*, 2002, 12(5): 669-684.
- [16] TAN K K, LEE T H, ZHOU X H X. Micro-positioning of linear-piezoelectric motors based on a

learning nonlinear PID controller [J]. *IEEE-ASME T. Mech.*, 2001, 6(4):428-436.

- [17] 赵学良, 张承进, 顾建军, 等. 离散化正弦电压作用下的压电驱动器蠕变特性 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):942-948.

ZHAO X L, ZHANG CH J, GU J, *et al.*. creep characteristics of stack piezoactuator effected by discretized sine voltage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):942-948. (in chinese)

作者简介:



赵学良(1976—),男,山东邹平人,博士研究生,讲师,1998年于济南大学获得学士学位,2006年于山东大学获得硕士学位,主要从事非线性系统的建模与控制、压电陶瓷微纳定位方面的研究。E-mail: xueliangzhao@hotmail.com

导师简介:



张承进(1962—),男,山东莱芜人,博士,教授,博士生导师,1983年于中国海洋大学获得学士学位,1992年于山东科技大学获得硕士学位,1997年于东北大学获得博士学位,主要从事自动控制、系统辨识等方面的研究。E-mail: cjzhang@sdu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)