

文章编号 1004-924X(2014)04-0942-07

离散化正弦电压作用下的压电驱动器蠕变特性

赵学良^{1,2}, 张承进^{3,1*}, 顾建军¹, 刘红波¹, 李康¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 泰山医学院信息工程学院, 山东 泰安 271016;
3. 山东大学威海校区机电与信息工程学院, 山东 威海 264209)

摘要:研究了具有不同离散化台阶的正弦电压对压电陶瓷驱动器蠕变大小以及蠕变起始时间的影响,采用新的数学模型分析了低频下压电陶瓷驱动器的蠕变特性。首先,对 0.025 Hz/0V~60 V 正弦电压输入信号进行了 5 种倍数关系的离散化,分析了蠕变与输入电压的关系以及蠕变与输入台阶电压压差的关系。然后,按照提出的数学模型,在符合文中所述两种准则前提下,对蠕变起始时间进行了预测。实验结果表明,上升段蠕变变化范围最大出现在台阶电压等于 47.7 V 时,而下降段蠕变变化范围最大出现在台阶电压等于 12.3 V;相比于 20 个台阶,320 个台阶对应的上升段最大蠕变增长量下降了 899.5%,而在下降段最大蠕变的这一比值增大到了 936.9%。使用所提公式对蠕变起始时间进行预测,得到当台阶电压为 12.3 V 时,20、40、80、160、320 个台阶的蠕变起始时间分别在 0.959、0.911、0.813、0.664 和 0.016 ms 以后。蠕变与输入电压以及蠕变与输入台阶电压差值都是迟滞关系,并且台阶蠕变随着台阶数量的增加而减小。不同离散化的电压信号改变了蠕变的起始时间,台阶电压数量越多,蠕变起始时间越早。

关键词:压电驱动器;蠕变;台阶电压;起始时间

中图分类号:TN384;TP271 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142204.0942

Creep characteristics of stack piezoactuator effected by discretized sine voltage

ZHAO Xue-liang^{1,2}, ZHANG Cheng-jin^{3,1*}, GU Jian-jun¹, LIU Hong-bo¹, LI Kang¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. School of Information Engineering, Taishan Medical University, Tai'an 271016, China;
3. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering,
Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

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

Abstract: The influence of sine voltages with different discretized stairs on the size and initial time of the creep for a stack PZT was investigated. A new model was presented to investigate the creep characteristics of the stack PZT in a low frequency. Firstly, a 0.025 Hz/0 V—60 V sine wave was discretized with five multiple relations. The relations between the creep and the stair voltage or the creep and the difference of stairs were also analyzed. Then, the initial time of the creep was predicted by the proposed model. Experimental results indicate that the biggest creep range in the rising period appears

收稿日期:2013-12-05;修订日期:2014-01-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61174044);山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2010FM018);山东省科技发展计划政策引导类项目(No. 2013YD01049)

on the stair voltage of 47.7 V, and that in the decline period appears on the stair voltage of 12.3 V. As compared to 20 stairs, 320 stairs correspond to the period of maximum creep growth in the rising falls by 899.5%, and that in the declining period is up to 936.9%. Using the proposed formula to predict creep initial time, the creep initial time of 20, 40, 80, 160 and 320 stairs is 0.959, 0.911, 0.813, 0.664, and 0.016 ms later respectively when the stair voltages is 12.3 V. Moreover, the differences between the creep and the input voltage and the creep and the input voltage are hysteresis, and the stair creep decreases with increasing the number of stairs. The voltage signal with different discretizations has changed the initial time of creep, and the more the stair voltage, the sooner the initial time of creep.

Key words: piezoactuator; creep; stair voltage; initial time

1 引言

尽管压电陶瓷驱动器具有的迟滞、蠕变等非线性特性影响其定位精度,但高分辨率和快速响应等特性仍使其得到了广泛的应用^[1]。压电陶瓷驱动器的快速形变响应过程可以分为三个阶段^[2]:第一阶段为瞬态过程,台阶电压的输入与迟滞有关形变几乎同时完成^[3],关于迟滞方面的建模与控制可见文献[4-6];第二个阶段是暂态过程,该阶段的形变与振动有关,当输入电压频率接近第一谐振频率时会有明显的振动;第三个阶段是形变相对缓慢的阶段-蠕变。对于共振频率高的堆叠型压电陶瓷驱动器,在电压输入频率相对较低时不会出现第二阶段的振动过程^[7]。在初始快速形变之后就是具有慢速形变现象的蠕变过程^[8]。在这种情况下,与迟滞相关形变的结束时间就是蠕变过程的起始时间。

由于数字控制^[9]和数据处理^[10]的需要,输入的电压信号往往被离散化后使用。为了研究蠕变的影响以及实际使用控制算法对时间的需求,往往使用台阶电压来驱动压电陶瓷驱动器^[11]。台阶电压可维持 0.1 s^[12,13], 1 s^[14,15], 5 s^[16], 8 s^[17], 50 s^[18]等。通常把三角和正弦等输入电压信号离散成具有不同数量的台阶电压。目前不同的离散化电压信号对压电陶瓷驱动器蠕变的影响还未见报导。和迟滞的率相关不同^[19],蠕变的大小和控制电压的离散化台阶数量是相关的。

很少有文献报导蠕变的起始时间或蠕变与迟滞的分离点。文献[2, 20]认为蠕变起始于台阶电压输入后的 0.1 s,但文献[21]认为在施加台阶电压几毫秒后蠕变就开始产生了,文献[22]认为

蠕变起始时间小于 300 μ s。压电陶瓷驱动器的快速响应特性,使获得蠕变起始时间变得非常困难,甚至不可能。但是由于蠕变和迟滞在时间上是相连的,确定蠕变与迟滞的分离点将会直接对确定迟滞的大小产生影响。研究显示,尽管很难直接得到台阶电压输入后的蠕变起始时间^[23],但是可以通过适当的模型进行估计。本文研究了正弦电压不同离散化对压电陶瓷驱动器蠕变起始时间的影响,采用新的数学模型,实现了低频大范围下压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究。

2 实验

在如图 1 所示的实验平台上,进行了一系列的对同一电压信号不同离散化的实验。当输入电压为 0~150 V 时,压电陶瓷驱动器(PSt 150/7/40 VS12,德国)的标称位移在 0~40 μ m。控制器(AD7011EVA,日本)输出的电压信号被功率放大器(XE501.B,中国)放大。位移信号由封装在压电陶瓷驱动器内部的 SGS 检测,然后由控制器采样(采样频率为 1 kHz)。

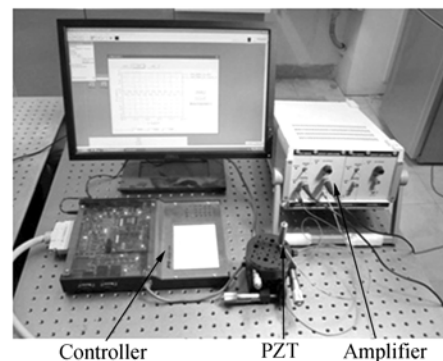
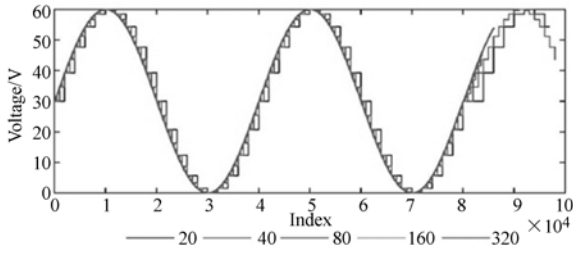


图 1 实验平台

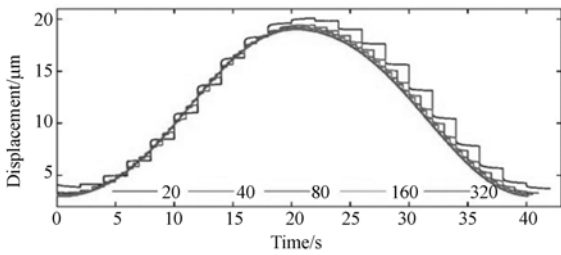
Fig. 1 Experiment setup

2.1 离散化对蠕变的影响

把施加到压电陶瓷驱动器上的正弦控制电压通过 5 种不同的方式进行离散化,如图 2(a)所示,分别把同一频率的正弦电压离散成具有 20, 40, 80, 160 和 320 个台阶的电压信号,则它们拥有 20 个相同的台阶电压。



(a) 输入离散化电压
(a) Discretized voltage



(b) 输出位移
(b) Corresponding displacement

图 2 去除初始影响的不同离散化电压和对应位移

Fig. 2 Different discretization voltages and displacements without the initial curves

在去除掉初始曲线后,每个完整周期由第 30 001 个点到 70 000 个点,即共有 40 000 个采样点组成。由于采样频率是 1 kHz,因此可以计算出正弦电压的周期是 40 s,得到的对应形变曲线如图 2(b)所示。把每个台阶对应的形变减去该台阶在 1 ms 时刻的形变值,获得的蠕变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,蠕变在电压的上升段和下降段都有相同的趋势,都是先上升后再下降。

蠕变和输入台阶电压之间的迟滞关系如图 4 所示。在同一电压信号作用下,蠕变值会随着台阶数量的增加而减小,并且随着台阶数的增加蠕变的分布趋向于 0 对称。实际上蠕变不仅受到输入台阶电压大小的影响,同时还与台阶电压变化的大小有关,如图 5 所示。蠕变与输入台阶电压差值的关系也是迟滞的。蠕变的绝对最大形变发

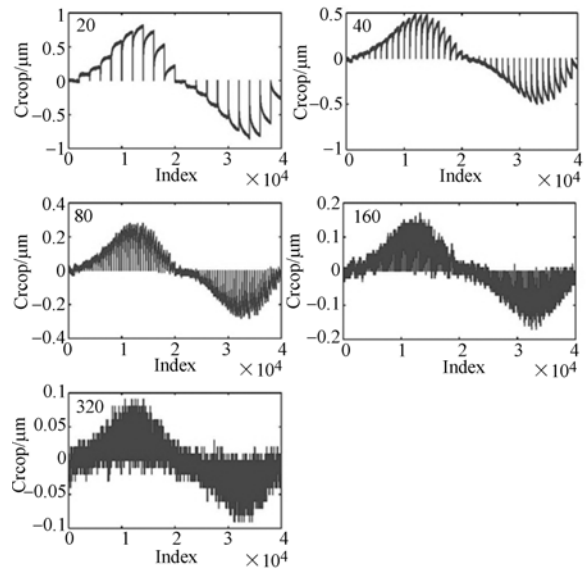


图 3 1 ms 起始时不同离散化电压对应的蠕变

Fig. 3 Creeps corresponding to different stair voltages at the initial time of 1 ms

生在输入台阶电压差值最大的附近。降低输入台阶电压差值可以降低蠕变的影响,增加台阶数目等价于减小台阶电压差值。一个周期内更多的台阶数量意味着更小的控制间隔和更高的控制开关频率,这会使硬件投资急剧增加而使实现困难。所以找到蠕变起始时间,消除或降低蠕变的影响是十分必要。

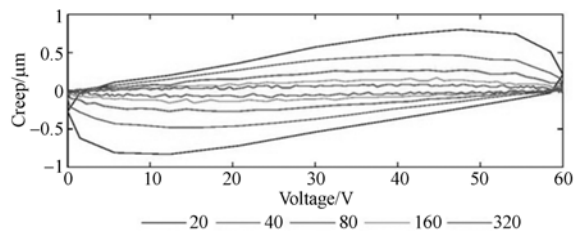


图 4 电压和蠕变的迟滞关系

Fig. 4 Hysteretic relation between creep and input voltage

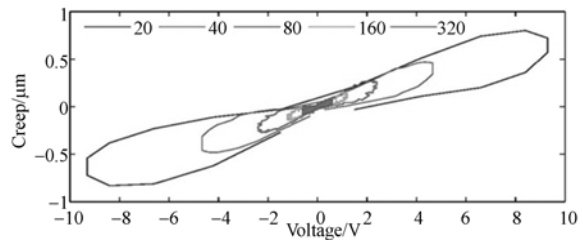
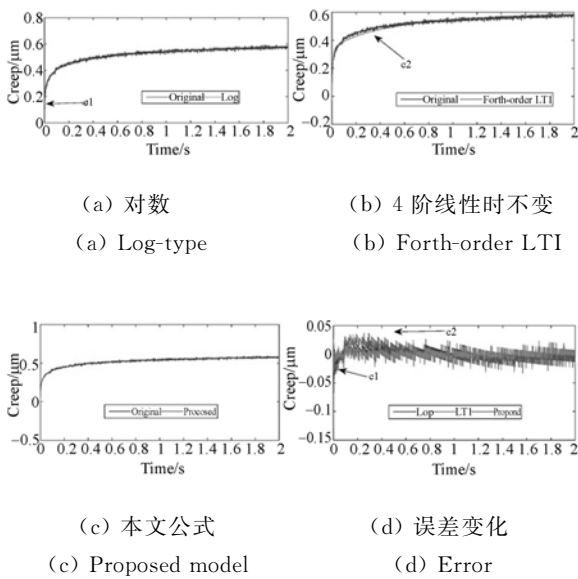


图 5 台阶压差和蠕变的迟滞关系

Fig. 5 Hysteretic relation between creep and the difference of input voltage

2.2 蠕变的起始时间

因瞬态迟滞过程难以被采样,需要从能够被采样的相对慢速蠕变过程来推导。对压电陶瓷执行器的蠕变进行现象建模,现有的模型有对数模型^[1, 2, 10, 17, 18, 20],幂指数模型^[21, 23],LTI 模型^[24],与迟滞耦合的蠕变算子^[11, 13]等。因不同离散化下蠕变的改变,直接会使迟滞值发生变化,所以不考虑蠕变算子模型。不过,用现有蠕变模型来仿真台阶蠕变会出现达不到零点或者是具有较大的误差的问题,如图 6 所示。



(a) 对数 (a) Log-type
(b) 4 阶线性时不变 (b) Forth-order LTI
(c) 本文公式 (c) Proposed model
(d) 误差变化 (d) Error

图 6 蠕变曲线拟合
Fig. 6 Curve fit of creep

造成这种情况的主要原因是由于越靠近零点形变越剧烈。对研究蠕变起始时间来说,提出的仿真模型必须符合以下准则:①具有较小的仿真误差;②必须恰好抵达零点。因此建立了下面的模型来对实验数据来进行仿真:

$$\begin{cases} L_{creep} = L_{log} + L_{LTI} + L_{pow} \\ L_{log} = L_0 \times \left[1 + \gamma \times \log \left(\frac{t}{0.001} \right) \right] \\ L_{LTI} = a \times [1 - \exp(-b \times t)] \\ L_{pow} = c \times t^d \\ t \in (0.001, T_C) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: L_{creep} 是从零开始的蠕变, L_{log} 是符合对数特征的、变化缓慢的蠕变, L_{LTI} 是符合线性时不变特征的蠕变, L_{pow} 是符合幂指数特征的蠕变。 L_0, γ, a, b, c 使用最小二乘方法辨识出来;实验发现,使

用最小二乘辨识参数时不可能保证同时满足所述两个准则,而人工调节参数 d 完全能够满足两准则; t 的单位是 ms, T_C 是控制间隔。如图 6(d),所使用数学模型在零点及整段曲线内都有较小的误差,完全能满足所提准则。当所有参数辨识确定以后,每个台阶曲线可以用下面的公式来进行仿真:

$$H = L_{creep} + L_{0.001}, \quad (2)$$

其中: H 为压电执行器的形变值, L_{creep} 为从零开始的台阶蠕变值, $L_{0.001}$ 为执行器在 1 ms 的形变值。为了便于控制,往往假定在同一个电压信号作用下迟滞能保持一个定值。因此在同一个电压信号作用下,不同离散化时压电陶瓷驱动器应具有固定的迟滞。图 7 用来研究蠕变的起始时间。

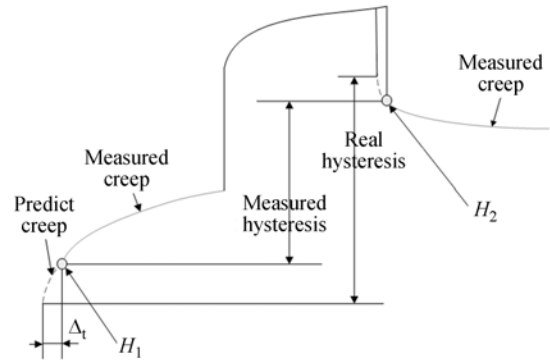


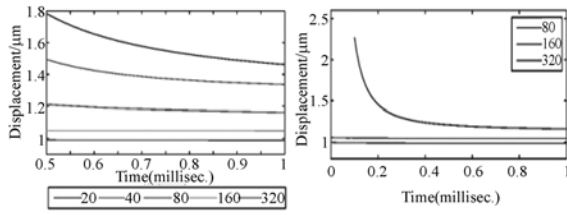
图 7 计算示意图
Fig. 7 Diagrammatic sketch

真实的迟滞通过下面获得:

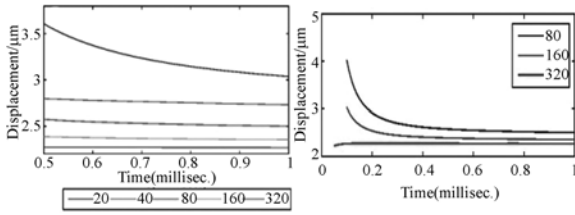
$$\begin{aligned} L_{hys} &= [H_2 + L_{creep2}(\Delta t)] - [H_1 + L_{creep1}(\Delta t)] \\ \Delta t &\in (\epsilon, T_C) \\ \epsilon &\rightarrow 0 \end{aligned}, \quad (3)$$

其中: L_{hys} 为每一台阶电压对应的真实迟滞, H_1, H_2 分别是上升段和下降段在台阶电压输入后 1 ms 时刻的位移值, L_{creep1}, L_{creep2} 分别代表上升段和下降段的蠕变变形值。为了避免由于输入电压换向带来的复位作用,在输入信号顶部或底部的台阶不予考虑。当 L_{hys} 等于定值时,使用 MATLAB 自带 FIT 函数对不同离散化台阶按式(3)进行直接求解发现,所得的 Δt 超过了台阶保持时间或得到了复数解,这表明迟滞在不同离散化条件下不再保持固定值。当 L_{hys} 不等于定值时,形变预测

曲线如图 8 所示。



(a) 12.3 V/0.5 ms 预测曲线 (b) 12.3 V/0.1 ms 预测曲线
 (a) Predicted curves at 12.3 V/0.5 ms (b) Predicted curves at 12.3 V/0.1 ms



(c) 30 V/0.5 ms 预测曲线 (d) 30 V/0.1 ms 预测曲线
 (c) Predicted curves at 30 V/0.5 ms (d) Predicted curves at 30 V/0.1 ms

图 8 在不同台阶电压及时间范围内预测的形变

Fig. 8 Predicted displacements under different stair voltages and different time scales

3 结 果

3.1 不同电压离散化对蠕变的影响

当施加电压是上升段的 47.7 V 或下降段的 12.3 V 时在对应的台阶上产生的蠕变最大,表 1 是其对应的最大蠕变值。相比于 20 个台阶,320 个台阶对应的的蠕变最大相对增长量在上升段和下降段分别下降了 899.5% 和 936.9%,表明随着控制电压离散程度的增加或的台阶数的增多,会显著地降低台阶蠕变的影响。

表 1 最大蠕变变化情况
 Tab. 1 Maximum creep (μm)

台阶数	上升段 47.7 V	下降段 12.3 V
	最大蠕变	最大蠕变
20	0.801 6	-0.831 6
40	0.460 9	-0.480 9
80	0.270 5	-0.270 5
160	0.140 3	-0.160 3
320	0.080 2	-0.080 2

另外一个现象是蠕变的生长并不像输入的台阶电压那样有正弦式的增长规律。0~47.7 V 蠕变是正向增长的,并且最大值逐渐增加;从 47.7~60 V 蠕变虽然还是正向增加,但最大值是逐渐减小的;与此类似,从 60~12.3 V 蠕变是负向增长的,且最大绝对值逐渐增加;从 12.3~0 V 蠕变虽然还是负向增加,但最大绝对值是逐渐减小的。台阶电压差和对应蠕变之间的关系也是迟滞非线性。台阶数分别为 20,40,80,160 和 320 时,47.7 V 对应的压差为分别是 8.4,4.05,2.1,1.05 和 0.6 V,对应的蠕变分别是 0.801 6,0.460 9,0.270 5,0.140 3 和 0.080 2 μm ;下降段的压差分别为 -6.6,-3.45,-1.8,-0.9 和 -0.45 V,对应的蠕变为 -0.230 4,-0.140 3,-0.090 2,-0.03 和 -0.01 μm 。因此,对应 47.7 V 时台阶数是 20 的电压形成的蠕变范围是台阶数 40 的电压形成蠕变的 1.72 倍,80 个台阶的 2.86 倍,160 个台阶的 6.06 倍和 320 个台阶的 11.44 倍。

3.2 离散化对蠕变起始时间的影响

如果始终把 1 ms 看作是压电执行器蠕变的起始时间,不同离散化时同一个台阶电压对应的迟滞变化很大且不是定值,表明在不同离散化电压输入情况下,迟滞相关的位移值应该在不同时刻被采样。把形变变化在 0.01 μm 内看做是误差带时,对蠕变起始时间进行预测,以台阶电压等于 12.3 V 为例,结果表明,20 个台阶的蠕变起始时间是 0.959 ms,40 个台阶时是 0.911 ms,80 个台阶时是 0.813 ms,160 个台阶时是 0.664 ms,320 个台阶时是 0.016 ms。可见随着离散化的不同,蠕变起始时间是变化的。不同离散化改变了蠕变的起始时间,台阶电压数量越多,蠕变起始时间越早。另外一个现象是,不同离散化条件下预测值初始的间隔是不同的,因此必须加一个固定的补偿值使预测值在不同离散化条件下保持相等。

4 结 论

对于同一个正弦电压,不同离散化对蠕变有不同的影响,增加离散化台阶的数量可以减小蠕变。实验表明,320 个台阶电压在 47.7V 时的蠕变范围比 20 个台阶的蠕变范围下降了 11.44 倍,但离散化台阶越多意味着控制间隔变得越小,这会导致留给复杂控制算法的运行时间越少,会急

剧增加系统的硬件投资。考虑硬件的成本,离散化台阶数量需要被限定到一定范围内。实验结果表明,12.3 V时,320个台阶的蠕变起始时间比20个台阶的蠕变起始时间提前了0.943 ms,也就是说,台阶数量的增加时应提高采样频率以保持

迟滞恒定。利用求得的蠕变起始时间,确定迟滞采样时刻可以保证不同离散化时迟滞是定值。下一步的工作将明确蠕变起始时间和台阶电压及台阶电压压差的数学关系,消除小间隔下蠕变与迟滞的耦合。

参考文献:

- [1] DEVASIA S, ELEFThERIOU E, MOHEIMANI S O R. A survey of control issues in nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007,15(5): 802-823.
- [2] JUNG H, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000,71(4):1896-1900.
- [3] BASEDOW R W, COCKS T D. Piezoelectric ceramic displacement characteristic at low frequencies and their consequences in fabry-perot interferometry [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1980,13:840-844.
- [4] 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)
- [5] 陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制 [J]. *光学精密工程*, 2012,20(1):88-95.
CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, *et al.*. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(1):88-95. (in Chinese)
- [6] 张栋,张承进,魏强,等. 压电工作台的神经网络建模与控制 [J]. *光学精密工程*, 2013,20(3):587-596.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q, *et al.*. Modeling and control of piezo-stage using neural networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,20(3):587-596. (in Chinese)
- [7] PING G, JOUANEH M. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996,4(3):209-216.
- [8] HUES S M, DRAPER C F, LEE K P, *et al.*. Effect of PZT and PMN actuator hysteresis and creep on nanoindentation measurements using force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994,65(5):1561-1565.
- [9] XU Q S, LI Y M. Micro-/nanopositioning using model predictive output integral discrete sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012,59(2):1161-1170.
- [10] ZHAO X L, ZHANG CH J, LIU H B, *et al.*. Analysis of hysteresis-free creep of the stack piezoelectric actuator [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, art. ID 187262:10.
- [11] KUHNEN K, KREJCI P. Compensation of complex hysteresis and creep effects in piezoelectrically actuated systems a new preisach modeling approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009,54(3):537-550.
- [12] GU G Y, ZHU L M. High-speed tracking control of piezoelectric actuators using an ellipse-based hysteresis model [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010,81(8):085104.
- [13] PESOTSKI D, JANOCCHA H, KUHNEN K. Adaptive compensation of hysteretic and creep nonlinearities in solid-state actuators [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010,21(14):1437-1446.
- [14] CHEN M Y, HUANG H H, HUNG S K. A new design of a submicropositioner utilizing electro-magnetic actuators and flexure mechanism [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010,57(1):96-106.
- [15] LI Y M, XU Q S. A novel piezoactuated XY stage with parallel, decoupled, and stacked flexure structure for micro-/nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011,58(8):3601-3615.
- [16] SHIOU F J, CHEN C J, CHIANG C J, *et al.*. Development of a real-time closed-loop micro-/nano-positioning system embedded with a capacitive sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010,21(5):054007.

- [17] RU CH H, SUN L N. Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuator in open-loop operation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005,122:124-130.
- [18] 张旋, 潘鸣. 压电双晶片扫描器的低温迟滞蠕变特性[J]. *光学精密工程*. 2013, 20(5):1064-1068.
ZHANG X, PAN M. Cryogenic hysteresis and creep characteristic of piezoelectric bimorph scanner [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 20(5):1064-1068. (in Chinese)
- [19] SONG D, LI C J. Modeling of piezo actuator's nonlinear and frequency dependent dynamics [J]. *Mechatronics*, 1999,9:391-410.
- [20] JUN H, SHIM J Y, GWEON D. New open-loop actuating method of piezoelectric actuators for removing hysteresis and creep [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(9):3436-3440.
- [21] RICHTER H, MISAWA EA, LUCCA DA, *et al.*. Modeling nonlinear behavior in a piezoelectric actuator [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25: 128-137.
- [22] PÉREZ-ENCISO E, AGRAT N, VIEIRAZ S. Experimental evidence of nonactivated creep in Pb (ZrxTi_{1-x})O₃ ceramics at low temperatures [J]. *Physical Review B*, 1997, 56(6):R2900-2903.
- [23] FETT T, THUN G. Determination of room-temperature tensile creep of PZT [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1998,17:1929-1931.
- [24] CROFT D, SHED G, DEVASIA S. Creep, Hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators; atomic force microscopy application [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999,123: 35-43.

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等方面的研究。E-mail: xueliang-zhao@hotmail.com

导师简介:



张承进(1962—),男,山东莱芜人,博士研究生,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)