

文章编号 1004-924X(2013)06-1503-07

压电陶瓷微位移驱动器建模与控制

刘 泊, 郭建英, 孙永全*

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨, 150080)

摘要:考虑利用白光干涉仪进行表面三维形貌测量时压电陶瓷(PZT)的蠕变效应对微位移驱动器位移精度的影响,提出了一种沿参考镜光轴方向提高该驱动器位移精度的方法。系统研究了该驱动器的位移检测回路、PID 闭环控制以及蠕变补偿控制;利用光电位置传感器和光学杠杆调节位移检测回路,将压电陶瓷驱动器微位移反馈至控制系统,建立 PID 闭环控制。充分考虑了 PZT 蠕变特性对测量过程的影响,建立了“电压蠕变”补偿模型,实现了基于 PID 闭环控制与蠕变补偿控制相结合的复合控制方法。利用 XL-80 激光干涉仪测量压电陶瓷驱动器在 PID 闭环控制和复合控制二种情况下的微位移,实验结果显示前者位移误差为 $0.007 \mu\text{m}$,后者位移误差为 $0.005 \mu\text{m}$ 。结果表明该方法可有效克服压电陶瓷迟滞非线性和蠕变对测量结果的影响,满足表面三维形貌测量的高精度要求。

关键词:压电陶瓷;位移驱动器;PID 闭环控制;电压蠕变补偿

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1503

Modeling and control for PZT micro-displacement Actuator

LIU Bo, GUO Jian-ying, SUN Yong-quan*

(College of Measurement Control Technology and Communication Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: sunyongquan@sina.com

Abstract: When a white light interferometer is applied to 3D surface microcosmic topographic measurement, the measuring accuracy is effected by the hysteresis and creeping phenomenon generated by the piezoelectric actuator seriously. Therefore, this paper proposes a method to improve the displacement accuracy of the reference mirror along the optical axis direction. The piezoelectric actuator is given, and its displacement detecting circuit, PID closed loop control algorithms, and creep compensation control are studied. First, displacement detecting circuit is established by a position sensitive device and an optical lever, by which the piezoelectric ceramic micro-displacement can be fed back to control the system, then the PID closed-loop control algorithm is established. Furthermore, the creeping characteristics of piezoelectric ceramic is discussed during the measurement. In order to eliminate the creeping phenomenon and improve measurement accuracy, the “voltage creep” compensation model is proposed. Finally, an integer control system based on PID closed-loop control and creep compensation control is established. The micro-displacement of the piezoelectric actuator is measured by a high-precision XL-80 laser interferometer under the two cases of PID closed-loop control and integer control.

收稿日期:2013-01-29;修订日期:2013-03-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA042407)

Experimental results indicate that the displacement error for the former is $0.007 \mu\text{m}$, and that for the latter is $0.005 \mu\text{m}$, respectively. This method reduces the influence of hysteresis and creeping on measurement results, and meets the requirements of three-dimensional shape measurement for high accuracy.

Key words: piezoelectric ceramics; displacement actuator; PID control; voltage creep compensation

1 引言

微位移驱动器能够提供纳米级的位移输出,在光学工程、微电子工程、航空航天、生物工程、精密机械制造等领域有广泛的需求和应用^[1]。压电陶瓷(PZT)具有分辨率高、体积小、输出力大、频响高、不发热和响应速度快等优点,是微位移驱动器的首选驱动元件,在精密制造、精密测量中发挥着关键作用^[2]。但 PZT 的迟滞、蠕变等非线性特性,使得测量精度降低,瞬态响应速度变慢,严重影响微位移工作台定位精度的提高^[3]。

利用前馈非线性迟滞模型的开环控制方法,从数学角度逼近压电陶瓷的迟滞特性曲线,是改善压电陶瓷迟滞非线性的有效途径之一,其关键是建立压电陶瓷的电压-位移数学模型。经典的 Preisach 模型将具有局部记忆性的滞回发生器叠加,构造具有全局记忆性的滞回发生器,描述 PZT 驱动器滞回曲线具有多极点的复杂过程^[4]。P. Ge 在经典 Preisach 模型的基础上,建立了广义 Preisach 模型^[5]。贾宏光等提出了一种变比数学模型,它能够较准确地描述压电叠堆静态内、外环非线性曲线的关系^[6]。Goldforb 等将驱动器中预紧弹簧和输出位移滑块等高速运动部件的动力学特性进行了合理、有效的集成,基于 Maxwell 建模机理准确描述压电叠堆非线性滞回特性^[7]。Banning R 进一步提出了改进模型,并导出相应的数学微分方程^[8]。模型复杂、解析困难和运算量大成为开环控制的主要缺陷,限制了其在综合控制中的应用^[9]。基于位移反馈的闭环控制方法可避免建立复杂的前馈模型,是提高压电陶瓷定位精度的又一重要途径。朱猛采用显微动态散斑相关法研究了压电陶瓷的压电位移特性,并对其线性区间进行标定,简化了测量光路,提高了测量效率^[10]。但是基于位移反馈的闭环控制方法需借助精密测量仪器检测压电陶瓷微位移,容易受

到外部干扰,引起系统不稳定,迫切需要提高微定位系统的稳定性和定位精度^[11]。为了从根本上减小迟滞效应对控制精度的影响,在探明 PZT 内在机理和动力学特性的基础上, Koops 采用硬 PZT 作为驱动元件,虽然降低了非线性,但使蠕变增大^[12]。Newcomb 等人使用电荷控制法,改善了压电陶瓷的迟滞特性,但仍存在蠕变增大、行程变小、响应速度变慢等问题^[13]。压电陶瓷蠕变特性成为影响定位精度的另一关键因素,其大小随材料特性而变化,有些材料达到 20% 以上^[14]。范伟对压电陶瓷微动工作台蠕变特性开展试验研究,获取其蠕变特性曲线,找到了压电陶瓷驱动器蠕变的规律,为进一步修正和减少蠕变误差、提高定位精度,提供了科学依据^[15]。肖祥丽在利用原子力显微镜(AFM)扫描图像过程中,对扫描器中的压电陶瓷采用分步补偿的方式补偿其蠕变影响,减轻了扫描图像的失真^[16]。采用移相干涉仪(PSD)、扫描探针显微镜(SPM)、原子力显微镜(AFM)等方法进行三维表面测量,要求被测工件定位精确且稳定^[17],消除或削减压电陶瓷蠕变影响成为提高测量精度的关键一环。

本文选用了 WTYD0808030 PZT 微位移驱动器,建立了一种位移反馈闭环控制和逆补偿控制相结合的控制方法,提高了定位精度。该方法利用光学杠杆和光电位移传感器(PSD)实现微位移检测,并构建了微位移闭环反馈控制。在探明 PZT 的蠕变规律的基础上,建立蠕变补偿模型,消除了 PZT 蠕变效应对微位移测量精度的影响。

2 测量系统及微位移驱动器

利用白光干涉技术进行表面三维形貌测量时,从参考镜和被测工件表面反射回的光束在空间相互叠加产生干涉条纹。利用 CCD 摄像机接收干涉条纹图像,送至计算机进行数据处理,即获取被测工件表面三维形貌,如图 1 所示。PZT 驱

动器带动参考镜沿光轴方向作微纳尺度线性移动,其位移定位精度是保证和提高测量精度的关键因素之一。然而,迟滞、非线性以及蠕变等PZT固有特性,却严重影响其位移精度。

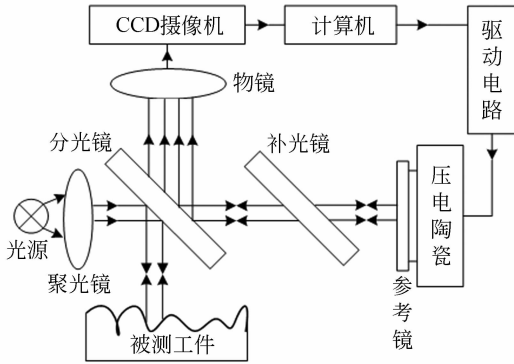


图1 测量原理

Fig. 1 Measurement theory

2.1 微驱动器系统结构

驱动器系统结构包括控制系统、驱动电源、PZT驱动器和位移检测装置,系统结构如图2所示。

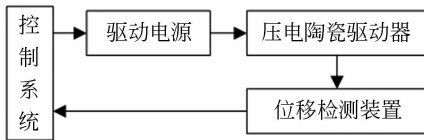


图2 驱动器系统结构

Fig. 2 Configuration of driver system

控制系统通过驱动电源给PZT驱动器提供高分辨率模拟电压,驱动PZT使参考镜作精细定位运动。位移检测装置拾取PZT实际位移信息,并反馈至控制系统。控制系统将实际位移同预设的目标位移作比较,依据比较结果调整驱动电压,最终使二个位移量达到同步一致。

2.2 微位移检测装置

准确检测PZT位移量是构建PID闭环控制系统的基础,而PZT位移只有纳米级,检测困难。本文将稳定光源固定于PZT上,把PZT驱动器的位移转化为光信号输出,由位敏探测器(PSD)接收后再转化为等价的电信号送至控制系统。微位移检测装置结构如图3所示。考虑到PZT运动步长应与PSD位置分辨力相匹配,利用光学杠杆将PZT微位移放大,使PSD可识别PZT位移变化。

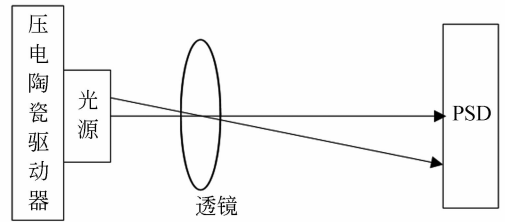


图3 位移检测装置

Fig. 3 Configuration of displacement measurement equipment

x 为光入射点距 PSD 中点的距离:

$$x = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \times L, \quad (1)$$

其中: I_1 和 I_2 为两极输出电流, L 为 PSD 的长度。

选取恰当电阻 R , 光点的位移量可以通过测量电压的方法获得:

$$x = \frac{(I_2 - I_1)R}{(I_2 + I_1)R} L = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} L, \quad (2)$$

其中: V_1 和 V_2 分别为 PSD 两极输出电流经电路转换后的输出电压。

则 PZT 的实际位移量 x' 为:

$$x' = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \frac{L}{\beta}, \quad (3)$$

其中: β 为光学系统的放大倍数。

3 微位移驱动器控制策略

3.1 PID 闭环控制策略

PID 控制表示比例(Proportional)、积分(Integral)、微分(Differential)控制,具有较好的鲁棒性,在精细定位控制系统中被广泛采用。PID 闭环控制结构如图4所示。 X_{in} 是要求的位移, X_{out} 是压电驱动器的实际输出位移。 u_1 是 PID 算法将 X_{in} 与输出值 X_{out} 的差值进行比例、积分和微分运算后得到的控制电压。将控制电压 u_1 送至 D/A, 经 D/A 转换后产生一个低电压信号,控制驱动电源发出激励信号,使 PZT 产生伸缩变形。经由 A/D 和 PSD 读取 PZT 实际微位移与设定值作比较,并进行下一次 PID 控制,直至满足精度要求,实现 PZT 驱动参考镜精细定位。

控制电压 u_1 为:

$$u_1(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)], \quad (4)$$

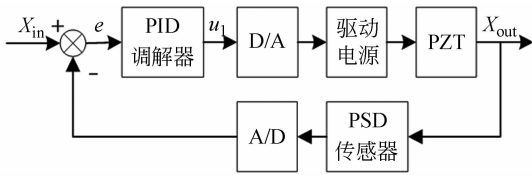


图 4 PID 闭环控制结构

Fig. 4 Configuration of PID controller system

其中： $e(k)$ 为第 k 次采样时的偏差， $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。

对应的增量式 PID 调节器输出表达式为：

$$\Delta u_1(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]. \quad (5)$$

采用增量式 PID 控制算法，可以有效改善积分饱和，减小系统超调，缩短过渡过程实际，系统的总体动态性能得到了很大改善。

3.2 电压蠕变模型

蠕变作为 PZT 的固有特性，其对 PZT 定位精度的影响不能忽略。对 PZT 驱动器加以阶跃输入电压，在其机械谐振所决定的时间尺度范围内产生瞬时阶跃响应，通常为几毫秒，然后是缓慢的蠕变响应过程。通常认为 PZT 的蠕变过程具有对数形式：

$$L(t) = L_0[1 + \gamma \log_{10}(\frac{t}{t_0})], \quad (6)$$

其中： $L(t)$ 为给定输入电压时 PZT 总位移， L_0 为给定输入电压 t_0 时间后 PZT 位移， γ 为 PZT 蠕变系数， t_0 为瞬时阶跃响应时间，通常取 $t_0 = 0.1$ s， t 为蠕变时间， t_0 为 t 的计时零点。

当施加输入电压 $t_0 = 0.1$ s 后，PZT 进入蠕变过程。蠕变率 γ 因输入电压不同而不同，甚至还与电压历程有关^[18]。

根据电能与机械能的逆变关系，可以认为恒定的输入电压导致 PZT 产生一定的位移蠕变，而恒定的应变也可以导致 PZT 电压蠕变^[19]。据此，电压蠕变可以按照位移蠕变规律分析，电压蠕变模型为：

$$V(t) = V_0[1 + \gamma_v \log_{10}(\frac{t}{t_0})], \quad (7)$$

其中： $V(t)$ 为 t 时刻的输入电压， V_0 为恒定应变 L_0 对应的输入电压， γ_v 为电压蠕变系数。

V_0 、 γ_v 和 t_0 依赖于 PZT 材料、实验条件、驱动电压的大小和速率等因素。由于压电材料不同、PZT 老化和实验条件不同，导致 PZT 蠕变公

式中的 3 个模型参数不容易精确地确定，可通过最小二乘法获得。

3.3 复合控制策略

在 PID 闭环控制的基础上，利用蠕变模型进行前馈控制，实现 PID 闭环控制与蠕变补偿控制相结合的复合控制，可进一步减小蠕变对参考镜精细定位的影响，如图 5 所示。

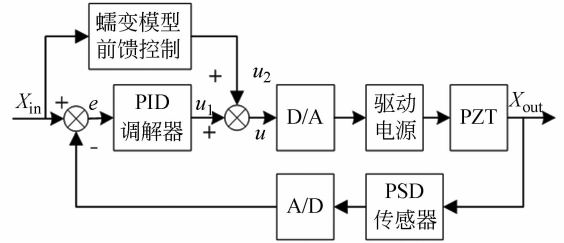


图 5 复合控制系统结构

Fig. 5 Configuration of integer control system

根据输出位移的要求，利用电压蠕变模型前馈控制得到控制电压 u_2 ， u_2 与 u_1 相加得到最终的控制电压 u ，控制电压 u 控制驱动电源发出激励信号，使 PZT 产生伸缩变形。

4 实验结果分析

PZT 微位移驱动器的驱动电源为 0~80 V 自制可调式直流稳压电源，步进值在 0.1~1.0 V 可调。微位移测量采用英国雷尼绍公司的 XL-80

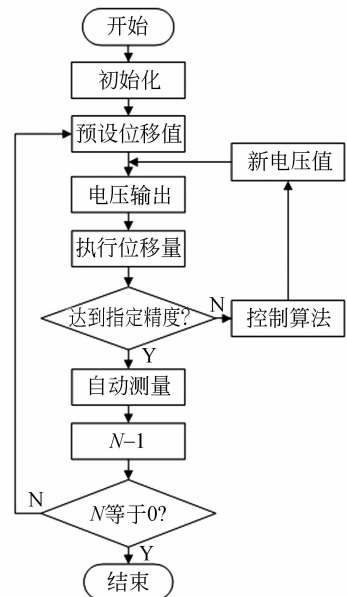


图 6 自动测量流程

Fig. 6 Auto measurement procedure

激光干涉仪,线性测量位移分辨率为 $0.001 \mu\text{m}$ 。

以 40 V 为起始电压,预设位移步长为 $\lambda/8 = 536 \text{ nm}/8 = 67 \text{ nm}$,位移检测装置放大倍数设为 10 倍。利用激光干涉仪多次测量 PZT 微位移,取平均值。自动测量流程如图 6 所示,PID 闭环控制与复合控制策略下的测量结果如表 1 所示,微位移特性曲线如图 7 所示。

表 1 两种控制策略下 PZT 位移

Tab.1 PZT displacement under two control strategies

序 号	预置位移 / μm	PID 闭环控制		复合控制	
		位移变化 / μm	实际电压 /V	位移变化 / μm	实际电压 /V
1	0.000	0.000	40.006	0.000	40.004
2	0.069	0.074	40.589	0.073	40.579
3	0.138	0.145	41.102	0.132	41.057
4	0.207	0.211	41.698	0.215	41.658
5	0.276	0.279	42.201	0.278	42.151
6	0.345	0.351	42.712	0.349	42.702
7	0.414	0.418	43.229	0.415	43.219
8	0.483	0.485	43.779	0.481	43.749
9	0.552	0.554	44.345	0.559	44.305
10	0.621	0.620	44.830	0.625	44.822
11	0.690	0.693	45.254	0.692	45.294

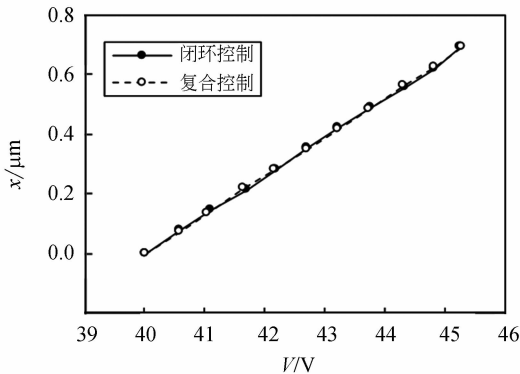


图 7 两种控制策略下微位移特性曲线

Fig. 7 Micro-displacement characteristic curves under two control strategies

由图 7 可知,两种控制方法都有较好的定位

精度,但复合控制下,PZT 微位移特性曲线线性度优于仅采取 PID 闭环控制策略的情况。PZT 微位移误差如表 2 所示,基于复合控制的位移误差为 $0.005 \mu\text{m}$,基于闭环控制方法的位移误差为 $0.007 \mu\text{m}$,且前者离散度较小,重复定位精度较高。

表 2 PZT 微位移误差

Tab.2 Error of micrometric displacement of PZT

序号	误差 / μm	
	复合控制	PID 闭环控制
1	0.000	0.000
2	0.003	0.005
3	0.005	0.007
4	0.002	0.004
5	0.004	0.003
6	0.001	0.006
7	0.001	0.004
8	0.004	0.002
9	0.004	0.002
10	0.004	0.001
11	0.002	0.003

由图 6 及表 2 可以发现,对 PZT 进行电压蠕变补偿改进了其微位移特性曲线的线性度,可提高三维表面测量过程中 PZT 的定位精度。

5 结 论

提出 PID 闭环控制与电压蠕变补偿控制相结合的 PZT 微位移复合控制方法,位移误差为 $0.005 \mu\text{m}$,实现了提高微位移工作台定位精度的目的。根据电能和机械能转换关系,建立了“电压蠕变”模型,用于微位移驱动器前馈控制,削减 PZT 蠕变对位移精度的影响。利用 PSD 和光学杠杆构造位移检测装置,结构紧凑、简单。但需要克服 PSD 测量精度受背景光、暗电流和光源等因素的影响。本研究成果不仅可用于 PZT,还可用于改善铁磁等其它智能材料的迟滞非线性与蠕变特性。

参考文献:

[1] 孙立宁,荣伟彬,曲东升,等. 基于微操作的大行

程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. 光学精密工程,2001, 9(6):514-519.

SUN L N, RONG W B, QIU D SH, *et al.*. Research on a large travel and high resolution rotary

- micro2driver based on micro-manipulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6):514-519. (in Chinese)
- [2] 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 Z 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.
- [3] 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*, 2012, 20(3):577-586.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):577-586. (in Chinese)
- [4] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Model of Hysteresis* [M]. New York: Springer, 1991.
- [5] GE P, JOUANEH M. Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators [J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(2):99-111.
- [6] 贾宏光. 基于变比模型的压电驱动微位移工作台控制方法研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
JIA H G. *Study on Feed Forward Control Method to Micro Positioning System Driven by PZT Basing on Non-equi-ration Model* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- [7] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation [J]. *IEEE*, 1997, 17(3):69-79.
- [8] BANNING R, KONIN G W L, ADRIAENS H J, *et al.*. State space analysis and identification for a class of hysteretic systems [J]. *Automatica*, 2001, 37(12):1883-1892.
- [9] 宾洋, 杨东超, 陈娜娜, 等. 新型压电驱动机电耦合动力学系统分析与建模[J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(2):179-185.
BIN Y, YANG D CH, CHEN N N, *et al.*. Analysis and modeling of a novel piezo-actuated electro-mechanical coupling dynamic system [J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(2):179-185. (in Chinese)
- [10] 朱猛, 黄战华, 王小军, 等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):844-849.
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, *et al.*. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):844-849. (in Chinese)
- [11] 张波, 王纪武, 陈恳, 等. 压电驱动晶体的特性研究 [J]. *中国机械工程*, 2002, 13(5):446-450.
ZHANG B, WANG J W, CHEN K, *et al.*. Study on the hysteresis property of piezoelectric actuator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(5):446-450.
- [12] KOOPS R, SAWATZKY G A. New scanning device for scanning tunneling microscope applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(8):4008-4009.
- [13] NEWCOMB CV, FLINN I. Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Electronics Letters*, 1982, 18(11):442-444.
- [14] RIFAIO M E, AUMOND B D, TOMI K Y. Imaging at the nano-scale [C]. *Proceedings 2003 IEEE/ A SME International Conference, Monterey, California*, 2003: 715-722.
- [15] 范伟, 余晓芬. 压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(11):1383-1387.
FAN W, YU X F. Study on PZT actuator creep characteristics [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(11):1383-1387.
- [16] 肖祥丽, 张承进. 一种原子力显微镜中蠕变迟滞非线性特性补偿方案 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(9):4-8.
XIAO X L, ZHANG CH J. A compensating scheme for hysteresis and creep in atomic force microscope scanner [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 2008, 36(9):4-8.
- [17] CROFT D, SHED G, DEVASIA S. Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactua-

tors; atomic force microscopy application [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, 123:35-43, March.

- [18] HEWON J, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(4):1896-2000.

- [19] HEWON J, JONG Y S, GWEON D G. New open-loop actuating method of piezoelectric actuators for removing hysteresis and creep [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(9):3436-3451.

作者简介:



刘泊(1961—),男,黑龙江巴彦人,教授,硕士生导师。1982年于天津大学获得学士学位,1989年获哈尔滨理工大学硕士学位。主要从事光电检测技术、三维表面形貌测量方面的研究。E-mail: Lb0303@263.net



孙永全(1982—),男,山东沂南人,博士,讲师。2005年于山东理工大学获得学士学位,2008年、2011年于哈尔滨理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事可靠性理论及应用、测试计量等方面的研究。E-mail: sunyongquan@sina.com.



郭建英(1943—),男,河北唐山人,教授,博士生导师。主要从事可靠性理论及应用,传感技术等方面的研究。E-mail: guojy@hrbust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)