

文章编号 1004-924X(2009)09-2212-06

# 压电陶瓷管的微位移测量与非线性校正

董维杰<sup>1</sup>, 宋志杨<sup>1</sup>, 崔 岩<sup>2</sup>

- (1. 大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为了对原子力显微镜(AFM)中压电陶瓷管扫描位移进行非线性校正, 提出了一种微位移测量与校正的简易方法。采用涡流位移传感器测量微位移, 将其放大 100 倍以提高检测灵敏度; 得到了压电陶瓷管的位移-电压曲线, 其最高位移分辨率计算值为 0.4 nm。根据 AFM 中压电陶瓷管的工作特点, 确定扫描范围下测量得到的位移-电压关系, 通过对等间隔像素点施加对应的非等间隔控制电压序列的方法进行非线性校正, 依据像素点精度要求通过插值算法获得控制电压序列。系统采用 LabVIEW 虚拟仪器技术, 校正后压电陶瓷管最大位移滞回偏差从 10.1% 降为 0.4%。实验表明: 扫描频率和扫描像素分辨率调节方便, 同时校正算法复杂度也有所降低。

**关键词:** 压电陶瓷管; 涡流位移传感器; 位移测量; 非线性校正; 虚拟仪器

**中图分类号:** TN384; TB92 **文献标识码:** A

## Measurement and nonlinear correction for micro-displacement of piezoceramic tube

DONG Wei-jie<sup>1</sup>, SONG Zhi-yang<sup>1</sup>, CUI Yan<sup>2</sup>

- (1. *School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
2. *Key Laboratory for Micro/ Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116023, China*)

**Abstract:** A simple way to measure and correct the micro-displacement of a piezoceramic tube used in an Atom Force Microscope(AFM) is proposed. The X/Y micro-displacement is detected by an eddy current meter and it is amplified by 100 times to improve the detection sensitivity. The relationships between the displacements of piezoceramic tube and the control voltages are obtained, and the highest resolution of displacement is calculated to be 0.4 nm. According to the working feature of the tube, the nonlinear correction is realized by applying non-equidistant control voltage sequences to scanning equidistant pixel, in which non-equidistant control voltage sequences with different pixel resolutions are obtained through interpolation based on the measured displacement-voltage relationship. The experimental results show that the maximum hysteresis error of full scale is reduced from 10.1% to 0.4%. It is concluded that the proposed method can adjust the scan frequency and pixel resolution easily, and can reduce the complexity of correction algorithm greatly.

**Key words:** piezoceramic tube; eddy current meter; displacement measurement; nonlinear correction; virtual instrument

收稿日期: 2008-07-28; 修订日期: 2008-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 90607002)

# 1 引 言

压电陶瓷管作为多轴微位移驱动器,能够精确控制多个方向的微小位移,是原子力显微镜(AFM)中不可缺少的扫描器件,在 AFM 中完成对样品 X、Y 方向的扫描和 Z 方向的反馈,实现对样品表面形貌成像。压电陶瓷管执行器在纳米定位应用中具有结构简单、尺寸小、分辨率高、重复性好、响应速度快和易于控制等优点<sup>[1]</sup>。随着纳米科技的发展,其与原子力显微镜一起,在表面科学、材料科学、生命科学等各个领域发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。

圆管形压电陶瓷管作为 AFM 扫描驱动器与早期的扫描隧道显微镜(STM)中的条形压电陶瓷扫描驱动器相比,具有结构更加紧凑、共振频率更高<sup>[3]</sup>等优点,但是压电陶瓷管的位移迟滞<sup>[4]</sup>非线性和蠕变效应极大地影响了 AFM 的扫描定位精度<sup>[5]</sup>,所以精确控制压电陶瓷管 X、Y 方向的扫描位移量是扫描探针显微镜需要解决的核心问题之一<sup>[6]</sup>。目前已提出多种非线性校正方法,例如基于多项式拟合建模校正法<sup>[7-8]</sup>、统计物理分析法<sup>[9]</sup>、反函数校正法<sup>[10]</sup>、微机械建模校正法<sup>[11]</sup>和基于 Preisach 模型的逆控制算法<sup>[12]</sup>等。这些非线性校正方法大部分是通用的,都可应用于 AFM 系统,但是算法稍显复杂。本文建立了基于涡流位移传感器的压电陶瓷管 X/Y 方向测微系统,在深入分析 AFM 扫描工作特点的基础上,采用升、回程扫描分别施加与等间隔位移相对应的非等间隔电压序列的方法实现了简易非线性校正。

# 2 压电陶瓷管微位移测量

压电陶瓷管的基本结构如图 1 所示,其为一个中空的圆柱,内表面涂导电涂层作为 Z 电极,

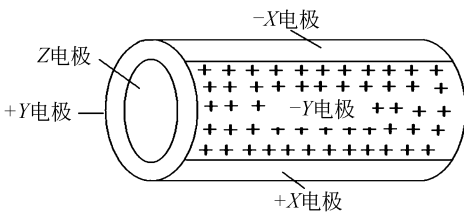


图 1 压电陶瓷管基本结构

Fig. 1 Basic structure of piezoceramic tube

而外表面为 4 个面积相等、但彼此绝缘的导电层<sup>[13]</sup>,分别为 ±X 电极、±Y 电极。基于逆压电效应,当把极性相反的两个电压分别加到两个相对的 X 电极或者 Y 电极上时,陶瓷管一边伸长一边收缩,从而使其垂直轴向一侧弯曲,实现了 X-Y 平面扫描。

## 2.1 测量系统

目前对压电陶瓷管微位移测量多采用价格昂贵的激光干涉仪<sup>[6]</sup>,也可采用非接触式电感测微仪<sup>[14]</sup>,本文采用涡流位移传感器。涡流位移传感器的测量结果直观、线性度好,其非接触测量方式优于电感测微仪,但是灵敏度不高。系统由硬件电路部分和软件部分组成,如图 2 所示。

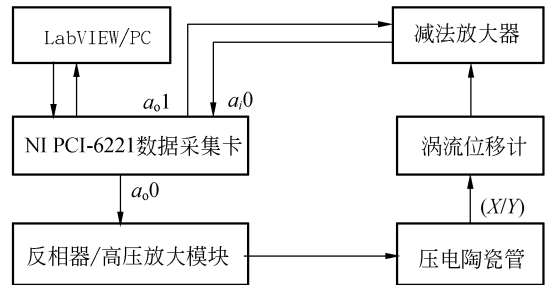


图 2 压电陶瓷管 X/Y 方向位移测量系统

Fig. 2 Measuring system for micro-displacement of piezoceramic tube

软件部分基于美国 NI 公司的 LabVIEW 可视化虚拟仪器,可通过编程产生压电陶瓷管的控制电压,并管理微位移信号检测。硬件部分包括 PCI-6221 数据采集卡、反相器/高压放大模块、涡流位移计和减法放大器。

NI PCI-6221 数据采集卡的 A/D 和 D/A 均 16 位,D/A 的  $a_{00}$  通道用于输出  $-10 \sim +10$  V 的分阶控制电压;反相器/高压放大模块以 3584JM 高压运算放大器为核心,将控制电压放大 10 倍或者先反相再放大 10 倍,形成一对绝对值相等  $-100 \sim +100$  V 的驱动电压,施加到压电陶瓷管 ±X 电极或者 ±Y 电极;涡流位移计测量微位移;数据采集卡上 A/D 的  $a_{i0}$  通道负责采集微位移。涡流位移计灵敏度为  $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$ ,由于要将其用于压电陶瓷管的微位移测量,需要提高系统的位移分辨率,因此设计了减法放大器作为涡流位移计的后续处理电路,其原理图如图 3

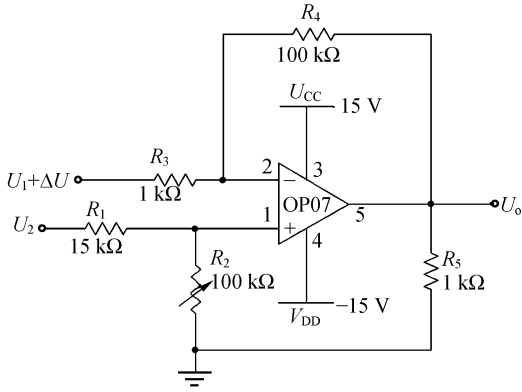


图 3 减法放大器电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of subtraction-amplifier

所示。

减法放大器的核心器件是模拟运算放大器 OP07,  $U_1 + \Delta U$  为输入电压,  $U_2$  为调整电压。当  $\Delta U = 0$  时, 通过调节  $U_2$  或电阻  $R_2$  使  $U_0 = 0$ , 因此输出电压  $U_0$  为:

$$U_0 = -100\Delta U.$$

从而对微小变化  $\Delta U$  实现了 100 倍放大。这里  $U_1$  为扫描初始位置时涡流位移计的直流输出电压,  $\Delta U$  为位移引起的涡流位移计输出电压的变化量。

下面以 X 方向扫描为例说明微位移测量过程。

(1) 涡流位移计输出调零: 首先将一个长方形的薄钢片垂直固定在压电陶瓷管的磁性样品底座上, 使其法线方向为 X 向; 调整涡流位移计探头和薄钢片的间距, 使图 3 中  $U_1$  约为  $-6.5$  V; 数据采集卡上 D/A 口的  $a_01$  通道产生  $-8$  V 电压, 作为图 3 中的电压  $U_2$ ; 调节  $R_2$  使  $U_0 = 0$  V。

(2) LabVIEW7.1 编程产生控制电压  $V_{zin}$ :  $V_{zin}$  按照  $0 \rightarrow 10$  V  $\rightarrow 0 \rightarrow -10$  V  $\rightarrow 0$  路径循环, 步长为  $0.5$  V, 并通过数据采集卡上 D/A 的  $a_00$  通道输出; 经反相器/高压放大模块放大后, 形成一对正负驱动电压, 分别施加到压电陶瓷管的 +X 电极和 -X 电极上。

(3) 微位移采集: 涡流位移计的输出改变  $\Delta U$ ,  $\Delta U$  与位移量成正比, 经过  $-100$  倍放大后, 由数据采集卡上 A/D 的  $a_i0$  通道采集; 换算出压电陶瓷管的微位移量, 得到压电陶瓷管样品台 X 方向上的位移-电压关系。

该微位移测量方法成本低、直观、易于实现。

## 2.2 测量结果

在循环加压方式下得到压电陶瓷管 X、Y 方向上的微位移分别与其控制电压  $U_{zin}$ 、 $U_{yin}$  之间的关系如图 4、图 5 所示。

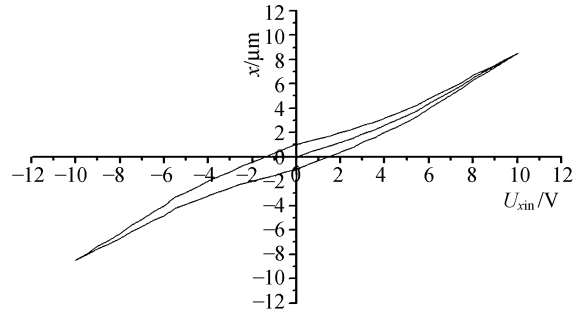


图 4 压电陶瓷管 X 向位移-电压关系

Fig. 4 X-displacement versus control voltage

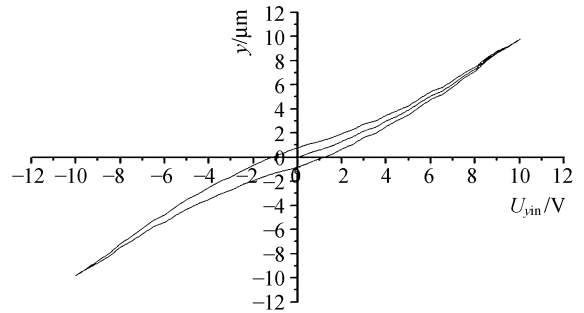


图 5 压电陶瓷管 Y 向位移-电压关系

Fig. 5 Y-displacement versus control voltage

由图 4 和图 5 可得, 压电陶瓷管在  $-10 \sim +10$  V 控制电压下, X 方向在  $-8.5 \sim 8.5$   $\mu\text{m}$  扫描, Y 方向在  $-9.8 \sim 9.8$   $\mu\text{m}$  扫描。涡流位移计经 100 倍放大后的灵敏度为  $800$   $\text{mV}/\mu\text{m}$ , NI PCI-6221 数据采集卡的 A/D 是 16 bit, 对于  $-10 \sim +10$  V 模拟输入电压的分辨率是  $0.305$   $\text{mV}$ , 则本文位移测量系统的最高分辨率为  $0.4$   $\text{nm}$ 。从图 4、图 5 还可以看出, 压电陶瓷管的位移与控制电压之间并不是线性关系, 而是呈曲线关系, 在一定的控制电压上, 升程位移和回程位移不同。升回程的最大位移滞回偏差为  $10.1\%$ , 这么大的位移偏差会造成扫描图像的严重畸变。

## 3 压电陶瓷管微位移非线性校正

AFM 扫描成像原理决定了 X/Y 方向的扫

描点必须是等间隔的,所谓压电陶瓷管非线性校正,即通过调整控制电压使陶瓷管等间距线性移动,保证所得到的扫描图像没有畸变<sup>[15]</sup>。本文根据这一工作原理,提出了一种非线性校正简易方法。

AFM 中压电陶瓷管的工作特点为:第一,压电陶瓷管通常有几个固定不变的扫描范围,扫描路径也是确定的,这比一般压电执行器的工作方式简单,可应用几条固定的位移-电压关系曲线来设计校正算法。第二,在每个扫描范围内样品表面被分成等间隔的像素点,由于压电陶瓷管的位移-电压关系是非线性的,所以 X、Y 方向等间隔像素点的控制电压必然是非等间隔的。X 方向等间隔位移与控制电压的关系如图 6 所示,升程 2、4、6  $\mu\text{m}$  处的 X 轴控制电压序列  $U_2、U_4、U_6$  是非等间隔的,回程 2、4、6  $\mu\text{m}$  处的 X 轴控制电压序列  $U_1、U_3、U_5$  是非等间隔的。

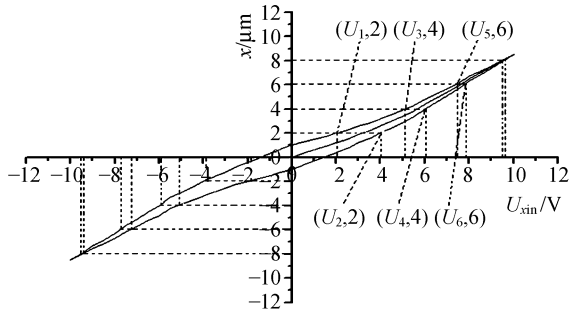


图 6 X 向等间隔位移与控制电压的关系

Fig. 6 Relationship between X equidistant displacement and control voltage

根据上述特点,本文设计了专门的、简单的压电陶瓷管微位移校正算法。利用压电陶瓷管一个扫描范围的位移-电压关系,先从原点移到升程的正最大位移处,再开始应用非线性校正;通过分别在升程和回程等间隔的像素点上施加非等间隔阶梯控制电压的方法对其进行非线性校正。非等间隔控制电压序列的确定方法如图 6 所示,例如,在回程 6  $\mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m} \rightarrow 2 \mu\text{m}$  的像素点上施加控制电压序列  $U_5 \rightarrow U_3 \rightarrow U_1$ ,一直到在回程负最大位移处;在升程 2  $\mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m} \rightarrow 6 \mu\text{m}$  的像素点施加控制电压序列  $U_2 \rightarrow U_4 \rightarrow U_6$ 。

在实测并得到控制电压和压电陶瓷管扫描微位移之间的关系曲线之后,利用插值算法可以得到不同位移间隔要求下的控制电压序列。本文用

LabVIEW 可视化虚拟仪器编程进行逐个像素点的非线性校正,后面板程序框图如图 7。前面板非线性校正控制电压输出序列与 LabVIEW 检测到的校正后的位移检测曲线如图 8、图 9 所示,可见校正电压序列是非线性变化的,而得到的扫描位移的线性性较好。

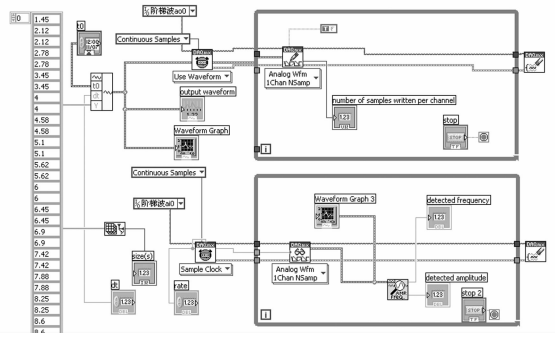


图 7 非线性校正的 LabVIEW 程序图

Fig. 7 LabVIEW program for nonlinear correction

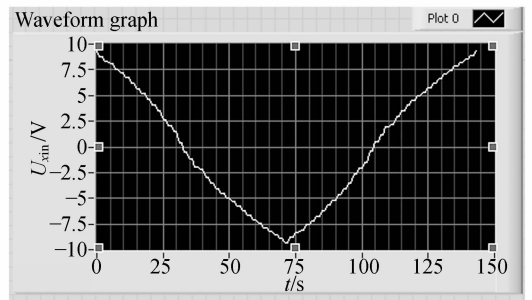


图 8 非线性校正控制电压序列

Fig. 8 Control voltage sequence for nonlinear correction

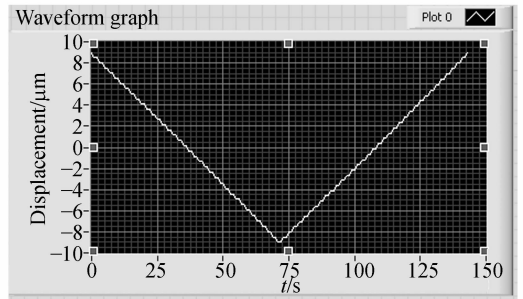


图 9 校正后扫描位移曲线

Fig. 9 Corrected displacement curve

利用 LabVIEW 可视化虚拟编程可以很方便地调整阶梯控制电压的幅值,达到更高的像素分辨率;还可以很方便地调整每阶电压的保持时间,从而使其适合 AFM 的不同扫描频率。以压

电陶瓷管 Y 方向  $19.6 \mu\text{m}$  的扫描范围内 36 个像素点为例,像素点的位移间隔为  $0.5 \mu\text{m}$ ,校正曲线如图 10 所示。其中 X 轴是不同的校正电压所对应的不同像素点,Y 轴是在校正电压序列下压电陶瓷管的微位移量。校正后升回程的位移滞回偏差为  $0.4\%$ ,该偏差值与校正前相比降低了  $9.7$  个百分点。

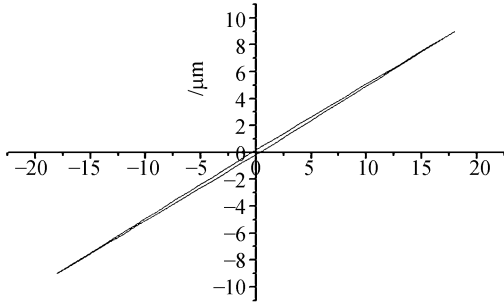


图 10 压电陶瓷管 X/Y 扫描校正曲线

Fig. 10 Nonlinear correction curves of piezoceramic tube

#### 参考文献:

- [1] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1017-1024.  
MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nano positioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1017-1024. (in Chinese)
- [2] 白春礼. 扫描隧道显微镜技术及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.  
BAI CH L. *Technology and Application of Scanning Tunnel Microscopy* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1991. (in Chinese)
- [3] 李志扬,刘武,钟小丽. 压电陶瓷扫描器在纳米加工中的应用[J]. 压电与声光, 1998, 20(1): 25-27.  
LI ZH Y, LIU W, ZHONG X L. The application of a piezoelectric tube scanner in nanometer structure fabrication [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 1998, 20(1): 25-27. (in Chinese)
- [4] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.  
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)

## 4 结 论

本文提出一种利用涡流位移计测量压电陶瓷管 X/Y 扫描微位移的方法,测量得到了压电陶瓷管的位移-电压曲线。在此基础上,根据压电陶瓷管的工作特点,提出了在升程和回程的等间隔像素点分别施加位移-电压曲线上的非等间隔电压序列的校正方法,采用 LabVIEW 虚拟仪器技术实现了对压电陶瓷管位移的非线性校正。压电陶瓷管微位移测量的最高分辨率为  $0.4 \text{ nm}$ ,非线性校正后的滞回偏差为  $0.4\%$ ,比校正前的  $10.1\%$  降低了  $9.7$  个百分点。整个系统结构紧凑、实现方便、成本低廉,适用于压电陶瓷管扫描器的工作特性测量与校正。

- [5] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1032-1040.  
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. precision Eng.*, 2006, 14(6): 1032-1040. (in Chinese)
- [6] 王丹丹,韩立,杨忠山. 压电陶瓷管非线性校正[J]. 压电与声光, 2005, 27(6): 714-716.  
WANG D D, HAN L, YANG ZH SH. Nonlinear calibration of piezotube [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2005, 27(6): 714-716. (in Chinese)
- [7] 周兵,孙鑫. 单管压电陶瓷管非线性校正的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 302-304.  
ZHOU B, SUN X. Simulation of nonlinearity correction of cylindrical piezoelectric scanner [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(7): 302-304. (in Chinese)
- [8] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 368-371.  
FAN W, YU X F, XI L. Research on driving system and controlling means of PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 368-371.
- [9] 曲东升,荣伟彬,孙立宁,等. 压电陶瓷微位移器件控制模型的研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 602-607.

QU D SH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. Research on the control model of piezoelectric micro-positioning actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (6):602-607. (in Chinese)

- [10] 李晓娜, 韩立, 左燕生, 等. 压电陶瓷管非线性校正的实验研究[J]. *压电与声光*, 2007, 29(2):219-221.  
LI X N, HAN L, ZUO Y SH, *et al.*. A study of the nonlinearity calibration for PZT scanner [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2007, 29(2):219-221. (in Chinese)
- [11] CHEN W, LYNCH C S. A micro-electro-mechanical model for polarization switching of ferroelectric materials [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(15):5303-5311.
- [12] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):1032-1040.  
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algo-

rithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1032-1040. (in Chinese)

- [13] 秦磊, 王振华, 孙立宁. 四分压电陶瓷管的动力学研究[J]. *压电与声光*, 2007, 29(1):122-124.  
QIN L, WANG ZH H, SUN L N. Dynamics research of piezoelectricity tube [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2007, 29(1):122-124. (in Chinese)
- [14] 陈超, 何玉琳, 章海军. 压电陶瓷微纳米伸缩量测试系统[J]. *光学仪器*, 2007, 29(2):27-30.  
CHEN CH, HE Y L, ZHANG H J. The testing system of micro-nano dilation of the piezoelectric ceramics [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(2):27-30. (in Chinese)
- [15] GOYOMAR D. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior: application to langevin transducer [J]. *Journal De Physique*, 1997, 7(6):1197-1208.

#### 作者简介:



董维杰(1968—),女,吉林白山人,教授,1991年、1994年和2004年于大连理工大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事微机电系统测控、压电传感器与执行器方面的研究。E-mail: dongwj@dlut.edu.cn



崔岩(1967—),女,辽宁大连人,副教授,1989年于大连理工大学获学士学位,2003于德国卡尔斯鲁厄应用科学大学获第二硕士学位,现为大连理工大学机械工程学院微机电系统与精密工程研究所副所长,主要从事微纳米加工技术、半导体测试及精密测量技术等方面的研究。E-mail: yanc@dlut.edu.cn



宋志杨(1984—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事微力传感器与微弱信号检测方面的研究。E-mail: song-zhiyang1984@163.com