

文章编号 1004-924X(2002)06-0602-06

# 压电陶瓷微位移器件控制模型的研究

曲东升, 荣伟彬, 孙立宁, 徐 晶, 蔡鹤皋  
(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**从不同角度介绍了压电陶瓷微位移器件的两种控制模型。首先,借助于统计物理学分析,结合数学建模方法,建立了一个简单实用的压电陶瓷的迟滞数学模型。其次,借助于弹性体变形理论,介绍了压电/电致伸缩陶瓷的归一化控制模型,从理论上说明了采用电极化强度的方法可以有效减小迟滞的观点。并设计了两种实验系统,对两种控制模型进行了实验验证,实验结果表明,所建立的两种模型可有效减小压电陶瓷的迟滞非线性误差,提高压电陶瓷微位移的控制精度,有助于实现压电陶瓷驱动器的高精度开环微位移控制。

**关键词:**压电陶瓷;控制模型;迟滞;极化强度

**中图分类号:** TP224 **文献标识码:** A

## 1 引言

压电陶瓷微位移器具有体积小、位移分辨率高、频响高、承载力大、无噪声、不发热等特点,是一种理想的纳米微位移元件,获得了广泛应用。但是由于压电陶瓷的迟滞非线性效应,给压电陶瓷的控制带来了困难<sup>[1]</sup>。目前提出的减少压电陶瓷迟滞的方法归纳起来主要有三种:(1)采用各种位移反馈实现闭环控制的方法,这种方法得到了认可。但是,由于没有精确的控制模型,需要采用一些智能化的控制方法,因而控制系统比较复杂,容易受到干扰,引起系统不稳定,迫切需要提高微定位系统的可靠性和实用性。(2)采用电流源代替电压源,实现电荷控制方法。关键是基于电荷控制的驱动电源的研究,但由于压电陶瓷的内阻很高,因此充电电流小,响应时间长,使得这种电源仅适合于静态场合。这种方法受到电源局限性的制约。(3)基于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。建立压电陶瓷的电压—位移数学模型是进行高精度开环控制的根基,目前,国内外一些学者提出了很多方法,如:通用的 Maxwell 模型,

Preisach 模型,FIANN 模型,多项式近似模型<sup>[2-4]</sup>。Preisach 模型、隐含的数值预测算法、滞回曲线的小数指数幂曲线近似法、循环滞回能模型、非线性迟滞效应的广义模型等<sup>[5-8]</sup>,都有各自的特点,在实用性上还需要进一步研究和完善。这类方法理论上可以取得较好的效果,对系统进行精确的开环控制,从而彻底避免因反馈而可能引起的不稳定问题。因此,建立压电陶瓷精确控制模型,是提高压电陶瓷微定位系统控制精度的可靠实用的途径,因而也成为国内外微驱动控制领域许多学者探讨的问题。

本文首先利用统计物理分析的结果,通过数学方法建立了压电陶瓷迟滞数学模型;其次,利用已有研究成果,给出了压电/电致伸缩归一化控制模型;最后,对两种模型进行了实验验证,为提高压电陶瓷微定位系统的控制精度进行有益的尝试。

## 2 迟滞数学模型的研究

### 2.1 迟滞数学模型建立的理论依据

压电陶瓷的位移是由电偶极子的极化引起的。电偶极子之间的作用力是微观效应,而表现

收稿日期:2002-04-17;修订日期:2002-10-25

基金项目:哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(HIT.MD.2001.07)

在宏观的物理现象则是大量电偶极子相互作用的平均效应。因此可采用统计物理学的方法来研究电偶极子的宏观规律。在没有外加电场的情况下,压电陶瓷晶体的内部结构决定了它的整个分子具有非零的固有电偶极矩  $p_0$ , 并且  $p_0$  的值不随时间的变化发生改变,也很难受外界宏观条件的影响,可视为固定值。但是如果存在外加电场作用,当电场强度发生改变时,电偶极子偏转方向也随之改变,由于电偶极子之间存在滞回摩擦,当停止外加电场的作用时,  $p_0$  也同时发生了变化,从宏观上便产生了压电陶瓷的迟滞特性。

采用统计物理学的方法来推导电偶极子的宏观规律可知:压电陶瓷伸长的位移值由所施加电压值及其固有电偶极矩所决定。而固有电偶极矩则与所加电压的历史有关。施加不同初始电压的位移曲线之间具有线性关系。这是下面进行数学建模的统计物理学基础。

### 2.2 迟滞曲线的分析

观察图 1 中的迟滞曲线分布可知,施加不同初始电压的曲线之间具有相似性,首先每条曲线的上升起始形状相差不大,并且最终都收敛到施加极限电压处,此处即压电陶瓷晶体位移的最大值,定义其为饱和区域。在整个上升过程中,曲线间的差别只是收敛的速度不同。为了简便,把从零点出发的曲线定义为极限曲线,则其它曲线与极限曲线之间的函数关系为线性对应关系,与统计物理学分析得出的结论是一致的。

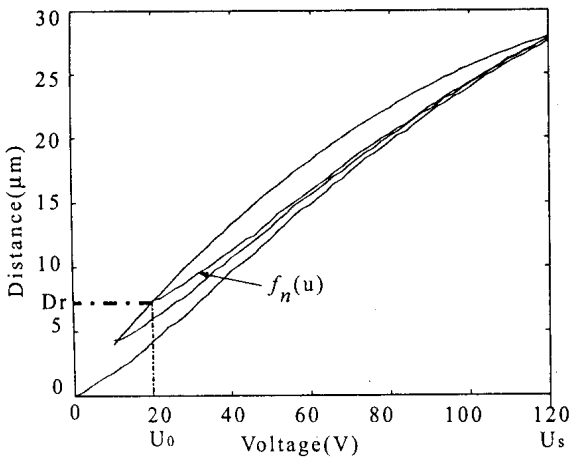


图 1 压电陶瓷的迟滞曲线

Fig. 1 Hysteresis curves of piezoelectric actuator.

因此,只要计算出极限曲线的各点数值,就可

以用线性函数来拟合施加不同初始电压的位移曲线。由于两点确定一条直线,极限点的电压和位移可以测出,初始点的位移也是确定可测的,这样,就可通过极限曲线拟合出所有的曲线。

### 2.3 迟滞曲线的线性确定法

施加不同起始电压值的迟滞曲线具有线性关系,因此具有相同的导数。即极限上升曲线  $f_0$  与上升分支  $f_n$ , 的关系可表示为

$$f_n(u) = f_0(u - U_0), \quad (1)$$

式中,  $U_0$  为  $f_n$  的起始点,  $u > U_0$ 。

由于  $f_n$  是  $f_0$  的函数,所以设

$$f_n(u) = f_0(u - U_0) + D(u - U_0), \quad (2)$$

这里,  $D(u)$  也应该是  $f_0$  的函数。首先不妨设  $D(u)$  具有二次函数的形式

$$D(u) = af_0^2(u - U_0) + bf_0(u - U_0) + c, \quad (3)$$

式中,  $a, b, c$  是待定系数。

由式(2)取导数,得

$$\frac{df_n(u)}{du} = \frac{df_0(u - U_0)}{du} + \frac{dD(u - U_0)}{du}, \quad (4)$$

由最初的上升速率一致的假设,并且当趋于极限点时,  $f_n$  和  $f_0$  的导数是相同的。可得

$$\frac{df_n(u)}{du} = \frac{df_0(u - U_0)}{du}, \quad (5)$$

由式(4)和式(5),得

$$\frac{dD(u - U_0)}{du} = 0, \quad (6)$$

式(3)代入式(6),整理,得

$$[2af_0(u - U_0) + b]f_0(u - U_0) = 0, \quad (7)$$

由于  $f_n(u - U_0) \neq 0$ ,得

$$af_0(u - U_0) = -\frac{b}{2}, \quad (8)$$

把式(8)代入式(3),得

$$D(u) = \frac{b}{2}f_0(u - U_0) + c, \quad (9)$$

即所求的  $f_n$  实际上是  $f_0$  的一次函数。故假设

$$f_n(u) = kf_0(u - U_0) + b, \quad (10)$$

由于

$$f_n(u) \Big|_{u=U_r} = D_r = f_0(U_0), \quad (11)$$

$$f_n(u) \Big|_{u=U_s} = f_0(U_s), \quad (12)$$

得

$$k = \frac{f_n(U_s) - f_n(U_0)}{f_0(U_s) - f_0(0)}, \quad (13)$$

$$b = f_n(U_0) - k \times f_0(0). \quad (14)$$

因此,如果得到极限曲线上各点,即可根据式(10)、式(13)、式(14)得到压电陶瓷各迟滞曲线。

## 2.4 极限曲线的拟合方法

从上述分析可知,极限曲线上各点需要根据实测数据拟合得到,极限曲线拟合的精度直接影响数学模型的精度。目前,可采用神经网络和多项式拟合两种方法,神经网络法可采用 BP 网络控制算法,BP 算法的多层网络是目前应用最多的模型之一,但是由于神经网络受到采样点数量的限制,只能在采样点保持连续,并且与样本一致,但是在采样点间隔中,数据点很难训练与样本点性质相同。通过对比,作者认为,使用多项式拟合,所得的函数基本是与极限上升曲线的图形是一样的,与神经网络法相比,简单、准确。

## 3 压电/电致伸缩陶瓷归一化控制模型的研究

压电陶瓷和电致伸缩陶瓷在电场的作用下有两种效应,逆压电效应和电致伸缩效应。若将压电陶瓷叠片等效为一弹性体,将其在电场作用下产生的电荷等效为一个电偶极子,由文献[9]的分析和推导表明,压电陶瓷的位移  $L$  与电介质极化电荷  $Q$ 、剩余极化电荷  $Q_r$  以及陶瓷特性参数相关,压电陶瓷位移与电场强度及电极化强度之间的关系如下

$$\begin{aligned} L &= \frac{Q Q_r + Q^2}{\epsilon_0 S K} \\ &= \frac{Q_r E + \epsilon^2 E^2 S}{\epsilon_0 K} = dE + ME^2, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{Q Q_r + Q^2}{\epsilon_0 S K} \\ &= \frac{Q_r P + P^2 S}{\epsilon_0 K} = gP + GP^2, \quad (16) \end{aligned}$$

即

$$L = dE + ME^2 = gP + GP^2, \quad (17)$$

式中, $\epsilon$ 为压电陶瓷介质的介电常数; $\epsilon_0$ 为压电陶瓷介质在真空中的介电常数; $S$ 为极板面积; $K$ 为压电陶瓷的弹性模量; $dE$ 、 $gP$ 表示逆压电效

应; $d$ 、 $g$ 为压电应变系数; $ME^2$ 、 $GP^2$ 表示电致伸缩效应; $M$ 、 $G$ 为电致伸缩系数; $E$ 为电场强度; $P$ 为电极化强度。

上述公式表明:

(1)压电/电致伸缩陶瓷的电压与位移的模型可以用同一个关系式来表达,即压电/电致伸缩陶瓷在控制模型上是可以归一化的。在式(16)中,包含介电系数项,它是和所施加的电场强度和电场强度变化历史相关的参数,而在式(17)中,不含介电系数项,因而得出采用电极化强度控制方法可以有效改善压电陶瓷迟滞的结论。

(2)当无预极化处理时, $Q_r = 0$ ,模型表达式表示电致伸缩陶瓷的电场强度及电极化强度与输出位移的二次方关系。

(3)当预极化后剩余极化电荷  $Q_r \gg Q = ES$  时,模型表达式表示逆压电效应中的电场强度及电极化强度与输出位移的线性关系。目前的压电陶瓷多属于这种情况,需要进行预极化。

(4)当预极化后剩余极化电荷  $Q_r$  不是很大时,模型表明当逆压电效应和电致伸缩效应同时存在时,电场强度及电极化强度与输出位移的关系, $Q_r$  越大线性越好,电场强度小时线性较好。

## 4 迟滞数学模型和归一化控制模型的关系

迟滞数学模型从微观角度,采用统计物理学的方法来推导电偶极子的宏观规律,在此基础上,通过数学方法推导出外加电场与位移之间的关系。从而在不消除迟滞现象的情况下,通过计算确定出每一电压值所对应的位移。

电极化控制模型从宏观角度,通过分析电偶极子在外电场下的受力,结合弹性体变形理论,推导出位移与电荷之间的对应关系。将压电陶瓷位移与电压之间的迟滞特性曲线转化为电极化强度与位移之间的线性关系。

因此,电极化控制模型与迟滞数学模型都是针对压电陶瓷在电场控制下,产生迟滞和位移非线性现象而提出的控制模型。本质上是从不同角度对电偶极子在电场作用下运动的两种描述方式。电极化控制采用电荷驱动方法控制压电陶瓷,迟滞模型用电压驱动方法控制压电陶瓷。

## 5 实验研究

### 5.1 迟滞数学模型的实验研究

实验系统的总体构成如图 2 所示。该实验系统由控制计算机、压电/电致伸缩陶瓷、压电陶瓷驱动电源、电容测微仪及数据采集卡等部分组成。

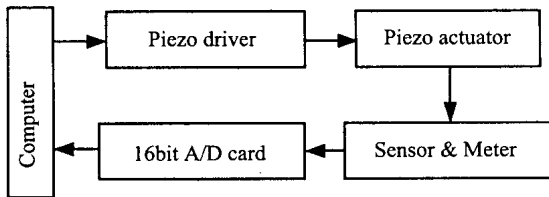


图 2 迟滞模型实验系统框图

Fig. 2 Structure of the hysteresis model experimental system.

(1) 压电/电致伸缩陶瓷:压电陶瓷型号为 AE0505D16,耐压范围为 0~150V。电致伸缩陶瓷型号为 WTDS-1,耐压范围为 -300~300V。

(2) 压电陶瓷驱动电源:用于向压电陶瓷施加电场。采用自行研制的 HPV 型压电陶瓷驱动电源,输出电压范围为 0~300V,电压分辨率为 10mV。

(3) 传感器及检测系统:采用电容式检测方式,两个电容极板,一个安装在压电陶瓷上,另一个固定在磁性表座上。测微仪选用 DWS-6 型电容测微仪,检测量程为 30 $\mu$ m;检测分辨率为 20nm。

(4) 数据采集卡:采集电容测微仪的模拟输出,并将数据输入到计算机。采用 16 路 16 位数/模转换板,型号:PCI-9118HR,具有较高量化精度和分辨率。

(5) 控制计算机:控制压电陶瓷驱动电源的电压输出,并对压电陶瓷的位移数据进行采集。并完成对电压—位移数学模型分析与实验对比。

由前面推导的公式及极限拟合曲线,计算出压电陶瓷迟滞曲线,如图 3 所示,图中,曲线代表计算曲线,星号代表实测值。经计算,应用迟滞模型来计算压电陶瓷的位移,最大位移误差占总位移量的 0.7%。

同理,由前面推导的公式及拟合曲线,计算出电致伸缩陶瓷曲线如图 4 所示,图中,曲线代表计

算曲线,星号代表实测值。经计算:最大位移误差占总位移量的 1.3%。

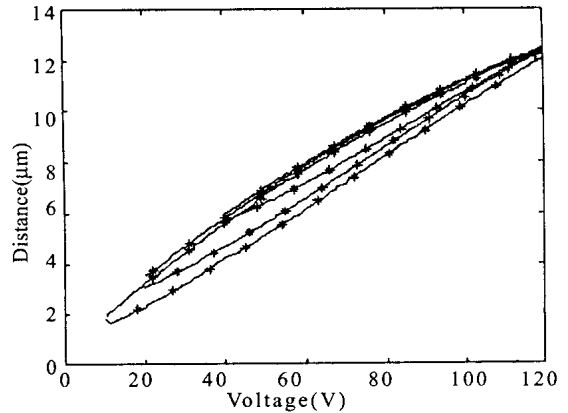


图 3 压电陶瓷迟滞模型与实测数据对照曲线

Fig. 3 Comparison of the hysteresis model with the measured data of piezoelectric actuator.

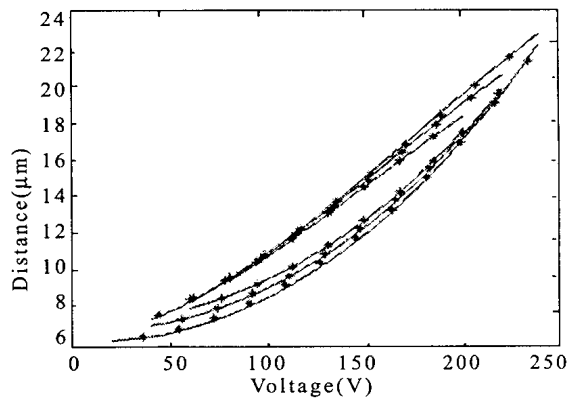


图 4 电致伸缩陶瓷迟滞模型与实测数据对照曲线

Fig. 4 Comparison of the hysteresis model with the measured data of electrostriction actuator.

从实验结果可以看出,所建立的压电陶瓷电压—位移控制模型能够较好模拟出迟滞特性,实验曲线中间明显有一个空白带。这个空白带是由于在控制过程中,电压上升与下降转折过程中,程序控制过程中需要改变加压区间,时间间隔大约 2s,从而产生了一定程度的蠕变。如果采用实时采集转折点位移值的方法,可使计算曲线与实验数据几乎重合。

### 5.2 归一化控制模型的实验研究

为了验证采用电极化强度(电荷)的控制方法减小迟滞这一结论。设计了如图 5 所示的控制实验原理。计算机控制压电陶瓷驱动电源的电压输出,给压电陶瓷串联一个电容器,由于电容两端电

压的变化与压电陶瓷两端极化强度的变化成线性关系,因而只需测出电容两端电压与压电陶瓷位移之间的关系,串联电容器的电容值要远远大于压电陶瓷本身电容,并且要求尽量采用精密电容,这里压电陶瓷实验使用  $33\mu\text{F}$  的钽电容,电致伸缩陶瓷实验采用  $400\mu\text{F}$  的电解电容。为了测量电容两端电压,采用了高阻抗电压跟随器,经 16 位 A/D 采集卡输入到计算机。

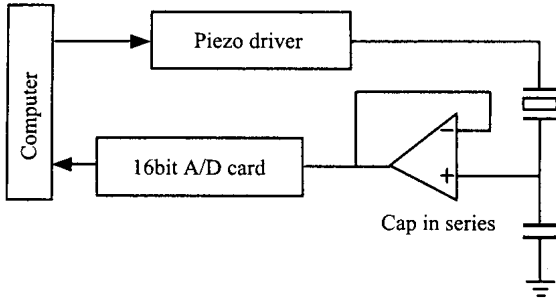


图 5 电极化强度控制实验框图

Fig. 5 Experimental structure of polarization control.

图 6 和图 7 为压电陶瓷和电致伸缩陶瓷在电极化强度控制下位移与电容两端控制电压之间的关系。

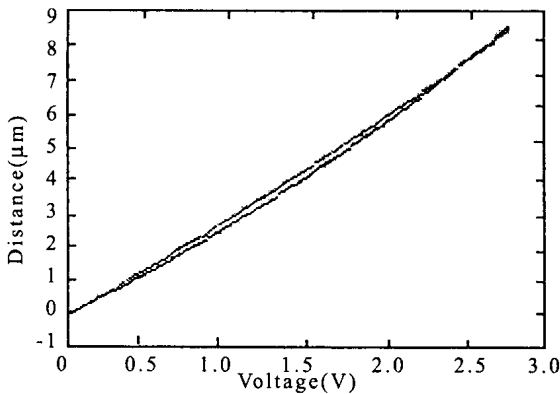


图 6 电极化强度控制压电陶瓷位移曲线

Fig. 6 Displacement curves obtained by the polarization control method of piezoelectric actuator.

本实验中,压电陶瓷电压直接驱动时,迟滞引起的位移误差为 12.7%,采用电极化强度控制方法时产生的位移误差降为 3.0%;电致伸缩陶瓷直接由电压驱动时,迟滞引起的位移误差为 13.6%,采用电极化强度控制方法时产生的位移

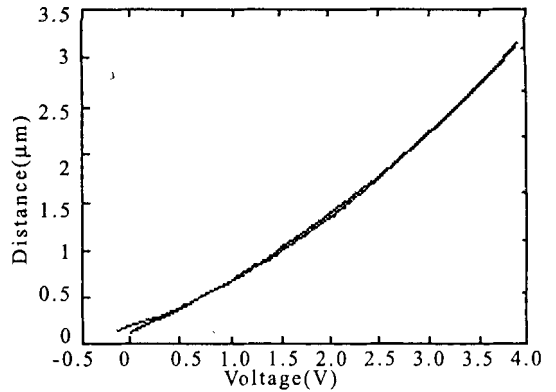


图 7 电极化强度控制电致伸缩陶瓷位移曲线

Fig. 7 Displacement curves obtained by the polarization control method of electrostriction actuator.

误差降为 1.2%。微小误差产生的原因是:由于大电容很难做得很精密,并且存在较大漏电容。电荷控制法与迟滞数学模型相比较,具有控制算法简单,并且线性度好的优点。但是存在响应速度慢,电荷改变时释放速度较慢,且不易控制等问题。

## 6 结论

从不同角度介绍了压电陶瓷微位移器件的两种控制模型。首先,借助于统计学分析,结合数学建模方法,建立了压电陶瓷的迟滞数学模型。其次,利用已有研究成果,介绍了压电/电致伸缩陶瓷的归一化控制模型,从理论上说明了采用电极化强度的方法可以有效减小迟滞。并设计了两种实验系统,对两种控制模型进行了实验验证,采用迟滞数学模型的实验表明:压电陶瓷的误差由 12.7% 减小为 0.7%;电致伸缩陶瓷的误差由 13.6% 减小为 1.3%。采用归一化控制模型的实验表明:通过控制极化强度,压电陶瓷的迟滞减少为 3.0%,电致伸缩陶瓷的迟滞减少为 1.2%。因此,两种模型可以有效解决压电陶瓷的迟滞非线性误差给控制精度带来的影响。本文的研究为压电陶瓷控制模型的进一步研究奠定了基础,有助于提高微位移系统的控制精度。本文对电极化强度的实验只是初步研究,下一步作者将对基于电极化强度的压电陶瓷控制方法及硬件进行更深入的研究。

## 参考文献:

- [1] Sun L N, Zhang T, Cai H G. Study of micro/ nano positioning system[A]. *Proceeding of the 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics* [C]. Kitakyushu, Fukuoka, Japan, 1998:486-490.
- [2] Galinaitis W S, Rogers R C. Compensation for hysteresis using bivariate Preisach models[J]. *SPIE*, 1997, 3039: 538-547.
- [3] Venkataraman R, Krishnaprasad P S. A novel algorithm for the invention of the Preisach operator[J]. *SPIE*, 2000, 3984:404-414.
- [4] Ge P, Jouaneh M. Tracking control of a piezoceramic actuator[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996, 4(3):209-216.
- [5] Leigh T, Zimmerman D. An implicit method for the nonlinear modeling and simulation of piezoceramic actuators displaying hysteresis[J]. *Smart Structures and Material*, 1991, AMD-123:57-63.
- [6] 张治国, 高红. 磁滞回线的小数指数幂曲线近似法[J]. *东北电力技术*, 1996, (3):27-31.
- [7] 杜正春, 李春梅, 颜景平. 非线性迟滞现象的广义模型及其在压电微作动器中的应用[J]. *仪器仪表学报*. 1999, 20(4):32-34.
- [8] 姜风春, 刘端堂. 循环滞回能的瞬态响应及数学模型[J]. *哈尔滨船舶工程学院学报*, 1994, 15(3):65-71.
- [9] 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.

## Research on the control model of piezoelectric micropositioning actuator

QU Dong-sheng, RONG Wei-bin, SUN Li-ning, XU Jing, CAI He-gao

(Robot Research Institute, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Two control models for piezoelectric actuators are introduced from different angles. Firstly, by means of statistic physical analysis, a simple and practical mathematic formula describing the hysteresis of a piezoelectric actuator built by a mathematic modeling method. Then, based on elastic deformation theory, a normalization model of piezoelectric/electrostrictive effect is introduced. Accordingly, the viewpoint that hysteresis can be greatly reduced by polarization control method was proved theoretically. Two experimental systems were designed and two control models tested, respectively. Some experimental results show that the models are effective in decreasing the error arising from nonlinear hysteresis. In this way the micropositioning control accuracy of piezoelectric actuators can be improved. As a result, the research is helpful to realize high precision open loop micropositioning controls based on piezoelectric actuators.

**Key words:** piezoelectric actuator; control model; hysteresis; polarization intensity

**作者简介:**曲东升(1973-),男,辽宁省朝阳人,哈尔滨工业大学机械电子工程专业博士生,哈尔滨工业大学机器人研究所讲师,主要从事微驱动及微操作机器人方面的研究工作。