

文章编号 1004-924X(2012)05-0996-06

压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模

张桂林, 张承进*, 赵学良

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 考虑压电驱动器固有的迟滞特性对驱动器定位精度的影响, 提出了一种精确描述压电驱动器迟滞非线性特性的建模方法。根据迟滞曲线的运动规律, 并且考虑迟滞曲线的记忆更新特性, 新的迟滞数学模型修正了单纯采用抛物线拟合时的建模误差。为了验证模型的有效性, 以 PST150/7/40VS12 型压电陶瓷驱动器为例进行了试验研究。研究显示, 采用抛物线迟滞模型对一阶反转输入信号进行预测时, 最大误差为 $0.1413 \mu\text{m}$, 均方误差为 $0.0604 \mu\text{m}$, 对复杂信号模型预测的最大误差为 $1.3960 \mu\text{m}$, 均方误差为 $0.8566 \mu\text{m}$; 采用修正后的模型对文中复杂信号建模时, 最大误差为 $0.2370 \mu\text{m}$, 均方误差为 $0.09 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 修正后的模型不仅能够满足迟滞曲线的运动规律, 还能够满足迟滞非线性的记忆更新特性, 可以比较精确地描述复杂输入信号下的迟滞非线性特性。

关键词: 压电驱动器; 迟滞非线性; 建模; 非局部记忆

中图分类号: TN384; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.0996

Modeling of nonlocal memory hysteresis in piezoelectric actuators

ZHANG Gui-lin, ZHANG Cheng-jin*, ZHAO Xue-liang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

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

Abstract: As piezoelectric actuators have poor position accuracy caused by their inherent hysteresis nonlinearities, this paper proposed a new modeling method to precisely describe their hysteresis phenomena. Based on the motion rules of hysteresis curves and the nonlocal memory property of the hysteresis nonlinearity, proposed model modified the modeling errors fitted by parabolic model. To verify the feasibility of the model, an experiment was performed by the PST150/7/40VS12 piezoelectric actuator. Experimental results indicate that for the first order reversal signal, the maximum error is $0.1413 \mu\text{m}$ and the mean-squared error (MSE) is $0.0604 \mu\text{m}$ by using the parabolic model. However, for a more complex signal, those of the parabolic model are $1.3960 \mu\text{m}$ and $0.8566 \mu\text{m}$, respectively. When using the amended model to predict the actuator response under the above-mentioned complex signal, the maximum prediction error and the mean-squared error are $0.2370 \mu\text{m}$ and $0.09 \mu\text{m}$, respectively. These data demonstrate that the proposed model not only provides a minor-loop identical property, but also offers the nonlocal property and it can precisely predict the hysteresis path for assigned complex input profiles.

Key words: piezoelectric actuator; hysteresis nonlinearity; modeling; nonlocal memory

收稿日期: 2011-12-16; 修订日期: 2012-02-23.

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. ZR2010FM016)

1 引言

由于压电陶瓷驱动器具有纳米级分辨率等特点,使其在微纳米定位中得到了广泛的应用^[1],然而,压电材料自身具有的迟滞、蠕变等特性大大降低了其定位精度。迟滞非线性造成的定位误差可达到最大行程的10%~15%^[2],不但降低了系统的控制精度,而且可能造成系统失稳,严重限制了压电陶瓷驱动器的应用。

为了消除迟滞特性的影响,提高压电驱动器的定位精度,国内外学者进行了大量研究,提出了多种模型,其中应用广泛的模型有 Preisach 模型^[3-4]、Prandtl-Ishlinskii(PI)模型^[5-6]、Duhem 模型^[7]和 Bouc-Wen 模型^[8]等,有学者采用神经网络和曲线拟合的方式对压电驱动器迟滞效应进行建模,取得了很好的效果^[9-11]。

Preisach 模型采用 Preisach 算子,对其进行二次积分得到迟滞模型,由于 Preisach 模型中权函数 $\mu(\alpha, \beta)$ 的辨识依赖于积分曲线的选取,间隔越短模型越精确,但是计算量也越大。Duhem 模型认为迟滞输出仅发生在输入改变方向的时刻,该模型把迟滞上升和下降曲线分别用两个微分方程描述,模型容易理解和实现,但是模型参数辨识时需要依据经验选择。

迟滞建模的主要难点为迟滞非线性的多值映射和非局部记忆性,即相同的输入电压有不同的位移输出,相同的位移输出可以有不同的输入电压,并且位移的输出不仅与输入电压的瞬时值有关,还与输出电压的历史有关,尤其与输入电压的历史极值有关,迟滞非线性的这两个特性使得大部分文献中的迟滞模型仅对一阶反转信号进行建模。

文献[10]中采用指数函数拟合的方式对迟滞非线性进行建模,可以描述一类一阶反转信号下的迟滞曲线,但当极值电压更新时,该方法迟滞建模误差较大,文献[11]中的三阶多项式拟合的方法能够拟合迟滞上升和下降曲线,但同样没有考虑极值电压更新后导致的模型失配问题。针对上述问题,本文提出了一种新的压电陶瓷驱动器迟滞建模方法,当输入电压超出极值电压,即当历史极值更新时,在抛物线模型基础上对模型进行修正,使其满足迟滞特性的非局部记忆特性。

2 迟滞特性分析

本文迟滞建模的主要思想是根据迟滞曲线的运行规律和次环全等特性,采用抛物线模型拟合压电陶瓷驱动器输出位移曲线,当输入电压超出历史极值电压时,抛物线模型并不能满足迟滞的记忆更新特性,预测输出位移偏离了驱动器实测位移,因此有必要对模型进行修正,使得模型满足迟滞现象的记忆更新特性。

经典迟滞 Preisach 模型和实验数据同时显示,迟滞具有记忆更新特性。记忆更新特性表现在当输入电压超过历史极值电压时,历史极值更新,此时迟滞输出将偏离所在迟滞曲线的运行规律,即输入信号极值更新,迟滞曲线运行规律更新。历史极值包括历史极大值和历史极小值。历史极大值为输入信号某个时刻前的最大输入电压。历史极小值的更新规律不同于历史极大值,本文历史极小值定义为历史极大值未更新时,输入信号的最小值,若历史极大值更新,先前的历史极小值需要重置,重置为历史极大值后的最小输入电压,先前的历史极小值删除,每次历史极大值更新,历史极小值都需重置。

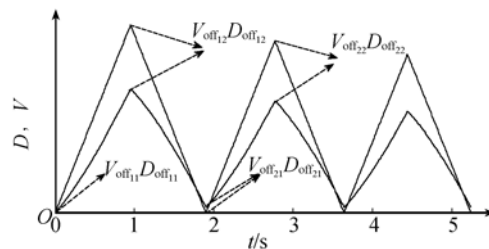


图1 Definition of turning points

Fig. 1 迟滞曲线转折点示意图

当驱动器远离饱和和电压操作时,观察驱动器实验数据可知,输出位移曲线与抛物线非常相近,当初始曲线已知时,采用抛物线来分段描述压电驱动器的迟滞非线性特性,驱动器迟滞模型输出 D 可以表示为

$$D(V) = \sum_{i=1}^n \left[(D_{i1}(V, V_{\text{off}_{i1}}, D_{\text{off}_{i1}}) + D_{i2}(V, V_{\text{off}_{i2}}, D_{\text{off}_{i2}}) \right], \quad (1)$$

其中, $D_{i1}(V, V_{off_{i1}}, D_{off_{i1}}) = a_{i1}(V - V_{off_{i1}})^2 + b_{i1}(V - V_{off_{i1}}) + D_{off_{i1}}$,

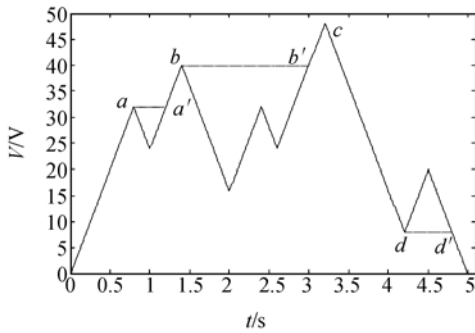
$D_{i2}(V, V_{off_{i2}}, D_{off_{i2}}) = a_{i2}(V - V_{off_{i2}})^2 + b_{i2}(V - V_{off_{i2}}) + D_{off_{i2}}$, 其中 V 为输入电压, $V_{off_{i1}}$ 和 $D_{off_{i2}}$ ($V_{off_{i2}}$ 和 $D_{off_{i2}}$) 为对应第 i 上升(下降)环输入电压和输出位移的起始点(图 1), a_{i1} 和 b_{i1} (a_{i2} 和 b_{i2}) 表示迟滞第 i 环上升(下降)曲线系数。

当对压电驱动器输入如图 2(a) 所示电压时, 采用式(1)模型对输出位移进行预测, 预测位移与实测位移如图 2(b)。由图 2(b)可以看出, 当经过 a', b', d' 点时, 预测误差发生较大变化。当电压经过极值更新点 a' 时, 由于 a' 点电压等于 a 点电压, 从 a' 点开始模型(1)的预测误差逐渐变大, 到 b 点时误差基本稳定; 从 b' 点开始误差逐渐变大, 到 c 点时到达稳定值; 而当到达 d' 点, 预测误差逐渐减小, 直到电压降为 0, 而此时的预测误差减小是因为 d' 点开始, 输入电压超出了历史极小值

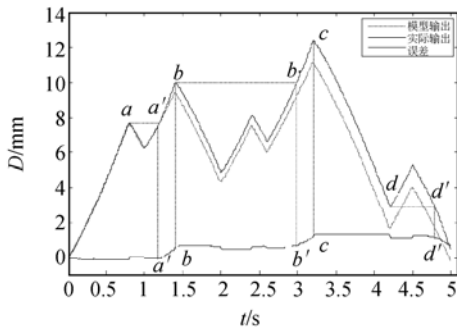
d 点电压, 与超出历史极大值相反, 预测位移比实际输出变大, 结合前面的两次超出历史极大值, 仅仅在结果上显示预测误差变小。由极值更新导致的模型预测误差大大影响了模型精度, 不能忽视, 必须在极值更新点时对模型(1)进行修正。

3 模型修正

当输入电压到达 a', b', d' 点时超过历史极值, 由于迟滞的非局部记忆特性, 输出位移不会按照模型(1)的运动轨迹输出, 而是按照上一历史极值点 a, b, c 点时的运动轨迹输出。图 3 中电压到 2 点时到达历史最大值, 继续增加将超出历史极值, 若采用模型(1)进行预测, 模型输出由 3-2-4 轨迹输出, 即沿着曲线 3-2 的延长线输出, 而实际输出轨迹为 3-2-5, 即沿着曲线 1-2 的延长线输出。可以看出每当极值更新时, 位移按照上一历史极值时的曲线运动轨迹输出, 因此模型(1)将造成预测误差, 在极值点更新时, 需对模型(1)进行修正。



(a) Input complex signal
(a) 复杂输入信号



(b) Actuator output and parabola model response
(b) 驱动器输出与抛物线模型输出

图 2 复杂信号下驱动器输出和模型响应

Fig. 2 Actuator output and model response under complex signal

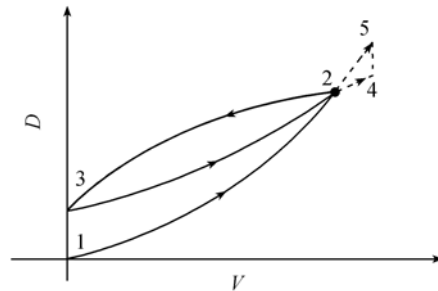


图 3 Hysteresis curve movement path
Fig. 3 迟滞曲线运行轨迹

设在第 m 上升环 t_m 时刻, $V_{t_m} = V_{max}$ (V_{max} 为上一历史极大值), 到 t_{m+1} 时刻到达历史最大值, 此时进行历史极值更新, 模型改进为下式

$$D(V) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^k [D_{i1}(V, V_{off_{i1}}, D_{off_{i1}}) + D_{i2}(V, V_{off_{i2}}, D_{off_{i2}})] + [D_{m1}(V, V_{off_{m1}}, D_{off_{m1}}) + H(V, V_{off_{m1}}, V_{t_m}) + \Delta_{m1}] + D_{m2}(V, V_{off_{m2}}, D_{off_{m2}}), \quad (2)$$

其中,

$$\Delta_{m1} = D_{11}(V, V_{off_{11}}, D_{off_{11}}) H(V, V_{t_m}, V_{t_{m+1}}) - D_{m1}(V_{t_m}, V_{off_{m1}}, D_{off_{m1}}),$$

$$H(x, a, b) = \begin{cases} 1, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \text{ 或 } x < a \end{cases}$$

Δ算子中 D_{i1} 表示当电压超过历史极值时,超出部分按照初始曲线轨迹来重新计算。每当次环电压超出历史极大值时,都必须按照式(2)对超出历史极大值的次环上升曲线重新建模。

同样,设在 t_n 时刻第 n 下降环, $V_{t_n} = V_{\min}$ (V_{\min} 为上一历史极小值),到 t_{n+1} 时刻到达历史最小值,此时历史极小值更新,模型输出修改为下式

$$D(V) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^k \left[D_{i1}(V, V_{\text{off}_{i1}}, D_{\text{off}_{i1}}) + D_{i2}(V, V_{\text{off}_{i2}}, D_{\text{off}_{i2}}) \right] + D_{n1}(V, V_{\text{off}_{n1}}, D_{\text{off}_{n1}}) + D_{n2}(V, V_{\text{off}_{n2}}, D_{\text{off}_{n2}}) H(V, V_{\text{off}_{n1}}, V_m + \Gamma_{n2}), \quad (3)$$

其中

$$\Gamma_{n2} = D_{n2}(V, V_{\text{off}_{n2}}, D_{\text{off}_{n2}}) H(V, V_{n+1}, V_{t_n}) - D_{n2}(V_{t_n}, V_{\text{off}_{n2}}, D_{\text{off}_{n2}}).$$

Γ算子中 D_{n2} 表示当电压超出历史极小值时,超出部分按照模型(2)极大值后对应的下降曲线轨迹来计算。

需要注意的是,每次伴随着极大值的更新,极小值都要被重置,重置为极大值点后对应的极小值,以前的历史极小值将被删除。图 2(a)中当电压在 a' 点超过历史极值 a 点,到达新的历史极值 b 点,尽管 b 点后对应的极小值小于 a 点对应的极小值,但是由于 b 点此时极大值更新,极小值重置,因此 b 点后的曲线仍然满足式(1)模型。

式(1)表示当在输入电压两个极值之间时,输出位移曲线为典型的抛物线形状,尽管迟滞环由于材料的不同会具有不同的形状,但是同种材料迟滞次环具有相同的形状(本文指抛物线系数相同)。式(2)和式(3)表示当输入电压超出历史极值时,由于迟滞的记忆更新特性,超出历史极值部分输出曲线不是按照式(1)的模型输出,而是按照模型(2)或模型(3)的方式输出。

4 模型验证

为了验证模型的有效性,采用一套基于压电陶瓷(PZT)驱动器的压电陶瓷平台进行控制。压电陶瓷驱动器型号为 PST150/7/40VS12,工作电压为 0~150 V,输出位移为 0~40 μm。驱动器

位移由控制器内部线性可变差动变压器(LVDT)位移传感器测量,计算机通过 EPP(增强并行口)与控制器进行通讯。上位机采用 VC++ 编程产生数字控制信号,通过控制器内置的 16 位 D/A 转换成模拟信号,经 PZT 放大器驱动压电陶瓷产生位移模拟信号,由 16 位 A/D 转换成数字信号,通过 EPP 传送给上位机,实验装置如图 4 所示。

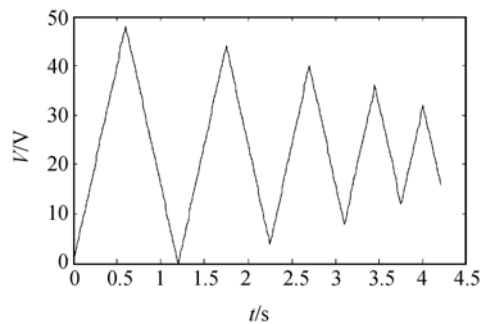


图 4 实验装置

Fig. 4 Experiment setup

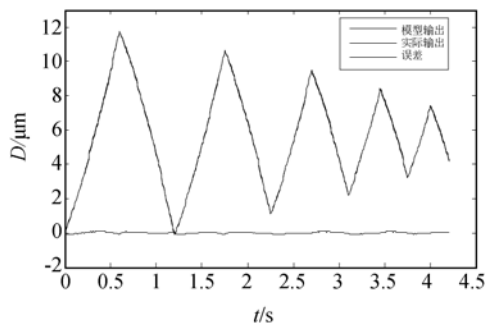
由于所建模型的前提是初始化曲线已知,因此首先采用传统的最小二乘法辨识初始化曲线系数,在远离饱和和电压下操作(本文取 0~50 V)。假设驱动器迟滞上升和下降曲线关于中心对称,又有次环全等特性,因此所有次环抛物线系数 b_{n1} 和 b_{n2} 相等, $a_{n1} = -a_{n2}$,可在离线状态下辨识,在建模过程中,所有次环系数 $a_{n1} = -a_{n2} = 0.014$, $b_{n1} = b_{n2} = 0.182$ 。

对驱动器输入如图 5(a)的衰减三角波电压,电压步长为 0.8 V,时间间隔 0.01 s,在未进行极值更新采用式(1)对输出位移进行预测时,预测结果与实际输出对比如图 5(b),模型预测最大误差为 0.141 3 μm,均方误差 0.060 4 μm。



(a) 输入电压波形

(a) Input signal

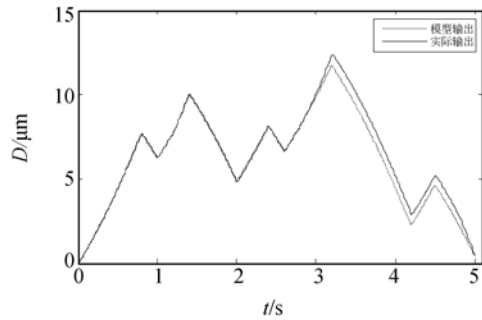
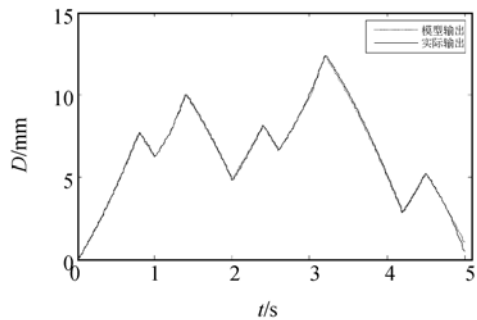


(b) 驱动器输出位移和模型输出

(b) Actuator output and model response

图 5 一阶反转信号下驱动器输出和模型响应

Fig. 5 Actuator output and model response under the first order reversal curve

(a) 第一个 Δ 算子(a) The first Δ operator(b) 第二个 Δ 算子(b) The second Δ operator

在输入电压曲线为图 2 所示的复杂三角波电压时,根据极值电压更新次数,采用模型(2)和模型(3)对模型(1)进行改进,图 6(a)为在第一次极大值更新时增加 Δ 记忆算子时模型输出与驱动器实际输出,图 6(b)为在图 6(a)基础上在第二次极大值更新时增加 Δ 记忆算子,可以看出模型预

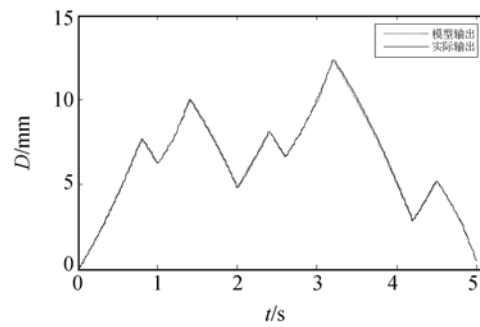
(c) 第一个 Γ 算子(c) The first Γ operator

图 6 3 个记忆算子下的模型响应

Fig. 6 Model responses with the first, second and third operator

测精度提高,图 6(c)是在图 6(b)基础上在第一次极小值更新时增加 Δ 记忆算子,模型预测精度进一步提高。由图 6 可以看出,在极值更新后到下一极值更新前,增加记忆算子可以很好地预测输出。在 3 次极值更新后增加 3 个记忆算子,抛物线模型与修正模型误差对比如表 1。

表 1 抛物线模型与修正模型对比

Tab. 1 Modeling performance of parabola model and modified model

	抛物线模型	修正模型
最大误差/ μm	1.396 0	0.237 0
均方误差/ μm	0.856 6	0.09
精度提高/%	83.5	89.5

5 结 论

压电驱动器迟滞现象具有非局部记忆特性。在输入信号未有历史极值更新时,可以采用单纯抛物线模型预测驱动器的输出位移,文中对一阶反转信号预测最大误差为 $0.114\ 3\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.060\ 4\ \mu\text{m}$;在输入信号含有历史极值更新时,抛物线模型在极值电压更新时预测误差会突然变大,最大误差为 $1.396\ 0\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.856\ 6\ \mu\text{m}$ 。本文在极值电压更新时,可在抛物线模型基础上增加记忆算子。利用改进后的模型对同一输入信号建模,最大误差为 $0.237\ 0\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.09\ \mu\text{m}$ 。实验结果表明,单纯抛物线模型能够满足迟滞曲线的运行规律和次环全等

特性,可以预测极值未有更新信号(如一阶反转信号)的输出位移,当输入信号有电压极值更新时,

可在抛物线模型基础上增加记忆算子来补偿迟滞记忆更新特性带来的建模误差。

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] MOHEIMANI S O R. Accurate and fast nanopositioning with piezoelectric tube scanners: Emerging trends and future challenges [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(5):1-11.
- [3] 李黎,刘向东,侯朝桢,等. 混合 Preisach 迟滞模型及其性质研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 279-284.
LI L, LIU X D, HOU CH ZH, *et al.*. Mixed preisach hysteresis model and its properties [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 279-284. (in Chinese)
- [4] GE P, JOUANEH M. Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators [J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(2): 99-111.
- [5] 张栋,张承进,魏强. 压电微动工作台的动态迟滞模型[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 549-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 549-556. (in Chinese)
- [6] BASHASH S, JALILII N. Robust multiple frequency trajectory tracking control of piezoelectricaly driven micro/nanopositioning systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5): 867-878.
- [7] SONG D, LI C. J. Modeling of piezoactuator's nonlinear and frequency dependent dynamics [J]. *Mechatronics*, 1999, 9: 391-410.
- [8] 王代华,朱炜. WTYD型压电陶瓷微位移器的迟滞特性建模与实验验证[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 205-211
WANG D H, ZHU W. Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 17(3): 211-217. (in Chinese)
- [9] 魏强,张玉林. 压电陶瓷微位移工作台的建模方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1596-1601
WEI Q, ZHANG Y L. Modeling method of micro-displacement stage driven by piezoelectric ceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1596-1601. (in Chinese)
- [10] TZEN J J, JENG S L, CHIENG W H. Modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 70-86.
- [11] SUN L N, RU C H, RONG W B, *et al.* Tracking control of piezoelectric actuator based on a new mathematical model [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(1): 1439-1444.

作者简介:



张桂林(1983—),男,山东潍坊人,博士研究生,2006年于山东大学获得学士学位,主要从事迟滞非线性系统的建模与控制方面的研究。E-mail: zhangguilin0531@163.com



赵学良(1976—),男,山东邹平人,博士研究生,讲师,2006年于山东大学获得硕士学位,主要从事迟滞非线性系统的建模与控制方面的研究。E-mail: zhaoxueliang@126.com

导师简介:



张承进(1962—),男,山东莱芜人,教授,博士生导师,主要从事非线性系统控制、自适应辨识与控制、时变系统控制、鲁棒控制、智能控制等方面的研究。E-mail: cjzhang@sdu.edu.cn