

文章编号 1004-924X(2010)01-0205-07

# WTYD 型压电陶瓷微位移器的 迟滞特性建模与实验验证

王代华<sup>1,2</sup>, 朱 炜<sup>1,2</sup>

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院 精密与智能实验室, 重庆 400044)

**摘要:**为了模拟 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线,通过采用 Bouc-Wen 模型模拟迟滞分量,提出了一种表征 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间迟滞关系的 Bouc-Wen 模型并建立了相应的参数辨识方法。为了验证 Bouc-Wen 模型及其相应的参数辨识方法的有效性,建立了相应的实验装置并对模型进行了实验验证。研究表明,Bouc-Wen 模型的最大绝对误差为  $3.78 \mu\text{m}$ ,最大相对误差为  $5.79\%$ ,表明 Bouc-Wen 模型及相应的参数辨识方法能较好地模拟 WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性。

**关键词:**压电陶瓷微位移器;迟滞曲线;Bouc-Wen 模型;参数辨识

**中图分类号:**TN384;TH703.9 **文献标识码:**A

## Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators

WANG Dai-hua<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>1,2</sup>

- (1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*;
2. *Precision and Intelligence Laboratory, Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

**Abstract:** With the aim to model the hysteretic curve between the output displacement and applied voltage of the WTYD type piezoceramic micro-actuators, the Bouc-Wen model to characterize the hysteretic relationship between the output displacement and applied voltage of the piezoceramic micro-actuators is put forward by using the Bouc-Wen hysteretic operator to simulate the hysteretic component and then a corresponding parameter identification method is established. To evaluate the effectiveness of the developed model and the parameter identification method, the corresponding experimental setup is established and the model is validated. Research results indicate that the maximal absolute and relative errors of the proposed Bouc-Wen model are less than  $3.78 \mu\text{m}$  and  $5.79\%$  respectively, which shows the proposed Bouc-Wen model and the parameter identification method can well simulate the hysteretic characteristics of the WTYD type piezoceramic micro-actuators.

**收稿日期:**2009-04-07;**修订日期:**2009-04-27.

**基金项目:**高等学校科技创新工程重大项目培育基金资助项目(No. 708048);新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-05-0765)

**Key words:** piezoceramic micro-actuator; hysteresis curve; Bouc-Wen hysteretic operator; parameter identification

## 1 引言

压电陶瓷微位移器具有体积小、能量密度高、定位精度高、分辨率高、频响快等优点,在精密定位、微机电系统、微纳米制造技术、纳米生物工程等领域中得到了广泛应用。但是压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压呈现迟滞现象的特性给压电陶瓷微位移器的控制带来了困难。

为了模拟压电陶瓷微位移器的迟滞特性,国内外学者对压电陶瓷微位移器的数学模型进行了大量研究,提出了模拟其迟滞特性的 Preisach 模型<sup>[1-3]</sup>、Maxwell 模型<sup>[4]</sup>、Dahl 模型<sup>[5]</sup>等。Preisach 模型通过对迟滞因子的双重积分来逼近迟滞特性,但是存在在线实现复杂,难于与控制器相结合的缺点。Maxwell 模型利用摩擦力和弹簧系统输出力与位移的迟滞特性模拟压电陶瓷微位移器的迟滞特性,其求解计算过程过于复杂。Dahl 模型描述压电陶瓷微位移器的迟滞特性时需要在频域中对其进行研究,并且模型参数较多,模型的参数辨识比较困难。

Bouc-Wen 模型是由 Bouc<sup>[6]</sup>提出并由 Wen<sup>[7]</sup>完善的一种微分方程,模型采用一个具有不确定参数的非线性微分方程来模拟迟滞环,通过选择合适的参数得到各种形状的迟滞环。近年来,一些学者利用 Bouc-Wen 模型研究了模拟压电陶瓷微位移器构成微位移平台系统的迟滞特性<sup>[8-12]</sup>的方法。其中 Ha 等人<sup>[8]</sup>和 Lin 和 Yang<sup>[9]</sup>分别利用简化的 Bouc-Wen 模型模拟压电陶瓷微位移器构成的微位移平台系统的迟滞特性,但是精度并不是很理想。Ikhouane 和 Rodellar<sup>[10-12]</sup>用 Bouc-Wen 模型描述压电陶瓷微位移器构成的微位移平台系统的迟滞曲线,取得了比较好的效果,但其参数辨识过程较为复杂。

本文通过采用 Bouc-Wen 模型模拟迟滞分量提出了一种表征 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞关系的 Bouc-Wen 模型并建立了相应的参数辨识方法。为了验证 Bouc-Wen 模型及其相应的参数辨识方法的有效性,建立了相应的实验装置并对模型进行了

实验验证。

## 2 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型

图 1 为实验测得的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线(测试方法见第 4 节)。如果将迟滞曲线的两端点用直线连接(如图 1 中实线),则迟滞曲线(如图 1 中

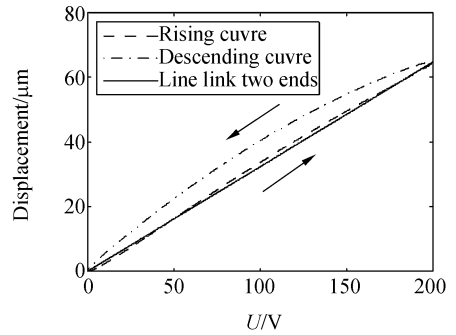


图 1 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞关系曲线

Fig. 1 Relationship between output displacement and applied voltage of WTYD type piezoceramic micro-actuator

虚线)可以看成是线性分量(如图 1 中实线)和迟滞分量的叠加。由此得到在任意驱动电压下 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移为:

$$x(t) = k_v u(t) + h(t) + x_0, \quad (1)$$

式中  $x(t)$  为 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移;  $u(t)$  为压电陶瓷微位移器的驱动电压;  $k_v$  为输出位移与电压的比率常量;  $k_v u(t)$  为线性位移分量;  $h(t)$  为迟滞位移分量;  $x_0$  为初始状态下存在的位移。用 Bouc-Wen 模型模拟迟滞位移分量,  $h(t)$  由下式给出<sup>[6]</sup>:

$$h'(t) = A u'(t) - \beta |u'(t)| |h(t)|^{n-1} h(t) - \gamma u'(t) |h(t)|^n, \quad (2)$$

式中  $h'(t)$  为迟滞位移的一阶导数;  $A$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和  $n$  为模型的参数。

为了简化参数辨识过程,令  $n=1$ ,式(2)可以

简化为:

$$h'(t) = Au'(t) - \beta |u'(t)| h(t) - \gamma u'(t) |h(t)|. \quad (3)$$

由式(1)和(3)确定的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型可知,模型需要确定的参数为  $k_v$ 、 $A$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ 。利用 Bouc-Wen 模型预测 WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞曲线需要通过参数辨识确定这些参数的值。

### 3 模型参数辨识方法

分别对 WTYD 型压电陶瓷微位移器输入两个周期为  $T$  的驱动电压  $u(t)$  和  $v(t)$  (其中  $v(t) = u(t) + q$ ,  $q$  为常数),对应的输出位移分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ 。由式(1)可得:

$$x(t) = k_v u(t) + h(t) + x_0, \quad (4)$$

$$y(t) = k_v [u(t) + q] + h(t) + x_0, \quad (5)$$

由式(4)和(5)可得:

$$k_v = \frac{y(t) - x(t)}{q}, \quad (6)$$

根据文献[11]可得:

$$\int_0^T h(t) dt = 0, \quad (7)$$

由式(4)和(7)可得:

$$x_0 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(\tau) - k_v u(\tau)] d\tau, \quad (8)$$

由式(1)可得:

$$h(t) = x(t) - k_v u(t) - x_0, \quad (9)$$

由式(3)可得:

$$h'(t) = u'(t) \{ A - \{ \gamma + \beta \operatorname{sgn}[u'(t)h(t)] \} |h(t)| \}, \quad (10)$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}.$$

由式(10)可得:

$$\frac{dh(t)}{du(t)} = A - \{ \gamma + \beta \operatorname{sgn}[u'(t)h(t)] \} |h(t)|, \quad (11)$$

设  $u(t) = u_0$  时  $h(t) = 0$ ,由式(11)可得:

$$A = \frac{dh(t)}{du(t)} = \left[ \frac{dx(t)}{du(t)} - k_v \right]_{u=u_0}, \quad (12)$$

在图 1 所示的上升曲线上取点  $(u_1, x_1)$  ( $u_1 < u_0$ ),此时  $u'(t)$  和  $h(t)$  同号,由式(11)可得:

$$A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_1} = (\beta + \gamma) |h_1|, \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$\beta + \gamma = \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_1}}{|h_1|}, \quad (14)$$

在图 1 所示的上升曲线上取点  $(u_2, x_2)$  ( $u_2 > u_0$ ),此时  $u'(t)$  和  $h(t)$  异号,由式(11)可得:

$$-\beta + \gamma = \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_2}}{|h_2|}, \quad (15)$$

根据式(14)和(15),可解得:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_1}}{|h_1|} - \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_2}}{|h_2|} \right], \quad (16)$$

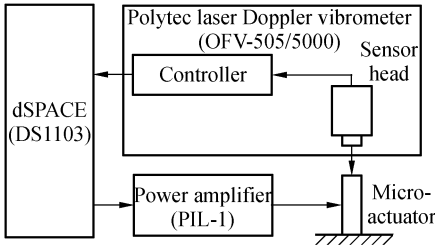
$$\gamma = \frac{1}{2} \left[ \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_1}}{|h_1|} + \frac{A - \left( \frac{dh}{du} \right)_{u=u_2}}{|h_2|} \right]. \quad (17)$$

根据式(6)、(8)、(12)、(16)和(17),只要能够分别测量得到 WTYD 型压电陶瓷微位移器在驱动电压  $u(t)$  和  $v(t)$  (其中  $v(t) = u(t) + q$ ,  $q$  为常数)作用下对应的输出位移  $x(t)$  和  $y(t)$ ,就可确定 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型的参数  $k_v$ 、 $x_0$ 、 $A$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ 。

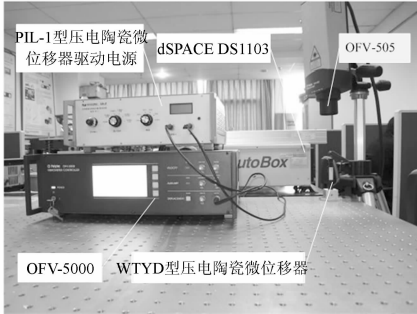
## 4 实验验证

### 4.1 实验装置

为了验证 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型和参数辨识方法的正确性,建立了测试 WTYD 型压电陶瓷微位移器(由中国电子科技集团公司第 26 研究所生产,最大驱动电压为 200 V)特性的实验系统,其系统组成原理示意图和测试装置的照片分别如图 2(a)和 2(b)所示。根据图 2,实验系统主要由 WTYD 型压电陶瓷微位移器、PIL-1 型压电陶瓷驱动电源<sup>[13]</sup>(输出电压范围为 0~200 V,线性度优于 99.98%,静态纹波 < 20 mV,分辨率为 10 mV)、Polytec OFV-505/OFV-5000 型激光多普勒测振仪、基于 MATLAB/Simulink 的实时仿真系统(dSPACE DS1103)组成。实验过程中采用 PIL-1 型压电陶瓷驱动电源驱动 WTYD 型压电陶瓷微位移器,采用 Polytec OFV-505/OFV-5000 型多普勒测振仪测试 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移,采用基于 MATLAB/Simulink 的实时仿真系统采集实验数据并进行相应处理。



(a) 系统组成原理示意图  
(a) Schematic

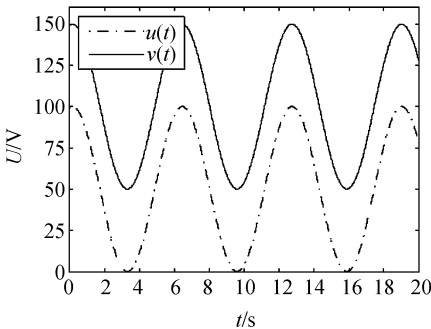


(b) 测试装置实物图  
(b) Photograph

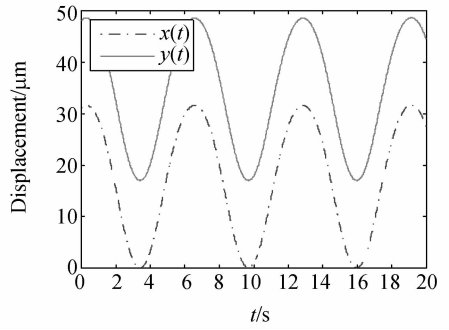
图 2 WTYD 型压电陶瓷微位移器的实验测试装置  
Fig. 2 Experimental setup for WTYD type piezoelectric micro-actuator

4.2 实验结果

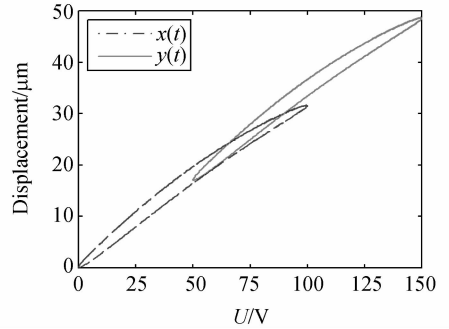
分别对 WTYD 型压电陶瓷微位移器输入如图 3(a)所示的两组驱动电压,测得对应的压电陶瓷微位移器的输出位移时间曲线如图 3(b)所示,由图 3(a)和图 3(b)可得出在这两组电压作用下压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线如图 3(c)所示。



(a) 驱动电压时间曲线  
(a) Input voltage time history



(b) 输出位移时间曲线  
(b) Output displacement time history



(c) 输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线  
(c) Hysteretic curves of output displacement versus applied voltage

图 3 WTYD 型压电陶瓷微位移器的实验测试曲线  
Fig. 3 Measured voltage time histories and hysteretic curve of WTYD type piezoceramic micro-actuator

根据图 3 所示的数据,利用式(6)、(8)、(12)、(16)和(17)可得 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型的参数分别为:

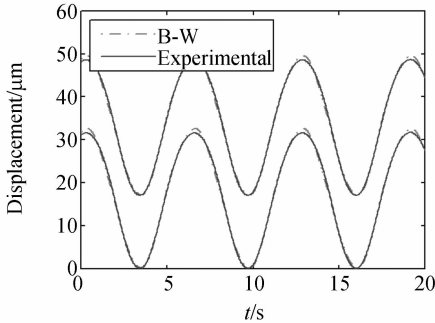
$$k_v = 3.75 \times 10^{-7}, x_0 = -3.91 \times 10^{-6}, A = -1.82 \times 10^{-7}, \beta = 0.065, \gamma = -0.036.$$

将得到的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型的参数值代入式(1)和(3),可以预测将如图 3(a)所示的两组驱动电压分别输入 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移,其输出位移时间曲线和输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线分别如图 4(a)和 4(b)所示,模型预测的输出位移与实验测量输出位移之间的误差-电压曲线分别如图 4(c)和 4(d)所示。根据图 4(c)和 4(d),模型预测输出位移的最大绝对误差为  $\Delta_{MAX} = 1.21 \mu\text{m}$ 。定义模型的最大相对误差为:

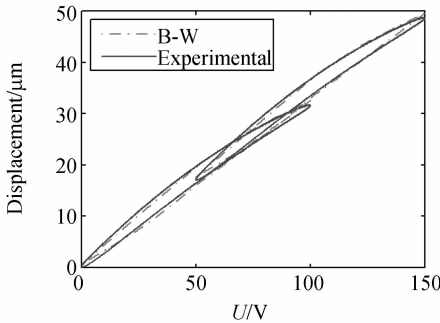
$$\delta_{\text{MAX}} = \frac{\Delta_{\text{MAX}}}{x_{\text{FS}}} \times 100\% , \quad (18)$$

式中  $x_{\text{FS}}$  为实验测量的输出位移的最大值。

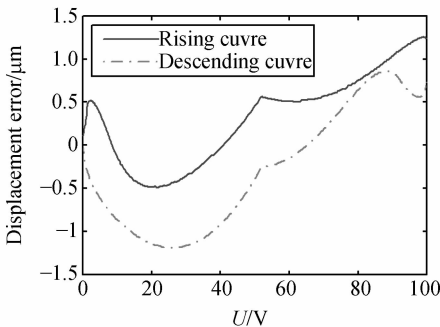
由式(18)得出模型预测位移的最大相对误差为  $\delta_{\text{MAX}} = 3.78\%$ 。



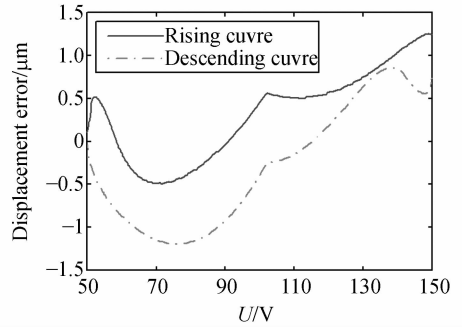
(a) 输出位移时间曲线  
(a) Input voltage time history



(b) 输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线  
(b) Hysteretic curves of output displacement versus applied voltage



(c) Bouc-Wen 模型跟踪的位移误差与驱动电压之间的关系曲线  
(c) Relationship between displacement error by Bouc-Wen model and applied voltage



(d) Bouc-Wen 模型跟踪的位移误差与驱动电压之间的关系曲线  
(d) Relationship between displacement error by Bouc-Wen model and applied voltage

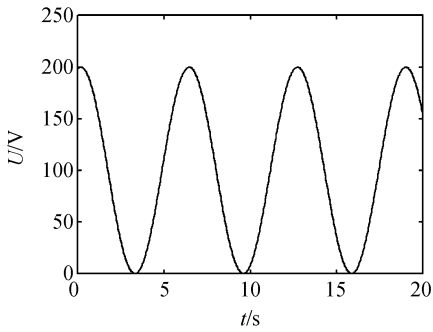
图 4 Bouc-Wen 模型预测的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的结果与实验测量结果的比较  
Fig. 4 Comparisons between predicted outputs from WTYD type piezoceramic micro-actuator by Bouc-Wen model and measured outputs

根据图 4 及上面的计算结果,由式(1)和(3)确定的压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型能够较好地跟踪实验测得的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移-时间曲线和输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线。

为了考证式(1)和(3)所确定的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型的推广能力,输入如图 5(a)所示的驱动电压以比较 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型的预测结果和实验测试结果。由 Bouc-Wen 模型预测和实验测量的输出位移时间曲线和输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线分别如图 5(b)和 5(c)所示,图 5(d)给出了 Bouc-Wen 模型预测输出位移的误差与驱动电压之间的关系曲线。由图 5(d)可得模型的最大误差为  $\Delta_{\text{MAX}} = 3.78 \mu\text{m}$ ,由式(18)可得,最大相对误差为  $\delta_{\text{MAX}} = 5.79\%$ 。

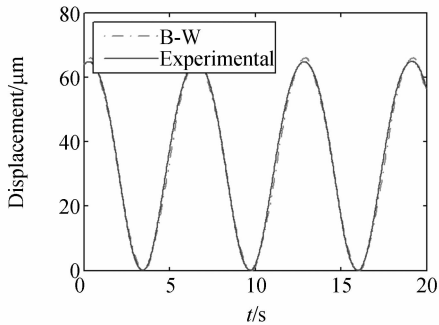
比较图 4 和 5 以及计算得到的最大相对误差,当采用与模型参数辨识不同的驱动电压时模型预测的输出位移误差比采用模型参数辨识相同的驱动电压时的模型预测的输出位移误差大,但从图 5(b)和 5(c)可以看出模型仍然能够跟踪实验测得的输出位移时间曲线和输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线。因此有理由认为式(1)和(3)所确定的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-

Wen 模型的和由式(6)、(8)、(12)、(16)和(17)确定的参数辨识方法具有较好的推广能力。



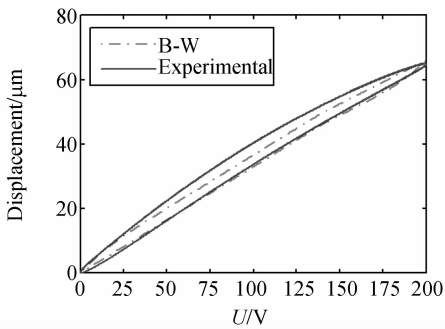
(a) 驱动电压时间曲线

(a) Applied voltage time history



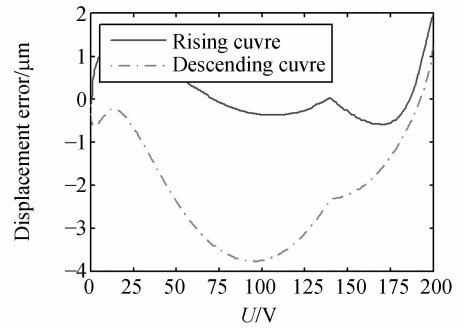
(b) 输出位移时间曲线

(b) Output displacement time history



(c) 输出位移与驱动电压之间的迟滞曲线

(c) Hysteretic curves of output displacement versus applied voltage



(d) Bouc-Wen 模型预测的输出位移误差与驱动电压之间的关系曲线

(d) Relationship between output displacement error by Bouc-Wen model and applied voltage

图 5 Bouc-Wen 模型预测的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的结果与实验测量结果的比较

Fig. 5 Comparisons between predicted results from WTYD type piezoceramic micro-actuator by Bouc-Wen model and measured results

## 5 结 论

本文提出了一种表征 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间的迟滞关系的 Bouc-Wen 模型并建立了相应的参数辨识方法。为了验证 Bouc-Wen 模型及其相应的参数辨识方法的有效性,建立了相应的实验装置并对模型进行了实验验证。研究表明,Bouc-Wen 模型的最大绝对误差为  $3.78 \mu\text{m}$ ,最大相对误差为  $5.79\%$ 。本文提出并研究的 WTYD 型压电陶瓷微位移器的 Bouc-Wen 模型及相应的参数辨识方法能较好地模拟 WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性。

## 参考文献:

[1] 李黎,刘向东,侯朝楨,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)

[2] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(5):706-712.

LI L, LIU X D, WANG W, *et al.*. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity

- of piezoceramic actuator and its numerical implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):706-712. (in Chinese)
- [3] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞与蠕变的逆控制算法[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)
- [4] CHOI G H, OH J H, CHOI G S. Repetitive tracking control of a coarse-fine actuator [C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1999: 335-340.
- [5] AWABDY B A, SHIH W C, AUSLANDER D M. Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1998,3(2):113-119.
- [6] BOUC R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C]. *Proceedings of the 4th Conference on Nonlinear Oscillations, Prague, Czechoslovakia*, 1967:315.
- [7] WEN Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1976,102(2):249-263.
- [8] HA J L, KUNG Y S, FUNG R F, *et al.*. A comparison of fitness functions for the identification of a piezoelectric hysteretic actuator based on the real-coded genetic algorithm[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2006,132(2):643-650.
- [9] LIN C J, YANG S R. Precise positioning of piezo-actuated stages using hysteresis-observer based control [J]. *Mechatronics*, 2006,16(4):417-426.
- [10] IKHOUANE F, RODELLAR J. A limit cycle approach for the parametric identification of hysteretic systems [J]. *Systems and Control Letters*, 2008,57(8):663-669.
- [11] IKHOUANE F, RODELLAR J. On the hysteretic Bouc-Wen model Part II [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2005,42(1):79-95.
- [12] IKHOUANE F, RODELLAR J. Modeling and validation of a piezoelectric actuator [J]. *Electrical Engineering*, 2007,89(8):629-638.
- [13] 丁文明, 王代华. 一种压电陶瓷执行器动态驱动电源[J]. *压电与声光*, 2008,30(3):297-300.  
DING W M, WANG D H. A dynamic power supply for piezoelectric actuators [J]. *Piezoelectric and Acoustooptics*, 2008,30(3):297-300. (in Chinese)

#### 作者简介:



王代华(1966—),男,湖北松滋人,博士,教授,博士生导师,1999年于重庆大学获得博士学位,为2001年度“全国优秀博士学位论文”作者,2005年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”入选者,主要从事智能结构与系统、传感技术及系统、多维精密定位/振动控制和微装配技术方面的研究。E-mail: dh-wang@cqu.edu.cn



朱 炜(1984—),男,江西泰和人,硕士研究生,2006年于重庆大学获得学士学位,主要从事压电陶瓷执行器模拟与控制方面的研究。E-mail: 20060802085@cqu.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)