

文章编号 1004-924X(2015)01-0110-07

压电执行器的 Bouc-Wen 模型在线参数辨识

朱 炜*, 芮筱亭

(南京理工大学 发射动力学研究所, 江苏 南京 210094)

摘要: 现有的定参数 Bouc-Wen 模型由于无法表征压电执行器迟滞具有的频移和时变性, 极易产生较大的模拟误差。为了精确地模拟压电执行器的迟滞特性, 本文建立了压电执行器的 Bouc-Wen 模型, 并采用递推最小二乘在线辨识方法来实时辨识 Bouc-Wen 模型的参数。为了避免出现数据饱和现象, 使用限定记忆来限定辨识方法所使用的数据组数。为验证该辨识方法的有效性, 建立了相应的实验系统对其进行实验验证。实验结果表明, 限定记忆递推最小二乘在线辨识方法能使 Bouc-Wen 模型也呈现频移和时变特性。以 100 Hz 的驱动电压为例, 其最大绝对模拟误差从 1.38 μm 降为 0.51 μm 。因此, 与传统的离线参数辨识方法相比, 限定记忆递推最小二乘在线辨识方法能够有效地提高 Bouc-Wen 模型的模拟精度。

关键词: 压电执行器; Bouc-Wen 模型; 在线参数辨识; 递推最小二乘法; 限定记忆法

中图分类号: TP271; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0110

Online parameter identification of Bouc-Wen model for piezoelectric actuators

ZHU Wei*, RUI Xiao-ting

(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuwei@cqu.edu.cn

Abstract: The exciting Bouc-Wen model with fixed-parameters can not characterize the frequency-dependent and time-varying properties from the hysteresis of piezoelectric actuators and easy to generate simulation errors. In order to accurately describe these characteristics, the Bouc-Wen model was established and a recursive least square online identification method was proposed to identify the parameters of the Bouc-Wen model in real-time. Meanwhile, the limited memory method was used to limit the data sets to avoid the data saturation phenomenon. To verify the availability of the identification method, an experimental system was set up and the performance of the identification method was experimentally verified. Experimental results show that the limited memory recursive least square identification method makes the Bouc-Wen model show the frequency shift and time-varying characteristics. When the drive voltage is set to be 100 Hz, the largest absolute simulation error decreases from 1.38 μm to 0.51 μm , and reduced by 63.7%. Compared with the traditional off line parameter identification, the online identification effectively improves the modeling accuracy of the

收稿日期: 2014-04-19; 修订日期: 2014-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61304137); 高等学校博士学科点专项基金资助项目 (No. 20113219110025)

Bouc-Wen model.

Key words: piezoelectric actuator; Bouc-Wen model; online parameter identification; recursive least square method; limited memory method

1 引 言

基于逆压电效应的压电执行器具有体积小、能量密度高、频响快、定位精度高等优点,在精密定位^[1]中得到越来越广泛的应用。然而,压电执行器的输出位移与驱动电压之间存在的迟滞却对定位的精度有很大的影响。为了降低压电执行器的迟滞特性对精密定位的影响,一般通过建立压电执行器迟滞模型,利用逆迟滞模型提供前馈补偿来提高定位精度。

压电执行器的迟滞模型可分为静态模型和动态模型两类。静态模型包括 Preisach 模型^[2-4]、Prandtl-Ishlinskii 模型^[5]、多项式^[6-7]、神经网络^[8-9]等,它们模拟精度高,但是不能很好地描述压电执行器的动态特性。动态模型包括 Maxwell 模型^[10-11]、Jiles-Atherton 模型^[12]、LuGre 模型^[13-14]和 Bouc-Wen 模型^[15-17]等,它们使用非线性微分方程描述压电执行器和压电驱动系统的迟滞特性,不但能表征迟滞的数学特性,而且能描述压电执行器的动态特性。

由于 Bouc-Wen 模型具有模拟各种迟滞行为的能力^[18],被广泛应用于模拟具有迟滞特性的结构材料与系统中^[19],但在压电执行器中的应用遇到了一些困难,例如定参数 Bouc-Wen 模型无法表征压电执行器迟滞具有的频移和时变性,由此产生了较大的模拟误差。

为了更精确地模拟压电执行器的迟滞特性,本文采用递推最小二乘法在线辨识方法实时辨识 Bouc-Wen 模型的参数,由于递推最小二乘法随着采集的数据增多,会出现新数据提供的信息比重越来越小,最终被老数据“淹没”的现象。为了避免数据饱和,本文用限定记忆限定辨识方法所使用的数据组数,使建立的 Bouc-Wen 模型也具有频移和时变特性。

2 Bouc-Wen 模型

对压电执行器输入 1 Hz 正弦电压,实验测得的压电执行器的输出位移-驱动电压迟滞曲线如

图 1 所示。压电材料具有的记忆特性使得初始周期的输出位移与稳定周期有所区别。将实验测得的迟滞曲线最小二乘拟合后得到图 1 中虚线所示的直线,以拟合得到的直线作为线性分量将迟滞曲线分解可以得到线性分量($X(t)$)和迟滞分量($h(t)$),图中的毛刺主要是测量过程中引入的外界干扰。压电执行器的输出位移-输入电压迟滞曲线可以看成线性分量和迟滞分量的叠加,可以分别模拟。

压电执行器的输出位移为:

$$x(t) = X(t) + h(t), \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为压电执行器的输出位移; $X(t)$ 为线性位移分量, $h(t)$ 为迟滞位移分量。压电执行器的输出位移中的线性分量和迟滞分量可以分别表示为:

$$X(t) = k_v u(t) + x_0, \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 为压电执行器的输入电压; k_v 为输出位移与输入电压的比率常量; x_0 为初始状态下存在的位移。根据式(1)和(2)可得:

$$x(t) = k_v u(t) + x_0 + h(t). \quad (3)$$

用 Bouc-Wen 迟滞算子模拟迟滞分量:

$$\dot{h}(t) = A\dot{u}(t) - \beta|\dot{u}(t)|h(t) - \gamma\dot{u}(t)|h(t)|, \quad (4)$$

式中: $\dot{h}(t)$ 为迟滞位移的一阶导数; A 、 β 和 γ 为模型的参数。式(3)和(4)定义了压电执行器的 Bouc-Wen 模型,模型参数为 k_v 、 x_0 、 A 、 β 和 γ 。采用 Bouc-Wen 模型模拟压电执行器的迟滞曲线,需首先通过参数辨识确定上述参数的值。

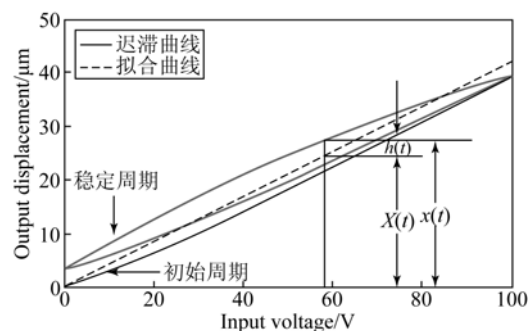


图 1 压电执行器在 1 Hz 正弦电压作用下的迟滞曲线
Fig. 1 Measured hysteresis curve of piezoelectric actuator under 1 Hz sinusoidal input voltage

3 在线参数辨识方法

压电执行器的频移特性如图 2 所示。

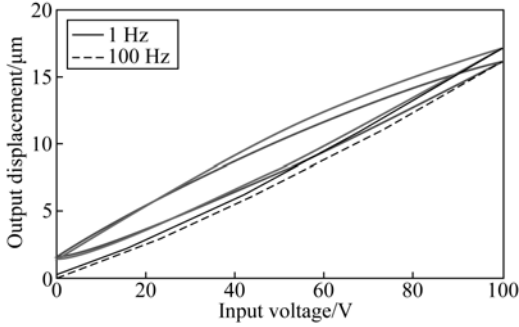


图 2 压电执行器的频移特性

Fig. 2 Frequency-dependent hysteresis of piezoelectric actuator

当压电执行器的频率变化时,其输出位移与输入电压的关系将会发生较大的变化。为了让 Bouc-Wen 模型能够更好地模拟压电执行器的迟滞曲线,必须使其也具有频移和时变特性,采用递推最小二乘法在线实时更新模型参数。为了避免随着时间的推移产生数据饱和现象,采用限定记忆法固定参数估计所使用的观察数据的组数,即每采样一组新数据,就去掉最老的一组数据。令限定记忆的组数为 N ,当采样点为 $k+1$ 时,得到压电执行器输入电压和输出位移的 N 组数据 $([u_{k+1-N} \ x_{k+1-N}], \dots, [u_{k+i-N} \ x_{k+i-N}], \dots, [u_{k+1} \ x_{k+1}])$ 时,使用限定记忆递推最小二乘法进行线性拟合,由式(3)可得:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \mathbf{K}_{k+1} (\boldsymbol{\varphi}_{k+1} \Delta x_{k+1} - \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N} \Delta x_{k+1-N}) \\ \mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1} + \frac{\mathbf{P}_{k+1} \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N}}{1 - \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N}^T \mathbf{P}_{k+1} \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N}} \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N}^T \mathbf{P}_{k+1} \\ \mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{K}_k - \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1} (\mathbf{1} + \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1})^{-1} \boldsymbol{\varphi}_{k+1} \mathbf{K}_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: $k \geq N$; $\theta = [k_v \ x_0]^T$; 上标 $\hat{\cdot}$ 表示参数的估计值;

$$\boldsymbol{\varphi}_i = [u_i \ 1]; \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \hat{\theta}_k \\ \hat{x}_{k+1-N} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1-N}^T \hat{\theta}_k \end{cases}; \\ \mathbf{K}_k = (\boldsymbol{\Phi}_k^T \boldsymbol{\Phi}_k)^{-1}; \\ \boldsymbol{\Phi}_k = [\boldsymbol{\varphi}_{k-N}^T \ \dots \ \boldsymbol{\varphi}_{k+i-N}^T \ \dots \ \boldsymbol{\varphi}_k^T]^T;$$

$$\begin{cases} \Delta x_{k+1} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} \\ \Delta x_{k+1-N} = x_{k+1-N} - \hat{x}_{k+1-N} \end{cases}$$

将初始值设定为

$$\hat{\theta}_N = (\boldsymbol{\Phi}_N^T \boldsymbol{\Phi}_N)^{-1} \boldsymbol{\Phi}_N^T [x_1 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_N]^T, \quad (6)$$

或者将离线辨识得到的参数值设为初始值。

假定在采样得到的 N 组数据中存在 N_1 组数据 $([u_{0,j} \ x_{0,j}], j=1, \dots, N_1)$, 满足 $\dot{u}_{0,j} > 0$, 并且对应的迟滞分量 $h_{0,1}, \dots, h_{0,j}, \dots, h_{0,N_1}$ 等于 0, 根据式(4)可得:

$$\dot{x}_{0,j} = (A + \hat{k}_{v,k+1}) \dot{u}_{0,j}, \quad (7)$$

式中: $\hat{k}_{v,k+1}$ 为采样点 $k+1$ 时刻 k_v 的估计值。根据最小二乘法和式(7), 可得估计值为:

$$\hat{A}_{k+1} = (\boldsymbol{\Phi}_{N_1}^T \boldsymbol{\Phi}_{N_1})^{-1} \boldsymbol{\Phi}_{N_1}^T \dot{\mathbf{x}}_{0,N_1} + \hat{k}_{v,k+1}, \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}_{N_1} = [\dot{u}_{0,1} \ \dots \ \dot{u}_{0,j} \ \dots \ \dot{u}_{0,N_1}]^T$; $\dot{\mathbf{x}}_{0,N_1} = [\dot{x}_{0,1} \ \dots \ \dot{x}_{0,j} \ \dots \ \dot{x}_{0,N_1}]^T$ 。 $\hat{k}_{v,k+1}$, $\boldsymbol{\Phi}_{N_1}$ 和 $\dot{\mathbf{x}}_{0,N_1}$ 均在实时更新, 因此根据式(8)得到 \hat{A}_{k+1} 为在线实时辨识得到的估计值, 具有时变性。

假定在 N 组数据中存在 N_2 组数据 $([u_{+,j} \ x_{+,j}], j=1, \dots, N_2)$, 满足 $\dot{u}_{+,j} > 0$, 并且对应的迟滞分量 $h_{+,1}, \dots, h_{+,j}, \dots, h_{+,N_2}$ 大于 0。此时式(4)可写为:

$$\begin{cases} \frac{\dot{h}_{+,1}}{u_{+,1}} = \hat{A}_{k+1} - (\beta + \gamma) h_{+,1} \\ \dots \\ \frac{\dot{h}_{+,j}}{u_{+,j}} = \hat{A}_{k+1} - (\beta + \gamma) h_{+,j} \\ \dots \\ \frac{\dot{h}_{+,N_2}}{u_{+,N_2}} = \hat{A}_{k+1} - (\beta + \gamma) h_{+,N_2} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)使用最小二乘法后可得:

$$\hat{\beta}_{k+1} + \hat{\gamma}_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{+,j}}{u_{+,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_2} h_{+,j}} \quad (10)$$

假定在 N 组数据中存在 N_3 组数据 $([u_{-,j} \ x_{-,j}], j=1, \dots, N_3)$, 满足 $\dot{u}_{-,j} < 0$, 使得该系列的点对应的迟滞分量 $h_{-,1}, \dots, h_{-,j}, \dots, h_{-,N_3}$ 大于 0。式(4)可写为:

$$\begin{cases} \frac{\dot{h}_{-,1}}{u_{-,1}} = \hat{A}_{k+1} - (-\beta + \gamma)h_{-,1} \\ \dots \\ \frac{\dot{h}_{-,j}}{u_{-,j}} = \hat{A}_{k+1} - (-\beta + \gamma)h_{-,j} \\ \dots \\ \frac{\dot{h}_{-,N_3}}{u_{-,N_3}} = \hat{A}_{k+1} - (-\beta + \gamma)h_{-,N_3} \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)使用最小二乘法后可得:

$$-\hat{\beta}_{k+1} + \hat{\gamma}_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^{N_3} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{-,j}}{u_{-,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_3} h_{-,j}} \quad (12)$$

由式(10)和(12)可得,参数 β 和 γ 的估计值为:

$$\hat{\beta}_{k+1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_2} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{+,j}}{u_{+,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_2} h_{+,j}} - \frac{\sum_{j=1}^{N_3} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{-,j}}{u_{-,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_3} h_{-,j}} \right] \quad (13)$$

$$\hat{\gamma}_{k+1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_2} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{+,j}}{u_{+,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_2} h_{+,j}} + \frac{\sum_{j=1}^{N_3} \left(\hat{A}_{k+1} - \frac{\dot{h}_{-,j}}{u_{-,j}} \right)}{\sum_{j=1}^{N_3} h_{-,j}} \right] \quad (14)$$

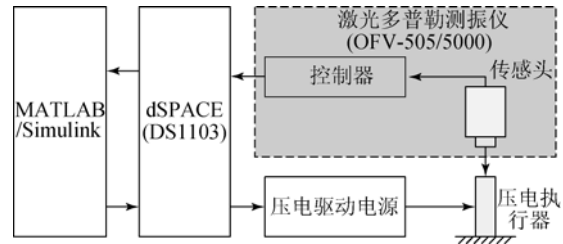
$\hat{\beta}_{k+1}$ 和 $\hat{\gamma}_{k+1}$ 也具有时变特性。由式(5)、(8)、(13)和(14)可知,当实时采集输入电压 $u(t)$ 和对应的输出位移时,由式(3)和(4)确定的 Bouc-Wen 模型的参数 k_v 、 x_0 、 A 、 β 和 γ 的值可在线实时更新。因此,在线辨识方法能用最新的数据实时辨识模型参数,而离线辨识方法得到的参数不变,不具备频移和时变性。

4 实验验证

4.1 实验装置

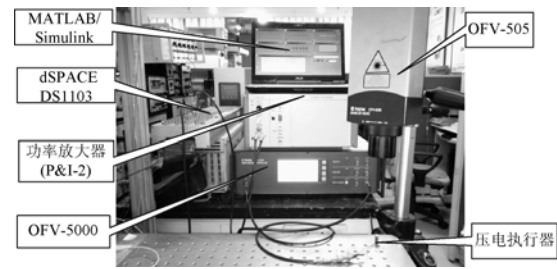
为了验证在线辨识方法的有效性,建立了压电执行器的实验系统,其系统组成原理和测试装置分别如图 3(a)和 3(b)所示。实验系统主要由压电执行器(型号:P885.51,尺寸:5 mm×5 mm×18 mm,驱动电压:0~120 V,输出位移:0~18 μ m,德国 PI 公司)、压电执行器驱动电源

(P&L-2)^[20]、激光多普勒测振仪(型号:OFV-505/5000)和实时仿真系统(dSPACE DS1103)和计算机(MATLAB/Simulink)组成。压电执行器由压电陶瓷驱动电源驱动,输出位移由激光多普勒测振仪测试,采用实时仿真系统采集实验数据并送入 MATLAB/Simulink 进行在线参数辨识。



(a) 原理图

(a) Principle schematic



(b) 实物图

(b) Physical photograph

图 3 压电执行器的实验系统

Fig 3 Experimental setup for piezoelectric actuators

4.2 实验结果

将 1 Hz 的正弦电压输入压电执行器,得到迟滞曲线如图 4(a)所示,对应的模拟误差如图 4(b)所示。根据图 4 可知,Bouc-Wen 模型能够同时模拟迟滞曲线的初始周期和稳定周期,并且当压电执行器的工作频率与辨识数据的频率一致时,两种辨识方法的模拟精度几乎相同。

压电执行器的输入电压分别为 10、100 和 200 Hz 的正弦电压时,采用由 1 Hz 离线辨识得到的定参数和在线辨识参数的方法得到时变参数,分别模拟实验测得的迟滞曲线如图 5(a)、6(a)和 7(a)所示,对应的模拟误差如图 5(b)、6(b)和 7(b)所示。当输入电压为 10 Hz 时,离线参数辨识方法和在线辨识方法的最大绝对误差分别为 0.82 μ m 和 0.51 μ m。当输入电压为

100 Hz 时,两种辨识方法的最大绝对误差分别为 $1.38 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 。当输入电压为 200 Hz 时,两种辨识方法的最大绝对误差分别为 $3.25 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 。因此,当压电执行器的工作频率发生变化时,离线参数辨识方法产生了较大的误差,而在线参数辨识方法通过实时更新参数的值使 Bouc-Wen 模型也呈现频移特性,其最大绝对误差一直保持在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右。与离线参数辨识方法相比,当输入电压频率为 10、100 和 200 Hz 时,模拟误差分别降低了 39.0%、63.7% 和 84.6%。因此采用限定记忆递推最小二乘法对 Bouc-Wen 模型的参数进行在线辨识,可以使其具有频移和时变特性,能有效地提高模拟精度。

当输入电压幅值递减的正弦波时,两种辨识方法的模拟结果如图 8 所示。当输入电压的幅值发生变化时,在线参数辨识方法依然有很高的模拟精度。

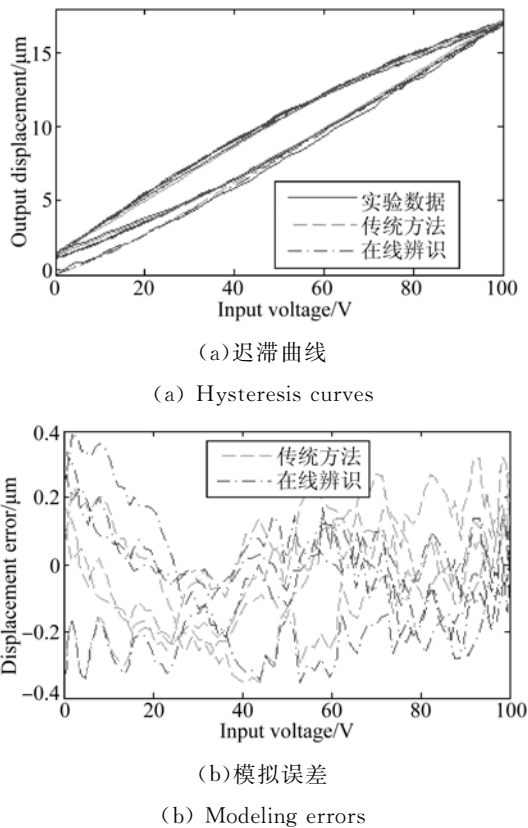


图 4 输入电压为 1 Hz 正弦波时两种辨识方法的模拟结果

Fig. 4 Modeling results of two parameter identification methods under a 1 Hz sinusoidal input voltage

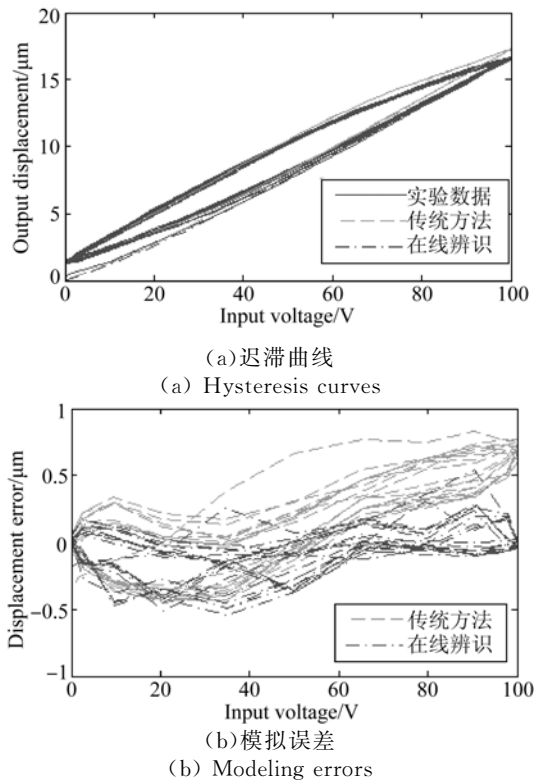


图 5 输入电压为 10 Hz 正弦波时两种辨识方法的模拟结果

Fig. 5 Modeling results of two parameter identification methods under 10 Hz sinusoidal input voltage

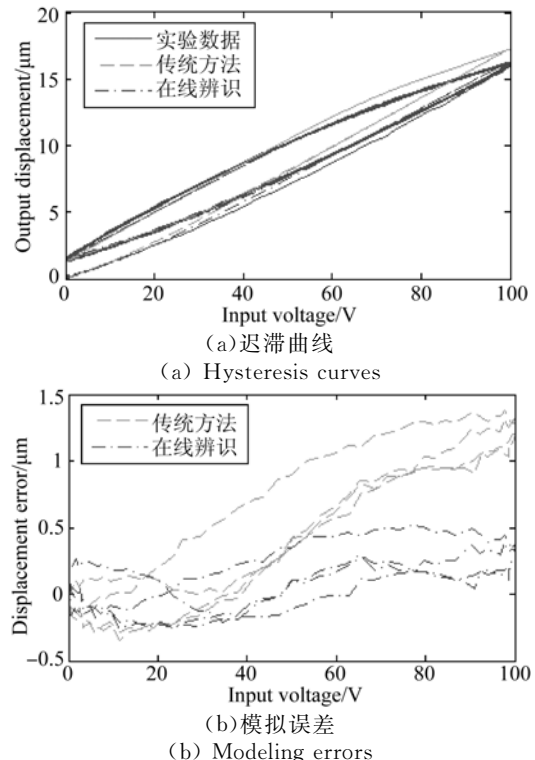
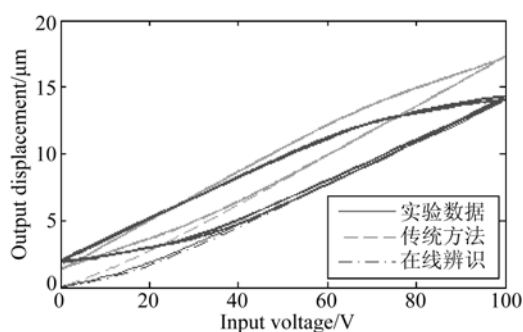
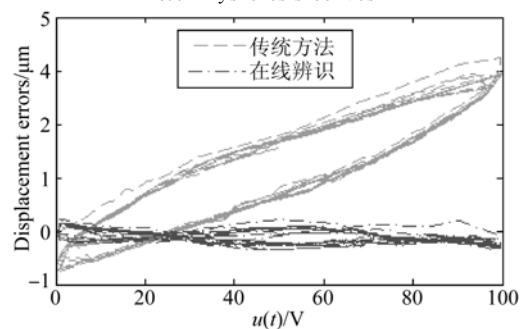


图 6 输入电压为 100 Hz 正弦波时两种辨识方法的模拟结果

Fig. 6 Modeling results of two parameter identification methods under 100 Hz sinusoidal input voltage



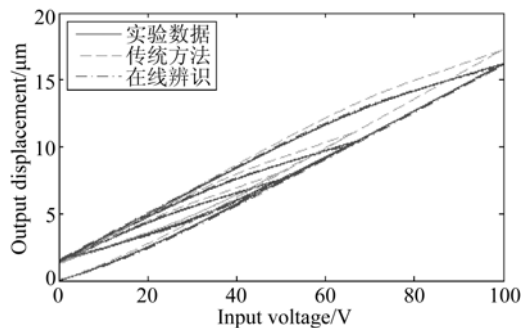
(a) 迟滞曲线
(a) Hysteresis curves



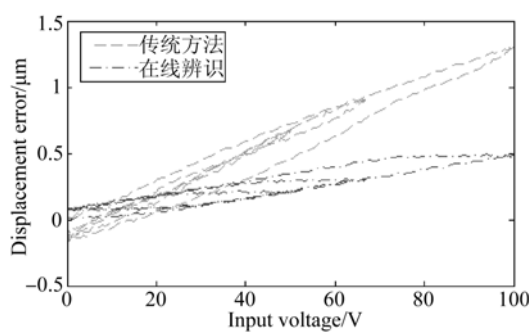
(b) 模拟误差
(b) Modeling errors

图 7 输入电压为 200 Hz 正弦波时两种辨识方法的模拟结果

Fig. 7 Modeling results of two parameter identification methods under a 200 Hz sinusoidal input voltage



(a) 迟滞曲线
(a) Hysteresis curves



(b) 模拟误差
(b) Modeling errors

图 8 输入电压为 120 Hz 幅值递减的正弦波时两种辨识方法的模拟结果

Fig. 8 Modeling results of two parameter identification methods under 100 Hz sinusoidal input voltage with decreasing amplitude

5 结 论

为了精确地模拟工作压电执行器的迟滞特性,提出了采用限定记忆递推最小二乘在线辨识方法实时辨识 Bouc-Wen 模型参数的方法。建立了相应的实验系统对该辨识方法的有效性进行实验验证。实验结果表明,限定记忆递推最小二乘在线辨识方法能够使得 Bouc-Wen 模型也具有频移和时变特性,当压电执行器的输出电压频率变化为 100 Hz 时,其最大绝对模拟误差从 1.38 μm 降为 0.51 μm 。该在线辨识方法能够有效地提高 Bouc-Wen 模型的模拟精度。

参考文献:

[1] DONG W, TANG J, AND ELDEEB Y. Design of a linear-motion dual-stage actuation system for precision control [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(9): 095035-1-11.
 [2] 房建成, 陈萌, 李海涛. 磁悬浮控制力矩陀螺框架系统谐波减速器的迟滞建模 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2950-2958.
 FANG J CH, CHEN M, LI H T. Hysteresis modeling for harmonic drive in DGMSCMG gimbal system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2950-2958. (in Chinese)
 [3] 陈远晟, 裘进浩, 季宏丽. 基于双曲函数的 Preis-

ch 类迟滞非线性建模与逆控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1205-1212.
 CHEN Y SH, QIU J H, JI H L. Modeling and inverse control of preisach type hysteresis nonlinearity using hyperbola functions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1205-1212. (in Chinese)
 [4] 耿洁, 刘向东, 陈振, 等. Preisach 迟滞逆模型的神经网络分类排序实现 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 855-862.
 GENG J, LIU X D, CHEN ZH, *et al.*. The sorting & taxis realization of Preisach inverse hysteresis model using neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 855-862. (in Chinese)
 [5] TAN U X, LATT W T, WIDJAJA F, *et al.*. Track-

- ing control of hysteretic piezoelectric actuator using adaptive rate-dependent controller [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 150(1): 116-123.
- [6] SUN L, RU C, RONG W, CHEN L, *et al.*. Tracking control of piezoelectric actuator based on a new mathematical model [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(11): 1439-1444.
- [7] 张桂林, 张承进, 赵学良. 压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 996-1011.
ZHANG G L, ZHANG CH J, ZHAO X L. Modeling of nonlocal memory hysteresis in piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 996-1011. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 魏强, 张承进, 张栋, 等. 压电陶瓷驱动器的滑模神经网络控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1055-1063.
WEI Q, ZHANG CH J, ZHANG D, *et al.*. Neural network control for piezo-actuator using sliding-model technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1055-1063. (in Chinese)
- [10] QUANT M, ELIZALDE H, FLORES A, *et al.*. A comprehensive model for piezoceramic actuators: modelling, validation and application [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(12): 125011 (16 pp).
- [11] 袁进浩, 陈海荣, 陈远晟, 等. 压电驱动器的非对称迟滞模型 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(3): 189-197.
QIU J H, CHEN H R, CHEN Y SH, *et al.*. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(3): 189-197. (in Chinese)
- [12] HEGEWALD T, KALTENBACHER B, KALTENBACHER M, *et al.*. Efficient modeling of ferroelectric behavior for the analysis of piezoceramic actuators [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008, 19(10): 1117-1129.
- [13] LI J W, CHEN X B, AN Q, *et al.*. Friction models incorporating thermal effects in highly precision actuators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(4): 045104-1-6.
- [14] HUANG S J, CHIU C M. Optimal LuGre friction model identification based on genetic algorithm and sliding mode control of a piezoelectric-actuating table [J]. *T. I. Meas. Control*, 2009, 31(1): 181-203.
- [15] 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. The hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 205-211. (in Chinese)
- [16] ZHU W, WANG D H. Non-symmetrical Bouc-Wen model for a piezoelectric ceramic actuator [J]. *Sensor Actuat. A-Phys.*, 2012, 181: 51-60.
- [17] WANG D H, ZHU W. Phenomenological model for pre-stressed piezoelectric stack actuators [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2011, 20(3): 035018-1-11.
- [18] SMYTH A W, MASRI S F, KOSMATOPOULOS E B, *et al.*. Development of adaptive modeling techniques for nonlinear hysteretic systems [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, 37(8): 1435-1451.
- [19] ISMAIL M, IKHOUANE F, RODELLAR J. The Hysteresis Bouc-Wen model, a survey [J]. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2009, 16: 161-188.
- [20] WANG D H, ZHU W, YANG Q, *et al.*. A high-voltage and high-power amplifier for driving piezoelectric stack actuators [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(16): 1987-2001.

作者简介:



朱 炜 (1984—), 男, 江西泰和人, 博士, 讲师, 2012 年于重庆大学获得博士学位, 主要从事智能材料系统与控制方面、振动与噪声控制等方面的研究。E-mail: zhuwei@cqu.edu.cn



芮筱亭 (1956—), 男, 江苏盐城人, 博士, 研究员, 1994 年于南京理工大学获得博士学位, 主要从事智能材料的振动噪声控制, 武器系统发射动力学理论与仿真, 武器系统试验与评估技术, 提高武器系统性能新技术, 多体系动力学新方法研究。E-mail: ruixt@163.net