

文章编号 1004-924X(2013)05-1205-08

基于双曲函数的 Preisach 类 迟滞非线性建模与逆控制

陈远晟¹, 裘进浩^{1*}, 季宏丽¹, Ronan Le Breton²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 萨瓦大学材料与机电系统实验室, 法国旧阿纳西城, BP 80439, 74944)

摘要: 为了补偿压电双晶片驱动器的迟滞非线性, 提出了基于双曲函数的 Preisach 类迟滞非线性建模方法, 并用该模型设计了压电双晶片驱动器的逆控制器。首先, 用两个双曲函数分别拟合迟滞主环的上升段与下降段, 利用坐标变换描述依附于主环的一阶曲线; 然后, 根据 Preisach 模型理论的记忆擦除性与次环一致性, 基于一阶上升与下降曲线分别描述了次环的上升段与下降段。由于这种建模方法所需的参数远小于 Preisach 等经典迟滞模型, 非常适用于压电驱动器等智能材料系统。实验结果显示, 基于这种迟滞非线性模型设计的逆控制器, 控制后的最大误差比控制前减小了 44.26%, 有效地提高了压电双晶片驱动器的定位控制精度。

关键词: Preisach 模型; 压电驱动器; 迟滞非线性; 精密定位

中图分类号: TP273; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1205

Modeling and inverse control of Preisach type hysteresis nonlinearity using hyperbola functions

CHEN Yuan-sheng¹, QIU Jin-hao^{1*}, JI Hong-li¹, LE BRETON Ronan²(1. *State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*2. *Laboratory of Systems and Materials for Mechatronics, University of Savoie, BP 80439, 74944 Annecy le Vieux Cedex, France)** *Corresponding author, E-mail: qiu@nuaa.edu.cn*

Abstract: To compensate the hysteresis nonlinearity of a piezoelectric biomorph actuator, a new model with hyperbola functions was proposed to describe the Preisach type hysteresis nonlinearity, and an inverse controller was designed with the proposed model. Two hyperbola functions were used to fit the curves of hysteresis major loop and then the first-order ascending and descending branches were described by the coordinate conversion. Based on the wiping-out and congruency property of Preisach model, the minor loops were modeled by the corresponding first-order curves. As the parameters of the proposed model are much less than those of classic hysteresis models, such as Preisach model, the

收稿日期: 2012-12-27; **修订日期:** 2013-02-03.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (No. 90923029); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0968); 国家自然科学基金中美合作与交流项目 (No. 51161120326); 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目 (No. BK2009020); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (No. CXZZ11_0194); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家留学基金管理委员会公派留学基金资助项目

proposed model is suitable for the smart material systems including piezoelectric actuators. Experimental results show that the inverse controller designed with the proposed model can compensate the hysteresis of piezoelectric biomorph actuator, and the maximum control error with inverse controller has reduced by 44.26%.

Key words: Preisach model; piezoelectric actuator; hysteresis nonlinearity; precision positioning

1 引言

压电陶瓷^[1]、磁致伸缩^[2-4]等智能材料制备的驱动器件被广泛应用于精密定位领域,但这些智能材料本身所固有的迟滞非线性严重制约了定位系统的控制精度^[5],并有可能导致系统不稳定^[6]。迟滞是一种包含历史极值的非线性过程,即迟滞系统的输出不仅取决于当前的输入,而且与输入的历史极值有关。这给控制上带来的难度是多映射性,在相同的输入下迟滞系统有着不同的输出,而相同的输出下对应着不同的输入。

为了减小迟滞非线性对系统的不利影响,通常采用基于迟滞模型的控制方法,如 Preisach 模型^[7-8]、Prandtl-Ishlinskii 模型^[9]、Maxwell 模型^[10-11]等,但这些模型的精度主要取决于基本迟滞单元的数量。Preisach 模型具有原理简单、数学表达方便的优点,在迟滞非线性建模上的应用最为广泛^[12],但该模型是通过 Relay 算子的叠加描述迟滞非线性过程,其精度取决于 Relay 算子及其权值的数量^[13]。Prandtl-Ishlinskii 模型是线性 Play 算子的加权求和^[14-15],虽然所需参数少于 Preisach 模型,但只能描述对称的迟滞过程^[16]。Maxwell 模型的基本迟滞单元是弹簧滑块,尽管提高模型的精度不需要提高模型的阶数,但却要增加弹簧滑块的数量^[17]。在这些迟滞模型的应用过程中,为了提高模型的精度都不可避免地要增加基本迟滞单元的数量。这不仅使得模型的计算与参数辨识更为复杂,而且还给控制器设计增加了难度。Badel 等^[18]采用双曲线函数建立了描述压电叠堆驱动器迟滞非线性的数学模型,所需的参数与计算量远小于 Preisach 等经典迟滞模型,易于在实时控制器中使用,但这种模型对迟滞非线性描述不完整,只具备迟滞的记忆擦除性,而不遵循次环一致性。

本文基于双曲线函数描述 Preisach 类的迟滞非线性,分别采用 2 个双曲线函数描述迟滞主环的

上升段与下降段,并通过坐标变换拟合依附于主环的一阶曲线,然后根据 Preisach 模型的记忆擦除性与次环一致性原理,用一阶上升曲线描述次环的上升段,一阶下降曲线模拟次环的下降段。基于这种迟滞模型设计了逆控制器来补偿压电双晶片驱动器的迟滞非线性,提高了定位控制的精度。

2 基于双曲线函数迟滞非线性模型

2.1 Preisach 模型

Preisach 模型是迟滞非线性领域应用最广的一种数学模型,其基本原理是对 Relay 算子的叠加^[19]:

$$y(t) = H[u](t) = \iint_S \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\varphi}[u](t) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

其中: $y(t)$ 表示输出的位移量, $u(t)$ 为驱动电压, $\gamma_{\varphi}[u](t)$ 是 Relay 算子,输出为+1或-1, $\mu(\alpha, \beta)$ 为权重函数, $S = \{(\alpha, \beta) | u_{\max} \geq \alpha \geq \beta \geq u_{\min}\}$ 为 Preisach 平面上的积分区域,如图 1 所示。

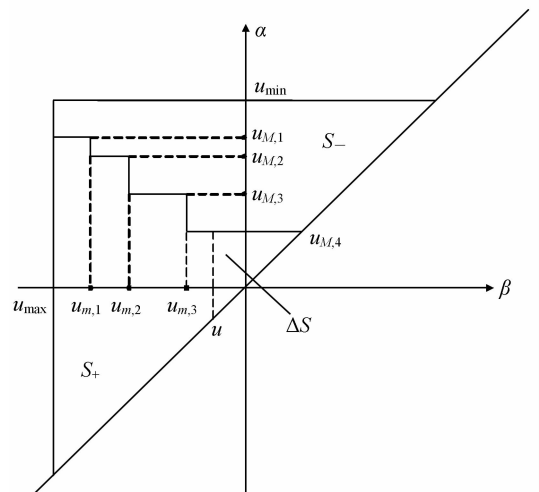


图 1 Preisach 平面

Fig. 1 Preisach plane

记忆擦除性与次环一致性是 Preisach 模型的两个重要特征, 也是迟滞建模研究的两个重要方面。理论上, 只要满足记忆擦除性与次环一致性迟滞过程, 都可以用 Preisach 模型建模描述。记忆擦除性反映了迟滞系统的输出不仅受到当前输入的影响, 还受到输入的历史主导极值的影响。主导极值分为主导极大值与主导极小值, 其中主导极大值是指输入 $u(t)$ 一个局部极大值能够大于后续的所有局部极大值; 主导极小值是指输入 $u(t)$ 一个局部极小值能够小于后续的所有局部极小值。

若在某时刻, 主导极值序列包含了 p 个主导极大值:

$$u_{M,1} > u_{M,2} > \dots > u_{M,i} > \dots > u_{M,p}, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

与 q 个极小值:

$$u_{m,1} < u_{m,2} < \dots < u_{m,i} < \dots < u_{m,q}, \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (3)$$

根据输入信号 $u(t)$ 的变化率, 迟滞曲线可以分为上升段与下降段。若下降段的当前主导极值为 $u_{M,p}$ 与 $u_{m,q}$, 迟滞的下降段曲线从当前主导极大值点 $(u_{M,p}, y_{M,p})$ 开始, 将经过主导极小值点 $(u_{m,q}, y_{m,q})$ 。若输入信号 $u(t)$ 递减到小于 $u_{m,q}$ 时, 则擦除主导极值 $u_{M,p}$ 与 $u_{m,q}$, 并将 $u_{M,p-1}$ 与 $u_{m,q-1}$ 作为当前主导极值, 迟滞的下降曲线将经过点 $(u_{m,q-1}, y_{m,q-1})$ 。上升段的主导极值擦除过程与下降段相类似。若上升段的当前主导极值为 $u_{M,p}$ 与 $u_{m,q}$, 则迟滞的上升段从当前主导极小值点 $(u_{m,q}, y_{m,q})$ 开始, 将经过主导极大值点 $(u_{M,p}, y_{M,p})$ 。若输入信号 $u(t)$ 递增到大于 $u_{M,p}$ 时, 则擦除主导极值 $u_{M,p}$ 与 $u_{m,q}$, 并将 $u_{M,p-1}$ 与 $u_{m,q-1}$ 作为当前主导极值, 迟滞的上升段曲线将经过点 $(u_{M,p-1}, y_{M,p-1})$ 。

次环是输入信号 $u(t)$ 在相邻的主导极值 $[u_-, u_+]$ 之间, 从 u_- 单调递增到 u_+ 再单调递减到 u_- 所形成的封闭轨迹。次环一致性说明了即使在不同的历史输入下, 输入区间 $[u_-, u_+]$ 所形成次环的大小与形状是一致的。如图 2 所示, 在相同的主导极值之间形成的次环 1 与次环 2 具有相同的形状。大多数经典的迟滞模型包括 Preisach 模型、Prandt-Ishlinkii 模型、Maxwell 模型等都具有次环一致性, 但 Badel^[18] 等的双曲函数迟滞模型只遵循记忆擦除性, 不具有次环一致性。

令 u_D 表示遵循记忆擦除性的当前主导极值, 即 u_D 在输入 $u(t)$ 的上升段等于最后一个主导极小值, 而在 $u(t)$ 的下降段等于最后一个主导极大值。将 u_D 对应的时间记为 t_D , 对应的输出记为 y_D , 同时考虑到 ΔS 内 Relay 算子的输出变化, 式的 Preisach 模型可表达为:

$$y(t) = \iint_S \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u](t_D) d\alpha d\beta + 2 \iint_{\Delta S} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u](t) d\alpha d\beta, \quad (4)$$

式中: 第一项输出 y_D 仅与主导极值有关, 第二项可以表达为当前主导极值 u_D 与当前输入 $u(t)$ 的函数^[20]:

$$y(t) = y_D + H_D[u_D, u](t), \quad (5)$$

或:

$$H_D[u_D, u](t) = y(t) - y_D, \quad (6)$$

式中: y_D 是当前主导极值对应的输出, $H_D[u_D, u]$ 计算 y_D 与当前输出的差值, 根据次环一致性原理, 用一阶曲线的拟合。

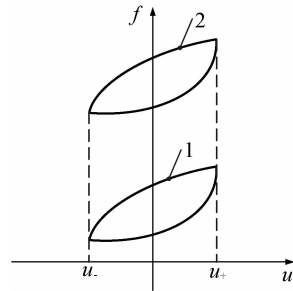


图 2 次环一致性

Fig. 2 Congruency property of minor loops

2.2 基于双曲函数描述 Preisach 类迟滞非线性

Badel 等用 2 个双曲函数描述压电叠堆驱动器迟滞的主环:

$$\begin{cases} f_1(u) = a_1 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{u^2}{b_1^2}} \right) + c_1 u \\ f_2(u) = -a_2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{u^2}{b_2^2}} \right) + c_2 u \end{cases}, \quad (7)$$

其中: $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 是需要根据驱动器响应辨识的参数。上式的模型所需的参数远小于式 (1) 的 Preisach 模型, 而且在辨识过程中只需要主环的数据, 所以在控制器的设计上具有一定的优势, 但式 (7) 描述的迟滞主环必须经过 $(0, 0)$ 点, 适用于压电叠堆驱动器的迟滞非线性, 却不适用于压电双晶片驱动器及其它智能材料与结构的迟

滞非线性。因此,需增加参数 d_1, e_1, d_2, e_2 拓展式(7)的应用范围:

$$\begin{cases} g_1(u) = a_1 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{(u + d_1)^2}{b_1^2}} \right) + c_1 u + e_1 \\ g_2(u) = a_2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{(u - d_2)^2}{b_2^2}} \right) + c_2 u - e_2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: g_1 用于描述迟滞曲线的上升段, g_2 可以迟滞曲线的下降段。虽然式(8)与式(7)描述的曲线形状可能相同,但是式(8)的曲线可以不经过 $(0, 0)$ 点,是对式(7)的扩展,能够模拟压电双晶片驱动器的迟滞非线性。

的主导极值描述次环,使模型具备了与 Preisach 相同的记忆擦除特性^[18]。为了使模型同时具备次环一致性,提出用对应的一阶曲线描述迟滞次环。迟滞非线性的一阶曲线是指依附于主环的上升或下降曲线,可以看成是一种特殊的次环,如图 3 所示。对于任意次环,上升段曲线将从当前主导极小值点 $(u_{m,q}, y_{m,q})$ 开始,将经过主导极大值点 $(u_{M,p}, y_{M,p})$, 对应的一阶上升曲线从点 $(u_{m,q}, g_2(u_{m,q}))$ 开始,将经过全局最大值点 $(u_{max}, g_2(u_{max}))$, 如图 3(a) 所示。该次环的上升段为:

$$y(t) = y_D(t) + g_1[u(t) - u_T] + y_T - g_2(u_{m,p}), \quad (9)$$

式中: (u_T, y_T) 是坐标转移向量,根据以下方程组求解:

$$\begin{cases} g_2(u_{m,q}) = g_1(u_{m,q} + u_T) + y_T \\ g_2(u_{max}) = g_1(u_{max} + u_T) + y_T \end{cases}, \quad (10)$$

式中:全局最大值 u_{max} 是已知的,主导极小值 $u_{m,q}$ 随输入 $u(t)$ 变化,坐标转移向量 u_T 与 y_T 是未知量。相同主导极小值的任意两个次环,用式(10)求解的坐标转移向量是相同的,式(9)中第二项至第四项的代数和也相同,所以这两个次环上升曲线的形状是一致的。

对于任一次环的下降段,曲线将从当前主导极大值点 $(u_{M,p}, y_{M,p})$ 开始,将经过主导极小值点 $(u_{m,q}, y_{m,q})$, 对应的一阶下降曲线从点 $(u_{M,p}, g_1(u_{M,p}))$ 开始,将经过全局最小值点 $(u_{min}, g_1(u_{min}))$, 如图 3(b) 所示。该次环的下降段表示为:

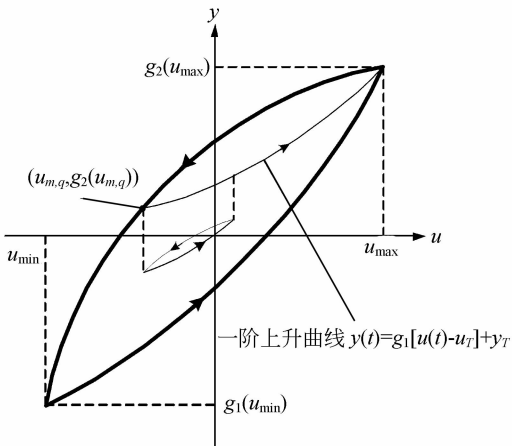
$$y(t) = y_D(t) + g_2[u(t) + u_T] + y_T - g_1(u_{M,p}), \quad (11)$$

式中: (u_T, y_T) 是坐标转移向量,由下式获得:

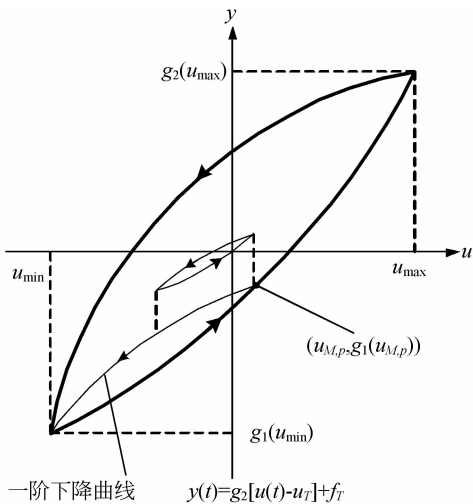
$$\begin{cases} g_1(u_{M,p}) = g_2(u_{M,p} + u_T) + y_T \\ g_1(u_{min}) = g_2(u_{min} + u_T) + y_T \end{cases}, \quad (12)$$

式中: u_{min} 是已知的,主导极大值 $u_{M,p}$ 随输入 $u(t)$ 变化。若两个次环具有相同主导极大值 $u_{M,p}$, 则用式(12)求解的坐标转移向量相等,式(11)的第二项至第四项也相同,所以这两个次环的下降曲线的形状是一致的。

基于双函数的迟滞模型采用了与 Preisach 模型相同的主导极值,所以符合记忆擦除性。对于任意两个次环,只要主导极大值与极小值相同,用式(10)与(12)得到的坐标转移向量就相等,所以次环的大小与形状也就相等。因此,基于双函数的迟滞模型同时具备了记忆擦除性与次环一致



(a) 次环上升段
(a) Ascending branch of minor loop



(b) 次环下降段
(b) Descending branch of minor loop

图 3 用一阶曲线描述迟滞次环

Fig. 3 Describe minor loop with first-order curve

基于双函数的迟滞模型使用与式(5)相同

性。这种建模方法的使用前提是双曲函数能够拟合迟滞非线性的主环。

3 基于双曲函数模型的逆系统控制

为了验证这种双曲函数模型的有效性, 基于该模型设计了逆控制器用于压电双晶片驱动器的精密定位控制。实验系统如图 4 所示, 装有 dSPACE 系统(dSPACE 公司的 DS1103 型)的计算机通过功率放大器(NF 公司的 HSA4052 型)将驱动电压作用在压电双晶片上, 通过光纤位移传感器(MTI 公司的 MTI-2100 型)测量压电双晶片的位移, 并将信号传回 dSPACE 板卡。基于迟滞数学模型的控制算法在 MATLAB/Simulink 中编译实现, 然后下载到 dSPACE 硬件中。为了

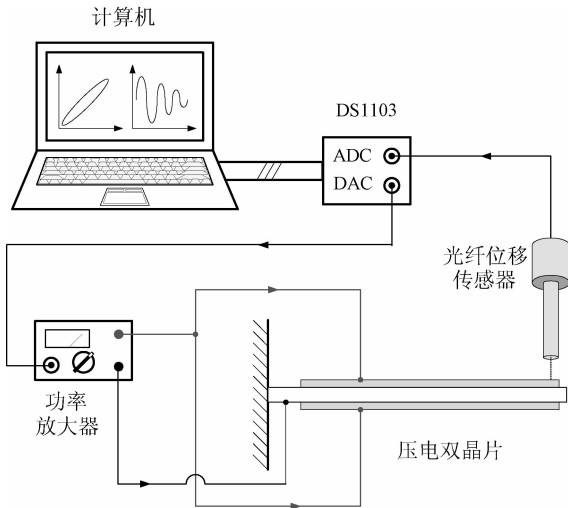


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

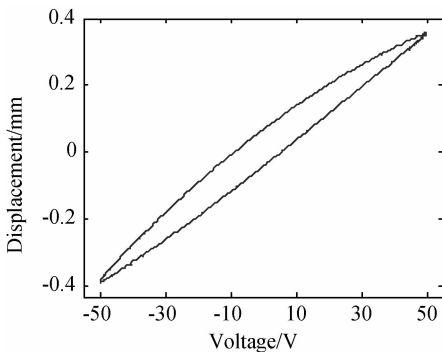


图 5 压电双晶片驱动器的迟滞回线

Fig. 5 Hysteresis of piezoelectric biomorph actuator

比较控制效果并获得迟滞模型的辨识数据, 测量了压电双晶片驱动器在频率为 1 Hz、幅值为 50 V 正弦信号作用下的响应, 结果如图 5 所示。将测量结果中的位移作为目标输入, 电压作为目标输出, 用 MATLAB 曲线拟合工具箱辨识式(8)的模型参数, 获得压电双晶片驱动器迟滞非线性的逆模型。同时用多次测量的数据与模型的输出相比较, 用最小二乘法对优化参数, 结果如表 1 所示。

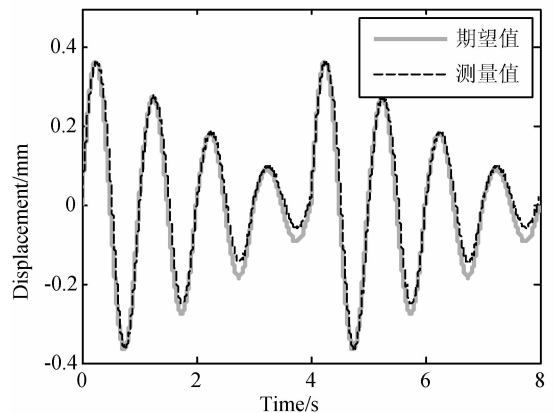
表 1 迟滞逆模型的参数表

Tab. 1 Parameters of hysteresis model

参数	数值
a_1/V	-10.449 210 23
b_1/mm	0.239 798 644 6
$c_1/(V \cdot mm^{-1})$	166.271 982 1
d_1/mm	0.389 544 000 0
e_1/V	25.219 463 21
a_2/V	47.841 670 96
b_2/mm	0.334 973 803 2
$c_2/(V \cdot mm^{-1})$	227.833 891 2
d_2/mm	-0.357 381 999 9
e_2/V	-79.265 402 63

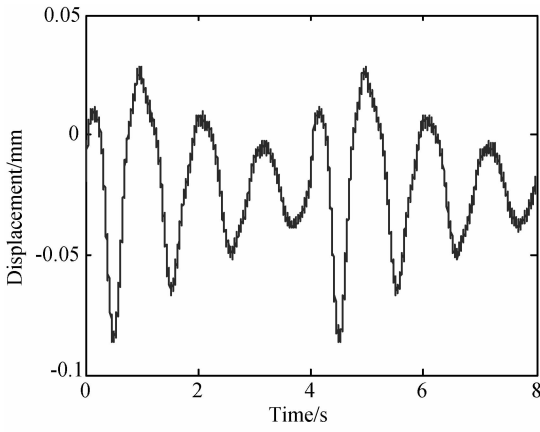
3.1 控制前

为了同时测试迟滞主环与次环的控制结果, 期望位移采用 1 Hz 变幅值的正弦信号。功率放大器的倍数设置为图 5 中电压最大幅值与位移最大幅值之比, 则功率放大器的输入信号可以作为期望位移信号如图 6 所示, 定位的最大误差为 0.086 3 mm, 均方根误差为 0.032 0 mm。

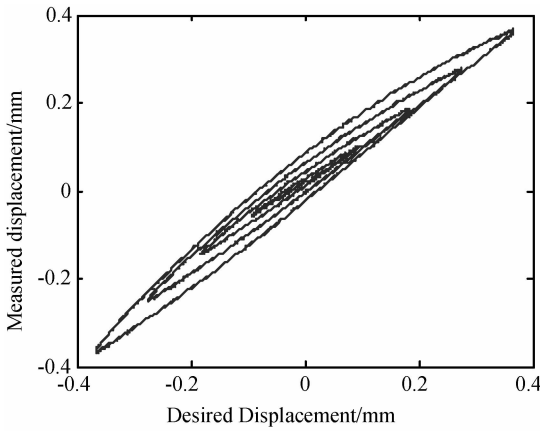


(a) 控制前期望位移与测量位移

(a) Desired and measured displacement without control



(b)控制前定位误差
(b) Tracking error without control



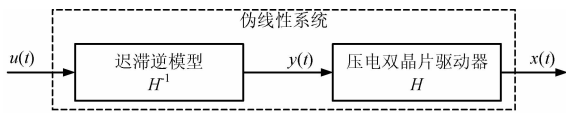
(c)控制前的迟滞回线
(c) Hysteresis loop without control

图 6 控制前的定位结果

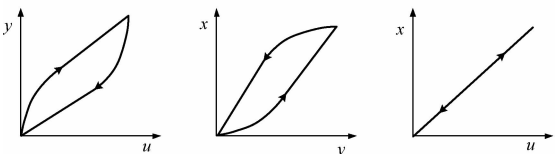
Fig. 6 Tracking results without control

3.1 控制后

逆控制的原理如图 7 所示, $u(t)$ 是期望位移, 作为模型的输入, $y(t)$ 是模型的输出, 作为施加在压电双晶片驱动器上的电压, $x(t)$ 是压电双晶片驱



(a)逆系统控制原理
(a) Principle diagram of inverse control

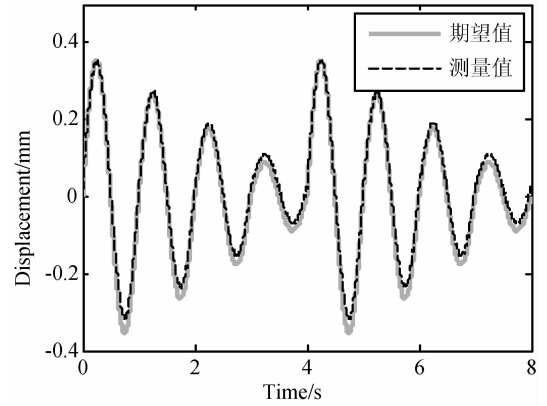


(b)逆模型的迟滞 (b) Hysteresis of inverse model
(c)压电驱动器的迟滞 (c) Hysteresis of piezoelectric actuator
(d)补偿后的迟滞 (d) Hysteresis with inverse control

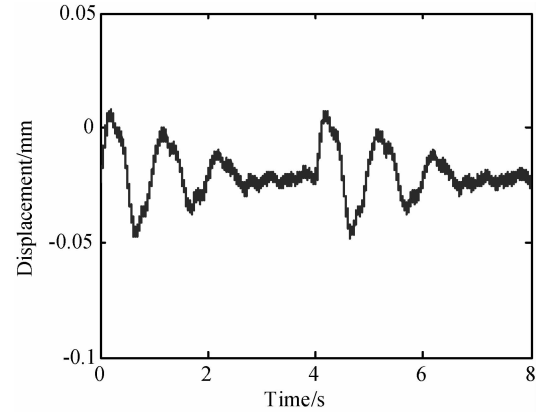
图 7 逆系统控制原理

Fig. 7 Inverse control principal

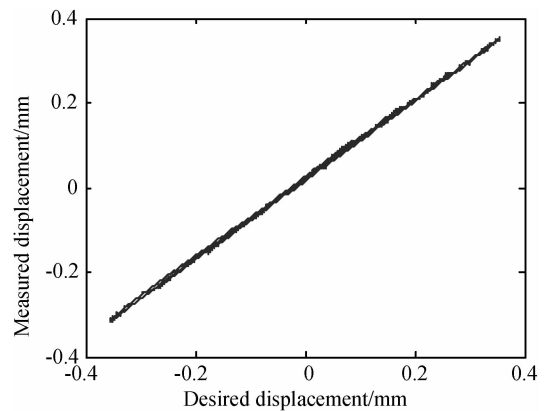
动器的响应位移。如果迟滞逆模型足够精确, 将与压电双晶片驱动器的迟滞非线性相互抵消, 使期望位移 $u(t)$ 与响应位移 $x(t)$ 线性化, 如图 7(d) 所示。本实验中采用式的双曲函数通过式(9)与(11)描述压电双晶片驱动器迟滞非线性的逆过程, 模型参数如表 1 所示。图 8 为逆控制的结果,



(a)控制后的期望位移与测量位移
(a) Desired and measured displacement with control



(b)控制后的定位误差
(b) Tracking error with control



(c)控制后的迟滞回线
(c) Hysteresis loop with control

图 8 逆控制的结果

Fig. 8 Inverse control results

控制后的最大误差只有 0.048 1 mm,比控制前减少了 44.26%,均方根误差是 0.022 7 mm,减小了 29%。比较图 6(c)与图 8(c)可以发现,采用逆控制之后,期望位移与测量位移的迟滞环几乎已经消失。

4 结 论

本文基于双曲函数建立了描述 Preisach 类迟滞非线性的数学模型,先用 2 个双曲函数分别描述迟滞主环的上升段与下降段,通过坐标变换

拟合了依附于主环的一阶上升与下降曲线,然后根据记忆擦除性与次环一致性描述迟滞非线性的任意次环。这种建模方法所需的模型参数远小于经典的 Preisach 模型,而且参数识别容易,使用该模型的前提是双曲函数能够拟合迟滞非线性的主环,这适用于控制压电驱动器等智能材料的迟滞非线性。基于该迟滞模型设计了压电双晶片驱动器的逆控制器,使控制后的最大定位误差比控制前减小了 44.26%,可有效抑制迟滞非线性引起的误差。

参考文献:

- [1] RAKOTONDRABE M. Bouc-wen modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis nonlinearity in piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(2):428-431.
- [2] KWAK Y K, KIM S H, AHN J H. Improvement of positioning accuracy of magnetostrictive actuator by means of built-in air cooling and temperature control [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(5):829-834.
- [3] 李欣欣, 王文, 陈子辰. 超磁致伸缩致动器的广义预测-多模 PID 控制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 412-419.
LI X X, WANG W, CHEN Z CH. Generalized predictive-multimode PID control for giant magnetostrictive actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 412-419. (in Chinese)
- [4] SMITH R C. Inverse compensation for hysteresis in magnetostrictive transducers [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2001, 33(1-3):285-298.
- [5] KIM B, WASHINGTON G N, YOON H S. Hysteresis-reduced dynamic displacement control of piezoceramic stack actuators using model predictive sliding mode control [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(5):055018.
- [6] GE P, JOUANEH M. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(3):209-216.
- [7] 赖志林, 刘向东, 耿洁, 等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1281-1290.
LAI ZH L, LIU X D, GENG J, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse Preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1281-1290. (in Chinese)
- [8] JANAIDEH M, RAKHEJA S, SU C Y. An analytical generalized prandtl-ishlinskii model inversion for hysteresis compensation in micropositioning control [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(4):734-744.
- [9] MIELKE A. Generalized prandtl-ishlinskii operators arising from homogenization and dimension reduction [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2012, 407(9):1330-1335.
- [10] BADEL A, QIU J H, SEBALD G, *et al.*. Self-sensing high speed controller for piezoelectric actuator [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008, 19(3):395-405.
- [11] TRI V M, TJAHHJOWIDODO T, RAMON H, *et al.*. A new approach to modeling hysteresis in a pneumatic artificial muscle using the maxwell-slip model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(1):177-186.
- [12] 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 micropositioning actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 602-607. (in Chinese)
- [13] 李春涛, 谭永红. 基于状态观测器的迟滞非线性系统输出反馈控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(9): 967-972.
LI CH T, TAN Y H. Observer-based adaptive output feedback control of systems preceded by un-

- known hysteresis [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(9): 967-972. (in Chinese)
- [14] ANG W T, KHOSLA P K, RIVIERE C N. Feed-forward controller with inverse rate-dependent model for piezoelectric actuators in trajectory-tracking applications [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(2):134-142.
- [15] JIANG H, JI H, QIU J, *et al.*. A modified Prandtl-Ishlinskii model for modeling asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(5):1200-1210.
- [16] SHEN J CH, JYWE W Y, CHIANG H K, *et al.*. Precision tracking control of a piezoelectric-actuated system [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(2):71-78.
- [17] LEE S H, OZER M B, ROYSTON T J. Piezoceramic hysteresis in the adaptive structural vibration control problem [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(2-3):117-124.
- [18] BADEL A, QIU J H, NAKANO T. A new simple asymmetric hysteresis operator and its application to inverse control of piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(5): 1086-1094.
- [19] SONG G, ZHAO J Q, ZHOU X Q, *et al.*. Tracking control of a piezoceramic actuator with hysteresis compensation using inverse Preisach model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2):198-209.
- [20] MAKAVEEV D, DUPR L C, WULF M D, *et al.*. Modeling of quasistatic magnetic hysteresis with feed-forward neural networks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(11):6737-6739.
- [21] CHEN Y S, PALACIOS J, SMITH E C, *et al.*. Tracking control of piezoelectric stack actuator using modified prandtl-ishlinskii model [C]. *ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Scottsdale, Arizona*, 2011, 2:35-41.

作者简介:



陈远晟(1982—),男,江苏南通人,博士研究生,2005年于南京航空航天大学获学士学位,2010年赴美国宾西法尼亚大学交流,主要从事迟滞非线性的建模与控制、压电驱动系统的精密定位方面的研究。E-mail: yuansheng.chen@gmail.com



季宏丽(1983—),女,江苏盐城人,讲师,2004年于太原理工大学获得学士学位,2007年、2012年于南京航空航天大学分别获得硕士、博士学位。主要从事振动控制、智能结构方面的研究。E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn



Ronan Le Breton (1982—),男,法国人,博士研究生,2004、2009年于法国雷恩第一大学分别获得学士、硕士学位,主要从事振动主动控制、精密定位、智能结构方面的研究。E-mail: Ronan.Le-Breton@univ-savoie.fr

导师简介:



裘进浩(1963—),男,浙江嵊州人,教授,博士生导师,1983年、1986年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,1996年于日本东北大学获得博士学位,2006年获教育部长江学者特聘教授,主要研究方向为智能材料与结构,压电驱动技术。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn