

文章编号 1004-924X(2007)05-0706-07

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

李 黎, 刘向东, 王 伟, 侯朝桢

(北京理工大学 信息科学技术学院 自动控制系, 北京 100081)

摘要: 压电陶瓷执行器的迟滞非线性不具有经典 Preisach 模型的次环一致特性, 直接利用该模型对压电陶瓷执行器的迟滞特性建模会产生较大误差。为了提高压电陶瓷执行器的迟滞特性建模精度, 在非线性 Preisach 模型的基础上推导出适用于压电陶瓷迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型, 并给出简化分类计算公式。广义非线性 Preisach 模型将经典 Preisach 模型表示定理中的次环一致特性修改为次环等弦长特性, 放宽了对描述对象的限制要求。实验数据表明, 与经典 Preisach 模型相比, 广义非线性 Preisach 模型预测位移的误差绝对值的最大值降低了 $0.22 \mu\text{m}$, 均方根误差降低了 $0.11 \mu\text{m}$, 能够更精确地描述压电陶瓷的迟滞特性。

关键词: 压电陶瓷; 执行器; 迟滞特性; 广义非线性 Preisach 模型; 建模

中图分类号: TN384; TP391.9 **文献标识码:** A

Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator and its numerical implementation

LI Li, LIU Xiang-dong, WANG Wei, HOU Chao-zhen

(*Department of Automatic Control, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: The hysteresis nonlinearity of the piezoceramic actuator can not satisfy the congruency property of the classical Preisach model so that the modeling error is large when applying the classical Preisach model to the piezoceramic actuator. In order to improve the accuracy in hysteresis modeling of the piezoceramic actuator, the generalized nonlinear Preisach model and its new numerical implementation based on the nonlinear Preisach model with some modifications are presented. The new model has equal vertical chord property of minor loops to relax the congruency property of the classical Preisach model. Experimental results show that the maximum of the absolute error predicted by the generalized nonlinearity Preisach model reduces $0.22 \mu\text{m}$ and the root mean square error reduces $0.11 \mu\text{m}$ compared to the classical Preisach model. The generalized nonlinear Preisach model can describe the hysteresis of the piezoceramic actuator more accurately.

Key words: piezoceramic actuator; actuator; hysteresis nonlinearity; generalized nonlinearity Preisach model; modeling

收稿日期: 2006-12-25; 修订日期: 2007-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10402003); 中国博士后科学研究基金资助项目 (No. 2005038047)

1 引言

压电陶瓷执行器具有体积小、功耗低、响应速度快、位移控制精度高等优点,因而被广泛应用于光纤调准、电子隧道显微镜、硬盘驱动定位、微机械加工及微定位平台等各种领域^[1-2]。类似许多其他材料,如铁磁体,记忆合金等,压电陶瓷表现出多值映射的迟滞特性,这种非线性会严重影响系统性能,降低定位控制精度,因此对压电陶瓷执行器的迟滞特性建模成为高精度位移控制需要解决的关键问题^[3-9]。迟滞模型的研究主要分为两个方向^[8],一种是基于机理的物理模型,从基本物理原理出发描述物理特性;一种是基于现象的数学模型,从数学的角度描述物理现象。采用机理建模的方法,要求掌握材料微观结构的详细信息,还要求解复杂非线性和偏微分方程,很难获得满意的模型。采用基于现象的数学模型则相对灵活,它可以有效地描述材料的输入输出关系而不需要考虑其内部结构,实现过程简单直接。因此,它是目前主要采用的迟滞模型建模方法。经典 Preisach 模型^[4]是应用较为广泛的基于现象的建模方法,该模型源于磁滞现象,通过对迟滞因子的双重积分来逼近迟滞特性。然而,应用经典 Preisach 模型时,需要被描述的对象具有擦除特性和一致特性,实验数据表明压电陶瓷并不满足一致特性^[10],如果直接应用经典 Preisach 模型对压电陶瓷进行建模,会带来较大误差。本文根据压电陶瓷的输入输出特性在非线性 Preisach 模型的基础上进行改进,得到广义非线性 Preisach 模型,从而放宽了经典 Preisach 模型对一致特性的限制条件。在压电陶瓷平台上进行的试验结果表明,在压电陶瓷特性不满足一致特性的情况下,该模型仍能保持较高的建模精度。

2 广义非线性 Preisach 模型

2.1 经典 Preisach 模型

经典 Preisach 模型的数学表达式^[4]如下:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

其中 $f(t)$ 为模型在 t 时刻的输出, $u(t)$ 为模型在 t 时刻的输入, $\mu(\alpha, \beta)$ 为 Preisach 函数, $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}(u(t))$ 为

基本迟滞算子, α 和 β 分别为其上升和下降阈值。

经典 Preisach 模型具有两个重要的特性:擦除特性和一致特性。擦除特性是指当输入局部极大值大于历史上的某些极大值或者输入的局部极小值小于历史上的某些极小值时,新的局部极值将会擦除这些历史极值,而与这些历史极值相应的历史过程也将被擦除,不再影响该时刻之后的输出;所谓一致性,是指输入极大值和极小值相同的所有闭合回线均一致全等。同时,这两个特性也构成了利用经典 Preisach 模型描述迟滞特性的充分必要条件^[4]。如果被描述对象不满足这两个条件,利用经典 Preisach 模型进行建模,就会降低模型的精度,从而影响补偿控制的效果。

对压电陶瓷的实验研究^[10]结果表明,压电陶瓷的迟滞特性很好地满足了擦除特性,但是在极大值和极小值相同的两组电压下所得到的闭合回线并不全等,这说明了压电陶瓷不具有 consistency 特性,不能直接应用经典 Preisach 模型对压电陶瓷执行器的迟滞特性进行建模。

2.2 非线性 Preisach 模型

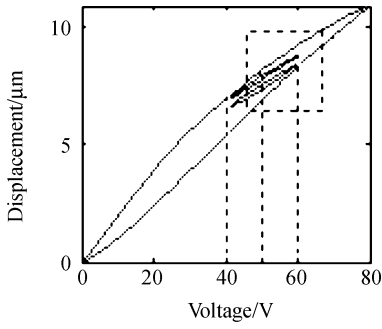
在经典 Preisach 模型的基础之上, Mayergoyz 提出了非线性 Preisach 模型^[11],该模型对一致特性进行了修改,要求当输入变量在相同的极大值和极小值之间变化时,所得的闭合回线对应的垂直弦长相等,称为次环等弦长特性。这个修改放宽了对一致特性的限制条件,拓展了 Preisach 模型迟滞建模的适用范围。

为了观察压电陶瓷执行器迟滞特性的性质,对其进行了实验研究,试验装置见第四节。图 1 中的迟滞回线在 40 V 和 60 V 之间出现了两个次环,当输入电压为 50 V 时,这两个次环的垂直弦长分别为 $\Delta f_1 = 0.19 \mu\text{m}$ 和 $\Delta f_2 = 0.20 \mu\text{m}$, Δf_1 和 Δf_2 近似相等,这表明压电陶瓷执行器迟滞特性具有次环等弦长性质,可以利用非线性 Preisach 模型进行建模。

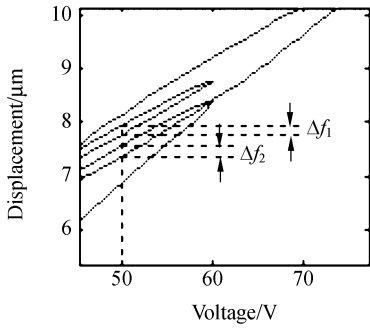
针对压电陶瓷的输入输出特性对非线性 Preisach 模型进行修改,可得到应用于描述压电陶瓷迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型,其数学表达式如下:

$$f(t) = \iint_{R_{u(t)}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) \hat{\gamma}_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+, \quad (2)$$

其中 $f_{u(t)}^+$ 为 Preisach 函数 $\mu(\alpha, \beta, u(t))$ 在图 2 中



(a)



(b)

图 1 压电陶瓷执行器迟滞特性的次环等弦长特性
Fig. 1 Equal vertical chord property of the hysteresis of piezoceramic actuator

三角形 Oab 上的积分数值,表示在主滞环上升半支上 $u(t)$ 对应的位移输出值,即从 0 上升到 $u(t)$ 时输出位移值; $R_{u(t)}$ 为图 2 中的矩形阴影区域,可分为 $S^+(t)$ 和 $S^-(t)$ 两个部分:其中,在 $S^+(t)$ 中的迟滞算子 $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ 的输出值均为 1;在 $S^-(t)$ 中的迟滞算子 $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ 的输出值均为 0。因此,式(2)可以简化为,

$$f(t) = \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+, \quad (3)$$

由式(2)可见,广义非线性 Preisach 模型中 Preisach 函数 $\mu(\alpha, \beta, u(t))$ 不仅与上升阈值 α 和下降阈值 β 相关,还与输入电压 $u(t)$ 有关。在经典 Preisach 模型中仅需要通过一阶回转曲线即可辨识出 Preisach 函数,在广义非线性 Preisach 模型中需要利用一阶和二阶回转曲线两组曲线进行辨识。广义非线性模型的这个特性大大提高了建模精度,但同时给其离散实现带来了一定的困难。

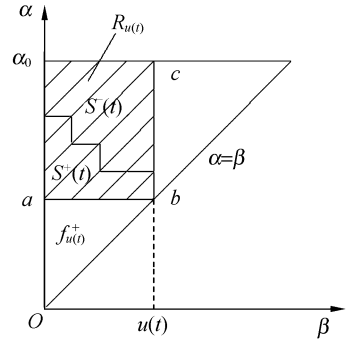


图 2 广义非线性 Preisach 模型的几何描述

Fig. 2 Geometrical description of generalized nonlinear Preisach model

3 广义非线性 Preisach 模型的离散化数值实现

为了实现对 Preisach 函数 $\mu(\alpha, \beta, u(t))$ 的辨识,定义 $F(\alpha', \beta', u(t))$ 为输入电压为 $u(t)$ 时一阶回转曲线上的位移和二阶回转曲线上的位移之差^[11],即:

$$F(\alpha', \beta', u(t)) = f_{\alpha', u(t)} - f_{\alpha', \beta', u(t)}, \quad (4)$$

式中, $f_{\alpha', u(t)}$ 表示输入电压从零电压上升到 α' 后下降到 $u(t)$ 时压电陶瓷的输出位移值,即一阶回转曲线上 $u(t)$ 对应的位移; $f_{\alpha', \beta', u(t)}$ 表示输入电压从零电压上升到 α' 后下降到 β' 后再上升到 $u(t)$ 时的位移输出值,即二阶回转曲线上 $u(t)$ 对应的位移。

据式可得,

$$f_{\alpha', u(t)} = \iint_{S_1^+(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+, \quad (5)$$

$$f_{\alpha', \beta', u(t)} = \iint_{S_2^+(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+. \quad (6)$$

式(5)、(6)中的 $S_1^+(t)$, $S_2^+(t)$ 分别如图 3(a) 所示, $S_1^+(t)$ 为整个阴影部分; $S_2^+(t)$ 为格状阴影部分; $R(\alpha', \beta', u(t))$ 为 $S_1^+(t)$ 和 $S_2^+(t)$ 两部分面积之差。

将式(5)和(6)代入式(4)中可得,

$$F(\alpha', \beta', u(t)) = \iint_{R(\alpha', \beta', u(t))} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta, \quad (7)$$

对式(7)两边求二次导数,得 Preisach 权函数

$$\mu(\alpha', \beta', u(t)) = -\frac{\partial^2 F(\alpha', \beta', u(t))}{\partial \alpha' \partial \beta'} = \frac{\partial^2 f_{\alpha', \beta', u(t)}}{\partial \alpha' \partial \beta'}, \quad (8)$$

定义 $f_{u(t)}^-$ 为在主滞环下降半支上 $u(t)$ 对应的位移输出值,即从初始值 0 上升到正向饱和值 α_0 后再降到 $u(t)$ 时对应的输出位移值。在图 2 中, $f_{u(t)}^-$ 表示梯形 $Obc\alpha_0$ 上 Preisach 函数 $\mu(\alpha, \beta, u(t))$ 的积分值,则,

$$\iint_{R_{u(t)}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta = f_{u(t)}^- - f_{u(t)}^+, \quad (9)$$

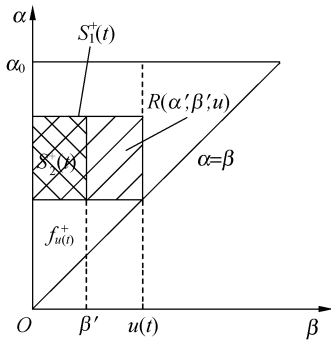
则式(3)为,

$$\begin{aligned} f(t) &= \iint_{R_{u(t)}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta - \\ &\iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+ = \\ &f_{u(t)}^- - f_{u(t)}^+ - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta + \\ &f_{u(t)}^+ = f_{u(t)}^- - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta, \end{aligned} \quad (10)$$

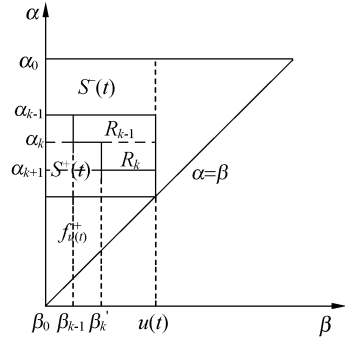
将 $S^-(t)$ 划分为若干个小矩形 R_k , 如图 3(b) 所示,即

$$\iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta = \sum_{k=0}^n \iint_{R_k} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta, \quad (11)$$

其中, n 表示历史过程中,输入电压 $u(t)$ 上升过程和下降过程转折变换的次数,取极大值个数和极小值个数中较小值。



(a) $F(\alpha', \beta', u(t))$ 的几何描述
(a) Geometrical description of $F(\alpha', \beta', u(t))$ function



(b) $S^-(t)$ 的划分
(b) Division of $S^-(t)$

图 3 广义非线性 Preisach 模型的数学实现
Fig. 3 Numerical realization of generalized nonlinear Preisach model

由图 3(a)和(b)可得,
 $R_k = R(\alpha_k, \beta_k, u(t)) - R(\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t))$, (12)
而由式(7)可得,

$$F(\alpha_k, \beta_k, u(t)) = \iint_{R(\alpha_k, \beta_k, u(t))} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta, \quad (13)$$

$$F(\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)) = \iint_{R(\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t))} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta, \quad (14)$$

因此,

$$\iint_{R_k} \mu(\alpha, \beta, u(t)) d\alpha d\beta = F(\alpha_k, \beta_k, u(t)) - F(\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)), \quad (15)$$

将式(11)、(15)代入式(10),可得,

$$f(t) = f_{u(t)}^- - \sum_{k=0}^n [F(\alpha_k, \beta_k, u(t)) - F(\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t))], \quad (16)$$

利用式(16)预测模型的输出位移值时,首先采集大量输入电压为 $u(t)$ 时一阶和二阶回转曲线的输出位移值,根据式(4)计算所需的各个 $F(\alpha, \beta, u(t))$ 的数值后再代入式(16)计算预测位移值,过程较为繁复。下面进一步推导得到简化分类计算公式,根据 $u(t)$ 的上升或下降趋势选择相应的公式,减少了需要计算的数据项,简化了计算过程。

当 $u(t)$ 处于下降阶段时,由式(4)可将式(16)进一步写为,

$$\begin{aligned}
f(t) = & f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} - F(\alpha_0, \beta_0, u(t)) + F(\alpha_1, \beta_0, u(t)) - \\
& F(\alpha_1, \beta_1, u(t)) + F(\alpha_2, \beta_1, u(t)) + \dots - \\
& F(\alpha_{n-1}, \beta_{n-1}, u(t)) + F(\alpha_n, \beta_{n-1}, u(t)) - \\
& F(\alpha_n, \beta_n, u(t)) + F(\alpha_{n+1}, \beta_n, u(t)) = \\
& f_{\alpha_0, u(t)} - f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} + f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} + f_{\alpha_1, u(t)} - f_{\alpha_1, \beta_0, u(t)} - \\
& f_{\alpha_1, u(t)} + f_{\alpha_1, \beta_1, u(t)} + f_{\alpha_2, u(t)} - f_{\alpha_2, \beta_1, u(t)} + \dots - \\
& f_{\alpha_{n-1}, u(t)} + f_{\alpha_{n-1}, \beta_{n-1}, u(t)} + f_{\alpha_n, u(t)} - f_{\alpha_n, \beta_{n-1}, u(t)} - \\
& f_{\alpha_n, u(t)} + f_{\alpha_n, \beta_n, u(t)} + f_{\alpha_{n+1}, u(t)} - f_{\alpha_{n+1}, \beta_n, u(t)} = \\
& f_{\alpha_{n+1}, u(t)} + \sum_{k=0}^n [f_{\alpha_k, \beta_k, u(t)} - f_{\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)}], \quad (17)
\end{aligned}$$

同理, $u(t)$ 当处于上升阶段时,

$$\begin{aligned}
f(t) = & f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} - F(\alpha_0, \beta_0, u(t)) + F(\alpha_1, \beta_0, u(t)) - \\
& F(\alpha_1, \beta_1, u(t)) + F(\alpha_2, \beta_1, u(t)) + \dots - \\
& F(\alpha_{n-1}, \beta_{n-1}, u(t)) + F(\alpha_n, \beta_{n-1}, u(t)) - \\
& F(\alpha_n, \beta_n, u(t)) + F(\alpha_{n+1}, \beta_n, u(t)) = \\
& f_{\alpha_0, u(t)} - f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} + f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} + f_{\alpha_1, u(t)} - f_{\alpha_1, \beta_0, u(t)} - \\
& f_{\alpha_1, u(t)} + f_{\alpha_1, \beta_1, u(t)} + f_{\alpha_2, u(t)} - f_{\alpha_2, \beta_1, u(t)} + \dots - \\
& f_{\alpha_{n-1}, u(t)} + f_{\alpha_{n-1}, \beta_{n-1}, u(t)} + f_{\alpha_n, u(t)} - f_{\alpha_n, \beta_{n-1}, u(t)} - \\
& f_{\alpha_n, u(t)} + f_{\alpha_n, \beta_n, u(t)} = \\
& f_{\alpha_n, \beta_n, u(t)} + \sum_{k=0}^{n-1} [f_{\alpha_k, \beta_k, u(t)} - f_{\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)}], \quad (18)
\end{aligned}$$

当 $k=0$, 由模型的几何意义上可得,

$$f_{\alpha_0, \beta_0, u(t)} - f_{\alpha_1, \beta_0, u(t)} = f_{u(t)}^+ - f_{u(t)}^- = 0, \quad (19)$$

因此, 应用于压电陶瓷执行器的广义非线性 Preisach 模型的离散数学公式如下式描述:

$$f(t) = \begin{cases} f_{\alpha_n, \beta_n, u(t)} + \sum_{k=1}^{n-1} [f_{\alpha_k, \beta_k, u(t)} - f_{\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)}] \\ \text{当 } u(t) \text{ 处于上升阶段} \\ f_{\alpha_{n+1}, u(t)} + \sum_{k=1}^n [f_{\alpha_k, \beta_k, u(t)} - f_{\alpha_{k+1}, \beta_k, u(t)}] \\ \text{当 } u(t) \text{ 处于下降阶段,} \end{cases} \quad (20)$$

4 实验验证

实验平台中的压电陶瓷型号为 PST150/7/40 VS12, 耐压为 $-30 \sim 150$ V, 输出位移为 $0 \sim 15$ μm 。压电陶瓷驱动电源型号为 MPT-1JRL002, 输出电压 $-20 \sim 150$ V; 内置测微仪采用电阻应变片式传感器, 检测分辨率为 0.01 μm 。

4.1 数据采集

从式(20)可以看出, 在利用广义 Preisach 模型离散表达式对压电陶瓷迟滞特性进行建模时, 要计算当前输入电压 $u(t)$ 对应的输出位移值, 需要知道两类信息: 一类是不同上升极值情况下前一阶回转曲线上 $u(t)$ 对应的位移值 $f_{\alpha_k, u(t)}$, 一类是不同历史过程二阶回转曲线上 $u(t)$ 对应的位移值 $f_{\alpha_k, \beta_k, u(t)}$ 。通过图 4 所示的实验流程可以获得大量等分点所对应的一阶和二阶回转曲线的位移值, 对于不在等分点上的电压对应的位移值, 可以通过二维或三维样条插值获得。随着图 4 中 N 的增大, 需要测试的数据量会成 N^3 增大, 将会大幅度增加数据采集的工作量。但是 N 越大, 电压值划分得越细致, 插值带来的误差就越小, 根据其建立的模型就将越精确。

4.2 实验结果

本小节中, 任意选取几组电压序列进行大量实验, 为了达到更好的验证效果, 使得电压序列中上升极值和下降极值交替出现。根据各电压值查找或者插值得到所需要的一阶或二阶回转曲线的位移输出值, 利用式(20)的广义非线性 Preisach 计算公式预测出当前输入电压对应的位移值。同时, 利用文献[12]中的方法, 计算出在同样输入电压序列下经典 Preisach 模型预测的位移值, 将两种模型预测位移值的误差进行比较。

表 1 中驱动电压序列中的电压值均在等分点上, 无需通过插值计算就可以得到各点位移; 表 2 中电压值为随机选取, 大部分一阶或二阶回转曲

表 1 等分点上的电压序列输入下两种模型的位移输出结果比较

Tab. 1 Comparison of displacements in the divided voltage list using two different models

电 压 /V	实测 位移 / μm	CPM		GNPM	
		输出/ μm	误差/ μm	输出/ μm	误差/ μm
120	15.13	15.13	0.00	15.13	0.00
30	6.38	6.37	-0.01	6.38	0.00
100	13.54	13.57	0.03	13.43	-0.11
20	4.82	5.01	0.19	4.89	0.07
80	11.52	11.85	0.33	11.43	-0.09
50	8.80	8.92	0.12	8.80	0.00
70	10.55	10.88	0.33	10.51	-0.04
60	9.75	9.96	0.21	9.73	-0.02

型不能继续保证模型的精度,广义非线性 Preisach 模型较为适用。

表 2 随机选取的电压序列输入下两种模型的位移输出结果比较

Tab.2 Comparison of displacements under random voltages using two different models

电 压 /V	实测 位移 / μm	CPM		GNPM	
		位移 输出/ μm	位移 误差/ μm	位移 输出/ μm	位移 误差/ μm
118	14.94	14.94	0.00	14.94	0.00
12	3.57	3.53	-0.04	3.57	0.00
93	12.76	13.10	0.34	12.64	-0.12
25	5.51	5.53	0.02	5.52	0.01
76	10.99	11.33	0.34	10.95	-0.04
32	6.44	6.51	0.07	6.48	0.04
64	9.67	9.99	0.32	9.68	0.01
45	7.95	8.10	0.15	7.97	0.02
51	8.41	8.67	0.26	8.43	0.02

同时,表 1 中输入电压为 20 V 时,上一个下降极值点 30 V 被擦除,较之经典 Preisach 模型,广义非线性 Preisach 模型仍能保持一定精度,被擦除的极值点也未影响此后的位移输出精度。广义非线性 Preisach 模型表现出良好的擦除特性。

5 结 论

由于压电陶瓷迟滞特性不完全满足经典 Preisach 模型对描述对象的充分必要条件,直接利用该模型对压电陶瓷的迟滞特性建模将会造成较大误差。为了提高压电陶瓷执行器的迟滞特性建模精度,本文在非线性 Preisach 模型的基础上,针对压电陶瓷输入输出特性进行修改后引入广义非线性 Preisach 模型,并给出了新的离散数学实现公式。实验结果证明,压电陶瓷具有次环等弦长的性质,满足广义非线性 Preisach 模型的限制要求。与经典 Preisach 模型比较,广义非线性 Preisach 模型预测位移的误差绝对值的最大值降低了 0.22 μm ,均方根误差降低了 0.11 μm ,能够更精确地描述压电陶瓷的迟滞特性。

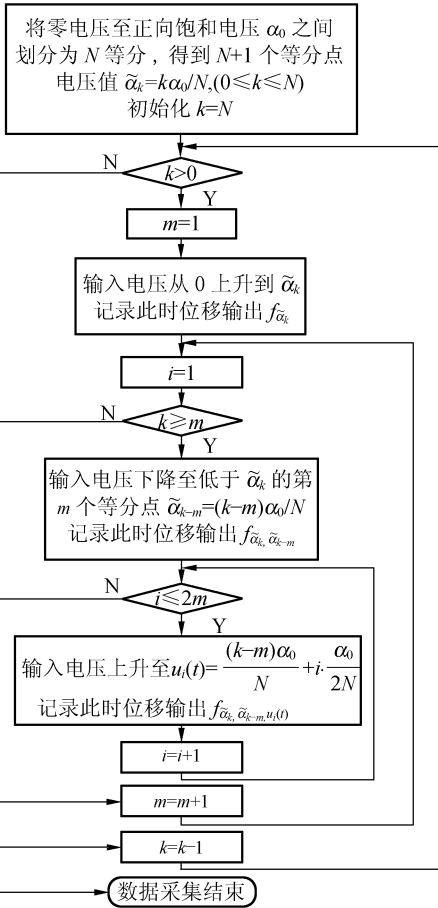


图 4 一阶二阶回转曲线位移值采集流程

Fig.4 Sampling course of the displacements of the first and second order reversal curves

线输出位移值均需要通过插值计算来获得。下面是两组电压序列作用下的经典 Preisach 模型 (CPM) 和广义非线性 Preisach 模型 (GNPM) 的预测位移及其与实际位移间的误差值。

表 1 中,CPM 模型的误差绝对值最大为 0.33 μm ,均方根误差为 0.15 μm ,GNPM 误差绝对值最大为 0.11 μm ,均方根误差为 0.04 μm ;表 2 中,CPM 模型的误差绝对值最大为 0.34 μm ,均方根误差为 0.17 μm ,GNPM 误差绝对值最大为 0.03 μm ,均方根误差为 0.002 μm 。从以上实验结果的比较中可以看出,广义非线性 Preisach 模型的建模精度大大高于经典 Preisach 模型。因此,在压电陶瓷迟滞特性不具有次环全等而仅具有次环等弦长特性的情况下,经典 Preisach 模

参考文献:

- [1] HU H, GEORGIU H M S, BEN-MRAD R. Enhancement of tracking ability in piezoceramic actuators subject to dynamic excitation conditions [J]. *IEEE/ASME Transact. Mechatronics*, 2005, 10(2):230-239.
- [2] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):55-59.
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):55-59. (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] MAYERGOYZ I D. *Mathematical models of hysteresis*[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [5] 晏祖根, 孙立宁, 节德刚. 微驱动定位系统及其在误差补偿机器人中的应用[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):703-708.
YAN Z G, SUN L N, JIE D G. Research of micro-driven table based on PZT and its control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):703-708. (in Chinese)
- [6] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁, 等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):171-178. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 李春涛, 谭永红. 迟滞非线性系统的建模与控制[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(2):281-287.
LI CH T, TAN Y H. Modeling and control for nonlinear systems with hysteresis [J]. *Control Theory and Applications*, 2005, 22(2):281-287. (in Chinese)
- [9] HWANG C L, JAN C, CHEN Y H. Piezomechanics using intelligent variable-structure control [J]. *IEEE Transact. Indus. electron.*, 2001, 48(1):47-59.
- [10] 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 Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2):198-209.
- [11] GE P, JOUANEH M. Generalized Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator [J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(2):99-111.
- [12] 魏燕定, 陶惠峰. 压电驱动器迟滞特性的 Preisach 模型研究 [J]. *压电与声光*, 2004, 26(5):364-367.
WEI Y D, TAO H F. Study the Preisach model of hysteresis in piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2004, 26(5):364-367. (in Chinese)

作者简介:李 黎(1982—),女,江苏东台人,北京理工大学自动控制系博士研究生,研究方向为压电陶瓷微定位系统的建模与控制,E-mail:pearli99@gmail.com