文章编号:1004-2474(2018)05-0811-04

基于三线性插值法的 preisach 模型及数值实现

范青武1,2,张 恒1,2,刘旭东1,2,徐 辽1,2,张跃飞3

(1.北京工业大学 信息学部,北京 100024;2.数字社区教育部 工程研究中心,北京 100024;

3. 北京工业大学 固体微结构与性能研究所,北京 100024)

摘 要:传统 preisach 模型具有次环一致特性,压电陶瓷执行器迟滞特性不满足其特性。采用传统 preisach 模型建模精度较低,因此,该文提出一种改进型 preisach 模型,推导出离散化计算方法,其数值实现采用三线性插值法。在 PI 公司生产的 E-625 系列压电陶瓷控制器平台上针对此算法进行相关实验设计和结果的验证。实验结果表明,该文提出的基于三线性插值法的 preisach 模型其绝对误差最大值为 0.2 μm,提高了压电陶瓷 preisach 模型 精度。

关键词:压电陶瓷驱动器; preisach 模型; 三线性插值; 迟滞; 数值实现

中图分类号:TN04;TP282 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.05.037

The Preisach Model Based on Trilinear Interpolation Method and Its Numerical Implementation

FAN Qingwu^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, LIU Xudong^{1,2}, XU Liao^{1,2}, ZHANG Yuefei³

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China;

2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100024 China;

3. Institute of Microstructure and Properties of Advanced Materials, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: The traditional preisach model has the characteristics of the secondary loop consistency, and the hysteresis characteristics of the piezoelectric ceramic actuator do not satisfy its characteristics. The traditional Preisach model has low modeling accuracy, so an improved Preisach model is proposed in this paper. The discretization method is derived and its numerical implementation is based on the trilinear interpolation. The verification of the experimental design and results of this algorithm are carried out on the E-625 series piezoelectric ceramic controller platform fabricated by PI Company. The experimental results show that the preisach model based on trilinear interpolation method proposed in this paper has a maximum absolute error of 0.2 μ m, which improves the precision of the piezoelectric ceramic preisach model.

Key words: piezoelectric actuator; preisach model; trilinear interpolation; hysteresis; numerical implementation

0 引言

随着航空及超精密技术等领域的发展,压电陶 瓷制动器由于具有精度控制高,功耗小,响应速度快 等优点广泛应用于航天,精密技术等领域^[1]。但由 于压电陶瓷具有迟滞、蠕变等非线性特征,在实际运 用中会降低其控制精度,因此,压电陶瓷执行器迟滞 特性的建模是高精度纳米定位需要解决的关键技 术^[2-3]。迟滞模型主要从基于机理的物理模型及基 于现象的数学模型^[1]两个方向研究。由于机理模型 需要从微观角度出发进行求解,很难获得精度高的 模型。采用基于现象的数学模型可灵活有效的描述 压电陶瓷的输入电压和输出位移之间的关系,因此, 多数学者采用此方法对压电陶瓷执行器迟滞特性 建模。

经典 preisach 模型是基于现象建模的数学模型,在压电陶瓷迟滞特性的描述上具有最广泛应用^[2]。但由于压电陶瓷迟滞特性不满足次环一致性,因此,采用经典 preisach 模型对压电陶瓷执行器 建模会带来较大的误差。为提高压电陶瓷执行器建 模精度,李黎提出广义非线性 preisach 模型^[3], Mayergoyz提出非线性 preisach 模型^[4]。本文根据 压电陶瓷迟滞特性不满足次环一致性,传统 preisach 模型精度较低的问题,提出一种基于三线性插值

收稿日期:2017-10-28

基金项目:科技部国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ03007508)

作者简介:范青武(1977-),男,山西平遥人,副教授,博士,主要从事智能优化控制、纳米操作技术与仪器制造等方面的研究。

法的 preisach 模型,即 TI-preisach。

1 经典 preisach 模型 经典 preisach 模型数学表达式为 $f(t) = \iint_{\sim a} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\varphi}(u(t)) d\alpha d\beta$ (1)

式中: f(t) 为 preisach 模型在 t 时刻的输出位移; $\mu(\alpha,\beta)$ 为 preisach 模型的密度函数; $\gamma_{\varphi}(u(t))$ 为基 本迟滞算子; u(t) 为模型在 t 时刻的输入。

图 1 为 Preisach 模型的几何描述。图中, T_0 为限制三角形,代表迟滞算子取值范围, α_0 和 β_0 为制动器的输入饱和电压, S_0 代表迟滞发生器为 0 的区域, S^+ 代表迟滞发生器为 1 的区域^[5]。



图 1 preisach 模型几何解释

由于 preisach 模型的求解过程复杂, Mayergoyz 提出一种经典 preisach 数值实现方法,其表达 式^[4]为

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n-1} \left[F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k) \right] + F(\alpha_n, \beta_{n-1}) - F(\alpha_n, u(t))$$
(2)

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n-1} \left[F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k) \right] + F(u(t), \beta_{n-1})$$
(3)

式中 k 为极值点个数。式(2)表示上升阶段离散化, 式(3)表示下降阶段离散化,通过式(2)、(3)可对 preisach模型进行离散化,并求出其位移输出值。

2 问题描述

为了研究压电陶瓷执行器迟滞特性的特质, 对其进行相关实验设计。实验数据采集过程如下:电压变化率为 10 V/s,施加的驱动电压序列 (V)为 0—70 V—50 V—90 V—50 V—70 V—0— 100 V—50 V—70 V—0。图 2(a)为其压电陶瓷执 行器随电压变化所对应的位移输出值。电压为 50~70 V时出现 3 个次环,通过观察实验现象,发 现生成的 2 个次环不全等。图 2(b)为图 2(a)中方 框的放大图像,在次环中心电压 60 V 时,所对应 的位移差为 h_1 、 h_2 和 h_3 (见图2(b)),其次环的垂直 弦长 $h_1=1.243$ μ m; $h_2=1.257$ μ m, $h_3=1.25$ μ m, h_1 、 h_2 和 h_3 近似相等。实验表明压电陶瓷执行器的迟 滞特性具有次环等弦长性,但不满足次环一致性。

由于次环一致性是经典 preisach 模型的充要条件,压电陶瓷迟滞特性不满足次环一致性,因此,采 用经典 preisach 模型会降低压电陶瓷执行器模型 精度。



图 2 压电陶瓷执行器迟滞次环等弦长特性



3.1 TI-preisach 模型

通过对以上问题的分析发现,压电陶瓷执行器 在相同的最大极值点和最小极值点所生成的次环等 弦长。因此,本文提出压电陶瓷迟滞非线性 TI-preisach 模型,其模型的迟滞效应不仅与当前电压 u(t) 有关,还与压电陶瓷最大极值点和最小极值点有关。 其数学表达式为

$$f(t) = \iint_{R_{u(t)}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) \gamma_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^+$$
(4)

式中: $f_{u(t)}^{+}$ 为 preisach 模型中密度函数 $\mu(\alpha,\beta,u(t))$ 在图 3 中所围成的面积,其含义为压电陶瓷执行器 preisach 模型电压从 0 上升到第一个极大值电压, 然后下降到第一个极小值电压,最后上升到当前输 入电压的输出值。



图 3 改进型 preisach 模型几何描述

图 3 中阴影部分面积为 $R_{u(t)}$,其含义是压电陶 瓷从第二个极大值点到最终实时电压所围成的面积。由此可见 TI-preisach 模型不仅与 α , β 相关,还 和当前输入电压 u(t)相关。

压电陶瓷执行器 preisach 模型离散化分为上升 和下降过程。阴影部分面积之和是图(3)中的 $R_{u(t)}$, 且 $R_{u(t)} = A_1 + A_2 + \dots + A_n$ 。定义函数 $f(\alpha_k, \beta_k, u)$ 为 压电陶瓷的二阶偏转函数,表示压电陶瓷从电压 0 上升到电压 α_k ,然后下降到电压 β_k ,最后上升到实 时输入电压 u 的输出位移值,如图 4 所示。





压电陶瓷执行器根据最终电压变化过程可分为 上升和下降过程。在最终电压为下降过程时,上升 极大值点个数等于下降极小值点的个数,即 $n_a = n_\beta$,其中, n_a 为上升极值点个数; n_β 为下降极值点个数。其下降过程离散表达式的推导过程如下:

$$f(t) = \iint_{R_{u(t)}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) \gamma_{q\beta}(u(t)) d\alpha d\beta + f_{u(t)}^{+} = f_{u(t)}^{+} + \iint_{\Sigma_{1}^{n}A_{i}} \mu(\alpha, \beta, u(t)) \gamma_{q\beta}(u(t)) d\alpha d\beta = f(\alpha_{1}, \beta_{1}, u) + f(\alpha_{2}, \beta_{2}, u) - f(\alpha_{2}, \beta_{1}, u) + \dots + f(\alpha_{k}, \beta_{k}, u) - f(\alpha_{k}, \beta_{k-1}, u) = f_{u(t)}^{+} + \sum_{k=2}^{n} (f(\alpha_{k}, \beta_{k}, u) - f(\alpha_{k}, \beta_{k-1}, u))$$
(5)

同理,当最终电压处于上升阶段时,上升极值点 个数比下降极值点个数多1,县α_{k+1}=u即

$$f(t) = f_{u(t)}^{+} + \sum_{k=2}^{n} (f(\alpha_{k}, \beta_{k}, u) - f(\alpha_{k}, \beta_{k-1}, u))$$
(6)

上升过程时, $n_a = n_\beta + 1$, $\alpha_{k+1} = u$; 下降过程时, $n_a = n_\beta$, $\beta_k = u$ 。

3.2 TI-preisach 模型数值实现方法

TI-preisach 模型密度函数有3个未知数,因此 采用三线性插值法计算其不在插值点位移输出值。

三线性插值法是在三维离散采样点上生成三维

数据库,且进行线性插值计算,其三维离散采样流程 图如图 5 所示。图中,*n*.*m*,*k* 是三维数据建模的三 维坐标。通过三维网格线性计算的值。图 6 为在三 维数据库上所划分的最小单元上任意解 *f*(*x*,*y*,*z*) 求解示意图。







图 6 三线性插值法空间标示图

图 6 中, *f*(*x*, *y*, *z*)为本文所要求的插值点, 其 求解式为

$$Q(R_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(x_1, y_1, z_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(x_2, y_1, z_1)$$
(7)

$$Q(R_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(x_1, y_2, z_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(x_2, y_2, z_1)$$
(8)

$$f(x,y,z) = \frac{z_2 - z}{z_2 - z_1} f(x,y,z_1) + \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} f(x,y,z_2)$$
(9)

$$f(x,y,z_1) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} Q(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} Q(R_2)$$
(10)

将式(7)、(8)代入式(10)可得 $f(x,y,z_1)$,同理 可求 $f(x,y,z_2)$ 。把所求 $f(x,y,z_1)$ 和 $f(x,y,z_2)$ 代入式(9)中可求出非线性 TI-preisach 模型在任意 点的输出位移值。

4 实验验证

实验平台(见图 7)采用 PI 公司生产的 PZ167E 型号压电陶瓷和 E-625 压电陶瓷控制器,其耐压范 围为 (-20 V, +120 V), 位移输出值范围为 (0,120 µm),从式(4)中可得,压电陶瓷执行器模型 有3个未知参数。设置采集速率初值为10 V/s,压 电陶瓷控制器饱和电压分为10等分,采集电压从0 上升到 $10n(n=1,2,\dots,10)$,下降到 $10i(i=1,2,\dots,10)$,下降到 $10i(i=1,2,\dots,10)$,下降到 $10i(i=1,2,\dots,10)$,下降到 $10i(i=1,2,\dots,10)$,下降到 $10i(i=1,2,\dots,10)$, …,10),最后上升到 10*i*(*i*=1,2,…,10)的位移输 出值。遍历以上所有电压序列,采集流程图如图 5 所示,其采集数据点约为1000个。此外,采集电压 变化过程所对应的输出位移值。作为随机位置 preisach 模型的分析。在采集完数据的基础上,采用 TI-preisach 模型离散化方法进行压电陶瓷执行器 建模,对于不在等分点上的位移值采用三线性插值 计算。将其模型与经典 preisach 模型进行对比,其 对比结果如表 1、2 所示。



图7 压电陶瓷实验平台 表1 等分点上的电压序列输入下两种 模型位移输出的比较

电压/	实测	传统 preisach		TI-preisach	
V	位移/μm	位移/μm	误差/μm	位移/μm	误差/μm
30	25.78	25.78	0	25.78	0
50	47.09	47.21	0.12	47.10	0.01
80	81.77	81.90	0.13	81.80	0.03
40	47.33	47.41	0.08	47.32	-0.01
60	62.68	62.58	-0.11	62.70	0.02
90	93.48	93.57	0.09	93.51	0.03
10	13.62	13.60	-0.15	13.70	0.08
70	71.16	71.20	0.04	71.14	-0.02

表 2 随机选取的电压序列输入下两种 模型位移结果的比较

电压/	实测	传统 preisach		TI-preisach	
\mathbf{V}	位移/ μm	位移/μm	误差/μm	位移/μm	误差/μm
25	20.99	21.03	0.04	20.99	0
47	43.82	43.94	0.12	43.85	0.03
83	85.27	85.17	-0.09	85.32	0.05
19	23.73	23.90	0.17	23.77	0.04
56	56.73	56.92	0.19	56.67	-0.06
28	32.82	32.62	-0.24	32.9	0.08
72	73.42	73.67	0.25	73.46	0.04
16	19.51	19.64	0.13	19.44	-0.07

由表 1、2 可看出,在等分点上 TI-preisach 模型 最大误差是 0.08 μ m,经典 preisach 模型最大误差 为 0.15 μ m。不在等分点 TI-preisach 模型最大误 差为 0.08 μ m,经典 preisach 模型最大误差为 0.25 μ m。可见 PI-preisach 模型的精度远优于经典 preisach 模型的精度。

5 结束语

压电陶瓷执行器的迟滞特性不具有次环全等性,而具有次环等弦长特性。次环一致性是传统 preisach模型的充要条件,因此采用经典模型误差 较大,为了提高压电陶瓷建模精度,在经典 preisach 模型的基础上提出一种 TI-preisach模型,不在等分 点电压位移值采用三线性插值法。实验结果表明, 本文提出的 TI-preisach模型精度优于经典 preisach模型精度,其中误差绝对值最大降低 0.21 μm, 能够更好的描述压电陶瓷执行器的迟滞特性。

参考文献:

- [1] 高学辉.迟滞 Hammerstein 非线性系统辨识与控制[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [2] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器的输入和历史 相关 preisach 模型[J]. 压电与声光,2008,30(5): 551-553.
 LI Li,LIU Xiangdong,WANG Wei, et al. Iput history depengdent preisach model of piezoceramic actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2008,30(5):551-553.
- [3] 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):384-391.
- [4] MAYEGOYZ I. Mathematical models of hysteresis [J]. Magnetics, IEEE Transactions on,1991,22(5):603-608.
- [5] 念龙生,隆志力,王哲琳,等.一种改进 preisach 模型数值 实现方法[J]. 压电与声光,2014,36(2):255-260.
 NIAN Longsheng, LONG Zhili, WANG Zhelin, et al. An improves numerical implementation of prieisach model[J].
 Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014,36(2):255-260.