

辅助线法预测 Preisach 类一阶回转曲线*

孙浩添^{1,2,3}, 杜福嘉^{1,2}, 张志永^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京, 210042)

(2. 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京, 210042) (3. 中国科学院大学 北京, 100049)

摘要 为了实现磁致伸缩和压电材料迟滞特性的描述,建立高精度前馈补偿系统,对 Preisach 模型一阶回转曲线的预测方法进行了研究。首先,介绍了一阶回转曲线及经典插值法预测一阶回转曲线的基本原理,着重指出线性经典插值法对 Preisach 模型一阶回转曲线的预测存在不足;其次,在此基础上,利用非线性变换的思想,提出了辅助线法预测一阶回转曲线;最后,实验比较了超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material,简称 GMM)与压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer,简称 PZT)两种迟滞情况下,辅助线法和经典插值法对迟滞一阶回转曲线的预测结果。实验结果表明:在 GMM 迟滞下,对任意一阶回转曲线的预测数据,辅助线法的均方根误差(root mean square error,简称 RMSE)最大减少为经典插值法的 14.22%;对所有预测数据,辅助线法的 RMSE 减少为经典插值法的 29.42%;在 PZT 迟滞下,对任意一阶回转曲线的预测数据,辅助线法的 RMSE 最大减少为经典插值法的 18.18%;对所有预测数据,辅助线法的 RMSE 减少为经典插值法的 41.07%。辅助线法对一阶回转曲线的预测精度整体高于经典插值法,且迟滞效应的非线性误差越高,预测精度较经典插值法越优异。

关键词 Preisach 模型;迟滞效应;一阶回转曲线;辅助线法

中图分类号 TM27

引言

以 GMM^[1-2] 和 PZT^[3-4] 等为核心单元的作动器^[5]广泛应用于精密控制系统,这些作动器在响应外界激励时都具不同程度的迟滞非线性效应,迟滞非线性效应会影响系统的控制精度^[6]。为了消除迟滞非线性对控制系统的影响,通常可建立迟滞非线性效应的模型,借助非线性逆模^[7-8],采用基于开环补偿的前馈控制^[9]或基于补偿的闭环控制^[10]来消除迟滞。迟滞模型可分为机理模型和数学模型两大类,数学模型包括 Preisach^[11]模型、神经网络模型^[12]等,机理模型包括 J-A 模型^[13]、自由能模型^[14]等。由于 Preisach 模型是一种与迟滞机理无关的实验数据模型,具有简单、通用等优点,因此被广泛应用于迟滞非线性建模^[15]。Hasiak 等^[16]采用通过采样一阶回转曲线的数值方法建立 Preisach 模型。

目前对于 Preisach 模型一阶回转曲线的未采样点,基本都采用最初的经典插值法进行预测。经典插值法是一种线性插值方法^[17],其对迟滞非线性

效应描述效果的优劣,受到模型线性度^[18]的显著影响^[7]。线性度为器件实际输出与理想直线的最大偏差与满量程输出的百分比,该值越小表明线性特性越好。迟滞效应具有明显的非线性特征,因此,如果能采用非线性变换降低迟滞非线性效应对模型的影响,将有利于预测未采样的一阶回转曲线。笔者提出一种新的辅助线法来对迟滞一阶回转曲线进行预测,并通过实验分别对 GMM 迟滞、PZT 迟滞比较了经典插值法与辅助线法的预测精度。结果表明,辅助线法的预测精度高于经典插值法,迟滞模型非线性误差越大,辅助线法的预测精度就越优异于经典插值法。

1 一阶回转曲线及经典插值法

1.1 一阶回转曲线

要得到 Preisach 模型,就要先测量一阶回转曲线。一阶回转曲线如图 1 所示,施加正方向激励时,

* 国家自然科学基金资助项目(11373049, 11190013)
收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-09-04

横轴为 α 轴,无量纲;施加反方向激励时,横轴为 β 轴,无量纲;纵轴 $f(\alpha, \beta)$ 表示一次正反激励下系统的输出,无量纲。负向饱和点 (α_0, β_0) 为系统的初始点,由初始点正向激励至某 (α_n, β_n) ,然后由 (α_n, β_n) 反向激励系统至 (α_n, β_0) ,其中反向激励形成的曲线就是一阶回转曲线, (α_n, β_n) 称为回转点,回转点处 $\alpha_n = \beta_n$ 。

Preisach 模型是通过实测数据建立的,采样一阶回转曲线是建立模型的第 1 步。其过程如下:由回转点 (α_n, β_n) 反向激励至 (α_n, β_0) ,记录所有输出 $f(\alpha_n, \beta_{n-k}) (k=0, 1, \dots, n)$ 。由于迟滞效应的影响, $f(\alpha_n, \beta_0) \neq f(\alpha_0, \beta_0)$,所有的 $f(\alpha_n, \beta_{n-k})$ 就表示回转点 (α_n, β_n) 下的一阶回转曲线。

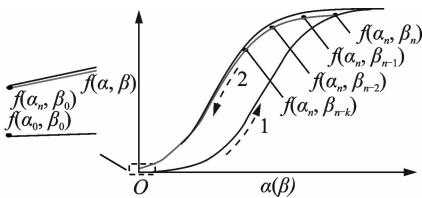


图 1 由负向饱和开始的一阶回转曲线

Fig. 1 First order reversal curve starting from negative saturation

不同的回转点 (α_n, β_n) 决定了不同的一阶回转曲线。将所有的一阶回转曲线采样点,按照各自的 α_n 和 β_n 绘制在 α - β 平面中就得到了 Preisach 限制三角形,如图 2 所示。由图 2 可以看出,在一阶回转曲线上存在大量的未采样点,称为未知点。其中落在矩形网格内部的未知点为 $f(\alpha_R, \beta_R)$,落在三角形网格内部的未知点为 $f(\alpha_T, \beta_T)$ 。为了从已知采样点预测未知点的值,通常可采用经典插值法。

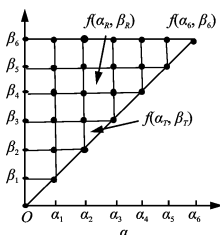


图 2 Preisach 限制三角形

Fig. 2 Preisach restricted triangle

1.2 经典插值法

尽管可以通过细分采样步长、密集化网格划分来减小模型误差,但这会造成实验数据成平方的增加^[19],且受到检测设备的分辨率、激励源的步长精度等影响而难以实现。因此,常通过经典插值法来

提高模型精度^[20]。经典插值法的基本原理是将未知点与未知点所处区域的各项点连线,根据连线分割后的各子区域面积确定未知点的值,如图 3 所示。未知点可分为以下两种情况。

1) 由 4 个已知顶点确定矩形网格内部的未知点 $f(\alpha_R, \beta_R)$,如图 3(a)所示

$$f(\alpha_R, \beta_R) = \frac{S_4 f(\alpha_{i+1}, \beta_j) + S_3 f(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1}) + S_2 f(\alpha_i, \beta_j) + S_1 f(\alpha_i, \beta_{j+1})}{S_4 + S_3 + S_2 + S_1} \quad (1)$$

其中: S_1, S_2, S_3 和 S_4 分别为 4 个小矩形面积。

2) 由 3 个已知顶点确定三角形网格内部的未知点 $f(\alpha_T, \beta_T)$,如图 3(b)所示

$$f(\alpha_T, \beta_T) = \frac{S_3 f(\alpha_{i+1}, \beta_j) + S_2 f(\alpha_{i+1}, \alpha_{i+1}) + S_1 f(\alpha_i, \alpha_i)}{S_3 + S_2 + S_1} \quad (2)$$

其中: S_1, S_2 和 S_3 分别为 3 个小三角形面积。

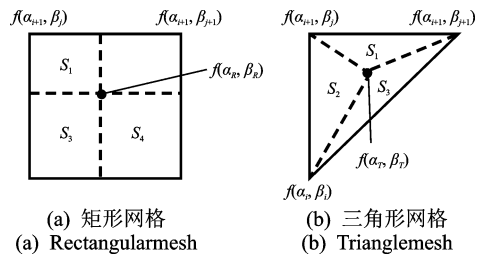


图 3 经典插值法

Fig. 3 Classical interpolation method

由式(1)、式(2)可知,经典插值法是一种线性插值法,在模型非线性误差较大时,必须用大量的采样点将图 2 的网格划分的非常致密,才能降低非线性误差,从而保证经典插值法的准确性;而网格划分比较稀疏时,必须采取其他措施保证模型的精度。

2 辅助线法

2.1 非线性变换

从数学现象学角度展开分析^[21],因为回转点 (α_n, β_n) 的不同导致一阶回转曲线不同,所以如果能消除回转点对一阶回转曲线的影响,就能综合分析全部一阶回转曲线在反向激励下的变化规律。

如图 4 所示, A, B 和 C 是具有相同横坐标的采样点, β_{max} 为最大激励。

A 位于主迟滞下降曲线 f_d 上,坐标为 $f_d: [\beta, f_d(\beta)]$, $\beta \in [0, \beta_{max}]$; B 位于一阶回转曲线 f 上,坐标为 $f: [\beta, f(\beta)]$, $\beta \in [0, \beta_n]$; C 位于主迟

滞上升曲线 f_u 上,坐标为 $f_u: [\beta, f_u(\beta)]$, $\beta \in [0, \beta_{\max}]$ 。

$$AB = f_d(\beta) - f(\beta) \quad (3)$$

$$AC = f_d(\beta) - f_u(\beta) \quad (4)$$

A, B, C 重合时对预测一阶回转曲线无实际意义,因此 $\beta_n < \beta_{\max}$ 。定义非线性变换

$$G = \frac{AB}{AC} = \frac{f_d(\beta) - f(\beta)}{f_d(\beta) - f_u(\beta)} \quad (\beta \in [0, \beta_n]) \quad (5)$$

其中: G 为非线性变换的结果,无量纲。

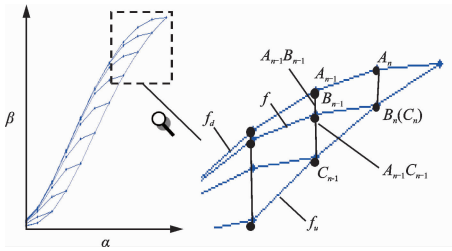


图4 非线性变换

Fig. 4 Nonlinear transformation

2.2 非线性变换的性质

式(5)的非线性变换具有以下两条重要性质。

性质1: $\forall (\alpha_n, \beta_n), G \in [G_{\min}, 1]$ 。证明如下。

1) 回转点处 B 和 C 重合, $AB = AC$, $G = 1$ 。

2) 负向饱和处 B 和 C 再次重合, $AB = AC$, $G = 1$ 。根据迟滞效应的现象学数学模型^[23],一阶回转曲线将先于主迟滞下降曲线达到反向饱和,此时 B 和 C 重合于主迟滞上升曲线上。

3) 其他情况 $AB < AC$, $G_{\min} \leq G < 1$ 。 A 和 B 竖直距离最近时 $G = G_{\min}$ 。

性质2:在 β - G 平面内, $\beta \in [0, \beta_n]$,若 $\beta_n \rightarrow 0$,则 $\forall (\beta, G) \rightarrow (0, 1)$ 。证明如下。

1) $\beta = \beta_n$,由性质1第1条, $G = 1$ 得以证明。

2) $\beta = 0$,分两种情况讨论:①系统未经历任何回转过程 $\beta_n = 0$,初值 $f_d(0) \neq 0, f_u(0) = 0$,剩余迟滞 $f_{\text{res}} = 0$,所以 $f(0) = 0$,代入式(5), $G = 1$ 得以证明;②系统经历过回转过程 $\beta_n \neq 0$,初值 $f_d(0) \neq 0, f_u(0) = 0$,剩余迟滞 $f_{\text{res}} \neq 0$,所以 $f(0) = f_{\text{res}}$,代入式(5),根据迟滞现象的基本原理,若 $\beta_n \rightarrow 0$,则 $f_{\text{res}} \rightarrow 0$,则 $G \rightarrow 1$ 得以证明。

3) $\beta \in (0, \beta_n)$,若 $\beta_n \rightarrow 0$,则 $\beta \in (0, \beta_n)$ 中左右极限皆为0,根据夹逼定理 $\beta = 0$ 。结合上一步的结论,若 $\beta_n \rightarrow 0$,则 $G \rightarrow 1$ 得以证明。

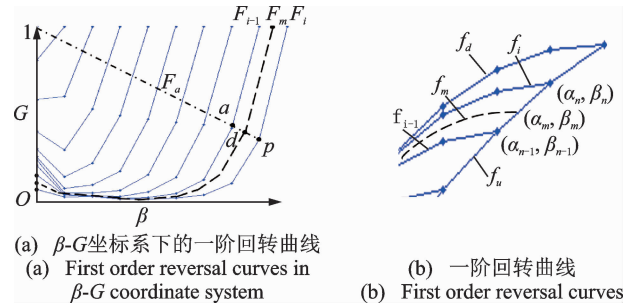
根据性质1,式(5)消除了回转点不同对回转曲线的影响,任何回转曲线都有 $G \in [G_{\min}, 1]$ 。

根据性质2, $\forall (\beta, G) \rightarrow (0, 1)$ 有许多种可选

轨迹,其中直线轨迹是最简单的一种。因此,可以用 $\forall (\beta, G)$ 与 $(0, 1)$ 的直线近似表示该点在 β - G 平面的运动轨迹,这条直线就是本研究中的辅助线。

2.3 辅助线法实施过程

已知待预测曲线 f_m 落在 f_i 和 f_{i-1} 之间,如图5(b)所示, f_m 的回转点为 (α_m, β_m) , f_i 和 f_{i-1} 的回转点分别为 (α_i, β_i) 和 $(\alpha_{i-1}, \beta_{i-1})$,预测 f_m 的过程如下。



(a) β - G 坐标系下的一阶回转曲线
(a) First order reversal curves in β - G coordinate system

(b) 一阶回转曲线
(b) First order reversal curves

图5 辅助线法

Fig. 5 Auxiliary line method

1) 非线性变换。取相邻一阶回转曲线 f_i, f_{i-1} 的采样点以及 f_d, f_u 的采样点,拟合 f_i, f_{i-1}, f_d 和 f_u 方程 $f_i(\beta), f_{i-1}(\beta), f_d(\beta)$ 和 $f_u(\beta)$,并代入式(5),得到 f_i, f_{i-1} 的变换式方程 $F_i(\beta, G), F_{i-1}(\beta, G)$ 。

2) 辅助线法求解。过 $(0, 1)$ 的辅助线方程为 $F_a(\beta, G, k)$,参数 k 表示直线斜率,由于 k 最终将被消去,因此不必对斜率无穷大的情况单独讨论。分别联立方程 $F_i(\beta, G), F_{i-1}(\beta, G)$ 与 $F_a(\beta, G, k)$,计算交点 a 和 p 关于 k 的表达式,记为 $a: [\beta(k), G(k)], p: [\beta(k), G(k)]$ 。采用式(6)、式(7)计算 β - G 平面内的待预测曲线方程上的点 $d: [\beta(k), G(k)]$

$$d = \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_n - \beta_{n-1}} \right) a + \left(\frac{\beta_m - \beta_{n-1}}{\beta_n - \beta_{n-1}} \right) p \quad (6)$$

消去 $d: [\beta(k), G(k)]$ 中的参数 k ,得到 β - G 平面内的待预测曲线方程 $F_m(\beta, G)$ 。

3) 非线性逆变换。将方程 $f_d(\beta), f_u(\beta)$ 和 $F_m(\beta, G)$ 代入式(5),得待预测一阶回转曲线方程 $f_m(\beta)$ 。

算法流程如图6所示。

2.4 辅助线法与经典插值法的比较

1) 对已知信息的利用率。在求解1个预测点时,经典插值法只用了相邻2条一阶回转曲线的4个采样点信息。辅助线法用了 f_u, f_d 和相邻2条一

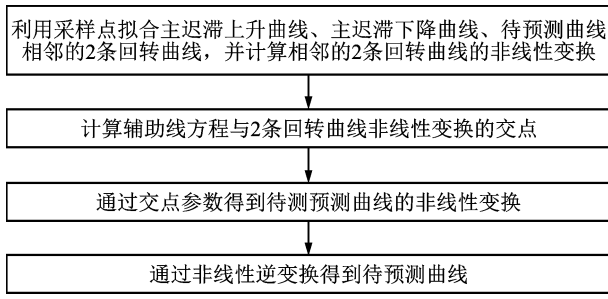


图 6 辅助线法流程图

Fig. 6 Auxiliary line method flow chart

阶回转曲线的全部采样点信息。显然,在对已知信息的利用率上,辅助线法优于经典插值法。

2) 模型近似。经典插值法将相邻采样点间近似为直线,这种近似在非线形误差较低的情况下是可以接受的。辅助线法采用非线性变换,在 βG 平面内拟合最优曲线。因此,辅助线法受非线性误差影响低。非线性误差越高,非线性变换就越优于线性变换。

3 测量实验与结果

为了验证辅助线法的有效性,分别比较了 GMM 迟滞与 PZT 迟滞两种情况下辅助线法与经典插值法对一阶回转曲线的预测效果,其中 GMM 迟滞数据来源于文献[23],PZT 迟滞数据来源于实际测量。PZT 迟滞测试平台如图 7 所示,信号源采用苏州博实机器人技术有限公司的 PPC 系列集成式精密定位控制器,输出电压静态纹波 $<30\text{mV}$,输出电压稳定性 $<0.1\% \text{FS}/8\text{h}$,输出电压分辨率为 16bit。检测装置采用美国 MTI 公司的 Accumeasure9000 电容位移传感器,测量范围为 $0\sim 125\mu\text{m}$,分辨率($\% \text{满量程}$)为 0.00167% ,精度($\% \text{满量程}$)为 $\pm 0.02\%$ 。

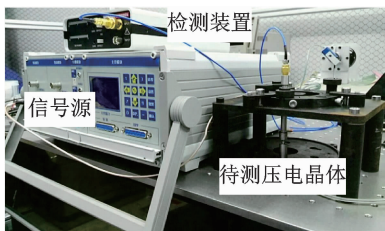


图 7 PZT 迟滞数据实测平台

Fig. 7 PZT hysteresis data measurement platform

3.1 实验设计

将归一化的原始数据的奇数行与奇数列作为已

知数据,偶数行与偶数列作为真实数据。分别采用经典插值法与辅助线法预测真实数据。根据预测数据与真实数据的均方根误差的大小,评估预测方法的精度。

3.2 GMM 迟滞实验结果

将两种方法下的预测数据与真实数据绘制于图 8 中。其中:蓝色实线为真实数据;红色点划线为经典插值法预测数据;黑色虚线为辅助线法预测数据,可以直观地看出辅助线法优于经典插值法。如表 1 所示,结果保留两位小数。

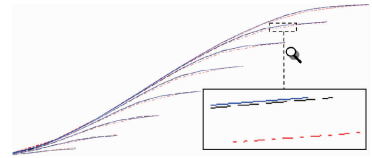


图 8 GMM 迟滞下两种方法的预测数据与真实数据

Fig. 8 Prediction data of tow methods and real data under GMM hysteresis

表 1 GMM 迟滞下每条曲线的预测数据与真实数据的 RMSE

Tab. 1 The RMSE between data predicted of GMM hysteresis and real data

预测数据 点数/真实 数据的非线 性误差/ $\%$	辅助线法预 测数据与真 实数据的 RMSE(10^{-3})	经典插值法 预测数据与 真实数据的 RMSE(10^{-3})	辅助线法 与经典插 值法误差 对比/ $\%$
18/13.67	0.69	4.85	14.22
16/12.89	0.91	5.64	16.13
14/12.10	1.14	6.28	18.15
12/11.24	1.29	6.44	20.03
10/10.29	1.80	5.90	30.50
8/8.93	2.59	4.75	54.52
6/7.95	2.65	3.59	73.82
4/5.08	0.78	2.82	27.56

由表 1 可以看出,在相同的预测数据点数下,辅助线法的 RMSE 都不同程度地小于经典插值法的 RMSE。如预测数据点数为 18,辅助线法误差是经典插值法的 $0.69/4.85 \times 100\% = 14.22\%$ 。通过误差对比,辅助线法对任意回转曲线的预测精度都高于经典插值法。对所有预测数据来说,辅助线法的 RMSE 为 1.48×10^{-3} ,经典插值法的 RMSE 为 5.03×10^{-3} ,误差减少到原来的 29.42%。辅助线法的整体预测精度高。

随着真实数据非线性误差的升高,辅助线法与经典插值法误差对比整体呈降低趋势。非线性误差

越高,辅助线法的非线性变换就越优于经典插值法的线性变换。

3.3 PZT 迟滞实验结果

图9中曲线表示方法、表2中数据记录方法及有效数字位数皆与GMM迟滞实验结果相仿。

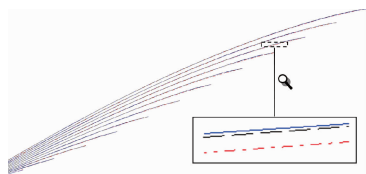


图9 PZT迟滞下两种方法预测数据与真实数据

Fig.9 Prediction data of two methods and real data under PZT hysteresis

表2 PZT迟滞下每条曲线预测数据与真实数据的RMSE
Tab.2 The RMSE between data predicted of PZT hysteresis and real data

预测数据 点数/真实 数据的非 线性误差/%	辅助线法预 测数据与真 实数据的 RMSE(10^{-3})	经典插值法 预测数据与 真实数据的 RMSE(10^{-3})	辅助线法和 经典插值法 误差对比/%
24/7.58	0.64	0.97	65.98
22/7.04	0.41	1.07	38.32
20/6.64	0.30	1.36	22.06
18/6.11	0.30	1.32	22.73
16/5.67	0.37	1.43	25.87
14/4.90	0.20	1.10	18.18
12/4.31	0.50	1.00	50.00
10/3.73	0.64	0.70	91.42
8/2.97	0.41	1.13	36.28
6/2.21	0.37	1.07	34.58
4/1.43	0.94	1.12	83.93

由表2可以看出,在相同的预测数据点数下,辅助线法的RMSE都不同程度地小于经典插值法的RMSE。如预测数据点数为24,辅助线法误差是经典插值法的 $0.64/0.97 \times 100\% = 65.98\%$ 。通过误差对比,辅助线法对任意回转曲线的预测精度都高于经典插值法。对所有预测数据来说,辅助线法的RMSE为 0.46×10^{-3} ,经典插值法的RMSE为 1.12×10^{-3} ,误差减少到原来的41.07%。辅助线法的整体预测精度高。

4 结论

1) 笔者利用非线性变换的思想,提出了一种用

辅助线预测一阶回转曲线的方法,详细介绍了辅助线法的基本原理与实施过程,并实验验证了方法的可行性。

2) 在GMM迟滞下,对任意一阶回转曲线的预测数据来说,辅助线法的RMSE最大减少为经典插值法的14.22%;对所有预测数据来说,辅助线法的RMSE缩小为经典插值法的29.42%。在PZT迟滞下,对任意一阶回转曲线的预测数据来说,辅助线法的RMSE最大减少为经典插值法的18.18%;对所有预测数据来说,辅助线法的RMSE缩小为经典插值法的41.07%。

3) 因为GMM迟滞的非线性误差比PZT迟滞的非线性误差大,所以GMM迟滞下采用辅助线法改善RMSE的程度高于PZT迟滞下的对应程度。这说明迟滞效应的非线性误差越大,辅助线法的非线性变换就越优于经典插值法的线性变换。

参 考 文 献

- [1] 蔡万宠, 张建富, 郁鼎文, 等. 超磁致伸缩超声振动系统的机电转换效率研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19):52-58.
CAI Wanchong, ZHANG Jianfu, YU Dingwen, et al. Research on the electromechanical conversion efficiency for giant magnetostrictive ultrasonic machining system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19):52-58. (in Chinese)
- [2] 薛光明, 张培林, 何忠波, 等. 喷油器用超磁致伸缩致动器多自由度模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24):97-104.
XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Multiple degrees of freedom model of giant magnetostrictive actuator used on high-pressure-common-rail injector[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24):97-104. (in Chinese)
- [3] 于志亮, 王岩, 曹开锐, 等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8):2113-2120.
YU Zhiliang, WANG Yan, CAO Kairui, et al. Hysteresis compensation and composite control for piezoelectric actuator [J]. Optical Precision Engineering, 2017, 25(8):2113-2120. (in Chinese)
- [4] 王亮, 舒承有, 金家楣, 等. 用于驱动履带的夹心式压电作动器的动力学特性[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5):128-135.
WANG Liang, SHU Chengyou, JIN Jiamei, et al. Dynamical characteristics of sandwich-type piezoelectric actuator for driving track[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5):128-135. (in Chinese)
- [5] 张春林, 贺国京, 易锦. 菱形微位移压电作动器输入输出杂交建模[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3):

- 518-524.
- ZHANG Chunlin, HE Guojing, YI Jin. Hybrid modeling input and output for a rhombic micro-displacement amplifier[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(3):518-524. (in Chinese)
- [6] 冒鹏飞, 王传礼, 喻曹丰, 等. 磁滞伸缩驱动器磁滞特性的 Preisach 模型建模[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(9):149-152.
- MAO Pengfei, WANG Chuanli, YU Caofeng, et al. Establish the Preisach model of hysteresis in giant magnetostrictive material[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(9):149-152. (in Chinese)
- [7] 龚大成, 吕福在, 潘晓弘, 等. Preisach 逆补偿的 GMA 精密轨迹跟踪与实验优化[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8):1241-1246.
- GONG Dacheng, LÜ Fuzai, PAN Xiaohong, et al. Precision tracking and experimental optimization of GMA by Preisach inverse compensation[J]. *Optical Precision Engineering*, 2007, 15(8):1241-1246. (in Chinese)
- [8] SONG X, DUGGEN L, LASSEN B, et al. Modeling and identification of hysteresis with modified Preisach model in piezoelectric actuator[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany:IEEE,2017: 1538-1543.
- [9] 刘一帆, 章文俊. 压电驱动器建模与控制技术研究[J]. *压电与声光*, 2016, 38(3):363-366.
- LIU Yifan, ZHANG Wenjun. Study on modeling and control technology for piezoelectric actuators[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2016, 38(3):363-366. (in Chinese)
- [10] 李捷. 压电驱动的快刀伺服器的迟滞逆模型辨识与自抗扰复合逆控制[J]. *机床与液压*, 2017, 45(10):153-157,161.
- LI Jie. An identification of hysteresis inverse model and composite control with active disturbance rejection control for piezoelectrically actuated fast tool servo[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(10):153-157, 161. (in Chinese)
- [11] 赵志刚, 戎静怡, 魏鹏, 等. 基于 Preisach 磁滞模型的分布函数辨识与实验验证[J]. *磁性材料及器件*, 2017, 48(4):6-9.
- ZHAO Zhigang, RONG Jingyi, WEI Peng, et al. Identification of distribution function and experiment verification of Preisach hysteresis model[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2017, 48(4):6-9. (in Chinese)
- [12] MAKAVEEV D, DUPRE L, WULF M D, et al. Modeling of quasi-static magnetic hysteresis with feed forward neural networks[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(11):6737-6739.
- [13] JILES D C, HARIHARAN S. Interpretation of the magnetization mechanism in terfenol-D using barkhausen pulseheight analysis and irreversible magnetostriction[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(9):5013-5015.
- [14] SMITH R C, DAPINO M J. A free energy model for hysteresis in magnetostrictive transducers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(1):458-466.
- [15] SUN Z, XI N, CHENG Y, et al. Exact inversion of discrete Preisach model for compensating complex hysteresis in AFM based nanomanipulator [C] // 2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2017:430-433.
- [16] HASIAK M, MIGLIERINI M. Thermomagnetic properties and first order reversal curve analysis of annealed Fe-Co-Si-B-Mo-P alloy[J]. *Acta Physica Polonica*, 2017, 131(5):1222-1225.
- [17] 龚大成, 唐志峰, 吕福在, 等. 非线性 Preisach 理论与超磁致伸缩执行器高阶迟滞建模[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12):252-256.
- GONG Dacheng, TANG Zhifeng, LÜ Fuzai, et al. Nonlinear Preisach model and high order hysteresis modeling for giant magnetostrictive actuator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(12):252-256. (in Chinese)
- [18] BERTRAM S K. Understanding linearity and monotonicity[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2005(5):30-31.
- [19] EICHLER J, NOVÁK M, KOŠEK M. Implementation of the first order reversal curve method for identification of weight function in Preisach model for ferromagnetics[C]//2016 IEEE 11th International Conference ELEKTRO. Strbske Pleso, Slovakia: IEEE, 2016:602-607.
- [20] HUSSAIN S, LOWTHER D A. An efficient implementation of the classical Preisach model[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017(99):1-4.
- [21] DANILIN A N, SHALASHILIN A D. Hysteresis modeling of mechanical systems at nonstationary vibrations[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018(7):1-15.
- [22] SHI J, AVRAMIDIS S. Water sorption hysteresis in wood: II mathematical modeling-functions beyond data fitting[J]. *Holzforchung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 2017, 71(4):317-326.
- [23] 程建华. 基于 Preisach 模型的超磁致伸缩驱动器迟滞建模与位移控制研究[D]. 天津:河北工业大学, 2008.



第一作者简介:孙浩添,男,1988年12月生,博士生。主要研究方向为机电系统计算机控制。

E-mail:htsun@niaot.ac.cn