第 37 卷第 3 期
2017 年 6 月

振动、测试与诊断
Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis

Vol. 37 No. 3
Jun. 2017

doi:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2017.03.016

菱形微位移压电作动器输入输出杂交建模*

张春林， 贺国京， 易　锦
（中南林业科技大学土木工程与力学学院　长沙，410004）

摘要　针对某定位装置，研究了一种新型菱形微位移压电作动器，该压电作动器由压电堆、菱形位移放大机构以及柔性铰链组成。菱形微位移压电作动器的核心驱动部件为压电堆，由于压电材料的迟滞特性，菱形压电作动器具有非线性迟滞特性。为了消除迟滞对压电作动器在后续控制中的影响，发展了一种 Preisach 杂交建模的方法，该方法在传统 Preisach 模型的基础上，有效结合了 Preisach 离散模型和支持向量机（support vector machine，简称 SVM），建立了微位移压电作动器输入输出杂交模型。试验结果表明，SVM 有效解决了因 1 阶滞回曲线数量不足而导致 Preisach 模型精度低的问题，同时与传统 Preisach 模型相比，杂交建模能更准确地描述迟滞特性，具有更高的精度。

关键词　位移放大机构；压电作动器；迟滞；杂交建模
中图分类号　TP183；TH703.65

引　言

压电作动器作为一种微位移、力输出机构被广泛应用于工程各领域。由于压电作动器的微位移输出特性限制了其应用范围，因而压电作动器的应用通常伴随有位移放大机构[1]。国外学者对放大机构进行了大量的研究，现存的一些位移放大机构主要有杠杆机构[2-3]、Scott-Russell 型位移放大机构[4]、cymbal-type 压电作动器[5]（钹型压电作动器）以及蜂窝杆式位移放大机构[6]等。国内关于位移放大机构的研究主要有：王隆太等[7]研究的柔性铰链位移放大机构；吴家龙等[8]关于液压微位移放大器的设计与研究；李万全等[9]基于液压微位移放大机构的压电陶瓷执行器的设计。笔者的菱形微位移压电作动器与钹型压电作动器结构类似，由压电作堆、菱形位移放大机构以及柔性铰链组成，同时也具有微位移特性、较好的放大系数以及提供压电堆抵抗横向干扰力的能力[10]。

由于压电作动器作为整个位移放大机构的核心驱动部分，压电材料的非线性迟滞导致整个作动器具有非线性迟滞特性，同时压电堆在使用中表现出的响应和驱动电压之间的迟滞非线性的不准确描述会严重影响控制精度。针对压电材料具有非线性迟滞特性，对含有菱形放大机构的压电作动器进行了杂交建模研究。国内外学者提出了很多关于描述迟滞非线性的技术方案，如多项式拟合模型[11]，可以简单求得逆多项式，用于消除控制系统中的迟滞非线性，但是只能准确描述大环迟滞曲线，小环迟滞描述很难精确，从而整体精度不够高。对于 Maxwell[12]模型，环境参数的变化会导致该模型无法准确描述作动器迟滞非线性。Preisach[13-14]模型能准确描述形式复杂的迟滞非线性，而且能很方便地转化为离散形式并应用于控制，然而其精度很大程度上取决于 1 阶滞回曲线的精度与数量，但实际中很难获得大量 1 阶滞回曲线。因此，笔者建立了 Preisach 杂交模型，引入支持向量机来解决 1 阶滞回曲线数量不足而导致 Preisach 模型精度低的问题，并将该方法应用于菱形微位移压电作动器输入输出建模问题中，使菱形微位移压电作动器能更准确地应用于后续的控制处理。

1　微位移压电作动器工作原理

位移放大器通常都具有紧凑的结构和一定的输入输出放大倍数，并且都需要与特定的目标装置相连。图 1 为菱形压电作动器中菱形放大机构工作前后的示意图，菱形放大机构为对称结构，可认为由 8

* 国家自然科学基金资助项目（E080503）
收稿日期：2015-04-27；修回日期：2015-07-09

根杆件与 8 个柔性转角组成。假设 8 根杆件为刚性结构，即忽略作动器在工作过程中杆件的弹性变形。当给压电堆一个输入电压，压电堆在轴向方向将输出一定位移 ΔL，菱形放大机构将会输出一个竖向位移 $2H$，从而实现横向变竖向的位移放大。

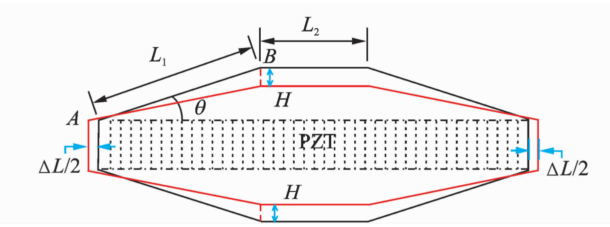


图 1　菱形微位移压电作动器结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of rhombic micro-displacement amplifier

2　压电作动器输入输出试验

图 2 为菱形微位移压电作动器实物图，在微位移压电作动器中，使用的压电堆为 Physik Instrumente P-885.91，该压电堆正向饱和电压为 120 V，负向饱和电压为－20 V。压电陶瓷作动器不能承受大的拉伸载荷，而且收缩驱动性能要显著弱于伸长驱动性能，为保证作动器安全稳定，实际工作电压范围取为 0～120 V。试验系统如图 3 所示，其组件包括 1 台 KEYENCE LK-G80 激光位移计，测量精度为 0.1 μm，此外还包括 1 台预装 SIMULINK 的计算机、dSPACE 系统和由西安交通大学自制的功率放大器。

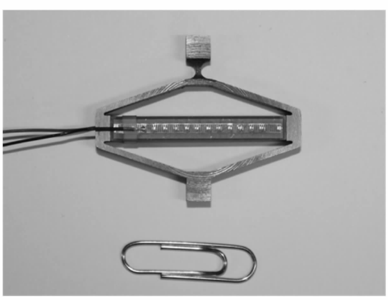


图 2　菱形微位移压电作动器实物图

Fig. 2　Prototype of rhombic micro-displacement amplifier

图 4 为 1 阶滞回曲线测试结构框图。为了测量 1 阶滞回曲线，首先在计算机生成一组线性分段折返电压曲线。电压曲线如图 5 所示，尽管压电堆可施加一定量的负向电压，但为了系统稳定，仅允许系统的最低电压为 0。输入电压包含了一组主迟滞回

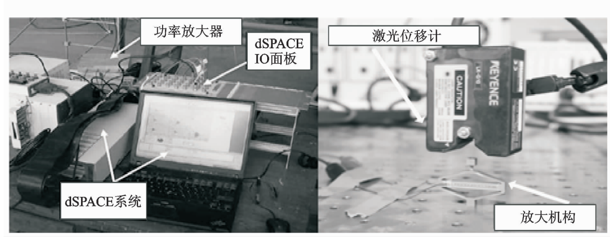


图 3　1 阶滞回曲线试验系统

Fig. 3　Schematic of the experimental setup for the first-order hysteresis curve test

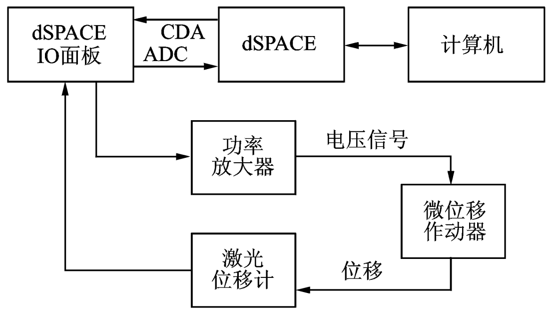


图 4　测试试验原理结构框图

Fig. 4　The principle flowchart of experimental system

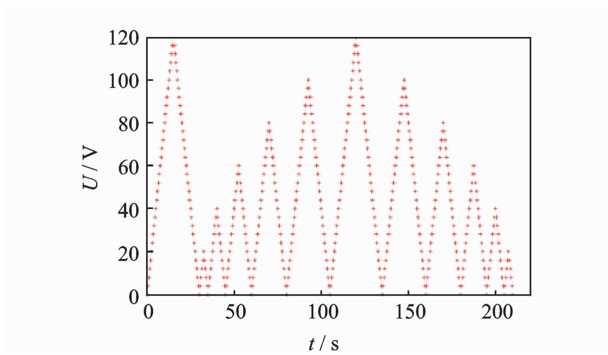


图 5　压电作动器的输入电压

Fig. 5　Input voltage of PA

线信号：首先由初始电压 0 增大到正向饱和电压，再降低到 0；然后为每次正向饱和电压增加 20 V 的折返电压信号。计算机通过 dSPACE 系统把数字信号转化为电压信号，再经过功率放大器把电压施加于微位移压电作动器。激光位移计测量作动器输出位移，并通过 dSPACE 系统把电信号转变为数字信号。图 6 为信号处理后所得到的压电作动器输出位移。

图 7 为菱形压电作动器 1 阶滞回曲线，结果表明，机构输出位移在电压上升阶段和下降阶段具有不同的输出值。导致此种现象的原因是压电堆压电迟滞特性，因此需要精确的模型来描述菱形微位移压电作动器的输入输出关系。

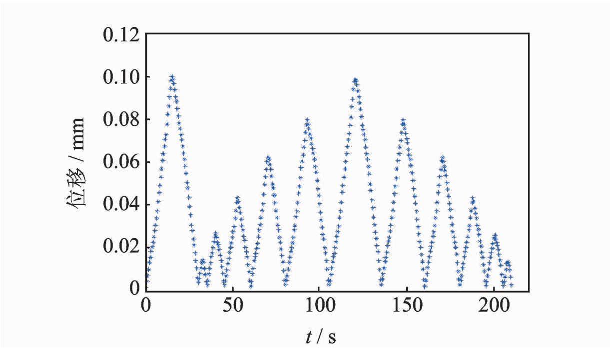


图 6 菱形压电作动器输出位移

Fig. 6 Output displacement of rhombic micro-displacement amplifier

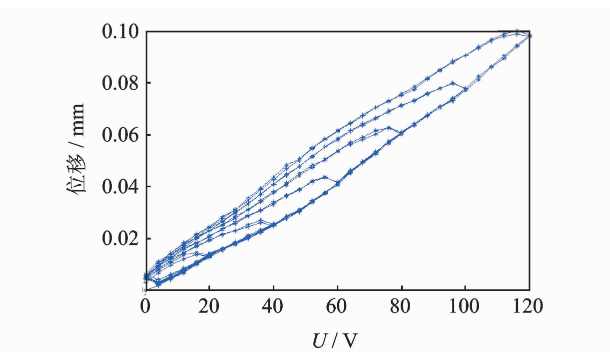


图 7 菱形压电作动器 1 阶滞回曲线

Fig. 7 First-order reversal curves of amplifier

3 压电作动器 Preisach 杂交模型

Preisach 模型能准确描述形式复杂的迟滞非线性,而且能很方便地转化为离散形式并应用于控制,但其精度很大程度上取决于 1 阶滞回曲线的精度与数量。为了准确描述压电作动器具有非线性迟滞特性的输入输出关系模型,将建立 Preisach 杂交模型。Preisach 杂交模型是基于离散经典 Preisach 模型以及 SVM 基础上的。SVM 以数值的方法解决了 Preisach 模型需要大量 1 阶滞回曲线的问题。

Preisach 杂交模型的建立主要分为以下两步:

1) 离散 Preisach 模型的建立;

2) Preisach 与 SVM 杂交建模获得更精细的权值矩阵 $\boldsymbol{E}_n(i,j)$。

3.1 经典 Preisach 模型

引进 Preisach 平面,如图 8 所示,来理解 Preisach 模型。图中的三角形区域 T_0 被称为 Preisach 平面,迟滞系统输入电压的取值范围 $(u_{\min},u_{\max})$ 被限制在这个三角形内,因此 T_0 也叫做限制三角形。在任意时刻,根据相应的输入电压,限制三角形都可以被分成两个部分 $S^+(t)$ 和 $S^-(t)$。分布于 $S^+(t)$ 内的单元迟滞算子为开启状态,输出为 1;分布于 $S^-(t)$ 内的单元迟滞算子为关闭状态,输出为 0。假设初始输入电压 $u(t)$ 为 0,此时所有的单元迟滞算子输出都为 0;当电压升高到 α_1 时,所有上升电压阈值小于 α_1 的单元迟滞算子都将处于开启状态,输出均为 1,其余的单元迟滞算子全部为关闭状态,输出为 0,在几何上表示为一水平线从下往上移动至 α_1,水平线以下的单元迟滞算子都开启,系统输出定义为 f_{α_1};当输入电压从 α_1 下降到 β_1 时,对于下降电压阈值大于 β_1 的单元迟滞算子将关闭,输出为 0,其他的单元迟滞算子保持原状态不变,几何上表示为一条垂直方向直线从右向左移动,垂线右边的单元迟滞算子关闭,其他的迟滞算子不受影响,系统输出表示为 f_{α_1,β_1}。可见,系统的输出仅等于处于开启状态的单元迟滞算子与每个开启状态的迟滞算子的权值的乘积,则微位移压电作动器的输出可表示为

$$f(t)=\iint_{S^+}\mu(\alpha,\beta)\left[u(t)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta\right]+c \tag{1}$$

其中:$f(t)$ 为模型输出;$\mu(\alpha,\beta)$ 为 Preisach 权函数,即单元迟滞算子权值分布函数;$u(t)$ 为输入电压。

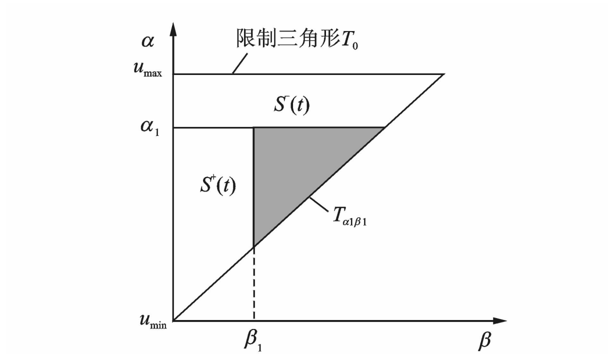


图 8 Preisach α_β 平面

Fig. 8 The Preisach α_β plane

3.2 离散 Preisach 模型

离散 Preisach 模型比经典模型更具优势:首先,减少了权函数求面积积分,节省大量时间;其次,避免了试验数据得到 Preisach 权函数时需要对试验数据求二阶导的问题。

将图 8 所示的三角平面的电压在 α 方向(电压上升)和 β 方向(电压下降)等步长分为 n 小份,则每个步长的电压为 $\Delta u=(u_{\max}-u_{\min})/n$。Preisach 平面被分成 $n(n+1)/2$ 个单元,每个单元表示 1 个 Preisach 迟滞算子。显然,随着 n 的增加,模型计算

的时间复杂度会大幅度增加，所需要的 1 阶滞回曲线数量也会大量增加。

离散 Preisach 模型的公式可表达为

$$\begin{cases} f = \sum\limits_{i,j=1}^{n} \boldsymbol{E}_n(i,j) + c \\ \boldsymbol{T}(i,j) \in S^{+} \end{cases} \tag{2}$$

其中：$\boldsymbol{T}(i,j)$ 为 Preisach 平面上的一个单元；$\boldsymbol{E}_n$ 为 $n \times n$ 的矩阵，它表示离散后的权值分布；c 为 Preisach 模型的一个偏移量，即当系统处于负向饱和状态时，Preisach 模型输出为 c。

元素 $\boldsymbol{E}_n(i,j)$ 对应单元 $\boldsymbol{T}(i,j)$ 的权值，它是权函数在单元 $\boldsymbol{T}(i,j)$ 内的面积积分

$$\boldsymbol{E}_n(i,j) = \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} \int_{\beta_{j-1}}^{\beta_j} \mu(\alpha,\beta)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta \tag{3}$$

权值元素 $\boldsymbol{E}_n(i,j)$ 可以通过 n 条 1 阶滞回曲线确定，当输入电压从负向饱和状态上升到 α_p，然后由 α_p 下降到 β_q 时系统的输出位移为

$$f_{\alpha_p,\beta_q} = \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{q} \boldsymbol{E}_n(i,j) + c \tag{4}$$

通过等步长的变换输入电压，1 阶滞回曲线对应点的输出被记录下来，从而得到维数为 $n(n+1)/2$ 的方程组，求解方程组，$n(n+1)/2$ 个位置的权值元素可以被求解出来。以 $n=3$ 的 Preisach 模型为例，不同加载过程下对应的一系列 f_{α_p,β_q} 在 Preisach 平面上的演化如图 9 所示。

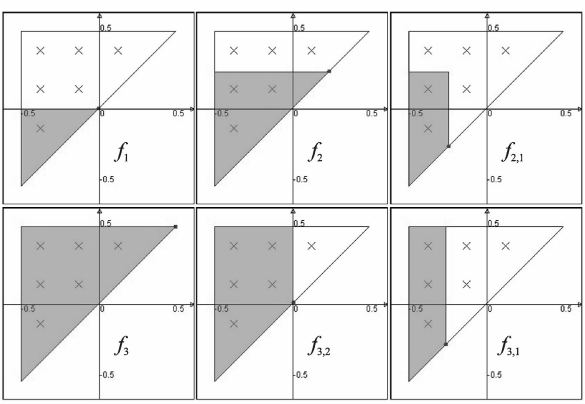


图 9　$n=3$ 的离散 Preisach 模型的几何描述

Fig. 9　The geometric description of discrete Preisach model($n=3$)

3.3　支持向量机 SVM

SVM 理论是基于统计学习理论发展起来的一种新的数据挖掘算法，包括支持向量分类机（support vector classification，简称 SVC）和支持向量回归机（support vector regression，简称 SVR），分别应用于分类预测和回归分析[16]。SVM 是一种新型的非参数化的算法，它将输入空间映射到高维特征空间，从而把原空间中的非线性问题转化为特征空间的线性问题，并构造最优分类超平面。对于一组训练数据集 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_l,y_l)$，$x \in \boldsymbol{R}^n$，$y \in \{-1,1\}$，可以被超平面 $(\boldsymbol{wx})+b=0$ 无错误地分开，如果在训练数据集中，离超平面最近的向量与其中某个超平面的间隔（$2/\|\boldsymbol{w}\|$）是最大的，则此超平面就是最优超平面。

对于给定的训练数据 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_l,y_l) \in \boldsymbol{R}^n \times R$，用线性函数 $f(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{wx} + b$ 拟合数据（其中 $\boldsymbol{w}$，b 为变量），代入不敏感损失函数，可以得到对应的线性回归的优化问题

$$\min \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{N}(\xi_i + \hat{\xi}_i)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} (\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}x_i + b) - y_i \leqslant \varepsilon + \xi_i \\ y_i - (\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}x_i + b) \leqslant \varepsilon + \hat{\xi}_i \quad (i=1,2,\cdots,N) \\ \xi_i, \hat{\xi}_i \geqslant 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中：ξ_i 为允许错分的松弛变量；$C > 0$ 为惩罚因子。

引入拉格朗日函数，并求其鞍点，可得式(5)优化问题的对偶问题

$$\min W(a) = \frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{l} a_i a_j y_i y_j (x_i x_j) - \sum_{i=1}^{l}(a_i)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum\limits_{i=1}^{l} a_i y_i = 0 \\ a_i \in [0,C] \end{cases} \tag{6}$$

其中：a 为拉格朗日乘子。

取值非零的乘子对应的样本即为支持向量，最优超平面只取决于非零的拉格朗日乘子和支持向量，这也是支持向量机的解具有稀疏性的原因。对应的决策函数为

$$f(x) = \mathrm{sgn}\Big(\sum_{i=1}^{l} y_i a_i (x_i x) + b\Big) \tag{7}$$

3.4　Preisach 与 SVM 杂交建模

利用 SVM，根据由 n 条 1 阶滞回曲线确定的相对粗糙的权值分布矩阵 $\boldsymbol{E}_n(,)$，预测得到一个相对细致的权值分布矩阵 $\boldsymbol{E}_m(,)$。试验中 1 阶滞回曲线的数目 $n=6$，预测得到的相对精细的权值分布矩阵中 $m=60$。权值 $\boldsymbol{E}_{60}(i,j)$ 为分布于单元 $\boldsymbol{T}_{60}(i,j)$ 中的权系数 $\mu(\alpha,\beta)$ 的面积积分

$$\boldsymbol{E}_{60}(i,j) = \iint\limits_{\alpha,\beta \in \boldsymbol{T}_{60}(i,j)} \mu(\alpha,\beta)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta \tag{8}$$

权系数矩阵 $\boldsymbol{E}_n(i,j)$ 可以表示为所处单元

$\boldsymbol{T}_n(i,j)$内权系数 $\mu(\alpha,\beta)$ 的平均值与单元面积的乘积，因此对于 $n=6$ 的权系数矩阵

$$\boldsymbol{E}_6(i,j)=\iint_{\alpha,\beta\in \boldsymbol{T}_6(i,j)} \mu(\alpha,\beta)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta=\bar{\mu}(i,j)\boldsymbol{A}_6(i,j) \tag{9}$$

其中：$\bar{\mu}(i,j)$ 为权系数 $\mu(\alpha,\beta)$ 在单元 $\boldsymbol{T}_6(i,j)$内的平均值；$\boldsymbol{A}_6(i,j)$为单元 $\boldsymbol{T}_6(i,j)$的面积。

因此，每个单元内的平均权系数 $\bar{\mu}(i,j)$ 可以根据 $\boldsymbol{E}_6(i,j)$计算得到。可以证明，在单元 $\boldsymbol{T}_6(i,j)$内，肯定存在一个权值 $\mu(\alpha,\beta)$ 等于 $\bar{\mu}(i,j)$ 的点。假设这个点就是单元的形心，则该形心在 Preisach 平面上的坐标(α,β)就可以更容易获得。所有单元的形心坐标和对应的权值 $\bar{\mu}(i,j)$ 就构成了支持向量机的训练集合，其中形心坐标作为训练集的输入部分，对应的权值作为训练集的输出部分。训练完毕得到的支持向量机模型就可以用来描述 Preisach 权函数，即输入限制三角形内任一个点的坐标，就可以通过支持向量机模型预测出对应的权值。

同理，预测后权系数矩阵为

$$\boldsymbol{E}_{60}(i,j)=\iint_{\alpha,\beta\in \boldsymbol{T}_{60}(i,j)} \mu(\alpha,\beta)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta=\bar{\mu}(i,j)\boldsymbol{A}_{60}(i,j) \tag{10}$$

该过程可以描述为以下几步：

1）根据 1 阶滞回曲线的测量试验，获取数据，辨识权系数矩阵 $\boldsymbol{E}_6(,)$，根据式(9)求得每个单元 $\boldsymbol{T}_6(i,j)$的平均权值 $\bar{\mu}$ 作为单元形心处的权系数；

2）求得每个单元形心处的坐标，将这些坐标构成支持向量机训练集的输入部分，对应位置的权系数构成支持向量机训练集的输出部分，选取合适的训练参数，训练得到描述权值函数的支持向量机模型；

3）将精细划分的单元 $\boldsymbol{T}_{60}(i,j)$的形心坐标输入到 SVM 模型中，输出的预测值就是单元 $\boldsymbol{T}_{60}(i,j)$的近似权值 $\bar{\mu}$；

4）根据预测得到的权值 $\bar{\mu}$ 和式(10)，可得到一个更精细的权系数矩阵 $\boldsymbol{E}_{60}$。

原理图如图 10 所示。

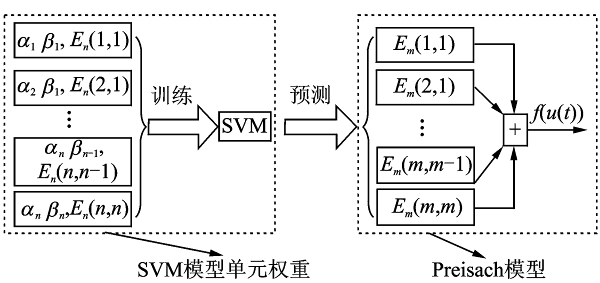


图 10 SVM-Preisach 杂交模型原理图

Fig. 10 The principle flowchart of the hybrid model

4 Preisach 杂交模型试验验证

通过试验测得的 6 组上升阶段和下降阶段的数据见图 6，联立式(2)，求得的单元权值 $\boldsymbol{E}_6(i,j)$为

$$\boldsymbol{E}_6=\begin{bmatrix} 12 & 11 & 5.8 & 15 & 36 & 109 \\ 3.87 & 19 & 25 & 10 & 112 & 0 \\ 8.09 & 22 & 33 & 124 & 0 & 0 \\ 19 & 23 & 127 & 0 & 0 & 0 \\ 35 & 101 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 115 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\times 10^{-4}\ \mathrm{mm} \tag{11}$$

在开始训练之前，需要确定支持向量机的训练参数，过程如下。

1）对于多维问题，若输入特征的维数为 d，则径向基函数(radial basis function，简称 RBF)核的宽度系数 χ 满足 $\chi^d\in(0.1,0.5)$，这里 $1/2\chi^2=\gamma$。文献[15]证明了这样取值可以使 SVM 训练得到的模型在回归问题中有良好的表现。本研究中，训练数据集的输入部分为形心在 Preisach 平面中的坐标值，因此维数 d 为 2，则 $\gamma\in(1,5)$。

2）文献[15]还证明了惩罚因子 C 的理想取值范围 $C=\max(|\bar{y}+3\sigma_y|,|\bar{y}-3\sigma_y|)$，其中：$\bar{y}$ 为训练集输出部分的平均值；σ_y 为训练集输出部分的均方差。在本研究中，训练集输出部分的平均值为 0.015 4，而均方差为 0.028 7。在进行训练之前，训练集需要进行归一化，使得平均值为零，而均方差为 1。因此，归一化后，C 的取值为 3。

确定训练参数后，就可以通过训练得到能够描述权系数分布的 SVM 模型，通过这个模型就可以预测出限制三角形内任意一点的权系数。通过 SVM 预测得到精细的 $\boldsymbol{E}_{60}$ 权值分布如图 11 所示。

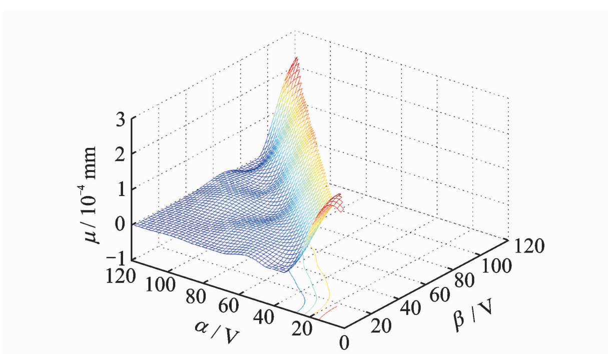
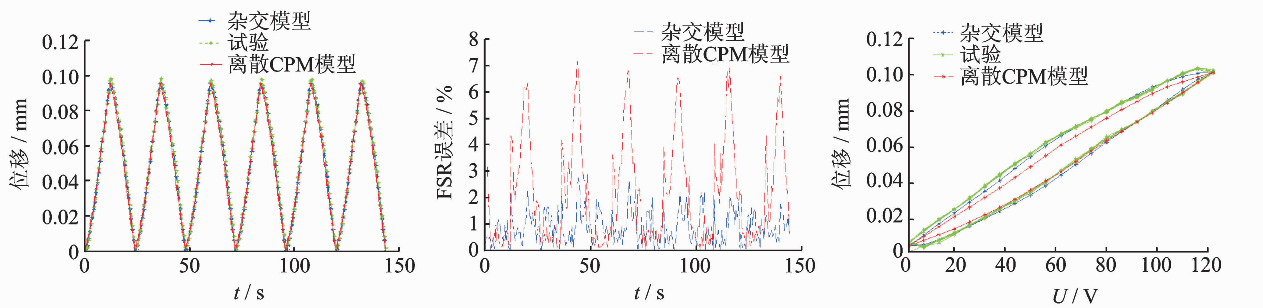


图 11 SVM 预测得到的权值分布

Fig. 11 Predicted weighting distribution of SVM

检验一：为了检验获得的杂交模型的性能，一组(0 V，120 V)三角波形电压信号被施加于压电作动器上，电压的变化率 du/dt 为 8 V/s。经典离散模型、杂交模型和实测的实际输出位移之间的对比如图 12 所示。其中：图 12(a)为位移输出对比图；图 12(b)给出了两种模型的输出同实际输出之间的满刻度范围(full scale range，简称 FSR)误差的对比；图 12(c)为输出位移-输入电压的滞回曲线对比图。

检验二：以 1 阶迟滞试验为检验对象。图 13(a)为 Preisach 经典离散模型、杂交模型和实测的实际输出位移之间的对比图；图 13(b)给出两种不同模型 FSR 误差；图 13(c)为输出位移-输入电压的滞回曲线。

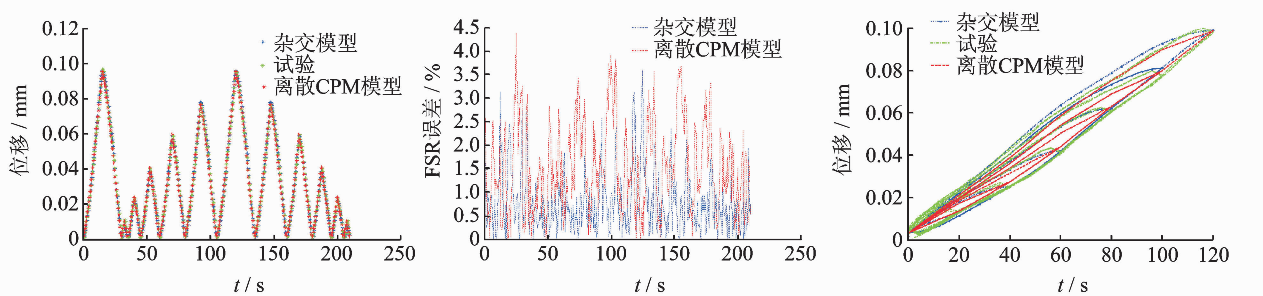


(a) 位移输出对比图　(b) FSR误差　(c) 滞后曲线对比图

(a) Comparison of the output between predicted date and experimental date　(b) The FSR error percentage　(c) Comparison of the hysteretic characteristics of the voltage versus displacement

图 12　三角波激励下经典离散模型、杂交模型和实测输出对比图

Fig. 12　Comparison of classical discrete model, hybrid model and the actual output under triangular wave excitation



(a) 位移输出对比图　(b) FSR误差　(c) 输出位移-输入电压的滞回曲线

(a) Comparison of the output between predicted date and experimental date　(b) The FSR error percentage　(c) Comparison of the hysteretic characteristics of the voltage versus displacement

图 13　线性分段折返激励下经典离散模型、杂交模型和实测输出对比图

Fig. 13　Comparison of classical discrete model, hybrid model and the actual output under linear piecewise turn-back excitation

通过杂交模型输出位移与实际位移的对比，检验一中 Preisach 经典离散模型的平均 FSR 误差为 1.06 %，最大误差为 7.13%；杂交模型的平均 FSR 误差为 0.797 6 %，最大误差为 2.76 %。检验二中 Preisach 经典离散模型的平均 FSR 误差为 1.501 %，最大误差为 4.46 %；杂交模型的平均 FSR 误差为 0.881 6 %，最大误差为 3.954 %。Preisach 经典离散模型与杂交模型相比，杂交模型的误差低，模型更精确。

5　结束语

针对某定位装置的位移输出问题，笔者研究了一种新型菱形微位移压电作动器。为了消除迟滞对压电作动器在后续控制中的影响，发展了一种 Preisach 杂交建模的方法。该方法在传统 Preisach 模型的基础上，有效结合了 Preisach 离散模型和 SVM，并建立了微位移压电作动器输入输出杂交模型。其中，SVM 有效解决了因 1 阶滞回曲线数量不

足而导致 Preisach 模型精度低的问题,同时与传统 Preisach 模型相比,杂交建模能更准确描述迟滞特性,具有更高的精度。试验结果表明,在两种不同电压输入情况下,Preisach 经典离散模型的平均 FSR 误差分别为 1.06 %和 1.501 %,杂交模型的平均 FSR 误差分别为 0.797 6 %和 0.881 6 %,具有较高精度,说明了杂交模型在迟滞现象的建模上有着很好的准确性和独特的优势。

参 考 文 献

[1] Xu Wei, King T. Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations [J]. Precision Engineering, 1996, 19 (1): 4-10.

[2] Ouyang P R, Zhang W J, Gupta M M. A new compliant mechanical amplifierbased ona symmetric five-bar topology [J]. Journal of Mechanical Design, 2008 , 130(10): 104501.

[3] Zubir M N M, Shirinzadeh B. Development of a high precision flexure-based microgripper [J]. Precision Engineering, 2009, 33 (4): 362-370.

[4] Tian Y, Shirinzadeh B, Zhang D, et al. Development and dynamic modelling of a flexure-based Scott - Russell mechanism for nano-manipulation [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23 (3): 957 - 978.

[5] James F T, Robert E N. Special issue correspondence doubly resonant cymbal-type transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1997,44 (5): 1175-1177.

[6] Muraoka M, Sanada S. Displacement amplifier for piezoelectric actuator based on honeycomb link mechanism [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2010, 157:84-90.

[7] 王隆太,周志平,马志新. 柔性铰链位移放大机构放大能力和负载能力分析 [J]. 机械设计, 2007, 24 (7) : 11-13.
Wang Longtai, Zhou Zhiping, Ma Zhixin, Analysis on magnification ability and loading capacity of displacement magnification mechanism of flexible hinge [J]. Journal of Machine Design, 2007, 24 (7):11-13. (in Chinese)

[8] 吴家龙,李宝富,张虎翼, 等. 液压微位移放大器的设计与研究 [J]. 机电一体化, 2010 (5) :13-16, 20.
Wu Jialong, Li Baofu, Zhang Huyi, et al. The design and analysis of hydraulic micro-displacement amplifier [J]. Mechatronics, 2010 (5) :13-16, 20. (in Chinese)

[9] 李万全,高长银,冯地耘. 基于液压微位移放大机构的压电陶瓷执行器的设计[J]. 机床与液压, 2011, 39 (5): 88-89.
Li Wanquan, Gao Changyin, Feng Diyun. Design on piezoelectric actuator based on hydraulic mico-displacement amplifying mechanism [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39 (5): 88-89. (in Chinese)

[10] 张春林,张希农,陈杰,等. 菱形微位移压电作动器的输入输出线性建模[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (5):102-106.
Zhang Chunlin, Zhang Xinong, Chen Jie, et al. Linear modeling for imput-output relations of a rhombic mico-displacement piezoelectric actuator[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2014, 48 (5): 102-106. (in Chinese)

[11] 纪华伟. 压电陶瓷驱动的微位移工作台建模与控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

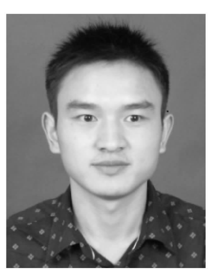
[12] Lampaert V, Al-Bender F, Swevers J. A generalized Maxwell-Slip friction model appropriate for control purposes[C]// Physics and Control International Conference, 2003. [S. l.]:IEEE, 2003:1170-1177.

[13] Hu H, Ben Mrad R. A discrete-time compensation algorithm for hysteresis in piezoceramic actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18 (1): 169-185.

[14] Jang M J, Chen C L, Lee J R. Modeling and control of a piezoelectric actuator driven system with asymmetric hysteresis[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2009, 346 (1): 17-32.

[15] Cherkassky V, Ma Y Q. Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression [J]. Neural Networks, 2004, 17 (1): 113-126.

[16] 陈法法,汤宝平,马婧华,等. 基于遗传退火优化 MSVM 的齿轮箱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4):699-704.
Chen Fafa, Tang Baopin, Ma Jinhua, et al. Gearbox fault diagnosis based on multi-kernel support vector machine optimized by genetic simulated annealing algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagonsis, 2014, 34(4): 699-704. (in Chinese)



第一作者简介:张春林,男,1988 年 2 月生,博士生、讲师。主要研究方向为振动主动控制、智能结构设计等。曾发表《Active control of honeycomb sandwich plate using MFC piezoelectric actuators》(《Applied Electromagnetics and Mechanics》2014, Vol. 45)等论文。
E-mail:zhangchunlin01@126.com