

基于分段辨识方法的迟滞Preisach模型辨识

高学辉^{1,2}, 任雪梅¹, 巩兴安³, 黄捷¹

1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081

E-mail: xhgao@163.com, xmren@bit.edu.cn, autohuangjie@gmail.com

2. 山东科技大学 机电工程系, 泰安 271019

E-mail: xhgao@163.com

3. 山东科技大学 济南校区, 济南 250031

E-mail: abc3116@126.com

摘要: 迟滞阻碍了智能材料传感器或执行器的精度, 成为发展的障碍. 论文针对Preisach离散迟滞模型, 提出了一种新的分段辨识方法, 该方法将单调变化的曲线分段, 分别构成Preisach平面, 求出每个Preisach平面中输入输出以及Preisach算子和Preisach函数的关系, 并辨识Preisach函数. 该方法与基于一阶转换曲线分段输出参数辨识方法相比, 避免了Preisach模型擦除特性的影响; 与基于最小二乘法的辨识方法相比, 该方法能精确辨识Preisach函数参数. 论文以压电陶瓷执行器为例, 验证了本文提出的Preisach模型辨识方法, 仿真和实验结果表明该方法准确有效.

关键词: Preisach, 迟滞, 辨识, 逆模型

The Identification of Preisach Hysteresis Model Based on Piecewise identification method

GAO Xuehui^{1,2}, REN Xuemei¹, GONG Xing'an³, HUANG Jie¹

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P.R.China

E-mail: xhgao@163.com, xmren@bit.edu.cn, autohuangjie@gmail.com

2. Department of Mechanical and Electronic engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, P.R.China

E-mail: xhgao@163.com

3. Shandong University of Science and Technology, Ji'nan 250031, P.R.China

E-mail: abc3116@126.com

Abstract: Hysteresis hinders the precision of smart materials in sensors and actuators and impedes the development of smart material actuators. This paper addresses a novel piecewise identification approach of hysteresis in smart materials, where hysteresis is modeled by discrete Preisach operator. The hysteresis curve is divided into Preisach planes based on monotonic changing of input. For every Preisach plane, the relationship of input, output, the Preisach operator and the Preisach function is reached and the Preisach function is identified. Compare with the identification of first order transition curves and the new approach, that new approach avoids the effect of wiping-out property in Preisach model. The new method can also precise identify the parameters of Preisach function in comparison with the least-squares method. Simulation and experimental results based on piezoceramic actuator are provided to illustrate the proposed approach.

Key Words: Preisach, Hysteresis, Identification, Inverse Model

1 引言

几乎所有的智能材料都具有迟滞特性, 如压电陶瓷、磁致伸缩材料、形状记忆合金等. 随着新一代电子元件向微纳封装发展, 对精度的要求也越来越高, 特别是在微机电产品和精确控制系统中, 由智能材料制造的高精度传感器、高精度执行器、高精度驱动器, 由于迟滞的存在, 成为其发展的障碍.

在实际应用中, 如何消除智能材料迟滞的影响是高精度传感器或驱动器的最为重要的问题. 目前, 迟滞模型分为两大类: 物理模型和唯象模型. 物理模型与材料的物理特性有关, 不同的材料其迟滞的物理模型不同, 著名的物理模型有Jiles-Atherton^[1]模型、铁磁迟滞模型^{[2][3]}等. 唯象模型与材料的物理特性无关, 只是描述迟滞的现象, 此类模型主要有Preisach模型^[4]、Krasnosel'skii-Pokrovskii (KP) 模型^[5]和Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型^[6]等.

近年来, Preisach模型应用在许多方面. 文献[7-9]将其应用于压电陶瓷的控制; 文献[10-11]将Preisach模型应用于形状记忆合金的控制; 文献[12-14]将此模

*国家自然科学基金资助项目 (No.61273150, No.60974046.), 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20121101110029), 长江学者和创新团队发展计划资助(No. IRT1208)

型应用于磁化现象精确控制；文献[15-16]将Preisach模型应用于磁致伸缩材料精确控制。

Preisach模型的辨识一直是研究的重点，Mayergoyz^[4]提出了一阶转换曲线的分段输出参数辨识方法，该方法可辨识Preisach模型参数的解析解，但是由于Preisach模型的擦除特性，该辨识方法依赖于特殊输入，虽然如此，该方法仍是最为经典的辨识方法。文献[17-19]改进了该方法并应用神经网络辨识Preisach模型参数，取得了较好的结果。Xiaobo Tan等^[16]提出了最小二乘法辨识Preisach函数参数，该方法无法求得Preisach函数参数的解析解，但是可以在线辨识。本文提出了一种新的参数辨识方法，该方法不需要特殊输入，不受Preisach模型擦除特性的影响，同时可求得Preisach函数参数的解析解，但是该方法需离线进行。

论文研究了离散Preisach模型结构，针对基于一阶转换曲线分段输出参数辨识方法受擦除特性影响的缺点，提出了一种新的离散Preisach模型辨识方法。该方法将迟滞曲线按单调变化分组，对每组单调变化的迟滞曲线Preisach模型进行辨识，确定该单调变化曲线的Preisach函数。在辨识过程中，巧妙地解决了Preisach算子时间变量与输入变量的映射，并由此确定Preisach函数。论文还研究了Preisach逆模型及其离散模型，由于Preisach逆模型在迟滞系统智能控制中有重要作用，因此本文的研究是十分必要的。

论文结构如下：第一部分引言，介绍Preisach模型参数辨识的背景及研究进展；第二部分Preisach模型介绍，并定义本文所采用的变量表示；本文提出的新的模型参数辨识方法在第三部分阐述；最后给出仿真和实验结果。

2 Preisach模型

2.1 Preisach模型的定义

Preisach模型是由Preisach迟滞开关算子定义的，Preisach迟滞开关算子定义如下：

定义在无限集中的Preisach迟滞开关算子 $\gamma_{\beta\alpha}[\cdot]$ ， α, β 为上升和下降阈值。算子的输出值为1和-1（算子输出值可根据实际情况取其他值，如1，0）。实际应用中一般假定 $\alpha \geq \beta$ ，如图1所示。在 $[0, T]$ 内的连续泛函定义域为 $C[0, T]$ ，令 $u \in C[0, T]$ ， $\xi \in \{-1, 1\}$ ， $\omega = \gamma_{\beta\alpha}[u, \xi]$ ，定义

$$\omega(t) = \begin{cases} -1 & u(t) < \beta \\ 1 & u(t) > \alpha \\ \omega(t^-) & \beta \leq u(t) \leq \alpha \end{cases}$$

其中 $\omega(0^-) = \xi$ ， $t^- = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0, \varepsilon > 0} t - \varepsilon$ ， $t \in [0, T]$ 。

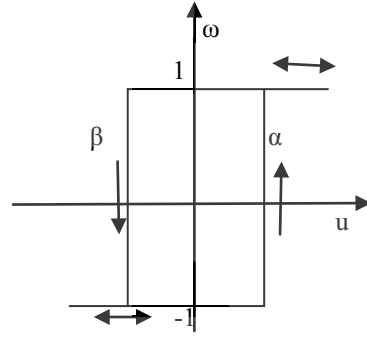


图 1: 基本迟滞算子

则 $\omega(t)$ 即 $\gamma_{\beta\alpha}[u, \xi(\beta, \alpha)](t)$ 为Preisach迟滞开关算子。

定义Preisach平面 $P_0 = \{(\alpha, \beta) \in R^2 \mid \alpha \geq \beta\}$ ，如图2所示，对Preisach迟滞开关算子在Lebegue意义下求积分，则输出^[16]

$$y(t) = \Gamma[u, \xi](t) = \int_{P_0} \mu(\beta, \alpha) \gamma_{\beta\alpha}[u, \xi(\beta, \alpha)](t) d\nu(\beta, \alpha) \quad (1)$$

其中 $\mu(\beta, \alpha)$ 为Preisach函数， $\gamma_{\beta\alpha}[u, \xi(\beta, \alpha)](t)$ 为Preisach迟滞开关算子。式(1)即为Preisach模型。

当 ν 非奇异，且 $\|\nu\|$ 在Lebegue可测条件下绝对连续，则Preisach模型化为：

$$y(t) = \Gamma[u, \xi](t) = \int_{P_0} \mu(\beta, \alpha) \gamma_{\beta\alpha}[u, \xi(\beta, \alpha)](t) d\alpha d\beta \quad (2)$$

在实际应用中， ν 总是非奇异的，且 $\|\nu\|$ 在Lebegue可测条件下是绝对连续的，因此，实际应用时Preisach模型总是采用式(2)形式。

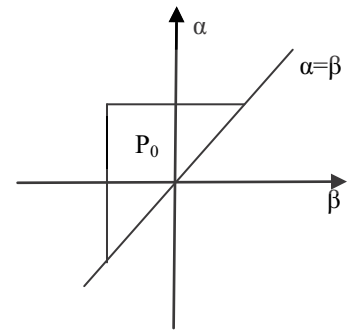


图 2: Preisach平面

2.2 Preisach模型的离散化

在实际应用中，不论参数辨识还是实际数据的采集和测量，均需离散Preisach模型。假设实际迟滞输入范围为 $[u_{\min}, u_{\max}]$ 是阈值 $[\beta_0, \alpha_0]$ 的子集，其中 β_0, α_0 表示阈值的最小值和最大值。显然， $\mu(\beta, \alpha)$ 为紧集，i.e.，当 $\beta < \beta_0$ 或者 $\alpha > \alpha_0$ 时， $\mu(\beta, \alpha) = 0$ 。

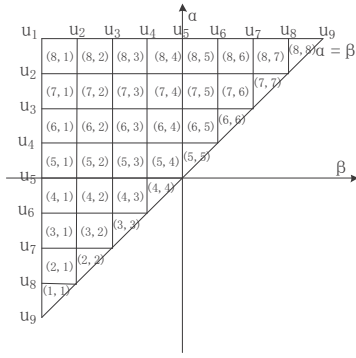


图 3: 离散Preisach模型结构 (m=8)

根据输入 $u_i, 1 \leq i \leq m$ 可在Preisach 平面P上得到离散化结构如图3所示^[16]。 $\mu_{ij}(k)$ 为 (i, j) 单元的Preisach函数，则对于给定时刻 k ，离散Preisach模型输出 $y(k)$ 可表示为：

$$y(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i \omega_{ij}(k) \mu_{ij}(k) \quad (3)$$

其中 $\omega_{ij}(k)$ 为 k 时刻Preisach平面P上 (i, j) 单元的取值，为 $\{1, -1\}$ （实际应用时也可取为 $\{1, 0\}$ ），即离散Preisach开关算子， $\mu_{ij}(k)$ 为离散Preisach函数。

3 Preisach模型的辨识

经典Preisach模型辨识方法是在如图3所示的离散结构上根据不同输入 u_i 的取值得到上升和下降曲线的阶梯状分界，根据分段输出辨识Preisach模型。该方法需要输入的幅值为单调变化，否则，Preisach模型的擦除特性将影响辨识结果。本文将输入 u_i 进行分组，每组输入 $\{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ 均为单调变化但对其幅值无要求，显然，该分组Lebesgue可积且可测。对每组输入应用如图3所示离散结构，可将 k 阶变化的阶梯状分界（图4 a, $k = 3$ ）划分为 k 个Preisach平面，如图4 b, c, d所示。对每个Preisach平面进行辨识，可得 k 个Preisach函数矩阵，应用Preisach开关算子即可得到Preisach模型。

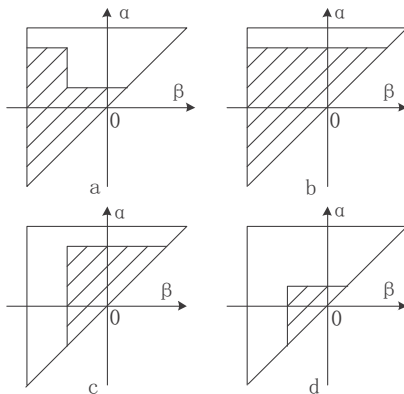


图 4: 阶梯离散Preisach平面和分离后的Preisach平面

将输入按单调上升和下降区间分组，在每个单调区间内根据Preisach离散化模型可知， k 时刻输出 $y(k)$ 为：

$$y(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i \omega_{ij}(k) \mu_{ij}(k)。$$

对每一个划分后的Preisach平面， $\omega_{ij}(k)$ 的取值为 $\{1, 0\}$ ，根据2.2节所给出的离散化方法，可以将 ω 取为三角阵，本文将 ω 取为下三角阵。有定理3.1成立。

定理3.1： 对于给定时刻 k ，输出由式3确定， $\omega_{ij}(k)$ 的取值为 $\{1, 0\}$ ，则离散化Preisach模型为

$$y = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^k y_{1j} & \sum_{j=1}^k y_{2j} & \sum_{j=1}^k y_{3j} & \dots & \sum_{j=1}^k y_{kj} \end{bmatrix}^T, \text{ 其中}$$

$$y_{ij} = \sum_{i=1}^k \omega_{ij} \mu_{ij}, i \geq j, [\cdot]^T \text{ 表示矩阵的转置。}$$

证明：

令 $k = m$ ，则式3为：

$$y_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \omega_{ij}(k) \mu_{ij}(k) \quad (4)$$

其中 $\omega_{ij}(k)$ 的取值为 $\{1, 0\}$ 。

又Preisach平面为Lipschitz连续且单调变化，当 $\beta \leq u_i \leq \alpha$ 时，根据图3离散化方法，可取

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \omega_{21} & \omega_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{k1} & \omega_{k2} & \omega_{k3} & \dots & \omega_{kk} \end{bmatrix} \text{ 为 } k \times k \text{ 阶三角}$$

$$\text{阵, } \mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{k1} & \mu_{k2} & \mu_{k3} & \dots & \mu_{kk} \end{bmatrix} \text{ 为 } k \times k \text{ 阶三角阵。}$$

根据 $y_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \omega_{ij}(k) \mu_{ij}(k)$ ，有：

$$y = \begin{bmatrix} \omega_{11}\mu_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \omega_{11}\mu_{11} + \omega_{21}\mu_{21} & \omega_{22}\mu_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \omega_{11}\mu_{11} + \omega_{21}\mu_{21} + \omega_{31}\mu_{31} & \omega_{22}\mu_{22} + \omega_{32}\mu_{32} & \omega_{33}\mu_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{11}\mu_{11} + \omega_{21}\mu_{21} + \dots + \omega_{k1}\mu_{k1} & \omega_{22}\mu_{22} + \omega_{32}\mu_{32} + \dots + \omega_{k2}\mu_{k2} & \omega_{33}\mu_{33} + \omega_{43}\mu_{43} + \dots + \omega_{k3}\mu_{k3} & \dots & \omega_{kk}\mu_{kk} \end{bmatrix}$$

$$= \omega \mu$$

则：

$$y = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^k y_{1j} & \sum_{j=1}^k y_{2j} & \sum_{j=1}^k y_{3j} & \dots & \sum_{j=1}^k y_{kj} \end{bmatrix}^T, \text{ 且}$$

$$y_{ij} = \sum_{i=1}^k \omega_{ij} \mu_{ij}, i \geq j. \text{ 证毕。}$$

从定理3.1可以看出，单调区间内任一时刻 k 的输出是此时刻以前的输出的叠加，即任意时刻的输出均

是离散化后各时刻的Preisach函数的值与Preisach算子的值的积的和。定理中取 $k = m$ ，即令离散化的各时刻与输入对应，由此可以得到Preisach算子的值，而Preisach函数的值则需要辨识。

进一步分析Preisach算子，在 $k = m$ 的条件下，

研究输入 u 和Preisach算子 ω ，可以得出 ω 和 u 有定理3.2所描述的关系，且定理3.2成立。

定理3.2: Preisach模型如式3，则输出输入函数可

表示为： $y = \omega \mu = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u} \mu$ ，其中 $\omega = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u}$ ，其中

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{k1} & \mu_{k2} & \mu_{k3} & \dots & \mu_{kk} \end{bmatrix}, \quad \overset{\circ}{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

$$\overset{\circ}{u} = \begin{bmatrix} u_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 & \dots & 0 \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k1} & u_{k2} & u_{k3} & \dots & u_{kk} \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } u_{ij} = \frac{u_i - u_{i-1}}{i}, j = 1, 2, \dots, i.$$

证明:

由2.1节知，Preisach迟滞算子 $\omega = \gamma_{\beta\alpha}[u, \xi]$ ，且令 $k = m$ ，由定理3.1得：

$$\text{当 } \beta \leq u_i \leq \alpha \text{ 时，取 } \overset{\circ}{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

$$\overset{\circ}{u} = \begin{bmatrix} u_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 & \dots & 0 \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k1} & u_{k2} & u_{k3} & \dots & u_{kk} \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } u_{ij} = \frac{u_i - u_{i-1}}{i}, j = 1, 2, \dots, i, \quad \text{则}$$

$$\omega = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u} = \begin{bmatrix} u_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u_{11} + u_{21} & u_{22} & 0 & \dots & 0 \\ u_{11} + u_{21} + u_{31} & u_{22} + u_{32} & u_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{11} + u_{21} + \dots + u_{k1} & u_{22} + u_{32} + \dots + u_{k2} & u_{33} + u_{43} + \dots + u_{k3} & \dots & u_{kk} \end{bmatrix}$$

， $y = \omega \mu = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u} \mu$ ，其中 $\omega = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u}$ 。证毕。

定理3.2描述了Preisach模型输出 y 和输入 u 的关

系，即 $y = \omega \mu = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u} \mu$ 与一阶转换曲线分段输出参数辨识法[4]相比，本文所提出的方法更直观，不需要一阶转换曲线，且不受擦除特性影响。

对于实际Preisach模型辨识，可根据实际输入 u 测得输出 y ，再由定理3.2可以求得Preisach函数 $\mu(k)$ ，且 $\mu(k)$ 为：

$$\mu(k) = \left[\sum_{j=1}^k \mu_{1j} \quad \sum_{j=1}^k \mu_{2j} \quad \sum_{j=1}^k \mu_{3j} \quad \dots \quad \sum_{j=1}^k \mu_{kj} \right]^T \quad (5)$$

根据定理3.2，容易得到定理3.3成立。

定理3.3: Preisach离散化模型如式3，

$y = \omega \mu = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u} \mu$ ，其中 $\omega = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u}$ ，则

$$\mu = \overset{\circ}{\omega}^{-1} y = \overset{\circ}{u} \overset{\circ}{\omega}^{-1} y.$$

证明:

因为 $\overset{\circ}{\omega}$ 和 $\overset{\circ}{u}$ 均为下三角阵，所以 $\omega = \overset{\circ}{\omega} \overset{\circ}{u}$ 为满秩阵，因此其逆阵存在且 $\omega^{-1} = \overset{\circ}{u}^{-1} \overset{\circ}{\omega}^{-1}$ ，所以 $\mu = \overset{\circ}{\omega}^{-1} y = \overset{\circ}{u} \overset{\circ}{\omega}^{-1} y$ 。证毕。

定理3.3可以辨识 μ ，却无法辨识具体的每一个 $\mu_{ij}(k)$ ，但是这并不影响Preisach模型的辨识结果，因为Preisach模型中， $\mu(k)$ 总是以式(5)的形式出现。虽然无法辨识具体的 $\mu_{ij}(k)$ ，但是可以求出 $\mu_{ij}(k)$ 的平均值，用 $\mu_{ij}(k)$ 平均值表示的Preisach函数同样可以精确描述Preisach模型。

用 $\mu_{ij}(k)$ 平均值描述的Preisach函数为：

$$\mu(k) = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{2j}}{2} & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{2j}}{2} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{3j}}{3} & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{3j}}{3} & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{3j}}{3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{kj}}{k} & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{kj}}{k} & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{kj}}{k} & \dots & \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{kj}}{k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于每一个Preisach平面，输入 u 和输出 y 的Preisach模型可由定理3.2描述。将输入 u 化为

$$\overset{\circ}{u} = \begin{bmatrix} u_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 & \dots & 0 \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k1} & u_{k2} & u_{k3} & \dots & u_{kk} \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } u_{ij} = \frac{u_i - u_{i-1}}{i}, j = 1, 2, \dots, i$$

则可取 $\dot{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$, 将离散Preisach模型

表示为 $y = \omega \mu = \dot{\omega} \dot{u} \mu$, 其中 $\omega = \dot{\omega} \dot{u}$, 实际应用时, 根据输入 u 和输出 y 并且由定理3.3可以辨识出Preisach函数 $\mu(k)$ 。Preisach函数一旦确定, 由输入 u 且根据定理3.2即可计算出Preisach迟滞输出 y 。

4 仿真与实验

压电陶瓷具有典型的迟滞非线性现象, 压电陶瓷执行器模型可看作有非线性环节 $\Gamma(t)$ 和线性环节 $G(t)$ 组成, 如图6所示, 其中 $\Gamma(t)$ 为迟滞环节, $G(t)$ 为线性环节。若把非线性环节看作系统扰动, 则压电陶瓷执行器的状态方程可描述如下^[9]:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\psi + d(t) \\ y = Cx \end{cases}, \text{其中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T^2} & -\frac{2\varepsilon}{T} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ K \\ T^2 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0], x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

式中 x_1 为压电陶瓷执行器的输出位移, T 为时间常数, ε 为阻尼比, K 为系统增益。其中 $d(t)$ 主要是 $\Gamma(t)$ 表现的迟滞非线性现象。

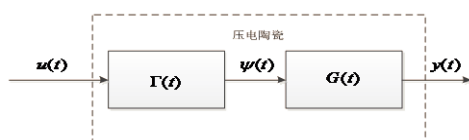


图6: 压电陶瓷执行器模型结构

通过实验可测得压电陶瓷执行器状态方程中 $T = 2.0116, K = 1, \varepsilon = 0.2786$, 压电陶瓷执行器耐压范围为 $-30V \sim 150V$, 输出位移为 $0 \sim 15 \mu m$ 。实验中输入电压为 $0 \sim 100V$, 步长为 $0.125V$, 输入波形为三角波, 迟滞输出如图7所示。

根据定理3.3提出的Preisach函数辨识方法, 可得压电陶瓷执行器的Preisach函数(式6)如图8、图9所示, 其中图8是单调上升Preisach函数, 图9是单调下降Preisach函数。

按照图6所示结构建立压电陶瓷执行器模型, 由式6和以上辨识结果, 求得压电陶瓷执行器模型状态方程, 结果与实验测得压电陶瓷执行器迟滞模型基本符合, 误差曲线如图10、11所示, 其中图10是单调上升阶段误差曲线, 图11是单调下降阶段误差曲线。迟

滞曲线比较如图12所示。图12中红色曲线表示辨识结果, 蓝色曲线为实验结果。

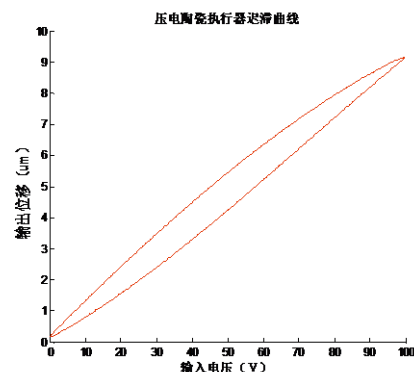


图7: 压电陶瓷执行器迟滞曲线

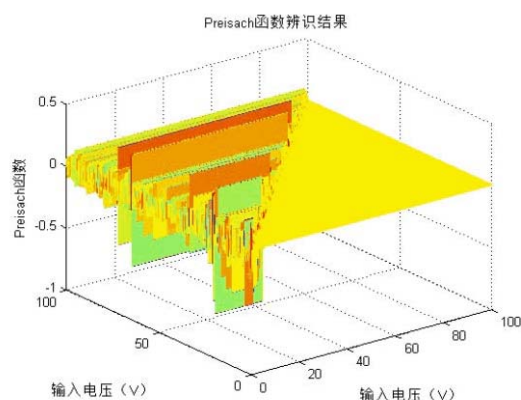


图8: 单调上升Preisach函数辨识结果

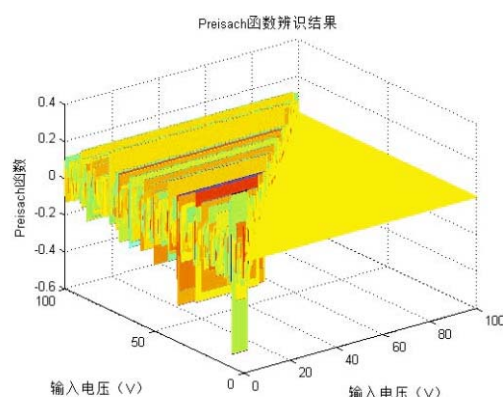


图9: 单调下降Preisach函数辨识结果

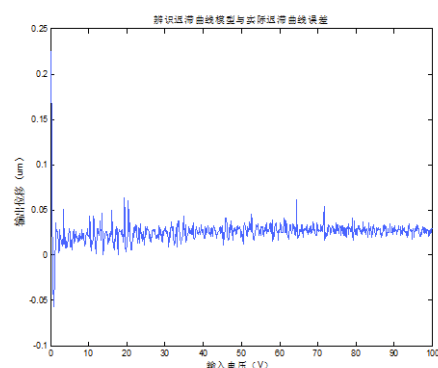


图10: 单调上升阶段辨识结果与实际数据的误差

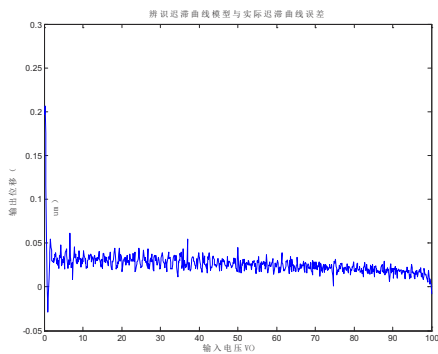


图 11: 单调下降阶段辨识结果与实际数据的误差

从图中可以看出, 辨识结果与实际曲线的平均误差为 $0.0258 \mu\text{m}$, 最大误差为 $0.2255 \mu\text{m}$, 最小误差为 $-0.287 \mu\text{m}$, 其中最大误差出现在 0 V 附近, 接近于开始与结束。从辨识结果看, 十分接近于实际迟滞曲线, 证明该辨识方法正确有效。

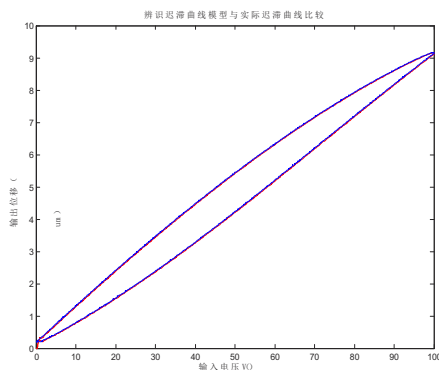


图 12: 辨识迟滞模型曲线与实际迟滞模型曲线比较

5 结论

本文研究了Preisach模型的辨识方法, 针对现有辨识方法的局限, 提出了一种新的Preisach函数辨识方法, 该方法突破了传统Mayergoyz基于一阶转换曲线分段输出辨识方法受Preisach模型擦除特性影响的局限, 可以对任意输入的Preisach模型分段辨识。通过对压电陶瓷执行器的迟滞模型辨识, 与实际输出结果比较, 该辨识方法很好的反映了压电陶瓷执行器的迟滞特性, 平均误差仅有 $0.0258 \mu\text{m}$ 。实验证明该辨识方法是准确可行的。

参考文献

- [1] D.C.Jiles and D.L.Atherton. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Magn.Mater.Vol.61,pp.48-60,1986.
- [2] R.Venkataraman and P.S.krishnaprasad. A Model for a thin magnetostrictive actuator[J]. Proc.conf. Information sciences and systems. Mar.18-20, 1998 .
- [3] R.Venkataraman. Modeling and adaptive control of magnetostrictive actuators. Ph.D. dissertation,univ.Maryland,college Park,Md,1999.
- [4] I.D.Mayergoyz. Mathematical models of hysteresis[M]. New York:Springer-verlag,1991.
- [5] M.A.Krasnosel'skii and A.V.Pokrovskii. systems with hysteresis[M]. new York:Springer-verlag,1989.
- [6] K.Kuhnen and H.Janocha. Adaptive inverse control of piezoelectric actuators with hysteresis operators. European control conf.(ECC).F.0291. Germany.1999.
- [7] Yunhe Yu, Zenggehu Xiao, Nagi Naganathan, Rao v.Dukkiputi. Preisach modeling of hysteresis for piezoceramic actuator system[J] . JSME Vol22 No.2 553-560.2001.
- [8] Klaus Kuhnen and Pavel Krejci, Compensation of Complex Hysteresis and Creep Effects in Piezoelectrically Actuated Systems —A New Preisach Modeling Approach[J]. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 54, NO. 3,537-550,2009.
- [9] 赖志林, 刘向东, 耿洁, 李黎. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. 光学精密工程, 19 (6) : 1281-1290, 2011.
- [10] Bao Kha Nguyen and Kyoung Kwan Ahn. Feedforward Control of Shape Memory Alloy Actuators Using Fuzzy-Based Inverse Preisach Model[J]. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. VOL. 17, NO. 2,434-441,2009.
- [11] Ciro Visone, Daniele Davino, and Amr A. Adly_ Vector Preisach Modeling of Magnetic Shape Memory Materials Oriented to Power Harvesting Applications[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 6,1848-1851,2010.
- [12] M. Kuczmam. Measurement and Simulation of Vector Hysteresis Characteristics[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 45, NO. 11,5188-5191,2009.
- [13] Laurentiu Stoleriu Ilie Bodale, Alin Apetrei, and Alexandru Stancu Realistic Reversible Magnetization Component in Preisach-Type Models[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 6, 2341-2344, 2010.
- [14] Emad Dlala Efficient Algorithms for the Inclusion of the Preisach Hysteresis Model in Nonlinear Finite-Element Methods[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 2, 385-408, 2011.
- [15] Xiaobo Tana, John S. Barasa, Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators[J] Automatica,40: 1469-1480,2004.
- [16] Xiaobo Tan and John S. Baras, Adaptive Identification and Control of Hysteresis in Smart Materials[J]. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 50, NO. 6,827-839,2005.
- [17] 李黎, 刘向东, 侯朝桢. 压电陶瓷执行器Preisach 模型的分层排序实现[J]. 压电与声光.29(5):544-547, 2007.
- [18] 李黎,刘向东,王伟,侯朝桢. 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.15(5):706-712, 2007.
- [19] 刘向东,刘宇,李黎. 一种新广义Preisach迟滞模型及其神经网络辨识[J]. 北京理工大学学报. 27(2):135-138, 2007.