

文章编号 1004-924X(2012)09-2087-08

压电陶瓷执行器的类 Hammerstein 模型及其参数辨识

赖志林*, 刘向东, 耿洁

(北京理工大学自动化学院复杂系统智能控制与决策重点实验室, 北京 100081)

摘要:针对压电陶瓷执行器的迟滞非线性对压电陶瓷精密定位的影响,提出了应用类 Hammerstein 模型对压电陶瓷执行器进行建模的方法。建立了压电陶瓷执行器的迟滞模型并且描述其频率相关性。利用类 Hammerstein 模型把压电陶瓷执行器看成静态迟滞模型和动态二阶系统的串联,其中静态模型由分类排序的 Preisach 模型进行描述,二阶系统应用遗传算法辨识其参数。实验结果表明:加入二阶系统后,类 Hammerstein 模型对频率的相关性有较大增强,其误差相应地大幅降低,在 800 Hz 时平均绝对误差为 $0.339\ 2\ \mu\text{m}$;而由 Preisach 建立的迟滞模型的误差随着频率的增大而大幅增大,在 800 Hz 为 $0.888\ 1\ \mu\text{m}$ 。

关键词:压电陶瓷执行器;迟滞非线性;Hammerstein 模型;参数辨识

中图分类号: TN384; TP273.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.2087

Hammerstein-based model of piezoceramic actuator and its identification

LAI Zhi-lin*, LIU Xiang-dong, GENG Jie

(Key Laboratory for Intelligent Control & Decision of Complex Systems,
School of Automatic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: lai@bit.edu.cn

Abstract: For the effect of hysteretic linearity of a piezoceramic actuator on nano-positioning system, a modeling method based on Hammerstein model was proposed. The Hammerstein-based model for the piezoceramic actuator was established and its frequency dependence was described. By using the Hammerstein model, the piezoceramic actuator was taken as a static hysteretic model couple with a dynamic second-order system, and the former was described by the Preisach model and the latter was identified by the genetic algorithm. The experimental results show that the frequency dependence of the Hammerstein-based model is improved after adding the second order system, correspondingly, the error is decreased greatly. In 800 Hz, the absolute average tracking error of the Hammerstein-based model is $0.339\ 2\ \mu\text{m}$, which is less than that of the Preisach model in $0.888\ 1\ \mu\text{m}$.

Key words: piezoceramic actuator; hysteresis nonlinearity; Hammerstein model; parameter identification

收稿日期: 2012-04-01; 修订日期: 2012-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10872030); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (No. 2012CB720000); 北京市自然科学基金资助项目 (No. 4122066)

1 引言

压电陶瓷有精度高、响应快等诸多优点,已经被广泛应用于纳米定位技术中^[1-2]。理想情况下,压电陶瓷执行器的伸缩量与驱动电压之间是简单的线性比例关系。但实际上,由于压电陶瓷极化机理和机电耦合效应等因素的影响,压电陶瓷叠堆执行器还存在着迟滞、蠕变等非线性特性。

国内外学者对迟滞模型的建立已经进行了大量的研究。迟滞模型一般分为两种:一种是基于机理的物理模型,如 Maxwell 模型^[3],Jiles-Atherton 迟滞模型^[4],Duherm 模型^[5]等;另一种是基于现象的数学模型,或称唯象数学模型(phenomenological mathematic model),如 Preisach 模型^[6-8],Prandtl-Ishlinskii 模型^[9]等等。其中,Preisach 模型是当前广泛应用的迟滞模型,但是单纯的 Preisach 模型无法解释迟滞特性的频率相关性^[10]。Hammerstein 模型把系统分成静态的非线性部分和线性部分的串联。文献^[11]应用 Hammerstein 模型研究了电磁材料的迟滞模型,并验证了模型对电磁迟滞的有效性。

针对压电陶瓷执行器的迟滞非线性问题,本文利用 Hammerstein 模型把压电陶瓷执行器分成历史相关的迟滞非线性部分和二阶线性系统部分。其中迟滞非线性部分利用分类排序的方法建立。在此基础上,利用遗传算法辨识出二阶系统的参数。通过比较实验,验证了 Hammerstein 模型的有效性。

2 压电陶瓷执行器实验平台

压电陶瓷执行器由单片的压电陶瓷片并联而成,如图 1 所示。压电陶瓷片层间使用银、石墨合金作为内电极,每隔一层的内电极形成玻璃绝缘膜,再装上外电极,形成并联连接。

本文针对型号为 MPT-1JRL/I002 的微定位平台进行实验。该平台中压电陶瓷执行器的耐压为 $-30\sim 120\text{ V}$,输出位移为 $0\sim 15.02\ \mu\text{m}$;内置测微仪采用电阻应变片式传感器,检测分辨率为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。

为了实现对上述压电陶瓷执行器的数据采集及控制,设计了如图 2 所示系统。控制器按照设定位置发出驱动控制指令,经 D/A 转换器转换后,由驱

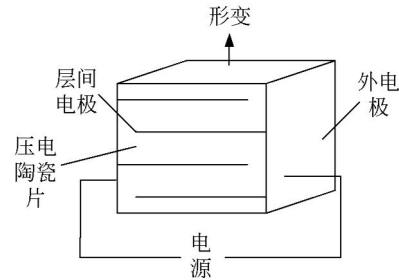


图 1 压电陶瓷结构

Fig. 1 Structure of piezoelectric ceramic

动电源放大并加载到压电陶瓷执行器输入端,压电陶瓷执行器运动并驱动工作台产生微位移;该微位移由电阻应变片测微仪检测后,通过 A/D 转换器送回控制器与预定位置进行比较,计算位置误差并根据控制算法调整输出指令,从而实现精密闭环定位。

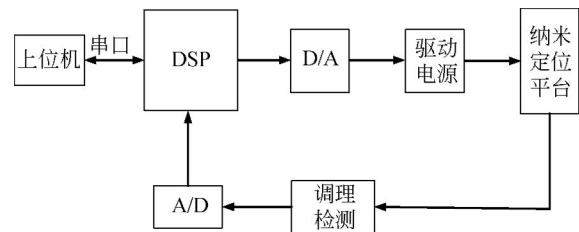


图 2 压电陶瓷控制系统

Fig. 2 PZTs control system

3 压电陶瓷执行器的类 Hammerstein 模型

非线性系统中,有相当一部分可以用 Hammerstein 模型描述,其结构如图 3 所示,该结构为两箱结构,由无记忆非线性子系统级联线性子系统组成。

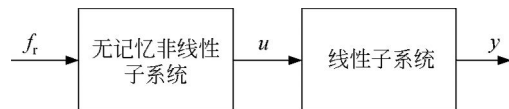


图 3 Hammerstein 模型结构

Fig. 3 Structure of Hammerstein model

如果把压电陶瓷执行器看成是由图 4 所示的非线性部分 $\Gamma(r, t)$ 和线性部分 G 的串联,则可以用 Hammerstein 模型的结构进行描述。与 Hammerstein 模型不同的是,这里的非线性部分表示迟滞特性,不是静态的,而是历史相关的。

如果把非线性部分看成是系统的扰动,则压电陶瓷执行器的状态方程可表示如式(1):

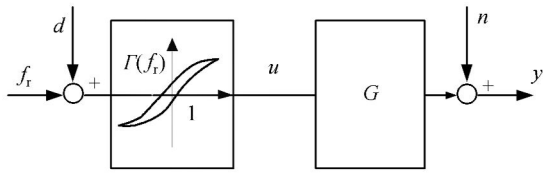


图 4 类 Hammerstein 模型

Fig. 4 Hammerstein-based model

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{d} \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{x} + n \\ u = \Gamma(f_r) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T^2} & -\frac{2\xi}{T} \end{bmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T^2} \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{c} = [1 \ 0]$, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$, $f_r, u, y \in \mathbf{R}$, f_r 为压电陶瓷的参考输入, u 为线性部分输入, y 为压电陶瓷的输出。 x_1 为输出位移, x_2 为速度, T 为时间常数, ξ 为系统阻尼因子, K 为增益。写出分量形式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T^2}x_1 - \frac{2\xi}{T}x_2 + \frac{K}{T^2}u + d \\ y = x_1 + n \end{cases} \quad (2)$$

4 压电陶瓷模型的遗传算法辨识

如图 4 所示,压电陶瓷执行器可以用类 Hammerstein 模型来描述,为了对压电陶瓷进行

控制,必须对模型的参数进行辨识。本文在类 Hammerstein 模型的基础上应用 Preisach 模型 + 遗传算法对压电陶瓷模型进行辨识。这种方法把压电陶瓷的辨识分成两部分进行:首先对类 Hammerstein 模型的迟滞非线性部分进行辨识,即应用 Preisach 模型对压电陶瓷执行器的静态迟滞进行建模。然后,对类 Hammerstein 模型的线性部分进行辨识,线性部分体现了压电陶瓷执行器的动态特性,在应用 Preisach 建立静态模型的基础上,再通过遗传算法对线性部分进行参数辨识。

4.1 迟滞辨识

Preisach 模型^[12]是一种应用广泛的迟滞建模方法,经俄国数学家 Krasnoselskii 和 Pokrovskii 在数学意义上进行拓展之后,成为一种一般性的描述迟滞现象的模型。Preisach 模型的数学表达式如下:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta, \quad (3)$$

其中: $f(t)$ 是模型在 t 时刻的输出, $u(t)$ 是模型在 t 时刻的输入, $\mu(\alpha, \beta)$ 为 Preisach 权函数, $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ 是基本迟滞算子, α 和 β 分别是其上升和下降的阈值。

Mayergoyz^[12]给出 Preisach 模型的经典非参数化辨识方法,称为 Mayergoyz 法。利用实验数据进行插值计算,预测输出值对 Preisach 模型进行实现,而无需进行微分运算。其离散计算式如下:

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(u(t), \beta_{n-1}) & \dot{u}(t) > 0 \\ \sum_{k=1}^{n-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(\alpha_n, \beta_{n-1}) - F(\alpha_n, u(t)) & \dot{u}(t) < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为输出位移, $F(\alpha, \beta) = f_\alpha - f_\beta$ (f_α 表示当输入电压 $u(t) = \alpha$ 时此极限上升支线对应的输出值。 f_β 表示在电压从 $u(t) = \alpha$ 下降到 $u(t) = \beta$ 时在一阶回转曲线上的输出值。)

式(4)是 Preisach 模型的数学实现方法的规则性说明,在上升过程中的电压极值是单调递减序

列或下降过程中电压极值是单调递增序列时直接利用该公式是可行的,但若输入电压序列不是单调变化时,由于迟滞存在擦除特性,该公式不能完全体现。对此文献[13]提出了 Preisach 模型的分排序实现方法,使得输入电压在非单调时也可以对输出进行比较精确的预测。具体实现公式如下:

$$I[u(t)] = \begin{cases} f(t-1) + F[u(t), u(t-1)] & \dot{u}(t) \geq 0, u(t) \leq \alpha_{\min} \\ V_f(K_{i+2}^a - 1) + F[u(t), V_u(K_{i+2}^a - 1)] & \dot{u}(t) > 0, \alpha_{\min} < u(t) < \alpha_i \\ f(t-1) - F[u(t-1), u(t)] & \dot{u}(t) \leq 0, u(t) \geq \beta_{\max} \\ V_f(K_{j+2}^b - 1) - F[V_u(K_{j+2}^b - 1), u(t)] & \dot{u}(t) < 0, \beta_j < u(t) < \beta_{\max} \end{cases}, \quad (5)$$

式中： α_{\min} 、 β_{\max} 分别为 t 时刻上升电压序列最小值和下降电压序列最大值。定义边界矩阵 $v_{2 \times q} \in \mathbf{R}^2$ ， $v_{1k} = V_u(k)$ ， $v_{2k} = V_f(k)$ ， $k=1, 2, \dots, q$ ，用来存储对当前输出值产生影响的全部历史极值。当某个历史极值被超越而失去对位移输出的影响作用时将会立即被擦除； $V_u(k)$ 指边界序列中第 k 个边界极值， $V_f(k)$ 指其对应的位移输出值， k_i^a 、 k_j^b 分别指输入极值 α_i 、 β_j 在边界序列中的排列序号。

迟滞 Preisach 模型的实现程序如图 5 所示。 $F(\alpha, \beta)$ 函数通过对矩阵 $Fab[-, -]$ 查表得到；矩阵 $Fab[-, -]$ 按如下方法构建：给定输入电压序列从 0 V 上升到 100 V，步长为 5 V。根据定义 $F(\alpha, \beta) = f_a - f_\beta$ ， $F(\alpha, \beta)$ 是电压输入 $u(t) = \alpha$ 下降到 $u(t) = \beta$ 时压电陶瓷执行器的位移数值。 $Fab[R_\alpha, C_\beta]$ (其中 R_α 、 C_β 分别是矩阵的横坐标和纵坐标值)是指横列的电压值 α 下降到竖列的电压值 β 时位移的变化量 $F(\alpha, \beta)$ 。所以通过对矩阵 $Fab[-, -]$ 插值即可实现 $F(\alpha, \beta)$ 函数。

实验中利用频率为 0.025 Hz 的正弦输入：

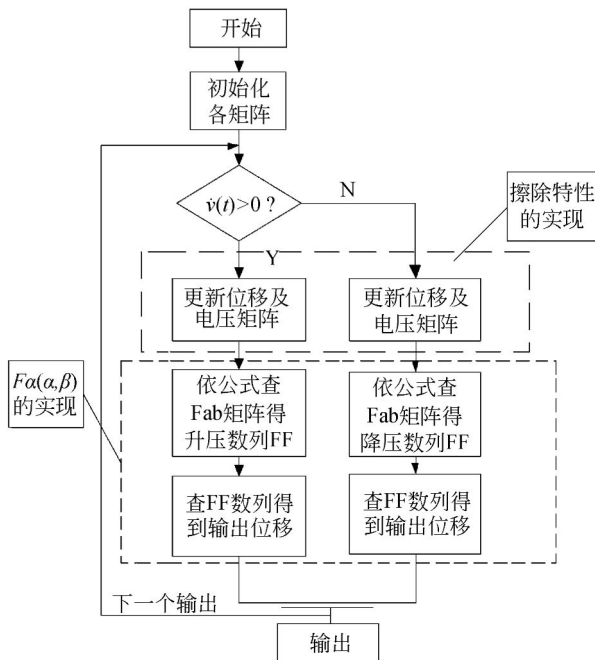
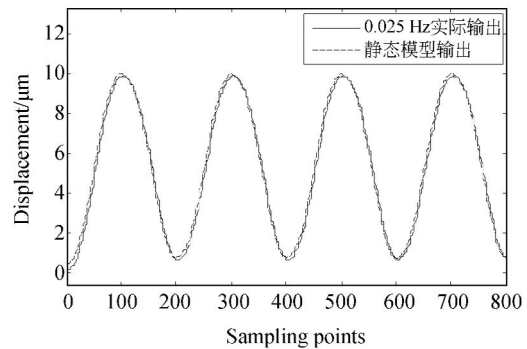
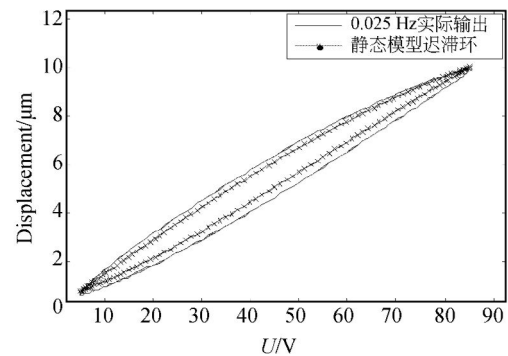


图 5 Preisach 模型实现流程图
Fig. 5 Flowchart of achieving Preisach model

$u(t_s) = 45 - 40 \times \sin(\pi/2 - \pi \times n_s/100)$ 。其中， $t_s = T_s \times n$ ， T_s 是采样周期， n_s 是采样点数。对压电陶瓷的静态模型进行验证，其跟踪图及迟滞环如图 6 所示，其中绝对平均误差为 $0.2141 \mu\text{m}$ ，最大误差为 $0.4324 \mu\text{m}$ ，均方差为 0.0602 。



(a) 0.025 Hz 的跟踪曲线
(a) Tracking curve of 0.025 Hz



(b) 0.025 Hz 的迟滞拟合
(b) Hysteresis loop curves of 0.025 Hz

图 6 Preisach 模型对低频率信号的跟踪效果
Fig. 6 Tracking effect of the Preisach model in low frequency

如果用频率为 100 Hz 及 200 Hz 的同样正弦信号输入，其模型的跟踪输出和迟滞环如图 7 所示。100 Hz 的同样正弦信号输入，其模型的跟踪输出和迟滞环如图 7(a) 和图 7(b) 所示。其中绝对平均误差为 $0.4429 \mu\text{m}$ ，最大误差为 $0.9092 \mu\text{m}$ ，均方差为 $0.2582 \mu\text{m}$ 。200 Hz 情况如图 7(c) 和图 7(d) 所示，其中绝对平均误差为 $0.4481 \mu\text{m}$ ，最大误差为 $0.9213 \mu\text{m}$ ，均方差为 0.2689 。

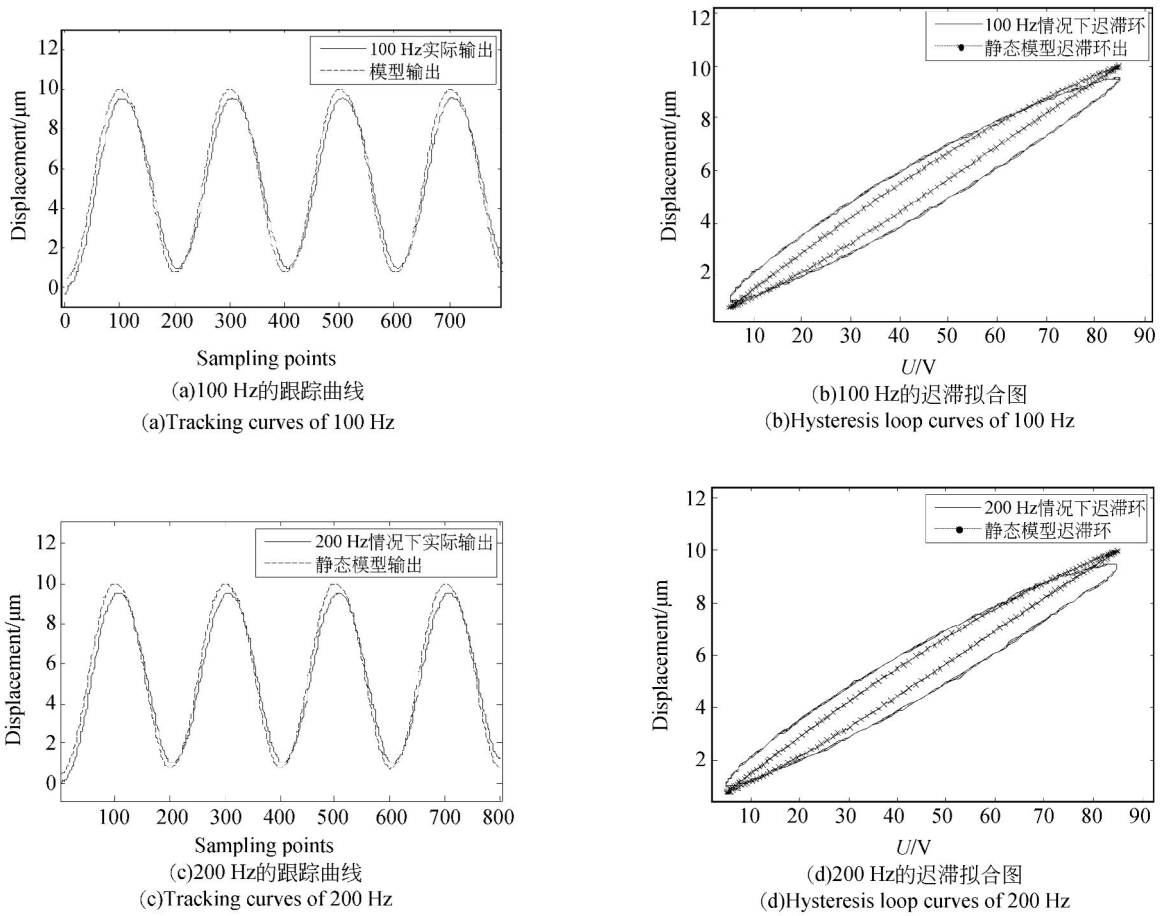


图 7 Preisach 模型对更高频率信号的跟踪效果
 Fig. 7 Tracking effect of the Preisach model in higher frequency

由此可以看出,压电陶瓷执行器的迟滞和输入信号的频率有关,而所建立的 Preisach 模型是静态模型不会随着频率变化而改变。

4.2 线性模型辨识

由上节可以看出,Preisach 迟滞模型只是一个静态模型,对于频率稍大的输入,其模型预测效果差。为此,文中在静态迟滞的基础上加入了二阶线性系统来描述压电陶瓷执行器。

如图 4 所示,为了得到 G 的参数,在建立压电陶瓷迟滞静态模型后,通过遗传算法对压电陶瓷执行器的输入和输出进行了拟合。

遗传算法的具体步骤如下^[14]:

第一步:若系统参数为 m 个,用随机方法产生 M 组初始参数群体 $\theta_j^0 = [\theta_{1j}^0, \dots, \theta_{mj}^0]^T$,其中每个参数向量第 n 个分量在区间 $[p_{\min n}, p_{\max n}]$ 中选取,此区间的上下限可根据已有的知识和经验给出,以缩小搜索范围。

第二步:设置最大进化代数。

第三步:根据适应度函数,计算 M 组参数的适

应度。

第四步:若当前进化代数达到设定值或参数已收敛到指定精度,则遗传算法的寻优过程结束,此时对应于最大适应度的参数组即是参数辨识结果。

第五步:根据群体中各个体的适应度进行遗传选择、复制、交叉和变异等操作,产生下一代群体,新一代群体的规模保持不变,并返回到步骤三。

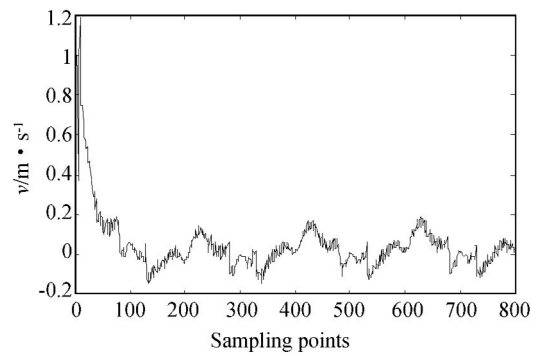
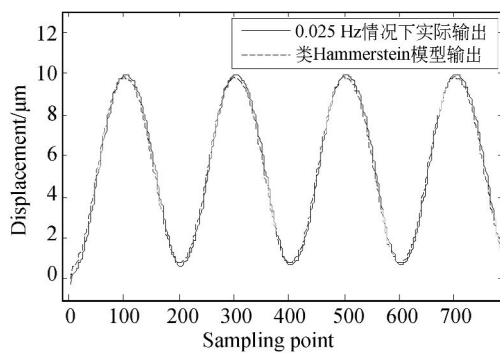


图 8 遗传算法指标曲线
 Fig. 8 Indicator curve

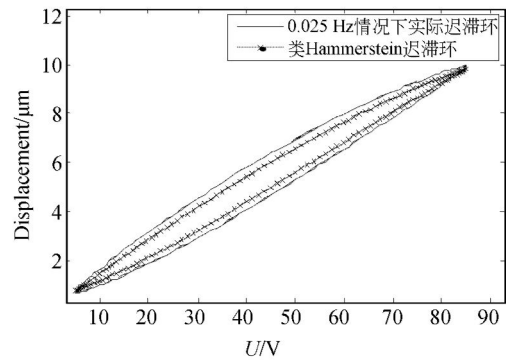
实验中应用 200 Hz 的信号进行拟合。遗传算法的种群个体数量为 100, 遗传代数数为 2 000。T 的搜索区间为 $[0, 2]$, K 的搜索区间为 $[0, 2]$, ξ 的搜索区间为 $[0, 10]$, 选取的指标函数为拟合后的误差, 如图 8 所示。得到压电陶瓷执行器的状态方程参数如下: $K=0.9811$, $T=3.92 \times 10^{-4}$, $\xi=0.1364$ 。

为了验证该模型的有效性, 分别用 200、100 及

0.025 Hz 的正弦对进行验证。如图 9 和图 10 所示。200 Hz 情况下, 其中绝对平均误差为 $0.0371 \mu\text{m}$, 最大误差为 $0.1305 \mu\text{m}$, 均方差为 0.0022 。100 Hz 情况下, 当收敛时其中绝对平均误差为 $0.2531 \mu\text{m}$, 最大误差为 $0.5272 \mu\text{m}$, 均方差为 0.0904 。0.025 Hz 情况下, 其绝对平均误差为 $0.2297 \mu\text{m}$, 最大误差为 $0.3877 \mu\text{m}$, 均方差为 0.0635 。



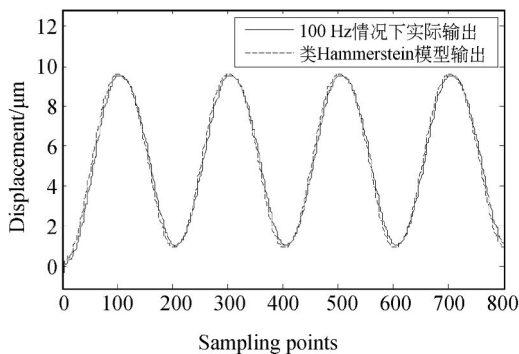
(a) 0.025 Hz 的跟踪曲线
(a) Tracking curves of 0.025 Hz



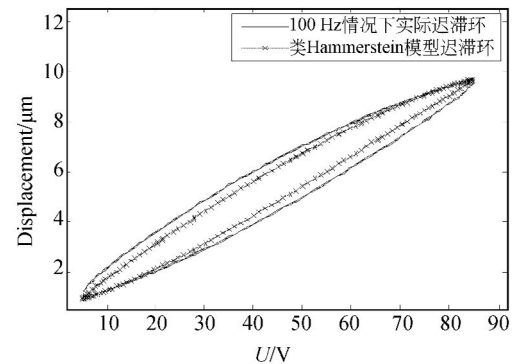
(b) 0.025 Hz 的迟滞拟合图
(b) Hysteresis loop curves of 0.025 Hz

图 9 类 Hammerstein 模型对低频率信号的跟踪效果

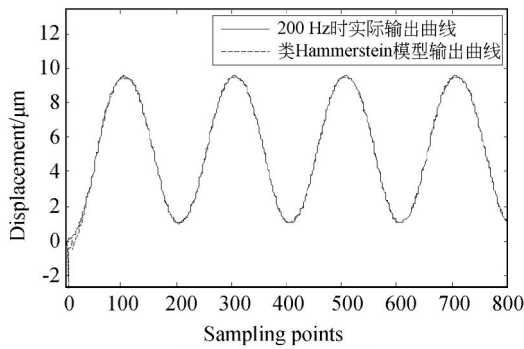
Fig. 9 Tracking effect of the Hammerstein-based model in low frequency



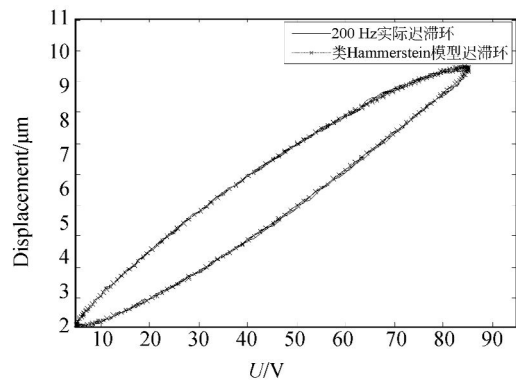
(a) 100 Hz 跟踪曲线
(a) Tracking curves of 100 Hz



(b) 100 Hz 的迟滞拟合图
(b) Hysteresis loop curves of 100 Hz



(c) 200 Hz 的跟踪曲线
(c) Tracking curves of 200 Hz



(d) 200 Hz 的迟滞拟合图
(d) Hysteresis loop curves of 200 Hz

图 10 类 Hammerstein 模型对更高频率正弦的拟合

Fig. 10 Tracking effect of the Hammerstein-based model in higher frequency

同样的正弦输入静态模型和类 Hammerstein 模型在不同频率下的模型输出性能如表 1。

表 1 两种模型的比较

Tab. 1 Result comparison of two models

f/Hz	Preisach model			Hammerstein-based model		
	E_{abs}	E_{max}	MSE	E_{abs}	E_{max}	MSE
0.025	0.214 1	0.432 4	0.060 2	0.229 7	0.387 7	0.063 5
1	0.250 9	0.450 8	0.083 3	0.255 3	0.507 4	0.087 3
10	0.320 3	0.597 9	0.134 7	0.305 5	0.603 2	0.129 1
100	0.442 9	0.909 2	0.258 2	0.253 1	0.527 2	0.002 5
200	0.448 1	0.921 3	0.268 9	0.037 1	0.130 5	0.002 2
300	0.620 5	1.135 5	0.495 2	0.158 6	0.557 3	0.037 9
400	0.833 7	1.550 8	0.898 3	0.312 8	0.757 4	0.129 4
800	0.888 1	1.631 2	1.026 3	0.332 9	0.741 8	0.141 3

由图 6、7、9、10 及表 1 可以发现,比起静态的 Preisach 迟滞模型,类 Hammerstein 模型对频率的变化有一定的适应性。随着输入信号的频率的增加,静态 Preisach 迟滞模型的误差有不断大幅

增大的趋势。相比之下,由于线性部分的加入,类 Hammerstein 模型在不同频率下的误差比较稳定,并且在频率较高情况下有明显的优势。

5 结 论

Hammerstein 模型由无记忆非线性子系统级联线性子系统组成,广泛用于描述非线性系统。本文采用类 Hammerstein 模型对压电陶瓷执行器的迟滞进行建模。类 Hammerstein 模型的迟滞非线性部分利用分类排序的方法进行建模,在此基础上利用遗传算法辨识类 Hammerstein 模型中的线性部分。实验对所建立的静态 Preisach 迟滞模型和类 Hammerstein 模型进行了验证。实验表明:随着频率的增大,静态 Preisach 迟滞模型的误差大幅增大(从 0.025 Hz 时的绝对平均误差 0.214 1 μm ,到 800 Hz 时的 0.888 1 μm);而类 Hammerstein 模型具有频率相关性,其误差会相应地大幅降低(0.025 Hz 时的绝对平均误差为 0.229 7 μm ,800 Hz 时的平均绝对误差为 0.332 9 μm)。

参考文献:

- [1] VASILJEV P, MAZEIKA D, KULVIETIS G. Modelling and analysis of omni-directional piezoelectric actuator [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308: 867-878.
- [2] 张栋,张承进,魏强. 压电微动工作台的动态迟滞模型[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 551-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 551-556. (in Chinese)
- [3] LEE S H, ROYSTON, FRIEDMAN G. Modeling and compensation of hysteresis in piezoceramic transducers for vibration control [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(10): 781-790.
- [4] JILES D C, ATHERTON D L. Ferromagnetic hysteresis [J]. *IEEE Transactions Magnetics*, 1983, 19(5): 2183-2185.
- [5] HODGDON M L. Applications of a theory of ferromagnetic hysteresis [J]. *IEEE Transactions Magnetics*, 1988, 24(1): 218-222.
- [6] WANG X H, SUN T. Preisach modeling of hysteresis for fast tool servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1421-1425.
- [7] 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)
- [8] SCHIFFER A, IVANYI A. Preisach distribution function approximation with wavelet interpolation technique [J]. *Physica B*, 2006, 372(1): 101-105.
- [9] BOBBIO S, MILANO G, SERPICO C, et al.. Models of magnetic hysteresis based on play and stop hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33(6): 4417-4426.
- [10] 陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 88-95.
CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, et al.. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic

- ramic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 88-95. (in Chinese)
- [11] JIA-TZER H, KHAI D T. A Hammerstein-based dynamic model for hysteresis phenomenon [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, 12(3): 406-413.
- [12] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Model of Hysteresis*[M]. New York: Springer, 1991.
- [13] 李黎, 刘向东, 侯朝桢. 压电陶瓷执行器 Preisach 模型的分类排序实现[J]. *压电与声光*, 2007, 29(5): 544-547.
- LI L, LIU X D, HOU C ZH. The sorting & taxis realization of Preisach model on piezoelectric ceramic actuator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, 29(5): 544-547. (in Chinese)
- [14] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. *控制理论与应用*, 1996, 13(6): 697-708.
- XI Y G, CHAI T Y, YUN W M. Survey on genetic algorithm [J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(6): 697-708. (in Chinese)

作者简介:

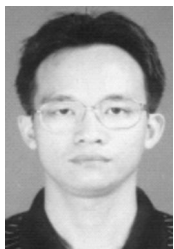


赖志林(1984—),男,江西赣州人,博士研究生,2006年于南昌大学获得工学学士学位,2009年于北京理工大学获得工学硕士学位,主要从事压电陶瓷微定位系统的建模与控制方面的研究。E-mail: lai@bit.edu.cn



耿洁(1986—),女,山东济南人,博士研究生,2008年于南昌大学获得工学学士学位,主要从事迟滞非线性系统的建模与控制方面的研究。E-mail: gengjie63@bit.edu.cn

导师简介:



刘向东(1971—),男,湖北荆门人,教授,博士生导师,1992年于武汉工学院获学士学位,1995年、1998年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事非线性动力学理论、迟滞非线性系统的建模与控制、航天器控制、高精度伺服控制等方面的研究。E-mail: xdliu@bit.edu.cn