

DOI : 10.3901/JME.2014.06.165

基于双曲正切函数磁滞算子的超磁致伸缩驱动器动态 Preisach 模型*

朱玉川^{1,2} 徐鸿翔¹ 陈 龙¹ 李跃松¹

(1. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室 南京 210016 ;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要：经典 Preisach 算子存在不能反映单元算子磁滞输出依赖于输入变化率的固有缺陷，为扩大 Preisach 磁滞模型的应用范围，提出一种基于双曲正切函数的动态 Preisach 磁滞算子，其形状参数为输入变化率的双曲正切函数，该算子可描述超磁致伸缩驱动器磁滞依赖输入变化率的特性。在此基础上构造出超磁致伸缩驱动器动态 Preisach 模型，并利用 BP 神经网络完成动态 Preisach 模型的参数辨识。进行超磁致伸缩驱动器磁滞输出试验研究，将驱动频率分别为 40 Hz、70 Hz、100 Hz 的正弦电流下超磁致伸缩驱动器(Giant magnetostrictive actuator, GMA)输出位移试验数据作为训练样本数据，并另取训练样本数据中未包含的 100 Hz 以下 20 Hz、50 Hz、80 Hz 与 100 Hz 以上 120 Hz、130 Hz、150 Hz 共六种频率信号下 GMA 输出位移试验数据对其预测能力进行检验，结果表明该动态模型能够较为精确地描述超磁致伸缩驱动器的动态磁滞现象并具有较好的模型泛化能力。在 0~150 Hz 频率的输入电流下，该动态 Preisach 模型的最大预测位移均方误差为 2.87 μm ，最大绝对位移误差为 4.4 μm 。研究结果可广泛应用于 GMA 实时控制系统，提高 GMA 器件的控制精度。

关键词：动态 Preisach 模型；超磁致伸缩驱动器；双曲正切算子

中图分类号：TH113

Dynamic Preisach Model in Giant Magnetostrictive Actuator Based on Hyperbolic Tangent Function Hysteresis Operators

ZHU Yuchuan^{1,2} XU Hongxiang¹ CHEN Long¹ LI Yuesong¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract : The basic operators used in Preisach model is hard to be used to describe the dynamics of the hysteresis depending on the input change-rate. A novel tangent function hysteresis operator is, whose shape parameters are related to the input rate, so the shape of the new operator is variable. A dynamic Preisach model is built based on the new operator, and Preisach model parameter are identified by the neural network. Finally, experimental investigation of giant magnetostrictive actuator hysteresis effect is conducted, in this test item, displacement output of giant magnetostrictive actuator excited by sinusoidal current such as 40 Hz, 70 Hz, 100 Hz are sampled as training data, at the same time, ones such as 20 Hz, 50 Hz, 80 Hz and 120 Hz, 130 Hz, 150 Hz are taken as inspection data, experimental results are illustrated to show that the new dynamic model can describe the dynamic hysteresis of the giant magnetostrictive actuators accurately the effectiveness of the proposed approach. Under multi-frequency signals, the maximum value of the mean square error predicted by this new model is no more than 2.87, and the max absolute error of the new model is no more than 4.4 μm . The research results should be attributed to improvement of accuracy of real-time control systems driven by giant magnetostrictive actuator.

Key words : dynamic Preisach model ; giant magnetostrictive actuator ; tangent function hysteresis operator

0 前言

稀土超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive

material, GMM)、压电陶瓷和形状记忆合金是近年来发展起来的一些^[1]新型功能材料，因其优异的物理特性被广泛应用于精密加工和微位移驱动等场合。超磁致伸缩驱动器(Giant magnetostrictive actuator, GMA)就是利用 GMM 在外加磁场作用下发生形变这一特性，实现 GMM 电磁能向机械能转换的一种新型驱动器。该新型驱动器具有输出力大、

* 国家自然科学基金(51175243)、航空科学基金(20110752006)、流体动力与机电系统国家重点实验室 2011 年度开发基金(GZKF-201116)和南京航空航天大学基本科研业务费(NS2013046)资助项目。20130306 收到初稿，20130919 收到修改稿

磁-机耦合系数高、应变大、响应快等优点,在精密和超精密驱动、微定位机构、微机电系统以及纳米技术等领域显示出良好的应用前景^[1-3]。

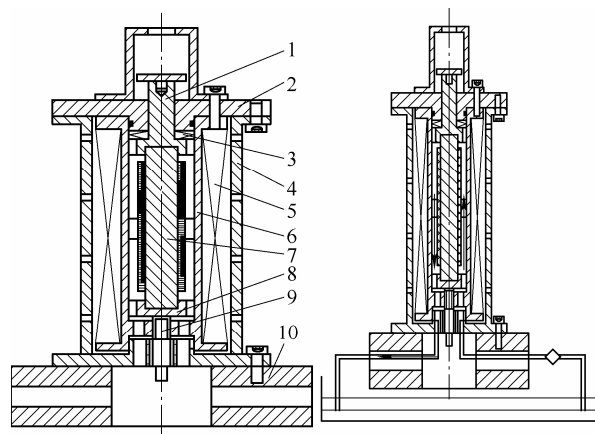
然而,由于 GMM 内在的磁滞效应与磁-机耦合效应,使得 GMM 的输入磁场与输出磁化强度之间存在滞回非线性关系,这给超磁致伸缩器件的应用带来很大困难,因此很有必要开展 GMA 非线性模型的研究工作。目前描述磁滞行为的模型大致分为两类:一类为物理模型,它探索磁滞产生的物理原因,用各种物理参量来构建模型。如 Jiles-Atherton 模型^[4],但这些模型捕捉磁滞的能力是相当有限的,因为到现在为止,有些磁滞行为的物理原因尚未完全搞清楚,而且这类模型通常相当复杂;另一类为现象模型^[5],用数学模型描述观察到的现象,而在这类现象模型中,Preisach 模型是得到最广泛应用的一种,因其具有对复杂磁滞行为的建模能力强、滞回非线性预测能力强、通用性好等优势。然而,经典 Preisach 模型只能描述静态磁滞特性,研究表明 GMA 输出-输入磁滞曲线的形状会随着输入信号变化率的变化而变化,因此当 GMA 输入信号的频率范围增大时,直接利用静态 Preisach 模型建模会带来较大的误差。近年来 Preisach 动态模型的研究也取得一些成果,大部分研究工作的方向是通过在权函数中引入输入或输出变化率等来表征动态特性。MAYERGOYZ^[6]将输出变化率引入到 Preisach 模型权函数中,导出了一个动态 Preisach 模型,但由于模型复杂、参数测定困难等原因,在实际工程计算中很难得到普遍应用;TAN 等^[7]通过放置电阻 R_{eddy} 来等效涡流效应而提出一个动态 Preisach 模型;唐志峰^[8]直接采用经典 Preisach 模型来建立 GMA 输入电流和输出位移的关系,这种方法较简单,但由于模型没考虑动态磁滞的影响,因此仅能描述静态和准静态下的磁滞特性。

本文通过将输入变化率引入经典 Preisach 磁滞算子,提出了一种改进型动态 Preisach 算子,使得算子本身就能反映磁滞动态特性,在此基础上构造 GMA 的动态 Preisach 磁滞模型,并利用神经网络辨识模型的相关参数,最后将模型的预测结果与试验的实测结果进行对比,给出了相关结论和评价。

1 GMA 的结构与工作原理

图 1 所示 GMA 的结构是根据 GMM 的基本理论和磁路驱动原理,以满足驱动器的性能及技术指标为要求而设计的。其中 GMA 的闭合磁路由前端盖、输出杆、GMM 棒、滑块、调节螺钉、外罩和

底座等构成。



(a) 磁驱动位移输出原理

(b) 热位移控制原理

图 1 GMA 的结构原理图

1. 输出杆 2. 前端盖 3. 磁簧组 4. 外罩 5. 驱动与偏置线圈
6. 线圈骨架 7. GMM 棒 8. 滑块 9. 调节螺钉 10. 底座

GMA 磁驱动位移输出原理如下:激励线圈通入电流产生驱动磁场,进而 GMM 棒的长度发生变化,推动输出杆移动,从而实现位移和力的输出,实现电磁能转变为机械能。

GMA 热驱动位移控制原理如下:当 GMA 工作时,内部温度发生变化时,由于温升的作用,线圈骨架和 GMM 棒都发生热膨胀。在线圈骨架发生热膨胀时,向其自由端(底端)伸长,同时带动与线圈骨架螺纹连接的调节螺钉向下移动,这样滑块与 GMM 棒之间形成间隙,GMM 棒底端成自由端,GMM 棒的热膨胀向下伸长,由于线圈骨架材料的热膨胀率与 GMM 棒的热膨胀率相当,对 GMA 的温升变形进行实时补偿。

2 双曲正切函数动态磁滞算子

2.1 经典 Preisach 算子

经典 Preisach 磁滞模型^[9]认为,系统的宏观磁滞特性可看成无穷个具有矩形滞回曲线的单位磁滞算子 $\gamma_{\alpha\beta}(u(t))$ 的加权和

$$f(t) = \Gamma u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 、 $u(t)$ 分别为磁滞系统在 t 时刻的输出与输入; $\gamma_{\alpha\beta}$ 为经典磁滞算子,算子的输出为 1 或 0,分别对应“开”和“关”状态,每个算子可以由一对开关值 (β, α) 来表示 $(\beta < \alpha)$,并与半平面 $\{(\beta, \alpha) \in R^2, \beta < \alpha\}$ 上的点一一对应。

2.2 动态磁滞算子

为了更好地表征磁滞依赖于输入变化率的动

态特性, 一些学者尝试将输入变化率的影响引入单位磁滞算子中, 提出了一些动态磁滞算子。BERTOTTI^[10]提出了一个通用化的标量 Preisach 模型, 通过假定每个经典 Preisach 算子输出取值+1(或-1)不是瞬时发生的, 而是以受外部输入控制的有限速率来取值; WEI 等^[11]提出了一种改进型 Prandtl-Ishlinskii 磁滞算子, 引入输入变化率来调整该算子的斜率参数, 使得该算子可以描述输入变化率对输出的影响; 李黎^[12]提出一种基于不对称指数函数的动态磁滞算子, 并用于描述压电陶瓷执行器的磁滞动态特性。

2.3 双曲正切函数动态磁滞算子

本文提出一种与输入变化率 du/dt 相关的双曲正切函数动态磁滞算子^[10]

$$\gamma(\alpha, \beta, u(t), du/dt) =$$

$$\begin{cases} \tanh(\lambda_1 \times (u(t) - \alpha)) & u(t) \geq \alpha \quad du/dt \geq 0 \\ \xi & \beta < u(t) < \alpha \\ \tanh(\lambda_2 \times (u(t) - \beta)) & u(t) \leq \beta \quad du/dt < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 α, β ($\alpha \geq \beta$) ——动态算子的上升、下降阈值;

ξ ——上一状态值;

λ_1, λ_2 ——描述动态算子的形状参数, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$;

$\lambda_1 = \lambda_0 - \chi_1(du/dt)$;

$\lambda_2 = \lambda_0 - \chi_2(du/dt)$;

λ_0 ——输入变化率为零时的形状参数值;

χ_1, χ_2 ——描述形状参数与输入变化率 du/dt 之间的函数关系式。

双曲正切动态算子工作原理如图 2 所示, 假设在某时刻 t_1 , 输入 $u(t)$ 单调递增至 u_1 , 当输入 u_1 越过某一特定值 α 继续增加时, 该算子的输入将沿着曲线 $\tanh(\lambda_1 \times (u(t) - \alpha))$ 从零开始增加, 而曲线形状参数 λ_1 由当前的输入变化率 du/dt 决定, 输入变化率的变化引起 λ_1 相应变化, 曲线形状也相应变化, 最终该算子输出将沿着该曲线增大到+1 达到正饱和状态; 假设输入开始单调递减至某一时刻 t_2 , 输入 $u(t) = u_2$, 当输入 u_2 越过某一特定值 β 时该算子输出将沿曲线 $\tanh(\lambda_2 \times (u(t) - \beta))$ 开始从上一状态值逐渐减小, 同样曲线形状参数 λ_2 由当前输入变化率 du/dt 决定, 最终该算子输出将沿着该曲线减小到-1 达到负饱和状态。

与经典 Preisach 算子最大的不同在于, 双曲正切动态 Preisach 算子可以根据输入变化率来改变形

状参数值, 使得算子自身具有显著的动态特性, 同时由于形状参数 λ_1, λ_2 的取值可以不相等, 这样得到的不对称磁滞算子就可以描述许多材料的磁滞曲线不对称性, 因此本文提出的动态 Preisach 磁滞算子可以更为灵活地描述各种磁滞行为。

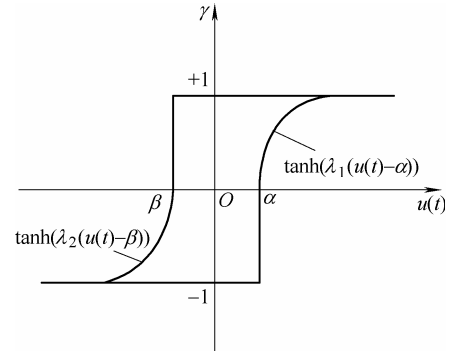


图 2 双曲正切动态磁滞算子

2.4 基于双曲正切算子的 GMA 动态磁滞模型

将经典 Preisach 模型(式(1))中的单元磁滞算子用双曲正切动态 Preisach 算子(式(2))代替, 便得到 GMA 的基于双曲正切磁滞算子动态 Preisach 模型

$$f(t) = \Gamma u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma(\alpha, \beta, u(t), du/dt) d\alpha d\beta \quad (3)$$

对 GMA 输入电流信号的最大值 u_s 进行 N 等分, 令每个双曲正切算子上升下降阈值分别为 $\alpha_k = ku_s/N$, $\beta_m = mu_s/N$, 则 GMA 动态 Preisach 模型可离散化为

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \mu(\alpha_k, \beta_m) \gamma_{\alpha_k, \beta_m}(u(t), du/dt) \quad (4)$$

3 GMA 动态磁滞模型参数辨识及验证

3.1 模型参数辨识的试验台搭建

为获得辨识模型所需磁滞输入输出数据, 构建 GMA 试验台如图 3 所示。通过 DG1022 型双通道函数/任意波形发生器与恒流功率放大器为超磁致伸缩驱动器提供频率和幅值均可调节的输入电流, 驱动器输出位移通过 TDS1012B-SC 型示波器测量 BZF-2 型电涡流位移传感器输出信号获得。示波器选用 TDS1012B-SC 型数字存储示波器, 其采样频率为 20 GHz; 电涡流传感器选用 BZF-2 型非接触式电涡流位移传感器, 其分辨率为 0.05%(静)和 0.1%(动)。

将信号发生器中产生的弱电压信号经过恒流放大器作为输入电流信号提供给 GMA, 使 GMA 内部激励线圈通电产生驱动磁场, 进而 GMM 棒长度发生变化, 推动输出杆移动, 利用安装在输出杆端

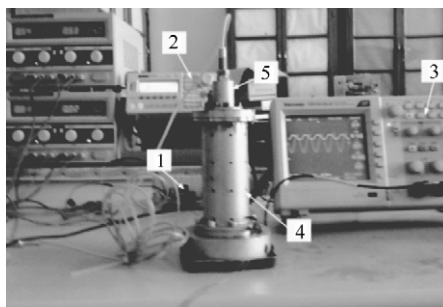


图 3 GMA 样机及其测试系统

1. 恒流功率放大器 2. 信号发生器 3. 示波器
4. 超磁致伸缩驱动器 5. 电涡流位移传感器

的电涡流传感器采集当前输出信号并接入示波器。

将偏置电流设置为 1.6 A, 输入电流分别为 20 Hz、40 Hz、50 Hz、70 Hz、80 Hz、100 Hz、120 Hz、130 Hz、150 Hz 的正弦电流, 幅值均取 1 A, 相应得到不同驱动频率下用于辨识模型参数所需的 GMA 输入输出数据, 为方便模型参数辨识及验证将这些数据分为三组, 第一组选取驱动信号频率分别为 40 Hz、70 Hz、100 Hz 下实测的 GMA 输入输出数据, 用于模型参数的辨识; 第二组选取驱动信号频率分别为 20 Hz、50 Hz、80 Hz 下实测的 GMA 输入输出数据, 用于对模型辨识结果进行验证; 第三组选取驱动信号频率分别为 120 Hz、130 Hz、150 Hz 下实测的 GMA 输入输出数据, 用于对模型泛化能力进行验证。

3.2 模型参数的辨识

由式(2)、(4)可知, 需要对该模型中的形状函数 λ_1 、 λ_2 与权函数 $\mu(\alpha, \beta)$ 两部分进行辨识。为了充分描述 GMA 依赖于输入变化率的磁滞行为, 形状函数 λ_1 、 λ_2 应满足如下条件, 如图 4 所示。

(1) 单支算子最大的变化范围不超过最大输入电流值 u_s , 即存在最小值 λ_{\min} , $u(t)=u_s$, $du/dt \geq 0$ 时, $\exists \delta \in \mathbf{R}^+$, 使得 $\tanh(\lambda_{\min} \times u_s) \leq \delta$, 其中取值 $\delta=5 \times 10^{-4}$;

(2) 初值 λ_0 应保证双曲正切算子可以在相邻阈值 u_{k-1} 、 u_k 之间完整地变化, 即当 $u(t)=u_{k-1}$, $du/dt \geq 0$ 时, $\exists \delta \in \mathbf{R}^+$, 使得 $\tanh(\lambda_0 \times (u_k - u_{k-1})) \leq \delta$, 其中取值 $\delta=5 \times 10^{-4}$ 。

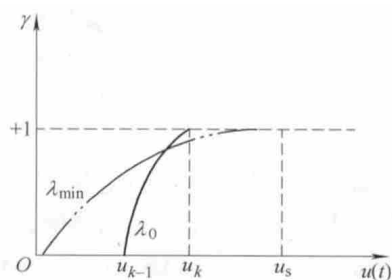


图 4 不同形状参数的双曲正切算子

由于很难通过试验获得形状函数的具体表达式, 简化处理将其假定为线性函数, 并根据形状函数满足的上述两个条件, 得到形状函数的表达式:

$\lambda = \lambda_0 - \varepsilon \times |du/dt|$, 其中 $\varepsilon = (\lambda_0 - \lambda_{\min}) / |du/dt|_{\max}$, λ_0 、 λ_{\min} 可由输入电流信息以及算子阈值的取值估计得出。

对模型中另一参数权值 $\mu(\alpha, \beta)$ 的辨识采用构造 BP 三层反向传播神经网络来实现。输入电流 $u(t)$ 的幅值变化范围为 $-1 \sim 1$ A, 频率变化范围 $0 \sim 100$ Hz, 对输入电流最大值进行 N 等分 (N 取 100), 则双曲正切算子阈值取值为 $\alpha_k = k/100$, $\beta_m = m/100$ ($0 \leq m < k \leq 100$)。根据以上信息可知, 结合形状函数 λ_1 、 λ_2 需要满足的两个条件, 便可估算出 $\lambda_0=0.05$ $\lambda_{\min}=5 \times 10^{-4}$, 由此得出 $\lambda=0.05 - 7.878 \times 10^{-5} |du/dt|$ 。利用以上磁滞算子及参数, 构建三层 BP 神经网络对权值 $\mu(\alpha, \beta)$ 进行辨识, 由输入电流及其变化率经过 100 个双曲正切算子的磁滞预处理后, 作为神经网络的输入, 输入层采用 100 个神经元, 中间层使用 S 型函数, 输出层使用的是线性求和函数, 经反复试验后确定各层神经元单元个数, 其结构如图 5 所示。

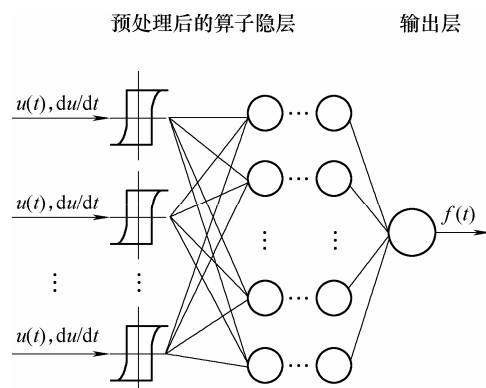


图 5 GMA 动态磁滞模型的神经网络结构

运用神经网络出辨识参数权值 $\mu(\alpha, \beta)$ 后依据所提出的双曲正切算子可以克服经典 Preisach 算子不能反映单元算子磁滞输出依赖于输入变化率的固有缺陷这一特点, 使得在此算子基础上构造的 GMA 动态 Preisach 模型, 相比直接建立 GMA 输入-输出关系的神经网络模型可更具有较好的模型适用性与泛化能力。

3.3 试验验证

将驱动频率分别为 40 Hz、70 Hz、100 Hz 的正弦电流下 GMA 输出位移试验数据作为训练样本数据, 并结合双曲正切算子的数学表达式(2)以及已求得的形状函数 $\lambda=0.05 - 7.878 \times 10^{-5} |du/dt|$, 对各个磁滞算子进行预处理。

然后得到不同时间 t 对应下的正弦输入电流 $u(t)$ 引起的各磁滞算子输出值；再将预处理后磁滞算子的输出数据作为神经网络输入矢量，将相应输入电流下实测 GMA 输出位移数据作为神经网络目标矢量，对所构建神经网络进行训练，结果如图 6 所示。

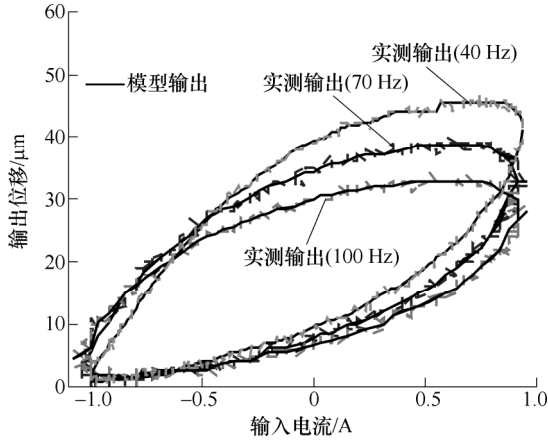


图 6 训练样本下模型的输出结果与实测结果对比

经过上述三种不同频率下的样本训练后，基于双曲正切算子的 GMA 磁滞模型的位移辨识误差结果如表 1 所示。

表 1 训练样本下 GMA 磁滞模型的输出位移误差

频率/Hz	最大绝对误差值/ μm	最大相对误差	方均根误差
40	1.2	0.03	0.43
70	1.6	0.05	1.32
100	2.7	0.09	1.47

为检验 GMA 磁滞模型的预测能力，需要另取训练样本数据中未包含的 100 Hz 以下 20 Hz、50 Hz、80 Hz 与 100 Hz 以上 120 Hz、130 Hz、150 Hz 等六种频率信号下 GMA 输出位移试验数据对其预测能力进行检验，检验结果如图 7、8 所示。其中试验数据通过 DS1012B-SC 型数字存储示波器获得，其采样频率为 20 GHz，图 7、8 中的采样个数用于反映不同频率下模型输出结果与实测输出结果之间的误差，在输入电流变化范围 $-1 \sim +1$ 选取 1 200 个电流值，求取每个电流值对应的模型输出结果与实测输出结果之间的误差。

从图 7 三组小于 100 Hz 的验证数据下模型输出位移预测结果及位移误差结果可知对不同频率输入下，基于双曲正切算子的 GMA 动态 Preisach 模型最大预测位移均方误差为 $1.62 \mu\text{m}$ ，最大绝对位移误差为 $2.76 \mu\text{m}$ ，说明所建模型在 100 Hz 以内能够较好地预测超磁致伸缩驱动器的动态磁滞特性。为进一步验证模型在 100 Hz 以上的泛化能力，给出 100 Hz 以上不同频率模型预测结果与输出位移误差如图 8 所示。

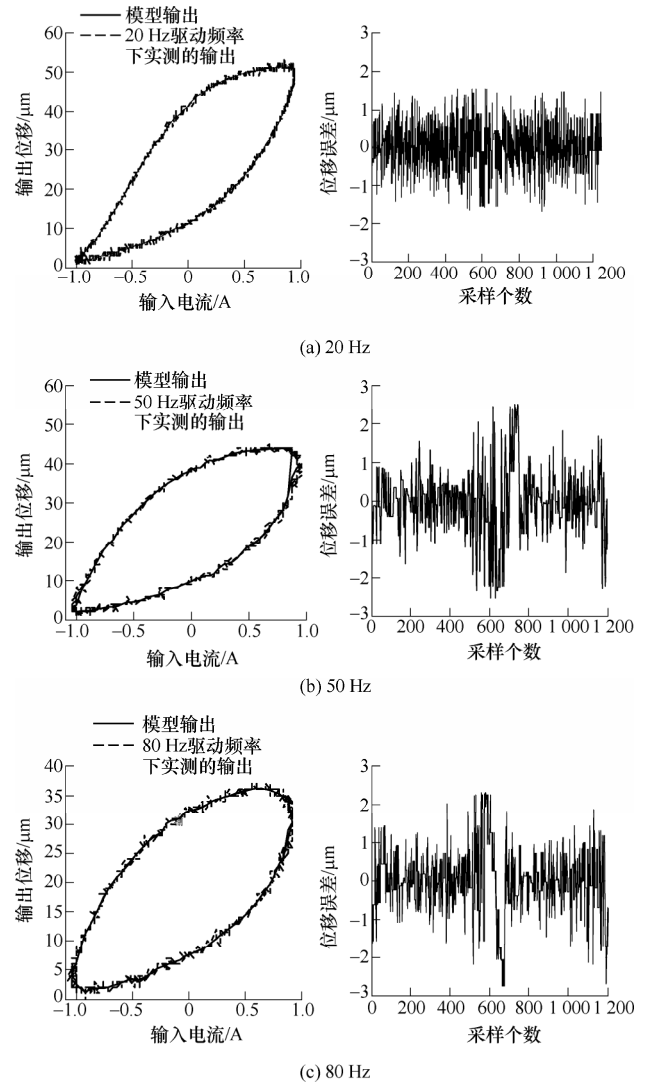


图 7 100 Hz 以下不同频率模型预测结果与输出位移误差

从图 8 三组大于 100 Hz 的验证数据下模型的输出位移预测结果及其位移误差结果可以看出，动态 Preisach 模型的最大预测位移均方误差为 $2.87 \mu\text{m}$ ，最大绝对位移误差为 $4.4 \mu\text{m}$ 。由此证明了本文中所构建模型的有效性，具有较好的适用性与泛化能力。

4 结论

本文提出一种双曲正切函数算子，通过以输入变化率为参数的形状函数来调整该磁滞算子的输入输出关系，建立双曲正切算子输出与输入及输入变化率的对应关系，进一步构造出可用于描述超磁致伸缩驱动器动态磁滞特性的动态 Preisach 模型，利用神经网络完成 GMA 动态磁滞模型的参数辨识。最后在不同输入频率下，对超磁致伸缩驱动器进行输出磁滞试验，试验结果表明该模型能较好地反映 GMA 实际动态磁滞特性。在频率变化范围 $0 \sim 150$ Hz 的输入电流下，所建动态 Preisach 模型的最大预

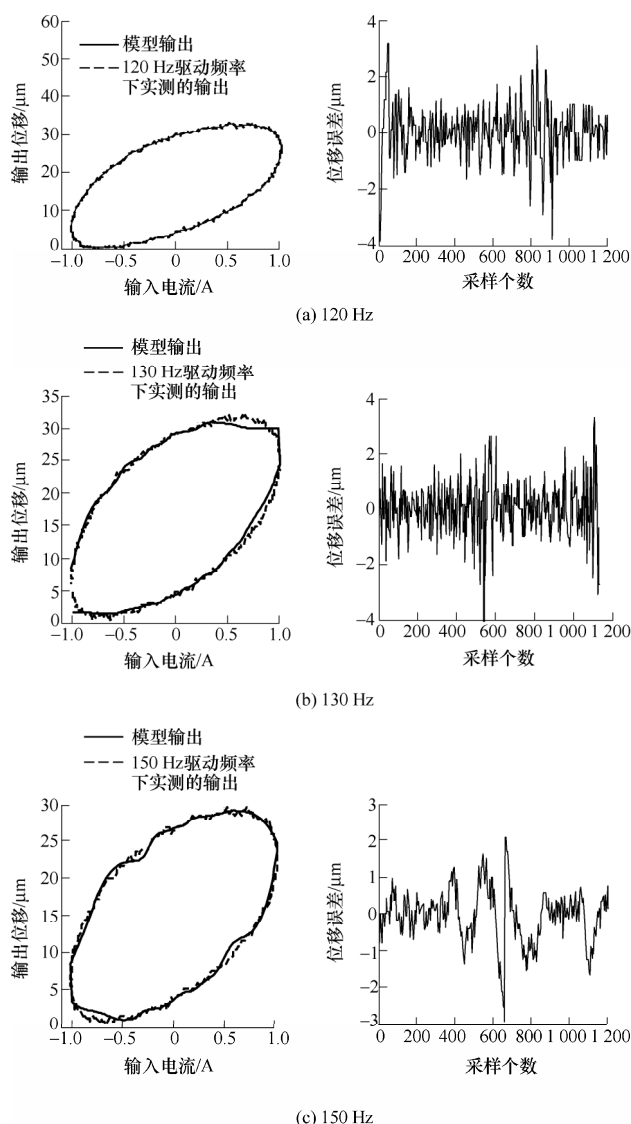


图8 100 Hz以上不同频率模型预测结果与输出位移误差

测位移均方误差为 $2.87 \mu\text{m}$, 最大绝对位移误差为 $4.4 \mu\text{m}$ 。基于该新型算子的磁滞数学模型不仅可以描述 GMA 动态磁滞特性且具有较宽的模型适用性与精度, 可广泛应用于 GMA 实时控制系统, 提高 GMA 器件的控制精度。

参考文献

- [1] 朱玉川, 李跃松. 超磁致伸缩执行器驱动的新型射流伺服阀[J]. 压电与声光, 2010(4): 574-577.
ZHU Yuchuan, LI Yuesong. A novel jet pipe servo valve driven by giant magnetostrictive actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010(4): 574-577.
- [2] 王博文, 曹淑瑛, 黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
WANG Bowen, CAO Shuying, HUANG Wenmei. Magnetostrictive material and its devices[M]. Beijing:

Metallurgical Industry Press, 2008.

- [3] 贾振元, 杨兴. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(2): 3-5.
JIA Zhenyuan, YANG Xing. Theories and method of designing microdisplacement actuator based on giant magnetostrictive materials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(2): 3-5.
- [4] JILES D C, ATHERTON D L. Ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1983, 19(5): 2183-2185.
- [5] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis [M]. New York: Springer-verlag, 1991.
- [6] MAYERGOYZ I D. Dynamic Preisach model of hysteresis[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1988, 24(6): 2925-2927.
- [7] TAN X B, BARAS J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators[J]. Automatica, 2004, 40: 1469-1480.
- [8] 唐志峰. 超磁致伸缩微位移驱动器的非线性迟滞建模及控制方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 55-61.
TANG Zhifeng. Nonlinear hysteresis model and control of magnetostrictive micropositioner[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 55-61.
- [9] PREISACH F, UBER D. Magnetische Nachwirkung[J]. Zeitschrift für Physik, 1935, 94(5-6): 277-302.
PREISACH F, UBER D. Magnetic effect[J]. Journal of Physics, 1935, 94(5-6): 277-302.
- [10] BERTOTTI I. Dynamic of the scalar Preisach model of hysteresis[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1992, 28(5): 2599-2601.
- [11] WEI T A, FRANCISCO A G, PRADEEP K K, et al. Modeling rate dependent hysteresis in piezoelectric actuators[C]//Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on the Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, 2003: 1975-1980.
- [12] 李黎. 基于不对称指数函数迟滞算子的压电陶瓷执行器动态 Preisach 迟滞模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1468-1488.
LI Li. Dynamic hysteresis Preisach model of a piezoceramic IC actuator based on asymmetric exponential function hysteresis operators[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1468-1488.

作者简介: 朱玉川(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为智能材料电液控制技术。
E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn