

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2013.19.037

基于 Preisach 磁滞理论的超磁致伸缩驱动器建模

徐鸿翔¹, 陈龙¹, 朱玉川^{1,2}, 蒋鑫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, 江苏南京 210016;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

摘要: 超磁致伸缩驱动器具有响应快、输出应变大、机电转化效率高等优点, 但因受超磁致伸缩材料内在的磁滞效应与磁-机耦合效应等因素影响, 导致其输出位移存在较大滞环, 大大降低了驱动器的输出位移精度, 也影响了该材料及其致动器更广泛的应用。为了有效地设计和使用超磁致伸缩驱动器, 需要建立准确描述其磁滞非线性的数学模型。在经典 Preisach 模型的基础上建立了超磁致伸缩驱动器的 Preisach 磁滞数值模型, 并通过对 Preisach 限制三角形的离散划分, 依赖大量实验数据辨识了该模型的参数, 并进行了超磁致伸缩驱动器磁滞输出实验研究。实验结果表明: 该 Preisach 磁滞模型能较好地描述准静态下超磁致伸缩驱动器的磁滞现象, 对指导超磁致伸缩驱动器位移精度的提高具有一定意义。

关键词: Preisach 滞回模型; 超磁致伸缩驱动器; 参数辨识

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2013)19-130-3

Modeling of Giant Magnetostrictive Actuator Based on Preisach Theory

XU Hongxiang¹, CHEN Long¹, ZHU Yuchuan^{1,2}, JIANG Xin¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: The giant magnetostrictive actuator (GMA) has some advantages, such as fast response, large magnetostrictive strain, high electromechanical transformation efficiency and so on. However, the GMA exhibits nonlinear characteristics of magnetic-elastic coupling and frequency-dependent hysteresis, which severely hinders the accuracy of GMA's output displacement as well as its further applications. In order to design and use the GMA effectively, a suitable hysteresis nonlinearity model should be established. A Preisach-based numerical model for describing the nonlinear hysteresis of GMA was derived on the study of the classic Preisach model, and the Preisach restrict plane was discretized into Levels uniformly, and a lot of experiment data were carried to identify the parameters of Preisach-based numerical model. The results reveal that the hysteresis nonlinear model can well describe the practical situation. It has guiding significance for improving the positioning precision of GMA.

Keywords: Preisach model; Giant magnetostrictive actuator; Parameter identification

稀土超磁致伸缩材料 (Giant Magnetostrictive Material, GMM) 是 21 世纪一种极具战略性的新型智能材料, 因其具有输出应变大、能量密度大、承载能力强等优点^[1], 在现代高新技术领域中有着十分广泛的用途, 受到学术界、工业界尤其是国防研究中的高度重视。以 GMM 棒为核心部件的超磁致伸缩驱动器 (Giant Magnetostrictive Actuator, GMA), 在响应速度、控制精度、频宽等方面均优于传统驱动器。但由于 GMM 棒内在的磁滞效应与磁-机耦合效应等因素影响^[1], 致使 GMA 的输入与输出之间存在强滞回非线性关系, 这给 GMA 的实际应用带来很大困难。为了解决这一难题, 国内外学者对 GMA 磁滞模型进行大

量研究并取得一些研究成果, 简单地来说分为两大类: 其一是基于材料物理特性的磁滞模型, 如 J-A 磁滞模型^[2]、自由能磁滞模型^[3]; 其二是基于材料宏观现象的磁滞模型, 如 Preisach^[4]模型、Prandtl-Ishlinskii^[5]模型等。

近年来, Preisach 模型因其具有对复杂磁滞行为的描述能力较强、通用性好等优势, 已被广泛应用于压电陶瓷形状、记忆合金、超磁致伸缩等新型智能材料的磁滞模型中。作者基于经典 Preisach 模型, 建立了适合应用于 GMA 控制中的 Preisach 磁滞模型, 然后设计相关试验对模型参数进行辨识, 并将模型的预测结果与试验的实测结果进行对比, 最后给出了相关

收稿日期: 2012-09-24

基金项目: 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)

作者简介: 徐鸿翔 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电控制及自动化。E-mail: xhx_1989@126.com。通信作者: 朱玉川, E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn。

结论和评价。

1 GMA 的结构与工作原理

如图 1 所示为 GMM 的结构, 其端盖、外壳、底座、GMM 棒、输出杆、滑块、调零螺钉构成闭合磁路, 使 GMA 的磁能利用率最大; 考虑到 GMA 长时间工作时线圈发热会影响到输出精度, 在设计时选取外壳材料与 GMM 棒材料热膨胀量相当, GMM 棒热膨胀可由外壳热膨胀抵消, 因此可以充分保证超磁致伸缩驱动器受热影响最小。

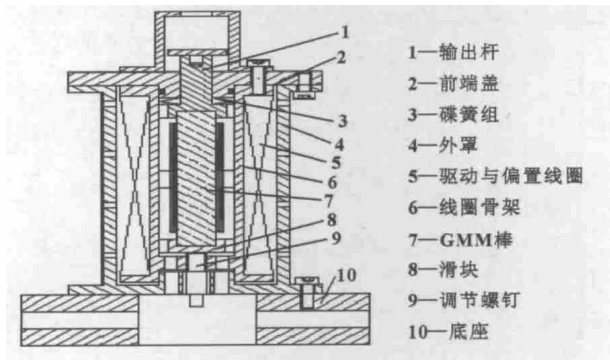


图 1 GMA 的结构原理图

GMA 的工作原理: 驱动线圈通入电流产生驱动磁场, 进而使得 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, 实现电磁能到机械能的转变。

2 GMA 的 Preisach 磁滞模型

2.1 Preisach 磁滞模型的数学描述

Preisach 磁滞模型^[4]是德国科学家 Preisach 提出的一种磁滞模型, 该模型认为: 系统的宏观磁滞特性可看成无穷个具有矩形滞回曲线的基本磁滞单元磁滞算子 ($\gamma_{\alpha\beta}(u(t))$) 的加权和。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。建立 GMA 的 Preisach 磁滞模型, 考虑到实际中为消除 GMA “倍频” 现象通常会对它预先施加一定的偏置磁场, 使其处于 “极化” 状态, 这样便能保证再加驱动磁场后总输入磁场的变化限制在 $[0, +\infty]$ 区间内, 从而消除 “倍频” 现象。由于实际中 GMA 磁滞系统的输出位移 $f(t)$ 与输入电流 $u(t)$ 仅发生在第一象限, 这决定了开关阈值 α, β 的有限性, 需要将原来 Preisach 模型中算子的输出取值修正为 1 或 0。于是便得到 GMA 的 Preisach 磁滞模型具体数学表达式:

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

式中: $f(t)$ 为 GMA 的位移输出; $u(t)$ 为 GMA 的输入; $\gamma_{\alpha\beta}(u(t))$ 为磁滞算子; $\mu(\alpha, \beta)$ 为算子的权函数。

2.2 Preisach 磁滞模型的离散化

为了方便辨识式 (1) 中的权函数 $\mu(\alpha, \beta)$, 需要对 Preisach 磁滞模型进行离散化处理。先假设 GMA 磁滞系统的限制三角形如图 2 (a) 所示, 其中 α_0 为实际系统的正饱和输入值, 则算子和权重函数都只能在由直线 $\alpha = \alpha_0, \beta = 0$ 和 $\alpha = \beta$ 构成的限制三角形内取值。

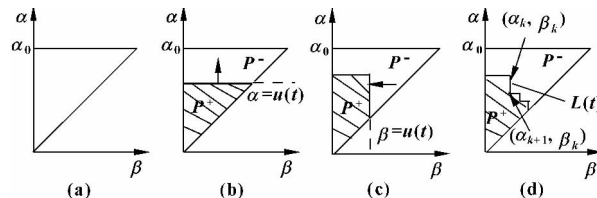


图 2 GMA 磁滞系统的限制三角形

GMA 的 Preisach 模型特性简单描述如下: 可在任意时刻以开关算子的实际输出状态, 将 Preisach 限制三角形划分为两部分 P^+ 和 P^- 。当 GMA 的输入为 $u(t)$ ($0 \leq u(t) \leq \alpha_0$), 则输入 $u(t)$ 增加过程在限制三角形内就表现为水平线段 $\alpha = u(t)$ 由下向上移动, 如图 2 (b) 所示; 输入 $u(t)$ 减小过程则表现为竖直线段 $\beta = u(t)$ 由右向左移动, 如图 2 (c) 所示。当 GMA 磁滞系统输入为任一连续过程时, 则在几何上就表现为上述上移和左移过程的交替进行, 从而得到一条折线 $L(t)$, 如图 2 (d) 所示, 其中定义输入的极大、极小值序列分别为 $\{\alpha_i\}$ 和 $\{\beta_i\}$ 。结合该模型的上述特性, 并定义 f_{α_i} 为输入从 0 单调增加至 α_k 处的模型输出值, $f_{\alpha_i \beta_i}$ 为输入从 α_k 下降至 β_k 处的模型输出值, 把 P^+ 区域划分为 n 个小梯形, 则式 (1) 又可以表示为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n (f_{\alpha_i \beta_i} - f_{\alpha_i \beta_{i-1}}) + f_{\alpha_n u(t)} - f_{\alpha_n \beta_{n-1}} \quad (2)$$

$$f(t) = \sum_{k=1}^n (f_{\alpha_i \beta_i} - f_{\alpha_i \beta_{i-1}}) + f_{u(t)} - f_{u(t) \beta_{n-1}} \quad (3)$$

式中: $f_{\alpha_i \beta_i}$ 为 GMA 输入从 α_k 下降至 β_i 处的输出值;

$u(t)$ 为 GMA 的输入; n 为等分后的梯形个数。

式 (2) 为输入 $u(t)$ 单调递减时 GMA 的输出离散表达式; 式 (3) 为输入 $u(t)$ 单调递增时 GMA 的输出离散表达式。

3 Preisach 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的磁滞输入输出数据, 构建 GMA 试验台如图 3 所示。试验原理简述如下: HG63303 直流稳压电源为 GMA 提供偏置与驱动电流, B2F-2 型电涡流传感器探头安装于 GMA 的输出杆端, 通过电涡流传感器的前置级便将 GMA 的位移输出相对应的电压值显示在 UT805A 型台式数字万用表上。GMA 主要参数取值见表 1。

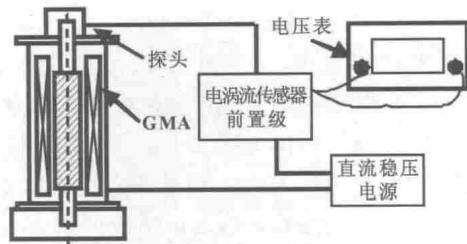


图 3 GMA 试验平台的原理图

表 1 GMA 主要参数取值

GMM 棒直径 D/m	12	偏置线圈匝数 $N_2/\text{匝}$	700
GMM 棒长度 L/m	80	偏置电流 I_b/A	0.5
驱动线圈匝数 $N_1/\text{匝}$	800	预压力 σ_0/MPa	6

参数辨识过程如下：(1) 如图 4 所示将 Preisach 平面限制三角形离散化，在 GMA 输入电流 $u(t)$ 的 $[0, \alpha_0]$ 区间内，将三角形沿 α 、 β 轴等距离地离散分成 n 等分，则每分间隔的电流值为 α_0/n ；(2) 输入电流 $u(t)$ 从 0 开始上升至任一等分 $\alpha_0 k/n$ ($0 \leq k \leq n$)，并记下相应的输出位移值；(3) 输入电流 $u(t)$ 再逐渐降为 0，并记下下降过程中每一等分点时的输出位移值；(4) 根据试验测得输出位移值，即一阶反向曲线结果，结合公式 (1) 即可确定每个等分点对应 $f_{\alpha_i \beta_i}$ 值，其中 $\alpha_k = 0.15k$ ， $\beta_r = 0.15r$ ($0 \leq r \leq k \leq 15$)，从而得到一个 $f_{\alpha_i \beta_i}$ 表格。

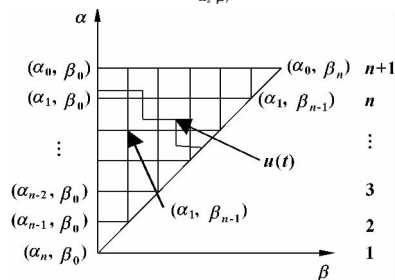


图 4 Preisach 平面的离散化

3.2 GMM 的 Preisach 磁滞模型验证

对于 GMA 磁滞系统的任意输入，输入极值 (α_k, β_r) 可能落在等分点上，也可能落在正方形单元和三角形单元上，当 (α_k, β_r) 在等分点上时，通

过查 $f_{\alpha_i \beta_i}$ 表格得到其相应的值；对于不在等分点上的 (α_k, β_r) ，可查 $f_{\alpha_i \beta_i}$ 表格得到其在表格中的位置，然后利用最小二乘法获得相应的值。为验证参数已辨识的 Preisach 磁滞模型的准确性，进行了超磁致伸缩驱动器磁滞输出实验研究。图 5 所示为不同输入电流下 Preisach 磁滞模型的预测输出结果与实验结果的对比，可以看出两者基本吻合，证明该模型能较好地反映准静态输入下 GMA 的磁滞情况。

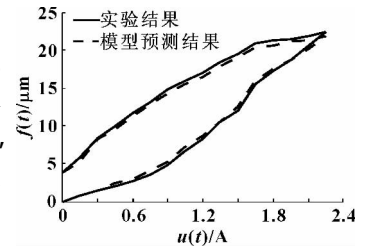


图 5 模型预测输出结果与实验结果的对比

4 结论

针对超磁致伸缩驱动器的磁滞非线性建立 Preisach 磁滞模型，并推导出易于应用的 Preisach 数值模型。将 GMA 磁滞系统的 Preisach 平面离散化，结合试验测得的一阶反向曲线结果，辨识了该 Preisach 磁滞模型的相关参数。最后进行了 GMA 准静态输入信号下的磁滞输出实验研究，证明该模型能够对 GMA 的非线性磁滞进行有效地描述。

参考文献：

- [1] 王传礼, 丁凡, 许贤良. GMA 喷嘴挡板阀参数设计及特性研究[J]. 机床与液压, 2006(8): 69-103.
- [2] JILES D C, HARIHARAN S. Interpretation of the Magnetization Mechanism in Terfenol-D Using Barkhausen Pulse-height Analysis and Irreversible Magnetostriction[J]. J Appl Phys, 1990, 67(9): 5013-5015.
- [3] 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.
- [4] PREISACH F. Über Die Magnetische Nachwirkung[J]. Zeitschrift für Physik, 1935, 94: 277-302.
- [5] VISINTIN Augusto. Differential models of Hysteresis[M]. New York: Springer-Verlag, 1944.

2014 年我国机床附件增速情况分析预测

2014 年我国机床附件市场增速发展将达到 16.1%。

机床在中国的主要市场有工业机械与设备、交通运输设备、初级金属制品和电气电子设备。其中，由于工业机械广泛应用于各工业领域，因而成为机床的最大市场。由于中国汽车产业的爆炸式发展，交通运输设备制造在过去 10 年一直是机床的第二大市场。金属切削机床是最大的产品门类，其规模 3 倍于金属成形机床。

机床工具行业由金属切削机床、金属成形机床、铸造机械、木工机床、量刃具、磨料磨具、机床附件（含滚动功能部件）、机床电器（含数控系统）八个小行业组成，是为国民经济各领域提供工作母机的基础装备产业，是国防军工现代化建设急需的战略性新兴产业，是国家综合竞争实力的重要标志。数控机床属于高端制造装备，是国家培育和发展战略性新兴产业的重要领域。先进的机床制造是高端装备制造的一个重要组成部分，因此行业能够从中央和地方政府获得补贴从而进行研究和开发。销售高端机床也能从关税政策中受益，从而提高本土产品的销售额。

（内容来源：中国行业研究网）