

文章编号 1004-924X(2007)08-1241-06

Preisach 逆补偿的 GMA 精密轨迹跟踪与实验优化

龚大成, 吕福在, 潘晓弘, 唐志峰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对超磁致伸缩执行器(GMA)的非线性迟滞,研究了开环条件下采用 Preisach 逆模型对参考轨迹实现精密跟踪的补偿方法。简要介绍了经典 Preisach 迟滞数值模型,详细推导了 Preisach 逆模型及其数值实现方法。采用 FFT 数字滤波方法对一阶回转下降曲线(FOD)实验数据进行优化处理,同时结合拉各朗日双线性插值方法,提高了在同等离散水平下 Preisach 模型对 GMA 非线性迟滞的预测精度。在精密预测的基础上,通过 Preisach 逆模型实现了 GMA 对参考轨迹的精密跟踪。实验结果表明:在 $0\sim 34\ \mu\text{m}$,跟踪误差由补偿前的 $-14.7\%\sim +11.2\%$ 减小到 $-2.9\%\sim +2.7\%$ 。此外,FFT 滤波和双线性插值算法可以明显提高 Preisach 模型对 GMA 非线性迟滞的预测精度,基于 Preisach 数值逆模型的补偿算法可以有效消除由于 GMA 非线性迟滞造成的跟踪误差。实验同时指出,如果要进一步提高跟踪精度,还须结合反馈实现闭环控制。

关键词:超磁致伸缩致动器;Preisach 逆模型;开环前馈补偿;跟踪控制

中图分类号:TP271.72 **文献标识码:**A

Precision tracking and experimental optimization of GMA by Preisach inverse compensation

GONG Da-cheng, LÜ Fu-zai, PAN Xiao-hong, TANG Zhi-feng

(Modern Manufacture Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to realize high precision tracking control of the Giant Magnetostrictive Administer (GMA), a numerical compensation approach was presented based on inverse Preisach model and a series of optimized experimental methods were discussed. The numerical expressions of the classical Preisach model were presented in detail for different input variations and the inverse classical Preisach model was established. The First Order Descending(FOD) datasets were obtained from the identification experiments and smoothed by a FFT filter. A good agreement between measured hysteresis loops and predicted curves shows that the FFT filter is an effective tool to cancel the errors and noises of the FOD datasets. In the tracking experiments, the Preisach inverse model was used to compensate the hysteresis of GMA to obtain a good tracking performance. On a moving range of $0\sim 34\ \mu\text{m}$, the tracking error of the GMA with compensation is less than $-2.9\%\sim +2.7\%$, compared with the error of $-14.7\%\sim +11.2\%$ without compensation. The experimental results indicate that the compensation approach based on numerical inverse Preisach model can greatly improve tracking performance of

收稿日期:2007-03-09;修订日期:2007-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50105019);中国博士后科学基金资助项目(No. 20060390337)

GMA, and the optimized experimental methods are effective.

Key words: GMA; inverse Preisach model; open loop feedforward compensation; tracking and controlling

1 引言

磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)由于良好的位移分辨率和重复定位精度,近年来已经被广泛地应用于振动控制、精确定位、精密加工等领域^[1-6]。但与其他智能材料一样,磁致伸缩材料在响应外界激励时存在着强烈的非线性迟滞。解决迟滞的根本方法是建立迟滞数值模型,通过开环补偿^[6-7]或基于补偿的闭环控制^[8-10]来消除迟滞,但不论是开环还是闭环,补偿是共同的基础,因此深入研究迟滞补偿有着广泛的理论与现实意义。

目前的迟滞模型主要包括两大类,一类是基于材料物理特性的解析模型,如 J-A 模型^[11],但是该模型相对复杂,模型参数很多,不易确定,而且当磁场变化率改变时,模型参数均须重新确定;另一类是基于迟滞过程宏观现象描述的算子模型,如 Preisach 模型。近年来,由于 Preisach 模型在对压电陶瓷和形状记忆合金等智能材料的迟滞预测上取得了良好的效果,已逐步成为当前迟滞模型的主流,并已经被广泛应用于各种迟滞系统的建模与控制^[6-12]。但 Preisach 模型的参数辨识通常基于一阶回转实验数据(First Order Descending, FOD)曲线,因而实验数据的精确程度通常会严重地影响模型的精度,进而又影响到补偿的精度,因此采用优化方法提高 FOD 数据的准确性对扩大 Preisach 模型的应用领域和提高 GMA 的精密控制起着重要的作用。

本文简要介绍了经典 Preisach 理论及其数值模型的实现方法,并给出了相应逆模型的数值实现方法。在实验中,独创地采用了 FFT 滤波算法对 FOD 实验数据进行优化,在同等离散水平下提高了 Preisach 模型的预测精度。最后研究了基于 Preisach 逆模型的逆补偿方法,并在自行研制的直动型 GMA 上实现了高精度的开环跟踪控制。

2 经典 Preisach 模型及其数值实现

Preisach 模型的本质是将迟滞过程输入/输

出之间的一维多值映射变成可以用上、下开关场表示的二维平面内的一一映射。模型通过无穷个具有矩形滞回特征的 Preisach 算子的加权求和等效系统的宏观迟滞。其数学式为^[11]:

$$f(t) = \iint_T \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha, \beta}[u(t)] d\alpha d\beta, \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为系统迟滞输出, $u(t)$ 为输入, $\mu(\alpha, \beta)$ 为权重函数, $\gamma_{\alpha, \beta}[u(t)]$ 为迟滞开关算子, α, β 为算子的上、下开关阈值,算子输出值为 1 或 -1,分别对应着算子的输入为 $>\alpha$ 或 $<\beta$ 的状态,即所谓“开”和“关”状态。但由于倍频效应等现象的存在,事实上算子在描述 GMM 时,其输出值被修改为 1 和 0^[12]。

Preisach 模型的辨识需要先构造辨识函数^[11]:

$$F(M_k, m_k) = f_{M_k} - f_{m_k}, \quad (2)$$

式中: f_{M_k} 为输入沿主环单调上升至 M_k 时的系统输出, f_{m_k} 为输入上升至 M_k 后又单调减小至 m_k 时的系统输出。

文献[11]分别针对以单调减小和单调增加作为当前输入状态的输入序列,给出了 Preisach 模型迟滞预测数学式。

输入 $u(t)$ 处于增加阶段,系统输出可以写为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(u(t), m_{n-1}), \quad (3)$$

输入 $u(t)$ 处于减小阶段,系统输出可以写为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(M_n, m_{n-1}) - F(M_n, u(t)), \quad (4)$$

式中: $n(t)$ 为随输入变化 Preisach 平面上记忆曲线的水平链数, $\{M_k\}$ 和 $\{m_k\}$ 分别为输入极大值序列和极小值序列。

3 Preisach 数值逆模型

尽管构造的辨识函数 $F(\alpha, \beta)$ 为双变量非线性函数,但由实测 FOD 曲线可知,如果固定双变量中的一个, α 或 β , $F(\alpha, \beta)$ 严格单调变化,即与另一个变量之间存在一一的映射关系^[8-9]。

因此给定 α 时,定义其逆函数为:

$$\beta = F_{\beta}^{-1}[\alpha, F(\alpha, \beta)], \quad (5)$$

当 $\dot{u}(t) \leq 0$ 时, $m_n = u(t)$, 由式(3)可得:

$$F(M_n, u(t)) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(M_n, m_{n-1}) - f(t), \quad (6)$$

代入式(5)得:

$$u(t) = F_{\beta}^{-1} \left\{ M_n, \left\{ \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(M_n, m_{n-1}) - f(t) \right\} \right\}, \quad (7)$$

同理由式(4)得到给定 $\beta (\dot{u}(t) \geq 0)$ 时逆函数的表达式:

$$u(t) = F_{\alpha}^{-1} \left\{ \left\{ \frac{f(t) - \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)]}{m_{n-1}} \right\}, m_{n-1} \right\}. \quad (8)$$

由上述推导可以看出, FOD 实验数据既是 Preisach 预测模型参数辨识的基础, 也是其逆模型的构建基础, 因此 FOD 数据的准确性必将极大地影响模型的预测精度和补偿精度。

4 实验过程及优化

本文的实验将包括两部分, 一部分是 FOD 数据测定与优化, 并通过优化前后对滞环预测精度的比较来说明优化的效果; 另一部分是通过开环逆补偿跟踪实验来验证逆模型的有效性。

实验平台基于 LabVIEW 虚拟仪器系统, 实验装置如图 1 所示。自行研制的直动式 GMA 其主要参数如下: 棒长: 150 mm, 外径: $\Phi 21$ mm, 激励线圈匝数: 1 000 匝, 电阻: 1.8 Ω , 电感: 5.5 mH。

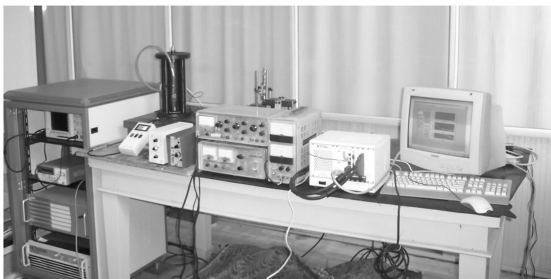


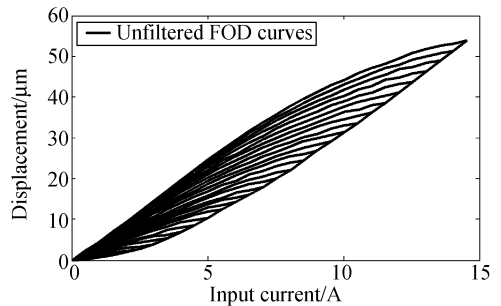
图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

4.1 FOD 曲线数据测定与优化

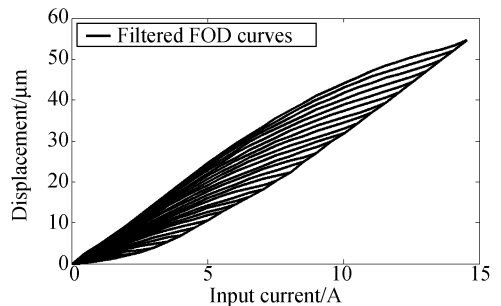
FOD 曲线即为一阶回转曲线, 是 Preisach 模型参数辨识的经典方法^[11]。实验过程中首先将需要辨识的输入区间 (α_0, β_0) 均匀划分为 L 等份, 间隔为 $\Delta I = (\alpha_0 - \beta_0) / L$, 给 GMA 线圈通入任一等分点激励电流, $u(k) = k\Delta I$, 且 $(0 \leq k \leq L)$, 后逐步减小至 0, 记录每一与等分点输入电流值相对应的输出值, 直接通入等分点电流值得到的实验数据即为主滞环曲线, 后逐步减小至零的过程则为一阶回转曲线。遍历每个等分点, 即可得到一组 FOD 曲线, 如图 2(a) 所示。在 FOD 实验数据基础上, 根据式(2)可计算得到相应的辨识函数 $F(M_k, m_k)$ 数值表, 再由式(3)和式(4)即可实现对任意输入的输出预测。

由图 2(a) 可以看出, 由于误差和漂移的存在, 实测 FOD 曲线并不光滑, 直接用于预测计算必然会将实验误差引入预测结果。考虑到真实 FOD 曲线应具有缓变特征, 而误差与突变可视为高频噪声, 因此考虑采用 FFT 滤波方法实现对 FOD 曲线进行平滑处理, 具体的处理过程通过



(a) 实测 FOD 曲线

(a) Measured FOD curves



(b) FFT 滤波后的 FOD 曲线

(b) Filtered FOD curves

图 2 实测 FOD 曲线与优化 FOD 曲线比较 (激励电流范围 0~15 A, 输入细分数 $L=30$)

Fig. 2 Measured FOD curves and filtered FOD curves

Matlab 程序来完成,处理后的优化 FOD 曲线如图 2(b)所示。

Preisach 模型通过对输入输出平面的离散化来近似预测迟滞输出^[11],如图 3(a)所示。尽管可以通过密集的网络划分来减小误差,但会造成实验数据的平方增加^[6],因此必须考虑插值算法来提高模型的精度,本文采用 Lagrang 双线性插值算法^[10]。

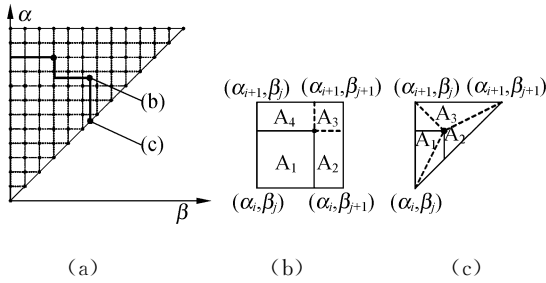


图 3 Lagrang 双线性插值

Fig. 3 Illustration of Lagrang bilinear spline interpolation

由图 3(a)可知,记忆曲线的节点可能会落在图 3(b)和图 3(c)两种不同的单元内,因此插值算法也必须根据不同的情况给出。当节点落在矩形区域图 3(b)时,其插值公式为:

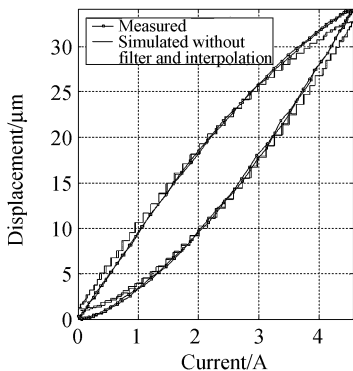
$$F(\alpha, \beta) = \lambda_1 F(\alpha_i, \beta_j) + \lambda_2 F(\alpha_i, \beta_{j+1}) + \lambda_3 F(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1}) + \lambda_4 F(\alpha_{i+1}, \beta_j), \quad (9)$$

式中: $\lambda_1 = A_3/A$, $\lambda_2 = A_4/A$, $\lambda_3 = A_1/A$, $\lambda_4 = A_2/A$; 当节点落在三角形区域图 3(c)时,其插值公式为:

$$F(\alpha, \beta) = \lambda_1 F(\alpha_i, \beta_j) + \lambda_2 F(\alpha_{i+1}, \beta_j) + \lambda_3 F(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1}), \quad (10)$$

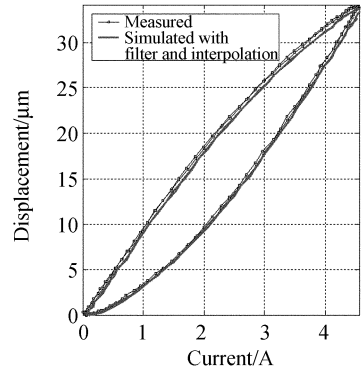
式中: $\lambda_1 = A_3/A$, $\lambda_2 = A_2/A$, $\lambda_3 = A_1/A$ 。

图 4 为对 FOD 数据优化前、后,Preisach 模



(a) 优化前

(a) Before simulation



(b) 优化后

(b) After simulation

图 4 FFT 滤波及插值前、后的滞环预测比较

Fig. 4 Comparison of hysteresis simulation

型预测滞环与实测滞环的比较。由图可以看出,优化后预测精度有了明显的提高,考虑到这是在没有增加 Preisach 平面离散水平的情况下实现的,因此验证了优化作用。

4.2 迟滞逆补偿跟踪实验

为了验证 Preisach 逆模型的有效性,设计了迟滞逆补偿开环跟踪实验,其方法就是将系统的期望输出作为输入,通过迟滞逆模型补偿系统的非线性迟滞,实现系统实测输出对期望输出的线性跟踪。通过考察逆补偿后系统实测输出与参考期望输出间的一致性就可以验证逆补偿消除 GMA 非线性迟滞的能力。原理框图如下:

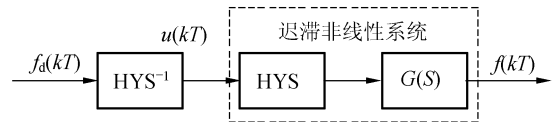


图 5 迟滞补偿原理框图

Fig. 5 Block diagram of inverse compensation

图 5 中: T 为采样间隔; $f_d(kT)$ 为 kT 时刻系统的期望输出; $u(kT)$ 为 kT 时刻 GMA 的真实输入; $f(kT)$ 为该时刻系统的真实输出; HYS 为 GMA 非线性迟滞; HYS⁻¹ 为迟滞逆模型; $G(s)$ 为传递函数。

为了能够对逆补偿过程进行详细观测,设计了如下的实验过程:先对 GMA 施加一参考激励信号 $u_r(t)$,将其线性放大作为系统的参考跟踪轨迹 $f_d(t)$,将 $f_d(t)$ 的离散序列 $f_d(kT)$ 作为系统输入,采用逆模型对输入进行实时计算,得到 GMA

的真实输入 $u(kT)$,最后将真实输出 $f(kT)$ 与参考轨迹 $f_d(kT)$ 进行对比。

取参考激励信号 $u_r(kT) = 4.5(1 - \cos(kT))$,将 $u_r(kT)$ 输入 GMA,其电流波形与迟滞输出波形如图 6 所示,将最大位移输出 W_m 和最大激励电流幅值 U_m 的比值作为线性放大系数,计算得到 $f_d(kT) = (W_m/U_m) \times u_r(kT)$,将 $f_d(kT)$ 作为参考跟踪轨迹。可以看出,未补偿的 GMA 实测轨迹明显滞后于参考轨迹,因此补偿是必要的。

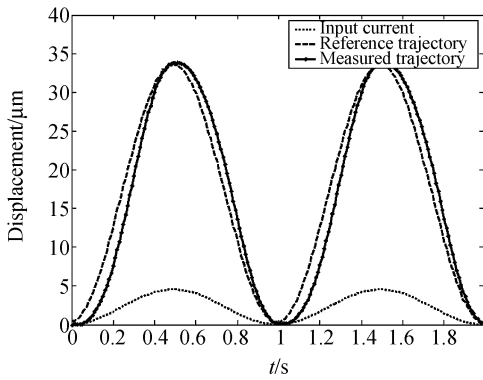
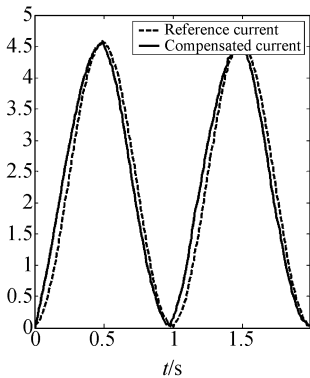


图 6 参考跟踪轨迹与 GMA 实测轨迹

Fig. 6 Comparison of reference and measured trajectory

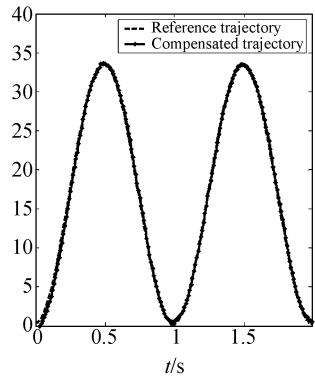
跟踪实验中,由式(7)或式(8)构成的求逆过程将由事先写好的 LabVIEW 程序完成,控制程序按照依次给入的参考序列 $f_d(kT)$ 值,实时计算出补偿后的真实输入序列 $u(kT)$,再经过功放输入到 GMA 中去。

图 7 为逆补偿跟踪实验结果。图 7(a)为补偿后 GMA 真实输入序列 $u(kT)$ 与参考激励序列



(a) $u(kT)$ 与 $u_r(kT)$ 的比较

(a) Comparison of $u(kT)$ and $u_r(kT)$



(b) GMA 的实测位移波形

(b) Measured displacement of GMA

图 7 逆补偿跟踪实验结果

Fig. 7 Experiment results of inverse compensation

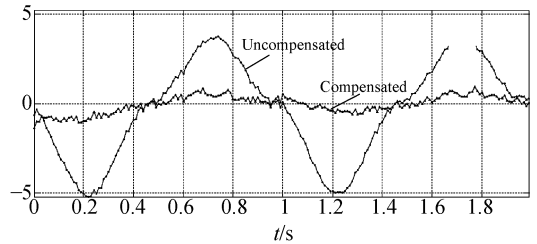


图 8 跟踪误差比较

Fig. 8 Comparison of tracking errors

$u_r(kT)$ 的比较,可以看出, $u(kT)$ 明显超前于 $u_r(kT)$;图 7(b)为 $u(kT)$ 激励下 GMA 的实测位移波形,可以看出,逆补偿后,系统迟滞明显减小,对参考输入显示出良好的线性跟踪能力。

图 8 为补偿前、后跟踪误差比较。由图可以看出,跟踪误差由补偿前的 $-14.7\% \sim +11.2\%$ 减小为补偿后的 $-2.9\% \sim +2.7\%$,进一步说明了逆补偿的有效性。

5 结 论

密集的 FOD 曲线是提高 Preisach 模型预测精度一个重要手段,但从实验的角度来看,密集的划分一方面会增加实验的困难,另一方面会引入更多的实验误差。FFT 滤波方法可以明显提高 FOD 实验数据的准确性,在同等的离散水平下可以明显提高 Preisach 模型的预测精度。

本文完整地给出了采用 Preisach 逆模型补偿 GMA 迟滞实现精密开环跟踪的方法。实验结

果表明,补偿后跟踪误差由原先的 $-14.7\% \sim +11.2\%$ 减小为 $-2.9\% \sim +2.7\%$,说明文章给出 Preisach 逆模型是有效的。

参考文献:

- [1] 梅德庆,陈子辰. 微制造平台的精密隔振系统研究[J]. 光学精密工程,2001,9(6):506-510.
MEI D Q, CHEN Z CH. Research on precision isolation system of micro manufacturing platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6):506-510. (in Chinese)
- [2] 孙麟治,李鸣鸣,程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学精密工程,2005,13(增):69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.):69-75. (in Chinese)
- [3] NEALIS J M, SMITH R C. An adaptive control method for magnetostrictive transducers with hysteresis[J]. *Decision and Control*, 2001,5: 4-7.
- [4] 王雷,谭久彬,刘玉涛. 超磁致伸缩体内涡流效应有限元分析[J]. 光学精密工程,2006,14(3):445-448.
WANG L, TAN J B, LIU Y T. Analysis on eddy current effect in giant magnetostriction with finite element method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):445-448. (in Chinese)
- [5] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[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)
- [6] 魏燕定,吕永桂,陈子辰. 基于压电驱动器的微动平台开环精密定位控制研究[J]. 机械工程学报,2004,40(12): 81-85.
WEI Y D, LV Y G, CHEN Z CH. Research on open-loop precision positioning control of a micro-displacement platform based on piezoelectric actuators[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(12): 81-85. (in Chinese)
- [7] HUGHES D, WEN J T. Preisach modeling and compensation for smart material hysteresis[J]. *SPIE*, 1995, 2427:50-64.
- [8] IYER R V, TAN X B, KRISHNAPRASAD P S. Approximate inversion of the Preisach hysteresis operator with application to control of smart actuators[J]. *Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6):798-810.
- [9] SONG G, ZHAO J Q, ZHOU X Q, et al.. Tracking control of a piezoceramic actuator with hysteresis compensation using inverse preisach model[J]. *Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2):198-209.
- [10] 唐志峰. 超磁致伸缩执行器的基础理论与实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
TANG ZH F. *Fundamental theory and experiments study of giant magnetostrictive actuator* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [11] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis and their Application* [M]. New York: Academic Press of Elsevier, 2003.
- [12] GONG D C, XIANG Z Q, PAN X H, et al.. Strategy and experiment of giant magnetostrictive actuator's precision control based on Preisach mode[C]. *Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006,2:1105-1109.

作者简介:龚大成(1978—),男,浙江杭州人,浙江大学现代制造工程研究所博士研究生,主要研究方向为新型智能材料执行器的精密控制;E-mail: gongdacheng@yahoo.com.cn

潘晓弘(1954—),男,浙江大学教授、工学博士、博士生导师,现任浙江大学机械与能源工程学院副院长、现代制造工程研究所常务副所长、浙江省先进制造技术重点实验室副主任、兼浙江省生产工程学会理事长、浙江省十五制造业信息化专家组成员,主要从事先进制造技术等领域的科研工作。E-mail: pan_xh@zju.edu.cn