

文章编号 1004-924X(2013)01-0124-07

基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制

杨斌堂*, 赵寅, 彭志科, 孟光

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要:针对超磁致伸缩驱动器(GMA)存在复杂的磁滞非线性易降低系统性能,导致系统不稳定的问题,建立了可以精确描述磁滞现象的模型并提出了合适的驱动控制方法。首先,基于 Prandtl-Ishlinskii(PI)模型对 GMA 磁滞建模,并采用最小均方法(LMS)进行模型参数辨识,模型预测误差为 $0.0379\ \mu\text{m}$ 。接着,通过对 PI 模型解析求逆进行实时补偿控制,从而有效减小磁滞误差,补偿控制误差为 $0.309\ \mu\text{m}$ 。实验结果证明,PI 模型可以精确描述 GMA 磁滞现象,且具有计算简单,磁滞跟踪能力强的优点。基于该模型的实时磁滞补偿控制方法可以有效减小磁滞误差,提高 GMA 实时驱动定位控制精度,是实现 GMA 精密驱动控制的一种有效方法。

关键词:超磁致伸缩驱动器;磁滞;Prandtl-Ishlinskii 模型;逆模型;实时补偿

中图分类号:TP273;TM274 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0124

Real-time compensation control of hysteresis based on Prandtl-Ishlinskii operator for GMA

YANG Bin-tang*, ZHAO Yin, PENG Zhi-ke, MENG Guang

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: btyang@sjtu.edu.cn

Abstract: Giant Magnetostrictive Actuator (GMA) has complex hysteretic nonlinearities, which can degrade system performance and cause system instability. To solve the problem, this paper establishes a model to accurately describe hysteretic phenomenon and propose a proper method to improve real-time control accuracy. Firstly, Prandtl-Ishlinskii (PI) operator is proposed in this paper to model the hysteresis of GMA and Least Mean Square (LMS) algorithm is used identify the parameter of this model, by which the prediction error reaches up to $0.0379\ \mu\text{m}$. Then, an inverse model is established based on the PI model for real-time compensation control of the hysteresis, and the inverse control error reaches up to $0.309\ \mu\text{m}$. The experimental results demonstrate that PI operator can accurately characterize the GMA hysteresis, and the model has advantages of simple calculation and strong hysteretic tracking ability. The real-time compensation control of hysteresis can effectively reduce hyster-

收稿日期:2012-08-02;修订日期:2012-09-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11172169, 11125209);机械系统与振动国家重点实验室重点基金资助项目(No. MSVZD201102);上海航天基金资助项目(No. HTJ10-08)

etic errors and improve real-time control accuracy. It is an effective way to achieve precision driving control of GMAs.

Key words: giant magnetostrictive actuator; hysteresis; Prandtl-Ishlinskii(PI) operator; inverse model; real-time compensation

1 引言

天文学的不断发展需要更大口径的望远镜做技术支持,但是随着望远镜口径的增大,大型望远镜的镜面加工难度也越来越大。对于大口径镜面整块加工这一技术难题,通常由拼接镜面主动光学技术^[1]来解决,通过精密驱动和传感控制技术对若干个单独加工的子镜面精确定位,拼接成一个大的镜面。子镜面的定位精度越高,拼接后的镜面对焦和表面一致性就越好,超磁致伸缩驱动器(Giant Magnetostrictive Actuator GMA)具有伸缩系数大、承载力强、响应快等优点,利用 GMA 进行驱动非常适合子镜面定位拼接,但是超磁致伸缩材料(GMM)存在的磁滞非线性会导致 GMA 回程误差高达 20%左右^[2],因此磁滞问题是限制 GMA 应用的最大因素。要避免磁滞对 GMA 性能的影响,必须对其磁滞特性进行建模并采用合适的控制算法进行驱动控制。

目前,GMA 磁滞建模主要采用 Preisach 模型^[3]和 Jiles-Atherton 模型^[4]两种方法。但是 Preisach 模型无法解析求逆,其逆模型需要通过大量的数值计算得到,不利于实时补偿控制;Jiles-Atherton 模型需要辨识的参数较多,辨识算法也比较复杂,而且磁滞跟踪能力差。考虑上述方法的不足,本文提出采用 Prandtl-Ishlinskii 模型^[5-6](简称 PI 模型)对 GMA 磁滞特性进行建模,并基于其逆模型设计了实时磁滞补偿控制系统。实验结果表明,PI 模型可以对 GMA 磁滞现象精确建模,基于 PI 模型进行实时补偿控制可以有效减小 GMA 磁滞误差,提高可控精度。

2 GMA 结构及工作原理

图 1 所示为实验室研制的 GMA 基本结构图,主要由基础圆盘、下端盖、线圈、GMM 棒、套筒、预紧螺栓、碟簧、上端盖、输出圆盘等部件组

成。通过给线圈加载电流产生磁场,GMM 棒会在磁场作用下发生伸长或缩短,由于输出圆盘和上端盖由 4 个螺栓固连成一个整体,GMM 棒会推动输出圆盘输出位移和力。套筒和基础圆盘由螺栓连接成一体,通过调节预紧螺栓的旋紧程度可以产生所需预压力。

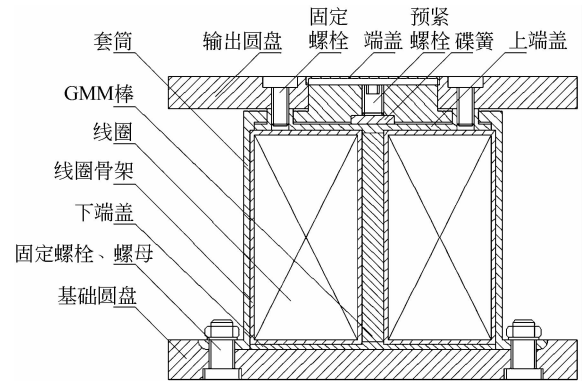


图 1 GMA 基本结构

Fig. 1 Basic structure of GMA

3 基于 PI 模型的磁滞建模方法

磁滞是超磁致伸缩材料的固有特性,主要是由于磁畴畴壁的不可逆移动产生的能量损失造成的^[7],对 GMA 的磁滞特性进行建模是实现精密驱动控制的前提,PI 模型可以精确描述复杂滞回现象,具有计算参数少且易于求逆的优点,对实现 GMA 精密驱动控制具有重要意义。

3.1 PI 模型

PI 模型由有限个线性 play 算子(Linear-play Operator, LPO)加权叠加构成,每一个 LPO 由一个阈值 r 确定,如图 2 所示,单个 LPO 可以表示一个简单的滞回系统,其表达式为:

$$y(t) = H_r[x, y_0](t) = \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, y(t_i)\}\}, \quad (1)$$

在初始时刻 t_0 ,其初始一致性条件为:

$$y(t_0) = \max\{x(t_0) - r, \min\{x(t_0) + r, y_0\}\}. \quad (2)$$

其中, 阈值 $r \in \mathbf{R}^+$, $x(t)$ 为分段单调输入信号, $t \in [t_0, t_N]$, $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_i \leq t \leq t_{i+1} \leq \dots \leq t_N$, y_0 为初始值, $y_0 \in \mathbf{R}$.

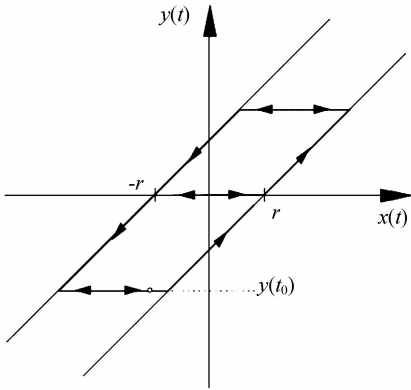


图 2 线性 play 算子

Fig. 2 Linear-play operator

通过对不同阈值的 LPO 线性叠加即可得到 PI 模型, 其表达式为:

$$z(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i H_{r_i} [x, y_{0i}](t) = \mathbf{H}^T \mathbf{W}, \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = [H_{r_0} [x, y_{00}](t), H_{r_1} [x, y_{01}](t), \dots, H_{r_{n-1}} [x, y_{0n-1}](t)]^T$$

$$\mathbf{W} = [\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{n-1}]^T$$

其中, \mathbf{W} 为权系数向量, $y_{00}, y_{01}, \dots, y_{0n-1}$ 为各个 LPO 的初始值, n 表示 LPO 的个数, 为了计算方便, 阈值 r_i 取为:

$$r_i = \frac{i}{n+1} \max\{|x(t)|\}; i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (4)$$

由于 LPO 的连续性, 只需少数几个 LPO 叠加就可以精确描述一个复杂的滞回系统。

3.2 PI 模型参数辨识

用 PI 模型进行磁滞建模首先需要辨识权系数向量。由于辨识算法的精度和稳定性将影响最终的控制结果, 本文采用 LMS 算法^[8] 计算 PI 模型最优权系数向量。LMS 算法最早由 Widrow 等人提出^[9], 该算法依据最小均方误差准则对滤波器权系数进行调节, 是求解最优权矢量的一种简单有效的递推方法, 式(6)即为 LMS 算法最优权系数向量迭代公式, LMS 算法计算简单且稳定性好, 已成为自适应滤波中最常用的算法。其计算过程如下:

$$e(t) = d(t) - z(t) = d(t) - \mathbf{W}^T(t) \mathbf{X}(t), \quad (5)$$

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) + \mu \frac{\partial [e^2(t)]}{\partial \mathbf{W}(t)} = \mathbf{W}(t) - 2\mu e(t) \mathbf{X}(t). \quad (6)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 为 GMA 的输入信号向量, $d(t)$ 为 GMA 第 t 时刻的输出, $z(t)$ 为 PI 模型第 t 时刻的输出, $e(t)$ 为辨识误差, $\mathbf{W}(t)$ 为辨识模型权系数向量, μ 为辨识误差收敛因子。

3.3 GMA 磁滞建模

为了验证 PI 模型对 GMA 磁滞特性建模的效果, 用 10 个 LPO 构成的 PI 模型进行磁滞建模实验, 以频率为 1 Hz、幅值为 10 A 的三角信号作为驱动电流, GMA 输出位移由激光位移传感器(型号为 LK-G80)采集, 采样频率为 500 Hz, PI 模型最优权系数向量通过 LMS 算法辨识得到。结果如图 3、4、5 所示, 图 3 为 GMA 实际输出位移和 PI 模型预测位移随时间变化曲线, 图 4 为 GMA 实际位移和 PI 模型预测位移的误差曲线, 图 5 为 GMA 实际滞回曲线及 PI 模型预测滞回曲线对比。

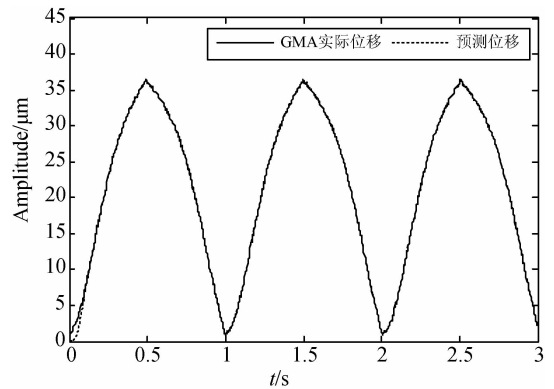


图 3 GMA 实际位移与 PI 模型预测位移比较

Fig. 3 Comparison between actual displacement of GMA and prediction displacement of PI operator

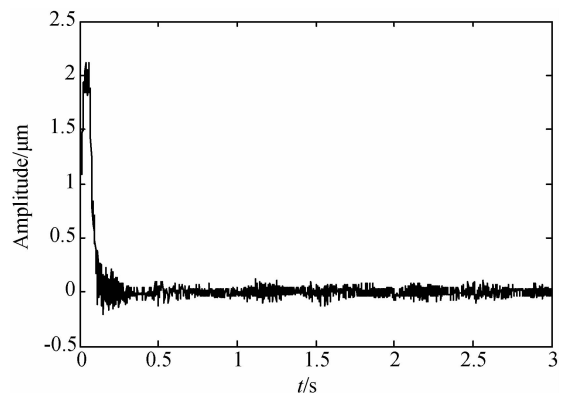


图 4 预测误差

Fig. 4 Prediction error

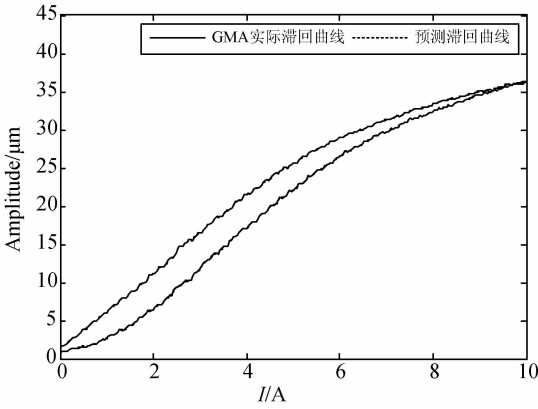


图 5 GMA 实际滞回曲线与 PI 模型预测滞回曲线比较
Fig. 5 Comparison between actual hysteresis curve of GMA and prediction hysteresis curve of PI operator

从实验结果可以看到,通过 LMS 算法建立的 PI 模型可以精确描述 GMA 滞回特性,图 3 中起始阶段 PI 模型预测位移与 GMA 实际位移误差较大,这是由于采用 LMS 算法计算 PI 模型最优权系数向量需要一段调整时间,从图 3 可以看到 LMS 算法的调整时间较短,辨识误差收敛很快。经过计算,PI 模型对 GMA 实际输出位移的均方误差为 $0.0379 \mu\text{m}$,最大预测误差为 $0.146 \mu\text{m}$ 。

4 GMA 磁滞补偿控制

构建逆模型是磁滞补偿控制的关键环节,逆模型的准确性将直接决定控制系统的性能,而基于 PI 模型可以准确得到其逆模型且易于实现在线补偿控制,逆模型的求解过程如下:

式(3)表示的 PI 模型的逆模型仍然是一个 PI 模型^[10],如式(7)所示,只要确定逆模型的阈值 r'_i 、权系数 ω'_i 、初始值 y'_{0i} 与原 PI 模型的阈值 r_i 、权系数 ω_i 、初始值 y_{0i} 的关系即可得到磁滞逆模型

$$z^{-1}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \omega'_i P_{r'_i}[x](t) = \mathbf{W}'^T \mathbf{H}' \quad (7)$$

PI 模型的滞回特性由初载曲线确定,初载曲线即当磁滞算子初始值 y_{0i} 为 0 并使输入信号 $x(t)$ 从 0 单调增加到最大值时,PI 模型的输出,如式(8)所示,初载曲线 $\varphi(r)$ 可以表示为一个与阈值 r_i 相关的分段线性函数:

$$\varphi(r) = \sum_{j=0}^i \omega_j (r - r_j); r_i \leq r \leq r_{i+1}; \quad i = 0, 1, \dots, n - 1. \quad (8)$$

同理,逆模型的初载曲线可以表示为:

$$\varphi'(r') = \sum_{j=0}^i \omega'_j (r' - r'_j); r'_i \leq r' \leq r'_{i+1}; \quad i = 0, 1, \dots, n - 1. \quad (9)$$

由于互逆,将式(8)中的 r 分别取为 r_i 即可得到逆模型对应的 r'_i ,即

$$r'_i = \varphi(r_i) = \sum_{j=0}^i \omega_j (r_i - r_j); i = 0, 1, \dots, n - 1. \quad (10)$$

由于逆模型和正模型关于直线 $y = x$ 对称,因此 $d\varphi(r_i)/dr = 1/d\varphi'(r'_i)/dr'$,从而可得到逆模型权系数 ω'_i :

$$\omega'_0 = \frac{1}{\omega_0}, \omega'_i = -\frac{1}{\left(\sum_{j=0}^i \omega_j\right) \left(\sum_{j=0}^{i-1} \omega_j\right)}, \quad i = 1, \dots, n - 1. \quad (11)$$

初始值 y'_{0i} 可以由下式得到^[11]

$$(y'_{0i+1} - y'_{0i}) / (r'_{i+1} - r'_i) = (y_{0i+1} - y_{0i}) / (r_{i+1} - r_i), \quad (12)$$

$$y'_{0i} = \sum_{j=0}^i \omega_j y_{0j} + \sum_{j=i+1}^{n-1} \omega_j y_{0j}. \quad (13)$$

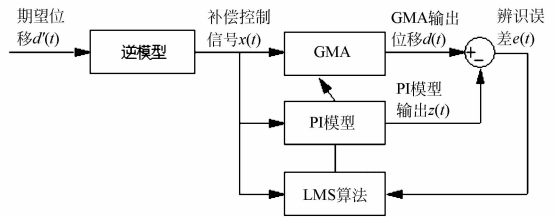


图 6 GMA 实时磁滞补偿控制原理
Fig. 6 Principle of compensation control in real-time for GMA

实时补偿控制原理如图 6 所示,整个控制过程可以分为 3 步:在线建模、构建逆模型、驱动。首先基于 PI 模型对 GMA 进行在线辨识,接着将得到的辨识模型转化为逆模型,并根据期望位移 $d'(t)$ 计算出补偿控制信号 $x(t)$,然后通过电源给 GMA 加载相应电流信号,GMA 输出位移 $d(t)$,此时再对 GMA 进行辨识并计算出对应的逆模型,根据得到的逆模型和期望位移计算出下一个控制电流,由此达到 GMA 磁滞补偿控制的目的。

5 实验结果

实验用到的硬件设备如图 7 所示,包括

GMA、Keyence 激光位移传感器 (LK-G80)、电源、控制计算机,控制实验基于 LabVIEW 软件平台进行,通过 LabVIEW 实现控制算法和仪器通讯。

以幅值为 $30\ \mu\text{m}$,频率为 $1\ \text{Hz}$ 的三角波作为期望位移进行控制实验,PI 模型通过 10 个 LPO 叠加而成,辨识误差收敛因子 μ 取为 0.008。图 8 为期望位移和 GMA 实际输出位移随时间变化曲线,图 9 为期望位移和 GMA 实际输出位移的误差曲线,图 10 为期望位移对应的补偿控制信号曲线,图 11 为经过补偿控制以后期望位移对应的 GMA 实际输出位移曲线。

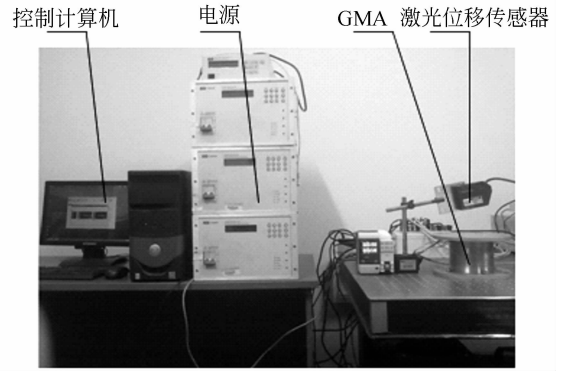


图 7 GMA 实验系统

Fig. 7 Experimental system of GMA

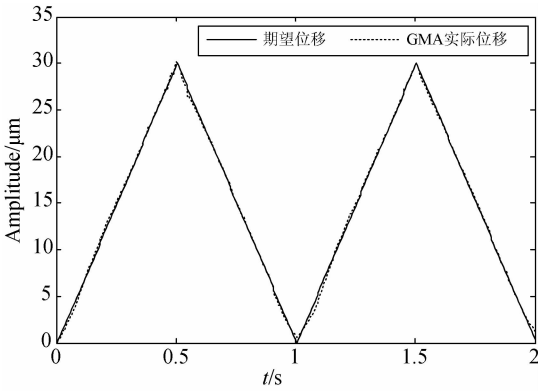


图 8 期望位移和实际位移对比

Fig. 8 Expectation displacement vs. actual displacement

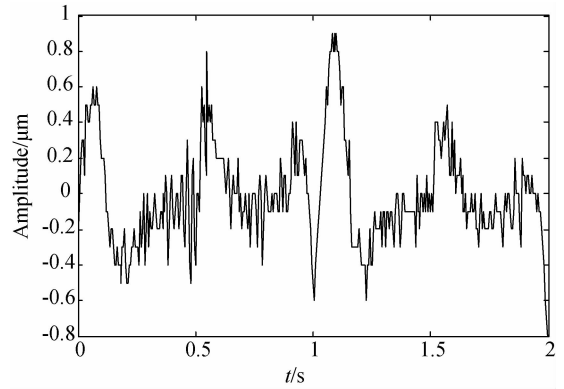


图 9 补偿控制误差

Fig. 9 Error of compensation control

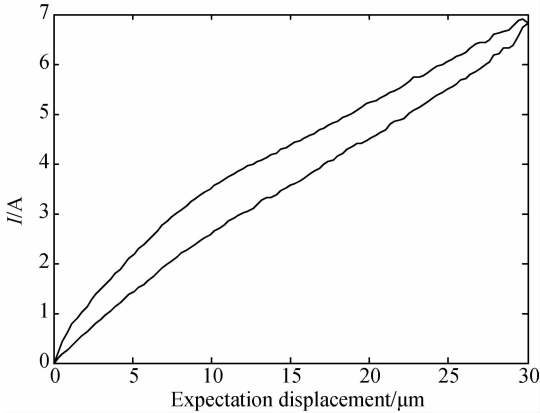


图 10 补偿控制信号

Fig. 10 Signal of compensation control

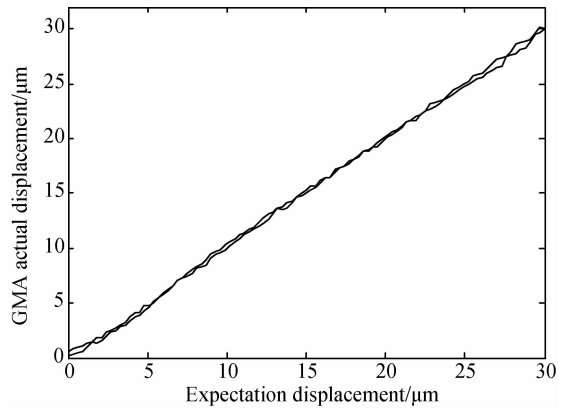


图 11 GMA 有控输出

Fig. 11 Actual output displacement corresponding to desired displacement after compensating control

从实验结果可以看到,经过逆模型实时补偿控制以后,磁滞对 GMA 驱动控制的影响被大幅减小。通过计算,控制误差均方值为 $0.309\ \mu\text{m}$,最大误差为 $0.9\ \mu\text{m}$ 。要进一步提高 GMA 驱动控制精度,可以增加构成 PI 模型的 LPO 个

数,LPO 个数越多,驱动控制的精度也越高,然而 LPO 越多计算量也越大;另外可以通过增加温控设备和引入隔振平台等措施减少温度及外界环境对 GMA 的影响也可以进一步提高控制精度。

6 结 论

采用 PI 模型对 GMA 磁滞现象进行了精确建模,模型预测精度达到了 $0.0379\ \mu\text{m}$ 。该模型简单、计算量小,通过对 PI 模型解析求逆进行实时补偿控制有效减小了磁滞误差,提高了

GMA 驱动控制精度,补偿控制精度为 $0.309\ \mu\text{m}$ 。另外,在需要超精密驱动场合,可以通过增加 LPO 个数,适当增大在线辨识收敛因子等途径增加驱动控制精度。基于 PI 模型的磁滞建模和实时磁滞补偿控制方法是 GMA 在大口径天文望远镜子镜精密驱动领域应用的关键技术之一,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐彭有,杨斌堂,孟光,等. 天文望远镜超磁致伸缩驱动器驱动模型及参数辨识[J]. 天文研究与技术, 2010,7(2):150-157.
XU P Y, YANG B T, MENG G, *et al.*. Modeling and parameter identification for giant magnetostrictive actuators applied in driving segmented mirrors [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2):150-157. (in Chinese)
- [2] 贾振元,王福吉,张菊,等. 超磁致伸缩执行器磁滞非线性建模与控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7):131-135.
JIA ZH Y, WANG F J, ZHANG J, *et al.*. Hysteresis nonlinearity modeling and control of giant magnetostrictive actuator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(7):131-135. (in Chinese)
- [3] 赖志林,刘向东,耿洁,等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6):1281-1290.
LAI ZH L, LIU X D, GENG J, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse Preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1281-1290. (in Chinese)
- [4] 李建强. 三自由度磁致伸缩驱动平台建模仿真与控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
LI J Q. *Research on a 3-D platform driven by giant Magnetostrictive actuator* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [5] JANOCCHA H, KUHNEN K. Real-time compensation of hysteresis and creep in piezoelectric actuators [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, 79(2000):83-89.
- [6] 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):549-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):549-556. (in Chinese).
- [7] 徐彭有. 超磁致伸缩驱动器精密位移驱动控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
XU P Y. *Research on the micro positioning control of giant magnetostrictive actuator* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese)
- [8] 赵春晖,张朝柱,王立国,等. 自适应信号处理技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009.
ZHAO CH H, ZHANG CH ZH, WANG L G, *et al.*. *Adaptive Signal Processing Techniques* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [9] WIDROW B, STEARNS S D. *Adaptive Signal Processing* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
- [10] KUHNEN K. Modeling identification and compensation of complex hysteresis nonlinearities A modified prandtl-ishlinskii approach [J]. *European Journal of Control*, 2003, 9(4):407-418.
- [11] KUHNEN K, JANOCCHA H. Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart-material systems [J]. *Control and Intelligent Systems*, 2001, 29(3):74-83.

作者简介:



杨斌堂(1970—),男,博士,副教授,博士研究生导师,1991年、1999年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,2005年于法国贡比涅技术大学和西北工业大学获得博士学位,主要研究方向为智能材料、结构与系统,精密驱动和振动主动控制。E-mail: btyang@sjtu.edu.cn



赵寅(1988—),男,硕士研究生,2010年于武汉大学获得学士学位,主要从事非线性建模和振动主动控制方面的研究。E-mail: zhaoyin104@yahoo.com.cn



彭志科(1974—),男,博士,教授,博士研究生导师,1998年、2002年于清华大学分别获得学士、博士学位,主要研究方向为非线性振动理论及方法,振动主动控制方法,信号的时频分析方法及理论,机械设备故障诊断方法。E-mail: z.peng@sjtu.edu.cn



孟光(1961—),男,博士,教授,博士研究生导师,1981年、1984年、1988年于西北工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为结构,转子动力学和智能材料结构与系统。E-mail: gmeng@sjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)