

文章编号 1004-924X(2015)03-0753-07

超磁致伸缩致动器的小脑神经网络 前馈逆补偿-模糊 PID 控制

孟爱华¹, 刘成龙¹, 陈文艺¹, 杨剑锋¹, 李明范²

- (1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 杭州浙大精益机电技术工程有限公司, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对超磁致伸缩致动器(GMA)在精密致动控制中存在的迟滞和位移非线性,提出了小脑神经网络(CMAC)前馈逆补偿结合模糊 PID 控制的新策略。通过小脑神经网络(CMAC)学习获得超磁致伸缩致动器动态逆模型用于对超磁致伸缩致动器迟滞非线性进行补偿;利用模糊 PID 控制降低小脑神经网络(CMAC)学习时的误差和抑制扰动,提高系统的跟踪控制性能,从而实现超磁致伸缩致动器的精密致动控制。仿真和实验结果表明:所采用的控制策略有效地消除了迟滞非线性的影响,系统的跟踪误差降低到了 5% 以下,而位移跟踪误差均方差仅为 0.58。此外,这种策略的特点是学习和控制同时进行,控制系统能够适应被控对象动态特性的变化,使系统具有较强的鲁棒性,同时也能够有效地抑制外界的干扰,提升系统的自适应控制性能。

关键词:超磁致伸缩致动器;迟滞非线性误差;小脑神经网络;前馈逆补偿控制;模糊 PID 控制

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0753

CMAC feedforward inverse compensation-fuzzy PID control for giant magnetostrictive actuator

MENG Ai-hua¹, LIU Cheng-long¹, CHEN Wen-yi¹, YANG Jian-feng¹, LI Ming-fan²

- (1. Mechanical Engineering College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
 2. Hangzhou Zhejiang University Jingyi Elettromechanical Technology Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310027, China)
- * Corresponding author, E-mail: mengah@hdu.edu.cn

Abstract: Giant magnetostrictive actuators show hysteresis and displacement nonlinear characteristics when they are used in the field of precision actuation control. To overcome the shortcomings, a kind of control strategy combined with the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC) feedforward inverse compensation and the fuzzy PID control was presented. A dynamic inverse model of the GMA was established with the CMAC on-line learning method to compensate the hysteresis nonlinearity of the GMA. A fuzzy PID controller was introduced in GMA to achieve the precision control of the GMA. Using this controller, the learning error of CMAC was decreased, the disturbance was eliminated and the tracking control performance of system was improved. The results came from

收稿日期:2014-04-30;修订日期:2014-06-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905051, No. 11202061);浙江省重点科技创新团队资助项目(No. 2010R50003);“海洋机电装备技术”浙江省重中之重学科资助项目

simulation and experiments show that the control method can effectively reduce the hysteresis error and the tracking error of the system is less than 5% and the displacement tracking error is 0.58 (mean square error). In addition, this strategy is characterized by learning and controlling at the same time, so that the control system adapts to the changes in the dynamic characteristics of controlled object and has a stronger robustness. Meanwhile, it eliminates external interference effectively and improves its adaptive control performance.

Key words: Giant Magnetostrictive Actuator (GMA); hysteresis nonlinear error; Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC); feed forward inverse compensation control; fuzzy PID control

1 引言

超磁致伸缩致动器 (Giant Magnetostrictive Actuator, GMA) 作为一种新型精密定位致动器, 具有响应速度快、输出力大、可靠性好等优点, 可实现快速、准确定位, 在超精密加工、精密定位以及微型机电系统等领域具有广阔的应用前景。然而 GMA 中的超磁致伸缩材料 (Giant Magnetostrictive Material, GMM) 存在饱和非线性、磁滞回环等不足, 造成 GMA 的驱动磁场输入与输出位移之间存在明显的迟滞非线性, 不仅影响开环系统的定位精度, 而且使闭环系统更不稳定, 不能满足精密致动的要求, 迫切需要采用合理的控制方式来解决^[1-4]。

目前国内外对 GMA 非线性控制技术方面的研究主要是基于物理或数学磁滞模型, 应用各种反馈补偿及智能控制方法对致动器输出的迟滞非线性进行补偿和控制, 例如自适应控制、磁滞逆补偿控制、神经网络控制和模糊控制等。李国康等^[5]提出一种参数自适应模糊 PID 控制器, 在过程参数变化缓慢及外界干扰较少的情况下, 可以有效改善 GMA 的动态和稳态性能; 李欣欣等^[6]建立了一种基于 Jiles-Atherton 模型 (简称 J-A 模型) 的磁滞补偿控制方法, 该方法能有效消除磁滞回环的影响, 提高 GMA 的定位精度, 但其抗干扰能力较差, 不能自适应实时调节; 杨凌霄等^[7]将 P-模糊 PID 控制策略应用到 GMA 中, 在工作环境稳定情况下取得了较好的控制效果; 王丽梅等^[8]提出基于径向基函数 (RBF) 神经网络整定 PID 控制, 在过程参数较少的情况下能有效减小磁滞非线性的影响, 并具有良好的抗干扰能力。但由于 GMA 的迟滞非线性较强, 过程参数甚至模型结构都会随时间和工作环境而变化, 因此要求在 GMA 控制过程中, 不仅过程参数的整定不

依赖于对象数学模型, 并且能够实现在线调整, 以满足实时控制的要求。由此, 将智能控制方法和 PID 控制方法融合在一起形成新型的智能 PID 控制器成为了目前 GMA 迟滞非线性控制的发展趋势。胡世峰等^[9]提出了一种基于小脑神经网络 (Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC) 前馈的常规 PID 实时滞回补偿控制策略, 在线性系统或者非线性较小的场合取得了较好的控制效果。但是常规 PID 对于非线性较强系统比如小磁滞环的控制中, 其参数不能自适应实时调整, 会造成较大误差, 不能满足精密致动的要求, 因此本文引入自适应能力更强的模糊 PID 控制器。利用 Jiles-Atherton 模型构建 GMA 的迟滞非线性动态模型, 在此基础上, 使用小脑神经网络补偿结合模糊 PID 控制, 构建 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器, 提出了一种实时迟滞非线性补偿控制策略, 实现了 GMA 的精密致动控制。

2 超磁致伸缩致动器动态迟滞模型

GMM 在外部驱动磁场作用下产生形变, 但其磁致伸缩运动具有明显的迟滞非线性, 因此若实现对 GMA 位移的精确控制, 关键是要准确描述 GMM 的磁滞回特性。目前, 针对 GMM 磁滞回特性的建模方法主要分为两类: 一类从材料内部机理出发, 建立物理模型, 其典型代表为 J-A 模型; 另一类不考虑材料的内部机理, 使用纯抽象的数学方法建立模型, 其典型代表为 Preisach 模型^[10]。由于 Preisach 模型较为复杂, 需辨识的参数较多, 不利于实时控制, 而 J-A 模型所使用的物理参数都会反映出驱动磁场的特性, 因此相比于 Preisach 模型, J-A 模型得到了更广泛地应用^[11]。

J-A 铁磁磁化理论模型由 Jiles-Atherton 根据 Weiss 分子场理论和微磁学理论提出, 在该模型中, 需要从 5 个方面来确定外加磁场 H 和磁化

强度 M 之间的关系^[6,12]:

$$H_e = H + \alpha M + H_\sigma = H + \tilde{\alpha} M, \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right], \quad (2)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \alpha(M_{an} - M_{irr})}, \quad (3)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}), \quad (4)$$

$$M = M_{irr} + M_{rev}. \quad (5)$$

式(1)~(5)反映了磁性材料的有效磁场 H_e 、无磁滞磁化强度 M_{an} 、不可逆磁化强度 M_{irr} 、可逆磁化强度 M_{rev} 、总磁化强度 M 之间的关系。 H 为外加磁场,其值为驱动磁场 H_d 和偏置磁场 H_b 之和,其中驱动磁场 H_d 是由激励电流 I 产生的,可通过公式 $H_d = nI$ (n 为单位长度线圈的匝数)求得;偏置磁场 H_b 是由永久磁铁产生的; αM 为材料内部磁畴间相互作用产生的磁场; H_σ 为预应力 σ_0 产生的磁场。参数 $\tilde{\alpha} \equiv \alpha + 9\lambda_s \sigma_0 / (2\mu_0 M_s^2)$,当 H 变大时,参数 $\delta \equiv +1$;当 H 减小时,参数 $\delta \equiv -1$ 。 M_s 为饱和磁化强度, α 为畴壁相互作用系数, a 为无磁滞磁化强度形状系数, k 为不可逆损耗系数, c 为可逆系数, μ_0 是真空磁导率。式(1)~(5)构成了 GMA 动态迟滞模型的仿真框图,如图 1 所示。但是模型中的不可逆磁化强度 M_{irr} 涉及的参数互相嵌套,不能由模块直接建立,由 Simulink 中的 S 函数功能建立;无磁滞磁化强度 M_{an} 由普通的 MATLAB-Fcn 模块建立。

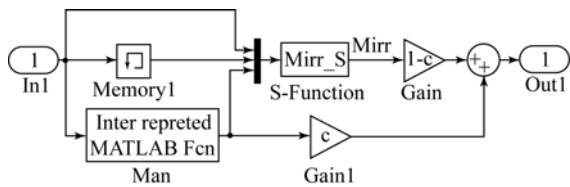


图 1 基于 Jiles-Atherton 模型的动态迟滞模型

Fig. 1 Dynamic hysteresis model based on Jiles-Atherton model

3 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器

3.1 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器原理

CMAC 前馈逆补偿控制器是基于表格查询式输入、输出的局部神经网络模型,具有较强的非线性映射能力,可学习任意维度非线性映射,且具有学习速度快、记忆稳定、收敛速度快、不易陷入极小局部值等优点,适用于 GMA 迟滞非线性的

实时控制^[13-14]。模糊 PID 控制器基于常规的 PID 控制,利用模糊集来表示控制规则的条件和操作,通过模糊控制规则进行推理,对 PID 控制器的 3 个参数进行优化设计。将来自反馈的实时信号按照给定的模糊控制规则模糊化,信号模糊化后输入模糊规则,经过模糊推理后,把最终的输出信号施加到执行机构,可实现自动调整控制器参数来适应不同的环境,且模糊 PID 控制对 GMA 迟滞非线性中的小磁滞环有良好的自适应能力^[5,15]。将 CMAC 前馈逆补偿控制器和模糊 PID 控制器相结合,构建 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器,其特点是可实现学习和控制同时进行,使控制系统能够适应被控对象动态特性的变化,从而具有较强的鲁棒性,同时也能够有效地抑制外界干扰。

图 2 所示为 GMA 高精度 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器的原理框图,其中 CMAC 前馈控制器用来通过 CMAC 神经网络学习获得 GMA 动态逆模型,从而对 GMA 迟滞非线性进行补偿;模糊 PID 反馈控制器用来减小 CMAC 神经网络学习的误差和抑制扰动,提高系统的跟踪控制性能。其中, $r(t)$ 为参考输入, $h(r(t))$ 为迟滞逆输入, $u(t)$ 为 CMAC 前馈逆补偿控制器和模糊 PID 控制器共同作用下的输入电压,位移跟踪误差 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。GMA 的输入控制量为 CMAC 前馈逆补偿控制器的输出 $u_1(t)$ 和模糊 PID 控制器的输出 $u_2(t)$ 之和。

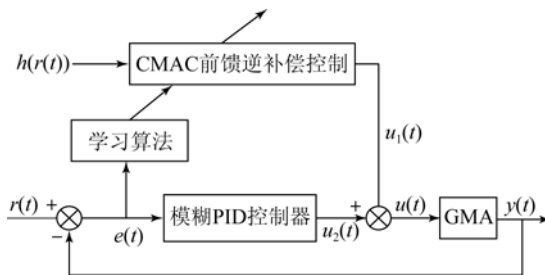


图 2 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器的原理框图

Fig. 2 Principle of CMAC feedforward inverse compensation-fuzzy PID controller

3.2 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器的仿真与分析

根据图 2 所示的原理框图,建立基于 Jiles-Atherton 模型的动态迟滞模型的 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器的 Simulink 仿真模型,如图 3 所示。其中输入驱动磁场强度为保存在 Simout 模块中的数据,由 Workspace 输入至 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制系统。

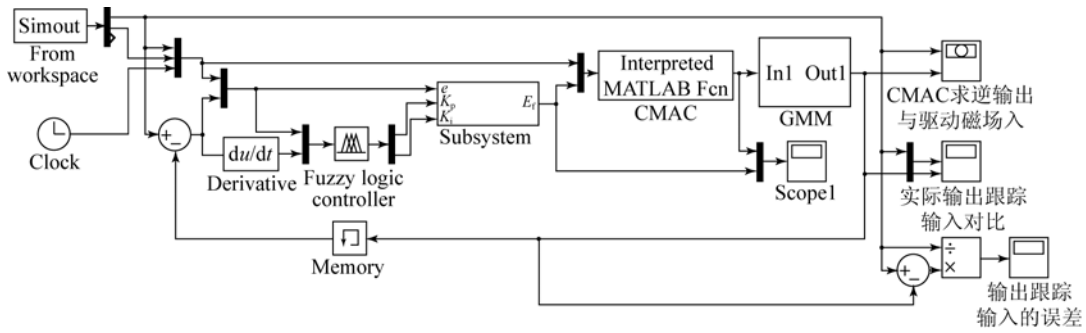


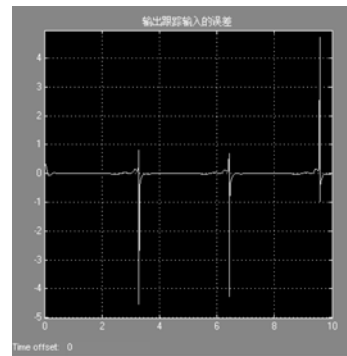
图 3 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of CMAC feedforward inverse compensation-fuzzy PID controller

为了检验所设计的 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器的控制效果,使用仿真采样周期 $T_s=0.1\text{ ms}$,仿真时间为 10 s 的信号进行动态仿真实验,仿真结果如图 4 所示。

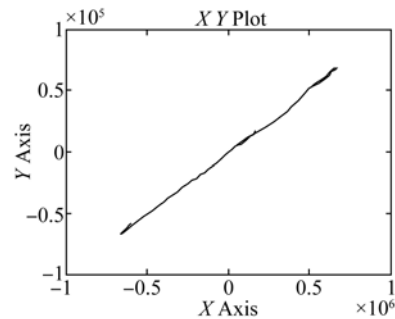
对图 4 中的结果进行分析,可以得出以下结论:由图 4(a)可知 CMAC 拟合逆模型的输出磁化强度可较好地跟踪期望的驱动磁场强度。由图 4(b)可知 GMA 实际输出跟踪输入的效果较好,对于所使用的输入信号的输出最大跟踪误差只有不到 5%,因此 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制对 GMA 迟滞非线性特性中的小磁滞环有较好的自适应能力。由图 4(c)可看出逆模型输出与期望驱动磁场的输入也有较好的一致性,验证了建立的 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器可以有效补偿 GMA 的迟滞非线性。

为了进一步验证 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制性能,采用常规 PID 结合 CMAC 前馈和模糊 PID 结合 CMAC 前馈的方法对微定位系统进行闭环控制,分别进行了阶跃响应仿真实验,得到了常规 PID 控制作用下和模糊 PID 控制作用下的阶跃响应曲线,结果如图 5 所示。



(b) 输出跟踪输入的误差

(b) Error of output tracking the input

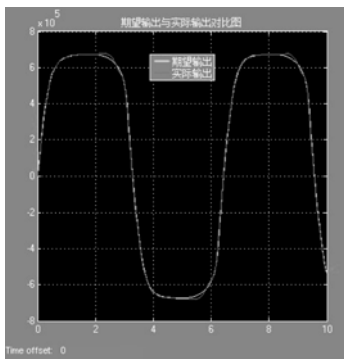


(c) 逆模型输出与期望驱动磁场输入

(c) Inverse model output and desired input

图 4 CMAC 前馈逆补偿-模糊 PID 控制器信号轨迹跟踪仿真结果

Fig. 4 Simulation results of CMAC feedforward inverse compensation-fuzzy PID controller



(a) 实际输出跟踪输入对比图

(a) Contrast figure of actual output tracking the input

从图 5 中可以看出,模糊 PID 控制器的调节速度略差于常规 PID 控制,但是常规 PID 控制器出现了较大的超调量 $M_p = 5.17\%$,而采用 CMAC 前馈控制结合模糊 PID 控制的阶跃响应曲线并不存在超调问题,且响应速度与稳态误差等时域特性相比常规 PID 控制都得到了一定程度的改善。

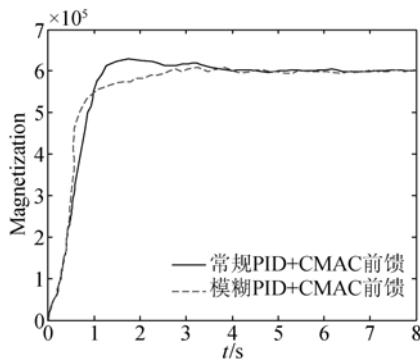


图5 常规PID控制与模糊PID控制阶跃响应对比
Fig. 5 Comparison of step responses for conventional PID control and fuzzy PID control

4 实验验证

GMA 控制系统测量实验平台的测试原理如图6所示,测量数据包括由电涡流位移传感器测得的GMA位移输出,以及在驱动电流激励下的线圈磁场强度(可以转化为由数据采集卡采集的线圈感应电压值)。

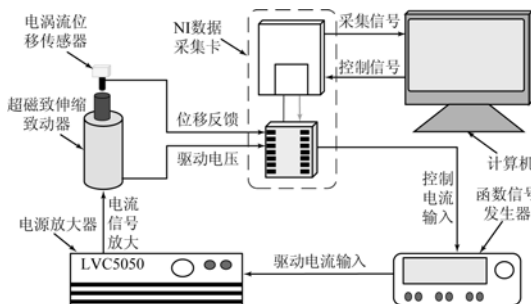


图6 GMA的实验测试原理图
Fig. 6 Principle of GMA experimental tests

以幅值为 $45 \mu\text{m}$, 周期为 1 s 的正弦波作为期望位移进行位置控制实验,图7所示为期望位移和GMA实际输出位移的对比曲线,图8所示为期望位移和GMA实际输出位移的各时刻位置误差曲线,图9所示为控制系统为补偿GMA迟滞非线性发出的控制信号。

由图7所示知,CMAC前馈逆补偿-模糊PID控制使得GMA中迟滞非线性被基本消除,实际位移输出曲线几乎无偏差跟踪期望位移曲线;由图8可知,只有在正弦信号波峰和波谷处的小磁

滞回环造成了较大的位移误差,这主要是由于建立迟滞逆模型会受到神经网络的泛化参数和量化精度的影响,而迟滞的波峰、波谷处数值斜率变化最大,因此受影响最明显,产生的误差也最大。通过选取合适的迟滞逆模型的神经网络泛化参数和量化精度,对比几组参数的计算结果,选取最优的模型参数可以降低误差。

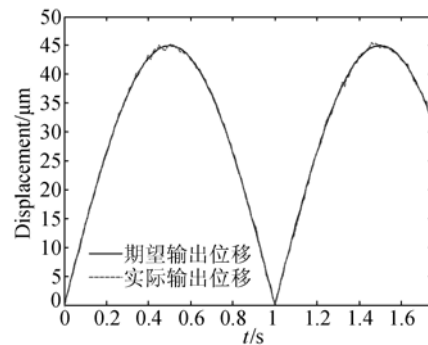


图7 期望位移与输出位移对比曲线
Fig. 7 Contrast curves of expected displacement and output displacement

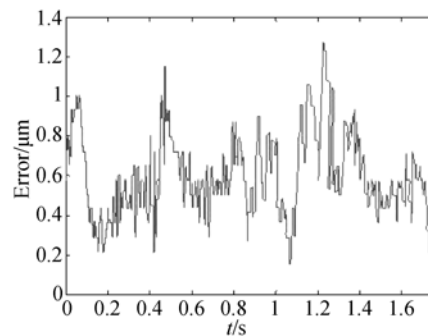


图8 GMA位移误差曲线
Fig. 8 Curves of GMA displacement error

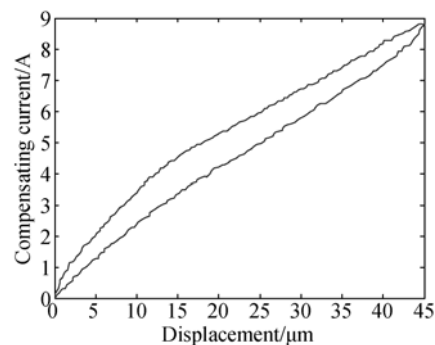


图9 位移补偿控制信号
Fig. 9 Curve of displacement compensation control signal

经计算误差的均方值仅有 $0.58 \mu\text{m}$, 进一步验证了所建立的控制系统可以有效减小迟滞误差、提高 GMA 的可控精度。

对 GMA 进行位移特性实验时, 实验周期控制较短, 主要是为了克服线圈及 GMM 温度升高产生热膨胀对位移的影响。GMA 若在工程实践中普及使用, 要面对长时间工作问题, 就必须解决温度升高对其定位精度带来的影响。有两方向可以尝试: (1) 使用液体循环或者风冷循环的冷却系统, 引入更容易传热散热的材料导热, 提高驱动器的散热能力; (2) 驱动磁场使用其他方式, 摒除线圈电磁感应磁场找到新型磁场源。

参考文献:

- [1] 李欣欣, 王文, 陈戡恒, 等. 超磁致伸缩致动器的广义最小方差-模糊 PID 控制方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4):642-649.
- LI X X, WANG W, CHEN J H, *et al.*. Generalized minimum variance-fuzzy PID control method for giant magnetostrictive actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):642-649. (in Chinese)
- [2] 李永. 超磁致伸缩致动器驱动系统关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- LI Y. *Research on the Key Technologies of Giant Magnetostrictive Actuator Drive System* [D]. Jinan: Shandong University, 2013. (in Chinese)
- [3] OLABI A G, GRUNWALD A. Design and application of magnetostrictive materials [J]. *Materials and Design*, 2008, 29(2):469-483.
- [4] ZHU Z W, ZHANG W D, XU J. Nonlinear dynamic characteristics of giant magnetostrictive sensor [J]. *Sensors and Materials*, 2014, 26(5):319-324.
- [5] 李国康, 杨申. 超磁致伸缩微位移系统的模糊 PID 控制方法 [J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(6):1025-1027.
- LI G K, YANG SH. Fuzzy-reasoning based self-tuning PID control for ultra-magnetostriction micro-displacement [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(6):1025-1027. (in Chinese)
- [6] 李欣欣, 王文, 陈戡恒, 等. Jiles-Atherton 模型的超磁致伸缩驱动器磁滞补偿控制 [J]. *光学精密工*

5 结 论

本文利用 Jiles-Atherton 模型构建了超磁致伸缩致动器的动态迟滞模型, 在此基础上, 提出一种 CMAC 前馈逆补偿结合模糊 PID 控制策略。仿真结果表明该控制系统将最大跟踪误差降低至 5% 以下, 实验得出的 GMA 位移跟踪误差均方差仅有 $0.58 \mu\text{m}$, 表明了该控制策略的有效性。基于该策略的 GMA 控制系统响应速度快、无超调、控制精度高, 可以有效减小 GMA 的迟滞非线性误差, 保证 GMA 位移输出精度, 提高了系统的可控性能, 在 GMA 的动态控制方向具有良好的应用前景。

程, 2007, 15(10):1558-1563.

- LI X X, WANG W, CHEN J H, *et al.*. Hysteresis compensation of giant magnetostrictive actuator based on Jiles-Atherton model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1558-1563. (in Chinese)
- [7] 杨凌霄, 陶玉昆, 钟颖. 超磁致伸缩执行器的 P-模糊 PID 控制 [J]. *计算机仿真*, 2011, 28(1):214-217.
- LANG L X, TAO Y K, ZHONG Y. Control with P-Fuzzy PID for Giant magnetostrictive actuator [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(1):214-217. (in Chinese)
- [8] 王丽梅, 董接吉. 超磁致伸缩致动器的基于 RBF 神经网络整定 PID 控制 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2013(5):76-79.
- WANG L M, DONG A J. Baesd on RBF neural network self-tuning PID control of giant magnetostrictive actuator [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013(5):76-79. (in Chinese)
- [9] 胡世峰, 朱石坚, 楼京俊, 等. 基于 CMAC 小脑神经网络的超磁致伸缩作动器高精度控制的仿真研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(3):68-72.
- HU SH, ZHU SH J, LOU J J, *et al.*. Study on the simulation of the giant magnetostrictive actuator high-precision control based on CMAC neural network [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(3):68-72. (in Chinese)
- [10] 王彬, 屈稳太, 郭义杰, 等. 超磁致伸缩材料磁滞建模方法国内外研究现状评述 [J]. *功能材料*, 2013, 44(16):2295-2300.
- WANG B, QU W T, WU Y J, *et al.*. Review on

- hysteretic modeling methods of giant magnetostrictive materials [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(16):2295-2300. (in Chinese)
- [11] 王博文,曹淑瑛,黄文美,等. 超磁致伸缩致动器的数学模型和控制技术 [J]. *河北工业大学学报*, 2013, 42(1):06-13.
WANG B W, CAO SH Y, HUANG W M, *et al.*. Mathematical model and control technology of giant magnetostrictive actuator [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2013, 42(1): 06-13. (in Chinese)
- [12] MENG A H, ZHU J M, KONG M, *et al.*. Modeling of Terfenol-D biased minor hysteresis loops [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1):552-557.
- [13] RODRIGUEZ F O, RUBIO J D, GASPAR C R M, *et al.*. Hierarchical fuzzy CMAC control for nonlinear systems [J]. *Neural Comput & Applic*, 2013, 23(Suppl 1):323-331.
- [14] 陈瑾. 基于CMAC的网络控制系统控制方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
CHEN J. *Research on Control Methods based on CMAC for Network Control Systems* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [15] 王述彦,师宇,冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究 [J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(01):166-172.
WANG SH Y, SHI Y, FENG ZH X. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(1): 166-172. (in Chinese)

作者简介:



刘成龙(1988—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,研究方向为智能材料及器件的性能分析与控制。E-mail: lengyueawen@163.com

导师简介:



孟爱华(1978—),女,山东莱芜人,博士,副教授,硕士生导师,2000年于山东大学获得学士学位,2006年于浙江大学获博士学位,主要从事智能材料及器件性能分析与控制、机电一体化设备开发等方面研究。E-mail: mengah@hdu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)