

文章编号 1004-924X(2015)增-0417-08

超磁致伸缩驱动精密定位平台的动态递归神经网络 前馈-PD 反馈控制

喻曹丰, 王传礼*, 魏本柱, 张 辉

(安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:提出了采用 Jiles-Atherton 磁滞模型理论和动态递归神经网络(DRNN)前馈-PD 反馈控制策略来提高超磁致伸缩驱动精密定位平台的定位精度。通过 Jiles-Atherton 磁滞模型建立了能准确描述其磁滞非线性的数学模型;采用 DRNN 学习获得其逆动态模型并用于磁滞非线性补偿;利用 PD 闭环反馈控制补偿 DRNN 的映射误差和抑制扰动,从而提高超磁致伸缩驱动精密定位平台的定位精度。研究表明:Jiles-Atherton 磁滞模型能较好地描述超磁致伸缩驱动精密定位平台的磁滞非线性特征;DRNN 前馈-PD 反馈控制策略能有效消除系统的非线性特性,对提高超磁致伸缩驱动精密定位平台的定位精度具有实际意义。

关键词:超磁致伸缩驱动器(GMA);磁滞非线性;动态递归神经网络(DRNN);精密定位平台;定位精度

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0417

DRNN feedforward-PD feedback control for precision positioning stage based on giant magnetostrictive actuator

YU Cao-feng, WANG Chuan-li*, WEI Ben-zhu, ZHANG Hui

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

* Corresponding author, E-mail: chlwang@aust.edu.cn

Abstract: The Jiles-Atherton hysteresis model and the Dynamic Recurrent Neural Network (DRNN) feedforward-PD feedback control strategy were adopted to improve the positioning accuracy of precision positioning stage based on a Giant Magnetostrictive Actuator (GMA). An accurate hysteresis nonlinearity model of the precision positioning stage was established with the Jiles-Atherton model. A dynamics inverse model of the precision positioning stage was established with the DRNN learning method to compensate the hysteresis nonlinearity characteristic. The closed-loop PD feedback control was used to compensate the mapping error and to suppress the disturbance of DRNN. Using these control methods, the positioning accuracy of the precision positioning stage was improved. The research results show that the Jiles-Atherton hysteresis model can describe the hysteresis nonlinear characteristic of the precision positioning stage, and that DRNN feedforward-PD feedback control

收稿日期:2015-04-05;修订日期:2015-05-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075001, No. 51205002);安徽省科技计划资助项目(No. 1301022074)

strategy can eliminate the nonlinear characteristics of the system, which has practical significance for improving positioning accuracy of the precision positioning stage based on the GMA.

Key words: Giant Magnetostrictive Actuator(GMA); hysteresis nonlinearly; Dynamic Recurrent Neural Network(DRNN); positioning stage; positioning accuracy

1 引言

超磁致伸缩精密定位平台是采用超磁致伸缩驱动器(giant magnetostrictive actuator, GMA)作为驱动系统的精密定位装置。与采用传统压电陶瓷驱动器的定位平台相比,采用 GMA 的定位平台具有响应速度快、控制精度高、承受负载大等优势^[1-3]。但由于 GMA 是利用超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material, GMM)的磁致伸缩效应制成,具有铁磁性功能材料的饱和非线性、磁滞现象,使得 GMA 的输入磁场和输出磁化强度之间存在磁滞非线性,导致输出位移的回程误差高达 20%左右^[4],不能满足精密定位的要求,因此迫切需要建立精确的 GMA 磁滞非线性模型,采用合理的控制方式,提高 GMA 的控制精度,以拓宽 GMM 在精密、超精密定位领域的应用范围。

目前,国内外针对 GMM 磁滞非线性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,如 Jiles-Atherton 模型;另一类使用纯数学方法建立数学模型,如 Preisach 模型^[5]。因 Preisach 模型较复杂,需要辨识的参数较多,相比较而言,Jiles-Atherton 模型因所使用的物理参数均能反映出驱动磁场的特性,而获得了广泛应用^[6]。李欣欣等^[7]基于 Jiles-Atherton 模型建立了磁滞补偿控制系统,有效消除了磁滞影响,提高了定位精度,但抗干扰能力较差;李国康等^[8]采用一种参数自适应模型 PID 控制器,在外界干扰较少的情况下,有效改善了 GMA 的动态和稳态性能,但只适用于参数变化较慢的情况;Dapino 等^[9]将 Jiles-Atherton 模型和二次畴转磁致伸缩模型结合,建立了描述输入电流与输出位移之间的磁滞模型;孟爱华等^[10]提出了小脑神经网络前馈逆补偿-模糊 PID 控制策略,有效地消除了磁滞非线性的影响,但控制过程需要占用大量的控制器内存,降低了执行效率。以 Jiles-Atherton 模型为基础,建立 GMA 定位平台的磁滞非线性

模型,使用 DRNN 前馈-PD 反馈控制,构建一个学习和控制同时进行的控制器,改善系统的动态性能,提高 GMA 精密定位平台的定位精度。

2 精密定位平台结构与工作原理

2.1 精密定位平台结构

精密定位平台结构如图 1 所示,由 GMA、柔性铰链机构和工作台等组成,其中 GMA 由底座、GMM 棒、驱动线圈、永磁圆筒、外壁套筒、导磁环、预压碟簧和输出杆等部分组成,其结构如图 1(a)所示;柔性铰链和工作台结构如图 1(b)所示。

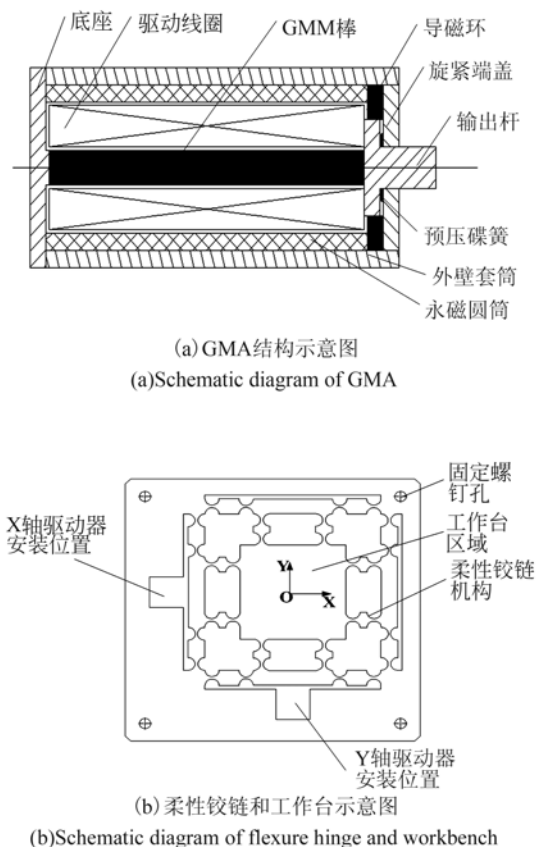


图 1 二维精密定位平台结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D precision positioning table

2.2 精密定位平台工作原理

工作时,GMA 内驱动线圈中通入电流,使驱动器内部产生磁场,GMM 棒在磁场的作用下产生一定出力,出力加载到柔性铰链机构上使得定位平台产生移动,输入不同的控制电流实现不同大小输出位移,从而实现定位的功能。根据定位平台的工作原理,可以把定位平台分为 GMA 和柔性铰链两部分,其中 GMA 包括线圈和 GMM 棒。其工作流程如图 2 所示。

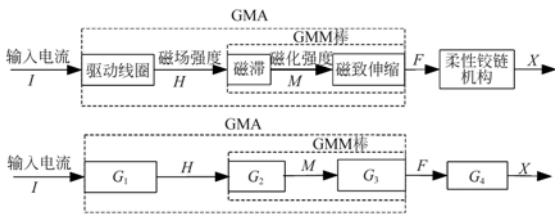


图 2 定位平台工作流程及方框示意图

Fig. 2 Work flow and framework of positioning stage

3 精密定位平台数学模型

根据精密定位平台的工作原理可将其分为磁场模型、磁滞模型、磁致伸缩模型和柔性铰链模型。

3.1 磁场模型

超磁致伸缩驱动精密定位平台的 GMA 采用

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(M_{an} - M) + ck\delta \frac{dM_{an}}{dH_e}}{k\delta - (\alpha + \frac{9\lambda_s \sigma_0}{2u_0 M_s^2})(M_{an} - M) - k\delta c(\alpha + \frac{9\lambda_s \sigma_0}{2u_0 M_s^2}) \frac{dM_{an}}{dH_e}}, \quad (3)$$

式中:可逆分量系数 c 、畴壁相互作用系数 α 、无磁滞磁化强度形状系数 a 、不可逆损耗系数 k 、饱和磁化强度 M_s 。5 个参数可通过实验 λ - H 曲线经过参数辨识获得,在此引用 A. Nouicer 参数辨识的结果^[14],其值如表 1 所示。

表 1 参数辨识结果

Tab.1 Results of parameters identification

参数名	c	α	a	k	M_s /(A/m)	λ_s /(ppm)
结果	5.7080×10^{-4}	1.9903×10^{-8}	6200.2	2476.6	6.5×10^5	1500

组合式驱动方式,即磁场由驱动线圈产生的驱动磁场和永磁圆筒产生的偏置磁场的合成。根据电磁场知识^[11]可得:

$$H(t) = H_q + H_p = f_q I(t) + H_p, \quad (1)$$

式中: $H(t)$ 为 GMA 的驱动磁场; H_q 为线圈产生的驱动磁场; H_p 为永磁圆筒产生的偏置磁场; f_q 为线圈磁场系数; $I(t)$ 为线圈电流。

3.2 Jiles -Atherton 模型

Jiles-Atherton 模型是 Jiles 和 Atherton 基于铁磁材料的畴壁理论建立的磁滞模型,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^[12-13]。

$$\begin{cases} H_e = H + \alpha M + H_\sigma = H + \alpha' M \\ M_{an} = M_s [\coth(\frac{H_e}{a}) - \frac{a}{H_e}] \\ \frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \alpha'(M_{an} - M_{irr})} \\ M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \\ M = M_{irr} + M_{rev} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: H_e 为磁性材料的有效磁场; M_{an} 为无磁滞磁化强度; M_{irr} 为不可逆磁化强度; M_{rev} 为可逆磁化强度; M 为总磁化强度; H 为外加磁场; H_σ 为预应力 σ_0 产生的诱发磁场;参数 $\alpha' = \alpha + 9\lambda_s \sigma_0 / (2u_0 M_s^2)$,当 $dH/dt > 0$ 时, $\delta = 1$;当 $dH/dt < 0$ 时, $\delta = -1$ 。

经推导得出,磁化强度 M 和驱动磁场 H 之间的关系为:

3.3 磁致伸缩模型

根据二次畴转模型^[15],对于各项同性的材料,可得到磁致伸缩应变 λ 与磁化强度 M 的关系为:

$$\lambda = \frac{3\lambda_s}{2M_s^2} M^2, \quad (4)$$

式中: M_s 为饱和磁化强度; λ_s 为饱和磁致伸缩系数。

根据材料力学知识,磁致伸缩力 F 为:

$$F = E^H A_r \lambda, \quad (5)$$

式中: E^H 为 GMM 棒的弹性模量; A_r 为 GMM 棒的横截面积。

3.4 柔性铰链模型

如图 3 所示的柔性铰链,其杆部截面是矩形,铰链由 2 个垂直于端面的对称圆柱面切割而成。其几何尺寸为宽度 b ,最小厚度 t ,切割半径 R ,高度 h ,圆心角 θ_r ,设铰链所受力矩为 M ,铰链角变形为 θ 。

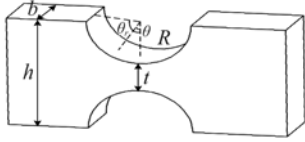


图 3 柔性铰链的几何结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flexure hinge

当最小厚度 t 远小于高度 h 时,根据 Paros 给出的柔性铰链转动刚度简化计算公式^[16]可得:

$$\frac{\theta}{M} = \frac{9\pi R^{\frac{1}{2}}}{2Eb t^{\frac{5}{2}}}, \quad (6)$$

式中: E 为柔性铰链材料的弹性模量; M 为铰链所受力矩, θ 为铰链产生的变形角。

由柔性铰链机构的运动原理可知,当定位平台受到力 F 作用时,其柔性铰链结构变形的简化图如图 4 所示。

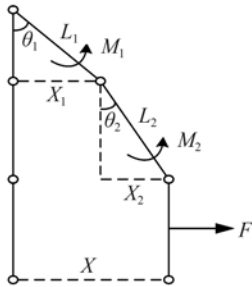


图 4 柔性铰链机构变形简化示意图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of flexible hinge deformation

由机械原理和材料力学知识可得,

$$M_1 = \frac{F}{2} \cdot L_1, \theta_1 = M_1 \cdot \frac{9\pi R^{\frac{1}{2}}}{2Eb t^{\frac{5}{2}}}, \quad (7)$$

$$X_1 = L_1 \cdot \tan \theta_1 \approx L_1 \cdot \theta_1,$$

$$M_2 = \frac{F}{2} \cdot L_2, \theta_2 = M_2 \cdot \frac{9\pi R^{\frac{1}{2}}}{2Eb t^{\frac{5}{2}}}, \quad (8)$$

$$X_2 = L_2 \cdot \tan \theta_2 \approx L_2 \cdot \theta_2,$$

则定位平台受力 F 作用时,其所产生的位移 X 为:

$$X = X_1 + X_2 = F \cdot \frac{9\pi R^{\frac{1}{2}}(L_1^2 + L_2^2)}{4Eb t^{\frac{5}{2}}}. \quad (9)$$

4 DRNN 前馈-PD 反馈控制器

4.1 DRNN 前馈-PD 反馈控制器原理

DRNN 是具有固定的权值、外部的输入和内部的状态的神经网络,可将其看作以权值和外部输入为参数的,关于内部状态的行为动力学^[1]。根据 GMA 的磁滞非线性特性,构造三层 DRNN,其结构如图 5 所示,有 M 个输入节点、 N 个隐含层节点、1 个输出节点。

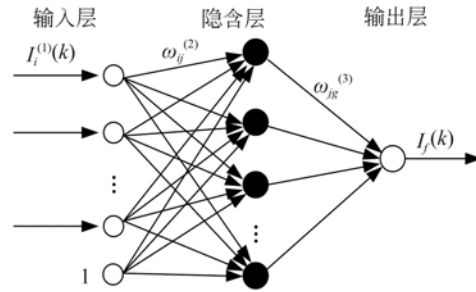


图 5 动态递归神经网络结构

Fig. 5 The structure of DRNN

DRNN 输入层节点输出为:

$$\begin{cases} O_i^{(1)}(k) = I_i^{(1)}(k), i = 1, 2, \dots, M-1 \\ O_M^{(1)}(k) = I_M^{(1)}(k) \equiv 1 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $O_M^{(1)}(k)$ 为输入层阈值; $I_i^{(1)}(k) = [r(k), y(k-1), \dots, y(k-n), I(k-1), \dots, I(k-m)]^T$ 。

DRNN 隐含层输入、输出为:

$$\begin{cases} I_j^{(2)}(k) = \omega_j^D O_j^{(2)}(k-1) + \sum_{i=1}^M \omega_{ij}^{(2)} O_i^{(1)}(k) \\ O_j^{(2)}(k) = f[I_j^{(2)}(k)], j = 1, 2, \dots, N \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $\omega_{ij}^{(2)}$ 为连接输入层节点与隐含层节点的权系数; ω_j^D 为隐含层节点的反馈权系数; $f[\cdot]$ 为隐含层的激活函数。

DRNN 输出层的输入、输出为:

$$\begin{cases} I_g^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^N \omega_{jg}^{(3)} O_j^{(2)}(k) \\ u_l(k) = O_g^{(3)}(k) = g[I_g^{(3)}(k)], g = 1 \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $\omega_{jg}^{(3)}$ 为连接隐含层节点与输出层节点的权

系数; $g[\cdot]$ 为输出层的激活函数。

GMA 精密定位平台的 DRNN 前馈 PD 反馈控制系统结构如图 6 所示。由 DRNN 控制器实现前馈控制,学习 GMA 精密定位平台的近似逆动态模型,由 PD 控制器实现闭环反馈控制,提高系统位移输出的性能。

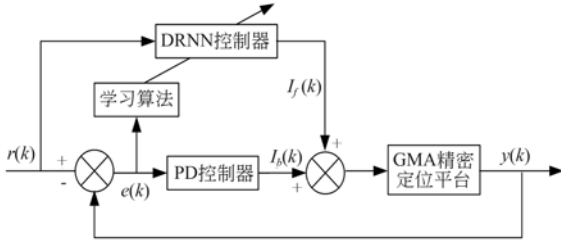


图 6 DRNN 前馈-PD 反馈控制系统结构

Fig. 6 Principle of DRNN feedforward-PD controller

图 6 中, $r(k)$ 为参考输入信号; $y(k)$ 为 GMA 精密定位平台的输出位移; 进入 GMA 精密定位平台的总控制量 $I(k)$ 为反馈控制信号 $I_b(k)$ 和前馈控制信号 $I_f(k)$ 之和, 即:

$$I(k) = I_b(k) + I_f(k), \quad (13)$$

4.2 模型仿真与分析

根据各部分建立的数学模型,在 MATLAB / SIMULINK 平台中搭建了超磁致伸缩驱动精密定位平台的 DRNN 前馈逆补偿 PD 反馈控制仿真模型,其仿真框图如图 7 所示,其中超磁致伸缩驱动精密定位平台的模型的仿真如图 8 所示, Jiles-Atherton 模型仿真如图 9 所示,其中图 7 中 GMA 精密定位平台的逆模型和图 9 中的不可逆磁化强度 M_{irr} 因计算复杂且存在互相嵌套,采用 SIMULINK 中的 S-Function 模块建立。

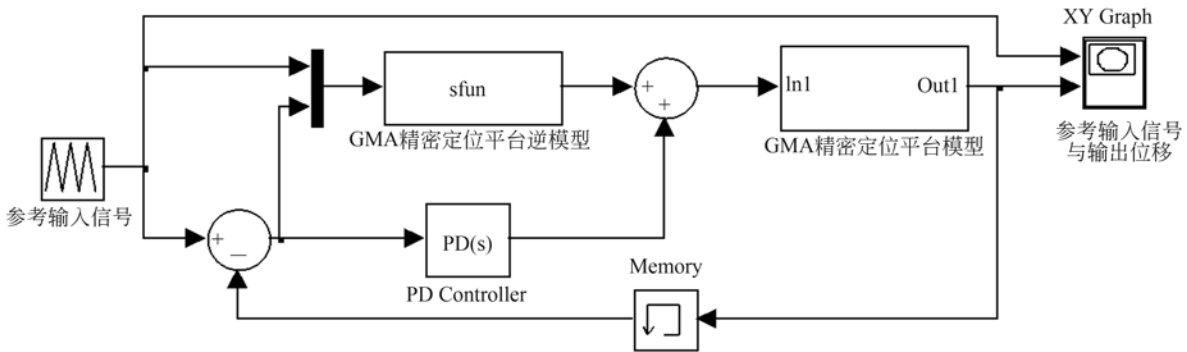


图 7 DRNN 前馈逆补偿-PD 反馈控制仿真模型

Fig. 7 Simulation model of DRNN feedforward inverse compensation-PD control

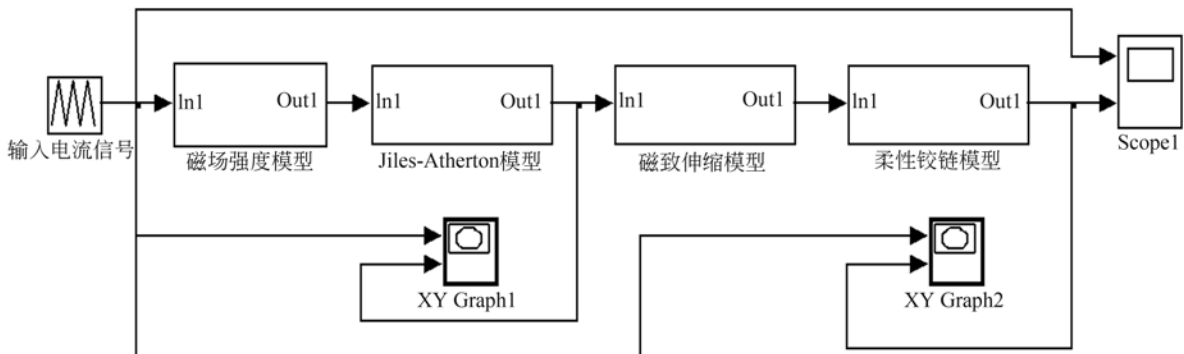


图 8 超磁致伸缩驱动精密定位平台的仿真模型

Fig. 8 Simulation model of precision positioning stage based on GMA

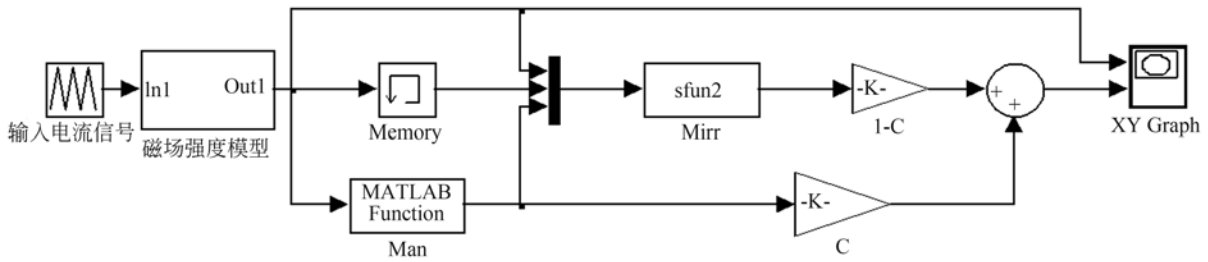


图 9 Jiles-Atherton 仿真模型

Fig. 9 Simulation model of Jiles-Atherton model

在 GMA 驱动线圈中接入电流信号, 电流强度以 $0 \sim 2 \sim 0$ A 进行线性变化。根据图 9 和图 8 所示的模型, 仿真后得到, Jiles-Atherton 模型输出的磁化强度 M 和定位平台的输出位移 y 与输入电流 I 之间的关系曲线分别如图 10 和图 11 所示。

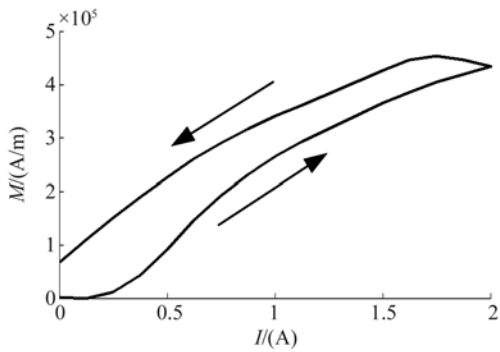


图 10 磁化强度与输入电流关系曲线

Fig. 10 Curve between magnetization M and current I

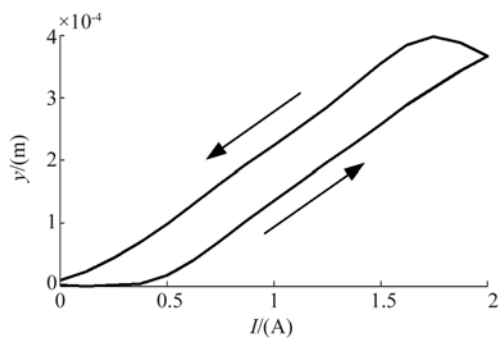


图 11 输出位移与输入电流关系曲线

Fig. 11 Curve between displacement y and current I

由图 10 可以看出, Jiles-Atherton 磁滞模型能有效的描述超磁致伸缩精密定位平台因超磁致

伸缩材料而具有的磁滞非线性特性。由图 11 可以看出, 超磁致伸缩精密定位平台存在回程误差, 需要设计相应的误差补偿器进行补偿。

为了消除磁滞非线性和减小回程误差, 采用动态递归神经网络结构和误差反向传播学习算法修正网络权值相结合的方式在线训练 GMA 精密定位平台的逆模型, 得到逆模型输出的控制信号与输入的电流信号对比如图 12 所示。按图 5 所示的模型, 即采用 DRNN 前馈-PD 反馈控制, 仿真后得到参考输入信号与输出位移对比图, 如图 13 所示。

由图 12 可以看出, 逆模型的实际输出信号与理想输出信号基本吻合, 从而验证了采用动态递归神经网络结构和误差反向传播学习算法修正网络权值相结合的方式训练 GMA 精密定位平台的逆模型的有效性。

由图 13 可以看出, 系统的输出位移跟随参考输入信号进行变化, 且跟踪误差较小, 从而说明了采用逆模型控制, 能有效消除系统的非线性特性, 能提高系统输出位移的控制精度。

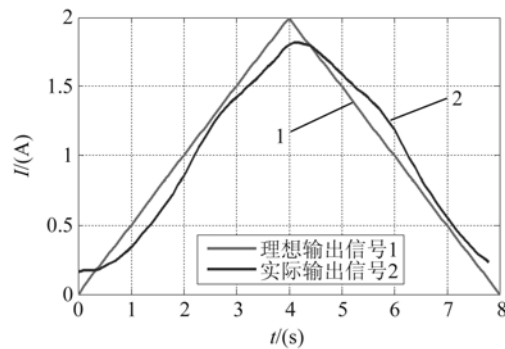


图 12 逆模型理想输出信号与实际输出信号对比图

Fig. 12 Contrast curve between ideal output signal and actual output signal

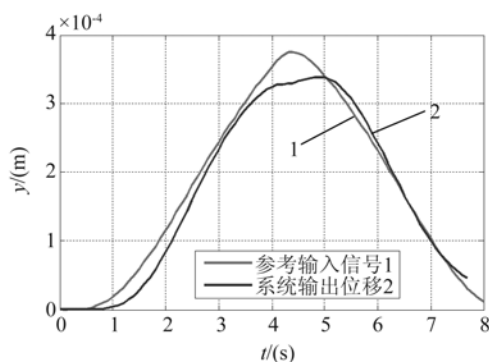


图 13 参考输入信号与输出位移关系

Fig. 13 Curve between output displacement y and reference input signal

参考文献:

- [1] 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 B W, CAO SH Y, HUANG W M. *Magnetostrictive Materials And Devices* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 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 Y C, LI Y S. A Novel Jet Pipe Servo Valve Driven by Giant Magnetostrictive Actuator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010(4):574-577. (in Chinese)
- [3] 李欣欣,王文,陈戡恒,等. 超磁致伸缩驱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]. 2008, 16(4):642-649. (in Chinese)
- [4] 贾振元,王福吉,郭东明. 功能材料驱动的微执行器及其关键技术[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12):61-67.
JIA Z Y, WANG F J, GUO D M. Functional Material Driving Microactuator And Its Key Technology [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(12):61-67. (in Chinese)
- [5] 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.

5 结 论

本文在经典 Jiles-Atherton 磁滞模型的基础上建立了超磁致伸缩驱动精密定位平台的数学模型,并采用了动态递归神经网络(DRNN)前馈-PD 反馈控制策略在线学习获得系统的逆补偿模型。仿真模拟研究表明, Jiles Atherton 磁滞模型能较好的描述超磁致伸缩驱动精密定位平台的磁滞非线性特性,动态递归神经网络(DRNN)前馈-PD 反馈控制策略能有效消除系统的非线性特性,在提高超磁致伸缩驱动精密定位平台的定位精度方面具有良好的应用前景。

- WANG B, QU W T, WU Y J, *et al.*. Review on Hysteretic Modeling of Giant Magnetostrictive Materials [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 16:2295-2300. (in Chinese)
- [6] 王博文,曹淑英,黄文美,等. 超磁致伸缩制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)
- [7] 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]. 光学精密工程, 2007, 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, 10:1558-1563. (in Chinese)
- [8] 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 Turning PID Control For Ultra-magnetostriction Microdisplacement [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(6):1025-1027. (in Chinese)
- [9] DAPINOO M J, SMITH R C, FLATAU A B. Structural Magnetic Strain Model For Magnetostrictive Transducers [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(3):545-556.

- [10] 孟爱华,刘成龙,陈文艺,等.超磁致伸缩制动器的小脑神经网络前馈逆补偿-模糊 PID 控制[J].*光学精密工程*,2015,03:753-759.
MENG A H, LIU C L, CHEN W Y, *et al.*. CMAC Feedforward Inverse Compensation-fuzzy PID Control For Giant Magnetostrictive Actuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015,03: 753-759. (in Chinese)
- [11] 戴道生,钱昆明.铁磁学(上册)[M].科学出版社,1987.
DAI D S, QIAN K M. *The Ferromagnetism (Volume 1)*[M]. Beijing: Science Press,1987. (in Chinese)
- [12] JILES D C, Atherton D L. Ferromagnetic Hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,1983, 19(5): 2183-2185.
- [13] SABLİK M J,JILES D C. A Model For Magnetostriction Hysteresis[J]. *J. Appl. Phys.*,1988,64 (10):5402-5404.
- [14] NOUICER A, NOUICER E, MAHTALI M, *et al.*. A Neural Network Modeling of Stress Behavior in Nonlinear Magnetostrictive Materials [J]. *J. Supercond. Nov. Magn.*,2013, 26: 1489-1493.
- [15] JILES D C, THOELKE J B, DEVINE M K. Numerical Determination of Hysteresis Parameters for The Modeling of Magnetic Properties Using The Theory of Ferromagnetic Hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,1992,28(1):27-35.
- [16] PAROS J M, WEISBORO L. How to Design Flexure Hinges[J]. *Mach. Des.*,1965, 37(27): 151-157.

作者简介:



喻曹丰(1987—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要从事功能材料及其控制技术研究。E-mail: yucaofeng@126.com

导师简介:



王传礼(1964—),通讯作者,男,安徽淮南人,博士,教授,博士生导师,2005年于浙江大学获博士学位,主要从事流体传动与控制技术、功能材料应用、煤矿采掘机械、水液压技术和新型液压元件等领域的教学科研工作。E-mail: chl-wang@aust.edu.cn