DOI: 10.3901/JME.2019.09.136

基于 GMM 的高性能微定位工作台 驱动系统的研制*

喻曹丰 王传礼 解 甜 杨林建 姜 志
(安徽理工大学机械工程学院 淮南 232001)

摘要: 提高微定位工作台的性能是提升高端制造装备加工性能的重要方式之一, 针对现有微定位工作台驱动系统存有驱动力小、行程短、定位精度低等问题, 研制了一台以超磁致伸缩材料为核心元件微定位工作台的驱动系统。为提高驱动系统输出位移的建模精度, 以 Jiles-Atherton 磁滞模型为基础, 建立该驱动系统的输出位移模型; 为提高模型参数的辨识精度, 将粒子群算法快速局部搜索性与人工鱼群算法全局收敛性相结合, 提出一种高精度的混合优化参数辨识算法; 为补偿驱动系统的输出位移误差, 引入一种动态递归神经网络前馈-模糊 PID 反馈控制策略; 为提高程序的执行效率, 采用了高速 DSP 芯片开发控制系统; 通过研制样机, 搭建试验平台进行验证。结果表明: 所研制驱动系统的最大位移为 30.8 μm , 最大输出力为 292.3 N, 定位精度达到 0.75 μm , 最大重复性误差为 0.4 μm , 为研制高性能精密定位装置奠定了理论基础。

关键词: 超磁致伸缩材料; 磁滞非线性; 混合优化算法; 控制策略

中图分类号: TP27

Development of Drive System of High Performance Micro Positioning Worktable Based on Giant Magnetostrictive Material

YU Caofeng WANG Chuanli XIE Tian YANG Linjian JIANG Zhi
(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001)

Abstract: Improving the performance of a micro positioning worktable is one of major approaches used to improve the processing performance of high-end manufacturing equipment. Aiming at the problems such as low drive force, short stroke and low positioning accuracy existing in the drive system of existing micro positioning worktable, a drive system of micro positioning worktable taking the giant magnetostrictive material as the core component is developed. In order to improve modeling accuracy of output displacement of the drive system, an output displacement model of the drive system is set up based on the Jiles-Atherton hysteresis model. In addition, in order to improve the identification precision of model parameters, a hybrid optimization parameter identification algorithm which has high accuracy and combines the rapid local search function of particle swarm algorithm and the global convergence of artificial fish swarm algorithm is proposed. And in order to compensate the output displacement error of the drive system, a dynamic recurrent neural network feedforward-fuzzy PID feedback control strategy is introduced. And in order to improve the execution efficiency of the program, a high-speed DSP chip is used to develop the control system. The prototype is built and verified with the experimental platform established. The research results indicate that the maximum displacement of the developed drive system is 30.8 μm , the maximum output force is 292.3 N, the positioning accuracy is 0.75 μm and the maximum repeatability error is 0.4 μm . This result lays a theoretical foundation for development of high-performance precision positioning devices.

Key words: giant magnetostrictive material; hysteresis nonlinear characteristic; mixed optimization algorithm; control strategy

0 前言

微定位工作台是一种精密定位装置, 具有高定

位精度、快响应速度、强稳定性等优点, 广泛应用于航空航天、集成电路、生物工程、机械工程等高端装备制造领域, 用以操纵对象接近目标位置, 如精密加工系统中操纵刀具接近工件加工点, 实现精准定位。随着《中国制造 2025》发展规划纲要的颁布, 大力发展我国制造业尤其是高端装备制造业的目标提出, 未来的微定位工作台将由机械化、低

* 国家自然科学基金(51075001, 51675003, 51705003)、安徽省 2018 年度重点研究与开发计划(1804a09020016)和安徽理工大学青年教师科学研究基金(QN 2018102)资助项目。20180511 收到初稿, 20181218 收到修改稿

端化向自动化、高端化方向发展,并进一步向智能化、集成化与综合化等方向发展^[1]。目前,德国 PI 公司是全球领先的制造商和供应商,其所开发的线性促动器(如 P-131 系列)的定位精度达到 10 nm,但其定位行程最大仅为 10 μm ;而 P-622 系列的定位工作台借助柔性放大机构,使其定位行程达到 50 μm ,但其最大推力只达 10 N,导致现有的精密定位装置已难以满足发展需求。因此,为提高高端制造装备的加工性能,进一步提高现有微定位工作台的性能或研究一种新形式的驱动方案显得尤为重要。

我国 2006 年颁布实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》中明确提出:新一代信息功能材料及器件是制造业的前沿技术和重点发展领域,是未来高新技术更新换代和新兴产业发展的重要基础^[2]。超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive material, GMM)与压电陶瓷材料(Piezoceramic material, PZT)是应用于驱动器最成功的两种智能材料,具有应变大、输出力大、响应速度快以及能量密度高等优异性能,被认为是体现国家综合实力的功能材料,其应用研究已成为国内外研究热点^[3]。

因此,利用 GMM 的快响应速度、高能量转换效率、大输出力等特性研制一种微定位工作台的驱动系统成为可能。但 GMM 具有铁磁性功能材料的饱和磁滞非线性现象,导致驱动系统的输入电流和输出位移之间具有磁滞非线性,最大回程误差高达 20%左右,严重影响精密定位效果^[4-5]。Jiles-Atherton 模型能够准确描述此驱动系统的磁滞非线性特性,但模型中包含多个未知参数,采用不同的参数辨识算法,所得到模型的精度也不同^[6-7]。贾振元等^[8]采用最小二乘法进行参数辨识,获得了比较可靠的参数结果,具有方法简便的优点;刘慧芳等^[9]将遗传算法与模拟退火算法融合后进行参数辨识,使得模型误差为 3.85%;孟爱华等^[10-11]采用改进的粒子群算法进行参数辨识,使得模型误差为 5%。在获得精确磁滞模型的基础上,还需要对磁滞非线性进行补偿控制。目前根据控制结构不同,可将误差补偿控制策略分成以下三种:磁滞线性化控制、开环逆补偿控制和前馈反馈闭环控制,其中前馈反馈闭环控制方法逐渐从压电陶瓷、形状记忆合金等智能驱动器的迟滞补偿中引用到超磁致伸缩材料的控制中,并且取得良好的效果^[12-14]。

因此,本文在基于 GMM 研制一种微定位工作台驱动系统的基础上,采用 Jiles-Atherton 模型

建立其输出位移模型,并提出一种将粒子群算法和人工鱼群算法混合的参数辨识算法,引入一种动态递归神经网络前馈-模糊 PID 反馈控制策略,采用高速 DSP 芯片开发控制系统,补偿驱动系统的输出位移误差,提高程序的执行效率,研制样机,搭建试验平台进行验证,以提高驱动系统的输出性能,为研制高性能精密定位装置提供理论基础。

1 驱动系统的结构设计和工作原理

1.1 驱动系统的结构

如图 1 所示,基于 GMM 的驱动系统由底座、GMM 棒、驱动线圈、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 1a 所示;其实物如图 1b 所示。

(a) 驱动系统的结构示意图

(b) 驱动系统的实物图

图 1 基于 GMM 的驱动系统

1. 底座 2. 预紧螺钉 3. 隔热材料 4. 线圈骨架 5. 线圈
6. GMM 棒 7. 输出轴 8. 预压碟簧 9. 端盖 10. 外壁套筒

1.2 驱动系统的工作原理

工作时,在驱动系统的驱动线圈中通入电流,在驱动系统内部形成磁场域,在磁场的作用下,GMM 棒因磁致伸缩效应产生一定的输出位移,不同大小的输入的电流可产生不同大小的输出位移。根据此工作原理,基于 GMM 的驱动系统的工作流程可表示为如图 2 所示。

图 2 基于 GMM 驱动系统的工作流程示意图

2 驱动系统的输出位移模型

根据驱动系统的工作原理可将其分为三个部分，分别为磁场模型、磁滞模型、磁致伸缩模型。

2.1 磁场模型

基于 GMM 的高性能微定位工作台驱动系统采用内外双层线圈驱动，即驱动系统的磁场由外层线圈和内层线圈两部分叠加而成，其中外层线圈产生偏置磁场，内层线圈产生的驱动磁场。则由电磁场叠加理论可知

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

式中， $H(t)$ 为驱动系统的驱动磁场； H_q 为内层线圈产生的驱动磁场； H_p 为外层线圈产生的偏置磁场； f_q 为内层线圈磁场系数； f_p 为外层线圈磁场系数； $I(t)$ 为驱动线圈电流； I_p 为偏置线圈电流。

2.2 离散化的 Jiles-Atherton 模型

Jiles-Atherton 模型是物理学家 Jiles 和 Atherton 根据铁磁性材料畴壁理论建立起来的一种磁滞模型，其中外加磁场 H 和磁化强度 M 之间的关系如下式(2)所示^[15-16]。

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

式中， H_e 表示磁性材料的有效磁场； M_{an} 表示无磁滞磁化强度； M_{irr} 表示不可逆磁化强度； M_{rev} 表示可逆磁化强度； M 表示总磁化强度； H 表示外加总磁场； H_σ 表示预应力 σ_0 形成的诱发磁场；参数 $\alpha' = \alpha + 9\lambda_s \sigma_0 / (2u_0 M_s^2)$ ，当 $dH/dt > 0$ 时， $\delta = 1$ ； $dH/dt < 0$ 时， $\delta = -1$ ； c 表示可逆分量系数； α 表示畴壁相互作用系数； a 表示无磁滞磁化强度形状系数； k 表示不可逆损耗系数； M_s 表示饱和磁化强度。

由于式(2)是连续型表达式，无法采用计算机求

解，将其进行离散化处理后，得到离散化的 Jiles-Atherton 模型如式(3)所示^[17]

$$\begin{cases} H_e = H + \alpha' M_{an} \\ M_{an} = M_s [\coth(\frac{H_e}{a}) - \frac{a}{H_e}] \\ M_{irr}(m+1) = M_{irr}(m) + \frac{M_{an}(m) - M_{irr}(m)}{\delta k - \alpha'(M_{an}(m) - M_{irr}(m))} \\ M_{rev}(m+1) = c(M_{an}(m+1) - M_{irr}(m+1)) \\ M(m+1) = M_{irr}(m+1) + M_{rev}(m+1) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 磁致伸缩模型

在磁场强度一定的情况下，GMM 棒的磁致伸缩应变 λ 与磁化强度 M 的关系为

$$\lambda = \gamma M^2 \quad (4)$$

式中， M 表示磁化强度； γ 表示磁致伸缩系数。

根据材料力学知识，磁致伸缩位移 X 为

$$X = \lambda L \quad (5)$$

式中， L 表示 GMM 棒的长度。

故超磁致伸缩驱动系统的位移模型中，共有 6 个参数需要辨识，即 $\theta = (M_s \ \alpha' \ a \ k \ c \ \gamma)$ 。

3 驱动系统位移模型的参数辨识

3.1 参数辨识原理

图 3 为基于 GMM 的高性能微定位工作台驱动系统输出位移模型的参数辨识原理图，其中在参数辨识过程，主要是对如式(6)所示的目标函数求极小值。

$$\begin{aligned} E(\theta) &= \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q (x(k) - \hat{x}(k, \theta))^2 \\ d_i &\leq \theta_i \leq b_i \quad i=1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6)$$

式中， k 表示第 k 个采样时刻； Q 表示总采样的次数； $x(k)$ 表示第 k 时刻，GMM 棒变形量的测量值； $\hat{x}(k, \theta)$ 表示第 k 时刻，模型参数为 θ 时，GMM 棒变形量的理论计算值； θ_i 表示 θ 的第 i 个参数； b_i 表示 θ_i 取值范围的上限； d_i 表示 θ_i 取值范围的下限。

图 3 参数辨识原理图

在参数辨识过程中, 主要分成三步: 第一步, 将所建模型中未知参数的取值范围尽可能的细分, 并将这些细分结果形成一个可行解的集合; 第二步, 在第一步形成的可行解的集合内, 采用适合的算法不断搜索得到的参数值, 并将这些参数按一定取值顺序代入到所建模型中计算出在驱动电流为 $I(k)$ 时, 系统的输出位移 $\hat{x}$, 然后计算出与系统实际输出位移 x 的差值 e ; 第三步, 将计算出的差值 e 代入到式(6)中的目标函数计算出目标函数值, 并不断改变模型中未知参数的取值, 使得目标函数值达到最小。

3.2 粒子群和人工鱼群混合辨识算法

粒子群算法具有快速的局部搜索性, 而人工鱼群算法具有全局的收敛性, 两者相互补充, 将两种算法结合, 充分发挥各自的优势, 形成一种粒子群和人工鱼群混合优化算法^[18]。可将其操作过程分成如下六个阶段。

(1) 初始化阶段: 种群规模 N 的确定。采用随机数, 限定取值范围, 生成 N 个个体; 分别用 c_1, c_2 和 c_3 表示粒子群算法的加速度, 用 w 表示算法的惯性权值; 用 $visual$ 表示人工鱼群算法的可视域, 用 $Step$ 表示人工鱼每次搜寻的步长, 用 try_number 表示人工鱼群算法的最大试探次数, 用 δ 表示人工鱼的拥挤度, 用 GEN_{max} 表示混合算法的最大迭代次数。

(2) 确定种群最优解: 将生产的种群 N 划分成数量相等的两个子种群, 分别用 pop_1 和 pop_2 表示。其中, 子种群 pop_1 按照粒子群算法计算出每个个体的适应度值, 得到一组最优解, 用 pg_1 表示; 子种群 pop_2 按照人工鱼群算法计算出每个个体的适应度值, 得到另外一组最优解, 用 pg_2 表示; 将两组最优解 pg_1 和 pg_2 进行比较, 根据最优取值原则, 得出种群的最优解, 用 pg 表示。

(3) 种群更新阶段: 根据粒子群算法的种群更新公式, 对子种群 pop_1 进行更新, 得到新的最优解和新种群, 分别用 pg_{1_new} 和 pop_{1_new} 表示; 根据人工鱼群算法的种群更新公式, 对子种群 pop_2 进行更新, 得到新的最优解和新种群, 分别用 pg_{2_new} 和 pop_{2_new} 表示。

(4) 更新种群最优解: 将最新得到的两组最优解 pg_{1_new} 和 pg_{2_new} 进行比较, 根据最优取值原则, 得出更新后种群的最优解, 用 pg_{new} 表示; 并将 pg_{new} 与之前的最优解 pg 比较, 再次根据最优取值原则, 若 pg_{new} 优于 pg , 则将最优解更新为 pg_{new} , 用 p_{gg} 表示, 反之, 则最优解仍为 pg , 且将其值赋值给 p_{gg} 。

(5) 算法终止判定阶段: 将步骤(3)和(4)阶段重复执行, 若算法的运行次数达到初始设定的最大迭代次数 GEN_{max} 或者最优解 p_{gg} 已达到设定的误差界内, 可判定算法终止。

(6) 算法结束: 达到算法终止条件后, 终止算法运行, 同时将最优解输出, 即将 p_{gg} 的值输出。

整个粒子群和人工鱼群混合优化算法的流程图如图4所示。

图4 粒子群和人工鱼群混合优化算法流程图

3.3 参数辨识

(1) 模型数据测试。

图5为微定位工作台驱动系统的模型数据测试系统, 主要由基于 GMM 的驱动器、高精度程控电

图5 微定位工作台驱动系统的数据测试系统

1. XL 激光头 2. 线性干涉镜 3. 线性反射镜
4. 超磁致伸缩驱动器 5. 温度显示仪
6. IT6332B 多通道高精度电源 7. 计算机

流源(IT6332B)、高精度双频激光干涉仪(XL-80)和其他固定夹具组成。其中铽镝铁合金(TbDyFe)是驱动器的核心元件,其尺寸为 $\Phi 10 \times 100$ mm;高精度程控电流源的作用是为驱动器供电,其最小分辨率为1 mA;由激光器、分光镜和反射镜组成高精度测量系统,用于实时测量驱动器的输出位移值,其测量精度达到 nm 级;粘贴在 GMM 棒上的 PT100 温度传感器,通过温度显示仪实时显示 GMM 棒上的温度。

试验过程中,设定最大工作电流 $I_{\max}$ 为 6 A,电流变化步长为 0.2 A,以 0 A~6 A~0 A 作为一个测试周期,测出的驱动系统的输出位移与电流之间的关系曲线如图 6 所示。

图6 试验测得的数据曲线

(2) 参数辨识过程

设定初始值,种群规模 N 为 40,粒子群算法的加速度参数 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为 2、1、1,惯性权值 w 为 0.2,人工鱼群算法的可视域 $visual$ 为 50,人工鱼搜索步长 $Step$ 为 30,人工鱼群的最大试探次数 try_number 为 5,人工鱼的拥挤度 δ 为 0.618,混合优化算法的最大迭代次数 $GEN_{\max}$ 为 30,适应度函数的最小误差为 10^{-6} 。

为了检验提出算法的寻优效果,将上述试验测得的数据作为样本值,分别使用人工鱼群算法(AF)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、以及本文提出的粒子群和人工鱼群混合算法(PSO-AF)进行模型参数辨识,参数辨识进化曲线如图 7 所示,辨识后的最优参数如表 1 所示,表中 $E_{\min}$ 为辨识算法适应度函数的最小值。

表1 基于 Matlab 的参数辨识结果

参数	$M_s/\times 10^5$ (A/m)	a	k	a	c	$\gamma/\times 10^{-15}$	$E_{\min}$ / μm
AF	2.70	0	2 197.2	8 904.8	0.050 0	5.00	1.522 0
GA	2.92	0.000 1	1 918.1	9 923.0	0.024 6	4.65	0.906 7
PSO	9.58	0.010 4	2 748.1	13 723	0.034 0	0.484	0.683 4
PSO-AF	4.43	0.021 8	2 340.6	13 758	0.035 2	2.28	0.660 2

图7 参数辨识进化曲线图

将表 1 中四种算法的辨识结果值分别代入到所建驱动器的输出位移模型中,通过计算比较,得出如图 8 所示的四种辨识算法的模型计算曲线与试验曲线的对比图。

图8 不同辨识算法计算曲线与试验曲线对比图

将 Matlab 运行的进化曲线与 DSP 运行的曲线进化进行对比,如图 9 所示。

图9 DSP 硬件平台与 Matlab 软件平台参数辨识进化曲线对比图

根据图 8 可得,采用粒子群和人工鱼群混合辨识算法得到的模型计算曲线与试验测出的曲线最为接近。经计算得出,采用人工鱼群算法辨识后的位移误差约为 10%,采用遗传算法得到的位移误差约

为 7.1%，采用粒子群算法得到的位移误差约为 5.8%，而采用粒子群和人工鱼群混合算法得到的位移误差仅为 4.7%，表明采用粒子群和人工鱼群混合辨识算法能使模型计算误差达到最优。

由图 9 的进化对比曲线可得，采用 Matlab 运行参数辨识算法，其进化 30 次的时间为 11.26 h，而采用高速 DSP 芯片运行参数辨识算法，其进化 30 次的时间为 224 s，运算效率提高了约 180 倍。

4 驱动系统的控制系统

4.1 DRNN 前馈-模糊 PID 反馈控制原理

图 10 为基于 GMM 的高性能微定位工作台的 DRNN 前馈-模糊 PID 反馈控制系统整体结构原理图，图中 DRNN 控制器的功能是采用神经网络训练微定位工作台的动态逆模型，用于前馈控制；模糊 PID 控制器的功能是对逆模型补偿后的误差进行动态修正，用于闭环反馈控制，以此来提高控制系统的性能。

图 10 DRNN 前馈-模糊 PID 反馈控制原理图

图 10 中， $r(k)$ 为系统输入的标准参考信号； $y(k)$ 为微定位平台的输出位移信号； $I(k)$ 为微定位工作台的总控制信号，其值由前馈控制信号 $I_f(k)$ 和反馈控制信号 $I_b(k)$ 组成，即

$$I(k) = I_f(k) + I_b(k) \quad (7)$$

4.2 控制系统开发

为了提高算法程序的运行效率，以高速 DSP 芯片为核心元件，搭建了参数辨识算法和误差补偿控制系统的硬件调试运行平台，如图 11 所示。

5 试验验证

5.1 搭建试验平台

图 12 为搭建试验平台的实物图，主要由 IT6332B 型程控高精度直流电源、基于 GMM 的驱动系统、GT2-P12K 型高精度位移传感器、温度传感器、DSP 控制板、24 V 稳压电源、NI USB-6003 型数据采集卡、电流/电压转换模块、水循环冷却系统以及上位

图 11 控制系统运行的硬件平台

1. Code Composer Studio 5.5.0 2. XDS100V1 在线仿真器 3. DSP 控制板

图 12 基于 GMM 高性能微定位工作台驱动系统的试验平台

1. 上位机监控系统 2. 水循环冷却系统 3. 电流/电压转换模块
4. NI USB-6003 型数据采集卡 5. 24 V 稳压电源 6. DSP 控制板
7. 温度显示仪 8. 程控高精度直流电源 9. 基于 GMM 的驱动系统
10. GT2-P12K 型高精度位移传感器 11. GT2-71MCN 功率放大器

机监控系统等部分组成。

5.2 性能测试

(1) 输出位移测试。

输出位移是驱动系统重要的性能指标之一，其大小直接决定了定位工作台的定位行程。选取驱动系统偏置线圈电流为 0.6 A，预压应力为 2 MPa 时，进行输出位移测试，得到输出位移曲线如图 13 所示。

图 13 驱动系统的输出位移曲线

由图 13 可知，所研制驱动系统在电流为 6 A 时，

获得最大输出位移为 $30.8\ \mu\text{m}$ 。

(2) 输出力测试。

输出力是决定驱动系统负载大小的主要因素,选取驱动系统偏置线圈电流为 $0.6\ \text{A}$,预压应力为 $2\ \text{MPa}$ 时,测得驱动系统输出力与输入电流之间的曲线如图 14 所示。

图 14 驱动器输出力与输入电流之间的曲线

采用多项式拟合方法,将图 14 中的数据拟合,得出驱动系统的输出力与输入电流之间的关系如下式(8)所示;通过分析试验测得的数据得出,在最佳驱动参数条件下,驱动系统最大所能输出的力约为 $292.3\ \text{N}$ 。

$$F = -2.152 \cdot I^2 + 65.16 \cdot I - 14.78 \quad (8)$$

(3) 重复性测试。

重复性一般是指在相同的条件下对同一对象进行多次测量,用于衡量测量结果之间的一致程度。对于微定位工作台,重复性是其重要的性能指标之一,若其重复性越高,则表明工作台的定位性能越好,使用价值越高。因此,在相同的测试条件下对工作台驱动系统的输出位移进行了五次测量,测量结果如图 15 所示。

图 15 驱动系统五次测量的输出位移曲线

通过测试结果计算可得,所研制驱动系统 5 次测量的最大位移误差为 $0.4\ \mu\text{m}$,具有较高的重复性。

(4) 定位精度测试。

经试验测试,得到如图 16 所示的驱动系统的实际位移与理想位移的对比曲线,通过计算得出如图 17 所示的实际位移与理想位移之间的误差曲线。

图 16 驱动系统实际输出位移与理想输出位移对比曲线

图 17 驱动系统的实际输出位移与理想输出位移误差曲线

由图 16、17 可知,所研制驱动系统的实际输出位移曲线的变化与理想输出位移一致,实际输出位移与理想输出位移的最大误差值为 $0.75\ \mu\text{m}$,表明系统的定位精度为 $0.75\ \mu\text{m}$ 。

6 结论

(1) 基于 GMM 研制一种快响应、大推力、高精度的微定位工作台驱动系统的研制方案是完全可行的。

(2) 与 AF、PSO、GA 算法相比,提出的粒子群和人工鱼群混合的参数辨识算法具有辨识精度高、辨识速度快等优点。

(3) 相比于 Matlab 软件平台,采用高速 DSP 芯片硬件平台运行参数辨识算法,其进化 30 次的时间为 $224\ \text{s}$,运算效率提高了约 180 倍。

(4) 所研制驱动系统的最大位移为 $30.8\ \mu\text{m}$,最大输出力达到 $292.3\ \text{N}$,定位精度达到 $0.75\ \mu\text{m}$,最大重复性误差仅为 $0.4\ \mu\text{m}$,表明提出的控制策略具有较高的误差补偿效果。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

Ministry of engineering and materials science of the

- National Natural Science Foundation of China. Strategic report on development of mechanical engineering discipline (2011-2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006-2020) [M]. 北京: 中国法制出版社, 2006.
- State Council. The outline of national program for long-and medium-term scientific and technological development (2006-2020)[M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2006.
- [3] 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 Bin, QU Wentai, WU Yijie, et al. Review on hysteretic modeling of giant magnetostrictive materials [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 16: 2295-2300.
- [4] 喻曹丰, 王传礼, 魏本柱, 等. 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[J]. 光学精密工程, 2015, 23 (10z): 417- 424.
- YU Caofeng, WANG Chuanli, WEI Benzhu, et al. DRNN feed forward-PD feedback control for precision positioning stage based on giant magnetostrictive actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23 (10z): 417-424.
- [5] ZHU Yuchuan, LI Yuesong. A hysteresis nonlinear model of giant magnetostrictive transducer [J]. Journal of Intelligent Material Systems And Structures, 2015, 26(16): 2242- 2255.
- [6] YU Caofeng, WANG Chuanli, DENG Haishun, et al. Hysteresis nonlinearity modeling and position control for a precision positioning stage based on a giant magnetostrictive actuator [J]. RSC Advances, 2016, 6(64): 59468-59476.
- [7] ZHANG Yongfei, ZHOU Youhe. Modification of one-dimension coupled hysteresis model for GMM with the domain flexing function [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2014, 27(5) 461-466.
- [8] 贾振元, 王晓煜, 王福吉. 超磁致伸缩执行器的动力学参数及磁滞模型参数的辨识方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 9-13.
- JIA Zhenyuan, WANG Xiaoyu, WANG Fuji. Identification method of giant magnetostrictive transducer's dynamic parameters and magnetic parameters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 9-13.
- [9] 刘慧芳, 贾振元, 王福吉, 等. 超磁致伸缩执行器位移模型的参数辨识[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 115-120.
- LIU Huifang, JIA Zhenyuan, WANG Fuji. Parameter identification of displacement model for giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 115-120.
- [10] MENG Aihua, YANG Jianfeng, LI Mingfan, et al. Research on hysteresis compensation control of GMM [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(1-2): 161-167.
- [11] 孟爱华, 祝甲明, 刘成龙, 等. 基于改进 PSO 算法的 GMA 迟滞模型参数辨识[J]. 控制工程, 2014, 21(5): 735-739.
- MENG Aihua, ZHU Jiaming, LIU Chenglong, et al. Parameter identification of hysteresis model for GMA based on improved PSO Algorithm[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(5): 735-739.
- [12] WANG H, CHEN B, LIU K, et al. Adaptive neural tracking control for a class of nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2014, 25(5): 947-958.
- [13] LIU Y, SHAN J, GABBERT U. Feedback / feedforward control of hysteresis-compensated piezo-electric actuators for high-speed scanning applications [J]. Smart Materials and Structure, 2014, 24(1): 015012.
- [14] RUDERMAN M, BERTRAM T. Control of magnetic shape memory actuators using observer-based inverse hysteresis approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(3): 1181-1189.
- [15] SABLİK M J, JILES D C. A model for magnetostriction hysteresis[J]. J. Appl. Phys., 1988, 64(10): 5402-5404.
- [16] JILES D C, ATHERTON D L. Ferromagnetic hysteresis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1983, 19(5): 2183-2185.
- [17] 何汉林. GMM 动态迟滞特性建模及其参数辨识[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- HE Hanlin. GMM dynamic hysteresis characteristics modeling and parameter identification [J]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.
- [18] 罗德相, 周永权, 黄华娟. 粒子群和人工鱼群混合优化算法[J]. 计算机与应用化学, 2009, 26(10): 1257-1261.
- LUO Dexiang, ZHOU Yongquan, HUANG Huajuan. Hybrid optimization algorithm based on particle swarm and artificial fish swarm algorithm[J]. Computers and Applied Chemistry, 2009, 26(10): 1257-1261.

作者简介: 喻曹丰, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为精密驱动与控制技术。

E-mail: yucaofeng@aust.edu.cn

王传礼(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为流体传动与控制技术、功能材料应用及新型液压元件开发。

E-mail: chlwang@aust.edu.cn