

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.019

高速大行程滚珠丝杠副智能测控平台的伺服控制^{*}

付胜华 韩秋实 王红军

(北京信息科技大学 机电工程学院 北京 100192)

摘 要:为了研究滚珠丝杠副的动态特性如定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、动态摩擦力矩、负载扰动、预紧力、疲劳性能、温升和机械振动等对滚珠丝杠副精度保持性能的影响,针对五轴联动加工中心高速大行程滚珠丝杠副设计了一套伺服电机+滚珠丝杠副高速运转、直线电机模拟负载扰动、多通道信号采集的智能精密测控试验平台;建立了测控平台时变参数不确定性和外力扰动的优化动力学模型;提出了基于遗传算法的自适应非线性PID双位置反馈的控制算法和速度、加速度前馈误差补偿的控制策略。试验结果表明,该控制策略具备小的跟踪误差、较强的抗干扰能力和稳定性,满足测控平台的试验需求。

关键词:滚珠丝杠测控平台;动力学模型;自适应非线性PID;遗传算法;前馈误差补偿

中图分类号: TP242.6;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Servo control of intelligent measurement and control platform for ball screw with high speed and large range

Fu Shenghua Han Qiushi Wang Hongjun

(School of Mechanical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract:In order to research the dynamic characteristics of the ball screw on the Five-axis linkage machining center, such as positioning accuracy, repeated positioning accuracy, speed and acceleration tracking, dynamic friction torque, load disturbance, preload, fatigue performance, temperature rise and mechanical vibration, an intelligent precision measurement and control test platform is designed, which includes servo motor + ball screw driving, linear motor simulation load disturbance and multi-channel signal acquisition. And the dynamic model of time-varying parameter uncertainty and external force disturbance is described. Meanwhile, the adaptive nonlinear PID control model and feedforward error compensation based on genetic algorithm are established. The test result shows that the control strategy has a small tracking error, strong anti-jamming capability and stability.

Keywords: ball screw measurement and control platform; dynamic modeling; adaptive nonlinear PID; genetic algorithm; feedforward compensation

0 引 言

正滚珠丝杠副是数控机床、精密仪器等各种精密机械装备中的关键零部件,具有传动效率和传动精度高、能逆向传动、同步性能好、性价比高特点,我国高端装备的发展起着关键和决定性作用,其精度和速度直接决定了高端装备的定位精度与效率。对滚珠丝杠副高速运转

下的动态特性如定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、负载扰动、动态摩擦力矩、预紧力、温升及机械振动等信号的监测及影响因子分析是保证滚珠丝杠副精度和效率的重要手段^[1-2]。目前,国内外针对滚珠丝杠副相关性能的测控试验技术采用变载荷动态连续测量的方法模拟滚珠丝杠副工作状态;优化的智能控制策略;高精度传感器实时监测及诊断的方向不断发展。国内南京理工大学冯虎田教授及团队^[3-5]对滚珠丝杠测试平台做了大量

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51575055)、科技重大专项(2015ZX04001002)资助

研究工作。主要集中在滚珠丝杠副精度保持性试验方法研究,滚珠丝杠高过载工况下极限承载能力及失效分析以及滚珠丝杠摩擦力矩动态测量试验研究等。另外西安交通大学、大连理工大学、山东大学、东南大学等学者对滚珠丝杠副的动态特性如定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、动态摩擦力矩、负载扰动、预紧力、疲劳性能、温升和机械振动等综合性能实验台的开发和研究^[6-10]。然而,针对高速大行程滚珠丝杠副在不同位置下系统的固有频率与振型的变化;力矩波动、切削负载变化及外界扰动;摩擦力矩的不确定变化等因素还没有进行全面分析。对滚珠丝杠副动态特性的综合影响因子还没有进行定量分析。对于五轴联动加工中心大行程滚珠丝杠副的精度保持性及其影响因素的测试平台以及基于测控平台的测控数据与工况环境下监测数据的比较分析还有待完善。急需研究高速大行程滚珠丝杠副综合测控技术、开发高速大行程精密滚珠丝杠副检测平台,以便很好地对滚珠丝杠副的动态特性和性能劣化规律开展研究。

滚珠丝杠伺服系统因其传动稳定性高、对负载扰动和惯性变化的敏感性低而被广泛应用于工业高定位控制领域。由于高精度、高速及高加速度的是滚珠丝杠副运动的发展趋势,因此设计高速大行程滚珠丝杠精密测控试验平台的伺服系统轨迹跟踪的优越控制策略尤为重要。在控制策略的选择上,PID 控制器易于实施、可靠性、稳定性等特点而被广泛使用。Fernandez-Gauna 等人^[11]针对滚珠丝杠伺服系统采用随机搜索优化算法的双位置 PID 参数自适应整定的反馈控制策略;Mahmoodabadi 等人^[12]针对不确定混沌系统提出的基于滑模监督控制的自适应鲁棒 PID 控制策略;Li 等人^[13]提出了滚珠丝杠伺服系统干扰力前馈补偿 PID 控制策略。然而由于动态特性的影响,PID 控制参数随系统误差变化表现出非线性,采用常规线性 PID 控制器不利于

分析测控平台的动态特性。

本文基于滚珠丝杠副的动态特性如定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、动态摩擦力矩、负载扰动、预紧力、疲劳性能、温升和机械振动等对滚珠丝杠副精度保持性能的影响,研究滚珠丝杠副精度保持性失效的影响因子;同时对高速大行程滚珠丝杠在测控实验平台的数据与工况环境下的运行状态数据进行比较分析,建立优化的滚珠丝杠副精度保持性及疲劳性能监测和评估方案的初衷。设计了一套伺服电机+滚珠丝杠副高速运转、直线电机模拟负载扰动、多通道信号采集的滚珠丝杠副测控平台方案。针对测控平台摩擦力矩的时变不确定性、直线电机负载的扰动、扭转振动的不确定性干扰,建立了系统的动力学模型。提出了基于遗传算法的非线性 PID 双闭环控制模型;利用遗传算法在多目标寻优上的良好特性,便捷实现了对非线性 PID 的参数进行自适应整定;同时,针对干扰力进行了前馈速度及加速度补偿的控制方案;最后进行了 MATLAB 仿真试验,验证了测控平台控制策略的可行性。

1 测控平台方案设计

滚珠丝杠副测控试验平台整体设计方案如图 1、2 所示。被测丝杠由永磁同步伺服电机驱动产生旋转运动,电机输出的转角由编码器读取反馈给控制器形成闭环,螺母转换成直线运动同时由光栅提取其位置信号,反馈给控制器双闭环反馈控制;丝杠螺母与直线电机动子联接,直线电机始终产生与螺母移动方向相反的推力来加载,根据直线电机输出的电流等参数得到加载力的实时监测;同时以 PMAC 控制器为核心实现对定位精度、重复定位精度、速度、加速度的监测和跟踪。测控平台对滚珠丝杠副的疲劳性能的分析主要由传感器采集相关信号、

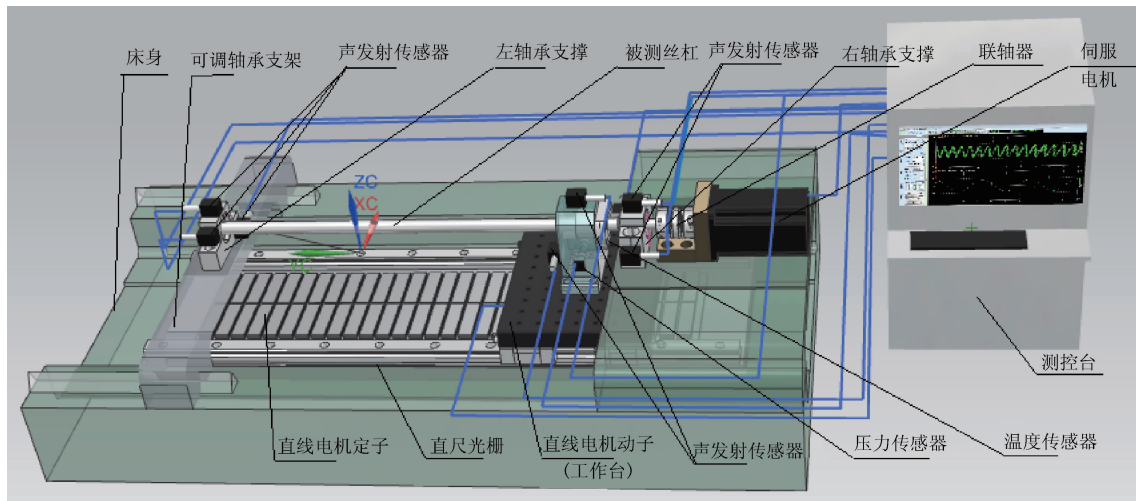


图 1 测控平台结构方案

Fig. 1 Scheme of control platform structure

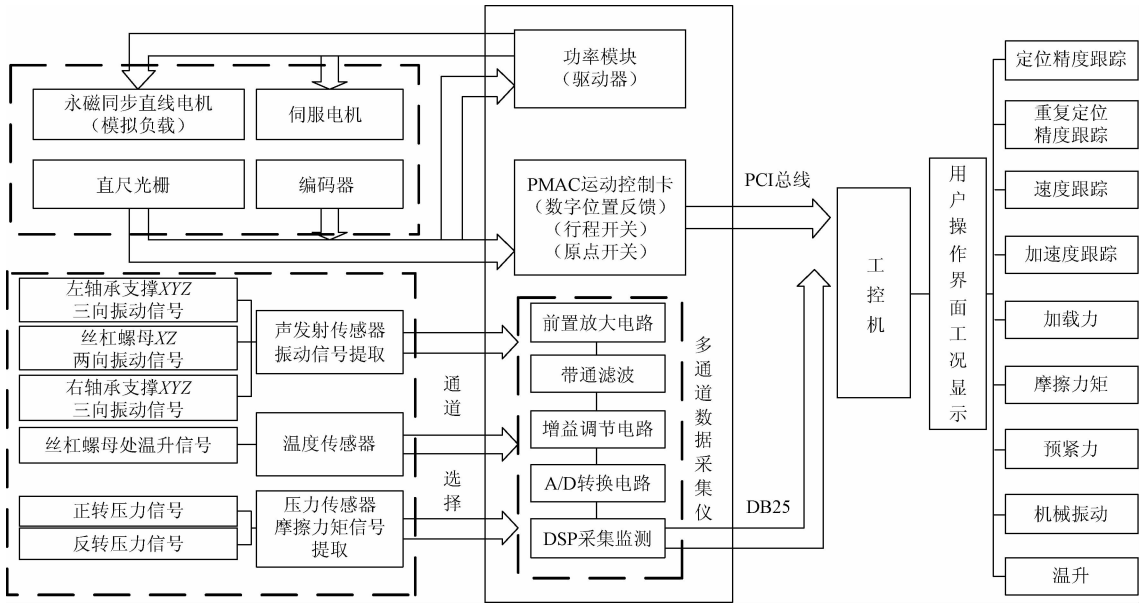


图 2 测控平台设计方案
Fig. 2 Scheme of control platform design

通过数据采集仪进行特征提取,压力传感器提取摩擦力矩信号,声发射传感器提取两端轴承 X 、 Y 、 Z 三向和螺母 X 、 Z 两向振动信号,温度传感器提取运转过程中的温升信号。运动控制器和数据采集仪通过现场总线技术实现与计算机的数据传送、并通过计算机编程实时显示运动过程中的定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、加载力、动态摩擦力矩、负载扰动、预紧力、温升和机械振动信号。

2 测控平台伺服控制系统建模

2.1 动力学建模

对滚珠丝杠副测控平台的结构分析可知,伺服电机与被测丝杠、工作台与丝杠螺母座以及被测丝杠与轴承座之间存在弹性模量。由此可将测控平台简化为两自由度的传动系统如图 3 所示^[14-15]。

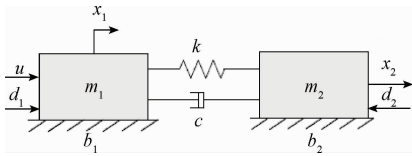


图 3 测控平台简化模型

Fig. 3 Simplified model of control platform

m_1 为伺服电机的等效转动惯量; m_2 等效为工作台的质量; b_1 等效为伺服电机轴与联轴器间的粘性摩擦系数; b_2 等效为工作台与导轨间的摩擦系数; k 等效为被测丝杠的轴向刚度系数; c 等效为被测丝杠与螺母间的阻尼

系数; $u(t)$ 为伺服电机的输出扭矩; $x_1(t)$ 为伺服电机轴的旋转位移; $x_2(t)$ 为工作台等效的运动位移; $d_1(t)$ 等效为指令输入的干扰, $d_2(t)$ 等效为直线电机的扰动负载。

测控平台简化的二自由度动力学模型表示如下:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -b_1 \dot{x}_1 + k(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + u(t) + d(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -b_2 \dot{x}_2 + k(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \end{aligned} \tag{1}$$

等效模型的传递函数由式(1)可得:

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{m_2 s^2 + (b_2 + c)s + k}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \\ G_2(s) &= \frac{x_2(s)}{u(s)} = \frac{cs + k}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \\ \frac{x_2(s)}{x_1(s)} &= \frac{cs + k}{m_2 s^2 + (b_2 + c)s + k} \end{aligned} \tag{2}$$

式中:

$$\begin{cases} a_4 = m_1 m_2 \\ a_3 = m_1(b_2 + c) + m_2(b_1 + c) \\ a_2 = k(m_1 + m_2) + b_1 b_2 + b_1 c + b_2 c \\ a_1 = k(b_1 + b_2) \end{cases}$$

定义状态空间变量等效变换如下:

$$[z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T = [x_2 \ x_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_1]^T$$

等效模型转换后的状态空间模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k}{m_2} & \frac{k}{m_2} & -\frac{b_2 + c}{m_2} & \frac{c}{m_2} \\ \frac{k}{m_1} & -\frac{k}{m_1} & \frac{c}{m_1} & -\frac{b_1 + c}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{m_2} \\ \frac{1}{m_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

2.2 基于遗传算法的非线性 PID 自适应控制器设计

本文基于系统的控制误差来设计 PID 控制器,测控系统的参考向量量定义为:

$$\mathbf{z}_r = [z_{1r} \quad z_{2r} \quad z_{3r} \quad z_{4r}]^T \tag{4}$$

式中: z_{1r} 和 z_{2r} 分别为工作台直线位移和伺服电机旋转角位移的参考值; z_{3r} 和 z_{4r} 为工作台线速度。

定义状态变量的跟踪误差为:

$$\begin{cases} \mathbf{e} = \mathbf{z} - \mathbf{z}_r \\ \mathbf{e} = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4]^T \end{cases} \tag{5}$$

常规线性 PID 控制器适用于对动态特性要求不高的系统,本测控平台由于摩擦力和加载阻力的存在,对系统的动态特性有较高的要求,提出了基于遗传算法的非线性 PID 整定,使得控制系统既能到达响应快,又无超调现象。同时、由于非线性 PID 调节器的增益参数能够控制误差而变化,因而具备良好的抗干扰能力。系统误差 $e(t)$ 变化的非线性函数如式(6):

$$\begin{cases} K_p(e_p(t)) = a_p + b_p(1 - \text{sech}(c_p e_p(t))) \\ K_d(e_p(t)) = a_d + b_d/(1 + c_d \exp(-d_d e_v(t) e_p(t))) \\ K_i(e_p(t)) = a_i \text{sech}(b_i e_p(t)) \end{cases} \tag{6}$$

式中: a_p 、 b_p 、 c_p 、 a_d 、 b_d 、 c_d 、 d_d 、 a_i 、 b_i 为正实常数, $e_v(t)$ 为误差变化速率,分别调整 c_p 、 d_d 、 b_i 的值可调整与之对应的 K_p 、 K_d 、 K_i 的变化速率。

控制输入方程为:

$$u_{pid}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{7}$$

遗传算法作为一种全局优化算法,可以对非线性 PID 的待辨识的 9 个参数寻求全局最优解,确保系统的稳定性、准确性和快速性。为获取满意的过渡过程动态特性,并防止产生超调,采用误差绝对值时间积分性能指

标作为参数选择最小目标函数如式(7),为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项。同时为避免超调,采用惩罚功能,一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项。

$$\begin{cases} J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 \cdot t_u \\ J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |e(t)|) dt + w_3 \cdot t_u \\ error(i) < 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中: $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制器输出, t_u 为上升时间, w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为权值,且 $w_1 \gg w_4$ 。

遗传算法是解决多参数寻优问题的方法之一,通过遗传算法可以较为方便的找出一组满意的非线性 PID 调节参数。遗传算法流程如图 4 所示。

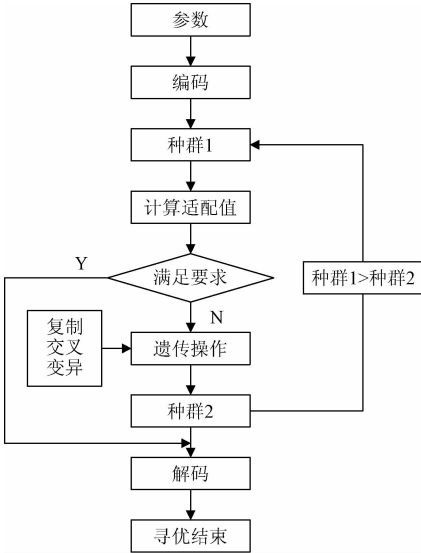


图 4 遗传算法流程

Fig. 4 Flow chart of genetic algorithm

2.3 伺服控制系统建模

伺服控制系统采用位置环、速度环、电流环三环控制,结合动力学数学模型和非线性 PID 整定设计基于 PMAC 控制卡的伺服控制系统如图5所示。在三环伺服

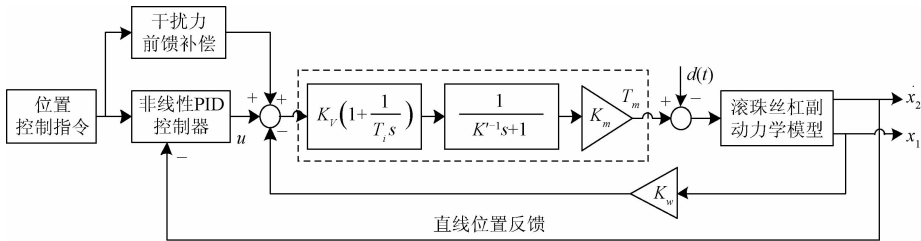


图 5 伺服控制模型

Fig. 5 Servo control model

控制中,电流环可以等效为一阶惯性环节、 $1/K$ 为惯性环节的时间常数, K_v 和 T_i 分别表示速度环速度环积分控制比例和时间常数, K_w 为速度环反馈系数; K_m 为伺服电机扭矩常数;位置环控制采用基于遗传算法的非线性PID + 速度/加速度前馈补偿控制算法。 K_{aff} 和 K_{vff} 分别为速度/加速度补偿系数。

3 仿真分析及验证

设计测控试验平台动力学参数如表 1 所示。本文采用连续进给运动轨迹跟踪实验方法。如图 6 所示,丝杠运行行程 1 800 mm、运行速度 500 mm/s、加速度 500 mm/s²。

表 1 系统动力学模型参数

Table 1 System dynamics model parameters	
$m_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	9.6×10^{-3}
$m_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.9×10^{-4}
$b_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^{-3}
$b_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.2×10^{-3}
$c/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.04
$k/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	558

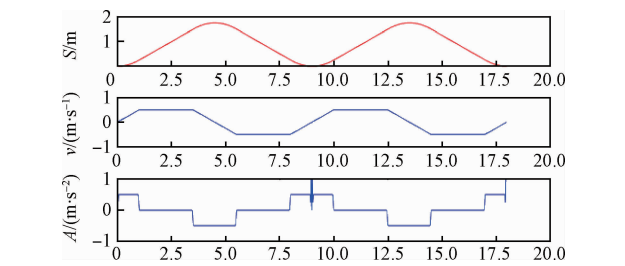


图 6 参考轨迹
Fig. 6 Reference trajectory

3.1 非线性 PID 自适应整定

遗传算法中选择群体大小 $M = 30$;终止进化代数 $G = 100$;交叉概率 $P_c = 0.9$;变异概率 $P_m = 0.033$;取权值 $w_1 = 0.999$ 、 $w_2 = 0.001$ 、 $w_3 = 2.0$ 、 $w_4 = 100$,对非线性 PID 的参数自适应寻找最优值。遗传算法程序运行结果如图 7 所示,随着代数的增加适配值函数 BestJ 不断减小,最终为 3.77。

采用整定后的非线性 PID 对测控平台进行位置跟踪仿真如图 8、9 所示,仿真结果表明在不考虑摩擦力和加载的理想状况下,测控平台具备良好的动态特性和位置跟踪特性,测控平台跟踪曲线和误差曲线到达预期,定位精度误差控制在 15 μm 以内。

3.2 干扰力补偿仿真

高精度高性能的伺服控制系统必须具备良好的刚性

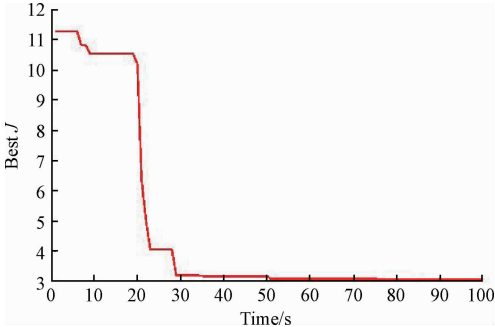


图 7 测控平台非线性 PID 寻优
Fig. 7 Nonlinear PID optimization of control platform

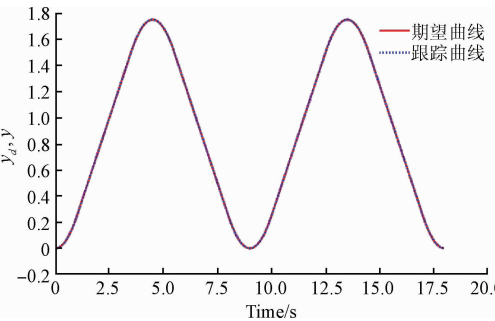


图 8 测控平台位置跟踪曲线
Fig. 8 Position tracking curve of control platform

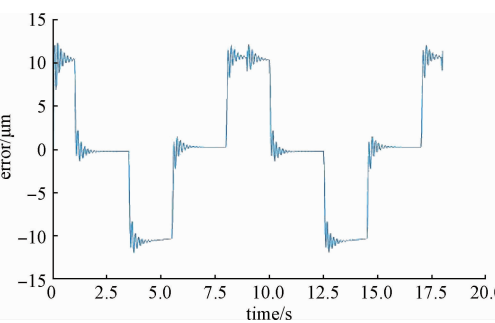


图 9 测控平台误差跟踪曲线
Fig. 9 Error tracking curve of control platform

和快速的响应速度,由于负载和速度的变化很大程度上影响了系统的精度和稳定性,通过基于遗传算法的非线性 PID 整定对系统设定了合适的 PID 参数,使得测控平台具有控制性能达到最佳,同时对干扰力进行前馈补偿,有效减少测控平台的跟踪误差。

测控平台采用基于遗传算法的非线性 PID + 速度前馈补偿的控制算法达到期望的控制误差,通过系统的运动方向和大小,整定所需的 PID 参数,并根据速度的大小实时计算出干扰力的大小,并将其值赋予给前馈补偿模型。仿真得到了其位置和速度的跟踪曲线和误差曲线如图 10、11 所示。仿真结果表明,在干扰力补偿条件下,速

度跟踪消除了“死区”现象、尖峰现象基本消除;定位跟踪误差得到了很大改善,误差控制在预期范围内。

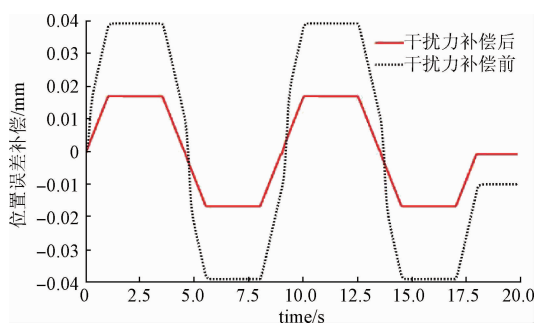


图10 位置跟踪误差

Fig. 10 Position tracking error

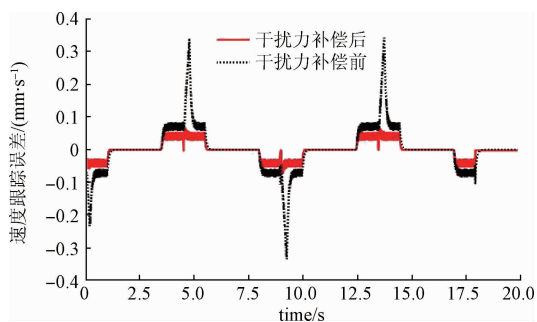


图11 速度跟踪误差

Fig. 11 Speed tracking error

4 结 论

为建立高速滚珠丝杠副的动态特性如定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪、动态摩擦力矩、负载扰动、预紧力、疲劳性能、温升和机械振动对滚珠丝杠副性能的综合因子分析平台,本文从结构方案上结合相关研究成果优化了测控平台的动力学模型。结合本测控平台的智能分析需求,从运动控制的角度优化并监测滚珠丝杠副的精度保持性能,提出了伺服电机驱动被测丝杠的电流环、速度环和位置环三环控制,同时基于遗传算法的非线性PID控制和干扰力前馈误差补偿控制算法的控制策略,有效改善了测控平台的动态跟踪误差和定位精度误差。仿真实验表明、被测丝杠在高速运转状态下、跟踪误差有效控制,在15 μm 以内,满足测控平台在连续稳定变负载的情况下,被测丝杠副在高速、高加速度、大负载等条件下的定位精度、重复定位精度、速度及加速度跟踪需求。从精密及超高精密的角度上,本控制策略依然有优化的空间。该测控试验平台为后续采集和分析测控试验台精度保持失效的因素如动态摩擦力矩、负载扰

动、预紧力、温升和机械振动建立了基础;在基于大数据分析端与工况环境下运行的滚珠丝杠副进行对比试验,通过大量实验的数据采集可实现对相关滚珠丝杠副的精度保持性失效的影响因子分析创建了实验平台。

参考文献

- [1] 童亮,王准. 基于直线电机的滚珠丝杠副寿命试验机设计[J]. 中国机械工程, 2014(13): 1711-1714.
TONG L, WANG ZH. Ball screw testing machine design based on the linear motor [J]. China Mechanical Engineering, 2014(13): 1711-1714.
- [2] LI H, GUO J, DU H, et al. Study on the test scheme of ball screw dynamic characteristic parameters [C]. International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, 2015.
- [3] 孙震,陶卫军,冯虎田. 精密滚珠丝杠副精度损失模型试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(3): 1-4.
SUN ZH, TAO W J, FENG H T. Precision ball screw precision loss model test research [J]. Combination Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2013(3): 1-4.
- [4] 冯虎田. 滚动功能部件综合性能检测及可靠性研究发展趋势[J]. 金属加工(冷加工), 2012(5): 10-12.
FENG H T. Ball screw comprehensive performance testing and the development trend of reliability research [J]. Metal Processing, 2012(5): 10-12.
- [5] 冯虎田,杨艳国,王小牧. 滚珠丝杠副激光动态测量系统设计[J]. 金属加工(冷加工), 2010(24): 54-55.
FENG H T, YANG Y G, WANG X M. Ball screw pair of laser dynamic measurement system design [J]. Metal Processing, 2010(24): 54-55.
- [6] 孙志平. 滚珠丝杠副综合性能测量试验台测控系统设计与试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
SUN ZH P. Ball screw comprehensive performance measurement system design and test method research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [7] 王刚. 高速精密滚珠丝杠副综合性能测试系统开发[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
WANG G. Ball screw comprehensive performance measurement testing system design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [8] 杨雪,陶卫军,韩军,等. 模拟工况下滚珠丝杠副精度检测方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(1): 78-80.
YANG X, TAO W J, HAN J. The precision of ball screw

- test method research under the simulated working condition [J]. Combination Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2016(1):78-80.
- [9] DONG L, TANG W. Control of ball screw drives using adaptive back stepping sliding mode controller and minimum tracking error prefilter[C]. IEEE International Conference on Control & Automation, IEEE, 2014: 995-1000.
- [10] QIAN R, LUO M, ZHAO J, et al. Novel sliding mode control for ball screw servo system [C]. MATEC Web of Conferences, 2016:03007.
- [11] FERNANDEZ-GAUNA B, ANSOATEGUI I, ETXEBERRIA-AGIRIANO I. Reinforcement learning of ball screw feed drive controllers [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 30 (1) : 107-117.
- [12] MAHMOODABADI M J, MAAFI R A, TAHERKHORSANDI M. An optimal adaptive robust PID controller subject to fuzzy rules and sliding modes for MIMO uncertain chaotic systems [J]. Applied Soft Computing, 2017(52): 1191-1199.
- [13] LI X G, MEI Z Q. Disturbance-compensation of ball screw servo system [C]. International Conference on Electronics, Communications and Control, IEEE, 2011: 230-234.
- [14] 刘秀丽, 徐小力. 风电场机组远程监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (5) :794-801.
LIU X L, XU X L. The unit of wind power remote monitoring system design [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (5) :794-801.
- [15] 向红标, 裴祖荣, 李醒飞, 等. 测量机滚珠丝杠 Z 轴伺服系统的动力学建模及补偿[J]. 天津大学学报, 2011, 44(4):291-296.

XIANG H B, QIU Z R, LI X F, et al. the Z axis servo system dynamics modeling and compensation on the ball screw of measuring machine [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4):291-296.

作者简介



付胜华, 北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为机电系统监控监测、智能制造及控制。

E-mail:18811562916@163.com

Fu Shenghua is a M. Sc. candidate in Beijing Information and Science Technology University. His main research interest includes monitoring and control, intelligent manufacturing and control.



韩秋实, 北京信息科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机电系统监控监测与故障诊断及预测、智能制造。

E-mail:hanqiushi@bistu.edu.cn

Han Qiushi is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing Information and Science Technology University. His main research interests include monitoring and control, fault diagnosis and prediction technology of mechanical and electrical system, and intelligent manufacturing.



王红军 (通讯作者), 北京信息科技大学教授, 主要研究方向为机电系统监控监测与故障诊断及预测、高档数控机床智能维护与可靠性预测、智能制造。

E-mail:wanghongjun@bistu.edu.cn

Wang Hongjun (Corresponding author) is a professor in Beijing Information and Science Technology University. Her main research interests include monitoring and control, fault diagnosis and prediction technology of mechanical and electrical system, top-grade CNC machine tool reliability prediction, and intelligent manufacturing.