

高精度激光追踪控制方法研究

陈洪芳^{**}, 孙若水, 何瑞彬, 宋辉旭^{*}

北京工业大学材料与制造学部北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124

摘要 为了实现激光追踪控制系统永磁同步电机的快速响应、高稳态精度、高鲁棒性控制,提出了一种基于改进型非线性扩张状态观测器(NESO)的激光追踪测量控制方法,采用电流预测控制算法提高了系统的动态响应速度,利用改进型 NESO 消除非线性扰动的干扰,提高了激光追踪控制系统的稳定性和鲁棒性。设定激光追踪控制系统可以实现 1 m 内猫眼反射镜 1 m/s 的跟踪,此时电机转速为 955 r/min。实验结果表明,当电机转速为 955 r/min 时,稳态误差为 1.7 r/min,速度稳定后向电机添加 0.1 N·m 的外加负载,速度降幅为 1.85%。相较传统的比例积分(PD)控制方法,在转速超调量相同的情况下,改进型 NESO 控制方法的稳态误差更小,响应速度更快,速度回复更稳定,控制系统整体的抗干扰能力更强。

关键词 测量; 激光追踪测量; 永磁同步电机; 电流预测控制; 非线性扩张状态观测器

中图分类号 TH71

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2304002

1 引言

激光跟踪测量系统是一种面向现场的便携式三维坐标测量系统^[1-5]。激光跟踪仪(laser tracker)的空间坐标测量精度一般不高,主要受限于跟踪镜机构中的轴未对准误差和制造误差,其角度测量的精度有限,且随着测量距离的增大,角度的测量不确定度增大,这限制了激光跟踪仪测量精度的进一步提升^[6-7]。德国 ETALON 公司于 2010 年推出了激光追踪仪,其干涉测量系统在万向架中围绕固定的精密球体移动,该球体的圆度小于 50 nm,这种设计使得激光跟踪机械旋转轴的径向和横向偏差不会显著影响测量精度,使空间坐标的测量精度得到了大幅度的提高^[8-11]。

为了实现对空间动态目标的高精度跟踪测量,需要激光跟踪测量系统能够实时精确地检测目标位置的相对变化,跟踪测量系统中控制俯仰轴和回转轴运动的驱动电机的高速伺服控制方法研究至关重要。

比例积分微分(PID)控制算法作为最常用的控制算法,被广泛应用于各个领域。其中伺服电机最常用的控制算法为 PI 算法,但 PI 算法的动态控制精度不佳,更适用于静态或模型参数稳定的系统^[12]。为了提高激光追踪测量系统的动态响应速度,在控制系统的电流环部分可以引入动态响应速度较快的电流预测控制(CPC)算法^[13-14]。但 CPC 算法的精度依赖于系统数学模型的精度,模型失配会影响 CPC 的预测控制性能^[15-16]。与其他的扰动估计技术相比,扩张状态观

测器(ESO)利用系统的惯性项和阶数,可粗略观测出系统内部与外部的“总扰动”,这一特性使得扩张状态观测器受到了广泛关注^[17-21]。Pu 等^[22]提出了一种线性参数时变的自适应扩张状态观测器,该观测器结构复杂,不适用于电机控制系统。Cui 等^[23]提出了一种用于外部扰动估计的自适应线性扩张状态观测器,该观测器旨在观测系统外部扰动。Yang 等^[24]提出了一种可以估计系统“总扰动”的动态增益自适应线性扩张状态观测器,其动态增益项处理“总扰动”的方式还有进一步提升的空间。

本文提出了一种基于非线性扩张状态观测器(NESO)的电流预测控制方法,可有效实现高精度激光追踪控制。

2 激光追踪控制原理

2.1 测量原理

激光追踪测量系统是一个随动系统,系统中的激光头为随动部分,猫眼反射镜为主动部分。追踪测量时,猫眼与被测对象固连。当猫眼反射镜静止时,被猫眼反射的激光束入射到激光头中的位置敏感探测器(PSD)中心处。当猫眼运动时,PSD 将输出偏移量信号控制俯仰轴电机和回转轴电机运动,保证激光头出射的激光束始终入射到猫眼的中心,实现系统的跟踪测量。激光追踪测量原理如图 1 所示,其中 l 为标准球球心与猫眼反射镜的距离, l_{in} 为激光追踪测量系统射入猫眼反射镜的光束, l_{out} 为猫眼反射镜位于初始

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(52175491, 52105043)、国家重点研发项目(2018YFB2001400)

通信作者: *huixu_song@bjut.edu.cn; **chf0302@126.com

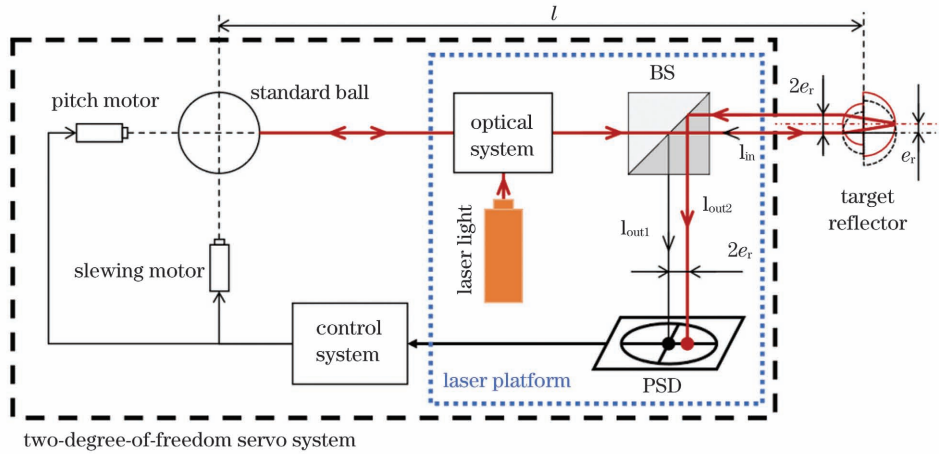


图 1 激光追踪测量系统的追踪原理图

Fig. 1 Tracing principle of laser tracing measurement system

位置时 l_{in} 被分束镜 (BS) 反射回 PSD 上的光束, l_{out2} 为猫眼反射镜由于运动偏离初始位置时 l_{in} 被 BS 反射回 PSD 上的光束。当目标反射镜的相对位置移动 e_r 时, 入射到 PSD 上的光斑能量中心与 PSD 感光表面中心的偏移距离为 $2e_r$ [25]。

激光追踪测量系统是基于标准球反射的万向节式两自由度回转轴系统, 结构示意图如图 2 所示。该系统以球度小于 50 nm 的标准球作为内部的反射单元。为了减小轴系误差的影响, 系统的光轴、俯仰轴以及回

转轴三轴的轴线与标准球球心的偏心误差应控制在 $10 \mu\text{m}$ 以内 [26]。

2.2 跟踪控制原理

激光追踪测量系统利用永磁同步电机 (PMSM) 驱动二自由度回转机构运动。控制系统采用电流-速度-位置三闭环系统, 如图 3 所示, 在电流环部分引入了 CPC 算法, 其中“+”表示系统输入正反馈, “-”表示系统输入负反馈, d' 表示激光追踪测量光学系统的输出。

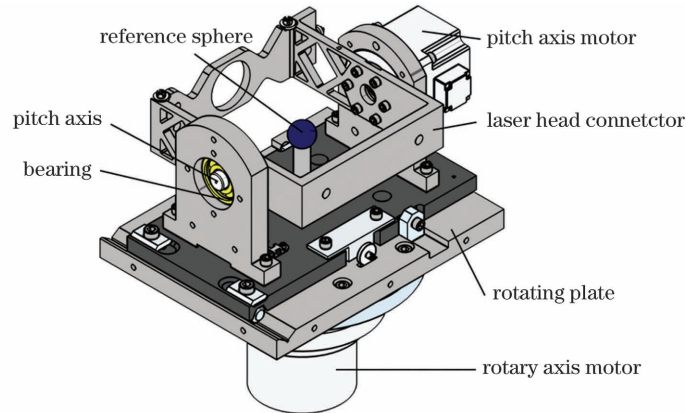


图 2 二自由度回转轴系统的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of two-degree-of-freedom rotating shafting system

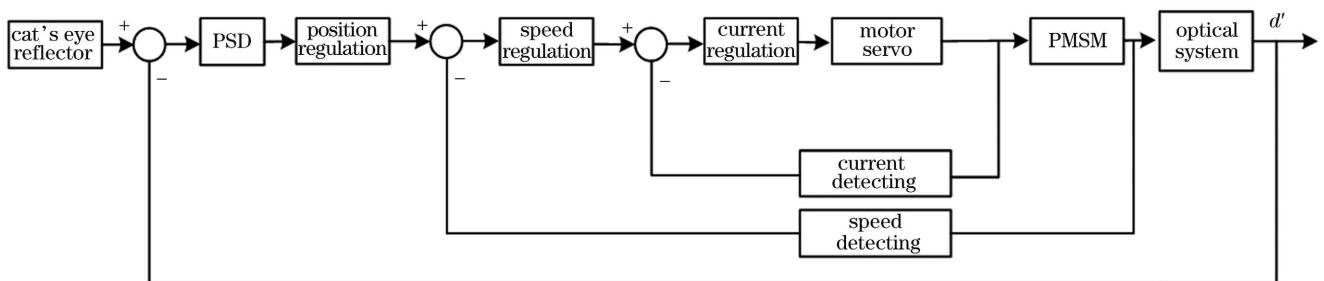


图 3 激光追踪测量系统的伺服控制原理图

Fig. 3 Schematic of servo control of laser tracing measurement system

忽略电机铁心饱和、涡流损耗、迟滞损耗、温度和频率对电机参数的影响。在电机转子上建立一个坐标系, 此坐标系与转子同步转动, 其中 d 轴平行于电机

转子磁场方向, q 轴垂直于转子磁场方向, 将电机的数学模型转换到此 $d-q$ 坐标系下, 此时 PMSM 的电压与磁链方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \omega\psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d, \\ \psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中： $u_d、u_q$ 分别为 $d、q$ 轴定子的电压； $i_d、i_q$ 分别为 $d、q$ 轴定子的电流； $\Psi_d、\Psi_q$ 分别为 $d、q$ 轴定子的磁链； $L_d、L_q$ 分别为 $d、q$ 轴定子的电感； R_s 为 $d、q$ 轴定子的绕组电阻； ω 为电机转子角速度； Ψ_f 为电机转子永磁体磁链。

由此得到 PMSM 的连续状态空间方程为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\frac{\omega L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega\Psi_f}{L_q} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

利用前项欧拉法对式(2)进行离散化处理,得到 PMSM 的电流预测模型^[27]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_s}{L_d} & -\frac{T_s \omega L_q}{L_d} \\ -\frac{T_s \omega L_d}{L_q} & 1 - \frac{T_s R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \omega \Psi_f}{L_q} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中： T_s 为采样周期； $i(k)$ 为第 k 个采样时刻 ($k=1, 2, 3, \dots$) 时状态变量 i 的值。

为了消除电机运行时非线性扰动对 CPC 控制算法的影响,在电流环中引入非线性的扩张状态观测器,观测系统扰动情况并进行补偿,提升系统整体的鲁棒性。由于系统使用 $i_d=0$ 的矢量进行控制,因此 $L_d=L_q=L$ 。依据式(2)得到 PMSM 的电流状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + B_0 \mathbf{U} + \mathbf{W}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{X} \end{cases} \quad (4)$$

式中： \mathbf{Y} 为状态观测器的输出量；状态观测器的状态变量 $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix}$ ；状态观测器的输入量 $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix}$ ；

$B_0 = \frac{1}{L}$ ； \mathbf{W} 为 PMSM 系统中的其他未知扰动； $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ 为 PMSM 的内部扰动,表达式为

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L}i_d(k) + \omega i_q(k) \\ -\frac{Ri_q(k) - \omega\Psi_f}{L} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中： R 为永磁同步电机的定子电阻。

将内外总扰动扩张为新的状态变量： $\mathbf{x}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{W}$,并扩张 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{X}$ 。采用 Fal 收敛函数 $F(\cdot)$ 构造出 NESO,结构为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = \mathbf{Z}_1 - \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{e}_2 = \mathbf{Z}_2 - \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{Z}}_1 = \mathbf{Z}_2 + B_0 \mathbf{U} - \lambda_1 F(\mathbf{e}_1, \beta, \delta_1) \\ \dot{\mathbf{Z}}_2 = -\lambda_2 F(\mathbf{e}_2, \beta, \delta_2) \end{cases}, \quad (6)$$

式中： \mathbf{Z}_1 为 \mathbf{x}_1 的观测值； \mathbf{Z}_2 为 \mathbf{x}_2 的观测值； $\mathbf{e}_1、\mathbf{e}_2$ 为系统的跟踪误差； $\lambda_1 \approx \frac{1}{T}, \lambda_2 \approx \frac{1}{1.6T^{1.5}}$,其中 T 为系统的采样周期； $\delta_1、\delta_2$ 和 β 为设计参数,并且 $\delta_1 > 0, \delta_2 > 0$ 。

$$F(\mathbf{e}_{i'}, \beta, \delta_{n'}) = \begin{cases} |\mathbf{e}_{i'}|^\beta \text{sgn}(\mathbf{e}_{i'}), & |\mathbf{e}_{i'}| > \delta_{n'} \\ \frac{\mathbf{e}_{i'}}{\delta_{n'}^{1-\beta}}, & |\mathbf{e}_{i'}| \leq \delta_{n'} \end{cases}, \quad (7)$$

$i' = 1, 2 \text{ and } n' = 1, 2,$

式中： $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

在基于 Fal 函数的传统扩张状态观测器中,Fal 函数为非有限时间收敛函数,且函数中存在判断项,计算时间较长。当 Fal 函数中 δ 取值较小时,Fal 函数中的大增益项 $\frac{1}{\delta^{1-\beta}}$ 可以更好地使观测器放大系统中的小误差,但放大误差更容易造成观测器的脆弱性^[28]。因此,本文将传统的 Fal 收敛函数替换为指数螺旋式收敛函数:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{a}_0^2 |\mathbf{e}_1|^{2-2q_0/p_0} \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + \mathbf{b}_0^2 |\mathbf{e}_1|^{q_0/p_0} \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + 2\mathbf{a}\mathbf{b}\mathbf{e}_1 \\ \mathbf{a}_{i_1} = \text{diag}(a_{i_1, j_1}) \\ \mathbf{b}_{i_1} = \text{diag}(b_{i_1, j_1}) \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $\mathbf{a}、\mathbf{b}$ 为指数螺旋式收敛函数的设计参数； $a_{i_1, j_1} > 0; b_{i_1, j_1} > 0; i_1 = 0, 1; j_1 = 1, 2, 3, \dots; q_0 > 0; p_0 > 0; q_1 > 0; p_1 > 0; q_0/p_0 \in (0, 1); q_1/p_1 \in (0, 1)$ 。

指数螺旋式收敛函数中不再存在判断项,且为

固定时间收敛。因此在观测到较大误差与扰动的情况下,系统具有更快的收敛速度与更高的稳态精度^[29-31]。

由此,得到改进型 NESO 模型为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = \mathbf{Z}_1 - \mathbf{X} \\ \dot{\mathbf{Z}}_1 = \mathbf{Z}_1 + B_0 \mathbf{U} - \mathbf{v}_0 \\ \dot{\mathbf{Z}}_2 = -\mathbf{a}_1^2 |\mathbf{v}_0|^{2-2q_1/p_1} \text{sgn}(\mathbf{v}_0) - \mathbf{b}_1^2 |\mathbf{v}_0|^{q_1/p_1} \text{sgn}(\mathbf{v}_0) - 2\mathbf{a}_1 \mathbf{b}_1 |\mathbf{v}_0| \text{sgn}(\mathbf{v}_0) \\ \mathbf{v}_0 = \mathbf{a}_0^2 |\mathbf{e}_1|^{2-2q_0/p_0} \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + \mathbf{b}_0^2 |\mathbf{e}_1|^{q_0/p_0} \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + 2\mathbf{a}\mathbf{b}\mathbf{e}_1 \\ \mathbf{a}_{i_1} = \text{diag}(a_{i_1, j_1}) \\ \mathbf{b}_{i_1} = \text{diag}(b_{i_1, j_1}) \end{cases} \quad (9)$$

3 实 验

3.1 仿真实验

根据建立的改进型 NESO 模型即式(9),建立了基于非线性扩张状态观测器的激光追踪控制系统仿真模型。实验电机模型参数为:额定转速 $n_N = 955 \text{ r/min}$;极对数 $p = 4$;定子电阻 $R = 0.75 \Omega$;定子电感 $L = 2 \text{ mH}$;电机转动惯量 $J_m = 0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;转子转动惯量 $J_D = 0.00000588 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;永磁体磁链 $\Psi_f = 0.007374 \text{ Wb}$ 。

激光追踪控制系统可以实现 1 m 内猫眼反射镜 1 m/s 线速度的跟踪,电机输出端稳定性达到 $\pm 0.01 \text{ r/min}$ 。电机减速比为 1:100,此时电机内部转速 $v = 955 \text{ r/min}$,电机内部所需的稳定速度 $\Delta n \leq 2 \text{ r/min}$ 。以电机的实时状态量三相电流、旋转角度、

角速度作为输入,控制电机从静止升速至 955 r/min,控制过程的仿真结果如图 4 所示。基于改进型 NESO 控制模型的激光追踪控制系统的转速稳态误差 $\Delta n_{\text{NESO}} = 1.6 \text{ r/min}$ 。基于 PI 控制模型的激光追踪控制系统的转速稳态误差 $\Delta n_{\text{PI}} = 3.4 \text{ r/min}$,前者相比后者下降了 50.0%,有效提升了电机的稳定性。

根据猫眼运动速度与电机转速计算得到激光追踪控制系统稳态跟踪过程的仿真结果,如图 5 所示,系统处于稳定跟踪状态后,猫眼与激光追踪控制系统的相对位置曲线平稳。激光追踪控制系统基于 PI 控制模型的跟踪响应时间为 1.36 ms,激光追踪控制系统基于改进型 NESO 控制模型的跟踪响应时间为 1.13 ms,激光追踪测量系统的响应能力得到提升。

为了进一步验证控制方法的抗干扰能力,跟踪时间为 0.020 s 时向系统添加了 0.1 N·m 的外加负载,

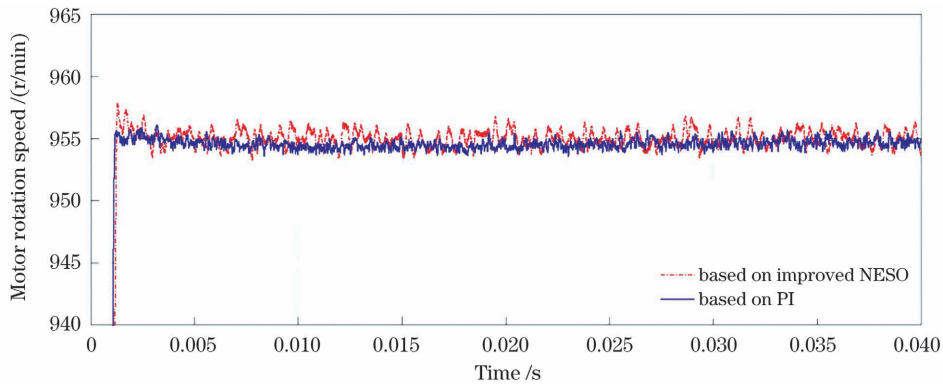


图 4 不同激光追踪控制系统中电机转速的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of motor rotation speed in different laser tracing control systems

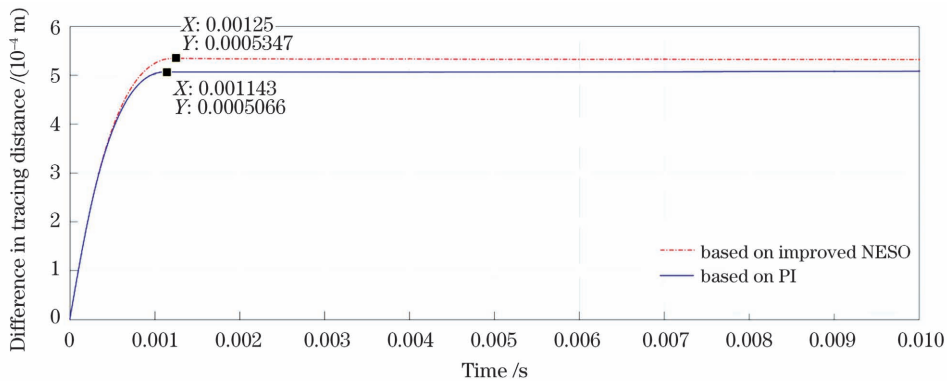


图 5 不同激光追踪控制系统中稳态跟踪过程的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of steady state tracking process in different laser tracing control systems

此时的电机转速过程仿真结果如图 6 所示。可以看出,加入外加负载后,基于 PI 控制模型的激光追踪控制系统降速至 940.6 r/min,0.015 s 后重新恢复稳态;基于改进型 NESO 控制模型的激光追踪控制系统降速至 945.8 r/min,0.017 s 后重新恢复稳态。在受到外部干扰的情况下,虽然基于 PI 控制模型的激光追踪控制系统比基于改进型 NESO 控制模型的激光追踪控制系统

稍快恢复稳态,但后者的稳定性和鲁棒性较高。

3.2 实验

基于半物理仿真的多电机控制平台进行了实验,如图 7 所示。该实验台基于 VxWorks 实时操作系统与 Links-RT 实时仿真软件包,将 Simulink 模型自动编译为实时仿真代码,下载到实时仿真机中运行。驱动电机为永磁同步电机。

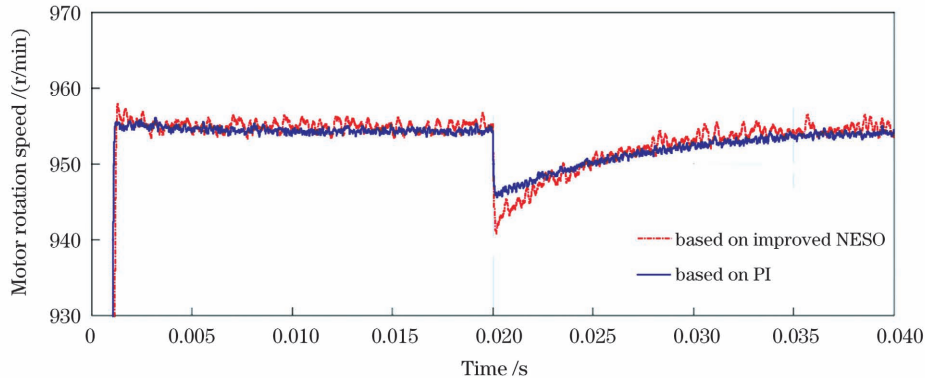


图 6 添加外加负载后不同激光追踪控制系统中电机转速的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of motor rotation speed in different laser tracking control systems after adding external load

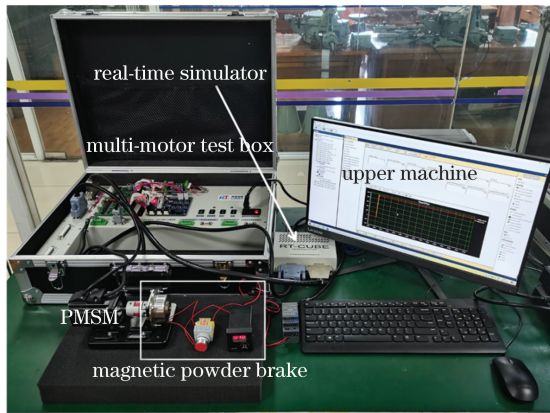


图 7 基于半物理仿真的多电机控制平台

Fig. 7 Multi-motor control platform based on semi-physical simulation

实验中采用 $i_d = 0$ 的矢量控制,利用小型磁粉制动器为电机添加外加负载。为了验证不同控制方法对电机响应与抗干扰能力的影响,在电机启动 1 s 后,令电机从静止升速至 955 r/min。在启动电机 4 s 后,向

电机添加 0.1 N·m 的外加负载,实验结果如图 8 所示。实验结果表明,PI 控制方法的速度稳态误差 $\Delta n_{PI} = 2.5$ r/min,改进型 NESO 控制方法的速度稳态误差 $\Delta n_{NESO} = 1.7$ r/min,基于改进型 NESO 控制模型的激光追踪控制系统中的电机稍快达到稳态。在速度稳定后向电机添加 0.1 N·m 的外加负载,基于 PI 控制模型的激光追踪控制系统的速度降低至 919.8 r/min,降幅为 3.69%,1.974 s 后重新恢复稳态;基于改进型 NESO 控制模型的激光追踪控制系统的速度降低至 937.3 r/min,降幅为 1.85%,2.060 s 后重新恢复稳态。基于半物理仿真的多电机控制系统的实验表明,电流预测控制算法在一定程度上提升了系统的响应速度,利用扩张状态观测器可以大幅提升系统的动态控制精确度与抗干扰能力。在输出速度超调量相同的情况下,与 PI 控制方法相比,改进型 NESO 控制方法的稳态误差更小,响应速度更快,速度回复更稳定,系统的抗干扰能力得到了较好的提升,在控制精确度上更能满足激光控制系统的要求。

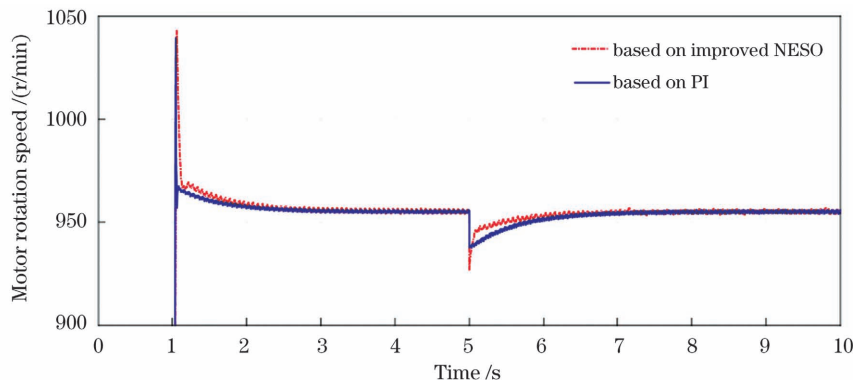


图 8 不同激光追踪控制系统中电机转速的实验数据

Fig. 8 Experimental data of motor rotation speed in different laser tracking control systems

4 结 论

依据激光追踪测量系统中永磁同步电机控制系统快响应、高精度、高稳定性的要求,建立了一种基于改进型 NESO 的激光追踪测量控制模型。在电机转速为 955 r/min 时,稳态误差为 1.7 r/min,速度稳定后向电机添加 0.1 N·m 的外加负载后,速度降幅为 1.85%。实验结果表明,与传统的 PI 控制模型相比,在转速超调量相同的情况下,所提方法的稳态误差更小,响应速度更快,速度回复更稳定,系统整体的抗干扰能力得到了较好的提升。

参 考 文 献

- [1] Wan A, Song L B, Xu J, et al. Calibration and compensation of machine tool volumetric error using a laser tracker [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 124: 126-133.
- [2] Mei B, Xie F G, Liu X J, et al. Calibration of a 6-DOF industrial robot considering the actual mechanical structures and CNC system[C]//2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), December 29-31, 2017, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2017: 6-10.
- [3] Aguado S, Samper D, Santolaria J, et al. Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1): 160-169.
- [4] Moeller C, Schmidt H C, Koch P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2017, 10(2): 100-108.
- [5] 王孝坤, 郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812010.
Wang X K, Zheng L G. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812010.
- [6] Hughes B, Forbes A, Lewis A, et al. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4): 045103.
- [7] 李杰, 伍凡, 吴时彬, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0112002.
Li J, Wu F, Wu S B, et al. Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112002.
- [8] Schwenke H, Schmitt R, Jatzkowski P, et al. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer[J]. *CIRP Annals*, 2009, 58(1): 477-480.
- [9] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines: an update [J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(2): 660-675.
- [10] Ibaraki S, Tsuboi K. "Open-loop" tracking interferometer measurement using rotary axes of a five-axis machine tool[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 2342-2350.
- [11] Schwenke H, Franke M, Hannaford J, et al. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer[J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 475-478.
- [12] 林继. 基于智能控制的 PID 控制方式的分析[J]. *冶金管理*, 2020(23): 67-68.
Lin J. Analysis of PID control mode based on intelligent control [J]. *China Steel Focus*, 2020(23): 67-68.
- [13] 严仲乔. 基于滑模观测器的永磁同步电动机模型预测电流控制 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 2-6.
Yan Z Q. Model predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 2-6.
- [14] 周新秀, 周咏平, 张旨, 等. 基于参数辨识的内置式永磁同步电机最大转矩电流比电流预测控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1083-1093.
Zhou X X, Zhou Y P, Zhang Z, et al. Maximum torque per ampere current predictive control of interior permanent magnet synchronous motors based on parameter identification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1083-1093.
- [15] 郑泽东, 王奎, 李永东, 等. 采用模型预测控制的交流电机电流控制器[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(11): 118-123.
Zheng Z D, Wang K, Li Y D, et al. Current controller for AC motors using model predictive control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(11): 118-123.
- [16] 王东文, 李崇坚, 吴尧, 等. 永磁同步电机的模型预测电流控制器研究[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(S1): 73-79.
Wang D W, Li C J, Wu Y, et al. Model predictive current control scheme for permanent magnet synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(S1): 73-79.
- [17] 姚绪梁, 麻宸伟, 王景芳, 等. 基于预测误差补偿的鲁棒型永磁同步电机模型预测电流控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(17): 6071-6081.
Yao X L, Ma C W, Wang J F, et al. Robust model predictive current control for PMSM based on prediction error compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(17): 6071-6081.
- [18] Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods: an overview [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 63(2): 1083-1095.
- [19] Huang Y, Wang J Z, Shi D W, et al. Performance assessment of discrete-time extended state observers: theoretical and experimental results [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, 65(7): 2256-2268.
- [20] 夏先齐, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机低速滑模控制[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2628-2638.
Xia X Q, Zhang B, Li X T, et al. Low speed sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2628-2638.
- [21] 刘春玲, 王明, 张瑾. 四旋翼 ESO 的 RBF 神经网络 PID 控制器研究[J]. *电光与控制*, 2021, 28(9): 84-88, 93.
Liu C L, Wang M, Zhang J. ESO based RBF neural network PID controller for quadrotor aircrafts[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(9): 84-88, 93.
- [22] Pu Z Q, Yuan R Y, Yi J Q, et al. A class of adaptive extended state observers for nonlinear disturbed systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5858-5869.
- [23] Cui R X, Chen L P, Yang C G, et al. Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6785-6795.
- [24] Yang H J, Sun J H, Xia Y Q, et al. Position control for magnetic rodless cylinders with strong static friction [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5806-5815.
- [25] 陈洪芳, 汤亮, 张爽, 等. 位置敏感探测器对激光追踪测量系统的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104001.
Chen H F, Tang L, Zhang S, et al. Effects of position sensitive detector on laser tracing measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104001.
- [26] 宋辉旭, 石照耀, 陈洪芳, 等. 面向激光追踪测量系统二维回转

- 轴系的误差分析及精度保证[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0504001.
- Song H X, Shi Z Y, Chen H F, et al. Error analysis and accuracy assurance of two-dimensional rotatory axes for laser tracing measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0504001.
- [27] 李键. 永磁同步电机模型预测电流控制的预测误差分析及抑制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Li J. Prediction error analysis and suppression of model predictive current control for PMSM drives [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [28] 刘希, 孙秀霞, 刘树光, 等. 非脆弱递归滑模动态面自适应神经网络控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1323-1328.
- Liu X, Sun X X, Liu S G, et al. Non-fragile recursive sliding mode dynamic surface control with adaptive neural network[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(10): 1323-1328.
- [29] 蒲明, 刘鹏, 熊彪. Fal 函数的改进及 3 种新型非线性扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1655-1662.
- Pu M, Liu P, Xiong A. Advanced Fal function and three novel nonlinear extended state observers [J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1655-1662.
- [30] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214003.
- Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- [31] 高家鑫, 宋延嵩, 刘洋. 非线性 PID 自抗扰控制在快反镜温控系统中的应用[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-14 [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220212.1751.020.html>.
- Gao J X, Song Y S, Liu Y. Application of nonlinear PID active disturbance rejection control in the temperature control system of fast steering mirror [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-14 [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220212.1751.020.html>.

High-Precision Laser Tracing Control Method

Chen Hongfang^{**}, Sun Ruoshui, He Ruibin, Song Huixu^{*}

*Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract

Objective A laser tracing measurement system is a type of portable three-dimensional coordinate measurement system. To achieve high-precision tracing and measurement of a spatially dynamic target, it is necessary for the laser tracing measurement system to detect the relative change of target position accurately in real time. It is important to study the high-speed servo control method of the driving motor, which controls the pitch axis and rotation axis motion in the tracing measurement system. The proportional-integral (PI) control is the most common method for controlling servo motors, but the dynamic control accuracy effect of PI control is poor. The PI control method is more suitable for a static or stable model parameter system. Although the laser tracing measurement system is a follow-up system, the traditional PI control method has big challenges in meeting the system control requirements, especially in dynamic response speed, speed steady-state error, and anti-interference ability. A current predictive control (CPC) method based on a nonlinear extended state observer (NESO) is proposed herein. The CPC method is used to improve the dynamic response speed of the system. The improved NESO is used to eliminate the interference of nonlinear disturbances and improve the stability and robustness of the laser tracing control system. It can realize high-precision tracing control of a laser tracing system.

Methods A laser tracing measurement system uses a permanent magnet synchronous motor to drive the movement of a two-degree-of-freedom rotary mechanism. The control system adopts a current-speed-position three-closed-loop system. To improve the dynamic response speed of the laser tracing system, a CPC algorithm that has an advantage in terms of the dynamic response speed is introduced into the current loop. However, the accuracy of the mathematical model of the system affects the accuracy of the CPC algorithm. When the model is mismatched, the predictive control performance is affected. To eliminate the influence of nonlinear disturbance on the CPC control algorithm during motor operation, an NESO is introduced into the current loop to observe the disturbance and then compensate for it back to CPC to improve the robustness of the system. To verify the control performance of the proposed CPC-NESO, MATLAB/Simulink is used for simulation experiments, and a multimotor control platform based on semiphysical simulation is used for real experiments (Fig. 7). The anti-interference ability of the control method is verified by adding an external load to the system. The control effect of the proposed method is evaluated by comparing the PI control method and the system control standard.

Results and Discussions Laser tracing control systems must track 1-m/s linear speed motion with a cat's eye reflector within 1 m, and the output stability of the motor must reach ± 0.01 r/min. In the simulation results (Figs. 4–6), when the improved NESO control method is compared with the PI control method, the steady-state error is reduced by 50%, improving the stability of the motor. The response capability of the laser tracing measurement system is improved. In the case of external interference, the speed is less affected. The real experimental results agree well with the simulation

results (Fig. 8), demonstrating that, under the same speed overshoot, the improved NESO control method has a smaller steady-state error, faster response, and more stable speed response than the PI method. The anti-interference ability of the system is improved, and the control accuracy better meets the control requirements of a laser control system.

Conclusions A permanent magnet synchronous motor control system in a laser tracing measurement system requires a fast response, high precision, and high stability. Therefore, a laser tracing measurement control model based on an improved NESO is established. The experimental results show that, when the motor speed is 955 r/min, the steady-state error of speed is 1.7 r/min, and the speed decreases by 1.85% when the 0.1 N·m load is added to the motor after the speed becomes stable. Experimental results show that, compared with the traditional PI control method, under the same speed overshoot, the method proposed in this study results in a smaller steady-state error, a faster response speed, a more stable speed response, and an improved anti-interference capability of the system. The proposed method can satisfy the fast response, high steady-state accuracy, and high robustness control requirements of permanent magnet synchronous motors in laser tracing control systems.

Key words measurement; laser tracing measurement; permanent magnet synchronous motor; current predictive control; nonlinear extended state observer