

文章编号 1004-924X(2017)10-2627-09

地基大口径望远镜伺服系统的抗扰动设计

王 帅^{1*}, 邓永停¹, 朱 娟²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024)

摘要:针对地基大口径望远镜伺服系统的抗扰动问题,提出了一种抗扰动控制算法。该算法采用双闭环控制结构:内环为高带宽的电流环,采用 PI 控制器;外环为速度环;采用线性自抗扰控制器,通过线性扩张状态观测器辨识出系统扰动,然后将该扰动前馈到系统控制量中去,构成复合校正系统。为解决大动态输入引起的控制器饱和问题,状态观测器的输入控制量加入了抗饱和控制算法,保证了系统的稳定性和良好的动态特性。仿真和实验结果表明:与传统的 PI 控制器相比,引入抗饱和功能的自抗扰控制器在高低速均可以获得良好的动态性能;在低速平稳跟踪实验中,速度波动误差(RMS)由 0.000 68 (°)/s 降低到 0.000 32 (°)/s。实验结果证明提出的方法能够有效提高伺服系统抗扰动能力和速度跟踪的平稳性。

关键词:地基望远镜;扰动抑制;线性自抗扰控制;交流永磁同步电机;抗饱和;低速性能

中图分类号:TP273;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172510.2627

Disturbance rejection control for large ground-based telescope

WANG Shuai^{1*}, DENG Yong-ting¹, ZHU Juan²

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)*

**Corresponding author, E-mail: wangxiaoshuai812@sohu.com*

Abstract: An improved disturbance rejection control algorithm was proposed to overcome the velocity fluctuation caused by the disturbance torque in a large ground-based telescope. The algorithm consists of two closed-loop structures, an inner high-bandwidth current loop and an outer speed loop. The inner current loop is a PI controller. The outer loop is a speed controller adopting the linear active disturbance rejection controller. For the speed loop, an extended state observer is used to estimate the system disturbances, and the estimated disturbance is fed into the control system to form a composite correction system. To solve the problem of controller saturation caused by the large dynamic input, an anti-windup control algorithm was induced the input of the extended state observer to guarantee the stability and good dynamic characteristics of the system. The simulation and experimental results show that linear active disturbance rejection controller with anti-windup achieves fast response without

收稿日期:2017-06-01;修订日期:2017-06-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11603024)

overshoot at both high or low speeds as compared with the PI controller. In a low speed smoothing experiment, the algorithm improves the RMS value of speed error from $0.000\ 68(^{\circ})/s$ to $0.000\ 32(^{\circ})/s$. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm effectively reduces the velocity fluctuation of the servo system caused by the motor torque ripple and improves its speed smooth.

Key words: ground-based telescope; disturbance rejection; linear active disturbance rejection control; permanent magnet synchronous motor; anti-windup; low-speed performance

1 引言

随着探测能力、空间分辨率等要求的提高,地基天文望远镜的口径越来越大,同时对伺服系统跟踪精度的要求也越来越高。扰动力矩是影响望远镜跟踪抖动的主要原因。对于地基大口径望远镜而言,扰动力矩按照来源分为内扰和外扰两部分,外扰主要是风阻力矩;内扰主要是传动间隙、摩擦力矩、周期性电机齿槽波动力矩,以及自身模型的非线性和不确定性,如驱动控制系统存在的饱和环节,望远镜俯仰角变化带来的自身转动惯量的变化等^[1]。

伴随着驱动控制技术的发展,克服、抑制望远镜扰动影响的方案、方法也一直在进步。首先从传动方式上,采用力矩电机直接驱动方案替代传统的齿轮传动和摩擦传动,具有传动刚度高、安装简便、易于维护、弱非线性特性等特点^[2],在大型地基望远镜上得到广泛应用,如已建造的 10.4 m GTC 望远镜^[3]、8.2 m Subaru 望远镜^[4]、欧南台 4 架 8 m VLT 望远镜^[5],以及正在建造的欧洲 42 m E-ELT^[6]、美国 30 m TMT 望远镜^[7]。另外,从控制策略上,基于经典控制理论和现代控制理论的各种方法也得到了广泛的研究和应用。针对经典控制,提高系统的开环增益以及控制带宽可以提高伺服系统对扰动力矩的抑制能力^[8],但增益的提高会降低系统的稳定性,为此 3.58 m TNG 望远镜采用变参数 PID 控制器来解决超调量和快速响应之间的矛盾^[9]。也有学者提出在常规位置-速度双闭环控制的基础上,再增加一个电流环^[10-11]或者加速度环,如 VLT 辅助望远镜为了克服风载力矩的影响,通过增加高精度的加速度传感器构建加速度反馈通道,以提高望远镜的扰动抑制能力^[12]。针对摩擦力矩扰动,有各种基于模型和不基于模型的补偿措施,如 LMT 望远

镜采用基于库伦摩擦模型的补偿策略,缩短了望远镜的定位时间并提高了定位精度^[13]。不基于模型的补偿算法主要有神经网络预测控制^[14]、扰动观测器控制^[15]等。周期性电机齿槽力矩常采用自适应滑膜控制^[16],或基于扰动模型的自适应前馈控制策略^[17],而 GBT 望远镜则通过设计基于内模控制的齿槽力矩补偿策略,有效克服了电机齿槽力矩波动引起的跟踪抖动问题^[18]。

纵观光电望远镜的各种扰动抑制方案,在选择合适的精密传动基础上,设计有效的控制方法是提高望远镜跟踪精度的保障。直驱技术是地基大型望远镜的首选,因此,本文针对采用直接驱动技术的大口径望远镜进行抗扰动控制算法设计,以解决如下两方面的技术要求:第一,控制算法鲁棒性强,适应自身参数的变化,可以应对自身模型的不确定性;第二,控制算法适应性强,各种扰动力矩会同作用在望远镜上,如果控制算法只能针对某一种扰动进行补偿,对跟踪精度的提高势必有限。本文提出了基于传统 PI 控制器的电流环+基于自抗扰控制器的速度环的多闭环控制架构,电流环的引入可以改造速度环的被控对象结构,提高速度环的稳定性,同时利于速度环控制器的设计;而基于自抗扰控制策略的速度环,通过其特有的状态观测器从速度信号中估计出扰动量,将该扰动前馈到系统控制量中进行补偿和抑制,可以有效提高系统的抗扰动能力。

2 问题描述

力矩电机是望远镜伺服控制系统的重要执行机构,分为有刷力矩电机和无刷力矩电机两种。地基大口径望远镜由于其转动惯量大,所需电机驱动电流也大,传统的有刷电机存在电刷磨损、电机换相易产生电火花等弊端,故多采用无电刷的交流永磁同步电机(Permanent Magnet Synchro-

nous Motor, PMSM) 进行驱动控制。PMSM 的定子为线圈, 转子为永磁体, 无机械电刷, 采用电子换相控制, 具有功率密度大、转动惯量低、可靠性高、易于维护等特点^[19]。

与工业高速应用不同, 望远镜伺服系统主要是高精度低速应用, 不需要弱磁调速, 因此选用表面贴装式 PMSM。首先, 建立 PMSM 电机驱动的光电望远镜系统的数学模型。PMSM 电机的 q 轴和 d 轴电压方程为:

$$\begin{cases} u_q = R_s i_q + L_q p i_q + \omega_r (L_d i_d + \psi_f) \\ u_d = R_s i_d + L_d p i_d - \omega_r L_d i_d \end{cases}, \quad (1)$$

式中: i_d, i_q 为 PMSM 电机 d, q 轴的电流, R_s 为定子相电阻, L_d, L_q 为 d, q 轴的电感; ψ_f 为永磁体基波励磁磁链过定子绕组的磁链, ω_r 为转子旋转的电角速度, p 为微分算子。

电机的电磁转矩方程为:

$$T_e = 1.5 n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (2)$$

式中: n_p 为转子极对数, T_e 为电磁转矩。

系统的运动方程为:

$$T_e = T_d + \kappa \omega + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

式中: J 为转动惯量, ω 为电机转速, κ 为黏性系数, T_d 为扰动力矩。对于地基望远镜而言, 扰动力矩包括风阻力矩、摩擦力矩以及电机本身的波动力矩等。

PMSM 电机控制具有强非线性特性和强耦合特性, 为简化分析与控制做如下两个近似:

(1) PMSM 电机需要控制励磁电流 I_d 和转矩电流 I_q 两个变量, 在电流环设计中常忽略相互耦合的影响, 以 q 轴电压方程为例, 忽略 $\omega_r (L_d i_d + \psi_f)$ 的影响, 电流闭环后, 近似等效为一个一阶惯性环节;

(2) 电磁转矩方程中, 包含 q 轴电流产生的永磁转矩和 d 轴电流产生的磁阻转矩, 为了获得高精度的转矩控制效果和较宽的调速范围, 常采用基于 $i_d = 0$ 的控制策略, 那么电磁转矩只包含 q 轴电流产生的永磁转矩。

综合以上近似, 并忽略扰动力矩的影响, 电机输出转速与输入 q 轴电流之间具有如下传递函数关系:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{I_q(s)} = \frac{1.5 n_p \psi_f}{(Js + \kappa)(t_e s + 1)}, \quad (4)$$

其中 t_e 为 q 轴电流环的等效时间常数。

3 控制器设计

基于 PMSM 电机的望远镜调速系统采用双闭环控制, 内环为电流环, 外环为速度环。其中, 要求电流环快速无超调、可靠性高, 采用简单易实现的 PI 控制器; 而速度环则要求控制精度高、调速范围宽、抗扰动能力强, 采用具有扰动观测及抑制能力的自抗扰控制算法。

3.1 电流环设计

PMSM 电机的电流环有两个: 转矩电流环和励磁电流环, 二者的控制结构基本相同, 以转矩电流环为例, 其传递函数如图 1 所示。

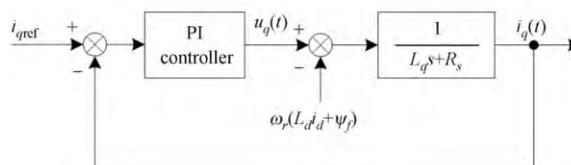


图 1 转矩电流环控制框图

Fig. 1 Schematic of torque current control system

在电流环设计中, 视 $\omega_r (L_d i_d + \psi_f)$ 为干扰项, 在控制器设计时则忽略它的影响, 那么采用 PI 控制器的系统开环传递函数的表达形式如下:

$$G_o(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_I s}) \frac{1}{L_d s + R_s}. \quad (5)$$

按照 I 阶系统设计, 取 $T_I = L_d / R_s$, 有:

$$G_o(s) = \frac{K_p}{T_I R_s} \frac{1}{s}. \quad (6)$$

系统的闭环传递函数有:

$$G_c(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{1}{(L_d / K_p) s + 1}. \quad (7)$$

当积分时间常数确定时, 就可以通过调节 K_p 来确定电流环的响应时间。

从上述电流环控制器设计可以看出, 原有的电气时间常数 L_d / R_s 被改造为 L_d / K_p , 选择合适的增益 K_p , 可以降低一阶惯性环节带来的相位延迟, 方便速度环控制器设计。

3.2 速度环设计

一般, 速度环的刚度越高, 系统的抗扰动能力越强, 但控制带宽受机械系统谐振频率的限制, 不可能做得很高。地基大口径望远镜转动惯量大、结构复杂, 整机一阶谐振频率只有几赫兹到十几赫兹的范围, 速度环带宽只有机械谐振频率的二

分之一,甚至三分之一。在带宽受限的情况下,如何提高速度环的抗扰动能力成为系统设计的关键。本文采用自抗扰控制策略,不需要额外增加传感器,通过其特有的状态观测器对扰动进行估计,并前馈到控制系统中,以实现对抗扰动的抑制。

自抗扰控制器引入非线性特性,并且参数众多、调整复杂,不便于工程实现^[20]。为此,本文采用一种简化的线性自抗扰控制器(Linear Active Disturbance Rejection Controller, LADRC)^[21-22]。典型的 LADRC 主要由线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observes, LESO)和线性控制律两部分构成。LESO 是一种状态观测器,根据系统阶数,它可以给出输入信号的估计值、输入信号的 n 阶近似导数以及系统的扰动量,其中扰动估计值作为顺馈信号作用到控制器输出端。线性控制器用来改善系统的动态过程及稳定性^[23-24]。

如式(4)所示,望远镜速度环被控对象是一个二阶系统,原则上需要设计一个二阶自抗扰系统;但是,由于电流环带宽高,电流环的等效时间常数非常小,对于大惯量望远镜伺服系统,其值可以忽略,那么速度环的被控对象就可以简化为一个一阶系统,从而进一步简化了自抗扰控制器的设计。

以一个典型的一阶速度控制系统为例,有:

$$\dot{\omega} + a_0\omega = b_0u + \tau, \quad (8)$$

式中: u 为系统输入, ω 为速度输出, a_0 为系统参数, b_0 为控制增益, τ 为外界扰动。

在式(8)中引入控制增益 b , 并对其整理,有:

$$\dot{\omega} = (b_0 - b)u - a_0\omega + \tau + bu, \quad (9)$$

其中 $(b_0 - b)u - a_0\omega + \tau$ 为系统自身已知或未知特性,定义为广义扰动,记作 f , 那么系统的动态方程表述为:

$$\dot{\omega} = f + bu. \quad (10)$$

将扰动变量 f 叠加到控制量中去实现前馈控制,选取控制律的结构如式(11)所示:

$$u = (u_0 - f) / b. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),有:

$$\dot{\omega} = u_0. \quad (12)$$

实际系统中,扰动变量 f 难以直接测量, LADRC 控制策略的核心思想是引入 LESO, 利用状态变量 z_2 实时估计出未知扰动 f 。对于望远镜伺服系统,电机的输出速度 ω 是可测量信

号,那么一阶 LESO 的状态方程为:

$$\begin{cases} e = \omega - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + L_1e + bu, \\ \dot{z}_2 = L_2e \end{cases} \quad (13)$$

式中: z_1 为速度信号的估计值, z_2 为扰动 f 的估计值, u 为系统控制量, L_1 和 L_2 为观测器增益。

通过参数 ω_0 来确定观测器增益 L_1 和 L_2 , 其计算公式如下^[25-26]:

$$\begin{cases} L_1 = 2\omega_0 \\ L_2 = \omega_0^2 \end{cases}. \quad (14)$$

控制器采用一种比例控制器,线性控制律如下:

$$u_0 = k_c(r - z_1), \quad (15)$$

式中: r 为给定输入信号, k_c 为比例系数。

将式(15)代入式(12),并转化为频域表达式,有:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{1}{(1/k_c)s + 1}. \quad (16)$$

在线性工作区内,控制过程的性能主要靠 k_c 来调节和保证。相比于二阶或者更高阶的自抗扰系统,一阶自抗扰系统更加简洁、易于实现。

上述控制律有效的前提是系统工作在线性区,但在实际控制系统中,受限于执行机构的能力,控制量的输出不可能无限增大,如驱动器的输出电流,会存在一定的限制范围。如果不考虑系统输出受限的情况,闭环控制系统的作用效果必然会恶化,典型的结果就是超调量增大、稳定时间变长、振荡剧烈,甚至出现不稳定的情况。常规的自抗扰控制器通过增加一个非线性跟踪微分器模块或者特殊设计的曲线规划模块来安排过渡过程,以解决快速性与超调之间的矛盾。本系统为了简化控制器结构,取消上述功能模块,通过引入抗饱和算法来解决该问题。

对于 LADRC 控制系统,LESO 状态方程中的输入变量 u 来自控制器的计算结果,并不是执行器真正作用的控制变量。当执行器进入饱和状态后,其真正输出的控制变量被限制在一定范围,而进入 LESO 中的控制变量不受任何限制,这会使 LESO 观测不准确,致使系统性能变差^[27]。为了解决这个问题,构造一个限幅函数,模拟执行机构的饱和现象,控制器的输出变量 u , 经过限幅函数后引入到 LESO 中。那么,具有抗饱和功能的 LESO 状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{e} = \omega - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + L_1 e + \text{sat}(u) \\ \dot{z}_2 = L_2 e \\ \text{sat}(u) = \text{sgn}(u) \min\{u_{\max}, |u|\} \end{cases}, \quad (17)$$

式中 u_{\max} 为执行器的最大输出能力。以 PMSM 电机为例,如果给定母线电压为 U_d ,那么理论上,空间矢量脉宽调制算法(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)能调制的最大电压矢量的幅值为 $2U_d/3$;但是 SVPWM 存在一个线性调制区,在这个线性调制区内, SVPWM 可以合成一个圆形磁链,圆形磁链的最大幅值为:

$$|u_g| = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2}{3} U_d = \frac{\sqrt{3}}{3} U_d. \quad (18)$$

4 仿真分析

为了分析 LADRC 控制器的性能及作用效果,以某一 PMSM 直接驱动的实验转台为控制对象,在 MATLAB 的 SIMULINK 环境下建立控制系统的仿真模型。系统转动惯量为 2 000 kgm², PMSM 力矩系数为 100.4 Nm/A,极对数为 65,同步电感为 36 mH,相电阻为 2.44 Ω,黏滞摩擦系数为 25,电机驱动器母线采用直流电源 36 V 供电,电流限幅为 ±5 A。

PMSM 电机的电子换相基于 SVPWM 技术实现,电流环的采样频率为 15 kHz。 d 轴、 q 轴电流环设计带宽为 100 Hz,那么根据电机参数,选取电流控制器的积分时间常数 $T_i = 0.014$,比例系数 $K_p = 28$ 。

电流闭环后,速度环的等效被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{I_q(s)} = \frac{100.4}{(2\,000s + 25)(0.0008s + 1)}. \quad (19)$$

仿真模型见图 2,加入饱和和环节,以验证具有 Anti-windup 功能的 LADRC 控制器对系统存在的非线性特性的校正能力。

在仿真分析中,首先在系统线性工作区内,通过阶跃响应调节系统的控制参数,并和具有抗饱和功能的 PI 控制器进行比较,取控制器参数如下:LADRC: $\omega_o = 314, K_c = 44, b = 1\,200$; PI 控制器: $K_p = 0.045, K_i = 1.6$ 。

系统给定速度为 1(°)/s 的阶跃响应如图 3

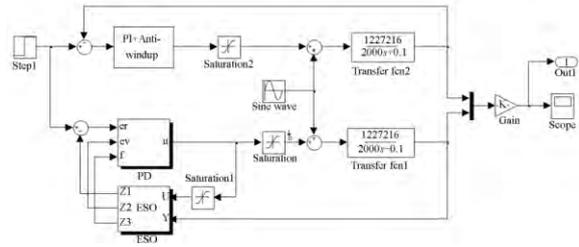


图 2 线性自抗扰控制系统仿真分析模型
Fig. 2 Servo system of LADRC in Simulink

所示。由于系统工作在线性区,且 LADRC 控制器将系统改造为一个一阶惯性环节,因此,系统无超调量,PI 控制器和 LADRC 控制器的阶跃响应上升时间基本相同。

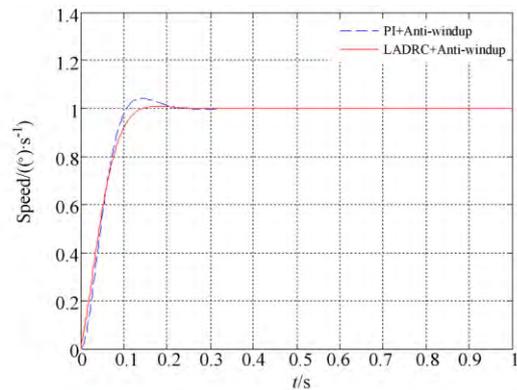


图 3 低速阶跃响应仿真曲线
Fig. 3 Step response of low speed

在设计好 LADRC 控制器参数后,首先验证其鲁棒性。针对实际望远镜转动惯量会发生变化的特点,通过改变被控对象的转动惯量来测试系统适应性。仿真中被控对象的转动惯量变化为 ±25%,即在 1 500 ~ 2 500 kgm² 变化,仿真 1(°)/s 的速度阶跃响应曲线基本没有变化。另外,为验证算法对自身参数的适应性,调节系数 b 值变化为 ±25%,即在 900 ~ 1 500,仿真结果表明 1(°)/s 的速度阶跃响应曲线也基本没有变化。由于系统阶跃响应结果基本没有变化,故未给出仿真结果。仿真结果表明:LADRC 控制算法对被控对象和自身参数的变化均有较强的适应性,具有鲁棒性强的特点。

然后进行频域分析,采用两种控制器的闭环 BODE 图如 4 所示,采用 LADRC 控制器的 -3 dB 闭环带宽为 25 rad/s,采用 PI 控制器的 -3 dB 闭环带宽为 31 rad/s,二者基本相当。

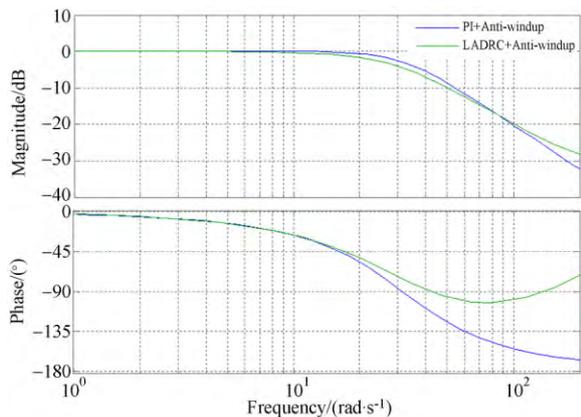


图 4 系统闭环 BODE 图

Fig. 4 Bode diagram of close-loop system

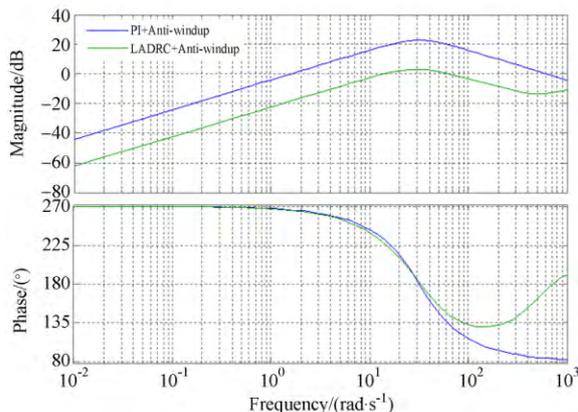


图 6 扰动抑制 BODE 图

Fig. 6 Bode diagram of disturbance-rejection system

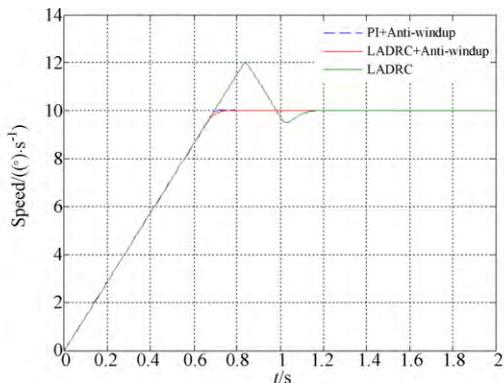


图 5 高速阶跃响应仿真曲线

Fig. 5 Step response of high speed

取执行机构的限幅值为 $[-5, +5]$,当给定速度为 $10 (^{\circ})/s$ 时,两种控制器均进入饱和状态,如图 5 所示。PI 控制器由于采用抗积分饱和算法,超调量很小;未采用抗饱和算法的 LADRC 控制器,出现很大的超调量,超调量达到 20%,且有振荡现象发生;而引入抗饱和算法的 LADRC 控制器,避免了控制量 u 的错误估计,输出速度快速无超调地达到给定值。

对于望远镜伺服系统,除了闭环控制带宽,更重要的是扰动抑制带宽。在图 2 所示的仿真模型中,取正弦波给定输入作为扰动输入端,闭环系统的速度误差作为输出端,此时系统的扰动抑制 BODE 图如图 6 所示。从图中可以看出,在中低频区,LADRC 控制器对扰动的抑制能力比常规的 PI 控制器高 20 dB,望远镜伺服系统的抗扰动能力明显增强。

5 实验验证

为了验证 LADRC 控制器的实际应用效果,在实际望远镜转台上进行了实验。整个实验转台如图 7 所示,由 PMSM 电机直接驱动,伺服控制器以 TMS320F28335 为控制核心,完成系统电流环和速度环的双闭环控制。被控对象的具体参数与仿真分析中给出的参数一致。位置反馈装置采用雷尼绍增量式光电编码器,刻线数为 76 800,编码器输出的正余弦信号在细分盒中进行了 1 000 细分,控制系统的采样频率为 1 000 Hz,速度反馈信号通过位置差分算法提取。

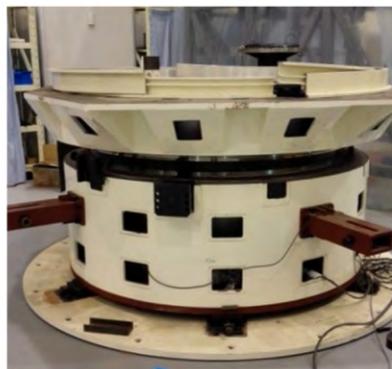


图 7 线性自抗扰控制系统实验平台

Fig. 7 Experimental platform of LADRC

图 8 是实测 $1 (^{\circ})/s$ 的阶跃响应曲线,与前述仿真结果基本一致。由于系统工作在线性区,PI 控制器稍有超调,而 LADRC 控制器则基本没有超调。图 9 是给定 $10 (^{\circ})/s$ 的大速度阶跃响应曲

线,实际实验中,引入抗饱和算法后,LADRC 控制器可以实现和抗饱和 PI 算法一样的效果,输出速度迅速进入稳定状态,无超调和振荡现象出现,有效提高了系统的稳定性。值得说明的是:图 10 中绿色曲线是将 ESO 的控制变量进行了 2 倍限幅(即电流限幅 $[-10, +10]$)后的结果,此时大速度阶跃响应已出现超调。如果不采用任何抗饱和和校正,高速速度阶跃响应会出现剧烈振荡,由于系统无法达到稳定状态,图中未给出该种状态的速度曲线。

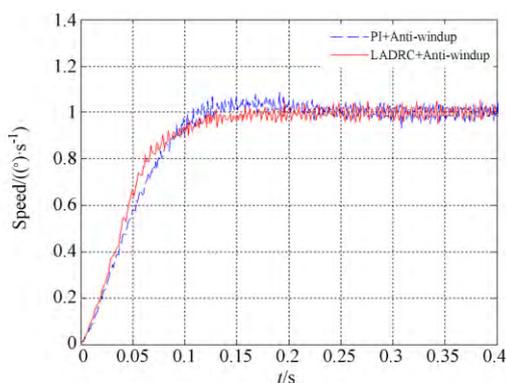


图 8 速度 $1 (^{\circ})/s$ 的阶跃响应曲线
Fig. 8 Speed step response at $1 (^{\circ})/s$

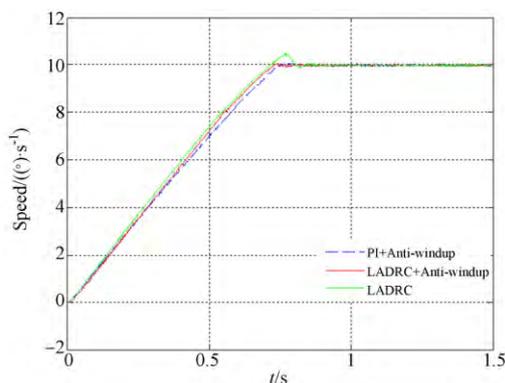


图 9 速度 $10 (^{\circ})/s$ 的阶跃响应曲线
Fig. 9 Speed step response at $10 (^{\circ})/s$

为进一步验证 LADRC 控制器对扰动的抑制能力,图 10 是给定速度为 $0.023 (^{\circ})/s$ 的低速跟踪曲线。由于实验转台受摩擦力不均匀,以及周

参考文献:

- [1] BELY P Y. 大型光学望远镜的设计与建造[M]. 高昕,王建立,唐嘉,译. 北京:清华大学出版社,2015.

期性力矩波动的影响,采用 PI 控制器时,速度波动 RMS 值为 $0.000\ 68 (^{\circ})/s$;而采用 LADRC 控制器时,速度平稳性得到有效提高,速度波动 RMS 值降低至 $0.000\ 32 (^{\circ})/s$,由此证明了 LADRC 控制器对扰动的抑制能力。

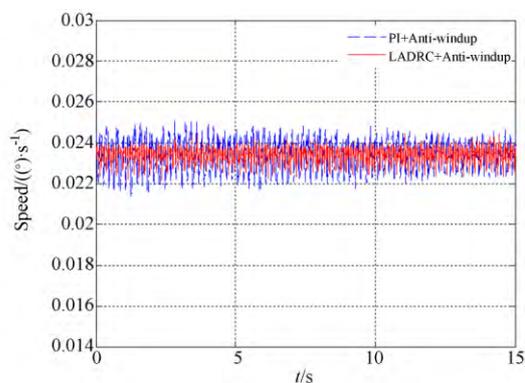


图 10 低速速度波动曲线
Fig. 10 Curve of velocity error at low speed

6 结 论

针对地基大口径望远镜伺服系统的抗扰动问题,本文引入一种抗扰动控制策略。该算法采用双闭环控制结构,其中内环为高带宽的电流环,采用传统的 PI 控制器;外环为速度环,采用改进的 LADRC 算法。该算法不依赖对象模型,具有很强的鲁棒性和易实现性,同时,它不需要额外的硬件系统,而是通过 LESO 观测器从速度信号中估计出扰动信号,然后将该扰动前馈到系统控制量中去,构成一种近似的按扰动补偿的复合校正系统。另外,为了解决实际系统执行机构输出受限的问题,引入抗饱和算法实现高低速的稳定输出。仿真和实验结果表明:LADRC 算法结构简单、适应性好、鲁棒性强,在高低速均可以获得良好的动态性能;在低速平稳跟踪实验中,相比 PI 控制器,采用 LADRC 控制器后,速度波动 RMS 误差由 $0.000\ 68 (^{\circ})/s$ 降低到 $0.000\ 32 (^{\circ})/s$,速度平稳性得到了有效提高。

BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescope* [M]. GAO X, WANG J L, TANG J, Trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)

- [2] 王国民. 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述[J]. 天文学进展, 2007, 25(4): 364-374.
WANG G M. Review of drive style for astronomical optical telescope[J]. *Progress in Astronomy*, 2007, 25(4): 364-374. (in Chinese)
- [3] SUÁREZ M, ROSICH J, ORTEGA J, *et al.*. The GTC main axes servos and control system[J]. *SPIE*, 2008, 7019: 70190J1.
- [4] MIYAWAKI K, ITOH N, SUGIYAMA R, *et al.*. Mechanical structure for the SUBARU telescope[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 754-761.
- [5] GUTIERREZ P. Standardization of direct drive servos in telescope applications[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 325-335.
- [6] SEDGHI B, MÜLLER M, BONNET H, *et al.*. Field stabilization (tip/tilt control) of E-ELT[J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773340.
- [7] MACMYNOWSKI D G, BLAUROCK C, ANGELI G Z. Dynamic analysis of TMT[J]. *SPIE*, 2008, 7017: 70170W.
- [8] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 81(3): 1-42.
MA J G. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems[J]. *Optical Engineer*, 1989, 81(3): 1-42. (in Chinese)
- [9] MANCINI D, BRESCIA M, CASCONI E, *et al.*. Variable structure control law for telescope pointing and tracking[J]. *SPIE*, 1997, 3086: 72-84.
- [10] 黄永梅, 张桐, 马佳光, 等. 高精度跟踪控制系统中电流环控制技术的研究[J]. 光电工程, 2005, 32(1): 16-19, 35.
HUANG Y M, ZHANG T, MA J G, *et al.*. Study on the control of a current loop in a high-accuracy tracking and control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 16-19, 35. (in Chinese)
- [11] 熊皓, 范永坤, 吴钦章. 光电跟踪系统力矩波动干扰抑制的研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(4): 72-74, 81.
XIONG A, FAN Y K, WU Q ZH. On restraining of disturbance caused by momentum fluctuation of optoelectronic tracking system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(4): 72-74, 81. (in Chinese)
- [12] SEDGHI B, BAUVIR B, DIMMLER M. Acceleration feedback control on an AT[J]. *SPIE*, 2008, 7012: 70121Q.
- [13] SMITH D R, SOUCCAR K. Friction compensation strategies in large telescopes[J]. *SPIE*, 2010, 7733: 77332.
- [14] 周旺平, 徐欣圻. 大型天文光学望远镜超低速跟踪控制[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 1-4.
ZHOU W P, XU X Q. Ultra-lower velocity control of large-scale optical astronomical telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 1-4. (in Chinese)
- [15] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1598-1605.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1598-1605. (in Chinese)
- [16] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于自适应滑模控制的大型望远镜低速控制[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 713-720.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Large telescope low speed control based on adaptive sliding mode control[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 713-720. (in Chinese)
- [17] 宋彦, 高慧斌, 张淑梅, 等. 直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2212-2220.
SONG Y, GAO H B, ZHANG SH M, *et al.*. Adaptive compensation of torque ripple in DC torque motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2212-2220. (in Chinese)
- [18] FRANKE T, WEADON T, FORD J, *et al.*. An iterative model-based cogging compensator for the green bank telescope servo system[J]. *SPIE*, 2014, 9145: 914555.
- [19] 邓永停, 李洪文, 王建立. 大型望远镜交流伺服控制系统综述[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 895-908.
DENG Y T, LI H W, WANG J L. Overview of AC servo control system for the large telescope[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 895-908. (in Chinese)
- [20] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485-492.
HUANG Y, ZHANG W G. Development of active disturbance rejection controller[J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(4): 485-492. (in Chinese)
- [21] GAO Z Q, HUANG Y, HAN J Q. An alternative

- paradigm for control system design[C]. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, IEEE*, 2001: 4578-4585.
- [22] MIKLOSOVIC R, GAO Z Q. A robust two-degree-of-freedom control design technique and its practical application[C]. *Proceedings of the 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, IEEE*, 2004: 1495-1502.
- [23] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2442-2449.
WANG SH, LI H W, MENG H R, *et al.*. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2442-2449. (in Chinese)
- [24] 王帅, 王建立, 李洪文, 等. 光电跟踪系统力矩波动的自抗扰控制[J]. *光电工程*, 2012, 39(4): 7-13.
WANG SH, WANG J L, LI H W, *et al.*. Active disturbance rejection control of torque ripple on optoelectronic tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(4): 7-13. (in Chinese)
- [25] 杨晓霞, 孟浩然, 李玉霞, 等. 具有扰动观测及实时补偿的大型光电望远镜主轴控制技术[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(11): 56-61.
YANG X X, MENG H R, LI Y X, *et al.*. Mount control technology using disturbance observer and compensation for large opto-electronic telescopes [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(11): 56-61. (in Chinese)
- [26] 杨晓霞, 王帅, 邓永停, 等. 利用扩张状态观测器的交流永磁同步电机控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(5): 810-816.
YANG X X, WANG SH, DENG Y T, *et al.*. PMSM control using extended state observer[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(5): 810-816. (in Chinese)
- [27] 周宏, 谭文. 线性自抗扰控制的抗饱和和补偿措施[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(11): 1457-1463.
ZHOU H, TAN W. Anti-windup schemes for linear active disturbance rejection control[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1457-1463. (in Chinese)

作者简介:



王 帅(1981—),男,河北秦皇岛人,博士,副研究员,2005 年于吉林大学获得学士学位,2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光电望远镜精密跟踪和控制技术。E-mail: wangxiaoshuai812@sohu.com



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,2010 年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光电望远镜精密跟踪控制技术和电子学设计。E-mail: dyt0612@163.com