

文章编号 1004-924X(2020)02-0350-13

# 基于级联滑模控制的高精度光电跟踪与捕获

刘 京\*, 邓永停, 李洪文

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了进一步提高光电跟踪系统的目标捕获和跟踪性能, 提出了一种基于变增益趋近律的级联滑模控制方法。基于反双曲正弦函数和幂次项设计了新型变增益滑模趋近律, 在提高滑模面趋近速度的同时抑制滑模抖振现象; 基于变增益滑模趋近律设计速度环和位置环滑模控制器构成级联滑模控制, 以提高系统的动态响应性能和鲁棒性, 提高系统对目标的捕获能力和跟踪精度。最后, 以某球形光电跟踪系统的方位轴作为控制对象, 进行了传统级联 PI 控制和级联滑模控制方法的对比分析。实验结果表明, 相比于传统级联 PI 控制, 捕获速度为  $1 (^{\circ})/s$  的目标时, 级联滑模控制可以将目标捕获时间减小 32%; 跟踪等效最大速度为  $4 (^{\circ})/s$  和最大加速度为  $2 (^{\circ})/s^2$  的正弦引导信号, 可将跟踪误差 RMS 值减小 31%, 采用级联滑模控制可有效提高跟踪系统的控制性能。

**关键词:** 光电跟踪系统; 变增益趋近律; 级联滑模控制; 目标捕获; 目标跟踪

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202802.0350

## High-precision photoelectric acquisition and tracking based on cascade sliding mode control

LIU Jing\*, DENG Yong-ting, LI Hong-wen

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\*Corresponding author, E-mail: nuaaliujing@163.com

**Abstract:** A cascade sliding mode control method based on a variable gain reaching law was proposed to improve the target acquisition and tracking performance of a photoelectric tracking system. First, to reduce sliding mode chattering and improve the dynamic response speed, a novel sliding mode reaching law with variable gains was designed. The variable gains were designed based on the inverse sine and exponential functions. Then, based on the novel reaching law with variable gain, the speed and position sliding mode controllers of the system were presented. The speed and position sliding mode controllers include cascade sliding mode control, which was designed to enhance the dynamic and robust performance of the system and further improve the system target acquisition and tracking accuracy. Finally, a comparison was made between the control performance of a traditional cascade PI control and the proposed cascade sliding mode control, based on the azimuth axis of a photoelectric tracking system. The experimental results show that compared to traditional cascade PI control, cascade

收稿日期: 2019-08-23; 修订日期: 2019-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11603024, No. 11973041); 中科院青年创新促进会会员资助项目 (No. 2019218); 长春市科技发展计划资助项目 (No. 18SS007)

sliding mode control can reduce the acquisition time by 32% when detecting a target with a speed of  $1(^{\circ})/s$ . Moreover, it can reduce the RMS of the tracking error by 31% when tracking the position sine signal with a maximum speed of  $4(^{\circ})/s$  and a maximum acceleration of  $2(^{\circ})/s^2$ . These results indicate that cascade sliding mode control can improve the control performance of the tracking system.

**Key words:** photoelectric tracking system; variable gain reaching law; cascade sliding mode control; target acquisition; target tracking

## 1 引言

光电跟踪系统是一个集光学、机械、电控、图像处理等多种技术于一身的综合集成系统,主要用于对运动目标进行实时跟踪和测量。根据载体平台不同,光电跟踪系统可分为地基、车载、舰载和机载等多种类型。不论哪种类型,光电跟踪系统在工作过程中均会受到非线性力矩扰动<sup>[1]</sup>,影响系统对目标的捕获和跟踪性能。

光电跟踪系统的目标捕获是指当目标出现在视场中,伺服系统迅速反应将目标拽入视场中心进行稳定跟踪的过渡过程,目标捕获是光电跟踪系统对目标进行实时跟踪测量的前提<sup>[2]</sup>。捕获视场的大小、目标距离以及运动特性、环境因素以及伺服系统的动态特性等均会对光电跟踪系统的捕获能力产生影响。本文仅从伺服控制系统的角度研究该问题。光电跟踪系统对目标进行捕获的过程是一个动态响应过程,伺服系统位置环的动态性能最终决定对目标的捕获能力,伺服系统的调节时间、超调量和稳态精度是衡量目标捕获能力的重要指标。目前,常用的目标捕获控制算法主要有传统的超前滞后、多模切换控制和模糊控制等。其中,传统线性控制方法的调节时间和超调量存在一定的矛盾,且系统对于扰动的鲁棒性较差。多模切换控制是线性与非线性控制相结合的方法,根据目标特性不同进行切换,但是切换过程中容易引入噪声并产生跃变,控制算法复杂,而且没有成型的设计理论。模糊控制相比于传统的线性方法可以很大程度上改善系统的动态性能,但是模糊控制的规则和控制量的关系不明确,对系统的控制精度不够。上述方法对机动目标的捕获能力有限,特别是在有扰动的条件下,目标捕获效果不佳。因此,需要引入响应快速、鲁棒性强的控

制方法,实现对目标的快速平稳捕获。

完成目标捕获后,光电跟踪系统进入稳定跟踪的运行状态。当伺服系统的传感器等硬件条件一定时,跟踪精度主要取决于伺服系统的控制精度以及系统对于扰动的鲁棒性。光电跟踪系统在运行过程中,存在摩擦、风载、电机力矩波动等多种干扰力矩,严重影响伺服系统的跟踪精度,采用鲁棒性强的非线性控制是提高伺服系统抗扰动能力,实现对目标高精度跟踪的有效途径。

滑模变结构控制是一种特殊的非线性控制方法,它的特点在于控制“结构”不固定,在动态过程中根据系统的当前状态不断变化,迫使系统按照设定的“滑动模态”轨迹运动<sup>[3]</sup>。由于滑动模态可以人为进行设计并且与系统参数及扰动均没有关系,因此滑模控制方法具有动态响应性能好、鲁棒性强等优势。目前,滑模控制理论发展得比较成熟,在很多工程领域均得到了应用<sup>[4-12]</sup>。文献<sup>[13]</sup>设计了变积分系数的滑模控制器,有效提高了系统的目标捕获能力。文献<sup>[14-15]</sup>设计了时间最优滑模控制器,可有效减小伺服系统捕获目标的时间和超调量。上述方法均基于滑模控制理论对伺服系统的位置和速度进行一体化控制,虽然可提高光电跟踪系统的目标捕获能力,但是这种一体化的控制方法在整个控制过程中的速度不可控,也无法完成对速度的限幅等操作。文献<sup>[16]</sup>提出了位置速度级联滑模控制的理念,但是其控制器切换增益固定,没有解决滑模控制方法固有的抖振问题。滑模抖振是滑模控制应用的主要问题,由于抖振问题与系统状态趋近滑模面的过程十分相关,因此对于趋近律进行变切换增益设计是解决滑模控制抖振问题最直接有效的手段<sup>[17-19]</sup>。因此,本文采用基于变增益趋近律的滑模变结构控制方法对光电跟踪系统的速度环和位

置环进行设计,构成级联滑模控制,以提高光电跟踪系统扰动条件下的目标捕获能力和跟踪精度。

## 2 光电跟踪系统的数学模型

地平式光电跟踪系统通常有方位和俯仰两个跟踪轴,两轴的伺服系统设计基本相同,此处以方位轴为例进行说明。某光电跟踪系统的方位轴采用直流力矩电机作为执行机构,电机和负载的等效模型如图 1 所示。

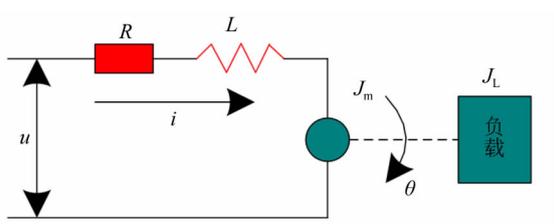


图 1 电机和负载的等效模型

Fig. 1 Diagram of the motor and load equivalent model

电压方程为:

$$U = Ri + L(di/dt) + C_e(d\theta/dt), \quad (1)$$

力矩方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m i - f\omega, \quad (2)$$

式中: $\theta$ 为机械角度, $U$ 为电机电枢电压, $i$ 为电机电枢电流, $R$ 为电机电阻, $L$ 为电机电感, $C_e$ 为电动势系数, $\omega$ 为机械角速度, $J_m$ 和 $J_L$ 分别为电机和负载的转动惯量, $J = J_m + J_L$ , $f_m$ 和 $f_L$ 分别为电机和负载的等效黏滞摩擦系数, $f = f_m + f_L$ , $C_m$ 为转矩系数。

由式(1)和式(2)可得输出角位置和输入电压的之间的传递函数为:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)}, \quad (3)$$

式中: $K = \frac{C_m}{C_m C_e + R(f_m + f_L)} \approx \frac{1}{C_e}$ ,  $T_m = \frac{J_m + J_L}{C_m C_e / R + f_m + f_L}$ ,  $T_e = \frac{R}{L}$ ,其中 $T_m$ 为机械时间常数, $T_e$ 为机电时间常数。

一般情况下有 $T_m \gg T_e$ ,可将式(3)改写为:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T_m s + 1)(T_e s + 1)}. \quad (4)$$

传递函数式(4)即为以直流力矩电机为执行机构的方位轴伺服系统被控对象。

## 3 系统扰动因素分析

光电跟踪系统在工作过程中会受到各种非线性扰动力矩的影响<sup>[20]</sup>,按照其来源可以分为内部扰动和外部扰动。内部扰动主要包括模型不确定性、电机力矩波动和摩擦力矩等。模型不确定性的来源是设计人员建立的系统模型与真实模型之间的误差,导致设计控制器时所依据的被控模型不准确,给系统引入不确定性扰动,不确定性扰动没有特定的模型。摩擦力矩具有非线性特性,对光电跟踪系统的影响主要表现为跟踪换向时的尖峰误差,以及低速跟踪时的黏滑问题。电机的力矩波动,是由于电机机械设计、制造工艺以及驱动控制系统等综合引起的周期性力矩波动,在系统低速运行时影响较大,高速运行时由于机械滤波作用可以忽略其影响。外部扰动主要包括风载扰动力矩,风载扰动是在外场工作的所有光电跟踪系统都会面临的一种扰动,研究显示风载扰动的频率主要集中在 1 Hz 以内,具有低频特性。扰动力矩的存在会影响光电跟踪系统的伺服控制精度,严重的甚至导致控制系统无法正常工作。因此,光电跟踪系统抗扰动能力的提升是一个需要解决的问题。

为了提高控制系统的鲁棒性,研究人员先后提出了自抗扰控制、自适应控制、滑模控制和神经网络智能控制等先进的控制方法。其中,滑模控制是一种非线性控制方法,它通过控制量的切换驱动系统状态沿着滑模面滑动,使得系统在受到扰动时具有不变性,这种特性使滑模控制方法得到了广泛关注。从理论角度分析,由于滑模面可以按照需要进行设计,并且系统的滑动模态与被控对象的参数变化以及系统的扰动没有关系,因此滑模控制系统具有比一般的常规连续系统更强的鲁棒性。本文基于滑模控制方法对光电跟踪系统的控制器进行了设计。

## 4 变增益趋近律设计

为了抑制滑模抖振问题,设计如下变增益滑

模趋近律:

$$\dot{s} = -(k \cdot a \sinh(b|x_1|) + k_l \cdot |s|^a) \cdot \text{sign}(s) - k_l \cdot s, \quad (5)$$

式中: $k > 0$ ,为切换增益; $k_l > 0$ ,为幂次项增益; $k_l > 0$ ,为线性增益; $x_1 = e$ ,为系统状态。该趋近律的设计在于反双曲正弦函数  $a \sinh(\cdot)$  和幂次项的应用。反双曲正弦函数  $y = a \sinh(bx)$  曲线如图 2 所示,可以看出在参数  $x$  较小时,函数值  $y$  也较小;随着  $x$  增大, $y$  值迅速增大并趋于饱和,并且在  $b$  取不同数值时, $y$  的增大速率有所不同。为了抑制滑模抖振问题,通常情况下我们希望在系统跟踪误差较大时,即系统状态离滑模面较远时,切换增益较大,以驱动系统快速到达滑模面进行滑模运动;而当系统状态离滑模面较近时,切换增益减小,以削弱系统在滑模面上的抖振。因此,可以利用反双曲正弦函数的特性来设计趋近律。幂次项的加入,使得系统在远离滑模面时有更好的动态响应能力。

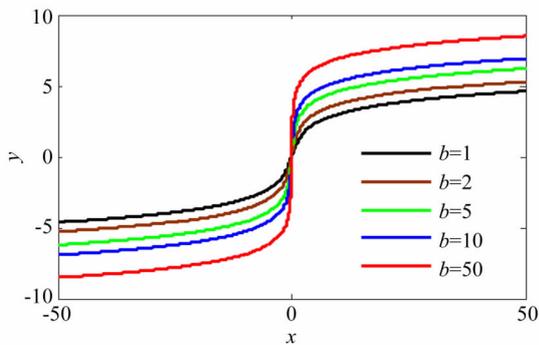


图 2 反双曲正弦函数曲线  
Fig. 2 Asinh function curves

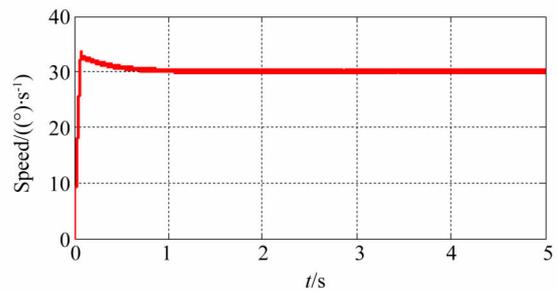
为了验证提出的变增益趋近律的有效性,将该趋近律与传统趋近律进行了仿真对比。在一典型系统的速度闭环条件下,分别采用以下 3 种趋近律进行对比分析(此对比的前提是,3 种趋近律的系数  $k$  和  $k_l$  均相同):

(1)传统趋近律: $\dot{s} = -k \cdot \text{sign}(s) - k_l \cdot s$ ;

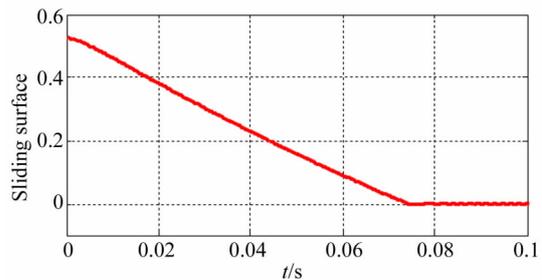
(2)加入反双曲正弦函数的趋近律: $\dot{s} = -k \cdot a \sinh(b|x_1|) \cdot \text{sign}(s) - k_l \cdot s$ ;

(3)变增益趋近律(加入反双曲正弦函数和幂次项的趋近律): $\dot{s} = -(k \cdot a \sinh(b|x_1|) + k_l \cdot |s|^a) \cdot \text{sign}(s) - k_l \cdot s$ ;

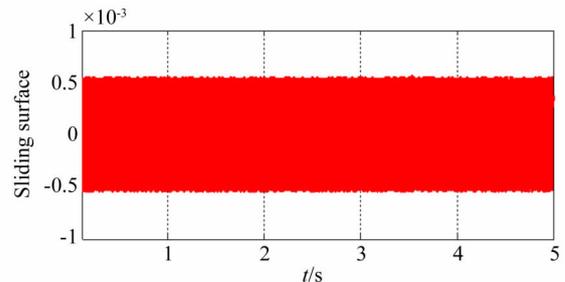
给定  $30 (^{\circ})/s$  的速度阶跃信号,采用 3 种趋近律的速度和滑模面响应仿真结果如图 3~图 5 所示。由图 3 可以看出,滑模面在  $0.075 s$  处到达滑模面,但是由于采用固定切换增益,系统状态在到达滑模面时存在固定带宽的抖振,最后反映在速度响应具有抖振。由图 4 可以看出,加入了反正弦函数后,系统状态在  $t=0.036 s$  处到达滑模面,提高了系统的响应速度;同时由于反正弦函数的特性,滑模面的抖振明显小于固定切换增益的情况,速度控制性能明显提高。由图 5 可以看出,加入了幂次函数项后,系统状态在  $t=0.031 s$



(a) 速度响应  
(a) Speed response



(b) 滑模面响应时间  
(b) Response time of sliding surface



(c) 滑模抖振情况  
(c) Condition of sliding mode chattering

图 3 传统趋近律的仿真结果( $k = 6, k_l = 5$ )

Fig. 3 Simulation results for conventional reaching law( $k = 6, k_l = 5$ )

处到达滑模面,减小了滑模面趋近时间,进一步提高了系统的快速性。

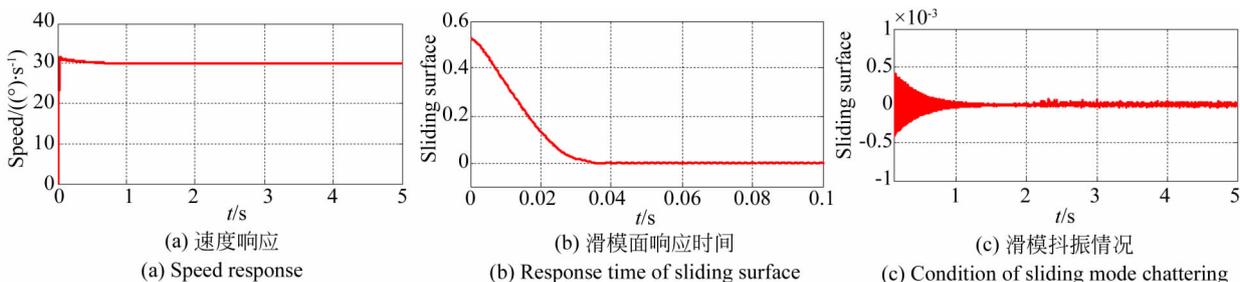


图 4 反双曲正弦函数趋近律的仿真结果( $k=6, b=50, k_t=5$ )

Fig. 4 Simulation results for asinh reaching law( $k=6, b=50, k_t=5$ )

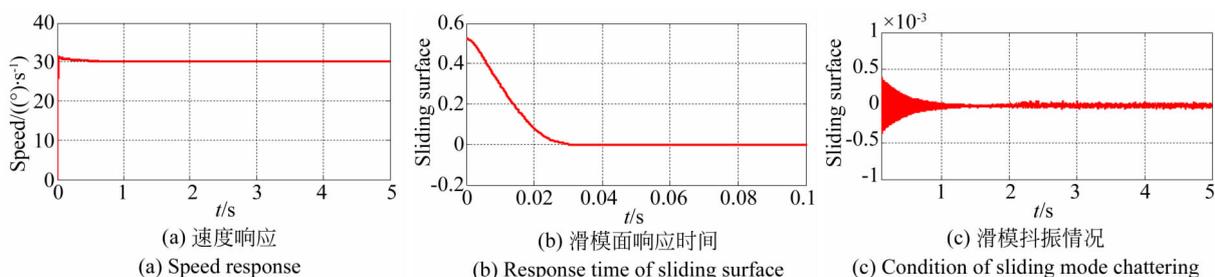


图 5 变增益趋近律的仿真结果( $k=6, b=50, k_t=15, \alpha=1.2, k_l=5$ )

Fig. 5 Simulation results for variable gain reaching law( $k=6, b=50, k_t=15, \alpha=1.2, k_l=5$ )

为了进一步削弱到达滑模面附近时系统状态变量的抖振,将符号函数采用平滑处理<sup>[21]</sup>:

$$\text{sgn}(s) = \frac{s}{|s| + \sigma}, \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为边界层系数,为一个数值较小的正常数。符号函数会对系统的快速性有所衰减,在设计时,需选取一个折中的参数取值。

### 5 速度滑模控制器设计

为了提升光电跟踪系统的抗扰动性能,设计速度环滑模控制器,提高系统的动态响应性能和速度跟踪精度。由于光电跟踪系统的方位轴和俯仰轴伺服系统的设计基本相同,所以本文仅以方位轴为例对设计方法进行描述。定义速度跟踪误差  $e_\omega = \omega_{\text{ref}} - \omega$ , 其中  $\omega_{\text{ref}}$  为速度给定信号,  $\omega$  为速度反馈信号,取状态变量  $x_\omega = e_\omega$ 。选取积分型滑模面:

$$s_\omega = e_\omega + c_\omega \int e_\omega. \quad (10)$$

结合式(5)变增益趋近律和式(2),可得速度环滑模控制律为:

$$u_\omega = \frac{J}{C_m}(ce_\omega + f\omega + k_{l\omega} \cdot s_\omega + (k_\omega \cdot a \sinh(b_\omega |x_\omega|) + k_{l\omega} \cdot |s_\omega|^\alpha) \cdot \text{sgn}(s_\omega)). \quad (11)$$

基于李雅普诺夫稳定性理论,对速度闭环系统进行稳定性分析。定义李雅普诺夫函数为:

$$V_\omega = \frac{1}{2} s_\omega^2. \quad (12)$$

可得:

$$\dot{V}_\omega = s_\omega \dot{s}_\omega = s_\omega (\dot{e}_\omega + c_\omega e_\omega), \quad (13)$$

将式(11)速度滑模控制律带入式(13)可得:

$$\dot{V}_\omega = -(k_\omega \cdot a \sinh(b_\omega |x_\omega|) + k_{l\omega} \cdot |s_\omega|^\alpha) \cdot |s_\omega| - k_{l\omega} \cdot s_\omega^2 \leq 0. \quad (14)$$

由式(14)可知,基于该速度滑模控制律的速度控制系统是稳定的,系统误差可在有限时间内趋近于 0。

### 6 位置滑模控制器设计

光电跟踪系统的位置环性能在一定程度上决定了其捕获目标的能力,最终体现在伺服系统对目标的跟踪精度上。位置控制要求快速,无超调以及具有较高的位置跟踪精度。

在进行位置环设计时,可将速度闭环系统等价为—阶惯性环节  $\frac{K}{Ts+1}$ ,其中  $T$  为速度环的时间常数<sup>[22]</sup>,基于此进行位置控制器设计,位置闭环结构框图如图 6 所示。

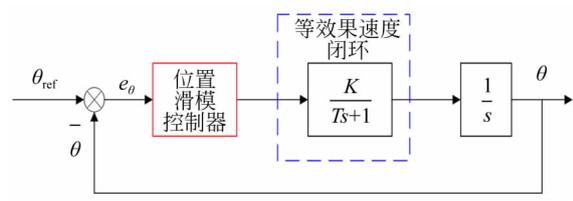


图 6 位置闭环结构框图

Fig. 6 Block diagram of position close loop

定义位置跟踪误差  $e_\theta = \theta_{ref} - \theta$ ,其中  $\theta_{ref}$  为位置给定信号, $\theta$  为位置反馈信号。选取两个状态变量  $e_1 = e_\theta, e_2 = de_1$ ,由图 6 可得:

$$e_1 = \theta_{ref} - \theta = \theta_{ref} - \omega_{ref} \cdot \frac{K}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s}. \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\dot{e}_2 = \frac{1}{T}(T\ddot{\theta}_{ref} + \dot{\theta}_{ref} - e_2 - \omega_{ref}K), \quad (16)$$

式中  $\omega_{ref}$  为位置控制器的输出。

可得状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K}{T} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\dot{\theta}_{ref}}{T} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

选取滑模面:

$$s_\theta = c_\theta e_1 + e_2. \quad (18)$$

采用设计的变增益趋近律,结合式(18)可得位置环滑模控制律:

$$u_\theta = \frac{T}{K}((c_\theta - 1/T)e_2 + \dot{\theta}_{ref}/T + k_{\theta 0} \cdot s_\theta + (k_\theta \cdot a \sinh(b_\theta |x_\theta|) + k_\theta \cdot |s_\theta|^a) \operatorname{sgn}(s_\theta)). \quad (19)$$

定义李雅普诺夫函数为:

$$V_\theta = \frac{1}{2} s_\theta^2. \quad (20)$$

可得:

$$\dot{V}_\theta = s_\theta \dot{s}_\theta = s_\theta(c_\theta \dot{e}_2 + \dot{e}_2). \quad (21)$$

将式(19)位置滑模控制律带入式(21)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta = & -(k_\theta \cdot a \sinh(b_\theta |x_\theta|) + k_\theta \cdot |s_\theta|^a) \cdot \\ & |s_\theta| - k_{\theta 0} \cdot s_\theta^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (22)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论,可知基于该位置滑模控制律的位置控制系统是稳定的,位置误差可在有限时间内趋近于 0。

基于级联滑模控制的光电跟踪系统控制结构框图如图 7 所示。

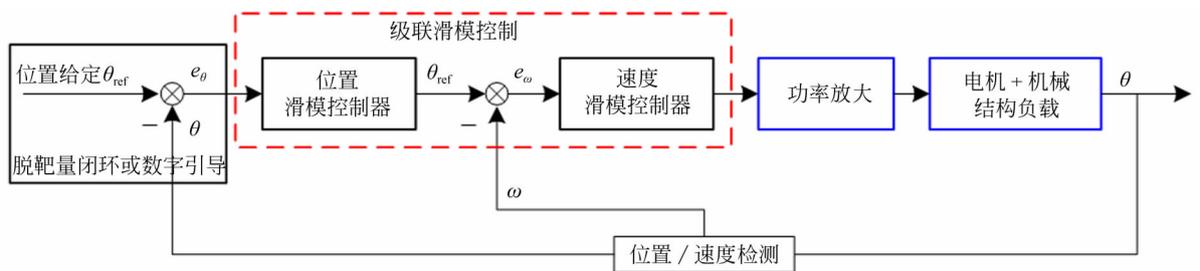


图 7 基于级联滑模控制的光电跟踪系统控制结构框图

Fig. 7 Block diagram of photoelectric tracking system based on cascade sliding mode control

## 7 仿真和实验分析

为了验证提出的控制方法的有效性,进行了仿真和实验分析。某球形光电跟踪系统实验平台及其驱动控制器如图 8 所示,由直流量电机作为执行机构驱动转台方位和俯仰运动,两轴各有一个 24 位绝对式光电编码器作为位置反馈元件。方位轴转动惯量为  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,方位轴电机参数如表 1 所示。驱动控制器采用 DSP+FPGA 的架构进行电机的驱动控制,DSP 作为主控制器完成速度环和位置环校正,FPGA 作为协控制器完成故障保护以及脉宽调制。



图 8 球形光电跟踪系统实验平台

Fig. 8 Experimental platform of spherical photoelectric tracking system

表 1 方位轴电机参数

Tab. 1 Parameters of azimuth axis motor

参数	数值
电阻/ $\Omega$	16.5
电感/mH	19.62
力矩系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	3
峰值力矩/ $(\text{N} \cdot \text{m})$	12
峰值电流/A	4

为了对本文提出的级联滑模控制方法的有效性进行验证,在仿真和实验中将它与传统的级联 PI 控制方法进行对比。PI 控制器的表达式为  $G_c(s) = k_p + k_i/s$ ,并且速度和位置 PI 控制器的参数选取参照文献[23-24]中典型系统 PI 参数工程设计方法进行整定,并在实际系统中将参数进行微调以达到优良的控制性能。

### 7.1 仿真分析

基于光电跟踪系统方位轴参数,利用 MATLAB/Simulink 对提出的控制方法进行仿真分析。

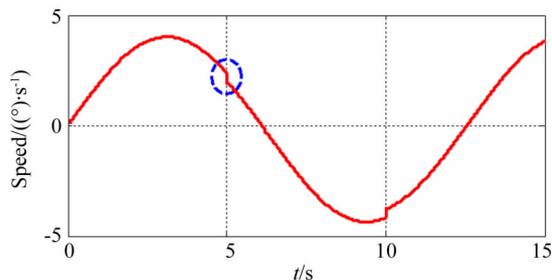
#### 7.1.1 速度滑模控制器有效性验证

给定参考速度信号为  $\omega = 4\sin(0.5t)$ 。在  $t = 5 \text{ s}$  时加入  $2 \text{ N} \cdot \text{m}$  的负载扰动力矩,在  $t = 10 \text{ s}$  时撤销  $2 \text{ N} \cdot \text{m}$  的扰动力矩,速度控制分别采用 PI 和基于变增益趋近律的滑模控制方法速度响应仿真结果如图 9~图 10 所示。

系统对于外部扰动的抑制主要在速度环,由以上仿真结果可以看出,在相同的扰动条件下,滑模控制下的速度出现较小幅值的波动,且以较快的速度恢复到给定速度。与 PI 控制相比,滑模控制表现出更优的速度控制性能。

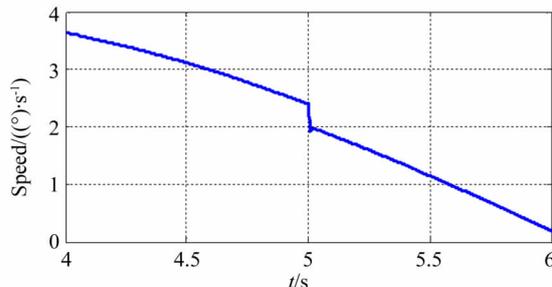
#### 7.1.2 位置滑模控制器有效性验证

为了验证级联滑模控制的有效性,分别输入位置阶跃和正弦引导信号,以测试控制方法的跟踪性能。给定位置阶跃信号  $5^\circ/\text{s}$ ,在  $t = 5 \text{ s}$  时加入正弦扰动力矩。分别采用 PI 级联控制和滑模级联控制方法,且两种方法位置和速度控制器的输出限幅值相等。位置响应仿真结果如图 11~图 12 所示。



(a) 速度响应

(a) Speed response



(b) 加载处速度放大曲线

(b) Zoom in of speed response at loading point

图 9 PI 控制速度响应仿真结果

Fig. 9 Speed simulation results with PI control

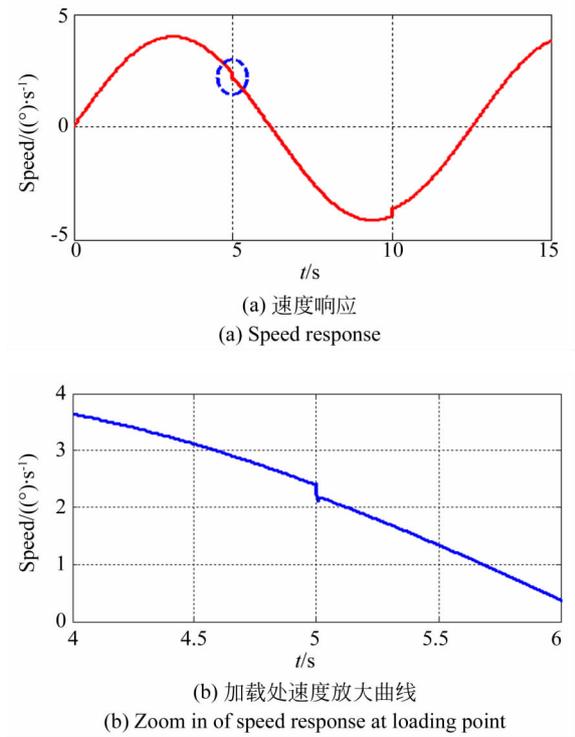


图 10 滑模控制速度响应仿真结果

Fig. 10 Speed simulation results with sliding mode control

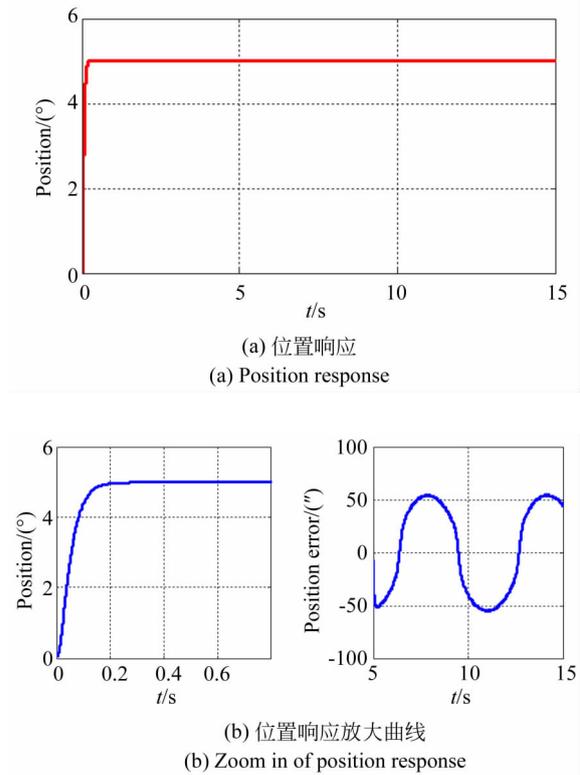


图 12 级联滑模控制位置响应仿真结果

Fig. 12 Position simulation results with cascade sliding mode control

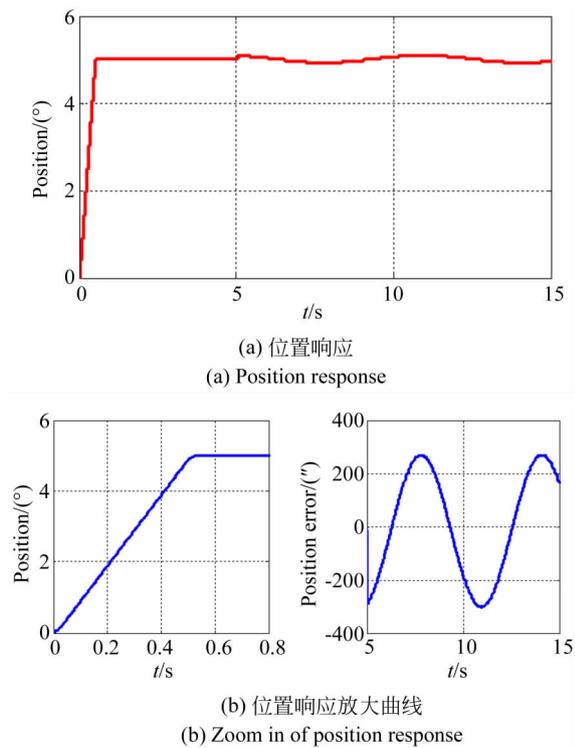


图 11 级联 PI 控制位置响应仿真结果

Fig. 11 Position simulation results with cascade PI control

由仿真结果可以看出,与 PI 级联控制相比,级联滑模控制下系统位置几乎没有超调,调节时间也大大降低。当系统中出现正弦扰动后,采用级联滑模控制方法的位置波动更小,这得益于滑模控制的强鲁棒性。

位置正弦引导信号为  $\theta = 8 \cdot \sin(0.5t)$ , 分别采用级联 PI 控制和级联滑模控制的位置跟踪仿真结果如图 13~图 14 所示。可以看出,采用级联滑模控制跟踪正弦信号的误差更小,表示级联滑模控制有更好的跟踪动态位置信号的能力。

### 7.2 实验

基于图 8 所示的硬件实验平台对提出的级联滑模控制方法的有效性进行验证。

#### 7.2.1 速度跟踪能力

给定  $1^\circ/\text{s}$  的恒值速度信号,分别采用 PI 和滑模控制器对速度信号进行跟踪,实验结果如图 15 所示,速度波动的均方根误差(Root Mean Square, RMS)值分别为  $0.0406^\circ/\text{s}$  和  $0.0352^\circ/\text{s}$ 。

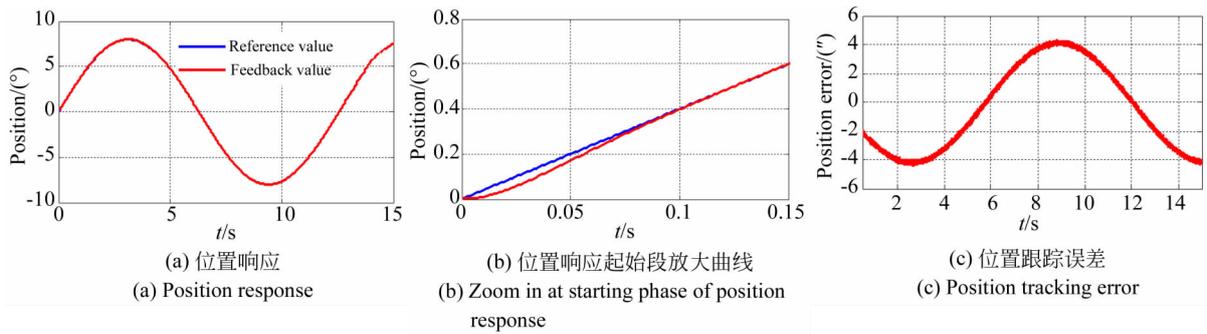


图 13 级联 PI 控制正弦跟踪仿真结果

Fig. 13 Simulation results of sinusoidal tracking with cascade PI control

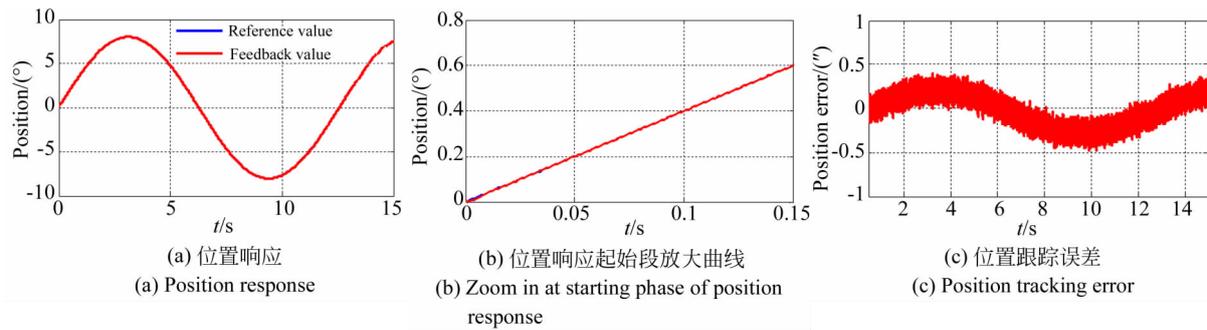


图 14 级联滑模控制正弦跟踪仿真结果

Fig. 14 Simulation results of sinusoidal tracking with cascade sliding mode control

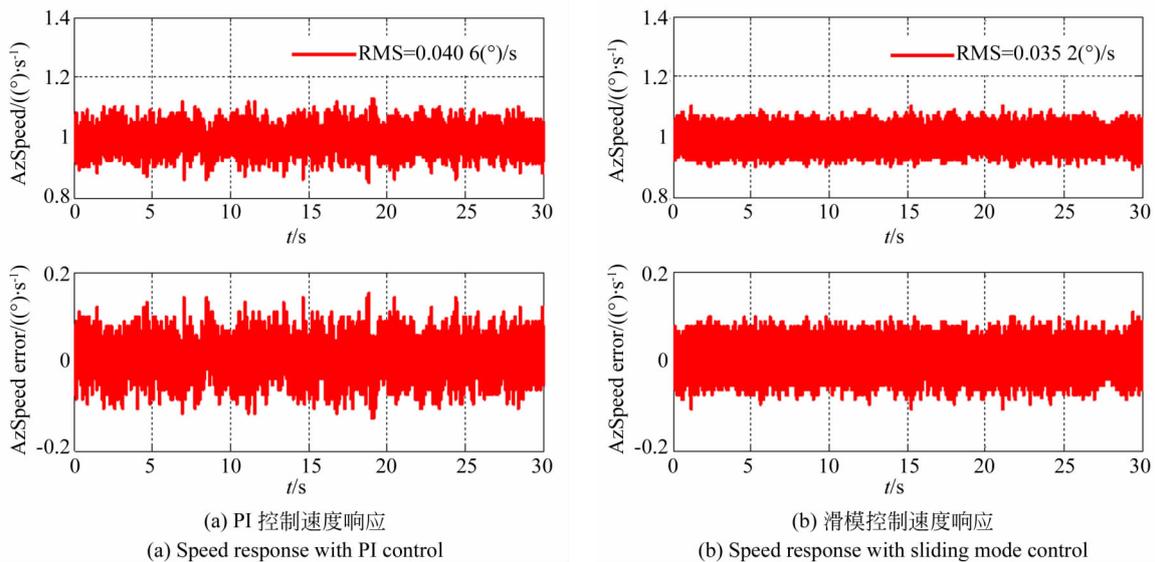


图 15 恒速引导实验结果

Fig. 15 Experimental results of constant speed tracking

给定速度正弦引导信号为  $\omega = 3\sin(0.4t)$ , 分别采用 PI 和滑模速度控制器对速度正弦信号进行跟踪, 实验结果如图 16 所示。由实验结果可以看出, 采用 PI 控制速度跟踪误差 RMS 值为

$0.0621(^\circ)/s$ , 采用滑模控制速度跟踪误差 RMS 值为  $0.0558(^\circ)/s$ , 并且在速度过零处由摩擦引起的误差尖峰也有所降低。实验结果表明, 速度滑模控制器相比 PI 有更强的鲁棒性, 能够获得更

优的速度控制性能。

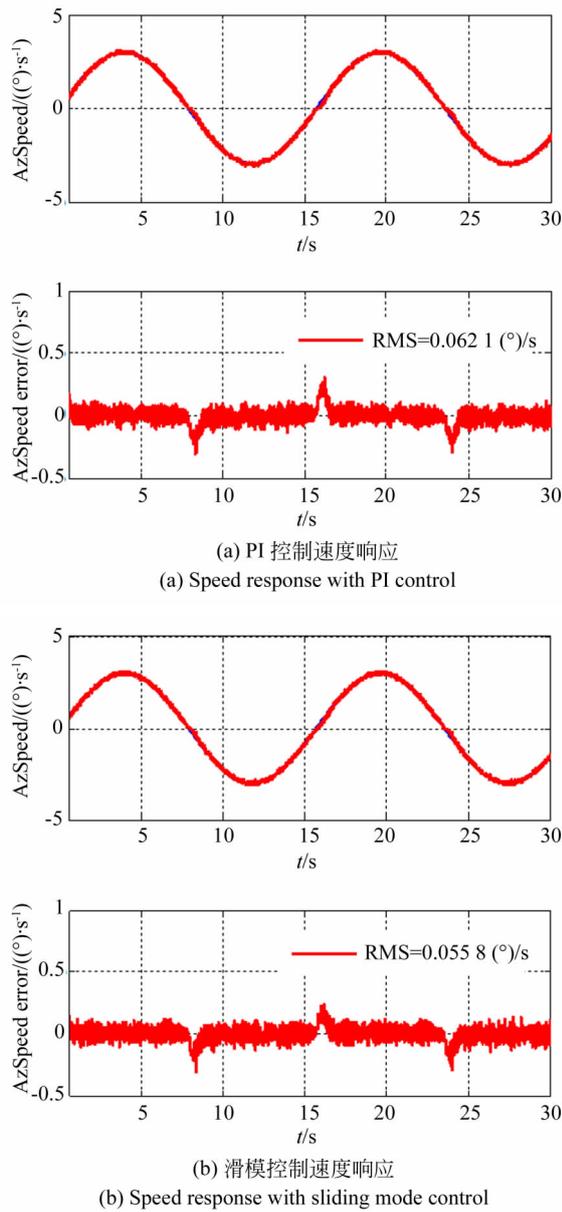


图 16 正弦引导实验结果

Fig. 16 Experimental results of sinusoidal speed tracking

### 7.2.2 目标捕获能力

在光电跟踪系统对目标进行捕获时,通常情况下是当目标初次出现在探测器视场内时,伺服跟踪系统会接收到一个脱靶量信号,伺服跟踪系统将目标拽到视场中心,再转入稳定跟踪。

伺服系统将目标拽入视场中心的过程可以理解为,伺服系统跟踪一个位置阶跃信号加上一个位置斜坡信号(假定目标恒速运行)。当跟踪系统

对目标进行捕获时,若系统对位置信号的响应出现超调,那么便会导致目标在视场中出现晃动,导致捕获不稳<sup>[25]</sup>。由于探测器的视场角有限,因此超调很可能导致目标逸出视场。因此,系统具有快速,无超调的响应能力才能实现对目标的平稳快速捕获。

首先将光电跟踪系统的方位轴定位在 37° 的位置处,在  $t=16\text{ s}$  时,给定  $37.2^\circ + 1^\circ/\text{s} \cdot t$  (s) 的位置指令信号模拟目标捕获,分别采用级联 PI 控制和级联滑模控制的位置响应实验结果如图 17 所示。

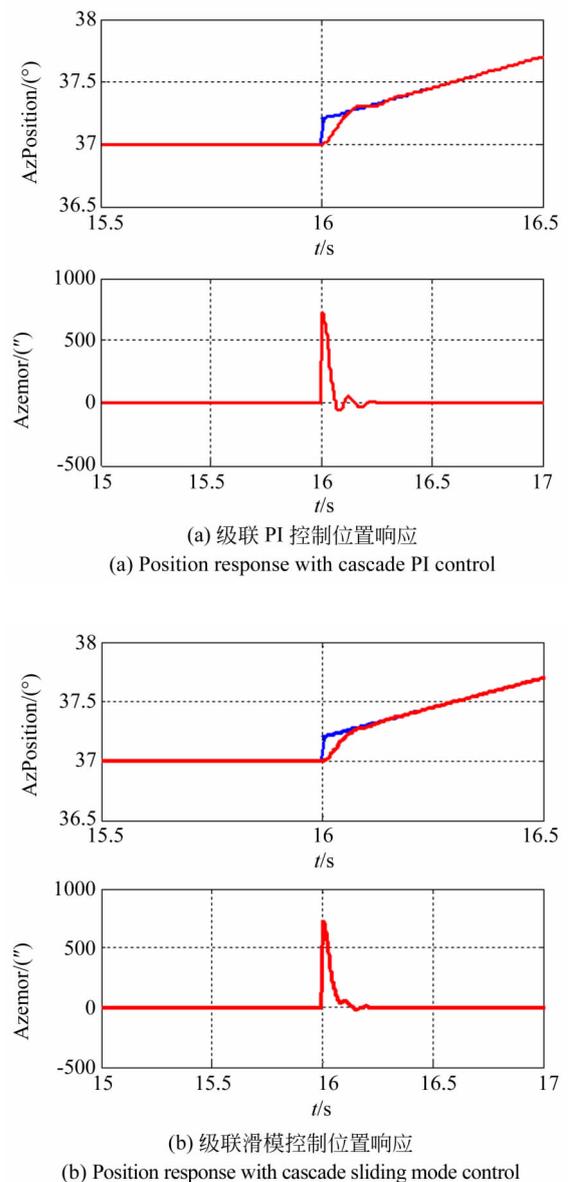


图 17 位置响应实验结果

Fig. 17 Experimental results of position acquisition

由实验结果可以看出,级联 PI 控制和级联滑模控制分别经历 0.28 s 和 0.19 s 的调节时间使得系统完全跟踪上给定信号。级联 PI 控制的位置响应出现了超调,级联滑模控制的位置响应并未出现超调,将目标捕获的时间减小了 32%。可以看出,采用级联滑模控制可有效提升光电跟踪系统的目标捕获性能。

### 7.2.3 位置跟踪能力

给定等效速度为  $4 (^{\circ})/s$  和加速度为  $2 (^{\circ})/s^2$  的正弦引导信号  $\theta_1 = 8 \cdot \sin(0.5t)$ , 分别采用级联 PI 控制和级联滑模控制的位置跟踪结果如图 18 所示。由图可以看出,采用级联 PI 控制和级联滑模控制跟踪正弦位置引导信号的误差 RMS 值分别约为  $3.64''$  和  $2.51''$ 。

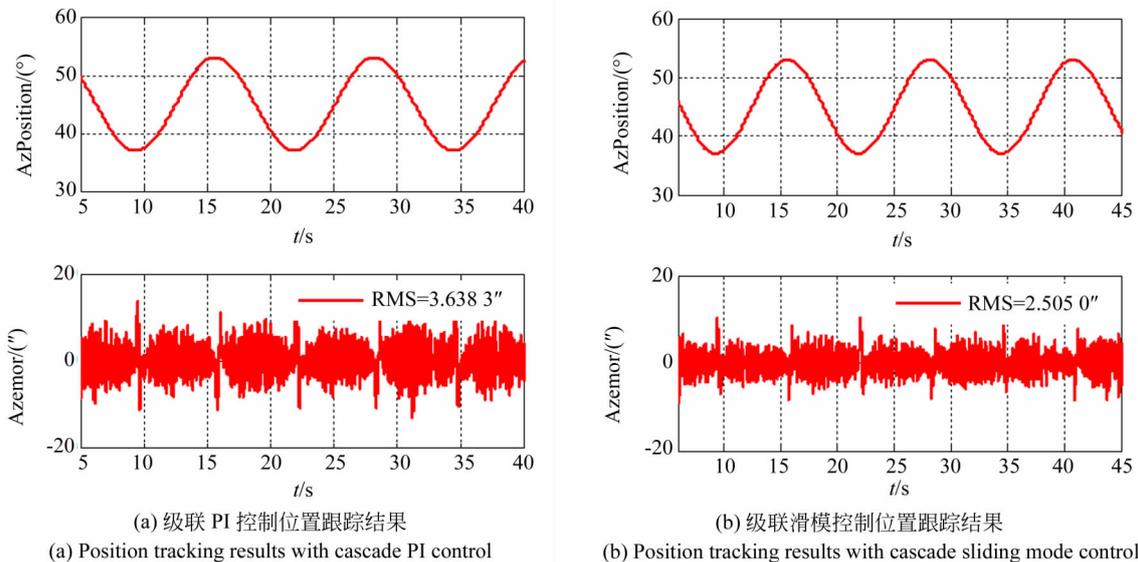


图 18 正弦引导信号的位置跟踪实验结果

Fig. 18 Experimental results for position tracking of sinusoidal signal

由以上实验结果可以看出,相比于传统的级联 PI 控制,级联滑模控制将跟踪误差减小了 31%,能够获得更优的位置跟踪性能。

## 8 结 论

为了提高光电跟踪系统的目标捕获和跟踪能力,本文提出了一种基于变增益趋近律的位置速

度级联滑模控制方法,利用滑模控制的快速性和强鲁棒性来提升系统的控制性能。实验结果表明,相比于传统级联 PI 控制,级联滑模控制可以将目标捕获时间减小 32%;同时跟踪等效最大速度为  $4 (^{\circ})/s$  和最大加速度为  $2 (^{\circ})/s^2$  的正弦引导信号,跟踪误差减小 31%。速度环和位置环采用基于变增益趋近律的级联滑模控制器,可有效提高光电跟踪系统的目标捕获和跟踪性能。

### 参考文献:

- [1] 蔡华祥. 望远镜中跟踪架的扰动补偿及精密控制技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
CAI H X. *Disturbance Compensation and Precision Control Techniques of Tracking Gimbal on Telescope*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [2] 程龙. 光电跟踪系统永磁同步电机快速捕获控制技术[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.

- CHENG L. *Fast Acquisition Control for the Optical Tracking System with Permanent Magnet Synchronous Motor* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 张晓光. 永磁同步电机调速系统滑模变结构控制若干关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
ZHANG X G. *Research on Key Issues of Permanent Magnet Synchronous Motor Sliding Mode Speed Control System*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

- te of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47-52.  
ZHANG X G, ZHAO K, SUN L, *et al.*. Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on a novel exponential reaching law[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(15): 47-52. (in Chinese)
- [5] 张立伟, 魏维, 张超, 等. 基于全局非线性积分滑模的永磁交流伺服系统研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3917-3924.  
ZHANG L W, WEI W, ZHANG CH, *et al.*. Study on permanent magnet synchronous motor servo system based on total sliding mode control approach with nonlinear integrator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(16): 3917-3924. (in Chinese)
- [6] LIANCQ, XIAOF, GAO S, *et al.*. Load torque and moment of inertia identification for permanent magnet synchronous motor drives based on sliding mode observer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5675-5683.
- [7] LISH, ZHOUM M, YU X H. Design and implementation of terminal sliding mode control method for PMSM speed regulation system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(4): 1879-1891.
- [8] INCREMONAGP, RUBAGOTTIM, FERRARA A. Sliding mode control of constrained nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(6): 2965-2972.
- [9] MAHF, WUJ H, XIONG Z H. Discrete-time sliding-mode control with improved quasi-sliding-mode domain[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6292-6304.
- [10] LIANGDL, LIJ, QU R H, *et al.*. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(10): 8994-9004.
- [11] ZHANGJH, SHIP, XIA Y Q, *et al.*. Discrete-time sliding mode control with disturbance rejection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10): 7967-7975.
- [12] 魏维. 基于滑模控制的永磁交流伺服系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- WEI W. *Research on PMSM AC Servo System Based on Sliding Mode Control*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [13] 吴培. 基于滑模变结构控制的光电经纬仪目标捕获动态性能研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.  
WU P. *Performance Research of Target Acquisition for Photoelectrical Theodolite Based on Sliding Mode Control*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2010. (in Chinese)
- [14] 程龙, 陈娟, 陈茂胜, 等. 光电跟踪系统快速捕获时间最优滑模控制技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 148-154.  
CHENG L, CHEN J, CHEN M SH, *et al.*. Fast acquisition of time optimal sliding model control technology for photoelectric tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 148-154. (in Chinese)
- [15] 冯媛媛, 华光辉. 车载雷达稳定转台伺服系统有限时间积分滑模控制[J]. 雷达与对抗, 2015, 35(4): 54-59.  
FENG Y Y, HUA G H. Finite-time integral sliding mode control of servo system for vehicle-borne radar stabilizing rotary platform [J]. *Radar & ECM*, 2015, 35(4): 54-59. (in Chinese)
- [16] 朱玉川, 李志刚, 马大为, 等. 永磁交流位置伺服系统串级复合滑模控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2779-2782.  
ZHU Y CH, LI ZH G, MA D W, *et al.*. Cascaded compound sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor position servo system [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(12): 2779-2782. (in Chinese)
- [17] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.  
TONG K W, ZHANG X, ZHANG Y, *et al.*. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous machine based on a novel reaching law[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(21): 102-106. (in Chinese)
- [18] ZHANGD, LIUGH, ZHOU H W, *et al.*. Adaptive sliding mode fault-tolerant coordination control for four-wheel independently driven electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(11): 9090-9100.

- [19] 廖瑛, 杨雅君, 王勇. 滑模控制的新型双幂次组合函数趋近律[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 105-110.  
LIAO Y, YANG Y J, WANG Y. Novel double power combination function reaching law for sliding mode control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(3): 105-110. (in Chinese)
- [20] 方宇超, 李梦雪, 车英, 等. 车载光电侦察平台视轴稳定技术研究[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(2): 410-417.  
FANG Y CH, LI M X, CHE Y, *et al.*. Study on boresight stabilized technology of vehicle photoelectric reconnaissance platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 410-417. (in Chinese)
- [21] 胡强晖, 胡勤丰. 全局滑模控制在永磁同步电机位置伺服中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 61-66.  
HU Q H, HU Q F. Global sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(18): 61-66. (in Chinese)
- [22] 唐红雨, 刘贤兴. 基于滑模自抗扰控制器的永磁同步电机位置环控制研究[J]. 微电机, 2015, 48(5): 90-94.  
TANG H Y, LIU X X. Position loop control study of permanent magnet synchronous motor based on sliding ADRC control[J]. *Micromotors*, 2015, 48(5): 90-94. (in Chinese)
- [23] 王莉娜, 朱鸿悦, 杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 104-117.  
WANG L N, ZHU H Y, YANG Z J. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(5): 104-117. (in Chinese)
- [24] THOMPSON P M, KRASUSKIT, TSUBOTA K, *et al.*. Keck telescope mount control redesign to improve short move performance[C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 9145, Ground-Based and Airborne Telescopes V, Montréal, Québec, Canada*, 2014, 9145: 914557.
- [25] 葛兵, 高慧斌, 张淑梅, 等. 经纬仪伺服系统快速捕获方法研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 41-44.  
GE B, GAO H B, ZHANG SH M, *et al.*. Research on fast acquisition of servo-control system [J]. *OME Information*, 2011, 28(12): 41-44. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘 京(1991—),女,辽宁铁岭人,博士,助理研究员,2013年于南京航空航天大学获得学士学位,2018年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事望远镜精密跟踪与控制技术的研究。E-mail: nuaaliujing@163.com



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,副研究员,2010年于中国石油大学获得学士学位,2015年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事大型望远镜精密跟踪控制及电子学设计方面的研究。E-mail: dyt0612@163.com