

基于 ESO 的导引头稳定平台双积分滑模控制

张明月¹, 刘 慧¹, 储海荣¹, 张玉莲¹, 孙婷婷¹, 苗锡奎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. 中国洛阳电子装备试验中心 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 为了提高导引头稳定平台抗扰性及速度稳态跟踪性能, 提出了一种基于扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 的双积分滑模控制器 (Double Integral Sliding Mode Controller, DISMC)。首先, 采用二阶扩张状态观测器对系统的未知扰动进行估计; 然后, 采用了双积分滑模控制器实现了系统的低稳态误差跟踪, 同时采用了改进的幂次趋近律来削弱控制系统的抖振影响; 最后, 采用导引头稳定平台进行目标跟踪实验和隔离度性能测试。实验结果表明, 与传统基于扰动观测器 (Disturbance Observer, DOB) 的 PI 控制方法相比, 跟踪 $3(^{\circ})/s$ 的梯形波时, 在提出的控制器作用下速度跟踪快速性提高了 48 ms, 跟踪误差标准差提高了 $0.0131(^{\circ})/s$ 。同时用转台模拟弹体扰动分别为 $\sin(\pi t)^{\circ}$ 、 $3\sin(5\pi t)^{\circ}$ 、 $7\sin(2\pi t)^{\circ}$ 时, 系统的隔离度分别提高了 2.91%、0.45%、0.7%, 表明基于扩张状态观测器的双积分滑模控制器对导引头稳定平台具有较强的抗扰性和较好的跟踪性能。

关键词: 导引头稳定平台; 双积分滑模控制器; 隔离度; 扩张状态观测器

中图分类号: TJ765.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0817009

Double integral sliding mode control based on ESO for stabilized platform of seeker

Zhang Mingyue¹, Liu Hui¹, Chu Hairong¹, Zhang Yulian¹, Sun Tingting¹, Miao Xikui²

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to reduce the influence of disturbances on the stabilized platform of seeker, an improved double integral sliding mode controller (DISMC) based on extended state observer (ESO) was proposed in this paper. Firstly, the second order extended state observer was used to estimate the unknown disturbances of the system. Secondly, a double integral sliding mode controller was adopted to achieve low steady-state error tracking; meanwhile, the improved power reaching law was adopted to reduce the chatting magnitude. Finally, the performances of tracking and disturbance rejection rate were carried out on the stabilized platform of seeker. The results showed that compared with the traditional PI controller based on disturbance observer (PI-DOB), when the system tracked the trapezoidal wave at $3(^{\circ})/s$, response time of LOS rate was reduced by 48 ms, and the standard deviation of tracking error was reduced by $0.0131(^{\circ})/s$ with the proposed controller. Meanwhile, the turntable generated a periodic motion with

收稿日期: 2018-03-13; 修订日期: 2018-04-17

基金项目: 中国洛阳电子装备试验中心光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(GKCP2017001, GKCP2017002)

作者简介: 张明月(1986-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事惯性稳定平台运动学、动力学与控制方面的研究。Email: zyy_2011@163.com

$\sin(\pi t)^\circ$, $3\sin(5\pi t)^\circ$ and $7\sin(2\pi t)^\circ$ respectively to simulate the motion of the carrier, the disturbance rejection rates were increased by 2.91%, 0.45%, 0.7% respectively. In conclusion, the DISMC-ESO has better performance in dynamic response and disturbance rejecting for stabilized platform of seeker.

Key words: stabilized platform of seeker; double integral sliding mode controller; disturbance rejection rate; ESO

0 引言

激光半主动制导系统中的导引头由跟踪稳定平台、激光探测系统、电子舱等组成。速率陀螺稳定平台是光学探测系统的载体,以其跟踪角速度大、离轴角大、抗干扰能力强、负载能力大等优点作为导引头跟踪稳定平台得到广泛应用,主要功能是实现光轴空间稳定、随动、搜索、锁定和跟踪^[1],其伺服系统通常由三环控制构成,电流环用于改善电机的动态性能,速度环用于提高系统抗扰性,并改善系统的稳定精度,位置环用来实现目标的位置跟踪控制。由于位置环的带宽较低,提高系统抗扰性和快速跟踪能力主要是通过改进速度环的稳定控制实现,所以速度环的控制器设计尤为重要。导引头稳定平台系统的内扰主要包括摩擦力矩、质量不平衡力矩、导线干扰,外扰主要是弹体的角运动和质心运动以及外部载荷如风、气流等引起的扰动。通常采用降低动静摩擦、提高配平精度、软化导线等工艺方法减小干扰力矩,并且采用合适的扰动抑制策略对扰动进行进一步抑制。以往针对光电稳定平台的扰动抑制策略主要采用的方法有扰动被动控制如平方滞后控制器和双极 PI 控制器,扰动主动抑制策略如基于扰动观测器的 PID 控制^[2]、采用卡尔曼滤波估计的积分滑模控制^[3]、自抗扰控制^[4]等。传统扰动被动控制无法对扰动进行实时观测,扰动抑制能力受限。基于扰动观测器的 PID 控制,扰动观测器的设计需要预先知道被控对象的名义模型。滑模控制器作为变结构控制策略,针对模型不确定性和时变的内外扰动具有强鲁棒性,但是受到切换特性的影响有抖振现象,减小或者消除抖振的三种^[5]通用方法,一种是将控制分解为连续控制和切换控制部分,以减小切换部分的幅度;第二种是采用陡峭的饱和函数代替符号函数;地第三种是采用模糊控制算法^[6]减弱抖振,近年来这些滑模控制的改进方法在非线性系统控制中得到广

泛应用。双积分滑模控制器是传统滑模控制器的一种改进形式,不仅具有传统滑模控制器的强鲁棒性,而且改善了系统稳态特性^[7]。自抗扰控制器的核心是设计 ESO,估计系统的总和扰动来进行补偿实现扰动抑制,受到其设计简单,不考虑扰动类型的设计原理,应用也非常广泛。

基于滑模控制^[7]和自抗扰控制^[8]特点,以及导引头稳定平台的功能需求,文中提出了基于 ESO 的双积分滑模控制器。充分利用 ESO 对扰动进行估计,采用双积分滑模控制对剩余扰动残差进行补偿,同时针对滑动变结构控制的抖振问题,采用改进幂次趋近律进行削弱,实现具有较强抗扰性的稳定平台系统。

1 系统建模

速率陀螺稳定平台由台体、速率陀螺、角度传感器、控制器、驱动功率放大器、力矩电机组成。激光导引头采用了俯仰偏航双框架结构形式,偏航轴设在外框架上,俯仰轴设在内框架上,光学系统安装在速率陀螺稳定平台的俯仰框架上,选择直接稳定方式,双轴速率陀螺配置在内框,直接敏感光轴惯性角速度,反馈俯仰和偏航方向的速率信息,力矩电机直接驱动两框架,角度传感器采用电位计实现位置测量。为了对系统进行建模,主要对电机及其负载建模、功率放大器建模、传感器建模。

图 1 为力矩电机和平台负载示意图。由图可以依次得到描述直流力矩电机动态特性的方程。

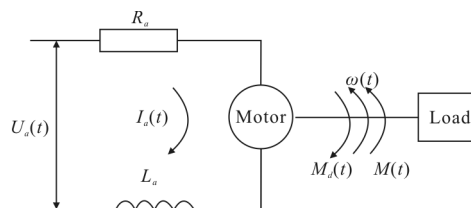


图 1 力矩电机及其负载示意图

Fig.1 Schematic diagram of torque motor and load

$$U_a(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + K_e n \quad (1)$$

$$M(t) = I_a(t)K_t \quad (2)$$

$$M(t) - M_d(t) = J \frac{dn(t)}{dt} \quad (3)$$

式中： U_a 为加载在电机上的理想电压平均值； I_a 为电机电枢电流； L_a 为力矩电机的电感系数； R_a 为力矩电机的相间电阻； K_t 为电机力矩系数； K_e 为电机反电动势比例系数； M 为电机电磁转矩； ω 为电机转子的角速度； M_d 为作用在电机轴上的扰动力矩； J 为加载在力矩电机轴上的总的转动惯量。

不考虑外部扰动，公式(1)~(3)依次进行拉氏变换并整理后得到如下方程：

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1} \quad (4)$$

式中： T_m 为电机的机电时间常数，且 $T_m = R_a J / K_e K_t$ ； T_e 为电机的电磁时间常数，且 $T_e = L_a / R_a$ 。

PWM 功率放大器通常可以看成是一个滞后的放大环节，若用 T 表示滞后时间，其传递函数为：

$$G_{PWM}(s) = \frac{K_{PWM}}{Ts+1} \quad (5)$$

一般在平台的驱动系统中，由于 PWM 调制电路的驱动频率远高于力矩电机的截止频率，因此功率放大器的传递函数可简化为比例环节：

$$G_{PWM}(s) \approx K_{PWM} \quad (6)$$

式中： K_{PWM} 为电源电压与三角波幅值之比。

陀螺实现对惯性空间角速度测量，其输出得到的是一个与输入角速度成正比例关系的电压信号。框架式机电结构的速率带宽在几十 Hz 之内，该系统采用 MEMS 陀螺 Stim202，其带宽为 262 Hz，因此在平台速度检测的几十 Hz 带宽之内，角速度陀螺一般可以看成是一个比例环节：

$$G_{gyro}(s) = K_g \quad (7)$$

该系统设计中 $K_g=1$ 。

2 速率陀螺稳定平台控制

偏航框除了含有正割补偿外，系统控制和俯仰框一致。文中以偏航框控制为例展开控制器设计。为使导引头控制系统具有较好的稳定跟踪精度，该伺服系统采用三环伺服回路的结构，如图 2 所示。 G_{pc} 为位置环控制器， G_{vc} 为速度环控制器， G_{cc} 为电流等效控制器，下标 y 和 p 分别对应表示偏航和俯仰。

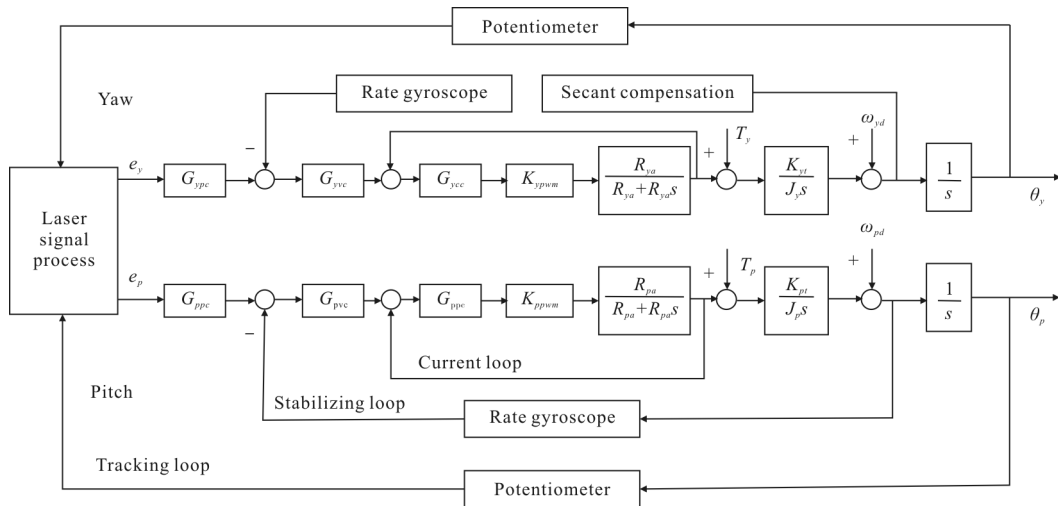


图 2 三环控制框图

Fig.2 Block diagram of three-loop control system

2.1 电流环及位置环设计

该设计采用有刷电机 PWM 功率驱动芯片 MSK4253 实现电流闭环。MSK4253 最突出的特点是内部集成电流闭环控制，自动产生双极模式 PWM 方波，双极模式 PWM 控制在控制系统中引入

了高频颤动信号，可达到显著改善控制系统低速特性的目的。设计后电流环的带宽达到 1 000 Hz 以上，在速度环所考虑的几十 Hz 带宽范围内，电流闭环的传递函数可以用常数 k_c 来简化，该系统 k_c 近似为 1。系统电流环组成如图 3 所示，其主要由电流环

调节器和电流采样电路组成。

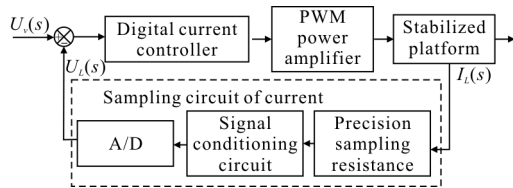


图 3 系统电流闭环组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of the current loop of system

位置环通过位置传感器得到当前的框架角信息,并根据脱靶量进行跟踪回路控制。通过内环电流环、中环速度环的控制,位置环被控对象近似于一阶系统,采用比例控制或者比例小积分控制就能完全实现系统的位置跟踪控制,该系统所采用的角位置传感器为线性度为 3‰ 的电位计。

2.2 ESO 设计

系统经过电流环控制之后,速度环的被控对象描述为:

$$\dot{\omega} = \frac{k_t}{J} u + d \quad (8)$$

令 $b_0 = \frac{k_t}{J}$, 其中 ω 为偏航轴运动角速度, d 为系统未知的内外扰动。导引头系统的内扰主要包括摩擦力矩、质量不平衡力矩、导线干扰,外扰主要有弹体的角运动和质心运动以及外部载荷如风、气流等引起的扰动。 u 为输入的电流控制量。该系统中 $K_t = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, $J = 0.00148 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

d 可以通过公式(9)所示的 ESO^[9]进行估计得到 \hat{d} 。

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 + b u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(e_1) \\ \hat{d} = z_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: β_1 、 β_2 均为常数; e_1 为 ESO 的估计误差; z_1 和 z_2 是中间状态, z_1 为对当前角速度的观测值, z_2 为 ESO 对扰动的观测值; b 为调节参数,但其值变化范围不大,实际应用中经常设定其值近似估计为 b_0 。

利用带宽概念确定 ESO 参数 β_1 、 β_2 , 状态观测器的闭环极点在 $-\omega_0$, 根据状态观测器的定义, ω_0 越大,系统越能够快速地跟踪干扰,对其进行估计。实

际中,由于系统受到噪声和采样频率等硬件的限制,带宽 ω_0 不能无限增大,设计为 $\beta_1 = 2\omega_0$, $\beta_2 = \omega_0^2$, 实际应用中参数选取根据系统带宽的要求确定或者在线整定。

2.3 双积分滑模控制

通过选择合理的 ESO 参数,采用 ESO 估计系统的未知扰动,在扰动有界情况下,对扰动进行补偿,系统性能将会得到很大的改善。然而,受到 ESO 选择参数的限制,扰动经过估计和补偿后,还会有估计误差,考虑到这些,采用滑模控制补偿估计误差和测量噪声,所设计的 DISMC-ESO 控制器如图 4 所示。

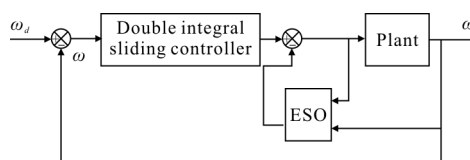


图 4 DISMC-ESO 控制策略

Fig.4 Control structure of DISMC-ESO

估计误差定义为:

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (10)$$

速度跟踪误差定义为:

$$e = \omega_d - \omega \quad (11)$$

式中: ω_d 对应期望的角速度指令; ω 为当前的角速度值。

定义双积分滑模面为^[9]:

$$s = a_1 e + a_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + a_3 \int_0^t \int_0^t e(\tau) d\tau d\tau \quad (12)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 为正常数,由 Hurwitz 稳定理论得到。

公式(12)求导得:

$$\dot{s} = a_1 \dot{e} + a_2 e + a_3 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (13)$$

认为估计误差有界,且上界为 d_m ,也即满足 $|\tilde{d}| \leq d_m$ ^[10]。滑模运动包括趋近运动和滑模运动两个过程,由于控制切换中延迟造成抖振,抖振会导致控制精度的降低,功率电路的热消耗和机械运动部件的磨损,还可能激励未建模的高频动力学系统,因而降低系统性能,甚至会导致系统不稳定。为了削弱抖振,采用改进的幂次趋近律的方法,将符号函数换

为饱和函数,同时为了进一步削弱抖振,采用准滑动模态方法。准滑动模态的控制规则是使一定范围内的状态点均被吸引至切换面的某一 ϕ 邻域内,通常称此 ϕ 邻域为滑动模态切换面的边界层。改进的幂次趋近律既可以保证滑动模态到达过程的动态品质,又可以减弱信号的高频抖振^[11-12],其表达式为:

$$\dot{s} = -K |s|^\alpha \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \quad (14)$$

其中 $0 < \alpha < 1$,通过调整 α ,可保证当系统状态远离滑动模态(s 较大)时,能以较大的速度趋近于滑动模态,当系统状态趋近滑动模态(s 较小)时,保证较小的控制增益,以降低抖振。 ϕ 是用来降低抖振的边界层厚度,为正常数,理想状态下减小边界层厚度可提高精度,边界层的厚度增加降低了抖振,但是却增加了稳态误差,该值的选择需要综合考虑。 $K > 0$,为调节系数。

该方法采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替理想滑动模态中的符号函数 $\text{sgn}(s)$ 。饱和函数的本质是,在边界层外,采用切换控制,在边界层之内,采用线性化反馈控制。

sat 函数如下:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\phi} & \left|\frac{s}{\phi}\right| \leq 1 \\ \text{sgn}\left(\frac{s}{\phi}\right) & \left|\frac{s}{\phi}\right| > 1 \end{cases}$$

$$\text{sgn}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} 1 & s > \phi \\ -1 & s < -\phi \end{cases} \quad (15)$$

将公式(14)代入公式(13)得:

$$a_1 \dot{e} + a_2 e + a_3 \int_0^t e(\tau) d\tau = -K |s|^\alpha \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \quad (16)$$

由公式(16),将估计误差采用上界代替得到控制量如下:

$$u = \frac{1}{a_1 b} \cdot \left\{ a_1 \dot{\omega}_d + a_2 (\omega_d - \omega) e + a_3 \int_0^t e(\tau) d\tau + K |s|^\alpha \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) - \tilde{d} a_1 \right\} \quad (17)$$

2.4 稳定性分析

选择 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (18)$$

为了保证系统稳定必须:

$$\dot{V} = s\dot{s} =$$

$$\left(a_1 e + a_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + a_3 \int_0^t \int_0^\tau e(\tau) d\tau d\tau \right) \left(-K |s|^\alpha \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \right) < 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &\text{当 } s < -\phi, \dot{V} = s\dot{s} = Ks |s|^\alpha < 0; \text{当 } s > \phi, \dot{V} = s\dot{s} = -Ks |s|^\alpha < 0; \\ &\text{当 } -\phi < s < \phi, \dot{V} = s\dot{s} = \left(\frac{-Ks^2 |s|^\alpha}{\phi} \right) < 0. \end{aligned}$$

因此只要取 k 满足大于 0 且其值足够大,就能保证系统误差在有限时间内收敛到 0。

3 仿真分析和实验验证

3.1 仿真分析

为了验证所设计的控制器性能,分别比较系统采用速度环 PI 控制器、PI-DOB、DISMC-ESO 时的系统响应。DISMC 的特性及其与 SMC 两种控制器的对比国外学者已经做了大量工作^[7,9,13],在此不再赘述,文中仅研究工程中常用的 PI 控制器和 PI-DOB 控制器与所提出控制器的对比。根据 DOB 设计原则,文中选取扰动观测器惯性环节为一阶滤波器,考虑到干扰观测器是对外干扰的抑制能力及对测量噪声的敏感性进行折中,取 $\tau=0.005$ 。经调试 PI-DOB 控制器参数为 $k_p=3.1, k_i=1.97$,其系统的名义模型取为公式(8)中所示的不含扰动的模型,不考虑系统谐振和扰动影响,辨识实际系统模型为: $\frac{12}{(0.35s+1)(0.001s+1)}$ 。DISMC-ESO 控制器参数为 $a_1=6, a_2=11, a_3=6, K=120, \alpha=0.95, \phi=0.01, \omega_0=1300$ 。用高斯噪声模拟系统测量噪声,并采用巴特沃斯滤波器对输出反馈进行滤波处理。

验证系统的跟踪性能,输入 $3(^{\circ})/s$ 的速度梯形波,其仿真响应曲线如图 5 所示,将系统达到稳态角

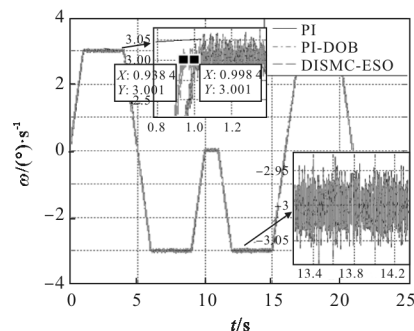


图 5 速度梯形波响应曲线

Fig.5 Response curve of trapezoidal wave

速度的时间进行对比,可以看出 DISMC-ESO 控制器作用下系统能够快速跟上系统,与 PI 和 PI-DOB 控制器跟踪快速性相比提高了近 60 ms,PI、PI-DOB 控制器、DISMC-ESO 控制器的稳态误差均方差分别为 0.020 0 (°)/s,0.018 4 (°)/s,0.013 2 (°)/s,可以看出提出的控制器动态特性和稳态特性均优于 PI 和 PI-DOB 控制器。

验证系统对稳定平台对内外部扰动的抗扰性,因为导引头稳定平台的隔离度测试通常选用正弦函数模拟系统的扰动信号,所以在此处也采用该方法,系统输入指令为 0 (°)/s,给定幅值为 3 (°)/s,频率为 1 Hz 的速度扰动。系统在 PI、PI-DOB 和 DISMC-ESO 控制器作用下的响应输出如图 6 所示。系统输入指令为 0 (°)/s,给定幅值为 0.1 Nm,频率为 1 Hz 的扰动力矩。系统在 PI、PI-DOB 和 DISMC-ESO 控制器作用下的响应输出如图 7 所示。根据图 6 和图 7 得到响应曲线的对比如表 1 所示。由表 1 可以看出稳定平台受到速度扰动作用,采用提出的 DISMC-ESO 控制器与 PI 和 PI-DOB 相比,误差均方差降低了 0.111 3 (°)/s 和 0.012 8 (°)/s;在力矩扰动作用下,采用提出的 DISMC-ESO 控制器与 PI 和 PI-DOB

相比,误差均方差降低了 0.452 9 (°)/s 和 0.046 4 (°)/s,表明 DISMC-ESO 控制器的抗扰性优于 PI 和 PI-DOB 控制器。

表 1 速度扰动和力矩扰动的误差均方差对比

Tab.1 Comparison of standard deviation of error by velocity disturbance and torque disturbance

Disturbance type	Disturbance signal	Standard deviation of error/(°)·s ⁻¹		
		PI	PI-DOB	DISMC-ESO
Velocity disturbance	3sin(2πt)	0.122 8	0.024 3	0.011 5
Torque disturbance	0.1sin(2πt)	0.467 3	0.060 8	0.014 4

3.2 实验验证

采用 TMS320F28335DSP 作为主控芯片,搭建如图 8 所示的导引头性能测试的实验平台验证提出的控制器性能。该实验平台主要包括导引头、五轴转台、激光目标模拟器、PC 机、工控机等。CCS 编程软件通过仿真器将程序烧写在 TMS320F28335DSP

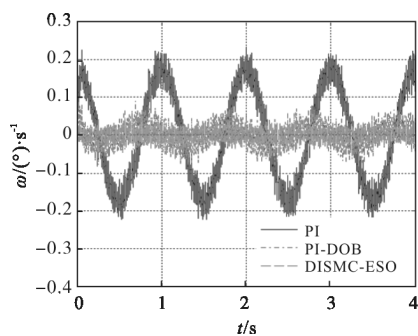


图 6 速度扰动响应曲线

Fig.6 Response curve with velocity disturbance

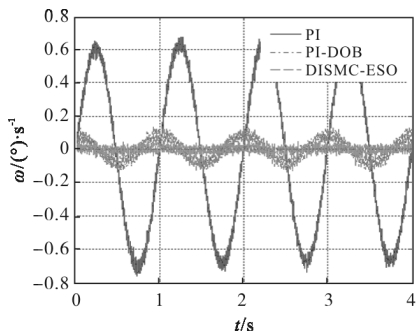


图 7 力矩扰动响应曲线

Fig.7 Response curve with torque disturbance

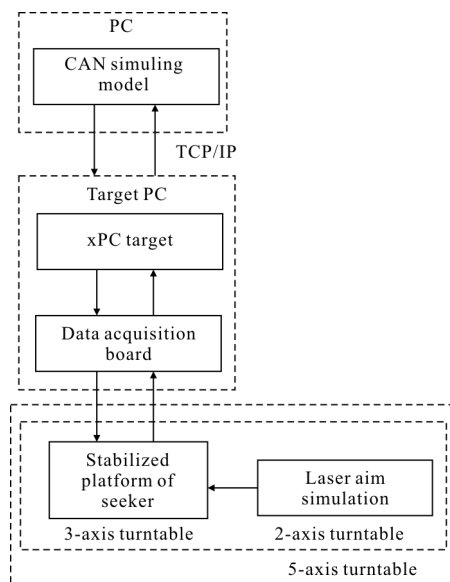


图 8 导引头实验装置

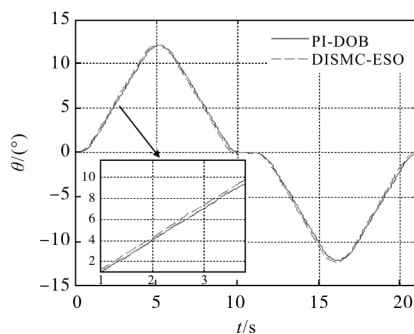
Fig.8 Experimental platform of seeker

中。在宿主机 Simulink 中搭建 CAN 通讯模块,采用研华工控机作为目标机执行宿主机的程序,并在工控机中集成 CAN 通讯卡,实现指令发送和角速度、角位置信息的采集。导引头安装在三轴转台上可以模拟导引头的滚转、偏航和俯仰,激光目标模拟器安

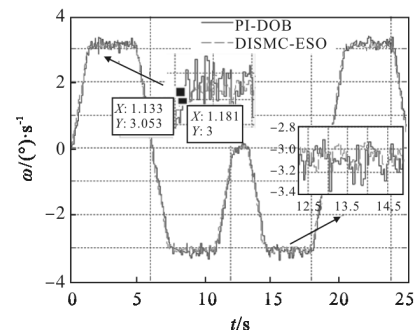
装在二轴转台上。速度环控制周期为 5 ms, 位置环控制周期为 50 ms。上节所提到的控制算法通过 z 变换实现离散化, 将 PI-DOB 和 DISMC-ESO 两种控制算法进行对比。为了经实际调试, 采用的控制器参数如下: PI-DOB 控制器参数: $\tau=0.005, k_p=3.32, k_i=1.86$, 其系统的名义模型取为公式(8)中所示的不含扰动的模型。DISMC-ESO 控制器参数为, $a_1=6.8, a_2=12.8, a_3=5.2, K=134.2, \alpha=6.8, \phi=6.8$ 。PI-DOB 速度环控制时所采用的位置闭环控制器为 PI 控制器, 其参数为 $k_{pp}=6.3, k_{ip}=0.05$, DISMC-ESO 速度环控制时所采用的位置闭环控制器为 P 控制器, 参数为 $k_{ps}=6.12$ 。同时在实验过程中, 为了改善系统的低速性能, 所设计的两种控制器均采用了常用的“换向补偿策略”实现对摩擦现象的削弱, 该方法实现简单且效果突出。该方法在许多论文中均有讨论^[14-15], 此处不再讨论, 仅对系统的跟踪性能和抗扰性能进行实验研究。

3.2.1 跟踪性能测试

采用五轴转台进行导引头跟踪性能测试, 导引头固定在五轴转台上的三轴转台中, 初始由安装在二轴转台上的目标模拟器产生目标, 随后仿真计算机操纵安装在三轴转台上的导引头锁定并持续跟踪目标。二轴转台按照 $3(^{\circ})/s$ 的梯度进行运动, 图 9(a) 为测试所得的跟踪曲线对比, 图 9(b) 为所得的速度曲线对比。系统能够快速跟踪系统位置指令及速度, 将系统达到稳态角速度的时间进行对比得出, 所提出的控制器与 PI-DOB 控制器相比, 速度响应时间提高了 48ms。DISMC-ESO 和 PI-DOB 控制器作用下速度的稳态误差标准差分别为 $0.1024 (^{\circ})/s$ 和 $0.0893 (^{\circ})/s$, 提出的控制器测得的跟踪误差标准差提高了 $0.0131 (^{\circ})/s$ 。



(a) 角位置
(a) Angular displacement



(b) 视线角速度
(b) LOS rate

图 9 不同控制器跟踪梯形波响应曲线

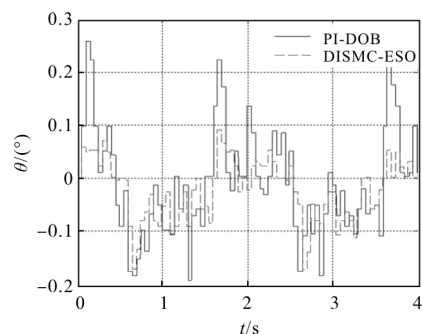
Fig.9 Response curve for tracking the trapezoidal wave by different controller

3.2.2 隔离度测试

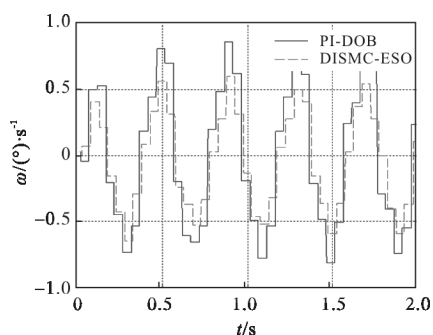
隔离度除了受到平台负载、干扰力矩、电机回路参数、稳定回路控制性能外^[16], 还受到扰动幅值、扰动频率的影响, 采用五轴转台测试系统隔离度, 导引头安装在三轴转台上, 由安装在二轴转台上的激光模拟器产生目标信号, 三轴仿真转台施加不同幅度不同频率的扰动, 测试视线角速度。隔离度计算公式如公式(20)所示:

$$\text{隔离度} = \frac{\text{导引头偏航 (或俯仰) 视线角速度峰-峰值}}{\text{转台偏航 (或俯仰) 最大角速度峰-峰值}} \quad (20)$$

式中: 转台偏航 (或俯仰) 最大角速度峰-峰值表示去除零位误差之后的值。分别得到 $\sin(\pi t)^{\circ}$ 、 $3\sin(5\pi t)^{\circ}$ 、 $7\sin(2\pi t)^{\circ}$ 弹体扰动下偏航通道的系统输出如图 10(a)~(c)所示。可以看出采用 PI-DOB 控制器下三种扰动条件下隔离度为 7.13%、1.72%、2.23%, 采用 DISMC-ESO 控制器得到的三种扰动条件下隔离度分别为 4.22%、1.27%、1.53%。系统的隔离度分别提高了 2.91%、0.45%、0.7%。

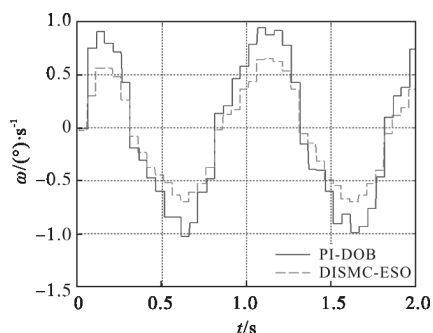


(a) $\sin(\pi t)^{\circ}$ 扰动偏航轴视线角速度
(a) LOS rate of yaw axis based on disturbance at $\sin(\pi t)^{\circ}$



(b) $3\sin(5\pi t)^\circ$ 扰动偏航轴视线角速度

(b) LOS rate of yaw axis based on disturbance at $3\sin(5\pi t)^\circ$



(c) $7\sin(2\pi t)^\circ$ 扰动时偏航轴视线角速度

(c) LOS rate of yaw axis based on disturbance at $7\sin(2\pi t)^\circ$

图 10 隔离度对比

Fig.10 Comparison of disturbance rejection rate

为了进一步测试系统性能，进行不同幅值和不同频率下弹体扰动下的实验，将两种控制器下系统隔离度进行对比，数据对比如表 2 所示，可以看出提出的控制器具有很好的隔离度。

表 2 不同扰动下隔离度对比

Tab.2 Comparison of disturbance rejection rate of different disturbances

Swing angle/ (°)	Frequency/Hz	PI-DOB	DISMC- ESO	Improvement degree
1	0.5	7.13%	4.22%	2.91%
1	1	4.79%	4.02%	0.77%
1	3.5	2.0%	1.20%	0.8%
3	0.5	3.50%	2.90%	0.6%
3	2.5	1.72%	1.27%	0.45%
7	1	2.23%	1.53%	0.7%

4 结束语

文中针对导引头稳定平台的伺服控制问题

进行了深入研究，提出了基于 ESO 的双积分滑模速度环控制器。根据系统三环控制原理，内环电流环采用 PWM 功率驱动芯片 MSK4253 实现，使速度环被控对象简化为一阶系统。速度环的控制器中，首先采用二阶 ESO 对系统的未知扰动进行估计；然后，采用双积分滑模控制器实现了系统的低稳态误差跟踪，同时采用了改进的幂次趋近律来削弱控制系统的抖振影响，并证明了所构建的控制系统稳定性；最后在五轴平台上通过实验验证了控制器的性能，实验结果表明与 PI-DOB 控制器相比，跟踪 $3^\circ/s$ 的梯形波时，所提出的控制器作用下速度跟踪快速性提高了 48 ms，跟踪误差标准差提高了 $0.0131^\circ/s$ 。同时用转台模拟弹体扰动分别为 $\sin(\pi t)^\circ$ 、 $3\sin(5\pi t)^\circ$ 、 $7\sin(2\pi t)^\circ$ 时，系统的隔离度分别提高了 2.91%、0.45%、0.7%，表明提出的控制器能够有效地抑制扰动，提高了系统隔离度，并具有较好的稳定跟踪能力，该控制策略对其他伺服控制问题也具有借鉴作用。

参考文献:

[1] Zhou Taopin, Li Younian. Analysis and adaptive compensation of seeker disturbance torque [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1830-1834. (in Chinese)
周桃品, 李友年. 位标器干扰力矩的分析与自适应补偿 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1830-1834.

[2] Jin Chaoqiong, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Friction compensation strategy of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(6): 1876-1885.
晋超琼, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扰动观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(6): 1876-1885.

[3] Mohammad Sheikh Sofla, Mohammad Zareinejad, Mohsen Parsa, et al. Integral based sliding mode stabilizing a camera platform using kalman filter attitude estimation [J]. Mechatronics, 2017, 44: 42-51.

[4] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. Infrared and laser Engineering, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
李贤涛, 张葆, 孙敬辉, 等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1574-1581.

- [5] Hassan K Khalil. Nonlinear System [M]. Translated by Zhu Yisheng, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
(美)Hassan K Khalil.非线性系统[M]. 朱义胜,等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [6] Atta Oveis, Tamara Nestorovi. Robust observer - based adaptive fuzzy sliding mode controller [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76-77: 58-71.
- [7] Syuan -Yi Chen, Sheng -Sian Gong. Hierarchical double integral sliding -mode control for second -order under actuated systems [C]//CACS International Automatic Control Conference, 2014: 173-178.
- [8] Dong Lili, Zhang Yao, Gao Zhiqiang. A robust decentralized load frequency controller for interconnected power systems [J]. ISA Transactions, 2012, 51: 410-419.
- [9] Pradhan R. Subudhi B. Double integral sliding mode MPPT control of a photovoltaic system [C]// IEEE Transactions on Control System Technology, 2016, 24: 285-292 .
- [10] Freidovich L B, Khalil H K. Performance recovery of feedback-linearization-based designs[C]//IEEE Trans Autom Control, 2008, 53: 2324-2334.
- [11] Kumar J, Kumar V, Rana K P S. Efficient reaching law for SMC with PID surface applied to a manipulator [C]// Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with Their Impact on Humanity, IEEE, 2017: 51-56.
- [12] Chun Yin, Chen Yangquan, Zhong Shouming. Fractional - order power rate type reaching law for sliding mode control of uncertain nonlinear system [C]//Proceedings of 19th World Congress The international Federation of Automatic Control Cape Town, 2014: 2369-5374.
- [13] Tan S C, Lai Y M, Chi K. T. Indirect sliding mode control of power converters via double integral sliding surface [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 600-611.
- [14] Mu Enxu, Ma Zhenqun, Feng Bin, et al. Friction compensation strategy for numerical control machine tools by reversing character analyzing [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2014, 48(8): 47-53. (in Chinese)
牟恩旭, 马振群, 冯斌, 等. 利用数控机床换向特性分析的摩擦误差补偿方法[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(8): 47-53.
- [15] Zhao Jianzhou, He Chao, Zhang Yuhe. An experimental study of compensation algorithms for backlash nonlinearity of servo systems [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(3): 317-321. (in Chinese)
赵建周, 何超, 张宇河. 伺服系统间隙非线性补偿算法的研究[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(3): 317-321.
- [16] Zhu Huazheng, Fan Dapeng, Ma Dongxi, et al. Disturbance isolation index of seeker servo system and its test[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1993-1998. (in Chinese)
朱华征, 范大鹏, 马东玺, 等. 导引头伺服系统隔离度与测试[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8): 1993-1998.