

文章编号 1004-924X(2018)08-2057-10

## 导引头稳定平台的扰动补偿及改进滑模控制

张明月<sup>1</sup>, 刘 慧<sup>1</sup>, 赵伟伟<sup>1,2</sup>, 储海荣<sup>1</sup>, 周 满<sup>1,2</sup>, 苗锡奎<sup>3</sup>, 张 帆<sup>1\*</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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:**为提高导引头稳定平台抗扰性,提出了一种导引头稳定平台的扰动补偿及改进滑模控制策略。首先根据扰动特点将扰动分为摩擦力矩和“剩余扰动”两部分,基于 Stribeck 摩擦模型辨识摩擦参数,并进行摩擦力矩补偿;采用扩张高增益观测器对“剩余扰动”进行估计,并给出了扩张高增益观测器的收敛条件。然后设计了改进滑模控制器作为稳定回路的控制器实现伺服控制,采用 Lyapunov 函数证明其稳定性。最后,搭建测试系统分别进行了稳定平台性能测试和导引头性能测试,用于验证跟踪和抗扰效果。实验结果表明,跟踪  $1(^{\circ})/s$  的梯形波时,提出的控制器有效地补偿了摩擦,同时稳态精度提高了  $0.0328(^{\circ})/s$ ;给定三轴转台典型幅值和频率扰动下,采用提出的控制器时系统隔离度至少提高了  $0.57\%$ 。表明提出的控制器改善了系统抗扰性。

**关键词:**改进滑模控制器;扩张高增益观测器;隔离度;摩擦补偿

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182608.2057

## Disturbance compensation and improved sliding-mode control of stabilized platform for seekers

ZHANG Ming-yue<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, ZHAO Wei-wei<sup>1,2</sup>, CHU Hai-rong<sup>1</sup>,  
ZHOU Man<sup>1,2</sup>, MIAO Xi-kui<sup>3</sup>, ZHANG Fan<sup>1\*</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Key Laboratory of Electro-Optical  
Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471000, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangfan@ciomp.ac.cn

**Abstract:** A control scheme consisting of a disturbance compensation method and an improved sliding mode controller was proposed to improve the disturbance rejection rate of the stabilized platform used in a seeker. Firstly, the disturbances were divided into friction torque and rest disturbances. The friction parameters based on the Stribeck friction model were identified. An extended high-gain observer was designed to estimate the rest disturbances in the system dynamics, and the convergence condition

收稿日期:2017-11-20;修订日期:2018-01-10.

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资助项目(No. GKCP2017002)

of the estimation error was set. Meanwhile, the peaking phenomenon of the observer was reduced by saturating the estimates. Then, an improved sliding mode controller was chosen to control the servo system, and a Lyapunov-based analytical method was employed to ensure the convergence of the tracking error. Lastly, experiments on the stabilized platform and the seeker were carried out to validate the control scheme. By using the proposed control scheme, the dead zone at low angular velocity caused by friction was eliminated, and the steady precision was increased by  $0.0328$  ( $^{\circ}$ )/s, when tracking a trapezoidal wave of  $1$  ( $^{\circ}$ )/s. In addition, the disturbance rejection rate was increased by a minimum of  $0.57\%$ , when the three-axis turntable was disturbed by typical disturbance conditions. It can be concluded that the control scheme can improve disturbance rejection.

**Key words:** improved sliding mode controller; extended high-gain observer; disturbance rejection rate; friction compensation

## 1 引言

半主动激光导引头稳定平台是激光探测系统的载体,主要功能是实现光轴空间稳定、随动、搜索和跟踪,受到干扰力矩和系统未建模误差的影响,实际被控制对象具有强非线性,对伺服系统设计提出了较高的要求。为了提高系统的抗扰性,有必要设计相应的控制器改善系统性能。

扰动的估计与补偿是稳定平台控制器设计的重点,研究主要分为两种,第一种将扰动分为摩擦力矩和其他干扰力矩,采用基于摩擦模型的摩擦补偿方法<sup>[1-2]</sup>,然后设计扰动观测器对剩余扰动进行估计及补偿<sup>[3]</sup>。该设计方法有效补偿了摩擦,但是采用的扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)依赖于被控对象的逆模型,引入了微分项,系统噪声变大,且需保证系统模型的不确定性不能太大,否则会导致系统不稳定;第二种将所有的内外扰动作为总和扰动,设计观测器如非线性扩张状态观测器<sup>[4-5]</sup>、高阶扰动观测器<sup>[6]</sup>及高阶滑模观测器<sup>[7]</sup>等对扰动进行估计,并进行补偿,该方法虽然能够在一定程度上提高系统的抗扰性,但是不能估计及补偿低速摩擦特性。基于此,为了更好地对扰动进行估计,需要将扰动估计分为“基于摩擦模型”和“剩余扰动”估计两部分,采用一种不依赖于系统模型的扰动估计技术对“剩余扰动”进行估计。考虑到非线性扩张状态观测器、高阶扰动观测器以及高阶滑模观测器可实现性相对复杂,本文采用扩张高增益观测器,其采用的高增益误差反馈使得观测器的动态远远高于系统的动态,相当于系统中的快变子结构,保证了观测误差

的快速收敛和足够高的估计精度。

在控制策略方面,受到 PI 控制器缺点的影响,稳定平台的非线性控制器和智能控制器得到发展,包括基于幂次趋近律的积分滑模控制<sup>[8]</sup>、自适应 RBFNN 控制<sup>[9]</sup>、Backstepping 自适应补偿控制<sup>[10]</sup>、RS-LSSVM 控制<sup>[11]</sup>、自适应模糊 PID-滞环开关控制<sup>[12]</sup>和自适应 RBFNN-滑模控制等<sup>[13]</sup>。各种算法均有其特性,智能控制器中模糊控制策略的模糊准则依赖于工程师经验设定,神经网络作为系统控制的近似工具需要大量样本和较长的时间来训练网络,实时性差。常规非线性算法中滑模控制的滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得滑模控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识及物理实现简单等优点,但缺点是有抖振现象。针对此问题,学者们采取各种措施削弱抖振,如准滑模面以及趋近律等,这些方法都取得了很好的效果。

基于以上扰动和控制策略分析,为了提高导引头稳定平台的抗扰性,本文提出了利用扰动补偿和改进滑模控制器实现导引头稳定平台控制。采用 Stribeck 摩擦模型对系统摩擦进行辨识并进行补偿,采用扩张高增益观测器对系统的“剩余扰动”进行估计,并在通道中进行补偿,根据状态观测器不能完全估计扰动的特点引入改进滑模控制器以增强系统鲁棒性。最后通过实验验证了该方法的可行性。

## 2 导引头稳定平台系统分析

本系统采用俯仰偏航双框架结构形式,如图

1 所示。系统采用力矩电机直接驱动方式,当平台的光轴与目标位置不一致时,驱动平台绕相应框架轴转动;采用直接稳定方式,速率陀螺安装在俯仰内框架上,直接感应光电探测器的姿态变化;系统分为脱靶量闭合和位置传感器闭合回路两种,其中系统待机阶段采用的是位置传感器闭环,系统跟踪过程采用的是激光脱靶量闭环。激光脱靶量闭环时,激光信号处理电路会解算出目标脱靶量,经伺服控制器位置环校正后作为速度环的指令,角速率陀螺作为反馈,共同经速度环控制器作用经驱动电路驱动电机带动框架运动,实现光轴跟踪视轴并且隔离弹体扰动。在此过程中,同时输出视线角速率信息给自动驾驶仪,用于制导控制。

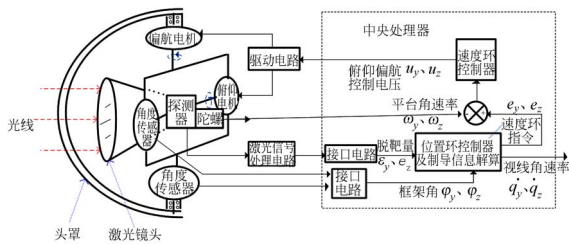


图 1 激光半主动导引头系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semi-active laser seeker

俯仰和偏航两框的控制均由电流环、速度环和位置环组成,引入电流环消除反电动势对输出力矩的影响,改变稳定回路的控制对象特性,提高系统的跟踪精度。位置环按照信号处理器给出的目标位置误差信息,处理后作为速度环的指令信号进而驱动力矩电机带动平台运动,实现对目标的自动跟踪,因为位置环采样频率低、带宽低,只对极低频率的载体扰动才有隔离作用。速度环又称稳定环,其带宽范围较宽,能隔离系统绝大部分的扰动,本文针对俯仰轴的速度环进行了分析。

根据导引头双框架结构的特点,可以看出系统受到扰动力矩主要有结构带来的质量不平衡力矩、非线性摩擦力矩、线缆拖拽力矩,以及外部干扰(气流等)带来的干扰力矩。针对不平衡力矩,通过在设计、加工和装配中采取措施减小质量不平衡力矩的基础上,本文采用质量动不平衡补偿实验方法对动不平衡进行补偿<sup>[14]</sup>。

电流闭环后稳定平台速度环被控对象由 0 型变为 I 型系统,俯仰轴的速度环被控对象为:

$$\begin{cases} \dot{x} = bu - \frac{1}{J_{Ges}}(T_f(x) + d(\dot{x}, x, t)) \\ y = x \end{cases}, \quad (1)$$

其中:  $x = \omega$ ,  $\omega$  为陀螺输出滤波之后的值,  $b = \frac{K_t}{J_{Ges}}$ ,  $K_t$  为电机的力矩系数,  $J_{Ges}$  为等效转动惯量,  $u$  为系统的控制输入,  $T_f(x)$  为摩擦力矩的非线性函数,  $d(\dot{x}, x, t)$  为除摩擦力矩外的“剩余扰动”,假设  $d(\cdot)$  有界,令  $f = \frac{d(\dot{x}, x, t)}{J_{Ges}}$ , 则  $f(\cdot)$  也有界。考虑到导引头稳定平台的工作条件,该假设条件在实际工作中是可以保证的。

### 3 控制策略分析

陀螺用于测量框架的角速度,其敏感的信息准确与否直接影响伺服控制的精度。考虑到量测噪声对系统的影响,在控制器设计之前,首先对陀螺进行补偿及滤波处理。针对 MEMS 陀螺确定性误差本团队采用基于内插法的陀螺误差补偿方法进行补偿<sup>[15]</sup>。针对随机误差本团队研究了采用 Allan 分析法以及 Kalman 滤波算法对 MEMS 陀螺仪进行随机误差分析和补偿<sup>[16]</sup>。由于导引头稳定平台的稳定环被控对象是非线性时变系统,难以建立系统精确模型,为提高系统抗扰性,本文采用的稳定环控制器设计如图 2 所示,可以看出,其中为滑模控制律,为辨识所得的摩擦力矩,是对基于辨识摩擦模型补偿的偏差和“剩余扰动”的估计。

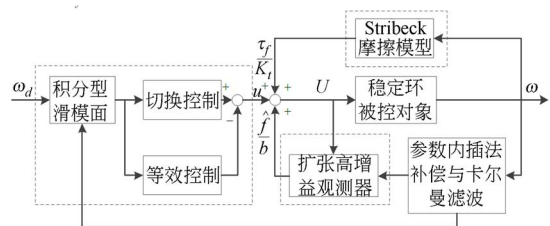


图 2 稳定环控制器框图

Fig. 2 Block diagram of control system for stability loop

本节介绍图 2 虚线框中所列的 Stribeck 摩擦模型辨识、扩张高增益观测器以及改进滑模控制器。

#### 3.1 摩擦模型辨识

许多学者采用摩擦模型对摩擦力矩进行辨识,比较常用的有 Lugre 摩擦模型和 Stribeck 摩

擦模型。虽然 Lugre 模型采用鬃毛变形理论对摩擦的动态特性和静态特性均有较好的解释,但是其动态模型建模和辨识复杂,实际离散化实现也较难。本文采用工程易于实现的 Stribeck 摩擦模型描述稳定平台摩擦特性,其模型表示为:

$$T_f = \begin{cases} T_f(\dot{\theta}) & \dot{\theta} \neq 0 \\ T_c & \dot{\theta} = 0 \quad |T_c| < T_s \\ T_s \text{sgn}(T_c) & \dot{\theta} = 0 \quad T_s \leq |T_c| \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $T_f(\dot{\theta}) = [T_c + (T_s - T_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^\alpha}] \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_v \dot{\theta}$ ,  $T_f$  为摩擦力矩,  $T_c$  为库伦摩擦力矩,  $T_s$  为静摩擦力矩,  $k_v$  为黏性摩擦力矩比例系数,  $\dot{\theta}$  为俯仰轴的转动角速度,  $\dot{\theta}_s$  为 Stribeck 速度。  $\alpha$  为经验参数,取值在 0.5~2,通过试凑法确定取值为 2。

通过等效控制电压法进行参数辨识<sup>[3]</sup>。搭建系统摩擦辨识的半实物仿真系统如图 3 所示,不加任何扰动补偿措施,构造速度闭环系统,速度指令分为正反向,考虑到框架行程范围,角速度范围为  $\pm 0.1 \sim \pm 20(^{\circ})/s$ 。以正向为例,从  $0.1(^{\circ})/s$  开始速率信号,测得转速对应电压的变化曲线,换

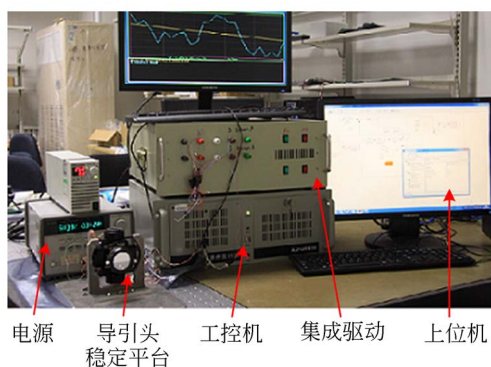


图 3 摩擦力矩辨识的实验平台

Fig. 3 Experimental system for friction identification

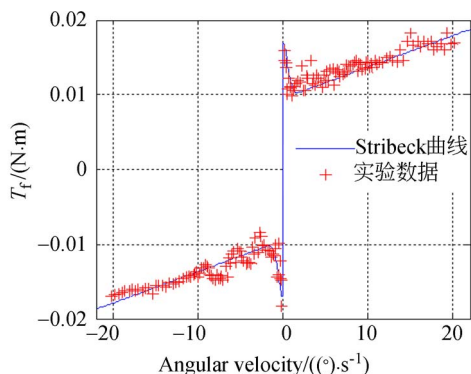


图 4 摩擦模型辨识

Fig. 4 Identification of friction model

算到转速对力矩的变化曲线,利用最小二乘方法拟合曲线如图 4 所示,对应的辨识的参数如表 1 所示。

表 1 Stribeck 摩擦模型辨识参数

Tab.1 Identification parameters of Stribeck friction model

$T_c/(N \cdot m)$	$T_s/(N \cdot m)$	$\dot{\theta}_s/((^{\circ}) \cdot s^{-1})$	$k_v$
0.009 5	0.017	15.2	$2.1 \times 10^{-5}$

### 3.2 扩张高增益观测器

扩张高增益观测器 (Extended High-gain Observer, EHGO) 广泛应用在输出反馈的非线性系统中<sup>[17]</sup>,在进行完摩擦补偿之后,设计如式(3)所示的扩张高增益观测器对式(1)进行估计。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{b}u + \hat{f} + \frac{\alpha_1}{\epsilon}(y - \hat{x}) \\ \dot{\hat{f}} = \frac{\alpha_2}{\epsilon^2}(y - \hat{x}) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\hat{x}$  为  $x$  的估计值;  $\alpha_1, \alpha_2$  为正实数;多项式  $s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2$ , 满足 Hurwitz 条件;  $\epsilon$  是一个非常小的值,  $\epsilon \ll 1$ ;  $\hat{b}$  是  $b$  的估计值;  $\hat{f}$  是对基于辨识摩擦模型补偿的偏差和“剩余扰动”的估计。

观测器应用的前提条件是保证观测器误差收敛。为了对观测器误差收敛条件进行分析,定义比例估计误差:

$$\eta_1 = \frac{x - \hat{x}}{\epsilon}, \eta_2 = f - \hat{f} \quad (4)$$

其满足如下方程:

$$\epsilon \dot{\eta} = \bar{A} \eta + \epsilon \bar{B} \dot{f} \quad (5)$$

其中  $\bar{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

扰动项的观测器误差为  $\tilde{f} = f - \hat{f}$ , 假设其有界且为  $f_m, \|\tilde{f}\| \leq f_m$ 。

对于任意给定的对称正定阵  $Q$  存在对称正定阵  $P$  满足如下 Lyapunov 方程:

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} + Q = 0 \quad (6)$$

定义观测器的 Lyapunov 函数为:

$$W = \epsilon \eta^T P \eta \quad (7)$$

对其求导得:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \epsilon \dot{\eta}^T P \eta + \epsilon \eta^T P \dot{\eta} = \\ & \eta^T (\bar{A}^T P + P \bar{A}) \eta + 2\epsilon \|\bar{P} \dot{f}\| \|\eta\| \|\tilde{f}\| = \\ & \eta^T (\bar{A}^T P + P \bar{A}) \eta + 2\epsilon \|\bar{P} \dot{f}\| \|\eta\| \|\tilde{f}\| \leq \\ & -\lambda_{\min}(Q) \|\eta\|^2 + 2\epsilon L \|\bar{P} \dot{f}\| \|\eta\| \end{aligned} \quad (8)$$

根据上述方程可知,当高增益观测器的参数满足  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max}$  时,  $\dot{\mathbf{W}} \leq 0$ , 也即观测器的收敛条件为:

$$\epsilon_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\boldsymbol{\eta}\|}{2\mathbf{L} \|\mathbf{PB}\|}, \quad (9)$$

其中  $\lambda_{\min}(\cdot)$  表示对应矩阵的最小特征值。

由式(8)可以看出观测误差的收敛速度与参数  $\epsilon$  有关,  $\epsilon$  越小, 收敛速度越快, 随着  $\epsilon$  减小, 观测误差逐渐向零趋近。

高增益观测器在系统跟踪时存在峰值现象, 通常采用增益切换控制法<sup>[18]</sup>和饱和函数法<sup>[19]</sup>两种方法进行改进, 切换控制方法由于初始采用低增益, 观测器收敛速度变慢, 不适合快速系统。考虑到系统特点, 本文采用饱和控制来产生一个缓冲, 降低了系统初始峰值现象。实际系统中受到电流和电机性能的限制, 均需在实现时对输入到电机的 PWM 控制量进行饱和限幅处理, 这点也非常有利于削弱高增益观测器带来的峰值现象。因此引入高增益观测器不会对导引头稳定平台系统的稳定性产生影响。

### 3.3 改进积分型滑模控制器

速度跟踪误差定义为:

$$e = \omega_d - \omega, \quad (10)$$

其中:  $\omega_d$  对应期望的角速度指令,  $\omega$  为当前的角速度值。

积分型滑模面可以使系统在初始时刻就在滑模面上, 可以提高控制系统的稳态性能。定义积分滑模面为:

$$s = c_1 e + c_2 \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (11)$$

其中  $c_1$ 、 $c_2$  是正常数, 需要满足 Hurwitz 稳定理论。

对式(11)求导得:

$$\dot{s} = c_1 \dot{e} + c_2 e. \quad (12)$$

令  $\dot{s} = 0$ , 式(1)带入式(12), 得到系统等效控制器为:

$$u_{eq} = \frac{1}{c_1 b} [c_1 \dot{\omega}_d + c_2 (\omega_d - \omega) - \tilde{f} c_1]. \quad (13)$$

本文采用等效控制和切换控制相结合的控制策略, 等效控制保证系统的状态在滑模面上, 切换控制保证系统的状态不离开滑模面, 如下式所示:

$$u = u_{eq} + u_{sw}. \quad (14)$$

切换控制器采用改进幂次项<sup>[20]</sup>:

$$u_{sw} = \frac{K |s|^\alpha \text{sat}(\frac{s}{\phi})}{b}. \quad (15)$$

采用  $|s|^\alpha$  幂次项使状态距离滑模面较远时, 以较快的速度进行到达滑模面, 在离滑模面较近时, 速度减慢。考虑到  $\tilde{f}$  未知, 采用  $f_m$  代替, 得到改进的滑模控制律 (Improved Sliding Mode Controller, ISMC) 为:

$$u = \frac{1}{c_1 b} [c_1 \dot{\omega}_d + c_2 (\omega_d - \omega) - f_m c_1] + \frac{1}{b} (K |s|^\alpha \text{sat}(\frac{s}{\phi})), \quad (16)$$

其中:  $\phi$  是用来降低抖振的边界层厚度, 为正常数, 理想状态下增加边界层厚度可降低抖振, 但是却降低了稳定精度, 该值的选择需要综合考虑。sat 函数如下所示:

$$\text{sat}(\frac{s}{\phi}) = \begin{cases} \frac{s}{\phi}, & \left| \frac{s}{\phi} \right| \leq 1 \\ \text{sgn}(\frac{s}{\phi}), & \left| \frac{s}{\phi} \right| > 1 \end{cases}, \quad (17)$$

其中:  $\text{sgn}(\frac{s}{\phi}) = \begin{cases} 1 & s > \phi \\ -1 & s < -\phi \end{cases}$

滑模平面中最主要和最有用的性质是对内部参数的变动和外部扰动作用具有不变性。理论表明采用该控制方法控制伺服系统可以达到期望的效果。

对控制器进行稳定性分析, 选择 Lyapunov 函数:

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

对式(18)求导得:

$$\dot{V} = s \dot{s} = -c_1 s (K |s|^\alpha \text{sat}(\frac{s}{\phi}) + \tilde{f} - f_m) < 0. \quad (19)$$

下面对式(19)进行分析:

当  $s < -\phi$  时, 由于  $\|\tilde{f}\| \leq f_m$ ,  $K$  满足  $K > 0$  时  $\dot{V} = -c_1 s (-K |s|^\alpha + \tilde{f} - f_m) < 0$ ;

当  $s > \phi$  时, 由于  $\|\tilde{f}\| \leq f_m$ ,  $K$  满足  $K > \frac{2f_m}{|\phi|^\alpha}$  时,  $\dot{V} = -c_1 s (K |s|^\alpha + \tilde{f} - f_m) < 0$ ;

当  $0 < s < \phi$ , 由于  $\|\tilde{f}\| \leq f_m$ ,  $K$  满足  $K > \frac{2f_m}{|\phi|^\alpha}$  时,  $\dot{V} = -c_1 s (\frac{K |s|^\alpha}{\phi} + \tilde{f} - f_m) < 0$ ;

当  $-\phi < s < 0$ , 由于  $\|\tilde{f}\| \leq f_m$ ,  $K$  满足  $K > 0$  时,  $\dot{V} = -c_1 s (\frac{K |s|^\alpha}{\phi} + \tilde{f} - f_m) < 0$ 。

由以上分析可知,只要取  $K>0$  且足够大,即能保证系统误差在有限时间内收敛到 0。

通过以上的理论分析可知,积分型滑模等效控制在控制量中含有饱和函数项,进一步有效减弱了高增益观测器的初始峰值现象。

对闭环系统进行稳定性分析,选择 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2. \quad (20)$$

对式(20)求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = e\dot{e} = e(\dot{\omega}_d - (bU - \frac{1}{J_{Ges}}(T_f(x) + d(\dot{x}, d, t)))) = \\ e(-\frac{c_2}{c_1}e + f_m - \tilde{f} - K|s|^\alpha \text{sat}(\frac{s}{\phi})) = \\ -\frac{c_2}{c_1}e^2 - e(K|s|^\alpha \text{sat}(\frac{s}{\phi}) + \tilde{f} - f_m). \end{aligned}$$

由于高增益观测器的收敛性,  $\tilde{f}$  有界且非常小,结合滑模控制器的稳定性条件可知,只要满足式(19)的参数选取条件,式(20)对应的  $\dot{V}_1 < 0$ 。

## 4 实验验证

为了验证所提出算法的有效性,将 PI-DOB 和 ISMC\_EHGO\_Stribeck 两种控制策略进行对比,实验采用某型半主动激光导引头作为实验对象,以俯仰框的运动控制性能作为评价标准,分别进行稳定平台性能实验和导引头性能实验。两实验硬件配置相同,以 TMS320F28335 和 EP3C40F324 作为处理芯片。采用有刷电机 PWM 功率驱动芯片实现电流闭环。所采用的电机的力矩系数为  $0.05 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ ,等效转动惯量为  $J_{Ges} = 0.00209 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。经调试所采用的 PI 控制器参数为:  $k_p = 0.056, k_i = 0.2$ , DOB 参数为  $\tau = 0.0045$ ,被控对象逆模型为:  $\frac{900}{(0.27s+1)(0.001s+1)}$ 。

ISMC-EHGO-Stribeck 控制器参数中 ISMC 参数为:  $c_1 = 2, c_2 = 20, \alpha = 0.95, K = 91, \phi = 0.05$ , EHGO 参数为  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.025, \epsilon = 0.01, \hat{b} = 4$ 。

### 4.1 稳定平台性能实验

给定系统幅值为  $0.6 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ ,频率为  $2 \text{ Hz}$  的低速正弦运动信号。系统在不同的控制器作用下的响应输出如图 5 所示(彩图见期刊电子版),绿线表示参考角速度,蓝线表示采用 PI-DOB 控制策略,可以看出系统在  $0 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$  时存在低速爬行现象,红

线表示采用 ISMC-EHGO-Stribeck 策略,可以看出系统在  $0 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$  时低速爬行现象得到了改善。

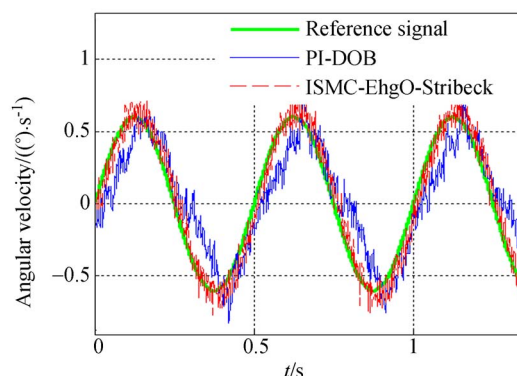


图 5 摩擦补偿效果对比

Fig. 5 Comparison of friction compensation

给定  $5 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$  的阶跃输入信号,并在  $1.5 \text{ s}$  时候添加  $0.008\sin(2\pi t) \text{ N} \cdot \text{m}$  的等效扰动力矩,系统响应曲线如图 6 所示,从超调量、上升时间、稳态精度、含扰动时跟踪误差均方差四方面进行分析如表 2 所示。稳态精度评判标准为  $0.5 \sim 1.5 \text{ s}$  的平稳阶段的误差均方差值;含扰动时跟踪误差均方差的评判标准为  $2 \sim 3 \text{ s}$  的误差均方差值。

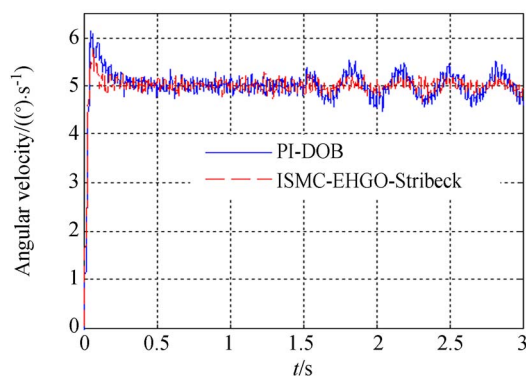


图 6 稳定回路阶跃响应对比

Fig. 6 Comparison of step response in stabilized loop

表 2 跟踪性能对比

Tab. 2 Comparison of tracking performances

控制器	超调量/%	上升时间/ms	稳态精度/ $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$	含扰动
				时跟踪误差均方差/ $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$
PI-DOB	22.8	34.6	0.091 6	0.225 0
ISMC-EHGO-Stribeck	16.0	33.5	0.081 3	0.115 3

由图 6 和表 2 可以看出,系统跟踪 5 (°)/s 的阶跃信号时,在提出的控制器作用下,超调量提高了 6%,上升时间提高了 0.9 ms,稳态精度提高了 0.010 3 (°)/s,含扰动时跟踪误差均方差提高了 0.109 7 (°)/s,表明了所设计控制器的有效性。

### 4.2 导引头性能实验

为了验证导引头的跟踪性能和抗扰性,在五轴转台上进行导引头性能测试实验。导引头实验装置原理框图如图 7 所示。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。位置环采用具有 Anti-windup 策略的 PI 控制器,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  $k_{pp}=6.2, k_{ip}=0.02$ , ISMC-EHGO-Stribeck 速度环控制时所采用的位置闭环控制器为 PI 控制器,参数为  $k_{ps}=6.12, k_{is}=0.01$ 。速度环控制周期为 1 ms,位置环控制周期为 50 ms。

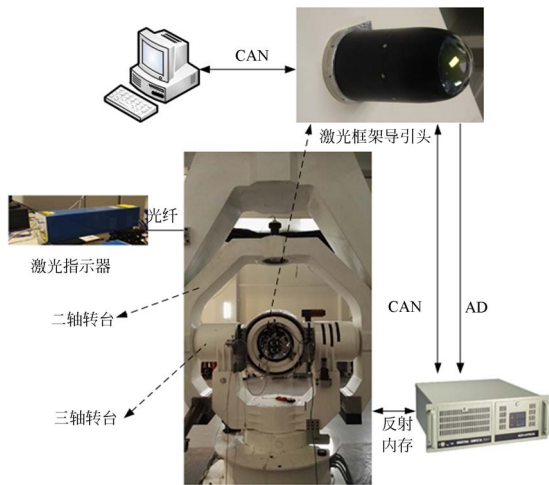


图 7 导引头实验平台

Fig. 7 Experiment platform of seeker

#### 4.2.1 梯形波跟踪实验

采用梯形波跟踪实验验证系统速度跟踪性能。实验结果如图 8 所示,采用 PI-DOB 控制时,1 (°)/s 梯形波跟踪状态下稳态误差均方差为 0.077 1 (°)/s,存在低速死区;采用 ISMC-EHGO-Stribeck 作用时,梯形波跟踪状态下稳态误差均方差为 0.044 3 (°)/s,不存在低速死区。可见所提出的控制器有效地补偿了摩擦,同时保证了稳态精度,且稳态精度提高了 0.032 8 (°)/s。

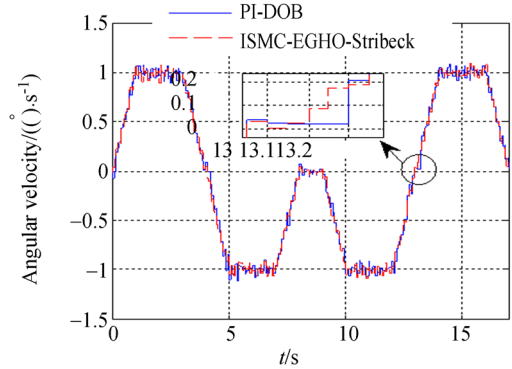


图 8 1 (°)/s 梯形波跟踪响应

Fig. 8 Response of trapezoid wave velocity tracking at 1 (°)/s

#### 4.2.2 隔离度测试

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模拟弹体扰动。隔离度  $J$  的定义为:

$$J = \frac{|\omega_{out}|}{|\omega_b|} \times 100\%, \quad (20)$$

其中:  $\omega_{out}$  为俯仰轴陀螺输出角速度,  $\omega_b$  弹体扰动角速度。隔离度表征系统抗扰性,其数值越小,表明隔离能力越强。给定三轴转台典型幅值和频率扰动条件下,不同控制器作用下导引头的隔离度如表 3 所示,可以看出与传统 PI-DOB 控制器相比,系统在所提出的算法控制下,系统隔离度至少提高了 0.57%。图 9 和图 10 分别给出了幅值为 1°频率为 1 Hz 和幅值为 1°频率为 3.5 Hz 的弹体扰动时导引头输出角速度对比,可以看出在提出的控制器作用下,系统抗扰性得到了提高。

表 3 扰动隔离度对比

Tab. 3 Comparison of disturbance rejection rate

摆动角 / (°)	频率 / Hz	PI-DOB / %	ISMC-EHGO-Stribeck / %	提高量 / %
1	0.5	7.96	5.62	2.34
1	1	6.32	3.42	3.11
1	2.5	3.06	2.13	0.93
1	3.5	4.98	3.09	1.89
3	0.5	3.71	2.80	0.91
3	2.5	1.59	1.02	0.57
3	3.5	1.91	1.21	0.70
7	1	3.30	2.10	1.20

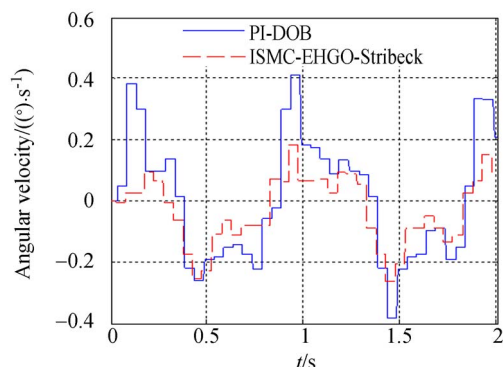


图 9  $\sin(2\pi t)^\circ$  扰动时不同控制器作用下响应对比  
Fig. 9 Comparison of response by different controller with disturbance of  $\sin(2\pi t)^\circ$

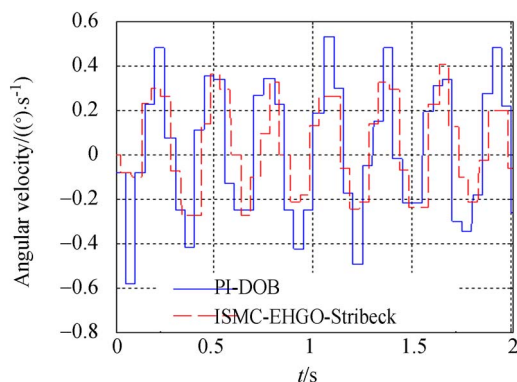


图 10  $\sin(7\pi t)^\circ$  扰动时不同控制器作用下响应对比  
Fig. 10 Comparison of response by different controller with disturbance of  $\sin(7\pi t)^\circ$

## 参考文献:

- [1] 孙高, 朱明超, 贾宏光, 等. 摩擦自适应补偿在导引头稳定平台控制系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1316-1321.  
SUN G, ZHU M CH, JIA H G, *et al.*. Adaptive friction compensation in seeker stabilized platform servo control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1316-1321. (in Chinese)
- [2] ZHANG ZH Y, LI ZH Q, ZHOU Q K, *et al.*. Application in prestiction friction compensation for angular velocity loop of inertially stabilized platforms

## 5 结 论

激光半主动导引头稳定平台实现光轴空间稳定、随动、搜索和跟踪, 受到干扰力矩和系统未建模误差的影响, 实际被控制对象具有强非线性, 为了提高系统的抗扰性, 有必要设计相应的控制器改善系统性能。本文利用扰动补偿和改进滑模控制器实现导引头稳定平台控制, 根据扰动特点将扰动分为摩擦力矩和“剩余扰动”两部分, 基于 Stribeck 摩擦模型辨识摩擦参数, 并进行摩擦力矩补偿; 采用不依赖于被控对象模型的扩张高增益观测器对“剩余扰动”进行估计, 并给出了扩张高增益观测器的收敛条件, 且采用饱和函数法抑制其峰值现象; 采用改进滑模控制器进一步提高系统抗扰性, 改进的滑模控制器采用积分型滑模面和含有改进幂次切换律的等效滑模控制, 并采用 Lyapunov 函数证明其稳定性。分别进行了稳定平台性能测试和导引头性能测试, 用于验证跟踪和抗扰效果。实验结果表明, 与 PI-DOB 控制器相比, 跟踪  $1^\circ/\text{s}$  梯形波时, 提出的控制器有效地补偿了摩擦, 同时稳态精度提高了  $0.0328^\circ/\text{s}$ ; 给定三轴转台典型幅值和频率扰动下, 系统的隔离度均有所提升, 根据不同扰动条件下对比可以看出隔离度至少提高了  $0.57\%$ 。表明所提出基于 Stribeck 摩擦与 EHGO 扰动补偿的改进滑模控制的算法能够有效提高导引头稳定平台的隔离度。

- [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, (2014), 27 (3): 655-662.
- [3] 晋超琼, 张葆, 李贤涛. 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, 2017.  
JIN CH Q, ZHANG B, LI X T. Friction compensation strategy of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017. (in Chinese)
- [4] 丛爽, 孙光立, 邓科, 等. 陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 170-177.

- CONG SH, SUN G L, DENG K. Active disturbance rejection and filter control of gyro-stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 170-177. (in Chinese)
- [5] 魏伟, 戴明, 李嘉全, 等. 航空光电稳定平台的自抗扰控制系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2297-2305.
- WEI W, DAI M, LI J Q, *et al.*. ADRC control system for airborne opto-electronic platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2297-2305. (in Chinese)
- [6] 汪永阳, 戴明, 丁策. 光电稳定平台中高阶扰动观测器的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 459-466.
- WANG Y Y, DAI M, DING C, *et al.*. Application of high order observer in EO stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 459-466. (in Chinese)
- [7] BHAGYASHRI T, SHAILAJA K, AMRUTA M. State and disturbance estimation using higher order sliding modes for seeker System[C]. *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, Kanpur, India: ACODS*, 2014: 348-354.
- [8] 周阳, 王磊, 周涛. 高精度光电伺服稳定平台积分滑模变结构控制[J]. *光电工程*, 2010, 37(7): 12-29.
- ZHOU Y, WANG L, ZHOU T. Integral sliding mode variable structure control of high precision EO servo-stabilized platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 12-29. (in Chinese)
- [9] LEI X SH, ZOU Y, DONG F. A composite control method based on the adaptive RBFNN feedback control and the ESO for two-axis inertially stabilized platforms[J]. *ISA Transactions*, 2015 (59): 424-433.
- [10] ZHOU X Y, ZHAO B L, LIU W. A compound scheme on parameters identification and adaptive compensation of nonlinear friction disturbance for the aerial inertially stabilized platform[J]. *ISA Transactions*, 2017, (67): 293-305.
- [11] SONG X R, CHEN H, XUE Y G. Stabilization precision control methods of photoelectric aim-stabilized system[J]. *Optics Communications*, 2015 (351): 115-120.
- [12] JI W, LI Q, XU B. Adaptive fuzzy PID composite control with hysteresis-band switching for line of sight stabilization servo system[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, (15): 25-32.
- [13] ZOU Y, LEI X SH. A compound control method based on the adaptive neural network and sliding mode control for inertial stable platform[J]. *Neurocomputing*, 2015, (155): 286-294.
- [14] 吴海龙, 贾宏光, 魏群. 滚仰式稳定平台质量不平衡分析[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 108-115.
- WU H L, JIA H G, WEI Q. Analysis of mass imbalance for roll-pitch inertial stabilized platform[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 108-115. (in Chinese)
- [15] ZHANG B Q, CHU H R, SUN T T, *et al.*. Thermal calibration of a tri-axial MEMS gyroscope based on Parameter-Interpolation method [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 261: 103-116.
- [16] 张玉莲, 储海荣, 张宏巍, 等. MEMS陀螺随机误差特性研究及补偿[J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 201-510.
- ZHANG Y L, CHU H R, ZHANG H W. Characteristics and compensation method of MEMS gyroscope random error [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 201-510. (in Chinese)
- [17] KHALIL H K, PRALY L. High-gain observers in nonlinear feedback control [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, (24): 993-1015.
- [18] ANDRIEU V, PRIEUR C, TARBOURIECH S, *et al.*. A hybrid scheme for reducing peaking in high-gain observers for a class of nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2016, (72): 138-146.
- [19] KHALIL H K. Cascade high-gain observers in

output feedback control [J]. *Automatica*, 2017, (80): 110-118.

[20] PRADHAN R, SUBUDHI B. Double integral slid-

ing mode MPPT control of a photovoltaic system [C]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(1): 285-292.

#### 作者简介:



张明月(1986—),女,山东聊城人,博士,助理研究员,2011年于华中科技大学获得硕士学位,2014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,主要从事航天器执行机构及光电稳定平台伺服控制方面的研究。E-mail: zyy\_2011@163.com

#### 通讯作者:



张帆(1979—),男,辽宁锦州人,博士,副研究员,2003年于宁波大学获得学士学位,2008年、2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间相机电子学、光机结构、热设计及仿真分析。E-mail: zhangfan@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:秦 思)