

doi: 10.7690/bgzdh.2021.05.008

# 机载光电稳定平台的强鲁棒性滑模变结构控制

马经帅, 于 洵, 韩 峰

(西安工业大学兵器科学与技术学院, 西安 710000)

**摘要:** 为使机载光电稳定平台系统在复杂环境下仍具有强鲁棒性, 建立光电稳定平台数学模型。以两轴四框架光电吊舱为研究对象, 通过分析噪声干扰及本身结构参数的变化对光电稳定平台的影响, 提出基于干扰观测器 (disturbance observer, DOB) 的滑模控制器设计方案。理论推导和仿真结果表明: 滑模变结构控制 (sliding mode variable structure control, SMVSC) 对于干扰力矩和摄动完全适应, 对系统结构参数变化和外界扰动具有良好的鲁棒性; 比无干扰观测器的控制系统, 拥有更高的稳定精度和更快的动态响应, 能增强光电稳定平台的抗扰动能力。

**关键词:** 光电稳定平台; 滑模变结构控制; 干扰观测器; 强鲁棒性

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Strong Robust Sliding Mode Variable Structure Control in Airborne Photoelectric Stabilized Platform

Ma Jingshuai, Yu Xun, Han Feng

(College of Ordnance Science &amp; Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to make the airborne optoelectronic stabilized platform system still have strong robustness in complex environments, a mathematical model of the optoelectronic stabilized platform is established. Taking the two-axis four-frame photoelectric pod as the research object, by analyzing the influence of noise interference and changes in its structural parameters on the photoelectric stabilized platform, a design scheme of sliding mode controller based on disturbance observer (DOB) is proposed. Theoretical derivation and simulation results show that: sliding mode variable structure control (SMVSC) is fully adaptable to disturbance torque and perturbation, and has good robustness to system structural parameter changes and external disturbances; it has higher performance than control systems without disturbance observers. Stable accuracy and faster dynamic response enhance the anti-disturbance capability of the photoelectric stabilized platform.

**Keywords:** photoelectric stabilization platform; SMVSC; DOB; strong robustness

### 0 引言

机载光电稳定平台一般由光电载荷、陀螺、框架结构、驱动及控制系统等组成, 是一种光、机、电高度集成的精密设备, 用于目标的搜索捕获和跟踪等。“十三五”以来, 对探测距离、目标跟踪和成像质量等要求越来越高, 即对平台的视轴稳定精度要求越来越高, 然而在复杂多干扰的机载环境下, 外界环境更易干扰平台的稳定, 进而降低系统的总体性能; 因此, 提高平台的抗干扰能力, 使其具备强鲁棒性, 成为提高光电稳定平台稳定精度的关键<sup>[1]</sup>。高精度电机伺服控制主要存在以下问题: 1) 对于摩擦与外力干扰的抑制能力; 2) 系统性能受参数变化的影响; 3) 对于动态跟踪的性能。为此形成了前馈跟踪控制、闭环控制策略和摩擦补偿技术 3 个主要研究领域。近年来对光电平台稳定领域

的探索涌现出多种方法, 文献[2]采用高斯型径向基函数 (RBF) 神经网络对摩擦进行观测和补偿的方法; 文献[3]采用基于神经网络的状态观测器设计陀螺稳定平台控制系统; 但以上方法的设计过程过于复杂, 计算繁琐, 成本高, 并未推广应用到实际工程中。此外自韩京清教授<sup>[4]</sup>提出自抗扰控制技术后, 在这方面的研究也层出不穷。文献[5]基于重复-自抗扰控制技术提高了系统的扰动隔离度; 文献[6]基于模型设计的线性自抗扰控制器提高了光电的响应速度和扰动抑制能力。

滑模变结构控制 (SMVSC) 作为一种非线性控制理论, 以其强鲁棒性和实现简单等优势被广泛关注; 但在实际控制系统中, 变结构控制在滑动模式下总伴随着高频抖动, 抖动会影响控制精度。高为炳院士<sup>[7]</sup>在变结构控制理论研究中首次提出趋近律、品质控制和切换模式等新概念, 以此来消除抖

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-02-23

作者简介: 马经帅 (1994—), 男, 河南人, 硕士, 从事机载光电吊舱伺服控制系统方法研究。E-mail: 1214691575@qq.com。



则  $\dot{z} = \dot{\hat{d}} - KJ\ddot{\theta}$ ，根据式(1)可得出  $\dot{z} = K(b\dot{\theta} - u) - K\dot{\hat{d}}$ 。干扰观测器可设计为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= K(b\dot{\theta} - u) - K\dot{\hat{d}} \\ \hat{d} &= z + KJ\dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对等效的常值干扰或慢时变干扰，可得观测误差为

$$\dot{\tilde{d}} = \dot{\hat{d}} - \dot{d} = -\dot{\hat{d}} = -\dot{z} - KJ\ddot{\theta} \quad (5)$$

将式(4)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}} &= -(K(b\dot{\theta} - u - KJ\dot{\theta}) - Kz) - KJ\ddot{\theta} = \\ &= K\hat{d} - K(J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} - u) = K(\hat{d} - d) = -K\tilde{d} \end{aligned} \quad (6)$$

因此观测误差方程为  $\dot{\tilde{d}} + K\tilde{d} = 0$ ，可解出

$$\tilde{d}(t) = \tilde{d}(t_0)e^{-Kt} \quad (7)$$

由上式可知：在初始观测误差确定的情形下，观测器的收敛精度取决于参数  $K$  值，且干扰估计值  $\hat{d}$  指数逼近于干扰  $d$ 。

### 2.2 滑模控制器的设计

在 SMC 控制器中对干扰进行补偿，使得切换增益降低，有效减少了切换带来的抖动问题。系统的控制目标是  $\theta \rightarrow \theta_d, \dot{\theta} \rightarrow \dot{\theta}_d$ ，因此设计滑模切换函数为  $s = ce + \dot{e}$ 。其中： $c > 0$  ( $c$  值决定收敛速度)， $e = \theta_d - \theta$  为跟踪误差。

由系统模型可推导出：

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d - (-b\dot{\theta} + u + d)/J; \quad (8)$$

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{\theta}_d + \frac{1}{J}\dot{\theta} - \frac{1}{J}u - \frac{1}{J}d \quad (9)$$

对滑模变结构控制可取控制律<sup>[11]</sup>为

$$u(t) = J(c\dot{e} + \ddot{\theta}_d + \frac{1}{J}\dot{\theta} - \frac{1}{J}\hat{d} + ks + \eta \operatorname{sgn} s), k > 0 \quad (10)$$

则得出

$$\dot{s} = -ks - \eta \operatorname{sgn} s - \frac{1}{J}\tilde{d} \quad (11)$$

由闭环系统的李雅普诺夫函数

$$V = s^2/2 + \tilde{d}^2/2 \quad (12)$$

根据式(6)、式(12)得出

$$\dot{V} = s\dot{s} + \tilde{d}\dot{\tilde{d}} = -ks^2 - \eta|s| - \frac{1}{J}\tilde{d}s - K\tilde{d}^2 \leq 0 \quad (13)$$

其中  $\eta \geq |\tilde{d}|_{\max}/J$  (切换项增益)。干扰观测器初始观测误差可取  $|\tilde{d}(0)| = |\tilde{d}|_{\max}$ 。

对于控制系统的收敛性分析：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -ks^2 - \eta|s| - \tilde{d}s/J - K\tilde{d}^2 \leq -ks^2 - K\tilde{d}^2 \leq \\ &= -k_1(s^2/2 + \tilde{d}^2/2) = -k_1V \end{aligned} \quad (14)$$

引理 1<sup>[12]</sup> 针对  $V: [0, \infty) \in R$ ，不等式方程  $\dot{V} \leq -\alpha V + f, \forall t \geq t_0 \geq 0$  的解为

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)}V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)}w(\tau)d\tau \quad (15)$$

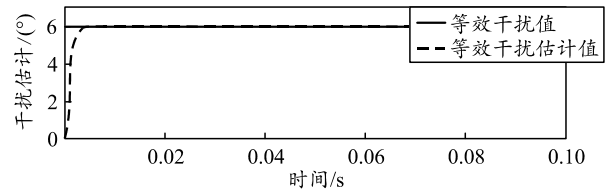
其中  $\alpha$  为任意常数。

根据引理 1 可解出式(14)， $V(t) \leq e^{-k_1(t-t_0)}V(t_0)$ ，由此可知方位轴系统指数收敛，其收敛精度取决于  $k_1$  值的大小，其中  $k_1 = 2\min\{k, K\}$ 。

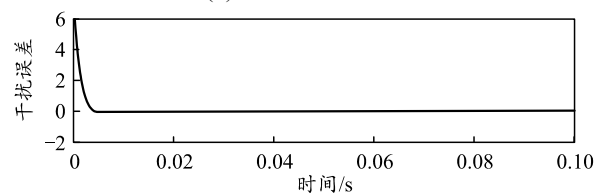
## 3 结果分析

### 3.1 干扰估计实验分析

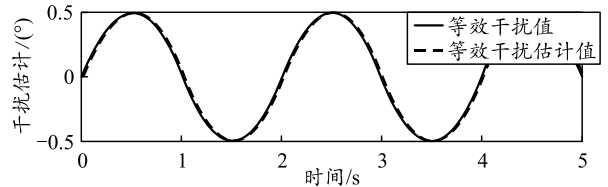
为验证 DOB 对干扰估计的有效性，笔者在仿真实验中首先验证加入赋值为 6 的恒值干扰，实验结果如图 4(a)、(b)所示，干扰被估计出的时间小于系统收敛的理论时间，满足要求。然后验证其对于动态干扰的估算能力，实验结果如图 4(c)、(d)、(e)、(f)所示，分别是加入  $0.5\sin(\pi t)$  干扰、干扰和参数变化与干扰同时作用的结果<sup>[13-14]</sup>。 $K$  值减小会导致收敛速度延缓且误差变大，不能对动态干扰进行实时估计。



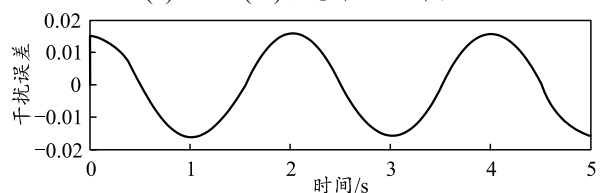
(a) 恒值干扰估计



(b) 恒值干扰估计误差



(c) 0.5sin(πt)动态干扰估计值



(d) 0.5sin(πt)动态干扰估计误差

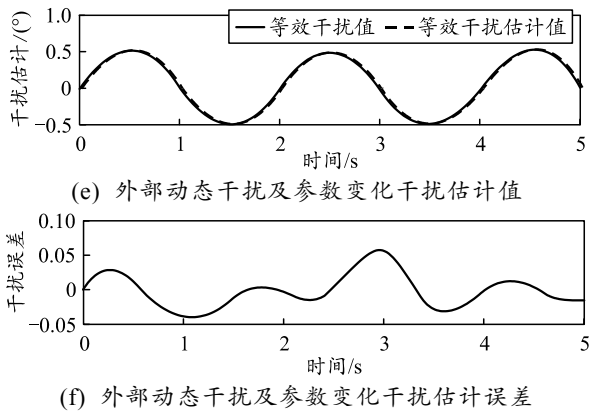


图 4 干扰观测器测试

从以上实验结果分析可知：该干扰观测器能够满足滑模控制的快速切换特性，对动态干扰和参数变化都能进行有效估计；同时，设计时需注意  $K$  值的选择。

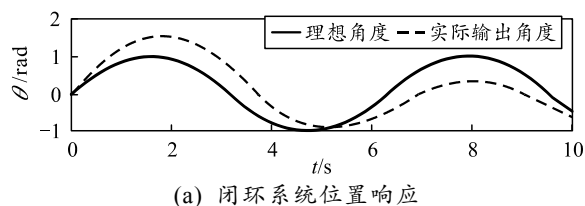
### 3.2 闭环控制系统结果分析

对于 SMC+DOB 控制策略的有效性，针对两轴四框架的光电稳定平台，按照图 4 的结构形式进行仿真验证，并与仅用 SMC 控制的方案进行对比。设置模型的参数  $J=0.00752$ ,  $b=0.188$ ，控制系统中加入正弦动态干扰信号作为对外界的其他干扰因素。同时，由于摩擦是干扰力矩的主要来源，低速和换向时，静摩擦和动摩擦来回交替会导致运动不流畅，称为爬行现象。高速时，由于摩擦的过阻尼特性会使实际速度低于期望速度<sup>[15]</sup>，需在仿真实验中加入 LuGre 摩擦模型：

$$\left. \begin{aligned} F &= (\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \alpha \dot{\theta}) / J \\ \dot{z} &= \dot{\theta} - (\sigma_0 |\dot{\theta}| / (g(\dot{\theta}))) z \\ g(\dot{\theta}) &= F_C + (F_S - F_C) e^{-(\dot{\theta}/V_S)^2} + \alpha \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中： $\sigma_0, \sigma_1$  是动态摩擦参数，取值为  $\sigma_0=260$ ,  $\sigma_1=2.5$ ； $F_C, F_S, \alpha, V_S$  是静态摩擦参数，取值为  $F_C=0.28, F_S=0.34, \alpha=0.02, V_S=0.01$ 。

为了验证系统在动态情况下的性能，输入位置指令  $\theta_d = \sin t$  的正弦信号，首先观察分析在无干扰观测器时，仅在 SMC 控制作用下系统的位置跟踪输出、控制量输出、位置跟踪误差和系统误差相轨迹。实验结果如图 5 所示。



(a) 闭环系统位置响应

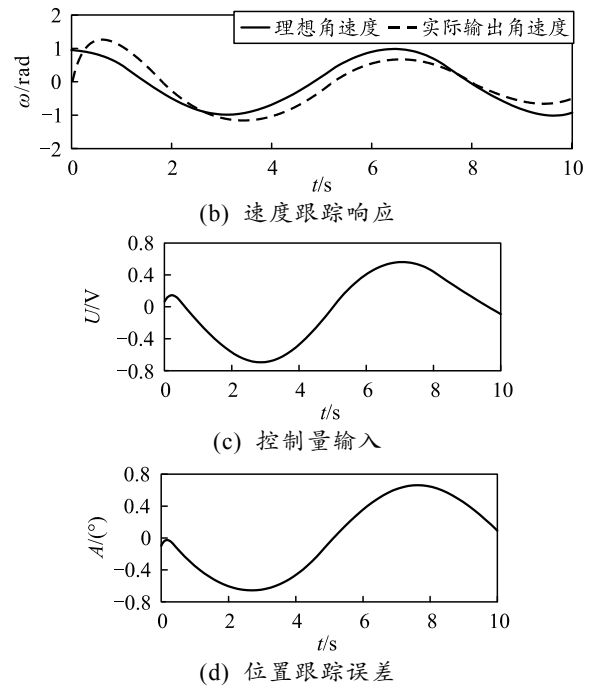


图 5 SMC 闭环控制系统仿真

再验证伺服控制系统加入干扰观测器后变成 SMC+DOB 控制系统，实验结果如图 6 所示。

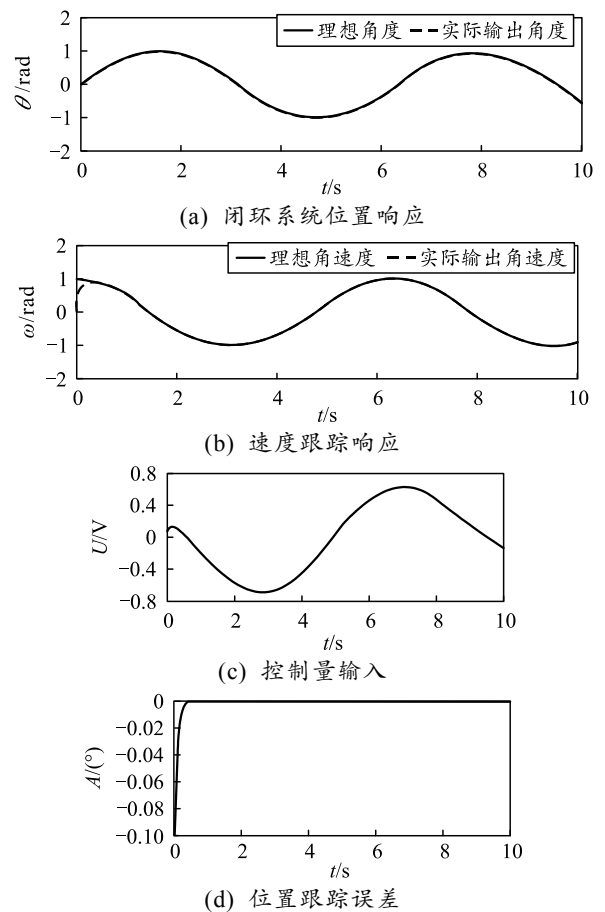


图 6 SMC+DOB 闭环控制系统仿真