

引用格式: 韩思凡, 秦超, 徐安鹏, 等. 光电跟踪转台反步滑模控制策略研究[J]. 电光与控制, 2023, 30(7): 95-99. HAN S F, QIN C, XU A P, et al. Reverse sliding mode control strategy of photoelectric tracking turntable[J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(7): 95-99.

光电跟踪转台反步滑模控制策略研究

韩思凡^{1,2,3}, 秦超^{1,3}, 徐安鹏^{1,2,3}, 徐振邦^{1,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000; 2. 中国科学院大学, 北京 100000;
3. 中国科学院空间光学系统在轨制造与集成重点实验室, 长春 130000)

摘要: 针对光电跟踪转台的高精度跟踪问题, 设计了一种反步滑模控制系统和算法, 该算法在反步控制的基础上引入滑模控制, 提高了控制器的鲁棒性。通过仿真分析可知, 该算法相较于反步控制算法和 PID 控制算法性能得到了提升, 其中, 阶跃跟踪响应速度提高 21% 以上, 正弦跟踪稳态精度和随机干扰下的稳态精度均提高两个数量级, 脉冲干扰稳定时间减少 0.7 s 以上, 很好地保证了光电跟踪转台的跟踪精度。

关键词: 光电跟踪转台; 反步滑模控制; 跟踪精度

中图分类号: TP273 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2023.07.017

Reverse Sliding Mode Control Strategy of Photoelectric Tracking Turntable

HAN Sifan^{1,2,3}, QIN Chao^{1,3}, XU Anpeng^{1,2,3}, XU Zhenbang^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China; 3. Key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the high precision tracking problem of photoelectric tracking turntable, a backstepping sliding mode control system and algorithm are designed. Sliding mode control is introduced in the algorithm based on backstepping control, which improves the robustness of the controller. Through the simulation analysis, it can be seen that the performance of the algorithm is greatly improved compared with that of the backstepping control algorithm and the PID control algorithm. The step tracking response speed is increased by more than 21%, and the steady-state accuracy of the sinusoidal tracking and the steady-state accuracy under random disturbance are improved by two orders of magnitude, the pulse interference stabilization time is reduced by more than 0.7 s. The tracking accuracy of the photoelectric tracking turntable are well guaranteed.

Key words: photoelectric tracking turntable; backstepping sliding mode control; tracking accuracy

0 引言

随着无人机技术的不断发展, 对于检测无人机飞行性能的设备——光电跟踪转台的性能要求也越来越高。光电跟踪转台是由各种光电传感器和机械结构组成的能满足对目标跟踪测量的高精度光电跟踪设备。其响应速度、跟踪精度以及抗干扰能力的好坏, 直接影响其对目标跟踪的准确性。因此, 高精度的控制技术是实现光电跟踪转台高精度跟踪的核心技术^[1]。

随着对光电跟踪转台跟踪精度要求的不断提高以及各种复杂扰动因素的存在, 传统 PID 控制算法已经难以满足控制精度需求。近年来, 科研学者不断提出新的控制算法。文献[2]提出一种基于逆系统解耦的积分滑模控制策略, 有效地抑制了光电平台内部耦合和干扰, 提高跟踪精度; 文献[3]针对系统干扰提出一种新型终端滑模干扰观测器, 并结合有限时间收敛和自适应控制思想, 实现了对干扰的估计和补偿, 提高了系统跟踪精度, 增强了鲁棒性; 文献[4]针对系统各种复杂干扰, 提出了基于新型非线性扩张观测器和滑模变结构的复合控制方法, 增强了光电稳定平台的抗干扰能力; 文献[5]针对导引头稳定跟踪精度与目标快速

收稿日期: 2022-06-27

修回日期: 2022-07-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B0404020002)

作者简介: 韩思凡(1997—), 男, 河南周口人, 硕士。

跟踪能力难以兼容问题,提出了通过非连续性观测投影调节自适应参数,并利用自抗扰控制的过渡函数解决了速度环超调问题,提高了光电平台的自适应性和跟踪精度;文献[6]提出一种积分反步自抗扰控制策略,有效抑制了系统时变摩擦、外界非线性扰动对系统的影响,提高系统跟踪精度和响应速度;文献[7]提出一种由多种群遗传算法优化的模糊Ⅱ型控制算法,实现了对系统动态高精度控制,提高了系统稳态精度;文献[8-9]通过引入DOB观测器有效地抑制了光电稳定平台的扰动,提高了跟踪精度。

本文首先建立了光电跟踪转台的三维模型,然后建立了其动力学模型,针对光电跟踪转台存在耦合、未知扰动、非线性等因素导致系统跟踪精度低的问题,将反步控制与滑模控制算法相结合,设计了一种反步滑模控制系统和算法。通过仿真分析可知,该控制算法相较于反步控制算法和PID控制算法,系统的响应速度、抗干扰能力和跟踪精度大大提升,很好地保证了光电跟踪转台的应用需求。

1 光电跟踪转台结构设计及动力学建模

1.1 光电跟踪转台结构设计

本文所设计的光电跟踪转台结构如图1所示。该转台主要由基座部分和三轴组成,三轴分别为由光学系统组成的视轴、由俯仰轴系组成的水平轴和由方位轴系组成的垂直轴。光学系统主要包括可见光相机和激光测距机,实现目标的捕获和距离测定;俯仰轴系主要由光学系统安装平台、俯仰电机、俯仰圆光栅、左右轴等组成,实现视轴和水平轴的俯仰运动;垂直轴系主要由U型架、方位轴、方位电机、方位圆光栅等组成,实现视轴、水平轴和垂直轴的方位运动。

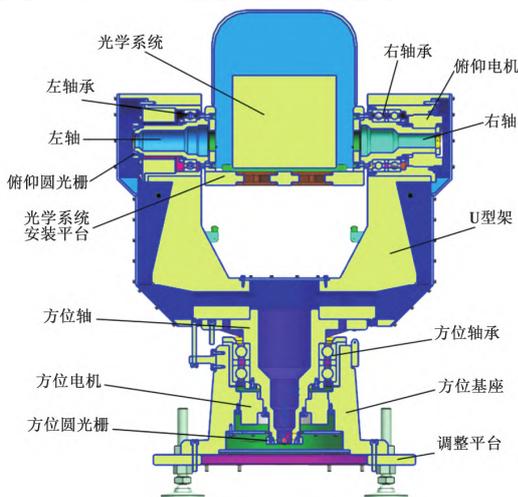


图1 光电跟踪转台结构图

Fig. 1 Structure diagram of photoelectric tracking turntable

1.2 光电跟踪转台动力学建模

在初始状态时,三轴处于相互正交的关系,其中,视轴在垂直面内绕着水平轴转动,视轴和水平轴在水平面内绕着垂直轴转动。

定义光电跟踪测量转台坐标系如下:基座坐标系为 $O-X_b Y_b Z_b$,垂直轴坐标系为 $O-X_c Y_c Z_c$,水平轴坐标系为 $O-X_s Y_s Z_s$ 。

3个坐标系之间的关系为:水平轴坐标系中 X_s 位于垂直轴上,并于垂直轴坐标系中的 X_c 重合;垂直轴坐标系中的 Z_c 轴与基座坐标系的 Z_b 重合,并于垂直轴上。

当转台运动时,三轴之间不再相互正交,此时三轴关系如图2所示,设垂直轴绕 Z_c 轴逆时针转动 α 角,水平轴绕 X_s 轴逆时针转动 β 角。

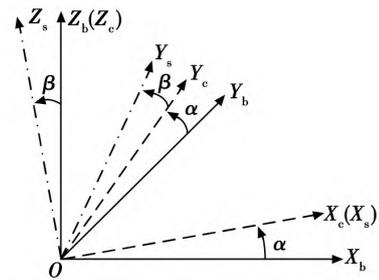


图2 转台运动时三轴关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-axis relationship when turntable is moving

设水平轴坐标系到垂直轴坐标系的旋转矩阵 T_{sc} 为

$$T_{sc} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

设垂直轴坐标系到基座坐标系的旋转矩阵 T_{cb} 为

$$T_{cb} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 α 为垂直轴坐标系绕其 Z_c 轴的旋转角度。

根据运动学理论可知,垂直轴的运动角速度由自身的旋转引起,水平轴的运动角速度由垂直轴和水平轴的旋转运动迭加得到。

则垂直轴相对于基座坐标系运动角速度为

$$\omega_{cb} = T_{cb}^{-1} \times (0 \ 0 \ \dot{\alpha})^T = (0 \ 0 \ \dot{\alpha})^T \quad (3)$$

水平轴相对于基座坐标系运动角速度为

$$\omega_{sb} = (\dot{\beta} \ 0 \ 0) + T_{sc}^{-1} (0 \ 0 \ \dot{\alpha})^T = (\dot{\beta} \ \dot{\alpha} \sin \beta \ \dot{\alpha} \cos \beta)^T \quad (4)$$

由刚体绕定点转动的动力学原理可得刚体绕定点转动的动力学方程,投影整理得各方向转矩为

$$\begin{cases} M_x = J_x \frac{d\omega_x}{dt} - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z \\ M_y = J_y \frac{d\omega_y}{dt} - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x \\ M_z = J_z \frac{d\omega_z}{dt} - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y \end{cases} \quad (5)$$

定义在垂直轴坐标系 $O-X_c Y_c Z_c$ 中,垂直轴(包括各种绕 Z_c 轴旋转的部件,水平轴除外)绕 $O-X_c Y_c Z_c$ 中 X_c 轴的转动惯量为 J_{cx} ,垂直轴绕 $O-X_c Y_c Z_c$ 中 Y_c 轴的转动惯量为 J_{cy} ,垂直轴绕 $O-X_c Y_c Z_c$ 中 Z_c 轴的转动惯量为 J_{cz} ;在水平轴坐标系 $O-X_s Y_s Z_s$ 中,水平轴(包括各种绕 X_s 轴旋转的部件)绕 $O-X_s Y_s Z_s$ 中 X_s 轴的转动惯量为 J_{sx} ,水平轴绕 $O-X_s Y_s Z_s$ 中 Y_s 轴的转动惯量为 J_{sy} ,水平轴绕 $O-X_s Y_s Z_s$ 中 Z_s 轴的转动惯量为 J_{sz} 。

由式(4)和式(5)可以得到水平轴转矩为

$$\begin{cases} M_{sx} = J_{sx} \ddot{\beta} + \dot{\alpha}^2 (J_{sz} - J_{sy}) \sin \beta \cos \beta \\ M_{sy} = J_{sy} \ddot{\alpha} \sin \beta + \dot{\beta} \dot{\alpha} (J_{sy} + J_{sx} - J_{sz}) \cos \beta \\ M_{sz} = J_{sz} \ddot{\alpha} \cos \beta + \dot{\beta} \dot{\alpha} (J_{sy} - J_{sx} - J_{sz}) \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

由式(3)和式(5)可得垂直轴自身的转矩为

$$\begin{cases} M_{cx} = 0 \\ M_{cy} = 0 \\ M_{cz} = J_{cz} \ddot{\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

水平轴对垂直轴的耦合转矩为

$$M_{sc} = T_{sc} \times M_s = \begin{cases} M_{sx} \\ M_{sy} \sin \beta - M_{sz} \cos \beta \\ M_{sy} \cos \beta + M_{sz} \sin \beta \end{cases} \quad (8)$$

最终得到光电跟踪测量装置动力学方程为

$$\begin{cases} M_{sx} = J_{sx} \ddot{\beta} + \dot{\alpha}^2 (J_{sz} - J_{sy}) \sin \beta \cos \beta \\ M_{cz} = J_{cz} \ddot{\alpha} + \ddot{\alpha} (J_{sy} \sin^2 \beta + J_{sz} \cos^2 \beta) + \\ 2 \dot{\alpha} \dot{\beta} (J_{sy} - J_{sz}) \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,光电跟踪转台运动时,转角、转速、转动惯量等对方位和俯仰运动的耦合均有影响。这给光电跟踪转台控制系统的设计带来了困难。

对于控制系统的设计,光电跟踪转台的方位和俯仰运动之间存在耦合,导致控制系统设计困难。又由于光电跟踪转台每个轴都可以独立设计,所以本文针对单轴系统进行控制系统设计,将耦合力矩作为外界干扰力矩进行建模,然后再拓展运用到整个转台系统。

本文以方位轴驱动系统为例来设计控制器,动力学方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ J \dot{\omega} = C_m i - F_f - F_d \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ 为角位置; ω 为角速度; J 为转动惯量; C_m 为电机转矩系数; F_f 为摩擦力矩; F_d 为其他扰动。

摩擦力矩模型采用目前应用最为广泛的 Stribeck 模型,该模型指出,在低速过渡阶段,摩擦力矩随着速度增大而减小,是速度连续的函数^[10]。Stribeck 模型可表示如下。

当角速度 $\omega \leq |\omega_s|$ 时,静摩擦力矩为

$$F_f^s = \begin{cases} F_m & F(t) > F_m \\ F(t) & -F_m \leq F(t) \leq F_m \\ -F_m & F(t) < -F_m \end{cases} \quad (11)$$

式中 $F(t)$ 是静摩擦力矩下的驱动力矩。

当角速度 $\omega > |\omega_s|$ 时,动摩擦力矩为

$$F_f^d = F_c \operatorname{sgn} \omega + (F_m - F_c) e^{-(\omega/\omega_s)^\varepsilon} + k_v \omega \quad (12)$$

其中: F_c 为库仑力矩; F_m 为最大静摩擦力矩; k_v 为黏性摩擦比例系数; ω_s 为 Stribeck 角速度; ε 为小的、正的常数。摩擦力矩模型各参数取值如表 1 所示。

表 1 摩擦力矩模型参数

Table 1 Frictional torque model parameters

参数	取值
库仑力矩 $F_c / (N \cdot m)$	0.2
最大静摩擦力矩 $F_m / (N \cdot m)$	0.5
黏性摩擦比例系数 $k_v / (N \cdot ms \cdot (^\circ)^{-1})$	0.04
Stribeck 角速度 $\omega_s / ((^\circ) \cdot s^{-1})$	0.005
正的常数 ε	2

2 反步滑模控制器设计

反步滑模控制是结合反步控制与滑模控制二者优点的一种控制方法,能够有效提高系统的稳定性、响应速度和稳态跟踪精度。控制策略结构如图 3 所示。

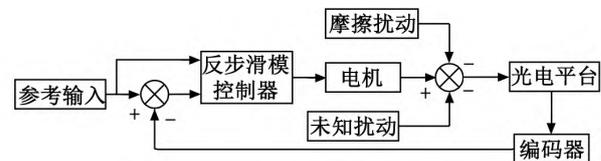


图 3 反步滑模控制策略结构图

Fig. 3 Structure diagram of reverse sliding mode control strategy

令 x_1 表示角位置, x_2 表示角速率, $b = C_m / J$, 控制量 u 为电流给定值 $\delta(t) = (F_f + F_d) / J$ 。

此时单轴系统动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu - \delta(t) \end{cases} \quad (13)$$

反步滑模控制器设计步骤如下。

1) 设系统角度跟踪误差 e_1 为

$$e_1 = x_{1d} - x_1 \quad (14)$$

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (15)$$

其中 x_{1d} 为目标角度输入。

选取 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (16)$$

对 V_1 取时间的微分得

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) = e_1 (\dot{x}_{1d} - x_2) \quad (17)$$

引入虚拟控制变量 x_{2d} , 令 x_{2d} 为

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} + A_1 e_1 \quad (18)$$

令 x_{2d} 代替式 (17) 中的 x_2 可得

$$\dot{V}_1 = e_1 (\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 - A_1 e_1) = -A_1 e_1^2 \quad (19)$$

式中 A_1 为一正数, 得到 $\dot{V}_1 = -A_1 e_1^2 \leq 0$, 此时系统是稳定的。

2) 设角速度跟踪误差 e_2 为

$$e_2 = x_{2d} - x_2 \quad (20)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_{2d} - \dot{x}_2 = \dot{x}_{2d} + \delta(t) - bu \quad (21)$$

式中 x_{2d} 为目标角速度输出。

设计滑模面为

$$s = K_s e_1 + e_2 \quad (22)$$

选取 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s^2 \quad (23)$$

对 V_2 取时间微分得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + s \dot{s} = & -A_1 e_1^2 + e_1 e_2 + s (K_s \dot{e}_1 + \dot{e}_2) = \\ & -A_1 e_1^2 - \frac{1}{K_s} e_2^2 + s \left[\frac{1}{K_s} e_2 + K_s (e_2 - A_1 e_1) + \ddot{x}_{1d} + \right. \\ & \left. A_1 \dot{e}_1 + \delta(t) - bu \right] \end{aligned} \quad (24)$$

通过式 (24) 反步滑模控制律可设计为

$$u = \frac{1}{b} \left[\frac{1}{K_s} e_2 + K_s (e_2 - A_1 e_1) + \ddot{x}_{1d} + A_1 \dot{e}_1 + Qs + \Delta u \cdot \text{sgn}(s) \right] \quad (25)$$

将式 (25) 代入式 (24) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -A_1 e_1^2 - \frac{1}{K_s} e_2^2 + s (\delta(t) - Qs - \Delta u \cdot \text{sgn}(s)) \leq \\ & -A_1 e_1^2 - \frac{1}{K_s} e_2^2 - Qs^2 + \|s\| (\|\delta(t)\| - \Delta u) \end{aligned} \quad (26)$$

其中 Q 为正数, 控制参数 $\Delta u > \|\delta(t)\|$, 可以保证 $\dot{V}_2 < 0$, 此时系统稳定。在实际应用中, 为了减少滑模控制中抖振的存在, 采用饱和函数代替上式中的符号函数, 即

$$\text{sat}(s/\sigma) = \begin{cases} s/\sigma & |s/\sigma| \leq 1 \\ \text{sgn}(s/\sigma) & |s/\sigma| > 1 \end{cases} \quad (27)$$

3 仿真分析

本文仿真分析主要针对光电跟踪转台的响应速度、跟踪精度和抗干扰能力等重要性能指标。采用阶跃跟踪响应验证算法的响应速度; 采用正弦跟踪响应验证算

法的跟踪精度; 通过加入随机干扰, 验证算法的抗干扰能力。将反步滑模控制与 PID 控制和反步控制仿真结果进行对比, 来验证反步滑模控制算法的效果。系统相关参数取值: 转动惯量 $J = 1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 电机转矩系数 $C_m = 0.9 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 反电动势系数 $C_e = 0.002 \text{ Vs}/(\text{°})$ 。3 种控制系统控制器参数取值如表 2 所示。

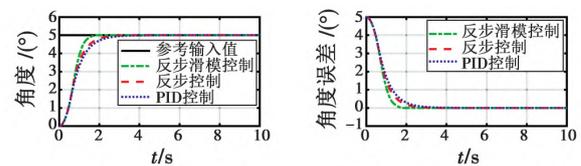
表 2 3 种控制系统控制器参数

Table 2 Parameter value of three control system controller

反步滑模控制		反步控制		PID 控制	
参数	取值	参数	取值	参数	取值
A_1	10	C_1	2	K_{P1}	6
K_s	10	C_2	25	K_{I1}	10
Q	2.5			K_{P2}	11
Δu	7			K_{D2}	10
σ	0.05				

3.1 阶跃跟踪响应分析

选定 5° 的阶跃信号为参考输入信号, 阶跃跟踪响应仿真结果如图 4 所示。



(a) 阶跃跟踪响应曲线

(b) 阶跃跟踪误差曲线

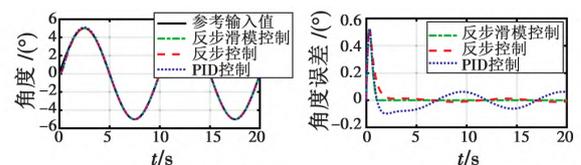
图 4 阶跃跟踪响应对比

Fig. 4 Comparison of step tracking responses

由图 4 (a) 可知, 反步滑模控制阶跃跟踪响应时间为 1.555 s, 反步控制阶跃跟踪响应时间为 1.992 s, PID 控制阶跃跟踪响应时间为 2.228 s。由此可见, 反步滑模控制算法响应速度明显优于 PID 控制算法和反步控制算法。

3.2 正弦跟踪响应分析

选定 $x_{1d} = 5 \sin(2\pi \cdot 0.1t)$ 的正弦信号为参考角度信号输入, 正弦跟踪响应仿真结果如图 5 所示。



(a) 正弦跟踪响应曲线

(b) 正弦跟踪误差曲线

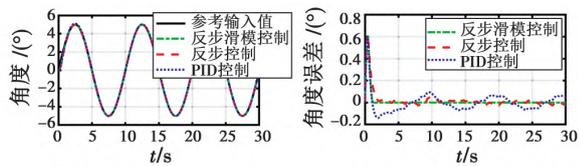
图 5 正弦跟踪响应对比

Fig. 5 Comparison of sinusoidal tracking responses

由图 5 可知, 反步滑模控制算法的正弦跟踪稳态误差为 0.0002° , 反步控制算法的正弦跟踪稳态误差为 0.015° , PID 控制算法的正弦跟踪稳态误差为 0.06° 。由此可见, 反步滑模控制算法的正弦跟踪精度明显优于反步控制算法和 PID 控制算法。

3.3 抗干扰分析

在力矩输入端加入随机正弦干扰 随机干扰 $F_{d1} = \sin(2\pi \cdot 0.5t) + (2\pi t) + (2\pi \cdot 2t)$ 。同时在 9 s 时, 力矩输入端加入持续时间 1 s 的 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 脉冲干扰 F_{d2} , 仿真结果如图 6 所示。



(a) 存在干扰时跟踪响应曲线 (b) 存在干扰时跟踪误差曲线

图 6 存在干扰时跟踪响应对比

Fig. 6 Comparison of tracking responses under interference

由图 6 可以知道,反步滑模控制算法稳态误差为 0.0007° ,脉冲的干扰下的误差波动为 0.002° ,稳定时间为 0.5 s;反步控制算法稳态误差为 0.02° ,脉冲干扰下的误差波动为 0.03° ,稳定时间 1.8 s;PID 控制算法稳态误差为 0.07° ,脉冲干扰下误差波动 0.03° ,稳定时间 1.2 s。由此可见,反步滑模控制算法的抗干扰能力明显优于反步控制算法和 PID 控制算法。

从以上的仿真分析,验证了反步滑模控制算法在响应时间、跟踪精度和抗干扰能力等方面均具有良好性能,能够满足光电跟踪转台的指标要求。

4 结束语

本文针对光电跟踪转台存在耦合、未知扰动、非线性等因素,影响系统跟踪精度的问题,设计了一种反步滑模控制器。以方位轴系伺服控制系统为例,将反步滑模控制与反步控制和 PID 控制进行对比仿真,得出

反步滑模控制算法在响应速度、稳态跟踪精度以及抗干扰能力等方面均具有良好的性能,能够很好地满足对无人机性能的检测需求。

参考文献

- [1] 唐涛,马佳光,陈洪斌,等. 光电跟踪系统中精密控制技术的研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 3-31.
- [2] YAO Z C, ZHANG H. Sliding mode control of photoelectric tracking platform based on the inverse system method[C]// International Conference on Electronic, Information and Computer Engineering. [S. l.]: EDP Sciences, 2016: 01031.
- [3] 任彦,牛志强. 新型终端滑模在光电稳定平台中的应用[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 104-110.
- [4] 马经帅,于洵,刘晓宇,等. 高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 597-607.
- [5] 吴辉,司晨,姜湖海,等. 光电跟踪平台的观测自适应控制器[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1311-1320.
- [6] 周新力,李醒飞. 光电跟踪系统积分反步自抗扰控制策略[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2021, 54(4): 379-387.
- [7] 秦树旺,毛耀,包启亮. 光电跟踪系统的模糊 II 型控制技术[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 147-154.
- [8] 袁雷超,王合龙,张新勇. 基于 DOB 光电稳定平台自适应鲁棒控制[J]. 电光与控制, 2022, 29(4): 21-25, 51.
- [9] 陈晓刚,蔡猛,戴宁. 基于 DOB 观测器的机载光电稳定平台扰动抑制方法[J]. 电光与控制, 2020, 27(1): 98-101.
- [10] 丁千,翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(1): 112-131.



请扫描二维码关注我刊