

光电测量设备线性自抗扰跟踪控制研究

赵巨波¹, 彭程², 蔡立华²

(1.92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了实现光电测量设备的精确跟踪控制, 考虑模型参数不确定性、外界扰动等因素, 从实际靶场应用角度出发, 提出了双闭环 PD 与线性自抗扰 (LADRC) 相结合的跟踪控制方法。首先建立光电跟踪控制系统数学模型, 设计外环 PD 位置控制器与内环 LADRC 速度控制器, 搭建线性扩张状态观测器实现对系统总扰动的实时估计。通过仿真对比实验验证了 PD-LADRC 控制策略的有效性。结果表明: 在正弦引导跟踪下基于 PD-LADRC 算法设备稳态误差 $\leq 0.469'$, 随机误差均方根值 $\leq 18.9''$, 具有准确的跟踪控制精度和良好的抗扰动能力。

关键词: 光电测量设备; 光电跟踪控制系统; 线性自抗扰; 不确定性; 线性扩张状态观测器

DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2024.02.014

文章编号: 1671-1041(2024)02-0042-04

中图分类号: TP242

Research on Linear Autodisturbance Rejection Tracking Control of Optoelectronic Measurement Equipment

Zhao Jubo¹, Peng Cheng², Cai Lihua²

(1.Unit 92941, Huludao, Liaoning, China, 125000; 2.Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin, China, 130000)

Abstract: To achieve precise tracking control for photoelectric measurement equipment, considering factors such as model parameter uncertainty and external disturbances, a tracking control method combining dual-closed-loop PD (Proportional-Derivative) and Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC) is proposed from the perspective of practical range applications. Firstly, a mathematical model of the photoelectric tracking control system is established, and an outer-loop PD position controller and an inner-loop LADRC speed controller are designed. A linear extended state observer is constructed to realize real-time estimation of the system's total disturbances. The effectiveness of the PD-LADRC control strategy is verified through simulation and comparative experiments. The results show that under sinusoidal guidance tracking, the steady-state error of the equipment based on the PD-LADRC algorithm is $\leq 0.469'$, and the root mean square value of random error is $\leq 18.9''$, demonstrating accurate tracking control precision and good disturbance rejection capability.

Key words: photoelectric measurement equipment; photoelectric tracking control system; linear active disturbance rejection control; uncertainty; linear extended state observer

0 引言

光电测量设备是现代靶场对导弹、火炮、卫星、火箭、宇航器等空间飞行目标进行远距离非接触式测量, 获取目标弹道数据、实况景象、飞行姿态及辐射特性的大型光学仪器^[1-2]。随着靶场测控体系建设发展和复杂任务需求, 对光电测量设备的目标跟踪能力提出了更高要求。光电跟踪控制系统 (Photoelectric tracking control system, PTCS) 负责目标识别探测、瞄准和跟踪, 是确保设备高精度跟踪的关键。

为了提高 PTCS 跟踪性能, 学者们取得了许多成果。一类是以 PID 控制为代表的传统跟踪方法, PID 算法在理论与应用上均已非常成熟, 但无法有效抑制随机扰动^[3]。另一类是现代先进控制方法, 如自适应控制、变结构控制等^[4-5]。张琰等^[6]提出非线性积分滑模控制方法, 引入滑模观测器, 增强了系统跟踪性能和抗扰能力。有学者结合自抗扰控制器与自适应模糊滑模算法作为跟踪控制器, 通过仿真实验验证了该算法能够提高目标跟踪性能及外扰抑制能力。朱启轩等^[7]采

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62303437)

作者简介: 赵巨波 (1970—), 女, 辽宁鞍山人, 博士, 正高级工程师; 研究方向: 测控总体与数据处理。

通讯作者: 彭程 (1987—), 女, 吉林长春人, 博士, 副研究员; 研究方向: 复杂系统建模与控制、伺服控制研究; E-mail: litianjinorc@126.com。

用了基于神经网络的自抗扰控制方法，提高了跟踪精度。有学者对光电跟踪系统在外外部扰动作用下跟踪性能下降问题，采用滑模控制速度环与 PID 跟踪位置环相结合的方法，提升光电跟踪平台稳定性和扰动环境下的适应性。由此可见，上述先进控制方法大部分处于理论与仿真阶段，算法较为复杂，对于实际工程实现有待探索。

因此，考虑到 PTCS 存在模型参数不确定性、高频未建模动态及测量噪声等扰动因素，本文从实际应用角度出发，设计了双闭环跟踪控制器。外环为位置环，采用 PD 控制器获取期望角速度；内环为速度环，采用线性自抗扰控制器保证良好的跟踪性能及快速响应特性。线性自抗扰控制器在自抗扰控制器的思想上，实现扩展状态观测器（ESO）的线性化，线性 ESO（LESO）能够实时估计并补偿系统不确定性及外部扰动，调试的控制参数较少，且均具有明确物理意义，有益于实际工程实现。最后，通过两类仿真实验及设备子引导实验证明了本文跟踪算法的有效性，并且在工程任务中得到实际应用。

1 PTCS 数学模型

PTCS 是一个具有方位轴和俯仰轴运动的二维伺服转台，通过驱动方位和俯仰力矩电机实现对目标的跟踪测量。由于方位和俯仰轴相互独立，两个轴系间具有足够的正交度，因此，本文将方位轴和俯仰轴视为两套独立的控制回路，采用相同的直流力矩电机和控制策略，以方位轴为研究对象进行详细阐述。

以直流力矩电机两端电压为输入，角速度为输出，忽略扰动力矩影响，得到电机传递函数模型如式（1）所示：

$$\begin{cases} u = L \frac{di}{dt} + Ri + E_a \\ T_e = C_T i \\ J \frac{dn}{dt} = T_e \end{cases} \quad (1)$$

式中： u 为电枢电压，电枢反电势 $E_a = C_e n$ ， C_e 为反电势系数， T_e 为电枢电流产生的电磁转矩， C_T 为电机转矩系数， n 为电机角速度， J 为折合到电机轴上的转动惯量。由此得到光电测量设备速度环被控对象的状态空间模型，如式（2）所示：

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + Dw_p \\ Y = CX \end{cases} \quad (2)$$

式中： $X = [x_1 \ x_2]^T$ ， x_1 表示 PTCS 的角速度， x_2 表示角加速度，控制量 U 为电枢电压， $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -C_e C_T T_e & -RJ \end{bmatrix}$ ， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ C_T C_e \end{bmatrix}$ ， $C = [1 \ 0]$ ， $D = [0 \ 1]^T$ ， Y 表示系统输出， w_p 代表系统未建模动态及外部扰动等。

2 跟踪控制策略

考虑 PTCS 的模型不确定性、系统噪声和外界扰动等对跟踪控制系统的影响，设计线性自抗扰控制器（LADRC）作为速度环跟踪器，LADRC 的控制参数易于工程调节，LESO 对 PTCS 的总不确定性能够实时估计与补偿，外环采用 PD 算法实现对角度的稳定跟踪。本文提出的方法与目前设备上使用的传统双闭环 PID 算法相比，鲁棒性更强。

以方位轴为例，针对式（3）所示的 PTCS 状态空间模型，双闭环 PD-LADRC 跟踪控制框图，如图 1 所示。

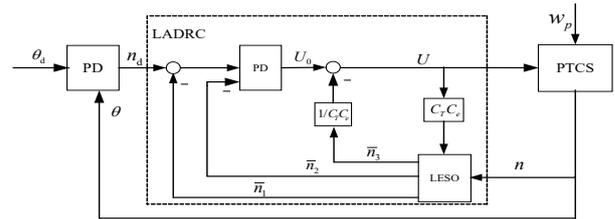


图 1 双闭环 PD-LADRC 跟踪控制框图

Fig.1 Double closed loop PD-LADRC tracking control block diagram

首先，设计外环 PD 角度跟踪控制器，如式（3）所示：

$$n_d = k_{op}(\theta_d - \theta) - k_{od} \frac{d(\theta_d - \theta)}{dt} \quad (3)$$

式中： θ_d 为设备期望方位角度， θ 为设备编码器输出的方位角度值， k_{op} 、 k_{od} 表示外环 PD 控制参数，输出 n_d 为内环期望方位角速度。

内环 LADRC 中，LESO 能够实现对系统不确定性的观测，如式（4）所示：

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \bar{n}_1 - n \\ \dot{\bar{n}}_1 = \bar{n}_2 - \beta_{01}\varepsilon_1 \\ \dot{\bar{n}}_2 = \bar{n}_3 - \beta_{02}\varepsilon_1 + C_T C_e U \\ \dot{\bar{n}}_3 = -\beta_{03}\varepsilon_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： \bar{n}_1 为设备方位角速度的估计值， \bar{n}_2 为方位角速度微分估计值，即方位角加速度的估计值， \bar{n}_3 为系统总不确定性 $w = w_p - CCTx_1 - RJx_2$ 的估计值。由此式（5）的特征方程可表示为 $s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}$ ，其中，设定 $L = [\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}]^T$ 表示 LESO 控制增益。进而配置控制增益为 $L = [3\omega_0, 3\omega_0^2, \omega_0^3]^T$ ， ω_0 表示观测器带宽，从而使得 LESO 特征方程改写成 $(s + \omega_0)^3$ ，确保系统更稳定，并且参数只需调整 ω_0 ，易于工程应用。

线性化 NLSEF 描述如式（5）所示，由此获取方位轴跟踪控制量 U ：

$$\begin{cases} U_0 = k_{ip}(n_d - \bar{n}_1) - k_{id}\bar{n}_2 \\ U = U_0 - \bar{n}_3 / C_T C_e \end{cases} \quad (5)$$

式中： k_{ip} 、 k_{id} 代表控制律参数， n_d 为设备的期望方位角速度，由式（3）计算得到。依据经验，线性 NLSEF 参数设计原

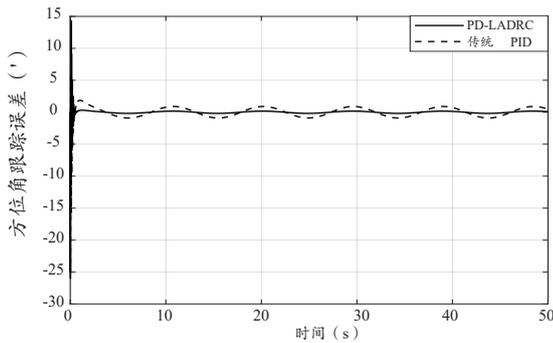
则如下^[11]: $k_{ip} = \omega_{ic}^2, k_{id} = 2\xi_i \omega_{ic}$, ξ_i 、 ω_{ic} 分别代表闭环阻尼比和自然振荡频率。

3 仿真实验与分析

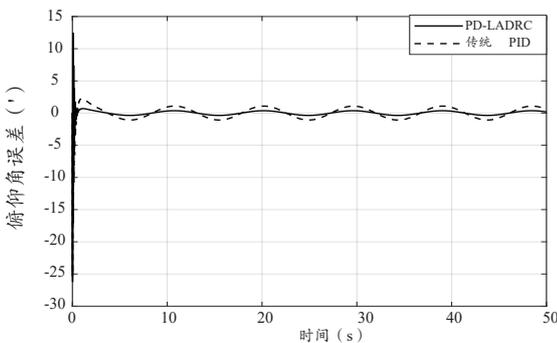
为了验证双闭环 PD-LADRC 在 PTCS 跟踪控制的有效性, 本文进行了与传统双闭环 PID 算法的仿真对比实验。

3.1 正弦引导跟踪仿真实验

以正弦曲线模拟目标运动轨迹, 对于运动角速度 $30^\circ/s$ 、运动加速度 $20^\circ/s^2$ 的目标, 运动仿真曲线等效于正弦 $y=45^\circ \sin(2t/3)$ 。假设设备方位角和俯仰角的初始位置均为 0° , 基于本文提出的双闭环 PD-LADRC 控制策略与基于传统双闭环 PID 控制的方位角与俯仰角跟踪误差曲线如图 2 所示。本文提出的双闭环 PD-LADRC 的控制策略与传统 PID 算法相比, 方位角稳态误差减少 66%, 方位角随机误差均方根值减少 43%, 俯仰角稳态误差减少 55%, 俯仰角随机误差均方根值减少 33%, 本文提出的控制策略具有更好的跟踪控制性能。



(a) 方位角跟踪误差对比曲线
(a)Azimuth tracking error curve comparison



(b) 俯仰角跟踪误差对比曲线
(b) Pitch tracking error curve comparison

图 2 设备跟踪角误差曲线对比图

Fig.2 Tracking angle error curve comparison

3.2 时变扰动仿真实验

为了验证本文提出算法的鲁棒性, 在方位轴和俯仰轴上分别加入外界时变扰动 $w = 0.1\sin(0.5t)$, 进行了与传统 PID 算法的仿真对比实验。设备初始状态设为 0° , 期望方位角与俯仰角均为 10° 。图 3 描述了本文提出的算法与传统 PID 算

法的角度运动曲线对比图, 图 4 为 LESO 对时变扰动的实时估计结果。可以看出, 由于在时变外扰下, 本文提出的算法具有更小的超调量和更快的调节时间, 方位轴与俯仰轴的调节时间均在 0.6s 内, 且无稳态误差。因此, 本文提出的控制策略在时变扰动下具有更优跟踪性能和更强抗扰动能力。

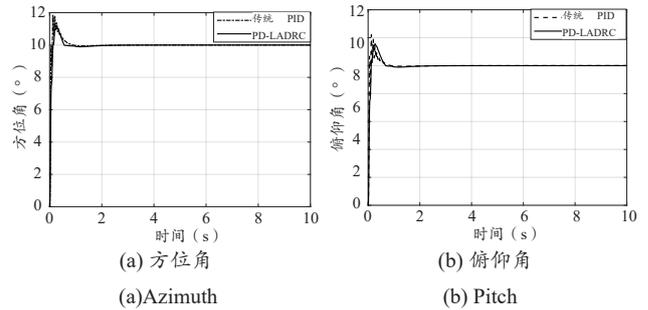
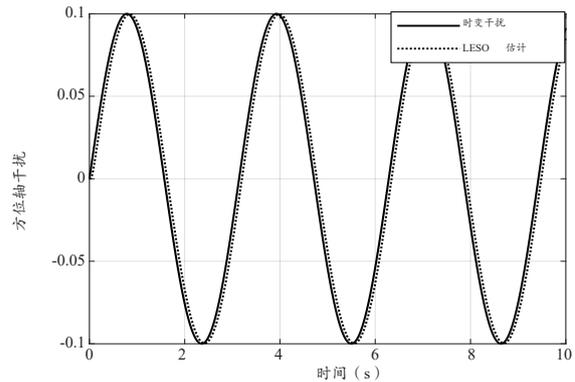
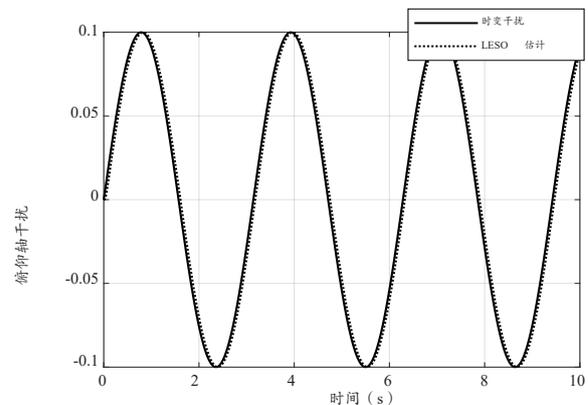


图 3 设备时变扰动下角度跟踪对比实验

Fig.3 Tracking angle curve comparison under time-varying disturbance



(a) 方位轴干扰估计
(a)Disturbance estimation on azimuth axis



(b) 俯仰轴干扰估计
(b)Disturbance estimation on pitch axis

图 4 LESO 对时变扰动的估计结果

Fig.4 Time-varying disturbance estimation of LESO

4 结束语

考虑 PTCS 存在扰动因素对系统控制性能产生影响的问题, 本文建立了 PTCS 系统数学模型, 设计了双闭环 PD-

下转第 47 页

雷击发生时, 优先引导雷电通过雷电防护装置泄放到地面, 保护气象站主体结构及设备不受直击雷影响; 在电源输入端安装两级电涌保护器防护, 确保电源线路免受雷电过电压的冲击^[8]。第一级电涌保护器 (SPD) 通常安装在总电源开关前, 第二级电涌保护器 (SPD) 则安装在敏感设备的电源入口处。针对气象站数据采集和传输系统中的各种信号线, 如 RS232、RS485、LAN 网络线等, 安装相应的信号线路 SPD, 防止雷击电磁脉冲 (LEMP) 通过信号线进入设备内部。所有雷电防护装置 (接闪杆、SPD 等) 的接地端子必须可靠地连接至接地网, 确保雷电流能迅速、有效地导入大地。接地系统应当符合相关标准, 保证接地电阻阻值符合设计要求, 以利于雷电流的快速泄放。对于气象站内部的设备和线缆, 应使用金属管、屏蔽线缆等进行电磁屏蔽, 并实施等电位连接, 减少闪电感应及地电位反击的影响。

3.4 电子设备的内部防护

使用高品质的交流电源电涌保护器 (SPD) 安装在电源入口处, 它可以吸收并抑制电网瞬间产生的过电压, 防止过电压窜入设备内部, 损坏电源模块和依赖电源的电子元件^[9]。为数据采集和传输线路安装信号线路 SPD, 如数据线、通讯线等, 以防止雷击电磁脉冲 (LEMP) 通过信号线路侵入设备内部, 损害敏感的微电子元件。在电路设计阶段就考虑到防雷要求, 采用合理的抗干扰设计, 如加入滤波电路, 减少电磁干扰对设备的影响。采用隔离放大器、光电隔离等技术, 隔绝不同电位之间的干扰。用金属屏蔽罩包裹电子设备内部的关键电路板和元器件, 有效防止外部电磁场的干扰, 同时也防止设备内部产生的电磁能量对外界造成影响^[10]。对于关键的、不可替代的电子设备或系统, 采用冗余备份设计, 一旦某个设备因雷击受损, 备用设备能够立即投入运行, 保证系统不间断工作。

4 结束语

综上所述, 通过深入探析可以明确, 只有全面了解雷电对自动气象站的危害机制, 才能有针对性地采取科学、高效的防护措施, 最大限度地降低雷电对自动气象站的影响, 确保自动气象站长期、稳定、准确地提供气象数据, 服务于气象预警、科研和国民经济建设等诸多领域。未来的发展中, 雷电防护技术应继续结合新的科技成果, 不断完善和发展, 以适应更加复杂多变的雷电环境挑战。

参考文献:

- [1] 王媛, 田人妃, 邓如露, 等. 自动气象站遭受雷击的原因分析及防雷保护措施[J]. 农家参谋, 2020,(4):190.
- [2] 冉然. 新型自动气象站雷电灾害的原因分析及雷电防护[J]. 南方农机, 2019,50(11):235.
- [3] 胡夏初, 刘迎春, 宋爱武, 等. 自动气象站雷击灾害风险分析及应对措施[J]. 通讯世界, 2015,(16):23-24.
- [4] 李志江, 孙丽. 自动气象站雷击损坏原因分析及防护措施[J]. 建筑电气, 2013,32(10):59-61.
- [5] 刘勤勤. 自动气象站防雷工作中的常见问题及应对[J]. 北京农业, 2015,(6):121-122.
- [6] 吴明江, 牛萍. 自动气象站雷电防护分析与探讨[J]. 气象水文海洋仪器, 2010,27(2):99-102.
- [7] 周圣军, 陈成国, 刘长海, 等. 自动气象站观测场防雷常见问题与防护措施[J]. 山东气象, 2010,30(1):54-57.
- [8] 竺赢, 朱文博. 新型自动气象站遭受雷击的原因分析及防雷保护措施[J]. 农家参谋, 2020,(7):85.
- [9] 李建国. 自动气象站遭受雷击的原因分析及防雷保护措施[J]. 农家参谋, 2019,(22):165.
- [10] 包勿日塔. 自动气象站遭受雷击的原因分析及防雷保护措施[J]. 农村实用技术, 2019,(5):123.

上接第 44 页

LADRC 跟踪控制器, 其中 LESO 能够实现对系统扰动的实时补偿, 算法调试的控制参数较少, 有益于工程实际应用。最后, 通过两类仿真实验验证了本文提出的跟踪策略的可行性与鲁棒性, 为实际靶场任务应用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Zhang HW, Li PF. Measurement-driven gauss-hermite particle filter with soft spatiotemporal constraints for multi-optical theodolites target tracking[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023,36(8):313-330.
- [2] 余毅, 刘震宇, 孙志远, 等. 靶场光电测量设备发展现状及展望[J]. 光学学报, 2023,43(6):16-32.

- [3] 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.
- [4] Zhou XL, Li XF. Trajectory tracking control for electro-optical tracking system using ESO based fractional-order sliding mode control[J]. ISA Transactions, 2021,117:85-95.
- [5] Ravindra S, Shahida K, Himanshu C, et al. Neural-fuzzy controller configuration design for an electro-optical line of sight stabilization system[J]. Computers and Electrical Engineering, 2020,88:106837.
- [6] 张琰, 张鹏, 张新勇. 机载光电平台的非线性积分滑模控制器设计[J]. 电光与控制, 2022,29(1):99-104.
- [7] 朱启轩, 张红刚, 高军科. 光电稳定平台神经网络自抗扰控制方法[J]. 电光与控制, 2018,25(3):10-14.