

基于 PLC 的电缆敷设滑模变结构控制系统设计

程 颢, 过 杰, 庄 裕

(无锡广盈集团有限公司配电工程分公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:在电力系统的电缆敷设过程中, 电缆敷设机的工作速度、摆放位置等参数控制的精准度可以直接影响电缆敷设的效率和安全性。然而, 电缆敷设机的速度控制精度容易受到伺服电机调速系统的非线性、参数不确定性以及负载突变性影响。滑模变结构控制方法因其易实现、不依赖系统模型、对内部参数不匹配和外部负载变化具有不变性的优点, 在实际自动化控制应用领域中被广泛应用。该文提出将滑模变结构方法应用在电力电缆敷设自动控制系统中, 该方法首先分析影响电缆敷设机输送带工作速度的因素与动态特性, 确定相关控制参数。然后, 根据电缆控制参数作为控制变量, 进行基于滑模变结构控制的速度控制器设计, 最后, 实现了基于 PLC 的滑模变结构控制系统, 并且利用 Qt 平台设计了电力电缆敷设自动控制系统监控平台。实验利用数据测试了电缆敷设系统的工作性能, 结果表明, 跟经典的 PID 控制比较, 基于 PLC 的滑模变结构控制电缆敷设系统有速度响应快、系统超调量小、系统跟踪精度高、鲁棒性强等优点, 该方法在电缆输送带自动控制中表现出显著的控制性能, 并且具有实际的应用价值。

关键词: PLC; 电缆敷设机; 输送带; 滑模变结构控制; 自动控制

中图分类号: TP273

文章编号: 1000-0682(2025)04-0056-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.04.010

Design of sliding mode variable structure control system for cable laying based on PLC

CHENG Hao, GUO Jie, ZHUANG Yu

(Wuxi Guangying Group Co., Ltd. Power Distribution Engineering Branch, Jiangsu Wuxi 214000, China)

Abstract: In the cable-laying process of the power system, the control accuracy of the cable-laying machine's working speed, placement position, and other parameters can directly affect the efficiency and safety of cable laying. However, the speed control accuracy of the cable-laying machine is susceptible to the non-linearity, parameter uncertainty, and load variability of the servomotor speed control system. The sliding mode variable structure control method is widely used in servomotor speed control systems due to its advantages of being easy to implement, independent of the system model, and invariant to internal parameter mismatches and external load variations. This paper proposes to apply the sliding film variable structure method to the automatic control system of power cable laying. Firstly, the technique analyses the factors and dynamic characteristics that affect the working speed of the conveyor belt of the cable-laying machine to determine the relevant control parameters. Then, a speed controller is designed based on the sliding film variable structure control with cable operating parameters as control variables. Finally, design the control system of sliding film variable structure based on PLC, and the Qt platform was utilized to design a monitoring platform for power cable laying automatic control system. The experiments used data to measure the working performance of the cable laying system. The results show that the PLC-based sliding film variable structure control of cable laying has the advantages of fast response speed, small overshooting, small tracking error, and strong anti-interference ability compared with the traditional PID control. The method shows a significant control performance in the automatic control of cable conveyor belts and has practical applications.

Keywords: PLC; cable-laying machine; conveyor belts; slip film variable structure control; automatic control

收稿日期: 2024-10-16

第一作者: 程颢(1990—), 男, 江苏无锡人, 学士, 工程师, 主要从事配电网线路检修运维领域方面研究工作。E-mail: 670214992@qq.com

0 引言

电缆敷设机是一种专用于敷设电缆的机械装置,它是由牵引装置、控制系统、输送装置等部分组成,在电缆敷设过程中具备高效、准确、安全等特性^[1-2]。由于电缆敷设机工作的环境通常比较复杂,所以,外部干扰因素影响以及设备控制系统的长时间使用都会导致敷设机出现控制误差,不仅会造成敷设机输送机构故障,严重的还会给电力公司带来巨大经济损失。为此,针对电缆敷设机设计一种基于 PLC 的用于输送结构控制的自动控制方法,成为当前电力公司亟待解决的问题。

电缆敷设机是电缆敷设中的重要设备,电缆敷设的关键技术是自动控制技术,电力电缆敷设过程中,由于负载扰动比较大,且设备在使用中系统特性容易发生改变,所以难以通过有效手段建立精确的系统控制模型,当前普遍应用的控制方法主要有两类:一类是以工程应用中比较广的 PID 传统控制方法为代表, PID 控制算法在工程应用中已经很成熟,但在被控对象的参数极其容易变化的控制系统中,控制效果就会变得非常的不理想,同时很难解决系统受到随机干扰的问题^[1-5]。一类是比较先进的智能控制技术,如预测控制、模糊控制、自适应优化控制等^[6-8]。文献[7]中采用模糊控制算法,模糊控制对系统实现要求比较高,需要建立模糊控制器模糊规则,并且需要专家归纳总结模糊规则才能有效实现,这些控制方法与传统的控制方法相比,既能适应非线性系统特性,又有比较优秀的鲁棒性和抗干扰能力,系统运行更稳定,但是这些控制方式在工程应用中实现比较困难。

滑模控制是一种不连续的非线性控制技术,与其他非线性控制技术相比,它能持续改变系统当前的状态,并迫使系统状态变量按照预设的滑模轨迹向滑模面趋近,并引导系统状态变量遵循预设的滑模轨迹逼近滑模面。这一特性使得基于该控制技术的控制器在鲁棒性能力上超越了传统的连续控制方式^[10]。与经典的 PID 控制技术相比,滑模变结构控制技术原理简单,工程应用中容易实现,并且它在抗干扰方面表现出优良的特性。

鉴于此,该研究提出了一种基于 PLC 的滑模变结构控制的电力电缆自动敷设系统。此系统旨在提升电缆铺设品质,解决电缆受力不均和精准控制问题,同时推动电力电缆施工的自动化水平提升。

1 电缆敷设机组成

1.1 系统组成

电力电缆敷设自动控制系统的机械结构传动装置组成如图 1 所示。该系统的主要机械传动装置包括牵引机、电动滚筒、滑轮、电缆龙门支撑框架以及电动电缆卷盘。电缆自动控制系统的动力来源由伺服电机保障。工作原理是通过控制伺服电机运行,通过减速器带动橡胶轮转动,电缆盘两侧的轮缘被橡胶轮摩擦使得电缆盘转动,控制伺服电机的正反转实现电缆收放功能。

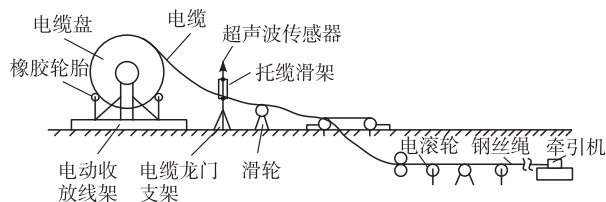


图 1 电力电缆敷设机械装置组成

1.2 电缆敷设机输送带输送控制参数获取

电缆敷设机输送带包括输送带、驱动装置等设备。电缆敷设机输送带控制,就是通过上述不同组件电缆敷设时带工作安全加速度、加速驱动力的精准控制,达到对不同带的有效控制,从而确保电缆敷设机按照既定要求实现电缆的敷设任务。根据上述影响因素分析结果,该研究充分考虑输送带托辊弧长影响因素,获取输送机的相关工作参数。工作参数包括弹性位移值、最大加速驱动力、最大安全加速度。输送机的相关工作参数具体分别为:

(1) 输送带输送电缆工作过程中的弹性位移值 $O_{\Delta L}$ 为:

$$O_{\Delta L} = \omega_{\Delta L} + o_{\Delta L} \quad (1)$$

式中: $\omega_{\Delta L}$ 为输送带的静张力作用下变形值; $o_{\Delta L}$ 为动张力变形值。

(2) 敷设机在电缆输送过程中,分析加速运行状态驱动受力情况,将张力划分成承载张力 $F_{1A, \max}$ 以及回程张力 $F_{2A, \max}$ 两个部分。

$$\begin{cases} F_{1A, \max} = F_{A, \max} \\ F_{2A, \max} = \frac{1}{2} m \Delta L \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为电缆敷设机自身质量; $F_{A, \max}$ 为最大可承载张力。

该研究根据上述计算结果的差值获取电缆敷设机的最大加速驱动力 $F_{qd} = F_{1A, \max} - F_{2A, \max}$, 通过上述计算结果的和可获取运动阻力 $F_{f, \max}$ 以及加速力 $F_{a, \max}$ 。方程表达式如下式所示:

$$F_{qd} = F_{1A, \max} - F_{2A, \max} = F_{f, \max} + F_{a, \max} \rightarrow k_N B - \frac{1}{2} m \Delta L$$

$$= f(\Delta L + a_{\max, \text{ten}} L) \times (m_{\text{roll}} + 2m_{\text{belt}} + m_{\text{bulk}}) \quad (3)$$

式中： f 为电缆输送过程中遇到的阻力值； $a_{\max, \text{ten}}$ 为输送带的最大安全加速度； m_{roll} 、 m_{belt} 和 m_{bulk} 分别为输送带、驱动轮和传输电缆质量； B 为输送带宽度； k_N 为敷设机额定张力。

(3) 引入维包系数，则输送带打滑状态下的最大安全加速度 $a_{\max, \text{slip}}$ 为：

$$a_{\max, \text{slip}} = \frac{(\varepsilon^{\eta\beta} - 1) m \Delta L}{L(m_{\text{roll}} + 2m_{\text{belt}} + m_{\text{bulk}})} - f \quad (4)$$

式中： β 为围包角标； ε 为维包系数； η 为输送带与驱动轮的摩擦系数。

输送机在传送电缆的运行过程中，因为电缆质量的增加，会导致电机的输出转矩变大。电机输出转矩的增大可能导致电机过热，从而进一步影响输送带的运输效果。为了应对这一问题，同时为了确保输送机的稳定运行，该研究需要采用伺服系数 i_s 来分析传动带过载承受能力，在电机温度过热状态下，传动带的最大安全加速度 $a_{\max, \text{best}}$ 为：

$$a_{\max, \text{best}} = \frac{i_s T_{\text{nom}} - R_d f \Delta L (m_{\text{roll}} + 2m_{\text{belt}} + m_{\text{bulk}})}{R_d [L(m_{\text{roll}} + 2m_{\text{belt}} + m_{\text{bulk}}) + m_r + m_{ge}]} \quad (5)$$

式中： T_{nom} 为输送带额定转矩； R_d 为输送带的驱

动轮半径； m_r 和 m_{ge} 为电机以及减速器的惯性质量。

由此，确定高压电缆敷设机输送带的控制变量，进而设计自动控制器实现控制。

2 电缆敷设机输送带滑模变结构控制方法

2.1 电缆敷设机滑模变结构设计原理

该文为了实现输送带的精准控制，设计了基于电缆敷设机的滑模变结构控制器系统进行高效调控。这一系统通过引入滑模变结构的基本理论，能够灵活应对复杂多变的控制环境，确保输送带运行的精确性和稳定性。电缆敷设滑模变结构控制系统框图如图 2 所示。

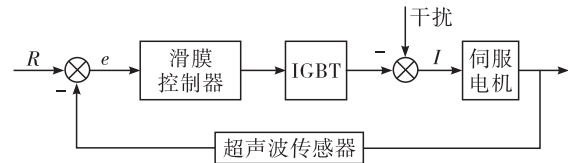


图 2 电缆敷设滑模控制系统框图

滑模控制器的设计通常为两部分，一部分是滑模面的选取，一部分是控制律的设计，控制律的设计就是为了保证系统状态变量能够在一定时间达到平衡点^[10]。

常规状况下，所设计的控制律不光要求能以更快的速度收敛，还需要较强的抗干扰能力，而控制律的设计与滑模趋近律有关。系统框图如图 3 所示。

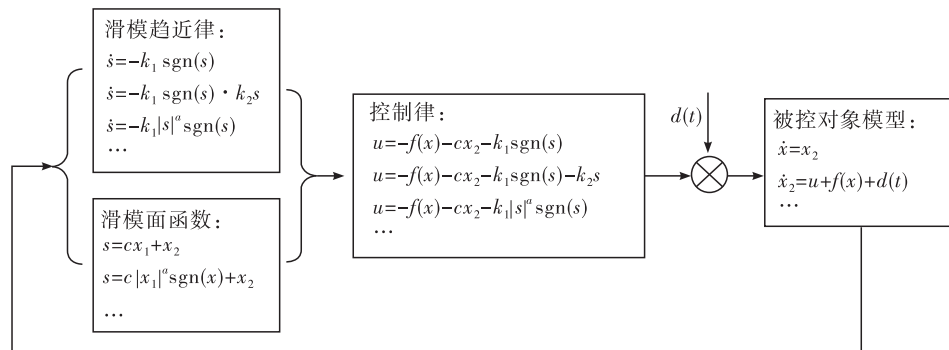


图 3 滑模控制系统框图

2.2 电缆敷设机滑模变结构控制器设计

将速度环设计为滑模变结构控制，对直流电机电流环的数学模型进行公式推导化简，过程如下：

二阶工程最佳系统是指在平衡稳定性和快速性的考虑下，系统的阻尼比取值为 0.707。设计目标限制超调量并使调节时间较短。根据性能与参数之间的关系，无法同时实现完美的稳定性和快速响应。通过选择适当的阻尼比范围，在实际工程中取 $\zeta = 0.707$ 作为设计依据，以达到一种平衡状态。

按照二阶工程最佳系统进行电流环设计，取 $\tau_i = T_a$ ， $T_a = L/R$ ， T_a 为电磁时间常数。 T_a 可以被电流环调节器的零点有效抵消，则开环传递函数为 $W_i = \frac{k_i K_f / R}{\tau_i s (T_f s + 1)}$ ，可以使：

$$k_i K_f / (R \tau_i) = \frac{1}{2T_f} \quad (6)$$

将式(6)代入电流环的开环传递函数，可以得出化简后的传递函数为：

$$W_i = \frac{1}{2T_f s(T_f s + 1)} = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_f} s} \quad (7)$$

电流环闭环传函由式(7)推导得出:

$$\Phi_i = \frac{1}{2T_f^2 s^2 + 2T_f s + 1} \quad (8)$$

因为导通时间常数一般比较小,可以将式(8)

化简为 $\Phi_i \approx \frac{1}{2T_f s + 1}$ 。如果将串联的摩擦和传动惯量考虑进去,可以求出速度环开环状态空间表达式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_2 &= \frac{K_m}{2T_f J} u - \frac{1}{2T_f J} \mathbf{x}_2 - \frac{T_1}{2T_f J} \text{sgn}(x_1 - d(t)) - \\ &\quad \frac{T_1}{J} (\mathbf{x}_2 - \dot{d}(t)) \delta(x_1 - d(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: u 为速度环控制器输出; $\delta(\cdot)$ 为冲激函数; x_1 为角速度; x_2 为角加速度。

将式(9)设计为速度滑模控制器。

希望输出与系统输出的差值是 $e = x_d - x_1$, 对速度环的误差经过求导得出 $\dot{e} = \dot{x}_d - x_2$, 其中, e 为角速度误差, x_d 为希望系统输出。 \dot{e} 为角加速度误差。为了使系统在快速性方面表现出优秀的性能,系统采用了积分滑模面 $s_1 = \int e dt + e$, 其中, c 为滑模面系数。

对滑模面进行求导,则:

$$\dot{s}_1 = ce + \dot{e} = c(\dot{x}_d + x_1) + (\dot{x}_d - x_2) \quad (10)$$

为了防止系统容易抖动,将指数趋近律法应用在设计中, $\dot{s}_1 = -ks - \varepsilon \text{sgn}(s)$, 将公式联合,推导出控制器的输出为:

$$\begin{aligned} u &= \frac{2T_f J}{K_m} (\ddot{x}_d + \varepsilon \text{sgn}(s_1) + ks_1 + c(x_d - x_1)) + \\ &\quad \frac{1}{2T_f J} \mathbf{x}_2 + \frac{T_1}{2T_f J} \text{sgn}(x_1 - d(t)) + \\ &\quad \frac{T_1}{J} (\mathbf{x}_2 - \dot{d}(t)) \delta(x_1 - d(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

根据李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (12)$$

对式(12)进行求导,得:

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (13)$$

代入积分滑模面等式和式(10),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(c(x_d - x_1) + (\dot{x}_d - x_2)) \\ &= s(c(x_d - x_1) + (\dot{x}_d - \varepsilon \text{sgn}(s) - ks - c(x_d - x_1))) \\ &= s(-\varepsilon \text{sgn}(s) - ks) \\ &= -\varepsilon |s| - ks^2 \end{aligned} \quad (14)$$

由此可以得到 $V \geq 0$ 和 $\dot{V} \leq 0$, 符合滑模变结构控指标条件,因此系统是稳定的。

3 基于 PLC 的电力电缆敷设自动控制系统设计

3.1 硬件设计

设计了基于可编程逻辑控制器的滑模变结构电缆敷设自动控制系统,硬件关联设计方案,该系统采用分层架构,由监控层、控制层和执行层3大核心部分构成,旨在实现电缆敷设过程的智能化、自动化与高效化。通过集成先进的人机交互界面(HMI)与PROFINET总线通信技术,使系统有效解决了长距离电缆敷设中的控制信息传输难题,保证了系统能稳定性和可靠性的运行。

3.1.1 系统架构

系统整体架构如图4所示,主要包括监控层、控制层和执行层。

(1) 监控层:该层通过高性能的HMI(人机界面)实现人机交互,用户可直观监控电缆敷设的实时状态,包括速度、位置、张力等关键参数,并可根据需求进行参数设置与远程控制。

(2) 控制层:作为系统的核心,控制层采用技术成熟的PLC作为主控单元,负责接收来自监控层的指令,执行逻辑和自动控制算法,并协调各执行设备的协同工作。PLC通过其强大的数据处理能力和灵活的编程环境,确保了系统的高精度控制与快速响应。

(3) 执行层:由2套电动放线架伺服装置、速度和位置采集装置、80个电滚轮驱动装置以及1个牵引动力装置等关键设备组成,直接参与电缆的输送与定位。这些设备通过精确控制电缆的张力、速度与位置,确保电缆敷设过程的平稳与精确。

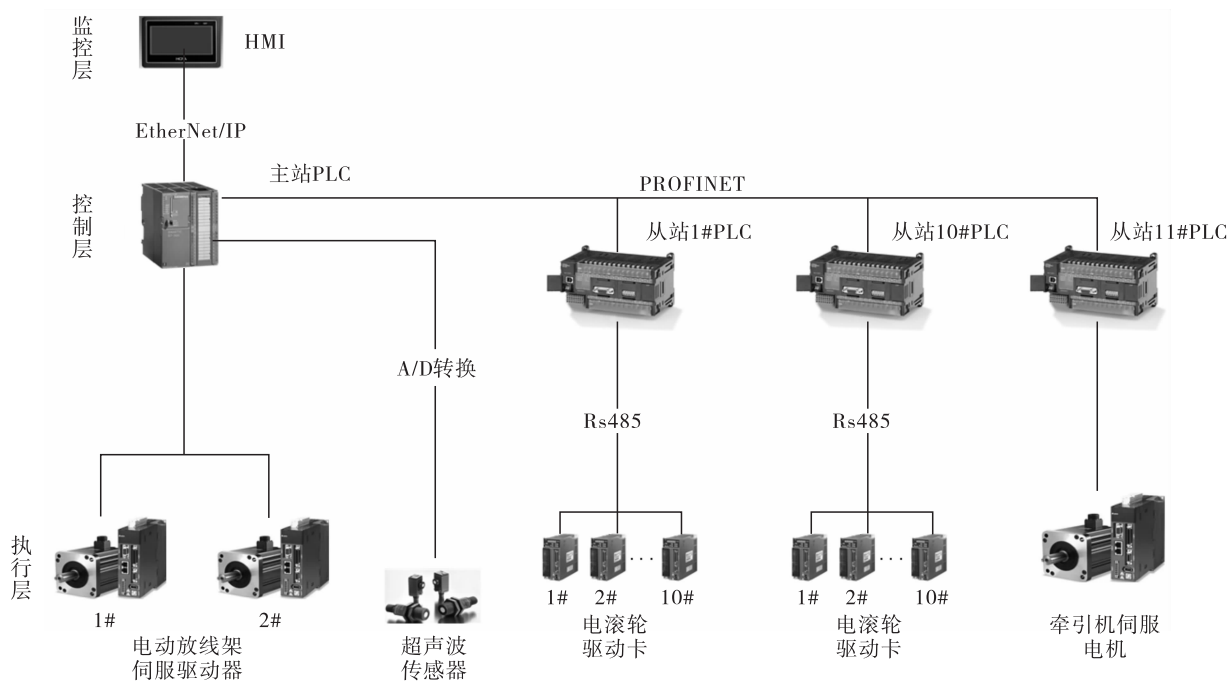


图4 控制系统硬件结构

3.1.2 硬件关联设计

为实现长距离电缆敷设过程中的高效信息传输与控制,系统采用了 PROFINET 总线技术。通过构建工业以太网,将现场设备(如伺服驱动器、电滚轮驱动卡等)与 PLC 紧密相连,实现数据的实时采集与指令的即时下发。

该文提出的基于 PLC 的滑模变结构电缆敷设自动控制系统,通过科学的硬件关联设计与先进的通信技术,实现了电缆敷设过程的智能化、自动化与高效化。该系统不仅提高了电缆敷设的精度与效率,还降低了人力成本与安全风险,对于推动相关行业的技术进步与产业升级具有重要意义。

3.2 电力电缆自动控制系统上位机界面

利用 Qt 设计平台设计了电力电缆的自动控制系统监控平台,系统人机界面包括参数设置、手动模式、自动模式和故障报警界面等功能。控制系统人机界面的运行图如图 5 所示。



图5 系统控制人机界面

3.3 电力电缆自动控制系统测试

电力电缆敷设自动控制系统测试主要涵盖自动放电缆测试和收卷测试。在系统中分别用传统的 PID 控制方式和滑模变结构控制方式进行自动收放电缆测试,并且采集反馈数据进行两种控制方法的动态性能分析比较,验证滑模变结构控制方法的控制效果好。

(1) 系统自动放电缆测试

在电缆敷设控制自动控制系统终端中,设置牵引速度为 5 m/min,选择自动模式,启动敷设电缆,利用速度传感器采集的实际速度数据进行曲线分析,传统 PID 控制方法和滑模变结构控制方法的电缆敷设速度曲线如图 6 所示。可以看出,滑模变结构控制器的跟踪速度效果要比传统方式敷设电缆响应快,超调量也小,稳定误差在 2% 以内。

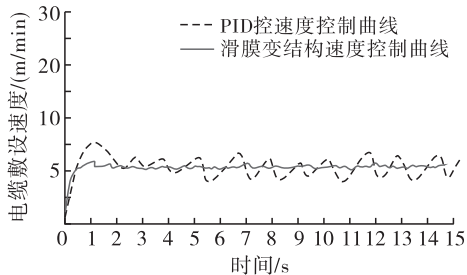


图6 PID控制和滑模变结构控制系统敷设放电缆速度曲线

(2) 系统自动收电缆测试

在电缆敷设控制自动控制系统终端中,设置回收速度为 5 m/min,选择自动模式,启动回收电

缆,传统PID控制方法和滑模变结构控制方法的电缆收卷速度曲线如图7所示。经过数据分析,可以得出滑模变结构控制比传统PID控制响应速度快,超调量小,稳定误差在2%以内,收卷的速度能稳定在5 m/min附近,整个收卷过程运行平稳。

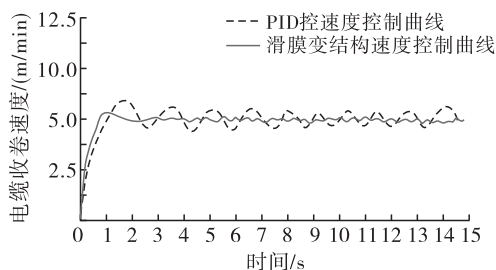


图7 PID控制和滑模变结构控制系统敷设收电缆速度曲线

4 结论

该研究针对电缆敷设机输送带的自动控制问题,提出了一种基于PLC的滑模变结构控制方法,并通过试验验证了其有效性。传统控制方法由于缺乏对输送带速度、位置等参数的精确控制能力,造成电缆在敷设过程中发生偏差,影响作业质量。同时,传统方法缺乏实时调整参数能力,难以适应不同工作条件和电缆类型的需求,导致控制效果不稳定。该研究在分析输送带动态特性及控制参数的基础上设计了滑模变结构控制器,并利用PLC对滑模变结构参数进行实时调节,实现高精度的自动化控制。在量化控制效果方面,通过试验数据进行详细分析。与传统方法相比,控制精度和控制扰动方面,所提方法能够达到设定的期望扰动,误差控制在2%以内,显示了良好的控制稳定性和精确性。

综上所述,该研究提出的基于PLC的滑模变结构的电缆敷设机输送带自动控制方法相较于传统PID方法具有更高的控制精度和稳定性,能够适应不同工作条件和电缆类型的需求,降低控制能耗,减少误差。然而,该研究仍存在一定局限性,例如对于极端工作条件下的控制效果尚未充分验证。未来研究可进一步拓展该方法的适用范围,优化控制算法,

提高电缆敷设机的整体性能。

参考文献:

- [1] 龙坤. 基于模糊PID控制的四旋翼快递无人机控制系统研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2022.
- [2] 曲建华, 宋鹏飞. 基于PID控制算法的控制器调节[J]. 集成电路应用, 2024, 41(05): 16-17.
- [3] HOU Q, DING S, YU X, et al. A super-twisting-like fractional controller for spmsm drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9376-9384.
- [4] 何佩林. 基于二维气浮运动平台的PID控制研究机器改进[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [5] 杨光海, 王宏宇, 周通, 等. 高精度光电伺服稳定平台控制技术[J]. 兵工自动化, 2021, 40(8): 9-11+29.
- [6] 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): 1-11.
- [7] 张越杰, 赵宝奇, 张鹏, 等. 光电稳定平台变论域模糊自抗扰控制器设计[J]. 光电与控制, 2021, 28(3): 76-80.
- [8] 金鸿雁, 赵希梅, 原浩. 永磁直线同步电机动态边界层全局互补滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(09): 1945-1951.
- [9] 郭昕. 滑模变结构控制及其在永磁同步电机调速系统中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [10] 张越杰, 赵宝奇, 张鹏, 等. 光电稳定平台变论域模糊自抗扰控制器设计[J]. 光电与控制, 2021, 28(3): 76-80.
- [11] 史心怡, 朱姝姝, 潘志伟. 基于改进滑模自抗扰结构的永磁同步电机伺服控制[J]. 飞控与探测, 2023, 6(06): 68-74.
- [12] LIU Z H, NIE J, WEI H L, et al. Switched PI control based MRAS for sensorless control of PMSM drives using fuzzy-Logic-controller [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022(3): 368-381.
- [13] BRAHMI B, LARAKI M H, BRAHMI A, et al. Improvement of sliding mode controller by using a new adaptive reaching law: Theory and experiment [J]. ISA Transactions, 2020, 97: 261-268.