

基于PLC和Profinet总线的超万米绳索取心绞车电控系统方案设计

刘晓林^{1,2,3,4}, 姜宇昊^{1,2,3,4}, 吕振平⁵, 高洁云^{1,2,3,4*}, 于晓晨⁵, 刘凡柏^{1,2,3,4}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300300; 2. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 天津 300300; 3. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 天津 300300; 4. 自然资源部地质钻探找矿装备创新中心, 天津 300300; 5. 烟台杰瑞石油装备技术有限公司, 山东 烟台 264003)

摘要:针对13000 m绳索取心绞车在特深井作业中面临的牵引失效、钢丝绳乱绳及断裂等风险,设计了一套基于西门子S7-1500 PLC与Profinet总线的电控系统。系统采用模块化设计,集成交流变频驱动、多源信息采集与能耗制动,具备本地控制、无线遥控和远程司钻房集控三种操控模式。关键控制策略上,双牵引电机采用“转速闭环同步+负载分配”的主从控制实现负载均衡;通过松弛补偿器压力传感器构建张力闭环PID控制,使储绳卷筒线速度自动跟随牵引速度,达成恒张力收放;排绳机构采用编码器计算与角度传感器测量互为冗余的方式,实现精确位置跟随与自动换向。硬件方面设计了集成PLC控制柜与变频柜的VFD房,并配置工业无线遥控与上位机组态界面。该系统可有效提升绞车控制的精准性、操作灵活性与作业安全性,为超万米绳索取心装备研发提供技术支撑。该控制系统方案可为超深孔绳索取心绞车的自动化水平提升与安全作业提供技术基础。

关键词:绳索取心;绞车;PLC;电控系统;缆绳张力控制;VFD;PID;特深井

中图分类号:P634.3;TE923 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0140-09

Scheme design of the electrical control system for ultra-deep (>10000 m) wireline coring winch based on PLC and Profinet fieldbus

LIU Xiaolin^{1,2,3,4}, JIANG Yuhao^{1,2,3,4}, LÜ Zhenping⁵, GAO Jieyun^{1,2,3,4*}, YU Xiaochen⁵, LIU Fanbai^{1,2,3,4}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300300, China; 2. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Tianjin 300300, China; 3. Innovation Center for Deep Exploration and Drilling Equipment Technology, CGS, Tianjin 300300, China; 4. Innovation Center for Geological Drilling and Prospecting Equipment, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300300, China; 5. Yantai Jereh Petroleum Equipment & Technologies Co., Ltd., Yantai Shandong 264003, China)

Abstract: In response to the risks such as traction failure, wire rope disorder and breakage faced by the 13000 m wireline core drilling winch during ultra-deep well operations, an electrical control system based on the Siemens S7-1500 PLC and Profinet fieldbus was designed. The system adopts a modular design, integrating AC variable frequency drive, multi-source information acquisition, and dynamic braking, and it features three operation modes, namely, local control, wireless remote control, and centralized control in the remote driller's cabin. For key control strategies, the dual traction motors implement load balancing through master-slave control with "speed closed-loop

收稿日期:2026-06-30; 修回日期:2026-07-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.015

基金项目:国家科技重大专项课题(编号:2024ZD10000801)

第一作者:刘晓林,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质机械专业,长期从事钻探设备自动化研究工作,天津市东丽区锦鲤道23号, liuxiaolin_cqu@163.com。

通信作者:高洁云,女,汉族,1996年生,工程师,机械工程专业,硕士,从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作,天津市东丽区锦鲤道23号,775726390@qq.com。

引用格式:刘晓林,姜宇昊,吕振平,等.基于PLC和Profinet总线的超万米绳索取心绞车电控系统方案设计[J].钻探工程,2026,53(S1):140-148.

LIU Xiaolin, JIANG Yuhao, LÜ Zhenping, et al. Scheme design of the electrical control system for ultra-deep (>10000 m) wireline coring winch based on PLC and Profinet fieldbus[J]. Drilling Engineering, 2026,53(S1):140-148.

synchronization + load distribution". A tension closed-loop PID control is constructed using pressure sensors of the slack compensator, enabling the line speed of the cable storage drum to automatically follow the traction speed and achieve constant-tension cable winding and unwinding. The cable arrangement mechanism employs encoder calculation and angle sensor measurement as redundant methods to realize precise position tracking and automatic direction reversal. In terms of hardware, a VFD room integrating the PLC control cabinet and frequency conversion cabinet was designed, equipped with industrial wireless remote control and an upper computer configuration interface. This system can effectively improve the control accuracy, operational flexibility, and operational safety of the winch, providing technical support for the research and development of ultra-deep wireline core drilling equipment. The control system scheme can serve as a technical foundation for enhancing the automation level and ensuring safe operations of wireline core drilling winches for the ultra-deep hole.

Key words: wireline coring; winch; PLC; electrical control system; cable tension control; VFD; PID; ultra-deep well

0 引言

绳索取心作为一种成熟高效的取心方法,在国内外均有大量应用,其核心装备是绳索取心绞车,而在特深井复杂条件下绳索取心作业面临牵引绞车失效、钢丝绳变形、乱绳甚至断裂等诸多风险^[1];根据国内外绞车发展现状分析,由牵引绞车和储绳绞车组成的绞车收放系统在高质量排绳、精准控制等方面具有突出优点,以此为基础,研究制定了13000 m绳索取心绞车总体技术方案,主要结构如图1所示,由牵引绞车、导向滑轮、松弛补偿器、排绳器、储绳绞车等组成。提升作业时,外部负重钢绳进入牵引绞车,经滑轮导向后到达松弛补偿器,在排绳器往复移动下将钢绳有序缠绕到储绳绞车的滚筒上。为提高绞车自动化水平和作业安全性,制定了采用VFD变频驱动和PLC控制、配备多参数检测传感器^[2-4]的全电数字化技术的绞车控制系统方案。

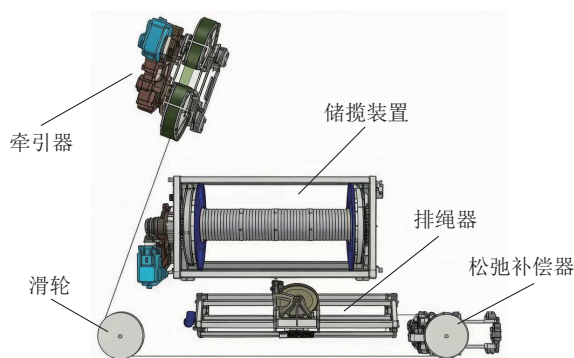


图1 13000 m绳索取心绞车主要结构

本文以实现绞车精准控制为目标,采用二次创新、集成创新手段和模块化设计思想,旨在通过综合运用交流VFD变频驱动、传感器与自动化控制、

PLC及工业总线通信及程序开发等技术,为超万米绳索取心绞车设计配备一套具备本地控制、无线遥控和远程司钻房集控三种控制方式的电控系统,保障取心作业系统的安全高效。

1 系统方案设计

1.1 总体方案

13000 m大深度绳索取心绞车电控系统总体方案设计以精准控制、接口互联互通、人性化交互为目标,综合分析绞车多源信息采集输入、精准控制输出及与司钻房中央集控通信需求,采用模块化设计思想,形成司钻房集控系统、本地上位机系统、无线遥控系统、下位机系统、多源信息采集系统、交流变频系统、能耗制动系统等子系统模块。由于Profinet总线具备实时性高(循环时间可达微秒级)、数据传输速率快(最大100 Mbps)、抗干扰能力强、支持等时同步和热插拔,且与西门子S7-1500 PLC无缝集成,能够有效满足绞车多子系统间高频控制指令与海量传感数据的可靠交换需求,因此在各子系统通信互联中采用Profinet总线,子系统模块具体功能实现如下^[5-8]:

司钻房集控系统和本地上位机系统与下位机系统之间通过Profinet总线双向交互传输数据,实现参数设置输入、操控指令下发与传感数据显示、报警状态输出。

多源信息采集系统将系统所有传感器检测数据信息分别以0~10 V模拟电压、4~20 mA模拟电流、高速脉冲、RS485串口数字等信号输出方式,经下位机A/D采集模块、数字输入模块等传输至下位机系统PLC寄存器,实现绞车传感数据与状态多源信息的采集输入,为绞车的精准控制提供条件

输入。

无线遥控系统通过无线接收器将无线遥控的操控开关和操作杆指令数据以 Profinet 总线数字输出方式接入下位机系统。

交流变频系统与下位机系统之间、能耗制动系统与下位机系统之间通过 Modbus 总线进行双向通

信,实现双向数据传输与闭环控制。

运用工业通信接口和总线技术,将各子系统或模块互联、耦合,形成集本地、无线遥控和远程司钻房集控于一体的绞车电控系统,各子系统接口通信互联与耦合集成如图2所示^[9]。

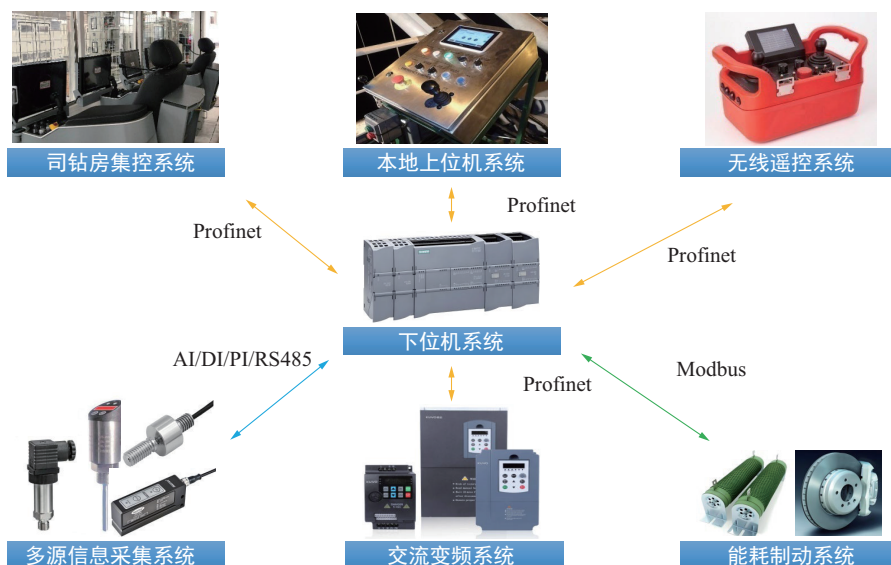


图2 各子系统通信互联与耦合集成示意

1.2 系统组成及架构

系统结构示意图如图3所示^[10]。

系统由外部 AC 380 V 供电;电控系统的核心是 VFD 控制房,其内集成了 VFD 变频柜、PLC 控制柜等。

绞车采用本地控制箱、钻机司钻房上位机集控

和无线遥控盒三种控制方式。

绞车各类传感器经本地控制箱接入系统,经 VFD 控制房(包括变频器、接触器、继电器等)输出至各机构电机(牵引、排绳、储绳、液压、润滑及散热等辅助机构)和电磁阀。

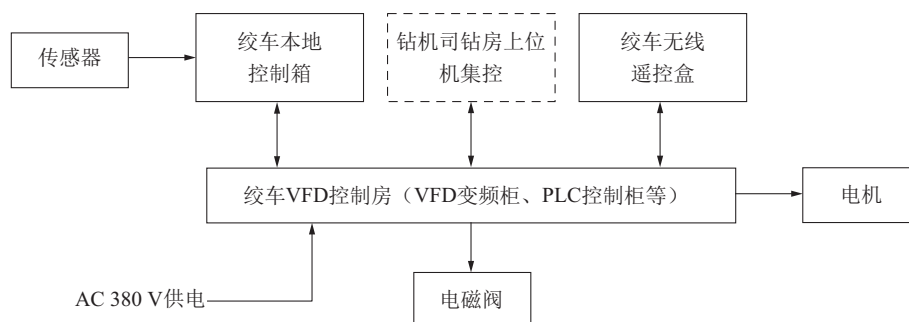


图3 绞车电控系统结构示意图

1.3 网络拓扑

当绞车在钻井井场作业时,为实现多设备配合、统一和安全、高效作业,常常需要对井场多设备进行中央集控,即在司钻房中央集控室控制台画面上,运用工业组态开发技术,集成绞车控制页面。

司钻房集控系统,作为绞车本地上位机系统的扩展,通过总线通信技术与绞车下位机系统进行数据通信,实现对绞车所有传感数据、运行状态参数和报警信息的实时读取,以及对绞车的全部动作操控与参数设置。

为实现绞车与钻机司钻房主控系统的一体化中央集成控制,绞车系统与钻机主控系统之间采用基于工业以太网技术的Profinet总线通信方式,其网络拓扑见图4,并使用UDP协议以提供低延迟的

实时(RT)通信,适用于传感器、执行器和控制系统之间的高频数据交换,支持高速数据传输和低延迟,并基于标准以太网,可支持多种拓扑结构和网络设备,具有很高的兼容性和集成性。

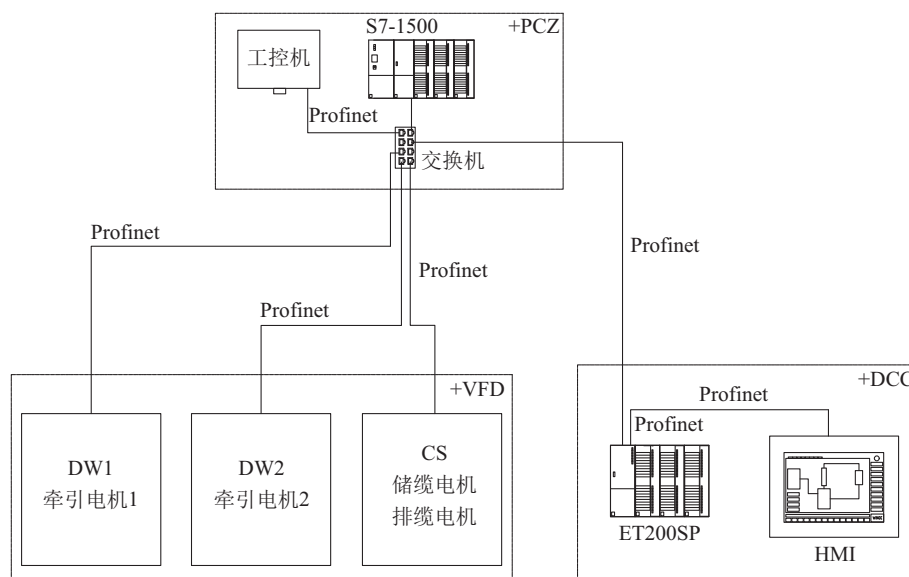


图4 绞车电控系统网络拓扑

2 主要部件控制原理及策略

2.1 双牵引电机主从同步控制策略

如图5所示,根据牵引机构结构设计,牵引机构由结构相同、前后排列的两个摩擦绞盘(轮)组成。

牵引机构采用双牵引摩擦轮同步同向驱动方式,即由两个独立的变频器单元独立控制驱动两台牵引摩擦轮变频电机,经减速机驱动摩擦轮。

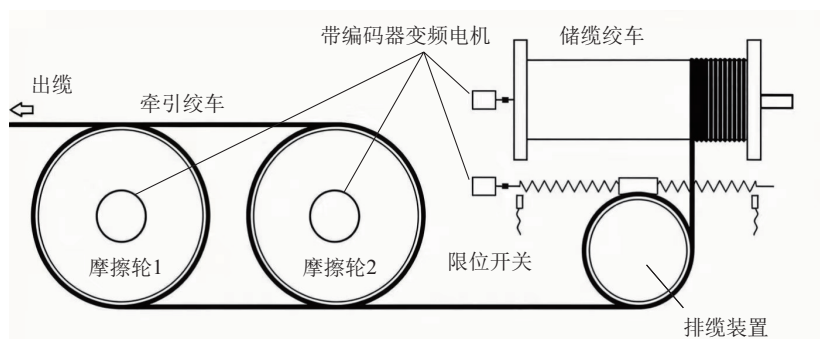


图5 绞车双摩擦轮牵引机构示意

在本牵引机构中,主摩擦轮与从摩擦轮之间是非刚性连接,通过设置主、从摩擦轮电机变频器的工作模式,实现双电机的闭环同步控制,因双摩擦轮共同驱动的牵引机构仅靠转速或位置同步可能导致负载分配不均,需引入负载分配策略,结合转矩反馈实现负载均衡控制,为实现带反馈、高精度且具有负载分配的闭环同步控制,需配置增量式编

码器,采用“转速闭环同步+负载分配控制”的控制方式。

主、从摩擦轮的闭环同步控制策略与逻辑如下:主站以转速指令为控制目标(如50 Hz),通过编码器反馈实现自身转速闭环控制;从站以主站的实际转速(而非指令转速)为跟随目标,同时通过自身编码器反馈计算转速偏差,动态调整输出频率,确

保从站实际转速与主站一致;若需转矩均衡,可额外引入转矩反馈,使从站转矩跟随主站转矩变化。

2.2 排缆张力控制及储缆机构控制策略

要实现恒张力控制,首先要解决缆绳张力的采集问题^[11],如图6所示,通过在松弛补偿器活塞腔设置压力传感器测液压压力 P ,可计算作用在活塞端的力 f ,进而可得缆绳拉力 F ,这就解决了缆绳张力的采集问题。

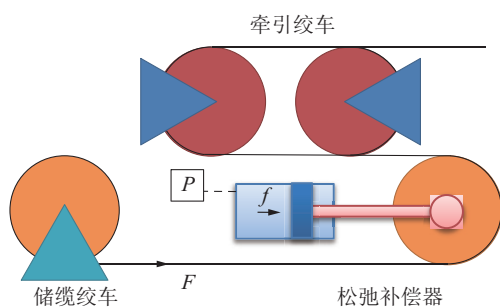


图6 缆绳张力的采集与控制示意

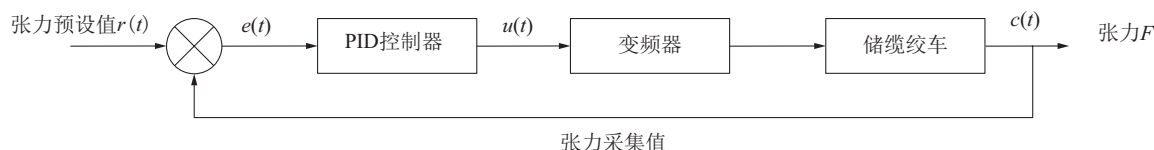


图7 控制流程

2.3 排缆机构控制策略

2.3.1 排缆机构功能分析

排缆机构的作用是为了保证缆绳在滚筒上整齐紧密地排列,具体功能如下:

(1)准确控制位置。排缆机构要能够精准地使缆绳的位置跟随滚筒上缠绕缆绳的位置,并且要快速响应。排缆机构精准的位置跟踪是缆绳整齐紧密地排列在储缆卷筒上的前提。

(2)准确换向。当排缆机构驱动导向轮随缆绳运行至储缆卷筒端部时,须进行精确换向,使丝杠在单层排缆完成后,迅速实现反向旋转。

2.3.2 排缆机构控制方法与策略^[15]

排缆机构的控制策略要基于储缆卷筒的设计来确定,储缆卷筒采用Lebus折线绳槽,每一圈绳槽分斜线绳槽部分和直线绳槽部分,其中斜线绳槽部分所对应的圆周角为 90° ,直线绳槽部分所对应的圆周角为 270° ,根据以上特性,要求排缆丝杠推动缆绳在导向轮上移动一个绳槽距,然后停止等待缆绳在储缆卷筒上的直线绳槽部分运动,紧接着再进入斜

当绞车进行收放缆绳作业时,牵引绞车摩擦轮的工作半径恒定,而储缆卷筒的工作半径会随着绞车的收放缆绳而增大或减小;牵引绞车作为主动机构,储缆绞车须跟随配合牵引机构的线速度,根据储缆卷筒当前工作半径,确保在缆绳张力达到设定值时,储缆卷筒的线速度与牵引绞车的线速度一致^[12]。

张力闭环控制系统控制流程见图7,系统在缆绳上采集张力信号反馈给控制器进行偏差量的自我修正,选取压力传感器采集张力信号,在前文已作详细论述。工作时,传感器将检测到的压力信号实时反馈至控制器,与预设的张力给定值进行比较并计算偏差;控制器依据该偏差信号,采用PID控制算法对执行机构进行调节与校正,使缆绳张力维持在目标值附近,确保系统稳定运行^[13-14]。该闭环控制结构可有效抑制外部扰动对张力控制的影响,使系统具备较强的抗干扰能力。

线绳槽部分丝杠推动缆绳在导向轮上移动,如此重复运动。

通过PLC及相关传感器,实现计算与测量互为冗余的排缆控制策略,确保精准控制排缆位置与换向。

计算:通过PLC预设参数(储缆卷筒及缆槽相关参数),采集储缆电机转动角度及圈数(编码器实现),根据传动比及缆绳圈数、层数来计算缆绳缠绕位置。

测量:如图8所示,为了准确控制位置,精准实现排缆机构的位置跟随,在排缆机构上设置排缆角度传感器,实时测量缆绳与储缆卷筒的角度,以便控制系统进行微调;为了准确换向,在与储缆卷筒正对的丝杠两端处设置行程开关。排缆器结构如图9所示,排缆器角度传感器安装示意如图10所示。

3 主要硬件设计

3.1 VFD房设计

VFD房(绞车控制集装箱)是电控系统的核心

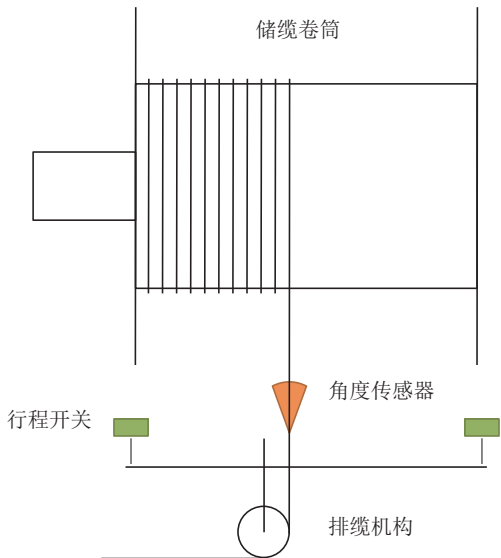


图 8 排缆机构示意

集成场所,内部集成了 PLC 控制柜、VFD 变频柜、配电柜等设备。VFD 房外形尺寸为 4500 mm×3000 mm×3000 mm,配套 5 匹工业空调(3.7 kW)用于内部环境温控,房内设置制动电阻(260 kW)用于能耗制动。VFD 房与绞车本体之间通过电缆及通信网线连接,与钻机司钻房之间通过 Profinet 通信网线连接。房体配置多种规格防爆插头,用于绞车动力、控制和信号的快速连接。充分考虑井场安全

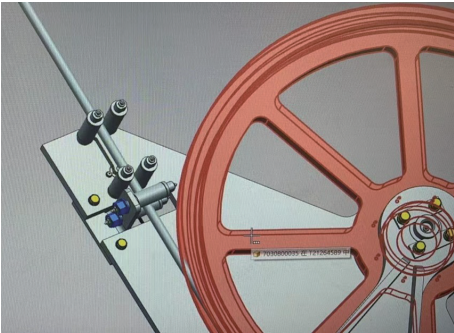


图 9 排缆器结构

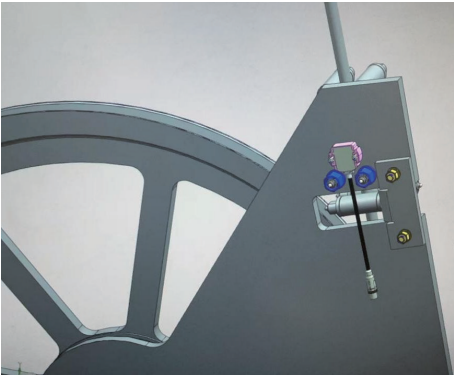


图 10 排缆器角度传感器安装示意

及电磁兼容要求,按标准配置房内铜排、接地棒、电缆格兰等辅料。VFD 房内布局如图 11 所示。

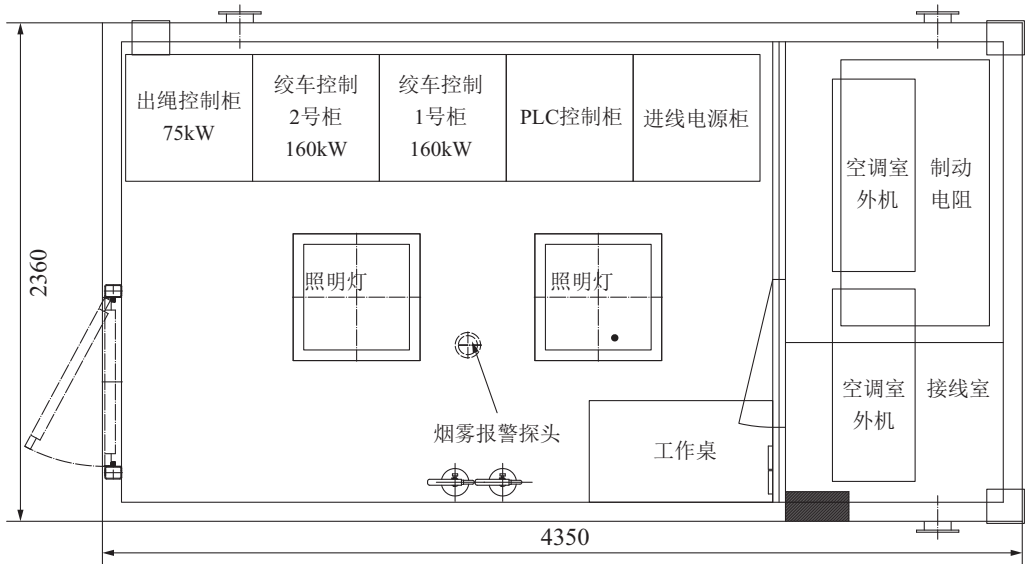


图 11 VFD 房内布局

3.2 PLC 及 IO 模块选型配置

PLC 及 IO 模块选型配置如表 1 所示。主控 PLC 选用西门子 S7-1500 系列 CPU 1511-PN,其工

作内存 150 KB,负载内存 1 MB,位处理速度 60 ns/布尔指令,集成 1 个 Profinet 接口。S7-1500 PLC 是西门子高性能控制器,具有处理速度快、程序容量

大、通信功能强大及系统诊断能力全面的显著优势。其集成的Profinet接口不仅支持实时以太网通信,还能实现等时同步模式,确保多子系统间控制指令与传感数据的高确定性传输。这些特性使其

能够完全满足超万米深度绳索取心绞车复杂算法的开发要求,可靠地完成高速数据采集、精准闭环控制和多站协同任务,与Profinet总线共同构成系统的高性能控制核心。

表1 PLC及IO模块选型配置

序号	名称	型号	数量	单位	品牌
1	CPU 1511-PN	6ES7 511-1AK02-0AB0	1	个	西门子
2	4 MB存储卡	6ES7 954-8LC03-0AA0	1	个	西门子
3	数字输出	6ES7 522-1BH10-0AA0	2	个	西门子
4	数字输入	6ES7 521-1BH10-0AA0	3	个	西门子
5	模拟量输入	6ES7 531-7KF00-0AB0	2	个	西门子
6	模拟量输出	6ES7 532-5HD00-0AB0	1	个	西门子
7	交换机模块	6GK5008-0BA10-1AB2	1	个	西门子
8	TP700 精智	6AV2124-0GC01-0AX0	1	个	西门子
9	接口PN模块标准型	6ES7155-6AA01-0BN0	1	个	西门子
10	16DI 标准型	6ES7131-6BH01-0BA0	3	个	西门子
11	16DO 标准型	6ES7132-6BH01-0BA0	2	个	西门子
12	4AO 标准型	6ES7135-6HD00-0BA1	1	个	西门子

根据系统传感器及执行机构IO需求,配置合理的数字量输入(DI)、数字量输出(DO)、模拟量输入(AI)、模拟量输出(AO)模块,共包含48个DI点、32个DO点、16个AI点、4个AO点。此外,配置西门子交换机模块用于Profinet网络扩展,以及远程4G模块实现远程监控。本地控制箱内集成西门子TP700精智系列人机交互界面和分布式IO,用于现场信号采集与执行器控制。

3.3 无线遥控设计

无线遥控系统选用工业434 MHz无线模块,采用定制化面板设计,集成操控手柄、钮子开关、旋钮/按钮等控制元件,并配备4.3 in(109.22 mm)黑白背光液晶显示器,用于实时显示绞车缆绳长度、钢丝绳拉力和运行速度等关键参数,无线遥控外形及面板设计如图12所示。无线遥控器通过天线与安装在绞车本地电控箱内的总线型无线接收模块通信,接收模块与下位机PLC之间采用Profinet总线进行双向数据交换,实现操作指令的采集上传以及传感参数的显示输出。

4 上位机界面及程序设计

在司钻房钻机主控系统中,绞车系统作为主控系统关键集成设备之一,在司钻房钻机主控系统控



图12 无线遥控外形及面板设计

制界面上设置独立界面;当需要控制绞车时,在主控系统界面上切换进入绞车控制界面,通过网线连接绞车电控系统进行Profinet总线通信,实现绞车的远程中央集控。绞车的控制界面设计如图13~15。

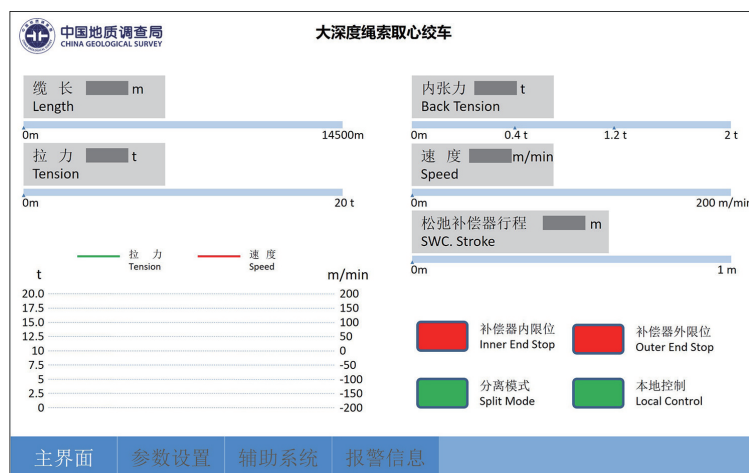


图13 控制主界面



图14 控制参数设置界面

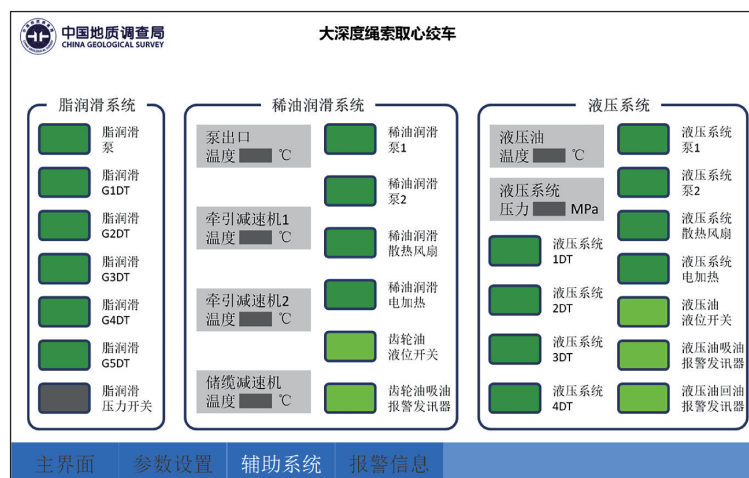


图15 辅助系统界面

5 总结与展望

本文针对13000 m绳索取心绞车在特深井作业

中面临的牵引失效、钢丝绳乱缆与断裂等风险,设计了一套基于西门子S7-1500 PLC和Profinet总线

的全电数字化电控系统。系统采用模块化设计,可实现本地、无线遥控和远程司钻房中央集控三种操控模式。在关键控制策略上,双牵引电机采用“转速闭环同步+负载分配”的主从控制,确保双摩擦轮负载均衡,通过松弛补偿器压力传感器构建张力闭环PID控制,使储缆卷筒线速度自动跟随牵引速度,实现恒张力收放。排缆机构采用计算与角度传感器测量互为冗余的控制方式,实现精确位置跟随与自动换向。根据井场作业环境和绞车性能要求,集成设计VFD房,设计了详细的PLC控制硬件架构,无线遥控的操作方式使现场使用更具便捷性和灵活性。该电控系统方案可有效提升绞车控制的精准性、操作灵活性和作业安全性,有效支撑超深孔取心绞车装备的技术研发。

参考文献:

- [1] 张金昌,刘凡柏,黄洪波,等.5000米智能地质钻探技术与装备研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):1-8.
- [2] 朱跃.钻井平台变频驱动系统应用分析[J].电子测试,2022(16):29-31.
- [3] 刘晓林,高洁云,杜一锦,等.基于PLC的CGJ系列搓管机电控系统研发与应用[J].钻探工程,2025,52(4):96-102.
- [4] 刘晓林,王林清,许本冲,等.基于Profinet与S7-1200PLC的RN254型铁钻工电控系统的研发与应用[J].钻探工程,2024,51(S1):231-237.
- [5] 林珊颖,廉立志,李泽华,等.科考绞车系统关键技术研究现状与发展趋势[J].船舶工程,2025,47(4):10-25.
- [6] 沈博汉.高速电动绞车系统精确排缆技术研究[D].武汉:武汉大学,2026.
- [7] 刘晓进,赵延明,敬明洋.电驱动海洋绞车自动排缆控制系统建模与仿真[J].机械工程师,2024(2):74-78.
- [8] Yoo S, Kim T, Seo M, et al. Position-tracking control of dual-rope winch robot with rope slip compensation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021,26(4):1754-1762.
- [9] Han S M. Implementation of integrated development environment for machine vision-based IEC 61131-3[J]. Computers, 2024, 13(7): 172.
- [10] 吴水章.西门子PLC在研石山绞车自动化升级改造中的应用[J].煤矿机械,2019,40(11):173-175.
- [11] 王小军,王超,师子锋,等.船用绞车的技术现状和发展趋势分析[J].装备环境工程,2026,23(4):144-152.
- [12] 张恒志.牵引绞车缆绳弹性滑动对缆绳张力影响机理与调控方法研究[D].镇江:江苏科技大学,2025.
- [13] Shang W W, Xie F, Zhang B, et al. Adaptive cross-coupled control of cable-driven parallel robots with model uncertainties[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4110-4117.
- [14] 陈琦,李格伦.新型布缆船拖曳绞车控制系统[J].上海交通大学学报,2019,53(8):990-999.
- [15] 章平,徐畅,吕庆桃,等.全海深地质绞车自适应多冗余排缆系统[J].机电设备,2026,43(1):1-6.

(编辑 王文)