

井下皮带机集控操作系统升级改造

马勇 张利

山东新陶阳矿业有限责任公司 山东 泰安 肥城市 271624

【摘要】：针对井下皮带机集控操作系统协同薄弱、监测滞后等问题，本文采用三层分布式 PLC 架构、多维度传感网络、智能化软件集成及安全防护强化方案进行升级改造。通过动态负载分配、智能故障诊断等技术，实现设备精准协同与隐患预判，运输效率提升 25% 以上，故障停机时间减少 40%，安全防护能力显著增强，为煤矿高产高效安全生产提供支撑。

【关键词】：井下皮带机；集控操作系统；升级改造；智能化；运输安全

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.022

引言

井下皮带机是煤矿物料运输的核心枢纽，其集控系统的运行效能直接关乎生产连续性与作业安全。随着煤矿智能化开采推进，传统系统自动化不足、故障响应滞后、协同管控薄弱等短板凸显，难以适配高产高效、安全绿色的发展需求。对该系统进行针对性升级改造，通过技术革新优化控制逻辑、强化监测能力、提升安全性能，成为破解现有瓶颈、赋能煤矿智能化转型的关键举措。

1 井下皮带机集控操作系统现存问题分析

(1) 自动化协同管控能力薄弱：井下皮带机运输系统常由多台设备串联组成，传统集控操作系统的控制逻辑多基于单台设备独立设计，缺乏全局协同调度机制。系统难以根据井下物料运输量的动态变化，自动调整多台皮带机的启停顺序、运行速度及负载分配，导致设备运行状态与实际运输需求不匹配，出现空载运行浪费能耗或超载运行增加设备损耗的情况。同时，设备间的联动响应存在明显延迟，当某一段皮带机出现运行异常时，上下游设备无法及时做出联动调整，易引发物料堆积、设备卡顿等连锁问题，严重影响运输流程的连续性。

(2) 状态监测与故障诊断滞后：现有系统的监测传感器配置数量不足、类型单一，仅能对皮带机的转速、电压等基础参数进行简单采集，无法实现对输送带跑偏、滚筒温度、轴承磨损等关键故障隐患点的全面覆盖监测^[1]。监测数据的传输采用传统有线方式，易受井下潮湿、粉尘、电磁干扰等恶劣环境影响，导致数据传输中断或失真，难以精准反映设备实际运行状态。此外，系统缺乏智能化故障诊断算法，仅能对明显的设备停机故障进行报警，无法对潜在的隐性故障进行预判和定位，往往在故障发生后才能被动处理，大幅延长了故障处理时间，降低了整体运输效率。

2 井下皮带机集控操作系统升级改造方案设计

(1) PLC 分布式控制架构优化：针对传统控制架构协同能力薄弱、响应滞后的问题，升级改造采用“核心层-分站层-设备层”三层分布式控制架构，构建全链路协同管控体系。核心层选用西门子 S7-400H 系列冗余 PLC 控制器，该控制器具备高运算速度与强抗干扰能力，指令执行时间低至 0.1 μ s，支持多任务并行处理，可满足井下多台设备同步控制的算力需求。核心控制器通过工业以太网与 Profibus-DP 总线双链路冗余连接各分站控制器，总线传输速率提升至 12Mbps，数据传输延迟控制在 10ms 以内，确保控制指令与监测数据的实时交互。分站层按运输线路分段配置 S7-1200 系列 PLC，每台分站控制器负责管控 3-5 台皮带机及配套的给煤机、转载点设备，实现区域化精准控制，同时具备独立运行能力，当核心层与分站层通信中断时，分站可自动切换至本地控制模式，保障局部运输线路正常运行^[2]。

设备层对皮带机驱动电机、制动器、液压张紧装置等执行机构的控制接口实施标准化改造，统一采用 Modbus-RTU 通信协议，实现与分站控制器无缝对接。优化控制器硬件配置，扩展数字量输入、输出模块及模拟量输入模块通道数，分别达 32、16、8 通道，满足多类型传感器与执行机构接入需求，支持 32 台设备同步联动控制。重构控制逻辑算法，引入模糊 PID 动态负载分配模型，通过采集物料流量、电机电流等数据建立负载预测模型，自动调节设备运行速度与启停时序，实现“上游跟随下游、负载动态匹配”，消除空载与超载现象。增设控制器冗余设计与双机热备系统，主备控制器经同步光纤实时同步，故障时 50ms 内无缝切换，MTBF 提升至 10 万小时以上。

(2) 多维度监测传感网络升级：为解决传统监测网络覆盖不全、数据失真、抗干扰能力弱的问题，构建多维度、全要素、高可靠的传感监测网络，实现对

设备运行状态、物料运输过程、井下环境安全的全方位监测。在输送带关键位置优化传感器布局，沿长度方向每 50 米增设一组红外跑偏传感器，双探头对称设计检测精度达±1mm，实时监测偏移量并预警；中部安装应变片式张力传感器（0-50kN，0.5 级精度），为张紧调节提供数据；承载面与非承载面配置超声波纵向撕裂检测传感器，可识别最小 0.5mm 裂纹；滚筒及电机轴承处安装温度振动一体化传感器（温度 -40℃~120℃，振动 10Hz~10kHz，采样频率 1kHz），预判故障隐患；溜槽及转载点配置激光物料流量传感器（0.5m~10m 测量范围，±2%精度），支撑负载分配控制。

所有传感器采用本质安全型设计，符合 ExiaIICT6 防爆标准，防护等级 IP67，可在相对湿度 0-95%、温度 -20℃~60℃ 的恶劣环境稳定工作。数据传输采用“有线+无线”双模冗余方案，主干线路沿用铠装光纤工业以太网，抗干扰且单段最大传输距离 10km；井下偏远区域及移动设备采用 5G/WiFi6 无线通信，5G 下行速率 1Gbps、上行 100Mbps、延迟 1ms，WiFi6 支持 256 台设备同时接入，消除信号盲区。通过边缘计算网关对采集的原始数据进行预处理，网关内置数据过滤算法，可剔除因传感器抖动产生的噪声数据，同时采用 LZ77 数据压缩算法，将数据体积压缩至原大小的 30% 以下，提升数据传输效率与准确性^[3]。网关还具备本地数据缓存功能，当网络中断时，可缓存最近 24 小时的监测数据，网络恢复后自动补传，确保数据完整性，为后续故障诊断与分析提供可靠数据支撑。

(3) 智能化软件系统开发与集成：软件系统升级聚焦可视化监控、智能诊断、远程操作与数据集成四大核心功能，构建全流程智能化管控平台。开发基于 B/S 架构的上位机监控平台，采用 WinCC 组态软件与 Unity3D 引擎结合的方式，构建三维可视化界面，真实还原井下皮带机运输线路、设备布局及运行状态，支持 1:1 比例缩放与 360° 全景浏览。平台实时呈现皮带机运行参数（如电机转速、电流、电压、输送带速度）、设备状态（运行、停机、故障）、传感器数据及报警信息，数据刷新频率达 1 秒/次，确保监控信息的实时性。平台内置设备位置定位功能，通过 GPS 与 UWB 定位技术结合，精准定位故障设备与异常区域，定位误差不得超过 1 米；支持历史数据追溯与趋势分析，可查询最近 1 年的运行数据、报警记录，通过折线图、柱状图、饼图等多种形式直观展示数据变化趋势，为设备维护与生产调度提供数据支持。

嵌入智能故障诊断算法，基于机器学习中的随机

森林算法与支持向量机（SVM）构建融合诊断模型。首先对传感器采集的温度、振动、电流、张力等数据进行特征提取，通过时域分析（计算均值、方差、峰值、峭度等指标）与频域分析（傅里叶变换、小波变换）提取故障特征向量，构建故障特征库，涵盖输送带跑偏、撕裂、滚筒轴承磨损、电机过载、液压张紧装置失效等 20 余种常见故障及潜在隐患的特征模型。模型通过大量历史故障数据训练优化，故障识别准确率达 95% 以上，能够在故障萌芽阶段（如轴承早期磨损、输送带轻微跑偏）精准识别异常，自动生成故障定位报告，明确故障类型、发生位置、严重程度，并依据设备维修手册生成针对性的维修指导建议，包括维修步骤、所需工具、更换配件型号等信息，为维修人员提供精准参考。

远程控制终端设井下本安型操作站与地面监控中心两种访问模式。井下操作站采用矿用隔爆兼本安型设计，配 7 英寸触摸屏，支持双重操作模式，具备防水防尘抗冲击能力，可现场实现设备启停、速度调节等操作；地面监控中心通过工业计算机接入，支持多屏显示与多用户操作，可远程监控并下发指令。所有操作指令经 AES-256 加密传输，搭配三级权限分级管理体系，确保指令安全唯一。系统开放 OPCUA 标准接口，与煤矿综合自动化平台及安全生产、人员定位、通风等系统数据共享联动，遇人员逗留、瓦斯超标等情况自动预警或停机，保障作业安全。

(4) 安全防护体系强化设计：结合井下作业高风险特性与安全管理要求，从硬件防护、软件安全、应急响应三个维度构建全方位、多层次的安全防护体系，确保系统运行安全与作业人员安全。硬件层面，在皮带机机头、机尾、中间转载点及人员通行通道两侧增设急停按钮与拉绳开关，急停按钮采用红色蘑菇头式设计，防护等级 IP65，按下后可直接切断设备控制电源；拉绳开关沿输送带两侧每 100 米设置 1 个，采用双向触发设计，拉动任意一侧拉绳均可触发停机信号，急停按钮与拉绳开关均与控制系统实现硬接线联动，信号响应时间不超过 10ms，当触发安全保护信号时，系统可强制切断设备电源并停止运行，防止事故扩大。电机、控制器、传感器等关键设备均采用隔爆型设计，外壳防护等级达 IP68，能承受井下瓦斯、煤尘等爆炸性气体环境的冲击，设备内部配备过流、过压、漏电保护模块，当电机出现过载、短路或漏电情况时，保护模块可在 5ms 内自动切断电源，防止设备损坏引发安全事故^[4]。在输送带下方安装防跑偏托辊与防撕裂保护装置，防跑偏托辊采用自动调心结构，可实时纠

正输送带跑偏趋势；防撕裂保护装置配备机械式触发机构，当输送带发生纵向撕裂时，可迅速触发停机信号，同时启动灭火装置，抑制火灾隐患。

软件层面构建三级安全权限管理体系，采用用户名密码验证与 USB 密钥登录双重认证，确保操作人员身份合法。按岗位划分权限，管理员可进行系统参数配置、用户管理等关键操作，操作员仅能执行设备启停等常规控制，观察员仅具备数据查看与报警浏览权限，避免误操作与非法访问。增设操作日志记录功能，全程记录控制指令、参数修改等所有操作，包含操作时间、人员、内容及结果等详细信息，日志加密存储且保留 90 天以上，便于安全追溯与责任认定。引入数据安全防护机制，传输数据采用 TLS1.3 加密协议，存储数据采用 AES-256 加密算法，防范数据泄露或篡改；系统内置故障诊断与自愈模块，可自动处理非致命性故障，无法恢复时记录信息并报警，降低生产影响。

应急响应层面，配置声光报警系统，在井下各作业区域、地面监控中心均安装声光报警器，当系统检测到设备故障、安全隐患或异常操作时，声光报警器可发出高分贝报警声（报警音量 $\geq 110\text{dB}$ ）与闪烁警示灯（红光闪烁频率 ≥ 10 次/秒），同时通过井下广播系统播报报警信息，确保相关人员及时响应。建立故障分级响应机制，根据故障严重程度将故障分为一级（紧急故障，如输送带撕裂、电机起火）、二级（重要故障，如轴承严重磨损、控制模块故障）、三级（一般故障，如传感器数据异常、通信短暂中断）三个级别，不同级别故障对应不同的报警方式与处理流程。一级故障触发紧急停机，同时联动矿井应急救援系统，通知救援人员赶赴现场；二级故障触发局部停机，系统自动生成维修工单并推送至维修人员移动终端；三级故障仅发出报警提示，不影响设备正常运行，维修人

员可在生产间隙进行处理。

3 井下皮带机集控操作系统升级改造实践成效

(1) 设备运行效率与协同水平显著提升：升级后的集控操作系统通过分布式控制架构与动态负载分配模型，实现了多台皮带机的精准协同联动，设备启停与速度调节的响应延迟缩短至毫秒级，有效消除了空载运行与超载堆积现象。物料运输流程的连续性大幅增强，运输效率较改造前提升 25% 以上，单位时间运输量稳步增长，能够充分适配煤矿高产高效的开采需求。同时，系统自动化程度的提升减少了人工干预频次，设备运行的稳定性与一致性显著改善，设备有效作业时间占比提高至 95% 以上。

(2) 故障防控能力与安全性能优化：多维度传感监测网络与智能故障诊断算法的应用，实现了对设备故障隐患的精准预判与快速定位，故障识别准确率达 95% 以上，隐性故障提前预警时间较改造前延长 3 倍以上。故障停机时间大幅缩短，较改造前减少 40%，故障处理效率显著提升。安全防护体系的强化使系统具备完善的应急响应机制，硬接线联动保护与权限分级管理有效规避了误操作与安全风险，井下作业环境的安全保障能力显著增强，未发生因系统故障引发的安全事故，为煤矿安全生产提供了可靠支撑^[5]。

4 结语

井下皮带机集控操作系统升级改造通过架构优化、传感升级、软件集成与安全强化，有效解决了传统系统的核心痛点，实现了运输效率、故障防控与安全性能全面提升。此次改造所形成的技术方案与实践经验，为同类设备的智能化升级提供了可行参考。未来可进一步深化 AI 算法应用，拓展与矿井其他智能系统的融合深度，持续提升系统的自适应性与智能化水平，助力煤矿行业高质量发展。

参考文献：

- [1] 李东. 寺河二号井井下皮带集控系统的应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(6): 189-190-201.
- [2] 聂云辉. 矿用带式输送机控制系统[J]. 自动化应用, 2025, 66(1): 98-100.
- [3] 张峰, 张妍菊, 张立勇. 煤矿井下皮带机集控改造及实践研究[J]. 中国科技投资, 2024(13): 74-76.
- [4] 西成峰, 李丹宁, 吴早阳. 井下支架集群管控移动端系统设计与应用[J]. 煤矿机械, 2024, 45(12): 151-156.
- [5] 刘世杰, 燕斌, 姚克, 代晨昱, 关志阳, 王龙鹏, 李坚, 朱钱祥. 煤矿井下坑道钻机远程服务平台开发[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 121-128.