

煤矿机电运输设备智能化改造技术应用分析

余安东

永煤集团股份有限公司新桥煤矿 河南 商丘 476600

摘要：为解决煤矿传统机电运输设备人工依赖强、故障监测滞后、能耗偏高、协同性差等痛点，本文围绕带式输送机、提升机等核心设备，系统探究智能感知监测、自适应调速、故障预警维保及协同调度等智能化改造关键技术。分析当前改造中设备适配性不足、数据孤岛、复合型人才短缺等问题，从技术、管理、运维层面提出优化对策，总结改造综合效益，展望技术迭代方向，为煤矿机电运输智能化升级提供实践参考。

关键词：煤矿机电运输设备；智能化；改造技术；应用

引言：机电运输是煤矿生产的核心命脉，设备运行稳定性与智能化水平直接关乎矿井安全生产效率与经济效益。传统煤矿机电运输设备多依赖人工操作与定期检修，存在人力成本高、隐患处置滞后、能耗管控粗放、多机协同低效等诸多短板，难以适配现代煤矿安全高效、绿色低碳的生产需求。基于此，本文系统剖析机电运输设备智能化改造的技术体系、应用现状与现存问题，针对性制定优化方案，助力矿井运输系统提质增效、安全升级。

1 煤矿机电运输设备概述及智能化改造基础

1.1 煤矿核心机电运输设备类型及运行特性

(1) 带式输送机依靠驱动滚筒与胶带间的摩擦传动连续输送物料，适用于长距离、大运量煤流运输；刮板输送机通过链条带动刮板在溜槽内往复运动，承担采煤工作面往复式、大倾角条件下煤炭转运任务，是综采工艺的关键衔接环节。(2) 矿井提升机利用卷筒缠绕或摩擦轮传动完成大高度、大载荷的垂直提升作业，是煤矿主副井煤炭与人员升井核心装备；轨道运输机车（架线式、蓄电池式）承担采区巷道水平及倾斜运输，负责材料、设备及矸石的中短途转运调度^[1]。(3) 给煤机、翻车机、装车闸门等辅助设备与主运系统配合，实现给料量调节、车辆定位卸载等配套功能；局部通风机、水泵等电力拖动设备虽不直接参与运输，其运行状态直接影响主运系统连续作业的供电排水安全保障。

1.2 传统机电运输设备现存问题

(1) 大量设备依赖人工就地启停及巡检，岗位定员多、操作标准化程度低，人力成本常年居高不下。(2) 关键部件磨损、温升、振动等劣化参数缺乏在线监测手段，隐患发现滞后，计划性检修精度不足，造成非计划

停机频发。(3) 供电能耗计量粗放、多机协同缺乏速度与载荷动态匹配，重载轻载工况切换响应慢，系统整体运行效率与能效水平偏低。

1.3 智能化改造核心内涵与改造原则

(1) 以多源感知、边缘计算、智能决策、自动执行为闭环，推动运输设备从人工干预向自适应运行升级。(2) 坚持安全优先，防爆、防护等级达标为前提；兼顾高效节能，适配矿井恶劣工况环境，采用分系统、分区域、分阶段递进式改造策略。(3) 核心目标锁定降低岗位人工干预强度、提升运输系统综合能效与设备完好率，同时筑牢人员与设备运行安全防线。

1.4 智能化改造核心支撑体系

(1) 硬件层部署矿用激光雷达、红外热成像、振动/温度传感器及边缘智能控制器，满足井下复杂环境数据高可靠采集与控制指令下达。(2) 软件层建设统一数据中台，嵌入AI故障诊断与动态调度算法，实现运行状态智能评估与协同优化决策。(3) 网络层依托5G专网、Wi-Fi6及工业以太网融合架构，构建低时延、高带宽、全覆盖的有线无线混合传输通道，保障数据实时互通与远程指令快速响应。

2 煤矿机电运输设备智能化关键改造技术及应用

2.1 设备智能感知与状态监测技术

(1) 在带式输送机驱动滚筒、改向滚筒及电机轴承座等关键部位布设PT100热电阻与一体化振动传感器，在联轴器端加装霍尔转速传感器与转矩传感器，同时在机架安装激光雷达煤流量计与阵列式称重传感器，构建覆盖温度、转速、转矩、张力、瞬时煤流量等多维参数

的实时采集网络,实现对设备运行状态的全息数字化映射,采样频率达毫秒级,数据精度满足闭环控制要求。(2)在转载点、皮带机头卸载处及中间段关键断面安装本安型工业智能相机,搭载改进型轻量化卷积神经网络目标检测模型,对胶带纵向撕裂、边缘跑偏量累积、托辊异常卡转及大块矸石异物卡滞等异常状态进行逐帧智能判别与跟踪标注,检测精度达毫米级,较人工目测巡检效率提升十倍以上,且能在异常出现初期自动触发减速或停机保护指令,将隐患遏制在萌芽阶段^[2]。(3)依托井下千兆工业以太环网与边缘计算网关,将各类传感器与视觉检测终端输出的海量异构数据按统一数据字典进行标准化封装与压缩预处理,采用 OPCUA 通信协议实时上传至地面数据中心,构建设备全生命周期运行数字档案,完整记录单机投运时长、累计过煤量、检修维保履历及关键性能参数退化轨迹,为后续故障诊断与寿命预测奠定完备的数据基础。

2.2 智能控制与自适应调速改造技术

(1)在带式输送机与刮板输送机驱动系统上推广应用隔爆兼本安型高压变频器,通过 PLC 控制器实时接收上游煤流量计与称重传感器反馈信号,采用模糊 PID 与模型预测控制相融合的动态调节算法,自动修正电机输出频率与目标转速,实现煤流量大时高速满载运行、煤流小时自动降速节能、空载状态下延时停机休眠的多模式智能切换,综合节电率可达 15%~25%,同时显著降低机械冲击磨损。(2)开发基于时序逻辑与负荷动态联动的设备启停智能联控系统,将采煤机截割落煤量变化、转载机实时电流负荷、主运皮带运行速度与缓冲仓连续料位计数据进行多参量交叉耦合运算,制定顺煤流方向逐级延时启动、逆煤流方向逐级延时停车的精细化控制策略,确保全运输链各环节启停衔接无缝平滑,从根本上杜绝堆煤压堵与空载电能损耗。(3)部署无人值守自动运行控制软件系统,融合红外对射人员定位、电流突变检测、关键点视频智能分析及设备状态自检等多重安全确认闭锁条件,实现固定带式输送机、给煤机、装车闸门等岗位远程集中操控与全自动无人值守运行,将传统三班制固定值守转变为流动巡查模式,岗位用工减少 60% 以上^[3]。

2.3 智能故障诊断与预警维保技术

(1)基于数据中台汇聚的海量历史故障样本库与实时工况数据流,采用深度残差网络提取振动频谱与时域波形深层特征,结合梯度提升决策树与支持向量机融合分类器,对轴承磨损、齿轮断齿、电机匝间短路、联轴器不对中等典型故障进行精准模式识别与

分类诊断,同时利用时频倒谱分析与振动传递路径反演算法实现故障部位米级精度定位,故障识别准确率稳定超过 92%。(2)建立四级递进式预警智能处置体系,按故障危险程度与紧迫性划分为关注级、注意级、警告级与紧急级四个等级,每级匹配差异化的短信推送、大屏声光报警、远程减速停机响应策略,同步推送标准化应急处置操作卡与关联图纸,辅助调度人员在 30 秒内完成态势全面研判与科学处置决策^[4]。(3)引入基于 Weibull 分布寿命评估模型与长短期记忆神经网络时序预测相融合的预测性维保方法,科学推演电机轴承、减速机齿轮、制动闸瓦及输送带接头等关键零部件剩余寿命与劣化拐点时间,据此按需生成动态维保工单与备件采购建议,替代传统到期即修的定期检修模式,可减少过度检修工时约 30%,同时显著降低突发故障导致的非计划停机损失。

2.4 智能调度与协同运输改造技术

(1)研发基于 NSGA-II 多目标遗传算法与 Q-learning 强化学习相融合的协同调度优化引擎,统筹考量采面出煤速率波动、各运输段通过能力约束、缓冲仓剩余容积动态变化及设备检修状态等多重约束条件,自动生成全局最优的运输作业序列与设备启停时序配置方案,可有效降低运输系统拥堵等待时间约 20%。(2)搭建井下运输智能调度平台,统一集成带式输送机子系统、轨道运输子系统、给排煤子系统及提升子系统实时运行数据,与 GIS 井下巷道拓扑地图深度融合,以三维可视化组态驾驶舱界面全景呈现全运输链条实时运行态势,实现采掘、运输、提升各环节数据融合共享下的集中监视、统一指令分发与远程协同干预调度。(3)落地运输路径动态优化智能管控系统,根据各转载点堆煤高度变化、设备瞬时负载率波动与巷道通行状态实时采集数据,通过动态规划算法在线计算最优物流分配方案,自动推荐最佳运输路线并同步下发沿线各设备调速参数与换向切换指令,有效增强运输系统面对突发扰动(如局部设备故障检修、采面落煤量剧烈突变等)时的快速应变能力与柔性生产调节水平^[5]。

3 煤矿机电运输设备智能化改造应用现存问题与优化对策

3.1 智能化改造技术应用现存问题

(1)部分智能传感器、边缘控制器及执行机构基于通用工业平台开发,与矿井现役老旧机型在电气接口、通信协议及机械安装尺寸上存在较大差异,导致设备改装工程量大、系统匹配周期长,改造后综合效能难以

达到设计预期。(2)各子系统(提升、主运、辅运、排水等)智能化改造分属不同厂商实施,数据格式、通信标准与接口规范各异,缺乏统一的数据中台进行跨系统整合,形成烟囱式数据孤岛,严重制约运输全链条协同优化与统一调度决策能力。(3)运维管理体系尚未完成由传统机械检修向智能化运维的转型过渡,既懂智能设备原理又精通现场工艺的复合型技术人才严重不足,设备故障诊断过度依赖厂商远程支持,自主运维能力薄弱,制约系统长期稳定高效运行。

3.2 技术层面优化改进策略

(1)针对不同类型、不同服役年限设备制定差异化改造方案,研发模块化、可插拔的智能加装组件与协议转换网关,采用非侵入式安装方式,最大限度降低对原有设备的改造扰动与停产影响,提升改造方案的场景适配性与经济性。(2)构建统一的数据采集交换标准体系与矿井级工业互联网数据共享平台,对各子系统数据实施标准化治理与语义统一建模,打通数据壁垒,实现跨系统数据融合共享与业务协同联动,为智能调度与故障诊断提供全局数据视图支撑。(3)持续迭代优化智能识别与调度算法,引入迁移学习与联邦学习框架解决各矿井数据样本差异带来的模型泛化能力不足问题,同时利用数字孪生技术构建高保真仿真测试环境,在虚拟空间完成算法验证与参数调优后部署至实际系统,有效提升故障诊断准确率与调度控制精度。

3.3 管理与运维体系优化措施

(1)制定智能化设备专项运维管理制度,明确各类智能感知设备、网络传输设施与控制系统的日常点检规范、定期标校周期与故障处置时效标准,建立运维质量量化考核指标体系,实现全流程制度化闭环管理。(2)搭建分层分级的人才培养体系,面向管理层开设智能化系统认知与决策能力提升研修班,面向一线操作维保人员开展传感器标定、智能终端操作、数据分析基础等实操技能培训,建立校企联合实训基地与持证上岗考核机制,持续强化全员智能化操作素养。(3)完善设备常态化巡检维护机制,制定智能化设备日检、周检、月检标准作业流程,建立软件版本管理与远程 OTA 升级制度,定期对边缘控制器、通信网关及传感器执行固件升级与参数优化,确保系统始终运行在最优状态并具备持续迭代演进能力。

3.4 改造效益提升与未来发展展望

(1)安全效益上,智能感知与预警系统可提前识别设备劣化趋势,有效遏制重大机电运输事故;经济效益上,变频调速与智能调度可降低吨煤运输电耗约 15%~25%,预测性维保减少停机损失与备件库存,综合年化投入产出比达 1:3 以上;社会效益上,大幅降低矿工井下值守强度,改善职业健康环境,提升行业本质安全水平与社会形象。(2)智能化、无人化、绿色化构成煤矿机电运输三大核心发展方向——智能感知与决策算法推动系统整体自运行能力跃升,无人值守常态化运行解放一线操作人员,变频节能与永磁直驱等技术全面推广助力矿山碳达峰目标实现,三者互为支撑、协同推进。(3)后续技术迭代重点聚焦多源数据融合感知精度提升、基于大模型的设备健康管理决策系统开发、5G+工业互联网深度应用以及井下机器人自主巡检与协同作业场景拓展,推动煤矿机电运输系统向更高层次的全流程全生命周期智能化迈进。

结束语

本文全面梳理煤矿机电运输设备智能化改造的核心技术与应用成效,明确当前改造存在的设备适配不足、数据壁垒突出、运维体系滞后等关键问题,并提出技术优化、管理升级、人才培育等系统性对策。智能化改造可有效提升矿井运输安全水平、节能降耗、降低人工成本,是煤矿高质量发展的必然趋势。未来需深耕多源数据融合、智能大模型、井下无人巡检等技术,推动机电运输系统全生命周期智能化升级。

参考文献

- [1] 鲍久圣,章全利,葛世荣,刘恩福.煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J].煤炭学报,2023,48(02):1085-1098.
- [2] 王国法,庞义辉,任怀伟.智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J].煤炭学报,2024,49(01):181-202.
- [3] 陈晓晶,何敏.井工煤矿运输系统智能化技术现状及发展趋势[J].工矿自动化,2022,48(06):91-97.
- [4] 常凯.煤矿辅助运输系统智能化现状分析及框架设计研究[J].工矿自动化,2022,48(03):22-28.
- [5] 冯亚军,郑金松,许路成.基于移动机器人的矿山带式输送机自动检测方法[J].金属矿山,2024,24(03):209-214.