

煤矿机电运输系统中的自动化技术研究

李栋梁

北京天玛智控科技股份有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17178

[摘要] 机电运输系统作为煤矿生产的关键环节,其运行效率与安全性直接关系到整个矿井的产能与人员安全。本文聚焦于煤矿机电运输系统中的自动化技术,系统梳理了当前主流的自动化技术体系,包括带式输送机智能控制、矿用机车无人驾驶、单轨吊自动调度、立井提升系统自动化以及基于物联网与大数据的综合监控平台。文章深入分析了上述技术在感知层、控制层与决策层的应用原理与关键技术,并结合典型工程案例,验证了自动化技术在提升运输效率、降低能耗、减少人工干预及增强本质安全方面的显著成效。同时,本文指出了当前煤矿机电运输自动化发展中存在的标准不统一、系统集成度低、数据孤岛严重及高端传感器依赖进口等问题,并对未来发展趋势进行了展望,提出构建“云-边-端”协同的智能运输生态体系,推动煤矿运输系统向全要素感知、全流程闭环、全系统自治的高级阶段演进。

[关键词] 煤矿; 机电运输; 自动化技术; 智能控制; 无人驾驶; 物联网; 数字孪生

中图分类号: TD634 文献标识码: A

Research on Automation Technology in Coal Mine Electromechanical Transportation Systems

Dongliang Li

Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd.

[Abstract] As a critical component of coal mine production, the operational efficiency and safety of electromechanical transportation systems directly impact the overall mine productivity and personnel safety. This study focuses on automation technologies in coal mine electromechanical transportation systems, systematically reviewing the current mainstream automation technology framework. This includes intelligent control of belt conveyors, unmanned mining locomotives, automated dispatching of monorail cranes, automation of vertical shaft hoisting systems, and integrated monitoring platforms based on the Internet of Things and big data. The paper provides an in-depth analysis of the application principles and key technologies of the aforementioned systems at the perception, control, and decision-making layers. Through typical engineering case studies, it validates the significant effectiveness of automation technologies in improving transportation efficiency, reducing energy consumption, minimizing manual intervention, and enhancing intrinsic safety. Furthermore, the study identifies existing challenges in the development of coal mine electromechanical transportation automation, such as lack of standardized protocols, low system integration, severe data silos, and reliance on imported high-end sensors. Finally, it outlines future development trends, proposing the construction of an intelligent transportation ecosystem with "cloud-edge-device" collaboration to advance coal mine transportation systems toward a higher stage characterized by comprehensive perception, closed-loop processes, and full-system autonomy.

[Key words] Coal Mine; Electromechanical Transportation; Automation Technology; Intelligent Control; Unmanned Operation; Internet of Things; Digital Twin

引言

机电运输系统贯穿于煤矿采掘、运输、提升、排矸等全过程,是连接井下各作业单元的“动脉”。因此,推进机电运输系统的自动化、智能化升级,不仅是实现“机械化换人、自动化减人、智能化无人”战略目标的关键路径,更是提升煤矿本质安全水平

与绿色低碳发展的必然要求。近年来,随着人工智能、5G通信、边缘计算、数字孪生等新一代信息技术的迅猛发展,煤矿机电运输自动化技术取得了长足进步。从早期的单机PLC控制,到如今的多设备协同调度、远程集中监控乃至部分场景下的无人化运行,自动化技术正深刻重塑煤矿运输的作业模式。然而,由于煤

矿井下环境复杂(高湿、高粉尘、强电磁干扰、空间受限)、系统构成多元(涵盖皮带、电机车、绞车、单轨吊等多种设备)、标准体系滞后等因素,自动化技术的深度应用仍面临诸多挑战。本文旨在系统梳理煤矿机电运输自动化技术的发展现状,剖析其核心技术架构,并针对现存问题提出优化路径与发展建议,以期煤矿智能化建设提供理论支撑与实践参考。

1 煤矿机电运输系统概述

煤矿机电运输系统是指在矿井生产过程中,用于煤炭、矸石、材料、设备及人员运输的各类机电设备及其控制系统的总称。根据运输方式与空间布局,可将其划分为以下几类:

1.1 主运输系统

主运输系统主要由井下主运输巷道中的带式输送机构成,承担着将工作面采出的原煤连续、高效地输送至井底煤仓或地面储煤场的核心任务。该系统通常由多台输送机串联组成,具有运量大、距离长、连续性强的特点,是煤矿生产流程中承上启下的关键环节。其运行状态直接影响全矿的生产节奏与物流效率。在传统管理模式,主运输系统往往采用固定速度运行,缺乏对上游采煤量波动和下游仓储容量变化的动态响应能力,导致空载或轻载运行时间过长,造成大量电能浪费,同时也增加了设备磨损风险。

1.2 辅助运输系统

辅助运输系统主要用于人员、物料、设备的井下转运,形式多样且适应性强。轨道运输如蓄电池电机车和架线式电机车广泛应用于大巷运输,具备载重大、可靠性高的优势;无轨胶轮车则适用于巷道条件较好、转弯半径较大的现代化矿井,灵活性更强;单轨吊系统通过悬挂于巷道顶部的轨道运行,特别适合坡度大、空间狭窄或地质条件复杂的区域,能够实现连续、平稳的物料吊运;而卡轨车或齿轨车则专用于大倾角斜巷,通过机械啮合确保运行安全^[1]。这些系统在传统作业中高度依赖人工操作与信号联络,存在调度效率低、人为失误风险高、劳动强度大等问题,亟需通过自动化手段实现流程再造与效能提升。

1.3 提升运输系统

提升运输系统主要指立井或斜井提升装置,通过高性能提升机配合箕斗或罐笼,完成煤炭、矸石、人员及大型设备在井筒内的垂直或倾斜运输任务。作为连接井上与井下的唯一通道,其运行效率与安全性至关重要。传统提升系统虽已实现电气化控制,但在精准定位、加减速曲线优化、钢丝绳状态监测等方面仍显不足,难以满足高频率、高可靠性的现代矿井需求。自动化技术的引入,使得提升过程可实现全自动装卸载、智能调速、故障预警与应急联动,大幅提升了系统整体运行品质。

2 煤矿机电运输自动化关键技术

2.1 感知层: 多源异构信息融合

自动化系统的有效运行首先依赖于对井下环境与设备状态的全面、实时、精准感知。在复杂恶劣的矿井环境中,单一传感器难以满足多维信息获取需求,因此必须构建由多种类型传感器组成的异构感知网络。设备状态监测方面,振动、温度、电流

电压等传感器被广泛部署于电机、减速器、滚筒等关键部件,用于捕捉异常运行特征;环境安全监测则依靠甲烷、一氧化碳、粉尘浓度及温湿度传感器,确保运输过程始终处于安全阈值内。对于移动设备如电机车和单轨吊,其精确定位是实现自主运行的前提,目前普遍采用UWB、RFID、惯性导航与视觉SLAM等多技术融合方案,以克服单一技术在遮挡、漂移或精度方面的局限。此外,高清视频监控结合人工智能图像识别算法,可对皮带跑偏、堆煤、异物侵入、人员违规闯入等异常行为进行自动识别与告警^[2]。所有感知数据通过工业以太网或5G专网汇聚至边缘计算节点,在此进行初步的数据清洗、时间同步、特征提取与多源融合,为上层控制与决策提供高可信度的信息输入。

2.2 控制层: 智能协同与闭环反馈

在感知信息的基础上,控制层负责执行具体的自动化操作,并实现设备间的协同与闭环调节。带式输送机智能控制系统摒弃了传统的恒速运行模式,转而采用“煤流追踪+变频调速”策略,即根据上游给煤机的出煤量预测和下游煤仓的料位状态,动态调整各段皮带的运行速度,从而在保证运输连续性的前提下最大限度减少空载能耗。同时,系统集成软启动/软停止技术,有效缓解启停过程中的机械冲击,并配备撕裂、打滑、堵转等多重故障保护机制,可在毫秒级时间内触发紧急停机,防止事故扩大。矿用电机车无人驾驶系统则通过高精度定位、激光雷达环境建模与V2X通信技术,实现自主路径规划、多车协同避碰、装卸点自动对位及远程应急接管功能,彻底改变依赖司机目视操作的传统模式。单轨吊自动调度系统依托数字巷道地图与中央任务分配算法,能够动态规划最优运行路径,协调多台设备有序作业,避免冲突并提升巷道通行效率。立井提升系统自动化则聚焦于提升过程的精细化控制,通过高性能PLC与变频驱动技术,实现±5cm级别的精准停靠、智能加减速曲线优化、钢丝绳张力在线平衡以及与井口信号系统的全自动联动,显著提升提升效率与安全性。

2.3 决策层: 数据驱动与智能优化

决策层是自动化系统的“大脑”,其核心在于利用大数据与人工智能技术,从海量运行数据中挖掘价值,实现从被动响应到主动预测、从经验调度到智能优化的转变。依托工业互联网平台构建的运输系统数字孪生体,不仅能够以三维可视化方式实时展示设备状态、物流流向与能耗分布,更为关键的是支持深层次的智能分析。例如,通过建立设备健康指数模型,结合历史运行数据与实时监测参数,可提前数天甚至数周预测关键部件的潜在故障,从而实现预测性维护,避免非计划停机^[3]。在调度层面,系统可综合考虑当日生产计划、各运输设备健康状态、巷道通行能力及能源价格波动等因素,动态生成全局最优的运输调度方案,实现资源的高效配置。此外,能效管理模块通过对各环节能耗的精细计量与分析,识别出如空载运行、频繁启停等能耗浪费点,并提出错峰运行、负载均衡等节能策略,助力矿井实现绿色低碳运营。

3 典型应用案例分析

3.1 案例一: 某千万吨级矿井主运输系统自动化改造

某千万吨级现代化矿井原有8条主运皮带长期处于分散控制、人工巡检状态,存在能耗高、故障响应慢、运维成本高等问题。实施自动化改造后,系统在关键设备上部署了200余个传感器,构建了覆盖全运输线的感知网络,并建立了中央集控室,实现了“一键启停、无人值守”的运行模式。通过引入煤流追踪算法,系统能够根据实际煤量动态调节皮带速度,使平均运行速度降低15%,年节电量超过300万度。同时,故障诊断与保护系统将非计划停机时间减少了60%,故障响应时间由原来的小时级缩短至分钟级,显著提升了主运输系统的可靠性与经济性。

3.2 案例二: 某深部矿井电机车无人驾驶项目

在某深部矿井-800米水平大巷,传统电机车运输依赖司机与信号工协同作业,劳动强度大且存在安全隐患。该项目部署了5台具备L4级自动驾驶能力的蓄电池电机车,采用UWB与惯性导航融合定位技术,定位精度达到±10厘米。系统实现了24小时连续自主运行,运输效率较人工模式提升25%,并成功取消了跟车工与信号工岗位,单班减员8人。更重要的是,通过V2X通信技术,无人驾驶电机车可与风门、道岔等基础设施自动联动,彻底杜绝了因人为误操作导致的安全事故,显著提升了辅助运输的本质安全水平。

4 存在问题与挑战

尽管自动化技术在煤矿机电运输领域取得显著进展,但其深度推广仍面临多重现实挑战。首先,行业标准体系尚不健全,不同厂商设备采用的通信协议(如Modbus、CAN、Profibus等)互不兼容,导致系统集成困难,形成一个个“信息烟囱”,严重制约了数据的横向贯通与纵向协同。其次,部分高可靠性、高精度的核心传感器(如本安型激光雷达、光纤光栅应变传感器)仍严重依赖进口,不仅成本高昂,还存在供应链安全风险。再次,井下通信基础设施虽有5G井下试点,但受限于巷道结构复杂、电磁干扰强等因素,覆盖范围有限,Wi-Fi6、TSN(时间敏感网络)等高带宽、低时延技术尚未大规模部署,难以支撑高清视频回传与毫秒级控制指令传输^[4]。此外,现有人工智能模型多基于特定矿井的历史数据训练而成,泛化能力较弱,面对不同地质条件、设备配置或工况变化时表现不佳,亟需发展迁移学习、小样本学习等先进算法。最后,无人驾驶、远程操控等新模式在安全认证、责任界定、法规监管等方面缺乏明确依据,相关标准与法规滞后于技术发展,成为制约其规模化应用的重要制度障碍。

5 发展趋势与建议

面向未来,煤矿机电运输自动化应朝着更高层次的智能化迈进。首要任务是构建“云-边-端”协同的新型架构:在端侧强化设备嵌入式智能,实现本地快速响应与初级决策;在边缘侧部署高性能计算单元,处理实时控制逻辑与数据预处理;在云端则承载大数据分析、模型训练与全局优化任务,形成“感知-决策-执行-反馈”的完整闭环。其次,应加快推进统一标准体系建设,制定涵盖通信接口、数据格式、安全协议等方面的国家标准或行业规范,鼓励开放平台与开源生态发展,打破厂商壁垒,促进系统互联互通。第三,需加大国产化核心器件的研发投入,支持产学研联合攻关,突破高可靠性本安型传感器、专用控制器等“卡脖子”技术,实现关键设备自主可控。第四,应深化数字孪生与人工智能的深度融合,构建高保真度的运输系统虚拟映射,结合强化学习、知识图谱等前沿技术,推动系统从“状态可知”向“行为可塑”“决策自主”跃迁。最后,必须同步完善法规政策与人才培养体系,出台无人驾驶矿车安全准入与责任认定规范,建立自动化系统运维工程师认证制度,加快培养既懂矿业工程又掌握信息技术的复合型人才,为智能化转型提供坚实支撑。

6 结语

煤矿机电运输系统的自动化是实现智能矿山建设的核心支撑。本文研究表明,通过多源感知、智能控制与数据驱动决策的深度融合,自动化技术已在提升运输效率、保障安全生产、降低运营成本等方面展现出巨大价值。未来,随着“云-边-端”架构的成熟、标准体系的完善以及AI技术的持续突破,煤矿机电运输系统将逐步迈向“全自主、自适应、自优化”的高级智能化阶段。这不仅将彻底改变传统煤矿的作业模式,更将为我国煤炭工业的绿色、安全、高效发展注入强劲动力。

[参考文献]

- [1]李永玲.自动化技术在煤矿机电运输系统中的应用研究[J].凿岩机械气动工具,2025,51(08):228-230.
- [2]朱效民,马磊.煤矿机电运输系统中自动化技术的应用分析[J].当代化工研究,2025,(15):130-132.
- [3]谢东力.煤矿机电运输系统中的自动化技术探索[J].内蒙古煤炭经济,2025,(12):169-171.
- [4]万雷.煤矿机电运输系统自动化技术应用研究[J].中国机械,2025,(04):81-84.