

煤矿机电智能化与井下安全管理融合

郭瑞祥

山西石泉煤业有限责任公司 山西 长治 046203

摘要: 煤矿井下作业环境复杂恶劣, 五大自然灾害并存, 安全生产面临严峻挑战。随着新一代信息技术快速发展, 煤矿机电智能化升级为安全管理提供了新路径。本文系统分析煤矿机电智能化体系架构与核心技术, 深入探讨其与安全管理融合的内在逻辑与关键机制, 提出“实时感知—动态诊断—智能决策—自动执行”全链条融合框架, 并从设备状态监测、瓦斯灾害防控、水害预警、人员安全保障等维度阐述融合应用路径。研究表明, 两者深度融合能实现从“人防”向“技防”的根本转变, 有效提升煤矿本质安全水平, 为煤炭行业高质量发展提供有力支撑。

关键词: 煤矿机电; 智能化; 安全管理; 融合机制; 灾害预警

引言: 煤炭作为我国主体能源地位短期内不会改变, 但安全生产形势依然严峻。近年来煤矿事故数据显示, 顶板、瓦斯和水害事故仍占较大比重, 暴露传统安全管理在感知能力、响应速度和决策水平等方面的不足。以物联网、大数据、人工智能为代表的新一代信息技术正深刻改变煤矿生产运行方式, 机电设备智能化水平显著提升, 为破解安全管理难题提供了技术可能。然而, 当前煤矿机电智能化系统与安全管理系统往往各自独立运行, 数据孤岛问题突出, 协同效应未能充分发挥。本文从系统架构、融合机制和应用路径三个层面进行系统探讨, 以期为煤矿智能化转型升级提供参考。

1 煤矿机电智能化系统概述

1.1 发展历程

煤矿机电智能化经历了从单机自动化到系统智能化再到全面智能化的演进。早期以 PLC 和微型计算机应用为标志, 煤矿主要环节实现局部自动化控制, 但系统间相互独立。随后, 随着工业以太网技术成熟, 煤矿走向综合自动化, 实现主要运输、提升、通风、排水等系统远程集中监控。近年来, 大数据、云计算和 AI 技术快速渗透, 煤矿机电向智能化跨越发展。在国家政策推动下, 煤矿智能化建设进入全面提速阶段。目前国内已建成数百个智能化示范煤矿, 采煤工作面智能化程度显著提升, 固定场所无人值守逐步普及, 正从“单系统智能”向“全矿井协同智能”纵深推进。

1.2 体系架构

煤矿机电智能化系统划分为设备感知层、数据传输层、平台支撑层和智能应用层四个层级。设备感知层由各类智能传感器、执行器、嵌入式控制器和智能设备终

端组成, 负责采集生产系统运行参数和环境数据, 执行上层控制指令。数据传输层承担数据上行和控制指令下行通信任务, 骨干网普遍采用万兆工业以太环网, 配合 4G/5G、WiFi6 等无线接入, 实现井上井下无缝覆盖。平台支撑层包括数据存储计算平台、数据中台、AI 算法平台和数字孪生平台, 对多源异构数据进行融合治理, 提供智能模型训练部署服务^[1]。智能应用层涵盖智能采掘、运输、通风、排水、供电等生产子系统, 以及智能预警、调度、决策等安全管理子系统, 通过统一平台实现数据共享和业务协同。

1.3 关键技术与核心装备

感知技术方面, MEMS 传感器、光纤光栅传感器、激光甲烷传感器等逐步替代传统传感器, 分布式光纤测温与振动监测技术在胶带运输、供电电缆和围岩监测中实现长距离分布式感知。控制技术方面, 基于 MPC 和自适应控制的智能系统改变传统 PID 模式, 采煤机记忆截割与自动调高、液压支架电液控制等成熟应用使综采工作面实现常态化少人化运行。数据分析方面, CNN 用于振动信号故障特征提取, LSTM 用于设备剩余寿命预测, 知识图谱用于构建安全知识库。数字孪生作为新兴集成技术, 构建矿井全要素数字孪生体, 实现运行状态实时映射、仿真推演和优化决策。

2 煤矿井下安全管理现状与挑战

2.1 安全管理主要内容

煤矿井下安全管理涵盖“人、机、环、管”四大要素。设备设施安全管理侧重于机电设备完好状态、保护装置可靠性和安全设施有效性, 核心目标是防止设备故障引发事故。作业环境安全保障涵盖通风、瓦斯抽采、

防突、防治水、防灭火、粉尘防治和顶板管理等,重点将环境参数控制在安全阈值以内。人员安全行为管理包括安全培训、操作规程执行和个体防护,着力消除人的不安全因素。从业务流程看,安全管理包含危险源辨识、风险评估、过程监控、预警报警、应急处置和持续改进的闭环过程。

2.2 传统安全管理面临的主要问题

感知能力不足是最突出短板。传统监测以固定点式传感器为主,点位有限、覆盖不完整,定期巡检方式难以发现早期潜在故障,离散和主观的点检数据影响状态评估准确性。信息孤岛严重制约效率。通风、瓦斯抽采、机电控制、人员定位等系统分属不同专业,数据不互通、业务不协同,管理人员需从多个系统分别获取信息后人工比对,应急场景下缺乏有效联动更加致命。预警能力薄弱使管理长期处于被动响应^[2]。多数系统采用简单阈值比较,阈值偏保守致误报频繁,偏宽松致漏报,缺乏趋势分析能力,难以实现超前预警。

2.3 智能化转型对安全管理的新要求

首先,安全管理须从“辅助功能”上升为“核心业务”,理念和功能需深度嵌入生产控制各环节。其次,须从“人的决策”走向“数据驱动决策”,建立新的分析模型和决策机制,管理人员需具备数据思维。再次,须从“单点监测”走向“系统协同”,与生产控制、设备管理、调度指挥等深度协同,形成安全闭环,组织架构、业务流程和考核体系均需相应调整重构。

3 机电智能化与安全管理融合的内在逻辑

3.1 理论基础

从系统论看,煤矿是“人一机一环”耦合的复杂巨系统,机电智能化提升“机”子系统能力,安全管理关注整体风险可控性,融合本质是将智能化贯穿安全全流程实现系统整体功能最优。从信息论看,安全管理是信息获取、传输、处理和应用过程,智能化大幅提升信息感知广度深度精度,为安全决策提供前所未有的数据基础。从控制论看,安全管理是对安全状态监测、比较和校正的控制过程,智能化使控制回路从开环走向全闭环、从人工走向自动、从事后走向前馈,实现控制品质的飞跃。

3.2 动力机制

技术进步是推动力,物联网、5G、云计算边缘计算、AI 算法、数字孪生等技术成熟使过去难以实现的

安全管理功能具备可行性。政策驱动是引导力,国家先后出台多项政策明确智能化建设要求,部分地区将融合

3.3 关键要素

数据融合是机电智能化与安全管理融合的底层基础。企业应建立统一的数据采集、存储与共享标准,打通各机电装备、安全监测系统壁垒,对多源异构数据进行汇聚、清洗与融合,构建涵盖设备运行、环境条件、人员行为的安全生产数据视图,消除信息孤岛。模型融合为核心支撑,整合设备机理模型、数据分析模型与安全评价模型,建立机电工况与安全风险的量化关联,实现设备异常到风险预警的转化。流程融合是长效保障,把智能模块嵌入安全管理业务,重构传统管理流程,借助信息平台实现巡查、隐患治理等业务线上自动运转,保障融合体系持续落地^[3]。

4 融合的系统架构与关键机制

4.1 “感知—诊断—决策—执行”融合框架

实时感知层对井下“人一机一环”进行全域全时多维数字化感知,多维协同监测振动、温度、电流、电压及瓦斯、风速、温湿度、粉尘等,结合 UWB 定位和行为识别实现人员精准感知,输出结构化信息包。动态诊断层部署信号处理、异常检测、剩余寿命预测等智能算法模型,回答当前是否正常、原因何在、还能维持多久等问题,输出风险等级和故障类型。智能决策层采用规则推理、案例推理和智能优化相结合,综合评估后制定最优处置策略,输出带优先级和时间窗口的动作指令。自动执行层将控制指令通过 PLC/DCS 下发给设备,管理指令通过信息系统通知责任人,预警报警多渠道发布并跟踪反馈,形成闭环。

4.2 数据驱动的安全态势感知机制

多源数据融合将各子系统结构化和非结构化数据进行时空对齐和语义融合,构建统一安全生产数据模型,如关联采煤机截割电流与瓦斯浓度分析截割强度对瓦斯涌出的影响。态势特征提取利用特征工程和深度学习从融合数据中自动提取幅值、趋势、频谱等信号特征及设备运行模式、环境变化规律等语义特征,构成高维描述向量。态势评估与预测采用层次分析和模糊综合评判进行等级评定,利用时间序列预测模型动态修正,实现对安全态势的持续跟踪。

4.3 基于知识图谱的智能预警机制

知识图谱构建从煤矿安全领域本体设计开始,涵盖设备故障模式、事故致因链、环境危险条件、人员不安全行为等核心概念及关系,融合设计资料、事故报告、操作规程、专家经验,采用人工构建与自动抽取相结合的方式形成安全知识图谱。基于图谱的预警推理利用图结构关联推理能力,检测到异常时多跳推理推测次生风险和演化路径,如瓦斯涌出增大时不仅发出超限预警,还推理影响范围、关联设备和联动措施。预警分级发布和协同处置根据紧迫程度和影响范围分级,通过移动终端实时推送至责任人,确保信息传达到位、响应及时。

4.4 机电设备健康管理 with 故障预测

每台关键设备拥有唯一数字身份,记录全生命周期信息,建立含运行效率、振动烈度、温升速率、绝缘性能等多维指标的健康评价模型进行量化评分和等级划分。故障预测利用机器学习识别早期征兆,采用振动分析诊断轴承故障、油液分析评估磨损状态、热成像检测电气接头过热,利用 LSTM 神经网络预测滚动轴承等关键部件剩余寿命。将设备健康信息融入安全管理,使管理人员前瞻性掌握设备故障可能时间及后果,在制定采掘计划时将设备健康状态作为重要参考,优化检修时机和内容,避免过度维修和维修不足。

5 融合应用的关键路径

5.1 智能通风与瓦斯灾害融合防控

智能通风系统构建“感知—分析—控制”闭环调控体系。感知端布设高精度风速传感器、数字化气压计和瓦斯传感器网络实时获取通风网络参数。分析端建立数字化模型,利用在线仿真实时解算通风系统状态,快速识别瓶颈和异常区域。控制端通过远程控制自动风门、可调风窗和变频风机实现风量精准按需分配。瓦斯融合防控将抽采参数、通风参数、采掘活动和地质构造数据融合分析,建立涌出动态预测模型,当预测瓦斯涌出可能超限时提前预警并自动调整通风参数,联动采煤机降低截割速度或停机,实现从被动“超限后处置”向主动“超限前预防”转变^[4]。

5.2 智能供电与水文预警融合应用

智能供电系统融合应用体现在供电设备健康管理和供电可靠性保障。通过绝缘监测、局部放电监测和温升监测对开关柜、变压器、电缆进行在线评估,识别潜在故障提前安排检修;发生供电故障时具备自动隔离和快

速自愈功能,优先保障通风、排水、提升等安全负荷供电连续性。水文预警方面,将水文监测系统与供电、排水系统联动融合,通过井下水位监测点、地面水文观测孔数据结合微震和电阻率监测构建多参数预警模型,异常时自动评估突水风险等级,启动应急预案自动开启排水泵站、关闭防水闸门、发布撤离指令,供电系统健康状态作为应急决策约束条件。

5.3 人员精准定位与应急管理融合

基于 UWB 的井下精准定位系统实现静态定位精度 30 厘米以内,结合惯性导航和气压测高实现三维精确定位,实时统计各区域人员分布、监测进入危险区域、追踪行走轨迹,紧急时快速统计出险区域人员数量和身份。将定位信息与设备控制和安全预警深度融合,当人员进入采煤机、掘进机等运行区域时自动识别危险接近并触发减速或停机;当区域安全参数异常时自动向该区域人员广播预警并指引撤离路线;在瓦斯突出、透水等紧急情况下,结合人员分布、通风状态和逃生路线通行条件动态规划最优撤离方案,通过定位终端导航指引。

结束语

本文从煤矿机电智能化系统建设与安全管理需求出发,系统探讨了两者融合的理论基础、内在逻辑、系统架构和应用路径。研究表明,两者深度融合涉及感知方式、分析模式、决策机制和执行体系的全方位变革。通过构建“实时感知—动态诊断—智能决策—自动执行”闭环融合框架,将多源数据多维融合分析,可实现从被动应对向主动防控转变,显著提升煤矿本质安全水平。展望未来,随着矿山大模型、具身智能机器人等新技术成熟,融合将向泛在感知、深度智能、自主协同方向演进,数字孪生实现安全态势超前推演,共同构成煤矿智能化高质量发展的有机整体,为行业本质安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 杨府. 基于物联网的煤矿井下机电设备安全供电技术[J]. 自动化应用, 2026, 67(6):267-269.
- [2] 陈喆, 王云飞, 郭程. 煤矿井下机电设备智能化改造的研究与应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(1):151-153.
- [3] 乔富国. 煤矿井下机电设备安全供电技术探讨[J]. 中国设备工程, 2025(21): 45-47.
- [4] 赵飞宇. 基于多传感器技术深度融合的煤矿井下安全监控技术研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(13):301-303, 307.