

智能化煤矿安全生产管理系统的构建与优化

徐 伟 王海波 辛 颖

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司露天矿 内蒙古 锡林郭勒 026200

摘 要：煤炭作为我国重要能源，其安全生产至关重要。传统煤矿安全生产管理模式存在效率低、风险预警不及时等问题。本文阐述了智能化煤矿与安全生产管理系统概念，提出系统构建方案，包括硬件架构、软件架构及核心功能模块，并指出系统集成要点。从技术、管理流程、评估与迭代三方面提出优化策略，涵盖算法模型、通信网络、硬件设备升级，业务流程再造、人机协同机制完善、培训体系强化，以及多维度评估、闭环迭代、风险动态监测等内容，旨在提升煤矿安全生产管理水平。

关键词：智能化煤矿；安全生产管理系统；构建方案；优化策略

引言：随着信息技术发展，智能化煤矿成为趋势。智能化煤矿安全生产管理系统借助物联网、大数据、人工智能等技术，可实现对煤矿生产全流程的实时监测、风险预警与科学决策。本文旨在探讨该系统的构建与优化策略，为煤矿安全生产提供技术支撑与管理借鉴，推动煤炭行业向智能化、安全化方向发展。

1 智能化煤矿和安全生产管理系统的概念

1.1 智能化煤矿的概念

智能化煤矿其核心在于利用物联网、大数据、人工智能（AI）、5G通信、云计算等前沿技术，对煤矿生产全流程进行感知、分析、决策与控制，实现煤炭资源安全、高效、绿色开发。从技术层面看，智能化煤矿通过部署大量智能传感器、智能装备和通信网络，构建起覆盖井下采掘、运输、通风、排水等环节的感知体系。在数据驱动下，基于机器学习算法的分析平台能够对设备运行状态、生产效率和安全风险进行预测，实现预防性维护和精准化管理。从运营模式层面，智能化煤矿打破传统“人海战术”，以少人化、无人化作业为目标，推动管理模式向智能化决策转型。管理层可通过数字孪生技术构建井下三维可视化场景，直观掌握生产动态，快速制定资源调配、灾害防治等策略。

1.2 安全生产管理系统的概念

煤矿安全生产管理系统是以安全生产法律法规、行业标准为依据，以“预防为主、综合治理”为原则，涵盖安全监测、隐患排查、风险预警、应急处置等核心功能，形成闭环管理机制。在功能架构上，安全生产管理系统分为多个层次：感知层依托各类传感器和监测设备，实时采集井下环境、设备运行、人员行为等数据；传输层通过5G、工业以太网等通信技术，将数据快速、稳定地传输至数据处理中心；平台层利用大数据分析技

术，对海量数据进行清洗、整合与挖掘，识别潜在安全隐患；应用层则通过可视化界面，为管理人员提供风险预警、应急指挥、安全培训等功能，辅助科学决策。从管理维度看，安全生产管理系统强调全员、全过程、全方位的参与。它不仅要求技术系统的高效运行，还需配套完善的管理制度和人员培训体系^[1]。如通过人员定位与行为监测功能，可规范矿工操作行为；利用风险分级管控模块，对不同风险等级的隐患采取差异化处理措施；在应急管理方面，系统能够快速启动应急预案，协调救援资源，最大程度降低事故损失。

2 智能化煤矿安全生产管理系统的构建方案

2.1 系统架构设计

2.1.1 硬件架构

硬件架构主要包括以下感知层、传输层和执行层。（1）感知层部署于煤矿井下各关键区域，通过各类传感器实现数据实时采集。如在采掘工作面、巷道、硐室等位置安装瓦斯浓度传感器、粉尘检测仪、压力传感器，用于监测环境参数；在机电设备上部署振动传感器、温度传感器，实时掌握设备运行状态；采用UWB或北斗定位技术，为井下人员和移动设备配备定位终端，实现精准定位。（2）传输层承担数据快速、稳定传输的任务。5G网络凭借其低延迟、高带宽的特性，成为井下数据传输的首选方案，可满足高清视频监控、设备远程控制等大流量数据的实时传输需求；对于无法覆盖5G信号的区域，工业以太网作为补充，确保数据链路的完整性。边缘计算节点的部署，可在本地完成部分数据的预处理和分析，减少云端计算压力，提升响应速度。（3）执行层由智能巡检机器人、自动化控制设备等组成。智能巡检机器人搭载高清摄像头、气体检测仪等设备，可自主完成巷道巡检、设备检测任务，替代人工进入高危区域；

自动化控制设备根据系统指令自动调节运行参数，实现少人化、无人化作业。

2.1.2 软件架构

软件架构以数据为核心，分为以下数据中台、智能分析平台和可视化交互界面。（1）数据中台负责数据的清洗、存储与治理，通过ETL技术整合感知层采集的多源异构数据，构建统一的数据标准和存储模型，形成安全生产数据库。（2）智能分析平台基于大数据和AI技术，构建风险预测、设备故障诊断、生产优化等算法模型。利用LSTM神经网络预测瓦斯浓度变化趋势，通过关联规则挖掘分析事故诱因；（3）可视化交互界面采用三维GIS地图和数字孪生技术，将井下生产场景1:1还原，管理人员可通过PC端或移动端实时查看生产动态、设备状态及安全风险，实现“一屏统览”。

2.2 核心功能模块

2.2.1 实时监测模块

实时监测模块实现对井下环境、设备和人员的全方位动态监控。环境监测方面，系统实时采集瓦斯、一氧化碳、氧气浓度等数据，一旦超过阈值立即触发报警；设备监测通过分析传感器数据，掌握设备运行参数，识别异常振动、过热等故障前兆；人员监测则结合定位系统与行为分析技术，跟踪人员位置、行动轨迹，识别违规操作，并通过语音广播及时提醒纠正^[2]。

2.2.2 风险预警模块

风险预警模块基于历史数据和实时监测信息，通过AI算法实现风险的智能识别与分级预警。系统采用机器学习算法构建风险预测模型，对瓦斯突出、顶板垮塌、透水等灾害进行概率评估；利用知识图谱技术整合安全生产知识库，实现风险原因的智能追溯与关联分析。预警结果根据风险等级划分为蓝色（一般）、黄色（较重）、橙色（严重）、红色（特别严重）四级，通过短信、弹窗、声光报警等多渠道推送至相关人员，确保风险及时处置。

2.2.3 决策支持模块

决策支持模块为管理层提供数据驱动的科学决策依据。在生产调度方面，系统通过优化算法制定采掘计划、设备排班方案，平衡生产效率与安全风险；在资源管理上，根据设备运行状态和物料消耗数据，自动生成备件采购、能源调配计划；系统还可模拟不同决策方案的实施效果，例如模拟瓦斯抽采方案调整对安全生产的影响，帮助管理人员选择最优策略。

2.2.4 应急处置模块

应急处置模块旨在提升煤矿应对突发事件的能力。

系统内置应急预案库，包含瓦斯爆炸、火灾、透水等常见事故的处置流程。当发生事故时，系统自动定位事故位置，分析影响范围，启动相应预案；通过三维地图展示逃生路线，引导人员撤离；同时，系统整合救援资源（如应急物资储备、救护队位置），生成救援方案，并通过视频会议系统实现远程指挥调度，确保应急响应高效有序。

2.3 系统集成要点

智能化煤矿安全生产管理系统集成需解决多系统兼容性、数据交互效率和系统稳定性问题，实现各模块协同运行，具体如下：（1）在技术集成方面，采用微服务架构设计软件系统，将监测、预警、决策等功能拆分为独立服务，通过API接口实现数据共享与功能调用，降低系统耦合度，便于后续功能扩展与维护。在数据集成层面，建立统一的数据标准和通信协议，确保不同厂商设备的数据能够无缝对接；利用消息队列实现数据的异步传输，避免数据拥塞。（2）在系统部署上，采用“云-边-端”协同架构。边缘计算节点负责处理实时性要求高的任务，云端平台承担大数据分析、模型训练等计算密集型任务，移动端应用则为一线人员和管理人员提供便捷的数据查询与操作入口^[3]。

3 智能化煤矿安全生产管理系统的优化策略

3.1 技术层面优化策略

3.1.1 算法模型迭代升级

针对现有AI算法在复杂井下环境中的适应性不足问题，需建立以下持续优化机制。（1）结合煤矿生产实际数据，对风险预测模型进行动态训练，通过迁移学习和强化学习技术，降低模型对历史数据的依赖，提高新场景下的预警准确率。针对瓦斯浓度波动的非线性特征，优化LSTM神经网络参数，增强趋势预测能力；（2）引入联邦学习技术，实现跨煤矿数据协同训练，在保护数据隐私的前提下，提升算法泛化能力；（3）定期开展算法效果评估，淘汰低效模型，更新为更先进的算法框架，适应海量数据处理需求。

3.1.2 通信网络优化

为解决井下信号传输延迟和稳定性问题，需构建混合通信网络架构。在5G网络基础上，部署Mesh自组网作为补充，增强巷道深处、复杂地形区域的信号覆盖；采用网络切片技术，为不同业务划分独立的通信资源，保障关键任务的低延迟传输。优化数据压缩算法，减少非必要数据传输量，降低网络带宽压力；引入边缘计算节点，将设备状态监测、本地报警等实时性任务下沉至边缘端处理，仅将关键数据上传至云端，提升系统响应速度。

3.1.3 硬件设备智能化升级

针对传感器精度下降、设备老化等问题,需分阶段推进硬件智能化改造。优先替换低功耗、高精度的新型传感器,例如采用激光原理的瓦斯传感器替代传统催化燃烧式传感器,提升检测灵敏度和稳定性;对巡检机器人、自动化设备进行模块化升级,增加自适应导航、故障自诊断功能,使其能够在复杂工况下自主避障、修复简单故障;加强设备间的协同性设计,通过统一通信协议实现传感器、执行器与控制系统的无缝对接,避免“信息孤岛”。

3.2 管理流程优化策略

3.2.1 业务流程再造

基于智能化系统功能,重新梳理安全生产管理流程。将传统的“事后处理”模式转变为“事前预防-事中管控-事后复盘”的全周期管理。将隐患排查流程与系统监测数据联动,当系统识别出潜在风险时,自动生成排查任务并推送至责任人员,实现隐患从发现、整改到验收的闭环管理;优化生产调度流程,利用系统决策支持模块自动生成设备维护计划和人员排班方案,减少人为干预导致的效率损耗;建立跨部门协同机制,打破生产、安全、机电等部门的数据壁垒,实现信息共享与流程贯通。

3.2.2 人机协同机制完善

明确智能化系统与人工决策的边界,构建高效人机协同模式。对于实时性强、规则明确的任务由系统自主执行或触发预警;对于复杂决策场景,系统提供数据支持和预案推荐,最终由人工决策。建立人机交互反馈机制,操作人员可通过系统界面反馈算法误判、数据异常等问题,推动系统持续优化;加强岗位技能培训,使员工掌握系统操作、数据分析等技能,避免因过度依赖系统而导致的应急处置能力退化。

3.2.3 培训体系强化

针对智能化系统操作与维护的专业性要求,构建分层分类的培训体系。对一线操作人员,重点培训设备操作、数据查看、简单故障处理等基础技能;对技术人员,开展算法优化、系统调试、数据治理等专项培训;对管理人员,加强智能化管理理念、数据分析决策等能力培养。培训方式采用理论授课、模拟操作、案例研讨相结合,定期组织技能考核与认证,确保员工能力与系统升级同步提升;建立外部专家协作机制,邀请行业技术专家进行技术指导和前沿技术分享。

3.3 评估与迭代优化策略

3.3.1 多维度评估指标体系

构建包含技术、安全、经济等维度的评估指标体系。技术指标关注系统响应时间、数据准确率、算法预警成功率等;安全指标考核事故预防效果、隐患整改率、应急响应效率;经济指标衡量设备维护成本降低比例、生产效率提升幅度等。通过量化评估,定期生成系统运行报告,直观反映系统效能与存在问题。

3.3.2 闭环迭代优化机制

基于评估结果,建立“问题识别-方案制定-实施验证-效果反馈”的闭环迭代流程。若发现某区域传感器数据传输延迟过高,需分析网络拓扑、设备性能等因素,制定升级网络设备或优化传输协议的方案,实施后验证效果并记录经验;建立需求收集渠道,定期收集一线员工、管理人员的使用反馈,将新需求纳入系统迭代计划,确保系统功能与实际业务需求同步更新。

3.3.3 风险动态监测与预案调整

利用系统自身数据监测功能,对优化过程中的潜在风险进行动态跟踪。例如,在算法升级期间,加强对预警准确性的监测,避免因模型调整导致误报漏报;在硬件设备更换时,同步评估设备兼容性风险^[4]。根据风险监测结果,及时调整优化方案,并更新应急预案,确保系统在优化过程中仍能保障安全生产。

结束语:智能化煤矿安全生产管理系统的构建与优化是提升煤矿安全生产水平的关键举措。通过构建完善的系统架构与核心功能模块,并从技术、管理流程、评估与迭代等多维度进行优化,可有效提高系统性能与管理效率。随着技术不断进步,应持续关注系统升级与创新,加强人机协同,完善培训体系,确保系统稳定运行,为煤矿安全生产提供坚实保障,助力煤炭行业高质量发展。

参考文献

- [1]杨玉辉.煤矿安全管理信息系统的构建与效能分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(1):116-119.
- [2]安媛.煤矿安全生产闭环管理的关键技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3):129-132.
- [3]胡云峰.智能化技术在煤矿安全管理中的应用与前景分析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(4):093-096.
- [4]崔振杰,杨晴,刘霄.关于提升煤矿安全生产标准化管理的若干措施[J].山东煤炭科技,2025,43(2):161-164+174.