

智慧矿山建设在采煤工程中的应用

戚慧婷

易普力（新疆）矿山工程有限公司准东分公司 新疆 昌吉 831799

摘要：智慧矿山建设是煤炭工业转型升级的核心方向，其与采煤工程的深度融合正在重构传统开采技术体系。本文系统阐述了智慧矿山的技术架构及其在采煤工程中的多层次应用，涵盖智能感知、自动化截割、远程控制、灾害预警及全流程协同管理等关键环节。研究表明，智慧矿山技术能够有效提升采煤工程的生产效率、安全水平和资源回收率，但同时也面临数据融合、系统兼容性和井下复杂环境适应性等现实挑战。本文进而提出了优化路径，包括完善统一数据标准、强化边缘计算能力、构建人机协同决策机制等，以期为煤矿智能化建设提供理论参考。

关键词：智慧矿山；采煤工程；智能化开采；物联网；大数据；安全保障

引言

煤炭作为我国主体能源的地位在短期内难以根本改变，但传统采煤工程长期面临生产效率待提升、安全风险高、作业环境恶劣等突出问题。近年来，随着新一代信息技术与矿山生产的加速融合，智慧矿山建设从概念走向实践，为采煤工程带来了革命性变革。智慧矿山以数字化、网络化、智能化为核心特征，通过将传感感知、数据传输、分析决策与控制执行贯通于采煤全流程，力图实现“少人化、无人化、可视化、可控化”的开采目标。然而，智慧矿山在采煤工程中的落地并非简单的技术叠加，而涉及系统架构重塑、管理流程再造和业务模式创新。当前，关于智慧矿山的研究多侧重于整体框架或单点技术，系统论述其在采煤工程中具体应用逻辑的文献尚显不足。本文立足于采煤工程的实际作业链条，从感知层、传输层、分析层和执行层出发，分析智慧矿山技术的嵌入方式与应用成效，同时审视当前存在的制约因素，并提出针对性优化建议，旨在为煤矿企业推进智能化采煤提供系统性的认识框架。

1 智慧矿山的技术体系与采煤工程适配性

1.1 智慧矿山的概念内涵与目标定位

智慧矿山是指以矿产资源开采全生命周期为对象，以新一代信息技术为手段，通过信息感知、传输、处理与控制的一体化集成，实现矿山生产过程的自动化、信息化、智能化，使矿山具备全面感知、实时互联、动态预测、协同控制和智能决策的能力。其目标定位可概括为“四化”：生产过程的自动化——减少人工直接操作；安全监控的智能化——实现风险超前预警；资源利用的最优化——提高回采率和降低贫化率；管理决策的

数字化——以数据驱动科学管理。智慧矿山不是单一技术的应用，而是一种全新的矿山运行范式，其最终形态是实现采煤工程从“有人值守、机器作业”向“机器自主运行、人员远程监管”的跃迁。

1.2 智慧矿山的基本架构

智慧矿山通常划分为感知控制层、数据传输层、数据分析层与智能决策层。感知控制层依托各类传感器（如压力传感器、位移传感器、气体浓度传感器、视频摄像头等）和执行机构（如电液控阀组、变频器、智能开关等），实现对采煤工作面设备状态和环境参数的实时采集与本地调控^[1]。数据传输层借助有线网络（光纤、工业以太网）与无线网络（WiFi、5G、ZigBee）的混合组网，完成海量数据的高速、可靠传输。数据分析层利用大数据平台和人工智能算法，对地质条件、设备运行数据、历史开采记录进行融合挖掘，形成预测模型与优化策略。智能决策层则将分析结果转化为操作指令，通过协同调度系统下发给各执行单元，形成“感知—传输—分析—控制”的闭环。

1.3 采煤工程对智慧化的特殊需求

采煤工程具有作业空间受限、地质条件复杂多变、设备种类繁多且耦合性强、安全威胁突出等特点，这对智慧矿山技术提出了特殊要求。首先，感知系统须具备高抗干扰能力和低延时响应，因为井下粉尘、水雾、电磁干扰严重，且采煤机截割过程对控制的实时性要求极高。其次，数据传输需兼顾带宽与可靠性，采煤工作面不断推进，网络拓扑需要动态适应。再次，分析决策算法必须适应煤层厚度变化、断层构造等不确定因素，具备较强的鲁棒性。最后，执行层面要求机电设备具有智

能化接口和冗余保护功能,确保在极端工况下仍能安全停机或降级运行。因此,智慧矿山建设不能照搬地面工业互联网的方案,而必须围绕采煤工艺特性进行针对性设计。

2 智慧矿山在采煤工程中的核心应用领域

2.1 地质信息数字化与智能开采规划

采煤工程的第一步是掌握煤层赋存条件。传统方法依赖钻孔勘探和地质报告,信息离散且更新滞后。智慧矿山通过建立三维地质模型,将钻探数据、槽波地震勘探数据、随钻测量数据等融合,形成高精度的动态地质数据库。在此基础上,开采规划系统能够自动生成最优截割路径,调整采高和推进方向,避免因断层或夹矸导致设备损坏。同时,利用机器学习算法对历史开采数据进行反演,可以预测前方地质异常体,实现“预测性截割”,从而减少停机时间和截齿损耗。地质信息数字化还使得资源储量管理更加精准,有助于提高回采率,减少煤炭损失。

2.2 采煤工作面智能感知与自动化截割

采煤工作面的智能化是智慧矿山最核心的应用场景。通过在采煤机、液压支架、刮板输送机上安装大量传感器,系统可以实时获取滚筒位置、牵引速度、截割阻力、支架压力、运输机负荷等参数。基于这些数据,智能控制系统能够实现自适应截割——根据截割阻力自动调节滚筒转速和牵引速度,防止过载闷车;根据支架压力变化自动完成移架、推溜和支护动作,保证顶板管理的及时性和均衡性^[2]。此外,惯导系统和激光雷达技术的应用,使得采煤机能够记忆截割轨迹,并在下一刀次进行误差补偿,从而实现工作面调直和自动化跟机。这些功能共同支撑了“无人跟机、有人巡视”的生产模式,大幅减少了工作面作业人员数量。

2.3 远程可视化控制与少人化开采

智慧矿山建设的重要目标是将操作人员从危险的工作面现场撤离至地面或井下安全硐室。依托高速工业网络和高清视频监控,操作人员可以通过集控中心的大屏幕实时查看采煤机运行状态、支架动作序列、运输系统流量以及工作面全景画面。结合设备工况数据和视频图像,操作员可对采煤机进行远程启停、调速和方向控制,对支架进行成组动作干预。更为先进的是,部分系统已实现基于视频 AI 分析的自动跟机——系统通过识别采煤机位置和滚筒高度,自动触发支架的收打护帮板和推移动作,无需人工介入。远程控制的实现不仅提升了安全性,还改善了作业环境,使采煤工程从“高危体

力劳动”向“监控决策型”转变。

2.4 智能通风与灾害动态预警

瓦斯突出、煤尘爆炸、顶板垮落和水害是采煤工程的主要安全威胁。智慧矿山将安全监控系统与生产过程深度融合,实现了灾害的早期识别和主动防控。在通风方面,智能通风系统根据工作面推进速度和瓦斯涌出量实时调节风量分配,确保有害气体浓度始终处于安全限值以下。在瓦斯抽采方面,利用浓度和流量传感器进行精细调控,提高抽采效率。对于顶板灾害,通过微震监测、应力计和位移计组成的围岩稳定性监测网络,结合大数据分析建立预警模型,当顶板来压步距异常或应力集中系数超限时,系统自动发出报警并联动支架增压或建议放缓推进速度。水害预警则依托水文观测孔和涌水量实时监测,结合水位动态曲线进行趋势判断。这些应用将被动式事后响应转变为主动式事前预防,显著增强了采煤工程的安全保障能力。

2.5 采煤全流程协同调度与智能决策

采煤工程不是孤立的截割作业,而是涉及掘进、采煤、运输、提升、洗选等多环节的大系统。智慧矿山通过建设统一的协同管控平台,将各子系统数据汇聚至“矿山大脑”,实现全流程的优化调度。例如,当刮板输送机负荷增大时,系统可自动降低采煤机牵引速度,避免压溜事故;当主井提升能力饱和时,系统协调工作面放慢割煤节奏,防止堆煤堵塞。同时,生产调度系统结合设备健康管理数据,合理安排检修窗口,避免突发故障导致停产^[3]。在决策层面,基于数字孪生技术构建的虚拟采煤工作面,可以模拟不同开采参数下的产量、功耗和安全性,辅助管理人员制定最优的生产计划。这种全局协同模式打破了传统采煤工程中各环节信息孤立的局面,提升了整体运营效率。

3 当前智慧矿山应用面临的制约因素

尽管智慧矿山在采煤工程中展现出显著优势,但其深度应用仍面临多重制约。其一,数据融合难度大。不同厂商的传感器、控制器和通信协议互不兼容,导致数据格式异构、接口不统一,海量数据难以有效整合和利用。其二,井下复杂环境对设备可靠性和通信稳定性构成持续挑战,高温、高湿、强震动的工况使得传感器漂移和失效频发,影响了控制精度和预警可信度。其三,智能化算法对高质量标注数据的依赖较强,而煤矿井下难以获取大量带标签的训练样本,导致模型泛化能力不足,尤其在遇到未学习过的地质条件时,系统可能做出错误判断。其四,人员素质和管理模式尚未跟上技术发

展步伐,一线操作人员对智能系统缺乏深入理解,过度依赖自动控制而忽视人工干预能力的保持,可能引发新的安全风险。此外,智慧矿山的建设投入成本高,中小型煤矿在资金和技术力量上存在较大缺口,制约了先进技术的普及。

4 优化智慧矿山采煤应用的路径与策略

4.1 建立统一的数据标准与开放平台

为解决异构系统集成难题,应推动制定煤炭行业统一的智能矿山数据接口标准,规范感知数据格式、通信协议和设备互操作规范。鼓励建设开放式工业互联网平台,采用微服务架构和中间件技术,使不同厂家的子系统能够“即插即用”。同时,构建煤矿大数据共享机制,在确保安全隐私的前提下,实现地质数据、设备故障数据和开采案例的跨矿交流,从而丰富训练样本,提升模型泛化能力。

4.2 强化边缘智能与容错控制能力

考虑到井下通信带宽和延时限制,不宜将所有数据上传至云端处理。应在采煤工作面部署边缘计算节点,就近完成数据预处理、特征提取和实时控制决策,只有关键决策摘要和长期统计信息上传至中心云。边缘节点应具备冗余设计和故障自诊断功能,当通信中断或传感器失效时,能够切换至本地保守控制模式,保证采煤机安全停机或低速运行,避免失控风险^[4]。同时,研发抗污染、抗振动的新型传感器,提升感知系统的环境适应性。

4.3 构建人机协同的柔性决策机制

智能化不等于完全无人化,采煤工程的复杂性和不可预见性决定了人工决策不可替代。应建立“机器执行—人工监督—异常干预”的三级人机协同框架。在正常工况下,系统自主运行;当置信度低于阈值或触发多重冗余校验不一致时,系统主动向操作员发出提示并请求干预。操作员通过增强现实(AR)终端获得数据可视化辅助,快速判断并下达指令^[5]。这种柔性机制既发挥了机器的高效精确优势,又保留了人类的经验判断能力,有助于平衡自动化水平与系统可靠性。

4.4 推进分层级智能化建设与渐进式升级

针对不同规模煤矿的实际情况,不宜追求“一步到位”的全智能化。建议将智慧矿山建设划分为基础自动化、局部智能化、全面智能化和自主开采四个层级。中小型煤矿可优先实现设备远程控制和基本安全预警,大型矿井则着力于全流程协同和自适应决策。通过渐进式升级,逐步积累数据资产和运维经验,培养专业人才队伍,最终实现采煤工程的全面智能转型。

5 结语

智慧矿山建设正在深刻改变采煤工程的技术面貌,从地质感知、自动截割、远程控制到灾害预警和协同调度,智能技术已渗透至采煤作业的每一环节。实践表明,智慧化手段能够有效提升生产效率、降低安全风险、改善劳动条件,是煤炭工业高质量发展的必然选择。然而,我们也应清醒认识到,当前智慧矿山应用仍处于快速发展但尚未成熟的阶段,数据孤岛、环境适应性、算法可靠性和人员匹配等问题有待攻克。未来,随着5G+工业互联网、数字孪生、人工智能大模型等新技术的进一步融入,采煤工程的智能化水平将迈向更高台阶。但无论技术如何演进,坚持工程实际导向、注重人机协同、尊重渐进规律,始终是智慧矿山建设应遵循的基本原则。期待在产学研用的协同努力下,智慧矿山能够真正实现“安全、高效、绿色、智能”的开采愿景,为我国能源安全保障提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王国法,刘峰,孟令宇,等.煤矿智能化建设理论体系与发展方向[J].煤炭学报,2023,48(1):1-18.
- [2] 张良,李首滨,黄曾华,等.基于5G的智能采煤工作面关键技术研究[J].工矿自动化,2024,50(2):1-9.
- [3] 毛善君,陈华州,李梅,等.数字孪生驱动的智慧矿山管控平台研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):1-10.
- [4] 王虹,姜德义,陈结,等.煤矿智能感知与安全预警技术进展[J].中国安全科学学报,2023,33(5):1-8.
- [5] 刘志强,尹世杰,付国军,等.基于边缘计算的采煤设备故障诊断方法[J].煤矿机械,2024,45(3):45-49.