

Application of Intelligent Technology in Metal Mining

Junsheng Ma

Wuchuan County Jinyulin Mining Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 011700, China

Abstract

The mineral resource development sector is undergoing profound digitalization and intelligent transformation, with metal mining being a particularly prominent field. Intelligent technologies redefine production processes and management models, driving mines to transition from labor-intensive operations to technology-driven systems. This study focuses on the core advantages of intelligent applications, analyzes their critical technological support systems, and explores deep integration practices across multiple scenarios. It systematically demonstrates how technology reshapes the future of mining into more efficient, safer, and environmentally sustainable operations, providing actionable insights for industry transformation and upgrading.

Keywords

intelligent mining; digital twin; autonomous driving; mine Internet of Things

智能化技术在金属矿采矿中的应用

马俊生

武川县金煜林矿业有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 011700

摘要

当前矿产资源开发正经历一场深刻的数字化与智能化变革, 这场变革在金属矿开采领域表现尤为显著。智能技术通过重新定义生产流程与管理模式, 推动矿山从劳动密集型向技术驱动型转变。本论述聚焦智能化应用带来的核心优势, 剖析其关键支撑技术体系, 并探讨多场景下的深度融合实践, 旨在系统呈现技术如何重塑矿业高效、安全、绿色的未来形态, 为行业转型升级提供清晰的实践图景。

关键词

智能采矿; 数字孪生; 无人驾驶; 矿山物联网

1 引言

在国家矿山安监局、应急管理部联合印发《关于深入推进矿山智能化建设 促进矿山安全发展的指导意见》(矿安〔2024〕42号)的明确指引下, 以及国家矿山安全监察局综合司最新颁布的《金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)》(矿安综〔2025〕20号)的具体部署中, 金属矿开采行业的智能化转型被提升至保障国家资源安全与实现高质量发展的战略高度。面对资源与安全环保的双重压力, 智能化已成为矿山发展的必然选择。其核心在于构建“感知-互联-分析-决策-控制”的智慧化体系, 重塑全链条运营模式, 系统解决生产效率、安全管控与可持续发展难题。

2 智能化技术在金属矿开采中的优势

2.1 提升生产效率与资源利用率

通过在生产全流程部署传感网络与智能控制系统, 矿山实现了从“经验驱动”到“数据驱动”的根本转变。爆破设计、配矿、铲装运输等关键环节得以动态优化与精准协同。例如, 智能调度系统可依据矿石品位分布与设备实时状态, 自动规划无人驾驶矿卡的最优路径, 大幅减少空驶与等待。选矿过程的磨矿细度与药剂添加也由智能模型实时控制, 稳定并提高精矿品位与回收率。这种全流程的闭环优化, 显著提升了装备综合效率与资源综合利用水平, 在降低能耗物耗的同时, 保障了生产组织的稳定性与高效性。

2.2 构建主动预防型安全体系

智能化技术构建了覆盖“人、机、环”的立体化安全防护网络。借助遍布井下的微震监测、应力应变、气体传感与视频监控, 矿山实现了对岩爆、突水等重大风险的全天候、超前预警。人工智能算法能深度分析风险前兆信息, 推动安全管理从被动响应转向主动预防。在危险区域, 远程遥控或自主作业的智能装备替代人工作业, 实现了“机械换人”。

【作者简介】马俊生(1973-), 男, 中国内蒙古乌兰察布人, 工程师, 从事地下采矿技术与安全管理研究。

同时,智能通风、人员精确定位与个体状态监测,为井下人员提供了全方位保障。这构建了一个以本质安全为目标、人机环和谐共生的新型安全生态。

3 金属矿开采应用的具体智能化技术

3.1 矿山物联网感知技术

矿山物联网感知技术是智能化矿山的数据基石,旨在构建覆盖“地质体-工程体-设备-人员”的全要素、全天候、高精度感知网络。该技术通过部署耐恶劣环境的智能传感器,如用于岩体稳定性监测的微震传感器、用于应力监测的光纤光栅传感器、用于气体浓度监测的多参数气体传感器,以及用于人员与设备定位的 UWB(超宽带)定位基站与标签。在线品位分析仪与矿仓雷达等设备,可实时监测矿石成分与物料流量。这些感知终端通过 5G、工业环网与 Wi-Fi 6 等高速、可靠、低时延的通信网络,将海量、多源的实时数据汇聚至数据中心,从而打通信息壁垒,构建一个数字化的透明矿山,为上层智能应用提供源源不断的鲜活数据。

3.2 数字孪生建模与仿真技术

数字孪生建模与仿真技术是矿山智能决策与优化的核心引擎。它基于物联网采集的实时数据与地质、工程等多源信息,在虚拟空间中构建一个与物理矿山动态同步、高度保真的数字镜像模型。这个模型不仅包含三维地质体、巷道工程、生产设备等静态几何信息,更集成了岩体力学、设备运行状态、生产流程等动态物理规律与业务逻辑(如图 1)。通过此技术,技术人员可在虚拟环境中对开采计划、爆破参数、通风方案、设备调度等进行仿真推演与优化迭代,提前预测不同方案下的生产效果与安全风险,从而在实际操作前获得最优决策。该技术将传统的经验决策转变为基于模型与数据的科学决策,极大提升了矿山规划与运营的精准性与前瞻性。



图 1 数字孪生建模与仿真技术在矿山应用中的实时监测图

3.3 露天矿无人驾驶运输技术

露天矿无人驾驶运输技术是实现露天矿山“少人化、无人化”生产的关键执行技术。该技术融合了高精度定位、多传感器融合感知、智能决策规划和车-路-云协同控制等子技术。无人驾驶矿用卡车搭载激光雷达、毫米波雷达、摄

像头与组合导航系统,实现对周围环境、障碍物及自身位姿的精确感知(如图 2)。车辆控制单元依据中央调度系统下达的任务指令,自主规划行驶路径,完成从电铲装载点到破碎站卸矿点的全流程自动驾驶,包括循迹行驶、精准停靠、自动装卸与动态避障。车-路-云通过 5G/V2X 技术实时通信,调度中心可对车队进行全局协同优化。此项技术已在中国、澳大利亚等国的多个大型露天矿山实现规模化商业应用,显著提高了运输效率与安全水平。



图 2 露天矿无人驾驶运输技术实际工作图

4 智能化技术在金属矿开采中的多场景深度融合应用

4.1 矿山物联网感知技术在资源勘查与开采设计中的应用

矿山物联网感知技术的应用彻底改变了资源勘查与开采设计的工作模式,使其从传统的离散化、阶段化作业,转向动态化、一体化的“智慧勘探”与“协同设计”。在资源勘查阶段,搭载高光谱成像仪、磁力仪的无人机可快速对勘探区域进行大面积扫描,采集海量地表物化探数据。这些数据通过物联网网络实时回传至数据中心,经智能算法处理后,能够自动识别地质构造线和矿化蚀变带,显著提高找矿靶区的圈定效率和准确性。

钻探工程实施过程中,物联网的价值得到进一步深化。安装在钻机上的传感器实时监测钻进参数,如钻速、扭矩、泥浆压力等,这些“钻进特征”数据与随钻测量的伽马测井、电阻率数据同步传输。结合岩芯扫描仪获取的高分辨率光谱与影像信息,物联网系统构建了钻孔轨迹上的“数字岩芯”。这些连续、多维的数据流,为地质工程师动态更新三维矿体模型提供了前所未有的数据支撑。传统的资源模型往往基于有限、离散的取样数据,存在较大的推断不确定性,而物联网带来的连续数据流使模型能够更精细地刻画矿体形态、品位分布及地质构造,实现了“透明化”储量估算。在开采设计环节,基于高精度的动态地质模型,设计工作得以在更加可靠的基础上展开。设计人员利用智能设计软件,能够综合考虑矿岩力学参数、地下水文条件、开采设备能力等多重约束。例如,在露天矿最终境界优化中,系统可基于物联网实时更新的边坡岩体监测数据,动态评估边坡稳定性,优化

边坡角设计,在保障安全的前提下最大化资源回收率。对于地下矿山的采场结构参数与支护设计,物联网提供的岩体应力、位移实时监测信息,使设计从静态的、经验性的方案,转变为基于实时岩体响应的动态、优化性方案。

4.2 数字孪生建模与仿真技术在生产调度与流程优化中的应用

数字孪生建模与仿真技术为矿山生产运营构建了一个高保真、可计算的“虚拟平行矿山”,成为实现生产流程全局优化与动态调度的核心中枢。该技术通过集成物联网采集的实时数据,在虚拟空间中同步映射物理矿山的所有关键要素,包括地质矿体、开拓系统、采掘设备、运输网络、选矿流程乃至能源消耗。这使得管理人员能够在统一的数字平台上,直观、量化地审视从爆破、铲装、运输到破碎、选矿的全链条生产过程。在实际应用中,数字孪生系统首先用于生产的“预演”与“推演”。

例如,在编制露天矿短期生产计划时,调度员可在孪生环境中导入设备状态、矿石品位分布、天气预测等信息,对不同的电铲-卡车调度方案进行模拟仿真。系统能够精确计算每种方案下的矿石产量、入选品位、设备利用率、燃油消耗等关键绩效指标,并预测可能发生的卡车排队、破碎站拥堵等瓶颈问题。经过多次迭代对比,可以筛选出综合效率最高、成本最优的生产调度预案,从而实现“先优化,后执行”。在地下矿山,数字孪生技术同样至关重要。通过模拟不同出矿顺序下的采场应力重分布,可以评估岩爆风险,优化开采顺序以控制地压。在生产执行层面,数字孪生体与物联网实时数据流保持同步,成为监控与干预实际生产的“仪表盘”。当实际生产偏离预定计划时,如某台关键设备突发故障,系统可立即在虚拟环境中评估此事件对整体生产链的影响,并快速重新仿真,生成新的应急调度方案,指导现场调整。

4.3 露天矿无人驾驶运输技术在智能采区协同运行中的应用

露天矿无人驾驶运输技术是推动露天矿山生产模式变革的关键使能技术,其核心价值在于实现了“智能采区”内多设备的高效、安全、协同无人化作业。一个典型的无人驾驶运输系统并非仅仅是单车的自动化操作,它实际上是一个高度集成的、由“车-路-云”三大核心要素构成的复杂协同系统。在这一系统中,智能车辆、智慧道路基础设施以及

云端控制平台通过高效的信息交互与协同运作,共同实现了运输过程的自动化、智能化与网络化管理。

在具体应用场景中,多台无人驾驶矿用卡车与智能电铲、远程遥控推土机、智能洒水车等设备,在统一的中央调度系统指挥下,组成一个高度协同的作业编队。中央调度系统如同“智能大脑”,它基于数字孪生平台提供的全局模型和实时物联网数据,综合考虑电铲作业位置、矿石质量需求、卡车实时位置与状态、破碎站受矿仓料位、道路状况乃至天气条件,运用先进的优化算法,为每一辆无人驾驶矿卡动态分派最优的运输任务。这包括指令其前往指定的电铲装载、规划最经济的行驶路径、以及在破碎站指定卸料口排队与卸矿。整个流程中,人工调度员的角色从繁琐的实时对讲与派车指令中解放出来,转变为监控系统运行、处理少量异常情况的高层级管理者。无人驾驶矿卡自身集成的环境感知系统,包括激光雷达、毫米波雷达、摄像头和全局导航卫星系统,使其能够在复杂、动态的矿区环境中实现精准循迹、自主避障和定点停靠。车辆与基础设施之间通过 5G/V2X 通信技术实时交换信息,实现“车路协同”,例如在弯道盲区提前预警对向来车。

5 结语

智能化技术在金属矿开采中的深度融合,标志着矿业发展进入了以数据和模型为核心驱动的新阶段。从立体感知到数字孪生,再到自主执行,技术集群的系统性应用不仅解决了效率与安全的传统难题,更开创了精细化开发与可持续发展新模式。尽管在标准统一、系统集成和人才培养等方面仍面临挑战,但智能化转型的路径已然清晰。展望未来,随着技术迭代与生态完善,一个更高效、更安全、更绿色的现代矿业体系将加速形成,为保障资源安全与产业进步奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 冯智伟,李鑫.智能化技术在金属矿山采矿中的应用[J].冶金与材料,2025,45(9):76-78.
- [2] 刘高栋,代志奇,周童,等.智能化技术在金属矿采矿中的应用与安全考量[J].冶金与材料,2024,44(12):148-150.
- [3] 余辉.金属非金属矿山采矿中自动化与智能化技术应用研究[J].当代矿工,2025(6):29-30.
- [4] 靳程,吴育章,叶凤娟.崩落采矿法在金属矿山开采中的安全性与效率研究[J].冶金与材料,2025,45(9):181-183.