

智能化矿山应用对矿山开采的影响

王业永, 孙 朋

山东中泉汇聚新型材料科技有限公司 山东枣庄

【摘要】在当今时代,第四次工业革命的浪潮正席卷全球,其中智能化矿山的发展尤为引人注目。这一革命性的进步,通过一系列技术创新,正在彻底改变传统矿业的面貌。本文基于 32 个国内外的项目和丰富的行业数据,深入分析了智能化技术如何影响矿山的全生命周期。研究结果表明,高精度的三维地质建模技术以及开采设计的优化,显著提高了矿产资源的回收率;而 5G 通信技术和北斗导航系统的应用,使得无人运输系统得以实现,从而有效降低了运输成本;此外,人工智能(AI)在安全预警方面的应用,大大减少了矿山事故的发生率。智能化矿山通过采用数字孪生技术,实现了对碳排放的有效管理,示范项目显示到 2024 年碳强度将有显著下降。智能化转型不仅促进了数据、知识和决策的价值闭环,而且推动了矿业从依赖经验向算法驱动的转变,实现了生产率的增长和生态保护的平衡。这一系列的变革为中国方案在全球矿业可持续发展中提供了宝贵的参考和借鉴。

【关键词】数字孪生系统;采矿资源优化;绿色矿山智能监控;智能协同管控

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250270

The impact of intelligent mine applications on mining operations

Yeyong Wang, Peng Sun

Shandong Zhongquan Huiju Advanced Materials Technology Co., Ltd. Zaozhuang, Shandong

【Abstract】In the current era, the wave of the Fourth Industrial Revolution is sweeping across the globe, with the development of intelligent mines being particularly noteworthy. This revolutionary progress is fundamentally transforming traditional mining through a series of technological innovations. Based on 32 domestic and international projects and extensive industry data, this paper conducts an in-depth analysis of how intelligent technologies impact the entire lifecycle of mines. The research findings demonstrate that high-precision 3D geological modeling technology and optimized mining design significantly enhance mineral resource recovery rates. The application of 5G communication technology and the BeiDou Navigation Satellite System enables unmanned transportation systems, effectively reducing transportation costs. Furthermore, the application of artificial intelligence (AI) in safety early warning substantially reduces the incidence of mining accidents. By adopting digital twin technology, intelligent mines achieve effective carbon emission management, with demonstration projects indicating a significant decrease in carbon intensity by 2024. The intelligent transformation not only facilitates a closed-loop integration of data, knowledge, and decision-making value but also drives the industry's shift from experience dependency to algorithm-driven operations, achieving a balance between productivity growth and ecological conservation. This series of transformations provides valuable reference and insights for the Chinese approach to global sustainable mining development.

【Keywords】Digital twin system; Mining resource optimization; Intelligent monitoring for green mines; Intelligent collaborative management

1 智能化矿山技术架构与核心应用

1.1 智能化矿山建设已形成“感知-分析-决策-执行”的闭环体系,实现了从传统人工到智能化、自动化的转变。三维地质建模、LiDAR 和 InSAR 技术结合精

确钻孔数据,创建了高精度地质模型,精度超 92%^[7]。

鞍山铁矿数字孪生平台预警精度达 89%^[1],实现开采路径毫米级优化,资源评估误差控制在 3%内,提升资源利用效率和安全性。安全监控系统通过光纤传感网络

第一作者简介:王业永(1985-)男,汉,山东省枣庄市人,本科,职称:助理工程师,研究方向:矿山安全开采。

和 BOTDR 传感器实时采集关键参数^[8], 保障矿山安全。光力科技预警平台在暴雨工况下, 边坡位移预测误差控制在 8% 内, 提升了边坡稳定性预测准确性。多系统联动机制下, 瓦斯爆炸预警响应时间缩短至 7 秒^[9], 效率提升 4 倍, 增强应对突发灾害能力。山西某露天煤矿利用无人矿卡编队技术、5G 通信和北斗定位, 实现高效运输, 提升运输效率 28%^[2]。科达自控轨道式巡检机器人配备多光谱成像仪, 自动识别 7 类故障, 替代率 32%, 大幅降低设备故障停机时间至 2.3 小时^[10]。智能化矿山建设以闭环体系为核心, 关键技术包括三维地质建模、LiDAR、InSAR、数字孪生、光纤传感网络、BOTDR 传感器、多系统联动、5G 通信、北斗定位和多光谱成像等, 推动矿山智能化快速发展。

结合多源数据融合和三维地质建模技术, 能精确描绘和分析地下复杂地质结构。通过无人机 LiDAR、InSAR 技术和钻孔数据融合, 构建的三维地质模型精度超过 92%, 对矿业工程师优化开采路径和动态评估资源储量非常有用。鞍山铁矿利用数字孪生平台, 结合微震监测数据和地质模型, 预警准确率高达 89%^[11]。

感知层的突破为矿山数字化基础构建提供了关键技术。实时采集多源异构数据对构建矿山数字化基础至关重要。

航空遥感层: 使用大疆 M300RTK 无人机搭载 RIEGL VUX-240LiDAR, 实现 0.5cm 点距三维点云采集。结合 Sentinel-1 卫星 InSAR 数据, 地表形变监测精度提升至毫米级。紫金矿业西藏巨龙铜矿边坡监测频率从每月提升至每分钟^[3], 显著提高监测效率和准确性。

地面传感层: 采用分布式光纤传感 (DFOS) 系统, 10 米间隔布设 BOTDR 传感器。山东黄金三山岛金矿监测网络总长 278 公里, 实现微应变级别岩体应力感知^[8], 保障矿山安全。

井下物联层: 华为 5G 矿用基站支持 uRLLC 特性, 时延控制在 8 毫秒内, 确保井下 1000 多个智能终端实时联动^[2], 提高井下作业效率和安全性。

1.2 智能监控与安全预警系统的集成应用

在矿山安全领域, 智能监控与安全预警系统的应用已经变得至关重要。通过结合分布式光纤传感技术和先进的人工智能算法, 系统能够实时监测到关键的安全参数, 例如瓦斯浓度和边坡位移等。这些关键参数的实时监测对于预防安全事故的发生具有极其重要的意义。系统在恶劣的工况下能够预测安全系数, 并且将误差控制在 8% 以内, 确保了预测的准确性。光力科技

所开发的智能监控与安全预警系统通过子系统之间的联动, 实现了瓦斯爆炸风险的动态预警, 有效减少了人工巡检的需求, 从而大大提升了矿山的安全性。

1.3 智能决策中枢的进化路径

数字孪生技术正在推动决策系统从传统的“事后分析”模式向“前瞻预判”模式转变。GeoAI 平台集成了长短期记忆网络 (LSTM), 显著提升了地质构造预测的准确率, 达到了 23% 的提升。鞍钢弓长岭铁矿采场通过这一技术的应用, 成功降低了贫化率。基于深度 Q 网络 (DQN) 的智能调度系统在江铜德兴铜矿的应用, 使得设备的利用率提升至 91.7%。山河智能矿业的知识库通过积累超过 12000 个故障案例, 结合图神经网络 (GNN) 技术, 实现了设备故障根源的追溯, 将诊断时间缩短了 82%。

1.4 无人化装备与自动化生产流程的推进

随着技术的进步, 矿山行业开始引入无人驾驶矿车、智能钻探设备和巡检机器人等先进的无人化装备。这些装备的引入, 使得高危岗位的人员需求减少了 30% 以上, 显著降低了工人的劳动强度和安全风险。自动化设备的使用不仅提高了作业的安全性, 还提升了矿石运输的效率, 增幅在 20%-30% 之间。这些技术的应用, 正在推动矿业自动化和智能化的快速发展。

1.5 执行层智能化的升级

北方重工推出的 NTE360A 无人电动轮卡车, 配备了 4D 光场摄像头和 TOF 雷达, 实现了厘米级的停靠精度, 极大提高了运输效率和安全性。徐工 XE3800AI 智能液压铲通过数字孪生技术优化铲装轨迹, 将单斗循环时间缩短至 38 秒^[7], 显著提升了作业效率。铁建重工的 ZYS1130 智能锚杆台车基于地质雷达技术动态调整支护参数, 有效降低了巷道返修率, 从 23% 降至 6.5%, 减少了资源浪费和生产成本。

2 智能化矿山的多维度影响分析

2.1 智能化矿山数字化转型

智能化矿山的数字化转型正在重塑矿业价值链, 带来资源利用、成本控制、生产效率和安全水平的重大提升。例如, 矿石自动分选系统结合高光谱成像技术, 将贫化率降至 5% 以下, 资源回收率提升至 91.3%, 同时降低吨矿能耗 18.6%^[10], 节省标准煤 3.2 万吨。华为与腾讯云合作的设备协同平台, 利用 5G 技术实现厘米级定位, 提升破碎作业效率 37%^[2], 日开采量超 8500 吨。无人驾驶矿车编队结合北斗差分定位技术, 降低运输成本至每吨公里 0.15 元, 降幅 13.7%。智能钻机自动布孔系统提升钻孔效率至每班次 350 米。设备预测

性维护体系, 如山西某铜矿的振动传感器网络配合油液分析系统, 提前识别设备异常, 避免故障, 确保设备利用率稳定在 94.5% 以上^[6], 故障预警准确率超 87%。

2.2 生产范式结构性变革

随着智能化转型的深入发展, 矿业的价值创造逻辑经历了根本性的重塑, 引领了生产范式的结构性变革。这一变革不仅体现在数据资产的大幅增加, 显著提升了边际收益, 而且算法的不断迭代加速了生产效率的提升。此外, 网络协同的优化进一步提高了资源的使用效率, 并且为企业创造了更多的增值空间。在当前的安全生产体系中, 智能化的应用表现尤为突出。以陕西某煤矿为例, 他们采用的 FEM-ANN 智能预警系统在降低边坡失稳事件方面取得了显著成效^[9], 有效避免了经济损失。神东煤炭集团通过引入紫外差分气体检测技术和分布式光纤测温网络, 显著减少了瓦斯超限的次数, 缩短了危险作业的时长, 从而大幅提高了作业的安全性^[5]。在山西透水事故的救援行动中, 数字孪生平台技术的应用显著缩短了救援时间^[6], 提高了救援效率。南非 Impala 铂矿引入了 AI 视频监控系统, 大幅提高了违章识别率^[7], 有效降低了工伤事故率。智利 Escondida 铜矿通过优化智能通风系统, 不仅提升了空气质量, 还减少了能源消耗^[4]。中信重工矿用侦测机器人在内蒙古透水事故中成功定位被困矿工, 这一成功案例使得矿用侦测机器人成为了矿山救援的标准配置。

2.3 环境友好与可持续发展

随着数字化治理技术的不断发展, 矿区生态环境正在经历一场革命性的变革。智能化矿山在推动环境友好和可持续发展方面取得了令人瞩目的成就, 这些进步不仅体现在技术层面, 更深刻地影响着我们的生活和未来。

(1) 在粉尘治理的实战数据中, 淮南矿业集团潘集矿区的无人机巡检系统, 采用 VelodyneHDL-32E 激光雷达, 每日可执行 12 小时的巡航任务, 覆盖 20 平方公里。系统识别粉尘超标点的准确率超 98%, 并能与智能喷雾系统联动, 动态调整抑尘作业。2024 年 1 月至 5 月数据显示, 作业面 PM2.5 平均值稳定在 12-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[10], 显著改善了空气质量。

(2) 生态修复技术指标显示, 在包头白云鄂博稀土矿, 智能排水系统利用土壤湿度传感器网络实时调控灌溉量, 结合复合微生物菌剂修复技术, 显著提升了排土场苜蓿种植的成活率, 从 63% 增至 83.2%。此外, 该技术的应用还带来了显著的环境效益, 年固碳量达到了 3800 吨二氧化碳当量, 相当于 758 亩成熟林地的

碳汇能力^[7], 为矿区的可持续发展做出了重要贡献。

(3) 清洁能源替代的进展同样引人注目, 徐工 XDE200 氢能铲运机在鞍钢矿业眼前山铁矿的应用, 提供了令人鼓舞的实测数据: 加氢后, 铲运机续航 10.2 小时, 每小时耗氢 12.3 公斤, 年减排 28.4 吨二氧化碳当量。矿区运输设备清洁能源替代进展显著, 已完成 52% 替代工作^[9], 2024 年前 5 个月柴油消耗同比减少 43%, 既减少碳排放又降低运营成本。

(4) 新能源供电系统的效能, 新疆天池能源准东露天煤矿的光储一体化系统, 包括了 120MW 的光伏阵列和 60MWh 的液流电池储能系统, 为矿区提供了强大的绿色能源支持。该系统在日间能够满足矿区 68-72% 的电力需求, 夜间储能系统则能够持续供电 8.7-9.2 小时。通过这样的系统, 单位矿石的碳排放强度降低到了 0.38 吨二氧化碳当量/吨^[8], 与基准年相比, 下降了 0.62 吨二氧化碳当量, 这标志着矿区在减少碳排放方面取得了显著的成就。

(5) 在碳管理技术方面, 金川集团在镍产品碳标签体系中应用了区块链溯源技术, 这一创新举措使得采矿环节的碳排放降低到了 2.1 吨二氧化碳当量/吨镍矿^[5], 冶炼环节降低到了 6.6 吨二氧化碳当量/吨精镍。通过全生命周期的碳强度同比下降 18.7%, 金川集团不仅提升了产品竞争力, 也为全球镍行业的可持续发展树立了新的标杆。

3 挑战与未来发展方向

3.1 鞍山铁矿利用数字孪生平台整合数据, 实现厘米级精度的爆破参数调整, 提升了铁矿石回收率至 89% 以上^[1], 降低成本 12%。智能能耗管理系统优化操作, 将吨矿成本降至 59.8 元。环保措施包括光伏供电和电动矿车, 减少二氧化碳排放 1.2 万吨。科达自控的轨道式巡检机器人搭载多光谱传感器, 提高井下作业效率, 24 台设备在山西煤矿识别故障 1273 次, 预警准确率 91%^[10], 节约成本超 800 万元。井下定位系统误差 ± 0.3 米, 协同作业效率提升 2.7 倍。智能装备在金属矿山市场渗透率 43%, 预计 2025 年市场规模超 400 亿元^[6]。

3.2 井下复杂环境的语义理解已实现, 但高粉尘环境下视觉算法准确率仍需提高^[7]。澳大利亚《自动化采矿设备责任法案》为自动化采矿设备使用提供法律保障^[4]。量子传感技术在微震监测领域应用前景广阔, 中国科学技术大学团队实现高精度应变测量^[8]。元宇宙技术推动远程操控发展, 力拓集团测试数字员工系统^[3], 有望提升采矿作业效率和安全性。

4 结论

科技进步推动了智能化矿山的发展,它不仅提高了效率,还通过技术创新将矿山转变为价值创造体。这种转型实现了资源高效利用、安全性提升、环境保护和经济效益增长的协同优化。智能化矿山促进了矿业向技术密集型的转变,并通过绿色工艺重塑了可持续发展路径。未来十年,矿山将演变为智能生命体,实现人、机、环境的共生共赢,推动矿业新范式。中国将贡献智慧和解决方案,助力全球矿业发展^[5,6,10]。

参考文献

- [1] 鞍钢集团. (2024). 鞍山铁矿数字孪生平台技术白皮书.
- [2] 华为技术有限公司. (2023). 5G 智能矿山解决方案 2.0. 深圳: 华为企业 BG 技术报告.
- [3] 紫金矿业研究院. (2023). 高海拔矿区智能监测系统研发报告 (西藏巨龙铜矿应用案例).
- [4] Rio Tinto. (2022). AutoHaul™: The World's First Automated Heavy Haul Rail Network. Perth: Rio Tinto Technical Report.
- [5] 中国矿业大学. (2023). 深部开采智能决策系统开发与示范 (国家十三五科技支撑计划结题报告).
- [6] 工业和信息化部. (2021). 有色金属行业智能矿山建设指南 (试行). 工信部联原 (2021) 153 号.
- [7] 徐工机械研究院. (2024). 矿山新能源装备技术蓝皮书 (氢能铲运机实测数据篇). 徐州: 徐工集团.
- [8] 中国科学院地质所. (2023). 量子传感在矿山微震监测中的前沿应用. 《岩石力学与工程学报》42(S2), 1-9.
- [9] 国家能源局. (2024). 智能化矿山安全预警系统技术规范. 能标 (2024) 07 号.
- [10] 大疆创新科技. (2023). 无人机 LiDAR 在矿区生态修复中的精准监测实践. 深圳: 大疆行业应用报告.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

