

# 矿山机电设备智能化升级的关键技术与发展趋势研究

皇中位

昆明煤炭设计研究院有限公司 云南 昆明 650000

**摘要：**矿山机电设备智能化升级以智能感知、物联网、边缘计算、AI决策为核心技术，通过多源传感器融合实现设备状态实时监测，依托5G/6G网络构建互联体系，利用深度学习与强化学习算法优化故障预测及作业路径规划。发展趋势呈现技术融合特征，如数字孪生支持全生命周期管理、量子计算优化通风网络设计，同时向全矿井协同、服务商模式转型，并推动零碳矿山与稀土资源循环利用，实现安全、高效、绿色的可持续发展目标。

**关键词：**矿山机电设备；智能化升级；关键技术；发展趋势

引言：在矿业数字化转型与“双碳”目标驱动下，矿山机电设备智能化升级已成为行业高质量发展的必由之路。传统矿山设备存在信息孤岛、能耗高、人工依赖性强等痛点，而5G、人工智能、工业互联网等新兴技术的融合应用，为设备自主感知、智能决策与协同作业提供了技术支撑。本文系统剖析智能感知、边缘计算、数字孪生等关键技术体系，探讨技术融合、产业协同与绿色低碳发展趋势，旨在为矿山智能化建设提供理论参考与实践路径。

## 1 矿山机电设备智能化升级的理论基础

### 1.1 矿山机电设备分类与智能化需求

(1) 采掘设备：作为矿山生产核心设备，需实现工况实时监测与自适应调节。掘进机需通过智能定位系统精准控制截割路径，减少超挖欠挖；采煤机需结合煤层厚度动态调整截割高度，同时具备故障预警功能，避免停机影响生产效率，核心需求聚焦于“精准作业+故障预判”。(2) 运输设备：需解决长距离、高负荷运输中的效率与安全问题。皮带机需智能监测跑偏、打滑等异常，自动调节张紧度；矿用卡车需通过路径优化算法规划运输路线，结合载重感应实现负载均衡，降低能耗，核心需求为“高效调度+安全防护”。(3) 通风与排水设备：直接关系矿山作业环境安全，需具备动态适配能力。主扇风机需根据井下瓦斯浓度、风量需求自动调节风速；水泵需依据水位变化智能启停，避免空转或溢水，核心需求是“实时响应+稳定运行”<sup>[1]</sup>。

### 1.2 智能化升级的核心理论支撑

(1) 工业物联网（IIoT）与设备互联：通过传感器、RFID等设备采集机电设备的温度、振动、压力等数据，依托5G/光纤网络构建设备互联体系，实现数据实时传输与共享，为智能化分析提供基础，打破“信息孤岛”，支撑多设备协同作业。(2) 数字孪生与虚拟调

试：构建设备虚拟模型，映射物理设备的运行状态，可在虚拟环境中模拟设备启停、故障场景，提前完成调试与优化，减少实体设备停机时间，降低试错成本。(3) 边缘计算与实时决策：在设备附近部署边缘计算节点，快速处理采集的实时数据，无需依赖远程云端，可实现毫秒级响应，如皮带机跑偏时即时触发调节指令，保障设备连续安全运行，避免数据传输延迟导致的事故。

## 2 矿山机电设备智能化升级的关键技术

### 2.1 智能感知与数据采集技术

(1) 多源传感器融合：针对矿山复杂工况，通过多类型传感器协同采集设备运行数据。振动传感器实时捕捉掘进机截割部、电机轴承的振动频率，识别异常磨损；温度传感器监测皮带机滚筒、采煤机齿轮箱的温度变化，预防过热故障；压力传感器感知水泵管路、液压系统的压力波动，避免泄漏；图像传感器结合机器视觉，识别矿用卡车装载量、输送带物料偏移情况。通过数据融合算法消除单一传感器误差，提升数据准确性，为后续分析提供全面、可靠的原始数据支撑<sup>[2]</sup>。(2) 5G/6G低时延通信技术：矿山井下环境封闭、电磁干扰强，5G技术凭借毫秒级时延、大连接数特性，实现传感器数据、设备控制指令的实时传输，保障采掘设备远程操控、巡检机器人协同作业的稳定性；6G技术进一步突破传输带宽与覆盖范围限制，可支持井下高清视频监控、多设备同步调度，解决深井、复杂巷道的信号盲区问题，为设备智能化运行提供高速、可靠的通信保障，避免因通信延迟导致的安全事故与生产中断。

### 2.2 智能决策与控制技术

(1) 基于深度学习的故障预测：利用长短期记忆（LSTM）神经网络对设备历史运行数据（如振动波形、温度变化趋势）进行训练，构建故障预测模型。该模型可捕捉数据中的长期依赖关系，提前识别设备潜在

故障,例如通过分析采煤机电机电流、振动数据,预测轴承磨损程度,提前安排维修;对比主扇风机历史故障数据与实时运行参数,预警风机叶片疲劳损伤,将被动维修转变为主动预防,减少设备停机时间,降低维修成本。(2)强化学习在自主作业路径规划中的应用:将矿山作业环境(如巷道布局、煤层分布、障碍物位置)转化为强化学习的“环境空间”,以设备作业效率(如掘进速度、采煤量)、安全风险(如碰撞概率)为“奖励函数”,让设备自主探索最优作业路径。例如掘进机通过强化学习,在复杂巷道中动态调整截割路径,避开断层、积水区域;矿用卡车通过持续学习优化运输路线,减少转弯次数与空驶距离,提升整体运输效率,实现“自主决策、动态适配”的作业模式<sup>[3]</sup>。

### 2.3 自主执行与机器人技术

(1)矿用巡检机器人:采用同步定位与地图构建(SLAM)技术,巡检机器人可在无预设地图的井下巷道中自主定位、规划巡检路径,通过搭载的传感器(红外、超声)检测设备运行状态(如输送带接头磨损、电缆绝缘层破损);配备机械臂的机器人可完成简单维修作业,如更换故障传感器、紧固松动螺栓,替代人工进入高风险区域(如高瓦斯、高粉尘巷道),降低人员安全风险,提升巡检覆盖率与效率,实现“无人化巡检、自动化维护”。(2)无人驾驶矿卡:融合车路协同(V2X)技术,无人驾驶矿卡可与井下基站、其他设备实时交互路况信息(如前方障碍物、道路坡度),动态调整行驶速度与路线;结合激光雷达、毫米波雷达实现360°环境感知,精准识别行人、其他车辆,避免碰撞;同时支持远程操控模式,当遇到复杂工况(如突发障碍物、极端天气)时,地面操作人员可接管车辆,保障作业安全。相比人工驾驶,无人驾驶矿卡可实现24小时连续作业,降低人工成本,提升运输效率与安全性。

### 2.4 能源管理与绿色技术

(1)电机系统能效优化:针对矿山机电设备中能耗占比高的电机(如水泵电机、风机电机),采用变频调速技术,根据设备实际负载需求动态调整电机转速,例如水泵根据井下水位变化调节转速,避免满负荷运行导致的能源浪费;推广永磁同步电机替代传统异步电机,其效率提升5%-10%,且启动电流小、运行噪音低,适用于采煤机、皮带机等高频运行设备,显著降低矿山整体能耗,实现“按需供能、节能降耗”<sup>[4]</sup>。(2)氢能/电动化设备替代:传统矿山设备多依赖柴油动力,存在尾气污染、噪音大等问题。氢能设备通过氢燃料电池发电,排放物仅为水,零污染、零碳排放,适用于井下封闭环

境;电动铲运机、电动矿卡采用大容量锂电池供电,搭配快速充电技术,可满足高强度作业需求,且运行噪音低、维护成本低。通过氢能与电动化设备替代,减少矿山对化石能源的依赖,降低碳排放与环境污染,契合“双碳”目标,推动矿山绿色可持续发展。

## 3 矿山机电设备智能化升级的挑战与对策

### 3.1 技术挑战

(1)复杂矿井环境下的信号干扰与传输延迟:井下巷道狭窄、岩层结构复杂,且存在电磁干扰、粉尘遮挡等问题,导致5G/6G信号衰减严重,传感器数据传输易中断;深井作业场景中,信号传输距离增加,时延进一步拉长,影响远程操控与实时决策,例如无人驾驶矿卡可能因信号延迟无法及时避让障碍物。(2)异构设备协议兼容性问题:矿山机电设备来源多样,早期设备多采用Modbus协议,新型智能设备则常用OPCUA协议,两种协议数据格式、通信规则差异大,导致设备间数据无法互通,形成“信息孤岛”,阻碍多设备协同作业与智能化调度。(3)算法鲁棒性不足:井下高粉尘、低光照环境易干扰图像传感器采集的画面,导致基于机器视觉的算法(如矿卡装载量识别、输送带故障检测)准确率大幅下降;同时,煤层地质条件突变(如断层、涌水)也可能导致路径规划算法、故障预测算法失效,影响设备稳定运行。

### 3.2 管理挑战

(1)传统矿工技能断层与转型压力:传统矿工长期从事体力操作,缺乏智能化设备(如巡检机器人、远程操控系统)的操作与维护技能;而智能化设备运维需要掌握物联网、人工智能等专业知识,现有人才储备不足,导致设备难以充分发挥效能,同时也给矿工转型带来较大压力。(2)数据安全与隐私保护:智能化升级过程中会产生大量设备运行数据、生产数据,这些数据涉及矿山生产核心信息;若数据传输、存储环节缺乏安全防护措施,易遭受黑客攻击或数据泄露,不仅可能影响生产安全,还可能泄露企业商业机密,造成经济损失。

### 3.3 对策建议

(1)制定矿山智能化标准体系:以现有ISO19439(矿山机械安全标准)为基础,进一步完善设备通信协议、数据格式、安全防护等方面的标准,统一异构设备接口,解决协议兼容性问题;同时明确智能化设备性能指标与测试方法,提升技术与设备的通用性、安全性。(2)开发低代码AI开发平台降低技术门槛:搭建可视化、模块化的低代码平台,将故障预测、路径规划等复杂算法封装为现成组件,矿工或运维人员无需掌握高深

编程知识，通过拖拽、配置即可完成算法部署与设备调试，降低智能化技术的应用门槛，加速技能转型<sup>[5]</sup>。

(3) 建立“政-产-学-研”协同创新机制：政府出台专项扶持政策，引导矿山企业与高校、科研机构合作，针对井下信号干扰、算法鲁棒性不足等技术难题开展联合攻关；同时依托合作平台开展技能培训，定向培养智能化运维人才，缓解技能断层问题，推动技术成果快速转化落地。

#### 4 矿山机电设备智能化升级的发展趋势与展望

##### 4.1 技术融合趋势

(1) 大模型赋能矿山知识图谱构建：依托ChatGPT等大模型的自然语言处理与知识整合能力，可将矿山设备故障案例、维修手册、运行数据等信息转化为结构化知识图谱，实现故障诊断的智能化与高效化。当设备出现异常时，大模型能快速匹配知识图谱中的相似案例，生成维修方案，同时通过持续学习矿山新增数据，不断优化诊断精度，减少人工经验依赖。(2) 量子计算优化复杂矿井通风网络设计：矿井通风网络涉及多巷道风量分配、风机能耗控制等复杂变量，传统计算方法难以快速找到最优方案。量子计算凭借超强并行计算能力，可在短时间内模拟不同通风场景，精准计算各巷道最优风量与风机运行参数，在保障井下通风安全的同时，最大限度降低风机能耗，提升通风系统运行效率。

##### 4.2 产业生态趋势

(1) 从单机智能化向全矿井协同演进：未来矿山将打破设备间的“信息壁垒”，通过工业互联网平台实现采掘、运输、通风等设备的全域数据互联与协同调度。例如采煤机可将煤层信息实时共享给运输设备，动态调整矿卡运输频次；通风设备根据采掘面瓦斯浓度自动优化风量，形成“设备联动、全局协同”的智能化生产模式，提升全矿井生产效率。(2) 服务商模式转型：传统设备销售模式将逐步向“租赁+服务”转型，服务商不仅提供智能化设备租赁，还通过远程监控、预测性维护等服务，保障设备稳定运行。例如矿山企业无需一次性购置昂贵的无人驾驶矿卡，可通过租赁方式使用，服务商

则负责设备的运维、算法更新与数据管理，降低企业前期投入与运营风险。

##### 4.3 可持续发展趋势

(1) 零碳矿山与全生命周期碳足迹追踪：依托光伏、氢能等清洁能源供电，结合设备电动化升级，推动矿山实现零碳排放；同时利用区块链技术构建设备全生命周期碳足迹追踪系统，精准记录设备生产、运输、使用、报废各环节的碳排放数据，为矿山碳减排目标制定与核查提供依据，助力“双碳”目标实现。(2) 稀土资源高效回收与循环利用技术：矿山机电设备中含有的稀土元素（如永磁电机中的钕铁硼），将通过先进回收技术实现高效提取与纯化，再用于新设备制造，减少对原生稀土资源的依赖。同时，设备报废后的核心部件经检测修复后可重新投入使用，形成“资源开采-设备制造-回收再利用”的循环体系，降低资源浪费与环境压力。

##### 结束语

矿山机电设备智能化升级是矿业迈向高质量发展的核心引擎，其融合物联网、AI与数字孪生等技术，已实现设备自主感知、精准决策与绿色运行。未来，随着量子计算、大模型等前沿技术的突破，设备将向全矿井协同、零碳化与全生命周期管理演进，形成“技术-产业-生态”协同创新格局。企业需把握技术融合趋势，构建开放创新生态，以智能化升级推动矿山安全、高效、可持续转型，为全球矿业贡献中国方案。

##### 参考文献

- [1]张琨.浅谈故障检测诊断技术在智能化煤矿机电设备中的应用[J].中国设备工程,2021,(12):185-186.
- [2]霍建良.基于智能化矿山的煤矿机电设备安全技术管理措施研究[J].中国设备工程,2023,(18):28-30.
- [3]张秀宇,付智博,吴季洪.矿山机电设备故障诊断技术发展现状[J].能源与节能,2024,(10):151-153.
- [4]隋世亚.矿山机电设备故障智能化检测系统研究[J].矿业装备,2024,(02):95-97.
- [5]幸伟鹏.基于深度学习的矿山机电设备智能故障预测[J].中国矿业,2024,33(S1):238-240.