

智能矿山建设关键技术与装备发展

马克沙特·居马别克

新汶矿业集团（伊犁）能源开发有限责任公司，新疆伊犁，835302；

摘要：本文围绕智能矿山建设展开研究，首先解析了两大关键技术：物联网技术通过“传感器-通信-云平台”协同构建全要素感知网络，承担数据采集传输基础职能；人工智能技术以机器学习等为核心，推动生产向数据驱动转型。随后重点阐述装备体系构建路径，包括按“云-边-端”分层搭建全域感知终端网络、依据传输需求选型并适配协议的传输体系，以及匹配算力与算法的 AI 智能控制设备部署，还结合矿山实例说明实施细节，最终为智能矿山实现实时管控、数据交互与自主决策提供完整技术方案。

关键词：智能矿山；关键技术；装备

DOI：10.64216/3080-1508.25.09.023

引言

当前传统矿山面临设备管控低效、数据流通不畅等问题，智能转型成为突破瓶颈的关键，而物联网与人工智能技术的发展为这一转型提供了核心支撑。不过，现有智能矿山建设中，常存在终端设备异构导致的数据孤岛、传输网络适配性不足、智能控制落地难等问题。基于此，本文以解决这些实际痛点为目标，先梳理智能矿山建设的关键技术作用，再系统设计装备体系的构建、传输优化与智能控制方案，为矿山智能化落地提供可操作的技术思路。

1 智能矿山建设关键技术

1.1 物联网技术

智能矿山建设需依托物联网技术，构建覆盖矿山全要素互联的“神经末梢”，该技术通过传感器、通信网络与云平台的协同运作，搭建起针对矿山设备、作业环境与人员的实时感知网络，其承担着矿山数据采集与传输的基础性职能。依托物联网技术，能够实现矿山设备的互联互通与运行状态实时监测，完成对矿山环境参数的动态感知以及作业人员的精准定位与安全管控，从而真正实现对矿山全要素信息的实时管控，有效提升矿山整体管理水平。

1.2 人工智能技术

人工智能技术在智能矿山建设中扮演着矿山智能决策“大脑中枢”的关键角色，其通过机器学习、深度学习与计算机视觉等核心技术，赋予矿山自主分析与决策能力，推动矿山生产模式从传统经验驱动向现代数据驱动转型。其中，通过融合卫星遥感数据、地球物理数据以及历史勘探资料构建 AI 预测模型，可实现对矿脉

分布的精准定位，同时基于 AI 算法能够优化传统作业轨迹，动态调整采煤机截割路径。

此外，人工智能还可实现矿山无人化作业、运输安全预警与风险管控，甚至能够从绿色能源管理与生态修复的角度出发，为矿山可持续发展提供技术支撑。

2 智能矿山建设的装备体系构建

2.1 搭建全域感知的物联网终端设备网络，夯实数据采集基础

2.1.1 分层构建

构建全域感知的物联网终端设备网络，需以统一标准、分散部署、动态扩展为核心原则，在终端设备选型层面，需优先选择支持多协议兼容的传感器与终端设备，确保其具备低功耗、高精度、抗干扰的核心特性，同时满足矿山复杂作业环境的适应要求。在此基础之上，需制定设备接口的标准化协议，统一数据格式与传输规则，避免因设备异构性导致数据孤岛问题；在网络架构设计层面，可采用“云-边-端”三级分层框架，在边缘侧远程部署轻量级网关，实现对设备数据的实时采集与初步处理，在终端层构建区域级基层节点，承担数据清洗、特征提取与初步分析的任务，在云层搭建集中式管理平台，负责数据存储、模拟训练与决策支持。通过以上分层框架的协同运作，既能有效降低网络传输压力，又能显著提升数据处理的实效性与可靠性，且这些环节需预留网络扩展接口，支持未来新增设备的无缝接入，以保障网络的可扩展性。

例如，某矿山为夯实数据采集基础，在终端设备选型与分层构建环节，该矿山优先采购具备 ATEX 防爆认证的矿用本安型振动传感器与温湿度传感器，这类传感器不仅能在-30℃至 60℃的环境温度区间内稳定工作，

还能抵抗井下粉尘浓度达 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 的恶劣环境,完全满足矿山复杂作业环境的适应要求;同时,该矿山制定了基于 MQTT-SN 协议的接口标准化规则,统一数据采集格式为 JSON 格式、传输波特率为 9600bps ,有效避免因设备异构性导致的数据孤岛问题。

在网络架构设计上,该矿山采用“云-边-端”三级分层框架,其中边缘侧在井下各水平运输大巷部署 KG3000 型矿用边缘网关,该网关可直接接入周边 200 米范围内的终端设备,实时采集主运输系统电机的振动频率(测量范围 $0\sim 500\text{Hz}$)、输送带的运行速度(测量范围 $0\sim 2.5\text{m}/\text{s}$)等数据,并对采集到的数据进行初步滤波处理,剔除因电磁干扰产生的异常值;终端层依托布置在各采区的 ZB400 型区域级基层节点,对边缘网关传输的数据进行进一步清洗,提取出电机振动峰值、输送带跑偏量(测量精度 $\pm 5\text{mm}$)等关键特征参数,并将处理后的数据按 15 分钟/次的频率上传至云层平台;云层平台选用华为 FusionSphere 工业云平台,配置 8 台 64 核 256GB 内存的服务器,负责存储近 3 年的设备运行数据,同时搭载基于 LSTM 算法的设备故障预测模型,能根据历史数据提前 72 小时预测设备潜在故障,为矿山生产调度提供决策支持;此外,该矿山在边缘网关与基层节点均预留了 LoRa 无线通信接口,支持未来新增的矿用智能定位终端无缝接入,保障网络的可扩展性。

2.1.2 设备部署

后续设备部署的合理性将直接影响数据采集的覆盖范围与质量,相关单位需基于矿山三维地质模型与生产流程图识别关键感知区域,通过空间覆盖算法计算设备部署的最小数量与最优位置,确保无感知盲区。紧接着需结合设备功能特性进行点位匹配,最后建立设备部署的动态优化机制,定期通过数据质量评估反推设备运行状态,对故障设备进行快速替换,对感知覆盖薄弱区域进行补充部署,同时根据生产布局调整实时更新设备位置,确保网络运行与生产需求同步。这一环节需为设备配备自诊断模块,实时监测设备运行状态,并通过网络自动上报异常信息,为动态优化机制提供数据支撑。

例如,上述矿山先通过 Surpac 软件构建精度达 0.1m 的矿山三维地质模型,结合 AutoCAD 绘制的井下生产流程图,明确主运输巷道、采场工作面、提升机房等 18 个关键感知区域;再运用 Delaunay 三角剖分算法计算终端设备的最小部署数量,通过模拟不同部署密度下的感知覆盖范围,最终确定在 12 条主运输巷道各部署 3 台振动传感器、2 台温湿度传感器,在 3 个采场工作面各部署 4 台位移传感器,确保井下所有关键作业区域的

感知覆盖率达到 100%,无感知盲区。在点位匹配环节,该矿山将振动传感器优先部署在主运输巷道的转载点附近,因为这些位置是电机与输送带的连接部位,设备故障发生率较其他区域高 30%,能更精准捕捉设备异常信号;同时,将温湿度传感器部署在距离巷道顶板 0.5m、距离帮壁 1m 的位置,避免因巷道滴水或粉尘堆积影响测量精度。

2.2 构建高速可靠的物联网传输设备体系,保障数据实时交互

在完成全域感知物联网终端设备的布局之后,需进一步构建高速可靠的物联网传输设备体系,以保障数据实时交互。

2.2.1 技术选型

相关单位需以技术适配性、协议兼容性、传输冗余性为基本准则,基于矿山场景的传输需求(如数据传输量、传输距离、实时性要求等核心要素)进行技术选型:对于短距离、低功耗的局部传输,可优先选择低功耗广域网技术,其覆盖范围可达数公里,且具备低功耗特性,能够满足井下设备长期稳定运行的需求;对于中距离、高带宽传输,采用 WiFi6 或 5G 专网技术,其峰值速率可达 10Gbps 以上,可支持大规模数据实时回传;对于长距离、跨区域传输,可结合光纤通信与卫星链路构建“有线+无线”的混合式传输通道,确保在复杂地形条件下通信的连续性。

例如,某露天煤矿基于不同区域传输需求精准匹配技术:针对采场周边传感器(如边坡位移传感器、矿车定位终端)的短距离低功耗传输,优先选用 LoRa 低功耗广域网技术,该技术覆盖半径达 3 公里,单设备工作电流仅 $50\mu\text{A}$,可支持传感器连续运行 18 个月无需更换电池,完全满足露天矿区分散设备的长期稳定传输需求;针对主破碎站、洗煤厂等中距离高带宽场景,部署 5G 专网技术,选用华为 5G 矿用基站,其峰值传输速率达 1.2Gbps ,能实时回传破碎设备高清运行视频(分辨率 4K)与振动数据(采样频率 1kHz),保障设备状态实时监控;针对矿区总部与偏远排土场的长距离跨区域传输,构建“单模光纤+北斗短报文”混合通道,主干路采用 G.652D 型单模光纤(传输损耗 $\leq 0.3\text{dB}/\text{km}$)连接各生产区域,排土场等光纤难以覆盖区域则通过北斗短报文终端(通信速率 1.2kbps)传输环境监测数据,确保复杂地形下通信不中断。

2.2.2 协议适配

在协议适配层面,需统一协议传输标准,优先采用工业互联网领域通用的 MQTT、CoAP 协议,其轻量化设

计可降低传输延时,同时需支持 TCP/IP、UDP 等底层协议的灵活切换,以适配不同传输技术的需求,且需在协议中嵌入拥堵控制与流量调度机制,根据数据优先级动态分配带宽,避免关键数据因网络拥堵导致传输延迟。

例如,上述露天煤矿统一采用 MQTT 协议作为数据传输标准,其轻量化设计使单条数据传输延时控制在 50ms 以内,同时支持 TCP/IP 与 UDP 底层协议灵活切换——5G 专网与光纤传输场景启用 TCP/IP 协议保障数据完整性,LoRa 与北斗短报文场景切换为 UDP 协议降低传输开销;运维团队在协议中嵌入拥堵控制机制,按数据优先级分配带宽:设备故障预警数据(优先级最高)分配 30%带宽,生产监控数据分配 50%带宽,环境监测数据(优先级最低)分配 20%带宽,避免关键数据因网络拥堵延迟。

2.2.3 传输设备部署

传输设备部署的合理性直接影响网络覆盖范围与信号质量,需通过覆盖分析、拓扑优化、冗余设计的策略实现精准配置:基于矿山三维地图与设备分布图,采用路径损耗模型计算不同区域的信号覆盖情况,识别传输盲区,并通过增加中继节点或调整设备发射功率等方式消除盲区;紧接着需根据数据流向与传输距离优化网络拓扑结构,对于数据量小、实时性要求低的场景,可采用星型拓扑简化布线;对于数据量大、实时性要求高的场景,则采用网状拓扑或树状拓扑,通过多路径传输提升可靠性。

最后可构建传输网络冗余机制,在关键节点部署双电路热备份,当主电路故障时自动切换至备用电路,切换时间需控制在毫秒级以内,同时需在传输设备中集成自愈合算法,通过动态链路调整与动态路由优化绕过故障节点,确保网络整体可用性不低于 99.9%。

例如,上述露天煤矿先通过 Okumura-Hata 路径损耗模型计算矿区信号覆盖,发现南边坡区域存在信号盲区后,在盲区增设 3 台 KT250 型矿用中继器(发射功率 27dBm),并将附近基站发射功率从 43dBm 调至 46dBm,彻底消除盲区;再按场景优化拓扑:排土场(数据量小、实时性低)采用星型拓扑,通过 1 台核心交换机连接 20 个终端,简化布线;主采区(数据量大、实时性高)采用网状拓扑,用 12 台华为 AP8050DN-W 矿用 AP 组成多路径传输网络;最后构建冗余机制:在矿区核心交换机节点部署双电路热备份(主电路为光纤、备用为 5G 专网),故障切换时间控制在 30 毫秒内,所有传输设

备集成 OSPF 自愈合算法,可在 2 秒内绕过故障节点,经测试该传输网络整体可用性达 99.92%。

2.3 部署 AI 驱动的智能控制设备,实现生产流程自主决策

AI 驱动的智能控制设备部署,需以算力匹配、算法适配、环境适配为核心原则,科学开展设备选型与算法开发工作。

2.3.1 硬件层面

在硬件层面,相关单位需根据控制场景的复杂度选择适配的算力平台:对于简单控制任务(如皮带机启停、照明调节),可采用嵌入式 AI 芯片,其低功耗特性可满足长期运行需求;对于复杂决策任务(如采掘设备路径规划、灾害预警联动),需部署工业级边缘计算服务器,支持多模态数据实时处理,同时硬件需集成多类型传感器接口,支持与矿山现有设备无缝对接,并通过硬件加密模块保障数据传输安全。

3 结束语

总体来说,本文对智能矿山关键技术与装备体系的研究,为不同类型矿山的智能化改造提供了可复制的参考范式。从行业发展视角看,这一研究成果能推动矿山突破传统生产模式局限,为后续融合数字孪生、绿色能源管理等技术奠定基础,进一步助力矿山行业向高效化、安全化、可持续化的智能发展新阶段迈进。

参考文献

- [1] 姚占辉. 基于数字化技术的矿山自动化智能采矿系统设计与优化[J]. 中国金属通报, 2025, (07): 140-142.
- [2] 王金臣. 市场规模超千亿, 智能矿山建设成为必选项[J]. 中国报道, 2025, (07): 56-59.
- [3] 郭侃. 池州海螺绿色矿山建设探索与实践研究[J]. 中小企业管理与科技, 2025, (12): 88-91+113.
- [4] 钱建生, 郭星歌. 智能矿山零距离走进中国矿业大学对话钱建生教授[J]. 智能矿山, 2025, 6(05): 38-41.
- [5] 李文. 浅谈智能矿山综合管控平台的建设[J]. 能源与节能, 2025, (03): 12-15. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2025.03.097.
- [6] 刘晓兵. 智能矿山背景下的煤矿机电设备管理创新[J]. 能源与节能, 2025, (03): 25-27+31. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2025.03.046.