

铝土矿企业生产运营全过程 数字化管控平台构建措施

吴波

(铝电金海有限公司, 北京 102209)

摘要 针对偏远铝土矿区存在的通信孤岛、恶劣工作环境、结构性人员不足等问题, 为了解决长距离跨域管理和物资调度的困难, 本文构建了一个全过程数字化管控平台, 采用端网边云用五方面共同工作的模式。阐述了下沉边缘算力打通底层断点数据、重新形成虚实映射的跨域集控中枢、依靠状态预判提前维保物资等主要形成方法, 旨在实现了现场高危物理空间和核心操作权的解耦, 依靠底层数据流来精确驱动生产业务流, 达到偏远矿山少人化作业和连续运转的目的, 为同类恶劣场景的数字化重构提供可参考的方式。

关键词 铝土矿企业; 偏远矿区; 生产运营; 数字化管控

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.025

0 引言

随着《金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)》等国家政策的深入推进, 传统矿业的数字化转型已成行业共识。在此宏观导向与客观现实的双重驱动下, 传统的局部自动化改造已难以破局。企业亟须依托工业互联网与先进的信息技术, 构筑跨越物理空间限制的全过程数字化管控体系, 重塑偏远矿山的生产运行逻辑与安全基础。

1 偏远地区铝土矿生产运营的数字化需求分析

1.1 复杂地形与弱网环境下的底层数据贯通需求

偏远铝土矿区处在复杂地貌相互交错的地带, 地形起伏和深凹岩体明显削弱无线信号覆盖和衍射能力, 使采剥作业面长期处在高丢包率和高延迟的弱网环境当中。受到物理信道条件限制, 移动采装设备和现场监测终端所产生的海量时序数据很难达到连续稳定的回传^[1]。大量关键运行参数受阻于信号盲区而滞留于端侧, 不可避免地在物理方面形成了数据孤岛, 在底层传输通道上数据发生堵塞, 会让总控系统不能够及时得到作业现场的信息, 也不能够准确对应现场的状况, 造成生产协同调度响应变慢, 并且产生安全监管的空白区域。

1.2 恶劣环境与用工短缺下的异地集控需求

偏远铝土矿区长期处在高粉尘、强震动、边坡形变等恶劣物理环境之中。这种极端的现场环境让操作

人员的职业健康风险变得更大, 造成一线专业技术人才流失严重和常态化结构性用工短缺发生。传统深度和高危作业面绑定的粗放生产模式, 由于长期存在较大安全隐患, 并且受到劳动力供给不足的限制。在此双重企业受到的挤压情况下, 客观上必须把核心操作岗位和高危采掘工作面在物理空间上实现空间解耦。由此, 矿山必须把附着在生产现场的近程操作属性剥离, 并将采装运和核心环节控制权、调度中枢转移到远端安全区域, 尝试通过异地集控模式对现有的劳动组织架构进行重塑, 这已经成为解决偏远矿区运营停滞、维持连续生产的必要条件。

1.3 偏远区位与物流受限下的智能运维需求

偏远铝土矿大多位于内陆深处, 客观上缺乏核心工业支撑和成熟的供应链枢纽。这种区位上的隔离使矿区物资补给线变长, 重型机电设备在高负荷磨损时, 很容易陷入长时间的非计划停机困境。传统的被动式抢修模式严重依赖外部资源的及时介入^[2]。然而, 长距离物流存在限制, 这大幅延长了备件调拨和专家支援的响应时间, 进而容易导致连续生产链条局部中断。为规避供应链滞后对矿山产能的冲击, 生产运营系统需彻底摒弃对事后维修的路径依赖。企业应尽快建立一种能提前洞察机组劣化的内生机制, 通过精准预判设备运行状态, 来消除物理距离造成的阻隔, 进而在孤岛式工矿环境中实现物资调度与设备运转的动态平衡。

作者简介: 吴波(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 信息化技术。

2 全过程数字化管控平台总体架构设计

铝土矿作为重要的工业原料，其需求量随全球工业化进程不断增长，广泛应用于建筑、交通、电力，以及航空航天、国防科技等尖端产业领域。针对偏远铝土矿区多源异构数据并发与长距离弱网环境的客观矛盾，全过程数字化管控平台在顶层设计上摒弃传统集中式数据处理模式，系统性确立“端—网—边—云—用”五维协同的分布式架构。

2.1 端侧感知与执行层

端侧节点作为物理架构的延伸部分，可以完全覆盖深凹采掘面、排土场和运矿道路。该层级聚合高精度组合导航终端、工况传感器与机载数据网关，可以在粉尘和高频震动环境下将物理实体的状态量进行数字化，并对异构通信协议进行初步标准化。该结构功能主要用来形成最底层的初始数据源，并且可以作为远端控制指令的最末端执行单元。

2.2 网侧异构融合传输层

为解决复杂地貌阻碍物理信道的问题，网络层采用高冗余的异构融合拓扑结构。骨干网利用5G独立专网切片技术，并发低时延控制信令和高带宽视频流进行传输，同时保留平行架构微波通信和宽带卫星链路作为骨干断点后的物理热备份。该层级在云端中枢和边侧节点之间建立起稳健的交互通道，用来对长距离跨区域的数据穿透进行支持。

2.3 边侧计算与控制层

鉴于偏远矿山骨干外网很脆弱，在靠近高频作业面的矿区枢纽处需要配置前置的边缘计算节点。边侧主导海量时序数据在本地进行过滤、视频流在近处完成解析、达到毫秒级别的控制指令即时下发，该层级在系统拓扑中为主要缓冲区，现场主要采剥设备和安全监测子系统在和主网完全断开的孤岛工况下，仍可以维持基本的局部自治及闭环运行。

2.4 云端数据与调度中枢层

云端算力中心整体迁至远离恶劣矿区的城市总部。该层级部署企业级数据中台和工业大模型底座，承载时空演化数据库、三维地质块段模型以及多维AI调度算法。云层专门负责处理跨矿区、长周期历史数据的深度清洗与机理模型训练，并持续向边缘节点下发优化后的算法模型，形成“云端训练全局寻优、边侧推理局部速决”的算力协同机制。

2.5 用侧业务微服务展现层

最顶端的应用层采用微服务架构，对矿山运营的全业务流进行组件化的解构与重组。这一层级直接承

担跨地域异地集控的系统级逻辑，聚合了采装运协同调度、机电设备寿命预测、边坡形变地质灾害预警等核心微服务群。所有业务流最终汇集到数字孪生框架中，实现复杂矿区物理空间向虚拟高维空间的精准映射和穿透式管控。

3 铝土矿企业生产运营全过程数字化管控平台构建措施

3.1 下沉矿区边缘算力，贯通现场断点数据

形成全过程管控平台的重点在于将算力资源部署在物理底层，依靠在前端感知终端和云端数据中枢之间添加具备高度自治能力的边缘计算层，来调整底层数据流转逻辑，把数据处理安排在矿区枢纽或采装移动装备旁边，系统可以在当地对多源异构数据进行毫秒级过滤和清洗^[3]。这种边缘介入模式截留了大量无效的数据冗余数据，让主干网络的并发传输压力得到缓解，边缘节点给现场装备提供了局部闭环的计算和决策能力，在不依靠主网调度的情况下仍然可以维持基础安全逻辑，由此在物理底座上实现了生产管控连续数据链的贯通。

在进行具体部署过程中，可以直接把工业级抗震边缘网关接入到重型矿卡、电铲控制系统的内部。车辆进入深凹采场这种典型的信号盲区后，网关会接管底层数据链路，把设备运行状态和周边环境感知的雷达点云数据在本地进行高速缓存，车辆依靠内置的轻量化规则引擎进行操作，在失联时仍然可以自主进行轨迹测算和障碍物干预，遇到极值工况会直接启动车载紧急制动，以达到保证单机绝对安全的目的。待设备物理位移至网络覆盖区，断点续传机制自动激活，将静默期积压的时序数据依时间戳序列异步回传至云端数据湖。针对固定破碎站等场景，则通过部署区域级微型边缘节点聚合多路视频流。节点端载入机器视觉算法实施近端抽帧比对，自主筛查矿石堵塞或违规闯入，仅向异地中枢发送报警切片与结构化日志。此路径剥离了云端对全量冗余数据的依赖，精准缝合了因通信受限产生的时空轨迹断层。

3.2 剥离高危现场岗编，重塑跨域集控中枢

面对偏远矿区恶劣工况与结构性缺工的双重困境，管控平台需从空间维度对传统高危作业模式进行解构。其底层逻辑是依托大带宽融合网络与数字孪生底座，将生产指挥权从矿区剥离至城市中心。这种跨地域的集控重塑并非简单的视频监控堆叠，而是将物理开采实体精准映射到虚拟高维空间，并实现双向闭环交互。通过深度解绑人机，从根本上消除采掘工作面的物理

危险属性, 重塑矿山劳动力组织结构, 为连续化安全生产构筑坚固的隔离屏障^[4]。

具体实现方式需要在装备线控化改造方面和数字孪生舱建设方面同时努力, 对主要采矿装备来说, 应当把原有机械或液压先导操作回路进行拆解, 并联高频数字比例阀和专用车载 PLC 控制器, 使其可以接收数字电信号以实现直接驱动, 具备线控底盘功能。同步在车身边外安装防爆超高清摄像机阵列和三维激光雷达, 获取全景视频流、环境点云。远端城市总部集控中心利用无人机航测数据和地质勘探信息, 并结合矿区真实坐标, 反向建立高精三维地质块段模型。操作员落座于集成动感平台的远程操控台, 视线前方为融合了实景视频拼接与虚拟数字地形的增强现实视界^[5]。操控手柄发出的微调信令, 经由 5G 专网网络切片以极低时延穿透至矿坑底部, 精准驱动铲斗挖掘。为规避长距离广域网抖动带来的操作迟滞风险, 必须在设备侧固化本地防撞逻辑。当车载视觉模型侦测到进入作业包络面范围的人员或车辆后, 边缘控制器会迅速截断来自远端的指令, 并且触发底层液压系统进行紧急制动, 远端驾驶配合近端边缘防线的实际配置, 把现场操作员变成室内的系统监控者, 完成安全底线的基础保障。

3.3 预判机组劣化趋势, 前置偏远物资调度

数字平台应当把设备维保逻辑进行调整, 从被动响应变成内生前置干预, 用来处理偏远矿区供应链末端在地理空间上的隔离问题, 长距离物流障碍造成突发停机后备件调拨经历很高时间消耗, 严重打断连续生产。因此, 控制系统需要把物联网高频采集数据和时序预测算法结合起来, 在云端对重型机电设备的衰减特征进行分离。通过精准锚定核心部件的物理劣化临界点, 系统利用算法模型提前跨越时间差, 将滞后的事后抢修转化为基于健康状态的定向物资前置。这种底层运维逻辑的升维, 本质上是以算力预判来对冲物理距离带来的调度迟滞, 从而在空间受限的工况下谋求物资补给与连续生产的动态平衡。

具体形成过程中需要仔细结合矿区中心主要重资产的物理运行参数, 在三轴高频振动传感器和油液在线理化探头的安装上, 半移动式旋回破碎机、大型球磨机和重型矿卡这类关键设备的减速箱、主轴承和液压缸等易损部件被进行了大规模部署。这些端侧感知元件高频捕捉机械运转过程中的温度漂移、金属磨粒浓度及振动包络信号, 并经由工业网关实时推流至云端数据中台。

在数据中台层, 部署基于长短期记忆网络或支持向量机的设备劣化趋势推理模型。该模型摒弃传统的人工静态阈值报警方式, 持续摄取设备全生命周期内的时序波形, 通过自监督学习动态拟合专属健康基线。当实际回传的振动频谱中高频谐波能量开始异常聚集, 或润滑油铁磁性颗粒斜率出现微小拐点时, 系统即可在物理断裂发生前数周, 精准定标出轴承内圈剥落或齿轮面点蚀的早期微弱特征。确认劣化趋势后, 管控平台直接击穿底层业务孤岛, 向下级物资管控模块与企业 ERP 系统抛出联动指令。系统根据衰减曲线推算出的设备剩余有用寿命, 结合偏远矿区的平均物流配送周期, 自主生成前置采购清单与定向调拨单。在设备接近功能失效临界点之前的这段时间里, 需要的备品备件已经提前运送到矿区前置仓, 利用数据流来推动实物物资流动的这种实际操作方式, 把偏远地区导致供应链断裂的问题给解决了, 让高价值装备能够保持可控的连续运转。

4 结束语

偏远铝土矿区处在极端工况和空间孤岛的硬性约束下, 全过程数字化管控平台的形成, 实际上是对矿山传统生产组织逻辑的彻底重构, 企业利用边缘算力下沉、跨域集控解耦和时序预判的前置运维, 打破物理空间界限, 进行人机深度解绑和对底层业务流的精准驱动。这一模式从根本上对冲了高危作业风险与长距离供应链迟滞, 为矿山连续安全运转确立了坚实的数字基础。随着工业大模型与多模态感知底座的深度介入, 管控平台将由当前的“自动化协同”向“认知型智慧矿山”转变。未来, 偏远地区的铝土矿开采将具备在复杂地质环境下进行全域自主决策与自适应调度的能力。

参考文献:

- [1] 姜德波, 张起钻, 江沙, 等. 中国喀斯特型铝土矿找矿预测研究进展 [J]. 地质学报, 2025, 99(02): 649-665.
- [2] 王文韬. 国有企业绿色转型背景下铝土矿开采及物流运输项目管理创新研究: 基于全产业链协同与 ESG 治理的视角 [J]. 张江科技评论, 2025(03): 161-163.
- [3] 同 [1].
- [4] 蒋玲. 数字化转型背景下的国有企业预算管理智能化体系探究 [J]. 中国集体经济, 2023(22): 41-44.
- [5] 尚莹莹. 数字化转型背景下矿产企业预算管理创新路径探索 [J]. 投资与创业, 2025(18): 101-103.