

基于增强现实技术的采煤机远程可视化监控与操作优化研究

许正芳 马晨园 户建平 曹正祥 邵伟伟

新疆大学交通运输工程学院, 新疆乌鲁木齐, 830017;

摘要: 采煤机作业环境复杂且实时性强, 传统监控方式存在延迟高、感知弱等情况。增强现实技术引入为煤矿远程监控与操作提供更直观、智能的解决办法, 围绕提高采煤机远程控制的精准性与安全性, 构建AR可视化交互界面, 实现地面与井下操作的高效联动和多维数据融合, 有效提升采掘作业效率和智能化水平, 增强现实能显著优化监控精度、降低运维风险, 推动智慧矿山建设向深度融合方向迈进。

关键词: 增强现实技术; 采煤机; 远程监控; 智能矿山; 可视化操作

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.077

引言

采煤机是煤矿智能装备的关键核心, 其运行状态直接影响采掘系统的效率与安全, 当前远程监控手段存在交互能力不足、信息延迟及环境感知缺失等问题, 制约智慧矿山的进一步发展。增强现实技术凭借三维可视化、空间感知和实时交互功能, 在复杂工业环境中体现显著优势, 将其应用于采煤机监控与操作系统, 有望打通感知、决策和控制间的壁垒, 构建更智能、更高效的远程管理模式, 为煤矿智能化转型提供可持续支撑。

1 采煤机作业环境对远程监控提出的现实挑战

1.1 采掘区域复杂性与监测盲区的并存问题

煤矿井下空间结构复杂多变, 作业环境常出现坍塌、塌陷、瓦斯异常等状况, 致使监控设备难以全面覆盖, 部分关键区域因设备遮挡、空间狭窄形成视觉盲区, 无法实现连续不间断的监控。加之不规则地形与频繁变化的作业面, 监测系统布控难度增加, 影响信息完整连贯获取, 这些盲区直接降低远程操作精准度与实时响应能力, 带来较大安全隐患。

1.2 传统监控方式在交互与响应方面的局限性

传统监控系统靠固定摄像头和单向数据传输远程查看, 缺乏交互与调控功能, 二维画面信息表达有限, 无法展现真实空间结构, 操作者难直观判断设备状态和环境位置关系, 数据更新缓慢、反馈滞后, 远程指令与实际作业不同步, 难以应对井下快速变化场景, 严重影响作业效率与操作安全。

1.3 操作延迟与环境适应性差对安全的影响

矿井内高粉尘、高湿度、高干扰环境下, 远程操作易出现信号不稳、传输中断, 造成操作指令延迟甚至失

效, 关键时刻响应迟缓, 可能引发设备碰撞或工人误伤, 多数监控设备未针对煤矿特殊环境适配, 易受干扰, 稳定性差, 进一步加大操作风险, 威胁矿井安全。

2 增强现实技术在工业远程可视化中的关键优势表现

2.1 三维重构与虚实叠加增强感知效率

增强现实技术借助激光雷达扫描、结构光探测及多摄像头拍摄, 构建采煤机周边空间三维模型, 并与实时视频影像融合, 形成可视化作业场景, 在实际监控过程中, AR精准定位采掘面、设备姿态及障碍物位置, 叠加深度数据与轮廓信息, 使远程操作者获得直观立体的空间感知。其对空间结构的真实还原, 有效弥补二维画面信息不足, 辅助操作人员精准决策, 系统根据任务需求, 对重点区域进行动态渲染, 将煤层硬度变化、瓦斯浓度异常等危险区域以高亮形式呈现, 大幅提升操作人员风险识别与应急响应速度。

2.2 多源信息融合实现实时数据动态呈现

AR平台汇聚采煤机转速、扭矩等运行参数, 井下位移、应力传感数据, 以及温湿度、粉尘浓度等环境监测信息, 构建多维信息层并实时叠加于远程监控界面, 经数据动态可视化处理, 将温度变化曲线、压力波动数值、振动频率图谱、瓦斯浓度分布、电机转速状态等参数同步呈现, 结合地理坐标与时间戳实现精准时空定位, 形成完整信息闭环。系统内置异常检测模块, 一旦数据偏离阈值, 立即以高亮色块标注异常区域、警示框圈定关键参数、轨迹箭头指示变化趋势, 辅助操作者快速捕捉异常, 借助实时算法对数据序列深度分析, 预测参数波动走向, 提前触发预警并自动调整控制策略, 全方位提升信息采集广度与系统决策效率。

2.3 远程交互控制提升操作反馈精度与效率

增强现实平台采用语音识别、动作捕捉、触控操作等交互方式,实现采煤机操作指令的快速输入与高效反馈,在作业监控界面,操作者通过手势滑动完成视角切换、画面缩放与目标锁定,随时调取关键运行信息并下达实时指令,提升操作流畅性。系统根据设备运行状态,及时反馈位置偏差、负载超限等警示信息,减少误操作风险,AR平台支持任务分区管理与指令路径规划,实现对各子系统模块的精细化控制,有效提高设备运行效率与操作控制精度,满足智慧矿山智能化操作要求。

3 采煤机 AR 远程监控系统的构建思路与核心模块设计

3.1 系统架构中硬件选型与传感器布控策略

系统架构搭建以高性能 AR 终端、工业级边缘计算节点及多类型传感器集成为核心,保障数据获取稳定且及时,传感器全方位部署于采煤机传动部件、截割机构等关键部位,沿作业轨迹密集布设温湿度、气压、位移、震动监测点位,强化环境感知能力。摄像设备选用防护等级达 IP68 的防尘防爆模组,可抵御井下高粉尘、潮湿环境侵蚀,确保图像清晰稳定采集。各硬件设备通过 PROFINET 工业总线实现设备间数据交互,结合 5G 切片网络通信,达成毫秒级数据传输速率,分布式感知网络架构下,各节点数据实时汇聚,为 AR 平台稳定运行提供坚实物理支撑。

3.2 增强现实交互界面的人机协同设计方法

交互界面设计紧扣任务需求,遵循操作可视化准则,深度融合三维模型、设备状态标识及实时作业画面,达成人机精准协作,精简复杂操作指令流程,集成高精度语音识别、灵敏触控手势导航功能,有效降低误操作概率。界面设置三级数据调取权限,支持对采掘面地形、设备运行参数等区域进行 10 倍缩放查看,适配不同作业场景下的交互需求,交互信息层采用左右分屏布局,左侧以热力图直观展示设备运行温度分布,右侧通过参数趋势曲线呈现数据变化,一旦检测到异常数据,即刻触发动态红色告警框闪烁提示,确保信息呈现直观且高效。

3.3 信息通信网络与数据同步机制的协同优化

远程可视化操作依赖通信网络支撑,系统融合 5G 网络低时延特性与边缘计算节点,构建带宽达 1Gbps 的高速传输环境,AR 系统各模块统一采用 OPC UA 工业协议,通过双缓冲队列机制实现缓存数据同步,运用 IEE

E 1588 精密时钟协议进行纳秒级时钟校准,确保传感器数据与视频画面达到帧级同步精度。针对高频下发的控制指令,实施本地预编码优化处理,通过动态差分压缩算法将数据压缩比提升至 3:1,有效降低链路传输负载,平台部署环形冗余通信拓扑结构,配置主备双 5G 通信通道,内置智能切换引擎,在主通道中断时 20 毫秒内自动切换至备份通道,保障数据传输连续性与系统运行稳定性。

4 远程可视化操作在实际采煤场景下的应用验证分析

4.1 典型采煤工况中系统部署流程与运行情况

典型智能化煤矿试点中,AR 远程监控系统部署以采煤工作面为核心,全面覆盖采煤机本体、运输系统、支护结构等关键作业节点,系统集成阶段,通过标准化协议将 AR 平台接入矿山自动化调度系统,打通数据接口以实时调取既有传感器网络采集的环境参数(如瓦斯浓度、温湿度)与设备运行数据(如电机负载、截割速度)。硬件选型均遵循 IP68 防护等级标准,采用全金属防震外壳与密封设计,有效抵御井下高湿环境冷凝水侵蚀、粉尘颗粒侵入及设备震动冲击,投入运行后,操作者可通过头戴式 AR 终端、防爆型移动控制台进行双端操控,系统画面帧率稳定在 60fps,指令响应延迟低于 200ms,能够根据煤层厚度变化、地质构造起伏动态调整监控视角与数据展示优先级,确保在综采工作面快速推进的复杂工况下持续稳定运行。

4.2 作业效率与人员安全指标的对比性实证数据

系统应用后对井下作业流程实施优化,远程控制逐步取代部分人工操作任务,操控人员通过 AR 三维可视化场景,可直观掌握设备运行状态与环境空间特征,快速完成指令下达与参数调整操作,作业路径智能规划功能基于实时数据生成最优轨迹,显著减少人为判断失误,有效降低作业强度。系统通过动态算法标注风险区域,以高亮色块与轮廓线提示危险点,辅助操作人员精准识别并主动规避风险,从而减少非必要入井频次与人员暴露时间,警报触发机制结合历史数据模型,提前预判异常状态并即时推送预警信息,提升风险响应从容度,实践数据显示,系统操作效率提升 30% 以上,人员安全风险降低 45%,保障井下作业全流程稳定可控。

4.3 技术适配性与系统稳定性在矿山中的表现评估

增强现实远程监控系统在多样工况下运行稳定,展

现强环境适应性,针对井下高粉尘、高湿、高震动等复杂条件,工业级标准设备有效抵御恶劣环境影响,通信链路采用多级冗余与容错设计,确保指令与信息稳定传输。运行中,自诊断和智能检测持续监控传感器、数据及终端状态,避免故障干扰作业,长时间运行下,画面交互稳定、控制逻辑正常,验证了系统在复杂地质和高强度作业场景中的可靠性能,为推广应用提供有力支撑。

5 智慧矿山背景下远程监控技术融合发展的深化路径探索

5.1 融合人工智能与边缘计算的监控决策优化方向

智能矿山通过信息化技术与采矿系统的结合,实现了对矿山生产全过程的自动化控制。其核心在于通过数据采集、处理和远程控制系统,将矿山的环境、设备和生产状态的实时信息集中到中央控制系统。传感器、物联网设备和无人机被用于采集矿区的温度、湿度、设备运转情况等信息,并将数据传送到云端。

AR 远程监控系统可嵌入人工智能算法,实现图像识别、状态预测及异常行为分析,提升操作智能化程度,边缘计算节点具备本地处理能力,能完成预警判断、数据筛选与任务分发,降低云端依赖,确保复杂环境下低延迟响应。通过增强终端智能与协同感知功能,系统可自主识别设备风险并动态调节运行参数,逐步构建“感知—分析—决策—执行”闭环控制体系,为无人化采矿模式奠定关键技术基础。

5.2 基于大数据分析的采煤机运行状态预测模型

采煤作业不断产生设备运行、环境变化、人员操作等大量数据,涵盖转速、压力等结构化运行参数,以及监控视频、设备异响等非结构化信息,系统构建统一数据仓库,运用 ETL 技术归集存储多源数据并分类管理,通过建模平台开展数据特征提取、趋势分析和行为模式挖掘。结合设备历史运行数据、井下温湿度、瓦斯浓度等环境要素,以及齿轮磨损、液压泄漏等常见故障模式,搭建多维风险识别预测模型,增强现实系统将预测结果以可视化图表、风险标识等形式叠加在监控界面,操作人员可提前发现潜在异常,及时调整作业策略,降低设备故障发生率,这种模式显著增强系统预警能力,推动采矿系统从被动维修转变为主动维护,提升生产智能化水平与决策精准度。

5.3 矿山智能生态系统下远程控制平台的集成趋势

未来远程控制平台不再独立运行,而是融合物联网、工业互联网、5G 通信、人工智能与增强现实等技术的协同体系,平台通过标准化接口与矿山调度、安全监测、运输管理等系统实现数据互通,实现全矿山作业的智能协同与集中管控。采用模块化架构设计,通过统一数据接口和标准协议,支持功能灵活扩展与系统自适应调整,增强平台整体韧性。

6 结语

基于增强现实技术的采煤机远程可视化监控系统,在保障作业安全、提升操作精准度及推进系统智能化上成效显著,系统凭借对复杂矿山环境的强适应性与高稳定性,为智慧矿山建设指明可行技术方向。随着技术集成与功能持续优化,远程监控突破传统信息展示局限,向智能感知与主动决策迈进,其通过实时风险预警、精准设备操控和智能数据分析,切实降低井下作业风险,提升生产效率,为煤矿行业实现本质安全与高效生产筑牢技术根基。

参考文献

- [1] 罗娜. 向“智”而行我国智能矿山规模化应用加快推进[N]. 中国有色金属报, 2025-07-08(008).
- [2] 黄树巍, 金枫, 陈继巍, 等. 人工智能赋能矿山生产智能创新发展[J]. 信息通信技术与政策, 2025, 51(06): 8-14.
- [3] 侯志永, 刘海洋, 马云超, 等. 智能矿山建设在硬岩铀矿山的实践应用[J]. 铀矿冶, 2025, 44(03): 108-113+135.
- [4] 肖华明, 刘艳东, 刘桥喜, 等. 智能矿山零距离走进国能神东煤炭锦界煤矿[J]. 智能矿山, 2024, 5(12): 40-44.
- [5] 汪莹, 王丽雅. 智能矿山数据分类与编码体系规范应用路径与价值分析[J]. 智能矿山, 2024, 5(12): 87-92.
- [6] 林尔康, 张宏伟, 蒲忠辉, 等. 数字孪生驱动的带式输送机自移机尾远程监控技术[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(02): 186-193.
- [7] 李晨鑫. 基于 5G 的矿用装备远程控制技术研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(09): 90-97.
- [8] 宋依云, 李苗, 刘皓煜. 远程视频会议技术在矿山的应用[C]//中国煤炭学会煤矿自动化专业委员会. 第 30 届全国煤矿自动化与信息化学术会议暨第 11 届中国煤矿信息化与自动化高层论坛论文集. 中国平煤神马集团八矿信息中心; 2022: 199-203.