

复杂环境下远程协控煤矿智能化开采技术研究

王文博

平凉新安煤业有限责任公司 甘肃 平凉 744201

摘要：针对深部煤矿高地应力、高温高湿、电磁干扰及灾害多发的复杂开采环境，传统开采模式存在安全风险高、设备协同差、作业效率低等问题。本文构建三层远程协控技术架构，探究多源感知、高可靠通信、设备协同控制及数字孪生管控关键技术，结合工程实例开展应用优化验证。结果表明，该技术可大幅缩减井下作业人数、提升开采效率，降低生产成本与灾害风险，为复杂矿井智能开采提供技术支撑。

关键词：复杂环境；远程协控；煤矿智能化；开采技术

引言：随着煤炭开采向深部延伸，井下复杂恶劣环境加剧，传统人工主导的开采方式已无法适配安全高效的生产需求，智能化、远程化开采成为行业发展必然趋势。复杂地质与作业干扰严重制约智能设备稳定运行，现有技术存在感知精准度低、通信时延高、设备适配性差等短板。基于此，本文聚焦复杂矿井工况，研究远程协控智能化开采技术体系与关键工艺，通过工程实践验证技术可行性，助力煤矿无人化安全开采升级。

1 复杂煤矿开采环境特征与远程协控技术体系

1.1 煤矿复杂开采环境类型及干扰特性

(1) 深部高地应力、高温高湿地质环境特征。深部开采中地应力显著升高，加剧围岩变形与冲击地压风险；地温梯度使采掘面温度超 35℃、相对湿度近饱和，严重制约设备散热效率并威胁人员安全。(2) 瓦斯、粉尘、透水等灾害风险环境特性。高瓦斯矿井采动裂隙带易积聚瓦斯触发爆炸；截割产尘浓度高，降低能见度且加速设备磨损；承压水与采动裂隙耦合导通形成隐蔽突水通道，突发性强且难以预测^[1]。(3) 井下电磁干扰、空间受限等作业环境干扰因素。变频调速与大功率设备密集布置产生宽频强电磁噪声，严重干扰无线通信与传感器信号；巷道断面狭窄，设备错车与维护可达性极差，制约自动化装备的物理部署。

1.2 远程协控智能化开采核心内涵与运行机制

(1) 远程协控智能化开采的核心定义与技术特征。其定义为人机共融的远程干预与井下自主自治协同模式，技术特征涵盖多源异构感知深度融合、控制指令低时延高可靠闭环，以及开采工艺参数随地质条件自适应调整。(2) 无人化开采“感知-传输-决策-执行”闭环运行机制。感知层构建“人-机-环”全息数字映像；传输层

依托 5G+ 光纤冗余环网保障低时延高可靠；决策层运用数字孪生驱动多目标优化；执行层精准响应，四层形成毫秒级闭环。(3) 复杂环境下远程协控开采的适配性要求。通信中断时边缘端具备自主降级运行能力；感知系统抗粉尘抗湿并支持自标定；指令响应时延严控百毫秒内；决策模型可据地质动态在线自整定工艺参数。

1.3 远程协控智能化开采整体技术架构

(1) 云端管控、边缘计算、终端执行三层架构体系。云端负责全局调度与长周期数据分析；边缘侧执行实时推理、故障预诊断与应急联动；终端层按边缘指令执行精准采掘动作。(2) 环境感知、数据传输、智能决策、设备协同模块组成。感知整合甲烷、粉尘、微震等多物理场传感器矩阵；传输基于时间敏感网络实现异构数据确定性调度；决策嵌入深度强化学习优化工艺；协同采用分布式一致性协议协调多机时序与空间位姿^[2]。(3) 复杂环境下技术架构的优化设计要点。采用冗余热备与环形网络拓扑提升系统生存性；强化散热防爆密封设计；引入对抗性样本检测抵御电磁干扰引发的数据异常；构建多级容错机制确保部分感知失效工况下仍具基本作业能力。

2 复杂环境下远程协控煤矿智能化开采关键技术

2.1 多源融合井下环境智能感知技术

(1) 三位一体融合感知架构。构建激光雷达、工业视觉与多类型环境传感器（甲烷、温度、湿度、风速、振动等）协同的感知系统。激光雷达测绘采掘面轮廓与设备三维位姿，工业视觉识别煤岩界面及人员闯入，环境传感器网监测瓦斯、粉尘及风流参数。三者时空同步、互为补充，实现井下开采面 360° 无盲区的“人-机-环”全要素数字表征^[3]。(2) 复杂干扰下数据降噪与

精准采集。针对高粉尘、高湿度及强电磁干扰,采用自适应滤波与小波阈值去噪抑制噪声,基于深度学习的信号重构算法恢复畸变数据段,配合传感器冗余部署与一致性校验剔除异常值,确保恶劣工况下输出数据的准确性。(3)多源数据融合处理。建立异构数据统一时间戳与空间坐标系的配准融合框架,利用扩展卡尔曼滤波实现最优估计融合,针对地质突变、设备退化等场景构建差异化融合策略,最终生成涵盖地质条件、装备健康状态及风险等级的综采工作面综合信息矩阵,为上层决策提供高可信数据底座。

2.2 高可靠井下远程通信传输技术

(1) 5G+Wi-Fi6 融合井下全覆盖通信组网技术。采用矿用 5G 基站实现主干巷道的广覆盖与低时延控制类业务承载, Wi-Fi6 接入点补充覆盖综采工作面等设备密集区域, 两网通过核心网互通、统一管控, 形成骨干网与接入网协同的全矿井无缝覆盖通信架构, 确保设备移动换区过程中通信不中断^[4]。(2) 复杂环境下通信抗干扰、低延迟传输优化方法。针对井下多径衰落与电磁噪声干扰, 采用正交频分复用调制与信道编码技术增强抗干扰能力; 通过时间敏感网络调度机制为控制指令分配固定时间片, 避免拥塞导致的随机延迟, 配合边缘节点前置处理降低端到端传输延迟, 确保关键业务时延优于 50ms, 抖动控制在 10ms 以内。(3) 井下数据海量传输与安全加密技术。采用光纤骨干环网承载视频流与点云数据等高带宽业务, 经 H.265 编码压缩后分级传输; 构建基于国密算法的端到端加密体系, 对设备控制指令与地质参数等敏感数据实施分级分类加密, 引入轻量级认证协议降低加密计算开销, 兼顾传输效率与信息安全, 防范数据窃听与篡改风险。

2.3 开采设备远程协同智能控制技术

(1) 采煤机、液压支架、输送机设备群协同控制逻辑。以采煤机截割位置与速度为主导信号, 液压支架依据采煤机行进位置自动执行降柱、移架、升柱的跟随动作, 输送机基于煤流负荷动态调节运行速度, 三者通过分布式控制协议实时交换状态信息, 内置时序约束规则库与碰撞规避算法, 形成“采-支-运”时序互锁、空间避让的严密联动控制逻辑。(2) 基于专家系统与 AI 算法的远程智能决策技术。将开采工艺规程与专家经验规则化编码构成知识库, 构建推理引擎进行工况识别与策略初选; 同时引入深度强化学习算法, 基于实际开采数据持续优化决策策略, 形成规则驱动稳健性与数据驱动自适应相融合的混合决策机制, 具备面对未知工况时的决策泛化能力。(3) 复杂工况下设备自适应调节与容错

控制技术。设备根据截割负载、温度及振动特征在线辨识工况变化, 自动调节牵引速度与截割参数以适应地质条件波动; 同时部署基于观测器的故障诊断模块, 实时估计系统状态残差并定位故障源, 当检测到执行机构偏差时自动切换至容错控制律或降级运行模式, 确保突发工况下系统仍安全可控、不停机。

2.4 数字孪生虚拟仿真远程管控技术

(1) 井下开采场景数字孪生模型构建方法。基于三维地质勘探数据与激光雷达点云建立采掘面精细化几何模型, 融合设备运动学模型、液压与电气物理特性构建高保真开采场景镜像, 通过实时数据驱动孪生体状态同步更新, 并引入偏差校正机制持续缩小虚实误差, 实现物理世界与虚拟空间的精准映射。(2) 虚实同步的远程可视化监控与干预技术。将采掘现场实时数据映射至数字孪生模型驱动虚拟场景动态呈现, 提供沉浸式远程监视界面与多视角切换功能; 管控人员可在虚拟空间中对设备位姿与作业参数进行标注式干预, 经孪生体仿真验证后再下发至现场终端执行, 形成“地面操作、井下执行”的远程作业闭环, 显著降低人员下井频次^[5]。(3) 开采工况模拟推演与风险预判技术。基于数字孪生模型构建“如果-怎么办”推演引擎, 在截割工艺调整、设备故障注入或地质异常等预设场景下进行超前模拟, 量化评估不同决策方案对生产效率与安全指标的影响, 输出风险预警等级与最优控制策略推荐, 将管控节点前移, 实现从事后被动处置向事前主动预判的根本性跨越。

3 复杂环境下远程协控煤矿智能化开采技术应用优化与工程实证分析

3.1 复杂矿井工程应用场景概况

(1) 目标矿井地质条件与开采环境参数。以某深部开采高瓦斯矿井为工程对象, 平均采深超 850m, 地应力达 22MPa 以上, 采掘面温度 36~40℃、相对湿度 92%~97%, 绝对瓦斯涌出量 28m³/min, 粉尘浓度峰值达 120mg/m³, 属典型高温高湿高瓦斯复杂开采环境。(2) 矿井传统开采模式存在的技术难题。传统模式下采掘面作业人员密集, 面临冲击地压与瓦斯突出双重动力灾害威胁; 人工操控设备依赖经验判断, 采煤机截割路径调整滞后于地质突变, 综采设备群协调靠人工喊话与信号灯传递, 错刀、挤架、压溜事故频发, 故障平均处置耗时长达 4 小时以上。(3) 远程协控智能开采技术应用适配条件。目标矿井已完成 5G 专网全覆盖与液压支架电液控改造, 采煤机具备记忆截割功能且开放通信协议接口, 供电容量满足智能化设备增容需求, 作业人员经过系统化技能培训, 具备智能化采煤工作面建设的

基础条件与实施保障。

3.2 关键技术落地优化方案

(1) 针对环境干扰的感知与通信技术优化。感知侧采用多传感冗余部署与自适应滤波算法抵抗电磁干扰,加装双波段红外热成像辅助穿透粉尘雾区识别煤岩界面;通信侧通过 5G 专网切片隔离控制信令与视频业务,保障时延确定性,采掘面两端增设信号中继确保移架过程通信无盲区。(2) 设备协同控制算法的工况适配改进。针对煤层倾角变化大的特点,在协同算法中引入倾角补偿模块,根据实时姿态调整推移行程与拉架速度;开发地质构造识别预警子程序,截割阻力突变时自动触发降速保护与支架主动增阻响应,避免断链与漏冒事故。(3) 远程管控系统稳定性与安全性优化策略。采用主备冗余调度架构与双路供电保障,关键指令双端确认后下发;网络异常时启动边缘缓存与断点续传机制确保数据不丢失;软件系统通过等保三级认证并部署工业防火墙,防范外部攻击与误操作风险。

3.3 工程应用效果分析

(1) 开采作业安全提升效果分析。系统投用后井下单班作业人数由 25 人减至 7 人,人员暴露于危险区域时长减少 70%;瓦斯超限响应时间由人工处置 180s 缩短至系统联动 15s 以内,冲击地压前兆信号识别提前量达 3~5 分钟,实现灾害超前预警。(2) 开采效率与生产成本优化效果验证。采煤机平均牵引速度由 4.5m/min 提升至 6.8m/min,月产由 18 万吨提高至 24 万吨;设备故障平均处置时长由 4 小时压缩至 1.5 小时,故障率下降 42%;吨煤电耗降低 8.6%,乳化液消耗减少 21%,综合生产成本下降约 12%。(3) 技术应用存在的问题与成因分析。主要问题包括:视频传输在割煤时段存在偶发性卡顿,成因在于粉尘激增导致 5G 信号衰减;数字孪生模型对顶板来压预测精度不足,源自地质勘探数据稀疏与应力演化机理建模不完善;边缘算力同时处理多路视频解码与实时优化时存在瓶颈。

3.4 技术推广与发展展望

(1) 复杂矿井智能化开采技术推广适配性。本技术体系对同类深部高瓦斯矿井具有良好的可迁移性,但要

求目标矿井具备基础网络设施、装备电液控改造条件及稳定供电保障,推广时需根据煤层厚度、倾角及围岩类别差异化调整算法参数与设备配置。(2) 当前技术的局限性与后续优化方向。系统对突发性地质异常的自适应能力仍显不足,需强化基于小样本学习的快速适应算法;高带宽业务增长对网络承载力提出更高要求,下一步将探索 5G-A 通感算一体化升级;数字孪生模型需融合更多地质力学先验知识以提升预测可信度。(3) 煤矿远程协控智能开采技术未来发展趋势。系统将从“地面远程干预”向“地面规划调度、井下自主执行”演进,矿山大模型的全局智能决策有望取代规则型控制框架;多矿协同的云端管控平台将实现跨矿井资源调度与经验迁移;通感算智深度融合的 6G 技术将从根本上破解井下通信瓶颈,支撑全矿井无人化常态化运行。

结束语

本文完成了复杂环境下煤矿远程协控智能开采技术体系构建与关键技术研究,经工程应用证实,该技术可有效提升矿井开采安全性与生产效率,降低运维成本,适配深部高瓦斯复杂矿井开采需求。同时梳理出技术应用中信号衰减、模型预测精度不足等现存问题。后续将依托 5G-A、矿山大模型等技术优化算法与系统架构,完善技术体系,推动智能开采技术规模化落地普及。

参考文献

- [1] 王国法,任怀伟.煤矿复杂环境智能开采协同控制理论与关键技术[J].煤炭学报,2025,50(01):102-108.
- [2] 王学文,刘曙光,王雪松.面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维与远程协同控制系统[J].煤炭学报,2024,49(04):2124-2140.
- [3] 崔耀,叶壮.基于 5G 的煤机油边云端协同智能控制开采技术[J].煤炭科学技术,2023,51(06):205-216.
- [4] 李浩荡,刘清,谷彬.复杂地质条件下急倾斜煤层短壁综放智能远程开采关键技术[J].煤炭科学技术,2025,53(09):89-96.
- [5] 张磊,李绍良,曲越.复杂工作面数字孪生驱动的煤矿智能开采远程协同控制系统应用[J].山东煤炭科技,2024,42(12):173-182.