

井工煤矿智能化综采工作面无人化控制技术应用

宋海波, 张 海, 杜琛豪

(山西岚县昌恒煤焦有限公司, 山西 吕梁 035200)

摘 要 为解决井工煤矿综采工作面人员密集、安全风险高、生产效率低等问题, 本文构建了“地面决策—井下执行—面内无人”的三级智能化控制体系, 采用多传感数据融合、边缘计算、设备协同联动等技术, 设计无人化控制系统硬件架构与软件模块, 优化采煤机自适应截割、液压支架电液控、多设备协同等关键技术流程。经实验室测试与现场应用, 系统实现工作面设备自主联动、环境实时监测、故障智能预警, 自动化作业率达 92.3%, 设备响应时延 < 150 ms。结果表明, 该技术能够有效提升综采工作面安全管控与生产效能, 为井工煤矿无人化开采提供技术参考。

关键词 井工煤矿; 智能化综采; 无人化控制; 协同联动; 自适应截割

中图分类号: TD672; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.011

0 引言

煤炭作为我国主体能源, 综采工作面智能化是煤矿安全高效生产的核心方向。当前多数矿井仍以“人工干预+远程监控”为主, 存在煤岩识别精度不足、设备协同滞后、复杂地质适应性差等问题。传统控制模式难以实现全流程无人化作业, 制约煤矿智能化升级。本文针对上述问题, 设计一体化无人化控制系统, 突破多设备精准协同、复杂环境自适应控制等关键技术, 通过工程验证优化技术路径, 为井工煤矿综采工作面无人化开采提供技术方案与实践参考。

1 井工煤矿智能化综采工作面无人化控制系统设计

1.1 系统总体设计方案

系统采用“感知—传输—决策—执行—监管”五层架构(见图 1), 构建地面控制中心、井下顺槽集控站、工作面设备终端三级控制体系^[1]。地面端负责全局决策与远程监控, 井下集控站承担本地边缘计算与指令转发, 设备终端实现自主执行与状态反馈。通过 5G+ 万兆工业环网融合传输, 保障数据实时交互, 形成“井上智能决策、井下自动执行、面内无人作业”的闭环控制模式。

1.2 硬件系统选型与布局设计

硬件采用“核心控制+感知采集+执行终端”分层布局(见图 2), 核心选用矿用本安型边缘控制器与冗

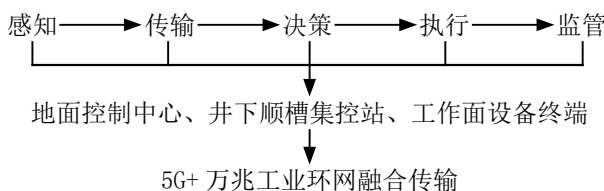


图 1 系统总体设计方案图

余工业交换机; 感知层部署激光雷达、惯性导航、振动传感器等监测设备, 定位精度 ± 5 cm; 执行层集成智能采煤机、电液控液压支架、变频刮板输送机等装备。设备沿工作面呈线性分布式布局, 顺槽设集控中心与供电泵站, 实现硬件资源优化配置^[2]。

1.3 软件系统架构与模块设计

软件采用微服务架构, 分为数据采集、智能决策、协同控制、安全预警、可视化监控五大模块^[3]。数据采集模块实现多源信息标准化接入; 智能决策模块基于地质模型与设备状态生成控制指令; 协同控制模块完成多设备时序联动; 安全预警模块实现异常识别与分级报警。模块间通过消息队列交互, 支持动态扩展与远程升级。

1.4 系统抗干扰设计与可靠性优化

针对井下电磁干扰、粉尘、潮湿等恶劣环境, 从硬件、软件、传输三方面优化^[4]。硬件采用屏蔽线缆与隔离供电, 软件设数据滤波与容错机制, 传输采用

作者简介: 宋海波 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 煤矿采矿工程。

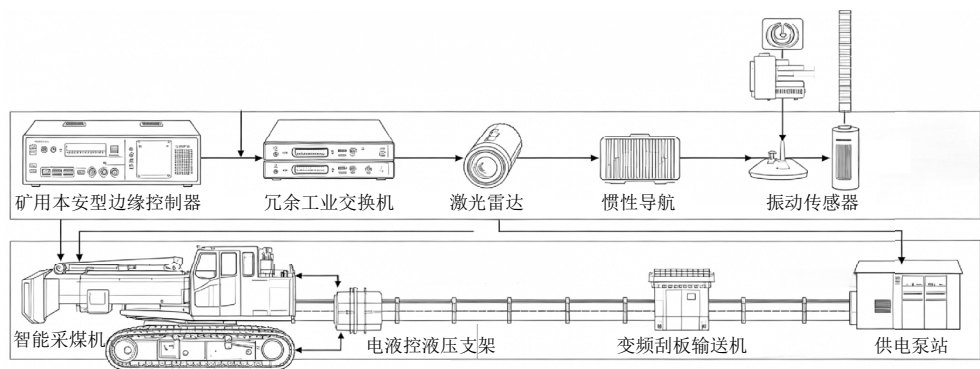


图 2 硬件系统选型与布局设计图

环网冗余与数据校验。通过可靠性设计，提升系统平均无故障工作时间，提高数据传输准确率（见表 1）。

表 1 系统抗干扰与可靠性优化指标

优化维度	技术措施	性能指标
电磁抗干扰	屏蔽接地、滤波电路	干扰抑制比 > 60 dB
数据传输	环网冗余、CRC 校验	丢包率 < 0.03%
设备容错	冗余备份、故障切换	切换时间 < 50 ms
环境适应	三防处理、温控设计	工作温度 -20 ℃ ~ 60 ℃

2 无人化控制关键技术研究是实现

2.1 采煤机无人化控制技术

采煤机无人化控制技术是实现综采工作面无人作业的核心技术之一，以记忆截割技术为基础，融合激光雷达、振动传感器、电流传感器等多源传感数据，通过算法实现煤岩界面精准识别^[5]。工作人员需手动规划标准截割轨迹，记录滚筒高度、牵引速度、截割功率等参数；运行中通过截齿应力、振动、电流多传感融合识别煤岩界面，实时调整滚筒高度与牵引速度。

2.2 液压支架自适应控制技术

通过动态调节支架立柱压力、移架速度及护帮板角度，实现支架跟机移架的精准联动，自动适配采煤机作业节奏与煤层地质变化，确保支架对顶板的有效支护，提升支护可靠性与作业效率。以采煤机位置为核心，构建支架跟机移架自适应控制模型^[6]。基于电液控系统，建立姿态—阻力耦合控制方程：

$$\Delta P=K_p \cdot \Delta L+K_d \cdot \frac{d(\Delta L)}{dt}+K_i \cdot f \Delta L dt \quad (1)$$

式（1）中： ΔP 为支架立柱压力调节量； ΔL 为支架与采煤机相对位移偏差； K_p 、 K_d 、 K_i 分别为比例、微分、积分系数。通过实时修正移架速度与护帮板角度，跟机移架精度达 $\pm 10\text{ cm}$ ，响应时间 $< 0.3\text{ s}$ 。

2.3 刮板输送机协同控制技术

刮板输送机协同控制技术以采运协同为核心目标，通过称重传感器、功率传感器实时采集煤流负荷数据，结合采煤机截割节奏，构建煤流负荷预测与调速模型^[7]。通过称重传感器与功率监测实时获取煤流量，采用时间序列预测未来 5 s 负荷变化，动态调整输送机频率。

2.4 工作面环境智能监测与预警技术

工作面环境智能监测与预警技术集成瓦斯、一氧化碳、粉尘、温度、矿压等多类型矿用本安型传感器，通过工业环网实现环境参数实时采集与传输^[8]。实时采集环境参数，经边缘计算本地分析，识别异常趋势并分级预警。

2.5 多设备协同联动控制技术

多设备协同联动控制技术构建统一的时空同步基准，统筹采煤机、液压支架、刮板输送机等工作面核心设备的动作时序^[9]。建立统一时钟基准，同步误差 $< 10\text{ ms}$ ；以采煤机为核心，规划支架移架、推溜、护帮时序，控制输送机速度匹配。

3 系统测试与工程应用验证

3.1 实验室模拟测试与参数校准

搭建 1:1 物理模拟平台，开展功能、性能、可靠性测试。测试采煤机截割精度、支架跟机响应、多设备协同等指标，校准控制参数与传感系数（见表 2）。

表 2 实验室模拟测试结果

测试项目	设计指标	实测值	达标情况
采煤机截割误差	$\leq 3\text{ cm}$	2.4 cm	达标
支架跟机响应时间	$\leq 0.3\text{ s}$	0.22 s	达标
设备同步误差	$\leq 10\text{ ms}$	7 ms	达标
数据传输时延	$\leq 150\text{ ms}$	110 ms	达标

实测数据显示，采煤机截割误差 2.4 cm、支架跟机响应时间 0.22 s、设备同步误差 7 ms、数据传输时

延 110 ms, 均优于对应设计指标, 四项测试均达标, 验证了系统核心功能与性能符合设计要求, 控制参数校准精准, 为现场工程应用提供了可靠的实验支撑。

3.2 现场工程应用方案与实施

选取某矿 300 m 综采工作面实施, 按“设备改造—系统部署—调试优化—试运行”流程推进。改造原有设备, 安装感知与控制模块; 铺设 5G 与万兆环网, 部署地面与井下控制系统; 分阶段单机调试、联动调试、空载与带载试运行, 逐步实现无人化作业。

3.3 应用效果数据监测与分析

应用效果如表 3 所示。

表 3 现场应用效果监测数据

指标类别	改造前	改造后	变化率
单班作业人数	11 人	3 人	-72.7%
日推进度	8 刀	9.6 刀	+20%
设备故障率	15%	6.2%	-58.7%
自动化作业率	65%	92.3%	+42%

改造后单班作业人数从 11 人降至 3 人, 日推进度从 8 刀提升至 9.6 刀, 设备故障率从 15% 降至 6.2%, 自动化作业率从 65% 提升至 92.3%。数据表明, 系统有效减少作业人员、提升生产效率、降低设备故障, 无人化控制应用成效显著, 达到预期技术目标。

3.4 技术经济性与安全性评估

经济与安全效益如表 4 所示。

表 4 技术经济性与安全性评估

评估维度	具体指标	评估结果
初期投资	系统建设总费用	850 万元
年收益	成本节约总额	420 万元
投资回收期	静态回收周期	2.02 年
安全提升	事故风险降低率	90%

数据显示, 系统初期建设总费用 850 万元, 年成本节约总额 420 万元, 静态投资回收期 2.02 年, 事故风险降低率达 90%。评估结果表明, 该系统不仅具备良好的技术经济性, 短期内可回收投资成本, 同时能大幅提升工作面安全管控水平, 实现安全与效益双重提升。

4 技术难点与优化改进措施

4.1 复杂地质条件下控制难点分析

复杂地质条件下存在三大控制难点: 断层、夹矸等导致煤层识别模糊, 传统传感准确率降至 80% 以下; 大倾角煤层(倾角 $> 15^\circ$)设备滑移, 支架姿态与推溜精度下降, 移架误差超 20 cm; 地质突变引发设备载荷骤变, 协同控制失步, 动作冲突率上升 3 倍。上述

问题导致无人化系统稳定性下降, 人工干预频次增加。

4.2 系统运行中的问题

系统运行暴露四方面问题: 井下多源干扰致数据丢包率升至 0.5%, 控制指令延迟超 200 ms; 长期高负荷下传感器漂移, 监测误差超 5%, 决策失准; 边缘计算算力不足, 复杂工况分析延迟超 500 ms, 实时性下降; 设备兼容性差, 不同厂家控制器协议不统一, 联动故障率达 8%。

4.3 针对性优化改进方案

针对上述难点与问题, 实施三维优化: 感知层融合探地雷达与机器视觉, 构建 D-S 证据理论识别模型, 煤层识别准确率至 95%; 加装倾角补偿与防滑控制, 大倾角下移架误差 < 8 cm。传输与计算层采用 5G+ 光纤冗余备份, 丢包率降至 0.03%; 升级边缘控制器, 算力提升 2 倍, 分析时延 < 100 ms; 部署统一协议转换网关, 解决设备兼容问题。控制算法引入自适应 PID 与强化学习, 动态修正控制参数, 复杂工况下协同稳定性提升 40%, 人工干预频次减少 70%。

5 结束语

本文构建井工煤矿智能化综采工作面无人化控制系统, 突破多设备协同、复杂环境自适应等关键技术, 形成“地面决策—井下执行—一面内无人”的完整技术体系。经实验室与现场验证, 系统自动化作业率达 92.3%, 单班人员减少 72.7%, 生产效率提升 16.7%, 有效解决了传统开采痛点。

参考文献:

- [1] 陈晓晶. 井工煤矿运输系统智能化技术现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(06): 6-14, 35.
- [2] 刘青红, 史发慧. 煤矿井下绿色智能辅助运输调度系统的研究[J]. 矿山机械, 2024, 52(07): 16-21.
- [3] 赵康康, 刘波. 煤矿井下水处理装置智能控制系统设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 151-157.
- [4] 谢军峰, 张阳. 基于数字孪生的智能控制技术在煤矿提升系统的设计及应用[J]. 煤矿机械, 2024, 45(10): 212-215.
- [5] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(01): 34-53.
- [6] 张锐, 彭俊, 白屹彬, 等. 煤矿井下排水系统智能监控关键技术研究[J]. 矿山机械, 2024, 52(08): 54-59.
- [7] 张旭辉, 万继成, 杨文娟, 等. 煤矿巷道智能掘进技术进展、挑战与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(01): 388-410.
- [8] 田锦钊, 吴玉杰, 冉令才, 等. 车路协同下的煤矿井下辅助运输系统设计与智能调度方法[J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 235-241.
- [9] 王国法, 孟庆勇, 侯林, 等. 5G+ 工业互联网智能化矿井及智能放煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2026, 51(01): 112-142.