



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

急倾斜短壁综放智能开采关键技术与示范

李浩荡 刘清 谷彬 姚钰鹏 孙延义 田欣 熊武 刘昆轮 鲍新平 吴军飞 闫瑞兵

引用本文:

李浩荡, 刘清, 谷彬, 等. 急倾斜短壁综放智能开采关键技术与示范[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 43–55.

LI Haodang, LIU Qing, GU Bin. Key technologies and demonstration of unmanned steeply inclined short-wall fully mechanized top-coal caving intelligent mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 43–55.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0778>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

急倾斜厚煤层短壁综放采场承载结构泛化特征

Generalization characteristics of bearing structure in short wall fully-mechanized top-coal caving mining face of steeply inclined thick seam

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 56–64 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d3e0fc1e-e01e-4717-8ac2-aace33352b52>

千万吨级综放工作面智能化放煤理论及关键技术

Theory and key technologies for intelligent fully-mechanized top-coal caving faces of annual production of millions of tons

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 48–67 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0880>

高瓦斯综放工作面智能放煤关键技术研究与应用

Research and application of key technology of intelligent coal caving in high gas fully-mechanized top coal caving face

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 252–265 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1407>

特厚煤层综放工作面智能控制关键技术研究

Study on key technology of intelligent control in fully-mechanized top coal caving face in extra thick seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/74be4f1f-0ac0-4a87-9049-cf0b22e6bd95>

综放开采智能化控制系统研发与应用

Research and application of intelligent control system for full-mechanized caving mining

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 128–135 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a0729e1a-d36c-46c8-907b-5de5cae5a550>

我国煤矿综放开采40年: 理论与技术装备研究进展

Advances on longwall fully-mechanized top-coal caving mining technology in China during past 40 years: theory, equipment and approach

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 1–29 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李浩荡, 刘 清, 谷 彬, 等. 急倾斜短壁综放智能开采关键技术与示范[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 43–55.

LI Haodang, LIU Qing, GU Bin, *et al.* Key technologies and demonstration of unmanned steeply inclined short-wall fully mechanized top-coal caving intelligent mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 43–55.

论文 30 篇, 授权专利 7 项。

李浩荡, 男, 河北柏乡人, 教授级高级工程师, 博士研究生导师, 享受国务院政府特殊津贴, 现任国家能源集团新疆能源公司副总经理, 兼任中国煤炭学会副主任委员。主要研究方向包括煤矿冲击地压防治、数智开采技术、煤炭智能化开采、煤矿动载控制技术、产业战略规划与协同发展机制; 重点聚焦煤矿智能装备应用、智能化系统建设及其对生产关系与组织模式的变革研究。获第 24 届孙越崎青年科技奖, 中国能源研究会优秀青年能源科技工作者奖, 中国煤炭工业科技创新领军人才、全国煤炭工业一线优秀青年科技工作者、神华专利之星等荣誉称号, 获省部级科技进步奖 3 项。发表学术

急倾斜短壁综放智能开采关键技术与示范

李浩荡^{1,2}, 刘 清³, 谷 彬⁴, 姚钰鹏³, 孙延义⁵, 田 欣¹, 熊 武³, 刘昆轮^{1,2}, 鲍新平¹, 吴军飞³, 闫瑞兵¹

(1. 国家能源集团新疆能源化工有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830027; 2. 厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399; 4. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 榆林 719315; 5. 国家能源集团新疆能源化工有限公司乌东煤矿, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:“十四五”以来, 中国煤矿数智技术快速发展, 特别是在薄煤层开采中取得较大突破。但急倾斜短壁综放无人化智能开采技术仍处于探索阶段, 尚无成熟应用示范。为加快推进数智技术赋能煤炭产业升级, 基于新疆乌东煤矿急倾斜短壁综放开采特点和优势, 提出了急倾斜短壁综放智能开采的 5 项关键核心技术和 1 个管控模式。5 项关键核心技术包括: 基于工作面煤层赋存条件、开采特点难点的单滚筒采煤机“厘米+毫秒”级精准规划时空导航系统; 解决短壁工作面采放协同机制复杂、参数调控难度大的基于行为数据驱动的自主放煤模型和基于图像煤矸自识别的闭环控制系统; 解决井下环境复杂、设备状态数据割裂等问题的全工作面物理场景实时映射仿真的数字孪生系统; 解决远程干预反馈信息不足、生产指导力差的国内首套用于急倾斜短壁工作面的全工作面视频拼接软件, 实现了提供地面干预物理场景并与数字孪生全息交互; 聚焦急倾斜煤层开采设备繁杂、设备协同难度大和井下多设备间控制逻辑分散、远程干预频次高等问题的工作面机架协同控制系统和地面操作岛远程集控系统, 实现多设备集中控制。1 个管控模式包括 1 个决策控制平台、1 个智能化设备群、1 支专业化运维队伍, 实现平台化扁平化管控新模式。依托 5 项关键核心技术和 1 个管控模式, 建成了新疆乌东煤矿急倾斜短壁综放智能常态化运行的示范工作面, 为我国煤矿普适性数智无人开采提供了技术范式和实践样板。

关键词:专业模型; 采放协同; 短壁综放; 智能无人; 生产方式变革

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0043-13

Key technologies and demonstration of unmanned steeply inclined short-wall fully mechanized top-coal caving intelligent mining

LI Haodang^{1,2}, LIU Qing³, GU Bin⁴, YAO Yupeng³, SUN Yanyu⁵, TIAN Xin¹, XIONG Wu³, LIU Kunlun^{1,2}, BAO Xinpeng¹, WU Junfei³, YAN Ruibing¹

收稿日期: 2025-06-03

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2025-0778

基金项目: 企业科技创业资助项目(E170000212)

作者简介: 李浩荡(1981—), 男, 河北柏乡人, 教授级高级工程师, 博士研究生导师。E-mail: 10000338@chnenergy.com.cn

(1. CHN Energy Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830027, China; 2. Engineering Research Center of Green and Intelligent Mining for Thick Coal Seam, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd. Beijing, 101399, China; 4. Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China; 5. Wudong Coal Mine, CHN Energy Group Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: Since the 14th Five-Year Plan, my China's coal mine digital intelligence technology has developed rapidly, especially in thin coal seam mining. However, the unmanned intelligent mining technology of steeply inclined short-wall fully mechanized caving is still in the exploratory stage, and there is no mature application demonstration. In order to accelerate the promotion of digital intelligence technology to empower the upgrading of the coal industry, based on the characteristics and advantages of steeply inclined short-wall fully mechanized caving mining in Xinjiang Wudong Coal Mine, 5 key core technologies and 1 management and control mode of steeply inclined short-wall fully mechanized caving intelligent mining are proposed. The five key core technologies include: a single drum coal mining machine “centimeter + millisecond” level precise planning and space-time navigation system based on the coal seam occurrence conditions and mining characteristics of the working face; an autonomous coal-laying model driven by behavioral data and a closed-loop control system based on image-based coal gangue self-identification to solve the complex coordination mechanism of short-wall working faces and the difficulty of parameter control; a digital twin system for real-time mapping and simulation of the physical scene of the entire working face to solve the problems of complex underground environment and fragmentation of equipment status data; the first domestic full-face video splicing software for steeply inclined short-wall working faces to solve the problems of insufficient feedback information and poor production guidance for remote intervention, which realizes the provision of ground intervention physical scenes and holographic interaction with digital twins; a working face rack collaborative control system and a ground operation island remote centralized control system that focus on the problems of complex equipment, difficult equipment coordination, decentralized control logic between multiple equipment underground, and high frequency of remote intervention in steeply inclined coal seams, to achieve centralized control of multiple devices. One management and control mode includes one decision-making control platform, one intelligent equipment group, and one professional operation and maintenance team to realize a new platform-based flat management and control mode. Relying on five key core technologies and one management and control model, a demonstration working face for the intelligent and normalized operation of steeply inclined short-wall fully-mechanized mining in the Wudong Coal Mine in Xinjiang was built, providing a technical paradigm and practical model for the universal digital and unmanned mining in my country's coal mines.

Key words: specialized control model; mining-caving coordination; short-wall fully mechanized top-coal caving; intelligent unmanned mining; production mode transformation

0 引 言

2020 年,国家八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,明确了煤矿智能化发展的方向、目标、路径,推动了煤矿智能化建设进入新的阶段^[1-4]。近年来,煤矿智能化建设取得较快发展,尤其是以榆家梁^[5]、黄陵一号煤矿^[6]为代表的较薄煤层综采工作面实现了无人开采。针对综放工作面,同煤塔山煤矿^[7-8]进行了大采高综放开采技术试验,通过“多采少放”促进采放协同,改善了顶煤的破碎度和冒放性;应用 RBF 算法与果蝇优化算法对放顶煤时间进行精确控制,自动调整和记录放煤时间及放煤过程中的人工干预情况,解决了特厚煤层开采过程中随着放煤时间的变化面临的难以定量控制的难题。王家臣等^[9]提出了放煤“四要素”理论框架,通过系统研究煤岩分界面、顶煤放出体、顶煤采出率和含矸率之间的关系,为放煤工艺的优化提供了科学依据。针对综放工作面中高级智能技术阶段,提出了煤矿体制变革和管控方式^[10]。

目前,急倾斜短壁超大采放比工作面智能化开

采存在诸多难点需要攻克^[11-13]。胡璟^[14]提出了受限于短壁空间尺度,需采用单滚筒设备进行开采,而目前成熟的采煤与放煤协同工艺是基于双滚筒设备开发,无法直接移植于短壁工作面。王忠宾等^[15]明确了急倾斜煤层地形起伏剧烈、结构复杂,支架稳定性差,造成作业环境动态变化显著的难点。徐辉^[16]提出采煤机在急倾斜煤层中的截割轨迹变化快速且非线性明显,需要研发具备自适应截割能力的控制系统,并实现远程控制与路径修正,从而保障采煤效率与设备安全。李东印等^[17]在研究中提出超大采放比群组放煤过程面临顶煤放出规律不清、采放协同机制复杂、参数调控难度大等技术瓶颈严重制约智能放煤控制系统的稳定性与实用性。侯利鹏等^[18]提出急倾斜煤层结构复杂、顶煤与矸石界面识别困难的观点。王林海等^[19]、马宏伟等^[20]指出了当前针对放煤混矸率的监测主要依赖人工经验或间接信号推断,缺乏高精度、实时的混矸率在线监测系统,不利于构建闭环智能控制机制的论点。王国法等^[21]提出智能化综放开采不仅依赖于单点设备的自动化控制,更需构建面向全工作面的感知—决策—执行闭环系统

的观点。为破解急倾斜短壁综放无人化智能开采技术难题和加快推进数智技术赋能煤炭产业升级,依据新疆乌东煤矿急倾斜短壁综放开采煤层赋存条件,分析了实现智能化、无人化开采的主要制约因素,研究提出了“5项关键技术+1个管控新模式”的智能化示范路径。

1 工程背景及分析

乌东煤矿位于急倾斜煤层赋存区,井田面积 19.94 km^2 ,可采储量 6.61 亿 t ,设计产能 600 万 t/a ,服务年限 76.9 a ,为大型急倾斜井工煤矿。矿井地质条件复杂,冲击地压、高瓦斯等多灾害耦合,煤层倾角大($43^\circ\sim 89^\circ$),煤层厚度 $30\sim 50\text{ m}$,采用水平分段综放开采工艺(阶段高度 25 m ,工作面顶底板为煤)。研究对象为西区+443水平 B_{1+2} 工作面,工作面长 31.6 m ,推进长度 1830 m ,倾角 89° ,采放比 $1:7$ (超大),采用MG380/435-NWD型单滚筒采煤机、ZFY10000/22/40D型号支架(共14架)、SGZ-800/315(前)/SGZ-1000/315(后)型号刮板输送机。该工作面短、水平分段开采,生产过程主要面临以下4方面挑战:

1)工作面开采长度短导致空间限制。受限空间要求采用单滚筒采煤机取代传统双滚筒设备,割煤始终处于进刀收刀状态,需重构采放协同工艺,现有的智能化系统难以直接适配。

2)煤层顶底板变化大动态控制难。急倾斜煤层导致煤层厚度变化大,设备需实时自适应调整截割轨迹与支护参数,对传感器精度和控制响应速度要求高。

3)超大采放比导致采放过程出现同步性问题。极限采放比下,传统放煤策略失效,需通过分组多级

放煤优化时序,工艺复杂度显著增加,易引发放煤滞后或矸石混入风险。

4)多设备在受限空间内协同控制难度大。短壁开采狭小空间布局大量设备,作业内容繁多、设备动作频繁、互相影响较大,设备感知、人工干预能力严重受限,且物理场景动态变化、粉尘和有害气体干扰严重,多机群体智能协同挑战大。

因此,乌东煤矿兼具资源禀赋优势与各种挑战,亟需通过智能化技术突破设备适配性、动态协同控制等核心难题,为急倾斜短壁综放工作面安全高效智能开发提供示范路径。

2 综放无人智能开采总体思路和技术路线

结合地质条件、装备配套及存在问题,提出综放无人化智能开采的总体思路和技术路线。

1)总体思路。基于该矿工作面短、分层开采、单滚筒煤机等优势和特点,研究工作面人的操控行为,将井下物理场景全景呈现地面,并与数字场景交互,构建割煤放煤AI专业模型、攻克动态视频拼接技术,形成地面操作与井下作业同感场景,实现短壁综放工作面面内无人化智能开采常态化运行。针对开采场景复杂等难题,聚焦机架协同控制等科学问题,建立专业模型,攻克采放协同控制、数字孪生、全景视频等关键技术,构建“远程自主采放、虚实全景辅助、面内无人作业”的采放新模式,综放无人智能开采总体思路如图1所示。

2)技术路线。按照总体思路,提出工作面内无人、地面操控新模式的“5+1”技术体系,构建全感知、自决策、智寻优和人机环管全要素、全周期、全场景交互耦合的群体协同智能技术和新的生产管控模式,综放无人智能开采技术路线如图2所示。



图1 综放无人智能开采总体思路

Fig.1 Design ideas

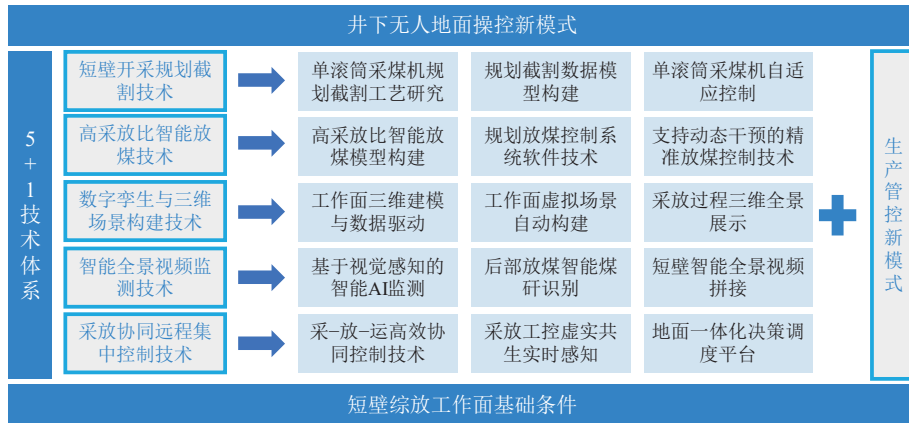


图 2 综放无人智能开采技术路线

Fig.2 Technical route of fully mechanized caving unmanned intelligent mining

3 综放无人智能开采的 5 项关键技术

围绕“感知-决策-执行-反馈”闭环控制体系构建,形成急倾斜短壁综放智能开采系统解决方案,突破采煤机厘米级导航、智能放煤建模控制、集控岛远程作业、全景拼接和数字孪生可视化平台等 5 项关键技术,打破了大倾角、高干扰、强耦合等制约因素,有效构建出多源信息融合、全流程闭环控制的智能开采新范式。

3.1 短壁工作面自主规划截割技术

自主规划截割技术是综放智能开采的核心技术之一,其原理是通过构建规划截割数据模型,实现采煤机截割高度和路径的精准规划^[22]。围绕“无人化、精准化、自主化”目标,构建国内首套面向短壁工作面的单滚筒规划截割控制技术体系,实现多维感知、数据驱动、自主学习的融合。短壁工作面自主规划截割技术主要包括“厘米+毫秒”级导航反馈与行为数据驱动的动态截割轨迹构建技术、高频闭环纠偏与概率因子动态修正、分布式智能调度与边缘计算融合架构。单滚筒自主规划截割系统展示效果如图 3 所示。

(1)“厘米+毫秒”级导航反馈与行为数据驱动的动态截割轨迹构建技术。“厘米+毫秒级”自适应精准控制系统如图 4 所示,首创“空间-时间-行为”三维融合的截割模板体系,形成截割曲线的高精度动态建模与修正机制,其实现路径优化包括以下 3 个部分:

1)“空间-时间-行为”三维融合的截割模板架构:以煤层倾角 θ 、厚度 h 和硬度 η 为基础建立空间模型 M :

$$M(x, y, z) = f(\theta(x, y), h(x, y), \eta(x, y)) \quad (1)$$

2)实时捕捉采煤机运行状态序列 S :

$$S_t = \{v_t, a_t, \omega_t\}, t \in [0, T] \quad (2)$$

式中: v_t 为 t 时刻的采煤机速度; a_t 为 t 时刻的采煤机运行方向; ω_t 为 t 时刻的采煤机摇臂角度。

3)构建动态模板库,引入采煤机运行过程中的人工干预、路径修正操作数据 B_t ,构建时序行为数据库,提取关键特征 \hat{B}_t ,驱动模板自适应更新,对截割路径进行持续更新与滚动预测:

$$\hat{B}_t = \text{FeatureExtract}(B_t) \quad (3)$$

$$\Delta M_t = \phi(\hat{B}_t) \quad (4)$$

(2)高频闭环纠偏与概率因子动态修正。在路径执行过程中,系统通过逐点空间匹配机制计算后验概率匹配度,若低于阈值则执行轨迹自动纠偏:

$$P_{\text{pose}}(x_t|z_t) = \frac{P(z_t)P(x_t|z_t)}{P(x_t)} < \epsilon \Rightarrow \text{轨迹更新} \quad (5)$$

其中, $P_{\text{pose}}(x_t|z_t)$ 为在给定观测值 z_t 的条件下,当前预测轨迹状态 x_t 的可信程度; $P(z_t)$ 为观测值 z_t 出现的总概率; $P(x_t|z_t)$ 为当前状态 x_t 观测到 z_t 的概率; $P(x_t)$ 为在没有观测数据前,系统预测当前位置为 x_t 的概率; ϵ 为后验概率匹配度阈值;

高度模板与路径模板由动态赋值模块驱动,根据实时地质感知数据与煤层结构变化进行自适应调整,实现单滚筒截割轨迹的精准建模与闭环控制。相比传统模式,系统响应时间缩短 70% 以上,截割偏差降低至 ± 5 cm 以内,实现短壁工况下截割轨迹的高保真复现与精准控制。

(3)分布式智能调度与边缘计算融合架构。系统采用多通道边缘计算节点+分布式控制总线技术架构,提升采煤机与支架系统的调度响应效率。煤机轨迹控制延迟压缩至 300 ms 以内,实现短壁综采设备间的高频协同控制,为智能化综放系统提供了稳定的控制底座。

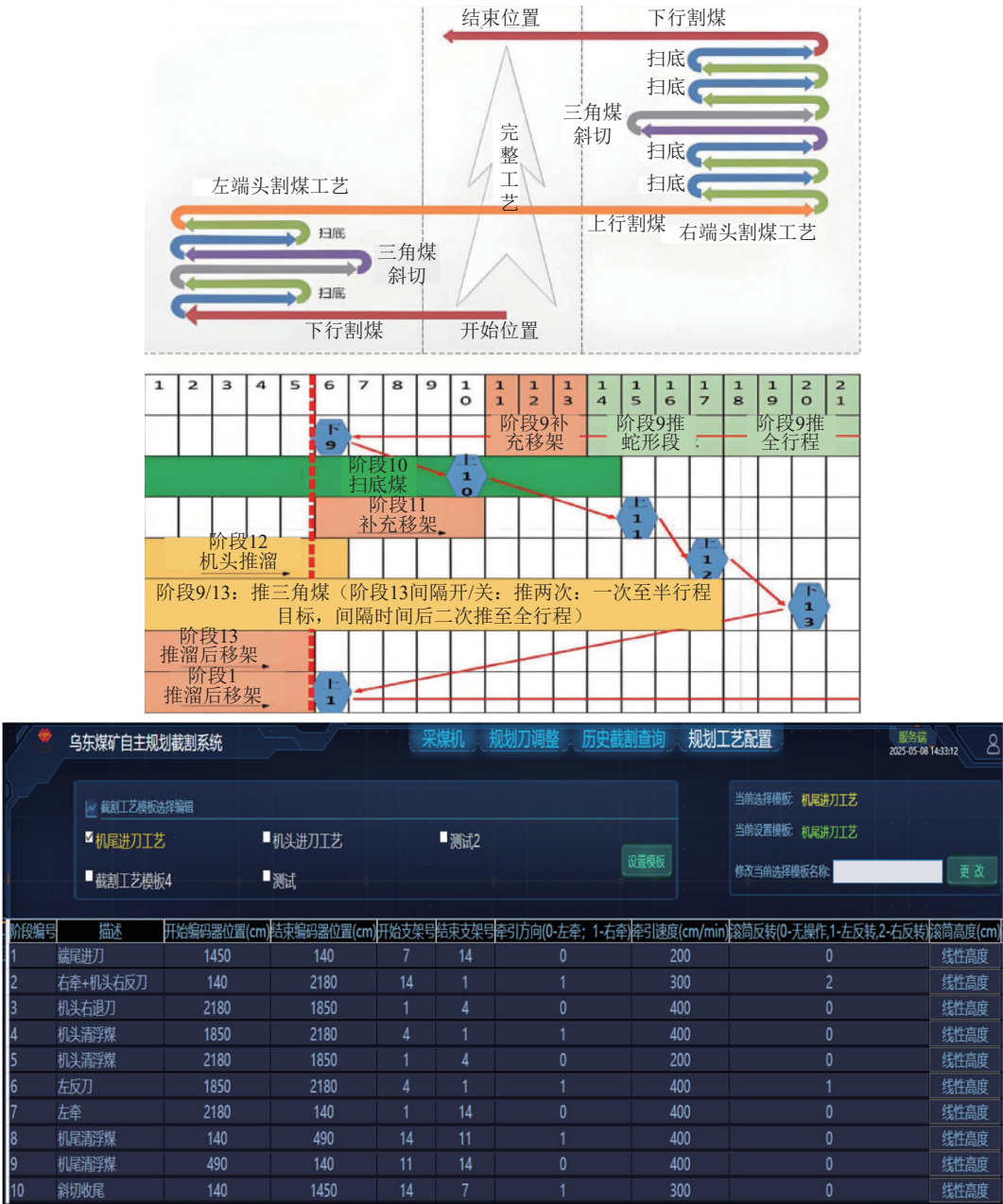


图 3 单滚筒自主规划截割系统展示效果
Fig.3 Single drum autonomous planning and cutting

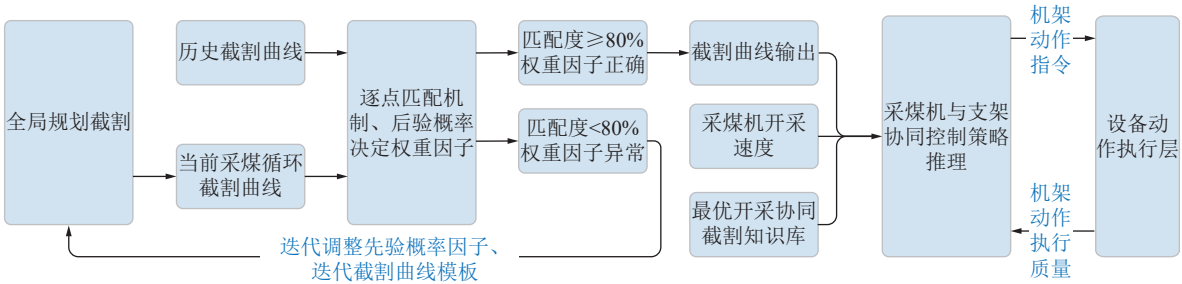


图 4 “厘米+毫米级”自适应精准控制系统
Fig.4 “Centimeter + millimeter level” adaptive precision control system

3.2 超大采放比智能放煤技术

智能放煤技术是综放智能开采的关键技术，通

过研发放煤专业模型及多级融合的智能放煤技术体系，聚焦放煤图像识别、参数模型生成与支架集控协

同控制 3 个维度,开发短壁综放工作面在超大采放比条件下的精准智能放煤控制系统,实现面内系统自主放煤。放煤混矸率控制精度明显优于传统人工经验控制模式,采放协同效率提升约 30%。

1)多源感知驱动的煤矸识别技术。针对传统见矸关门方法感知精度低、响应滞后的问题^[23-24],引入基于 YOLOv8 的矸石实例分割模型^[25],系统通过高帧率工业相机采集液压支架后部放煤窗口图像,结合训练数据集完成对含矸特征的深度学习建模,在图像感兴趣区域内对矸石进行实例分割。计算含矸率方法为

$$\eta_{\text{gangue}} = \frac{A_{\text{gangue}}}{A_{\text{ROI}}} \quad (6)$$

其中, A_{gangue} 为识别出的矸石区域像素面积; A_{ROI} 为感兴趣区域的总面积;以此为依据评估煤流混矸率 η_{gangue} , 判断是否执行关门动作,形成实时闭环控制信号。通过注意力机制对识别模型进行优化,算法模型准确率由原来的 91% 提升至 95%,在多类异构支架放煤场景中具备良好的鲁棒性与泛化能力。煤矸识别系统如图 5 所示。

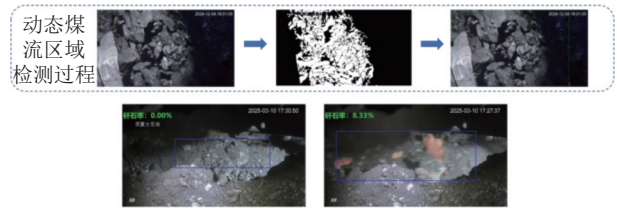


图 5 基于图像的煤矸识别系统

Fig.5 Image-based coal gangue recognition system

2)放煤参数训练式生成模型。面对不同工况下放煤动作的高度差异性,系统通过采集工作面历史人工放煤数据,构建典型放煤动作序列库。基于 RBF 神经网络建立数据驱动放煤模型并持续性训练,放煤参数生成模型如图 6 所示,其中 Input 表示输入的原始工况参数特征,通过权重矩阵 W 和偏置项 b 与 RBF 径向基函数层结合进行加法操作,生成中间层特征;随后通过输出层权重矩阵和偏置项与中间层特征进行乘法操作,最终由 Output 输出放煤控制参数预测结果。该模型实现对放煤等控制要素的自适应拟合与生成。通过动态匹配当前工况参数,系统可生成高度拟合现场条件的放煤控制参数,实现参数级行为精准控制。

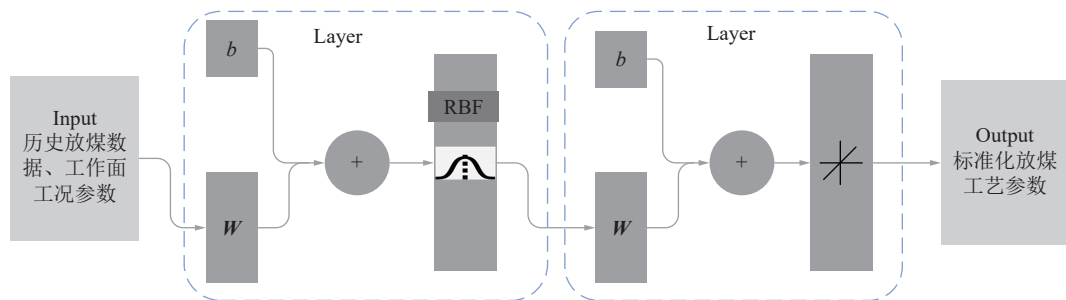


图 6 放煤参数生成模型

Fig.6 Coal caving parameter generation model

3)采支放一体化放煤协同调度机制。基于规划截割路径与放煤需求联动控制逻辑,系统实现采煤机牵引、支架步进与放煤窗口联动控制。在采煤机沿预设轨迹牵引割煤的同时,系统实时解析截割区域的煤层特征与煤矸识别结果,动态控制放煤窗口。随着采煤机完成 1 个循环周期,液压支架按序完成移架操作,刮板输送机自动同步推煤,实现煤流连续输送。该机制显著提升了放煤时机判断的科学性,降低人为干预频率,保障采放比达标的同时有效控制混矸率。

4)“智能识别-参数驱动-协同控制”三位一体放煤体系。图 7 为多级融合的智能放煤技术体系架构,不再依赖单一感知或经验规则,而是实现了“图

像识别+参数预测+工艺调度”的多级融合闭环控制机制。系统具备多源信息融合、自主判断、自主生成、自主控制等能力,显著提升了复杂工况下放煤决策的智能性与适应性,为短壁综放工作面实现稳定、高效、少混矸的放煤作业提供了坚实支撑。

3.3 数字孪生及三维场景构建技术

数字孪生是实现综放智能开采的重要支撑,通过构建能够实时反映设备工况、场景环境和作业过程的数字化支撑平台,实现与物理场景交互控制。依托数字孪生技术,创新构建短壁采放数字孪生系统与三维场景自动构建技术体系,驱动数据与虚拟模型关联准确度达 95%,实现对井下复杂采放环境的高精度重建、动态信息同步与多角度沉浸式可视

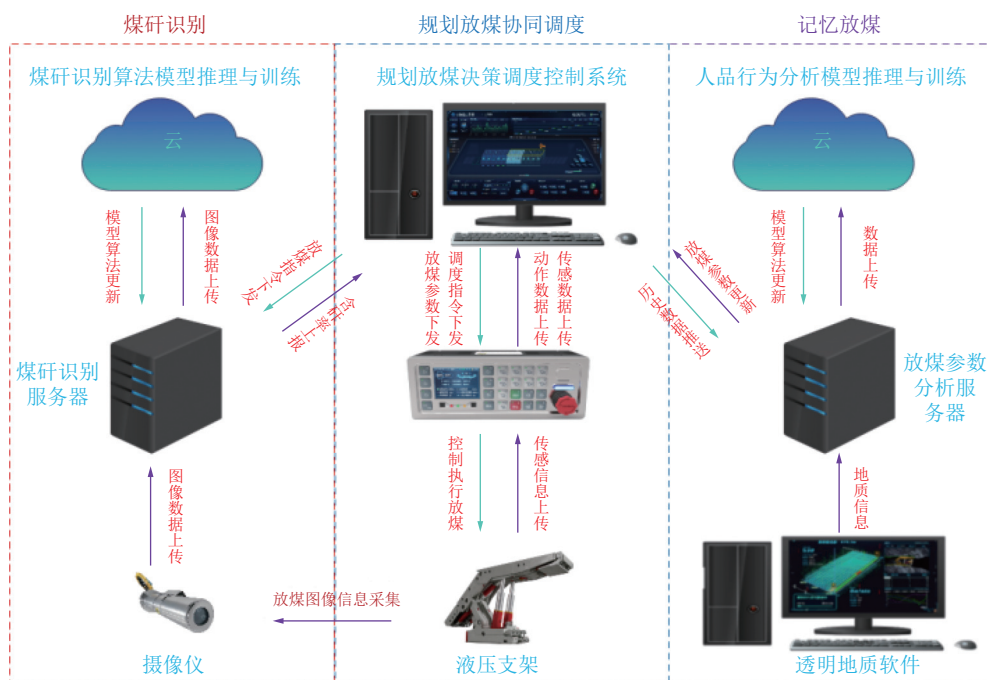


图7 多级融合的智能放煤技术体系架构

Fig.7 Multi-level integrated intelligent coal caving technology system architecture

化展示,为地面远程操控和工艺优化提供有力支撑。

3.3.1 短壁工作面多设备高精度孪生模型

针对设备形态复杂、空间分布紧凑及运行状态多变的特点,构建了基于PBR(Physically Based Rendering)的数字孪生建模框架:首先通过标准化层级设计建立“设备层-组件层-零件层”三级参数化模型,融合工程图纸与BIM数据实现多源几何语义映射,采用语义驱动装配技术完成液压支架伸缩梁、采煤机摇臂等关键部件的动态构型生成;继而通过金属度/粗糙度参数提取、法线贴图烘焙等PBR材质生成流程,构建具备物理属性的装备表面特征;在建模优化阶段实施低多边形轻量化(三角面片缩减78%)、LOD细节层级管理及按需加载机制,结合Draco压缩算法实现多终端高效传输;最终嵌入实时孪生同步算法,通过动态约束耦合(采煤机截割速度-支架移架时间时序同步)与GPU Instancing批量渲染技术,构建支持毫米级精度与毫秒级响应的数字孪生体,为复杂采煤装备系统的虚实交互与智能决策提供保真模型基础。基于PBR的高精度孪生模型建模流程如图8所示。

3.3.2 三维场景自动化构建算法

提出了三维虚拟场景自动化构建算法,通过多模块协同实现综放工作面场景的快速搭建与灵活重构。算法主要包括以下3个关键步骤:

1)坐标系自动对齐。基于全局参考坐标与设备局部坐标的几何映射关系,采用ICP(Iterative Closest Point)算法^[26]实现模型的空间自动对接与姿态统一,

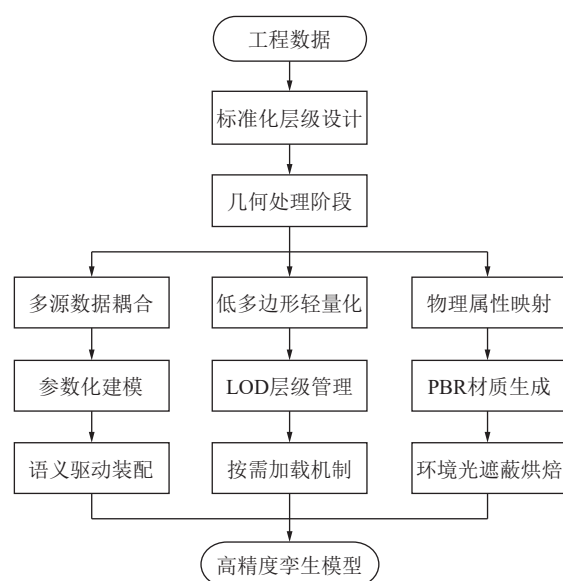


图8 基于PBR的高精度孪生模型建模流程

Fig.8 PBR-based high-fidelity digital twin modeling workflow

ICP算法的公式如式7所示:

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^n \left\| (R * p_{gi} + t) + p_{li} \right\|^2 + \gamma \sum_{i=1}^n \text{shapeContext}(p_{gi} + p_{li}) \quad (7)$$

其中, R 为 3×3 旋转矩阵,其满足正交性约束 $R^T R = I$,表示2个坐标系之间的旋转关系,用于对齐设备几何方向; t 为 3×1 平移向量,表示坐标系原点偏移,用于消除设备安装基准面差异; p_{gi} 为模型全

局坐标系下的点坐标; p_{li} 为模型局部坐标系下的点坐标; γ 为模型形状上下文权重系数; ShapeContext 是形状上下文描述子函数, 计算点对形状特征差异。

2) 接口标准化。通过统一设备几何连接接口的定义方式与通信协议, 实现模块间的无缝拼接与交互兼容。

3) 参数化驱动拼接。构建设备模型参数字典与配置模板, 结合预设工况自动匹配设备类型、数量及相对位置, 完成模型的规则化组合与装配。

此外, 系统还集成了模型库自动扩展机制, 可依据实时读取的装备配置数据动态加载所需模块, 并支持边运行边更新场景布局, 从而显著提升系统的工况适应能力与部署效率。有效克服了传统建模过程中依赖人工、重建周期长的问题和工况适配难题, 为综放工作面的快速仿真部署提供了技术支撑。

3.3.3 虚实双向同步机制

系统以“虚映实”与“实映虚”双向映射机制为核心, 构建了集感知、融合、驱动于一体的设备状态映射框架。结合井下传感器实时数据, 融合采煤机牵引速度、滚筒摆角、支架位置、尾梁倾角等关键参数, 实现采煤机位置、支架状态、尾部姿态等的动态更新。特别是针对尾部放煤过程不可视、状态难控的问题, 设计后部支架局部特写视角与实时动作映射算法, 结合尾梁姿态传感器, 动态呈现尾部放煤过程, 后部放煤视角如图 9 所示, 显著提升了地面操控人员对隐蔽区域作业的可视化理解和干预能力。

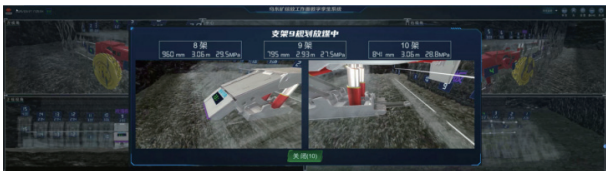


图 9 后部放煤视角

Fig.9 Coal caving perspective from the rear

3.3.4 三维历史回放与设备故障孪生诊断技术

系统支持关键操作流程的三维历史回放与可视化分析, 便于调度人员复盘放煤工艺, 优化操作策略。同时结合运行数据分析与状态异常检测, 具备初步的设备孪生故障诊断能力, 可提前预警关键设备异常状态, 为实现预测性维护提供基础支撑。短壁工作面数字孪生场景如图 10 所示。

3.4 短壁智能全景视频监控技术

全景视频监控是短壁综放智能开采的有效载体^[27-28], 通过引入智能视频识别与全景图像拼接技术, 将特殊区域场景 AI 识别和工作面场景整体地面化呈现, 实现关键设备状态、作业过程与异常工况全

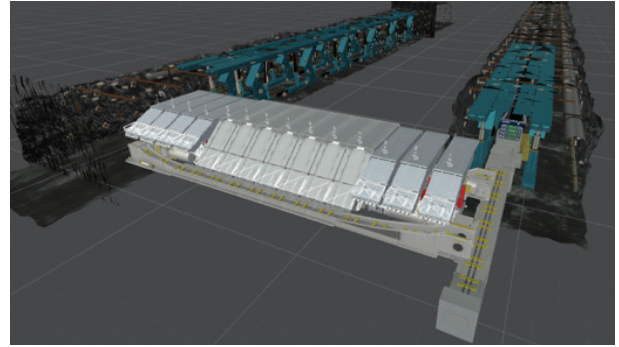


图 10 短壁工作面数字孪生场景

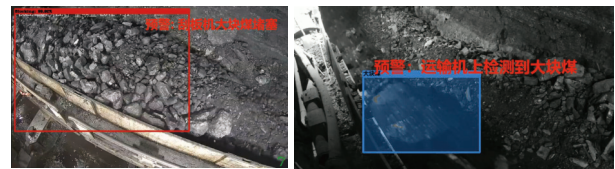
Fig.10 Short wall working face scene

面感知、智能识别、实时察看, 支撑地面调度系统实时干预和精细管理, 系统成功应用标志着我国在复杂地质条件下工作面全景感知与多源信息融合技术领域取得了重要突破, 为智能综放开采由“点控制”向“面覆盖”演进提供了可行路径, 实现了工作面物理场景地面全景呈现。

1) 工作面 AI 视频监控技术。通过对工作面大量实拍监控视频数据进行标注和分析, 构建了多尺度视觉特征提取框架, 设计并训练面向复杂工况的多类别目标检测识别与语义分割算法模型, 基于深度学习 CNN(卷积神经网络)技术实现采煤机目标图像检测和后部摄像仪煤矸识别; 基于视频时间序列分析技术实现工作面运输机煤流状态识别; 部署应用过程中, 采用 TensorRT 模型^[29] 量化和剪枝实现模型推理加速, 实现视频图像实时推理分析。为后端控制策略的自动化提供了稳定、可靠的数据支撑。显著提升了工作面智能感知能力与辅助控制水平。图 11 为智能视频监控效果。



(a) 滚筒护帮防碰撞监测



(b) 大块煤防堵塞监测



(c) 煤流监测

图 11 智能视频监控效果

Fig.11 Intelligent video monitoring effect

2)短壁工作面全景视频拼接技术。基于多摄像头阵列协同感知、深度学习图像配准算法、畸变自适应校正技术以及视频流实时融合框架,融合 ORB/SURF 等传统特征提取方法^[30-31]与卷积神经网络提取语义特征,实现对图像帧间的自适应匹配与稳健拼接。采用边缘节点进行图像预处理与帧同步,大幅降低数据传输延迟,提升拼接系统整体实时性。通过 IMU 与视觉联合定位技术,实现设备运行过程

中视角变化的实时标定与图像重定位,确保拼接画面的空间一致性。该技术实现了复杂动态场景下的稳定拼接与无缝切换,效果如图 12 所示。

3)智能视频信息驱动控制闭环机制。对视频帧图像中煤矸混杂物、煤流目标进行检测与语义分割,将视频中感知结果转化为结构化信息输出,输出被实时输入至主控系统,触发对应控制策略,完成闭环联动。



图 12 全景视频拼接效果

Fig.12 Panoramic video stitching effect

3.5 采放协同远程集中控制技术

地面远程集中控制是综放智能开采的操控平台,通过融合信息感知、远程操作、集中调度与智能决策能力,实现地面对井下采煤、放煤等关键工序的一体化、透明化和智能化控制,提升整体作业效率。围绕短壁综放工作面的智能管控需求,设计并实现了一套采放协同远程集中控制系统,实现了从地面对工作面的远程集中控制与智能辅助决策。

1)采用工作面智能终端-巷道控制节点-地面管控中心三级集中控制架构,打破传统“设备独立运行、信息分散孤立”的局限,实现了控制系统的纵向贯通与全局协调。系统以工业以太网为主干网络,联合工作面无线局域网与多跳自组网通信技术,构建覆盖井下各类智能终端设备的高可靠高速信息通道。所有传感器与执行机构信息首先汇聚至工作面巷道监控中心的隔爆型服务器,通过数据规约及协议转换,上行传输至地面高性能数据中心与调度服务器。在此基础上,系统采用基于组态软件平台的控制框架,实现多源异构子系统(采煤机、液压支架、刮板输送机)的统一建模与集中控制,为构建“信息集中、决策统一、调度灵活”的智能采放系统奠定了坚实基础。集中控制三级架构如图 13 所示。

2)面向地面高效采放操控需求,研究开发了一套一体化调度决策平台,融合采放工序建模、模板调度控制、实时视频监控和人机交互操作于一体,构建感知-决策-控制-反馈的全流程闭环调度体系。平台具备以下关键特征:① 流程化采放工序引擎:支持采煤割煤、放煤、设备调姿等多类工序的模板化编排与动态调度,支持按区段/时间/工况进行任务设定。② 工艺智能干预技术:在放煤等自动工艺执行过程

中,支持上位机发出暂停指令,临时中止当前工艺流程,并将液压支架位姿固定在暂停时的状态。期间允许手动干预操作。通过恢复指令,系统在原工艺断点处继续执行,确保工艺流程的连续性。③ 触屏交互与跳转控制机制:操作员可通过图形化触屏界面快速跳转执行特定采放工序,具备良好的人机交互体验。④ 高分辨率视频拼接与零盲区监控方案:通过视频拼接技术整合工作面多路图像源,采用横向高清布局实现“煤机割煤一张图”的效果,增强井下可视化感知能力。⑤ 监控区域独立可调设计:支持放煤窗口、两巷交汇口等重点区域的单独放大、实时回看和智能识别结果叠加,便于异常状态快速响应。⑥ 反馈闭环控制逻辑:采集视频图像、设备状态、混矸率等数据,实时调整采高模板、支架开闭逻辑,实现自动控制与动态纠偏。一体化决策调度中心如图 14 所示。

4 智能开采管控新模式

基于 5 项关键核心技术,构建了短壁综放智能开采“远程自主采放、虚实全景辅助、面内无人作业”生产新模式。

4.1 管控模式变革

基于生产新模式,构建“1+1+1”生产管控新模式,即“1 个决策控制平台+1 个智能设备群+1 支专业化运维队伍”,明确了人机分工边界,形成以平台为核心、设备为载体、人员为保障的智能化生产协同体系,变革前后变化对比见表 1。

4.2 组织架构变革

组织架构如图 15 所示,采用扁平化、平台化管控,以地面决策控制中心为核心,构建功能清晰、

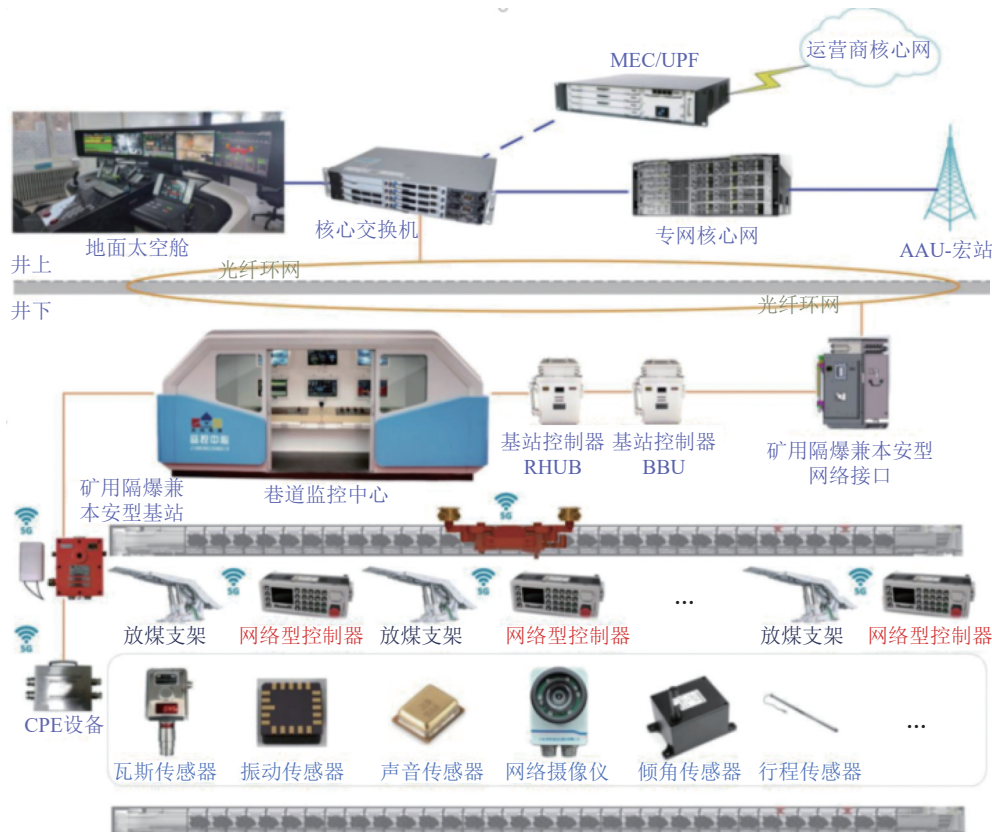


图 13 集中控制三级架构
Fig.13 Centralized control three-level architecture



图 14 一体化决策调度中心
Fig.14 Integrated decision-making and dispatching center

协同高效的专业化运行团队。各机构分工明确，分别负责采煤机控制、支架电液控、后台数据分析、设备检修与巡检等任务，高效完成井上下各类作业。

4.3 岗位设置变革

建立了“前台调度 + 后台分析 + 现场运维”的分层操控岗位架构，如图 16 所示，实现组织职能的集成与高效协同。新增地面控制、后台分析、生产运维与巡检干预等岗位，整体人员配置较传统模式明显精简。

5 建设成效

- 1) 减人提效成果突出，井下面内作业人数由 5 人减少至 1 人(特殊情况干预人员)，每班减少作业人员 2 人，作业人员减少 80%、直接生产效率提升 15%，员工劳动强度大幅降低。
- 2) 提高了安全绿色开采水平，生产班工作面内减少人员 80%，提高了多灾害矿井安全保障水平。

表 1 生产管控模式变革对比
Table 1 Comparison of changes in production control models

维度	创新前	创新后
管理方式	人工指挥，人工汇报	远程集控，数据驱动决策
信息反馈	人工喊话，信息传递滞后	数字孪生与视频拼接，毫秒级实时反馈
设备控制	分散控制，现场操作	操作岛远程集中控制
决策模式	被动响应，效率低	主动预测，数据分析优化生产
目标	维持生产，安全管理难度高	助力智能矿山建设，高效安全生产

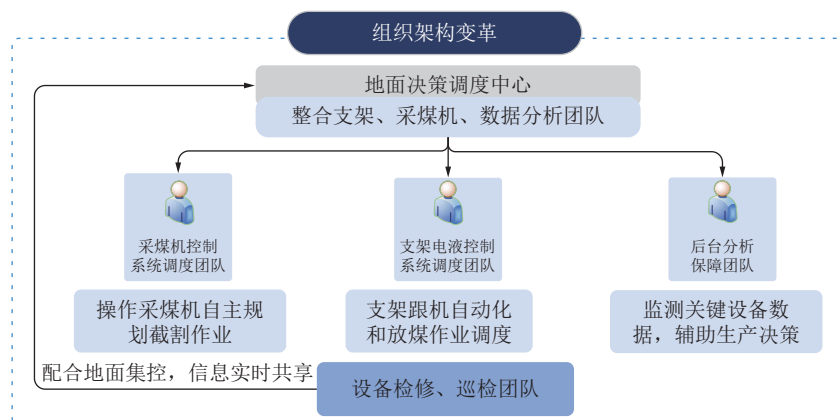


图 15 组织架构

Fig.15 Organizational structure

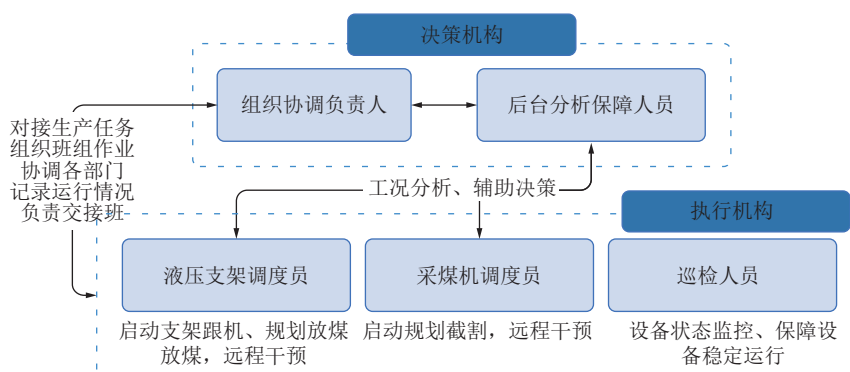


图 16 岗位架构

Fig.16 Position structure diagram

顶煤回收率提升了 4%，年煤炭产量达 300 万 t，绿色开采取得实效。

3) 工作面基本实现常态化运行，工作面内人工干预率小于 5%、地面人工干预率小于 15%，为复杂煤层智能开采提供了一条具备普适性的新路径。

6 结 论

1) 聚焦急倾斜短壁综放工作面智能开采难题，突破规划截割、智能放煤、虚拟建模、感知识别与远程调控五项关键核心技术，构建了高效、协同、闭环的智能控制体系，显著提升了开采效率与控制精度，为复杂地质条件下智能化开采提供了系统性解决方案。

2) 首创了“远程自主采放、虚实全景辅助、面内无人作业”的新型生产模式和“1+1+1”平台化、扁平化管控架构，实现了智能开采在提质增效、减人提效、安全环保等方面的综合价值。

3) 急倾斜短壁智能综放工作面示范重塑了传统生产关系，推动煤矿产业向本质安全、智能无人、绿色清洁方向转型升级。

参考文献(References):

- [1] 王家臣, 杨胜利, 刘淑琴, 等. 急倾斜煤层开采技术现状与流态化开采构想[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 48–59.
WANG Jiachen, YANG Shengli, LIU Shuqin, et al. Technology status and fluidized mining conception for steeply inclined coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 48–59.
- [2] 王家臣. 我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 43–51.
WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 43–51.
- [3] 黄曾华. 综采装备单机智能化向智能协同模式转型的探索研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 169–175.
HUANG Zenghua. Exploration and research on transformation from intelligent single machine equipment to intelligent synergy in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 169–175.
- [4] 王国法, 徐亚军, 孟祥军, 等. 智能化采煤工作面分类、分级评价指标体系[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3033–3044.
WANG Guofa, XU Yajun, MENG Xiangjun, et al. Specification, classification and grading evaluation index for smart longwall mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3033–3044.
- [5] 刘小雄, 王海军. 薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技

- 术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 67–74.
- LIU Xiaoxiong, WANG Haijun. Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 67–74.
- [6] 赋能高质量蓄势新征程全面建成国际一流智能化示范矿井: 陕西陕煤黄陵矿业公司一号煤矿[J]. 中国煤炭工业, 2023, (7): 2–3.
- Empowering High-Quality Development and Building a World-Class Intelligent Demonstration Mine: No. 1 Coal Mine of Shaanxi Huangling Mining Company of Shaanxi Coal and Chemical Industry[J]. China Coal Industry, 2023(7): 2–3.
- [7] 于斌, 邵阳, 徐刚, 等. 千万吨级综放工作面智能化放煤理论及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 48–67.
- YU Bin, TAI Yang, XU Gang, et al. Theory and key technologies for intelligent fully-mechanized top-coal caving faces of annual production of millions of tons[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 48–67.
- [8] 于斌, 徐刚, 黄志增, 等. 特厚煤层智能化综放开采理论与关键技术架构[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 42–53.
- YU Bin, XU Gang, HUANG Zhizeng, et al. Theory and its key technology framework of intelligentized fully-mechanized caving mining in extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 42–53.
- [9] 王家臣, 杨胜利, 李良晖, 等. 智能放煤理论与技术研究进展[J]. 工矿自动化, 2024, 50(9): 1–12.
- WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Lianghui, et al. Research progress on intelligent coal caving theory and technology[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(9): 1–12.
- [10] 李浩荡, 丁震, 张凯, 等. 基于中高级智能技术的煤炭井工开采管控模式[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 1–10.
- LI Haodang, DING Zhen, ZHANG Kai, et al. Management and control mode of underground coal mining based on medium and high-level intelligent technology[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 1–10.
- [11] 宋选民, 朱德福, 王仲伦, 等. 我国煤矿综放开采 40 年: 理论与技术装备研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 1–29.
- SONG Xuanmin, ZHU Defu, WANG Zhonglun, et al. Advances on longwall fully-mechanized top-coal caving mining technology in China during past 40 years: Theory, equipment and approach[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 1–29.
- [12] 王家臣. 我国综放开采 40 年及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 83–99.
- WANG Jiachen. 40 years development and prospect of longwall top coal caving in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 83–99.
- [13] 揭志文. 急倾斜近间距厚煤层采煤方法研究及工程应用[J]. 采矿技术, 2021, 21(S1): 1–4.
- JIE Zhiwen. Research and Engineering Application of Mining Methods for Steeply Inclined Close-Distance Thick Coal Seams[J]. Mining Technology, 2021, 21(S1): 1–4.
- [14] 胡璟. 双级摇臂单滚筒短壁采煤机采煤工艺分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6): 232–234.
- HU Jing. Analysis of mining technology of double-stage ranging arm single drum short wall shearer[J]. Coal Technology, 2023, 42(6): 232–234.
- [15] 王忠宾, 李福涛, 司垒, 等. 采煤机自适应截割技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 296–311.
- WANG Zhongbin, LI Futao, SI Lei, et al. Research progress and development trends in adaptive cutting technology for shearers[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 296–311.
- [16] 徐辉. 急倾斜难采煤层群安全高效开采实践[J]. 中国煤炭工业, 2025(2): 23–25.
- XU Hui. Practice of Safe and Efficient Mining in Steeply Inclined and Difficult-to-Mine Coal Seam Groups[J]. China Coal Industry, 2025(2): 23–25.
- [17] 李东印, 王祖洸, 王伸, 等. 特厚煤层采放协调智能群组放煤工艺模型及关键技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 22–33.
- LI Dongyin, WANG Zuguang, WANG Shen, et al. Research on the intelligent coordinated top-coal caving model and key technologies in extra-thick coal seams[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2025, 44(3): 22–33.
- [18] 侯利鹏, 王恒星, 李晋慧. 煤矿急倾斜特厚煤层综放面安全开采技术分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(2): 104–106.
- HOU Lipeng, WANG Hengxing, LI Jinhui. Analysis of comprehensive safety mining technology in steep and extra-thick coal seam in coal mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2025(2): 104–106.
- [19] 王林海, 徐善永. 基于 GCS-YOLOv8n 模型的煤矸石识别方法[J]. 信息技术与信息化, 2025(3): 115–118.
- WANG Linhai, XU Shanyong. Coal gangue identification method based on GCS-YOLOv8n model[J]. Information Technology and Informatization, 2025(3): 115–118.
- [20] 马宏伟, 周文剑, 王鹏, 等. 改进的 ORB-FLANN 煤矸石图像高效匹配方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 288–296.
- MA Hongwei, ZHOU Wenjian, WANG Peng, et al. Improved ORB-FLANN efficient matching method for coal gangue image[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 288–296.
- [21] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 千米深井三软煤层智能开采关键技术与展望[J]. 煤炭工程, 2019, 51(1): 1–6.
- WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent mining technology development path and prospect for three-soft seam of deep coal mine[J]. Coal Engineering, 2019, 51(1): 1–6.
- [22] 李重重. SAM2.0 新一代无人化开采系统[J]. 智能矿山, 2022, 3(7): 142–145.
- [23] 程伟轩, 陈敬川, 张立辉, 等. 智能放顶煤技术在特厚煤层上覆含水层保护中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 249–258.
- CHENG Weixuan, CHEN Jingchuan, ZHANG Lihui, et al. Application of intelligent top-coal caving technology in overlying aquifer protection of extra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 249–258.
- [24] 李伟. 综放开采智能化控制系统研发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 128–135.

- LI Wei. Research and application of intelligent control system for full-mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 128–135.
- [25] 骆津津, 陈伟, 田子建, 等. 基于 YOLOv8-ECW 的井下人员行为实时检测算法[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(2): 316–327.
- LUO Jinjin, CHEN Wei, TIAN Zijian, et al. Real-time detection algorithm of underground personnel behavior based on YOLOv8-ECW[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(2): 316–327.
- [26] 史振玮. 基于改进 ICP 算法和级联 ASPP 算法的异形建筑表面重建[J]. 北京测绘, 2025, 39(4): 462–467.
- SHI Zhenwei. Surface reconstruction of irregular buildings based on improved ICP algorithm and cascaded ASPP algorithm[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2025, 39(4): 462–467.
- [27] 任颖杰. 含夹矸中厚煤层智能化综采技术研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(3): 1–3, 6.
- REN Yingjie. Research and application of intelligent fully mechanized mining technology in medium thick coal seam with gangue[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2023, 41(3): 1–3, 6.
- [28] 刘斌. 全方位视频监控监控系统在采煤工作面设备安装中的应用[J]. 能源与节能, 2025(5): 266–268.
- LIU Bin. Application of omnidirectional video monitoring system in equipment installation at coal mining face[J]. Energy and Energy Conservation, 2025(5): 266–268.
- [29] 安龙辉, 王满利, 张长森. 基于轻量化 YOLOv7 的带式输送机输送带撕裂检测算法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(1): 64–75.
- AN Longhui, WANG Manli, ZHANG Changsen. Conveyor belt tear detection algorithm of belt conveyor based on lightweight YOLOv7[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(1): 64–75.
- [30] 朱志浩, 鹿志旭, 郭毓, 等. 基于改进 ORB-FLANN 算法的工件图像识别方法[J]. 电子科技, 2024, 37(4): 55–61.
- ZHU Zhihao, LU Zhixu, GUO Yu, et al. Workpiece image recognition method based on improved ORB-FLANN algorithm[J]. Electronic Science and Technology, 2024, 37(4): 55–61.
- [31] 尚明珠, 王克朝, 高玉宝. 一种基于 SURF-ORB 的改进图像配准算法[J]. 计量学报, 2025, 46(3): 323–328.
- SHANG Mingshu, WANG Kechao, GAO Yubao. An improved image registration algorithm based on SURF-ORB[J]. Acta Metrologica Sinica, 2025, 46(3): 323–328.