

“智能采矿·数智赋能”专题

【编者按】智能采矿数智赋能是通过工业互联网、人工智能、数字孪生等技术手段,深度融合采矿工业机理与数字化能力,实现矿山全流程的感知透明化、决策自主化、执行精准化、系统自进化的综合性技术体系。当前,智能采矿技术正处于加速落地阶段,数据和智能的融合创新,为煤矿数智化转型注入了新动能。为进一步总结我国智能采矿领域的前沿成果,深化数智赋能技术在煤矿场景的应用实践,《工矿自动化》编辑部特邀太原理工大学王开教授担任专题客座主编,太原理工大学王然风副教授、付翔副教授担任专题客座副主编,于2025年第3期组织出版“智能采矿·数智赋能”专题。在专题刊出之际,衷心感谢各位专家学者的大力支持!

文章编号: 1671-251X(2025)03-0001-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18239

智能采矿数智赋能技术内涵与应用范式

付翔^{1,2,3}, 王开¹, 王然风¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 智能采矿装备技术全国重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 山西焦煤集团有限责任公司 博士后工作站, 山西 太原 030024)

摘要: 数据与智能是驱动精准化、高效化和安全化智能采矿可持续发展的核心引擎。提出了基于“数据-算法-装备-生态”四维协同架构的智能采矿数智赋能技术体系,构建了涵盖数据治理、智能决策、装备执行与人机协同的采矿全链条智能化闭环框架。数据层通过标准化存储架构与多模态数据融合,建立全矿井数据资产平台,支撑实时数据流服务与历史数据挖掘;算法层结合工业机理模型与群智能算法,构建基于多目标优化的动态决策体系,实现采矿工序协同优化与安全权重优先控制;装备层依托智能新型煤机装备群,开发装备自适应控制与多机协同联动机制;生态层通过数字孪生、人在回路优化与专家规则嵌入,构建“人-机-智-环”共生体系,驱动系统动态迭代。基于上述框架,提出了智能采矿“数据流-智能流”双向协同机制与分层解耦逻辑,实现毫秒级装备控制、秒级算法决策与分钟级人工干预的动态响应,构建AI与人类双向赋能的新型采矿生产关系。以综采工艺为典型场景,基于“需求牵引-数据驱动-智能决策-装备执行”的闭环赋能路径,构建了综采工艺的智能采矿数智赋能应用范式,建立了“自动化工艺执行→AI策略生成→人工校验→人机协同控制”循环流程,支持人工/分工/批准/否决多模式动态切换,可实现采煤工艺自动化与AI辅助决策的深度协作,推动采矿行业从“机器替代人”向“人智增强机”范式转型。

关键词: 智能采矿; 数智赋能技术; 煤矿人工智能; AI决策; 人机协同

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Connotation and application paradigm of intelligent mining data intelligence enabling technology

FU Xiang^{1,2,3}, WANG Kai¹, WANG Ranfeng¹

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Post-doctoral workstation, Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: Data and intelligence are the core engines driving the precision, efficiency, and safety of

收稿日期: 2025-03-06; 修回日期: 2025-03-20; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274157); 山西省基础研究计划联合资助项目(202403011241002); “科技兴蒙”行动重点专项项目(2022EEDSKJXM010)。

作者简介: 付翔(1986—), 男, 山西长治人, 副教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为智能采矿数智赋能技术, E-mail: 14632235@qq.com。

引用格式: 付翔, 王开, 王然风. 智能采矿数智赋能技术内涵与应用范式[J]. 工矿自动化, 2025, 51(3): 1-8.

FU Xiang, WANG Kai, WANG Ranfeng. Connotation and application paradigm of intelligent mining data intelligence enabling technology[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(3): 1-8.



扫码移动阅读

sustainable intelligent mining development. A system for intelligent mining data intelligence enabling technology based on the "data-algorithm-equipment-ecology" four-dimensional collaborative architecture was proposed, and an intelligent closed-loop framework covering data governance, intelligent decision-making, equipment execution, and human-machine collaboration for the entire mining chain was constructed. The data layer established a comprehensive mine data asset platform through standardized storage architecture and multi-modal data fusion, supporting real-time data flow services and historical data mining. The algorithm layer combined industrial mechanism models and swarm intelligence algorithms to construct a dynamic decision-making system based on multi-objective optimization, achieving collaborative optimization of mining processes and safety-weighted priority control. The equipment layer relied on intelligent new coal machine equipment groups, developing equipment adaptive control and multi-machine collaborative linkage mechanisms. The ecology layer built a "human-machine-intelligence-environment" symbiosis system through digital twins, human-in-the-loop optimization, and expert rule embedding, driving the system's dynamic iteration. Based on the above framework, a bidirectional coordination mechanism of "data flow-intelligence flow" and a layered decoupling logic were proposed, achieving dynamic responses with millisecond-level equipment control, second-level algorithmic decision-making, and minute-level human intervention, establishing a new mining production relationship with bidirectional enabling between AI and humans. Using fully mechanized mining process as a typical scenario, a closed-loop enabling path based on "demand-driven - data-driven - intelligent decision-making - equipment execution" was constructed, establishing an application paradigm of intelligent mining data intelligence enabling for fully mechanized mining technology. A cyclical process of "automated process execution → AI strategy generation → human verification → human-machine collaborative control" was established, supporting dynamic switching between multiple modes, including manual, division of labor, approval, and rejection. The deep collaboration between coal mining automation and AI-assisted decision-making facilitated the transition of the mining industry from the "machine replacing humans" paradigm to the "human intelligence enhancing machines" paradigm.

Key words: intelligent mining; data intelligence enabling technology; coal mine artificial intelligence; AI decision; human-machine collaboration

0 引言

在全球矿业加速向数字化、智能化转型的背景下,智能采矿已成为保障矿产资源安全供给、推动矿山绿色低碳发展的核心路径^[1-2]。随着国家“双碳”战略与智慧矿山建设政策的密集落地,矿山行业面临效率提升、安全保障与可持续发展的多重挑战:传统采矿模式依赖人工经验决策,难以应对复杂地质条件与动态生产环境;装备自动化水平不足导致安全事故频发;矿山多源数据孤岛、异构系统协同困难等。

当前研究聚焦于智能采矿关键技术突破与应用范式创新。刘峰等^[3]构建了数字化、智能化、绿色化三维协同发展框架,系统阐释了新质生产力在煤炭工业中的核心内涵,提出通过数据要素重组、智能决策系统构建及低碳技术集成实现产业升级。王国法等^[4-6]阐明了智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向,提出了智慧煤矿建设的6S技术评价体系,系统梳理了智能化开采技术的创新方向与现存瓶颈。王双明等^[7]系统解析了智能开采、深部开采与绿色开

采对地质透明化的技术要求,提出了“透明地质-数字地质-宜居地质”三位一体的技术架构。袁亮等^[8]提出了煤矿地质模型动态重构技术。程建远等^[9]构建了透明地质应用场景,形成了支撑智能开采的地质信息实时感知与决策系统。范京道等^[10-11]揭示了煤矿智能化对传统“人-机-环”关系的重构机制,创新研发了全矿井机械破岩智能化建井装备,攻克了复杂地层条件下的高效掘进难题。

“十四五”规划^[12]提出“促进数字技术与实体经济深度融合,赋能传统产业转型升级”。数智赋能促进企业技术研发、业务流程重构和商业模式变革,使传统企业由单一化的产业创新体系向数字创新生态系统转变^[13]。目前煤矿工业在面对数字化、智能化转型时仍存在诸多瓶颈^[14-16]:①数据缺乏统一治理架构,多模态数据难以跨系统流动与资产化应用。②面向应用场景的算法匮乏,数据驱动AI模型真正现场应用不足。③人机协同机制尚未成熟,极端工况下人类经验与机器智能的互补性未被充分激活。这些缺陷导致智能采矿系统难以实现全流程闭环优

化与自适应进化,亟需智能采矿数智赋能理论框架与技术路径的创新。

本文提出基于“数据-算法-装备-生态”架构的智能采矿数智赋能技术体系,通过构建数据驱动的全矿井数字基座、多模型耦合的决策中枢、装备群协同的执行网络以及人机共融的进化机制,形成以“数据驱动(数)”与“智能决策(智)”为双核心的综合性技术体系。

1 智能采矿“数据-算法-装备-生态”协同架构

智能采矿“数据-算法-装备-生态”四维协同架构如图1所示。以“数据驱动、算法决策、装备执行、人机生态”为核心逻辑,通过各层级间的闭环交互和动态反馈,实现从数据采集到智能决策、精准执行的全链条人机协同。

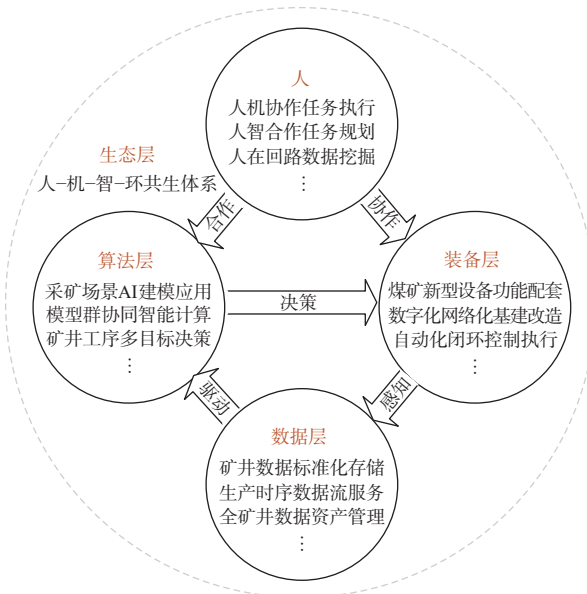


图1 智能采矿“数据-算法-装备-生态”四维协同架构

Fig. 1 Four-dimensional collaborative architecture of "data-algorithm-equipment-ecology" for intelligent mining

1.1 数据层

数据层作为四维协同架构的“记忆”,通过矿井数据标准化存储、生产时序数据流服务,构建全矿井数据资产底座。

1) 矿井数据标准化存储:制定地质特征、设备状态、环境参数等数据的标准化格式,消除多源异构数据孤岛,统一数据规范;构建数据字典与元数据库,定义数据来源、采集频率、存储周期等属性,实现元数据管理;采用时序数据库存储设备实时数据,通过关系型数据库存储结构化业务数据,利用对象存储管理地质三维模型等非结构化数据,构建分布式存储架构。

2) 生产时序数据流服务:通过传感器、控制器、

边缘网关实时采集采、掘、机、运、通等矿井运行过程时序数据,支持毫秒级传输,实现工业物联网实时采集;利用Kafka/Flink等工具实现数据流清洗、异常检测、特征提取等流数据处理;通过煤矿网络将数据流同步至算法层(决策模型)与装备层(控制指令),实现低时延数据分发。

3) 全矿井数据资产管理:整合地质勘探数据、生产过程数据、安全监测数据等多模态数据,基于大数据架构构建统一数据湖;建立数据质量评估(涵盖完整性、一致性等指标)、冷热温数据分层存储、数据全生命周期管理与权限控制等机制,构建数据治理体系;提供标准化接口支持上层调用,例如算法层调用历史数据训练模型,生态层调用数据可视化分析与人机交互。

数据层向上驱动算法决策,实现实时数据流感知输入与历史数据挖掘建模;向下反馈装备执行,实现算法决策指令下发与执行状态监测反馈。

1.2 算法层

算法层作为四维协同架构的“大脑”,利用采矿场景AI推理逻辑、模型群协同计算,生成多目标决策方案(如煤机装备控制策略动态生成、生产任务规划排序等),实现采矿全流程的智能化决策。

1) 采矿场景AI建模应用:利用煤矿大数据和采煤专业知识,采用机器学习、因果分析、数学推导等建模方法,构建煤矿全流程不同工序场景的工业机理AI模型;根据不同场景任务实际应用模式,开发构建AI模型推理逻辑和触发机制,形成匹配现场应用的数据流到决策结果的推理流程。

2) 模型群协同智能计算:集成不同场景的AI模型,结合各个推理逻辑,构建多模型耦合计算框架,实现多模型多触发并行推理计算;利用煤矿多级边缘云协同架构,部署轻量化模型在装备层边缘节点处理实时控制指令,复杂模型在云端进行全局优化;基于安全权重大于效率权重的原则,调整多模型计算优先级,实现动态权重分配。

3) 矿井工序多目标决策:以安全、提效、降本、少人为目标函数,利用群智能算法、强化学习等方法,平衡采煤、掘进、运输、通风等工序的时空冲突,实现工序协同优化;根据装备层执行结果和数据层实时反馈,触发决策模型在线更新,实现规划策略动态反馈调整。

算法层纵向贯通数据→决策→执行技术路径,横向协同不同场景多个模型推理计算与闭环交互。

1.3 装备层

装备层是四维协同架构的“肢体”,将算法决策

转换为煤机装备闭环控制指令(如采煤机截割路径调整、液压支架自适应移架等),驱动数字化改造后的装备执行动作。

1) 煤矿新型设备功能配套:根据煤矿工艺研制新型智能化煤机装备,包括智能采煤机、智能掘锚一体机、无人驾驶矿车、特种机器人等,逐步实现煤矿安全生产全工序中煤机装备替代人工。

2) 数字化网络化基建改造:在煤矿综合机械化基础上,通过研制新型传感器、电控改造煤机装备、建设新一代工业网络、部署私有云数据中心等,实现煤矿数字化、网络化基建改造,为智能化决策运行奠定实施基础。

3) 自动化闭环控制执行:通过装备端工业控制系统,开发应用自动闭环控制程序,实现简单工况或目标的自动化执行;将算法层的智能控制策略转换为程序执行指令,实现工艺过程的装备自适应控制。

装备层纵向贯通策略→执行→反馈技术路径,横向协同煤矿生产工序链,实现装备群联动控制。

1.4 生态层

生态层是四维协同架构的“神经末梢”,通过人机协作任务执行、人智合作任务规划、人在回路数据挖掘等方式,构建“人-机-智-环”共生体系,实现采矿过程中“感知-决策-执行-优化”的智能闭环迭代。

1) 人机协作任务执行:人员通过视频、数字孪生、数据分析可视界面等方式,实时观察生产现场设备姿态、工艺工况、地质条件等信息,结合算法层信息结论和决策结果,与系统共同控制设备动作。

2) 人智合作任务规划:通过采矿专家规则库、强化学习、生成式 AI 等技术支撑,人员与 AI 共同完成年度采掘接续计划制定、生产任务调度等煤矿管控规划,实现煤矿整体降本增效。

3) 人在回路数据挖掘:通过对数据层的人工标注与修正,反向训练算法层的缺陷检测模型;当 AI 模型置信度低于阈值时,自动推送待标注数据至生态层,人工介入提升模型鲁棒性。

生态层通过决策校准和执行干预,实现人机交互驱动全链路优化,实现数据-算法-装备迭代升级。

2 智能采矿数智赋能技术原理

王国法等^[17]提出了煤炭绿色开发数智化技术体系,给出了煤炭数智化概念:煤炭数字化和煤矿智能化的融合体,强调煤炭全产业链各业务场景数据和智能技术的深度集成应用,实现对煤炭绿色开发全过程的全面感知、深度分析和智能决策。根据这一

概念,本文提出智能采矿数智赋能技术定义:以“数据驱动(数)”与“智能决策(智)”为双核心,通过工业互联网、AI、数字孪生等技术手段,深度融合采矿工业机理与数字化能力,构建“数据-算法-装备-生态”四维协同体系,实现矿山全流程的感知透明化、决策自主化、执行精准化、系统自进化的综合性技术体系。数智技术对四维协同架构赋能路径见表 1。

表 1 数智技术对四维协同架构赋能路径

Table 1 Enabling paths of data intelligence technology for four-dimensional collaborative architecture

赋能维度	数字技术支撑	智能技术实现
数据层	全矿井数据湖构建、时序数据流服务	数据特征提取、异常模式挖掘
算法层	多源数据融合分析、知识图谱构建	混合智能建模、多目标优化决策
装备层	设备状态实时监控、执行数据反馈	自适应控制算法、多机协同策略
生态层	人工标注数据回流、跨系统数据交互	人在回路优化、专家规则嵌入

数智赋能是“数据-算法-装备-生态”四维协同架构落地的技术基石,由“数据流”和“智能流”双向驱动,通过分层解耦与动态响应逻辑,实现智能采矿过程的人机能力互补模式,其技术原理如图 2 所示。通过数据流(蓝色)与智能流(红色)的双向协同,构建“数据驱动决策、人机动态交互”的闭环系统,形成双流协同的核心机制。

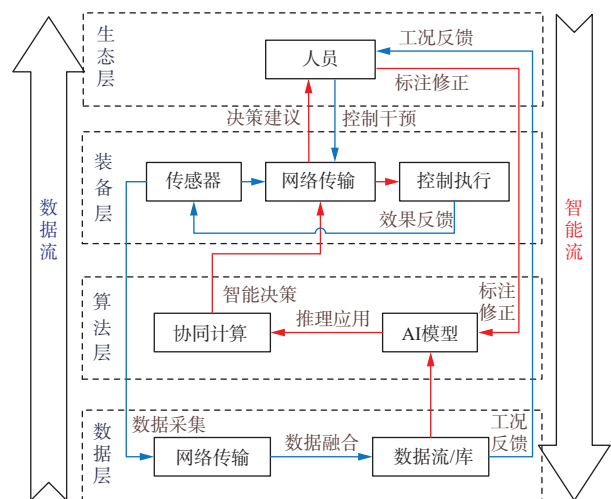


图 2 智能采矿数智赋能技术原理

Fig. 2 Principle of data intelligence enabling technology in intelligent mining

2.1 数据-智能双向驱动机制

1) 数据→智能:数据流为智能流提供输入,装备层传感器采集的实时数据通过数据层清洗、对齐后,转换为算法层的输入特征向量, AI 模型基于输入数据生成决策指令,实现从数据感知到智能决策的

转换。

2) 智能→数据: 智能流为数据流注入知识, 人工通过标注数据, 采用机器学习方法构建、修正 AI 模型, 同时将专家经验编码为数学约束, 限制 AI 决策边界, 避免违反安全规程的指令生成, 实现知识注入的数据赋能。

2.2 分层解耦与动态响应逻辑

根据新一代智能煤矿多级云边协同工业互联网架构特点^[18], 设计智能煤矿装备-算法-生态的分层解耦逻辑, 见表 2。

表 2 智能煤矿装备-算法-生态的分层解耦逻辑

Table 2 Hierarchical decoupling logic of intelligent coal mine equipment-algorithm-ecology

层级	功能定位	技术特性	应用举例
装备层	高频率控制与物理执行	毫秒级响应, 微控制器实时控制	液压支架自动跟机控制
算法层	复杂计算与多目标优化	秒级-分钟级决策, 模型计算推理	液压支架直线度调控
生态层	不确定性任务与战略决策	分钟级-小时级响应, 人类专家介入	顶板来压采煤工艺调整

2.3 人机能力互补模式

智能采矿过程涉及的任务类型、数据处理、决策边界等方面, AI 与人工具有不同的优势领域, 见表 3。

表 3 智能采矿过程 AI 与人工优势领域

Table 3 AI and human advantage fields in intelligent mining process

能力维度	AI 优势领域	人工优势领域
任务类型	重复性、高精度计算 (如设备毫秒级控制)	创造性、高不确定性推理 (如地质突变处置)
数据处理	海量数据模式挖掘 (如 TB 级日志分析)	小样本专家经验提炼 (如特殊工况数据分析)
决策边界	规则明确的优化问题 (如设备协同调度)	价值观权衡的复杂问题 (如安全与效率平衡)

根据采矿过程不同场景需求, AI 与人工通过角色分工与协作, 建立 AI 增强人类-人类训练 AI 的双向赋能路径, 通过人工标注数据→AI 模型训练→模型辅助人工决策→新数据产生, 形成持续迭代的知识创造循环。

3 智能采矿数智赋能应用范式

以煤矿综采工艺为例, 基于“需求牵引-数据驱动-智能决策-装备执行”的闭环赋能路径, 根据液压支架人机协同模式选择、液压支架自动跟机再次调控策略、刮板输送机调直策略、液压支架初撑承压是否有效、区域支护质量评价等综采工艺过程具体应用场景需求, 结合采煤机位置及液压支架立柱压力、推移行程、角度、动作等智能化系统感知数据, 采用与或图、决策树、贝叶斯回归、随机森林、支持

向量机、卷积神经网络等 AI 算法, 构建液压支架人机协同模式选择模型^[18]、液压支架自动化后再次调控决策模型^[19]、刮板输送机直线度调控决策模型^[20]、液压支架初撑承压效果即时预测模型^[21]、工作面区域支护质量动态评价模型^[22], 其技术架构如图 3 所示。

上述各个模型被开发并嵌入煤矿工业数据 AI 模型自动推理系统架构^[23]中, 部署至工作面现场, 在不同开采条件下选择相应的人工/分工/批准/否决 4 种人机协同模式^[18], 随采煤过程动态输出智能策略。技术人员观测判断智能策略是否可行, 根据实际情况进行人工干预, 协作控制液压支架电液控制系统, 实现综采工艺的智能采矿数智赋能技术应用, 其应用范式如图 4 所示。

该范式现场运行分为 4 个步骤, 依序进行, 每刀循环执行 1 次。具体步骤如下:

1) 采煤工艺自动化系统全自动执行全工作面采煤机割煤、液压支架自动跟机等工艺控制任务。

2) 综采场景式 AI 决策系统自动采集分析现场数据, 生成液压支架控制策略。

3) 人员观测 AI 决策系统输出的控制策略, 并根据现场实际情况分析控制策略是否合理可行, 以决定是否采纳决策结果。

4) 人工模式下, 人员不采纳控制策略, 直接观测现场并操作装备完成任务; 分工模式下, 人员部分采纳控制策略, 通过远程半自动化控制, 与液压支架电液控制系统共同完成任务; 批准或否决模式下, 人员完全采纳控制策略, 通过人员批准或在一定时间内不否决, 控制策略直接下达给液压支架电液控制系统执行。

可见, 综采工艺的智能采矿数智赋能技术应用范式通过“自动化工艺执行→AI 策略生成→人工校验→人机协同控制”循环流程, 结合人工干预灵活切换人工/分工/批准/否决 4 种人机协同模式, 最终实现采煤工艺自动化与 AI 决策支持人工调控的深度协作。

4 总结与展望

4.1 总结

1) 提出了智能采矿“数据-算法-装备-生态”四维协同架构, 构建了从数据感知到智能决策、装备执行、人机协同反馈的闭环体系。数据层通过标准化存储与实时流服务支撑算法决策, 算法层依托多模型协同计算生成决策方案, 装备层实现精准控制与状态反馈, 生态层通过人机协作保障系统优化运行,

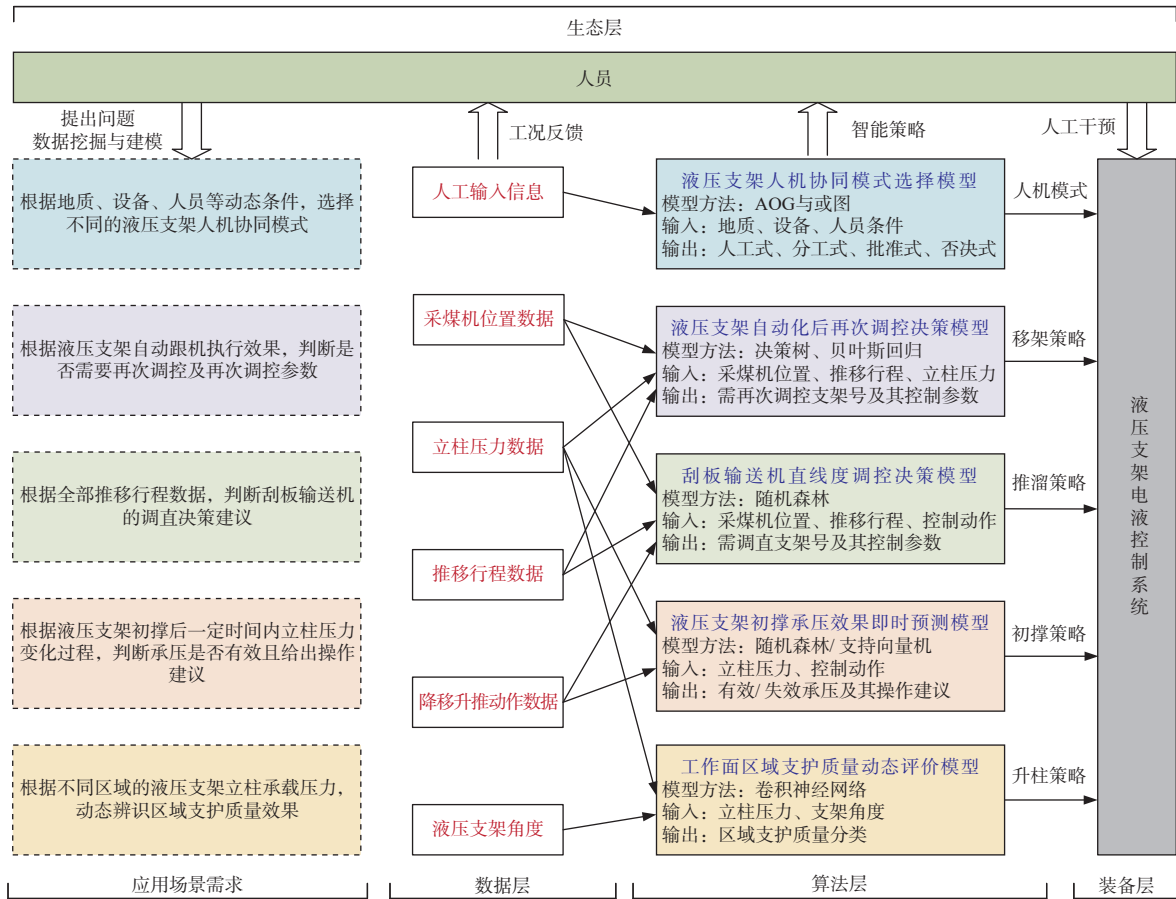


图 3 综采工艺的智能采矿数智赋能技术架构

Fig. 3 Intelligent mining data intelligence enabling technology architecture for fully mechanized mining technology

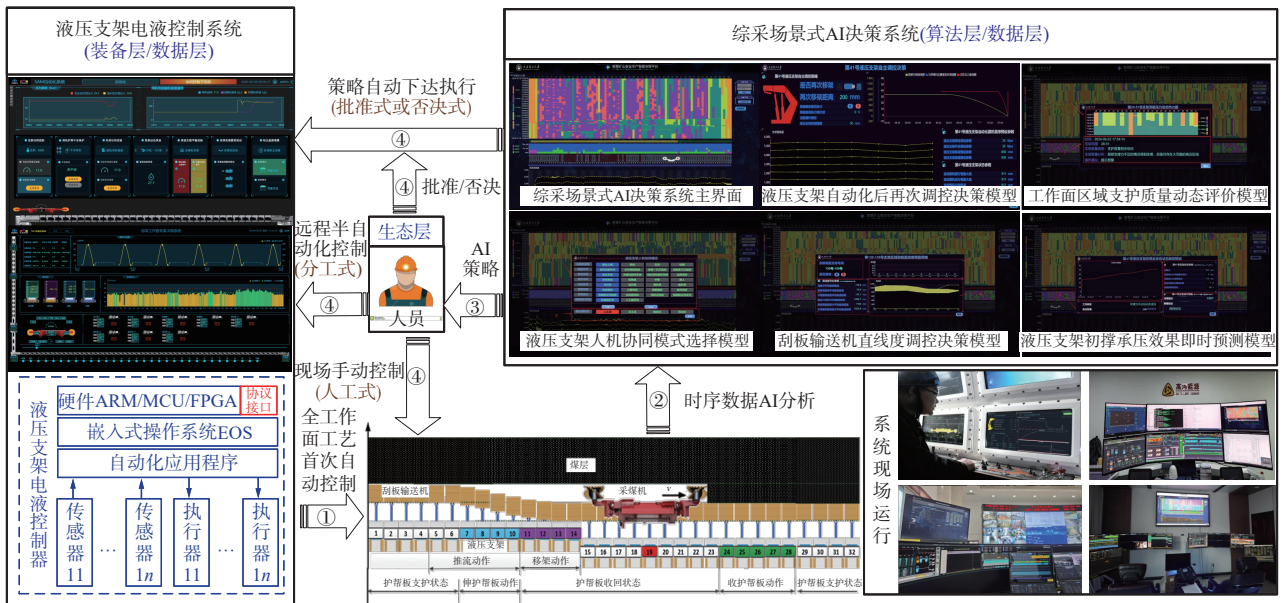


图 4 综采工艺的智能采矿数智赋能技术应用范式

Fig. 4 Application paradigm of intelligent mining data intelligence enabling technology for fully mechanized mining technology

形成动态平衡的智能采矿生态系统。

2) 提出了数智双核驱动的智能采矿数智赋能技术内涵,以数据流与智能流双向协同为核心,通过分层解耦机制实现毫秒级装备控制、秒级算法决策与分钟级人类干预的动态响应,建立 AI 增强人类-人

类训练 AI 的双向赋能路径,形成“数据驱动决策、人机动态交互”的智能采矿数智赋能范式。

3) 以综采为应用对象,构建了综采工艺的智能采矿数智赋能技术应用范式示例,提出了“自动化工艺执行→AI 策略生成→人工校验→人机协同控制”

循环流程,通过人工/分工/批准/否决多模式灵活切换机制,实现综采系统AI决策与人工协同智能运行。

4.2 展望

未来智能采矿应深入利用数智技术,向人机深度融合的“增强智能”范式演进,形成“人类经验显化-AI模型进化-人机共识强化”的螺旋上升闭环,实现煤矿人员认知能力与采矿数据AI算力的双向赋能,最终形成“人类定义价值边界、AI优化执行路径、人机共担安全责任”的智能采矿生态,推动从“机器替代人”的综合机械化采煤向“人智增强机”的智能化采煤转型升级。

参考文献(References):

- [1] 国家能源局. 国家能源局关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知[EB/OL]. [2025-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954239.htm.
National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on further accelerating the intelligent construction of coal mines to promote the high-quality development of coal[EB/OL]. [2025-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954239.htm.
- [2] 王国法, 富佳兴, 王忠鑫. 煤矿智能化重要进展与高质量发展方向[J]. 智能矿山, 2025, 6(1): 2-12.
WANG Guofa, FU Jiaying, WANG Zhongxin. Important progress and high-quality development direction of coal mine intelligence[J]. Journal of Intelligent Mine, 2025, 6(1): 2-12.
- [3] 刘峰, 郭林峰, 张建明, 等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greenization of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [4] 王国法, 杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [5] 王国法, 杜毅博, 庞义辉. 6S智能化煤矿的技术特征和要求[J]. 智能矿山, 2022, 3(1): 2-13.
WANG Guofa, DU Yibo, PANG Yihui. Technical characteristics and requirements of 6S intelligent coal mine[J]. Journal of Smart Mine, 2022, 3(1): 2-13.
- [6] 王国法, 张金虎, 任怀伟, 等. 煤炭高效开采数智技术与成套装备研究及应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 43-64.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, REN Huaiwei, et al. Research and application practice of digital intelligent technology and complete set of equipment for efficient coalmining[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 43-64.
- [7] 王双明, 孙强, 谷超, 等. 煤炭开发推动地学研究发展[J]. 中国煤炭, 2024, 50(1): 2-8.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GU Chao, et al. The development of geoscientific research promoted by coal exploitation[J]. China Coal, 2024, 50(1): 2-8.
- [8] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1-14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1-14.
- [9] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 1-12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, et al. Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1-12.
- [10] 范京道, 封华, 宋朝阳, 等. 可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 499-514.
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 499-514.
- [11] 范京道, 金智新, 王国法, 等. 煤矿智能化重构人与煤空间关系研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 243-253.
FAN Jingdao, JIN Zhixin, WANG Guofa, et al. Reconstructing human-coal space relationship through coalmine intellectualization[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 243-253.
- [12] 国务院. “十四五”数字经济发展规划[EB/OL]. [2025-03-01]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5671108.htm.
The State Council. The 14th Five-Year Plan for digital economy development[EB/OL]. [2025-03-01]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5671108.htm.
- [13] 陈旭升, 张旭东, 刘洪予. 数智服务赋能工业企业创新路径研究[J]. 中国科技论坛, 2024(12): 137-145.
CHEN Xusheng, ZHANG Xudong, LIU Hongyu. Research on the innovation paths of industrial enterprises empowered by digital intelligence services[J]. Forum on Science and Technology in China, 2024(12): 137-145.
- [14] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤

- 炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1-27.
- [15] 付翔, 秦一凡, 李浩杰, 等. 新一代智能煤矿人工智能赋能技术研究综述[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 122-131, 139.
FU Xiang, QIN Yifan, LI Haojie, et al. Summary of research on artificial intelligence empowerment technology for new generation intelligent coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 122-131, 139.
- [16] 谢嘉成, 房舒凯, 王学文, 等. “人本智造与XR+”驱动的综采工作面人机协同智能化运行模式探索与实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1099-1114.
XIE Jiacheng, FANG Shukai, WANG Xuewen, et al. Exploration and practice of the human-machine collaborative intelligent operation mode of fully mechanized coal mining face driven by humanistic intelligent manufacturing and XR+technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 1099-1114.
- [17] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1-16.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(11): 1-16.
- [18] 付翔, 李浩杰, 张锦涛, 等. 综采液压支架中部跟机多模态人机协同控制系统[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1717-1730.
FU Xiang, LI Haojie, ZHANG Jintao, et al. Multimodal human-machine collaborative control system for hydraulic supports following the shearer in the middle range of fully mechanized mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1717-1730.
- [19] 张锦涛, 付翔, 王然风, 等. 智采工作面中部液压支架集群自动化后人工调控决策模型[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 20-25.
ZHANG Jintao, FU Xiang, WANG Ranfeng, et al. Manual regulation and control decision model of middle hydraulic support cluster automation in the intelligent working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(10): 20-25.
- [20] 孙岩, 付翔, 王然风, 等. 融合传感器数据和人工调控信息的工作面直线度智能预测[J]. 工矿自动化, 2024, 50(11): 84-91.
SUN Yan, FU Xiang, WANG Ranfeng, et al. Intelligent prediction for face straightness based on sensor data and human operation information[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(11): 84-91.
- [21] 贾一帆, 付翔, 王然风, 等. 基于数据驱动的液压支架初撑后承压效果即时预测技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(7): 32-39.
JIA Yifan, FU Xiang, WANG Ranfeng, et al. Real time prediction technology for load bearing effect of hydraulic support after initial support based on data-driven approach[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(7): 32-39.
- [22] 贾思锋, 付翔, 王然风, 等. 液压支架时空区域支护质量动态评价[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 26-33, 81.
JIA Sifeng, FU Xiang, WANG Ranfeng, et al. Dynamic evaluation of support quality of hydraulic support in space-time region[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(10): 26-33, 81.
- [23] 张智星, 付翔, 张小强, 等. 煤矿工业数据 AI 模型自动推理技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(9): 138-143.
ZHANG Zhixing, FU Xiang, ZHANG Xiaoqiang, et al. Automatic reasoning technology for coal mine industrial data AI models[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(9): 138-143.