

引文格式:王国法,王丹丹,庞义辉,等. 智能化煤矿分级与无人化开采数智技术进展 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2025, 45(5): 14-33.

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.002

智能化煤矿分级与无人化开采数智技术进展

王国法^{1,2,3}, 王丹丹^{1,3}, 庞义辉^{1,2}, 王 峰^{1,3}, 刘 清³, 姚钰鹏^{1,3}, 南柄飞^{1,3}, 刘再斌^{1,4}

(1.中国煤炭科工集团煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室,北京 100013; 2.煤炭科学研究总院有限公司数字矿山研究院,北京 100013; 3.北京天玛智控科技股份有限公司,北京 101399; 4.中煤科工西安研究院(集团)有限公司西安煤科透明地质科技有限公司,陕西 咸阳 712000)

摘要:目的 总结当前我国煤矿智能化建设与安全高效绿色开采技术的最新进展,并分析能源转型背景下煤炭产业面临的挑战及其作用。方法 基于煤矿智能化系统配置的完整性、装备智能化程度及常态化运行水平等关键要素,提出了一套5级(L1~L5)智能化煤矿等级划分标准。构建了无人化开采系统的技术架构,明确其感知层、传输层、决策层、执行层与监管层之间的协同机制。通过创新地质保障与时空信息精准感知、自适应控制决策、智能运维保障等关键技术,推进智能化煤矿示范工程建设。结果 结合实践案例进行验证分析,实践案例验证了智能化技术在煤矿减人、提效、增安方面具有显著作用;初步构建了支撑煤炭无人化开采和煤矿智能化建设的理论基础与技术支持体系。结论 研究提出的智能化煤矿分级标准、无人化开采技术架构及关键技术创新,为推进我国煤矿智能化建设提供了重要支撑,并有效验证了智能化技术在提升煤炭开采安全性、效率和可持续性方面的关键作用。

关键词:煤矿智能化;智能化煤矿分级;无人化开采;数智技术;自适应控制

中图分类号:TD82 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2025)05-0014-20

Progress in Intelligent Coal Mine Classification and Unmanned Mining Technology

WANG Guofa^{1,2,3}, WANG Dandan^{1,3}, PANG Yihui^{1,2}, WANG Feng^{1,3}, LIU Qing³,
YAO Yupeng^{1,3}, NAN Bingfei^{1,3}, LIU Zaibin^{1,4}

(1.China Coal Technology Engineering Group, State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Beijing 100013, China; 2.Coal Science Research Institute Co., Ltd., Digital Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3.Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 4.CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an CCTEG Transparent Geology Technology Co., Ltd., Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: Objective To summarize the latest progress in the intelligent construction and safe, efficient, and green mining technology of coal mines in China, and to analyze the challenges and roles faced by the coal industry under the background of energy transformation. **Methods** A set of 5-level (L1~L5) intelligent coal mine classification standards is proposed based on key elements such as the completeness of intelligent system configuration, the degree of equipment intelligence, and the level of normalized operation. The technical architecture is constructed of an unmanned mining system, clarifying the collaborative mechanism between its

收稿日期:2025-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304170, 52274154)

作者简介:王国法(1960-),男,山东文登人,研究员,博士,研究方向:煤炭无人化开采技术理论与装备。

perception layer, transmission layer, decision-making layer, execution layer, and regulatory layer. By innovating key technologies such as geological assurance, precise perception of spatiotemporal information, adaptive control decision-making, and intelligent operation and maintenance support, the construction of intelligent coal mine demonstration projects is promoted. **Results** Practical case verification and analysis show that intelligent practical cases have verified the significant role of intelligent technology in reducing personnel, improving efficiency, and increasing safety in coal mines. A foundation has been laid for a theoretical and technical system to support unmanned coal mining and intelligent coal mine construction. **Conclusion** The intelligent coal mine grading standards, unmanned mining technology architecture, and key technological innovations proposed in this study provide important support for promoting the intelligent construction of coal mines in China, and effectively verify the key role of intelligent technology in improving coal mining safety, efficiency, and sustainability.

Key words: intelligentization of coal mines; smart coal mine grade; unmanned mining; digital intelligence technology; adaptive contron

在能源转型和新型能源体系构建过程中,煤炭在较长时期内仍是我国主体能源。我国是世界第一大煤炭生产消费国,2024年全球煤炭产量为92.42亿吨,中国煤炭产量47.8亿吨,占比51.7%,继续稳居世界首位。根据《2024煤炭行业发展年度报告》,近4年来,全国煤炭产量181.8亿吨,占一次能源生产、消费总量的66.6%、55%,煤炭在我国能源供应体系中仍将发挥兜底保障和系统调节作用。煤矿智能化建设进入全面发展新阶段,攻克了超大采高智能化开采、薄煤层无人化开采、掘支运一体化快速掘进等一批核心技术与装备难题,建成了一批国家级智能化示范煤矿、智能化采煤工作面和智能化掘进工作面。但是,煤炭产业自身发展仍面临多重挑战。当前,煤矿智能化系统的设备稳定性可靠性亟待提升。同时,地下采场的全时空感知、透明地质保障、智能决策支持、装备协同运行以及常态化智能运维等关键环节,也亟需实现创新突破。深部矿井建设不断推进,我国煤矿开采逐渐走向深部,矿井最大开采深度已达到1500m,超过700m的矿井有130余处。我国已探明的煤炭资源量中千米以深占比超过50%,亟待突破千米以深资源智能安全高效开发技术^[1]。随着全球能源结构向低碳化、智能化方向加速转型,进入深部开采后,高瓦斯、高地压、高地温、高承压水等复杂开采条件下,各类灾害风险加剧,开采技术装备、灾害防治技术等面临前所未有的挑战^[2-3]。

国际能源署数据显示,2022年全球煤炭消费量

虽达历史峰值,但其在一次能源消费中的比重由30.02%下降到26.73%,凸显传统煤炭产业向清洁高效转型的迫切性^[4-5]。我国作为全球最大的煤炭生产与消费国,近年来通过《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》等政策引领,已建成国家级智能化示范煤矿66座,形成涵盖地质勘探、智能采掘等多个环节的智能化体系^[6]。然而,智能化建设仍面临多重瓶颈:井下复杂地质条件导致传感器网络覆盖率不足,中国煤炭工业协会统计显示,截至2024年,中国有17家采煤企业实现了5G信号全覆盖,仅43%的煤矿实现工作面5G信号全覆盖^[7-8];设备异构性引发的系统协同效率降低约30%^[9];现有分级评价体系偏重机械化水平,对数据治理能力、系统自学习能力等核心要素缺乏科学考量^[10]。

当前研究多聚焦单一技术,如智能巡检机器人^[11]或数字孪生系统^[12],但系统性整合不足。王国法团队提出了智能化煤矿分级框架^[13],其评价维度以设备自动化为主,未全面覆盖数据智能、生态协同等高阶特征。同时,无人化开采体系缺乏统一架构标准,导致技术应用碎片化。例如榆家梁煤矿实现了“0+2+2”无人化模式^[14],但装备群协同控制仍需人工干预;小保当煤矿450m超长工作面虽突破系统协同控制技术^[15],但地质透明化建模精度仅达米级,难以支撑自适应开采决策。这些实践暴露出现有智能化开采技术在数据融合、动态感知与协同控制方面的短板。

通过开发多源数据融合算法^[16-17]、提出煤矿装

备数字孪生技术^[18-19],研究了液压支架支护本体支护姿态信息易受现场振动干扰和支架群组关联姿态信息缺失等难题^[20]。袁智等^[21]系统梳理了智能化综采装备的应用现状,指出当前液压支架群协同控制精度不足、采煤机自适应截割算法泛化能力弱等共性问题,导致 L4 级以上智能化工作面常态化运行率不足 60%。这一结果与王国法团队^[22]关于“跨系统数据孤岛制约装备群协同效率”的结论基本一致,揭示了智能化建设中技术碎片化的深层矛盾。针对深部开采的特殊性,李伟等^[23]通过赵楼煤矿实践验证了深地煤层透明化建模技术,创新性地将微震监测与三维地质动态反演结合,使千米以深煤层建模误差控制在容许范围以内,为深部复杂地质条件下的智能导航开采提供了关键技术支撑。然而,该研究也暴露出深井高温高湿环境导致传感器失效率增加硬件瓶颈,凸显智能化装备耐候性设计的迫切需求。

近年研究聚焦开采装备智能化升级与系统集成。王国法团队构建“L1~L5”工作面分级标准与“云边端”技术架构^[24-25],数据孤岛制约系统协同^[26]。范京道团队通过十年技术实践^[27]验证了薄煤层无人化开采的可行性(工效提升 3 倍)。刘峰等从示范煤矿建设、建设模式和建设经验 3 个方面总结了我国煤矿智能化发展的主要进展^[28]。黄曾华^[29]提出煤矿智能化已经从传统“装备+智能”模式向“智能化+装备”模式(智能协同模式)转变。张吉雄团队指出深部充填开采是实现灾变调控、地表沉陷控制和矿山固废处置等的重要手段,并从多场耦合作用下充填体-围岩相互作用机理、强扰动条件下充填采场矿压分析模型、深部充填开采岩层控制方法以及对充填体与地下水环境互相影响四个方面的相关研究进展进行了总结与探讨^[30]。张强等^[31-32]研发的智能充填支护机器人实现沉陷控制率超 85%;而王清峰等^[33]指出钻进参数动态优化不足制约智能掘进效率。核心矛盾在于复杂地质条件下装备自适应决策滞后^[34],需强化工况感知与自主控制耦合。

灾害防控呈现“数据驱动、智能预控”趋势。10m 超大采高装备、智能充填支护^[35]突破采深限制。董书宁团队^[36-37]构建的水害智能平台预警准

确率达 92%,袁亮研发的瓦斯抽采监测系统^[38]提升抽采效率 35%。程德强等^[39]的 AI 视频隐患识别技术替代 30% 人工巡检,刘玉冰团队^[40]提出的“云边端”管控体系实现灾害多源信息融合。现存瓶颈集中于深部高地温致传感器失效^[41]及多灾种耦合预警模型缺失,亟待开发抗扰传感网络与跨灾种联动算法。

绿色矿山建设从规范约束转向技术赋能。基于《绿色矿山建设规范》(DZ/T 0315-2018),王双明团队^[42-43]的地质保障技术使西部矿区植被破坏率降低 50%,王国法等^[44]的大型装备变频控制技术节电 25%,李明文等^[45]的智能通风系统节能 30%。郭英杰^[46]揭示露天矿智能化改造后碳排放强度反升 12%,金向阳等^[47]强调闭坑矿区生态修复标准缺失。破局关键在于依托煤炭兜底保障,探索“光伏-氢能”互补供能模式及全生命周期碳追踪体系。

新一代信息技术与新型感知技术深度渗透生产环节。樊红卫等^[48]的输送带异物 AI 算法响应速度突破 200ms,赵文团队^[49]的数字孪生平台实现井下全要素动态镜像,陈万辉等^[50]的智能支护设计将可靠性提升至 80%,包建军^[51]指出井下多源数据融合率不足 40%,王森揭示矿山专用 AI 芯片算力缺口^[52]。未来需突破矿山边缘计算架构与轻量化模型部署技术。王国法团队构建的智慧矿山复杂巨系统框架,推动了“数据-控制-执行”全链耦合^[53];文献^[54]设备全寿命健康管理技术可以降低故障停机 40%。在产业层面,根据文献^[55]统计显示 2024 年智能化投资增长 67%,中小煤矿渗透率仍低于 20%,协议标准化缺失制约系统兼容性。转型路径需兼顾技术攻关(矿山数据中台)、政策扶持(中小矿改造补贴)及商业模式创新(智能运维服务化)。

本研究拟基于研究团队的理论和技术创新成果和实践验证,提出智能化煤矿等级划分标准,构建煤炭无人化开采技术体系和创新路径,以期为煤矿智能化建设和无人化开采提供系统化的解决方案框架与技术基础。

1 煤矿智能化建设进展与等级划分

1.1 煤矿智能化建设进展与成效

煤矿智能化是煤炭产业发展新质生产力的核

心要素,自2020年2月国家8个部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》以来,我国煤矿智能化建设提质增速,地方政府与煤炭企业因地制宜制定煤矿智能化发展顶层规划及激励政策,科研院所、高校与煤炭企业积极研发先进适用技术装备,加快煤矿智能化标准体系建设,协同创新生态初步形成,分类分级建成了一批具有引领性和可复制推广的智能化示范煤矿,减人、增安、提效成效显著。

1)煤矿智能化生态不断优化 基于现阶段我国煤矿智能化发展现状、挑战与趋势,2024年4月,国家矿山安全监察局联合7个部委出台《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》,从强化顶层设计、坚持创新驱动、加快数字化进程、拓展智能化场景、提高整体应用水平等5个方面作出了系统部署,统筹推进煤矿与非煤矿山智能化建设。同年5月,国家能源局印发《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》,就新形势下进一步加快煤矿智能化建设的重点任务进行了系统部署,要求深入推进煤矿智能化升级改造,持续提升煤矿智能化系统常态化运行水平。山西、贵州、河南等省(区)因地制宜推出煤矿智能化建设激励政策,为煤矿智能化发展提供了良好的政策环境。

2)煤矿智能化标准体系加快建设 针对煤矿智能化建设存在数据编码不统一、通信接口不兼容、传输协议不开放、系统集成难度大等问题,2023年6月,国家矿山安全监察局发布了《智能化矿山数据融合共享规范》,并于同年8月制定发布了《矿山智能化标准体系框架》,系统梳理了矿山智能化领域的标准制定需求,包括基础通用、数据与模型、生产系统与技术装备、决策与应用等4部分,共265个具体标准制定方向;2024年3月,国家能源局印发了《煤矿智能化标准体系建设指南》,包括基础通用、信息基础、平台与软件、生产系统与技术装备、运维保障与管理5个标准子体系,计划在2025年底完成100项以上煤矿智能化国家标准和行业标准的修订工作,明确了煤矿智能化标准体系框架和重点建设内容。据不完全统计,目前已发布煤矿智能化相关国家标准、行业标准、地方标准以及团体标

准超100项,为煤矿智能化建设提供了标准指引。

3)研发应用了一批煤矿智能化先进适用技术装备 国家能源集团研发应用了“5类智能采煤、5类智能掘进、3类卡车无人驾驶、5类机器人”等关键技术,榆家梁煤矿研发应用了“生产期间工作面0人作业,进、回风巷2人监护,地面2名操作员远程监控”的“0+2+2”无人化生产模式;陕煤集团建成首个10m超大采高和450m超长中厚煤层智能化综采工作面,研发应用5大类101套智能快掘系统,13类792个生产辅助系统全部实现远程智能集控;山东能源集团研发应用了深部煤炭安全高效数智化开采成套技术装备,开发了盘古矿山大模型,在62座矿井应用,覆盖采掘机运通及安全管理等9个专业;中国华能伊敏露天矿研发应用了百台无驾驶室的纯电动无人驾驶矿用卡车和高可靠智能车控系统,采用“光伏绿电智能充换电站-无人换电矿用卡车”,实现了百台运输车辆混合编组高效运行;新疆天池能源南露天矿攻克了矿山时空数据融合实时态势感知的大规模调度算法、复杂矿区场景下车路云多源融合感知及智能化识别技术、采运排多智能体协同管控技术等,实现了单矿243台无人驾驶矿用卡车常态化编组运行;中煤大海则选煤厂实现了从原煤储运至产品装车的智能化系统全覆盖,智能加介、压滤等控制系统生产现场无岗位工操作。

4)加快了煤矿井下5类38种煤矿机器人重点产品研发和应用 国家矿山安全监察局与工信部分两批遴选矿山领域机器人典型应用场景,公布了51个典型应用场景,涵盖煤矿掘进、支护、采煤、无人驾驶、支架搬运、钻锚、管道安装、喷浆、巡检等场景;国家能源集团神东公司应用机器人21种、86台套,钻锚、喷浆等作业类机器人在部分区域实现了无人支护、喷浆作业,管路抓举、开槽等辅助作业类机器人显著减轻了作业人员的劳动强度,工作效率提升2倍以上;陕煤集团应用了5类303个煤矿机器人,涵盖设备巡检、管路安装、电缆卷放、水仓清淤、巷道喷浆等30余种,大幅降低了工人的劳动强度。

5)首批国家级智能化示范煤矿示范带动作用显著 各大煤炭企业集团坚持试点探路、典型引路、

复制推广的原则,加快推进智能化示范煤矿建设并取得了积极成效。截至 2025 年 3 月,已建成国家级示范煤矿 66 处、省级(央企级)示范煤矿 200 余处,全国建成智能化采掘工作面 1 806 个(其中采煤工作面 1 035 个、掘进工作面 771 个),煤矿智能化开采产能占比超过 50%,超 1.6 万个固定岗位实现无人值守。形成了包括采掘机运通、经营管理、井下地面全流程智能化的大型现代化煤矿智能化建设模式,智能防灾系统优先、其他系统同步建设的灾害严重煤矿智能化建设模式,以及重实用、求实效的地质条件复杂中小型煤矿智能化建设模式。国家能源集团实现煤矿智能化建设“5 个 100%”目标,推动智能采煤“530”迈进行动、智能掘进“975”跨越行动不断向更高水平发展;中国中煤能源 14 处煤矿开展“5G+”智能化煤矿建设,形成了煤矿智能化“6+7+N”示范体系;山东能源集团和陕煤集团等企业,按照因矿施策的原则,建设了多种模式的智能化煤矿。

1.2 智能化煤矿建设效果等级划分

2021 年 12 月,国家能源局印发了《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》,随后山西、贵州等地方管理部门在国家验收管理办法的基础上因地制宜出台了验收管理办法,推动了我国煤矿智能化验收管理及相关技术装备的应用推广。上述验收管理办法主要是基于现阶段煤矿智能化技术装备发展现状进行建设效果的分类分级,评价指标体系也较为复杂。为了引导企业自我评估煤矿智能化建设水平,推动煤矿智能化建设向高质量迭代升级,本文基于智能化建设的系统配置完整性、煤机装备/系统智能化程度及常态化运行水平、运维保障能力、管理水平与实施效果等因素,将煤矿智能化建设效果划分为 5 个等级(即 L1~L5,见表 1),从 L1~L5 需要在满足前一级条件的基础上升级,随着智能化等级的提高,减人、增安、提效等实施效果应取得明显提升。智能化煤矿建设效果等级划分主要考虑了以下要素:

1)矿井采、掘、机、运、通等相关智能化系统配置的完整性,智能化功能的先进性,整体运行的可

靠性,运维管理能力及实施效果,智能化系统的生产效率;

2)矿井时空信息感知、数据融合分析及综合管控水平,采(剥)掘装备智能协同运行水平,辅助作业的机器人替代,主辅运输流程的连续化、接驳作业的智能无人化,灾害信息的超前感知与预测预警能力,防灾治灾的智能化水平;

3)原煤处理、分选、脱水干燥、产品储存等核心环节的自动化控制程度,设备间协同联动能力及自适应调节功能,关键工艺参数在线监测与闭环控制水平;

4)智能化运维团队建设与专业技术能力,设备预防性维护与远程诊断系统应用,系统运行稳定性及故障响应速度。

表 1 井工煤矿、选煤厂智能化等级划分

等级	井工煤矿智能化建设效果等级划分	选煤厂智能化建设效果等级划分
L1	机械化作业的初级智能化矿井	基础自动化选煤厂
L2	具备较完整智能化系统和远程干预自动化作业的中级智能化矿井	局部协同的初级智能化选煤厂
L3	具备较全面时空信息感知和智能辅助决策作业的中级智能化矿井	数据驱动的中级智能选煤厂
L4	具备全面智能化系统实现自适应规划无人/少人(设备/系统群进行协同联动)作业的高级智能化矿井	高度协同的中级智能选煤厂
L5	全面实现多系统常态化智能自适应协同作业的高级智能化矿井	全流程自优化高级智能选煤厂

井工煤矿智能化建设效果等级划分具体如下:

①L1 级即机械化作业的初级智能化矿井,初步建设了井上下有线/无线通信网络,对大型煤机装备的关键部位及基础运行信息进行监测,系统之间仍存在数据壁垒,采掘机运通等主要系统以就地控制为主;采掘过程实现了机械化作业,部分设备/系统具备联动功能,供电与供排水系统具备无人值守作业功能,辅助作业仍然以人工/机械作业为主;主煤流运输过程实现了连续运输,但仍然需要进行定时巡检作业;不同辅助运输方式之间仍以人工接驳为

主;对水、火、瓦斯、顶板、粉尘、冲击地压等灾害信息进行了监测,但仍以阈值判断方法进行灾害报警;智能化系统运维管理主要依靠厂家,智能化煤矿管理体系尚不是十分健全,智能化系统的生产效率较低与传统综合机械化作业仍有较大差距。

②L2级即具备较完整智能化系统和远程干预自动化作业的中级智能化矿井,井下主要巷道及采掘工作面实现有线/无线通信网络全覆盖,对井上下煤机装备、作业环境等信息进行局部监测,监测数据进行了汇聚,但难以实现融合分析决策,采掘机运通单个系统初步实现了集中控制,但系统之间仍存在壁垒,难以实现多系统协同联动;采掘生产过程具备远程自动化控制功能,但仍需要人工干预,设备/系统之间具备联动控制功能,辅助作业以机械作业为主,采掘工作面作业人员劳动强度降低;主煤流运输系统具备无人值守功能,但仍需要人员进行巡视;供电与供排水系统实现常态化无人值守;辅助运输系统实现了远程监视与智能调度管理,但仍需要司机进行驾驶,不同辅助运输方式之间间接初步实现了机械化作业;水、火、瓦斯、顶板、粉尘、冲击地压等灾害信息实现了较为全面的监测管理,初步具备单一灾害信息融合分析及超前预测预警功能,但多种灾害信息仍难以实现融合分析,防灾治灾仍然以人工/机械化作业为主;具备智能化运行专职机构,但智能化煤矿管理体系仍不十分健全,初步构建智能化煤矿运维管理系统,智能化系统的常态化运维水平较低,生产效率与传统综合机械化作业的差距逐渐缩小。

③L3级即具备较全面时空信息感知和智能辅助决策作业的中级智能化矿井,井上下有线/无线通信网络基本实现了全覆盖,具备对井上下煤机装备、地质信息、作业环境信息进行较全面感知的功能,监测数据初步实现了汇聚与综合分析,基于数据分析结果实现对部分作业进行智能辅助决策的功能,采掘机运通各业务系统之间的信息壁垒逐渐打通,但仍难以实现智能联动控制与综合集中管控;采掘生产过程实现了标准化、自动化作业,采掘作业相关辅助工具进一步完善,具备完全自动化作业的功能,部分辅助作业实现了远程遥控控制,采掘过程实现了有人巡视跟机作业;主煤流运输系统实现常

态化有人巡视无人值守作业;辅助运输车辆具备无人驾驶功能,但难以实现常态化无人驾驶运行;不同辅助运输方式之间间接初步实现了自动化作业,初步建设了智能仓储系统,但智能仓储尚难以与辅助运输系统实现智能联动;水、火、瓦斯、顶板、粉尘、冲击地压等灾害信息实现了全面监测与数据融合管理,单一灾害超前预测预警的精度进一步提升,初步具备多种灾害信息的融合分析,初步建设智能防灾治灾软硬件平台,防灾治灾作业初步实现自动化;初步建设了智能化煤矿管理体系,建设了部分系统的专业化运维管理团队,智能化系统的常态化运维水平及生产效率大幅提升。

④L4级即具备全面智能化系统实现自适应规划无人/少人(设备/系统群进行协同联动)作业的高级智能化矿井,具备井上下煤机装备、地质信息、作业环境信息较全面感知功能,监测数据实现了汇聚与融合分析,人工智能辅助矿井主要系统智能决策能力增强,采掘机运通各业务系统之间初步实现了基于智能决策的联动控制与综合管控;采掘生产过程实现了基于煤层赋存信息的自适应规划截割,部分辅助作业实现了机器人替代,采掘过程实现了远程操作、面内无人值守作业;主煤流运输系统实现常态化无人值守作业;辅助运输实现连续化运输、智能协同调度管理,辅助运输与智能仓储实现智能联动,辅助运输车辆实现地面远程遥控驾驶,不同辅助运输方式之间间接实现了自动化作业;建设了融合水、火、瓦斯、顶板、粉尘、冲击地压等灾害信息的多灾种融合监测与预测预警系统,防灾、治灾实现智能决策、自动实施;建设了较为完善的智能化煤矿管理体系与专业的运维管理团队,智能化系统实现常态化有人巡视无人值守作业,智能化煤矿生产效率与传统综合机械化效率持平。

⑤L5级即全面实现多系统常态化智能自适应协同作业的高级智能化矿井,具备井上下信息全面感知与深度融合分析决策功能,采掘机运通各业务系统之间实现了基于智能决策的智能协同控制,综合管控系统具备自迭代、自优化功能;采掘生产装备具备基于煤层赋存变化的自适应协同作业功能,实现常态化无人高效智能作业,辅助作业全面实现机器人替代;主辅运输系统实现常态化无人值守作

业,并与智能仓储系统实现智能联动控制,不同辅助运输方式之间接驳实现机器人替代;全面实现了灾害信息的智能感知、分析与决策,防灾、治灾全部实现智能化无人作业;建设了完善的智能化煤矿运维管理体系,井下运维作业实现机器人替代,智能化系统实现井下常态化无人作业,智能化煤矿生产效率远超传统综合机械化水平。

选煤厂智能化建设效果等级划分具体如下:

①L1 级即基础自动化选煤厂,系统配置需满足:原煤处理、分选、脱水干燥等核心环节实现单机自动化控制,关键设备运行参数基本监测,但数据未实现全厂级融合,未部署智能化管控平台,生产流程依赖人工启停与参数调整。运行管理:生产流程需人工干预,设备间联动功能有限,辅助作业依赖人工操作,生产效率较传统选煤厂提升有所提升。安全环保:主要污染物实现达标排放,但监测手段以人工巡检为主,应急响应需现场处置,安全预警仅依赖设备自带阈值报警。运维保障:初步建立设备台账与定期维护制度,智能化运维能力薄弱,故障诊断依赖人工经验。

②L2 级即局部协同的初级智能化选煤厂,系统配置:主要工艺环节实现联动控制,车间级数据汇聚,初步支持生产调度,部署基础智能化管控平台,实现关键参数自动调节,但需人工确认。运行管理:生产流程可远程监控,部分环节实现少人化,辅助作业机械化水平提升。生产效率提升传统选煤厂提升有较大提升,能耗降低 5%~8%。安全环保:关键污染物实时监测,初步建立环保设施联动控制。安全预警以阈值判断为主,预警准确率 $\geq 70\%$ 。运维保障:组建专业化运维团队,设备故障预警准确率达 70% 以上,诊断覆盖率 $\leq 30\%$ 。

③L3 级即数据驱动的中级智能选煤厂,系统配置:全厂设备运行数据全面采集,构建智能化管控平台,支持工艺参数动态优化。部署工业互联网平台,实现多系统数据融合,但未实现全流程闭环控制。运行管理:生产流程自动化占比超 85%,关键岗位实现无人值守,辅助作业机械化覆盖率达 90%。AI 算法初步应用于部分环节,生产效率提升较初级智能化选煤厂有较大提升。安全环保:多源数据融合分析,实现污染物排放预测与智能调控,安全预

警准确率达 85% 以上。环保设施与生产系统联动控制。运维保障:建立设备全生命周期管理系统,诊断覆盖率超 60%,故障响应时间 $\leq 30\text{min}$ 。基于机器学习的设备故障预警,预警准确率 $\geq 80\%$ 。

④L4 级即高度协同的中级智能选煤厂,系统配置:工艺系统实现自适应控制,通过机器学习模型动态优化分选参数,设备群协同联动支持多目标生产优化。构建辅助决策平台,整合原煤特性、设备状态及市场需求数据,生成最优生产方案并实时调整。运行管理:关键岗位无人值守,辅助作业机器人实现自主作业,机器人替代率超 50%。调度系统动态优化设备运行时序,减少空转能耗,生产流程自动化占比 $\geq 90\%$ 。安全环保:多种算法融合粉尘、噪声、废水等多源数据,预测污染物排放趋势并自动调整环保设施参数,预警准确率 $\geq 95\%$ 。智能巡检系统实现设备故障早期识别,应急响应时间 $\leq 10\text{min}$ 。运维保障:建立 AI 驱动的预测性维护系统,通过深度学习分析设备振动、电流等历史数据,故障预警准确率 $\geq 95\%$,运维成本降低 30% 以上,远程运维平台支持专家系统实时诊断复杂故障,提供维修决策建议。

⑤L5 级即全流程自优化高级智能选煤厂,系统配置:工艺系统由 AI 自主决策,通过深度强化学习实现全流程闭环控制,自动适应原煤品质波动与市场需求变化。构建数字孪生系统,AI 模型实时模拟生产过程并预测潜在风险,支持系统自迭代优化。运行管理:全厂生产过程无人化,AI 生成并执行生产计划,辅助作业 95% 以上机器人替代。设备群通过 AI 算法实现动态协同。安全环保:实时监控全流程污染排放,通过自适应控制确保零超标排放。基于 AI 的多灾种融合预警系统,实现快速响应与全自动处置。运维保障:AI 运维机器人自主完成设备巡检、润滑等任务。建立 AI 知识图谱,自动积累运维经验并反哺优化生产工艺。

2 无人化开采系统基础与架构

2.1 无人化智能开采体系

无人化开采系统是一个高度复杂且集成化的体系,旨在通过先进技术实现矿山开采全过程的自

动化与智能化, 最大程度减少人力干预, 如图 1 所示。针对采煤工作面多设备协同控制, 涉及多种复杂控制系统, 煤机规划截割、支架自适应控制、三机一架协同、智能放煤、数字孪生等, 形成开采过程中的全面感知、智能决策、动态调整、协同控制等, 将

工业互联网、人工智能与先进装备技术深度融合为核心构建的复杂系统, 通过“感知、传输、决策、执行、运维、监管”六维协同架构, 各层面相互协作, 实现煤炭开采过程中的闭环智能控制, 以达成安全、高效开采目标。

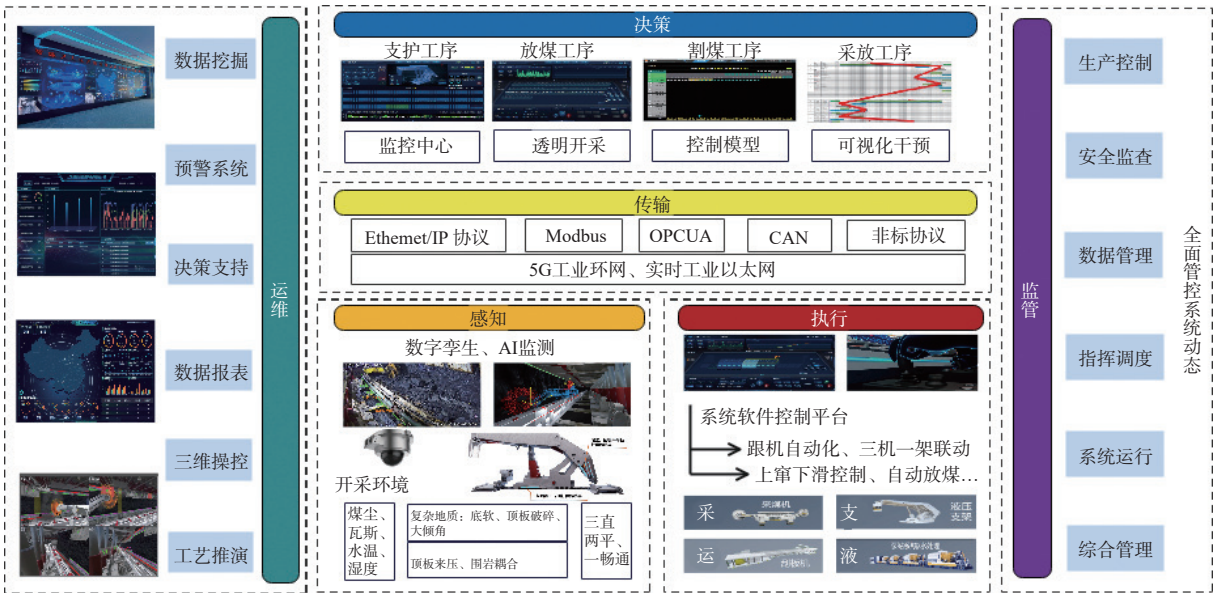


图 1 无人化开采智能感知全过程

感知层采集煤矿开采过程中的各类信息, 为系统的决策与控制提供数据支撑。如液压支架搭载压力、测高、倾角等传感器, 实时监测顶板下沉量与支架姿态, 通过电液控制系统动态调整支护强度。基于采煤机位置信息, 实现支架的跟机伸收护帮板、成组推溜、自动移架等时序协同。此外, 液压支架传感器逐渐升级为无线传感, 同时工作面布设视觉传感器(如摄像头、激光雷达等), 可对开采场景进行图像采集与分析, 实现障碍物识别、目标定位等功能, 如图 2 所示。

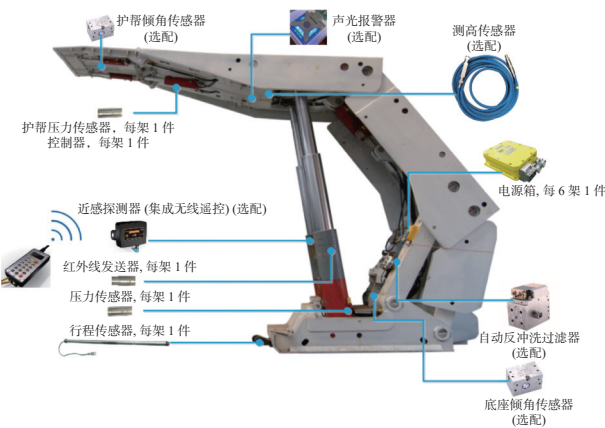


图 2 液压支架感知系统

传输层将感知层采集的数据快速、准确地传输至决策层, 并把决策层的指令下达给执行层。结合光纤通信, 以应对复杂的井下环境, 确保通信的稳定性与可靠性, 如图 3 所示。同时, 为保障数据传输安全, 采用加密技术、虚拟专用网络等手段, 防止数据被窃取或篡改。

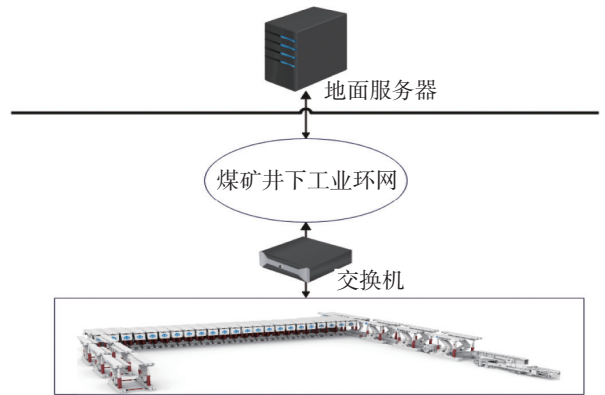


图 3 信息传输

决策层是无人化开采系统的核心大脑, 基于感知层传输的数据, 运用大数据分析、机器学习等技术进行深入处理与分析。通过建立开采模型、工艺算法, 对开采设备的运行状态进行实时评估, 预测

设备故障, 提前安排维护计划; 根据地质条件、开采进度等因素, 控制参量动态更新, 动态调整开采工艺, 如规划割煤路径、跟机调度策略, 以提高开采效

率与资源利用率; 并且在面对突发情况(如设备故障、地质灾害等)时, 能够迅速做出决策, 启动应急预案, 保障采煤工作面生产安全, 如图 4 所示。

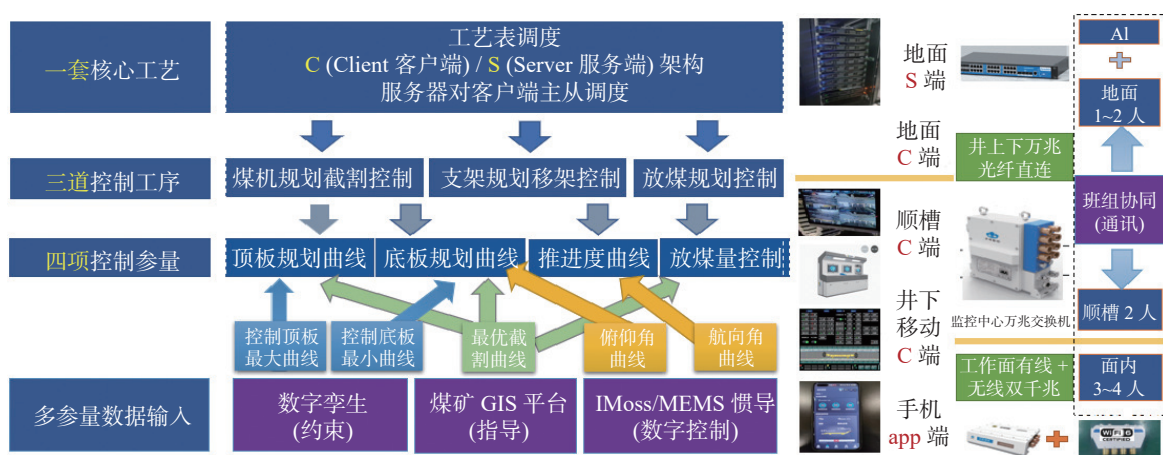


图 4 煤矿无人化开采工艺

执行层根据决策层下达的指令, 控制设备层的各类设备执行相应操作。例如, 当决策层规划好工作面采煤工艺, 远程调度工作面支架、采煤机等设备动作方向、速度等参数, 使其按规划路线割煤。执行层确保决策能够准确无误地转化为实际的开采作业行动。

运维是提供设备的远程监测、预警报警、远程故障诊断, 解决设备的安全和设备生命周期管理, 保障设备良性运作和使用寿命, 促进工作面常态化数字化采煤持续运行, 如图 5 所示。



图 5 智能工作面大数据中心监控设备故障

监管环节是确保煤矿开采系统安全、合规、高效运行的核心模块, 对生产控制、安全监查、数据管理、指挥调度、系统运行、综合管理等进行监管, 提

供多维度溯源分析, 推动无人化开采向透明化方向演进。

2.2 无人智控, 自主协同

在传统综采技术基础上, 北京天玛智控科技股份有限公司(天玛智控)构建矿井网络系统, 形成智能化数据平台和远程控制平台。这些平台共同组成智能化采煤工作面的完善系统, 包括视频系统、语音通信系统及远程监测监控系统。智能化采煤工作面运用智能化开采技术, 实现智能化集控中心对工作面开采过程的全程可视化操作和监测监控。地面智能化集控中心全面呈现井下采场的设备工况和人员配备情况, 实现人员的合理化分配和数据的深度分析利用。上述系统和功能进而共同组成综合智能化控制系统。该综合智能化控制系统的主要组成部分如下

1) 智能 AI 联动系统 该系统在无人化开采过程中, 借助视频 AI 技术, 自主检测识别护帮板姿态、支架丢架、支架行程状态、人员等目标, 可以实现采煤机的识别定位与实时动态跟踪监测、采煤机自主跟机与护帮板防碰撞干涉预警的联动智能监控、刮板输送机煤流状态的智能监测与负载平衡协同控制, 以及工作面危险区域人员安全动态感知与智能

监控。智能 AI 联动系统服务于工作面无人化开采的辅助目标,如图 6 所示。

2) 工作面端部测量技术 天玛智控智能视频团队基于点云与图像技术,应用于上窜下滑监测、回采推进度测量、设备姿态监测等,可以在工作面两端部署激光雷达+摄像机,实现两巷环境实时数字化,为系统提供数据支撑;还能获取工作面两端口安全出口距离的变化程度,预防工作面伪斜发生,为工作面机头机尾加减刀提供决策依据,如图 7 所示。

3) 规划截割控制系统 该系统控制采煤机割煤顶、底板,是实现工程“三直两平”要求的关键控制环节。该系统具备远程监测功能,实现对各控制单元运

行参数、保护状态等的监测,能执行各控制单元的启停操作与控制。规划截割控制系统基于历史截割数据、设备姿态感知数据、写实标定数据等多源数据融合,构建截割模板数据宽表。该系统通过机器学习迭代训练,生成位置、顶底板高度、速度等工艺参数,融合优化在可预测范围内。同时,该系统融合规划截割与可视化干预,支持视频自动追机的同时进行规划截割干预,实现以工作面减人为目的的智能截割。

工作面无人化生产采用采煤机规划截割,搭配支架自动跟机、数字孪生诊断增强和智能视频全面感知,构建四大技术栈,实现工作面无人化生产,如图 8 所示。

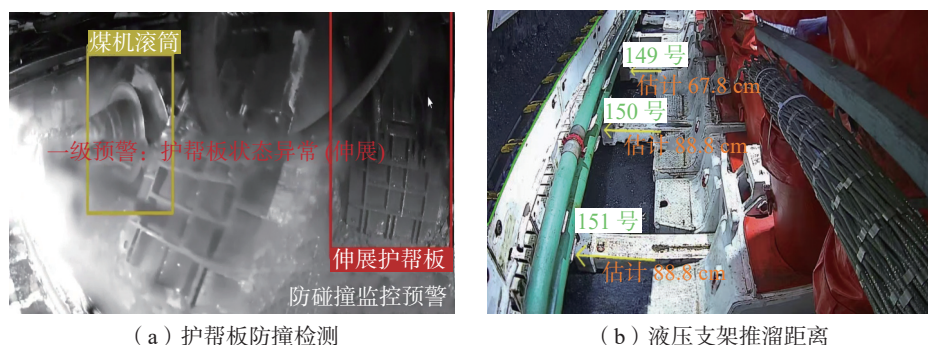


图 6 综采设备智能 AI 联动

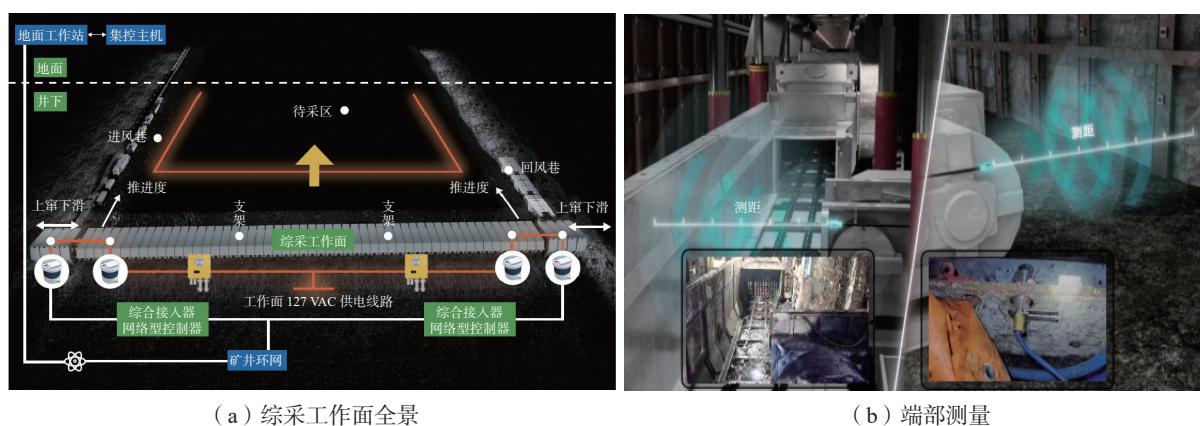


图 7 综采工作面端部测量

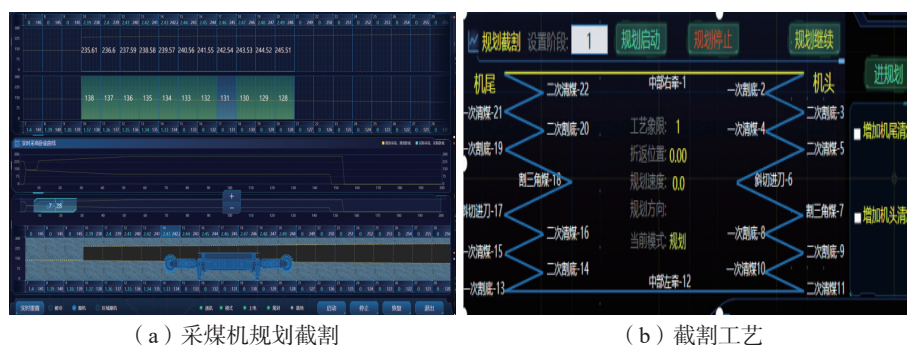


图 8 数字孪生与规划截割

4) 开采数字孪生 地面系统通过数字孪生映射井下工作面设备,提供控制诊断参量,具备 3D 防碰撞功能,提高开采安全性与开采效率。数字孪生系统融合工作面生产工况监控视频处理与 AI 视频监控,基于深度学习技术,构建工作面场景视觉感知算法模型,自动检测识别作业工况条件下设备围岩环境的关键参数,如图 9 所示。

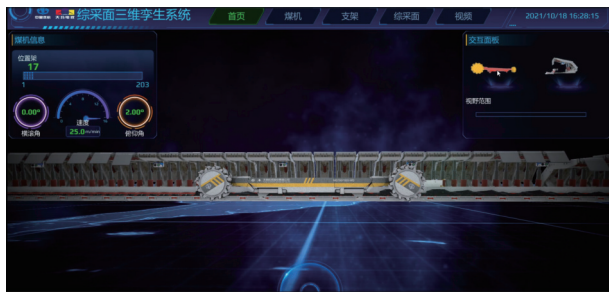


图 9 综采面三维孪生系统

5) 工作面自适应跟机控制系统 该系统依托部署于地面控制中心的一体化采煤工艺引擎平台,实现全工作面的自动化跟机控制。一体化采煤工艺引擎平台覆盖中部及两端头三角区在内的全部液压支架,能够随采煤机运行自动执行相应动作,精准响应三角区不同阶段的工艺需求,动态检测漏架情况并自动进行补架操作,从而完成全自动循环采煤作业。采煤工艺在地面控制中心遵循“编辑-调度-执行-调整-迭代”的全流程闭环管理,达成“统一控制、集中调度”的高效运行模式。一体化采煤工艺引擎平台具备离线工艺编辑能力,提供图形化界面和拖曳式交互方式,便于操作人员根据实际需要灵活定制采煤工艺。工艺引擎平台支持多场景工艺无缝切换,可在线调用多种采煤工艺,有效适应伪斜开采、加刀作业等复杂开采工况。

6) 三机一架协同控制系统 天玛智控建立 1 条贯穿地面-皮带机尾-转载自移-主运超前-工作面-辅运超前的网络链路,支持两巷设备联动执行或单独控制,实现全工作面设备控制的“一网到底”。操作人员通过地面控制中心工艺编辑,定制两巷(三机一架)设备与工作面设备的控制流程。根据采煤工艺、煤机位置、工作面条件等,工作面设备与两巷设备(超前支护、转载机、皮带自移机尾)就能实现协同推进。

3 地质保障与时空信息精准感知

当前,煤炭资源开发正面临地质条件复杂化、生产效率需求高端化、智能开采无人化的三重挑战。煤矿企业现阶段在技术投入、人员素养及硬件设施上存在显著差异,传统地质保障模式存在不同程度的数据滞后、模型静态、预警被动等问题。随着煤炭行业智能化转型加速,地质保障系统智能化水平以及矿井时空信息感知能力成为制约煤矿安全高效生产的决定性因素。

3.1 多维时空地质保障体系

构建全方位、多尺度的矿井地质时空信息感知系统是煤矿智能化建设的关键任务。煤矿隐蔽致灾及地质透明化受各种因素的影响,单一探测技术局限性大,多解性强。因此,需通过不同来源数据融合分析,才能为地质保障提供尺度更周全、属性更丰富、空间更立体的信息。

空-天遥感技术可实现对矿区地表形变与灾害隐患的早期预警,为井下采掘提供宏观地质约束;地面与井巷多源传感网络构建了超前的立体监测能力,能够精准捕捉采动诱发的地质异常信号。如图 10 所示,基于长期的地质保障科学研究与工程实践,系统性地从地质数据采集、地质建模全流程考虑,通过多空间多方法协同探测、多参数多属性融合,空-天-地-井-巷五维协同保障体系实现了对煤矿地质空间维度的全域覆盖与时间维度的连续监测。

上述不同时空信息感知方法的探测精度以及参数均有所区别。例如,遥感影像数据能够监测地表形变,但不能探测地下深部物性结构。地-空瞬变电磁法能够反映不同深度的电性变化,但该方法精度较差。地面三维地震精度高,能够较准确的确定构造的位置,但不能确定富水性的强弱。巷道随掘随采、槽波以及电阻率监测方法因在巷道进行探测,准确度相对较高,但其目标范围较小。长掘长探方法是以钻孔为施工空间,探测精度较高,但该方法受钻孔所限。通过对五维协同参数进行数据融合分析,提取数据特征和属性特征,能够更加准确识别煤矿地质灾害体,提高煤矿探测精度,为地质透明化和安全生产提供保障,如图 11 所示。对空-天-地-井-巷五维数据进行时空关联分析,能够

共同揭示地质体多场耦合作用机制, 支撑智能开采装备对断层、陷落柱、含水层等地质异常的超前规避, 将传统被动治理转变为主动防控, 显著提升复杂地质条件下的开采自适应能力。

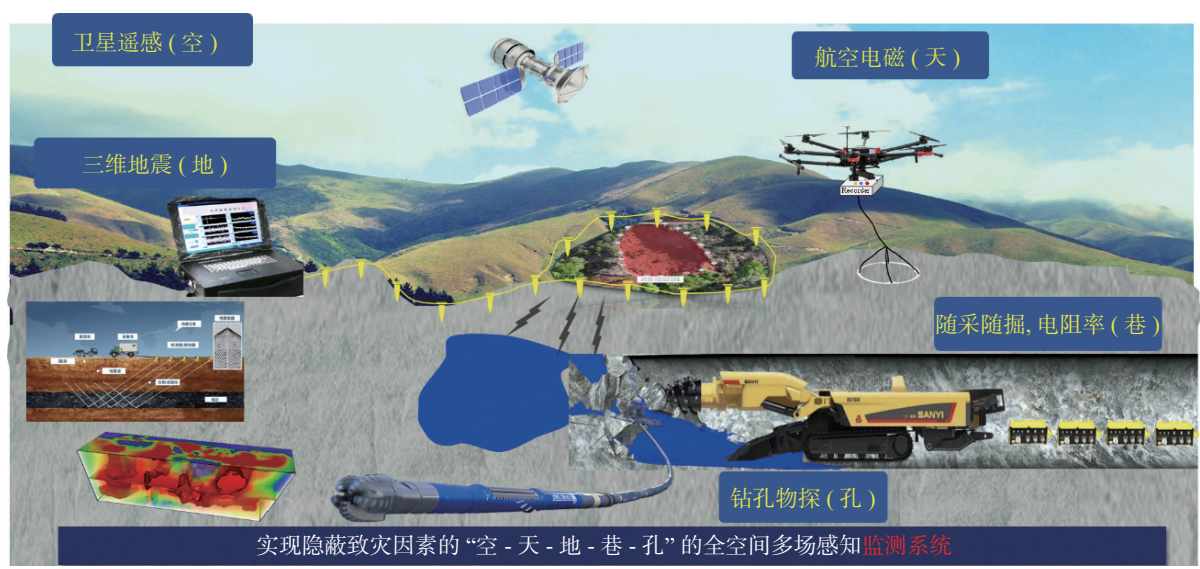


图 10 空-天-地-井-巷五维协同地质保障

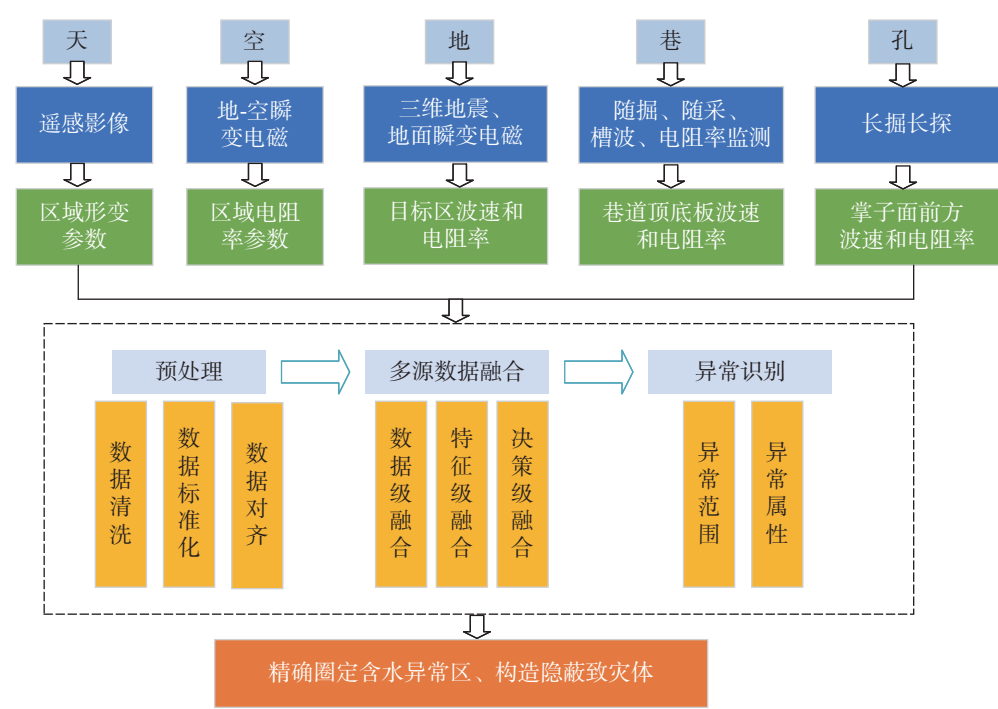


图 11 矿井多源数据融合技术体系构建

3.2 矿井时空信息感知融合

矿井地质空间内的时空信息感知是智能化矿山建设的基础保障。然而, 当前对矿井地质空间内的时空信息全面感知不足, 其原因主要在于各类监测传感器分布不均匀以及矿井灾害数据获取时效性不足。同时, 不同传感器所监测的矿井地质数据

在时间及空间分辨率方面均存在较大差异, 导致相对应的矿井地质时空信息具有多源时空异构性。因此, 对矿井数据进行空间尺度配准及时间尺度同步是时空信息融合基础。

1)空间尺度配准 钻探数据通常具备较为完整的空间信息记录, 包括钻孔的开孔坐标、井斜信息及钻孔轨迹等, 为后续空间分析和地质建模提供了

关键支持。相比之下,物探数据(如地震勘探、电法勘探等)原始采集多以时间域或频率域形式表达,缺乏直接的深度坐标信息,需通过特定的技术手段进行空间化处理。例如,三维地震勘探数据可借助合成地震记录与叠前深度偏移等方法实现时间-深度转换,进而获得精确的深度域空间定位。电法勘探数据则通常依赖反演算法,将频率域响应数据转换为相应的深度剖面,从而构建具有地质意义的空间分布图像。此外,对于地质写实、采掘揭露等传统地质记录数据,由于其采集过程中未配置或缺失高精度的大地坐标信息,往往需要依赖地质专家结合已有空间框架和地质解释结果进行后期空间标定,以实现多源异构地质信息的统一空间表达与综合分析。

2)时间尺度同步 采用时间尺度上的同步转换技术,可以实现不同传感器时间尺度同步。例如,使用插值法对不同时段的水害监测数据进行时间对齐,或者利用时间序列建模方法来预测并填补数据缺失。为捕捉地质环境的动态演化特征,在煤矿采掘过程中获取的各类地质监测数据(如水文地质、岩体应力、瓦斯浓度等)通常以时间序列形式进行连续记录。然而,由于监测设备部署方式、采样频率及数据获取时机的差异,不同时间点或不同监测系统之间的原始数据往往存在时间维度上的不一致性,对后续多源时空信息联合分析、趋势判断及异常识别造成较大影响。因此,为提高矿井感知信息融合的准确性与时序一致性,还需对监测数据进行时间尺度同步处理与规范化校正。可采用多种时序同步与重采样策略,例如,对于具有间歇性缺失的水害监测数据,可利用各类时序插值等方法实现监测数据在统一时间节点上的重构;而针对高度动态变化的监测变量,还可引入时间序列建模技术进行趋势预测与数据缺口填补。此外,在多源异构监测数据融合过程中,也可引入动态时间规整等算法,实现不同时间轴下数据序列的最优对齐,从而增强数据之间的时空协同性与分析的整体可靠性。通过对矿井多源信息进行时空标定,能够消除井下复杂环境导致的传感器数据歧义性,确保多源地质信息在同一时空基准下的可解释性。

3.3 时空地质模型动态构建

在煤矿三维地质模型构建的基础上,通过网格

化模拟,将其与矿井时空信息感知网络中的各灾害监测系统数据进行数据联动,实时分析关键地质参数变化是动态构建承载矿井时空信息透明地质模型的关键技术,具体包括采掘扰动下的模型更新和模型-时空信息同步映射两项技术。

1)采掘扰动下的模型更新 面对采掘扰动导致的地质条件时变特性,透明地质模型需结合实时监测数据,持续优化地质模型的几何结构与物性参数,以反映矿井开采过程中的地质环境动态演化特征。如图 12 所示,模型通过实时融合随钻测量、微震监测以及电阻率监测等数据流,自动修正地质空间内的断层活化趋势、顶板稳定性、顶底板富水性等环境参数,为透明工作面提供渐进精确的地质导航。上述形成的感知-建模-决策闭环迭代机制,能够使开采系统主动适应地质异常。

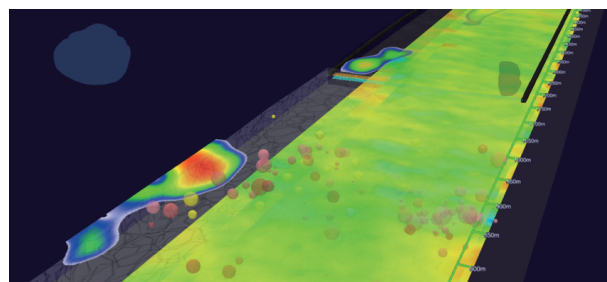


图 12 采掘扰动下的模型更新

2)模型-时空信息同步映射 同步映射处理技术是连接地质模型与矿井物联网系统的关键纽带,如图 13 所示,其核心在于建立模型与感知数据间统一的时空基准与动态权重分配机制,实现地质模型与多元监测数据的精准时空孪生关联。同时,通过轻量化增量更新技术,将承载矿井时空信息地质模型的刷新频率提升至分钟级,使煤矿透明地质保障系统能够实时反映采掘扰动下的地质环境。

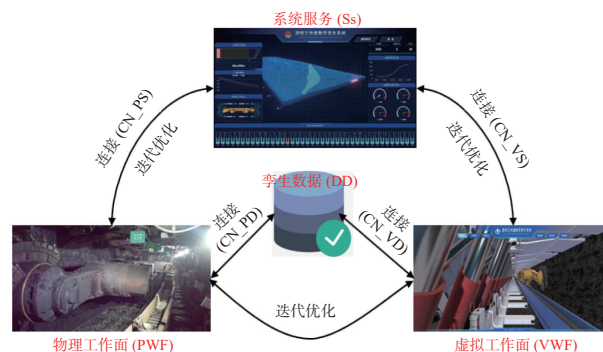


图 13 模型-监测数据时空孪生关联

3.4 工作面场景时空信息精准感知

随着煤矿智能化无人开采技术的快速发展,井下场景时空信息精准感知技术已成为实现智能化无人开采的关键核心技术之一。由于井下场景复杂多变,基于传统单模态视觉感知系统已难以满足智能化无人开采对采场环境及设备状态的准确、可靠感知需求,而多源融合时空感知技术可以实现多模态感知数据优势互补,是解决井下场景环境及设备状态高精度、高可靠感知的重要手段之一。在井下复杂多变的场景中,激光雷达在高粉尘环境中穿透能力强,具有三维空间测距能力,可以实现场景空间的高精度数字化重建;而视觉相机能够提供丰富的场景语义信息,为关键设备目标对象准确感知奠定基础;惯性导航里程计可以感知高频姿态变化信息,能够有效解决激光雷达与视觉相机在设备状态快速变化过程中出现的运动模糊问题,从而保障感知数据信息的连续性。

针对煤矿井下场景,开展多源融合的时空信息

精准感知技术研究,通过多模态传感紧耦合融合策略实现井下场景空间高精度数字化建模,系统框架如图14所示。在多源数据时空对齐层面,首先采用精密时间同步方法,结合三次样条插值技术将多源传感数据统一对齐至激光雷达时间基准,在传感数据层面确保数据的时间一致性;然后通过多源数据联合标定技术,建立各模态传感器统一的空间坐标系,为后续融合奠定基础。在系统算法架构方面,前端处理采用动态自适应分割算法对激光雷达点云进行密度聚类,结合边缘与平面特征提取,并引入轻量化网络预测语义标签以滤除动态场景噪声数据。同时,针对视觉图像数据,通过自适应响应值筛选图像角点,并设计具备时间、尺度及旋转不变性的特征描述子,实现视觉特征的鲁棒表征,提升特征的准确匹配。后端构建分层优化结构,采用扩展卡尔曼滤波与因子图相结合的多模态数据融合优化框架,有效减少激光雷达点云匹配误差、视觉重投影误差及惯性里程计数据预积分约束。

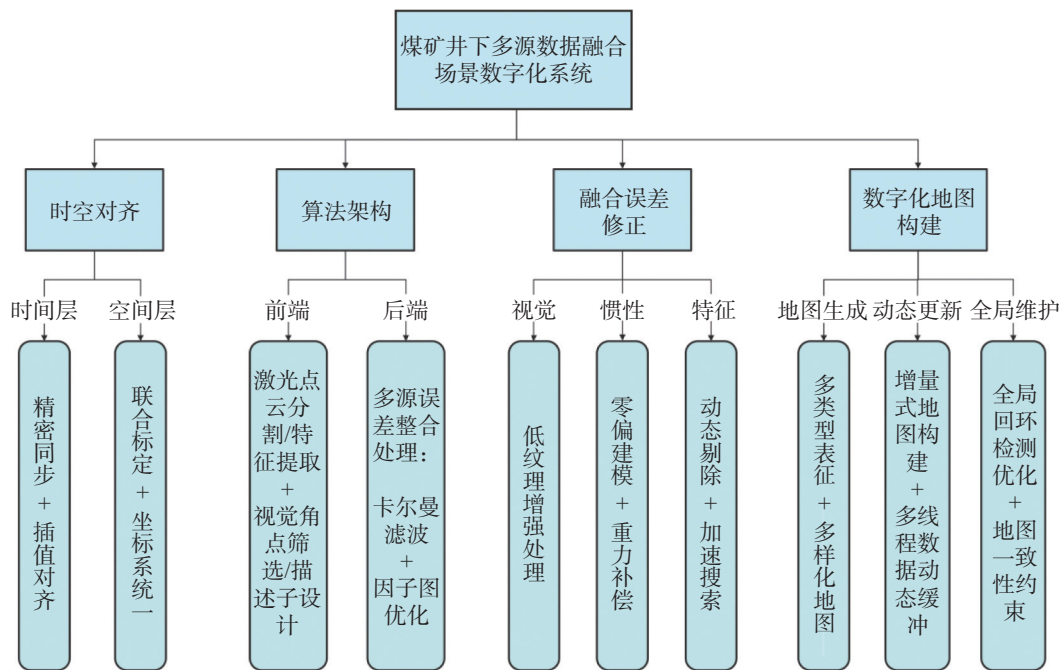


图14 煤矿井下多源数据融合场景数字化系统框架

如图14所示,在多模态数据融合误差修正方面,提出多项误差模型精细化方法。针对视觉图像,引入光度约束归一化互相关机制,以提升低纹理区域的匹配稳定性,保障纹理稀疏条件下视觉特征的准

确匹配,最终降低特征匹配误差。针对惯性导航里程计固有数据漂移及相应误差,通过零偏动态建模与重力补偿方法,纠正姿态漂移。同时,构建点云特征匹配加速搜索机制,结合下采样八叉树结构,进行点

云目标特征分类配准,完成动态关键目标对象分割,

剔除动态目标特征噪声,其可视化效果如图 15 所示。

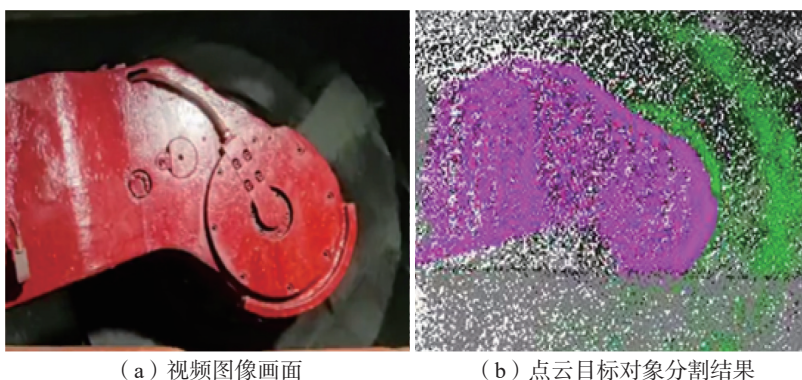


图 15 点云特征匹配可视化效果

在数字化地图构建方面,针对数字化地图生成应用,构建场景多样化地图,包括三维点云语义地图、栅格化地图、高程地图、视觉纹理地图、语义拓扑地图等,实现场景空间的全面特征表征,并根据不同场景应用进行地图灵活切换。数字化地图采用增量式更新策略,在保持全局地图连贯性的前提下,实现局部场景地图的动态实时更新。同时,建立关键帧及多线程动态数据缓存机制,进行地图增量数据的优先级排序,在显示交互层实现地图实时动态渲染与可视化。针对全局场景数字化地图,设计回环特征描述子,建立回环检测机制,基于因子图优化框架实现全局地图的一致性误差约束,最大化消除全局数字化地图系统累计漂移误差。

现阶段,研究团队基于多源融合时空感知技术,利用激光雷达、视觉相机和惯性导航里程计等多模传感设备,建立井下工作面场景空间的数字化三维实景重建模型。该模型实现采场围岩壁面区域的精确分割、结构变形趋势的智能预测、关键设备的自动检测与动态跟踪,以及设备状态的感知分析等应用。研究团队已成功完成该技术的实验验证,其系统应用效果如图 16 所示。未来,煤矿井下多源融合时空感知技术将向轻量化、智能化方向进一步发展。该技术将为煤矿智能化建设提供坚实技术支撑,推动煤炭行业向“少人化、无人化”安全高效生产方向持续迈进。

4 自适应控制决策机制

4.1 开采空间与装备群的耦合机制

该研究揭示煤炭开采空间与装备群之间的耦

合作用关系,对推动煤层开采从“人工经验决策”转向“数据-模型关联决策”发挥基础保障作用,为实现安全、高效、可常态化的“无人化”开采提供技术支撑。

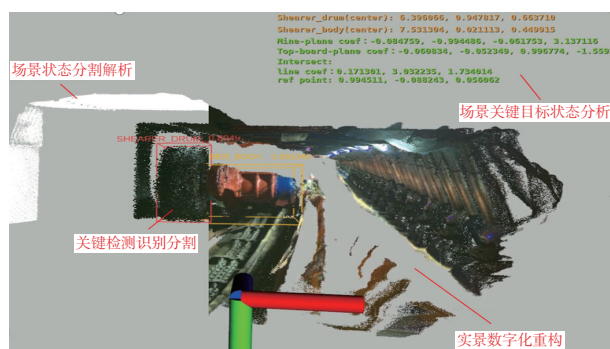


图 16 工作面场景数字化感知应用效果

1)空间约束与装备参数动态匹配 系统将煤岩硬度、煤岩界面变化趋势等煤层赋存信息作为约束参量,构建综采工作面物理空间约束模型。该模型分析约束参量对采煤机截割高度与速度、支架支护强度、输送机转速等装备运行参数的影响关系。系统制定约束参量与装备运行关键参数的关联规则表,实现以地质条件等采场物理空间参数驱动的装备运行参数动态调整。装备群如遇断层等复杂地质构造,协同调整截割路径和支护策略。

2)装备参数反馈优化约束模型 装备群配置压力、振动、位姿、视频等传感器,实时采集采煤机开采过程数据。采集数据可转换为采场空间环境信息,例如:通过液压支架压力监测数据预测顶板周期来压情况,通过视频数据感知煤壁片帮情况。系统利用上述信息反馈优化综采工作面物理空间约束模型,从而提升综采采场空间约束与装备参数的

动态匹配性。

4.2 动态环境下的装备群协同控制

随着“无人化”开发模式实践,针对作业人员非就地操控装备后带来的多机群协同控制理论不足、装备群协同控制能力差,以及采煤工艺与开采装备系统耦合弱的问题,需要制定装备间协同控制规则,以支撑多机协同控制规划。

为此,天玛智控研究团队提出了如图17所示的无人化智能开采自适应控制决策架构,包含感知

层、自主决策控制中枢和执行层。其中,自主决策控制中枢是面向非线性时变系统的模糊-模型预测控制(Fuzzy-MPC)混合架构,建立基于专家规则、加权融合与人机经验知识嵌入的模糊控制策略,并设计用于综采海量数据 IF-THEN 关联自动提取的 Apriori 算法。该团队还构建了开采过程中采煤机、液压支架、刮板输送机等主要综采装备的线性时序逻辑安全规则库,提出基于深度强化学习的复杂随机环境多工序协同决策优化引擎,实现动态煤层条件下无人化智能开采效率与安全性的双重提升。

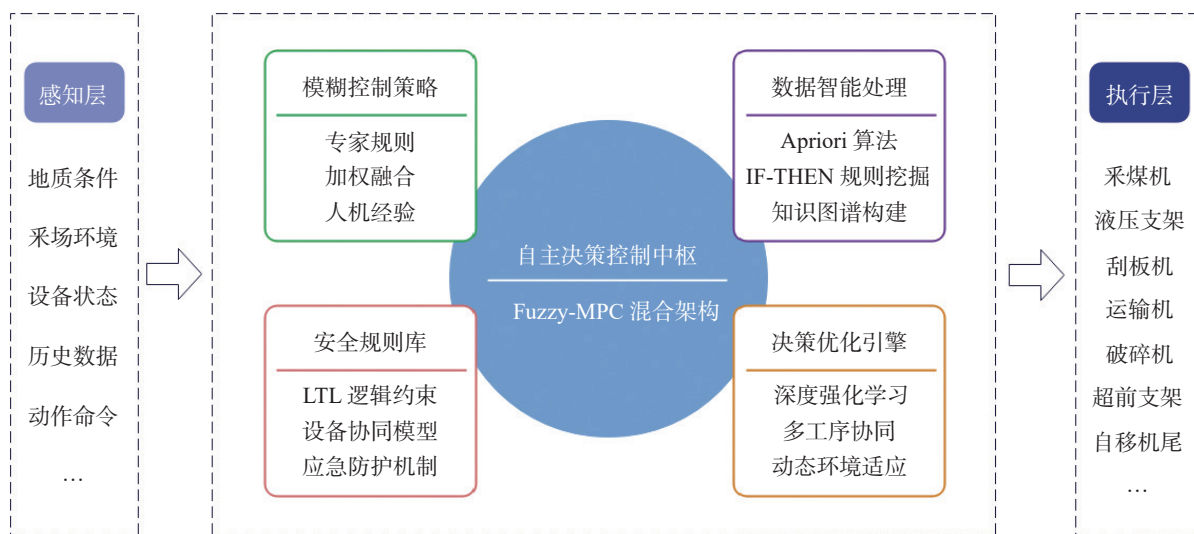


图 17 无人化智能开采自适应控制决策架构

4.3 自适应开采决策系统

1)装备群自适应开采调度 综采工作面装备群自适应智能精准调度控制包含“1 套采煤工艺、2 道控制工序、3 项控制参量”,如图 18 所示。基于图神经网络(GNNs)的采煤工艺知识图谱,天玛智控

智能开采团队开发了基于实时动态匹配算法的综采开采最优工艺链自动生成方法,解决煤炭开采过程无法及时调整采煤工艺的难题。开发了工艺四维时空编码技术,创建综采装备群标准单元工序集,研发离散工序集智能调度选择器,实现了全工作面(中部、三角煤区域)综采装备群工序集的自适应匹

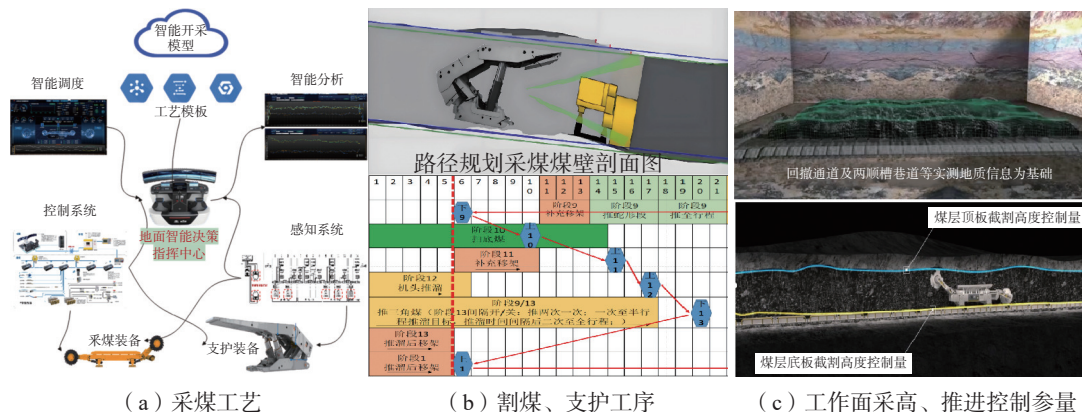


图 18 综采开采分层调度控制

配与组合,使装备群自动化控制率达到 100%。并开发了多参量耦合解算与实时动态补偿算法,实现煤层顶/底板截割高度量和工作面推进量的精准感知。

2)采煤工艺数字化开发平台 天玛智控数字孪生研究团队开发了煤矿采煤工艺数字化敏捷开发平台,采用业务领域驱动设计构建工艺微服务架构。团队研制了基于图形编辑引擎的可视化编排设计器,提供支持拖拽操作的可视化工艺逻辑开发界面,实现了复杂采煤工艺的高效可视化编辑。此外,提出了基于 Transformer 的工艺逻辑组件智能补全与推荐机制,开发了工艺耦合仿真推演验证沙盒技术,并构建了采煤工艺调度引擎,支持采煤工艺的实时在线调用,显著增强了综采装备对多样化采煤工艺的适应能力。

5 智能运维保障关键技术

5.1 煤矿智能化运维标准体系

近年来,我国煤矿智能化建设取得了阶段成效,智能化技术装备水平与系统功能持续提升,但受制于材料、制造工艺、装配技术及井下恶劣作业环境等因素影响,煤机装备系统运行的可靠性普遍较低,严重制约了智能化技术装备与系统的常态化高效运行,煤机装备运维管理技术是弥补装备可靠性不足、提升矿井智能化系统常态化运行水平的有效途径。目前,煤矿大型煤机装备与智能化系统的运维管理主要依靠煤机装备制造厂家,其运维管理内容、运维流程、运维工艺、运维效果评价等均存在较强

的随意性,缺少运维管理标准进行约束,且运维方式主要以被动式运维为主,即设备出现故障后才进行维修更换,主动式预测性运维应用较少,导致煤机装备及智能化系统的故障率较高、常态化运行效果较差、运维与维护效果不理想。

针对上述煤机装备系统运维管理存在的问题及煤矿现场实际运维管理需求,郭佐宁团队提出了煤矿智能化系统运维管理标准体系框架^[56],将煤矿运维管理划分为共性基础类、信息网络平台类、智能控制系统与装备类、运维保障类 4 个大类,并细化为 27 项具体运维管理标准。

按照现阶段智能化煤矿运维管理技术现状及需求的紧迫性,作者团队前期已完成了上述标准体系框架中 17 项标准的制定工作,并于 2023 年 11 月以团体标准的形式进行了发布,为煤矿智能化运维管理内容、流程与运维效果评价提供了标准支撑。

5.2 全生命周期运维管理平台

煤机装备全生命周期运维管理是智能化煤矿运维管理的重要组成部分,基于统一的装备编码体系、统一的数据底座、统一的运维标准流程、统一的资产管理体系、统一的运维安全管理策略等,构建煤机装备前期、中期、后期全生命周期运维管理平台是提升煤机装备高可靠常态化运行的有效途径。

基于智能化煤矿运维管理现状与需求,作者团队提出了集团公司端、矿业公司端、煤矿端不同需求的三层级煤机装备全生命周期运维管理平台架构,如图 19 所示。

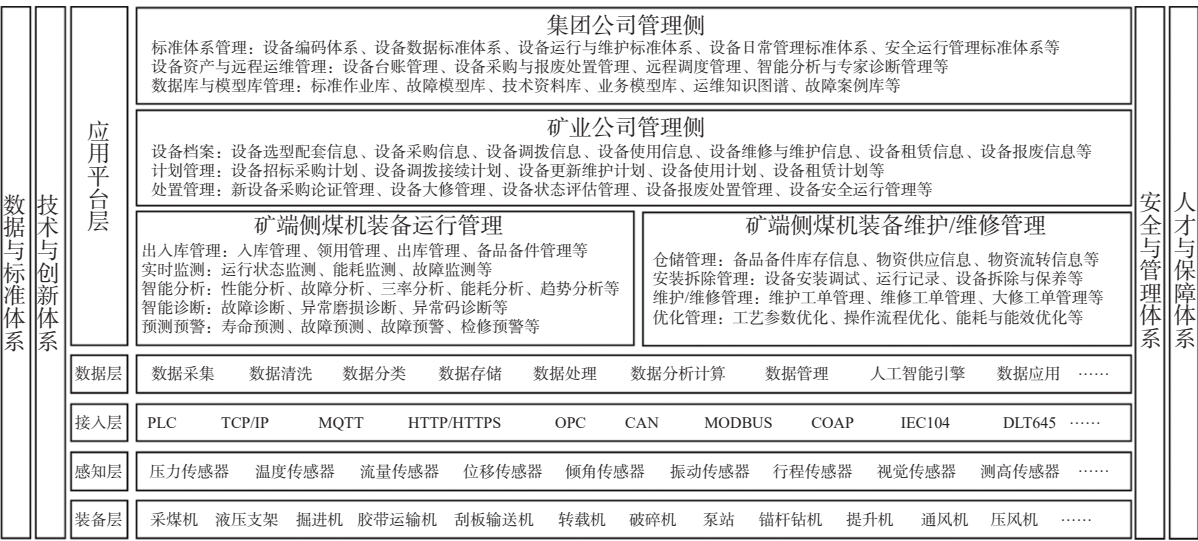


图 19 煤机装备全生命周期运维管理平台架构

基于煤机装备情况及运维管理需求,在煤机装备主要运行部件安装各类传感器,对煤机装备的运行状态进行全面感知,煤机装备运行状态感知数据通过接入层传输至数据层,接入层可以对各类传感器的传输协议进行解析;数据层则主要对设备运行状态监测数据进行数据清洗、分类存储、分析计算、管理应用等,为应用层提供数据支撑。

煤矿是煤机装备直接使用、维护与维修的主体,可将煤矿细分为矿端侧煤机装备运行管理、矿端侧煤机装备维护/维修管理,其中运行管理主要由煤矿实施,重点开展煤机装备运行使用过程管理,如设备运行状态监测分析、设备故障诊断与预测预警等,而维护/维修管理则可以由煤矿实施,也可以由第三方专业运维机构实施,重点开展煤机装备物资信息及备品备件管理、设备安装与拆除管理、设备维修与维护管理、工艺流程优化管理等,部分煤炭企业采用区域集中运维模式(即由专业运维机构集中对相邻的煤矿进行运维托管),取得了较好的运维效果。

矿业公司是煤机装备资产管理的主体,主要对煤机装备进行设备档案管理、计划管理与处置管理,重点开展设备的选型论证、招标采购、调拨使用、设备运行状态评估、报废处置、安全运行等管理,通过提升煤机装备资产调拨使用效率、减少设备故障率及运维支出,实现降本增效。

集团公司则主要对煤机装备的运维管理进行指导,是煤机装备编码体系、数据标准体系、安全运行管理体系等的制定主体,并参与煤机装备处置相关流程;另外,集团公司通过汇聚下属矿井煤机装备的运行及故障数据,为构建统一的标准作业库、故障模型库、业务模型库、运维知识图谱等奠定了基础,为矿井侧煤机装备运行维护管理提供数据模型支撑。

基于煤机装备全生命周期精益化管理平台与关键技术,转变煤炭企业煤机装备资产管理理念、技术与组织架构、运维管理模式等,可以最大程度科学高效地利用设备资产,提高设备运行的可靠性与经济性。

6 结论与展望

本文系统提出了L1~L5五级智能化煤矿等级划分体系,该体系作为一种简明的评估框架,避免了复杂的技术经济指标计算,有助于引导企业开展

自主评估,明确智能化建设阶段与发展路径。作者团队还构建了以“感知-传输-决策-执行-监管”为核心的无人化开采协同架构,并指出其关键技术应用是实现煤矿减人、增安、提效的根本途径。此外,空-天-地-井-巷多维信息感知与融合、三维地质动态建模、随采随掘探测与时空映射、自适应决策控制等关键技术,为复杂地质条件下安全高效的开采提供了必备支撑。但智能化系统的运维水平直接影响常态化运行质量,当前亟须推进运维标准化、专业化和智能化,加强技术标准研制与高端人才培养,从而保障系统长期稳定运行。

尽管目前智能化煤矿建设已取得显著进展,但仍面临多源数据融合效率低、装备群协同控制实时性不足等核心技术瓶颈。未来研究应致力于提升智能算法的精度与可靠性,增强标准体系对技术演进与应用场景变化的动态适配能力。同时,应进一步推动5G通信、数字孪生与大模型等前沿技术与煤矿开采场景的深度融合,突破现有系统集成与协同控制的限制,最终推动煤炭开采向全面智能化、无人化的方向迈进。

参考文献:

- [1] 袁亮,张通,王玥晗,等.深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J].煤炭学报,2025,50(1):1-12.
- [2] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):716-725.
- [3] 袁亮,徐良骥.高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践[J].煤炭学报,2024,49(1):65-74.
- [4] 陈浩南,吴春岩.新质生产力赋能煤炭产业清洁高效利用研究[J].煤炭经济研究,2025,45(5):111-117.
- [5] 王国法,杜毅博.煤矿智能化标准体系构建与建设内容解析[J].智能矿山,2024,5(5):2-12.
- [6] 王国法,刘峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
- [7] 王国法.“十四五”煤矿智能化和煤炭高质量发展的思考[J].智能矿山,2021,2(1):1-6.
- [8] 赵国瑞.“5G+生态”赋能煤炭智能化[N].中国煤炭报,2020-06-20(003).
- [9] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支持[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.

- [10] 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): 3 033–3 044.
- [11] 任文清, 刘孝军. 煤矿主运输系统智能巡检机器人研究与设计 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(s2): 372–378.
- [12] 李浩荡, 董启凡, 李孝胜. 基于数字孪生与规划放煤协同的煤矿智能开采技术研究 [J/OL]. 煤炭科学技术.[2025-09-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250827.1108.003>.
- [13] 王国法, 庞义辉, 刘峰, 等. 智能化煤矿分类、分级评价指标体系 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 1–13.
- [14] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 5–19.
- [15] 乔永力, 张金虎, 邢有望, 等. 中厚煤层年产千万吨 450 m 超长综采面“三机”选型配套与应用 [J/OL]. 煤炭工程.[2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4658>.
- [16] 王立兵, 任予鑫, 马昆, 等. 多源数据融合智能识别煤矿场景特征 AI 模型 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4 617–4 631.
- [17] 刘毅, 郭冠哲, 高宇翔, 等. 主动全景图像基于改进 ConvNeXt 网络的矿井目标定位 [J/OL]. 煤炭科学技术.[2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402>.
- [18] 李波, 胡成军, 刘宾, 等. 煤矿复杂装备数字孪生几何模型轻量化方法 [J]. 煤炭工程, 2025, 57(8): 218–224.
- [19] 寇子明, 王国荣, 邓海顺, 等. 基于数字孪生的矿井辅助运输机器人动态调度策略研究 [J/OL]. 煤炭学报.[2025-09-07]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0591>.
- [20] 袁智, 蒋庆友, 庞振忠. 我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 189–198.
- [21] 曾庆良, 班新亮, 孟昭胜, 等. 基于 Unity3D 的工作面液压支架群组空间支护姿态数字孪生重构方法 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 74–88.
- [22] 王国法, 任怀伟, 富佳兴. 煤矿智能化建设高质量发展难题与路径 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 1–18.
- [23] 李伟, 孙希奎. 深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 52–64.
- [24] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181–202.
- [25] 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(1): 34–53.
- [26] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 61–74.
- [27] 范京道, 黄克军, 李川, 等. 我国煤矿智能化技术十年发展与实践 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(7): 1–24.
- [28] 刘峰, 张建明, 曹文君. 我国煤矿智能化建设现状与发展建议 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(4): 6–10.
- [29] 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.
- [30] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 深部充填开采岩层控制理论与方法研究进展 [J]. 中国科学基金, 2024, 38(6): 1 043–1 051.
- [31] 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1 376–1 392.
- [32] 张强, 杨康, 曹津铭, 等. 视频 AI 算法分析的煤矿固体智能充填开采方法 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 163–173.
- [33] 王清峰, 刘洋, 陈航, 等. 煤矿井下钻进工况参数智能控制技术发展与展望 [J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 20–29.
- [34] 周杰. 液压机械臂在煤炭工业领域应用进展及关键技术 [J/OL]. 煤炭科学技术.[2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402>.
- [35] 康红普, 雷亚军, 赵福堂, 等. 特厚煤层 10 m 超大采高综采关键技术及装备 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 1 849–1 875.
- [36] 王皓, 董书宁, 姬亚东, 等. 煤矿水害智能化防控平台架构及关键技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 883–892.
- [37] 王皓, 董书宁, 乔伟, 等. 矿井水害防控远程服务云平台构建与应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 208–216.
- [38] 袁亮, 高坤, 赵玉刚, 等. 煤矿瓦斯安全高效抽采智能化监测监控系统 [EB/OL].[2025-09-07]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rr6VKxMbACpSr-kwoyzVWVxOgzFHNjXB7KVqnbhE_gV1KViUGW52Au8FBPDVut7Ep1kP9kEt-W2P0J7rcoIzn1ZRWRIn5lv9HpKYQ6N_Z2aSWv5Dxp_fiS9_R_yS3fw1B1NOilCC8A4buFBqp2ANRV7I4jtPheRX3QkEG-BcHcl=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [39] 程德强, 王崇景, 朱凯, 等. 煤矿安全隐患 AI 视频智能辅助监管监察技术研发与应用 [J]. 智能矿山, 2025, 6(2): 59–63.
- [40] 刘玉冰, 李怡腾, 李忠辉, 等. 煤矿灾害“云边端”一体化智能精准管控技术体系研究 [J]. 工矿自动化, 2025,

- 51(3): 105-112.
- [41] 齐庆新,李海涛,杨冠宇. 煤矿数字化与智能开采面临的挑战及对策——兼论新建冲击地压矿井建设对策[J]. 智能矿山, 2023, 4(4): 8-13.
- [42] 王双明,耿济世,李鹏飞,等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33-43.
- [43] 王双明,孙强,耿济世,等. 西部矿区采动损害及减损开采的地质保障技术框架体系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 1-13.
- [44] 王国法,李世军,张勇,等. 煤矿大型智能装备高效节能技术进展[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 1-8.
- [45] 李明文,李新翔. 基于智能控制技术的煤矿智能通风现状与展望[J]. 能源与节能, 2025(1): 208-211.
- [46] 郭英杰. 露天矿山智能化评价体系研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(8): 247-251.
- [47] 金向阳,李杨,于雷,等. 煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 131-142.
- [48] 樊红卫,闫昕山,曹现刚,等. 一种 DSP-YOLO 煤矿带式输送机人员不安全状态智能检测算法[J/OL]. 煤炭科学技术. [2025-09-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250605.1557.008>.
- [49] 赵文,王超,何利辉,等. 基于数字孪生的煤矿安全智能监控平台设计[J]. 矿山机械, 2025, 53(5): 54-59.
- [50] 陈万辉,郭瑞,韩伟,等. 煤矿巷道支护方案智能设计研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(8): 76-83.
- [51] 包建军. 煤矿巷道多源数据融合定位算法研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(8): 38-42.
- [52] 王森. 人工智能技术在煤矿安全监测中的应用[J]. 信息记录材料, 2025, 26(5): 136-138.
- [53] 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.
- [54] 曹现刚,段雍,王国法,等. 煤矿设备全寿命周期健康管理及智能维护研究综述[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 694-714.
- [55] 张林,王国法,刘治国,等. 煤矿智能化建设市场现状及发展趋势研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 29-44.
- [56] 郭佐宁,牛虎明,习晓,等. 智能化井工煤矿运行与维护管理标准框架[J]. 智能矿山, 2024, 5(3): 32-38.

(责任编辑:丁 寒)