智能矿山与矿冶产品智能制造技术及应用进展*

张翼翔[1,2],刘耀[1,3],赵子巍[1,3],董培林[1,3,4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心, 湖南 长沙 410012;
4.五矿集团国创中心科技(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对现有平台侧重设备接入、数据汇聚和业务系统集成的问题,构建了"对象感知—网络数据—模型决策—控制执行—业务管理"五层架构;与典型"现场层—边缘层—IaaS—PaaS—SaaS"五层技术栈及十大业务系统式组织架构相比,该架构进一步明确了3类运行时间尺度、7个闭环环节及生产与质量两类反馈通道。分析表明,智能矿山正由单机自动化向跨工序、多装备协同演进,但总体仍以局部闭环为主,产品质量信息对上游生产的反馈不足;数据语义不统一、模型泛化能力不足、任务接口不规范及跨装备安全联锁不完善仍是制约规模化应用的主要问题。为此,提出以统一对象模型和数字线程为基础,推进机理—数据融合、云—边—端协同及任务驱动的安全自主闭环,促进规划、生产、控制与产品质量的全产业链协同。

关键词:智能矿山;工业互联网;协同管控;全流程协同

中图分类号:TD67 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0225-10

Progress in Intelligent Manufacturing Technology and Application of Intelligent Mining and Metallurgical Products

Zhang Yixiang[1,2], *Liu Yao*[1,3], *Zhao Ziwei*[1,3], *Dong Peilin*[1,3,4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Minmetals National Innovation Center Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To address the issue that existing platforms focus on equipment access, data aggregation, and business system integration, a five-layer architecture of "object perception-network data-model decision-making-control execution-business management" was constructed. Compared with the typical five-layer technology stack of "field layer-edge layer-IaaS-PaaS-SaaS" and the organizational architecture of ten major business systems, this framework further clarified three types of operating time scales, seven closed-loop links, and two types of feedback channels for production and quality. Analysis shows that intelligent mines are evolving from single-machine automation to cross-process and multi-equipment collaboration, but overall they are still dominated by local closed loops, and the feedback of product quality information to upstream production is insufficient; inconsistent data semantics, insufficient model generalization ability, non-standardized task interfaces, and imperfect cross-equipment safety interlocking remain the main problems restricting large-scale application. To this end, based on a unified object model and digital thread, it was proposed to advance mechanism-data fusion, cloud-edge-terminal collaboration, and a task-driven safe autonomous closed loop, in order to promote the whole industry chain collaboration of planning, production, control, and product quality.

Key words: Intelligent mine, Industrial internet, Collaborative control, Full-process collaboration

---

* **收稿日期**:2026-03-04
基金项目:国家科技重大专项项目(2025ZD1010704)
作者简介:张翼翔(1982—),男,湖南湘潭人,高级工程师,主要从事智能采矿和数字矿山技术科研设计及管理工作。E-mail:58926227@qq.com
通信作者:刘耀(2000—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事智能矿山技术科研设计工作。E-mail:1483452812@qq.com

0 引言

非煤矿山生产对象动态、工序耦合紧密且安全风险复杂,但地质、测量、采矿、运输、选矿及产品制造系统多按专业独立建设,数据与业务难以贯通。现有研究已将全流程协同、少人化、无人化作业和综合管控作为重要方向[1-2],数字矿山也由可视化建模向智能化、协同化发展[3-4],但相关成果仍分散于规划、生产、平台和产品制造等环节。

在智能规划与安全感知方面,地测采协同平台实现了专业数据集中管理[5],边坡监测、微震分类和尾矿库点云计算提升了风险识别与空间量测能力[6-8],但资源模型更新、风险判识与计划调整仍以人工衔接为主。

在设备监测与局部控制方面,电气控制柜在线监测、输送带视觉预紧、自然风压调节及斜坡道交通管控推动设备管理由人工巡检向在线感知和自动调节转变[9-12],但多源状态信息关联和异常工况协同控制仍显不足。

在生产优化与过程控制方面,智能卡车调度、露天矿协同配矿和地下矿全流程配矿提高了采装运组织与品位控制的能力[13-15],现场总线和电力设备控制强化了过程自动控制[16-17],但计划、调度与控制之间尚缺统一任务对象及偏差回写机制。

在地下运输少人化、无人化方面,运矿机器人、无人驾驶电机车及无人有轨运输系统推动运输作业由单机自动化向多装备协同演进[18-20],但定位与通信可靠性、跨装备联锁和异常恢复能力仍制约其连续运行。

在平台协同管控方面,矿山物联网、综合管控、智能监察和应急指挥平台实现了生产、安全、设备及应急资源的集中管理[21-24],但对象语义、业务规则和控制权限尚未统一,部分平台仍停留于展示预警和人工协调。

在矿冶产品质量检测方面,改进 YOLOv5 模型实现镍板表面缺陷快速识别,三维视觉可获取阴极铜结粒位置与轮廓[25-26];复秤监测、复式称量和称量喷码加强了重量、批次与标识关联[27-29]。相关技术已形成初步质量数据链,但易受表面状态、点云标定和规格变化影响,检测结果也未充分关联上游生产数据。

在智能加工方面,结粒去除和镍板剪切装备实现了缺陷定位、自动上料与加工的局部衔接[30-34],但坐标基准、任务接口和换型参数尚未统一,加工后复检及质量回写仍不完善。

在柔性作业方面,自动化夹具、自适应吸盘和防污染压脚提高了不规则板材抓取与加工适应性[35-38],但吸附失效、工具状态和异常恢复仍缺少在线诊断。

在包装物流方面,可调链式输送机、打捆机器人加垫木及自动供垫木装置促进了输送、包装和入库衔接[39-41],但跨设备节拍、产品标识和质量信息尚未贯通。

总体来看,现有研究已在规划协同、风险监测、生产调度、无人运输、平台管控和产品智能制造等方面形成局部闭环,但数据语义不一致、模型复用不足、跨装备安全联锁困难及质量反馈不畅仍制约全流程协同。Mining 4.0 研究亦表明,实时数据、数字化决策与组织能力需要同步发展[42]。为此,本文界定智能矿山全产业链研究边界,构建统一技术架构,梳理规划与生产、协同管控和矿冶产品智能制造的关键技术与工程应用,并分析数据贯通、模型复用及安全闭环等共性问题。

1 智能矿山全产业链智能化内涵与技术架构

1.1 内涵、边界及技术演进

本文所称的全产业链包括三类对象:一是资源模型、地测采协同、计划编制和资源配置等规划与生产前端环节;二是采掘配矿、运输调度、通风供电、选矿控制及灾害监测等矿山核心生产环节;三是与产品质量和销售直接相关的缺陷检测、剪切去除、称量喷码、包装与物流等后处理环节。其边界不扩展至全部冶炼流程,而聚焦于矿山数据能够驱动质量判定和自动作业的矿冶衔接区段。相关技术呈现由信息集中向业务协同、由状态监测向决策执行、由矿内优化向质量追溯延伸的趋势[3-5]。全产业链智能化应以统一对象标识、时空基准和版本关系构建数字线程,使产品缺陷、重量及批次信息能够追溯至矿石来源、生产时段和工艺路径,并据此反向修正配矿、选矿或制造参数。

1.2 全产业链智能化总体架构

智能矿山全产业链智能化并非自动化系统与智能装备的简单叠加,而是围绕生产任务形成规划、决策、执行与反馈相贯通的运行体系,见图 1 和表 1。总体架构由对象与感知、网络与数据、模型与决策、控制与执行、业务与管理五层组成。其中,业务管理

层面向日计划、周计划和资源配置,模型决策层形成分钟至小时级优化任务,控制执行层负责毫秒至秒级联锁。数字孪生强调物理实体、虚拟模型、运行数据与服务应用的持续交互[43],因此静态三维展示仅提供空间表达,只有模型随现场状态更新、支持预测决策并接收执行反馈,才能形成面向生产的动态映射。上层优化任务必须经现场权限校核和安全联锁校验通过后执行。

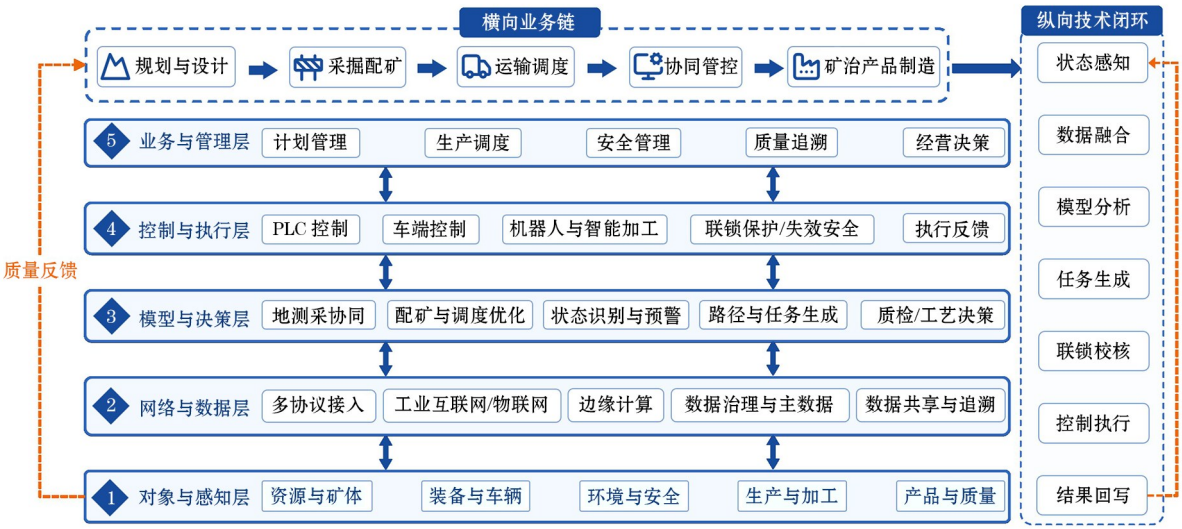


图 1 智能矿山全产业链智能化总体架构

Fig.1 Overallarchitecture of the entire intelligent mining industry chain

表 1 智能矿山全产业链关键层级、技术与闭环作用

Table 1 Key levels, technologies, and closed-loop functions of the entire intelligent mining industry chain

层级	主要对象或功能	关键技术	闭环作用
对象与感知	矿体、边坡、设备、车辆、产品、环境。	传感器、机器视觉、点云、定位。	形成可信状态量
网络与数据	现场数据接入、治理与共享。	总线、物联网、工业互联网、主数据。	统一数据语义
模型与决策	识别、预测、配矿、调度、路径。	机理模型、机器学习、人工智能服务。	生成预警与任务
控制与执行	可编程逻辑控制器(PLC)、车辆、机器人、加工包装装备。	边缘控制、联锁、故障安全。	执行并反馈结果
业务与管理	计划、调度、安全、质量、追溯。	综合管控、应急指挥、制造执行系统(MES)。	修正计划与规则

该架构横向贯通地测规划、采掘配矿、运输调度、协同管控和产品制造,纵向遵循“状态感知—数据融合—模型分析—任务生成—联锁校核—控制执行—结果回写”的运行流程。设备状态和任务进度构成生产反馈,产品检测及批次信息构成质量反馈,前者已形成部分局部闭环,后者则仍是跨环节协同的主要断点。与现有智能矿山架构相比,本文五层架构具有不同的组织逻辑。典型工业互联网平台多采用“现场层—边缘层—IaaS—PaaS—SaaS”五层架构,侧重设备接入、云边协同和应用服务。本文提出的架构则以生产任务闭环为主线,构建“对象与感知—网络与数据—模型与决策—控制与执行—业务与管理”五层架构,并明确 3 类运行时间尺度和 7 个闭环环节。此外,现有智能矿山建设多按十大业务系统组织,本文通过 5 个技术层贯通各业务系统,并设置生产反馈和质量反馈两类反馈通道,突出生产任务与产品质量的协同闭环。

2 矿山生产环节智能化关键技术

矿山生产环节智能化是智能矿山全产业链智能化的重要组成部分,主要覆盖规划设计、环境感知、采掘作业、运输调度、过程控制和设备运维等环节。其核心是感知矿体、环境、设备及物料状态,经模型分析形成计划、预警和控制任务,再由现场装备执行并反馈。当前研究已形成若干局部闭环,但跨工序数据关联、任务协同和安全控制仍需加强。

2.1 智能规划与地测采协同

智能规划利用三维地质模型、矿体块模型、采掘工程模型和测量验收数据支撑资源评价、开采设计及生产计划。张柏等[4]提出非煤地下矿山智能化建设应统筹生产流程、信息基础设施和智能装备。马天义等[5]构建地测采信息协同平台,实现地质、测量

与采矿数据集中管理,为设计和计划协同提供基础。韩晓刚等[44]采用多源数据融合开展矿山精细化建模与虚拟现实平台搭建,为矿山空间信息集成与数字化表达提供了支撑。

现有技术以统一空间坐标、对象编码和数据版本关联矿体边界、岩性品位、采掘工程、储量变化及验收结果,并利用工程量、出矿量和化验结果校核资源模型。研究正由静态展示转向动态更新,但设计变更、计划调整和执行回写仍存在人工环节。

2.2 多源感知与安全预警

多源感知主要采集地压、微震、位移、应力、设备状态、人员车辆位置及作业环境等信息。兰晓平等[6]将现场监测用于边坡变形分析与预警;寇永渊等[7]研究金川二矿区微震事件分类,为区分岩体破裂与生产扰动提供依据;长沙矿山研究院有限责任公司等[8]提出基于点云数据的尾矿库干滩长度计算方法,提高了复杂地形下的自动量测能力。段雨静[45]构建了地下矿山巷道裂缝智能检测网络,现场测试中检测效率达到人工巡检的 8 倍,漏检率由 18%降至 3.2%,表明机器视觉在矿山安全感知中具有较好的工程应用能力。在多源协同感知方面,已有研究构建了“天—空—地—人”协同监测体系[46],实现卫星遥感、无人机、地面监测与现场调查等多源信息融合。本文在此基础上进一步强调感知结果向模型决策、任务生成、联锁执行和结果回写延伸,突出由多源监测向生产闭环协同转变。在露天矿边坡等典型场景中,该模式有望缩短风险识别至处置的业务流程,提高预警与应急处置的协同性。

现有监测体系由传感器、通信网络、边缘节点和预警平台构成,边缘侧完成数据清洗与特征提取,平台结合地质条件、设备负荷和作业活动进行风险判别。研究已由单参数阈值报警转向多源信息融合及趋势预测,但粉尘、振动、遮挡和通信波动易引起数据缺失与漂移,不同矿区条件也会削弱模型泛化能力,仍需完善数据可信度评价、模型适用域判断及进行人工复核。重大风险预警还应明确阈值来源、适用范围、处置责任和解除条件。

2.3 采掘作业、配矿与生产调度

采掘作业智能化涵盖钻孔、爆破、铲装、出矿和采场组织。三维设计模型可向凿岩台车、铲运机等装备下发作业区域、孔位参数和生产任务,并结合设备定位、钻进参数、视觉及载荷信息判断作业状态,研究重点正由单机远程控制转向多装备任务协同。韩锋伟等[47]将 5G 远程智能控制应用于天井钻机施工,导孔、扩孔平均进尺分别达到 1.75 m/h 和 1.375 m/h,偏斜率为 0.68%,验证了采掘装备远程智能控制的工程适用性。

在生产组织方面,董培林等[13]开发基于移动应用程序(App)的智能卡车调度系统,提高了车辆状态和任务传递效率;马天义等[14-15]将采装运任务、品位目标和设备能力纳入露天矿协同配矿,并进一步贯通地下矿出矿、运输、堆存和入选环节,拓展了配矿全流程管控范围。

生产调度正由人工经验转向统筹产量、品位、运距、设备能力和时间窗口的多目标优化,并采用滚动优化和事件触发重调度。但模型结果仍常需人工转换,统一任务接口以及实际品位和任务状态的及时反馈仍不完善。调度偏差应触发约束重构和计划滚动修正,避免优化方案与现场状态脱节。

2.4 运输提升与无人协同作业

运输系统智能化涵盖车辆定位、交通组织、任务调度、路径规划、自动驾驶及装卸提升。赵鹏等[12]应用井下斜坡道交通信号智能管控系统,改善车辆会车、避让与通行秩序;唐音元等[18]将运矿机器人用于罐笼提升运输,实现运输装备与提升环节衔接;张毅力等[19]提出了地下矿无人驾驶电机车定位、控制及安全防护方案;徐中华等[20]在中钢富全矿业开展无人有轨运输协同管控,推动单车自动运行向车辆、装卸设备和调度平台协同控制发展。

主流体系由高精度定位、数字地图、任务调度、车载控制和安全联锁组成。平台负责任务与路径优化,车载控制端完成速度控制、障碍识别及紧急停车,装卸和提升由现场联锁保障安全。人员车辆混行、定位波动或通信中断时,仍需定位冗余、异常恢复及人工接管机制,并记录任务中断、接管和恢复过程。

2.5 选矿、通风与供配电过程控制

矿山过程控制覆盖选矿、通风、排水、供电和物料输送等连续系统。张翼翔等[16]基于 PROFIBUS 现场总线构建选矿自动化控制系统,实现参数集中采集与设备联动;杨倩等[11]将自然风压监测用于主通风机变频控制;中国恩菲工程技术有限公司等[17]提出的矿山电力设备监测与指令控制方法增强了供配电协同控制能力。

现有系统多采用可编程逻辑控制器(PLC)、分散控制系统(DCS)或数据采集与监视控制系统

(SCADA)完成现场控制,并通过工业以太网和现场总线汇聚流量、压力、浓度、品位、能耗及设备状态数据。控制方式正由单回路调节向多变量优化发展,软测量、专家规则和模型预测控制逐步用于协调处理量、质量、能耗与设备负荷;但模型输出进入控制链前仍须进行工况判断、权限校核和安全联锁。现场控制器保留基础调节和故障安全功能,确保上层系统故障时维持安全状态。

2.6 设备状态监测与预测性维护

设备智能运行维护通过振动、温度、压力、电流、油液、声学信号和图像等数据评估设备健康状态。长沙矿山研究院有限责任公司提出电气控制柜监测方法[9],实现关键电气参数和异常状态在线识别,其中输送带视觉预紧装置[10]利用图像判断运行状态并辅助调节预紧机构,推动设备管理由人工检查向在线识别和自动调节转变。

设备智能维护体系包括状态感知、异常检测、故障诊断、寿命预测、维护决策和工单闭环。研究由阈值及频谱分析转向机器学习、知识图谱和机理-数据融合,并尝试关联设备台账、维护记录及备件信息。但故障样本不足、设备型号差异和模型解释性不强等问题仍较突出,诊断结果与检修工单、备件及生产调度尚未充分贯通。维修完成后还应以复测数据验证诊断结果并更新模型。

2.7 技术演进与现存问题

综合现有研究,矿山生产智能化呈现出四方面演进趋势:规划设计由静态模型向动态更新转变;安全监测由单参数报警向多源信息融合与趋势预测转变;生产作业由单机自动化向跨工序、多装备协同转变;设备管理由事后维修向预测性维护转变。云端训练、边缘分析和端侧安全控制相结合,正成为兼顾模型能力、实时性与安全性的主要路径。

现有研究仍存在数据语义不统一、模型跨场景适应性不足、任务接口不规范以及跨设备联锁和结果回写不完善等问题。后续应围绕统一对象模型、机理-数据融合、任务驱动协同控制和维护闭环开展研究,推动矿山生产智能化由局部示范转向全流程稳定运行。

3 工业互联网、人工智能数智中台与协同管控

3.1 物联网与综合协同管控平台

物联网与综合管控平台通过多协议接入汇聚生产、安全、设备和经营数据,并利用三维场景、统一门户、调度管理和移动应用组织业务[21-22]。在此基础上,智能监察和可视化应急系统进一步关联风险信息、人员定位、视频、广播及应急资源[23-24]。现有工程已显著缩短信息获取时间并优化跨部门协同流程,但数据接入同一界面并不意味着对象编码、业务规则和控制权限已经统一。若监测结果不能进一步生成任务、完成校核并回写执行结果,平台仍主要停留在集中展示和人工协调阶段。平台由“展示中心”向“运行中心”演进,需要围绕矿体、设备、人员、物料和产品建立主数据,将报警、工单、任务和审批定义为可追踪事件,并明确触发条件、责任主体和回写对象。因此,监测异常可关联检修工单,品位偏差可触发配矿调整,调度任务可实时接收执行状态。平台评价则应由已部署模块数量转向数据完整率、事件闭环率、跨系统调用成功率和平均异常处置时间。

3.2 工业互联网平台与人工智能数智中台

工业互联网平台负责设备接入、协议适配和数据交换,数据中台统一对象编码、主数据及指标口径,人工智能(AI)数智中台提供模型训练、部署与算法服务复用,综合管控平台据此生成计划、预警和调度任务,PLC及车载控制器承担实时控制与安全联锁[21-24,48-49]。相关工程表明,矿山平台正由数据汇聚向模型服务和业务协同延伸,但对象语义、模型迁移、任务接口及结果回写仍制约跨系统闭环。AI数智中台还应覆盖样本治理、训练验证、分阶段发布(灰度发布)、性能监测、版本回滚和退役归档;模型复用前须校核传感器、采样频率、设备型号和工况范围。数据分布或模型性能持续偏离基线时,应启动再训练或切换至规则模型。

3.3 安全监察、应急指挥与数据安全

随着平台由信息汇聚向任务协同延伸,矿山风险范围由设备和环境异常扩展至数据失真、模型误判和越权控制。安全治理应覆盖身份认证、权限校核、工况判断、联锁确认、指令审计和模型版本管理[48]。关键指令仅在状态可信、权限匹配且安全条件满足时进入控制链;通信或平台故障时,现场系统应维持关键安全功能并按预设策略降级。网络按业务重要性和实时性分区,跨区访问实行白名单与最小权限;补丁、模型和配置更新须经过测试、审批及具备回退机制的发布流程,不得影响紧急停止及安全联锁通信。

面向生产任务的跨工序协同管控关系如图2所示。

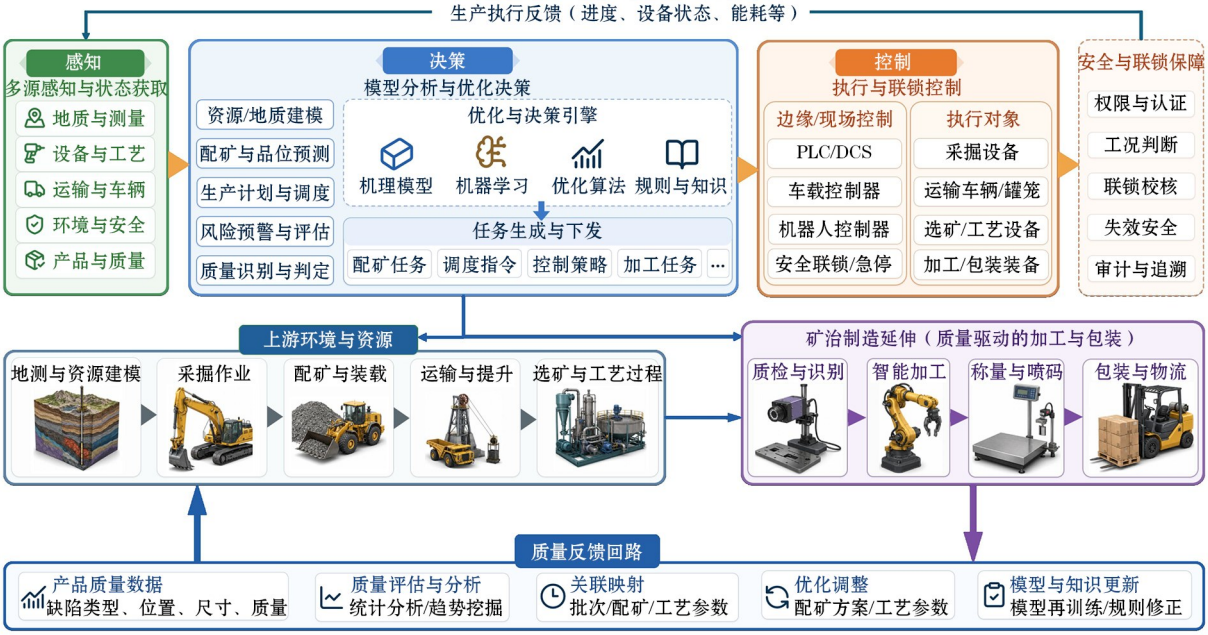


图 2 面向生产任务的跨工序协同关系

Fig.2 Cross-process collaborative relationships oriented toward production tasks

4 典型矿冶产品智能制造与工程应用

矿冶产品智能制造连接矿山生产、选矿、冶炼和成品质量管理。相关成果主要在金川集团镍、铜产品生产场景中开展了应用，覆盖缺陷检测、质量计量、智能加工、自动包装和物流追溯等环节。针对镍板、阴极铜等产品表面反光强、板形不规则且单件质量大的特点，已形成机器视觉、三维检测、机器人加工、精密称量和自动包装等典型应用，工程评价重点包括识别精度、作业节拍、装备可靠性和质量追溯完整性。

4.1 矿冶产品质量智能检测

在镍产品质量检测领域，谭沁源等[25]针对镍板裂纹、斑点等缺陷构建改进 YOLOv5 模型，平均精度均值达 81.4%，检测速度达 61 帧/s，可为产品分级、剪切和包装提供判定依据。但连续生产中仍受表面反光、光照和产品姿态影响，需要采用封闭光源、相机标定及样本持续更新等措施提高稳定性。

在铜电解生产中，阴极铜结粒形状不规则且位置随机，二维图像难以准确表征其高度和轮廓。相关研究利用三维机器视觉采集点云，经分割、特征提取和坐标转换获得结粒位置与空间形态[26]，并为机器人去除提供目标坐标，使检测结果直接转化为加工参数。但点云坐标系与机器人坐标系需定期标定，复杂反光、板面变形和遮挡仍会影响定位精度。工程运行中还需监测标定漂移，并对低置信度目标设置人工复核。

在镍产品包装计量中，复秤对比精密计量系统通过 PLC 连接称重仪表，比较两次称量结果并报警，同时将重量上传至 MES[27]；复式称量监测和称量喷码装置进一步关联重量、批次与标识[28-29]，提高计量效率并减少二次录入。后续仍需统一设备检定记录、喷码信息和质量结果，避免标识与实际批次不一致。

4.2 检测驱动的智能加工与柔性作业

阴极铜结粒处理已形成由三维检测向智能去除延伸的技术路径。金属板结粒智能去除系统依据检测坐标生成加工任务并完成定位去除[30]，双面结粒去除装置可适应阴极铜双面处理[31]，形成“点云采集—缺陷识别—坐标转换—路径生成—自动去除”局部闭环。工程推广仍需验证不同规格产品的处理节拍、去除完整率、板面损伤率和连续运行可靠性，并设置加工失败后的工件隔离与人工处置流程。

在镍板精整加工中，智能剪切机组、专用剪板机和自动上料台承担输送、定位、上料及剪切[32-34]；自动化夹具、自适应吸盘增强了对翘曲、姿态偏差和表面不平的适应性[35-37]，防污染压脚可降低污染物对压紧与剪切的影响[38]。装备组合后可形成连续作业单元，推动镍板加工由单机自动化向成套协同发

展,其关键在于统一工件坐标系、任务状态和设备节拍。

该类应用可减少人工搬运和重复操作,提高加工一致性并降低人员进入剪切危险区的频次。但检测、抓取与剪切设备仍多采用独立坐标系和接口,换型、抓取失败及加工异常时仍依赖人工干预。应增加加工后自动复检,并将残留缺陷、剪切尺寸、作业时间和异常代码回写至任务系统,形成任务完成率、一次加工合格率及异常停机时间等运行指标。

4.3 智能包装、物流及典型工程比较

在包装物流中,可调链式输送机可适配不同设备接口和产品高度[39],打捆机器人加垫木及自动供垫木装置实现垫木取料、定位和放置自动化[40-41]。与称量喷码系统联合后,可形成"输送—称量—喷码—加垫木—打捆—入库"连续流程,减少人工操作并支撑批次追溯。

典型矿冶产品智能制造工程应用及效果见表2。

表2 典型矿冶产品智能制造工程应用及效果对比

Table 2 Comparison of applications and effects of intelligent manufacturing engineering for typical mining and metallurgical products

典型工程场景	主要技术配置	实际应用效果	主要不足
镍板表面缺陷检测[25]	工业相机、图像增强、改进YOLOv5模型。	实现镍板表面缺陷快速识别,为产品分级和后续加工提供依据。	易受金属反光、光照变化及样本差异影响。
阴极铜结粒检测与去除[26,30-31]	三维机器视觉、点云处理、坐标转换、自动去除装备。	获取结粒位置与空间轮廓,并将检测结果转换为去除任务。	坐标标定、加工后复检及连续运行能力仍需完善。
镍摞精密称量与喷码[27-29]	复式称量、PLC通信、异常报警、喷码及MES数据上传。	提高计量自动化水平,实现重量、批次与产品标识关联。	检定记录、喷码信息和质量结果尚未完全贯通。
镍板自动剪切加工[32-38]	自动上料、柔性夹具、自适应吸盘、智能剪切机组。	减少人工搬运,提高连续加工能力和复杂板形适应性。	换型参数、设备接口及异常恢复机制尚未统一。
成品包装与物流[39-41]	可调式输送机、加垫木机器人、自动打捆装备。	促进输送、称量、包装和入库工位连续衔接。	跨设备节拍协调及产品质量信息回写不足。

总体来看,镍板检测与剪切、阴极铜结粒识别与去除、成品称量喷码及自动包装已形成工程化技术链条,局部实现质量数据对作业装备的驱动。然而,各应用仍以独立单元为主,检测、加工、称量和物流信息尚未通过统一产品对象稳定关联。后续应以产品唯一标识贯通矿石来源、生产批次、缺陷检测、加工、称量包装及入库信息,并在质量偏差满足样本量和置信度要求后反向修正配矿、选矿或加工参数,同时保留参数调整前后的质量对比记录。

5 关键问题、发展瓶颈与未来趋势

5.1 关键问题

(1) 多源异构数据语义尚未统一。矿山规划、地测、采掘、设备、选矿和产品质量数据在对象编码、空间坐标、时间基准、指标口径及版本方面存在差异。现有平台虽可接入数据,但尚未形成覆盖矿体、设备、人员、任务、物料和产品的统一对象模型,设计成果、生产任务、执行状态与质量结果难以构成连续数字线程。

(2) 智能模型的泛化能力与可信度不足。机器视觉、微震识别、故障诊断、配矿优化和生产调度模型易受地质条件、设备型号、传感器配置及工况变化影响,跨矿区、跨设备应用时性能易下降。现有模型对适用范围、不确定性和异常输入缺少明确输出,输出仍需人工复核,尚难直接进入控制链。

(3) 决策、执行与反馈闭环尚不完善。多数系统已具备监测、预警和优化能力,但预警结果、调度方案及加工任务缺少统一接口,难以安全下发至PLC、车辆、机器人和加工装备。跨设备联锁、权限校核、异常恢复、人工接管及结果回写仍不完善,部分应用停留于"感知—分析"或"预警—人工处置"。

5.2 发展瓶颈

(1) 专业系统分散建设制约全流程协同。矿山智能化建设多以单一专业、设备或项目为边界,地测采、生产调度、安全监测、设备管理和产品制造系统分别建设,缺少统一规划与约束。接口开放只能解决数据传输,而不能消除对象含义、业务规则和控制权限差异,因而仍制约跨工序协同。

(2) 示范应用难以规模化复制推广。不同矿山在资源条件、开采方式、装备基础、网络环境和管理流程方面的差异显著,现有模型、平台和控制策略通常需要定制开发。模型、接口及业务组件的标准化和模块化程度不足,示范成果难以迁移,易造成重复建设、实施周期长和运行维护成本高。

(3) 安全治理与长期运行机制仍不健全。工业互联网平台和人工智能数智中台参与生产决策后,

风险扩展至数据失真、模型误判、越权控制及网络攻击。数据、模型、接口、指令和控制策略的全生命周期治理尚不健全,版本管理、分阶段发布、性能监测、故障回退和安全审计能力不足,运行维护、人员培训及责任划分也需纳入建设全过程。

5.3 未来发展趋势

(1) 由数据汇聚向统一对象模型和数字线程发展。未来应以矿体、设备、人员、任务、物料和产品为核心对象,统一编码、空间坐标、时间基准及数据版本,建立贯穿规划、生产、质量检测和产品追溯的数字线程,关联设计版本、任务状态、设备参数、物料流向和质量结果,推动数据由集中展示转向业务协同和质量反向修正。

(2) 由单一数据驱动向机理—数据融合和云—边—端协同发展。智能模型将融合地质机理、物料平衡、设备能力、工艺边界和安全规则,提高可解释性、稳定性及迁移能力;部署上形成云端训练与管理、边缘实时推理、端侧安全校核的协同架构,使模型能力与现场实时性和可靠性要求相适应。

(3) 由局部自动化向任务驱动的安全自主闭环发展。未来矿山智能化将以生产任务为核心,贯通状态感知、模型决策、任务生成、权限校核、联锁确认、控制执行、结果回写及异常恢复。平台负责计划优化与任务编排,现场系统负责实时控制和故障安全,并以分级自治及人工接管保障复杂工况下的运行。同时,应贯通矿石品位、选矿指标与产品质量数据,使检测结果反向修正配矿、选矿和制造参数,推动多个局部闭环向全产业链协同闭环演进。

6 结论

本文围绕智能矿山规划与生产、协同管控与矿冶产品智能制造,对地测采协同、多源感知、配矿调度、无人运输、过程控制、设备运行维护、工业互联网平台、人工智能数智中台以及产品智能检测与加工等技术与工程应用进行了系统梳理,得到以下结论。

(1) 智能矿山技术已由单机自动化和单系统信息化逐步向跨工序、跨系统协同演进。本文以生产任务闭环为主线,构建“对象与感知—网络与数据—模型与决策—控制与执行—业务与管理”五层架构,明确 3 类运行时间尺度、7 个闭环环节及生产与质量两类反馈通道,体现了由设备接入和数据汇聚向生产任务与质量协同闭环的发展特征。

(2) 矿山生产智能化呈现较为明确的阶段性演进规律。地测采由静态模型向动态更新发展,安全监测由单参数报警向多源融合与趋势预测发展,采掘运输由单机自动化向多装备协同发展,设备管理由事后维修向状态监测和预测性维护发展,矿冶产品制造则由单一检测或加工向“检测—加工—计量—包装—追溯”连续作业发展。现有工程应用已在地测采协同、安全预警、配矿调度、无人运输以及产品检测与加工等环节形成不同程度的局部闭环。

(3) 当前智能矿山总体仍处于多个局部闭环并存、全流程协同尚未完全形成的阶段。生产侧已能够实现部分“感知—分析—决策—执行—反馈”闭环,矿冶产品侧也已形成缺陷检测、自动加工、精密称量和包装物流等工程化技术链条,但产品质量、批次及加工结果尚未与矿石来源、配矿、选矿及生产过程稳定关联,质量信息对上游生产参数的反向反馈仍是全产业链智能化中的主要薄弱环节。

(4) 当前制约智能矿山规模化应用的主要因素表现为系统协同能力不足。主要问题集中在对象编码和数据语义不统一、智能模型跨场景适应性不足、跨系统任务接口不规范、跨装备安全联锁及异常恢复机制不完善,以及执行结果和质量信息回写不足等方面。研究表明,统一对象模型和连续数字线程,以及模型决策、任务下发、安全校核、控制执行与结果反馈的稳定衔接,是推动局部智能向全流程协同发展的关键。

参考文献(References):

[1] 王李管,陈鑫.数字矿山技术进展[J].中国有色金属学报,2016,26(8):1693-1710.
Wang Liguan, Chen Xin. Advances in digital mine technologies[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016,26(8):1693-1710.

[2] 国家矿山安全监察局综合司.金属非金属矿山智能化建设指南(2025 年版)[EB/OL].[2026-03-01]. https://www.hunan.gov.cn/zqt/zcsd/202601/t20260105_33886401.html.

[3] 覃美满,寇向宇,吴玓文,等.基于 CiteSpace 的国内数字矿山文献知识图谱分析[J].现代矿业,2024,40(3):1-6.
Qin Meiman, Kou Xiangyu, Wu Diwen, et al. Knowledge map analysis of Chinese digital mine literature[J]. Modern Mining,2024,40(3):1-6.

[4] 张柏,覃美满,寇向宇,等.非煤地下矿山智能化整体规划及建设研究[J].世界有色金属,2025(16):32-34.
Zhang Bai, Qin Meiman, Kou Xiangyu, et al. Research on the overall planning and construction of intelligent underground non-coal mines[J]. World Nonferrous Metals, 2025(16):32-34.

[5] 马天义,寇向宇,张翼翔,等.矿山地测采信息协同平台的基础体系研究及应用[J].采矿技术,2023,23(4):222-226.

Ma Tianyi, Kou Xiangyu, Zhang Yixiang, et al. Research and application of a collaborative information platform for mine geology, surveying, and mining [J]. Mining Technology,2023,23(4):222-226.

[6] 兰晓平,欧阳波,覃美满,等.边坡稳定性监测预警技术研究与应用[J].采矿技术,2023,23(3):94-97.
Lan Xiaoping, Ouyang Bo, Qin Meiman, et al. Research and application of slope stability monitoring and early-warning technology[J]. Mining Technology, 2023, 23(3): 94-97.

[7] 寇永渊,蔡双,寇鹏飞,等.金川二矿区微震监测系统检测事件分类方法探讨[J].采矿技术,2023,23(4):227-232.
Kou Yongyuan, Cai Shuang, Kou Pengfei, et al. Discussion on event classification methods for the microseismic monitoring system in Jinchuan No.2 mining area[J]. Mining Technology,2023,23(4):227-232.

[8] 长沙矿山研究院有限责任公司,湖南铭生安全科技有限责任公司.基于点云数据的尾矿库干滩长度计算方法:CN202411734481.9[P].2025-03-04.

[9] 长沙矿山研究院有限责任公司.电气控制柜的监测方法、装置、设备及介质:CN202510286665.1[P].2025-06-06.

[10] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种基于视觉检测的矿山输送带预紧装置及预紧方法:CN202510258594.4[P].2025-04-01.

[11] 杨倩,谭星宇,刘峰,等.基于自然风压实时监测的主通风机变频控制研究[J].采矿技术,2025,25(4).
Yang Qian, Tan Xingyu, Liu Feng, et al. Variable-frequency control of main fans based on real-time monitoring of natural ventilation pressure [J]. Mining Technology, 2025,25(4).

[12] 赵鹏,黄爽,寇向宇,等.新田岭斜坡道交通信号灯智能管控系统应用研究[J].采矿技术,2023,23(5):246-250.
Zhao Peng, Huang Shuang, Kou Xiangyu, et al. Application of an intelligent traffic signal control system in the Xintianling decline ramp[J]. Mining Technology,2023, 23(5):246-250.

[13] 董培林,覃美满,吴玓文,等.基于手机 APP 的智能卡车调度系统开发与应用[J].采矿技术,2024,24(3):269-272.
Dong Peilin, Qin Meiman, Wu Diwen, et al. Development and application of an intelligent truck dispatching system based on a mobile application[J]. Mining Technology,2024, 24(3):269-272.

[14] 马天义,董培林,张翼翔,等.基于智能配矿调度的露天矿协同开采技术研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(6):119-125.
Ma Tianyi, Dong Peilin, Zhang Yixiang, et al. Collaborative mining technology for open-pit mines based on intelligent ore blending and scheduling [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(6):119-125.

[15] 马天义,陶洪明,寇向宇,等.地下矿智能配矿全流程管控技术[J].采矿技术,2025,25(1):263-267.
Ma Tianyi, Tao Hongming, Kou Xiangyu, et al. Full-process control for intelligent ore blending in underground mines[J]. Mining Technology,2025,25(1):263-267.

[16] 张翼翔,邹奕.基于 PROFIBUS 现场总线的选矿自动化控制系统[J].采矿技术,2023,23(4):244-248.
Zhang Yixiang, Zou Yi. Mineral processing automation control system based on PROFIBUS [J]. Mining Technology,2023,23(4):244-248.

[17] 中国恩菲工程技术有限公司,中国有色工程有限公司.矿山中电力设备的控制方法、系统、电子设备和存储介质:CN202510326634.4[P].2025-08-01.

[18] 唐音元,赵子巍,蔡双,等.运矿机器人在罐笼提升运输系统的应用[J].采矿技术,2025,25(2):215-218.
Tang Yinyuan, Zhao Ziwei, Cai Shuang, et al. Application of ore-haulage robots in a cage hoisting and transportation system[J]. Mining Technology,2025,25(2):215-218.

[19] 张毅力,汪令辉,黄寿元.地下矿无人驾驶电机车运输关键技术方案研究[J].金属矿山,2013(5):117-120.
Zhang Yili, Wang Linghui, Huang Shouyuan. Key technical solutions for driverless electric locomotive transportation in underground mines[J]. Metal Mine,2013(5):117-120.

[20] 徐中华,马双双,张鑫,等.地下金属矿无人智能有轨运输协同管控关键技术与应用:以中钢富全矿业为例[J].中国矿业,2025,34(11):60-69.
Xu Zhonghua, Ma Shuangshuang, Zhang Xin, et al. Key technologies and collaborative control for unmanned intelligent rail transportation in underground metal mines:a case study of Sinosteel Fuquan Mining[J]. China Mining Magazine,2025,34(11):60-69.

[21] 李学恩,游博,陈卿,等.矿山物联网生产设备协同管控系统设计[J].工矿自动化,2018,44(6):1-5.
Li Xueen, You Bo, Chen Qing, et al. Design of a cooperative management and control system for production equipment in the mine Internet of Things[J]. Journal of Mine Automation,2018,44(6):1-5.

[22] 刘海洋,赵子巍,黄爽,等.中核锦原铀业智能矿山综合管控技术的探讨与研究[J].采矿技术,2024,24(4):301-304.
Liu Haiyang, Zhao Ziwei, Huang Shuang, et al. Discussion and research on integrated management and control technology for the intelligent mine of CNNC Jinyuan Uranium Industry[J]. Mining Technology,2024,24(4):301-304.

[23] 陶洪明,魏星,张翼翔,等.矿山智能化监察平台研究和分析[J].采矿技术,2023,23(5):189-193.
Tao Hongming, Wei Xing, Zhang Yixiang, et al. Research and analysis of an intelligent mine supervision platform[J]. Mining Technology,2023,23(5):189-193.

[24] 赵子巍,覃美满,寇向宇,等.矿区可视化应急指挥管理系统设计及关键技术研究[J].采矿技术,2024,24(5):255-260.
Zhao Ziwei, Qin Meiman, Kou Xiangyu, et al. Design and key technologies of a visualized emergency command and management system for mining areas [J]. Mining Technology,2024,24(5):255-260.

[25] 谭沁源,唐勇,金岩,等.基于改进 YOLOv5 的镍板表面缺陷检测方法[J].矿冶工程,2024,44(2):160-166.
Tan Qinyuan, Tang Yong, Jin Yan, et al. Surface defect detection for nickel plates based on improved YOLOv5[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(2):160-166.

[26] 谭沁源.基于3D机器视觉的阴极铜结粒检测及智能去除系统研究[D].长沙:长沙矿山研究院,2024.
Tan Qinyuan. Research on a cathode copper particle detection and intelligent removal system based on 3D machine vision[D]. Changsha:Changsha Institute of Mining Research,2024.

[27] 张伯文,吴伟,周向荣.复秤对比镍摞精密计量系统设计[J].现代信息科技,2021,5(19):157-160.
Zhang Bowen, Wu Wei, Zhou Xiangrong. Design of a precision metering system for nickel stacks based on comparative reweighing [J]. Modern Information Technology,2021,5(19):157-160.

[28] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种复式称量监测装置:CN202121969749.9[P].2022-01-07.

[29] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种称量喷码装置:CN202122310588.9[P].2022-03-01.

[30] 长沙矿山研究院有限责任公司.金属板表面结粒智能去除系统及方法:CN202311555588.2[P].2024-02-06.

[31] 长沙矿山研究院有限责任公司.金属板双面结粒去除装置:CN202323131368.5[P].2024-06-21.

[32] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种镍板智能剪切机组:CN202110984296.5[P].2021-12-10.

[33] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种镍板专用剪板机:CN202121307368.4[P].2021-12-21.

[34] 长沙矿山研究院有限责任公司.自动化镍板剪切上料台:CN202222763436.9[P].2023-01-03.

[35] 长沙矿山研究院有限责任公司.自动化夹具:CN202022132489.1[P].2021-05-07.

[36] 长沙矿山研究院有限责任公司.不平工件自适应吸盘:CN202022852959.1[P].2021-09-24.

[37] 长沙矿山研究院有限责任公司.新型自调节吸盘:CN202220834407.4[P].2022-07-29.

[38] 长沙矿山研究院有限责任公司.一种防污染工件剪板机压脚:CN202022724014.1[P].2021-08-10.

[39] 长沙矿山研究院有限责任公司.高度可调节的传动链条输送机:CN202223122101.5[P].2023-03-14.

[40] 长沙矿山研究院有限责任公司.打捆机机器人加垫木装置:CN202122098950.0[P].2022-01-21.

[41] 长沙矿山研究院有限责任公司.打捆机自动添加垫木装置:CN202121951497.7[P].2022-01-04.

[42] Lööw Joel, Abrahamsson Lena, Johansson Jan. Mining 4.0:the impact of new technology from a work place perspective[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2019,36(4):701-707.

[43] Fei Tao, He Zhang, Ang Liu, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2019,15(4):2405-2415.

[44] 韩晓刚,王江梅,朱万成,等.多源数据融合的双阳煤矿精细化建模及虚拟现实平台搭建[J].矿业研究与开发,2024,44(3):178-184.
Han Xiaogang, Wang Jiangmei, Zhu Wancheng, et al. Detailed modeling and virtual reality platform of Shuangyang Coal Mine based on multi-source data fusion[J]. Mining Research and Development,2024,44(3):178-184.

[45] 段雨静.面向地下矿山巷道裂缝智能检测的UMTC-net设计与工程化应用[J].矿业研究与开发,2025,45(10):152-159.
Duan Yujing. Design and engineering application of UMTC-net for intelligent crack detection in underground mine roadways[J]. Mining Research and Development,2025,45(10):152-159.

[46] 陈国良,时洪涛,汪云甲,等.矿山地质环境"天—空—地—人"协同监测与多要素智能感知[J].金属矿山,2023(1):9-16.
Chen Guoliang, Shi Hongtao, Wang Yunjia, et al. Integrated space-air-ground-human monitoring and multi-parameter intelligent sensing of the mine geological environment[J]. Metal Mine,2023(1):9-16.

[47] 韩锋伟,颜武刚,代建龙.天井钻机远程智能控制系统在切割天井施工中的应用[J].矿业研究与开发,2025,45(10):190-198.
Han Fengwei, Yan Wugang, Dai Jianlong. Application of a remote intelligent control system for raise boring machines in slot raising[J]. Mining Research and Development,2025,45(10):190-198.

[48] 寇向宇,豆泽平,鄢德波,等.智能矿山数据管理与信息安全保障措施[J].采矿技术,2025,25(4):231-235.
Kou Xiangyu, Dou Zeping, Yan Debo, et al. Data management and information security measures for intelligent mines[J]. Mining Technology,2025,25(4):231-235.

[49] 申斌学.基于矿山工业互联网的选煤厂智能管控体系设计与关键技术[J].煤炭科学技术,2024,52(9):210-219.
Shen Binxue. Design and key technologies of an intelligent management and control system for coal preparation plants based on the Mine Industrial Internet[J]. Coal Science and Technology,2024,52(9):210-219.