智能矿山大模型技术演进及安全治理分层协同架构*

寇向宇[1,2],郭晖晖[3],高操[1,2],陈谌[1,4],黄爽[1,4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.五矿集团国创中心科技(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410012;
4.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:数字化、自动化和专业模型的长期积累,使矿山具备了引入大模型的工程基础,但数据分散、知识孤立以及预警与处置脱节,仍限制着安全系统对复杂风险的整体认知。结合智能矿山技术演进和工程实践,梳理了平台接口、专用工具、多源安全证据和领域知识等前序基础,分析了采空区、尾矿库和提升系统等高风险场景的差异化需求。研究认为,矿山安全大模型不宜替代控制系统和现场责任链,而应作为"认知与提议层"参与跨模态理解、风险研判、机理解释和方案生成;其输出须经过数据证据、专业规则、机理模型、保护联锁和人工复核等环节校核,并保留拒绝执行和安全回退路径。由此形成的分层协同架构,将数据治理与知识底座、认知提议、约束校核、现场处置和结果反馈纳入同一责任链。矿山安全大模型的工程价值应具备可解释性、可追溯性、可校核性和可回退能力。

关键词:智能矿山;矿山安全;大模型;分层协同

中图分类号:TD67;TP18 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0235-09

Technological Evolution of Intelligent Mine Large Models and Layered Collaborative Architecture for Safety Governance

Kou Xiangyu[1,2], *Guo Huihui*[3], *Gao Cao*[1,2], *Chen Chen*[1,4], *Huang Shuang*[1,4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Minmetals National Innovation Center Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The engineering basis for introducing large models in mines is established through the long-term accumulation of digitalization, automation, and specialized models. However, the integrated understanding of complex risks by safety systems is still hindered by fragmented data, isolated knowledge, and the disconnection between early warning and response. Based on the technological evolution of intelligent mines and engineering practices, the prior foundations, including platform interfaces, specialized tools, multi-source safety evidence, and domain knowledge, were examined, and the differentiated requirements of high-risk scenarios such as goaf, tailings pond, and hoisting system were analyzed. The study suggests that mine safety large models should not replace control systems and on-site responsibility chains, but rather serve as a "cognition-and-proposal layer" to participate in multimodal understanding, risk assessment, mechanism interpretation, and solution generation. Its outputs should be checked by data evidence, professional rules, mechanistic models, protection interlocks, and human review, and routes for rejection and safe fallback shall be retained. Data governance and knowledge base, cognition and proposal, constraint checking, on-site response, and outcome feedback are incorporated into the same accountability chain by the resulting layered collaborative architecture. The engineering value of mine safety large models should possess interpretability, traceability, verifiability, and fallback capability.

Key words: Intelligent mine, Mine safety, Large model, Layered collaboration

---

* **收稿日期**:2026-03-04
基金项目:国家科技重大专项项目(2025ZD1010906)
作者简介:寇向宇(1985—),河南南阳人,博士,正高级工程师,主要从事智能采矿工艺、岩石力学、矿山数字信息技术等方面的研究工作。E-mail:kouxiangyu2008@163.com
通信作者:郭晖晖(1991—),湖南长沙人,博士,主要从事智能矿山、矿山智能机器人方面的研究工作。E-mail:137755952@qq.com

0 引言

大语言模型与多模态基础模型正推动人工智能从单一信息处理工具升级为兼具跨模态理解、知识组织和工具调用的综合技术形态。对矿业而言,关键不只是新增一种算法,而在于能否将现有的人工智能技术与既有矿山生产组织和安全管理体系有效衔接。围绕金属矿山智能化建设,深部开采、智能采矿等研究已在感知、装备、调度和安全保障等方面有了一定的技术积累[1-2];数字孪生、矿业数字化和4DGIS等研究,进一步建立了物理对象、数字模型与业务干预之间的联系[3-6];非煤地下矿山整体规划和数字矿山演化分析则表明,统一的数据基础、标准体系和综合管控平台已成为智能矿山建设的重要支撑[7-8]。

在风险智能认知方面,现有研究主要沿两条路径展开:其一,利用微震、多任务学习和多模态融合等方法,开发面向特定灾种或工况的识别、预测与预警模型[26-30];其二,围绕尾矿库等重大危险源,构建基于数字孪生、动态评价和物联网的监测体系,以增强在线感知和风险预警能力[33-35]。煤矿多灾害预警、通风知识图谱和事故知识分析等研究,则可为跨源信息理解、知识抽取和风险解释提供了方法参照[23-25]。考虑到煤矿与非煤地下金属矿山在灾害机理、监测指标、规程阈值和处置流程等方面具有不同特点,为煤矿开发的各种矿井风险智能监测与预警技术,在金属矿山场景下的场景适配性仍需结合金属矿山实际工况进一步验证。

从工程应用看,现有研究对生成式模型如何进入安全业务流程的讨论仍较有限。矿山数据不仅来源分散,还常存在时间基准、空间坐标、设备编码和事件粒度不统一等问题;异常记录和人工修订过程也往往缺乏可追溯关联。与此同时,模型输出难以自动对应设计参数、灾害机理、规程阈值和专用预测工具,风险提示向现场处置转化时,授权、复核、留痕与安全回退等环节亦容易出现断点。

因此,本文重点研究大模型在矿山安全业务中的参与边界及其工程接口,以智能矿山技术演进和工程实践为线索,分析平台、数据、专用工具和安全证据对矿山安全大模型的支撑作用,并将大模型置于业务链条前端的“认知与提议层”,由模型承担信息汇聚、风险解释和方案生成,由规则、机理模型、保护联锁、操作规程与人工复核共同完成校核与执行确认。

1 智能矿山的能力积累与安全治理缺口

矿山安全大模型的应用基础,来自数字矿山、自动化矿山和智能矿山建设过程中形成的数据资源、专用模型与业务系统,而非独立于既有体系之外的新的技术路径。随着矿山对象数字化、生产系统自动化和业务平台协同化的不断推进,矿山已具备一定的数据采集、状态感知、模型分析和业务联动条件。但在复杂安全场景中,跨系统信息组织、专业知识调用以及研判与处置之间的衔接仍有待完善。

1.1 数字化表达与平台协同

数字矿山首先把矿体、巷道、设备和生产活动转化为可描述、可查询的对象;随后通过平台化建设构建数据、系统和业务接口之间的连接;再通过自动化系统与专业模型将感知结果转化为控制、预测和优化动作。非煤地下矿山的整体规划与国内数字矿山研究演化表明,数据仓库、标准体系、业务平台和综合管控已经成为普遍基础[7-8]。4DGIS云平台、矿业数字孪生和国际矿业数字化研究,则从不同角度拓展了地质、生产、装备及其时空关系的数字化表达与关联分析能力[3-6]。

在此基础上,综合管控、地测采协同、智能监察和数据安全保障等研究逐步形成了较稳定的业务接口[9-12];物联网状态诊断、无人装备、地下矿调度优化和智能配矿等研究,则沉淀了设备状态、实时任务、专用预测模型和优化工具等可调用资源[13-22]。这些建设为后续智能应用提供了数据与工具基础,也使技术关注点由单个系统建设,逐渐转向跨系统协同、数据持续治理及业务过程闭环。

1.2 安全治理仍缺少跨源认知

现有安全系统通常能够持续采集数据,却难以将不同来源的数据放在同一时空语境中解释。监测、生产、设备和管理数据分散在各自系统,灾害机理、规程制度、事故案例与专家经验也没有充分转化为可检索、可推理的知识。风险判断因此容易停留在单一指标或局部模型,预警之后的研判、处置和复盘又可能出现新的信息断点。微震监测模型、水害防控平台以及多灾种、多模态预警研究,已被验证具有持续感知和专用预测的价值[26-30],但是,单一模型无法独立完成跨专业、跨系统的风险治理。

安全场景同时具有高认知需求和强工程约束,已成为大模型应用的重要切口。风险研判需要联结地质、采矿、机电、通风、尾矿和调度等方面的信息,

单一专业很难覆盖完整情境；但任何建议又关系人员、装备和连续生产，不能绕过阈值、机理、联锁与岗位责任。大模型可以扩大信息视野和提出候选判断，却不能据此取得现场控制权。这种张力规定了矿山安全大模型的基本位置，也构成了后续架构设计的出发点。

2　面向大模型的工程基础与实践证据

大模型在矿山场景中的工程应用，不仅取决于模型自身能力，也取决于现场是否具备可计算的对象、可调用的工具、可追溯的证据和可组织的知识。既有研究与工程实践已在上述方面形成相应基础，共同界定了大模型能够理解的信息范围、可调用的专业能力及其接受校核的条件。

2.1　平台化建设：数据与业务的统一入口

长沙矿山研究院有限责任公司近年来围绕非煤地下矿山整体规划、综合管控、地测采信息协同、智能监察和数据安全保障开展研究，逐步构建从总体规划、平台支撑到业务协同和运行保障的技术链[7,9-12]。这些工作与国内数字矿山研究演化[8]、数字孪生及矿业数字化研究[3-6]相互印证：平台化建设的价值不在于把更多画面集中到一块屏幕，而在于建立可计算的矿山对象、可追溯的数据链和可调用的业务接口。业务数据看板只是综合管控平台的一种典型展示形式，如图 1 所示。大模型真正需要的是看板背后经过治理的数据及其业务语义。

面向大模型应用，平台数据还需进一步转化为可训练、可检索和可调用的数据资产。在工程实施中，可在原始数据层、清洗数据层、事件数据层和知识条目层之间保留来源、质量、版本、权限和修订记录，并将异常标注与工单、巡检和处置结果关联。

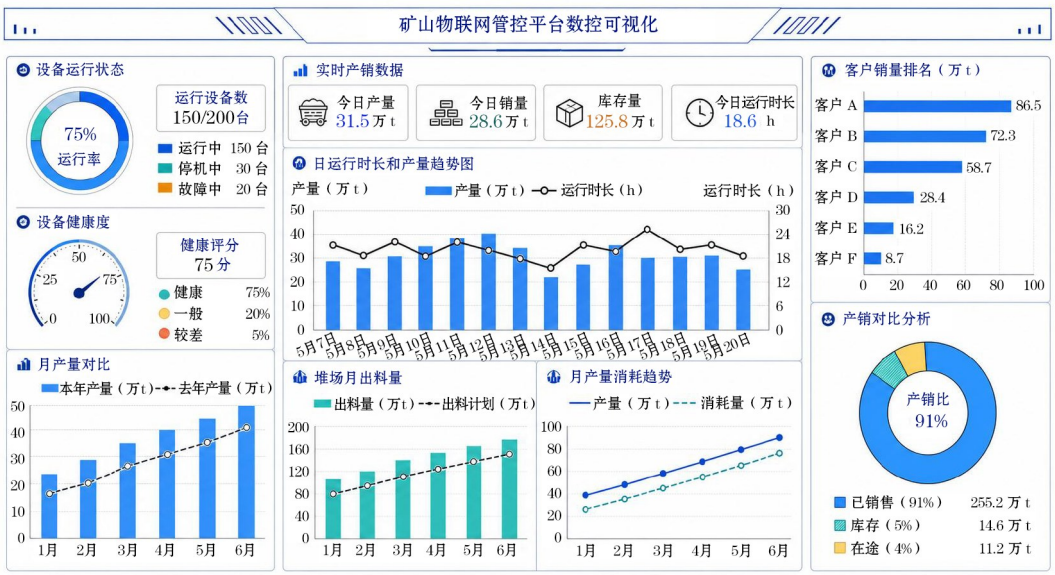
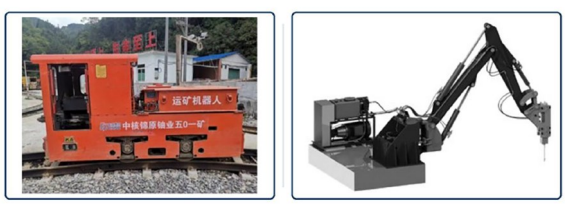


图 1　智能矿山物联网管控平台数据看板

Fig.1　Data dashboard of intelligent mine IoT control platform

2.2　生产与装备智能化：可调用的专业工具

生产组织和装备智能化更能体现大模型与既有系统之间的关系。地下矿智能配矿、运矿机器人等实践生成了连续生产组织和装备运行数据[19-20]；物联网状态感知、地下金属矿无人装备、地下矿调度优化、工业物联网维护和数字孪生自动化等研究，则为装备状态识别、任务调度和运行维护提供了相关技术参照[13-18,21-22]。这些系统一方面持续产生任务、位置、工况、能耗和健康状态等业务数据，另一方面沉淀调度优化、故障诊断、控制逻辑和运行规程等专业工具。图 2 所示的运矿机器人和智能破碎机器人，正是这种“数据持续生成、工具稳定执行”的工程形态。



（a）运矿机器人　（b）智能破碎机器人

图 2　典型的智能化矿山装备

Fig.2　Typical intelligent mining equipments

这类实践也划清了系统分工。大模型可以理解任务、补全上下文、比较备选方案并编排工具调用；

运输冲突消解、设备保护、工艺计算和控制指令,则仍由经过验证的优化器、控制器和联锁系统完成。实际产业应用与技术测试结果表明,把专用模型作为工具接入大模型,比通用生成模型更符合矿山连续生产对稳定性和责任追溯的要求。

2.3 安全监测实践:多源证据与领域知识

安全监测积累的不是单一数据流,而是性质各异的风险证据。可视化应急指挥、微震事件分类、尾矿库数字孪生和动态风险评价等研究,已经汇集视频、波形、位移、环境参数、设备状态和处置记录[31-34];微震监测模型、水害防控平台、多任务预警、多模态水害预警和地下矿山地质灾害融合预测研究,则分别覆盖感知接入、时序建模、机理分析和综合判识[26-30]。基于尾矿库物联网与云计算监测预警系统,可持续在线组织浸润线、水位和坝体变形等关键证据[35]。但是,目前这些证据分散在不同灾种、系统和时间尺度中,尚未形成可供复杂风险研判统一调用的证据链。

平台与业务接口、专用预测和优化工具、多源安全证据,以及由规程、案例、机理和专家经验共同构成的领域知识,构成了已有智能化实践留给大模型的主要资产。多灾害预警、知识图谱、微震模型和多模态融合研究[23-30]已经展示出把数据转化为知识并参与推理的可能性。下一步的难点不是再次证明模型能够生成答案,而是把这些资产组织为稳定的调用关系,并与约束校核、现场执行和安全回退保持清晰接口。

3 矿山安全大模型分层协同架构

前述平台、数据、专用工具和安全证据,为大模型参与矿山安全业务提供了工程基础;但数据质量差异、专业规则约束和现场责任边界,也决定了模型不能脱离既有系统独立运行。矿山安全大模型既应发挥复杂信息组织、风险解释和任务编排的作用,又不宜将具有不确定性的生成结果直接用于阈值判定、保护联锁和现场控制。基于此,本文构建数据治理与知识底座、认知与提议、约束校核、现场处置和结果反馈相衔接的分层协同架构,并在证据不足、结果冲突或高风险操作等情形下设置安全回退路径。

3.1 认知与提议层的功能定位

矿山安全大模型宜置于业务流程的前端,承担的任务包括信息汇聚、情境理解、风险研判、机理解释、任务规划和方案建议,其工作依赖多模态数据治理、领域知识底座、行业模型和场景智能体,但输出并不直接等同于处置指令。专业规则、机理模型、阈值体系、优化算法和操作规程负责检查建议是否合法、可行,现场动作仍由控制系统、保护联锁和授权人员完成。处置记录、结果评估、案例更新和数据回传再进入认知环节,使整个过程可追溯、可复盘。图3给出了这一分层关系。

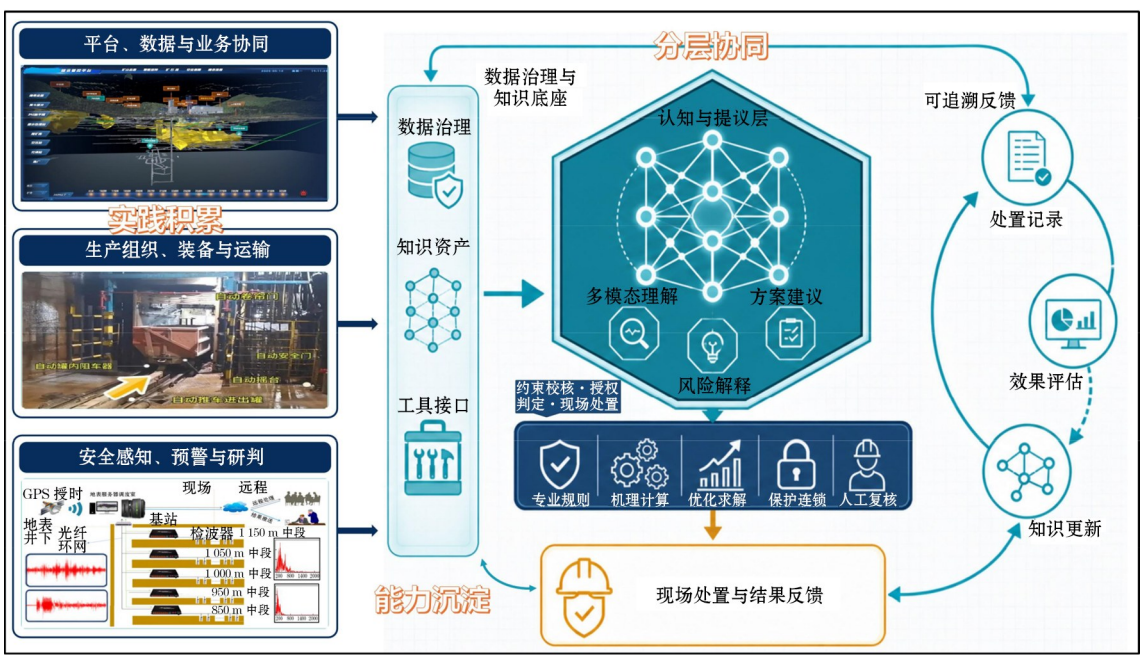


图 3 矿山安全大模型分层协同框架

Fig.3 Layered collaboration framework for mine safety large model

在具体运行中,约束校核可包括四类关口:证据充分性,检查数据来源、时效和缺失情况;专业一致性,检查模型解释与灾害机理、专业计算是否相符;授权安全性,检查建议是否符合岗位权限、保护联锁和审批流程;现场执行确认,核查现场条件、责任主体和处置记录。通过校核的建议方可进入后续业务系统或现场处置环节。

3.2 约束校核与系统边界

面对不完整、异构的现场信息,数据治理宜按"对象—事件—证据"组织:对矿体、巷道、采场、设备和监测点等对象建立统一编码与时空基准,将报警、检修、巡检、调度和处置组织为带时间戳的事件,并为原始数据、清洗结果和人工修订记录标注来源、质量和版本。当前矿山数据资产面临的主要障碍是同一对象在不同系统中的名称和编码不一致,坐标、时间和作业事件粒度不统一,真实灾害样本相对稀缺,异常标注又多依赖阈值、工单和事后复盘,导致相关数据难以直接用于模型训练和业务推理。

规程、案例和灾害机理应以可检索条目、适用条件、阈值与版本进入知识底座,并关联监测对象、业务事件及专业模型。复杂任务先检索证据和知识,再调用稳定性评价、预测模型、优化器或业务系统;调用过程记录输入、依据、结果和版本,输出依次接受证据充分性、机理一致性、规则合规性、权限有效性和现场可执行性校核。证据不足、结果冲突、接口超时、权限异常或涉及高风险动作时,系统应停止自动推进,回退至既有监测报警、专业计算、人工会商和应急预案流程。

3.3 典型高风险场景的协同接口

本文以非煤地下金属矿山安全业务为主要研究对象,同时将与金属矿山生产活动密切相关的尾矿库作为重大危险源场景纳入分析。采空区、尾矿库和提升系统分别对应地压灾害、重大危险源和关键生命线装备。三者可以共享同一分层架构,但进入模型的证据、接受校核的规则以及触发回退的条件并不相同。换言之,架构的普适性体现在"认知—校核—处置—反馈"的责任链可复用,而不是用同一套阈值、模型或处置动作覆盖所有场景。典型矿山安全场景的大模型任务与协议接口见表1。

表1 典型矿山安全场景的大模型任务与协同接口

Table 1 Large-model tasks and collaboration interfaces in typical mine-safety scenarios

场景	数据治理重点	认知与提议任务	校核规则、执行边界与安全回退
采空区	按采场、采空区、监测点和采动事件统一编码,关联微震、位移、应力、爆破、采掘进度及地质模型,保留噪声事件和人工修订记录。	识别异常组合,解释围岩状态变化,生成风险分级、补充监测和处置建议。	由稳定性评价、阈值规则、采矿设计参数和专家复核校核;模型建议不得直接转化为人员撤离或采掘调整指令。证据不足或机理解释冲突时,回退至既有阈值预警、补测核查和人工会商。
尾矿库	按坝体分区、监测点、运行水位和气象事件组织渗压、位移、水位、降雨、视频、巡检、遥感及历史险情记录。	关联浸润线、变形和降雨过程,识别漫顶、渗流破坏、局部失稳等风险模式,提出联动建议。	由监测规范、调洪演算、排渗能力、稳定性计算、应急预案和审批流程校核;处置动作由工程责任链确认。监测异常、模型低置信或审批未通过时,转入保守预警、现场巡查、工程复核和预案处置。
提升系统	按设备、部件、运行循环、报警、检修工单和故障案例统一组织振动、电流、油压、速度、位置和维护记录。	进行状态解释、故障模式识别、寿命趋势研判和检修方案建议。	由设备保护联锁、运行规程、检修标准、故障诊断模型和授权人员确认;联锁与停机控制保持独立。接口异常、建议冲突或高风险故障时,隔离大模型调用,恢复原有监测报警、联锁保护和人工处置链路。

(1) 采空区风险感知与失稳预警。微震波形、位移、应力、采动工况和地质模型共同描述围岩状态,微震事件分类、监测模型和地下矿山多模态地质灾害预测研究为异常关联与趋势判断提供基础[26,30,32]。实施时应按采场、采空区、监测点和采动事件统一组织数据,区分真实微震、生产噪声和不确定事件。大模型可解释多源异常之间的关系并提出风险分级、补测和处置建议,但失稳判定仍须通过稳定性评价、阈值规则、采矿设计参数和专家复核来进行核验;证据不足或机理解释冲突时,应回退至既有阈值预警、补测核查和人工稳定性会商。

(2) 尾矿库灾害监测与精准预警。渗压、位移、水位、降雨、视频、巡检、遥感和历史灾变记录可以支持失稳模式识别与趋势推演。尾矿库数字孪生、动态风险评价和物联网监测预警研究已形成较为系统的技术积累[33-35]。实施时应按照坝体分区、监测点、运行水位和气象事件对多源数据进行时序对齐。大模型可提出风险解释和联动建议,但调洪、排渗、降库水位及应急响应必须符合监测规范、工程计算、处置预案和审批流程。当模型置信不足、监测异常或审批未通过时,应转入保守预警、现场巡查和工程复核。

(3) 提升系统装备安全运维。振动、电流、油压、运行日志、检修记录和故障案例能够支持状态识

别、健康评估、剩余寿命预测与检修建议。矿山机械状态诊断、运矿机器人和工业物联网维护研究提供了数据与知识基础[13,20-21]。实施时应统一设备、部件、运行循环、工单和故障案例编码,把状态诊断结果、运行规程和检修标准共同作为校核依据。在这一场景中,设备保护联锁、停机逻辑和人工故障确认仍是不可跨越的执行边界。接口异常、建议冲突或出现高风险故障时,应隔离大模型调用,恢复原有监测报警、保护联锁和人工处置链路。

3.4 从场景智能体到受约束闭环

单个场景智能体可以完成局部信息处理,但难以独立协调监测、分析、调度、维护和应急等系统。更高层级的总控智能体需要理解任务,选择场景模型和知识资源,编排跨系统流程,并将处置结果回传至数据与知识底座。这里所说的闭环,并非由模型自行作出全部决定,而是使认知、校核、授权、处置和反馈形成可追踪的业务链。每一项高风险动作均应经过相应的规则、模型、权限和人员节点,并保留中止、降级和人工接管条件。

将大模型用于认知研判与方案生成,将规则约束校核和现场处置执行严格限定在经过验证的业务系统内,有利于构建职责明确、全过程可追溯的安全闭环。若直接以生成结果承担阈值判定、联锁保护或控制执行,则难以回避可靠性验证、责任界定和故障降级等问题。矿山安全大模型的工程价值,不仅取决于模型能力,也取决于模型、知识、专业工具、业务流程和安全边界能否形成协调一致的体系。

4 工程化路径与发展判断

矿山安全大模型的工程应用宜从边界清楚、结果可校核的任务起步,再根据验证结果逐步增加模型参与深度。数据和模型能力固然重要,组织责任、系统接口、验证制度及长期运营同样决定项目能否离开概念验证。

4.1 由知识服务走向协同处置

现场应用首先需要将数据治理要求落实到数据接入接口环节,明确数据对象目录、统一全链路编码规则、对齐坐标与时间基准、划定数据质量等级、规范各系统取数方式,再分层存储原始数据、清洗后标准化数据、业务事件数据和知识条目资产。对规程、案例与机理资料应保留来源、适用条件和版本,并与业务对象和事件全流程建立关联。综合管控、信息协同、智能监察、监测预警、应急指挥、运输调度及装备控制等成果为数据接入和工具调用提供了条件,但后续需要通过统一接口和权限体系来避免形成新的信息孤岛。

实施深度可随验证结果递进:起步阶段以规程问答、事故检索、数据查询和报告生成为主,模型只读数据和知识库;随后接入预测模型与机理工具,开展风险解释、方案比选和预警建议,并明确信息接收岗位、人工复核时限要求和修改记录留痕规则;前两阶段稳定后,再通过智能体联通调度、维护和应急系统。涉及现场动作时,仍由业务系统、保护联锁和授权人员执行,全过程保留权限隔离、人工确认和安全回退能力,递进关系见图 4。



图 4 矿山安全大模型的递进建设路径

Fig.4 Progressive development path for mine safety large model

4.2 以系统和业务效果评价模型价值

评价对象不能只停留在模型答案。事实检索需要检查来源是否可追溯,风险研判要分别考察漏报、误报、提前量和跨场景稳定性,方案建议还应记录约束违反情况,以及被专家接受、修改或拒绝的原因。对于低频高损灾害,小样本学习和跨矿迁移尤其需要谨慎,语言流畅不能替代专业可靠性。

一套可用的评价体系至少要同时观察模型、系统和业务。模型层关注准确性、校准性、鲁棒性和事实一致性;系统层检查接口成功率、响应时延、权限控制、链路追溯与降级恢复;业务层则看预警是否有效、处置时长是否缩短、专家工作量是否变化,以及安全绩效能否持续改善。示范工程应明确矿种、场景、数据周期和基线方法,连续记录运行表现,而不能以一次准确率代表长期效果。

4.3 从单场景验证走向行业能力

随着应用深入,行业化程度将不再由参数规模

或问答效果衡量,而取决于模型能否利用矿山知识、调用专业工具并适应具体场景。安全业务可能首先形成可验证的应用范式,随后再向生产组织、设备运维、能耗优化和经营管控延伸。基础模型、专业小模型、机理模型和控制系统不会相互取代:大模型负责跨模态认知与任务编排;专业模型保持特定对象的分析精度;机理和规则承担安全校核;控制系统获得授权后完成现场动作执行。

对矿山而言,大模型带来的增量不在于替代多少既有系统,而在于能否把原本分散的信息、模型和业务连接起来,并使提议、校核、授权、执行和反馈对应到清晰的责任主体。这样的系统既不同于脱离现场的知识问答,也不同于让生成模型直接接管控制。系统的可复制性取决于接口、评价和治理机制能否跨矿复用,而非单个示范场景是否取得短期效果。

5 结语

智能矿山的长期建设已经形成平台接口、专用工具、安全证据和领域知识等模块产品,为大模型进入矿山安全领域应用提供了现实基础。本文在梳理相关研究与工程实践的基础上,强调矿山安全大模型的关键问题不是能否生成专业化回答,而是能否在清晰边界内参与风险识别、方案生成和业务协同。将大模型限定在"认知与提议层",并通过数据治理与知识底座、约束校核、现场执行和反馈评估形成分层协同,有助于在利用跨模态理解和知识组织能力的同时,保留规则、机理、联锁和人工责任链。采空区、尾矿库和提升系统的比较进一步说明,架构中可复用的是接口和责任链,而具体数据治理、校核规则和安全回退方案必须按场景配置。后续工程化应用应以可解释、可校核、可拒绝、可追溯和可回退作为基本判据,在连续运行和多场景验证中检验其行业价值。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
Cai Meifeng, Tan Wenhui, Wu Xinghui, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3409-3421.

[2] 王联成,邵安林,曲福明,等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
Wang Liancheng, Shao Anlin, Qu Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering,2025,47(5):971-983.

[3] 丁恩杰,俞啸,夏冰,等.矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J].煤炭学报,2022,47(1):564-578.
Ding Enjie, Yu Xiao, Xia Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of smart mines based on digital twins[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):564-578.

[4] Barnewold L, Lottermoser B G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2020,30(6):747-757.

[5] Van Eyk L, Heyns P S. A framework to define, design and construct digital twins in the mining industry[J]. Computers & Industrial Engineering,2025,200:110805.

[6] 毛善君,景超,李团结,等.基于4DGIS的智能化矿区云平台关键技术研究及应用[J].煤炭学报,2023,48(7):2626-2640.
Mao Shanjun, Jing Chao, Li Tuanjie, et al. Research and application of key technologies of intelligent mining area cloud platform based on 4DGIS[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(7):2626-2640.

[7] 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. Overall planning and construction of intelligent non-coal underground mines[J]. World Nonferrous Metals, 2025(16):32-34.

[8] 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. Analysis of domestic digital mining literature knowledge map based on CiteSpace[J]. Modern Mining,2024,40(3):1-6.

[9] 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 assurance measures for intelligent mines[J]. Mining Technology,2025,25(4):231-235.

[10] 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 the basic system of information coordination platform of geology, survey and mining in mine [J]. Mining Technology,2023,23(4):222-226.

[11] 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 intelligent supervision platform for mine[J]. Mining Technology,2023,23(5):189-193.

[12] 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 intelligent mines at CNNC Jinyuan Uranium Industry[J]. Mining Technology,2024,24(4):301-304.

[13] 丁恩杰,俞啸,廖玉波,等.基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J].煤炭学报,2020,45(6):2308-2319.
Ding Enjie, Yu Xiao, Liao Yubo, et al. Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under internet of things[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2308-2319.

[14] 鲍久圣,章全利,葛世荣,等.煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J].煤炭学报,2023,48(2):1085-1098.
Bao Jiusheng, Zhang Quanli, Ge Shirong, et al. Basic research and application practice of unmanned auxiliary transportation system in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(2):1085-1098.

[15] Li J G, Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering,2018,4(3):381-391.

[16] Chimunhu P, Topal E, Ajak A D, et al. A review of machine learning applications for underground mine planning and scheduling[J]. Resources Policy,2022,77:102693.

[17] Åstrand M, Johansson M, Zanarini A. Underground mine scheduling of mobile machines using constraint programming and large neighborhood search [J]. Computers & Operations Research,2020,123:105036.

[18] 涂思羽,徐帅,胡建辉,等.地下金属矿开采作业调度仿真方法研究[J].黄金科学技术,2025,33(2):255-268.
Tu Siyu, Xu Shuai, Hu Jianhui, et al. Research on simulation method of underground metal mine mining operation scheduling[J]. Gold Science and Technology, 2025,33(2):255-268.

[19] 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. Whole-process management and control technology for intelligent ore blending in underground mines[J]. Mining Technology, 2025,25(1):263-267.

[20] 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 an ore transport robot in cage hoisting transportation systems[J]. Mining Technology,2025,25(2):215-218.

[21] Zhang G, Chen C H, Cao X G, et al. Industrial Internet of Things-enabled monitoring and maintenance mechanism for fully mechanized mining equipment [J]. Advanced Engineering Informatics,2022,54:101782.

[22] Sreedharan S, Gopalakrishnan M, Nair A, et al. Harnessing digital twins and industrial-IoT for cutting-edge mining automation: a methodological and technology assessment prototype[J]. Computers & Industrial Engineering, 2025, 200:110871.

[23] 秦凯,叶锦娇,舒龙勇,等.基于大模型和GIS的煤矿多灾害风险智能融合预警技术[J].煤炭科学技术,2026,54(5):28-42.
Qin Kai, Ye Jinjiao, Shu Longyong, et al. Intelligent fusion early warning technology for multi-disaster risks in coal mines based on large models and GIS[J]. Coal Science and Technology,2026,54(5):28-42.

[24] Dong J Y, Li J Q, Li Y C, et al. Knowledge extraction and alignment for mine ventilation: a knowledge graph construction framework based on large language models[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 162:112726.

[25] Jiang Y J, Nie B S, Wang J H, et al. Large language model-driven knowledge graph and intelligent analysis for coal mine accidents[J]. Measurement,2026,277:121558.

[26] 曹安业,李茂涛,杨旭,等.矿山微震智能处理基础模型构建及应用[J].煤炭学报,2025,50(6):2823-2836.
Cao Anye, Li Maotao, Yang Xu, et al. Construction and application of foundational models for intelligent processing of microseismic events in mines[J]. Journal of China Coal Society,2025,50(6):2823-2836.

[27] 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.
Wang Hao, Dong Shuning, Ji Yadong, et al. Key technology and platform development of intelligent prevention and control on coal mine water disaster[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(2):883-892.

[28] Liu C F, Wang E Y, Li Z H, et al. Research on multi-factor adaptive integrated early warning method for coal mine disaster risks based on multi-task learning[J]. Reliability Engineering & System Safety,2025,260:111002.

[29] Shi J W, Zhang Z Y, Li L N. A multimodal full-cycle risk perception and early warning model for mine water inrush disasters[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026,273:112362.

[30] Liang R Y, Zhang C G, Huang C R, et al. Multimodal data fusion for geo-hazard prediction in underground mining operation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 193:110268.

[31] 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 of visual emergency command management system and its key technology research in mining areas[J]. Mining Technology, 2024,24(5):255-260.

[32] 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.

[33] 魏杰,付搏涛,苏贺涛,等.基于数字孪生技术的尾矿库实时分析系统构建与探究[J].金属矿山,2026(2):236-242.
Wei Jie, Fu Botao, Su Hetao, et al. Construction and exploration of real-time analysis system of tailings reservoir based on digital twin technology[J]. Metal Mine,2026(2):236-242.

[34] 冯威,张小龙,唐立鹤,等.基于 AHP-EWM 与多源数据的尾矿库安全风险动态监测评价[J].金属矿山,2025(7):172-181.
Feng Wei, Zhang Xiaolong, Tang Lihe, et al. Dynamic monitoring and evaluation of safety risk in tailings reservoir based on AHP-EWM and multi-source data[J]. Metal Mine, 2025(7):172-181.

[35] Sun E J, Zhang X K, Li Z X. The internet of things (IoT) and cloud computing (CC) based tailingsdam monitoring and pre-alarm system in mines[J]. Safety Science,2012,50(4):811-815.