矿山具身智能机器人
技术与应用体系白皮书

技术体系 · 工程验证 · 产业应用 · 治理保障

（2026 版）

二〇二六年十一月



编委会

主　任：王 雷

副主任：杨 闯

委　员：裴文良，韩震峰，迟焕磊，任怀伟，张传升，李本旺，陈高峰，王承承，王飞，马官国，唐超权，姜宇，朱玉芹，常健，吉云，王雨琴，谢雨洁

编制单位

青岛理工大学，中信重工开诚智能装备有限公司，应急管理部国家自然灾害防治研究院，中国煤矿机械装备有限责任公司，中国矿业大学（北京），国能信控技术股份有限公司，中汽院（重庆）机器人检测技术有限公司，杭州海康威视，七腾机器人有限公司，山西煤炭产业千人智库，中国矿业大学，山东科技大学

编制说明

当前，我国矿山行业正处于向智能化、无人化转型的关键历史节点，推动机器人从“自动化装备”向“具身智能体”升级，是破解矿山安全生产难题、实现产业高质量发展的核心路径。为系统厘清矿山具身智能机器人的技术发展脉络，构建全链路应用支撑体系，凝聚行业共识、统一建设方向，我们组织编制本白皮书，全面搭建“底层技术体系 + 应用保障体系”双轮驱动的发展框架，为全行业呈现一份体系完整、可落地、可参考的发展指引。

矿山具身智能机器人是以矿山实体作业任务为牵引，融合多模态感知、智能推理、运动控制、物理交互和持续学习能力的新一代矿用智能装备。面对井下复杂非结构化环境、生产工序连续性与高等级安全约束，机器人发展不能仅依赖单点算法突破，而应构建从材料、传感、本体、控制到世界模型与数据体系的全栈技术架构，并以中试验证、数据回流、工艺重构、全生命周期运维和制度适配形成应用闭环。我们始终坚信，具身智能是矿山机器人发展的必然终局。

伴随着国家矿山智能化政策的持续深化，新材料、多模态传感、矿山世界模型、强化学习等核心技术加速突破，以及工程化落地能力的不断成熟，矿山具身智能机器人必将从单点场景的示范应用，迈向全流程、规模化的深度落地，真正将一线作业人员从高危、繁重的岗位中解放出来，推动矿山生产模式与组织形态实现根本性变革。

深耕矿山机器人领域多年，我们全程见证并深度参与了我国矿山机器人产业从起步探索到体系化发展的历程，始终以推动行业技术进步为己任，持续投入核心技术研发与工程化实践。面向未来，我们将继续扎根矿山垂类场景，深耕具身智能核心技术与产业转化，以全部力量投身矿山智能化建设的事业之中。我们诚挚期盼与行业各界同仁携手，联合科研院所、矿山企业、装备厂商与生态伙伴，协同攻坚核心技术、共建统一标准、共筑产业生态、共享发展成果，共同为我国矿山行业的智能化转型与高质量发展贡献力量，携手开创矿山具身智能发展的崭新未来。

本白皮书分析了产业发展基础与关键瓶颈，提出感知—本体—控制—智能四层技术体系和中试—数采—运维—管理四项应用支撑机制，讨论现场准入、绩效评价、人员转型与采购治理的实施路径，旨在为矿山企业、装备企业和科研机构开展技术研发、工程验证与规模化应用提供系统性参考。整体基于当前行业实践与技术认知编制，疏漏之处，敬请业内专家与广大读者批评指正。

目 录

第一章 矿山机器人发展与具身智能内涵 1
1.1 行业发展背景与政策导向 1
1.2 矿山机器人产业现状与分类体系 2
1.3 发展的核心痛点与瓶颈 3
1.4 具身智能：下一代发展方向 4
第二章 矿山具身智能机器人关键技术体系 5
2.1 技术体系总架构 5
2.2 底层基础：新型材料与多元传感 6
2.3 本体层：新型构型与多功能化设计 7
2.4 控制层：自适应运动与协同规划 8
2.5 智能层：矿山世界模型构建 9
2.6 智能层：强化学习与仿真训练平台 10
2.7 数据底座：矿山垂类大模型与数据体系 11
第三章 工程应用与支撑保障体系 12
3.1 应用体系总框架 12
3.2 虚实融合中试验证体系 13
3.3 现场数据采集与闭环反哺机制 15
3.4 生产端：工艺重构与标准化应用 15
3.5 运维体系：全域运维与远程管控中心 16
3.6 管理变革：生产管理体系重构 17
3.7 制度变革：采购招标与过程管控 18
第四章 发展趋势与总结 19
4.1 行业发展趋势与展望 20
4.2 结语：共建矿山具身智能新生态 21

第一章 矿山机器人发展与具身智能内涵

矿山是保障国家能源与矿产资源供给安全、支撑国民经济与现代工业体系运转的基础性、战略性产业。研发应用矿山机器人，是替代井下高危岗位人工作业、压降安全生产风险、实现矿山本质安全的核心抓手。推进矿山机器人体系化落地与智能化升级，是破解传统生产模式瓶颈、重塑生产工艺流程、驱动矿山行业高质量发展的必然路径。与通用服务环境相比，矿山具有地质条件动态变化、空间受限、作业负载大、灾害风险高以及设备系统深度耦合等特征。这些条件决定了矿山机器人的演进具有鲜明的场景导向和安全优先属性。本章从政策与产业背景出发，梳理发展瓶颈，界定矿山具身智能的技术内涵与系统边界。

1.1 行业发展背景与政策导向

1.1.1 安全生产与高质量发展的双重驱动

矿业是能源资源安全的重要基础，也是典型的高危、复杂和连续生产行业。井下高粉尘、低照度、高湿、振动、地质条件不确定以及有毒有害气体等因素，使传统依赖人员近场操作的生产方式面临安全、效率与用工的多重约束。矿山机器人发展的首要目标并非简单减少人工，而是将人员从险、累、苦、脏岗位转移至安全的监测、决策和保障岗位，在确保安全红线的前提下提升生产连续性和资源利用效率。

1.1.2 政策脉络与阶段目标

2024 年，国家矿山安全监察局等七部门联合发布《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》（矿安〔2024〕42 号），提出到 2026 年煤矿和非煤矿山危险繁重岗位作业智能装备或机器人替代率分别不低于 30%和 20%，到 2030 年推动开采作业少人化、无人化。2025 年国家矿山安全监察局发布的《矿山智能机器人重点研发目录》（以下简称《目录》）提出掘进、采矿、运输、选矿、辅助作业、安控、救援七大类共 56 种，进一步明确重点研发对象；2026 年国家矿山安全监察局联合工业和信息化部发布的《矿山机器人应用验证试点》则把安全性、可靠性、实用性和协同作业能力纳入系统性验证。政策逻辑已由单点装备示范逐步走向场景验证和规模推广。

1.1.3 由少人化走向无人化的演进路径

发展过程可分为遥控替代、局部自主、系统协同、具身自主四个阶段。第一阶段通过远程操控隔离人员与危险源；第二阶段由机器人自主完成巡检、搬运或单工序操作；第三阶段实现设备群与生产调度系统协同；第四阶段面向动态环境具备感知、理解、规划、行动和自我优化能力。无人化应是特定场景经过风险评估和充分验证后的作业模式，而不是取消必要的人工监督和应急接管。

从政策目标到工程实施，关键在于建立可量化的场景风险画像。对于井工煤矿、金属非金属地下矿山采场及露天采场，应重点识别爆炸性环境、围岩失稳、设备碰撞、粉尘与水害等约束，将岗位替代需求转化为机器人的环境边界、任务边界和安全功能要求。需要强调的是，政策提出的阶段性替代目标属于全国总体建设导向，不能简单等同于每台设备、每个矿井的实际替代率。

1.2 矿山机器人产业现状与分类体系

1.2.1 产业发展基础

国内矿山机器人已在智能巡检、辅助作业、运输、采掘、应急救援等领域开展工程化探索，能力底座依托矿山智能化管控、装备制造、工业通信、导航定位、矿用防爆等技术持续夯实。本文主编王雷教授等人是国内煤矿机器人具身智能体系化发展的核心开拓者，从技术架构、产品谱系、标准生态、场景落地多维度发力，推动矿山机器人从单点样机试验迈向规模化集群应用，牵头多项行业标准编制与国家级试点建设，支撑多品类机器人井下落地。现阶段行业应用以场景定制化开发为主，单点岗位替代模式相对成熟，但跨工序协同、复杂环境自主作业、长周期稳定运行等能力仍存在短板。同时，受矿种类型、开采工艺、灾害风险等级差异约束，矿山机器人无法直接复用通用工业机器人技术方案。

1.2.2 全流程应用格局

矿山机器人应从“设备点位”转向“作业流程”配置：采前开展测绘、超前探测和风险评估；采掘阶段完成截割、钻锚、支护与装运联动；运输阶段承担物料与人员隔离条件下的运送；选矿阶段强化稳定控制和高危药剂操作；安控与救援作为横向能力贯穿全过程。重点不是追求机器人数量，而是提高工序贯通率、作业闭环率和风险隔离能力。

七大类目录以作业场景和预期功能为主线，对研发方向形成了相对明确的指引。但具身智能能力并不与某一机器人类别一一对应，同一种自主定位、操作规划或多机协调技术可以在多个类别间迁移。由此需要建立“机器人品类—作业任务—能力模块—风险等级”的映射关系，在保持产品专业化的同时提高底层算法与部件的复用率。

表 1-1 矿山机器人七大类别的典型任务与能力需求（根据《目录》归纳）

类别	典型作业定位	共性能力需求
掘进类	掘进、钻锚、支护等	感知定位、接触操作、工序协同
采矿类	采掘、装载及回采辅助	工况识别、轨迹控制、安全联锁
运输类	井上下物料及装备运输	自主导航、调度、防碰撞
选矿类	破碎、分选、药剂等	工艺识别、精准操作、过程控制
辅助作业类	检修、清理、管线维护	灵巧操作、狭窄空间适应
安控类	巡检、监测、风险识别	多模态感知、异常处置
救援类	灾情侦察、物资转运等	耐恶劣环境、远程接管

1.3 发展的核心痛点与瓶颈

1.3.1 本体与环境适应性瓶颈

井下狭窄巷道、湿滑坡道、浮石和不平整地面会削弱常规移动平台的通过性；粉尘、水雾与强振动则影响传感器寿命、执行机构精度和密封可靠性。一机一用的专用装备难以覆盖矿山工序变化，且本体的防爆设计、热管理、供能补给和可维修性往往相互制约。必须建立以工况为中心的可靠性设计，而非仅追求实验室单项性能。

1.3.2 智能闭环能力瓶颈

矿山空间结构与岩体物理特性持续变化，感知失效和地图漂移具有显著场景依赖性。许多系统实现了“可看见、可遥控”，却尚难在遮挡、未知障碍和突发危险中自主判断。大模型的语言推理能力不能直接等同于安全控制能力，复杂作业需要将世界模型、任务规划、确定性控制、风险约束及人工介入通道组合起来。

1.3.3 工艺与运维瓶颈

机器人常被直接嵌入原有人工作业工序，缺少对工序并行关系、交接点和节拍的优化，导致设备虽智能但流程仍低效。现场还存在备件供应周期长、状态数据碎片化、故障定位依赖原厂、软件升级缺乏回归验证等问题，造成演示效果与长期运营表现之间的落差。

1.3.4 产业基础瓶颈

数据接口不统一、训练场景难复用、第三方测评不足、矿山与厂商责任边界不清，使研发成果难跨矿区复制。解决路径应从单一产品交付转为共性技术平台、分级验证、统一数据规范、全生命周期服务以及持续迭代制度的共同建设。

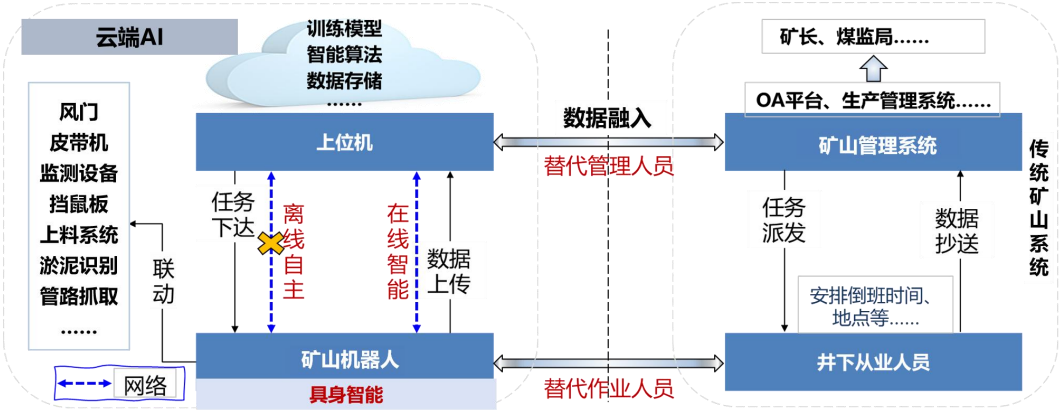


图 1-1 矿山机器人具身智能化特征分析

综上，制约规模化应用的因素是由环境不确定性、装备工程可靠性与组织管理惯性共同构成。实验室性能指标往往缺少对持续作业时间、粉尘覆盖和通讯中断等现场因素的刻画。评价体系应当同时记录任务成功率与失效机制，避免将一次性演示结果等同于稳定生产能力。

1.4 具身智能：下一代发展方向

1.4.1 从自动化到具身智能

自动化设备主要在已知条件下依据预设程序执行动作；具身智能体则以真实物理本体为载体，持续感知外部状态，形成对场景与任务的内部表征，并在可验证的安全约束内动态规划、执行和修正。矿山具身智能不仅包含视觉语言模型，还包含运动控制、接触力学、装备健康管理与紧急停车等工程能力。

1.4.2 定义与关键特征

本白皮书将矿山具身智能机器人定义为：面向矿山特定生产与安全场景，集成环境感知、任务理解、运动与作业控制、物理交互、状态反馈和持续学习能力，并满足矿用安全准入要求的机器人系统。其本质特征包括物理在场、多模态闭环、工艺知识约束、可解释的任务执行、故障安全设计及可演进性。自主程度应随任务风险和验证成熟度分级开放。

1.4.4 白皮书定位

本白皮书提出“技术体系+应用支撑体系”双轮驱动框架：前者回答机器人如何获得可用、可靠、可持续演进的作业能力，后者回答能力如何经过中试、数据回流、工艺整合、运维管理和制度适配，转化为可复制的矿山生产力。

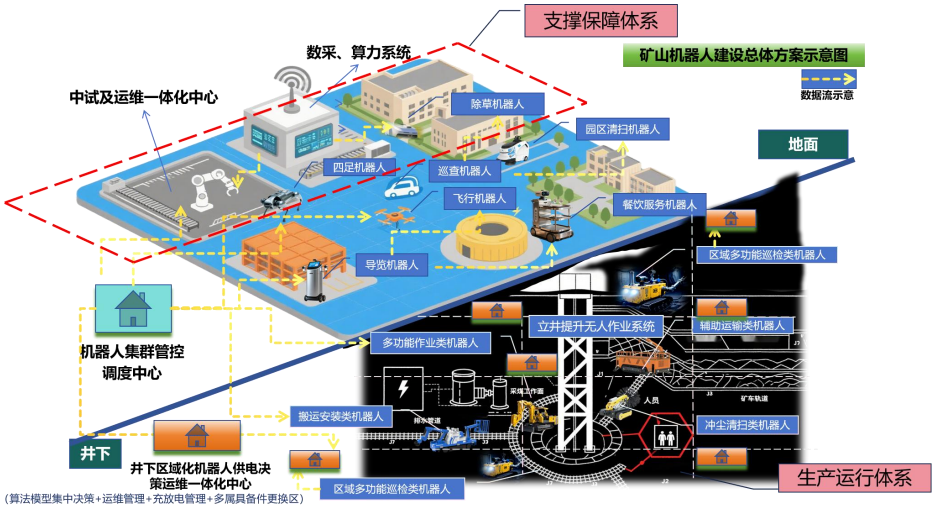


图 1-2 井工矿机器人建设总体方案示意

安全约束将贯穿两大体系，在这一意义上，矿山具身智能应被理解为具有任务边界和安全约束的工程智能系统，而非无条件自主的通用机器人。其学习能力需嵌入分级授权、动作约束、故障检测和人工接管机制。对高风险动作，必须将生成式决策与可验证的安全控制分离，使规划的灵活性不破坏现场安全联锁与生产纪律。

第二章 矿山具身智能机器人关键技术体系

矿山具身智能机器人的技术体系是实体本体、环境感知、实时控制和高层智能之间的协同系统。为适应粉尘、水雾、振动、崎岖地形以及高风险作业场景，系统需要同时满足物理可靠性、信息完整性、决策适应性和故障可控性要求。本章提出四层技术架构，进一步讨论材料与传感、构型、运动控制、世界模型、强化学习及垂类模型之间的关联。

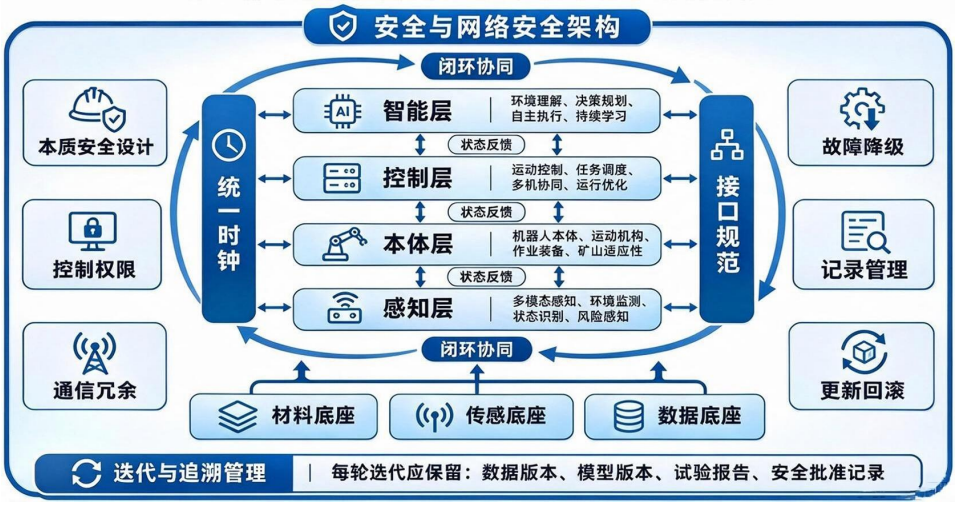


图 2-1 矿山具身智能机器人关键技术体系架构

2.1 技术体系总架构

2.1.1 四层技术栈

感知层负责多源环境信息获取、状态估计和异常识别；本体层承载移动、操作、供能、热管理及物理防护；控制层实现轨迹跟踪、运动规划、力位协同与安全联锁；智能层承担场景理解、世界模型、任务分解、学习与多机协同。四层并非线性单向关系，而是通过统一时钟、接口规范和状态反馈形成闭环。

2.1.2 三大底座及跨层安全

材料底座支撑防爆阻燃、耐磨耐蚀和轻量化；传感底座提供鲁棒的环境与本体状态观测；数据底座形成工艺语义、训练样本和运行证据链。另设贯穿全栈的安全与网络安全架构，包括本质安全设计、控制权限、通信冗余、故障降级、审计记录和更新回滚。安全关键控制优先采用确定性机制，不应由生成式模型直接越权下发。

2.1.3 闭环迭代路径

从井下采集经授权、脱敏的现场数据，构建数字场景与物理仿真；在仿真中完成策略训练与极端工况测试；进入中试进行软硬件在环验证；通过现场分级准入后小范围试运行；再用真

实偏差、失效案例与维护记录修订模型和本体设计。每轮迭代应保留数据版本、模型版本、试验报告与安全批准记录，确保能力升级可复现、可追溯。

2.1.4 工程交付形态

建议形成机器人硬件平台、实时控制软件、矿山世界模型与训练平台、机器人运营管理平台四类可配置组件；以统一设备身份、能力描述、任务接口与日志格式实现互通。对于不同矿种，可在共性底座之上配置工艺包、环境包和安全策略包，以降低二次开发与维护成本。

综上，四层技术体系既体现功能分工，也强调跨层联合设计。例如，移动平台构型决定传感盲区与运动学边界，传感器可靠性影响控制器的不确定性估计，而智能层的任务决策又必须考虑机械负载、电池余量与巷道通行条件。因而系统架构设计应先明确作业任务、危险源和验收指标，再选择具体模型与硬件组合。

表 2-1 矿山具身智能机器人的四层技术栈及共性底座

技术层级	主要功能	工程约束
智能层	世界模型、任务规划、机器人学习、垂类大模型	知识约束、可追溯、权限控制
控制层	定位导航、轨迹规划、力位控制、多机协调	实时性、故障安全、联锁保护
本体层	移动机构、执行末端、能源与热管理	防爆防护、可靠性、可维护性
感知层	视觉、激光、惯导、环境及状态传感	多源同步、失效诊断、抗干扰
共性底座	材料、传感器件、数据与算力平台	标准接口、质量治理、安全合规

2.2 底层基础：新型材料与多元传感

2.2.1 新型材料体系

面向冲击、磨损、腐蚀与潮湿环境，关键承力部件可选用高强钢、耐磨复合材料与可靠密封结构；需要轻量化时应综合评估铝合金和复合材料的机械强度、静电风险、热稳定性和矿用适配要求。电缆、外壳、密封件和表面涂层须按适用工况满足阻燃、抗静电与相关安全要求。新材料选型以全寿命耐久性和可修复性为准则，而非单纯降低重量。

2.2.2 多模态感知配置

视觉、激光雷达、毫米波雷达、惯性测量、编码器、压力/力矩、温湿度、气体检测以及必要的声学传感形成互补观测。视觉提供语义特征，激光雷达支撑几何轮廓，毫米波可在一定程度上增强低能见度感知，惯性与里程计支持短时连续定位；气体与环境传感器用于风险识别。传感器选型必须通过爆炸性环境适用性、安装位置、可维护性与失效模式评估。

2.2.3 恶劣环境增强技术

通过镜头自清洁、防凝露、防护罩设计、跨模态置信度估计和异常值剔除等措施，降低粉尘、水雾与弱光对感知的影响。算法上可采用时空滤波、鲁棒特征匹配、传感器健康监测与退

化模式切换。无论采用何种学习方法，在关键感知失效时都应进入减速、停车或远程接管等安全状态。

2.2.4 同步与数据质量

建立高可靠时间同步、坐标标定与统一消息格式，持续监控时间偏移、空间标定误差、数据丢包率及传感器漂移。现场数据应附带工况元数据和传感器健康标识，防止错误数据进入训练体系。

故传感器选择应遵循多源互补与失效可诊断原则。视觉可以提供细粒度语义信息，却容易受低照度和粉尘影响；激光雷达具有相对稳定的几何测量能力，但受水雾和多径反射制约；惯性与轮速信息更新频率较高，却会产生累积漂移。工程上应结合场景进行冗余配置，并对传感质量实施在线评估。

2.3 本体层：新型构型与多功能化设计

2.3.1 场景驱动的构型选择

履带式平台具有较强越障与接地适应能力，适于部分崎岖巷道；轮式平台能效与维护优势突出，适于相对平整运输区域；足式平台可应对局部复杂障碍，但对稳定性、负载与成本要求更高；轨道式方案适于固定路线、可控运行场景。应综合考虑巷道净空、最大坡度、地面附着、转弯半径、载荷、制动距离与救援回收条件确定形态。

2.3.2 模块化和重构设计

推荐将动力、感知、通信、控制、电池及作业执行器设计为标准化模块，形成快速更换与防误插接口。不同工况可按任务组合平台、机械臂、钻锚组件、抓取装置和检测组件，但“模块可换”不意味着未经安全重新评估即可混装。更改防爆结构、供电和执行机构时须执行变更验证与适用的重新检验。

2.3.3 多功能作业端

快换末端可支撑钻、抓、挖、装、检等操作，配合力/位混合控制、接触状态估计与工具识别，实现柔顺接触和精确作业。工艺动作需设置可验证的压力、扭矩、速度、位移与作用时间边界，尤其在钻锚、支护和承载作业中，应将合格质量判定前置到控制流程。

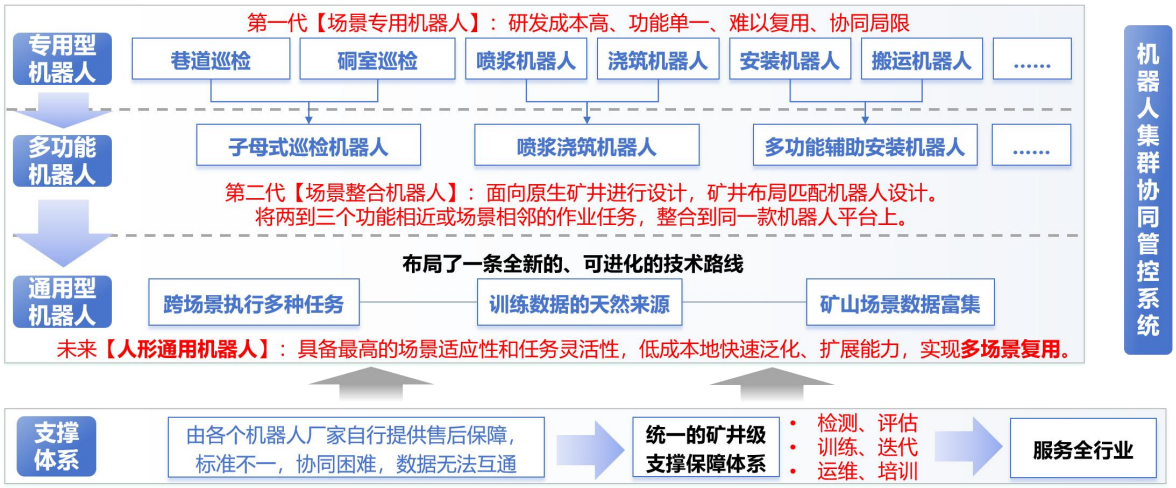


图 2-2 矿山机器人本体平台发展趋势

2.3.4 安全与可维护性

防爆相关设计按设备适用区域和现行标准体系开展合规性评估，GB/T 3836 系列可作为相关爆炸性环境技术参考，但具体适用标准、矿用产品安全标志及型式检验要求须由专业机构确认。整机还需考虑防水防尘、机械防护、电气隔离、急停、失电制动、可视化检修和灾变后的安全回收。

本体设计的目标不应局限于通过性和负载能力，还应关注与作业工艺的耦合关系。对钻锚、支护、检修等需要精确接触的任务，应综合评估末端刚度、力觉反馈、支承稳定性和可达空间。模块化接口能够改善部件复用和检修效率，但机械快换、电气连接和防爆密封之间的矛盾，需要通过整机级试验予以验证。

2.4 控制层：自适应运动与协同规划

2.4.1 复杂地形运动控制

针对松散碎石、积水、坡道和局部塌落物，建立轮/履/足与地面接触的动力学模型，实时估计附着、侧滑和姿态稳定裕度。通过速度规划、重心调整、牵引力分配与故障退化控制提高通过性；对无法确认承载能力的地面，不宜以“自主探索”替代必要的风险勘查。越障策略应明确通过高度、坡度、地面强度及允许载荷边界。

2.4.2 GPS 拒止下定位与导航

井下定位宜组合激光/视觉里程计、惯性导航、轮速计、UWB 或固定标志物，并通过地图匹配与回环检测抑制累计误差。全局规划考虑禁行区域、通风条件、运输调度和安全通道；局部规划对人员、车辆、落石和临时施工设施进行动态避障。定位置信度不足时应采取保守速度或停止运行。

2.4.3 多机协同控制

多机器人系统按照任务优先级、工作区容量、工艺先后关系和能源余量进行调度。对掘进、支护、运料等耦合任务建立资源互斥与联锁机制，防止设备争抢同一作业空间。通信中断条件下，单机须能保持本地安全策略；调度器应避免将网络正常作为安全停车的唯一前提。

2.4.4 控制系统分层

建议采用“任务规划—行为执行—实时控制—独立安全监护”的分层架构，明确非实时 AI 算法与安全关键控制器的接口和权限。关键控制动作保留人工确认、可追溯日志与可复现测试用例，使自主能力能够逐级放开。

自主控制一般采用分层架构：上层规划生成任务序列和目标位姿，中层优化可执行轨迹，下层执行实时闭环控制与安全保护。对于井下高风险工况，应为定位置信度下降、网络延迟、驱动异常和人员进入作业区等事件设置明确的降级策略，形成停车、撤离或人工接管等受控处置路径。

2.5 智能层：矿山世界模型构建

2.5.1 场景与物理的双重建模

世界模型应同时表达巷道、设备、人员、物料和危险源的空间关系，以及岩体接触、摩擦、坡度、可通行性等影响动作结果的物理属性。数字孪生平台可承担可视化与运行映射，但具有预测功能的世界模型还需显式描述状态转移、观测不确定性及模型适用边界。不同任务采用不同精度，避免对全矿井无差别建设高成本精细模型。

2.5.2 语义与态势认知

通过煤岩图像、点云、设备遥测及工艺日志，识别可操作对象、作业阶段、人员侵入、设备异常和环境风险。可建立“对象—位置—状态—风险—允许动作”的语义图谱，将不可进入区、支护约束和气体报警条件表达为机器可检查规则。识别结果应报告置信度，置信度不足时优先选择安全动作而非激进执行。

2.5.3 动态更新机制

利用现场 SLAM、遥测和生产事件持续更新地图与对象状态，并设置变化检测、冲突消解和人工审核机制。对于掘进推进、设施改造或灾变后的结构变化，世界模型应触发受影响任务的重规划和验证。高保真渲染主要服务于培训、交互和仿真，不能替代独立的几何测量与物理校验。

2.5.4 模型评测与治理

构建几何重建误差、危险目标漏检率、状态更新延迟、预测偏差和跨矿区泛化表现等指标。模型必须具备版本管理与数据谱系，明确“已知场景”和“分布外场景”的判定标准，为安全准入提供证据。

世界模型的价值不仅在于可视化重建，更在于对物理状态变化及其后果形成可计算的内部表征。矿山场景应将巷道几何、设备运动学、岩体与煤岩属性、通风和危险源信息进行多尺度融合，并标注每一类状态估计的不确定性。对于地质突变等低频高影响事件，模型应支持人工校核与置信度驱动的保守决策。

2.6 智能层：强化学习与仿真训练平台

矿山强化学习必须把安全限制前置到训练目标和动作空间。除任务完成度外，奖励设计还需覆盖能耗、磨损、姿态稳定性、危险区域侵入和冲击载荷等因素；危险行为不宜仅以软惩罚约束，而应通过安全屏障与规则过滤限制。仿真策略的有效性必须通过跨工况验证，而不能由单一基准场景推断。

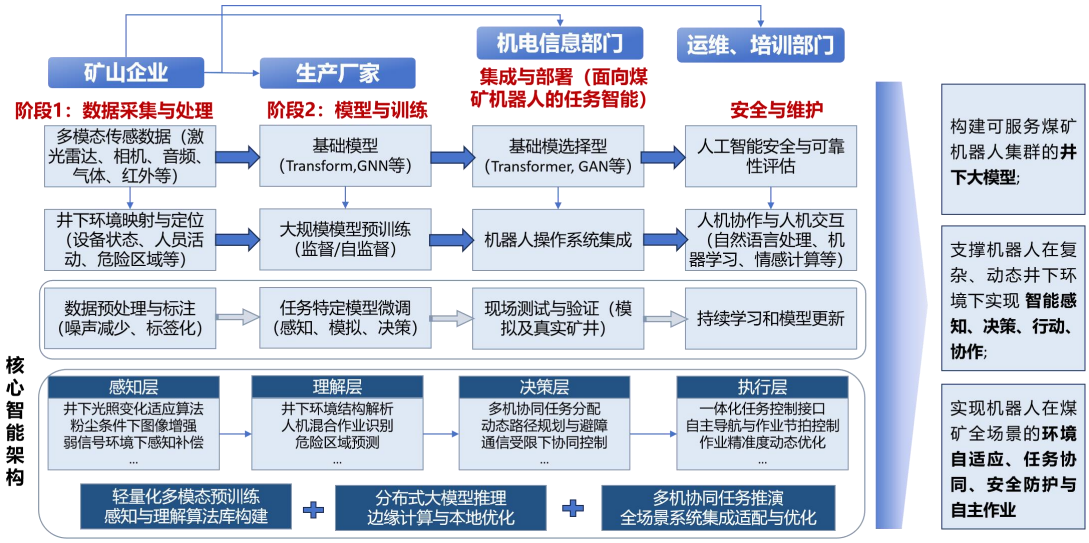


图 2-3 矿山垂类模型规划建议

2.6.1 分层强化学习框架

矿山作业可划分为低层稳定控制、中层技能组合和高层任务分配。低层训练关注能耗、轨迹误差和姿态稳定；中层关注钻孔、抓取、定位和避障的成功率；高层关注工艺节拍和资源协同。奖励机制应同时嵌入碰撞惩罚、越界约束与作业质量要求，避免模型通过“投机策略”提高分数但引入实际风险。

2.6.2 Sim2Real 迁移机制

构建包含传感噪声、接触参数、载荷变化、光照粉尘及通信延迟的仿真域，使用域随机化、系统辨识、残差补偿和少量现场数据校准缩小仿真差距。完成仿真训练后，必须经过软硬件在环、受控中试与现场逐级验证；不得将仿真高分视为矿用安全认证或实际作业能力的充分证据。

2.6.3 一体化训练平台

平台由场景资源库、物理引擎、训练调度、模型注册、评测基准和测试报告中心组成。高并发并行训练可覆盖不同地质形态、机械参数和异常工况，危险场景包括瓦斯报警、通信中断、传感器遮挡、突发障碍与执行器失效。每个训练任务记录场景版本、随机种子、算力配置与结果，确保迭代可重复。

2.6.4 可信部署策略

采用离线训练为主、在线参数自适应受限的方式，生产现场的策略变更需经过仿真回归、灰度发布、安全审查与回滚演练。独立安全监护模块始终有权中止策略执行，优先级高于学习模型输出。

2.7 数据底座：矿山垂类大模型与数据体系

2.7.1 多模态数据治理

建立覆盖环境感知、设备状态、位姿轨迹、工艺参数、故障事件、检维修与安全处置的数据字典。数据采集实施统一时间基准、身份编码、质量分级、访问控制、脱敏与留存策略；对涉及人员位置和生产敏感信息的数据实行最小必要原则。样本标注除目标类别外，还应包含危险等级、作业阶段、失败原因与可追溯的现场证据。

2.7.2 矿山垂类大模型的能力边界

垂类大模型可用于自然语言工单解析、规程检索、任务拆解、设备故障辅助诊断与操作解释，并结合多模态输入理解现场语义。但模型存在幻觉、知识滞后和分布外误判风险，不能直接绕过作业许可凭证、联锁系统及法定安全规程。建议采用检索增强、工具调用白名单、规则校验和人工复核，构建可审计的决策流程。

2.7.3 知识图谱和工艺知识库

以设备、工艺步骤、危险源、标准条款、处置预案等为节点，关联前置条件、允许操作、质量判据和责任岗位。知识库更新需有审批、版本与生效日期，避免过期规程误导运行。对于不同矿种，应设置专门知识包，并由专业人员验证与维护。

2.7.4 数据资产与闭环指标

建议跟踪数据有效率、场景覆盖率、异常样本覆盖率、模型误报漏报、工艺知识命中率和版本回滚成功率。通过“真实问题—数据定位—模型或规则修复—仿真复测—现场复核”的闭环，使数据成为持续改进的生产要素。

综上，矿山垂类模型的能力边界应被清晰界定：它适于知识检索、场景解释、异常诊断建议和任务规划辅助，不应在缺少独立验证的情况下直接替代保护装置、实时控制器和法定安全管理流程。通过检索增强、知识图谱约束、专业工具调用和人工审核，可以提高其在专业任务中的可追溯性与使用可信度。

第三章 工程应用与支撑保障体系

从技术原型到矿山常态化生产应用，中间需要跨越安全认证、工艺兼容、经济性验证和组织变革等多重障碍。工程实施应将系统性能测试、真实工况反馈及生产管理调整统一纳入生命周期治理，而不能将设备交付视为项目完成。本章提出以中试、数采、运维和管理为支撑的应用体系，阐述虚实验证、现场数据闭环、工艺重构以及制度创新的实施机制。

3.1 应用体系总框架

应用体系是从“算法在实验室可运行”走向“装备在生产现场可持续运行”的必要中介。其核心不是单次部署，而是定义研发、验证、准入、运营和迭代各环节的交付物及责任主体。建议对机器人能力建立任务级版本档案，使作业范围、环境限制、测试证据和升级记录同步更新。

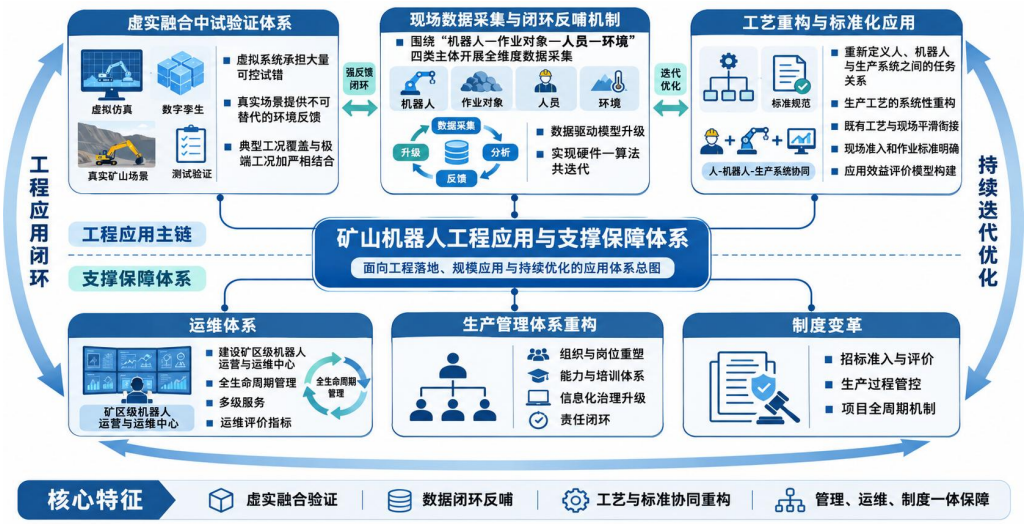


图 3-1 矿山机器人工程应用与支撑保障体系

3.1.1 一虚一实的落地逻辑

“虚”是可更新的矿山世界模型与训练仿真环境，“实”是经过安全设计与合规验证的机器人及其生产作业现场。两者通过任务场景、数据采样、参数校准和性能评价持续联动；虚拟系统承担大量可控试错，真实场景提供不可替代的环境反馈。应用部署坚持安全优先、价值导向、循序渐进和能力可回退。

3.1.2 从中试到生产的路径

建议按需求识别、场景遴选、联合方案设计、实验室验证、中试验证、现场试运行、生产验收、规模复制八个环节推进。每阶段设置“进入条件—测试计划—判定依据—退出机制”，特别关注人员隔离、紧急制动、通信故障、恶劣工况和工艺质量。试点成功不仅意味着机器人能完成动作，也意味着矿山能够独立组织日常调度、维护和事故应对。

3.1.3 四大应用支撑体系

中试体系回答“能否稳定、安全地使用”；数采体系回答“如何依据真实问题升级”；运维体系回答“如何长期保持可用”；管理体系回答“由谁采购、调度、审核、负责与考核”。四者共享一致的设备台账、场景编号、风险等级和指标口径，并通过生产运营平台汇总形成闭环。

3.1.4 场景优先级原则

优先选择人员暴露风险高、工艺标准明确、空间边界相对可控、数据容易采集且收益可测的任务。对高耦合、高灾害风险作业，可先实现远程化和监督自主，再随着测试证据积累逐步提升自主程度。

3.2 虚实融合中试验证体系

3.2.1 中试基地定位

中试基地是实验室创新与矿山实地生产之间的工程化缓冲区，应具备模拟巷道、坡道、障碍、湿滑地面、粉尘低照及作业载荷等功能，并配置软硬件在环系统、远程接管台和独立安全监护。可采用代表性场景的等比例复刻与参数化工况模拟，不能以局部 1:1 复刻替代真实矿井全部危险因素的评估。

3.2.2 三级验证体系

实验室级聚焦功能正确性、关键部件与故障注入；中试级聚焦多工况下的连续运行、集成接口与安全联锁；现场级聚焦生产工艺、人员交互、长期稳定性和应急处置。不同级别均设置测试用例、测试边界、独立记录与审查签字。对于法规要求的检验、认证及矿用产品安全标志，应按相关制度另行办理，不得以中试报告替代。

3.2.3 分级准入指标

建议建立安全性、可靠性、适应性、效率、工艺质量和可维护性六维评价。可记录危险区误入次数、急停响应、运行任务成功率、平均无故障时间、故障恢复时间、作业质量合格率和人工干预频次。具体阈值应由适用法规标准、风险评估和矿山工况联合确定，白皮书不设置跨场景统一强制阈值。

表 3-1 分级准入评价（研究建议）

维度	指标
安全性	S1 危险区误入次数（次 / 千小时）、S2 急停响应时间（s）、S3 安全联锁与急停回路有效率、S4 安全防护配置符合项、S5 人员伤害事故
可靠性	R1 运行任务成功率、R2 平均无故障时间 MTBF、R3 非计划停机率
适应性	A1 工况适应覆盖项（断面 / 坡度 / 温湿度 / 粉尘 / 瓦斯 / 积水）、A2 场景切换部署时间、A3 极端工况连续运行通过率
效率	E1 台班作业量达成率、E2 有效作业时间占比、E3 人工干预频次（次 / 班）
工艺质量	Q1 作业质量合格率、Q2 质量波动离散度、Q3 返工 / 复检率
可维护性	M1 故障恢复时间 MTTR、M2 首次修复率 / 备件可得性、M3 预防性维护达成率、M4 故障自诊断覆盖率

3.2.4 试点与政策衔接

2026 年矿山机器人应用验证试点要求重点验证安全性、可靠性、稳定性、实用性、复杂环境适应性及协同作业能力，并提出“应用验证—效果反馈—改进完善—再验证”机制。企业可据此建立持续验证台账，将第三方测试、矿山生产记录与厂商整改结果串联。

中试验证应采用典型工况覆盖与极端工况加严相结合的策略。前者关注平均作业效率、连续运行与工艺符合性，后者覆盖通讯中断、传感器遮挡、供电异常、人员误入和紧急停机等情况。测试报告应明确样本数量、环境条件、统计口径和适用范围，防止将中试通过结果误用于未经验证的矿种与场景。

表 3-2 建议采用的分级验证路径（研究建议）

验证层级	主要验证内容	典型交付证据
实验室与试验装置	基本功能、部件性能、控制安全	测试记录与风险分析
中试与场景复现	连续运行、极端环境、软硬件在环	试验报告、故障清单、整改闭环
现场运行验证	工艺衔接、稳定性、效率和现场安全	运行日志、验收报告、责任确认

3.3 现场数据采集与闭环反哺机制

3.3.1 全维度现场数据

围绕“机器人—作业对象—人员—环境”四类主体开展数据采集，包括位置姿态、电机电流、关节扭矩、温升、气体浓度、图像点云、接触力、执行工艺参数、报警和人工接管记录。按照安全等级和网络能力配置采样频率，重要安全事件保留前后文；视频与人员信息采集需符合数据安全及个人信息保护要求。

3.3.2 边缘与云协同

边缘侧负责实时控制、风险报警、缓存和必要的特征提取，云端或矿区中心负责长期存储、训练分析、版本注册及跨设备对比。网络中断时必须保证本地安全控制不失效，并通过断点续传恢复非实时数据。对高价值训练数据建立质量评分，区分正常样本、临界失效样本和稀有危险事件。

3.3.3 数据驱动模型升级

现场失败案例经过归因后分别进入感知模型修正、世界模型校准、控制参数优化或工艺规则完善；再通过复现测试验证修复效果。将“回流数据量”与“有效解决问题数”分开评价，避免只追求采集规模。每次版本发布提供变更说明、适用场景、回归测试结果和回退方案。

3.3.4 硬件—算法共迭代

若误识别来自传感遮挡，应同时评估算法鲁棒性与传感器安装位；若打滑来自结构和载荷分配，应同步修正履带花纹、重心与牵引控制。建立由矿山工艺人员、机器人机械与算法团队共同参加的故障复盘会，使本体、软件及工艺协同演进。

高价值数据不仅包括成功作业轨迹，也包括失败事件、人工干预、设备过载、误报漏报和环境突变等长尾样本。通过事件触发采集、时间同步、数据质量分级和安全脱敏，可形成可复现的训练集和回归测试集。模型更新应经过离线验证、灰度部署、现场观察和必要时回滚，避免在线学习对安全关键行为产生不可控影响。

3.4 生产端：工艺重构与标准化应用

工艺重构的核心在于重新定义人、机器人与生产系统之间的任务关系。机器人承担可标准化、可验证的实体作业，人负责目标设定、风险监督、异常决策和维护保障。对多机协同系统，应将工序节拍、物料缓冲、通行冲突和安全隔离纳入统一优化，避免在局部设备效率提升的同时形成新的全流程瓶颈。

3.4.1 生产工艺的系统性重构

以机器人作业单元为核心重新定义工序边界，将原“人工主导、装备辅助”逐步调整为“机器人执行、人员监督与异常接管”。针对掘进—支护—运输等链条建立节拍平衡与资源共享机制；可在安全隔离和工序条件满足时采用并行化组织，但不能为追求并行而弱化支护时序、设备互锁与通风安全要求。组织方式由单一工种班组转向机器人作业群、远程调度和专业保障相结合。

3.4.2 既有工艺与现场平滑衔接

机器人接入必须保持或提高采掘参数、支护质量、运送节拍、选矿工艺指标等关键工艺输出。优先通过本体尺寸、路径、感知和接口调整适配既有巷道断面、管线、硐室及设备布置；必要的现场改造要纳入安全设计审查。采用标准接口对接生产执行、调度指挥、人员定位及安全监控系统，避免形成信息孤岛。

3.4.3 现场准入和作业标准

应用标准建议分为入井准入、安装验收、过程作业、人机协同及异常处置五类。入井前核对适用资格认证、防爆与防护要求；作业中明确速度、力矩、姿态、行进区域与质量检验节点；人机同场时明确隔离区、接近检测、人工授权、紧急停机和责任边界。所有标准均应与现行法规及矿山经批准的规程一致。

3.4.4 应用效益评价模型

建立安全、效率、质量、经济四维评价：安全看危险岗位替代、人员暴露工时和高风险事件；效率看单位工序用时、设备利用率和连续作业时长；质量看参数合格率、返工率和稳定性；经济看全生命周期成本、故障损失及投资回收期。比较时统一产量、班次、地质和作业条件，以基准期对照与持续运行数据为依据，不使用未经验证的提升百分比。

表 3-3 矿山机器人应用成效评价指标建议

评价维度	建议指标	测量原则
安全性	危险岗位暴露时间、联锁触发、险情处置闭环率	按场景和暴露基准口径比较
生产效率	任务成功率、节拍、有效作业时间占比	采用连续统计周期
作业质量	工艺参数合格率、返工率、质量波动	与现有工艺标准一致
经济性	全生命周期成本、平均修复时间、投资回收期	纳入维护及停机成本

3.5 运维体系：全域运维与远程管控中心

矿山机器人运维既具有传统机电设备的物理失效特征，也涉及软件模型、传感器校准和数据管道等新型失效模式。需建立机械、电气、控制、算法、通信五类故障编码与处置流程，将设备健康指标和任务性能指标关联分析。远程诊断与升级应实行身份认证、权限控制、版本锁定和操作审计。

3.5.1 运维中心功能

建设矿区级机器人运营与运维中心，统一监控在线率、定位状态、作业任务、核心部件健康、异常报警和通信质量。远程操作席提供分级授权、视频与传感融合视图、接管记录和工单联动；关键异常的处置遵循先安全隔离、再故障定位、最后恢复作业的顺序。远程接管链路需对延迟、断线和权限冲突实施验证。

3.5.2 全生命周期管理

设备从选型、安装、使用、校验、检维修、软件升级到退役都要建立数字档案。采用寿命预测与状态检修相结合的维护策略，重点关注密封件、履带轮组、执行机构、电池、传感器标定与安全关键部件。检维修作业执行停机断电、能量隔离和工作许可要求；涉及防爆结构的维修应符合适用管理规定。

3.5.3 多级服务体系

现场运维小组承担每日点检、耗材替换和简单故障排除；区域中心承担复杂诊断、备件共享与现场培训；制造商后台提供软件缺陷修复、结构改进与远程专家支持。通过服务级别协议明确响应时间、修复窗口、备件保障、数据权属、知识转移与安全责任，不应把关键安全决策完全外包给远程厂商。

3.5.4 运维评价指标

持续监测可用率、计划外停机时长、平均故障间隔、平均修复时间、重复故障率、软件更新成功率和运维成本/任务量。建立风险分级故障库，对重复高危缺陷启动停用与整改机制。

3.6 管理变革：生产管理体系重构

管理体系调整应坚持安全生产责任不转移的原则。即使机器人承担了原有人工作业，也必须明确设备管理者、任务批准者、远程操作员、现场监护者与技术服务商的职责边界。岗位转型应覆盖异常识别、应急撤离、系统日志分析、数据标注和设备可靠性评估等能力，并与技能考核和持续培训相衔接。

3.6.1 组织与岗位重塑

具身智能规模应用后，岗位重点从近场重复作业转向生产调度、机器人远程操作、算法与数据治理、现场维修、工艺工程和安全管理。矿山应围绕“人机混合作业班组”明确指挥链、作业许可、设备责任人和应急接管人，确保无人值守场景仍有明确的安全管理主体。

3.6.2 能力与培训体系

建立岗位分级能力模型，要求调度人员理解工艺顺序和作业区域冲突，操作人员掌握授权边界与远程接管，运维人员掌握故障诊断与矿用安全检修，管理人员具备数据与模型变更审核

能力。采用理论考核、模拟演练和现场实操相结合的方式，定期复训通信中断、气体报警、机器人失控等高风险场景。

3.6.3 信息化治理升级

机器人管理平台与矿山调度、设备资产、生产执行及安全系统对接，统一设备身份、任务编码、事件时间线和报表口径。建立生产数据、设备数据和人员数据的最小权限访问机制与分级备份；重要调度操作可追责，模型版本与生产绩效能够对应追溯。

3.6.4 责任闭环

落实矿山企业对现场生产安全的主体责任，厂商对交付产品、技术服务与约定缺陷处置承担相应责任，第三方按职责开展检验评价。形成“计划发布—作业授权—执行监控—异常处置—质量验收—责任复盘”的管理闭环。

3.7 制度变革：采购招标与过程管控

采购机制需要从设备参数符合性评价转向全生命周期能力评价。除采购价格外，还应考察作业场景适配度、可用率、任务成功率、平均修复时间、数据可移植性、升级安全性及供应商响应能力。对于“能力订阅”或服务化交付模式，合同应细化安全责任、数据权属、停机损失和服务退出机制。

3.7.1 从买设备到采购能力

传统只按单台参数和最低采购价评标的方式难以反映机器人长期价值。建议引入场景任务完成能力、安全合规证据、设备稳定性、接口开放程度、维修响应及全生命周期成本等维度，允许在依法合规前提下探索设备采购、运维服务和按服务绩效付费等模式。应明确验收与付款节点，避免单纯以演示成功作为最终交付条件。

3.7.2 招标准入与评价

招标文件应列明场景工况、风险等级、工艺质量、矿用资格证明、数据接口、网络安全、知识产权、培训和维保要求，杜绝以非必要的品牌专有参数限制竞争。技术评分建议以真实场景试验和可追溯证据为基础，识别产品宣传指标与矿山实测指标的差异。

3.7.3 生产过程管控

把机器人任务纳入矿山生产计划和安全管理体系，明确工作区域占用、设备交接、生产质量抽检、人机隔离、应急救援和事故上报机制。安全关键软件升级、功能扩展或作业区域变更应触发变更管理与重新验证，不得作为普通软件推送直接进入生产。

3.7.4 项目全周期机制

项目经历方案论证、风险评估、部署调试、中试/现场验证、阶段验收、持续运维和复盘迭代。合同应明确数据归属、模型训练使用授权、停机责任、保险安排和退出移交。形成可复制的合同模板、评价规范和项目档案，有助于降低跨矿区推广成本。

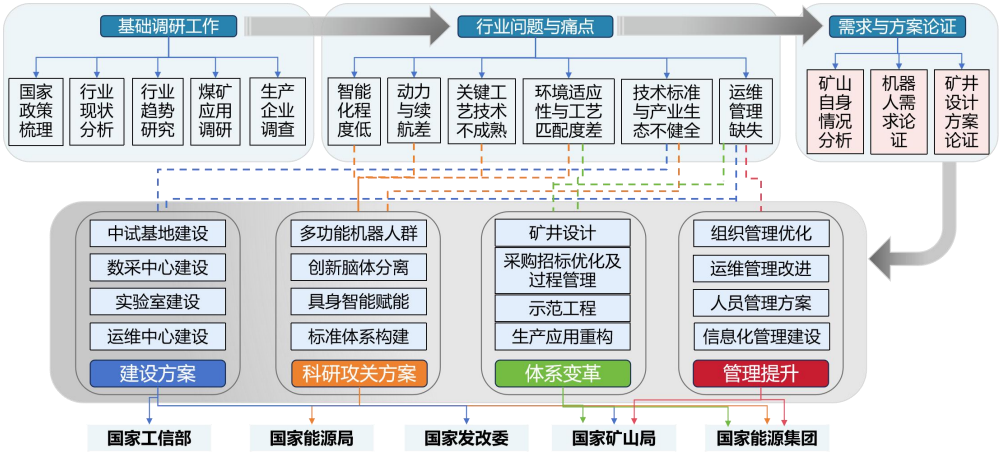


图 3-2 矿山具身智能机器人应用范式重构逻辑

第四章 发展趋势与总结

随着多模态基础模型、机器人学习和工业数字孪生技术持续发展，矿山具身智能正由单装备智能迈向跨设备、跨工序的系统协同。然而，矿山领域的技术成熟度必须由长期运行、安全证据与生产价值共同检验。本章从技术、产业与生态三个维度讨论未来方向，并对矿山具身智能体系建设的原则和路径作出总结。

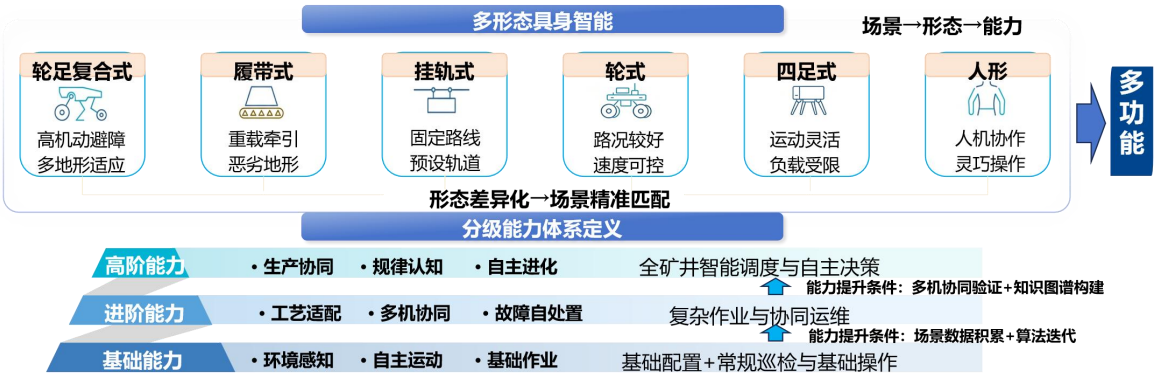


图 4-1 未来矿山机器人具身智能形态

4.1 行业发展趋势与展望

未来一段时期，矿山具身智能更可能首先在边界清晰、任务重复度高、危险暴露显著的场景形成规模化应用，再逐步向复杂接触作业和多机系统协同拓展。技术路线将呈现专用装备与通用智能底座并行、确定性控制与学习型决策融合的发展格局。规模推广的基础仍是稳定、安全、经济的长期运行证据。

4.1.1 技术演进方向

矿山机器人将从单点感知与固定流程执行，走向多模态融合、可解释任务规划、工艺约束下的自主操作和群体协同。通用具身模型提供底层能力，矿山垂类数据、环境物理模型与安全规则决定应用上限。短中期更可行的路径是“通用能力平台+场景技能包+独立安全系统”，而非在所有高风险场景直接追求完全自主。

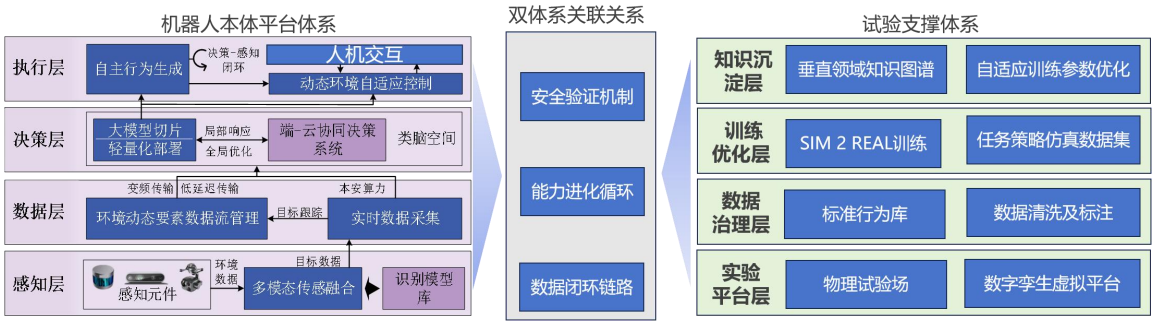


图 4-2 矿山具身智能机器人本体-试验关联关系

4.1.2 产业化方向

设备结构、传感模块、任务接口、数据格式和验收流程标准化，将支持模块化生产、区域维保和跨矿区迁移。产业竞争重点预计从单台机器性能延伸至任务成功率、长期可靠性、运维服务和持续进化效率。验证平台、试验数据集和第三方评测机构将成为产业公共基础设施。

4.1.3 协同生态建设

建议由矿山企业提出高价值真实场景，由装备企业提供工程产品，由高校科研机构攻关关键算法与机理，由检测评价机构形成独立证据，由主管部门和标准组织推动规范化建设。通过联合中试基地、标准工作组、共享基准场景及人才培训体系，构建产学研用相互促进的合作机制。



图 4-3 矿山机器人产业协同生态建设

4.1.4 长期价值与实施原则

长期价值首先体现在危险暴露降低和本质安全能力提升，其次是生产节拍稳定、停机减少、质量一致性提高及人才结构升级。行业推广须坚持因矿制宜、循证评估和安全优先，避免以概念宣传替代长期运行数据，也避免用短期省人指标掩盖运维成本与新增风险。

4.2 结语：共建矿山具身智能新生态

4.2.1 从必然方向到可实施工程

矿山具身智能是矿山智能化向更高自主作业能力演进的重要方向，但其落地不是简单叠加大模型和机器人本体，而是涉及装备、地质、工艺、控制、安全、组织与制度的系统工程。技术成熟度、场景风险和法规准入共同决定自主作业边界；任何阶段均应为必要的人工监督和应急干预保留可靠机制。

4.2.2 双轮驱动的核心路线

技术侧以材料、传感、模块化本体、控制、世界模型、仿真强化学习及垂类数据模型构成能力体系；应用侧以中试、现场数据回流、生产工艺重构、全生命周期运维、组织管理和采购制度构成保障体系。只有把“研发有效性”与“生产长期可用性”同时纳入评估，才能将原型机转化为稳定生产力。

4.2.3 共建倡议

倡议矿山企业开放可控、合规的真实验证场景；装备企业提供可靠、可维修、可验证的产品；科研机构加强基础研究与安全可信算法；标准与检测机构推动一致的评价方法；行业各方依法合规共享非敏感共性数据、共建中试与人才体系。以能够复核的安全、效率、质量和经济证据推动规模化应用，让技术创新真正服务于矿山本质安全和高质量发展。

4.2.4 编制说明与参考依据

本白皮书为技术与应用体系研究稿，所列架构、建设流程和指标框架属于建议性内容，不替代法律法规、强制性标准及矿山专项安全设计。主要政策依据包括：〔1〕《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》（矿安〔2024〕42 号，2024 年）；〔2〕《矿山智能机器人重点研发目录》（国家矿山安全监察局公告 2025 年第 3 号）；〔3〕《关于开展矿山机器人应用验证试点工作的通知》（矿安综〔2026〕7 号，2026 年）等。

实现矿山具身智能的持续发展，有赖于需求侧、科研侧、装备侧与监管标准侧形成协同机制。建议围绕典型任务建设共享测试基准和标准化接口，在保障安全与数据合规的前提下推进场景数据、仿真模型及非敏感失效案例的合作利用，以可验证的技术进步推动高危岗位替代与矿山生产方式转型。