

# 智能化矿山运输机械路径规划与协同作业机制

崔宏旺

太钢集团有限公司矿业分公司 山西太原 030024

**摘要：**随着信息技术的不断发展，煤矿智能管控已经成为提高煤矿安全生产水平和管理效率的重要手段。文章聚焦智能化矿山运输机械路径规划与协同作业机制，提出针对性优化策略。路径规划上，采用多智能体强化学习算法，助运输机械自主优化路径以适配动态环境；融合多源数据构建感知系统，结合相关算法实现精准规划；搭建动态规划与实时调度系统，依生产、设备及环境变化调整方案。协同作业机制方面，以先进技术构建稳定设备通信网络；借智能算法建立决策模型优化任务分配；制定多维度协同标准，保障设备兼容与作业规范，推动矿山高效、安全智能化运营。

**关键词：**智能化矿山；运输机械；路径规划；协同作业机制

传统矿山运输机械作业常面临路径固定、设备协同不畅等问题，导致效率低、安全风险高，难以适配矿山智能化发展需求。运输机械作为矿山生产关键环节，其路径规划合理性与协同作业高效性，直接影响矿山整体效益。因此，深入研究智能化矿山运输机械路径规划与协同作业机制，探索优化策略，对推动矿山提质增效、保障安全生产，实现矿山智能化转型意义重大。

## 一、智能化矿山运输机械路径规划优化策略

### （一）基于多智能体强化学习的路径规划算法

在智能化矿山运输系统中，基于多智能体强化学习（Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL）的路径规划算法，通过构建“个体自主决策-群体协同优化”的双层控制架构，实现了对复杂运输场景的精准适配。该算法的核心逻辑在于，将每台矿山运输机械（如露天矿用自卸车、地下矿电机车）抽象为具备独立感知、决策与执行能力的智能体（Agent），同时通过多智能体通信协议与全局reward（奖励）机制，建立智能体间的协同交互关系，最终达成“局部最优服从全局最优”的路径规划目标。

从技术实现层面来看，该算法通过三个核心环节应对矿山环境的复杂性：

首先，在智能体感知与建模阶段，每个运输机械智能体均搭载激光雷达、毫米波雷达、高清摄像头及惯性测量单元（IMU）等多模态传感器，实时采集矿山道路的地形坡度、路面平整度、障碍物分布（如落石、临时施工区域）及其他运输机械的位置、速度、航向角等动态信息。通过传感器数据预处理与特征融合技术，智能

体可构建局部环境的实时状态空间（State Space），为决策提供精准输入——例如，露天矿智能体可通过激光雷达点云数据识别道路积水区域，地下矿智能体可通过毫米波雷达感知巷道内的人员或小型设备，避免传统路径规划中“静态地图与动态环境脱节”的问题。其次，在环境交互与策略学习阶段，算法采用“试错-反馈-优化”的强化学习机制，让智能体在与矿山动态环境的持续交互中迭代优化路径策略。具体而言，系统为智能体设定多层次奖励函数：基础层奖励包括“行驶距离最短化”“能耗最低化”“行驶时间最小化”等核心指标，例如当智能体选择更短路径完成运输任务时，可获得正向奖励；约束层奖励则聚焦安全与协同目标，如“避免与其他智能体碰撞”“不偏离道路边界”“配合装载设备作业节奏”等，若智能体出现超速、占道或等待时间过长等情况，则会触发惩罚机制（负向奖励）。

### （二）融合多源数据的环境感知与路径规划系统

为更连贯地展现融合多源数据的环境感知与路径规划系统的运作逻辑，我将摒弃分点形式，以系统工作流程为主线，把设备协同、数据处理、算法结合及动态调整等内容串联起来，形成完整且流畅的扩写内容。

在智能化矿山运输场景中，融合多源数据的环境感知与路径规划系统是保障运输机械安全、高效行驶的核心中枢，它打破了单一传感器在感知范围、精度及环境适应性上的局限，构建起一套从数据采集到路径输出的全流程协同体系。该系统首先通过科学部署激光雷达、高清摄像头、GPS等多种感知设备实现多源数据的全面

采集，其中激光雷达凭借高频激光扫描技术，能够生成百万级精度达厘米级的三维点云数据，精准捕捉矿山地形的坡度变化、路面起伏情况，以及落石、废弃设备等障碍物的三维坐标与轮廓信息，即便在露天矿的粉尘、薄雾环境或地下矿的无光照场景中，也能清晰还原复杂地形与空间布局；高清摄像头则聚焦于环境的视觉特征采集，通过捕捉道路纹理、交通标识（如限速牌、避让标识）以及行人、其他车辆等障碍物的图像信息，借助深度学习算法实现对环境的语义化理解，比如在白天光照充足时识别道路积水反光特征，夜间或地下矿无光源时通过红外摄像头的热成像技术区分活体生物与无生命障碍物，有效弥补激光雷达仅能识别几何形态、无法判断物体属性的不足；GPS则主要负责获取运输机械的绝对位置信息，包括经纬度与海拔，为路径规划提供基础的位置锚点，不过考虑到矿山环境中可能存在的卫星信号遮挡问题，系统还会结合其他辅助定位技术，进一步提升定位的稳定性与精度。

### （三）动态路径规划与实时调度系统

为充分展现动态路径规划与实时调度系统在矿山动态场景中的核心作用，我将以系统的“实时感知-动态决策-闭环优化”逻辑为主线，结合矿山生产实际场景补充监测维度、技术支撑与调度细节，让内容更具场景感与技术深度，且保持段落式表达的连贯性<sup>[1]</sup>。

在智能化矿山运输体系中，动态路径规划与实时调度系统是衔接环境感知、路径计算与实际生产需求的“动态中枢”，它打破了传统静态调度“按计划执行、难应变突发”的局限，以“实时响应、全局最优”为核心目标，构建起与矿山生产节奏深度耦合的调度体系。该系统首先通过全域感知网络实现多维度信息的实时采集，其监测范围不仅覆盖矿山生产核心环节——如采区的矿石实时产量（通过皮带秤、采场称重传感器获取）、破碎站的处理能力与待料库存、卸载点的仓储容量，还精准捕捉每台运输机械的动态状态，包括实时位置（依托GPS/INS组合定位）、当前负载（通过车载称重传感器）、剩余油耗、发动机工况及故障预警信息，同时同步接入环境变化数据，如道路实时拥堵情况（通过道路旁的毫米波雷达或视频监控分析）、突发障碍物（如落石、临时施工区域）及极端天气（暴雨、大风）对通行的影响，这些数据通过物联网（IoT）终端与边缘计算节点高速传输至系统核心算力单元，确保信息延迟控制在秒级以内，为动态决策奠定实时数据基础。

## 二、智能化矿山运输机械协同作业机制优化策略

### （一）构建稳定可靠的设备通信网络

在智能化矿山协同作业体系中，设备通信网络是连接运输机械、装载设备、调度中心及环境感知系统的“神经网络”，其稳定性与传输效率直接决定协同作业的实时性与准确性。针对矿山露天与地下场景的差异化环境特征，需通过“场景化技术选型-针对性抗干扰设计-标准化协议统一”的三层架构，构建兼具高速率、低时延、高冗余的通信网络，彻底解决传统矿山“信号断连、数据延迟、设备孤岛”的通信痛点，为多设备协同作业提供持续可靠的数据传输支撑<sup>[2]</sup>。

从通信技术的场景化选型来看，需结合矿山不同作业环境的传输需求与信号特性，采用“5G+工业以太网”的混合组网方案：在露天矿山场景中，由于作业范围广（通常覆盖数平方公里至数十平方公里）、设备移动性强（如自卸车、挖掘机需在采区与破碎站间频繁往返），优先部署5G独立组网（SA），通过在采区制高点、破碎站周边、运输主干道沿线部署5G宏基站，实现覆盖半径1-3公里的广域通信，其毫秒级时延（空口时延 $\leq 10\text{ms}$ ）可满足运输机械与调度中心的实时指令交互，10Gbps级峰值速率能支撑激光雷达点云、高清摄像头图像等大容量数据的实时传输——例如，当露天矿自卸车行驶至边坡区域时，可通过5G网络将实时采集的地形数据与车辆状态信息同步至调度中心，调度中心结合多车数据快速生成协同避让指令。而在地下矿山场景中，由于巷道狭窄、岩石遮挡严重、电磁环境复杂，无线信号衰减快，需以工业以太网（如Profinet、EtherNet/IP）为核心构建有线骨干网，通过在巷道顶部铺设光纤或屏蔽双绞线，连接各作业面的交换机与接入点，同时在长距离巷道（超过500米）或岔路口部署无线AP（接入点），实现“有线骨干+无线接入”的混合覆盖，工业以太网的确定性时延（ $\leq 1\text{ms}$ ）与高可靠性（链路冗余设计），可保障地下矿电机车、铲运机与井底车场调度系统的稳定通信，避免因无线信号中断导致的调度失效。此外，针对矿山部分临时作业区域（如临时破碎点、应急救援区域），还可部署便携式5G微基站或卫星通信终端，实现通信网络的灵活扩展与应急补盲。

### （二）基于智能算法的协同决策与任务分配模型

在智能化矿山多设备协同作业体系中，基于智能算法的协同决策与任务分配模型是实现“生产需求-设备能力-资源效率”动态匹配的核心引擎。该模型突破传

统人工调度“依赖经验、响应滞后、全局优化不足”的局限，以矿山实时生产数据为输入，以人工智能算法为求解核心，构建“多目标优化-多约束适配-动态迭代更新”的决策框架，综合平衡生产效率、设备负载、能耗成本等目标，实现运输任务与设备资源的最优配置，为矿山运输环节的高效协同提供科学决策支撑<sup>[3]</sup>。

从模型的核心构建逻辑来看，其首要任务是建立覆盖“生产任务-设备状态-环境条件”的多维度输入体系，确保决策依据的全面性与实时性。在生产任务维度，模型需实时接入矿山生产计划数据，包括各采区的矿石计划产量、品位要求、卸载点（如破碎站、选矿厂）的接收能力与库存状态，以及紧急任务优先级（如抢险物资运输、故障设备转运）；在设备状态维度，通过前文构建的设备通信网络，同步获取每台运输机械（自卸车、电机车等）、装载设备（挖掘机、铲运机等）的实时位置、当前负载、剩余能耗（燃油/电量）、设备健康状态（如发动机工况、轮胎磨损程度）及历史作业数据（如单位时间运输量、故障率）；在环境条件维度，关联多源数据环境感知系统的输出，将道路拥堵情况、天气影响（如暴雨导致路面通行效率下降）、临时施工区域等动态因素纳入决策变量。这些多维度数据通过标准化接口接入模型数据库，形成实时更新的“决策信息池”，为智能算法求解提供精准输入。

### （三）制定统一的协同作业标准与规范

在智能化矿山建设进程中，统一的协同作业标准与规范是打破“技术壁垒、设备孤岛、流程混乱”的顶层设计，更是保障运输机械与多设备高效协同的“通用语言”。当前，由于缺乏行业统一标准，不同矿山企业在设备选型、系统搭建、作业流程上各自为战——例如甲厂家的自卸车采用私有通信协议，无法与乙厂家的铲运机直接交互；露天矿与地下矿的协同安全阈值无统一界定，导致技术复用成本高、协同效率低。为此，需构建“多元主体协同制定-全场景覆盖的标准框架-闭环落地保障”体系，由行业协会（如中国矿业联合会、中国煤炭工业协会）、国家矿山安全监察机构牵头，联合矿山龙头企业（如国家能源集团、山东黄金集团）、设备制造商（如徐工集团、三一重工）及科研院所（如中国矿业大学、中南大学）形成标准制定联盟，结合矿山生产实

际与技术发展趋势，制定兼具“通用性、前瞻性、实操性”的《智能化矿山运输机械协同作业标准体系》，为行业智能化转型提供统一技术遵循<sup>[4]</sup>。

为确保标准规范的落地执行，还需建立“认证-培训-监督-更新”的闭环保障机制：在认证环节，由第三方机构（如中国矿业联合会认证中心）对设备、系统进行标准符合性检测，通过认证的产品方可进入矿山市场；在培训环节，要求矿山企业定期组织设备操作人员、维护人员参加标准培训，考核合格后方可上岗；在监督环节，国家矿山安全监察机构将标准执行情况纳入矿山安全生产检查内容，对未达标企业责令限期整改；在更新环节，标准制定联盟需每2-3年根据技术发展（如AI、6G技术的应用）与矿山实际需求修订标准内容，确保标准的前瞻性与适用性。

### 结语

智能化矿山运输机械路径规划与协同作业机制的优化，是矿山行业突破效率瓶颈、提升安全水平的关键。路径规划三类策略，从算法、感知、调度维度，实现运输路径动态适配与精准规划；协同作业三类策略，从通信、决策、标准层面，保障设备高效联动与规范作业。二者协同作用，可显著降低矿山运营成本、提升生产效率与安全系数。未来，随着AI、物联网等技术深化应用，需持续完善机制，推动矿山运输向更智能、更绿色、更高效的方向发展，为矿山行业智能化转型提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 王飞, 刘孝军, 蔡东, 赵格兰, 贺海波. 智能化矿山大数据研究现状[J]. 煤矿机械, 2024, 45(12): 200-202.
- [2] 于涛. 智能化煤矿数据治理技术研究与应用[J]. 中国煤炭, 2024, 50(11): 96-101.
- [3] 侯凯钟, 阳升, 郭建波, 孔繁龙, 李旭东. 智能化矿山数据中台关键技术研究[J]. 能源与节能, 2024, (10): 67-71.
- [4] 樊子恒. 智能化矿山数据中台构建与关键技术研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(09): 217-224.