

Research on the Construction of a Safety Risk Prevention and Control System for Open-Pit Coal Mine Transportation Operations Driven by Intelligent Technologies

Shida Wang Weijian Bao Lijia Wang

Zhalute Banner Zhahalunuoer Coal Industry Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia, 029200, China

Abstract

The high risks associated with open-pit coal mine transportation lead to frequent accidents. This paper applies unmanned driving, Internet of Things, big data analysis, and artificial intelligence technologies to construct a safety risk prevention and control system covering the full elements of "human-machine-environment-management." By deconstructing typical risks such as vehicle collisions and rollovers, it elucidates the application mechanisms and pathways of intelligent technologies in real-time risk identification, assessment, early-warning, and mitigation. It innovatively proposes a hierarchical collaborative prevention and control architecture based on the "perception-analysis-decision-execution" closed loop. Supported by practical case studies from a large open-pit mine, quantitative analysis verifies that this system significantly reduces accident rates and enhances the intrinsic safety of transportation, providing theoretical support and a technical paradigm for the intelligent safety development of mines.

Keywords

Open-pit coal mine; Transportation safety; Risk prevention and control; Intelligent technologies; Unmanned driving; Risk early-warning; Big data analysis

智能化技术驱动下露天煤矿运输作业安全风险防控体系构建研究

王是达 包威健 王立佳

扎鲁特旗扎哈淖尔煤业有限公司, 中国·内蒙古 通辽 029200

摘要

露天煤矿运输高风险导致事故频发。本文应用无人驾驶、物联网、大数据分析和人工智能等技术, 构建覆盖“人-机-环-管”全要素的安全风险防控体系。通过解构车辆碰撞、侧翻等典型风险, 阐释智能技术在风险实时识别、评估、预警及处置中的应用机理与路径, 创新提出基于“感知-分析-决策-执行”闭环的层次化协同防控架构。依托某大型露天矿实践案例, 定量分析验证该体系显著降低了事故发生率, 提升了运输本质安全, 为矿山智能化安全建设提供了理论支撑与技术范式。

关键词

露天煤矿; 运输安全; 风险防控; 智能化技术; 无人驾驶; 风险预警; 大数据分析

1 引言

当前, 我国露天煤矿开采规模持续扩大、深度不断增加, 重型卡车运输作为物料转运核心方式, 安全运行面临严峻挑战。运输线路拓扑复杂、作业环境恶劣(如扬尘、大坡度、夜间作业)及人-车-设备混行等因素交织, 导致运输事故在矿山事故总量中占比长期居高不下。传统依赖人工经验的安全管理模式, 在动态复杂环境下暴露出响应滞后、监管盲

区多、预防能力弱等显著瓶颈。随着工业 4.0 深化与智能矿山建设推进, 物联网、5G、AI、高等级自动驾驶等智能技术, 为解决露天矿运输安全痛点提供颠覆性路径。本研究立足智能技术深度融合背景, 系统探索运输作业风险防控体系构建方法, 旨在突破传统被动响应模式, 实现安全管理向数据驱动、智能决策、主动预防的根本性跃迁。

2 露天煤矿运输作业安全风险特征与致因机理

露天矿运输系统具有动态时变性、空间复杂性及系统开放性三大核心特征, 风险呈现多源性、耦合性特点。基于事故致因理论及现场调研, 主要风险类型如下:

车辆运行风险: 包括超速行驶(尤其坡道、弯道)、

【作者简介】王是达(1989-), 男, 中国内蒙古通辽人, 本科, 工程师, 注册安全工程师, 从事露天煤矿安全生产管理研究。

驾驶员疲劳驾驶（长时作业所致）、车流密集区违规变道，以及制动系统突发失效、车辆碰撞（含追尾、侧向及交叉碰撞）、急弯或大坡度路段因速度/载荷控制不当引发的侧翻。

环境感知风险：突出表现为大型运输设备（如宽体自卸车、电铲）视觉盲区引发人车碰撞；低能见度工况（夜间照明不足、雨雾、高浓度粉尘）导致驾驶员判断能力下降；路面坑洼、积水湿滑、边坡局部塌陷等道路异常引发车辆失控。

人因管理风险：涵盖驾驶员技能不足（操作不熟、应急知识欠缺）、习惯性违章（如不系安全带、违规使用通讯设备）、应急处置不当；调度中心指令错误（路径规划不合理、冲突点预警失误）；安全监管存在时间与空间盲区（如偏远运输支线、交接时段）。

设备维保风险：指车辆关键安全部件（制动、转向系统及轮胎）的潜在故障，因预防性维护不足或故障诊断不及时未被识别，最终在运行中引发恶性事故。

3 智能化技术在运输安全防控中的核心应用架构

3.1 高精度环境感知与全域实时监控

多源异构传感网络构建：在运输卡车集成毫米波雷达（中远距离探测）、激光雷达（高精度三维建模）、多目视觉传感器（色彩与纹理信息捕捉）及超声波传感器（近距离补盲），通过多模态传感器融合算法，实现 360° 无死角环境感知，有效克服单一传感器局限^[1]。

路侧智能监控单元部署：在关键风险节点（如急转弯、陡坡起止点、交叉路口、装/卸料点）布设具备夜视、透雾功能的智能高清摄像头、路侧雷达及微型气象站，实时采集并传输道路表面状态（干湿、平整度）、实时车流密度、气象参数（风速、能见度、降水）等关键环境信息。

高精度定位与轨迹追踪：采用北斗三号/GPS 差分定位技术结合高精度惯性导航单元，实现运输车辆厘米级实时定位与连续轨迹跟踪，误差控制在 ±10cm 以内，为安全监控与调度提供精准空间基准。

应用价值：实现对运动障碍物（人员、车辆、落石）、静态障碍物（堆积物、路障）及道路危险状态（湿滑、塌陷）的毫秒级识别与定位，彻底消除传统视觉盲区带来的安全隐患。

3.2 基于人工智能的自动驾驶与智能决策辅助

露天矿无人驾驶卡车系统（AHS）：在封闭采区或固定运输环线，部署 L4 级无人驾驶卡车车队，通过 V2X 通信实现车-车、车-路、车-云平台实时信息交互，支持车队协同编队（保持安全车距、协同启停），从根本上规避驾驶员疲劳、疏忽或误操作引发的人因事故。

高级驾驶辅助系统（ADAS）集成：在有人驾驶车辆加装 ADAS，核心功能包括：前向碰撞预警（FCW）（基于相对

速度与距离预测碰撞时间）、车道偏离预警（LDW）（视觉识别车道线）、盲区监测（BSD）（雷达监测侧后方）、自适应巡航控制（ACC）（自动调节车速保持安全跟驰）及自动紧急制动（AEB）（碰撞不可避免时主动制动）。

智能动态限速控制：基于高精度地图与实时感知数据，自动识别路段风险等级（弯道曲率、坡度、路面附着系数），动态设定并执行最高安全车速，超速时自动限制动力输出^[2]。

应用价值：机器智能替代或辅助人工决策，可降低碰撞与侧翻事故概率 60%-80%，减轻驾驶员操作负担与心理压力。

3.3 数据驱动的风险智能预警与动态评估

全域风险数据库构建：整合 5-10 年事故数据、维修记录等历史数据，及车辆 CAN 总线数据（车速、油门/刹车开度等）、定位坐标、路侧传感器数据、实时视频流等动态数据，形成覆盖“人-车-路-环”的全息数据仓库。

机器学习风险预测模型开发：应用随机森林、XGBoost 等集成学习算法及 DNN、LSTM 等深度神经网络，训练侧翻风险指数模型（融合车速、载荷、坡度等因子）、碰撞概率模型（融合车间距、相对速度等）、驾驶员行为风险评分模型（基于操作习惯、违规频次）。

实时动态风险评估与可视化：基于 Flink、Spark Streaming 等流式计算引擎，毫秒级评估车辆状态及路段环境风险，生成实时风险热力图与单车评分，通过管控平台、车载终端推送蓝黄橙红四级预警^[3]。

应用价值：实现风险提前 5-30 秒识别预警，推动安全管理从“事后处置”向“事前预防”转型，提升管控前瞻性。

3.4 智能协同调度与全局化管控

全局路径优化算法引擎：基于实时路网状态（拥堵指数、风险等级）、生产任务需求（物料种类、运量、优先级）、设备状态（可用卡车数、位置）等约束，利用强化学习或遗传算法，动态规划全矿卡车最优运输路径，自动规避高风险区域（如边坡下方、地质不稳定区）。

冲突预测与智能避让机制：调度中心基于高精度定位数据，实时计算车辆轨迹，预测潜在冲突点（交叉路口会车、装载点交汇），自动生成避让指令（减速、停车等候、变道建议），通过车联网实时下发至相关车辆。

电子围栏与智能区域管控：基于地理围栏技术，在数字地图设定禁行区（爆破警戒区、检修区）、限速区（弯道、坡顶坡底）、安全缓冲区（人员作业区附近），车辆接近或进入时自动触发车载报警、语音提示甚至强制限速/制动。

应用价值：优化全矿车流分布，减少交通拥堵与交叉冲突（冲突点减少约 40%），提升运输效率（循环时间缩短 15%-25%）与本质安全水平。

3.5 人员状态智能监控与主动防护

驾驶员状态监测系统（DSM）：在驾驶室内安装红外摄像头与生物传感器，实时监测驾驶员面部特征（眼睑开合度

PERCLOS、打哈欠频率)、头部姿态(低头、偏转)、手部位置(是否脱离方向盘),结合方向盘握力、心率变异性(HRV)等生理指标,综合判定疲劳、分心状态及违规行为(吸烟、手持通话)。系统触发三级报警:一级(语音提醒)、二级(座椅震动)、三级(自动减速/停车并上报平台)。

人员智能定位与接近预警:为现场所有作业人员(维修工、安全员、管理人员)配备高精度UWB/BLE定位工牌或手环。当人员接近车辆预设的安全距离(如进入卡车盲区5米范围)或高风险区域(边坡警戒线)时,触发人员端与车辆端的双向声光报警(人员手环震动+闪光,车载系统鸣笛+屏幕警示)。

应用价值:实现对关键人因风险要素(疲劳、分心、违章、位置风险)的主动识别与即时干预,有效阻断“人误”向事故的转化路径。

4 智能化驱动的安全风险防控体系架构设计

基于上述核心技术群的支撑,本研究构建了“四层逻辑架构、三道防控防线”的立体化、闭环式露天煤矿运输安全风险防控体系:

4.1 四层逻辑架构

感知层(数据采集):构建全域多维智能传感网,含车端传感器(雷达、摄像头等)、路侧感知单元(摄像头、气象站等)、人员穿戴设备(定位工牌、生物传感器)。

传输层(数据传输):采用5G专网(uRLLC低时延切片)与工业环网双冗余架构,保障海量数据低延时(<20ms)、高可靠(>99.999%)传输。

平台层(数据处理与决策):构建智能矿山安全管控云平台,集成GIS、BIM、数字孪生技术,核心模块包括多源数据融合、实时风险计算、智能预警决策、全局调度优化、应急指挥及大数据可视化。

应用层(服务交付):开发多角色智能终端,如调度员指挥大屏、驾驶员车载终端、安全员移动APP、管理者决策驾驶舱。

4.2 三道纵深防控防线

事前预防:动态路径规划(避高风险区)、VR安全培训、设备预测性维护、安全准入与资质管理。

事中监控与干预:多通道风险预警推送、ADAS主动干预、调度中心远程制动、电子围栏越界管控。

事后应急与改进:事故定位与应急响应、事故根因分析、PDCA循环优化、风险模型迭代更新。

体系核心机制:以数据驱动决策、算法智能研判、人机高效协同、全流程闭环管理,实现风险“识别-评估-预警-处置-反馈-优化”全生命周期管理。

该体系的核心运行机制强调数据驱动决策(Data-Driven Decision)、算法智能研判(Algorithmic Intelligence)、人

机高效协同(Human-Machine Teaming)、全流程闭环管理(Closed-Loop Control),形成风险“识别-评估-预警-处置-反馈-优化”的完整生命周期管理。

5 结论与展望

本研究构建的智能化露天煤矿运输安全风险防控体系,集成先进环境感知、自动驾驶、大数据分析及多智能体协同管控等技术,形成“感知层-传输层-平台层-应用层”技术底座,设“事前-事中-事后”三道纵深防御机制。体系实现运输全流程(计划-执行-监控-结束)、全要素(人、车、路、环、管)风险的精准识别、动态评估、实时预警与智能干预,提升本质安全水平,推动矿山安全管理数字化、网络化、智能化变革。实证显示其具显著安全效益(事故率大降)、经济效益(效率提升、成本节约)及社会效益(保障人员安全)。

面向未来,为进一步提升该体系的鲁棒性、普适性与可持续性,后续研究应着重关注以下关键方向:

1. 极端恶劣环境下的感知可靠性增强:研究强降雨雾、沙尘暴、冰雪覆盖等极端条件下多传感器(特别是光学传感器)性能退化补偿算法,探索雷达成像、声波探测等替代或增强方案。

2. 多源异构智能装备的系统兼容性:制定露天矿智能装备(不同品牌无人驾驶卡车、ADAS系统、路侧单元)的互联互通标准协议,解决数据格式、通信接口、控制指令的兼容性问题。

3. 网络安全防护体系构建:深入研究工控系统安全(如车载ECU、路侧PLC)、数据传输安全(防窃听、防篡改)、云平台安全(防入侵、防勒索),建立覆盖“端-管-云”的全方位网络安全纵深防御体系。

4. 人机共驾模式的权责界定与伦理规范:深入研究自动驾驶系统(ADS)与人类驾驶员在控制权切换(Handover)过程中的责任边界,制定相关法律法规与技术标准,解决事故责任认定难题。

5. 基于数字孪生(DT)的风险模拟推演:构建高保真露天矿运输数字孪生体,支持复杂场景(设备故障、极端天气、突发事件)下的风险演化模拟与应急预案推演,提升主动防御能力。

通过持续的技术迭代与应用深化,本防控体系有望成为引领全球露天矿山智能化安全发展的标杆范式。

参考文献

- [1] 王国法,刘峰,庞义辉,等.智慧矿山顶层架构及关键技术体系研究[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
- [2] 李首滨,王雷,张晞.露天矿无人驾驶运输系统关键技术研究与实践[J].煤炭科学技术,2021,49(8):200-208.
- [3] 国家能源集团.露天煤矿无人驾驶运输系统技术规范:NEG-STM-001-2023[S].北京:国家能源集团,2023.