

# 轨道作业车行车安全智能防控系统的研究

刘佳幸

中铁电气化铁路运营管理有限公司上海维管处杭州维管段 浙江杭州 310000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18517

**[摘要]** 本文针对轨道作业车行车安全问题, 首先从碰撞、脱轨、设备故障、人员操作这四个维度, 去分析典型风险类型及其成因, 并且构建了“风险因子树”来梳理环境、设备、人员、管理这四类一级风险因子以及细化后的二级因子, 接着, 设计了智能防控系统的四层总体架构, 还有实时监测、风险智能分析、应急决策与执行三个核心子系统, 最后阐述了多源数据融合技术和边缘计算与云协同机制的实现路径, 通过应用特征加权融合公式和交叉熵损失函数, 来提升风险识别与模型优化能力。

**[关键词]** 轨道作业车; 行车安全; 智能防控系统; 多源数据融合

伴随铁路网络越来越密集、作业场景越来越复杂, 作业车存在与其他列车共线作业、复杂环境下瞭望受限、设备长期高负荷运行等问题, 这些问题导致碰撞脱轨等安全风险频繁发生。

## 1 轨道作业车行车安全风险分析

### 1.1 典型风险类型与成因

#### 1.1.1 碰撞风险

轨道作业车在运行时所面临的碰撞风险主要是因为作业环境复杂和信息交互不充分, 作业车一般是在既有线路上和其他列车、工程车辆或者线路设施共同使用空间, 若调度指令传递出现延迟或者信息存在不对称的情况, 就可能造成作业车和其他移动体的运行轨迹出现交叉。

#### 1.1.2 脱轨风险

脱轨风险产生和轨道状态、车辆性能还有操作行为紧密相关, 轨道作为作业车运行的基础, 它几何参数的异常变化会直接影响车辆稳定性, 例如轨距突然加宽或者缩窄、轨道高低不平顺情况加剧, 使轮对与钢轨接触状态恶化增加脱轨可能性, 作业车自身走行部件若出现磨损或者故障, 例如轮缘厚度不足、转向架定位装置松动, 会降低车辆的抗脱轨能力。

#### 1.1.3 设备故障风险

设备故障风险是贯穿在作业车整个运行周期, 根源在于设备自然损耗以及维护管理不足, 作业车的动力系统、制动系统还有液压系统等关键部件, 在长期使用过程中会出现零件磨损、密封失效或者管路堵塞等问题, 若没有及时发现并修复, 就可能造成部件功能出现失效情况, 例如发动机燃油系统故障会造成动力出现中断现象, 制动系统失灵就会使车辆失去控制能力。

#### 1.1.4 人员操作风险

人员操作风险主要是来自司机操作行为和安全意识方面, 作业车操作必须严格遵守相关规程, 但在实际作业中部分司机可能因为疲劳、注意力不集中或者经验不足等情况, 从而出现违规操作的现象, 当面对突发情况时司机应急处置能力不足, 如未能及时采取制动措施或者选择错误的避让路线, 这也会让事故后果变得更加严重。

### 1.2 风险因子层次结构

#### 1.2.1 构建风险因子树

风险因子树是对作业车行车安全风险进行系统性梳理的一种方式, 它通过层次化的结构把复杂的风险分解成可识别且可分析的具体因子。

一级因子: 从宏观层面来说会把风险划分成环境风险、设备风险、人员风险和管理风险这四大类, 环境风险主要关注作业车所处的各种外部条件, 设备风险重点聚焦车辆自身的具体技术状态, 人员风险着重强调操作主体的相关行为因素, 管理风险则涉及安全制度的执行情况与监督工作。

二级因子: 在一级因子基础上再进一步做细化, 环境风险包含天气条件、线路状况、障碍物分布等情况, 设备风险涵盖动力系统以及制动系统等关键部件状态, 人员风险涉及操作技能和安全意识等相关方面, 管理风险包括调度流程和维护计划等具体内容<sup>[1]</sup>。

## 2 智能防控系统架构设计

### 2.1 系统总体架构

#### 2.1.1 感知层

智能防控系统的基础为感知层, 它负责全面采集轨道作业车运行过程各类信息, 它通过部署在作业车车身、内部以及周边环境的多种感知设备, 实现对人、车、环境三个维度的实时感知, 对于作业车本身而言, 感知层会采集车辆位置、速度、转向角度等运行状态信息, 还有发动机、制动系统、

走行部等关键部件工作参数, 针对人员方面, 感知层会监测司机操作行为、生理状态等信息以确保操作规范性和安全性, 在环境方面, 感知层会收集作业线路轨道状况、周边障碍物分布、天气情况等数据, 这些感知设备协同工作, 为系统提供丰富全面原始数据, 是后续分析和决策的前提<sup>[2]</sup>。

### 2.1.2 网络层

网络层是连接感知层跟与平台层的重要桥梁, 它主要负责数据的传输以及交互工作, 它需要保证感知层采集到的海量数据, 能够及时且准确地传输到平台层去处理, 同时要把平台层的决策指令快速传递到执行层, 网络层会采用多种通信技术相结合的方式, 以此来应对各种各样不同的场景需求, 在有稳定网络覆盖区域, 可利用高速的有线或者无线网络进行数据传输, 在网络信号较弱或者没有网络的区域, 会采用卫星通信等方式保障数据的连通性, 网络层还具备数据加密和身份认证的功能, 能确保数据在传输过程中的安全性与完整性, 防止数据出现被篡改或者泄露。

### 2.1.3 平台层

平台层是智能防控系统的核心部分, 承担着数据处理分析和决策的重要职责, 它接收来自网络层的原始数据之后, 首先进行数据清洗和预处理工作, 去除噪声数据和冗余信息以提高数据质量, 接着平台层会运用大数据分析和人工智能等技术, 对数据展开深入挖掘和细致分析, 通过构建风险评估模型和故障预测模型等各种模型, 平台层能从数据中提取有价值信息并识别潜在安全风险和设备故障, 同时平台层还会依据分析结果生成相应的决策指令, 为应急处理和系统优化提供有力支持, 平台层具备强大的计算能力和存储能力, 能够高效处理和存储海量数据来保障系统稳定运行<sup>[3]</sup>。

### 2.1.4 应用层

应用层是智能防控系统和用户交互的界面能为不同用户群体提供个性化服务与功能, 对于作业车司机, 应用层会提供实时风险预警信息、车辆状态监测数据和操作指导建议帮助司机及时发现和处理安全隐患, 对于运维人员应用层会提供设备故障诊断报告、维护计划建议等内容方便运维人员开展设备维护管理工作, 对于管理人员应用层会提供系统运行状态统计报表、安全风险分析报告等资料为管理人员决策提供数据支持, 应用层设计注重用户体验界面简洁明了且操作方便快捷, 能让用户快速获取所需信息提高工作效率<sup>[4]</sup>。

## 2.2 核心子系统设计

### 2.2.1 实时监测子系统

实时监测子系统会实时采集感知层传输的各类数据并且

对数据进行实时处理和分析, 通过监测车辆运行状态数据实时监测子系统能及时发现车辆异常情况, 对于人员操作行为, 该子系统会监测司机操作是否符合规范, 例如是否按规定操作设备以及是否存在疲劳驾驶等情况, 在环境监测方面实时监测子系统会关注周边障碍物变化和天气情况突变等, 为后续风险分析和决策提供及时准确的信息。

### 2.2.2 风险智能分析子系统

风险智能分析子系统会对采集到的数据开展多维度分析, 如车辆运行状态分析、人员操作行为分析以及环境因素分析等维度, 通过建立风险评估模型, 风险智能分析子系统能对不同类型的安全风险进行量化评估, 进而确定风险的等级和影响范围, 该子系统还会运用数据挖掘技术, 从历史数据中寻找风险发生的规律和趋势, 以此实现对风险的预测和预警<sup>[5]</sup>。

### 2.2.3 应急决策与执行子系统

系统检测到安全风险时, 应急决策与执行子系统会迅速启动应急预案, 依据风险的等级还有类型来选择合适的应对措施, 例如发生碰撞风险时该子系统会发出警报并且自动采取制动措施避免事故发生, 在制定应急决策方案时, 应急决策与执行子系统会综合考虑各种因素, 如风险的紧急程度和现场的实际情况等以确保决策的科学性和有效性(见图1)。

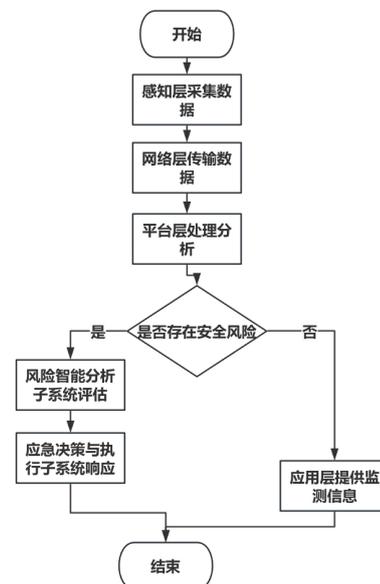


图1 智能防控系统架构设计流程图

## 3 关键技术实现

### 3.1 多源数据融合技术

在轨道作业车场景中, 感知层会产生多种类型的数据, 如位置信息、设备状态参数、环境感知数据以及人员操作数

据等。这些数据在采集过程可能存在误差、延迟或者不一致性的情况,若单独使用某一类数据来进行分析,就容易导致判断出现偏差。多源数据融合技术通过建立统一的数据处理框架,先对各类原始数据进行标准化处理,把不同格式和不同尺度的数据转换为可兼容的形式,接着通过特征层融合,提取各数据集中和安全风险相关的关键特征,最后通过决策层融合,综合多维度特征开展逻辑推理与概率计算,形成对当前运行状态的统一判断<sup>[6]</sup>。在特征层融合过程中,可通过加权求和的方式整合不同特征的贡献度,即

$$F_{fusion} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot F_i$$

例如,在某一时刻,作业车的速度特征  $F_1=0.8$  (归一化后,取值范围 0-1,值越大表示速度越高)、障碍物距离特征  $F_2=0.3$  (归一化后,值越小表示距离越近)、轨道平顺性特征  $F_3=0.6$  (归一化后,值越大表示轨道越平顺),根据经验设定权重系数  $w_1=0.4$ 、 $w_2=0.5$ 、 $w_3=0.1$ ,代入公式可得:

$$\begin{aligned} F_{fusion} &= 0.4 \times 0.8 + 0.5 \times 0.3 + 0.1 \times 0.6 \\ &= 0.32 + 0.15 + 0.06 = 0.53 \end{aligned}$$

该融合特征值可作为后续风险判断的重要依据,值越高通常表示碰撞风险越大。

### 3.2 边缘计算与云协同机制

边缘计算将部分数据处理和决策功能部署在作业车本地或者靠近作业车的边缘节点上,这样能在数据产生的源头快速做出响应,进而减少数据传输延迟以满足系统对实时性的要求,在轨道作业车运行时,有些场景可能处于网络信号薄弱或者中断的环境中,这时边缘节点能够独立完成数据处理以及简单决策,而云平台拥有强大的计算能力和存储能力,能够对边缘节点上传的海量数据进行离线分析和模型训练,云平台会收集多辆作业车的历史运行数据,通过大数据分析来挖掘风险发生的规律和趋势,优化风险识别模型和决策算法,然后将更新后的模型下发到边缘节点以实现系统的持续进化<sup>[7]</sup>。

边缘计算与云协同机制通过合理划分计算任务,将实时性要求高的简单决策放在边缘侧,将非实时性的复杂分析和模型优化放在云端,这样既保证了系统的响应速度,又实现了全局数据的共享与利用,提升了整个智能防控系统的稳定性和智能化水平,例如边缘节点实时处理作业车的实时位置和障碍物数据并生成即时预警信息,云平台则分析多辆作业车的长期运行数据来优化碰撞风险识别模型的参数,让模型能更好地适应不同轨道条件和环境变化<sup>[8]</sup>。在云平台对模型

进行优化时,可通过损失函数最小化的方式调整模型参数,即

$$\min_{\theta} L(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathcal{L}(y_j, \hat{y}_j(\theta))$$

例如,云平台收集了  $m=1000$  个历史样本,每个样本的真实标签  $y_j$  为 0 (无风险) 或 1 (有风险),模型预测输出  $\hat{y}_j(\theta)$  为 0-1 之间的概率值,采用交叉熵损失函数:

$$\mathcal{L}(y, \hat{y}) = -y \ln(\hat{y}) - (1 - y) \ln(1 - \hat{y})$$

若初始模型在某一批次训练中,对 1000 个样本的预测结果与真实标签的平均交叉熵损失为  $L(\theta) = 0.35$ ,通过梯度下降算法迭代优化模型参数  $\theta$  后,损失值下降至  $L(\theta) = 0.12$ ,表明模型的预测精度得到显著提升,优化后的模型可下发至边缘节点,提高现场风险识别的准确性。

## 4 结论

本研究将宏观风险通过风险因子树分解成能量化、能监测的具体因子,给防控系统设计提供了很清晰的目标导向,构建的四层总体架构能够覆盖全流程。但设计的实际效能需结合不同作业场景做现场测试,进一步优化系统参数和模型算法,验证它在复杂环境下的稳定性和可靠性,推动智能防控技术在轨道作业车领域落地应用。

### [参考文献]

- [1] 尹梦鹤. 智能调度系统在城市轨道交通行车组织优化中的应用研究[J]. 人民公交, 2025, (22): 101-103.
  - [2] 崔庭琼, 杨一步, 张欣萍, 等. 轨道交通行车安全监测系统的模块化设计[J]. 中国信息化, 2025, (11): 99-100.
  - [3] 杨旭. 城市轨道交通行车调度的应急处理原则和方法研究[J]. 人民公交, 2025, (20): 161-163.
  - [4] 陈阳, 向红. 城市轨道交通全自动机械灵活编组模式下行车组织方案[J]. 都市快轨交通, 2025, 38 (05): 35-41.
  - [5] 曾险峰, 沈子康, 王芳玲, 等. 南宁轨道交通 3 号线远期行车交路设计方案研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (19): 65-67.
  - [6] 杨西. 轨道交通调度指挥与行车安全分析[J]. 人民公交, 2025, (18): 179-181.
  - [7] 张克礼. 城市轨道交通行车安全管理体系构建与风险防控策略分析[J]. 运输经理世界, 2025, (15): 1-3.
  - [8] 李永, 张学兵. 城市轨道交通行车调度岗位风险分析与思考[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (08): 57-61.
- 作者简介: 刘佳幸, 1987.10.07, 汉族, 男, 河北邯郸, 本科, 助理工程师, 研究方向为轨道作业车安全及运用。