

智能交通系统环境下城市公共交通安全管理体系的优化与重构

郭建国

郑州天迈科技股份有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i1.19352

[摘要] 城市化与机动化的不断深化,使得城市公共交通运行环境变得日趋复杂,传统“人防”安全管理模式难以应对高密度混合交通流与新能源车辆新型风险,存在滞后性与结构性不足。本文基于智能交通系统工程理论,剖析风险演变机理、构建多维动态安全风险量化模型,研究设计了“端-边-云”协同系统架构,通过感知层全域采集、边缘层实时计算、云端层智能决策的层级联动,实现全域感知、实时互联与智能决策的贯通,探讨适配的工程技术标准与管理机制。通过多源异构数据标准化融合与数字化闭环管控,推动安全管理从被动响应转向主动防御,为公共交通系统安全与高质量发展提供支撑。

[关键词] 智能交通系统; 城市公共交通; “端-边-云”协同架构; 主动安全防御; 新能源车辆; 风险量化模型

中图分类号: TP212.6 文献标识码: A

Optimization and Reconstruction of Urban Public Transport Safety Management Systems in the Context of Intelligent Transportation Systems

Jianguo Guo

Zhengzhou Tiamaes Technology Co., Ltd.

[Abstract] With the deepening of urbanization and motorization, the operating environment of urban public transport has become increasingly complex. The traditional "human-based" safety management model struggles to address high-density mixed traffic flows and new types of risks posed by new-energy vehicles, exhibiting inherent lag and structural deficiencies. Based on the theory of intelligent transportation systems engineering, this study analyzes the evolution mechanism of risks and establishes a multi-dimensional dynamic safety risk quantification model. A "terminal-edge-cloud" collaborative system architecture is designed, realizing the integration of full-domain perception, real-time interconnection, and intelligent decision-making through hierarchical linkage—full-domain data collection at the perception layer, real-time computing at the edge layer, and intelligent decision-making at the cloud layer. Additionally, the study explores appropriate engineering and technical standards as well as management mechanisms. Through the standardized integration of multi-source heterogeneous data and digital closed-loop management and control, this research promotes the transformation of safety management from passive response to active safety defense, providing support for the safety and high-quality development of public transport systems.

[Key words] Intelligent Transportation Systems; Urban Public Transport; "Terminal-Edge-Cloud" Collaborative Architecture; Active Safety Defense; New-Energy Vehicles; Risk Quantification Model

1 引言

城市公共交通作为城市运行的动脉与公共安全的关键基础设施,其安全水平直接关系到社会经济稳定运行。在“交通强国”战略引领下,我国公共交通正从规模扩张向质量效益转型^[5],正如赖明所指出的,绿色化、智能化、一体化是其高质量发展的核心方向^[3]。但转型中,技术创新的快速迭代与既有管理体系的演进迟缓形成显著结构性张力:新能源车辆大规模应用带来的电

池热失控、高压电气故障等新型风险,因突发性强、破坏力大、演化迅速,使传统固定周期维保模式难以应对;智能交通环境催生了复杂的“人-车-路”交互场景,国内外经验表明,单纯依赖基础设施扩容无法根本解决系统安全问题,必须依托系统级智能化工程管理手段^[4,6]。而安全本质是涉及人、机、环境、管理的复杂系统工程^[1],当前多数城市地面公交安全管理仍侧重“事后处置”与“分段监管”,缺乏顶层系统架构支撑,导致数据割

裂、预警迟滞、协同困难。为此,本文立足智能交通系统工程理论视角,旨在融合数字化技术与数学模型方法,对现有公共交通安全管理体系进行系统性重构,构建具备前瞻性风险防控能力的现代化安全保障机制。

2 现状与痛点: 基于事故数据的结构性失效分析

在探讨重构路径之前,必须以量化的视角审视现有体系的缺陷。鉴于安全数据的敏感性,本研究选取我国东部某副省级城市公交集团2023年至2025年的内部运营脱敏数据作为实证样本(见表1)。该样本企业运营车辆约1.2万辆,其中新能源车辆占比超75%,其数据特征与交通运输部发布的行业发展趋势高度一致,能够客观反映当前城市公共交通系统面临的典型安全挑战。

表1 2023-2025年某典型城市公交集团车辆安全运营事故与故障成因统计

统计指标 (Key Indicators)	2023年(实测)	2024年(实测)	2025年(统计/预测)	趋势说明 (Trend Analysis)
运营车辆总数(辆)	11,850	12,020	12,150	运力微增,新能源占比提升至75%
年运营总里程(亿公里)	28.5	29.2	30.1	线路网密度增加
一般及以上事故总数(起)	142	138	135	总体事故率呈下降趋势,符合严管环境
机械类故障占比	45.10%	32.60%	20.70%	大幅下降:得益于车辆更新换代与燃油车淘汰
人为因素占比	31.70%	38.40%	41.50%	上升:认知负荷过载、疲劳/分心驾驶风险凸显
新能源系统故障占比	6.30%	14.50%	24.40%	激增:电池老化周期(8年临界点)到来,三电故障高发
外部环境及其他	16.90%	14.50%	13.40%	相对稳定,受恶劣天气及社会车辆干扰

数据来源:基于某副省级城市公交集团内部安全运营报表的脱敏处理数据。

从表1的纵向数据演变中,可以清晰地观察到公共交通安全风险重心的结构性转移。数据分析揭示了两个深层的结构性矛盾。首先,新能源特有风险呈现出指数级攀升态势。三年内,涉及电池管理系统(BMS)、高压线束及电控单元的新能源系统故障占比从6.3%激增至24.4%,翻了近4倍。这一剧烈变化有力地证明,随着早期投入运营的纯电车辆进入电池性能衰减期(通常为5-8年),沿用多年的基于燃油车机械特性的检测标准,已难以覆盖全生命周期的电化学安全风险。与此同时,数字化设备的引入并未如预期般显著降低人为失误。数据显示,人为因素(含疲劳驾驶、分心驾驶)导致的事故占比不降反升,达到41.5%。这表明在智能交通环境下,车载信息终端的冗余与无效报警的频繁干扰,正加剧驾驶员的“认知过载”(Cognitive Overload)^[7]。这一现象也印证了VermaSK等人^[2]指出的工程技术与用户真实场景之间往往存在“体验鸿沟”的观点,即单纯的技术堆砌若缺乏对运营场景的深刻理解,极易引发技术应用与实际管理的摩擦。

3 优化与重构: 基于系统级工程视角的解决方案

针对上述结构性失效,本文提出重构一套“端-边-云”协同的智能交通安全管理体系。该体系的核心逻辑在于将离散的数据流转化为连续的控制流。

3.1 动态安全风险量化模型

实现从“被动合规”到“主动防御”的跨越,这就需要精准刻画系统的实时安全状态。本研究摒弃传统离散的定性评估,将时刻 t 的综合安全风险指数 $R(t)$ 定义为关键风险因子的加权集成:

$$R(t) = \alpha \cdot H(t) + \beta \cdot V(t) + \gamma \cdot E(t) + \delta \cdot I(t)$$

各分量函数定义如下:

$H(t)$ (人因风险): 基于驾驶员状态监测数据,对闭眼时长、哈欠频率、视线偏离等参数归一化计算得出, $H(t) \in [0, 1]$ 。归一化计算采用线性插值法,设定闭眼时长阈值为2s(超过则计1分)、哈欠频率阈值为5次/10min(超过则计1分)、视线偏离阈值为3s/次(累计超过10s则计1分),即 $H(t) = \frac{a_1 \times S_1 + a_2 \times S_2 + a_3 \times S_3}{3}$,

其中 a_1 、 a_2 、 a_3 为各项权重(均取 $\frac{1}{3}$), S_1 、 S_2 、 S_3 为各项得分(0-1分)。

$V(t)$ (车辆健康度风险): 针对新能源车辆,集成电池管理系统与高压电气参数:

$$V(t) = w_1 \cdot \frac{|T_{\max} - T_{\text{avg}}|}{T_{\text{limit}}} + w_2 \cdot \int_{t-T}^t I(R_{\text{ins}}(s) < R_{\text{safe}}) ds$$

其中 $R_{\text{ins}}(t)$ 为绝缘电阻值, T 为监测周期(取5min), $I(\cdot)$ 为指示函数(满足条件时取1,否则取0)。积分项用于捕捉持续性微弱异常,实现对故障早期演化的趋势监测。

$E(t)$ (环境风险): 融合高级驾驶辅助系统提供的车距、碰撞时间信息,以及路侧单元传来的路面附着系数、能见度等环境数据。

$I(t)$ (交互风险): 表征车路协同通信质量对安全的影响,定义为时延 $d(t)$ 与丢包率 $p(t)$ 的函数:

$$I(t) = \eta_1 \cdot d(t) + \eta_2 \cdot p(t)$$

权重通过历史协同事故数据回归确定。

模型权重系数 α 、 β 、 γ 、 δ 采用熵权-层次分析法组合确定,基于某市公交集团2020-2022年1200起事故数据训练后,取值范围为 $\alpha \in [0.35, 0.45]$ 、 $\beta \in [0.30, 0.40]$ 、 $\gamma \in [0.10, 0.15]$ 、 $\delta \in [0.05, 0.10]$; w_1 、 w_2 根据电池故障与高压故障的事故占比确定,分别取0.6和0.4; η_1 、 η_2 通过线性回归分析获得,取值分别为0.7和0.3。当 $R(t)$ 超越预设阈值 R_{th} 时,系统自动触发分级预警与干预,形成“感知-评估-决策-控制”的工程闭环。

3.2 系统级架构

支撑上述模型的物理架构采用层次化设计,分为四个逻辑层级:

(1) 感知与边缘控制层: 作为系统末梢,集成BMS探针、DSM摄像头等专用传感器。车载智能网关承担边缘计算任务,运行轻量级风险模型,该模型基于云端完整模型通过剪枝算法简化得到,模型参数每30min与云端同步一次,确保在网络中断时仍能基于本地缓存的历史参数实现紧急状况的毫秒级本地响应。

(2) 通信与接入层: 利用5G与C-V2X技术构建高可靠、低时延传输网络, 采用“C-V2X为主、5G为辅”的协同机制, 车路安全类数据(如碰撞预警、故障告警)通过C-V2X传输(优先级最高), 非安全类数据(如运营统计、视频监控)通过5G传输, 两种技术互为冗余, 当其中一种网络中断时, 自动切换至另一种, 保障车、路、云间数据的高并发实时交互。

(3) 数据与模型层: 在云端构建统一安全数据湖, 采用Parquet列存储格式, 支持PB级数据存储; 通过AES-256加密技术保障数据传输与存储安全, 建立三级访问权限体系(管理员、运营人员、维护人员), 实现数据分级管控。其核心功能是负责多源异构数据的清洗、融合与标准化, 持续训练与优化风险模型, 并向下分发模型参数。

(4) 智慧应用与交互层: 面向运营者提供全景可视化指挥与决策支持; 面向驾驶员提供实时风险预警与辅助信息; 面向公众提供安全出行服务。

4 实施路径: 标准化体系与管理机制创新

技术架构的落地需要配套的工程技术标准与管理机制作为支撑。

4.1 工程技术标准的统一化

数据的互联互通是系统工程的基础。当前行业内亟需针对新能源公交及智能系统制定统一的数据交互标准(见表2)。

数据域 (Data Domain)	关键参数项 (Parameters)	采样频率 (Frequency)	标准化工程意义 (Engineering Significance)
BMS电池数据	单体电压、温度探针数据、绝缘阻值	$\geq 1\text{Hz}$	统一热失控预警算法的输入维度, 消除跨品牌车辆的数据壁垒
驾驶行为数据	急加速/减速阈值、车道偏离时长	事件触发(触发条件: 急加速(加速度 $>0.8\text{m/s}^2$)、急减速(减速度 $<-1.2\text{m/s}^2$)、车道偏离(偏移距离 $>0.5\text{m}$)	确立统一的驾驶员考核基准, 避免因传感器标定差异导致的不公
环境感知数据	前向碰撞时间(TTC)、盲区障碍物距离	$\geq 10\text{Hz}$	为ADAS系统的算法迭代与误报率校验提供基准数据

4.2 管理流程的再造: 从“追责”到“赋能”

数字化技术的引入要求管理流程进行适应性变革。首先, 建立数据驱动的免责与追责机制。建立三级预警机制: 一级预警($R(t) \in [R_{th}, 0.8]$), 系统推送语音提示, 驾驶员需在3s内作出回应(如轻踩刹车确认); 二级预警($R(t) \in [0.8, 0.9]$), 系统限制车速至30km/h, 驾驶员需靠边检查; 三级预警($R(t) \geq 0.9$), 系统自动触发紧急制动。如果系统发出了预警, 驾驶员按照规范操作了但事故依然发生, 数据应成为其免责的证据; 反之, 若驾驶员人为屏蔽报警装置, 则从重处罚。其次, 实施精准化培训。基于H(t)函数的历史数据, 为每位驾驶员生成能力画像, 针对其特定的薄弱环节(如频繁急刹或车距过近)推送定制化课程, 实现从“大水漫灌”到“精准滴灌”的教育模式转变。培训效果通过H(t)函数值变化评估, 要求培训后驾驶员的H(t)均值较培训

前下降 $\geq 30\%$, 急加速/减速事件发生率下降 $\geq 25\%$, 未达标的驾驶员需参加二次定制化培训。

5 结论

智能交通系统环境为城市公共交通安全管理带来了革命性的机遇与挑战。本文通过引入系统级工程架构设计, 将数字化工程、新能源技术与安全管理深度融合, 构建了一套基于多维状态向量R(t)的主动防御体系。研究表明, 安全管理的重构不仅仅是设备的更新, 更是管理理念的迭代。通过建立统一的工程技术标准与数据交互规范, 打破信息孤岛, 实现对安全风险的“全息感知、全链条监测、全过程管控”。未来, 随着车路协同(V2X)技术的进一步成熟, 安全管理的边界将从“单车智能”延伸至“城市协同”——通过与城市交通管控平台、轨道交通系统、共享单车运营平台的数据互通, 构建多模式交通协同安全预警网络, 实现跨系统风险的联动处置, 为城市公共交通的高质量发展构筑起一道坚不可摧的数字防线。

[参考文献]

[1]刘梦佳, 欧阳德胜, 张德义. 城市轨道交通安全管理体系建设研究[J]. 时代汽车, 2025, (21): 187-189.

[2]Verma SK, Verma R, Singh B K, et al. Management of intelligent transportation systems and advanced technology[M]/Intelligent transportation system and advanced technology. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 159-175.

[3]以绿色化、智能化、一体化引领城市公共交通高质量发展——十四届全国政协常委赖明在第二届(广州)国际公共交通新能源和数字科技产业博览会上的讲话[J]. 人民公交, 2025(17): 25-28+24.

[4]张菲娜, 周进均, 胡义良. 国内外城市交通发展经验总结分析[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(11): 155-158.

[5]姜辉. 交通强国视角下城市公交高质量发展策略的探讨[J]. 城市公共交通, 2021, 277(7): 31-35.

[6]Zemmouchi-Ghomari L. Artificial intelligence in intelligent transportation systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2025, 6(1): 26-42.

[7]Ma S, Yan X, Billington J, et al. Cognitive load during driving: EEG microstate metrics are sensitive to task difficulty and predict safety outcomes[J]. Accident Analysis & Prevention, 2024, 207: 107769.

作者简介:

郭建国(1958--), 男, 汉族, 河南开封人, 本科, 研究方向: 智能交通系统工程/城市公共交通数字化与智能化控制工程。