

高密度交通场景下路线交叉安全保障技术研究

王 耀 项晓阳

浙江数智交院科技股份有限公司 浙江 杭州 310013

摘 要：随着城市路网高密度化发展，路线交叉节点的通行安全保障对路网稳态运行至关重要。系统梳理高密度交通流、交叉构型、交通主体行为等核心风险影响要素，解析高密度场景下的风险链式传导规律；构建涵盖动态管控、冲突消解、感知预警、行为引导的安全保障技术体系；提出多技术协同适配、稳定运行与联动优化的实施路径，为高密度路网交叉节点的安全管控提供支撑。

关键词：高密度交通；路线交叉；安全保障；主动防控

引言：随着城镇化进程持续推进，城市路网密度不断提升，路线交叉区段的多向交通流交织冲突愈发激烈，已成为制约路网通行效率与安全水平的核心瓶颈。高密度交通场景下，交叉节点风险呈现多因素耦合、链式传导的特征，传统静态管控手段难以适配动态复杂的运行环境。亟须厘清风险生成与传导机理，构建适配高密度场景的全链条安全保障技术体系，破解交叉节点安全管控难题，提升城市路网运行的韧性与稳定性。

1 高密度交通路线交叉安全保障核心概述

高密度交通路线交叉安全保障聚焦立体或平面交汇区段多模态冲突消解与运行韧性强化。其核心依托全息感知网络实时捕获交通流参数、环境变量及异常事件，借助边缘计算引擎融合多源数据构建动态风险图谱；精准调节信号相位、可变限速与车道功能分配以抑制交织区紊流、压缩清空时段；部署主动抗撞结构及预警诱导设施提升物理防护冗余。基于历史轨迹与实时监测的隐患辨识模型持续优化时空资源调配逻辑，确保复杂立交条件下通行权分配的时空精度与系统容错阈值，最终实现人车路环境耦合作用的稳态维持与次生事故阻断。

2 高密度交通路线交叉安全风险核心影响要素

2.1 高密度交通流的交叉通行安全影响

高密度交通流在交叉范围内的安全衰减，主要源于车车间时距压缩与视觉空窗效应。过饱和流量迫使跟驰间隙逼近临界阈值，扰动一旦生成便沿纵向队列呈放大式传播，极易诱发连锁制动与追尾串并；转向交织段内合流楔入与分流迟滞相互叠加，冲突角域内轨迹交叉频次陡增且避险余量急速收窄；排队尾端外溢至上游功能区后模糊了引道与干道的感知边界，驾乘人员预判负担显著加重；加之超长周期内重复性操作导致的警觉钝化与反应迟滞，进一步放大了潜在失控概率；交叉内部滞留车辆与清场不完全所遗留的二次冲撞隐患亦同步抬升。此般多

重机理耦合作用下，微小干扰即可能触发通行秩序失稳，致使节点承载能力与运行稳健性遭受严峻考验^[1]。

2.2 路线交叉构型的安全适配核心要素

路线交叉构型的安全适配水平取决于几何线位与通行需求的耦合精密度。交叉角度偏离正交过远将延长冲突暴露弧段并扭曲观测视野，直接削弱对向预判与避险容差；立交匝道渐变段收缩梯度若未与变速行为匹配，易在分流鼻端催生犹豫徘徊与急刹追尾的叠加风险；交织区长度不足致使车道置换窗口狭窄，频繁的强制换道与摩擦挤压破坏流场稳态并抬升侧向刮擦概率；平交口缘石半径偏大虽利于转向平顺却隐含高速离心失稳隐患，偏小则制约大型车身轨迹覆盖引发侵限占道；此外竖曲线顶部与平面弯道内侧形成的视距盲区阻隔了清空确认环节，直接导致让行判定失误。唯有线形走向、断面过渡与冲突分离手法同实际运行特征深度契合，方能消解构造性缺陷所催生的潜在险兆。

2.3 交通主体行为的交叉安全影响逻辑

交通主体行为在高密度交叉场景中形成复杂交互影响链。驾驶员变道决策受周边车流密度制约，频繁变道易引发“多米诺”效应，局部扰动扩散至全局系统；跟车距离缩短导致制动反应时间压缩，急刹行为可能触发连锁追尾；非机动车与行人动态路径不确定性增加，如突然横穿或违反信号灯，加剧人-车冲突概率。行为异质在密集车流中放大，不同驾驶风格（激进/保守）的碰撞风险差异显著；视觉注意力分配受车流密度影响，驾驶员易忽视侧后方来车，形成视线盲区。行为交互通过空间-时间双重维度耦合，形成风险叠加网络，最终表现为事故概率的非线性增长与空间扩散特征，需通过行为模式分析与风险预测模型优化实现安全逻辑重构^[2]。

2.4 高密度场景下交叉风险的传导规律

高密度交通场景下交叉风险传导呈现动态耦合特征，

交通流密度与车辆速度差异形成矛盾张力,加剧风险叠加效应。驾驶员行为异质性在密集车流中放大,如变道频率增加、跟车距离缩短,导致局部冲突概率攀升。道路几何设计参数如曲线半径、交叉角度,在车流饱和状态下对风险传导路径产生非线性影响,小角度交叉易引发视线盲区,加剧碰撞风险;信号灯配时与交通流波动周期若不同步,将诱发周期性拥堵,形成风险传导的“涟漪效应”。环境因素如雨雾天气降低路面摩擦系数,同步削弱驾驶员视觉感知能力,使风险传导链条中的人-车-路-环交互作用更为复杂,形成多维度风险叠加的传导网络,最终表现为事故概率的非线性增长与空间扩散特征。

3 高密度交通路线交叉安全保障核心技术体系

3.1 交叉通行空间动态管控安全保障技术

交叉通行空间动态管控依托对车流时空轨迹的精细解析与即时干预重构安全运行环境。可变车道功能与进口道导向方案随潮汐流量波动快速翻转,缓解转向失衡衍生的强制穿插与死锁滞留;信号配时参数依据实时占有率及排队长度迭代寻优,削减绿灯空放与溢流冲突所积累的隐性能量;匝道调节与干道绿波协同实施截流控速,平抑交织区紊流强度并维持主线下游容纳裕度;路侧全息感知单元捕捉异常减速及行人闯入信号后触发可变情报板诱导与闪烁警示,压缩危险感知传递时差;清场时段末端借助雷达补盲排除滞留体隐患,严防闯尾碰撞与次生卷入。整项技术体系旨在将交叉区域内离散的不确定扰动纳入可控调节周期,以毫秒级响应维持通行流在临近饱和和边界时的有序收敛与稳健释放。

3.2 高密度交通流冲突主动消解安全技术

高密度交通流冲突主动消解安全技术聚焦于交通流动态特性解析与实时干预策略构建。该技术通过多源传感器融合实现交通流状态精准感知,利用深度学习算法对车辆轨迹进行预测,识别潜在冲突点。在冲突识别基础上,采用自适应信号控制与动态路径诱导策略,对交通流进行主动疏导,通过优化车辆变道行为模型,减少无序变道引发的连锁冲突;结合车路协同系统,实现车辆与基础设施的实时信息交互,提升冲突预警的时效性。技术核心在于构建“感知-预测-干预”闭环机制,通过智能算法动态调整交通流分布,降低高密度场景下的冲突概率,保障交通运行安全高效,同时避免对既有交通设施进行大规模改造,实现成本与效益的平衡优化^[3]。

3.3 交叉通行状态实时感知预警核心技术

交叉通行状态实时感知预警核心技术依托多模态传感器阵列实现交通场景全要素采集,通过毫米波雷达、激光雷达与视觉传感器的数据融合,精准捕捉车辆位置、

速度及轨迹信息。采用边缘计算架构对海量感知数据进行实时处理,结合时空关联分析算法识别交叉口通行状态异常模式。技术重点构建动态阈值预警模型,通过机器学习持续优化冲突风险判定标准;实现从“被动响应”到“主动预防”的转变。在数据传输层面,采用低延迟通信协议保障预警信息实时性,避免因传输延迟导致的安全风险,该技术通过感知-分析-预警的闭环设计,提升交叉通行场景下的安全保障能力,同时兼容现有交通设施,无需大规模改造即可实现技术部署,具有较高的工程实用价值与推广潜力。

3.4 交通主体行为引导安全保障核心技术

交通主体行为引导安全保障核心技术聚焦于交通参与者行为模式解析与智能引导策略设计。通过车载传感器与路侧设备协同采集驾驶人操作特征、行人移动轨迹等数据,运用行为动力学模型分析异常行为模式,如急加速、急刹车、违规变道等。技术核心构建“感知-分析-引导”闭环,基于实时交通状态动态生成个性化引导指令,如调整车速、保持安全距离、规范变道等,通过车载终端或路侧显示屏实时反馈。采用强化学习算法持续优化引导策略,提升行为干预的有效性,该技术通过主动引导而非被动约束,降低因人为失误引发的交通事故风险,同时兼容不同交通主体行为特性,无需强制改变既有驾驶习惯,具有较高的用户接受度与场景适应性,为高密度交通场景下的安全保障提供创新解决方案。

4 高密度交通路线交叉安全保障技术协同优化

4.1 多技术模块的安全协同适配核心方法

多技术模块的安全协同适配核心方法聚焦于不同技术模块间的动态交互与安全融合。通过构建统一数据接口标准,实现传感器数据、算法模型、控制指令的无缝对接,确保各模块信息实时共享与精准同步。采用冲突检测算法识别模块间潜在安全风险,如数据传输延迟、控制指令冲突等,并通过动态调整机制优化协作策略;结合自适应学习算法持续优化协同规则,提升系统对复杂交通场景的适应能力。模块化设计降低系统耦合度,便于技术迭代与功能扩展;安全校验机制保障协同过程可靠性,避免因模块故障引发的系统性风险,该技术通过灵活适配不同技术模块特性,实现安全保障能力的最大化,为高密度交通场景下的多技术协同提供创新方法论,兼具工程实用性与技术前瞻性^[4]。

4.2 技术体系运行的稳定性优化核心路径

高密度交通场景下技术体系稳定性优化需聚焦多技术模块动态协同机制。传感器数据融合算法需增强抗干扰能力,避免车流饱和时数据失真;通信协议应优化冗

余设计,确保信号传输在密集车流中的可靠性;自适应控制算法需提升突发交通响应速度,减少系统延迟引发的风险扩散;模块接口标准化可降低技术耦合度,增强系统容错性。实时监测与动态校准机制能持续修正参数偏差,维持复杂环境中的稳定运行;多维度技术协同形成稳定网络,通过人-车-路-环交互作用的动态平衡,抑制局部扰动向全局系统的传导,最终实现高密度交通场景下安全保障技术体系的高效稳定运行与风险可控。

4.3 全场景下安全保障技术的适配性调整

全场景适配需聚焦技术参数动态校准与交互逻辑重构。高密度车流中,雷达与摄像头融合算法需根据光照、雨雾强度实时调整探测阈值,避免误判;车路协同通信协议应支持带宽动态分配,适应突发车流对数据传输速率的需求;自适应控制模块需整合多源数据,如车辆间距、速度波动率,动态调整信号灯配时与变道引导策略。环境感知模块需增强对非标准驾驶行为(如急刹、频繁变道)的识别能力,优化风险预测模型;技术适配性调整通过人-车-路-环系统的动态匹配,形成场景自适应的安全保障网络,抑制局部风险扩散,最终实现全场景下安全保障技术的精准适配与高效运行,提升高密度交通交叉场景的安全性及稳定性。

4.4 多维度安全技术的联动运行核心机制

多维度安全技术的联动运行核心机制聚焦于感知、预警、引导等技术的深度融合与动态协同。通过统一数据平台实现多源异构数据实时融合,如雷达轨迹数据、视觉图像信息、车辆状态参数等,构建全维度交通场景画像;采用分布式计算架构提升数据处理效率,确保各技术模块指令同步精度。联动机制引入动态权重分配算

法,根据交通流密度、风险等级自动调整各技术模块参与度,如高风险场景强化预警模块权重,通过闭环反馈系统持续优化联动策略,提升技术协同的时效性与准确性。该机制通过技术模块间的无缝衔接与智能调配,实现多维度安全能力的最大化,为高密度交通场景下的安全保障提供高效、灵活的技术支撑,兼具技术创新性与工程实用性^[5]。

结束语: 高密度交通路线交叉的安全保障,是城市路网安全高效运行的核心支撑。通过厘清多维度风险影响要素与链式传导规律,构建起全链条的安全保障技术体系,实现了交叉节点运行风险的主动防控与动态消解。多技术模块的协同适配与联动优化,进一步强化了系统运行的稳定性与全场景适配性,可为高密度路网交叉节点的安全管控实践提供参考,助力城市交通系统安全韧性的持续提升。

参考文献

- [1]何智龙.城市道路平面交叉口交通安全设施设计及改善研究[J].交通与运输,2022,38(2):38-42.
- [2]翟亚东,刘凡,贺海军,等.基于视频检测的低等级公路交叉口交通冲突预警技术研究[J].交通科技与管理,2023 (21): 12-14+18.
- [3]赵晋芳,赵晋利,李权,等.基于机器视觉的交叉口特种车辆快速通行技术研究[J].计算机测量与控制,2023, 31(10):240-246+254.
- [4]张晖,杨春晖,田凯,等.行人与智能汽车交互行为建模关键技术综述[J].中国公路学报,2025,38(12):200-229.
- [5]杨亮.单个道路开口安全影响评价[J].人民交通, 2024 (20):0044-0046.