

高速公路智慧隧道交通安全保障技术分析

郑 辉

山西晋通公路工程监理单位 山西 晋城 048000

摘要: 在高速公路建设规模不断扩大、交通流量日益增长的背景下, 交通安全保障面临更高要求, 本文聚焦高速公路智慧隧道交通安全保障技术。先阐述智慧交通系统架构, 包括分层协同框架与数据驱动逻辑。接着分析全路段安全保障核心技术模块, 涵盖感知、控制、应急及运维等方面。再探讨技术协同与区域联动, 最后展望技术演进方向, 涉及感知、决策、车路协同及绿色低碳技术, 为提升高速公路隧道交通安全提供全面技术方案。

关键词: 高速公路; 智慧隧道; 交通安全保障; 技术协同; 车路协同

引言: 高速公路隧道作为交通网络关键节点, 其安全保障至关重要。传统隧道交通管理模式在应对复杂路况和突发事件时存在局限。随着信息技术发展, 智慧交通理念兴起。智慧隧道交通安全保障技术融合多种先进技术, 构建起全方位、智能化的安全管理体系。深入研究这些技术, 有助于提升隧道通行效率, 降低事故风险, 保障高速公路安全畅通运行。

1 高速公路智慧交通系统架构

1.1 分层协同框架

感知层作为智慧交通系统的神经末梢, 通过全路段部署的异构传感器网络实现多维数据采集^[1]。雷达系统可实时捕捉车辆速度与位置信息, 摄像头网络则对道路场景进行视觉解析, 气象站持续监测能见度、降雨量等环境参数, 路侧单元通过短程通信技术收集车载终端数据。这些设备形成互补性感知矩阵, 确保复杂场景下的数据完整性。通信层构建了车路云一体化传输通道, 采用5G网络与V2X车路协同技术实现低时延通信, 光纤专网作为骨干传输链路保障关键数据可靠性。双通道并行传输机制既满足实时性要求, 又具备抗灾备份能力, 确保极端天气或网络故障时基础通信不断联。计算层采用分布式协同架构, 路侧边缘计算节点就近处理紧急事件数据, 实现毫秒级响应; 区域云端平台整合多路段数据, 运用大数据分析技术生成全局调控策略。这种分级处理模式既减轻云端负荷, 又提升系统整体容错性。应用层将技术能力转化为具体服务, 安全预警模块通过模式识别提前发现潜在风险, 交通控制模块动态调整信号配时与限速策略, 应急调度模块优化救援资源部署路径, 运维管理模块实现设备全生命周期监测。各模块通过标准化接口实现数据互通, 形成有机整体。

1.2 数据驱动逻辑

多源数据融合机制将交通流量、气象变化、设备运

行状态、历史事故记录等异构数据进行时空对齐, 构建出与物理道路完全映射的数字孪生体。该基底支持对任意路段进行虚拟推演, 为决策提供量化依据。动态知识图谱通过机器学习持续更新交通规则库、风险评估模型与应急处置预案。系统自动解析新发生的事件特征, 将其转化为知识节点并建立关联关系, 使知识库随实际运行不断进化, 保持决策逻辑与现实场景的高度适配。闭环优化体系包含仿真验证与效果评估两个核心环节。新策略首先在数字孪生环境中进行多场景压力测试, 验证其有效性与鲁棒性; 实施后通过实际运行数据反向修正参数, 形成"部署-验证-优化"的螺旋上升循环, 确保系统性能持续提升。

2 全路段安全保障核心技术模块

2.1 全域感知与风险识别

多模态交通感知体系通过多类型传感器协同工作实现全方位环境解析。车辆状态监测中, 路侧毫米波雷达与高清摄像头形成数据互补, 前者捕捉车辆运动轨迹异常, 后者通过图像特征分析识别逆行、超速等违规行为, 两种技术融合使识别准确率提升至98%以上。行人及非机动车入侵检测依托深度学习语义分割算法, 可精确区分道路主体与边缘地带, 对违规进入高速的目标实现秒级响应^[2]。货运车辆安全监测采用复合检测机制, 图像识别技术分析货物捆绑牢固度, 气体传感器监测危化品泄漏特征, 两种数据交叉验证提升风险预警可靠性。环境风险预警系统构建了多层次监测网络。气象灾害预警模块整合能见度仪、雨量传感器与路面温度计数据, 通过多参数联合分析模型, 可提前30分钟预警团雾、暴雨等极端天气, 为驾驶员预留充足应对时间。地质灾害预警体系结合边坡监测传感器网络与地质数据库, 倾角仪捕捉岩土体微小形变, 土壤含水率计监测水分渗透情况, 系统通过机器学习模型评估滑坡、泥石流发生概

率,实现从数据采集到风险评估的全流程自动化。二次事故防范机制采用多源数据融合分析,烟雾识别算法定位火灾事故,车辆急刹轨迹分析技术捕捉追尾风险,系统自动触发邻近路段电子屏更新与广播预警,形成500米安全防护圈。

2.2 动态交通控制技术

分级限速策略基于实时交通密度、能见度与路面摩擦系数动态调整限速值,系统每5分钟更新一次限速参数,确保限速值与实际路况高度匹配。可变车道管理系统通过智能锥桶与LED指示牌联动,应急车道在高峰时段可动态开放为临时行车道,潮汐车道根据早晚流量差异自动切换行驶方向,路网通行效率提升25%以上。区域级交通流预测模型融合历史数据规律与实时感知信息,采用时空卷积神经网络预测未来1小时拥堵趋势,预测准确率达92%,为分流方案制定提供科学依据。多目标路径规划算法在考虑距离、时间、路况等因素基础上,引入道路承载力均衡指标,为驾驶员提供既避开拥堵又平衡路网负载的最优路线。特种车辆管控体系通过RFID标签与车牌识别技术实现全程跟踪,危化品运输车辆被限制进入桥梁、隧道等高风险路段,应急车辆优先通行系统利用V2X技术向周边车辆发送避让指令,信号灯相位自动调整为绿灯优先通行模式。

2.3 智能应急处置技术

事故快速响应机制包含自动报警与定位、救援资源调度两个核心环节。视频分析算法通过运动目标检测与碰撞识别触发报警,车载终端通过加速度突变与定位信息上报事故,两种方式互补确保报警及时性。救援资源调度系统基于GIS平台规划最优路径,清障车、救护车等资源按就近原则调配,系统实时更新道路封闭信息,动态调整救援路线。多级应急预案库针对不同事故类型预设处置流程,系统根据事故严重程度自动匹配预案级别,执行过程中持续接收现场数据,动态调整封闭车道数量与分流方向。现场安全管控采用无人机与智能警示设备协同作业,无人机搭载高清摄像头与热成像仪,10分钟内抵达现场提供空中视角,可移动式LED警示屏与声光报警器部署在事故后方500米处,引导后续车辆安全变道。

2.4 基础设施智能运维

道路状态监测体系采用非接触式检测技术,激光轮廓仪以50米间隔扫描路面,实时生成平整度曲线,车载传感器网络通过振动分析评估路面病害程度,两种数据融合构建道路健康档案。桥梁隧道结构健康监测集成应变计、加速度计与位移传感器,系统每分钟采集结构响

应数据,通过有限元模型分析评估承载力变化,耐久性评估周期从传统1年缩短至实时监测。机电设备预测性维护采用多参数融合分析,振动频谱分析识别轴承故障,温度趋势监测预警电机过热,电流波动分析检测线路老化,故障预测准确率达90%。能源管理系统根据车流量与光照强度动态调节路灯亮度,光伏发电系统与储能装置协同配合,实现了能源的高效利用与智能调配。

3 技术协同与区域联动

3.1 路段间协同

隧道、桥梁与主线构成的立体交通网络通过智能联动机制形成高效运行整体^[1]。当隧道内出现突发状况时,事故检测系统立即启动多级响应流程,隧道内部同时强化应急照明与通风措施,并将关键信息快速传递至邻近桥梁与主线控制终端。桥梁监测系统根据隧道拥堵态势,动态调整限速标准并开放应急车道,主线控制平台则通过可变情报板与车道指示器引导车辆提前变道,构建起梯度式疏导方案。这种跨单元协同使事故影响范围得到有效控制,二次事故发生概率随之降低。收费站与服务区的协同运行依托智能调度系统实现资源优化配置。收费站出现车辆排队积压时,系统自动分析周边服务区承载能力,通过导航软件向驾驶员推送临时停靠建议,同时调整收费车道开放数量引导车辆分流。服务区管理模块针对停靠车辆类型实施差异化服务,优先保障危化品运输车与长途客车停放需求,利用电子围栏技术规范停车秩序。这种弹性调度策略缓解了收费站拥堵压力,提升了服务区周转效率。

3.2 路网级调度

跨区域交通管控体系通过构建多层次信息共享平台实现全局优化。相邻高速路段建立实时数据交互通道,某路段出现严重拥堵时,区域控制中心综合分析周边路网承载能力,生成跨区域疏导方案。通过协同调整限速标准、开放应急车道等措施,形成动态分流网络,遏制拥堵扩散趋势。这种协同机制提升了区域路网整体运行效率,增强了应对突发事件的能力。与城市交通的衔接通过标准化接口实现无缝对接。高速出口控制平台将实时运行状态传输至城市交通信号系统,后者根据高速车辆消散需求动态调整相邻路口信号配时,确保车流平稳过渡。反向调控机制通过城市交通感知网络预判高速入口压力,提前优化收费站车道配置。这种双向联动模式减少了高速与城市道路衔接段的通行延误,平抑了交通流波动,构建起高效协同的综合运输体系。

4 技术演进方向

4.1 感知技术升级

量子传感技术正逐步渗透至交通基础设施监测领域。基于量子纠缠原理的微变形监测装置,可实现毫米级形变检测精度,在桥梁健康监测、隧道结构安全评估等场景中展现出独特优势^[4]。通过量子传感网络部署,能够捕捉传统传感器难以识别的早期结构损伤特征,为预防性维护提供数据支撑。卫星遥感与地面传感器的融合应用推动全域感知网络构建。高分辨率卫星影像与分布式地面传感器形成立体监测体系,既可实现大范围交通态势宏观感知,又能针对重点区域进行微观数据采集。这种天地一体化的感知模式突破了单一传感器的空间限制,尤其在恶劣天气或复杂地形条件下,仍能保持稳定的数据获取能力,为交通运行状态评估提供多维数据源。

4.2 决策智能化深化

强化学习算法在动态交通控制领域的应用持续深化。通过构建交通流仿真环境,算法可自主探索不同限速策略下的系统运行规律,逐步优化自适应限速模型。这种基于环境交互的决策机制,能够根据实时交通流特征动态调整控制参数,较传统固定阈值控制方法更具灵活性与适应性。数字孪生与元宇宙技术为交通系统仿真测试开辟新路径。通过构建高精度虚拟交通场景,可在数字空间中模拟各类极端交通状况,测试不同控制策略的响应效果。元宇宙技术进一步拓展了仿真维度,支持多用户协同交互与沉浸式体验,为交通管理方案验证提供更接近真实环境的测试平台。

4.3 车路协同进阶发展

车路协同正迈向更高水平的发展阶段。V2X技术标准进程不断加快,车端通信设备普及程度日益提高。基于统一通信协议构建的车-路-云实时双向通信机制,让车辆能获取超视距交通信息,道路基础设施也可精准感知车辆运行状态。这种全要素互联互通模式意义重大,一方面为自动驾驶车辆提供了更可靠的环境感知补充,弥补了单车智能在感知范围和准确性上的不足;另一方面,提升了整体交通系统的运行效率,使交通流更加顺畅。与此同时,自动驾驶车辆与智慧高速系统的协同也愈发紧密。高精度地图借助车端传感器数据反哺实现动态更新,保证地图信息的实时性与准确性。路侧单元

与自动驾驶车辆的协同决策系统,能依据车辆行驶意图提前调整交通控制策略,构建起车路协同的闭环控制体系,推动车路协同向更智能、更高效的方向发展。

4.4 绿色低碳技术

光伏路面、风能发电装置与储能系统的集成应用,推动高速基础设施向能源自洽方向演进。透光混凝土光伏路面既满足车辆行驶需求,又能将太阳能转化为电能;路侧风力发电装置利用车辆行驶形成的气流加速效应提升发电效率。配套的储能系统通过削峰填谷调节能源供需,形成完整的微电网运行体系^[5]。碳足迹监测与减排优化算法为交通领域“双碳”目标实现提供技术支撑。通过构建覆盖全生命周期的碳排放核算模型,可精准定位高排放环节并制定针对性优化措施。基于机器学习的减排策略优化算法,能够在保障交通服务水平的前提下,动态调整能源配置与运行方案,实现节能减排目标与运营效率的平衡。

结束语

高速公路智慧隧道交通安全保障技术通过分层协同架构、多源数据融合及先进算法应用,实现了对隧道交通全要素的精准感知、智能决策与高效管控。技术协同与区域联动模式进一步拓展了安全保障范围,提升了整体运行效率。随着感知、决策、车路协同及绿色低碳等技术的持续演进,高速公路隧道交通安全保障将迈向更高水平,为公众出行提供更安全、便捷、高效的服务。

参考文献

- [1]杨圆皎.高速公路智慧隧道交通安全保障技术[J].科学技术创新,2025(22):155-158.
- [2]贺文喆.高速公路智慧隧道交通安全保障技术分析[J].中国储运,2023(4):168-169.
- [3]卢金勤.高速公路智慧隧道交通安全保障技术研究[J].建筑工程技术与设计,2023,11(28):163-165.
- [4]方勇.智慧安全运营保障技术在兴汕高速公路城埔山隧道应用的研究[J].上海公路,2024(4):149-153.
- [5]余强.高速公路智慧隧道综合管控平台应用[J].中国交通信息化,2025,311(6):107-110.