

多源协同与立体感知融合一体化的智慧路缘石系统研究

王柯璇，黎帅，宋晨城

东北林业大学 土木与交通学院，黑龙江 哈尔滨 150040

摘 要： 随着城市化进程加速，我国城市交通面临拥堵治理效率低、安全预警覆盖不足、道路设施健康监测滞后等核心问题，智慧交通体系建设成为新时代解决问题的关键。本研究设计了一种集成立体化感知、智能化预警与协同化调控的智慧路缘石系统，突破传统路缘石的静态功能，通过多源传感器融合技术，构建“空-路-地”三维感知体系，实时监测交通流量、车辆行为、行人动态及道路结构状态，并结合边缘计算与云端协同平台实现全域交通态势的动态分析。以低成本路侧设施改造为基础，实现了交通感知、风险预警、拥堵治理与设施维护的全链条闭环管理，为城市交通系统的高效运行与安全提升提供了创新性解决方案，具备广泛的适用性与工程落地价值。

关 键 词： 智慧交通；安全预警；车路协同；信号控制；双向警示；智慧路缘石

Research on Intelligent Curb System Based on Integration of Multi-Source Collaboration and Stereo Perception

Wang Kexuan, Li Shuai, Song Chencheng

College of civil engineering and transportation, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040

Abstract： With the acceleration of urbanization, China's urban transportation systems face core challenges including inefficient congestion management, inadequate safety warning coverage, and delayed health monitoring of road infrastructure. The establishment of intelligent transportation systems has become crucial for addressing these issues in the new era. This study proposes a smart curbstone system integrating three-dimensional perception, intelligent warning, and coordinated regulation. Transcending the static functionality of traditional curbstones, the system constructs an "air-road-ground" tri-dimensional perception architecture through multi-source sensor fusion technology. It enables real-time monitoring of traffic flow, vehicle behaviors, pedestrian dynamics, and road structural conditions. By combining edge computing with a cloud-based collaborative platform, the system achieves dynamic analysis of comprehensive traffic situations. Based on low-cost roadside facility modifications, it realizes closed-loop management encompassing traffic perception, risk warning, congestion mitigation, and infrastructure maintenance. This innovative solution provides technical support for enhancing operational efficiency and safety of urban transportation systems, demonstrating extensive applicability and significant engineering implementation value.

Keywords： intelligent transportation systems; proactive safety warning; cooperative vehicle-infrastructure system; adaptive signal control technology; bi-directional hazard notification; smart roadside unit

一、研究背景及意义

随着城市化进程加速，我国城市交通面临拥堵治理效率低、安全预警覆盖不足、道路设施健康监测滞后等核心问题。据交通部统计，2023年国内交通拥堵造成的经济损失高达数千亿元，且因道路设施缺陷引发的交通事故占比超15%。传统交通管理依赖人工巡查与被动式响应，难以实现实时动态调控，亟须智能化升级。

通过分析国内外研究不难发现，在“车-路-云”协同控制中，现有方案多聚焦于“车端”或“云端”，功能集中于车辆交互，对道路设施健康、行人安全等复合风险覆盖不足。而传统路侧设备（如摄像头、信号灯）独立部署，缺乏多源数据融合与协同控制能力，智能化程度低，数据孤岛问题突出。道路健康监测

依赖定期人工巡检，无法实现早期预警与动态养护决策。与此同时，路缘石作为城市道路的基础设施，长期处于静态功能状态，其空间资源与物理特性未被充分挖掘，成为智慧交通体系的“盲区”。

国家《数字交通“十四五”发展规划》明确提出“推动路侧设施智能化改造”，而《2025年中国路缘石行业报告》指出，行业正从传统建材向“绿色化、智能化”转型，透水路缘石、生态材料等新产品需求增长显著。由此可见，智慧路缘石系统通过低成本改造实现功能扩展，契合政策导向与市场需求。^[1]

综上所述，基于目前社会背景和交通现状，本设计提出了一种多源协同与立体感知融合一体化的智慧路缘石系统，多源协同与立体感知融合一体化的智慧路缘石系统，通过多源传感器融合技术，构建“空-路-地”三维感知体系，实时监测交通流量、

车辆行为、行人动态及道路结构状态，并结合边缘计算与云端协同平台实现全域交通态势的动态分析，实现了交通感知、风险预警、拥堵治理与设施维护的全链条闭环管理，为城市交通系统的高效运行与安全提升提供了创新性解决方案，具备广泛的适用性与工程落地价值。

二、系统设计原理

本系统基于多源协同和立体感知建立了智慧路缘石系统，该

系统由硬件装置、智慧交通协同平台以及智慧路缘石交通管理方案三部分组成。下文将分别对三部分内容的设计原理进行阐述。

（一）硬件装置搭建

该系统的硬件装置由三级能源供电单元、环境感知单元、协同预警单元以及控制单元组成。

环境感知单元由多源传感器融合网络和道路摄像头构成，针对智慧路缘石系统的三大核心功能，采用功能导向型传感器选配策略，构建“视觉－物理场”双重感知体系，突破了传统交通感知设备功能单一、部署离散的局限。具体传感器类型如表1所示：

表1 多源传感器融合网络

功能目标	传感器类型	技术参数	部署位置与目的
交通流调控	微波雷达	探测距离 100 m，速度精度 ± 0.1 m/s	路侧杆件，监测主干道车辆速度、密度及排队长度
	压敏薄膜传感器	压力范围 0-100 kN，响应频率 1 kHz	路缘石表层，嵌入间距 0.5 m，检测车辆轴重、通过时间及异常停车行为
道路健康监测	光纤光栅阵列	应变分辨率 $\pm 2 \mu \varepsilon$ ，温度灵敏度 10 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	路缘石基底，纵向间隔 1 m，实时监测路基沉降、裂缝扩展及结构微变形
	电容式湿度传感器	分辨率 0.1 mm，量程 0-5 mm	路缘石－路面接缝处，检测积水深度与路面湿滑状态
人车交互预警	固态激光雷达	分辨率 0.1 mm，量程 0-5 mm	路缘石侧面间隔分布，覆盖人行横道盲区和来车方向车道，追踪行人轨迹与车辆相对位置
	红外热成像模块	分辨率 640 $\times$ 480，测温范围 -20~150 $^{\circ}\text{C}$	交叉口路缘石侧面，全天候检测行人动态

本系统将基于以上路缘石传感器网络，与道路摄像头结合，通过时空对齐算法，将视频流与传感器数据进行像素级映射，形成跨模态数据关联。视觉数据弥补了雷达在静止目标检测、语义

理解方面的不足，降低误判率，控制策略精细化：结合视频语义信息，实现从“车流调控”到“特定车辆引导”的粒度升级。“视觉－物理场”协同机制举例如表2：

表2 “视觉－物理场”协同机制举例

感知维度	摄像头功能	互补传感器	协同作用机制
车辆分类	基于 YOLOv8 的车型识别	压敏传感器（轴重检测）	交叉验证车辆类型（如区分卡车 / 轿车）
车道占用率	语义分割车道线（U-Net 模型）	微波雷达（车辆密度）	融合视觉与雷达数据计算实时占有率
事件检测	交通事故 / 违停识别	激光雷达（空间定位）	三维空间坐标映射，精确定位事件位置
信号灯状态	HSV 颜色空间检测	无	独立获取信号相位，支持配时优化

协同预警单元主要包括 LED 灯带、投影灯组、语音提示器等装置。根据实际道路情况选择不同决策，起到安全预警、交通调

控的作用，提高了交互性和可识别性。协同预警单元结构组成如表3：

表3 协同预警单元结构组成

预警模式	硬件组成	部署位置	功能目标
定向声场预警	压电陶瓷扬声器阵列	路缘石侧面	向行人定向播报风险提示
激光投影警示	投影灯组（灯色：白、黄、红）	路缘石侧面嵌入式投射器	路面投射动态警示标识，人行横道两侧投射条形警示线，投射可变车道线及箭头
LED 交互灯带	可变色 LED 灯带（灯色：红、黄、绿）	路缘石顶端	通过灯色变化提醒通行状态和安全预警

在供电单元上，智慧路缘石系统采用太阳能－市电混合供电，并创新性提出余电共享网络概念，形成三级能源供给体系：

一级能源（主供）：嵌入式光伏组件（集成于路缘石顶部左右两端），选用单晶硅光伏板，转换效率 $\geq 22\%$ ，倾斜角度根据城市纬度优化设计；

二级能源（备用）：市政电网接入，通过双向逆变器与光伏系统并联，支持能源互补与余电回馈；

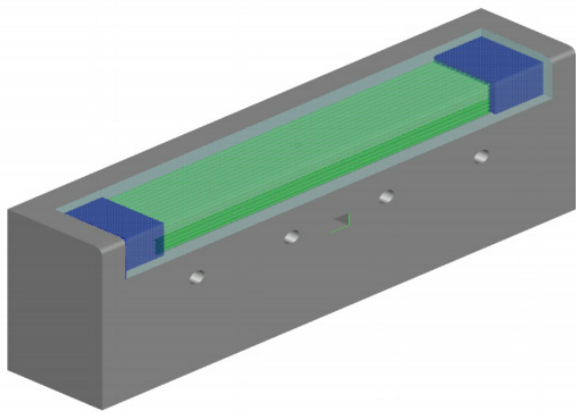
三级能源（共享）：邻近交通设施（路灯、指示灯等）的余电接入，通过智能微电网控制器实现能源动态调度，避免清洁能源浪费。

控制单元包括上位机和下位机，其中上位机采用英伟达 Jetson Orin Nano 核心模组，下位机采用 STM32F407ZET6。环境感知单元将与上位机相连，协同预警单元将与下位机相连。系统收集的车辆和行人相关的参数数据将通过串口进行通信传输，实现实时决策。

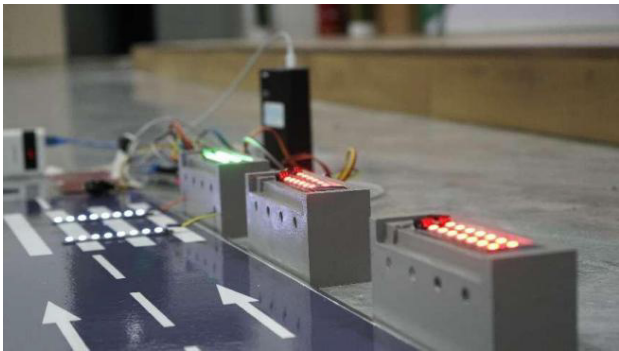
（二）智慧交通协同平台

该系统拥有智慧交通协同平台，采用“云端决策－交互应用双层架构”，通过 TCP/IP 协议及 5G/LoRa 混合通信网络实现与

路侧硬件设备的实时数据交互。其核心功能涵盖设备管理、态势感知、策略调控三大维度。^[7]



> 图1 智慧路缘石3D建模设计



> 图2 智慧路缘石实物模型展示

在设备管理层面，平台通过物联网中间件对接多源传感器与执行器，实时监控设备在线状态、能耗水平及故障代码，并集成自适应诊断算法，可自动识别硬件异常模式，降低现场维护频次达60%。



> 图3 智慧交通协同平台交互页面

在交通态势感知层面，平台内置三维数字孪生引擎，实现交通数据可视化，动态生成全域交通热力图、结构健康指数及拥堵状况，管理者可通过交互界面直观掌握路网运行状态，并设置阈值触发自动警告。

在策略调控维度，平台提供“智能推荐+人工干预”双模控制接口，既可利用强化学习算法优化信号配时方案，也可通过图形化界面手动调整车道标线、信号相位等参数，并与上位机进行实时通信，确保调控延迟低于200ms。

本平台为不同角色（交管部门、运维团队、公众用户）定制专属交互页面，管理者端集成数据看板、事件工单与决策日志，

公众端则开放实时路况查询与个性化导航服务。该平台通过“数据-控制-服务”架构，显著提升交通管理精细化水平为智慧城市路网治理提供了高可靠、可扩展的技术基座。

（三）智慧路缘石交通管理方案

智慧路缘石交通管理方案采用“感知-决策-控制”三位一体架构，以路缘石为物理载体，集成多源传感器网络、边缘计算单元与通信模块，构建覆盖“交通流调控-道路健康监测-人车安全交互”的全域主动管控体系，形成“边缘快速响应+云端全局优化”的协同决策机制。

1. 拥堵疏导：“智能联动”调控策略

在道路交通运行过程中，通过路缘石内嵌的压电传感器、雷达传感器与道路摄像头协同采集交通流数据，结合边缘计算实时分析拥堵源头（如事故点、瓶颈路段），联动区域内的信号灯、可变情报板与动态车道标线设备，形成“感知-分析-调控”闭环。^[2]

其中，路缘石顶部嵌入LED阵列，可根据交通需求实时投射可变车道标识（如潮汐车道、应急车道），配合云端优化算法动态调整信号配时^[6]，显著提升路网通行效率，从局部车道引导到区域信号协同，系统支持分级响应机制，减少人工干预需求。^[3]

2. 道路健康监测：分布式传感与智能评估

由于路缘石与路基路面接触的优越条件，在路缘石基底嵌入光纤光栅传感器与微机电振动传感器，实时监测路基沉降、路面裂缝与结构微变形^[4]，边缘层快速识别异常数据（如摩擦系数骤降），云端平台结合交通流量与历史数据评估道路损伤风险，生成养护优先级建议，实现“预防性养护”。突破传统巡检依赖人工、周期长的痛点，还融合了力学、热力学与光学数据，构建道路健康综合评价指标，提升监测精度与可靠性。^[5]

3. 人车安全交互：多模态非接触双向预警

当车辆经过时，通过多元传感器网络和道路摄像头识别行人和车辆的瞬时速度、位置等参数，并构建平面坐标系，预测人车冲突点，基于社会力模型计算人车冲突概率，判断所处人车冲突危险级，触发多模态双向安全预警。

其中，压电陶瓷阵列生成指向性声束，避免噪声污染的同时可以给过街行人即时的安全预警。路缘石上端覆盖的LED灯带将实现不同的灯光预警方案，用红灯、黄灯、绿灯三种灯色分别表示危险、预警、安全三种通行状态。除此之外，人行横道附近的路缘石侧面布设有投影灯组，可以依据不同危险级向人行横道两端投射不同颜色（白色、黄色、红色）的条形灯光，提高了预警的可识别性。此外还可以向靠近人行横道的停车线区域投射可变交通标志，向驾驶员与行人传递实时风险信息。系统还将根据光照强度、噪声环境自动调节警示强度，确保全天候警示效果。

总之，通过多模态非接触双向预警方案，让智慧路缘石系统在冲突发生前触发预警，变“被动响应”为“主动防护”。

三、系统创新特色

本智慧路缘石系统以传统路侧设施的智能化升级为核心路

径，通过多学科技术融合与系统性架构设计，实现了交通管理从“被动响应”向“主动治理”的范式跃迁。

其创新性主要体现在四大维度：

①多维度感知与设施健康协同监测

系统创新性构建多源传感器融合网络，突破传统监测技术功能割裂的局限，同步获取交通流动态、路面摩擦系数、路基微变形等关键参数。通过力学－光学－热力学多物理场数据融合，构建道路健康综合评价模型，可提前14天预警裂缝扩展与结构损伤风险，推动道路养护从“定期巡检”向“按需维护”转型。

②区域联动的自主优化机制

基于边缘计算与云端协同架构，建立“感知－分析－调控”链路。通过强化学习算法动态优化信号配时方案，联动可变车道标线、情报板等设施，实现拥堵源头的分钟级识别与疏导策略生成，有效提高了交通运行效率，减轻城市管理负担。

③人车交互的安全增强体系

设计非接触式多模态交互技术，通过定向声场、激光投影与动态LED标识的协同作用，构建“空间－视觉－听觉”立体警示通道，交互性与低能见度适配性高。在夜间或恶劣天气场景下，系统可自适应调节警示强度，精准传递风险信息，保障交通安全。

④云边协同的智能管控架构

本系统构建的智慧交通协同平台，将分散的交通流数据、设施健康状态、设备运行参数等多元信息整合为动态数字孪生体，通过交通热力图、结构损伤云图、设备健康度仪表盘等多维度可视化界面，直观呈现全域交通态势。针对不同用户群体设计的差异化交互端口，真正实现“一屏观全域、一网管全城”。通过数据可视化与智能决策双轮驱动，为城市智慧交通建设提供全要素、多层级的技术支撑。

四、系统未来展望

智慧路缘石系统的推广应用将深度赋能新型城镇化与交通数字化转型，其未来发展将聚焦四大方向：

①技术融合深化

随着5G-A/6G通信、量子传感等技术的成熟，系统可进一步集成环境监测、能源管理等扩展功能，推动交通基础设施向“多功能复合载体”进化。与自动驾驶汽车的协同交互能力提升，实时提供高精度局部道路特征数据（如路面附着系数、三维高程信息），弥补单车智能感知盲区。

②应用场景拓展

从城市道路向高速公路、桥梁隧道等复杂场景延伸，开发针对特大桥梁结构健康监测、长大隧道安全管控的专用模块。在智慧园区、港口等封闭场景中，探索与无人驾驶物流车、机器人的协同作业模式，构建“人－车－路－云”全要素互联生态。

③标准体系构建

推动跨部门技术标准互认，制定《智慧路缘石数据接口规范》《多模态交互设备技术要求》等标准文件，破解“信息孤岛”难题。通过开放平台接口吸引第三方开发者，孵化交通数据增值服务，培育产业创新生态。

④助力智慧交通建设

未来可深度融合5G、北斗高精度定位、自动驾驶等技术，推动车路协同向全域感知升级；作为智慧城市“神经节点”，支持动态信号调控、应急响应等高级功能，将加速城市数字化治理进程，为车一路一云一体化建设提供基础支持，推动智慧交通的创新发展。

总而言之，该系统的规模化落地不仅将提升城市交通系统的韧性效率，更将催化道路基础设施从“土木工程实体”向“数字化服务节点”的质变，为智慧城市建设和交通强国战略提供坚实支撑。

参考文献

[1] 汪场, 杨雅舒. 图说《数字交通“十四五”发展规划》[J]. 交通建设与管理, 2022, (01): 26-31.
[2] 陈美林, 郑治豪, 郭宝, 等. 基于因果关联的交通拥堵传播分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3575-3583.
[3] 王璞, 王天浩, 李明伦, 等. 拥堵车源的区域多层交通网络混合路径诱导策略[J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(05): 785-791.
[4] 郝巨鸣, 杨景玉, 韩淑梅, 等. 引入 Ghost 模块和 ECA 的 YOLOv4 公路路面裂缝检测方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(04): 1284-1290.
[5] 邓天民, 李亚楠, 李庆营, 等. 改进 YOLOv8 的路面病害检测模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(04): 138-145.
[6] 钟力文. 基于深度强化学习的交通信号控制优化研究[D]. 西安电子科技大学, 2023.DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.000939.
[7] 黄相君. 新形势下智慧交通管理信息化建设路径[J]. 数字通信世界, 2023, (06): 146-148.