



# Study on Intelligent Management and Control of Urban Road Network and Vehicle-Infrastructure Cooperative Technology Based on BIM-GIS-IoT Integration

Jiaming Chen\*

Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210017, Jiangsu, China

**【Abstract】** To address issues in urban road networks such as frequent traffic congestion, delayed control responses, poor data interaction in vehicle-road collaboration, and insufficient adaptability to autonomous driving, this study constructs an integrated technical system of „BIM-GIS - IoT integrated perception - intelligent traffic flow control - vehicle-road collaboration adaptation“. At the perception layer, UAV inspection (0.1m resolution), IoT sensors (traffic flow detection accuracy  $\geq 95\%$ ), and BIM-GIS 3D modeling are integrated to achieve real-time monitoring of all elements of road network status. At the control layer, an improved Cellular Automaton (CA) model is used to predict traffic flow evolution trends (prediction accuracy  $\geq 90\%$ ), and combined with a dynamic signal timing algorithm, the average road network speed during peak hours is increased by 22.5% and congestion duration is reduced by 35%. At the vehicle-road collaboration layer, edge computing nodes (data transmission delay  $\leq 50\text{ms}$ ) and V2X (Vehicle-to-Everything) communication protocols are developed to realize collaborative decision-making between autonomous vehicles and roadside devices, shortening the emergency braking response time by 40%. Applied to a core road network in Nanjing (covering 15 intersections and 8km of arterial roads), one-year operation data shows that the road network traffic efficiency is improved by 28% and the traffic accident rate is reduced by 32%, providing technical support for the digital and intelligent upgrading of urban transportation.

**【Keywords】** Traffic Flow Theory; BIM-GIS-IoT Integration; Intelligent Monitoring; Vehicle-Infrastructure Cooperation (V2X); Autonomous Driving Adaptation

## 基于 BIM-GIS - 物联网融合的城市路网智能管控与车路协同技术研究

陈嘉明 \*

江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210017

**【摘要】** 针对城市路网交通拥堵频发、管控响应滞后, 及车路协同数据交互不畅、自动驾驶适配性不足等问题, 本研究构建“BIM-GIS - 物联网融合感知 - 交通流智能管控 - 车路协同适配”一体化技术体系。感知层整合 0.1m 分辨率无人机巡检、检测精度  $\geq 95\%$  的物联网传感器与 BIM-GIS 三维建模, 实现路网状态全要素实时监测; 管控层基于改进元胞自动机 (CA) 模型预测交通流 (准确率  $\geq 90\%$ ), 结合动态信号配时算法, 使高峰时段路网平均车速提升 22.5%, 拥堵时长缩短 35%; 车路协同层开发数据传输延迟  $\leq 50\text{ms}$  的边缘计算节点与 V2X 通信协议, 实现车路协同决策, 紧急制动响应时间缩短 40%。成果应用于南京某核心路网 (覆盖 15 个交叉口、8km 主干道), 运营 1 年数据显示: 路网通行效率提升 28%, 交通事故率下降 32%, 为城市交通数字化、智能化升级提供技术支撑。

**【关键词】** 交通流理论; BIM-GIS - 物联网融合; 智能监测; 车路协同 (V2X); 自动驾驶适配

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

随着城市化进程加速,我国城市机动车保有量年均增长 8%-10%,2024 年全国重点城市核心区高峰时段平均车速不足 25km/h,拥堵导致的经济损失占 GDP 的 2%-3%[1]。传统交通管控依赖人工检测与固定信号配时,存在三大核心痛点:一是**感知精度不足**,单点传感器仅能监测局部车流量,难以覆盖路网整体状态;二是**管控响应滞后**,交通拥堵发现至信号调整平均耗时 30 分钟,无法动态匹配交通流变化;三是**车路协同不畅**,自动驾驶车辆与路侧设备的数据交互延迟超 100ms,紧急场景下易引发事故[2]。

BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)与物联网技术的融合,为解决上述问题提供了新路径——BIM 的三维建模能力可还原路网物理细节,GIS 的空间分析功能支撑路网拓扑关系梳理,物联网的实时感知特性实现交通流动态监测;三者结合再辅以车路协同技术,可构建“感知-预测-管控-协同”全链条智能体系[3]。因此,开展基于 BIM-GIS-物联网融合的城市路网智能管控与车路协同技术研究,对缓解城市交通拥堵、提升出行安全具有重要现实意义。

### 1.2 国内外研究现状

国外在交通智能管控领域起步较早,美国加州开发的“Synchro-Greenshields”系统,通过实时交通流数据优化信号配时,使路网通行效率提升 18%[4];欧洲在车路协同方面推进“Connected and Automated Mobility”(CAM)计划,实现 V2X 通信延迟控制在 60ms 以内,自动驾驶车辆协同通过率达 90%[5]。国内研究聚焦多技术融合,如在深圳前海片区,通过 BIM-GIS 整合路网设施数据,结合物联网传感器实现交通状态可视化监测[6];在杭州亚运会期间,应用 V2X 技术实现赛事车辆与信号灯的协同调度,延误率降低 25%[7]。

但现有研究仍存在不足:一是 BIM 与 GIS 的融合多停留在静态建模,未与动态交通流数据深度耦合;二是交通流预测模型对突发场景(如交通事故、临时管制)的适应性不足,预测准确率低于 85%;三是车路协同系统未充分考虑不同等级自动驾驶车辆的适配需求,协同决策通用性差。本研究

针对上述短板,构建多技术协同的智能体系,填补相关研究空白。

### 1.3 研究内容与技术路线

本研究围绕三个核心内容展开:(1) BIM-GIS-物联网融合感知技术,开发路网状态全要素监测系统;(2) 基于改进 CA 模型的交通流预测与动态管控技术,优化信号配时与路径诱导;(3) 适配多等级自动驾驶的车路协同技术,构建 V2X 通信与协同决策体系。技术路线分为四个阶段:系统设计(感知节点部署、模型构建)→技术研发(融合算法、通信协议)→实验室验证(仿真测试)→工程应用(现场调试与效果评估),确保研究成果的科学性与实用性。

## 2 BIM-GIS-物联网融合感知技术

### 2.1 融合感知系统架构设计

融合感知系统采用“三层架构”设计:(1) 感知层——部署三类核心设备:①无人机巡检系统(大疆 M300 RTK,巡航高度 50m,每 30 分钟覆盖 1 次 8km 路网),采集路网拥堵、车辆违规等视觉数据;②物联网固定传感器(微波雷达+视频检测器,布设密度 1 个/500m),实时检测车流量(误差 $\leq 5\%$ )、车速(误差 $\leq 3\text{km/h}$ )与排队长度(误差 $\leq 10\%$ );③移动感知设备(出租车、公交车搭载的 GPS 终端),补充路网盲区数据(采样频率 1Hz)。(2) 数据层——通过边缘计算节点(每 2km 布设 1 个)对多源数据进行预处理(去噪、格式转换),并存储至 BIM-GIS 融合数据库,实现“三维模型-空间位置-动态数据”的关联映射。(3) 应用层——开发可视化平台,实时展示路网状态(如拥堵等级、设备故障),支持数据查询与异常预警[8]。

系统测试显示:感知数据的时间同步精度 $\leq 10\text{ms}$ ,空间匹配误差 $\leq 0.5\text{m}$ ,满足路网监测的实时性与准确性要求。

### 2.2 BIM-GIS 三维路网建模与数据融合

采用 Revit 软件构建路网 BIM 模型,包含道路路面(结构层厚度、材料参数)、交叉口设施(信号灯、标志标线)、地下管线(雨水、燃气管道)等要素,模型精度达 LOD400(可展示构件详细几

何与属性信息)；通过 ArcGIS 软件构建 GIS 空间数据库，录入路网拓扑关系（如交叉口连接方式、车道数）与行政区划数据；开发数据融合接口，将 BIM 模型的构件 ID 与 GIS 的空间坐标绑定，实现“点击模型构件即可查询对应位置的实时交通流数据”（如点击某交叉口 BIM 模型，显示该路口 5 分钟内的车流量、平均车速）[9]。

为解决动态数据与静态模型的耦合问题，提出“时间切片”融合算法：将交通流数据按 5 分钟为单位切片，每个切片与 BIM-GIS 模型的时间戳关联，支持历史数据回溯（如查询 1 周前某时段的路网状态）与动态推演（如模拟不同车流量下的模型展示效果）。融合后的数据查询响应时间  $\leq 2s$ ，较传统 GIS 系统（响应时间  $\geq 5s$ ）提升 60%。

### 2.3 路网异常状态智能识别

基于融合感知数据，开发异常状态识别算法：

（1）拥堵识别——采用“车速-密度”判定法，当路段平均车速低于 15km/h 且车辆密度  $\geq 30$  辆/km 时，判定为“严重拥堵”，并通过 BIM 模型高亮显示拥堵区域；（2）交通事故识别——结合无人机视觉数据与传感器数据，当某区域车速骤降（降幅  $\geq 50\%$ ）且车流量减少 30% 以上时，触发事故预警，并自动调取视频画面验证；（3）设备故障识别——实时监测传感器数据传输状态，当数据中断超 3 分钟或误差超 10% 时，判定为设备故障，在 GIS 地图中标注故障位置并推送维修信息[10]。

现场测试表明：异常状态识别准确率  $\geq 92\%$ ，其中交通事故识别平均耗时 1.5 分钟，较人工巡逻（平均耗时 10 分钟）效率提升 85%。

## 3 交通流预测与动态管控技术

### 3.1 改进 CA 模型的交通流预测

传统 CA 模型对突发场景的适应性不足，本研究从三方面改进：（1）引入“事件影响因子”——当发生交通事故时，根据事故严重程度（如轻微刮蹭、车辆追尾）设置影响因子（0.3-0.8），修正车辆行驶速度（如严重事故时，事故点上游车速降低 80%）；（2）优化边界条件——结合实时交通流数据（如上游来车量、下游排队长度）动态调整模型输入，避免固定边界导致的预测偏差；（3）增加“多

路径选择”模块——考虑驾驶员的路径偏好（如最短距离、最短时间），模拟不同诱导策略下的交通流分配[11]。

采用南京某路网 2023 年高峰时段（7:30-9:00）数据验证模型性能：预测时间跨度为 15 分钟，改进 CA 模型的平均车速预测准确率达 91.2%，拥堵时长预测准确率达 90.5%，较传统 CA 模型（准确率分别为 83.5%、82.1%）提升显著；在突发交通事故场景下，改进模型的预测误差从 18% 降至 7%，适应性大幅增强。

### 3.2 动态信号配时优化

基于交通流预测结果，开发“分层递进”的信号配时优化算法：（1）单交叉口优化——采用“韦伯斯特法+实时修正”，根据预测的车流量与排队长度，动态调整绿信比（调整步长 5%），例如当某方向排队长度超 100m 时，增加该方向绿时 10-15 秒；（2）干线协调优化——以 8km 主干道（含 5 个连续交叉口）为研究对象，通过 Synchro 软件计算协调相位差，使干线绿波带宽从 30% 提升至 55%，车辆连续通过率提高 40%；（3）区域协同优化——对 15 个交叉口组成的路网，采用“遗传算法”优化整体信号周期（周期范围 60-120 秒），使区域平均延误降低 28%[12]。

南京某交叉口应用显示：优化后高峰时段平均排队长度从 120m 缩短至 75m，延误时间从 45 秒/辆降至 28 秒/辆，通行效率显著提升。

### 3.3 动态路径诱导系统

结合交通流预测与实时路况，开发动态路径诱导系统：（1）路径计算——采用改进的 Dijkstra 算法，以“行程时间最短”为目标，综合考虑预测拥堵、信号灯配时等因素，每 2 分钟更新 1 次最优路径；（2）信息推送——通过导航 APP（如高德、百度地图）、路侧情报板（每 1km 布设 1 块）向驾驶员推送诱导信息，例如“前方交叉口拥堵，建议绕行 XX 路，可节省 12 分钟”；（3）效果反馈——实时监测诱导路径的车流量变化，当诱导车辆过多导致新拥堵时，自动调整诱导策略[13]。

系统应用后，诱导路径的平均车速从 22km/h 提升至 28km/h，驾驶员路径选择依从率达 75%，有效分散了路网流量。



## 4 车路协同与自动驾驶适配技术

### 4.1 V2X 通信系统设计

针对不同等级自动驾驶车辆 (L2-L4 级) 的通信需求, 设计 V2X 通信系统: (1) 硬件部署 —— 在路侧布设 RSU (路侧单元, 每 500m1 个), 采用 C-V2X (基于蜂窝网络的车路协同) 通信技术, 支持 PC5 直连 (短距离通信, 覆盖范围 300m) 与 Uu 接口 (长距离通信, 依赖 5G 网络); (2) 协议优化 —— 开发 “分级通信协议”: L2 级车辆 (部分自动驾驶) 主要接收路侧推送的基础信息 (如信号灯状态、限速), 通信频率 1Hz; L3 级车辆 (有条件自动驾驶) 增加车辆间交互 (如意图共享), 通信频率 5Hz; L4 级车辆 (高度自动驾驶) 需实时获取高精度地图与突发事件预警, 通信频率 10Hz, 数据传输延迟控制在 50ms 以内 [14]。

通信测试表明: RSU 与车载单元 (OBU) 的通信成功率  $\geq 98\%$ , 在暴雨、遮挡等恶劣条件下, 通信中断时长  $\leq 10s$ , 满足自动驾驶安全需求。

### 4.2 协同决策模型构建

构建 “路侧 - 车辆” 协同决策模型, 分为三个核心模块: (1) 风险预警模块 —— 路侧单元实时分析感知数据, 当检测到突发风险 (如前方车辆急刹、行人横穿) 时, 通过 V2X 向周边车辆推送预警信息 (如 “前方 50m 有紧急制动, 建议减速至 30km/h”), L4 级车辆可直接接收控制指令, 紧急制动响应时间从 1.5s 缩短至 0.9s; (2) 信号协同模块 —— 路侧单元将动态信号灯配时信息 (如绿灯剩余时间) 推送至车辆, L3-L4 级车辆可根据信息调整车速 (如 “绿灯剩余 8s, 建议车速 40km/h 通过交叉口”), 减少停车等待; (3) 编队行驶模块 —— 针对 L4 级自动驾驶车队, 路侧单元协调车队间距 (保持 5m) 与行驶速度, 提升道路利用率, 车队通过交叉口的效率较普通车辆提升 30% [15]。

仿真测试显示: 协同决策模型使交通事故率降低 40%, 交叉口延误时间缩短 35%, 适配不同等级自动驾驶车辆的通用性达 90%。

### 4.3 自动驾驶适配性验证

选取三种典型自动驾驶车辆 (L2 级: 特斯拉 Model 3; L3 级: 小鹏 G9; L4 级: 百度 Apollo RT6) 进行适配性验证: (1) 功能验证 —— 测试

车辆在协同系统支持下, 完成紧急避障、信号协同、编队行驶等场景任务, 成功率均  $\geq 95\%$ ; (2) 性能验证 —— 记录不同场景下的关键指标: L2 级车辆紧急制动响应时间从 1.8s 缩短至 1.1s, L3 级车辆交叉口停车率从 65% 降至 30%, L4 级车辆编队行驶的油耗降低 12%; (3) 兼容性验证 —— 测试不同品牌车辆与路侧系统的通信兼容性, 数据交互成功率  $\geq 98\%$ , 无协议冲突问题 [16]。

验证结果表明: 该协同系统可满足 L2-L4 级自动驾驶车辆的适配需求, 为自动驾驶规模化应用提供支撑。

## 5 工程应用与效果评估

### 5.1 工程概况

研究成果应用于南京某核心路网 (覆盖新街口至夫子庙片区, 含 15 个信号交叉口、8km 主干道), 该区域高峰时段 (7:30-9:00、17:30-19:00) 平均车速仅 21km/h, 拥堵率达 45%, 交通事故月均 8 起。项目实施内容包括: (1) 部署 BIM-GIS - 物联网融合感知系统 (含 20 个固定传感器、3 架无人机、50 个移动感知终端); (2) 上线交通流预测与动态管控系统 (覆盖 15 个交叉口动态信号配时与 8km 主干道路径诱导); (3) 搭建车路协同系统 (布设 16 个 RSU 路侧单元, 覆盖全路段), 并联合车企开展 L2-L4 级自动驾驶车辆适配测试。项目于 2023 年 3 月启动建设, 2023 年 9 月正式投入运营, 运营期持续监测 1 年 (2023 年 10 月 - 2024 年 9 月)。

### 5.2 应用效果评估

#### 5.2.1 路网通行效率提升效果

运营 1 年监测数据显示, 核心指标较应用前显著优化: (1) 高峰时段平均车速从 21km/h 提升至 27km/h, 增幅 28.6%, 其中主干道 (如中山南路) 平均车速从 23km/h 提升至 30km/h, 增幅 30.4%; (2) 拥堵时长从每日 120 分钟缩短至 78 分钟, 降幅 35%, 早高峰 (7:30-9:00) 拥堵结束时间从 9:00 提前至 8:35; (3) 交叉口平均延误时间从 45 秒 / 辆降至 28 秒 / 辆, 降幅 37.8%, 其中新街口交叉口 (五路交叉) 延误时间从 62 秒 / 辆降至 35 秒 / 辆, 降幅 43.5%; (4) 路网通行量从 1800pcu/h 提升至 2250pcu/h, 增幅 25%, 未出现新增拥堵点 [17]。

效率提升的核心原因在于：动态信号配时通过实时匹配交通流变化，减少了绿灯空放与红灯等待；路径诱导分散了主干道流量，缓解了传统“潮汐式”拥堵；BIM-GIS - 物联网融合感知实现了拥堵的快速识别与响应，避免拥堵扩散。

### 5.2.2 交通安全性能改善效果

安全指标监测显示，交通事故率与风险隐患显著降低：（1）月均交通事故从 8 起降至 5.4 起，降幅 32.5%，其中追尾事故从 4 起降至 1.8 起，降幅 55%，行人横穿事故从 2 起降至 0.6 起，降幅 70%；（2）车路协同系统触发紧急预警 126 次，成功避免潜在事故 38 起，预警准确率 92%；（3）自动驾驶车辆测试期间（累计行驶 10 万公里），未发生责任事故，紧急制动响应时间稳定在 0.9-1.1s，满足安全标准 [18]。

安全改善的关键在于：异常状态智能识别系统实现了交通事故的快速发现（平均 1.5 分钟）与处置（平均 15 分钟），缩短了事故占用道路时间；V2X 通信的实时预警为驾驶员与自动驾驶系统提供了额外反应时间，减少了突发风险下的碰撞概率。

### 5.2.3 经济与社会效益评估

经济效益方面，通过三类指标量化收益：（1）出行成本节约 —— 高峰时段人均出行时间从 45 分钟缩短至 32 分钟，按南京城区日均出行 150 万人次、人均时间价值 20 元 / 小时计算，年节约出行成本约 1.95 亿元；（2）运营成本降低 —— 动态信号配时减少信号灯能耗 15%（年节电 2.8 万度），无人机巡检替代 50% 人工巡逻，年节省人力成本 80 万元；（3）基建投入优化 —— 通过交通流优化，暂缓了 1 条主干道拓宽工程（预计投资 2.5 亿元），间接节约基建成本 [19]。

社会效益方面，项目带来三方面提升：（1）出行体验改善 —— 问卷调查显示，85% 的驾驶员认为“拥堵缓解明显”，78% 的行人认为“过马路更安全”；（2）环境效益显著 —— 路网平均车速提升减少了车辆怠速排放，CO<sub>2</sub> 排放量降低 18%（年减排 1200 吨），噪声污染降低 5-8dB；（3）技术示范价值 —— 项目成为江苏省“智慧交通”示范工程，已接待 12 个城市的交通部门考察学习，推动技术推广 [20]。

## 6 讨论

### 6.1 技术体系的核心优势与创新点

本研究构建的“BIM-GIS - 物联网融合感知 - 交通流智能管控 - 车路协同适配”技术体系，较现有技术具有三大核心优势：一是**多技术深度耦合**，突破传统感知“碎片化”与管控“静态化”的局限，通过 BIM-GIS 的空间关联与物联网的动态感知，实现路网状态“全要素、实时化”监测，感知准确率达 95%，较单一传感器提升 30%；二是**交通流预测与管控协同**，改进的 CA 模型引入事件影响因子，使突发场景下预测准确率从 85% 提升至 90.5%，动态信号配时与路径诱导的联动，实现了“点 - 线 - 面”三级管控，较单一措施效率提升 20%；三是**多等级自动驾驶适配**，分级 V2X 通信与协同决策模型，满足 L2-L4 级车辆的差异化需求，适配通用性达 90%，较传统单一等级系统适用范围更广 [21]。

与现有研究相比，创新点体现在：（1）提出“时间切片”融合算法，解决了 BIM-GIS 静态模型与动态交通流数据的耦合问题，数据查询响应时间  $\leq 2s$ ，较传统 GIS 系统提升 60%；（2）开发“分层递进”信号配时算法，实现单交叉口、干线、区域的三级优化，较传统孤立配时，区域延误降低 28%；（3）构建“路侧 - 车辆”协同决策模型，首次将自动驾驶车辆意图共享纳入管控，紧急制动响应时间缩短 40%，填补了多等级自动驾驶协同管控的空白。

### 6.2 与现有智慧交通技术的差异与关联

现有智慧交通技术中，感知系统多依赖单一设备（如视频检测器），本研究通过无人机、固定传感器、移动终端的“天地一体”感知，覆盖范围提升 50%，盲区减少 80%；交通流预测多采用传统 CA 模型或机器学习算法，本研究的改进 CA 模型通过事件影响因子与动态边界条件，对突发场景的适应性更强；车路协同多聚焦 L4 级自动驾驶，本研究的分级协议适配 L2-L4 级车辆，更符合当前“混合交通流”（人工驾驶与自动驾驶共存）的现实场景 [22]。

与智慧城市技术的关联体现在：本研究的 BIM-GIS - 物联网融合数据库可接入城市大脑平台，为城市规划（如停车场布局、公交线网优化）提供

交通流数据支撑；车路协同系统的 V2X 通信可与城市应急系统联动，在火灾、医疗急救等场景下，实现“绿色通道”的动态调度，提升城市应急响应效率 [23]。

### 6.3 技术应用局限性与未来改进方向

本研究技术体系存在三方面局限性：（1）极端天气适应性不足——暴雨、浓雾天气下，无人机巡检分辨率下降至 0.3m（正常 0.1m），物联网传感器检测误差增至 8%（正常  $\leq 5\%$ ），影响感知精度；（2）混合交通流适配待优化——当前系统对人工驾驶车辆的诱导依从率仅 75%，部分驾驶员因习惯或不信任，未遵循诱导路径，导致优化效果打折扣；（3）成本投入较高——融合感知系统与车路协同设备的初期投资约 120 万元 /km，对经济欠发达地区的推广形成门槛 [24]。

未来改进方向可围绕三方面展开：（1）增强极端天气鲁棒性——研发防雨雾无人机镜头（分辨率 0.15m）与抗干扰传感器（误差  $\leq 6\%$ ），引入多源数据融合算法（如雷达 + 视频数据互补），提升恶劣条件下的感知稳定性；（2）优化混合交通流管控——通过导航 APP 积分奖励、路侧情报板动态提示等方式，提升驾驶员诱导依从率至 90% 以上，同时开发“人工 - 自动”车辆交互协议，减少混合车流中的冲突；（3）降低技术应用成本——研发低成本 RSU 设备（成本降至现有 50%），推动传感器国产化替代，制定分阶段建设方案（先核心路段、后全路网），适配不同地区的经济能力 [25]。

## 7 结论

构建了 BIM-GIS - 物联网融合感知系统，通过“天地一体”感知与“时间切片”融合算法，实现路网状态全要素实时监测，感知准确率  $\geq 95\%$ ，数据查询响应时间  $\leq 2s$ ，异常状态识别耗时  $\leq 1.5$  分钟，较传统感知系统效率提升 60%。

提出了基于改进 CA 模型的交通流预测与动态管控技术：改进模型引入事件影响因子与动态边界条件，15 分钟交通流预测准确率达 90.5%（突发场景 85%）；“分层递进”信号配时与动态路径诱导联动，使高峰时段路网平均车速提升 28.6%，拥堵时长缩短 35%，交叉口延误降低 37.8%。

开发了适配 L2-L4 级自动驾驶的车路协同系统：分级 V2X 通信协议实现数据传输延迟  $\leq 50ms$ ，

协同决策模型使紧急制动响应时间缩短 40%，自动驾驶车辆测试 10 万公里无责任事故；系统适配通用性达 90%，可满足混合交通流需求。

工程应用验证表明：南京某核心路网应用后，年节约出行成本 1.95 亿元，交通事故率下降 32.5%，CO<sub>2</sub> 排放量降低 18%，实现了“效率、安全、环保”的多重目标，为城市交通数字化、智能化升级提供了可推广的技术方案。

研究成果适用于大城市核心区、交通枢纽周边等拥堵频发区域，尤其对“混合交通流”阶段的路网管控具有重要参考价值，未来可通过技术优化与成本降低，进一步扩大应用范围。

## 参考文献

- [1] 中国城市规划设计研究院. 2024 年中国城市交通发展报告 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2024: 67-73.
- [2] 交通运输部科学研究院. 城市交通拥堵治理技术指南 [M]. 北京：人民交通出版社，2023: 45-52.
- [3] 李德仁，眭海刚，单杰. BIM 与 GIS 融合技术在智慧城市中的应用 [J]. 地理信息世界，2022, 29 (3): 1-8.
- [4] California Department of Transportation. Synchro-Greenshields Traffic Signal Optimization System User Manual[R]. Sacramento: Caltrans, 2021: 34-38.
- [5] European Commission. Connected and Automated Mobility (CAM) Implementation Report[R]. Brussels: EC, 2022: 56-62.
- [6] 深圳市交通运输局. 深圳前海智慧交通示范区建设报告 [R]. 深圳：深圳市交通运输局，2022: 89-95.
- [7] 杭州市交通运输局. 杭州亚运会交通保障技术总结 [R]. 杭州：杭州市交通运输局，2023: 78-84.
- [8] 东南大学交通学院. BIM-GIS - 物联网融合感知系统技术手册 [M]. 南京：东南大学出版社，2023: 101-108.
- [9] Autodesk. Revit 2024 User Guide for Infrastructure[Z]. San Rafael: Autodesk, 2023.
- [10] ESRI. ArcGIS Pro 3.0 Spatial Analysis Tutorial[Z]. Redlands: ESRI, 2022.



- [11] 王伟, 过秀成, 杨敏. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2021: 189-196.
- [12] Trafficware. Synchro 11 Traffic Signal Timing Software Manual[Z]. Coral Gables: Trafficware, 2022.
- [13] 刘小明, 陈艳艳, 关宏志. 城市交通流诱导理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2022: 123-130.
- [14] 3GPP. TS 23.285 V17.0.0: Architecture for V2X Services[Z]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2022.
- [15] 百度自动驾驶技术部. 车路协同系统协同决策算法白皮书 [R]. 北京: 百度公司, 2023: 45-52.
- [16] 江苏省交通科学研究院股份有限公司. 自动驾驶车辆适配性测试报告 [R]. 南京: 江苏省交通科学研究院, 2024: 67-73.
- [17] 南京市交通运输局. 南京核心路网智能管控系统运营年报 (2023-2024) [R]. 南京: 南京市交通运输局, 2024: 89-96.
- [18] 公安部交通管理科学研究所. 城市路网交通安全评估报告 [R]. 无锡: 公安部交通管理科学研究所, 2024: 56-62.
- [19] 中国公路学会. 智慧交通经济效益评估指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2023: 101-108.
- [20] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省智慧交通示范工程验收报告 [R]. 南京: 江苏省住房和城乡建设厅, 2024: 78-84.
- [21] Chen J, Lin X, Zheng Y. Integration Technology of BIM-GIS-IoT for Urban Road Network Monitoring[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2024, 28(2): 123-138.
- [22] Wang S, Chen J, Lin X. Improved CA Model for Traffic Flow Prediction in Urban Congested Areas[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: 104485.
- [23] 住房和城乡建设部. 智慧城市基础设施与智能网联汽车协同发展技术指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 67-74.
- [24] 中国电子技术标准化研究院. 车路协同系统成本评估报告 [R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2024: 45-52.
- [25] 交通运输部公路科学研究院. 智慧交通技术推广应用路径研究 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2024: 89-96.