

# 基于车路协同的智能交安设施布局优化方法探讨

杨 朴

江苏现代交通科技有限公司 江苏 南京 210002

**【摘 要】**：车路协同技术通过车辆与道路设施的实时信息交互，为智能交通安防提供了全新解决方案。本文系统梳理了车路协同环境下智能交安设施的布局优化理论框架，分析了交通流特性、安全风险等级、能源消耗等多目标约束下的布局优化模型，并结合典型城市道路案例探讨了动态自适应布局技术。研究表明，融合时空数据特征的深度学习模型可使设施布局效率提升 40%以上，车路协同与智能化的结合将成为未来智能交安的核心发展方向。

**【关键词】**：车路协同；智能交安设施；布局优化；多目标算法；动态自适应

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.029

## 引言

随着智能网联汽车渗透率的快速提升，传统静态交通安防设施已难以满足动态交通流的安全管控需求。车路协同技术通过 V2X 通信协议，实现车辆、道路、行人等交通要素的实时数据交互，为智能交安设施的精准布局提供了数据支撑。智能交安设施布局优化旨在通过科学规划设施类型、位置及密度，实现交通安全风险最小化、通行效率最大化、建设成本最优化的多目标平衡。然而，复杂交通场景下的时空数据耦合特性（如早晚高峰流量突变、天气影响下的视距变化）、设施间通信覆盖盲区等问题，导致传统基于经验的布局方法误差率高达 25%~30%。本文从车路协同关键技术、布局优化模型构建、智能算法应用及工程实践等方面展开综述，为智能交通系统的规划设计提供理论与技术参考。

## 1 工程案例概述

### 1.1 项目概况

沪武高速公路太仓至常州段是沪武国家高速公路（G4221）的重要组成部分，其中苏沪界向西至董浜枢纽段为与沈海高速公路（G15）共线段。本项目路线起自 G15 苏沪界，向西经过太仓、常熟、张家港、江阴、惠山、武进，终于常州南互通，全长 134.865km。全线采用两侧拼宽为主的总体扩建方案，其中苏沪界至太仓北枢纽段、董浜枢纽至常州南互通段采用双向八车道高速公路标准进行扩建，路基宽度 42 米；太仓北枢纽至董浜枢纽段采用双向十车道高速公路标准进行扩建，路基宽度 53.5 米。

### 1.2 交通量组成及车型构成

根据本项目工交通量预测数据，远景年总质量大于 25t 的车辆自然数占比仅为 7.7%，低于 20%；载质量大于 7 吨的货车和 19 座以上的客车车辆占比为

22.1%，低于 50%。本项目护栏形式选取时考虑护栏最大横向动态位移外延值（W）作为护栏受碰撞后的变形量控制指标，且护栏设计无需额外提高防护等级。

## 2 车路协同关键技术与设施布局需求

### 2.1 车路协同核心技术体系

DSRC 专用短程通信工作于 5.8~5.9GHz 频段，通信时延<10ms，有效距离 300~500m，适用于实时安全信息交互；基于 4G/5G 网络，覆盖范围达 1~3km，支持非视距通信，可实现交通态势的广域感知。激光雷达（精度±5cm）、毫米波雷达（探测距离 200m）、视觉摄像头（分辨率≥8MP）组成多模态感知网络，实时获取车辆位置、速度、行人轨迹等数据；部署于路侧设施，实现数据本地处理（延迟<50ms），减少云端传输压力。采用卡尔曼滤波（KF）与贝叶斯网络融合多源数据，提升目标检测准确率（如行人检测精度从 85%提升至 95%），为设施布局提供可靠输入。

### 2.2 智能交安设施布局的核心需求

#### 2.2.1 安全风险分级管控

事故高发路段需加密智能警示灯（间距≤50m）与毫米波雷达（检测盲区<10m），结合历史事故数据（如弯道侧翻率>30%）优化布局；部署智能信号灯（带行人过街预测功能）与 V2X 路侧单元（RSU），通信覆盖半径≥200m，确保车辆冲突预警时间≥5s。互通前一般设置四级出口预告标志，枢纽前设置六级出口预告标志，同时在互通前 1km 和枢纽前 1km 和 2km 出口预告门架均设置“前方出口，请提前变线”警告标志，互通出口采用阶梯实线；标线采用高亮反光材料。另外，针对距离较近的互通（如沙溪枢纽和沙溪互通），互通出口标志采用了组合预告，同时在 1.5km 处设置树杈型图形化，并在有条件的情况下在互通出口前增设一级 4km 树杈型出口预告标志。

## 2.2.2 交通流高效疏导

快速路瓶颈点设置可变限速标志（更新频率 $\geq 1$ 次/分钟）与车流监测雷达（采样间隔 $\leq 2s$ ），根据实时流量调整限速值，提升通行效率 15%~20%；公交优先路段通过车路协同信号优先算法，缩短公交车辆等待时间 $\geq 30\%$ ，需在站台 50m 范围内部署 RSU 与摄像头。互通枢纽出口预告均从 3km 开始预告，并对枢纽增设了 1.5km 图形化标志；针对沙溪枢纽和沙溪互通距离较近的情况，出口标志采用组合预告的形式，同时在 1.5km 处设置树杈型图形化标志，并在沙溪互通出口前增设一级 4km 树杈型出口预告标志；双向十车道路段各出口前采用阶梯状实线，其中一、二车道分界线采用虚线，出口前最外侧车道施划 200 米纵向减速标线，以提醒驾驶人减速行驶；除设置标志、标线等引导、警告设施以规范行车秩序外，智慧运行管理等专业还设置了相关情报板、监控设备等设施，引导行车。

## 2.2.3 低碳节能设计

部署智能能耗管理系统，使非高峰时段智能设施自动进入低功耗待机状态，能耗控制在 $\leq 10W$ ，当检测到车辆接近时，系统可在 0.5s 内快速唤醒设备，实现节能与功能响应的平衡，进一步提升能源利用效率。考虑到冬季等光照不足季节，光伏供电存在不稳定因素，为确保系统持续稳定运行，需配套设计储能系统与电网备用方案。储能系统可选用锂电池组，其容量应依据区域历史气象数据、设备日均耗电量进行精准计算。以某典型路段为例，经测算，配置容量为 500kWh 的储能系统，可满足连续 3 天光照不足时的基础用电需求。同时，建立与市政电网的智能切换机制，当储能系统电量低于 30%且光伏供电不足时，自动无缝切换至市电供电模式，保障设施正常运转，避免因电力供应中断影响交通服务质量。

## 3 布局优化模型与算法研究进展

### 3.1 传统优化方法

#### 3.1.1 图论模型

Dijkstra 算法用于求解设施间通信链路的最小延迟路径，适用于 RSU 布局中的通信覆盖优化；采用集合覆盖（SC）与最大覆盖（MC）模型确定设施最小数量与最优位置，如在 50km 道路范围内，SC 模型可使摄像头数量减少 18%同时满足全路段监控。

#### 3.1.2 启发式算法

以设施位置坐标为基因编码，适应度函数融合安全、效率、成本目标，某城市道路优化案例中，GA

算法使事故率降低 22%，但收敛速度较慢（迭代次数 $\geq 100$ 代）；通过概率突跳避免局部最优，在交叉口信号灯配时与设施布局联合优化中，SA 算法使平均延误降低 15%，但参数敏感性高（初始温度、冷却速率）。

## 3.2 智能优化算法

（1）机器学习模型：基于历史事故数据训练风险预测模型，输入参数包括道路曲率、坡度、交通流量等，输出安全风险等级（准确率 89%），指导设施差异化布局；分析道路图像特征（如车道线磨损程度、路侧障碍物），自动识别设施缺失区域，检测精度达 92%，较人工巡检效率提升 5 倍。

（2）强化学习：构建“状态-动作-奖励”模型，状态为实时交通流参数（流量、速度、占有率），动作为设施布局调整（如开启应急警示灯），奖励函数为安全风险降低值。

（3）混合算法：利用 CNN 提取道路特征，GA 优化设施位置，某工业园区道路优化中，混合算法使布局方案生成时间缩短 40%，综合性能提升 35%；LSTM 预测交通流时序特征，SA 优化动态设施布局（如临时施工区警示灯布置），预测误差 $< 8\%$ ，响应时间 $< 10min$ 。

## 4 动态自适应布局技术与应用案例

### 4.1 动态布局关键技术

#### 4.1.1 实时数据驱动

为车路协同业务分配专用带宽（ $\geq 100Mbps$ ），确保实时数据（如突发事故位置）传输延迟 $< 20ms$ ；路侧边缘服务器根据实时感知数据（如车辆排队长度 $> 500m$ ），自动调整可变信息标志内容与信号灯配时。在隧道入口、弯道等危险路段部署毫米波雷达（检测距离 300m）与智能爆闪灯（闪烁频率 2Hz）；利用数字孪生技术构建全路段虚拟模型，实时模拟设施布局调整后的交通流状态。隧道内追尾事故率下降 65%，恶劣天气下车辆平均速度保持 60km/h（传统方案为 40km/h）；布局优化周期从人工设计的 2 周缩短至 AI 生成的 2 小时。

#### 4.1.2 设施弹性部署

内置 GPS 与通信模块，通过机器人或无人机部署，响应时间 $< 15min$ ，适用于临时施工区警示；公交车搭载临时信号灯模块，在路口停电时自动启动，维持交通秩序。主干道每 200m 部署 1 套激光雷达+RSU 组合设施，交叉口增设智能行人过街按钮（带压力传感器）；采用强化学习算法优化信号灯配时，结合实

时公交 GPS 数据实现公交优先通行。事故率较改造前下降 38%，行人过高峰时段通行效率提升 22%，碳排放降低 12g/km · 车。

## 5 现存问题与未来趋势

### 5.1 关键技术瓶颈

传统算法在高维约束下易陷入局部最优，需开发基于帕累托前沿的改进算法（如 NSGA-III）；在高楼林立的城市峡谷效应区域，通信中断概率达 15%，需研究超材料天线与中继节点布局策略；太阳能设施的电池衰减（年效率下降 5%）未充分纳入优化模型，需建立动态成本预测模型。

### 5.2 前沿发展方向

#### 5.2.1 数字孪生驱动的精准布局

数字孪生技术利用物联网传感器收集多源数据（如结构应力、环境温湿度、交通流量等），通过高保真三维建模，在虚拟空间中精确复制物理设施，形成动态演化的数字孪生体。此技术在设施布局优化中发挥关键作用，能够整合历史数据与预测算法，模拟不同方案的全生命周期性能演变。

对于桥梁和道路设计，数字孪生体能模拟长期服役中的老化及环境影响，预测路面破损速率与养护需求，并通过大数据分析和机器学习将性能预测误差控制在 5% 以内，提高布局方案的科学性和可靠性。

此外，该技术实现了“以虚控实”的闭环管理，基于虚拟模型实时指导施工与运维决策。例如，在施工阶段根据沉降模拟调整路基参数；运营期间，对比虚拟预测与实际监测数据，精准识别隐患并制定预防性维护策略。这种精准管理模式减少了经验决策的盲目性，确保了交通基础设施的安全稳定运行。

#### 5.2.2 绿色能源与智能设施融合

随着绿色能源的应用，光伏-储能一体化设备，如光伏智能信号灯，利用光伏发电和储能系统满足 24 小时用电需求，实现无市电区域的自给自足，特别适

合偏远地区或临时设施。无线能量传输技术（WPT）为路侧传感器等智能设施供电，无需传统电缆，降低成本超过 30%，减少对地下电力网络的依赖，增强设施的灵活性和可扩展性。这两项技术共同推动了绿色能源与智能设施的融合，减少了对传统电网的依赖并提升了部署效率。

#### 5.2.3 人机共驾场景下的协同布局

（1）差异化信息交互策略：自动驾驶车辆依赖高精度地图，需融合卫星定位、路侧感知与车载数据，通过边缘计算实现分钟级更新，保障导航精度。人工驾驶车辆则通过动态信号灯、可变信息标志和主动发光警示标志获取直观、实时的路况与安全提示，提升响应效率。

（2）脑机接口技术赋能的协同交互：利用脑电传感器实时监测驾驶员状态，结合 AI 分析其注意力与反应能力。在突发情况下，系统联动路侧设施（如调整警示灯闪烁频率、切换标志内容），增强警示效果。研究表明，该技术可提升人工驾驶应急反应速度约 20%，显著降低事故风险。

（3）协同布局的实施框架：构建“车-人-路-云”一体化协同网络：硬件升级感知与交互设备，软件开发数据融合与控制算法，管理层面统一标准与规则，打破数据孤岛。最终实现安全、高效的人机协同交通环境。

## 6 结论

基于车路协同的智能交安设施布局优化是智能交通系统的核心组成部分，其技术演进经历了从经验驱动到数据驱动、从静态布局到动态自适应的转变。当前，深度学习与强化学习算法在多目标优化中表现出显著优势，而智能化技术与绿色能源技术为未来发展提供了新方向。未来需进一步突破复杂场景下的通信可靠性、全寿命周期成本优化等瓶颈，构建“安全、高效、低碳、智能”的新一代交通安防体系，为智能网联汽车的大规模商用奠定基础。

## 参考文献：

- [1] 面向路侧视角目标检测的轻量级 YOLOv7-R 算法[J]. 张小俊; 奚敬哲; 史延雷; 袁安录. 汽车工程, 2023(10).
- [2] 考虑通信时延的智能网联汽车协同定位方法[J]. 闵海根; 李尧; 汪建球; 张磊; 李杰; 童星; 吴霞; 赵祥模. 中国公路学报, 2023(06).
- [3] 顾及通信延迟的车路协同高精度定位[J]. 张红娟; 钱闯; 招倩莹; 李文卓; 李必军. 测绘学报, 2024(01).
- [4] 基于点云极化表征与孪生网络的智能车定位[J]. 陶倩文; 胡钊政; 万金杰; 胡华桦; 张明. 电子与信息学报, 2023(04).