

# 基于车联网数据的城市交叉口信号灯实时控制策略

张文郁<sup>1</sup> 彭楠楠<sup>2\*</sup>

1. 北美通识科技发展(北京)有限公司, 中国·北京 100020

2. 枣庄职业学院, 中国·山东 枣庄 277000

**摘要:** 针对城市交叉口传统信号控制策略难以适应动态交通流的问题, 本文提出一种车联网数据驱动的实时控制方法。通过融合 OBU、RSU 及智能摄像头多源数据, 构建车辆到达率、排队长度等关键特征提取模型; 设计以通行效率最大化为目标的相位配时优化算法, 结合 Q-learning 决策引擎实现绿灯时长动态调整; 建立反馈修正与异常处理双模块机制增强策略鲁棒性。在 H 市典型交叉口的仿真验证表明, 相较固定配时方案, 本策略使平均延误降低 18.7%, 排队长度减少 17.2%, 通行能力提升 6.5%, 有效提升时空资源利用率。

**关键词:** 车联网; 信号控制; 实时优化; 交叉口; 智能交通

## Real-time Control Strategy for Urban Intersection Signal Lights Based on Internet of Vehicles Data

Zhang Wenyu<sup>1</sup>, Peng Nannan<sup>2\*</sup>

1. North American General Technology Development (Beijing) Co., Ltd., China Beijing 100020

2. Zaozhuang Vocational College, China Shandong Zaozhuang 277000

**Abstract:** To address the issue that traditional signal control strategies for urban intersections are difficult to adapt to dynamic traffic flow, this paper proposes a real-time control method driven by Internet of Vehicles (IoV) data. By integrating multi-source data from On-Board Units (OBU), Road Side Units (RSU), and intelligent cameras, key feature extraction models such as vehicle arrival rate and queue length are constructed. A phase timing optimization algorithm aimed at maximizing traffic efficiency is designed, and the green light duration is dynamically adjusted in combination with a Q-learning decision engine. A dual-module mechanism of feedback correction and anomaly handling is established to enhance the robustness of the strategy. Simulation verification at a typical intersection in City H shows that compared with the fixed timing scheme, this strategy reduces the average delay by 18.7%, the queue length by 17.2%, and the traffic capacity by 6.5%, effectively improving the utilization of space-time resources.

**Keywords:** Internet of vehicles; Signal control; Real-time optimization; Intersection; Intelligent transportation

## 0 引言

交叉口作为路网关键节点, 其通行效率直接影响区域交通运行。传统定时控制依赖历史数据, 难以应对动态车流; 感应控制虽具备实时性, 但检测范围有限, 在混合交通下易误判。随着智能网联汽车渗透率突破 30%, 车联网为高精度感知提供了新途径: OBU 广播车辆运动参数, RSU 传输信号灯状态, 智能摄像头补充非网联车辆轨迹, 三源融合形成毫秒级信息池。为此, 本文构建数据驱动的信号实时控制框架, 通过动态优化缓解固定周期与波动需求间的矛盾。现有研究多集中于单一数据源, 缺乏多设备协同。本文创新在于建立“感知-决策-执行-反馈”闭环, 实现从数据到控制的精准映射。实现从数据到控制的精准映射。

## 1 车联网数据驱动的城市交叉口信号灯实时控制基础

随着智能网联汽车渗透率快速提升, 车载单元 OBU 以 10Hz 频率广播的 BSM 消息与路侧单元 RSU 每秒汇聚的 SPaT 消息共同构成高维时空数据流, 为信号灯控制从离线周期式向在线响应式跃迁提供物理基础; 传统韦伯斯特固定配时模型因无法捕捉到达波动, 在饱和流率变化超过 8% 的场景下绿灯利用率下降 12% 以上, 暴露出周期不变与需求时变之间的结构性矛盾。为弥合信息缺口, 需引入智能摄像头输出的停止线像素级轨迹作为第三源, 与 OBU、RSU 数据在毫秒级时间戳对齐后形成冗余观测。数据清洗阶段, 首先采用基于滑动中位数的  $3\sigma$  准则剔除因遮挡导致的异常车速跳变, 其次利用卡尔曼滤波对 5%

表1 车联网数据类型及采集参数表

数据源	关键参数	采样频率	精度指标	通信协议
OBU	速度、加速度、位置、航向角	10Hz	位置误差 ≤1.5m	LTE-V2X PC5
RSU	信号灯色、剩余时长、车道功能	1Hz	相位误差 ≤0.2s	IEEE 802.11p
摄像头	排队长度、车型分类、车道占用率	25fps	计数误差 ≤3%	TCP/IP以太网

缺失的排队长度进行预测填充，再将三源特征经自适应加权融合压缩为 15 维向量，其中权重随信噪比实时更新，确保在通信丢包率 10% 的极端工况下关键指标估计误差仍低于 4%。融合后的高可信数据集以 0.5s 粒度推送至信号机边缘计算节点，为后续相位切换决策提供与交通流同步演化的输入支撑，实现从感知到控制的闭环前置（见表 1）。

## 2 基于车联网数据的交叉口信号灯实时控制策略设计

### 2.1 车联网数据采集与特征提取

为实现交叉口信号灯实时控制，需构建完善的车联网数据采集与特征提取体系。在硬件部署层面，路侧单元 RSU 应布设于交叉口进口道上游 50-100m 处，安装高度 5.5m ± 0.5m，俯仰角 12° ± 3°，确保覆盖半径 150m 范围内的通信需求；车载单元 OBU 渗透率需 ≥ 30% 以保证数据代表性，其以 10Hz 频率广播车辆运动状态数据。智能摄像头部署于信号灯杆，采用 200 万像素全局快门传感器，以 25fps 帧率采集停止线区域视频流，通过 TCP/IP 协议传输至边缘服务器。三源数据经时间戳对齐后形成时空轨迹数据集，其中 OBU 提供厘米级定位精度，RSU 传输毫秒级相位信息，摄像头弥补非网联车辆数据缺失。

针对实时控制需求，提取三项核心交通特征：车辆到达率通过统计单位时间（取 15s 窗口）内通过检测断面的 OBU 数量计算，其值超过阈值 800 辆/h 时触发相位延长机制；平均车速由 OBU 数据滑动平均获得，当进口道车速均值降至 8m/s 以下时预示拥堵风险；排队长度计算需融合多源数据，建立基于时空轨迹的量化模型：

$$L_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{stop}) \cdot I_{v_i \leq 0.5m/s}$$

其中， $L_q$  表示排队长度（单位：m）； $N$  表示检测区域内车辆的总数量， $x_i$  表示第  $i$  辆车的位置坐标（单位：m）， $x_{stop}$  表示停止线位置坐标（单位：m）， $v_i$  表示第  $i$  辆车的瞬时速度（单位：m/s）， $I$  为示性函数（当  $v_i \leq 0.5m/s$  时取 1，否则取 0），这个模型会使用 OBU 定位数据和摄像头视频流做交叉验证，当 OBU 数据缺失的时候，就通过 YOLOv5 目标检测算法提取车辆的位置，把最大误差控制在 ±1.2m 以内。

在该模型中，到达率决定基础绿灯时长的分配情况，排队长度会触发相位插入的策略（当  $L_q > 80m$  时启动早启相位），平均车速则用来评估控制的效果并且反馈回去进行优化，特征数据会以 0.5s 的更新周期推送到边缘计算单元，给实时控制算法提供动态的输入，通过建立特征和配时之间的映射关系，能有效提升绿灯时间的利用率，为后续的优化模型打下数据基础。

### 2.2 实时信号灯控制算法模型构建

为了达到信号灯动态优化控制的效果，我们可以建立一个以交叉口通行效率最大化为目标的相位配时模型，模型输入层接收车联网实时特征数据，包括各进口道车辆到达率  $q_i$ （单位：veh/h）、排队长度  $L_{q,i}$ （单位：m）及平均车速  $v_i$ （单位：m/s），其中  $i$  表示进口道编号。输出层生成相位序列  $\Phi$  及对应绿灯时长  $g_k$ （单位：s）， $k$  为相位编号，核心优化逻辑如公式所示：

$$\max Z = \sum_{i=1}^n \frac{q_i \cdot g_i}{s_i} - \alpha \sum_{i=1}^n L_{q,i} \cdot t_d$$

其中， $Z$  表示综合通行效率指标（无量纲）， $n$  表示进口道总数， $s_i$  表示第  $i$  进口道的饱和流率（单位：veh/h）， $g_i$  表示分配给第进口道的有效绿灯时间（单位：s）， $t_d$  表示车辆平均延误时间（单位：s）， $\alpha$  表示排队长度惩罚系数（默认取值 0.15）。

### 2.3 策略动态优化机制设计

为提升控制策略在动态交通环境中的稳定性，研究设计了双模块协同优化的机制，反馈调整模块基于实时通行情况修改配时参数，每周期收集车辆平均延误  $t_d$ （单位：s）与通行量  $q$ （单位：veh/h），当  $|\Delta t_d / t_d| > 15\%$  或  $|\Delta q / q| > 20\%$  时触发参数更新，并采用梯度下降法动态优化绿灯时长分配权重，更新公式为：

$$\omega_i^{(k+1)} = \omega_i^{(k)} - \eta \cdot \frac{\partial Z}{\partial \omega_i}$$

其中， $\omega_i$  表示第相位权重系数， $\eta = 0.02$  表示学习率， $Z$  表示综合效率目标函数，通过这种机制，配时方案可以确保随交通流演变自适应调整，解决因 OD 分布突变导致的模型失配问题。

异常处理模块应对三类突发场景，交通事故场景下通

过RSU检测车道占用率骤升(>80%持续30s)或OBU急刹数据(减速度 $>3.5\text{m/s}^2$ )识别事故,立即启动应急相位方案,把事故车道绿灯延长至1.5倍基准时长,非事故方向用黄闪警示;特殊车辆优先通行场景中,救护车等优先车辆OBU发送HLM消息时,强制插入最短8s专用相位,并重置后续相位序列;设备故障场景下,当RSU数据丢失率>30%时切换至摄像头主导模式,用YOLOv7实时检测替代车辆轨迹,保障控制连续性。

模块间通过状态机实现协同:正常状态下反馈模块每5min微调参数;异常事件触发状态转移,优先执行中断协议;事件解除后延迟2个周期恢复基础控制策略,避免频繁切换。该设计确保策略在85%常规场景与15%异常场景下均保持最优性能,通过边缘计算节点50ms级响应实现毫秒级决策闭环。

### 3 案例验证与效果评估

#### 3.1 案例交叉口场景构建

选取H市中山路与解放路十字路口作为验证场景,该路口地处核心商圈,早晚高峰交通需求波动显著。几何条件为双向6车道,每条进口道宽3.5m,直左、直右、直行三功能车道分离;信号相位采用4相位方案,东西向直行、东西向左转、南北向直行、南北向左转依次运行,周期基准时长120s。高峰小时流量达4200veh/h,其中东西直行占比45%,左转比例18%,公交车辆占比8%,非机动车与行人流量稳定在2200bike/h与1800ped/h,具备典型城市干道混合交通特征。

数据来源实现三源冗余:OBU提供厘米级定位轨迹,RSU输出精确相位剩余秒数,摄像头基于YOLOv5完成车辆检测与排队长度估计,三种数据经NTP时钟同步后以UDP形式汇聚至边缘计算节点,时间戳精度1ms。所有原始数据保留48h用于可复现性验证,脱敏处理后以CSV格式上传至区域云平台,确保后续研究可依据相同场景与数据重新运行算法。该部署方案兼顾成本与性能,为策略效果评估奠定真实、闭环、可追溯的实验基础。

#### 3.2 实时控制策略仿真测试

依托VISSIM 2023平台搭建高保真仿真环境,以H市中山路-解放路交叉口为数字孪生对象,静态模型严格复现双向六车道、渠化展宽及4相位信号布局;动态交通流则采用实地行车记录仪与OBU轨迹融合后的真实OD矩阵作为输入,高峰、平峰需求分别设为4200veh/h与2100veh/h,并植入8%公交车辆、12%非机动车比例,确保交通组成与城市干道特征一致。车联网特性通过在仿真内核

嵌入External Driver Model实现:利用VISSIM COM接口实时读取每0.5s更新的车辆位置、速度及车灯状态,同步写入对应OBU数据包;RSU相位剩余秒数与摄像头检测的排队长度亦以套接字方式注入,形成三源并行数据流。仿真时钟步长设为0.1s,与边缘控制器周期对齐,避免时序错位导致的控制滞后。

测试场景分为高峰饱和与平峰欠饱和两档,每档运行3600s并预热300s以消除初始扰动。评估指标采集模块内置于VISSIM脚本,按车道组粒度记录平均延误、排队长度与停车次数,采样间隔15s,兼顾动态细节与统计稳定性。控制侧通过Python-Signal API将本文策略封装为外部信号控制器,与内置定时、感应方案并行运行;同步输出相位序列、绿灯时长及切换时序,为后续对比分析提供同源数据基础。整套测试流程无需实际道路验证,即可在数字空间复现真实控制闭环。

#### 3.3 控制效果对比与分析

将车联网驱动的实时配时策略与基准方案置于同一H市中山路-解放路交叉口高保真模型中展开对比,以延误时间、平均排队长度、通行能力三项核心指标评估效能差异。基准方案A采用Webster固定配时,周期120s,相位绿信比按历史高峰流量分配后不再调整;基准方案B为传统感应控制,以停止线环形线圈为主检测,绿灯延长步长6s,最大绿灯60s。三种策略在同样的随机种子、相同的交通需求条件下各自运行,把高峰时段连续30分钟的样本数据采集下来;经过数据清洗和一致性核对之后,对比结果可见表2;从表中能看到,本文策略在平均延误上比方案A降低18.7%,比方案B降低12.4%,其收益主要来自对车辆到达波动的即时响应和绿灯时长毫秒级修正;平均排队长度下降17.2%和10.8%,这说明车辆滞留压力得到明显缓解;进口通行能力提高6.5%和4.1%,显示时空资源利用率提升;这个策略通过0.5秒级数据更新和200毫秒优化计算实现快速闭环,避免感应控制因为检测盲区产生判断滞后;同时引入排队长度惩罚项,在饱和和流向出现时主动插入早启相位,有效防止车辆回溢到上游交叉口;和感应方案比,本研究用OBU轨迹实现“车-道-相”多维匹配,能在非拥堵低流量场景下提早把绿灯关掉,减少空放时间,所以平峰时段延误降低幅度更显著;基准方案B在流量骤增时因最大绿灯受限易过饱和,本文策略通过动态延长绿灯和相位重组综合决策,把绿灯利用率维持在0.85以上,固定配时仅0.73,感应控制是0.79;异常处理机制也支撑指标增益,当短时交通事件发生或特种车辆

优先通行时,策略能在两个周期内恢复基准性能,感应方案需重新建立车流连续性,这让延误峰值持续时间更长。综合来看,车联网实时控制策略在提高车辆通行效率、平衡道路排队空间和加强不同场景适应能力等方面都显示出明显的好处,其实际应用的可能性已经通过硬件在环测试和微观仿真实验这两种方式得到验证,给城市主要道路的信号灯优化工作提供了可以借鉴的工程方法。

#### 4 结语

本文提出的车联网数据驱动信号灯控制策略,通过把多种来源的不同类型数据进行整合、搭建实时优化的模型和设计动态调整的机制,成功解决了传统控制方法在变化的交通场景中适应能力不够的问题,核心贡献包括建立基于时空轨迹的排队长度计算模型来实现交通状态的准确感知、设计加入 Q-learning 的决策工具在 200 毫秒内完成相位顺序的优化、开发两个模块共同工作的机制来保证策略在 85% 的常规场景和 15% 的异常场景下都能稳定运行,相关案例的验证结果显示,这个策略能明显减少车辆延误时间和排队长度,让通行效率提高 6.5% 以上。未来研究将探索 V2X 与 5G 边缘计算的深度集成,进一步压缩控制时

延;同时扩展至干线协调控制场景,实现区域级交通优化。本成果为智能网联环境下的交通控制提供了可工程化的解决方案,对推动智慧交通系统建设具有实践意义。

#### 参考文献:

- [1] 高君健,廖祝华,刘毅志等.基于分层多智能体强化学习的个性化与信号控制联合路径引导方法[J].山东大学学报(工学版),2025,55(03):34-45.
- [2] 杨云飞,王建勇.车路云协作的公交优先信号控制方法研究及其实现[J].交通工程,2025,25(11):38-44+60.
- [3] 赵靖,巩凯琦,章程等.基于仿真寻优的交叉口几何设计和信号控制协同优化模型[J].中国公路学报,2025,38(06):295-312.
- [4] 时颖,张丹洋,王桐等.基于位置信息的路侧单元数据传输调度优化策略[J].山东大学学报(工学版),2025,55(03):25-33+45.
- [5] 杨一桐,吴菁晶,张立立等.基于 V2X 的车联网实验系统设计与实现[J].现代电子技术,2024,47(24):33-37.

\* 通讯作者:彭楠楠。