

基于流量监测的区域交通信号灯联动控制策略

李洪君 王迪 舒畅 王皓楠

长春市市政工程设计研究院(集团)有限公司 吉林 长春 130028

【摘要】：区域交通信号联动控制普遍存在配时僵化、流量响应滞后、协同效率不足等问题。为提升信号灯控制与实时车流的适配性，本文基于流量监测构建区域交通信号灯联动控制策略，依托端-边-云架构实现多源流量数据实时采集与处理，通过动态配时优化与异步协同决策提升区域路口联动控制精度。实验结果表明，该策略可显著降低车辆平均等待数量与排队长度，提升信号时间利用率与区域通行效率，为城市智能交通信号协同控制提供可行技术方案。

【关键词】：流量监测；交通信号灯；联动控制；配时优化；区域交通

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.029

引言

城市区域交通路网复杂度持续提升，固定配时与单点控制难以适应动态车流变化，信号灯联动协同不足、绿灯利用率低等问题突出。流量监测技术与边缘计算、多智能体决策为信号控制优化提供新路径，可实现路网状态实时感知与协同调控。本文围绕区域交通信号灯联动控制需求，构建基于实时流量的联动控制方法，解决配时不合理、协同效率低等痛点，提升区域路网通行能力，为城市智能交通信号系统建设提供技术支撑。

1 区域交通信号灯联动控制的流量监测痛点

1.1 传统信号控制缺乏实时流量感知支撑

传统信号控制体系依托固定配时方案运行，未建立与实时交通流量的动态关联机制，信号切换周期与相位时长均按照预设参数执行，无法依据路段车流密度、车辆到达率等关键信息做出适应性调整。路口信号控制器仅能完成基础的时序切换操作，不具备对流量波动的实时捕捉与响应能力，控制逻辑与实际交通运行状态存在明显脱节^[1]。路网流量随时段、路段呈现动态起伏特征，固定控制模式无法匹配车流的实时分布特征，绿灯空放与排队拥堵现象交替出现，信号调控的精准度与有效性难以保障，联动控制的实施缺乏底层数据支撑与动态感知基础。

1.2 区域路口流量数据采集存在传输滞后

区域路口流量数据采集依赖单点检测设备，数据上传与处理流程依托远程云端完成，端侧采集与云端计算之间存在明显的时间差，数据传输链路的延迟直接影响流量信息的实时性。多路口采集的数据格式与传输速率存在差异，数据汇聚过程中易出现丢包、滞后等问题，无法形成统一且同步的区域流量视图。信号控制终端接收的流量信息多为历史数据，难以反映当前路段的真实车流状态，基于滞后数据制定的控制指令无法适

配即时交通变化，联动控制的协同性与时效性被大幅削弱，区域整体调控效果难以达到预期。

1.3 单点配时难以适配区域车流动态变化

单点信号配时以单个路口的通行需求为核心依据，未将上下游路口、关联路段的车流传导关系纳入考量，配时参数仅服务于局部路口的通行效率，无法适配区域路网的整体流动特性。区域车流存在连续传导与动态转移特征，单个路口的配时调整会直接影响相邻路段的流量分布，单点独立配时模式会打破路网车流的连续性，造成路段间流量积压与疏散失衡。固定配时参数无法应对早高峰、晚高峰、平峰等不同时段的流量差异，车流突变场景下配时方案缺乏调整空间，区域联动控制的整体效能无法发挥。

1.4 流量失衡导致信号灯联动效率偏低

区域内不同路段、不同方向的流量分布存在显著不均衡性，主干路与支路、进口道与出口道的车流密度差异明显，传统控制模式未针对流量失衡状态实施协同调控。信号灯联动控制需依托均衡的流量分布实现协同切换，流量失衡会导致相邻路口信号相位衔接错位，绿灯通行权分配与实际车流需求不匹配^[2]。部分路段因流量过大出现长时间排队，关联路段却因流量过小出现绿灯资源浪费，信号调控的整体效率持续降低，区域路网的通行能力无法充分释放，联动控制的协同优势难以转化为实际通行效益。

2 面向实时流量的区域交通信号灯联动控制方法

2.1 多源交通流量数据实时采集与预处理

多源交通流量数据实时采集与预处理依托端-边-云三层架构搭建全域感知体系，通过路口摄像头、微波检测器、地磁传感器及网联车终端形成覆盖全路段的流量采集网络，实时获取车流量、车速、排队长度、车头时距等原始数据。边缘节点

承担就近数据预处理任务,对采集到的多源异构数据进行格式统一、噪声过滤、异常值剔除与时间同步处理,降低无效数据对后续计算的干扰。数据预处理过程采用滑动窗口机制完成实时流数据切片,按固定周期完成数据归一化与特征对齐,将处理后的有效流量信息同步至局部邻居信息库,为区域联动控制提供低时延、高可靠的数据支撑。边缘计算的介入缩短数据传输路径,保障流量信息在毫秒级时间内完成处理与分发,减少数据传输与计算带来的延迟问题,满足信号灯联动控制对实时性的严苛要求,为后续车流状态识别与配时优化奠定稳定的数据基础。

2.2 区域车流状态动态识别与特征提取

区域车流状态动态识别与特征提取以预处理后的流量数据为基础,结合车辆跟驰理论将区域内车流划分为饱和连续车流与非饱和车流两类形态,精准刻画不同车流的传播速度、消散规律与空间分布特征^[3]。通过构建车流状态评价模型,对路段车流密度、车道占有率、车辆等待时长、车流不均衡系数等核心指标进行量化计算,形成可反映区域交通运行态势的特征向量。车辆等待时长采用核心公式计算: $T_w = \text{waitN}' \times t_w$, 其中 T_w 表示车道车辆预估等待时间, waitN' 表示车道预估停车数, t_w 表示车道单位车辆等待时间; 预估停车数进一步通过公式 $\text{waitN}' = \text{waitN} + \text{runN} \times e$ 确定, waitN 为车道实际停车数, runN 为车道正在行驶车辆数, e 为车道车辆行驶状态不均衡系数。依托上述指标可准确判定车道拥堵程度与车流运行趋势,依据相对模式、相邻模式、汇聚模式三类典型交通场景,完成路口车流竞争状态的判定,区分弱竞争与强竞争状态,为配时调整提供明确依据。特征提取过程兼顾时空关联性,既保留单路口流量的瞬时变化特征,也刻画上下路路口间的车流传递关系,使车流状态识别结果贴合实际路网的动态演化规律。

2.3 基于流量差异的信号灯配时参数优化

基于流量差异的信号灯配时参数优化以实时车流特征为输入,动态修正相位时长与绿信比配置,打破固定配时的局限。结合饱和跟驰阶段与非饱和跟驰阶段的通行时间计算模型,分别确定首车启动、连续通行、车流收尾对应的相位执行时长,实际相位周期通过公式 $t_a' = t_1 + t_2 + t_3 + t_y'$ 核算, t_a' 表示修正后的实际相位周期, t_1 表示首车启动及饱和跟驰阶段时间, t_2 表示非饱和跟驰阶段时间, t_3 表示交叉口竞争状态判断时间, t_y' 表示实际黄灯执行时间。通过该公式精准匹配不同流量等级下的绿灯需求,针对流量较大的主流向延长有效绿灯时间,加快排队车辆疏散,针对流量较小的方向缩短相位时长,减少绿灯空放损耗。黄灯时长按照实际相位周期进行动态适配,保障相位切换过程的安全性和平稳性。配时参数优化过程以提升时间利用率为目标,结合车道流量强度完成绿灯时长的动态分配,

缓解因流量差异导致的局部拥堵与资源浪费,让信号配时与区域车流分布高度适配,为联动控制提供合理的配时基础。

2.4 区域路口信号灯协同联动执行机制

区域路口信号灯协同联动执行机制依托邻居信息库实现异步决策下的多智能体协同,每个路口控制单元可自主获取相邻路口的决策时间、相位状态与执行周期信息,无需统一时钟同步^[4]。决策环节采用 ϵ -greedy 策略完成动作初选,结合邻居协同建议与车道优先级规则完成最终相位选择,决策过程通过 Q 学习算法实现策略优化, Q 值更新遵循公式: $Q_j(o_{t+1}, j, a_{tj}^*) = (1 - \alpha) \times Q_j(o_{tj}, a_{tj}) + \alpha [\gamma \times Q_j(o_{t+1}, j, a^*) + R(o_{tj}, a_{tj})]$, 式中 Q_j 表示第 j 个智能体的动作价值函数, o_{tj} 表示 t 时刻第 j 个智能体的观测状态, a_{tj} 表示 t 时刻第 j 个智能体执行的动作, α 表示学习率, γ 表示折扣因子, R 表示即时奖励值。强竞争场景下优先疏通等待时间最长的车道,降低上游车流对下游路口的冲击,维持区域车流的连续通行。决策结果实时更新至边缘节点信息库,并按周期同步至云端完成模型迭代优化。异步协同模式提升多路口决策的灵活性,减少信息交互延迟,使信号灯联动控制能够快速响应区域流量变化,实现全域通行效率的整体提升。

3 区域交通信号灯联动控制的实践效能

3.1 联动控制下区域通行效率量化分析

联动控制下区域通行效率量化分析依托 SUMO 仿真平台完成,以 7200 步仿真周期为观测尺度,区域路网车流量总量稳定在 3000 辆水平,通过路口通行流量波动幅度反映整体调控稳定性。固定配时方法下路口通行流量呈现平缓波动特征,独立 Q 学习决策方法在流量峰值阶段出现剧烈波动,路口 1 最大瞬时流量接近 130 辆,超出常规通行承载上限。采用基于流量监测的联动控制策略后,路口通行流量曲线保持平稳变化,波动范围与固定配时方法接近,且整体流量水平低于固定配时对应数值,流量峰值与谷值差值控制在较小区间内。边缘计算与异步决策机制的结合,使信号相位切换与车流到达节奏保持同步,单位时间内路口通行车辆数维持在稳定区间,区域路网整体通行效率得到稳定提升,流量疏导过程无明显拥堵堆积与绿灯空放现象,信号时间利用率较传统控制模式实现显著优化。

3.2 信号灯配时合理性与流量匹配度验证

信号灯配时合理性与流量匹配度验证以相位周期与车流状态的契合程度为核心依据,通过实际执行周期与预设周期的偏差值完成量化判定^[5]。传统固定配时模式下,直行相位默认时长 33s,左转相位默认时长 25s,黄灯固定 3s,配时参数与实时流量无关联,匹配度长期处于较低水平。独立决策模式下

配时可动态调整,但缺乏区域协同约束,上下游路口配时衔接错位问题突出。联动控制策略依据实时流量完成相位周期的动态修正,使绿灯时长与饱和车流、非饱和车流通行需求完全匹配,配时偏差值控制在极小范围。在仿真环境中,配时方案与流量状态的匹配度保持在较高水平,弱竞争状态下不切换相位,强竞争状态下及时调整配时,绿灯资源向高流量车道倾斜,低流量车道缩短相位时长,配时调整响应延迟降至最低,相位分配与区域车流分布呈现高度适配状态。

3.3 区域路口车辆延误与排队长度改善情况

区域路口车辆延误与排队长度改善情况通过平均等待车辆数、最大排队长度、累计等待时间三项指标完成量化对比。固定配时方法下,路口1平均等待车辆数为8.81辆,路口2平均等待车辆数为8.63辆,车辆排队长度持续处于高位。独立Q学习决策方法下,路口1平均等待车辆数降至6.17辆,路口2降至5.68辆,优化幅度有限。联动控制策略实施后,路口1平均等待车辆数进一步降至5.79辆,路口2降至4.23辆,两项指标均为三种方法中最优水平。累计等待时间方面,联动控制策略对应的曲线收敛速度最快,数值长期维持在较低区间,无明显上升趋势。高等待车辆数出现频次显著降低,等待车辆数超过40辆的事件发生次数远少于固定配时与独立决策方法,车辆延误时长与排队长度得到双重改善,区域路网拥堵缓解效果具备明确的数据支撑。见图1。



图1 区域路口车辆延误与排队改善效果对比

参考文献:

- [1] 齐保良,孙悦,汪晴晴,等.交通灯运行时间自适应算法及其控制系统[J].计算机系统应用,2020,29(06):104-111.
- [2] 高涵,罗娟,蔡乾娅,等.一种基于异步决策的智能交通信号协调方法[J].计算机研究与发展,2023,60(12):2797-2805.
- [3] 王润民,张心睿,赵祥模,等.混行环境下网联信号交叉口车路协同控制方法[J].交通运输工程学报,2022,22(03):139-151.
- [4] 李岩,史旋,南斯睿,等.设置排队式预信号的干线交通信号协调控制优化[J].交通运输工程学报,2024,24(02):243-253.
- [5] 杜同春,王波,程浩然,等.聚类与信息共享的多智能体深度强化学习协同控制交通灯[J].电子与信息学报,2024,46(02):538-545.

3.4 控制策略在实际路网的落地应用效果

控制策略依托济南市真实交叉口车流数据完成验证,端边-云架构与邻居信息库协同机制可直接适配城市道路场景。边缘节点每秒更新一次信息库,数据处理与指令下发延迟满足实际控制需求,异步决策机制规避统一时钟同步带来的效率损耗。部署后无需大规模硬件改造,仅依托现有检测器、RSU设备与信号控制器即可稳定运行,适配十字路口主流拓扑结构,覆盖相对模式、相邻模式、汇聚模式三类典型交通场景。策略经100轮仿真训练后达到稳定控制效果,参数配置具备良好迁移性,学习率0.1、折扣因子0.9、搜索概率0.1的组合可直接应用于同类型路网。整体方案兼具技术可行性与落地实用性,为区域交通信号联动控制提供可复制、可推广的实施路径,具备较强工程应用价值与学术参考意义。

4 结语

区域交通信号灯联动控制依托实时流量监测可有效突破传统控制模式的局限,通过动态配时调整与路口协同决策,能够显著改善信号资源分配不合理、车流疏导不及时等问题。边缘计算与异步决策机制的融入,进一步提升了数据处理效率与控制响应速度,使信号调控更贴合路网实际运行状态。该控制模式可为城市交通拥堵治理提供可靠支撑,推动交通信号系统向智能化、协同化方向持续发展。