

考虑速度感知的最大压力交叉口信号动态控制方法

姚一帆, 林志阳*

上海应用技术大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月20日

摘要

随着城市交通需求持续增长, 信号交叉口成为制约通行效率的重要因素。传统最大压力控制主要依赖流量或排队信息, 对车辆速度等动态状态信息利用不足, 在动态识别拥堵和信号切换方面存在一定局限, 难以满足现代交通系统日益复杂和多变的需求。引入速度信息刻画拥堵强度, 旨在增强动态信号控制对排队和速度变化的敏感性, 及时优化信号配时以适应快速变化的交通需求和提升交叉口通行效率。本文提出考虑速度感知的最大压力交叉口信号动态控制算法, 基于SUMO (Simulation of Urban Mobility) 软件进行仿真, 并与固定配时控制和传统最大压力控制算法进行对比。以上海市吴中路与虹许路交叉口为研究对象进行仿真分析, 结果表明, 所提出的速度感知最大压力算法的平均旅行时间比固定配时缩短52.0%、比传统最大压力缩短9.4%, 平均延误对比固定配时与传统最大压力分别减少83.5%与32.5%。本研究可为城市交通信号优化提供参考, 进一步扩展至多路口联动及智能网联环境下的自适应信号调度。

关键词

城市交通, 速度感知最大压力动态控制, SUMO-TraCI, 信号交叉路口

Speed-Aware Max-Pressure Dynamic Signal Control Method for Urban Intersections

Yifan Yao, Zhiyang Lin*

College of Economics and Management, Shanghai Institute of Technology, Shanghai

Received: March 30, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 20, 2026

Abstract

With the continuous growth of urban traffic demand, signalized intersections have become a critical

*通讯作者。

bottleneck constraining traffic efficiency. Traditional maximum pressure control strategies primarily rely on traffic flow or queue length information, while insufficiently exploiting dynamic vehicle state information such as speed. As a result, they exhibit limitations in dynamically identifying congestion and adjusting signal phases, making it difficult to meet the increasingly complex and variable demands of modern traffic systems. By incorporating speed information to characterize congestion intensity, this study aims to enhance the sensitivity of dynamic signal control to both queue formation and speed variations, thereby enabling timely optimization of signal timing to adapt to rapidly changing traffic demand and improve intersection operational efficiency. A speed-aware maximum pressure-based dynamic signal control algorithm for signalized intersections is proposed. Simulation experiments are conducted using the Simulation of Urban Mobility (SUMO) platform, and the performance of the proposed method is compared with that of conventional fixed-time control and traditional maximum pressure control algorithms. Based on simulation experiments conducted at the Wuzhong Road and Hongxu Road intersection in Shanghai, the results demonstrate that the speed-aware max-pressure algorithm reduces the average travel time by 52.0% and 9.4% compared with fixed-time control and the conventional max-pressure approach, respectively. Furthermore, the average delay is decreased by 83.5% and 32.5% under the proposed method. This work can serve as a reference for urban traffic signal optimization and can be further extended to multi-intersection coordinated control and adaptive signal scheduling in intelligent traffic environments.

Keywords

Urban Traffic, Speed-Aware Max-Pressure Control, Sumo-Traci, Signalized Intersections

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市区域道路交叉口的交通信号灯对车辆通行起着关键作用[1]。信号控制系统通过控制交通信号灯来调节路网中的交通流,进而缓解交通拥堵[2]。传统的信号控制方法主要可以分为两大类:固定配时控制和感应式与自适应控制。固定配时控制通常是基于历史的交通流数据进行离线优化的,但它不能应对实时交通需求的变化[3]。相比之下,SCATS(悉尼协调自适应交通系统)[4]、SCOOT(分周期偏移优化技术)[5]和ROHODES(实时分层优化分布式有效系统)[6]等自适应控制系统,能够根据实时的交通状况动态调整信号控制参数,如周期长度和相位。这些系统虽然在反馈性能上有所提升,但仍存在无法提供性能保证的问题。随着通信、计算与检测技术的进步,基于优化理论的智能信号控制方法日益受到关注。

背压控制凭借高计算效率及最大稳定性保证,成为信号控制的研究热点。背压控制的理论基础源于Tassiulas和Ephremides于1990年在通信网络领域提出的队列调度策略[7]。Varaiya首次将这一背压理论引入城市交通信号控制领域,提出了最大压力(Max-Pressure, MP)控制框架[8]。Varaiya将通信网络节点队列映射为交叉口进口道车辆排队,链路容量约束对应为信号相位绿灯时长,建立了基于排队长度的压力计算模型。该模型将相位压力定义为进出口道排队车辆数之差,优先放行压力最大的相位。然而,经典最大压力控制基于若干理想化假设,在实际应用中存在局限,如未考虑排队溢出对上游交叉口的阻塞效应:忽略车辆具有不同目的地的异质性,难以准确刻画多路径交通流;相位选择完全基于瞬时压力优化,导致绿灯时间碎片化,不符合驾驶员习惯与工程实践;仅依赖排队长度或流量信息,对车辆速度、延误等动态状态信息利用不足。针对上述局限,国内外学者开展了大量改进研究。Gregoire等提出了容量感知

背压控制, 通过引入惩罚函数考虑下游剩余容量, 有效防止排队溢出[9]; Le 等提出了循环最大压力控制, 在保持固定周期与循环相位结构的同时实现压力优化, 提升了工程适用性[10]; Zaidi 等提出了多商品背压控制, 引入虚拟队列处理多目的地车辆流[11]; Li 与 Jabari 提出了位置加权背压控制, 通过车辆空间位置加权更准确地刻画排队分布[12]; Mercader 等提出了基于旅行时间的最大压力控制, 利用旅行时间替代排队长度, 并在实际交叉口进行了现场验证[13]。这些改进算法从不同角度拓展了最大压力控制的理论框架与应用边界, 但对车辆速度信息的利用仍显不足。

车辆速度是交通流的重要参数, 能够灵敏地反映交通拥堵的发生和发展过程。与排队长度相比, 速度变化能够预示拥堵风险[14]。交通需求接近饱和时, 速度下降先于排队形成, 而拥堵消散时速度恢复滞后, 更能反映拥堵持续强度。然而, 经典最大压力控制仅依赖排队长度, 难以区分低速长排队与高速短排队的差异, 也无法利用速度下降这一拥堵前兆实现前瞻控制。现代交通流波动剧烈, 融合速度等多源数据可有效提升控制的敏感性与响应速度。

针对上述问题, 本文提出了考虑速度感知的最大压力交叉口信号动态控制算法, 通过引入速度信息来刻画拥堵强度, 提升信号控制对排队和速度变化的敏感性, 从而实现更及时、精准的信号配时优化。研究通过构建速度感知压力函数, 设计了一种结合排队长度和速度信息的综合压力指标, 建立了速度与压力之间的映射关系, 使压力值能够更敏感地反映交通流的拥堵强度和演化趋势。在仿真验证方面, 使用 SUMO 仿真平台, 以上海市吴中路与虹许路交叉口为研究对象, 进行了与固定配时控制和传统最大压力控制的对比分析。实验结果表明, 所提出的速度感知最大压力模型显著提升了交通流效率, 减少了交通延误, 并在复杂的交通环境中保持了较好的稳定性。

2. 仿真设计

本研究使用 SUMO 交通仿真平台, 利用其内置的 TraCI 模块构建实时交通信号控制系统。其中 SUMO 负责模拟交通仿真过程, Python 控制程序通过 TraCI 接口与仿真环境持续交互, 实现对交通状态的实时感知与动态信号控制策略的数据记录。

2.1. 网络建模与仿真场景设计

本研究以上海市吴中路与虹许路交叉口为模拟场景生成 SUMO 路网, 并在此基础上进行场景校准与信号灯逻辑替换。交叉口结构如图 1 所示。

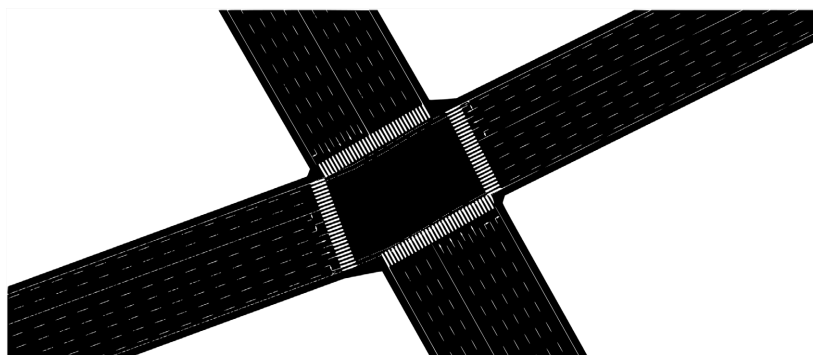


Figure 1. Intersection of Wuzhong road and Hongxu road, Shanghai

图 1. 上海市吴中路与虹许路交叉口

该交叉口为典型的四方向平面交叉口, 包含多个车道组, 分别用于左转、直行与右转通行。采用固定车流量的方式配置交通输入数据。各方向车道在仿真过程中持续产生车辆, 结合交叉口实测, 具体流

量设置如下: 南北直行与右转方向流量设定为 3900 veh/h 与 1260 veh/h, 东西方向直行、左转和右转流量分别为 1050 veh/h、750 veh/h 和 480 veh/h。仿真中统一为小轿车这种类型。

2.2. 相位设定

将交叉口的有效放行相位划分为三类: 南北向直行(NS)、东西向直行(WE)及东西向左转专用(WE_LEFT)。每一放行相位均设置相应的黄灯过渡相位(NS_YELLOW、WE_YELLOW、WE_LEFT_YELLOW), 用于交通流在交叉口内的清空与相位平滑切换。

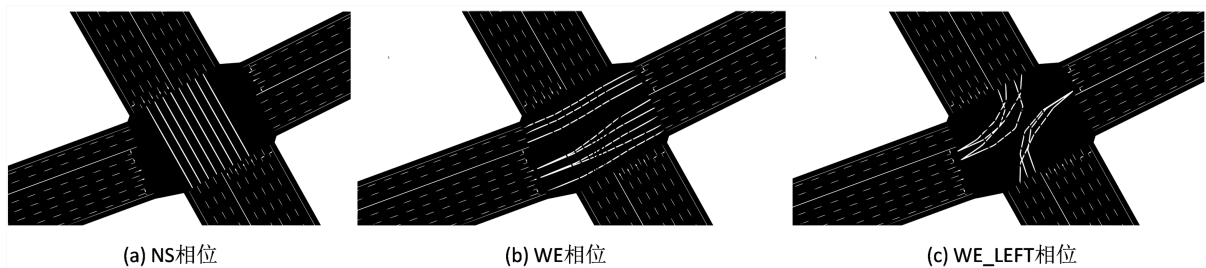


Figure 2. Phase diagram

图 2. 相位示意图

相位与线路的空间对应关系如图 2 所示: 图 2(a)为 NS 相位(南北直行), 图 2(b)为 WE 相位(东西直行), 图 2(c)为 WE_LEFT 相位(东西左转保护模式)。相位切换时, 系统进入固定时长的黄灯阶段, 不进行压力评估和相位切换, 以保障交通安全与清空效率。为避免短周期抖动与频繁切换, 对各放行相位施加最小绿灯时长约束。当前相位绿灯时间超过该阈值后, 重新计算压力。

3. 研究方法

3.1. 速度感知最大压力控制

最大压力控制作为一种实时、自适应的交通信号控制方法, 核心思想是: 在每一控制周期中, 选择“压力”最大的相位放行。压力的定义通常为: 入口排队长度减去出口排队长度之差, 反映当前路口的“供需矛盾”, 如图 3 所示。

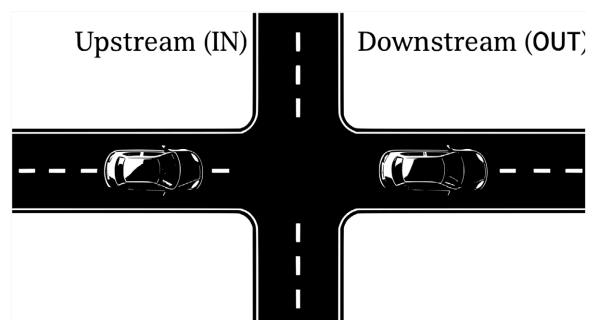


Figure 3. Schematic diagram of upstream and downstream vehicles

图 3. 上下游车辆示意图

图 3 为上下游车辆示意图, 本研究采用基于车道单元的车辆检测方法, 通过 SUMO 的 TraCI 接口实时获取指定车道上的车辆状态。上游检测范围为信号控制交叉口进口道的近端车道组, 下游检测范围为对应的出口车道组。

在传统最大压力算法中, 设定某个相位 p 所控制的入口排队车辆数为 q_{in} , 出口排队车辆数为 q_{out} , 则该相位的压力定义如下

$$P_p = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

传统最大压力控制在拥堵感知上只统计完全停下的车辆, 忽视了低速蠕动的情况, 可能会导致系统低估真实的拥堵程度。

速度感知最大压力采用连续的速度权重, 将每辆车的速度映射为 $0 \sim 1$ 的值, 从而低速蠕动的车辆也被计入有效队列, 避免了低估拥堵的情况。即权重 $\omega_i(t)$ 用来衡量车辆对拥堵的贡献度。车越慢, 所处车道越拥堵, 就应当给这辆车更高的权重; 反之车越快越接近自由流, 就不应当被视为“排队”。若车辆 i 的瞬时速度为 $v_i(t)$, 自由速度为 v_{free} , 则权重设置如下

$$\omega_i(t) = 1 - \frac{v_i(t)}{v_{free}} \quad (2)$$

车辆速度接近零时, 权重 ω_i 趋近 1, 表示几乎静止且拥堵贡献最大; 当速度达到自由流速度 ($v_i = v_{free}$) 时, 权重取 0。

基于此, 车道 L 上的加权车数 $W_L(t)$ 定义如下

$$W_L(t) = \sum_{i \in L} \omega_i(t) \quad (3)$$

对于某相位 p , 设定入口车道 L_{in} 和出口车道 L_{out} , 在时刻 t 的上游加权 $W_{in}(p, t)$ 与下游加权 $W_{out}(p, t)$ 定义为

$$W_{in}(p, t) = \sum_{L \in L_{in}} W_L(t), W_{out}(p, t) = \sum_{L \in L_{out}} W_L(t) \quad (4)$$

进一步, 考虑不同相位在通行能力上的固有差异(车道数不同)。如果仅考虑上游与下游加权车数之差, 则车道数较多的相位在相位选择过程中更容易被赋予绿灯。因此对相位的通行能力做归一, 令 n_{in} 为相位实际控制的入口车道数, n_{out} 为相位实际控制的出口车道数。相位 p 时刻 t 的基准压力 P_{base} 定义为

$$P_{base}(p, t) = \frac{W_{in}(p, t)}{n_{in} \times S_{in}} - \frac{W_{out}(p, t)}{n_{out} \times S_{out}} \quad (5)$$

其中, n_{in} 、 n_{out} 分别为相位 p 的入口、出口车道数; S_{in} 、 S_{out} 分别为相位 p 入口、出口车道的平均饱和和流率, 即每车道每小时最大通行车辆数, 是反映车道实际通行能力的核心参数。结合城市主干道交叉路口实际交通观测数据确定, 依据《城市道路工程设计规范》(GB 50220-2018), 城市主干道车道的饱和和流率标准值为 1800~2200 pcu/h/lan, 明确了不同车道类型的通行能力上限。针对本仿真场景吴中路与虹许路交叉路口, 结合规范标准与路口实际交通流特征, 设定入口车道 $S_{in} = 2000$ pcu/h/lan, 出口车道 $S_{out} = 2100$ pcu/h/lan, 所有取值均在官方规范范围内, 确保与实际通行能力匹配。

当 $P_{base} > 0$ 时, 表示上游相对更为拥堵或下游相对空闲。此时若对该相位放行, 可利用其通行能力有效缓解上游拥堵, 从而缩短排队长度并降低车辆延误。从直观角度来看, 这对应于“上游存在排队且下游通行条件良好”的情形, 设置绿灯能够产生实际效果。当 $P_{base} < 0$ 时, 表示下游已较为拥堵或上游相对空闲, 继续放行将使车辆驶入更为拥挤的下游路段, 容易导致下游拥堵加剧甚至发生排队溢出, 进而阻滞其他相位的通行, 降低系统整体运行效率。

在每一个仿真周期, 系统会对所有相位集合中的每一个相位进行实时压力评估。计算得到加权后的总压力 P_{base} , 系统从所有候选相位中选取当前加权压力最大的相位作为下一个预选绿灯目标相位。在判

断是否切换相位时, 会优先检查当前绿灯相位已持续的时间 $t - t_{last}$ 是否超过最小绿灯时间阈值 T_{min} 。即仅当满足以下条件时, 系统才会触发压力评估与切换判断逻辑:

$$t - t_{last} \geq T_{min} \quad (6)$$

若当前相位不是压力最大者, 即 $P_{current} \neq P$, 则系统将进入黄灯过渡阶段, 持续时长为 T_{yellow} 。黄灯结束后, 系统正式切换至新的绿灯相位 P 。

3.2. 系统控制框架

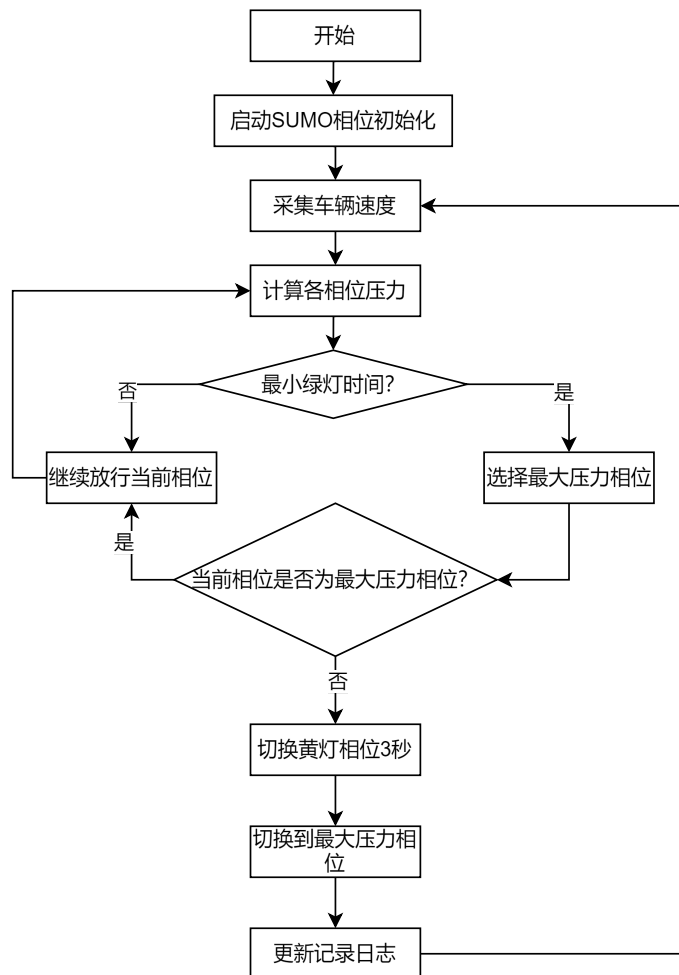


Figure 4. Control framework configuration

图 4. 系统控制框架

在系统控制框架方面, 采用 SUMO 仿真平台对城市交叉口的交通流进行模拟仿真, 利用其对车辆微观行为、交通流演化及信号灯物理执行的内置仿真能力, 确保交通运行过程的真实性和可控性, 见图 4。为了实现自适应信号控制, Python 外部控制程序通过 SUMO 的 TraCI 接口与仿真环境建立实时交互通道。控制器在每一个仿真步长中实时获取各车道的车辆信息, 包括车辆数量、速度及排队情况等关键状态数据; 随后基于动态压力计算模型对各信号相位进行评估, 并生成最优相位切换策略; 最后, 通过 TraCI 接口将计算结果下发至仿真环境, 使信号灯按照计算策略执行相应的相位调整。整个过程以仿真步长为单位形成闭环控制, 保证控制器能够连续感知交通状态的动态变化, 并对信号相位进行实时响应, 从而

实现对交叉口通行效率的持续优化。同时, 该框架的模块化设计使得控制逻辑与仿真环境相互独立, 便于在不同交通需求模式和控制策略下进行灵活的实验验证和性能评估。

4. 实验结果

为评估所提出的基于速度感知最大压力动态控制策略在实际交通场景下的效果, 我们对比分析了三种不同交通信号控制策略对交叉口交通效率的影响: 传统固定配时信号控制、传统最大压力动态信号控制、速度感知最大压力动态信号控制。通过仿真数据对比分析得到结果。

4.1. 数据分析

基于 SUMO 交通仿真结果, 采集车辆在路网中的微观运行数据对交通效率进行分析。选取平均旅行时间、平均行驶速度、平均延误时间等典型指标, 全面刻画车辆在信号交叉口控制下的运行特性。

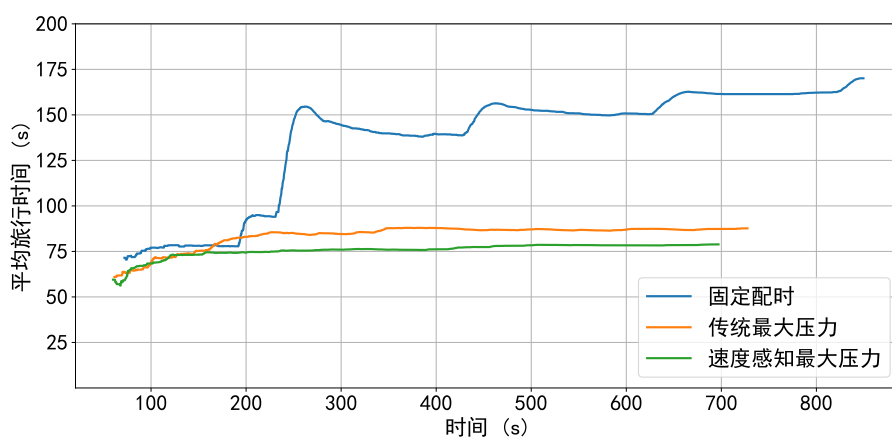


Figure 5. Average travel time
图 5. 平均旅行时间折线图

图 5 为平均旅行时间折线图, 表征某时刻进入仿真场景的车辆的平均旅行耗时。可以看到, 相比固定配时方法, 动态控制方法的车辆平均旅行时间大幅降低。对比速度感知最大压力和传统最大压力方法, 速度感知最大压力在整个过程的平均旅行时间始终低于传统最大压力动态控制。

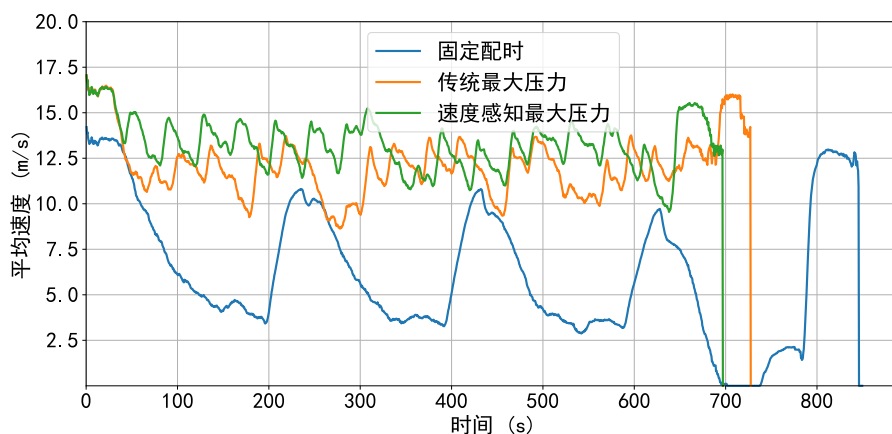


Figure 6. Line graph of average speed
图 6. 平均速度折线图

图 6 为平均速度折线图, 表示当前时刻仿真场景内所有车辆的平均速度。可以看出固定配时控制在平均速度均表现最差, 传统最大压力动态控制相较于固定配时有改善, 但整体平均速度表现仍存在明显波动。相比之下, 速度感知最大压力控制在整个仿真过程中表现最优, 平均速度更高且更稳定, 表明其能够有效提升交叉口的整体通行效率。

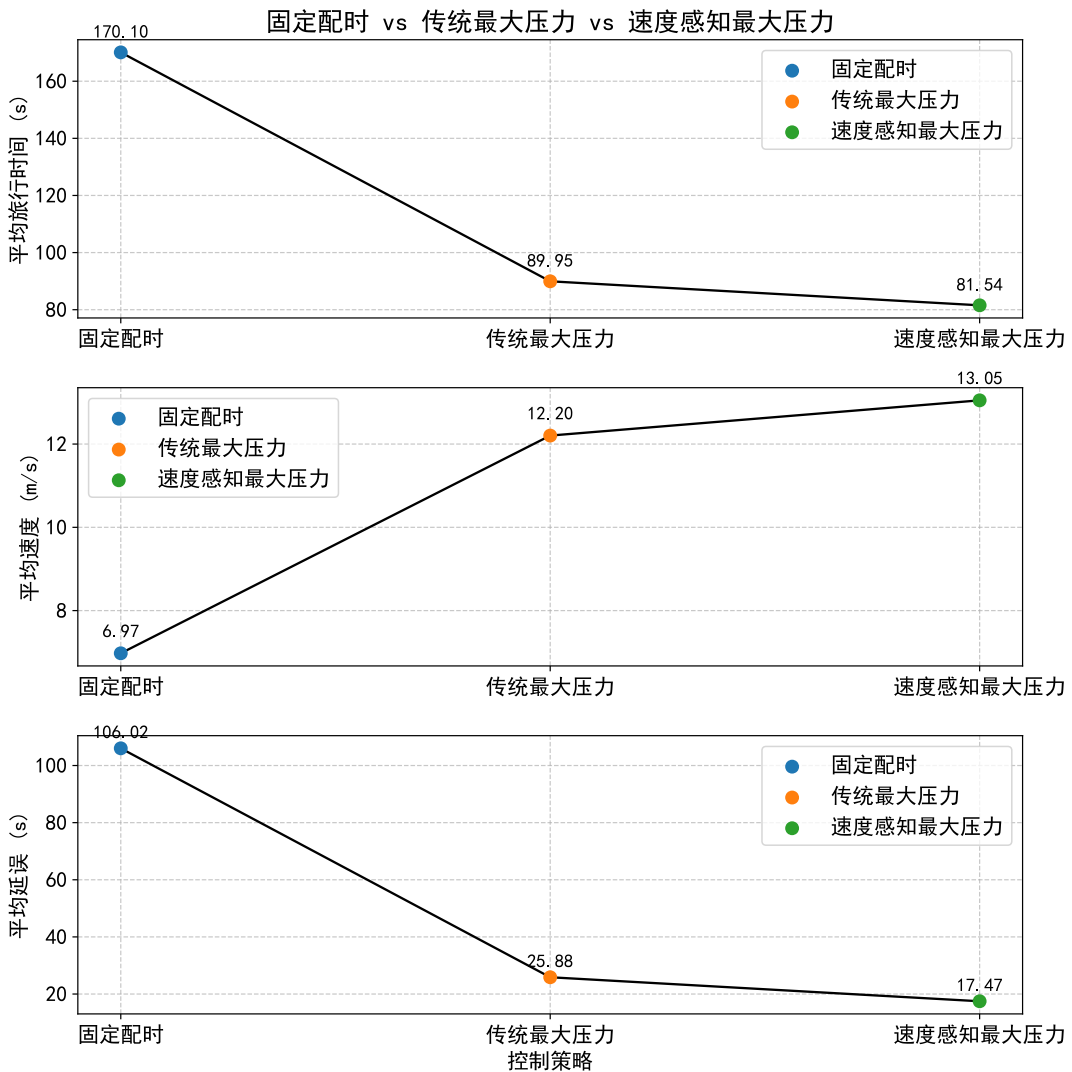


Figure 7. Comparative analysis chart of the three schemes
图 7. 三种方案对比分析图

图 7 为三种方案下的对比分析图, 是在不同方案下对整体的平均旅行时间、平均速度、以及平均延误的分析。其中, 平均延误是衡量车辆通行效率的重要微观指标, 定义为车辆实际旅行时间与自由流状态下行驶所需时间之差。结果表明: 固定配时的平均旅行时间为 170.10 s, 平均速度为 6.97 m/s, 平均延误达到 106.02 s; 传统最大压力动态控制的平均旅行时间下降至 89.95 s, 平均速度提高至 12.20 m/s, 平均延误减少至 25.88 s; 而速度感知最大压力动态控制下, 平均旅行时间为 81.54 s, 平均速度达到 13.05 m/s, 平均延误仅为 17.47 s。速度感知最大压力算法的平均旅行时间对比固定配时缩短 52.0%、比传统最大压力缩短 9.4%, 平均延误对比固定配时与最大压力分别减少 83.5%与 32.5%。

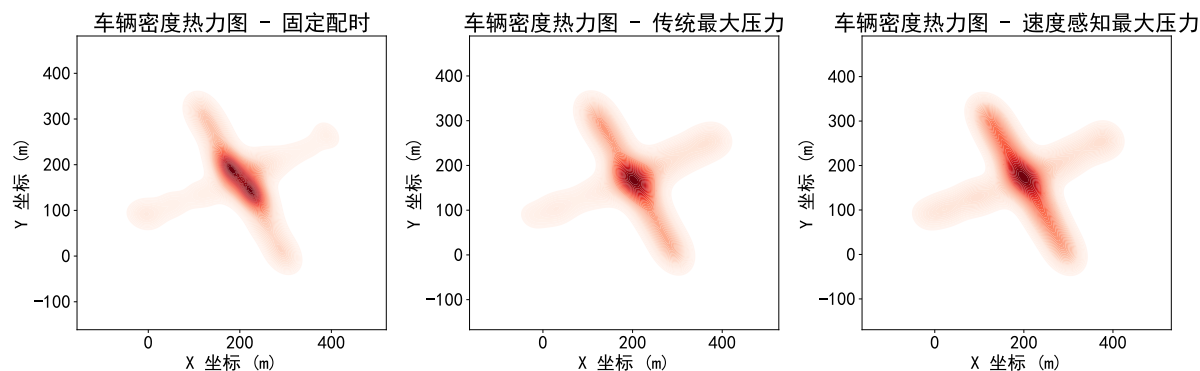


Figure 8. Density heatmap
图 8. 密度热力图

图 8 为密度热力图, 可以看到, 固定配时方案下车辆在交叉口附近的堆积最为明显, 红灯等待形成高密度区域, 车辆通行受到限制, 拥堵现象突出; 传统最大压力控制通过实时调整绿灯相位, 根据排队压力优先放行拥堵路段, 减少车辆堆积, 使车辆分布更加均匀; 速度感知最大压力控制在传统最大压力策略基础上进一步引入车辆速度信息, 高密度区域进一步减小, 整体车辆分布最为均匀, 表现出最佳的通行流态。

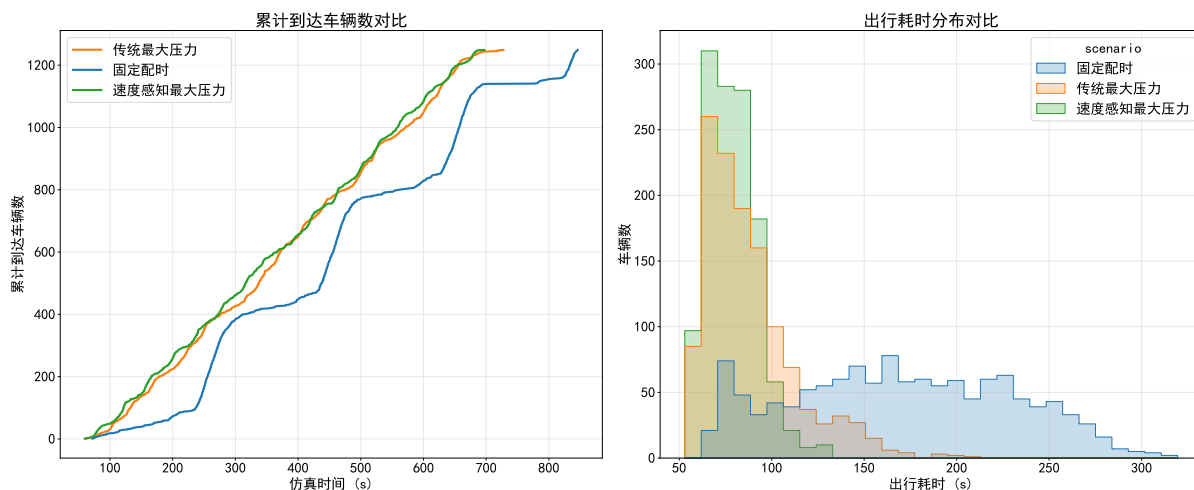


Figure 9. Cumulative vehicle arrival comparison chart and travel time distribution plot
图 9. 累计到达车辆对比图和出行耗时分布图

图 9 为到达车辆数对比图。可以发现, 固定配时方案下首辆车到达时间较晚, 末辆车到达时间最长, 累计曲线呈平缓趋势, 表明车辆在交叉口前停等时间长、通行效率低。相比之下, 传统最大压力控制方案的累计到达曲线陡峭, 中途车辆到达速率明显提升, 表明动态信号控制通过实时检测路段排队压力, 优化绿灯放行顺序, 缩短了车辆停等时间。速度感知最大压力控制方案进一步提升了通行效率, 首尾车辆间隔最短, 累计到达曲线最为陡峭, 车辆通过路口更加均匀。在出行耗时对比图中, 固定配时方案的出行耗时跨度最大, 平均耗时最高, 说明固定信号配时难以适应高峰流量, 部分车辆经历长时间等待。传统最大压力控制方案将平均耗时降低, 同时最大耗时下降, 有效缓解了车辆排队和拥堵。速度感知最大压力控制方案在此基础上进一步优化, 平均耗时下降至 78.86 s, 最大耗时缩短至 132.5 s, 出行耗时分布更加集中, 车辆通行效率最高。

4.2. 相位切换数据分析

在交通信号优化仿真研究中, 信号相位的切换策略直接决定了交叉口的通行效率和车辆排队特性。

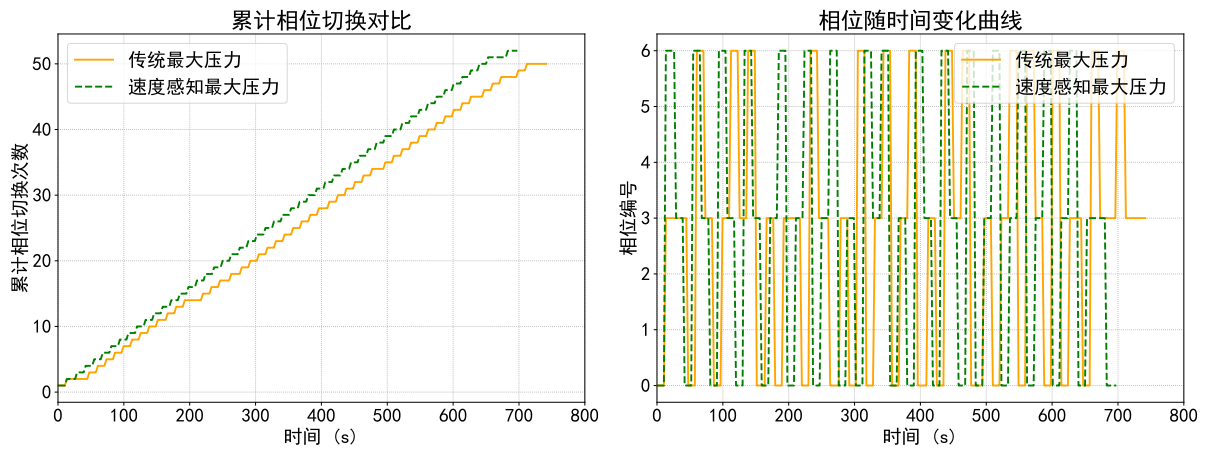


Figure 10. Cumulative phase switching comparison chart and phase variation over time curve
图 10. 累计相位切换对比图和相位随时间变化曲线图

图 10 所示, 速度感知最大压力控制在单位时间内的相位切换略高于传统最大压力控制, 反映了其对交通流状态的更高敏感度和快速响应能力。在相位变化曲线中, 速度感知最大压力策略相位持续时间相对较短, 且切换更为频繁, 表明该策略能够根据实时车辆速度和路段排队情况, 动态调整信号周期, 从而减少局部拥堵, 提高车辆通过效率。

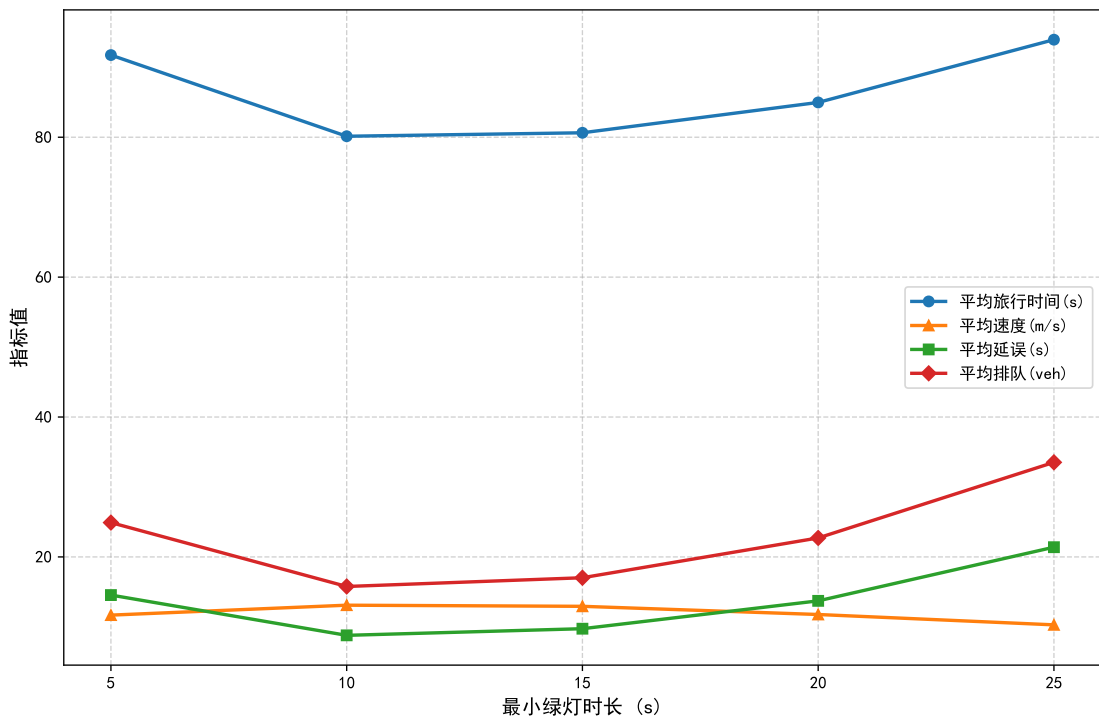


Figure 11. Analysis of minimum green-light duration
图 11. 最小绿灯时长分析

4.3. 参数敏感性分析

本节针对信号控制算法中的关键参数进行了敏感性分析,以评估参数选择对交叉口运行效率的影响。分析的主要参数包括最小绿灯时间和黄灯持续时间,这两类参数在动态信号控制策略中直接影响相位切换节奏、车辆延误以及排队长度。

4.3.1. 最小绿灯时间敏感性分析

在保持其他参数固定的条件下,分别设置最小绿灯时长为 5 s、10 s、15 s、20 s 和 25 s,进行敏感性分析。固定黄灯持续时间为 3 s。对比车辆平均旅行时间、平均速度、平均延误及平均排队等指标。

图 11 所示为不同绿灯时长仿真下的平均旅行时间、平均速度、平均延误和平均排队折线图,可以直观观察到各指标随最小绿灯变化的趋势。整体来看,随着最小绿灯从 5 s 增加到 25 s,交叉口的交通效率呈先改善后下降的趋势,最佳点集中在 10 s 和 15 s 之间。当最小绿灯从 5 s 增加到 10 s 时,平均旅行时间有所下降,平均速度提升,平均延误和平均排队车辆数量均明显减少;说明绿灯时间过短会造成频繁切换,无法充分放行车辆,而 10 s 能够实现车辆顺畅通行。随着最小绿灯继续增加到 15 s、20 s、25 s,各项指标开始回升或下降,平均延误和排队逐渐增加,平均速度下降,表明绿灯过长会导致某些方向车辆长时间等待,降低交叉口整体效率。最小绿灯为 10 s 在平均旅行时间、平均速度、平均延误及平均排队上均表现最佳,因此被确定为当前交叉口的最优最小绿灯时长配置。

4.3.2. 黄灯持续时间敏感性分析

以下针对交叉口交通信号黄灯时长进行敏感性分析。在保持其他参数固定(最小绿灯 10 s)的前提下,通过调整黄灯时长进行仿真,评估不同黄灯时长对交通效率的影响。

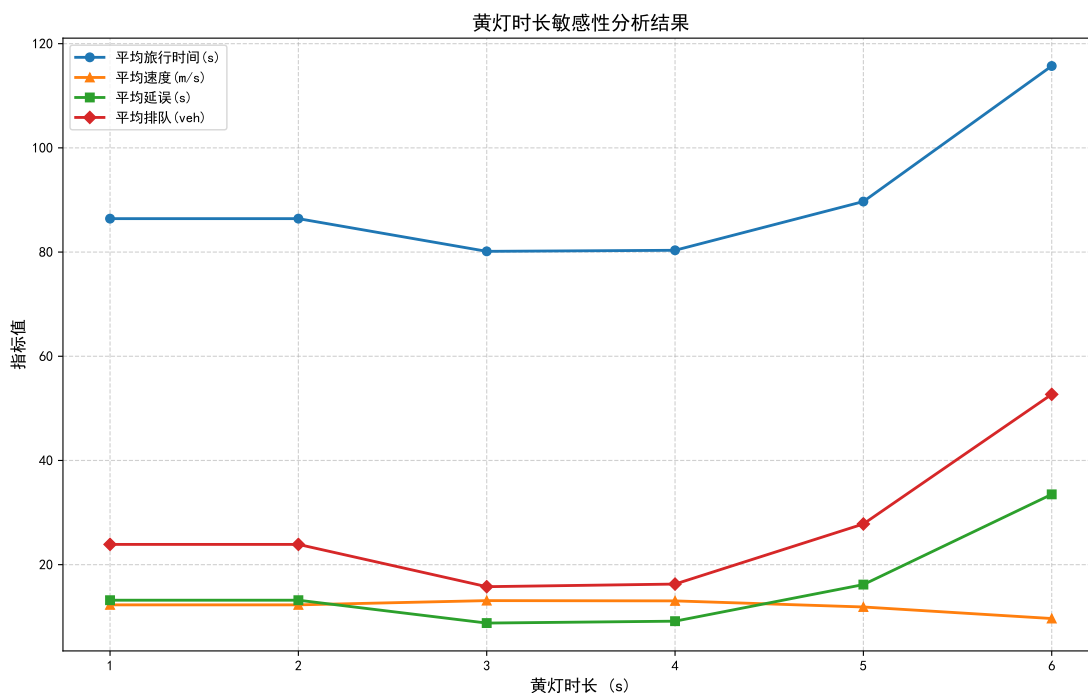


Figure 12. Analysis of minimum yellow-light duration

图 12. 最小黄灯时长分析

图 12 所示,黄灯时长对路口交通效率和车辆排队情况具有一定影响。随着黄灯时长从 1 s 增加到 3

s, 平均旅行时间和平均延误呈下降趋势, 同时平均速度逐步提升, 表明适度延长黄灯可以缓解车辆在相位切换时的滞留, 提高通行效率。从仿真过程中可观察到, 黄灯的过短会造成车辆在路口堵塞, 影响黄灯以外车道的正常通行。黄灯过长则会造成车辆少的黄灯车道持续放行, 而车辆多的红灯车道缓行, 造成通行效率极度低下, 故黄灯时长 3 s 为最优配置。

4.4. 多场景实验分析

为验证本文所提速度感知最大压力控制方法在不同交通需求条件下的有效性, 同四种交通流量场景下三种信号控制方法的平均延误时间对比。实验以实地采集的高峰流量为基准流量, 设计场景 1 低流量(20%基准流量)、场景 2 低峰流量(50%基准流量)、场景 3 高峰流量(100%基准流量)及场景 4 高流量(150%基准流量)的四种典型交通场景, 分别对应交通网络的轻载、中等负载、满载及过载运行状态。对比方法包括传统固定配时信号控制、基于排队信息的传统最大压力控制, 以及本文提出的速度感最大压力控制方法。通过 SUMO 仿真平台采集车辆行程延误数据, 以平均延误为核心评价指标, 分析各方法的优化能力与鲁棒性。

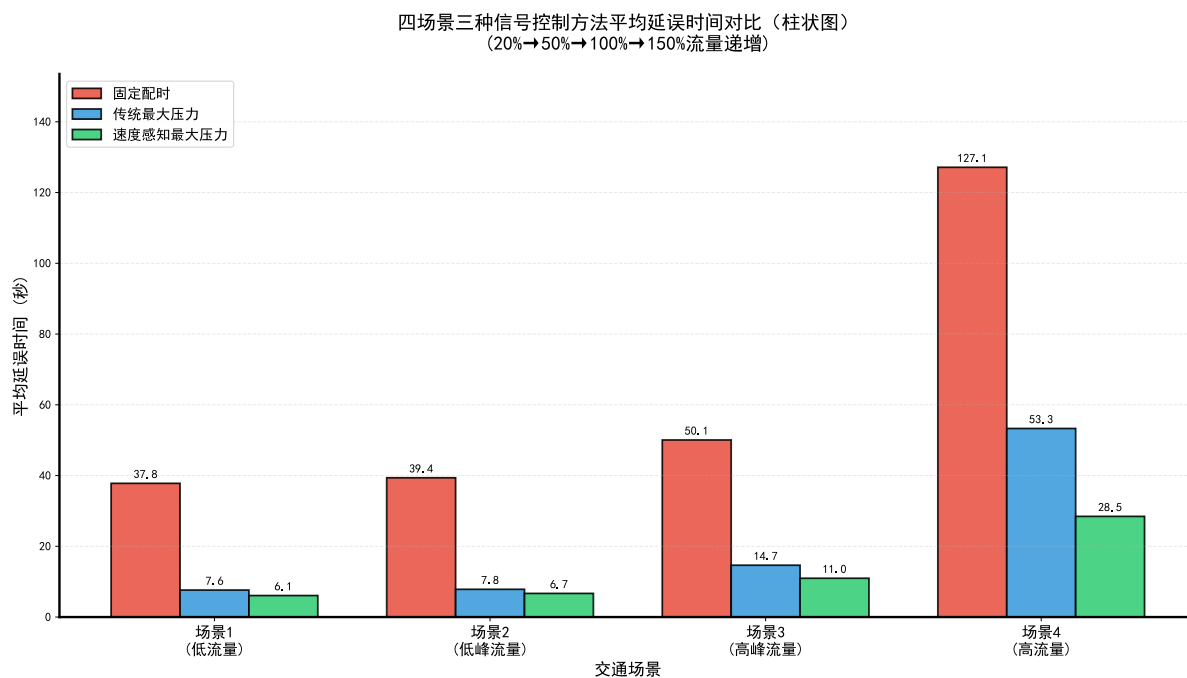


Figure 13. Comparative analysis of average delay across three signal control strategies under varying traffic demand levels
图 13. 四种交通流量场景下三种信号控制方法的平均延误时间对比

如图 13 所示, 场景 1 和场景 2 中, 固定配时平均延误最高, 传统最大压力控制和速度感知最大压力控制性能差异较小, 主要原因是低流量下道路资源充裕, 各方向交通需求均能得到较好满足, 信号配时优化空间受限, 速度感知机制虽能实时捕捉路段速度波动, 但此时车辆基本处于自由流状态, 速度变化幅度小, 优化潜力尚未充分显现。场景 3 和场景 4 中, 性能分化显著, 固定配时平均延误急剧攀升, 传统最大压力控制通过排队感知实现中等幅度优化, 速度感知最大压力控制表现最优。该差异机理在于: 在高流量场景中, 固定配时因周期固定导致各方向排队交替溢出; 传统最大压力受限于排队信息的局部性与滞后性, 在多向过饱和时难以协调各相位冲突; 速度感知最大压力通过路段速度监测, 可在排队形成前识别潜在拥堵风险, 通过早期预警调整绿灯时间分配, 实现过饱和状态的主动防控, 防止排队溢出

与网络瘫痪。由上述分析可知速度感知最大压力方法在四种流量场景下均保持较优性能, 且随交通压力增大优势扩大, 验证了本文方法的有效性。

5. 结论与展望

论文提出一种考虑速度感知的最大压力交叉口信号动态控制方法, 并使用 SUMO 软件在上海市吴中路与虹许路交叉口进行了仿真验证。相比传统最大压力动态控制算法, 所提出算法在压力计算中引入了车辆速度, 对车辆拥堵感知更加准确。仿真结果表明, 速度感知最大压力动态控制方法在平均延误时间、车辆通行效率等指标上均优于传统最大压力动态控制和固定配时策略, 同时能够有效缓解短时拥堵并降低排放强度。

在未来研究中, 可进一步将该方法扩展至多交叉口协同控制, 实现网络级交叉口信号控制优化。另一方面, 论文仍存在一定局限性: 速度信息主要来源于仿真环境, 未充分考虑实际检测条件下速度数据的缺失问题; 控制策略仍以单交叉口为研究对象, 尚未刻画相邻交叉口之间的溢流效应与协调关系; 模型参数和权重设置依赖经验, 缺乏系统性的自适应调节机制。未来可考虑将强化学习或进化算法引入速度感知最大压力框架, 实现参数在线优化与策略自学习, 并在不同交通需求水平、道路结构和控制场景下开展更大规模的仿真与实地验证, 以进一步提升方法的工程适用性与推广价值。

基金项目

国家自然科学基金项目(72101185)。

参考文献

- [1] 彭显玥, 王昊. 交通分配与信号控制组合优化研究综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(1): 1-18.
- [2] 徐东伟, 周磊, 王达, 等. 基于深度强化学习的城市交通信号控制综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(1): 15-30.
- [3] Webster, F.V. (1958) Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No.39. Road Research Laboratory.
- [4] Lowrie, P.R. (1990) SCATS: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System: A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic. Roads and Traffic Authority NSW, Traffic Control Section.
- [5] Robertson, D.I. and Bretherton, R.D. (1991) Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time-The SCOOT Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **40**, 11-15. <https://doi.org/10.1109/25.69966>
- [6] Mirchandani, P. and Head, L. (2001) A Real-Time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms, and Analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **9**, 415-432. [https://doi.org/10.1016/s0968-090x\(00\)00047-4](https://doi.org/10.1016/s0968-090x(00)00047-4)
- [7] Tassiulas, L. and Ephremides, A. (1992) Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **37**, 1936-1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>
- [8] Varaiya, P. (2013) Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **36**, 177-195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>
- [9] Gregoire, J., Qian, X., Frazzoli, E., de La Fortelle, A. and Wongpiromsarn, T. (2015) Capacity-aware Backpressure Traffic Signal Control. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, **2**, 164-173. <https://doi.org/10.1109/tcns.2014.2378871>
- [10] Le, T., Kovács, P., Walton, N., Vu, H.L., Andrew, L.L.H. and Hoogendoorn, S.S.P. (2015) Decentralized Signal Control for Urban Road Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **58**, 431-450. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.009>
- [11] Zaidi, A.A., Kulcsar, B. and Wymeersch, H. (2016) Back-pressure Traffic Signal Control with Fixed and Adaptive Routing for Urban Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **17**, 2134-2143. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2521424>
- [12] Li, L. and Jabari, S.E. (2019) Position Weighted Backpressure Intersection Control for Urban Networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, **128**, 435-461. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.08.005>

- [13] Mercader, P., Uwayid, W. and Haddad, J. (2020) Max-pressure Traffic Controller Based on Travel Times: An Experimental Analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **110**, 275-290.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.002>
- [14] 林志阳, 姚一帆. 基于速度感知最大压力的交通信号动态控制系统及方法[P]. 中国专利, 202511992157. 2025-12-26.