

基于相位队列演进的单交叉口自适应控制策略

王道斌, 赵慧慧, 徐缘缘, 柳祖鹏

(武汉科技大学汽车与交通工程学院, 武汉 430065)

摘要: 针对现阶段交叉口自适应控制算法存在控制迭代效率低、模型复杂度高的问题, 基于相位内队列消散情况提出了一种自适应控制算法。首先, 建立参数预测模型实现配时参数优化, 并基于车流波动理论计算得到车辆在交叉口处的停车延误; 其次, 基于速度变化曲线计算得到车辆进入和驶出交叉口时的加、减速延误; 最后, 提出状态转移矩阵用于延误最小化动态优化模型的构建, 进而实现交叉口信号控制的全阶段优化。将固定配时控制和感应控制作为对照组, 发现超高负荷交通流场景下本文方法相较于两个对照组, 车均延误分别减少了 55% 和 27.8%, 平均停车次数减少了 58.5% 和 10.1%; 高负荷交通流场景下车均延误分别减少了 36.1% 和 14.6%, 平均停车次数减少了 23.4% 和 8.7%; 中负荷交通流场景下车均延误分别减少了 22.8% 和 10.5%, 平均停车次数减少了 3.3% 和 2.6%。结果表明: 在不同的交通流负荷条件下, 本文算法均能有效提高交叉口的运行效率。

关键词: 交通运输系统工程; 自适应控制; 相位队列演进; 流量预测; 动态优化

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3862-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240359

Adaptive control strategy for isolated intersection based on phase queue simulation

WANG Dao-bin, ZHAO Hui-hui, XU Yuan-yuan, LIU Zu-peng

(College of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: An adaptive control algorithm based on the in-phase queue dissipation was proposed to address the issues of low control efficiency and high model complexity in existing signal control algorithms. Firstly, a prediction model was established to optimize signal timing parameters, and calculate the vehicle's stopping delay based on traffic shockwave theory. Secondly, the acceleration and deceleration delays of vehicles were calculated based on the speed variation curve. Finally, state transition matrix for constructing dynamic optimization model was proposed to minimize delays, thereby realizing full-stage optimization of intersection signal control. Compared with fixed-time control and actuated control methods, the proposed method respectively reduced the average delay by 55% and 27.8% per vehicle in ultra-high-traffic demand scenario and reduced the average number of stops by 58.5% and 10.1%. In high-traffic demand scenario, the average delay decreased by 36.1% and 14.6% per vehicle, and the average number of stops decreased

收稿日期: 2024-04-07.

基金项目: 留学基金委项目 (202308420104).

作者简介: 王道斌 (1987-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通系统建模和中微观交通仿真.

E-mail: wangdaobin05@163.com

by 23.4% and 8.7%, respectively. In medium-traffic scenario, the average delay decreased by 22.8% and 10.5% per vehicle, and the average number of stops decreased by 3.3% and 2.6%. The results indicate that the algorithm proposed in this study can effectively improve the traffic operational efficiency at isolated intersections under different traffic demand conditions.

Key words: engineering of communication and transportation; adaptive signal control; phase queue simulation; flow prediction; dynamic optimization

0 引 言

交叉口作为城市交通网络节点其通过能力至关重要,现阶段交叉口信号控制手段包括定时控制、感应控制及自适应控制等方式。为保证交叉口交通运行效率,避免交通流时变带来的影响,自适应控制作为一种及时、高效的控制方法近年来被广泛关注^[1]。经典的控制系统如 SCATS^[2]与 SCOOT^[3],通常以检测交通量为基础动态选择或生成交通信号控制方案,预置或生成的信号控制方法通常会受到交通工程师经验的影响。为避免预先设置参数的局限性,部分学者提出了以二元选择法和排序法为主的在线信号优化方法^[4]。二元选择法是将相位划分为连续时间间隔,在每个时间间隔确定是否结束当前相位,例如 Miller 算法^[5]、交通优化逻辑^[6]和逐步配时调整算法^[7]等;而以自适应优化策略(OPAC)^[8]为主的排序法则通常基于滚动周期进行配时优化。在控制效率及稳定性方面,二元选择法由于逻辑简单,只需要短期信息,具有较高的控制效率和稳定性。然而,由于只考虑短期内的效益,可能会忽略那些需要较长时间才能显现出来的长期效益。相比二元选择法,排序法考虑得更全面,在信号优化时考虑的滚动周期时间也更长,因此,理论上可以实现更好的系统运行,减少系统的综合延误。但现阶段在实际应用中仍存在一些挑战,特别是如何使用检测数据来评估不同相序切换的效果以及如何有效降低计算的复杂度。

一般来说,自适应信号控制方法包含 3 部分^[9]:①基于受控系统的交通到达量建立交通状态预测的模型;②明确使其符合受控系统控制水平的控制参数条件;③以控制性能指标为依据优化信号控制参数。在交通状态预测层面:Head^[10]结合传统车辆检测器数据和交通流理论对交通流量进行了预测,进而实现实时交通自适应控制。Comert^[11]构建了交叉口车辆队列长度的估算模

型,为队列优化的自适应控制问题奠定了理论基础。随着计算机技术不断更新迭代,以深度学习为主的计算机技术被广泛应用于交通状态预测领域^[12-15]。然而,由于其“黑箱”逻辑、性能差异性较大以及特殊的硬件要求,在现实交叉口中这类技术并没有被广泛部署^[16]。在优化技术层面: Akcelik^[17]提出了一种估算交叉口绿灯时间和周期时间的分析方法,但仅限于检测器设置固定时间间隔的控制策略。Viti 和 VanZuylen^[18]在感应控制的基础上提出了一种基于概率论的控制模型用于动态优化交通信号控制,通过概率方法进一步降低了模型时间复杂度。Zhang 和 Wang^[19]利用实时队列长度和交通到达特性建立随机模型动态优化控制参数,将最小化延误、最大化吞吐量以及避免周期内饱和等指标进行多目标融合以提高交叉口信号控制水平。预置配时参数无法对交通流的时变性做出快速响应,ShirvaniShiri 和 Maleki^[20]基于模糊控制理论动态调整相位时间以提升交叉口的交通运行效率。在控制性能指标层面:Lee 等^[21,22]提出了基于组的交叉口延误优化方法,通过对交叉口滚动周期的优化达到全局优化。为防止车队溢出导致交通堵塞,Liu 等^[23]提出了逆向因果建模的方法以减弱信号控制对交通流的干扰,将信号控制交叉口视为普通瓶颈,通过构建动态线性规划模型提高交叉口的总通行能力。Ren 等^[24]利用简化交通波模型识别交叉口队列溢出,提出一种自适应控制算法降低交叉口车辆的通行延误。部分研究的计算公式和控制参数非常复杂,在信号机中执行起来也比较困难。Zheng 和 Recker^[9]提出了一种实时自适应控制方法,该方法采用与真实信号机一致的控制逻辑,保证了控制方法的实用性,但该方法的相序优化过程仍然较为烦琐。骆旅舟等^[25]基于电警数据开发了单交叉口自适应控制方法,实验表明该方法在不同场景下均能取得较优的控制效果,然而该方法是基于上游交叉口的电警数据对下游交叉口进行信号优化,而上游电警数据无法判断单个车

辆在下游流向的问题,因此,在左转交通流量较大时会出现放行不充分的问题。

为进一步降低计算复杂度以便控制器求解,本文基于相位队列演进的方式提出了一种自适应控制算法以调整相位时长及相序。该方法以排序法为基础控制逻辑,利用周期间迭代数据量化车辆进入交叉口所产生的总延误,基于车流波动理论实现周期内相位队列演进,并基于NEMA环栅相位结构^[26]提出状态转移矩阵用以相序优化,进而建立以总延误最小为目标的动态线性优化模型,提高交叉口运行效率。

1 优化目标构建

1.1 建立目标函数

交叉口的通行延误主要为车辆的停车延误,但在信号变换时驾驶员对车辆的纵向操作也会产生部分延误。如图1所示,车辆 k 在 i 相位 $T_{k,1}^i$ 时刻收到信号变换并减速,直至 $T_{k,2}^i$ 时刻停车以等待红灯,当红灯信号在 $T_{k,3}^i$ 时刻运行结束后,车辆加速通过交叉口并在 $T_{k,4}^i$ 时刻恢复至正常行驶速度。图中①~③部分覆盖面积表示车辆在此过程中由于减速延误、停车延误及加速延误所缩短的行驶距离。另外,受车流波动影响,部分车辆到达交叉口时只有加、减速延误,对于这部分车辆来说,有 $T_{k,2}^i = T_{k,3}^i$ 。

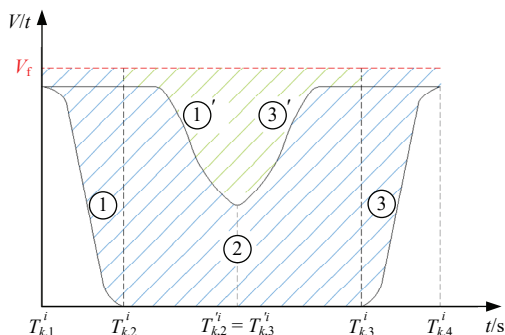


图1 车辆行驶延误

Fig. 1 Vehicle delays

设车辆 k 的速度方程为 $V(t)$,车辆在道路行驶的自由流速度为 V_f (单位:km/h)。则当 $0 < V(t) < V_f$ 时,产生加、减速延误;当 $V(t) = 0$ 时,产生停车延误。设车辆 k 在相位 i 处的总延误(单位:s)为 d_k^i ,则有:

$$d_k^i = \int_{T_{k,1}^i}^{T_{k,2}^i} \frac{V_f - V(t)}{V_f} dt + \int_{T_{k,2}^i}^{T_{k,3}^i} 1 dt + \int_{T_{k,3}^i}^{T_{k,4}^i} \frac{V_f - V(t)}{V_f} dt \quad (1)$$

设相位 i 在一个周期内到达的车辆总数为 N_i 辆,以NEMA环栅八相位结构为例,交叉口在一个周期内所产生的总延误如下所示:

$$\text{Delay} = \sum_{i=1}^8 \sum_{k=1}^{N_i} d_k^i \quad (2)$$

1.2 模型假设

建立控制模型过程中的一些必要假设如下:

- (1) 相位 i 的损失时间等于黄灯时间与全红时间之和。
- (2) 排除因外力影响所产生的车辆加、减速行为,如非信号灯变化导致驾驶员紧急停车、突然加速等。
- (3) 排队车辆始终保持最大安全间距,前车出现减速,后方车辆会及时进行刹车操作。
- (4) 进口道车流为稳态车流且车辆到达服从泊松分布。
- (5) 车辆排队消散在可控范围内且车流未达到饱和条件。
- (6) 交通流量具有可预测性,通过历史数据和趋势分析,可预测未来流量变化。
- (7) 交叉口所有车辆类型的加、减速具有一致性,且服从统一加速度方程。

2 队列状态及车流参数预测

2.1 队列状态预测

如图2所示,设加、减速过程中产生的时间间隔分别为 t_a 、 t_d ,车辆 $k+1$ 与车辆 k 之间产生后继减速的反应时间为 Δt ,有效红灯时间为 R_i (单位:s)。

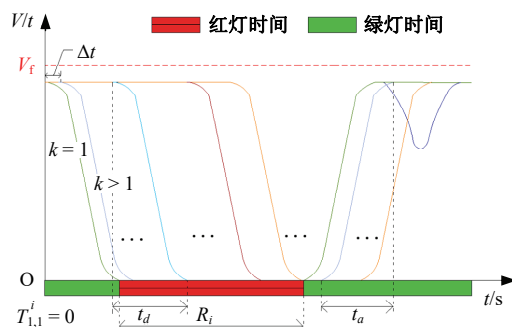


图2 车速变化状态示意图

Fig. 2 Illustration of speed change state

当 $k=1$ 时,有:

$$\begin{cases} T_{1,1}^i = 0 \\ T_{1,2}^i = t_d \\ T_{1,3}^i = T_{1,2}^i + R_i \\ T_{1,4}^i = T_{1,3}^i + t_a \end{cases} \quad (3)$$

对于后继停车的车辆($k > 1$),有:

$$\begin{cases} T_{k,1}^i = T_{k-1,1}^i + \Delta t \\ T_{k,2}^i = T_{k,1}^i + t_d \\ T_{k,3}^i(k) = T_{k,2}^i + (\cdot) \\ T_{k,4}^i = T_{k,3}^i(k) + t_a \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(\cdot)$ 为排队车辆由于信号变换导致车辆停车或上一周期未完全消散车辆停车产生的时间间隔,该参数需要根据上一周期不同的消散程度进行分析。

如图 3 所示,设第 n 个滚动周期有效绿灯时间为 G_i^n ,损失时间为 L_i (单位:s),则第 n 个滚动周期 i 相位绿灯时间和红灯时间分别为:

$$\begin{cases} g_i^n = G_i^n + L_i \\ r_i^n = R_i^n - L_i \end{cases} \quad (5)$$

设第 $n-1$ 个滚动周期 i 相位由于绿灯时间不足导致的剩余排队车辆数为 $\tilde{N}_i^{n-1}$ 辆,第 n 个滚动周期 i 相位预测平均到达率为 λ_i^n (单位:veh/s),则 i 相位周期内预测到达的车辆数以及该周期红灯期间预测到达的车辆数分别为:

$$\begin{cases} N_i^n = \tilde{N}_i^{n-1} + \lambda_i^n(r_i^n + G_i^n + L_i) \\ N_{stop}^{i,n} = \lambda_i^n(r_i^n + L_i) \end{cases} \quad (6)$$

此外,感应控制一般是通过车头时距与探测器检测间隔时间之间的关系确定是否继续当前相位的信号状态。车头时距和延长间隔时间分别用 h 和 u_i (单位:s)表示,设第 n 个滚动周期最小绿灯时间为 $G_{min}^{i,n}$,绿灯延长时间为 $G_e^{i,n}$,最大绿灯时间为 $G_{max}^{i,n}$ (单位:s)。设车辆 k 在相位 i 处的停车时间函数为 $U_p^{i,n}(k)$,对于红灯期间到达产生停车的排队车辆,可根据上一周期剩余车辆数 $\tilde{N}_i^{n-1}$ 判断当前相位车辆消散状况。对于后继停车的车辆

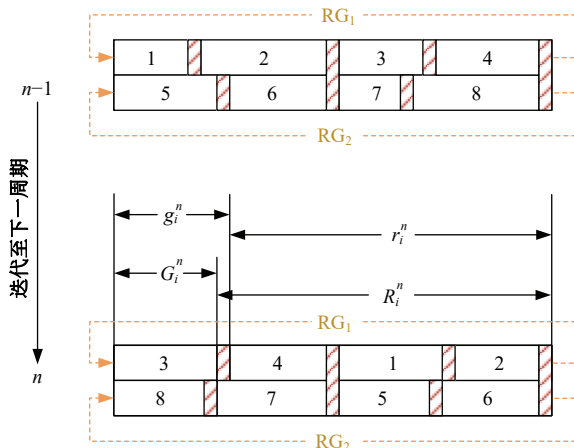


图 3 周期迭代逻辑

Fig. 3 Cycle iteration logic

($k > 1$),有:

(1)如图 4(a)所示,若 $n-1$ 周期相位 i 绿灯信号状态以 $h > u_i$ 结束(即 $\tilde{N}_i^{n-1} = 0$),则下一周期有效绿灯时间 $G_i^n = G_{min}^{i,n} + G_e^{i,n}$,则队列内车辆速度变化时刻如下所示:

$$\begin{cases} T_{k,1}^i = T_{k-1,1}^i + \Delta t \\ T_{k,2}^i = T_{k,1}^i + t_d \\ T_{k,3}^i(k) = T_{k,2}^i + U_p^{i,n}(k) \\ T_{k,4}^i = T_{k,3}^i(k) + t_a \end{cases} \quad (7)$$

(2)如图 4(b)所示,若 $n-1$ 周期相位 i 绿灯信号状态以最大绿灯时间结束(即 $\tilde{N}_i^{n-1} \neq 0$),则下一周期有效绿灯时间 $G_i^n = G_{max}^{i,n}$,则队列内车辆速度变化时刻如下所示:

$$\begin{cases} T_{k,1}^i = T_{k-1,1}^i + \Delta t \\ T_{k,2}^i = T_{k,1}^i + t_d \\ T_{k,3}^i(k) = \begin{cases} T_{k,2}^i + R_i^n, & 1 \leq k \leq \tilde{N}_i^{n-1} \\ T_{k,2}^i + U_p^{i,n}(k), & \tilde{N}_i^{n-1} < k \end{cases} \\ T_{k,4}^i = T_{k,3}^i(k) + t_a \end{cases} \quad (8)$$

如图 4 所示,车辆到达交叉口进行排队到队列消散过程中通常存在 4 种“波”。其中,第 1 种为车队形成冲击波,用 ω_1 表示;第 2 种为车队消散波,用 ω_2 表示,第 3 种为车辆离去波,用 ω_3 表示;第 4 种为二次排队冲击波,用 ω_4 表示,(单位:m/s)^[27]。设第 n 个滚动周期 i 相位的饱和流率为 λ_m^i (单位:veh/s),临界密度为 k_a^i ,阻塞密度为 k_m^i ,在一个滚动周期 n 内的平均预测密度为 k_i^n (单位:veh/m),则 4 种波的计算公式如下所示:

$$\begin{cases} \omega_1^{i,n} = \frac{0 - \lambda_i^n}{k_m^i - k_i^n} \\ \omega_2^{i,n} = \frac{\lambda_m^i - 0}{k_a^i - k_m^i} \\ \omega_3^{i,n} = u_i = \frac{\lambda_m^i - \lambda_i^n}{k_a^i - k_i^n} \\ \omega_4^{i,n} = \omega_2^{i,n} = \frac{0 - \lambda_m^i}{k_m^i - k_a^i} \end{cases} \quad (9)$$

设车均长度为 l_v (单位:m),根据图 4 中的几何关系可得车辆 k 红灯期间到达交叉口的停车时间 $U_p^{i,n}(k)$ 为:

$$U_p^{i,n}(k) = \frac{\omega_2^{i,n} - \omega_1^{i,n}}{\omega_2^{i,n} \omega_1^{i,n}} l_v (k-1) + R_i^n \quad (10)$$

且 $U_p^{i,n} \in [0, R_i^n]$,根据式(10)可求得车辆进入交叉口所产生的停车延误,第 4 部分将对车辆行驶过程中的加、减速延误计算进行描述。

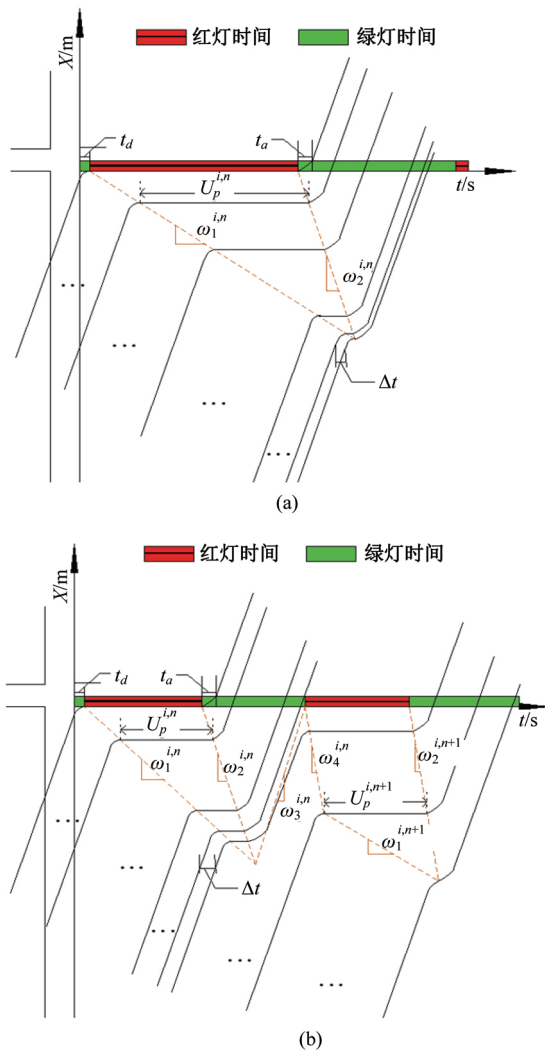


图 4 不同消散情景下的车辆轨迹

Fig. 4 Vehicle trajectories under different dissipation scenarios

2.2 车流参数预测

一般情况下,在一个滚动周期 n 内第 i 相位车流平均到达率 λ_i^n 及平均密度 k_i^n 会随着时间缓慢变化,即如果上一周期检测值相比之前有所上升(或下降),那么下一周期也将会有相同趋势,直到达到某极值为止。因此,这里采用动态指数平滑预测模型对车流到达率进行预测^[28]。设第 n 个滚动周期 i 相位的实测参数值为 $\dot{p}_i^n \in \{\dot{k}_i^n, \dot{\lambda}_i^n\}$,第 $n+1$ 个滚动周期 i 相位的预测参数值为 $\dot{p}_i^{n+1} \in \{\dot{k}_i^{n+1}, \dot{\lambda}_i^{n+1}\}$,则有:

$$\dot{p}_i^{n+1} = \sigma_i^{n+1} \dot{p}_i^n + \sigma_i^{n+1} (1 - \sigma_i^{n+1}) \dot{p}_i^{n-1} + (1 - \sigma_i^{n+1})^2 \dot{p}_i^{n-2} \quad (11)$$

式中: σ_i^n 为权重, $\sigma_i^n \in (0, 1)$ 。

权重 σ_i^n 的取值与到达率变化剧烈程度呈正

相关,当到达率变化达到一定程度时,应当对其做出调整。设绝对误差比参数为 $\eta_i^n = |(\dot{p}_i^n - \dot{p}_i^{n-1}) / \dot{p}_i^n|$,当 $\eta_i^n > \delta$ (临界值 δ 一般取10%~30%),对权重参数 σ_i^n 进行调整:

$$\sigma_i^{n+1} = 0.5 \left(\eta_i^n + \left| \frac{\dot{p}_i^n - \dot{p}_i^{n-1}}{\dot{p}_i^{n-1}} \right| \right) \quad (12)$$

3 配时参数优化

3.1 最短绿灯时间

当交叉口某个相位处于低负荷状态时,交通量较小,其相位时长可以适度缩短,并将这部分时间预留给交通量较大的相位。但是,当交叉口存在行人过街需求时,即使车流量较小,也必须设置最小绿灯时间,其计算公式如下^[29]:

$$G_{\min}^{i,n} = \begin{cases} 3.2 + \frac{L}{S_p} + 0.81 \frac{N_{\text{ped}}}{W_E}, & W_E > 3.0 \\ 3.2 + \frac{L}{S_p} + 0.27 \frac{N_{\text{ped}}}{W_E}, & W_E \leq 3.0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: L 为行人过街距离,m; W_E 为过街道有效宽度,m; S_p 为行人过街平均速度,m/s; N_{ped} 为单位时间间隔内过街行人数量,人。

3.2 绿灯延长时间

上个交叉口排队车辆行驶至下一交叉口时,由于不同车辆的行驶速度存在差异,排队车辆将变得分散,绿灯延长时间用于在车流到达密度较高且车头时距小于检测器间隔时间时,为绿灯期间到达车辆延长通过时间,保证在整个周期内排队车辆车头时距较小的车辆得到充分消散。在车流到达服从泊松分布的条件下车辆车头时距服从负指数分布,在计数时间间隔 u_i 内,车头时距 $h > u_i$ 的概率为:

$$P\{h \geq u_i\} = \exp(-\lambda u_i) \quad (14)$$

设第 m 辆车车头时距 $h > u_i$,则概率为:

$$P\{m(h) \geq u_i\} = \exp(-\lambda u_i) (1 - \exp(-\lambda u_i))^{m-1} \quad (15)$$

上述概率函数均值 $\bar{m}_e = \exp(\lambda u_i)$ 。因此,绿灯延长时间 $G_e^{i,n}$ 可通过 $\bar{m}_e - 1$ 辆车所需时间进行计算,即:

$$G_e^{i,n} = \frac{\exp(\lambda_i^n u_i) - 1}{\lambda_i^n} \quad (16)$$

3.3 最大绿灯时间

最大绿灯时间主要用于高负荷车流条件下控制各相位绿灯时间的分布,通过最大绿灯时长的

限制,避免自适应信号控制器无法处理高负荷车流量的问题。在高负荷情况下,第 n 个滚动周期第 i 相位以最大绿灯时间清空车辆时,其最大通行车辆数为 $\lambda_m^i G_{\max}^{i,n}$ 。设当前周期排队车辆消散比例为 α_i^n ,为了合理地分配不同相位的绿灯时间,最大绿灯时间 $G_{\max}^{i,n}$ 可通过下式进行计算:

$$G_{\max}^{i,n} = \frac{\tilde{N}_i^{n-1}}{\lambda_m^i} + \frac{\alpha_i^n \lambda_i^n (r_i^n + L_i)}{\lambda_m^i - \alpha_i^n \lambda_i^n} \leq \text{MxG} \quad (17)$$

式中: MxG 为最大绿灯时间优化上限。

需要注意的是,除采用单左转车道的左转相位外,其余相位的最大绿灯时间应存在上限以避免车流量过大导致相位时间过长。考虑到车辆到达流量严格小于饱和流量,设 $\lambda_i' = (\lambda_m^i + \lambda_i^n)/2$ 为相位 i 的最大消散流率, MxG 和消散比例 α_i^n 分别为:

$$\begin{cases} \text{MxG} = \frac{2(\tilde{N}_i^{n-1} + \lambda_i^n (r_i^n + L_i))}{\lambda_m^i + \lambda_i^n} \\ \alpha_i^n = \min\left(\frac{\tilde{N}_i^{n-1} - \tilde{N}_i^{n-1}}{\tilde{N}_i^{n-1}} + \Phi, 1\right) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\tilde{N}_i^{n-1}$ 为第 $n-1$ 个滚动周期第 i 相位的实际到达车辆数; Φ 为消散增量,一般取 10%。

4 速度方程拟合

4.1 速度方程

设 V_{initial} 为车辆初始速度, V_{end} 为受加、减速操作后的最终速度(单位: km/h); 设 $a(\tau)$ 为车辆在 τ 时刻的加、减速度(单位: m/s²), 车辆行驶速度为:

$$V(t) = V_{\text{initial}} + 3.6 \int_0^t a(\tau) d\tau \quad (19)$$

且满足 $V_{\text{initial}} + 3.6 \int_0^{t_{\text{end}}} a(\tau) d\tau = V_{\text{end}}$ 。

如图 5 所示, 减速延迟存在车辆减速停车

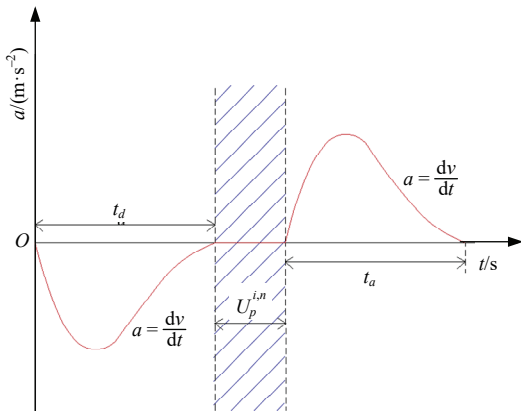


图 5 加速度变化曲线

Fig. 5 Acceleration change profile

($U_p^{i,n} > 0$) 和车辆减速不停车 ($U_p^{i,n} = 0$) 两种情形, 设车辆减速停车的速度方程为 $V_{a/d}^s(t)$, 减速未停车的车辆 k 速度方程为 $V_{a/d}^{k,ns}(t)$, 两种情形下的速度方程记为:

$$\begin{cases} V_{a/d}^s(t): \begin{cases} V_{\text{initial}}^a = 0 \& V_{\text{end}}^a \neq 0; \\ V_{\text{initial}}^d \neq 0 \& V_{\text{end}}^d = 0 \end{cases} \\ V_{a/d}^{k,ns}(t): \begin{cases} V_{\text{initial}}^{a/d} \neq 0 \& V_{\text{end}}^{a/d} \neq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

在车辆减速不停车过程中, 需要确定减速后的 V_{end} 或者加速时的 V_{initial} 。在无外力影响下, 车辆减速后的最终速度取决于交通流量、驾驶员驾驶习惯和道路条件等, 图 6 描述了车辆减速时的速度变化曲线, 后继跟随车辆最终车速 V_{end} 呈现 Sigmoid 函数型变化。因此, 这里增加了第 k 辆车驾驶速度恢复的经验函数 $\mu(k)$ 以模拟车辆减速但不停车的速度变化, 车辆 k 受到车流停车波影响但不停车的最终速度 V_{end} 计算公式如下所示:

$$\begin{cases} V_{\text{end}}^d = V_{\text{initial}}^a = \mu(k) V_{\text{initial}}^d \\ \mu(k) = \frac{1 - \exp(-\lambda k h_t)}{1 + \exp(-\lambda k h_t)} \end{cases} \quad (21)$$

式中: h_t 为上一滚动周期检测到的最小车头时距, s。

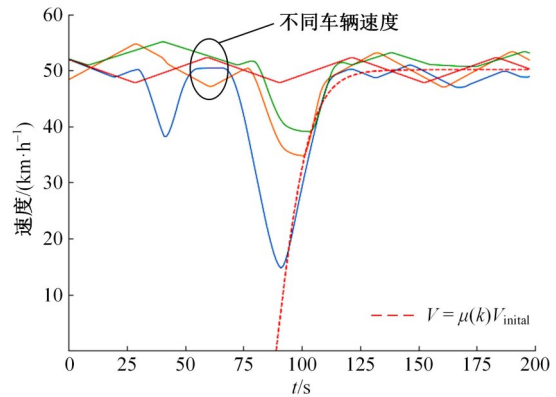


图 6 跟随车辆行驶速度恢复曲线

Fig. 6 Follow the vehicle travel speed recovery curve

4.2 加速度方程

现阶段的车辆加速度模型主要包括常量加速度模型、线性递减加速度模型、双项正弦加速度模型、三项正弦加速度模型以及多项式加速度模型等。Akcelik 和 Biggs^[30] 对上述加速度变换模型在中心商业区、一般城区以及郊区预测加速度变化能力进行分析, 研究发现多项式加速度模型在所有加速度预测模型中准确度最高。本文利用多项式加速度模型对单一车辆在交叉口的加速度变化进行描述, 加速度模型及约束条件如下所示:

$$\begin{aligned}
 a(t) &= t\beta_{a/d} \left(1 - \left(\frac{t}{t_{a/d}} \right)^{m_{a/d}} \right)^2 \quad (22) \\
 \text{s. t. } &\begin{cases} a(0) = a(t_{a/d}) = 0 \\ \left. \frac{da}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{da}{dt} \right|_{t=t_{a/d}} = 0 \end{cases} \\
 \frac{x_{a/d}}{t_{a/d}} &> \frac{V_{\text{end/initial}} + 2V_{\text{initial/end}}}{10.8} \\
 \rho_{a/d} &= \frac{3.6 \left(\frac{x_{a/d}}{t_{a/d}} \right) - V_{\text{initial/end}}}{V_{\text{end/initial}} - V_{\text{initial/end}}} \\
 m_{a/d} &= \frac{\sqrt{81\rho_{a/d}^2 - 138\rho_{a/d} + 73} - 27\rho_{a/d} + 15}{12\rho_{a/d} - 4} \\
 \beta_{a/d} &= \frac{2(m_{a/d} + 1)(m_{a/d} + 2)(V_{\text{end}} - V_{\text{initial}})}{3.6m_{a/d}^2 t_{a/d}^2} \\
 \begin{cases} t_a = \frac{V_{\text{end}} - V_{\text{initial}}}{2.08 + 0.127\sqrt{V_{\text{end}} - V_{\text{initial}}} - 0.0182V_{\text{initial}}} \\ t_d = \frac{V_{\text{initial}} - V_{\text{end}}}{1.71 + 0.238\sqrt{V_{\text{initial}} - V_{\text{end}}} - 0.0090V_{\text{initial}}} \end{cases} \\
 \begin{cases} x_a = t_a \frac{(0.467 + 0.0020V_{\text{initial}} - 0.0021V_{\text{end}})(V_{\text{initial}} + V_{\text{end}})}{3.6} \\ x_d = t_d \frac{(0.473 + 0.00155V_{\text{initial}} - 0.00137V_{\text{end}})(V_{\text{initial}} + V_{\text{end}})}{3.6} \end{cases}
 \end{aligned}$$

式中: $\rho_{a/d}$ 为与速度-时间函数曲线形状相关的加速度比率, 是无量纲常量; $m_{a/d}$ 与 $\beta_{a/d}$ 的取值由 $\rho_{a/d}$ 确定, $\beta_{a/d}$ 决定了加、减速度方向, 规定车辆行驶方向为正方向, m/s^3 ; $t_{a/d}$ 为车辆在加减速期间的行驶时间, s ; $x_{a/d}$ 为车辆在加减速期间的行驶距离, m 。

5 延误最小化动态线性优化模型

5.1 状态转移矩阵

令有效红灯时间向量 $R^n = [R_1^n, \dots, R_8^n]^T$, 各相位绿灯时间向量为 $g^n = [g_1^n, g_2^n, \dots, g_8^n]^T$, 损失时间向量 $L = [L_1, L_2, \dots, L_8]^T$ 。在图 3 中, 各相位对应有效红灯时间可用下式表示:

$$R^n = \begin{bmatrix} g_2^{n-1} + g_3^{n-1} + g_4^{n-1} + g_3^n + g_4^n + L_1 \\ g_3^{n-1} + g_4^{n-1} + g_1^n + g_3^n + g_4^n + L_2 \\ g_4^{n-1} + L_3 \\ g_3^n + L_4 \\ g_6^{n-1} + g_7^{n-1} + g_8^{n-1} + g_7^n + g_8^n + L_5 \\ g_7^{n-1} + g_8^{n-1} + g_5^n + g_7^n + g_8^n + L_6 \\ g_8^{n-1} + g_8^n + L_7 \\ L_8 \end{bmatrix} \quad (23)$$

在进行线性变换后得到式(24):

$$R^n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot g^{n-1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot g^n + L \quad (24)$$

将式(24)中的 8×8 矩阵定义为周期 $n-1$ 与周期 n 的状态转移矩阵, 进而可扩展到状态转移矩阵的一般形式。

设 x_{ij} 为环中相位 i 是否需要等待相位 j 结束, $x_{ij} \in \{0, 1\}$, 进而构建第 n 个滚动周期的状态转移矩阵 S^n 为:

$$S^n = \begin{bmatrix} RG_1^n & O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 4} & RG_2^n \end{bmatrix}_{8 \times 8} \quad (25)$$

式中: $O_{4 \times 4}$ 为规模为 4×4 的零矩阵; $RG_1^n =$

$$\begin{bmatrix} 0 & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & 0 & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & 0 & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & 0 \end{bmatrix}; RG_2^n = \begin{bmatrix} 0 & x_{56} & x_{57} & x_{58} \\ x_{65} & 0 & x_{67} & x_{68} \\ x_{75} & x_{76} & 0 & x_{78} \\ x_{85} & x_{86} & x_{87} & 0 \end{bmatrix}$$

则红灯时间向量 R^n 可通过下式计算:

$$R^n = [S^{n-1}]^T \cdot g^{n-1} + S^n \cdot g^n + L \quad (26)$$

此外, 可以将 RG^n 划分为 4 个矩阵块, 即

$$RG^n = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_2 & A_2 \end{bmatrix}, \text{ 其中, 块 } A_1, A_2 \text{ 决定相序;}$$

$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ = lag 即左转后置相序; $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ = lead, 即左转前置相序; 块 B_1, B_2 决定不同方向的放行顺序, $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 表示该方向先行, $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 表示该方向后行。

以图 3 为例, 第 $n-1$ 个滚动周期与第 n 个滚动周期的 RG^{n-1}, RG^n 矩阵分别为:

$$RG_1^{n-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; RG_1^n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$RG_2^{n-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; RG_2^n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

用 $N_{\text{res}}^{i,n-1}$ 表示第 $n-1$ 周期第 i 相位绿灯时间最大通过车辆数,用 $\dot{N}_i^{n-1}$ 表示第 $n-1$ 周期第 i 相位累计到达的车辆总数,已知 R_i^{n-1} 和 G_i^{n-1} , 则有:

$$\begin{cases} N_{\text{res}}^{i,n-1} = \lambda_m^i G_i^{n-1} \\ \dot{N}_i^{n-1} = \tilde{N}_i^{n-2} + \dot{\lambda}_i^{n-1} (R_i^{n-1} + G_i^{n-1}), \\ R_i^{n-1} \in \mathbb{R}^{n-1} \\ \tilde{N}_i^{n-1} = \max(\dot{N}_i^{n-1} - N_{\text{res}}^{i,n-1}, 0) \end{cases} \quad (27)$$

5.2 优化约束建立

通过状态转移矩阵可计算得到每个相位在两个周期之间需要等待的有效红灯时间,根据冲突相位之间的限制以及放行规则,需要考虑的约束如下所示。

5.2.1 NEMA 环栅结构约束

如图 3 所示,根据 NEMA 环栅八相位结构的特点,在栅两侧的环 RG_1 的相位时长之和应等于环 RG_2 的相位时长之和,如下所示:

$$\begin{cases} g_1^n + g_2^n = g_3^n + g_4^n \\ g_5^n + g_6^n = g_7^n + g_8^n \end{cases} \quad (28)$$

5.2.2 主、次街放行顺序约束

由 5.1 小节对状态转移矩阵的定义可知,块 B_1 、 B_2 中所有未知参数取相同值,以满足相应的放行需求,如下所示:

$$\begin{cases} x_{13} = x_{14} = x_{23} = x_{24} \\ x_{31} = x_{32} = x_{41} = x_{42} \\ x_{57} = x_{58} = x_{67} = x_{68} \\ x_{75} = x_{76} = x_{85} = x_{86} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=3}^4 \sum_{i=1}^2 x_{ij} - \sum_{j=7}^8 \sum_{i=5}^6 x_{ij} = 0 \\ \sum_{j=1}^2 \sum_{i=3}^4 x_{ij} - \sum_{j=5}^6 \sum_{i=7}^8 x_{ij} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

5.2.3 等待相位最大数量约束

根据周期间迭代规律可得每个相位所需等待的其他相位最多为 6 个相位:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 x_{ij} = 6 \\ \sum_{j=5}^8 \sum_{i=5}^8 x_{ij} = 6 \end{cases}, i \neq j \quad (31)$$

5.2.4 相序设置约束

由于状态转移矩阵中两相邻相位之间存在前后制约关系,则:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 x_{ij} = 1 \\ \sum_{j=3}^4 \sum_{i=3}^4 x_{ij} = 1 \\ \sum_{j=5}^6 \sum_{i=5}^6 x_{ij} = 1 \\ \sum_{j=7}^8 \sum_{i=7}^8 x_{ij} = 1 \end{cases}, i \neq j \quad (32)$$

5.3 延误最小化动态线性优化模型

设第 n 个滚动周期所有相位产生的总延误为 Delay^n ,联立式(4)~式(27)可以获得其计算公式,如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Delay}^n = & \sum_{i=1}^8 \sum_{k=1}^{N_i} \left(\int_{T_{k,1}^i}^{T_{k,2}^i} \frac{V_f - V(t)}{V_f} dt + \int_{T_{k,2}^i}^{T_{k,3}^i} 1 dt + \right. \\ & \left. \int_{T_{k,3}^i}^{T_{k,4}^i} \frac{V_f - V(t)}{V_f} dt \right) = \sum_{i=1}^8 \left((N_{\text{stop}}^{i,n} + \tilde{N}_i^{n-1}) \right. \\ & \left. \left(\int_0^{t_d^i} \frac{V_f - V_d^s(t)}{V_f} dt + \int_0^{t_a^i} \frac{V_f - V_a^s(t)}{V_f} dt \right) + \right. \\ & \left. (N_i^n - N_{\text{stop}}^{i,n} - \tilde{N}_i^{n-1}) \left(\int_0^{t_d^{i,k}} \frac{V_f - V_d^{k,ns}(t)}{V_f} dt + \right. \right. \\ & \left. \left. \int_0^{t_a^{i,k}} \frac{V_f - V_a^{k,ns}(t)}{V_f} dt \right) + \sum_{k=1}^{N_{\text{stop}}^{i,n}} U_p^{i,n}(k) + \tilde{N}_i^{n-1} R_i^n \right) \end{aligned} \quad (33)$$

化简后的 Delay^n 表达式包含 3 部分:第 n 周期所有相位的停车车辆在加、减速过程中产生的延误;第 n 周期所有相位的停车车辆以及第 $n-1$ 周期未清空车辆的停车延误;第 n 周期所有相位的未停车车辆的加、减速延误。

基于式(33)构建最优相序组合下使延误最小化线性优化模型如下:

$$\begin{cases} \text{func} = \min(\text{Delay}^n) \\ \text{s.t.} \begin{cases} (28)(29)(30)(31)(32) \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \text{ 且 } g_i^n \in N^* \end{cases} \end{cases} \quad (34)$$

6 算法验证

6.1 算法流程

自适应控制算法流程如图 7 所示。

首先,算法开始的第一个周期以固定配时方案为基础,采集交通数据并进行初始化。在上游交叉口出口道 50 m 处设置数据采集检测器,交叉口停车线前 30 m 处设置信号延长检测器^[31],获得初始采集数据后对下一周期流量数据及队列状态进行预测。

其次,基于所采集的流量数据进行配时参数优化。利用流量数据对下一周期车流到达率进行预测,并分析本周期各相位车流排队消散情况。将每个数据采集检测器获取的平均车速平均值作为速度方程拟合过程中的初始速度。完成配时参数优化及速度方程拟合后,基于总延误线性优化模型对相序参数进行优化并输出配时方案。

最后,基于自适应控制理论对当前交叉口进行信号控制,周期结束后输出的实际配时将用于未完全消散车辆数的计算。在此过程中,对下一滚动周期所需数据进行采集直到当前周期结束迭代至下一周期。算法性能的评估主要依据车辆延误、周期内平均车队长度、停车次数及行人延误。

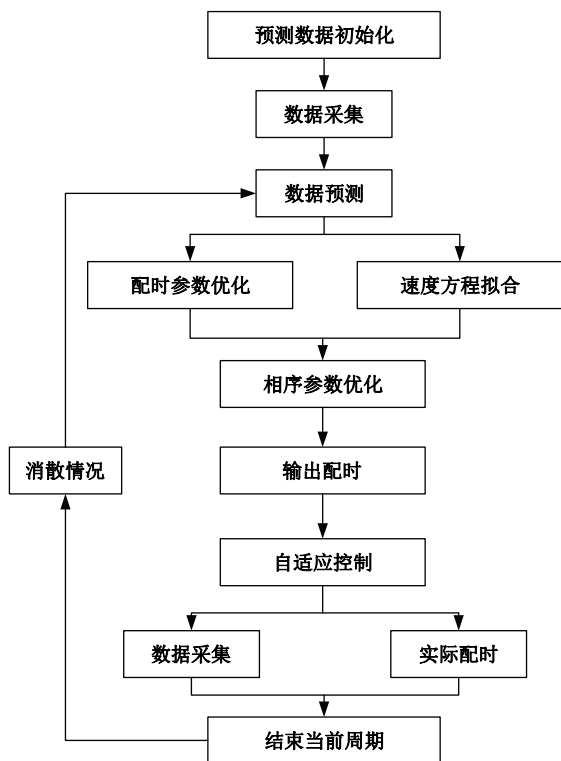


图 7 算法流程

Fig. 7 Algorithmic process

进而在固定配时控制、感应控制及自适应控制 3 种方式下进行对比以量化算法控制效益。

6.2 实验场景设计

本文以银川市上海东路与友爱街交叉口(见图 8)为实例,采用 VISSIM 软件对自适应信号控制算法进行可行性和有效性验证,其中自适应信号控制算法功能由 Python 实现。

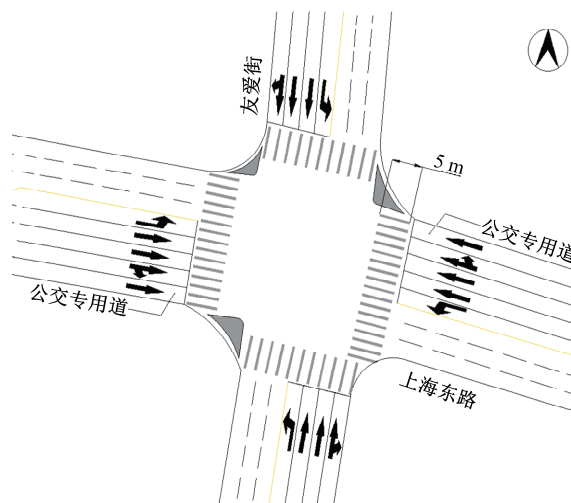


图 8 上海东路-友爱街交叉口

Fig. 8 Intersection of east shanghai road and you-ai Street

实验所用数据来自 2024 年 2 月 26 日上午 8:00~9:00 所采集到的高峰流量,道路限速 60 km/h,为验证不同交通需求强度下本文算法的有效性,将采集得到的高峰流量作为高负荷场景,并在其基础上分别减少和增加 25% 的车流量用以设置中负荷和超高负荷场景,不同实验场景下的流量数据如表 1~表 3 所示。

表 1 中负荷实验场景流量

Table 1 Medium load experimental scenario traffic

进 口	直行/行人 /[(veh·h ⁻¹)/(p·h ⁻¹)]	左转/ (veh·h ⁻¹)	右转/ (veh·h ⁻¹)	合计/ (veh·h ⁻¹)
东	297/161	147	114	558
西	213/137	78	120	411
南	694/251	111	60	865
北	660/140	102	33	795

此外,使用感应控制与固定配时控制进行对照实验。设置各相位红灯清空时间为 2 s,黄灯时间为 3 s,延长检测器最大时间间隔为 3 s,每个场景仿真时间为 3 h,前 600 s 作为仿真预热时间并采用固定配时方案运行,预热时间结束后开始运行其他控制策略,感应控制最大绿灯时长和固定

配时时长取相同值,根据式(14)计算得到最短绿灯时长, N_{ped} 取行人到达率在 15 min 内到达行人数量。感应控制下的最小绿灯时长和调查得到的固定配时方案以及相位放行顺序如表 4 所示。

表 2 高负荷实验场景流量

Table 2 High load experimental scenario traffic

进口	直行/行人 /[(veh·h ⁻¹)/(p·h ⁻¹)]	左转/ (veh·h ⁻¹)	右转/ (veh·h ⁻¹)	合计/ (veh·h ⁻¹)
东	396/214	196	152	744
西	284/182	104	160	584
南	925/334	148	80	1 153
北	880/186	136	44	1 060

表 3 超高负荷实验场景流量

Table 3 Ultra-high load experimental scenario traffic

进口	直行/行人 /[(veh·h ⁻¹)/(p·h ⁻¹)]	左转/ (veh·h ⁻¹)	右转/ (veh·h ⁻¹)	合计/ (veh·h ⁻¹)
东	495/268	245	190	930
西	355/228	130	200	685
南	1 156/418	185	100	1 441
北	1 100/233	170	55	1 325

表 4 配时方案

Table 4 Timing plan

进口	直行时间/s	左转时间/s	左转放行 顺序
	固定/感应 G_{min}	固定/感应 G_{min}	
东	45/35	30/25	lead
西	30/25	15/15	lag
南	60/35	20/15	lag
北	60/35	20/15	lag

考虑到不同的参数取值对模型优化效果存在一定影响,本文针对车流参数预测过程中权重调整临界值 δ 的取值进行分析。以超高负荷为实验场景, δ 的取值为[10%,30%],步长为 5% 进行测试,以车均延误为评估指标,最终结果如图 9 所示。相较于其他取值,在当前交通场景下 $\delta=25\%$ 能够使交叉口控制延误较低且各时间段内车均延误波动起伏也较为稳定。

6.3 实验结果分析

为保证实验结果的可靠性,采用 5 组不同随机种子条件下的重复实验数据对结果进行对比分析。每组实验中,车均延误和平均停车次数作为评估交叉口车流控制效果的性能指标,人均延误作为评估不同控制策略下行人通过效益的性能指标。此外,为测试算法的鲁棒性,选取了 $\delta=10\%$ 作为车流参数预测过程中的权重调整临界值。将交叉口所有相位下不同时间间隔计算得到的评估

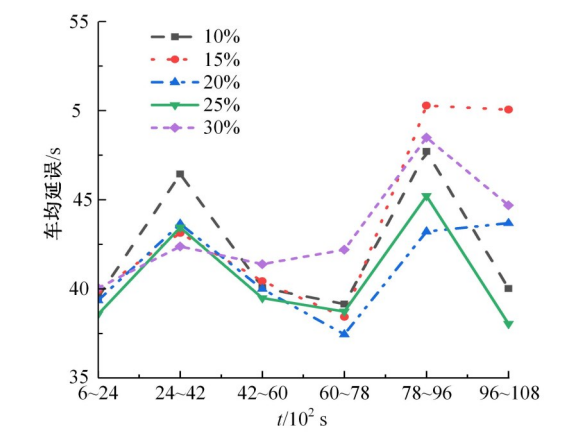


图 9 不同临界值产生的延误比较

Fig. 9 Comparison of delays from different thresholds

因子取平均值作为整个交叉口的评估因子。3 种场景下不同控制策略的实验结果如图 10 所示。

实验结果表明:在不同场景下本文方法均能够有效降低交叉口车均延误。由图 10 可知,在超高负荷场景下,固定配时方案下的车均延误明显高于其他控制策略,感应控制下的交叉口拥堵状况有所缓解,但由于固定的相序和相位时长限制,交叉口各相位的车均延误仍在较高水平。本文算法相较于固定配时控制和感应控制策略,能够根据各相位交通需求重新设置放行顺序,尽可能满足到达率较大的相位的交通需求,因而进一步降低了交叉口整体的车均延误。在超高负荷场景下,采用本文算法车均延误分别减少了 55% 和 27.8%,平均停车次数减少了 58.5% 和 10.1%,能够有效解决超高负荷场景下交通流密度过大导致车队未完全清空的问题。本文算法在相位排队未清空时会基于最大消散流率进一步延长相位的最大绿灯时间,进而使得车辆平均停车次数进一步降低。此外,本文考虑了行人到达特性,所以人均延误均处于较低水平,提高了行人的通行效益。

在高负荷和中负荷场景下,交叉口绿灯时长均能满足车流通行需求,因此,优化目标为在满足交通需求的基础上减少不必要的绿灯时间。在车队完全消散时,本文算法能够及时结束该相位的绿灯状态,通过灵活的相序控制有效降低车辆延误。其中,在高负荷场景下,本文算法相较于固定控制和感应控制下的车均延误分别减少了 36.1% 和 14.6%,平均停车次数减少了 23.4% 和 8.7%;在中负荷场景下,车均延误分别减少了 22.8% 和 10.5%,平均停车次数减少了 3.3% 和

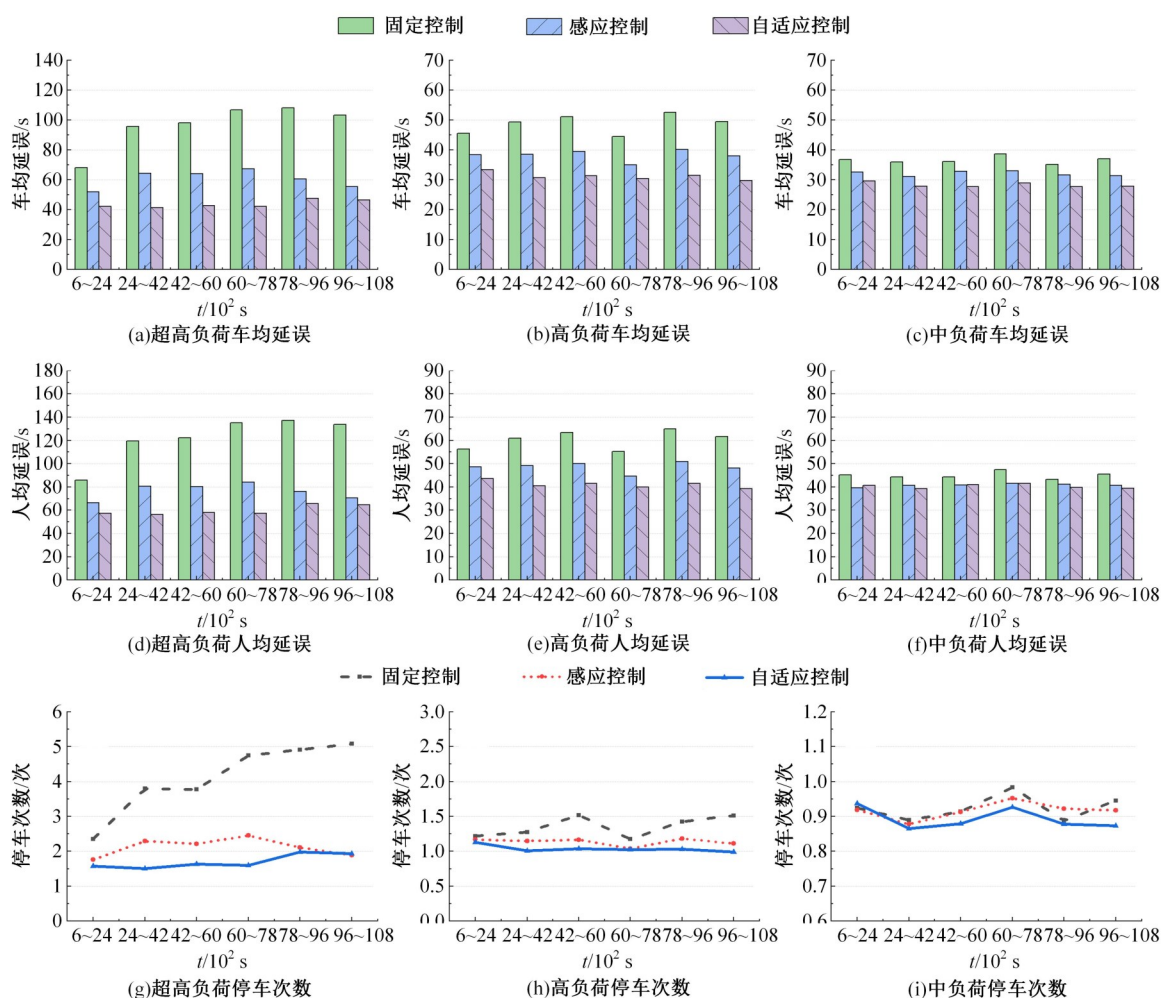


图 10 不同交通负荷下控制效益对比

Fig. 10 Comparison of control benefits under different traffic loads

2.6%。得益于相位放行顺序上的灵活性,本文控制方法的人均延误也均低于其他控制方法。

不同场景下采用不同控制策略的交叉口排队长度变化如图 11~图 13 所示。在超高负荷、高负

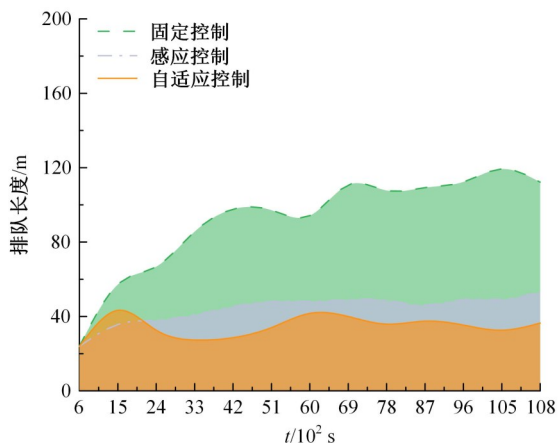


图 11 超高负荷车辆排队长度

Fig. 11 Ultra-high demand vehicle queue length

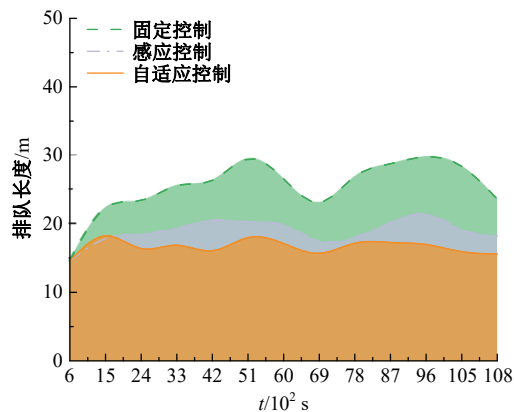


图 12 高负荷车辆排队长度

Fig. 12 High demand vehicle queue length

荷和中负荷 3 种场景下,固定配时控制策略具有明显局限性,交叉口平均排队较长。在超高负荷场景下,为提高交叉口整体的控制效益以降低车辆延误,自适应控制算法在初期评估区间内的车辆平均排队长度可能会略大于感应控制。但整体

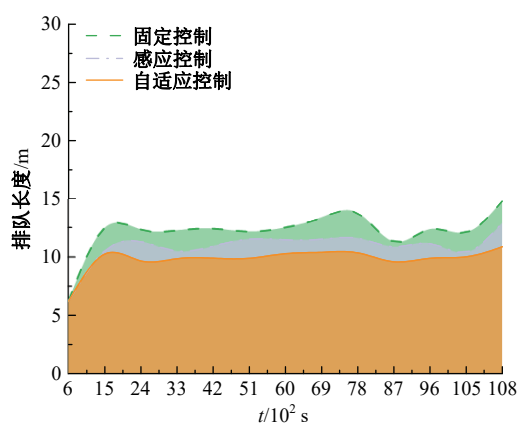


图 13 中负荷车辆排队长度

Fig. 13 Medium demand vehicle queue length

来看,本文算法能够在超高负荷交通条件下起到调节交叉口排队长度的作用。在高、中负荷条件下由于能够减少绿灯时长浪费,因此,交叉口排队长度也明显缩短。在运算效率方面,本文算法实验硬件为 Intel i5-7400 处理器,测试过程中的程序单个步长运行时间少于 100 ms,能满足实际控制过程中对时间复杂度的需求。

7 结束语

本文在综合考虑车辆驾驶延误的组成部分后,提出基于相位队列演进的自适应控制算法,包括队列状态及车流参数预测、配时参数优化、车辆行驶状态下延误的计算以及基于延误最小化的相序优化 4 部分,实验结果表明:在不同的交通负荷场景下,本文的自适应控制算法相较固定配时控制和感应控制方法,其优化效果非常明显。本文算法的创新之处在于:①对车辆在进入交叉口时的驾驶状态进行分析,基于车流波动理论对队列消散情况进行预测,实现了车辆在交叉口行驶延误的全过程预测,为交叉口信号控制优化目标提供了新思路;②基于交叉口交通流的时变性对相序灵活地进行调节,并利用周期间的数据以及相序状态转移矩阵实现延误最小化,基于此对现有自适应方法进行改进。整体来看,本文简化了自适应控制流程,降低了计算复杂度,能够在优化过程中及时响应控制器需求。然而,本文算法会受到车流到达模型的影响,当车流到达率过大,达到饱和条件时,控制模型优化能力将逐渐降低。由于采用单一的加速度模型,因此,对车辆加、减速延误的预测与实际会存在一定差异。此外,本文算法基于 NEMA 环栅相位结构进行控制优化,对

于非标准交叉口,如 Y 形或有单行道的十字交叉口需要进行相应的调整。针对不同车辆到达特性与道路结构,本文算法的适应性还需要进一步研究分析,后续将针对这些问题开展更深入的研究,以提升算法的优化性能。

参考文献:

- [1] Tang K, Boltze M, Nakamura H, et al. Global Practices on Road Traffic Signal Control: Fixed-time Control at Isolated Intersections[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [2] Sims A G, Dobinson K W. The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(2): 130-137.
- [3] Robertson D I, Bretherton R D. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15.
- [4] Lin F, Vijayakumar S. Adaptive signal control at isolated intersections[J]. Journal of Transportation Engineering, 1988, 114(5): 555-573.
- [5] Miller A J. A computer control system for traffic networks[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow, London, UK, 1963: 200-220.
- [6] Bang K L, Nilsson L E. Optimal control of isolated traffic signals[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1976, 9(4): 173-184.
- [7] Lin F B, Cooke D, Vijayakumar S. Use of predicted vehicle arrival information for adaptive signal control—an assessment[J]. Transportation Research Record, 1987, 1112(1): 89-98.
- [8] Gartner N. OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal[J]. Transportation Research Record, 1983, 906(1): 75-81.
- [9] Zheng X, Recker W. An adaptive control algorithm for traffic-actuated signals[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 30: 93-115.
- [10] Head L. Event-based short-term traffic flow prediction model[J]. Transportation Research Record, 1995, 1510(1): 45-52.
- [11] Comert G. Simple analytical models for estimating the queue lengths from probe vehicles at traffic signals [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 55: 59-74.

- [12] Cai C, Wong C K, Heydecker B G. Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(5): 456-474.
- [13] Genders W, Razavi S. Asynchronous n -step Q-learning adaptive traffic signal control[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2019, 23(4): 319-331.
- [14] Zheng Y, Zhang Y, Hu J. Iterative learning based adaptive traffic signal control[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(6): 34-40.
- [15] 陆丽萍, 程垦, 褚端峰, 等. 基于竞争循环双Q网络的自适应交通信号控制[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(8): 267-277.
- Lu Li-ping, Cheng Ken, Chu Duan-feng, et al. Adaptive traffic signal control based on dueling recurrent double Q network[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 10(6):34-40.
- [16] Stevanovic A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice[M]. Washington, DC:Transportation Research Board, 2010.
- [17] Akcelik R. Estimation of green times and cycle time for vehicle-actuated signals[J]. *Transportation Research Record*, 1994, 1457(1): 63-72.
- [18] Viti F, Van Zuylen H J. A probabilistic model for traffic at actuated control signals[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2010, 18(3): 299-310.
- [19] Zhang G, Wang Y. Optimizing minimum and maximum green time settings for traffic actuated control at isolated intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(1): 164-173.
- [20] Shirvani Shiri M J, Maleki H R. Maximum green time settings for traffic-actuated signal control at isolated intersections using fuzzy logic[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2017, 19(1): 247-256.
- [21] Lee S, Wong S C. Group-based approach to predictive delay model based on incremental queue accumulations for adaptive traffic control systems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 98: 1-20.
- [22] Lee S, Wong S C, Varaiya P. Group-based hierarchical adaptive traffic-signal control Part II: Implementation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 104: 376-397.
- [23] Liu H, Balke K N, Lin W H. A reverse causal-effect modeling approach for signal control of an oversaturated intersection[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(6): 742-754.
- [24] Ren Y, Wang Y, Yu G, et al. An adaptive signal control scheme to prevent intersection traffic blockage [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016: 1-10.
- [25] 骆旅舟, 谈超鹏, 唐克双. 基于电警数据的单点自适应信号控制优化方法[J]. *同济大学学报*, 2022, 50(12): 1798-1808.
- Luo Lü-zhou, Tan Chao-peng, Tang Ke-shuang. Adaptive signal control optimization for isolated intersection based on E-police data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 50(12):1798-1808.
- [26] Institute of Transportation Engineers (ITE). Traffic Control Devices Handbook[M]. Washington, DC:Institute of Transportation Engineers, 2001.
- [27] Wu X, Liu H X. A shockwave profile model for traffic flow on congested urban arterials[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(10): 1768-1786.
- [28] Billah B, King M L, Snyder R D, et al. Exponential smoothing model selection for forecasting[J]. *International Journal of Forecasting*, 2006, 22(2): 239-247.
- [29] National Research Council (U. S.). Highway Capacity Manual[M]. Washington DC.:Transportation Research Board, National Research Council, 2000.
- [30] Akcelik R, Biggs D C. Acceleration profile models for vehicles in road traffic[J]. *Transportation Science*, 1987, 21(1): 36-54.
- [31] Urbanik T, Tanaka A, Lozner B, et al. Signal timing manual-second edition[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2015.