

文章编号:1671-1637(2024)02-0243-11

# 设置排阵式预信号的干线交通信号协调控制优化

李 岩<sup>1</sup>, 史 旋<sup>1</sup>, 南斯睿<sup>2</sup>, 朱才华<sup>1,3</sup>

(1. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;  
3. 河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:**为提升干线道路整体的车流运行效率,建立了一种优化设置排阵式预信号的干线交通信号协调控制系统配时方案的双层模型,并提出对应求解算法;双层模型的上层模型为主信号间相位差优化模型,采用遍历搜索算法优化主信号各交叉口间的相位差;下层模型是以通过车辆数、车均延误为优化目标的多目标优化模型,建立了多目标花朵授粉算法(FPA)对其求解;双层模型中的交通参数通过冲击波建模进行关联,通过上下层模型的迭代求得参数的最优解;以设置排阵式预信号后 3 个连续交叉口为研究对象,应用提出模型优化高、低 2 种交通需求下的干线道路交通信号协调配时方案,通过 SUMO 软件测试所选方案的有效性。研究结果表明:该双层模型能够优化设置排阵式预信号的干线交通信号协调配时方案,与传统干线信号协调控制方案相比,提出方法的配时方案在高、低交通需求下系统通过车辆数可分别增加 16%~35%与 8%~17%,延误分别降低 7%~17%与 2%~16%;相较于粒子群优化(PSO)算法与二代非支配排序遗传算法(NSGA-II),FPA 达到指定精度要求的迭代次数分别减少 13 和 24 次。通过仿真结果可知,所提出模型可进一步提升高需求状况下道路的运行效率。

**关键词:**交通控制;排阵式预信号;干线道路;交通信号协调控制;双层模型;花朵授粉算法

**中图分类号:**U491.54 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.02.017

## Optimization of arterial traffic signal coordinated control with tandem pre-signal

LI Yan<sup>1</sup>, SHI Xuan<sup>1</sup>, NAN Si-rui<sup>2</sup>, ZHU Cai-hua<sup>1,3</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Changan University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** To improve the overall traffic flow efficiency, a bi-level model was established for optimizing the timing plans of arterial traffic signal coordinated control system with tandem pre-signals, and its solving algorithm was proposed. The upper-level model of the bi-level model was an optimization model of the offset between main signals, and the traversal search algorithm was employed to solve it between intersections. The lower-level model was a multi-objective optimization model, which selected the throughput vehicles and the average delay time as the optimization objectives. The flower pollination algorithm (FPA) was established to solve the

收稿日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(72371035);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JM-237)

作者简介:李 岩(1983-),男,河北衡水人,长安大学教授,工学博士,从事交通信号控制与智能交通系统研究。

引用格式:李 岩,史 旋,南斯睿,等. 设置排阵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(2):243-253.

**Citation:** LI Yan, SHI Xuan, NAN Si-rui, et al. Optimization of arterial traffic signal coordinated control with tandem pre-signal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(2): 243-253.

proposed multi-objective optimization model. The traffic parameters in the bi-level model were connected by using the shockwave model. The optimal solutions of the parameters were obtained through the iterations between the upper-level and lower-level models. Three consecutive intersections after setting up tandem pre-signals were chosen to test. The proposed method was applied to optimize the traffic signal coordination timing plan on arterial roads under both high and low traffic demands. The effectiveness of the selected scheme was tested by software SUMO. Research results indicate that the bi-level model can optimize the arterial traffic signal coordination timing plan with tandem pre-signals. Compared with the traditional arterial signal coordinated control plan, the timing plans obtained from the proposed methods can increase the throughput vehicles through the system by 16%–35% and 8%–17%, respectively. Under high and low traffic demands, and the delays reduce by 7%–17% and 2%–16%, respectively. Compared to the particle swarm optimization (PSO) algorithm and non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II), the FPA requires 13 and 24 fewer iterations to achieve the specified accuracy requirements, respectively. The simulation results indicate that the proposed model can further improve the operational efficiency of road under high demand conditions. 2 tabs, 7 figs, 30 refs.

**Key words:** traffic control; tandem pre-signal; arterial road; traffic signal coordinated control; bi-level model; flower pollination algorithm

**Author resume:** LI Yan(1983-), male, professor, PhD, liyan@chd.edu.cn.

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (72371035); Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (2020JM-237)

## 0 引 言

排阵式预信号(后文简称预信号)是在进口道上游增设辅助交通信号组,以使候驶区内所有车道可用于同一流向车流的交通信号控制方式。预信号的设置可有效提升交叉口通行能力,尤其是高饱和度和交叉口的运行效率。然而,预信号的设置增加了干线交通信号协调控制的难度,原因在于:(1)协调控制算法需同时协调不同交叉口主信号及单个交叉口主、预信号的配时方案,使得信号配时参数间的约束关系更复杂,造成模型计算复杂度高,难以获得可行解;(2)设置预信号旨在提升交叉口的通行能力,而经典协调控制算法中常采用的最大带宽、最小延误等优化目标,无法直接响应对通行能力提升的需求。应用此类模型求解时,因优化目标有偏差,常造成计算时间长、求解困难等问题,因此,为进一步提升设置预信号后干线道路的运行效率,亟需建立适用于预信号干线道路的交通协调控制方案优化方法。

已有研究表明,设置预信号适用于交通需求较高的时段或直行左转车辆差异较大且难以设置足够左转车道的交叉口<sup>[1]</sup>。Xuan等<sup>[2]</sup>发现当预信号理念被应用于串联设计的交叉口或相位交换策略的交

叉口时,交叉口的通行能力可提升10%~20%。在预信号配时优化的建模过程中,概率模型<sup>[3]</sup>、冲击波模型<sup>[4]</sup>、元胞自动机模型<sup>[5]</sup>等被用于描述车辆到达及各参数间关系,Webster模型<sup>[6]</sup>、动态规划<sup>[7]</sup>和仿真分析<sup>[8]</sup>等方法被用于优化预信号交叉口的配时方案,其优化目标包括延误时间<sup>[9]</sup>、停车次数<sup>[10]</sup>等。尽管上述模型已被用于改善单个预信号系统<sup>[11]</sup>,但上述模型中仍需深入考量交通需求的随机性和交叉口物理环境的复杂性,更需深入分析设置预信号后对道路网络运行效率的影响。

增设预信号后干线路网的协调控制结构更加复杂,需优化交通控制优化模型的框架,以更高效地优化配时方案。传统干线信号协调控制多以延误最小或绿波带宽最大为优化目标<sup>[12]</sup>。干线协调控制一般采用时空图分析车辆运行状态<sup>[13-14]</sup>,并通过数解法、图解法和结合法等算法求解相位差以及最大绿波带宽;MAXBAND控制模型<sup>[15-16]</sup>、加权带宽的控制算法<sup>[17]</sup>、多目标优化算法<sup>[18-19]</sup>、遗传算法<sup>[20]</sup>及部分人工智能算法<sup>[21-25]</sup>等也被应用于干线协调控制中, Lee等<sup>[26-29]</sup>根据遗传算法提出了优化配时方法和配时参数的新思路。

目前预信号干线道路协调控制研究仍主要针对

单个交叉口内部主、预信号交通信号协调控制的问题,忽略了增设预信号后与其邻近的交叉口干线交通信号协调控制和控制优化目标的差异等问题。为解决该问题,本研究将预信号干线交通信号协调控制问题分为2个阶段,即主信号间相位差优化阶段和主、预信号内部优化阶段,通过建立双层模型和相应的求解算法来获取配时方案,并通过算例分析验证模型与算法的有效性。

## 1 预信号干线协调控制双层模型

设置预信号的干线道路交通信号协调控制方案需对主、预信号的配时方案及主信号间配时方案进行协同优化。由于在优化过程中,各交叉口既有主、预信号内部的优化目标,又要满足整个干线协调路段的优化目标,主信号间的协调控制和同一交叉口主、预信号间的协调控制为上层和下层的层次关系,而双层模型可分析2个各具目标函数的决策者之间的相互作用。上层决策者优先根据目标函数做出决策,下层决策者以上层决策新信息为基础做出相应决策。一方的行为对另一方策略的选择和实施产生影响,且任何一方又不能完全控制另一方的选择行为。所以,本文在设置预信号的干线道路交通信号协调控制方案优化的过程中,首先对主信号间配时方案进行优化,再对主、预信号的配时方案进行优化,整个过程可选用双层模型进行建模优化。

### 1.1 上层模型

双层模型的上层模型以协调路径为对象,以候驶区中车辆通过数最高为目标,预信号协调控制面向拥堵状态时的管控措施应尽可能考虑车辆放行而非延误。在上层模型中,协调控制应保证候驶区有

效排队在主信号绿灯时长内以较高效率消散,同时尽量减少排队,所以在预信号的协调控制中应选取候驶区车辆放行效率高的时段。绿灯启亮初期,车流以饱和流率放行,此时效率最高。通过各路口间相位差对绿波带宽的影响,主、预信号间的交通流关系可根据车队经过主、预信号停车线处是否有排队分为如图1所示的2种情况:主信号处无排队和主信号处有排队。图1中: $O_i$ 和 $O_j$ 分别为交叉口 $i$ 、 $j$ 主信号的绝对相位差; $R_i$ 、 $R_j$ 分别为交叉口 $i$ 、 $j$ 主信号的红灯时间; $G_i$ 为交叉口 $i$ 主信号的绿灯时间; $r_j$ 为交叉口 $j$ 预信号的红灯时间; $q_{zi}(t_1)$ 、 $q_{zi}(t_2)$ 、 $q_{vj}(t_3)$ 、 $q_{vj}(t_4)$ 分别为 $t_1 \sim t_4$ 时段内主信号和预信号处车辆的平均驶出率; $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 分别为上游车辆受阻时间、排队时间、预信号口车辆受阻时间; $t_4$ 、 $t_5$ 分别为预信号口上游车辆排队时间、排队消散时间(当下游主信号无排队时, $t_4$ 为0); $\Delta_{i,j}$ 为交叉口 $i$ 、 $j$ 主信号间的相位差; $\Delta_{i,pj}$ 为交叉口 $i$ 主信号与交叉口 $j$ 预信号间的相位差; $l_{i,pj}$ 为交叉口 $i$ 主信号与交叉口 $j$ 预信号间的距离; $l_j$ 为交叉口 $j$ 主信号与预信号间的距离; $v$ 为车流速度; $t$ 为行驶时间; $\Delta_{pj,j}$ 为交叉口 $j$ 的预信号与主信号间的相位差; $b_{i,j}$ 为交叉口 $i$ 、 $j$ 间上行方向的绿波带宽度; $C$ 为协调控制的共有周期时长; $x$ 为位移。

使用冲击波理论分析待行区内交通运行状态,以协调控制相位的黄灯开始时间为相位差基准点。当车队经过下游主信号有排队时,车流关系如图1(a)所示;当预信号灯变为红灯时,车辆将开始在上游区域排队,此时将产生速度为 $\omega_1$ 的冲击波,以分离到达车流和排队队列;在预信号绿灯启亮时,队列将以饱和流率排放,形成速度为 $\omega_2$ 的

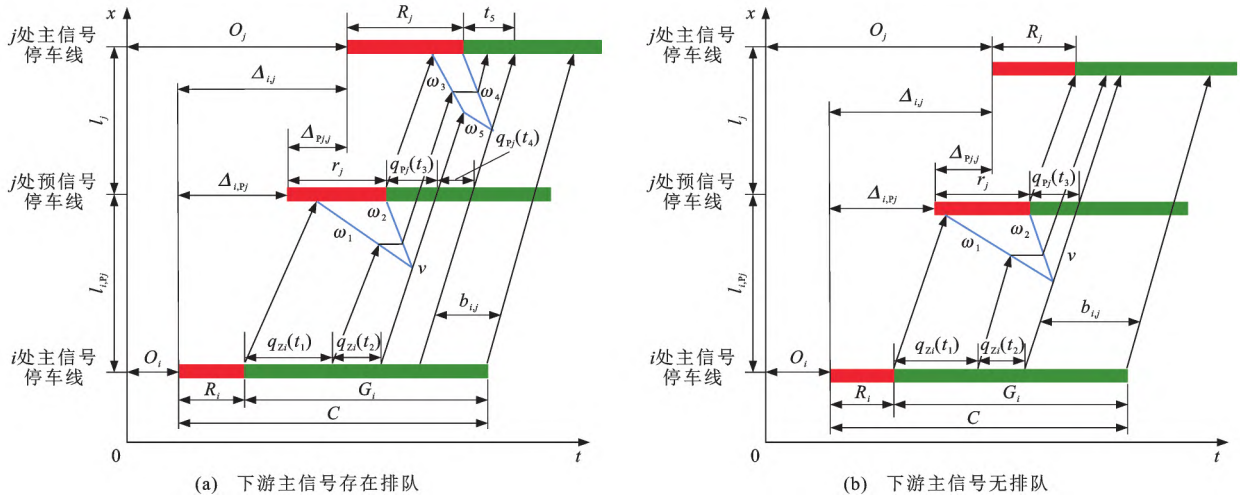


图1 各排队状态下绿波带宽的时空图

Fig. 1 Time-space diagram of green wave bandwidth under various queue conditions

冲击波;当车辆穿过停车线预信号灯时,车道数增加,当车辆到达停车线时,主信号灯变为红灯,队列将在排序区域内再次形成排队,产生后向速度为  $\omega_3$  的冲击波,并在上游区域的队列完全清空时遇到前向速度为  $\omega_4$  的冲击波,当这 2 个冲击波相遇时,将产生反向速度为  $\omega_5$  的冲击波 ( $\omega_3 > \omega_5 = \omega_1$ )。图 1(b)为图 1(a)的特殊情况,即当下游主信号无排队时队列的运行状况。

基于对上层模型优化目标的分析,本文以各交叉口间绿波带宽度内通过车辆数最大为优化目标。此时,上层模型的优化目标为

$$F = \max \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_{i,i+1} b_{i+1,i} q_{i,i+1}(t) q_{i+1,i}(t)}{q_{i,i+1}(t) b_{i+1,i} + q_{i+1,i}(t) b_{i,i+1}} \quad (1)$$

式中:  $F$  为以各路口间绿波带宽度内通过车辆数最大为优化目标的目标函数;  $n$  为交叉口数量;  $b_{i,i+1}$ 、 $b_{i+1,i}$  分别为交叉口  $i$  和  $i+1$  间上、下行方向的绿波带宽度;  $q_{i,i+1}(t)$ 、 $q_{i+1,i}(t)$  分别为上、下游路口时间  $t$  内车辆的驶出率。

约束条件主要通过分析相位差同车流运行效率、路段流量、各交叉口间距、候驶区长度等参数间的关系,建立预信号协调控制优化模型,以获取满足目标的各主信号间的相位差。此模型采用遍历搜索方法求解。

由车辆驶出和驶入的关系可得:在  $t_1$  和  $t_2$  时段储存的车辆将在  $t_3$  时段开始后逐渐消散,当已有排队完全消散后,排队车流满足

$$t_1 q_{Zi}(t_1) + t_2 q_{Zi}(t_2) = t_3 S_{Pj} \quad (2)$$

$$t_3 q_{Pj}(t_3) + t_4 q_{Pj}(t_4) = t_5 S_j \quad (3)$$

式中:  $S_j$ 、 $S_{Pj}$  分别为主、预信号的饱和流率。

如图 1(a)所示,车流将以速度  $v$  到达预信号停车线处,此时根据速度-距离关系可得到  $t_1$ 、 $t_3$ 、 $t_5$  表达式为

$$t_1 = R_i - \left( \Delta_{i,Pj} - \frac{l_{i,Pj}}{v} \right) \quad (4)$$

$$t_3 = t_2 + \Delta_{i,Pj} - \frac{l_{i,Pj}}{v} \quad (5)$$

$$t_5 = t_4 + \Delta_{i,j} - \Delta_{i,Pj} - \frac{l_j}{v} - t_3 \quad (6)$$

由上下游主信号间、下游主信号与上游预信号间、上游主预信号间的相位差关系可得

$$\Delta_{i,Pj} = \Delta_{i,j} - \Delta_{Pj,j} \quad (7)$$

候驶区长度  $l_h$  为

$$l_h = l_p + \frac{v t_h}{3.6} \quad (8)$$

式中:  $l_p$  为候驶区车辆排队距离;  $t_h$  为平均换道时

间,取 3.4 s。

根据式(2)~(8)可计算得到  $t_2$  和  $t_4$  分别为

$$t_2 = \frac{R_i q_{Zi}(t_1) - (\Delta_{i,j} - \Delta_{Pj,j} - l_{i,Pj}/v) [q_{Zi}(t_1) + S_{Pj}]}{S_{Pj} - q_{Zi}(t_2)} \quad (9)$$

$$t_4 = \frac{(\Delta_{Pj,j} - l_j/v) S_j - [S_j + q_{Pj}(t_3)] t_3}{q_{Pj}(t_4) - S_j} \quad (10)$$

当车队通过预信号且无排队时,  $t_4 = 0$ , 则

$$t_2 = \max \left\{ \frac{R_i q_{Zi}(t_1) - (\Delta_{i,j} - \Delta_{Pj,j} - l_{i,Pj}/v) [q_{Zi}(t_1) + S_{Pj}]}{S_{Pj} - q_{Zi}(t_2)}, 0 \right\} \quad (11)$$

$$t_4 = \max \left\{ \frac{(\Delta_{Pj,j} - l_j/v) S_j - [S_j + q_{Pj}(t_3)] t_3}{q_{Pj}(t_4) - S_j}, 0 \right\} \quad (12)$$

综上,绿波带宽度可表示为

$$b_{i,j} = G_i - t_2 - t_4 \quad (13)$$

## 1.2 下层模型

下层模型为主、预信号间优化模型,为影响预信号系统运行效率的关键。

主、预信号之间的协调控制在拥堵状态下,除考虑延误外,还应考虑通过车辆数等,因此,建立多目标优化框架,如需额外考虑能耗、排放等目标,也可应用此框架进行建模及求解。本模型选取通过车辆数、车均延误时间为优化目标进行建模,其目标函数如下

$$f_1 = \max \sum_{j=1}^n q_j \quad (14)$$

$$f_2 = \min \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (15)$$

式中:  $f_1$  为以通过车辆数为优化目标的目标函数;  $f_2$  为以车均延误为优化目标的目标函数;  $q_j$  为交叉口  $j$  的流量;  $D_j$  为交叉口  $j$  主、预信号的总延误。

下层模型的约束条件如下。

(1) 周期时长约束

$$C_Z = C_P \quad (16)$$

式中:  $C_Z$ 、 $C_P$  分别为主、预信号的周期时长。

(2) 有效绿灯时长约束

$$\begin{cases} g_{T,\min} \leq g_T \leq g_{T,\max} \\ g_{L,\min} \leq g_L \leq g_{L,\max} \\ G_{T,\min} \leq G_T \leq G_{T,\max} \\ G_{L,\min} \leq G_L \leq G_{L,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $g_T$ 、 $g_L$  分别为预信号直行、左转绿灯时间;  $G_T$ 、 $G_L$  分别为主信号直行、左转绿灯时间;  $g_{T,\max}$ 、 $g_{T,\min}$  分别为预信号直行绿灯时间的最大值与最小值;  $g_{L,\max}$ 、 $g_{L,\min}$  分别为预信号左转绿灯时间的最大值与最小值;  $G_{T,\max}$ 、 $G_{T,\min}$  分别为主信号直行绿灯时间的最大值与最小值;  $G_{L,\max}$ 、 $G_{L,\min}$  分别为主信号左

转绿灯时间的最大值与最小值。

### (3) 相位差约束

$$\begin{cases} \Delta_{L,i} \leq \frac{l}{v} + R \\ \Delta_{T,i} \leq \frac{l}{v} + R \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\Delta_{L,i}$ 、 $\Delta_{T,i}$  分别为交叉口  $i$  主信号左转、直行流向的相位差;  $l$  为主信号与预信号间的距离;  $R$  为主信号红灯时间。

### (4) 清空时间约束

$$\begin{cases} g_L + g_T + r_L + \frac{l}{v} \leq \Delta_{L,i} + G_L + G_T + R_L \\ g_L + g_T + r_T + \frac{l}{v} \leq \Delta_{T,i} + G_L + G_T + R_T \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $r_L$ 、 $r_T$  分别为预信号左转、直行后的红灯时间;  $R_L$ 、 $R_T$  分别为主信号左转、直行后的红灯时间。

假设道路交通流处于安全运行状态, 则式(15)中的延误指标可根据图2计算, 以主信号红灯时间开始时为相对时间原点, 图中: 折线  $ABKF$  为交叉口

主信号处车辆的到达曲线; 折线  $GEF$  为预信号绿灯相位结束前主信号处排队未消散时的主信号处车辆驶离曲线; 折线  $GEKF$  为预信号绿灯结束前主信号处排队已消散时的主信号处车辆驶离曲线; 直线  $IJ$  的斜率为交叉口进口道的车辆到达率; 直线  $JF$  为预信号绿灯提前结束期间预停车线上游累计到达的排队车辆数;  $g_j$  为交叉口  $j$  预信号的绿灯时间。

图2(a)、(b)的阴影部分分别表示主、预信号处车辆累计到达情况, 交叉口处车辆的总延误为主、预信号处车辆延误之和。主信号车辆一个周期内的总延误为图2中多边形  $ABE'G$  的面积, 而三角形  $HAB$  的面积为一个周期内车辆在预信号处的总延误, 因此, 三角形  $HGE'$  的面积  $S_H$  为一个周期内所有车辆在主、预信号处的总延误  $D$ , 可由下式计算

$$D = S_H = \frac{q_j N_j (R_j + \Delta_{pj,j})^2}{2(N_j - q_j h)} \quad (20)$$

式中:  $N_j$  为交叉口  $j$  主信号的待行车道数;  $h$  为饱和车头时距。

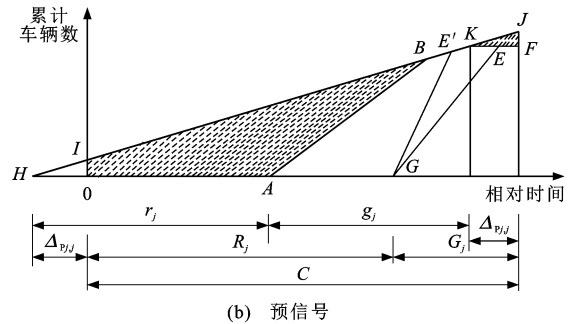
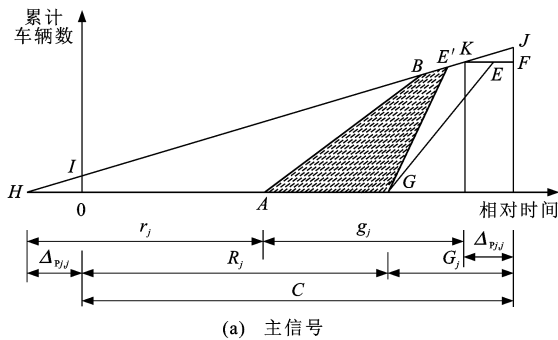


图2 主、预信号系统的车辆到达累计

Fig. 2 Cumulative arrival of vehicles in main and pre-signal systems

## 2 模型求解流程与算法

### 2.1 双层模型求解流程

采用迭代优化算法对双层模型进行求解, 步骤如下。

步骤1: 上层模型首先输入初始  $q_j$ , 通过遍历搜索算法求解满足要求的绿波带宽对应最大累计通过车辆数下的相位差等配时参数。

步骤2: 根据上层模型求解得到的配时参数求解下层模型, 得到  $q_j$ 。

步骤3: 将连续2次迭代所得路段流量的平均绝对百分误差  $\sigma_M$  作为临界值, 若  $\sigma_M \leq 5\%$ , 则结束迭代; 否则, 继续迭代。  $\sigma_M$  为

$$\sigma_M = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{q_j^n - q_j^{n-1}}{q_j^{n-1}} \right| \quad (21)$$

### 2.2 上层模型求解步骤

上层模型采用遍历搜索算法优化相位差, 步骤如下。

步骤1: 初始化交叉口  $i$  的相位差为  $\Delta_i = 0$ 。

步骤2: 调整相位差进行绿波协调, 则交叉口  $i$  的最优相位差  $\Delta'_i = \Delta_i$ , 当目标函数值  $F_i$  取得最大时, 即可得到该阶段最优相位差。

步骤3: 计算绿波带宽  $w$ , 将每次产生的新的绿波带宽加入带宽集合  $W$ 。

步骤4: 令  $\Delta_i = \Delta_i + 1$ 。

步骤5: 判断  $\Delta_i$  大小, 若  $\Delta_i$  小于周期时长, 则返回步骤2, 继续进行迭代; 否则, 表示遍历完成, 进入步骤6。

步骤6: 筛选相位差。输出绿波带宽集合  $W$  中优化后的相位差组合。

### 2.3 下层模型求解步骤

花朵授粉算法(Flower Pollination Algorithm, FPA)是一种新型启发式算法,结构简单,参数少,鲁棒性强,寻优能力强,包括全局授粉和局部授粉2种寻优模式。相比其他启发式算法,可以避免最优解是局部最优解的困境,且被成功应用于解决各种优化问题中,故本文构造多目标 FPA 求解下层模型,应用 FPA 需要满足下述条件。

(1)异花授粉过程中花粉的传播者采用 Lévy 飞行机制传播花粉进行全局授粉。

(2)自花授粉是在局部小范围内搜索。

(3)2 朵花的相似性和繁衍概率成比例。

(4)转换概率  $p \in [0, 1]$  是决定算法进行全局授粉还是局部授粉的关键因素,当  $p > U$  ( $U$  为  $[0, 1]$  的随机数)时,算法进行全局授粉搜索,此时全局授粉得到的解为

$$X_{e+1,m} = X_{e,m} + \mu L(X_{\max} - X_{e,m}) \quad (22)$$

$$L(\lambda) \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\lambda\pi/2)}{\pi s^{1+\lambda}} (s \gg s_0 > 0)$$

$$s = \frac{Q}{|W|/\lambda} \quad (23)$$

$$\sigma^2 = \left[ \frac{\Gamma(1+\lambda) \sin(\lambda\pi/2)}{2^{\frac{\lambda-1}{2}} \lambda \Gamma(1+\lambda)/2} \right]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (24)$$

式中: $X_{e,m}$  为第  $e$  代第  $m$  个花朵的花粉配子; $X_{\max}$  为算法进行全局授粉的最优解; $\mu$  为算法控制步长的比例因子,为简化计算, $\mu$  值取为 1; $L(\cdot)$  为控制授粉强度的参数,其本质为 Lévy 飞行机制的控制步长; $\lambda$  为 Lévy 分布的参数,取 1.5; $\Gamma(\lambda)$  为伽马函数; $s_0$  为最小步长,要求  $|s_0| \gg 0$  在实践中取值小到 0.1; $s$  为步长; $Q$  为服从数学期望为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布; $U$  为服从数学期望为 0、方差为 1 的高斯分布。

通过伪随机数算法,当步长为 50 时可以形成一个连续的 Lévy 飞行曲线,故本文步长取值为 50。

当  $p < U$  时,算法进行局部授粉搜索,此时局部授粉得到的解为

$$X_{e+1,a} = X_{e,a} + \rho(X_{e,b} - X_{e,k}) \quad (25)$$

式中: $\rho$  为区间  $[0, 1]$  上的随机数; $X_{e,a}$ 、 $X_{e,b}$ 、 $X_{e,k}$  分别为第  $e$  代第  $a$ 、 $b$ 、 $k$  个花朵的花粉配子,代表同种植物不同花朵的花粉。

FPA 算法求解步骤如下。

步骤 1:初始化参数,分别是种群数目、最大迭代数和转换概率等。

步骤 2:随机生成初始种群,计算每一初始解对应的适应度,本研究中适应度函数为多目标函数  $F$ ,

即  $F = f_1 + f_2$ ,从而确定初始最优解。

步骤 3:产生一个随机数,并判断其与转换概率  $p$  的大小关系,进而选择全局授粉或局部授粉,获得新的解及其适应度函数。

步骤 4:评价新解和当前候选解,选择适应度小的参与到下一次的迭代中。

步骤 5:评选出新的全局最优可行解。

步骤 6:检查精度是否已经达标或迭代次数是否已经达到。如果是,返回最优解并结束循环,否则转到步骤 3 继续迭代。

## 3 算例分析

### 3.1 试验设计

以 3 个干线相邻交叉口为例,验证本文方法对优化设置预信号的干线路网协调配时方案的有效性。交叉口的几何设计如图 3 所示。当交叉口 2 为预信号交叉口,其上、下游交叉口均为传统交叉口时,定义为预信号干线道路交叉口①;当 3 个交叉口均为预信号交叉口时,定义为预信号干线道路交叉口②。交叉口 1、2、3 的间距分别为 360 和 420 m。主路方向为双向八车道,次路方向为双向六车道,限速分别为 60 与 50  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,各车道的宽度均为 3.5 m。各个交叉口均采用 4 相位信号配时方案,右转车辆不受信号控制,仿真时各方案的交通需求方案可根据车道的饱和度确定,取饱和度大于 0.8 时为高交通需求方案,饱和度小于 0.4 时为低交通需求方案<sup>[30]</sup>,具体如表 1 所示。因预信号系统主要适用于高需求状况,所以在本文中低需求方案仅用于测试所提出方法的有效性。在实际应用中,如果交通需求为低需求状况,可采用预信号不控制,仅采用主信号控制的方法。

### 3.2 结果

预信号系统的布局可参照文献[11]中的方法设置,根据所设定交通需求,候驶区长度为 100 m。

#### 3.2.1 信号配时方案优化结果

交叉口处的参考周期时长可应用 Webster 法计算关键交叉口获得,在高需求状态时,3 个交叉口的最佳周期时长分别为 110、125、145 s,因此,选择 145 s 作为协调控制的公共周期。同理,确定低需求状态的公共周期时长为 90 s。根据本文提出模型计算得出主、预信号间最优信号配时方案及相位差优化结果,如图 4、5 所示,图中 L 和 T 分别指左转和直行的相位。

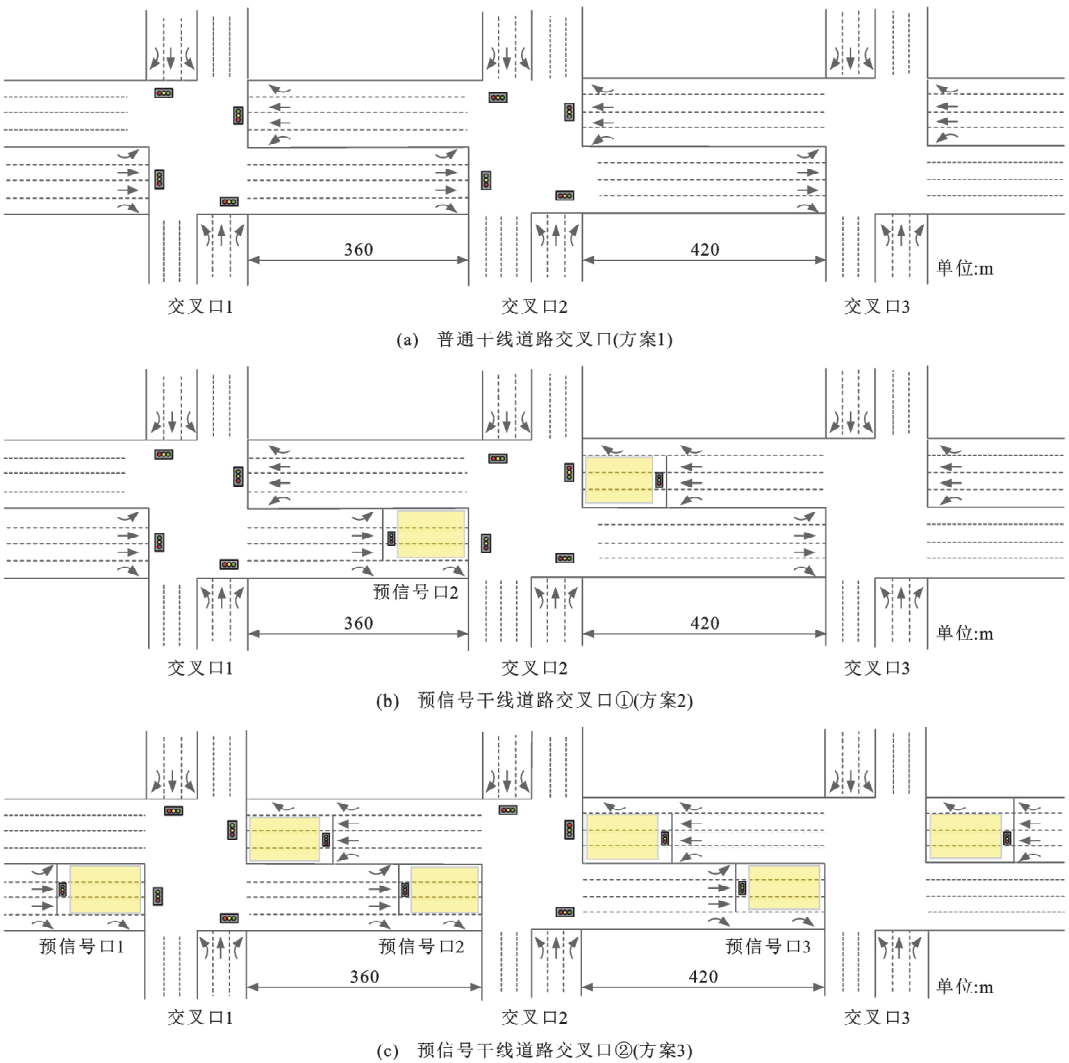


图 3 预信号干线道路系统的几何设计方案

Fig. 3 Geometric design scenarios for per-signal arterial road system

表 1 各进口道的交通流量

Table 1 Traffic flow at each entrance

进口道	流向	高(低)交通需求/(pcu·h <sup>-1</sup> )(按车道计)		
		交叉口 1	交叉口 2	交叉口 3
东	左转	504(252)	548(274)	494(247)
	直行	768(192)	742(371)	776(388)
	右转	562(281)	484(242)	482(241)
西	左转	512(256)	532(266)	502(251)
	直行	762(381)	826(413)	812(406)
	右转	558(279)	478(239)	498(249)
南	左转	542(271)	562(281)	480(240)
	直行	854(427)	842(421)	838(419)
	右转	520(260)	538(269)	546(273)
北	左转	542(271)	562(281)	480(240)
	直行	854(427)	842(421)	938(469)
	右转	522(261)	538(269)	546(273)

在 SUMO 软件中建立仿真模型,将预信号交叉口的几何设计及本文优化算法得到的最优配时方案等信息输入 SUMO,并对各配时方案的有效性进行评估。每种交通需求方案仿真 20 次,仿真时长为 3 600 s,取平均值作为评价结果。以通过车辆数、延误时间等交通参数作为预信号干线道路交叉口协调前后评价指标,并传统绿波带宽最大优化方法的仿真结果进行对比分析,结果如图 6 所示,图中东直、西直、东左、西左分别指对应编号交叉口的东进口直行、西进口直行、东进口左转、西进口左转流向。

本文在仿真方案中设置了高、低 2 种交通需求,其中低需求组作为验证和对比方案,实际中可采用无控方式,本文着重对比高需求下预信号协调控制方案与无协调控制方案、低需求下预信号协调控制方案与低需求下主信号协调控制方案 4 种方案在仿真试验中的结果。



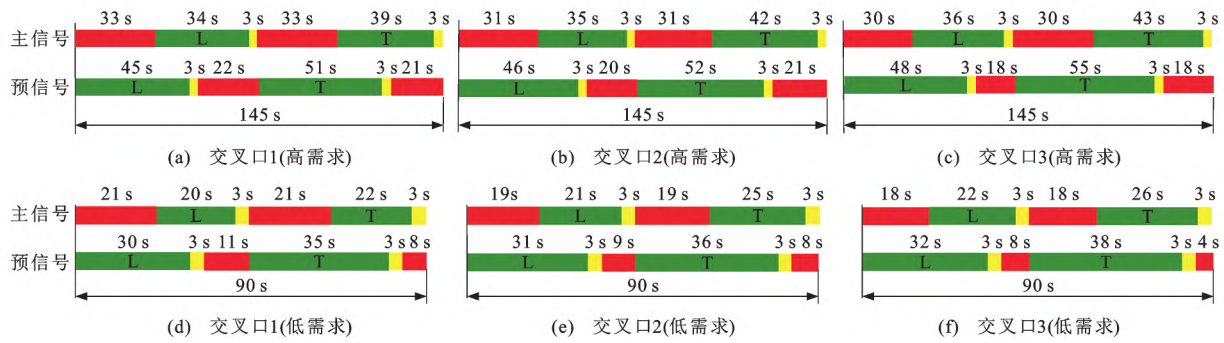


图 4 各交通需求下的主、预信号配时方案

Fig. 4 Timing plans at both main signal and pre-signal under various traffic demands

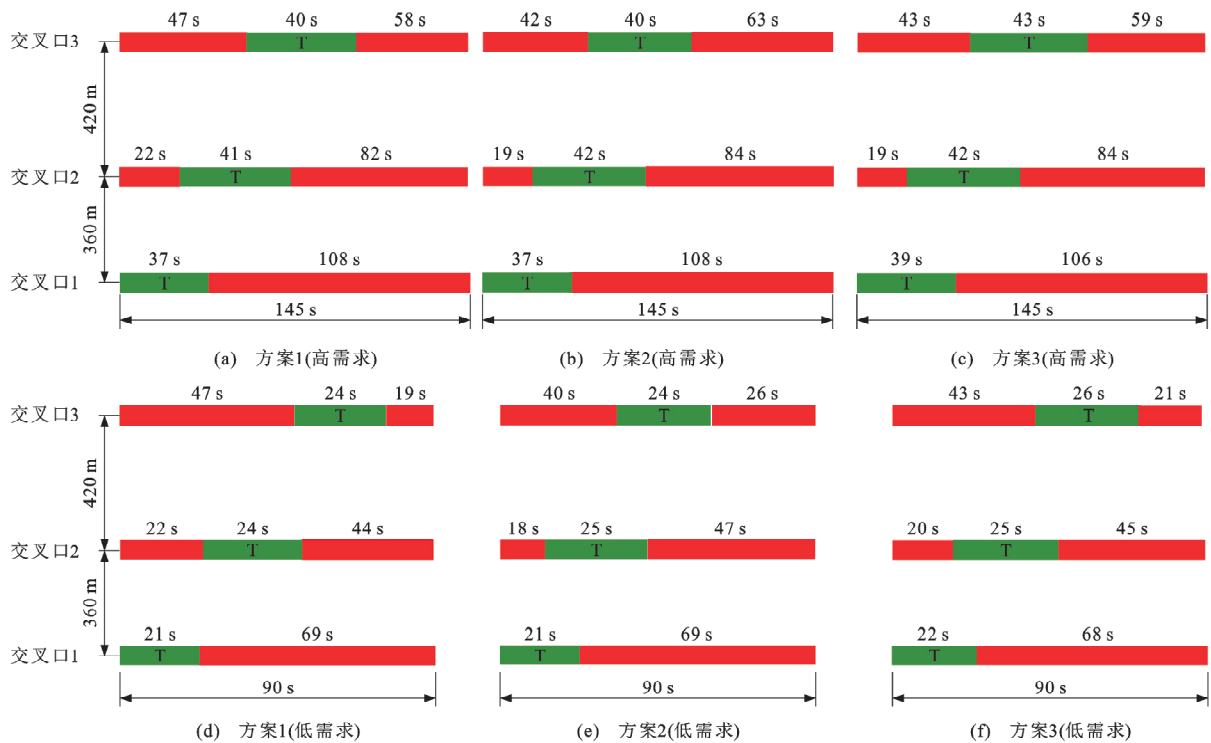


图 5 各交通需求下的相位差优化结果

Fig. 5 Optimization results of offsets under various traffic demands

(1)通过车辆数:在预信号干线协调控制方案 2 和 3 中高需求下,采用提出方法获取的干线协调控制方案比未采用干线协调控制方案的交叉口直行、左转车辆进口道的通过车辆数分别增加 21%~30%、18%~27%和 16%~30%、27%~35%。

(2)延误时间:在预信号干线协调控制方案 2 和 3 中高需求下,采用提出方法获取的干线协调控制方案比未采用干线协调控制方案的交叉口直行、左转车辆进口道的平均延误时间分别降低了 10%~14%、7%~10%和 8%~15%、10%~17%。

(3)在高需求下进行干线协调控制的预信号交叉口比未进行干线协调控制交叉口的通过车辆数可增加 8%~18%,延误时间可降低 10%~36%。

### 3.2.2 FPA 的有效性检验

本文通过 FPA 求解下层模型,为证明 FPA 的寻优效果,利用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法、二代非支配排序遗传算法 (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm- II, NSGA- II) 与 FPA 对本文模型进行计算寻优,各算法参数设置如表 2 所示。为确保准确性和客观性,3 种算法独立运算 50 次,算法种群为 20 次,最大迭代次数为 100 次。

根据迭代精度要求进行对比,即当  $\sigma_M \leq 5\%$  时迭代结束,对比结果如图 7 所示。PSO 算法、NSGA- II、FPA 分别在迭代次数为 77、66、53 时满足平均百分误差的要求,可见 FPA 的迭代速度和迭代精度最优。



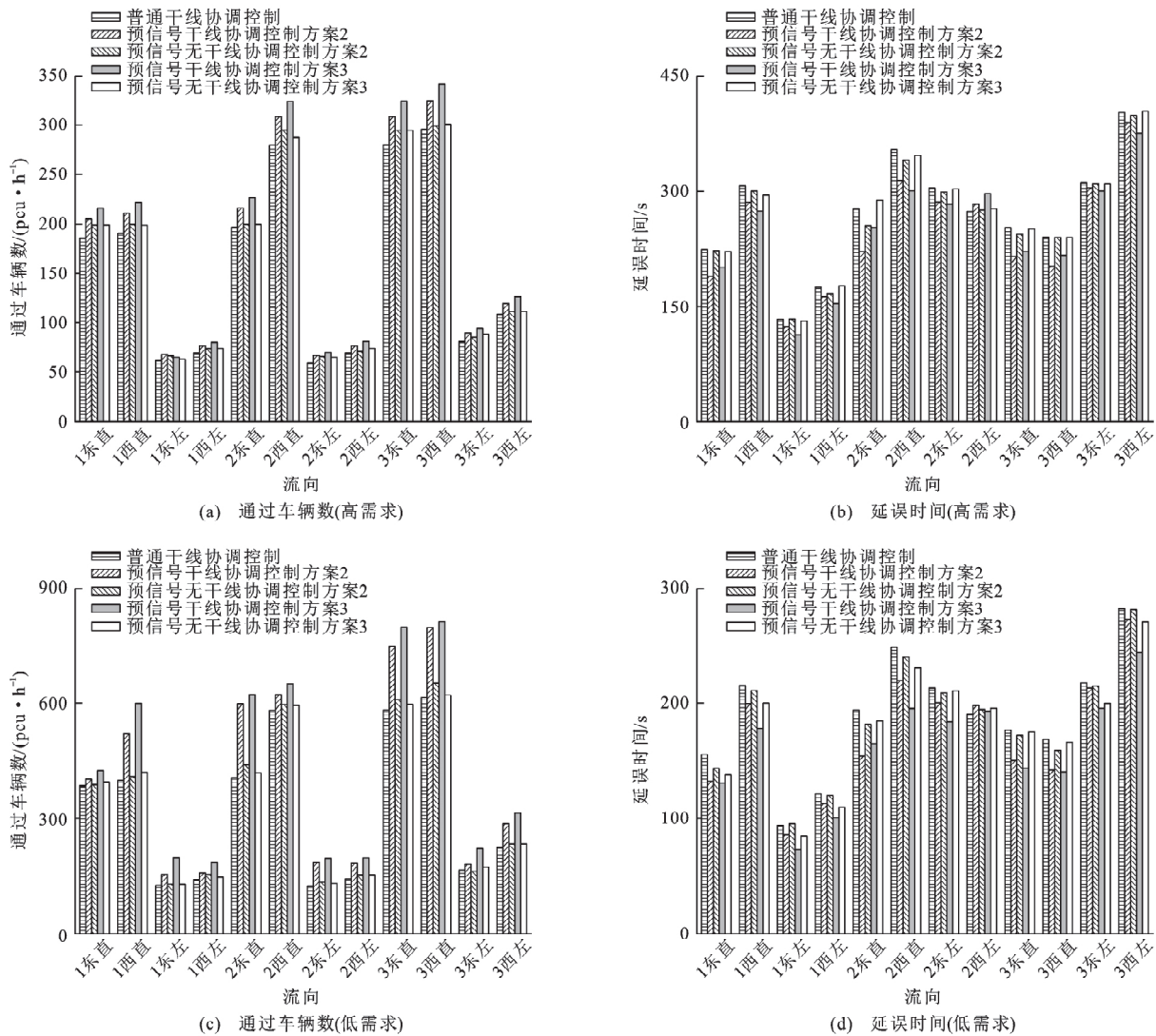


图 6 各交通需求下算法的运行效果

Fig. 6 Operational effectiveness of algorithm under various traffic demands

表 2 各算法参数取值

Table 2 Parameter values of each algorithm

算法	参数名称	参数取值
PSO 算法	惯性权重 $\gamma$ , 学习因子 $c_1, c_2$ , 粒子最大速度 $v_{\max}$	$\gamma=0.9, c_1=c_2=2, v_{\max}=0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	变异概率 $p_1$ , 交叉分布指数 $p_2$	$p_1=0.1, p_2=1$
FPA	转换概率 $p$ , 伽马函数 $\Gamma(\lambda)$ , 控制步长比例因子 $\mu$	$p=0.8, \lambda=1.5, \mu=1$

4 结 语

(1)综合考虑设置预信号后干线交通信号协调控制的特性,建立了预信号干线道路交叉口交通信号控制双层优化模型及对应的求解算法。仿真验证结果表明提出的模型能够有效提升增设预信号后干线路网的通过车辆数并有效降低延误。

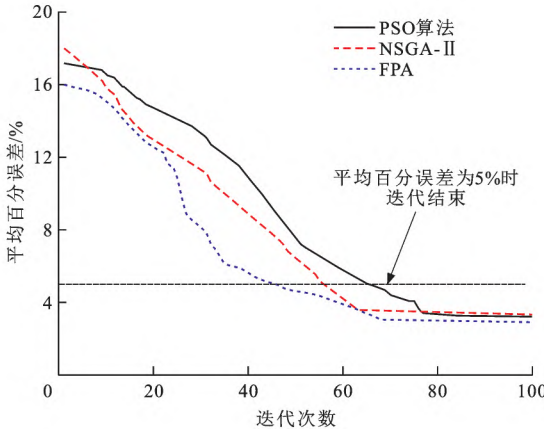


图 7 算法有效性检验

Fig. 7 Algorithms validity check

(2)SUMO 仿真结果表明,提出模型可使干线路网在各级交通需求下的通过车辆数均有所增加,延误时间均有所降低,其中高、低交通需求下通过车

辆数可分别增加 16%~35%与 8%~17%,延误时间可分别降低 7%~17%与 2%~16%,高需求下进行干线协调控制的预信号交叉口的参数有较为明显的改善。

(3)本文构建的双层模型中下层模型仅采用通行车辆数和延误等传统优化目标,后续研究中可增加考虑车辆的排放、油耗、能耗等因素。

(4)由于在干线道路系统中应用预信号的实践案例较少,故本文的数据是基于仿真获取的,后续研究中会进一步加强该方法在实践中的应用,并采集相关数据对方法进行改进。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] GULER S I, GAYAH V V, MENENDEZ M. Bus priority at signalized intersections with single-lane approaches: a novel pre-signal strategy[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 63: 51-70.
- [2] XUAN Yi-guang, GAYAH V V, CASSIDY M J, et al. Presignal used to increase bus-and car-carrying capacity at intersections[J]. *Transportation Research Record*, 2012, 2315(1): 191-196.
- [3] XUAN Yi-guang, DAGANZO C F, CASSIDY M J. Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(5): 769-781.
- [4] MA Wan-jing, XIE Han-zhou, LIU Yue, et al. Coordinated optimization of signal timings for intersection approach with presignals[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2355(1): 93-104.
- [5] LI Yan, LI Ke, TAO Si-ran, et al. Optimization of the design of pre-signal system using improved cellular automaton[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2014, 2014: 926371.
- [6] ZHOU Ya-ping, ZHUANG Hong-bin. The optimization of lane assignment and signal timing at the tandem intersection with pre-signal[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2014, 48(4): 362-376.
- [7] 李瑞敏,唐瑾.过饱和和交叉口交通信号控制动态规划优化模型[J].*交通运输工程学报*,2015,15(6):101-109.  
LI Rui-min, TANG Jin. Traffic signal control optimization model of over-saturated intersection based on dynamic programming[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(6): 101-109. (in Chinese)
- [8] 江欣国,任瀚堃,范英飞,等.信号协调控制干线交通安全仿真分析[J].*中国安全科学学报*,2020,30(3):143-149.  
JIANG Xin-guo, REN Han-kun, FAN Ying-fei, et al. Simulation analysis on traffic safety of signal-coordinated arteries[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(3): 143-149. (in Chinese)
- [9] 栗波,别一鸣,成卫.基于车均延误的预信号交叉口信号配时优化[J].*华南理工大学学报(自然科学版)*,2018,46(4): 35-43.  
LI Bo, BIE Yi-ming, CHENG Wei. Signal timing optimization for the intersection with pre-signals based on average vehicle delay[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 35-43. (in Chinese)
- [10] 安实,宋浪,王健,等.借用公交专用道左转的主预信号控制方案优化[J].*中国公路学报*,2020,33(4):115-125.  
AN Shi, SONG Lang, WANG Jian, et al. Main and pre-signal control scheme optimization of turning left by using bus lanes[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(4): 115-125. (in Chinese)
- [11] LI Yan, NAN Si-rui, GONG Xiao-lin, et al. A geometric design method for intersections with pre-signal systems using a phase swap sorting strategy[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0217741.
- [12] 曾佳棋,王殿海.双向干线协调控制的改进数解算法[J].*浙江大学学报(工学版)*,2020,54(12):2386-2394.  
ZENG Jia-qi, WANG Dian-hai. Improved numerical method for two-way arterial signal coordinate control[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(12): 2386-2394. (in Chinese)
- [13] 王昊,彭显玥.临界饱和状态交通干线协调控制模型[J].*中国公路学报*,2022,35(7):228-240.  
WANG Hao, PENG Xian-yue. Signal coordination control model for near saturated arterial intersections[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(7): 228-240. (in Chinese)
- [14] 王殿海,杨希锐,宋现敏.交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进[J].*吉林大学学报(工学版)*,2011,41(1):29-34.  
WANG Dian-hai, YANG Xi-rui, SONG Xian-min. Improvement of classical numerical method for arterial road signal coordinate control[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(1): 29-34. (in Chinese)
- [15] 蒋贤才,金宇,谢志云.车联网环境下干线交通信号协调控制方法[J].*哈尔滨工业大学学报*,2021,53(3):18-25.  
JIANG Xian-cai, JIN Yu, XIE Zhi-yun. Arterial coordinated signal control method under connected vehicle environment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(3): 18-25. (in Chinese)
- [16] 杨晓芳,李婷瑞.考虑左转汇入的干线协调控制与速度引导优化[J].*控制理论与应用*,2023,40(9):1595-1601.  
YANG Xiao-fang, LI Ting-rui. Optimization of arterials coordination control and speed guidance considering the convergence of left-turning vehicles[J]. *Control Theory and Applications*, 2023, 40(9): 1595-1601. (in Chinese)
- [17] 卢凯,张杰华,邓兴栋,等.基于车速与信号协同优化的区域绿波协调控制模型[J].*中国公路学报*,2021,34(7):31-41.  
LU Kai, ZHANG Jie-hua, DENG Xing-dong, et al. Regional

- green wave coordinated control model based on cooperative optimization of vehicle speed and traffic signal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 31-41. (in Chinese)
- [18] 马莹莹,杨晓光,曾滢. 信号控制交叉口周期时长多目标优化模型及求解[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 761-765.  
MA Ying-ying, YANG Xiao-guang, ZENG Ying. Multi-objective cycle length optimization model and solution[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(6): 761-765. (in Chinese)
- [19] 杨东霞,巨永锋. 基于CTM的交通信号多目标优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 105-111.  
YANG Dong-xia, JU Yong-feng. Multi-objective optimization method of traffic signal based on CTM[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 105-111. (in Chinese)
- [20] 刘智敏,叶宝林,朱耀东,等. 基于深度强化学习的交通信号控制方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6): 1249-1256.  
LIU Zhi-min, YE Bao-lin, ZHU Yao-dong, et al. Traffic signal control method based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(6): 1249-1256. (in Chinese)
- [21] 尚春琳,刘小明,田玉林,等. 基于深度强化学习的综合干线协调控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(3): 64-70.  
SHANG Chun-lin, LIU Xiao-ming, TIAN Yu-lin, et al. Priority of dedicated bus arterial control based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(3): 64-70. (in Chinese)
- [22] YU Chao-dong, CHEN Jian, XIA Ge-ming. Coordinated control of intelligent fuzzy traffic signal based on edge computing distribution[J]. Sensors, 2022, 22(16): 5953.
- [23] ZHANG Zheng-hua, QIAN Jin, FANG Chong-xin, et al. Coordinated control of distributed traffic signal based on multiagent cooperative game[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, 2021: 6693636.
- [24] 马东方,陈曦,吴晓东,等. 基于强化学习的干线信号混合协同优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 145-153.  
MA Dong-fang, CHEN Xi, WU Xiao-dong, et al. Mixed-coordinated decision-making method for arterial signals based on reinforcement learning[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 145-153. (in Chinese)
- [25] 赵靖,徐竞琪,严佳超,等. 考虑行程时间波动的干线信号协调控制鲁棒优化模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1261-1269.  
ZHAO Jing, XU Jing-qi, YAN Jia-chao, et al. Robust optimization model for arterial signal coordination control considering travel time fluctuation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1261-1269. (in Chinese)
- [26] LEE J, KIM J, PARK B. A genetic algorithm-based procedure for determining optimal time-of-day break points for coordinated actuated traffic signal systems[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(1): 197-203.
- [27] CHAVIS C, CHRISTOFA E. A real-time signal control strategy for mitigating the impact of bus stops at urban signalized intersections[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(5): 349-363.
- [28] QADRI S S S M, ALI GÖKÇE M, ÖNER E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities[J]. European Transport Research Review, 2020, 12(1): 1-23.
- [29] WANG Pang-wei, JIANG Yi-lun, XIAO Lin, et al. A joint control model for connected vehicle platoon and arterial signal coordination[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24(1): 81-92.
- [30] LEITNER, D, MELEBY P, MIAO Lei. Recent advances in traffic signal performance evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9(4): 507-531.