

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711033

借对向出口车道左转交叉口交通控制方案优化

陈松, 李显生, 王运豪, 任园园

(吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要: 为提高借对向出口车道左转交叉口信号配时的科学性以及交通流运行效率, 提出借对向车道左转的适用条件, 将左转机动车的到达-驶离图式分为8种情况, 分别建立每种情况下左转机动车的延误计算方法. 以交叉口车均延误最小为目标, 以周期时长、主信号与预信号各相位绿灯时间、借对向车道左转车道的长度为优化变量, 建立了交叉口信号控制方案优化模型, 并采用遗传算法进行求解. 以算例的形式对所建立的优化方法进行验证, 并与传统控制方法进行对比. 结果表明: 优化方法可以提高左转机动车通行能力, 减少其所需绿灯时间, 进而缩短交叉口周期时长; 左转相位绿灯时间的缩短减小了直行相位的红灯时间, 进而缩短了交叉口的车均延误, 在高峰期交叉口车均延误下降比例达到23.8%.

关键词: 交通工程; 信号控制; 配时方案; 左转交叉口; 出口车道; 车均延误

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)03-0074-09

Traffic control plan optimization for the intersection with contraflow left-turn lane

CHEN Song, LI Xiansheng, WANG Yunhao, REN Yuanyuan

(School of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve signal timing and traffic flow operation at the intersection with contraflow left-turn lane, the application condition for the contraflow left-turn lane was developed. The arrival and discharge pattern of left-turn vehicles were divided into 8 groups and the calculation method for left-turn vehicle delay under each group was carried out. The average intersection vehicle delay minimum was taken as the objective, cycle length, green times of main and pre-signal phases, and the lengths of contraflow left-turn lanes were taken as optimization variables, and then the signal control plan optimization model was developed. The genetic algorithm was used to solve this model. A case study was conducted to validate the optimization method, which was also compared with the traditional control method. Results show that the optimization method can increase the capacity of left-turn vehicles, decrease the required green time and then reduce the intersection cycle length. The decrease in the green time of left-turn phases would result in the decrease in the red time of through phases and then the decrease in intersection average delay. In peak hour, average vehicle delay can be decreased by 23.8%.

Keywords: traffic engineering; signal control; timing plan; left-turn lane; exit lane; average vehicle delay

信号交叉口发生交通拥堵的根本原因是到达的交通流量大于交叉口通行能力. 而交叉口通行能力除了与信号配时方案有关外, 还与各股流向的机动车可以利用的车道数密切相关. 以一个进口方向为例, 在过饱情况下如果给直行车分配较多的车道, 那么左转车将严重拥堵; 如果给左转车分配较多车道, 那么直行车将严重拥堵. 为了缓解过饱和交叉口的拥堵, 交通工程领域的学者提出了多种管理方法, 比如禁止左转^[1-3]、综合待行区^[4-5]、钩形转弯^[6-10]等, 并在不同的交通场景下进行应用. 2012年以来济南市、邯郸市在市区多个交叉口实施了一种借对向车道左转的特殊设计方法, 不仅可以增大交叉口左转

车通行能力, 还可以避免左转车绕行或者停车次数的增加.

近年来, 一些学者对借对向车道左转(以下简称“借道左转”)这种交叉口设计方法进行了理论分析. 比如文献[11]以在邯郸市采集的实际数据为基础, 建立了左转机动车通行能力校正方法以及估计模型, 并将该方法与综合待行区方法进行对比. 文献[12]在驾驶模拟器中分析对比了64名驾驶员对借道左转的适应能力, 并分析了交通标志、交通标线以及交通状态的影响. 文献[13]选择闯红灯、交通事故数、车道选择正确率等作为评价指标, 从交通安全的角度对这种类型交叉口的左转交通流进行分析.

综合来看, 目前在“借道左转”方面的理论研究还比较少, 对于信号控制影响下的车辆排队、消散情况考虑不够全面; 而在工程方面各地交通管理部门依靠经验设计信号配时方案, 缺乏理论依据, 限制了

收稿日期: 2017-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578262)

作者简介: 陈松(1983—), 男, 博士研究生;

李显生(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李显生, lixs@jlu.edu.cn

交叉口控制效益的提升. 因此,本文以“借道左转”交叉口为研究对象,以车均延误最小为目标建立交叉口信号配时方案的优化方法,这对于提高交叉口交通流运行效率、缓解交通拥堵具有重要意义.

1 交通流运行特征分析

图1给出了一个十字路口机动车借道左转情况下的渠化方案. N_0 、 N_1 等代表车道编号. 以南进口为例,渠化区内有2条左转车道、1条直行车道、1条直右共用车道. 与传统交叉口相比,图1所示交叉口在每个进口方向通过占用对向的出口车道增设了1条左转进口车道. 其中车道 N_0 、 N_4 、 N_8 、 N_{12} 均为借用对向出口车道而增设.

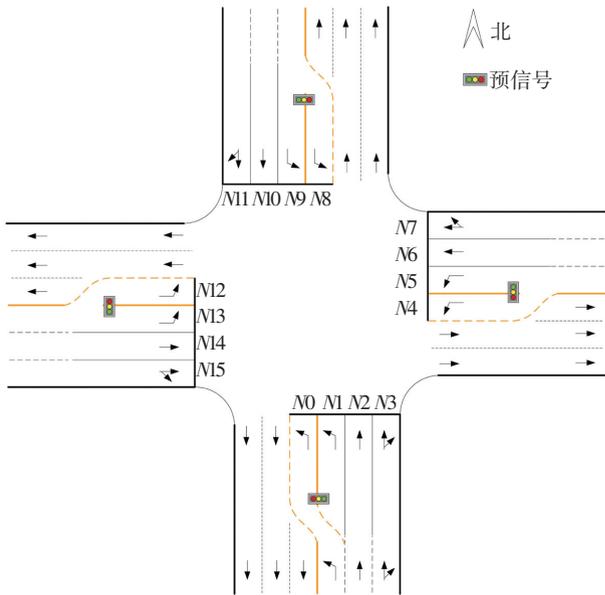


图1 借对向车道左转交叉口车道设计方案

Fig.1 Design scheme of approaching lanes at the intersection with contraflow left-turn lane

图1所示交叉口的相位相序如图2所示. 该交叉口一共包括6个信号相位,其中4个主信号相位(M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4)、2个预信号相位(P_1 、 P_2). 其中 M 代表主信号(Main signal), P 代表预信号(pre-signal), M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 分别控制主信号的南北左转、南北直行、东西左转、东西直行交通流; P_1 、 P_2 分别控制预信号的南北左转、东西左转交通流. 为了避免南进口车道 N_0 内的左转车与对向的直行车或者东进口的左转车发生冲突,在南进口黄实线开口位置处设置一组预信号. 当允许左转车驶入车道 N_0 时,预信号显示绿灯;否则显示红灯,此时左转车只能使用车道 N_1 .

当南北直行相位 M_2 或者东西左转相位 M_3 显示绿灯期间,南北进口的预信号相位 P_1 需要显示红灯;不过此时东西进口的预信号相位 P_2 可以显示绿

灯,即东西方向的左转车驶入车道 N_4 、 N_{12} . 当东西直行相位 M_4 或者南北左转相位 M_1 显示绿灯期间,南北方向的预信号 P_1 可以显示绿灯,即南北方向的左转车驶入车道 N_0 、 N_8 ;此时东西方向的预信号 P_2 需要显示红灯.

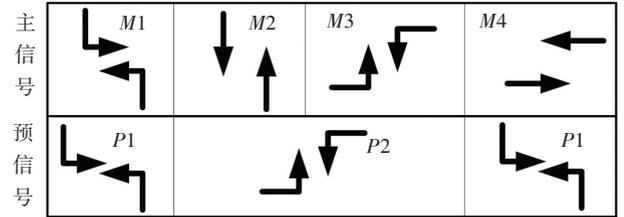


图2 借道左转交叉口信号相位相序

Fig.2 Phasing scheme of the intersection with contraflow left-turn lane

关于主、预信号之间的绿灯启亮/结束时刻之差,有两点需要说明: 1) 为了避免主信号相位 M_1 、 M_3 绿灯结束后有左转车滞留在车道 N_0 、 N_4 、 N_8 、 N_{12} 内,预信号相位 P_1 、 P_2 的绿灯需要较相位 M_1 、 M_3 提前 η_1 秒结束; η_1 与左转车道停车线至预信号的距离、车辆平均运行速度有关. 2) 相位 M_4 的绿灯启亮 η_2 秒后,相位 P_1 的绿灯才能启亮;同理,相位 M_2 的绿灯启亮 η_2 后,相位 P_2 的绿灯才能启亮. 以相位 M_4 和 P_1 为例,在 M_4 绿灯启亮时刻,东西左转机动车刚驶离交叉口、尚未到达南北进口黄实线开口处;如果此时 P_1 也启亮绿灯,南北进口的左转车驶入车道 N_0 、 N_8 ,将与东西左转驶来的机动车发生冲突;因此,相位 P_1 的绿灯需要延迟 η_2 秒启亮, η_2 与左转车从车道 N_4 、 N_{12} 的停车线至南北进口黄实线开口处的行驶距离、车辆平均运行速度有关.

通过上面的分析可以看出,通过相位相序设计可以避免借道左转车与其他交通流的冲突. 当左转车流量较大时,可以借用对向出口更多的车道供左转车使用. 在本文中仅研究借用对向出口1条车道的情况.

2 信号控制方案优化方法

以图1所示的“借道左转”交叉口为例,给出其信号控制方案以及车道 N_0 、 N_4 、 N_8 、 N_{12} 长度的优化方法.

2.1 交叉口参数描述

实施“借道左转”交叉口的主信号周期时长为 C ,车道 N_0 的长度(从黄实线开口处至停车线)为 L_{N_0} ,能够容纳 $Q_{N_0}^{max}$ 辆机动车排队;主信号相位 M_i 的绿灯时间用 g^{mi} 表示,绿灯间隔时间用 I^{mi} 表示,红灯时间用 R^{mi} 表示,其中 $i = 1, 2, 3, 4$; 预信号相位 P_i 的绿灯时间用 g^{pi} 表示,绿灯间隔时间用 I^{pi} 表示,红

灯时间用 R^{pi} 表示,其中 $i = 1, 2$. 则

$$C = \sum_{i=1}^4 (g^{mi} + I^{mi}),$$

$$g^{p1} = g^{m4} + I^{m4} - \eta_2 + g^{m1} - \eta_1,$$

$$g^{p2} = g^{m2} + I^{m2} - \eta_2 + g^{m3} - \eta_1.$$

式中: η_1 为预信号相位 $P1、P2$ 的绿灯较相位 $M1、M3$ 的绿灯提前结束时间; η_2 为预信号相位 $P1、P2$ 的绿灯较相位 $M4、M2$ 的绿灯延迟启亮时间.

相位 Mi 的最大、最小绿灯时间分别用 $g_{max}^{mi}、g_{min}^{mi}$ 表示; 相位 Pi 的最大、最小绿灯时间分别用 $g_{max}^{pi}、g_{min}^{pi}$ 表示. 设一个周期内主信号相位 Mi 的绿灯启亮时刻为 t_g^{mi} , 绿灯结束时刻为 \vec{t}_g^{mi} ; 预信号相位 Pi 的绿灯启亮时刻为 t_g^{pi} , 绿灯结束时刻为 \vec{t}_g^{pi} . 则

$$g^{mi} = \vec{t}_g^{mi} - t_g^{mi},$$

$$g^{pi} = \vec{t}_g^{pi} - t_g^{pi}.$$

图 1 中直行与直右车道的流量用 q 表示, 如 $q_{N2}、q_{N3}$ 分别代表车道 $N2、N3$ 的到达流量. 东、西、南、北 4 个进口的左转到达流量用 $q_l^e、q_l^w、q_l^s、q_l^n$ 表示. 以南进口为例, 左转车将驶入车道 $N0、N1$, 所以 q_l^s 代表车道 $N0、N1$ 的到达左转车流量之和.

2.2 交叉口各相位车均延误计算

本文选择以车均延误最小为目标优化主信号相位周期时长 C 、各个相位的绿灯时间 $g^{mi}、g^{pi}$ 以及借对向车道的左转车道长度 $L_{N0}、L_{N4}、L_{N8}、L_{N12}$. 主信号直行相位 $Mi(i = 2, 4)$ 的机动车运行与传统交叉口中的公式计算车均延误, 即

$$\varphi_{mi} = \frac{0.5C(1 - \lambda_{mi})^2}{1 - [\min(1, x_{mi})\lambda_{mi}]} + 900T[(x_{mi} - 1) + \sqrt{(x_{mi} - 1)^2 + \frac{8 \times 0.5 \times x_{mi}}{Cap_{mi}T}}], \quad i = 2, 4.$$

式中: φ_{mi} 为主信号直行相位 Mi 关键车道的车均延误; λ_{mi} 为相位 Mi 绿信比; x_{mi} 为相位 Mi 关键车道的饱和度; Cap_{mi} 为相位 Mi 关键车道的通行能力, 等于车道饱和流率乘以绿信比; T 为分析时段长度, 默认值 0.25 h.

主信号直行相位 Mi 关键车道的车总延误 Φ_{mi} 为

$$\Phi_{mi} = \varphi_{mi} \times C \times q_{mi}, \quad i = 2, 4.$$

式中 q_{mi} 为主信号直行相位 Mi 关键车道的到达流量, pcu/s. 以相位 $M2$ 为例, q_{m2} 等于车道 $N2、N3、N10、N11$ 到达流量中的最大值.

而对于主信号左转相位 $M1、M3$ 以及预信号相位 $P1、P2$, 它们的交通流运行受预信号以及左转车

道 $N0、N4、N8、N12$ 的影响, 与传统交叉口存在明显差异, 无法采用式(1) 计算, 所以需要单独分析.

仍以图 1 所示交叉口南进口为例分析左转车的运动过程. 车道 $N0$ 的长度为 L_{N0} , 能够容纳 Q_{N0}^{max} 辆机动车排队. 在预信号 $P1$ 显示红灯期间, 到达南进口的左转车首先在车道 $N1$ 排队. 在预信号 $P1$ 的绿灯启亮时刻(即时刻 t_g^{p1}), 如果车道 $N1$ 的累积排队左转车辆数 $Q_{N1}(t_g^{p1}) \leq Q_{N0}^{max}$, 则这 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 辆左转车将继续在车道 $N1$ 排队, 无法换道至 $N0$; 后续到达的左转车将驶入车道 $N0$ 排队, 直至车道 $N0$ 的排队车辆数也达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$; 之后到达的左转车将分别选择驶入车道 $N0、N1$, 使得车道 $N0、N1$ 的排队长度维持相等. 当满足下列两个条件之一时左转车将不再驶入车道 $N0$: 1) 车道 $N0$ 的排队车辆数已经达到 Q_{N0}^{max} . 此时车道 $N0$ 已经排满, 后续车辆无法驶入. 2) 主信号 $M1$ 绿灯启亮后车道 $N1$ 的排队已经消散. 后续到达的左转车如果选择车道 $N0$, 将进行一次变道; 所以可以直接选择车道 $N1$ 驶离交叉口, 无需变道或者减速停车.

在时刻 t_g^{p1} , 如果车道 $N1$ 的累积排队左转车辆数 $Q_{N1}(t_g^{p1}) > Q_{N0}^{max}$, 则从 $Q_{N0}^{max} + 1$ 至第 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 辆机动车将换道至车道 $N0$, 所以车道 $N1$ 的排队车辆数将暂时减少, 后续到达的左转车也驶入车道 $N0$, 使得车道 $N0、N1$ 的排队长度维持相等. 当满足条件 1 或者 2 时, 左转车将不再驶入车道 $N0$, 而是选择车道 $N1$. 所以通过对比 t_g^{p1} 时刻 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 与 Q_{N0}^{max} 的关系, 可以将南进口左转机动车的运行分为两种情况分析, 进而分别计算左转车的延误.

2.2.1 $Q_{N1}(t_g^{p1}) \leq Q_{N0}^{max}$ 时的运行情况

在交通流均匀到达的情况下, 如果满足 $Q_{N1}(t_g^{p1}) \leq Q_{N0}^{max}$, 则

$$(g^{m2} + I^{m2} + g^{m3} + I^{m3} + \eta_2) \times q_l^s \leq Q_{N0}^{max}.$$

式中: $g^{m2} + I^{m2} + g^{m3} + I^{m3} + \eta_2$ 为本周期相位 $M1$ 红灯开始时刻至 t_g^{p1} 时刻的已显示红灯时间.

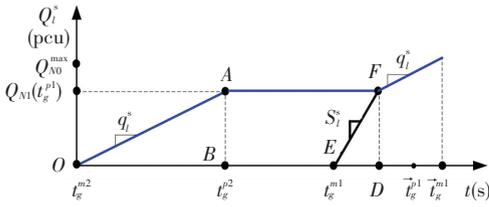
根据上式可以得到

$$q_l^s \leq Q_{N0}^{max} / (g^{m2} + I^{m2} + g^{m3} + I^{m3} + \eta_2).$$

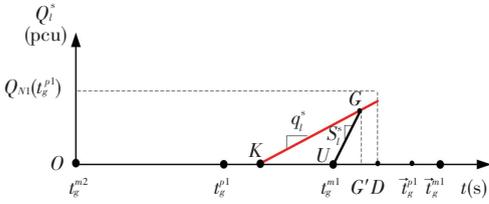
车道 $N0$ 的排队车辆数是否达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 以及车道 $N1$ 的排队完全消散时刻, 对两条车道的机动车延误具有重要影响. 下面分 4 种情况进行分析, 其中从情况 1 至情况 4 左转流量逐渐增大.

情况 1 预信号相位 $P1$ 绿灯结束前车道 $N1$ 的排队已完全消散, 且车道 $N0$ 的排队车辆数未达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$. 此时两条左转车道的车辆到达与驶离图式如图 3 所示. 在图 3 中横坐标代表时刻, 纵坐标代表累积到达车辆数. 图 3(a) 中蓝线代表车道 $N1$ 的累

积排队长度变化, S_l^s 为南进口左转车道的饱和流率; 图 3(b) 中红线代表车道 N_0 的累积排队长度变化。



(a) 南进口车道 N_1 累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道 N_0 累积排队长度变化图式

图 3 情况 1 中车道 N_0 与 N_1 累积排队变化图式

Fig.3 Cumulative queue change patterns of lane N_0 and N_1 (Case 1)

以主信号 M_1 的红灯启亮时刻(即主信号 M_2 的绿灯启亮时刻 t_g^{m2}) 作为 0 时刻点, 此时预信号 P_1 也在显示红灯, 左转车无法驶入车道 N_0 , 所以均匀到达的左转车在车道 N_1 排队。在 t_g^{p1} 时刻车道 N_1 的累积到达车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 。在 P_1 相位绿灯启亮后, 后续到达的左转车将驶入车道 N_0 , 并在图 3(b) 中的 K 点时刻开始在车道 N_0 排队。其中 K 点与 t_g^{p1} 的时刻之差为左转车从黄线开口处行驶至车道 N_0 停车线所需的行程时间。所以从 t_g^{p1} 时刻开始车道 N_1 的排队长度将不再增加。主信号 M_1 的绿灯在 t_g^{m1} 时刻启亮后, 车道 N_0, N_1 的开始消散。由于车道 N_0 的排队长度小于等于车道 N_1 的排队长度, 所以车道 N_0 的排队完全消散时刻将早于车道 N_1 的排队完全消散时刻。在图 3 中, 车道 N_1 的排队在 F 点完全消散, 车道 N_0 的排队在 G 点完全消散。之后到达的左转车将驶入车道 N_1 , 不再驶入车道 N_0 ; 在相位 M_1 绿灯结束之前, 这些左转车可以直接通过交叉口。

经过上述分析可知, 车道 N_1 的左转车辆累积延误为图 3(a) 中多边形 $OAFE$ 的面积, 其中 O 为坐标原点; 车道 N_0 的左转车辆累积延误为图 3(b) 中多边形 KGU 的面积。

多边形 $OAFE$ 的面积 θ_{OAFE} 为

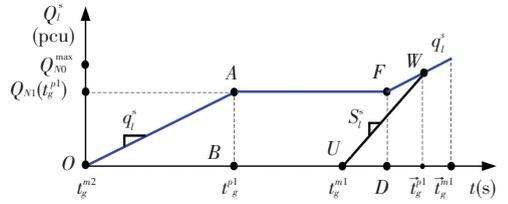
$$\theta_{OAFE} = \frac{1}{2}(OE + AF) \times FD = \frac{1}{2} [t_g^{m1} - t_g^{m2} + t_g^{m1} - t_g^{p1} + Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s] \times Q_{N1}(t_g^{p1}) = \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{2} [2t_g^{m1} - t_g^{m2} - t_g^{p1} + Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s].$$

多边形 KGU 的面积 θ_{KGU} 为

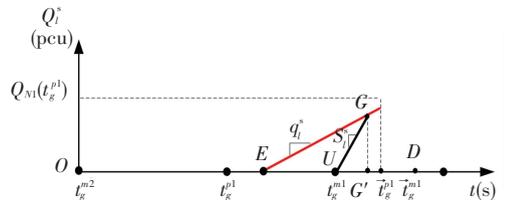
$$\theta_{KGU} = \frac{KU \times GG'}{2} = \frac{1}{2} (t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) \times (t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) + q_l^s \times (t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) / (S_l^s - q_l^s) \times \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{S_l^s} \times \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{2(S_l^s - q_l^s)}.$$

式中: V_{N0} 为车辆在车道 N_0 上的行驶速度, m/s ; Φ_{m1}^{sl} 为交叉口南进口左转相位每周期的车总延误, $\Phi_{m1}^{sl} = \theta_{OAFE} + \theta_{KGU}$ 。

情况 2 预信号相位 P_1 绿灯结束前车道 N_1 的排队未完全消散, 且车道 N_0 的排队车辆数未达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 。此时两条左转车道的车辆到达与驶离图式如图 4 所示。车道 N_1 的排队消散时间大于 \vec{t}_g^{p1} , 而车道 N_0 的排队消散时刻小于 \vec{t}_g^{p1} 。在图 4(b) 中, 当车道 N_0 的排队完全消散后, 左转车辆继续以流率 q_l^s 到达, 待预信号相位 P_1 绿灯结束后左转车将选择车道 N_1 。



(a) 南进口车道 N_1 累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道 N_0 累积排队长度变化图式

图 4 情况 2 中车道 N_0 与 N_1 累积排队变化图式

Fig.4 Cumulative queue change patterns of lane N_0 and N_1 (Case 2)

在情况 2, 车道 N_1 的左转车辆累积延误为图 4(a) 中多边形 $OAFWUB$ 的面积, 车道 N_0 的左转车辆累积延误为图 4(b) 中多边形 EGU 的面积。

多边形 $OAFWUB$ 的面积 θ_{OAFWUB} 为

$$\theta_{OAFWUB} = \frac{1}{2} Q_{N1}(t_g^{p1}) (2t_g^{m1} - t_g^{m2} - t_g^{p1}) + \frac{(t_g^{p1} - t_g^{m1})}{2} [2Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1})] + \frac{[Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1})]^2}{2(S_l^s - q_l^s)}.$$

多边形 EGU 的面积 θ_{EGU} 为

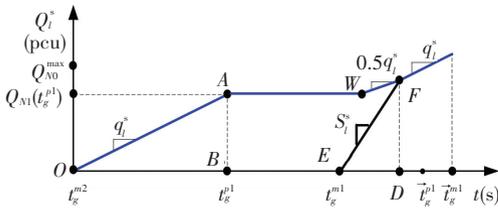
$$\theta_{EGU} = \frac{1}{2}EU \times GG' = \frac{q_l^s (t_g^{m1} - t_g^{p1} - L_{N0}/V_{N0})^2}{2(S_l^s - q_l^s)}$$

交叉口南进口左转相位每周期的车总延误

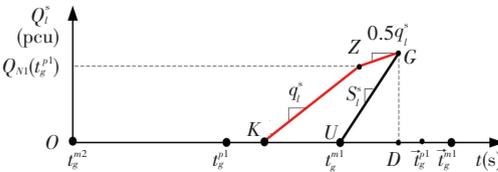
$$\Phi_{m1}^{s1} = \theta_{OAFWUB} + \theta_{EGU}$$

情况 3 预信号相位 $P1$ 绿灯结束前车道 $N1$ 的

排队已完全消散,且车道 $N0$ 的排队车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$.当车道 $N0$ 的排队车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 后,再驶来的左转车将分别选择车道 $N0$ 和 $N1$,在一定时间段内这两条车道的车辆到达率均维持在 $0.5q_l^s$.这是与情况 1、2 的主要区别.从图 5 可以看出在 Z 点车道 $N0$ 的排队车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$,而在 F 点车道 $N1$ 排队才完全消散.所以从 Z 点所对应时刻至 F 点所对应时刻,车道 $N0$ 和 $N1$ 的车辆到达率均为 $0.5q_l^s$.在车道 $N1$ 的排队完全消散后,左转车辆将只选择车道 $N1$,所以该车道的车辆到达率升为 q_l^s .



(a) 南进口车道 $N1$ 累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道 $N0$ 累积排队长度变化图式

图 5 情况 3 中车道 $N0$ 与 $N1$ 累积排队变化图式

Fig.5 Cumulative queue change patterns of lane $N0$ and $N1$

(Case 3)

在情况 3, 车道 $N1$ 的左转车辆累积延误为图 5(a) 中多边形 $OAWFE$ 的面积,车道 $N0$ 的左转车辆累积延误为图 5(b) 中多边形 $KZGU$ 的面积.

多边形 $OAWFE$ 的面积 θ_{OAWFE} 为

$$\theta_{OAWFE} = \frac{1}{2}Q_{N1}(t_g^{p1})(2t_g^{m1} - t_g^{m2} - t_g^{p1}) + \frac{1}{2} \left[\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right] [2Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right) + Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right)] \times$$

$$\frac{[Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right)]}{S_l^s - 0.5q_l^s}$$

多边形 $KZGU$ 的面积 θ_{KZGU} 为

$$\theta_{KZGU} = \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{2} (3t_g^{m1} - 2t_g^{p1} + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{S_l^s} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s}) + (2t_g^{m1} + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{S_l^s} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) \times \frac{[Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right)]}{2(S_l^s - 0.5q_l^s)}$$

交叉口南进口左转相位每周期的车总延误

$$\Phi_{m1}^{s1} = \theta_{OAWFE} + \theta_{KZGU}$$

情况 4 预信号相位 $P1$ 绿灯结束前车道 $N1$ 的

排队未完全消散,且车道 $N0$ 的排队车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$.从图 6 可以看出,从 A 点至 W 点车道 $N1$ 的排队长度不再增加,在 F 点排队完全消散.在 Z 点车道 $N0$ 的排队车辆数达到 $Q_{N1}(t_g^{p1})$,在 G 点排队完全消散.在情况 4,车道 $N1$ 的左转车辆累积延误为图 6(a) 中多边形 $OAWFE$ 的面积,车道 $N0$ 的左转车辆累积延误为图 6(b) 中多边形 $KZGU$ 的面积.需要注意的是:图 6(a) 中从 W 点至 H 点,车辆平均到达率为 $0.5q_l^s$;从 H 点至 F 点,车辆平均到达率为 q_l^s .这是情况 4 与情况 3 的主要区别.

多边形 $OAWFE$ 的面积 θ_{OAWFE} 为

$$\theta_{OAWFE} = \frac{1}{2}Q_{N1}(t_g^{p1})(2t_g^{m1} - t_g^{m2} - t_g^{p1}) + \frac{1}{2} \left[\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right] [2Q_{N1}(t_g^{p1}) - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{m1} + t_g^{p1} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right) + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}] + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \times [2Q_{N1}(t_g^{p1}) + \alpha_1 - S_l^s \left(\frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} + \frac{L_{N0}}{V_{N0}} + 2t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}} \right) + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) + \alpha_1}{2} \times \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) + \alpha_1 - S_l^s (t_g^{p1} - t_g^{m1})}{S_l^s - q_l^s}$$

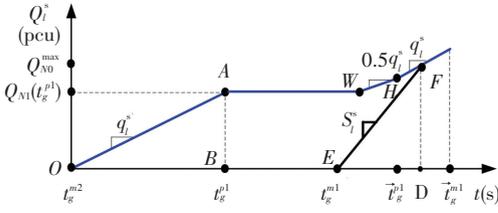
式中

$$\alpha_1 = 0.5q_l^s \left(t_g^{p1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}} - t_g^{p1} + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} + t_g^{p1} \right)$$

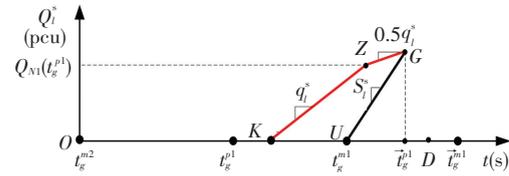
多边形 $KZGU$ 的面积 θ_{KZGU} 为

$$\theta_{KZGU} = \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{2} (2t_g^{m1} - 2t_g^{p1} + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{S_l^s} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s})$$

$$\frac{L_{N0}}{V_{N0}} + \frac{1}{2}(t_g^{m1} - t_g^{p1} + \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{S_l^s} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) \times [S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}) - Q_{N1}(t_g^{p1})].$$



(a) 南进口车道 N1 累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道 N0 累积排队长度变化图式

图 6 情况 4 中车道 N0 与 N1 累积排队变化图式

Fig.6 Cumulative queue change patterns of lane N0 and N1 (Case 4)

交叉口南进口左转相位每周期的车总延误

$$\Phi_{m1}^{sl} = \theta_{OAWFE} + \theta_{KZGU}.$$

在实际计算南进口左转相位的车总延误时,如何辨识南进口属于哪种情况也非常关键.情况 1~4 除了需要满足 $Q_{N1}(t_g^{p1}) \leq Q_{N0}^{max}$ 外,还需要分别满足:

$$Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s \leq (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}) \text{ 且 } [Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s + t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0})] \leq Q_{N1}(t_g^{p1});$$

$$Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s > (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}) \text{ 且 } [Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s + t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0})] \leq Q_{N1}(t_g^{p1});$$

$$Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s \leq (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}) \text{ 且 } [Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s + t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0})] > Q_{N1}(t_g^{p1});$$

$$Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s > (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}) \text{ 且 } [Q_{N1}(t_g^{p1})/S_l^s + t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0})] > Q_{N1}(t_g^{p1}).$$

2.2.2 $Q_{N1}(t_g^{p1}) > Q_{N0}^{max}$ 时的运行情况

如果满足 $Q_{N1}(t_g^{p1}) > Q_{N0}^{max}$, 则存在

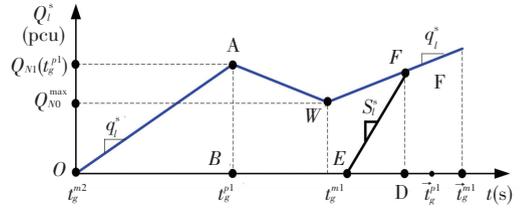
$$(g^{m2} + I^{m2} + g^{m3} + I^{m3} + \eta_2) \times q_l^s > Q_{N0}^{max},$$

$$q_l^s > Q_{N0}^{max} / (g^{m2} + I^{m2} + g^{m3} + I^{m3} + \eta_2).$$

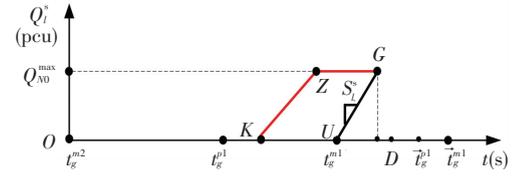
根据相位 M1 绿灯启亮时刻,车道 N0 排队是否达到 Q_{N0}^{max} 以及相位 P1 绿灯结束时刻车道 N1 的排队是否完全消散,也可以将左转车辆的运行分为 4 种情况,编号为情况 5 ~ 8.

情况 5 相位 M1 绿灯启亮前车道 N0 排队车辆数已经达到 Q_{N0}^{max} ,且相位 P1 绿灯结束前车道 N1 排队已经完全消散.如图 7 所示,在时刻 t_g^{p1} 车道的到达车辆数 $Q_{N1}(t_g^{p1})$ 大于等于 Q_{N0}^{max} ,所以当相位 P1

的绿灯启亮后,部分排队车辆将转向车道 N0,而且后续新到达的左转车也将选择车道 N0.从 K 点开始车道 N0 的累积排队车辆数逐渐增加,当达到 Q_{N0}^{max} 后左转车将选择车道 N1.



(a) 南进口车道 N1 累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道 N0 累积排队长度变化图式

图 7 情况 5 中车道 N0 与 N1 累积排队变化图式

Fig.7 Cumulative queue change patterns of lane N0 and N1 (Case 5)

在情况 5,车道 N1 的左转车辆累积延误为图 7(a)中多边形 OAWFE 的面积,车道 N0 的左转车辆累积延误为图 7(b)中梯形 KZGU 的面积.

多边形 OAWFE 的面积 θ_{OAWFE} 为

$$\theta_{OAWFE} = \frac{1}{2}Q_{N1}(t_g^{p1})(t_g^{p1} - t_g^{m2}) + \frac{1}{2}[Q_{N1}(t_g^{p1}) + Q_{N0}^{max}] \times [Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{max}] / S_l^s + \frac{1}{2}(Q_{N0}^{max} + \alpha_2) \times (t_g^{p1} - t_g^{m2} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{max}}{S_l^s}) + \frac{1}{2}\alpha_2 \times \frac{Q_{N0}^{max} + S_l^s(\alpha_2 - Q_{N0}^{max}) / q_l^s}{S_l^s - q_l^s}.$$

式中 $\alpha_2 = Q_{N0}^{max} + q_l^s(t_g^{p1} - t_g^{m2} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{max}}{S_l^s})$.

多边形 KZGU 的面积为

$$\theta_{KZGU} = \frac{Q_{N0}^{max}}{2}[2t_g^{m1} - 2t_g^{p1} - \frac{2L_{N0}}{V_{N0}} - \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{max}}{S_l^s} - \frac{2Q_{N0}^{max} - Q_{N1}(t_g^{p1})}{q_l^s} + \frac{Q_{N0}^{max} + S_l^s(\alpha_2 - Q_{N0}^{max}) / q_l^s}{S_l^s - q_l^s} - (\alpha_2 - Q_{N0}^{max}) / q_l^s].$$

交叉口南进口左转相位每周期的车总延误

$$\Phi_{m1}^{sl} = \theta_{OAWFE} + \theta_{KZGU}.$$

情况 6 相位 M1 绿灯启亮前车道 N0 排队车辆数尚未达到 Q_{N0}^{max} ,且相位 P1 绿灯结束前车道 N1 排队已经完全消散.图 8 中多边形 OAWHFE 的面积为

$$\theta_{OAWHFE} = \frac{1}{2}Q_{N1}(t_g^{p1})(t_g^{p1} - t_g^{m2}) + \frac{1}{2}[Q_{N1}(t_g^{p1}) +$$

$$Q_{N0}^{\max}] \times [Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{\max}] / S_l^s + \frac{1}{2} Q_{N0}^{\max} \times [t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}} - (Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{\max}) / S_l^s] + \frac{2Q_{N0}^{\max} - S_l^s [2Q_{N0}^{\max} - Q_{N1}(t_g^{p1})] / q_l^s}{2} \times \frac{[2Q_{N0}^{\max} - Q_{N1}(t_g^{p1})]}{q_l^s} + \frac{1}{2(S_l^s - q_l^s)} \times [Q_{N0}^{\max} - \frac{S_l^s(2Q_{N0}^{\max} - Q_{N0}(t_g^{p1}))}{q_l^s}]^2.$$

多边形 $KZWGU$ 的面积 θ_{KZWGU} 为

$$\theta_{KZWGU} = (t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) \times \frac{Q_{N1}(t_g^{p1}) - Q_{N0}^{\max}}{S_l^s} + \frac{1}{2} [(t_g^{m1} - t_g^{p1} - \frac{L_{N0}}{V_{N0}}) + \frac{Q_{N0}^{\max} q_l^s - S_l^s(2Q_{N0}^{\max} - Q_{N1}(t_g^{p1}))}{q_l^s(S_l^s - q_l^s)}] \times (2Q_{N0}^{\max} - Q_{N1}(t_g^{p1})).$$

交叉口南进口左转相位每周期的车总延误 Φ_{m1}^s 等于 θ_{OAWHFE} 与 θ_{KZWGU} 之和。

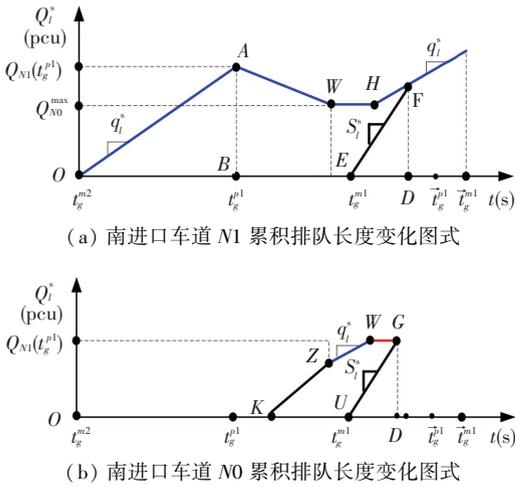


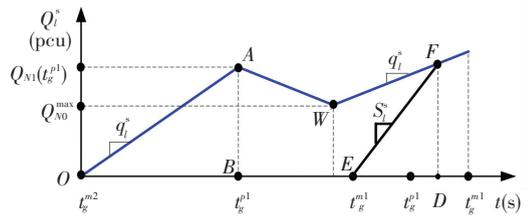
图8 情况6中车道N0与N1累积排队变化图式

Fig.8 Cumulative queue change patterns of lane N0 and N1 (Case 6)

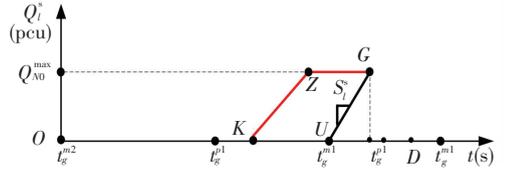
情况7 相位M1绿灯启亮前车道N0排队车辆数已经达到 Q_{N0}^{\max} , 且相位P1绿灯结束前车道N1排队尚未完全消散. 情况7与情况5的区别在于前者车道N1的排队完全消散发生在相位P1绿灯结束后, 而后者发生在相位P1绿灯结束前. 对比图7与图9可以发现, 两条车道的车辆到达与驶离图式相似, 车总延误的计算方法也基本相同, 在此不再赘述. 图9中交叉口南进口左转相位每周期的车总延误 $\Phi_{m1}^s = \theta_{OAWHFE} + \theta_{KZWGU}$.

情况8 相位M1绿灯启亮前车道N0排队车辆

数尚未达到 Q_{N0}^{\max} , 且相位P1绿灯结束前车道N1排队尚未完全消散.



(a) 南进口车道N1累积排队长度变化图式

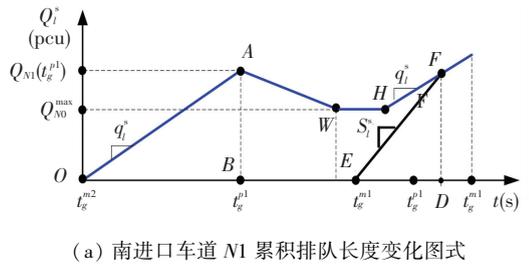


(b) 南进口车道N0累积排队长度变化图式

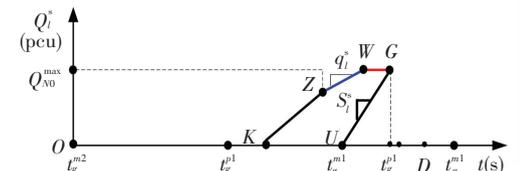
图9 情况7中车道N0与N1累积排队变化图式

Fig.9 Cumulative queue change patterns of lane N0 and N1 (Case 7)

情况8与情况6的区别在于前者车道N1的排队完全消散发生在相位P1绿灯结束后, 而后者发生在相位P1绿灯结束前. 对比图8与图10可以发现, 两条车道的车辆到达与驶离图式相似, 车总延误的计算方法也基本相同, 在此不再赘述. 图10中交叉口南进口左转相位每周期的车总延误 $\Phi_{m1}^s = \theta_{OAWHFE} + \theta_{KZWGU}$. 情况5~8除了需满足 $Q_{N1}(t_g^{p1}) > Q_{N0}^{\max}$ 外, 还需分别满足:



(a) 南进口车道N1累积排队长度变化图式



(b) 南进口车道N0累积排队长度变化图式

图10 情况八中车道N0与N1累积排队变化图式

Fig.10 Cumulative queue change patterns of lane N0 and N1 (Case 8)

$$Q_{N0}^{\max} / S_l^s \leq t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0} / N_{V0}) \text{ 且 } Q_{N0}^{\max} + q_l^s (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{p1} - L_{V0} / N_{V0} - Q_{N0}^{\max} / S_l^s) \leq S_l^s (\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1});$$

$$Q_{N0}^{\max} / S_l^s > t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0} / N_{V0}) \text{ 且 } Q_{N0}^{\max} + q_l^s (\vec{t}_g^{p1} -$$

$$\begin{aligned}
 t_g^{p1} - L_{V0}/N_{V0} - Q_{N0}^{\max}/S_l^s &\leq S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}); \\
 Q_{N0}^{\max}/S_l^s \leq t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0}) &\text{且 } Q_{N0}^{\max} + q_l^s(\vec{t}_g^{p1} - \\
 t_g^{p1} - L_{V0}/N_{V0} - Q_{N0}^{\max}/S_l^s) &> S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}); \\
 Q_{N0}^{\max}/S_l^s > t_g^{m1} - (t_g^{p1} + L_{V0}/N_{V0}) &\text{且 } Q_{N0}^{\max} + q_l^s(\vec{t}_g^{p1} - \\
 t_g^{p1} - L_{V0}/N_{V0} - Q_{N0}^{\max}/S_l^s) &> S_l^s(\vec{t}_g^{p1} - t_g^{m1}).
 \end{aligned}$$

2.3 优化模型建立与求解

本文以各个相位关键车道的车均延误最小为目标优化信号配时方案. 东、西、北3个进口左转机动车延误的计算方法与南进口相同,不再赘述. 具体优化目标函数为

$$\min \Phi = \frac{\Phi_{m2} + \Phi_{m4} + \max(\Phi_{m1}^s, \Phi_{m1}^n) + \max(\Phi_{m3}^e, \Phi_{m3}^w)}{[q_{m2} + q_{m4} + \max(q_l^s, q_l^n) + \max(q_l^e, q_l^w)] \times C}. \quad (2)$$

式中 $\max(\Phi_{m1}^s, \Phi_{m1}^n)$ 为将南、北进口左转机动车每周期总延误中的最大者作为相位1的每周期车总延误; $\max(\Phi_{m3}^e, \Phi_{m3}^w)$ 为将东、西进口左转机动车每周期总延误中的最大者作为相位3的每周期车总延误.

式(2)等号右侧分母代表每周期交叉口各关键车道到达的车辆数之和. 之所以采用车均延误指标而非车总延误指标,是因为在优化求解过程中周期时长会发生变化,进而影响每周期到达的车辆数;而车总延误模型不仅与配时方案有关,也与到达的车辆数有关;采用车总延误指标无法客观描述信号配时方案与交通流运行效率之间的关系. 式(2)中的优化变量包括主信号相位周期时长 C 、各个相位的绿灯时间 g^{mi} 、 g^{pi} 以及借对向车道的左转车道长度 L_{N0} 、 L_{N4} 、 L_{N8} 、 L_{N12} . 其中约束条件为

$$\begin{cases} g_{\min}^{mi} \leq g^{mi} \leq g_{\max}^{mi}; \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max}; \\ L_{Nj}^{\min} \leq L_{Nj} \leq L_{Nj}^{\max}, j = 0, 4, 8, 12. \end{cases} \quad (3)$$

式中 C_{\min} 、 C_{\max} 分别为交叉口的最小周期、最大周期; L_{Nj}^{\min} 、 L_{Nj}^{\max} 分别为借对向车道的左转车道最小长度、最大长度. 由式(2)、(3)组成的优化模型一共包括11个优化变量,很难采用穷举法、整数规划法或者基于梯度的算法进行求解. 而遗传算法只需要计算目标函数(适应度函数),无需计算梯度,适用于求解类似的优化问题. 因此本文选择采用遗传算法进行求解. 由于篇幅的限制,对遗传算法不再介绍,有兴趣的读者可以查阅相关文献.

3 算例分析

3.1 交叉口数据输入

以图1所示交叉口为例验证第2节所建立的优化方法,该交叉口采用图2所示的相位方案,绿灯间

隔时间设置为3 s. C_{\min} 、 C_{\max} 分别设置为90、160 s; g_{\min}^{mi} 、 g_{\max}^{mi} 分别设置为15、50s; L_{Nj}^{\min} 、 L_{Nj}^{\max} 分别设置为15、150 m. $\eta_1 = L_{Nj}/V_{Nj}$; $\eta_2 = L_{Nj}/V_{Nj} + 5$. $V_{Nj}(j = 0, 4, 8, 12)$ 取值为10 m/s. 左转、直行车道的饱和流率分别取0.417、0.5 pcu/s.

为了评价不同负荷下的交叉口交通流运行情况,设计两种流量输入方案. 在每种方案下,各个进口的左转、直行、右转流量均相等. 在方案一下,每个进口的左转、直行、右转流量分别为0.076、0.208、0.028 pcu/s;在方案二下,每个进口的左转、直行、右转流量分别为0.097、0.236、0.042 pcu/s.

将本文所建立的交叉口信号控制方案(简称“优化方案”)与传统的交叉口信号控制方案(简称“传统方案”)进行对比,分析不同流量方案下二者的车均延误变化情况. 在传统方案下,交叉口执行四相位控制,最小、最大周期分别为90、160 s;最小、最大绿灯时间分别为15、50 s;每个进口方向有1条左转车道、1条直行车道、1条直右车道;采用式(1)计算传统方案下的车均延误,并以车均延误最小为目标优化其配时方案.

3.2 仿真结果分析

首先在MATLAB中编程计算两种流量输入情况下优化方案、传统方案的信号配时参数. 利用遗传算法进行求解,终止进化代数200,交叉概率0.8,变异概率设置为0.05. 具体见表1. 由于各个进口的流量输入相同,所以 $g^{p1} = g^{p2}$ 、 $L_{N0} = L_{N4} = L_{N8} = L_{N12}$.

表1 不同流量下交叉口优化信号配时参数

Tab.1 Optimal signal timing parameters of the intersection under different traffic volumes

流量方案	C/s	g^{m1} /s	g^{m2} /s	g^{m3} /s	g^{m4} /s	g^{ni} /s	L_{Nj} /m
I	92	15	25	15	25	31	21
II	142	20	45	20	45	56	56

从表1、2可以看出,优化方案下的交叉口周期时长小于传统方案下的交叉口周期时长. 在流量方案II下,传统方案的周期时长为160 s,此时传统交叉口处于高负荷状态;而优化方案的周期时长为142 s,尚处于非饱和状态. 这是因为在优化方案下采用借对向出口车道左转,每个进口增加了1条左转车道,使得左转车的通行能力增加,所需要的绿灯时间减少,进而使得交叉口整体周期时长减小.

表2 不同流量下交叉口传统信号配时参数

Tab.2 Traditional signal timing parameters of the intersection under different traffic volumes

流量方案	C/s	g^{m1} /s	g^{m2} /s	g^{m3} /s	g^{m4} /s
I	108	21	28	21	28
II	160	30	44	30	44

而在表 3 中,优化方案下的左转车、直行车以及交叉口整体车均延误都小于传统方案. 在高负荷状态下交叉口车均延误可以下降 23.8%. 这首先是因为优化方案下左转车通行能力增加,降低了左转车延误;其次,由于左转相位的绿灯时间减少,导致直行相位的红灯时间减少,进而降低了直行相位的车均延误. 例如在表 3 中的流量方案一下,优化方案的 g^{m1} 为 15 s,仅仅达到最小绿灯时间;而表 4 中传统方案的 g^{m1} 达到了 21 s. 在流量方案 II 下也出现了相同的规律. 在表 3 中 L_{Nj} 分别等于 21、56 m. 由于在排队状态下车头间距为 7 m,所以它们分别能够容纳 3 辆和 8 辆左转车. 即使在高负荷状态下, L_{Nj} 的取值也并不大. 这主要是因为预信号显示红灯期间,左转车只能选择在原有左转车道排队(如南进口车道 $N1$);如果 L_{Nj} 取值过大,则在车道 $N1$ 距离停车线小于等于 L_{Nj} 的排队车辆将无法在预信号显示绿灯期间转至车道 $N0$. 而且当车道 $N1$ 的排队完全消散后,左转车仍只能选择车道 $N1$,所以 L_{Nj} 取值稍小可以提高车道 $N0$ 的利用率.

表 3 不同控制方案下交通流车均延误

Tab.3 Average vehicle delays under different control plans

流量方案	类型	优化方案下车 均延误/s	传统方案下车 均延误/s	下降 比例/%
I	左转车	42.6	57.3	25.7
	直行车	38.8	47.2	17.8
	交叉口整体	40.3	51.2	21.3
II	左转车	77.6	97.5	20.4
	直行车	63.4	86.3	26.5
	交叉口整体	69.2	90.9	23.8

4 结 论

1)借对向出口车道左转是一种有效提高交叉口通行能力、缓解交通拥堵的措施. 借对向出口车道左转交叉口的交通流运行与传统交叉口存在显著差异,进而导致信号配时方案优化方法、评价指标计算方面的不同.

2)考虑不同的左转车流量以及排队释放所需的绿灯时间,建立了 8 种图式下的车均延误计算方法,这是本文建模的核心. 最后以车均延误最小为目标对信号控制方案进行优化.

3)所建立的信号控制方案优化方法可以在不同的交通负荷条件下减少交叉口车均延误;在高负荷状态下可以减少 23.8%. 为了提高借对向左转车道的利用率,该车道长度不宜过大.

参考文献

- [1] 徐良杰,王炜. 信号交叉口左转非机动车影响分析[J]. 中国公路学报,2006,19(1): 89-92.
XU Liangjie, WANG Wei. Analysis of influence of left-turn non-motors in signalized intersection [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 89-92.
- [2] 蒋贤才,汪贝,曾永松. 不良天气和路面环境对交通信号配时方案的影响[J]. 公路交通科技,2014,31(7): 135-142.
JIANG Xiancai, WANG Bei, ZENG Yongsong. Influence of inclement weather and poor road condition on traffic signal timing scheme [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 135-142.
- [3] 王殿海,郭伟伟,宋现敏,等. 交通控制中展宽段设计与信号配时的优化[J]. 控制理论与应用,2010,27(12): 1598-1604.
WANG Dianhai, GUO Weiwei, SONG Xianmin, et al. The optimization of stretching segment and signal timing in traffic control [J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(12): 1598-1604.
- [4] HE H, GULER S I, MENENDEZ M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 64: 28-44.
- [5] BIE Y, LIU Z, WANG Y. A real-time traffic control method for the intersection with pre-signals under the phase swap sorting strategy [J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177637.
- [6] HOUNSELL N B, YAP Y H. Hook turns as a solution to the right-turning traffic problem [J]. Transportation Science, 2013, 49(1): 1-12.
- [7] BIE Y, LIU Z, LU L. Optimization of coordinated signal settings for hook-turn intersections [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(2): 197-213.
- [8] LIU Z, BIE Y. Comparison of hook-turn scheme with U-turn scheme based on actuated traffic control algorithm [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(6): 484-501.
- [9] 成卫,别一鸣,刘志远. 基于机动车延误的 Hook-turn 交叉口信号控制方案优化方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 94-101.
CHENG Wei, BIE Yiming, LIU Zhiyuan. Signal control scheme optimization method for intersection with Hook-turn based on motor vehicle delay [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 94-101.
- [10] CURRIE G, REYNOLDS J. Managing trams and traffic at intersections with Hook turns [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2219: 10-19.
- [11] WU J, LIU P, TIAN Z Z, et al. Operational analysis of the contra-flow left-turn lane design at signalized intersections in China [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 228-241.
- [12] ZHAO J, YUN M, ZHANG H M, et al. Driving simulator evaluation of drivers' response to intersections with dynamic use of exit-lanes for left-turn [J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 81: 107-119.
- [13] ZHAO J, LIU Y. Safety evaluation of intersections with dynamic use of exit-lanes for left-turn using field data [J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 102: 31-40.

(编辑 魏希柱)