

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.03.019

非对称流量下的环形交叉口信号控制研究

管翔¹, 成卫¹, 雷建明²

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 玉溪市公安局交通警察支队, 云南 玉溪 653100)

摘要: 在环形交叉口左转二次信号控制理论的基础上, 针对环形交叉口在非对称流量下的环道利用不均衡问题, 提出了一种在流量差异的情况下, 利用环道空间提前放行车流的方法, 以达到减小信号周期、降低车辆延误、提高环形交叉口通行效率的目的, 并对该方法进行了效果评价。最后以昆明市环形交叉口实际非对称流量为基础, 利用VISSIM仿真技术进行了对比分析, 验证了其有效性和实用性。

关键词: 交通工程; 信号控制; VISSIM 仿真; 环形交叉口; 非对称流量

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 03-0138-06

Study on Signal Control for Roundabout with Asymmetric Flow

GUAN Xiang¹, CHENG Wei¹, LEI Jian-ming²

(1. School of Traffic Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650224, China;

2. Traffic Police Detachment of Yuxi Public Security Bureau, Yuxi Yunnan 653100, China)

Abstract: Based on the signal control theory of twice left-turn at roundabout, a new method for solving the problem of unequal use of the ring lanes of roundabout with asymmetric traffic volume under the condition of traffic volume difference in the roundabout is presented. By using the loop space in advance, the aim is to reduce the signal cycle, reduce the vehicle delay and improve the traffic efficiency of the roundabout, and evaluate the effect of the method. Finally, based on the actual asymmetric traffic volume at the roundabout in Kunming, the comparative analysis is conducted by using the VISSIM simulation technology and its effectiveness and practicability are verified.

Key words: traffic engineering; signal control; VISSIM simulation; roundabout; asymmetric flow

0 引言

在流量较小的情况下, 环形交叉口可以使车辆畅通有序地通过, 不仅消除了冲突点, 而且还提高了行车安全性。但是近些年来, 不断增长的交通流量已使单纯的无控制环形交叉口不再适用。同济大学杨晓光等提出的环形交叉口左转二次控制方法^[1]成为一般大型环形交叉口的信号控制方法。该方法突破了环形交叉口的容量瓶颈, 合理利用环岛容量对左转车流进行二次排队, 降低了排队延误, 提高了通行效率^[2]。

环形交叉口左转二次控制一般采用对称放行的两相位控制, 但在实际运用中, 各进口方向不可能是标准的对称流量。在这种情况下, 同一相位中各进口方向对环形交叉口内部环道的利用不均衡, 信号周期内的绿灯时间没有被充分利用。因此, 需要在环形交叉口左转二次控制的理论基础上, 针对非对称流量下的环形交叉口信号控制进行进一步研究。

在环形交叉口左转二次控制方法理论的前提下, 现提出一种针对非对称流量情况下的环形交叉口优化控制方法, 并结合仿真对该优化控制方法与常规对称控制方法进行对比评价, 以证明其有效性和优

收稿日期: 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61364019)

作者简介: 管翔 (1990-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生. (guangxiang531@163.com)

越性。

1 环形交叉口左转二次控制方法简述

对环形交叉口的左转二次控制,需要对环形交叉口的进口道、停车线、渠化、信号灯等设施进行改造。其基本设计如图1所示。进口车道上设置第1停车线,并设置专用左转车道及专用左转信号灯。在环道中,各进口道左转交通流与对向进口道左转交通流冲突点前设置第2停车线,并配以环道信号灯。各个方向的右转交通流不受信号控制通过交叉口;经过第1停车线信号灯控制后,直行交通流进入环岛后直接通行,而左转交通流需经环道信号灯控制后二次通过交叉口^[3-4]。

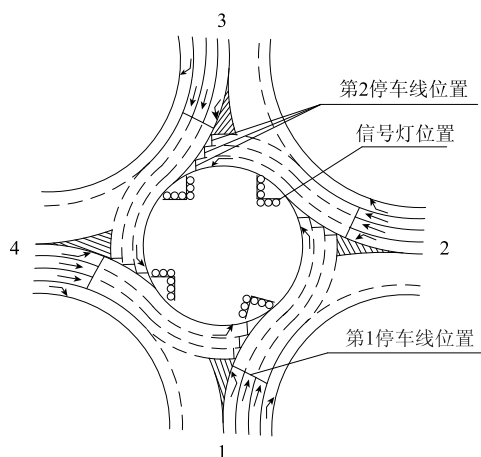


图1 左转二次环形交叉口信号控制设计图

Fig.1 Design of twice left-turn roundabout signal control

左转二次控制一般采用两相位控制。在标准的十字环形交叉口中,一个信号相位中放行两个对向进口道,直行车流绕环后通过,左转车流由环道信号控制在环道内待行,在后一相位放行前驶离环形交叉口^[5],其常规相位相序如图2所示。

2 优化控制方法思路

对于非对称流量的环形交叉口信号控制,为了便于研究,不考虑行人及非机动车对环形交叉口的影响。主要的优化控制方法思路如下:

(1) 判断流量是否存在非对称性,不存在非对称性时,不需要优化控制;存在非对称性时,依据经验计算方法^[6]得出环形交叉口的初始信号周期。

(2) 由于两个对向进口道的流量不同,必然存在相邻的两个流量较大的进口道。如图1所示,在两个相邻的较大流量交叉口中,从环岛外侧向内侧方向看,选取右侧进口道作为进口道1,其他进口道

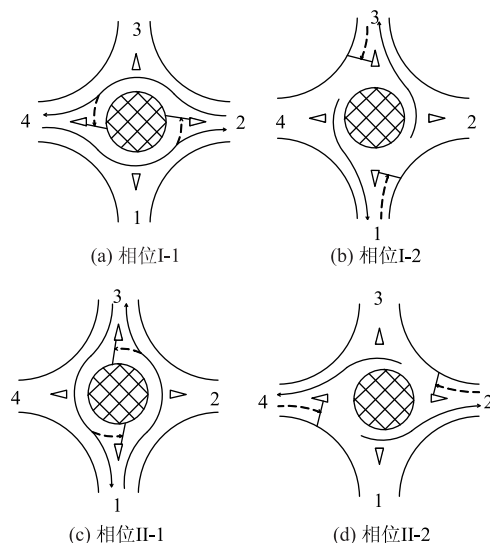


图2 左转二次信号控制相位示意图

Fig.2 Schematic diagram of twice left-turn signal control phases

按照逆时针顺序分别为2, 3, 4。由于进口道1流量大于进口道3,在1, 3方向对称放行中,进口道3的流量会在相位结束前放完。在这个相位中,从3到1的半个环岛车道不能被完全利用,此时可以提前放行进口道4的车辆。

(3) 根据以上思路,考虑环形交叉口内车流冲突关系,对进口道4流量进行修正,判断修正后的进口道4和进口道2的流量大小,选取较大方向的流量与进口道4修正后的流量做对比,确定环形交叉口的最佳信号周期。

(4) 根据最佳信号周期和修正后的流量,确定初始绿信比和绿灯时间。判断2, 4方向是否存在非对称性,若存在非对称性,根据环道容量限制情况对流量较小一侧的直行绿灯时间和其他对应绿灯时间进行调整,最终确定2, 4方向的绿灯时间。

(5) 优化左转绿灯时间和第2停车线的绿灯时间,协调各个相位之间的关系,最终确定信号控制方案,其信号控制相位示意图如图3所示。

3 优化控制方案

3.1 流量非对称性判断

从理论上讲,各个交叉口对向流量对称是绝对不存在的。但是对于信号控制方案来说,有一定的控制精度。在这种控制精度的约束下,必须有一种对对向流量是否存在非对称性的判断方法,才能使控制方案达到理论最优。只有当交叉口对向进口的总流量差大到一定程度时,才需要考虑对信号控制方案进行优化^[7]。本文所提出的优化方法是建立在

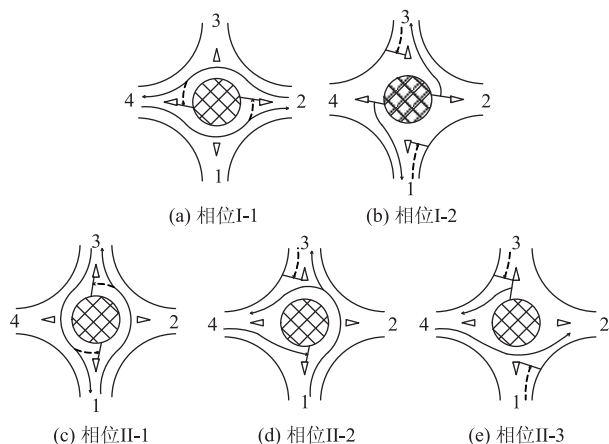


图3 信号相位优化控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of signal phase optimization control

各进口道及其对向进口道之间存在流量非对称性的基础上提出的,关于非对称性的判断方法如下。

当对向两进口道总流量差值超过 ω 时,判断两进口道总流量存在非对称性,即:

$$\frac{|q_i - q_{i+2}|}{q_i + q_{i+2}} \geq \omega, \quad (1)$$

式中, q_i 为第 i 进口的总流量; ω 为相对两进口总流量差值范围,一般在 0.05 ~ 0.08 之间,可根据该方向是否为关键方向或该方向的饱和度高低等因素进行综合考量而取值。

一般环型交叉口直行车流的流量比是该相位的关键流量比,故需对对向两进口的直行车流流量比进行比较,当其差值大于 ϕ 时,判断两个对向进口道关键流量存在非对称性,即:

$$|y_{ai} - y_{ai+2}| \geq \phi, \quad (2)$$

式中, y_{ai} 为第 i 进口的直行车流量比; ϕ 为相对两进口直行流量比差值范围,一般在 0.05 ~ 0.1 之间,其具体取值可参照上述。

总的来说,对于两个对向进口道,只有当同时满足总流量和关键流向流量比均存在非对称性时,才能判断其是否存在非对称性。

3.2 初始信号周期及有效绿灯时间的确定

3.2.1 初始信号周期

对于环形交叉口初始信号周期,可以采用杨晓光等提出的环形交叉口信号控制最佳周期计算方法^[6]来确定:

$$C_m = \frac{1.05L + 2.5}{1 - Y}, \quad (3)$$

式中, C_m 为初始最佳信号周期; L 为损失时间; Y 为各相位关键流量比之和。

3.2.2 有效绿灯时间

根据信号周期,可以得到每周期的总有效绿灯时间 G_e ^[8] 为:

$$G_e = C_m - \sum (I - g_y + l_s), \quad (4)$$

式中, G_e 为每周期的总有效绿灯时间; C_m 为初始最佳信号周期; I 为绿灯间隔时间; g_y 为黄灯时间; l_s 为启动损失时间。

3.3 直行初始相位绿灯时间的确定

环形交叉口直行相位的初始绿灯时间按照直行车车流的流量比来确定,即:

$$g_{a(i,i+2)} = G_e \lambda_{a(i,i+2)}, \quad (5)$$

式中, $g_{a(i,i+2)}$ 为某一方向及对向进口直行的初始绿灯时间; G_e 为一个周期内的有效绿灯时间; $\lambda_{a(i,i+2)}$ 为与 $g_{a(i,i+2)}$ 相对应的进口直行相位初始绿信比,即:

$$\lambda_{a(i,i+2)} = \frac{\max(y_{ai}, y_{ai+2})}{Y}, \quad (6)$$

式中, y_{ai} 为第 i 进口道直行车辆的流量比; Y 为一个周期内全部信号相位的最大 y 值之和。

3.4 提前绿灯时间的确定

在放行进口道 1 和进口道 3 的相位中,由于进口道 1 的流量大于进口道 3 的流量,进口道 1 的直行相位绿灯时间为 $g_{a(1,3)}$,进口道 3 的直行绿灯时间以进口道 1 和进口道 3 的流量大小关系调整为 $g_{a(1,3)} \cdot (y_{a3}/y_{a1})$ 。对于进口道 3 来说,能提前结束绿灯的时间为 $g_{a(1,3)}(1 - y_{a3}/y_{a1}) - g_y$,其中 g_y 为黄灯时间。

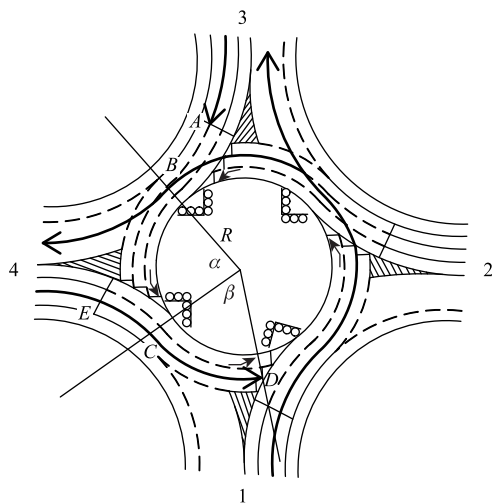


图4 提前放行示意图

Fig. 4 Schematic diagram of early release

如图4所示,设环岛半径为 R ,环岛车道宽度为 r ,进口道 3 车流到第 1 停车线处为 A ,进口道 3 进岛车流与进口道 1 进岛左转弯车流最外侧冲突点为 B ,进口道 3 直行车流与进口道 4 进岛车流的最外侧冲

突点为 C , 进口道4直行车流与进口道3第2停车线的交点为 D , 进口道4车流到第1停车线处为 E , B 与 C 之间的角度为 α , C 与 D 之间的角度为 β , AB 之间的距离为 L_{ab} , EC 之间的距离为 L_{ec} 。

进口道3车流从 A 到 C 所用的最大时间 t_{ac} 为:

$$t_{ac} = \frac{L_{ab} + \frac{\alpha}{180} \left[R + (n-1)r + \frac{r}{2} \right]}{v} + t_{s3}, \quad (7)$$

式中, v 为车流在环道内的平均行驶速度; n 为环岛内除去专用右转车道的车道数; t_{s3} 为进口道3车流启动损失时间。

进口道4车流从 E 到 C 所用的时间 t_{ec} 为:

$$t_{ec} = \frac{L_{ec}}{v} + t_{s4}, \quad (8)$$

式中 t_{s4} 为4进口道车流启动损失时间。

经分析可知, 进口道4车流能提前的总绿灯时间 t'_{a4} 为:

$$t'_{a4} = t_{a4} + g_{32}, \quad (9)$$

式中, t'_{a4} 为进口道4车流能在相位I前提前的总绿灯时间; g_{32} 为在相位II-3中的车流放行时间(图3); t_{a4} 为在相位II-2中能提前放行的时间(图3):

$$t_{a4} = g_{a(1,3)}(1 - y_{a3}/y_{a1}) - g_y + t_{ec} - t_{ac} \quad (10)$$

3.5 流量修正与信号优化

3.5.1 流量修正

在图4所示的提前放行示意图中, 当进口道4车流提前放行后, 即进口道4的车流可以在上一个相位中使车流提前进入环道内部进行排队等待, 并且可以与进口道3的左转车流一起放行。对于下一个相位中的进口道4车流来说, 有部分车流已经进入环道内部, 在计算下一相位中的进口道4绿灯时间时, 需要对流量进行修正。对于流量的修正主要有以下3种情况: (1) 提前绿灯时间很小, 进口道3第2停车线放行后, 进口道4车流才开始放行; (2) 提前绿灯时间较小, 进口道4车流刚放行, 进口道3第2停车线就开始放行, 环道内部没有排满车辆; (3) 提前绿灯时间较长, 进口道4第1停车线到进口道3第2停车线之间的环道已经排满车辆, 进口道3第2停车线才开始放行。对这3种情况的流量修正如下:

$$q'_4 = \begin{cases} q_4 - Q_{t_{a4}} n & t_{a4} \leq 0 \\ q_4 - Q_{t_{a4}} n_4 - Q_{g_{32}} \delta n & 0 < t_{a4} < g_{32}, \\ q_4 - \frac{CAP_h n_4 - CAP_{h3}}{G_e} - Q_{g_{32}} n_4 & g_{32} \leq t_{a4} \end{cases} \quad (11)$$

式中, q'_4 为修正后的进口道4流量; q_4 为进口道4的总流量; $Q'_{t_{a4}}$ 为在 t'_{a4} 时间内每个车道能从进口道4第1停车线开始通过的车流量; $Q_{t_{a4}}$ 为在 t_{a4} 时间内每个车道能从进口道4第1停车线开始通过的车流量, 其计算方法见文献[8-10]; n_4 为进口道4除去专用右转车道外的车道数; $Q_{g_{32}}$ 为车道3第2停车线开始放行到下一个相位开始之间每个车道能通过的车流量^[8-10]; δ 为关于进口道4车流刚放行, 进口道3第2停车线就开始放行的时间差值对 $Q_{g_{32}}$ 的修正系数; CAP_h 为图4中从 E 到 D 之间每个环道的容量, 其确定方法见文献[8]; CAP_{h3} 为进口道3左转车辆在图3所示相位II-1和图4所示 E 到 D 之间排队所占用的环岛容量; G_e 为每周期的总有效绿灯时间。

3.5.2 信号周期优化

由以上分析可知, 进口道2和进口道4修正后的流量分别为 q_2 和 q'_4 , 于相位I的初始直行绿灯时间 $g_{a(2,4)}$ 为:

$$g_{a(2,4)} = G_e \frac{\max(y_{a2}, y_{a4})}{Y} \quad (12)$$

修正进口道4流量以后, 相位I的直行绿灯时间 $g'_{a(2,4)}$ 为:

$$g'_{a(2,4)} = G_e \frac{\max(y_{a2}, y'_{a4})}{Y'}, \quad (13)$$

式中, $g'_{a(2,4)}$ 为修正后的相位I直行绿灯时间; y'_{a4} 为修正后进口4直行车辆的流量比; Y' 为修正后组成周期全部信号相位的最大 y 值之和。

在相位II中, 为了利用其流量不平衡下的环道空间, 对进口道1的直行绿灯时间不做改变, 而进口道3的较小直行绿灯时间和左转绿灯时间均根据流量大小关系相应缩小, 节省出的时间可提供给进口道4的车流, 使其能提前进入环岛中。总体来说, 相位II中的直行绿灯时间和左转绿灯时间大小不变, 只是将能提前放行的时间放到了前一个相位中, 所以可以得到修正后的最佳信号周期 C'_m :

$$C'_m = C_m - (g_{a(2,4)} - g'_{a(2,4)}), \quad (14)$$

式中, C'_m 为修正流量后的最佳信号周期; C_m 为初始最佳信号周期。

3.5.3 第2、第4进口道直行绿灯时间优化

确定整个环形交叉口的最佳信号周期以后, 对于进口道1和进口道3来说, 两个进口道的绿灯时间的大小已经确定。但是对于进口道2和进口道4在图3所示第I相位中的直行绿灯时间是 $g'_{a(2,4)}$, 为了充分利用有效绿灯时间, 提高交叉口的通行能力, 需要判断在第I相位中进口道2和进口道4修正后

流量的对称性, 如果不存在非对称性, 则可以直接确定进口道2和进口道4在第I相位中的直行绿灯时间为 $g'_{a(2,4)}$; 如果仍然存在非对称性, 首先判断进口道4的流量修正量 q'_4 是否达到最大值 $q'_{4\max}$:

$$q'_{4\max} = q_4 - \frac{CAP_{h4} - CAP_{h3}}{G_e} - Q_{g32} n_{40} \quad (15)$$

如果已经达到了最大值, 则说明已经充分利用了环道内部的空间, 无需对绿灯时间继续优化; 如果没有达到, 则需要对两个进口道方向的绿灯时间继续优化。将流量较小方向的直行绿灯时间提前结束, 同时对向进口道第2停车线及右侧进口第1停车线提前放行。绿灯时间的变化值 $t_{2,4}$ 为:

$$t_{2,4} = g_{a(2,4)} \left[1 - \frac{\min(y_{a2}, y'_{a4})}{\max(y_{a2}, y'_{a4})} \right] \quad (16)$$

绿灯时间变化以后, 按照以上方法重新修正提前绿灯时间和流量, 并优化信号周期, 得到最终的最佳信号周期 C'_m 和各个方向的优化绿灯时间等。

3.5.4 左转绿灯时间优化

左转绿灯时间的优化需以直行绿灯时间为依据, 根据环道容量的大小限制和相位内左转车流占用环道容量的关系, 可分为3种情况: (1) 左转车流量在相位内大于其对应的环道容量; (2) 左转车流量在相位内小于其对应的环道容量, 且左转车流量比大于直行车流量比; (3) 左转车流量在相位内小于其对应的环道容量, 且左转车流量比小于直行车流量比。需注意的是, 提前结束和提前放行的两个进口道左转车流对应的环岛容量有变化, 需另行计算。左转绿灯优化时间的确定公式为^[6]:

$$g_{li} = \begin{cases} \min\left(g_{ai}, \frac{CAP_{li}}{n_{li}S_{li}}\right) & q_{li}G_e \geq CAP_{li} \\ g_{ai} & q_{li}G_e < CAP_{li}, y_{li} \geq y_{ai} \\ g_{ai} \frac{y_{li}}{y_{ai}} & q_{li}G_e < CAP_{li}, y_{li} < y_{ai} \end{cases} \quad (17)$$

式中, g_{li} 为第 i 进口左转绿灯的优化时间; CAP_{li} 为进口 i 对应的环道内左转车的最大容量; n_{li} 为第 i 进口对应的左转环道数; S_{li} 为进口 i 左转车饱和流量; q_{li} 为进口 i 的左转车流量; y_{li} 为进口 i 左转车流量比。

3.5.5 第2停车线绿灯时间优化

在同一相位中, 第1停车线左转车的绿灯时间小于等于直行车绿灯时间, 且第2停车线左转车流与对向的第1停车线车流存在冲突, 所以根据第1停车线的绿灯时间和环形交叉口的物理半径等条件

可以确定第2停车线的绿灯时间。

$$g_{ei} = C'_m(C''_m) - 2(A + A_{ri}) - g_{a(i+2)}, \quad (18)$$

式中, g_{ei} 为进口 i 第2停车线的优化绿灯时间; A 为黄灯时间; A_{ri} 为进口 i 第2停车线与进口 $i+2$ 直行之间的全红时间^[11]; $C'_m(C''_m)$ 的意义为取值 C'_m 或 C''_m 。

4 评价方法

本文所提出的优化控制方法是利用同相位低流量进口道的环道空间, 使下一个相位的高流量进口道车流能提前放行, 以达到降低环形交叉口的延误, 提高环形交叉口的通行能力利用率的目的。考虑评价方案实现的难易程度, 本文采取仿真分析的方法进行验证。利用已有的 VISSIM7.0^[12]进行仿真, 选取平均延误 D 和平均停车次数为评价指标, 对比优化控制与对称放行的优劣性。其中, 平均停车次数指每辆车停车次数的平均值。平均延误 D 的计算式为:

$$D = \frac{D_z}{K_y + K_n}, \quad (19)$$

式中, D 为平均延误(每辆车的停止时间); D_z 为路网内或已到达的所有车辆的总延误; K_n 为路网内的车辆数; K_y 为已到达的车辆数。

5 仿真分析

由于云南省目前没有左转二次控制方案的环形交叉口, 故选取昆明市环形交叉口高峰流量实际数据, 利用 VISSIM 进行仿真分析。搭建直径为 70 m 的四进四出环形交叉口, 各个进口道均为 1 条专用左转, 两条直行, 1 条专用右转。按照各个交叉口的各流向及流量比的情况, 对该环形交叉口进行非对称流量下的信号优化控制, 得到的优化信号控制配时方案见图 5, 其中信号周期为 130 s, 黄灯时间为 3 s。

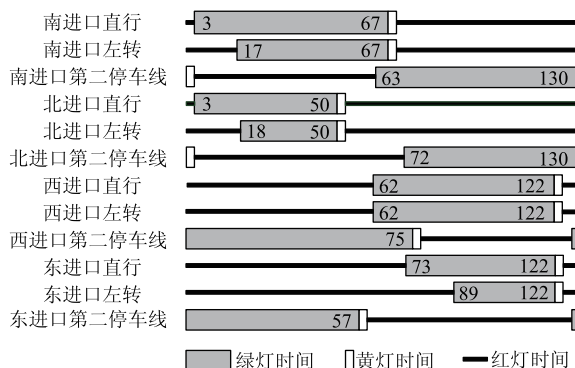


图5 优化控制信号配时图(单位:s)

Fig. 5 Timing diagram of optimal control signal (unit: s)

在环形交叉口的渠化设计、各进口流量数据、

各方向转向比例不变的情况下,对环形交叉口分别按照优化控制方案 and 对称控制方案进行仿真。考虑到环形交叉口各进口道均有专用右转车道,所以在仿真分析过程中不考虑右转车流。其中仿真结果数据获取时段为 200 ~ 1 050 s,数据采集间隔为 50 s,共计得到 17 组数据(在 50 s 内测得的各数值的平均值)。将 17 组数据取平均值,得到的数据对比示意图如图 6 所示,数据统计如表 1 所示。

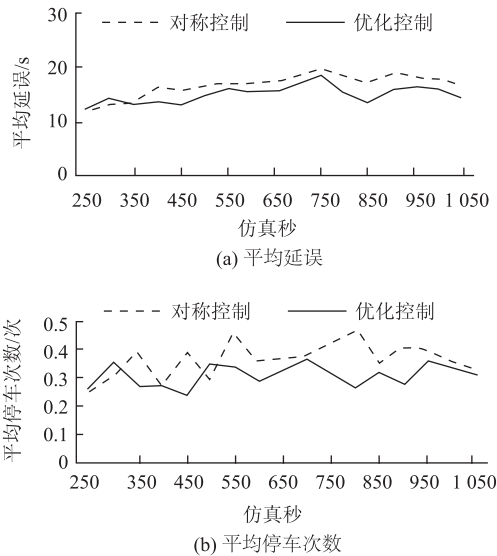


图6 平均延误和平均停车次数对比

Fig. 6 Comparison of average delays and average number of stops

表1 仿真检验统计结果

Tab. 1 Statistical result of simulation test

控制方案	平均延误/ [s · (50 s) ⁻¹]	平均停车次数/ [次 · (50 s) ⁻¹]
优化控制	15.04	0.309
对称控制	16.67	0.364

从表 1 可以看出,在未实施优化控制之前,环形交叉口的车辆平均延误为 16.67 s,平均停车次数为 0.364 次。实施本优化控制方案以后,平均延误降低了 9.8%,平均停车次数降低了 15.1%。对比结果表明,与原对称控制方案相比,优化控制方案可有效降低延误和停车次数。这说明本文所提出优化控制的信号配时方案更加合理、有效、可行。

6 结论

在有一定流量差异的大型环形交叉口,采取利用环道容量空间提前放行车流的方法是可行的,可有效减小信号周期、降低车辆延误、提高环形交叉口的通行效率,是对传统环形交叉口左转二次控制

理论的补充和发展,具有一定的应用价值。

需要注意的是,本文提出的方法是建立在大型环形交叉口流量有一定差异情况下的,对各进口道的流量差异有一定的范围要求,其适用范围相对来说较狭窄。特别是在两个相邻流量存在差异时,对环形交叉口从外向内看,右侧进口道与对向进口流量差所提供的提前放行时间在满足左侧流量可排满可利用环道,且左侧流量与对向流量差恰好为排满流量时,本优化控制方法能达到最佳。当流量差继续增大时,本方法也能起到较好的作用。

本文所提出的方法建立在左转二次信号控制的基础上,对于不适用左转二次信号控制方法的直径较小的环岛,在流量不对称的信号控制方面没有进行讨论,具体方法还需后续研究。

参考文献:

References:

- [1] 杨锦冬, 杨晓光, 彭国雄. 环形交叉口交通控制模式研究 [J]. 公路交通科技, 2000, 17 (3): 47-52.
YANG Jin-dong, YANG Xiao-guang, PENG Guo-xiong. Mode of Traffic Control in Ring Intersection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17 (3): 47-52.
- [2] 杨晓光, 杨锦冬, 边经卫. 大型环形交叉口交通改善设计与控制 [C] //中国城市交通规划协会成立 20 周年纪念论文集. 兰州: 中国建筑工业出版社, 1999.
YANG Xiao-guang, YANG Jin-dong, BIAN Jing-wei. Traffic Improvement Design and Control of Large Ring Intersection [C] // Proceedings of the 20th Anniversary of the Establishment of China Urban Traffic Planning Association. Lanzhou: China Architecture & Building Press, 1999.
- [3] 薛昆. 十字环形交叉口信号控制理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
XUE Kun. Study on Signal Control Theory of Cross Ring Intersection [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [4] YANG Xiao-guang, LI Xiu-guang, XUE Kun. A New Traffic-signal Control for Modern Roundabout: Method and Application [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5 (4): 280-287.
- [5] 汪涛. 信号控制环形交叉口时空优化方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
WANG Tao. Spatio-temporal Optimization Method for Signalized Roundabout [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

(下转第 151 页)

- the Behavior of Neurological Function [J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 1998, 24 (5): 272 – 274.
- [13] MURRAY C D R, FLYNN J, RATCLIFFE L, et al. Effect of Acute Physical and Psychological Stress on Gut Autonomic Innervation in Irritable Bowel Syndrome [J]. Gastroenterology, 2004, 127 (6): 1659 – 1700.
- [14] 李文. 高速铁路声屏障声学景观设计与研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- LI Wen. Research on Acoustical and Landscape Design of High-speed Rail Way Noise Barriers [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [15] 范丽丽. 泡沫铝声屏障降噪效果测试与机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- FAN Li-li. Study on Effect Test and Mechanism of Aluminum Foam Noise Barrier [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [16] 周信. 高速铁路声屏障降噪效果预测及新型声屏障设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHOU Xin. Noise Reduction Prediction and Design of New Type of Noise Barrier for High-speed Train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [17] 郭萍. 三维声屏障声压简化算法及声学特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- GUO Ping. Research on a Simplified Method to Calculate Acoustic Pressure of Three-dimensional Noise Barrier and Its Acoustic Performance [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [18] GREINER D, AZNAREZ J J, MAESO O, et al. Single and Multi-objective Shape Design of Y-noise Barriers Using Evolutionary Computation and Boundary Elements [J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41 (2): 368 – 378.
- [19] GRUBESA S, JAMBROSIC K, DOMITROVIC H. Noise Barriers with Varying Cross-section Optimized by Genetic Algorithms [J]. Applied Acoustics, 2012, 73 (11): 1129 – 1137.
- [20] 卢洋. 屏体吸声性能布局对声屏障插入损失的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2014, 34 (6): 121 – 125.
- LU Yang. Influence of Arrangement of Sound Absorptive Surface on Insertion Loss of Noise Barriers [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34 (6): 121 – 125.
- [21] 卢洋, 蒋中锐. 屏体吸声性能对道路声屏障插入损失的影响 [J]. 环境影响评价, 2015, 37 (1): 92 – 96.
- LU Yang, JIANG Zhong-rui. The Influence of Sound Absorptive Surface to the Performance of Noise Barrier [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37 (1): 92 – 96.
- [22] AMINI S, WILTON D T. An Investigation of Boundary Element Method for the Exterior Acoustic Problem [J]. Numerical Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 54 (1): 49 – 65.
- +++++
- (上接第 143 页)
- [6] 杨晓光, 赵靖, 汪涛. 环形交叉口信号控制最佳周期计算方法 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (6): 90 – 95.
- YANG Xiao-guang, ZHAO Jing, WANG Tao. Optimal Cycle Calculation Method of Signal Control at Roundabout [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (6): 90 – 95.
- [7] 薛昆, 杨晓光, 白玉. 给定周期条件下环交叉口优化控制方法研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (5): 83 – 87.
- XUE Kun, YANG Xiao-guang, BAI Yu. Optimization of Control Method for Roundabout at Fixed Cycle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (5): 83 – 87.
- [8] 杨佩昆, 张树升. 交通管理与控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- YANG Pei-kun, ZHANG Shu-sheng. Traffic Management and Control [M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [9] 王炜, 过秀成. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.
- WANG Wei, GUO Xiu-cheng. Traffic Engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2011.
- [10] 郭瑞军. 环形交叉口通行能力分析 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.
- GUO Rui-jun, Analysis Method of Traffic Capacity of Roundabout [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2013.
- [11] 马莹莹, 杨晓光, 曾滢. 十字环形交叉口绿灯间隔时间计算方法研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (7): 95 – 98.
- MA Ying-ying, YANG Xiao-guang, ZENG Ying. Calculating Method of Intergreen Interval for Roundabout [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (7): 95 – 98.
- [12] 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 Yi-ming, LIU Zhi-yuan. 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.