

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.017

# 交叉口直行待行区的车辆延迟启动策略分析

王浩<sup>1</sup>, 包林基<sup>1</sup>, 云美萍<sup>2</sup>

(1. 上海应用技术学院, 上海 201418; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 道路交叉口设有直行待行区可提高其通行能力, 但车辆进入直行待行区的时机将会影响车辆停车次数与车道容量。为减少交叉口的平均停车次数, 利用交通流波动理论分析因设置直行待行区产生的交通流集散波状态, 建立了一种以车流到达率及排队长度为约束条件, 以降低交叉口平均停车次数为优化目标的车辆延迟启动模型。该模型可得出车辆进入直行待行区的最佳时机以减少停车次数, 并避免因延迟启动导致的排队溢出。以上海市宜山路-虹梅路交叉口为案例展开了研究, 通过 VISSIM 进行了仿真验证。结果表明: 该策略在避免排队溢出条件下, 在车流高峰期可降低平均停车次数 19%, 在车流平峰期可降低 35.2%。

**关键词:** 交通工程; 延迟启动策略; 交通流分析; 直行待行区; 车辆到达率; 停车次数

中图分类号: U491.5<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)04-0108-05

## Analysis of Delayed Starting Strategy for Through Vehicles at Intersection Waiting-zone

WANG Hao<sup>1</sup>, BAO Lin-ji<sup>1</sup>, YUN Mei-ping<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Road intersection with through waiting zone can increase its capacity, but the moment of vehicle enters into the through waiting zone will affect the number of vehicle parking and road capacity. In order to reduce the average number of parking at intersection, the traffic flow gather-disperse wave state due to setting through waiting-zone is analysed by using traffic flow wave theory, a vehicle delayed starting model that taking traffic arrival rate and queue length as the constraints and taking reducing the average number of stops at intersection as the optimization objective is established. This model can be used to obtain the vehicle's best moment of entering into through waiting-zone to reduce the number of parking and avoid the queue overflow caused by delayed starting. The case study of the intersection of Yishan Road and Hongmei Road in Shanghai is conducted, which is simulated and verified by VISSIM. The result shows that this strategy can reduce the average number of parking by 19% at the peak traffic period and reduced by 35.2% at normal traffic period in the state of avoiding queue overflow.

**Key words:** traffic engineering; delayed starting strategy; traffic flow analysis; through waiting-zone; vehicle arrival rate; number of parking

## 0 引言

在城市道路车流高峰时段, 车道容量将会趋于饱和, 为了增加车道容量, 可以考虑将车道的停车线提前, 在交叉口内部设置机动车待行区<sup>[1]</sup>。机动车待行区是提高城市道路交叉口通行能力的重要手

段之一, 如何合理设置并利用待行区来控制车辆通行, 成为众多学者研究的目标。国内学者对机动车待行区进行了一些探索。倪颖<sup>[2]</sup>和金勇等<sup>[3]</sup>以交通流理论为基础, 通过停车线法等分析了设置左转待转区对交叉口通行能力的影响; 王殿海等<sup>[4]</sup>利用累计曲线及交通流理论计算出左转待转区设置的临界

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178344)

作者简介: 王浩(1976-), 男, 河北泊头人, 博士, 副教授。(mr.wanhao@163.com)

条件;李小帅<sup>[5]</sup>和杨明等<sup>[6]</sup>提出设置直行待行区可缓解交叉口内部各交通流对空间资源的争夺。基于上述理论研究,国内部分城市已经设置了机动车待行区。研究表明,在有条件的路口设置左转与直行待行区,路口的通行能力平均提高8%~10%<sup>[6]</sup>。

现有的研究主要针对设置机动车待行区对交叉口通行能力的作用和影响及其设置的临界条件等,并未考虑如何合理利用机动车待行区来控制交叉口车流的通行。传统的直行待行区控制策略从异向左转绿灯开始,本向车辆立即进入直行待行区<sup>[7]</sup>,这种控制策略导致了车辆停车次数增加,通过采用相应的交通诱导手段(如信息指示牌等)可抑制其增加。

因此,本文以降低直行车辆停车次数为目标,建立车辆延迟进入直行待行区的时间优化模型,根据不同的车流到达率,给出合理的待行区控制策略。结合上海市徐汇区宜山路-虹梅路交叉路口的调研数据,利用VISSIM软件分析优化后平均停车次数及延误等交通运行参数。

### 1 路段车流集散波分析

#### 1.1 路段车辆状态描述

道路车辆从上游交叉口进入下游开始到离开下游交叉口的过程如下:从车辆在道路交叉口遇到红灯后,陆续在交叉口停车线处停车结成高密度排队,形成一次集结波<sup>[8-9]</sup>;在异向左转绿灯开启后,车辆陆续驶入直行待行区,形成一次疏散波;然后车辆在待行区停车线处停车,形成二次集结波;待直行绿灯开启后,车辆离开待行区,形成二次疏散波。直行待行区如图1所示。

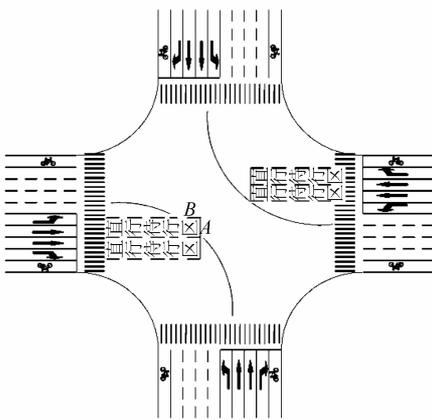


图1 直行待行区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of through waiting-zone

#### 1.2 车队波动特性分析

图2是交叉口间路段车辆的时空轨迹图。每条

曲线表示每辆车的状态。A点表示车辆在交叉口停车线处停车,其虚线表示车辆从运动到停止的分界,沿车队向后传播形成的集结波,其斜率即为波速 $w_1$ ;B点表示车辆启动,其虚线表示车辆从停止到运动的分界,沿车队向后传播形成的疏散波,其斜率即为波速 $w'_1$ ;C点表示车辆在待行区停车线,其虚线表示二次集结波开始形成,其斜率即为波速 $w_2$ ;D点表示车辆离开待行区,其虚线表示二次疏散波开始形成,其斜率即为波速 $w'_2$ (下同); $L_w$ 表示待行区的长度。车辆从C点开始产生二次停车,当D点产生的疏散波开始与C点产生的集结波交汇时,车辆排队完全消散(图3),其中由二次集结波与二次疏散波形成的区域P面积的大小表示二次停车的影响。

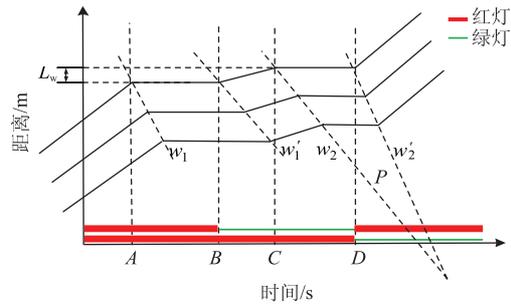


图2 车辆时空轨迹图

Fig. 2 Vehicle spatio-temporal trajectories

### 2 车辆延迟启动模型

#### 2.1 车辆延迟启动策略

机动车待行区的基本思想是车队前端车辆提前进入待行区,以增加车辆停车次数为代价为车队末端增加车辆容纳空间<sup>[10]</sup>。传统的待行区车辆控制策略是信号灯跳变为可进入待行区的相位时,车辆就立即进入待行区。当绿灯启动时,车队前端的车辆开始从待行区离开交叉口,由于排队长度较长,车队前端进入待行区时产生的第1次疏散波还未传播至车队末端,这既增加了车辆的停车次数也未能及时疏散车队末端的车辆。因此,可以结合上游车辆到达率和原始排队长度来考虑车辆延迟进入待行区的时间以减少车辆停车次数,即所谓的车辆延迟启动策略。如图3所示,将启动点B延迟至B',那么区域P的面积将减小,这表示停车次数与时间将减少。但同时要考虑到,延迟车队前端车辆进入待行区,亦可能造成车辆排队溢出。

##### 2.1.1 车辆排队溢出约束

在道路车辆控制过程中,要求车道不能发生溢出,以保证上游交叉口不会发生锁死。设车道长度

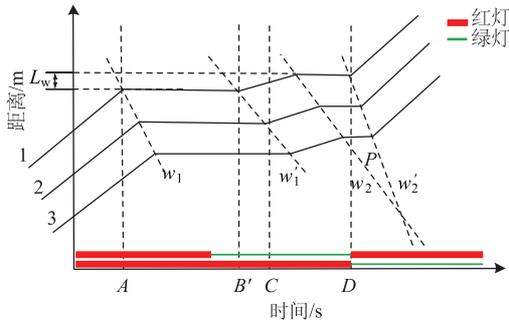


图3 车辆延迟启动轨迹图

Fig. 3 Vehicle delayed starting trajectories

为  $L$ , 那么交叉口路段的车辆最大排队长度  $L_{\max}$  必须满足:

$$L_{\max} \leq L - L_w \quad (1)$$

### 2.1.2 道路通行能力匹配

在交通流控制中,若上游交叉口向下游释放交通流的能力大于下游交叉口的疏散能力,那么下游交叉口就会发生溢出。因此,本文假设上、下游交叉口的通行能力匹配<sup>[11]</sup>,以避免不可抗力的排队溢出对系统稳定性造成破坏。

### 2.1.3 车辆速度均衡

在车辆排队运动过程中,车辆状态可分为:停车排队、排队等待、排队前进、离开排队,其中汽车停车排队与离开排队的速度要大于排队等待与排队前进的速度。

假设停车排队与离开排队的速度相等,设为  $v_1$ ,排队前进的速度为  $v_2$ ,则有车速约束条件:  $v_1 > v_2$ 。

## 2.2 模型求解

### 2.2.1 集散波波速计算

由文献[12-14]可知,集结波与疏散波(均为  $w$ )的计算公式为:

$$w_2 = \frac{k_2 v_2}{k_2 - k_j}, w'_2 = \frac{k_1 v_1}{k_1 - k_j} \quad (2)$$

式中,  $k_1$  与  $k_2$  为车流前后状态的密度;  $v_1$  与  $v_2$  为车流前后状态的速度;  $k_j$  为阻塞密度。

根据式(2)可计算出二次集结波  $w_2$  与二次疏散波  $w'_2$ :

$$w_2 = \frac{k_2 v_2}{k_2 - k_j}, w'_2 = \frac{k_1 v_1}{k_1 - k_j} \quad (3)$$

有学者通过实际交通调查数据验证发现,格林伯速度-密度模型适合描述高密度交通流状态<sup>[15]</sup>,其模型如下:

$$v = v_m \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4)$$

式中,  $v_m$  为最佳速度,即交通流达到最大时的速度;  $k$  为交通流密度。

结合式(3)、式(4),则有:

$$w_2 = \frac{v_2}{1 - e^{r/v_m}}, w'_2 = \frac{v_1}{1 - e^{r_1/v_m}} \quad (5)$$

由于  $v_1 > v_2$ , 所以二次疏散波的传播速度大于二次集结波的传播速度。

### 2.3.2 延迟启动时间 $\Delta\tau$ 求解

在交叉口直行红灯时,车辆在停车线上依次排队停车,随着红灯时间延长,排队长度不断增长,直到车辆开始进入直行待行区时,排队长度  $L_1$  为:

$$L_1 = qrj \quad (6)$$

式中,  $r$  为直行车道车辆排队时间;  $q$  为车辆到达率;  $j$  为每辆车占据的车道长度。由图4可知,  $r = T - T_g - T'_g + \Delta\tau$ 。根据车辆排队溢出约束有:

$$\Delta\tau \leq \frac{L_{\max} - P}{qj} + T_g + T'_g - T \quad (7)$$

式中,  $T_g$  为本向直行绿灯时间;  $T'_g$  为异向左转绿灯时间;  $T$  为交叉口信号周期;  $P$  为车辆初始排队长度。

由于需要保证  $\Delta\tau \leq T'_g - \frac{L_w}{v_2}$ , 即当车辆经过待行区恰好不停车离开时有临界条件。由式(5)得,当  $\frac{L_{\max} - P}{qj} + T_g + T'_g - T = T'_g - \frac{L_w}{v_2}$  时到达率临界点,则有:

$$q = \frac{L_{\max} - P}{j\left(T - T_g - \frac{L_w}{v_2}\right)} \quad (8)$$

因此,可根据车辆到达率与延迟启动时间的关系分为两种控制策略:

策略1:当到达率  $q$  小于临界条件时,车道在红灯时间内不会发生排队溢出,那么可以通过延迟车辆启动时间,使车辆不停车离开交叉口,如图4所示,即:

$$\Delta\tau = T'_g - \frac{L_w}{v_2} \quad (9)$$

策略2:当到达率  $q$  大于临界条件时,应该考虑车排队溢出的情况,此时有:

$$\Delta\tau = \frac{L_{\max} - P}{qj} + T_g + T'_g - T \quad (10)$$

设二次疏散波与二次停车波相交的时间为  $t_1$ ,从图5可知:

$$t_1 = \frac{w_2\left(T'_g - \Delta\tau - \frac{L_w}{v_2}\right)}{w'_2 - w_2} + T \quad (11)$$

相交的位置  $H$  为:

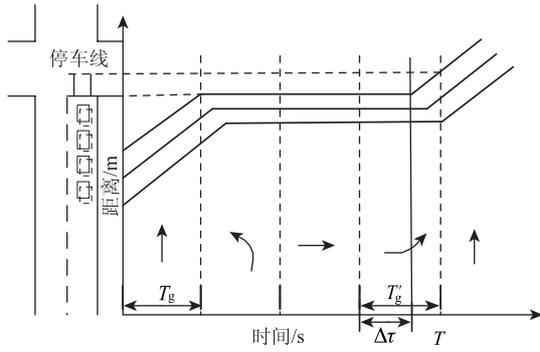


图4 策略1图解

Fig. 4 Graphic of strategy 1

$$H = \frac{w'_2 w_2 \left( T'_g - \Delta\tau - \frac{L_w}{v_2} \right)}{w'_2 - w_2} + w'_2 (T - T_g) \quad (12)$$

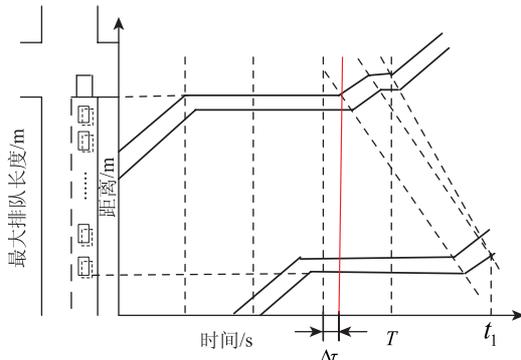


图5 策略2图解

Fig. 5 Graphic of strategy 2

由于车辆排队不能溢出, 则  $H \leq L$ , 可计算出到达率  $q$  的控制区间:

$$j \frac{T - T'_g - \frac{L_w}{v_2}}{L_{\max} - P} \leq q \leq \frac{[L - w'_2 (T - T'_g)] (w'_2 - w_2) + \frac{L_w}{v_2} - T'_g + T'_g}{w'_2 w_2 L - P} \quad (13)$$

### 3 实例研究及仿真验证

#### 3.1 道路基本条件

本文通过交通调查获取上海市徐汇区宜山路-虹梅路交叉路口的各项交通数据, 并运用 VISSIM 仿真软件对上述控制策略展开实例验证, 交叉口示意图以及仿真界面见图6。图中标识A点即表示直行待行区。

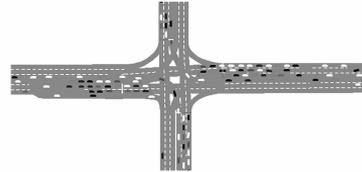
交通调查所得的交叉路口车流高峰期与平峰期的各项数据如表1所示。

#### 3.2 实例求解过程

研究假设车辆占据长度  $j = 5 \text{ m/veh}$ , 已测得车道长度为  $300 \text{ m}$ , 待行区长度为  $20 \text{ m}$ , 车辆启动速



(a) 交叉口示意图



(b) 仿真界面

图6 交叉口示意图及仿真界面

Fig. 6 Schematic diagram of Intersection and simulation interface

度  $v_1 = 5 \text{ m/s}$ , 车辆排队前进速度  $v_2 = 2 \text{ m/s}$ 。

表1 车流高峰期与平峰期交通数据表

Tab. 1 Traffic data of peak period and normal period

交通数据	高峰期	平峰期
车流到达率/(veh · h <sup>-1</sup> )	2 400	900
信号周期/s	240	240
本向直行绿灯/s	53	53
异向左转绿灯/s	46	46
初始排队长度/m	30	0

步骤1: 由式(6)可计算到达率临界条件:  $q = 0.31 \text{ veh/s}$ 。

步骤2: 在平峰期宜用策略1控制交叉口车辆通行。由式(7)可得平峰期延迟启动时间:  $\Delta\tau = 36 \text{ s}$ 。

步骤3: 在高峰期宜用策略2控制交叉口车辆通行。由式(4), (8), (9)可得高峰期延迟启动时间与到达率控制区间:  $\Delta\tau = 18 \text{ s}$ ,  $0.31 \leq q \leq 0.73$ 。

#### 3.3 仿真结果

表2为使用车流延迟启动控制策略与传统控制策略的仿真对比结果。可以看出, 在平峰期通过策略1控制车辆可降低平均停车次数35.2%, 在高峰期使用控制策略2可降低平均停车次数19%, 并且不造成延误增加。从中可得出, 随着到达率的不断增加, 可延迟的时间递减, 导致停车次数不断增加。

表2 仿真对比结果

Tab. 2 Result of simulation comparison

交通数据	车流高峰期		车流平峰期	
	传统控制策略	延迟启动策略	传统控制策略	延迟启动策略
停车次数	2.45	1.98	1.25	0.81
延误/s	45.3	45.9	18.9	19.1

## 4 结论

本文通过分析设有直行待行区的信号交叉口停车线前的车辆集散波状态,以减少路段间车辆平均停车次数为目标,建立了车辆延迟启动模型。通过分析不同车流到达率下的车辆集散波状态,根据车流到达率的不同,给出了两种控制策略,指出了两种车辆控制策略下车流到达率的临界条件,并给出了相应的延迟时间求解过程。

经实例研究与 VISSIM 仿真试验,利用本文提出的策略分析得出,在不同的车辆到达率下,采用相应的控制策略可优化平均停车次数,且随着到达率的不断增加,可优化的延迟启动时间递减,从而降低停车次数的比率。文中的控制策略易于实现,且对控制左转车辆进出左转待行区也有较大参考价值。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 左天福. 关于设置平面交叉口直行待行区的思考与实践 [J]. 交通与运输, 2011 (增1): 21-25.  
ZUO Tian-fu. Study and Practice on Waiting-area for Through Vehicles at Grade Intersection [J]. Traffic & Transportation, 2011 (S1): 21-25.
- [2] 倪颖, 李克平, 徐洪峰. 信号交叉口机动车左转待行区的设置研究 [J]. 交通与运输, 2006 (2): 32-36.  
NI Ying, LI Ke-ping, XU Hong-feng. Research on Waiting-area for Left-turning Vehicles in Signalized Intersections [J]. Traffic & Transportation, 2006 (2): 32-36.
- [3] 金勇. 平面交叉口转弯车流交通组织优化方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.  
JIN Yong. Research on Traffic Organization Optimization Methods of Turning Vehicle Flows at Grade Intersections [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [4] 王殿海, 李丽丽, 陈永恒. 机动车左弯待转区设置的临界条件 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (11): 132-135.  
WANG Dian-hai, LI Li-li, CHEN Yong-heng. Critical Condition for Setting Left-turn Waiting Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (11): 132-135.
- [5] 李小帅, 贾顺平, 孙海瑞. 机动车待行区设置方法的实证研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11 (增1): 195-199.  
LI Xiao-shuai, JIA Shun-ping, SUN Hai-rui. Study on the Methods of Establishing Waiting Areas for Auto-vehicles Turning Left and Going Straight at Signalized Intersections [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11 (S1): 195-199.
- [6] 杨明. 直行待行区平面交叉口交通组织及通行能力研究 [D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009.  
YANG Ming. Research on Traffic Organization and Capacity of Intersection Straight Way Waiting-area [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2009.
- [7] 周沛. 待行区交通信号控制策略及方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
ZHOU Pei. Research on Traffic Signal Control Strategy and Method for Waiting Area [J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [8] 王进, 白玉, 杨晓光. 关联信号交叉口排队长度计算模型 [J]. 同济大学学报, 2012, 40 (11): 1635-1640.  
WANG Jin, BAI Yu, YANG Xiao-guang. Queue Length Calculation Model at Adjacent Signal Intersections [J]. Journal of Tongji University, 2012, 40 (11): 1635-1640.
- [9] 熊烈强, 王富, 李杰. 路段交通流的动力学模型及其仿真 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 91-94.  
XIONG Lie-qiang, WANG Fu, LI Jie. Dynamical Model of Traffic Flow on Segment and Its Simulation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (2): 91-94.
- [10] 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.
- [11] 王浩, 吴翱翔, 杨晓光. 过饱和条件下信号交叉口协调控制可靠性优化 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (11): 87-91.  
WANG Hao, WU Ao-xiang, YANG Xiao-guang. Reliability Optimization of Signalized Intersection Coordinated Control under Oversaturated Condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (11): 87-91.
- [12] 王殿海. 交通流理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
WANG Dian-hai. Traffic Flow Theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [13] DAGANZO C F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations [M]. Washington D. C.: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1997.
- [14] GARTNER N H. Monograph on Traffic Flow Theory [M]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, 1996.
- [15] 姚荣涵, 曲大义, 王殿海. 基于运动学方程的停车波模型 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37 (5): 1049-1052.  
YAO Rong-han, Qu Da-yi, WANG Dian-hai. Stop-wave Model Based on Kinematic Equation [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37 (5): 1049-1052.