

文章编号:1005-0523(2018)03-0049-07

# 右转车辆穿越直行非机动车流延误计算方法

武亚鹏<sup>1</sup>, 郑长江<sup>1</sup>, 马庚华<sup>2</sup>, 李锐<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 河海大学 1. 土木与交通学院; <sup>2</sup> 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 论文通过分析信号控制交叉口直行非机动车流的消散过程和右转车辆穿越直行非机动车流过程, 探讨机非冲突机理, 提出了一种右转车辆穿越直行非机动车流延误计算方法。并且通过南京市西康路与汉口西路交叉口实例分析验证, 得到交叉口右转车辆由于直行非机动车所产生的实际延误与所计算的理论值的比值控制在  $1 \pm 0.05$ , 可以得出由该方法计算所得结果在合理的误差范围内, 符合右转车辆延误的实际值。此计算方法可以用来分析设立右转专用相位前后的交叉口延误, 以助于正确评价右转专用相位的整体效益。

**关键词:** 右转车辆; 直行非机动车; 安全时间间隔; 信号控制交叉口; 延误

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

在没有右转相位的信号控制交叉口造成右转车辆的延误, 不仅仅是由于过街行人的干扰, 直行非机动车流也会造成右转车辆的延误。国外非机动车主要是自行车, 大多学者在研究交叉口右转车辆延误时, 主要分析了右转机动车穿越过街行人流的延误, 而对于机动车与非机动车冲突的研究主要集中在机非碰撞分析, 例如: Chong S 对于自行车与机动车碰撞损伤比较分析<sup>[1]</sup>; Wang Y 对于信号交叉口自行车与机动车碰撞危险性的估计<sup>[2]</sup>。我国交通情况与国外不同, 我国城市非机动车数量相当巨大, 非机动车交通在城市道路交通中占据重要地位<sup>[3]</sup>。国内对于交叉口非机动车的研究较多, 例如: 苏岳龙等人的交叉口右转机动车与行人和非机动车的冲突研究<sup>[4]</sup>; 陈学武等人研究了交叉口非机动车群的膨胀过程<sup>[5]</sup>; 周勇等人的右转车辆与慢性交通冲突研究<sup>[6]</sup>; 梁春岩等人的自行车交通流宏观特性研究<sup>[7]</sup>, 这些研究都仅仅分析了交叉口机非冲突的过程和规律, 但并未提出关于交叉口右转车辆穿越非机动车流的延误计算方法。

所以本文通过微观分析交叉口直行非机动车流的消散过程以及机动车穿越直行非机动车流的过程, 探讨机非冲突机理, 提出了一种右转车辆穿越直行非机动车流延误的计算方法。此计算方法可以用来分析设立右转专用相位前后交叉口延误, 以助于正确评价右转专用相位的整体效益。

## 1 平面交叉口右转车辆与直行非机动车冲突分析

平面交叉口的控制方式包括信号控制和减速或停车让行控制两种控制方式, 其中信号交叉口不仅使车辆行驶更加有序, 同时信号交叉口的设置减少了交通管理人员 40% 的工作<sup>[8]</sup>, 城市平面交叉口多采用信号控制方式。因此本文主要研究信号控制交叉口的机非冲突。

信号控制的交叉口通常采用 2~4 个相位, 若设置有右转相位, 则右转相位将机动车辆与非机动车辆在时间上进行隔离; 在没有右转相位的三相位交叉口, 机非冲突主要是右转车辆与直行非机动车之间的冲突<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2018-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508161)

作者简介: 武亚鹏(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为交通规划运输与管理。

本文主要研究的是没有设置右转相位的三相位信号控制交叉口,此时右转车辆不受信号灯控制可随时进行右转。如图1所示,其中A点为右转机动车与直行非机动车在三相位交叉口的冲突点。

## 2 交叉口非机动车交通流特性分析

非机动车与机动车相比灵活性强、速度小、操作简单、基本设施投资少、占地面积小等特点,并且非机动车大多缺乏对使用者的保护措施,目前城市中非机动车以自行车为主<sup>[10]</sup>。最近共享单车的慢慢兴起,很好的解决了“公共交通”最后一公里的问题,城市居民更加愿意选择比较自由、绿色、低价、方便的自行车出行,城市道路上自行车的数量不断上升。

### 2.1 非机动车交通流的特性

1) 群体性。我国城市非机动车的数量是相当巨大的,在行驶高峰期例如早高峰或者晚高峰常常会出现首尾相连、或者集结成对骑行。特别是在临近信号控制的交叉口时,从道路上游到达的不同方向、不同速度的非机动车都会在信号灯的作用下在交叉口汇聚成群。在信号灯放行之后,成群离开消散,产生群体效应。

2) 潮汐性。非机动车交通流在信号控制的交叉口,由于要接受信号灯的调控有规律的被截断释放,因此道路上的非机动车流像潮汐一样有规律的流动<sup>[10]</sup>。

3) 离散性。这与群体性不同,大部分人并不愿意与陌生人并肩骑行或者出于安全的考虑,大部分人在与他人并排骑行时一般会超前或者滞后一段距离,与他人保持一段距离,这样就可以自由、安全的进行骑行。另外不同年龄、性别的骑行者的速度差别较大,因此造成了非机动车交通流的离散型。

### 2.2 直行非机动车交通流在信号控制交叉口消散过程分析

非机动车在临近信号控制的交叉口时,从道路上游到达的不同方向、不同速度的非机动车都会在信号灯的作用下在交叉口汇聚成群等待信号灯的放行,形成集群效应。在信号灯放行之后,非机动车开始消散。

如图2所示,非机动车流的消散过程可分为三个过程:首先是集中消散过程,时长为 $a$ ,这个过程中非机动车成群行驶,因此这个过程中不存在可穿越间隔;其次是随机消散过程,时长为 $b$ ,这个过程中可穿越间隔随机出现,右转车辆可随机穿越;最后是消散结束部分,时长为 $c$ ,这个过程中基本没有非机动车通过,右转车辆可随时通过。

## 3 右转车辆穿越直行非机动车流产生延误分析

右转车辆穿越非机动车流的过程:首先在交叉口直行相位放行的过程中,右转车辆随机到达,随即判断是否可以穿越非机动车流。如果存在可穿越间隔则右转车辆可以通过,如果非机动车流间隔小于可穿越间隔,则继续等待直至出现可穿越间隔。

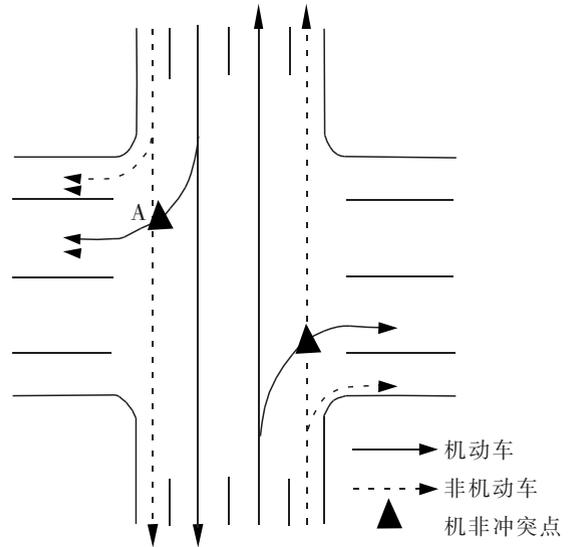


图1 平面交叉口机非冲突点示意图

Fig.1 Schematic diagram of the intersection traffic conflict points

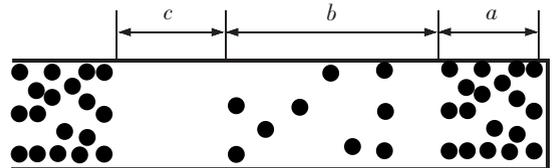


图2 交叉口直行非机动车消散过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the elimination process of straight non-motor vehicles at the intersection

其中非机动车的到达时刻可分为3种情形:

第1种情形是右转车辆非机动车流随机消散过程中到达,当车辆到达时,开始判断是否可以通过非机动车流,如果可以通过,则车辆离去;如果非机动车流间隔太小,不满足可穿越间隔,则车辆等待下一个间隔直至出现可穿越间隔;如果在随机消散的整个过程中,一直未出现可穿越间隔,则车辆需要在非机动车消散结束时通过。

第2种情形是右转车辆非机动车流集中消散过程中到达,第二种情形与第一种情形相类似。当车辆在集中消散到达时需要等待集中消散结束后,再随机通过,之后的过程与第一种情形相同。

第3种情形是右转车辆非机动车流随机消散结束后到达,此时交叉口没有非机动车与右转车辆相互干扰,所以右转车辆达到后可直接通过并不存在延误。

从中可以看出右转车辆产生延误主要是由于右转车辆的随机到达性、非机动车的随机到达性和最小可穿越间隔3种因素。

#### 4 右转车辆穿越直行非机动车流延误计算方法分析

在一般的信号控制交叉口,机动车和非机动车的到达分布一般服从泊松分布,则非机动车之间的车头时距大小服从负指数分布<sup>[1]</sup>。

##### 4.1 右转车辆穿越非机动车流的可穿越时间间隔的确定

机动车穿越时间间隔应该大于等于安全时间间隔,其中安全时间间隔是机动车穿越车道所用的时间加上安全保险时间。影响车辆可穿越安全时间间隔的因素有很多,包括车辆的车型、车速、驾驶员反应速度等。根据几种因素的综合考虑给出机动车可穿越安全时间间隔的计算方法如下

$$u = \frac{l_d + l_b}{v} + j \quad (1)$$

式中: $u$ 为安全时间间隔, $s$ ;  $l_d$ 为一条车道的宽度,通常为3.5 m;  $l_b$ 为机动车的车身长度, $m$ ;  $j$ 为机动车驾驶员做出预判的时间, $s$ ;  $v$ 为机动车速度, $m/s$ 。

##### 4.2 第1种情形分析

第1种情形是右转车辆在交叉口直行非机动车流随机消散过程中到达。现假设直行非机动车和右转车辆的到达分布均为泊松分布,则非机动车流的车头时距服从负指数分布。右转车道最多可容纳 $n$ 辆车排队,记驶过冲突点A点的直行非机动车流的时距为 $h$ , $u$ 为右转车辆驶过A点时直行非机动车最小车头时距即安全时间间隔, $u_0$ 为右转车辆连续驶过A点的最小车头时距, $s$ 。

当 $u \leq h \leq u + u_0$ 时,仅允许一辆右转车辆通过A点;当 $u + (k-1)u_0 \leq h \leq u + ku_0$ 并且 $k \leq n$ 时,则允许 $k$ 辆右转车辆排队通过A点; $h \geq u + nu_0$ 时,右转车辆可以随时通过A点。则直行非机动车流出现 $u + (k-1)u_0 \leq h \leq u + ku_0$ 的概率为 $P_k$ ,计算方法如下

$$P_k = P(h \geq u + (k-1)u_0) - P(h \geq u + ku_0) = e^{-\lambda[u + (k-1)u_0]} - e^{-\lambda[u + ku_0]} = e^{-\lambda u} [e^{-\lambda(k-1)u_0} - e^{-\lambda k u_0}] \quad (2)$$

其中 $\lambda$ 为非机动车的平均到达率,辆/s。

直行非机动车流的车头时距总数为 $b$ ,其中出现 $u + (k-1)u_0 \leq h \leq u + ku_0$ 的次数为 $\lambda b \cdot P_k$ ,出现 $h \geq u + nu_0$ 的次数为 $\lambda b \cdot e^{-\lambda(u+ku_0)}$ ,在非机动车流随机消散过程中允许穿过A点的右转车辆总数为 $N_{右}$ ,计算方法如下:

$$\begin{aligned} N_{右} &= \sum_{k=1}^n \lambda b P_k \cdot k + \lambda b e^{-\lambda(u+nu_0)} \cdot n = \lambda b P_1 + \lambda b \times 2P_2 + \cdots + \lambda b n P_n + n \lambda b e^{-\lambda u} \cdot e^{-\lambda n u_0} \\ &= -\lambda b e^{-\lambda u} [(1 - e^{-\lambda u_0}) + 2 \times (e^{-\lambda u_0} - e^{-2\lambda u_0}) + \cdots + n(e^{-\lambda(n-1)u_0} - e^{-\lambda n u_0})] + n \lambda b e^{-\lambda u} \cdot e^{-\lambda n u_0} \end{aligned} \quad (3)$$

则在随机消散过程中右转车辆穿过直行非机动车流的平均时间为 $\bar{t}$ ,计算方法如下

$$\bar{t} = \frac{b}{N_{右}} = \frac{(1 - e^{-\lambda u_0})}{\lambda e^{-\lambda u} (1 - e^{-\lambda n u_0})} \quad (4)$$

则在随机消散过程中到达 $k$ 辆右转车辆的概率为 $P_1(k)$ ,计算方法如下

$$P_1(k) = \frac{(\lambda_1 b) e^{-\lambda_1 b}}{k!} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_1$  为机动车平均到达率, 辆/s。

则在随机消散过程中平均到达的右转车辆数为  $\bar{k}_1$ , 计算方法如下

$$\bar{k}_1 = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P_1(k) = \lambda_1 b \quad (6)$$

#### 4.3 第2种情形分析

第2种情形是在右转车辆非机动车流集中消散过程中到达。由于在直行非机动车流集中消散过程中并不存在可穿越安全时间间隔, 因此在集中消散过程中到达的右转车辆必须等到非机动车流集中消散结束后再随机通过。

在集中消散过程中到达  $k$  辆右转车辆的概率为  $P_2(k)$ , 计算方法如下

$$P_2(k) = \frac{(\lambda_1 a) e^{-a}}{k!} \quad (7)$$

则在集中消散过程中平均到达的右转车辆数为  $\bar{k}_2$ , 计算方法如下

$$\bar{k}_2 = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P_2(k) = \lambda_1 a \quad (8)$$

非机动车的平均到达率的计算方法如下<sup>[12]</sup>

$$\lambda = q \frac{e^{-qu/3600}}{3600} \quad (9)$$

其中  $q$  为非机动车流量, 辆/h。

#### 4.4 延误计算

1) 第1种情形下的延误计算。

根据第1种情形分析可以得出随机消散过程中平均到达的右转车辆数为  $\bar{k}_1$ , 右转车辆穿过直行非机动车流的平均时间为  $\bar{t}$ , 右转车辆连续驶过 A 点的最小车头时距为  $u_0$ 。第1种情形下右转车辆总延误为

$$D_1 = \bar{k}_1 \cdot \bar{t} - \bar{k}_1 \cdot u_0 = \frac{\lambda_1 b (1 - e^{-\lambda u_0})}{\lambda e^{-\lambda u} (1 - e^{-\lambda u_0})} - \lambda_1 b u_0 \quad (10)$$

其中:  $D_1$  为第1种情形下右转车辆总延误, s。

2) 第2种情形下的延误计算。

根据第1种情形分析可以得出集中消散过程中平均到达的右转车辆数为  $\bar{k}_2$ 。由于第2种情形下右转车辆需要等待集中消散结束后, 再随机通过, 故第2种情形下的右转车辆总延误包括  $d_1$  和  $d_2$  两部分, 其中  $d_1$  为右转车辆非机动车流集中消散时到达所等待的时间,  $d_2$  为右转车辆随机通过时的延误。

现假设一辆右转车辆的等待时间为  $t_1$  且服从均匀分布<sup>[13]</sup>, 所以  $t_1$  的概率密度为  $f(t_1) = 1/a$ , 则  $d_1$  和  $d_2$  的计算公式如下

$$d_1 = \bar{k}_2 \cdot \int_0^a t_1 f(t_1) dt_1 = \frac{\lambda_1 a^2}{2} \quad (11)$$

$$d_2 = \bar{k}_2 \cdot \bar{t} - \bar{k}_2 \cdot u_0 = \frac{\lambda_1 a (1 - e^{-\lambda u_0})}{\lambda e^{-\lambda u} (1 - e^{-\lambda u_0})} - \lambda_1 a u_0 \quad (12)$$

第2种情形下的右转车辆总延误的计算公式为

$$D_2 = d_1 + d_2 = \frac{\lambda_1 a^2}{2} + \frac{\lambda_1 a (1 - e^{-\lambda u_0})}{\lambda e^{-\lambda u} (1 - e^{-\lambda u_0})} - \lambda_1 a u_0 \quad (13)$$

其中:  $D_2$  为第2种情形下右转车辆总延误, s。

3) 交叉口右转车辆穿越直行非机动车流的总延误计算。

交叉口右转车辆穿越直行非机动车流的总延误为第1种情形下的右转车辆总延误  $D_1$  与第2种情形下

的右转车辆总延误  $D_2$  之和,即:

$$D=D_1+D_2=\frac{(1-e^{-\lambda u_0})(\lambda_1 b+\lambda_1 a)}{\lambda e^{-\lambda u}(1-e^{-\lambda u_0})}+\frac{\lambda_1 a^2}{2}-u_0(\lambda_1 b+\lambda_1 a) \quad (14)$$

其中: $D$  为交叉口右转车辆穿越直行非机动车流的总延误值,s。

### 5 实例分析

本文选取南京市西康路与汉口西路交叉口为调查对象,汉口西路的西面为河海大学 1 号门,其示意图如图 3 所示。本文的数据采集对象为西康路南进口的右转机动车辆与西康路由南向北的非机动车辆,得到的数据主要包括右转车辆的数量、直行非机动车数量以及右转车辆的延误时间。调查时间选择周六与周日的早高峰与晚高峰,通过多次摄像调查得到相应的数据。调查所得到的数据如表 1 所示。

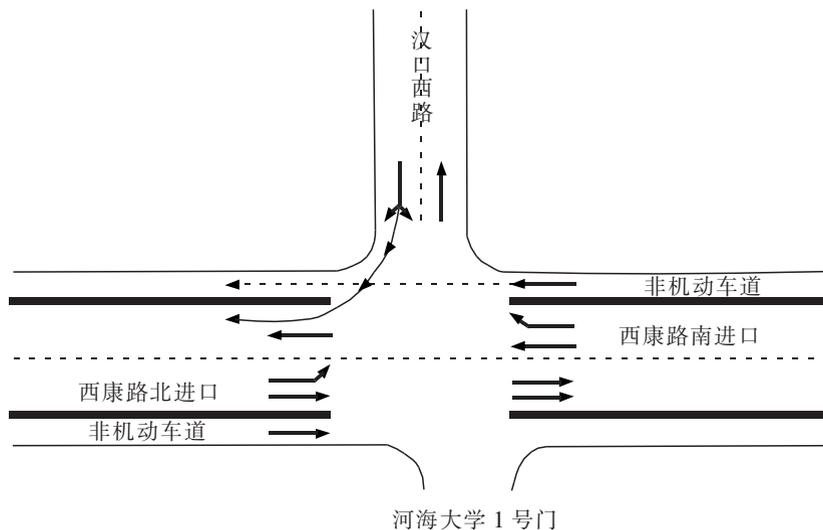


图 3 西康路与汉口西路交叉口示意图

Fig.3 Schematic diagram for the intersection of Xikang Road and West Hankou Road

表 1 交叉口机动车与非机动车流量统计

Tab.1 Traffic statistics of motor and non-motor vehicles at the intersection

车辆类型	流量/(辆/h)	早高 1 (7:30-8:30)	晚高 1 (16:00-17:00)	早高 2 (7:30-8:30)	晚高 2 (16:00-17:00)
西康路南进口右转车辆	$Q_1$	224	283	145	142
西康路南进口直行非机动车	$Q_2$	345	352	355	367

注: $Q_1, Q_2$  分别表示西康路南进口右转车辆与西康路南进口直行非机动车流量,辆/h;

经过调研可以得到该交叉口右转车辆延误总时间如表 2 所示。

表 2 西康路与汉口西路交叉口右转车辆延误统计

Tab.2 Statistics on right-turning vehicle delay at the intersection of Xikang Road and West Hankou Road

时间	早高 1 (7:30-8:30)	晚高 1 (16:00-17:00)	早高 2 (7:30-8:30)	晚高 2 (16:00-17:00)
延误 d/s	518.16	714.18	521.46	626.09

该计算方法充分考虑了交叉口直行非机动车和右转车辆的随机到达性,以及右转车辆可穿越安全时间间隔等影响因素。西康路与汉口路交叉口非机动车数量较多,以其为例具有很好的代表性。从表 3 可以看

出交叉口右转车辆由于直行非机动车所产生的实际延误与公式所计算的理论值的比值控制在,可以得出该计算方法所得出的结果符合交叉口车辆延误实际值,如图4所示。从中可以看出此模型不仅适用于三相位四进口的交叉口,也同样适用于三相位三进口的交叉口。

表3 延误实际值  $d$  与公式(14)计算值  $D$  的比率  
Tab.3 Ratio of delayed actual value  $d$  to calculated value  $D$  of formula (14)

项目	延误/s	早高 1 (7:30—8:30)	晚高 1 (16:00—17:00)	早高 2 (7:30—8:30)	晚高 2 (16:00—17:00)
西康路南进口右转车辆	$d$	518.16	714.18	521.46	626.09
公式(14)计算值	$D$	504.11	683.66	496.40	614.84
比值	$d/D$	1.03	1.04	1.05	1.02

注:计算理论延误值  $D$  时取机动车的可穿越安全间隙为 5 s,集中消散过程时长  $a$  为 10 s,随机消散过程时长  $b$  为 15 s, $u_0$  取值为 2 s, $n$  的取值为 30 辆。

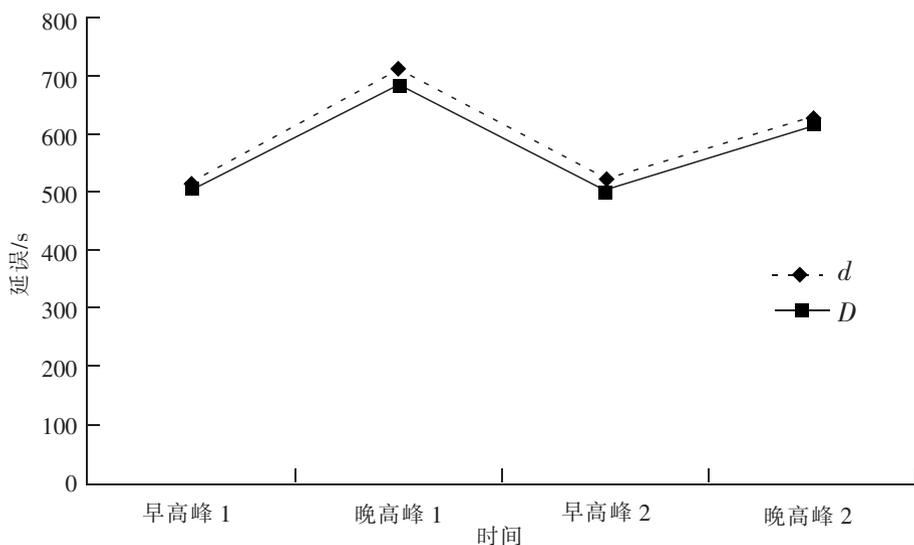


图4 延误理论计算值  $D$  与实际值  $d$  比较折线图

Fig.4 Line chart of delayed theoretical calculation  $D$  compared with the actual value  $d$

## 6 结语

本文所提出的右转车辆延误计算方法,通过实例分析表明具有很好的适用性,但本延误计算方法仅适用于不设置右转专用相位的三相位信号控制交叉口。

本文所提出的延误计算方法可以用于评价设置右转专用相位的实用性,通过计算设置前后右转车辆的延误,结合右转专用相位整体效益评价模型,确定是否设置右转专用相位,为相关部门作出合理的交通设置提供参考。

## 参考文献:

- [1] CHONG S,POULOD R,OLIVIER J,et al. Relative injury severity among vulnerable non-motorised road users: comparative analysis of injury arising from bicycle-motor vehicle and bicycle-pedestrian collisions[J]. Accid Anal Prev,2010,42(1):290-6.

- [2] WANG Y, NIHAN N L. Estimating the risk of collisions between bicycles and motor vehicles at signalized intersections[J]. *Accident; analysis and prevention*, 2004, 36(3): 313–21.
- [3] 张志远. 交叉口非机动车交通流特征分析[J]. *中原工学院学报*, 2006, 17(6): 66–68.
- [4] 苏岳龙, 魏铮, 程思瀚, 等. 信号交叉口右转机动车与行人和非机动车冲突研究[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(12): 157–161.
- [5] 陈学武, 王友普, 陈景旭, 等. 信号交叉口左转非机动车膨胀特性研究[C]//中国城市交通规划年会暨第27次学术研讨会. 2014.
- [6] 周勇, 方守恩, 杨晓芳. 右转车与慢行交通冲突的调查研究[J]. *交通与运输: 学术版*, 2009(1): 75–77.
- [7] 梁春岩. 自行车交通流特性及其应用分析[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [8] 周溪召, 许琰. 车道宽度对信控交叉口通行能力及车辆延误影响研究[J]. *华东交通大学学报*, 2016, 33(6): 38–42.
- [9] 马泽丹, 杨新苗. 城市信号控制交叉口右转专用车道通行能力分析[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(12): 108–111.
- [10] 王丹. 路段非机动车交通流特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [11] 胡明伟. 交叉口车辆到达统计分布的实证研究[J]. *道路交通与安全*, 2009(2): 10–15.
- [12] 郑长江. 行人过街信号与交叉口信号联动控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [13] 韩印, 张楠, 马万达, 等. 右转车辆穿越行人流的延误模型[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(6): 121–126.

## Calculation Method of Non-motor Vehicle Flow Delay for Turning Right and Passing Vehicles

Wu Yapeng<sup>1</sup>, Zheng Changjiang<sup>1</sup>, Ma Genghua<sup>2</sup>, Li Rui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper, through analyzing the dissipation of straight non-motor vehicle, in the signalized intersection and the process of passing through non-motor vehicle flow of vehicles turning right, explored the principle of conflict between vehicles and bicycles and put forward a method about delay calculation of the vehicles turning right passing through straight non-motor vehicle flow. Through the Nanjing Xikang Road and West Hankou Road intersection data validation, the research results show that the actual delay of vehicles turning right in the intersection due to the non-motor vehicles and the ratio to the calculated theoretical value was kept at  $1 \pm 0.05$  with the calculation results satisfying the actual value of the delay of vehicles turning right and in the reasonable error range. This method can be used to analyze the intersection delay before and after setting the right turn phase, so as to help to evaluate the overall benefit of the right turn phase.

**Key words:** vehicles turning right; straight non-motor vehicles; safety time interval; signalized intersection; delay