

DOI: 10.7652/xjtuxb201508018

减少机动车与非机动车冲突的 交叉口交通组织方法

王耀东¹, 陈雨人^{1,2}

(1. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海; 2. 同济大学道路交通安全与环境教育部工程研究中心, 201804, 上海)

摘要: 为了减少信号交叉口内机动车与非机动车之间的冲突,在分析直行非机动车与右转机动车行为的基础上,提出了一种新的非机动车停车组织方法。该方法以现有的非机动车停车线提前法为原型,在原停车线后方加设第二条非机动车停车线和信号控制,从而形成两个非机动车停车等待区域,通过两个信号灯的错时开启使两个区域内的非机动车先后通行,让右转车能够利用两个非机动车群间的较大时间间隔通过冲突区域。以上海市曲阳路大连西路交叉口为例,通过 Vissim 仿真证明提出方法的合理性。研究结果表明,提出的方法适用于非机动车与右转机动车流量较大的进口道,在直行非机动车流量大于 500 辆/h 的情况下,该方法可以有效减少机动车与非机动车之间的冲突,增加右转区域的安全可靠性和通行效率。

关键词: 交通安全;交通组织;交通冲突;信号交叉口;非机动车;Vissim 仿真

中图分类号: U491.225 **文献标志码:** A **文章编号:** 253-987X(2015)08-0109-07

Traffic Organization Method at Intersection for Alleviating Traffic Conflict Between Vehicle and Non-Motor Vehicle

WANG Yaodong¹, CHEN Yuren^{1,2}

(1. Traffic Engineering School, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Engineering Research Center of Road Traffic Safety and Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at alleviating conflicts at signalized intersection, a new approach to organize non-motor vehicles is proposed following the analysis of right-turn vehicles and straight non-motor vehicle behavior. Based on the traditional non-motor vehicle stop line preposed design, a stop line and a signal light behind the first stop line are added in this strategy, thus two stop areas for non-motor vehicles are formed. By staggering signal lights, non-motor vehicles in two areas pass through in turn, and in this way, right-turn vehicles pass through the conflict area at interval between two groups appearing. As an example, intersection of Quyang road and Dalianxi road is investigated. The strategy is verified to be rational by Vissim simulation. The result indicates that this strategy is suitable for the approaches having a large sum of right-turn vehicles and straight non-motor vehicles. When non-motor vehicle volume reaches above 500 per hour, this strategy enables to reduce traffic conflicts and heighten safety reliability and traffic efficiency in right-turn area.

Keywords: traffic safety; traffic organization; traffic conflicts; signalized intersection; non-motor vehicle; Vissim simulation

收稿日期: 2014-12-25。 作者简介: 王耀东(1990—),男,硕士生;陈雨人(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078270,51238008)。

网络出版时间: 2015-06-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150629.1137.006.html>

中国的非机动车保有量极大,信号交叉口内机动车非机动车冲突(以下简称机非冲突)是造成交通事故的重要原因,该类冲突中右转机动车与直行非机动车的冲突又占有相当大的比例。当右转机动车流量较大时,信号交叉口多采用右转专用相位,该相位绿灯亮起后,红灯时期排队等待的非机动车群以饱和流率快速启动抢占机动车与非机动车冲突区,非机动车流间隙很小,右转机动车无法穿越;当排队等待的非机动车全部通过冲突区后,才会出现右转机动车可穿越间隙。因而在冲突区域,直行非机动车优先通行,右转机动车需要等待非机动车流出现可穿越间隙时才能通过交叉口^[1]。

在高峰时段,直行非机动车流量极大时,势必会对右转机动车造成较大的延误。由于右转车穿越非机动车的穿越间隙选择具有不确定性,如果等待时间过长,机动车驾驶员失去耐心强行穿越会产生较大的安全隐患。如果因此而采用右转专用相位与直行相位分离,则会较大地增加信号周期的长度,降低了通行效率。

为了解决这一矛盾,本文采用一种新的非机动车停车组织方法,通过对非机动车停车位置和放行时间的限制与约束,在时空上依次赋予非机动车与右转机动车通行优势,这在一定程度上避免了机动车与非机动车冲突,相对增加了通行效率,减小了安全隐患。

1 右转车与非机动车冲突研究现状

由于非机动车和机动车的保有量增加,加之近几年来电动自行车的出现,机动车与非机动车冲突日益严重。在日本,1988年之后每年由于机动车与非机动车冲突事故死亡的人数都要超过1 000人,这大概占了交通事故死亡人数的10%。对于中国来说情况更加严重,大概38.7%的交通事故死亡事件是由于机动车与非机动车冲突产生的^[2]。机动车与非机动车冲突不仅对安全造成了影响,对通行能力的影响也很大^[3-4]。文献[5]将机动车与非机动车冲突按照机动车的运动方向分为了3类,并建立了3种冲突的事故发生概率预测模型。

国外关于大流量非机动车的组织方法研究较少,原因在于国外的非机动车保有量远低于中国。我国的实际情况与西方国家不同,因此对机动车与非机动车冲突和相关的管理方法的研究应当更加深入、具体。文献[6]研究了未设置右转专用相位的信号灯控制道路交叉口右转机动车与行人和非机动车

的冲突行为,对比分析右转车流正常行驶状态和受到干扰情况下通过道路交叉口时的车速和过街时间。文献[7]分析了机动车与非机动车发生交通冲突的条件;非机动车占用冲突区的时段内有机动车到达冲突区,并且到达冲突区的机动车提供的车头时距不大于非机动车穿越的临界间隙。该文根据这一条件得到机非冲突模型,模型计算结果表明,随着非机动车流量的增加,机动车与非机动车冲突概率呈现上升趋势。

非机动车停车线提前法是目前存在的较为成熟的方法,该方法将非机动车的停车线提前至机动车停车线前方一段距离,让红灯阶段到达的非机动车在机动车正前方等待,并能够在相位开启时优先通过。该方法赋予了非机动车较大的优先权,但当非机动车流量很大时,不间断的非机动车流产生可穿越间隙的概率大大减小,会导致机动车的延误增加。同样,类似思想的设计还有非机动车相位提前开启法,该方法最先应用于行人相位,后应用于非机动车,通过非机动车相位提前开启若干秒,赋予非机动车通行优先权。与停车线提前法不同,这一方法从时间上将非机动车与机动车进行了优先权的分离,但在效果上两种方法的作用相同,因此其缺点与停车线提前法相同,即不适用于非机动车流量特别大的情形^[8-9]。

另外一种方法是将右转专用相位与直行相位分离,这样可以完全避免右转机动车与直行非机动车之间的冲突,但缺点在于极大地延长了信号周期,降低了交叉口的通行效率。

2 右转车与非机动车冲突处理方法

本文针对右转机动车与直行非机动车流量均较大的进口道,按照《城市道路设计规范》规定(高峰时1个信号周期进入交叉口的右转机动车多于4辆时,应增设右转专用车道^[10])认为,未设置机动车右转专用道的交叉口处,右转机动车流量很小;在右转机动车流量较大时,为减少右转机动车汇入直行车时产生的冲突,会设置右转专用相位。因此,本文仅针对进口道设有右转专用相位的情形。

本文采用一种新的设计思路,以现有的非机动车停车线提前法为原型,在后方一段距离处加设第二条非机动车停车线,从而形成两个非机动车停车区域,两个区域的非机动车受到不同的信号控制,通过时间与空间上的分离,依次赋予非机动车和右转机动车通行的优先权,具体设计如图1所示。

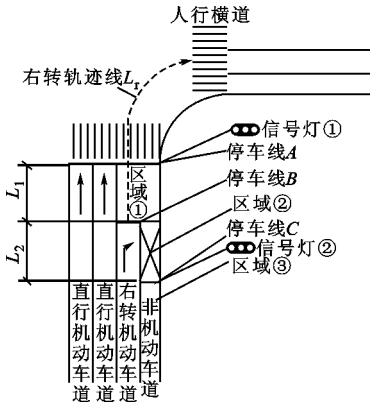


图 1 信号交叉口非机动车组织设计示意图

图 1 所示为交叉口进口道区域,由上至下的停车线分别为停车线 A、停车线 B、停车线 C,这 3 条停车线将非机动车的行车区域分为了 3 个部分。区域①由现有的非机动车停车线提前法设置而成,直行非机动车在红灯阶段可以在此区域内停车,由于该区域在右转机动车停车线前方,所以绿灯亮起后,直行非机动车首先获得通行的优先权,待该部分所有非机动车启动后,右转机动车才可以通行。区域②介于停车线 B 向右延伸部分和停车线 C 之间,该区域理论上不允许非机动车停车等候,将区域①与区域③的非机动车在空间上分离。区域③位于停车线 C 后方,该区域的非机动车受信号灯②控制。

位于停车线 A 处的非机动车与位于停车线 B 处的机动车受到信号灯①的控制,即右转专用相位,该相位与直行相位为同一相位。位于区域③的非机动车受到信号灯②的控制,该信号灯的绿灯相位要比信号灯①延后开启,以保证区域①内的非机动车和一部分右转机动车正常通过。由于交叉口进口道处双信号灯的设计并不常见,因此为了达到指示效果并对非机动车驾驶员有一定的针对性,信号灯②采用专门针对非机动车的信号灯并设有倒计时,在信号灯②的前方设置注意信号灯的警示标志,具体采用的样式如图 2 所示。



(a)信号灯②样式 (b)警示标志样式

图 2 信号灯②及警示标志样式

图 1 中, L_1 为停车线 A 与停车线 B 之间的距离, L_2 为停车线 B 与停车线 C 之间的距离。本设

计中需要确定 L_1 、 L_2 的取值,以及信号灯①与信号灯②的配时方案。

2.1 设计参数取值

本文以上海市曲阳路大连西路交叉口内的非机动车与机动车的行驶状况作为确定参数的数据来源。选择该交叉口原因如下:①该交叉口形状规则,十分典型,为四相位控制交叉口,交叉口长度为 50 m;②进口道设有右转专用车道,且右转车流量较大;③设有非机动车专用车道且非机动车流量较大;④该交叉口内有交通管制,所以大部分机动车与非机动车遵守交通规则。

首先根据该交叉口内的非机动车行为获得非机动车的速度-位移模型。该交叉口从进口道停车线到出口道停车线距离为 50 m,由于交叉口尺寸较大,所以非机动车在交叉口内即可达到期望速度。由于非机动车流量较大,所以非机动车加速过程较为缓慢,通过对交叉口的非机动车进行观测,进入交叉口约 40 m 后,非机动车的速度达到恒定值,即路段正常行驶速度,之后不再加速。本文借鉴文献[11]的非线性分析方法,通过对该交叉口内自行车速度-位移数据进行统计,可以得到直行自行车通过交叉口的速度-位移模型

$$\begin{aligned} V_x &= V_n, \quad x \geq 40 \text{ m} \\ V_x &= 0.292V_n x^{1/3}, \quad 0 \leq x < 40 \text{ m} \end{aligned} \tag{1}$$

式中: V_x 为直行非机动车在某一位置处的速度; V_n 为非机动车最后达到的期望车速; x 为车辆相对于进口道停车线的距离。对式(1)进行如下整理,可以得到非机动车的速度-时间模型

$$\begin{aligned} dx/dt &= v \Rightarrow dx/v = dt \\ \int_0^L dt &= \int_0^L \frac{dx}{V_x} = \int_0^x \frac{dx}{0.292V_n x^{1/3}} \\ t(x) &= \frac{5.14}{V_n} x^{2/3} \Rightarrow x = \frac{t(x)^{3/2} V_n^{3/2}}{11.65} \\ V(t) &= \frac{dx}{dt} = 0.13V_n^{3/2} t^{1/2} \end{aligned} \tag{2}$$

取 $V_n=20 \text{ km/h}$,最终得到自行车加速过程的速度-时间模型

$$V_b(t) = 1.69t^{1/2} \tag{3}$$

同样可以得到自行车加速过程的时间-位移模型

$$x_b = 1.12t^{3/2} \tag{4}$$

我国的非机动车组成较为复杂,并不只包含自行车一种成分,随着电动自行车的普及,非机动车中电动自行车的比重也日益增大,而电动自行车的加速性能和速度都明显大于自行车。根据观测得到的

电动自行车的运动特性,结合非线性分析方法,可以得到电动自行车加速过程的模型

$$V_m(t) = 4.38t^{1/2} \quad (5)$$

$$x_m = 2.92t^{3/2} \quad (6)$$

(1)确定 L_1 取值。右转机动车启动后要通过区域①后才能进行右转,因此右转机动车启动后先做直线运动,假设该阶段机动车做的是匀加速直线运动,通过交叉口的期望速度为 30 km/h。本文确定 L_1 取值的思想为:当区域①内最后一辆非机动车启动后,第一辆右转机动车经历一段启动损失后开始运动,通常情况启动损失为 0.8~1.2 s,本文取中间值 1 s。 L_1 的取值应使机动车在正常启动后做匀加速直线运动的过程中不受前方直行非机动车的干扰。

为保证机动车启动阶段有较大的加速空间,本文在计算 L_1 时对机动车的加速度取较大值 2 m/s²,得到机动车在匀加速直线运动阶段的位移与速度时间函数为

$$x_r = t^2 - t \quad (7)$$

$$V_r = 2t - 1 \quad (8)$$

将非机动车与机动车的速度与时间曲线建立在同一个坐标系内,如图 3 所示。

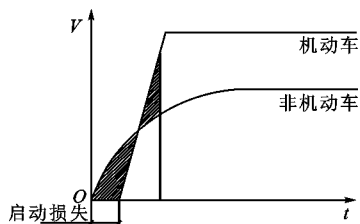


图3 非机动车与机动车速度时间曲线

在 t 时刻,机动车与非机动车的位移相等, t 时刻后,如果右转机动车仍然没有开始右转,则会受到前方速度较慢的非机动车的干扰而被迫减速,因此 t 时刻的位移 S 即为 L_1 取值的上限。由于右转车受到速度最慢的非机动车影响,因此在计算时采用式(4),令 $x_b = x_r$,求得 $t = 2.92$ s,代入式(7),得到此时的 x_r 为 5.61 m,即 L_1 的最大值为 5.61 m,本文中取 5 m。

(2)行人影响。在绿灯亮起初期,红灯期间到达的行人会形成人群通过人行横道,如果右转车到达与行人冲突区域时人群仍未通过则会造成干扰,使得通行效率 and 安全性下降。设右转车从启动到到达与行人冲突区的行驶路程为 L_r ,则根据交叉口设计参数可知 $L_r = 23$ m。根据右转车的运动方程,可以求得右转车通过 L_r 所需要的时间为 5.4 s,加上启动损失 t ,可以求得右转车从启动到到达行人冲突

区用时共 $t_r = 6.4$ s。取行人的平均行进速度为 $V_p = 1.2$ m/s^[12],行人到达与右转车冲突点的最大距离为两个机动车道和非机动车道的宽度之和,即 7 m,那么有

$$V_p t_r = 7.68 \text{ m} (> 7 \text{ m})$$

上式说明,当右转车到达行人冲突区域时,行人已经通过,因此在本文的设计下,不存在右转车与行人的互相干扰,这也是本设计优于传统设计的方面。

(3)确定 L_2 取值。区域①内不存在分离机动车与非机动车的车道线。由于非机动车流具有膨胀性,通过停车线 B 后就会对右转机动车产生影响,为使这种影响最小,应当使非机动车通过停车线 B 时的效率尽可能高。根据格林希尔治模型,可以认为非机动车的速度密度符合经验模型,表达式为

$$V_t = V_n(1 - k/k_j)$$

$$k = k_j(1 - V_t/V_n)$$

$$Q = kV_t = k_j(V_t - V_t^2/V_n) \quad (9)$$

式中: k 为非机动车在某一时刻的密度; k_j 为非机动车停车时达到的最大密度; Q 为非机动车流量。由式(9)可知,当 $V_t = 0.5V_n$ 时, Q 达到最大,令 $V_x = 0.5V_n$,分别代入自行车与电动自行车的速度-位移公式,求得 $x_b = 5$ m, $x_m = 2.5$ m,两者的平均值为 3.75 m,此处取 $L_2 = 4$ m,认为非机动车群能够以较大的效率通过停车线 B ,此时对右转机动车产生的影响较小。

(4)信号配时思想。信号灯①的信号配时与交叉口原有配时相同,不做改动。信号灯②的配时方案需要根据右转车流量进行设置,这里利用专用右转相位下的右转车道饱和和流量进行计算。设信号灯①绿灯起亮 T 后信号灯②绿灯起亮, T 的取值思想为 T 内让红灯到达的右转机动车能够全部通过停车线,这种确定 T 的方法可以保证红灯阶段到达的右转机动车不需要等待第二个红灯。同时,绿灯阶段到达的右转车与红灯阶段排队的右转车之间的车头时距较大,直行非机动车可以利用该间隙通过冲突区域。

(5)确定 T 取值。确定 T 取值需要分析右转车道的通行能力,根据文献[13],右转专用相位下的右转车道饱和和流量可用下式计算

$$S_r = S_{br} f_g f_r \quad (10)$$

式中: S_r 为右转车道计算饱和和流量; S_{br} 为右转基本饱和和流量,取值范围通常为 1 350~1 550 辆/h,本文取中间值,即 1 400 辆/h; f_g 为坡度及重车修正系数, $f_g = 1 - (G + H)$, G 为右转车道综合坡度, H

为重车率; f_r 为右转车道宽度及转弯半径修正系数。文献[13]将常见的车道宽度 W 和转弯半径 R 对应右转车道饱和流量转换为相应的修正系数 f_r ,并制成系数查询表格。本文中, W 为 3.5 m,右转转弯半径 R 为 15 m,在系数查询表中查得, $f_g=1$, $f_r=0.98$, $S_r=1\,372$ 辆/h,求得 $T=\lambda/0.381$,其中 λ 为一个信号周期中红灯阶段右转机动车的到达数。本例中信号周期为 90 s,该进口道绿灯 47 s,黄灯 3 s,红灯 40 s。取一条右转车道右转机动车的最大流量为 800 辆/h,经计算得 $T=23$ s,得到信号灯①和信号灯②的配时方案如图 4 所示。

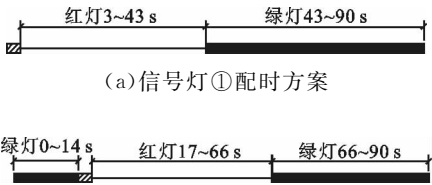


图 4 信号灯配时方案

2.2 仿真实验

利用微观交通仿真软件 Vissim 对本文设计方案进行仿真验证,以上海大连西路曲阳路交叉口进口道为原型,建立仿真交叉口,设置右转机动车让直行非机动车的优先规则,利用本文的自行车、电动自行车和右转车的运行特征模型,对 Vissim 中的非机动车和机动车模型进行更改,自行车与电动自行车各占非机动车总量的一半。在不同的右转机动车流量和直行非机动车流量情况下,分别对比新的设计与原有的非机动车停车线提前法和非机动车相位提前开启法的优劣。由于直行非机动车优先原则的存在,发生冲突时右转机动车的延误必然会增加,当延误较大时,右转机动车强行穿越非机动车的可能性也增加,使得安全性下降。因此,本实验中采用右转机动车的车均延误作为评价指标。

本文将右转机动车的流量分为一条右转机动车道(右转机动车流量 <600 辆/h)和两条右转机动车道(右转机动车流量 ≥ 600 辆/h)两种情况,并得到不同右转机动车流量下的车均延误与直行非机动车流量的关系曲线,结果如图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可知,随着直行非机动车流量的增大,右转机动车的车均延误也随之增加。当直行非机动车流量小于 400 辆/h 时,本文方法与传统方法对右转车造成的延误区别不大。当直行非机动车流量超过 400 辆/h 后,原有的设计带来的车均延误明显增加,而本文方法造成的车均延误增长十分平缓。

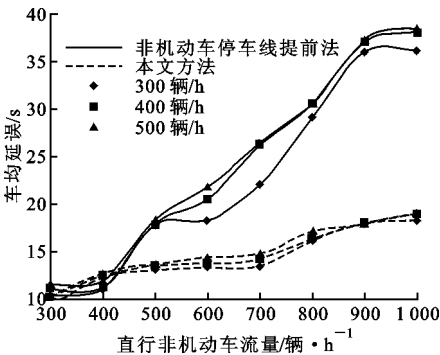


图 5 一条右转机动车道时右转车的车均延误

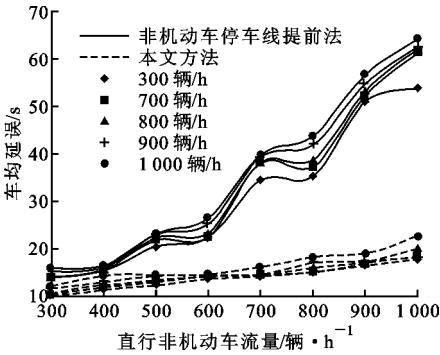


图 6 两条右转机动车道时右转车的车均延误

随着直行非机动车流量的增加,两种方法带来的车均延误差值越来越大,这说明直行非机动车流量越大,本文方法的优势越明显。

在同样的设计下,右转机动车的流量对车均延误的影响不大,两条右转机动车道下的车均延误要大于一条右转车道的车均延误。在两条右转车道的情况下,原有设计的车均延误随着直行非机动车流量的增加呈阶梯式增加,本文方法的车均延误增长十分缓和。

直行非机动车绿灯与右转机动车绿灯的间隔时间 Δt 的计算方法如下[14]

$$\Delta t = \frac{q\rho}{B_0 v e} + \frac{l}{v}$$

(11)

式中: q 为在红灯时间内到达排队的非机动车数量; ρ 为非机动车停车密度; B_0 为非机动车进口道宽度; v 为非机动车车速; e 为非机动车流进入交叉口后的膨胀系数; l 为停车线与冲突区域之间的距离。由于本文针对的是非机动车流量较大的情况,因此取 $q=8$ 。以该交叉口的实际观测数据对其他参数赋值,计算得到绿灯间隔时间约等于 3 s。同样,根据右转机动车的流量分为一条右转机动车道(右转机动车流量 <600 辆/h)和两条右转机动车道(右转机动车流量 ≥ 600 辆/h)两种情况,得到不同右转机动车流量下的车均延误与直行非机动车流量的关系曲

线如图7、图8所示。

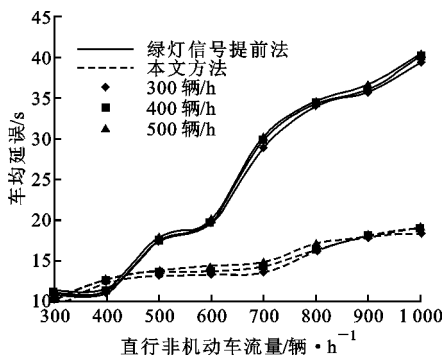


图7 一条右转机动车道时右转弯的车均延误

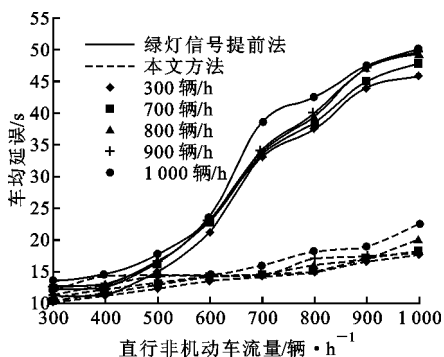


图8 两条右转机动车道时右转弯的车均延误

直行自行车绿灯信号提前开启对右转弯造成的影响与非机动车停车线提前十分相近,对比原有设计,本文方法在非机动车流量较大时优势十分明显。在只有一条右转车道时,直行非机动车流量大于400辆/h后,随着流量的增加,本文设计的优势越来越明显,而当具有两条右转车道时,直行非机动车流量大于500辆/h后即呈现出这种优势。

综合以上对比可以看到,对于一条右转车道与两条右转车道的情况,本文方法所造成的车均延误无明显区别,说明该方法对右转车道的不同设计具有很强的适应性。

3 结 语

本文提出了一种新的信号交叉口非机动车组织方法,并且提供了确定设计参数取值的方法。该方法适用于非机动车流量和右转机动车流量均很大的进口道。相比较于传统的非机动车停车线、提前机动车绿灯迟起、右转机动车箭头灯控制等方式,本文方法在非机动车流量较大时效果更好,并且可以降低右转弯对行人的干扰。在现实应用中,只需要获取交叉口尺寸、交通流量信息、信号配时信息,即可求得新设计中的参数。通过分析证明该方法在理论

上可行,并且利用仿真软件 Vissim 进行模拟仿真,证明本文方法在直行非机动车流量大于500辆/h的情况下,较现有的非机动车停车线提前法与直行自行车绿灯提前法都有较大的优势,这种优势随着非机动车流量的增大而越发明显,并且该方法对右转弯车道的数量有着很强的适应性。

我国的非机动车保有量较大,本文的设计方法应用范围较广。考虑到高峰时段和平峰时段非机动车流量相差较大,可以在某些高峰非机动车流量大的进口道在高峰时段采用这种设计,非高峰时段关闭信号灯②,实现资源的合理配置。本设计在实际应用初期需配合相应的人员进行管制,以实现理想的效果。

参考文献:

- [1] 黄迪, 钱大琳, 赵春龙. 平交口右转机动车穿越直行自行车行为研究 [J]. 北京交通大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 23-26.
HUANG Di, QIAN Dalin, ZHAO Chunlong. Study on behavior of right-turning motor crossing through bicycles at grade intersection [J]. Journal of Beijing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2006, 30(3): 23-26.
- [2] LIU X, SHEN D, HUANG J. Analysis of bicycle accidents and recommended countermeasures in Beijing, China [J]. Transportation Research Record, 1995 (1487): 75-83.
- [3] AL-KAISY A F, STEWART J A. New approach for developing warrants of protected left-turn phase at signalized intersections [J]. Transportation Research: Part A Policy and Practice, 2001, 35(6): 561-574.
- [4] MUNG G K S, POON A C K, LAM W H K, et al. Distribution of the maximum number of opposed turns in a signal cycle at fixed time traffic signals [J]. Transportation Research: Part B Methodological, 1998, 32(6): 373-386.
- [5] WANG Y, NIHAN N L. Estimating the risk of collisions between bicycles and motor vehicles at signalized intersections [J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36(3): 313-321.
- [6] 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, 166.
SU Yuelong, WEI Zheng, CHENG Sihan, et al. Research of conflict between right-turn vehicles and pedestrians or bicyclists at signalized intersection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and

- Development, 2008, 25(12): 157-161, 166.
- [7] 沈家军, 王伟, 陈学武. 城市道路交叉口混合交通流机动车与非机动车冲突概率 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(5): 1093-1096.
- SHEN Jiajun, WANG Wei, CHEN Xuewu. Study on conflict probability of motor and non-motor mixed traffic at urban intersections [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(5): 1093-1096.
- [8] 孙明正, 杨晓光. 机非混行平面交叉口交通设计理论研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(8): 82-86.
- SUN Mingzheng, YANG Xiaoguang. Research on the theory of traffic design for intersection of mixed traffic [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8): 82-86.
- [9] 倪颖, 李克平. 信号交叉口行人与右转机动车冲突的处理 [J]. 交通与计算机, 2007, 25(1): 22-26.
- NI Ying, LI Keping. Dealing with conflict between pedestrian and right turning vehicle in signalized intersection [J]. Computer and Communications, 2007, 25(1): 22-26.
- [10] 北京市市政设计研究院. CJJ 37-90, 城市道路设计规范 [S]. 北京: 北京市市政设计研究院, 1990.
- [11] KHAN S I, RAKSUNTORN W. Accuracy of numerical rectification of video images to analyze bicycle traffic scenes [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1773(1): 32-38.
- [12] KNOBLAUCH R L, PIETRUCHA M T, NITZBURG M. Field studies of pedestrian walking speed and start-up time [J]. Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1538(1): 27-38.
- [13] 吴震, 杨晓光. 信号交叉口右转车道饱和流量研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 37-41.
- WU Zhen, YANG Xiaoguang. Research on saturation flow of right-turning lane at signalized intersection [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2008, 36(1): 37-41.
- [14] 刘永娜. 基于非机动车优先的城市信号交叉口安全改善 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 51 页)

- surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2006, 42(7): 1828-1837.
- [10] MARKOVIC M, JUFE M, PERRIARD Y. Reducing the cogging torque in brushless DC motors by using conformal mappings [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2004, 40(2): 451-455.
- [11] JIAN Linni, CHAU K T, GONG Yu, et al. Analytical calculation of magnetic field in surface-inset permanent magnet motors [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2009, 45(10): 4688-4691.
- [12] CHUNG S, LEE H, HWANG S. A novel design of linear synchronous motor using FRM topology [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2008, 44(6): 1514-1517.
- [13] YANG Tong, ZHOU Libing, LI Langru. Influence of design parameters on end effect in long primary double-sided linear induction motor [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 192-197.
- [14] ZHU Y, LEE S, CHUNG K, et al. Investigation of auxiliary poles design criteria on reduction of end effect of detent force for PMLSM [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2009, 45(6): 2863-2866.
- [15] HIRASA T, ISHIKAWA S, YAMAMURO T. Equivalent circuit of linear induction motors with end effect taken into account [J]. Electrical Engineering in Japan, 1980, 100(2): 65-71.
- [16] GIERAS J F, DAWSON G E, EASTHAM A R. A new longitudinal end effect factor for linear induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, 2(1): 152-159.
- [17] 张颖. 永磁同步直线电机磁阻力分析及控制策略研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [18] 马志云. 电机瞬态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 43-48.
- [19] 刘成颖, 沈祥明, 王昊. 永磁直线同步电机非线性电感与推力波动的分析和补偿 [J]. 清华大学学报, 2010, 50(12): 1968-1973.
- LIU Chengying, SHEN Xiangming, WANG Hao. Analysis and compensation of the nonlinear inductance and thrust ripple in permanent magnet linear synchronous machine [J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 50(12): 1968-1973.

(编辑 杜秀杰)