

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220802001

文章编号: 1672-9331(2024)01-0164-10

引用格式: 王正武, 谢静怡, 王杰, 等. 基于轨迹数据的非机动车左转信号灯安全效应评估[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 164-173.

Citation: WANG Zhengwu, XIE Jingyi, WANG Jie, et al. Traffic safety evaluation of left-turning non-motor vehicle signal lights at intersections based on trajectory data [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 164-173.

基于轨迹数据的非机动车左转信号灯安全效应评估

王正武¹, 谢静怡¹, 王杰¹, 邢璐¹, 朱全军²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015)

摘要:【目的】对城市交叉口采用的左转非机动车信号灯设施进行交通安全性量化评估。【方法】提出一种基于拓展碰撞时间(extended time to collision, ETTC)指标的左转非机动车信号灯安全效应评估方法。针对现有的碰撞时间(time to collision, TTC)指标不适用于评估交叉口左转非机动车冲突的问题, 考虑非机动车车辆尺寸与加速度对交通冲突的影响, 采用拓展碰撞时间指标, 评估交叉口非机动车交通冲突。收集长沙市4个信号交叉口的视频大数据, 利用视频软件Tracker提取车辆微观轨迹后, 开展案例分析。【结果】左转非机动车信号灯在时间上明确了非机动车的通行权, 其设置能显著降低非机动车冲突率, 在平峰、高峰时段非机动车冲突率分别降低了40.11%、25.27%。在直行相位末期、左转相位即将启亮时, 设置组的左转非机动车在待行区等待, 冲突率降为0; 而对比组近50%的非机动车违规左转, 冲突严重。设置左转非机动车信号灯的改善效果随非机动车流量的增大呈先增加后降低趋势, 而随机动车流量的增大呈逐步波动下降趋势。【结论】本研究揭示了非机动车左转信号灯的设置对减少交叉口交通冲突的影响, 可为城市交叉口非机动车交通安全管控提供有益参考。

关键词: 交通工程; 交叉口冲突; 轨迹数据; 非机动车信号灯; 拓展碰撞时间

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

Traffic safety evaluation of left-turning non-motor vehicle signal lights at intersections based on trajectory data

WANG Zhengwu¹, XIE Jingyi¹, WANG Jie¹, XING Lu¹, ZHU Quanjun²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: [Purposes] To quantitatively evaluate the impact of left-turning non-motor vehicle signal lights at urban intersections on traffic safety. [Methods] An evaluation method based on extended time to collision (ETTC) was proposed to assess the safety of left-turning non-motor vehicle signal lights. This study used video software to extract the microscopic vehicle trajectory data to calculate conflict indicators. In view of the existing time to collision (TTC) was not suitable for the evaluation of left-turning non-motor vehicles conflict at intersections, the improved TTC was used for the analysis of non-motor vehicle conflict. The extended time to collision considered

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-10-05; 接受日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52102406, 52102405); 2021年长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJCX2021110)

通信作者: 王杰(1989—)(ORCID: 0000-0001-9589-004X), 男, 副教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail: wangjie@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

the influence of vehicle dimensions and acceleration. The case study was conducted based on video data at 4 typical signalized intersections in Changsha, and used video trajectory tracking software to extract the conflicting trajectory data. **[Findings]** The install of left-turning non-motor vehicle signal lights provided a clear passing time for non-motor vehicles, which can significantly reduce the rate of non-motor vehicles conflict. Non-motor vehicles conflict rate of non-peak time and peak time was reduced by 40.11% and 25.27% respectively. At the end of the straight phase and when the left turn phase was about to light up, the left-turn non-motor vehicles in treatment groups wait in the waiting zone, and the conflict rate is 0; while near a half of non-motor vehicles had illegal left-turn behaviors during this period, leading to amounts of serious conflicts. The treatment effect (TE) of left-turning non-motor vehicle signal lights increases first and then decreased with the increase of non-motor vehicle flow. With the increase of motor vehicle flow, the trend of the treatment effect fluctuation gradually decreased. **[Conclusions]** This study revealed the influence of non-motor vehicle left turn signal on reducing traffic conflicts at intersections. It can provide useful reference for the control of non-motor vehicle traffic safety at signalized intersections.

Key words: traffic engineering; intersection conflict; trajectory data; non-motor vehicle signal light; extended time to collision

Foundation item: Projects (52102406, 52102405) supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China; Project (SJCX2021110) supported by Practical Innovation and Entrepreneurship Enhancement Plan for Professional Degree Graduates of Changsha University of Science & Technology in 2021

Corresponding author: WANG Jie (1989—) (ORCID: 0000-0001-9589-004X), male, associate professor, research interest: transportation planning and management. E-mail: wangjie@csust.edu.cn

0 引言

城市道路交叉口汇集了机动车、非机动车和行人等交通流,这种混合交通特性使之成为交通事故高发地。在交叉口非机动车流中,左转非机动车需要进行加速、减速、寻找可接受间隙等一系列复杂操作,对交叉口安全通行的影响最为明显^[1]。当左转非机动车流量不大时,主要采用非机动车与机动车左转共信号灯方案,易导致左转非机动车与对向左转车抢占交叉口内空间资源,严重影响通行安全。目前,交通管理部门为规范非机动车左转时间,鼓励设置交叉口左转非机动车信号灯,但尚未明确设置条件。虽然已有不少研究关注了交叉口非机动车通行安全^[2-4],但仍缺乏非机动车左转信号灯交通安全效应的研究。

交叉口交通安全评价,通常是基于交通事故统计数据建立交叉口安全性能函数后,利用事前-事后评价^[5]、横断面评价^[6]等方法,针对交叉口交通设计或控制方案进行的。然而,事故统计数据存在局限性:一是在非机动车交通事故数据统计

不完全,问题仍存在^[7]的情况下,短时间内难以获取满足安全评估要求的事故统计量;二是安全性能函数虽然量化了长时间统计交通量、道路设计因素对事故发生的影响,但不能识别短时交通特征与设施设计对车辆微观行为的影响^[8-9]。随着交通监控和图像识别技术的发展,基于视频轨迹数据的交通冲突技术被应用于交通安全评价。视频轨迹数据收集容易且蕴含了丰富的微观信息^[10-11],根据轨迹数据可计算出衡量交通安全的各种事故替代指标^[12-15],这在一定程度上解决了事故统计数据局限性带来的问题。AUTEY等^[16]采用基于视频的自动交通冲突分析方法,评估了交叉口右转渠化设施的安全性,发现右转渠化设施可以显著降低合并、追尾严重程度和冲突频率,设置右转交通岛后平均小时交通冲突数下降了51%,严重性交通冲突数下降了41%。郭延永等^[17]基于交叉口视频数据与随机参数交通冲突模型,探究了直行交通量和右转交通量、渠化岛类型和右转设计要素与交通冲突的关系。以交叉口右转渠化设施为例,SACCHI等^[18]比较分析了基于事故和冲突的安全评价结果,说明了交通冲突用于

交通设施安全评价的可靠性。

目前,基于视频轨迹数据的交通冲突技术多用于机动车,其中碰撞时间(time to collision, TTC) T_{TTC} 是判定机动车交通冲突最常用指标,一般用于计算跟驰车辆的追尾风险或交叉车辆直角碰撞风险^[19],不适用于交叉口无车道约束条件下任意角度碰撞的车辆冲突分析。WARD等^[20]运用基于车辆相对运动的“逼近”技术提出了估计车辆碰撞的新方法(简称“WARD方法”),使其适用于任意角度碰撞的机动车冲突分析;XING等^[21]将该方法应用于收费站机动车换道冲突判别中,但未考虑车辆加速度对冲突判别的影响。因非机动车具有灵活性,其动力性能约束下的运动加速度不可忽略,且非机动车外观尺寸与机动车存在显著差别,故WARD方法仍不适用于交叉口非-机、非-非冲突分析。因此,本文以视频轨迹的交通冲突技术为基础,考虑非机动车尺寸、加速度影响,提出一种衡量交叉口左转非机动车冲突的拓展碰撞时间(extended time to collision, ETTC) T_{ETTC} 指标,并以长沙市4个信号交叉口为例评估交叉口左转非机动车信号灯设置的安全效应。

1 方法

1.1 判定非机动车冲突的拓展碰撞时间指标

碰撞时间 T_{TTC} 是判定冲突风险的常用指标,表示在本车与前车相对速度不变情况下,从当前时刻到本车与前车发生碰撞的时间。碰撞时间指标值越小,则越可能发生交通冲突。为有效判定交叉口非机动车交通冲突,本文考虑非机动车尺寸、加速度影响,改进WARD方法,构建适用于非机动车的拓展碰撞时间 T_{ETTC} 计算方法。图1所示为机动车与非机动车接近时的位置示意图,其中,机动

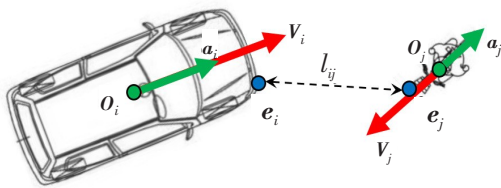


图1 两辆车接近时的位置示意图

Fig. 1 Illustration of two vehicles' positions when they are approaching

车 i 与非机动车 j 分别以速度 V_i 、 V_j 和加速度 a_i 、 a_j 行驶, O_i 、 O_j 分别为质心位置向量。

两车最近点间距离 l_{ij} 的计算式为:

$$l_{ij}^2 = \|e_i - e_j\|^2 = (e_i - e_j)^T (e_i - e_j) \quad (1)$$

$$l_{ij} \dot{l}_{ij} = (e_i - e_j)^T (V_i - V_j) \quad (2)$$

$$\dot{l}_{ij}^2 + l_{ij} \ddot{l}_{ij} = (V_i - V_j)^T (V_i - V_j) + (e_i - e_j)^T (a_i - a_j) \quad (3)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(e_i - e_j)^T (e_i - e_j)} \quad (4)$$

$$\dot{l}_{ij} = \frac{(e_i - e_j)^T (V_i - V_j)}{l_{ij}} \quad (5)$$

$$\ddot{l}_{ij} = \frac{\left[(V_i - V_j)^T (V_i - V_j) + (e_i - e_j)^T (a_i - a_j) \right] - \dot{l}_{ij}^2}{l_{ij}} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: e_i 、 e_j 分别为机动车 i 与非机动车 j 最近点的位置向量; \dot{l}_{ij} 为 l_{ij} 一阶导数,即分离率; \ddot{l}_{ij} 为 l_{ij} 二阶导数。

若分离率 \dot{l}_{ij} 恒定,按标准运动方程式(7)~(8)

求解,可得碰撞时间 T_{TTC_1} ;若 \dot{l}_{ij} 可变,则按标准运动方程式(9)求解,可得式(10)碰撞时间 T_{TTC_2} 。

$$l_{ij} + \dot{l}_{ij} \cdot T_{TTC_1} = 0 \quad (7)$$

$$T_{TTC_1} = -l_{ij} / \dot{l}_{ij} \quad (8)$$

$$l_{ij} + \dot{l}_{ij} \cdot T_{TTC_2} + \frac{1}{2} \ddot{l}_{ij} T_{TTC_2}^2 = 0 \quad (9)$$

$$T_{TTC_2} = \begin{cases} -\frac{l_{ij}}{\dot{l}_{ij}}, & \ddot{l}_{ij} = 0 \\ \frac{\dot{l}_{ij}}{\ddot{l}_{ij}}, & f_{delt} < 0 \\ \min \left(\frac{-\dot{l}_{ij} \pm \sqrt{f_{delt}}}{\ddot{l}_{ij}} \right), & \min \left(\frac{-\dot{l}_{ij} \pm \sqrt{f_{delt}}}{\ddot{l}_{ij}} \right) \geq 0 \\ \max \left(\frac{-\dot{l}_{ij} \pm \sqrt{f_{delt}}}{\ddot{l}_{ij}} \right), & \min \left(\frac{-\dot{l}_{ij} \pm \sqrt{f_{delt}}}{\ddot{l}_{ij}} \right) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(7)~(10)中: T_{TTC_1} 为分离率 \dot{l}_{ij} 不变情况下的碰撞时间; T_{TTC_2} 为分离率 \dot{l}_{ij} 可变情况下的碰撞时间,

f_{delt} 为一元二次方程是否有实数解的判别式。

因视频记录的车辆位置点信息为车辆质心坐标,故计算碰撞时间时,需要将碰撞车辆最近点距离 l_{ij} 转换为两车辆质心间距离 L_{ij} ,很明显 L_{ij} 大于 l_{ij} 。虽然 $D_{l_{ij}} = L_{ij} - l_{ij}$ 随两车碰撞角度的变化而变化,难以精确测量,但 $D_{l_{ij}}$ 可通过式(11)近似计算^[21],则:

$$D_{l_{ij}} \approx (L_i + L_j)/2 \quad (11)$$

$$l_{ij} \approx L_{ij} - D_{l_{ij}} \quad (12)$$

式(11)~(12)中: $D_{l_{ij}}$ 为两车质心间距离与两车最近距离的差值; L_i 、 L_j 分别为车辆 i 、 j 的长度,对于非机动车可取2 m、机动车可取4 m; L_{ij} 为两车质心间距离。由式(12)可知, $\dot{L}_{ij} = \dot{l}_{ij}$, $\ddot{L}_{ij} = \ddot{l}_{ij}$,且用 \mathbf{o}_i 、 \mathbf{o}_j 替换 \mathbf{e}_i 、 \mathbf{e}_j ,则式(4)~(6)可转换为:

$$L_{ij} = \sqrt{(\mathbf{o}_i - \mathbf{o}_j)^T (\mathbf{o}_i - \mathbf{o}_j)} \quad (13)$$

$$\dot{L}_{ij} = \dot{l}_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} (\mathbf{o}_i - \mathbf{o}_j)^T (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \quad (14)$$

$$\ddot{L}_{ij} = \ddot{l}_{ij} =$$

$$\frac{\left[(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)^T (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) + (\mathbf{o}_i - \mathbf{o}_j)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j) - \dot{L}_{ij}^2 \right]}{L_{ij}} \quad (15)$$

则非机动车拓展碰撞时间 T_{ETTC} 如式(16)所示:

$$T_{\text{ETTC}} = \begin{cases} \frac{L_{ij} - D_{l_{ij}}}{\dot{L}_{ij}}, & \ddot{L}_{ij} = 0 \\ \frac{\dot{L}_{ij}}{\ddot{L}_{ij}}, & f_{\text{delt}} < 0 \\ \min \left(\frac{-\dot{L}_{ij} \pm \sqrt{f_{\text{delt}}}}{\ddot{L}_{ij}} \right), & \min \left(\frac{-\dot{L}_{ij} \pm \sqrt{f_{\text{delt}}}}{\ddot{L}_{ij}} \right) \geq 0 \\ \max \left(\frac{-\dot{L}_{ij} \pm \sqrt{f_{\text{delt}}}}{\ddot{L}_{ij}} \right), & \min \left(\frac{-\dot{L}_{ij} \pm \sqrt{f_{\text{delt}}}}{\ddot{L}_{ij}} \right) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: \dot{L}_{ij} 为 L_{ij} 的一阶导数; \ddot{L}_{ij} 为 L_{ij} 的二阶导数。

1.2 交通安全评价效果

在交叉口一定时段 t 内,左转非机动车冲突次数 $N_{\text{ETTC}}(t)$ 计算公式如下:

$$N_{\text{ETTC}}(t) = \sum_{m=1}^n x_m(t) \quad (17)$$

$$x_m(t) = \begin{cases} 0, & T_{\text{ETTC},m} > T_0 \\ 1, & T_{\text{ETTC},m} \leq T_0 \end{cases} \quad m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (18)$$

式(17)~(18)中: n 为时段 t 内通过的左转非机动车数; $T_{\text{ETTC},m}$ 为第 m 辆车的 T_{ETTC} 值; $x_m(t)$ 为时段 t 内第 m 辆车的 $T_{\text{ETTC},m}$ 是否落入冲突时间阈值 T_0 范围的取值,根据AUTEY等^[16]的研究,冲突事件筛选阈值 T_0 可取3.0 s^[16]。

在信号交叉口,左转非机动车冲突率为一个周期内左转非机动车冲突次数除以该周期内非机动车流量,则第 k 个信号周期的左转非机动车冲突率 R_k 为:

$$R_k = \frac{N_{\text{ETTC}}^k}{\omega_k} \quad (19)$$

式中: N_{ETTC}^k 为信号周期 k 的左转非机动车冲突次数; ω_k 为信号周期 k 的非机动车流量。

采用横断面分析方法,通过定量对比分析设置组和对比组的左转非机动车冲突率进行安全效应评估。本文应用设置组的交通冲突率与对比组的比值对冲突率进行比较分析,获取设置左转非机动车信号灯的交叉口安全改善效果(treatment effect, TE),则:

$$\varphi_{\text{OR},s} = \frac{R_{t,s,T}}{R_{t,s,C}} \quad (20)$$

$$\varphi_{\text{TE},s} = \varphi_{\text{OR},s} - 1 \quad (21)$$

式中: $\varphi_{\text{OR},s}$ 为第 s 对设置组冲突率与对比组冲突率的比值; $R_{t,s,T}$ 与 $R_{t,s,C}$ 分别为时间段 t 内设置组T与对比组C左转非机动车冲突率; $\varphi_{\text{TE},s}$ 为第 s 对设置组相对于对比组的改善效果。

若设置组和对比组共 S 对,则综合值 φ_{OR} 为:

$$\varphi_{\text{OR}} = \exp \left(\frac{\sum_{s=1}^S w_s \cdot \lg(\varphi_{\text{OR},s})}{\sum_{s=1}^S w_s} \right) \quad (22)$$

$$w_s = \left(\frac{1}{R_{t,s,T}} + \frac{1}{R_{t,s,C}} \right)^{-1} \quad (23)$$

式中: w_s 为权重;T代表设置组;C代表对比组。

在统计推断中,为检验设置组与对比组的冲突率是否有显著差异。零假设为 $H_0: \varphi_{\text{OR}} = 1$,即设置组与对比组的冲突率没有显著差异;备选假设为 $H_1: \varphi_{\text{OR}} \neq 1$,即设置组与对比组的冲突率有显著差异。检验统计量 z 遵循如下标准正态分布:

$$z = \lg(\varphi_{\text{OR}}) \sqrt{\sum_{s=1}^S w_s} \sim N(0, 1) \quad (24)$$

2 试验数据准备

2.1 试验地点

本研究为评估交叉口左转非机动车信号灯的可行性,采集了湖南省长沙市4个交叉口的交通冲突数据,如表1、图2所示。

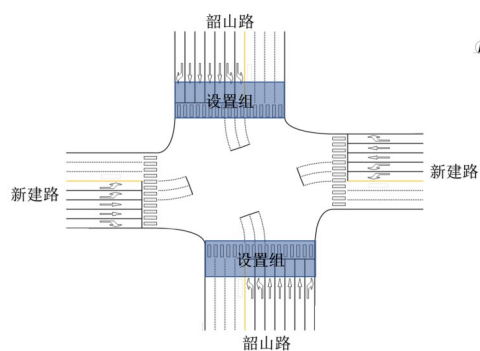
设置两组横向对比试验,其中两个交叉口设置了左转非机动车信号灯(设置组),两个交叉口未设置左转非机动车信号灯(对比组)。设置组与对比组在交通组织、交通设计、交通组成等特征上均类似,满足横断面对比分析条件。

设置组交叉口信号相位方案如表2所示,非机动车信号灯与机动车信号灯同步,具有4个相位。表中实线箭头表示机动车车流,虚线箭头表示非机动车车流。设置组中的非机动车具有明确的通行时段,在非机动车信号灯指示下通过交叉口;而对比组中的非机动车不具有明确的通行时段,非机动车寻找可穿越间隙通过交叉口。

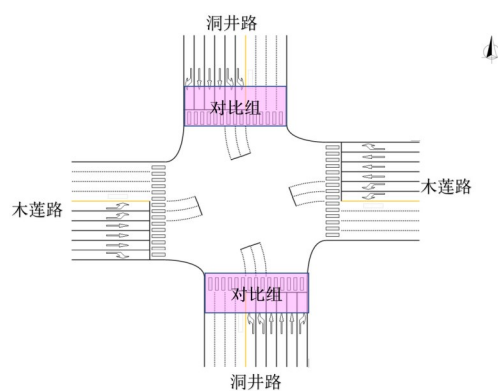
表1 数据采集地点特征

Table 1 Features of the data collection sites

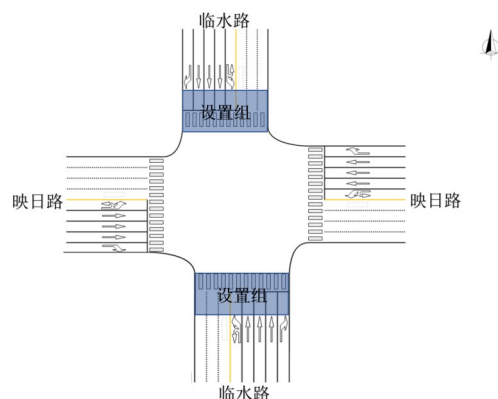
组数	组别	交叉口	进口道方向	是否设置左转非机动车信号灯	左转车道条数
第一组	设置组	新建路-韶山路	南北向	是	2
	对比组	洞井路-木莲路	南北向	否	2
第二组	设置组	映日路-临水路	南北向	是	1
	对比组	人民路-蔡锷路	南北向	否	1



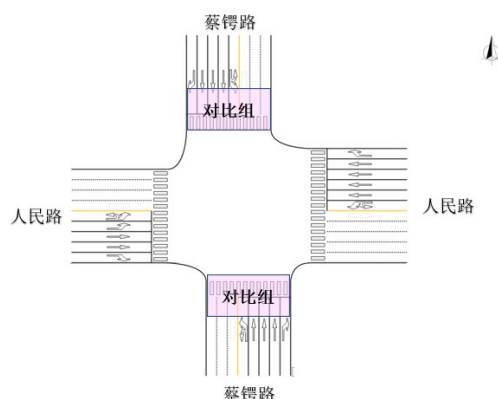
(a) 第一组设置组



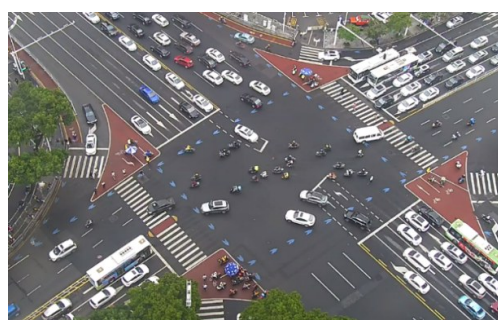
(b) 第一组对比组



(c) 第二组设置组



(d) 第二组对比组



(e) 交叉口渠化情况

图2 数据采集地点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the data collection sites

表2 信号相位方案

Table 2 Traffic flow organization

相位一	相位二	相位三	相位四
南北直行非机动车与机动车同时放行	南北左转非机动车从非机动车待行区驶离;南北左转机动车通行	东西直行非机动车与机动车同时放行	东西左转非机动车从非机动车待行区驶离;东西左转机动车通行

2.2 数据收集

为避免人工观测造成误差,数据采集利用摄像机进行录像,以提取车辆轨迹信息。为保证视频窗口可以覆盖整个交叉口,视频录制时将摄像机架置到高层建筑上。在2021年5月17日的高峰期、平峰期分别同时对4个交叉口进行俯视拍摄。在天气良好、无风条件下高峰、平峰各拍摄约1.5 h的视频,各选择80 min的视频进行处理。根据收集到的交通数据,计算出各交叉口进口每30 s的左转非机动车、左转机动车流量。

交通冲突采集利用自动视频数据分析软件Tracker,通过对运动车辆的识别和追踪,提取车辆的运动轨迹数据,进而计算冲突指标。该软件使用模板匹配来完成对象检测,每帧可以检测到单个像素,并自动记录为轨迹数据。提取数据时,在视频中选定一个质点并划定搜索区域,开启自动跟踪功能,软件就会在视频的每一帧自动跟踪搜索区域内与模板匹配的图像,并记录其轨迹数据。本研究轨迹数据追踪时间间隔为0.12 s(4帧),数据包括:在时刻 t 下车辆 i 的质心向量 $O_r(i)$ 、速度 $V_r(i)$ 、加速度 $a_r(i)$ 。

3 试验结果

本文采用拓展碰撞时间 T_{ETTC} 来判定非机动车交通冲突,记录冲突事件的拓展碰撞时间,指标阈值设定为3 s,即将拓展碰撞时间小于3 s的交通冲突记录到数据库,将拓展碰撞时间大于3 s的交通事件剔除。研究中左转非机动车冲突包括:左转非机动车与对向左转机动车的非-机冲突、左转非机动车与对向左转非机动车的非-非冲突、左转非机动车与同向左转机动车的非-机冲突、左转非机

动车与同向左转非机动车的非-非冲突。对4个信号交叉口左转非机动车冲突的统计结果见表3。

表3 交通冲突与 T_{ETTC} 统计描述Table 3 Statistical description of traffic conflicts and T_{ETTC}

编号	交叉口	视频时长/min	交通冲突数/个	T_{ETTC}/s		
				最大值	最小值	平均值
1	新建路-韶山路	80	554	2.995	0.705	2.279
2	洞井路-木莲路	80	560	2.986	0.257	1.901
3	映日路-临水路	80	493	2.997	0.891	2.386
4	人民路-蔡锷路	80	526	2.984	0.663	2.167

表3统计了设置组与对比组南北直行相位和南北左转相位的左转非机动车冲突。共提取了左转非机动车冲突2 133个,拓展碰撞时间范围为0.257~2.997 s。在4个交叉口中,洞井路-木莲路交叉口交通冲突拓展碰撞时间均值最小,为1.901 s;映日路-临水路交叉口冲突拓展碰撞时间均值最大,为2.386 s。

3.1 非机动车信号灯设置对冲突率影响随信号周期变化特性

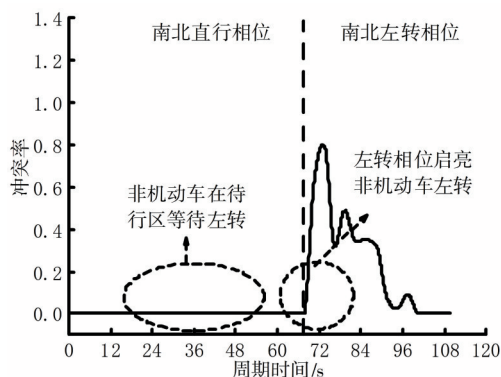
选择第一组的两个交叉口进行对比分析,其中设置组为新建路-韶山路交叉口,对比组为洞井路-木莲路交叉口。

图3与图4分别展示了平峰时段与高峰时段,第一组两个交叉口在南北相位期间内每3 s冲突率的时间变化特性。其中:横轴表示时间,纵轴表示非机动车冲突率,即统计时间内非机动车冲突点数与非机动车流量的比值。

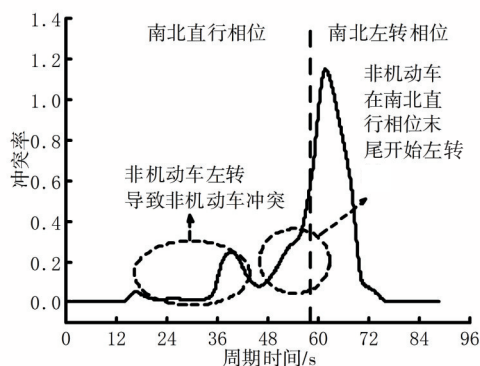
图3和图4中的左区显示了南北直行相位内的左转非机动车冲突率。对于设置组,因为有明确的非机动车通行时段,所以仅1.8%的非机动车在直行相位内进行违规左转;对于对比组,由于未设置非机动车左转信号灯,所以有45.7%的左转非机动车在直行车流间隙中穿越交叉口。

平峰时段(图3),因直行机动车车流间隙大,左转非机动车利用直行机动车车流间隙穿越交叉口的比重大,导致对比组左区的冲突率明显比设置组的高;而高峰时段(图4),因直行机动车流量大导致车流间隙小,无论是在设置组还是对比组,非机动车左转的情况均很少。

从图3(b)、图4(b)中可发现,对于对比组交叉口,在直行相位即将转换为左转相位时,大量非机动车提前左转,出现高的冲突率。这可能是由那些试图在车流间隙切入的侵略性骑手造成的。一旦成功切入,机动车将被迫屈服,其他骑手跟随加入穿越交叉口^[22]。而对于设置组,非机动车按照左转非机动车信号灯的指引,在绿灯亮时与左转机动车同时左转,可以有效消除安全隐患。



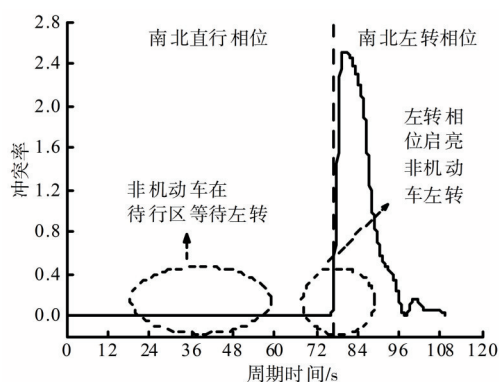
(a) 设置组



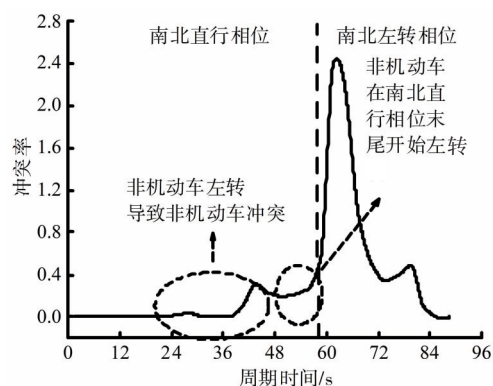
(b) 对比组

图3 平峰时段冲突率随信号周期变化特性

Fig. 3 Characteristics of conflict rate varying with signal period in non-peak time



(a) 设置组



(b) 对比组

图4 高峰时段冲突率随信号周期变化特性

Fig. 4 Characteristics of conflict rate varying with signal period in peak time

在左转相位的第一个3 s内,设置组交叉口的冲突率大于对比组的冲突率,这可能是在非机动车信号灯控制的指引下,大量非机动车集中在绿灯亮起的前3 s通过交叉口。但从第二个3 s起,对比组的冲突率开始大于设置组的冲突率。这表明在南北左转相位期间,设置组在绝大多数时间内具有更低非机动车冲突风险、更高的安全性。

3.2 安全改善效果评估

平峰与高峰期间的设置组与对比组的左转非机动车冲突率见表4。

表4 针对单个设置组与对比组的冲突分析总结

Table 4 Summary of conflict analysis for individual treatment and control sites

时段	组别			每周期 内平均 冲突率	比值 比/%	改善 效果/ %	综合改 善效果/ %
平峰	第一 组	设置 组	新建路- 韶山路	1.85	52.26	47.74	40.11
		对比 组	洞井路- 木莲路	3.54			
	第二 组	设置 组	映日路- 临水路	2.61	66.58	33.42	
		对比 组	人民路- 蔡锷路	3.92			
高峰	第一 组	设置 组	新建路- 韶山路	3.06	81.82	18.18	25.27
		对比 组	洞井路- 木莲路	3.74			
	第二 组	设置 组	映日路- 临水路	2.78	68.14	31.86	
		对比 组	人民路- 蔡锷路	4.08			

由表4可知,设置组的冲突率始终对比组的小,这表明设置左转非机动车信号灯能有效缓解左转非机动车冲突。改善效果在平峰与高峰期间呈现差异性,平峰期间整体呈现出更高的冲突改善效果,这符合实际预期,主要是因为:① 左转非机动车信号灯规范了左转非机动车的左转通行权,能有效阻止非机动车在平峰期间机动车流量较小的情况下左转;② 在没有非机动车信号灯的情况下,平峰期间左转非机动车与直行机动车的接近速度要高得多,这可能会增加碰撞风险的概率。计算设置组和对比组的交通冲突率比 φ_{OR} ,得到设置了非机动车信号灯的交叉口的安全改善效果,即平峰期间整体改善效果为40.11%且 $P<0.05$,表明设置组与对比组的冲突率在统计学上有显著差异,即 $\varphi_{OR} \neq 1$;高峰期间整体改善效果为25.27%($P<0.05$)。综上表明,设置非机动车信号灯可以显著减少左转非机动车的交通冲突。

为明确左转非机动车信号灯设置效果最佳的交通条件,本文比较了不同机动车、非机动车流量

下的左转非-机冲突改善效果,如图5所示。交叉口左转非机动车冲突改善效果随非机动车流量的增大呈先增加后降低趋势,随机动车流量的增大呈逐步波动下降趋势。这与之前的研究结果一致。与高位流量相比,在低位流量和中位流量下,骑手影响交通安全的可能性更大^[22]。

4 结论

本研究提出一种基于拓展碰撞时间指标的左转非机动车信号灯安全效应评估方法,基于实际案例,揭示了非机动车左转信号灯的设置对减少交叉口交通冲突的影响,主要结论如下:

1) 考虑非机动车尺寸、加速度的影响,并采用机动车冲突碰撞时间指标,提出一种衡量交叉口左转非机动车冲突的计算方法,用于非机动车冲突评估。

2) 整体改善效果显示,平峰期间交通冲突率降低了40.11%,高峰期间交通冲突率降低了25.27%,且 $P<0.05$,即设置组与对比组的冲突率在统计学上有显著差异。与高峰期间相比,平峰期间的改善效果更显著。

3) 设置左转非机动车信号灯的改善效果随非机动车流量的增大呈先增加后降低趋势,随机动车流量的增大呈逐步波动下降趋势。

本研究仅凭车辆轨迹数据来计算交通冲突,存在一定的局限性,后续可综合考虑试验观测数据、事故数据等多元数据来改进。此外,充分考虑微观道路因素安全效应的区域异质性特征是本文后续研究的一个方向。

[参考文献]

- [1] 龙科军,张燕,邹志云,等. 基于车辆轨迹的信号交叉口机非冲突判别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 69-74. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.01.011.
- LONG Kejun, ZHANG Yan, ZOU Zhiyun, et al. Vehicle and non-motorized vehicle traffic conflict recognition at signalized intersection based on vehicle trajectory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 69-74. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.01.011.
- [2] 张燕,龙科军,谷健. 信号交叉口机非交通冲突安全

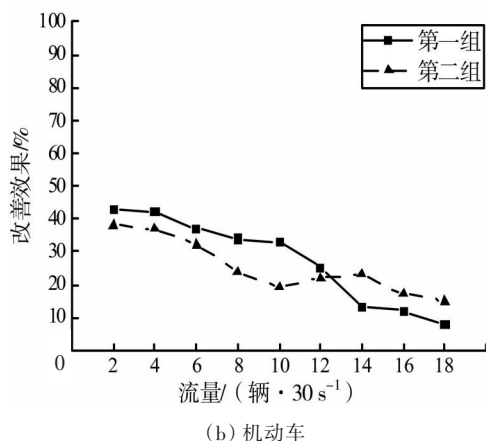
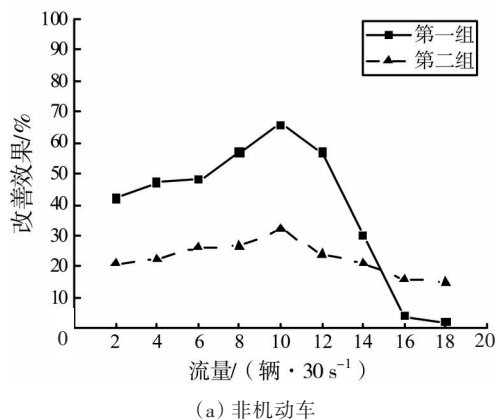


图5 不同流量下的冲突改善效果

Fig. 5 Conflict improvement effect under different traffic flow

- 评估[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 98-106. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.015.
- ZHANG Yan, LONG Kejun, GU Jian. Safety assessment of vehicle-non-motor traffic conflict at signalized intersection[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 98-106. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.015.
- [3] 潘晓东, 陈丽烨. 直行非机动车避让右转车辆轨迹分析[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(4): 56-61. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.04.011.
- PAN Xiaodong, CHEN Liye. The analysis of the track of no turning non-motorized vehicles when avoiding the vehicles turning right[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(4): 56-61. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.04.011.
- [4] HUANG H L, ZHOU H C, WANG J, et al. A multivariate spatial model of crash frequency by transportation modes for urban intersections [J]. Analytic Methods in Accident Research, 2017, 14: 10-21. DOI: 10.1016/j.amar.2017.01.001.
- [5] 郭延永, 刘攀, 徐铖铖, 等. 基于交通冲突模型的信号交叉口右转设施安全分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 139-146. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.11.018.
- GUO Yanyong, LIU Pan, XU Chengcheng, et al. Safety analysis of right-turn facility at signalized intersection using traffic conflict model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11): 139-146. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.11.018.
- [6] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 基于冲突极值模型的非常规信号交叉口安全评价[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 85-92. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.01.008.
- GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Safety evaluation of unconventional signalized intersection based on traffic conflict extreme model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 85-92. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.01.008.
- [7] MARTÍNEZ RUIZ V, JIMÉNEZ MEJÍAS E, AMEZCUA PRIETO C, et al. Contribution of exposure, risk of crash and fatality to explain age and sex related differences in traffic related cyclist mortality rates [J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 76: 152-158. DOI: 10.1016/j.aap.2015.01.008.
- [8] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 基于贝叶斯多元泊松-对数正态分布的交通冲突模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 101-109. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.01.012.
- GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Traffic conflict model based on Bayesian multivariate poisson-lognormal normal distribution [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 101-109. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.01.012.
- [9] 朱顺应, 蒋若曦, 王红, 等. 机动车交通冲突技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 15-33. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.002.
- ZHU Shunying, JIANG Ruoxi, WANG Hong, et al. Review of research on traffic conflict techniques [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 15-33. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.002.
- [10] XING L, HE J, LI Y, et al. Comparison of different models for evaluating vehicle collision risks at upstream diverging area of toll plaza [J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 135: 105343. DOI: 10.1016/j.aap.2019.105343.
- [11] CHEN Q H, GU R F, HUANG H L, et al. Using vehicular trajectory data to explore risky factors and unobserved heterogeneity during lane-changing [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 151: 105871. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105871.
- [12] ST-AUBIN P, SAUNIER N, MIRANDA-MORENO L. Large-scale automated proactive road safety analysis using video data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 363-379. DOI: 10.1016/j.trc.2015.04.007.
- [13] WANG C, XU C C, XIA J X, et al. A combined use of microscopic traffic simulation and extreme value methods for traffic safety evaluation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 281-291. DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.011.
- [14] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 考虑异质性的贝叶斯交通冲突模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 296-303. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.04.034.
- GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Bayesian traffic conflict model accounting for heterogeneity [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 296-303. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.04.034.
- [15] 袁黎, 何娟, 张璇. 基于车流冲突线的无信号交叉口风险分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 172-178. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2019.04.025.
- YUAN Li, HE Juan, ZHANG Xuan. Model for unsignalized intersection risk evaluation based on traffic conflict line theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 172-178. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2019.04.025.
- [16] AUTEY J, SAYED T, ZAKI M H. Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic

- conflict analysis[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 45: 120–130. DOI: 10.1016/j.aap.2011.11.015.
- [17] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 基于交通冲突模型的信号交叉口渠化岛设置方法[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(4): 140–148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.04.015.
- GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Design approach of channelized island based on traffic conflict models at signalized intersection[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(4): 140–148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.04.015.
- [18] SACCHI E, SAYED T, DELEUR P. A comparison of collision-based and conflict-based safety evaluations: the case of right-turn smart channels [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 59: 260–266. DOI: 10.1016/j.aap.2013.06.002.
- [19] SOHEL MAHMUD S M, FERREIRA L, HOQUE M S, et al. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: a review of recent developments and research needs [J]. *IATSS Research*, 2017, 41(4): 153–163. DOI: 10.1016/j.iatssr.2017.02.001.
- [20] WARD J R, AGAMENNONI G, WORRALL S, et al. Extending time to collision for probabilistic reasoning in general traffic scenarios [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 51: 66–82. DOI: 10.1016/j.trc.2014.11.002.
- [21] XING L, HE J, ABDEL-ATY M, et al. Examining traffic conflicts of up stream toll plaza area using vehicles' trajectory data [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 125: 174–187. DOI: 10.1016/j.aap.2019.01.034.
- [22] ZHANG Y Q, WU C X. The effects of sunshields on red light running behavior of cyclists and electric bike riders[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 52: 210–218. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.032.

(责任编辑:周鹏展;校对:刘平;英文编辑:刘至真)

(上接第163页)

- 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.023.
- LIU Guangping, ZHAI Runping. Approach delay model of signalized intersection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(4): 609–612. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.023.
- [22] 冯树民, 裴玉龙. 行人过街延误研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(4): 613–616. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.024.
- FENG Shumin, PEI Yulong. Research on delay of pedestrian crossing [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(4): 613–616. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.024.

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)