

文章编号: 1674-599X(2021)03-0098-09

信号交叉口机非交通冲突安全评估

张燕¹, 龙科军^{1,2}, 谷健^{1,2}

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
2.智能道路与车路协同湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对机非冲突多角度、强随机性等特征, 建立了机动车“安全制动区”模型, 采集机动车和非机动车轨迹, 提出了基于安全制动区的机非冲突判别方法。基于距离碰撞时间和冲突速度两参数, 提出一种新的机非冲突严重程度分析方法。以长沙市4个信号控制交叉口为例, 采集机非冲突和相关交通运行参数, 探讨了机非冲突次数和交叉口安全风险程度的影响因素。研究表明: 基于安全制动区的机非冲突判别方法能适应中国城市交叉口混合交通流特征, 机动车和非机动车流量是影响机非冲突数量的主要因素, 交叉口面积、车道数、交通流量是影响交叉口安全风险程度的主要因素。

关键词: 机非冲突; 冲突严重程度; 距离碰撞时间; 冲突速度; 车流轨迹

中图分类号: U491.2⁺65 文献标志码: A
DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.015

Safety assessment of vehicle–non–motor traffic conflict at signalized intersection

ZHANG Yan¹, LONG Ke-jun^{1,2}, GU Jian^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Key Laboratory of Smart Roadway and Cooperative Vehicle Infrastructure System, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: By accounting the characteristics of vehicle-nonmotor conflict, including multi-angle and strong randomness, the motor vehicles model of safe braking zone was established. The trajectories of motor vehicles and non-motor vehicles was collected and analyzed, the identifying method for the vehicle-nonmotor conflict was proposed based on the safe braking zone. Consequently, the new analytical method of severity of vehicle-non-motor conflict was proposed using the time to collision and conflict speed. Taking the four signal-controlled intersections in Changsha as examples, the number of vehicle-non-motor conflict and related traffic operating parameters were collected, and key factors for the number of vehicle-non-motor conflict and the safety risk of the intersection were investigated. The results show that the method based on safe braking zone can adapt to the characteristics of mixed traffic flow of urban intersections in China. The number of motor vehicles and the number of non-motor vehicles were recognized as the main factors of the number of vehicle-non-motor conflict. Whereas intersection area, number of lanes and traffic flow were the main factors that significantly affect the degree of safety risk of intersections.

Key words: vehicle-non-motor conflict; conflict severity; time to collision; collision speed; vehicle trajectory

中国城市道路交叉口汇集了机动车、非机动车和行人等交通流, 这种混合交通特性严重影响

收稿日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51678076); 国家重点研发计划(2018YFB1600905); 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2171)湖南省研究生科研创新项目(CX2019667)

作者简介: 张燕(1993—), 女, 长沙理工大学硕士生。

到交通运行的安全与效率^[1]。非机动车具有运行轨迹随机多变、车身稳定性差、易受伤害等特点。机动车与非机动车冲突和车-车冲突相比较, 其具有不确定、难评估、后果不对等的特征。目前, 国内外学者在车-车冲突方面的研究已比较成熟, 但在机动车与非机动车冲突的研究中未充分考虑非机动车运行特征及机非冲突特征等。

车-车冲突大多基于机动车的刹车、转向和减速等行为来判别^[2-3], 如果冲突双方为避免碰撞, 导致速度或运动趋势发生改变, 则被判定为一次冲突。在冲突严重程度评估方面, 常见的车-车冲突严重程度评估指标有距离碰撞时间(time to collision, 简称为TTC)、后侵入时间(post encroachment time, 简称为PET)、车头时距(time headway, 简称为TH)等^[4-5], 由于机非冲突与车-车冲突有显著的差别, 已有的车-车冲突分析模型无法满足机非冲突的研究。实际的交叉口内, 识别非机动车的刹车和减速行为极其困难, 其转向行为极具随机性, 传统的车-车冲突判别方法难以准确统计机非冲突次数。同时, 车-车冲突的严重度评估指标也无法体现机非冲突多角度、后果不对等的特征。

为了准确评估机动车与非机动车的冲突, 张开冉等人^[6]建立了交叉口冲突回归模型, 提出了改进散点化方法对交叉口进行安全评价。袁黎等人^[7]提出交通场概念, 基于场势能得到冲突严重性计算公式, 并对安全程度进行了界定。郭伟伟等人^[8]提出临界安全区域判别冲突, 并建立了冲突严重程度判别函数。王耀东等人^[9]以冲突时间差小于0.6 s作为机非冲突严重程度判别指标。王力劭等人^[10]通过分析机动车和非机动车位置、速度、角度等参数, 建立了基于定量判别的机非冲突数学模型。王玉全等人^[11]采用接受间隙方法, 分析了左转非机动车对直行机动车的影响。徐良杰等人^[12-13]应用摄影测量原理实时获取机动车、非机动车的坐标, 将机动车与非机动车重叠区域定义为冲突区域, 建立了机动车与非机动车冲突概率模型。沈家军等人^[14]基于非机动车避让机动车的轨迹, 以骑行者性别、年龄和车辆类型为研究对象, 分析避让行为影响因素。

现有机动车与非机动车冲突分析模型均在车-车冲突模型上改进, 缺少对非机动车运行特

征的描述和机动车与非机动车冲突原理的揭示。因此, 本研究基于交叉口内非机动车运行特征与机非冲突特征, 以“安全制动区”表征机动车冲突影响范围, 若其他机动车或非机动车进入该范围, 则判定为一次冲突, 以此评估信号交叉口左转绿灯相位期间的机非冲突。同时, 结合TTC和冲突速度2个参数, 提出一种机非冲突严重程度分析方法, 即: 机非冲突严重程度描述为冲突发生时间(TTC)和碰撞后果综合作用的结果。

1 机动车与非机动车冲突特征

1.1 机非冲突定义

在道路空间内机动车和非机动车相互接近, 其中, 一方或多方感知到潜在交通安全风险的存在, 为避免发生碰撞, 机动车或非机动车通过制动、减速、转向等措施, 改变自己的交通行为的交通事件。

1.2 非机动车特征

由于非机动车独特的构造特征, 具有稳定性差、转向灵活、运行轨迹随机多变等特征。机动车则相反, 运行稳定、运行轨迹相对确定且可预测性较强。在交叉口内, 非机动车散布于机动车四周, 与机动车冲突呈现多角度、多方向等特征。非机动车的体积、重量、稳定性和安全性与机动车的有明显差异。机非冲突中, 非机动车骑手作为弱势交通群体, 发生事故后双方受伤程度不对等, 非机动车驾驶员比机动车驾驶员受到的伤害更严重。

1.3 机非冲突特征

根据机非冲突定义, 以避险行为为机非冲突判别依据, 选择长沙市4个典型信号交叉口采集机非冲突数据, 见表1。

由于4个信号交叉口都是城区典型四相位控制交叉口, 右转车辆没有信号控制, 机动车与非机动车冲突主要发生在右转与左转相位期间, 因此, 主要采集右转与左转机动车与非机动车冲突数据, 分析其冲突特征。机动车与非机动车冲突的特征主要包括机动车和非机动车的冲突速度、冲突角度、冲突距离和非机动车位置。冲突速度为冲突发生时机动车与非机动车的瞬时速度; 冲突角度为机动车行驶方向与非机动车行驶方向所

成的夹角；冲突角度可以分为：正向冲突、横向冲突和追尾冲突 3 种；机非冲突距离为冲突发生时机动车和非机动车之间的距离；非机动车位置是发生机非冲突时，非机动车相对机动车的位置。

表1 信号交叉口特征

Table 1 Characteristics of signalized intersections

对象	面积/m ²	左转进口道数	出口车道数	绿灯时间/s	渠化情况	右转专用相位	中央分隔带类型	右转让行标志	相位相序
韶山南路-新建路	610	2 车道	2 车道	38	软渠化	无	隔离栅	无	四
芙蓉路-营盘路	510	3 车道	2 车道	30	软渠化	无	隔离栅	无	四
人民中路-蔡锷南路	720	1 车道	1 车道	35	软渠化	无	隔离栅	无	四
人民中路-芙蓉路	500	2 车道	1 车道	25	软渠化	无	隔离栅	无	四

为定量分析机动车在平面交叉口与非机动车发生冲突时交通参与者的躲避行为和机非冲突特征，采集长沙市城区 4 个信号交叉口视频，共提取 210 组机非冲突特征数据，对数据进行统计分析，结果表明：①4 个信号交叉口机非冲突特征基本一致；②机动车减速是机非冲突发生时采取最多的躲避行为；③右转机非冲突以追尾冲突和横向冲突为主，左转机非冲突以追尾冲突为主；④当非机动车位于机动车前方时，机非冲突距离较大，当非机动车位于机动车后方和侧方时，机非冲突距离偏小，机动车和非机动车运行速度平均值分别为 3.0 m/s 和 3.2 m/s，见表 2~4。

表2 躲避行为统计

Table 2 Statistical of avoidance behavior

信号交叉口	机动车减速/%	非机动车减速/%	机动车转向/%	非机动车转向/%	冲突次数
韶山南路-新建路	66.7	30.0	1.0	2.3	72
芙蓉路-营盘路	62.1	29.3	1.5	7.1	42
人民中路-蔡锷南路	58.0	35.4	2.0	4.6	36
人民中路-芙蓉路	59.6	30.8	1.0	8.6	60

表3 冲突角度统计

Table 3 Statistical of conflict angle

信号交叉口	右转机非冲突		左转机非冲突		
	追尾冲突	横向冲突	追尾冲突	横向冲突	正向冲突
韶山南路-新建路	35	25	20	15	5
芙蓉路-营盘路	40	15	30	10	5
人民中路-蔡锷南路	34	21	32	12	1
人民中路-芙蓉路	33	20	35	10	2

表4 冲突距离统计

Table 4 Statistical of conflict distance

信号交叉口	右转机非冲突			左转机非冲突		
	前方	后方	侧方	前方	后方	侧方
韶山南路-新建路	3.2	1.5	1.5	3.0	1.9	1.9
芙蓉路-营盘路	3.0	1.5	1.5	3.1	2.0	1.9
人民中路-蔡锷南路	3.1	1.6	1.5	3.1	1.9	1.9
人民中路-芙蓉路	3.2	1.6	1.5	3.0	2.0	2.0

2 机非冲突判别方法

机动车与非机动车冲突特征分析表明：当交叉口发生机非冲突时，车辆减速为机非冲突发生时的主要避险措施；冲突发生时，非机动车位于

机动车不同位置时，两车距离不同，但在一定范围内。减速行为判别冲突时，主要以刹车指示灯作为判别依据，但非机动车减速行为难以判别。因此，本研究提出了“安全制动区”概念，即考虑机动车周围存在一个安全制动区域，其他机动车或非机动车一旦进入该区域，机动车驾驶员压

力增加,从而被迫采取避险措施,此时认定为一次机动车与非动车冲突。应用冲突距离判别法,建立机动车与非机动车冲突判别模型。

2.1 机动车安全制动区模型

交叉口内,非机动车往往结队通行,且其运行轨迹随机多变,行车的意图和趋势无法及时、准确识别。为了简化判别机非冲突,将非机动车看作静止的实体,机动车安全制动区看似成圆,安全制动区半径为 R 的组成,如图1所示。其中, I 为机动车; II 为非机动车; D 为当非机动车位于机动车行驶方向正前方A点时,机动车为避免发生碰撞所需要的最大安全制动距离。为了保证安全,安全制动区半径 R 以最大安全制动距离、非机动车长度和机动车对角线长度为指标进行建模。当机动车和非机动车中心连线长度小于安全制动区半径时,机动车与非机动车冲突发生。其中,车辆制动距离 D 为:

$$D = 0.21v_1 + 0.07v_1^2. \quad (1)$$

安全制动区半径 R :

$$R = D + \frac{1}{2}(l_1 + \sqrt{l_2^2 + d^2}). \quad (2)$$

式中: v_1 为机动车瞬时速度; l_1 为非机动车长度; l_2 为机动车长度; d 为机动车宽度。

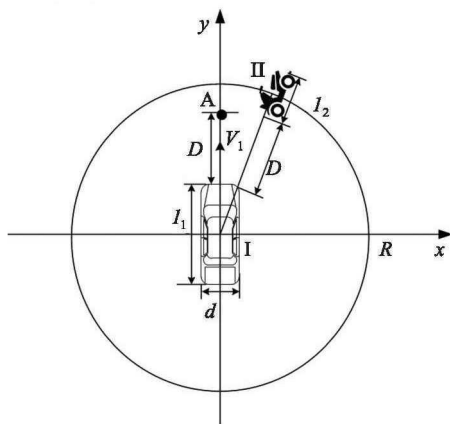


图1 安全制动区域

Fig. 1 Safety braking area

2.2 基于安全制动区的机非冲突判别

机动车与非机动车冲突判别以安全制动区为判别指标,当机动车与非机动车距离小于安全制动距离时,认为发生了机非冲突。判别机非冲突需要得到机动车与非机动车之间的距离,为了准确计算二者之间的距离,对信号交叉口视频进行处理,根据交叉口的几何特征,选定某2条相交的

人行横道线作为交叉口的 x 轴和 y 轴,对交叉口进行网格绘制,并将绘制好的网格加载到视频播放软件上,如图2所示。其中,每个正方形网格长度为1.5 m,根据建立的整个交叉口的坐标体系,针对运行视频测量机动车与非机动车中心的距离,如果机动车与非机动车中心距离小于安全制动区半径即认为发生一次机非冲突。



图2 交叉口网格视频

Fig. 2 Intersection grid video

为了准确测量两车之间的距离,对该视频进行逐帧播放,以1 s为时间间隔,对视频进行动态图片采集,根据机动车与非机动车冲突调查发现,当车辆平均速度为3 m/s,当两车发生机非冲突时,两车之间的实际距离小于3 m,此时机动车或非机动车如果采取有效措施,就可以避免冲突继续发生。因此,本研究以1 s为时间间隔采集冲突数据,认为非机动车进入安全制动区后,在1 s的时间内,有充分时间采取措施离开安全制动区,否则将其视为发生第二次冲突。

3 机非冲突严重程度评估

严重程度由观测人员对交通冲突事件可能造成的后果严重性进行判断。目前,常用的交通冲突严重程度判别方法有时间距离法、空间距离法、能量判别法和速度法^[15-16]。这些传统的冲突度量指标不仅存在各自的局限性,而且对机非冲突不对等特征也无法做出正确评估。传统的冲突度量指标只能衡量冲突严重程度的一方面,即交通冲突风险严重性或发生事故的可能性,不能对潜在碰撞可能造成的后果进行评估。本研究基于距离碰撞时间(TTC)和冲突速度2个参数,提出一种机动车与非机动车冲突严重程度的评估方法,即冲突严重程度是冲突发生概率与碰撞后果综合作用的结果。

3.1 距离碰撞时间

距离碰撞时间 (TTC) 是指位于碰撞轨迹上的车辆, 如果保持当前轨迹与速度行驶, 到达冲突点的时间。当时间满足要求时, 即认为发生了冲突。冲突距离示意图如图3所示, 以非机动车质点 O 为坐标原点, 建立直角坐标系。其中, 非机动车的瞬时速度为 v_2 , 沿 x 轴正方向运动, 机动车的瞬时速度为 v_1 , 行驶方向与非机动车的行驶方向所成角度为 θ , 机动车车头至冲突点的距离为 d_1 , 机动车长度为 l_2 , 非机动车至冲突点的距离为 d_2 。假设两个交通实体在运行期间不采取任何措施, 则会在 x 轴发生碰撞, 距离碰撞点的时间为 TTC, 则 TTC 表达式如下:

$$TTC = \frac{d_2}{v_2}, \frac{d_1}{v_1} \leq \frac{d_2}{v_2} \leq \frac{d_1 + l_2}{v_1} \quad (3)$$

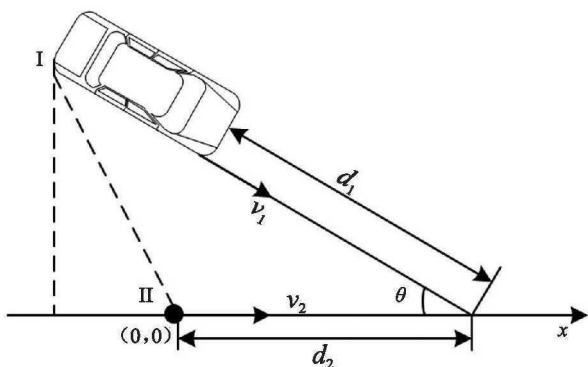


图3 冲突距离示意

Fig.3 Diagram of conflict distance

机非冲突与车-车冲突差异性显著, 机非冲突 TTC 的临界值不同于车-车冲突的, 因此, 需要对机非冲突严重程度指标 TTC 进行界定。观测信号交叉口的视频, 基于观测者对冲突严重性的判断, 初步界定冲突所属类别 (一般冲突或严重冲突), 获得冲突距离和冲突速度, 从而导出 TTC, 界定一般冲突和严重冲突的分界值。机非冲突的判别方法是观测交通参与者是否采取减速、刹车或转向措施, 当机动车和非机动车在交叉口因躲避潜在危险采取转向、减速或刹车措施时, 即认为发生机非冲突。由于观测时车辆的瞬时速度难以直接获得, 因此, 冲突速度采用平均车速代替, 冲突距离是冲突发生时交通实体距假想碰撞点的距离。将得到的 TTC 值以 0.1 s 的分组方法进行分组, 计算每组数据的累积频率, 结果如图4所示。

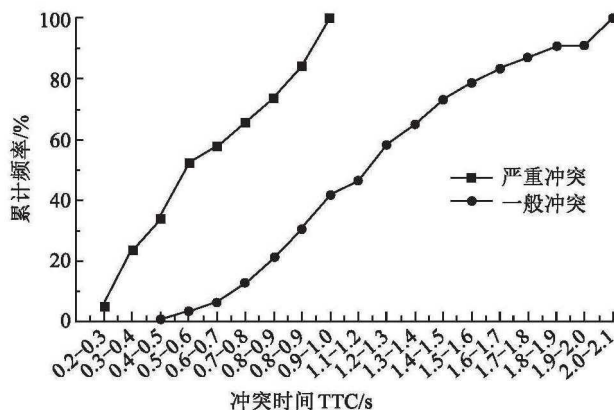


图4 一般冲突和严重冲突在不同 TTC 时段内累积频率曲线

Fig. 4 Cumulative frequency curve of general conflict and serious conflict in different TTC periods

在图4中, 选定 85% 位累积频率对应的 TTC 值作为一般冲突的下界。从图4中可以看出, 出临界值为 1.7 s~1.8 s, 考虑到机非冲突安全性, 本研究选择 1.8 s 作为机动车与非动车冲突的判别指标。同理, 选定 85% 位累积频率对应的 TTC 值作为严重冲突的下界, 从图4中还可以看出, TTC 值为 0.9 s~1 s, 本研究选择 1 s 作为机动车与非动车冲突严重性的下界。因此, 机动车与非动车冲突的界定标准为: $1.0 \text{ s} < TTC \leq 1.8 \text{ s}$ 为一般冲突, $0 \leq TTC \leq 1.0 \text{ s}$ 为严重冲突, 当 $TTC > 1.8 \text{ s}$ 不构成冲突。

3.2 冲突当量速度

冲突当量速度是道路使用者在规避行动开始的前一刻采取规避行动的行驶速度, 如果机动车与非机动车以当前状态行驶, 会在冲突点发生碰撞, 冲突速度越大, 则冲突越严重。机动车的速度与非机动车的相同时, 对冲突有减弱作用, 相反时具有增强作用, 定义冲突速度 v 为:

$$v = \sqrt{(v_1 \cos \theta - v_2)^2 + (v_1 \sin \theta)^2} \quad (4)$$

3.3 冲突严重程度指标

TTC 与冲突速度具有不同的量纲, 通过归一化处理将两者转换为无量纲, 建立机非冲突严重程度模型。距离碰撞时间的临界值 T 为 1.8 s, 当 $TTC > T$ 时, 认为没有冲突发生, 将这组数据剔除不予考虑; 当 $TTC < T$ 时, 机非冲突发生, 冲突严重程度随着 TTC 的减小而增大。将冲突严重程度判别的冲突时间指标设为 φ 。

$$\varphi = 1 - \frac{TTC}{T} \tag{5}$$

φ 取值范围为 (0,1), 且 TTC 越小, φ 越大, 即发生冲突的概率越大。

《电动自行车通用技术条件》(GB 17761-1999) 规定电动自行车的最高车速不大于 20 km/h, 交通法规定机动车十字路口左转限速为 30 km/h, 机非冲突的最高速度 v_0 为对向碰撞速度 50 km/h。当非机动车和机动车超过限速值时, 将其剔除不予考虑。因此, 将冲突速度的判别指标 χ 设为:

$$\chi = \frac{v}{v_0} \tag{6}$$

车辆在规定限速下运行时, χ 取值范围为 (0, 1), 且速度 v 越大 χ 就越大, 即发生冲突时, 非机动车危险程度随着瞬时速度的增大而增大。

由于发生冲突的概率和碰撞后果对冲突严重程度的影响不同, 因此将 TTC 和冲突速度的权重设为 η 、 μ , 从而建立冲突严重程度判别模型为:

$$\lambda = \eta\varphi + \mu\chi = \eta\left(1 - \frac{TTC}{T}\right) + \mu\frac{\sqrt{(v_1 \cos \theta - v_2)^2 + (v_1 \sin \theta)^2}}{v_0} \tag{7}$$

式中: λ 取值范围为 (0, 1)。

3.4 冲突严重程度分析

采集长沙市 4 个中心城区交叉口的交通运行数据, 基于机非冲突判别方法和严重程度模型得到机非冲突严重程度数据, 设定 TTC、冲突速度对冲突严重程度的影响权重分别为 $\eta=0.5$, $\mu=0.5$, 本次共采集 399 组左转机非冲突严重程度数据, 将冲突严重程度指标 λ 按照 0.1 的分组方法进行分组, 计算每组数据的频率, 结果如图 5 所示。

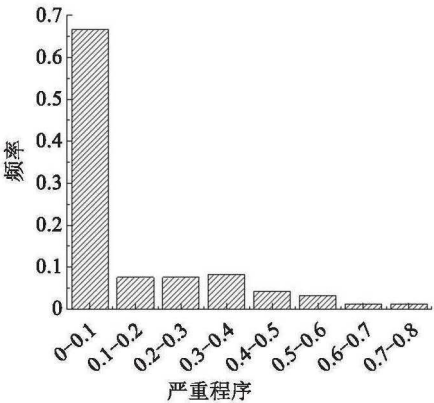


图5 冲突严重程度的累积频率分布

Fig. 5 Cumulative frequency distribution of serious conflicts

从图 5 中可以看出, 机非冲突严重性主要分布在 0~0.1, 表明信号交叉口发生机非冲突时, 冲突严重程度很小; 冲突严重程度在 0.1~0.6 呈均匀分布, 发生概率较小; 冲突严重程度最大为 0.8, 即发生机非冲突时, 有很大可能发生碰撞, 且碰撞后果严重性较大。

4 机非冲突影响因素分析

4.1 机非冲突次数影响因素

以长沙市典型四相位信号交叉口为例, 分析某进口道机非冲突次数的影响因素, 通过对采集到的交叉口交通运行数据分析可知, 左转机动车数量、非机动车数量、对向非机动车数量、交叉口几何特征对机非冲突次数产生影响。

4.1.1 相关性分析

对韶山南路-新建路交叉口非机动车数量、对向非机动车数量、机动车数量、当量交通量和机非冲突次数进行统计。采集交叉口绿灯开启前 15 s 的机动车与非机动车各 25 组数据, 利用 SPSS 软件进行相关性分析, 结果见表 5。由表 5 可知, 非机动车数量与机非冲突次数的相关系数为 0.842, 表明其显著性相关; 当量交通量为左转机动车数量与左转非机动车数量折合为当量小汽车量的和, 与机非冲突次数的相关系数为 0.892, 显著性相关, 对向非机动车数量、非机动车数量与冲突次数相关性分别为 0.573、0.505, 相关性较差。

表5 机非冲突次数相关性分析表

Table 5 Correlation analysis of the number of vehicle-non-motor conflict

研究对象	相关系数	显著性
机非冲突数量-机动车量	0.505	0.010
机非冲突数量-非机动车量	0.842	0.000
机非冲突数量-非机动车量	0.573	0.003
机非冲突数量-当量交通量	0.892	0.001

4.1.2 多元回归分析

采用 K-S 检验机非冲突分布, 结果表明: 渐进显著性 p 值为 0.574, 机非冲突服从正态分布。以左转非机动车数量、对向非机动车数量与机动车数量中 2 个或 3 个变量为解释变量, 以机非冲突次数为被解释变量进行多元线性回归分析。结果表明: 左转非机动车数量、机动车数量与机非冲突

次数的多元线性回归模型判定系数最大，为0.806，拟合优度最好。因此，可以由左转非机动车和机动车的数量预测机非冲突次数，其多元线性回归分析函数为：

$$w = 1.527x + 2.738y - 7.525。$$

(8)

式中： x 为非机动车数量； y 为机动车数量； w 为冲突次数。

4.2 机非冲突安全风险影响因素

目前，国内外交通冲突安全评价主要以冲突次数和冲突率为评价指标，这种评估方法没有考虑冲突严重程度对安全风险的影响。因此，本研究考虑冲突次数与冲突严重程度对交叉口安全风险的影响，建立基于机非冲突的交叉口安全风险评估模型。

安全风险程度指标 R 为：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\alpha}。$$

(9)

式中： λ_i 为左转相位第 i 个机非冲突的冲突严重程度； n 为目标地点左转相位周期内发生的机非冲突次数； α 为目标地点左转相位周期内机动车和非机动车的当量交通量。

以长沙市城区4个典型信号交叉口为例，分析冲突次数与安全风险程度的影响因素，考虑交叉口几何特征、信号控制与车辆数对机非冲突的影响，采集信号交叉口高峰时期数据，得到平均每周期左转相位交叉口的机非冲突次数、安全风险程度与车辆数等参数，统计结果见表6。

表 6 交叉口安全风险情况对比表

Table 6 Comparison of safety risks at intersections

信号交叉口	面积/m ²	左转进口道数	出口车道数	机动车数量/辆	非机动车数量/辆	冲突次数	安全风险程度	交叉口特征
韶山南路-新建路	610	2 车道	2 车道	25.0	20.50	33.75	0.184 8	非机动车绿灯初期成群驶过，交叉口面积小，车辆多
芙蓉路-营盘路	510	3 车道	2 车道	54.5	11.50	26.5	0.046 9	机动车辆多，非机动车数量少、非机动车随机到达
人民中路-蔡锷南路	720	1 车道	1 车道	12.0	17.25	8.0	0.028 4	非机动车较多、机动车少、交叉口面积大、运行随意
人民中路-芙蓉路	500	2 车道	1 车道	20.5	24.75	31.0	0.074 0	交叉口面积小、某进口非机动车初始时刻位于机动车前

由表6可知，机非冲突次数与非机动车数量和机动车数量有关，冲突次数随非机动车与机动车数量增大而增多；交叉口面积、车道数、机动车数量、非机动车数量与交叉口特征是交叉口左转相位期间安全风险程度的综合影响因素。韶山南路-新建路面积小、车道数多、机动车和非机动车数量较多，绿灯初期非机动车成群通过，左转机非冲突次数多且安全风险大；人民中路-蔡锷南路面积大、左转车道数少、机动车数量少，非机动车在交叉口运行轨迹随机多变，机非冲突次数少且安全风险小；芙蓉路-营盘路左转车道多、交叉口面积小，机动车数量大，机非冲突次数多，但非机动车到达呈随机性，安全风险较低；人民中路-芙蓉路绿灯初期非机动车抢占机动车道，导致机动车无法通行，虽然非机动车与机动车冲突较多，但是机动车绿灯初期处于静止状态，冲突严重程度低，安全风险小。因人民中路-蔡锷南路外

的交叉口冲突次数较多，安全风险较大，所以需要进行交通规划以减少安全风险，提高运行效率。

5 结论

本研究提出了机非冲突判别方法与冲突严重程度评估方法。考虑到冲突严重程度对安全风险的影响，以机非冲突次数与冲突严重程度作为判别交叉口安全风险的综合影响参数，建立基于机非冲突的交叉口安全风险评估模型。对比长沙市城区4个典型交叉口，结果表明：非机动车数量与机动车数量是机非冲突的主要影响因素；交叉口面积、左转车道数、机动车数量、非机动车数量及运行方式对安全风险程度产生影响。引入“安全制动区”判定机非冲突，是将非机动车看作静止的实体，但非机动车是有速度和方向的，这在一定程度上影响模型精度。同时，参与试验的交

叉口人工测量耗时大,有待研究新方法检测机非冲突。

参考文献(References):

- [1] 景春光,王殿海.典型交叉口混合交通冲突分析与处理方法[J].土木工程学报,2004,37(6):97-100.(JING Chun-guang, WANG Dian-hai. Analysis and dealing method to conflict of mixed traffic at typical intersection [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 97-100. (in Chinese))
- [2] 成卫.城市交通冲突技术理论与应用[M].北京:科学出版社,2006.(CHENG Wei. Theory and application of urban traffic conflict technology[M]. Beijing: Science Press, 2006.(in Chinese))
- [3] 卢川,项乔君,张国强,等.公路平交口交通冲突严重性的判定[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(5):683-686.(LU Chuan, XIANG Qiao-jun, ZHANG Guo-qiang, et al. Determination of the severity of traffic conflict at highway intersections[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(5): 683-686.(in Chinese))
- [4] Mahmud S M S, 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.
- [5] 周嗣恩,李克平,孙剑,等.道路交叉口冲突仿真分析[J].中国安全科学学报,2009,19(5):32-37,179.(Zhou Si'en, Li Keping, Sun Jian, et al. Traffic conflict simulation analysis for urban road intersection[J]. China Safety Science Journal: CSSJ, 2009, 19(5): 32-37,179.(in Chinese))
- [6] 张开冉,邱谦谦.平面交叉口电动自行车交通冲突模型研究[J].安全与环境学报,2017,17(2):422-425.(ZHANG Kai-ran, QIU Qian-qian. Innovative traffic jam-dissolving model for the motor-bicycles in the cross-road sections[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 422-425.(in Chinese))
- [7] 袁黎,张璇,韩敏.基于交通场的无信号交叉口交通冲突严重性分析[J].公路工程,2015,40(6):55-58.(YUAN Li, ZHANG Xuan, HAN Min. No signalized intersection analysis of traffic conflict severity based on traffic field[J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 55-58. (in Chinese))
- [8] 郭伟伟,曲昭伟,王殿海.交通冲突判别模型[J].吉林大学学报:工学版,2011,41(1):35-40.(GUO Wei-wei, QU Zhao-wei, WANG Dian-hai. Traffic conflict discrimination model[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(1): 35-40. (in Chinese))
- [9] 王耀东,陈雨人.考虑驾驶员选择通过行为的机非严重冲突判别[J].交通信息与安全,2015,33(4):61-68.(WANG Yao-dong, CHEN Yu-ren. A method of identifying serious conflicts of motor and non-motor vehicles during passing maneuvers[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(4): 61-68.(in Chinese))
- [10] 王力劭,毛保华,陈绍宽,等.基于冲突点检测的城市交叉口机非混合流连续仿真模型的实现[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(1):45-53.(WANG Li-shao, MAO Bao-hua, CHEN Shao-kuan, et al. The realization of continuous simulation-based conflict-point detection model for heterogeneous mixed traffic flows in an urban intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(1): 45-53.(in Chinese))
- [11] 王玉全,邢芳,郭伟伟.信号交叉口混合交通冲突研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):47-51.(WANG Yu-quan, XING Fang, GUO Wei-wei. Research on mixed traffic conflict at signalized intersection[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(6): 47-51.(in Chinese))
- [12] 徐良杰,王炜.信号交叉口左转非机动车影响分析[J].中国公路学报,2006,19(1):89-92.(XU Liang-jie, WANG Wei. Analysis of influence of left-turn non-motors in signalized intersection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 89-92.(in Chinese))
- [13] 沈家军,王炜,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 Jia-jun, WANG Wei, CHEN Xue-wu. 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.(in Chinese))
- [14] 沈家军,王炜.基于摄影测量原理的道路交叉口机非冲突区域界定[J].扬州大学学报:自然科学版,2010,13(1):75-78.(SHEN Jia-jun, WANG Wei. Study on the motor and non-motor mixed traffic conflict zone of urban intersections based on photogrammetry[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2010, 13

- (1): 75-78.(in Chinese))
- [15] 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. (PAN Xiao-dong, CHEN Li-ye. 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.(in Chinese))
- [16] 项乔君, 陆键, 卢川. 道路交通冲突分析技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (XIANG Qiao-jun, LU Jian, LU Chuan. Analysis technology and application of road traffic conflict[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese))
-
- (上接第84页)
- [J]. 工程力学, 2013, 30(8): 205-211. (ZHANG Yuan-hai, LIN Li-xia. Initial parameter method for analyzing shear lag effect of thin-walled box girders[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 205-211. (in Chinese))
- [9] 曹操, 李传习, 刘永明. 小半径曲线连续梁桥地震反应分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(2): 64-70. (CAO Cao, LI Chuan-xi, LIU Yong-ming. Seismic response analysis of minor radius curve continuous beam bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 64-70. (in Chinese))
- [10] 刘健新, 马麟, 胡庆安. 薄壁箱梁振动时的剪力滞效应[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(3): 122-125. (LIU Jian-xin, MA Lin, HU Qing-an. The research of analysis method of Shear lag effect on forced vibration of thin-walled box-girder[J]. Journal of Zhengzhou University: (Engineering Science), 2008, 29(3): 122-125. (in Chinese))
- [11] 蔡恒, 卢海林, 汤正. 考虑剪力滞效应的曲线箱梁自振特性研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 239-244. (CAI Heng, LU Hai-lin, TANG Zheng. Vibration properties research on curved box girder considering shear lag effects[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32 (4): 239-244. (in Chinese))
- [12] Reissner E. Analysis of shear lag in box beams by the principle of minimum potential energy[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1946, 4(3): 268-278.
- [13] 张元海, 李乔. 箱形梁剪滞效应分析中的广义力矩研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(1): 77-81. (ZHANG Yuan-hai, LI Qiao. Study on the generalized moment in shear lag effect analysis of the box girder[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(1): 77-81. (in Chinese))
- [14] 卢海林, 蔡恒, 汤正. 移动荷载作用下薄壁曲线箱梁剪力滞效应分析[J]. 铁道建筑, 2016, 56(9): 14-18. (LU Hai-lin, CAI Heng, TANG Zheng. Analysis on shear lag effect of thin-walled curved box girder under moving load[J]. Railway Construction, 2016, 56(9): 14-18. (in Chinese))