

基于交通冲突的主干路交织区特性与安全研究

王子鸣¹,李树彬^{1,2},崔帅¹

(1.山东建筑大学 交通工程学院,山东 济南 250101;2.山东警察学院 交通管理工程系,山东 济南 250014)

摘要:为了研究城市主干路进口与信控交叉口之间交织区交通冲突特性及各车道安全水平,选取济南经十路某交织区作为调查对象。以一个信号周期为调查间隔,以交通冲突为基础,以碰撞时间(T_{TTC})为指标,通过累计频率法确立交通冲突严重阈值,建立交织区整体交通量、交通密度与交通冲突数的关系模型。再通过主成分分析法以各车道交通冲突严重程度和交通流状况为评价指标,对城市主干路进口与信控交叉口之间交织区各车道进行安全评价并排序。研究表明:在交织区交通量少、交通密度低时,冲突数随着交通量和交通密度的增大而增加,当整体交通量达到288辆/(3.5 min),交通密度达到419辆/km时,交通流变为强制流;对各车道的安全评价发现各车道安全区分明显,和主干路入口相邻车道安全性较低,实践证明主成分分析法对于交织区各车道的评价结果正确可靠。

关键词:城市主干路;交织区;交通冲突;交通冲突阈值;主成分分析法;安全评价

中图分类号:U491

文献标志码:A

Characteristics and Safety of Weaving Areas of Trunk Roads Based on Traffic Conflicts

WANG Ziming¹, LI Shubin^{1,2}, CUI Shuai¹

(School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China; 2.College of Traffic Management Engineering Shandong Police College, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: This paper selected a weaving area on Jingshi Road in Jinan, China as the investigation object to study the characteristics of traffic conflicts and the safety level of each lane in the weaving area between the entrance of an urban trunk road and a signal-controlled intersection. In this research, a signal period was set as the investigation interval, traffic conflicts were identified as the research basis, and the collision time (T_{TTC}) was selected as the index. Severity thresholds of traffic conflicts were established by using the cumulative frequency method, and a model was constructed to represent the relationship among the overall traffic volume, traffic density, and the number of traffic conflicts in the weaving area. Principal component analysis was conducted to evaluate the safety of each lane in the weaving area between the entrance of the urban trunk road and the signal-controlled intersection. The evaluation indexes included the severity level of traffic conflicts and the traffic flow of each lane. The results show that in weaving areas with low traffic volume and density, traffic conflicts increase with rising traffic volume and density. When the overall traffic volume reaches 288 vehicles/(3.5 min) and the traffic density reaches 419 vehicles/km, the traffic flow becomes a forced flow. In addition, safety evaluations of each lane reveal a significant distinction in safety levels, with lanes adjacent to the entrance of the trunk road exhibiting lower safety. It has proven that principal component analysis provides accurate and reliable results for evaluating lanes in weaving areas.

Keywords: urban trunk road; weaving area; traffic conflict; traffic conflict threshold; principal component analysis; safety evaluation

收稿日期:2024-04-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:71871130);山东省公安厅科技服务项目(编号:SDGP370000000202102003878, SDGP370000000202102003700)

作者简介:王子鸣,男,硕士研究生.E-mail:wang15369302998@163.com

0 引言

主干路作为城市路网的骨架,连接了城市不同区域,承载了城市内大部分交通量。但由于很多主干路进口设置不合理,与下游信控交叉口距离过近,导致在主干路进口处形成的合流区与车辆通过右转车道驶出主干路的分流区距离太近,在进口与信控交叉口之间的路段车辆合流、穿插、分流,形成交织区^[1-3]。严重干扰主干路的交通流,造成主干路交通冲突增多,各车道交通安全性降低^[4-6]。为科学地选择安全性较低的车道进行交通管理或组织优化,从而减少交织区交通冲突,提高道路安全等级,须对已建成的主干路进口与信控交叉口之间的交织区路段进行交通冲突特性分析以及各车道安全评价并进行综合排序。

在交通冲突特性方面,目前国内外对交织区的交通冲突研究大多集中在高速公路和城市快速路,对于城市主干路的研究较少,而主干路中独有的主干路进口与信控交叉口形成的交织区又异于高速公路和快速路匝道进出口形成的交织区,所以需要城市主干路交织区交通特性进行单独研究。

在交通安全评价方面,学者们最初是通过交通事故数据来定性分析评价道路安全状况^[7-8];但是由于交通事故数据量大,计算烦琐而且事故具有随机性,所得到的结果可信度不高^[9-10],Chin等^[11]通过和传统统计事故数据方法对比,总结出交通冲突有效替换基于事故统计的方法,证明交通冲突可以有效地弥补这些不足。在基于交通冲突的安全评价方法研究中,目前主要有3类:①基于交通冲突数或交通冲突率等排序的方法,如孙璐等^[12]运用交通冲突并结合微观仿真以交通冲突率为评价指标,评价分析不同交织区的交通安全状况;梁国华等^[13]选取冲突率为评价指标,对高速公路作业控制区进行评价,选取最优的交通组织形式;②将交通冲突数据和需要评价的道路数据、交通流数据建立回归模型,确立综合影响指标,并进一步确定综合影响系数和冲突的关系,得到相应的安全等级^[14-15];③基于数学运算对交通冲突数据处理后评价的方法,如迟佳欣等^[16]将综合风险指数为评价指标,运用灰色聚类评价法对交织区整体进行评价;张鑫等^[17]通过模糊综合评价

法对快速路合流区进行了安全评价,得到不同交通流状态下的安全状况;成卫等^[18]通过灰色聚类评价法对昆明16个平面交叉口安全状况进行等级分类。

在上述三类方法中,第①类逻辑简单,方便实用,但考虑不周全,忽略了被评价道路本身交通流的情况;第②类考虑了各方面因素,但所需要的交通数据较多,处理难度较大,一般单纯的安全评价不采用此方法;第③类中灰色聚类、模糊理论、层次分析法所需要的交通数据较少,易于处理,可操作性较强,但分类有很强的主观性。通过分析,本文将采用第③类中基于数学运算对交通数据处理后评价的主成分分析法,该方法可减少指标选择的工作量,降低主观性,科学全面地反映被评价道路各车道的安全状况。此方法在交通方面多被用于评价较为宏观的区域整体安全状况,如马社强等^[19]运用主成分分析法对黑龙江13个地级区域道路交通安全水平进行了评价并综合排序,但运用在交织区对各车道进行交通安全评价并排序尚属首次,通过本文研究,以期对微观的交织区各车道安全评价提供新的思路,为交织区各车道安全情况提供理论基础。

鉴于此,本文通过实际调查统计数据,首先通过累计频率曲线法,以85%对应数值确定城市主干路交织区交通冲突严重阈值,建立交通量、交通密度与交通冲突数的关系模型。再以交通冲突严重程度和交通流数据为评价指标,以主成分分析法为评价方法来评价交织区各车道安全状况。

1 交织区交通数据的采集与分析

1.1 调查地点

经十路作为连接济南东西的城市主干路,车道数多,交通流量大。本次选定的调查地点位于经十路东部一个主干路进口与信控交叉口较近的典型路段,上游为五车道,临近交叉口拓宽为八车道(图1)。在进口与交叉口之间的路段车辆合流、穿插、分流,形成交织区,为本次研究提供充足的交通冲突样本。根据实际调查发现辅路进入主干路进口处左转车流提前压实线变道情况以及上游车辆直行压实线情况严重,所以本次研究将左转实线看成虚线(即图2方框内实线看作虚线)。

路段实景图及说明如图1、2所示。



图1 交织区路段实景图

Figure 1 View of road section in weaving area



图2 主干路入口路段实景图及车道分布图

Figure 2 View of entrance section of trunk road and distribution of lanes

1.2 调查方式及时间

本次调查使用无人机定点航拍方式采集交织区交通流视频,航拍视频相较于其他采集数据方法更有优越性^[20-21]。时间段均选择在没有恶劣天气的正常工作日上午07:00—08:00(早高峰)、09:30—10:30(平峰)和下午05:00—06:00(晚高峰)。

1.3 数据描述和分析

根据实际调查发现,绝大部分车辆合流、交织、分流并不是在很靠近交叉口处完成,而是在如图3所示的交织区完成。交织区出口信号灯周期时长为3.5 min,参考国内外研究方法并结合实际调查情况,将一个信号周期时长作为统计间隔,统计间隔3.5 min内的交通量和交通密度数据。

本次研究将交织区交通冲突划分为两类,分别为追尾冲突和侧撞冲突。根据中国道路交通事故角度分析和美国SSAM中的交织区交通冲突角度划分综合考虑,将交通冲突角度小于 15° 的定义为追尾冲突,将交通冲突角度大于 15° 的定义为侧撞冲突^[16]。

使用视频识别追踪软件Tracker及人工配合的方法对已拍视频进行处理,得到需要的交通数据。Tracker是一个用于视频分析的物理软件,可以实现对物体的追踪,详细分析视频内的物体运动规律,很适合处理高处俯拍的视频。对于视频的处理首先需

要观察人员对拍摄视频反复观看,以交通冲突定义为标准找出发生的交通冲突,以是否发生紧急制动或大幅度变相为标准判别交通冲突严重性,记录冲突发生的位置和视频的时间,方便后期工作的进行,然后利用软件Tracker获取交通冲突 T_{TTC} (碰撞时间)指标,将主观的判断客观计算出来。

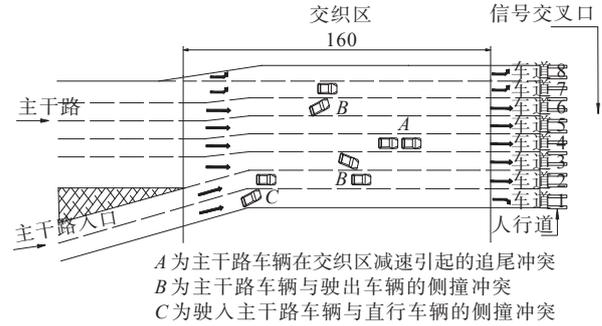


图3 交织区及交通冲突形式划分示意图(单位:m)

Figure 3 Weaving areas and forms of traffic conflicts (unit:m)

1.4 交通冲突指标选取及计算

T_{TTC} (Time to Collision)表示两车若保持当前的方向和速度到相撞时所需要的时间。目前常用的交通冲突指标为 T_{TTC} 和 T_{PET} (侵入时间), T_{PET} 虽适用于有相交轨迹的冲突车辆,但其不考虑速度,与真实情况可能会有较大的偏差。本文以无人机航拍的方式保证了数据的全面性,此时 T_{TTC} 也可用于车辆侧面碰撞的情况^[22-23]。

追尾冲突 T_{TTC} 计算过程:首先在Tracker中建立坐标系,对前车车尾进行冲突过程追踪,然后回到冲突的起点,以前车车尾作为相对坐标系,对后车车头进行冲突过程追踪,得到时间-距离曲线。此时根据曲线最大斜率切线与相对距离为0的时间轴交点K与最大斜率点横坐标H之差即为此次追尾冲突的 T_{TTC} 。如图4所示。

侧撞冲突 T_{TTC} 计算过程:首先在Tracker中建立固定的坐标系,分别对两车冲突过程追踪得到运动参数,然后对在避免冲突发生的节点进行逐帧反复观察,同时记录此时换道车辆A、直行车辆B两车的速度 V_A 和 V_B ,用标尺测量出两车的长度 L_A 、 L_B 和距离碰撞点的距离 S_A 和 S_B 。在避险行为发生时刻,可计算出 $T_{TTC_A} = S_A/V_A$, $T_{TTC_B} = S_B/V_B$ 。此时将会出现两种情况:①车辆A撞向车辆B(即 $T_{TTC_A} \geq T_{TTC_B}$),若 $T_{TTC_A} \leq T_{TTC_B} + L_B/V_B$,则冲突有

效且最终 $T_{TTC} = T_{TTC_A}$, 否则冲突无效, 如图 5(a) 所示; ② 车辆 B 撞向车辆 A (即 $T_{TTC_A} < T_{TTC_B}$), 若 $T_{TTC_B} \leq T_{TTC_A} + L_A/V_A$, 则冲突有效且最终 $T_{TTC} = T_{TTC_B}$, 否则冲突无效, 如图 5(b) 所示。通过以上方法即可计算出侧撞 T_{TTC} 。

2 交织区交通冲突阈值确定

目前可采取两种数学方法对于交通冲突不同严重程度进行界定。一种是借鉴交通流理论中的可接受间隙理论; 另一种是累计频率曲线法。前者更适合应用于无信号灯的平面交叉口, 后者较于前者更有普适性, 引用了管理学中的 Pareto 定律, 在交通工程中有着广泛应用^[24]。以 85% 对应数值作为冲突判定的临界值 (即在冲突发生的过程中, 85% 的交通冲突 T_{TTC} 不会超过该时间), 得到不同严重程度对应的累计频率分布如图 6 所示。从图 6 可以看出: 85% 分位处 T_{TTC} 有较为明显的拐点, 可以用作阈值的界定。通过交织区各类型不同严重程度累计频率分析可以确定各类冲突严重程度阈值如表 1 所示。再根据计算得来的交通冲突严重程度阈值量化分类通过主观

感受确定的交通冲突。

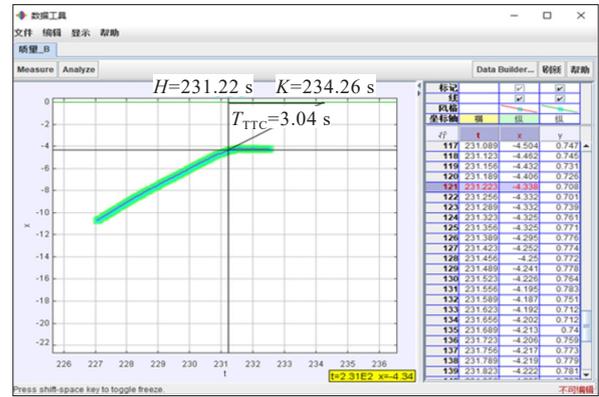


图 4 追尾冲突 T_{TTC} 获取演示

Figure 4 Demonstration of T_{TTC} acquisition for rear-end collision

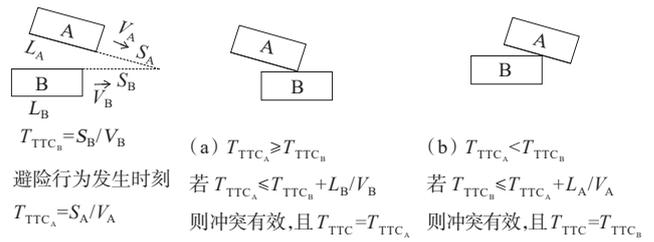


图 5 侧撞冲突 T_{TTC} 计算方法

Figure 5 Calculation method for T_{TTC} of side collision

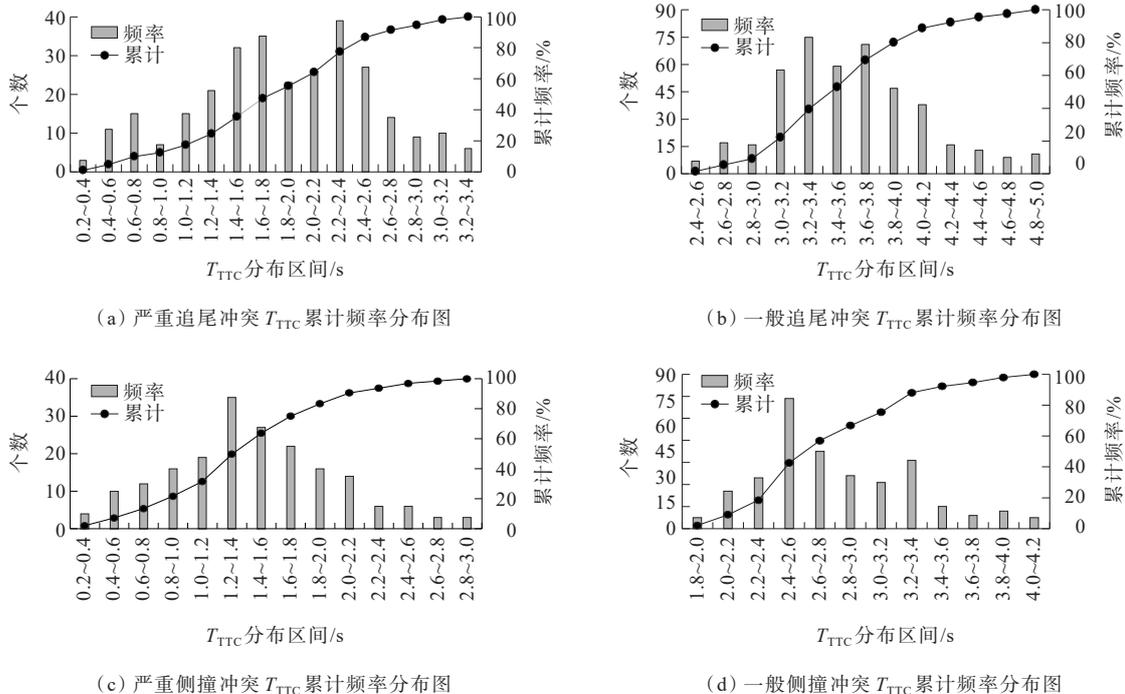


图 6 交织区各类型不同严重程度冲突累计频率分布

Figure 6 Cumulative frequency distribution of vairous conflicts of different severity in weaving areas

表1 交织区各类交通冲突严重程度阈值界定
Table 1 Severity thresholds for traffic conflicts in weaving areas

冲突类型	度量指标/s	交通冲突严重程度/s	
		严重	一般
追尾冲突	T_{TTC} 阈值	(0, 2.57)	(2.57, 4.11)
侧撞冲突	T_{TTC} 阈值	(0, 2.04)	(2.04, 3.35)

3 交织区交通冲突特性分析

本次研究的主干路交织区出口为信控交叉口,绿灯时车辆无障碍通过,红灯时车辆被强制停下,使得车辆在交织区出现周期性车辆排队的情况,在排队过程中必然导致交通冲突的发生。交织区车辆排队情况分为3种:①在一个信号周期内,交织区车辆较少,红灯期间排队的车全部在绿灯期间释放;②在一个信号周期内,红灯期间交织区车辆排队多但上游车辆排队较少,绿灯期间交织区的车辆得以释放但上游排队的车辆没有完全释放进而在交织区继续排队;③在一个信号周期内,交织区及上游车辆都很多,红灯期间排队的车只被释放了一小部分,上游的大部分车辆未得到释放,形成短暂性的区域交通阻塞。

3.1 交织区交通流量与交通冲突数关系

交通流量是指在单位时间内通过道路某一地点、某一断面或道路上某一车道的交通实体数,一般用 Q 表示。本文中交通流量数据为单方向的,统计交织区进口断面处交通流量,常采用式(1)表示:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (1)$$

式中: N 为观察时段内的车辆数; T 为观察时段的长度。

在交通调查中发现交通冲突数和交通流量有很大的关联性。根据上面交通冲突阈值,确定了追尾冲突 T_{TTC} 的范围为(0, 4.11 s],侧撞冲突 T_{TTC} 的范围为(0, 3.35 s],将之前记录的冲突筛选得到观察时段内交织区域更加精确的交通冲突数量。如图7所示。

由图7可以看出:当交通流量在288辆/(3.5 min)之前时,城市快速路交织区交通流量与交通冲突数呈明显的线性关系,拟合关系式为:

$$y = 0.415x - 2.554 \quad (2)$$

复相关系数 $R^2 = 0.885$,达到精度要求,说明该线性关系拟合度较高。

当交通流量增加到288辆/(3.5 min)时,交通冲突数达到了峰值,之后随着交通流量的增加,交通冲突数逐渐降低,交通冲突交织区交通流量-交通冲突数关系拟合式为:

$$y = -0.0024x^2 + 1.445x - 112.975 \quad (3)$$

复相关系数 $R^2 = 0.888$,达到精度要求,拟合程度较高。

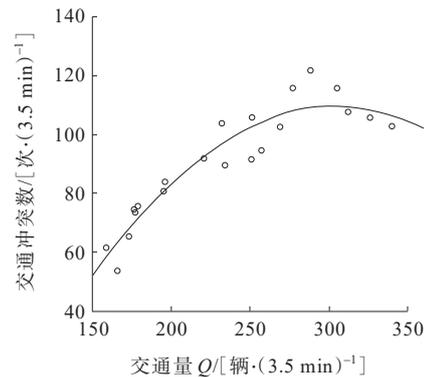


图7 交织区交通流量-交通冲突数关系

Figure 7 Relationship between traffic volumes and traffic conflicts in weaving areas

3.2 交织区交通密度与交通冲突数关系

交通密度 K 是指某一瞬间单位长度道路上所存在的车辆数。本次交通密度研究采用录像法,取1画面/s,在视频的每一画面中,读取观测区间八车道的车辆数,计算一个信号周期3.5 min内的平均车辆数,用区间长度计算单位公里长存在的车辆数,得到交织区交通密度。采用计算式(4)表示:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \times \frac{1}{L} \quad (4)$$

式中: K 为交织区交通密度; K_i 为每个画面车辆数; n 为画面总个数; L 为车道长度。

在实际调查中发现,当整体交通密度较低的情况下,车辆可以轻松变道,交通冲突数较少;随着交通密度的增大,道路行驶状况变差,车辆换道变得复杂,交通冲突数变多;当增大到一定密度时,会造成车辆拥堵,换道概率降低,交通冲突数降低。密度-交通冲突数之间的拟合关系如图8所示。

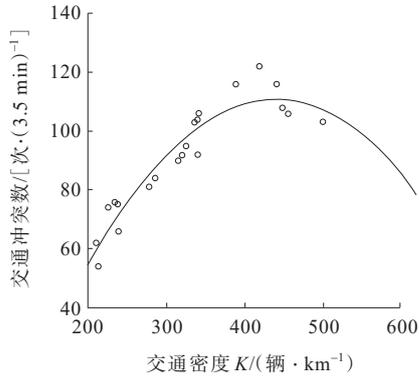


图8 交织区交通密度-冲突数关系

Figure 8 Relationship between traffic density and traffic conflicts in weaving areas

由图8可以看出:当交通密度小于419辆/km时,交通冲突数随着密度的增大而增多,交通量与交通冲突数有很明显的线性关系。交织区交通密度-冲突数的拟合式为

$$y = 0.292x + 0.875 \quad (5)$$

复相关系数为 $R^2 = 0.935$, 达到精度要求, 拟合度较高。

当交通密度大于419辆/km时, 交通流变为强制流, 车辆之间相互制约, 交通冲突数随密度的增大而降低, 但不会像普通无交叉口道路那样降低到零, 除非交叉口下游的交通供给满足不了交织区及上游的交通需求, 这种情况是很少的, 所以本次研究不考虑全路段阻塞的情况。交织区交通密度-冲突数的整体拟合式为:

$$y = -0.001x^2 + 0.87x - 80.37 \quad (6)$$

复相关系数为 $R^2 = 0.905$, 达到精度要求, 拟合度较高。

4 交织区各车道安全评价

由实际调查可发现, 在大部分情况下快速路交织区车辆排队情况为上文分析的第①、②种情况, 第③种情况相对较少, 因此本次交织区各车道的安全评价仅考虑前两种情况, 即一个信号周期内(3.5 min)交织区交通量小于288辆, 交织区交通密度小于419辆/km。在此状态下交通冲突数和交通量与交通密度分别有明显的线性关系。

4.1 评价方法确定

交织区交通安全系统是多因素相互作用的复杂

系统, 因此单靠一种指标来评价具有片面性, 需要选用多种因素融合的综合评价的方法才是可靠完善的。而主成分分析法就是综合分析此类问题的有效方法。它可以将多个指标简化为几个不相关(或相互独立)的综合指标(即主成分), 这些主成分能够反映原始指标的绝大部分信息, 而且所含的信息不重叠^[25]。所以本文确定采用主成分分析法对交织区各车道进行评价。

4.2 评价指标确定

以往的关于交织区的安全评价指标选取主要集中在交通冲突数、冲突率等单一指标上, 对于所发生的冲突类别、冲突严重程度与交通流状态的结合等指标选取较少。而对于交织区各车道的评价不能仅仅考虑交通冲突, 还要将交织区各车道的交通流状态考虑进去。所以针对交织区各车道构造的安全评价指标如表2所示, 评价时间为10个信号周期即35 min。

4.3 主成分分析过程及应用

(1) 构造样本矩阵。

设待评价样本个数为 $n=8$, 选取的评价指标个数为 $P=7$, 将表2所示的交织区车道交通安全评价指标依次记为 $X_j (j=1, 2, \dots, 7)$; 8个交织区车道依次记为第 i 个评价对象。 $x_{i,j}$ 为指标 X_j 对第 i 个被评价对象的评价值, 构造矩阵 $X_{8 \times 7}$, $x_{i,j}$ 值如表2所示。

(2) 指标数据标准化。

将指标数据进行标准化处理, 其转化公式为

$$z_{ij} = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, p; \text{ 其中, } \bar{x}_j =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_{i,j}}{n}, s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,j} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}。 \text{ 标准化处理结果如表3}$$

所示。

(3) 计算根据标准化矩阵 z_{ij} 建立的相关系数矩阵

$$R, \text{ 其元素 } r_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n z_{k,i} \cdot z_{k,j}}{n-1}, i, j = 1, 2, \dots, p。$$

$r_{i,j}$ 为第 i, j 个指标的相关系数, $r_{i,i} = r_{j,i}$, R 为对称矩阵, 矩阵对角线元素为1。得到的相关系数矩阵如表4所示。

(4) 求 R 的特征根和特征向量, 确定 ρ 个成分中的主成分。求解特征方程 $|\lambda E - R| = 0$, 其中 E 为单

表 2 交织区各车道安全评价指标

Table 2 Safety evaluation indexes of each lane in weaving areas

车道分布	严重追尾/次	一般追尾/次	严重侧撞/次	一般侧撞/次	交通冲突数/次	交通量/辆	交通密度/(辆·km ⁻¹)
车道 1	14	62	13	23	112	304	47
车道 2	17	68	18	30	133	320	51
车道 3	16	70	10	18	114	336	50
车道 4	12	66	4	16	98	328	48
车道 5	13	59	3	15	90	344	49
车道 6	9	66	2	13	90	332	47
车道 7	2	29	1	4	36	128	18
车道 8	1	21	1	3	26	80	12

表 3 待评价车道标准化处理结果

Table 3 Standardized processing results of the lanes to be evaluated

车道分布	严重追尾	一般追尾	严重侧撞	一般侧撞	交通冲突数	交通量	交通密度
车道 1	0.576 51	0.361 42	1.016 90	0.860 73	0.653 81	0.309 99	0.429 18
车道 2	1.070 66	0.676 85	1.799 14	1.638 17	1.211 38	0.462 60	0.683 51
车道 3	0.905 95	0.781 99	0.547 56	0.305 42	0.706 91	0.615 22	0.619 93
车道 4	0.247 08	0.571 70	-0.391 12	0.083 30	0.282 10	0.538 91	0.492 76
车道 5	0.411 79	0.203 71	-0.547 56	-0.027 77	0.069 70	0.691 52	0.556 35
车道 6	-0.247 08	0.571 70	-0.704 01	-0.249 89	0.069 70	0.577 06	0.429 18
车道 7	-1.400 10	-1.373 40	-0.860 46	-1.249 45	-1.364 05	-1.368 73	-1.414 71
车道 8	-1.564 81	-1.793 97	-0.860 46	-1.360 51	-1.629 55	-1.826 57	-1.796 21

表 4 相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix

指标	严重追尾冲突	一般追尾冲突	严重侧撞冲突	一般侧撞冲突	交通冲突数	交通量	交通密度
严重追尾冲突	1.000	0.922	0.773	0.925	0.979	0.897	0.940
一般追尾冲突	0.922	1.000	0.572	0.816	0.946	0.977	0.987
严重侧撞冲突	0.773	0.572	1.000	0.913	0.801	0.463	0.567
一般侧撞冲突	0.925	0.816	0.913	1.000	0.956	0.756	0.830
交通冲突数	0.979	0.946	0.801	0.956	1.000	0.897	0.944
交通量	0.897	0.977	0.463	0.756	0.897	1.000	0.992
交通密度	0.940	0.987	0.567	0.830	0.944	0.992	1.000

位矩阵,可得到 ρ 个成分对应的特征根 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, 7)$, 要求 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4 > \lambda_5 > \lambda_6 > \lambda_7$; 然后求解 λ_j 对应的特征向量记为 a_j , 利用 SPSS 软件因子分析处理后得到的方差分解主成分分析结果如表 5 所示。

得到 $\lambda_1=6.135\ 156$ 、 $\lambda_2=0.791\ 639$ 、 $\lambda_3=0.040\ 746$ 、 $\lambda_4=0.028\ 702$ 、 $\lambda_5=0.003\ 696$ 、 $\lambda_6=0.000\ 059$ 、 $\lambda_7=0$ 。其中： $a_1=(0.397\ 670\ 545\ 0.385\ 962\ 478\ 0.309\ 658\ 181\ 0.380\ 714\ 034\ 0.402\ 515\ 262\ 0.372\ 235\ 779\ 0.388\ 788\ 563)$ 。

(5) 计算主成分的数量。

前 $m (m \leq \rho)$ 个成分的累计贡献率计算公式为

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j / \sum_{j=1}^{\rho} \lambda_j$$

当累计贡献率达到 80%~90%, 且特征根大于 1 时, 所对应的成分个数 $m (m$ 为整数) 值即为主成分个数。可求得 $\text{Min}(m)=1$, 即得到 1 个主成分, 主成分变量的贡献率累计为 87.645%, 表明用 1 个主成分变量可替代原指标。

(6) 计算主成分的值。

构造主成分分量 F_1 ,

表5 方差分解主成分提取分析

Table 5 Analysis of principal component extraction through variance decomposition

指标	初始特征值			提取平方和载荷		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率
严重追尾冲突	6.135	87.645	87.645	6.135	87.645	87.645
一般追尾冲突	0.792	11.309	98.954			
严重侧撞冲突	0.041	0.582	99.536			
一般侧撞冲突	0.029	0.410	99.946			
交通冲突数	0.004	0.053	99.999			
交通量	0.000	0.001	100.000			
交通密度	0.000	0.000	100.000			

$$F_i = Z_{8 \times 7 \times ai} (i=1)$$

式中: F_i 第*i*行的元素值表示第*i*个被评价对象的评价分值。得到 $F_1=1.556\ 757\ 147$ 。

(7) 计算综合评价结果。

在计算各个主成分的基础上,再利用式(7)进行加权求和,得到综合评价值。

$$F = \sum_{i=1}^m F_i \cdot \lambda_i / \sum_{j=1}^p \lambda_j \quad (7)$$

4.4 综合评价结果

根据得到的综合评价值由大到小排列合流区8个车道的安全水平,如表6所示。交织区各车道安全水平评价示意图见图9。

表6 综合评分及排序结果

Table 6 Comprehensive scoring and ranking

排序序号	车道分布	综合评价值	排序序号	车道分布	综合评价值
1	车道2	2.448	5	车道5	0.494
2	车道3	1.492	6	车道6	0.192
3	车道1	1.364	7	车道7	-3.013
4	车道4	0.644	8	车道8	-3.623

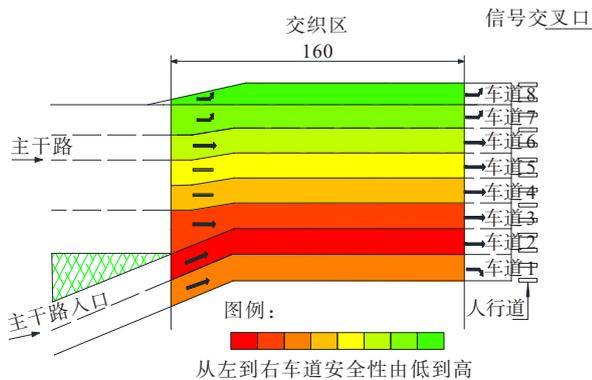


图9 交织区各车道安全水平评价结果示意图(单位:m)

Figure 9 Evaluation results of the safety level of each lane in the weaving area (unit:m)

由表6数据和图9可知:交织区安全水平高的两个车道为车道8和车道7,安全水平低的两个车道为车道2和车道3。依据现场调查结果,车道3有较多主线车辆想要通过交叉口右转,主干路进口车道1车辆进入主干路想要直行,都需经过车道2,导致车道2车流较混乱;车道3交通量较大,是主干路其余直行车道想要右转车辆必经道,右转车辆对车道3车辆影响较大;车道1为右转车道,其受主线右转车辆影响以及频繁避让人行道行人过街,排队现象也很严重;车道8和车道7交通量很少,而且从主干路入口想要通过交叉口左转的车也较少;其余3车道都为直行车道,车辆交织情况少,排队也较有序。调查结果和论文评价结果相吻合,证明主成分分析法对交织区各车道评价的可靠性。

5 结论

中国城市主干路入口距离交叉口近的问题较严重,导致主干路交通安全存在很大不确定性,需要引起广泛的关注。本文以济南市经十路某进口和交叉口之间交织区为研究对象,通过实际调查得到交通流数据,确立主干路交织区交通冲突阈值,建立交通冲突和交通流量与交通密度之间的定性关系模型,复相关系数均在0.85以上。通过主成分分析法,以交通冲突为基础,以交通冲突的严重程度和交通流状况为评价指标,对交织区各车道的安全情况进行评价,得出如下结论:

(1) 城市主干路交织区(八车道)交通量在288辆/(3.5 min)之前,交通冲突数和交通量之间有明显的线性关系;当交通量大于288辆/(3.5 min)之后,交通冲突数随着交通量的降低而减少。在交织区整体交通密度较低的情况下,冲突数随着密度的增大而增

加;当交通密度达到 419 辆/km 时,交通流变为强制流,随着交通密度的增大,交通冲突数逐渐减少。

(2) 城市主干路交织区各车道安全水平差异明显,和主干路入口相邻的几车道安全水平较低;专用左转车道由于车辆较少,安全性最高;中间专用直行车道安全性水平相差不大。

本次研究可为城市主干路入口与交叉口之间交织区交通流研究特性提供参考,为交织区各车道安全评价提供新思路。但对于如何提高安全水平较低的车道安全等级本文并没有给出方法,今后需要进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual [M]. Washington D.C.: National Research Council, 2000.
- [2] 曾岳凯,周涛,陈亚振.基于仿真的多车道高速公路交通冲突分析[J].中外公路,2023,43(3):270-274.
ZENG Yuekai, ZHOU Tao, CHEN Yazhen. Traffic conflict analysis of multilane expressway based on simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):270-274.
- [3] 王海亮,程冲,官洪,等.基于交通冲突的城市地下互通左出匝道减速车道长度研究[J].中外公路,2024,44(1):209-217.
WANG Hailiang, CHENG Chong, GUAN Hong, et al. Study on length of deceleration lane of left off-ramp for urban underground interchanges based on traffic conflicts[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1):209-217.
- [4] 胡腾飞.城市主干路出入口间距及组合模式研究[D].西安:长安大学,2018.
HU Tengfei. Study on the access spacing and combination of the urban major arterials[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [5] 王宁.城市主干路出入口合理间距的仿真研究[D].西安:长安大学,2008.
WANG Ning. Simulation study on reasonable spacing between entrances and exits of urban trunk roads[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [6] 王文博,严锋.基于贝叶斯模型的高速公路合流区交通冲突预测[J].公路,2023,68(7):328-332.
WANG Wenbo, YAN Feng. Prediction of traffic conflict in expressway merging area based on Bayesian model[J]. Highway, 2023, 68(7):328-332.
- [7] MARTIN J L. Relationship between crash rate and hourly traffic flow on interurban motorways[J]. Accident; Analysis and Prevention, 2002, 34(5):619-629.
- [8] 李硕,夏文慧,李洁,等.考虑与过街行人冲突的道路右转机动车延误研究[J].中外公路,2021,41(2):344-348.
LI Shuo, XIA Wen-hui, LI Jie, et al. Delay research for on delay of right-turning motor vehicles considering conflicts with crossing pedestrians [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2):344-348.
- [9] 陈德望.基于模糊聚类的快速路交通流状况分类[J].交通运输系统工程与信息,2005,5(1):62-67.
CHEN Dewang. Classification of traffic flow situation of urban freeways based on fuzzy clustering[J]. Communication and Transportation Systems Engineering and Information, 2005, 5(1):62-67.
- [10] 吴宇晟,马永磊,李孟晖.危险驾驶环境下高速公路施工区交通冲突研究[J].公路与汽运,2022(4):29-32,38.
WU Yusheng, MA Yonglei, LI Menghui. Study on traffic conflict in expressway construction area under dangerous driving environment[J]. Highways & Automotive Applications, 2022(4):29-32,38.
- [11] CHIN H C, QUEK S T. Measurement of traffic conflicts[J]. Safety Science, 1997, 26(3):169-185.
- [12] 孙璐,李颜平,钱军,等.基于交通冲突技术的交织区交通安全评价[J].中国安全科学学报,2013,23(1):55-60.
SUN Lu, LI Yanping, QIAN Jun, et al. Evaluation of weaving sections with respect to traffic safety based on traffic conflict technique[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(1):55-60.
- [13] 梁国华,张景峰,路鹏,等.八车道高速公路作业控制区交通组织形式效果评价[J].中外公路,2014,34(4):347-352.
LIANG Guohua, ZHANG Jingfeng, LU Peng, et al. Effect evaluation of traffic organization form in operation control area of eight-lane expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4):347-352.
- [14] 项乔君.道路交通冲突分析技术及应用[M].北京:科学出版社,2008.
XIANG Qiaojun. Analysis technology and application of road traffic conflict[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] 张宇,吴忠广,田万利,等.基于VISSIM仿真的高速公路改扩建工作区布设分析[J].中外公路,2021,41(3):352-357.
ZHANG Yu, WU Zhongguang, TIAN Wanli, et al. Layout analysis of highway reconstruction and extension working

- area based on VISSIM simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3):352-357.
- [16] 迟佳欣,贺玉龙.基于交通冲突的交织区安全评价方法研究[J].交通科技与经济,2020,22(4):27-32,38.
CHI Jiixin, HE Yulong. Research on the safety evaluation method of weaving segments based on traffic conflict[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2020, 22(4):27-32, 38.
- [17] 张鑫,张卫华,冯忠祥,等.基于交通冲突技术的城市快速路合流区交通安全评价[J].安全与环境工程,2020,27(4):174-179.
ZHANG Xin, ZHANG Weihua, FENG Zhongxiang, et al. Traffic safety evaluation of expressway confluence area based on traffic conflict technology[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(4):174-179.
- [18] 成卫,王贵勇.基于交通冲突技术的交叉口安全状况灰色聚类评价研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2005,30(3):106-110.
CHENG Wei, WANG Guiyong. Gray cluster evaluation of safety at intersections by traffic conflict technique[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences), 2005, 30(3):106-110.
- [19] 马社强,孟大凡,刘东.黑龙江省道路交通安全状况评价[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2011,17(2):33-36.
MA Sheqiang, MENG Dafan, LIU Dong. Evaluation of road traffic safety in Heilongjiang Province[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2011, 17(2):33-36.
- [20] 周琪.城市快速路合流区交通特征分析与网联控制策略研究[D].西安:长安大学,2019.
ZHOU Qi. Traffic characteristic analysis and connected control strategy of urban expressway merging area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [21] 冯心宜.粤港澳大湾区高速公路互通立交通行能力分析[J].中外公路,2021,41(4):380-383.
FENG Xinyi. Analysis on traffic capacity of expressway interchange in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):380-383.
- [22] 赵世鹏.基于交通冲突技术的互通立交出口交通安全评价模型[D].南京:东南大学,2016.
ZHAO Shipeng. Interchange traffic safety evaluation model based on traffic conflict technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [23] 郑来,侯芹忠,郭延永,等.高速公路合流区冲突极值建模与交通事故预测[J].公路交通科技,2022,39(10):132-140.
ZHENG Lai, HOU Qinzhong, GUO Yanyong, et al. Conflict extremum modeling and traffic accident prediction for expressway merging areas[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(10):132-140.
- [24] 王胤皓.城市快速路出口交通冲突影响及建模研究[D].西安:长安大学,2018.
WANG Yin hao. Safety evaluation and modeling for exits of urban expressway using conflicts theory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [25] 朱星宇,陈勇强.SPSS多元统计分析方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2011.
ZHU Xingyu, CHEN Yongqiang. SPSS multivariate statistical analysis method and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.