

文章编号:1671-1637(2026)05-0219-15

超大流量高速公路短净距交织区车辆 运行特征与行车风险

徐进^{*1,2}, 刘妍伶¹, 金勇³, 郭桂³, 张越¹

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 东莞市路桥投资建设有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要:为明确超大流量高速公路短净距立交交织区内车辆运行特征、交通冲突及事故发生风险,选取常虎高速大有园互通-松山湖互通作为研究对象,利用无人机采集短净距立交交织区车辆行驶数据,并结合 Data From Sky Viewer 视频分析平台对车辆运行状态进行精准跟踪与识别,共获取 1 883 条车辆轨迹数据;从不同车道维度切入,深入剖析在大流量条件下短净距交织区的车辆运行特征及车辆分合流换道行为特征,得到交织区内冲突分布。研究表明:车道间速度特征呈现显著差异,外侧车道因净距压缩形成反喇叭型加速模式(速度均值提升 12.3%),其分流鼻前 200 m 处速度带宽值激增 23%,辅助车道通过“加速-减速”双阶段策略实现效率优化;车头间距分布存在明显车道分异,主线车道负偏态分布显著(0~80 m 间距占比不小于 75%),内侧车道危险间距占比达 61.1%,而辅助车道高速区危险间距发生率升至 71.6%;合/分流车辆呈现差异化换道行为,合流车辆采用短距换道集中于鼻点后 200 m,分流车辆则实施长距换道且冲突严重性更高,直行-合流冲突因速度差较大成为主要风险源;基于时空动态特征,提出分流区换道长度应不小于 500 m 以缓解急刹风险,合流区重点优化加速车道几何参数,确保车辆速度匹配安全汇入。研究成果为短净距交织区安全设计提供了理论依据和技术支撑。

关键词:交通安全;短净距立交;无人机视频分析;超大流量高速公路;交织区;交通事故;车辆运行特征

中图分类号:U491.26 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.029

Vehicle operational characteristics and driving risks in short spacing weaving areas of ultra-high traffic volume expressways

XU Jin^{*1,2}, LIU Yan-ling¹, JIN Yong³, GUO Gui³, ZHANG Yue¹

(1. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Traffic and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
3. Dongguan Road and Bridge Investment and Construction Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

Abstract: To clarify the vehicle operation characteristics, traffic conflicts, and accident occurrence risks in the short spacing interchange weaving areas of ultra-high traffic volume expressways, the Dayouyuan-Songshanhu Interchange of Changping-Humen Expressway was selected as the

出版历程:2025-03-03 收稿,2025-05-26 修回,2025-08-22 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52172340);重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21022)

* 作者简介:徐进(1977-),男,吉林四平人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:xj996699@163.com.

引用格式:徐进,刘妍伶,金勇,等.超大流量高速公路短净距交织区车辆运行特征与行车风险[J].交通运输工程学报,2026,26(5):219-233.

Citation: XU Jin, LIU Yan-ling, JIN Yong, et al. Vehicle operational characteristics and driving risks in short spacing weaving areas of ultra-high traffic volume expressways[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 219-233.

research object. The vehicle driving data in the short spacing interchange weaving area were collected by unmanned aerial vehicles, and the precise tracking and identification of vehicle operation states were conducted in combination with the Data From Sky Viewer video analysis platform. A total of 1 883 vehicle trajectory data were obtained. From the dimensions of different lanes, the vehicle operation characteristics and diverging and merging vehicle lane-changing behavior characteristics in the short spacing weaving area under ultra-high traffic conditions were deeply analyzed, and the conflict distribution within the weaving area was obtained. The research results indicate that the speed characteristics between lanes present significant differences; the outer lane forms a reverse-trumpet acceleration pattern due to spacing compression (the average speed increases by 12.3%), and the speed bandwidth value at 200 m before its diverging nose surges by 23%; the auxiliary lane achieves efficiency optimization through the “acceleration and deceleration” two-stage strategy; the headway distribution has obvious lane differentiation, and the negative skewness distribution of the main lane is significant (the proportion of 0-80 m spacing is no less than 75%); the proportion of dangerous spacing in the inner lane reaches 61.1%, while the occurrence rate of dangerous spacing in the high-speed area of the auxiliary lane rises to 71.6%; the merging and diverging vehicles present differentiated lane-changing behaviors; the merging vehicles adopt short-distance lane-changing concentrated at 200 m after the nose point, while the diverging vehicles implement long-distance lane-changing, and the conflict severity is higher; the through - merging conflict becomes the main risk source due to the large speed difference. Based on the spatiotemporal dynamic characteristics, it is proposed that the lane-changing length in the diverging area should be no less than 500 m to mitigate the sudden braking risk, and the geometric parameters of the acceleration lane in the merging area should be mainly optimized, to ensure that the vehicle speed matches for safe merging. The theoretical basis and technical support are provided for the safety design of the short spacing weaving area.

Keywords: traffic safety; short spacing interchange; UAVs video analysis; ultra-high traffic volume expressway; weaving area; traffic accident; vehicle operating characteristic

Publication history: Received 2025-03-03; Received in revised form 2025-05-26; Accepted 2025-08-22

Funding: National Natural Science Foundation of China (52172340); Group Program of Innovation and Research of Higher Education in Chongqing (CXQT21022)

* **Corresponding author:** XU Jin, professor, PhD, E-mail: xj996699@163.com.

0 引 言

互通立交交织区行车环境的复杂程度远高于其他路段。高速公路和快速路的不断建设的同时,路网密度不断增加,短净距立交比例增多,立交间距不足会影响立交交织区的车辆运行,压缩车辆变道的时间和空间,降低行车安全^[1-3]。据统计,美国 2001 年有 82 609 起事故发生在高速立交或匝道上^[4],中国江苏省 2014~2016 年互通立交发生 15 272 起交通事故,其中分流影响区占比 20.28%,合流影响区占比 14.24%^[5]。而在高度城市化地区/城市群地区的高速公路中,路网密度大,交通流量易达到超饱和状态,并且交通组成复

杂、交织区长度短以及车辆运行速度较高等多因素共同作用,致使互通立交交织区的通行效率与行车安全面临更大的挑战。因此探究超大流量高速公路不同车道车辆在短净距交织区的运行特征并对形成机理进行深入解析,对于短净距立交交织区的安全运营和事故预防具有重要意义。

交织区与基本路段的主要区别在于前者存在大量分合流车辆换道行为,影响行车安全。现有研究多从换道意图识别^[6]、换道决策机制^[7]、换道过程^[8]以及换道轨迹预测^[9]这 4 个方面进行建模分析,如 Hao 等^[10]提出了基于强制换道的位置概率密度模型描述高速公路交织区换道位置的分布特征。邬岚等^[11]构建随机森林模型解析主线车辆换道点决策

机制。潘兵宏等^[12]从广域视角提取交织区交通矢量位置、速度等信息,构建车辆跟驰行为风险判别模型。邬岚等^[13]提出基于互通交织区双向搜索的协同换道控制方法,通过合理规划换道车辆的轨迹实现协同控制。分合流车辆的换道行为易导致交通冲突现象,近年来部分学者创新风险评估模型,深化了对换道冲突形成机理的认知。学者们提出车辆换道风险评估指数^[14]、潜在事故指标^[15]以及换道碰撞时间和碰撞损失能量指数^[16]等多个指标评估换道风险。随着车路协同技术的发展,谢济铭等^[17]构建了交织区智能网联车辆换道风险识别与预警模型,赵红专等^[18]提出一种V2X环境下基于圆风险域的交通冲突识别模型。在预测技术方面,Chen等^[19]提出了优先学习方法,Shangguan等^[20]提出梯度提升算法(LightGBM)预测换道风险,其预测准确率在95%以上。

而针对交织区内车辆行车风险,部分学者构建模型研究其影响因素,发现交织区长度、交织流量比、大车比例等因素显著影响交通流稳定性^[21]。如王子鸣等^[22]发现在交织区交通量少、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。徐进等^[23]发现驾驶人的减速行为会增加苜蓿叶形立交交织区的纵向干涉。陈宽民等^[24]揭示了小间距互通交织区纵向速度分布特性及分、合流区对主线交通流影响的范围。近年来的研究表明,交织区的车辆运行状态、道路几何线形以及驾驶环境等因素均与行车风险存在一定的联系,如Liao等^[25]识别城市立交桥短交织区的风险分布特征,发现风险集中在外车道的3/4路段和出口路段。Zhao等^[26]基于驾驶行为和速度变化的交通秩序指数(TOI)评估城市快速路交织区安全风险等级。短净距立交在道路线形、驾驶环境、交通冲突方面均与普通净距立交存在不同,这些因素或单独或共同作用,会导致驾驶人对车辆周围环境的感知判断能力减弱^[27]。已有研究表明,较小的立交间距对驾驶安全产生了不利影响,如Wang等^[28]基于西安G3001高速公路的事故数据研究多个指标对交通安全的影响,发现立交间距缩小是导致交通事故的主要影响因素之一。Yuan等^[29]基于驾驶模拟器研究发现小净距立交是事故高发区域。Shang等^[30]分析不同因素对车辆强制换道时间的影响,发现净距对行车风险的影响最明显。

综上所述,国内外学者在交织区交通特性研究方面已取得一定成果,主要集中于建模分析交织区

换道行为以及探究交织区行车风险影响因素等方面,而对交织区车辆纵向动力学特征的精细化分析不足。且现有研究多基于常规交织区场景,对短净距交织区特有的车辆运行特征和驾驶风险未得到充分揭示,特别是在超大流量条件下,车辆间的交织强度高,车辆纵向运动特征呈现出显著的非线性、突变性特点,应当基于实际车辆运行数据揭示短净距交织区车辆交互的动态风险。因此,本文利用无人机采集交通量较大时短净距立交交织段车辆速度、加速度等数据,结合Data From Sky Viewer (DFS)平台系统性分析短净距交织区不同车道内车辆运行特征并揭示车辆分合流换道行为特征。本文的研究结果有助于深入了解超大流量高速公路短净距交织段不同车道车辆纵向运行特征及行车风险,为短净距立交交织段的优化设计、交通安全设施改善以及安全运营管理提供理论依据,为类似道路条件的高速公路交织区安全提升提供支撑。

1 研究对象与数据处理

1.1 研究场景及其事故特点

本文通过无人机高空定点航拍获取自然驾驶状态下的车辆行驶数据,研究场景位于东莞市常虎高速公路的大有园枢纽立交和松山湖互通,其中大有园互通为部分苜蓿叶形立交立交,松山湖互通为A形单喇叭立交。根据ETC门架数据,大有园立交至松山湖立交段日交通量高达52 576 pcu(单向),8:00~20:00的日间12 h交通量为37 800 pcu,日间交通量远超《公路工程技术标准》(JTGB01—2014)中40 000~55 000 pcu·d⁻¹的标准,为超大流量高速公路。且该路段2019~2023年共发生828起交通事件、427起交通事故,其中共发生了390起追尾事故,占比91%,为事故高发区。

根据大有园与松山湖互通的道路空间布局,本文选取上行方向的交织段作为研究对象,主线为3车道,设计速度120 km·h⁻¹,2座立交之间净距约为400 m,不符合《公路立体交叉设计细则》(JTJ/TD 21—2014)中对于立交最小净距的要求(1 000 m),为短净距立交路段,故定义该交织区为短净距交织区,如图1所示。为得到车辆在交织段行驶速度加速度特性,本文将合流鼻端和分流鼻端作为车辆数据截取的起止点,截取后的交织区长度为675 m。

1.2 拍摄时间及设备

本文的视频采集设备为DJI Mavic 3,所有视频参数设置一致,像素格式为3 840像素×2 160像

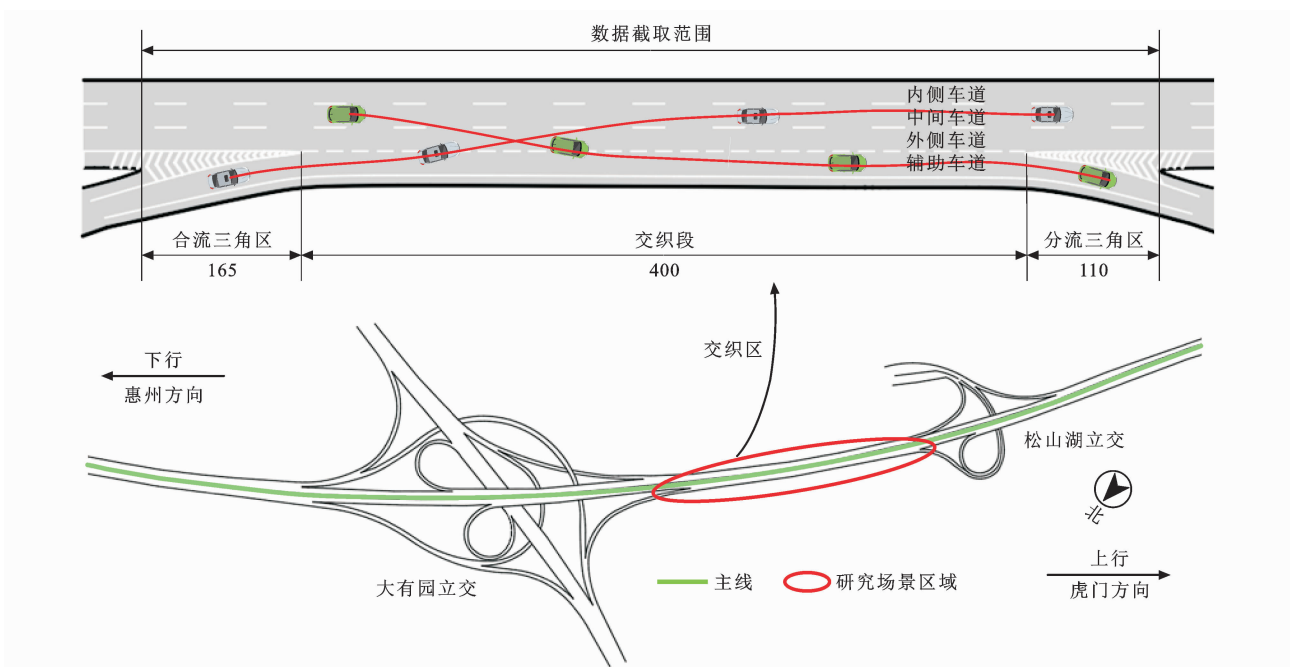


图1 无人机拍摄地点(单位:m)

Fig. 1 UAV shooting location (unit: m)

素,视频帧率为 60 Hz,无人机悬停高度为 320 m。本次试验开展的时间段为 9:00~18:00,视频记录过程中的天气条件良好且风速较低,以避免外界环境因素导致的云台摄像机抖动和旋转。为了减少相机参数标定过程所造成的透视失真,本文采用垂直摄影的方式(摄像机以 -90° 俯视道路平面)记录车辆在交织区内部的运行状况,共获取 1 883 条车辆轨迹数据。

1.3 数据预处理

将无人机采集的立交交织区域视频导入 DFS 软件,采用 WGS-84 地理坐标进行配准,并对路段设置道路进、出闸口,以提取不同车道车辆信息(车辆 ID、车辆类型、速度、加速度、车头时距和车头间距等)。将观测时间间隔设为 $4 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$,导出视频

中通过的车辆轨迹坐标、速度、时间等数据至 Excel。经验证,配准后位置数据与真实坐标的平均相对误差在 0.1 m 内^[31],精度满足要求。最后将输出的车辆信息与无人机航拍视频进行对比,对采集过程中目标跟踪丢失导致数据异常的车辆信息进行剔除。

随后计算每辆车的累积行驶里程,将生成的时间序列数据转换为按累积里程变化的数据,并使用 Python 软件对数据进行 3 次样条插值以及 Smooth 滤波处理,保证数据的一致性和有效性。数据处理流程如图 2 所示,提取出的部分数据如表 1 所示。刘小明^[32]进行了对比验证试验,与实测数据相比其平均误差为 -0.4% ,证明 DFS 平台获取数据的准确性和和可靠性。

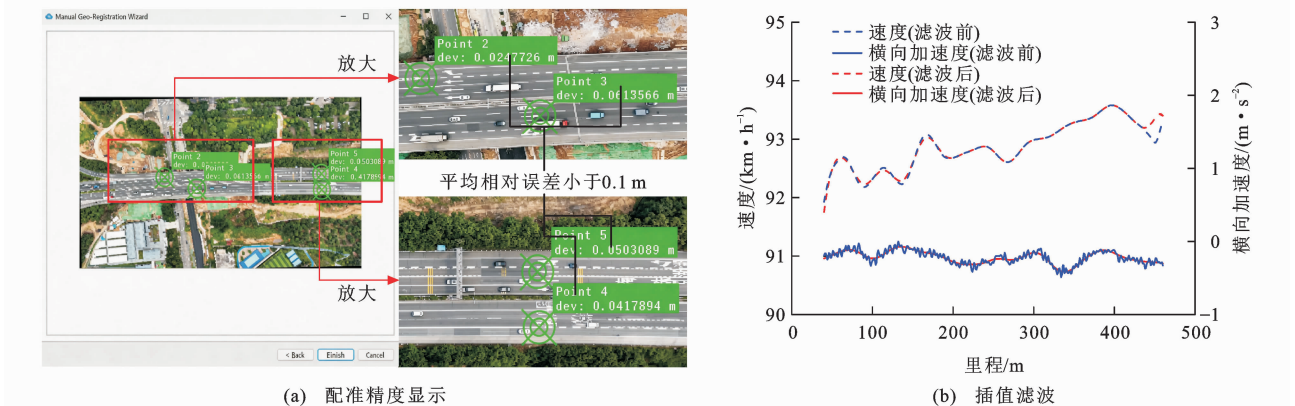


图2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow

表 1 DFS 软件识别部分结果
Table 1 Partial results identified by DFS software

车辆 ID	车辆类型	纬度/(°)	经度/(°)	速度/(km·h ⁻¹)	横向加速度/(m·s ⁻²)	纵向加速度/(m·s ⁻²)
55	小客车	800 772.2	2 534 312	68.48 723	1.036 775	-0.064 190
70	铰接车	800 730.8	2 534 314	48.651 54	0.216 373	0.286 555
503	大货车	800 520.7	2 534 316	47.084 58	-0.525 657	1.748 823

2 交织区车辆运行特征

2.1 行驶速度分析

立交交织区作为多交通流交互作用的特殊路段,其内部同时存在直行、分流、合流 3 种运动行为。

本文统计了大有园枢纽立交和松山湖互通上行方向车辆速度随里程变化数据,并绘制速度分布曲线如图 3 所示。图 3 中 4 条车道的速度特征曲线,分别呈现了 15%、25%、50%、75%、85% 百分位速度分布特征。

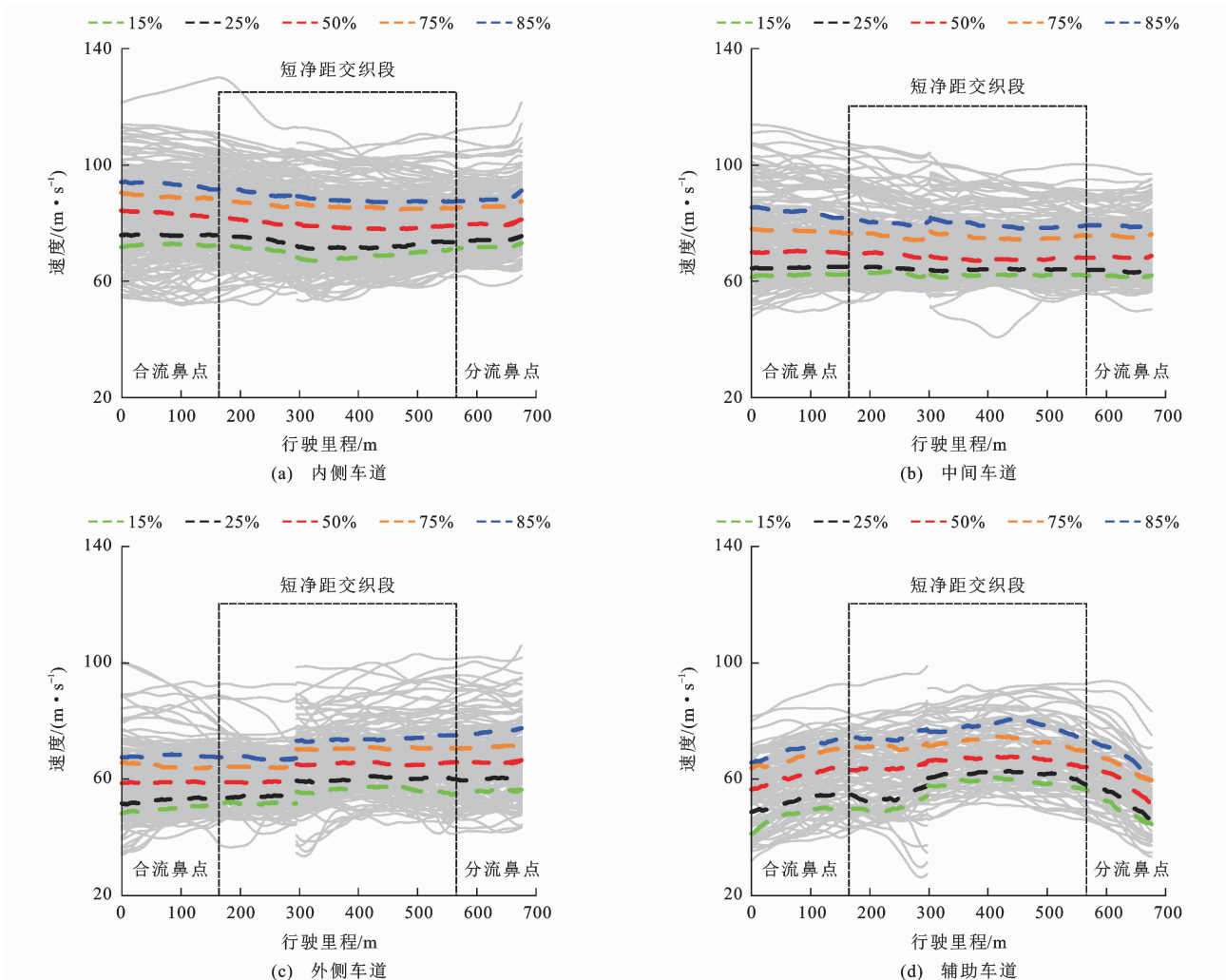


图 3 短净距交织段行驶速度曲线

Fig. 3 Driving speed curves of short spacing weaving sections

对比杨迪^[33]的研究,可知常规净距立交通常呈现速度先微降后回升的 V 形曲线,整体速度分布呈现标准喇叭型。而短净距交织段各车道速度演变呈现显著分化:内侧与中间车道速度分布呈现左宽右窄的非对称喇叭型(左侧速度离散度较高而右侧趋于集中),整体速度均值呈平缓下降趋势,说明交织

区对内侧车道的干扰效应较弱;外侧车道则表现为左窄右宽的反喇叭型分布,速度均值呈现明显上升趋势,这源于净距压缩导致变道窗口期缩短,迫使车辆通过提速完成变道操作,从而引发更剧烈的速度波动。辅助车道整体速度分布带宽保持稳定,但存在显著的“加速-减速”双阶段特征,其拐点恰好对应

分流鼻位置。这种现象表明在有限的分流距离约束下,驾驶人为把握变道时机普遍采取加速策略,直至临近分流鼻端部才实施减速操作。这种驾驶行为模式不仅影响局部交通流稳定性,更对交织区安全设计提出了特殊要求。

本文采用速度带宽曲线研究区域内速度离散性,图4(a)为4条车道 V_{15} 与 V_{85} 速度带宽曲线。结果表明短净距交织段内各车道速度离散性呈现显著差异。阶段I(交织起始段)辅助车道速度带宽达到峰值($24.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),而外侧车道仅 $14.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,形成最大离散差;阶段II(交织核心区)辅助车道带宽值呈现V形波动($24.4 \rightarrow 18.2 \rightarrow 20.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),其余车道则呈倒V形变化;阶段III(交织结束段)内

侧与辅助车道带宽分别下降17%和11%,中间车道及外侧车道增长约7%和23%。且内侧与中间车道带宽曲线呈现显著同步性,其峰值均出现在交织段中点位置。

王延鹏等^[34]进行了关于速度离散性与事故风险的量化关系研究,本文发现外侧车道在分流鼻前200 m处带宽值骤增23%,这主要归因于车辆为完成匝道驶入需实施快速变道行为,导致速度分布离散度加剧。辅助车道带宽曲线的逆向变化特征(与主车道带宽变化呈现显著负相关)表明交织行为对其速度分布具有强约束作用。对比图4(b)可知,辅助车道在短净距段的 V_{15}/V_{85} 值与外侧车道相比较,这验证了连续合-分流过程对辅助车道速度离散性的强化效应。

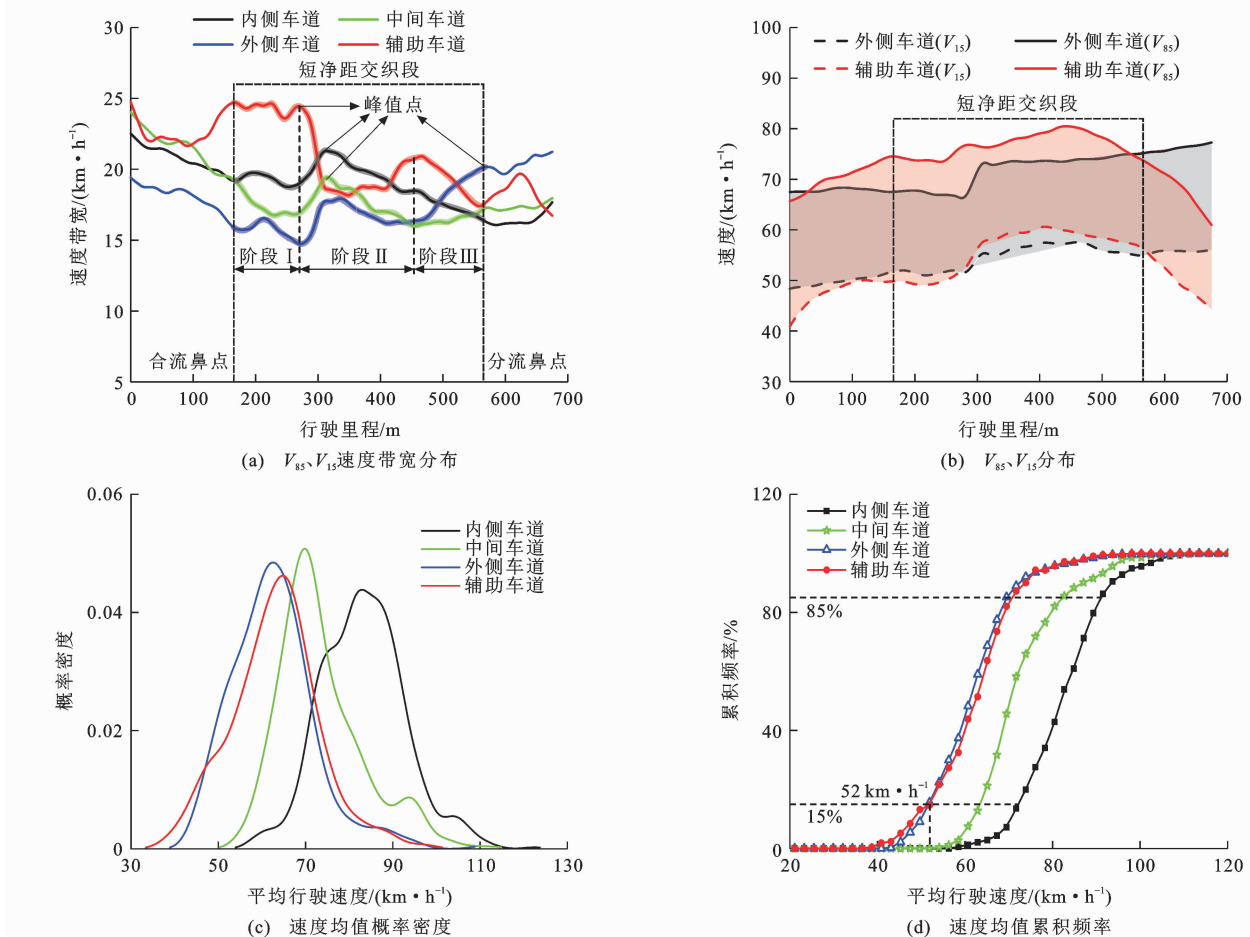


图4 短净距交织段速度特征值分布

Fig. 4 Speed bandwidth distribution of short spacing weaving section

通过建立概率密度分布模型[图4(c)],发现内侧车道速度分布呈现典型右偏特征,其峰值速度达 $83 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,较辅助车道高28%。本研究将外侧车道与辅助车道累积频率曲线相交点对应的平均行驶速度($52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)定义为临界速度,该临界值在累积频率曲线上恰好对应15%分位值[图4(d)]。辅

助车道虽速度分布范围大于外侧车道,但在低速区($V < 52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)辅助车道车辆比外侧车道占比高2%,而在高速区($V > 52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)外侧车道占比比辅助车道占比高2%。这种速度分布的双向特征揭示了短净距交织段特有的速度变化,即辅助车道通过提升速度离散性实现通行效率优化。

2.2 纵向加速度分析

针对短净距交织区车辆运行特征,本研究通过纵向加速度参数揭示车辆动态行为特征。基于交织段内车辆纵向加速度时序数据,提取峰值、谷值及其空间位置参数,构建纵向加速度分布特征图谱[图 5(a)、(b)]。研究表明,加速度峰值呈现先递增后递减趋势,谷值则呈先降后升趋势,验证了交织区频繁的

加/减速行为特征。主线的内侧、中间及外侧车道加速度离散度显著高于辅助车道,且辅助车道谷值集中分布于合流鼻点后区(占比 42.5%),峰值集中分布于交织段中段(占比 69.3%),表明辅助车道车辆驶入主线时采取“减速-加速”的汇入策略,受限于狭小空间条件,驾驶人在合流鼻后区完成降速后立即持续加速驶入。

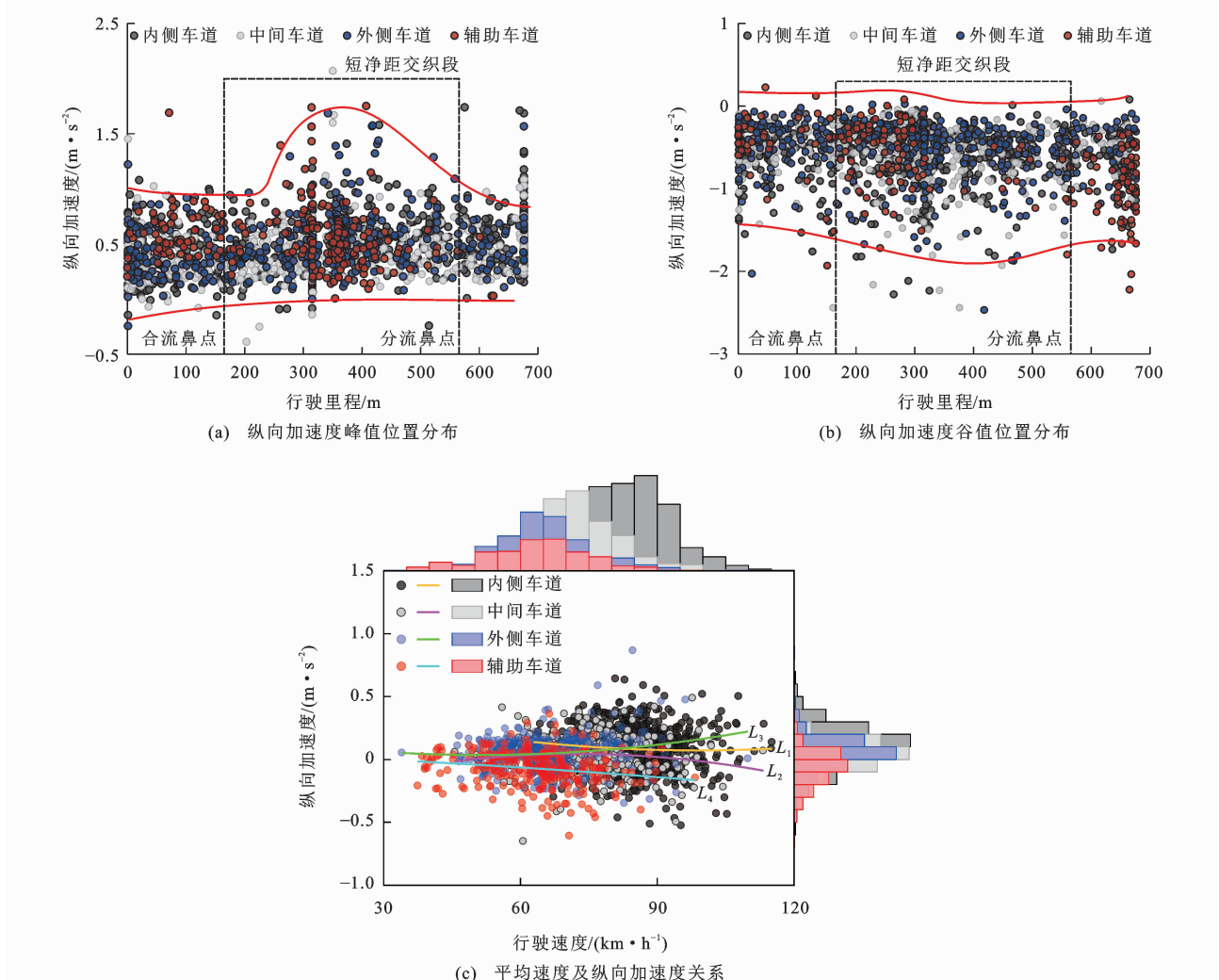


图 5 短净距交织段加速度峰值谷值位置分布

Fig. 5 Position distribution of peak and valley value of longitudinal acceleration in short spacing weaving section

Moon 等^[35]的研究表明中等速度区间车辆加速度呈线性变化规律。本文进一步量化短净距交织段车辆纵向加速度与行驶速度的二维分布,提取各节点纵向加速度与行驶速度对应散点数据,如图 5(c)所示,其中边际直方图代表速度与纵向加速度分布。由图 5(c)可知,主线的内、中及辅助车道纵向加速度与速度呈负相关,而外侧车道呈正相关。这说明立交净距压缩显著改变外侧车道车辆运动模式,形成“速度-加速度协同增长”的特殊现象,印证了外侧车道车辆在空间约束下的持续加速逃逸行为。

2.3 车头间距分布

车头间距反映了前后车辆之间的纵向相互作用,本研究基于 DFS 仿真平台获取多车道车头间距时序数据,采用空间分段统计法(20 m 为一个区间)对不同研究区段的车头间距特征值进行量化分析(表 2)。由图 6 可知,主线内侧、中间及辅助车道车头间距呈显著负偏态分布,峰值集中于 0~40 m 区间,数据集中分布于 0~80 m(累积频率不小于 75%);外侧车道呈现独特分布特征,其峰值前移至 20 m 区间,累积频率曲线在 60 m 处达 75%分位点,

表2 车头间距特征分位值

Table 2 Characteristic quantile value of headway distance

车辆位置	均值	5%分位	15%分位	25%分位	50%分位	75%分位	85%分位	95%分位
内侧车道	62.98	14.06	20.11	25.45	41.23	75.05	113.40	186.75
中间车道	69.78	13.09	19.85	26.14	48.14	92.88	128.43	198.25
外侧车道	51.92	8.57	13.52	17.26	30.49	61.36	95.46	173.22
辅助车道	83.21	11.02	18.31	25.56	50.91	115.12	163.60	261.54

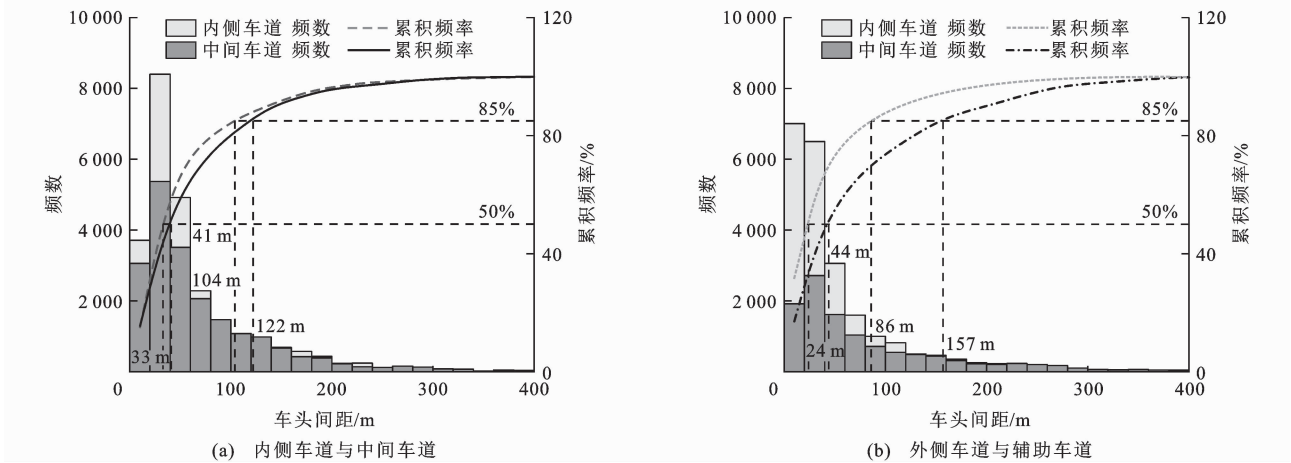


图6 短净距立交交织段车头间距频数分布

Fig. 6 Headway frequency distribution in short spacing weaving interchange

印证了交织行为对车头间距的压缩效应。

根据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》的规定,车辆在高速公路上行驶时,车速超过 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车头间距应大于 100 m ;低于 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,间距不得少于 50 m 。本文将低于上述建议值的间距定义为危险间距,并统计后车在不同速度区间内与前车的车头间距,绘制箱型图,如图7所示。结果显示,后车速度增加时,各车道车头间距均值和中位值显著增大,波动性增强,内侧车道处于区间危险间距占比达 61.1% ,高于其他车道。

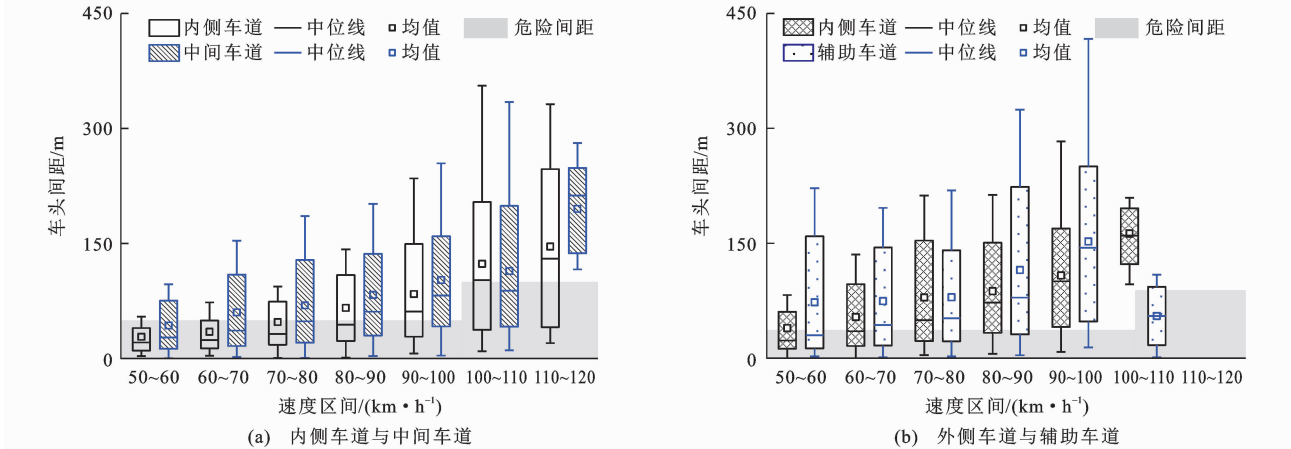


图7 短净距立交交织段车头间距箱型分布

Fig. 7 Headway box plot distribution in short spacing weaving interchange

辅助车道在高速区间($100 \sim 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)呈现异常风险特征,危险间距发生率突增至 71.6% ,较中间车道高 1.6 倍,这与潘兵宏等^[36]提出高速度需求与有限的道路空间可能导致安全裕度急剧下降,从而增加事故风险这一结论相吻合。

2.4 相对速度分布

不同车型存在性能差异,本文将车型分为大型车(大货车、铰接车、大客车)和小型车(小汽车),构建车型组合矩阵(后车为小型车;前车为大型车/小型车),整理相对速度(后车速度减去前车速度)数据

并绘制箱型分布图、累积频率曲线以及热力图,揭示不同车道-车型组合的相对速度时空演化规律,如图 8 所示。一般来说,相对速度越大侧向冲突事件的严

重率越高,发生侧向碰撞事故的概率也就越大,当超过 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时会导致后车需要频繁调整速度,这可能会导致不稳定的车流和增加追尾的风险^[37]。

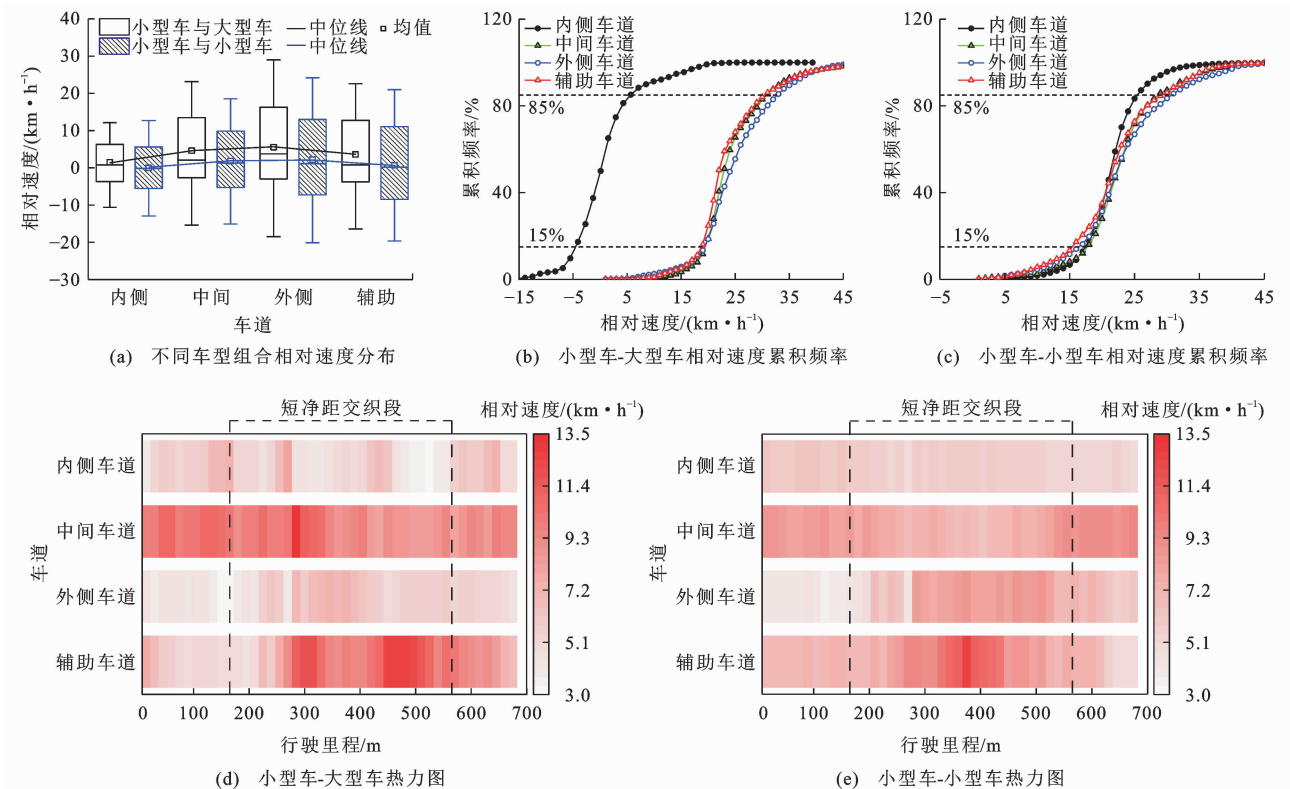


图 8 短净距立交交织段相对速度分布

Fig. 8 Relative velocity distribution of weaving section of short spacing interchange

图 8(a)表明小型车-小型车组合的相对速度均值及中位值均显著低于小型车-大型车组合,且二者分布均呈现右偏态。累积频率曲线图 8(b)、(c)显示,内侧车道小型车-大型车组合累积频率达 15% 时,相对速度为 $-4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而小型车-小型车组合为 $17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,反映不同动力性能车辆在受限空间内的速度适应差异。外侧车道速度聚集性更高,相对速度低于辅助车道,车辆交织行为更复杂;辅助车道车辆在高风险区间(相对速度大于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)占比达 10.5%,较中间车道高 1.2 倍。图 8(d)、(e)可知,所有车道平均相对速度稳定在 $5 \sim 15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间,辅助车道相对速度呈现“加速汇入-减速分离”的抛物线特征。整体上看小型车-大型车组合的相对速度离散度高于小型车-小型车,表明前车异质性是速度波动的重要诱因;辅助车道呈现速度聚集特征,交织强度更高,导致实际风险等级较高。

运行特征存在差异的主要原因是合流车辆与分流车辆对主线交通流的影响不同。车辆在换道过程中主要通过横向运动来改变车道,因此需要从横向和纵向 2 个方向对换道行为进行分析。本文将车辆横向位移(Δy)超过车道宽度(3.5 m)的 50% 即视为换道开始,位移超过 90% 视为换道完成,换道车辆与辅助车道车道线交点作为车辆变道位置,具体如图 9 所示。

3 车辆分合流换道行为特征

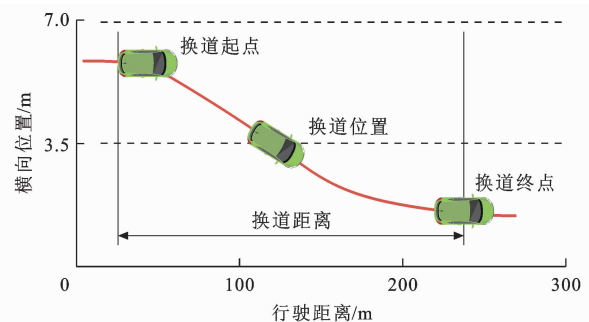
分析交织区内不同车道的车辆运行特性可知,外侧车道与辅助车道车辆行驶风险较高,不同车道车辆

图 9 换道特征数据提取

Fig. 9 Lane change feature data extraction

3.1 分合流车辆换道平稳性分析

在分合流车辆换道过程中,速度、加速度均值、换道时长与换道距离等指标与换道平稳性密切相



关,平稳性越高,则换道行为越安全,李林波等^[38]的研究表明低速换道时适当延长时长可提升平稳性。因此本文提取所有分合流车辆换道过程的运行数据,分析车辆的换道特征,其结果如图10所示。由图10(a)~(c)可知,与合流车辆相比,分流车辆的速度加速度分布更为集中。这是由于合流车辆汇入主线时需从低速逐渐加速以匹配主路车速,而分流车辆驶离主线时通常已减速,使得合流车辆换道时需频繁加速或减速,速度和加速度分布较为分散;分流车辆则更多进行横向移动,如变道或避让,速度分布相对集中。驾驶人的加速、减速和转向行为直接影响车辆的速度和加速度分布,合流车辆需要更多纵向操作,而分流车辆则侧重于横向移动。

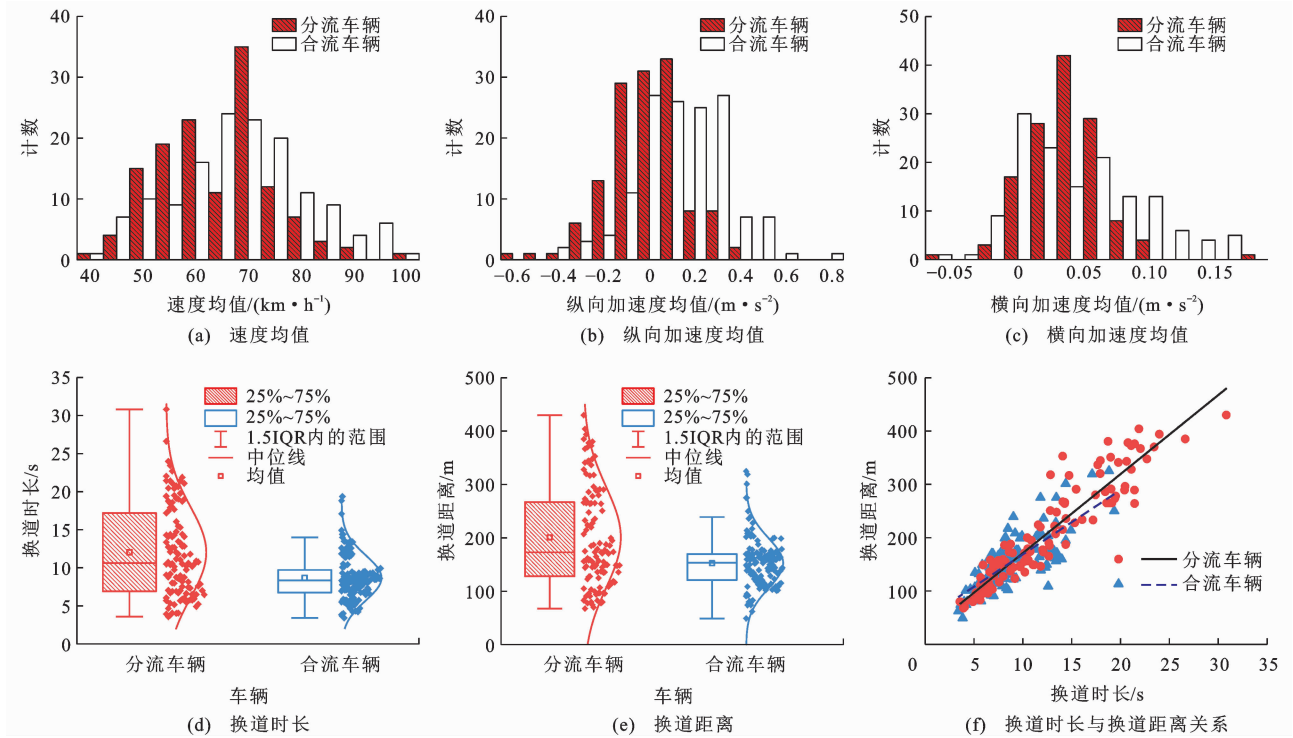


图10 分合流车辆换道特性

Fig. 10 Lane-changing characteristics of merging vehicles

3.2 车辆换道位置选择特征

利用DFS平台筛选出匝道进入主线的合流车辆以及主线驶入匝道的分流车辆,共计141辆合流车辆和131辆分流车辆,绘制车辆轨迹图,并提取车辆轨迹与辅助车道车道线交点作为车辆变道驶入或驶出主线的换道位置,绘制散点图以及分合流车辆换道位置横坐标位置分布图,如图11所示。

从图11中可知,合流车辆换道行为高度集中于合流鼻点后短距离范围内(横坐标位置不大于200 m),频数分布呈现单峰集中趋势,累积频率曲线显示其换道位置在200 m内累积占比达75%;而分流车辆

通过对比分析图10(d)、(e)可知,分流车辆换道时长及距离分布范围显著大于合流车辆。数据显示,分流车辆换道时长及距离分别集中于20~35 s和300~500 m区间,而合流车辆则集中于10~25 s和100~300 m区间。说明分流车辆需在有限距离内完成减速及匝道驶入操作;合流车辆则需加速匹配主线车流速度,其换道距离受车流间隙与速度梯度限制,故换道时长较短。进一步分析图10(f)发现,分流车辆换道距离每增加100 m,时长增幅逐渐趋缓,表明长距离换道可通过速度调整优化时间效率;而合流车辆在短距离换道(<200 m)时长随距离增加显著上升,在长距离(>200 m)时长趋于稳定,说明合流车辆需在有限距离内需快速完成加速与并道。

换道位置分布范围更广(0~500 m),呈现多峰分散特征,累积频率增长平缓,表明其换道行为具有长距提前性。箱型图显示,合流车辆换道位置中位数(100 m)显著低于分流车辆(300 m),且其四分位距(25%~75%)集中于50~150 m,分布离散性较小;分流车辆箱型分布范围跨越150~450 m,离散性较大,均值(320 m)与中位数存在偏差,说明车辆合流会受到更多因素的影响如主线交通量、主线速度等,而分流车辆换道位置更多地受到道路设计和交通规则约束呈现右偏特征。合流车辆短距集中换道导致鼻点后局部区域交通流扰动加剧,与直行车辆速

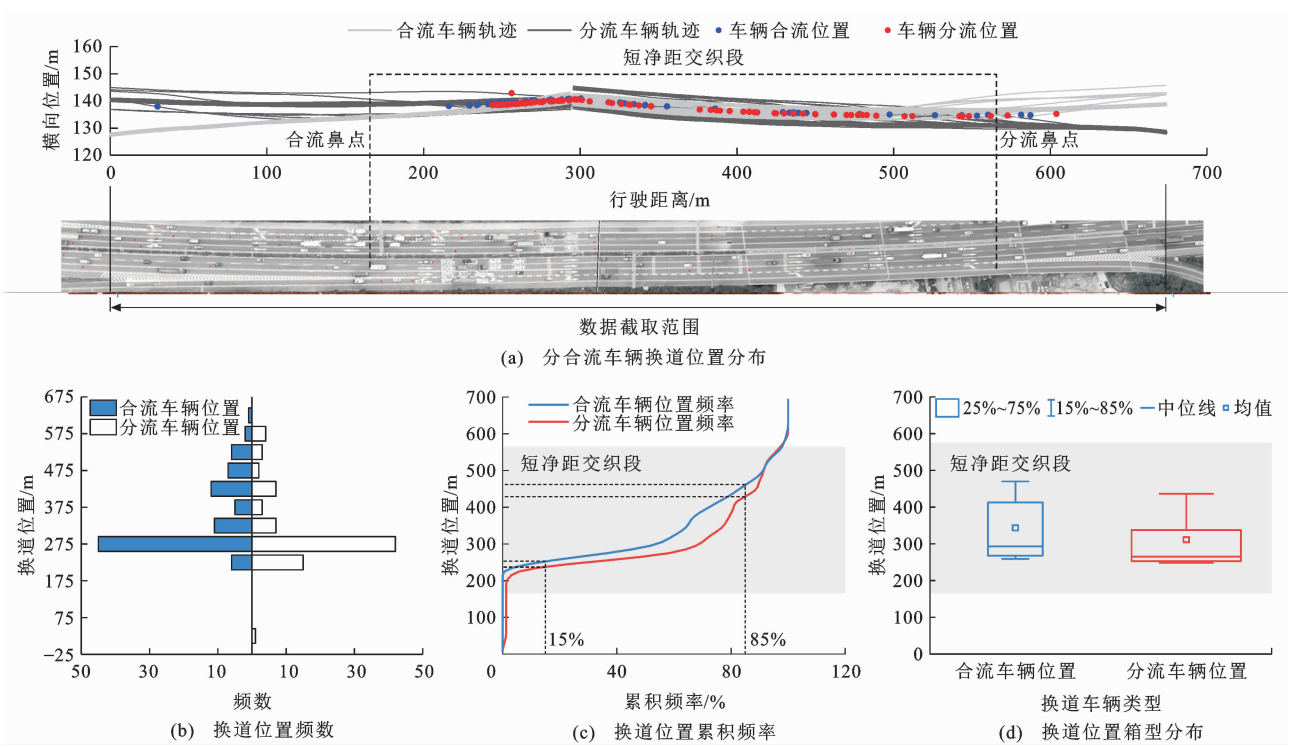


图 11 分合流车辆轨迹及换道位置分布

Fig. 11 Distribution of trajectories and lane-changing locations for diverging and merging vehicles

度差扩大引发冲突;分流车辆长距分散换道虽降低局部密度,但提前换道需求与主线车辆动态交互时间延长,可能加剧交织段整体风险。

4 交织区交通冲突分布与行车风险

4.1 交通冲突阈值确定及类型划分

由上文分析可知,由于分合流车辆的驶入驶出,分流车辆、合流车辆及主线行驶车辆间存在冲突,且交通冲突之间的潜在后果严重性存在很大区别。因此交织区内车辆状态可分为直行车辆、分流车辆与合流车辆 3 类,按照冲突发生的车辆状态将冲突分为以下 6 类:直行车辆与分流车辆冲突(S-F);直行车辆与合流车辆冲突(S-H);直行车辆与直行车辆冲突(S-S);分流车辆与合流车辆冲突(F-H);分流车辆与分流车辆冲突(F-F);合流车辆与合流车辆冲突(H-H)。交织区内车辆冲突大体上可以分为 2 类:一类是同一行驶目的的车辆间因变道或未控制好车速而产生的冲突(如:S-S、F-F、H-H);另一类是不同行驶目的的车辆间因侵占车道而产生的冲突(如:S-F、S-H、F-H)。如图 12(a)、(b)所示。

本研究在完成数据采集后,基于视频识别输出的交通冲突数据,将各个研究区域内的 TTC(Time to Collision)数据汇总并绘制相对频率柱状图和累积频率曲线[图 12(c)]。本文采用累积频率法来划

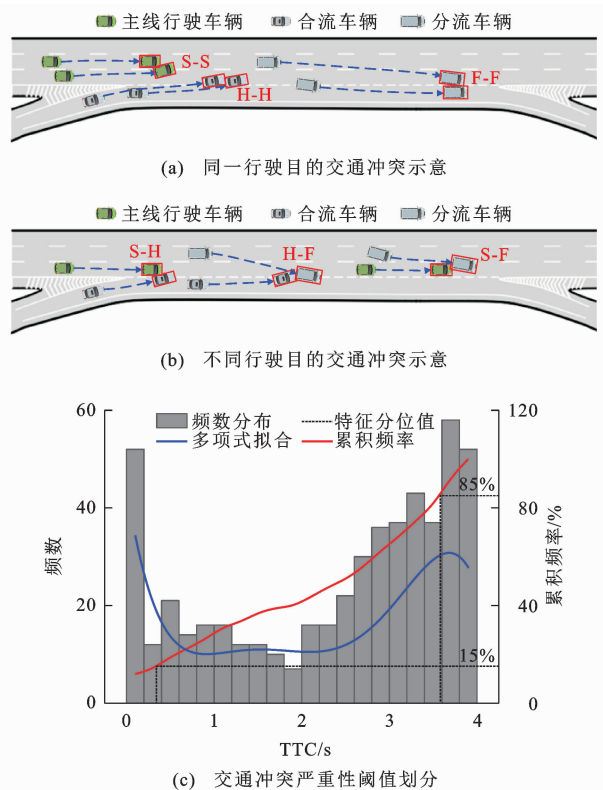


图 12 交通冲突严重性及冲突类型划分

Fig. 12 Classification of traffic conflict severity and types

分各类冲突的阈值区间,选取 15%和 85%分位值作为关键阈值节点划分冲突等级——前者界定严重冲突与中度冲突的临界值,后者标定一般冲突向轻微冲

突过渡的分界线。经计算确定该场景严重冲突区间为(0,0.516] s,一般冲突区间为(0.516,3.733] s,轻微冲突区间为(3.733,4.000] s。

4.2 交通冲突空间分布

统计不同类型冲突发生次数及其严重程度,绘制柱状图如图 13 所示。由图可知,在同一行驶目的的冲突下,直行与直行车辆间冲突数远高于其他两类,但严重冲突所占比例最小,说明冲突数与车辆数成正相关,冲突严重程度与车辆行驶目的的高度相关。分流车辆与合流车辆数相当,但分流车辆间冲突数高于合流车辆间冲突数,且严重冲突比例也高于后者,说明当净距较短时,分流车辆间的危险高于合流车辆间。发生这一现象的原因可能是分流车辆在短距离短时间内必须加速驶离主线,速度较高的车辆集中在辅助车道,易增加车辆间的冲突。

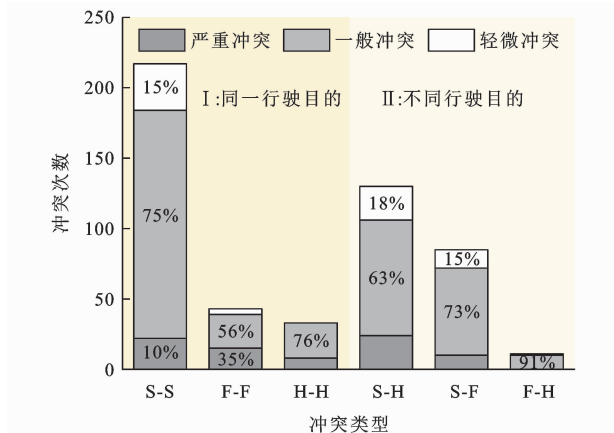


图 13 不同交通冲突类型特征分布

Fig. 13 Feature distribution of different traffic conflict types

在不同行驶目的的冲突下,直行与合流车辆冲突数及冲突严重程度均高于其他两类,表明合流车辆汇入主线的影响高于分流车辆驶离主线。从上文可知,主线车辆与合流车辆速度差较大,主线车辆与分流车辆速度差较小,说明行驶目的不同时,较大的速度差更易导致交通冲突。而分流与合流车辆速度差更大,但冲突数较少的原因与车辆分流位置选择及样本量有关。直行-合流冲突的高频率(25%)与高严重性(18%)验证了合流鼻点附近因速度差导致的动态失衡,与前期分析的合流车辆短距换道行为引发的扰动一致。

为更直观展示交织区交通冲突的分布,统计每个冲突发生时冲突点的 X 值与 Y 值,在每个数据点周围放置一个核函数,对整个数据区域进行密度估计,并绘制交织区交通冲突的空间分布图以及箱线图,如图 14 所示,颜色越深代表该区域的密度越高,

发生交通冲突次数更多。由于 DFS 软件是根据车辆间速度及当前位置计算交通冲突,存在车辆在短净距交织段内行驶,但发生冲突的位置并不完全在交织段内的情况,因此绘制交通冲突图像时,与上文数据截取范围不一致。

从图 14 可以看出,交织区内冲突数量呈现先增多后减少的趋势,严重冲突也主要发生在短净距交织段中间,这是由于交织段内存在多种行驶目的的车辆,不同类型冲突数在短净距交织段内达到峰值。直行与分流车辆冲突多集中于合流鼻点前后 200 m,分流与分流车辆冲突多集中于分流鼻点前后 200 m,合流与合流车辆、直行与合流车辆这两类冲突均集中在交织区后半段,分流与合流车辆冲突集中在交织区中段。说明分流车辆与其他行驶目的的车辆间冲突分布范围较大,这与前文分析的合流车辆为短距换道,分流车辆为长距换道存在关系。

《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)规定立交加速车道长度阈值为 320 m,减速车道长度阈值为 245 m。根据本文交织区的特定情况,综合前文分流车辆换道行为的特征可知,合流车辆受主线车流速度梯度约束,需在有限距离内完成加速并匹配车流间隙,导致换道位置集中(箱型图中中位线 100 m,四分位距 50~150 m)。短距离换道易引发速度差冲突,需通过加速车道长度与渐变段协同设计缓解扰动,如优化渐变段曲率避免换道位置过度分散而导致合流车辆与主线车辆交互时间过长,同时辅助合流车辆加速。

而分流车辆的换道行为受道路设计引导(如预告标志、标线),换道位置分散(均值 320 m,箱型范围 150~450 m)。当换道长度不小于 500 m 时可分散车辆轨迹,降低局部区域密度[图 9(d)中换道距离分布多峰特征],避免交织段风险累积,契合驾驶人长距提前变道习惯,减少因换道需求集中引发的急刹。

5 结 语

(1)各车道车辆行驶速度与加速度特征差异显著,外侧车道因净距压缩形成反喇叭型加速特征(速度均值提升 12.3%);速度离散性时空分异显著,外侧车道在分流鼻前 200 m 带宽值骤增 23%,辅助车道通过“加速-减速”双阶段策略实现通行效率优化;外侧车道 15%分位值($52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)恰为辅助车道临界速度。

(2)车头间距分布呈现显著车道差异,主线车道呈负偏态分布(峰值 0~80 m,累积频率不小于

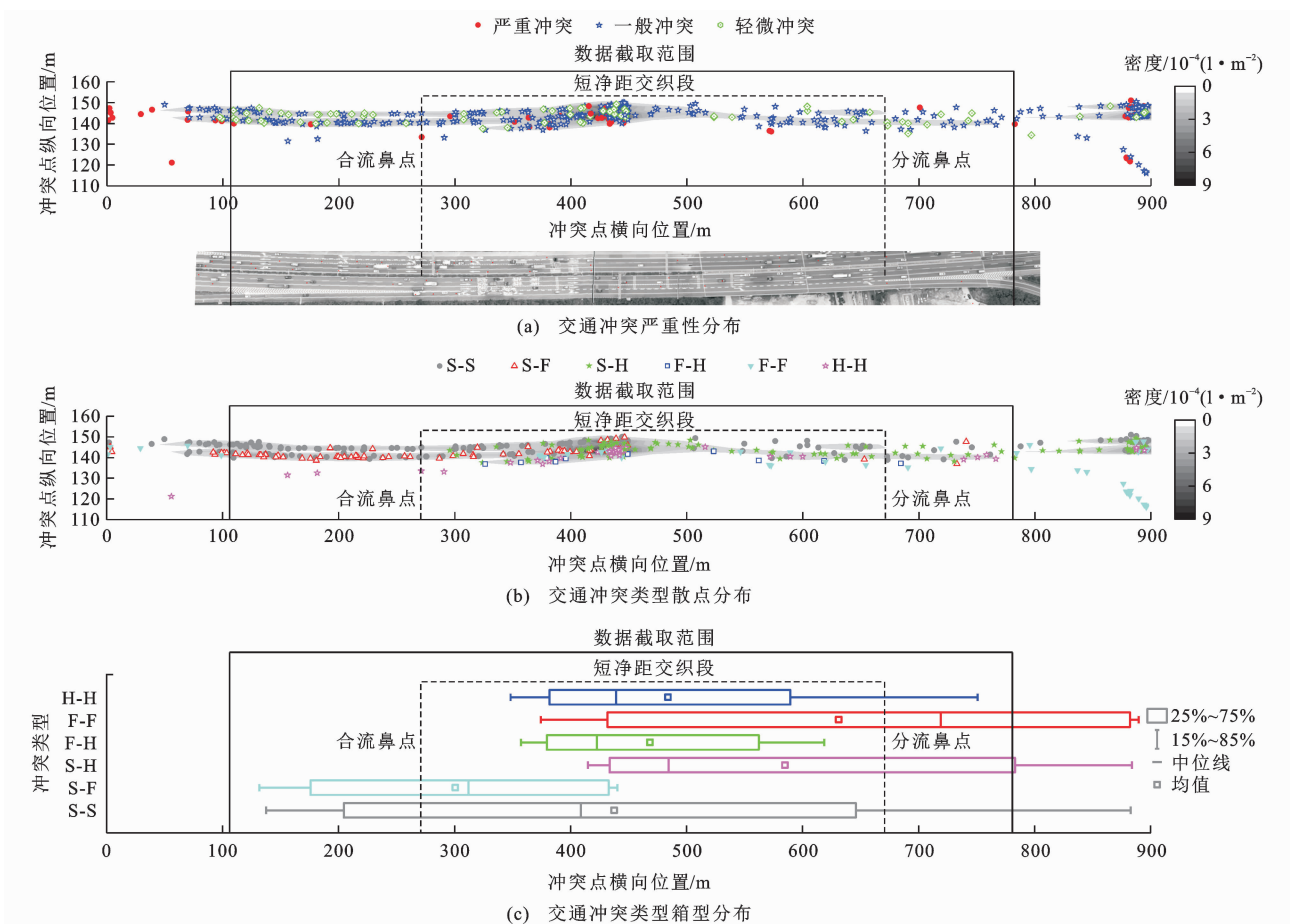


图 14 交织区交通冲突空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of traffic conflicts in weaving areas

75%), 外侧车道因交织压缩效应峰值前移 20 m; 内侧车道危险间距占比达 61.1%, 辅助车道高速区危险间距发生率激增至 71.6%。车型组合导致速度异质分化, 辅助车道呈现“加速汇入-减速分离”特征, 整体风险最高, 高风险区间占比达 10.5%。

(3) 合流车辆为短距换道, 集中于合流鼻点后 200 m, 而分流车辆为长距换道, 位置提前且受道路约束; 短净距交织区交通冲突数与与车辆数呈正相关, 其冲突严重程度与行驶目的关联更紧密。分流车辆因短净距内需加速驶离主线, 其冲突数及严重性均高于合流车辆。且由于主线与合流车辆速度差较大, 导致直行-合流冲突更频繁且严重。

(4) 分流车辆通过延长时空尺度保障行驶平稳性, 合流车辆则通过压缩操作时间适应车流动态。因此建议在分流区设计中, 建议适当增加换道区长度(推荐值不小于 500 m)以降低急刹风险; 合流区应重点优化加速车道几何参数, 确保车辆能在速度匹配条件下安全汇入。

(5) 本研究结论可为短净距立交交织段的设计与交通管控提供理论依据。但研究存在一定局限性, 研

究场景过于单一, 缺乏不同净距、不同交通量条件下的数据对比, 且行车风险仅采用 TTC 指标进行评价。在后续研究中, 将采集多个短净距交织区路段的车辆轨迹数据, 分析不同交通特性与道路特征下的车辆运行规律, 构建适用于短净距交织区的行车风险综合评价指标体系, 进一步完善研究结果。

参考文献:

References:

[1] LE T Q, PORTER R J. Safety evaluation of geometric design criteria for spacing of entrance-exit ramp sequence and use of auxiliary lanes[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2012(2309): 12-20.

[2] HE H Y, SUN Z Q, HE H, et al. How interchange spacing effects drivers' visual performance in high-density interchange groups-a naturalistic driving study[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2024, 104: 433-448.

[3] RIM H, ABDEL-ATY M, MAHMOUD N. Multi-vehicle safety functions for freeway weaving segments using lane-level traffic data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 188: 107113.

- [4] 郭唐仪, LIN Xiao-li, KRACHT Matthias. 高速公路出口匝道事故预测模型优选及弹性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(3): 682-686.
GUO Tang-yi, LIN Xiao-li, KRACHT Matthias. Selection and elastic analysis of crash prediction models for freeway exit ramp[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(3): 682-686.
- [5] 胡江碧, 何禄诚, 王荣华. 高速公路互通立交安全性评价研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 17-28.
HU Jiang-bi, HE Lu-cheng, WANG Rong-hua. Review of safety evaluation of freeway interchange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 17-28.
- [6] PANG M Y, JIA B, XIE D F, et al. A probability lane-changing model considering memory effect and driver heterogeneity[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2020, 8(1): 72-89.
- [7] HOEL C J, WOLFF K, LAINE L. Automated speed and lane change decision making using deep reinforcement learning[C]// IEEE. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2018: 2148-2155.
- [8] HESS S, CHOUDHURY C F, BLIEMER M C J, et al. Modelling lane changing behaviour in approaches to roadworks: Contrasting and combining driving simulator data with stated choice data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 112: 282-294.
- [9] LIN X, WANG C Z, WANG K P, et al. Trajectory planning for unmanned aerial vehicles in complicated urban environments: A control network approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103120.
- [10] HAO W, ZHANG Z L, GAO Z B, et al. Research on mandatory lane-changing behavior in highway weaving sections [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(1): 3754062.
- [11] 邬 岚, 陈雨欣, 陈 茜, 等. 城市连续隧道交织区主线交织车辆换道点选择行为研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 46-52.
WU Lan, CHEN Yu-xin, CHEN Qian, et al. Lane change point selection behavior for mainline weaving vehicles in urban continuous tunnel weaving areas[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(5): 46-52.
- [12] 潘兵宏, 李圳发, 何勇海, 等. 单向三车道高速公路主线分流方式适应的交通量和分流比例[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2026, 46(1): 153-174.
PAN Bing-hong, LI Zhen-fa, HE Yong-hai, et al. Traffic volumes and diversion ratios adapted to mainline diversion mode of one-way three-lane highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2026, 46(1): 153-174.
- [13] 邬 岚, 赵 颀, 陈雨欣, 等. 基于双向搜索的快速路互通交织区智能网联车辆协同换道控制方法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2024, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241097>.
WU Lan, ZHAO Yi, CHEN Yu-xin, et al. Cooperative lane change control method of intelligent connected vehicles in expressway interweaving area based on two-way search[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2024, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241097>.
- [14] PARK H, OH C, MOON J, et al. Development of a lane change risk index using vehicle trajectory data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 110: 1-8.
- [15] CHEN T Y, SHI X P, WONG Y D. Key feature selection and risk prediction for lane-changing behaviors based on vehicles' trajectory data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 129: 156-169.
- [16] 程国柱, 孟凤威, 徐 亮. 城市快速路合流区智能网联车辆换道风险实时评估方法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2025, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240632>.
CHENG Guo-zhu, MENG Feng-wei, Xu Liang. Real-time risk assessment method for connected autonomous vehicle lane changing on urban express-ways[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2025, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240632>.
- [17] 谢济铭, 夏玉兰, 钱正富, 等. 考虑智能网联近邻车辆信息的交织区换道风险预警[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 287-300.
XIE Ji-ming, XIA Yu-lan, QIAN Zheng-fu, et al. Lane-change risk warning in interweaving area considering information from intelligent connected near-neighboring vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 287-300.
- [18] 赵红专, 代 静, 张继康, 等. V2X 环境下基于圆风险域的交通冲突识别模型[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(1): 74-82.
ZHAO Hong-zhuan, DAI Jing, ZHANG Ji-kang, et al. Traffic conflict recognition model based on circular risk region under V2X environment[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2024, 41(1): 74-82.
- [19] CHEN T Y, SHI X P, WONG Y D, et al. Predicting lane-changing risk level based on vehicles' space-series features: A pre-emptive learning approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 116: 102646.
- [20] SHANGGUAN QQ, FU T, WANG J H, et al. A proactive lane-changing risk prediction framework considering driving intention recognition and different lane-changing patterns[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 164: 106500.
- [21] 冯玉荣, 杨少伟, 杨宏志, 等. 高速公路交织区运行分析方法对比研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(8): 134-143.
FENG Yu-rong, YANG Shao-wei, YANG Hong-zhi, et al. Comparative study on operation analysis methods of expressway weaving area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(8): 134-143.
- [22] 王子鸣, 李树彬, 崔 帅. 基于交通冲突的主干路交织区特性与安全研究[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 236-245.
WANG Zi-ming, LI Shu-bin, CUI Shuai. Characteristics and safety of weaving areas of trunk roads based on traffic

- conflicts[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2024, 44(3): 236-245.
- [23] 徐进,崔强,常旭,等.苜蓿叶形互通立交进/出口的纵向驾驶行为特征[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2019,49(6):1205-1214.
XU Jin, CUI Qiang, CHANG Xu, et al. Longitudinal driving behavior characteristics at approaching/departing areas of clover leaf interchange[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1205-1214.
- [24] 陈宽民,田甜,夏立品.基于GIS技术的小间距互通交织区交通特性研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2018,37(7):80-84.
CHEN Kuan-min, TIAN Tian, XIA Li-pin. Research on traffic characteristics of small spacing between interchanges based on GIS technology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2018, 37(7): 80-84.
- [25] LIAO Y G, YANG Y, DING Z Z, et al. Risk distribution characteristics and optimization of short weaving area for complex municipal interchanges[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 5573335.
- [26] ZHAO X H, DING Y, YAO Y, et al. A multinomial logit model: Safety risk analysis of interchange area based on aggregate driving behavior data[J]. *Journal of Safety Research*, 2022, 80: 27-38.
- [27] 梅家林,杜志刚,王首硕.不同时段高速公路特长隧道入口视觉特性研究[J].*武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*,2022,46(1):50-53.
MEI Jia-lin, DU Zhi-gang, WANG Shou-shuo. Study on visual characteristics of the entrance of extra-long tunnel of expressway in different time periods[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2022, 46(1): 50-53.
- [28] WANG Y P, XU J, LIU X L, et al. Analysis on risk characteristics of traffic accidents in small-spacing expressway interchange[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 9938.
- [29] YUAN J H, ABDEL-ATY M, CAI Q, et al. Investigating drivers' mandatory lane change behavior on the weaving section of freeway with managed lanes: A driving simulator study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 62: 11-32.
- [30] SHANG T, LIAN G, ZHAO Y C, et al. Off-ramp vehicle mandatory lane-changing duration in small spacing section of tunnel-interchange section based on survival analysis[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022: 9427052.
- [31] 戴振华,廖祺硕,潘存书,等.城市干路交叉口右转车辆轨迹流线与曲率特性分析[J].*交通信息与安全*,2022,40(4):157-166.
DAI Zhen-hua, LIAO Qi-shuo, PAN Cun-shu, et al. An analysis of trajectory streamline and curvature characteristics of right-turn vehicles at urban arterial road intersections[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(4): 157-166.
- [32] 刘小明.基于高空视频图像的山地城市道路交叉口车辆运行特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
LIU Xiao-ming. Study on vehicle operation characteristics of road intersections in mountainous cities based on aerial videos[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [33] 杨迪.高密度互通立交出入口驾驶人精神负荷研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
YANG Di. Study on driver's mental workload at the entrance and exit of high-density interchange [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [34] 王延鹏,张杰,潘存书,等.高速公路小净距互通立交车辆纵向运行特性[J].*交通信息与安全*,2024,42(2):147-157.
WANG Yan-peng, ZHANG Jie, PAN Cun-shu, et al. Longitudinal operational characteristics of cars between small-spacing interchanges on freeway[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2024, 42(2): 147-157.
- [35] MOON S, YI K. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(8): 661-690.
- [36] 潘兵宏,王潮,王俏,等.基于微观换道的高速公路双车道出口辅助车道长度研究[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2022,50(11):1647-1657.
PAN Bing-hong, WANG Chao, WANG Qiao, et al. A study of length of auxiliary lanes for two-lane expressway exits based on microscopic lane change[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(11): 1647-1657.
- [37] 何晖宇,丁瑞,应聘,等.苜蓿叶立交交织区冲突特征及严重程度影响因素分析[J].*交通运输系统工程与信息*,2024,24(5):246-258.
HE Hui-yu, DING Rui, YING Dan, et al. Conflict features and impact factors of severity in weaving area of cloverleaf interchange[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(5): 246-258.
- [38] 李林波,李杨,邹亚杰.基于时依等比例风险回归模型的换道时长影响因素[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2021,49(7):933-940.
LI Lin-bo, LI Yang, ZOU Ya-jie. Factors affecting lane-changing duration based on time-dependent proportional-hazards regression model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(7): 933-940.