

张 驰, 宁子尧, 张 敏, 等. 高速公路互通立交交织段硬路肩开放策略[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2026, 46(2): 106-116.

ZHANG Chi, NING Zi-yao, ZHANG Min, et al. Hard shoulder opening strategy for weaving sections of expressway interchanges[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2026, 46(2): 106-116.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2026.02.008

高速公路互通立交交织段硬路肩开放策略

张 驰¹, 宁子尧¹, 张 敏², 宋金明¹, 国廷玉¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为缓解高峰期间绕城高速公路互通立交交织区的拥堵与安全风险, 聚焦硬路肩临时开放策略的安全性及通行效率影响, 在定量评估的基础上提出决策建议。利用无人机航拍获取包含主线与匝道全视角的高分辨率车辆轨迹视频, 通过 DataFromSky 视觉识别软件自动提取车辆路径, 并进行数据坐标转换处理, 统一度量各车道车辆的运动特征。在此基础上, 引入改进的事故时间指数 (ITA) 以增强对速度差异情境的敏感性, 并采用核密度估计方法对车辆合流、分流点进行空间聚类, 对比分析硬路肩关闭与开放 2 种工况下的风险分布。研究结果表明: 在硬路肩未开放时, 交织区潜在冲突集中于主线内侧一、二车道, 风险峰值高达 1.8×10^{-3} ; 启用硬路肩后, 风险热点向外侧车道及硬路肩转移, 峰值降至 7.0×10^{-4} , 主线内侧车道风险显著减小, 但当匝道与主线流量比超过 0.25 或匝道与三车道流量比高于 1 时, 外侧车道和硬路肩容易形成新的拥堵与冲突集聚; 核密度与 ITA 结果高度相关, 揭示了外侧车速差异大和频繁换道是高风险区出现的主要原因; 基于流量比阈值划分, 提出按匝道与主线或三车道流量比分段控制硬路肩启闭的策略, 并建议配合限速、车道引导等措施, 指导在不同流量状态下合理动态开放硬路肩, 为城市绕城高速的交通安全管理和效率提升提供科学依据。

关键词: 交通工程; 硬路肩开放; 核密度估计; 交织区; 无人机航拍

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2026)02-0106-11

Hard shoulder opening strategy for weaving sections of expressway interchanges

ZHANG Chi¹, NING Zi-yao¹, ZHANG Min², SONG Jin-ming¹, GUO Ting-yu¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To alleviate congestion and safety risks in weaving sections of ring expressway interchanges during peak periods, a quantitative evaluation was carried out to examine the safety and efficiency impacts of temporarily opening the hard shoulder, and decision making recommendations were derived. High resolution vehicle trajectory videos covering the mainline and ramps were obtained by using unmanned aerial vehicles (UAVs). Vehicle paths were automatically extracted via the DataFromSky vision recognition software, and the trajectory data

收稿日期: 2025-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005); 四川省科技计划项目(2022YFG0048); 陕西省社会科学基金项目(2025R018)

作者简介: 张 驰(1981-), 男, 四川宜宾人, 教授, 工学博士, 从事公路路线安全研究, E-mail: zhangchi@chd.edu.cn.

were transformed into a Frenet coordinate system to standardize the motion characteristics across lanes. On this basis, a modified incident time analysis (ITA) index was introduced to enhance sensitivity to speed difference scenarios, and kernel density estimation (KDE) was employed to cluster the spatial distribution of merging and diverging points, so that risk distributions under hard shoulder closed and hard shoulder open conditions were compared. The results show that when the hard shoulder is closed, potential conflicts in the weaving area are concentrated on the first and second inner lanes of the mainline, with risk peaks up to 1.8×10^{-3} . After the hard shoulder is opened, risk hot spots shift toward the outer lane and shoulder, the peak decreases to 7.0×10^{-4} and the risk on the inner lanes significantly reduces. But when the ramp to mainline flow ratio exceeds 0.25 or the ramp to three lane flow ratio exceeds 1.0, new clusters of congestion and conflicts tend to form on the outer lane and hard shoulder. In addition, the kernel density and ITA results are highly correlated, revealing that large speed difference and frequent lane change in the outer lane are the main reasons for the occurrence of high risk areas. Based on flow ratio thresholds, a segmented control strategy was proposed to open or close the hard shoulder according to the ramp to mainline or ramp to three lane flow ratios. It is suggested that such control should be coordinated with speed limits and lane guidance measures, providing a scientific basis for dynamically opening the hard shoulder under different traffic conditions and improving traffic safety and efficiency on ring expressways. 1 tab, 7 figs, 35 refs.

Key words: traffic engineering; hard shoulder opening; KDE; interchange area; UAV

Author resume: ZHANG Chi (1981-), male, professor, PhD, zhangchi@chd.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2020YFC1512005); Science and Technology Program of Sichuan Province (2022YFG0048); Social Science Foundation of Shaanxi Province (2025R018)

0 引言

随着中国城市化的快速发展,部分城市的交通需求已远超道路供给能力,导致高峰时段拥堵频发^[1]。随着绕城高速公路交通量持续攀升,交织区的合流与分流矛盾日益突出。为缓解高峰期拥堵,许多国家和地区陆续尝试在特定时段临时开放硬路肩以增加可用车道数。中国近年来陆续出台政策支持这一做法,如交通运输部与公安部2022年共同发布的行动方案提出对易拥堵路段实行硬路肩动态调整,以提升缓堵能力;2024年初多部门联合印发通知,进一步明确在安全条件允许情况下,可暂时将应急车道作为行车道并增设停车港湾,以提高道路通行效率。尽管这一措施在扩容方面取得一定成效,却也引发新的安全隐患:外侧车道跨多车道变道更频繁,交织区的交通干扰和碰撞潜在风险随之上升^[2]。

在国内外现有案例中,一些欧洲国家采用动态硬路肩管理通过专门控制中心和传感器网络^[3-5],对

高速公路流量和事故情形进行实时监测,可在流量接近饱和时临时开放硬路肩,并利用可变信息标志引导车辆快速切换;英国在M42高速公路开展了类似试点,综合采取“匝道流量管控+限速+硬路肩动态开放”的组合策略^[6]。美国采用Managed Lane理念,将主线车道与可变收费车道或高载客量车道(HOV/HOT)相结合^[7],辅以可变信息系统引导和事故快速清理等手段,从而提高了高峰时段的通行效率。随着车联网和大数据技术的发展,AI及机器学习逐渐被引入高速公路实时管理中:通过整合传感器网络(如地磁、毫米波雷达、路侧摄像头)和车辆动态数据(OBD、GPS等),利用深度学习或贝叶斯网络等方法对交通量、速度波动、车辆间距等进行实时计算,形成对拥堵风险或碰撞概率的预测模型,可以辅助交通管理中心动态调度硬路肩或专用车道,并与可变情报板联动,及时向驾驶人发布合流、限速或车道变更指令,然而,多车道交织区的微观驾驶行为依旧带来巨大的不确定性^[8]。因此,硬路肩开放后外侧车道与常规车道之间的冲突问题仍未得到充

分解决,尤其缺乏对跨车道合流所带来的风险叠加进行深入研究。

围绕高速公路硬路肩开放所引发的风险分布这一焦点问题,本文采用无人机获取高分辨率交通流视频,从微观角度剖析硬路肩开放对绕城高速公路交织区风险分布的影响^[2]。无人机相较于固定监测设备具有视角灵活、覆盖范围广的特点,可同步监控主线、匝道及应急车道车辆的动态轨迹。选取西安某环城高速典型交织路段为试验对象,从时间和空间 2 个维度对硬路肩开放前后的潜在冲突进行综合分析^[5]。研究结果可明确硬路肩开放后合流分流规律及冲突风险的变化趋势,为城市绕城高速的交通安全管理与效率提升提供科学依据。

1 试验数据采集与预处理

随着交通需求的持续攀升,不少高速公路或绕城快速路在高峰时段尝试临时开放硬路肩,以增加可用车道、缓解主线拥堵。然而,此举在减轻部分车道负荷的同时,也引发了一系列新的交通问题:外侧车道流量迅速集聚,跨车道变道频次增多,尤其在立交出入口附近,合流与分流更加频繁,局部拥堵与潜在冲突进一步加剧。加之硬路肩本身并非常规行车带,一旦车辆故障或紧急情况发生,处置难度和对整体交通的干扰也随之上升^[4]。针对这些现象,要通过更系统和细致的观测手段,对硬路肩开放后道路实际运行状况进行深入评估。

1.1 开放硬路肩适用路段

硬路肩的开放主要用于在特定条件下增大通行能力或加快交通疏散,从而缓解高速公路的交通压力。

1.1.1 高峰期常发拥堵的瓶颈路段

部分高速公路由于建设时期的设计规模相对保守,难以满足当前持续增长的交通需求,尤其在承担集散功能的绕城高速路段,立交匝道的频繁分合流常形成瓶颈^[7]。高峰时段交通流过饱和易导致拥堵。此时,若临时开放硬路肩,可在一定范围内为主线或匝道分流提供额外横向空间,减缓内侧车道的排队压力。

1.1.2 事故位置保通或拥堵疏散路段

高速公路发生偶发性事故时,由于其全封闭特征,排障和交通疏散的难度较大。若在事故地点附近开放硬路肩,可在短时间内增加可用车道数,对缓解排队和加速事故处置具有显著效果。

1.1.3 改扩建施工保通路段

高速公路在改扩建或提质升级施工期间,常需要占用部分主线车道,使得可通行的横向空间受限。适时启用硬路肩,可在一定程度上保证施工期间的通行能力^[8]。

1.2 研究路段概述

本文选取了双向六车道高速公路交织区作为试验对象,重点关注硬路肩在高峰时段临时开放对交通运行与安全的影响。为保证研究具有较强的针对性与代表性,试验路段须同时满足以下要求:①所选路段涵盖基本路段、匝道出入口及交织段等多种交通环境,以便观察合流、分流乃至多车道跨越时车辆的真实行为;②路面状况良好,确保无积水、车辙等病害对车辆行驶特性造成额外干扰;③路段纵坡坡度小于 3%,以减少大坡度引发的显著加减速工况;④试验时视线情况良好且天气晴朗,避免不良气象条件对无人机航拍与车辆速度选择的干扰;⑤交通管理部门应有意愿并具备条件尝试在高峰期发生拥堵期间开放硬路肩,为本文提供可观测的硬路肩开放实景^[9]。

基于上述原则,本文最终选取了西安某绕城交织区作为研究对象。该路段为双向六车道,并在局部匝道出入口分布相对集中,能够形成典型的分合流交织区。路面整体平整、纵坡缓和且交通量在早晚高峰时期呈明显波动,符合本文对多时段、多车流状态的观测需求。此外,当地管理部门正尝试于高峰时段临时启用硬路肩以缓解交通压力,为本文开展无人机航拍、微观车辆轨迹跟踪以及多种工况对比分析创造了良好条件。图 1 为航拍区域全景及硬路肩开放前后风险分布变化情况,其交通风险计算方法在后文指出。

1.3 试验设计与数据采集方法

为了采集精细的交通流数据,本研究选用 DJI Air3 无人机进行路段航拍。无人机相较于固定式地面检测设备,具备视角灵活、覆盖范围大的优势。

为减少单日交通波动或偶发事件的干扰,本文在不同工作日进行了航拍的多日重复性观测(图 2)^[9]。

1.4 车辆轨迹提取与筛分

所采集的视频由 DataFromSky 软件进行自动目标识别与轨迹跟踪。该软件内置成熟的多目标检测算法,能够实时匹配并追踪车辆和行人等对象,并通过几何校正和背景建模等机制减小遮挡误差,使

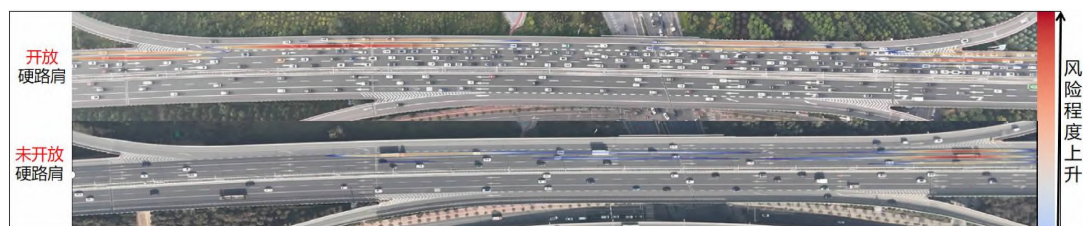


图1 研究路段风险分布对比

Fig.1 Comparison of risk distributions of study sections

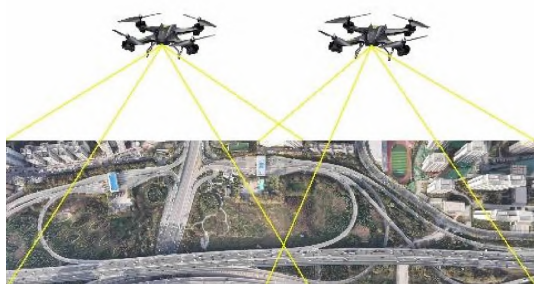


图2 航拍示意

Fig.2 Aerial diagram

输出轨迹数据具有较高的精度与稳定性。在环城高速交织区这种复杂场景下,软件实践效果良好。当车辆短暂被匝道桥或大型车辆遮挡时,系统利用相邻帧的信息预测并填补缺失;若遮挡持续时间较长或识别中断,则辅以人工校正^[10]。获取信息界面如图3所示。

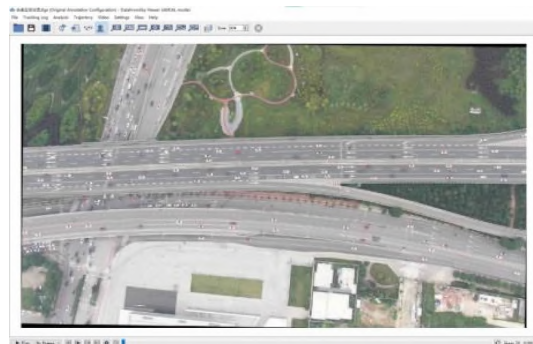


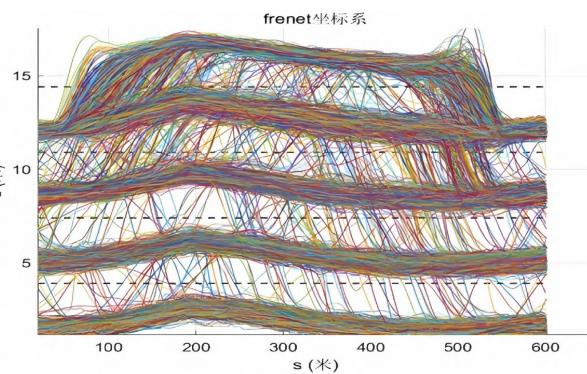
图3 DataFromSky 软件获取信息

Fig.3 Information retrieval from DataFromSky software

为了统一不同车道的轨迹数据,本文将清洗后的图像坐标转换到道路 Frenet 坐标系,计算车辆在纵向和横向方向的位移,从而得到每辆车的时空位置、速度和加速度等连续轨迹信息^[5]。转换方式如图4所示。



(a) 现实车辆轨迹



(b) Frenet车辆轨迹

图4 Frenet 坐标系转换

Fig.4 Frenet coordinate system transformation

帧率与空间分辨率等基本参数如下:帧率为30 帧/s、空间分辨率;每帧图像像素为4 K。

在无人机航拍视频解析后,通常获得的是逐车形式的轨迹数据,即每辆车在整个观察时段内的时空序列,然而,为了在微观层面捕捉车辆间的交互,需要对所有车辆在同一时刻(帧)的相对位置与速度进行对比^[10]。因此,本文进行下列转换步骤:根据视频帧率等信息整合至统一帧数据结

构中。若个别车辆在某时刻存在数据缺失或不同步,可采用线性/样条插值将其补充完整^[11]。

1.5 精度验证与局限性

本文仅选择天气晴朗、能见度良好的时段进行航拍,极端天气或夜间低光环境下的精度对无人机航拍清晰度影响较大,尚未纳入测试。高峰时段车流集中时可能产生局部车辆遮挡,但 DataFromSky 的多帧跟踪算法和人工校对,可将识别丢失率降至

较低水平^[12]。

2 交织区风险区域评估方法

为在硬路肩开放这一特殊场景下开展系统的交通风险评估,本文首先从空间与时间 2 个维度对目标路段进行科学划分,并辅以高分辨率的无人机航拍数据获取车流微观运行特征。在空间维度上,选取立交附近交织区作为典型研究路段在 Frenet 坐标系下对车辆轨迹进行一致化标定;同时,根据匝道与主线的功能布局分合流特点,将纵向区段进一步划分为合流段、交织段和分流段,以便识别不同位置上潜在冲突的空间聚集度^[11]。在时间维度上将采集到的无人机视频统一分为若干具有相似流量水平或特定状态的短时片段,并在早高峰与平峰 2 个主要时段分别提取车辆轨迹,保证从高车流量到相对通畅的多种工况均被覆盖。依托无人机在高空拍摄的视野优势和高分辨率,能够准确捕捉车辆在横纵向上的微观交互行为,并记录其连续速度、加速度与变道情况^[13]。

2.1 路段时空划分

为了系统探讨硬路肩开放对交织区交通风险分布的影响,首先需要对所观测的绕城高速公路路段进行多维度时空划分,并据此确定相应的分析指标。在时间维度方面,基于管理部门对硬路肩的启闭情况及交通量高峰与平峰的变化特征,对所拍摄的全部无人机视频进行统一处理,即将每段连续的航拍视频按照 5 min 为 1 个时间间隔进行分割^[14-15],形成了共计 175 个观测片段,如表 1 所示。

表 1 时间片段划分
Table 1 Time segment division

序号	交织点 数	峰度值	三车道 车辆数	主线 车辆数	匝道 车辆数
1	4 522	0.001 35	91	260	20
2	6 466	0.001 93	89	258	23
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
175	938	0.001 37	18	58	1

2.2 基于 ITA 的交织区冲突风险评估

在交通安全研究领域,碰撞时间(TTC)、后侵入时间(PET)以及避撞减速度(DRAC)等常见冲突指标各有其特点,但各有其适用范围与局限:TTC 要求后车速度大于前车速度才能得到正值,且对突发减速情境描述不足;PET 更适合横向交叉冲突场合,对纵向速度差敏感度有限;DRAC 则主要衡量

后车若要避免碰撞所需的最小减速度,与瞬时横向变道和多车道干扰情境贴合度不足,尤其在硬路肩开放后,外侧车道车速与主线车速的差值显著放大,传统指标在此类高速差或突发减速场景下可能出现评估偏差^[16]。

因此,本文选用改进事故时间指数(ITA)作为主要冲突替代指标。ITA 是在事故时间指数(TA)指标基础上,通过引入速度差指数修正项来放大高速差情境的影响,使其能够更敏感地反映追尾风险^[5]。其常用形式可表示为

$$I_{TA} = \exp[\lambda(v_i - v_j)] \frac{v_i}{s_j - s_i - L_j} \quad (1)$$

式中: I_{TA} 为 ITA 值; v_i 、 v_j 分别为后车 i 与前车 j 在 h 帧的纵向速度; s_i 、 s_j 分别表示车辆 i 、 j 的纵向位置; L_j 为前车 j 车的长度; λ 为对速度差敏感度进行放大的修正系数。

当 $v_i - v_j$ 显著大且 $s_i - s_j - L_j$ 明显偏小, I_{TA} 会迅速提高,表示碰撞在短时间内极有可能发生,说明该区域碰撞概率较高,两车在短时间内极有可能发生碰撞。该指标在交织区复杂车流条件下更具适用性,为后续阈值划分和风险控制提供依据。

2.3 基于核密度估计法的风险区域识别

在本研究中,ITA 通过计算车辆间的相对速度差,并结合车辆之间的距离,能够有效识别出因追尾而可能引发的交通冲突。当后车速度明显大于前车且两车间距较短时,ITA 迅速增高,从而反映出较高的追尾风险。追尾风险并非本文中唯一关注的风险类型,尤其在交织区等复杂交通环境下,横向换道行为和车道间的横向干扰也可能引发潜在的安全隐患。

为全面评估硬路肩开放对交通流的影响,本文进一步引入了核密度估计(KDE),它能够识别并呈现出不同车道上车辆的空间聚集区域。KDE 不仅能够揭示追尾风险的空间分布,还能有效捕捉因车辆换道行为引发的侧向冲突风险^[13]。

KDE 是一种概率密度估计的非参数方法,能够直接根据样本点在空间或时空内的分布,构建相对平滑的密度函数^[6]。不需要预设分布类型,也不依赖具体参数估计过程,可以用于道路交通领域风险热点识别。从地理空间数据挖掘的角度出发,KDE 特别适合处理二维空间点数据的群体分布。具体来讲,若在平面坐标系中有 N 个事件

点,可将它们转换为连续的平滑密度面。核密度越高说明该位置的事件更为集中。与其他密度分析法相比,KDE考虑到点之间的距离衰减,可避免断崖式变化,保证空间分布的连续性。二维KDE的核心思想是:每个事件点都通过1个核函数对周围空间产生影响,并在一定半径范围(即带宽)内逐渐衰减^[11]。对于某平面点,若其周围范围内共有 N 个事件点,则该处的核密度估计可表示为

$$K(x,y) = \frac{1}{Nr^2} \sum_{i=1}^{+\infty} p \left[\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{r^2} \right] \quad (2)$$

式中: r 为带宽,决定核函数影响区域; $K(x,y)$ 为核函数,用于描述事件点 (x_i, y_i) 对目标点 (x, y) 的权重分配。

核函数的选择通常不会对最终结果造成巨大影响,但 r 的设定至关重要,直接决定了密度分布的平滑程度。 r 过大时,事件点间的距离差异被过分平滑,易导致过度光滑,难以凸显实际的聚集特征;若 r 过小,则密度面会呈现突兀不平、局部噪声明显,难以反映整体趋势。因此,正确选择带宽可使核密度估计同时兼顾整体关联性与局部特征^[16],常用方法如下:

(1)固定带宽法最常用的方法是将未知真实密度与估计密度之间的均方误差最小化,以确定最佳

带宽。

(2) k 阶最邻近距离法,相比固定带宽法, k 阶最邻近距离法具有更强的适用性和灵活性。其基本思路是:对于每个事件点 m ,选取距离它最近的 k 个邻近点,并计算该 k 个邻近点与点 m 的平均距离 d_{mm} ;最后,将所有点的平均结果汇总得到带宽 r 。带宽的计算可表示为

$$r = \frac{1}{kN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^k D_{nm} \quad (3)$$

式中: N 为事件点总数; D_{nm} 表示事件点 n 到第 m 个最近邻点的距离。

当 k 增大时, r 也随之增大,密度面更平滑;反之 k 减小时 r 变小,可突出局部峰值。通过对不同 k 的试验对比,可找到兼顾整体与局部聚集度的最优带宽。

在研究高速公路交织区冲突聚集时,若将车辆冲突事件或高风险点视为空间事件点数据,通过对比固定带宽法与 k 阶最邻近距离法的结果,可更灵活地探索不同尺度下的热点分布。本文在实证中主要采用 k 阶最邻近距离法来获得合理带宽,并对外侧车道合流区域的冲突点进行KDE可视化,以确认硬路肩开放是否在此处形成新的冲突高发区段。

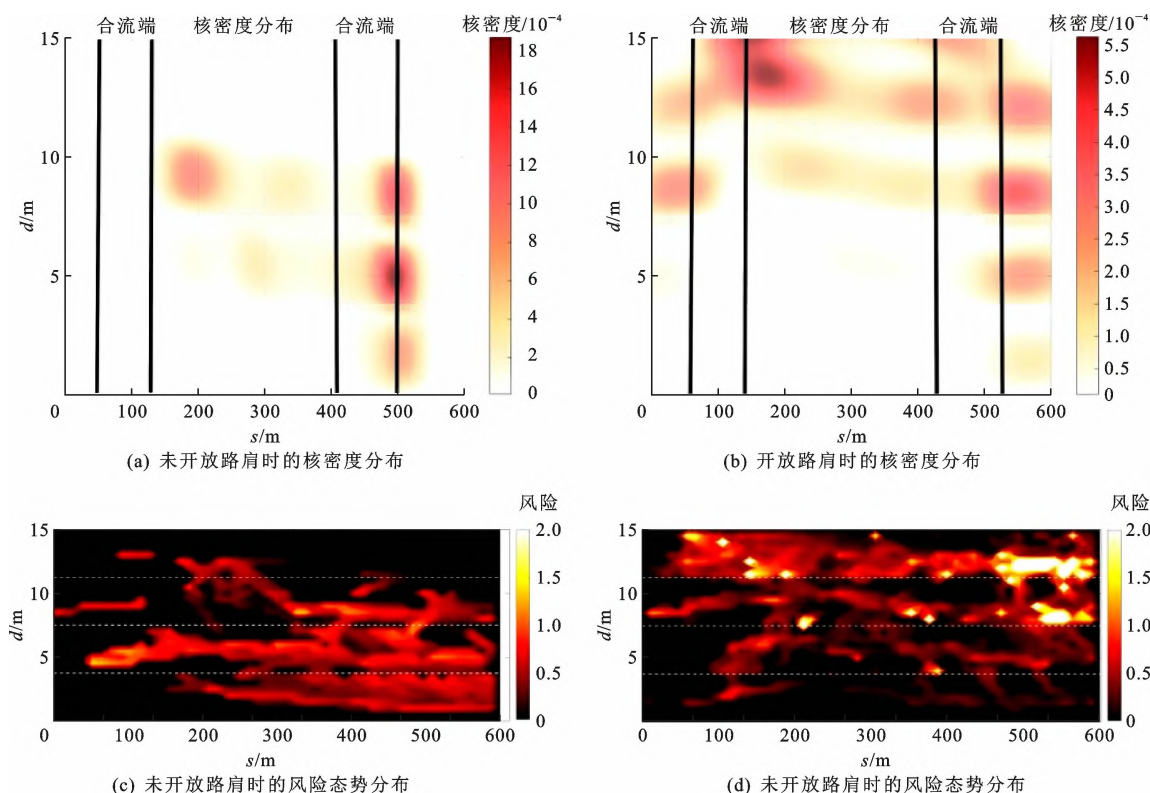


图5 核密度分布与风险态势分布

Fig. 5 Kernel density distributions and risk situation distributions

3 硬路肩开放对交织区交通风险的影响

图 5 为核密度分布与风险态势分布。图 5 中: d 为横向位置, s 为纵向位置。由图 5 可知:在硬路肩未开放的状态下,交织区中的冲突大多集中在主线第 1、2 车道,特别是在匝道汇入或驶离主线的邻近区域,会形成几个明显的高密度风险热点。这是由于主线横向宽度有限,车辆在进入或离开交织区时普遍在主线车道上频繁并线,导致干扰高度集中;相比之下,第 3 车道虽然也发生交织,但密度明显低于内侧车道,说明在硬路肩关闭时,车辆较少在最外侧车道进行汇入或转出^[17]。当硬路肩开放后,交织冲突的高风险区呈现明显外移和分散趋势,主线第 1、2 车道原有的高密度区域显著缓解,局部密度降低并缩小了原先的热点范围;第 3 车道、集散车道乃至硬路肩附近出现了新的高风险聚集区。早高峰时,由于主线车道流量趋于饱和,一部分车辆选择行驶在硬路肩或最外侧车道,使得这些车道上合流和分流行为大增^[18]。交织密度外移到了加减速车道,同时密度峰值从 1.8×10^{-3} 下降到了 7.0×10^{-4} 在最外侧的硬路肩区域,由于车辆进出路线多样、车速差异较大,其局部核密度甚至高于关闭硬路肩时的水平。

交织区事故时间指数的分布与交织点核密度分布具有较强的相关性。硬路肩关闭时,较高的 ITA 主要集中在主线第 1、2 车道。硬路肩开放后,这些区段风险有所降低,但在第 3 车道与硬路肩衔接处 ITA 却显著上升,这与核密度分析观察到的热点外移趋势一致^[19]。但存在个别路段车辆在并入主线后已经完成减速或换道,冲突持续时间较短且风险较低,因此对最终 ITA 的影响较小^[20]。

综合分析认为,硬路肩开放确实缓解了内侧车道的拥堵和交织风险,但同时在外侧车道及硬路肩处形成了新的高风险区域^[21],原因在于硬路肩开放后部分车辆转至硬路肩或外侧车道行驶,降低了主线密度,但硬路肩原本并非常规行车道,其横向宽度有限,安全设施较少,车辆在此处行驶时车速差异大、合流间距变化频繁,局部冲突风险随之上升^[22]。开放硬路肩后有时需横跨更多条车道完成并线^[23],显著提高了发生交通冲突的可能性^[22]。在车速波动较大的早高峰,频繁的多车道换道更易引发安全事件。存在不少主线车辆借助硬路肩及集散车道加速后再并入主线,导致合流区出现异常拥堵和高风

险;当硬路肩交通量超过其安全承载阈值时,车辆间横向干扰和纵向速度差快速累积,使 I_{TA} 显著增加^[24]。

4 硬路肩开放条件的量化评估与策略

第 3 节利用 KDE 和 ITA 详细分析了硬路肩开放对交织区车流风险分布的影响,发现硬路肩在减轻内侧车道冲突的同时,也会在外侧车道和匝道汇合处引发新的潜在冲突热点。为了进一步分析何时开启硬路肩这一实践需求,本节将基于多时段的流量比例与风险峰度值,从量化角度探讨硬路肩开放的适宜时机^[25]。

为揭示硬路肩开放前后不同时段内匝道与主线、三车道的流量对比对交织区风险的影响,本文将通过匝道车辆数与主线车辆数之比、第 3 车道占主线车辆比值、匝道车辆数与第 3 车道车辆数之比进行分析,并将其与核密度峰度进行对应分析。

4.1 匝道与主线车辆数之比

图 6 为匝道车辆数与主线车辆数比值与核密度峰度的散点图。由图 6 可以发现,当匝道车辆占比低时未开启硬路肩,核密度峰度通常分布于 1.0×10^{-3} 以上,甚至超过 2.0×10^{-3} ,说明匝道流量虽不算高,但因主线车道可用空间有限,且未开启硬路肩,匝道并入主线时无法通过硬路肩过渡直接并入主线,这很可能会催生出危险程度很大的潜在风险点。而在硬路肩开放情形下,匝道车辆数与主线逐渐增大至 0.15~0.20,核密度峰度却整体维持在较低水平,显示出硬路肩带来的额外通行空间在一定程度上分散了合流冲突。同时也可以推断出开放硬路肩的阈值应该是在匝道车辆数与主线车辆数之比为 0.12~0.15。同时,当该比值进一步上升至 0.25 或更高时,蓝色散点中出现少数核密度峰度上扬的情形,表明此时车流量已趋于饱和,硬路肩开放无法彻底缓解外侧车道的拥堵和风险,需要额外的流量管控或限流措施予以辅助^[26]。

4.2 匝道与第 3 车道车辆数之比

因为硬路肩开放后主要影响的为第 3 车道、加减速车道及匝道车辆,因此本文着重研究第 3 车道车辆数与匝道车辆数的关系^[27]。

由图 7 可知,开放硬路肩的阈值为 0.35~0.80。硬路肩未开放时,当匝道车辆占外侧车道总量比超过 0.2 时,会出现核密度峰度在 1.0×10^{-3} 以上的高风险点;硬路肩开放(蓝色)后,若保持匝道车辆数与第 3 车道车辆数在 1 以下,则大部分散点对应的

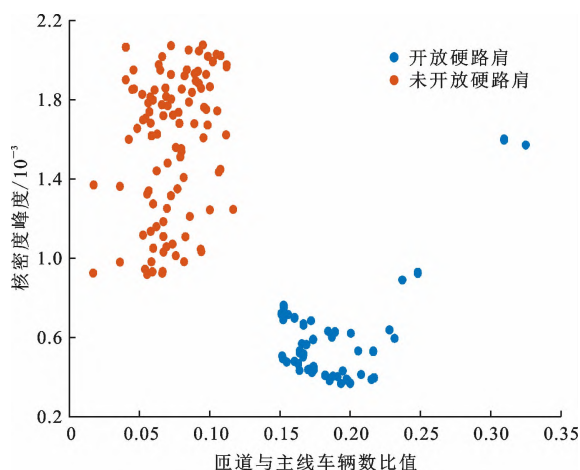


图6 核密度分布散点图1

Fig. 6 Kernel density distribution scatter plot 1

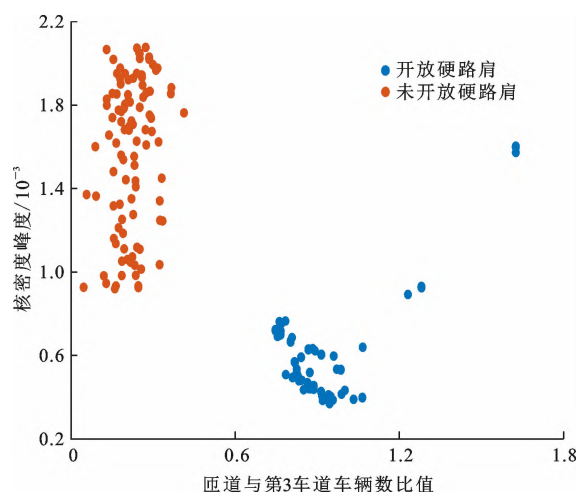


图7 核密度分布散点图2

Fig. 7 Kernel density distribution scatter plot 2

核密度峰度均处于 8.0×10^{-4} 以下,体现了匝道流量与外侧车道容量相对均衡时冲突有所缓解。若该匝道车辆数与第3车道车辆数比继续升至1以上,蓝色散点亦有个别核密度峰度高于 1.0×10^{-3} ,说明在高峰时段匝道流量猛增下,单纯依赖开放硬路肩也难以避免风险。

本文通过对匝道车辆数与主线车辆数比值与匝道车辆数与三车道车辆数比值在不同时段的散点分布进行分析,发现当匝道流量占主线或第3车道流量的比值逐渐升高时,交织区合流干扰亦随之加剧。若此时未及时开放硬路肩并合理引导车辆流向外侧车道,极易在内侧车道及合流口形成高密度冲突;而一旦比值突破某临界区间,即使硬路肩处于开放状态,也难以彻底消除因流量饱和带来的安全风险^[28]。基于前文的实测数据和阈值划分,本文将硬路肩开放时机的判定主要归纳为以下3个区间:

(1)低占比区间。匝道车辆数与主线车辆数比值小于0.12或匝道车辆数与第3车道车辆数比值小于0.35。当匝道车辆相对于主线或第3车道的占比较低时,匝道对主线的干扰程度有限,即使未开放硬路肩,也不会合流区段形成明显的拥堵或高冲突热点。此时可根据实际观测到的流量和速度情况,酌情保持硬路肩关闭,从而保留必要的应急停车与救援空间。此外,如若预判后续匝道流量将快速上升,也可提前进入下一个区间的策略准备,但在该低占比条件下并不必然需要立即开启硬路肩。

(2)临界上升与适度区间。匝道车辆数与主线车辆数比值为0.12~0.25,匝道车辆数与三车道车辆数比值为0.35~1.00。当匝道流量持续上升,且与主线(或第3车道)流量比进入上述区间时,常是合流冲突开始显著增加的阶段。若此时仍保持硬路肩关闭,车辆只能在内侧车道频繁并道,势必造成横向干扰大幅增长。通过前文实测可知,当匝道车辆数占比为0.15~0.20时,若开启硬路肩可将大部分新增车流平滑引导至外侧车道,显著降低合流区的拥堵与潜在冲突。若比值继续增大但尚未触及高饱和和临界值,硬路肩仍具备一定的分流功能;此时应维持硬路肩开放并视情在匝道端引入限速或分批放行措施,以确保外侧车道不过度饱和。

(3)高饱和区间。匝道车辆数与主线车辆数比值大于0.25或匝道车辆数与第3车道车辆数比值大于0.80。当匝道车辆数占比突破上述适度范围,表明合流区段已接近或进入饱和状态。此时,即使硬路肩处于开放状态,外侧车道的剩余容量也难以有效吸纳新增车辆,大概率出现合流冲突再次集中在外侧车道的现象。为避免局部拥堵波及整个交织区,需在硬路肩开放的基础上,同时采取一定措施避免风险叠加^[29]。

需要指出的是,本文目前主要基于匝道车辆数与主线比例建立判断标准,在实际应用中,建议在匝道车辆数与主线车辆数比值为0.15~0.20的基础上,结合三车道占有率或行驶速度(如主线平均车速高于设计速度的80%,则硬路肩开放的必要性相对较低)作为辅助判断条件,以确保在不同交通流状态下更精准地确定硬路肩开放时机^[30]。未来研究将进一步完善这一多参数决策模型,探索在不同天气条件和昼夜变化下各参数阈值的动态调整机制,这种多参数联合判定机制,有望进一步提高硬路肩开放效果,减少因单一指标判断带来的局限性^[31]。

同时需要注意的是硬路肩的主要原则是为紧急

情况提供救援快车道,因此,在硬路肩开放的过程中,若有恶性交通事故发生,硬路肩的首要功能应向生命通道倾斜,暂时放弃高峰期增车道的扩容作用,以确保救援车辆的优先通行。具体而言,当事故位置位于已开放应急车道的区段,应在救援力量抵达前终止或暂缓开放策略,并在相邻路段和匝道执行必要的流量管控,为救援车辆预留快速抵达现场的路径,减少对正常交通流的干扰,若应急车道已被部分社会车辆占用,则需配合警示标志和现场指挥,及时疏散占用车道的车辆,防止二次事故或拥堵扩散。待事故处置完成后,如仍有高峰拥堵需求,可视情况重新启用应急车道,并通过车联网及动态信息平台对开放时机进行实时评估^[32]。

综上所述,当匝道主线车辆数比值或匝道车辆数与第3车道车辆数比值进入临界上升与适度区间时,即可视为启动或保持硬路肩开放的主要窗口期;若该比值向高饱和区间演化,则需辅以更严密的流量控制措施。需要指出的是,以上阈值依据本文所处路段的实测数据得出,对其他地区或存在特殊交通构成的高速公路,宜结合日常流量观测和仿真验证进行适度校正^[28]。

5 结 语

(1)基于无人机高分辨率航拍数据评估了硬路肩开放对绕城高速公路交织区的交通风险分布与通行效率影响,重点探讨了合流、分流冲突在开放与未开放2种情境下的演变规律。研究结果表明,硬路肩开放能够在一定程度上缓解内侧车道的高冲突集聚,使得局部风险峰值从约 1.8×10^{-3} 下降至 7.0×10^{-4} 左右。然而,当匝道车辆数与主线车辆数比值超过0.25或匝道车辆数与第3车道车辆数比值高于0.80时,外侧车道及硬路肩段常成为新的冲突热点,说明仅靠增加车道数量难以应对高饱和和流量条件,必须辅以流量配比、限速或分批放行等更严格的管控措施,此处管控措施待后续继续深入研究^[33]。

(2)本文为在高峰时段实施硬路肩开放的管理实践提供了可量化的启闭策略与风险评估依据,尤其对绕城高速中匝道流量持续升高的立交出入口区域具有一定的指导意义。针对硬路肩开放后跨多车道变道和匝道合流干扰明显增加的问题,本文建议在匝道车辆数与主线车辆数比值为0.12~0.25及匝道车辆数与第3车道车辆数比值为0.35~0.80时及时开启硬路肩,并结合车辆速度波动特征,采取相应的分批放行或限速措施,以进一步减小早晚高

峰时段的交织区冲突风险。

(3)本文为绕城高速公路交织区在高峰时段的风险管理与调控策略设计提供了可量化的技术支持^[34]。鉴于故障车辆占用硬路肩、应急救援需求以及极端流量激增等情况对硬路肩开放的实施效果可能产生深远影响,后续研究可结合更加多样的气象与交通条件,进一步验证并细化硬路肩开放的时段和规模,并探索跨路段协同管控的可行性,从而为绕城高速公路交织区的安全管理与效率提升提供更全面的技术支持^[35]。由于研究路段的几何条件和交通特征具有一定代表性,但仍难以覆盖所有高速公路环境,因此在其他不满足要求的路段应用时需结合当地流量特征和相关仿真进行校准。

参考文献:

References:

- [1] 徐金凤. 基于交通冲突的快速路合流区安全评价研究[D]. 西安:长安大学, 2024.
XU Jin-feng. Research on safety evaluation of merging sections of expressways based on traffic conflicts[D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.
- [2] 李熙莹, 梁靖茹, 张伟斌, 等. 基于航拍视频构建风险指数的交织区拥堵识别方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 494-505.
LI Xi-ying, LIANG Jing-ru, ZHANG Wei-bin, et al. Congestion identification method for weaving sections based on a risk index from aerial photography[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 494-505.
- [3] HU Y, LI Y, HUANG H, et al. A high-resolution trajectory data driven method for real-time evaluation of traffic safety [J]. Accident Analysis and Prevention, 2022, 165: 1-10.
- [4] KAR P, VENTHURUTHIYIL S, CHUNCHU M. Crash risk estimation of heavy commercial vehicles on horizontal curves in mountainous terrain using proactive safety method[J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 199: 1-9.
- [5] 王 博, 刘昌赫, 张 驰, 等. 基于道路监控的高速公路作业区碰撞风险预警[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1221-1232.
WANG Bo, LIU Chang-he, ZHANG Chi, et al. Collision risk early-warning for expressway work zones based on roadway monitoring[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6): 1221-1232.
- [6] DIXON K, FITZPATRICK K, AVELAR R. Operational

- and safety trade-offs: Reducing freeway lane and shoulder width to permit an additional lane [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2588(1): 89-97.
- [7] 孙 颖. 高速公路硬路肩缓解拥堵的措施[J]. 中国交通信息化, 2014(11): 28-30.
SUN Ying. Measures for alleviating congestion by using hard shoulders on expressways [J]. *China Transportation Informatization*, 2014(11): 28-30.
- [8] 刘星良, 谢 厅, 刘唐志, 等. 基于 HNAC-FD 的高速公路网应急疏导措施效用评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 222-229.
LIU Xing-liang, XIE Ting, LIU Tang-zhi, et al. Effectiveness evaluation of emergency diversion measures for expressway network based on HNAC-FD[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(7): 222-229.
- [9] COFFEY S, PARK S. Part-time shoulder use operational impact on the safety performance of interstate 476 [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2020, 21(7): 470-475.
- [10] 李瑞敏, 叶 朕, 李 斌. 高速公路临时路肩使用措施优化控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 1036-1045.
LI Rui-min, YE Zhen, LI Bin. Optimization control and simulation of temporary shoulder use measures on expressways [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 1036-1045.
- [11] 王李轩. 基于 KDE 与 GWR 的城市出租车载客出行特征研究——以西安市为例[D]. 西安: 长安大学, 2021.
WANG Li-xuan. Research on urban taxi passenger trip characteristics based on KDE and GWR: A case study of Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [12] 马小龙, 余 强, 刘建蓓, 等. 基于无人机视频拍摄的高速公路小型车换道行为特性[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 95-105.
MA Xiao-long, YU Qiang, LIU Jian-bei, et al. Lane-changing behavior of passenger cars on expressways based on UAV video analysis[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(6): 95-105.
- [13] 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 Yan-ping, QIAN Ju, et al. Traffic safety evaluation of weaving areas based on traffic conflict technology[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(1): 55-60.
- [14] 胡立伟, 陈 琛, 赵雪亭, 等. 基于行车风险场的快速路短交织区车辆交互风险识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 221-231.
HU Li-wei, CHEN Chen, ZHAO Xue-ting, et al. Identification of vehicle interaction risk in short weaving sections of urban expressways based on driving risk field [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(3): 221-231.
- [15] CHEN P, ZENG W, YU G. Assessing right-turning vehicle-pedestrian conflicts at intersections using an integrated microscopic simulation model[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 129: 211-224.
- [16] KAMEL A, SAYED T, FU C. Real-time safety analysis using autonomous vehicle data: A Bayesian hierarchical extreme value model [J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2023, 11(1): 826-846.
- [17] 马 菲. 基于轨迹数据的快速路交织区交通风险评估[D]. 济南: 山东大学, 2024.
MA Fei. Traffic risk assessment of expressway weaving sections based on trajectory data[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [18] ZHONG G, DU S, ZHANG H, et al. Demarcation method of safety separations for sUAV based on collision risk estimation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 242: 109738.
- [19] YU R, HAN L, ZHANG H. Trajectory data based freeway high-risk events prediction and its influencing factors analyses [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2021, 154: 106085.
- [20] 夏号杰. 基于车辆轨迹的城市快速路合流区危险驾驶行为识别方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
XIA Hao-jie. Study on methods for identifying dangerous driving behavior in urban expressway merging sections based on vehicle trajectories[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [21] 徐汉清. 高速公路典型区段交通冲突及安全性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
XU Han-qing. Research on traffic conflicts and safety evaluation of typical expressway segments [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [22] 段鑫鹏. 基于合流区通行效率的超多车道高速交通组织方式选用研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
DUAN Xin-peng. Study on the selection of multi-lane expressway traffic organization schemes based on merging section efficiency [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [23] 仲媛媛. 基于交通冲突的公路平面交叉口模糊安全评

- 价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- ZHONG Yuan-yuan. Fuzzy safety evaluation of highway at-grade intersections based on traffic conflicts [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [24] MAHAJAN V, KATRAKAZAS C, ANTONIOU C. Crash risk estimation due to lane changing: A data-driven approach using naturalistic data [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 1-11.
- [25] 田润泽. 高速公路交通拥堵识别和预判方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2024.
- TIAN Run-ze. Research on recognition and prediction methods for expressway traffic congestion [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2024.
- [26] 谢寒,蒋阳升,蒋若曦,等. 城市快速路交织区换车道次数与车速、密度的关系实证研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(8):75-81.
- XIE Han, JIANG Yang-sheng, JIANG Ruo-xi, et al. Empirical study on correlation among lane-changing frequency, speed, and density in urban expressway weaving sections[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(8): 75-81.
- [27] GARCIA M, LIZARAZO J, MANGONES S, et al. Safety performance of dedicated and preferential bus lanes using multivariate negative binomial models for Bogota, Colombia [J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 202: 1-10.
- [28] BROOKS-RUSSELL A, BROWN T, FRIEDMAN K, et al. Simulated driving performance among daily and occasional cannabis users[J]. Accident Analysis and Prevention, 2021, 160: 106326.
- [29] 张菁,巨永锋. 快速路交织区交通流模型研究[J]. 中国公路学报,2011,24(5):89-93.
- ZHANG Jing, JU Yong-feng. Study on traffic flow modeling for urban expressway weaving sections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 89-93.
- [30] ABDELRAHMAN A. Safety evaluation of innovative intersection designs: Diverging diamond interchanges and displaced Left-turn Intersections [D]. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 2019.
- [31] 陈纪龙,陈丰,张婷,等. 可变标线干预下的快速路交织区运行研究[J/OL]. 西南交通大学学报,2024. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240704.1405.002>.
- CHEN Ji-long, CHEN Feng, ZHANG Ting, et al. Study on urban expressway weaving sections under variable marking intervention [J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240704.1405.002>.
- [32] 尚永毅,何廷全,卢国华,等. 微观交通仿真参数校正下高速公路合流区交通运行状态研究[J]. 交通工程,2024,24(8):31-37.
- SHANG Yong-yi, HE Ting-quan, LU Guo-hua, et al. Study on traffic operation status in freeway merging sections under microscopic simulation parameter calibration[J]. Traffic Engineering, 2024, 24(8): 31-37.
- [33] 戴骏晨. 基于交通冲突技术的高速公路互通立交交织区交通安全评价[D]. 南京:东南大学,2017.
- DAI Jun-chen. Traffic safety evaluation of expressway interchange weaving segments based on traffic conflict technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [34] 张驰,高艳阳,杨榕玮,等. 基于航拍数据的互通隧道小净距路段运行速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(2):136-150.
- ZHANG Chi, GAO Yan-yang, YANG Rong-wei, et al. Operating speed model for short-clearance sections of interchange tunnels based on aerial photography data[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 136-150.
- [35] 张敏,陈嘉乐,张驰,等. 基于航拍数据的高速公路出口环圈匝道行车安全性评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(4):108-118.
- ZHANG Min, CHEN Jia-le, ZHANG Chi, et al. Driving safety evaluation method for highway exit loop ramps based on aerial photography data[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 108-118.