

中文引用格式:张越,张诗,段伟建,等. 基于实车驾驶数据的互通立交匝道区行车综合风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8):219-226.

英文引用格式:ZHANG Yue,ZHANG Shi,DUAN Weijian, et al. Comprehensive risk evaluation of interchange ramp area traffic based on real vehicle driving data [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8):219-226.

基于实车驾驶数据的互通立交匝道区 行车综合风险评价*

张越¹, 张诗¹, 段伟建²高级工程师, 朱兴林³教授, 徐进^{**3}教授

(1 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2 重庆市公安局 交通管理局, 重庆 400054;

3 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.0852

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

【摘要】 为评价互通立交匝道区行车综合风险,选取重庆市一互通立交群开展以右转向式匝道、左转半定向式匝道和小半径环圈式匝道的实车驾驶试验,采用 PhysioLAB 生理检测仪和 Speedbox 测速仪分别收集驾驶人经过匝道区的心电数据和车辆行驶状态数据。分析 3 种典型形式匝道的心理负荷和车辆运行风险,采取改进熵权逼近理想解排序(TOPSIS)法构建行车综合风险模型并进行评价。结果表明:驾驶员的心率增长率(HRI)变化呈现出 4 种模式:凸曲线、连续增加、持续减少、凹曲线。HRI 在右转向式匝道区先降再升,在左转半定向式匝道区的分、合流点前后先升再降,在小半径环圈式匝道区的分、合流点波动较大。车辆运行风险匝道段最大,且匝道半径越小,车辆运行风险越大。车辆运行风险大小为:小半径环圈式匝道大于左转半定向式匝道大于右转向式匝道。行车综合风险在匝道段最高且分布范围大,在分、合流段分布集中且在分流点后不远处出现最大值。

【关键词】 实车驾驶数据; 互通立交; 匝道区; 综合风险评价; 心理负荷; 车辆运行风险

Comprehensive risk evaluation of interchange ramp area traffic based on real vehicle driving data

ZHANG Yue¹, ZHANG Shi¹, DUAN Weijian², ZHU Xinglin³, XU Jin³

(1 College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2 Traffic Management Bureau, Chongqing Municipal Public Security Bureau, Chongqing 400054, China;

3 College of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University,
Urumqi Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to evaluate comprehensive driving risk in interchange ramp areas, a real-vehicle test was conducted on Chongqing interchange groups, focusing on three typical ramps: right-turn directional, left-turn semi-directional, and small-radius loop ramps. Drivers' electrocardiographic data and vehicle operation status were collected by PhysioLAB and Speedbox, respectively, when passing through ramps. Psychological load and vehicle operation risks of the three ramps were analyzed, and an improved entropy-

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0219-08; 收稿日期:2025-03-14; 修稿日期:2025-05-18

** 通信作者:徐进(1977—),男,吉林四平人,博士,教授,主要从事道路安全性设计、人车路协同、驾驶行为与交通安全方面的研究。
E-mail: yhn1_996699@163.com。

weighted Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) method was used to construct and evaluate a comprehensive driving risk model. Results show four HRI change patterns: convex curve, continuous increase, continuous decrease and concave curve. Heart Rate Increase (HRI) in right-turn directional ramps first decreases, then increases, in left-turn semi-directional ramps, it first increases, then decreases near diverging/merging points, in small-radius loop ramps, it fluctuates significantly there. Vehicle operation risk is highest in ramp sections, increasing with smaller radii. The level of vehicle operation risk is small-radius loop ramp greater than left-turn semi-directional ramp, greater than right-turn directional ramp. Comprehensive driving risk peaks in ramp sections, widely distributed in split/confluence areas and peaking shortly after diversion points.

Keywords: real vehicle driving data; interchange; ramp area; comprehensive risk evaluation; mental load; vehicle operational risk

0 引言

互通立交作为高速公路的关键节点,其安全性对于整个高速公路网的交通安全与运输效率至关重要。匝道是高速公路互通立交连接不同方向车流的重要通道,因其复杂的线形设计和行车环境,成为事故高发区域。驾驶人风险驾驶行为是匝道区交通事故的核心因素^[1-2],风险驾驶状态重点关注驾驶人的心理和生理状况。因此,研究互通立交匝道区行车过程中驾驶人心理负荷和车辆运行风险,通过实车驾驶数据深入分析匝道区域行车综合风险,对研究互通立交安全具有重要意义。

在心理负荷方面,多以心率增长率(Heart Rate Increase, HRI)^[3]、心率间隔和心率变异率^[4]为指标研究驾驶人,如徐进等^[5]采集了驾驶人在自然驾驶下经过螺旋型立交匝道段的心电信号,分析了HR和相邻正常心动周期差值的均方根的整体分布特征,发现车辆运行速度和匝道曲率显著影响驾驶人心理负荷。张雪榆等^[6]将驾驶人按换道状态分类后发现,城市道路多车道交织区非干扰状态驾驶人心理负荷整体大于干扰状态,但后者波动更频繁,女性心理负荷大于男性。徐进^[7]、陈正欢^[8]等探究了互通立交净距、换道形式等多因素对心理负荷的影响,发现小间距立交下驾驶人心理负荷较大,且入口段安全风险高于出口段。GE Hongcheng等^[9]以HRI、速度、加速度等指标,采取客观赋权法-重要性相关性(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC)权重法评估高速公路隧道安全性,表明驾驶人在隧道的出入口区域心理负荷最大。与此同时,国内外学者对立交道路场景车辆运行状态、驾驶行为与行车安全风险也开展了大量研究。如BEINUM等^[10]分析了上、下匝道和交织路段的驾驶行为微观特征,发现匝道合分合流段车辆换道行为强

烈,且车流量较多时车辆换道行为会提高。徐进等^[11]基于实车驾驶试验,分析了右转直连式匝道的汽车运行状态和驾驶行为特征,发现其速度变化模式为“减速-加速”,出口匝道横向加速度分布更加离散且舒适性较差。以驾驶行为研究为基础,可采用Vissim仿真试验^[12]或实车试验,通过分析不同指标研究其车辆运行风险,确定出行车风险分布特征,现有的行车风险量化方法包括基于事故分析的风险评估方法、基于车辆运动学的评估方法。张晖等^[13]构建考虑行车事件严重程度和个体差异的评估方法,发现速度标准差等指标对驾驶风险评估重要度高。丁瑞^[14]通过分析驾驶行为,确定了立交匝道危险等级及危险驾驶行为的高发路段。然而现有研究多针对特定立交类型,且多为单因素量化风险,缺乏多因素综合评估、不同立交匝道形式对比及提出有效减轻负荷措施,成果向实际交运安全改进措施转化不足。

鉴于此,笔者拟通过实车驾驶试验采集驾驶人在互通立交匝道区域的心电数据以及车辆运行状态数据,基于实车驾驶数据探究驾驶人在互通立交匝道区域心理负荷变化特性,结合心理负荷和驾驶行为风险,进行行车综合风险评价,为提升匝道安全水平、优化交通设施设计提供理论依据。

1 实车驾驶试验流程与方案设计

1.1 试验地点与环境特征

选取位于重庆市江北区的东环立交-石港立交-腾龙立交段作为试验场景,采取实车驾驶数据,试验设计路线全长约40 km,设有8座互通立交,形成高密度立交群,如图1所示。选取5座互通立交中10条匝道区域作为研究对象,将其分为右转定向式匝道、左转半定向式匝道、小半径环圈式匝道3种常见的匝道形式,匝道区域的相关信息见表1。

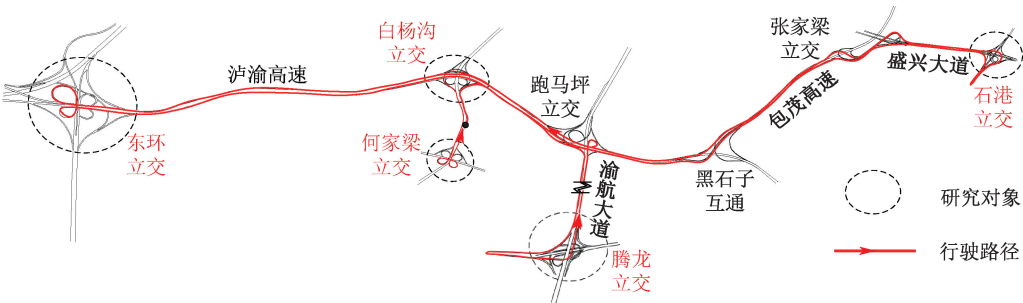


图 1 车辆行驶路线和研究对象

Fig. 1 Vehicle routes and research subjects

表 1 研究对象的相关信息

Table 1 Information on subject of study

立交名称	立交型式	立交类型	匝道形式	编号	匝道限速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	匝道车 道数
白杨沟立交	变形苜蓿叶形 (对称双环式)	枢纽互通	右转定向式匝道	BY	40	2
			左转半定向式匝道	BZ	40	2
石港立交	变形苜蓿叶形 (单环式)	一般互通	右转定向式匝道	SY	40	2
			左转半定向式匝道	SZ	40	2
腾龙立交	变形苜蓿叶形 (单环式)	一般互通	右转定向式匝道	TY	40	2
			左转半定向式匝道	TZ	40	2
东环立交	完全苜蓿叶形	枢纽互通	小半径环圈式匝道	DX1	30	2
				DX2	30	2
何家梁立交	完全苜蓿叶形	一般互通	小半径环圈式匝道	HX1	30	2
				HX2	30	2

1.2 生理与车辆参数采集设备

试验选用生理监测仪通过心电图贴片和主线采集驾驶员的心电数据,主要使用心电模块,采样频率为 500 Hz。并选用测速仪采集车辆的行驶速度。试验车辆为 7 座运动型多用途汽车,行车记录仪安装于车辆前后玻璃上,记录整个行车过程及道路相关信息。试验设备如图 2 所示。



图 2 试验仪器及数据采集

Fig. 2 Test instruments and data acquisition

1.3 被试及试验流程

实车试验招募 38 名驾驶人,因设备故障致 1 人数据缺失,最终 37 名驾驶人数据可用。其中,男性驾驶人 21 名,女性驾驶人 16 名,年龄 27~53 岁,平均年龄为 40.2 岁,实际驾龄 6~20 年,平均实际驾龄为 12.5 年,驾驶里程均超 5 万 km。

试验选在工作日晴天/阴天的 9:30—11:30、13:00—17:00 非高峰时段开展。驾驶人按照个人驾驶习惯行驶,每人沿试验路线行驶 1~2 次,中途以 10 min 为间隔休息,保证能够采集到自由流的驾驶人 心电数据和车辆运行状态数据。

1.4 分析范围及数据处理

研究范围由主线驶出段、匝道基本路段、另一主线驶入段 3 部分组成,包含减速车道、加速车道在内的整个匝道区域,研究范围按照匝道与主线的分合流点划分为分流段、匝道段和合流段。以白杨沟立交右转定向式匝道为例,研究范围和路段划分,如图 3 所示。

对于实车驾驶数据预处理中原始数据曲线存在毛刺的问题,使用 Python 以 1 m 为间隔进行插值滤波处理;为确保心率数据的有效性和准确性,采用 3 倍标准差法去除异常数据。

1.5 驾驶人心理负荷及车辆运行评价指标

心电图记录了心脏活动的变化,驾驶人的心理负荷对道路交通安全有显著影响。选用 HRI 表征驾驶员心理工作量的指标,HRI 越高表示驾驶人的心理工作量越大。车辆运行参数是指影响车辆性能和运行

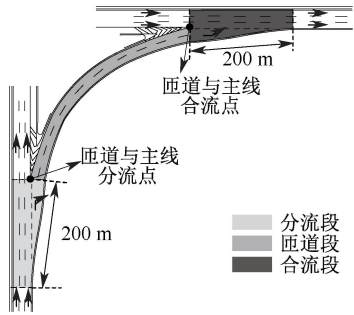


图3 研究范围和路段划分

Fig.3 Study area and section delineation

状态的各种指标和数据。选择速度均值、速度标准差、纵向加速度、横向加速度作为车辆运行指标^[15]。

2 驾驶人心率特征

2.1 驾驶人 HRI 变化特征

驾驶人在互通立交匝道区域分流段、匝道段、合

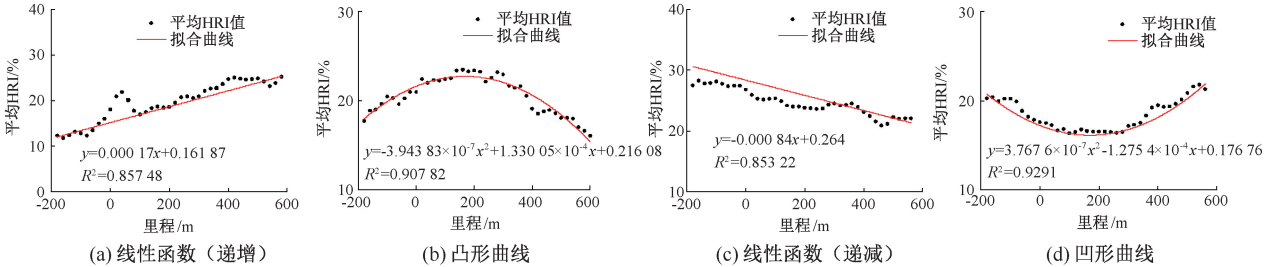


图4 互通立交匝道区域驾驶人心率增长 HRI 变化典型曲线(分流点前 200 m 为起点(-200),分流点为原点(0))

Fig.4 Typical HRI change curves of drivers' heart rate growth in interchange ramp area(starting point at 200 m before diversion point (-200), diversion point as origin (0))

2.2 不同匝道形式的驾驶人 HRI 分布特性

立交匝道区域实车驾驶数据中的 HRI 分布曲线如图 5 所示。由图 5a 可知:右转定向式匝道区整体趋势先降后升。分流点前驾驶人观察环境及车辆交织, HRI 增大;进入匝道后,由于匝道内部速度较低,驾驶环境单一, HRI 开始减小。驾驶人在合流点前后的 HRI 先减小再增大。由图 5b 可知:左转半

流段的驾驶负荷不同。比较各行车区段心理负荷大小,对连续驾驶的 HRI 变化模式分类, HRI 提供 4 种模式:连续增加、“凸曲线”、持续减少和“凹曲线”。具体的划分原则如下:

1) 计算每位驾驶人在分流段($i=1$)、中间段($i=2$)、合流段($i=3$)的平均 HRI_i。

2) 依据 HRI_i 大小,将驾驶人 HRI 变化曲线分为 4 类:当 $HRI_1 < HRI_2 < HRI_3$ 时为第 1 类;当 $HRI_1 < HRI_2 > HRI_3$ 时为第 2 类;当 $HRI_1 > HRI_2 > HRI_3$ 时为第 3 类;当 $HRI_1 > HRI_2 < HRI_3$ 时为第 4 类。

3) 绘制所有驾驶人平均 HRI 的散点图,用线性函数和多项式拟合,以拟合优度 $R^2 > 0.8$ 的函数作趋势线。统计每个场景的 HRI 变化模式占比可知:“凹曲线”模式的占比最高。部分驾驶人在白杨沟立交右转定向式匝道区域下的 HRI 随里程连续变化曲线如图 4 所示。

定向式匝道区分/合流点前后的 HRI 先增后减,匝道段 HRI 呈现先增后减的趋势,汇入主线后 HRI 先减后增。由图 5c 可知:东环立交小半径匝道的匝道段,驾驶人 HRI 呈下降趋势,因从复杂高速交通流进入单一匝道环境。由图 5d 可知:何家梁立交小半径匝道中,驾驶人在驶入匝道前 HRI 较低,在匝道段 HRI 先升后平稳,与东环立交小半径匝道区域趋

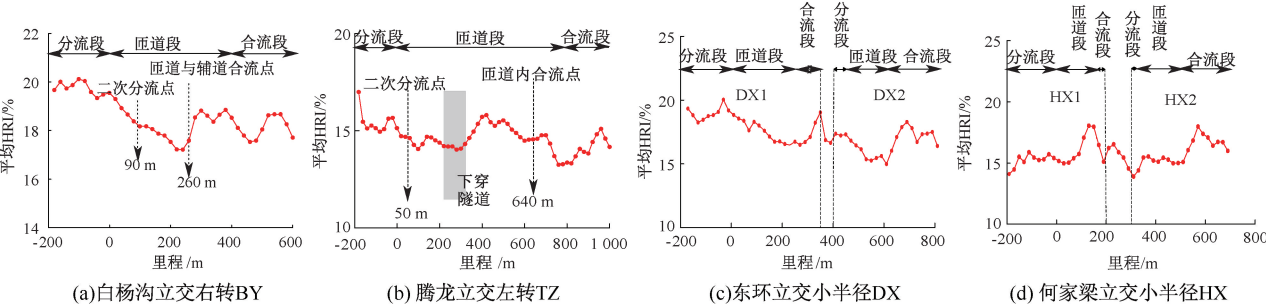


图5 立交匝道区域 HRI 分布曲线

Fig.5 HRI distribution curve for interchange ramp area

势相反。驾驶人在不同立交形式的小半径环圈匝道分流点前后 HRI 波动均较大,可见对于小半径环圈式匝道,分合流点是引起驾驶人精神大幅度波动的主要因素,该结论与文献[5]自然驾驶试验发现的螺旋型立交匝道的分、合流鼻端驾驶人 HR 变异指标显著升高结果相符合。

统计 5 个立交所有驾驶人的 HR 均值特征值,3 种匝道的 HRI 特征值见表 2,小半径环圈式匝道的驾驶人 HRI 平均值最大;左转半定向式匝道的 HRI 标准差最大,表明该区域转向变化多,驾驶人 HRI 波动大、分布散。

表 2 不同形式匝道的驾驶人 HRI 特征值统计
Table 2 Driver HRI eigenvalue statistics for different forms of ramps

匝道形式	平均值	15 th	85 th	最小值	最大值
右转定向式匝道	16.41	14.17	18.30	12.68	20.12
左转半定向式匝道	16.44	13.78	20.32	12.42	22.26
小半径环圈式匝道	16.66	15.13	18.64	13.90	20.04

3 车辆运行风险

3.1 车辆运行指标量化模型

选择实车驾驶数据中的平均车速、区间车速差、速度标准差、纵向加速度、横向加速度为车辆运行风险评价指标,采用 CRITIC 权重法评价匝道区域车

辆运行风险。经 min-max 标准化法,结合指标与驾驶风险的相关性,采用 CRITIC 法得出权重计算结果,见表 3。结果显示,速度平均值占比最大,横向加速度次之,表明二者对运行风险影响显著。

表 3 CRITIC 赋权法权重计算结果
Table 3 CRITIC assignment method weight results

行为指标	信息量	权重/%
速度平均值	1.049	26.91
区间车速差	0.488	12.52
纵向加速度	0.907	23.27
横向加速度	1.04	26.69
速度标准差	0.413	10.60

3.2 车辆运行风险综合量化模型结果

采用 Min-max 标准化法处理车辆运行风险数值,各匝道区域车辆运行风险数值变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知:右转定向式匝道(白杨沟立交为例),高风险区集中于二次分流点和匝道内合流点左右。左转半定向式匝道(腾龙立交为例),高风险区集中在隧道段和分合流处,隧道曲线路段的弯道线形,影响驾驶人的方向感知能力,驾驶人感知-反应时间增加,车辆运行风险增大。小半径环圈式匝道区域高风险主要集中在分流点前后,刚驶入匝道段时车辆运行风险较大。整体来说,匝道段最大,分流段较大;匝道半径越小,车辆运行风险越大,符合文献[16]结论。但与文献[16]仅通过横向力系数及其心率变化率来判断风险不同,文中采取多项车辆运行指标对其进行风险量化。

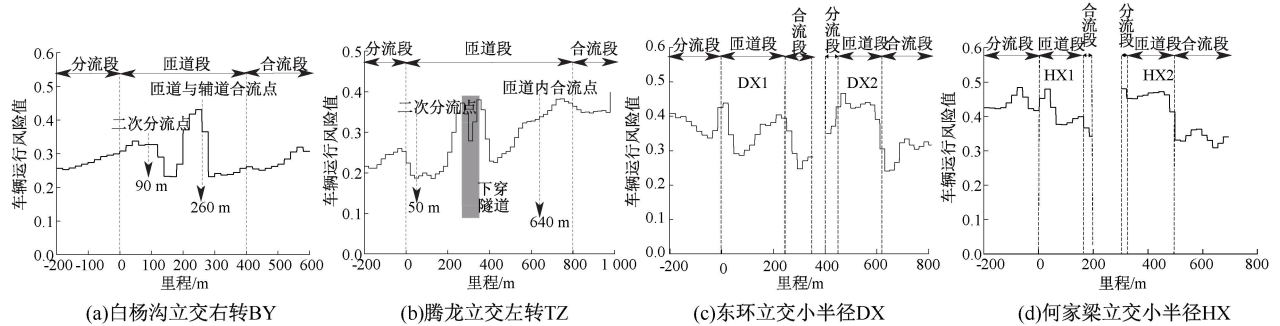


图 6 各匝道区域的车辆运行风险值变化曲线
Fig. 6 Vehicle operation risk value change curves for each ramp area

4 匝道区域行车综合风险评价

4.1 风险等级划分

车辆运行指标包含速度平均值、区间速度差、纵向加速度、横向加速度、速度标准差,把其标准化为车辆运行风险,选取驾驶人 HRI 和车辆运行风险作

为模型参数。基于驾驶人 HRI 和车辆运行风险值对各行车区间的综合风险排序。经 min-max 法标准化数据,利用 Matlab R2022b 软件编程改进熵权逼近理想解排序 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 的计算,求取心理负荷指标和车辆运行风险指标的信息熵分别为

0.988 2 和 0.970 7、信息效用值分别为 0.011 8 和 0.029 3、权重值分别为 48.96% 和 51.04%，车辆运行风险权重较高，表明其对行车综合风险影响显著。

将指标权重与标准化矩阵相乘，路段每 20 m 为一单元，利用 TOPSIS 法按各单元与正、负理想解的距离得到综合风险并排序，不同匝道的综合风险值见表 4。经 K-means 聚类为高、较高、低风险 3 类区间见表 5，说明匝道区域综合风险较高。

表 4 改进熵权 TOPSIS 评价法部分计算结果

Table 4 Improved entropy weight TOPSIS evaluation method partial calculation results				
项	正理想解距离 d^+	负理想解距离 d^-	综合风险值 C	排序结果
路段单元 1	0.455	0.255	0.360	199
路段单元 2	0.434	0.274	0.387	153
路段单元 3	0.431	0.277	0.391	142
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
路段单元 390	0.557	0.156	0.219	363
路段单元 391	0.587	0.168	0.222	359

4.2 互通立交匝道区域行车综合风险评价

根据实车驾驶数据计算各路段单元综合行车风险并对其评价，如图 7 所示。右转定向式匝道区域在接近主线与匝道分流点和进入匝道前行车综合风险逐渐增加。驾驶人在左转半定向式匝道区驶离匝道与主线分流点为较高风险；匝道段存在多分流点时，为较高或高风险，且可能延长高风险区域的覆盖

表 5 匝道区域驾驶综合风险值聚类结果及等级划分

Table 5 Clustering results and classification of combined risk values for driving in ramp areas

项目	聚类中心		
	1 高风险	2 较高风险	3 低风险
驾驶综合风险值	0.426	0.408	0.34
驾驶综合风险值 C	>0.416	$0.375 \leq C \leq 0.416$	<0.375
所占比例/%	23	29	48

范围^[17]；左转半定向式匝道的高风险区间集中在匝道隧道段和分合流段，尤其是在合流段。驾驶人在小半径环圈式匝道区分流点前后行车综合风险值均为高或较高风险；进入匝道后行车综合风险值持续为高风险区间，行车综合风险最大值出现在进入匝道分流点后不远。

各区段行车综合风险评价结果的箱型图如图 8 所示。由图 8a 可知：右转向式匝道区域匝道段的行车综合风险值均值最低，其从主线右侧流出再从右侧汇入其他主线，方向明确、流线顺畅。由图 8b 可知：从右侧驶离主线的分流段、匝道段到右侧汇入其他主线的合流段，行车综合风险值均值依次增加，合流段的最大。由图 8c 可知：小半径环圈式匝道区域中匝道段行车综合风险值均值最大，合流段的最小。3 种匝道区域中，匝道段行车综合风险值分布

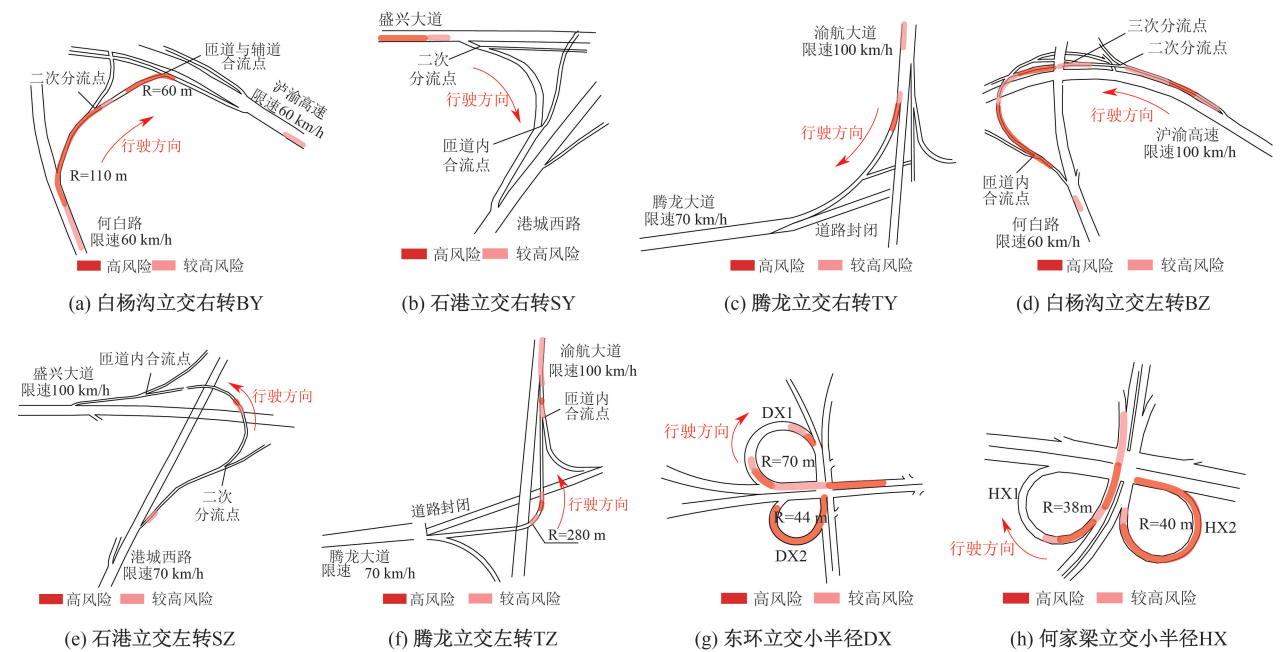


图 7 行车综合风险分布

Fig. 7 Comprehensive risk map for driving

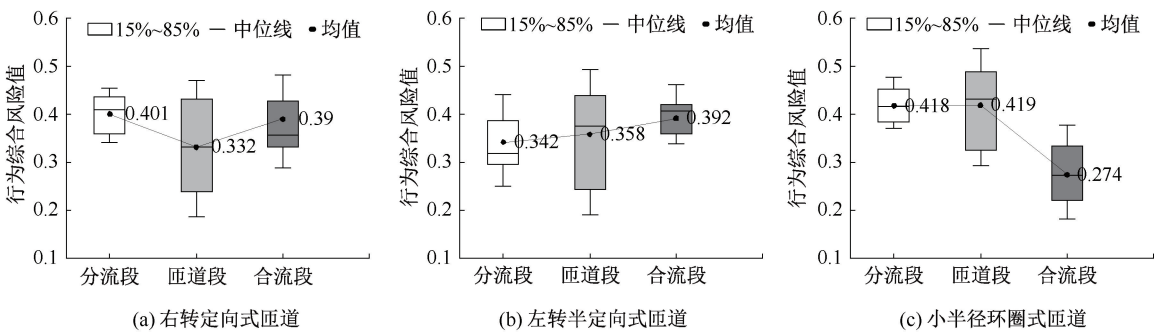


图 8 匝道区域不同区段的行车综合风险值变化箱型图

Fig. 8 Box plots of changes in the combined value-at-risk of traveling in different segments of the ramp area

范围较大,而分流段和合流段分布相对集中。

4.3 风险改善建议与措施

1) 加强高风险位置的防撞护栏等级。因小半径匝道行车综合风险最高且高风险位置密集,建议采用立柱间距为普通波形护栏 1/2 的加强型波形护栏提升防护能力;左转匝道高风险集中于中部,需提升该区域护栏防撞等级;同时应加强分流点附近护栏防撞措施。

2) 合理设置高风险区段减速标志。根据综合行车风险评估,建议在高风险路段入口前设置纵向减速标志,利用振动效应使车辆提前降速,提高行车安全。

3) 优化分流点处指路标志。分流点前后行车综合风险较高,设置合理的分流指路标志,减少驾驶人分心行为。拒绝出现路标有遮挡,信息量过多且字较小的情况,通过降低分流点附近的 HRI,降低行车综合风险。

4) 优化圆曲线半径。由行车综合风险可知:小半径匝道由于半径较小而形成几乎全红路段。在互通立交设计时可扩大立交匝道的圆曲线半径,降低行车综合风险。

5 结 论

1) 互通立交匝道区驾驶人 HRI 变化有凸曲线、连续增加、持续减少、凹曲线 4 种模式,凹曲线模式占比最高。

2) 右转定向式匝道区 HRI 先降后升,匝道段因环境单一 HRI 减小;左转半定向式匝道区驾驶人在分合流点前后 HRI 先增后减,汇入主线后先减后增;小半径环圈式匝道分合流点易致驾驶人精神波动,该区域 HRI 平均值最大,左转半定向式匝道 HRI 标准差最大。

3) 根据区域看,匝道段驾驶行为风险最大,分流段次之;匝道半径越小风险越高,高风险区域集中于隧道段与分合流处。根据匝道形式来看,驾驶人的车辆运行风险排序为:小半径环圈式匝道大于左转半定向式匝道大于右转定向式匝道。

4) 匝道区域驾驶综合风险评价等级分为高、较高、低 3 类区间,进入匝道后持续高风险,最大值出现在分流点后。3 种不同形式的匝道区域中匝道段行车综合风险值分布范围较大,而分流段和合流段分布相对集中。

参 考 文 献

[1] 中国公路学会编委会. 交通工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,1998:43-52.

[2] 裴玉龙,程国柱. 高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):74-78. PEI Yulong, CHENG Guozhu. Research on the relationship between discrete character of speed and traffic accident and speed management of freeway [J]. Chinese Journal of Highway and Transport,2004,17(1): 74-78.

[3] 杨迪,徐进,吕能超,等. 山地城市立交出入口驾驶员心理负荷研究[J]. 中国科技论文,2022,17(2):195-202. YANG Di, XU Jin, LYU Nengchao, et al. Mental workload of drivers at interchanges in mountain cities [J]. China Sciencepaper, 2022,17 (2): 195-202.

[4] 郭玉洁,郭唐仪,吴军. 基于因子分析的城市隧道驾驶人心理负荷变化规律[J]. 交通运输研究,2021,7(2):91-99. GUO Yujie, GUO Tangyi, WU Jun. Change regularity of drivers' psychological load in urban tunnels based on factor analysis [J]. Transportation Research, 2021,7 (2): 91-99.

[5] 徐进,刘小明,胡静. 基于自然驾驶数据的螺旋匝道(桥)驾驶人心理负荷分析[J]. 交通运输系统工程与信息,

2020, 20(3): 212-218.

XU Jin, LIU Xiaoming, HU Jing. Analysis of driver mental load on helical ramps and helical bridges based on naturalistic driving data [J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2020, 20 (3): 212-218.

- [6] 张雪榆, 潘存书, 林伟, 等. 山地城市多车道交织区驾驶人心理负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 25-32.

ZHANG Xueyu, PAN Cunshu, LIN Wei, et al. Psychological load of drivers in multi-lane interweaving areas of urban roads [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32 (3): 25-32.

- [7] 徐进, 陈正欢, 廖祺硕, 等. 基于心电数据的高速公路高密度互通立交驾驶负荷研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(10): 2 807-2 817.

XU Jin, CHEN Zhenghuan, LIAO Qishuo, et al. Mental workload of drivers at high-density interchanges of freeways based on ECG data [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2024, 54(10): 2 807-2 817.

- [8] 陈正欢. 高密度互通立交驾驶人精神负荷与安全风险研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

CHEN Zhenghuan. Study on driver's mental workload and safety risks of high-density interchanges [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

- [9] GE Hongcheng, HE Shijian, SUN Yuhai, et al. A method for evaluating the safety of freeway tunnel sections based on driving comfort: a naturalistic driving study[J]. Traffic Injury Prevention, 2023, 24(8): 670-677.

- [10] BEINUM A, FARAH H, WEGMAN F, et al. Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 426-441.

- [11] 徐进, 孙子秋, 冯忠祥, 等. 互通立交直连式右转匝道小客车运行特性[J]. 中国科技论文, 2022, 17(8): 844-850.

XU Jin, SUN Ziqiu, FENG Zhongxiang, et al. Driving behavior of passenger car on direct-connected right-turn ramp of interchange [J]. China Sciencepaper, 2022, 17 (8): 844-850.

- [12] WANG Xiaofei, DING Zhenzhong, GUO Kai, et al. A simulation-based comprehensive analysis for traffic efficiency and spatial distribution of risks in short weaving area of municipal interchange[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1-14.

- [13] 张晖, 刘永杰, 吴超仲, 等. 考虑行车安全事件严重程度和个体差异的驾驶行为风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 24-31.

ZHANG Hui, LIU Yongjie, WU Chaozhong, et al. A risk assessment method of driving behavior considering severity of safety-critical events and individual heterogeneity [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (7): 24-31.

- [14] 丁瑞, 刘俊, 蒋艳, 等. 基于车辆加速度数据的互通立交匝道驾驶风险分析[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(1): 17-25.

DING Rui, LIU Jun, JIANG Yan, et al. Driving risks of interchange ramps based on vehicle acceleration data [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39 (1): 17-25.

- [15] FENG Zhongxiang, YANG Miaomiao, ZHANG Weihua, et al. Effect of longitudinal slope of urban underpass tunnels on drivers' heart rate and speed: a study based on a real vehicle experiment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 147-153.

- [16] 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 Jiale, ZHANG Chi, et al. Aerial photography data-based method for evaluating traffic safety of highway exit loop ramps [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2024, 44 (4): 108-118.

- [17] 沈海旭. 多车道高速公路分流影响区通行能力分析[D]. 西安: 长安大学, 2021.

SHEN Haixu. Analysis on traffic capacity of diversion affected area of multi-lane highway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

作者简介: 张越 (2001—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为道路交通安全。
E-mail: 1337538097@qq.com.

