

基于生存分析的山区公路借道超车 风险暴露时间模型

卢梦媛^{1,2}, 戢晓峰^{1,2}, 徐迎豪³, 覃文文^{1,2}

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省现代物流工程研究中心, 昆明 650500; 3. 重庆市铁路(集团)有限公司, 重庆 401121)

摘要: 针对山区双车道公路超车车辆与被超车车辆交互、与对向来车交互两种场景, 利用两台无人机同步采集借道超车行为视频, 通过改进二维碰撞时间(TTC)计算方法量化借道超车风险; 基于生存分析理论构建了考虑驾驶风格的借道超车风险暴露时间模型, 解析了超车车辆与不同交互车辆间的风险持续性影响机制。结果表明: 相较于与对向来车交互, 超车车辆与被超车车辆交互的平均风险暴露时间更长(5.19 s); 超速型风格驾驶人的风险暴露时间较保守型增加 15%, 超越货车时的风险暴露时间较超越摩托车和小客车分别增加 19% 和 42%; 除超车车辆速度外, 两车横向位置差、对向来车速度分别对两种借道超车交互场景风险暴露时间的平均影响程度最大。

关键词: 交通运输安全工程; 超车风险暴露时间; 生存分析; 山区公路; 驾驶风格

中图分类号: U491.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)09-2361-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250170

Overtaking risk exposure duration model of two-lane mountainous highways based on survival analysis

LU Meng-yuan^{1,2}, JI Xiao-feng^{1,2}, XU Ying-hao³, QIN Wen-wen^{1,2}

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Modern Logistics Engineering Research Center, Kunming 650500, China; 3. Chongqing Railway Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of risk persistence effects between overtaking vehicles and different interacting vehicles, two UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) were used to collect video data of overtaking behaviors on a mountainous highway. The two-dimensional time to collision (TTC) calculation method was improved to assess overtaking risk. And an accelerated failure time (AFT) model was developed based on the survival analysis theory, considering the differences in overtaking styles. The findings indicate that the average risk exposure duration was considerably extended (5.19 s) when the overtaking vehicle interacted with the overtaken vehicles, in contrast to interactions with oncoming vehicles

收稿日期: 2025-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72461015); 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(2023-83(二)).

作者简介: 卢梦媛(1998-), 女, 博士研究生. 研究方向: 道路交通安全. E-mail: lmy@stu.kust.edu.cn

通信作者: 戢晓峰(1982-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通安全. E-mail: 20090077@kust.edu.cn

in the opposite direction. Speeding driving style increased the risk exposure duration by 15% compared to conservative driving style. When the overtaken vehicle was a truck, the risk exposure duration increased by 19% and 42% compared to motorcycles and minibuses, respectively. In addition to the overtaking vehicle's speed, the lateral position difference between the two vehicles and the oncoming vehicle's speed had the greatest average effect on the risk exposure duration for the different overtaking scenarios.

Key words: traffic and transportation safety engineering; overtaking risk exposure duration; survival analysis; mountainous highways; driving style

0 引言

山区双车道公路道路狭窄,行车环境复杂多变,因驾驶人不当超车而引发严重交通事故的问题十分突出。据统计,借道超车事故约占山区双车道公路所有事故的 20%,事故死亡人数占比高达 50%^[1]。Choudhari 等^[2]认为,借道超车是双车道公路最困难、最危险的驾驶行为之一。因为在双车道公路超车时需要借用对向车道行驶,超车车辆与前方车辆、对向车道来车间同时存在交互,产生侧向和正向严重冲突风险的可能性很大。因此,解析借道超车行为风险影响机制以提升山区双车道公路超车安全水平尤为重要。

目前,国内外学者大多通过模拟驾驶实验、高清摄像机拍摄等方式采集参与借道超车行为的车辆轨迹数据,利用碰撞时间(Time to collision, TTC)^[3]、避免碰撞减速率(Deceleration rate to avoid crash, DRAC)^[4]、车头时距(Time headway, TH)^[5]和超车视距(Passing sight distance, PSD)^[6]等单一或组合指标评估借道超车风险,并基于统计分析和机器学习等方法研究车辆运行状态、交通流等因素对双车道公路借道超车行为及风险的影响。Figueira 等^[7]通过驾驶模拟实验分析发现,被超车车辆的速度和车辆类型是影响乡村双车道公路借道超车行为的主要因素。Pawar 等^[8]基于广义线性模型(Generalized linear mixed model, GLMM)探究了不同时间压力驾驶条件下,跨越车道线时间和速度变异系数对借道超车碰撞概率的影响。Branzi 等^[3]研究发现,对向车道交通流量增大会导致双车道公路借道超车风险增加。

虽然现有研究对双车道公路借道超车风险展开了探讨,但研究内容主要聚焦于风险的严重性,较少关注异质驾驶风格视角下不同借道超车交互场景风险的持续性影响。Karimi 等^[9]的研究揭示驾驶员特征对借道超车频率有显著影响,表明不

同风格驾驶员的超车行为和超车风险也可能存在差异。由于阻碍车辆、对向来车与超车车辆的交互形式不同,它们之间的冲突风险影响特征也不一致^[10]。因此,本文将山区双车道公路借道超车交互场景划分为两类,引入风险暴露时间指标表征借道超车风险持续性特征。采用 K-means 算法对超车驾驶人风格进行分类,并基于生存分析方法分别构建超车车辆与被超车车辆、对向来车交互场景下的加速失效时间(Accelerated failure time, AFT)模型,以检验驾驶风格、车辆交互状态、行车环境等因素对不同借道超车交互场景严重冲突风险暴露时间的异质性影响。

1 数据采集及处理

1.1 数据采集

本文选取云南省典型山区双车道公路——元双公路牟定段的某平直路段、弯道路段作为研究路段(见图 1),路基宽度为 7.5 m、路肩宽度为 1.5 m、行车限速为 60 km/h,道路中央无强制分隔设施。弯道路段转角为 103°50'50"、直曲线半径为 135.2 m、缓和曲线参数为 127.4 m、曲线长度为 365.1 m。由于车辆借道超车距离较长,而单台无人机拍摄范围有限,因此本文在天气晴朗且无风或微风的条件下,利用两台无人机同步采集研究路段交通流视频数据,拍摄视频画面保证一定的重叠区域,为后续轨迹数据拼接提供条件。两台无人机参数设置完全一致,视频分辨率为 4 K、帧率为 30 帧/s,经持续的外业工作,两个路段共采集到约 34 h 的交通流视频数据。

1.2 数据处理

借道超车行为从超车车辆产生超车意图,即车头向对向车道偏转时刻 t_1 开始,直至超越前方阻碍车辆返回原车道时刻 t_4 结束。借鉴 Mwesige^[1]、Song^[11]等的研究,本文将超车车辆右后车轮跨越道路中心线时刻定义为驶出换道结束时

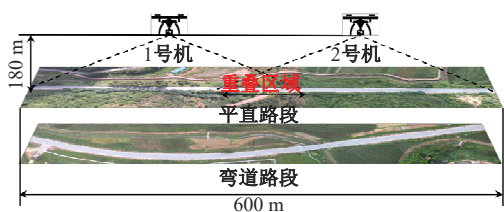


图1 研究路段

Fig. 1 Study sections

刻 t_2 (即占道超车开始时刻),将超车车辆右前方车轮跨越道路中心线时刻定义为占道超车结束时刻 t_3 (即驶回换道开始时刻),以此将借道超车行为划分为3个阶段,如图2所示。同时,基于交互对象将借道超车交互场景划分为2类:超车车辆与被超车车辆交互(场景1)、超车车辆与对向来车交互(场景2)。

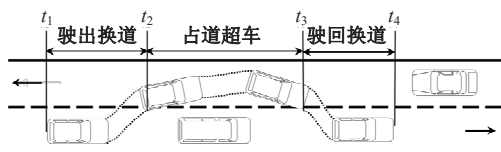


图2 山区公路车辆借道超车场景示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overtaking scenarios on mountain highways

由于山区公路借道超车事件中80%以上的超车车辆类型为小客车^[12],因此本文以小客车为超车车辆研究对象,从交通流视频中初步筛选得到小客车借道超车行为398组,利用Tracker软件提取研究路段上参与借道超车行为的机动车轨迹数据。经轨迹拼接和平滑处理后,最终得到完整、有效的借道超车轨迹数据376组,其中,对向来车干扰的轨迹数据77组(均发生在平直路段)。被超车车辆类型分别为小客车、摩托车和货车;3类车辆的数据样本量分别为239、39和98组。轨迹数据处理步骤如下所示。

(1)轨迹数据提取。在视频画面重叠区域标记唯一的基准点作为空间直角坐标系原点,运用Tracker软件的目标自动追踪功能提取目标车辆的轨迹数据,时间粒度为0.167 s。

(2)轨迹数据拼接。遍历1、2号机位在重叠区域相同时间戳下的车辆质心坐标,基于车辆质心坐标进行轨迹点关联匹配,选择2个机位中车辆质心坐标空间距离最短的轨迹点作为轨迹拼接点,将2号机位轨迹拼接点后的数据加载到1号机位轨迹数据后方,实现车辆轨迹数据的拼接。

(3)轨迹数据平滑。由于部分车辆颜色与地面接近、视频画面轻微抖动等原因,原始数据中存

在轨迹跳跃的现象,因此采用一维卷积平滑方法对拼接后的轨迹数据进行降噪平滑,排除异常数据。

经以上处理后可获取的数据包括车辆编号、时间戳、横/纵向坐标、速度、加速度、横/纵向速度、横/纵向加速度、车道位置、车辆类型和车辆尺寸,共计13种类型的数据。

2 借道超车冲突风险特征分析

2.1 风险指标计算方法

(1)风险严重性指标

由于借道超车过程同时涉及车辆横向与纵向的复合运动,经典TTC指标难以准确量化其风险,故有学者提出将经典TTC计算方法拓展至二维空间。然而,现有二维TTC(Two-dimensional time to collision, TTC_{2D})计算方法忽略了车辆偏航角的变化,其假设两车间的相对碰撞角度相同。尽管该方法在跟驰场景中具有良好适用性,但却难以满足冲突类型多样、冲突角度变化较大的借道超车实时风险量化需求。因此,本文引入车辆之间最短碰撞距离和接近率的概念^[13]对二维TTC计算方法进行改进。考虑到碰撞点处于车辆的外缘,车辆之间最短空间距离的位置坐标难以直接获取,首先,基于车辆质心距离、车辆尺寸和车辆偏航角推导最短碰撞距离;其次,结合车辆碰撞角度对车辆矢量速度进行求和,计算得到改进的二维TTC(Improved two-dimensional time to collision, $ITTC_{2D}$)指标。

如图3和图4所示,假设 t 时刻超车车辆 i 的质心位置向量为 O_i ,速度为 v_i ;被超车车辆或对向来车 $j(j=1,2)$ 的质心位置向量为 O_j ,速度为 v_j ,其中, $j=1$ 表示被超车车辆, $j=2$ 表示对向来车。则车辆 i 与车辆 j 的质心距离 S 为:

$$S = \sqrt{(O_i - O_j)^T (O_i - O_j)} \quad (1)$$

分别计算交互车辆的相对碰撞角度,采用 α_i 表示 t 时刻车辆 i 速度方向与其碰撞方向的夹角,即车辆 i 的相对碰撞角度,其计算公式为:

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{O_i O_j} \cdot \overrightarrow{O_i v_i}}{\|\overrightarrow{O_i O_j}\| \|\overrightarrow{O_i v_i}\|} \right) \quad (2)$$

式中: O_i 为 $t-1$ 时刻车辆 i 的质心位置向量。同理,可计算得到车辆 j 的相对碰撞角度 α_j 。

采用 β 表示 t 时刻车辆 i 与车辆 j 速度方向的

夹角,即两车碰撞角度,其计算公式为:

$$\beta = \arccos \left(\frac{|\overrightarrow{O_i O_i} \cdot \overrightarrow{O_j O_j}|}{|\overrightarrow{O_i O_i}| |\overrightarrow{O_j O_j}|} \right) \quad (3)$$

若车辆 i 的车身长度为 l_i 、宽度为 w_i ,则 t 时刻车辆 i 的质心至车辆轮廓边界的距离 D_i 为:

$$D_i = \begin{cases} \frac{l_i}{2\cos\alpha_i}, & \alpha_i \in \left[0, \arctan\left(\frac{w_i}{l_i}\right)\right] \\ \frac{w_i}{2\sin\alpha_i}, & \alpha_i \in \left[\arctan\left(\frac{w_i}{l_i}\right), \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{l_i}{w_i}\right)\right] \\ \left|\frac{l_i}{2\cos\alpha_i}\right|, & \alpha_i \in \left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{l_i}{w_i}\right), \pi\right] \end{cases} \quad (4)$$

基于式(1)~(4),得到车辆 i 与车辆 j 的最短碰撞距离 L 为:

$$L = S - D_i - D_j \quad (5)$$

将 t 时刻车辆 i 与车辆 j 的速度投影到其最短碰撞位置矢量的延长线上,得到车辆 i 与车辆 j 在最短碰撞位置矢量上的速度分别为 v'_i 、 v'_j :

$$v'_i = v_i \cdot |\cos\alpha_i| \quad (6)$$

$$v'_j = v_j \cdot |\cos\alpha_j| \quad (7)$$

综上,得到 t 时刻车辆 i 与车辆 j 的 ITTC_{2D} 计算公式为:

$$\text{ITTC}_{2D} = \begin{cases} L/(v'_i - v'_j), & \beta \in [0, \pi/2] \\ L/(v'_i + v'_j), & \beta \in (\pi/2, \pi] \end{cases} \quad (8)$$

式中:ITTC_{2D} 为 t 时刻车辆 i 与车辆 j 在二维空间最短碰撞位置矢量方向上发生碰撞的时间。

ITTC_{2D} 值越小,表示两车之间的冲突风险严重程度越高,发生碰撞事故的可能性越大。

基于 ITTC_{2D} 计算结果,采用累计频率分布曲线法,将 ITTC_{2D} 值以 0.1 s 为间隔进行均等分组处理,选定 85% 累计分布频率所对应的 ITTC_{2D} 值作为严重冲突风险阈值,分别对场景 1、2 的冲突严重程度进行阈值区间划分。

(2) 风险持续性指标

基于严重冲突风险阈值,采用风险暴露时间(Risk exposure duration, RED)、风险暴露水平(Risk exposure level, REL)两个指标反映借道超车严重冲突风险的持续性。其中,RED 表征借道超车过程中驾驶人处于严重冲突风险的持续时间,即 ITTC_{2D} 值小于或等于严重冲突风险阈值的

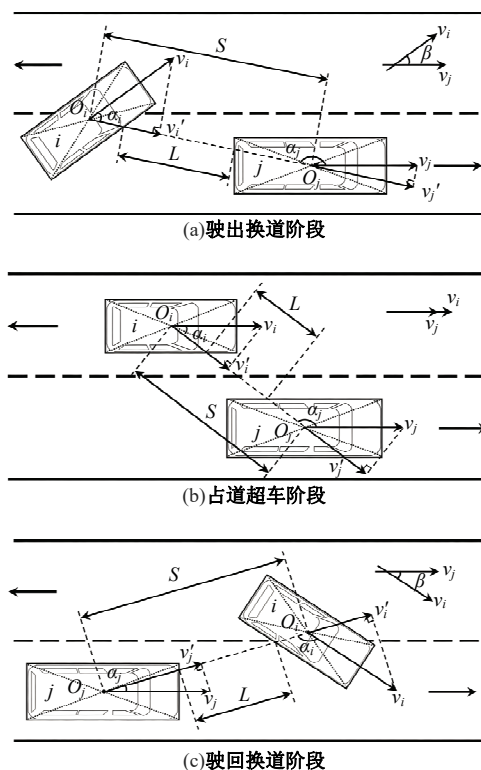


图 3 超车车辆与被超车车辆交通冲突空间矢量图

Fig. 3 Space vector of traffic conflict between overtaking vehicle and overtaken vehicle

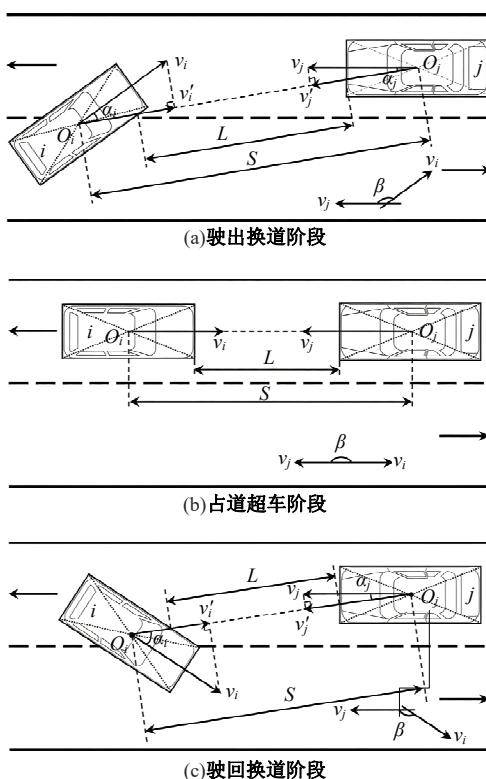


图 4 超车车辆与对向来车交通冲突空间矢量图

Fig. 4 Space vector of traffic conflict between overtaking vehicle and oncoming vehicle

时间间隔总长度。超车事件 k 的风险暴露时间 $RED(k)$ 可表示为:

$$RED(k) = \sum_{n=1}^N \delta_k \cdot \tau \quad (9)$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & 0 \leq ITTC_{2D} \leq ITTC_{2D}^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $ITTC_{2D}^*$ 为严重冲突风险阈值; δ_k 为转换变量; τ 为时间粒度。

本文将REL定义为RED与超车持续时间(Overtaking duration, OD)的比例,超车事件 k 的风险暴露水平 $REL(k)$ 可表示为:

$$REL(k) = \frac{RED(k)}{OD(k)}, \quad REL(k) \in [0, 1] \quad (11)$$

2.2 ITTC_{2D}计算方法有效性检验

为验证ITTC_{2D}指标量化借道超车风险的有效性,在提取出的数据样本中随机挑选两组车辆,将其与TTC_{2D}、TTC_x和TTC_y等当前常用的二维TTC指标进行对比,结果如图5所示。

从图5可以看出,在两种场景下,TTC_{2D}数值均明显高于ITTC_{2D},原因在于采用TTC_{2D}计算方法时未考虑车辆自身的车体旋转,认为两车相对碰撞角度相同。然而,车辆旋转会显著改变碰撞角度,增加忽略冲突风险的可能性^[14]。采用TTC_x和TTC_y组合计算方法可以同时量化两车在横、纵方向上的风险,但受限于一维TTC中后方车辆速度应高于前方车辆的应用条件,当后方车辆速度小于前方车辆时便无法捕捉两车之间的冲突风险,即图5中 $\Delta v_x \leq 0$ 或 $\Delta v_y \leq 0$ 时,相应的风险指标TTC_x和TTC_y将面临失效。

由表1可知,TTC_{2D}计算方法低估了两种场景下车辆间的整体冲突风险,且随着被超车车辆尺寸的增大,被低估的风险程度提高;当小客车超越货车时,TTC_{2D}与ITTC_{2D}之间的差值达3.28 s。由此可见,考虑了车辆偏航角、车身尺寸的ITTC_{2D}计算方法在借道超车场景具有良好的适用性,能够有效克服TTC_{2D}计算方法对碰撞角度的局限性,同时使得风险严重性度量结果更接近真实情况。

2.3 风险指标描述性统计

由图6可知,场景1、2的严重冲突风险阈值分别为2.10、2.08 s。场景1中,当ITTC_{2D}值小于或等于2.10 s时为严重冲突,当ITTC_{2D}值大于2.10 s时为非严重冲突;场景2中,当ITTC_{2D}值小

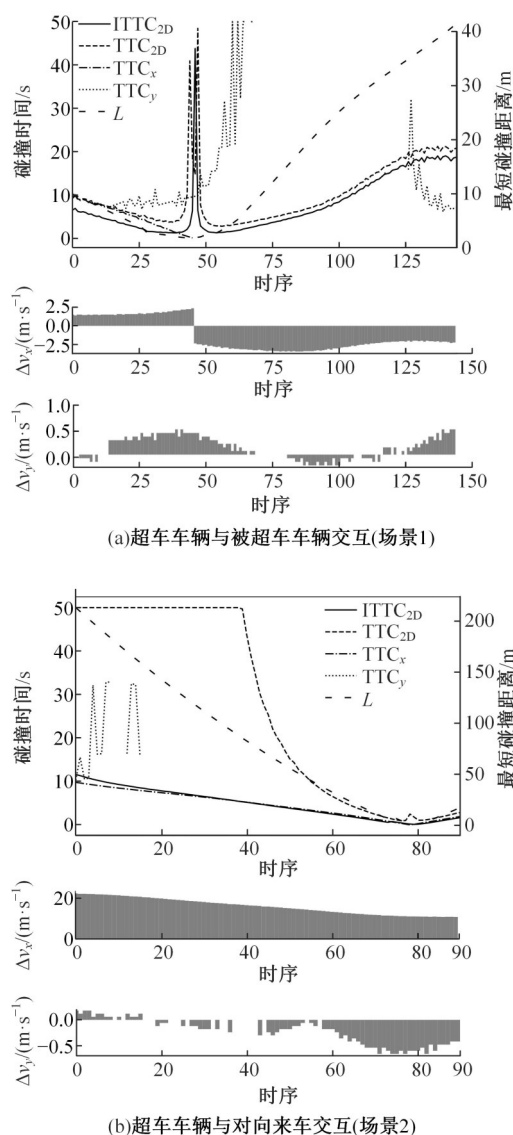


图5 ITTC_{2D}与其他风险严重性指标对比

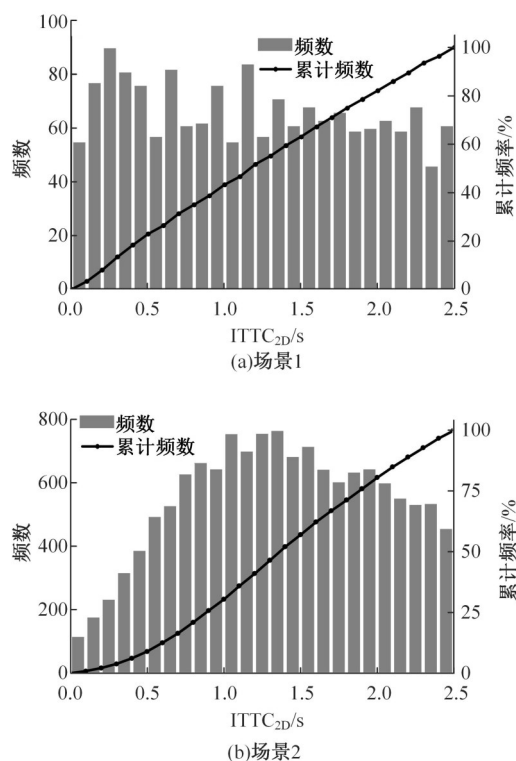
Fig. 5 ITTC_{2D} versus other indicators of risk severity

表1 不同风险严重性指标平均碰撞时间统计

Table 1 Average collision time statistics for different risk severity indicators

超车交 互场景	被超车车 辆类型	ITTC _{2D}	TTC _{2D}	TTC _x	TTC _y
场景1	总体	7.14	10.00	11.34	12.27
	摩托车	6.58	8.52	9.47	10.80
	小客车	8.00	10.67	12.13	11.55
	货车	4.70	7.98	9.28	15.28
场景2	总体	3.91	8.34	3.72	17.18
	摩托车	4.33	6.38	3.63	19.41
	货车	3.75	14.51	3.99	12.21

于或等于2.08 s时为严重冲突,当ITTC_{2D}值大于2.08 s时为非严重冲突。基于阈值划分结果,对存在严重冲突风险的借道超车事件进行统计,发现超车车辆与被超车车辆之间存在严重冲突风险

图6 严重冲突ITTC₂₀累计频率分布曲线Fig. 6 ITTC₂₀ cumulative frequency curve of the serious conflict

的事件比例高达99.47%,超车车辆与对向来车之间存在严重冲突风险的事件比例为80.52%。

由表2可知,场景1、2的风险暴露时间均值分别为5.19、3.05 s,风险暴露水平均值分别为0.37、0.17,表明超车车辆与被超车车辆交互时处于严重冲突状态的持续时间更长,可能发生碰撞事故的概率更高。场景1在占道超车阶段的平均风险暴露时间最长,平均风险暴露水平为0.43,高于整体平均水平6个百分点;场景2平均风险

表2 借道超车风险持续性指标描述性统计

Table 2 Descriptive statistics for overtaking risk persistence indicators

超车交互场景	所处超车阶段	风险暴露时间/s				风险暴露水平			
		平均 值	标准 差	最小 值	最大 值	平均 值	标准 差	最小 值	最大 值
场景1	全过程	5.19	1.87	0.00	13.17	0.37	0.16	0.00	0.96
	驶出换道	1.03	1.45	0.00	7.17	0.33	0.39	0.00	1.00
	占道超车	2.76	2.13	0.00	8.67	0.43	0.31	0.00	1.00
	驶回换道	1.41	2.00	0.00	7.83	0.26	0.29	0.00	1.00
	全过程	3.05	2.00	0.00	6.00	0.17	0.11	0.00	0.41
场景2	驶出换道	2.14	2.06	0.00	5.33	0.27	0.30	0.00	1.00
	占道超车	0.45	0.73	0.00	2.50	0.15	0.27	0.00	1.00
	驶回换道	0.46	0.79	0.00	3.00	0.16	0.29	0.00	1.00
	全过程	3.05	2.00	0.00	6.00	0.17	0.11	0.00	0.41
	驶出换道	2.14	2.06	0.00	5.33	0.27	0.30	0.00	1.00

暴露时间最长的阶段为驶出换道,平均风险暴露时间为2.14 s,分别是其他两个阶段平均风险暴露时间的4.76和4.65倍。

综上可知,超车车辆与被超车车辆交互、与对向来车交互时的严重冲突风险持续性特征存在明显差异。因此,有必要对山区双车道公路不同借道超车交互场景下的风险异质性影响展开深入研究。

3 考虑驾驶风格的风险暴露时间模型

3.1 驾驶风格分类

(1) 驾驶风格特征参数选取

当前用于评价驾驶人驾驶风格的特征参数没有公认的标准,Zang等^[15]的研究表明,不同交通场景下驾驶人的驾驶风格差异显著,需结合特定场景驾驶行为特征客观分析驾驶风格。本文基于文献[16,17],结合超车车辆的运动状态特征,选择占道行驶距离比例(Travel distance occupancy ratio, TOR)、横向偏移变异系数(Lateral migration coefficient of variation, LCV)和超速驾驶时间比例(Overspeed time ratio, OTR)作为山区公路驾驶人借道超车风格特征参数。TOR是超车车辆占用对向车道行驶距离与超车总距离之比,表征驾驶人对占用对向车道行驶距离的偏好性;LCV是超车车辆横向位置偏移的标准差与其均值之比,表征超车驾驶人横向驾驶行为的稳定性;OTR是超车车辆超速行驶的时间与超车总时间之比,表征驾驶人对超速超车的倾向性。

(2) 基于K-means的驾驶风格分类

采用K-means算法划分不同驾驶人借道超车风格,以TOR、LCV和OTR为聚类指标,采用肘部法则确定最佳聚类数量,并将聚类结果作为风险暴露时间模型的协变量。由图7可知,当聚

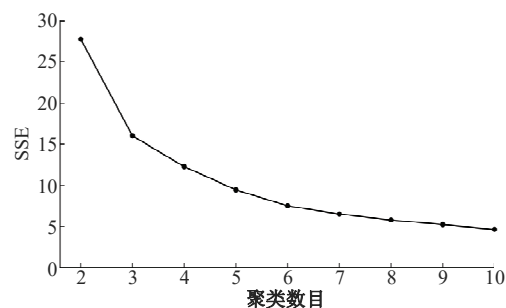


图7 基于肘部法则的最佳聚类数量分析

Fig. 7 Analysis of the optimal number of clusters based on the elbow method

类数量由2增至4时,误差平方和(Sum of squared errors, SSE)值迅速下降。当聚类数量增加超过4后, SSE值降幅明显减缓,表明增加更多类别对模型分区精度的提升效果并不显著。据此,确定最佳聚类数量为4。

结合表3和图8可知,2号簇(Cluster 2)相比其他3类在OTR数据的聚类中心值最高,故将其定义为超速型驾驶风格,此类驾驶人主要表现为超速驾驶,包含98个样本,占比26.1%;3号簇(Cluster 3)在LCV数据的聚类中心值最高,故将Cluster 3定义为激进型驾驶风格,此类驾驶人驾驶车辆时横向位置波动较大,驾驶稳定性较差,包含46个样本,占比12.2%;1号簇(Cluster 1)在LCV数据的聚类中心值最低,故将1号簇(Cluster 1)定义为稳健型驾驶风格,此类驾驶人主要表现为平稳驾驶,包含160个样本,占比42.6%;Cluster 0在TOR和LCV数据的聚类中心值略高于Cluster 1,故将Cluster 0定义为保守型驾驶风格,此类驾驶人主要表现为保守驾驶,包含72个样本,占比19.1%。

表3 聚类中心

Table 3 Clustering centers

特征参数	Cluster 0	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
TOR	0.79	0.47	0.82	0.74
LCV	0.20	0.14	0.18	0.65
OTR	0.02	0.02	0.91	0.04

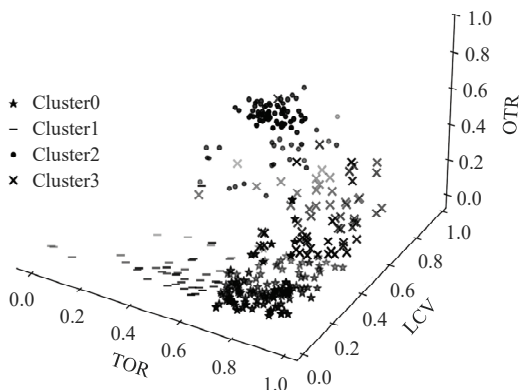


图8 K-means驾驶风格聚类结果

Fig. 8 K-means driving style clustering result

3.2 风险暴露时间生存分析

基于风险持续时间的生存分析模型^[18]不仅能够预测多种外生变量条件下的风险持续时长,还能通过生存曲线或危险曲线直观展示风险变化趋势,目前已在分心驾驶^[18]、危险跟驰^[19]等交通风险场景中得到广泛应用。本文采用生存分析方

法分析借道超车严重冲突风险,将生存时间定义为超车车辆与其他车辆交互时的风险暴露时间 T ,生存函数 $S(t)$ 表示风险暴露时间 T 大于 t 的概率,即:

$$S(t) = P(T \geq t), t \geq 0 \quad (12)$$

危险函数 $h(t)$ 表示超车严重冲突风险状态持续到 t 时刻未结束,在接下来 $t \sim t + \Delta t$ 时间内结束的概率,即:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t \geq T \geq t | T \geq t)}{\Delta t} \quad (13)$$

结合研究山区公路借道超车行为特性和超车风险影响因素的相关文献^[6-8],从驾驶人驾驶风格、车辆类型、道路线形和车辆交互状态4个方面构建影响借道超车风险暴露时间的协变量指标体系,并对协变量进行描述性统计分析,结果如表4所示。

3.3 风险暴露时间建模

本文引入AFT模型检验协变量对生存时间的影响方向和程度。采用AFT模型分别对超车车辆与被超车车辆交互、超车车辆与对向来车交互两种场景下的风险暴露时间建模。根据生存时间和协变量的值,构建Weibull、Log-Logistic和Log-Normal三种常见分布形式下的生存函数,并使用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)和贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)评估不同分布形式的参数生存模型性能。

AFT模型中,采用车辆借道超车风险暴露时间的自然对数 $\ln T$ 作为协变量的线性函数,即:

$$\ln T = X^T \beta + \epsilon \quad (14)$$

式中: X 为由表4所示协变量构成的列向量; β 为回归系数的向量; ϵ 为扰动项。

AFT模型的生存函数和危险函数分别为:

$$S(t|X) = S_0[t \exp(X' \beta)] \quad (15)$$

$$h(t|X) = h_0[t \exp(X' \beta)] \exp(X' \beta) \quad (16)$$

式中: S_0 为基准生存函数; h_0 为基准危险函数。

4 模型结果

4.1 AFT模型估计结果

为识别具有统计学意义的协变量和最优参数模型,利用Python的Lifelines库分别构建两种场景下的参数生存模型。采用向后逐步回归法筛选

表 4 借道超车风险暴露时间协变量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of overtaking risk exposure duration

协变量	超车场景 1			超车场景 2		
	协变量说明	平均值	标准差	协变量说明	平均值	标准差
Z_1	超车驾驶人驾驶风格类型(0~3 分别代表保守型、稳健型、超速型、激进型)	—	—	超车驾驶人驾驶风格类型(0~3 分别代表保守型、稳健型、超速型、激进型)	—	—
Z_2	被超车车辆类型(0~2 分别代表小客车、摩托车、货车)	—	—	被超车车辆类型(0、1 分别代表摩托车、货车)	—	—
Z_3	超车路段类型(0、1 分别代表平直、弯道)	—	—	—	—	—
$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	超车车辆速度	17.64	5.62	超车车辆速度	14.43	6.43
$a_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	超车车辆加速度	0.28	0.53	超车车辆加速度	0.16	0.48
cv_i	超车车辆速度变异系数	0.16	0.26	超车车辆速度变异系数	0.14	0.14
$v_j/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	被超车车辆速度	13.44	4.65	对向来车速度	15.10	5.85
$a_j/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	被超车车辆加速度	0.03	0.36	对向来车加速度	-0.17	0.59
cv_j	被超车车辆速度变异系数	0.09	0.10	对向来车速度变异系数	0.15	0.17
$\Delta x_{ij}/\text{m}$	两车横向位置差	2.41	0.60	两车横向位置差	2.62	1.2
$\Delta v_{ij}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	两车速度差	4.53	3.11	两车速度差	5.33	3.39
s_{ij}/m	两车车头间距	17.92	7.32	两车车头间距	36.34	17.90
$t_{ij}^{\text{TWH}}/\text{s}$	两车车头时距	1.40	0.85	两车车头时距	3.14	1.25

出不同分布形式下协变量的最优组合,并对比各参数分布形式下的 AIC 和 BIC,确定最优参数分布和协变量组合。AIC 和 BIC 比较结果如表 5 所示。

由表 5 可知,场景 1、2 的 AFT 模型最优参数分布分别为 Weibull 分布、Log-Logistic 分布。因此,本文将 Weibull AFT 模型结果作为场景 1 的最优参数模型,将 Log-Logistic AFT 模型作为场景 2 的最优参数模型,模型参数估计结果分别如表 6 和表 7 所示。参数估计值 β 反映了协变量对风险暴露时间的影响方向, $\beta > 0$ 表示协变量对风险暴露时间呈正向影响, $\beta < 0$ 表示呈负向影响。

表 5 不同分布形式下的 AFT 模型拟合优度比较

Table 5 Comparison of the AFT model's goodness of fit of different distributional forms

超车交互 场景	指标	Weibull 分布	Log-Logistic 分布	Log-Normal 分布
场景 1	AIC	1 398.33	1 527.30	1 769.14
	BIC	1 449.35	1 578.32	1 820.15
场景 2	AIC	191.56	181.16	190.33
	BIC	210.71	200.30	209.48

协变量的影响程度可通过危险比 $\exp(\beta)$ 表示, $[\exp(\beta)-1] \times 100\%$ 表示协变量变化 1 个单位引起的风险暴露时间变化百分比。

表 6 Weibull AFT 模型协变量参数估计(场景 1)

Table 6 Estimates of Weibull AFT model (scenario 1)

协变量	β	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)-1$	SE	z	p -value	95% CI	
							Lower	Upper
$Z_1=1$	0.00	1.00	0.00	0.05	0.06	0.95	-0.09	0.09
$Z_1=2$	0.14	1.15	0.15	0.05	2.61	0.01	0.04	0.25
$Z_1=3$	0.03	1.03	0.03	0.05	0.57	0.57	-0.07	0.13
$Z_2=1$	0.00	1.00	0.00	0.06	0.04	0.97	-0.11	0.11
$Z_2=2$	0.35	1.42	0.42	0.03	11.61	<0.005	0.29	0.41
$Z_3=1$	-0.20	0.82	-0.18	0.06	-3.38	<0.005	-0.32	-0.08
v_i	-0.02	0.98	-0.02	0.00	-3.91	<0.005	-0.03	-0.01
a_i	-0.12	0.88	-0.12	0.02	-5.15	<0.005	-0.17	-0.08
$cv_i(j=1)$	0.51	1.67	0.67	0.14	3.62	<0.005	-0.03	-0.01
$\Delta x_{ij}(j=1)$	-0.10	0.91	-0.09	0.03	-3.71	<0.005	-0.15	-0.05
$\Delta v_{ij}(j=1)$	0.01	1.01	0.01	0.00	2.42	0.02	0.00	0.02

注:SE 为标准差; z 为 z 统计量; p -value 设置为 0.05 显著水平;95%CI 为 95% 置信区间。

表7 Log-Logistic AFT模型协变量参数估计(场景2)
Table 7 Estimates of Log-Logistic AFT model (scenario 2)

协变量	β	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)-1$	SE	z	p -value	95% CI	
							Lower	Upper
$Z_1=1$	-0.30	0.74	-0.26	0.18	-2.35	0.02	-0.55	-0.05
$Z_1=2$	0.15	1.16	0.16	0.13	0.88	0.38	-0.19	0.49
$Z_1=3$	-0.20	0.82	-0.18	0.17	-1.44	0.15	-0.48	0.07
$Z_2=1$	0.17	1.19	0.19	0.14	2.24	0.02	0.02	0.32
v_i	-0.06	0.94	-0.06	0.08	-5.30	<0.005	-0.09	-0.04
$v_j(j=2)$	0.05	1.05	0.05	0.01	5.49	<0.005	0.03	0.07
$s_{ij}(j=2)$	-0.02	0.98	-0.02	0.00	-5.79	<0.005	-0.03	-0.01

4.2 AFT模型参数分析

为直观展示协变量对风险暴露时间的影响程度,绘制两种场景下各协变量对生存函数的影响图,分别如图9和图10所示。图中,分类协变量以赋值为0的类别作为基准,连续协变量以中位值作为基准,连续协变量的15%或85%分位值作为危险阈值(呈正向影响的取85%分位值,呈负向影响的取15%分位值)。

结合表6和图9结果可知,当超车车辆与被超车车辆交互时,影响两车风险暴露时间的关键协变量为超车驾驶人驾驶风格 Z_1 、被超车车辆类型 Z_2 、超车路段类型 Z_3 、超车车辆速度 v_i 、超车车辆加速度 a_i 、被超车车辆速度变异系数 $cv_j(j=1)$ 、两车横向位

置差 $\Delta x_{ij}(j=1)$ 和两车速度差 $\Delta v_{ij}(j=1)$ 。

(1) 相较保守型驾驶风格($Z_1=0$),超速型($Z_1=2$)、激进型($Z_1=3$)驾驶风格驾驶人借道超车时的风险暴露时间均有延长,前者使风险暴露时间增加15%,而后者及稳健型($Z_1=1$)驾驶风格与保守型驾驶风格在统计学意义上的差异并不显著。

(2) 当被超车车辆类型为货车($Z_2=2$)时,超车风险暴露时间相较于小客车($Z_2=0$)时增加42%。这是由于,货车车身体积大、载重大,机动性能差,容易对超车驾驶人的行车视线和超车操作造成负向影响,使得超车车辆处于严重冲突风

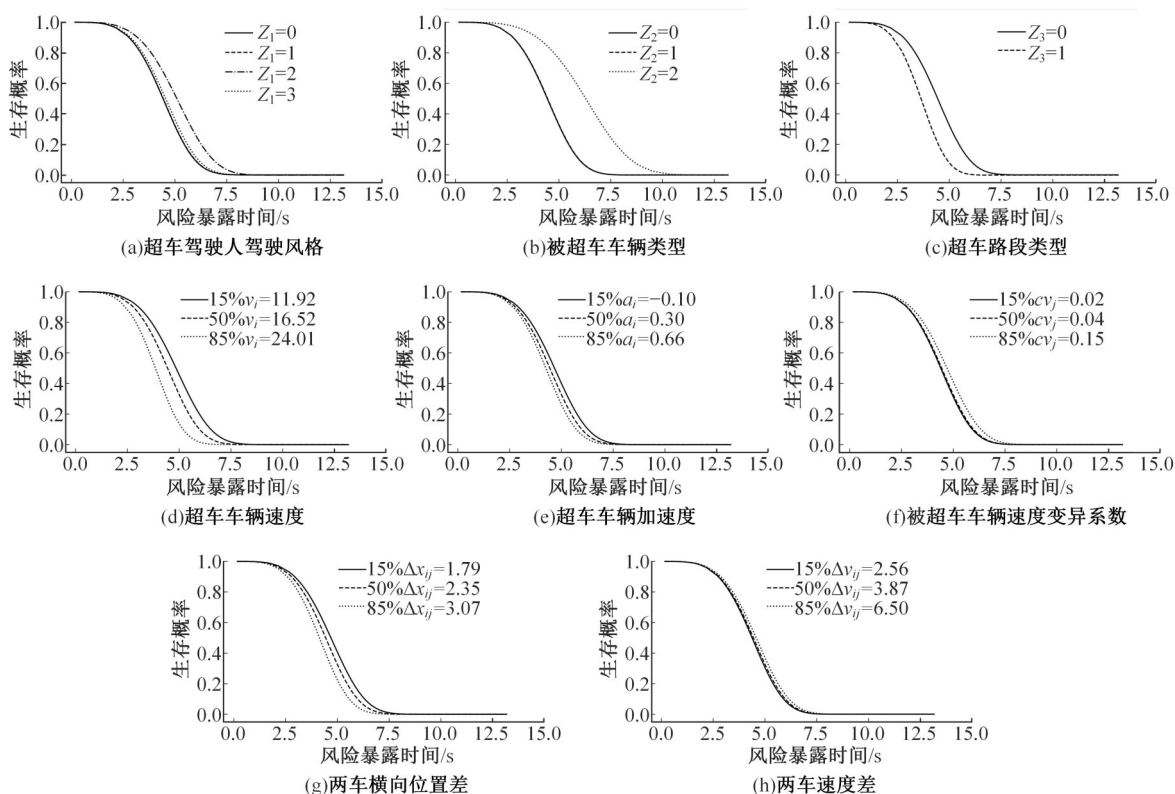


图9 协变量对生存函数的影响(场景1)

Fig. 9 Effect of covariates on the survival function (scenario 1)

险状态的时间更长。

(3)车辆在弯道路段超车($Z_3=1$)时相较于在直道($Z_3=0$)的风险暴露时间减少18%。产生这一结果的原因是,具备驾驶经验的驾驶人都深知在弯道超车存在诸多安全隐患,故而会尽量缩短超车持续时间,快速完成超车,因此风险暴露时间也相对较短。

(4)连续协变量中对风险暴露时间正向影响程度最大的是被超车车辆速度变异系数 $cv_j(j=1)$, $cv_j(j=1)$ 数值每增加1,风险暴露时间增加67%;当 $cv_j(j=1)$ 由中位值向危险阈值变化时,风险暴露时间将提升约7个百分点。其次是两车速度差 $\Delta v_{ij}(j=1)$, $\Delta v_{ij}(j=1)$ 每增加1 m/s,风险暴露时间增加1%;当 $\Delta v_{ij}(j=1)$ 由中位值向

危险阈值变化时,风险暴露时间将提升约3个百分点。

(5)连续协变量中,超车车辆加速度 a_i 对风险暴露时间的负向影响程度最大, a_i 每增加1 m/s²,风险暴露时间减少12%。超车车辆速度 v_i 和两车横向位置差 $\Delta x_{ij}(j=1)$ 的负向影响程度较小,分别为-2%、-9%。然而,该对比忽略了协变量的数量级,当考虑协变量的平均值时, v_i 和 $\Delta x_{ij}(j=1)$ 的平均影响较大,分别为 $(-2\%) \times 17.64 = -35.28\%$ 和 $(-9\%) \times 2.41 = -21.69\%$ 。

通过分析表7和图10可知,当超车车辆与对向来车交互时,影响两车风险暴露时间的关键协变量为超车驾驶人驾驶风格 Z_1 、被超车车辆类型 Z_2 、超车车辆速度 v_i 、对向来车速度 $v_j(j=2)$ 和两车车头间距 $s_{ij}(j=2)$ 。

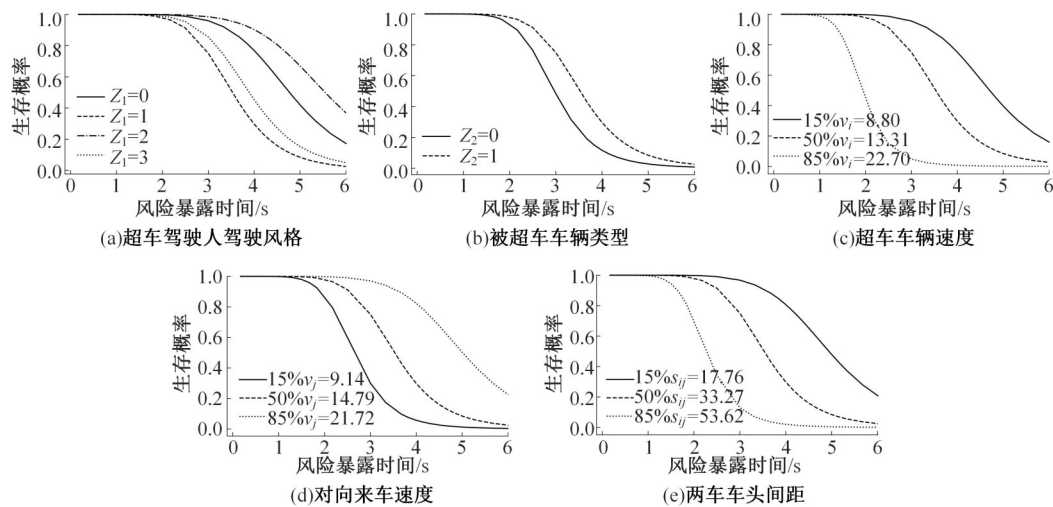


图10 协变量对生存函数的影响(场景2)

Fig. 10 Effect of covariates on the survival function (scenario 2)

(1)相较保守型驾驶风格($Z_1=0$),稳健型驾驶风格($Z_1=1$)驾驶人在借道超车与对向来车交互时的风险暴露时间减少26%,而超速型($Z_1=2$)、激进型驾驶风格($Z_1=3$)对风险暴露时间的相对影响在统计学意义上并不显著,表明稳健型风格驾驶人在山区公路借道超车时具有相对较好的避险表现。

(2)当被超车车辆类型为货车($Z_2=1$)时,风险暴露时间相较于摩托车($Z_2=0$)时增加19%。摩托车在山区公路行驶时占用的道路空间面积较小,可为超车车辆提供的避险道路空间相较货车更大,一定程度上降低了超车车辆与对向来车发生冲突的可能性,也使得风险暴露时间进一步

缩短。

(3)连续协变量中对风险暴露时间呈正向影响的是对向来车速度 $v_j(j=2)$, $v_j(j=2)$ 每增加1 m/s,风险暴露时间增加5%;当考虑协变量的平均值时,对向来车速度 $v_j(j=2)$ 的平均影响为 $5\% \times 15.10 = 75.50\%$;当 $v_j(j=2)$ 由中位值向危险阈值变化时,风险暴露时间将提升约35个百分点。

(4)连续协变量中,超车车辆速度 v_i 对风险暴露时间的负向影响程度最大, v_i 每增加1 m/s,风险暴露时间减少6%;其次是超车车辆与对向来车的车头间距 $s_{ij}(j=2)$, $s_{ij}(j=2)$ 每增加1 m,风险暴露时间减少2%。当考虑协变量的平均值

时,超车车辆速度 v_i 和两车车头间距 $s_{ij}(j=2)$ 的平均影响分别为 $(-6\%) \times 14.43 = -86.58\%$ 和 $(-2\%) \times 36.34 = -72.68\%$ 。

综上分析表明,被超车车辆速度变异系数 $cv_j(j=1)$ 、超车车辆与被超车车辆速度差 $\Delta v_{ij}(j=1)$ 、对向来车速度 $v_j(j=2)$ 等车辆交互状态参数对生存函数具有显著的正向影响,当上述参数由中位值向危险阈值变化时,超车风险暴露时间显著延长。

5 结 论

(1)山区公路借道超车严重冲突风险主要发生在超车车辆驶出换道和占道超车阶段,两个阶段的主要冲突对象分别是对向来车、被超车车辆。相较与对向来车交互,超车车辆与被超车车辆交互时处于严重冲突风险状态下的持续时间更长。

(2)超车驾驶人驾驶风格、被超车车辆类型对两个AFT模型的风险暴露时间均有显著影响。相较保守型驾驶风格,超速型风格驾驶人的风险暴露时间增加15%,稳健型风格驾驶人的风险暴露时间减少26%;超车车辆在超越货车时的风险暴露时间最长,相比超越摩托车、小客车时的风险暴露时间分别增加19%、42%。

(3)超车车辆与被超车车辆交互的Weibull AFT模型中,超车车辆速度、加速度、被超车车辆速度变异系数、两车横向位置差和两车速度差5个连续协变量对风险暴露时间具有显著影响。平均影响程度最大的是超车车辆速度,其每增加1 m/s,风险暴露时间减少35.28%;其次是两车横向位置差,其每增加1 m,风险暴露时间减少21.69%。

(4)超车车辆与对向来车交互的Log-Logistic AFT模型中,超车车辆速度、对向来车速度和两车车头间距3个连续协变量对风险暴露时间具有显著影响。平均影响程度最大的是超车车辆速度,其每增加1 m/s,风险暴露时间减少86.58%;其次是对向来车速度和两车车头间距,对向来车速度每增加1 m/s,风险暴露时间增加75.50%,两车车头间距每增加1 m,风险暴露时间减少72.68%。

参考文献:

[1] Mwesige G, Farah H, Koutsopoulos H N. Risk ap-

praisal of passing zones on two-lane rural highways and policy applications[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 90: 1-12.

[2] Choudhari T, Budhkar A, Maji A. Modeling overtaking distance and time along two-lane undivided rural highways in mixed traffic condition[J]. Transportation Letters, 2022, 14(2): 75-83.

[3] Branzi V, Meocci M, Domenichini L, et al. A combined simulation approach to evaluate overtaking behaviour on two-lane two-way rural roads[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021(2): 1-18.

[4] 刘照霞,付锐,牛世峰. 基于极值理论与智能网联信息的超车风险评估[J]. 吉林大学学报:工学版, 2025, 55(3): 925-937.

Liu Zhao-xia, Fu Rui, Niu Shi-feng, Risk assessment in overtaking scenarios using extreme value theory and intelligent and connected information[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2025, 55(3): 925-937.

[5] Mahmud S M S, Ferreira L, Hoque Md S, et al. Overtaking risk modeling in two-lane two-way highway with heterogeneous traffic environment of a low-income country using naturalistic driving dataset[J]. Journal of Safety Research, 2022, 80: 380-390.

[6] Li D, Pan H. Two-lane two-way overtaking decision model with driving style awareness based on a game-theoretic framework[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2023, 19(3): No. 2076755.

[7] Figueira A C, Larocca A P C. Analysis of the factors influencing overtaking in two-lane highways: a driving simulator study[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020, 69: 38-48.

[8] Pawar N M, Velaga N R. Investigating the influence of time pressure on overtaking maneuvers and crash risk[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 82: 268-284.

[9] Karimi A, Boroujerdian A M, Catani L, et al. Who overtakes more? Explanatory analysis of the characteristics of drivers from low/middle and high-income countries on passing frequency[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 76: 167-177.

[10] Papakostopoulos V, Nathanael D, Portouli E, et al. The effects of changes in the traffic scene during overtaking[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 79: 126-132.

[11] Song Y. Integrated overtaking model and safety anal-

- ysis for truck platooning requirements on two-lane undivided highways[J]. *Transportation Research Record*, 2024, 2678(8): 1-18.
- [12] 耿晓峰, 戴秉佑, 普永明, 等. 基于生存分析的山区双车道公路超车持续时间模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(6): 183-190.
- Ji Xiao-feng, Dai Bing-you, Pu Yong-ming, et al. Overtaking duration model of two-lane mountainous highways based on survival analysis[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(6): 183-190.
- [13] Venthuruthiyil S P, Chunchu M. Anticipated collision time (ACT): a two-dimensional surrogate safety indicator for trajectory-based proactive safety assessment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 139: No. 103655.
- [14] Cheng H, Jiang Y, Zhang H, et al. Emergency index (EI): a two-dimensional surrogate safety measure considering vehicles' interaction depth[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 171: No. 104981.
- [15] Zang Y, Wen L, Cai P, et al. How drivers perform under different scenarios: ability-related driving style extraction for large-scale dataset[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2024, 196: No. 107445.
- [16] Espinoza J, Delpiano R. Statistical models of interactions between vehicles during overtaking maneuvers[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023, 678(4): 323-333.
- [17] Sabek B, Srour F J, El Mendelek M, et al. Are you in the mood to pass? A study on the interplay of psychological traits and traffic on young drivers' overtaking behavior on two-lane, two-way highways[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2024, 101: 59-77.
- [18] Ye S, Chen T, Oviedo-Trespalacios O, et al. Investigating work-related distraction's impact on male taxi driver safety: a hazard-based duration model[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2024, 44: No. 100350.
- [19] 耿晓峰, 李金, 普永明, 等. 穿村镇公路车辆跟驰冲突暴露时间生存分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2025, 25(2): 349-360.
- Ji Xiao-feng, Li Jin, Pu Yong-ming, et al. Survival analysis of car-following conflict exposure time on through-village highway[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2025, 25(2): 349-360.