

货车移动遮断影响下的跟驰风险异质性建模

谢世坤¹, 杨 轸¹, 戢晓峰²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 基于移动瓶颈理论和交通流理论构建“货车移动遮断”效应模型, 解析货车移动遮断形成机理, 选用无人机采集货车移动遮断场景中车辆行驶视频数据并提取高精度车辆跟驰轨迹样本, 基于此提出考虑冲突可能性和冲突严重度的小客车跟驰风险评价方法和分级标准, 利用 RP-ORP 模型构建了考虑异质性跟驰风险概率预测模型。结果表明: 货车移动遮断动态影响交通流稳定性, 其形成过程包括减速跟驰和加速超车两个阶段; 考虑异质性的 RP-ORP 模型能实现特定条件下小客车跟驰行为处于不同风险等级的概率预测, 且拟合优度高于 FP-ORP 模型高; 货车纵向加速度、跟驰车头间距、跟驰持续时间、小客车与货车速度差、激进型驾驶员 5 个变量显著影响小客车跟驰风险水平, 且跟驰持续时间和激进型驾驶员 2 个变量具有随机参数特性。

关键词: 交通安全; 货车移动遮断; 跟驰风险; 交通冲突; 异质性; 山区双车道公路

中图分类号: U491

文献标志码: A

Modeling Heterogeneity for Car-following Risk Evaluation Under Truck Movement Block

XIE Shikun¹, YANG Zhen¹, JI Xiaofeng²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on the movement bottleneck and traffic flow theory, a "truck movement block" effect model was constructed to analyze occurrence mechanism and the car-following behavior. Then, the UAV was selected to collect the vehicle driving video under the truck movement block, and the high-precision car-following trajectory was extracted by trajectory software. Last, the car-following risk assessment methods and grading standards that considers both the possibility and the severity of the risk

was proposed. And the random parameter ordered probit model (RP-ORP) was established to assess the car-following risk, and the elasticity coefficient was introduced to analyze the magnitude and direction of the impact on car-following risk. This finding demonstrates that truck movement block includes two processes: car-following and overtaking, which dynamically affects the traffic stability. The RP-ORP model has a better fit than the FP-ORP model, and can realize the probability prediction that different car-following levels under certain conditions. Five variables significantly affect the car-following risk level, such as truck longitudinal acceleration, car-following distance, car-following time, average car-following speed difference, radical driver, among the variables of car-following time and radical driver have random parameter characteristics.

Key words: traffic safety; the truck movement block; car-following risk; traffic conflict; heterogeneity; two-lane mountainous highway

受公路设计标准和地形地质条件等综合限制, 山区双车道公路呈路窄、弯多、坡陡等特征, 行车环境极其复杂。同时, 伴随着物流业的快速发展, 交通流中货车占比不断加大, 加之货车具有体积大、载重多、行驶速度相对慢等特性, 会持续遮断后车驾驶员行驶视线, 由此导致后车低速跟驰、逆向借道或占用硬路肩超车等高风险驾驶行为频繁发生, 引发较高的事故风险。据统计, 货车-小客车事故占货车事故的 60%, 其中, 小客车驾驶员死亡率高达 83%^[1], 可见, 货车移动遮断导致的行车安全问题已成为交通安全领域亟待解决的现实问题。

国内外学者较早开展了低速货车对道路通行能力及行车安全造成的影响研究, 包括货车移动瓶

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(52062024); 上海市科委科研计划(19DZ1209102)

第一作者: 谢世坤(1996—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路安全与环境工程。E-mail: 2111521@tongji.edu.cn

通信作者: 戢晓峰(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通安全。E-mail: yiluxinshi@sina.com



颈^[2]、移动屏障^[3]、货车结伴效应^[4]等。2021年,戢晓峰等^[5]首次针对山区双车道公路货车遮断现象展开研究,发现货车遮断导致小客车行车速度降低20~30 km·h⁻¹,平均跟驰时距为小于《公路工程技术标准》中规定的最小安全值,一定程度上会增加小客车驾驶风险。由于货车移动遮断影响下不能及时获取道路前方交通信息,后车驾驶员更倾向于跟驰行驶。跟驰行驶时受货车压迫和视距受限的影响,驾驶员会出现紧张等心理变化,导致驾驶员改变其跟驰行为,引起车头时距等微观驾驶特征改变影响交通流稳定性。为量化与评估车辆跟驰风险,大多数学者从仿真实验数据和自然驾驶数据出发,利用统计分析和机器学习等方法构建跟驰风险评估模型^[6-9]。随着研究不断推进,风险场理论被提出并应用于行驶风险研究,如Wu^[10]等基于风险场理论构建了自动驾驶车辆跟驰风险概率预测模型。

上述研究虽考虑了交通流对跟驰车辆的影响,但集中于高速和城市道路等多车道公路。与多车道公路相比,双车道公路车辆运行更为复杂,车辆驾驶行为不仅受本车道前车干扰,同时受对向车道来车影响。并且山区双车道公路特殊线形和货车低速行驶性能会导致相邻车辆跟驰行为与常规交通流不一致,后方小客车通常会选择减速跟驰或跨线占道跟驰来等待超车机会,频繁调整车速和占用对向车道,造成货车移动遮断路段交通流扰动,进而增加后方小客车跟驰风险^[11-12]。基于此,本文通过设计无人车辆轨迹数据采集实验,开展山区双车道公路货车移动遮断发生机理及对小客车跟驰行为的影响研究。综合考虑交通冲突风险可能性和严重度,建立

货车移动遮断场景内小客车跟驰风险评价方法和分级标准,采用随机参数有序probit(FP-ORP)模型构建小客车跟驰行为风险预测模型,并基于边际效应和弹性系数定量分析货车移动遮断场景下车辆属性、驾驶员行为差异、跟驰特性与小客车跟驰风险间的相互关系,从而为道路交通管理部门制订和实施山区公路交通安全管理办法工作提供理论和技术支撑。

1 货车移动遮断形成机理

1.1 货车移动遮断

货车动力性能差异大、行驶速度慢,其平均行驶速度小于车流整体平均速度(特别是小客车平均速度),对货车后方车辆行驶扰动严重。而山区双车道公路行车条件复杂,且道路无中央隔离带,在货车影响影响下,后方车辆近距离跟驰、占道超车等高风险驾驶现象普遍,导致较高的事故风险,该现象称为货车移动遮断。

基于与云南省公路局联合监测的货车移动遮断现象,结合移动瓶颈理论^[13],提出山区双车道公路货车移动遮断的概念,即某一低速货车行驶在双向两车道公路上,由于道路线形条件和货车性能限制,遮断货车后方驾驶员行驶视线,导致货车后方出现单一或成队等待超车的车辆,且该车辆(队)随交通流一起发生移动的现象。移动遮断是静态设施(道路线形)与动态设施(运行车辆),以及交通流内部各车辆间相互作用的结果,其导致的道路时空资源损失随时间空间动态变化的。如图1所示。

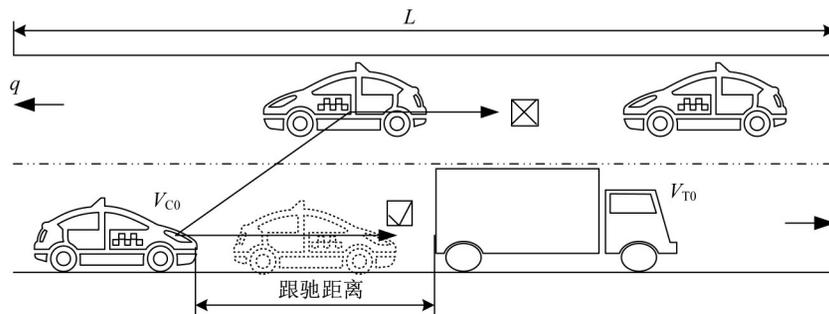


图1 山区双车道货车移动遮断现象

Fig.1 The classic scene of truck movement block on two-lane mountain highway

1.2 移动遮断形成机理分析

结合交通流理论,解析双车道公路货车移动遮断的发生机理,如图2所示。设某一长度为 L ,流量为 q 的山区双车道路段,有正常行驶的货车(速度为

V_{T0} ,状态①)和小客车(速度为 V_{C0} ,状态②, $V_{T0} < V_{C0}$)。开始路段小客车以速度 V_{C0} 运行,当小客车进入货车遮断场景后(t_1 时刻),路段车流将以速度 V_{C1} 前进($V_{C1} \leq V_{T0}$,状态③),整体交通流的速度不稳

定。根据交通工程学压缩波模型,路段将形成速度小于 V_{T0} 集结波 F_1 (状态④),即遮断形成。当路段满足超车条件后(t_3 时刻),小客车将以速度 V_{C2} 超车($V_{C2} > V_{T0}$,状态⑤),排队车辆相继完成超车,形成消散波 F_2 (状态⑤),路段车流重新进入正常行驶状态(状态②),即遮断消失。当道路线形和交通流条件远远满足超车需求时,道路通行效率则不被货车移动遮断影响。

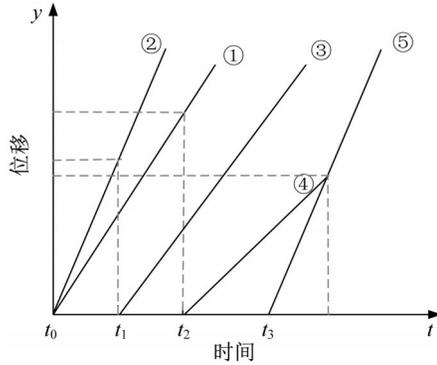


图2 山区双车道货车移动遮断发生机理

Fig.2 The mechanism of truck moving block on two-lane mountain roads

由此可得,货车移动遮断包括跟驰和超车2个阶段,驾驶员在不同阶段采取不同的操作行为。当对向车道交通流和本车道车辆间能够提供可以超车和回车的能力时,小客车驶入对向车道完成超车;当超车条件不满足时,小客车只能根据前方货车行驶状态来选择合理车速跟驰行驶,并且时刻关注道路线形和对向车道交通流情况等待超车。通过对移动遮断场景内紧邻小客车驾驶行为统计,发现超车行为占30.38%,而跟驰行为占69.62%,是双车道公路货车移动遮断场景内的典型驾驶行为。

当小客车在货车移动遮断场景内跟驰行驶时,驾驶员视线长期被低速货车遮挡,不能及时准确地获取道路前方交通信息,导致小客车产生强烈的超车需求。后方驾驶员均想通过改变其驾驶行为超越其前方低速货车,尽快离开货车移动遮断场景,出现频繁变速(速度变异系数为0.463)、跨线行驶(横向偏移分布在-0.83 m至1.76 m区间)、强制超车(40%超车视距小于规范值250 m)等危险行为,这些行为使得交通流极不稳定,进而增加驾驶员行车风险。因此,本文以货车移动遮断影响下的小客车跟驰行为风险为评估对象。

2 数据采集与筛选

2.1 数据采集与处理

为获取高精度的货车移动遮断轨迹数据,本文选取云南省典型山区双车道元双公路进行数据采集。在良好的天气条件下,采用大疆御MAVIC 2专业版无人机在200 m高空进行连续拍摄,拍摄时间2019年9月25日至9月30日8:30~18:00,为提高拍摄结果的精度,地面比例标定方法采用专用钢尺测定。

采用日本名古屋大学开发的视频处理软件George2.1追踪视频中目标车辆的行驶轨迹数据。数据处理流程如图3所示。设置车辆轨迹提取频率为10 HZ,控制图像坐标与地面坐标的精度误差在±0.05 m之内,通过坐标变换、轨迹提取、轨迹平滑等流程,得到货车移动遮断场景内的车辆行驶轨迹数据,如图4所示。George2.1软件能直接输出的轨迹数据包括前后车ID、采样时刻、车辆速度、横向速度、纵向速度、加速度、横向加速度、纵向加速度、前后车位置坐标等。

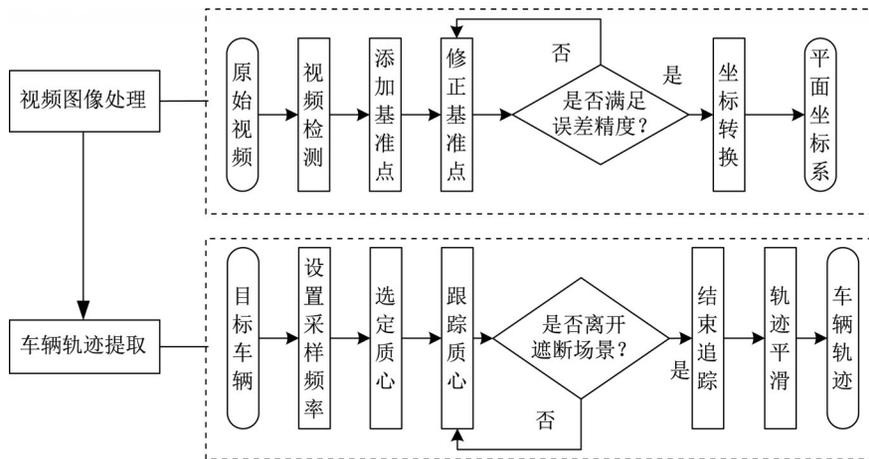


图3 车辆轨迹数据处理流程

Fig.3 Vehicle trajectory data processing flow



图 4 货车移动遮断场景内的跟驰小客车跟驰轨迹

Fig. 4 Trajectory of the car-following in the truck movement blocking scene

2.2 跟驰片段提取

为保证模型参数标定和验证需求,须从数据集中提取满足货车移动遮断和跟驰条件的相关数据,保证包含充足完整的信息。在进行跟驰片段筛选前,先将货车移动遮断影响范围进行限制,通过统计货车场景下第一辆小客车开始减速或加速时的车头间距,将货车与其后方第一辆小客车车头间 150 m 范围确定为货车移动遮断的影响范围。

从相邻两车的车头间距和车头时距判定跟驰状态。交通流理论认为本车与前车间距在 125 m 范围内为跟驰行为,也有研究定义本车与前车的车头时距小于 5 s 时为跟驰行为。对于双车道公路而言,美国 HCM^[14]认为当车头时距小于或等于 5 s 时,车辆处于跟驰状态。因此,提出双车道货车移动遮断影响下的小客车跟驰状态判定准则:小客车和货车车头时距小于或等于 5 s。根据该准则对车辆轨迹数据进行筛选,并剔除掉帧、ID 无法匹配、非正常驾驶速度等异常数据,得到 110 组货车移动遮断场景下的跟驰行为轨迹数据,共计 36 960 条。一个典型的跟驰片段如表 1 所示。图中, V_T 是前导货车速度; V_C

表 1 小客车—货车跟驰片段实测数据

Tab.1 A car-truck following process with measured data

t/s	$V_T/(km \cdot h^{-1})$	$V_C/(km \cdot h^{-1})$	$a/(m \cdot s^{-2})$	s/m	h/s
0.1	37.19	30.11	0.10	31.89	3.81
0.2	37.21	30.15	0.13	32.08	3.83
0.3	37.24	30.2	0.17	32.28	3.85
0.4	37.28	30.26	0.20	32.47	3.86
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17.5	46.15	42.77	0.55	42.85	3.61

是跟驰小客车速度; a 是跟驰小客车加速度; s 是车辆间距; h 是车头时距。

3 基于 ICRI 的跟驰风险模型

3.1 跟驰模型变量选取

3.1.1 因变量构建

风险可能性和严重度是评价风险的两个维度,单维度评价不能准确量化交通事故风险。据此,本文提出结合风险可能和风险后果的综合风险指数 I_R , 表征货车移动遮断场景中小客车跟驰行为的风险程度,作为模型因变量。

(1) 风险可能性

根据冲突特性及既有研究^[17],采用碰撞时间 T 判别跟驰风险概率。其定义为道路上行驶的车辆不采取避险措施,保持原有速度和轨迹行驶直至碰撞的时间,即

$$T_C(t) = \frac{x_T(t) - x_C(t) - l_T}{V_C(t) - V_T(t)} \quad (1)$$

式中: $T_C(t)$ 为 t 时刻小客车碰撞货车的碰撞时间; $X_T(t)$ 和 $X_C(t)$ 分别为 t 时刻货车和小客车位置坐标; $V_T(t)$ 和 $V_C(t)$ 分别为 t 时刻货车和小客车地点车速; l_T 为货车车长。

通过 MATLAB 读取移动遮断场景内货车和小客车行驶轨迹数据,根据位置坐标及两车行驶速度计算出 T 。参考相关研究成果^[15],采用统计学中累积频率分布曲线对冲突风险进行差异化分级。将每起冲突的 T 值以 1s 为间隔进行均等分组处理,计算每组数据的频率及累积频率并绘制累积频率曲线图(图 5)。根据帕累托定律分别选定 15%、40%、

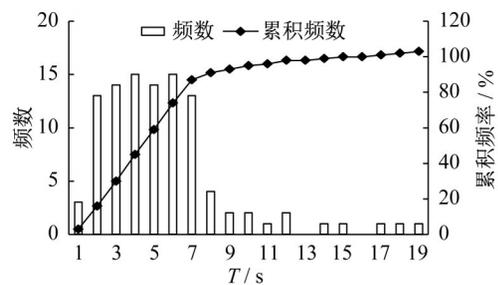


图 5 T 累积频率分布曲线图

Fig.5 Time to collision cumulative frequency distribution curve

60%、85% 位累积频率对应 T 值为不同风险概率等级判别标准^[18]。如表 2 所示。

(2) 风险严重度

相同的 T 值代表发生碰撞的概率相同,但一个轻微事故与一个人员伤亡事故的严重程度区别明显,故还应考虑冲突潜在碰撞的后果严重性。结合

表2 不同冲突风险概率等级的碰撞时间阈值

Tab.2 Time to collision thresholds for conflict risk probability levels

风险概率等级	T/s	事故风险状况
0	≤0 >7.0	无冲突
1	(5.3,7.0]	小
2	(4.0,5.3]	中等
3	(2.0,4.0]	大
4	(0.0,2.0]	很大

现有研究^[16],选取避撞减速度D衡量冲突风险的严重程度。定义为跟驰间距较近的两辆车,后车为规避碰撞所需的减速度,即

$$D_c(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{[V_c(t) - V_T(t)]}{\frac{x_T(t) - x_c(t) - l_T}{V_c(t) - V_T(t)}} = \frac{[V_c(t) - V_T(t)]^2}{x_T(t) - x_c(t) - l_T} \quad (2)$$

基于D计算值,同理选定15%、40%、60%、85%位累积频率(图6)对应D值为不同风险概率等级判别标准,获取不同冲突风险概率等级对应的冲突严重程度,如表3所示。

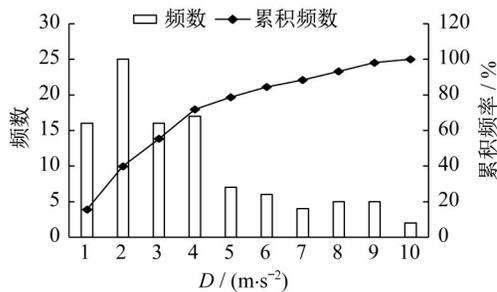


图6 不同冲突风险严重程度等级的避撞减速度阈值

Fig. 6 D thresholds for different conflict risk severity levels

表3 不同冲突风险严重程度等级的避撞减速度阈值

Tab.3 D thresholds for conflict risk severity levels

冲突严重程度等级	D/(m·s ⁻²)	冲突严重程度描述
0	≤0 (0.0,1.0]	正常行驶,无需避撞
1	(1.0,2.0]	轻微冲突
2	(2.0,3.5]	一般冲突
3	(3.5,6.0]	较严重冲突
4	≥6.0	严重冲突

(3)跟驰风险等级

根据式(2)可知,D和T的倒数呈一元一次正相关关系,表明冲突风险概率等级系数和冲突严重程度等级可以一一对应,即冲突风险概率越高,冲突风险

严重程度概率也越高。已有研究表明冲突风险水平与事故间存在相关系数 $\rho^{[17]}$,且该系数与风险变化水平呈S形曲线关系^[18],因此引入比数概念对风险系数进行对数转换(表4),以精确描述交通冲突与交通事故间的关系。

表4 冲突风险系数转换

Tab.4 Conversion of collision risk coefficients

风险水平	T/s	D/m·s ⁻²	风险系数 ρ	风险系数对数转化
无冲突	≤0 >7.0	≤0 (0.0,1.0]	0	0
1	(5.3,7.0]	(1.0,2.0]	0.2	0.25
2	(4.0,5.3]	(2.0,3.5]	0.3	0.43
3	(2.0,4.0]	(3.5,6.0]	0.6	1.5
4	(0.0,2.0]	≥6.0	0.8	4.0

基于不同风险水平下T和D统一的风险系数,构造货车移动遮断场景内小客车跟驰行驶时的综合风险指数 I_R 计算公式为如下:

$$I_R = \rho \sqrt{T_c(O_i)^2 + D_c(O_j)^2} \quad (3)$$

式中: I_R 表示跟驰风险综合指标, $T_c(O_i)$ 表示冲突风险概率等级, $D_c(O_j)$ 表示冲突严重程度等级, $i, j=0, 1, 2, 3, 4$ 。

根据式(3)计算得到货车移动遮断场景内小客车的 I_R 值,将小客车跟驰风险水平划分为四级(表5):零风险水平(I),低风险水平(II)、中风险水平(III)、高风险水平(IV)。

表5 货车移动遮断场景内小客车跟驰风险等级

Tab.5 Car-following risk level in truck movement block

跟驰风险水平	冲突严重程度等级					
	0	1	2	3	4	
冲突风险概率等级	0	I	II	II	III	IV
	1	II	II	II	III	IV
	2	II	II	II	III	IV
	3	III	III	III	III	IV
	4	IV	IV	IV	IV	IV

3.1.2 自变量选取

结合相关研究及现场调研,从交通流特性、跟驰特性和驾驶员风格等方面初步选取14个影响跟驰行为风险的特征指标(表6)。其中,驾驶倾向指标是选取小客车横向偏移、小客车横向加速度和小客车纵向加速度3个指标,采用KNN无监督聚类算法进行聚类,按照相似程度将其划分为保守型、稳健型和激进型。保守型驾驶员感知低速货车的压迫感最强,会较早产生减速意识,且强烈要求视线前方有足够的空间满足观察对向车道行驶状况和本车道前方

行驶趋势;稳健型驾驶员感知到的货车压迫感次于保守型驾驶员;激进驾驶员感知到的货车压迫感最小,超车意识强烈。

表 6 跟驰风险预测模型自变量

Tab.6 Independent variables of the car-following risk prediction model

变量	变量符号	含义
X1	L_T	货车车身高/m
X2	V_T	货车平均速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
X3	A_T	货车平均加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
X4	A_{TH}	货车平均横向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
X5	A_{TV}	货车平均纵向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
X6	V_C	小客车平均速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
X7	A_C	小客车平均加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
X8	H_d	跟驰车头间距均值/m
X9	H_t	跟驰车头时距均值/s
X10	T	跟驰持续时间/s
X11	ΔV	小客车与货车速度差/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
X12-1	C_C	保守型驾驶员
X12-2	S_C	稳健型驾驶员
X12-3	E_C	激进型驾驶员

为保证模型预测精度,自变量之间不能出现多重共线性,因此对变量进行相关性分析。Spearman 相关性检验不要求变量服从正态分布,且可以较好地减少异常值影响。因此本文采用 Spearman 相关系数来检验变量间的相关性。若相关系数大于 0.8,说明变量之间存在高度线性相关,则选取相对重要性较大的一个变量作为输入参数。通过 Spearman 相关性检验(图 7),可以发现变量 V_T 与变量 V_C 的相关系数为 0.82,表明 V_T 与 V_C 高度线性相关。为避免多重共线性的影响,剔除相关性系数较小的 V_C ,其他变量作为模型自变量。

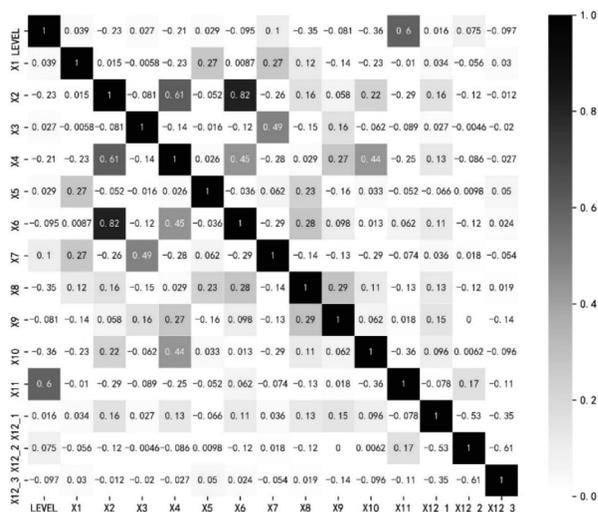


图 7 变量相关性矩阵

Fig.7 Correlation matrix of variables

3.2 跟驰风险模型构建

车辆行驶风险是由人、车、路和环境多个因素相互作用引发,数据采集无法全面记录与事故风险相关的所有影响因素,而这些因素会影响参数估计和模型预测准确性^[19]。RP-ORP 模型可以解决传统固定参数有序 probit 模型(FP-ORP 模型)未能考虑个体差异的限制^[20]。因此,为了解决数据采集中可能存在的异质性,本文选取 RP-ORP 构建山区双车道公路货车移动遮断影响下的小客车跟驰风险预测模型,并与传统 FP-ORP 模型进行对比。跟驰风险概率通过效用函数 y^* 推导得到,即

$$y^* = X\beta + \epsilon \quad (4)$$

式中: y^* 货车移动遮断场景内小客车跟驰风险等级, X 为自变量向量集, β 为系数向量, ϵ 是误差项。小客车跟驰风险 y 可通过式(4)映射得到,即

$$\begin{aligned} y &= 0 \quad \text{if} \quad y^* \leq 0 \\ y &= 1 \quad \text{if} \quad 0 < y^* \leq \mu_1 \\ y &= 2 \quad \text{if} \quad \mu_2 < y^* \leq \mu_1 \\ &\dots \\ y &= j \quad \text{if} \quad y^* > \mu_{j-1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: y 的分类由阈值 μ 参数确定; j 是最高有序值。本文 j 有 4 个等级,由于误差服从标准正态分布,不同风险等级的冲突概率计算如下:

$$\begin{aligned} P(y=0) &= \Phi(-\beta_i X_i) \\ P(y=1) &= \Phi(\mu_1 - \beta_i X_i) - \Phi(-\beta_i X_i) \\ &\dots \\ P(y=j) &= 1 - \Phi(\mu_{j-1} - \beta_i X_i) \end{aligned} \quad (6)$$

FP-ORP 模型参数被预先假定为不随样本个体而变的固定参数^[21]。然而每个变量都有一定的随机效应,通过在每个系数上加上一个服从正态分布的随机误差项,则可导出 RP-ORP 模型。RP-ORP 模型第 k 个解释变量对第 i 起冲突的随机效应计算如下:

$$\beta_k = \mu_k + \sigma_k u_{ik} \quad (7)$$

式中: μ_k 和 σ_k 分别是 β_k 的均值和标准差; u_{ik} 是第 i 起冲突不可观测的随机效应。

由于参数估计值只能反映各因素对于不同冲突风险水平的影响趋势,不能定量化解释变量影响效应。故采用弹性系数和边际效应值进一步量化各影响因素对不同跟驰风险等级的影响程度。弹性系数是指变量增加 1% 时,某事故严重等级概率的变化值,由式(8)计算。

$$E_{X_{jk}}^{P(Y_i=j)} = \frac{\partial P(Y_i=j)}{\partial X_{jk}} \cdot \frac{X_{jk}}{P(Y_i=j)} \quad (8)$$

式中： X_{jk} 表示等级*j*的第*k*个显著变量。但弹性系数仅适用于连续变量，对于分类变量而言，概率不能由分类值微分直接得到。由于每起冲突中每个变量对于各类风险等级均可计算一个值，故通过公式(9)计算分类变量的边际效应^[22]，即

$$E_{X_{jk}}^{P(Y_i=j)} = \frac{P(Y_i=j)[X_{jk}=1] - P(Y_i=j)[X_{jk}=0]}{P(Y_i=j)[X_{jk}=0]} \quad (9)$$

3.3 模型结果与分析

3.3.1 参数估计结果

使用统计分析软件Nlogit5.1进行模型求解，选取显著性水平为0.05，利用蒙特卡洛方法估计参数结果，并采用Halton序列抽样300次求解模型，模型估计结果如表7所示。

由表7可知，模型收敛时RP-ORP模型的对数

似然拟合值从218.38提高至231.66，AIC值从260.4下降到251.7，说明考虑异质性的随机参数模型拟合效果更好。此外，两模型收敛时对数似然值构造似然比统计量LR值为13.28，高于11.07(自由度为5时，在95%的置信区间内似然比统计量临界值为11.07)，再次证明RP-ORP模型适应度高于FP-ORP模型。

在满足95%置信水平条件下，货车纵向加速度、跟驰车头间距、跟驰持续时间、跟驰速度差、激进型驾驶员5个变量与小客车跟驰风险水平显著相关。其中，跟驰持续时间和驾驶倾向(激进型)参数为随机参数，且在0.001的显著性水平上显著。

3.3.2 模型结果分析

根据模型估计结果(表7)和显著变量边际效应(图8)，分析各显著变量对小客车跟驰风险的影响方向和强度。

表7 FP-ORP模型和RP-ORP模型的估计结果

Tab.7 Estimation results for FP-ORP model and RP-ORP model

变量	FP-ORP模型			RP-ORP模型			弹性系数/%			
	参数估计	标准误差	P值	参数估计	标准误差	P值	I	II	III	IV
常数	1.848	0.753	0.014	3.541	0.572	0.001				
A_{TV}	1.161	0.505	0.021	0.791	0.451	0.008	3.33	1.28	-1.49	-4.94
H_d	-0.024	0.009	0.010	-0.040	0.009	0.001	149.86	58.38	-67.92	-225.32
H_l	-0.042	0.018	0.025	-0.094	0.022	0.001				
$T\#$				0.083	0.012	0.001	182.28	71.01	-82.62	-274.06
ΔV	0.059	0.014	0.000	0.062	0.013	0.001	-52.51	-20.45	23.79	78.94
E_c	0.467	0.335	0.015	0.599	0.294	0.042				
$E_c\#$				1.139	0.547	0.001	-82.87	-22.20	36.57	95.71
N		103			103					
K		15			10					
AIC		260.4			251.7					
-2LL		218.38			231.66					
df			5							
LR			13.278							

注：#表示该变量的标准差。

(1) 货车纵向加速度

货车纵向加速度每增加1个单位，小客车处于中风险、高风险跟驰状态的概率分别降低1.49%和4.94%。说明移动遮断场景内货车加速度越大(行驶速度越快)，对跟驰小客车的期望速度影响越小，小客车更加谨慎驾驶，从而更不容易处于高风险状态。

(2) 跟驰过程平均车头间距

跟驰间距每增加1个单位，小客车处于零风险和低风险行驶状态的概率分别增加149.86%和58.38%，处于中风险和高风险行驶状态的概率分别

减少67.92%和225.32%。主要由于货车体积大，车身高，易形成视觉盲区。当小客车与货车间距较大时，小客车在遇到紧急情况时有足够的反应时间，从而可以避免追尾等碰撞事故发生，从而降低跟驰风险。

(3) 跟驰持续时间

跟驰时间对应系数服从 $N(-0.094, 0.083^2)$ 的正态分布，对行车风险的影响存在异质性效应。根据正态分布累计概率计算结果可知(图9)，有12.92%跟驰持续时间较长的小客车

驾驶员倾向于产生更高的行驶风险。87.08%

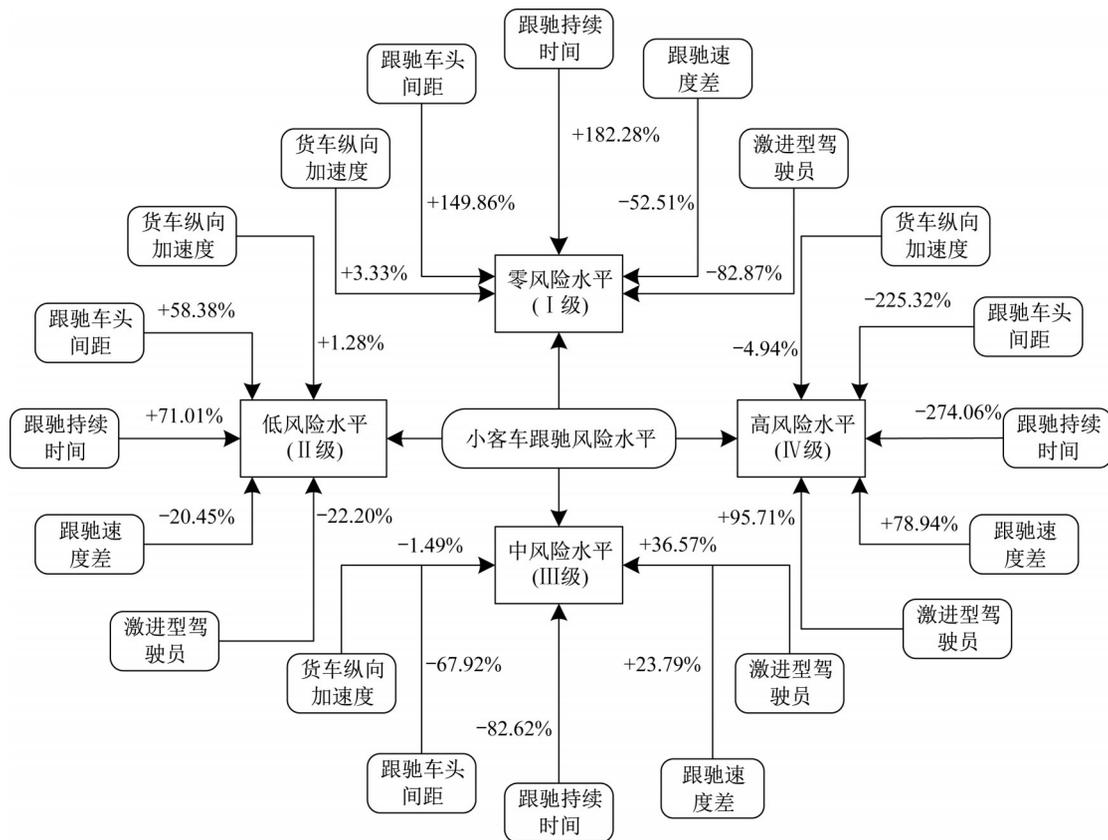


图 8 显著变量的边际效应

Fig.8 Marginal effects for significant variables

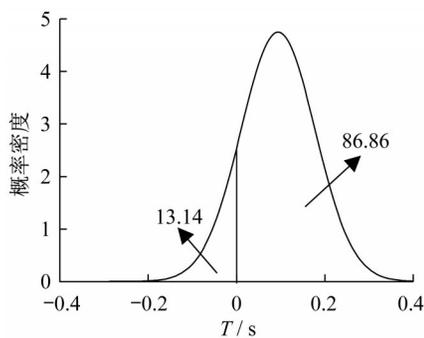


图 9 跟驰时间变量正态分布

Fig.9 Normal distribution of car-following time

跟驰时间较长的小客车驾驶员倾向于产生较低的行
驶风险。对应图 8 可知,跟驰持续时间每增加 1 个单
位,跟驰行为处于零风险、低风险的概率分别增加
182.28%、71.01%。其异质性效应来源于双车道公
路不同交通条件下的跟驰时间对风险水平的影响不
同。当车流量较小时,小客车一旦受货车移动遮断
影响选择立即超车,由于货车影响不能准确判断道
路前方信息,会导致车辆风险增加。当车流量较大
时,小客车驾驶员持续跟驰行驶,但一直处于准备超
车的状态,可能出现超车条件不完全满足但选择超

车,进而增加车辆行驶风险。

(4)跟驰速度差

速度差每增加 1 个单位,小客车处于中风险和
高风险跟驰状态的概率会分别增加 23.79% 和
78.94%,处于低风险和零风险跟驰水平概率会分
别降低 20.45% 和 52.51%。原因是车辆间速度差越
大,遇到突发状况时驾驶人需要更长的认知和反应
时间。且根据能量守恒定律,当碰撞发生时,速度越
大能量越大,导致事故越严重。因此,小客车与货
车的速度差越大,小客车跟驰风险水平越高。

(5)驾驶员驾驶倾向

激进型驾驶员对应的系数服从 $N(0.599, 1.139^2)$ 的正态分布。根据图 10 可知,70.19% 的激
进型驾驶员更容易处于风险更高的行驶状态,
29.81% 的激进型驾驶员更不容易处于高风险行
驶状态。且由图 8 可得,相对于保守型驾驶员,激
进型驾驶员处于中风险和高风险行驶状态的可能
性会分别增加 36.57% 和 95.71%。此差异性结果
可归因于不同行驶场景下小客车驾驶员驾驶风
格对风险水平的影响不同。据统计,激进型驾驶
员平均横向偏移 86.93cm,其行驶轨迹呈远离行
车方向车道、靠近

对向车道的趋势,部分小客车越过行车方向车道边界线行驶,导致车辆可能出现与对向来车发生刮擦、弯道路段转向失控等现象,增加高风险行驶水平的发生率。但部分小客车驾驶员出现轨迹偏移,其目的是为了尽可能获取货车前方道路信息并寻找超车机会,当发现对向车道来车或没有足够的超车视距时,驾驶员返回原车道,进而降低行驶风险水平。

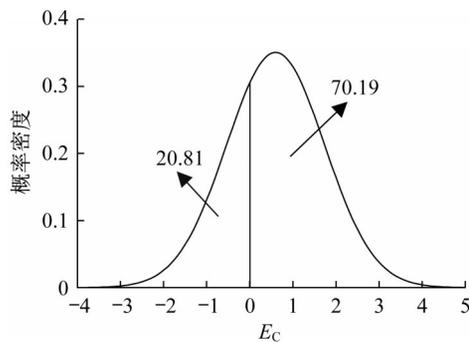


图10 激进型驾驶员变量正态分布

Fig.10 Normal distribution of radical driver

4 结论

本文从山区双车道公路货车影响行为出发,首次提出考虑道路线形和交通流特性的“货车移动遮断”概念,并结合交通波理论和货车移动瓶颈理论构建货车移动遮断效应模型,揭示了山区双车道公路货车移动遮断特性及发生机理。通过无人机高空录像采集货车移动遮断视频数据,提出了综合交通冲突风险和严重度的跟驰风险表征指标,并采用RP-ORP构建考虑异质性的的小客车跟驰行为风险等级预测模型。主要研究成果如下:

(1)移动遮断是由特殊道路线形,性能差异速度不一的车辆组成一类新的“混合交通”运行中所表现出来的现象,其形成过程减速跟驰(遮断形成)和加速超车(遮断消散)两个阶段,会导致平均行驶速度小于车流整体平均速度,影响交通流稳定性和安全性。

(2)考虑异质性的RP-ORP模型可以更加准确的拟合货车移动遮断影响下的小客车跟驰行为风险,预测特定条件下跟驰行为在不同风险等级的概率。识别出货车纵向加速度、跟驰车头间距、跟驰持续时间、小客车与货车速度差、激进型驾驶员5个变量显著影响小客车跟驰风险水平,且跟驰持续时间和激进型驾驶员2个变量具有随机参数特性,对跟驰风险存在异质性效应。

(3)受限于数据采集条件,本文仅从车辆行驶特性和驾驶行为特性研究了货车移动遮断影响下的小客车跟驰行为,后期将设计以道路线形条件为变量的货车移动遮断动态仿真实验,进一步扩展数据样本展开深入研究,优化跟驰风险预测模型的精度和可移植性。下一步将在小客车跟驰行为风险研究的基础上融合超车行为、并道行为风险,综合评估移动遮断下小客车的驾驶行为风险。

作者贡献声明:

谢世坤:数据处理、模型构建、实证分析、结果讨论;
杨轶:研究方法、结果讨论、论文修订;
戴晓峰:总体框架、思路梳理、结果讨论。

参考文献:

- [1] DANIEL B. The relative contribution of truck drivers and passenger vehicle drivers to truck- passenger vehicle traffic crashes [D]. Washington D C: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1998.
- [2] GAZIS D C, HERMAN R. The moving and phantom bottlenecks[J]. Transportation Science. 1992, 26(3): 223.
- [3] AL-KAISY A, BHATT J, RAKHA H. Modeling the effect of heavy vehicles on sign occlusion at multilane highways [J]. Journal of Transportation Engineering. 2005, 131(3): 219.
- [4] 冯树民, 聂涔, 胡宝雨. 基于元胞自动机的高速公路货车结伴行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 97.
FENG Shumin, NIE Cen, HU Baoyu. Partnering behavior of truck platoon on freeway based on cellular Automaton [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 97.
- [5] 戴晓峰, 卢梦媛, 覃文文. 货车移动遮断影响下的小客车驾驶行为识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 174.
JI Xiaofeng, LU Mengyuan, QIN Wenwen. Passenger cars driving behaviors recognition under truck movement interruption [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 174.
- [6] 田钧方, 朱陈强, 贾宁, 等. 基于轨迹数据的车辆跟驰行为分析与建模综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 148.
TIAN Junfang, ZHU Chenqiang, JIA Ning, et al. Review of car-following behavior analysis and modeling based on trajectory data [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 148.
- [7] 汪敏, 涂辉招, 李浩. 基于跟驰行为谱的跟驰风险状态预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 843.
WANG Min, TU Huizhao, LI Hao. Prediction of car-following risk status based on car-following behavior spectrum [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(6): 843.

- [8] 王雪松,孙平,张晓春,等.基于自然驾驶数据的高速公路跟驰模型参数标定[J].中国公路学报.2020,33(5):132.
WANG Xuesong, SUN Ping, ZHANG Xiaochun, *et al.* Calibrating car-following models on freeway based on naturalistic driving data [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2020, 33(5): 132.
- [9] 王健,温常磊,张香,等.高速公路合流区车辆跟驰行为分车道差异性[J].交通运输研究.2020,6(5):59.
WANG Jian, WEN Changlei, ZHANG Xiang, *et al.* Difference of vehicle following behavior in different lanes of freeway merging area [J]. Transportation Research, 2020, 6(5): 59.
- [10] WU B, YAN Y, NI D, *et al.* A longitudinal car-following risk assessment model based on risk field theory for autonomous vehicles[J]. International Journal of Transportation Science and Technology. 2021, 10(1): 60.
- [11] AHMED A, SARAH K. Car-following interaction and the definition of free-moving vehicles on two-lane rural highways [J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(10): 925.
- [13] 刘畅,唐阳山.低速货车对高速公路驾驶员愤怒情绪影响分析[J].汽车实用技术,2021,46(19):203.
LIU Chang, TANG Yangshan. Analyze the impact of low-speed trucks on the anger of drivers on highways [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(19): 203.
- [14] Transportation Research Board. Highway capacity manual [M]. Washington D C: Transportation Research Board, 2000.
- [15] 朱顺应,蒋若曦,王红,等.机动车交通冲突技术研究综述[J].中国公路学报.2020,33(2):15.
ZHU Shunying, JIANG Ruoxi, WANG Hong, *et al.* Review of research on traffic conflict techniques [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2020, 33(2): 15.
- [16] 郝志国.高速公路换道冲突预测与安全评价研究[D].长春:吉林大学,2019.
HAO Guozhu. Research on prediction and safety assessment of expressway lane change conflict [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [17] 李英帅.信号交叉口驾驶行为交通安全风险分析[D].南京:东南大学,2017.
LI Yingshuai. Risk analysis of traffic safety based on driving behavior at signalized intersection [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [18] LI Y, LU J, XU K. Crash risk prediction model of lane-change behavior on approaching intersections[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2017(8): 1.
- [19] FOUNTAS G, ANASTASOPOULOS P C, Abdel-Aty M. Analysis of accident injury-severities using a correlated random parameters ordered probit approach with time variant covariates [J]. Analytic Methods in Accident Research. 2018, 18: 57.
- [20] CHANG F, XU P, ZHOU H. Investigating injury severities of motorcycle riders: a two-step method integrating latent class cluster analysis and random parameters logit model [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 131: 316.
- [21] 李俊辉,汤左淦.基于混合有序Probit模型的货车翻车驾驶员伤害程度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(2):21.
LI Junhui, TANG Zuogan. Driver injury severity in truck rollover accidents based on mixed ordered probit model [J]. Journal of Chong Qing Jiao Tong University (Natural science), 2021, 40(2): 21.
- [22] KIM J, KIM S, ULFARSSON G F, *et al.* Bicyclist injury severities in bicycle-motor vehicle accidents [J]. Accident Analysis and Prevention. 2007, 39(2): 238.