

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.05.016

基于速度风险势场的高速公路行车风险甄别方法

王博^{1,2,3}, 张驰^{1,2}, 任士鹏⁴, 刘昌赫¹, 谢子龙¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 教育部公路基础设施数字化工程研究中心, 陕西 西安 710000; 3. 南洋理工大学土木与环境学院, 新加坡 639798; 4. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州, 510630)

摘 要: 为了在宏观尺度下实现行车风险的空间定位、分类和量化, 收集了路段和断面的车辆速度数据. 在分析速度空间分布特征的基础上, 综合考虑速度变化和道路线形对行车风险的影响. 引入安全势场理论, 建立速度风险势场模型, 提出高速公路行车风险宏观甄别方法, 最后进行实例分析与有效性验证. 结果表明: 在验证路段中甄别出的侧向、纵向和空间高风险路段占比分别为 7.74%、12.88%、24.33%. 区域内发生的事故占总事故的比例分别为 31.21%、31.55%、43.26%. 速度风险势场强度和交通事故分布具有较强的规律性, 能够在一定程度上表征路段行车风险构成和严重程度. 高速公路交通流速度波动在一定程度上反映道路安全状态, 考虑到道路线形指标对行车风险的影响, 车辆速度的变化可用于准确甄别行车风险.

关键词: 高速公路; 行车风险; 风险甄别; 速度分布; 风险势场

中图分类号: U 412 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2023)05-0997-12

Expressway driving risk identification method based on velocity risk potential field

WANG Bo^{1,2,3}, ZHANG Chi^{1,2}, REN Shi-peng⁴, LIU Chang-he¹, XIE Zi-long¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization, Ministry of Education, Xi'an 710000, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 4. Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co. Ltd, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The vehicle speed data on road segments and cross-sections were collected to achieve the spatial localization, classification, and quantification of driving risk at the macro scale. The influence of speed change and road alignment on driving risk was comprehensively considered based on the analysis of the spatial distribution characteristics of the vehicle speed. The safety potential field theory was introduced, the velocity risk potential field model was established, and a macro-identification method for expressway driving risk was proposed. Then the case analysis and validity check were conducted. The results showed that the proportions of lateral, longitudinal and spatial high-risk sections identified in the verification sections were 7.74%, 12.88%, and 24.33% respectively. The accidents in these areas accounted for 31.21%, 31.55% and 43.26% of the total accidents respectively. The intensity of the speed risk potential field and the distribution of traffic accidents have strong regularity, which can represent the composition and severity of the traffic risk in the road section to a certain extent. The velocity variation of expressway traffic flow reflects the road safety states to a certain extent. Taking into account the impact of road alignment index on driving risk, the change in vehicle velocity can be used to identify driving risk precisely.

Key words: expressway; driving risk; risk identification; velocity distribution; risk potential field

随着道路监控、电子不停车收费及高清卡口等设施全面普及, 目前我国高速公路管理已经进

入数字化时代. 按照国务院安委会发布《道路交通安全“十三五”规划》^[1], 截止 2020 年底全国各

收稿日期: 2022-05-07. 网址: www.zjujournals.com/eng/article/2023/1008-973X/202305016.shtml

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC1512005); 四川省科技计划资助项目 (2022YFG0048); 四川省交通运输厅科技项目 (2019-ZL-12, 2022-ZL-04); 山西省重点研发计划资助项目 (202102020101014).

作者简介: 王博 (1995—), 男, 博士生, 从事交通安全研究. orcid.org/0000-0002-0593-6612. E-mail: wb1010110wb@chd.edu.cn

通信联系人: 张驰, 男, 教授. orcid.org/0000-0003-0713-3722. E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

运营公司均已完成运营监控调度中心建设,全国高速公路已基本实现实时监控全覆盖。面对种类繁杂的海量信息,如何快速甄别出重点管控的高风险路段成为新的挑战。根据高速公路安全管理“精准监测、动态管控及快速反应”的需求,研究高速公路行车风险甄别方法,对于智慧感知设备布局、重点监测路段划分和交通管控决策具有重要意义。

车辆在行驶过程中,驾驶人通过感知障碍物距离和惯性力等信息对行车风险进行判别。驾驶人根据感知到的行车风险,会改变车辆速度或轨迹,以主动降低行车风险^[2],即车速在路域空间上的分布规律能够在一定程度上反映行车风险。自1964年起,学者们从不同角度研究车辆速度对行车风险的影响^[3]。相关研究可以分为风险机理和事故相关性2个方面,其中关于风险机理的研究,学者们从“人、车、路”等角度尝试诠释速度对行车风险影响的内在规律,提出“视距理论”^[4]、“安全距离理论”^[5]、“车辆动力学”^[6]和“交通冲突”^[7]等理论;在事故相关性方面,学者们通过统计学方法分析速度与交通事故的相关性,相关统计指标包括速度绝对值^[8]、速度离散度^[9]、运行速度^[10]等。基于风险机理的评估方法,能够对风险类型进行有效甄别,但是风险致因考虑较为单一,风险评估结果不全面。基于速度统计指标的评估方法能够较为全面地表征行车风险,但是受数据采集方法的限制,速度在二维空间的分布情况研究较少。得益于卫星导航、高清卡口等技术的发展,车速数据的监测效率和精度不断提高^[11]。采用这些技术能够获取车速在路域空间的纵向和横向分布数据,为更深层次的行车风险的分类甄别研究奠定了良好的数据基础。

21世纪初期,人工智能领域率先引用势场理论提出“虚拟引力场”并应用于机器人行为规划。近年来自动驾驶技术的相关学者,将势场理论引入交通领域,为行车风险研究提出了新的思路。目前势场理论在交通领域的相关研究主要有道路势场、车辆动能场和驾驶行为场3个方面。在道路势场方面,Wolf等^[12]考虑车道标线和道路边界等因素对行车的影响,采用类高斯函数建立道路侧向的车道势场计算模型;在车辆动能场方面,Woo等^[13]以车辆速度、距离和角度等参数建立车辆动能场模型,结合车辆轨迹预测分析相邻4个车辆对车辆换道风险的影响,提出一种换道风险

评估方法;在驾驶行为场方面,陶鹏飞等^[14]在分析驾驶人心理特点的基础上,结合人工势场理论提出吸引力模型和排斥力模型,建立包含减速停车、启动加速和常态行驶3种运行状态的跟驰模型。目前,清华大学王建强等^[15-16]在行车风险研究中引入势场理论,提出安全势场理论。安全势场在融合“人-车-路-环境”各类风险因素和统一风险刻画方法方面具有明显优势,并且为路域二维空间内的行车风险分析提供新的思路。

行车风险甄别包括高风险路段的空间定位、风险分类和量化。现有行车风险甄别方法在宏观层面较难实现风险分类。因此,为了更好地实现宏观层面的行车风险甄别,本研究分析车辆速度空间分布规律,结合道路线形、速度梯度对行车风险的影响,引入势场理论,提出速度风险势场理论。在综合考虑速度分布特征、道路圆曲线半径及纵坡等因素下,以行车风险甄别为目标,提出基于速度风险势场的高速公路行车风险甄别方法,建立速度势能场和速度风险势场强度计算模型。为了验证评价效果,以西南地区某高速为实例进行行车风险甄别,对比了2处路段的甄别效果,证明速度风险势场能够对高速公路行车风险进行有效甄别。

1 数据采集与处理

以西南地区某高速公路共66.5 km路段为数据采集对象,收集高清卡口道路断面监测数据共124 216组,高速公路事故数据共计439组。高清卡口实测道路断面共计4处分别为K2084、K2088、K2110和K2114,累计监测时长为31 d,其中每组监测数据包括车牌、车型、行车方向、时间、速度及车道等,筛选出的断面监测数据如表1所示,其中, T 为经过时间, v 为速度。高速公路事故数据统计时长为4 a,其中每组事故数据包括时间、桩号、行车方向、事故车型及事故类型等,筛选出的事故数据如表2所示。

本研究利用Python程序采集百度地图POI数据共计91 955组,每组数据包括坐标、监测时间、路段长度及行程时间,根据路段长度和行程时间,进一步计算路段平均车速。为了验证监测数据精确度,路段长度设置分别为30.0、16.0、8.0、4.0、2.0、1.0和0.5 km,其中1组30 km路段起终点设置于2处门架处,通过与实测数据对比分析发现,当路段长度为30 km时,得到的行程时间与门

表 1 西南地区某高速道路断面监测数据
Tab.1 Cross section monitoring data of expressway in Southwest China

序号	断面桩号	车牌号	车辆类型	T/s	行驶方向	$v/(km \cdot h^{-1})$	车道号
1	K2084	川D602**	大货车	20200223000246	由南向北	58	2
2	K2084	川U676**	大型客车	20200223000311	由南向北	61	2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
124216	K2114	晋KH16**	大型客车	20200322235935	由北向南	61	2

表 2 西南地区某高速公路事故数据
Tab.2 Accident data of expressway in Southwest China

序号	案发日期	公里桩号	车型	伤亡人数			事故类型
				轻伤	重伤	死亡	
1	2017-9-24	K2094+719	轿车	0	0	0	单车事故
2	2017-9-30	K2094+473	轿车	0	0	0	追尾
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
438	2020-12-20	K2105+472	轿车	0	0	0	单车事故
439	2020-12-24	K2120+200	轿车	0	0	0	单车事故

架监测得到的平均行程时间,误差为 16 s,满足实际需求.随后以 30 km 为标准,划分路段监测行车数据,对路段长度为 16、8、4 和 2 km 的行程时间进行递推修正,最终得到 2 km 路段长度的路段速度数据.

2 数据分析

2.1 速度数据分析

实测路段大小车限速均为 80 km/h,实行客货分离管制措施,外侧车道为货车专用车道.K2084 断面高清卡口位于小半径曲线段(曲线半径 $R=340\text{ m}$),K2088 断面高清卡口位于连续 S 型曲线段($R=620\text{ m}$),K2110 断面高清卡口位于直线段,

K2114 断面高清卡口位于曲线段($R=870\text{ m}$).在同一时间内,对高清卡口获取的车辆速度 v 进行统计,得到 K2084、K2088、K2110 和 K2114 断面处车辆的 75%、50%、25% 分位值和平均车速,并与百度 POI 获取的速度数据进行对比,如图 1 所示,其中 v 为高清卡口或百度 POI 获取的车速数据.结果显示百度 POI 获取的路段车速与高清卡口获取的内侧车道车辆平均速度较为接近.

按照车道和时间进行分类统计,卡口采集的横断面车速结果如表 3 和图 2 所示,其中 sd 为速度标准差,时间 T 统计时间段为 7:00—20:00.对比 4 处断面车速统计结果得出以下结论.1)清晨和傍晚 4 处断面的车速变化趋势相同.当 7:00—9:00 时,车速具有明显的增加趋势;当 18:00—

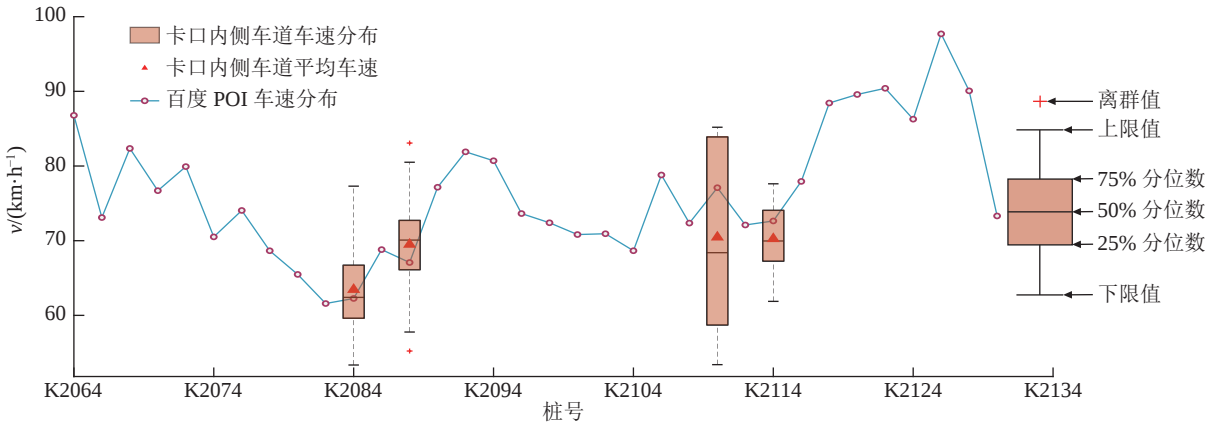


图 1 来自百度 POI 和高清卡口的车速数据对比
Fig.1 Comparison of vehicle speed data from Baidu POI and HD bayonet

表 3 断面车速统计

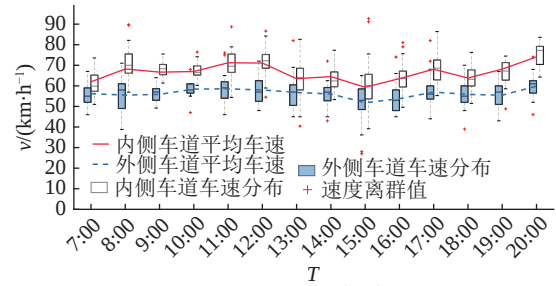
Tab.3 Cross section vehicle speed statistics

断面	车道	$\bar{v}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	R_{lane}	sd
K2084	内侧	66.50	0.847	6.43
	外侧	56.36		6.80
K2088	内侧	66.12	0.853	6.77
	外侧	56.43		6.75
K2110	内侧	70.93	0.841	8.35
	外侧	59.67		7.68
K2114	内侧	69.83	0.838	5.63
	外侧	58.53		5.86

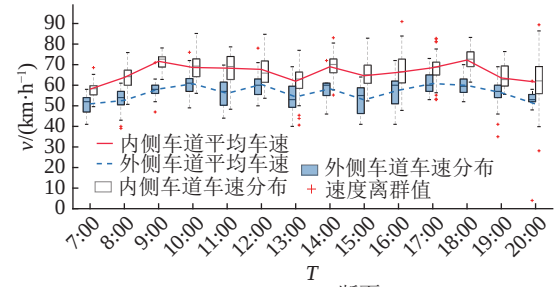
20:00 时, 车速具有明显的减小趋势; 其余时段, 各断面车速随时间变化无相同趋势. 2) 同一断面处内、外侧车道的平均车速 $\bar{v}$ 和车速离散度随时间变化趋势基本一致. K2084 断面在 15:00 时, 内、外侧车道的平均速度均位于峰谷, 速度离散度最大时段均位于 8:00; K2088 断面, 12:00—17:00 内、外侧车道的平均速度和速度离散度变化趋势一致; K2110 断面, 除 14:00—17:00 外, 其余时间段内、外侧车道的平均速度和速度离散度变化趋势基本一致; K2114 断面, 除 13:00 和 15:00 外, 其余时段内、外侧车道的平均速度和速度离散度变化趋势基本一致. 3) 直线段较曲线段车速离散度高, 并且内侧车道相比较外侧车道车速离散度高, 曲线段内、外侧车道离散度相近. K2110 断面位于直线段, 内、外侧车道的车速标准差 sd 均远大于其他断面, 且内侧车道较外侧车道高. 4) 内、外侧车道平均速度比值 R_{lane} 基本一致, 接近 0.85.

2.2 交通事故数据分析

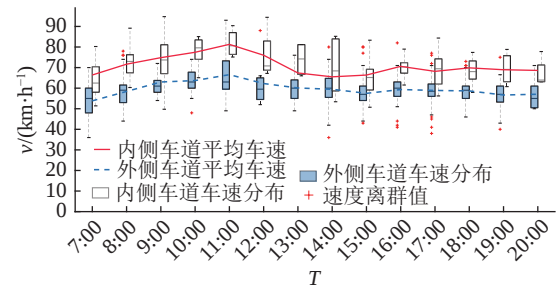
2.2.1 速度梯度与交通事故 Shoarian 等^[17] 研究交通流相关参数与交通事故的相关性, 发现速度梯度对交通事故风险具有较高的影响度. 在我国《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)^[18] 中, 以运行速度梯度的绝对值作为运行速度协调性评价指标. Zhu 等^[19] 对比设计速度、运行速度、加速度及速度梯度等速度相关安全性指标, 结果表明车辆速度梯度评价效果优于其他指标. 对比交通流速度梯度 G 与交通事故的分布规律, 如图 3 所示, 图中 Na 为事故数. 交通流速度梯度分布和交通事故分布有一定的趋同性, 但是在 K2085~K2105 相关性较低.



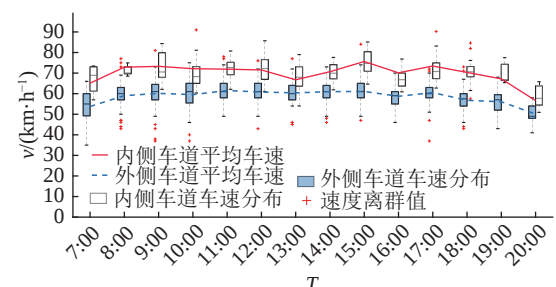
(a) K2084 断面



(b) K2088 断面



(c) K2110 断面



(d) K2114 断面

图 2 断面车速时间和空间分布特征分析

Fig.2 Time and space distribution characteristics analysis of vehicle speed on road cross-sections

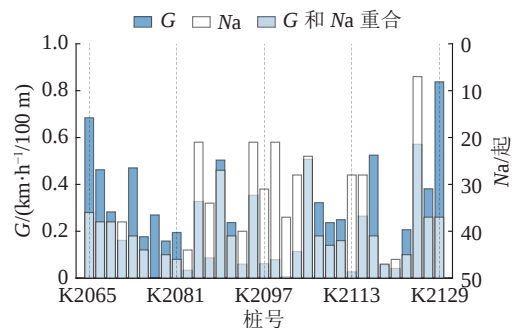


图 3 交通流速度梯度与交通事故分布

Fig.3 Distribution of traffic velocity gradients and traffic accidents

2.2.2 道路纵坡与交通事故 纵坡是影响高速公路交通安全的重要指标, 坡率与交通事故数正相关^[20]. 道路纵坡对交通安全的影响, 主要用于车速和车辆制动能力. 对于上坡路段, 坡率越大, 不同车型爬坡能力不同, 容易引起速差较大, 车辆换道超车概率增加; 对于下坡路段, 坡率越大、坡长越长, 车辆制动行为越频繁, 并且制动距离越低. 马聪等^[21]对比了曲率半径和道路纵坡对事故预测的影响, 认为道路纵坡对山区高速公路的影响更高. Ahmed 等^[22]的研究结果显示下坡路段较上坡路段事故率更高, 对比道路平均纵坡与交通事故的分布规律, 如图 4 所示. 结果表明平均纵坡 $\bar{i}$ 小于 2% 的路段事故数明显小于其他路段, 与林宣财等^[23]的研究结果一致. 此外, 事故数最高的路段位于 K2118~K2130 下坡路段中部.

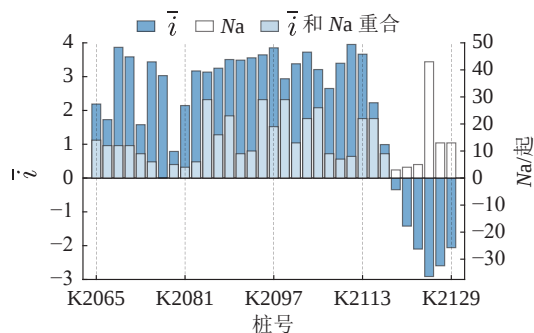


图 4 道路纵坡与交通事故分布

Fig.4 Distribution of vertical slope and traffic accidents

2.2.3 平面半径与交通事故 曲线段行车风险主要包含侧滑、侧偏和侧翻等侧向风险, 风险大小与道路半径呈负相关^[24-25]. 为了对比道路半径对交通事故的影响, 取道路不设超高的圆曲线最小半径规范值 R^* ^[26] 与道路平面半径 R 比值为道路平面曲率参数 α :

$$\alpha = \begin{cases} 1.0, & \text{直线段或 } R \geq R^* \text{ 曲线段;} \\ R^*/R, & R < R^* \text{ 曲线段.} \end{cases} \quad (1)$$

当 $R \geq R^*$ 时, 与直线段相近对行车安全影响不大的 α 取值为 1.0, α 与行车风险呈正相关. 曲率参数 α 和交通事故的分布规律对比, 如图 5 所示, 可以发现道路平面曲率参数分布与事故分布具有较高的相关性.

3 行车风险甄别方法

3.1 行车风险与车辆运动

在道路行驶过程中的车辆可以分为“目标车辆”与“环境车辆”, 被观察的单个车辆为目标车

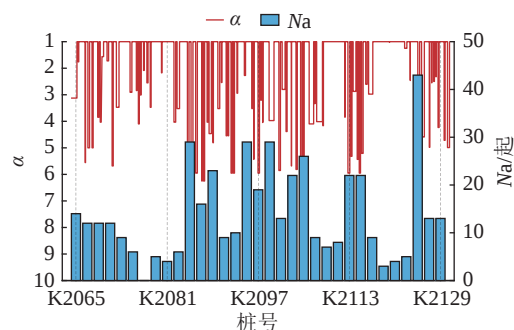


图 5 道路平面曲率参数与交通事故分布

Fig.5 Distribution of road horizontal curvature parameters and traffic accidents

辆, 除去目标车辆之外的所有车辆共同组成环境车辆. 由驾驶人或自动驾驶系统所控制的目标车辆, 能够通过识别与周围车辆速差和距离, 对行车风险进行感知^[27]. 在行驶过程中, 目标车辆与环境车辆的相对速度越小, 即与环境车辆速度越接近, 事故风险越低^[28]; 目标车辆与环境车辆的绝对速度越低, 车辆制动所需距离越短, 同时事故严重程度越低^[29]. 舒适性也是风险感知的一种, 车辆在行驶过程中加速度和离心力对驾驶人舒适性造成影响^[30]. 行车风险除去需要遵循上述内容外, 还会受道路线形、构造物、交通管制、气象及交通流措施等多类因素共同影响. 在感知到风险后, 驾驶人会通过控制车辆速度和行驶轨迹, 以避免产生交通事故. 结合速度数据分析结果, 可以假设在自由流状态下, 相似条件和环境下的车速选择趋近相同, 即同一时间段和同一路段内多数车辆速度趋近一致^[31-32].

3.2 速度风险势场

势是场产生的力按作用力方向的积分, 场强是势能按作用力方向的梯度. 行车风险可以利用场的形式表达, 同时可以刻画风险源的位置和强度. 根据牛顿第一运动定律“任何物体都要保持匀速直线运动或静止状态, 直到外力迫使它改变运动状态为止”. 当车辆在驶向风险源时, 车辆会降低速度; 当车辆在驶离风险源时, 车辆会增加速度. 这种运动状态的改变可以视为车辆受到“外力”作用, 即车辆受风险场的影响.

本研究提出的速度风险势场, 以速度变化趋势为基础, 考虑道路线形对行车风险的影响, 利用势场理论刻画道路行车风险在路域范围内的分布规律. 速度风险势场包含速度势能和速度风险势场强度 2 部分, 如图 6 所示. 基于同一时间段和同一路段内多数车辆速度趋近一致的特性, 提出交通流在某一位置处的速度选择趋势为速度势

能 P . 速度势能场的场强即为速度梯度, 可以描述路域空间中各方向的速度变化的剧烈程度. 在速度势能沿侧向和纵向的梯度变化基础上, 叠加道

路纵坡和平面半径对行车风险的影响, 构建速度风险势场强度 E , 描述该位置处车辆行车风险的大小和方向, 表征路段行车风险分布情况.

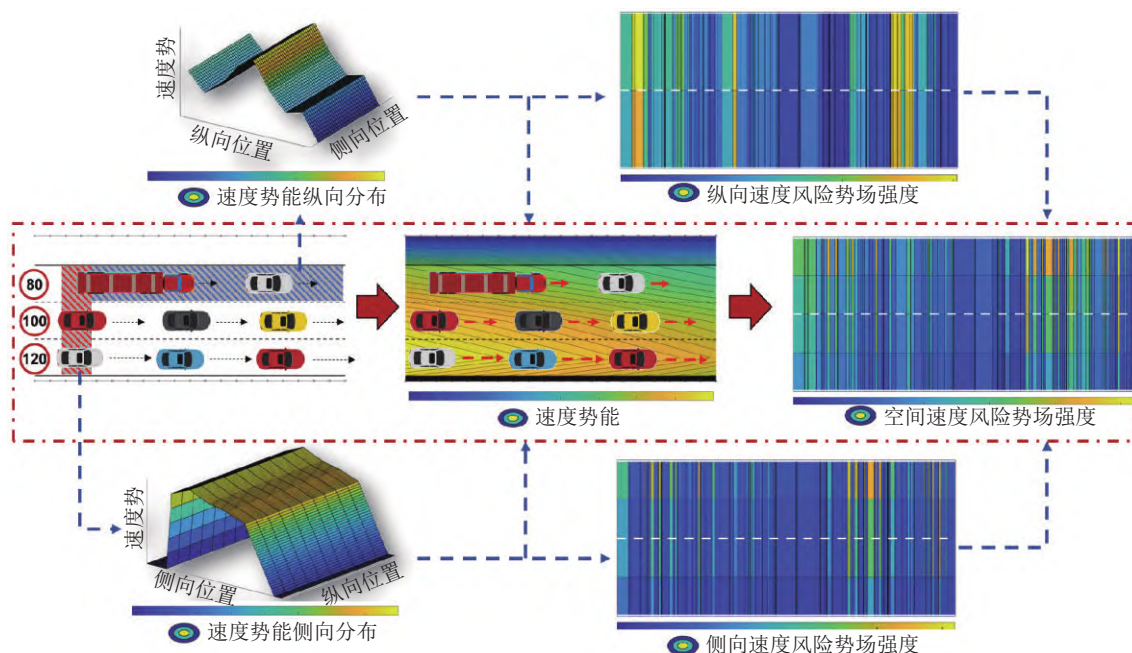


图 6 公路速度风险势场概念图

Fig.6 Conceptual map of highway velocity risk potential field

3.2.1 速度指标选择 关于交通流速度的统计指标较多, 例如 15% 位车速、50% 位车速、85% 位车速. 已有研究证明^[33-34], 在自由流和路段限速状态下, 车道断面速度频率分布符合正态分布, 在限速状态下车速离散性降低. 平均速度能够更好地描述驾驶人的速度选择趋势, 因此基于平均速度构建速度势能指标.

3.2.2 模型构建基础 速差和事故率之间的关系一直是交通安全研究的重点, 相关学者提出 Solomon 曲线等一系列成果^[35], 通过速度这一指标, 将微观风险模型与交通事故统计联系起来^[36]. 根据第 2 章数据分析可知, 速度梯度、道路半径、纵坡与交通事故分布具有一定相关性. 纵向行车风险以跟驰过程中的追尾事故风险为主, 主要风险表征为纵向安全距离不足, 所需的纵向安全距离受前、后车辆速差和制动性能影响. 道路纵坡影响车辆制动能力, 速度梯度直接表征所需的纵向安全车距. 侧向行车风险以侧向滑移为主, 这样容易发生侧撞事故, 主要风险表征为侧向安全距离不足. 根据波良可夫模型、斯特拉霍夫经验公式^[37]及 Qu 等^[38]的研究, 侧向相邻车辆所需的侧向安全距离与车辆的速差存在正相关, 即相同侧向车距情况下相邻车辆速差越大, 所需安全车

距越大. 车辆速差与距离的比值为侧向速度梯度, 侧向速度梯度越大, 行车风险越高.

结合第 2 章分析结果, 本研究将道路纵坡和纵向速度梯度作为纵向风险评价参数, 将道路半径和侧向速度梯度作为侧向风险评价参数. 提出的速度势能场是基于路段纵向车速建立的, 沿纵向的场强大小即为纵向速度梯度, 沿侧向的场强大小即为侧向速度梯度. 因此, 在速度势能场基础上, 计算不同方向速度势能场强, 进一步可以考虑道路纵坡及半径对行车风险的影响规律, 构建速度风险势场, 以评估、刻画纵向和侧向的行车风险.

3.3 计算模型及参数标定

3.3.1 速度势能 采用路域范围内各路段的平均速度作为速度势能, 路侧护栏处速度势能为 0. 当已知路段各车道车速时, 直接采用各车道速度数据计算速度势能. 当无法获取车道级速度数据时, 可根据式(2)进行全域速度势能计算:

$$P_{y,x} = \varphi_x \times P_y. \quad (2)$$

式中: $P_{y,x}$ 为横向位置 x 处, 纵向位置 y 处的速度势能, 单位为 km/h; P_y 为纵向位置 y 处全部车道的平均速度; φ_x 为侧向分布系数, 与车道数和侧

向位置有关.

相关研究^[39-41]已经证明,不同车道的平均速度沿道路侧向由内向外递减,车道间的速度差与车道数类型、及路段车型呈比例线性相关.在陆建等^[42]和吴明先等^[43]的研究结果基础上,结合表3中的统计结果,可以总结得出:双四车道的内、外侧车道平均速度比例为1.00:0.85;双向六车道的内、

中、外侧车道平均速度比例1.00:0.90:0.75.此外,结合驾驶人的换道和超车行为特性,以及侧向净距对驾驶人的心理效应,车道分隔线位置处车速可以认为是2个车道平均速度的均值;同时考虑到右侧硬路肩与左侧路缘带相比较宽,并且在无障碍物的情况下,速度降低情况较小,侧向分布系数 ϕ_x 具体取值如表4所示.

表 4 速度势能侧向分布系数取值表

Tab.4 Value table of lateral distribution coefficient of velocity potential energy

车道类别	ϕ_x						
	左边线	内侧车道	车道分界线		中间车道	外侧车道	右边线
			左	右			
双向四车道	0.900	1.000	0.925	0.925	—	0.850	0.800
双向六车道	0.900	1.000	0.950	0.825	0.900	0.750	0.700

3.3.2 速度风险势场强度 势场具有方向性,其中纵向速度、风险势场方向与加减速趋势一致,即低势能指向高势能位置.考虑到我国高速公路外侧车道车速一般低于内侧车道的情况,侧向速度风险势场在直线段和右偏曲线段以低势能指向高势能位置为方向,在左偏曲线段考虑横向力方向为由内侧指向外侧,因此侧向速度风险势场方向左偏曲线段与直线段相反.在此基础上,提出速度风险势场强度计算方法:其中采用道路平面曲率参数作为侧向风险影响因子 α ,

$$U = |\Delta P|. \quad (3)$$

$$E_y = \beta \times \frac{\eta U}{d_y}. \quad (4)$$

$$E_x = \begin{cases} \alpha \frac{\eta U}{d_x}, & \text{直线及左偏曲线;} \\ -\alpha \frac{\eta U}{d_x}, & \text{右偏曲线.} \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0, & \bar{i} \geq -2\%; \\ (100|\bar{i}| - 1), & \bar{i} < -2\%. \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{i} = (0.001\Delta H)/d_y. \quad (7)$$

$$E_v = E_x + kE_y. \quad (8)$$

式中: U 为路段起终点的速度势能差,单位为km/h; η 为速度风险势场强度系数; β 为纵向风险影响因子; $\bar{i}$ 为路段平均纵坡; ΔH 为路段的高度差,单位为m; d_x 和 d_y 分别为指向侧向和纵向距

离,方向由低势能指向高势能位置, d_x 单位为m, d_y 单位为km; E_v 为空间速度风险势场强度,具有大小和方向; E_x 和 E_y 分别为侧向和纵向的速度风险势场强度; k 为风险方向调整系数.

速度风险势场强度表征车辆受到“吸引力”和“排斥力”的大小和方向,即环境车辆平均速度对驾驶人速度选择的影响大小.速度风险势场强度与车速的离散性相关,速度离散性越小驾驶人速度选择趋近平均速度的几率越大.速度离散性的描述指标主要采用速度标准差sd和速度变异系数CV,其中速度变异系数CV指速度标准差与平均速度 $\bar{v}$ 的比值,值越大代表离散度越大^[44].由于离散度越大,速度风险势场强度越小,因此采用速度变异系数CV的倒数作为速度风险势场强度系数 η :

$$\eta = 1/CV = \bar{v}/sd. \quad (9)$$

侧向速度风险势场强度 E_x 和纵向速度风险势场强度 E_y 作为行车风险评价指标时,分别甄别侧向和纵向行车风险.在单一方向速度风险势场强度的基础上,构建空间速度风险势场强度 E_v 表征路段综合行车风险.由于各方向速度风险势场强度计算值范围和风险阈值存在不一致,同时还需要考虑不利情况,即侧向和纵向速度风险势场强度其中一个为0,另一个超过风险阈值时,空间速度风险势场强度依旧对风险进行有效判别.构建空间速度风险势场强度时,引入风险方向调整系数 k ,实现空间行车风险有效评估,风险方向调

整系数和空间速度风险势场强度阈值公式为

$$k = e_x / e_y, \quad (10)$$

$$e_v = \sqrt{2}e_x. \quad (11)$$

式中: e_x 、 e_y 、 e_v 分别为侧向、纵向和空间速度风险势场强度的风险阈值。

4 高速公路行车风险甄别

4.1 指标参数计算

选取 K2084 断面 28 d 中 10:00—20:00 的实测数据, 以小时为单元统计速度变异系数 CV, 计算结果如图 7 所示, 图中 N 为 CV 的统计单元数量。根据结果可知, 速度变异系数 CV 基本在 0.05~0.17, 最终取速度变异系数为 0.10, 计算速度风险

势场强度系数 $\eta=10$ 。该路段设计速度为 80 km/h, 不设超高时最小圆曲线半径为 2 500 m, 侧向和纵向风险影响因子根据式(1)和(6)计算, 计算结果如表 5 所示。

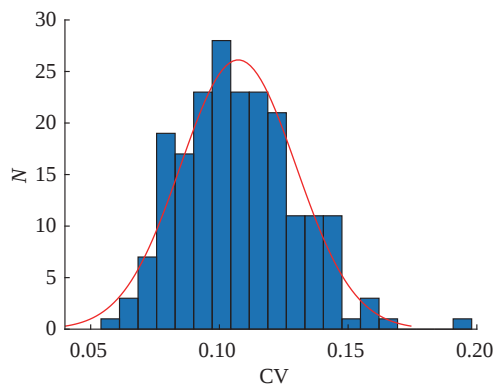


图 7 K2084 断面车速变异系数时间分布统计

Fig.7 Temporal distribution statistics of vehicle speed variation coefficient for cross-section K2084

表 5 K2064+140~K2094+140 路段侧向和纵向风险影响因子计算表

Tab.5 Calculation table of lateral and longitudinal risk impact factors for road section K2064+140 to K2094+140

序号	起点桩号	终点桩号	平面线形	R/m	α	$\bar{i}/\%$	β
1	K2064+140.000	K2065+174.558	圆曲线	800	3.13	-2.19	1.19
2	K2065+175.558	K2065+200.000	缓和曲线	—	1.00	-2.19	1.19
3	K2065+200.000	K2065+295.558	缓和曲线	—	1.00	2.12	1.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
198	K2094+000.000	K2094+140.000	直线	—	1.00	-3.20	2.20

4.2 行车风险甄别

为了研究基于速度风险势场的行车风险甄别方法, 根据式(4)和(5), 选取前述调研的西南地区某高速公路 K2064+140~K2094+140 路段为实例分析路段, 进行速度风险势场相关计算。利用前述获取的百度速度数据, 结合表 4 中的测向分布系数, 构建速度势能矩阵, 计算得到速度势能分布和速度风险势场强度分布。

根据所收集事故数据, 进一步筛选出 K2064+140~K2094+140 路段, 有记录事故共计 157 起, 按照事故车型分类可分为 3 组, 分别为有小型车事故 89 起、有大型车事故 60 起和大型车与小型车事故 8 起; 按照事故形态分类可分为 3 组, 分别为与侧向风险相关事故(撞击护栏、侧撞事故、操作不当)48 起、与纵向风险相关事故(追尾事故)29 起和形态不明事故 80 起。此外, 事故数据缺少车道信息, 根据现场调研情况该路段采取客货分离管制措施。在一般情况下, 大型车行驶于外侧车

道, 小型车行驶于内侧车道, 同时考虑车辆行驶一般靠近中心线位置, 常见车辆宽度为 1.8 m。为了方便研究, 事故点取车道中心线左右 0.9 m 位置, 仅有小型车事故位于内侧车道, 涉及大型车事故位于外侧车道。K2064+140~K2094+140 路段的速度风险势场强度及相关事故分布如图 8 所示。

由图 8(a)可知, 交通事故在 K2068、K2085 和 K2088 等场强峰值处出现聚集现象。考虑 48 起侧向风险有关事故, 对所处位置的侧向速度风险势场强度 E_x 进行统计(以下速度风险势场强度相关统计均取绝对值), 最大值为 244.2, 最小值为 16.6, 均值为 75.5, 所处位置 E_x 大于均值事故共计 16 起, 占比为 33%。由图 8(b)可知, 交通事故在 K2065 和 K2088 这 2 个场强峰值处出现聚集现象。考虑 29 起纵向风险有关事故, 对所处位置的纵向速度风险势场强度 E_y 进行统计, 最大值为 141.20, 最小值为 5.12, 均值为 74.60, 所处位置 E_y 大于均值事故共计 15 起, 占比为 51.72%。

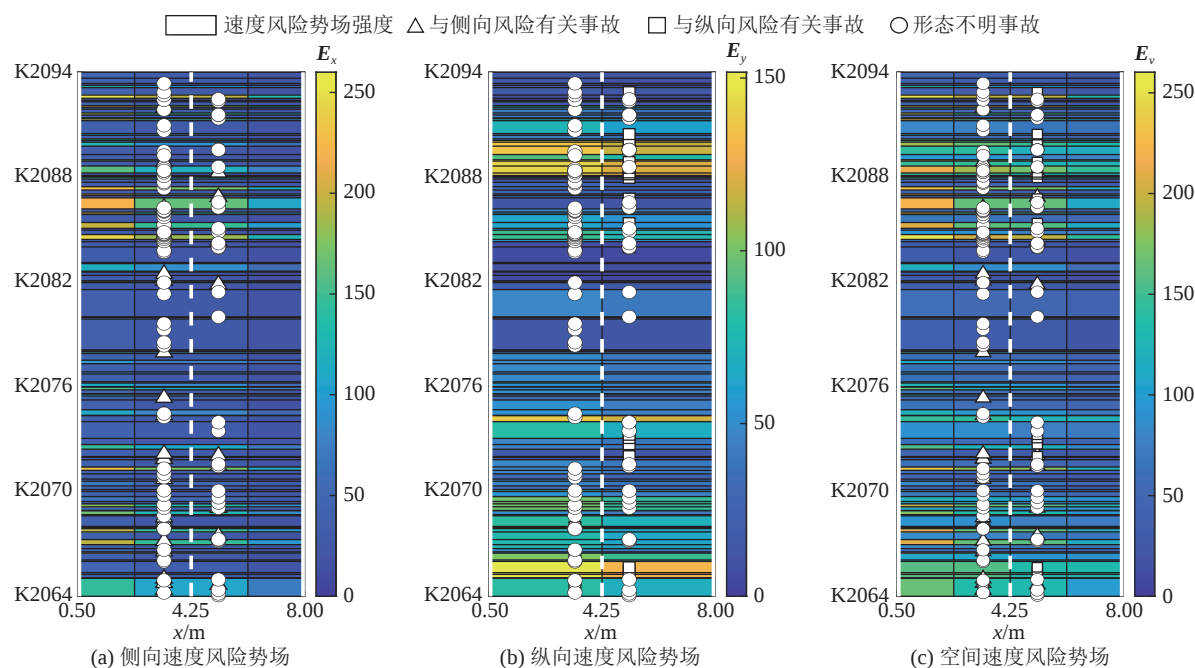


图8 K2064+140~K2094+140路段3种速度风险势场与车辆交通事故的分布

Fig.8 Three velocity risk potential fields and distribution of vehicle traffic accidents on K2064+140~K2094+140 section

速度风险势场强度越大,事故可能性越高.为了有效甄别行车风险,选取事故所在位置处速度风险势场强度的均值作为风险阈值,即侧向速度风险势场强度的风险阈值 $e_x=75.5$,纵向速度风险势场强度的风险阈值 $e_y=74.6$.当所处位置速度风险势场强度大于风险阈值时,代表发生对应风险相关事故可能性较高,即为侧向或纵向高风险路段.在K2064+140~K2094+140路段中,共甄别出13.85%的路段为侧向高风险路段,区域内发生了33.33%的侧向风险事故;16.26%的路段为纵向高风险路段,区域内发生了51.72%的纵向风险事故.

侧向速度风险势场和纵向速度风险势场均能够从单一角度对路段行车风险进行甄别,为了更好地实现路段行车风险评估,综合考虑侧向和纵向行车风险,根据式(7)计算空间速度风险势场强度,进一步作为路段宏观风险评价指标.结合式(9),取风险方向调整系数 $k=1.01$,空间速度风险势场强度 E_v 及相关事故分布如图8(c)所示.

根据式(10)可知,空间速度风险势场强度风险阈值为106.8.进一步统计可知,高于风险阈值的区域内发生了45.86%的历史交通事故,42.42%的形态不明事故,60.07%的纵向风险事故,40.00%的侧向风险事故.空间速度风险势场甄别出的高风险路段,涵盖了侧向、纵向速度风险势场甄别出的高风险路段,并且能够进一步对风险构成复杂的高风险路段进行有效甄别.因此,根

据速度风险势场强度与交通事故具有较高相关性,在一定程度上对高速公路行车风险进行空间刻画,综合运用侧向、纵向和空间速度风险势场能够对行车风险甄别.

4.3 有效性验证

为了验证速度风险势场在高速公路行车风险甄别中的有效性,选取K2094+140~K2130+640路段作为有效性验证路段,采用上述方法进行路段风险甄别,进行方法有效性验证.速度风险势场强度系数 $\eta=9.5$.该路段事故总数为282起,其中与侧向风险相关事故56起、与纵向风险相关事故76起和形态不明事故150起.速度风险势场强度及相关事故分布如图9所示可知,事故分布与速度风险势场强度分布具有一定规律性,侧向风险相关交通事故分布与侧向速度风险势场强度分布具有明显规律.

风险阈值采取前述统计结果,即侧向、纵向和空间速度风险势场的阈值分别为75.5、74.6和106.8.将3种速度风险势场强度的甄别效果进行统计对比,统计结果如表6所示.甄别效益比为总体事故甄别比例与大于风险阈值路段占比的比值.空间速度风险势场甄别出的高风险路段占比为24.33%,甄别出的事故比例为43.26%,甄别效益比为1.78.

同时时间段内K2094+140~K2130+640路段事故总数为282起,空间速度风险势场强度最大值为

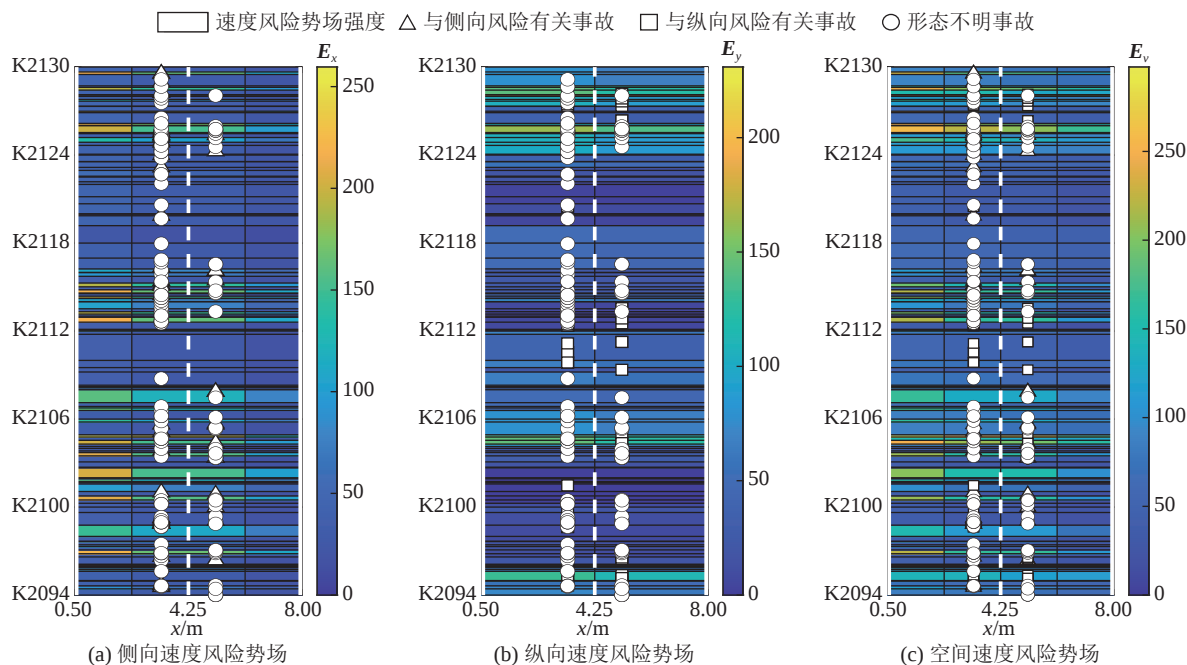


图 9 K2094+140~K2130+640 路段 3 种速度风险势场与车辆交通事故的分布

Fig.9 Three velocity risk potential fields and distribution of vehicle traffic accidents on K2094+140~K2130+640 section

297; K2064+140~K2094+140 路段事故总数为 157 起, 空间速度风险势场强度最大值为 260. K2094+140~K2130+640 路段的速度风险势场强度总体上大于 K2064+140~K2094+140 路段, 与事故总量规律一致. 对比有效性验证路段与实例分析路段相关统计数据, 相关结果表明: 1) 速度风险势场强度和相关事故分布具有一定的规律性; 2)

3 种速度风险势场对 2 处路段鉴别率均较高, 选取的风险阈值能够对高速公路行车风险进行有效分类甄别; 3) 速度风险势场强度极值能够表征路段总体安全水平. 综上所述, 速度风险势场可以甄别不同形态的行车风险, 能够量化描述高速公路行车风险的严重程度, 与传统一维的鉴别方法相比实现了在二维空间上行车风险有效刻画.

表 6 基于 3 种速度风险势场强度的高风险路段甄别效果对比

Tab.6 Comparison of high-risk road section identification effects based on three velocity risk potential field intensities

类别	阈值	高风险路段占比/%	事故比例/%			总体事故比例/%	甄别效益比
			侧向风险事故	纵向风险事故	形态不明事故		
E_x	75.5	7.74	21.43	—	34.9	31.21	4.03
E_y	74.6	12.88	—	34.21	30.2	31.55	2.45
E_v	106.8	24.33	32.14	43.42	47.65	43.26	1.78

5 结 论

1) 对路段和断面车速进行统计分析发现, 同一时间段和同一路段内多数车辆速度趋近一致; 同一断面处内、外侧车道的平均车速和车速离散度, 随时间变化趋势基本一致; 内、外侧车道平均速度比例基本一致. 进一步分析发现速度梯度、道路半径、纵坡与交通事故分布具有一定的相关性. 在此基础上, 结合行车风险演化规律, 提出了速度风险势场理论.

2) 综合考虑道路线形和交通流速度, 构建了速度势能和速度风险势场强度计算模型. 以平面曲线半径和纵断面纵坡为指标, 分别提出侧向和纵向风险影响因子计算方法. 结合实际调研数据, 对速度风险势场计算模型参数进行标定, 给出了侧向分布系数 ϕ_x 的取值方法, 引入速度变异系数提出速度风险势场强度系数 η , 同时考虑侧向、纵向和空间速度风险势场强度风险甄别间的不利情况, 提出风险方向调整系数 k 的计算方法.

3) 以西南山区某高速为实例进行速度风险势

场计算,并与实际事故分布进行对比.有效性验证路段是当侧向、纵向和空间速度风险势场阈值为75.5、74.6和106.8时,甄别出的高风险路段占比分别为7.74%、12.88%、24.33%,路段涉及的对事故占比分别为21.43%、34.21%、43.26%.结果显示风险甄别效果良好,侧向、纵向和空间速度风险势场甄别效益比分别为4.03、2.45、1.78.2处路段甄别结果证明速度风险势场均能有效评估路段行车风险,并且在一定程度上可以对高风险路段进行分类辨别.

4)提出速度风险势场理论及行车风险甄别方法,能够在二维空间上进一步实现风险路段定位、风险分类和量化,为宏观交通安全研究提供了新的方法.目前本研究所提出的风险阈值及确定方法,适用于宏观尺度的风险路段甄别,但是无法有效刻画车辆换道、超车等微观行车风险,具有一定局限性.此外,未考虑气象环境、车型比例、交通流密度等因素的影响,后续将进一步补充研究,以期实现宏观层面行车风险态势研判,提高高速公路安全管理的精准性和时效性.

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国务院安全生产委员会. 国务院安全生产委员会关于印发道路交通安全“十三五”规划的通知 [A/OL]. [2017-08-08] (2022-08-22). https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/agwzlf/tz_01/201709/t20170907_235227.shtml.
- [2] MA Y, MENG H, CHEN S, et al. Predicting traffic conflicts for expressway diverging areas using vehicle trajectory data [J]. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, 2020, 146(3): 04020003.
- [3] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle [R]. United States: Bureau of Public Roads, 1970: 1–44.
- [4] 陈雨人, 付云天, 汪凡. 基于支持向量回归的视距计算模型建立和应用 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 105–113.
CHEN Yu-ren, FU Yun-tian, WANG Fan. Establishment and application of sight distance computing model based on support vector regression [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(4): 105–113.
- [5] ADELL E, VÁRHELYI A, DALLA F M. The effects of a driver assistance system for safe speed and safe distance—a real-life field study [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2011, 19(1): 145–155.
- [6] 张驰, 孟良, 汪双杰, 等. 高速公路曲线路段小客车制动行为侧滑风险仿真分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 134–142.
ZHANG Chi, MENG Liang, WANG Shuang-jie, et al. Sideslip risk simulation analysis of passenger car braking behavior on expressway curved sections [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2015, 28(12): 134–142.
- [7] YANG H, OZBAY K. Estimation of traffic conflict risk for merging vehicles on highway merge section [J]. **Transportation Research Record**, 2011, 2236(1): 58–65.
- [8] WANG X, WANG X. Speed change behavior on combined horizontal and vertical curves: driving simulator-based analysis [J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2018, 119(1): 215–224.
- [9] AARTS L, VAN S I. Driving speed and the risk of road crashes: a review [J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2006, 38(2): 215–224.
- [10] YU R, QUDDUS M, WANG X, et al. Impact of data aggregation approaches on the relationships between operating speed and traffic safety [J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2018, 120(1): 304–310.
- [11] WU H. Comparing Google maps and uber movement travel time data [J]. **Findings**, 2019(1): 5115.
- [12] WOLF M T, BURDICK J W. Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance [C]// **2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Pasadena: IEEE, 2008: 3731–3736.
- [13] WOO H, JI Y, KONO H, et al. Lane-change detection based on vehicle-trajectory prediction [J]. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2017, 2(2): 1109–1116.
- [14] 陶鹏飞, 金盛, 王殿海. 基于人工势能场的跟驰模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(4): 854–858.
TAO Peng-fei, JIN Sheng, WANG Dian-hai. Car-following model based on artificial potential field [J]. **Journal of Southeast University: Natural Science Edition**, 2011, 41(4): 854–858.
- [15] WANG J, WU J, ZHENG X, et al. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2016, 72(1): 306–324.
- [16] 吴剑. 考虑人-车-路因素的行车风险评价方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015: 1–68.
WU Jian. Research on driver-vehicle-road factors considered driving risk evaluation method [D]. **Beijing: Tsinghua University**, 2015: 1–68.
- [17] SHOARIANSATTARI K, POWELL D. Measured vehicle flow parameters as predictors in road traffic accident studies [J]. **Traffic Engineering and Control**, 1987, 28(6): 328–329.
- [18] 华杰工程咨询有限公司. 公路项目安全性评价规范: JTG B05—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [19] ZHU Z, LU Y, FU C, et al. Research on the safety audit methods for two-lane highway based on HRV [J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014(1): 308028.
- [20] 陈昭明, 徐文远. 基于负二项分布的高速公路交通事故影响因素分析 [J]. 交通信息与安全, 2022, 40(1): 28–35.
CHEN Shao-ming, XU Wen-yuan. An analysis of factors influencing freeway crashes with a negative binomial model [J]. **Journal of Transport Information and Safety**, 2022, 40(1): 28–35.
- [21] 马聪, 张生瑞, 马壮林, 等. 高速公路交通事故非线性负二项预

- 测模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 176–185.
- MA Cong, ZHANG Sheng-rui, MA Zhuang-lin, et al. Nonlinear negative binomial regression model of expressway traffic accident frequency prediction[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(11): 176–185.
- [22] AHMED M, HUANG H, ABDELATY M, et al. Exploring a Bayesian hierarchical approach for developing safety performance functions for a mountainous freeway[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2011, 43(4): 1581–1589.
- [23] 林宣财, 张旭丰, 王佐, 等. 基于交通事故多发位置的区间平均纵坡控制指标研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 105–113.
- LIN Xuan-cai, ZHANG Xu-feng, WANG Zuo, et al. Study on control indicator of interval average longitudinal slope based on location of traffic accidents[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2021, 38(9): 105–113.
- [24] WONG Y D, NICHOLSON A. Driver behaviour at horizontal curves: risk compensation and the margin of safety[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 1992, 24(4): 425–436.
- [25] 张驰, 王博, 贺九平, 等. 基于行车动力学的高速公路积水路段行车风险分析[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 9–17.
- ZHANG Chi, WANG Bo, HE Jiu-ping, et al. Traffic risk analysis of ponding sections on freeways based on driving dynamics[J]. **Journal of Transport Information and Safety**, 2019, 37(5): 9–17.
- [26] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路路线设计规范: JTG D20-2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [27] ANSSEN W H, TENKINK E. Considerations on speed selection and risk homeostasis in driving[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 1988, 20(2): 137–142.
- [28] XU C, LIU P, WANG W, et al. Evaluation of the impacts of traffic states on crash risks on freeways[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2012, 47(1): 162–171.
- [29] GARBER N J, EHRHART A A. Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways[J]. **Transportation Research Record**, 2000, 1717(1): 76–83.
- [30] WANG X, WANG T, TARKO A, et al. The influence of combined alignments on lateral acceleration on mountainous freeways: a driving simulator study[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2015, 76(1): 110–117.
- [31] 汪双杰, 方靖, 周荣贵, 等. 公路运行速度特征研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(S1): 24–27.
- WANG Shuang-jie, FANG Jing, ZHOU Rong-gui, et al. Study on characteristics of highway speed[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2010, 23(S1): 24–27.
- [32] 李长城, 刘小明, 荣建. 降雨条件下高速公路车辆行驶速度特性[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 412–418.
- LI Chang-cheng, LIU Xiao-ming, RONG Jian. Speed characteristics of highway vehicles under rainfall conditions[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2015, 41(3): 412–418.
- [33] SIL G, NAMA S, MAJI A, et al. Effect of horizontal curve geometry on vehicle speed distribution: a four-lane divided highway study[J]. **Transportation Letters**, 2020, 12(10): 713–722.
- [34] GAO C, XU J, LI Q, et al. The effect of posted speed limit on the dispersion of traffic flow speed[J]. **Sustainability**, 2019, 11(13): 3594.
- [35] HAUER E. Speed and safety[J]. **Transportation Research Record**, 2009, 2103(1): 10–17.
- [36] EGGERT J. Solomon curve 2020: relating microscopic risk models with accident statistics [C]// **2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. Rio de Janeiro: IEEE, 2016: 2293–2300.
- [37] 林宣财, 曹骏驹, 周兴顺, 等. 互通式立交单车道匝道路宽度取值与单出入口优化设计[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 123–131.
- LIN Xuan-cai, CAO Jun-ju, ZHOU Xing-shun, et al. Value of single lane ramp width and optimization design of single entrance and exit for interchange[J]. **Journal of Highway and Transportation Research**, 2021, 38(9): 123–131.
- [38] QU D, CHEN X, YANG W, et al. Modeling of car-following required safe distance based on molecular dynamics[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014(1): 604023.
- [39] 孙祥龙, 陆建, 戴越. 普通公路车速分布特性影响因素分析[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(1): 5–9.
- SUN Xiang-long, LU Jian, DAI Yue. Analysis of factors influencing speed distribution at ordinary highway[J]. **Traffic Information and Safety**, 2012, 30(1): 5–9.
- [40] HURDLE V F, MERLO M I, ROBERTSON D. Study of speed-flow relationships on individual freeway lanes[J]. **Transportation Research Record**, 1997, 1591(1): 7–13.
- [41] SHANKAR V, MANNERING F. Modeling the endogeneity of lane-mean speeds and lane-speed deviations: a structural equations approach[J]. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 1998, 32(5): 311–322.
- [42] 陆建, 孙祥龙, 戴越. 普通公路车速分布特性的回归分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(2): 374–377.
- LU Jian, SUN Xiang-long, DAI Yue. Regression analysis on speed distribution characteristics of ordinary road[J]. **Journal of Southeast University: Natural Science Edition**, 2012, 42(2): 374–377.
- [43] 吴明先, 曹骏驹, 林宣财, 等. 多车道高速公路不同车道运行速度的特点[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 33–44.
- WU Ming-xian, CAO Jun-ju, LIN Xuan-cai, et al. Operating speed characteristics in different lanes of multi-lane expressway[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2021, 38(9): 33–44.
- [44] 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]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(1): 74–78.