

中文引用格式:张驰,王博,陈星光,等.基于风险场的高速公路高风险区域甄别方法[J].中国安全科学学报,2023,33(5):144-151.
英文引用格式:ZHANG Chi,WANG Bo,CHEN Xingguang,et al.High-risk area identification method of expressway based on risk field[J].
China Safety Science Journal,2023,33(5):144-151.

基于风险场的高速公路高风险区域甄别方法^{*}

张驰¹教授,王博¹,陈星光²,任士鹏²,翟艺阳¹

(1 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;

2 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)

中图分类号: X951; U412 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2023.05.1068

资助项目: 国家重点研发计划(2020YFC1512005); 四川省科技计划资助项目(2022YFG0048); 四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12, 2022-ZL-04)。

【摘要】 为有效识别高速公路高风险区域,首先在理论阐述和量化解释行车风险演化机制基础上引入势场理论,提出道路静态风险场的基本概念及性质;然后,在分析道路要素对行车安全影响的基础上,构建路域范围内的构造物、线形、路侧等要素的静态风险场计算模型,提出高速公路高风险区域甄别方法,同时,基于交通事故统计数据,对静态风险场计算模型的风险量进行参数标定;最后,依托实际项目,进行区域风险等级预测和有效性验证。结果表明:研究路段的33处区域中26处甄别结果与实际风险等级相同,仅有7处结果不一致,风险等级结果相差一个等级内的区域数量为30处;风险等级预测结果准确率达78.79%,与实际风险等级结果相差一个等级内的准确率达90.91%。静态风险场能够有效应用于高风险区域甄别,研究有助于设计及运营阶段高速公路安全治理。

【关键词】 风险场; 高速公路; 高风险区域甄别; 行车风险; 道路静态风险场

High-risk area identification method of expressway based on risk field

ZHANG Chi¹, WANG Bo¹, CHEN Xingguang², REN Shipeng², ZHAI Yiyang¹

(1 School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 2 Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510630, China)

Abstract: In order to effectively identify high risk areas of expressways, firstly, the potential field theory was introduced on the basis of theoretical exposition and quantitative interpretation of driving risk evolution mechanism, and the basic concept and properties of road static risk field were proposed. Then, on the basis of analyzing the influence of road factors on traffic safety, the static risk field calculation model of structures, alignments, roadsides and other factors in the road domain was constructed, and the method of identifying high risk areas of expressways was proposed. At the same time, based on the statistical data of traffic accidents, the risk quantity parameters of the static risk field calculation model were calibrated. Finally, based on the actual project, the regional risk level prediction and effectiveness verification were carried out. The results show that among the 33 areas of the study section, 26 of the screening results are

* 文章编号: 1003-3033(2023)05-0144-08; 收稿日期: 2022-12-23; 修稿日期: 2023-02-16

the same as the actual risk level, only 7 of the results are inconsistent, and the number of areas within one level of risk level difference is 30. The accuracy of the risk level prediction results is 78.79%, and the accuracy of the actual risk level results is 90.91%. The static risk field can be effectively applied to the identification of high-risk areas, and the research is helpful to the highway safety management in the design and operation stages.

Keywords: risk field; expressway; high-risk areas identification; driving risk; road static risk field

0 引言

随着我国高速公路总里程的增加,道路交通安全问题越来越严重。根据国际运输论坛组织的报告^[1],2019年有8万人因交通事故直接死亡,非致命伤害和财产损失更大。因此,准确识别高风险区域是提高道路安全性的关键基础。

交通流状态的随机性是由多种因素综合影响形成的,不良状态可能导致道路行车风险,进一步对整个道路交通系统的安全运行造成影响^[2]。风险场作为衡量风险状态的参数,可应用于交通领域的自动驾驶路径规划研究^[3]。势场理论被广泛应用于交通流研究领域,如人工势场法^[4]、势场跟驰模型^[5]和交通流动力学模型^[6]等,能够模拟交通行为并符合现实情况。将事故特征与道路属性之间的关系建立起来,刻画道路行车风险,有助于揭示风险产生机制。势场理论在道路行车风险方面的研究也在逐渐深入。最早为WOLF等^[7]建立的初代道路势场模型,同时还分别构建了车辆场模型和速度场模型。随着研究的深入,王建强等^[8]在WOLF车辆场模型基础上,引入虚拟质量和道路条件影响因子,建立了车辆动能场模型。此外,相关学者基于车辆速度指标,提出了势场改进模型^[9-10]。

虽然势场理论在交通领域已有一定的研究基础,但目前大多数应用于微观车辆交互场景,涉及道路因素的势场理论研究并不深入。因此,笔者拟将势场理论与道路静态条件结合,并融合定性分析与定量分析的思路,提出甄别高速公路高风险区域的新方法,以期为公路安全运营管理提供辅助决策。

1 道路静态风险场概念

驾驶员会主观保持与周围障碍物之间的安全距离^[11],车辆在道路上行驶时由一系列纵向和横向的运动组成^[12],而驱动车辆运动的作用力较大时会改变车辆运动的稳定性。相互作用影响下,车辆之间、车辆与道路之间会不断产生新的风险,形成风险场。

文中将道路静态风险场定义为在道路环境区域内的点函数^[13-14],以场源和行驶车辆之间的运行、变化规律作为研究对象。车辆行驶风险受道路构造物、线形、路侧设施影响。道路静态风险场是描述这3个因素对行驶风险的共同影响。

2 道路静态风险场基础理论及模型

2.1 线形静态风险场

1) 线形静态风险场势能。为了适应道路线形的变化,驾驶员会调整车辆速度及轨迹^[15-16]。速度分布可以描述道路线形对行车风险的影响,将路线线形在某一位置的风险影响能力称为线形静态风险场势能 φ 。断面的第85%分位车速,即运行速度能够较好地描述驾驶员在该断面的速度选择^[17]。具体计算方法如下:

$$\Delta V = V_{BP} - V_{EP} \quad (1)$$

$$\varphi_{ij} = V_{BP} + S \frac{\Delta V}{L_V} \quad (2)$$

式中: ΔV 为所属路段起点的运行速度与路段终点的运行速度差,km/h; V_{BP} 为所属路段起点的运行速度,km/h; V_{EP} 为所属路段终点的运行速度,km/h; φ_{ij} 为侧向位置为 j 、桩号为 i 处的路线静态风险场势能; S 为车辆距所属路段单元起点的距离,km; L_V 为所属路段单元的长度,km。

当无法测得车道级车速时,根据车道速度分布规律,在线形内插方法的基础上,利用下式计算各位置处的线形静态风险场势能:

$$\varphi_{ij} = \left(V_{BP} + S \frac{\Delta V_i}{L_V} \right) \beta \quad (3)$$

式中: β 为侧向分布系数,与车道数和侧向位置有关; ΔV_i 为 i 桩号位置所属路段起终点运行速度差,km/h。

2) 侧向分布系数。由于实际工作中难以直接获取路段内每条车道的车速,需要根据路段运行速度,结合侧向分布系数 β 进一步计算车道级的运行速度。结合相关研究^[18],双向4车道侧向分布系数

β 具体取值见表 1。

表 1 侧向分布系数取值

Tab.1 Values of lateral distribution coefficient

左边线	内侧车道	车道分界线	外侧车道	右边线
0.9	1	0.925	0.85	0.8

3) 线形静态风险场强度。线形静态风险场强度表示道路线形条件对路域范围内各位置的风险的物理量,用向量 E_v 表示。场强为道路区域内某一位置处线形静态风险场势能的梯度。计算如下:

$$E_x = f_{lx} Q_{lx} \frac{U_{lx}}{|d_x|} \cdot \frac{d_x}{|d_x|} \quad (4)$$

$$E_y = 100 f_{ly} Q_{ly} \frac{U_{ly}}{|d_y|} \cdot \frac{d_y}{|d_y|} \quad (5)$$

$$E_v = E_x + E_y \quad (6)$$

式中: E_v 为线形静态风险场强度向量; E_x 和 E_y 分别为侧向 x 和纵向 y 的线形静态风险场强度; f_{lx} 为线形静态风险场强系数; Q_{lx} 为路段单元所具有的风险量; U_{lx} 为线形静态风险场势能差; d 为场强方向距离向量; d_x 和 d_y 分别为侧向和纵向距离向量。

4) 线形静态风险场强系数。车辆速度离散性对风险场强的影响与速度变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 相关^[19]。为反映速度离散性对风险场强的影响,速度势场强系数计算如下:

$$f_{lx} = \frac{1}{CV} \quad (7)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{v}} = \frac{\sqrt{\frac{m \sum_{i=1}^n v_i^2 - (\sum_{i=1}^n v_i)^2}{m(m-1)}}}{\bar{v}} \quad (8)$$

式中: SD (Standard Deviation, SD) 为车辆速度标准差; m 为样本量。

2.2 构造物静态风险场

车辆所在断面与到达构造物时的速度差可用于衡量构造物静态风险场强度。将场内位置点距风险源点的距离作为影响场势能的反比关系值,定义这个综合值为等效距离 R_d , 计算如下:

$$E_g = \gamma \frac{Q_g}{R_d^2} \cdot n \quad (9)$$

式中: E_g 为某处的构造物静态风险场强度; γ 为构造物静态风险场因子; Q_g 为构造物风险场源点所具有的风险量; R_d 为等效距离 m ; n 为单位方向向量。

由式(9)可知: 构造物静态风险场强不是大小方向均衡分布的,其大小受道路风险场中心的风险

源点类型、风险源点所具有的风险量、道路条件、周围道路环境等多种因素的影响。构造物风险场强度空间分布如图 1 所示。

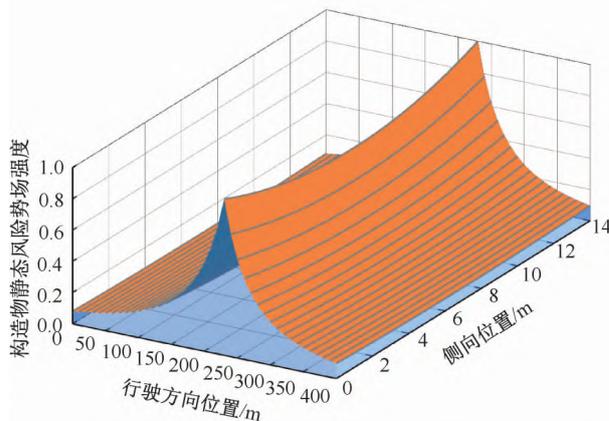


图 1 构造物风险场强度空间分布

Fig.1 Spatial distribution of structures risk field intensity

构造物静态风险场因子以风险场对场内车辆在某一位置开始发生调整处的速度与行驶至构造物处的速度变化值 ΔV_A 来衡量。

$$\gamma = \Delta V_A = V_i - V_j \quad (10)$$

式中 V_i 和 V_j 分别为 i, j 桩号断面车辆运行速度, km/h。

2.3 路侧静态风险场

路侧静态风险场强度取决于行驶车辆与路侧护栏之间的相对距离和路侧护栏本身所具有的风险量。左右侧护栏产生的路侧静态风险场强度计算方法见下式。路侧静态风险场强空间分布如图 2 所示。

$$|E_L| = |E_{LL}| + |E_{LR}| \quad (11)$$

$$E_L = \begin{cases} K_L Q_L \exp\left(-\frac{d_o}{l} \cdot n\right) & (\text{直线段或 } R \geq R^*) \\ K_L Q_L \frac{R^*}{R} \exp\left(-\frac{d_o}{l} \cdot n\right) & (R < R^*) \end{cases} \quad (12)$$

式中: d_o 为道路上位置点与两侧护栏的距离, m , 下标 o 为方向, 包括左侧和右侧 2 类; E_L 为路侧静态风险场强度, 具有大小和方向, 根据方向 o , 分为 E_{LL} 和 E_{LR} , 分别为左、右侧的路侧静态风险场强度; K_L 为路侧风险场增益系数, 由于车辆转弯时受离心力影响向曲线外侧滑移, 结合相关轨迹研究^[20-22], 故直线段取值为 1, 护栏位于曲线段内侧取值为 0.8, 护栏位于曲线段外侧取值为 1.2; Q_L 为路侧护栏所具有的风险量; R 为道路圆曲线半径 m ; R^* 为道路不设超高的圆曲线最小半径 m ; l 为道路侧向宽度 m 。

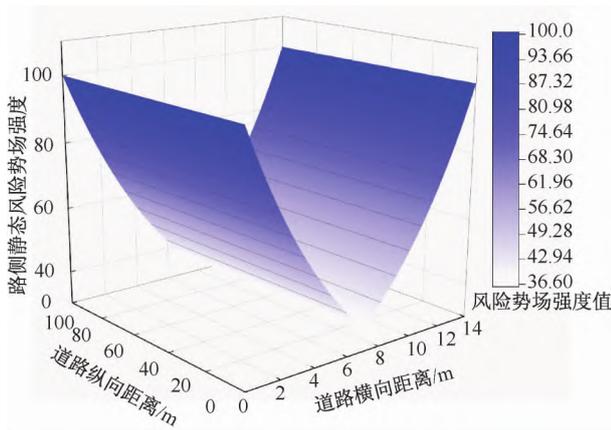


图 2 路侧静态风险场强空间分布

Fig.2 Roadside static risk field intensity spatial distribution

3 风险量标定

不同的场源拥有的风险量不同,产生的风险大小也不同,这种风险可以通过发生事故的可能性来衡量。文中选用百万车千米事故率(Crash Rate per million vehicles per kilometer, CR, 次/(百万车·km))来衡量构造物单元对事故的影响程度,由下式计算:

$$R_c = \frac{N}{V_A \times L} \times 10^6 \quad (13)$$

式中: CR 为全年每百万车每千米的事故率,次/(百万车·km); A 为全年的事故起数; V_A 为全年通行交通量,veh; L 为路段单元长度,km。

选定一般路段的百万车千米事故率作为基准,计算其他各类型的构造物场源风险量,计算式如下:

$$Q_{gi} = \frac{CR_i}{CR^*} \quad (14)$$

表 3 不同构造物区域场源风险量

Tab.3 Field source risk in different structures area

构造物类型	样本量	全年交通量/veh	路段长度/km	事故起数	事故率/(次·百万车 ⁻¹ ·km ⁻¹)	Q _{gi}
一般路段	—	3 617 539	12.69	11	0.239	1.0
隧道	28		71.07	88	0.342	1.5
互通	12		15.56	45	0.799	3.3
桥梁	71		26.00	62	0.659	2.8

4 高风险区域甄别方法

4.1 项目概况及运行速度数据获取

以西部某高速公路特征路段为研究对象(设计时速 80 km/h)应用道路静态风险场理论进行事故风险评价。选取总长 32.4 km 的路段,包含连续纵坡、隧道和桥梁等特征路段。以小型车为例,采用《公路项目安

全性评价规范》中的运行速度预测方法预测小型车运行速度^[24]。运行速度预测结果如图 3 所示。

文中选用各护栏区域内发生护栏事故的严重程度来表征这种事故特征,根据下式计算:

$$N_L = \lambda / N \quad (15)$$

式中: N_L 为事故严重程度,人/次; λ 为伤亡人数。

选定柔性护栏的事故严重程度作为基准,对于其他路侧护栏场源风险量,根据下式计算:

$$Q_{Li} = \frac{N_{Li}}{N_L^*} \quad (16)$$

式中: Q_{Li} 为各类型路侧护栏的场源风险量; N_L^{*} 为柔性护栏的事故严重程度,人/次; N_{Li} 为各类型路侧护栏的事故严重程度,人/次。

根据获得的某高速近 6 年事故数据,计算得出各场源风险量,见表 2 和表 3。文献[23]研究发现,以半径 1 000 m 为标准,将平曲线分为小半径和大半径曲线路段;以纵坡 3% 为标准,将纵坡分为小纵坡和大纵坡路段。根据上述标准,将高速公路划分成不同的路段组合,以编号 1—9 表示。以直线-小纵坡路段的亿车公里事故率作为基准,计算不同线形组合区域的场源风险量,结果见表 4。

表 2 不同护栏类型场源风险量

Tab.2 Field source risk of different guardrail types

护栏类型	事故起数	伤亡人数	N _{Li} /(人·次 ⁻¹)	Q _{Li}
柔性护栏	32	5	0.16	1.00
半刚性护栏	324	61	0.19	1.19
刚性护栏	438	112	0.26	1.63

全性评价规范》中的运行速度预测方法预测小型车运行速度^[24]。运行速度预测结果如图 3 所示。

4.2 道路静态风险场理论应用结果

基于所获得的小型车运行速度数据及路段设计文件数据,依据所研究的道路静态风险场理论分析应用结果。根据线形静态风险场、构造物静态风险场以及路侧静态风险场强,计算道路静态风险场综

表 4 不同类型路段事故率统计

Tab.4 Accident rate statistics of different types of road sections

类型编号	路段类型	样本数量	全年交通量 / veh	路段长度 / km	事故数	事故率 / (次·亿车 ⁻¹ ·km ⁻¹)	Q _{Li}
1	直线-小纵坡	42	3 617 539	63.95	49	20.75	1.00
2	直线-大上坡	46		13.87	11	21.92	1.06
3	直线-大下坡	132		13.87	11	21.92	1.06
4	小半径曲线-小纵坡	54		48.05	44	25.31	1.22
5	小半径曲线-大上坡	78		18.43	18	27.00	1.30
6	小半径曲线-大下坡	128		18.43	19	28.50	1.37
7	大半径曲线-小纵坡	12		48.17	40	22.95	1.11
8	大半径曲线-大上坡	18		8.15	7	23.74	1.14
9	大半径曲线-大下坡	32		8.15	7	23.74	1.14

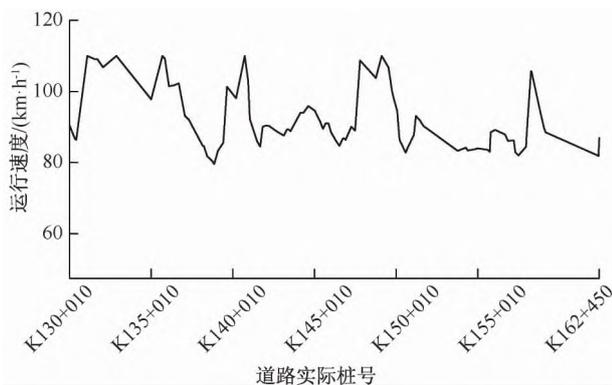


图 3 运行速度趋势

Fig.3 Running speed trend

合场强 E_{ep} 甄别人高风险区域。纵向上以 100 m 为间隔,同时,为能准确量化这种高速公路区域风险梯度的层级,引入区域平均场强指标 \bar{E} ,表示固定长度(取 1 km)的区域内,道路静态风险场强的平均强度大小 E_{ep} 计算如下:

$$E_{ep} = |E_v| + |E_g| + |E_L| \quad (17)$$

$$\bar{E} = \overline{E_{ep}} \quad (18)$$

图 4 为道路静态风险综合场强分布。由图 4 可以看出,在侧向上,左侧行车道中线及右侧行车道中线以右区域道路静态风险场强度最小,说明车辆在该侧向区域内行驶,所受到的道路侧向行车风险影响程度较小。这与实际侧向风险分布规律一致,保证车辆沿着行车道中线行驶,可以有效降低发生侧向碰撞风险的可能性。

4.3 高风险区域甄别分析

道路静态风险场在纵向上呈现出一定的梯度分布,场强越大的地方表示该区域的道路行车风险越高,车辆行驶更加不安全。结合场强与事故特征的比较,选取侧向风险最不利的区域即行车道分界线

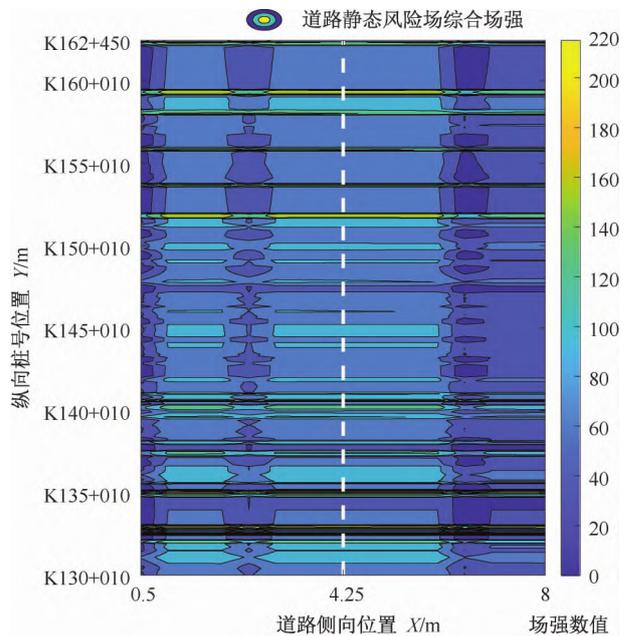


图 4 道路静态风险场综合场强分布

Fig.4 Comprehensive field intensity distribution of road static risk field

处作为研究区域,并确定该区域的风险评价等级。此外,为验证文中方法用于区域风险等级评价的有效性,需要将预测的风险等级与实际事故特征划分的风险等级比较。百万车千米事故率(Crash rate per million vehicles per kilometer, CR)值^[25],进一步划分为 6 个评价等级,具体见表 5。

表 5 区域风险评价等级

Tab.5 Regional risk assessment level

风险等级	极低风险	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
\bar{E}	(0, 80)	[80, 90)	[90, 100)	[100, 110)	[110, 120)	[120, +∞)
CR	(0, 0.3)	(0.3, 0.6]	(0.6, 0.975]	(0.975, 1.2]	(1.2, 1.5)	[1.5, +∞)

综上所述,以1 000 m为区间划分高速公路区域,根据文中提出的区域风险等级评价标准进行路段区域的风险等级评价,并与实际风险等级进行对比分析。收集到2014—2020年共7年的路段实际

事故数据,应用CR值风险分级方法计算得到该研究路段实际风险等级。各区域预测风险等级及实际风险等级具体结果见表6。

表6 各区域预测风险等级结果及对比

Tab.6 Results and comparison of predicted risk levels in various regions

起点桩号	终点桩号	\bar{E}	预测风险等级	2014—2020年路段 事故总数	CR	实际风险 等级
K130+010	K131+010	100.635	中	25	0.983	中
K131+010	K132+010	117.849	较高	33	1.297	较高
K132+010	K133+010	137.738	高	45	1.769	高
K133+010	K134+010	82.502	低	12	0.472	低
K134+010	K135+010	95.443	较低	22	0.865	较低
K135+010	K136+010	114.621	较高	21	0.826	较低
K136+010	K137+010	102.660	中	29	1.140	中
K137+010	K138+010	90.991	较低	18	0.708	较低
K138+010	K139+010	95.180	较低	16	0.629	较低
K139+010	K140+010	104.233	中	25	0.983	中
K140+010	K141+010	125.369	高	33	1.297	较高
K141+010	K142+010	103.174	中	30	1.179	中
K142+010	K143+010	85.923	低	17	0.668	较低
K143+010	K144+010	93.216	较低	19	0.747	较低
K144+010	K145+010	100.022	中	24	0.943	较低
K145+010	K146+010	96.046	较低	20	0.786	较低
K146+010	K147+010	95.595	较低	16	0.629	较低
K147+010	K148+010	85.235	低	9	0.354	低
K148+010	K149+010	89.187	低	11	0.432	低
K149+010	K150+010	100.247	中	14	0.550	低
K150+010	K151+010	87.608	低	9	0.354	低
K151+010	K152+010	122.273	高	42	1.651	高
K152+010	K153+010	78.878	极低	2	0.079	极低
K153+010	K154+010	93.636	较低	3	0.118	极低
K154+010	K155+010	80.900	低	8	0.314	低
K155+010	K156+010	97.487	较低	19	0.747	较低
K156+010	K157+010	85.560	低	13	0.511	低
K157+010	K158+010	103.841	中	30	1.179	中
K158+010	K159+010	122.419	高	39	1.533	高
K159+010	K160+010	107.732	中	26	1.022	中
K160+010	K161+010	77.970	极低	2	0.079	极低
K161+010	K162+010	75.863	极低	2	0.079	极低
K162+010	K162+410	112.955	较高	28	1.101	中

根据表6结果,该项目33处路段区域中,采用所提方法,区域风险甄别结果为:①极低风险区域3处,占比9.09%;②较低风险区域7处,占比21.21%;③低风险区域8处,占比24.24%;④中风险区域6处,占比18.18%;⑤较高风险区域3处,占比9.09%;⑥高风险区域4处,占比12.12%。甄别结果对比实际风险等级,33处区域中26处甄别结

果与实际风险等级相同,仅有7处结果不一致。进一步分析7处结果不一致的区域发现,主要原因为道路区域采用等距离划分,位于区域边界的事故,被分散的邻近统计区域中,导致统计获得的实际风险等级存在差异。考虑该问题导致结果偏差一般不大,进一步统计风险等级结果相差一个等级内的区域数量为30处。

上述结果表明: ① 甄别结果的准确率为 78.79% ,与实际风险等级结果相差一个等级内的准确率为 90.91% ,证明道路静态风险场强度和事故分布具有一定的规律性,基于道路静态风险场能够有效开展高风险区域甄别。② 甄别结果与实际风险等级不一致的 7 处路段,仅有 2 处为中风险以上,其余均为较低风险,同时甄别结果均高于实际风险等级。说明该风险甄别方法敏感度较高,对较高风险和高风险路段的甄别准确率更高。③ 相较传统方法,所提出的高风险区域甄别方法不依赖于事故数据,不仅适用于已运营的高速公路,还能够应用于设计阶段和缺少事故数据的高速公路。

5 结 论

1) 提出道路静态风险场模型,并进行实例分

析,研究结果不仅证实道路构造物、线形、路侧设施是影响交通风险形成的重要因素,还为势场理论应用于交通风险评估奠定了基础。

2) 文中风险等级预测结果准确率达到 78.79% ,与实际风险等级结果相差一个等级内的准确率达到 90.91% ,理论适用性及有效性良好。尤其在较高风险与高风险区域的识别上,预测结果较为准确。

3) 与基于事故数据的甄别方法相比,文中提出的高风险区域甄别方法适用于公路设计阶段的安全评估和安全改善。但是,文中研究未考虑气象、交通流等动态信息,存在一定的局限性。因此,后续研究将进一步补充,以实现更准确的高风险区域甄别。

参 考 文 献

- [1] International Traffic Safety Data and Analysis Group. Road safety annual report 2019 [R]. 2019.
- [2] 李振明, 牛毅, 樊运晓, 等. 不同区域高速公路货车事故特征研究 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(6): 121-127.
LI Zhenming, NIU Yi, FAN Yunxiao, et al. Study on characteristics of truck accidents in different regions of expressways [J]. China Safety Science Journal 20 30(6): 121-127.
- [3] TSOURVELOUDIS N C, VALAVANIS K P, HEBERT T. Autonomous vehicle navigation utilizing electrostatic potential fields and fuzzy logic [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 490-497.
- [4] 李晓弘. 六轮独立驱动电动车辆直驱驱动转矩分配策略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LI Xiaohong. The Research of torque distribute strategy for 6-wheel-independent-driving electric vehicle [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [5] BYRNE S, NAEEM W, FERGUSON S. Improved APF strategies for dual-arm local motion planning [J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control 2015 37(1): 73-90.
- [6] NI Daiheng. A unified perspective on traffic flow theory, part I: the field theory [J]. Applied Mathematical Sciences, 2013, 7: 1929-1946.
- [7] WOLF M T, BURDICK J W. Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance [C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008: 3731-3736.
- [8] WANG Jianqiang, WU Jian, ZHENG Xunjia, et al. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system [J]. Transportation research part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 306-324.
- [9] HU Hongyu, ZHANG Chi, SHENG Yuhan, et al. An improved artificial potential field model considering vehicle velocity for autonomous driving [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 863-867.
- [10] 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 Pengfei, JIN Sheng, WANG Dianhai. Car following model based on artificial potential energy field [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(4): 854-858.
- [11] ORFILA O, COIRET A, DO M T, et al. Modeling of dynamic vehicle-road interactions for safety-related road evaluation [J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(6): 1736-1743.
- [12] 尚婷, 吴鹏, 唐伯明, 等. 隧道至互通小间距路段车辆换道博弈行为研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 68-75.
SHANG Ting, WU Peng, TANG Boming, et al. Study on lane-changing game behavior of vehicles in small spacing section between tunnel and interchange [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 68-75.

- [13] 吴剑. 考虑人一车一路因素的行车风险评价方法研究[D].北京:清华大学,2015.
WU Jian. Research on driver-vehicle-road factors considered driving risk evaluation method [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [14] 谢树艺. 工程数学: 矢量分析与场论: 第2版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 27-48.
- [15] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle [R]. Bureau of Public Roads, 1964.
- [16] 郭应时, 付锐, 袁伟, 等. 山区公路事故率与平面线形的关系[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 63-71.
GUO Yingshi, FU Rui, YUAN Wei, et al. Relationship between highway accident rate and plane alignment in mountainous areas [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 63-71.
- [17] 符铎. 理论运行速度与公路线形设计及评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
FU Xinshe. Research on theoretical operation velocity versus highway alignment design and their evaluation methods [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [18] 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 Xianglong, DAI Yue. Regression analysis of speed distribution characteristics of ordinary highway [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(2): 374-377.
- [19] 曲大义, 郝亮, 陈秀锋, 等. 车流速度离散对运行安全的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33(6): 1-5.
QU Dayi, HAO Liang, CHEN Xiufeng, et al. Study on the impact of vehicle flow velocity dispersion on operation safety [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2012, 33(6): 1-5.
- [20] 徐进, 陈莹, 陈海源, 等. 回头曲线路段的轨迹行为模式与事故风险[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2020, 50(5): 973-982.
XU Jin, CHEN Ying, CHEN Haiyuan, et al. Vehicle track patterns and accident risk on hairpin curves [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2020, 50(5): 973-982.
- [21] XU Jin, LUO Xiao, SHAO Yi Ming. Vehicle trajectory at curved sections of two-lane mountain roads: a field study under natural driving conditions [J]. European Transport Research Review, 2018, 10: 1-16.
- [22] REN Yuanyuan, LI Xiansheng, REN You. Study on driving dangerous area in road curved section based on vehicle track characteristics [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2011, 4(6): 1237-1245.
- [23] 孟祥海, 荆林朋, 侯芹忠. 高速公路平纵线形与事故率的关系及其安全性评价[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(4): 69-75, 126.
MENG Xianghai, JING Linpeng, HOU Qinzhong. Relationship between horizontal and vertical alignment of Expressway and accident rate and its safety evaluation [J]. Journal of Traffic Information and Safety, 2015, 33(4): 69-75, 126.
- [24] JTG B05—2015, 公路项目安全性评价规范[S].
JTG B05—2015, Specification for safety evaluation of highway projects [S].
- [25] 张驰, 胡涛, 侯宇迪, 等. 基于制动毂温升的连续下坡货车事故风险评价模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2020, 48(11): 19-29.
ZHANG Chi, HU Tao, HOU Yudi, et al. Accident risk assessment model of continuous downhill freight cars based on brake hub temperature rise [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2020, 48(11): 19-29.



作者简介: 张驰 (1981—), 男, 四川宜宾人, 博士, 教授, 主要从事交通安全与交通 BIM 研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn。