

中文引用格式:胡立伟,刘冰,陈琛,等. 高速公路出口匝道交织区风险场模型[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):213-220.

英文引用格式:HU Liwei, LIU Bing, CHEN Chen, et al. Risk field model of freeway exit ramp weaving area[J]. China Safety Science Journal,2025,35(5):213-220.

高速公路出口匝道交织区风险场模型^{*}

胡立伟 教授, 刘冰, 陈琛, 张瑞杰, 侯智, 贺雨

(昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.2004

基金项目: 国家自然科学基金资助(42277476)。

【摘要】 为提高风险场模型对驾驶人在高速公路出口匝道交织区换道时刻预测的准确性, 首先, 采用驾驶人行为问卷调查法, 聚类分析驾驶风格和换道风格, 并开展实车驾驶试验, 获取车辆换道轨迹数据, 分析不同驾驶风格的风险感知水平; 然后, 在基础风险场模型基础上, 引入衍生交通环境风险, 并综合考虑驾驶风格和交通管控等因素, 从道路环境、交通环境、管理控制 3 方面构建风险场模型; 最后, 以匀加速(CA)运动模型与风险场模型结合设计车辆换道仿真控制策略和试验。结果表明: 谨慎型、普通型、激进型驾驶风格驾驶人运动风险感知系数分别为 0.71、1、1.17, 距离风险感知系数分别为 0.62、1、1.39; 谨慎型驾驶风格驾驶人所受风险强度>普通型>激进型, 谨慎型驾驶人临界换道距离>普通型>激进型; 管理控制风险场模型预测得到谨慎型、普通型、激进型驾驶人换道决策阈值时刻分别为 96.2、105.2、114.2 s, 与仿真换道时刻 97.4、104.8、113.8 s 相比误差小于 1.5%。

【关键词】 高速公路; 出口匝道; 交织区; 风险场模型; 驾驶风格

Risk field model of freeway exit ramp weaving area

HU Liwei, LIU Bing, CHEN Chen, ZHANG Ruijie, HOU Zhi, HE Yu

(Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the risk field model in predicting the lane-changing time of the driver in the weaving area of the freeway exit ramp, firstly, the driver behavior questionnaire survey method was used to cluster the driving style and lane-changing style, and the real vehicle driving test was carried out to obtain the vehicle lane-changing trajectory data and analyzed the risk perception level of different driving styles. Then, the derived traffic environment risk was introduced on the basis of the basic risk field model, and the risk field model was constructed from three aspects: road environment, traffic environment and management control, considering the factors such as driving style and traffic control. Finally, the vehicle lane change simulation control strategy and test were designed by combining the uniform acceleration (CA) motion model and the risk field model. The results show that the motor risk perception coefficients of cautious, ordinary and aggressive driving style drivers are 0.71, 1 and 1.17 respectively, and the distance risk perception coefficients are 0.62, 1 and 1.39 respectively. The risk intensity of driving style cautious type > ordinary type > aggressive type, and the critical lane change

distance of driving style cautious type > ordinary type > aggressive type. The management control risk field model predicts that the threshold time of lane change decision for cautious, ordinary and aggressive drivers is 96.2 s, 105.2 s and 114.2 s, respectively, and the error is less than 1.5% compared with the simulation lane change time of 97.4 s, 104.8 s and 113.8 s.

Keywords: freeway; exit ramp; weaving area; risk field model; driving style

0 引言

在驾驶环境和驾驶人驾驶风格作用下,高速公路出口匝道交织区车辆驾驶行为多样、分流换道频繁、换道行为复杂,容易产生交通延误,严重时还会引起交通事故。事故统计显示,出口匝道交织区的事故发生率为一般路段的4~6倍^[1],也是行车事故易发区段。因此,探究该区段的车辆换道行为特征和车辆运行风险是高速公路安全防控的重要切入点。

目前,对高速公路出口的风险研究主要集中在匝道,而对匝道交织区的换道行为研究较少,研究方法上更多是基于车辆安全换道距离、碰撞时间开展研究。孟祥海等^[2]以后侵入时间(Post Encroachment Time,PET)作为评价指标,分析了多车道高速公路出入口分合流区PET数据分布特征,识别出区域和各车道的潜在事故风险;冯嵩等^[3]通过考虑附着系数和延迟反应时间,提出基于安全距离的车辆换道轨迹模型,并结合舒适性和安全性指标规划了安全稳定的换道轨迹;王建强等^[4]提出行车风险场,并利用人工势场描述车辆风险;LI Linheng等^[5]构建了动态驾驶风险场模型,用于研究单车道跟车的微观交通流场景;安林芳等^[6]将人工势场应用于车辆换道行为;朱乃宣等^[7]利用人工势场理论评估了车辆周围风险,结合驾驶员的换道数据分析,实现个性化的换道触发。风险场理论可较为准确地刻画车辆交互的微观风险,但在模型上却忽略了交通管控对车辆运行的约束,也未考虑到驾驶风格对驾驶人驾驶决策存在的影响。

鉴于此,笔者拟在现有风险场模型基础上,进一步融合驾驶风格和交通管理控制因素,探究其与换道行为特征、行车风险的关系,以期提高风险场模型对驾驶人在高速公路出口匝道交织区换道时刻预测的准确性。

1 调查试验与分析

1.1 问卷调查与驾驶风格聚类

基于驾驶人行为问卷^[8],设计驾驶风格对应的

问题(1—16)和换道风格对应的问题(11—16),对96名被试开展问卷调查。其中,男性被试68名,女性被试28名,年龄分布为19~55岁,平均高速公路驾龄4.5年,问卷内容与调查结果见表1。

表1 问卷与调查结果

Table 1 Questionnaire and questionnaire results %						
序号	问题	从未发生	偶尔发生	有时发生	时常发生	总是发生
1	路程短或无监控时不系安全带	71.0	15.3	9.9	1.5	2.3
2	加速通过信号为黄灯的路口	52.0	29.0	12.2	5.3	1.5
3	在前方无车或监控时,会超速以加快抵达目的地	61.0	26.7	6.9	3.1	2.3
4	开车时打电话或回信息	56.5	28.2	7.6	4.6	3.1
5	前车刹车减速时,注意力不集中而踩急刹车	52.0	39.6	6.1	1.5	0.8
6	开车时被路边的事物吸引	44.4	36.6	13.7	3.8	1.5
7	堵车时候会换道至旁边最先移动的车道	59.4	24.4	11.5	3.2	1.5
8	近距离跟车	36.6	48.1	8.5	5.3	1.5
9	被超车时产生赶超的想法	59.5	26.0	8.4	2.3	3.8
10	被他人错误驾驶行为惹恼而追赶表示不满	58.0	27.5	9.1	3.1	2.3
11	尽一切可能换道或超车	53.4	35.2	7.6	1.5	2.3
12	高速公路上为达到更快车速而频繁换道	73.2	17.5	3.8	4.6	0.9
13	道路情况限制无法从左侧超车且前方车速很慢时,会从右侧超车	70.2	17.5	9.2	0.8	2.3
14	高速公路出口下道不会提前换道至最右车道行驶	53.4	25.2	13.7	4.6	3.1

续表 1

序号	问题	从未发生	偶尔发生	有时发生	时常发生	总是发生
15	高速公路驾车时未保持车辆在车道中线上行驶	63.4	22.1	6.9	5.3	2.3
16	换道时车辆保持较高的行驶速度	63.3	26.7	6.9	2.3	0.8

问卷信度检验结果见表 2。利用 SPSS 软件对整理后的数据作主成分分析,将累计贡献率超过 85%的前 8 个成分作为主成分^[9],通过计算得到驾驶风格和换道风格得分。

表 2 信度度分析

Table 2 Analysis of reliability and validity			
信度分析		效度分析	
Cronbach α	0.882	KMO	0.602
信度较好		效度良好	
Barlett P 值<0.001			

采用 K-means 均值聚类方法分析 96 名被试的驾驶风格得分、换道风格得分,将被试分为谨慎型、普通型和激进型 3 类。聚类结果如图 1 所示,得分越高其行为风格越激进。

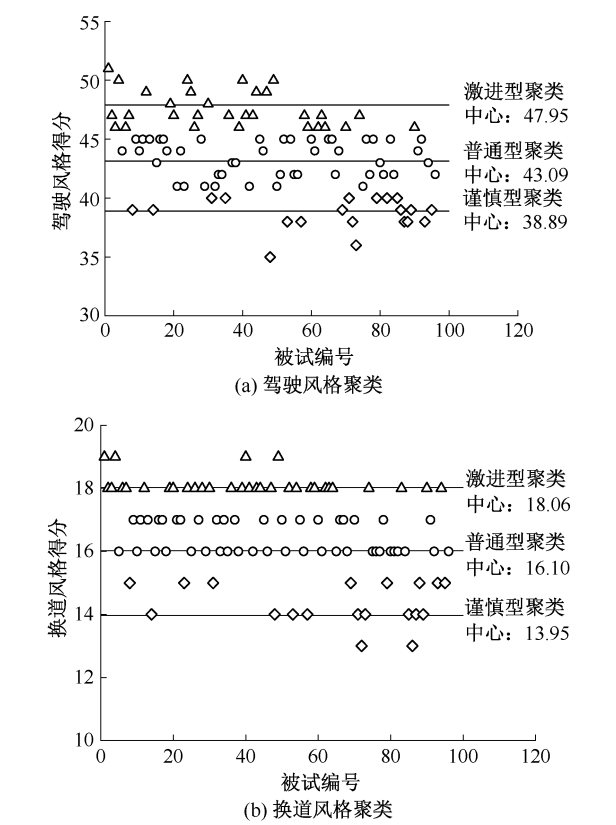


图 1 聚类分析结果

Fig.1 Results of cluster analysis

为探究驾驶风格和换道风格间的关系,采用 Pearson 相关系数对 2 次聚类结果进行相关性分析,结果见表 3。由表 3 可知:2 次聚类的总体相关性系数达 0.868,说明驾驶人的换道风格与驾驶风格具有很强的正相关关系。在换道过程中,驾驶风格的差异主要体现在驾驶人对距离、速度、加速度的感知水平上,因此,引入运动感知系数和距离感知系数来研究驾驶人风险感知水平。

表 3 相关性分析

2 次风格聚类	谨慎型	普通型	激进型	总体
Pearson 系数	0.717	0.350	0.385	0.868

1.2 车辆轨迹调查与风险感知系数分析

为探究不同驾驶风格驾驶人对风险的感知,从问卷调查样本人群中招募 3 类驾驶风格的男性、女性被试各 5 名,共 30 名被试进行实车驾驶试验,被试人群高速公路驾龄为 3.5~4.5 年。试验车辆车长 4.86 m,车宽 1.87 m,车辆配备惯性导航、角毫米波雷达记录交通环境情况,采用车载信息采集设备收集存储驾驶数据。试验地点为昆明市东绕城高速(G56)两面寺东出口,该道路主线双向 6 车道、车道宽度 3.75 m、设计时速 100 km/h,渐变车道长 300 m,匝道限速 40 km/h。驾驶试验流程如图 2 所示。

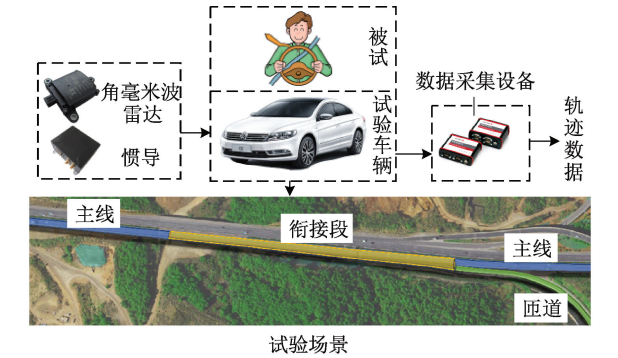


图 2 实车驾驶试验流程

Fig.2 Driving experiment procedure

换道开始至换道结束必须为连续轨迹段,换道轨迹识别指标如下:

- 1) 换道开始识别。①车辆中线偏移量 $\geq 0.2\text{ m}$ 且持续时间 $\geq 1\text{ s}$;②车辆航向角 $\leq -1.5^\circ$ 。
- 2) 换道结束识别。①换道开始后,车辆中线偏移量 $\leq 0.2\text{ m}$;②车辆航向角 $\geq 1^\circ$ 。

从试验车辆运行轨迹中识别出跟驰和换道轨迹段共 312 条,提取出 8 项换道相关数据集,按照驾驶风格进行聚类,得到各聚类中心,见表 4。

表 4 车辆换道数据集

Table 4 Vehicle lane change statistics

数据集	序号	谨慎型	普通型	激进型
换道速度/(m·s ⁻¹)	1	20.23	22.47	26.58
换道加速度/(m·s ⁻²)	2	1.38	2.71	3.75
换道时间/s	3	11.20	9.05	6.12
车车间距/m	4	181.05	118.77	73.11
车道中线偏移量/m	5	0.14	0.19	0.26
换道距出口距离/km	6	1.802	1.230	0.685

注:前 3 项为运动感知数据集,后 4 项为距离感知数据集。

分别以运动感知、距离感知为集合加权平均^[10]计算 3 种驾驶风格的风险感知系数:

$$\left\{\begin{aligned}\omega_{1p} &= \frac{\sum_{j=1}^3 \frac{|d_{pj} - d_{2j}|}{|d_{3j} - d_{1j}|}}{3} \\ \omega_{2p} &= \frac{\sum_{j=3}^6 \frac{|d_{pj} - d_{2j}|}{|d_{3j} - d_{1j}|}}{4}, p = 1, 2, 3\end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: d_{pj} 为驾驶风格 p 下第 j 种数据集的聚类中心 d , $p=1$ 为谨慎型, $p=2$ 为普通型, $p=3$ 为激进型; ω_1 、 ω_2 分别为运动感知系数、距离感知系数。

将普通型驾驶风格驾驶人的风险感知系数定为 1, 得到其他驾驶风格驾驶人风险感知系数, 见表 5。

表 5 3 种驾驶风格风险感知系数

Table 5 Risk perception coefficient of 3 driving styles

驾驶风格	ω_1	ω_2
激进型	0.71	0.62
普通型	1	1
谨慎型	1.17	1.39

注:系数越大表明驾驶人风险感知水平越高。

2 高速公路出口匝道交织区风险场模型

为便于构建模型,将车辆统一为长度为 L_1 、宽度为 L_2 的矩形障碍物模型。引入运动和距离感知系数,从道路环境、交通环境、管理控制 3 个维度构建风险场模型。

2.1 道路环境风险场

道路环境风险场由道路边界和车道分界线 2 部分风险场组成。道路边界旨在限制车辆在道路内部行驶,禁止车辆跨越,当车辆接近道路边界时,风险强度显著增大。车道分界线引导车辆在车行道内行驶。禁止跨越车道分界线与道路边界类似,随着车辆接近风险强度显著增加,可跨越车道分界线的风险强度在允许车辆换道时则是可接受的。

为约束车辆沿道路中线行驶,将车辆沿中线行驶时的道路环境风险场势场强度设为 0, 分别以对数函数和三角函数描述禁止跨越和可跨越的风险大小,具体势场强度计算如下:

$$E_1(x, y) = \begin{cases} -k_1 \cdot \ln\left(\frac{2}{\omega_2} \cdot \frac{h_1}{l - L_2}\right), & h_1 \leq \frac{l - L_2}{2} \\ 0, & \text{其他} \\ k_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\omega_2} \cdot \frac{h_2}{l - L_2}\right), & h_2 \leq \frac{l - L_2}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_1(x, y)$ 为道路上 (x, y) 点处道路环境风险场势场强度; k_1 、 k_2 分别为道路边界(禁止跨越车道分界线)、可跨越车道分界线风险场场强系数; h_1 、 h_2 分别为 (x, y) 点至道路边界(禁止跨越车道分界线)、可跨越车道分界线的垂直距离, m ; l 为车道宽度, m 。

三车道高速公路道路环境风险场势场分布,如图 3a 所示。车道宽度 l 为 3.75 m , 从左至右为道路边界、路面、可跨越车行道分界线, 车辆宽度 L_2 为 2 m 情况下, 车辆所受道路风险场 E_1 分布截面, 如图 3b 所示。

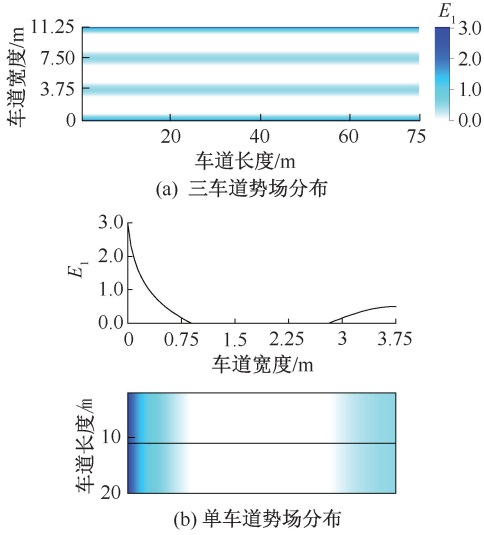


图 3 道路环境风险场势场分布

Fig. 3 Distribution of road environmental risk field potential field

2.2 交通环境风险场

交通环境风险场是由车辆运动而产生的风险, 表现为当车辆越接近或能更快地接近空间中某一点时, 该点与车辆发生碰撞的概率越大, 该点的风险强度也越大。为便于构建风险场模型, 利用等效质量^[11]统一车辆质量。

2.2.1 一般交通环境风险场

一般交通环境风险场指当前运动状态车辆在空

间中某点产生的车辆风险,强度大小与车辆的速度、加速度、尺寸等密切相关。假设车辆加速度与速度方向在同一直线上,以高阶中心距的二维高斯函数为基础模型来表征车辆表面具有相同的风险强度,一般交通环境风险场模型建立如下:

$$\left\{\begin{aligned} E_2(x,y) &= k_3 M_i \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\left[\frac{(x-x_0)^2}{\tau_x^2}\right]^\beta + \left[\frac{(y-y_0)^2}{\tau_y^2}\right]^\beta\right\}\right\} \\ \tau_x &= \sqrt{\left(\frac{L_1}{L_2}\tau_0 + \cos\theta_a\right) \cdot \frac{\omega_1}{10}(|\mathbf{a}_i| + |\mathbf{v}_i|)} \\ \tau_y &= \sqrt{(\tau_0 + \cos\theta_a) \cdot \frac{\omega_1}{10}(|\mathbf{a}_i| + |\mathbf{v}_i|)} \end{aligned}\right. \quad (3)$$

式中: E_2 、 k_3 为一般交通环境风险场势场的强度、系数; M_i 为车辆 i 的等效质量,与车辆质量 m 有关; (x_0,y_0) 为车辆中心坐标; β 为高阶系数; τ_x 、 τ_y 分别为一般交通环境风险场势场在 x 、 y 方向上的分布因子; τ_0 为待定常数; $\mathbf{v}$ 为车辆速度, m/s^2 ; $\mathbf{a}$ 为车辆加速度, m/s^2 ; θ_a 为空间某一点与 $\mathbf{a}$ 之间的夹角, $(^\circ)$, 范围为 $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 。

当车辆航向角为 φ 时,参照文献[12]进行坐标变换,以逆时针方向为正方向,将式(3)中的风险场模型坐标 (x,y,E_2) 投影在 xoy 坐标平面上,绕点 (x_0,y_0) 逆时针旋转 φ 。

2.2.2 衍生交通环境风险场

在实际驾驶过程中,由于驾驶人决策和车辆的运动状态随环境动态调整甚至产生突变,该车辆周围其他驾驶人为规避该车辆运动状态突变的风险,在该车辆决策未完成前一般不会轻易改变自身车辆运动状态。结合这种客观现象,提出衍生交通环境风险场。考虑到驾驶人决策取消时的车辆状态,将衍生交通环境风险场定义为在某瞬时刻,车辆原地直线加速或减速所形成的风险,其模型构建参照一般交通环境风险场:

$$\left\{\begin{aligned} E_3(x,y) &= k_4 M_i \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\left[\frac{(x-x_0)^2}{\tau_x^2}\right]^\beta + \left[\frac{(y-y_0)^2}{\tau_y^2}\right]^\beta\right\}\right\} \\ \tau_x &= \sqrt{\left(\frac{L_1}{L_2}\tau_0 + \cos\theta_{\hat{\mathbf{a}}}\right) \cdot \frac{\omega_1}{10}(|\hat{\mathbf{a}}|)} \\ \tau_y &= \sqrt{(\tau_0 + \cos\theta_{\hat{\mathbf{a}}}) \cdot \frac{\omega_1}{10}(|\hat{\mathbf{a}}|)} \end{aligned}\right. \quad (4)$$

式中: E_3 、 k_4 分别为衍生交通环境风险场势场的强度、系数; $\hat{\mathbf{a}}$ 为车辆可能改变运动状态时的加速度, m/s^2 ; τ_x 、 τ_y 分别为衍生交通环境风险场势场在 x 、 y 方向上的分布因子; $\theta_{\hat{\mathbf{a}}}$ 为空间某点与 $\hat{\mathbf{a}}$ 方向之间的夹角, $(^\circ)$, 范围为 $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 。

2.3 管理控制风险场

管理控制风险场是交通管控对车辆运行形成的约束,即出匝车辆必须在禁止跨越同向车道线前换道至车道1和过渡段。借鉴动能公式,具体风险场模型如下:

$$\left\{\begin{aligned} E_4 &= \frac{1}{2}k_5 \cdot M_i \left(\frac{\omega_1}{h_3}\right)^2 \\ v_{cn} \cdot (t_b + t_0) \cdot \tan\theta_n &= \sum l_n \\ t_0 &= 3(n-1) \end{aligned}\right. \quad (5)$$

式中: E_4 、 k_5 分别为管理控制风险场势场的强度、系数; h_3 为车辆到当前车道强制换道截面的垂直距离, m ; v_{cn} 为车道 n 的最低限速, m/s ; t_b 为换道时间, s ; t_0 为连续变道最短间隔时间, 单次间隔为 3 s ; θ_n 为车道 n 的强制换道截面与匝道鼻端连线夹角, $(^\circ)$; l_n 为车道 n 的宽度, m 。

强制换道截面是在无他车干扰且安全行驶情况下,从行驶车道变换至过渡段所需最短行驶距离的位置,具体如图4所示。管理控制风险场在强制换道截面处产生,指向来车方向,势场分布如图5所示。

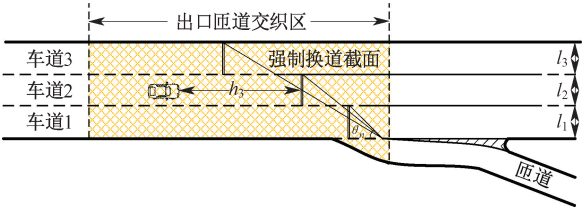


图4 强制换道截面

Fig.4 Forced lane change section

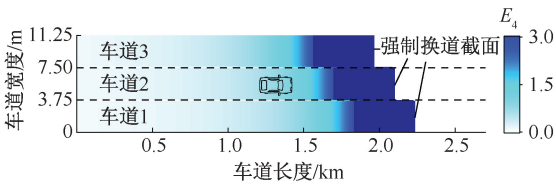


图5 单车情况下各车道管理控制风险场势场分布

Fig.5 Potential field distribution of each lane management control risk field in case of single vehicle

2.4 风险场作用机制

环境风险场影响着车辆的跟驰状态,高速公路

出口匝道交织区出匝车辆所受环境风险场为道路环境风险场与交通环境风险场的叠加,即

$$E = E_1 + \max \{ E_2, E_3 \} \tag{6}$$

管理控制风险场影响着出匝车辆的换道行为,车辆越临近强制换道截面,风险强度越大,此风险表现为驾驶人换道紧迫感,紧迫感越强,换道意愿更明显,更容易产生换道行为。

3 基于风险场模型的仿真试验

3.1 车辆运动模型与换道机制

3.1.1 均加速(CA)运动模型

基于物理特征的运动模型可有效预测物体运动轨迹和短期的碰撞风险预测^[13],因此,采用匀加速(Constant Acceleration, CA)运动模型作为车辆运动模型。仿真情境下,车辆信息在每过仿真步长 Δt 后做一次更新,将时间离散化后代入CA运动模型,通过车辆在 Δt 内的横向、纵向坐标、速度、加速度的变化情况即可求得 t 时刻车辆位置的预测轨迹。

3.1.2 换道机制

采用车辆行驶前方风险阈值^[14]触发换道的机制,换道控制程序流程如图6所示。

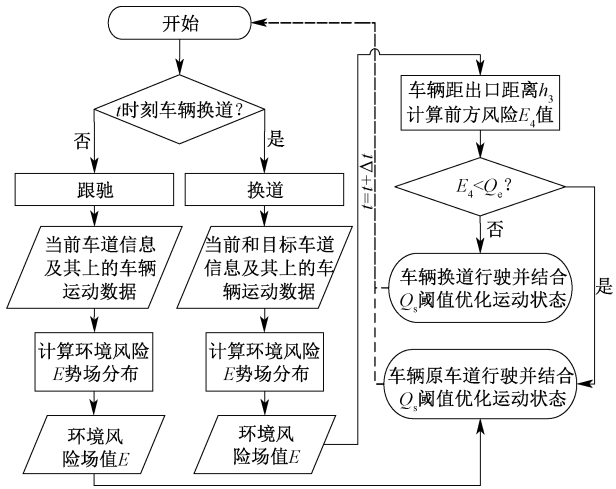


图6 换道控制程序流程

Fig. 6 Flow chart of lane change control program

其中具体限制条件如下:

1) 换道决策阈值 Q_e 。为车辆行驶前方风险的总和。以管理控制风险 E_4 作为驾驶人感受到的前方风险总和,当驾驶人感受到 E_4 增大且临近 Q_e 时,其换道意愿增强。

2) 安全接受阈值 Q_s 。为空间中某一点受道路环境、交通环境风险强度的最大值。驾驶人在临近 Q_s 时,车辆将在势场强度小于 Q_s 的空间中选取路

径进行换道。

3) 渐变段入口前2 km范围内已在最右侧车道的车辆直到驶入渐变段前不再进行任何换道。

4) 车辆驾驶行为约束。以稳定性和舒适性要求为限制,对速度、加速度、航向角、航向角变化率作出约束:

$$\begin{cases} v_{cn} \leq |v| \leq v_{zn} \\ |a| \leq a_u \end{cases}, \quad \begin{cases} \varphi \leq 15^\circ \\ \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \leq 5^\circ/s \end{cases} \tag{7}$$

式中: v_{zn} 为车道 n 的最大限制速度,m/s; a_u 为安全加速度,m/s²,与车辆和环境条件有关。

结合表4中换道轨迹数据集和风险场模型计算各类驾驶风格驾驶人的阈值,结果见表6。

表6 阈值计算

Table 6 Threshold calculation

阈值	计算模型	谨慎型	普通型	激进型	期望值
Q_e	式(5)	1.14	1.18	1.19	1.17
Q_s	式(6)	1.45	1.49	1.50	1.48

3.2 仿真分析

为验证文中风险场模型以及换道决策机制的合理性,将基于风险场模型的换道决策程序在Matlab中仿真。根据行车轨迹数据拟合标定风险场模型待定参数,具体选取见表7。

表7 模型参数取值

Table 7 Model parameter values

参数	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	β	τ_0
取值	1	0.5	10	10	1	2	1

仿真场景设计如图7所示,路段全长2.5 km,仿真研究对象(车辆 $i=0$)从车道2换道驶出高速进入匝道。交通环境中各车辆仿真参数见表8,其中,各车辆的速度值和加速度值为初始设定值。研究对象驾驶风格设置为待定,可通过改变其驾驶风格以模拟不同驾驶风格驾驶人在相同环境下的风险感知情况和换道行为。

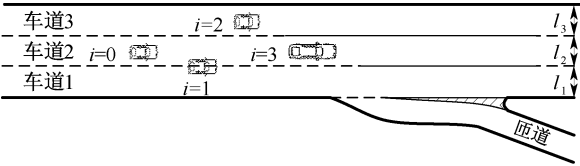


图7 仿真模拟场景

Fig. 7 Simulation scene

3.2.1 车辆跟驰风险分析

图8a、图8b分别为仿真情境中考虑和未考虑衍生交通环境风险情况下,跟驰车受到换道车辆交

表 8 仿真车辆参数取值
Table 8 Parameter value of simulation vehicles

仿真参数	驾驶风格	L_1 /m	L_2 /m	m /kg	v /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	a /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	$\hat{a}$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	a_u /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	v_{cn} /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_{zn} /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	l_n /m
车辆 <i>i</i>	0	待定	5	2 000	20	0	—	13	16.7	30.6	3.75
	1	普通型	5	2 000	20	0	-2				
	2	谨慎型	5	2 000	25	2	—				
	3	激进型	8	3 000	25	-2	—				

通环境风险的势场分布情况,图 8c 为车辆车头间距时间变化图。从图 8 可以看出,衍生交通环境风险更符合实际驾驶情况。

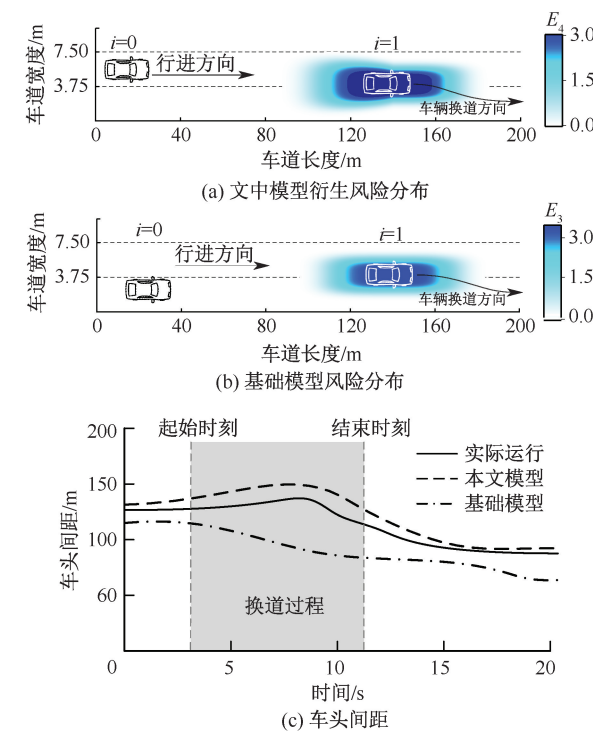


图 8 衍生交通环境风险场势场与车头间距关系
Fig. 8 Distribution of derived traffic environment risk field potential field

通过仿真分析跟驰状态下,谨慎型、普通型、激进型驾驶人感知风险分布如图 9 所示。

激进型驾驶人由于风险感知水平较低,其安全接受范围较普通型驾驶人更大;谨慎型驾驶人较高的风险感知水平,其安全接受范围较普通型驾驶人更小,仿真结果符合驾驶人风格习惯。

3.2.2 车辆换道时刻分析

选取 3 类驾驶风格各 1 名驾驶人仿真换道轨迹分析说明,图 10a 为 3 类驾驶人行车前方风险 E_4 计算值达到换道决策阈值 Q_c 的预测时刻,分别为 96.2、105.2、114.2 s;图 10b 为仿真模拟中出口前最后一次换道的横向位移曲线,第 1 个拐点为换道起

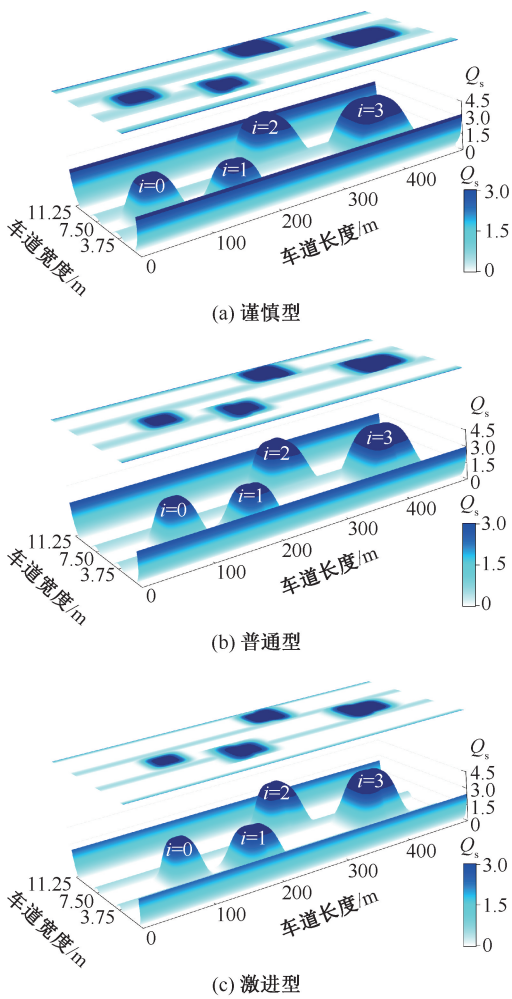


图 9 3 类驾驶人 Q_c
Fig. 9 3 types of driver's Q_c diagram

始时刻,3 类驾驶人换道时刻分别为 97.4、104.8、113.8 s;与仿真时刻相比,预测时刻误差范围小于 1.5%。图 10c 为车辆实际换道时刻箱线图,模型预测与仿真结果均在实际范围内。结果可知:换道决策阈值时刻与模拟仿真换道时刻接近,且均在实际换道时刻范围内。

4 结 论

1) 通过分析驾驶风格问卷调查聚类结果,驾驶

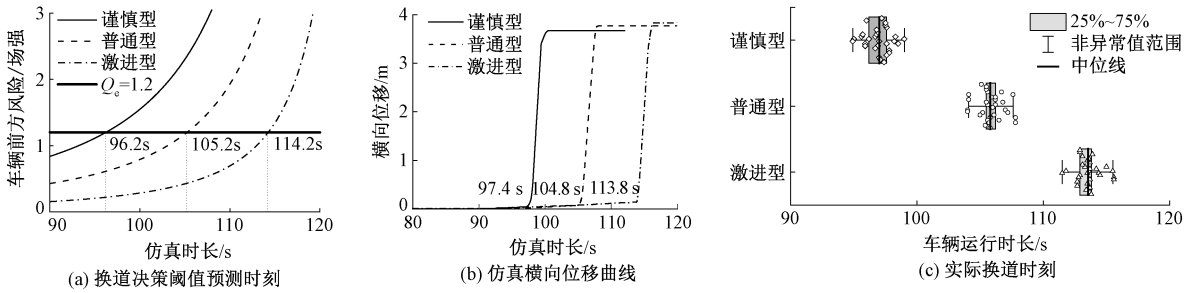


图 10 换道仿真结果

Fig. 10 Results of lane change simulation

人驾驶风格和换道风格相关性系数达 0.868,表明驾驶人换道风格与驾驶风格具有强相关性。

2) 通过分析车辆轨迹数据,谨慎型、普通型、激进型驾驶风格驾驶人运动风险感知系数分别为 0.71、1、1.17,距离风险感知系数分别为 0.62、1、1.39,系数越大其风险感知水平越高。

3) 仿真结果表明:在相同交通环境下,谨慎型驾驶风格驾驶人所受风险强度>普通型>激进型,谨慎型驾驶人临界换道距离>普通型>激进型。

4) 管理控制风险场模型预测得到谨慎型、普通型、激进型驾驶人换道决策阈值时刻分别为 96.2、105.2、114.2 s,与仿真换道时刻 97.4、104.8、113.8 s 相比误差小于 1.5%。

参考文献

- [1] NHTSA. Traffic safety facts 2001[R], 2002.
- [2] 孟祥海,林兰平.高速公路分合流区潜在事故风险研究[J].中国安全科学学报,2015,25(8):164-170.
MENG Xianghai, LIN Lanping. Research on potential crash risk in freeway merging and diverging areas[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(8):164-170.
- [3] 冯嵩,钱宇彬,曲现国,等.基于安全距离的雾天车辆换道轨迹模型[J].中国安全科学学报,2022,32(7):165-171.
FENG Song, QIAN Yubin, QU Xianguo, et al. Vehicle lane-changing trajectory model in foggy weather based on safety distance[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(7):165-171.
- [4] 王建强,吴剑,李洋.基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J].中国公路学报,2016,29(1):105-114.
WANG Jianqiang, WU Jian, LI Yang. Concept, principle and modeling of driving risk field based on driver-vehicle-road interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016,29(1):105-114.
- [5] LI Linheng, GAN Jing, JI Xinkai, et al. Dynamic driving risk potential field model under the connected and automated vehicles environment and its application in car-following modeling[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020,23(1):122-141.
- [6] 安林芳,陈涛,成文国,等.基于人工势场算法的智能车辆路径规划仿真[J].汽车工程,2017,39(12):1451-1456.
AN Linfang, CHEN Tao, CHENG Aiguo, et al. A simulation on the path planning of intelligent vehicles based on artificial potential field algorithm[J]. Automotive Engineering, 2017,39(12):1451-1456.
- [7] 朱乃宣,高振海,胡宏宇,等.基于交通风险评估的个性化换道触发研究[J].汽车工程,2021,43(9):1314-1321.
ZHU Naixuan, GAO Zhenhai, HU Hongyu, et al. Research on personalized lane change triggering based on traffic risk assessment[J]. Automotive Engineering, 2021,43(9):1314-1321.
- [8] MARTINUSSEN L M, HAKAMIES-BLOMQVIST L, MOLLER M, et al. Age, gender, mileage and the DBQ: the validity of the driver behavior questionnaire in different driver groups[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013,52: DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.036.
- [9] 卢文岱.SPSS for Windows 统计分析:第3版[M].北京:电子工业出版社,2006:480.
- [10] 林志坤,吴小竹.考虑驾驶员驾驶风格的车辆跟驰模型[J].地球信息科学学报,2023,25(9):1798-1812.
LIN Zhikun, WU Xiaozhu. Car-following model considering driver's driving style[J]. Journal of Geo-information Science, 2023,25(9):1798-1812.
- [11] 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.
WU Jian. Research on driver-vehicle-road factors considered driving risk evaluation method[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [12] 田野,裴华鑫,晏松,等.车路协同环境下行车风险场模型的扩展与应用[J].清华大学学报:自然科学版,2022,62(3):447-457.
TIAN Ye, PEI Huaxin, YAN Song, et al. Extended driving risk field model for i-VICS and its application[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022,62(3):447-457.
- [13] LEFÈVRE S, VASQUEZ D, LAUGIER C. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles[J]. ROBOMECH Journal, 2014,1(1): DOI:10.1186/s40648-014-0001-z.
- [14] 王妍.高速公路出口匝道强制换道研究[D].西安:长安大学,2020.
WANG Yan. The lane-changing research and safe operation of the ramp exit on expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

作者简介: 胡立伟 (1978—),男,山东潍坊人,博士,教授,主要从事交通安全、城市交通流特性分析及控制理论与方法等方面的研究。E-mail:liweihukm@kust.edu.cn。