

文章编号:1009-6094(2023)06-1739-13

高速公路隧道与互通出入口小净距路段行车风险评价方法*

张 驰¹,王 博¹,杨 坤²,黄春富^{1,3},
张 宏^{1,4},王 韩¹

(1 长安大学公路学院,西安 710064;

2 深圳市综合交通设计研究院有限公司,广东深圳 518003;

3 广西交通设计集团有限公司,南宁 530029;

4 内蒙古大学交通学院,呼和浩特 010021)

摘 要:为评价隧道与互通出入口小净距路段的行车风险,提出了基于交通流仿真的行车风险预测模型。首先,在明确小净距路段长度的基础上,定性分析其行车风险,从非交通流和交通流的角度选取风险影响因素;其次,通过实地调研采集的视频数据对交通仿真模型进行标定,结合风险与影响因素的关系,将交通冲突率作为风险评价指标;然后,通过单因素和多因素试验量化了风险影响因素和风险评价指标间的关系,揭示了小净距路段的风险成因,利用多元非线性回归法构建了风险度量方程,并采用 K 均值聚类算法将风险评价标准划分为5个等级;最后,选取某些山区高速公路隧道与互通出入口小净距路段对风险预测模型进行验证。结果表明:净距长度、主线设计速度、交通量、大车型比例、转向交通量比例、车道数对出入口路段的行车风险具有显著性影响;对于出口路段,“指数函数+幂函数”组合形式的拟合度较好, $R^2=0.896$,对于入口路段,“二次多项式+指数函数”组合形式的拟合度较好, $R^2=0.855$,模型评价结果与实际事故数的趋势基本一致,可适用于小净距路段行车安全风险评价。

关键词:安全工程;风险预测模型;微观交通流仿真;小净距路段;互通;行车风险

中图分类号:X951 **文献标志码:**A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1925

0 引 言

随着我国山区高速公路的大量建设,路网密度不断增加,受路线走廊带布设、复杂地形及社会经济条件等客观因素的限制,出现了许多隧道与互通出入口间距过近的工程实例,对交通安全运行的影响日渐突出。美国相关的调查研究表明^[1],隧道与互通出入口间路段的事故率随着其间距增大而减小。

邓国忠等^[2]统计2009—2012年浙江省甬金、长深、沈海等21处高速公路互通式立交的319起交通事故,发现事故率与净距长度间存在较高的相关性,伤亡事故主要发生在隧道出口与渐变段起点之间及出口三角端部,其中,隧道出口至减速车道渐变段起点间的事故伤亡比例最大,高达40%。因此,对高速公路隧道与互通出入口小净距路段的行车风险进行研究,对于提高高速公路安全水平具有重要意义。

近年来,国内外相关学者对隧道与互通出入口小净距路段展开了一定的研究。国外主要是国家标准和规范对最小间距或最小净距做出简单的规定:如欧盟的隧道标准规定车道数变化点距隧道洞口的距离不低于10 s的限制速度行程;德国道路规范根据出入主线的交通需求和预告标志设置情况,来规定间距值,但未明确具体值要求;日本《高速公路设计要领》规定互通与其他设施的最小间距应由指路标志和行车交织距离共同决定,最小间距的标准值为4 km,特殊值为2 km。国内对于净距长度的研究较多,软件仿真法^[3]、安全距离法^[4-5]以及2种方法相互结合研究^[6-7]是目前主要的研究手段。其中软件仿真法主要以交通冲突率和通行能力为评价指标,从交通流的角度研究净距长度;安全距离法则综合考虑交通运行特性、道路条件、驾驶行为及明暗适应等因素,基于车道变换理论给出相应的净距长度计算模型及推荐值。

此外,部分学者从风险评价的角度对隧道与互通出入口的安全性进行研究,主要包括风险致因、研究手段等方面。对于风险致因的研究,主要是通过数理统计方法对交通实测数据与道路条件、事故数据等的关系进行分析、建模,以此辨识和评估风险源,如候树展等^[8]、张驰等^[9]先后通过该方法研究了交通量、车型比例、车速等交通流参数对事故风险的影响,辨识了各类事故风险致因的分布规律;崔健等^[10]发现隧道入口实行可变限速能提高行车安全性,但未针对小净距路段的特殊性进行研究。对于风险研究手段的研究,主要是从车辆加减速或变换车道的角度研究该路段的行车安全性,将风险理论与模型结合,采用一定指标量化风险,进而划分风险等级,较少与道路的交通流相结合。如2010年,Broeren等^[11]利用风险计算理论,通过分析特定条件下隧道出入口的车辆行驶安全性,从分合流交织距离、识别洞口距离和适应光线距离分析了隧道与互通最小净距,并提出对于净距不满足路段,应该采取风险补偿措施,为研究小净距路段行车风险奠定

* 收稿日期:2021-11-01

作者简介:张驰,教授,博士,从事道路交通安全、道路正
向设计研究,zhangchi@chd.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)

基础。2011年,阎莹等^[12]针对高速公路出入口区域交通流特性,首次以临界减速度和不安全密度指数为评价指标,建立了行车风险评价模型,并根据安全风险管理规定与人机工程学原理,确定了风险等级和评价标准。此外,胡江碧等^[13]综述了交通冲突理论在高速公路互通式立交安全性评价中的应用。该理论能够较好地用于交通量较大时高速公路分合流路段的交通冲突评估。

综合来看,隧道与互通出入口间距离过近的情况在国外较少,而国内对于其研究主要集中在风险致因及净距长度的计算方法上,其计算结果主要是考虑在道路自由流状态下的单车所需长度,此时车辆间相互干扰较小,计算结果是较为适用的;当净距小于一定值,出现较高行车风险更多是受周边车流的影响,而目前风险量化的研究主要是基于车辆加减速或变道的角度,其研究成果的适用性需进一步考虑。交通流参数作为影响小净距路段行车风险的直接因素,需要进一步量化交通流参数与行车风险之间的关系。为此,本文首先结合已有的研究成果从定性角度分析车速、净距长度、车道数等非交通流因素及交通流因素对小净距路段行车风险的影响,从交通流的角度选取交通冲突率作为评价指标,基于MATLAB提取的实测数据对交通仿真模型进行了构建和标定。在分析不同因素组合工况下的行车风险后,建立了小净距路段行车风险度量方程和评价模型。最后结合实际工程案例对预测模型的可行性进行验证。

1 小净距路段行车风险分析

1.1 小净距路段

JTG D20—2017《公路路线设计规范》(以下简称规范)和JTG/T D21—2014《公路立体交叉设计细

则》均对隧道与互通出入口净距做出了明确的定义:隧道口至互通出口匝道渐变段起点或入口匝道渐变段终点的距离。以双向四车道高速公路为例,表1列举了不同研究方法下的隧道与互通出入口路段净距值,显然,由于不同学者的研究方法和侧重点不同,其最小净距长度存在较大的差异;而以交通冲突为评价指标,基于VISSIM微观交通流仿真软件模拟所得到的净距长度值介于规范值与安全距离法计算值之间。为避免不同研究方法造成的差异性,研究不同速度下的行车风险,本文统一将隧道出口与互通出口间净距长度小于1 000 m、互通入口与隧道入口间净距长度小于200 m的路段定义为小净距路段。

1.2 风险影响因素选取

在隧道与互通出入口路段的行车过程中,驾驶人需要不断地获取道路、交通流以及标志标线等相关信息,并根据所获取的有效信息采取相应的驾驶行为,主要包括明适应过程、识别过程、变道过程以及安全确认过程。行车过程中获取信息的复杂程度和处理时间直接影响着驾驶人的反应时间,进而在一定程度上决定了行车风险大小,主要包括前方车辆突然减速或变向导致的追尾冲突、相邻车辆变道导致的变道冲突。文献[6]研究表明,换道需要一定的距离,对于不同的道路条件、交通状况,车辆完成这个行车过程所需要的净距长度也不同。本文将风险影响因素分为非交通流因素和交通流因素,非交通流因素主要考虑净距长度、主线设计速度、车道数;交通流因素主要考虑交通量、车型比例、转向交通量比例。

2 交通仿真模型构建

由于现场采集的数据有限,采用该数据分析、构

表1 不同研究方法下隧道与互通出入口路段净距值

Table 1 Distance between tunnel and interchange under different research methods

代表性研究方法	出口路段设计速度/(km·h ⁻¹)			入口路段设计速度/(km·h ⁻¹)		
	120	100	80	120	100	80
规范	500	400	300	125	100	80
安全距离法 ^[5]	750	560	400	110	90	75
	850	700	550			
VISSIM 仿真法 ^[7]	700	700	600			

注:1)出口路段为单向双车道,入口路段不区分车道数。2)出口净距=明适应距离+等待插入间隙距离+判断可插入间隙距离+换道所需距离+安全距离;入口净距为车辆驶入主线后调整车速和位置等所需距离;安全距离法的出口还考虑了读取预告标志所行驶的距离。3)VISSIM仿真法以交通冲突率为评价指标。

建安全评估模型来研究小净距路段的行车风险,其适用性存在一定的局限性,不能较好地反映各工况下的行车风险,而近年来仿真软件的广泛应用弥补了这一不足。VISSIM 是一款微观交通流仿真软件,采用参数化建模理念,能仿真分析在交通组成、冲突规则等众多条件下的交通流状态。本文在实测数据的基础上运用 VISSIM7.0 软件,对隧道与互通出入口小净距路段行车风险仿真研究,其中交通仿真模型构建由四部分组成:数据采集、构建仿真模型、参数标定及结果输出。

2.1 数据采集

2.1.1 视频数据采集

以西安市为中心,发散式对周边多处已处于运营阶段的高速公路隧道与互通出入口小净距路段进行搜集,各路段的地图分布见图 1,概况见表 2。

本研究采用大疆精灵 3 航拍无人机开展数据采集(如图 2 所示),其采用 GPS/GLONASS 双模卫星定位模块,水平和竖向悬停精度分别为 $\pm 0.1\text{ m}$ 和 $\pm 1.5\text{ m}$,精度较高。采集时环境条件为天气良好、可见度较好的白天。收集的视频为 60 帧/s、1 200 万像素。同时为保证道路的交通量处于一般水平,

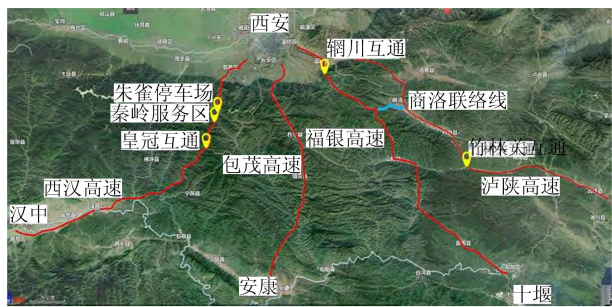


图 1 小净距路段工程案例分布

Fig. 1 Distribution of short distance sections

采集时间为 9:30—11:30、14:30—17:00。根据《道路交通标志与标线:限制速度》规定,设计速度为 80 km/h 时,断面测速样本不应少于 110 辆。

2.1.2 基于 MATLAB 视频数据提取

为提取视频数据,本文采用背景差分法^[14]进行目标车速检测,先获取背景信息,对采集的目标图像减去背景信息,得到前景目标并进行二值化处理,实现对前景目标的检测,该方法目前在目标检测及跟踪中具有广泛应用,具体如下。

1)利用 VideoReader 函数读取视频数据,得到图像序列,利用 read 函数获取各采集视频的静态图像帧序列。

2)在采样间隔内,视频中每个像素位置上背景像素出现的概率要远大于目标像素出现的概率,基于此,将这个像素位置上的像素平均值作为该点的背景图像像素,从而提取视频不同阶段的背景图像,并应用 rgb2gray 和 medfilt2 函数分别进行灰度处理和去噪处理,得到中值滤波后的背景图像和目标帧图像。

3)用 imabsdiff 函数对处理后的目标帧图像与背



图 2 航拍无人机

Fig. 2 Aerial drone

表 2 小净距路段工程案例概况一览表
Table 2 Overview of short distance sections

公路名称	互通/服务区	隧道	隧道长度/m	净距长度/m	
				出口路段	入口路段
西汉高速	朱雀停车区	朱雀隧道	6 500	10	65
	秦岭服务区	秦岭 1 号隧道	6 144	25	40
	秦岭服务区	秦岭 2 号隧道	6 200	28	35
	皇冠互通	无名隧道	350	147	234
福银高速	辋川互通	辋川隧道群	1 600	600	630
沪陕高速	竹林关互通	州河北隧道群	1 000	28	25

注:设计速度为 80 km/h,双向四车道。

景图像做差分运算,此时得到的车辆像素点的灰度值是连续的,车辆轮廓不明显,需进行二值化处理:当差分图像中某一点的灰度值小于阈值时,将该点灰度值改成0,当其灰度值大于阈值时,将该点灰度值改成1。根据文献[14],灰度阈值取0.12。此时,图像中灰度值为1的区域就是车辆,由此计算当前时间序列下该车的中心点坐标。

4)利用路面标线组成检测标定区,应用平面四边形变换算法计算实际空间坐标与其对应图形坐标间的转换系数;利用该转换系数,由图像坐标获取地面坐标,计算两目标帧图像间的纵向、横向距离,考虑本文调研无人机采集的视频频率为60帧/s,由此可以计算车辆的横向和纵向行驶速度。

2.2 VISSIM 模型

2.2.1 道路模型

道路模型示意图如图3所示,其相关属性参数:行车道宽度为3.75 m;主线设计速度和车道数按照表3进行设置;隧道路段限速为80 km/h;逐级限速区分别按主线设计速度75%、50%进行设定;单车道匝道设计速度为40 km/h;通过预试验验证了道路线形在交通仿真中对车辆的运行速度基本不产生影响,所以平纵线形采用规范值。仿真驾驶模型为Wiedemann 99模型;选取客车(Car)和重载货车(HGV)作为试验车型;交通量和交通组成按表3进行设置;采用路径设置功能对转向比例进行设置;由于交通流路线轨迹不同,对存在冲突的路段设定优

先通行的规则;各次试验均布设6处数据检测器:隧道出(入)口、净距段中间点、减(加)速车道渐变段起点和终点、减(加)车道中点、减(加)车道终点对应的主线位置,从而获取该点位各车型平均速度,以便进行仿真参数标定;不考虑天气因素。各仿真方案均进行3次试验,取均值作为最终结果。每次试验设定仿真时间为4 500 s,[0,900) s 主要实现交通流稳定行驶,[900,4 500] s 为有效数据采集的有效时间,持续1 h。并设置仿真轨迹数据输出到“trj”格式的二进制文件。

2.2.2 模型校准

在VISSIM 7.0中,车辆跟驰、变道等微观模型的驾驶行为参数较多且相互关联,不能逐一进行标定。因此,本研究主要校准对仿真结果有较为显著影响的参数。据相关研究^[15]发现,Wiedemann 99模型中 C_{c0} (停车间距)、 C_{c1} (车头时距)、 C_{c2} (跟车变量)和最大减速度对冲突数具有较大影响。其中 C_{c0} 采用默认值,为1.50 m; C_{c2} 指车辆在跟随另一辆

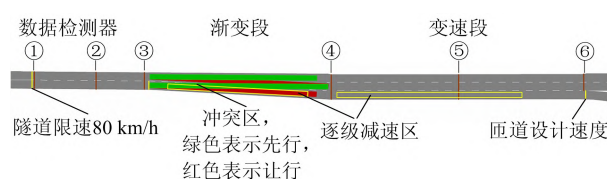


图3 VISSIM 道路模型

Fig.3 VISSIM road model

表3 考虑不同条件下的仿真策略

Table 3 Simulation strategies considering different conditions

编号	净距长度 L/m		主线设计速度 $v/$ ($km \cdot h^{-1}$)	交通量 (Q/N)/ ($veh \cdot h^{-1} \cdot ln^{-1}$)	大型车比例 $H/\%$	转向交通量 比例 $P/\%$	单向车道数 $N/道$	策略
	出口路段	入口路段						
1	50, 100, 300, 600, 1 000	20, 50, 100, 150, 200	80	600	10	10	2	单独作用
2	300	100	80, 90, 100, 110, 120	600	10	10	2	
3	300	100	80	200, 400, 600, 800, 1 000	10	10	2	
4	300	100	80	600	0, 10, 20, 30, 40	10	2	
5	300	100	80	600	10	0, 5, 10, 20, 30	2	
6	300	100	80	600	10	10	2, 3, 4	

车行驶时,根据前车的速度和加速度调整自己速度的程度,根据本研究航拍得到的车辆间距离及速度,无法体现出由驾驶员反应造成的该数值细微差别,故该值采用默认值为 4;结合 VISSIM 用户手册可知车辆间的跟车平均安全距离 $= C_{c0} + vC_{c1}$,本研究认为车辆变道前均为跟车状态,将根据 2.1.2 节得到的车辆距离按大到小排,取第 85% 的值作为跟车平均安全距离,出口路段为 38.84 m,入口路段为 35.72 m,考虑运行速度 v 时刻改变,故 v 按设计速度 80 km/h 取值,故出入口路段的 C_{c1} 分别为 1.68 s、1.54 s;根据 2.1.2 节得到的车辆速度可以计算出车辆最大减速度,出入口路段分别为 4.74 m/s²、4.46 m/s²;其余参数采用默认值。

另外,速度对冲突数的影响也较大,故本研究也对速度进行标定,并作为模型校准的评价标准。根据“五点标定法”(即累计频率为 0、15%、50%、85%、100%)分别对变速车道段和净距段的期望速度分布曲线进行仿真标定,以仿真中布设的 6 处数据检测点位(见图 3)的路段平均速度为输出指标,结合实测速度数据(取相应位置的平均值),控制仿真结果的相对误差在 5% 以内,得到期望速度分布曲线最终的标定结果,其标定过程见表 4。

由于实测数据来源于双向四车道、设计速度 80 km/h 的高速公路,因而,对于其他工况下的仿真期望速度分布,参考实测数据及 JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》进行标定。

2.3 风险评价指标

根据 1.2 节的风险影响因素定性分析可知,隧道与互通出入口小净距路段的行车风险最直接体现为交通冲突。交通冲突实质上是不安全交通行为的表现形式,可能会导致交通事故,两者理论上存在换

算系数,但在实践中,交通事故致因错综复杂,该换算系数很难获得。相关研究表明^[16],冲突率和事故率存在正相关,在一定程度上可客观反映道路行车风险程度。因此,本文取交通冲突率作为隧道与互通出入口小净距路段的行车风险评价指标,记为 f ,见式(1)。

$$f = 1000 \frac{N_1}{QL} \tag{1}$$

式中 f 为冲突率,次/(veh·km); N_1 为小时冲突(指追尾、变道冲突)次数,次/h;; Q 为通过该路段的交通量,veh/h; L 为隧道与互通出入口路段的净距长度,m。

3 风险影响因素量化

3.1 单因素仿真分析

为量化隧道与互通出入口小净距路段风险影响因素与风险评价指标的关系,本文根据第 2 节构建的仿真模型进行仿真。以碰撞时间 TTC(指该时间段内两车不采取任何行为将发生碰撞)为交通冲突辨别指标,根据文献[15],其阈值取 4.2 s,利用美国联邦公路局的仿真冲突分析软件 SSAM 转译“tj”的内容,筛选得出隧道与互通出入口净距路段的交通冲突数 N_1 ,包括追尾、变道冲突,其冲突角度分别为 0~15°、15°~85°。结果如图 4 所示。

1)从图 4(a)、(b)可以看出,随着隧道与互通出入口净距长度的增加,交通冲突率呈下降趋势。出口路段净距长度小于 600 m、入口路段净距长度小于 80 m 时,净距较短,可能会导致驾驶人进行强制变道,发生交通冲突的概率大大增加,故浮动速度较快;超过上述临界值时,驾驶人有较为充分时间反应、变道,交通冲突率较低且下降速度变缓。

表 4 速度标定过程
Table 4 Speed calibration process

位置	车型	标定所用数据	位置					
			隧道洞口	净距段中间点	渐变段起点	渐变段终点	变速车道中间点	变速车道主线段
出口路段	小/大型车	实测速度/(km·h ⁻¹)	90.2/81.3	81.9/78.2	70.6/63.6	58.9/52.3	53.5/45.4	86.9/83.6
		仿真速度/(km·h ⁻¹)	88.9/82.9	85.4/79.6	72.8/62.1	60.1/50.5	55.9/43.2	84.3/80.6
		相对误差/%	1.44/1.97	4.27/1.79	3.12/2.36	2.04/3.44	4.49/4.85	2.99/3.59
入口路段	小/大型车	实测速度/(km·h ⁻¹)	85.6/78.9	84.9/80.3	78.4/75.3	81.3/81.2	72.3/66.9	90.2/82.6
		仿真速度/(km·h ⁻¹)	83.9/76.2	83.7/77.9	75.6/73.2	80.6/80.6	70.9/65.1	88.4/83.9
		相对误差/%	1.99/3.42	1.41/2.99	3.57/2.79	0.86/0.74	1.94/2.69	2.00/1.57

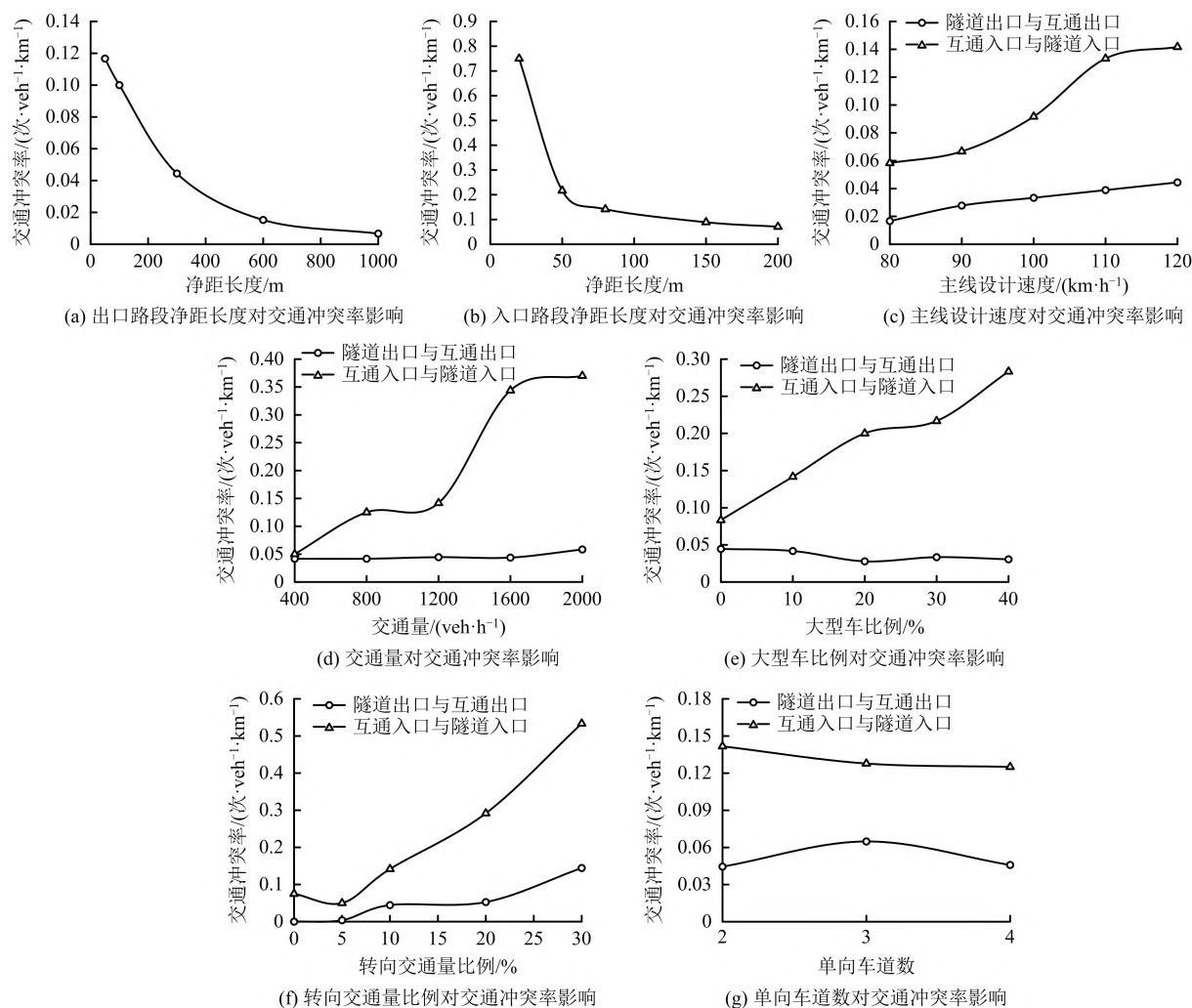


图4 各因素对交通冲突率的影响

Fig. 4 Influence of various factors on traffic conflict rate

2) 从图4(c)可以看出,主线设计速度在80~90 km/h时,出入口路段的冲突率变化幅度较小;在90~120 km/h时,易出现大小型车车速差明显,不利于车流稳定行驶,对于出口路段,仿真中其净距长度为300 m,车辆在驶出限速80 km/h隧道后,直行车流提速较慢,整体车速差较小,而对于入口路段,匝道上的车辆逐渐加速驶入主线,但由于前方接近隧道,车辆不会提速过高,会与以较高车速行驶的主线车流形成较大速差,故入口路段的交通冲突率较高且上升幅度较大。

3) 由图4(d)可以看出,交通量的增加均会增大隧道与互通出入口小净距路段的交通冲突率,且入口路段变化幅度远大于出口路段。当出口路段的交通量小于1600 veh/h时,车道占有率低,前后车辆的车头间距较大,车辆变道受周围车辆影响较小,此时换道所需的距离较短,换道容易,故交通冲突率波

动较小;当交通量大于1600 veh/h时,相邻车道出现可插入间隙以实现变道的概率低,内侧车道的车辆驶出主线时难以找到空隙进行变道,交通冲突率随交通量的增加而逐渐增大。入口路段的交通冲突率变化趋势与出口路段类似,当交通量小于1200 veh/h时,车辆间相互干扰较小,交通冲突率增长较慢;而交通量大于1200 veh/h时,车头时距逐渐变小,交通冲突率的增长速率变大;当交通量增加到1600 veh/h时,两车道的交通容量趋近饱和,冲突率变化趋近稳定。

4) 由图4(e)可以看出,随着大型车比例的增加,隧道与互通入口小净距路段的交通冲突率明显增大,而出口路段则呈下降趋势。对于出口路段,车辆刚驶出隧道,车速较为稳定,大型车比例的增大进一步限制了驶出车辆提速,交通冲突率小幅度下降。对于入口路段,大型车比例在0~20%时,外侧车道

上大型车对驶入主线车辆的干扰逐渐增大,尤其是载货量较大或满载的大型车,遇到小型车在入口路段强行变道时,紧急制动操作时难以在短时间内完成,入口路段的交通冲突率呈线性增加;当比例在 20%~30% 时,最外侧车道的大型车量数趋于饱和,交通冲突率增长速度变缓;大于 30% 时,大型车数量过多,驶入主线车辆不易找到可插入空隙进行变道,交通冲突率明显增大。

5) 由图 4(f) 可以看出,随着转向交通量比例的增加,隧道与互通出入口小净距路段的交通冲突率均呈增大趋势,且入口路段比出口路段变化幅度大。仿真中交通量为 1 200 veh/h、大型车比例为 10%,此时属于自由流状态,易于出现换道所需的可插入间隙。当驶出比例为 $[0, 5\%)$ 时,车辆容易完成换道驶出,交通冲突率变化较小;当驶出比例为 $[5\%, 20\%]$ 时,换道次数随之增加,直行车辆对转向车辆的影响增大,交通冲突率缓慢增加;当驶出比例大于 20% 时,车辆间隙难以满足众多车辆的换道需求,交通冲突率上升速度增大。当驶入比例为 0~5% 时,主线车辆谨慎驾驶,交通冲突率有所下降;当驶入比例大于 5% 时,不断出现驶入车辆的换道需求,受外侧车道大型车的影响,冲突率快速增大。

6) 由图 4(g) 可以看出,车道数对隧道与互通出入口小净距路段交通冲突率的影响并不明显。进一步分析可知,仿真时,出入口路段交通量按每车道进行确定,即单向车道数为 2、3、4 时总交通量分别为 1 200 veh/h、1 800 veh/h、2 400 veh/h,所以增加车道数的同时也增加了交通量。从图 4(d) 可知车道数不变时冲突率随着交通量增加而增大,结合图 4(g) 显示车道数增加、交通量增加时冲突率变化不大,所以交通量不变时,冲突率随车道数增加而减小。

为进一步量化各因素对隧道与互通出入口小净距路段行车风险的影响程度,利用 SPSS 软件分析各因素与交通冲突率的相关性,结果如表 5 所示。

结合相关性分析可知,交通冲突率与净距长度、大型车比例(仅出口路段)、车道数(仅入口路段)成反相关,与主线设计速度、交通量、大型车比例(仅入口路段)、转向交通量比例、车道数(仅出口路段)成

正相关。因此,可以判定以上因素均可作为隧道与互通出入口小净距路段的主要行车风险影响因素。

3.2 多因素仿真分析

通过单因素分析只得到了各因素对隧道与互通出入口小净距路段行车风险的单独影响,为综合考虑各类因素间的影响,需要进行多因素分析。由于风险因素较多,为减少仿真试验次数,对净距长度 L 、主线设计速度 V 、交通量 Q 、大型车比例 H 、转向交通量比例 P 共 5 个因素进行正交试验;为保证实验方案的合理性,对大型车比例和转向交通量比例为 0 的情况不进行考虑;分别选取双向四、六、八车道山区高速公路作为试验对象。采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表,具体见表 6。

利用 SSAM 软件筛选得到各组试验的交通冲突率,并根据式(1)计算得到各组交通冲突率,将各组冲突率带入式(2)~(5)中进行计算,得到各因素的检验统计量 F ,并与临界值进行比较即可得到各因素的显著性,结果如表 6 所示。

$$K_{jk} = \sum_{i=1}^c f_{jki} \quad (2)$$

$$S_j = \frac{b}{n} \sum_{k=1}^b K_{jk}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2 \quad (3)$$

$$S_e = \sum S_{\text{空列}} = S_6 \quad (4)$$

$$F_j = \frac{S_j/n_j}{S_e/n_e} \quad (5)$$

式中 f_i 为第 i 组试验的冲突率; f_{jki} 为第 j 列因素水平 k 对应的冲突率; K_{jk} 为第 j 列因素水平 k 对应的冲突率之和,次/(veh·km); c 为第 j 列因素水平 k 出现的次数,本文均为 5; b 为第 j 列因素的水平数,本文均为 5; n 为不同车道数下的试验总次数,本文为 25; S_j 为列偏差平方和; S_e 为误差项偏差平方和,本文等于空列偏差平方和,即表 6 中第 6 列因素的偏差平方和; n_j 为第 j 列因素的自由度,等于该列水平数减 1,本文均为 4; n_e 为误差项的自由度,本文误差项即为空列,为 4; F_j 为第 j 列因素的检验统计量。

由表 7 显著性检验结果可得以下结论。

1) 出口路段。

各因素对出口路段交通冲突率产生影响的强弱

表 5 各因素与交通冲突率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between various factors and traffic conflict rate

位置	净距长度	主线设计速度	交通量	大型车比例	转向交通量比例	单向车道数
出口路段	-0.908 2	0.986 4	0.797 7	-0.794 1	0.947 6	0.061 0
入口路段	-0.743 0	0.729 8	0.954 7	0.988 1	0.968 2	-0.933 3

表6 正交试验设计表
Table 6 Orthogonal design

试验 组号	净距长度 L/m	主线设计速度 $V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	交通量(Q/N)/ $(\text{veh} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ln}^{-1})$	大型车比例 H / %	转向交通量比例 P / %	空列
1	50(20)	80	350	10	5	1
2	50(20)	90	500	20	10	2
3	50(20)	100	750	25	15	3
4	50(20)	110	1 000	30	20	4
5	50(20)	120	1 250	40	30	5
6	100(50)	80	500	25	20	5
7	100(50)	90	750	30	30	1
8	100(50)	100	1 000	40	5	2
9	100(50)	110	1 250	10	10	3
10	100(50)	120	350	20	15	4
11	300(100)	80	750	40	10	4
12	300(100)	90	1 000	10	15	5
13	300(100)	100	1 250	20	20	1
14	300(100)	110	350	25	30	2
15	300(100)	120	500	30	5	3
16	600(150)	80	1 000	20	30	3
17	600(150)	90	1 250	25	5	4
18	600(150)	100	350	30	10	5
19	600(150)	110	500	40	15	1
20	600(150)	120	750	10	20	2
21	1 000(200)	80	1 250	30	15	2
22	1 000(200)	90	350	40	20	3
23	1 000(200)	100	500	10	30	4
24	1 000(200)	110	750	20	5	5
25	1 000(200)	120	1 000	25	10	1

注:括号中数值为互通入口与隧道入口间的净距长度水平划分值。

顺序依次是净距长度 L 、转向交通量比例 P 、交通量 Q 、大型车比例 H 、主线设计速度 V ,且不同车道数的影响程度也不一样。净距长度 L 对交通冲突率的影响显著高于其他因素,主要是因为净距长度直接影响着驾驶人驶出隧道洞口后变换车道的难易程度,主要体现为对换道时间需求;从整体来看,转向交通量比例 P 的显著程度略高于交通量 Q ,主要是因为仿真交通量处于稳定流范围内,而转向车流的存在增大了车辆间的影响,考虑到出口路段净距短,转向

车辆的车速较高,加上受直行车及货车的影响,随着转向比例增大,其对直行车的影响显著增大,大大增加了发生冲突的概率;尽管主线设计速度 V 较高,但事实上,隧道与互通出入口小净距路段受诸多因素影响,随着设计车速增大,车辆在经过该路段时整体的平均车速并没有增大太多,所以主线设计速度 V 的影响程度最弱。

2) 入口路段。

各因素对入口路段交通冲突率产生影响的强弱

表 7 显著性检验结果
Table 7 Significance test results

位置	影响因素	自由度	S			F			显著性
			2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道	
出口路段	<i>L</i>	4	0.462 1	1.514 0	6.516 5	15.629 0	16.668 2	15.549 8	显著
	<i>V</i>	4	0.093 9	0.414 4	2.069 0	3.176 1	4.562 1	4.937 0	显著
	<i>Q</i>	4	0.168 6	0.705 7	3.482 8	5.701 2	7.769 1	8.310 7	显著
	<i>H</i>	4	0.152 1	0.543 5	2.441 7	5.145 5	5.983 7	5.826 5	显著
	<i>P</i>	4	0.230 4	0.886 9	3.392 0	7.791 9	9.764 5	8.093 9	显著
	误差	4	0.029 6	0.090 8	0.419 1				显著
入口路段	<i>L</i>	4	25.681 9	53.272 1	95.994 0	17.059 1	13.198 9	18.125 7	显著
	<i>V</i>	4	6.015 4	13.744 4	22.704 8	3.995 7	3.405 4	4.287 2	显著
	<i>Q</i>	4	13.085 6	29.411 6	63.453 8	8.692 1	7.287 1	11.981 4	显著
	<i>H</i>	4	8.455 0	18.534 0	40.940 5	5.616 2	4.592 0	7.730 4	显著
	<i>P</i>	4	13.604 3	27.841 0	55.796 4	9.036 6	6.898 0	10.535 5	显著
	误差	4	1.505 5	4.036 1	5.296 0				显著

注:临界值: $F_{0.01}(4, 4) = 15.98, F_{0.05}(4, 4) = 6.39, F_{0.1}(4, 4) = 4.11, F_{0.25}(4, 4) = 2.06$;表 7 中 F 大于临界值时,则认为该因素的水平变动对冲突率有显著影响。

顺序依次是净距长度 L 、交通量 Q 、转向交通量比例 P 、大型车比例 H 、主线设计速度 V ,且不同车道数的影响程度也不一样。从整体来看,其转向交通量比例 P 的显著程度略低于交通量 Q ,主要是因为位于加速车道上的转向车辆以较为缓慢的速度寻找机会汇入主线,对冲突率的影响程度略低,而随着从匝道进入主线及主线的交通量逐步递增,再加上净距短、隧道路段存在限速,很大程度上影响着驾驶人并入主线的机会。净距长度 L 、大型车比例 H 和主线设计速度 V 对交通冲突率产生影响的强弱顺序则基本与出口的一致。

4 行车风险预测模型构建

4.1 行车风险度量方程

结合单、多因素分析可知,隧道与互通出入口小净距路段的交通冲突率与净距长度 L 、主线设计速度 V 、交通量 Q 、大型车比例 H 、转向交通量比例 P 、单向车道数 N 存在一定的量化关系,根据常见的多元非线性函数形式,发现“指数函数 + 幂函数”“二次多项式 + 指数函数”“指数函数 + 幂函数 + 二次多项式”3 种组合形式较符合 3.1 节单因素分析的变化趋势;对各函数的拟合采用非线性分析专业软件 1stOpt 中的“Levenberg-Marquardt (LM) + 全局优

化算法 (UGO)”进行迭代^[17],避免初值问题,以确定各函数的回归系数。

为了防止上述回归函数过度拟合,选取最优的回归模型,采用赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 来判别:以样本量 ($3n$)、拟合方程中系数个数 (K) 和残差平方和 (E) 为分析对象,对拟合方程进行评价,并以 AIC 数值 (C_a) 最小为最优判别标准,同时参考相关系数平方和 R^2 。该准则目前已广泛应用于公路交通等工程领域的拟合和模型选择^[18-19]。

$$C_a = 3n \ln \left(\frac{E}{3n} \right) + \frac{6n(K+1)}{3n-K-2} \tag{6}$$

由表 8 可知,对于出口路段的回归最优分析而言,3 种组合形式的拟合优度均较佳,其中“指数函数 + 幂函数”组合形式的 R^2 最高,为 0.896,进一步比较 C_a 和 F ,发现 C_a 最小,为 -451.613, F 最大,为 17 016.462,故该组合形式的拟合度最优;对于入口路段的回归最优分析而言,同理可以得到,“二次多项式 + 指数函数”组合形式拟合度最优。因此,隧道与互通出入口小净距路段的行车风险度量方程分别为

$$f_{out} = 0.0843 \exp [17.5852L^{-0.0852} - 0.0021V + 0.0007Q + 0.0190H - 1.0082 \exp (-0.1032P + 1.3288) - 0.9982 \exp (-0.0360N + 0.7744) - 9.7563]$$

$$R^2 = 0.896 \quad (7)$$

$$f_{in} = 3.2284 \exp[0.0001L^2 - 0.0401L + 0.0012V + 0.0007Q - 0.0028H - 0.0129P^2 + 0.6337P - 0.0277 \exp(0.2150N + 14.7886) - 6.3186] + 0.0244$$

$$R^2 = 0.855 \quad (8)$$

式中 f_{out} 和 f_{in} 分别为隧道与互通出入口小净距路段的交通冲突率预测值, 次/(veh·km); 当净距长度 L 值较小或者为 0 时, 发生冲突的概率大大增加, 结合实际情况可知, 净距长度接近 0 时不符合规范要求, 此时预测结果可直接判定为最不利。

4.2 行车风险评价模型

为进一步划分风险评价等级, 本文采用 K 均值聚类算法^[20] (K -means clustering algorithm) 对隧道与互通出入口小净距路段的交通冲突率进行迭代聚类分析, 该过程利用 SPSS 软件实现, 结果如表 9 所示。

根据表 9 显示可知, 同样风险水平下出口路段的交通冲突率大于入口路段, 主要是因为正交试验方案中 (表 6), 对于同一试验组号下的出入口路段, 主线设计速度、交通量、大型车比例、转向交通量比例均一致, 而入口路段的净距长度远小于出口路段, 当主线车辆接近隧道口时, 往往会在入口净距段前减速行驶, 车头时距较小, 而加速车道上的车辆需要变道驶入主线, 导致入口路段易发生交通冲突, 进一步结合图 6(a)、(b) 的单因素分析可知, 出口路段的冲突率为 0~0.12 次/(veh·km)、入口路段的冲突率为 0~0.8 次/(veh·km), 显然入口路段的行车风险更大。

综合上述研究, 最终采用降半梯形的函数形式, 构造隧道与互通出入口小净距路段交通冲突率的模糊隶属函数, 其表达式分别为式 (9) 和 (10), 分布图如图 5 所示。

$$r_1 = \begin{cases} 1 & f < 0.0360 \\ 10.4912(0.1313 - f) & 0.0360 \leq f < 0.1313 \\ 0 & f \geq 0.1313 \end{cases}$$

$$r_2 = \begin{cases} 0 & f < 0.0360 \\ 10.4912(f - 0.0360) & 0.0360 \leq f < 0.1313 \\ 133.6889(0.4875 - f) & 0.1313 \leq f < 0.4875 \\ 0 & f \geq 0.4875 \end{cases}$$

$$r_3 = \begin{cases} 0 & f < 0.1313 \\ 2.8074(f - 0.1313) & 0.1313 \leq f < 0.4875 \\ 5.0942(0.6838 - f) & 0.4875 \leq f < 0.6838 \\ 0 & f \geq 0.6838 \end{cases}$$

$$r_4 = \begin{cases} 0 & f < 0.4875 \\ 5.0942(f - 0.4875) & 0.4875 \leq f < 0.6838 \\ 6.1843(0.8485 - f) & 0.6838 \leq f < 0.8485 \\ 1 & f \geq 0.8485 \end{cases} \quad (9)$$

$$r_1 = \begin{cases} 1 & f < 0.1786 \\ 1.0261(1.1532 - f) & 0.1786 \leq f < 1.1532 \\ 0 & f \geq 1.1532 \end{cases}$$

$$r_2 = \begin{cases} 0 & f < 0.1786 \\ 1.0261(f - 0.1786) & 0.1786 \leq f < 1.1532 \\ 1.2621(2.3243 - f) & 1.1532 \leq f < 2.3243 \\ 0 & f \geq 2.3243 \end{cases}$$

$$r_3 = \begin{cases} 0 & f < 1.1532 \\ 0.8539(f - 1.1532) & 1.1532 \leq f < 2.3243 \\ 0.8598(3.4874 - f) & 2.3243 \leq f < 3.4874 \\ 0 & f \geq 3.4874 \end{cases}$$

表 9 小净距路段的行车风险水平

Table 9 Driving risk level of short distance sections

次/(veh·km)					
位置	安全	较安全	临界安全	相对危险	危险
出口路段	0.036 0	0.131 3	0.487 5	0.683 8	0.848 5
入口路段	0.178 6	1.153 2	2.324 3	3.487 4	5.037 2

表 8 不同多元非线性函数回归最优分析

Table 8 Optimal regression analysis of different multivariate nonlinear functions

位置	函数形式	迭代次数	3n	K	E	C _a	R ²	F
出口路段	指数函数 + 幂函数	20	75	13	0.114	-451.613	0.896	17 016.462
	二次多项式 + 指数函数	23	75	12	0.154	-432.203	0.894	12 595.397
	指数函数 + 幂函数 + 二次多项式	18	75	13	0.142	-435.101	0.895	13 638.071
出口路段	指数函数 + 幂函数	17	75	14	25.433	-42.972	0.853	1 473.094
	二次多项式 + 指数函数	27	75	13	24.015	-50.411	0.855	1 564.128
	指数函数 + 幂函数 + 二次多项式	25	75	13	25.464	-46.017	0.853	1 471.572

$$r_4 = \begin{cases} 0 & f < 2.3243 \\ 0.8598(f - 2.3243) & 2.3243 \leq f < 3.4874 \\ 0.6452(5.0372 - f) & 3.4874 \leq f < 5.0372 \\ 1 & f \geq 5.0372 \end{cases} \quad (10)$$

5 实例验证与应用

建立行车风险度量方程及评价模型后,需要进行验证。现选取西部地区处于运营阶段的 MS 高

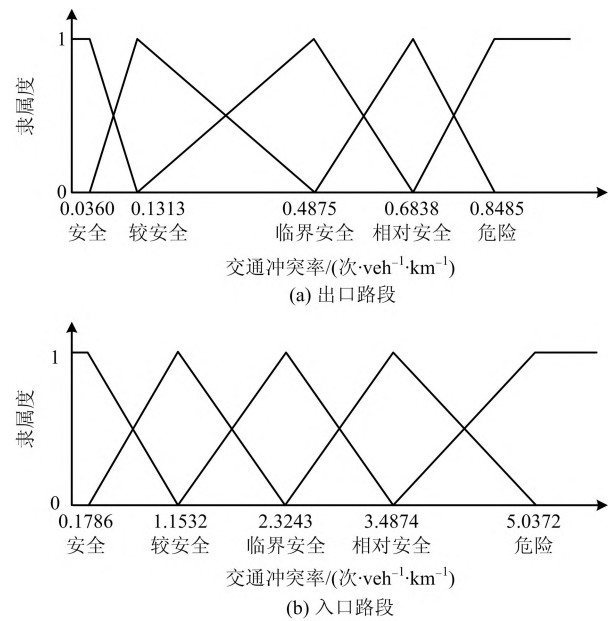


图 5 小净距路段冲突率隶属度函数图
Fig. 5 Membership function diagram of conflict rate of short distance sections

速、HS 高速、YX 高速隧道与互通出入口小净距路段,其中出口路段 7 处,入口路段 3 处,主线设计速度均为 80 km/h、双向四车道,交通事故数据分别来自 2018—2019 年、2016—2019 年、2013—2020 年,其中 MS 高速、YX 高速为山区高速公路,HS 高速研究段穿越山区较多。应用所得度量方程计算冲突率,依据隶属度函数图(图 5)对交通冲突率预测结果进行分级,并以各小净距路段年平均交通事故数作为风险评价结果的对比指标,从而验证预测模型的可行性,分析结果见表 10。

结果表明,大部分出入口小净距路段的预测行车风险均处于安全、较安全水平,各存在 1 处路段处于危险水平;路段 1、4 的风险等级分别为较安全、安全,而其对对应年平均事故数分别为 2 起、2.4 起,所评价结果存在较小误差,这是由于模型回归拟合时未考虑线形、驾驶人、天气等影响因素;其他路段的模型预测结果与其年平均事故数大小基本一致;其中路段 2、9 的风险等级均为危险,结合其具体参数分析可知,HS 高速在该路段的交通量为 1 768 veh/h,其转向交通量比较大,且出入口净距分别为 29 m、5 m,大型车比例为 31.5%,均处于较不利的水平,综合作用下使得该路段行车风险等级达到危险。文中认为在实际工程中模型产生的误差情况可在接受范围内,验证结果表明模型可靠性良好。

由此可从设计、运行管理角度考虑改善的意见。结合路段 2、9 的实际情况进行分析,该互通于 2020 年进行变更设计,将原 B 喇叭型式互通调整为 A 喇叭型式互通,使得互通入口与隧道入口间净距长度满足规范要求值;且将出口匝道分流鼻位置由隧道出洞口后调整至隧道入洞口前

表 10 小净距路段行车风险分析
Table 10 Traffic risk analysis of short distance sections

位置	公路名称	编号	L/m	Q/(veh · h ⁻¹)	H/%	P/%	f/(次 · veh ⁻¹ · km ⁻¹)	风险等级	事故数/(起 · a ⁻¹)
出口路段	MS 高速	1	81	688	6.90	18.30	0.102 0	较安全	2.00
	HS 高速	2	29	1 768	31.50	18.26	1.045 4	危险	7.25
		3	1 325	1 216	34.00	10.61	0.009 5	安全	0.60
		4	440	1 216	34.00	21.05	0.056 2	安全	2.40
	YX 高速	5	493	1 216	34.00	5.10	0.008 3	安全	1.20
		6	385	1 216	34.00	24.34	0.071 7	安全	1.80
		7	722	1 216	34.00	25.65	0.042 9	安全	1.60
入口路段	MS 高速	8	33	688	6.90	15.34	0.887 0	较安全	1.00
	HS 高速	9	5	1 768	31.50	16.40	6.145 3	危险	3.50
	YX 高速	10	152	1 216	34.00	29.52	0.210 5	安全	0.75

方,从而避免了隧道出口与互通出口间净距长度不符合规范要求的问题,车辆可在进入隧道前进行分流,极大地降低了行车风险。对于以大交通量和高大型车比例为主的路段,可考虑对大型车比例进行控制,必要时进行路网分流;同时,应在隧道入口前进行出口车辆诱导变道,在隧道内部合适位置提醒驾驶人出口位置。

6 结 论

1) 本文从交通流的角度选取交通冲突率作为隧道与互通出入口小净距路段行车风险评价指标,以净距长度、主线设计速度、交通量、大型车比例、转向交通量比例、车道数作为自变量,基于实测数据标定的仿真模型进行了单因素和多因素的综合仿真模拟,经分析,发现交通冲突率与净距长度、大型车比例(仅出口路段)、车道数(仅入口路段)成反相关,与主线设计速度、交通量、大型车比例(仅入口路段)、转向交通量比例、车道数(仅出口路段)成正相关,且各因素的水平变动对冲突率有显著影响。

2) 对多因素仿真结果分别采用“指数函数+幂函数”“二次多项式+指数函数”“指数函数+幂函数+二次多项式”3种组合形式进行多元非线性回归,发现对于出口路段,“指数函数+幂函数”组合形式的拟合度最优($R^2=0.896$, $C_a=-451.613$, $F=17016.462$),对于入口路段,“二次多项式+指数函数”组合形式的拟合度最优($R^2=0.855$, $C_a=-50.411$, $F=1564.128$),根据AIC准则将两者分别作为对应路段的行车风险度量方程,并根据K均值聚类算法将出入口路段的行车风险评价标准划分为安全、较安全、临界安全、相对危险、危险5个等级。

3) 对西部地区处于运营阶段的MS高速、HS高速、YX高速隧道与互通出入口小净距路段进行了行车风险预测模型验证,结果表明,模型的预测结果与事故数的趋势基本一致,验证了模型的合理性。为研究高速公路隧道与互通出入口小净距路段行车风险提供了一种办法。

4) 本文研究的大小车型单一,未考虑复杂天气条件、隧道出入口明暗适应、道路线形、匝道形态及驾驶员识别标志标牌等因素对隧道与互通出入口小净距路段行车风险的影响。下一阶段,应对这些因素进行考虑,以获得更为普适的结论。

致 谢

中交第一公路勘察设计研究院有限公司科研项目(KCJJ2020-24);四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12)。

1750

参考文献 (References):

- [1] 刘路. 相邻隧道与互通安全分析和合理间距研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
LIU L. Adjacent Tunnel and communication security analysis and reasonable spacing [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [2] 邓国忠, 曹帆, 吴勇, 等. 互通式立交与隧道出口小间距路段事故影响因素分析[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 283-287.
DENG G Z, CAO F, WU Y, et al. Analysis of accident influencing factors of the minimum distance between interchange and tunnel exits [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 283-287.
- [3] 廖军洪, 王芳, 郭洪波, 等. 高速公路互通立交与隧道最小间距研究[J]. 公路, 2012(1): 1-7.
LIAO J H, WANG F, WU H B, et al. Research on minimum distance between interchange and tunnel in expressway. Journal of Highway, 2012(1): 1-7.
- [4] LEE I B, KIM N. A study on safe separation distance between tunnel and interchange [J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 2019, 39(2): 273-279.
- [5] 吕纪云, 陈瑾, 章坤鹏. 互通式立交与隧道出入口安全净距研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 294-297.
LÜ J Y, CHEN J, ZHANG K P. Study on safe clear distance between interchange and tunnel entrance and exit [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 294-297.
- [6] 姚晶. 主线分合流与隧道及主线出入口最小间距研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
YAO J. Research on minimum spacing between the mainline shunt or confluence and the tunnel or the main access [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [7] 罗韧. 高速公路隧道与互通式立交安全间距研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LUO R. Study on safe spacing of expressway tunnel and interchange [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 侯树展, 孙小端, 贺玉龙, 等. 高速公路交通事故严重程度与交通流特征的关系研究[J]. 交通安全科学学报, 2011, 21(9): 106-112.
HOU S Z, SUN X D, HE Y L, et al. Relationships between crash severity and traffic flow characteristics on freeways [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(9): 106-112.
- [9] 张驰, 闫晓敏, 李小伟, 等. 互通式立交单车道出口小客车运行速度模型[J]. 中国公路学报, 2017, 30(06): 279-286.
ZHANG C, YAN X M, LI X W, et al. Operating speed model of passenger car at single-lane exit of interchange [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 279-286.
- [10] 崔健, 赵健有. 高速公路长隧道入口段可变限速研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 119-122.

- CUI J, ZHAO J Y. On the control of the variable speed limits at the long tunnel freeway entrance[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 119–122.
- [11] BROEREN P T W, HENNINK H, HOEKSM A J, et al. Tunnel road design junctions in and near tunnels in freeways[R]. Valencia: 4th International Symposium on Highway Geometric Design, 2010.
- [12] 阎莹, 盛彦婷, 袁华智, 等. 高速公路出入口区域行车风险评价及车速控制[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 90–96.
- YAN Y, SHENG Y T, YUAN H Z, et al. Driving risk evaluation and speed control in passageway areas of freeway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 90–96.
- [13] 胡江碧, 何禄诚, 王荣华. 高速公路互通立交安全性评价研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 17–28.
- HU J B, HE L C, WANG R H. Review of safety evaluation of freeway interchange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 17–28.
- [14] 冯硕果. 基于视频图像的多目标运动检测的研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- FENG S G. The research on multi moving target detection based on video image[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [15] 李桑. 基于交通冲突的高速公路互通立交交通安全分析方法[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LI S. Freeway interchange traffic safety analysis method based on traffic conflict technique southwest university [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] 杨少伟, 王晓, 冯玉荣, 等. 基于交通冲突技术互通式立交最小净距研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 133–138.
- YANG S W, WANG X, FENG Y R, et al. Research on minimum interchange spacing based on traffic conflict technique[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(3): 133–138.
- [17] 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 C, HU T, HOU Y D, et al. Crash risk evaluation model based on brake heating for trucks under continuous downhill road conditions [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(11): 19–29.
- [18] WANG X F, PU H Q, LI X W, et al. A new GNB model of crash frequency for freeway sharp horizontal curve based on interactive influence of explanatory variables [J]. Journal of Advanced Transportation, 2018(18): 1–9.
- [19] DHAHIR B, HASSAN Y. Probabilistic, safety-explicit design of horizontal curves on two-lane rural highways based on reliability analysis of naturalistic driving data. Accident Analysis and Prevention, 2019, 123: 200–210.

- [20] CHEN Z L, WANG Y, ZHANG S, et al. Differentially private user-based collaborative filtering recommendation based on k-means clustering [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: 1–9.

Driving risk evaluation method on the short distance section between the tunnel and interchange on freeways

ZHANG Chi¹, WANG Bo¹, YANG Kun², HUANG Chunfu^{1,3}, ZHANG Hong^{1,4}, WANG Han¹

(1 School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2 Shenzhen Transportation Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518003, Guangdong China; 3 Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 4 Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: To evaluate the driving risk of short-distance sections between the tunnel and interchange, this paper proposes a driving risk prediction model based on traffic flow simulation. Firstly, based on clarifying the length of the short distance section, this paper qualitatively analyzes its driving risk and selects its key risk factors from the perspective of non-traffic flow and traffic flow. Secondly, it collected the video data of short distance sections through field investigation, extracted the vehicle position and operating speed in the video by MATLAB to calibrate the traffic simulation model, and took the traffic conflict rate as the risk evaluation index. Thirdly, The risk factors and risk evaluation index are quantified by single factor tests to reveal the risk causes of short distance sections. On this basis, considering the interaction of various factors, the strong correlation risk influencing factors are determined by the orthogonal test. And the driving risk measurement equation is constructed by multiple nonlinear regression analyses based on 1stOpt, and through the K-means clustering algorithm, the driving risk classification criteria are divided into five grades. Finally, the driving risk prediction model is verified by some mountain freeway short distance sections. The results show that the clear distance length, mainline design speed, traffic volume, vehicle type proportion, steering proportion, and lane numbers have a significant impact on the driving risk of entrance and exit sections. The combination of exponential function and power function has a better fitting degree for the exit section and $R^2 = 0.896$, and the combination of quadratic polynomial and exponential function has a better fitting degree for the entrance section and $R^2 = 0.855$. The evaluation results of the model are consistent with the trend of the actual number of accidents, and it can be applied to the driving risk assessment of short-distance sections on mountainous freeways.

Key words: safety engineering; risk prediction; VISSIM simulation; short distance section; interchange; driving risk