

# 雨雪气象条件下桥隧连接段行车稳定性

王 露<sup>1</sup>, 李龙飞<sup>2</sup>, 刘玉雯<sup>1</sup>, 李华恩<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030012)

**摘 要:**为了缓解雨雪气象条件下桥隧连接段的交通安全运行问题,采用 Carsim 仿真分析软件,建立车辆-道路三维模型,通过侧向偏移量和横摆角速度 2 个评价指标,系统地模拟分析雨雪气象条件下 C 级标准车在桥隧连接段行驶的稳定性,定量分析行车速度、路面摩擦因数、圆曲线半径对桥隧连接段行车稳定性和车辆横向稳定性能的影响。研究结果表明:侧向偏移量与横摆角速度对行车稳定性的评价具有一致性,当侧向偏移量和横摆角速度指标的值越小、越稳定,车辆行驶越安全;车辆速度与行车稳定性呈负相关,路面摩擦因数和圆曲线半径与行车稳定性呈正相关,即降低车速、增大路面摩擦因数和圆曲线半径均可有效地减小车辆的侧向偏移量。在雨雪气象条件下桥隧连接段的特殊行车环境下,车辆设计速度由 80 降低至 75 km/h,降低了 6.25%;路面摩擦因数增大至 0.21、圆曲线极限最小半径由 250 增至 265 m,增大了 6%;二者均可保证车辆不发生大幅度侧滑,并能提升车辆行驶的稳定性,可为山区高速公路设计规划和交通运营管理提供参考。

**关键词:**交通工程;行车稳定性;Carsim 仿真;桥隧连接段;雨雪气象条件

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.013

## Driving stability along a bridge and tunnel connection segment under rain and snow conditions

WANG Lu<sup>1</sup>, LI Long-fei<sup>2</sup>, LIU Yu-wen<sup>1</sup>, LI Hua-en<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Transportation Planning Survey and Design Institute of Shanxi Co., Ltd., Taiyuan 030012, Shanxi, China)

**Abstract:** To ease traffic safety operational problems of a bridge and tunnel connection segment under rain and snow conditions, Carsim simulation analysis software was used to establish a three-dimensional vehicle-road model. Using the two evaluation indexes of lateral offset and yaw rate, the driving stability of a class C standard vehicle along the bridge and tunnel connection segment under rain and snow conditions was systematically analyzed. Then, the influence of vehicle speed, road friction coefficient, and road circular curve radius on the operational and lateral stability was quantitatively analyzed. The results show that the evaluation of vehicle stability by lateral offset and yaw rate is consistent. The smaller and more stable the value of lateral offset and yaw rate, the safer the vehicle driving. The vehicle speed is negatively correlated and the road friction coefficient, and the circular curve radius are positively correlated

收稿日期:2019-04-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0803906);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219111);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-146)

作者简介:王 露(1988-),女,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:1251058940@qq.com。

with the driving stability. In other words, decreasing the vehicular speed and increasing the road friction coefficient and road circular curve radius can effectively reduce the vehicle lateral offset. Under the special driving environment of a bridge and tunnel connection segment under rain and snow conditions, the design speed of the vehicle is reduced by 6.25% (from 80 to 75 km/h, ), the road friction coefficient increases to 0.21, or if the minimum circular curve limit radius increases by 6% (from 250 to 265 m), the vehicle is not subject to sharp side slip, and the stability and safety of vehicles is improved. This study provides a reference for mountain highway design and traffic operational management. 1 tab, 21 figs, 22 refs.

**Key words:** traffic engineering; driving stability; Carsim simulation; bridge and tunnel connecting segment; rain and snow condition

## 0 引言

现阶段,中国东部地区的高速公路建设逐渐完善,其重心已经转到西部。山区路线设计经常受地形限制,采用桥隧比例相对较高,道路总体上对施工、生态保护等方面有更高要求。如果某山区道路受到地形条件影响较大,将不得不采用桥隧连接的线形设计。桥隧连接段地形条件极为恶劣,但通过线形设计能有效保证工程质量,降低工程实际成本,实现快速穿越不良地形路段。王飞研究了山区高速公路桥隧连接段的地质条件及地形地貌,结合桥梁和隧道的结构特性,分析了各种桥隧连接形式的适用性及优缺点<sup>[1]</sup>。

然而,近年来交通事故发生数陡升,根据中国交通运输部 2017 年 12 月发布的最新研究报告显示,目前中国道路交通事故年死亡人数高居世界第 2 位,每年交通运输事故总量仍居高位,事故数、死亡人数分别占全国重、特大事故总量的 70% 和 80%。Navin 综合考虑了车辆、道路、人等相关因素,计算出了安全指数,用来评价路线设计对行车特性造成的影响<sup>[2]</sup>。肖蓉针对隧道群火灾及高速公路的特性对隧道群交通事故的发生地进行分析,指出大部分交通事故主要集中发生在桥隧群路段<sup>[3]</sup>。

与普通道路相比,桥隧连接段的行车特殊性是其将隧道路段、桥梁路段、连接段 3 种不同结构构造的统一,而这 3 种不同结构构造物的道路线形、结构形式、路基路面强度、视觉光线等都各不相同,行车环境发生连续突变状况时行车极为不稳定,且山区高速公路气象条件更为复杂。Jackson 等对降雨与行车安全的关系展开研究,提出撞车事故与降雨的相关性<sup>[4]</sup>。Ibrahim 等研究了加拿大不良气象条件对高速公路行车的影响,发现不良气象对自由流有减速影响<sup>[5]</sup>。田世芹等各种气象条件对交通运输

的影响进行研究,提出了复杂的气象条件对行车安全的不良影响<sup>[6]</sup>。上述原因会导致该路段行车稳定性较差,同时缺乏有效的行车安全性评估以识别行车危险程度。黄齐龙以中国多条山区高速公路桥隧群路段为对象,研究桥隧群交通事故的特征,提出了桥隧连接段已直接制约整个道路交通流的安全运行,对整个交通运输业产生了影响<sup>[7]</sup>。

对于桥隧连接段行车稳定性的相关研究,大多集中于自身结构特性和行车环境特性,并对该路段上发生事故的特点和原因进行系统分析,进而建立相应的行车安全性评价体系。张科显从所发生事故的时间、空间、气候条件、车型等方面系统分析了桥隧连接段上事故的分布特性<sup>[8]</sup>。邱月采用系统论分析了桥隧连接段安全运行理论,进行了车辆运行安全保障研究<sup>[9]</sup>。闫彬通过建立了安全熵模型和对应的评价指标,直接评价了桥隧连接段上的行车安全性<sup>[10]</sup>。黄爱华运用贝叶斯网络方法来建立评估模型,并评价该路段上的行车稳定性等级<sup>[11]</sup>。

对雨雪气象条件下的行车安全研究,各学者根据车辆的动力响应状况选取了不同的行车安全评价指标及相应的限值。Ewan 等通过道路气象传感技术,对行驶路表状态(干、湿、雪)的抓地力水平和摩擦因数开展调研<sup>[12]</sup>。唐晋娟研究路面上水膜对摩擦因数的影响,推导了车辆发生水滑现象时的行车速度,从而得出行车速度限值<sup>[13]</sup>。卢国范建立了恶劣天气与路面摩擦因数的量化关系模型和与道路能见度相关的车辆安全制动距离模型<sup>[14]</sup>。

在道路行车安全的风险评价方面,学者利用多种方法和模型展开了研究。黄冰娥从风险管理角度,对整个高速公路的行车风险识别、等级划分、预警管理进行了系统研究<sup>[15]</sup>。张磊通过工程类比法对隧道内部纵向不同区域的行车安全进行了等级排列<sup>[16]</sup>。罗勇等通过建立隧道内部纵向不同区域的

递阶层次结构模型,对行车安全进行了系统评价<sup>[17]</sup>。孙鑫将突变理论和耦合度方法用到行车安全性研究中,分析不同因素组合对行车安全的影响<sup>[18]</sup>。

综上可知,虽然在桥隧连接段、复杂气象条件、风险评价领域的研究成果较多,但将这3个要素综合考虑的研究较少。综合考虑多个因素研究是提升行车安全性和稳定性的关键。因此,本文在国内外研究成果的基础上,定量分析雨雪条件下桥隧连接段的行车安全及稳定性,建立在复杂气象条件下桥隧连接段行车仿真模型,并对行车稳定性、安全性改善进行研究。

## 1 行车稳定性评价指标

### 1.1 侧向偏移量

车辆行驶在平曲线上时会受到垂直于行车方向的侧向力。对车辆所受作用力进行分析可知,如果道路对车轮的摩擦力不能够完全抵消车体所受的侧向作用力,车辆便会向道路外侧滑移,其滑移量即侧向偏移量。侧向偏移量直接反映车辆运行状态中的稳定性,且其值与行车安全成负相关。

在山区高速公路上,由于车辆行车环境不断变化,车辆轴心不可能始终与道路中线一致。通常,一个车道标准宽度为3.75 m,车辆宽约为2 m,车辆与相邻车道的偏差值最大可为0.875 m;并综合考虑驾驶人行车时与相邻车道车辆的心理安全车距,本文选取0.5 m作为侧向偏移量的安全阈值<sup>[19]</sup>。

### 1.2 横摆角速度

横摆角速度作为Carsim软件中一个可输出的数据化指标,可以直观反映出车辆对道路的横向响应。车辆行驶过程中横摆角速度和行车稳定性呈负相关,其值较大时车辆便容易发生侧滑和甩尾现象,故本文选取横摆角速度作为评价指标之一。

在桥隧连接段上行车时,车辆在受到行车环境变化影响下的运行过程中,车辆除了会产生侧向偏移之外,还会产生垂直于行车方向的横摆角。当横摆角速度达到6 rad/s时,车辆便可能已经驶入相邻车道<sup>[19]</sup>,故本文选取6 rad/s作为横摆角速度的安全阈值。

## 2 模型建立

本文通过Carsim软件对雨雪条件下桥隧连接段的行车稳定性进行仿真分析。雨雪天气主要影响车辆轮胎的抗滑程度和对路面的附着力,可用路面

摩擦因数表征实际行车环境中雨雪条件对道路和行车的作用;而对于高速公路桥隧连接处这一特殊路段,需要在道路模型中对路面线形进行参数设置,以对该段进行实际仿真运行。

选取陕西省镇安县药树梁大桥处的桥隧连接段为建模原型,该地区夏季多雨,冬季多雪;且道路地形条件复杂,行车环境突变频繁,雨雪天气下经常发生交通事故。本文研究构造为隧道-桥梁-隧道。设计速度为80 km/h;桥梁路段平面线形为平曲线,转弯半径为260 m。

### 2.1 仿真车辆选取和参数设置

要建立桥隧连接段的整体模型,首先要选取在该路段上的主要仿真车型,设置其车辆参数,使所选车辆尽可能与实际行车环境相符,使其能真实反映在雨雪天气中车辆运行过程。Carsim软件中车辆模型数据库中主要车辆类型等级与市面车辆类型等级相一致,主要分4级,即A、B、C、D级标准车。本文仿真试验选取Carsim软件内置的与小客车车辆参数相符的C级标准模型车。

### 2.2 雨雪气象模型

由上文介绍,雨雪气象条件在道路方面主要反映在路面的摩擦因数上。在雨天条件下,雨水会在路面颗粒上形成一层水膜,所选的C级标准车在此环境下行驶时,水膜会直接使得路面摩擦因数降低<sup>[20]</sup>。在降雪时,路面的附着系数会更低,仅是正常路面的12.5%~25%<sup>[21]</sup>。本文通过对不同的天气条件设置不同的路面摩擦因数 $\mu$ (通常晴天时 $\mu$ 取0.6、雨天时 $\mu$ 取0.4<sup>[22]</sup>、雪天时 $\mu$ 取0.18)来研究其行车稳定性;在桥梁路段内设置为0.6,在桥梁和连接段上根据天气情况设置相应的系数,并根据道路情况设置摩擦因数渐变值。

### 2.3 道路模型和表格参数的选取

在桥隧连接段行车时,反映在道路上的是其结构形式和道路线形的变化,所以在Carsim中建模时着重从此方面入手。对于道路模型中的3个子模块,本文按照以下步骤进行建模。

(1)平面线形设置。输入所建道路逐桩坐标表中的X、Y坐标,从而定出道路中心线位置和道路桩号。

(2)高程设置。进入纵断面设置界面,将所建道路的高程数据按照桩号导入,得出其道路中心线高程。

(3)道路超高设置。进入道路模型下的Off-center elevation界面,依次选取横断面上右幅路基

最右端点、右幅行车道右端点、右幅行车道中点、左幅行车道中点、左幅行车道左端点、左幅路基最左端点 6 个点作为超高数据导入点;通过输入道路横断面上该 6 个点与道路中线的高差来设置该横断面的超高,然后依次设置每个桩号的横断面超高便可设置整条道路的超高。

3 仿真结果分析

对于桥隧连接段,当车辆在雨雪气象条件下行驶时,车辆行驶速度、道路转弯半径、路面摩擦因数等因素都会直接影响到行车稳定性。故本文将综合考虑这 3 种影响因素,分别用侧向偏移量、横摆角速度 2 个评价指标进行影响程度分析,以得出各影响因素的安全阈值。具体的仿真分析过程如表 1 所示。

表 1 仿真分析过程  
Tab. 1 Simulation analysis process

影响因素	仿真试验条件	
	规范中试验条件	本文试验条件
行车速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	60、70、80	分别依次降低设计速度 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%,进行仿真试验
路面摩擦因数	按照不同路段和天气状况分别设置 $\mu$	当 $\mu = 0.18$ 时,分别以 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 的步长,依次进行仿真试验
转弯半径/m	275 m (将极限最小半径 250 m 增大 10%)	将极限最小半径分别增加 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%,依次进行仿真试验

3.1 车速影响

行车速度作为车辆的运行状态控制指标,其对车辆的运行状态和道路的响应状况都十分重要。山区高速公路线形较复杂,当车辆驶入线形为圆曲线的桥梁且紧靠隧道时,若其行驶速度过高,车身便会受到非常大的指向转弯半径外侧的侧向力,从而导致车辆发生侧滑现象。

为研究行车速度对桥隧连接段上行车安全性的影响程度,现取 C 级标准车以 60、70、80 km/h 的速度,在雪天(隧道路段  $\mu$  为 0.6,桥梁路段  $\mu$  为 0.18)行驶,分析车速对车辆侧向偏移量、横摆角速度的影响情况,见图 1~图 6。

3.1.1 车速对侧向偏移量影响

由图 1~图 3 可知,车辆在桥隧连接段行驶时,行车速度会明显影响行车稳定性,且成负相关关系。行车速度为 60 km/h 时的最大侧向偏移量约为 0.03 m,尚未对行车安全产生显著影响;行车速度

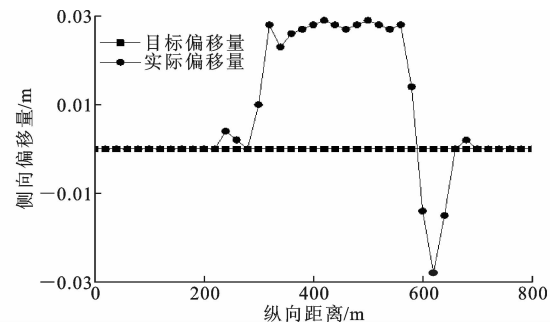


图 1 车速 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时的侧向偏移量  
Fig. 1 Lateral offsets at speed of 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

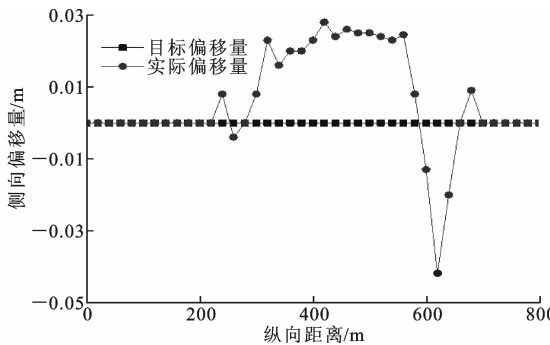


图 2 车速 70  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时的侧向偏移量  
Fig. 2 Lateral offsets at speed of 70  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

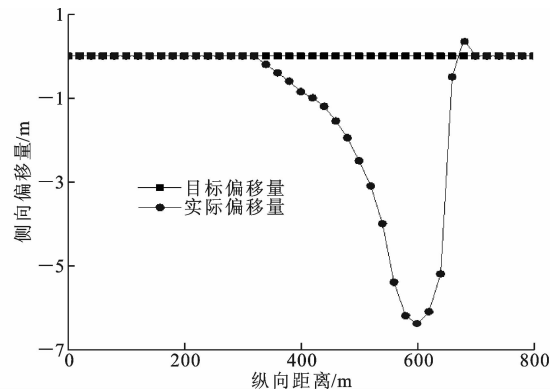


图 3 车速 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时的侧向偏移量  
Fig. 3 Lateral offsets at speed of 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

为 70 km/h 时的最大侧向偏移量约为 0.05 m,亦尚未对行车安全产生显著影响。行车速度 80 km/h 时,当车辆驶出隧道约 130 m 处,侧向偏移量已经达到 1 m,对应行驶时间约为 5.8 s,此时车辆已经超过侧滑临界并脱离自身车道;且其最大偏移量接近 7 m,车辆已完全驶离道路,见图 4,酿成事故。当车辆按照设计速度 80 km/h 运行时,并不能保证行车安全。

3.1.2 车速对横摆角速度影响

由图 5、图 6 可知:行车速度为 60、70 km/h 相对应的横摆角速度最大波动范围在 3.4~5.1 rad/s,均

未超过临界值 6 rad/s,行车相对较稳定;而车速在 80 km/h时的横摆角速度波动范围在 5~22.3 rad/s,其波动值已远超过临界界定的 6 rad/s,车辆逐渐驶离车道,发生大幅度侧滑事故。

根据对侧向偏移量和横摆角速度这 2 个评价指标的定性定量研究,可得出行车速度与行车安全性呈负相关。在雪天条件下,车辆通过山区高速公路的桥隧连接段时,车速过高时行车会产生危险。当车辆按照设计速度 80 km/h 运行时,车辆会直接驶离原车道(图 4),发生侧滑现象。



图 4 车辆侧滑驶出路面  
Fig. 4 Vehicle sideslip off road

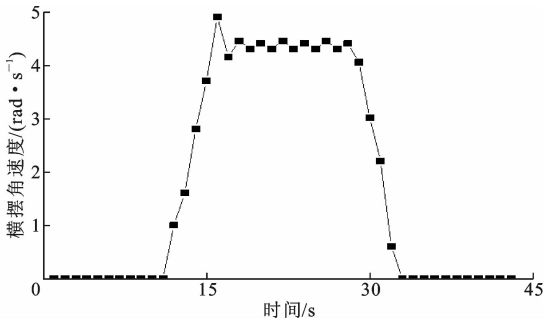


图 5 车速 70 km · h<sup>-1</sup>时的横摆角速度  
Fig. 5 Yaw rates at speed of 70 km · h<sup>-1</sup>

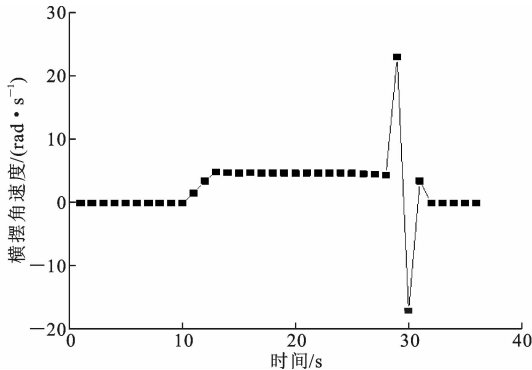


图 6 车速 80 km · h<sup>-1</sup>时的横摆角速度  
Fig. 6 Yaw rates at speed of 80 km · h<sup>-1</sup>

### 3.1.3 最大安全车速

为了得出车辆在该桥隧连接段行车的最大安全车速,选取最恶劣行车环境进行分析,即桥梁路段为冰雪路面。根据侧向偏移量以及横摆角速度这 2 个

评价指标,分别用 1%为梯度值依次降低设计速度(80 km/h)的 1%~10%,进行多次运行类比分析。通过对比各内插速度下车辆的评价指标量值,并参考 0.5 m 的侧滑临界值和 6 rad/s 的横摆角阈值,得出了设计速度降低的适用值。图 7 为 C 级车在设计速度降低 6.25%后的侧向偏移量,图 8 为 C 级车在设计速度降低 5%后的横摆角速度。

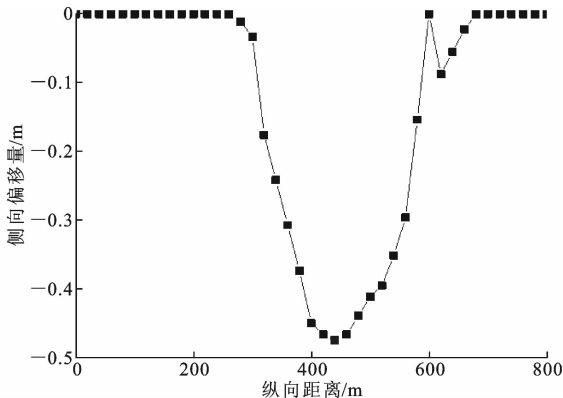


图 7 设计速度降低 6.25%后的侧向偏移量  
Fig. 7 Lateral offsets after 6.25% reduction in design speed

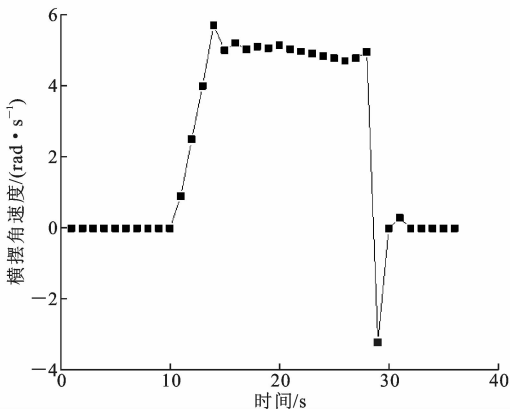


图 8 设计速度降低 5%后的横摆角速度  
Fig. 8 Yaw rates after 5% reduction in design speed

由图 7、图 8 可知:当车辆行驶速度降低 6.25%之后,车辆的侧向偏移量约为 0.49 m,接近且未超过侧向偏移量的安全阈值 0.5 m;当行车速度降低 5%之后,车辆的横摆角速度接近安全阈值 6 rad/s。

因此,在雨雪条件下桥隧连接段行车的设计速度应加以修正,即将设计速度由 80 降低至 75 km/h,降低了 6.25%,作为参考设计速度。

### 3.2 路面摩擦因数

道路路面的摩擦因数在平曲线或雨雪条件下的行车环境中,需给车轮以足够的制动力,故其可以作为行车侧滑的一个重要的评价指标。为研究路面摩擦因数对桥隧连接段上行车的影响程度,现模拟标

准载重 C 级轿车以 80 km/h 行车速度分别在路面摩擦因数为 0.6(晴天)、0.4(雨天)、0.18(雪天)的桥隧连接段上行驶时,侧向偏移量和横摆角速度的变化情况见图 9~图 13。

3.2.1 摩擦因数对侧向偏移量影响

对比图 9~图 11 可知,车辆在桥隧连接段行驶时,路面摩擦因数减小会直接降低行车安全性,且二者成正相关关系。晴天和雨天时的路面摩擦因数相对较大,车辆的最大侧向偏移量均在 0.15 m 左右,能保证行车安全。当遇到桥梁路面结冰的雪天时,车辆从隧道驶出至桥梁段的瞬间,路面摩擦因数突然大幅度降低,车辆已经偏离原行驶车道,发生了严重的侧滑,不仅行车安全难以保证,还容易引起二次事故。

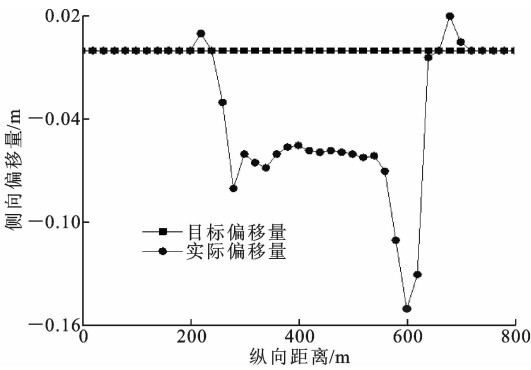


图 9 晴天下的侧向偏移量  
Fig. 9 Lateral offsets on sunny day

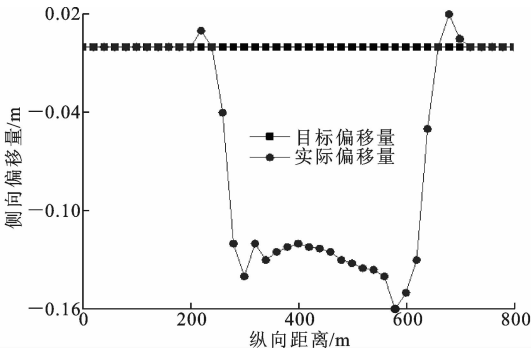


图 10 雨天下的侧向偏移量  
Fig. 10 Lateral offsets on rainy day

3.2.2 摩擦因数对横摆角速度影响

由图 12、图 13 可知,当车辆在晴天或雨天行驶在桥隧连接段时,路面摩擦因数较大,能够向车辆提供足够的摩擦力,车辆的横摆角速度最大约为 4.0 rad/s。而当车辆雪天条件下行驶时,从隧道驶出至桥梁段的过程中,路面摩擦因数发生突变,其值大幅度降低,横摆角速度远超过规定的临界值 6 rad/s,此时车辆偏离原行驶车道,侧滑现象极为严重,行车

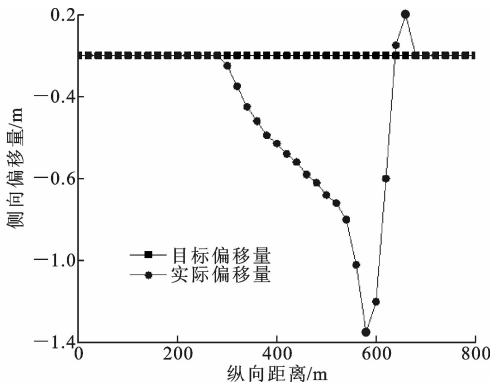


图 11 雪天下的侧向偏移量  
Fig. 11 Lateral offsets on snowy day

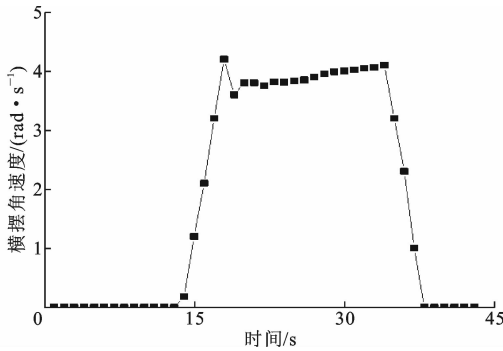


图 12 雨天下的横摆角速度  
Fig. 12 Yaw rates on rainy day

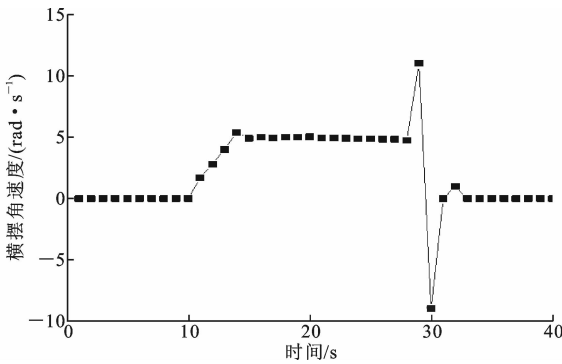


图 13 雪天下的横摆角速度  
Fig. 13 Yaw rates on snowy day

稳定性和安全性受到极大影响。

通过侧向偏移和横摆角速度这 2 个指标对桥隧连接段行车稳定性进行仿真研究,得出结论相同,在雪天条件下,车辆通过桥隧连接段时,路面摩擦因数对行车安全产生显著影响。

3.2.3 路面摩擦因数安全阈值

为了得出桥隧连接段上路面摩擦因数行车安全界限值,现以 0.1 为梯度依次对 0.1~0.6 的路面摩擦因数进行仿真运行,并对侧向偏移量和横摆角速度接近安全阈值处的路面摩擦因数以 0.01 为梯度再多

次仿真运行。根据侧向偏移量和横摆角速度 2 个指标的安全阈值,对比各内插摩擦因数下车辆的评价指标值,得出路面摩擦因数的安全值,见图 14、图 15。

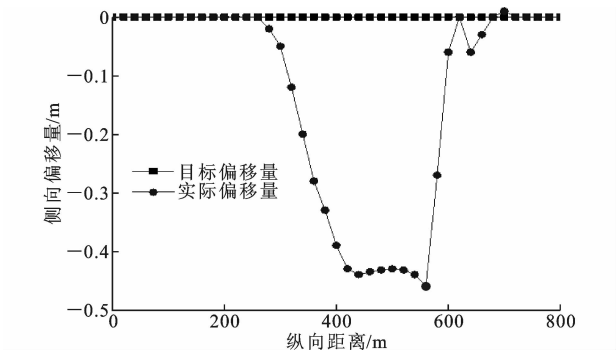


图 14 路面摩擦因数为 0.2 时的侧向偏移量  
Fig. 14 Lateral offsets when road friction coefficient is 0.2

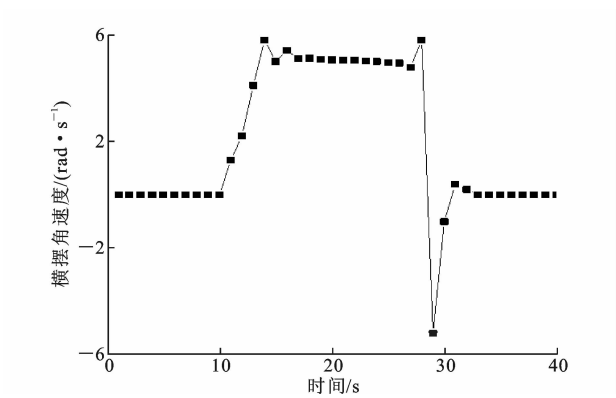


图 15 路面摩擦因数为 0.21 时的横摆角速度  
Fig. 15 Yaw rates when road friction coefficient is 0.21

由图 14、图 15 可知:在雪天条件下,当道路路面摩擦因数从 0.18 增加至 0.2 时,车辆的最大侧向偏移量接近安全阈值;当路面摩擦因数增加至 0.21 时,横摆角速度接近安全阈值。路面摩擦因数的微小增加就能对车辆的侧向偏移量产生很大的影响,大幅提高行车的稳定性,保障行车安全。所以在桥隧连接段,应当注重采取除冰等安全保障措施,以提升路面对车辆的附着力。

### 3.3 转弯半径

本文所建立道路模型中桥梁路段平面线形为平曲线,该高速公路设计速度为 80 km/h,则其相应的圆曲线半径应该满足《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)标准。

按照设计规范,在设计速度为 80 km/h 时的平曲线最小半径一般为 400 m,极限值为 250 m。上文建模仿真分析皆是取接近极限最小半径的 260 m 来分析,发现在雪天条件下以 80 km/h 车速行驶时车辆仍不稳定,本节研究在雪天条件下,圆曲线半径增大

10%的道路线形的行车稳定性情况,见图 16、图 17。

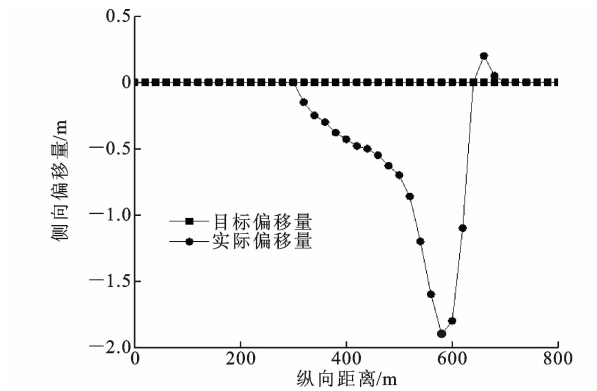


图 16 圆曲线半径为 260 m 时的侧向偏移量  
Fig. 16 Lateral offsets when radius of circular curves is 260 m

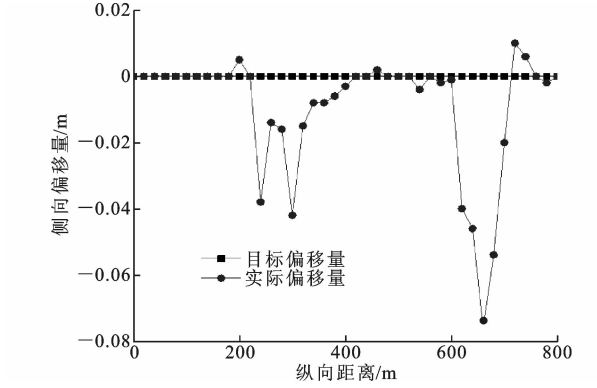


图 17 圆曲线半径增大 10% 后的侧向偏移量  
Fig. 17 Lateral offsets after increasing radius of circular curves by 10%

#### 3.3.1 转弯半径对侧向偏移量影响

从图 16 可知,圆曲线半径接近极限最小半径为 260 m 时,车辆行驶至 290 m 处驶出隧道进入缓和曲线,由于路面摩擦因数从 0.6 突变至 0.18 且受到离心力作用,车辆开始逐渐发生侧向偏移。随着车辆驶入圆曲线,车辆完全驶离了原来的行车车道,发生侧滑。

由图 17 可知,当极限最小半径增大 10% 之后,整个行车阶段的侧向偏移量在 0.02~0.08 m 之间波动,其值较小,车辆并无明显的侧滑现象,行车稳定。平曲线半径与侧向偏移量呈负相关,即半径越大,行车越稳定。

#### 3.3.2 转弯半径对横摆角速度影响

转弯半径对横摆角速度的影响见图 18、图 19。由图 18、图 19 可知:圆曲线半径接近极限最小半径为 260 m 时,由于横摆角速度过大,车辆逐渐驶离车道,发生侧滑;而极限最小半径增大 10% 之后,在整个行车过程中,横摆角速度最大值约为 4.8 rad/s,其值小于临界值,车辆并无明显的侧滑现象,行车稳定。

车辆在桥隧连接段行驶时,圆曲线半径会直接影响到行车安全,其值越小,行车稳定性亦越差。当车辆行驶在冰雪路面上时,从隧道驶入桥梁段,路面摩擦因数会突然大幅度降低,此时若圆曲线半径越接近设计极限值,越容易发生侧滑事故。

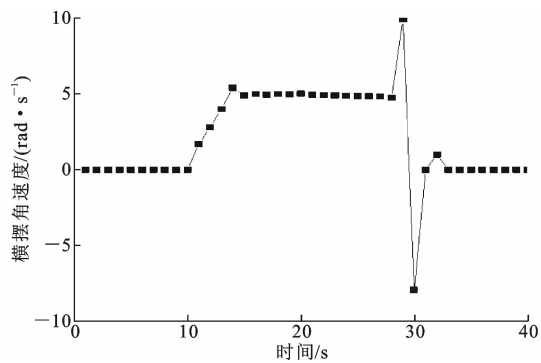


图 18 圆曲线半径为 260 m 时的横摆角速度  
Fig. 18 Yaw rates when radius of circular curve is 260 m

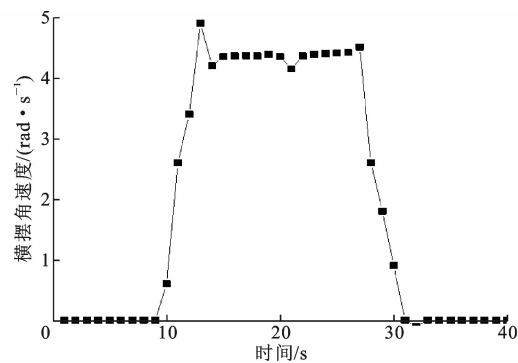


图 19 圆曲线半径增大 10% 后的横摆角速度  
Fig. 19 Yaw rates after increasing radius of circular curve by 10%

3.3.3 转弯半径安全阈值

为了得出车辆在该桥隧连接段行车的最佳转弯半径,现以 1% 为梯度依次将极限最小半径增加 1%~10% 进行仿真运行。根据侧向偏移量和横摆角速度 2 个指标的安全阈值,通过各内插圆曲线半径下各评价指标值,得出道路转弯半径的安全阈值,见图 20、图 21。

由图 20、图 21 可知:当转弯半径从极限最小半径(250 m)增大 6% 后,车辆的侧向偏移量接近安全阈值;当增大 5% 后,车辆的横摆角速度指标接近其安全阈值。故在道路设计时应当对雨雪条件下桥隧连接段的转弯半径加以修正,将恶劣天气下的极限最小半径设计值增大 6%,即以 265 m 作为 80 km/h 设计速度下圆曲线极限最小半径的参考修正值,方可满足行车稳定性要求。在雨雪气象条件下,规范中其他参数的极限值修正,亦可作为研究对象进行

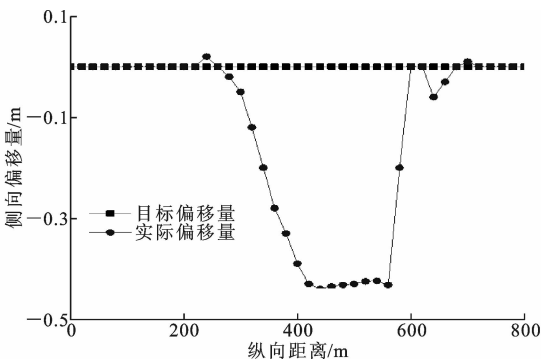


图 20 圆曲线半径增大 6% 时的侧向偏移量  
Fig. 20 Lateral offsets after increasing radius of circular curve by 6%

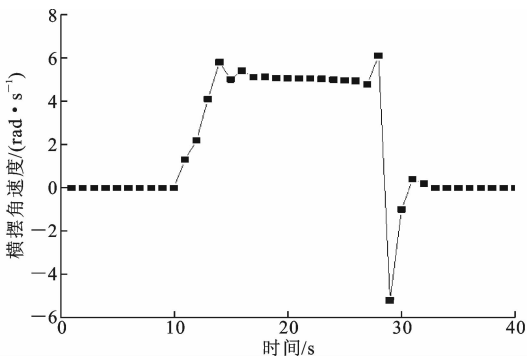


图 21 圆曲线半径增大 5% 时的横摆角速度  
Fig. 21 Yaw rates after increasing radius of circular curve by 5%

进一步地深入探讨。

4 结 语

(1)侧向偏移量与横摆角速度对行车稳定性的评价具有一致性,两指标值越大,行车稳定性越差;反之,两指标值越小,且能够维持在一定的临界界限(侧向偏移量为 0.5 m,横摆角速度为 6 rad/s)内时,行车安全即可获得保障。

(2)在影响行车稳定性的各项因素中,车辆速度与行车稳定性呈负相关,即在一定范围内车速越小,车辆稳定性越好;而路面摩擦因数和圆曲线半径与行车稳定性呈正相关,适当增大路面附着力和道路转弯半径,对行车安全有利。

(3)根据侧向偏移量和横摆角速度的临界状态判定值,对比梯度内插得到的多次仿真运行结果,可得出上述 3 种因素的安全行车临界值,即车速较设计速度(80 km/h)降低了 6.25%(即 75 km/h),交通运行管理方面将道路路面摩擦因数增大至 0.21,道路线形方面将圆曲线最小半径(250 m)增大 6%(即 265 m)时,均可保证车辆不发生大幅度侧滑,满足车辆在雨



雪天气桥隧连接段稳定安全行驶的要求。

(4)本文通过仿真试验提出考虑雨雪气象下桥隧连接段上行车速度、路面摩擦因数、圆曲线半径的改良值,可为山区高速公路设计规划和交通运营管理提供参考,对桥隧连接段的行车安全保障和交通事故发生率降低具有现实意义。

(5)本文在建立雨雪气象模型时仅选取道路路面的摩擦因数为变量,而在实际的车辆行驶过程中,雨雪天气还会影响到道路的能见度、路基整体强度、驾驶人的心理生理状态等,在后续研究中应充分考虑上述因素,使得出结论更切合实际。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王飞. 山区高速公路桥隧相连技术的研究与应用[J]. 交通标准化, 2008(11): 124-127.  
WANG Fei. Research and application of highway bridge and tunnel connection technology in mountainous areas[J]. Transportation Standardization, 2008(11): 124-127.
- [2] NAVIN F P D. Safety factors for road design: Can they be estimated? [J]. Transportation Research Record, 1990(1280): 181-189.
- [3] 肖蓉. 高速公路隧道群火灾事故风险分析[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(4): 444-446.  
XIAO Rong. Risk analysis of highway tunnel group fire accident[J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(4): 444-446.
- [4] JACKSON T L, SHARIF H O. Rainfall impacts on traffic safety: Rain-related fatal crashes in Texas[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(2): 843-860.
- [5] IBRAHIM A T, HALL F L. Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships [J]. Transportation Research Record, 1990(1457): 184-191.
- [6] 田世芹, 刘昭武, 孙亚丽, 等. 气象条件与道路交通[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2013, 27(增1): 80-81.  
TIAN Shi-qin, LIU Zhao-wu, SUN Ya-li, et al. Meteorological conditions and road traffic[J]. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition, 2013, 27(S1): 80-81.
- [7] 黄齐龙. 山区高速公路桥隧群路段安全容错能力提升技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.  
HUANG Qi-long. Study on security fault-tolerant technology of highway bridge-tunnel group in mountainous areas [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [8] 张科显. 山区高速公路桥隧连接段安全评价及改善研究[J]. 长春大学学报, 2016, 26(10): 44-48.  
ZHANG Ke-xian. Research on safety evaluation and improvement for bridge-tunnel linkage section of mountainous freeways[J]. Journal of Changchun University, 2016, 26(10): 44-48.
- [9] 邱月. 城市道路桥隧连接段交通运行安全评价及保障措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
QIU Yue. Traffic safety operation evaluation and technology for city road bridge-tunnel connection section[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [10] 闫彬. 山区高速公路桥隧群路段行车安全研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
YAN Bin. Research on traffic safety of highway bridge-tunnel group in mountainous areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [11] 黄爱华. 桥隧群路段交通安全评价与改善措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
HUANG Ai-hua. The traffic safety analysis and improvement measure research on sections of bridges and tunnels[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [12] EWAN L, AL-KAISY A, VENEZIANO D. Remote sensing of weather and road surface conditions: Is technology mature for reliable intelligent transportation systems applications? [J]. Transportation Research Board, 2013(2329): 8-16.
- [13] 唐晋娟. 不良天气条件下高速公路交通安全影响分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.  
TANG Jin-juan. Analysis on the influence of expressway traffic safety under the adverse weather condition [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [14] 卢国范. 恶劣天气条件下长营高速公路交通安全管理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
LU Guo-fan. Traffic safety management of Changying Expressway under adverse weather conditions [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [15] 黄冰娥. 恶劣天气下高速公路行车风险分析与预警管理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
HUANG Bing-e. Study on the traffic risk analysis and forewarning management of freeway under disaster weather[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [16] 张磊. 成渝高速公路龙泉山二号隧道安全风险预估分析[J]. 路基工程, 2013(3): 142-147.  
ZHANG Lei. Safety risk assessment analysis of Longquanshan No. 2 Tunnel on Chengdu-Anyue-Chongqing Expressway [J]. Subgrade Engineering, 2013(3): 142-147.