



# 大货车立交出口路段行车风险仿真分析

张驰<sup>1,2</sup>, 齐晨<sup>1</sup>, 华贵龙<sup>3</sup>, 刘园园<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室,  
陕西 西安 710075; 3. 安徽省交通规划设计研究总院, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 为了研究立交主线为圆曲线时出口路段车辆的行车安全性, 进行大货车行车动力学仿真分析, 建立车辆模型、道路模型以及驾驶员预瞄轨迹模型。通过改变道路的超高横坡度、行驶速度和换道半径, 模拟不同条件下的行驶工况。分别进行单因素分析与正交试验多因素分析, 缩减了试验次数, 得出车辆的横向荷载转移率及临界附着系数的响应输出, 分析不同因素及天气条件对立交出口行车安全的影响。并对风险评价进行量化分析, 将风险分为低、高和极高3个等级。研究结果表明: 立交出口处的反超高对行车安全造成严重威胁, 车辆以90 km/h的速度急转弯换道时, 侧翻风险等级为高; 在减速车道以小于400 m的转向半径进行换道, 侧翻风险等级为极高; 而当车辆在雨天以90 km/h的速度行驶时, 即使不是急转弯, 侧滑风险等级为高; 当车辆以大于600 m的转弯半径进行换道时, 至少需要120 m的行驶距离, 渐变段应该大于120 m以满足不良天气的行车要求。

**关键词:** 交通工程; 行车安全; 动力学仿真; 立交出口; 风险分析

**中图分类号:** TP391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-7029(2016)12-2522-11

## Driving risk simulation analysis of lorries at interchange exit section

ZHANG Chi<sup>1,2</sup>, QI Chen<sup>1</sup>, HUA Guilong<sup>3</sup>, LIU Yuanyuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co. Ltd, Xi'an 710075, China; 3. Anhui Transport Consulting & Design Institute Co. Ltd, Hefei 230000, China)

**Abstract:** To study the driving safety of lorries at interchange exit section where the mainline is circular, dynamic model of vehicle, road model and drivers' aiming trajectory model were developed by multi-body dynamics simulation software Trucksim. The lorries were simulated in the working conditions by changing the super-elevations, speed and vehicle turning radius separately. The single factor analysis and multi-factor analysis were done respectively to reduce the number of tests. The vehicle lateral load transfer rate and the response output of critical adhesion coefficient were concluded. The influence of weather conditions and different factors on driving safety at the interchange exit was analyzed. And risk evaluation was analyzed quantized. Risk can be divided into low, high, very high. The results show that anti super-elevation may pose a serious threat to the safety at interchange exit. The risk is high when vehicles changing lane at a speed of 90 km/h and at the steering radius less than 400 m in the deceleration lane. When the vehicle operates at a speed of 90 km/h in rainy day, even if there is no

收稿日期: 2016-08-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01); 教育部博士点基金新教师项目(20120205120013); 交通运输部应用基础研究项目(2014319812170); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590915)

通讯作者: 张驰(1981-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 从事交通安全与道路仿真研究; E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

sharp turn, side slip risk is also high. When vehicle is changing lane with the turning radius bigger than 600m, the length of transition section should be at least 120m to meet the driving requirement of the bad weather.

**Key words:** traffic engineering; driving operation safety; dynamics simulation; exit of interchange; risk analysis

近年来,随着交通运输业的发展,高速公路交通事故数量明显上升,在立交出口路段尤为严重。互通式立交减速车道设置在主线与出口匝道之间,是一段供驶出车辆完成减速过程的附加车道。由于减速车道的特定功能,驾驶员在减速车道行驶时,不仅要及时减速,还要转向换道,恶劣的天气状况更是对驾驶员造成严重的干扰,行车风险性在此段道路急剧增加。针对立交出口路段行驶安全问题,专家学者开展了众多研究。Hassan 等<sup>[1]</sup>基于期望事故率建立变速车道长度计算模型,得出减速车道的合理长度建议值。Roess 等<sup>[2]</sup>分析车道变换行为与交织区长度、交织区车道数、流量比和总流量之间的关系,车道变换率随流量比和总流量的变化趋势不明显,而当交织区长度由 135 m 增加到接近 500 m,平均每 30 m 约增加 0.5。孟巧娟等<sup>[3]</sup>对现行规范中分流点曲率半径及回旋曲线参数的取值进行了进一步探讨,研究结果表明立交出口的线形参数适当提高对保证行车安全是有利的。李光等<sup>[4]</sup>采用基于公路安全评价指南和基于汽车行驶动力学的前、后 2 种方法对某高速公路出口匝道工程实例进行安全评价。刘亚非等<sup>[5]</sup>在分析统计出口匝道事故数据的基础上,结合速度适应性、弯道错觉、坡道错觉等交通心理学原理,从主动防护和被动防护 2 个方面提出简单的改善措施。王海君等<sup>[6]</sup>针对我国设计中互通式立交减速车道最小长度取值不合理的问题,研究主线设计速度为 120 km/h 的高速公路互通式立交分流区驶出车辆的分流位置和减速特性,利用模型对减速车道长度取值的合理性进行分析,并给出对应不同匝道设计速度的减速车道长度建议值。目前,国内外的研究大多针对立交主线为直线时的出口安全问题,并没有考虑主线为圆曲线时的行车安全,而当立交主线为圆曲线时,车辆在减速车道上行驶时 would 经历一个不利于行车安全的反超高,这对车辆的侧翻有重要影响<sup>[7]</sup>。另外,对于不同天气对于立交出口路段车辆的行驶安全缺少足够的认识,而恶劣天气会导致

车辆安全事故的增加。本文采用 Trucksim 仿真软件,建立车辆的动力学模型、道路模型以及车—路耦合模型,以此为手段模拟车辆在立交圆曲线出口路段不同超高横坡度情况下以不同速度、不同换道半径的行驶情况,根据车辆的动力学以及运动学响应分析车辆在不同工况行驶的反应情况。

## 1 仿真模型

Trucksim 是由美国机械仿真公司 (Mechanical Simulation Corporation, 即 MSC), 在密歇根大学公路交通研究所 UMTRI 多年的试验及车辆动态研究经验基础之上,开发的一种动态模拟汽车整车动力学的仿真软件<sup>[8]</sup>,用于仿真及分析轻型货车、大客车、重型卡车、多轴半挂车等的动态特性,可分析车辆的动力性、燃油经济性、通过性、操纵稳定性、制动性及平顺性。Trucksim 是一款集成建模、仿真及分析软件包的软件,在整车性能仿真预测时,可根据初始理论设计参数,进行参数化模型搭建,而不需要进行实体模型构建,同时能够迅速地在所做的不同仿真之间切换;与目前其他常用车辆性能分析软件相比,具有方便、高效、有效、可靠及精确等优势。本文分别建立人、车、路模型对立交减速车道路段进行仿真<sup>[9]</sup>。

### 1.1 驾驶人模型

TruckSim 中的驾驶员转向控制模型为 C. C. MacAdam 教授提出的最优预瞄控制模型 (Optimal Preview Control), 是目前国际上公认的几种主要的驾驶员模型之一。预瞄最优控制模型的轨迹跟随程度非常高,它根据最优控制理论,用轨迹跟随的极小值计算并导出跟随路径。本文即利用预瞄轨迹模型来模拟驾驶员在减速车道的换道过程。

换道时驾驶员在行驶过程中最为常见的行为之一,李玮等<sup>[10-11]</sup>给出了车辆的圆弧换道轨迹模型,指出车辆的换道轨迹由 2 段圆曲线和直线构成,并且所得圆弧换道模型接近于实际工况。但是

由于圆曲线轨迹上各处曲率都是相同的,在曲线与直线的链接点处曲率是不连续的,这与车辆在实际情况下的换道行驶轨迹是不相符的。本文对圆弧换道轨迹进行改进,建立缓和曲线换道轨迹模型,使得仿真过程更加合理。

车辆在减速车道路段的换道行驶过程中,驾驶员首先会轻微转动方向盘,使车辆逐渐向由侧车道靠近,直至两车道的分界线。当车辆进入减速车道之后,驾驶员反向小角度转动方向盘,改变车辆的行驶方向,使车辆能够顺利进入减速车道,之后回正方向盘,完成换道过程。在这个换道过程中,驾驶员通常会以均匀速度来转动方向盘,来确保汽车在换道过程中稳定地行驶<sup>[12]</sup>。基于以上分析,将车辆换道轨迹简化为连续的反向凸型曲线,采用由缓和曲线构成的反向凸型曲线轨迹作为车辆换道轨迹模型,见图1。此轨迹为2段长度相等、方向相反的凸型曲线组成,凸型曲线中间的曲率半径即为车辆换道中的最小安全转弯半径。轨迹模型见式(1)。

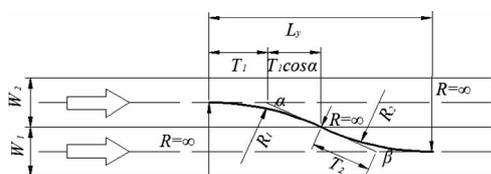


图1 车辆换道轨迹

Fig.1 Vehicle lane changing trajectory

$$\frac{W_1}{2} = \left( R_1 + \frac{L_{s1}^2}{24R_1} \right) \left( 1 - \cos \frac{L_{s1}}{R_1} \right) + \left( \frac{L_{s1}}{2} - \frac{L_{s1}^3}{240R_1^2} \right) \cdot \sin \frac{L_{s1}}{R_1} \quad (1)$$

式中:  $W_1$  为前车道宽度, m;  $R_1$  为第1个凸型曲线的连接处半径, m;  $L_{s1}$  为第1个缓和曲线长度, m。

应用上述模型即可得到大货车在减速车道路段的换道轨迹模型, 根据模型计算曲线长度等要素, 即可得到车辆仿真路径。将所得轨迹路径输入到 Trucksim 中, 即可对车辆进行仿真。

### 1.2 车辆模型

本文采用解放牌某型号载重货物运输车<sup>[13]</sup>, 车体尺寸为 11 995 mm×2 500 mm×3 080 mm, 额定载重 30 000 kg, 车轴数为 4, 车轮为前 4 后 8。车体建模的主要内容为车辆尺寸(车长、车高、车宽

等)、车体质量及和悬架系统等的设置, 此次试验在满载情况下进行。

#### 1.2.1 悬架系统

Trucksim 仿真软件中, 车辆悬架的建模主要是建立悬架的运动学特性(Kinematics)和弹性运动学特性(Compliance)。悬架特性数据通过试验获得, 根据客车的试验数据, 车辆前轴选用 5.5 T 悬架的 K&C 特性, 后轴选用 10 T 悬架的 K&C 特性<sup>[14]</sup>。钢板弹簧和阻尼器本身的特性曲线, 以及悬架系统 K&C 特性对转向系统、轮胎系统和操纵稳定性等整车动力学的影响因素, 采用软件提供的默认值。

#### 1.2.2 轮胎模型

对车辆进行动力学分析, 轮胎是一个重要研究对象, 它是车辆与道路直接接触的部件, 看来只是一个黏弹性的圆环, 但实际上是一个复杂的非线性系统, 良好的轮胎特性保证了仿真车辆的运动力学性能。按照车型的要求, 轮胎模型选取半径为 537 mm 的轮胎特性作为仿真输入参数。对于后两轴每侧都为双胎的车辆, 采用单独输入轮胎特性参数的方式, Trucksim 会根据具体的设置自动转化为当量双胎受力模块。本文车辆模型双胎中心线间距取 310 mm。

#### 1.2.3 转向系统

转向系统建模的主要内容是对于转向轴的设置, Trucksim 软件包括了长型、中型和短型等类型的转向轴。可以根据需要设置转向系统的名义传动比、左右轮非对称运动学特性、弹性运动学特性、轴转向特性以及相关的转向轮定位参数<sup>[15]</sup>。本仿真车辆选用的名义转向传动比为 23.3 : 1, 非对称转向系统的运动学特性、轴的转向特性以及与相关的车轮定位参数等的设置采用默认值, 所建立的转向系统模型不包括助力转向模块。

#### 1.2.4 荷载模型

荷载建模是通过在半挂车之上放置规则的配重块的方式来进行设置的, 仿真中拟模拟大货车在最不利条件下的仿真工况, 所以载重设为满载。采用规则荷载来模拟重型车辆的载重, 满载的荷载质量为 30 000 kg, 具体参数见表 1, 荷载模型见图 2。

表 1 荷载模型参数

Table 1 Parameters of Load Model

| 荷载参数               | 数值     |
|--------------------|--------|
| 荷载长度/mm            | 7 500  |
| 荷载宽度/mm            | 2 000  |
| 荷载高度/mm            | 2 000  |
| 荷载质心距前轴的距离/mm      | 7 200  |
| 荷载质心距地面距离/mm       | 2 300  |
| 荷载质心距汽车纵向对称面的距离/mm | 0      |
| 荷载质量/kg            | 30 000 |

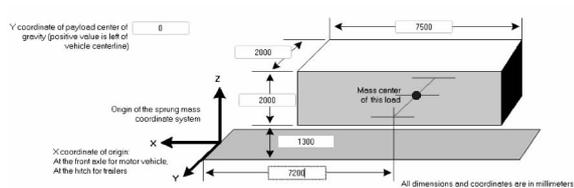


图 2 荷载模型

Fig.2 Model of payload

### 1.3 道路模型

本文研究大货车在减速车道的换道工况,道路的车道分为立交主线车道与减速车道,现对仿真道路模型进行简化,只建立立交主线最右侧车道与减速车道,并且减速车道在立交主线圆曲线外侧<sup>[16]</sup>。Trucksim 中道路模型可 Additional Data 模块中输入。首先利用道路设计软件设计指定半径的道路,并生成逐桩坐标表,将其输入到道路平面模块。道路超高的设置可在横断面界面模块中直接输入数据。

道路设计指标直接影响着车辆行驶的安全性,因此本试验中所采用的道路设计指标均符合《公路路线设计规范》<sup>[17]</sup>中的相关规定,道路模型参数各项指标见表 2。

## 2 立交出口风险评价指标

《公路立体交叉设计细则》<sup>[18]</sup>规定一个车道宽度处的路段应采用与主线相同的横坡。鼻端处的匝道横坡宜向外倾斜,并通过设于三角区的附加路拱完成反向过度。车辆在由主线车道进入减速车道的转弯换道过程中,车辆要右转方向盘,使车辆转弯换道行驶,此时道路的超高横坡度是按照车辆正常转弯而进行设置的,所以此时车道的超高横

坡度是不利于汽车向外转弯行驶的反超高,会对车辆的行驶安全造成一定的行车危险。

表 2 道路模型参数

Table 2 Parameters of road model

| 道路参数                           | 数值     |
|--------------------------------|--------|
| 主线设计速度/(km · h <sup>-1</sup> ) | 100    |
| 主线半径/m                         | 1 000  |
| 超高值/%                          | 4      |
| 变速段长/m                         | 125    |
| 渐变段长度/m                        | 90     |
| 出入口渐变率                         | 1/22.5 |
| 分流鼻端处出口匝道的曲率半径/m               | 300    |
| 车道宽度/m                         | 3.75   |
| 纵坡/%                           | 0      |
| 匝道超高/%                         | 6      |
| 匝道设计速度/(km · h <sup>-1</sup> ) | 70     |
| 匝道圆曲线半径/m                      | 175    |

车辆在弯道路面定转角或变转角行驶,所产生的横向力应不超过轮胎与路面附着力所允许的界限。当车速超过一定数值时,路面附着力不足以克服离心力的影响,汽车后轴发生侧滑;同时由于纵向和横向质量的转移,各车轮上的法向荷载变化很大,车身产生侧倾,严重时会导致侧翻。

货车的侧翻可以分为车辆自身转向引起的侧翻和由外界物体干扰所造成的绊倒型侧翻两大类,前者是由于有过多车辆荷载转移到一侧而使车辆两侧无法平衡,使得车辆一侧轮胎所受到的垂直支持力为 0,此时发生侧翻<sup>[19]</sup>。后者是由于车辆在行驶过程中由于某种原因发生侧滑,当车辆与行驶轨迹周围的障碍物发生碰撞时,会导致车辆的侧翻。本文所研究的类型为转向所引起的侧翻。孙川等<sup>[20]</sup>指出了侧翻指标方面,横向荷载偏移率(LTR)具有较高可信度,笔者基于此对大货车横向失稳风险进行研究。

LTR 定义为车辆在行驶过程中内侧车轮荷载转移到外侧车轮的荷载与总荷载之比,其值是左右车轮受力差的比值,其取值在±1 之间,见式(2)。

$$LTR = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{1i} - F_{2i})}{\sum_{i=1}^n (F_{1i} + F_{2i})} \quad (2)$$

式中:  $F_{1i}$  为车辆右侧车轮上的垂直载荷, kN;  $F_{2i}$

为车辆左侧车轮上的垂直载荷, kN;  $i$  为轴的位置;  $n$  为总的车轴数。

汽车在行驶过程中, 荷载会在两侧之间进行转移, 即  $LTR$  的取值范围为  $[-1, 1]$ , 一般地, 对于车辆侧翻风险, 当  $LTR$  值不超过 0.6 时, 车辆处于安全状态。

而在车辆的侧滑方面, 道路附着系数对车辆发生侧滑的影响很大, 主要原因为, 当车辆在附着系数低的路面上转向行驶时, 道路所能给轮胎提供的侧向力不足以抵消车辆转向所需要的离心力, 故选取风险分析指标临界附着系数<sup>[21]</sup>, 用以体现侧向力和垂直负荷的共同作用。临界附着系数是指大货车每个车轮所受的侧向力与垂直力的比值取绝对值后的最大值。选用临界附着系数作为侧滑风险分析指标是考虑速度、车辆转弯半径对侧滑风险的影响, 路面附着系数大于临界值, 行车安全, 小于临界值, 行车危险。需要指出的是, 临界是指当路面附着系数等于临界值时, 小客车会发生侧滑危险, 见式(3)。

$$\mu(z) = \max\left(\left|\frac{F_{yij}(z)}{F_{zij}(z)}\right|\right) \quad (3)$$

式中:  $\mu(z)$  为临界附着系数;  $F_{yij}(z)$  为轮胎侧向力;  $F_{zij}(z)$  为轮胎垂直力;  $i$  为车轴的轴数;  $j$  为车轴上的轮数。

为更加直观表示大货车行车风险, 定义  $\Delta LTR$  与  $\Delta\mu$  分别为横向荷载便宜率安全容许值、附着系数安全容许值, 其值为临界值与实际值的差值, 分别对侧翻风险与侧滑风险进行定量分析, 并且分为低、高和极高 3 个评价等级, 将侧翻与侧滑风险进行综合分析, 风险等级划分见图 3。

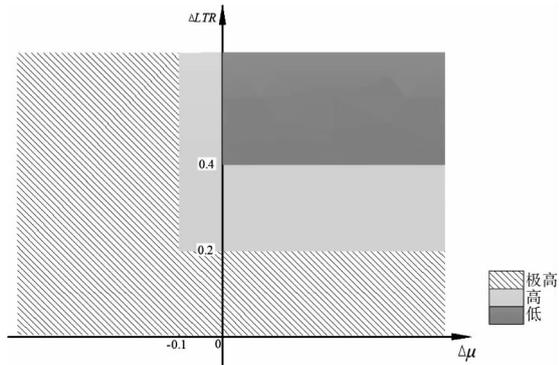


图3 风险等级划分区间  
Fig.3 Risk gradation range

### 3 出口路段风险因素分析

#### 3.1 车辆在立交出口路段行驶特性分析

车辆在由立交主线进入减速车道的过程中, 首先要以大半径转弯换道, 进入最右侧车道, 之后再转弯进入渐变段车道, 随之进入减速车道、通过分流鼻、小鼻端, 最后进入匝道, 在整个过程中, 车辆都是以减速来行驶的<sup>[22]</sup>。

在立交减速段中, 由于立交出口路段车道的复杂性, 车辆从主线最右侧车道行驶时, 可能会从渐变段开始转向进入减速车道, 也可能因驾驶员会因反应不及时或者操作不当导致车辆从减速段才开始转向进入减速车道。驾驶员要在小鼻点前完成转向换道, 所以转向行为发生的越晚, 车辆转弯半径越小, 驾驶人员的心理越紧张, 行车危险也越大。如果转向换道不及时, 不仅车辆不能及时减速进入匝道, 还可能会发生冲撞匝道鼻端等交通事故。

为了采集立交出口大货车行驶数据, 在广州广河高速的广河-京港澳立交减速车道前 90 m 处架设雷达测速仪, 利用雷达测速仪测定前方车辆的行驶速度及行驶坐标, 将雷达采集到的车辆数据资料进行提取, 共得到 133 辆驶入减速车道的大货车的行驶数据。利用所得数据进行统计分析, 可以得出大货车不同位置处的  $v_{85}$ , 横轴采用区间平均速度, 纵轴为累计频率, 可以直观的得出大货车的  $v_{85}$ 。统计速度见图 4。

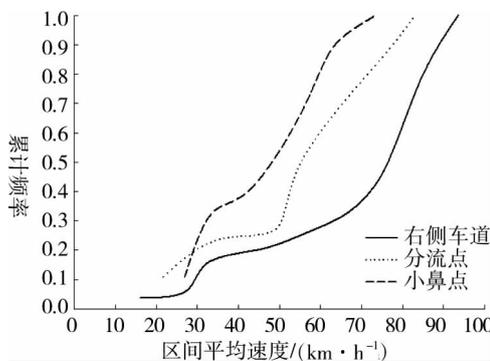


图4 减速车道区域行车速度  
Fig.4 Driving speed at deceleration lane

将此次仿真所用到的速度数据进行整理, 见表 3。

表 3 不同点处车速统计

Table 3 Statistical speed in different place

| 位置                   | 速度/(km · h <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|----------------------------|
| 主线设计速度               | 100                        |
| 主线右侧 v <sub>85</sub> | 90                         |
| 分流端 v <sub>85</sub>  | 75                         |
| 小鼻端 v <sub>85</sub>  | 63                         |
| 匝道设计速度               | 60                         |

工况进行仿真,研究道路超高横坡度  $e$ ,速度  $v$  和换道转弯半径  $R_{ref}$ 对行车风险的影响,仿真试验设计见表 4。

表 4 单因素仿真工况

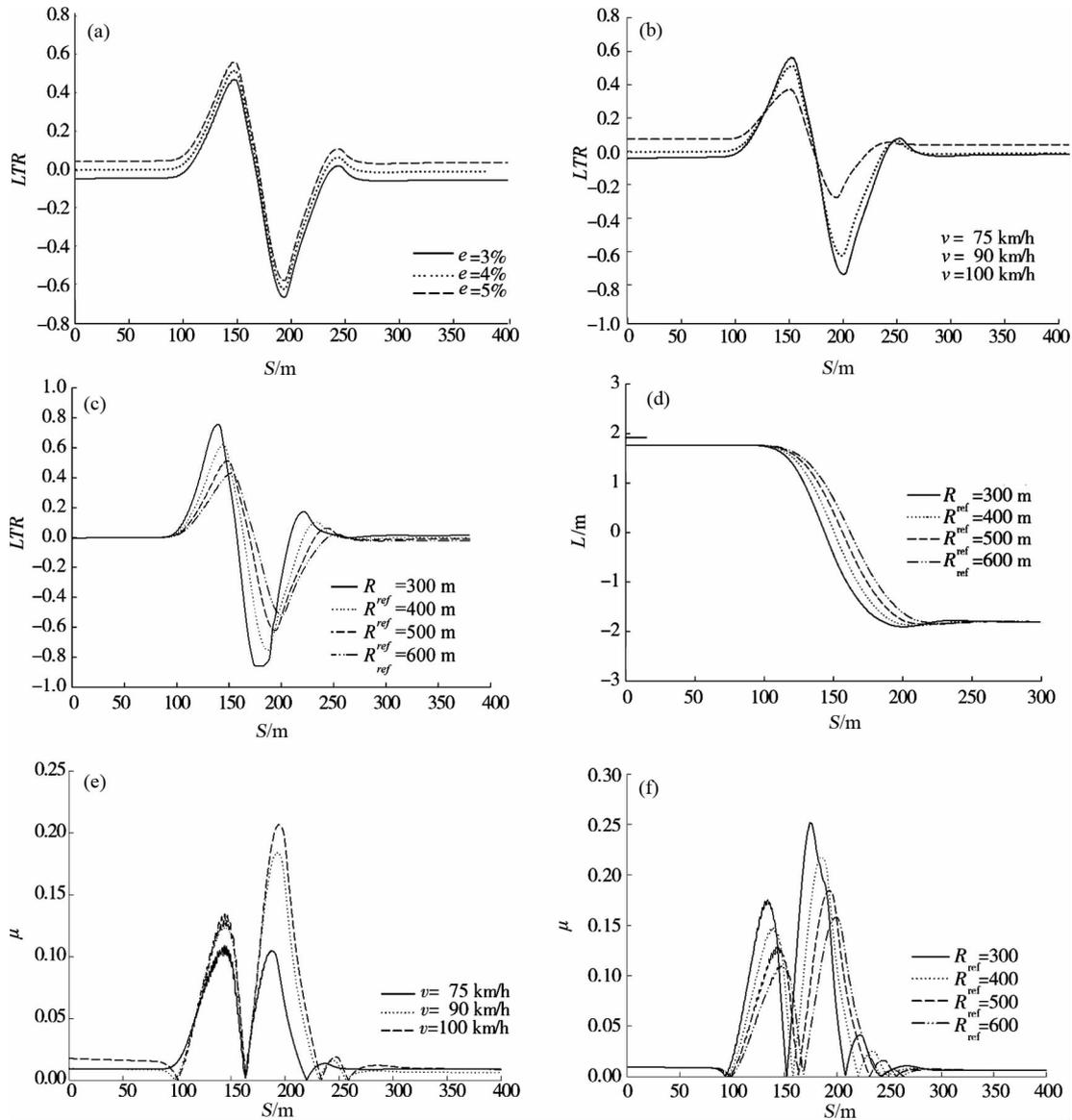
Table 4 Single factor simulation conditions

| 仿真工况       | $e/\%$ | $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | $R_{ref}/\text{m}$ |
|------------|--------|-------------------------------------|--------------------|
| 工况 1(道路超高) | 3,4,5  | 90                                  | 500                |
| 工况 2(行车速度) | 4      | 100,90,75                           | 500                |
| 工况 3(换道半径) | 4      | 90                                  | 300,400,500,600    |

### 3.2 单因素分析

参考《公路路线设计规范》和《公路立体交叉涉及细则》,本文对大货车在减速车道路段的行驶

利用 Trucksim 对所建模大货车进行以上工况的仿真分析,仿真结果见图 5。



(a)道路超高与侧翻风险;(b)速度与侧翻风险;(c)转弯半径与侧翻风险;(d)不同转弯半径下的换道距离

(e)速度与侧滑风险;(f)转弯半径与侧滑风险

图 5 车辆动力学响应

Fig.5 Vehicle dynamic response

从图 5(a) 中可以看出,大货车在 5% 的正常超高路段行驶时的  $LTR$  值约比在 3% 的正常超高路段行驶时的  $LTR$  值小 0.1,而在反超高路段,前者却比后者大 0.1,说明了反超高路段对车辆行车风险的不利影响。随着立交主线圆曲线路段超高值的增加,车辆在减速车道正常超高路段的侧翻风险减小,这与超高在弯道路段的作用是相一致的。但是在反超高路段,道路超高值的增加会加剧车辆的不稳定性,造成侧翻风险,这一点在道路的设计中、驾驶员的实际操作中通常是被忽略的。

图 5(b) 为当大货车以不同的行驶速度在减速车道上行驶的仿真工况,可以看出,随着速度的减小,车辆的行车风险明显降低。当大货车在转向换道之前不减速,直接以主线设计速度进行转向换道,在减速车道的任何路段开始执行换道,此时大货车在反超高路段的  $LTR$  值都已经达到了 0.6,行车风险很高,在正常超高路段,虽然  $LTR$  值大于反超高路段,但是由于弯道超高横坡度的存在行车风险明显小于反超高路段。当驾驶员反应及时,车辆在减速车道开始端附近,以主线右侧  $v_{85}$  进行转弯换道时,车辆处于安全状态;当驾驶员反应不及时,在分流端才开始执行换道时,由于速度在减速段的明显降低,以 500 m 的转弯半径进行换道时是很安全的。

从图 5(c) 中可以看出当车辆以不同的转弯半径换道进入减速车道时,随着转弯半径的增加,行车风险有明显的降低。当驾驶员转动方向盘以 300 m 和 400 m 的转弯半径进行转弯换道时,在反超高路段,车辆的  $LTR$  最大值分别达到了 0.8 和 0.6,已经超过了侧翻的临界值,大货车如果在减速车道以低于 400 m 的转向半径进行换道,侧翻风险极大。当驾驶员换道转弯半径大于 400 m 时,侧翻风险低,车辆能安全完成换道进入减速车道。

从图 5(d) 中可以看出,转弯半径越小, $LTR$  峰值的横坐标的道路桩号越小,随着换道半径的减小,车辆完成换道进入减速车道过程的行驶距离越短。300 m 的转弯换道半径所需要的行驶距离是最短的,而 600 m 的转弯换道半径所需要的行驶距离是最长的,两者相差约 50 m。驾驶员若要以较短的距离完成换道,则需要增大方向盘转角,减小转弯半径,但此时行车风险也在增大,驾驶员需要进行权衡决策。道路管理者也可以在减速车道路

段设置标示,给予驾驶员一定的指引,如在小鼻点前 100 m 处,若驾驶员仍以较大转弯半径换道行驶,则有冲撞小鼻点附近道路设施的危险,若以小半径转弯换道行驶,则有侧翻危险,应提醒驾驶员及早换道。

图 5(e) 为临界附着系数随着速度和车辆换道半径的变化曲线图。随着速度的增加、转弯半径的减小,临界附着系数  $\mu$  在增加,即侧滑风险增大。天气的变化会影响道路附着系数的变化,根据非稳态路面摩擦因数现场实验的研究结果和相关研究结果,可以知道当路面有冰雪覆盖时路面摩擦系数只有 0.1~0.2,当路面潮湿时摩擦因数只有 0.3~0.4,使用时间较长的旧路面摩擦因数为 0.5~0.6,新建路面摩擦因数为 0.7~0.8<sup>[23]</sup>。当路面附着系数小于车辆侧滑时的临界附着系数时,车辆会发生明显的侧滑。如在雨雪严重的天气,车辆在以 100 km/h 的速度在减速车道转弯换道时,此时侧滑风险很大,而 300 m 和 400 m 的小半径转向也会在雨雪天气对行车造成严重危险。

### 3.3 多因素分析

为了研究车辆在多种因素综合作用下的行车风险,本次试验需要考虑 3 种影响因素,每种影响因素又有 3 组数据,为缩减试验次数,采取正交试验缩减试验的数据组<sup>[24]</sup>,选取的正交试验表为  $L_9(3^4)$ ,显著性分析见表 5~6。

表 5 基于横向荷载偏移率  $LTR$  的离差及方差分析结果  
Table 5 Results of deviation and variance analysis based on lateral offset rate

| 因素      | $v$  | $R_{ref}$ | $e$      | 误差       |
|---------|--|-----------|----------|----------|
| 离差平方和   | 0.00 203   | 0.01 864  | 0.01 418 | 0.00 153 |
| 自由度     | 2  | 2         | 2        | 2        |
| $F$ 值   | 13.283   | 12.186    | 9.271    |          |
| $F$ 临界值 | $F_{0.1}(2,2) = 9F_{0.1}(2,2) = 9F_{0.1}(2,2) = 9$ |           |          |          |
| 显著性     | 显著   | 显著        | 显著       |          |

表 6 基于临界附着系数  $\mu$  的离差及方差分析结果  
Table 6 Results of deviation and variance analysis based on critical adhesion coefficient

| 因素      | $v$  | $R_{ref}$ | $e$      | 误差       |
|---------|--|-----------|----------|----------|
| 离差平方和   | 0.049 611  | 0.04 203  | 0.02 243 | 0.00 311 |
| 自由度     | 2  | 2         | 2        | 2        |
| $F$ 值   | 15.952   | 13.514    | 7.213    |          |
| $F$ 临界值 | $F_{0.1}(2,2) = 9F_{0.1}(2,2) = 9F_{0.1}(2,2) = 9$ |           |          |          |
| 显著性     | 显著   | 显著        | 不显著      |          |

表 5~6 为基于横向荷载转移率  $LTR$  和基于临界附着系数  $\mu$  的离差及方差分析结果,从表中可以看出行车速度、换道半径对大货车侧翻和侧滑影响显著,而道路超高横坡度对大货车的侧翻影响显著,对大货车的侧滑影响较小。行车速度对车辆的行驶安全具有重要作用,速度的增加导致转弯时轮胎侧向力的增加,增加超过阈值时即会发生侧翻,而所在路面无法提供过大的摩擦力时即会发生侧滑<sup>[25]</sup>。换道半径对行车风险也有较大影响,半径的大小直接影响车辆离心力的大小,进而影响侧翻与侧滑。道路的超高横坡度主要影响大货车的侧翻,主要是由于大货车在换道过程中经历一个反超高过程,在这个过程中车辆的荷载转移率在不断增加,过大的反向超高会显著影响车辆的侧翻。

#### 4 评价模型的建立及风险分析

由以上分析可知,行驶速度、换道半径、道路超高横坡度对大货车在换道过程中的侧翻有显著影响,行驶速度、换道半径对大货车侧滑有显著影响,各因素与行车风险的关系见式(4)。

$$\begin{cases} LTR = f_1(v, R_{ref}, e) \\ \mu = f_2(v, R_{ref}) \end{cases} \quad (4)$$

利用 MATLAB 对上述仿真试验所得数据进行回归分析,得出各因素综合作用对  $LTR$  及  $\mu$  值的预测值,见式(5)~(6)。

$$LTR = 0.018 \frac{v^2}{R} + 0.048 e + 0.054 \quad R^2 = 0.977 \quad (5)$$

式中: $LTR$  为车辆荷载偏移率; $F_{ri}$ 为车辆右侧车轮上的垂直载荷,kN; $F_{li}$ 为车辆左侧车轮上的垂直载荷,kN; $i$ 为轴的位置; $n$ 为总的车轴数。

$$\mu = 0.016 \frac{v^2}{R} + 0.083 \quad R^2 = 0.972 \quad (6)$$

式中: $\mu(z)$ 为临界附着系数; $F_{vij}(z)$ 为轮胎侧向力; $F_{zj}(z)$ 为轮胎垂直力; $i$ 为车轴的轴数; $j$ 为车轴上的轮数。

利用以上回归模型可以对天气状况、驾驶员操作、减速路段道路设计进行行车风险对比分析,参照规范,在主线设计速度为 100 km/h,匝道设计速度为 60 km/h 的条件下,分别取换道半径 400 m(急转弯)和 600 m(适度转弯),行驶速度为 90(驶入速度),70(分流处速度)和 60 km/h(驶出速度),道路超高为 4%,天气情况为正常天气、小雨天气、暴雨天气。最终得到雨天和超速、急转弯情况下的行车风险,见表 7。

表 7 立交出口大货车行车风险分析

Table 7 Truck driving risk analysis at interchange exit

| $e/\%$ | 天气 | $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | $R_{ref}/\text{m}$ | $LTR$ | $LTR_c$ | $u$   | $u_c$ | 行车风险 |
|--------|----|-------------------------------------|--------------------|-------|---------|-------|-------|------|
| 4      | 正常 | 60                                  | 400                | 0.408 | 0.6     | 0.227 | 0.8   | 低    |
|        |    |                                     | 600                | 0.354 | 0.6     | 0.179 | 0.8   | 低    |
|        |    | 70                                  | 400                | 0.467 | 0.6     | 0.279 | 0.8   | 低    |
|        |    |                                     | 600                | 0.393 | 0.6     | 0.214 | 0.8   | 低    |
|        |    | 90                                  | 400                | 0.611 | 0.6     | 0.407 | 0.8   | 高    |
|        |    |                                     | 600                | 0.489 | 0.6     | 0.300 | 0.8   | 低    |
|        | 小雨 | 60                                  | 400                | 0.408 | 0.6     | 0.227 | 0.4   | 低    |
|        |    |                                     | 600                | 0.354 | 0.6     | 0.179 | 0.4   | 低    |
|        |    | 70                                  | 400                | 0.467 | 0.6     | 0.279 | 0.4   | 低    |
|        |    |                                     | 600                | 0.393 | 0.6     | 0.214 | 0.4   | 低    |
|        |    | 90                                  | 400                | 0.611 | 0.6     | 0.407 | 0.4   | 高    |
|        |    |                                     | 600                | 0.489 | 0.6     | 0.300 | 0.4   | 低    |
| 暴雨     | 60 | 400                                 | 0.408              | 0.6   | 0.227   | 0.3   | 低     |      |
|        |    | 600                                 | 0.354              | 0.6   | 0.179   | 0.3   | 低     |      |
|        | 70 | 400                                 | 0.467              | 0.6   | 0.279   | 0.3   | 低     |      |
|        |    | 600                                 | 0.393              | 0.6   | 0.214   | 0.3   | 低     |      |
|        | 90 | 400                                 | 0.611              | 0.6   | 0.407   | 0.3   | 极高    |      |
|        |    | 600                                 | 0.489              | 0.6   | 0.300   | 0.3   | 高     |      |

从表7中可以看出,1)天气的变化主要影响道路路面附着系数的变化,路面的附着系数会对车辆的侧滑产生显著影响,在正常天气情况下,路面附着系数可以提供车辆的换道侧向力,因而没有侧滑风险。在雨天,车辆在减速车道路段以90 km/h的速度换道时会有较大的行车风险,随着降雨量的增加,车辆侧滑的风险也越大。所以在雨天,驾驶员应该减速慢行,当驶进减速车道区域后尽早换道,避免急转弯。道路管理者也可在进入减速车道处以交通标志给予驾驶员提醒。2)不论是在何种天气,速度对车辆行车风险的影响都较大,当车辆以90 km/h的速度急转弯进入减速车道时,车辆发生侧翻,当雨天时,此种工况还会发生侧滑。当车辆以60 km/h和70 km/h的速度进行换道时,行车风险低,可以给予大货车司机一个参考。所以车辆在进入减速车道区域后应及时减速,当速度降低到60 km/h~70 km/h时再执行换道,可大大降低行车风险。3)通过对比雨天和正常天气的行车风险,可以得出在正常天气的情况下,车辆发生侧翻的风险明显大于发生侧滑的风险,而在雨天的情况下,汽车发生侧滑的风险大于侧翻的,这就提醒驾驶员在不同的天气状况下,应该采取不同的应对措施以降低行车风险。而管理部门可以在不同的天气条件下给以不同的驾驶指引。

## 5 结论

1)以行车动力学为基础,利用Trucksim软件,考虑立交主线为圆曲线情况下,车辆换道进入减速车道时道路反向超高横坡度对行车安全的影响,模拟车辆以不同速度、换道半径由主线换道进入减速车道,发现反超高路段车辆侧翻风险高,速度及转弯半径对车辆换道过程均会产生影响。

2)采用正交试验缩减仿真数据,运用数理统计理论对行车风险影响因素进行了显著性检验,发现行驶速度、换道半径、道路超高对车辆侧翻有显著性影响,行驶速度、换道半径对车辆侧滑具有显著影响。

3)综合考虑影响因素,利用MATLAB软件将仿真所得到的数据进行回归分析,分别建立了横向

荷载偏移率的预测模型与临界附着系数的预测模型,模型可以对大货车在立交主线为圆曲线时减速车道路段换道侧翻、侧滑风险进行预测。

4)车辆以90 km/h的速度急转弯换道时,侧翻风险大。而当车辆在雨天以90 km/h的速度行驶时,即使不是急转弯,侧滑风险也较大,此种天气应给予驾驶员行驶速度的指导。当车辆以大于600 m的转弯半径进行换道时,至少需要120 m的行驶距离,而目前规范中渐变段长度最大为100 m,若使车辆在不良天气下能及时安全换道进入减速车道,渐变段应该足够长以满足不良天气的行车要求。

## 参考文献:

- [1] Hassan Y, Omar A E H A, Sarhan M. Design of free-way speed change lanes: safety - explicit approach [C]// Transportation Research Board 85th Annual Meeting. 2006.
- [2] Roess R P, Ulerio J M. Analysis of four weaving sections: implications for modeling [C]//Transportation Research Board 86th Annual Meeting. 2007.
- [3] 孟巧娟, 孙家驷, 杨森顺. 立交出口匝道安全性判断的探讨[J]. 公路交通技术, 2006(6): 127-129.  
MENG Qiaojuan, SUN Jiasi, YANG Senshun. Discussion on judgment of safety at exit of interchange [J]. Technology of Highway and Transport, 2006(6): 127-129.
- [4] 李光, 李志勇, 袁杰, 等. 高速公路互通立交出口匝道安全评价[J]. 公路工程, 2012, 37(5): 64-67.  
LI Guang, LI Zhiyong, YUAN Jie, et al. safety evaluation of off-ramp in highway interchange [J]. Highway Engineering, 2012, 37(5): 64-67.
- [5] 刘亚非, 杨少伟, 潘兵宏. 基于交通心理学的高速公路出口匝道事故成因研究[J]. 公路, 2011(11): 104-108.  
LIU Yafei, YANG Shaowei, PAN Binghong. Research on expressway off ramp accident causes based on traffic psychology [J]. Highway, 2011(11): 104-108.
- [6] 王海君, 杨少伟. 高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 124-128.

- WANG Haijun, YANG Shaowei. Research of length of deceleration lane at expressway interchange[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015,32(3):124-128.
- [7] 汪双杰,张驰,金龙.基于模糊综合评判的山区危险性急弯路段辅助决策方法[J].中国公路学报,2015(12):120-127.
- WANG Shuangjie, ZHANG Chi, JIN Long. Auxiliary decision-making method on risky sharp turn section in mountain area based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015(12):120-127.
- [8] Dupuy S, Egges A, Legendre V, et al. Generating a 3D simulation of a car accident from a written description in natural language: the CarSim system[J]. Proceedings of the Workshop on Temporal & Spatial Information Processing, 2001, 13(cs.CL/0105023):1-8.
- [9] 张驰,邵东建,张敏.基于小客车侧滑微观仿真曲线路段行车风险分析[J].系统仿真学报,2015,27(7):1609-1627.
- ZHANG Chi, SHAO Dongjian, ZHANG Min. Risk analysis of car moving on curved sections based on sideslip microscopic simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7):1609-1627.
- [10] 李玮,高德芝,段建民.智能车辆自由换道模型研究[J].公路交通科技,2010,27(2):119-123.
- LI Wei, GAO Dezhi, DUAN Jianmin. Research on lane change model for intelligent vehicles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(2):119-123.
- [11] 王崇伦,李振龙,陈阳舟.考虑换道约束空间的车辆换道模型研究[J].公路交通科技,2012,29(1):121-127.
- WANG Chonglun, LI Zhenlong, CHEN Yangzhou. Research on lane-changing models considering restricted space[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1):121-127.
- [12] 王灵利,李新伟,潘兵宏.高速公路主线侧连续出口最小间距研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):626-631.
- WANG Lingli, LI Xinwei, PAN Binghong. Study on minimum distance of the highway line side continuous export[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(4):626-631.
- [13] 《汽车工程手册》编辑委员会.汽车工程手册·设计篇[M].北京:人民交通出版社,2001.
- Editorial Committee of the Automobile Engineering Handbook. Automobile Engineering Handbook · Design[M]. Beijing:China Communications Press,2001.
- [14] 张驰,华贵龙,张敏.考虑大货车横向稳定性的平曲线设计控制指标[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015(3):36-41.
- ZHANG Chi, HUA Guilong, ZHANG Min. Control index of horizontal curve design considering truck's lateral stability[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015(3):36-41.
- [15] 游克思,孙璐,顾文钧.公路平曲线半径可靠性设计理论与方法[J].交通运输工程学报,2012,12(6):1-6.
- YOU Kesi, SUN Lu, GU Wenjun. Reliability design theory and method of highway horizontal curve radius[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6):1-6.
- [16] 王利朋,刘成龙,杨雪峰.基于正交距离最短的平面线形拟合方法及应用[J].铁道科学与工程学报,2014,11(5):125-130.
- WANG Lipeng, LIU Chenglong, YANG Xuefeng. Method and application of plane linear fitting based on shortest orthogonal distance[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(5):125-130.
- [17] JTG D20—2006,公路路线设计规范[S].
- JTG D20—2006, Design specification for highway alignment[S].
- [18] JTG TD21—2014,公路立体交叉设计细则[S].
- JTG D20—2006, Guidelines for design of highway grade-separated intersections[S].
- [19] 徐中明,于海兴,伍小龙.车辆侧翻指标与侧翻风险因素分析[J].重庆大学学报,2013(3):25-31.
- XU Zhongming, YU Haixing, WU Xiaolong. Analysis on rollover index and rollover risk factors of vehicles[J]. Journal of Chongqing University, 2013(3):25-31.
- [20] 孙川,吴超仲,褚端峰.弯道安全车速计算改进模型研究[J].中国公路学报,2015,28(8):101-108.
- SUN Chuan, WU Chaozhong, CHU Duanfeng. Improved model study of safety speed calculation in curves[J]. China Journal of Highway and Transport, 28(8):101

-108.

- [21] 张驰, 孟良, 汪双杰. 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(12):134-142.

ZHANG Chi, MENG Liang, WANG Shuangjie. Sideslip risk simulation analysis of passenger car braking behavior on expressway curved sections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015(12):134-142.

- [22] 杨少伟, 许金良, 李伟, 等. 路线设计中车辆行驶速度预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(3):53-55.

YANG Shaowei, XU Jinliang, LI Wei, et al. Prediction model of vehicle speed for highway route design[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(3):53-55.

- [23] 胡朋, 潘晓东. 不同状态下路面摩擦系数现场试验研究[J]. 公路, 2011(2):20-24.

HU Peng, PAN Xiaodong. Field experiment and study on pavement friction coefficient under different conditions[J]. Highway, 2011(2):20-24.

- [24] 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.

- [25] 王安顺, 张景, 施树明. 汽车转向轮侧滑及其影响因素的研究[J]. 中国公路学报, 1998(增1):122-128.

WANG Anshun, ZHANG Jing, SHI Shuming. Research on the side slipping of the vehicles steering wheel and the influencing factors[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998(Suppl 1):122-128.