

基于行车动力学的高速公路积水路段行车风险分析*

张 驰^{1,2▲} 王 博^{1,3} 贺九平^{1,3} 向德龙^{1,3} 伊力夏提·奥斯曼^{1,3}

(1. 长安大学公路学院 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 西安 710075;

3. 陕西省交通基础设施建设与管理数字化工程研究中心 西安 710064)

摘 要:近年来发生多起因积水产生的交通事故,为了研究高速公路积水路段小客车行车风险,综合考虑车速、驾驶行为和积水路段线形等因素,利用行车动力学仿真软件 CarSim,建立了车辆动力学模型、道路模型以及小客车换道轨迹模型。在临界水膜厚度的基础上,结合车辆侧向偏移量和质心侧偏角,提出临界积水路段长度作为评价指标,通过改变道路圆曲线半径、超高、纵坡、车速和驾驶行为,分析了小客车在积水路段的行车风险影响因素,运用 Matlab 回归分析建立了积水路段小客车行车风险预测模型,对多雨地区高速公路某积水路段进行了行车风险分析。研究表明,所建立的风险预测模型在综合考虑车速、道路圆曲线半径、超高、积水厚度的影响下,能根据积水路段长度判别小客车的行车风险类型和严重性,其中侧滑风险回归模型相关性系数达 0.962,侧偏风险回归模型相关性系数达 0.753,为针对性提出道路安全管理措施提供了参考依据。

关键词:交通安全;积水路段;行车风险分析;CarSim 仿真;风险预测模型

中图分类号:X951 **文献标志码:**A **doi:**10.3963/j.issn.1674-4861.2019.05.002

Traffic Risk Analysis of Ponding Sections on Freeways Based on Driving Dynamics

ZHANG Chi^{1,2▲} WANG Bo^{1,3} HE Jiuping^{1,3} XIANG Delong^{1,3} Yilixiati AOSIMAN^{1,3}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, 710064, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd, Xi'an, 710075, China;

3. Research Center of Digital Construction and Management for Transport Infrastructure in Shaanxi Province, Xi'an, 710064, China)

Abstract: In recent years, there have been many traffic accidents caused by ponding water on freeways. In order to study traffic risks of small passenger cars on the ponding sections, factors such as vehicle speed, driving behaviors, and line shape of the ponding sections are taken into consideration. CarSim is used to establish a vehicle dynamic model, a road model, and a Lane-changing trajectory model of the small passenger car. Based on critical thickness of water film, vehicle lateral offset is combined with sideslip angle, and critical length of ponding sections is proposed as an index for evaluation. By changing curve radius, superelevation, longitudinal slope of the road, and vehicle speed, driving behaviors, influencing factors of traffic risks of small passenger cars in the ponding sections are analyzed. By using the Matlab regression analysis method, a risk prediction model is established, which analyze a ponding section of one highway in rainy regions as a case study. The results show that the model can effectively identify the type and severity of traffic risks of small passenger cars in ponding sections. The correlation coefficient of the sideslip risk regression model is 0.962, and the cornering risk regression model is 0.753. The risk prediction model can provide references for road safety management measures.

Key words: traffic safety; ponding section; driving risk analysis; CarSim simulation; risk prediction model

收稿日期:2019-04-27

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0803906)、陕西省自然科学基金项目(S2017-ZRJJ-MS-0603)资助

▲第一作者(通讯作者)简介:张 驰(1981—),博士,副教授,研究方向:交通安全与道路仿真. E-mail:zhangchi@chd.edu.cn

0 引言

近年来,由于受厄尔尼诺等气候变化因素的影响,我国多个省市出现降雨逐年增多、雨季增长的现象,大量高速公路受连续降雨的影响,出现多处积水路段,导致交通事故率增加,并发生多起因路面积水导致的重特大交通事故。据相关数据统计,雨天交通事故发生率比晴天交通事故发生率高出约30%~60%^[1]。R. J. Charbeneau等^[2]对超高缓和段排水进行研究后发现,道路超高过渡缓和段容易积水并导致车辆产生滑水现象;戚明敏^[3]对雨天高速公路事故进行研究后发现,雨天交通事故在平曲线路段交通事故风险较直线段更高,并且在平曲线路段的事故70%发生在圆曲线段,30%发生在缓和段;李利等^[4]对雨天交通事故数据进行统计分析后发现,雨天交通事故车辆类型以小型车(轿车、小型客车)为主,约占各类事故车型的60%,主要由于路表水膜易造成轮胎表面平板状变形,易出现水膜流动变化,当车速较高或车辆较轻时易产生滑水现象,因此,对降雨天气下高速公路平曲线积水路段小客车行车风险进行研究,对提高高速公路安全水平具有重要意义。

根据国内外相关研究^[5-8],行车速度、道路表面水膜厚度、道路圆曲线半径、超高、纵坡等因素是影响积水路段行车安全的主要因素。目前积水条件下的行车安全研究主要集中在滑水机理和道路线形指标2个方向,T. F. Fwa等^[9-11]等综合考虑轮胎重启压力、花纹和车轮荷载等因素,采用CFD仿真方式验证并建立临界水漂速度的预测模型;季天剑等^[12]提出了道路表面水膜厚度预测模型,研究后发现积水路面的附着系数与车速、路表水膜厚度间有显著关系;Navin等^[13]考虑了驾驶员、车辆、道路线形等因素,将风险分析理论应用于道路线形设计中,并计算出安全评级指标,用以评价道路几何设计对行车造成的风险;张驰等^[14]分析了降雨、超速情况下平曲线路段的小客车行车风险,发现平曲线路段小客车行车风险受降雨强度和车速影响显著。

此外,针对积水路段行车风险,部分研究者从其他角度进行了研究。H. F. Oliveira^[15]综合分析道路主要线形几何指标对滑水现象的影响后,提出了滑水风险预测模型及评估方法;王维锋^[16]在研究路面抗滑值与其均衡性对弯道行车安全风险的影响后,建立了路面抗滑性能与制动距离、横向

位移之间的关系;刘建蓓等^[17]综合考虑道路线形、道路环境、视距、路面状态因素的情况下,提出了降雨天气下安全容许速度确定模型;张敏等^[18]将积水条件下车辙长度作为评价指标,分析小客车的行车风险后发现,积水长度对行车风险具有显著影响。但目前从事故主要机理角度出发,综合分析道路线形、车速、驾驶行为、积水区长度和深度对行车风险影响的相关研究有限。

笔者在分析积水路段交通事故产生机理的基础上,建立行车风险评价指标,综合考虑了道路圆曲线半径、超高、纵坡、行车速度、行车制动行为和换道行为等因素,对积水条件下高速公路平曲线路段的小客车行车风险进行了分析。首先分析了各项因素对行车风险的影响,之后建立了积水路段小客车行车风险预测模型,得到不同工况条件下的高速公路积水路段小客车行车风险。对西南地区某高速公路某积水路段进行了行车风险分析。

1 积水路段行车风险分析

1.1 积水对行车影响分析

小客车在雨天易发生交通事故的主要因为路面积水改变了轮胎与路面的接触状态,一方面路表水膜的润滑作用使路面与轮胎之间摩阻力系数明显降低,另一方面,轮胎与路面之间水膜的流体压力,使轮胎脱离地面发生滑水现象。当积水路段水膜厚度达到滑水对应的临界水膜厚度时,车辆易产生滑水现象,行车风险较高,因此,本文主要对积水超过临界水膜厚度路段进行研究,不同车速情况下临界水膜厚度见表1^[19]。

表1 不同车速情况下临界水膜厚度
Tab. 1 The critical thickness of water film under different speeds

行车速度/(km/h)	120	100	80	60
临界水膜厚度/mm	0.46	0.86	2.04	4.00

1.2 行车风险分析

小客车以车速 v 在平曲线半径为 R 的路段行驶时,转弯运动会受到离心力 F 作用,所需的向心力需要由路面与车轮之间的摩擦力 f 和路面对车辆支持力 F_n 的水平分力提供,其大小为

$$F = m \frac{v^2}{R} = F_n \cdot \sin\alpha + f \cdot \cos\alpha^{[20]}$$

即保持车辆平衡所需的摩阻力系数为 $\mu = (\frac{v^2}{Rg} - \sin\alpha) / \cos\alpha$,当地表积水达到临界水膜厚度时,车辆滑水几率增大,路面摩阻力系数 μ 降低,路面与

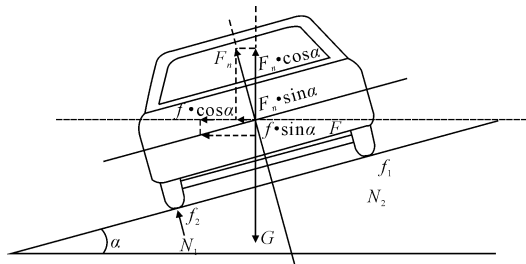


图 1 曲线路段车辆受力分析

Fig. 1 Vehicle force analysis of curved road segments

车轮间摩擦力 f 不足以提供转弯所需要的向心力,车辆会以被动增大转弯半径 R 的方式,减小圆周运动所需的向心力。

车辆在被动增大转弯半径过程中,主要存在侧滑、侧偏和侧翻 3 种行车风险,其中侧滑指车辆前后轮侧向滑移速率相差不大,车辆整体向弯道外侧移动的情况,易产生侧撞、同向刮擦等事故;侧偏指前后轮侧向滑移速率相差较大,车辆绕质心旋转较大的情况,易产生车辆转向不足或过多,车辆转向不足会导致“推头”现象,由于离心力的作用一般能够自行减缓直至消失,车辆转向过多危险性极大,会导致转向角速度增大,严重时会导致“甩尾”现象;侧翻指车辆单侧轮胎离地,车体侧面与地面接触的情况,小客车重心较低不与物体相撞时发生侧翻事故风险较低。

1.3 风险评价指标

1.3.1 临界积水路段长度

车辆在积水路段发生侧滑和侧偏是 1 个连续累积的过程,积水路段的长度直接影响侧滑和侧偏的严重程度,因此,在考虑水膜厚度的同时,需要考虑积水路段的长度。笔者提出临界积水路段长度概念,定义车辆在积水超过临界水膜厚度的路段中行驶,自驶入积水区至侧滑(或侧偏等)风险指标超过风险阈值时的行驶距离为侧滑(或侧偏等)风险对应的临界积水路段长度,记 S_s 为侧滑风险对应的临界积水路段长度, S_c 为侧偏风险对应的临界积水路段长度。

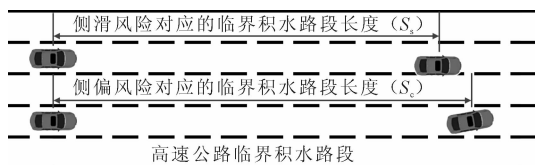


图 2 临界积水路段长度

Fig. 2 Critical length of ponding section

1.3.2 侧滑风险指标及阈值

侧向偏移量 L_y 定义为车辆在行驶过程中由于侧滑产生的横向偏移距离,其值可通过侧滑运

动时间与车辆侧向速度计算,单位为 m,见式(1)。

$$L_y = \int_0^t v_y dt \quad (1)$$

式中: v_y 为车辆侧向速度, m/s, t 为车辆侧滑运动的时间, s。

当 L_y 小于车辆与外侧临近车道的间距时,车辆不会影响临近车道交通,较为安全;当 L_y 大于车辆与外侧临近车道的间距时,车辆易发生侧撞、同向刮擦等事故,严重时会发生撞击护栏或冲出道路,因此,取侧向偏移量 L_y 为侧滑风险指标,取车辆与外侧临近车道间距为侧滑风险阈值 L_y^* 。

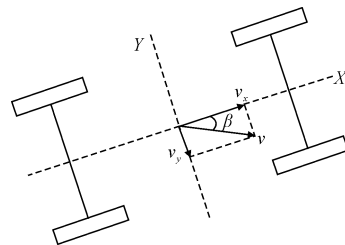

 图 3 质心侧偏角 β

 Fig. 3 Sideslip angle β

1.3.3 侧偏风险指标及阈值

质心侧偏角 β 定义为车辆行驶过程中车辆运动方向与车身纵向之间的夹角,其值是通过车辆纵向速度和侧向速度的比值计算,其单位为弧度,其值在 $\pm 360^\circ$ 之间,见式(2)。

$$\beta = \cot\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (2)$$

式中: v_x 为车辆纵向速度, km/h; v_y 为车辆侧向速度, km/h。

当 $\beta = 0^\circ$ 时,车辆无侧偏;当 $5^\circ \leq |\beta| < 90^\circ$ 时,车辆行驶较稳定;当 $\beta < -5^\circ$ 时,车辆转向不足严重,存在较大的“推头”风险;当 $\beta > 5^\circ$ 时,车辆转向过多严重,存在较大的“甩尾”风险^[21-22],因此,取质心侧偏角 β 为侧偏风险指标,取侧偏风险阈值 β^* 为 $\pm 5^\circ$ 。

1.3.4 侧偏风险指标及阈值

此外,采用横向荷载偏移率 LTR (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) 作为车辆侧翻事故风险指标,当 $0.6 \leq |LTR| < 0.8$ 时,车辆存在一定侧翻风险;当 $0.8 \leq |LTR| < 1$ 时,车辆侧翻风险极高;当 $LTR = \pm 1$ 时,车辆只有一侧车轮受力,即车辆已发生侧翻^[23]。

2 仿真系统模型

CarSim 是一种小客车整车动力学仿真软件,

采用参数化建模理念,可对轿车、轻型货车、轻型多用途运输车及 SUV 等多种车型进行仿真分析,主要由 database, animator 和 plotter 3 部分组成,可以仿真预测整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性。

已有研究结果表明 CarSim 中的算法对车辆的力学性能计算和工况模拟预测准确、可靠度高,在一定程度上可替代部分实际车辆试验,尤其为研究危险事故提供了可行有效地试验方法。Dupuy 等^[24]根据法国交通事故报告,利用 CarSim 软件模拟出可视化的 3D 事故场景;Sun Yuankui 等^[25]对 CarSim 在汽车研发过程中的应用,进行了系统性分析总结,认为 CarSim 能够通过简单的建模过程,快速、准确地实现开环和闭环模拟仿真,并具有很高的仿真精度,因此,本文也借助 CarSim 软件进行仿真分析,以期利用行车动力学,对道路进行有效的风险评价。

2.1 道路模型

本文研究的是积水条件下小客车在平曲线路段的行车风险,需要综合考虑道路圆曲线半径、纵坡和超高的影响,因此,需要构建适宜的道路模型,见图 4。



图 4 CarSim 积水路段道路模型

Fig. 4 CarSim road model of ponding section

本试验中所采用的道路设计指标均符合《公路工程技术标准》(以下简称《标准》)^[26]中的相关规定;本文只考虑单坡,其次,纵坡较大情况下不易形成积水路段,因此,在道路纵断面模块只输入起、终点高程,模拟纵坡较小的单坡道路状况;道路横断面形式需要考虑超高的影响,在直缓点、缓圆点、圆缓点、缓直点等特征断面上,修改道路左、中、右侧高程,特征断面之间的路段采取线性内插方式过渡,即可描述曲线路段的超高情况;本文研究在积水超过临界水膜厚度条件下的行车风险,因此,考虑最不利情况假设车辆产生滑水现象,取积水路面附着力系数为 0。各项相关指标见表 2。

2.2 车辆模型

CarSim 中车辆模块包括整车参数与系统参

表 2 道路模型参数

Tab. 2 Parameters of the road model

指标	参数值
圆曲线半径 R/m	600, 800, 1 000, 1 200
纵坡 $i/\%$	0.25, 0.5, 1.0, 2.0
超高 $e/\%$	4, 5, 6, 8
车道宽度 w/m	右侧: $1.5(\text{中分带}) + 3 \times 3.75(\text{行车道}) + 2.5(\text{硬路肩}) + 0.75(\text{土路肩}) = 16.0$
道路长度 S/m	$300(\text{直线}) + 145(\text{缓和曲线}) + 310(\text{圆曲线}) + 145(\text{缓和曲线}) + 300(\text{直线}) = 1200$
路面附着力系数	直线段: 0.5, 缓和曲线: 0(积水区), 圆曲线: 0(积水区)

数 2 个模块,车辆参数包括车辆的几何尺寸、质量等外观信息;系统参数分为引擎、制动系、转向系、悬架、轮胎 5 个子模块。相关重要的整车参数及系统参数见表 3。

表 3 整车参数及系统参数

Tab. 3 Parameters of the vehicle and system

指标	参数值
整车质量/kg	1 110
质心高度/mm	540
车长/mm	3 300
车宽/mm	1 695
车高/mm	1 535
轮距/mm	1 480
轴距/mm	2 600
整车绕 X 轴转动转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	440.6
整车绕 Y 轴转动转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1 343.1
整车绕 Z 轴转动转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1 343.1
前轮最大制动力/($\text{N} \cdot \text{m}/\text{MPa}$)	200
后轮最大制动力/($\text{N} \cdot \text{m}/\text{MPa}$)	75
ABS 启动时滑移率	0.2
ABS 失效时速度/(km/h)	7.5
主销内倾角/($^\circ$)	10
主销后倾角/($^\circ$)	3
后倾拖距/mm	8

2.3 驾驶人模型

利用 CarSim 进行人-车-路闭环系统仿真,驾驶人模型由转向控制、速度控制和制动控制组成,通过设定车辆沿道路的预先跟踪轨迹模拟车辆换道等驾驶行为,进行转向控制;本试验设定车辆为匀速行驶状态,故在不采取制动时,车速恒定;另外,通过预设制动方案,设定制动行为在小客车进入积水路段后发生。

3 风险影响因素分析

3.1 仿真策略

为了综合验证分析驾驶行为、车辆状况、道路指标对高速公路积水路段行车风险的影响,笔者在道路指标方面,考虑最不利路况,假设车辆产生滑水现象,取积水路面附着力系数为 0,并选用圆

曲线半径、纵坡坡率和超高横坡度作为主要影响因素;在行车状况方面,主要考虑行车速度对行车风险的影响;在驾驶行为方面,主要考虑制动和换道行为对行车风险的影响。

由于风险因素较多,为了缩减仿真试验的次数,提高模拟效率,对圆曲线半径 R 、纵坡坡率 i 、超高横坡度 e 、行车速度 v 、制动行为、换道行为 6 个元素进行正交试验,仿真策略见表 4。其中换道行为分为内侧换道和外侧换道,指车辆由原车道分别驶入内外侧车道,换道轨迹均采用缓和曲

线,侧向运动距离为 3.75 m,行驶距离为 100 m;为了模拟驾驶员在车辆进入积水路段后因车辆稳定性降低而开始采取减速制动的工况,假定驾驶员自感觉至采取制动措施反应总时长为 1.5 s,当车速为 80 km/h 时,其在积水路段的行驶距离约为 30 m,根据工况 4 试验可知车速低于 60 km/h 时各项风险指标极低,因此,减速制动行为施加方式是在车辆驶入积水区(300~900 m)内 30 m 时开始向车辆施加总时长 5 s 的 10 MPa 制动压力,将车速由 80 km/h 降低至 60 km/h。

表 4 考虑不同条件下的仿真策略
Tab. 4 Simulation strategy considering at different conditions

仿真工况	圆曲线半径 R /m	纵坡 i /%	超高 e /%	行车速度 v /(km/h)	驾驶行为
工况 1(圆曲线半径)	600,800,1 000,1 200	0.5	4	80	无
工况 2(纵坡)	800	0.25,0.5,1.0,2.0	4	80	无
工况 3(最大超高)	800	0.5	2,4,6,8	80	无
工况 4(行车速度)	800	0.5	4	60,80,100,120	无
工况 5(制动行为)	800	0.5	4	80	无制动、减速制动
工况 6(换道行为)	800	0.5	4	80	内侧换道、不换道、外侧换道

3.2 仿真结果分析

图 5~7 分别为不同圆曲线半径、纵坡、超高、行车速度、制动行为,以及换道行为对侧向偏移量

L_y 、质心侧偏角 β 和横向荷载偏移率 LTR 的影响。其中由于车道宽为 3.75 m,车宽 1.7 m,故临界侧向偏移量 L_y^* 取 1.025 m。

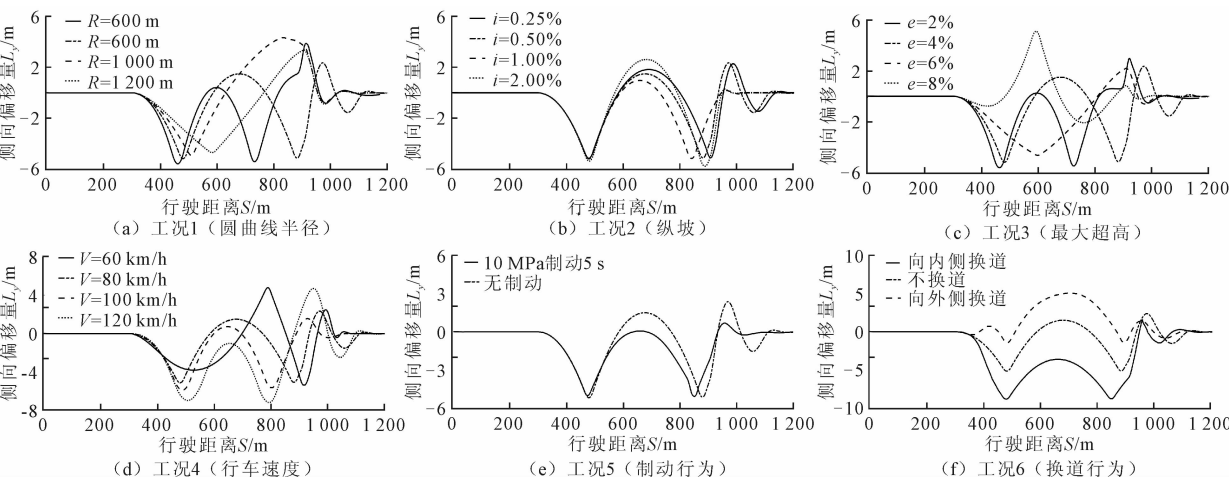
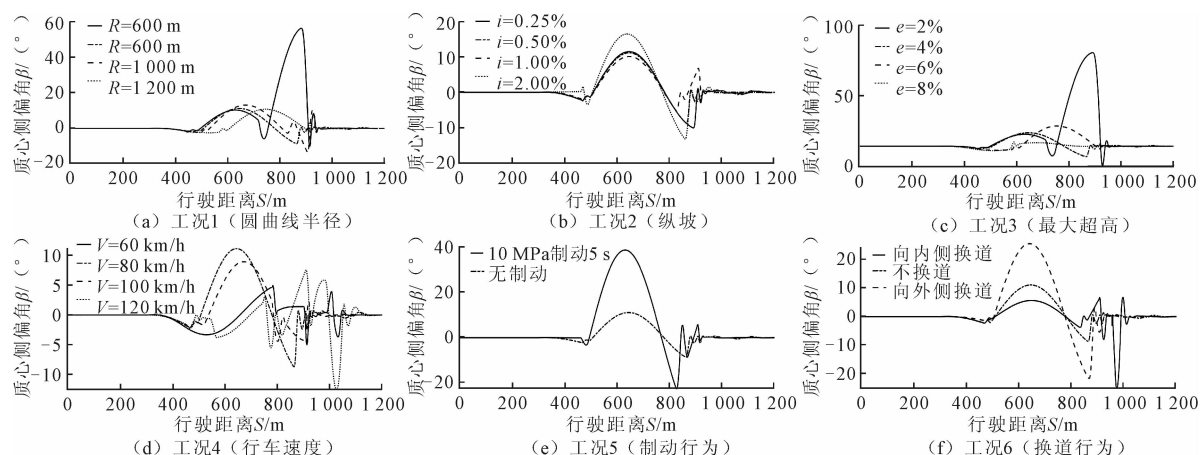


图 5 各因素对车辆侧向偏移量 L_y 的影响

Fig. 5 The influence of various factors on vehicle lateral offset L_y

图 5、图 6 可知:在 0~300 m 直线非积水路段,车辆行驶稳定, L_y 、 β 均为零;在 300~445 m 缓和曲线积水路段,曲率半径逐渐减小,受积水影响车辆向外侧滑移,随着路拱横坡逐渐增大和车辆向外侧滑移,离心力先增大再减小,侧向滑移速率先增大再减小为 0,故 L_y 在缓和曲线终点附近达到极值, β 略有变化;在 445~755 m 圆曲线积水路段,圆曲线半径达到最小,路拱横坡达到最大值均保持不变,圆曲线起点附近向外侧滑移的 L_y 达到极值,同时圆曲线路段转弯半径达到最大值,

路面对车辆支持力 F_n 的水平分力大于离心力,车辆向内侧滑移,转弯半径逐渐减小,离心力逐渐增大,当离心力大于路面对车辆支持力 F_n 的水平分力时,侧向滑移速率逐渐减小直至为 0,向内侧滑移的 L_y 达到极值,车辆受离心力作用,产生第二次向外侧滑移,在圆曲线终点附近向外侧滑移的 L_y 达到极值,故 L_y 产生波动,由于滑移方向变化,故 β 产生波动;在 755~900 m 缓和曲线积水路段,圆曲线半径逐渐增大,路拱横坡逐渐减小,车辆产生多次滑移,故 L_y 、 β 波动变化;在

图6 各因素下对车辆质心侧偏角 β 的影响Fig. 6 The influence of various factors on vehicle sideslip angle β

900~1 200 m, 车辆驶离积水区, 车轮与地面摩擦力恢复, 车辆经过小范围滑移逐步稳定, 故 L_y, β 在小范围波动变化后减小为 0。

由图 5~6 还可知, 随着圆曲线半径减小, L_y, β 逐渐增大, 第一次 $|L_y| > L_y^*$ 和 $\beta > 5^\circ$ 时对应的行驶距离均逐渐减小, 侧滑和甩尾风险增大, 当半径为 600 m 时甩尾风险急剧增加; 当纵坡小于 2% 时, 随纵坡变化 L_y, β 第一次波动基本不受影响; 随着超高减小, L_y, β 逐渐增大, 第一次 $|L_y| > L_y^*$ 和 $\beta > 5^\circ$ 时对应的行驶距离均逐渐减小, 侧滑和甩尾风险增大, 当最大超高等于 8% 时, 侧滑对外侧车道无影响, 对内侧车道影响较大, 当最大超高等于 2% 时, 在后缓和曲线积水段, 甩尾风险急剧增加; 随着车速增大, β 逐渐增大, 甩尾风险增大, 虽然 L_y 第一次波动变化不大, 第一次 $|L_y| > L_y^*$ 对应的行驶距离变化不大, 但相对应的临界水膜厚度急剧降低, 侧滑风险急剧增加; 适当的减速制动行为可降低侧滑对内侧车道的影响, 降低

车辆甩尾的风险; 向内侧换道行为虽可使用甩尾风险降低, 但侧向滑移风险急剧增加, 向外侧换道行为, 可使第一次 $|L_y| > L_y^*$ 时对应的行驶距离均急剧增加, 但甩尾风险急剧增加。

图 7 为各因素下对车辆横向荷载偏移率 LTR 的影响。由图 7 可知在车辆发生滑移情况下, 如不与其他车辆、护栏等物体发生碰撞则不易发生侧翻事故, 即当 $|L_y| < L_y^*$ 时车辆在安全范围内产生小幅度滑移, 不会引起较大的侧翻风险。

4 积水路段小客车行车风险预测模型及风险分析

4.1 评价模型

通过以上试验分析, 可知 $i < 2\%$ 时, 其对 L_y, β 影响不大, R, e, v 对积水路段行车风险有显著影响, 将侧滑风险对应的临界积水路段长度 S_s 和侧偏风险对应的临界积水路段长度 S_e 与以上 3 个因素相联系, 为使预测模型更加准确, 在上述正

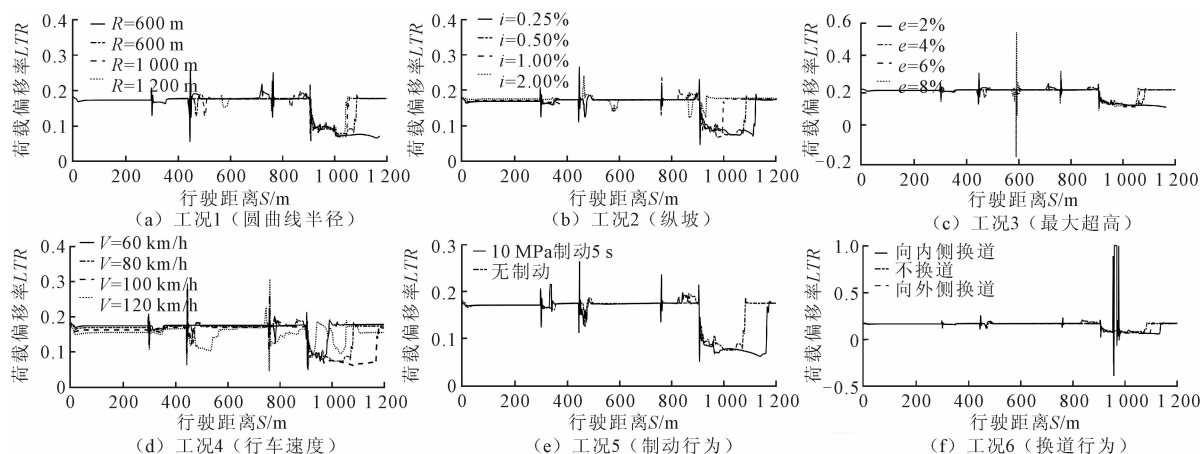
图7 各因素下对车辆横向荷载偏移率 LTR 的影响

Fig. 7 The influence of various factors on vehicle lateral offset rate

交试验的基础上补充试验数据,最终试验数据见表 5,并通过 Matlab 进行回归分析,建立积水路段小客车行车风险预测模型见式(3)。

表 5 回归分析试验数据
Tab. 5 Regression analysis of experimental data

数据序号	圆曲线半径 R /m	超高 e /%	车速 v / (km/h)	侧滑风险对应的临界积水路段长度 S_s /m	侧偏风险对应的临界积水路段长度 S_c /m
1	600	4	80	72.73	242.63
2	700	4	80	75.94	262.26
3	800	4	80	79.15	250.80
4	900	4	80	82.32	284.25
5	1 000	4	80	85.52	268.06
6	1 100	4	80	88.73	293.53
7	1 200	4	80	91.95	351.97
8	800	2	80	72.77	246.38
9	800	3	80	75.02	259.28
10	800	5	80	83.73	275.26
11	800	6	80	92.36	343.55
12	800	7	80	103.83	453.88
13	800	8	80	114.00	431.26
14	800	4	60	70.02	459.79
15	800	4	70	75.27	251.66
16	800	4	90	81.19	261.00
17	800	4	100	83.21	290.83
18	800	4	110	84.19	285.60
19	800	4	120	84.98	322.18

$$\left. \begin{aligned} S_s &= 8.969 + 0.031R + 7.41e + 0.196v \\ r^2 &= 0.962 \\ S_c &= 184.610 + 0.096R + 3.933e^{1.938} - 0.598v \\ r^2 &= 0.753 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: R 为道路圆曲线半径,m; e 为道路超高横坡值,%; v 为通过车速,km/h, S_s 为侧滑风险对应的临界积水路段长度,m, S_c 为侧滑风险对应的临界积水路段长度,m。

由预测模型所得的临界积水路段长度 S_s , S_c ,可与积水深度超过临界水膜厚度的路段长度

为 $S(m)$ 进行比较,确定积水路段事故风险, $S < S_s, S_c$ 时,侧滑和侧偏事故风险较低,相对安全;当 $S > S_s$ 时车辆具有较高的侧滑事故风险,相对危险;当 $S > S_c$ 时车辆具有较高的侧偏事故风险,相对危险。

如式(3)道路半径 R 、道路超高横坡值 e 与侧滑风险对应的临界积水路段长度 S_s 、侧滑风险对应的临界积水路段长度 S_c 均呈正相关与图 5~6 中仿真结果趋势一致,在一定范围内随着 R 和 e 增大, S_s 增大即侧滑风险降低;车速 v 与 S_s 呈正向,而与 S_c 负相关,但随着车速的减低,临界水膜厚度增大,超过临界水膜厚度的积水路段长度减小,即侧偏风险降低与图 5~6 中仿真结果趋势一致。因此本预测模型能够很好的反映道路半径 R 、道路超高横坡值 e 、车速 v 对积水路段行车风险的影响,能够较为精确指出事故风险类型,补充行车风险对积水长度考虑的不足,对高风险积水路段判别和处治提供了参照依据。

4.2 积水路段行车风险分析

利用式(3)可根据道路圆曲线半径、超高、车辆通过速度,对平曲线积水路段行车风险进行预测分析,并结合实际的积水道路的积水深度和长度,给出合理的安全通行建议。

现选取西南地区某山区高速公路易积水平曲线路段,应用所得预测模型对行车风险进行分析。此高速公路易积水平曲线路段采取双向 6 车道,车道宽 3.75 m,设计速度为 100 km/h,圆曲线半径为 910 m,超高 5%,缓和曲线长 120 m,圆曲线长 620 m,24 h 降雨量达 60 mm 时,全段积水深度达 1.5 mm 以上,2 处缓和曲线段及圆曲线端点处积水深度达 2 mm 路段长均约 100 m。分析结果见表 6。

表 6 积水路段行车风险分析
Tab. 6 Driving risk analysis on ponding section

数据序号	R /m	e /%	v / (km/h)	临界水膜厚度 n /mm	预测 S_s /m	预测 S_c /m	超过临界水膜厚度的积水路段长度 S /m	风险分析
1	910	5	120	0.46	98	262	860	侧滑和侧偏事故风险极高
2			100	0.86	94	274	860	侧滑和侧偏事故风险极高
3			80	2.04	90	286	2×100	侧滑事故风险较高 侧偏事故风险较低
4			60	4.00	86	325	0	侧滑和侧偏事故风险较低

由表 6 可知,在该路段积水情况下时,小客车通过速度高于 100 km/h 时,车辆发生侧滑和侧偏事故的几率极大,存在较高的行车风险;当小客车通过速度为 80 km/h 时,车辆侧偏事故风险较

低,侧滑事故风险较高,建议沿中间车道行驶,可降低与中央分隔带或护栏发生碰撞的风险,但车流密度较大时,易与外侧车道行车发生剐蹭、侧撞等行车事故;当车辆通过速度为 60 km/h 时,侧

滑和侧偏事故风险较低,因此,建议该路段在积水状况下,采取 60 km/h 限速措施,提醒驾驶人员提前减速制动,同时应禁止换道行为,以提高行车安全性。

5 结束语

1) 以行车动力学为基础,采用正交试验缩减试验次数,模拟了小客车在平曲线积水路段的行驶过程,分析了各因素对行车风险的影响,发现圆曲线半径、超高、通过速度对行车风险有明显影响,纵坡在 2% 以内对行车风险影响较小,制动行为和换道行为均会增大行车风险。

2) 引入临界积水路段长度概念,在正交试验基础上补充试验扩充基础数据,利用 Matlab 回归分析,建立了积水路段小客车行车风险预测模型,并对西南地区某高速公路易积水路段进行了行车风险分析,分析结果表明,积水条件下该路段车辆以设计速度 100 km/h 行驶,存在较大的侧滑和侧偏风险,限速 80 km/h 行驶,存在较大的侧滑风险,因此建议该路段积水条件下,小客车应采取 60 km/h 的限速措施,提醒驾驶人员提前减速制动,并禁止换道行为。为研究高速公路积水路段通行安全保障方案提供了一种可行方案,对限速值的合理确定提供了一种具体方法。

3) 本文研究车型单一,未考虑不同车型转弯半径对积水路段行车风险的影响。下一阶段,应考虑转弯半径对积水路段行车风险的影响,以获取更为普适的结论。

参考文献

References

- [1] 文斌,曹东伟. 高速公路路面抗滑力与交通事故的统计分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 2-75.
WEN Bin, CAO Dongwei. Statistical analysis of traffic accident and skid-resistance of expressway pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 72-75. (in Chinese)
- [2] CHARBENEAU R J, JEONG J, BARRETT M E. Highway drainage at superelevation transitions[R]. Washington, D. C. Transportation Research Board, 2008.
- [3] 戚明敏. 降雨对山区高速公路行车安全影响与保障技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- QI Mingmin. Study on the safety & security of freeway in mountainous area under rainy condition [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [4] 李利, 孙策. 高速公路雨天事故分析与对策研究[J]. 公路, 2013(8): 244-247.
LI Li, SUN Ce. Analysis and countermeasure research on accident of expressway at rainy days[J]. Highway, 2013(8): 244-247. (in Chinese)
- [5] 杨曼, 吴超仲, 张晖, 等. 行车安全事件的驾驶风险影响因素研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(5): 34-39.
YANG Man, WU Chaozhong, ZHANG Hui, et al. Influencing factors of driving risk based on critical incident events[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(5): 34-39. (in Chinese)
- [6] 刘修宇, 曹青青, 朱晟泽, 等. 沥青混凝土路面轮胎临界滑水速度数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 1020-1025.
LIU Xiuyu, CAO Qingqing, ZHU Shengze, et al. Numerical simulation of tire critical hydroplaning speed on asphalt[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 1020-1025. (in Chinese)
- [7] CHEN Y, QUDDUS M, WANG X. Impact of combined alignments on lane departure: A simulator study for mountainous freeways[J]. Transportation research part C: Emerging Technologies, 2018 (86): 346-359.
- [8] WANG X, WANG T, TARKO A, et al. The influence of combined alignments on lateral acceleration on mountainous freeways: A driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015 (76): 110-117.
- [9] FWA T F, ONG G P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(5): 182-190.
- [10] ONG G P, FWA T F. Prediction of wet-pavement skid resistance and hydroplaning potential [J]. Transportation Research Record, 2007, 2005(1): 160-171.
- [11] FWA T F, KUMAR S S, ONG G P, et al. Analytical modeling of effects of rib tires on hydroplaning [J]. Transportation Research Record, 2008 (2068): 109-118.
- [12] 季天剑, 高玉峰, 陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 57-60.
JI Tianjian, GAO Yufeng, CHEN Rongsheng.

- Dynamic hydroplaning analysis of car tire[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010,10(5):57-60. (in Chinese)
- [13] NAVIN F P D. Safety factors for road design: can they be estimated? [J]. Transportation Research Record, 1990(1280):181-189.
- [14] 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):1609-1616,1627.
ZHANG Chi, SHAO Dongjian, ZHANG Min. Risk analysis of passenger car moving on curved sections based on sideslip microscopic simulation [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1609-1616,1627. (in Chinese)
- [15] OLIVEIRA H F. Contribuição para análise da ocorrência de aquaplanagem em rodovias[D]. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.
OLIVEIRA H F. Contribution to the analysis of hydroplaning occurrence on highways[D]. Sao Paulo: University of Sao Paulo, 2018. (in Portuguese)
- [16] 王维锋. 路面抗滑性能影响弯道行车安全的仿真分析[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(6):32-37.
WANG Weifeng. A simulation analysis of pavement skid resistance against driving safety on curve roads[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(6):32-37. (in Chinese)
- [17] 刘建蓓,罗 京,郭腾峰. 基于安全容许速度的雨天公路可变限速方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12):128-133.
LIU Jianbei, LUO Jing, GUO Tengfeng. Variable speed limit method based on safe permissible speed under wet weather[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12):128-133. (in Chinese)
- [18] 张 敏,郭鑫鑫,张 驰. 积水条件下考虑行车安全的车辙长度仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(4):747-754.
ZHANG Min, GUO Xinxin, ZHANG Chi. Simulation analysis of rutting length based on driving safety under condition of road waterlogging[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4):747-754. (in Chinese)
- [19] 管朝鹏. 基于 DPM 及 EWF 模型的积水分布研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
GUAN Chaopeng. Study on the distribution of waterlogging water based on DPM and EWF[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [20] 徐 进. 道路几何设计对车辆行驶特性的影响机理研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
XU Jin. Effects of change in road geometry design on vehicle driving dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [21] 张晨晨,夏群生,何 乐. 质心侧偏角对车辆稳定性影响的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(4):277-282.
ZHANG Chenchen, XIA Qunsheng, HE Le. A study on the influence of sideslip angle at mass center on vehicle stability[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(4):277-282. (in Chinese)
- [22] 周红妮,陶健民. 质心侧偏角和横摆角速度对车辆稳定性的影响研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2008, 22(2):6-10, 24.
ZHOU Hongni, TAO Jianmin. Study on influence of sideslip angle and yaw rate on vehicle stability [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2008, 22(2):6-10, 24. (in Chinese)
- [23] 张 驰,齐 晨,闰晓敏,等. 基于行车动力学仿真的半挂车弯道超车风险分析[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4):1439-1447.
ZHANG Chi, QI Chen, YAN Xiaomin, et al. Risk analysis of semitrailer overtaking on curved section based on dynamic simulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4):1439-1447. (in Chinese)
- [24] 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[C]. Workshop on Temporal and Spatial Information, Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2001.
- [25] SUN Yuankui, FAN Xiaobin. Research on the application of CarSim in vehicle simulation and development[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2017, 22(4):200-211.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
Ministry of Transport, People's Republic of China, Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.