

基于小客车侧滑微观仿真曲线路段行车风险分析

张驰^{1,2}, 邵东建¹, 张敏³

(1. 长安大学教育部特殊地区公路工程重点实验室, 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. 长安大学公路学院交通工程研究所, 西安 710064)

摘要: 综合分析了降雨、超速情况下曲线路段小客车行车风险。利用 Carsim 软件建立车辆动力学仿真模型, 以临界附着系数作为小客车行车风险评价指标, 运用 Matlab 软件建立小客车行车风险评价模型并进行风险分析。结果表明: 在设计速度 80 km/h 时, 当行驶速度超过 96 km/h, 小客车在降雨的曲线路段行驶时发生侧滑的风险概率大于 48.40%; 当降雨强度大于 1.5 mm/min, 小客车在曲线路段超速行驶时发生侧滑的风险概率大于 16.35%; 在降雨、超速情况下, 小客车在曲线半径为 250 m 的曲线路段行驶时发生侧滑的风险概率大于 90%。

关键词: 道路工程; 侧滑; 风险分析; 平曲线路段; Carsim 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 07-1609-09

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.07.027

Risk Analysis of Passenger Car Moving on Curved Sections Based on Sideslip Microscopic Simulation

Zhang Chi^{1,2}, Shao Dongjian¹, Zhang Min³

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

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

3. Traffic Engineering Research Institute, School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In consideration of rainfall and over-speeding, the risk of passenger car moving on curved sections was analyzed synthetically. The simulation model of the dynamic characteristic of passenger car was established using Carsim, the critical adhesion coefficient was used as the evaluation index of passenger car moving risk, and the evaluation model of passenger car moving on curved sections was established using Matlab. The results show that under the situation of design speed 80km/h, when driving speed exceeds 96km/h, the risk probability of passenger car moving on rainfall curved sections exceeds 48.40%; when the rainfall intensity is bigger than 1.5mm/min, the risk probability of passenger car over-speeding moving on curved sections exceeds 16.35%; under the situation of rainfall and over-speeding, the risk probability of passenger car moving on curved sections which radius is 250m is 100%.

Keywords: road engineering; sideslip; risk analysis; curve sections; Carsim simulation

引言

随着高速公路建设的迅猛发展和汽车保有量

的不断增加, 交通事故与日俱增。统计资料表明^[1], 大部分交通事故发生在平曲线路段, 在美国达到 40%, 在中国达到 36%; 同时, Sherretz 和 Farhar^[2]对南伊利诺伊 7 市的交通气象数据研究表明, 交通事故数和降雨量之间存在正线性关系; 另外, 据公安部交管局统计, 2009 年上半年, 因超速行驶导致的交通死亡事故占总死亡事故的 13.8%。



收稿日期: 2015-02-12 修回日期: 2015-04-14;
基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAG05B01); 交通运输部应用基础研究项目(2014319812170);
作者简介: 张驰(1981-), 男, 四川宜宾, 博士, 副教授, 研究方向为交通安全与道路仿真; 邵东建(1990-), 男, 江苏南京, 硕士生, 研究方向为道路与铁道工程。

<http://www.china-simulation.com>

• 1609 •

因此,对不良天气及不良驾驶行为情况下曲线路段行车风险进行分析,对提高道路安全水平具有重要意义。

现今,设计人员进行道路线形设计时,均以规范为标准,认为只要满足规范要求,就是安全的。然而有研究表明,在某些情况下,比如降雨、超速时,在现行的道路规范下可能会导致行车风险^[3]。因此,如果能在道路处于规划、设计等阶段时,给设计人员提供能间接衡量行车风险的指标,就可以在不依赖于事故统计资料的情况下,对行车进行风险分析。目前,将风险分析应用于评价道路安全的研究正逐步开展。Navin^[4]首次将风险分析理论应用于道路线形设计,他考虑了驾驶员、车辆、道路等因素,计算出安全指数,用以评价道路几何设计对行车造成的风险;Lamm^[5]将其应用于道路圆曲线安全设计,通过量化的指标,评价了曲线路段的驾驶行为的危险;Haneen Farah^[5]借助驾驶模拟器,以车辆在超车完成后与对向车辆的距离作为风险评价指标,分析了双车道公路上超车的风险;Mohamed Hussein Azab^[6]借助道路几何设计校准模型,将校准值与规范进行比较,分析使用现行规范可能导致的危险;Karim Ismail^[7]运用风险分析理论,通过设置凸形竖曲线路段的视距指标,确定了不同道路因素条件下,路段的安全等级;郭忠印^[8]借助行车制动风险模型,分析了隧道典型风险特征点的风险影响要素取值,得到各特征点的临界安全车速;孙璐^[9]考虑了曲线路段侧滑、侧翻及停车视距这 3 种事故类型,采用蒙特卡罗法求解曲线路段行车风险的概率故障树模型,分析了曲线路段的行车风险。

在中国,将风险分析理论运用于道路安全评价的研究较少,在对平曲线风险分析的研究中,也存在可以进一步深入的地方:考虑降雨条件和超速行为对曲线路段行车风险的影响。本文以此为切入点,首先分析了影响曲线路段行车安全的道路因素及其影响强弱,之后在降雨及超速条件下,分析小客车的侧滑行为,建立了风险评价指标与道路线形之间的数学模型,并将其与风险评价指标与降雨量

之间的关系作分析比较,得到降雨、超速条件下曲线路段上的行车风险。

1 平曲线路段行车风险分析及风险评价指标

风险是指某一特定危险情况发生的可能性及其后果。将风险分析理论用于平曲线路段行车风险分析可以这样理解:小客车以速度 v 在半径为 R 的圆曲线上行驶时,由于受到离心力的作用,有向外运动的趋势,速度越大,趋势越明显,同时,因降雨导致的路面附着系数下降也会增加这种趋势。趋势的变化会导致可靠性的改变,当可能性达到 100% 时,就会发生侧滑,危及行车安全。

目前,国内外对小客车的风险分析指标有横向偏移比、横摆角速度等。但是若采用横向偏移比作为风险分析指标,一方面只有当小客车发生侧滑行为时,才会有显著的偏移量;另一方面,产生偏移量的大小需按照完全偏移车道或部分偏移车道进行分级,较为繁琐。而若采用横摆角速度作为风险分析指标,由于目前的规范《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》对小客车的取值只给出了大概范围,不好控制阈值。因此,本文拟采用一种新的风险分析指标——临界附着系数。

临界附着系数是指小客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,具体计算方法如下:

$$\mu = \max \left(\left| \frac{F_{Yi}(z)}{F_{Zi}(z)} \right| \right) \quad (1)$$

式中: μ 为不同桩号下的临界附着系数; $i=1, 2, 3, 4$, 分别表示前左轮,前右轮,后左轮,后右轮; $F_{Yi}(z)$ 为不同桩号下轮胎侧向力; $F_{Zi}(z)$ 为不同桩号下轮胎垂直力。

选用临界附着系数作为风险分析指标是考虑速度增大会导致离心力的增加,路面附着系数的下降会导致道路所能提供的附着力的降低,而临界附着系数可以表示离心力等于附着力这一临界情况,小于此值,行车安全,大于此值,行车危险。

2 仿真系统模型

Carsim 软件是专门针对车辆动力学的仿真软件,可以仿真车辆对驾驶员、路面及空气动力学输入的响应,主要用以仿真和预测整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性,同时被广泛地应用于现代汽车控制系统的开发。

很多学者早已运用 Carsim 软件做了很多有意义的研究: Benekahal 和 Treiterer^[10]通过在 Carsim 软件中设置平均速度、密度、车流量、驾驶操作、车辆行驶轨迹、刹车行为等,仿真分析了高速公路车辆正常行驶条件下及道路拥挤状态下的交通行为; Jason Spencer Stine^[11]在其硕士论文中,运用该软件仿真分析了高速公路道路中线的安全性。因此,本文也借助 Carsim 软件进行仿真分析,以期在不依赖于交通事故统计资料的情况下,对道路进行安全评价。

2.1 仿真模型建立

2.1.1 驾驶员模型

在人-车-路闭环系统仿真中,驾驶员模型由方向控制和速度控制组成。在 Carsim 软件建模中,在方向控制方面,设定车辆沿道路的预先跟踪轨迹,模拟转向等驾驶行为。在速度控制方面,由于本文研究的是匀速行驶的小客车,故车速设置为定值。

2.1.2 道路模型

本文研究的是曲线路段小客车行驶的稳定性的,需要分析圆曲线半径、纵坡、超高对曲线路段小客车行车风险的影响,因此,需要构建合适的道路模型。

Carsim 中道路模型可在 Additional Data 模块中输入。选择 3D 道路,在下一级菜单的道路平面模块(Centerline geometry:Horizontal(X-Y) table)中,通过输入不同桩号下的坐标值得到道路平面线形;道路纵断面模块(Centerline elevation:Zvs S)中,通过输入起终点高程(本文只考虑单坡,因此只需输

入起终点高程)得到道路纵断面线形;道路横断面模块(Off-center elevation: dZ,S & L,S)中,通过输入典型横断面下道路左、中、右侧高程得到道路横断面线形。

另外,附着系数是指附着力(地面对轮胎切向反作用力的极限值)与作用于驱动轮上的地面法向反作用力之比,对同一车辆和同一道路状况而言,作用于驱动轮上的地面法向反作用力不变,此时附着系数的改变只影响附着力的大小,而驱动力不大于附着力是小客车正常行驶、不发生侧滑的充分条件,驱动力不小于小客车所受的各种阻力是车辆行驶的必要条件。因此,在不发生侧滑行为时,小客车所受的各种阻力必定不大于附着力,所以附着系数的取值对研究没有影响,故可以取为定值,参考表 1^[12],本文取为 0.75。

表 1 不同路面状况下的沥青路面附着系数

路面状况	附着系数
干燥	0.70~0.80
潮湿	0.45~0.55
污染	0.20~0.40

2.1.3 车辆模型

Carsim 中车辆模块(如图 1)分为车体参数与系统参数两大模块,车体参数包括车辆的尺寸、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。表 2, 3 分别列出了一些重要的车体参数及系统参数。

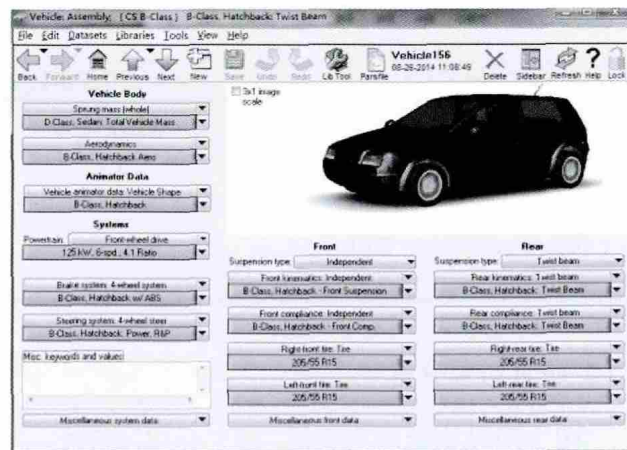


图 1 车辆模型参数设置界面

表 2 小客车主要参数

整车质量	质心高度	车长	车宽	车高	轮距	轴距	整车绕 X 轴转动惯量/(kg.m ²)	整车绕 Y 轴转动惯量/(kg.m ²)	整车绕 Z 轴转动惯量/(kg.m ²)
/kg	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm			
1530	540	4350	1795	1550	1481	2776	708	4520	4607

表 3 系统主要参数

模块	参数	取值
引擎	最大功率/kW	125
	档位	6
	齿轮齿数比	4:1
制动系	前/后轮最大制动力/(N.m/MPa)	600/400
	ABS 启动时滑移率	0.2
	ABS 失效时速度/(km/h)	7.5
转向系	主销内倾角/°	10
	主销后倾角/°	3
	后倾拖距/mm	8
悬架	簧下质量/kg	100
	轮距/mm	1475
	辊中心高度/mm	40
轮胎	车轮有效半径/mm	314
	轮胎宽度/mm	205
	最大轮载/N	6500

2.2 仿真结果输出形式

根据式(1)，可知为得到临界附着系数，需要得到不同桩号下轮胎的侧向力和垂直力。因此，在 Carsim 中建立整车模型后，在其 Plot Definitions 模块，将输出变量依次定义为 F_{jy} —Lateral Forces(轮胎所受侧向力)、 F_{jz} —Vertical Forces(轮胎所受垂直力)。之后，Simulink 工具根据 Carsim 的输出信号，设置小客车的仿真策略，并输出变量的具体数值。

表 4 考虑不同道路参数条件下仿真策略

仿真编号	圆曲线半径/m	超高/%	纵坡/%	速度(km/h)	仿真目的
1	250, 400, 500, 750, 1000	5	3	80	圆曲线半径单独作用
2	750	2, 4, 6, 8, 10	3	80	超高单独作用
3	750	5	1, 2, 3, 4, 5	80	纵坡单独作用
4	750	5	3	70, 80, 90, 100, 110	车速单独作用

3.1.2 仿真结果分析

图 3 的纵坐标均为 μ 值，横坐标均为桩号，其中 0~100 m 为直线段、100~225 m 为缓和曲线段、

3 曲线路段行车风险影响因素分析

曲线路段行车风险发生的根本原因在于，路面提供的附着力不足以抵抗由于转向行驶而产生的离心力，如图 2 所示(蓝色小客车正常行驶，白色小客车侧滑失稳)。理论上，各种道路因素对离心力均有可能产生影响，且各因素的影响也存在强弱之分。因此，需要逐一分析确定每种因素对曲线路段行车风险是否确有影响及各因素对曲线路段行车风险影响的强弱。



图 2 侧滑失稳视景

3.1 单因素分析

3.1.1 仿真策略

这里研究圆曲线半径、超高、纵坡、速度对曲线路段小客车行车风险是否产生影响，参考《公路路线设计规范》^[13]，表 4 列出了本次试验的仿真策略。

225~425 m 为圆曲线段、425~550 m 为缓和曲线段、550~650 m 为直线段。4 张图分别反映了在不同圆曲线半径、超高、纵坡、速度情况下，临界附着系数随桩号变化情况。

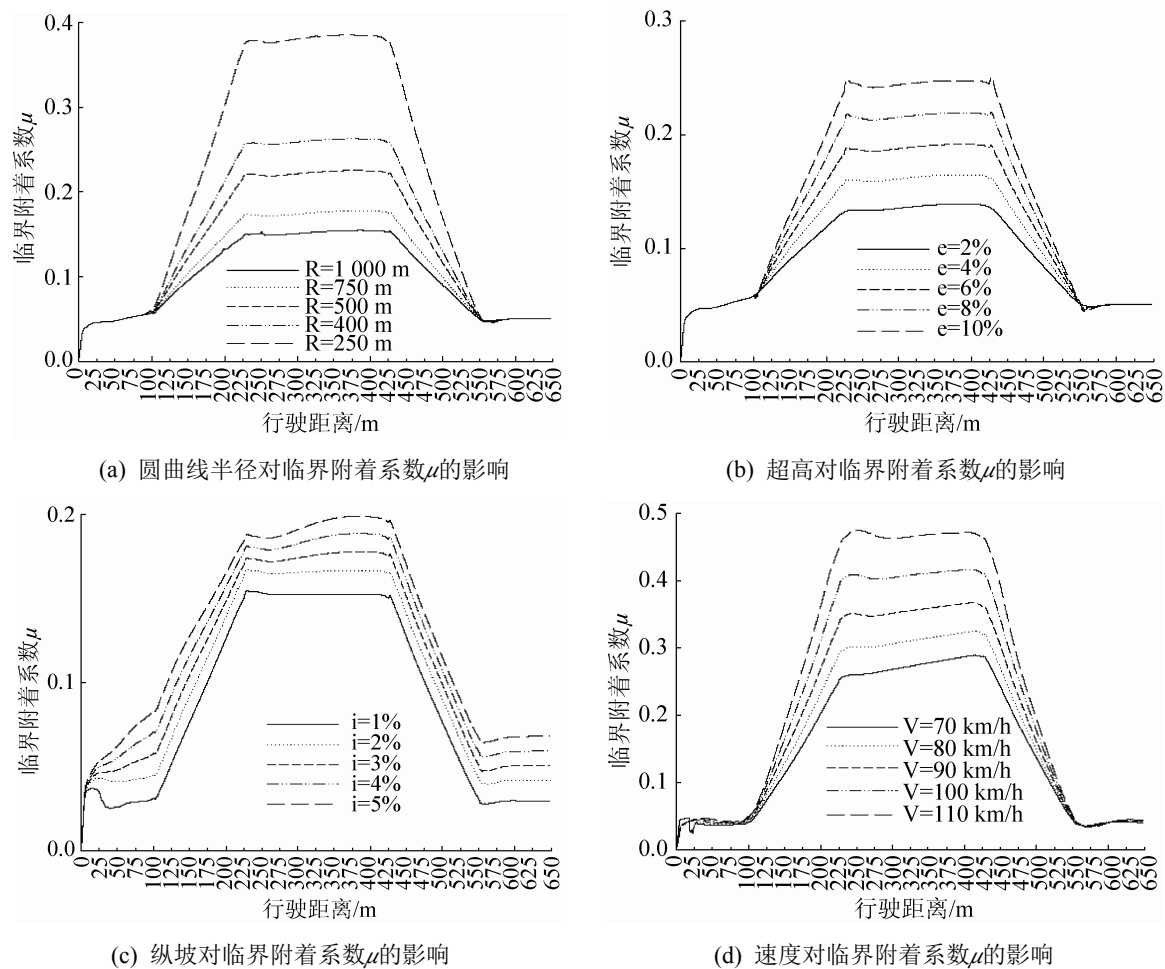


图 3 不同道路参数条件下路面临界附着系数

图 3 中, 在 0~10 m 时 μ 变化幅度极大, 原因在于车速从 0 到以一定速度匀速行驶, 需要一个过渡段; 在 10~100 m 时, 由于过渡已经完成, 所以 μ 保持稳定状态; 在 100~225 m 时, μ 值逐渐增加, 这是因为在缓和曲线路段, 曲线半径值在逐渐减小, 导致离心力逐渐增加, μ 值增加; 在 225~425 m 时, 由于是在圆曲线路段, 半径恒定, 故离心力不变, μ 值基本不变; 在 425~550 m 时, 是缓和曲线路段, 曲线半径逐渐增大, 离心力逐渐减小, μ 值下降; 在 550~650 m 时, 为直线路段, 不存在离心力的作用, 故 μ 值基本保持不变。同时, 从 (a), (b), (c), (d) 4 张图中的 5 条曲线可以看出, 随着圆曲线半径的减小, μ 值逐渐增大; 随着超高的增大, μ 值逐渐增大; 随着纵坡的增大, μ 值逐渐增大; 随着车速的增大, μ 值逐渐增大。因此, μ 值与圆曲

线半径呈反比关系, 与超高、纵坡、速度成正比关系。

3.2 多因素分析

3.2.1 仿真策略

这里需要分析圆曲线半径、超高、纵坡、速度对曲线路段小客车行车风险影响的强弱, 因此, 参考《公路路线设计规范》^[13], 各选取 3 组数据, 见表 5。

表 5 因素及水平表				
水平	圆曲线半径 /m	速度 /(km·h ⁻¹)	超高 /%	纵坡 /%
1	250	60	6	1
2	400	80	8	3
3	600	100	10	5

3.2.2 考虑交互作用的正交试验

由表 4 可知,本次试验需要考虑 4 种影响因素,同时应考虑因素之间的两两交互作用,包括圆曲线半径与速度、超高与纵坡的交互,因此,理论上有 6 种因素,如果依次用表 5 的 3 组数据对 6 种因素进行分析,数据极多,因此可采用正交试验缩减试验的数据组。

3.2.3 仿真结果分析

从表 6 可以看出:

(1) $SS_v > SS_R > SS_{R \times v} > SS_{e \times i} > SS_e > SS_i$, 即影响因素的主次顺序(由强到弱)为速度、半径、半径与速度的交互作用、超高与纵坡的交互作用、超高、纵坡。原因在于,离心力与速度的平方成正比,与半径成反比,而超高、纵坡的改变主要影响力的分

量大小,因此,速度的增减导致离心力变化幅度最大,其次是半径,而后是两者的交互作用;而超高、纵坡值本身很小,因而对力的分量影响较小,且超高、纵坡构成的合成坡度比超高或纵坡值都大,另外,小客车前轮有一定的外倾角和前束角,外倾角的主要设计意图是使轮胎的接地点向内缩以减小偏距,但前轮外倾会使左右轮产生侧向推力,因此,设置适当的前束角,产生与侧向推力方向相反的侧向力,与侧向推力相抵消^[14],所以当小客车在直线路段向正前方行驶时,若外倾角和前束角取得得当,可以使侧向力很小,因而 μ 值趋向于 0,可见纵坡影响最弱,因此,超高与纵坡的交互作用的影响大于两者的单一作用,且纵坡影响最小。

(2)各种因素的 F 值都高于临界值,因此,这些因素对曲线路段小客车行车风险均有显著影响。

表 6 基于临界附着系数 μ 的离差及方差分析结果

因素	离差平方和 SS	自由度	F 值	显著性	临界值
R	0.241 805	2	2 121.11	显著	$F_{0.01}(2, 10)=10.04$
e	0.023 222	2	203.70	显著	$F_{0.01}(2, 10)=10.04$
v	0.269 906	2	2 367.60	显著	$F_{0.01}(2, 10)=10.04$
i	0.006 594	2	57.84	显著	$F_{0.01}(2, 10)=10.04$
$(R \times v)$	0.051 031	4	223.82	显著	$F_{0.01}(4, 10)=5.99$
$(e \times i)$	0.025 730	4	112.86	显著	$F_{0.01}(4, 10)=5.99$
误差	0.000 568	10		显著	

4 评价模型的建立及风险分析

4.1 评价模型

降雨会造成路面附着系数的下降,进而导致轮胎与路面附着力的降低,且降雨量越大,附着系数越小,因此,在降雨条件下,为保证小客车在曲线路段正常行驶不发生侧滑,需要大半径圆曲线等更加良好的道路线形;此外,在曲线路段行驶时,速度的增加会导致离心力的增大,因此,为保证小客车在曲线路段正常行驶不发生侧滑,需要将速度控制在一定范围内。

鉴于此,需要研究降雨对路面附着系数的影响并得到模型,同时需要分析道路因素对 μ 值的影响并建立模型,用以分析在降雨、超速情况下曲线路段行车风险。

4.1.1 附着系数与降雨量关系模型

降雨不仅会给行车增加困难,也更易诱发交通事故,原因在于降雨导致道路表面覆盖一层水膜,小客车在道路上行驶时,由于水膜的润滑作用,附着系数显著降低,导致制动失控,转向不灵,小客车极易发生侧滑,偏离正常行驶方向。路面附着系数与降雨量之间的关系,一直是不良天气下交通事故研究的主要内容,我国学者季天剑^[15]利用实验数据回归分析得到了不同类型面层下水膜厚度与降雨强度的关系(见表 7)以及不同车型下附着系数与水膜厚度的关系(见表 8)。

AC-20I 改进型与 AC-25I 改进型主要用于中、下面层, SMA-13 一般用于上面层,且本文研究的车型为小客车,因此,选取表 7、表 8 中第 1 个式子,消去 h , 得到最终的附着系数与降雨量模型,

见式(2)。

$$\psi = 0.9548 - 0.0057v - 0.0007l^{0.6134} \cdot \alpha^{-0.3133} \cdot q^{1.4483} \quad (r^2 = 0.88) \quad (2)$$

表 7 不同类型路面下水膜厚度与降雨强度的关系

编号	水膜厚度表达式	路面类型	r ²
1	$h = 0.0609 \cdot l^{0.6134} \cdot \alpha^{-0.3133} \cdot q^{1.4483}$	SMA-13	0.95
2	$h = 0.0225 \cdot l^{0.7733} \cdot \alpha^{-0.3495} \cdot q^{1.4744}$	AC-20I 改进型	0.93
3	$h = 0.1673 \cdot l^{0.6275} \cdot \alpha^{-0.2929} \cdot q^{0.5719}$	AC-25I 改进型	0.98

注: h 为水膜厚度/mm; l 为坡面长度/m; α 为合成坡度; q 为降雨强度/mm; r^2 为相关系数。

表 8 不同类型车辆下附着系数与水膜厚度的关系

编号	附着系数表达式	车辆类型	r ²
1	$\psi = 0.9458 - 0.0057v - 0.0118h$	小客车	0.93
2	$\psi = 1.2517 - 0.0077v - 0.016h$	中型车	0.95
3	$\psi = 1.3280 - 0.0078v - 0.017h$	大货车	0.96

注: ψ 为附着系数, v 为车速(km/h)。

4.1.2 μ 值与道路因素关系模型

参照第 3 节的分析, 可将 μ 值与道路因素的关系模型表示成:

$$\mu = f(R, v, \alpha) \quad (3)$$

式中: μ 为临界附着系数; R 为圆曲线半径/m; v 为车速/km·h⁻¹; α 为合成坡度。

将多因素分析时得到的 27 组数据输入到 Matlab 中, 进行回归分析, 得到具体的回归模型:

$$\mu = \frac{0.014449v^2}{R} - 0.031159\cos\alpha + 0.093561 \quad (r^2 = 0.96) \quad (4)$$

4.2 降雨、超速条件下曲线路段行车风险分析

两大子样平均数之差的置信区间如式(5)所示; 当临界附着系数 μ 与路面所能提供附着系数 ψ 的差值大于 0 时, 小客车会发生侧滑, 即发生侧滑的置信区间为 $(0, \infty)$ 。因此, 在设计速度为 80 km/h 情况下, 分别固定行驶速度、降雨强度、圆曲线半径和合成坡度不变, 同时固定坡面长度不变(本文暂不考虑坡面长度影响), 取为 200 m, 对其他 3

个因素, 各随机选取 4 组值, 组合得到 64 组数据, 构成大子样, 代入式(2), (4)中, 得到 64 组 μ 与 ψ 值, 分别算出 μ 与 ψ 的均值和方差。运用均值可以定性分析在不同因素影响下小客车侧滑风险; 将均值和方差代入式(6)解出 u_α 值, 可以定量分析小客车侧滑风险, 得到分别在 3 种因素影响下小客车出现侧滑风险的概率。表 9 列出了各因素的取值策略及最终的风险分析结果。

$$\left(\overline{X}_1 - \overline{X}_2 + u_\alpha \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}, \infty \right) \quad (5)$$

$$\overline{X}_1 - \overline{X}_2 + u_\alpha \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} = 0 \quad (6)$$

式中: $\overline{X}_1, \overline{X}_2$ 为两大子样的平均值; u_α 为正态分布的上侧分位数; S_1^2, S_2^2 为两大子样的方差; n_1, n_2 为两大子样的样本数。

从表 9 可以看出:

(1) 合成坡度的改变, 对小客车侧滑风险影响微小。例如, 当行驶速度超过设计速度(80 km/h)的 0~30%、圆曲线半径大于极限值(250 m)的 0~220%、降雨强度介于小雨(0.05 mm/min)与暴雨(1.5 mm/min)之间, 合成坡度分别取 4%, 10%时, 路面附着系数均值均比临界附着系数均值高出 0.05, 侧滑风险概率分别为 0.52%, 1.29%, 因为均值差相同且侧滑风险概率相近, 故合成坡度影响微小。

(2) 超速对小客车侧滑风险影响较大, 当行驶速度超过设计速度的 20%, 且圆曲线半径大于极限值的 0~220%、降雨强度介于小雨与暴雨之间, 小客车侧滑风险概率约为 48.40%。

(3) 圆曲线半径对小客车侧滑风险影响很大, 当圆曲线半径取极限值, 且小客车的行驶速度超过设计速度的 0~30%、降雨强度介于小雨与暴雨之间, 小客车侧滑风险概率大于 90%。

(4) 降雨对小客车侧滑风险稍有影响, 当降雨强度超过 1.5 mm/min, 且行驶速度超过设计速度的 0~30%、圆曲线半径大于极限值的 0~220%, 小客车侧滑风险概率约为 16.35%。

表 9 因素取值策略及风险分析结果

编号	行驶速度 $V/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	圆曲线半径 R/m	降雨强度 $q(\text{mm}/\text{min})$	合成坡 度 $\alpha/\%$	路面附 着系数 均值 $\bar{\psi}$	临界附着 系数均值 $\bar{\mu}$	行车风险	风险概率
1-1	80	250,400,600,800	0.05,0.5,1,1.5	4,6,8,10	0.47	0.28	安全	0
1-2	96	250,400,600,800	0.05,0.5,1,1.5	4,6,8,10	0.38	0.38	比较危险	48.40%
2-1	80,88,96,104	250	0.05,0.5,1,1.5	4,6,8,10	0.40	0.56	极其危险	大于 90%
2-2	80,88,96,104	400	0.05,0.5,1,1.5	4,6,8,10	0.40	0.37	安全	0.24%
3-1	80,88,96,104	250,400,600,800	0.05	4,6,8,10	0.42	0.35	安全	0
3-2	80,88,96,104	250,400,600,800	1.5	4,6,8,10	0.37	0.35	略微危险	16.35%
4-1	80,88,96,104	250,400,600,800	0.05,0.5,1,1.5	4	0.40	0.35	安全	0.52%
4-2	80,88,96,104	250,400,600,800	0.05,0.5,1,1.5	10	0.40	0.35	安全	1.29%

5 结论

(1) 以汽车动力学为基础，利用 Carsim 软件，模拟小客车以不同速度在各种道路因素条件下行驶，发现车速、圆曲线半径、超高及纵坡对曲线路段小客车行车风险均会产生影响。

(2) 采用正交试验设计缩减数据，运用数理统计知识分析了不同道路因素及其交互作用对曲线路段小客车行车风险的影响，因素影响的强弱由大到小排序为：速度、半径、半径与速度的交互作用、超高与纵坡的交互作用、超高、纵坡，且各因素影响均显著。

(3) 综合考虑道路因素，利用 Matlab 软件，回归分析由 Carsim 软件仿真得到的数据，建立了附着系数与道路因素之间的模型。

(4) 分析了在设计速度为 80km/h，降雨及超速情况下，小客车在曲线路段的行车风险。当行驶速度超过设计速度的 20%，且圆曲线半径大于极限值的 0~220%、降雨强度介于小雨与暴雨之间，小客车侧滑风险概率约为 48.40%；当圆曲线半径取极限值，且小客车的行驶速度超过设计速度的 0~30%、降雨强度介于小雨与暴雨之间，小客车侧滑风险概率大于 90%；当降雨强度超过 1.5mm/min，且行驶速度超过设计速度的 0~30%、圆曲线半径大于极限值的 0~220%，小客车侧滑风险概率约为 16.35%；合成坡度的改变，对小客车侧滑风险影响微小。

(5) 本文仅在设计速度为 80 km/h 时对坡面长度为 200 m 的曲线路段行车风险进行了分析，而未考虑在其他设计速度及不同坡面长度下的情况，在下一步研究中，应考虑其他的设计速度及坡面长度，以完善得到的结论。

参考文献：

[1] McGeeHWHanscom, Fred R. Low-Cost Treatments for Horizontal Curve Safety[M]. Washington DC, USA: Transportation Research Record(S0021-8952), 2009.

[2] Sherretz, LA, FarharBC. An analysis of the relationship between rainfall and the occurrence of traffic accidents[J]. Journal of Applied Meteorologyand Climatology (S0021-8952), 1978, 17(5): 711-715.

[3] Lamm R, Smith B L. Curvilinear alinement: an important issue for more consistent and safer road characteristic[J]. Transportation Research Record(S0361-1981), 1994, 1445: 12-21.

[4] Navin F P D.Safety Factors for Road Design: Can They Be Estimated?[J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 1990, 1280: 181-189.

[5] Farah H, Bekhor S, Polus A. Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways[J]. Accident Analysis & Prevention(S0001-4575), 2009, 41(4): 887-894.

[6] Hussein M, Sayed T, Ismail K, *et al.* Calibrating Road Design Guides Using Risk-Based Reliability Analysis[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(9): 877-894.

[7] Karim Ismail. Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design[D]. Canada: The University of British Columbia, 2009.

(下转第 1627 页)

- distributions [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2014, 46(1): 23-37.
- [9] Fang D, Mark P, Van O, *et al.* Dynamic control of the N queueing network with application to shipbuilding [J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 2014, 52(4): 967-984.
- [10] Thomas H, Dirk C M. Integration of vehicle routing and resource allocation in a dynamic logistics network [J]. Transportation Research Part C (S0968-090X), 2009, 17(2): 149-162.
- [11] Malairajan R A, Ganesh K, Matti M, *et al.* CLING: heuristic to solve integrated resource allocation and routing problem with time window [J]. International Journal of Services and Operations Management (S1744-2370), 2012, 13(2): 247-266.
- [12] Ning S, Haiqing S, Warren B P. The dynamic fleet management problem with uncertain demand and customer chosen service level [J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2014, 148(2): 110-121.
- [13] Dariusz R. Kowalski, Eyal N, Michael S, *et al.* Scheduling problems in transportation networks of line topology [J]. Optimization Letters (S1862-4472), 2014, 8(2): 777-799.
- [14] Suhng B M, Lee W. A new link-based single tree building algorithm for shortest path searching in an urban road transportation network [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology (S2325-9833), 2013, 8(4): 889-898.
- [15] Shen X Y, Xie C J, Liu H X, *et al.* Model and algorithm for routing and scheduling problem in hazardous material stransportation network [J]. Journal of Networks (S1796-2056), 2013, 8(5): 1027-1034.
- [16] Uester H, Kewcharoenwong P. Strategic design and analysis of a relay network in truckload transportation [J]. Transportation Science (S0041-1655), 2011, 45(4): 505-523.
- [17] Farahani R Z, Miandoabchi E, Szeto W Y. A review of urban transportation network design problems [J]. European journal of operational research (S0377-2217), 2013, 229(2): 281-302.
- [18] Anghinolfi D, Paolucci M, Sacone S. Freight transportation in railway networks with automated terminals: a mathematical model and MIP heuristic approaches [J]. European journal of operational research (S0377-2217), 2011, 214(3): 558-59.

(上接第 1616 页)

- [8] 郭忠印, 戴忧华, 周小焕. 高速公路隧道(群)风险特征点得临界安全车速及其应用研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(增 1): 116-122.
- [9] 孙璐, 游克思. 基于多失效模式可靠度的曲线路段行车风险分析 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 36-42.
- [10] Benekohal R F, Treiterer J. CARSIM: Car-Following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-And-Go Conditions [J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 1988, 1194: 99-111.
- [11] Stine J S. Analyzing highway median safety through vehicle dynamics simulations [D]. University Park, PA, USA: The Pennsylvania State University, 2009.
- [12] 吴光强. 汽车理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [13] JTG D20-2006. 公路路线设计规范 [S].
- [14] 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册·基础篇 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [15] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2004.