

平曲线路段车辆行驶安全仿真研究

黄超智¹, 蔡凤田^{1,2}, 张红卫^{1,2}, 宗成强^{1,2}

(1.交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2.运输车辆运行安全技术交通行业重点实验室, 北京 100088)

摘要:平曲线路段是交通事故高发之处。文中从车、路协同作用对车辆弯道行驶安全性的影响入手, 分析了车、路中对弯道行驶安全性可能产生影响的因素, 探究不同参数车辆与弯道组合下安全车速的限值。应用 TruckSim 建立车路耦合模型, 通过仿真定性分析了各因素对车辆弯道行驶安全的影响; 对不同车、路参数进行正交仿真试验, 得出相应临界车速; 再利用 SPSS 对试验结果进行方差分析, 筛选出主要影响因素, 并对其进行回归分析, 建立其与安全车速之间的数学模型, 用于计算车辆弯道行驶安全速度, 指导车辆和道路设计。

关键词:交通安全; 平曲线路段; 弯道行驶; 安全车速; 仿真分析

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0040-05

文献[1]显示车辆在弯道处发生的事故数占总事故数的 17.6%, 死亡人数约占 22.8%; 死亡 10 人以上的交通事故中弯道处事故占比高达 41.7%, 死亡人数占 47.6%。通常这些严重事故的发生主要是由车辆在弯道处速度过快导致的。针对该问题, 虽然有关部门采取了诸如全线限速、特殊点段局部限速、分路段限速、分车道限速、分时限速等交通管制措施, 但车辆的性能参数、结构尺寸及弯道的超高、圆曲线半径等不同会使车辆通过弯道的安全速度千差万别。限速过低会造成通行缓慢, 限速过高又会增加行车风险, 对不同参数车辆在各类弯道上的行驶安全速度进行深入研究有利于车辆主动安全技术及弯道预警系统的开发。

国内外学者对车辆弯道行驶安全开展了各方面研究: Furtado G. 通过车辆动力学软件 VDMroad 研究了车辆在不同线形组合下的行驶安全性; Essam Dabbour 等基于抛物线原理, 提出了弯道路段的安全评价方法; 夏荣霞等对大货车前后轴内外轮受力进行分析, 确定了最容易发生侧滑的车轮; 孙川等研究了 3 种典型弯道行驶工况; 张弛等对一般制动和紧急制动下小客车在弯道路段的行车风险进行了分析; 何杰等利用 ADAMS 软件分别模拟了晴天、雨天、雪天和结冰条件下路面状况对行车安全的影响。总体而言, 目前对弯道行驶稳定性的研究多集中于车辆结构参数、装载情况、圆曲线半径、路面附着系数等单一因素的影响分析, 而较少对车、路两方面因素同时进行定量分析。为此, 该文分析车、路协同作用下可能影响弯道行驶安全性的因素, 选取轨道误

差跟随、侧向加速度和载荷转移率 3 种评价指标, 利用 TruckSim 软件进行不同参数下的正交仿真试验得出临界车速, 通过 SPSS 软件运用回归分析法构建安全车速与主要影响因素之间的风险模型。

1 弯道行车安全评价指标

根据历年交通事故形态分析结果, 在弯道处车辆发生正面碰撞、坠车、翻车等占绝大部分, 其中: 正面碰撞通常是由相向行驶的车辆轨迹发生交叉所致; 坠车通常是由于车辆行驶时发生侧滑; 翻车一般是因行驶速度过快造成离心力过大, 造成车辆倾覆力矩达到限值所致。因此, 采取轨道误差跟随、侧向加速度和载荷转移率作为弯道行车安全评价指标。

1.1 轨道误差跟随指标

轨道误差跟随是指车辆行驶时偏离道路中线的横向距离。车辆在道路上行驶时, 驾驶员通常难以感受到汽车的横向偏移量, 故该指标通常被忽视。然而轨道跟随的好坏与主动安全直接相关, 其反映出道路设计是否合理。郭孔辉院士提出的轨道误差跟随指标的阈值为 0.3 m。

1.2 侧滑评价指标

车辆在弯道路段行驶时, 不仅受到纵向驱动力或制动力的作用, 还受到侧向力的作用, 其受力平衡方程如下:

$$(\mu mg)^2 = F_x^2 + F_y^2 \quad (1)$$

式中: μ 为路面附着系数; m 为车辆质量; F_x 、 F_y 分别为车辆所受纵向力和侧向力。

根据式(1), 当纵向力和侧向力的合力超过路面

最大附着力时,车辆会发生侧滑。又有:

$$\begin{cases} F_y = ma_y \\ a_y = \frac{v^2}{R} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_y 为侧向加速度; v 为车速; R 为圆曲线半径。

当车辆驶入弯道时,地面必须提供相应的侧向力来防止车辆发生侧滑。因此,一般通过限定车辆的侧向加速度来控制车辆的横向稳定性。国家标准规定,普通车辆的侧向加速度不能超过 $0.4g$,重型车辆的侧向加速度不能超过 $0.3g$ 。

1.3 侧翻评价指标

国内外学者建立了多种侧翻评价指标,其中静态稳定因子定义为汽车半轮距与重心高度的比值,但其未考虑弯道行驶过程中车速等动态因素的影响。为此,Yoon Jangyeol、Jung Jongchul 等分别提出了动态稳定因子和动态滚装稳定指标。考虑到通用性与准确性,这里选取横向载荷转移率作为汽车侧翻评价指标,计算公式如下:

$$LTR = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (F_{li} - F_{ri}) \right|}{\sum_{i=1}^n (F_{li} + F_{ri})} \quad (3)$$

式中: F_{li} 、 F_{ri} 分别为左侧和右侧车轮上的垂向载荷; i 、 n 分别为车轴编号和数量。

综合以上评价指标,车辆转弯时的安全车速为轨道误差跟随指标、侧滑指标和侧翻指标同时限制下的临界车速。

2 车路耦合模型的构建

2.1 车辆模型

TruckSim 软件是一款适用于货车和大客车的汽车动力学仿真软件,主要用于仿真车辆对不同结构参数、驾驶员操纵方法、3D 路面及空气动力学输入等的响应,根据其仿真结果可对车辆的操纵稳定性、驾驶平顺性、制动系等整车性能进行分析和优化。利用该软件对某平头厢式货车进行仿真,该车为两轴货车,其基本参数见表 1。

2.2 道路模型

道路模型分为平面模型和横断面模型,其中重点为缓和曲线、圆曲线和超高,均按照 JTG B01—2014《公路工程技术标准》及 JTG D20—2006《公路路线设计规范》进行建模。所建车路耦合模型如图 1 所示。

表 1 整车基本参数

参数名称	参数值
总质量/kg	11 246
簧载质量/kg	4 457
簧载质心距坐标原点的纵向距离/mm	1 113
簧载质心距坐标原点的垂向距离/mm	1 173
簧载质心距坐标原点的横向距离/mm	0
绕 x 轴的转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	2 287
绕 y 轴的转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	35 408
绕 z 轴的转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	34 823
轮距/mm	2 030/1 863
轴距/mm	5 000



图 1 车路耦合模型

3 行驶安全影响因素分析

3.1 单因素仿真分析

影响弯道行车安全的因素包括人、车、路三方面,其中人的因素通常需通过实车试验进行主观分析,这里从车、路两方面选取汽车载重、质心高度、轴距、圆曲线半径、超高、附着系数、回旋线长度等,分析其对弯道行车安全的影响。仿真车辆行驶速度取 120 km/h ,驾驶员预瞄时间取 1.5 s ,仿真时长取 15 s 。试验参数见表 2。

3.1.1 载重的影响

分别按空载、额定载重和超载 50% 对应的 0 、 $6\,789$ 、 $10\,184 \text{ kg}$ 3 种质量对弯道行车安全进行仿真,结果见图 2~4。

由图 2~4 可知:1) 前 100 m 为直线段,侧向偏移量、侧向加速度和载荷转移率均接近于零并保持不变; $100\sim190 \text{ m}$ 为缓和曲线段,汽车开始发生偏移,且侧向加速度和载荷转移率开始逐渐增加。随着汽车慢慢驶入圆曲线段,各项指标均趋于稳定。2) 随着载重的增加,车辆向外侧偏移的距离越来越大,在额定载重下向外侧的偏移量峰值为 0.15 m 左

表2 各影响因素单独作用下的试验参数

载重 m/kg	质心高度 h/mm	轴距 L/mm	圆曲线半 径 R/m	超高 $e/\%$	附着系 数 f	回旋线长度 L_s/m	影响 因素
0,6 789, 10 184	1 173	5 000	400	4	0.5	90	载重
6 789	873,1 173,1473	5 000	400	4	0.5	90	质心高度
6 789	1 173	4 500,5 000,5 500	400	4	0.5	90	轴距
6 789	1 173	5 000	250,400,650	4	0.5	90	圆曲线半径
6 789	1 173	5 000	400	0.4,8	0.5	90	超高
6 789	1 173	5 000	400	4	0.2,0.5,0.8	90	附着系数
6 789	1 173	5 000	400	4%	0.5	60,90,120	回旋线长度

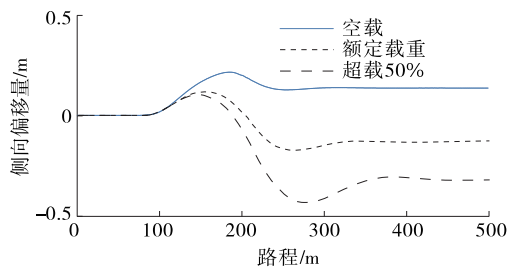


图2 不同载重时的侧向偏移量

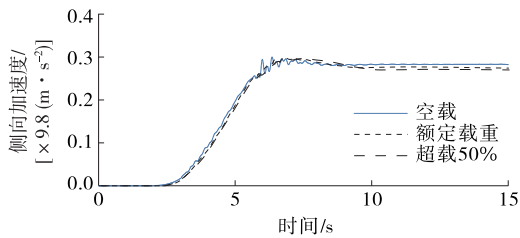


图3 不同载重时的侧向加速度

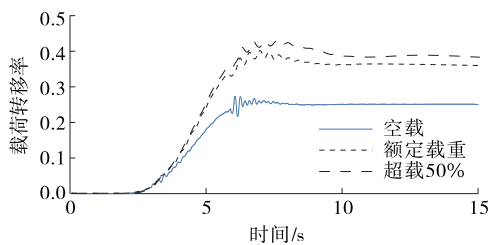


图4 不同载重时的载荷转移率

右,而超载50%的情况下,侧向偏移量峰值达到0.4 m,已超出0.3 m的阈值,增加了与其他车辆发生轨迹交叉的可能性。加速度超调量也随着载重的增加而增加,导致侧滑风险增大。载重为零时,左右轮的载荷转移率峰值为0.25左右,而在超载50%的情况下,载荷转移率峰值已将近0.45,侧翻的可能性大大提高。

3.1.2 轴距的影响

按4 500、5 000、5 500 mm 3种轴距对弯道行车安全进行仿真,结果见图5~7。

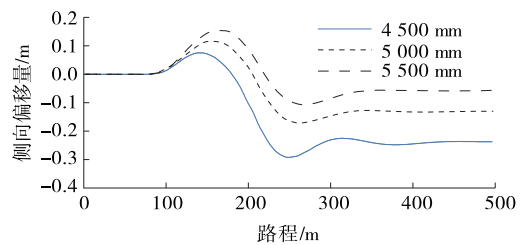


图5 不同轴距时的侧向偏移量

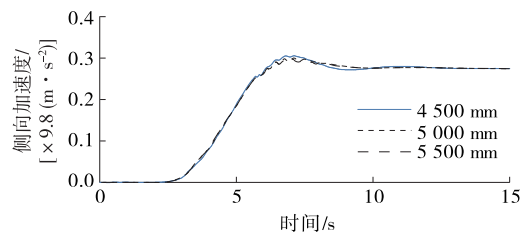


图6 不同轴距时的侧向加速度

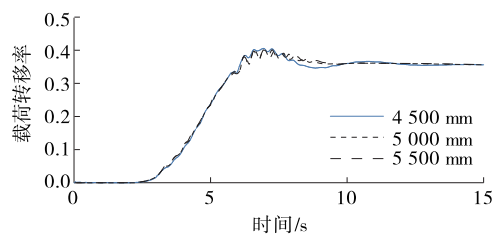


图7 不同轴距时的载荷转移率

由图5~7可知:汽车轴距越小,向外偏移量越大,当轴距减小到4 500 mm时,侧向偏移量峰值近似为0.27 mm,接近0.3 m的阈值。侧向加速度峰值随着轴距的减小而小幅度增加。载荷转移率峰值的变化不大,不过随着轴距的减小其曲线开始处于

波动状态,侧翻可能性增大。

3.1.3 圆曲线半径的影响

按 250、400、650 m 3 种圆曲线半径对弯道行车安全进行仿真,结果见图 8~10。

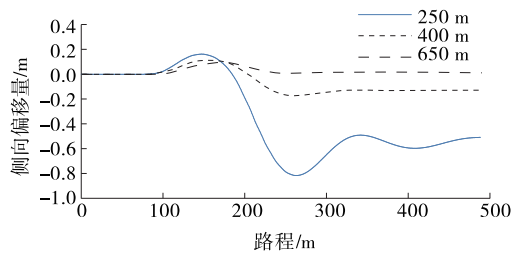


图 8 不同圆曲线半径时的侧向偏移量

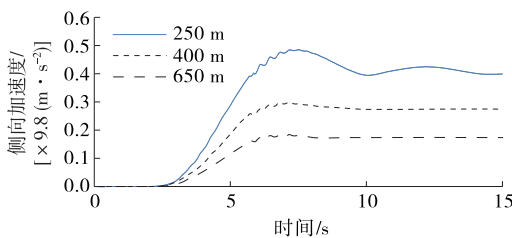


图 9 不同圆曲线半径时的侧向加速度

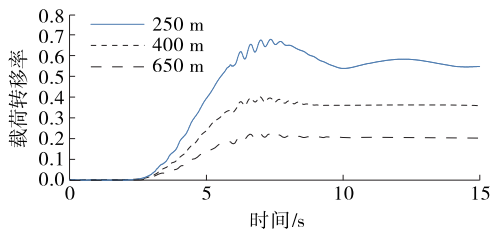


图 10 不同圆曲线半径时的载荷转移率

由图 8~10 可知:在同样车速下,圆曲线半径越小,汽车向外的侧向偏移量越大,车辆侧向加速度也越大,圆曲线半径为 250 m 时汽车已发生严重侧滑,且载荷转移率峰值已将近 0.7,此时若稍有侧向风等外力作用车辆将发生侧翻。

3.1.4 其他因素的影响

按照同样的方法分析其余因素,得:汽车质心高度对侧向加速度的影响不大,但与侧偏距离、载荷转移率成正比;随着超高的增加,向外侧偏移距离、侧向加速度及载荷转移率峰值均减小;随着路面附着系数的降低,各项参数开始变得极不稳定,附着系数降为 0.2 时汽车已严重偏移驶离路面;缓和曲线越短,侧向偏移量和侧向加速度增长越迅速,载荷转移率峰值也相应增加。

综上,尽可能地减少载重量、降低质心高度,适当增加轴距、圆曲线半径、超高、附着系数、缓和曲线

长度等有利于弯道行车安全。

3.2 多因素仿真分析

按表 2 所示各因素所对应的 3 种水平构造正交试验表并进行试验,分析各影响因素同时作用下不同因素的影响程度大小。车辆安全速度是同时满足侧向偏移量、侧向加速度和载荷转移率评价指标的最大速度,应确保行驶过程中各项指标均不高于阈值。表 3 为正交试验表及试验所得安全车速。

表 3 正交试验表

载重	质心高度	轴距	圆曲线半径	超高	附着系数	回旋线长度	安全车速/(km·h ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	1	75
1	2	2	2	2	2	2	120
1	3	3	3	3	3	3	155
2	1	1	2	2	3	3	121
2	2	2	3	3	1	1	135
2	3	3	1	1	2	2	95
3	1	2	1	3	2	3	96
3	2	3	2	1	3	1	107
3	3	1	3	2	1	2	120
1	1	3	3	2	2	1	165
1	2	1	1	3	3	2	82
1	3	2	2	1	1	3	88
2	1	2	3	1	3	2	146
2	2	3	1	2	1	3	85
2	3	1	2	3	2	1	119
3	1	3	2	3	1	2	113
3	2	1	3	1	2	3	116
3	3	2	1	2	3	1	95

将表 3 所示数据导入数据处理软件 SPSS 中进行方差分析,不考虑因素之间的交互作用,分析结果如表 4 所示。

F 统计量的显著性水平 *p* 越小,表明结果越显著。由表 4 可知:载重、质心高度、轴距、圆曲线半径、超高、附着系数的显著性水平 *p* 值均小于 0.05,说明其对车辆弯道行驶安全速度的影响显著;而回旋线长度的 *p* 值大于 0.05,说明其对车辆弯道行驶安全速度的影响不显著。对安全车速的影响程度由大到小排序为圆曲线半径、附着系数、超高、轴距、质心高度、载重。

表 4 SPSS 方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	自由度 df	方差	F 统计量	F 统计量的显著性水平 p
校正模型	10 997.111 *	14	785.508	62.287	0.003
截距	229 616.056	1	229 616.056	18 207.441	0.000
载重 A	256.444	2	128.222	10.167	0.046
质心高度 B	428.111	2	214.056	16.974	0.023
轴距 C	632.111	2	316.056	25.062	0.013
圆曲线半径 D	7 980.111	2	3 990.056	316.392	0.000
超高 E	644.778	2	322.389	25.564	0.013
附着系数 F	952.778	2	476.389	37.775	0.007
回旋线长度 G	102.778	2	51.389	4.075	0.140
误差	37.833	3	12.611		
总计	24 0651.000	18			
校正的总计	11 034.944	17			

注：* R 方=0.997(调整 R 方=0.981)。

4 弯道行驶风险模型

4.1 风险模型的建立

根据以上分析,载重 m 、质心高度 h 、轴距 L 、圆曲线半径 R 、超高 e 及附着系数 f 对车辆弯道行驶安全速度有显著影响,通过 SPSS 软件进行回归分析,得到以下回归方程:

$$v = -16.184 2 - 0.000 5m - 0.012 2h + 0.014 5L + 0.127 1R + 152.083 3e + 25f,$$

$$R^2 = 0.897 \quad (4)$$

4.2 模型的仿真实验

利用 TruckSim 软件对车辆弯道行驶风险模型进行验证。取 $m = 6\ 000\ \text{kg}$ 、 $h = 1\ 200\ \text{mm}$ 、 $L = 5\ 000\ \text{mm}$ 、 $R = 400\ \text{mm}$ 、 $e = 4\%$ 、 $f = 0.6$ 进行仿真,得安全车速为 $119\ \text{km/h}$ 。根据所建立的风险模型求得车辆在给定参数下的安全速度为 $110.6\ \text{km/h}$,相比于仿真所得车速,风险模型存在 7% 的计算误差。由于目前车辆所使用的弯道预警控制系统的控制阈值一般是临界车速的 80% 左右,存有 20% 的容错率,风险模型所得结果能保证车辆的行驶安全,模型合理。

5 结语

该文利用 TruckSim 软件,以某厢式货车为基础,首先通过仿真定性分析了车辆载重、质心高度、轴距、圆曲线半径、超高、附着系数、缓和曲线长度等

因素对车辆弯道行驶安全速度的影响;然后对上述因素进行正交仿真试验得出对应的临界车速,最后利用方差分析和回归分析得出车辆弯道行驶风险模型。该模型对相关车辆生产设计及道路限速有一定的指导意义。由于所选因素有限,后续研究中可适当增加车辆性能、结构方面的参数,进一步增强模型的通用性。

参考文献:

- [1] 公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2015 年度)[R].无锡:公安部交通管理科学研究所,2016.
- [2] 李长城,吴京梅.公路限速方法及其适用性分析[J].交通科技,2006(6).
- [3] Furtado G. Vehicle stability on combined horizontal and vertical alignments[D].Ontario,Canada: Carleton University,2002.
- [4] Essam Dabbour, Rahemlfar, Kannan. Optimum vertical curves for highway profiles using nonlinear optimization[A]. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering[C], 2002.
- [5] 夏荣霞,吴德华,何杰,等.平曲线处大型货车最大安全运行速度计算模型研究[J].公路交通科技,2016,33(1).
- [6] 孙川,吴超仲,褚端峰,等.基于车辆侧向稳定性分析的弯道行驶安全评价[J].交通信息与安全,2014,32(6).

(下转第 51 页)

四类>第二类。

上述聚类法得出的结果与实际情况较相符。如第二类油门控制不当(操作不当)单独作为一类,以区别于其他违法驾驶行为的类;第六类中违法变道、违法超车、违法调头、逆向行驶等都与违法使用车道有关。计算合并为不同类的违法驾驶行为的道路交通安全影响因子,从而得出不同违法驾驶行为对道路交通安全的影响程度。

3 结语

通过将具有潜在联系的违法驾驶行为合并为一类,得出不同类机动车违法驾驶行为等道路交通安全影响因素对交通安全的影响程度。结果表明目标高速公路上超速驾驶、酒后驾驶等第五类中的违法驾驶行为对其安全的影响程度最大,应重点加强整治;其次为违法牵引、违法侧车等,也应重点预防。通过聚类分析,找出重点,对症下药,有助于提升道路交通管理水平,防范交通事故的发生,减少生命、财产损失。

参考文献:

- [1] Klauter S G, Dingus T A, Neale V L, et al. Comparing real-world behaviors of drivers with high versus low rates of crashes and near crashes[R]. National Highway Traffic Safety Administration, 2009.
- [2] 王伟志.模糊聚类分析在交通事故中的应用[J].辽宁工学院学报, 2007, 27(4).
- [3] 张璐.灰色聚类法在交通事故影响因素分析中的应用

[J].公路与汽运, 2011(2).

- [4] 肖慎, 过秀成.模糊聚类法在公路交通事故黑点成因分析中的应用[J].交通运输系统工程与信息, 2002, 2(3).
- [5] Fang C Y, Hsueh H L, Chen S W. Dangerous driving event analysis system by a cascaded fuzzy reasoning petri net[A]. Intelligent Transportation Systems Conference 2006[C]. 2006.
- [6] 贾元华, 邬万江, 常胜, 等.主成分-聚类分析法在道路交通安全评价中的应用[J].交通标准化, 2010(19).
- [7] 田兵.系统聚类法及其应用研究[J].阴山学刊, 2014, 28(2).
- [8] 公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2010)[R].北京:公安部交通管理科学研究所, 2011.
- [9] 陈明, 郑彩云, 张铮. MATLAB 函数与实例速查手册[M].北京:人民邮电出版社, 2014.
- [10] 李倩星. R 语言实战:编程基础、统计分析与数据挖掘宝典[M].北京:电子工业出版社, 2016.
- [11] 喻伟, 方磊.城市轨道交通与常规公交协调的灰色聚类评价[J].公路与汽运, 2011(4).
- [12] 袁伟, 付锐, 郭应时, 等.驾驶员视觉搜索模式模糊聚类评价方法[J].中国公路学报, 2011, 24(1).
- [13] 赵海存.道路交通事故数据统计分析系统研究[D].西安:长安大学, 2005.
- [14] 陈玉玲.基于实例的系统聚类分析法在环境空气质量评价中的应用[J].环境科学与管理, 2010, 35(8).
- [15] 黎美清, 杜岩, 罗义学, 等.机动车驾驶员道路交通违法行为危险因素分析[J].应用预防医学, 2010, 16(3).

收稿日期:2017-01-14

(上接第 44 页)

- [7] 张弛, 孟良, 汪双杰, 等.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, 28(12).
- [8] 何杰, 刘霞, 陈一锴, 等.恶劣天气路面条件对行车安全的影响[J].交通运输工程学报, 2011, 11(1).
- [9] 刘晨.基于 Carsim 仿真软件的公路线形安全评价方法研究[D].西安:长安大学, 2014.
- [10] Jangyeol Yoon, Dongshin Kim, Kyongsu Yi. Design of a rollover index-based vehicle stability control scheme[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(5).
- [11] Jung Jongchul, Taehyun Shim, Jamie Gertsch. A vehicle roll-stability indicator incorporating roll center movements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8).

- [12] JTG B01-2014, 公路工程技术标准[S].
- [13] JTG D20-2006, 公路路线设计规范[S].
- [14] 唐歌腾, 任春晓, 李臣, 等.基于 Trucksim 的不同弯道半径安全车速确定方法[J].公路交通科技, 2016, 33(6).
- [15] 陈冉, 辜志强, 范李, 等.基于仿真的某型商用车弯道行驶安全速度模型研究[J].公路与汽运, 2016(1).
- [16] 刘晨.基于 Carsim 仿真软件的公路线形安全评价方法研究[D].西安:长安大学, 2014.
- [17] 王慧丽, 史忠科.山区道路车辆侧翻模型与安全分析[J].交通信息与安全, 2013, 31(3).
- [18] 孙川, 吴超仲, 褚端峰, 等.基于车辆侧向稳定性分析的弯道行驶安全评价[J].交通信息与安全, 2014, 32(6).

收稿日期:2017-03-17