

doi: 10.3969/j.issn.1674-0696.2015.03.08

考虑大货车横向稳定性的平曲线设计控制指标

张 驰¹ 华贵龙¹ 张 敏²

(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. 长安大学 公路学院交通工程研究所 陕西 西安 710064)

摘要: 为研究驾驶员行为和道路线形指标对大货车横向稳定性的影响,选择六轴半挂车为典型车型,采用 Trucksim 动力学仿真软件建立车辆动力学闭环仿真模型,以侧向加速度作为大货车横向失稳风险评价指标。基于统计学的理论,运用 MATLAB 回归建立大货车侧向加速度预测模型,得到了不同设计速度条件下典型车型的极限最小转向半径值。研究表明:采用多自由度大货车模型,考虑横向滑移条件计算得到的平曲线极限最小半径比我国标准所规定的平曲线极限最小半径在各级设计速度条件下均大 10% 左右。研究成果量化了驾驶员行为和道路线形指标对大货车横向稳定性的影响,并对平曲线设计控制提出了建议指标,对今后道路安全设计具有参考价值。

关键词: 道路工程; 平曲线设计; Trucksim 仿真; 货车稳定性

中图分类号: U412.34

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2015)03-036-06

Control Index of Horizontal Curve Design Considering Truck's Lateral Stability

Zhang Chi¹, Hua Guilong¹, Zhang Min²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Traffic Engineering Research Institute, School of Highway,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effects of driving behavior and alignment index on the truck's lateral stability, six-axle semi-trailer was selected as the typical vehicle model, thus a closed-loop vehicle dynamic model was established by Trucksim. Lateral acceleration was used as the index for risk evaluation. Based on statistical theory, the lateral acceleration regression prediction model was established by MATLAB. The circular curve's limit minimum steering radii of typical vehicle model was proposed under varied design speeds. The results show that the horizontal curve's limit minimum radius adopting multi degree truck model which considered lateral sliding conditions, were about 10% larger than the radius adopting traditional rigid truck model under various design speeds. The results quantify the effects of driving behavior and alignment index on the truck's lateral stability. The advised index for horizontal curve design control was proposed and the result provides a good reference for road safety design.

Key words: road engineering; horizontal curve design; Trucksim simulation; truck stability

0 引言

近年来,随着物流运输的快速发展,货运车辆逐年递增,特别是西部山区货运增长速度迅猛,但是由于早期山区道路修建指标较低,时常引发货车侧翻和侧滑的交通事故。早期将货车简化成为刚体进行转弯稳定性的研究思路是造成设计指标不满足日益增长的交通发展需求的原因。随着技术手段的发展,已经有较成熟的技术进行多自由度车辆行驶行为分析,因此为了保障货运交通安全,明确各级设计速度

条件下货车转弯行为所适应的安全半径,需要利用先进仿真手段对平曲线的设计控制指标进行深入研究。

有关大货车行驶稳定性与道路平曲线设计控制的研究一直是汽车工程和交通工程领域的热点,国内外学者对其进行了大量的研究,也得出了丰富的成果。S. Takano 等^[1]使用计算机建立了一种三自由度车辆动力学模型对车辆进行各种工况下的仿真分析,并对大货车侧翻稳定性进行了研究;

收稿日期: 2014-10-20; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 教育部博士点基金新教师项目(20120205120013); 交通运输部应用基础项目(2014319812170); 陕西省自然科学基金项目(2012JQ7001); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1050); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G2211005&CHD2011JC048)

第一作者: 张 驰(1981—),男,四川宜宾人,副教授,博士,主要从事交通安全与道路仿真方面的研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn。

S. Frimpong 等^[2]建立了矿用自卸汽车的 RASC 模型,对其转向时的控制性和稳定性进行了仿真分析研究;E. Dahlberg 等^[3]运用一种计算动态侧翻阈值的方法,提出了动态分析对于货车侧翻稳定性的重要作用;G. Furtado^[4]及 S. M. Easa 等^[5-6]通过车辆动力学仿真模拟软件 VDMroad 研究车辆在平曲线、平纵组合线形下安全行驶所需的最小曲线半径等问题,并与现有道路设计规范作比较;丁庆国^[7]利用 CarSim 软件建立了平纵组合路段车辆侧翻仿真模型,得出了车辆不发生侧翻时平纵组合线形指标的关系;白钢^[8]利用 CarSim 软件仿真分析了无纵坡路段平曲线半径限值、无纵坡路段平曲线超高限值以及纵坡路段车辆行驶稳定性;许金良 等^[9]采用风洞试验的方法,考虑横风对小客车和集装箱车的作用,提出了道路线形设计新指标;罗京 等^[10]通过分析悬挂系统对车辆行驶横向稳定性的影响以及大型车横向倾覆特点,推导出考虑车辆悬架结构后的公路平曲线设计指标及公式。

现有路线设计多以传统静力学理论为基础,将车辆简化为刚体,忽略了车辆侧倾运动、轮胎变形以及驾驶员行为的影响,并且通常研究的车型是小汽车。同时国内外也鲜有综合考虑道路、车辆以及驾驶员行为对道路平曲线设计控制的影响。为此,笔者通过 TruckSim 仿真软件动态的仿真分析道路、车辆以及驾驶员行为对新型大货车横向稳定性的影响,建立大货车侧向加速度模型,再分别对货车横向倾覆和横向滑移条件进行分析,提出平曲线设计建议指标,以期对道路平曲线设计有更好的控制。

1 仿真系统模型

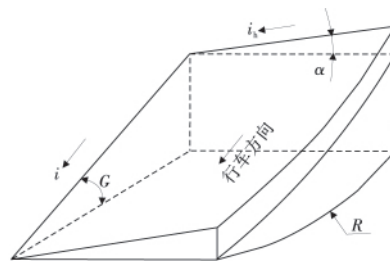
TruckSim 是由美国 Mechanical Simulation Corporation 公司开发的一种动态模拟汽车整车动力学的仿真软件,采用面向特性的参数化建模手段,用于仿真及分析轻型货车、大客车、重型半挂车、重型卡车以及多轴军用汽车对驾驶员操纵(转向、制动、加速)、车辆本身、3D 路面和空气动力学输入的响应,主要用来预测和仿真汽车整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性,主要由 Database、Animator 和 Plotter 三个部分组成。

A. A. Kordani 等^[11]利用 TruckSim 对行驶在设有减速丘的路面上的货车进行动力学仿真,得到减速丘尺寸与货车动力学响应的关系,并与实车数据进行对比,结果表明仿真的精确度很高,具有很强的实时性。H. Rakha 等^[12]采用 TruckSim 仿真分析了车辆对车辆本身、3D 路面输入的响应,为 HCM 中有关爬坡车道的设计提供了参考。段斌 等^[13]利用 TruckSim 工程软件进行了半挂汽车列车外摆值仿

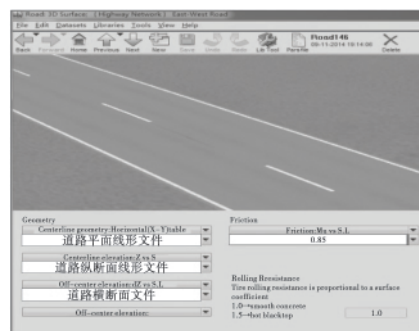
真,同时还进行了实车试验。研究结果表明:该算法计算结果准确、公式简洁、便于理解和工程实用,可为半挂汽车列车的通过性研究提供指导。因此,笔者采用 TruckSim 软件仿真分析大货车转向动力学。

1.1 道路模型

道路几何线形主要包括平曲线、纵坡、超高。如图 1 R 为平曲线半径、 i 为纵坡、 i_h 为超高。在 TruckSim 中道路模型主要由道路平面线形文件、道路纵断面线形文件和道路横断面文件组成。图中,由于道路的纵坡和超高一般均很小,因此,可取 $\alpha \approx i_h$, $G \approx i$ 。



(a) 道路三维简图



(b) TruckSim道路建模

图1 道路模型

Fig.1 Road model

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 JTG B01—2003《公路工程技术标准》(以下简称《标准》)中的相关规定,同时本试验路面附着系数暂定为 0.85。

1.2 车辆模型

近年来,我国公路运输高速发展,直线型的单体卡车已经不能满足货车重型化和高速化的要求,由此引发重型半挂车的产生,目前我国高速公路上出现大量的重型半挂车,根据 2011 年《中国高速公路运输量统计调查分析报告》^[14],六轴半挂车货运周转量比重已达到 58.22%,已成为我国高速公路货运的主力军。因此,笔者选用配置国产一汽锡柴 8.6LCA6 DL2-35E3 发动机的解放 CA4250P66K2T1E 型牵引车和华骏 ZCZ9402HJD 半挂车作为研究车型,该车为六轴半挂车,满载总重量 49 t,额定载重量为 34.5 t,试验在车辆满载情况下进行。

1.2.1 悬架模型

半挂汽车列车悬架系统以钢板弹簧为主,钢板弹簧力的产生较复杂,同时存在干摩擦,每次运动都会消耗部分能量,即在相同的挠度下,加载时弹簧力大于卸载时的弹簧力。模型近似采用线性的加载和卸载力曲线进行描述,牵引车前轴、后两联轴和半挂车后三联轴板簧的刚度分别为 250、700、2 500 N/mm;每轴板簧在相同挠度下加载与卸载弹簧力之差近似相等,分别为 4 000、10 000、10 000 N。减震器对车架与车身振动起到衰减作用,三轴的阻尼系数分别为 15、30、30 N·s/mm。

1.2.2 转向系统模型

转向系统建模过程中分为两部分:第1部分是从方向盘转角到转向器,近似用线性关系表示,定义为名义角传动比 n_w ;第2部分是从转向器到转向轮,这之间通过转向机构的非线性传递,梯形臂和横拉杆等的非线性传递使得传递到左右轮的传动比不同。设从转向器到左、右车轮的传动比分别定义为 n_{gl} 和 n_{gr} ,则转向系统的总角传动比为: $n_i = n_w \cdot n_{gi}$ 。

1.2.3 轮胎模型

轮胎模型是整车建模的关键部分,对仿真精度影响很大。笔者选用轮胎规格为 11.00R20 的轮胎,所建立的轮胎模型能够准确计算轮胎垂直力、剪切力以及各种力矩。轮胎的最大载荷为 1 000 000 N,其主要的测试变量包括有效滚动半径、轮胎刚度、滚动阻力、侧向力、回正力矩、轮胎转动惯量等。

2 仿真过程及行驶动力学分析

2.1 大货车横向失稳及风险度量指标

侧翻是指任何一种能够导致车辆绕其纵轴旋转 90°甚至超过 90°后车体直接与地面接触的操纵。造成侧翻的原因可以是一种或者是很多因素相结合,这些因素包括汽车结构、驾驶员操作、道路条件以及环境因素等。货车侧翻一般可分为两大类,一类是由于货车转向运行引起的侧翻,另一类则是绊倒侧翻。前者发生的主要原因是由于车辆在道路上行驶时,汽车的侧向加速度超过侧翻阈值,使得汽车的内侧车轮垂直反力为 0,因而引起侧翻;后者是指汽车运行时产生侧向滑移,与路面周围的障碍物侧向撞击而将其绊倒的侧翻^[15-16]。笔者所研究的侧翻指的是前者。

侧滑是指车辆在转向运动时,驾驶员在方向盘上施加转角以后,车辆作曲线运动产生离心力,进而使前轮产生侧偏力,弹性轮胎受侧向力作用滚动时就产生了侧偏角,再进一步引起车辆产生横摆运动;车辆的横摆运动又导致后轮也产生侧偏力,进而产生侧偏角。正是由于前、后轮产生的侧向力提供了车辆转向的向心力。车辆在小半径路段下以较高车

速行驶时,轮胎产生的侧向力与侧偏角之间为非线性关系。并且车辆发生失稳大多是在轮胎的非线性区,即随着侧偏角的增加轮胎产生的侧向力逐渐饱和。当前轴发生饱和时前轴就容易发生侧滑,使车辆偏离驾驶员的预期轨迹;当后轴发生饱和而侧滑时容易产生甩尾等更加危险工况。

目前,国内外针对重型车辆横向稳定性的评价指标主要有侧倾角、侧向加速度和横向载荷转移比 3 种^[17-19]。由于货车横向失稳的根本原因是侧向加速度过大。因此,笔者采用侧向加速度作为大货车横向稳定性评价指标。

2.2 车辆横向稳定性仿真分析

横向失稳的根本原因是大货车转向时,侧向加速度过大。其直接原因是由于车辆转向时转向半径 R_s 过小,图 2 是关于转向半径 R_s 的定义。

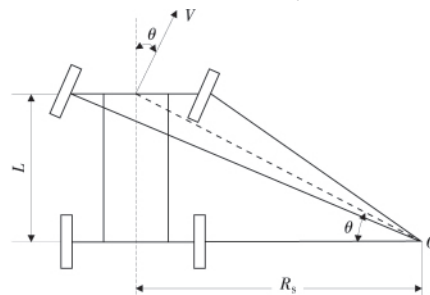


图 2 转向半径

Fig. 2 Steering radius

车辆由直线路段驶入弯道路段时,驾驶员需要转动方向盘,通过转向机构的转动,使前轴上的内外轮按一定的关系转过相应的角度,保证内外前轮的垂线与后轮的垂线交在同一点 O,此时,车辆将绕 O 点作圆周运动,O 点称为转向中心或轨迹的曲率中心,O 点到后轴的中心的距离就是车辆的转向半径 R_s 。笔者采用 TruckSim 软件可以实时记录行车过程中大货车侧向加速度的变化,当行车条件处于极限值时,货车就会发生侧滑甚至侧翻事故,如图 3。



图 3 大货车横向失稳情景

Fig. 3 Lateral instability of trucks

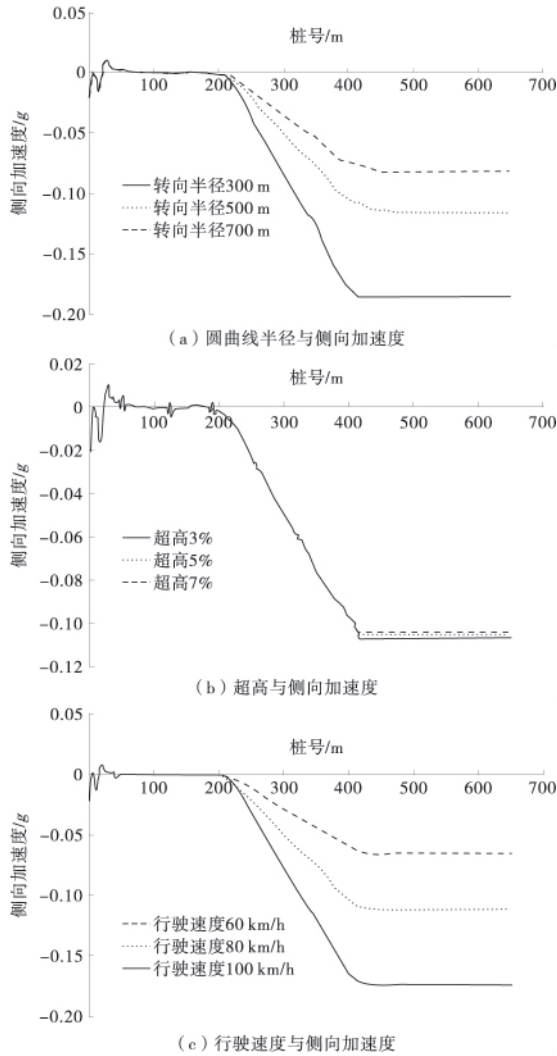
笔者研究急弯陡坡路段以及超车换道时,道路线形指标和驾驶员行为对大货车横向稳定性的影响,对于道路因素主要从车辆动力学分析的角度确定影响因素。对于驾驶员行为笔者主要考虑的是驾驶员转向半径和行驶速度。由于篇幅所限,只列出

部分指标值进行试验,表1列出了本次仿真的具体策略。

表1 不同道路参数下的仿真策略
Table 1 Simulation strategy of different road parameters

编号	转向半径/m	超高/%	行驶速度/(km·h ⁻¹)	仿真目的
1	700 600 500 400 300	5	80	转向半径单独作用
2	500	3 4 5 6 7	80	道路超高单独作用
3	500	5	60 70 80 90 100	行驶速度单独作用

图4 分别为大货车在不同转向半径、不同超高、不同行驶速度下行驶时侧向加速度随桩号的变化。



(c) 行驶速度与侧向加速度

图4 车辆动力学响应

Fig.4 Vehicle dynamic responses

由图4可见,桩号0~200 m标段为直线段,开始的50 m左右侧向加速度 a 变化幅度较大,原因是车辆启动后还没有达到稳定行驶状态,当车辆稳定行驶时,侧向加速度 a 基本保持水平状态,这与现实状态相吻合。桩号200~400 m标段为缓和曲线段,此路段侧向加速度 a 逐渐增大,原因是曲率逐渐增大,车辆所受的离心力也随之增大。桩号400~650 m标段为圆曲线段,由于曲率恒定,车辆所受的离心力不变,侧向加速度 a 值也基本保持恒定。因此可以得出:①其他条件保持不变的情况下,在一定的范

围内,随着转向半径的增大,侧向加速度 a 随之减小;②在一定的范围内,随着超高的增大,车辆所受重力的分量横向下滑力在增大,侧向加速度 a 也随之减小;③实际道路上车辆的行驶速度不可能和计算行车速度一致,可能高于也可能低于计算行车速度。图4(c)中,车辆分别以60,70,80,90,100(超速) km/h的速度转向,可以看出随着速度的增大,侧向加速度 a 大幅度增加。

3 平曲线设计控制及大车行驶控制

3.1 大货车侧向加速度模型

取转向半径、超高、车辆行驶速度3个指标作为模型的变量,可将大货车侧向加速度预测模型写为:

$$a=f(R_s,V,i_h) \tag{1}$$

运用MATLAB进行回归分析,分析结果得出相关系数 $R=0.999\ 6$,残差平方和为 $4.194\ 3\times10^{-5}$,相关性较好,具体数学方程为:

$$a=g(-0.008\ 400\frac{V^2}{R_s}+0.002\ 9i_h-0.005\ 325) \tag{2}$$

式中: R_s 为转向半径,m; i_h 为超高; V 为车辆行驶速度,km/h; g 为重力加速度, m/s^2 。

3.2 货车行驶的横向稳定性

离心力对货车在圆曲线上行驶的稳定性影响很大,它可能使货车向外侧滑移或者倾覆。为抵消或减小离心力的作用,保证货车在圆曲线上稳定行驶,应根据需要设置超高。平曲线上货车的主要受力分析见图5。

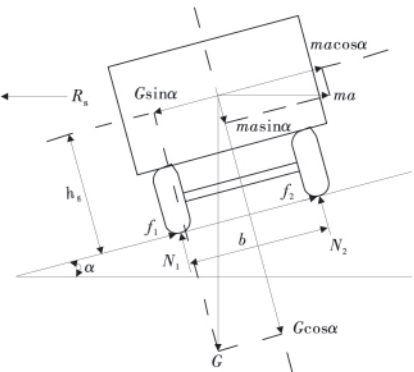


图5 平曲线上货车的受力分析

Fig.5 Force analysis of truck driving on horizontally curved section

将水平方向合力以及竖向合力分解为平行于路

面的横向力 X 和垂直于路面的竖向力 Y , 即:

$$X = m \cos \alpha - G \sin \alpha \quad (3)$$

$$Y = m \sin \alpha + G \cos \alpha \quad (4)$$

由于路面超高一般很小, 则 $\sin \alpha \approx \tan \alpha = i_h$, $\cos \alpha \approx 1$ 将式(2)代入式(3)中得:

$$X = ma - G i_h = mg(-0.008400 \frac{V^2}{R_s} + 0.0029i - 0.005325) - G i_h \quad (5)$$

3.2.1 横向倾覆条件分析

货车在设有超高的圆曲线上行驶时, 由于横向力的作用, 可能使货车绕外侧车轮触地点产生向外横向倾覆的危险。为使货车不产生倾覆, 必须使倾覆力矩小于或等于稳定力矩, 即:

$$X h_g \leq Y \frac{b}{2} = F i_h + G \quad (6)$$

式中: h_g 为车辆的重心高度; b 为车辆的轮距。

整理得到货车不发生侧翻的转向半径为:

$$R_s \geq \frac{0.008400V^2}{(\frac{b}{2h_g} + 0.997i_h - 0.005325)}$$

本次试验取 $\frac{b}{2h_g} \approx 0.4$, 超高 i_h 按《标准》中极限最小半径所对应的取值, 各设计速度对应的极限最小转向半径如表2。

表2 不同设计速度按横向倾覆条件分析的圆曲线极限最小转向半径

Table 2 Limit minimum steering radii of circular curve with different design speeds under lateral overturning conditions

设计速度/(km·h ⁻¹)	100	80	60	40	20
极限最小转向半径/m	177	113	64	29	7

3.2.2 横向滑移条件分析

货车在设有超高的圆曲线上行驶时, 由于横向力的作用, 可能使货车沿横向力的方向产生横向滑移。为使货车不产生横向滑移, 必须使横向力小于或等于轮胎和路面之间的横向摩阻力, 即

$$X \leq G \varphi_h \quad (7)$$

式中: φ_h 为横向摩阻系数。

整理得到货车不发生侧向滑移的转向半径为:

$$R_s \geq \frac{0.008400V^2}{(\varphi_h + 0.997i_h - 0.005325)}$$

本次试验横向摩阻系数 φ_h 、超高 i_h 均按《标准》中极限最小半径所对应的取值, 各设计速度对应的极限最小转向半径如表3。

表3 不同设计速度下按横向滑移条件分析的圆曲线极限最小转向半径

Table 3 Limit minimum steering radii of circular curve with different design speeds under lateral sliding conditions

设计速度/(km·h ⁻¹)	100	80	60	40	20
极限最小转向半径/m	431	276	135	66	17
《标准》中极限最小半径/m	400	250	125	60	15

注: 表2、表3给出货车超速至100 km/h时的极限半径。

综合表2和表3的结果可以看出:

1) 《标准》中规定的极限最小半径能满足按横向倾覆条件分析的圆曲线极限最小半径要求, 但是不能满足按横向滑移条件分析的圆曲线极限最小半径要求。

2) 按横向滑移条件分析得出的圆曲线极限最小半径均比《标准》中规定的圆曲线极限最小半径在各级设计速度条件下均高10%左右。

3) 在平曲线半径小于表3所规定的极限最小半径路段, 为了避免大货车产生横向滑移, 可按表格结果对大货车进行限速并且规范驾驶员行为或者在改扩建过程中进行参考修改。

4 结 论

1) 以汽车动力学为基础, 分析了平曲线路段汽车的受力情况, 利用 MATLAB 进行回归分析, 定量的推导出转向半径、超高和车辆行驶速度与车辆侧向加速度之间的数学关系。以此数学模型为基础, 通过车辆的横向稳定性分析, 参照《标准》采用的参数值, 为平曲线设计控制提出了建议指标。显然, 考虑横向滑移条件计算得到的平曲线极限最小半径, 多自由度大货车模型比传统刚体大货车模型在各级设计速度条件下均大于10%。

2) 笔者所得的大货车侧向加速度数学模型可为货车的侧翻、侧滑预警提供理论基础。并对进一步研究平曲线设计控制以及车辆转向安全保障措施提供良好的参考价值。

3) 实际应用中, 计算极限最小转向半径所需参数, 可通过现场调查来确定其值, 进而对笔者提出的指标进行适当的修正。

参考文献(References):

- [1] Takano S, Nagai M, Taniguchi T, et al. Study on a vehicle dynamics model for improving roll stability[J]. JSAE Review 2003, 24(2): 149-156.
- [2] Frimpong S, Changirwa R, Szymanski J. Simulation of automated dump trucks for large scale surface mining operations[J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2003, 17(3): 183-195.
- [3] Dahlberg E, Stensson A. The dynamic rollover threshold—a heavy truck sensitivity study[J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 40(1): 228-250.
- [4] Furtado G. Vehicle Stability on Combined Horizontal and Vertical Alignments[D]. Ontario, Canada: Carleton University 2002.
- [5] Easa S M, Dabbour E. Design radius requirements for simple horizontal curves on three-dimensional alignments[J]. Canadian Journal of Civil Engineering 2003, 30(6): 1022-1033.
- [6] Easa S M, Abd E I Halim A. Radius requirements for trucks on three-dimensional reverse horizontal curves with intermediate tangents[J]. Transportation Research Board 2006, 1961: 83-93.
- [7] 丁庆国. 基于汽车行驶稳定性的公路平纵组合线形设计指标研

- 究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Ding Qingguo. Research on Design Index of Highway Plane and Vertical Combined Alignment Based on Automobile Running Stability[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 白钢. 基于车辆行驶稳定性仿真的道路几何线形设计参数研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- Bai Gang. Study on Design Parameters of Road Geometric Alignment Based on Vehicle Handling Stability Simulation[D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [9] 许金良, 王恒, 赵利苹. 考虑横风作用的公路平曲线最小半径研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 38-43.
- Xu Jinliang, Wang Heng, Zhao Liping. Research on minimum radius of highway horizontal curve with crosswind considered[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 38-43.
- [10] 罗京, 张冬冬, 郭腾峰. 大型车辆横向稳定性对公路设计极限平曲线半径取值的影响分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 42-46.
- Luo Jing, Zhang Dongdong, Guo Tengfeng. Analysis for influence of large vehicle's lateral stability on ultimate horizontal curve radius of highway design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 42-46.
- [11] Kordani A A, Molan A M, Monajjem S, et al. Simulation Modeling of Dynamic Response of Vehicles to Different Types of Speed Control Humps[C]//T&DI Congress 2014: Planes, Trains, and Automobiles. Orlando, Florida: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [12] Rakha H, Yu B. Truck performance curves reflective of truck and pavement characteristics[J]. Journal of transportation engineering, 2004, 130(6): 753-767.
- [13] 段斌, 单颖春, 刘献栋, 等. 一种半挂汽车列车外摆值的计算方法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(6): 161-166.
- Duan Bin, Shan Yingchun, Liu Xiandong, et al. Out value algorithm of tractor semitrailer combinations[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(6): 161-166.
- [14] 交通部运输综合规划司, 长安大学运输科学研究院. 中国高速公路运输量统计调查分析报告[R]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Comprehensive Department of Transportation, Chang'an University Transportation Research Institute, The Report of China's Highway Traffic Volume Survey Analysis[R]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [15] 吴新烨, 葛晓宏, 罗树友, 等. 汽车侧翻稳定性研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2010, 49(6): 815-818.
- Wu Xinye, Ge Xiaohong, Luo Shuyou, et al. Research on vehicle's stability[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(6): 815-818.
- [16] 朱颖, 周炜, 郭志平, 等. 基于车辆侧倾角侧翻预警算法的研究[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 52-54.
- Zhu Ying, Zhou Wei, Guo Zhiping, et al. The study of vehicles roll-over forewarning algorithm based on pattern recognition[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2): 52-54.
- [17] Chen B C. Warning and Control for Vehicle Rollover Prevention[R]. Michigan, USA: University of Michigan, 2001.
- [18] Palkovics L, Semsey A, Gerum E. Roll-over prevention system for commercial vehicles—addition sensorless function of the electronic brake system[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(4): 285-297.
- [19] Liu P. Analysis, Detection and Early Warning Control of Dynamic Rollover of Heavy Freight Vehicles[D]. Quebec, Canada: Concordia University, 1999.
- (上接第35页)
- [3] 罗利锐, 刘志刚. 岩溶地区超前地质预报方法对比分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 351-355.
- Luo Lirui, Liu Zhigang. Comparative analysis of geological prediction methods in karst areas[J]. Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup1): 351-355.
- [4] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217-215.
- Li Shucai, Li Shuchen, Zhang Qingsong, et al. Forecast of karst fractured ground water and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-215.
- [5] 钟世航, 孙宏志, 李术才, 等. 隧道及地下工程施工中岩溶裂隙水及断层、溶洞等隐患的探查、预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3298-3327.
- Zhong Shihang, Sun Hongzhi, Li Shucai, et al. Detection and forecasting for hidden danger of karst fissure water and other geological disasters during construction of tunnels and underground projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3298-3327.
- [6] 陈宇, 温忠辉, 束龙仓. 基岩裂隙水研究现状与展望[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 62-65.
- Chen Yu, Wen Zhonghui, Shu Longcang. Status and prospect of research on bedrock fissure[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 62-65.
- [7] 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Xu Kaili, Zhu Zhicheng. Structural Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [8] Harry M J. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- Harry M J. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [9] Arkhipov V I. Hierarchy of dielectric-relaxation times in water[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002, 305(1/2/3): 127-135.
- [10] Annan A P. Ground Penetrating Radar: Workshop Notes[M]. Ontario, Canada: Sensors & Software Inc., 1999.
- [11] Topp G C, Yanuka M, Zebchuk W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resources Research, 1988, 24(7): 945-952.
- [12] 左昌群, 吕乔森, 黄彬. 隧道施工地质预报方法模糊优选与应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 948-952.
- Zuo Changqun, Lv Qiaosen, Huang Bin. Fuzzy optimization and its application of geologic prediction methods in tunnel construction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(5): 948-952.