

文章编号:1671-8879(2017)06-0031-07

# 高速公路弯道路段载重汽车侧滑 仿真及安全行车速度

王 恒<sup>1,2</sup>, 许金良<sup>1</sup>, 贾兴利<sup>1</sup>, 苏 龙<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 浙江省交通投资集团有限公司, 浙江 杭州 310000;

3. 陕西省交通规划设计研究院, 陕西 西安 710082)

**摘 要:**为了揭示高速公路载重汽车侧滑事故发生机理,分析侧滑时驾驶输入-道路-车辆的响应状态,寻找弯道路段载重汽车侧滑安全临界。针对侧滑事故研究受到真实试验无法开展的制约,采用 ADAMS 仿真软件,依据高速公路弯道路段载重汽车平衡条件,建立考虑刚柔耦合效应的载重汽车整车模型。分别采用 3D 样条路面和闭环控制方式建立非实测弯道路面模型和驾驶人模型,构建侧滑事故发生时驾驶人-道路-车辆瞬态动力学响应模型,并采用转向盘转角阶跃输入下的转向瞬态响应来评价载重汽车的操纵稳定性,实现仿真模型的可行性验证。参照实际采用参数值,对比设置道路条件、车辆条件、制动减速度、非实测路段特征点等 ADAMS 侧滑仿真工况。按照等差异划分,开展包含 400、500、600、700、800、1 000、1 500、2 500 m 共 8 种弯道半径,2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、10% 共 8 种超高,0.2、0.4、0.6 共 3 种路面附着系数的多组正交侧滑仿真试验,揭示载重汽车以不同速度在不同半径、不同附着系数的弯道路段下的侧滑轨迹变化规律,结合行车轨迹侧向偏移分析弯道特征点处的临界侧滑安全行车速度。结果表明:不同试验条件下高速公路弯道路段载重汽车轨迹侧向偏移量差异明显,最大可达 2.456 m,最小为 0.053 m,不同半径、不同附着系数下的弯道路段载重汽车瞬时转向临界侧滑安全行车速度阈值区间为 47~97 km/h。

**关键词:**道路工程;高速公路弯道;侧滑仿真;刚柔耦合;动力响应;临界速度

中图分类号:U412.3

文献标志码:A

## Sideslip simulation and safe driving speed of truck on highway curve section

WANG Heng<sup>1,2</sup>, XU Jin-liang<sup>1</sup>, JIA Xing-li<sup>1</sup>, SU Long<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Zhejiang Communications

Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 3. Shaanxi Provincial Transport

Planning Design and Research Institute, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

**Abstract:** To reveal the mechanism of sideslip accident of highway truck, the response state of driving input-road-vehicle in the case of sideslip was analyzed to find the truck sideslip safety criticality on curve section. As the data limit brought by the difficulties in field experiment, the whole truck model considering rigid flexible coupling effect was built by ADAMS according to

收稿日期:2017-05-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802208);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ5122)

作者简介:王 恒(1968-),男,陕西渭南人,浙江省交通投资集团有限公司教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:2016021066@chd.edu.cn.

通讯作者:许金良(1966-),男,山东曹县人,教授,博士研究生导师,E-mail:xujinliang@chd.edu.cn.

truck's balance condition on highway curve section. The non-measured curve pavement model and driver model were built based on 3D spline pavement and closed-loop control, then the driver-road-vehicle transient dynamic response model was established when sideslip happened. Also, the steering transient response under step input of steering wheel angle was used to evaluate the operation stability of truck, which verified the feasibility of simulation model. Referring to the actual value, the ADAMS sideslip simulation conditions were set up, such as road condition, vehicle condition, braking deceleration, and characteristic points of non-measured section, etc. According to the equal difference, a series of orthogonal sideslip simulation tests on 8 kinds of turning radius (400, 500, 600, 700, 800, 1 000, 1 500, 2 500 m), 8 kinds of super elevation (2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 10%) and 3 kinds of pavement adhesion coefficients (0.2, 0.4, 0.6) were carried out, the simulation results revealed the sideslip trajectory change law of truck with different speeds and under different radii and different adhesion coefficients. Critical sideslip safe driving speed of characteristic points on curve section was obtained based on driving trajectory lateral offset. The results show that the truck driving trajectory lateral offset on highway curve section differs from each other obviously under different test conditions. The maximum is 2.456 m, and the minimum is 0.053 m. And critical sideslip safe driving speed of truck instant turning threshold on curve road section under different turning radius and pavement adhesion coefficients is between 47 to 97 km/h. 4 tabs, 7 figs, 18 refs.

**Key words:** road engineering; highway curve section; sideslip simulation; rigid flexible coupling effect; dynamic response; critical speed

## 0 引言

据统计,由于载重汽车引起的交通事故占高速公路交通事故总数的 50%,导致的死亡人数比例为 60.32%,受伤人数比例为 67.10%,财产损失比例为 74.22%,严重威胁着正常的高速公路运营<sup>[1]</sup>。在载重汽车事故中,高速公路弯道路段侧滑为最多的单车事故形态,也是造成伤亡人数最多的事故形态之一。

对于车辆侧滑稳定性的研究,中国学者进行了大量的研究工作。许金良等采用风洞试验方法,选取 2 种代表车型,量化了风对车辆产生的作用力,建立了考虑风作用的汽车行驶稳定性模型<sup>[2]</sup>;王安顺等研究了汽车转向轮侧滑及其影响因素,指出侧向力是评价转向轮侧滑的指标<sup>[3]</sup>;周锋等研究了车轮侧滑和车轴侧滑的关系,提出了检测车轴侧滑量的基本原理<sup>[4]</sup>;熊坚建立了车辆制动时后轮抱死发生侧滑的力学模型,提出了在汽车急刹车时保证侧滑相对稳定的参数变化区域,为汽车制动稳定性的研究提供了参考<sup>[5]</sup>;元增民将车轮侧滑分为 4 类,并对比了各类侧滑对车辆的影响<sup>[6]</sup>。

国外对于车辆侧滑稳定性的研究主要集中在轮胎摩擦、橡胶材料、轮胎力学等基础学科方面。随着计算机科学的发展,计算机仿真系统方面的研究日渐兴起,ADAMS 仿真软件也得到了众多学者的关注。Tang 利

用 ADAMS/Car 中的合力驱动器方法,对扭转梁后悬架进行了运动学分析,验证了其正确性和合理性,结果表明,该合力驱动器可以方便地应用于非线性特性的 MBS 建模和仿真分析<sup>[7]</sup>;Gim 等利用 ADAMS 软件进行半经验轮胎模型的仿真研究,验证了该模型的正确性<sup>[8]</sup>;Kim 等利用 ADAMS 建立了七自由度车辆模型,提出多体动力学理论是研究汽车操纵性的一种简单有效的方法<sup>[9]</sup>;Juhlin 利用 ADAMS 建立了客车模型,研究了侧风对客车的影响,发现轴荷对客车气动力的影响较大,驾驶人模型对仿真影响也较大<sup>[10]</sup>;Hussain 等利用 ADAMS 建立三轴商用牵引车模型来研究车辆的稳态力学响应<sup>[11]</sup>;Nagai 等利用 ADAMS 对非线性四轮转向车辆模型进行了研究,发现应用线性控制理论和神经网络可以提高车辆操纵稳定性<sup>[12]</sup>;Verma 等利用 ADAMS/Insight 和 ADAMS/Car 这 2 个模块对卡车悬架和轮胎进行了优化设计<sup>[13]</sup>;Arczewski 等通过柔性动力学理论建立整车模型,研究车辆操纵行驶中的优化设计,为车辆设计积攒了经验<sup>[14]</sup>。由此看出,已有研究多从汽车结构稳定性出发,探讨轮胎、操纵及外部环境等对车辆运行的影响。针对道路条件对汽车行驶稳定性,尤其是侧滑临界影响的研究较少。同时,侧滑事故研究受到真实试验无法开展的制约,多采用计算机仿真作为数据获取主要途径,且在传统研究中车辆稳定性与力学特性等方面的精度无法满足当前关于侧滑

阈值研究的需求。

为此,本文利用 ADAMS 仿真软件,结合刚柔耦合效应建立载重汽车模型。通过合理设置仿真试验条件,研究高速公路弯道路段载重汽车临界侧滑稳定性,提出高速公路弯道路段载重汽车临界侧滑安全行车速度阈值,为载重汽车限速管理提供参考。

## 1 考虑刚柔耦合效应的载重汽车弯道行驶力学分析

汽车行驶时既存在大范围刚体运动,又存在弹性变形,属于复杂的刚柔耦合多体系统<sup>[15]</sup>。根据汽车动力学原理,考虑刚柔耦合效应,可以将汽车分为用悬挂系统连接的上、下2个部分<sup>[16]</sup>。现代汽车设计的悬挂系统弹性变形较大,在圆曲线上行驶时受到横向力作用,车身相对于一个虚拟支点  $O$  有相对转动的趋势<sup>[17]</sup>,使得汽车重心向曲线外侧偏移,增大了汽车倾覆的可能性,对行车安全不利。所以考虑刚柔耦合效应的载重汽车模型比单刚体模型更切合实际,提高了理论模型的精度。行驶在弯道路段的载重汽车横断面受力分析如图1所示。图1中: $G_s$ 、 $G_u$  分别为汽车悬架质量和非悬挂质量; $F_w$  为静摩擦力; $F_s$ 、 $F_u$  分别为悬挂质量和非悬挂质量产生的离心力; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为非悬挂质量和悬挂质量的侧倾角; $O_1$ 、 $O_2$  分别为悬挂质量和非悬挂质量的质心; $h_g$ 、 $h_u$ 、 $h_r$ 、 $h$  分别为悬挂质量的质心高度、非悬挂质量的质心高度、侧倾中心的高度、悬挂质量质心距侧倾中心的高度; $B$  为宽度。

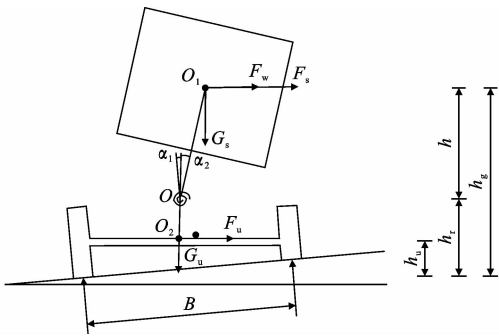


图1 考虑刚柔耦合效应的载重汽车力学分析

Fig.1 Truck mechanics analysis considering rigid-flexible coupling effect

分别对载重汽车左右轮和路面接触点取矩,并取弯道超高  $i_h$ ,得到载重汽车左右轮的载荷  $F_{ZL}$  和  $F_{ZR}$  为

$$\begin{cases} F_{ZL} = [G_s i_h h_g + G_s (B/2 - S_2) + G_u \cdot \\ (B/2 - S_3) - F_s h_g - F_u h_u] / B \\ F_{ZR} = [G_s (B/2 + S_2) + G_u (B/2 + S_3) + \\ F_s h_g + F_u h_u - G_s i_h h_g - G_u i_h h_u] / B \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_2 = h \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + h_u \sin(\alpha_1) \approx h(\alpha_1 + \alpha_2) + h_u \alpha_1$ ,  $S_3 = h_u \sin(\alpha_1) \approx h_u \alpha_1$ , 分别为悬挂质量和非悬挂质量的作用力矩。

## 2 基于 ADAMS 的驾驶人-车辆-道路瞬态动力学响应仿真模型

### 2.1 载重汽车整车模型的建立

选取东风系列额定载重 10 t 三轴大力神车型作为原型,利用 ADAMS 仿真软件建立载重汽车模型<sup>[16]</sup>。原型车性能参数如表1所示。

表1 原型车性能参数

Tab.1 Performance parameters of prototype vehicle

车辆型号	东风大力神
整车质量/t	6.270
额定载重/t	10
实际载重/t	10
车身长度/m	7.70
车身高度/m	3.95
车身宽度/m	2.50
转向传动比	20
齿条比率	471.0
最大前刹车扭矩/(N·m)	16 000
最大后刹车扭矩/(N·m)	4 000
前后轮刹车效率比	0.65

利用多体动力学理论,对仿真车辆整体结构进行抽象简化,简化后的车体结构主要包括钢板弹簧、前后悬架、转向系统、动力传动系统、轮胎及相互之间的约束连接。采用 ADAMS 分别搭建各个分部的子模块,并通过通讯器对上述模块进行约束和连接,形成刚柔耦合的载重汽车整车模型。

### 2.2 道路模型和驾驶人模型的建立

采用 3D 样条路面建立非实测弯道路面模型<sup>[18]</sup>。首先选定非实测弯道路段的半径和纵坡;利用纬地软件获取道路中心线各桩号的三维坐标( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ),为了满足精度要求,将直线路段和曲线路段桩号间距分别取 5、2 m;然后设置道路宽度、超高和左右侧路面附着系数等特征参数;最后,建立非实测弯道路面属性文件,完成弯道路面模型。

采用闭环控制方式模拟驾驶人模型:假定汽车以道路中心线为目标轨迹,速度控制采用恒速控制或纵向加减速度控制的原则,通过输入驾驶人控制文件使载重汽车维持在预设的运行速度和纵向加减速度附近。

### 2.3 瞬态动力学响应仿真模型验证

为验证已建立仿真模型的合理性,采用转向盘

转角阶跃输入下的转向瞬态响应来评价载重汽车的操纵稳定性,其方法为:初始速度分别为 100、80、60 km/h,选取试验速度中值 80 km/h 为初速度进行恒速直线行驶;根据汽车理论,方向盘最大转角为  $720^\circ$ ,最大转向角速度为  $1\,200\ (^{\circ})/\text{s}$ ,选取方向盘常见转角  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ ,并考虑初始行驶时的操作影响,选择在 5 s 时给整车以角阶跃输入,并且保持整车前进速度恒定。测得输出曲线后,并与转向盘转角阶跃变量标准变化曲线进行比较,结果如图 2 所示。

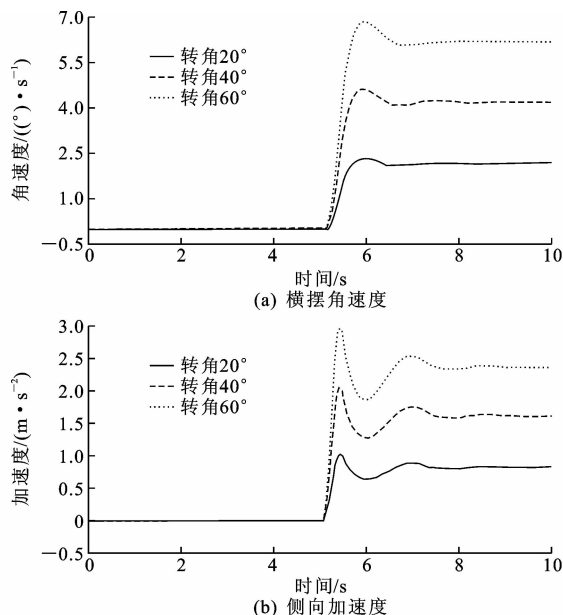


图2 载重汽车横摆角速度及侧向加速度变化

Fig. 2 Changes of yaw rate and lateral acceleration of motor truck

如图 2 所示:仿真 5 s 时,转向盘转角  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  的载重汽车都在 1.5 s 内进入稳定状态,分别稳定在相应的横摆角速度上,并且随着转角的增加,其稳态值也逐渐增加,即载重汽车横摆角速度和方向盘转角存在单调递增的关系,且在 6.5 s 后横摆角速度和转向灵敏度不存在波动,所建模型具有良好的瞬态响应特性。侧向加速度和转向盘转角存在单调递增关系。另外载重汽车仿真 5 s 后,在一定范围内出现较大波动,波动最大约为  $0.3g$  ( $g$  为重力加速度),根据汽车理论分析,此时,车辆还处于线性状态,证明仿真模型可行。

## 3 侧滑仿真

### 3.1 试验工况设置

#### 3.1.1 道路条件

假定道路的设计速度为 100 km/h,双向 4 车道,路线走向为左转,道路右幅总宽度为 11.25 m,

起点坐标为  $(0,0,0)$ 。选取转弯半径 400、500、600、700、800、1 000、1 500、2 500 m,超高 10%、8%、7%、6%、5%、4%、3%、2% 建立弯道路段。假定路面绝对平整,只考虑路面附着系数作为路面特征影响因素。选取沥青混凝土路面为代表性路面,分为干燥、潮湿与积雪 3 种类型,参照已有相关研究<sup>[2-4]</sup>,并按照等差划分,选取的路面附着系数分别为 0.6、0.4、0.2。

#### 3.1.2 车辆条件

假定载重汽车满载,载货量 10 t,装载高度 4.5 m,且装载均匀,载重汽车整车质心高度 2.276 m;载重汽车的初始速度分别为 100、80、60 km/h。

#### 3.1.3 制动减速度

制动减速度试验方案:①道路模型,路面附着系数分别为 0.6、0.4、0.2 的直线路段;②驾驶人模型,以 100 km/h 的初始速度,在 10 s 时刻,分别选取 3 组具有代表性的制动力  $F_{\text{zd}}$  进行制动,来模拟驾驶人紧急刹车行为。所得载重汽车的制动力-时间关系和速度-时间关系如图 3~下页图 5 所示。

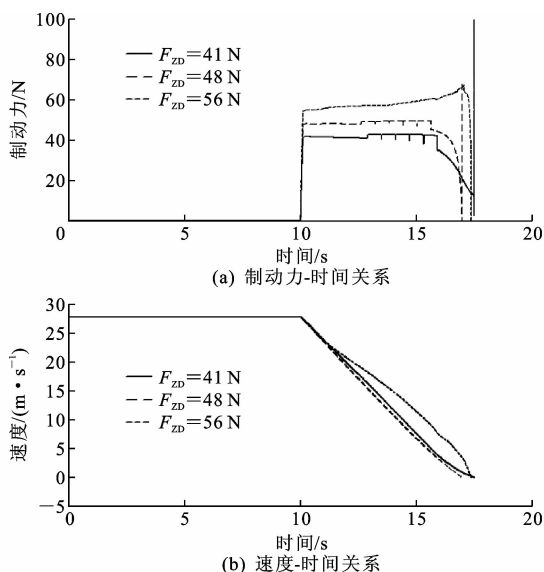
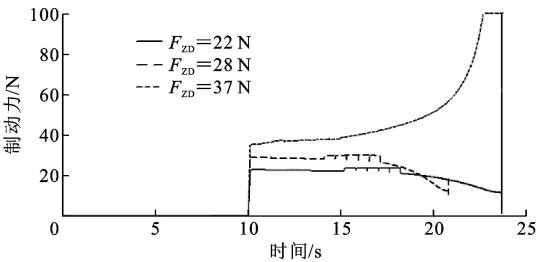


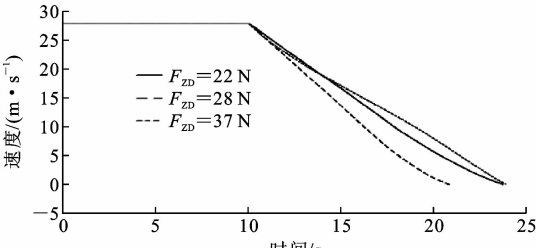
图3 附着系数为 0.6 时的直线制动仿真

Fig. 3 Braking simulation on straight road of  $\varphi=0.6$

从图 3~图 5 中可以看出:在路面附着系数为 0.6、0.4、0.2 的道路上,驾驶人紧急刹车制动力分别取 48、28、17 N 时,轮胎近似达到边滚动边滑动状态,载重汽车的制动效果最好。实际载重车辆都安装有 ABS(防抱死)系统,在紧急制动时都能使轮胎处于边滚边滑状态,可以达到最佳制动效果。因此选取载重汽车最佳制动力下的制动减速度作为急刹车时的制动减速度是可行的,如表 2 所示。



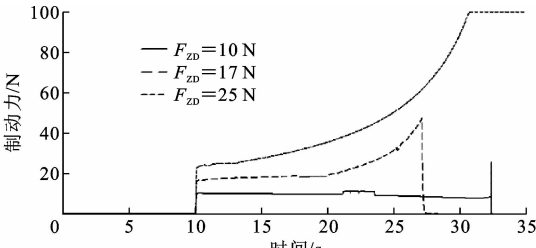
(a) 制动力-时间关系



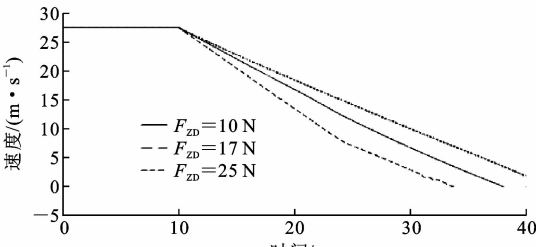
(b) 速度-时间关系

图 4 附着系数为 0.4 时的直线制动仿真

Fig. 4 Braking simulation on straight road of  $\varphi=0.4$



(a) 制动力-时间关系



(b) 速度-时间关系

图 5 附着系数为 0.2 时的直线制动仿真

Fig. 5 Braking simulation on straight road of  $\varphi=0.2$

表 2 载重汽车制动减速度

Tab. 2 Braking deceleration of motor truck

路面附着系数 $\varphi$	0.6	0.4	0.2
制动减速度 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	3.97	2.57	1.25

3.1.4 非实测路段特征点

为了全面研究载重汽车在弯道路段各位置处急刹车时的侧滑模型,对建立的半径为 400、500、600、700、800、1 000、1 500、2 500 m 的弯道进行非实测路段特征点设置,编号分别为 T1~T7,如图 6 所示。

3.2 侧滑仿真试验过程

按照侧滑仿真试验各工况正交设计,进行单车侧滑仿真试验。驾驶人在弯道路段急刹车时载重汽

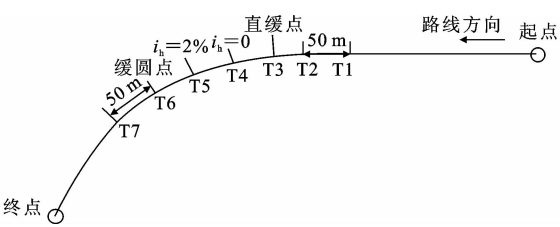


图 6 非实测路段特征点位置

Fig. 6 Positions of feature point of non-measured section

车发生侧滑,行车轨迹与道路中心线产生偏差,因此选取载重汽车轨迹作为侧滑严重程度的判别依据。仿真试验结果显示,载重汽车以不同速度在不同半径、不同附着系数的弯道路段下侧滑仿真结果不同。载重汽车以 80 km/h 的速度在弯道半径为 600 m、路面附着系数为 0.4 的弯道路段上行驶时,各特征点在急刹车工况下的侧滑轨迹如图 7 所示。

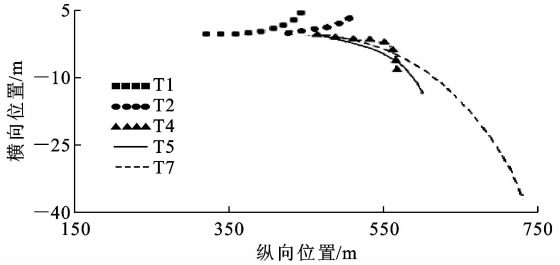


图 7 侧滑轨迹

Fig. 7 Skidding trajectory

从图 7 可以看出:

(1)T1 位于直缓点前 50 m 的直线段上,路拱横坡坡度为  $-2\%$ 。此处急刹车,后轮与路面有相对滑动,达到边滚边滑状态,纵向滑移率和路面附着系数增大,横向路面附着系数减小。载重汽车受到自身重力的水平分力作用,且其大于路面提供的横向摩擦力,会向路面外侧滑移,从而失去转向能力。

(2)T2、T3 分别位于直缓点及其后一定距离的缓和曲线段处,其位置直到 T4 均处于反超高段,路拱横坡坡度处于  $(-2\%,0)$  之间。载重汽车在急刹车工况下,较 T1 受到自身重力的水平分力减小,但是出现了新的离心力作用,两者方向一致,朝向弯道外侧,其合力大于路面提供的横向摩擦力,载重汽车向弯道外侧发生滑移,滑移量较 T1 小。

(3)T4 位于缓和曲线内超高为 0 的地方,载重汽车未急刹车前,车速较高,载重汽车受到的离心力较大,重力的水平分力为 0,其合力即横向力较大,方向朝弯道外侧。载重汽车急刹车,横向附着系数减小,载重汽车向弯道外侧滑动,随着制动距离的增加,车速降低,离心力减小。路面超高变为正值,载重汽车

又受到自身重力水平分力的作用,方向朝弯道内侧,且作用力大于离心力,载重汽车又向弯道内侧滑动。

(4)T5 位于缓和曲线超高为 2%的位置,载重汽车在此处急刹车的侧滑情形与 T4 处类似,只是往弯道外侧滑移的距离减少,原因是此处的超高为正值,载重汽车除了受到离心力作用,还受到自身重力水平分力的作用,2 个力的作用方向相反,减小了载重汽车向外滑移的距离。随着速度减小,离心力减小,同时超高增大,重力分力增大,载重汽车往弯道内侧滑动。

(5)T6、T7 分别位于缓圆点及其后一定距离的圆曲线上,载重汽车在这 2 个特征点上急刹车后的特征均与圆曲线相同,即纵向路面附着系数增大,横向路面附着系数减少,载重汽车受到的离心力小于自身重力的水平分力,并且其合力方向是朝弯道内侧,载重汽车向弯道内侧滑动。

表 3 路面附着系数为 0.6 时的侧向偏移量  
Tab. 3 Lateral offset when pavement adhesion coefficient is 0. 6

特征点	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	不同弯道半径(m)下的侧向偏移量/m							
		400	500	600	700	800	1 000	1 500	2 500
T1	100	2. 063	2. 062	2. 063	1. 935	1. 862	1. 434	1. 382	1. 338
	80	2. 074	1. 852	1. 680	1. 621	1. 514	1. 053	0. 900	0. 583
	60	1. 563	1. 394	0. 772	0. 555	0. 449	0. 489	0. 210	0. 054
T7	100	-2. 456	-2. 009	-1. 553	-1. 511	-1. 421	-1. 470	-1. 438	-1. 234
	80	-2. 155	-1. 349	-1. 248	-1. 212	-1. 175	-1. 184	-0. 953	-0. 727
	60	-1. 952	-1. 135	-0. 901	-0. 857	-0. 659	-0. 541	-0. 222	-0. 053

注:偏移量为正值表示向弯道内侧偏移,偏移量为负值表示向弯道外侧偏移。

表 4 不同弯道半径与附着系数下临界侧滑安全行车速度  
Tab. 4 Skidding safety driving speeds threshold under different radii and different adhesion coefficients

路面附着 系数 $\varphi$	不同弯道半径(m)下的临界侧滑安全行车速度/(km·h <sup>-1</sup> )							
	2 500	1 500	1 000	800	700	600	500	400
0. 6	97. 43	94. 52	85. 58	74. 34	69. 74	63. 21	55. 47	53. 12
0. 4	88. 55	83. 12	80. 03	73. 33	67. 89	60. 25	54. 06	50. 11
0. 2	78. 83	76. 54	70. 46	64. 52	60. 11	56. 56	50. 98	46. 74

从表 4 中可以看出:路面附着系数对弯道路段载重汽车侧滑有显著影响,在速度、弯道半径和超高相同的情况下,附着系数越小,载重汽车侧滑危险越高。弯道半径对载重汽车侧滑同样有显著影响,在相同速度、相同路面附着系数的情况下,弯道半径越小,载重汽车越容易侧滑。

5 结 语

(1)利用 ADAMS 仿真软件建立考虑刚柔耦合效应的载重汽车整车模型;采用 3D 样条路面中的路面中心点三维坐标、道路宽度、道路超高和道路左

4 临界侧滑安全行车速度

为得到仿真试验的行车轨迹侧向偏移量,将实际轨迹线减去预期轨迹线,得到载重汽车的行车轨迹侧向滑移量随道路桩号的变化。采用载重汽车在急刹车工况下,速度降低到 30 km/h 时的侧向偏移值作为载重汽车单车侧向滑移量的代表值。对侧滑仿真结果进行侧向偏移量统计,T1 和 T7 特征点的结果如表 3 所示。

结合行车轨迹侧向偏移量的范围,利用数值内插法求出不同弯道半径下各个特征点处的临界侧滑安全行车速度。将计算所得的某个弯道半径下的各个特征点处的临界侧滑安全行车速度进行去除奇异点处理,并取其均值作为该半径下的临界侧滑安全行车速度代表值,如表 4 所示。

右侧摩擦因数来实现对非实测道路模型的精确构建;通过路面中心点坐标追踪、运行速度和加减速度的控制来实现对闭环控制的驾驶人模型构建;设置了侧滑仿真工况,进行侧滑仿真试验,并对仿真试验结果进行了分析。

(2)选取行车轨迹侧向偏移量作为表征载重汽车侧滑事故严重程度的量化指标,限定行车轨迹侧向偏移量为 2. 456 m,利用数理统计和数值内插法计算出不同半径、不同附着系数下的弯道路段载重汽车瞬态转向临界侧滑安全行车速度阈值,阈值区间为 47~97 km/h。

(3)由于道路几何条件组合形式多样,不同平纵线形组合下汽车的侧滑临界与仅考虑平面线形指标下的侧滑临界会有一定差异,综合考虑线形组合揭示汽车侧滑机理,是下一步研究的重点。

## 参考文献:

## References:

- [1] 贾兴利,杨宏志,刘 晨.人-车-路耦合环境中车辆稳态安全仿真[J].中国安全科学学报,2015,25(1):40-45.  
JIA Xing-li,YANG Hong-zhi,LIU Chen. Safety simulation of vehicle stability in driver-vehicle-road coupled system[J]. China Safety Science Journal,2015,25(1):40-45.
- [2] 许金良,王 恒.浙江省台风期高速公路安全运行保障技术研究[R].西安:长安大学,2011.  
XU Jin-liang,WANG Heng. Study on safety operation technology of typhoon expressway in Zhejiang Province[R]. Xi'an:Chang'an University,2011.
- [3] 王安顺,张 景,施树明,等.汽车转向轮侧滑及其影响因素的研究[J].中国公路学报,1998,11(增1):122-128,137.  
WANG An-shun,ZHANG Jing,SHI Shu-ming,et al. Research on the side slipping of the vehicle's steering wheel and the influencing factors[J]. China Journal of Highway and Transport,1998,11(S1):122-128,137.
- [4] 周 锋,钟日锋,邓楚南,等.汽车的车轮侧滑和车轴侧滑[J].华南理工大学学报:自然科学版,1997,25(7):134-138.  
ZHOU Feng,ZHONG Ri-feng,DENG Chu-nan,et al. Automobile wheel side skidding and axle side sliding [J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science,1997,25(7):134-138.
- [5] 熊 坚.汽车后轴侧滑动态特性及稳定性研究[J].汽车工程,1996,18(6):348-354.  
XIONG Jian. Research on skid characteristics and stability of vehicle rear axles[J]. Automotive Engineering,1996,18(6):348-354.
- [6] 元增民.汽车车轮侧滑分析[J].汽车研究与开发,1995(3):26-30.  
YUAN Zeng-min. Research on wheel-sliding of the car[J]. Automobile Research & Development,1995(3):26-30.
- [7] TANG A H. Modeling and validation of MBS using joint force actuator in ADAMS/Car[J]. Advanced Materials Research,2012,482/483/484:2257-2260.
- [8] GIM G,CHOI Y,KIM S. A semiphysical tyre model for vehicle dynamics analysis of handling and braking[J]. Vehicle System Dynamics,2005,45(S1):267-280.
- [9] KIM C,RO P I. An accurate full car ride model using model reducing techniques[J]. Journal of Mechanical Design,2002,124(4):697-705.
- [10] JUHLIN M. Directional stability of buses under influence of crosswind gusts[J]. Vehicle System Dynamics,2004,41:93-102.
- [11] HUSSAIN K,STEIN W,DAY A J. Modelling commercial vehicle handling and rolling stability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part K:Journal of Multi-body Dynamics,2005,219(4):357-369.
- [12] NAGAI M,UEDA E,MORAN A. Nonlinear design approach to four-wheel-steering systems using neural networks[J]. Vehicle System Dynamics,1995,24(4/5):329-342.
- [13] VERMA M,RIZZONI G,GUENTHER D A,et al. Modeling,simulation and design space exploration of a MTV 5.0 ton cargo truck in MSC-ADAMS[C]//SAE. SAE 2005 World Congress & Exhibition. Washington DC:SAE,2005:79-90.
- [14] ARCZEWSKI K,FRACZEK J. Friction models and stress recovery methods in vehicle dynamics modeling[J]. Multi-body System Dynamics,2005,14(3/4):205-224.
- [15] 田 林,许金良,张 莹.横风作用下载重汽车在复杂路段运行的安全模型[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(3):21-26.  
TIAN Lin,XU Jin-liang,ZHANG Ying. Operational security model of truck in complex sections under cross wind[J]. Chang'an University: Natural Science Edition,2015,35(3):21-26.
- [16] 田 林.横风作用下复杂路段载重汽车运行安全的研究[D].西安:长安大学,2014.  
TIAN Lin. Study of operational safety of truck in complex sections of highway under crosswind[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.
- [17] 张景涛.基于多刚体汽车模型的公路平曲线半径研究[J].中外公路,2005,25(5):1-3.  
ZHANG Jing-tao. Research on highway flat curve radius based on multi-rigid body model[J]. Journal of China & Foreign Highway,2005,25(5):1-3.
- [18] 杨宏志,许金良,李建士.基于计算机仿真的公路线形设计评价[J].中国公路学报,2005,18(1):14-18.  
YANG Hong-zhi,XU Jin-liang,LI Jian-shi. Evaluation of highway route design based on computer simulation[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(1):14-18.