

文章编号:1671-8879(2014)01-0084-06

# 大客车行驶安全性仿真与评价模型

刘 伟,刘浩学,解少博

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了对大客车道路行驶过程中的侧翻行为进行动力学分析,基于 Matlab/Simulink 搭建了驾驶人-大客车-道路仿真模型,利用该模型对某二级公路长 3.6 km 路段进行了驾驶人的行驶仿真,采用方向盘转角、侧向偏移距离、侧向加速度、横摆角速度、质心侧偏角、车辆侧倾角、侧向载荷转移率 7 种动力学指标来评价大客车行驶安全性。研究表明:利用侧向载荷转移率对大客车侧翻趋势进行评价更加合理;相比于单纯的平曲线半径较小路段,在多弯道路段,车辆由于需要连续适应道路线形的变化,更易引起车辆侧向运动的不断累积,从而更容易引发道路交通事故;若弯道路段的前、后均为较长直线路段,驾驶人有足够的空间对车辆进行调整,从而在一定程度上降低了事故发生的概率。

**关键词:**交通工程;大客车;行驶仿真;安全性评价

**中图分类号:**U461.91 **文献标志码:**A

## Simulation and evaluation model of bus driving safety

LIU Wei, LIU Hao-xue, XIE Shao-bo

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To analyze the bus rollover behavior on the road from the perspective of dynamics, the driver-bus-road simulation was implemented based on the Matlab/Simulink platform, and the model was verified with the field test data. The simulation model was applied on a second-level highway with a length of 3.6 km and several indices were obtained including the steering angle, the lateral offset deviation, the lateral acceleration, the yaw rate, the sideslip angle, the rollover angle and the transfer ratio of the lateral load to evaluate the bus driving safety. The results show that the transfer ratio of the lateral load is a more reasonable index to evaluate the bus rollover accident. Compared with the simple horizontal curve with smaller radius, in the curved section, the vehicle is likely to have traffic accident because of the need to continuously adapt to changes in the road alignment which will cause accumulation of lateral movement; if it is a long straight line section before the curved section, the driver has enough space to adjust the vehicle, thereby reducing the probability of the accident. 1 tab, 20 figs, 11 refs.

**Key words:** traffic engineering; bus; driving simulation; safety evaluation

收稿日期:2012-02-06

基金项目:国家道路科技行动计划项目(2009BAG13A07);新疆维吾尔自治区科技支疆项目(201191121);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC180,CHD2011JC165,2013GR11016)

作者简介:刘 伟(1979-),男,江苏沛县人,讲师,工学博士研究生,E-mail:106046789@qq.com。

## 0 引 言

近年来,道路交通事故尤其是大客车侧翻事故不断增多,给人们的人身和财产安全构成了严重威胁,并对社会经济造成重大影响。大客车侧翻事故的形成,既牵涉到驾驶人员不合理操纵等行为因素,又与车辆的动力学性能相关,同时还与道路线形等环境因素对驾驶人和车辆造成的影响密不可分,可以归结为驾驶人、车辆和道路三者交互影响的结果。因此,在公路设计阶段以及公路运营过程中,通过模拟车辆在道路上行驶,可以为研究者合理选择道路线形提供参考,从设计源头减少交通事故发生的概率,同时还有助于车辆运行安全性的评价及公路安保工程的实施和改进。为此,国内外的研究者对车辆在道路上的行驶仿真展开了广泛研究。美国 Iowa 大学建立的车辆驾驶仿真平台,能在实验室条件下对车辆、道路等进行全方位、高精度的动态模拟<sup>[1]</sup>;车辆道路行驶仿真在中国近几年也得到了持续关注,如基于 Multigen/Creator 软件,实现人-车-路的动力学虚拟驾驶<sup>[2]</sup>;基于 Adams/Car 模块,建立小轿车刚体模型,并通过建立路面模型和选择合适的驾驶人模型实现了人-车-路虚拟试验<sup>[3-6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>基于计算机建立的小轿车动力学模型对公路线形设计安全性进行了评价。

综合上述文献可以看到,车辆行驶仿真模型多以小型车如小轿车为研究对象,而对大客车道路行驶仿真没有给予特别的关注。一方面,随着汽车工业的发展,乘用车已装备了越来越高级的主动安全系统,如电子稳定程序(ESP),而大客车出于成本的考虑尚未大规模配置这些安全系统,从而增加了发生交通事故的概率。另一方面,大客车尤其是长途大客车由于重心相对较高,引起交通事故的风险更大,并且事故类型常以侧翻等群死群伤的恶性事故为主,因此有必要对其进行重点研究。其次,从模型的复杂度来看,大客车的结构和轮胎数量、形式等因素使建模过程更加困难,只有建立精细的多自由度模型,才能够实现对车辆侧向载荷转移等关键指标的研究,从而对行驶安全性和道路线形设计等做出全面合理的评价。

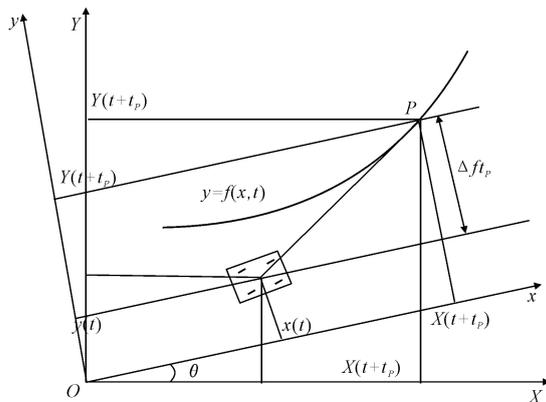
基于上述考虑,本文在 Matlab/Simulink 环境下建立了驾驶人-大客车-道路行驶仿真系统,并以某段二级公路为例进行了仿真行驶,得到了车辆不同行驶速度下的动力学响应来分析其道路行驶的安全性。

## 1 仿真模型及验证

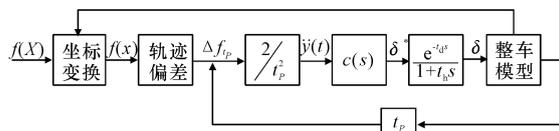
### 1.1 仿真模型的建立

本文的驾驶人-大客车-道路仿真模型是在 Matlab/Simulink 环境下搭建的。

大客车在道路行驶过程中,驾驶人需要根据道路线形的变化不断对方向盘转角进行调整,因此,仿真的关键问题是选择合适的驾驶人模型。本文选择大曲率路径驾驶人跟踪模型来模拟道路平、纵线形影响下驾驶人对车辆的操纵,跟踪模型如图 1 所示<sup>[8-9]</sup>。



(a) 驾驶人路径跟踪单点预瞄原理



(b) 单点预瞄驾驶人模型

图 1 驾驶人路径跟随模型

Fig. 1 Directional following model of driver

如图 1(a)中, $xOy$  和  $XOY$  分别为车辆动态坐标系和大地静坐标系;点  $P$  为驾驶人在预瞄时间  $t_p$  后期望到达的预瞄点; $\theta$  为大客车的运动方位角; $\Delta f_{t_p}$  为动坐标系下经过时间  $t_p$  后车辆侧向与预瞄点的距离差。图 1(b)中, $c(s)$  为考虑驾驶人反应滞后与汽车的动态反应滞后造成的误差; $\delta^*$  为理想的方向盘转角,在经过驾驶人的惯性反应滞后  $t_h$  和驾驶人的神经系统反应滞后  $t_d$ ;得到驾驶人施加于转向盘的实际转角  $\delta$ 。

设  $u$ 、 $v$  分别为车辆的纵向和侧向速度,则汽车在大地坐标系中的速度分量为

$$\begin{cases} \dot{X} = u \cos(\theta) - v \sin(\theta) \\ \dot{Y} = u \sin(\theta) + v \cos(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

且动、静坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2)$$

经过预瞄时间  $t_P$  后,点  $P$  的坐标为

$$\begin{cases} x(t+t_P) = x(t) + ut_P \\ y(t+t_P) = y(t) + t_P \dot{y}(t) + \frac{\ddot{y}(t)t^2}{2} \end{cases}$$

从而得到点  $P$  处车辆质心的侧向加速度  $\ddot{y}(t)^*$  为

$$\ddot{y}(t)^* = \frac{2}{t_P^2} (y(t+t_P) - y(t) - t_P \dot{y}(t))$$

大客车模型考虑到了整车纵向、侧向、横摆运动以及簧载质量的垂向、侧倾、俯仰和横摆运动自由度。悬架的形式为空气弹簧组成的独立悬架,其物理模型采用线性的弹簧-阻尼系统。应用“魔术公式”来计算轮胎和地面的相互作用力<sup>[10]</sup>。

大客车模型参考某型号长途大客车,主要参数为:总质量 16.8 t,前轴载荷 6 400 kg,后轴载荷 10 400 kg,前轮距 2.09 m,后轮距 1.86 m,轴距 6.3 m,侧倾刚度 8 956 kg · m<sup>2</sup>,阻尼 10 (kN · s)/m,前悬架(空气弹簧)刚度 100 N/mm,前悬架阻尼 8 000 (Nm · s)/rad,后悬架(空气弹簧)刚度 110 N/mm,前悬架阻尼 8 000 (Nm · s)/rad。车辆前轴左右侧分别为单轮胎,后轴左右侧为双轮胎形式。

### 1.2 仿真模型的验证

为了验证仿真模型的合理性,基于参考车辆进行了试车场地试验进行验证,试验中大客车沿直径为 32 m 的圆周做加速圆周运动并测试车辆的车速、横摆角速度、侧倾角和侧向加速度。仿真模型选择相同的圆周路径,并使车速模拟实际车速,如图 2 (a)所示。仿真模型得到的侧向加速度、横摆角速度和侧倾角 3 个变量与试验值的对比如图 2(b)~图 2(d)所示。可以看到,在加速圆周运动中,仿真模型和试验测量所得的结果在趋势上保持一致,说明该模型能够模拟大客车道路行驶的动力学特征。

## 2 大客车行驶安全性评价参数

本文采用如下 7 种动力学状态量来评价大客车道路行驶的安全性:①方向盘转角;②侧向偏移距离;③侧向加速度;④横摆角速度;⑤质心侧偏角;⑥车辆侧倾角;⑦侧向载荷转移率。

评价指标中,方向盘转角是驾驶人对道路线形弯曲程度做出的直接反映;侧向偏移距离是驾驶人为保持对目标路径的跟踪而产生的与目标路径的侧向距离偏差;侧向加速度能综合反映车辆侧向运动的剧烈程度;横摆角速度和质心侧偏角则反映了侧向稳定性;车辆侧倾角是车辆侧倾程度的直观表示,

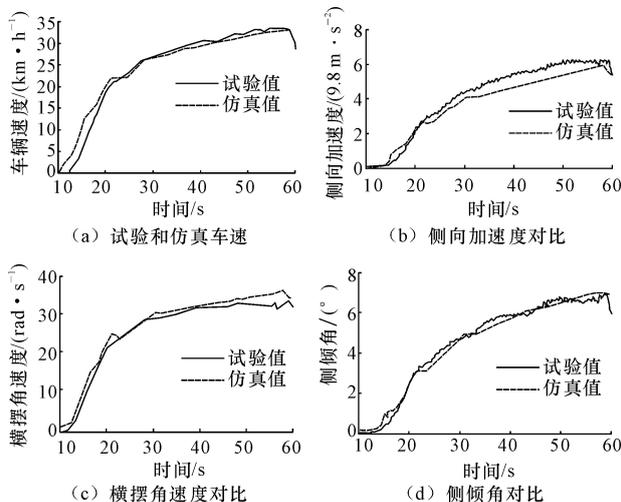


图 2 大客车仿真模型与场地试验对比

Fig. 2 Comparison of simulation and field test

而侧向载荷转移率反映了车辆载荷在左右侧的转移程度<sup>[11]</sup>,定义为

$$L = \frac{F_L - F_R}{F_L + F_R}$$

式中: $L$ 为侧向载荷转移率; $F_L$ 、 $F_R$ 分别为车辆左、右侧载荷。

## 3 道路行驶仿真结果及评价

选择四川松潘县尕里台某二级公路上行共 3.6 km 公路为例进行大客车行驶仿真。仿真过程中,依道路线形的平曲线半径和纵坡度的变化将该试验道路分为 16 个子路段,其长度、平曲线半径和纵坡度等参数见表 1。

表 1 试验路段线形参数

Tab. 1 Alignment parameters of test road

子路段编号	长度/m	平曲线半径/m	纵坡度/%
1	380.62	直线	0.750 0
2	179.38	420	0.750 0
3	178.52	420	1.200 0
4	418.73	-360	1.200 0
5	202.75	740	1.200 0
6	209.78	740	0.508 1
7	192.56	直线	0.508 1
8	217.66	-290	0.508 1
9	249.73	-290	1.900 0
10	187.62	320	1.900 0
11	190.41	320	-0.600 0
12	189.59	直线	-0.600 0
13	182.61	直线	1.700 0
14	197.39	260	1.700 0
15	172.68	260	1.100 0
16	183.15	直线	1.100 0

注:负的纵坡度表示上坡

### 3.1 车速为 60 km/h 的行驶仿真

基于单点预瞄驾驶人路径跟踪模型得到的方向盘转角如图 3 所示。可以看到,随着道路线形的不断变化,驾驶人不断地调整方向盘转角,并且在道路平曲线半径较小的路段,方向盘转角较大。驾驶人

的实际行驶路径和目标路径的侧向偏差如图 4 所示。车辆侧向加速度如图 5 所示,由图 5 可知,最大加速度出现在第 15 个路段,其值为  $-0.114g$ ,对应的平曲线半径为 260 m,为试验道路中平曲线半径最小的子路段。

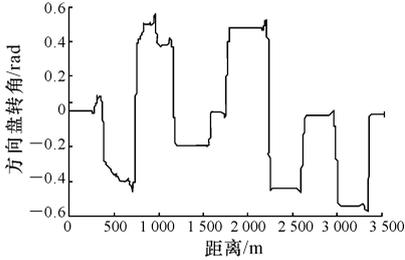


图 3 方向盘转角

Fig. 3 Steering wheel angle

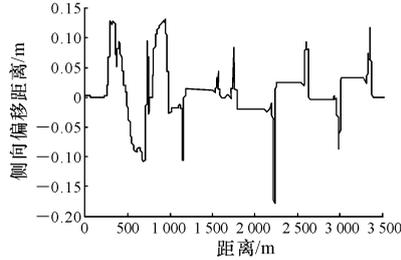


图 4 侧向偏移距离

Fig. 4 Lateral offset deviation

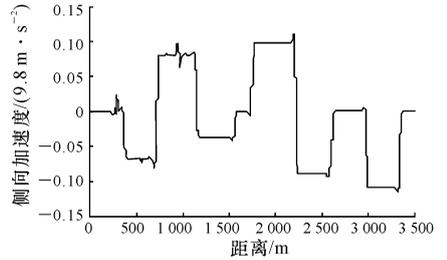


图 5 车辆侧向加速度

Fig. 5 Lateral acceleration

在第 4 个路段附近,由于道路平曲线半径较小,驾驶人为了适应道路线形的变化不断调整方向盘转角,车辆相应地发生了较为剧烈的侧倾运动,最大侧倾角达到  $6^\circ$ ,如图 6 所示。尽管第 14、15 路段是整条道路平曲线半径最小的急弯路段(平曲线半径为 260 m),但车辆侧倾角、方向盘转角、侧向偏移距离等安全性评价指标均小于在第 4 个路段处的响应。究其原因,主要是由于第 4 个路段的前(即第 2、3 路段)、后路段(第 5、6 路段)均为连续弯道,驾驶人需要连续适应线形的变化,由于车辆没有减速行驶,车辆的侧向运动不断积累,从而严重影响到行驶稳定

性。而第 14、15 路段的前(第 13 路段)后(第 16 路段)路段均为直线,驾驶人有足够的空间来调整车辆运动姿态。因此,连续急弯更易使车辆侧向运动变得剧烈,从而增加道路交通事故发生的概率。

车辆的横摆角速度、质心侧偏角以及左右侧车轮的垂直载荷分别如图 7~图 10 所示。图 11 为侧向垂直载荷转移率,用来衡量车辆侧翻的趋势。由图可知,在弯道路段车辆均发生了不同程度的侧倾,使载荷在车辆左右侧转移。在第 4 个子路段,车辆由于侧倾幅度较大,侧向载荷转移率达到 25%,为整个行驶过程的最大值。

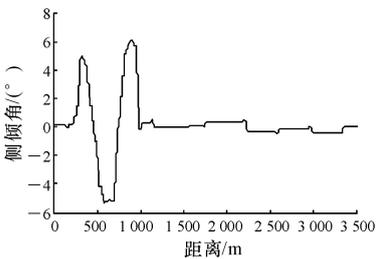


图 6 车辆侧倾角

Fig. 6 Rollover angle

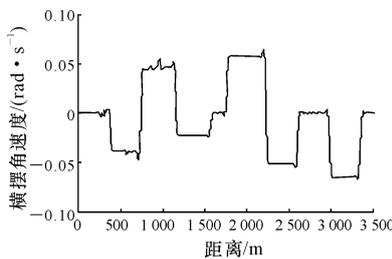


图 7 横摆角速度

Fig. 7 Yaw rate

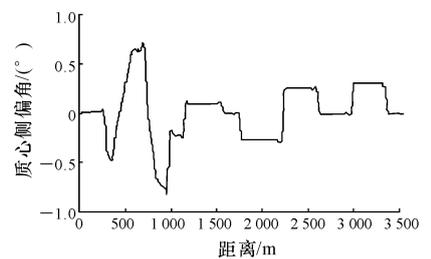


图 8 车辆质心侧偏角

Fig. 8 Vehicle sideslip angle

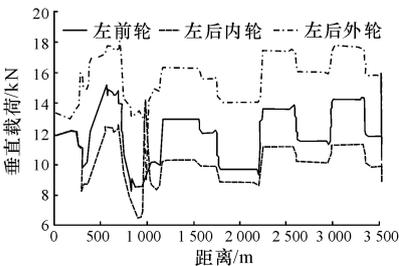


图 9 车辆左侧轮胎的垂直载荷

Fig. 9 Vertical load of left tires

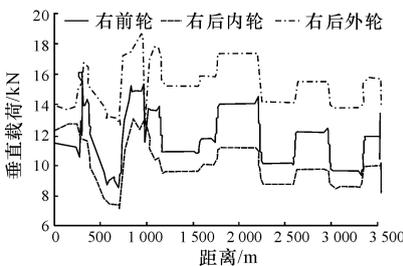


图 10 车辆右侧轮胎的垂直载荷

Fig. 10 Vertical load of right tires

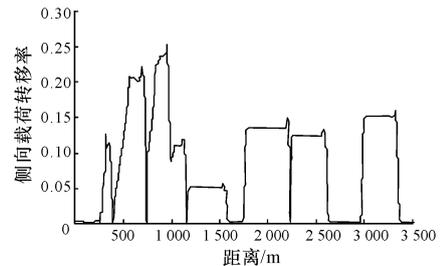


图 11 侧向载荷转移率

Fig. 11 Transfer ratio of lateral load

### 3.2 车速为 80 km/h 的行驶仿真

车辆的方向盘转角、侧向偏移距离如图 12、图 13 所示。当大客车以 80 km/h 的速度行驶时,车辆侧向加速度的最大值从 60 km/h 时的 0.1g 增长至 0.2g,如图 14 所示。由于侧向运动的加剧,大客车的安全性指标均不同程度地变大,车辆不安全性趋于增大。然而,由图 15 可以看到,车辆的侧倾角却几乎没有增加,最大值仍为  $6^\circ$ ,即如果用侧倾角作

为衡量指标可能会过低估计车辆发生侧翻的趋势。车辆的横摆角速度、质心侧倾角以及左右侧车轮的垂直载荷如图 16~图 19 所示。从图 20 的侧向载荷转移率可以看出,车辆左右侧载荷发生了剧烈的转移。在第 4 个路段的急弯处,侧向载荷转移率从 60 km/h 时的 25% 增大至 80 km/h 的 35%。因此,用侧向载荷转移率代替车辆侧倾角来衡量大客车的侧翻趋势将更为合理。

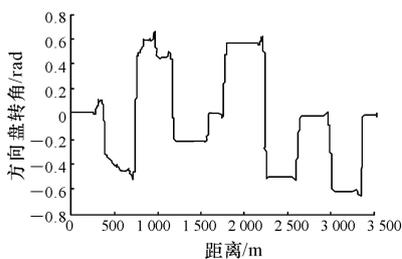


图 12 方向盘转角

Fig. 12 Steering wheel angle

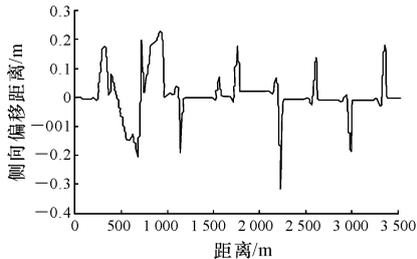


图 13 侧向偏移距离

Fig. 13 Lateral offset deviation

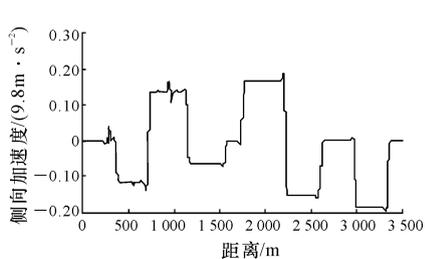


图 14 车辆侧向加速度

Fig. 14 Lateral acceleration

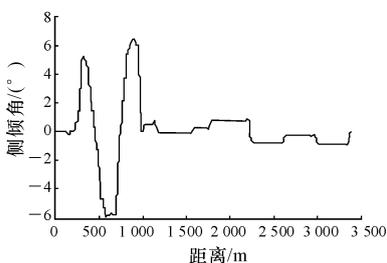


图 15 车辆侧倾角

Fig. 15 Roll over angle

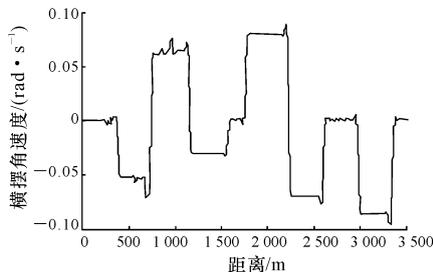


图 16 横摆角速度

Fig. 16 Yaw rate

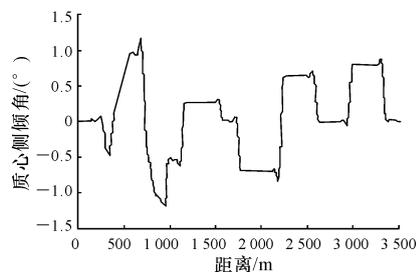


图 17 车辆质心侧偏角

Fig. 17 Vehicle sideslip angle

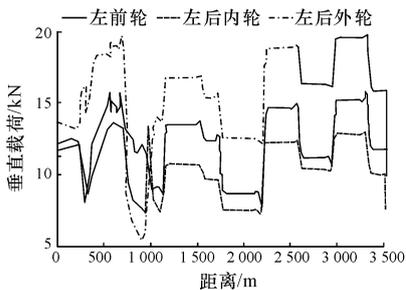


图 18 车辆左侧轮胎的垂直载荷

Fig. 18 Vertical load of left tires

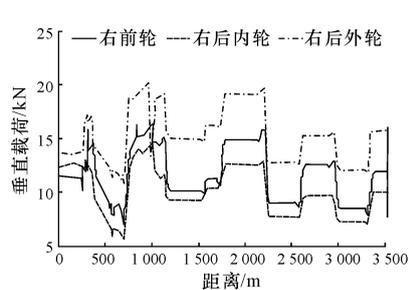


图 19 车辆右侧轮胎的垂直载荷

Fig. 19 Vertical load of right tires

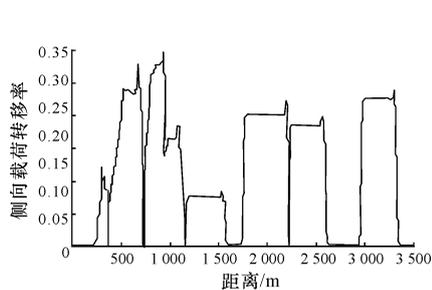


图 20 侧向载荷转移率

Fig. 20 Transfer ratio of lateral load

从整个仿真过程来看,同 60 km/h 车速时的情况类似,当大客车以 80 km/h 的速度在多弯道路段(第 4 个路段附近)行驶时,侧向运动会不断积累,其安全性指标比第 14、15(平曲线半径最小)路段的侧向稳定性更差,从而在该路段发生交通事故的概率将会增加。

## 4 结 语

(1) 针对大客车道路行驶的安全性仿真展开研究,利用 Matlab/Simulink 平台建立了驾驶人-大客车-道路行驶仿真系统,并通过实车试验数据对模型进行了验证。

(2)以某二级公路上行长 3.6 km 路段为例,模拟了大客车分别以 60 km/h 和 80 km/h 车速行驶时的动力学响应,得到了包括车辆方向盘转角、侧倾角、质心侧偏角、车辆侧向路径偏移、横摆角速度和侧向载荷转移率等安全性评价指标。对仿真结果的分析表明,对于大客车侧翻趋势的衡量,侧向载荷转移率比例倾角更加合理。

(3)通过对仿真结果的分析发现,相比于单纯的平曲线半径较小路段,在多弯道路段,车辆由于需要连续适应道路线形的变化,更易引起车辆侧向运动的不断累积,从而更容易引发道路交通事故;若弯道路段的前、后均为较长直线路段,驾驶人有足够的空间对车辆进行调整,从而在一定程度上降低了事故发生的概率。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] NADS. National advanced driving simulator overview [R]. Iowa; University of Iowa, 2010.
- [2] 陈涛,魏朗. 道路行车安全性虚拟评价方法研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6): 115-118.  
CHEN Tao, WEI Lang. Virtual assessment method for road operational safety[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(6): 115-118. (in Chinese)
- [3] 许金良,石飞荣,杨宏志,等. 基于计算机仿真的公路安全性设计方法[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 1-5.  
XU Jin-liang, SHI Fei-rong, YANG Hong-zhi, et al. Method for highway safety design on computer simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 1-5. (in Chinese)
- [4] 任秀欢,何杰. 基于人-车-路虚拟试验的道路线形安全性评价[J]. 公路, 2011(9): 171-175.  
REN Xiu-huan, HE Jie. Safety evaluation of road alignment based on human-vehicle-road virtual test[J]. Highway, 2011(9): 171-175. (in Chinese)

- [5] 蒋工亮,吕佳,杨丽改. 高速公路车辆安全行驶速度仿真识别系[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 121-126.  
JIANG Gong-liang, LU Jia, YANG Li-gai. Simulation and identification system of vehicle safety operating speed on freeway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 121-126. (in Chinese)
- [6] 徐进,彭其渊,邵毅明. 路线及路面条件设计阶段的安全性[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 36-42.  
XU Jin, PENG Qi-yuan, SHAO Yi-ming. Simulation system for safety estimation of alignment and road surface condition in designing phase[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 36-42. (in Chinese)
- [7] 张飞军,王云鹏,施树明,等. 公路线形设计安全性评价仿真[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(3): 528-533.  
ZHANG Fei-jun, WANG Yun-peng, SHI Shu-ming, et al. Simulation of road alignment design safety evaluation[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(3): 528-533. (in Chinese)
- [8] Ding H T, Guo K H, Wan F, et al. An analytical driver model for arbitrary path following at varying vehicle speed[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2007, 5(3): 204-218.
- [9] Guo K H, Guan H. Modeling of drive/vehicle directional control system[J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22(3): 141-184.
- [10] Pacejka H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [11] Liu P J, Rakheja S, Ahmed A K. Detection of dynamic roll instability of heavy vehicles for loop-rollover control[J]. SAE Special Publications, 1997, 106(2): 632-639.