

DOI:10.11918/202005086

侧风作用下货车和小汽车行驶稳定性对比分析

陈丰,彭浩荣,邵晓君,潘晓东

(道路与交通工程教育部重点实验室(同济大学),上海201804)

摘要:为对比侧风作用下货车和小汽车的行驶稳定性,基于8自由度驾驶模拟器,构建了侧风作用下山区高速公路桥隧连接段驾驶模拟平台。招募30名驾驶员进行6种侧风工况下的驾驶模拟实验,采集侧风作用下的侧向位移、横摆角速度、侧向加速度等车辆动态响应和驾驶员反应数据,探讨厢式货车和小汽车的侧滑稳定性、横摆稳定性以及侧翻稳定性。并基于静态稳定系数提出了侧倾比的概念,用于比较不同车型的抗侧翻能力。研究结果表明:在桥隧连接段行驶时,侧风作用下小汽车更易产生侧滑,但厢式货车在持续侧风作用下的侧向偏移更严重;驾驶小汽车相对于驾驶厢式货车能更快地对侧风环境做出响应,侧风感知时间较短;侧风作用下厢式货车更易出现侧翻失稳现象,且在驶出侧风作用区域后仍存在一定侧翻风险。

关键词:桥隧连接段;行驶稳定性;驾驶模拟器;货车与小汽车;侧风作用

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**0367-6234(2021)09-0010-07

Comparative analysis of driving stability between truck and car under crosswind

CHEN Feng, PENG Haorong, SHAO Xiaojun, PAN Xiaodong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 201804, China)

Abstract: To investigate the moving stability of trucks and cars under crosswind, a driving simulator study based on the eight degree-of-freedom motion system was carried out. The simulation platform was established for the bridge-tunnel section of expressway in mountain area under crosswind. Thirty participants were recruited, and six scenarios were designed with each run in a different crosswind condition. By comparing and analysing the lateral displacement, yaw rate, and lateral acceleration of cargo truck and car under crosswind, the sideslip stability, yaw stability, and roll stability of the vehicles were discussed. Based on the static stability factor, the concept of overturning ratio was proposed to compare the anti-overturning ability of different vehicles. Results show that the car was more prone to sideslip when driving in the bridge-tunnel section under crosswind, and the cargo truck had more serious side drift under continuous crosswind. The car, with a shorter crosswind perception time, could respond to the crosswind environment faster than the cargo truck. The risk of truck rollover was higher under crosswind, and there was still a certain risk of rollover after the cargo truck drove out of the crosswind area.

Keywords: bridge-tunnel section; driving stability; driving simulator; trucks and cars; crosswind

山区高速公路桥隧连接段是事故敏感地带^[1]。由于地处峡谷中,受“狭管效应”的影响,驶出隧道车辆的行驶稳定性容易受到强烈侧风作用的干扰,甚至可能发生侧滑、横摆、侧翻等安全问题^[2]。山区高速公路桥隧连接段作为交通要道,事故一旦发生,致死率高、经济损失大,相比于普通公路具有更高的事故危害性^[3]。为降低桥隧连接段事故风险,国内外学者利用数值仿真^[4-6]、风洞试验^[7-8]、驾驶模拟器^[9-10]等手段对风致行车安全问题进行了广泛的研究。其中,货车是风致安全事故的重点关注车辆类型之一。文献[11]以横摆角速度和转折角为

指标研究了集装箱半挂车在侧风作用下的行驶稳定性。文献[12]通过数值仿真的方法研究了半挂汽车列车稳定行驶的风速及车速临界值。文献[13]基于驾驶模拟试验对桥隧连接段侧风作用下厢式货车的动态响应和驾驶员反应进行了分析。文献[14]研究了重型货车在侧风影响下的侧滑和侧翻情况。除此之外,小汽车的行驶稳定性和安全性也备受关注。文献[15]研究了侧风作用下小汽车直线行驶和转向行驶的横摆角速度、侧向加速度以及侧向位移变化情况。文献[16]以侧向偏移作为行车风险评价指标,分析了侧风对大跨桥梁轿车行车安全的影响。文献[17]借助Carsim软件模拟了桥隧连接段不同风速大小及角度对小汽车行驶的影响。文献[18]提出了一种静态模型来衡量小汽车在发生侧翻、侧滑和横摆时的临界风速。文献[19]

收稿日期:2020-05-19

基金项目:国家自然科学基金(51508409)

作者简介:陈丰(1982—),男,副教授,博士生导师

通信作者:邵晓君,invincible_sxj@tongji.edu.cn

利用风洞试验研究了高速行驶的小汽车在侧风作用下的行驶稳定性。然而,山区高速公路桥隧连接段多为小汽车和货车混行,不同车辆类型在气动特性、车辆构造方面有所差异,单独开展研究由于所设工况均有不同,其结论较难整合和统一。为了深入对比侧风对货车和小车的影响,部分学者将货车和小汽车置于同一侧风场景下进行了分析。文献[20]通过修改驾驶模拟器参数研究了强风环境下大巴车、小汽车和救护车的动态响应。文献[21]采用风洞试验研究了牵引拖车、消防车、皮卡以及小轿车在不同风况下的气动力特性。文献[22]采用数值模拟的方法对比了集装箱半挂车和小轿车在侧风作用下的行驶稳定性。文献[23]通过选取基本型乘用车、交叉型乘用车、中型商用客车、大型厢式商用货车4种车型,基于数值仿真对比分析了侧风作用下不同车辆在公路桥梁上发生侧滑与侧翻的极限条件。

已有研究为侧风环境下车辆的安全行驶提供了有力保障,但研究手段多侧重于数值模拟,忽视了驾驶员行为的影响,且缺乏货车和小汽车在桥隧连接段这一事故多发路段的行驶稳定性对比研究。为此,本文同时对货车和小汽车的侧风作用下桥隧连接段行驶稳定性进行研究。基于8自由度驾驶模拟器,建立了侧风环境下山区高速公路桥隧连接段驾驶模拟平台。通过厢式货车和小汽车的驾驶模拟实验,采集不同侧风工况下的车辆动态响应数据,并从侧滑、横摆、侧翻3个方面对比分析了厢式货车和小汽车的行驶稳定性,为山区高速公路桥隧连接段交通管理、风致行车安全事故预警措施提供了理论支撑。

1 桥隧连接段驾驶模拟平台构建

1.1 实验场景

侧风作用下山区高速公路桥隧连接段行车模拟实验在同济大学交通行为与交通安全虚拟现实平台的8自由度驾驶模拟器中进行。实验基于驾驶模拟器构建了山区高速公路桥隧连接段场景,如图1所示。实验场景桥梁段长500 m,两侧隧道长度均为1 000 m,公路设计速度为80 km/h,采用分离式横断面设置,双向4车道,车道和路肩宽度分别为3.75、2.5 m。

1.2 实验车辆模块

驾驶模拟实验使用了小汽车和厢式货车两种类型的车辆(见图2),这两种车辆模块分别基于实际的小汽车和厢式货车车型开发。其中,小汽车的车长为4.5 m,车宽为1.8 m,质心高度为0.54 m,整车

质量为1 300 kg,轴距为2.6 m,前后轮距为1.546 m,方向盘最大转角为1 080°;厢式货车的车长为7.05 m,车宽为2.1 m,质心高度为1.1 m,整车质量为4 300 kg,轴距为3.6 m,前轮距为1.9 m,后轮距为1.8 m,方向盘最大转角为1 440°。实验中驾驶场景通过5个内置投影仪投射在一个水平视角为250°、垂直视角为40°的环形屏幕上,场景以60 Hz的频率刷新。由于驾驶模拟器中的内置车辆是小轿车(雷诺 Megane III),因此,针对厢式货车模块,通过调节场景投影使驾驶员的视点高度与实际驾驶货车时保持一致。同时,为提高货车驾驶真实度,实验根据厢式货车力反馈情况调整了方向盘、油门踏板和刹车踏板的参数,并在货车行驶的声音和路面声音方面采用了多通道声音系统来模拟。

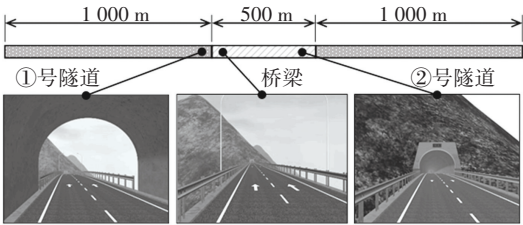


图1 桥隧连接段实验场景

Fig.1 Experimental scenario of bridge-tunnel section

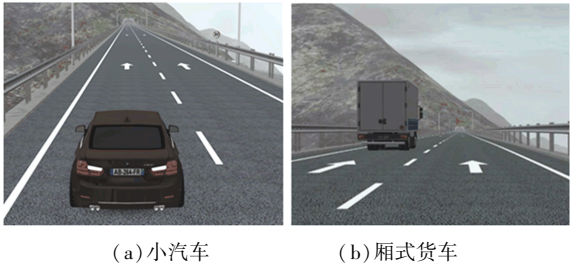


图2 驾驶模拟实验小汽车和厢式货车模块

Fig.2 Car and truck modules in driving simulator study

1.3 侧风作用工况

已有研究^[24]表明,厢式货车的行驶安全易受到桥面侧风的影响,尤其当风速达到72 km/h以上时。针对山区高速公路桥隧连接段实验场景,外力作用主要考虑突遇侧风作用。因此,分别计算侧风风速为40、50、60 km/h对车辆的作用力,并编写脚本将侧风作用融入驾驶模拟器。风向角方面,根据确定行驶车辆相对遭遇风速的向量法则,侧风的风速和风向需要结合在一起考虑^[25],而不同风向角下车辆所受到的作用力可通过调整风速来实现近似效果^[26]。由于本文的目的并不是研究风速风向的联合分布对行车安全的影响,因此结合已有研究^[16-17]选取最不利的横风作为实验条件。

正式实验时,要求驾驶员控制车速在80 km/h左右。车辆行驶至桥梁段时会触发随机加载的侧

风,风速为 40、50、60 km/h,风向包括与车道方向垂直的从左至右(90°)或从右至左(-90°)两种,侧风的持续作用时间为 10 s,各种侧风工况见表 1。

表 1 驾驶模拟试验工况

Tab.1 Scenarios of driving simulator study		
工况编号	风速/(km·h ⁻¹)	风向/(°)
1	40	90
2	40	-90
3	50	90
4	50	-90
5	60	90
6	60	-90

每位驾驶员分别进行 12 次模拟驾驶,每个工况分别驾驶小汽车和厢式货车各进行 1 次。实验过程中,6 种侧风工况的顺序随机分配给不同的驾驶员,以避免因工况次序一致所引起的实验偏差。

2 实验设计与数据采集

2.1 实验驾驶员

本次驾驶模拟实验共招募具有山区和沿海高速公路驾驶经验的职业货车驾驶员 30 名,均为男性,其中山区高速公路平均驾驶里程约 5×10⁴ km。被试驾驶员平均年龄 31.9 岁(标准差 6.80 a),平均驾龄 6.7 a(标准差 3.14 a)。实验过程中,没有驾驶员出现恶心、眩晕等不良反应,全部完成了驾驶模拟实验任务。

2.2 实验步骤

驾驶员到达实验室后先进行基本信息的采集,包括年龄、驾龄、驾驶频率等基本情况,确定实验人员是否符合要求。随后,要求每位驾驶员在高速公路驾驶模拟场景中完成 10 min 的适应性驾驶,以熟练对车辆方向盘、油门和刹车的操控。培训驾驶结束后,要求驾驶员先休息 10 min,调整好身心状态后方可进入正式实验。

驾驶员需完成 12 次桥隧连接段驾驶任务,小汽车和厢式货车交替进行,每个车型随机经历 6 种工况。实验过程中,要求驾驶员保持在最左侧车道行驶,并将车速维持在 80 km/h 左右,不可随意变道。由于突遇侧风后的车辆行驶稳定性是本文的研究重点,因此驾驶员对于遭遇侧风的位置、风速及风向是未知的。

2.3 数据采集

驾驶模拟器的采样频率为 20 Hz,可采集车辆速度、方向盘转角、加速踏板位置等 400 余种数据。为了对比小汽车和厢式货车在侧风作用下的行车稳定性,本研究主要提取了车辆运行的动态响应指标,

包括车辆侧向位移、横摆角速度、轮胎接地压力、侧向加速度等数据。

3 侧风作用下车辆行驶稳定性分析

根据文献[27]的研究,风致道路交通事故一般分为 3 类:侧滑失稳、横摆失稳、侧翻失稳。下面将从这 3 个方面对侧风作用下山区高速公路桥隧连接段车辆行驶稳定性进行分析。

3.1 侧滑稳定性分析

侧向位移常用于描述车辆在遭遇侧风时的车道偏移量,可以最直观地反应车辆在侧风作用下的行驶稳定性^[11]。车辆的侧向位移常以车道中心线与车辆中心之间的距离来计算。在驾驶模拟实验中,车道宽度为 3.75 m,小汽车宽度为 1.8 m,厢式货车宽度为 2.1 m,车辆初始的中心位置处在车道中心线上。因此,当小汽车侧向位移大于 0.975 m、厢式货车侧向位移大于 0.825 m 时,车辆将越过车道线驶入相邻车道,行车安全将受到严重威胁。

图 3 为不同侧风工况下 30 位驾驶员分别驾驶小汽车和厢式货车行驶的侧向位移变化全过程,由各时刻的侧向位移均值绘制而成,3 幅图分别对应工况 1 和工况 2、工况 3 和工况 4、工况 5 和工况 6。总体来看,小汽车和厢式货车在相同侧风工况作用下,其侧向位移均值变化趋势基本一致。在遭遇侧风前,车辆保持在车道中线附近行驶;在侧风作用初期,车辆的侧向位移增大较为明显,并逐渐达到峰值;侧风作用结束后,车辆侧向位移向反方向突然变化,并伴有小幅度左右波动,直至回归到车道中线。对比小汽车和厢式货车在各侧风工况下侧向位移均值的变化情况可知,厢式货车的侧向位移普遍大于小汽车,但小汽车对侧风的响应较为迅速。

为了更详细地对比小汽车和厢式货车在侧风作用下的侧向位移情况,将车辆通过侧风环境的过程划分为 4 个阶段,即车身驶入、完全驶入、车身驶出、完全驶出^[15]。由图 3 可知,小汽车和厢式货车在侧向位移上的差异主要集中在前两个阶段。当车身刚刚驶入侧风区域时,受车体质量差异的影响,小汽车对侧风的响应较快,其侧向位移量略大于厢式货车;当车身完全驶入侧风区域后,小汽车的侧向位移量不再增加并有逐渐减小的趋势,而厢式货车由于受力面积相对较大、质心高度较高,侧向位移仍有所增加,且在风速为 60 km/h 时有驶出车道的风险。

总体来看,侧风作用下车辆侧向位移最大值随风速的增加而增大,但受风向的影响较小;不同工况下侧向位移最大值出现时间均在 15 s 前后,即遭遇侧风后 3~5 s 处,且风速越快,达峰所需的时间越短。

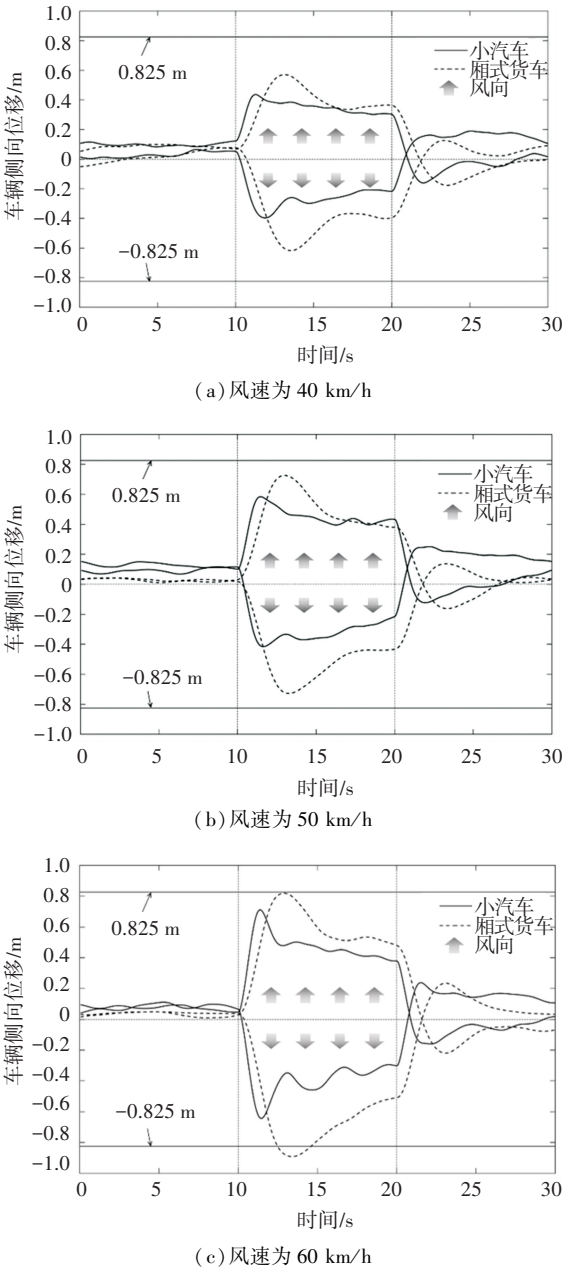


图 3 侧风作用下小汽车和厢式货车侧向位移

Fig. 3 Lateral displacement of moving car and truck under crosswinds

为了集中比较小汽车和厢式货车在不同侧风工况下侧向位移最大值情况,分别取各驾驶员侧向位移最大值的均值、以及侧向位移最大值出现时刻的均值,绘制条形图如图 4 所示。

对比来看,不同侧风工况下小汽车的侧向位移最大值均小于厢式货车,但其侧向位移最大值出现时间普遍快于厢式货车,说明小汽车更易受侧风影响而产生侧滑,但厢式货车在侧风作用下的侧滑失稳现象更严重。同时,由误差棒可知,厢式货车在各侧风工况下均存在一定概率驶出车道(侧向位移>0.825 m),小汽车仅在风速为 60 km/h 时,存在一定驶出车道的风险(侧向位移>0.975 m)。

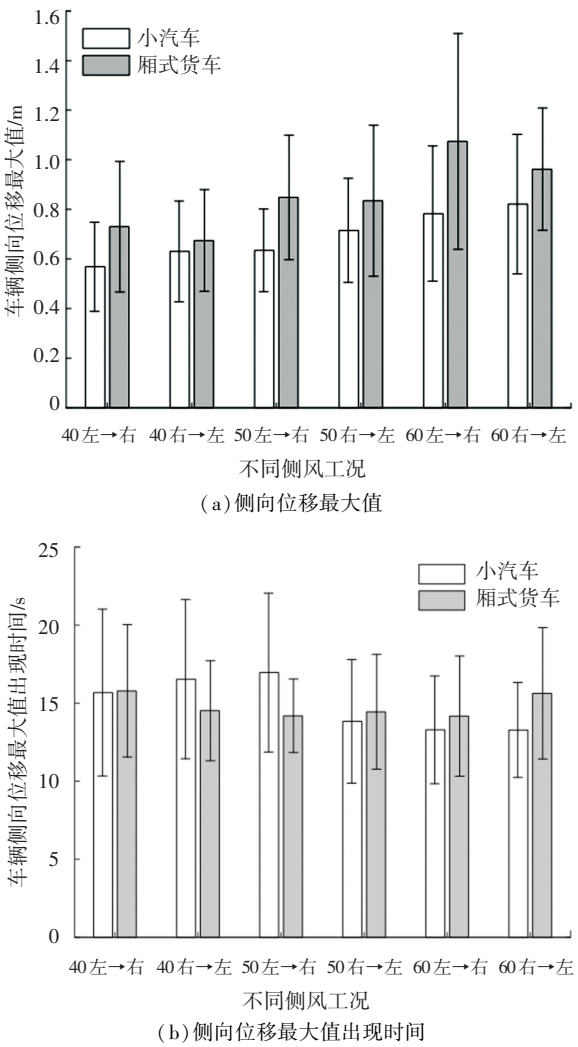


图 4 侧向位移最大值及最大值出现时间

Fig. 4 Peak values of lateral displacement and corresponding time

3.2 横摆稳定性分析

当车辆遭遇侧风时,横摆角速度的变化可以决定行驶状态和驾驶员反应,因此横摆角速度常用来评价车辆在侧风作用下的横摆稳定性^[9]。

以风速 50 km/h 的工况为例,选取每位驾驶员横摆角速度在各时间断面的均值绘制曲线,如图 5 所示。在侧风作用初期,车辆的横摆角速度先是朝外力作用方向增加,并达到第 1 个峰值,此时驾驶员感知到车辆的摆动,开始对方向盘施加反向作用力。随后横摆角速度迅速向反方向增加,再次达峰后逐渐趋于稳定,并伴随小幅度震荡现象,说明驾驶员在不断修正行驶方向以维持车辆行驶稳定性。侧风作用结束后,车辆的横摆角速度再次发生变化,其规律与侧风作用初期类似。

小汽车和厢式货车在横摆稳定性方面的差异主要体现在 3 个方面。首先,从横摆角速度峰值的出现时间来看,小汽车的达峰时间普遍早于厢式货车,可以推断小汽车相对于厢式货车对侧风的响应较为

迅速,感知到侧风的时间较短。其次,本次驾驶模拟实验中,在遭遇侧风初期和侧风作用结束后,小汽车横摆角速度的第 2 个峰值都异常地高于厢式货车,这可能是由于在驾驶模拟器中,小汽车方向盘的力反馈相对较小,方向盘的转动与车辆的偏转之间存在一定延迟,从而出现了“急打方向盘”和“过度转向”的操作行为。侧风作用后期,当车辆基本上脱离横摆失稳时,小汽车的横摆角速度曲线震荡依旧较为明显,也有可能是该原因导致,小汽车需要通过频繁操作以维持行驶稳定性。第三,侧风作用结束后,厢式货车第 1 个横摆角速度峰值更大,再次说明了小汽车的响应更迅速,能较快地感知到侧风的消失并做出相应操作。

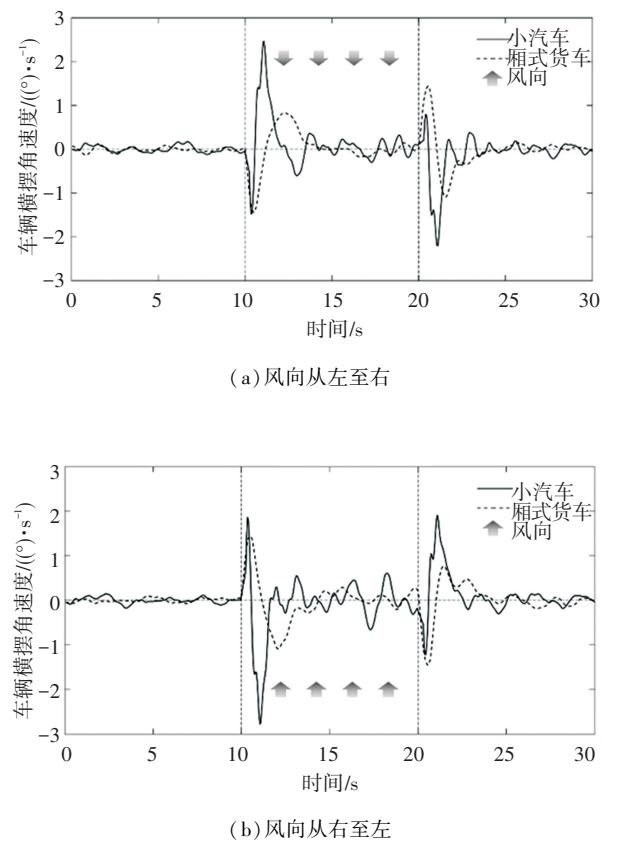


图 5 侧风作用下小汽车与厢式货车横摆角速度

Fig.5 Yaw rate of moving car and truck under crosswinds

3.3 侧翻稳定性分析

以往研究中,横向轴荷转移率和静态稳定系数常被用于作为车辆侧翻稳定性的评价指标^[28]。横向轴荷转移率(load transfer ratio, LTR)是指车辆的两侧轴荷之差和两侧轴荷之和的比值,若 LTR 的绝对值大于 0.9,则车辆被定义为侧翻失稳^[5],具体公式为

$$LTR = \frac{f_{w3z}^T + f_{w4z}^T - f_{w1z}^T - f_{w2z}^T}{f_{w1z}^T + f_{w2z}^T + f_{w3z}^T + f_{w4z}^T} \quad (1)$$

式中: f_{wiz}^T 为第 i 个轮胎的接地压力,N; $i = 1, 2, 3,$

4 依次代表左前车轮,左后车轮,右前车轮和右后车轮。

由于 LTR 指标未能考虑不同类型车辆在质心高度、倾覆力矩等方面的差异,仅适用于同一车型的侧翻失稳状态的分析,不能用于侧风作用下小汽车和货车侧翻失稳状态的对比。静态稳定系数(static stability factor, SSF)是将车辆半轮距与车辆质心高度的比值作为侧翻阈值,并用单位重力加速度下的侧向加速度与其比较来预估车辆的抗侧翻能力^[29],表达式为

$$SSF = \frac{B}{2h_g} \quad (2)$$

式中: B 为车辆轮距,m; h_g 为车辆质心高度,m。

SSF 值越大说明车辆的抗侧翻能力越强,越不容易发生侧翻事故。由于本文需要对比不同车型的侧翻倾向性,因此首先选择 SSF 作为侧翻评价标准。由式(2)计算可得,小汽车和厢式货车的侧翻阈值分别为 1.43 和 0.73。鉴于大小车的侧翻标准不同,为更直观地展示和对比不同车型的抗侧翻能力,本文基于静态稳定系数指标提出车辆侧倾比(overturning ratio, OR)概念,计算公式为

$$OR = \frac{a_y}{g \cdot SSF} \quad (3)$$

式中: a_y 为侧向加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度,取 $9.8 m/s^2$ 。

计算每位驾驶员在各工况下的车辆侧倾比,对各时间断面取均值,绘制曲线如图 6 所示。整体来看,随着风速的增加,车辆侧倾比也相应增大,说明风速越大车辆侧翻的可能性越高。同时,各工况侧倾比随时间变化曲线都出现了两次明显的峰值,分别位于侧风作用前期和侧风消失初期,这两个时段均属于驾驶员对侧风的感知阶段,说明此时段车辆发生侧翻的可能性较大,行驶稳定性较差。由于桥头、隧道洞口、桥塔附近通常是侧风作用的起始路段,建议有关部门加强对这些路段侧风的监测,保障车辆在侧风环境下的安全行驶。

对比小汽车和厢式货车的侧倾比可知,在同等风速下厢式货车的峰值明显高于小汽车,尤其体现在侧风作用结束后,两者的差值会随着风速的增加逐渐增大。这些现象说明厢式货车在侧风作用下发生侧翻的几率明显高于小汽车,且厢式货车在驶出侧风作用区域后仍存在一定的侧翻风险。这可能是由于侧风作用突然消失后驾驶员未能及时调整方向盘,而发现车辆偏移后又迅速对方向盘施加了较大的反向作用力,这种风环境突变导致的驾驶员应激反应一定程度上增加了车辆侧翻的可能性^[30]。

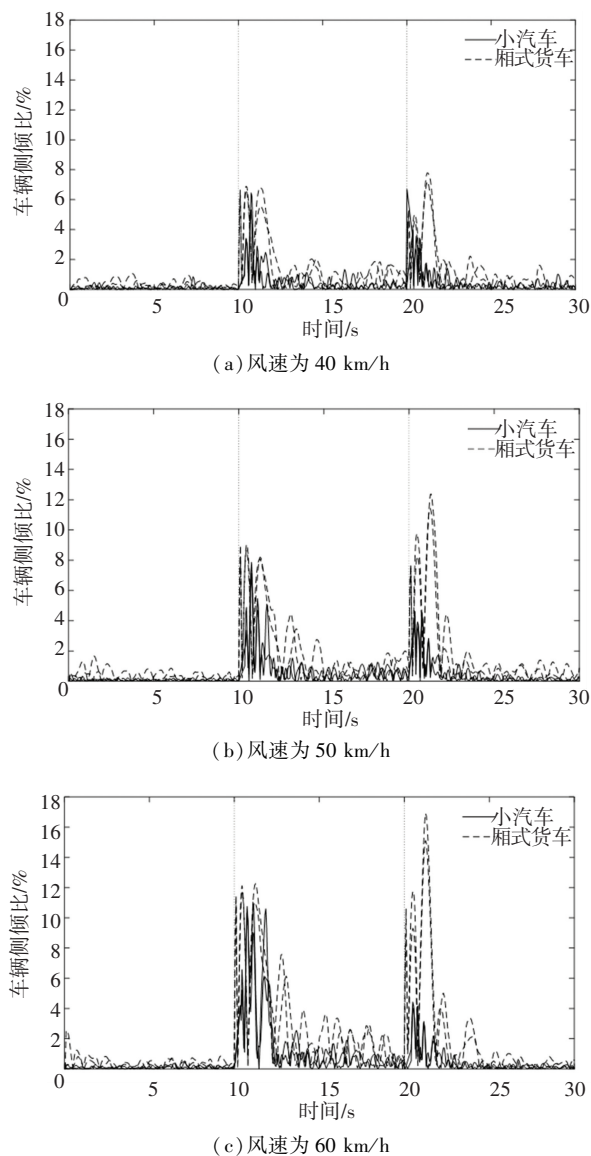


图6 车辆侧倾比变化过程

Fig. 6 Overturning ratio of moving car and truck under crosswinds

4 结 论

对侧风作用下山区高速公路桥隧连接段车辆行驶的稳定性进行研究,基于驾驶模拟实验采集了车辆的动态响应数据,对比了厢式货车和小汽车在两侧风工况下的侧滑失稳、横摆失稳和侧翻失稳情况,得到以下主要结论:

1) 在桥隧连接段行驶时,小汽车更易受侧风影响而产生侧滑,但厢式货车在持续侧风作用下的侧向偏移现象更严重,且当风速超过 40 km/h 时便存在一定驶出车道的风险,而对于小汽车,其驶出车道的风速临界值在 50~60 km/h 之间。

2) 相对于驾驶厢式货车,驾驶小汽车对侧风的响应较为迅速,感知到侧风的时间较短。

3) 基于静态稳定系数指标提出了侧倾比概念,

可以更直观地对比不同车型在侧风作用下的抗侧翻能力;通过对比车辆的侧倾比发现,在侧风环境中厢式货车相对于小汽车更容易发生侧翻事故,且厢式货车在驶出侧风作用区域之后,仍存在一定的侧翻风险。

4) 本研究成果可为侧风环境下桥隧运营管理、车辆预警设计等提供参考,对改善侧风作用下山区高速公路桥隧连接段的行车安全具有参考价值。研究中涉及的货车车型仅针对厢式货车,后续将进一步分析不同类型载货汽车的动态响应情况,同时丰富侧风工况,探索其他风速、风向角下车辆行驶稳定性,为桥隧连接段货车的行车安全提供理论支撑。

参考文献

- [1] 王露. 风环境下山区高速公路桥隧连接段行车安全影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2014
WANG Lu. Traffic safety study of mountain highway bridge and tunnel connecting segment under the wind environment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014
- [2] 陈艾荣, 王达磊, 庞加斌. 跨海长桥风致行车安全研究[J]. 桥梁建设, 2006(3): 1
CHEN Airong, WANG Dalei, PANG Jiabin. Study of wind-related riding safety on long sea-crossing bridge [J]. Bridge Construction, 2006(3): 1
- [3] 刘柏秀. 山区高速公路桥隧连接段安全评价及改善研究[D]. 西安: 长安大学, 2009
LIU Boxiu. Research on safety evaluation and improvement measures of mountainous freeway bridge-tunnel sections [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009
- [4] 谷正气, 贺桂敏. 集装箱货车高速侧风行驶稳定性分析[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(3): 250
GU Zhengqi, HE Guimin. Analysis on the driving stability of high-speed container truck in crosswinds [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(3): 250
- [5] WANG B, XU Y L. Safety analysis of a road vehicle passing by a bridge tower under crosswinds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 137: 25
- [6] GUO W, XU Y. Safety analysis of moving road vehicles on a long bridge under crosswind [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(4): 438
- [7] DORIGATTI F, STERLING M, ROCCHI D, et al. Wind tunnel measurements of crosswind loads on high sided vehicles over long span bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107-108: 214
- [8] ARGENTINI T, OZKAN E, ROCCHI D, et al. Cross-wind effects on a vehicle crossing the wake of a bridge pylon [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(6/7): 734
- [9] 潘晓东, 梁洁余, 陈丰, 等. 风-车-桥耦合作用下大跨桥梁驾驶模拟实验方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 787
PAN Xiaodong, LIANG Jieyu, CHEN Feng, et al. Experimental method for driving simulation on the long-span bridge under wind-vehicle-bridge coupling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 787
- [10] MARUYAMA Y, YAMAZAKI F. Driving simulator experiment on

- the moving stability of an automobile under strong crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(4):191
- [11]江浩,余卓平.集装箱半挂车在侧风作用下行驶稳定性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2001,29(12):1451
JIANG Hao, YU Zhuoping. Effect of side wind on handling performance of truck with trailer[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(12):1451
- [12]张翼鹏,丁能根.侧风干扰下半挂汽车列车行驶稳定性仿真[J]. 汽车安全与节能学报,2012,3(2):136
ZHANG Yipeng, DING Nenggen. Simulation of driving stability of a tractor semi-trailer in cross-wind[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(2):136
- [13]CHEN F, PENG H, MA X, et al. Examining the safety of trucks under crosswind at bridge-tunnel section: a driving simulator study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92(10):103034
- [14]SKRÚCANY T,GNAP J. The effect of the crosswinds on the stability of the moving vehicles[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 617:296
- [15]秦小飞.考虑风压中心位置影响下的汽车侧风稳定性及其控制研究[D].长沙:湖南大学,2014
QIN Xiaofei. Research on the automotive crosswind stability and the control of the crosswind stability consider the location of the center of pressure[D]. Changsha: Hunan University, 2014
- [16]姜康,尹宏程,冯忠祥.侧风对大跨度桥梁轿车行车安全影响的仿真分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(2):145
JIANG Kang, YIN Hongcheng, FENG Zhongxiang. Simulation analysis of the influence of crosswind on traffic safety of long-span bridges[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(2):145
- [17]王露,刘玉雯,陈红.侧风下峡谷桥隧连接段汽车的行驶特性[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(3):736
WANG Lu, LIU Yuwen, CHEN Hong. Cross-wind environment vehicle driving feature at canyon bridge and tunnel connection segment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3):736
- [18]BATISTA M,PERKOVIĆ M. A simple static analysis of moving road vehicle under crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 128:105
- [19]KEE J D, RHO J H, KIM K H, et al. High speed driving stability of passenger car under crosswind effects[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(5):741
- [20]RODRIGUEZ J M, CODJOE J, OSMAN O, et al. Experimental modeling of the effect of hurricane wind forces on driving behavior and vehicle performance[J]. Journal of Emergency Management, 2014, 13(2):159
- [21]LIU X, HAN Y, CAI C S, et al. Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 150:15
- [22]张琨.侧风对公路行车安全影响的仿真分析与对策研究[D].西安:长安大学,2015
ZHANG Kun. Simulation analysis and countermeasure of the influence of crosswind on road traffic safety[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015
- [23]盛士刚.公路桥梁侧风致行车安全研究[D].长春:吉林大学,2018
SHENG Shigang. Analysis of vehicle safety under cross wind on the road bridge[D]. Changchun: Jilin University, 2018
- [24]韩万水,陈艾荣.风环境下行驶于大跨度桥梁上的车辆安全评价及影响因素研究[J].空气动力学学报,2008,26(4):466
HAN Wangshui, CHEN Airong. Safety assessment of moving vehicles on a long-span bridge under crosswind and influence factors analysis[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(4):466
- [25]韩万水,马麟,院素静,等.基于风速风向联合分布的桥面侧风所致车辆事故概率性分析[J].中国公路学报,2010,23(2):43
HAN Wanshui, MA Lin, YUAN Sujing, et al. Probability analysis of bridge deck side wind-induced vehicle accidents based on joint distribution of wind speed and wind direction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2):43
- [26]CHEN S, CHEN F. Simulation-based assessment of vehicle safety behavior under hazardous driving conditions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(4):304
- [27]BAKER C J. A simplified analysis of various types of wind-induced road vehicle accidents[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 22(1):69
- [28]张辉.基于悬架刚度阻尼优化的车辆侧翻稳定性研究[D].长沙:湖南大学,2018
ZHANG Hui. Research on vehicle rollover stability based on suspension's stiffness and damping optimization[D]. Changsha: Hunan University, 2018
- [29]时晓杰,何杰,李培庆,等.侧风影响下车辆侧翻倾向性虚拟试验研究[J].机械设计,2014,31(6):92
SHI Xiaojie, HE Jie, LI Peiqing, et al. Virtual test study on rollover tendency of vehicles under crosswind[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(6):92
- [30]陈丰,彭浩荣,马小翔,等.侧风作用下货车驾驶员反应行为模型[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):702
CHEN Feng, PENG Haorong, MA Xiaoxiang, et al. Model of driving behavior of truck driver under crosswind[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(5):702

(编辑 魏希柱)