

文章编号:1671-6833(2011)02-0029-04

面向侧向风稳定性的高速客车建模与仿真研究

秦东晨, 于立, 徐一村, 蓝贤清

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为分析侧向风对高速客车操纵稳定性的影响, 以多体动力学为基础, 在 ADAMS/Car 专业模块中建立了某型号高速客车模型。通过考虑车身上 7 个离散的侧风作用点, 进而实现了风压中心漂移的侧风模型。通过对美国 ESV 规范中规定的侧风敏感性试验标准的改进, 分别进行了计及风压中心漂移侧风实验(test1)、风压中心固定下的侧风仿真试验(test2)、无侧风环境下客车高速直线行驶仿真试验(test3), 将三者的仿真试验结果进行对比, 认为风压中心漂移的仿真数据更为合理, 为改善该车型的侧风稳定性提供了参考依据。

关键词: 高速客车; 侧向风稳定性; 风压中心; ADAMS/Car; 仿真

中图分类号: U461.6, U271

文献标志码: A

0 引言

高速行驶中的汽车, 经常受到侧向风的袭击作用, 例如, 车辆高速行驶经城市街道两旁高大建筑物、山体隧道、大桥桥墩, 高速公路上会车、超车时, 都会有速度很高的侧风作用于车身^[1]。侧风产生的侧向气动力引起轮胎侧偏, 汽车将偏离行驶方向, 从而降低汽车的操纵稳定性。这种偏离由驾驶员调整方向盘来修正, 驾驶员连续调整方向盘, 会导致极度过早疲劳和增加危险性^[2]。

在利用虚拟仿真方法进行侧风对汽车操纵稳定性影响的研究中, 大多数学者将风压中心(侧向气动力在车身上的作用点)假设为车身坐标系中一个不随时间变化的固定点^[1,3], 此种假设与实际不符。后来有学者利用 step 函数拟合曲线实现了风压中心在车身上的漂移^[4], 但拟合方法复杂且所得漂移曲线精度不高。

笔者运用多体动力学仿真软件 ADAMS/Car 建立了宇通公司某型号客车的整车模型, 并进行了侧风稳定性仿真分析。通过建立离散的风压中心, 得到各个风压中心的气动力, 随后将这些力向客车纵向截面形心转化进而实现了风压中心的漂移, 并据此方法研究了侧风环境下, 风压中心漂移对客车侧风操纵稳定性的影响。

1 侧风敏感性试验方法描述及虚拟建模

1.1 试验方法描述

侧风敏感性试验是表征汽车侧风稳定性的一个重要方法, 美国 ESV (Experimental safety vehicle) 规范中对其有明确规定^[5]; 试验在平坦的道路上进行; 自然风速不超过 2 m/s; 路旁放置侧向风发生装置, 产生的侧向风速度为 (80 ± 8) km/h; 汽车分别以 50, 80, 110 km/h 的车速通过侧向风发生装置, 方向盘固定不动, 侧向风作用长度 $q = 6$ m; 以侧风作用后 2 s 汽车到达地点的侧向位移为评价标准。该试验的过程可分为 4 个的时间阶段: 车身驶入侧风带 ($0 \sim t_1$); 车身完全处于侧风带 ($t_1 \sim t_2$); 车身驶出侧风带 ($t_2 \sim t_3$); 车身完全离开侧风带 (t_3 之后), 如图 1 所示。



图1 侧风敏感性试验的4个阶段

Fig. 1 The four stages of crosswind sensitivity test

收稿日期:2010-10-10;修订日期:2010-11-16

基金项目:河南省科技攻关计划项目(072102210074)

作者简介:秦东晨(1965-),男,河南温县人,郑州大学教授,博士,主要研究方向为机械强度及结构优化设计、虚拟样机、CAD/CAE/CAM集成, E-mail:dcqin@zzu.edu.cn.

由于当今车速的不断提高,及客车车身长度较轿车大许多,故将侧风敏感性试验标准中车速改为 120 km/h,侧向风速改为 9 m/s,侧风带宽的数值修改为 21 m,其余标准不做变化。

1.2 客车动力学模型

在 ADAMS/Car 模块中建立了宇通公司某型号高速客车动力学模型,如图 2 所示。该模型包括:双横臂式空气弹簧独立前悬架^[6]、扁担梁结构非独立后悬架、刚性底盘、齿轮齿条转向系统、动力总成及 UA 轮胎。该客车的一些关键参数为:车身全长 $l_0 = 11\ 850\text{ mm}$,轴距 $l = 5\ 900\text{ mm}$,前悬 $l_{01} = 2\ 520\text{ mm}$,后悬 $l_{02} = 3\ 430\text{ mm}$,迎风面投影面积 $A = 7.695\text{ m}^2$,最高车速为 130 km/h,前轮前束角为 1° ,前轮外倾角为 -1.5° ,主销后倾角为 2° ,主销内倾角为 9° ,其中 $l_0 = l_{01} + l + l_{02}$ 。

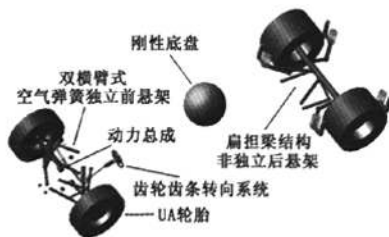


图2 客车动力学模型

Fig.2 The dynamic model of the bus

1.3 风压中心模拟

在实车试验中,汽车驶经侧风带时,车身上的风压中心是随时间移动的。为在仿真中实现该情况,将试验的 4 个阶段细分为 7 个区间,并选取共 7 个离散的风压中心,它们均作用在客车的纵向对称面上,且位于同一垂直高度。表 1 列出了 7 个离散的风压中心各自作用的时间区间及其在车身上的具体位置。这里认为当汽车完全处于侧风区($t_1 \sim t_2$)时,风压中心位于汽车纵截面的形心位置^[5]。其中 t_4, t_5 分别为客车前、后轴进入侧风区时刻; t_6, t_7 分别为客车前、后轴离开侧风区时刻。

表1 各时间段风压中心具体位置

Tab.1 The specific location of the pressure centers at every time step

风压中心编号	时间区间	时间段/s	风压中心位置	距质心纵向距离 d/mm
a	$0 \sim t_4$	$0 \sim 0.076$	前轴中心处	2 950
b	$t_4 \sim t_5$	$0.076 \sim 0.253$	质心处	0
c	$t_5 \sim t_6$	$0.253 \sim 0.356$	质心后	-550
d	$t_1 \sim t_2$	$0.356 \sim 0.63$	纵截面形心	-850
e	$t_2 \sim t_6$	$0.63 \sim 0.706$	形心后	-1 150
f	$t_6 \sim t_7$	$0.706 \sim 0.883$	形心后	-1 750
g	$t_7 \sim t_3$	$0.883 \sim 1$	后轴中心处	-2 950

图 3 为风压中心在车身纵向上偏离客车质心的距离随时间变化的示意图。其中 m, n 分别为客车最前端与最末端与质心的距离; d_0 为客车纵截面形心与质心的距离。取客车前进方向为正,故 $m - n = l_0$ 。

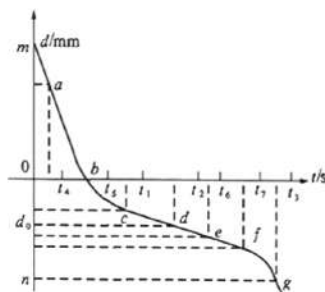


图3 风压中心随时间变化曲线

Fig.3 The time-history curves of the pressure center's location

1.4 侧向风模拟

汽车在流场中行驶,会受到纵向阻力、升力、侧向力 3 个气动力,以及相应的纵倾力矩、侧倾力矩、横摆力矩,在这些力和力矩的作用下产生了包括侧向风操纵稳定性在内的各种汽车空气动力学特性^[7]。在对汽车侧风操纵稳定性的研究以及侧风敏感性试验中,主要以侧向气动力和横摆力矩为对象,因此对侧向气动力和横摆力矩进行数值模拟,从而完成对侧向风的建模。

车辆经过侧风带时所受侧向风载荷有以下规律:

(1) 当客车完全进入侧风带时($t_1 \sim t_2$),车辆所受侧向气动力可表示为如下方程^[7]:

$$S_0 = \frac{1}{2} \rho v_w^2 A C_s \quad (1)$$

式中: S_0 为($t_1 \sim t_2$)时段的侧向力,N; ρ 为空气密度,取 $1.225\ 8\text{ kg/m}^3$; A 为汽车正面投影面积, m^2 ; C_s 为侧向气动力系数; v_w^2 为合成气流相对速度, m/s , $v_w = \sqrt{u^2 + v^2 + 2uv\cos\varepsilon}$,其中 u, v 分别为车速和风速, ε 为气流流入角,即 u, v 之间的夹角。本文考虑客车受垂直车身纵向对称面的侧向风作用,即 $\varepsilon = 90^\circ$ 。

(2) 当客车驶入($0 \sim t_1$)和驶出($t_2 \sim t_3$)侧风区时,车辆所受侧向气动力可近似表示为关于时间的二次函数^[1]:

$$S(t) = \begin{cases} \left[\frac{t(t-2t_4)}{2t_1(t_1-2t_5)} + \frac{t(t-2t_4)}{2t_1(t_1-2t_4)} \right] S_0 & 0 \leq t < t_1 \\ \left[\frac{(t-t_1)(t+t_3+2t_7)}{2(t_2-t_1)(t_2+t_3+2t_7)} + \frac{(t-t_1)(t+t_3-3t_6)}{2(t_2-t_1)(t_2+t_3-2t_6)} \right] S_0 & t_2 \leq t < t_3 \end{cases} \quad (2)$$

将所选客车的各项参数带入式(1)、(2)中,可得侧向风敏感性仿真试验中侧向气动力随时间变化的分段函数:

$$S(t) = \begin{cases} (3.17t - 2.51t^2) \times 2809 & (0 \sim t_1) \\ 2809 & (t_1 \sim t_2) \\ (3.5t^2 - 8.41t + 4.91) \times 2809 & (t_2 \sim t_3) \\ 0 & (t_3 \sim 2) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),按照7个时间段的划分,计算出每个时间段对应的风压中心所受侧向气动力,并根据力系的等效替换原理,将各个风压中心的侧向气动力向客车纵向截面形心转化。除 $(t_1 \sim t_2)$ 时间段外,其余时间段对应的作用于各自风压中心的侧向气动力均会产生横摆力矩 M_y 。最后结合ADAMS/Solver中if函数和step函数来表述侧向气动力 S 和横摆力矩 M_y ,得到图4中二者相对于时间的变化曲线。

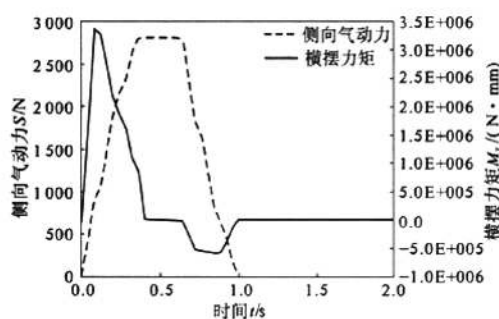


图4 侧向气动力和横摆力矩随时间变化曲线
Fig.4 The time-history curves of the lateral aerodynamic force and the yaw moment

2 侧风敏感性仿真试验

基于人-车-路闭环系统的操纵稳定性只能在已具有实际车辆的条件下通过试验求得,且由于进行试验的驾驶者的操作特性起了反馈作用,故具有一定的主观性。由于笔者进行的是理论型分析,故仍把客车作为一个开环控制系统进行研究。开环条件下的仿真设置为:仿真时间2s;仿真步数1000;客车初始车速120 km/h,车速恒定;档位5;方向盘转角 0° ,故为直线行驶;2 d平整路面。依次进行计及风压中心漂移实验(test1)和风压中心固定的侧风敏感性仿真试验(test2),最后进行无侧风下客车直线行驶仿真试验(test3)。图5~8分别表示了3个仿真试验中各自的侧向位移、横摆角速度、侧向加速度、横摆角加速度。

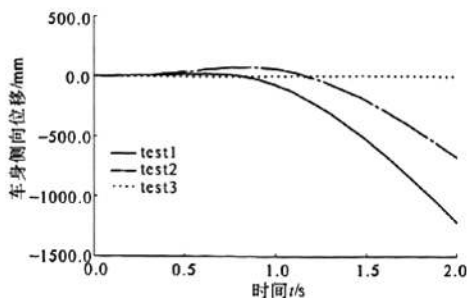


图5 车身侧向位移曲线
Fig.5 The lateral displacement of the chasis

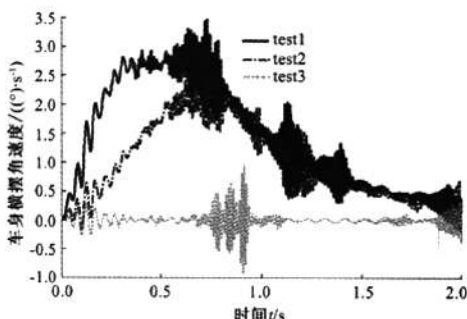


图6 车身横摆角速度曲线
Fig.6 The yaw velocity of the chasis

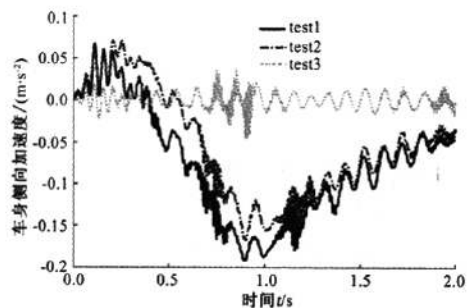


图7 车身侧向加速度曲线
Fig.7 The lateral acceleration of the chasis

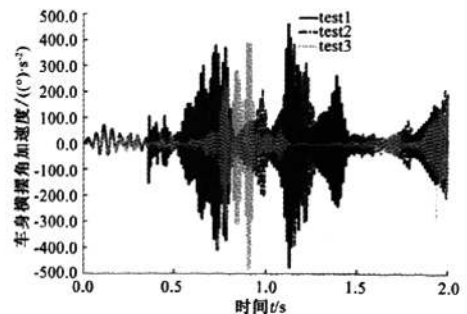


图8 车身横摆角加速度曲线
Fig.8 The yaw acceleration of the chasis

3 仿真试验结果分析

由图5可知,在侧风敏感性仿真试验中,风压中心漂移(test1)和风压中心固定下(test2)的侧向位移分别为1 216.147 mm和671.519 mm,相差544.628 mm;而侧风情况下(test3)侧向位移为1.038 mm,相对前两者近似为零。由图6可计算出车身横摆角速度超调量分别为:202.3%(test1)、185.7%(test2)、167.6%(test3),超调量越大,客车进入稳定状态所需的时间越长。在图7,8中,风压中心漂移下的各项仿真数据的峰值也均比另两种情况下高。图6~8中各项数值在1 s后逐渐减小并趋于稳态,这是由于客车1 s后完全驶出侧风区,即车身上已无侧向气动力作用。以上数据显示,计及风压中心漂移的客车侧风操纵稳定性较另外两种情况下差。这是由于在考虑了风压中心随时间的变化后,除($t_1 \sim t_2$)时间段外,均有侧向气动力引起的横摆力矩作用于车身,而横摆力矩有使客车绕垂直轴转动的趋势。当风压中心位于纵向截面形心之前时,横摆力矩将使车辆顺着风的方向转动,加大客车的横摆角,从而引起附加侧向位移,并使其他几项性能指标数值增大,使客车的操纵稳定性降低,但更符合实际情况。此时,如果驾驶员不做出及时调整,将对行驶安全产生严重影响。

4 结论

(1)利用ADAMS软件,对宇通公司开发的某型号高速客车进行了侧风敏感性仿真试验与传统方法(实车道路试验和物理模型风洞试验)相比,

用时少、花费小、不受外界环境因素影响、无安全性问题。

(2)在有侧向风的干扰时,客车的操纵稳定性较侧风情况下差;相同侧风环境下,计及风压中心漂移的客车与假设风压中心在车身上固定的客车相比,其操纵稳定性更差,但此结果更接近实际工况,也验证了文中方法的合理性。并依据对仿真结果的分析,得到一些改善该型号客车侧风稳定性的具体措施,如将发动机前置可使风压中心后移、加装侧翼减小横摆力矩等。

参考文献:

- [1] 罗荣峰. 高速汽车侧风稳定性及其影响参数研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与汽车工程学院, 2005.
- [2] SUZUKI M, TANENOTO K, MAEDA T, Aerodynamic characteristic of train/vehicle under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 209-218.
- [3] 周建美. 基于虚拟样机技术的高速汽车侧风稳定性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2009.
- [4] 谷正气, 王和毅, 罗荣峰. 计及风压中心漂移的汽车侧风稳定性研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 70-73.
- [5] 余志生. 汽车理论[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 秦东晨, 李浩亮. 基于刚柔耦合的空气悬架建模、仿真与优化研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(4): 73-76.
- [7] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-26.

Modeling and Simulation Study on Crosswind Stability of the High-speed Bus

QIN Dong-chen, YU Li, XU Yi-cun, LAN Xian-qing

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on multi-body system dynamics, the model of Yutong high-speed bus was built by the ADAMS/Car software to analyse the influence of crosswind on the high-speed bus handling stability. Seven discrete wind pressure centers that affect the chassis were taken into account, so the crosswind model with a shifting pressure center was achieved. After improving the standard of the crosswind sensitivity test that prescribed by American ESV (Experimental safety vehicle), the crosswind simulation tests with pressure center's shift and the immobile pressure center were carried out. The high-speed straight-line simulation test without the crosswind was also completed. By comparing the results of the three tests, the test data in consideration of wind pressure center's shift was more reasonable and provided the reference data for improving the crosswind stability of the bus.

Key words: high-speed bus; crosswind stability; wind pressure center; ADAMS/Car; simulation