

基于 Carsim 和 Simulink 联合仿真的汽车操纵稳定性评价

毕 锐, 范 英*, 侯峙朴, 陈佳峻

(太原科技大学 交通与物流学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了更好地评价汽车的操纵稳定性能, 将汽车简化为一个包含侧向、横摆和侧倾的三自由度模型。在 Carsim 和 Simulink 上建立联合仿真模型, 基于双移线和蛇形试验工况进行仿真试验, 依照 QC/T 480—1999 中的评价准则, 对模型仿真结果和实车试验结果进行综合评价计分, 并对其对比分析。结果表明: 所搭建的三自由度模型仿真结果评价得分与实车试验结果评价得分十分接近, 能够更好地代表实车的操纵稳定性, 可为后续汽车操纵稳定性评价提供了一定参考。

关键词: 仿真模型; 蛇形试验; Carsim/Simulink; 操纵稳定性评价

中图分类号: U461.6

文献标识码: A

Vehicle Handling Stability Evaluation Based on CarSim and Simulink Co-simulation

BI Kun, FAN Ying*, HOU Zhipu, CHEN Jiajun

(School of Traffic and Logistics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: In order to better evaluate the vehicle handling stability performance, this paper simplified the vehicle into a three-degree-of-freedom model containing lateral, transverse and lateral sway. A joint simulation model was built on Carsim and Simulink, and the simulation test was conducted based on double shift and serpentine test conditions. According to the evaluation guidelines in QC/T480-1999, the model simulation results and the real vehicle test results were comprehensively evaluated and scored, and a comparative analysis between them was conducted. The results show that the evaluation scores of the simulation results of the three-degree-of-freedom model are very close to those of the real vehicle test results, which can better represent the handling stability of the real vehicle and provide some references for the subsequent evaluation of the vehicle handling stability.

Key words: simulation model; serpentine test; Carsim/Simulink; handling stability evaluation

随着汽车普及率和人们对生活质量要求的不断提高, 汽车用户对汽车的各方面性能要求也越来越高, 其中极其关键的一项就是提高车辆的操纵稳定性, 车辆的操纵稳定性是汽车主动安全领域的研究热点, 也是汽车整车试验的一个重要方面。

汽车的操稳性评价方法包含有主观评价和客观评价两个方面。主观评价是车辆进行操纵稳定性试验后, 由具有丰富的驾驶经验的驾驶员或者

教练对车辆的各项指标和性能进行的评价打分, 具有很大的主观性。客观评价是根据实车试验或车辆模型仿真得到的数据, 参照现行的评价标准进行定量评价^[1]。Li^[2]基于 Trucksim 仿真平台, 构建了车辆模型, 选择方向盘转角阶跃试验工况, 通过改变部分车辆结构参数对车辆操纵稳定性进行了分析。Cao^[3]分析了行驶速度、轮胎侧向刚度、质心位置、前轮转角对汽车操纵稳定性的影响, 用 Matlab 软件绘制了相应的曲线, 并对汽车操

收稿日期: 2021-11-23

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D121176)

作者简介: 毕锐(1996-), 男, 山西高平人, 硕士研究生, 主要从事载运工具运用工程方向的研究。

* 通讯作者: 范英(1975-), 男, 山西祁县人, 硕士, 副教授, 主要从事汽车动力学方向的研究。

纵稳定性进行了仿真研究。Wang^[4]利用 ADAMS/Car 软件构建了车辆虚拟样机模型,对转向角阶跃输入试验、转向角脉冲试验和蛇形试验三种试验方案进行了仿真,分析了液压混合动力汽车的操纵稳定性。张义花^[5]基于双挂汽车列车建立了二自由度车辆动力学模型,分析计算了 RWA 值,分析研究了双挂汽车的操纵稳定性评价指标,并与国外的相关研究进行对比,研究结果可为确定和应用双挂汽车操稳性评价指标的相关研究提供一定的参考。汽车操纵稳定性的主观评价在整车和底盘的相关研究中具有重要意义,任成龙^[6]选用了 15 个操纵稳定性评价指标,并确定了各项指标的权重,运用灰色关联分析的方法,参考熟练驾驶员主观评价,对试验车进行操稳性评价,验证了该方法在操稳性评价方面的可行性。郝西洋^[7]在 ADAMS 软件上使用某越野车的实车参数建立了该车的整车仿真模型,选用汽车操稳性的评价实验进行仿真,对比仿真和实车试验结果,最后优化了稳态回转特性。李志魁^[8]对选用的试验车进行各个子系统的特性相关试验,使用试验结果数据在 Carsim 中建立整车模型,并进行了操纵稳定性试验和评价,对仿真模型进行了仿真,与实车试验结果对比分析,验证了模型的准确性。

本文以某国产车为研究对象,采用 Matlab/Simulink 工具在二自由度模型的基础上又考虑了车辆的侧倾特性,建立了三自由度车辆模型,通过与 Carsim 联合进行模型仿真试验,并与实车试验结果进行对比分析,然后依据 QC/T 480—1999 中的评价准则评价计分,综合评价汽车的操纵稳定性。

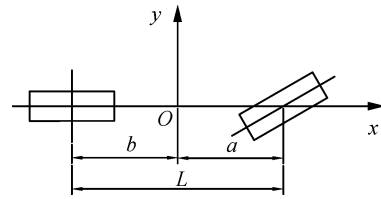
1 整车动力学建模

1.1 二自由度模型的建立

在汽车运动过程中,忽略空气动力、转向系统和悬架的影响,以前轮转角作为输入;驱动力不大,不考虑地面切向力对轮胎侧偏特性的影响;假定汽车只作平行于地面的平面运动。汽车被简化为一个只考虑横摆和侧向两个自由度的两轮车辆模型^[9],如图 1 所示。

简化的二自由度车辆模型受到的外力沿 y 轴方向的合力与绕质心的力矩和为

$$\begin{cases} \sum F_y = F_{y1} \cos \delta + F_{y2} \\ \sum M_z = aF_{y1} \cos \delta - bF_{y2} \end{cases} \quad (1)$$



注:O点—车辆的质心; a —车辆前轴距质心的距离,m;
 b —车辆后轴距质心的距离,m; L —轴距,m。

图1 简化后的两轮汽车模型

Fig. 1 Simplified two-wheeled vehicle model

可以得出车辆的线性二自由度模型动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} \omega_r + \frac{a k_1 - b k_2}{I_z} \beta - \frac{a k_1}{I_z} \delta \\ \dot{\beta} = \left(\frac{a k_1 - b k_2}{m u^2} - 1 \right) \omega_r + \frac{k_1 + k_2}{m u} \beta - \frac{k_1}{m u} \delta \end{cases} \quad (2)$$

1.2 三自由度模型的建立

虽然二自由度模型能够基本反映车辆的运动特性^[10],但是考虑到汽车在实际道路行驶过程中总会出现侧倾现象,而侧倾运动与横摆运动之间有着直接的联系,所以对车辆的转向特性就会产生较大的影响,进而影响汽车的操纵稳定性,针对这一问题,建立了包括车辆侧倾、侧向和横摆三自由度的车辆模型,该模型更加贴近现实生活中行驶的汽车,对操稳性研究具有重要意义,图2所示为车辆三自由度模型。

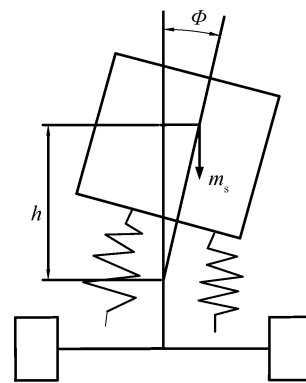


图2 简化的车辆模型

Fig. 2 Simplified vehicle model

经过受力分析,得到三自由度模型的动力学方程如式(3),当轮胎的侧偏角较小时,轮胎的侧偏特性基本呈线性,从而得出轮胎的侧偏力为式(4)。

$$\begin{cases} mu(\dot{\beta} + \omega_r) - m_s h \dot{p} = F_f + F_r I_z \dot{\omega}_r - I_{xz} \dot{p} = \\ aF_f - bF_r \\ I_x \dot{p} - I_{xz} \dot{\omega}_r - m_s hu(\dot{\beta} + \omega_r) = m_s gh\varphi - \\ (d_f + d_r)p - (k_f + k_r)\varphi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_f = k_1(2\beta + \frac{2a\omega_r}{u} - \delta_f - 2E_f\varphi) \\ F_r = k_2(2\beta - \frac{2b\omega_r}{u} - 2E_r\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3)可得

$$\begin{cases} mu(\dot{\beta} + \omega_r) - m_s h \dot{p} = k_1(2\beta + \frac{2a\omega_r}{u} - \delta_f - \\ 2E_f\varphi) + k_2(2\beta - \frac{2b\omega_r}{u} - 2E_r\varphi) \\ I_z \dot{\omega}_r - I_{xz} \dot{p} = ak_1(2\beta + \frac{2a\omega_r}{u} - \delta_f - 2E_f\varphi) - \\ bk_2(2\beta - \frac{2b\omega_r}{u} - 2E_r\varphi) \\ I_x \dot{p} - I_{xz} \dot{\omega}_r - m_s hu(\dot{\beta} + \omega_r) = m_s gh\varphi - \\ (d_f + d_r)p - (k_f + k_r)\varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中: m —整车质量, kg; m_s ——簧载质量, kg; ω_r —横摆角速度, $^\circ/\text{s}$; u —车辆速度, m/s ; φ —车身侧倾角, $^\circ$; δ_f —前轮转角, $^\circ$; p —侧倾角速度, $^\circ/\text{s}$; β —质心侧偏角, $^\circ$; F_f 、 F_r —前、后轮侧偏力, N; a 、 b —车辆前后轴到质心的距离, m; h —簧载的质心到侧倾轴的距离, m; I_x —整车绕侧倾轴的转动惯量, kg/m^2 ; I_z —整车绕横摆轴转动的转动惯量, kg/m^2 ; I_{xz} —簧载的惯量积; d_f 、 d_r —车辆前后悬架侧倾角阻尼, $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

1.3 Carsim 车辆模型的建立

Carsim 通过输入车辆的各项特性参数建立车辆的整车模型并仿真得出结果, 是车辆动力学仿真的一款常用软件, Carsim 整车模型悬架选取: 前悬架选用麦弗逊式独立悬架, 后悬架选用扭力梁式非独立悬架; 空气动力学参考长度 2 600 mm, 车辆的横截面积 2.54 m^2 ; 采用直接速度控制方式控制车辆, 实验车的发动机最大功率是 80 kW; 前后轮胎规格是 185/65 R15, 制动系统、转向系统、轮胎模型其他参数均采用 Carsim 中的缺省参数。通过对试验车的测量和参考相关文献, 得到车体模型主要参数, 包括车体尺寸参数、质心位置、转动惯量

和前后轮胎的静载半径, 具体参数见表 1 所示。

表 1 车体参数表

Tab. 1 Table of car body parameters	
项目	数值
车宽/mm	1 705.00
车高/mm	1 490.00
轴距/mm	2 600.00
整车整备质量/kg	1210.00
质心高度/mm	629.65
质心到前轴距离/mm	1 314.87
质心到纵向对称面距离/mm	8.73
整车绕 x 轴的转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	541.40
整车绕 y 轴的转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 865.10
整车绕 z 轴的转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 091.30
前轮胎的静载半径/mm	299.00
后轮胎的静载半径/mm	308.00

2 联合仿真的实现

在 MATLAB 中, Simulink 是用来建模、仿真和分析动态多维系统的交互工具, 可以单独实现建模和仿真, 还可以与 Carsim 联合完成更多的仿真分析任务。Carsim 中自带了 Simulink 内嵌模块, Carsim 和 Simulink 之间可以进行数据之间的实时互换。通过嵌入模型的 Simulink S 函数可以在 Simulink 中建立一个相应的 Carsim S-function 模块, 构建 Carsim 和 Simulink 的联合仿真模型^[11]。

Carsim 和 Simulink 联合仿真需要 Carsim 输出变量到 Simulink 中, 应用于自定义的模型, 实现 Carsim 整车模型和 Simulink 模型联合。本文中 Carsim 输出到 Simulink 中的变量包括: 车速和方向盘转角, 建立的联合仿真模型如图 3 所示。

3 模型验证

为了验证模型的准确性进而得到较好的实验结果。采用双移线试验工况, 以 60 km/h 的车速进行仿真和实车试验, 整个试验过程尽量保持一致, 反复进行三次试验, 通过实验仪器记录试验过程的各项数据, 模型仿真结果和实车试验结果对比如图 4 图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, 当实车和模型进行双移线试验时, 评价指标的响应曲线可以得出, 三自由度车辆模型比二自由度模型更加贴近实车, 为了量化三自由度模型的优越程度, 求出了其均方根值, 如表 2。

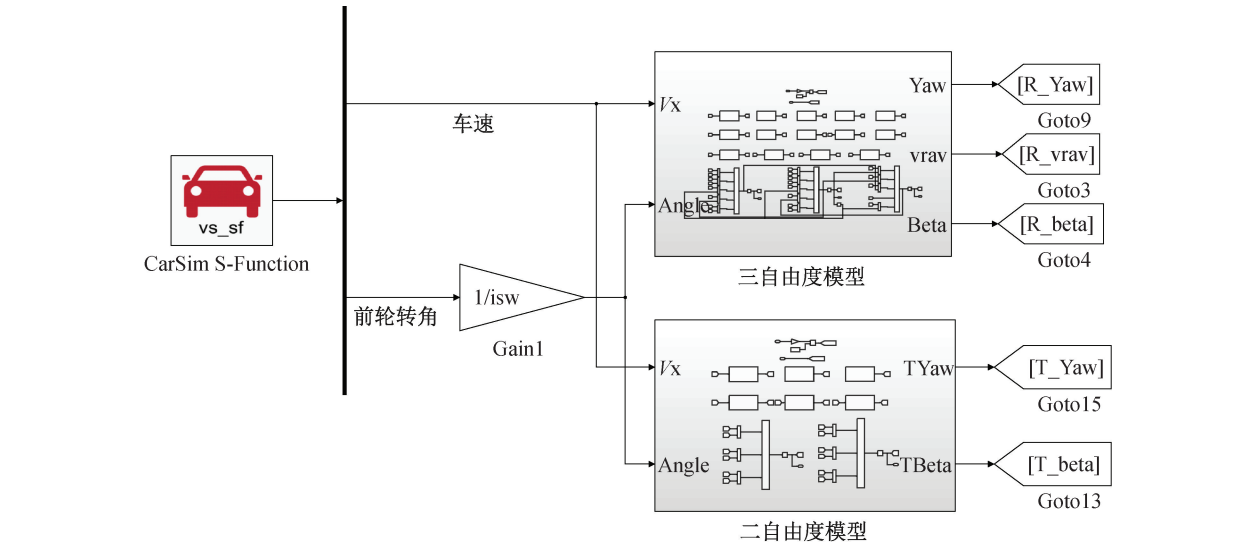


图 3 Carsim 和 Simulink 联合仿真模型

Fig. 3 Carsim and Simulink joint simulation model

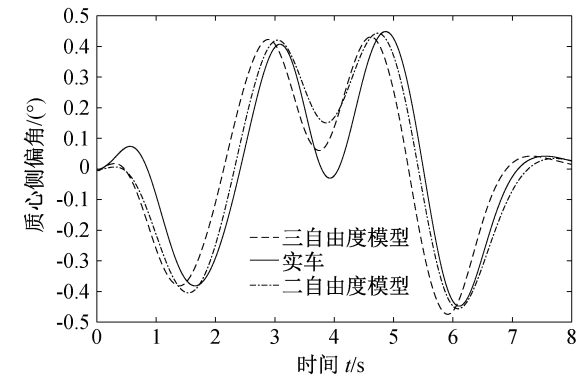


图 4 质心侧偏角对比图

Fig. 4 Comparison of sideslip angle of centroid

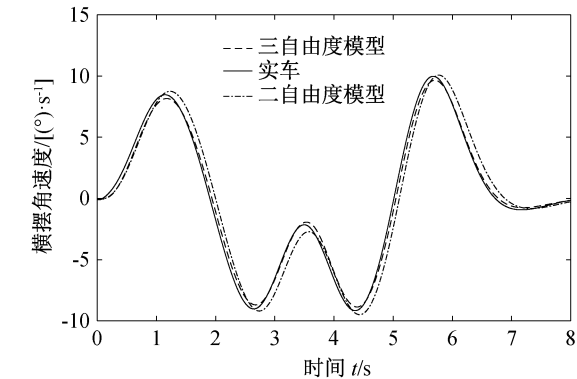


图 5 横摆角速度对比图

Fig. 5 Comparison of yaw velocity

双移线仿真试验重点关注质心侧偏角和横摆角速度随时间的变化。由表 2 可知,三自由度模型和二自由度模型与实车相比,三自由度模型的两项评价指标 RMS 值均低于二自由度模型,与实车的误差分别为 3.69% 和 3.61%,误差较小,且响应曲线的整体趋势与实车基本一致,验证了仿真模型的可行性。

4 实车试验及评价

本文的实车试验仪器包括 IMU04 陀螺仪、TR60 方向盘、DSP03 多功能显示器、文件管理器、VBOX 模拟量采集系统、笔记本电脑。根据仪器说明书要求,将各仪器设备安装好,在笔记本电脑上完成方向盘、双天线和陀螺仪等设备相关参数的设置,试验场地按图 6 布置。

实验车辆为某国产轿车,试验场地为平坦干燥的沥青路面,各实验条件均符合标准。试验过程严格按照 GB/T 6323—2014 进行,试验方法选用车辆操纵稳定性典型试验方法蛇形试验^[12],分别以 30、40、50、60 km/h 的速度通过试验场地,利用实验仪器采集数据,试验场景如图 7 所示。

表 2 RMS 值对比表			
Tab. 2 Comparison table of RMS values			
评价指标	实车	二自由度模型(误差率)	三自由度模型(误差率)
质心侧偏角/(°)	0.246 6	0.270 5(9.69%)	0.255 7(3.69%)
横摆角速度/[(°)·s ⁻¹]	5.41	5.803 2(7.27%)	5.605 1(3.61%)

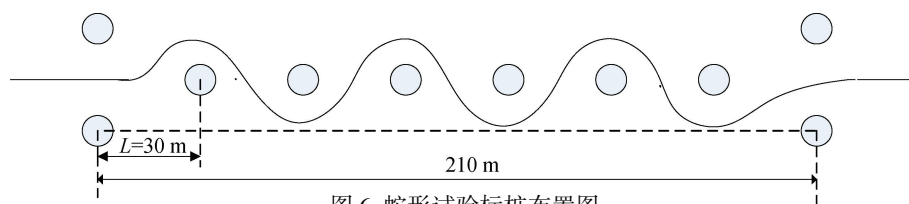


图6 蛇形试验标桩布置图

Fig. 6 Serpentine test pile layout



图7 蛇形试验现场

Fig. 7 Serpentine test site

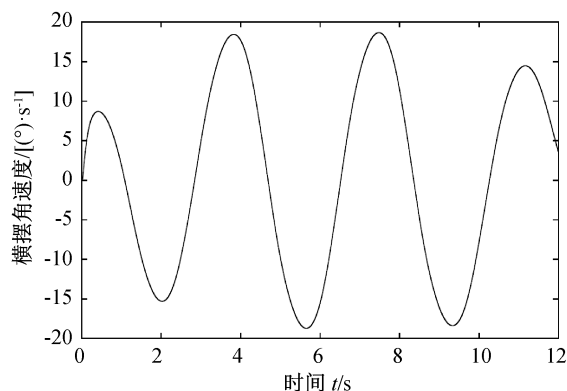


图9 实车试验横摆角速度曲线

Fig. 9 Yaw velocity curve for real vehicle test

图8和图9显示了蛇形试验的方向盘转角和横摆角速度与汽车车速的关系曲线。实验车辆速度为30、40、50、60 km/h时的试验数据如表3。

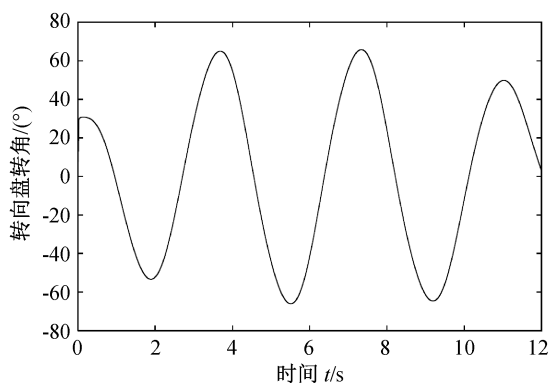


图8 实车试验转向盘转角曲线

Fig. 8 Steering wheel angle curve for real vehicle test

依据 QC/T 480—1999 中的评价准则,按照不同车速下的平均横摆角速度峰值和平均方向盘转角峰值进行综合评价计分^[13]。

(1) 平均横摆角速度峰值 γ 评价计分

$$N_{\gamma} = 60 + \frac{40}{\gamma_{60} - \gamma_{100}}(\gamma_{60} - \gamma) \quad (6)$$

式中: N_{γ} —平均横摆角速度峰值的评价计分值; γ_{60} —平均横摆角速度峰值的下限值, ($^{\circ}/s$); γ_{100} —平均横摆角速度峰值的上限值, ($^{\circ}/s$); γ —平均横摆角速度峰值的实验值, ($^{\circ}/s$)。

(2) 平均方向盘转角峰值 θ 评价计分

$$N_{\theta} = 60 + \frac{40}{\theta_{60} - \theta_{100}}(\theta_{60} - \theta) \quad (7)$$

式中: N_{θ} —平均方向盘转角峰值的评价计分值; θ_{60} —平均方向盘转角峰值的下限值, ($^{\circ}$); θ_{100} —平均方向盘转角峰值的上限值, ($^{\circ}$); θ —平均方向盘转角峰值的实验值, ($^{\circ}$)。

(3) 蛇形试验中,未达到基准车速 60 km/h 的车辆, N_{γ} 和 N_{θ} 按下式计算:

$$N_{\gamma} = N_{\theta} = 60 \cdot \frac{V_m}{V_n} \quad (8)$$

式中: V_m —实际车速, km/h; V_n —基准车速, km/h。

(4) 综合评价计分值由下式得出

$$N_s = \frac{2N_{\gamma} + N_{\theta}}{3} \quad (9)$$

式中: N_s —蛇形工况的综合计分值。

表3 实验结果

Tab. 3 Experimental results

车速 $V/(km \cdot h^{-1})$	平均转向盘转角 $\theta/(^{\circ})$	平均横摆角速度 $\gamma/(^{\circ}/s)$	平均车身侧倾角 $\varphi/(^{\circ})$	平均侧向加速度 $a_y/(m \cdot s^{-2})$
30	91.6	14.3	1.19	0.22
40	84.8	16.7	1.58	0.34
50	76.5	18.6	2.67	0.47
60	71.5	19.8	3.24	0.52

5 模型仿真分析及评价计分

5.1 模型仿真结果

为了在 Carsim 中重现实车试验场景,首先要设置标桩的间隔距离和位置,车辆行驶路径和车速,按照 GB/T 6323—2014 在 Carsim 中设置车辆行驶路径如图 10。

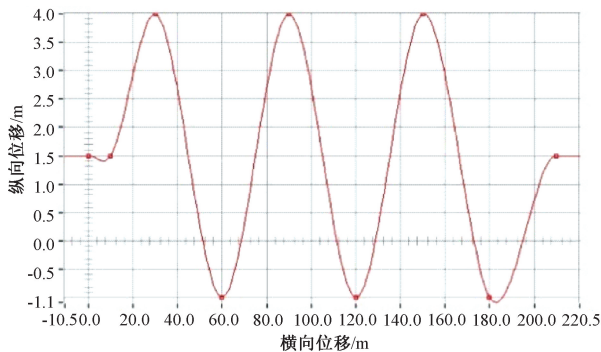


图 10 车辆行驶路径

Fig. 10 Vehicle driving path

蛇形试验重点关注横摆角速度、转向盘转角在不同的车速下与时间的变化关系^[14],仿真结果如图 11—图 13 所示。

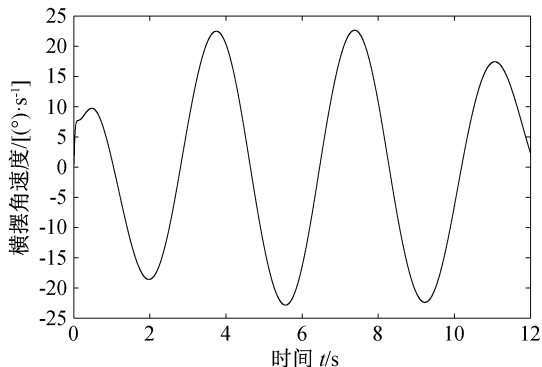


图 11 横摆角速度响应

Fig. 11 Yaw angular velocity response

5.2 仿真数据处理及评价计分

5.2.1 仿真数据处理

(1) 平均横摆角速度

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |\gamma_j| \quad (10)$$

式中: γ_j —有效仿真曲线的横摆角速度极值。

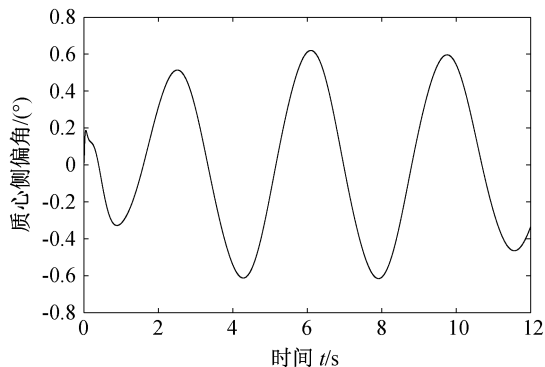


图 12 质心侧偏角响应

Fig. 12 Sideslip angle of centroid response

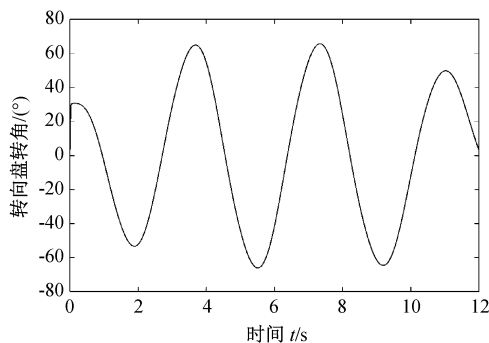


图 13 转向盘转角响应

Fig. 13 Steering wheel angle response

(2) 平均车身侧倾角

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |\varphi_j| \quad (11)$$

式中: φ_j —有效仿真曲线的车身侧倾角极值。

(3) 平均转向盘转角

$$\bar{\theta} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |\theta_j| \quad (12)$$

式中: θ_j —有效仿真曲线的转向盘转角极值。

(4) 平均侧向加速度

$$\bar{a}_y = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |a_{yj}| \quad (13)$$

式中: a_{yj} —有效仿真曲线的侧向加速度极值。

仿真数据通过上述公式进行处理,最终得到的仿真数据如表 4 所示。

5.2.2 评价计分

使用上述评价计分准则对模型仿真数据和实车试验数据进行评价计分,最终评价结果如表 5 所示。

表 4 仿真结果数据

Tab. 4 Simulation results

车速 $V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	平均横摆角速度 $\bar{\gamma}/(^{\circ}/\text{s})$	平均车身侧倾角 $\bar{\varphi}/(^{\circ})$	平均转向盘转角 $\bar{\theta}/(^{\circ})$	平均侧向加速度 $\bar{a}_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
30	15.1	1.62	91.6	0.32
40	17.2	2.14	84.8	0.44
50	20.4	2.87	76.5	0.55
60	22.2	3.81	71.5	0.67

表5 评价计分值对比表

Tab. 5 Comparison table of evaluation score values

车速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	实车	模型
30	30	30
40	40	40
50	50	50
60	88.8	86.8

由表5可知,在基准车速下,实车试验评价得分为88.8分,整车模型试验评价得分为86.6分。在不同车速下,综合评价计分:模型仿真试验得分为51.65分,实车试验为52.2分,结果表明实车试验评价得分与三自由度模型仿真试验评价得分十分接近。

6 结论

对二自由度模型和三自由度模型进行了双移线实验,对比分析其质心侧偏角和横摆角速度响应曲线,通过分析可知,三自由度车辆模型的仿真效果明显优于二自由度模型。针对汽车操纵稳定性的蛇形试验工况分别进行模型仿真和实车试验,并依据QC/T 48—1999中的评价准则,完成对两者实验结果的综合评价,结果表明三自由度模型仿真试验评价得分和实车试验评价得分十分接近,更加贴近实车试验,能够更好地研究汽车的操纵稳定性,对汽车在操纵稳定性能方面的研究提供一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 钟凡. 整车操纵稳定性主客观评价一致性研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
- [2] LI Longhui, GUO Taoyang, XU Shujie. Simulation Analysis of Vehicle Handling Stability Based on Trucksim[J]. Jour-

- nal of Physics: Conference Series, 2021, 1885(3): 032043
- [3] CAO Fengping, WANG Jinduo. Study on Simulation Analysis of Vehicle Handling Stability Based on MATLAB[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 688(3): 033002
- [4] WANG Chao, HE Xiaohui, SHEN Xinmin, et al. Analysis of Handling Stability of Hydraulic Hybrid Vehicle Based on ADAMS/Car Simulation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186(5): 012049
- [5] 张义花, 许洪国, 刘宏飞, 等. 双挂汽车列车操纵稳定性评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 145-151.
- [6] 任成龙, 王俭朴, 赵素芳. 乘用车操纵稳定性的灰色关联评价[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 252-254.
- [7] 郝西祥. 某越野车整车操纵稳定性实车试验及仿真优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- [8] 李志魁. 基于CarSim的整车动力学建模与操纵稳定性仿真分析[D]. 长春:吉林大学, 2007.
- [9] 朱振兴, 孙跃东. 基于MATLAB/Simulink的四轮转向车辆的操纵稳定性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(4): 42-45.
- [10] 宋成鏖, 李刚. 四轮独立驱动FSEC赛车稳定性控制[J]. 汽车工程师, 2020(7): 31-34.
- [11] 陈建兵, 向青青. 分布式驱动电动汽车Simulink/Car-sim联合仿真平台的建立[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(10): 1496-1500.
- [12] GB/T 6323—2014, 汽车操纵稳定性试验方法[S].
- [13] QC/T 480—1999, 汽车操纵稳定性指标限值与评价方法[S].
- [14] 刘丹, 王生昌, 陈娟娟, 等. 基于蛇形试验汽车操纵稳定性主客观评价相关性研究[J]. 交通节能与环保, 2017, 13(4): 32-35.

(责任编辑 周雪梅)