

特约来稿

轮胎力学特性对汽车操纵稳定性的影响分析

韦 勇, 韦宝侣, 赵 亮, 方 华, 贾永辉
(上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要:通过仿真分析表征轮胎力学特性的影响因子对轮胎力学特性和汽车操纵稳定性的影响,提出基于蛇形试验和稳态回转试验的汽车操纵稳定性评分方法,同时对仿真结果的正确性进行验证。结果表明,侧偏刚度和摩擦因数对汽车操纵稳定性影响较大,合理增大侧偏刚度比例因子和摩擦因数比例因子可以提高汽车操纵稳定性。该仿真分析方法操作简单且具有较高的准确性,在轮胎力学特性研究和汽车操纵稳定性分析评价方面具有指导意义。

关键词:轮胎;汽车;力学特性;影响因子;仿真分析;操纵稳定性;侧偏刚度;摩擦因数

中图分类号:U463.341;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2020)03-0131-08

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2020.03.0131



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎与路面接触形成各个方向的力和力矩,这些力和力矩使车辆完成行驶、制动、转向和加速等操作,因此汽车的绝大部分行驶状态与轮胎力学特性有密切关系^[1-3]。轮胎是汽车唯一直接与路面接触的部件,路面产生的作用力均由轮胎传递,因此若要提高汽车操纵稳定性,则需对轮胎的力学特性进行深入研究和分析。

轮胎模型用于描述轮胎运动状态中的力学特性,目前轮胎稳态模型可分为理论模型、经验模型和半经验模型^[1]。轮胎力学特性的研究始于20世纪30—40年代,德国人Fromm和法国人Brouhiet分别发现了轮胎的侧偏现象,由此开启了轮胎力学特性的研究历程^[2];郭孔辉等^[4-7]经过多年研究,开发了世界先进水平的轮胎力学特性试验台,并基于该试验台建立了能够全面表达轮胎六分力特性的半经验模型;朱春侠等^[8]分析了轮胎侧偏力与侧偏角的关系,并对车辆操纵稳定性做出预测;卢荡^[9]

提出了基于轮胎物理模型描述的全新非稳态特性建模方法。

本工作从轮胎力学特性的影响因子着手,建立精确的汽车模型和轮胎模型,提出汽车操纵稳定性的评价方法。通过仿真分析影响因子对轮胎力学特性[包括轮胎侧偏刚度(零点斜率)、摩擦因数、峰值曲率因子和回正刚度]和汽车操纵稳定性的影响,提出基于蛇形试验和稳态回转试验的汽车操纵稳定性评分方法,同时对仿真结果的正确性进行验证。

1 汽车模型和轮胎模型的建立

1.1 汽车模型

通过高精度的CarSim软件建立汽车模型,其子系统构成如图1所示。每个子系统的特性参数及特性曲线均通过特性测试获得,主要采取的试验内容如下。

(1) 汽车质心高度及转动惯量试验。可获得实车质心高度、3个方向的转动惯量和惯性积,为汽车模型提供参数。

(2) 弹簧和减震器试验。可测试实车弹簧刚度特性和减震器速度特性,为悬架C特性建模提供参数。

(3) 悬架K&C特性试验。可测试试验车辆的悬架运动学和弹性运动学特性,为汽车悬架部分



作者简介:韦勇(1968—),男,广西北流人,上汽通用五菱汽车股份有限公司教授级高级工程师,学士,主要从事汽车轮胎产品的开发工作,主导开发了“五菱宏光”“宝骏730”“五菱荣光”“五菱之光”等系列产品,广西知识产权领军人才,曾获“全国五一劳动奖章”“改革开放30年中国汽车工业杰出人物”“广西科学技术进步特等奖”等奖励,拥有发明专利5项。

E-mail:190577790@qq.com

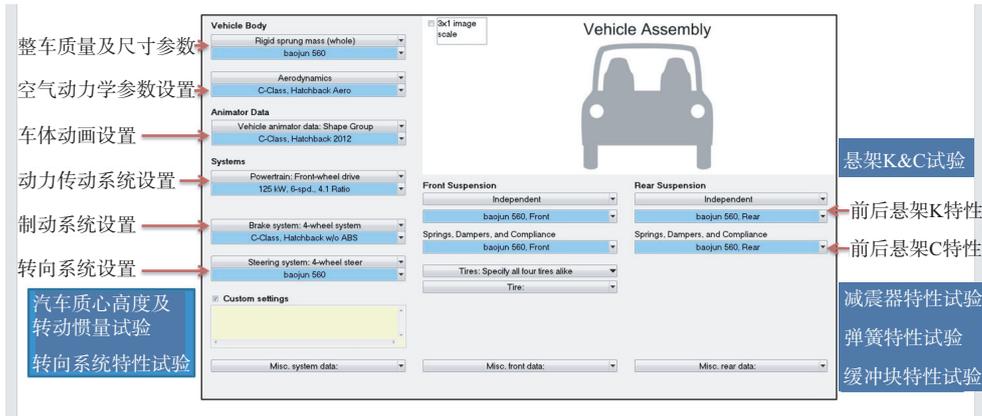


图1 整车模型的子系统构成

建模提供参数。该试验内容包括:平行轮跳试验、带/不带横向稳定杆的车身侧倾试验、转向几何测试、纵向柔性测试、侧向力柔性测试-反向加载试验和回正力矩反向加载试验等。本次试验利用英国ABD公司开发的SPMM·K&C试验台(见图2)进行测试,该试验台主要包括以下几个部分。

①测试系统。采用六拉线式传感器,通过计算得到车轮在不同时刻的位置,进而得到3个方向的位移变化和角度变化。



图2 SPMM·K&C试验台

②中心平台。实现垂向轮跳、仰俯和侧倾运动的加载平台。

③车轮平台。可以实现纵向力、侧向力和回正力矩的加载,同时测量每个车轮所受的六分力。

针对本工作的研究内容,需要精确建立车辆的悬架系统。由于轮胎与悬架之间复杂的耦合关系,因此轮胎与车辆的匹配往往指轮胎与悬架组成的系统与车辆的匹配。通过验证所建汽车模型的精度,确保仿真模型的高精度,减少实车试验的次数。

1.2 轮胎模型

魔术公式Pac2002模型可分为纯经验模型或半经验模型,是一套能够较为准确地表达轮胎力学特性的三角函数公式,由于其在汽车操纵稳定性仿真分析中表现出色,已被业界公认,成为工业标准,因此本试验用其建立轮胎模型。轮胎模型试验过程(见图3)为:将汽车模型封装到Matlab/Simulink的S函数中,然后运用外接的轮胎模型,经

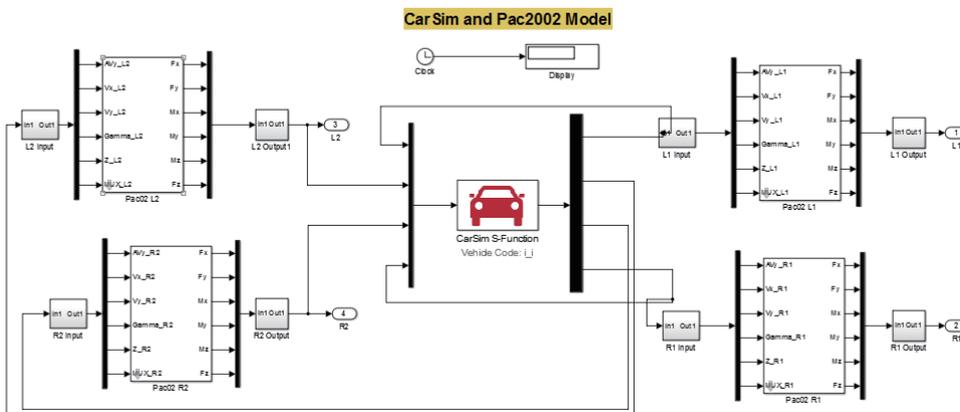


图3 轮胎模型试验过程

过计算获得轮胎接地印痕内轮胎六分力,并传回CarSim。

2 表征轮胎力学特性的影响因子

表征轮胎力学特性的影响因子是轮胎模型属性文件中的因素,在不改变一个真正的魔术公式系数的情况下,可以很容易地研究轮胎特性的影响因素。本试验研究的影响因子如下:LCY—形状因素比例因子,LEY—曲率系数比例因子,LHY—水平偏移比例因子,LKY—侧偏刚度比例因子,LMUY—摩擦因数比例因子,LVY—垂直偏移比例因子,LGAY—侧偏外倾角比例因子。

影响因子的默认值为1,在仿真试验中按照0.5,0.75,1,1.25和1.5顺序递增取值,以此分析纯侧偏工况下轮胎力学特性对汽车操纵稳定性的影响。

3 汽车操纵稳定性试验评价指标和评分方法

3.1 蛇形试验

本试验经过对GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》蛇形试验规定的数据处理方法进行分析,提出了平均转向盘转角和平均横摆角速度两项核心指标的评分标准。

平均横摆角速度峰值评价指标如下:

$$N_r = 60 + \frac{40}{r_{60} - r_{100}}(r_{60} - r) \quad (1)$$

式中, N_r 为平均横摆角速度峰值评价指标值,大于100时按100记; r_{60} 为平均横摆角速度峰值的下限值; r_{100} 为平均横摆角速度峰值的上限值; r 为基准车速下,平均横摆角速度峰值。

平均转向角峰值的评价指标如下:

$$N_\theta = 60 + \frac{40}{\theta_{60} - \theta_{100}}(\theta_{60} - \theta) \quad (2)$$

式中, N_θ 为平均转向角峰值评价指标值,大于100时按100记; θ_{60} 为平均转向角峰值的下限值; θ_{100} 为平均转向角峰值的上限值; θ 为基准车速下,平均方向盘转向角峰值。

蛇形试验的综合评价指标如下:

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

式中, N_s 为蛇形试验综合评价计分值。

蛇形试验指标限值见表1。

按 r 和 θ 进行评价计分, r 和 θ 越小,蛇形试验绕桩时的汽车操纵性和安全稳定性越好。

3.2 稳态回转试验

稳态回转试验输入指标限值见表2。 a_{n60} , U_{60} 和 $K_{\phi 60}$ 分别为中性转向点的侧向加速度(a_n)、不足

表1 蛇形试验指标限值

车 型	标桩间距/m	基准车速/(km·h ⁻¹)	$r_{60}/[(^\circ)\cdot s^{-1}]$	$r_{100}/[(^\circ)\cdot s^{-1}]$	$\theta_{60}/(^\circ)$	$\theta_{100}/(^\circ)$
轿车、客车和货车, $M_{\max} \leq 2.5 \text{ t}$	30	65,60 ¹⁾	25.0	10.0	180.0	60.0
客车和货车, $2.5 \text{ t} < M_{\max} \leq 6 \text{ t}$	30	50	25.0	8.0	180.0	60.0
客车和货车, $6 \text{ t} < M_{\max} \leq 15 \text{ t}$	50	60	10.0	4.0	180.0	60.0
客车和货车, $M_{\max} > 15 \text{ t}$	50	50	10.0	4.0	180.0	60.0

注: M_{\max} 为最大总质量;1)用于最高车速小于100 km·h⁻¹的汽车。

表2 稳态回转试验输入指标限值

车 型	$a_{n60}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$a_{n100}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\frac{U_{60}}{[(^\circ)\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}]}$	$\frac{U_{100}}{[(^\circ)\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}]}$	$\frac{K_{\phi 60}}{[(^\circ)\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}]}$	$\frac{K_{\phi 100}}{[(^\circ)\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}]}$
轿车、客车和货车, $M_{\max} \leq 2.5 \text{ t}$	5.00	9.80	1.00,0.60 ¹⁾	0.40,0.24 ¹⁾	1.20	0.70
客车和货车, $2.5 \text{ t} < M_{\max} \leq 6 \text{ t}$	4.00	8.00	1.20	0.50	1.20	0.70
客车和货车, $M_{\max} > 6 \text{ t}$	3.00	6.00	1.20	0.50	1.20,0.60 ¹⁾	0.70

注: M_{\max} 为最大总质量;1)用于最高车速大于150 km·h⁻¹的汽车或最大总质量大于9 t的客车。

转向度(U)和车厢侧倾度(K_ϕ)的下限值; a_{n100} , U_{100} 和 $K_{\phi 100}$ 为上限值。

不足转向度按前、后桥侧偏角差值与侧向加速度关系曲线上侧向加速度为2 m·s⁻²处的平均斜率(纵坐标值除以横坐标值)计算。评价计分值

按公式(4)计算。

$$N_U = 60 + \frac{40U(U_{60} - U)(\lambda - U)}{U_{100}(U_{60} - U_{100})(\lambda - U_{100})} \quad (4)$$

式中, N_U 为不足转向度的评价计分值; λ 为 U_{60} 与 U_{100} 的比值系数,即 $\lambda = \frac{2U_{60}/U_{100}}{U_{60}/U_{100} - 2} \cdot U_{100}$ 。

车厢侧倾度按车厢侧倾角与侧向加速度关系曲线上侧向加速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 处的平均斜率(纵坐标值除以横坐标值)计算。评价计分值按公式(5)计算。

$$N_{\varphi} = 60 + \frac{40(K_{\varphi 60} - K_{\varphi})}{K_{\varphi 60} - K_{\varphi 100}} \quad (5)$$

式中, N_{φ} 为车厢侧倾度的评价计分值,当 N_{φ} 大于100时,按100计。

稳态回转试验的综合评价计分值(N_w)按公式(6)计算。

$$N_w = \frac{N_{an} + N_U + N_{\varphi}}{3} \quad (6)$$

式中, N_{an} 为侧向加速度的评价计分值,按100计。

4 仿真和影响因子分析

4.1 影响因子对轮胎力学特性的影响

根据影响因子的变化编写侧偏角-侧向力的MATLAB公式,通过改变影响因子的大小,得到相应系数变化、曲线变化及对应的轮胎力学特性变化,获得轮胎侧向力-侧偏角关系随影响因子变化的力学特性曲线,如图4—9所示。

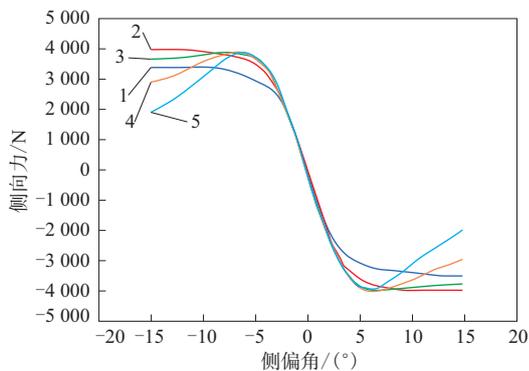
提取数据,得到不同影响因子与轮胎力学特性的关系,如图10—14所示。

根据仿真数据可以得出如下结论。

(1)影响侧偏刚度、轮胎摩擦因数和峰值曲率因子的主要影响因子分别为LKY,LMUY和LEY。

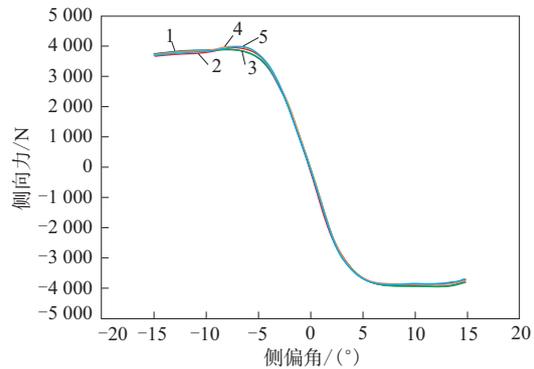
(2)LKY对轮胎回正刚度的影响最大,且呈线性关系,与对侧偏刚度的影响一致。

(3)随着LKY增大,零点斜率绝对值增大,表明轮胎侧偏刚度增大。



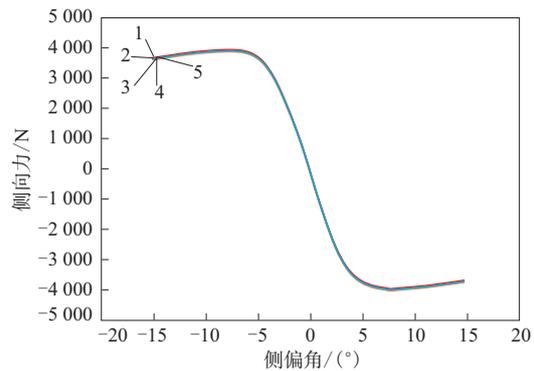
影响因子取值:1—0.5;2—0.75;3—1;4—1.25;5—1.5。

图4 LCY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响



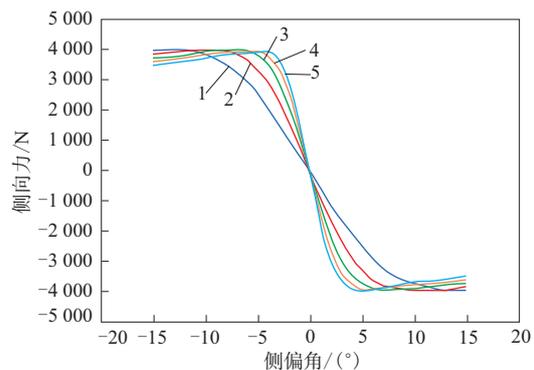
注同图4。

图5 LEY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响



注同图4。

图6 LHY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响



注同图4。

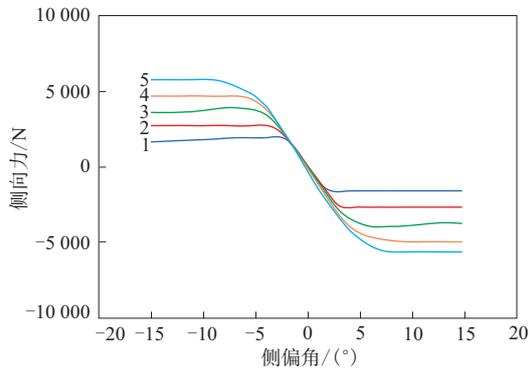
图7 LKY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响

(4)随着LMUY增大,侧向力峰值线性增大,表明轮胎摩擦因数增大。

(5)随着LEY增大,峰值曲率因子绝对值增大。

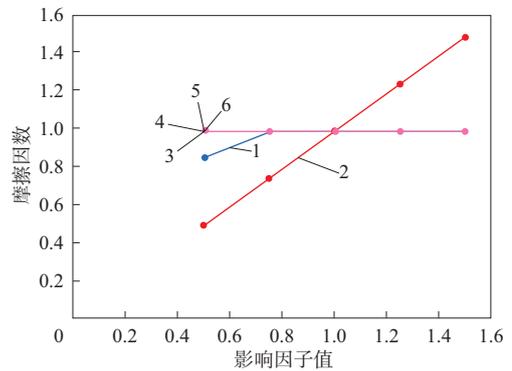
4.2 影响因子对汽车操纵稳定性的影响

(1)蛇形试验。运用Carsim软件对按照GB/T 6323—2014进行蛇形试验得到的数据进行仿真,研究影响因子对汽车操纵稳定性的影响。试验输



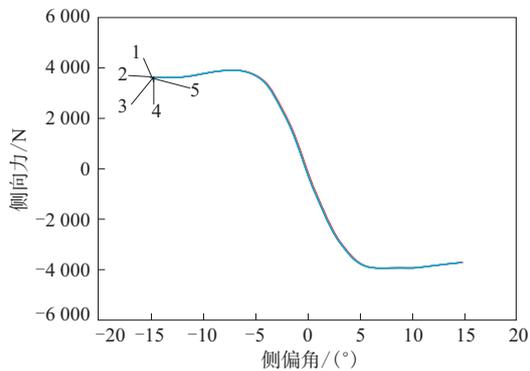
注同图4。

图8 LMUY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响



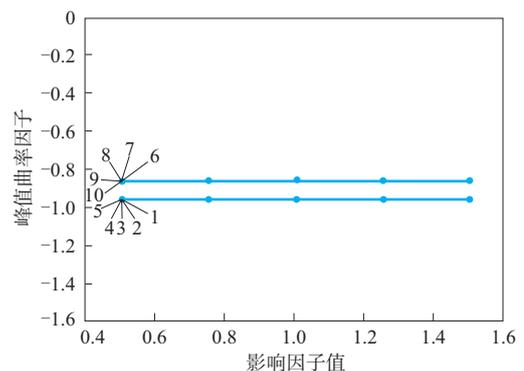
注同图10。

图11 影响因子对摩擦因数的影响



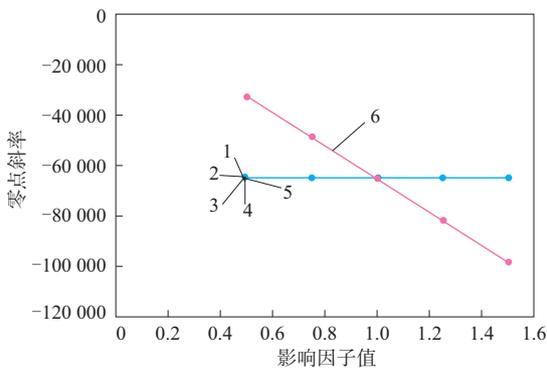
注同图4。

图9 LVY对轮胎侧向力-侧偏角关系曲线的影响



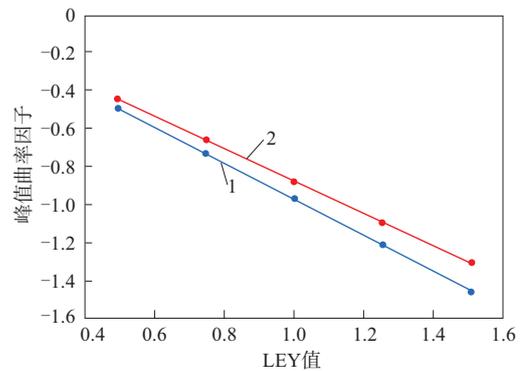
1—LCY1;2—LMUY1;3—LKY1;4—LHY1;5—LVY1。
6—LCY2;7—LMUY2;8—LKY2;9—LHY2;10—LVY2。

图12 LCY/LMUY/LKY/LHY/LVY对峰值曲率因子的影响



1—LCY;2—LMUY;3—LEY;4—LHY;5—LVY;6—LKY。

图10 影响因子对侧偏刚度的影响



1—LEY1;2—LEY2。

图13 LEY对峰值曲率因子的影响

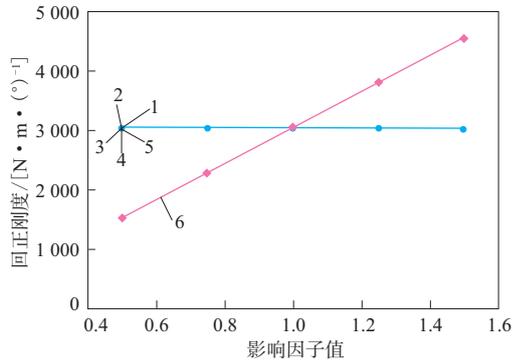
出数据包含时间、方向盘力矩、方向盘转角、侧向加速度、车厢侧倾角、横摆角速度、车速和车厢侧偏角。

通过MATLAB数据处理输出汽车在车速为60 km·h⁻¹下蛇形工况平均方向盘转角和平均横摆角速度,结果如图15和16所示。

由图15和16可以看出:LKY对汽车平均方向盘转角和平均横摆角速度的影响显著;LMUY

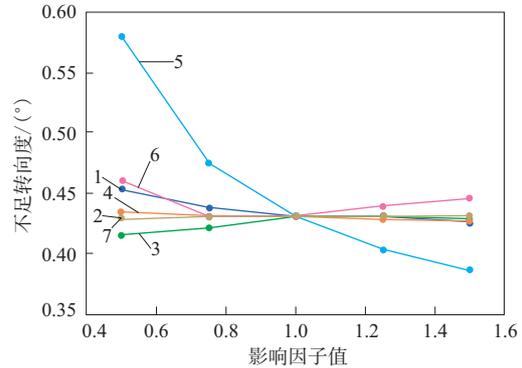
对汽车平均方向盘转角影响较大,对平均横摆角速度影响较小;其他影响因子对蛇形试验的汽车操纵稳定性无明显影响。

(2) 稳态回转试验。影响因子对稳态回转试验的汽车操纵稳定性的影响如图17和18所示。



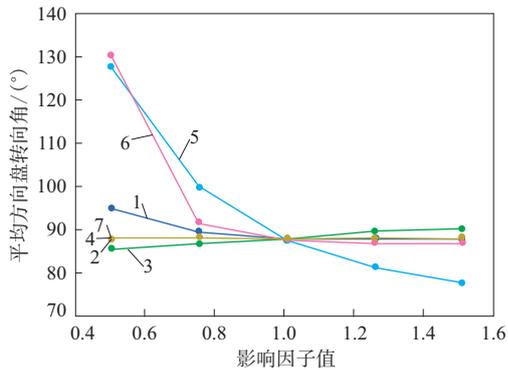
注同图10。

图14 影响因子对回正刚度的影响



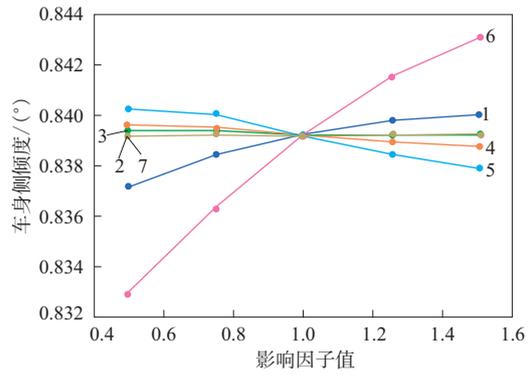
注同图15。

图17 影响因子对不足转向度的影响



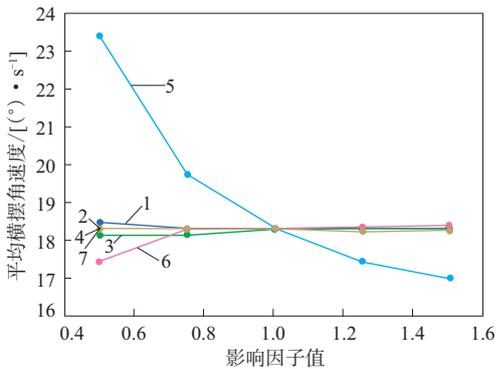
1—LCY; 2—LEY; 3—LGAY; 4—LHY; 5—LKY;
6—LMUY; 7—LVY。

图15 影响因子对平均方向盘转向角的影响



注同图15。

图18 影响因子对车身侧倾度的影响



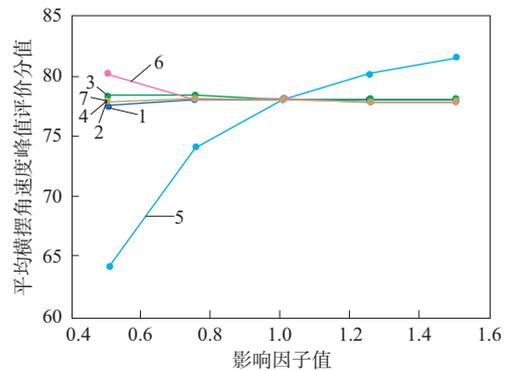
注同图15。

图16 影响因子对平均横摆角速度的影响

由图17和18可以看出:LKY对汽车不足转向度影响较大;LMUY对汽车车身侧倾度影响较大;其他影响因子对稳态回转试验的汽车操纵稳定性影响很小。

4.3 影响因子对汽车操纵稳定性试验评分的影响

影响因子对蛇形试验评分的影响如图19—21



注同图15。

图19 影响因子对平均横摆角速度峰值评价分数的影响所示。影响因子对稳态回转试验评分的影响如图22—24所示。

由图19—24可知:当LKY或LMUY增大时,蛇形试验的综合评价分值增大,汽车操纵稳定性提高,其他影响因子对蛇形试验的综合评价分值的影响较小;LKY和LMUY对稳态回转试验的综合评价分值影响较大,其中,LKY与综合评价分值成

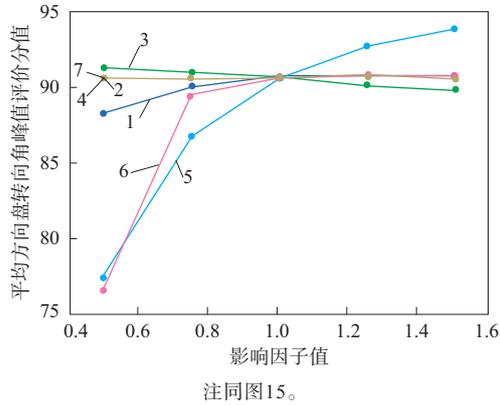


图20 影响因子对平均方向盘转角峰值评价分值的影响

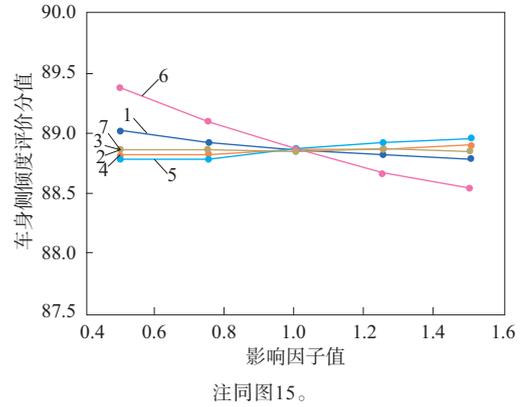


图23 影响因子对车身侧倾度评价分值的影响

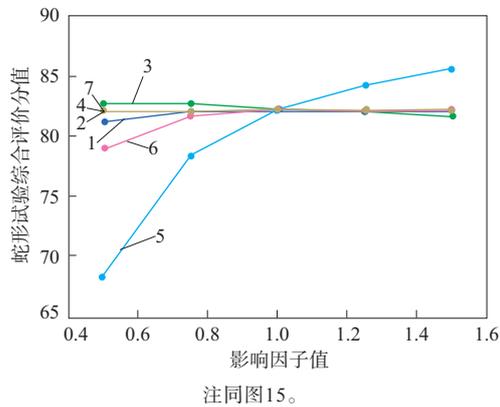


图21 影响因子对蛇形试验综合评价分值的影响

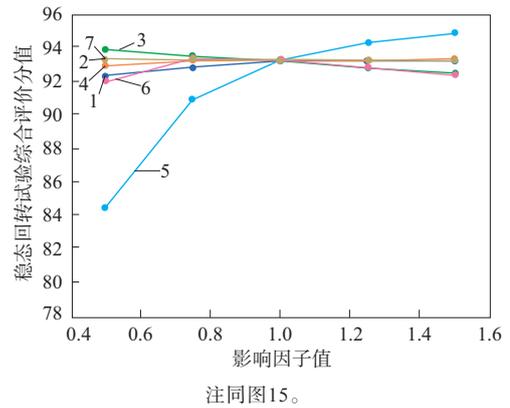


图24 影响因子对稳态回转向试验综合评价分值的影响

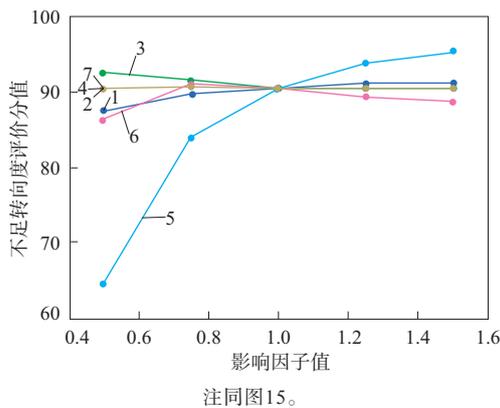


图22 影响因子对不足转向度评价分值的影响
正相关,随着LMUY增大,综合评价分值先提高后略有下降,但总体影响范围不大。

5 结论

(1)通过仿真分析表征轮胎力学特性的影响因子对轮胎力学特性和汽车操纵稳定性的影响,提出汽车操纵稳定性的评分方法。

(2)侧偏刚度和摩擦因数对汽车操纵稳定性影响较大,合理增大LKY和LMUY可以提高汽车操纵稳定性。

(3)该仿真分析方法操作简单且具有较高的准确性,在研究轮胎力学特性方面和工程实践中具有积极意义,在汽车操纵稳定性分析评价和控制方面具有指导意义。

参考文献:

- [1] 张向文,王飞跃,高彦辰. 轮胎稳态模型的分析综述[J]. 汽车技术, 2012(2):1-7.
- [2] 胥永宫. 轿车轮胎操纵稳定性匹配研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [3] 蔡永周,曾繁林,欧阳俊,等. 基于LS-DYNA的爆胎历程轮胎刚度特性仿真研究[J]. 橡胶工业,2019,66(6):461-465.
- [4] 郭孔辉. 各向摩擦系数不同条件下轮胎力学特性的统一理论模型[J]. 中国机械工程,1996,7(4):35-39.
- [5] 宗长富,郭孔辉,李铂. 汽车操纵稳定性的理论预测与综合评价[J]. 汽车工程,2001,23(1):5-8,12.
- [6] 陈焕明,郭孔辉. 轮胎性能对车辆操纵稳定性影响的仿真研究[J]. 汽车工程,2015,37(5):491-494,505.

- [7] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1991.
[8] 朱春侠,张韶回,李劲松. 轮胎对汽车操纵稳定性的影响分析[J]. 农业装备与技术,2011(3):28-30.

- [9] 卢荡. 轮胎操稳非稳态特性建模的理论与方法[J]. 科学技术与工程,2009,9(9):2518-2520.

收稿日期:2019-10-16

Influence of Tire Mechanical Characteristics on Handling Stability of Vehicle

WEI Yong, WEI Baolyu, ZHAO Liang, FANG Hua, JIA Yonghui
(SGMW, Liuzhou 545007, China)

Abstract: The effects of influential factors on the tire mechanical characteristics and handling stability of vehicle were analyzed through simulation. An evaluation method of handling stability of vehicle based on the serpentine test and steady-state rotation test was proposed, and the simulation results were verified. The results showed that, the lateral stiffness and friction coefficient had significant impact on the handling stability of vehicle, which could be improved by appropriately increasing the scale factors of lateral stiffness and friction coefficient. The simulation analysis method was easy to operate and had high accuracy, which had guiding significance in the study of tire mechanical characteristics and evaluation of the handling stability of vehicle.

Key words: tire; vehicle; mechanical characteristic; influential factor; simulation analysis; handling stability; lateral stiffness; friction coefficient

GRI推出环保型Ultimate XT实心轮胎

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2019年11月22日报道如下。

特种轮胎制造商全球橡胶工业有限公司(GRI)开发了一款环保型高性能Ultimate XT实心轮胎(见图1)。

据GRI官方人员介绍,该公司的研发团队与



图1 Ultimate XT实心轮胎

科伦坡大学化学系的科学家团队合作,已用碳中和且可再生的天然油代替了轮胎的石油基油。

该研发轮胎适用于所有地形地面和恶劣的工作环境,测试表明,采用特殊的环保型天然油代替石油基油后,轮胎性能卓越。

GRI销售总裁Gary Stevens说:“经统计证明,环保型Ultimate XT实心轮胎具有宽阔的轮廓印痕,可使其在整个寿命周期内按比例减少磨损,同时能够在任何环境(包括室内、室外、潮湿和干燥环境)下的地面使用。所有规格的该款无标记和夹式轮胎均已上市。”

随着高性能Ultimate XT实心轮胎的推出,GRI计划加强其生产高性能、绿色实心橡胶轮胎的战略,从而减少环境污染,提高效率。GRI总部位于斯里兰卡,在9个国家设有办事处,在50多个国家设有销售业务处。

(许亚双摘译 赵敏校)