整车操纵性能仿真客观评价体系研究

姜洪旭，王海艳
[浦林成山（青岛）工业研究设计有限公司，山东 青岛 264300]

摘要：根据整车评价的实际工况确定科学的六分力试验方法，建立轮胎的PAC2002模型；根据整车悬架的运动学与动力学试验数据和转向系统试验数据，在Carsim软件中建立某品牌SUV整车模型；根据GB/T 6323—2014和主观评价试验项目建立仿真流程，选取关键的客观评价指标并与主观评价结果对比，建立整车操纵性能仿真客观评价体系。结果表明仿真结果与主观评价结果有很好的一致性。

关键词：车辆；操纵性能；客观评价体系；六分力；Carsim软件
中图分类号：U463.341；O241.82 **文章编号：**1006-8171（2020）10-0630-05
文献标志码：A **DOI：**10.12135/j.issn.1006-8171.2020.10.0630

OSID开放科学标识码（扫码与作者交流）

轮胎作为车辆与地面接触的唯一部件，对整车的操纵性能有决定性作用[1]。整车的操纵稳定性是整车厂评价轮胎性能的核心指标之一。轮胎必须通过整车厂的整车主观评价，达到其评分标准，才能获得最终的技术认可。轮胎动力学建模能力、轮胎操纵稳定性试验和仿真以及轮胎与整车的操纵稳定性匹配是轮胎能否达到高端整车厂技术要求的核心技术[2-3]。

本研究根据整车评价实际工况确定科学的六分力试验方法，建立轮胎的PAC2002模型，根据整车悬架的运动学与动力学（K&C）试验数据和转向系统试验数据，在Carsim软件中建立某品牌SUV整车模型；根据GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》和主观评价试验项目建立仿真流程，选取关键的客观评价指标并与主观评价结果对比，以建立整车操纵性能仿真客观评价体系。

1 轮胎模型

采用SUV车型常用的215/60R17轮胎，分别选择国内品牌轮胎A，B及韩国品牌轮胎C，进行轮胎六分力试验，根据试验数据建立轮胎动力学模型。

1.1 六分力试验方法

（1）试验充气压力。根据测试车型轮胎的额定充气压力来确定，试验过程中保持不变。

（2）试验负荷。通常，在小角度转向主观评价时，车辆的横向加速度不超过0.2g（g为9.80 m·s^{-2}），在此范围内，轮胎负荷转移，轮胎负荷分别是前轮静态负荷的80%和120%。极限操纵时，车辆的横向加速度不超过0.6g，在此范围内，轮胎负荷分别为前轮静态负荷的40%和160%。

以某车型为例，该车辆前轴承重726 kg，后轴承重510 kg。前轴单轮负荷＝前轴承重/2＋驾驶员体重/2＝726/2＋75/2＝400.5（kg）；后轴单轮负荷＝后轴承重/2＝510/2＝255（kg）。

车辆横向加速度为0.6g，则转向前轴载荷转移时，前轮最大负荷＝400×1.6＝640（kg），前轮最小负荷＝400×0.4＝160（kg），后轮最大负荷＝255×1.6＝408（kg），后轮最小负荷＝255×0.4＝102（kg）。前轮对车辆操纵性能的影响远大于后轮，因此确定试验负荷时以前轮负荷为基准。

据此，可确定试验负荷分别为前轮静态负荷的40%，80%，100%，120%和160%。

（3）试验速度。根据平带式轮胎六分力试验机的试验能力，综合考虑整车使用工况，试验速度定为80 km·h^{-1}。

（4）纵向滑移率。通常轮胎的纵向滑移率为8%～15%时，其纵向力达到峰值，纵向滑移率为80%时，其纵向力达到稳定。纵向滑移率达到80%

作者简介：姜洪旭（1981—），男，山东荣成人，浦林成山（青岛）工业研究设计有限公司工程师，学士，主要从事车辆仿真工作。
E-mail：hxjiang@prinxchengshan.com

时需考虑电子稳定系统(如ABS)失灵时轮胎的抓着性能。本试验纵向滑移率范围为－80%～80%。

(5) 轮胎侧倾角。车辆侧倾角需考虑驾驶员体重的影响及侧倾角与前束角的配合，一般为0.05°～0.15°。驾驶员坐入车内时，轮胎与地面应该垂直。

(6) 侧偏角。车辆侧偏角取值为0°，2°，4°。侧偏角为4°时对应的侧向加速度约为0.6g。侧偏角扫描范围为－20°～20°。

(7) 侧偏角扫描速度。车辆操纵稳定性试验取小角度转向，轮胎转向速度约为4 (°)·s^{-1}，极限操作时为12 (°)·s^{-1}。蛇形试验方向盘速度为90 (°)·s^{-1}，一般车辆转向比为15～16.5，换算至轮胎转向速度为6 (°)·s^{-1}。本试验为减少轮胎磨损，保证数据的稳定性，将侧偏角扫描速度定为12 (°)·s^{-1}。

轮胎六分力试验条件如表1所示。

表1　轮胎六分力试验条件

编　号	试验名称	纵向滑移率/%	侧倾角/(°)	侧偏角/(°)
1	纯纵滑	－80～80	0	0
2	纯侧偏	0	0	－20～20
2	纯侧偏	0	2	－20～20
2	纯侧偏	0	4	－20～20
3	复合工况	－80～80	0	0
3	复合工况	－80～80	0	2
3	复合工况	－80～80	0	4

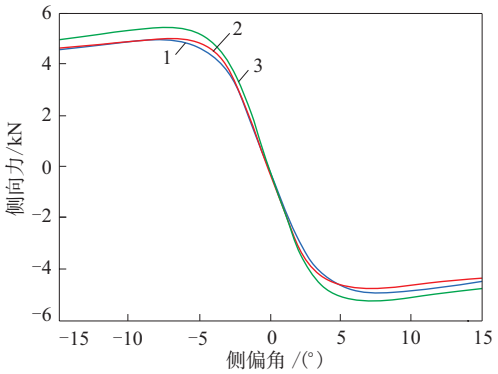
注：试验速度均为80 km·h^{-1}；试验负荷均分为5级，分别为前轮静态负荷的40%，80%，100%，120%，160%。

1.2　试验结果及轮胎模型

根据上述试验方法进行轮胎六分力测试。为了消除试验过程中轮胎磨损的影响，每个品牌需要6条轮胎，部分试验结果如图1—4所示。

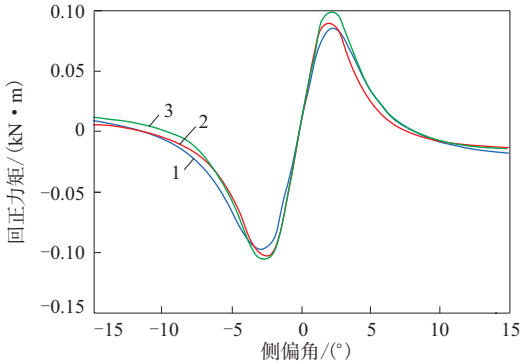
从图1—4可以看出，3个品牌轮胎的侧向力峰值、回正力矩以及纵向力等影响整车操纵性的关键数据存在明显差异。

轮胎模型可分为纯经验模型、理论模型和半经验模型。Magic Formula(MF/PAC模型)属于纯经验模型，其精度取决于试验数据及对试验数据的处理与拟合。根据试验结果，MF/PAC2002模型适用于描述轮胎在光滑路面上的特性，适用如下工况仿真：稳态转向、单移线和双移线、转向减速、不同摩擦因数路面刹车、J-转向和类似工况、ABS刹车等。



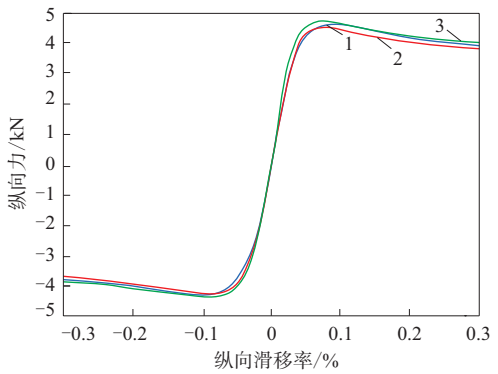
1—轮胎A；2—轮胎B；3—轮胎C。

图1　轮胎侧向力与侧偏角关系曲线



注同图1。

图2　轮胎回正力矩与侧偏角关系曲线



注同图1。

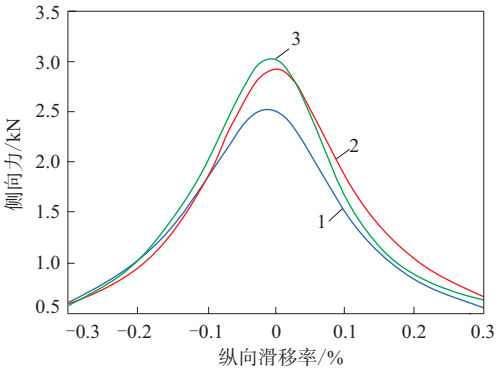
图3　轮胎纵向力与纵向滑移率关系曲线

本研究采用的轮胎模型为MF/PAC2002模型。

2　整车模型

整车车型为某国产SUV，根据整车试验数据在Carsim软件中建立虚拟整车模型。

整车模型系统如图5所示。



注同图1。

图4 轮胎侧向力与纵向滑移率关系曲线

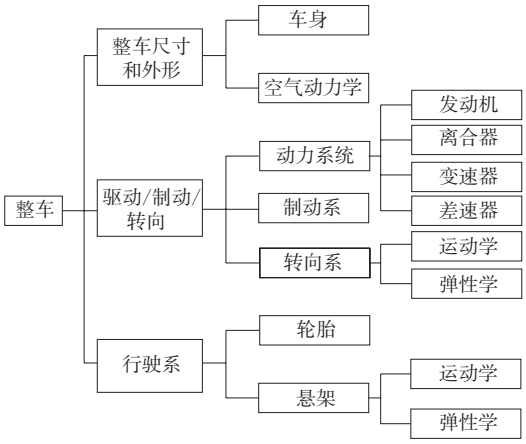


图5 Carsim软件中整车模型系统

除了轮胎六分力特性，整车模型还要考虑整车质心及转动惯量特性、悬架的K&C特性，转向系统特性均对整车操纵稳定性有很大影响，悬架的K&C特性决定车轮是否有合理的前束角、外倾角变化规律，最终表现为横摆角速度响应，受多个参数（如纵向力、侧向力、回正力矩、车身侧倾和轮胎跳动等）影响并相互关联[1]。

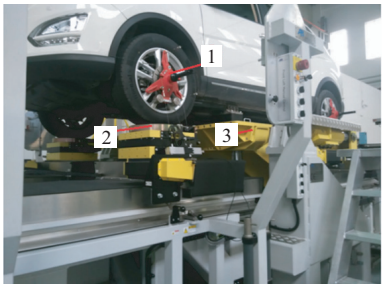
2.1 悬架的K&C试验

悬架的K&C试验包含多项内容，其试验台如图6所示。

试验中对Carsim建模有意义的项目包括垂向轮胎跳动试验、车身侧倾试验、转向测试-发动机开、纵向力测试、侧向力测试-反向加载、回正力矩测试-反向加载。

2.2 整车质量和转动惯量特性

整车质量为1 626.39 kg，整车质心的X，Y和Z坐标分别为−1 274.27，63.40和663.34 mm，整车绕质心X，Y和Z方向的转动惯量分别为732.2，2 596.8和2 814.2 kg·m^2，整车绕质心处任两轴的惯性积I_{xy}，I_{xz}，I_{yz}分别为34.4，−81.8和26.1 kg·m^2。



1—测量系统；2—车轮平台；3—中心平台。

图6 悬架K&C试验台

2.3 转向系统特性

转向系统试验数据如表2所示。

表2 转向系统试验数据

项 目	编号	试验数据
齿条移动力/N		
全程移动力（≤230）	1	155
全程移动力（≤230）	2	146
全程移动力（≤230）	3	131
全程移动力波动（<60）	1	55
全程移动力波动（<60）	2	41
全程移动力波动（<60）	3	46
转动力矩/（N·m）		
±180°范围内（0.8～1.7）	1	左0.96，右0.98
±180°范围内（0.8～1.7）	2	左0.86，右0.81
±180°范围内（0.8～1.7）	3	左0.83，右0.74
±180°范围外（0.6～1.8）	1	左0.88，右0.84
±180°范围外（0.6～1.8）	2	左0.81，右0.74
±180°范围外（0.6～1.8）	3	左0.69，右0.61
±90°范围内波动值（≤0.5）	1	左0.17，右0.30
±90°范围内波动值（≤0.5）	2	左0.14，右0.13
±90°范围内波动值（≤0.5）	3	左0.23，右0.20
±180°范围内波动值（≤0.6）	1	左0.17，右0.30
±180°范围内波动值（≤0.6）	2	左0.16，右0.16
±180°范围内波动值（≤0.6）	3	左0.23，右0.24
±180°范围外波动值（≤0.7）	1	左0.28，右0.30
±180°范围外波动值（≤0.7）	2	左0.20，右0.16
±180°范围外波动值（≤0.7）	3	左0.23，右0.24

注：括号内数值为要求范围。

2.4 整车建模

设立整车车身参数、悬架系统参数和转向系统参数。整车转向系统参数模块如图7所示。

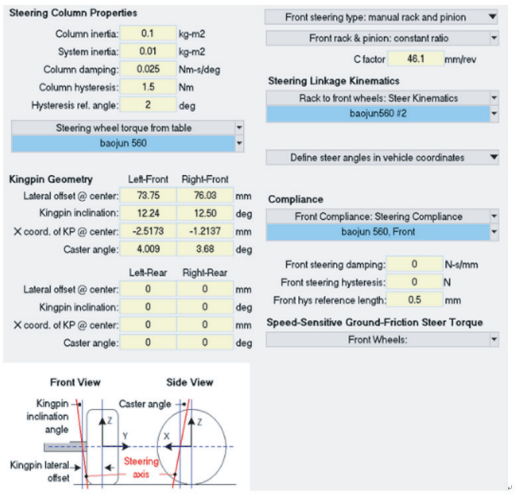


图7　整车转向系统参数模块

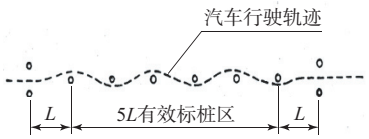
3　仿真

参照GB/T 6323—2014及后续主观评价试验项目，进行蛇形试验、非国标的变道试验(变道试验)、转向瞬态响应试验(包含角脉冲试验和角阶跃试验)、稳态回转试验、转向回正性试验、转向轻便性试验、转向盘中间位置操纵稳定性试验、转弯试验和横风稳定性试验。

以蛇形试验为例，过程如下。

(1) 仿真方法。行驶速度(基准车速)为65 km·h^{-1}，以驾驶员预瞄路径方式控制车辆绕桩。蛇形布桩如图8所示。蛇形绕桩工况仿真如图9所示。

(2) 评价指标。按基准车速下的平均横摆角速度峰值(r)与平均转向盘转角峰值(θ)进行评价计分。



L为相临标桩的水平距离，标桩间距为30 m。

图8　蛇形布桩示意

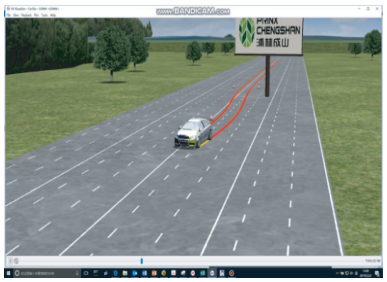


图9　蛇形绕桩工况仿真

蛇形工况指标对比如表3所示。其中，r、θ和车身侧倾角越小说明蛇形试验绕桩时的操纵性和安全稳定性越好。

表3　蛇形工况指标对比

指　标	轮胎A	轮胎B	轮胎C
r/[(°)·s^{-1}]	13.31	13.41	14.14
θ/(°)	52.21	52.71	64.82
侧倾角/(°)	2.33	2.33	2.35

从表3可以看出，轮胎A的综合性能最好。

(3) 评分计算。仿真项目客观评价各项得分均按照Q/CT 480—1999《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》计算。

横摆角速度峰值的评价指标(N_r)为

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

式中，r_{60}为r的下限，r_{100}为r的上限。

转向角峰值的评价指标(N_θ)为

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

式中，θ_{60}为θ的下限，θ_{100}为θ的上限。

蛇形试验的综合评价指标(N_s)为

$$N_s = \frac{2N_r + N_\theta}{3} \tag{3}$$

本试验中，对最大总质量不大于2.5 t的轿车、客车和货车车型，其r_{60}和r_{100}分别为25和10 (°)·s^{-1}，θ_{60}和θ_{100}分别为60°和180°。

根据公式(1)—(3)可得仿真项目蛇形工况客观评价各指标得分，如表4所示。

表4　仿真项目蛇形工况客观评价各指标得分

评价指标	轮胎A	轮胎B	轮胎C
N_r	91.18	90.89	88.95
N_θ	103.25	102.98	98.40
N_s	95.20	94.92	92.10

采用类似方法，可得其他仿真项目客观评价各指标得分，如表5所示。

4　主观评价及一致性验证

主机厂目前仍以车手的主观评价作为对轮胎操纵性能的最终评判手段。为了验证上述客观评

表5 其他仿真项目客观评价各指标得分

项 目	轮胎A	轮胎B	轮胎C
变道试验	99.00	94.50	100.00
r	100.00	99.00	91.00
侧倾角	100.00	100.00	98.00
转向瞬态响应(角脉冲)试验	126.64	126.64	125.15
谐振峰水平	106.62	106.62	103.63
谐振频率	146.67	146.67	146.67
转向瞬态响应(角阶跃)试验	94.29	89.77	82.30
侧向加速度响应时间	88.57	82.85	71.42
横摆角速度超调量	100.00	96.89	93.18
稳态回转试验	109.86	105.17	100.74
中性转向点侧向加速度	100.00	90.00	79.00
不足转向度	97.57	99.76	98.83
车厢侧倾度	132.00	125.76	124.40
转向回正性试验	104.00	92.00	81.00
残余横摆角速度	104.00	84.00	66.00
横摆角速度总方差	104.00	99.00	96.00
转向盘中间位置操纵稳定性试验	100.00	98.50	92.50
侧向加速度[1)](滞后性指标)	100.00	99.00	89.00
灵敏性指标[2)]	100.00	98.00	96.00
转弯试验	100.00	97.50	91.50
r	100.00	99.00	99.00
横摆角速度超调量	100.00	96.00	84.00
横风稳定性	98.00	96.00	98.00
横向位移量	100.00	97.00	96.00
车身翻倾角	96.00	95.00	100.00

注:1)方向盘力矩为零;2)指侧向加速度在±1 m·s^{-2}区间内曲线的斜率。

价指标的可靠性,本研究由经验丰富的车手进行3组轮胎的操纵性能主观评价试验。

项目主观评价得分如表6所示。仿真与主观评价一致性验证如表7所示。从表7可以看出,仿真与主观评价结果的一致性良好。

表6 项目主观评价得分

项 目	轮胎A	轮胎B	轮胎C
干操纵稳定性综合评价	6.5+	6.5	6.0+
直行操纵稳定性综合评价	6.5	6.5	6.5
转弯性能	6.5+	6.5	6.0+
转向感觉	6.5	6.5	6.0+

表7 仿真与主观评价一致性验证

项 目	轮胎A	轮胎B	轮胎C
仿真平均得分	100.68	97.46	91.23
主观评价得分	6.5+	6.5	6.0+

5 结语

本研究建立了整车操纵性能仿真客观评价体系,经与主观评价对比,具有一定的可靠性。

研究中需要注意:仿真应尽可能与试验条件一致,关键的轮胎六分力试验工况应与轮胎实际使用工况一致;整车模型尤其是与操纵性密切相关的悬架K&C参数和转向系统参数应通过试验测量。

参考文献:

[1] 高晋,杨秀建. 车轮定位角对操纵稳定性指标影响的定量研究[J]. 工程设计学报,2014,21(3):251-258.

[2] 宿晓峰,付平,丁忠军,等. 基于Abaqus软件的轮胎有限元模型建立及仿真分析[J]. 橡胶工业,2019,66(2):121-127.

[3] 付平,赵晓鹏,王昌宁,等. 无内胎载重子午线轮胎的结构设计及仿真评价[J]. 轮胎工业,2018,38(7):401-405.

收稿日期:2020-04-15

Study on Objective Evaluation System of Whole Vehicle Handling Performance Simulation

JIANG Hongxu, WANG Haiyan

[Prinx Chengshan(Qingdao) Industrial Research and Design Co., Ltd, Qingdao 264300, China]

Abstract: According to the actual working conditions of the whole vehicle evaluation, the scientific six-component force test method was determined, and the PAC2002 model of the tire was established. According to the kinematics and dynamics test data of whole vehicle suspension and the test data of the steering system, the whole vehicle model of a brand SUV was established by Carsim software. According to GB/T 6323—2014 and subjective evaluation test items, the simulation process of the SUV was established, key objective evaluation indexes were selected and compared with subjective evaluation results, and the objective evaluation system of the whole vehicle handling performance simulation was established. The results showed that the simulation results were in good agreement with the subjective evaluation results.

Key words: vehicle; handling performance; objective evaluation system; six-component force; Carsim software