

外部工况对轮胎翘曲的定量影响研究

姚 震, 黄海波*, 汪 晨, 鲁冰花

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对轮胎接地区域出现的翘曲现象, 提出了翘曲指数的概念; 建立 205/55R16 型半钢子午线轮胎的有限元模型, 在稳态滚动工况下, 采用单变量法分析了载荷、气压、速度、摩擦因子等外部因素对翘曲现象的影响, 量化了各种因素下翘曲现象的变化规律. 结果表明: 翘曲指数随垂直载荷和摩擦系数的增大而增强, 随充气压力和滚动速度的增大而减小; 影响轮胎翘曲指数的主次因素依次为垂向载荷、充气压力、滚动速度和摩擦系数. 研究成果可为提高车辆操控性和减少轮胎磨损提供参考.

关键词: 子午线轮胎; 翘曲指数; 单变量分析法; 接地印迹

中图分类号: TQ336.1; U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2015) 04-0070-05

轮胎是汽车的重要组成部分, 在与地面相互作用的过程中, 其性能决定着两者间的载荷传递特性, 并对车辆的乘坐舒适性、操纵性、安全、效率、轮胎的磨损与寿命产生重要影响^[1]. 接地印迹是轮胎在不同参数(如载荷、气压等)作用下与地面相互作用的直接反映. 通过对接地性态的研究, 获得相关参数对其影响的变化规律, 对于减少轮胎磨损和提高车辆运动性能有着重要作用. 国内外学者借助有限元软件对轮胎进行了多方面的研究. 闫相桥等^[2]通过不同的轮胎模型研究了下沉量与接地性态的关系, 表明当下沉量一定时, 地面总反力随滚动速度的增大而增大, 截面宽度则相反, 且在不同有限元网格计算的轮胎中下沉量变化的结果是一致的. 赵国群等^[3]研究了 195/60R14 型子午线轮胎不同工况下的滚动特性, 发现在自由滚动和驱动状态下高应力区均发生在接地印痕前部, 而制动状况下则相反. 王国林等^[4]研究了外倾和侧偏联合工况下轮胎接地印迹形状和接地压力分布的情况, 认为在两者合理的联合作用下可以改善接地印迹形状和接地压力的不对称分布. Cho 等^[5]研究了滚动状态下的阻力及温度分布, 表明滚动阻力主要受胎面及其结构的影响, 而最高和最低

温度分别存在带束层帘线和胎圈部位. Ghoreishy 等^[6]研究了带束层角度对轮胎力学性能的影响, 通过比较得到了最优的帘线角度. Liu 等^[7]通过自行设计的胎面花纹块滚动试验装置研究了自由滚动状态下的胎面受力情况, 并解释了接触区域切向力正弦分布的机理.

以上学者对轮胎的接地性态进行了广泛的探索, 但是对胎冠区域的翘曲现象缺少较详细的研究. 因此, 笔者以 205/55R16 半钢子午线轮胎为例, 探究稳态工况下, 外部因素对轮胎纵向翘曲现象的影响, 为轮胎设计和研究提供参考.

1 有限元模型的建立

1.1 轮胎材料模型

子午线轮胎主要是由胎面、胎侧、带束层、胎体、内衬层、三角胶、胎圈、子口护胶组成, 根据轮胎各部分材料的不同, 在有限元模型中分别定义不同的材料性能, 其中胎面和胎体等部位采用硬度不同的橡胶材料, 并用不可压缩的 Mooney-Rivlin 材料模型来模拟. 其应变能密度函数 W 模型的典型二次三项展开式为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + (I_3 - 1)^2 / D_1,$$

收稿日期: 2014-09-26.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51205213).

第一作者: 姚震(1989-), 男, 浙江台州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 轮胎摩擦磨损. E-mail: 465948403@qq.com

*通信作者: 黄海波(1978-), 男, 山东临沂人, 博士/副教授, 主要研究方向: 滚动体摩擦磨损. E-mail: huanghaibo@nbu.edu.cn

式中, C_{10} 和 C_{01} 为 Rivlin 系数, 均为正定常数, 可由单轴拉伸试验来确定; D_1 为压缩系数; I_1, I_2, I_3 分别为第一、第二、第三 Green 应变不变量, 对于不可压缩材料, $I_3 = 1$ 。

胎体和带束层是橡胶-帘线复合材料, 用 Rebar 材料模型来模拟。基体单元模拟橡胶的力学性能, rebar 单元模拟钢丝帘线的力学性能, 两者组合构成增强复合材料的单元模型。笔者采用 ABAQUS 中提供的定义单元的方法, 先将 rebar 单元定义在相应橡胶基体二维面单元上, 再将面单元嵌入到相应的橡胶实体单元内。Mooney-Rivlin 材料和 rebar 材料属性分别见表 1 和表 2^[8]。

表 1 Mooney-Rivlin 材料属性

橡胶材料	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	密度/ $(\text{t}\cdot\text{mm}^{-3})$
胎面	0.579 2	0.144 8	$1.112\times\text{e}^{-9}$
带束层	1.084 8	0.271 2	$1.144\times\text{e}^{-9}$
胎侧	0.524 0	0.131 0	$1.1101\times\text{e}^{-9}$
胎体	0.615 9	0.154 0	$1.058\times\text{e}^{-9}$
内衬层	0.140 4	0.427 0	$1.101\times\text{e}^{-9}$
三角胶	0.524 0	0.131 0	$1.133\times\text{e}^{-9}$
胎圈胶	11 500	2 870	$10.007\times\text{e}^{-9}$
子口护胶	0.726 3	0.181 5	$1.101\times\text{e}^{-9}$

表 2 rebar 材料属性

rebar 材料	杨氏模量/MPa	密度/ $(\text{t}\cdot\text{mm}^{-3})$	角度/ $^{\circ}$
带束层钢丝 1	110 530	$7.804\times\text{e}^{-9}$	67
带束层钢丝 2	110 530	$7.804\times\text{e}^{-9}$	-67
胎体帘线	2 710	$1.251\times\text{e}^{-9}$	0
胎圈钢丝	176 000	$7.804\times\text{e}^{-9}$	90

1.2 轮胎有限元模型

根据 205/55R16 型轮胎设计尺寸和结构特点, 画出二维截面几何模型并进行网格划分。为提高模型计算效率及避免出现网格畸变影响计算, 尽量采用四边形单元, 并在局部区域进行易于网格划分的分割处理。如胎侧和胎面交界区域由于曲率比较大、半径比较小, 易出现网格畸变, 笔者对其进行了较规整的切割, 并部分采用三角形网格。此外, 由于钢丝圈处杨氏模量极大, 后续动力学分析时, 临界时间步长一般取决于此处单元, 故该处网格尺寸不宜划分得过小, 否则将大大降低时间步长, 从而加大仿真成本。为与实际橡胶结构作对比, 笔者将不同区域分别以不同色差来区别, 所得

的轮胎二维模型如图 1 所示。

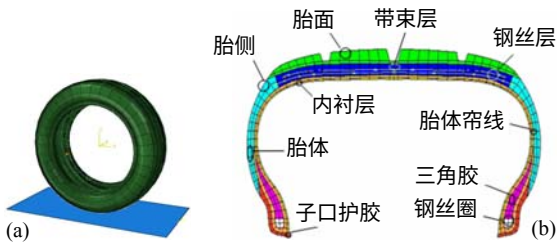


图 1 轮胎三维有限元模型(a)与二维截面(b)

在二维截面模型基础上将其旋转成三维模型。为了更精确地得到模拟结果且节省计算时间, 对接地区域附近的网格进行了局部细化。另外, 模型中考虑了轮胎的纵向花纹。在单元处理方面, 橡胶部件采用 8 节点线性完全积分常压杂交六面体单元(C3D8H)来模拟, 而模型中的每个刚性层则单独地划分成一层膜单元, 并采用 4 节点减缩积分四边形面单元(SFM3D4R)来模拟, 全胎共有 33 001 个单元, 37 832 个节点。最后, 通过 INP 文件将三维模型导入 ABAQUS 中与地面组成装配体。为提高计算效率, 将地面视为刚体, 并在轮胎中心点和轮辋边界处设置了耦合约束。

2 翘曲机理及翘曲指数

轮胎是通过与地面相互作用来进行工作的, 在滚动时接地印迹形状及胎面压力分布均会随着外部条件的改变而改变, 并伴随有翘曲现象的发生^[9]。产生这种现象的原因, 一方面是由于轮胎材料及几何结构的复杂性等因素导致接地部分刚度分布不均匀, 中间区域相对较小, 当承载过大的压缩负荷时, 则因不能抵抗变形而产生向上凹的趋势甚至翘离地面; 另一方面, 胎面接触区域沿滚动方向的切向摩擦力是成正弦分布且方向相反^[7], 即接地区域前半部分切向摩擦力向前, 接地区域后半部分切向摩擦力向后, 使得胎面橡胶材料向接地区域两端挤压变形, 从而造成纵向边缘区域抵抗变形能力加强, 表现为接地区域两端法向接触压力大于中间区域。图 2(a)为轮胎滚动状态下(初始条件见表 3)接地区域压强分布三维图, 由图可见, 靠近纵向接地两端区域的接地压力值较中间区域大, 曲线呈现下凹的状态, 即胎面发生翘曲。为便于量化翘曲度, 笔者提出了翘曲指数的概念, 取胎冠花纹纵向对称中心处的接地曲线为研究对

象, 定义为纵向两端法向压力最大值的平均值除以下凹处最小值(图 2(b)), 即:

$$\gamma = \frac{\sigma_f + \sigma_r}{2\sigma_m}$$

式中, γ 为翘曲指数, σ_f 和 σ_r 分别为纵向接地压力曲线两端最大值, σ_m 为纵向接地压力曲线中部下凹处最小值。

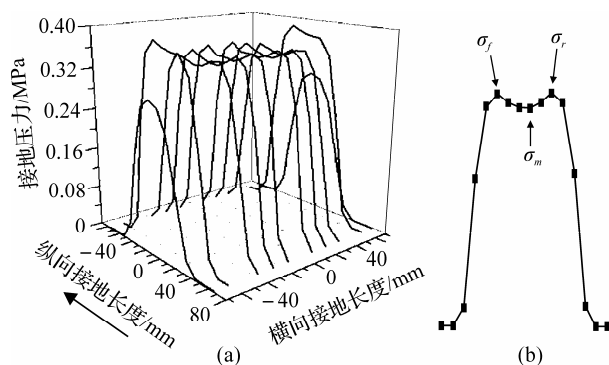


图 2 胎面接地印迹三维曲线(a)及翘曲指数(b)

3 参数对轮胎翘曲现象的影响

为便于比较分析, 将轮胎参数在表 3 所示的初始条件下, 使单一变量分别减少和增大各 25%, 保持其他参数不变, 观察翘曲指数 γ 的变化趋势。另外, 为便于说明和计算, 在计算翘曲度时, 取以接地印迹形态图中浅色线条所在节点的法向接地压力值为研究对象。表 3 参数中, 充气压力为轮胎内表面压强, 垂向载荷为施加在轮辋中心点上的压力, 滚动速度为轮胎直线运动速度, 摩擦系数作用于轮胎与地面之间。

表 3 轮胎初始滚动参数

充气压力/MPa	垂向载荷/N	滚动速度/(km·h ⁻¹)	摩擦系数
0.24	4 000	120	0.8

3.1 垂向载荷

在轮胎中心点分别施加 3 000, 4 000, 5 000 N 的垂向载荷, 得到接地印迹形态如图 3 所示(以下各图中的箭头表示轮胎滚动方向)。可见载荷较小时, 轮胎接地印迹近似为椭圆, 随着压力的增大逐渐变为矩形, 并且高压区域向横向和纵向边缘移动, 接地中心处受周围的变形挤压产生凹陷, 接地压力小于边缘部分, 发生翘曲现象。图 4(a)为胎面浅色纵向曲线所在节点接触压力随载荷的变化情况。可以看到, 接地长度和接地分布均随载荷的增

大而增大, 而曲线中间段的接触压强则呈现随载荷的增加而减少的现象。在翘曲方面, 当 3 000 N 时, 中间部分下凹幅度较小, 随着载荷的增大, 下凹趋势增大, 翘曲现象更明显。图 4(b)则证明此点, 随着垂向载荷的增大, 轮胎的翘曲指数呈非线性递增的趋势, 由 1.022 9 上升到 1.068 0, 并且随着载荷的增大, 翘曲指数变化减弱。

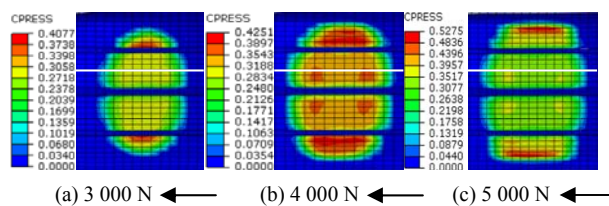


图 3 不同载荷作用下的接地印迹形态

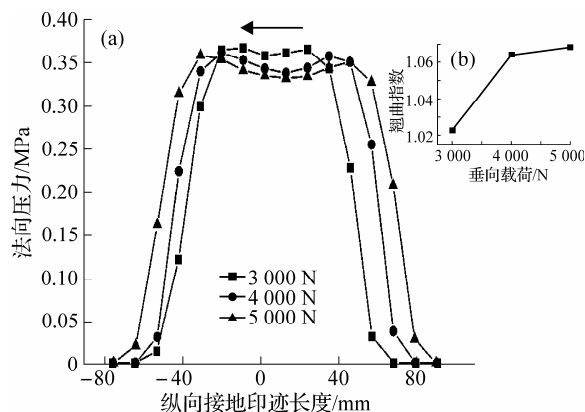


图 4 不同载荷作用下胎冠纵向法向应力分布曲线(a)及翘曲指数曲线(b)

3.2 充气压力

在轮胎内表面分别施加 180, 240, 300 kPa 的充气压力, 得到接地印迹形态如图 5 所示。可见随着气压增大, 接地区域减小, 最大接触压强增大, 由 0.383 0 MPa 增加到 0.546 1 MPa, 压力向接地中心集中。这主要是由于随着充气压力的增加, 轮胎的刚度增大, 相同载荷作用下轮胎的变形减小, 从而使轮胎接地面积减小, 接触压强增大。图 6(a)为胎面浅色纵向曲线所在节点接触压力随气压的变化情况。接地长度和接地分布均随充气压力的增大

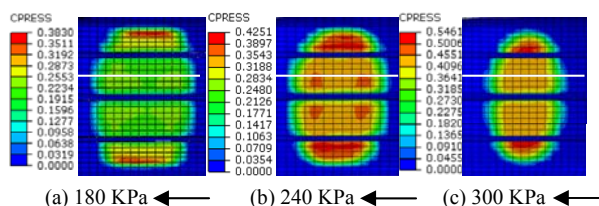


图 5 不同充气压力下的接地印迹形态

而较小, 而接地中段区域的接触压力增大, 并且曲线变平滑, 翘曲现象减弱. 由图 6(b)可证明此点, 随着充气压力的增大, 轮胎翘曲指数呈非线性递减的趋势, 由 1.0860 减小到 1.0268.

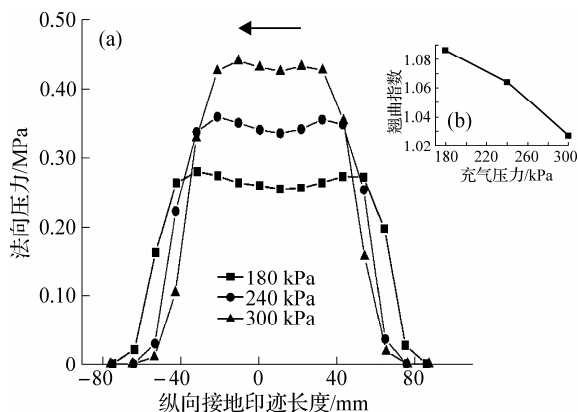


图6 不同充气压力下胎冠纵向法向应力分布曲线(a)及翘曲指数曲线(b)

3.3 滚动速度

在轮胎中心点分别施加 90, 120, 150 km·h⁻¹ 的滚动速度, 得到接地印迹形态如图 7 所示. 图中接地印迹和应力分布与静态相比有前倾现象, 并且最大接触压力增大. 由 0.4188 MPa 增加到 0.4300 MPa, 这主要是由于随着速度的增大, 胎面切向力增大的缘故. 图 8(a)是胎面浅色纵向曲线处节点接

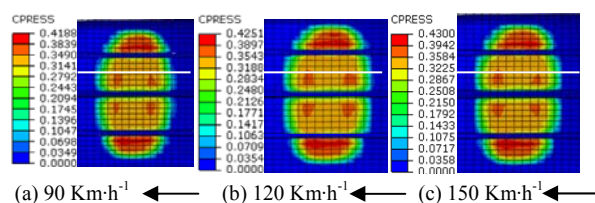


图7 不同车速下的接地印迹形态

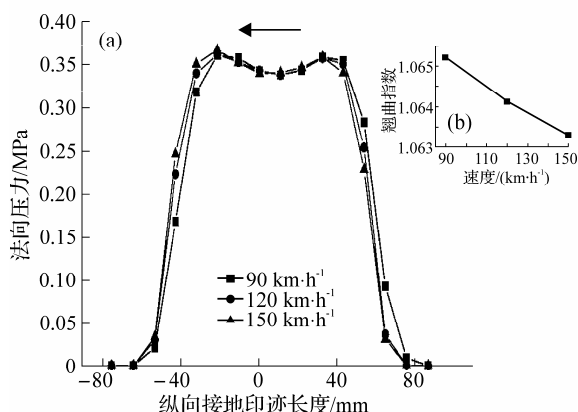


图8 不同速度下胎冠纵向法向应力分布曲线(a)及翘曲指数曲线(b)

触压力随速度的变化情况. 可见随着速度的增大, 其前倾现象增强, 在曲线前半段, 速度越大其接触压力越大, 后半段则相反. 图 8(b)则表明随着速度的增加翘曲减小, 由 1.0652 减小到 1.0633, 翘曲现象减弱. 这主要是由于滚动状态下, 轮胎的离心力引发了带束层帘线的附加拉伸应力, 并且速度越大, 拉伸应力越大, 带束层的箍紧作用加强, 从而使接地中心胎面的翘曲现象减弱.

3.4 摩擦系数

摩擦系数是轮胎与地面接触过程中不可缺少的外部因素. 分析图 9 和 10(a)可以看到, 随着摩擦系数的增大, 相同区域的接触压强增大, 这与实际中摩擦系数越大, 磨损越严重的状况是一致的, 但同时可以看到其对压力分布和变化率的影响都不大. 图 10(b)表明翘曲指数随摩擦系数的增大而增大, 由 1.0635 增大到 1.0642, 但影响不是很大.

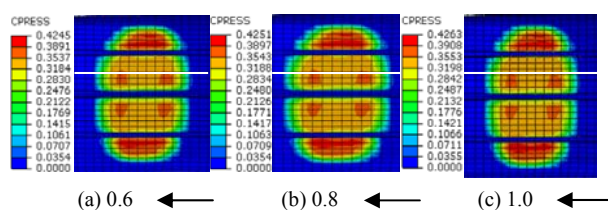


图9 不同摩擦系数下的接地印迹形态

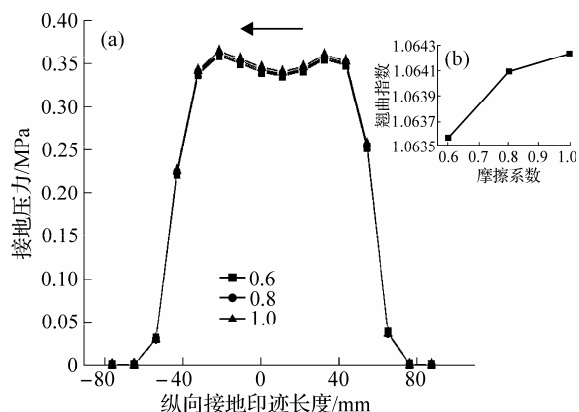


图10 不同摩擦系数下胎冠纵向法向应力分布曲线(a)及翘曲指数曲线(b)

4 翘曲指数分析

图 11 为各参数对胎面翘曲指数的灵敏度分析, 每个参数的数值沿着箭头方向依次为在原值基础上变化 -25% 以及 +25% 后胎面翘曲指数变化率, 即变化差值除以原值后得到的百分数, 箭头表示从 -25% 向 +25% 的变化方向. 为便于分析参照, 图中

横虚线表示根据表 3 数据计算各参数初始状态时的翘曲指数, 数值为 1.064 1。由图可见, 垂直载荷和摩擦系数对翘曲指数为正影响(翘曲随参数值的增大而增强), 充气压力和滚动速度对翘曲指数为负影响。并且垂直载荷、充气压力对翘曲指数的影响远大于滚动速度和摩擦系数。充气压力对翘曲指数的影响最大, -25%和+25%的变化率分别达到 2.056%和-3.502%, 摩擦系数的影响最小, -25%和+25%的变化率分别为-0.055%和 0.016%, 而垂直载荷对翘曲指数影响的不对称性最强, 其后依次是摩擦系数、充气压力和滚动速度。

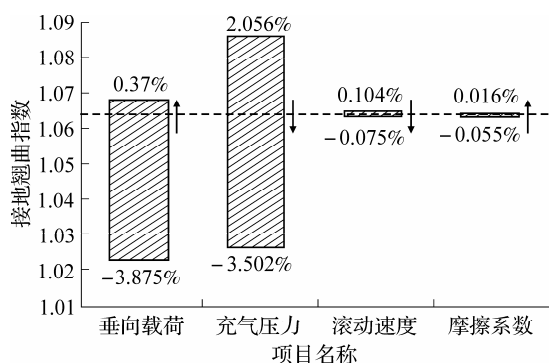


图 11 外部因素对胎面翘曲指数的灵敏度分析

5 结论

(1)定义了胎面翘曲指数, 用来表征胎面翘曲程度。发现影响轮胎胎面翘曲指数的主次因素依次为充气压力、垂直载荷、滚动速度和摩擦系数。

(2)充气压力和滚动速度的增大会减弱胎面翘

曲现象, 翘曲指数减小; 垂直载荷和摩擦系数的增大则会增强翘曲现象, 翘曲指数增大。

(3)在 $\pm 25\%$ 变化范围内, 垂直载荷对胎面翘曲指数影响的不对称性最大, 其后依次是摩擦系数、充气压力和滚动速度。

参考文献:

- [1] Sobhanie M. Road load analysis[J]. Tire Science and Technology, 2003, 31(1):19-38.
- [2] 闫相桥. 子午线轮胎稳态滚动的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2007, 27(6):323-328.
- [3] 赵国群, 程钢. 滚动轮胎接地性能有限元分析[J]. 中国机械工程, 2006, 17(1):104-108.
- [4] 王国林, 樊旭峰, 江浩斌. 外倾和侧偏联合作用下轮胎接地印迹研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(1):54-56.
- [5] Cho J R, Lee H W, Jeong W B, et al. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire[J]. International Journal Solids and structures, 2012, 27(2):86-96.
- [6] Ghoreishy M H R. Finite element analysis of the steel-belted radial tire with tread pattern under contact load[J]. Iranian Polymer Journal, 2006, 15 (8):667-674.
- [7] Liu F, Sutcliffe M P F, Graham W R. Prediction of tread block forces for a free-rolling tyre in contact with a smooth road[J]. Wear, 2010, 269:672-683.
- [8] 王长建. 复杂花纹子午线轮胎滑水仿真分析与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [9] 程钢. 子午线轮胎力学行为仿真及试验方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2004.

Quantitative Study on External Parameters of Tire Warping

YAO Zhen, HUANG Hai-bo*, WANG Chen, LU Bing-hua

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Warping factor is defined in this paper for investigating the tire warping phenomenon in contact patch. An FE model is built for semi-steel radial tire of type 205/55R16. The influence of load, inflation pressure, velocity and frictional coefficient on the tire warping is investigated and quantified using the signal variant analysis. The results indicate that the warping factor increases along with greater vertical load and frictional coefficient, but decreases as both the inflation pressure and rolling velocity are lowering. The influence degree on the tire warping can be listed in the descending order: vertical load, inflation pressure, rolling velocity and frictional coefficient. The results may render some design guidance for reducing tire wearing and enhancing vehicle maneuverability.

Key words: radial tire; warping factor; signal variant analysis; contact patch

(责任编辑 章践立)