

三角平衡轮廓轮胎振动模态的有限元分析

薛梓晨^{1,2}, 贺建芸^{1,2}, 唐霞^{1,2}, 丁玉梅^{1,2}, 杨卫民^{1,2}, 焦志伟^{1,2*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 轮胎设计与制造工艺国家工程实验室, 北京 100029)

摘要: 利用 Abaqus 有限元分析软件, 建立三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎的三维有限元模型, 研究三角平衡轮廓轮胎的固有频率和振型, 对比三角平衡轮廓轮胎与传统轮廓轮胎在轮辋和地面约束条件下的动态特性。结果表明, 相比传统轮廓轮胎, 三角平衡轮廓轮胎的固有频率较高, 具有低滚动阻力优势。

关键词: 轮胎; 三角平衡轮廓; 传统轮廓; 有限元分析; 固有频率

中图分类号: U463.314.4; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)02-0095-05

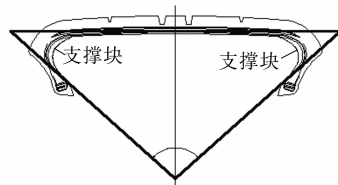
轮胎是汽车的重要部件之一, 其力学特性对汽车的行驶性能如操纵稳定性、安全性、平顺性和燃油经济性等都有极为重要的影响。随着汽车工业的发展和消费者对汽车产品要求的提高, 轮胎动态特性的研究工作越来越受到重视。传统的解析方法分析轮胎的振动特性时几乎都是将轮胎胎侧简化为弹簧, 胎冠当作各向同性材料的圆环来处理, 这种分析简化与轮胎的实际情况有很大出入, 分析结果很难具有工程实用价值。近年来采用有限元法分析轮胎结构力学成为轮胎研究领域的热点, 其中大多是采用 Abaqus 有限元分析软件对轮胎进行模拟分析。

本工作以 255/30R22 规格的三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎为例, 考虑橡胶材料的非线性和不可压缩性及帘线-橡胶复合材料的各向异性等因素^[1-2], 对其进行三维非线性有限元模拟仿真分析。边界约束对轮胎的模式参数有明显影响, 汽车行驶时需考虑轮辋和路面对轮胎振动的约束, 因此本工作主要研究和探讨三角平衡轮廓轮胎的模式参数对整车动力学性能的影响。

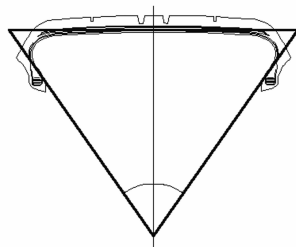
1 三角平衡轮廓

三角平衡轮廓是指以低扁平率的传统轮胎轮廓为基础, 通过增大轮胎自由状态下的断面水平轴到胎圈的距离、缩短着合宽度、在胎肩与胎侧的

内轮廓处增添高强度、耐高温和耐磨损的支撑块, 对轮胎轮廓进行优化。二维轮胎断面轮廓如图 1 所示。



(a) 三角平衡轮廓轮胎



(b) 传统轮廓轮胎

图 1 二维轮胎断面轮廓

由图 1 可以看出, 三角平衡轮廓轮胎在自由状态下胎面和胎侧区域内的胎体层断面轮廓呈等腰三角形, 且三角形的顶角远大于传统轮廓轮胎。当三角平衡轮廓轮胎处于标准充气压力工况时, 胎肩与胎侧所夹的支撑块不断地受充气压力的挤压, 由于支撑块硬度很高, 而胎侧胶很软, 因此支撑块挤压胎侧变形, 使胎侧部位的横向位移增大, 而胎冠中心线上的径向位移减小, 提高了周向刚性, 降低了高速行驶时的能量损失, 此时胎冠沿胎面横向被拉直, 且胎冠部的胎体帘线呈张紧状态。

作者简介: 薛梓晨(1989—), 男, 甘肃金昌人, 北京化工大学在读硕士研究生, 主要从事轮胎结构与仿真模拟研究。

* 通信联系人

当三角平衡轮廓轮胎承受负荷时,一方面高硬度的支撑块提高了胎侧的刚性;另一方面胎侧不断地被支撑块挤压,使胎冠的胎体帘线被张紧拉直,提高了胎冠的刚性,实现了胎冠和胎侧刚度的整体提高,从而使静负荷工况下轮胎的下沉量减小,实现翻转力臂的减小和真圆度的逼近,达到降低轮胎滚动阻力的目的^[3]。此外,三角平衡轮廓轮胎胎冠和胎侧较高的刚度与稳定的三角形结构使胎体层断面轮廓在滚动过程中基本不发生变化,提高了轮胎行驶的稳定性能;当轮胎处于漏气或零气压状态时,支撑块还起着承受车辆自身重力的作用,从而提高轮胎的安全性能。

2 轮胎有限元模型的建立和验证

2.1 材料模型的选取

轮胎中实体单元采用具有近似不可压缩性的超弹性橡胶材料模型表示,考虑各类帘线均为正交各向异性材料,冠带层锦纶帘线、带束层钢丝帘线和胎体聚酯帘线均采用 rebar 嵌入式单元处理,本研究采用 Yeoh 模型^[4],其应变能密度函数描述为 $W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$ 式中, W 为应变能密度函数,仅与主伸长比第一不变量 I_1 有关; C_{10} 、 C_{20} 和 C_{30} 为单轴拉伸或压缩、平面拉伸和等轴拉伸等简单试验测得的数据拟合而成的材料常数。

支撑块选用线弹性模型,其材料选用具有优异耐磨性能、优良抗撕裂性能和较高弹性的热固性聚氨酯弹性体。本研究取其杨氏模量为 510 MPa^[5],泊松比为 0.4。

2.2 接触算法

轮辋和路面定义为解析刚体,且胎圈与轮辋为过盈配合,胎圈与轮辋之间和胎面与地面之间的摩擦因数分别设为 0.3 和 0.5。在模态分析中,LANCZOS 向量直接叠加法是通过生成一组 LANCZOS 向量对运动方程进行缩减,然后通过求解缩减运动方程的特征值问题得到其特征解。由于该方法具有较理想的计算效率,因此本研究采用 LANCZOS 向量直接叠加法来求解线性方程组,得出固有频率和相应振型。

2.3 有限元模型的网格划分

利用 Symmetric Model Generation 功能,建

立三角平衡轮廓轮胎二维断面结构,如图 2 所示。为了降低收敛难度和缩短计算时间,忽略横向花纹沟,仅考虑纵向花纹沟,且选取标准轮辋 9J 进行装配。三角平衡轮廓轮胎的三维有限元模型有 39 574 个单元 69 934 个节点,如图 3 所示。

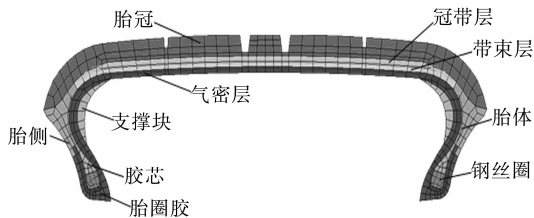


图2 轮胎二维断面结构

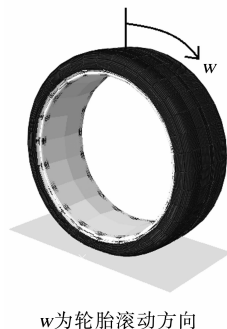


图3 轮胎三维有限元模型

2.4 边界条件及负荷的设定

充气压力为 290 kPa,对轮胎施加 5 520 N 标准负荷,由于轮胎结构的对称性及轮辋和地面对轮胎振动的限制,对轮胎进行模态分析时考虑轮辋与地面两部分的约束可使模拟的精度和结果的准确性大大提高,这种方法已经在模态分析领域取得一定的研究成果^[6-8]。由于胎圈部位受到轮辋和钢丝圈的约束,因此将钢丝圈中心线上所有节点除垂直方向外的 5 个自由度全约束,轮辋和地面设定为完全固定约束。

2.5 模型验证

采用目前较常用的在试验机上测试传统轮廓轮胎的下沉量-负荷曲线的验证方法进行模型验证,测试条件:温度 室温,充气压力 220 MPa,静负荷 5 650 N。有限元分析结果与试验结果对比见表 1,仿真值的误差控制在 7% 范围内,满足工程设计的要求。由表 1 可以看出,三角平衡轮廓轮胎的接地印痕面积明显小于传统轮廓轮胎,说明在相同试验条件下,三角平衡轮廓轮胎的

翻转力臂较小、真圆度较高,进一步证明了三角平衡轮廓轮胎具有低滚动阻力的优势。

表 1 不同轮廓轮胎有限元仿真结果与试验结果的对比

项 目	三角平衡轮廓	传统轮廓轮胎	
	轮胎仿真值	仿真值	试验值
印痕面积/cm ²	202.3	224.8	216.2
下沉量/mm	9.8	17.6	18.6
接地长度/mm	97	124	123
接地宽度/mm	230	223	215

3 模态分析

3.1 静止状态下的振动模态分析

轮胎的振动模态特性主要影响轮胎的乘坐舒适性和噪声,固有频率和模态取决于轮胎各部位的刚度和质量特性,通过调整轮胎的断面轮廓形状可以改变整体的刚度和质量。

轮胎的振动模态分析属于基本振动问题,从宏观分主要有横向振动模态、径向振动模态和周向振动模态,分别反映轮胎在不同振动频率下的横向变形、径向变形和周向变形。此外还有横向振动模态和径向振动模态的耦合振型。在汽车振动分析中,主要研究低频振动特性,因此,本研究模态分析截止频率为 180 Hz。

不同轮廓轮胎的固有频率特性曲线如图 4 所示,比较对象为规格型号相同但胎侧厚度和硬度不同的两条轮胎。由于三角平衡轮廓轮胎胎侧增添了高硬度的支撑块结构,使胎侧的厚度和质量提高,从而提高了横向刚度和径向刚度,因此三角平衡轮廓轮胎的固有频率较高。其原因是三角平衡轮廓轮胎的刚度增幅大于质量增幅。

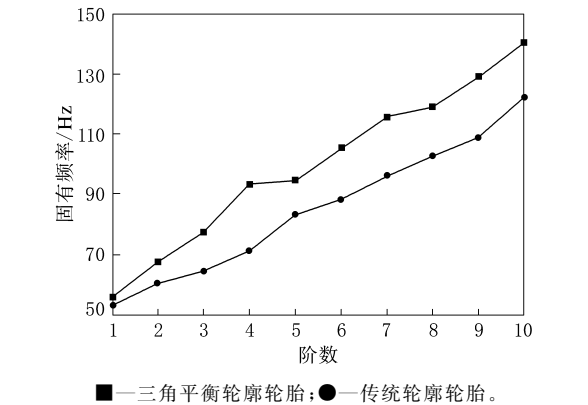


图 4 不同轮廓轮胎的固有频率特性曲线

3.1.1 横向振动

横向振动模态与轮胎的摆振有关,不同轮廓轮胎的横向各阶振动模态及对应的固有频率的仿真结果对比如表 2 和图 5 所示。

表 2 不同轮廓轮胎横向各阶对应的固有频率的仿真对比

阶数	三角平衡轮廓轮胎	传统轮廓轮胎
1	55.885	53.025
2	67.712	64.457
3	94.657	87.917
4	115.47	102.48
5	140.31	127.78

3.1.2 径向振动

径向振动模态与车辆的乘坐舒适性有很大关系,不同轮廓轮胎的径向各振动模态及对应的固有频率的仿真结果对比分别如图 6 和表 3 所示。

3.1.3 周向振动

周向振动模态对轮胎的周向滑移有很大影响,本次模拟仿真只得到了轮胎的周向 1 阶振动模态,三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎周向 1 阶振动固有频率分别为 77.248 和 60.366 Hz,仿真结果对比如图 7 所示。

由以上分析结果可知,三角平衡轮廓轮胎各向振动模态的固有频率均大于传统轮廓轮胎。

3.2 滚动状态下的振动模态分析

针对不同速度下 2 种轮胎固有频率的变化规律进行了模拟分析,结果如图 8 所示。由图 8 可见:前 2 阶三角平衡轮廓轮胎的固有频率低于传统轮廓轮胎;随着阶数的增大,三角平衡轮廓轮胎的固有频率逐渐高于传统轮廓轮胎;随着速度的提高,传统轮廓轮胎的各阶固有频率基本未发生改变,三角平衡轮廓轮胎的固有频率略有增大。这说明在车辆行驶的中低速阶段,轮胎转速对轮胎的刚性影响不大。

4 结论

采用 Abaqus 有限元分析软件对三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎的固有频率和振动特性进行模拟分析。研究表明,轮廓结构对轮胎刚性有较大影响,相比传统轮廓轮胎,三角平衡轮廓轮胎的固有频率有所增大,具有低滚动阻力优势。本

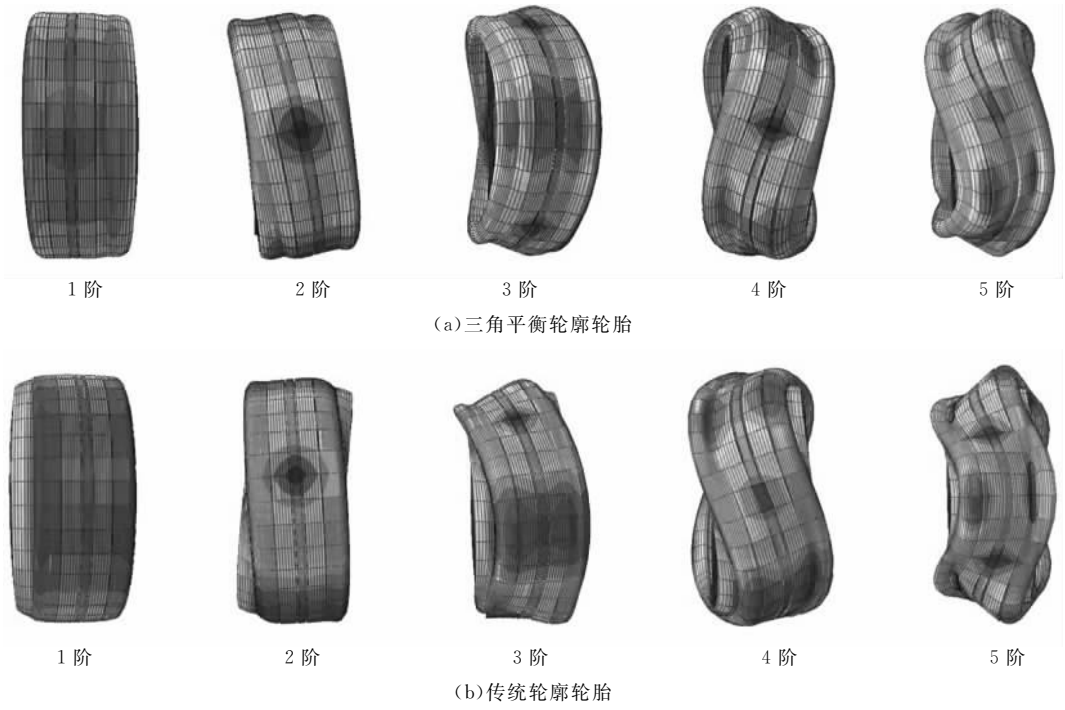


图 5 不同轮廓轮胎的横向各阶振动模式

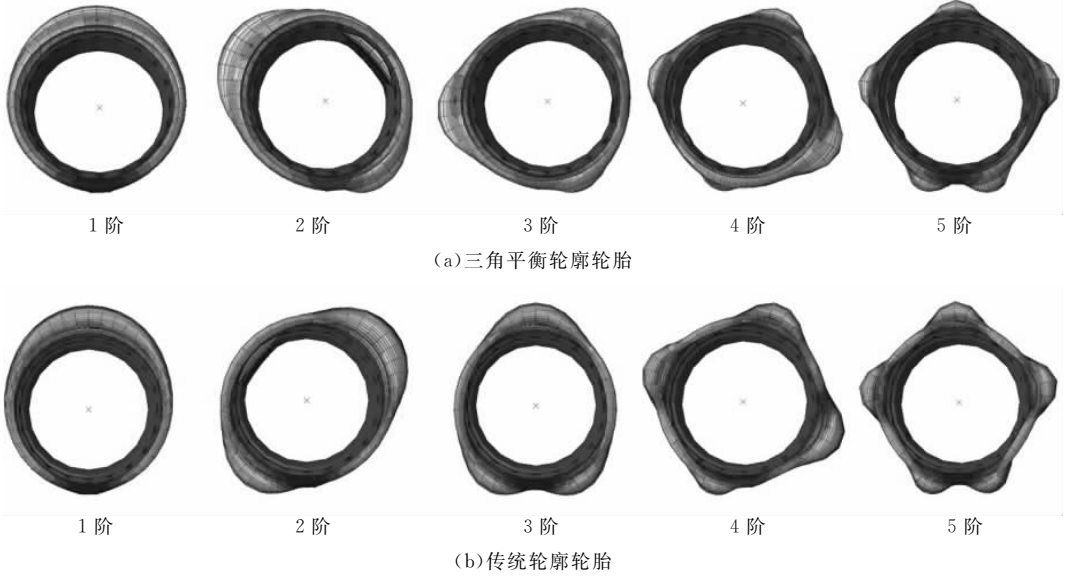


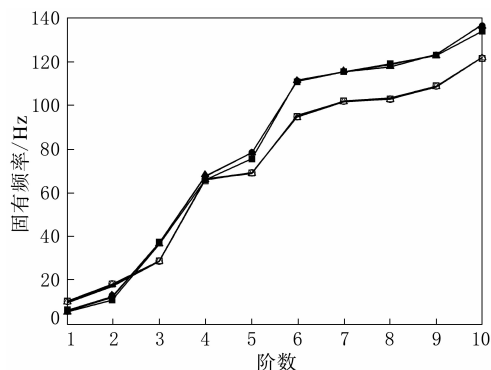
图 6 不同轮廓轮胎的径向各阶振动模式

表 3 不同轮廓轮胎径向各阶对应的固有频率的仿真对比

阶数	三角平衡轮廓轮胎	传统轮廓轮胎	Hz
1	93.244	71.285	
2	105.19	83.121	
3	128.94	96.010	
4	150.48	133.99	
5	164.77	147.87	



图 7 不同轮廓轮胎的周向 1 阶振动模式



三角平衡轮廓轮胎速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$): ■—30, ●—60, ▲—90;

传统轮廓轮胎速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$): □—30, ○—60, △—90。

图8 不同速度下2种轮胎固有频率特性曲线

研究结论可为轮胎结构设计和车辆设计及动力性能分析提供理论参考。

参考文献:

- [1] 冯森林, 吴长春, 毕凤荣. 基于三维均匀化方法的复合材料本构数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 30(6): 693-699.

- [2] 王迪, 马利, 方垒. 接触应力的混合求解法[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(4): 512-516.
- [3] 杨卫民. 轮胎设计与制造工艺创新的发展方向[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 39(2): 21-26.
- [4] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(8): 467-472.
- [5] 李俊, 陈晓东, 张海, 等. 采用 ABAQUS 对聚氨酯/橡胶复合轮胎应力场的有限元分析[A]. 中国聚氨酯工业协会第十五次年会. 上海: 2010: 420-423.
- [6] Huang S C, Su C K. In-plane Dynamics of Tires on the Road Based on an Experimentally Verified Rolling Model[J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21(4): 247-267.
- [7] Soedel W. On the Dynamic Response of Rolling Tires According to Thin Shell Approximations[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 41(2): 233-246.
- [8] Soedel W, Prasad M G. Calculation of Natural Frequencies and Modes of Tires in Road Contact by Utilizing Eigenvalues of the Axisymmetric Non-contacting Tire [J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 70(4): 573-584.

收稿日期: 2014-08-08

FEA on Vibration Modes of Triangle Balanced Profile Tire

XUE Zi-Chen^{1,2}, HE Jian-yun^{1,2}, TANG Xia^{1,2}, DING Yu-mei^{1,2}, YANG Wei-min^{1,2}, JIAO Zhi-wei^{1,2}
(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Process, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on Abaqus software, the 3D finite element models of the triangle balanced profile tire and the traditional profile tire were established. The inherent frequency and vibration model of the triangle balanced profile tire were studied, and the dynamic characteristics of both types of tires with rim constraint and road constraint were compared. The results showed that, compared with the traditional profile tire, the inherent frequency of the triangle balanced profile tire was higher, and the rolling resistance was lower.

Key words: tire; triangle balanced profile; traditional profile; finite element analysis; inherent frequency

一种氢化丁腈橡胶的制备装置及其制备方法

中图分类号: TQ333.7; TQ330.4+2 文献标志码: D

由张家港市进润彩印包装有限公司申请的专利(公开号 CN 104014283A, 公开日期 2014-09-03)“一种氢化丁腈橡胶的制备装置及其制备方法”, 提供了一种氢化丁腈橡胶的制备装置及其制备方法。该装置具有中空夹层可加热的筒体和置于筒体外侧的控制柜, 筒体外套设有保温套; 筒

体顶端设有进料口和催化剂进口; 筒体内悬挂搅拌轴, 搅拌轴一端伸出筒体与电机连接, 搅拌轴另一端连接搅拌叶片; 筒体底部设有氢气进口和排污口, 氢气进口通过管路连接曝气器; 筒体下半部设有出料口; 筒体顶端设有可监测筒体内压力和温度的压力表和温度计。该装置结构简单, 设计合理, 具有反应时间短、反应彻底、节能环保的特点, 可以提高生产效率。

(本刊编辑部 赵敏)