

有限元分析在轮胎结构设计中的应用

刘云鹏, 周 涛, 杨晓光

(万力轮胎股份有限公司, 广东 广州 510080)

摘要:详细介绍轮胎有限元模型的静力学分析建模方法, 并对235/50R19半钢子午线轮胎两个结构方案的充气轮廓和接地印痕进行对比。结果表明, 两个方案的充气轮廓基本没有差别, 而减小行驶面弧度高、调整带束层角度的方案接地印痕的形状和压力分布更优。有限元分析方法可为轮胎结构设计提供支持。

关键词:半钢子午线轮胎; 有限元分析; 结构设计; 轴对称模型

中图分类号: TQ336.1⁺1

文章编号: 1006-8171(2019)05-0263-05

文献标志码: A

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.05.0263

轮胎作为汽车与地面接触的唯一零部件, 其主要作用是承载负荷, 向车身传递驱动力、转向力和制动力, 以及缓冲车身振动, 是组成汽车结构、保证汽车正常运行不可或缺的零部件之一^[1]。

轮胎性能对汽车性能具有十分重要的影响, 汽车的许多重要性能, 如操作稳定性、行驶与制动的安全性、动力性、通过性等, 都与轮胎的力学特性密切相关, 同时轮胎性能还直接影响汽车的环保性和运输效率。对汽车这些性能的研究都依赖于对轮胎力学特性的研究, 并且车辆底盘控制系统的设计与分析、车辆系统结构和零部件的优化设计均建立在轮胎力学特性研究的基础上^[2-3]。

20世纪中后期, 有限元法被广泛应用到轮胎的工程设计和力学分析中, 作为一种行之有效的数值计算方法, 其主要方向是从静态分析向动态分析、从二维分析向三维分析发展。有限元法是结构分析中将连续问题离散化的一种近似解法, 它将物体分解成许多个有内在关系的子结构, 这些子结构被称为“单元”^[4]。假设已知在负荷作用下每个单元产生应力与应变, 则整体结构的应力与应变是由各个单元产生的应力与应变叠加而得到。有限元法可以逼真地模拟轮胎的实际形状, 对采用不同材料的轮胎各部位能进行计算, 对垂

直负荷作用下的应力与应变问题、非对称性负荷作用下轮胎的接触问题、接地区域的压力分布问题、动态下的应力-应变场等问题进行分析^[5]。

目前研究轮胎力学特性的模型主要有理论模型、半经验模型和经验模型, 这些模型都需要大量试验数据来验证, 但由于轮胎使用条件的复杂性, 对各种使用情况都通过试验方法来验证是不现实的^[6-10]。随着轮胎力学研究和计算机技术的发展, 有限元分析法已被逐步引入到轮胎研究和设计过程中, 以研究轮胎性能、进行结构参数分析和比较, 为轮胎合理设计提供依据。有限元分析可以有效模拟轮胎试验, 直接对轮胎有限元模型进行试验和参数分析。同时, 还可以通过有限元方法研究不同使用条件下轮胎力学特性的一般规律, 进而更好地验证理论模型、半经验模型和经验模型^[11-12]。

1 子午线轮胎有限元模型的建立

轮胎有限元模型是在精细描述轮胎物理结构基础上建立的模型, 通过测试获取轮胎所用骨架材料和橡胶材料的物性数据, 如弹性模量、泊松比和本构方程参数等。轮胎有限元模型能够比较真实地反映轮胎材料的物理特性, 从而进行轮胎的接触分析和内部结构受力分析等。

本工作以235/50R19半钢子午线轮胎为研究对象, 研究同规格轮胎两种结构方案对轮胎接地印痕的影响。该轮胎所用轮辋为7.5J×19, 设计

作者简介: 刘云鹏(1991—), 男, 河南信阳人, 万力轮胎股份有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎有限元仿真和车辆动力学研究工作。

E-mail: liuyunpeng@wanliti.cn

外直径为716 mm,断面宽为253 mm,标准充气压力为250 kPa,单胎最大负荷为775 kg,骨架材料为1层胎体、2层带束层和2层冠带层。与方案一相比,方案二减小了行驶面弧度高,调整了带束层角度。

在建立轮胎有限元模型时,由于需要考虑轮胎在工作时存在的几何、材料和边界条件的非线性,模型计算量较大且复杂,计算耗时长,因此需要在保证模型准确性的同时对模型进行合理的简化处理,例如轮胎花纹的组成比较复杂,在复杂花纹建模时省略花纹,用主沟代替。还有一些部件会存在角度很小的尖角,如果直接建模有可能造成模型计算不收敛,给后续工作带来不必要的困难,因此需要对角度很小的尖角进行适当的简化处理。

1.1 轮胎几何结构导入

向Abaqus软件中导入轮胎材料分布图,利用轮胎结构的几何对称性生成二维有限元模型,该方法不仅可以提高建模效率,同时可以避免模型定义出现不必要的错误。在建立轮胎结构三维模型时,也可以利用轴对称性生成三维模型。

1.2 网格划分

网格划分是有限元分析最重要的部分,由于轮胎结构的复杂性,其网格划分成为轮胎有限元分析的难点之一。在胎圈、带束层端点及带束层与胎体之间,不仅骨架材料相对集中,而且应力、应变的梯度也很复杂,因此这些位置不仅要求准确描述材料区域的边界,同时还要求网格尽量细分;三角形单元的精度很差,划分网格时应尽量使用四边形单元,需要嵌入rebar单元的网格应避免使用三角形单元;胎圈多为多边形截面,为了提高建模效率,应对胎圈部位进行适当简化。采用rebar单元模拟骨架材料的加强作用,将rebar单元定义为面单元,再将面单元镶嵌在对应的实体单元中(inp文件中用*EMBEDDED ELEMENT命令)。

网格划分完成后,需要对不同的单元选择单元类型。Abaqus提供了非常丰富的单元库,本工作对二维轴对称模型中的四边形单元选用CGAX4H(4节点可扭转轴对称杂交实体单元),其对应三维单元C3D8H;三角形单元选用CGAX3H

(3节点可扭转轴对称杂交实体单元),其对应三维单元为C3D6H;rebar单元选用SFMGAX1(2节点可扭转线性轴对称面单元)。

1.3 材料属性定义

235/50R19半钢子午线轮胎的结构如图1所示,主要由胎面、胎侧、带束层、胎体、胎面翼胶、冠带层、内衬层、三角胶、胎圈护胶和胎圈等部件组成。其中胎面、胎侧、胎面翼胶、内衬层、三角胶和胎圈护胶等使用性能不同的橡胶材料;带束层、胎体、冠带层和钢丝圈等使用帘线-橡胶复合材料。

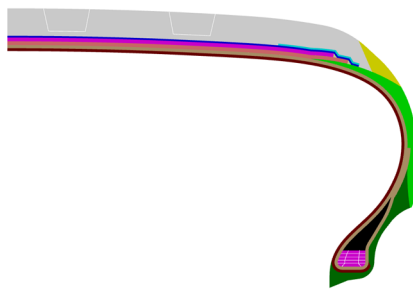


图1 235/50R19半钢子午线轮胎结构示意图

橡胶是一种非线性的不可压缩或近似不可压缩的超弹性材料,本工作采用通过Abaqus软件拟合出的Yeoh模型参数。胎圈钢丝和帘线均采用线弹性模型。帘线-橡胶复合材料采用加强筋(rebar)模型。

1.4 三维模型生成

上述步骤已完成二维轮胎有限元模型的建立工作,如图2(a)和(b)所示,利用重启动分析和Abaqus提供的*SYMMETRIC MODEL GENERATION命令生成三维模型,如图2(c)所示,利用*SYMMETRIC RESULTS TRANSFER命令向三维模型中传递二维充气数据。本工作在静力学计算时将轮胎150等分,约束方式为固定约束。轮胎三维有限元模型共有115 380个单元,127 892个节点。

1.5 接触、边界条件定义并求解

轮胎接触边界条件的模拟:在轮胎有限元分析中所讨论的静力学是一种非线性行为,本研究中轮胎与路面的静态接触是胎面与路面的接触,即面与面接触。在保证计算精度的前提下,把模型中的轮辋和地面简化为解析刚体。

轮胎充气压力加载模拟:模拟轮胎充气压力

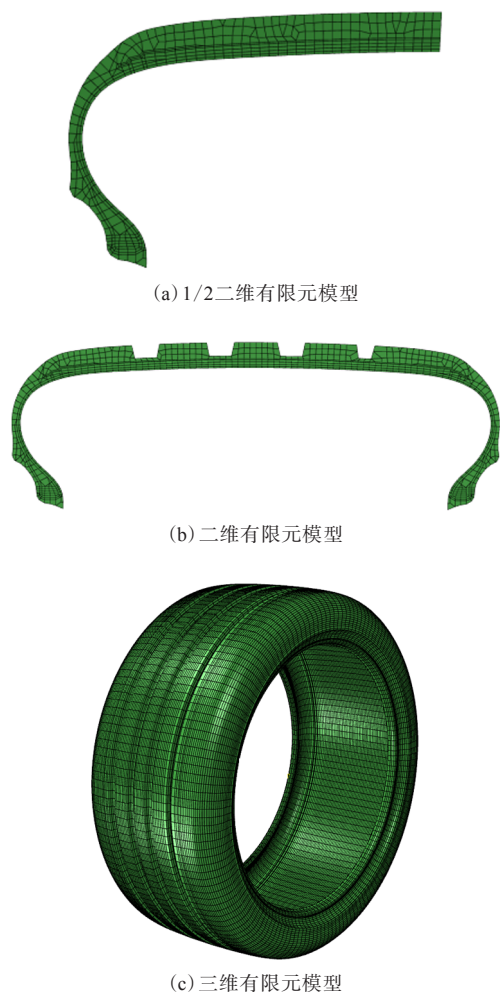


图2 轮胎有限元模型

只需要定义轮胎内轮廓受均匀分布的法向压力,轮胎在变形过程中始终受到垂直于内轮廓的压力。

静负荷加载模拟方式主要有4种:(1)固定路面,把力集中作用在轮辋上;(2)固定路面,在轮辋上作用位移;(3)固定轮辋,把力集中作用在路面上;(4)固定轮辋,在路面上作用位移。这4种加载方式的作用是等效的,但方式(4)的收敛性和稳定性较好,因此本研究先采用方式(4)进行预加载,再用方式(3)精确加载。对轮胎静力学模型添加边界条件和施加负荷后,利用Abaqus求解器进行有限元求解,根据求解结果可以得到同一规格轮胎不同结构方案下的印痕结果。

2 结果与讨论

2.1 不同结构方案轮胎的二维充气变形对比

轮胎的充气压力是通过作用在内轮廓上的均

匀分布负荷来实现,通过改变内轮廓分布负荷实现压力值的变化。方案一与方案二轮胎二维有限元模型充气前后对比如图3所示。

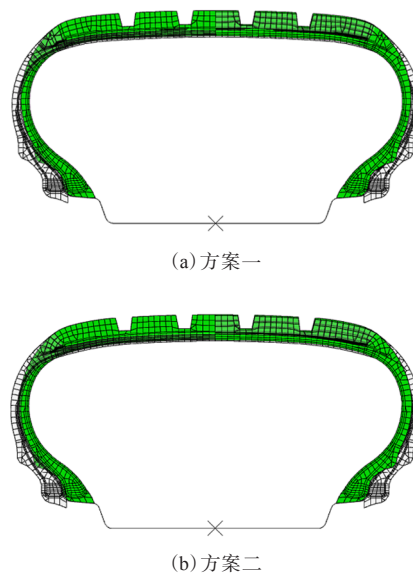


图3 方案一与方案二轮胎二维有限元模型充气前后对比

方案一与方案二轮胎充气轮廓尺寸对比如表1所示。从表1可以看出,两个方案仿真充气外径和断面宽仅分别相差0.002 3和0.739 4 mm。

表1 方案一与方案二轮胎充气轮廓尺寸对比 mm

项 目	方案一	方案二
充气外径	717.398 2	717.395 9
充气断面宽	242.324 4	243.063 8

2.2 不同结构方案对轮胎接地印痕的影响

轮胎与路面在接触区域相互作用,产生使汽车实现各种运动的力,因此接地印痕是研究轮胎力学特性的一项重要内容。

采用不开主沟的方法对轮胎的接地印痕形状进行仿真,方案一和方案二接地印痕有限元仿真云图如图4所示。由于没有主沟的干扰,该方法仿真结果可更直观地反映出轮胎接地印痕的形状。

从图4可以看出,两个方案接地印痕的形状和压力分布差别较大,方案二的接地印痕形状明显好于方案一。方案一的接地印痕长轴(轴向)长度约为183.82 mm,短轴(周向)长度约为130.25 mm,方案二的接地印痕长轴长度约为185.38 mm,短轴长度约为175.27 mm;方案一的最大压力为

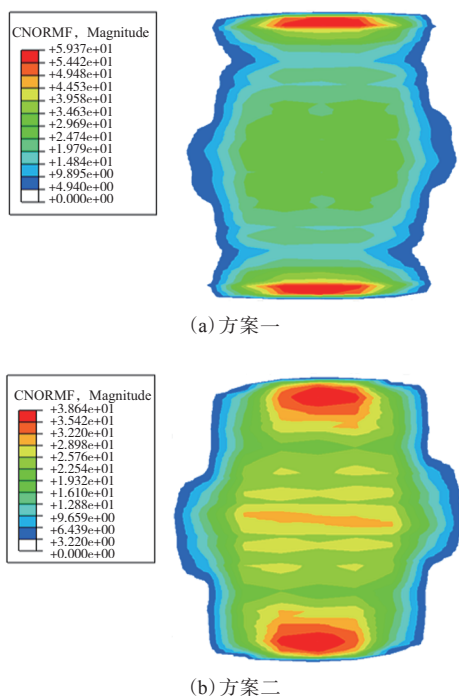


图4 方案一和方案二接地印痕有限元仿真云图(无主沟)
59.37 N,方案二的最大压力为38.64 N。

为更真实地仿真轮胎接地印痕区域的压力分布,采用开主沟的方法对轮胎进行仿真。方案一和方案二接地印痕有限元仿真压力分布云图如图5所示,接地印痕长轴方向有限元仿真压力分布曲线如图6所示。

从图6可以看出,在接地印痕区域内,方案一和方案二均在胎肩部位的压力分布最大,其中方案一胎肩部位的压力比方案二大,方案一最大压力为61.53 N,方案二最大压力为44.11 N,方案二总体压力分布比方案一均匀,方案一的压力分布主要集中在胎肩部位,容易导致轮胎偏磨。该趋势在图5中有更直观的体现,云图中红色最深的位置压力最大,蓝色最深的位置压力最小。

3 结论

详细介绍了轮胎有限元模型的静力学分析建模方法,通过对两个结构方案的充气轮廓和接地印痕的对比发现,两个方案的充气轮廓基本没有差别,而接地印痕的形状和压力分布差别较大,方案二的接地印痕压力分布更优,这与方案二的设计初衷是一致的,最终选取方案二作为优化结构方案。

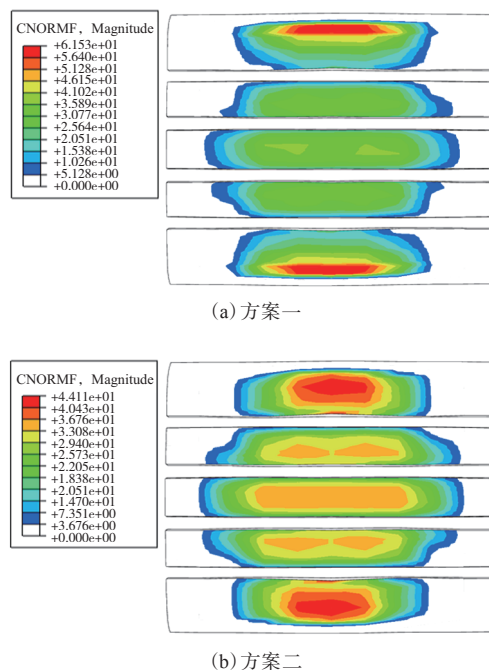


图5 方案一和方案二接地印痕有限元仿真
压力分布云图(开主沟)

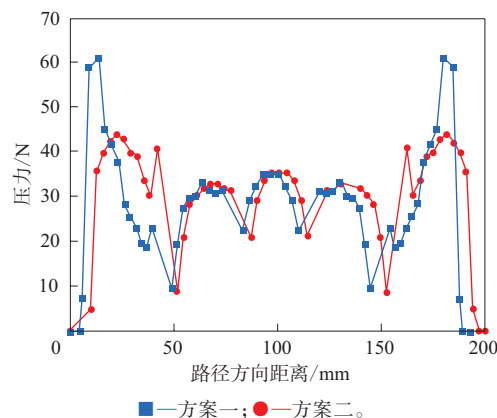


图6 接地印痕长轴方向有限元仿真压力分布曲线

参考文献:

- [1] 刘强. 全钢子午线轮胎振动仿真分析及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] 栗建民, 辛振祥, 晁春燕. 子午线轮胎的现状与发展趋势[J]. 橡塑技术与装备, 2003, 29(7): 14-18.
- [3] 朱俊. 我国汽车子午线轮胎的发展和未来[J]. 橡塑资源利用, 2009(2): 31-37.
- [4] 颜卫卫, 马铁军. 有限元法在汽车轮胎设计中的应用[J]. 橡胶工业, 2014, 61(1): 52-56.
- [5] 束永平, 陈秋红, 郑建荣. 载重子午线轮胎稳态滚动有限元分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 902-907.
- [6] 李福香, 张春颖, 邢正涛. 445/45R19.5超低宽基无内胎全钢载重

- 子午线轮胎的设计[J]. 橡胶工业, 2017, 64(3): 170-173.
- [7] 赵亚元, 王伟. 带束层参数对子午线轮胎胎面磨耗性能的影响[J]. 橡胶工业, 2017, 64(4): 232-235.
- [8] 王友善, 吴健, 向宗义. 三维花纹子午线轮胎有限元分析[J]. 轮胎工业, 2009, 29(6): 339-341.
- [9] 李丽娟, 刘锋, 杨学贵. 子午线轮胎接触变形的非线性有限元分析[J]. 合成橡胶工业, 2000, 23(5): 313-316.

- [10] 赵树高, 杨学贵, 邓涛, 等. 子午线轮胎接地问题的三维非线性有限元分析研究[J]. 轮胎工业, 2001, 21(11): 662-669.
- [11] 罗礼培, 王晓慧, 杨文波. 浅谈我国车用子午线轮胎发展现状及发展趋势[J]. 汽车工业研究, 2016(8): 41-44.
- [12] 哈斯巴根, 朱凌, 石琴, 等. 轮胎有限元建模过程优化及刚度特性仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015(7): 944-948.

收稿日期: 2018-12-24

Application of Finite Element Analysis in Tire Structure Design

LIU Yunpeng, ZHOU Tao, YANG Xiaoguang

(Wanli Tire Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The static mechanical characteristics analysis and finite element modeling of tire were introduced in detail, and the inflated profile and footprint data of two structure schemes for 235/50R19 steel-belted radial tire were compared. The results showed that, the difference of the inflated profiles between two schemes was small; however, the shape and pressure distribution of the footprint of the scheme with the reduced arc height of running surface and adjusted belt angle were better. The study showed that the finite element analysis method could provide support for tire structure design.

Key words: steel-belted radial tire; finite element analysis; structure design; axisymmetric model

东洋新Open Country H/T轮胎 具有双胎侧设计

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com) 2019年3月26日报道:

东洋轮胎美国公司为皮卡和SUV生产的新Open Country H/T II全天候公路轮胎具有双胎侧设计特点(见图1), 并采用新耐磨胶料。

该公司称, 新一代轮胎在Open Country H/T的质量和声誉的基础上采用了新技术和设计, 改善了

轮胎的湿地制动性能和操纵性能, 延长了胎面寿命, 提高了轮胎全使用寿命周期内牵引性能的均一性。

为改进做出贡献的是新耐磨胎面胶料, 可以延长轮胎寿命, 提高耐久性能。

自适应纵向花纹沟与扩展的胎肩沟槽组合的新专利胎面设计有益于在轮胎磨损寿命周期内始终提供优异的湿地性能。

4条宽纵向花纹沟和多重曲折刀槽花纹进一步加强了全天候性能。

Open Country H/T II轮胎还提供创新的双胎侧设计风格选择, 可随意定制符合车辆外观风格的轮胎: 经典或运动型。

东洋称, 经典设计保留了Open Country H/T轮胎的风貌, 可以吸引热爱上一代产品的人们。部分规格经典设计胎侧还带有凸起轮廓的白色字母。

运动型胎侧具有高对比度字体和迷人的风格化胎肩和胎侧, 适配于当今运动型和时兴的车辆。

该豪华全天候轮胎具有112 700 km (70 000英里) 胎面磨损担保和东洋轮胎805 km (500英里) 试驾支持。



(a) 运动型胎侧

(b) 经典设计胎侧

图1 Open Country H/T II 轮胎

(吴秀兰摘译 赵敏校)