

子午线轮胎静载特性的三维精细网格有限元分析

程冬冬, 刘臣才, 束永平*

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 基于 Abaqus 软件组合模型技术建立了带复杂花纹的子午线轮胎全局模型, 同时基于子模型技术建立了带束层的精细网格有限元分析子模型。分析对比结果表明: 子模型能更准确地反映带束层的受力特征; 在充气工况下, 胎冠中部带束层应力远大于边缘部位, 各截面内骨架结构受力分布关于轮胎中分面基本对称; 在静负荷工况下, 接地区胎冠部位帘线受力相对充气工况有所减小, 胎侧帘线受力有所增大, 帘线受力分布呈现出严重的不对称性。

关键词: 子午线轮胎; 带束层; 有限元分析; 子模型

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2014)12-0736-05

轮胎中一些几何形状复杂或刚度变化梯度很大的局部区域的有限元计算精度有待提高, 例如胎冠部的骨架结构复杂, 橡胶材料种类也很多, 这些部位的有限元网格需要合理细分^[1]。此外, 胎面花纹是轮胎直接与地面接触的部分, 是影响轮胎性能的重要因素, 但研究中常常简化花纹, 与花纹真实形状相差较大, 难以揭示其受力和变形特征。

带束层是子午线轮胎结构的核心, 承受了 60%~70% 的轮胎应力, 是子午线轮胎具有一系列优点的关键因素。本工作针对 12.00R20 全钢载重子午线轮胎, 采用 Abaqus 软件, 基于组合模型技术建立了带复杂胎面花纹的轮胎有限元模型, 并基于子模型技术分别建立了以 180° 和 0° 子午面为中心的 2 个区域的带束层有限元模型, 以实现对待束层部分的三维精细网格有限元分析。

1 子模型技术原理

众所周知, 无论求解对象的规模有多大, 有限元求解的是一个代数方程组:

$$KD=F \quad (1)$$

式中, K 为结构总刚度矩阵, F 为结构外负荷向量, D 为结构待求解位移向量。假设 D 中有一部分已知为 D_1 , 其余部分为 D_2 , 则式(1)可相应划分为

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将上式展开得

$$K_{22}D_2 = F_2 - K_{21}D_1 \quad (3)$$

由此可以看出, 对待求的 D_2 而言, 指定位移 D_1 已经成为求解 D_2 的负荷项的一部分, 即指定位移此时已转化为负荷项^[2]。

2 轮胎全局有限元模型的建立及验证

2.1 建模流程

基于组合模型法建立轮胎全局有限元模型, 主体是根据 12.00R20 轮胎真实结构, 各个部位分区在 hypermesh 中划分二维网格, 并赋予相应的材料属性, 然后利用 *symmetric model generation 命令沿周向旋转 360°。花纹部分采用一个基于类保角映射簇的胎面花纹建模方法^[3]。由于花纹较复杂, 为了便于提高计算精度, 花纹部分采用分块方式, 逐块建立完全的高质量六面体网格, 再将各块采用共节点方式连成一个整体。最后基于组合模型技术将二者用“tie”组合起来。建模过程及子午面位置示意如图 1 所示。最终三维模型共 71 650 个单元。

2.2 单元选择及模型简化

在轴对称模型和三维模型中, 轮胎橡胶材料分别选用 4 节点实体单元 CGAX4H 和 8 节点实体单元 C3D8H。轮胎的骨架材料带束层帘线、胎体帘线和带束加强层帘线采用 SFMGAX1 平面

作者简介: 程冬冬(1989—), 男, 湖北潜江人, 东华大学在读硕士研究生, 主要从事子午线轮胎有限元分析研究。

* 通信联系人

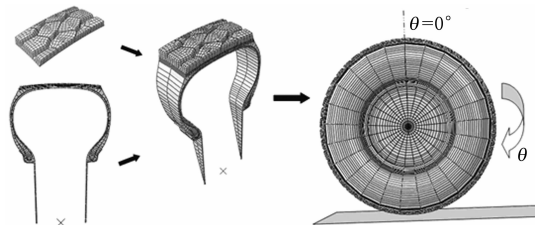


图 1 全局模型建模过程及子午面位置

膜单元模拟^[4], 钢丝帘线与橡胶基体之间的关系则采用 * rebar layer 和 * embedded element 来实现。

为减小计算量, 将轮辋与钢丝圈位置的节点采用共节点建模, 并将轮辋定义为一个刚体, 刚体参考点定义为轮辋中心。路面定义为解析刚体。

2.3 全局模型有效性验证

为了验证有限元模型的有效性, 计算了标准静负荷工况(充气压力为 0.84 MPa、负荷为 37.3 kN)下的断面宽度、外直径和静负荷半径, 并与 GB 9744—2007《载重汽车轮胎》中有关数据进行了比较, 如表 1 所示。由表 1 可以看出, 有限元计算的各参数与国家标准给出的数据误差均在 2% 以内, 一致性良好, 验证了模型的有效性。

表 1 有限元计算结果与国家标准对比				mm
项 目	断面宽度	外直径	静负荷半径	
GB 9744—1977	315	1 125	526	
计算值	321.273	1 130.42	530.996	
相对误差/%	1.99	0.48	0.95	

3 子模型的建立

确定子模型分割面的位置一般要满足两个条件: (1) 应力或变形梯度较小的位置; (2) 整体模型计算结果对该位置已足够准确, 即该位置的计算结果不再受结构中拟建子模型部位的网格进一步细化的影响^[1]。轮胎结构分析结果表明, 胎侧中部的应力和变形梯度都很小, 而且胎侧部位的位移很少受带束层部分网格划分粗细的影响。选择的子模型分割面如图 2 所示。

以 180° 和 0° 子午面为中心的 2 个区域的带束层三维子模型(分别记为子模型 1 和 2)如图 3 所示。子模型不仅在子午面内进行了细化, 在圆周方向也进行了细化, 在接地区与远离接地区部位, 分别包含 29 344 和 25 152 个单元, 而原模型相同

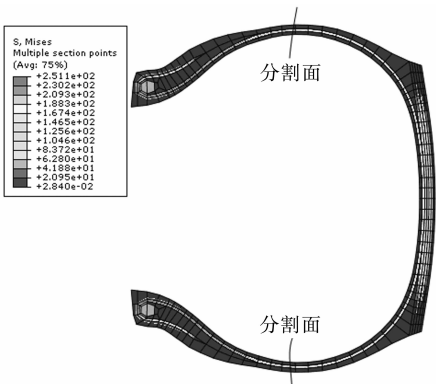


图 2 充气工况下轮胎子午面应力分布及分割面选择

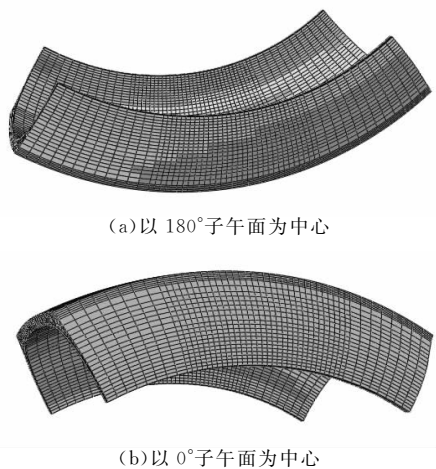


图 3 带束层三维子模型

部位分别只包括 1 910 和 1 528 个单元, 子模型单元数量远远多于全局模型。

4 带束层部分精细网格有限元分析

12.00R20 轮胎带束层部分的主要骨架结构在子午面的位置如图 4 所示。在表示骨架结构的受力分布时, 约定坐标原点取在对称面上。子午面内胎体帘线位置采用自然坐标 S 表示, $S < 0$ 为左, $S > 0$ 为右; 子午面内带束层帘线位置用 y 表示, $y < 0$ 为左, $y > 0$ 为右。

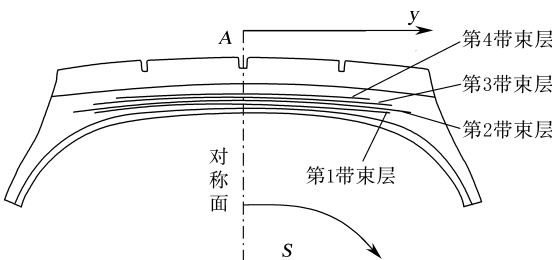


图 4 轮胎子午面内骨架结构分布

4.1 全局模型与子模型对比

静负荷工况下(充气压力为 0.84 MPa、负荷为 37.3 kN)子模型 1 与全局模型胎体帘线中部(图 4 中 A 点)沿周向的计算结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,全局模型与子模型 1 周向应力分布趋势大致相同,均关于 180°子午面对称。子模型 1 反映的应力变化趋势更为详细,说明精细网格子模型能得到比全局模型更加精确的结果。

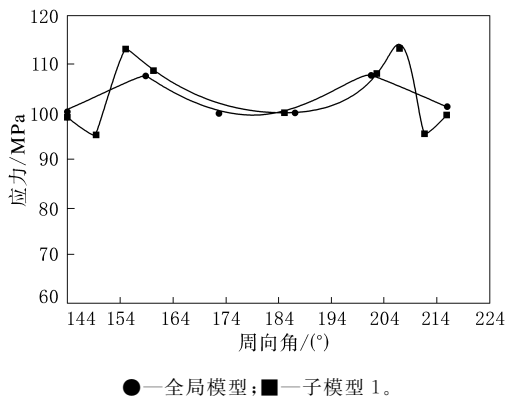


图 5 全局模型与子模型沿周向的等效应力曲线

4.2 胎体帘线受力

由子模型 1 分析得到的充气 and 静负荷工况下的胎体帘线轴力总体分布如图 6 和 7 所示。由图 6 和 7 可知:充气工况下,胎体帘线沿周向分布均匀,沿侧向分布不均匀,但关于轮胎中分面对称;静负荷工况下,胎体帘线沿周向和轴向的轴力分布都不均匀,关于接地中心对称,此外胎冠部位还出现少部分受压区域。

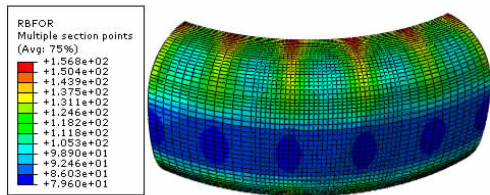


图 6 充气工况下胎体帘线轴力分布



图 7 静负荷工况下胎体帘线轴力分布

静负荷工况下(充气压力为 0.84 MPa、负荷为 37.3 kN)不同截面(0°, 151.2°, 180°和 208.8°)内的胎体帘线轴向应力分布曲线以及充气工况下 180°截面相应曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出:静负荷工况下 0°子午面内的胎体帘线轴向应力分布与充气工况基本一致;151.2°, 180°和 208.8°截面内的胎体帘线轴向应力分布与充气工况有明显差异,180°子午面内的胎体帘线轴向应力分布仍关于中分面对称,而 151.2°和 208.8°截面内的胎体帘线轴向应力分布彼此关于接地中心对称;在胎冠部,151.2°和 208.8°截面内的帘线轴向应力较大。

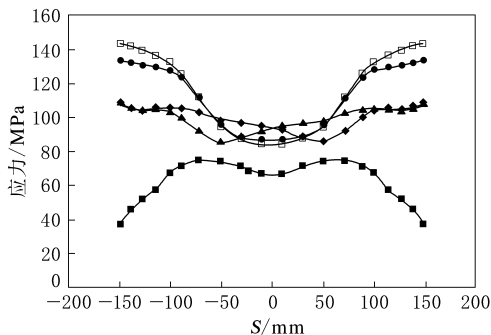


图 8 胎体帘线在不同截面内的应力分布

4.3 带束层帘线受力

充气工况下(充气压力为 0.84 MPa)各带束层帘线轴向应力分布的有限元计算结果如图 9 所示。由图 9 可以看出:虽然轮胎花纹关于中分面对称,但帘线轴向应力基本关于中分面对称;胎冠中部帘线轴向应力明显高于边缘部分;帘线角度对每层帘布层的受力影响很大,如第 4 带束层帘线角度为 5°的应力分布较均匀,且应力最小,其他几层带束层帘线角度较大,第 2 与第 3 带束层帘线角度相同,但是交错铺设,其受力特性也不同。

静负荷工况下(充气压力为 0.84 MPa、负荷为 37.3 kN)各带束层帘线轴向应力在 180°截面内分布的有限元计算结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,静负荷状态下,胎冠中部帘线受力较小,而边缘部位帘线受力显著增大,整个帘线受力更趋于平滑。

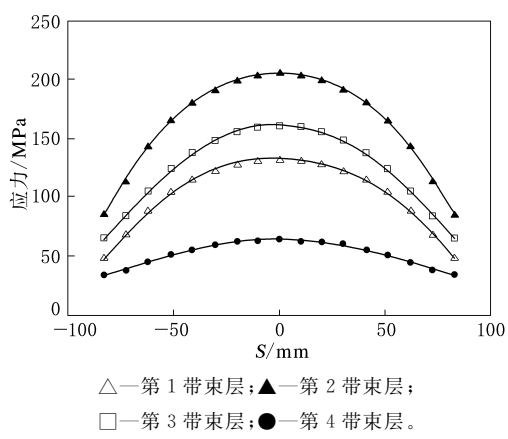
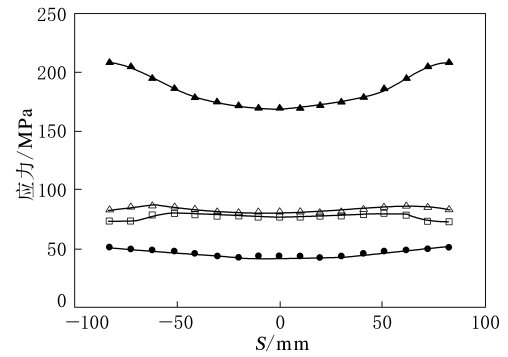


图 9 充气工况下带束层帘线的应力分布



注同图 9。

图 10 静负荷工况下 180°截面内带束层帘线的应力分布

考虑到第 2 带束层受力最大,对静负荷工况下不同截面(0°,21.6°,151.2°,180°和 208.8°)内的第 2 带束层轴向应力分布进行计算,并与充气工况下的曲线对比,如图 11 所示。由图 11 可知:静负荷工况下,0°和 21.6°截面内的第 2 带束层帘线轴向应力与充气工况基本相同,且关于轮胎中分面对称;而 151.2°和 208.8°截面内的胎体帘线轴向应力分布关于接地中心对称,自身呈现了严重的不对称性;接地对胎冠中部帘线受力有显著影响,使胎侧部位帘线受力增大。

5 结论

(1)针对 12.00R20 全钢载重子午线轮胎,基

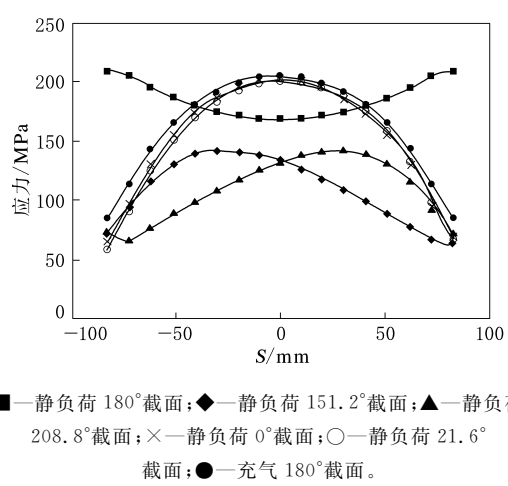


图 11 各截面内第 2 带束层帘线的轴向应力分布

于组合模型建立了复杂花纹的全局模型,基于子模型技术建立了带束层部分的精细网格有限元模型,验证了全局模型的有效性,同时证明子模型能更准确地反映骨架结构的受力特征。

(2)在充气工况下,胎冠中部带束层应力远大于边缘部位,各截面内骨架结构受力分布关于轮胎中分面基本对称。

(3)在静负荷工况下,接地区胎冠部位帘线受力相对充气工况反而有所减小,胎侧部位帘线受力有所增大,帘线受力分布呈现出严重的不对称性;在非接地区帘线受力分布情况与充气工况基本相同。

参考文献:

[1] 李炜. 子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.
[2] 谢素明,江渡,兆文忠. 提高计算精度的子模型技术及侧架实例[J]. 大连铁道学院学报,2000,21(9):1.
[3] 李兵. 计及复杂胎面花纹的子午线轮胎结构有限元分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
[4] 印海建,田旭东,石太平. 子模型技术在全钢载重子午线轮胎有限元分析中的应用[J]. 轮胎工业,2011,31(10):597-602.

收稿日期:2014-06-01

FEA of Radial Tire under Static Load by Using 3D Fine Grid

CHENG Dong-dong, LIU Chen-cai, SHU Yong-ping
(Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: A global finite element model of radial tire with complex pattern was established using

Abaqus software, and a fine grid finite element submodel of the belt was established based on submodel technology. Analysis and comparison results showed that, submodel could describe the force characteristics of the belt more accurately. Under inflated condition, the stress of crown central belt was much larger than that around edges, and the force distribution on the reinforcing materials was symmetrical. Under static load condition, the crown cord force in contact area was reduced compared with inflated condition, the sidewall cord force was increased, and the cord force distribution was rather asymmetrical.

Key words: radial tire; belt; finite element analysis; submodel

“米其林必比登挑战赛”领导者论坛隆重举行

中图分类号: F416.471; TQ336.1 文献标志码: D

2014年11月13日, 主题为“全球移动性的可持续发展”的“米其林必比登挑战赛”领导者论坛在成都隆重举行。论坛结合赛事期间发布的《米其林必比登挑战赛绿皮书》提出的5个挑战和5个应对策略, 从中国视角、全球趋势、能源战略和社会需求4个方面分享和探讨了中国的可持续和便利交通案例、全面实施所需的条件、削减温室气体和污染物给能源带来的影响和交通使用者的期待。

WTO前总干事Pascal Lamy先生指出, 尽管低碳、高效的运输系统在很大程度上和地方系统密切相关, 但是这些目标的全面实现仍旧需要一个全球化的条件, 其中包括多边二氧化碳排放的共识、多边可持续发展的标准、对于低收入国家的足够支持、开放贸易和新的独立方的合作。国际能源署执行总干事Maria女士从减排部署、新能源开发和市场激励的角度分享了其对能源战略的思考, 认为围绕减排、控排的总体目标应通过创新和大胆行动来实现, 并对未来充满信心。

中国中化集团公司(简称中化集团)总裁蔡希有先生表示, 论坛取得了如下共识: (1)《米其林必比登挑战赛绿皮书》中建议的五大变革措施是应对挑战、实现可持续发展的方向; (2)绿色低碳可持续交通是系统工程, 需要政府、企业、生产商、供应商等一系列参与者的共同努力; (3)树立低碳减排理念, 发展公共交通, 发展电动车, 鼓励自行车发展, 增加能源效率, 提高运输效率, 使用高科技

能源, 大力发展生物能源; (4)从我做起, 从现在做起, 真正促成变革的实现。

蔡希有表示: 在未来面前, 每一个人都是可持续发展的利益攸关者; 作为世界能源市场的重要参与者和中国领先的能源化工企业, 中化集团在橡胶工业领域拥有完整的产品线和突出的技术优势, 愿与包括米其林在内的世界主要轮胎企业以及所有利益相关者密切合作, 共同拥抱机遇, 携手应对挑战。

(本刊编辑部 肖大玲)

一种三元乙丙橡胶基电导非线性绝缘材料

中图分类号: TQ333.4; TQ336.4⁺2 文献标志码: D

由哈尔滨理工大学申请的专利(公开号 CN 103214747A, 公开日期 2013-07-24)“一种三元乙丙橡胶基电导非线性绝缘材料”, 涉及的三元乙丙橡胶(EPDM)基电导非线性绝缘材料由EPDM、非线性功能填料、气相法白炭黑、过氧化二异丙苯、硫黄和二苯甲酰对醌二胺组成, 其中非线性功能填料由纳米氧化锌、纳米二氧化钛、纳米碳化硅、碳纳米管、导电炭黑和纳米石墨组成。该非线性绝缘材料的交流击穿强度不小于 $30 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, 直流击穿强度不小于 $60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, 最大非线性因数为 $6 \sim 18$, 拉伸强度不小于 12.0 MPa , 拉伸伸长率不小于 260% , 主要用于高压复合绝缘材料, 解决了现有橡胶基电导非线性复合材料因非线性功能填料用量大而引起的击穿强度低的问题。

(本刊编辑部 赵敏)