

文章编号: 1004-4353(2019)02-0171-04

汽车轮胎与道路接触应力有限元分析

林旭, 李源, 陈国玉, 唐燕, 顾秉栋

(青海民族大学 交通学院, 青海 西宁 810007)

摘要: 利用有限元软件的接触单元和非线性分析技术, 建立汽车轮胎与道路接触的有限元分析模型, 研究了在一定胎压、车身自重及一定水平加速度的作用下, 轮胎与道路接触的应力及其应变分布情况. 研究结果表明: 轮胎接地部分接触应力最大, 轮胎两侧位移呈对称分布, 胎侧下端中部变形最为明显; 在轮胎周向, 横向变形从轮胎接触部分向胎圈部位逐渐过渡, 变形逐渐减小.

关键词: 有限元; 轮胎; 接触变形; 接触应力

中图分类号: O343.3

文献标识码: A

Finite element analysis of contact stress between automobile tire and road contact

LIN Xu, LI Yuan, CHEN Guoyu, TANG Yan, GU Bingdong

(School of Transportation, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China)

Abstract: The finite element analysis model of automobile tire and road contact is established by using the contact element and nonlinear analysis technology of finite element software. To study the stress and strain distribution of the tire in contact with the road under certain acceleration, tire pressure and vertical load. The results show that the contact stress of the grounded part of the tire is the highest. The lateral displacements of the tires are symmetrically distributed, and the deformation is most obvious in the middle of the lower end of the fetal side. In the circumferential direction of the tire, the lateral displacement gradually transfers from the contact part of the tire to the position of the tire rim, and the deformation gradually decreases.

Keywords: finite element; tire; contact deformation; contact stress

轮胎与地面的接触问题是研究汽车安全问题以及轮胎工作性能的重要内容之一. 随着汽车技术的不断发展, 汽车轮胎的使用条件日益苛刻^[1-2]. 轮胎在工作过程中受充气压力载荷、轮辋约束载荷、汽车自重及驱动力等作用, 载荷性质较为复杂. 另外, 由于轮胎材料是非均质各向异性材料, 而且轮胎在工作过程当中会发生大转动、大变形及横向剪切等^[3-5], 因此轮胎的应力和应变关系十分复杂. 目前, 很多学者基于轮胎理论经验模型对轮胎性能作了大量研究. 例如: 柳和玲研究了静态下轮胎与地面接触的变形状况, 结果表明当轮胎气压

一定时, 轮胎变形与载荷呈线性关系^[6]. 刘锋等以 9.00R20 子午线轮胎为例, 研究了在不同下沉量、内压、静摩擦系数的作用下, 轮胎与地面静态接触的位移和应力变化规律^[7]. 杜春娟基于有限元软件 ABAQUS 研究了子午线轮胎与地面接触的变形情况, 结果表明轮胎在垂直载荷作用下为扁平状, 胎侧应力较大^[8]. 本文以 60 系列 R15 型子午线轮胎作为研究对象, 利用有限元软件对子午线轮胎进行几何建模, 研究轮胎与道路接触的应力及其应变分布情况, 旨为轮胎设计提供参考.

收稿日期: 2019-02-28

作者简介: 林旭(1989—), 男, 助教, 研究方向为有限元分析.

1 轮胎的结构分析

1.1 本构模型

假定橡胶材料不可压缩,轮胎的弹性模量为 6 900 MPa,泊松比为 0.5,密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 因轮胎的橡胶材料为各向同性的超弹性材料,因此其应力-应变符合双参数 Mooney-Rivlin 模型,其应变势能函数方程为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3).$$

其中: $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ 为第 1 应力偏量不变量; $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$ 为第 2 应力偏量不变量; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为材料在某个方向的拉伸率; C_{10} 和 C_{01} 为橡胶材料的系数,本文利用硬度将橡胶材料的系数转化成弹性模量^[9-10],经计算得 $C_{10} = 0.567\ 523$, $C_{01} = 0.283\ 551$.

假设轮胎内的空气为可压缩气体,空气的初始密度为 1.22 kg/m^3 ,参考温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,摄氏温度与热力学温度的偏移值为 274;轮胎内的强化纤维为钢材料,其弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3.

1.2 结构分析

子午线轮胎为多层结构,由外胎、内胎、垫带 3 部分组成. 外胎由胎体、胎冠带束层、胎面花纹、胎侧等部分组成,其断面形状如图 1 所示. 胎面底胶和胎侧胶为各向同性,胎冠帘布层和胎冠带束层为各向异性^[11-12].

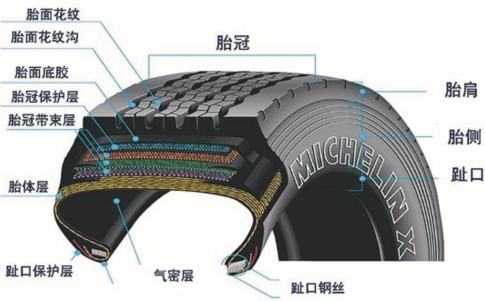


图 1 子午线轮胎断面结构示意图

轮胎在工作过程中,外胎与地面直接接触,因此在研究轮胎与道路接触问题时,只需研究胎冠表面与地面接触部分和胎侧变形即可. 本文在建立有限元模型时,对轮胎内部形状作出如下简化: ①为了防止出现畸形网格单元,将胎侧和其邻接材料相同的部分进行合并,并把狭长尖角改成倒角,防止单元变形严重影响收敛结果;②为了防止出现应力集中,保证能够顺利划分网格,在胎体层

和钢丝圈部位倒圆角,以使有限元模型平滑过渡; ③轮胎花纹会导致单元以及节点数剧增,因此为了减少计算量,节省计算时间,忽略轮胎花纹.

2 轮胎有限元分析

2.1 单元的选择

为了保证分析的精确性和可行性,本文在选择轮胎模型的单元类型时,按照轮胎各部件材料的本构规律来模拟. 由于轮胎存在各向异性材料,对胎体、厚壳体采用 SOLID186 单元建立有限元模型. SOLID186 由 20 个节点组成,支持大挠度、大应变、塑性变形、蠕变等,能够很好地模拟各向异性材料部位,可以保证有限元模型贴近胎内部的实际结构.

在建立有限元模型时,轮胎内的空气使用流体静压单元 HSFLD242 模拟,轮胎内强化纤维使用 reinf265 单元模拟,汽车重量采用 MASS21 质量单元模拟.

轮胎与道路的接触采用刚-柔接触模型进行模拟. 其中,将路面定义为刚性的目标面,目标单元采用 TARGE170 单元;将轮胎定义为柔性的接触面,接触单元采用 CONTA174 单元. 接触单元 CONTA174 和目标单元 TARGE170 通过共享一组实常数实现配对,形成轮胎与道路接触单元. 模拟道路与轮胎实际接触时,在刚性目标单元上施加载荷.

2.2 载荷的施加及其边界条件

为了减少模型的计算量,本文在处理边界条件时不考虑轮毂装配. 在路面单元各节点处施加固定约束,在轮胎内圈中心节点处约束 X、Z 向自由度. 在 Y 方向施加重力加速度 ($9\ 800 \text{ mm/s}^2$) 模拟轮胎自重;车身重量为 1.5 t,用 MASS21 质量单元模拟;轮胎充气压力为 0.24 MPa. 通过施加水平方向加速度模拟轮胎与道路之间的滚动接触. 由于轮胎与道路接触问题的有限元分析属于非线性、大变形分析,因此其计算求解时间较长,且计算结果是否能够收敛取决于模型中的网格密度、边界条件、荷载步等因素. 为了节省计算时间,本文在划分网格时,在保证精度的情况下尽量使网格稀疏. 实验时,按载荷步依次加载轮胎自重、车身重量、气压和加速度. 计算过程分为两个工

况:工况 1 是在考虑轮胎自重的情况下施加轮胎气压、车身重量;工况 2 是在工况 1 的基础上施加水平方向的加速度($1\,200\text{ mm/s}^2$).经过上述简化后建立的轮胎与道路接触的三维有限元模型如图 2 所示.

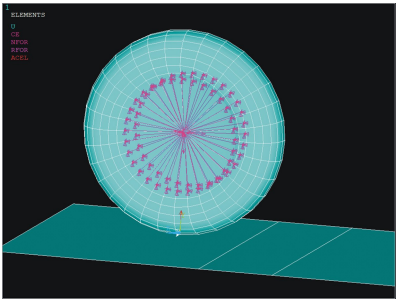


图 2 轮胎有限元模型

2.3 轮胎接触问题的有限元计算结果及其分析

轮胎的非线性特性包括几何非线性特性、材料非线性特性、非线性边界条件^[13].轮胎在充气气压的作用下,形状会发生显著变形,轮胎的应力与应变呈非线性关系.轮胎材料的有限元基本方程为 $[K(u)]\{u\}=\{P\}$.式中 $\{P\}$ 为结点外荷载矢量, $\{u\}$ 为结点位移矢量, $[K(u)]$ 为总体刚度矩阵.轮胎材料的有限元方程为非线性方程组,求解时按照非线性方程组的解法进行求解.

研究轮胎与道路的接触应力时,不仅需要考
虑轮胎运动和变形对接触状态、接触界面的影响,还需要考虑外荷载对节点载荷、接触面积以及接触压力分布的影响.因此,分析轮胎与道路的接触问题属于带约束条件的泛函极值问题.此类问题的计算方法有拉格朗日乘子法、罚函数法和基于求解器的直接约束法.因直接约束法不增加系统的自由度,因此本文采用直接接触法对轮胎与道路的接触情况进行求解.为了正确模拟轮胎与道路的接触界面,首先利用直接约束法探测出轮胎与道路可能发生接触的界面;然后通过节点追踪轮胎与道路的运动轨迹,并将接触时产生的运动约束和节点力作为边界条件直接施加在接触界面的节点上;最后利用接触迭代算法求解轮胎与道路的接触问题.

求解时,将轮胎与道路接触问题的计算选项定义为瞬态分析,并打开大变形开关.将轮胎承受载荷分为 5 个载荷步逐步加载,每个载荷步分为若干子步,并通过合理控制步长以避免步长过小

导致计算量太大或步长过大造成不收敛.为避免计算结果出现较大误差,收敛准则使用位移收敛准则和力收敛准则,收敛精度为 0.5%.收敛精度计算过程如图 3 所示.工况 1 按 4 个载荷步进行计算.计算结果显示:轮胎内圈有效应力最大,为 16 MPa(图 4);轮胎最大下沉量为 40 mm(图 5);轮胎有限元模型的胎侧部位向外膨胀突出(图 6);轮胎的最大横向位移为 4.8 mm.

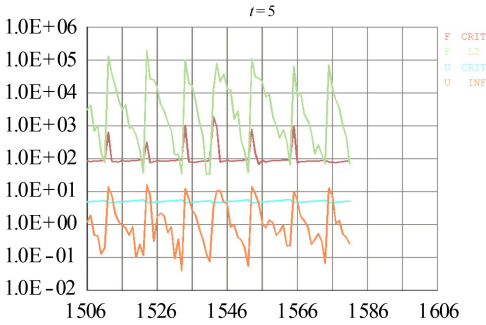


图 3 收敛精度的计算过程

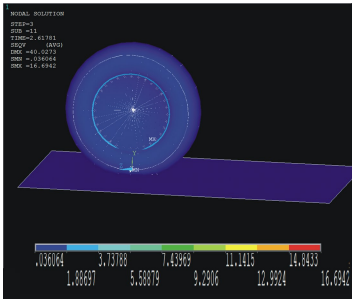


图 4 轮胎有效应力分析

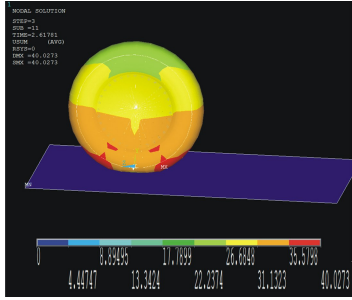


图 5 轮胎下沉量分析

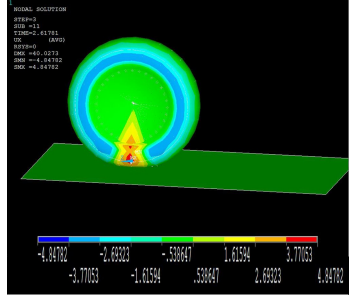


图 6 轮胎横向位移分析

工况 2 的有限元计算结果表明,轮胎内圈等效应力最大,为 24 MPa,如图 7 所示.由图 8 可以看出,轮胎周向的接触应力从轮胎接地部分向两边逐渐减小,呈对称分布,其中轮胎接地部分接触应力最大.由图 9 可以看出,轮胎与道路发生滚动接触后,轮胎被压成扁平状(两侧对称分布),轮胎周向的横向位移从轮胎接触部分向胎圈部位逐渐过渡,变形逐渐减小;其中胎侧下端中部变形最大,最大位移值为 23 mm.对比图 6 和图 9 可知,工况 2 的横向变形比工况 1 明显.

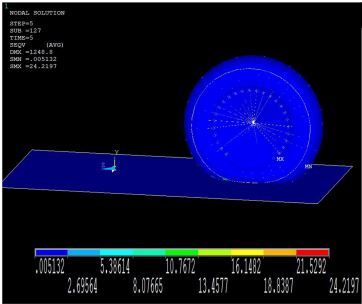


图 7 轮胎等效应力分析

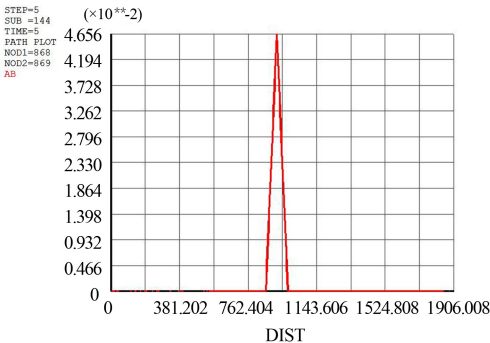


图 8 轮胎周向路径接触应力分析

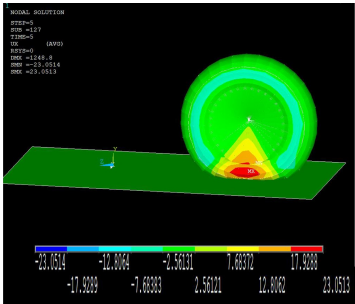


图 9 轮胎横向位移分析

3 结论

本文利用 ANSYS 软件,研究在轮胎气压、轮

胎自重、车身重量和水平加速度的作用下,轮胎与道路接触的应力及其应变分布情况.结果表明,轮胎内圈等效应力最大,为 24 MPa.轮胎与地面接触应力和横向位移在轮胎接地部位出现最大值,并且都以轮胎接地部位为临界点,沿周向呈对称分布.轮胎接地部分被压成扁平状,最大横向位移为 23 mm.从上述研究结果可知,在设计轮胎结构时要重点考虑轮胎接地部分产生的较大变形和高应力值.本文在建模过程中忽略了轮胎花纹和轮毂装配对轮胎与道路接触的影响,在后续研究中我们将考虑这些因素的影响,以得到更加接近轮胎工况的有限元分析结果.

参考文献:

[1] 王晓慧,罗礼培,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.

[2] 文兴,芥川惠,门田邦信.轮胎的未来发展趋势[J].现代橡胶技术,2016(2):15-18.

[3] 王克成.橡胶履带的性能与结构力学[J].世界橡胶工业,2011,38(7):25-33.

[4] 马晓.车辆充气轮胎[J].轮胎工业,2013(2):109.

[5] 刘肖英.基于有限元技术的高性能子午线轮胎力学性能研究[D].北京:北京化工大学,2014.

[6] 柳和玲.轮胎地面接触变形分析与试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.

[7] 刘锋,李丽娟,杨学贵.轮胎与地面接触问题的非线性有限元分析[J].应用力学学报,2001,18(4):141-146.

[8] 杜春娟.基于 ABAQUS 的子午线轮胎的非线性有限元分析[D].重庆:重庆交通大学,2012.

[9] 祝效华,王鹏飞,石昌帅.基于热老化实验的螺杆马达定子橡胶本构模型研究[J].计算力学学报,2017, 34(4):459-465.

[10] 左亮,肖维雄.橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数的一种确定方法[J].机械制造,2008,46(7):38-40.

[11] 杨望,徐向阳,付嵩.泄气保用轮胎工作原理及结构设计分析[J].科技创新导报,2017(18):100-100.

[12] 余航,陈自兵.汽车轮胎的有限元分析[J].中国高新技术企业,2016(36):131-132.

[13] 王国林,任洁雨,杨建,等.轮胎胎体轮廓设计对侧偏刚度的影响研究[J].机械工程学报,2015,51 (14):131-137.