文章编号: 1000-4750(2005)04-0196-05

子午线轮胎静负荷实验的有限元模拟

薛小香¹, ^{*}姚振汉¹, 尹伟奇¹, 李 鹏²

(1. 清华大学工程力学系,北京 100084;2. 北京橡胶工业研究设计院,北京 100039)

摘 要:建立了一种子午线轮胎的三维非线性有限元模型,来模拟子午线轮胎的静负荷试验。模型中考虑了橡胶 材料的非线性和不可压缩性、帘线-橡胶复合材料的各向异性、轮胎大变形导致的几何非线性以及轮胎与轮辋、 轮胎与路面的接触非线性边界条件。提出了一种单元重叠技术,通过重叠不可压缩橡胶单元和描述帘线的单元来 模拟帘线-橡胶复合材料,这种单元重叠技术产生的轮胎模型比正交各向异性模型计算过程更稳定。通过有限元 分析,得到了子午线轮胎在充气压力和静负荷作用下的变形和应力分布情况以及接地区的压力分布情况,并将计 算结果与试验结果进行了比较,两者吻合得很好。

关键词:子午线轮胎;有限元;帘线-橡胶复合材料;单元重叠;非线性;接触中图分类号:TB115 文献标识码:A

FINITE ELEMENT SIMULATION FOR STATIC LOAD TEST OF RADIAL TIRES

XUE Xiao-xiang¹, ^{*}YAO Zhen-han¹, YIN Wei-qi¹, LI Peng²

Department of Engineering Mechanics of Tsinghua University, Beijing 100084, China;
 Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100039, China)

Abstracts: A 3-D nonlinear finite element model was established to simulate the static load test of a radial tire. The nonlinear property and incompressibility of rubber materials, the anisotropy of cord-rubber composites, geometric nonlinearity due to large deformation of tire and the nonlinear boundary conditions resulting from the contact of tire with rim and road are considered in this model. A technique of overlaying elements representing two different materials, cord and rubber, to model the cord-rubber composites is proposed. The numerical model is shown to be more stable and efficient than those using orthotropic elements. The results of deformation and stress distribution of the radial tire under inflation and vertical load, and the contact pressure distribution of the ground-contact area by finite element analysis are presented and compared with experimental results. Good agreement is achieved.

Key words: radial tire; finite element; cord-rubber composite; element overlaying; nonlinearity; contact

轮胎结构的有限元分析^[1]是一项挑战性的工作,主要困难包括:(1)轮胎是由橡胶、帘线-橡

胶复合材料组成的复杂结构体,其中橡胶材料是一 种不可压缩的非线性超弹性材料,帘线-橡胶复合

收稿日期:2003-07-15;修改日期:2003-09-25

作者简介:薛小香(1975),女,陕西长安人,博士生,从事计算固体力学研究(E-mail:xuexiaoxiang99@mail.tsinghua.edu.cn); *姚振汉(1939),男,江苏常熟人,教授,博士生导师,从事计算固体力学研究(E-mail:demyzh@mail.tsinghua.edu.cn); 尹伟奇(1980),男,湖南邵阳人,硕士,从事计算固体力学研究; 李 鹏(1973),男,河南邓州人,工程师,从事轮胎结构研究。

材料呈现明显的各向异性;(2)由于轮胎大变形引 起的几何非线性;(3)轮胎与轮辋、轮胎与路面的 接触非线性边界条件。本文以 MSC.MARC 软件为 平台,建立了子午线轮胎 10.00R20 的三维非线性有 限元模型,模拟了轮胎的静负荷实验,即装配轮辋 充气 加静负荷的过程。

1 子午线轮胎的非线性特点

1.1 材料非线性

子午线轮胎^[2]的材料分布如图 1 所示,其胎冠、 胎侧、子口等部位使用的是硬度各不相同的纯胶; 胎体、带束层、子口包布和钢丝圈是一种帘线 - 橡 胶复合材料。

•橡胶材料

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^{[3][4][5]},其本构关系通常是从以应变 不变量或基本伸长率表示的应变能密度得到的,两 种常用的应变能密度函数为:

1) Mooney 型:

$$W = W_R(I_1, I_2) = \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{N} C_{mn}(I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n \quad (1)$$

其中 $C_{00} = 0$,表示开始阶段(无拉伸时)应变能为零,其中 I_1 、 I_2 分别是右 Cauchy-Green 变形张量

$$W = W_0(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_n \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2)$$

其中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 是三个基本伸长率。

W

常用的 Mooney-Rivlin 模型为:

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



图1 子午胎的材料分布图

Fig. 1 Material distribution of radial tires



Fig.2 Overlaid finite element

• 帘线-橡胶复合材料

轮胎中的帘线 - 橡胶复合材料是一种非常复 杂的材料,多数文献将其模拟成一种均匀正交各向 异性复合材料,其材料参数通常是通过简单的混合 公式(如 Halph-Tsai 公式^[6])得到,基体和帘线只能模 拟成线弹性材料。这种模型通常计算不稳定,充气 压力不到 20%迭代过程就很难收敛了,究其原因, 是由于帘线 - 橡胶复合材料的各向异性本构关系 矩阵中的各个量相差太大,这是由于橡胶基体和帘 线之间力学性质上很大的差异导致的。 为了克服计算不稳定的问题,本文提出了一种 单元重叠技术(如图 2 所示),用 8 结点不可压缩实 体单元来模拟橡胶基体,用 8 结点加强筋单元^[7,8,9] 来模拟钢丝帘线,这两个单元置于相同的空间位置 并公用结点,没有引入附加的自由度。通过这种方 法,可以将基体和加强筋分别用不同的本构关系来 描述,实验得到的组分材料的材料参数可以直接用 到分析中,并且基体和加强筋的应力状态可以分别 得到。这种方法虽然增加了单元数,但可以比较真 实地模拟帘线-橡胶复合材料的几何和物理非线 性性质,可以避免由于橡胶基体和帘线之间力学性 质上很大的差异导致的计算不稳定。

1.2 几何非线性

轮胎的几何非线性是由其工作时的大变形引起的,可采用全 Lagrange(T.L)方法,也可以采用更新的 Lagrange(U.L)方法。在大变形增量问题中,采用两种方法所得到的平衡方程在理论上是等效的,在实际应用中选择那种方法,大多数情况要看所采用的材料本构规律如何。在轮胎这类大变形增量问题中,有限元分析时通常采用T.L.方法。

1.3 边界条件非线性

轮胎的边界条件非线性体现在轮胎与路面的 接触、轮胎与轮辋的接触等。处理接触边界条件通 常用 Lagrange 乘子法、罚函数法、杂交元方法和混 合法、直接约束法。

直接约束法规定了接触体的运动,处理接触问 题时是跟踪接触体的运动轨迹,一旦探测出发生接 触,便将接触所需的运动约束(即法向无相对运动, 切向可滑动)和结点力(法向压力和切向摩擦力)作 为边界条件直接施加在发生接触的结点上。这种方 法对接触的描述精度高,具有普遍适应性,不需要 特殊的界面单元,并且可以模拟复杂的、变化的接 触条件。

2 子午线轮胎的三维有限元模型

在 MARC 中调入 CAD 中生成的子午线轮胎 10.00R20 的材料分布图,先生成二分之一子午面网 格(如图 3 中左图所示),由平面网格旋转拉伸生成 四分之一的三维网格(如图 3 中右图所示),并且对 可能发生接触的部位网格划分得比较细。该三维模 型采用了 8 结点实体单元,共有 17010 个单元、 14674 个结点。模型中橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 模型;帘线采用线弹性模型。为了解决橡胶材料的 不可压缩性,橡胶材料单元采用基于 Herrmann 公 式^[10]的不可压缩单元。该模型考虑了轮胎与轮辋、 轮胎与路面的接触边界条件以及对称边界条件,通 过直接约束法来解决接触问题,将轮辋和路面定义 为刚性体,给定轮辋沿轴向(X 方向)的位移,给定 路面沿径向(Y 方向)的位移(即下沉量)。

该模型先后施加以下三种载荷:

(1) 轮辋装配载荷:通过轮辋沿轴向的位移来 实现;

(2) 充气压力:施加在轮胎的内表面;

(3) 静负荷:通过路面的下沉量来实现。本文所要模拟的试验条件是气压为 0.81MPa、静负荷为 3000Kg(对应路面的下沉量为 33mm)。



图 3 轮胎的有限元网格

Fig.3 Finite element mesh of tire

该模型采用了全 Lagrange 格式的增量方法来 处理轮胎的大变形几何非线性,并考虑了随动载 荷。

针对轮胎的实际情况,该模型做了以下两点特 殊处理:

(1) 轮辋和胎圈的过盈配合:轮辋和胎圈的接 触是一种过盈配合,考虑到轮辋定位后的实际位置 和定位前的胎圈是相交的,本文的模型先将轮辋沿 轮胎轴线移动-40mm,使轮辋和胎圈有一定间隙, 再给轮辋定义一个沿轴向的位移40mm,通过定义 接触边界条件来真实地模拟轮辋和胎圈的配合。

(2)下沉量的模拟:实验中的下沉量是从轮胎充气后的胎面位置开始计算的,即充气过程中路面对轮胎没有约束,由于预先不知道充气后胎面的位置,本文中的模型将路面从胎面的初始位置沿径向向外移动 10mm(大于估计的胎面径向位移量),保证充气过程中路面对轮胎没有约束,将整个分析通过以下两个计算过程来完成:

过程 1:首先计算轮辋定位 充气过程,从而可以确定路面和充气后胎面之间的间距*d*₁,同时生成重启动文件。

过程 2:先使路面沿径向移动 *d*₁,即将路面移动到充气后胎面位置,最后将路面沿径向再移动一定的下沉量。

3 计算结果分析

图 4 显示了胎面位移随气压变化的关系,可以

看出胎面位移量和气压大小基本呈线性关系,并随 气压增大而增大。图 5 显示了不同阶段轮胎的整体 变形情况,图6显示了不同阶段轮胎接地区域子午 面的变形及等效 Cauchy 应力分布情况以及局部图。 可以看出轮辋定位后,胎圈部位向内收缩,充气后 轮辋和胎圈配合紧密,轮胎整体向外膨胀,加静负 荷后,接地部分受到路面的压缩,胎面上升,胎侧 向外膨胀,明显鼓出,整个轮胎的垂直方向(即 Y 方向)的位移都有所增大。从图 6 可以看出应力主要 集中在钢丝圈,其次是带束层边缘以及子口包布末 端,这和实际情况是相符的,胎圈和胎面的脱层属 于轮胎的主要破坏形式。图7结果表明,随着下沉 量的增加,接触区域扩大,接触压力增大,并且接 触区域为近似的四分之一椭圆形。图8结果表明, 随着下沉量增加,接触反力增大,并和下沉量近似 呈线性关系。



图 4 胎面位移随气压的变化情况

Fig.4 Variation of displacement with pressure at tread





(c)静负荷加载后 (d)局部图



Fig.6 Deformation and equivalent Cauchy stress distribution of the part of tire contacting road





at different deflection



图 8 路面接触反力随下沉量的变化情况



比情况。可以看出两者吻合得很好。

表1 充气后计算结果和试验结果对比

 Table 1
 Comparison of computing results and experimental

results	after	ınt.	latii	ıg
---------	-------	------	-------	----

充气后	外直径/mm	断面宽/mm	断面高/mm	胎肩宽/mm
标准	1053±0.5%	272±0.5%	/	/
实测	1052.55	269	270	209
计算	1053.95	278.73	269.3	209.986

表 2 静负荷(下沉量 33mm)下计算结果和试验结果对比

 Table 2
 Comparison of computing results and experimental results under vertical load

静负荷下	静半径/mm	断面宽/mm	断面高/mm	胎肩宽/mm
标准	/	/	/	/
实测	493	298	239	/
计算	491.5	305.25	236.3	/

表 3 接地区的计算结果和试验结果对比

 Table 3
 Comparison of computing results and experimental results in the ground-contact area

	接触反力/kg	印痕面积/cm ²	纵坐标长/cm	横坐标长/cm
实验	3000	518	26.1	20.3
计算	2789.7	515.93	28.9	20.4

4 小结

本文建立了一种子午线轮胎的三维非线性有 限元模型,模拟了轮胎的静负荷实验,模型中考虑 了橡胶材料的非线性和不可压缩性、帘线-橡胶复 合材料的各向异性、轮胎大变形的几何非线性以及 轮胎与轮辋、轮胎与路面的非线性接触边界条件, 并提出了一种单元重叠技术来模拟复杂的帘线-橡胶复合材料,计算结果表明利用单元重叠技术来 模拟帘线-橡胶复合材料是很有效的方法,轮胎的 充气过程和施加垂直负荷过程的迭代计算都很容 易收敛,并且计算结果和试验结果吻合得很好。

参考文献:

- Noor A K, Tanner A. Advances and trends in the development of computational model for tires [J]. Computers and Structures, 1985, 20: 517~533.
- [2] 俞淇,周锋,丁建平.充气轮胎性能和结构[M].广州:华南理工大学出版社,1997.

Yu Qi, Zhou Feng, Ding Jianping. The behavior and structure of pneumatic tires [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1997. (in Chinese)

- [3] Kim Y, Saleeb A F, Chang T Y P. Implementation of material stiffness coefficients in finite element applications to rubber [J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(4): 223~241.
- [4] Yoeh O H. Characterization of elastic properties of carbon black filled rubber vulcanizates [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 792~805.
- [5] 危银涛,杨挺青,杜兴文.橡胶类材料大变形本构关 系及其有限元方法[J].固体力学学报,1999,20(4): 281~289.

Wei Yintao, Yang Tingqing, Du Xingwen. On the large deformation rubber-like materials: constitutive laws and finite element method [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1999, 20(4): 281~289. (in Chinese)

- [6] Halph J C, Kardos J L. The Halpin-Tsai equations: a review [J]. Polymer Engineering and Science, 1976, 16(5): 629~639.
- [7] Helnwein P, Liu C H, Meschke G, Mang H A. A new 3D-FE-model of cord-reinforce composites, application to analyses of automobile tires [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1993, 14: 1~16.
- [8] Meschke G, Helnwein P. Large-strain 3D analysis of fibre-reinforced composites using rebar element: hyperelastic formulation for cord [J]. Computational Mechanics, 1994, 13(4): 241~254.
- [9] Sprenger W, Wagner W. On the formulations of geometrically nonlinear 3D-rebar-elements using of the enhanced assumed strain method [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 209~219.
- [10] L R Herrmann. Elasticity equations for incompressible and nearly incompressible materials by a variational theorem [J]. AIAA Journal, 1965, 3: 1896~1900.