

带束层对子午线轮胎均匀性影响的有限元分析

王晓明, 杨梅胜

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:以 ANSYS 通用分析软件为工具, 以载重子午线轮胎 9.00R20 为例, 采用层、体和接触单元建立子午线轮胎的三维有限元模型。分析在静态条件下子午线轮胎带束层厚度变化、左右偏移量以及局部密度变化对轮胎径向力波动和侧向力波动的影响。结果表明, 在一定充气压力 and 下沉量下, 轮胎径向力随带束层厚度增大单调增大; 侧向力随带束层偏移量变化具有方向性, 其绝对值单调改变; 径向力及侧向力基本不受带束层局部密度变化的影响。

关键词:子午线轮胎; 结构设计; FEA; 带束层

中图分类号: TQ336.1⁺1; U463.341⁺.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-890X(2004)01-0035-05

轮胎是一个由橡胶材料和橡胶基复合材料构成的复杂结构体。轮胎的分析设计理论发展先后经历了网络-薄膜理论、自然平衡轮廓理论, 从 20 世纪 80 年代以后新出现了一系列以有限元方法为基础的轮胎设计理论, 其中较为典型的理论有 RCOT, TCOT 及 CSSOT。另外, 在日本还有人提出过另外一些新的轮廓设计理论, 如山井雄健的“轮胎行驶时的接触地面理论”和丸桥囊司的“先进的 PSP-F 理论”等^[1]。有限元和计算机的引入从根本上改变了和正在改变着轮胎的分析方法和设计手段, 而分析方法和设计手段的转变使工程师有了更精确的依据和更充分的时间。轮胎结构的分析方法也从简化过甚的理论推算向数值模拟发展。

轮胎作为车辆与地面的唯一接触部件, 其性能, 尤其是均匀性对车辆的行驶性能和乘坐舒适性影响很大。所谓均匀性是指在静态和动态条件下轮胎圆周特性恒定不变的性能。就子午线轮胎而言, 对使用性能影响最大的是带束层^[2,3]。本研究应用 ANSYS 分析软件, 结合中型载重子午线轮胎 9.00R20 的具体结构, 就带束层结构变化(厚度变化、左右偏移和局部密度变化等)对轮胎

均匀性的主要指标(径向力波动和侧向力波动)的影响进行详细分析。

1 有限元分析假设条件

本工作进行的子午线轮胎有限元分析建立在如下基本假定和特性之上^[4~7]: 接触地面为刚性、轮胎材料的非线性、轮胎加载时的几何非线性和轮胎与地面接触的非线性。

1.1 充气轮胎材料的非线性特性

轮胎中的橡胶材料属近似不可压缩、各向同性的超弹性材料, 它能承受非常大的弹性变形, 其应力-应变关系表现出高度的非线性。其力学行为可用适当的应变能密度函数来描述。这种函数有 Rivlin 模型和 Ogden 模型等。Rivlin 模型为:

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

式中, I_1 和 I_2 为第一和第二应变不变量。

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

式中, λ_1 , λ_2 和 λ_3 为 3 个拉伸方向的伸长率, $\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$ 。

Rivlin 模型的三次方程(取前 9 项)为:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{02} (I_2 - 3)^2 + C_{12} (I_1 - 3) (I_2 - 3)^2 + C_{21} (I_1 - 3)^2 (I_2 - 3) + C_{30} (I_1 - 3)^3 + C_{03} (I_2 - 3)^3 \quad (2)$$

Rivlin 模型三次方程的简化形式为:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (3)$$

作者简介:王晓明(1948-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授, 工学博士, 主要从事测控技术、自动化、耦合场分析和应用方面的研究工作。

橡胶类超弹性材料的结构方程为:

$$S_{ij} = \partial W / \partial E_{ij} \quad (4)$$

式中 S_{ij} ——克希霍夫应力;

E_{ij} ——格林应变张量分量。

带束层是轮胎的主要受力部件。带束层帘线方向随带束层层数不同而改变,各层帘线的拉伸

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_f \varphi_f + E_r (1 - \varphi_f) \\ E_2 &= 4E_r (1 - \varphi_f) [\varphi_f E_f + E_r (1 - \varphi_f)] / [3\varphi_f E_f + 4E_r (1 - \varphi_f)] \\ G_{12} &= G_f (1 - \varphi_f) \\ \mu_{12} &= 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, E_1 和 E_2 分别为沿复合材料平板坐标系 1 和 2 方向的弹性模量; E_f 和 E_r 分别为帘线和橡胶的弹性模量; φ_f 为帘线的体积分数; G_{12} 为坐标系 1 和 2 平面内的剪切模量; G_f 为帘线的剪切模量; μ_{12} 为坐标系 1 和 2 平面内的泊松比。

根据轮胎中帘线-橡胶复合材料的结构特性,将帘线-橡胶复合材料垂直于纤维的平面近似认为是横观各向同性材料平面,该平面内的泊松比和剪切模量取传递应变的基体橡胶的泊松比 μ_r 和剪切模量 G_r , 故有 $E_2 = E_3$, $G_{12} = G_{13}$, $\mu_{12} = \mu_{13}$, $\mu_{23} = \mu_{32} = \mu_r = 0.49$, $G_{23} = G_r$ 。根据轮胎模型中分层复合材料单元的位置以及各层的几何和材料特性等,通过坐标转换,可以求得单元的等效刚度,并进一步计算单元应力等物理量。

1.2 充气轮胎加载时的几何非线性

轮胎几何非线性是由轮胎工作时的大形变引起的。可采用全 Lagrange 法,其矩阵形式可表示为:

$$([K]_0 + [K]_s + [K]_L) \{\delta_q\} = \{F\} \{T\} \{P\} \quad (6)$$

式中, $[K]_0$ 为切线刚度矩阵, $[K]_s$ 为初应力刚度矩阵或几何刚度矩阵, $[K]_L$ 为初位移刚度矩阵或大位移刚度矩阵, $\{\delta_q\}$ 为节点坐标增量矢量, $\{F\}$ 为体载荷矢量, $\{T\}$ 为面载荷矢量; $\{P\}$ 为应力在节点上的等价合力矢量。

1.3 充气轮胎加载时的接触非线性

接触问题属于带约束条件的泛函数极值问题。用于接触非线性的算法目前较为成熟的有 Lagrange 乘子法、罚函数法和直接约束法。在 ANSYS 软件中应用的罚函数法是对每一个约束引入一个事先指定的参数(罚参数),一旦接触区

模量不等,使得帘线-橡胶复合材料呈现出复杂的力学各向异性和非线性。本研究以复合材料力学中典型的 0° 排列平板模型为基础,结合轮胎中帘线-橡胶复合材料的力学特点,计算其材料特性参数。采用下列 Gough Tangorra 公式计算 0° 排列复合平板模型的材料特性参数:

域发生穿透,罚参数便夸大其影响,从而使系统的求解无法正常实现。换言之,只有在约束条件满足之后,才能解出有实际物理意义的结果。其接触势能 Q 可表示为:

$$Q = \frac{a}{2} \int_C \{g\}^T \{g\} dC \quad (7)$$

式中, C 为接触边界, $\{g\}$ 为接触间隙向量。

2 子午线轮胎有限元模型的建立

本研究以中型载重普通断面子午线轮胎 9.00R20 为例,为了真实反映子午线轮胎的实际情况,保证计算的可行性,以轮胎的胎冠、胎侧、带束层、胎体及胎圈为模型的基本框架。在建立轮胎有限元模型时,采用三维体单元和三维层单元的组合作模拟。轮胎中表现各向同性的胎冠和胎侧橡胶材料采用超弹性单元 Solid 185;带束层材料——各向正交异性的帘线-橡胶和胎体复合材料采用层单元 Solid 46;胎圈部位材料采用结构体单元 Solid 45。相对于轮胎胎面柔性材料,假设地面为刚性体。模型中采用面-面接触对来模拟轮胎与地面之间的接触情况,相应的单元为地面(目标面)TARGE170 和胎冠顶部(接触面)CONTA174。实际计算用的材料参数如表 1 和 2^[8,9] 所示。

胎圈采用钢的材料参数:弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3。图 1~3 为利用上述参数建立的轮胎有限元二维及三维模型。

3 加载及结果分析

3.1 约束条件

本工作着重研究静态条件下轮胎带束层结构等变化对均匀性的影响。分析中的约束条件如

表 1 带束层和胎体材料特性参数

项 目	带束层	胎体
E_x/Pa	9.32×10^{10}	2.83×10^{10}
E_y/Pa	2.76×10^8	3.7×10^7
E_z/Pa	2.76×10^8	3.7×10^7
G_{xy}/Pa	4.64×10^{10}	1.41×10^{10}
G_{yz}/Pa	9.4×10^7	1.26×10^7
G_{xz}/Pa	9.4×10^7	1.26×10^7
μ_{xy}	0.005	0.000 4
μ_{yz}	0.47	0.47
μ_{xz}	0.47	0.47
密度/ $(\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.035	2.185

表 2 胎冠和胎侧胶料的特性参数

项 目	胎冠	胎侧
C_{10}/Pa	7.70×10^5	9.35×10^5
C_{20}/Pa	-6.71×10^4	-1.90×10^5
C_{30}/Pa	9.55×10^4	1.84×10^5
泊松比	0.5	0.5
密度/ $(\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.025	1.125

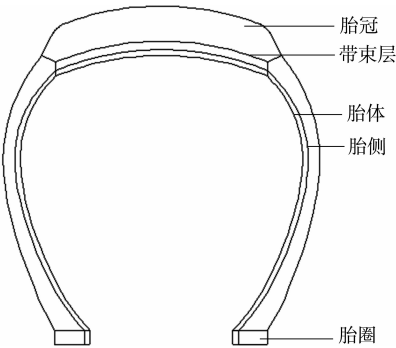


图 1 轮胎断面轮廓模型

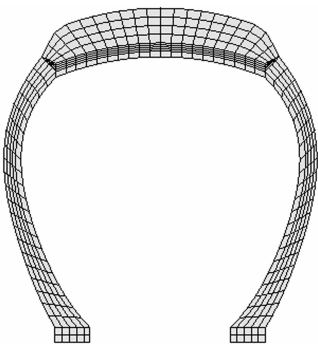


图 2 轮胎断面有限元模型

下:将轮胎胎圈上各个节点的位移 U_x 、 U_y 和 U_z 约束为零(也可将胎圈上所有节点耦合为一个节点,再将此节点的所有自由度位移约束为零),将目标面(地面)节点的位移 U_x 和 U_z 约束为零,从

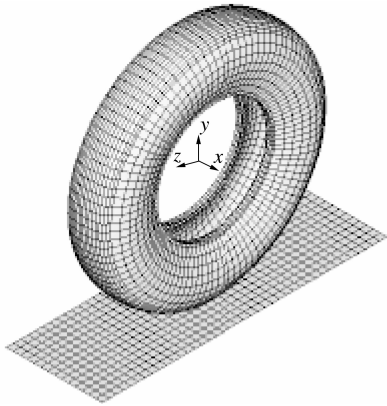


图 3 子午线轮胎与地面接触的三维有限元模型
而限制目标面只能沿 Y 方向,即与地面垂直向上移动。

3.2 加载步骤

第一步,空载轮胎内部充气。由于轮胎在充气过程中变形较大,为保证充气压力始终垂直于轮胎内表面以及分析数据的准确性,需要在此载荷步内应用多子步(50)逐步施加载荷。第二步,通过给出轮胎与地面垂直方向上的下沉量向充气轮胎加载。实际上,车辆通过轮胎与地面接触给地面的载荷表现为一定的下沉量;如果视轮胎固定,则地面相对轮胎表现为一定的上移量。为了确保分析数据的准确性,此载荷步内同样采用多子步(50)逐步施加载荷。在图 4 所示的模型中,通过地面上移实现对轮胎加载。

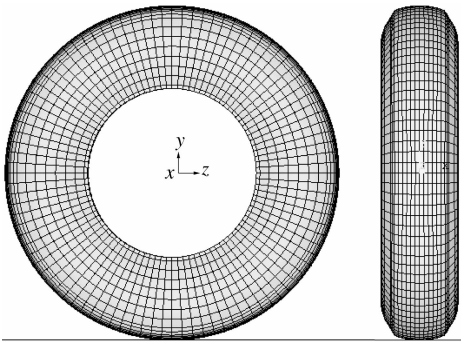


图 4 子午线轮胎加载后的有限元模型

3.3 结果分析

按实际使用要求选取充气压力为 0.45 MPa,下沉量为 12 mm,保持该加载条件不变,带束层结构及密度变化对轮胎均匀性指标——径向力波动和侧向力波动的影响如下。

(1) 带束层厚度变化

带束层厚度变化对轮胎均匀性的影响如图5所示。由图5可以看出,轮胎径向力随带束层厚度增大而单调变大;侧向力基本不随带束层厚度变化而变化。

(2) 带束层左右偏移

带束层偏移量对轮胎均匀性的影响如图6所示。由图6可以看出,轮胎径向力基本不受带束

层偏移量的影响,侧向力随偏移量绝对值的增大单调变大,变化有方向性和一定的对称性,即当带束层左右偏移时,侧向力方向相应随之改变。

(3) 带束层局部密度变化

首先进行密度减半的均匀带束层的作用力计算,然后将带束层沿圆周平均分为A、B、C和D四份,如图7所示,分析时每次将其中一部分密度减半,其余不变,发现径向力(X方向)均为10.08

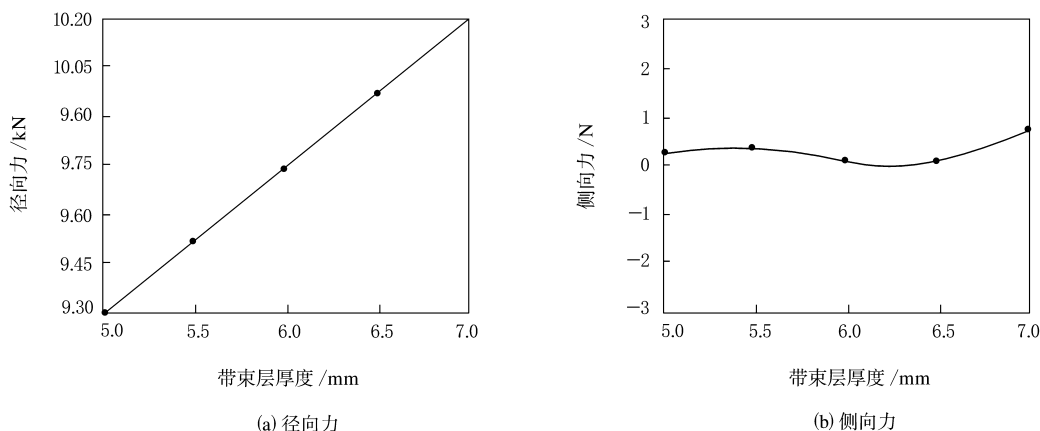


图5 带束层厚度变化对轮胎均匀性的影响

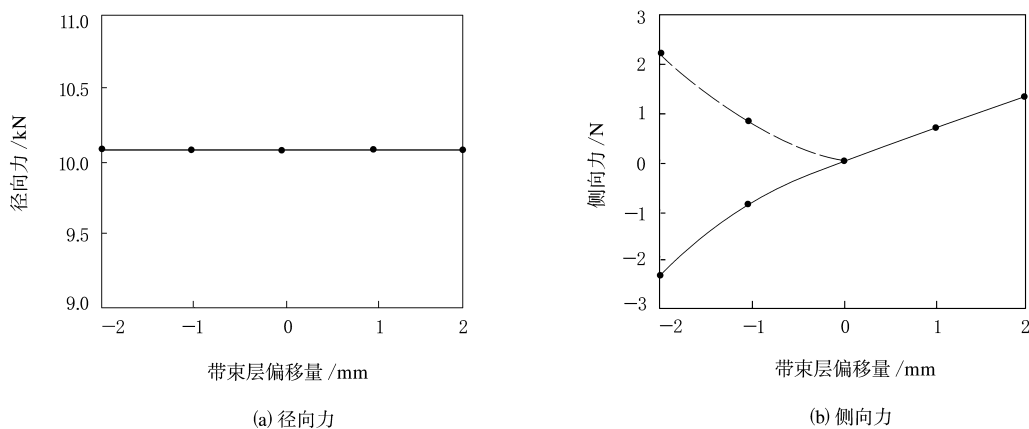


图6 带束层偏移对轮胎均匀性的影响

kN,侧向力(Y方向)均为零。由此可以看出,径向力及侧向力不随带束层整体或局部密度的改变而改变。

4 结语

就子午线轮胎带束层结构等变化对其均匀性的影响,本工作利用有限元分析软件进行了初步的探索性研究,主要结论如下:

(1) 子午线轮胎径向力随带束层厚度增大而提高;

(2) 侧向力随带束层偏移量增大而提高,且有方向性和一定的对称性;

(3) 径向力和侧向力不随带束层局部密度的变化而改变。

显然,如果沿轮胎园周的带束层厚度不均、带束层偏移量不同,将影响轮胎均匀性的径向力波

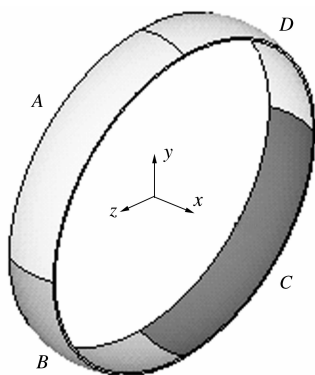


图 7 带束层整体或局部密度变化对轮胎均匀性的影响和侧向力波动指标。这些结论对子午线轮胎的制造,尤其对寻找影响子午线轮胎均匀性的制造因素有指导意义,人们可以从得到的子午线轮胎均匀性指标数据及其特点去追溯不均匀性的起源。

参考文献:

[1] 庄继德. 现代汽车轮胎技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001. 51-56.

- [2] 山井雄健. 日本大津轮胎公司提出载重子午线轮胎综合轮胎技术理论 I [J]. 刘蕴琰译. 轮胎工业,1990,10(2):29-31.
- [3] 美国固特异轮胎橡胶公司. 防止端部脱层的轮胎带束层结构[J]. 蔡惠才译. 轮胎工业,1990,10(7):45-52.
- [4] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black filled rubber vulcanizates[J]. Rubber Chem. and Technol.,1990,63(5):792-805.
- [5] Danielson K T, Noor A K, Green J S. Computational strategies for tire modeling and analysis[J]. Computers & Structures,1996,61(44):673-693.
- [6] Danielson K T, Noor A K. Three-dimensional finite element analysis in cylindrical coordinates for nonlinear solid mechanics problems[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997,27:225-249.
- [7] James M, Green J R. Application of a total lagrangian corotational finite element to inflation of a tire[J]. Int. J. Solids Structures,1997,34(27):3 541-3 570.
- [8] 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.
- [9] 李丽娟,刘 锋. 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.

第二届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文

Analysis for effect of belt on radial tire uniformity by FEA

WANG Xiao-ming, YANG Mei-sheng

(Haerbin University of Technology, Haerbin 150001, China)

Abstract: A three-dimensional FEA model has been built based on the practical structure of 9.00R20 tire by using layered elements, solid elements and contact elements, with ANSYS software. The model is used to analyze the effect of the gage, lateral deviation and local density in belt on the radial force variation (RFV) and lateral force variation (LFV). The results indicate that under certain inflation pressure and deflection, RFV of tire increases monotonously with the belt gage, LFV of tire increases monotonously and directionally with the lateral deviation of belt; and the change of local density in belt has little effect on both RFV and LFV.

Keywords: radial tire; structure design; FEA; belt

益阳橡机 GK250E 型密炼机出口欧盟

中图分类号: TQ330.4+3 文献标识码: D

2003 年 11 月 5 日, 益阳橡胶塑料机械集团有限公司与意大利莱茵公司正式签订了一台 GK250E 型密炼机的出口合同, 此举标志着该公

司的产品获得了出口欧盟的通行证。

该密炼机采用德国 GK 型密炼机技术, 主要用于树脂、塑料和硬橡胶制品及短纤维、CR 的混炼和终炼。

(益阳橡胶塑料机械集团有限公司 李四海供稿)