

子午线轮胎有限元分析

第6讲 子午线轮胎的有限元分析模型

洪宗跃, 吴桂忠

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82 文献标识码: E 文章编号: 1006-8171(2006)03-0187-05

子午线轮胎的材料和结构都比较复杂, 又有非线性特点, 给轮胎有限元分析带来非常大的困难。轮胎的橡胶材料具有大变形和近似不可压缩的超弹性。帘线-橡胶复合材料实质上是由作为增强相的帘线在基体橡胶中排列组成的刚柔相辅的复合材料, 呈现明显的各向异性。对于子午线轮胎而言, 胎体帘线呈径向分布, 带束层帘线斜向排列, 通常将这种材料看作正交各向异性材料或各向异性材料; 轮胎变形的大位移、小应变具有明显的几何非线性; 轮胎与轮辋以及轮胎与地面的接触非线性边界条件等都是轮胎有限元分析的难点。因此, 在轮胎的有限元分析中建立合理的模型可为提高分析的准确性提供极大的帮助。

目前越来越多的有限元软件(例如 Marc 和 ABAQUS 等)具有先进和现代计算机超强的建模能力, 使我们能建立比较真实的轮胎模拟模型。本文将介绍轮胎有限元分析模型建立的技术实例, 该模型是在 MSC 公司的非线性有限元分析软件 Marc 上运行的。

在以往的研究中, 比较注意材料模型的选择和计算模型的合理简化。

(1) 材料模型的选择。轮胎由胎面胶、胎肩胶、胎侧胶、气密层胶、胎圈护胶、三角胶、带束层、胎体、钢丝圈和胎圈包布等组成, 结构非常复杂, 文献中大多对橡胶基体和帘线分别定义。橡胶基体采用 Mooney-Rivlin 型的非线性弹性材料模型, 帘线采用线弹性模型。帘线-橡胶复合材料的有限元分析模型主要有层合壳模型和加强筋模型两种。层合壳模型的理论基础是纤维增强复合材

料的力学理论, 复合材料的各组成部分在同一单元中或同一层内的性质用平均值代替, 可用正交各向异性或一般各向异性来描述。该模型的优点是概念清晰, 但由于采用了平均值, 而且各层材料的正交各向异性材料参数通常是通过简单的混合公式(如 Halph-Tsai 公式)得到, 复合材料中的橡胶基体和帘线只能模拟成线弹性材料, 没有考虑橡胶的非线性以及帘线的双模量性质, 这些将影响计算结果的精度。加强筋模型是将加强筋部分和基体部分分别由加强筋单元和实体单元表示, 即在基体单元中包括一层或多层不同方向的增强帘线。基体单元和加强筋单元采用相同的节点, 没有引入附加的自由度。加强筋单元可以用来描述加强筋的小应变和大应变状态, 任何材料性质都可以用到加强筋单元上。利用加强筋模型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参数可以直接用到分析中, 并且可以分别得到基体和加强筋的应力状态。因此, 加强筋模型对于帘线-橡胶复合材料的几何和物理非线性分析非常有效。同时, 越来越多的研究采用加强筋模型。

(2) 计算模型的合理简化。用膜单元模拟胎体层和带束层, 用实体单元模拟胎面胶, 忽略轮胎结构的其余部分, Goldstein 建立了简化的三维有限元计算模型用于分析轮胎的操纵性; 将轮胎与轮辋的接触边界条件简化为给定位移的约束条件; 根据轮胎子午面内应变能总和沿轮胎周向分布受接地面的影响范围, Noor 及其合作者建议可以采用 1/2 或 1/4 轮胎的简化模型; 对轮胎局部

进行网格细化的简化模型。这些方法都在相对合理的情况下大大节省了计算资源和计算时间。

本文分别对层合壳模型和加强筋模型建模进行介绍。

1 层合壳模型

将帘线-橡胶复合材料模拟成横观各向同性材料,将橡胶基体和帘线均近似为线弹性材料,利用 Halph-Tsai 公式计算横观各向同性材料参数,

二维问题可以在模型中定义材料方向,三维问题需通过用户子程序定义材料主方向。

1.1 帘线-橡胶复合材料材料参数的计算

在第4讲中已经详细介绍了帘线-橡胶复合材料的弹性转轴公式和材料主轴坐标系中的横观各向同性材料的柔度矩阵。用 VB 编一个小程序(见图1),用来计算 0° 带束层($\theta=0^\circ$)、胎体($\theta=90^\circ$)和钢丝圈($\theta=0^\circ$)的正交各向异性材料的9个工程常数。这9个工程常数在 Marc 软件定义

输入组分材料参数		输出各向异性材料工程常数		检验计算结果	
Er	4.76727	E1	10472.2844082519	检验式1=	2.35630625738138E (>)
Pr	0.499	E2	5.95086603984335	检验式2=	41.466080926434 (>)
Ec	136955	E3	5.95086603984335	检验式3=	.7 (>)
Pc	0.3	P12	.483789832999993	检验式4=	.7 (>)
Vc	0.076433	P23	.3	检验式5=	41.466080926434 (>)
angle	90	P31	2.74913130257678E-04	检验式6=	2.35630625738138E (>)
计算		G12	1.8533297015612	检验式7=	.90965419953882 (>)
		G23	2.28879463070898	检验式8=	9.02660003547537E (>)
		G31	1.8533297015612		

图1 计算材料参数的软件界面

正交各向异性材料时需提供输入。

用 Matlab 软件或其它数值计算软件计算第1~3带束层以及胎圈包布在(x, y, z)坐标系中的柔度矩阵和刚度矩阵,该刚度矩阵在 Marc 软件中定义各向异性材料参数时需输入计算。

1.2 帘线-橡胶复合材料材料方向的定义

(1)轴对称模型材料方向的定义

先通过第4讲的转轴公式得到(x', y', z')坐标系下正交各向异性材料参数,再通过 Marc 软件中定义材料性质的 Orientation 功能(具体方法可以查看 Marc 软件的使用手册),在子午面上按平面单元的一个边的走向定义出平面单元的一个材料方向,即 x' 方向, z' 方向为垂直于子午面的方向(与 z 方向统一),在子午面内垂直于 x' 方向的

方向为 y' 方向,如图2所示。

(2)三维模型材料方向的定义

计算横观各向同性材料参数,利用用户子程序 orient.f 给轮胎模型中的每一个正交各向异性复合材料单元定义用户局部坐标系。

程序格式如下:

```
SUBROUTINE ORIENT (N,NN,KC,G)
IMPLICIT REAL * 8 (A-H, O-Z)
DIMENSION G(3,3),N(2)

      user coding

RETURN
END
```

在该程序中,N(2)为内部单元号;NN为积分点号;KC为层号(实体单元通常为1);G为转

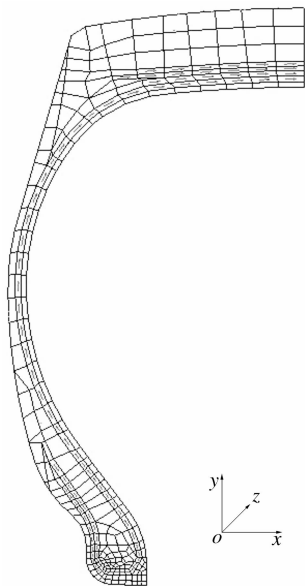


图 2 材料方向

换矩阵。

除了 G , 所有的参数都由 Marc 程序传入, 用户只需提供 G 矩阵, G 是从 Marc 中的坐标系到用户坐标系的转换矩阵。

$$\begin{pmatrix} \nu_1' \\ \nu_2' \\ \nu_3' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

1.3 轴对称模型的建立

(1)几何模型

轴对称几何模型如图 3 所示。

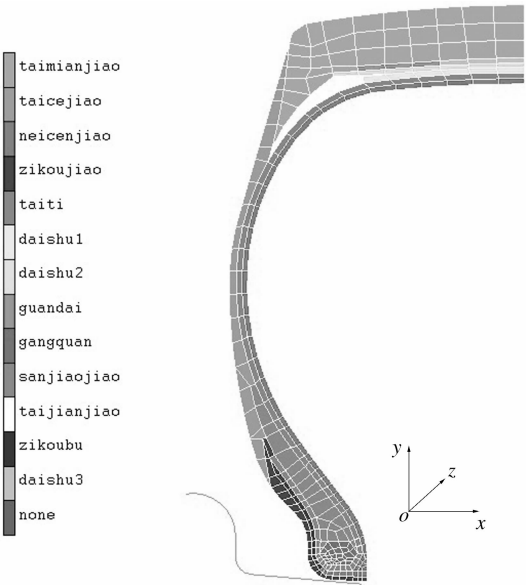


图 3 层合壳轴对称几何模型

(2)材料模型

橡胶材料模拟成线弹性材料; 帘线-橡胶复合材料模拟成横观各向同性材料。

(3)载荷

a) 轮辋装配载荷(装配位移)。给轮辋一个 x 方向的位移, 从 0 时刻到 1 时刻分步加上位移, 1 时刻以后保持不变。装配位移随时间的变化如图 4 所示。

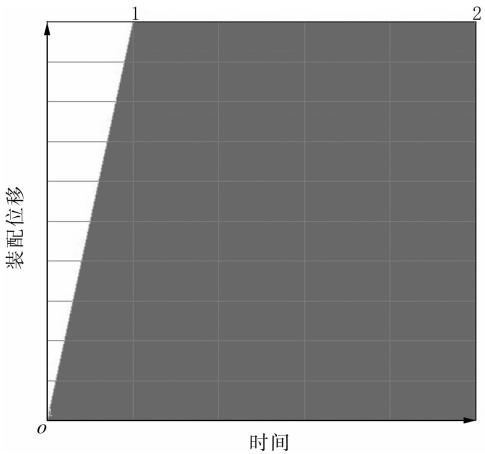


图 4 装配位移随时间的变化

b) 充气压力。装配位移加上后, 从 1 时刻到 3 时刻分步加上气压, 3 时刻以后保持不变。充气压力随时间的变化如图 5 所示。

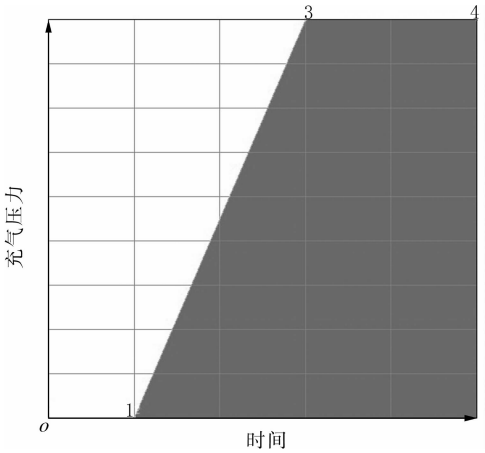


图 5 充气压力随时间的变化

c) 离心力(只用于轴对称模型)。3 时刻开始自由旋转(转速约为 $3 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$), 到 5 时刻达到最大旋转速度。转动角速度随时间的变化如图 6 所示。分析中需要提供自由旋转的角速度和转动轴角速度。

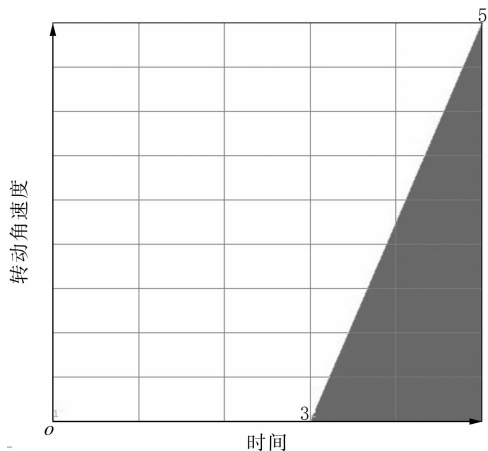


图6 转动角速度随时间的变化

这里需要注意单位的统一,模量的单位为MPa,长度单位为mm,力的单位为N,角速度的单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为计算方便,密度单位取为 $10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

(4)边界条件

轮胎边界条件的非线性指轮胎与路面的接触及轮胎与轮辋的接触等。处理接触边界条件通常采用拉格朗日乘子法、罚函数法、杂交元和混合法及直接约束法。

本文采用直接约束法。该方法规定了接触体的运动,处理接触时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)和节点力(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节点上。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,并且可以模拟复杂变化的接触条件。

在轮胎与轮辋接触边界条件中,将轮辋定义为刚体,同时还具有对称的边界条件。

1.4 三维模型的建立

(1)几何模型

三维几何模型如图7所示。

(2)材料模型

利用用户子程序 orient.f 确定复合材料的主轴方向。

(3)载荷

载荷为轮辋装配载荷(装配位移)、充气压力和负荷(下沉量)。负荷是给轮辋一个向下的位移或给路面一个向上的位移。

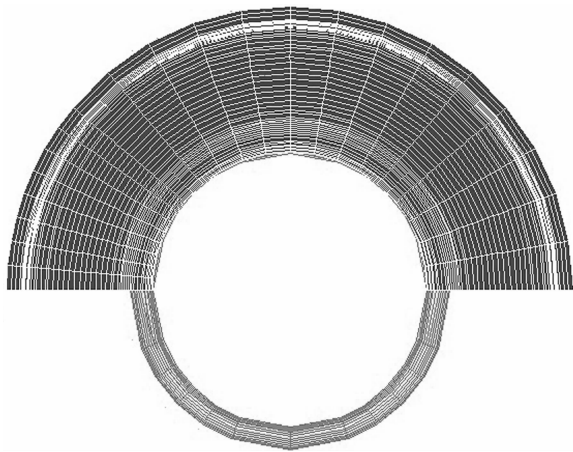


图7 层合壳三维几何模型

(4)边界条件

边界条件包括轮胎与轮辋的接触边界条件(将轮辋定义为刚体)、轮胎与路面的接触边界条件(将路面定义为刚体)和对称边界条件。

2 加强筋模型

帘线-橡胶复合材料用加强筋模型来模拟,分别定义橡胶基体材料和帘线材料,将橡胶基体定义成非线性弹性材料,模拟得更准确;材料的方向可以通过定义加强筋的方向来定义,不需编写用户子程序。

加强筋材料的定义需要输入加强筋的材料性质、加强筋层的参考面或边(单元的面或边)、加强筋方向的参考轴以及加强筋偏离参考轴的角度、加强筋层的相对位置、单根加强筋的横截面积和单位长度加强筋的根数,针对不同问题,可选择不同的加强筋单元。

2.1 轴对称模型的建立

(1)几何模型

复合材料在同一几何位置有两个重复单元,但共用相同的节点,轴对称几何模型如图8所示。

(2)材料模型

对于带束层、胎体和胎圈包布,分别定义橡胶和帘线的材料性质,将橡胶材料性质加到基体单元上,帘线材料性质加到加强筋单元上,将钢丝圈模拟为横观各向同性材料。这里将橡胶材料定义成 Mooney 型非线性弹性材料。

(3)单元性质

将加强筋单元定义为轴对称实体加强筋,其

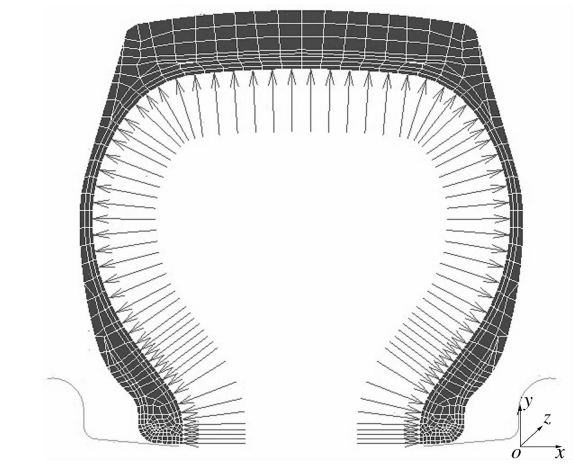


图 8 加强筋轴对称几何模型

它单元定义为轴对称实体。

(4)单元类型

加强筋单元选用 4 节点轴对称加强筋单元,橡胶材料单元选用 Hermann 积分的轴对称实体单元,钢丝圈单元选用全积分实体单元。

2.2 三维模型的建立

(1)几何模型

三维模型由轴对称模型旋转生成,见图 9。

(2)材料模型

对于带束层、胎体和胎圈包布,分别定义橡胶和帘线的材料性质,将橡胶材料性质加到基体单元上,帘线材料性质加到加强筋单元上,将钢丝圈模拟为横观各向同性材料。这里将橡胶材料定义成 Mooney 型非线性弹性材料。

(3)单元性质

将加强筋单元定义为三维实体加强筋,其它单元定义为三维实体。

(4)单元类型

加强筋单元选用 8 节点轴对称加强筋单元;

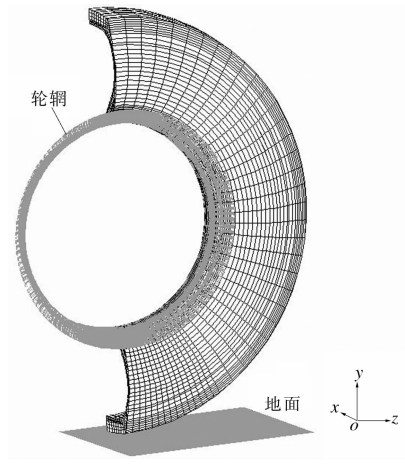


图 9 加强筋三维几何模型

橡胶材料单元选用 Hermann 积分的 8 节点实体单元;钢丝圈单元选用全积分 8 节点实体单元。

3 结语

层合壳模型的思路比较清晰,建模相对简单,但其计算精度比较低,目前我们只有橡胶材料的线弹性材料参数,因此将纯橡胶部分模拟成线弹性材料,实际上应该将其模拟成非线性弹性材料。

加强筋模型建模过程比较复杂,每种复合材料单元要复制一份,且分别定义基体材料和加强筋材料,但它考虑了帘线-橡胶复合材料的实际结构,可以比较准确地定义材料性质,计算结果也比较合理,在接下来的轮胎计算中计划采用加强筋模型。

目前的三维计算结果都存在计算不收敛的问题,这是高度非线性计算经常会遇到的问题,需要再修改模型,如细化几何模型、增加载荷步数和减小载荷步长。

我国汽车销量超过日本跃居全球第二

中图分类号:U469.1/.79 文献标识码:D

2005 年,我国全年生产汽车 570.7 万辆,销售国产汽车 575.82 万辆、进口汽车 16 万辆左右,汽车销售总量接近 592 万辆,首次超过日本(580 万辆),成为仅次于美国的全球第二大汽车销量市场。

2005 年,全年乘用车累计生产 393.07 万辆,累计销售 397.11 万辆,同比分别增长 19.7%和 21.4%,保持了较快的增长速度;商用车市场相对

低迷,全年累计销售 178.7 万辆,同比下降 0.75%。

中国机械工业联合会官员称,2005 年汽车市场的销量本来可以达到 600 万辆左右,但由于商用车销量出现了负增长,影响了全年的总量。预计 2006 年汽车市场有望保持 15%的增长率,乘用车市场中高档车的消费会相对稳定,增长最快的领域集中在 5 万~10 万元的小型车上,中小城市将成为汽车消费的主要增长区域。

(摘自《中国汽车报》,2006-01-16)