

# 斜交轮胎的三维有限元模型

孙淮松 崔文勇 徐 鸿

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 利用 AUTOCAD 绘制轮胎断面轮廓图; 编写 AUTOLISP 程序实现 CAD 与 ANSYS 的接口; 采用 ANSYS 有限元程序中的三维体单元、层单元建立的斜交轮胎 (9.00-20-16PR) 的三维有限元模型可有效地用于轮胎的非线性有限元分析。从而进一步完善了斜交轮胎三维有限元模型的技术。

**关键词:** 斜交轮胎; 非线性分析; 有限元模型

**中图分类号:** O 242.21

我国公路的实际状况,斜交轮胎仍将有很大的市场,对斜交轮胎进行理论分析及优化设计有着十分重要的实际工程意义<sup>[1]</sup>。当前世界各大轮胎公司都已采用 CAD 技术设计其产品结构,并用三维有限元技术来模拟轮胎在各种工况下的力学行为。有限元分析方法在子午线轮胎结构设计与性能分析中已被广泛采用,但很少见到用该方法研究斜交轮胎的报道。笔者认为三维非线性有限元法也是目前能够最有效地模拟斜交轮胎性能的技术方法之一。

## 1 轮胎径向截面有限元节点的形成

### 1.1 绘制轮胎结构初始轮廓曲线

轮胎结构设计的第一步是确定轮胎的初始轮廓曲线。斜交轮胎的初始轮廓曲线可采用文献[2]中所述的作图法确定。图 1、图 2 分别为用 CAD 技术绘成的 9.00-20-16PR 的斜交轮胎的径向截面轮廓图及材料分布图。

### 1.2 数字化轮廓的绘制

由于采用 ANSYS 软件进行有限元分析,因此为了更好地实现 CAD 模型与 ANSYS 的接口,特将轮胎的材料分布图制成数字化轮廓图。采用数字化轮廓,可以在屏幕上交互地随意改变这些坐标点的位置以灵活地改变轮廓曲线形状。而且,还可以把这些数字化的坐标点与有限元网格节点有机地结合在一起。一般采用圆柱坐标系,取轮胎轴线的中心为坐标原点,轮胎径向为  $r$  方向,轮胎周向为  $\theta$  方向,轴向为  $z$  方向。

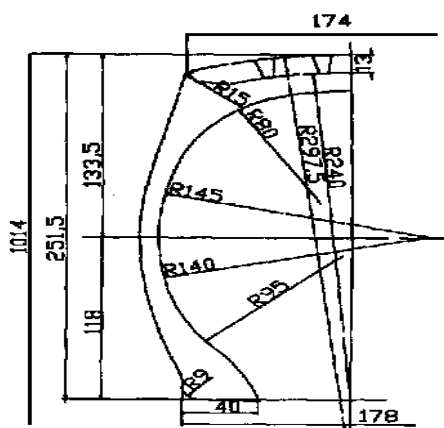


图 1 轮胎断面轮廓图

Fig. 1 Bias tire's section contour

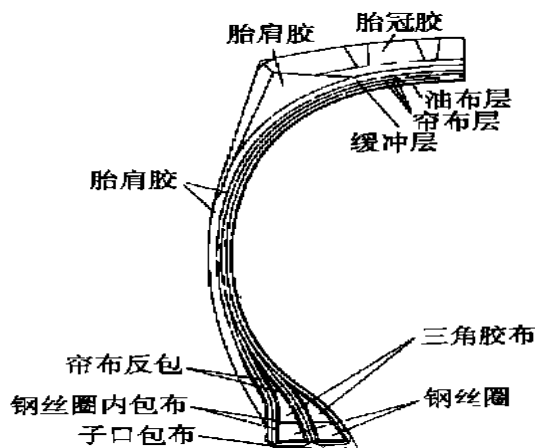


图 2 材料分布图

Fig. 2 Plot of material distribution

### 1.3 CAD 模块与 ANSYS 软件的接口

目前大型通用有限元 (FE) 软件包都带有 IGES 文件接口。通过这条公共通道,在 CAD 系统中所建

成的模型都可以被直接读取到 FE 软件的前处理模块中。这里所研究的轮胎模型,虽然同样也可以将 CAD 系统中所建成的轮胎三维实体模型直接读取到 FE 软件的前处理模块中来,但会引起如下问题:

(1) 轮胎是由复合材料构成,将 CAD 软件中轮胎三维实体模型读取到 FE 软件中,难以定义复合材料的性质。

(2) CAD 软件中轮胎三维实体模型读取到 FE 软件中后,在进行单元划分时,其单元及节点的位置,单元与节点的关系等不容易确定,给后处理中分析结果的定位与提取造成不便。

(3) 为提高运算效率,最大限度地减少单元总数是本研究中的一项重要指标,为此,对轮胎多层结构部位拟采用 Solid46 层单元。这种层单元的分层方向由单元节点顺序决定。因此,若采用自动网格划分方式将会导致一些部位层单元分层方向的失控<sup>[3]</sup>。

因此,专门设计了 CAD 数字化轮胎径向截面轮廓图与 FE 模型的接口程序。它的主要任务就是将 CAD 模块中数字化轮胎径向截面轮廓信息,写成一个 FE 程序能读取的命令流。运行此接口程序,生成的命令流在 ANSYS 中运行后将得到轮胎轮廓断面的节点坐标。图 3 即为运行此接口程序后在 ANSYS 中所得到的半个轮廓断面的节点位置。

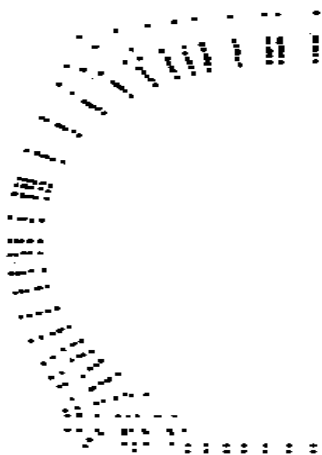


图3 CAD与ANSYS接口模型

Fig. 3 Interface model between CAD and ANSYS

## 2 有限元模型的形成

### 2.1 材料性质的定义

斜交轮胎中所涉及的结构材料包括单一材料,如:胎冠胶、胎肩胶、三角胶等;复合材料,如:帘布层、缓冲层等正交各向异性材料。对于这些材料需

要明确定义的材料性质有杨氏模量、泊松比(或剪切模量)、密度等。当涉及热分析时,还有材料的热导率系数和热膨胀系数等。

### 2.2 单元类型的选择

对于构成轮胎各个部分的材料,需要采用适当的单元来模拟,所采用的单元应能反映材料的本构规律。由于轮胎性能的复杂性,如果仅建立斜交轮胎的平面模型,显然无法满足以后对斜交轮胎进行全面的性能分析的要求。所以选用三维固体单元对斜交轮胎进行模拟。具体采用的单元类型主要有体单元 Solid45,层单元 Solid46 等<sup>[4]</sup>。

### 2.3 单元的形成

对结构或材料特性简单的物体,建模时可先生成几何实体,再定义单元尺寸,然后进行自动网格划分,按总体坐标定义材料特性,这样就得到正确的有限元模型。但在用层单元模拟轮胎时,则不能用常规方式。因为斜交轮胎结构复杂,共由 10 多种材料组成,其中多为正交各向异性材料,且每种材料在不同的位置方向不同,用单一的总体坐标无法恰如其分地模拟,而要依赖每个的局部坐标来定义材料特性,输出计算结果。

在 ANSYS 中,将当前的坐标系转化为柱坐标系,并且将轮胎轮廓半个断面上的节点沿  $\theta$  方向旋转  $5^\circ$ ,即得到两个断面上的节点。以内轮廓面为基准,根据这些节点按一定的顺序在圆周方向生成一排单元。具体生成过程主要通过 ANSYS 命令流来实现。图 4 是由 ANSYS 命令流所生成的半个节距的轮胎断面图,共划分为 118 个 Solid46 单元,65 个 Solid45 单元。将图 4 的断面图沿  $\theta$  方向旋转一周即可生成自由状态半整胎的有限元模型(FEM)。

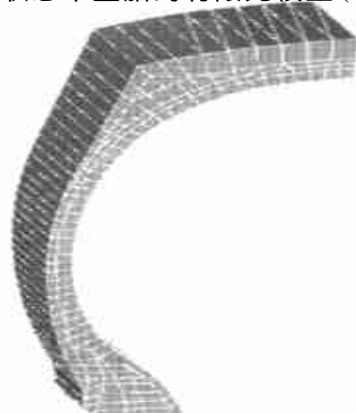


图4 轮胎断面图

Fig. 4 Sectional view of the tire

在此模型中,胎面花纹的形成是一个比较难以处理的环节。这里的模型模拟了斜交轮胎的折线胎面花纹和横向花纹,在胎冠部位采用 Solid45 的退化单元,删去花纹沟部位所填充的单元即可得到如图 5 所示的折线胎面花纹和图 6 所示的横向花纹的有限元模型。

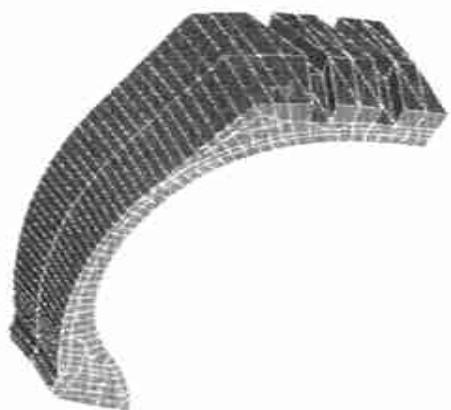


图 5 折线花纹块的单节距半胎模型

Fig. 5 A pitch FEM model of the half tire with broken line tire bar

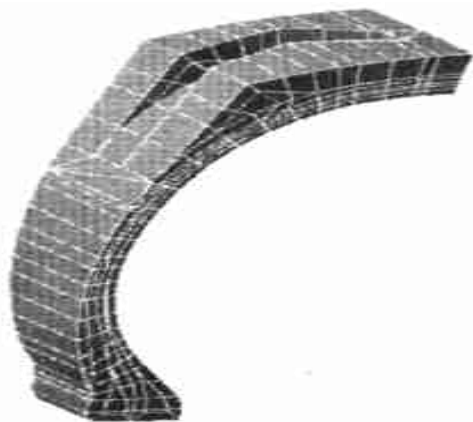


图 6 横向花纹块的半节距半胎模型

Fig. 6 A half pitch FEM model of the half tire with lateral tire bar

划分单元时,需考虑如下几点注意事项:

(1) 轮胎内轮廓为曲面,而 Solid45 和 Solid46 单元的每个面均为平面,即用折面来近似曲面,故单元在内轮廓上两个方向的尺寸不能太大;

(2) 为避免计算结果失真,单元在三个方向上尺寸比例不能太大(7),由于沿厚度方向尺寸较大,所以单元在内轮廓上的两个尺寸亦不能太小;

(3) 相邻单元每层厚度要互相衔接,并在 4 个角点上均不为零;

(4) 缓冲层端部和胎圈部位为应力应变梯度较

大的区域,单元要适当细化<sup>[4]</sup>。

## 2.4 安装轮辋

轮辋是汽车轮胎的一个重要组成部分,现在轮辋基本上都已经标准化,这里选用了 7.0 WFB 平底宽轮辋。将自由轮胎装配到轮辋上时,假定轮胎胎圈部节点在径向轴向有位移,而在另一方向无位移,并假定在加载变形后,轮辋处的节点没有相对位移,所以在整个求解过程中此处的约束为:轮辋处的 6 个节点(对一个节距而言)在径向和轴向给定位移值,在另一个方向上施加位移值为 0 的约束<sup>[4,5]</sup>。

## 2.5 整胎模型

在对斜交轮胎进行性能分析过程中,需要考虑多种工况,当只考虑充气状态时,一个节距的模型即可满足分析的要求,由于此时的节点数和单元数都很少,计算时对计算机硬件的要求较低,且所需的计算时间相对较少,因此一个节距的斜交轮胎有限元模型无疑是分析充气工况时的最佳模型;而如果考虑在平面内的滚动、接地工况,一个节距的模型显然无法满足要求,从节省计算时间和优化模型方面考虑,半整胎模型无疑是此时的最佳选择;随着分析的进一步深入,如果需要考虑更为复杂的斜交轮胎的性能,如侧偏、转向性等,半整胎模型又已无法满足分析的需要,此时必须采用全胎有限元模型。斜交轮胎的全胎有限元模型的具体形成过程为:在 ANSYS 中,将单个节距的轮胎模型沿周向旋转拷贝,即可得到半整胎模型,再将半整胎模型沿中间对称面对称拷贝即生成全胎模型。图 7 为仅考虑一个节距的折线花纹全胎模型,图 8 为横向花纹的全胎模型。

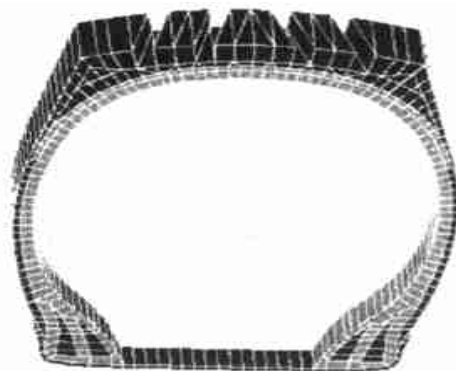


图 7 折线花纹块的单节距全胎模型

Fig. 7 A single pitch FEM model of the tire with broken line tire bar



图8 横向花纹块的全胎模型

Fig. 8 A whole FEM model of the tire  
with lateral tire bar

### 3 载荷与约束条件

在斜交轮胎性能分析过程中,它将受到很多种的载荷工况。如:充气时的自由状态;定轴转动;承受质量载荷;承受水平牵引力以及考虑扭矩和摩擦力等其中的一种或多种的组合。当然,不同的工况所施加的边界条件是不同的。

(1) 当仅考虑充气时的性能分析,图5、6所示的模型即可满足分析的要求。对于此模型,由于加载变形后,任何通过回转轴的轮胎截面仍保持为平面,且无周向位移,亦即约束条件是该截面上各节点的法向位移为零。在与回转轴相垂直的方向上,轮胎有一中间面,限制此中间面上各节点的法向位移为零。由于轮辋的刚性很大,可以认为通过轮胎中间面上轮辋各节点的三向位移值都为零,即刚性固定。

(2) 当研究轮胎的侧偏、滚动阻力、噪声、发热等复杂的性能分析时,可采用图8所示的全胎模型,而且必须考虑接地状态,此时的边界条件为:首先选择

轮胎上与地面接触的某3个点来限制其刚体位移,然后当轮胎受到垂直载荷与地面完全接触后,即可利用地面的反力(垂直反力与摩擦力)来限制轮胎的刚体位移。

(3) 当仅考虑在平面内滚动、接地工况时,此时半整胎模型无疑是最佳的选择。除了需要施加与(2)同样的约束外,还需在对称面上施加一对称约束。

至此,斜交轮胎的有限元模型已基本建成。经过验证,此模型在充气工况下的有限元计算结果与实验结果<sup>[2]</sup>吻合较好,可以认为此模型切实可行。

### 4 结 论

通过 AUTOLISP 可实现 AUTOCAD 与 ANSYS 的有效接口;利用 ANSYS 软件可以比较精确地模拟斜交轮胎的几何形状,可以模拟斜交轮胎的材料性质,还可以有效地模拟斜交轮胎在不同工况时的边界条件和载荷条件。

### 参 考 文 献

- [1] 庄继德. 汽车轮胎学. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 10~13
- [2] 梁守智等. 橡胶工业手册:第四分册(轮胎). 北京:化学工业出版社, 1993. 54~78, 168~168
- [3] 杨卫民. 子午线轮胎的三维非线性有限元分析和性能仿真的研究. [博士学位论文]. 北京:北京化工大学, 1998
- [4] 赵丽娟. 子午线轮胎的三维有限元分析. [硕士学位论文]. 北京:北京化工大学, 1997
- [5] 中国标准出版社第二编辑室编. 化学工业标准汇编:轮胎、轮辋、气门嘴. 北京:中国标准出版社, 1996. 274~275

## Three dimensional finite element model of bias tire

SUN Huai-song CUI Wen-yong XU Hong

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The techniques for developing 3-D finite element models of bias tire are presented. The plots of the bias tire section contour and the material distribution were drawn by means of AUTOCAD. AUTOLISP was used to perform the interface between CAD and ANSYS. A 3-D finite element model of a bias tire (9.00-20-16PR) was developed by using layer elements and solid elements to simulate the composite structure of the tire.

**Key words:** bias tire; nonlinear analysis; finite element model