

应用 MARC/ MENTAT 程序实现 汽车轮胎的三维模拟

徐 立 陈敏玲

(北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 介绍应用通用有限元程序 MARC/ MENTAT 实现汽车轮胎三维模拟的过程,讨论了轮胎有限元模型建立和边界条件处理等问题。说明了 MARC/ MENTAT 程序在轮胎有限元分析中的实用性。

关键词 MARC/ MENTAT 程序,有限元分析,三维模拟,轮胎

十几年来,有限元分析(FEA)已经逐步引入轮胎设计过程。轮胎设计人员应用 FEA 研究轮胎的一般性能,修改设计参数,最终达到优化轮胎设计的目的。随着计算机硬件及应用技术的发展,人们已经普遍认识到,应用 FEA 代替某些轮胎测试实验,可以缩短轮胎开发周期,降低开发成本。基于数值模拟优化轮胎设计参数这一长远目标,汽车轮胎的 FEA 模型不断地被建立和发展。

比较而言,汽车轮胎结构复杂,在充气承载状态下动态工作,伴有周期性的大变形,表现为高度的非线性。要准确地模拟轮胎的各项性能,首先要建立整体的轮胎有限元模型,在这个模型中应该包括橡胶及橡胶和增强帘线的数学模型、轮胎和路面的摩擦接触,同时还要考虑轮胎的有限大变形。其次要合理地划分单元,体现出轮胎各结构部件的分布状况。最后要选择有处理非线性问题能力的求解器,制定求解步骤,分析结果。

MARC 是高级非线性有限元分析模块,MENTAT 是 MARC 的前后处理图形界面。两者严密结合的 MARC/ MENTAT 是解决高级工程问题、完成学术研究的通用有限元软件,在轮胎工业中已有应用,许多轮胎公司采用 MARC 改进轮胎设计,提高乘坐舒适性和延长使用寿命。以下是 MARC/ MENTAT 在实现汽车轮胎三维模拟中的应用。

作者简介 徐立,男,1969 年出生。1996 年获天津大学流体力学专业硕士学位。从事轮胎结构设计和轮胎有限元分析工作。

1 轮胎的有限元模型

由于轮胎中的橡胶材料、帘线-橡胶复合材料(层合)和边界条件具有特殊的力学性能,轮胎 FEA 一直是计算固体力学研究的前沿课题。橡胶、帘线-橡胶以及边界接触问题的处理,是建立有限元模型的主要考虑对象。

1.1 橡胶的数值模型

轮胎中橡胶有独特的非线性力学性质,能承受非常大的弹性变形,其行为近于不可压缩材料。如果有限元分析在定义材料模型时,忽略橡胶的这些力学特性,就可能得到与实验不符的结果,也许根本得不到合理的结果。在当前的研究中,一般只考虑橡胶的非线性,而不考虑橡胶的粘弹性,为描述橡胶的非线性力学性质,将应变能函数 W 表示为 Mooney-Rivlin 形式:

$$W(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中, I_1 和 I_2 分别表示每种橡胶材料的第 1 和第 2 不变量, C_{10} 和 C_{01} 为材料常数。

测量到的应力 S_{ij} 与应变 E_{ij} 有如下关系:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (2)$$

杨氏模量 E 与材料常数 C_{10} 和 C_{01} 满足关系式

$$E = 6(C_{10} + C_{01}) \quad (3)$$

一般轮胎模型中,每种橡胶材料的 C_{10} 和 C_{01} 的值是不同的,它们利用该材料的准静态简单拉伸实验数据确定。MARC 程序提供了应用这些实验数据确定 C_{10} 和 C_{01} 的模块。

1.2 帘线-橡胶的有限元模型

轮胎的各帘布层是帘线-橡胶复合材料,是

汽车轮胎承担载荷的主要结构部件。各帘布层的帘线空间方向不同。如何处理这些材料,一直是轮胎有限元分析的重点之一。MARC提供了能处理有加强筋结构的 Rebar 单元,如图 1 所示。这种单元用于增强帘线复合材料的几何和物理非线性有限元分析,效果极好。各帘线层可以表示在一个覆盖单元内而不增加自由度,提高了计算效率。应用有限变形理论,利用实际的结构模型,就可以得到复合材料各不同组分(帘线和橡胶基体等)的力学信息。

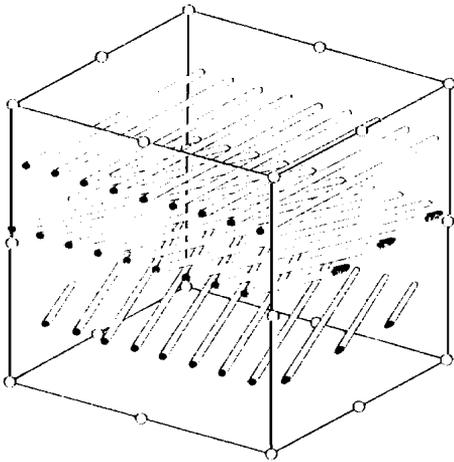


图 1 加强筋结构的 Rebar 单元模型

1.3 边界条件处理

轮胎的边界问题主要是接触问题,包括轮胎与轮辋的接触和轮胎与地面的接触。

1.3.1 轮胎与轮辋的接触

研究已经发现,在轮胎 FEA 模型中,对这个问题的处理不仅影响局部,而且最终也可能影响整个轮胎的变形、应力和应变。MARC 强大的接触功能和 MENTAT 丰富而灵活的接触定义菜单,为我们处理这类问题提供了较好的方法:假定轮胎与轮辋无摩擦接触,轮胎是变形体,轮辋是接触面。在接触区域内,变形体单元的边或面沿接触面自动离散匹配(见图 2)。



图 2 轮胎与轮辋的接触模型

1.3.2 轮胎与地面的接触

轮胎与地面是大位移、非线性的接触,分为静态和动态情况。动态意义下,轮胎与地面是有摩擦的滚动或转向接触,一般应包括加速和刹车等情况。图 3 是定常状态滚动轮胎的边界条件,轮胎绕固定轴转动,轮胎的下沉量和滚动速度由地面的变化来定义。

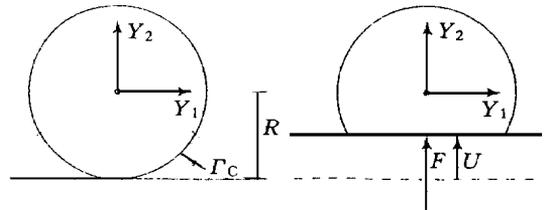


图 3 轮胎承载为 F、下沉量为 U 时,轮胎与地面的接触模型

2 有限元网格划分

汽车轮胎结构复杂,不仅各橡胶部件的力学性能不同,而且不同帘布层的帘线空间角度一般也不相同,FEA 需要的数据较多。用 MENTAT 这样的前处理程序生成三维有限元网格,可以减轻输入数据的繁琐,同时还可以细划局域网格,适应轮胎的复杂结构。

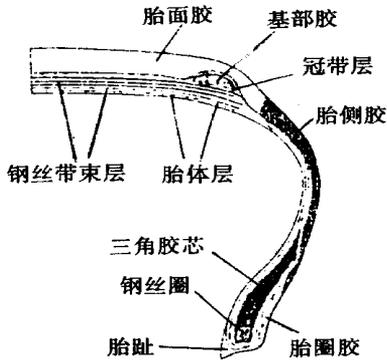
MENTAT 具有一流的几何造型、网格划分和结果处理功能,并可直接访问常用的 CAD/CAE 系统。在 CAD 系统中画出轮胎模型的断面,然后将其调入 MENTAT 界面,应用 MENTAT 对此断面生成二维有限元网格是很方便的。为便于定义各不同部件,给每种部件指定集合名(见图 4),然后依次将每一部分的二维网格扩展成三维网格。MARC 针对连接两个不同细划程度的有限元网格而提出的捆绑算法(见图 5),对于我们准确获得结构复杂部位或部件的力学信息是非常有用的(见图 6)。

3 求解器

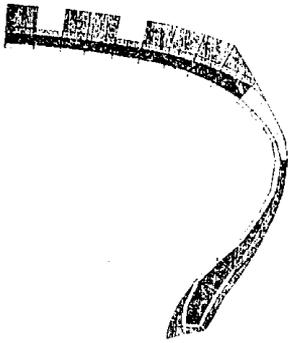
MARC 提供多种高效可靠的求解器,它们分别适用于不同的工程问题,全牛顿-拉夫森迭代对几乎所有非线性问题都可提供良好的分析结果。

4 数值结果举例

目前,在国外许多轮胎公司,MARC程序

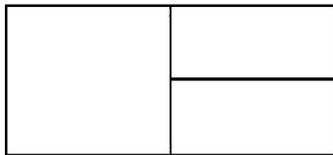


(a) 轮胎的不同部件

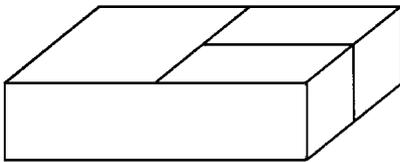


(b) 有限元离散

图 4 轮胎截面的有限元离散



(a) 平面单元



(b) 三维单元

图 5 应用捆绑算法细划单元网格

在轮胎设计中应用已久,并且发挥了作用,他们对 MARC 程序给予极高的评价。图 7 是 Meschke G 等应用 MARC 进行汽车轮胎三维模拟得到的结果。

5 结语

MARC 是目前世界上功能最全的非线性有限元软件,国外许多大轮胎公司应用 MARC

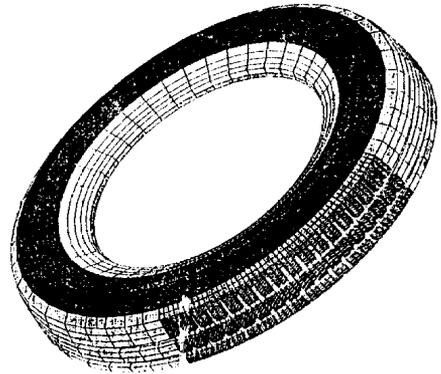
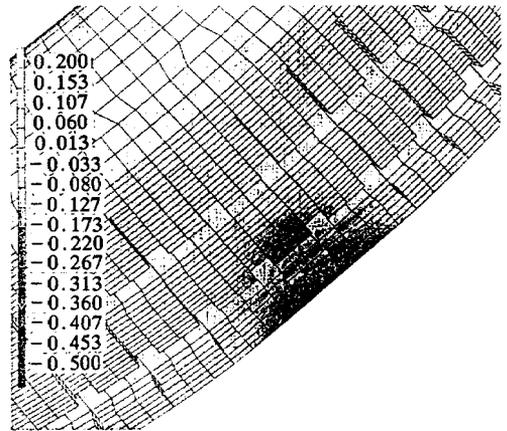
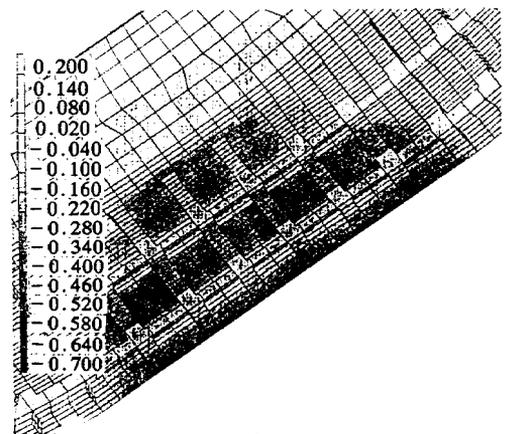


图 6 轮胎的三维有限元离散
胎面在接触区有简单花纹



(a)



(b)

图 7 不同下沉位移下轮胎与地面
接触区内的压力分布
压力单位:MPa

程序改进轮胎设计,但是由于属于技术机密,他们的成果极少公开。在国内轮胎行业,尽管 MARC 的用户不多,但是所有 MARC 用户都在积极开展轮胎有限元分析工作。