

三维有限元分析(3D-FEA)在轿车子午线轮胎接触问题中的应用

王铭新 何晓玫 吴桂忠

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 利用三维非线性有限元程序分析了 195/60HR14 和 185/70SR14 轿车子午线轮胎充气 and 接触状态下的受力及变形,并着重研究了接触区的受力及变形状态,分析了接触变形对轮胎性能的影响。给出的分析计算结果,可以为轮胎结构设计的优化提供依据。

关键词 有限元法,轮胎模型,轿车子午线轮胎,接地印痕,接地压力

90 年代,世界轮胎工业发展的主要特点之一,是竞争方式的改变,其中最突出的是进入市场的新产品更新换代频率加快,用户对轮胎性能的要求更严苛,因此缩短设计周期、预测产品质量便是创造名牌、推出新产品的关键。上述因素必然导致计算分析方法的进一步应用^[1]。随着计算机技术的飞速发展,大型的有限元分析通用程序给轮胎结构力学分析创造了有利条件。70 年代初主要研究轮胎的静态弯曲及充气变形问题,通过近 20 年的发展^[2],这方面的研究从进行二维轴对称的静态有限元分析,已发展为三维实体或壳元的轮胎非线性动态有限元分析。它不仅可以进行充气和负荷的受力及变形分析,而且可以进行轮胎的接触、滚动阻力及热分析等相当复杂的分析。用一个数学模型可以实现对不同设计假设的计算分析,为轮胎设计提供详细的信息。

本文应用国际上著名的大型有限元通用程序的前处理(Aries)建立轮胎三维有限元模型,利用非线性分析程序进行接触及充气分析,对计算分析结果利用后处理(Aries)实现结果的图形方式输出。

1 三维非线性有限元分析

1.1 三维实体元及壳元的建立

有限元法是一种近似的计算方法,它对

不同的模型提供出不同的数值解。由于轮胎具有非常复杂的复合材料结构和双曲率几何特性,所以对不同的工程问题,采用不同的轮胎模型。本文以 185/70SR14 和 195/60HR14 轿车子午线轮胎为例(这两种轮胎均以两层钢丝带束层和两层聚酯帘线为胎体组成)予以论述。模型的建立是用前处理 Aries 实现的,充气分析以 195/60HR14 为例,采用三维实体元,在轮胎圆周方向上每隔 11.25° 为一个断面,每个断面上有 156 个节点。该模型共有 4992 个节点,3840 个单元组成。图 1 为 195/60HR14 三维实体元有限元模型局部示意图。对轮胎的接触分析,以 185/70SR14 为例。我们重点研究轮胎接触部分的情况,因此在模型建立时,根据轮胎的接地印痕试验结果,在轮胎的单元划分时,加密接触区的网格,接触区的范围一般以接触印痕长轴长度向外延伸、圆周角扩大 $3\sim 5^\circ$ 而定,以保证充分计算有效的接触范围。图 2 为 185/70SR14 三维壳元的轮胎模型局部示意图。该模型共有 525 个节点,490 个单元。在轮胎圆周方向上每 20° 划分一次,在接触区内每 3° 划分一次。

1.2 轮胎的非线性特性

轮胎是由复杂的多层结构组成的,其材料特性和几何特性都相当复杂。例如,纯胶部件,由于胶种和基本配方的差异,胶料性能也

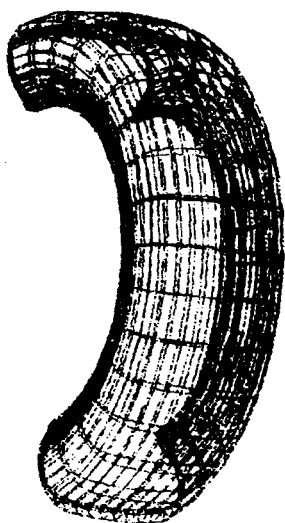


图1 195/60HR14 实体元模型

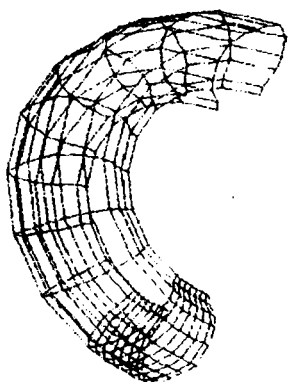


图2 185/70SR14 壳元模型

有很大的不同。复合结构的胎体和带束层材料,性能差异更大。

(1)几何非线性特性。轮胎在充气或垂直负荷下几何形状产生明显的变化,有些部位的变形甚至超过30%,这种现象称作“几何大变形”,因此受力后的位移与应变关系是非线性关系。

(2)材料非线性特性。轮胎骨架材料具有正交各向异性关系,它在某些方向可以表现出非常高的模量。例如,钢丝帘线表现在帘线方向上,弯曲模量达到 $10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2[1]}$,但在垂直于帘线方向上的最大弯曲模量只有 10 N

$\cdot \text{mm}^{-2}$,因此轮胎结构整体材料性能表现为非线性弹性不可压缩,并且帘线在拉伸和压缩情况下表现出不同的刚性。

(3)非线性边界条件。轮胎与刚性轮辋、轮胎与地面接触时通常要考虑非线性边界条件。由接触产生的力同样具有非线性属性。对这些非线性接触力,分析程序提供了两种方法:一是三维间隙单元(GAP),支持开放、封闭或带摩擦的边界条件;二是三维线接触,支持接触分离、摩擦及滑移边界条件。

轮胎与刚性轮辋的接触,无论是在充气模型还是在接触分析模型中,都简化为如图3所示的形式。



图3 轮胎与轮辋的接触

轮胎与路面的接触,将路面用无限大平面刚体表示。

1.3 前、后处理程序

有限元分析程序的运行需要输入大量的数据。该程序的前处理具有很强的自动形成有效数据功能,但由于轮胎的结构复杂,前处理自动划分的网格无法实现材料特性的区分,因此我们利用手动辅助划分来完成前处理。轮胎几何结构是轴对称的圆环型结构,所以我们采用轮胎的1/8结构进行划分,并在内部施加均匀的充气压力,然后经过对称旋

转等手段完成轮胎的整体划分。

计算结果的输出也是相当困难的。几何形状和变形的表达是简单易行的,但单元的应力-应变输出是相当复杂的,尤其是接触问题的输出。分析程序的后处理可以用图形或曲线形式表达模型的几何变形和应力-应变。本文给出一些后处理绘制的计算结果曲线。

2 结果与讨论

2.1 充气轮胎的分析

以 195/60HR14 为例,采用三维有限实体模型计算分析轮胎上的充气轮胎。该程序在 SUN-10 工作站上运行大约需要 6h。它可以分析轮胎的充气变形及轮胎内部各部件的应力-应变。

2.1.1 轮胎的变形

图 4 为轮胎的变形曲线图。图中的 6 条曲线代表的是不同的载荷步下的变形情况,图注中括号内的数值即 SUBCASE 值是指载荷与充气内压的比值(图 5—12 的情况与图 4 相同,将不再说明)。

由图 4 我们不难发现,轮胎的变形随气压的提高而增大。沿周向断面变形是从胎圈

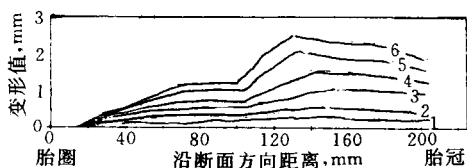


图 4 轮胎充气后变形曲线图

1—SUBCASE-1(0.1); 2—SUBCASE-1(0.2); 3—SUBCASE-1(0.4); 4—SUBCASE-1(0.6); 5—SUBCASE-1(0.8); 6—SUBCASE-1(0.978125)

到胎侧逐渐增加,到肩部达到最大。

2.1.2 轮胎的应力-应变分析

(1) 沿轮胎周向到胎体帘线的应力变化

图 5 为胎体帘线所受的主应力。根据子午线轮胎的特点,轮胎在整个断面方向上受力的承受部件不同,在胎冠部轮胎所受的内压由带束层承担 60% 以上,而其它部位则主要由胎体帘线胎圈加强处承担。由图 5 我们不难发现,从胎冠中心到带束层边缘,帘线所受应力较小,而到下胎侧和胎圈部位则帘线应力较大,尤其在钢丝圈上部至反包端点处出现应力峰值,所以在轮胎设计时,PDPE 设计理论^[3]提出加大轮辋宽度,给胎圈施加预应力,以减少轮胎在使用过程中出现的应力集中,提高轮胎的使用性能。

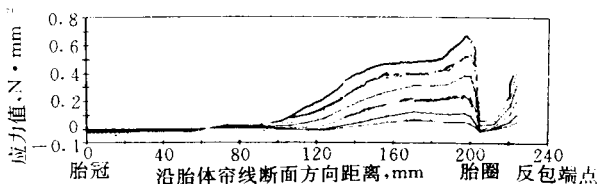


图 5 胎体帘线所受主应力

(2) 带束层的应力变化

图 6 为带束层所受主应力曲线图。很显然,带束层所受的主应力随着载荷步的提高

而增大。而且应力大小是从胎冠到带束层边缘逐渐减少。这在二维分析中已有详细介绍^[4,5]。

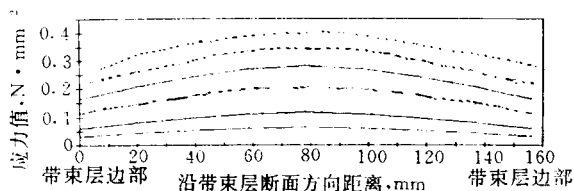


图 6 带束层全宽上所受主应力

(3)轮胎的周向应力和剪切应力

轮胎所受周向应力如图 7 所示。在胎冠和胎体反包处所受的周向应力较大,因此轮

胎在使用中易产生脱层等质量问题,故在轮胎优化设计时可将其周向应力的大小作为分析判断的指标。

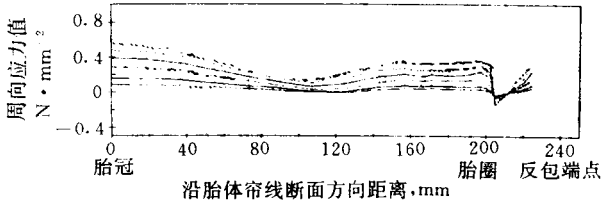


图 7 轮胎的周向应力

图 8 为轮胎所受的剪切应力。剪切应力在断面最宽点几乎为零,而在胎冠和下胎侧

较大。由剪切应力产生的轮胎质量问题与周向应力相似。

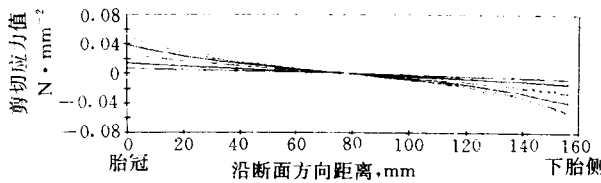


图 8 轮胎所受剪切应力

2.2 轮胎的接触分析

轮胎的接触分析是相当复杂的,它应当包括轮胎与轮辋、轮胎与地面的接触,目前我们考虑较多的是轮胎与地面的接触问题。这里我们仅对 185/70SR14 轮胎进行垂直负荷下的接触分析。

2.2.1 轮胎的接触变形

(1)轮胎在接地长轴方向上的变形

在垂直负荷作用下,轮胎在接地长轴方向的变形如图 9。由图 9 我们可以发现,轮胎的变形在接地长轴上最大;随着负荷的增加变形逐渐增大,但接地长轴的两侧变形是相同的。从图中我们不难发现,在垂直负荷作用下,接地地区变形较大,而且冠部出现了翘曲现象。通过分析不同轮胎的翘曲现象,可以改善轮胎的结构设计,从而达到优化设计的目的。

(2)轮胎在接地短轴方向上的变形

由于带束层的作用,轮胎在接地短轴方向的变形(见图 10)在冠部较小,其变化规律是从中间向两侧逐渐增大,而使胎侧形成较明显的变形,有时甚至产生超过 30%的大变

形。为避免这种大变形的产生,在 PDEP 设计理论中提出改变上胎侧的设计。它已在低断面轿车子午线轮胎设计中应用。

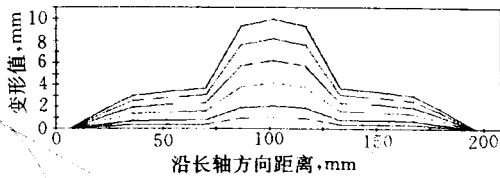


图 9 轮胎在接地长轴方向的变形

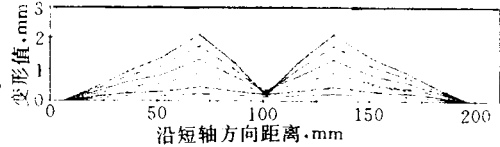


图 10 轮胎在接地短轴方向的变形

2.2.2 轮胎在接触变形中所受应力

轮胎在接触变形中所受的应力如图 11 和 12 所示,均以壳元网格加密起始点为参考点。由图 11 发现,沿长轴方向的主应力随气压的增高在冠部产生明显的峰值。应力的增高将导致轮胎接地性能及行驶性能下降。由

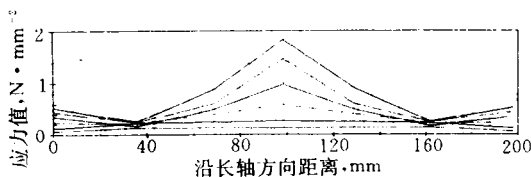


图 11 沿接地长轴方向上的主应力变化

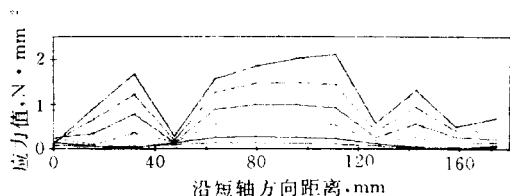


图 12 沿接地短轴方向上的主应力变化

图 12 可以发现,轮胎横断面上所受主应力出现几个峰值。主应力峰值的出现会使轮胎接地部分产生翘曲现象,此现象的出现会导致轮胎的接地性能显著恶化,因此我们在轮胎设计时必须注意这种现象,以减轻对轮胎的操纵性、振动及乘坐舒适性的不良影响。

3 结论

以上计算分析结果表明,应用三维有限元分析程序对轮胎的力学性能进行计算分析是可行的,其结果也是可靠的,本文只给出了其中的一部分分析结果。这些结果可以为轮胎设计工程提供设计依据,缩短轮胎的制造周期,并提高轮胎的产品质量。从上述计算分

析得出如下结论:(1)三维有限元分析可以使我們更全面地进行轮胎各部件的受力状态及变形的计算分析,并应用此结果指导我们的设计工作。(2)从分析结果我们可以判断出不同结构轮胎的受力状态,从而为轮胎的结构优化提供依据。(3)轮胎的接触分析可以预测轮胎的接触变形状态,并可根据变形分析轮胎的能量损失。这些结果的应用为轮胎设计技术的可靠性提供依据,为轮胎设计工作者进行计算结果与经验数据的对比分析提供了手段。三维非线性有限元分析可以对不同的边界条件、不同的假设进行模拟和分析,从而达到优化轮胎设计的目的。

参考文献

- 1 Federico M. Finite-element analysis for tire design. Tire Technology International, 1995;160—163
- 2 Trinko M J. Ply and rubber stresses and contact forces for a loaded radial tire. Tire Science and Technology, 1984;11(1):20—38
- 3 何晓玫等. 低断面轿车子午线轮胎 PDEP 设计理论. 橡胶工业,1995;42(2):67—71
- 4 吴桂忠等. 轿车子午线轮胎的三维有限元分析. 橡胶工业,1993;40(12):720—723
- 5 何晓玫等. 有限元法在充气轮胎研究中的应用. 橡胶工业,1991;38(4):155—160