

结构设计

轮胎有限元应力应变计算及绘图软件的研制与应用

刘大众 邴文光

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 根据非线性有限元 NFAP 程序,研制数据前处理程序和应力应变后处理程序。论述轮胎应力场和位移场色谱图的计算与绘图程序以及胎体、带束层帘线应力计算程序的原理和功能,并介绍其应用实例。

关键词 轮胎,有限元,前处理,后处理,软件

应用计算机和非线性有限元程序,进行轮胎结构力学分析、确定性能最佳的设计方案,是现代轮胎设计的显著特点^[1]。为进行轮胎有限元分析,需准备有关轮胎单元、节点、材料性能等大量数据;还需对计算结果进行复杂的后处理,才能了解轮胎的应力-应变状况。通用有限元程序缺乏针对轮胎这种特殊结构的前后处理程序。为提高效率,并使计算结果更加直观,研制了用于轮胎非线性有限元分析的前后处理程序。

1 轮胎有限元前处理程序

轮胎是复合材料构成的双曲面壳体。其内外轮廓和带束层、胎体、胎圈等部位的形状变化大、不规则。为便于进行有限元单元划分,研制了子午线轮胎材料分布图设计程序。通过参数化设计,可绘制包含轮胎各部件的材料分布图(图1),并建立 DXF 文件,进入 Auto CAD 进行前处理。根据轮胎材料分布图的特点和设计要求,形成轮胎有限元网格划分图(图2)。利用 Auto CAD 软件的绘图编辑功能,将轮胎各部位划分为4节点等参单元。用 Auto LISP 语言编制了轮胎有限元节点数据输入转换程序。将光标依次移动到各单元节点,按拾取键,即可将该点的序号及坐标自动记录到节点信息数据文件上。还编制了交互式输入单元数据和材料参数的应用

程序,用以生成相关的数据文件。将以上节点信息、单元信息和材料参数3个数据文件合并,加上总的求解信息和载荷数据,即形成轮胎有限元输入数据文件。应用有限元前处理程序可避免人工误差,提高数据准备工作的效率。

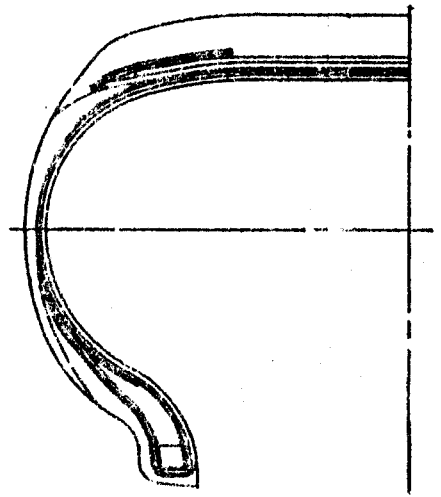


图1 轮胎材料分布图

2 轮胎有限元应力应变计算后处理程序

使用 NFAP 非线性有限元程序,输入轮胎结构数据,进行应力应变计算,可得到各单元节点的径向和侧向位移,径向、侧向和周向应力及面内剪切应力^[2]。计算结果约为160k的数据文件,阅读和整理这些结果需做大量

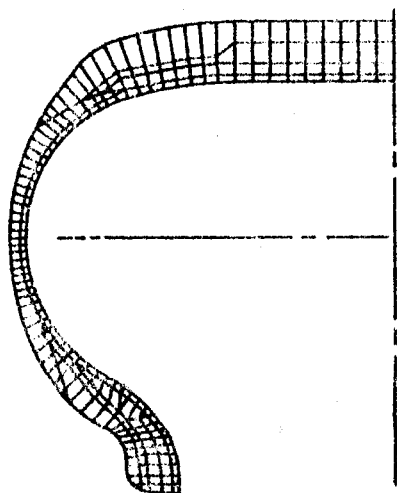


图 2 轮胎有限元网格图

复杂繁琐的工作。为提高数据后处理的工作效率,使结果更形象直观,研制了有限元后处理程序。

2.1 轮胎应力场色谱图程序

在充气压力作用下,子午线轮胎不同部位的应力状态有明显差别。为形象地显示轮胎应力分布,采用各种颜色代表应力的值,这就是应力场色谱图。轮胎应力场色谱图程序可分别显示径向、侧向、周向应力和剪切应力的分布状态。

应力场色谱图程序包括 3 个计算子程序:第 1 个子程序输入轮胎的单元节点位移数据,计算轮胎断面的变形并绘制图形。第 2 个子程序输入轮胎应力数据。为提高色谱图的精度,把每个单元划分为 4 个子单元,分别计算子单元的平均应力值。将 3 个方向的应力和剪切应力分别记录在相关单元的应力数组内。第 3 个子程序读取应力数组的数据,从中选出最大和最小应力,确定应力场变化范围。将应力范围分为 10 个等分区域,用深红色表示应力最大的区域,用深蓝色表示应力最小的区域;从深红到深蓝,依次取从暖色到冷色逐步过渡的 10 种颜色,代表应力从大到小的 10 个变化区域。随后,读取每个单元的 4 个子单元的应力数据,判断其所属的应力区域,用代替该区域的颜色填充。于是便得到

反映轮胎断面应力场分布状态的色谱图,如图 3—6(注:在黑白图像中仅能以深浅区分应力大小)。

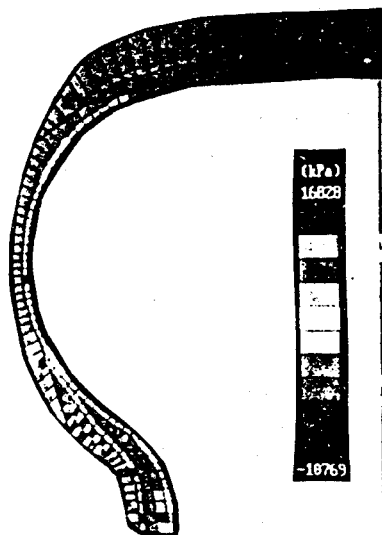


图 3 轮胎径向应力色谱图

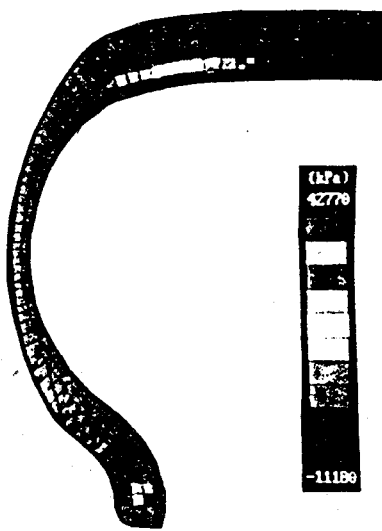


图 4 轮胎周向应力色谱图

2.2 轮胎位移场色谱图程序

与应力场色谱图程序相似,位移场色谱图程序也包括 3 个子程序:先计算并绘制轮胎变形图;再计算每个子单元的平均径向和侧向位移;判断最大、最小位移,确定位移场变化范围和等分区域,绘制轮胎位移场色谱图。如图 7 和 8 所示。

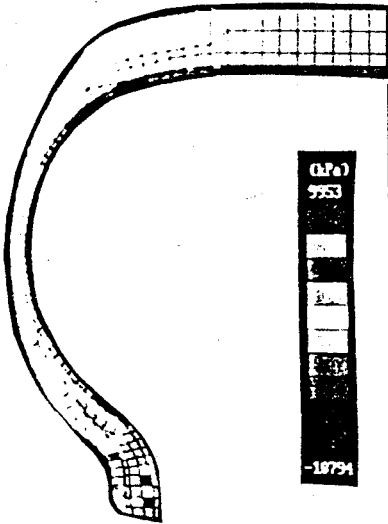


图 5 轮胎侧向应力色谱图

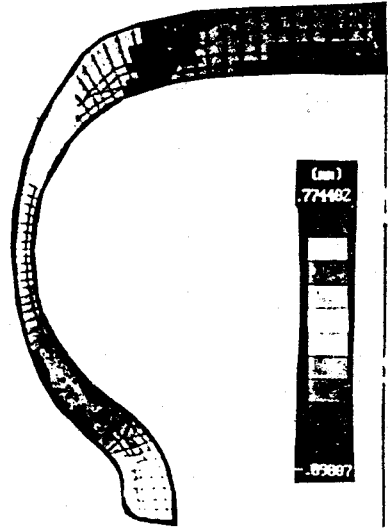


图 7 轮胎径向位移色谱图

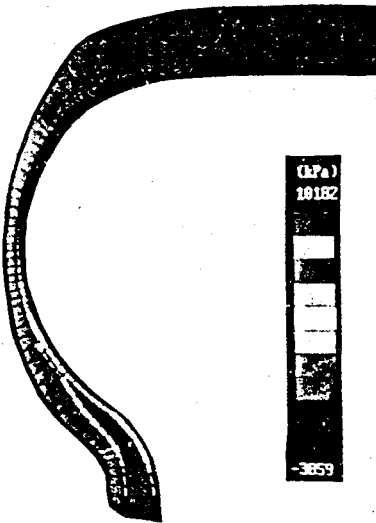


图 6 轮胎剪切应力色谱图

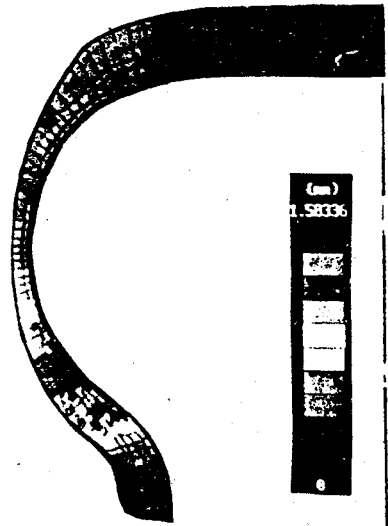


图 8 轮胎侧向位移色谱图

2.3 轮胎带束层和胎体帘线张力计算及绘图程序

应力场色谱图只能显示轮胎断面应力的变化趋势,不能精确反映每个单元的应力数值,而且计算结果只是 3 个总体坐标方向的应力。欲了解带束层和胎体帘线的张力,还需进一步换算。

带束层(对于冠带层,取 $\theta=0$)帘线张力计算公式如下:

$$T_f = \frac{\sigma_{x3} df}{\cos^2 \theta V_f} \quad (1)$$

式中 σ_{x3} 是周向应力。

胎体帘线张力计算公式如下:

$$T_f = \sigma [1 - (1 - V_f) \frac{E_r}{E_a}] \frac{A_f}{V_f} \quad (2)$$

式中主应力 $\sigma = \sigma_{x1} \cos \alpha + \sigma_{x2} \sin \alpha$, σ_{x1} , σ_{x2} 分别是径向和侧向应力。

带束层帘线张力计算及绘图程序包括两个子程序:第 1 个子程序输入带束层单元位移数据,计算带束层变形并绘图;第 2 个子程序按(1)式计算帘线张力,并将其按比例绘制到带束层单元的法向,形成带束层帘线张力

分布图,如图 9 和 10 所示。

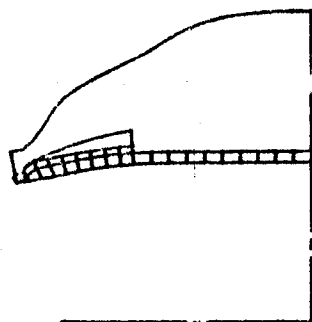


图 9 带束层帘线张力分布图

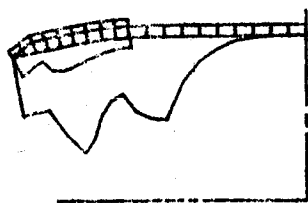


图 10 带束层剪切力分布图

胎体帘线张力计算及绘图程序的结构与带束层张力计算及绘图程序相似,按公式(2)计算帘线张力,绘制到胎体单元的法向,形成胎体帘线张力分布图,如图 11 所示。

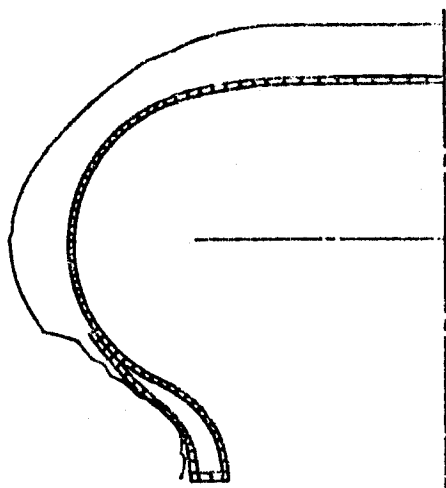


图 11 胎体帘线张力分布图

2.4 带束层和胎体剪切应力计算及绘图程序

带束层和胎体承受剪切应力,是引起轮胎损坏的重要原因之一。带束层和胎体剪切

应力计算及绘图程序包括两个子程序:第 1 个子程序输入带束层或胎体位移数据,计算并绘制变形图;第 2 个子程序输入剪切应力,计算每个子单元的平均剪切应力,将其按比例绘制到带束层和胎体的法向,形成剪切应力分布图,如图 12 所示。

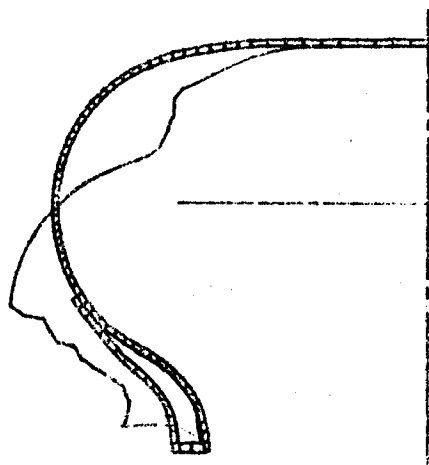


图 12 胎体剪切应力分布图

3 应用实例

将上述计算及绘图软件应用于高速低断面轿车子午线轮胎 205/60HR15 在充气状态下的力学性能分析,结果表明这些应用软件效率较高,可在短时间内完成大量数据的处理,并自动生成有关图表。

3.1 轮胎应力场色谱图

图 3 为径向应力色谱。从图中可以清楚地看到,轮胎的径向应力主要是由胎体帘布层承担的,并且在胎侧(断面最宽点)附近胎体层受径向力最大。这是因为在该处帘线的取向与径向基本重合的缘故。图 4 为周向应力色谱。该图清楚地表明,轮胎的周向应力主要是由带束层及胎圈承受的。在带束层承力的份额中,胎冠附近 1/2 带宽内的带束层承力占绝大部分。也就是说,带束层的周向力在胎冠附近最大且是较平坦的,之后向边端很快地减小。图 5 为侧向应力色谱。从色谱图上明显看出,轮胎侧向应力主要是由胎体层

承担的,并且靠胎冠处胎体层的侧向力最大,至胎肩下部逐渐减小,在断面宽点附近胎体侧向力最小。到下胎侧,胎体侧向力又有所增大。轮胎应力场色谱图表明,骨架材料是承受上述3个方向应力的主要部件,而胶料集中部位对轮胎承受应力方面的贡献较小,但帘布层中的基体橡胶却是使帘布层具有抗剪切能力的主要因素。轮胎剪切应力色谱图(图6)表明了这一点。

3.2 轮胎位移场色谱图

图7和8分别给出轮胎整体变形的径向位移场和侧向位移场的色谱。图7表明,轮胎最大径向位移发生在胎冠,向胎肩方向逐渐减小。靠近胎圈部位径向位移趋近于零。图8表明,轮胎侧向最大位移发生在胎侧(靠下一些);在胎冠及胎圈处受到约束,侧向位移等于零。

3.3 带束层帘线力计算及绘图

无论是在充气状态还是在使用状态,施加给轮胎的应力主要是由带束层承担的。因此带束层帘线力要比胎体帘线力大得多。图9表明,带束层帘线力在胎冠中心处最大,先是缓缓下降,当接近中部宽度的1/2时,转为直线减小,在边部帘线力最小。冠带层帘线力趋势与带束层类似,只是在量值上远小于前者。图9同时给出了冠带层帘线力的分布情况。

3.4 胎体帘线力计算及绘图

胎体帘布层是使外胎具有强度、韧性和弹性的主要因素。它承受轮胎行驶中作用于外胎上的法向、侧向及切向力所引起的周期性变形,有时还要承受强烈的振动和冲击。因此,轮胎的使用寿命取决于帘布层的耐疲劳强度和抵抗几种负荷的能力。图10表明,对

充气轮胎而言,胎体层帘线所受的力在胎侧附近最大,而在胎肩到上胎侧之间较小。

3.5 带束层的剪切应力计算及绘图

带束层的剪切应力是沿层间分布的,是带束层脱层、错位的主要原因。从图11可看出,由于轴对称,剪切应力值在胎冠中心为零,而在边部较大,另一方面,带束层边部为裁断端,钢丝与橡胶的粘合比较薄弱,因此,相对来说,轮胎肩部较易发生剪切破坏。

3.6 轮胎胎体的剪切应力

轮胎胎体的剪切应力分布在帘布层之间的界面上。胎体的剪切应力是由充气压力产生的帘线张力引起的。图12表明,在胎冠、胎侧和胎圈附近剪切力最小(近似为零),而在胎肩部和下胎侧出现峰值。

4 结论

实际应用表明,轮胎应力应变计算绘图程序可迅速处理大量的非线性有限元计算结果,以应力-应变曲线图和色谱图的形式为轮胎结构设计提供多种形象直观的图表,用以指导轮胎的优化设计。

对于其它大型非线性有限元程序,只要根据其数据结构编制接口程序,本文所述的轮胎有限元前后处理程序就可通用。

参考文献

- 1 Ridha R A, Theves M. Advances in tire mechanics. In: Plenary and invited lectures, international rubber conference '94, Mockba 1994, Mockba, Organization committee of IRC 92, 1994; Vol 1, 54
- 2 邴文光. 高速低断面轿车子午线轮胎冠带层力学性能研究. 化工部北京橡胶工业研究设计院硕士学位论文, 1995

收稿日期 1995-06-13