

轮胎有限元研究(FEA)进展及应用成果

王登祥 Tim Fry

[Shanghai T. R. T. R. (N. A.) Inc., Akron, U. S. A.]

摘要 从非线性有限元的实验设计获得在低应变条件下门尼-里夫林(Mooney-Rivlin)方程的常数解,成功地预测了轮胎的充气尺寸,从绘制的负荷条件下轮胎应力场色谱图分析,预报花纹沟并拢情况,并找出设计的薄弱环节,优化轮胎结构设计。

关键词 轮胎,有限元,ANSYS,应力场色谱,预测

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。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-应变情况。上海 T. R. T. R. 公司自 1995 年 9 月对有限元研究立项以后,在二维阶段已取得的成果有正确地预测轮胎充气尺寸、获得负荷下的轮胎应力场色谱等。根据色谱可以直观地考察应力最高区域以及预测轮胎花纹沟并拢情况,从而可以优化结构设计。本文为二维阶段工作的简要介绍。

1 用于 FEA 研究的软件和硬件准备

1.1 ANSYS 软件

当前在美国随着计算机技术的发展及广泛运用,在材料、力学、结构分析上广泛运用的功能强大的 ANSYS 软件正受到越来越多人的喜爱。ANSYS 适用于对各种材料及复杂物体进行应力、温度及其它情况的模拟和分析。它可以模拟二维和三维空间的图像,也可以进行二维和三维图像的互相转换;可

以对实心的、表面的、单元的物体进行有限元划分和分析;可以对物体在静态和动态下的各种应力、应变和温度进行模拟并提供误差分析;还能对产品进行局部的分析或者把它们组合起来。该软件可提供精确的模拟结果,从而优化设计,赋予产品优异的性能,缩短新产品的开发时间。本公司采用 ANSYS 软件作为 FEA 研究的主选软件。

ANSYS 软件目前在美国应用广泛,如美国波音 747,777 等型号的飞机许多部件均采用 ANSYS 来优化设计。ANSYS 软件目前是材料分析方面最好的软件,现在已经发展到 5.3 版本,5.4 版也即将推出。

用于轮胎 FEA 的软件还有 ABAQUS, MARC 和 IDEAS 等。韩国轮胎公司使用 ABAQUS 软件,登录普使用 MARC 软件。

1.2 计算机工作站

计算机操作系统选用 Windows NT。

本公司购置的第 1 台计算机工作站为 AlphaSta 250 4/266 NT,解决了大量应用问题,但是仍觉得运算速度跟不上课题要求,于是在 1997 年 3 月购置了更高计算速度的工作站 Digital Alpha NT(500 MHz),这台工作站还为将来升级到 1 000 MHz 留有余地。

近年来软件费用居高不下而硬件费用却年年下跌,购买这台 500 MHz 的工作站花了 1.16 万美元;而前一年购置 266 MHz 的工作站时却花了 2.5 万美元。

作者简介 王登祥,男,53 岁。高级工程师。上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司轮胎研究所美国阿克隆分部 T. R. T. R. 公司总经理。参加的子午线轮胎研究开发项目多次获得上海市科技进步奖,并获国家科技进步三等奖;获国家专利 2 项。先后发表论文 17 篇,并出版专著 1 本。

2 非线性有限元分析的实验设计和理论基础

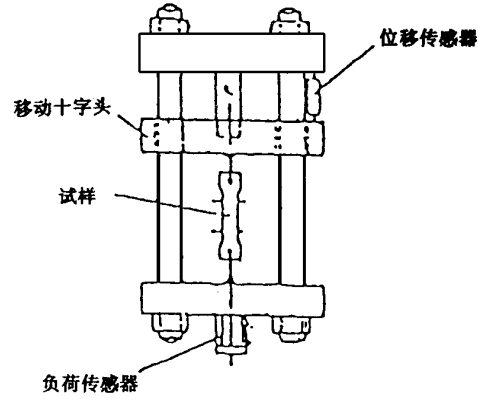
2.1 测试材料性能的基本试验

用于有限元分析所需材料性能数据的 5

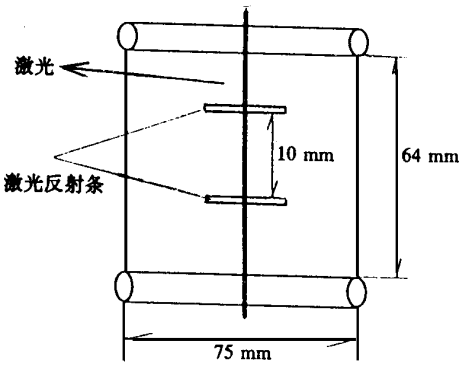
种基本试验^[1]形式见图 1。

(1) 单轴拉伸

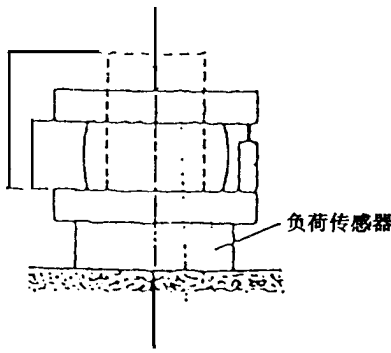
试样尺寸: ASTM 标准 C 型哑铃形试片;



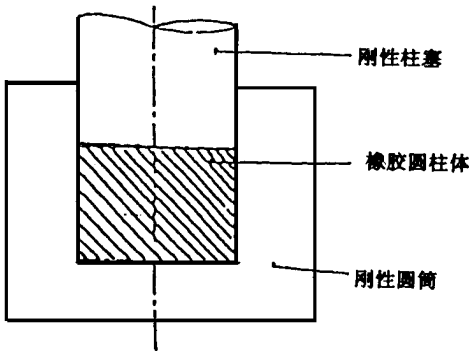
(a) 单轴拉伸



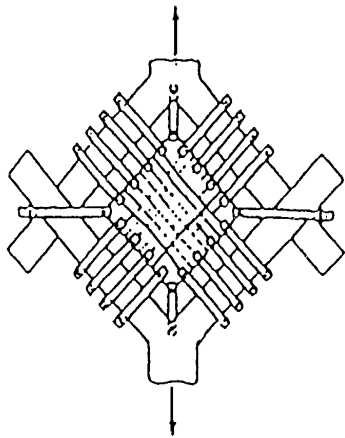
(b) 平面拉伸(剪切)



(c) 单轴压缩



(d) 定容积压缩



(e) 等双轴拉伸

图 1 非线性有限元分析的 5 种基本试验

测试速度: $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;
测试设备: 带激光测量头的孟山都 T-2000 拉力机。

(2) 平面拉伸(剪切)
试样尺寸: $75\text{ mm}\times 64\text{ mm}\times 1.65\text{ mm}$ (厚度);
测试速度: $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;
测试设备: 带激光测量头的孟山都 T-2000 拉力机。

(3) 单轴压缩
试样尺寸: $\Phi 29.5\text{ mm}\times 12.5\text{ mm}$;
测试速度: $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;
测试设备: MTS 831.20 Elastomer Test System。

(4) 定容积压缩
试样尺寸: $\Phi 17.8\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$;
测试速度: $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;
测试设备: MTS 831.20 Elastomer Test System。

(5) 等双轴拉伸
试样尺寸: $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 0.64\text{ mm}$ (厚度);
测试速度: $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;
测试设备: Iwamoto Biaxial Stretcher。

从上海携带了现生产轿车子午线轮胎的 9 种主要胶料来美, 委托当地阿克隆橡胶开发实验室 (ARDL) 进行了测试, 其中的等双轴拉伸试验在阿克隆大学的聚合物工程实验室进行。

由试验结果来计算各种胶料的泊松比, 并算出门尼-里夫林 (Mooney-Rivlin) 方程要求的各种参数。

2.2 理论依据及实验设计

门尼-里夫林应变能函数 (经验公式) 假定材料是各向同性的, 且是完全弹性体, 但实际的工程橡胶通常含有炭黑, 因此在上有其局限性, 在实际处理上通过制定合理的试验方案, 可减少变量因素。

对于单轴拉伸和单轴压缩试验, 只有主

方向 (拉伸方向) 有应力和伸长率的变化, 另外两个方向的伸长率相等, 这两个方向上的应力 (变形区单位应力) 为零。

对于平面拉伸, 由于试样宽度方向尺寸不变, 试样的长度方向 (拉伸方向) 和厚度方向的尺寸有变化, 在宽度方向和厚度方向上的应力为零。

对于等双轴拉伸, 在试样长度方向和宽度方向上的应力相等, 伸长率也相等。厚度方向的应力为零。

由此导出不同的缩减应力和 $I_1 - 3$ 关系式, 在不同的试验方法中, 缩减应力以及 $I_1 - 3$ 代表了不同的含义 (表达式不同), 见表 1。

表 1 不同测试方法的缩减应力与 $I_1 - 3$ 计算式

测试方法	缩减应力	$I_1 - 3$
单轴拉伸	$\frac{\sigma}{a - \frac{1}{a^2}}$	$a^2 + \frac{2}{a} - 3$
单轴压缩	$\frac{\sigma}{a - \frac{1}{a^2}}$	$a^2 + \frac{2}{a} - 3$
平面拉伸(剪切)	$\frac{\sigma}{a - \frac{1}{a^3}}$	$a^2 + 1 + \frac{1}{a^2} - 3$
等双轴拉伸	$\frac{\sigma}{a - \frac{1}{a^5}}$	$2a^2 + \frac{1}{a^4} - 3$

但是不管何种试验, 总能得到下列关系式:

缩减应力 =

$$2 C_{10} + 4 C_{20} (I_1 - 3) + 6 C_{30} (I_1 - 3)^2$$

将上面计算缩减应力的公式简化 (只取前二项) 得到: 缩减应力 = $2 C_{10} + 4 C_{20} (I_1 - 3)$ 。用已知的单轴拉伸数据 (即应力 σ 和伸长率 a), 算出缩减应力和 $I_1 - 3$, 将 $I_1 - 3$ 对缩减应力作图, 可以在低应变段得到近似的斜率, 以此图为基础来预测其它试验——单轴压缩、平面拉伸和等双轴拉伸试验结果 (目前用内插法, 用伸长率来推算出缩减应力), 再根据缩减应力和应力之间的关系式, 就可以求出在每种试验时, 与应变 (伸长率) 对应

的应力值。

用应变能函数的三次方程可在合理的误差范围内用单轴拉伸试验的应力-应变数据来预测平面拉伸试验的应力-应变数据。

3 现阶段成果和讨论

3.1 用体积压缩试验得到的数据计算泊松比^[2]

将一硫化后的橡胶圆柱体放在一个等体积的金属圆筒容器内进行压缩(见 ARDL FEA 试样制备和测试总结)。ARDL 用下述方法来计算有关参数:

(1) 杨氏模量 E ——计算橡胶圆柱体接触刚硬的容器壁以前的曲线(近似直线)斜率;

(2) 体积模量 K ——计算橡胶圆柱体接触刚硬的容器壁以后的曲线(近似直线)斜率;

泊松比 ν 与杨氏模量 E 和体积模量 K 有下列关系:

$$\nu = 0.5 - \frac{E}{6K}$$

据此可以算出泊松比。

3.2 用有限元分析预测材料性能^[3]

具体地说,用简单的单轴拉伸试验数据可以预测该种胶料在其它测试(单轴压缩、等双轴拉伸和平面拉伸)中的应力-应变性能。根据已有试验结果对预测的可信性进行了评价。

以平面拉伸为例,比较预测的平面拉伸值和测量的平面拉伸值,结果表明两者符合较好。当应变范围在 0~150% 时,两者的误差在 0.15 MPa 之内;应变小于 30% 时,虽然绝对误差较小,但相对误差较大。对比的结果有下列结论:

(1) 平面拉伸预测效果很好,尤其在 ARDL 认为的轮胎实际使用条件的应变范围之内(0.7~0.8)。

(2) 单轴压缩的预测结果较好。由于单

轴压缩本身的特点,应变大于 0.4 时的数据意义不大。因此只对应变小于 0.4 时作数据分析。

(3) 由于等双轴拉伸试验只做了一种胶料的试验,由此来对比,其预测结果没有平面拉伸和单轴压缩好,如果要得出比较充分的结论,还需增加等双轴拉伸测试,但费用太高,目前还没有必要。

3.3 用 FEA 二维模型预测 P215/70R15 轮胎充气尺寸

本文中“上海旧设计”系采用上海从前设计的一套图纸的数据来论证对比。

3.3.1 FEA 网格模式

有许多问题是关于网格单元的尺寸大小和形状的。本研究中取单元的大小为 1.5 mm,基本形状为砌砖式(认为此形状比较精确)。图 2 是用 ANSYS 有限元分析软件对 P215/70R15 轮胎自动划分的网格。网格数据见表 2。

计算轮胎充气及负荷状态比较复杂,第 1 步将轮胎接地面分成中心、中间和肩部计算,第 2 步将中间部变成中心部(因在负荷下曲线压成平面)来计算,因此网格单元再次自动划分,使用的网格单元要比单一充气状态多得多,在二维条件下计算轮胎充气及负荷状态下的应力场色谱,计算机工作站的运行时间为 8 h。

3.3.2 预测 T. R. T. R. 设计的零负荷轮胎充气尺寸

预测 T. R. T. R. 设计的 P215/70R15 轮胎零负荷充气尺寸见表 3 及图 3 和 4。

3.3.3 预测上海旧设计的零负荷轮胎充气尺寸

预测上海旧设计的 P215/70R15 轮胎零负荷充气尺寸见表 4 及图 5 和 6。

本研究采用二维模型在预测轮胎充气尺寸方面已经取得了很好效果,由于具备上海设计的 P215/70R15 轮胎安装在 152 mm 宽度轮辋上的实测尺寸可资比较,结果表明用

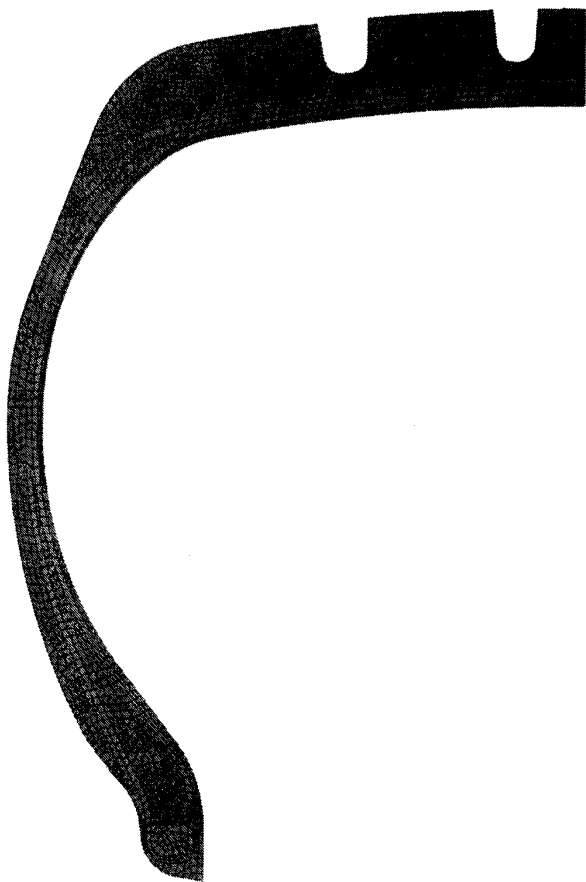


图 2 FEA 网络模式

表 2 网格划分数据

轮 胎 状 态	单元数	节点数
充气状态 1/2 断面	1 685	1 845
充气及负荷下 1/2 断面	6 193	2 046

表 3 预测 T. R. T. R. 设计的 P215/70R15 轮胎
零负荷充气尺寸 mm

项 目	轮胎外直径	轮胎断面宽
TRA 标准	683 ±1.5 %	221 ±4 %
TR 模具(以 165 mm 宽度轮辋设计)	680.0	216.4
在 152 mm 宽度轮辋安装时预测		
FEA 预测值	683.0	212.0
预测误差	无实测值可资比较	
在 165 mm 宽度轮辋安装时预测		
FEA 预测值	681.9	218.3
预测误差	无实测值可资比较	

FEA 预测上海旧设计轮胎的充气外直径十分准确,误差几乎为零(仅为 0.6 mm);而预测轮胎的充气断面宽,误差只有 - 2.2 mm,应该说也较为满意。

深究预测断面宽 - 2.2 mm 误差的由来,认为由下列因素造成:

- (1) 二维模型的准确度不及三维模型,鉴于现有条件,我们是用二维模型处理三维问题。
- (2) 上海轮胎生产在硫化后有后充气工序。我们的 FEA 模型不能考虑轮胎后充气因素。据上海提供的经验,轮胎经后充气后外直径基本不变,断面宽最多胀大 1 mm,这样,断面宽的预测误差为 - 1 mm,只相当于标准断面宽的 0.45 %,在二维条件下应该比较满意了。

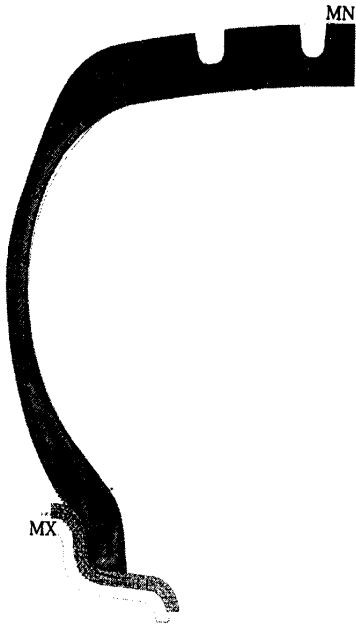


图 3 P215/70R15 轮胎 T. R. T. R. 设计预测充气尺寸(165 mm 宽度轮辋安装)

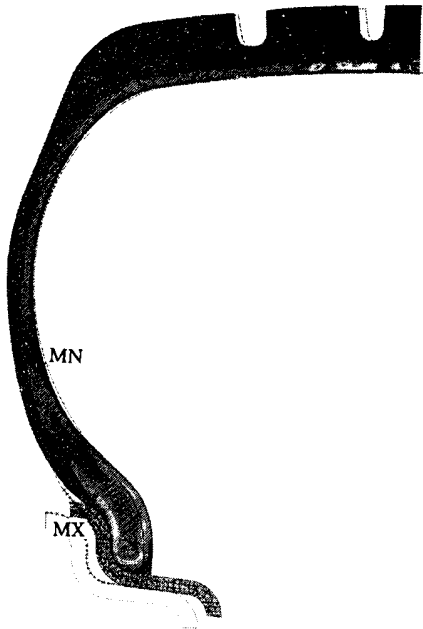


图 4 P215/70R15 轮胎 T. R. T. R. 设计预测充气尺寸(152 mm 宽度轮辋安装)

(3)在材料参数方面,上海的聚酯胎体帘布用167tex/2,钢丝带束层用1×5×0.25;

表 4 预测旧设计 P215/70R15 轮胎
零负荷充气尺寸 mm

项 目	轮胎外直径	轮胎断面宽
TRA 标准	683 ±1.5 %	221 ±4 %
上海模具(以 165 mm 宽度轮辋设计)	681.0	220.0
实测值(152 mm 宽度轮辋安装)	平均 683.0	平均 218.0
在 152 mm 宽度轮辋安装时预测		
FEA 预测值	683.6	215.8
预测误差	0.6	- 2.2
在 165 mm 宽度轮辋安装时预测		
FEA 预测值	682.9	223.1
预测误差	无实测值可资比较	

我们在计算时没有合适的复合材料参数,只能引用文献中的 111tex/2 聚酯帘布和 1×4×0.25 钢丝帘线数据来预测,相信会带来一定差别。

3.4 用 FEA 二维模型对 P215/70R15 轮胎两种设计的应力分析

图 7 和 8 分别为 T. R. T. R. 设计和上海旧设计的负荷下应力场分布色谱图。

两种设计的数学计算均采用相同的受力条件,即:负荷 735 kg,充气压力 200 kPa,胎冠中心点位移距离 33.4 mm。色标代表的量值相等,以兰色为最小,红色为最大(编者注:原文为彩色图像,转为黑白图后,暗处应力较小,亮处应力较大)。红色色谱区代表 10.575 MPa,应力大于 10.575 MPa 用灰色表示。在两种图中,应力最高处有 MX 标志;应力最低处有 MN 标志。

3.4.1 复合材料性能的数学处理

在 ANSYS 程序中需要输入材料性能数据,T. R. T. R. 公司发展了 Lotus 程序来评价上海送试胶料的测定数据,并用 Dr. Yeoh 的理论来计算门尼-里文方程的常数。我们算出的门尼-里文方程的常数项分别为:

$C_{10} = 183.7$

$C_{20} = - 601.5$

$C_{30} = 5\,442.0$

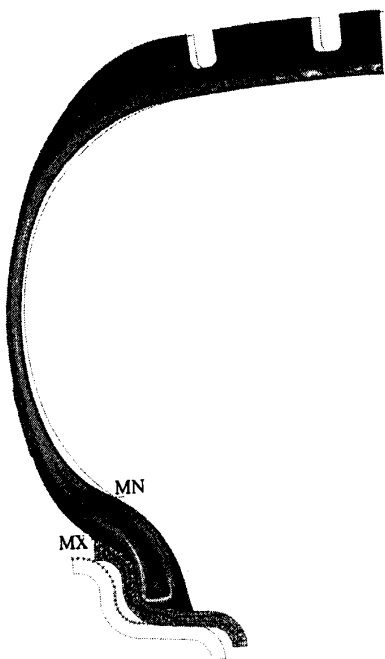


图 5 P215/70R15 轮胎上海旧设计预测充气尺寸(152 mm 宽度轮辋安装)

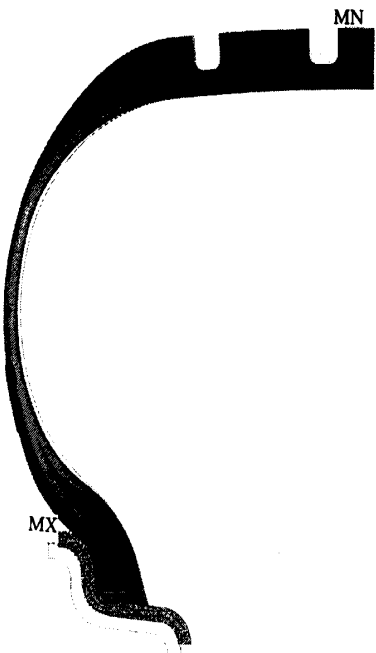


图 6 P215/70R15 轮胎上海旧设计预测充气尺寸(165 mm 宽度轮辋安装)

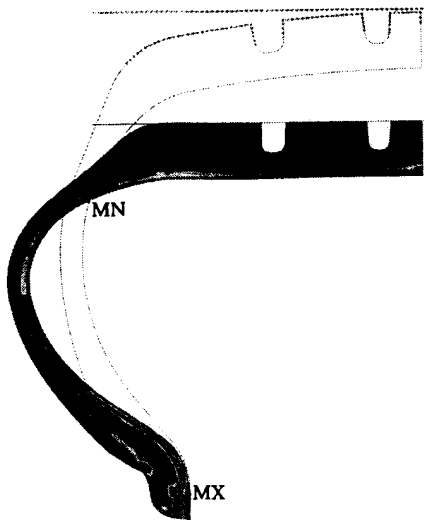


图 7 T. R. T. R. 设计 P215/70R15 轮胎的
负荷下应力场分布色谱图
负荷 735 kg, 充气压力 200 kPa ,
胎冠中心点位移距离 33.4 mm ;
* * * * —胎面接地点

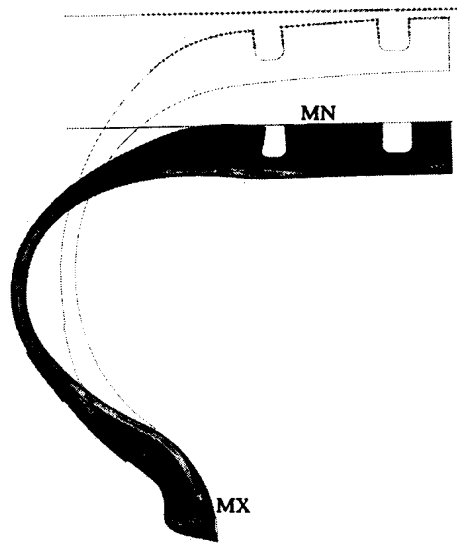


图 8 上海旧设计 P215/70R15 轮胎的
负荷下应力场分布色谱图
注同图 7

3.4.2 对 T. R. T. R. 设计的图谱分析及评价

T. R. T. R. 设计在带束层区域应力分布

合理,带束层的最大应力区域位于轮胎胎冠中央,平坦或基本平坦的带束层在路面和轮胎接触时能提供非常好的稳定性。从图7可见,在胎圈部分内侧有一个最高应力区,但是经验告诉我们这一区域不会发生问题,轮胎很少在这里出问题。从图7的应力场色谱可以得到下列判断:

(1) 由于应力分布合理,预计轮胎会有很好的行驶里程;

(2) 带束层边缘脱层的危险性减小;

(3) 图7显示出,轮胎肩部的花纹沟是张开的(未并拢),因而轮胎会有很好的湿牵引性;

(4) 应力分布均匀,因而驾驶操纵性能良好;

(5) 从图7的应力场色谱图分析,此设计在胎体强度上还有余地,不排除减小帘线密度或改用低旦帘线的可能性(以降低成本)。

3.4.3 对上海旧设计的图谱分析及评价

图8上海旧设计的胎冠弧度过于平坦(胎冠半径太大),在带束层边缘产生很高的应力。当轮胎胎面与路面相接触时,所传导的压力使带束层上翘,色谱图显示在该区域产生很高的应力。带束层上翘和带束层端部应力集中是轮胎设计的大忌,它会带来一系列不良后果:

(1) 缩短轮胎行驶里程;

(2) 带束层边缘脱层的危险性增大;

(3) 造成不规则磨损,以及出现磨胎肩现象;

(4) 轮胎在接地前后有振动现象,从而影响到驾驶操纵性;

(5) 图8显示在轮胎肩部的花纹沟有并拢现象,从而损害了轮胎的湿牵引性;

(6) 此设计对胎体强度的改变十分敏感,因而减小帘线密度或改用低旦帘线都是不可取的。

4 结论

(1) 本研究的非线性有限元分析的实验设计和本公司开发的数据处理程序能满足FEA研究所需要的材料性能数据。

(2) 本研究采用二维模型,在ANSYS 5.3版本支持下具有下述实用结果:①预测轮胎充气尺寸;②在设计胎冠半径条件下得出负荷下的轮胎应力场色谱图;③检查设计轮胎的花纹沟并拢情况;④负荷下的胎肩接地点,因而可以改进和优化轮胎设计,节约试制经费,改善轮胎使用性能。本研究指出通过减小上海旧设计的胎冠半径和胎肩半径可以大大改善原设计的应力分布不合理现象。

当然,本研究只考虑了轮胎在最大负荷下的应力场分布,并且只考虑了接地印痕的中央,实际情况是轮胎在进入接地面和离开接地面时都会有不同的应力分布结果。

普遍认为,在ANSYS的支持下用三维模型计算,其结果要比二维模型精确得多,这是我们下一步的研究方向,但目前的网格节点划分已经比最近一期出版的“Tire Science and Technology”杂志^[4]报道的三维模型要精细得多。

参考文献

- 1 Pannikottu A, Seiler J, Leyden J J. Non-linear finite element analysis support testing for elastomer parts. In: Rubber Division, American Chemical Society 148th Meeting, Cleveland, Ohio, Oct. 17~20, 1995. No. 73
- 2 Wang Dengxiang, Ken Immel. Poisson's ratio measurement and calculation for tire compounds. China Synthetic Rubber Industry-Communication, 1997; 20(3): 125
- 3 Ken Immel, Wang Dengxiang. Predicting properties of carbon black filled rubber compounds for finite element analysis of tires. Rubber World, 1997; 216(6): 43~48
- 4 Danielson K T, Noor A K. Finite elements in cylindrical coordinates for three-dimensional tire analysis. Tire Science and Technology, 1997; 25(1): 2~25

收稿日期 1998-02-21

Progress in Application of FEA to Tire Research

Wang Dengxiang and Tim Fry
[Shanghai T. R. T. R. (N. A.) Inc. ,Akron ,USA]

Abstract A constant solution of Mooney- Rivlin equation at low strain was obtained and the dimensions of inflated tire was successfully predicted from the experimental tire design with non- linear FEA ;the groove wall closing was predicted ,the weakness of the design was found and then the structure design was optimised based on the analysis of the chromatography for tire stress pro- file at load.

Keywords tire ,FEA ,ANSYS software ,stress profile ,chromatography ,prediction

登录普公司摩托车轮胎
技术的新发展

最近,登录普公司介绍了其在摩托车轮 胎技术方面的一项新的革命性进展,即 Sportmax D207 系列摩托车轮胎。在世界范 围内推出的公路和体育两种 D207 型子午线 轮胎是登录普公司坚持不懈的技术研究的最新 产品,并说明该公司推出的运动摩托车轮 胎是高水准的。

这种新型轮胎有多项创新,包括余割波 形沟胎面花纹、新型 SBR 胶料、用于后轮的 新型 SBR 胶料以及新型胎体张力控制系统 (CTCS)。同时开发的 D207GP 型和 D207 型轮胎,其设计对于达到最佳协同效应和部

件相互作用也起到了重要作用。
令人感兴趣的是,余割波形胎面花纹降 低和优化了磨损率,并且可使用较软的胶料, 从而改善了牵引性,减少了(花纹块)前后倒 角磨损,而新的胎体张力控制系统允许胎肩 到胎圈有较高的张力,从而改善了稳定性、操 纵性和抓着力,同时保持了较低的胎冠张力, 即使在高速和大角度倾斜时也显示出较高的 舒适性和控制性。
Sportmax D207 系列现包括从 103/ 70 ZR16(61W)到 190/ 50 ZR17(73W)共 9 个规 格,此外还有 110/ 70 ZR17 (54W)和 150/ 60 ZR17(66W)两个规格将在近期推出。
(董 屹摘译 涂学忠校)

1998 年 4 月份全国轿车产销表 辆

车 型	本月产量	去年同期产量	增长率/ %	本月销量	去年同期销量	增长率/ %	本月产销率	市场占有率 %
小红旗	1 577	2 928	- 46. 1	1 514	2 387	- 36. 6	96. 0	3. 17
桑塔纳	22 503	20 729	8. 6	23 043	20 551	12. 1	102. 4	48. 31
广州标致	892	161	454. 0	811	299	171. 2	90. 9	1. 70
捷达	5 255	3 782	38. 9	5 919	3 944	50. 1	112. 6	12. 41
北京切诺基	667	2 521	- 73. 5	1 261	1 625	- 22. 4	189. 1	2. 64
富康	654	792	- 17. 4	2 271	1 432	58. 6	340. 5	4. 76
夏利	10 627	7 655	38. 8	8 401	8 447	- 0. 5	79. 1	17. 61
奥拓	4 902	3 758	30. 4	4 256	4 146	2. 7	86. 8	8. 92
云雀	0	171	—	220	76	189. 5	—	0. 46
总计	47 077	42 497	10. 8	47 696	42 907	11. 2	101. 3	100. 00

摘自《上海汽车报》,1998-05-17