

# 子午线轮胎 CAD/CAE 与优化设计

杨卫民,程 源

(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

**摘要:**在轮胎结构设计 CAD 中提出一种规划轮廓曲线形状数字化方法,大大增加了轮廓设计的自由度。在此基础上提出一套能够在微机上高效运行的子午线轮胎动态仿真综合分析系统(CASDS)。利用该系统模拟轮胎充气工况、充气且高速旋转工况的轮胎变形情况及应力应变情况等,达到了性能仿真的预期目标。

**关键词:**子午线轮胎;结构设计;有限元分析;仿真;CAD;CAE

**中图分类号:**U463.341<sup>+</sup>.6;O241.82 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8171(2006)02-0067-07

随着汽车工业的发展,有关高性能轮胎的研究活动十分活跃。轮胎子午化是我国轮胎工业发展的方向。轮胎研究涉及材料学、力学和机械工程等多个学科,特别是轮胎材料、轮胎的大变形以及轮胎与路面的接触等均为强非线性问题,因此对轮胎结构与性能仿真的研究是极富挑战性的课题<sup>[1~16]</sup>。本工作对子午线轮胎 CAD/CAE 与优化设计做了较为系统的研究,并在此基础上提出了一套能够在微机上高效运行的子午线轮胎动态仿真综合分析系统(CASDS)。

## 1 子午线轮胎 CAD

本研究选取 205/60R16 轿车子午线轮胎为实例,采用 CASDS 对轮胎进行优化设计的流程如图 1 所示。

在本研究建立的轮胎结构设计 CAD 系统中,提出了一种规划轮廓曲线形状的数字化方法。该方法大大增加了轮廓设计的自由度,并可与 FEM 模块很好地结合在一起,还可快速准确地输入材料特性参数,优化有限元网格划分,从而为快速求解和数据处理创造有利条件。

## 2 子午线轮胎 CAE

### 2.1 FEM 建模

在进行 CAE 分析之前,对用于轿车子午线

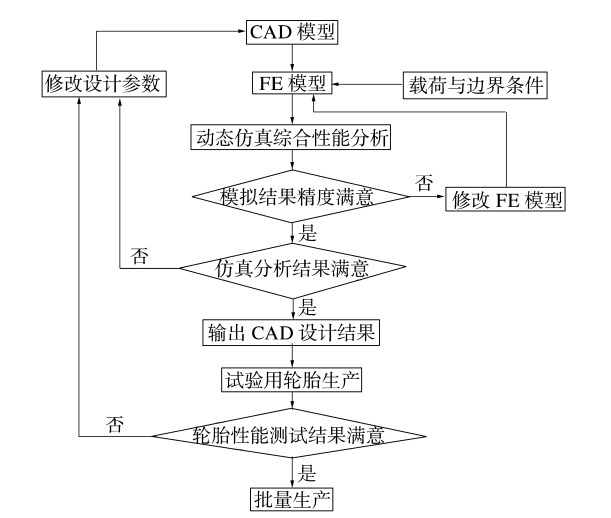


图 1 CASDS 轮胎优化设计流程

轮胎的三大类 11 种材料的物性数据进行了测试,并根据实际情况确定了各种材料的本构关系数学模型,然后采用适当的单元进行模拟<sup>[17~28]</sup>。橡胶/帘线复合结构的有限单元如图 2 所示。205/60R16 轮胎的有限元模型如图 3 所示,模拟结果如图 4 所示。

### 2.2 CAE 分析结果(部分)

为了预测试验轮胎在垂直载荷条件下的力学响应特征,参照试验标准要求,在 5 种不同的垂直载荷作用下,对轮胎横断面上的第一主应力、第一主应变、接地印痕和主要变形参数等进行了 CAE 分析。

(1)第一主应力分布及其随载荷的变化  
第一主应力分布及其随载荷的变化如图 5 和

**基金项目:**北京市科技新星计划资助项目(954811600)  
**作者简介:**杨卫民(1965-),男,湖南会同人,北京化工大学教授,博士,主要从事高分子材料成型加工原理及设备的研究工作。

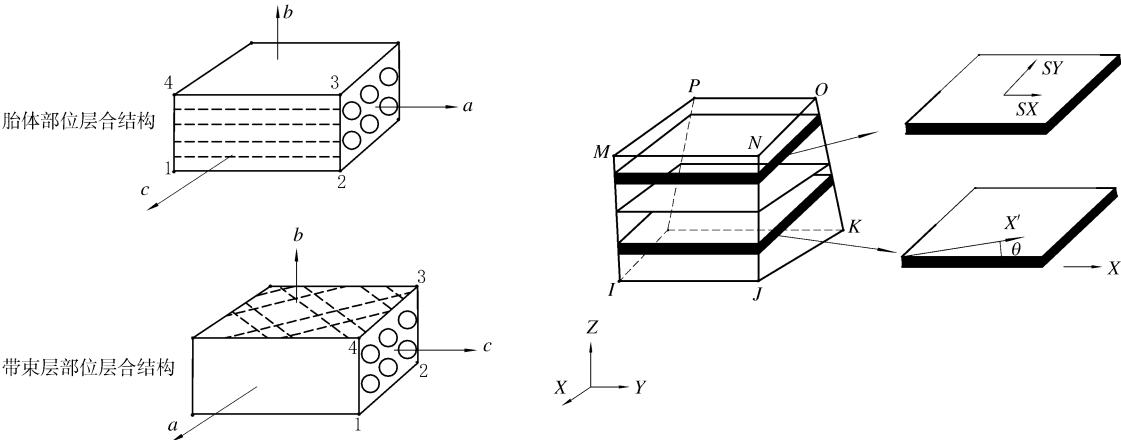


图2 橡胶/帘线复合结构的有限单元示意

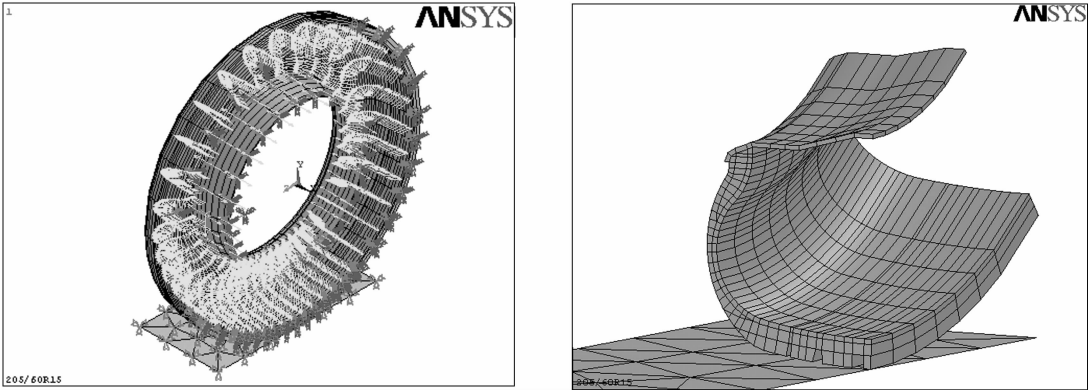


图3 205/60R16 轮胎的有限元模型

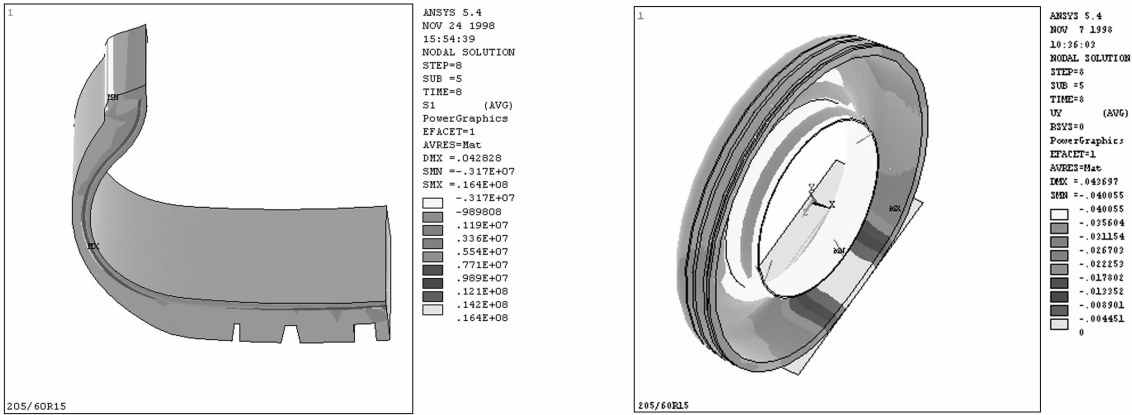


图4 205/60R16 轮胎的有限元分析模拟结果

6 所示。

(2)第一主应变分布及其随载荷的变化

第一主应变分布及其随载荷的变化如图 7 和 8 所示。

(3)轮胎在不同垂直载荷下的印痕和接触压

强分布

轮胎在不同垂直载荷下的印痕和接触压强分布如图 9 所示。

(4)在不同垂直载荷下轮胎印痕区特征参数在不同垂直载荷下轮胎印痕区的特征参数如

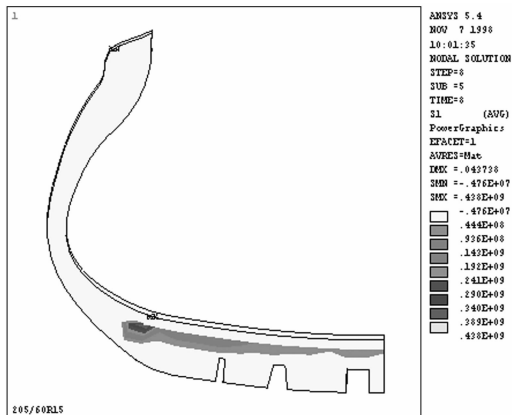


图 5 垂直载荷为 6 775 N 时接地区中部截面上第一主应力分布情况

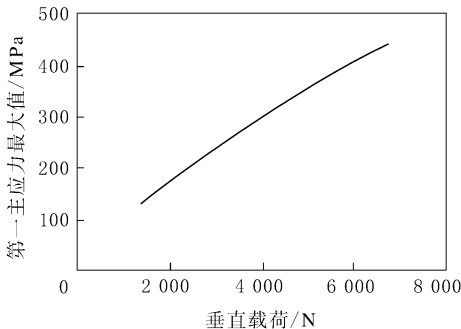


图 6 接地区中部截面上第一主应力最大值随垂直载荷的变化曲线

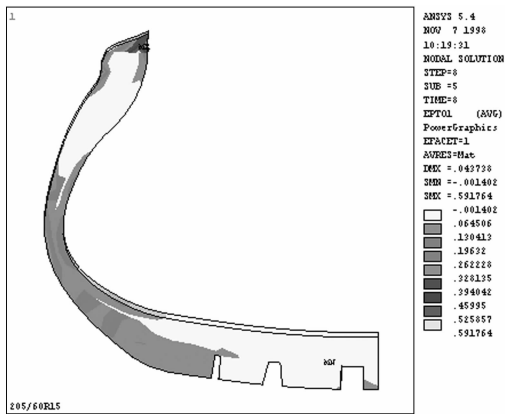


图 7 垂直载荷为 6 775 N 时接地区中部截面上第一主应变分布情况

表 1 所示。

2.3 试验研究结果

为了检验本研究得到的 CAE 结果与实际结果的吻合程度,通过疲劳试验和变形实测等方法

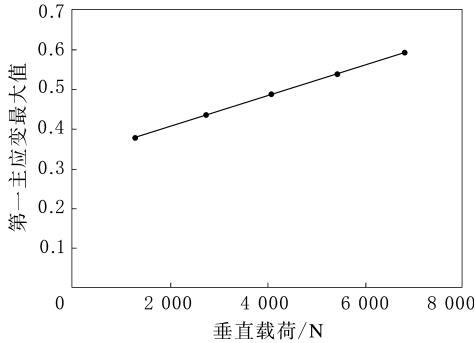


图 8 接地区中部截面上第一主应变最大值随垂直载荷的变化曲线

对部分模拟结果进行了直接或间接的验证性试验研究。

(1) 疲劳试验结果

疲劳试验结果如图 10 所示,轮胎疲劳破坏情况与 CAE 分析的应力分布情况相同。

(2) 垂直载荷下变形模拟计算与试验结果对比

垂直载荷下的变形模拟计算与试验结果对比如图 11 所示。由图 11 可见,与试验结果相比,计算断面宽度较大、半径较小,而下沉量基本一致。

3 子午线轮胎优化设计(以带束层为例)

带束层结构是影响子午线轮胎性能的关键因素。本研究在 205/60R16 轮胎普通带束层结构(如图 12 所示的 N 型)的基础上,提出了 A,B,C 和 D 四种改进形式,分别如图 13~16 所示。然后采用前述 CAD/CAE 系统对其进行仿真分析计算,并将部分结果进行对比分析,如图 17~24 所示。模拟结果显示,这 5 种结构中 D 型最好。采用 D 型带束层结构可简化加工工艺,并有望获得良好的高速性能。

4 结语

本研究提出了一种规划轮廓曲线形状的数字方法,以此为基础,提出了一套能在微机上高效运行的子午线轮胎动态仿真综合分析系统 CAS-DS。利用该系统模拟了轮胎充气工况、充气且高速旋转工况的轮胎变形情况及应力应变情况等。通过对 205/60R16 轮胎设计方案的性能仿真分析,确立了试验轮胎设计参数的可行性等,性能仿

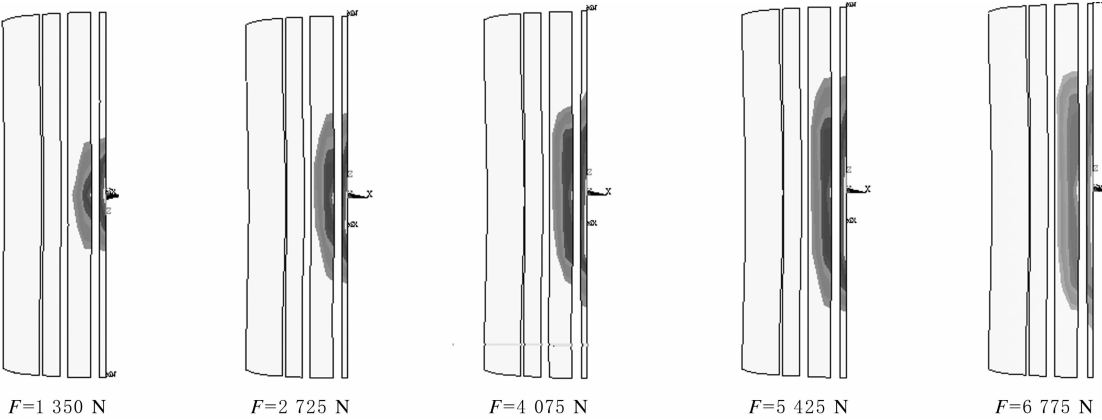


图 9 轮胎在不同垂直载荷下的印痕和接触压强分布

表 1 不同垂直载荷下轮胎印痕区的特征参数

| 项 目                    | 负荷/N  |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 1 350 | 2 725 | 4 075 | 5 425 | 6 775 |
| 负荷下断面宽/mm              | 211   | 220   | 228   | 236   | 243   |
| 负荷下静半径/mm              | 304   | 296   | 290   | 283   | 277   |
| 下沉量/mm                 | 7.98  | 15.6  | 21.9  | 27.8  | 33.4  |
| 下沉率/%                  | 6.5   | 12.7  | 17.9  | 22.7  | 27.2  |
| 印痕长轴 <sup>1)</sup> /mm | 98    | 141   | 170   | 192   | 215   |
| 印痕短轴 <sup>1)</sup> /mm | 102   | 128   | 149   | 157   | 160   |
| 最大压强/kPa               | 573   | 700   | 803   | 877   | 962   |

注:1)该数值为根据接触地区变形后轮胎表面节点位移量计算得出,印痕长轴方向系指轮胎滚动方向。

真结果与试验轮胎的实测结果十分吻合,证明 CASDS 的模拟结果是可靠的。利用 CASDS 可以方便快捷且低成本地进行轮胎的优化设计。作为应用实例之一,对子午线轮胎带束层结构进行了优化设计,得到了一种综合性能优异的 D 型带束层结构设计。



图 10 疲劳试验轮胎切片

致谢:在研究过程中北京化工大学徐鸿教授在有限元分析方面给予了指导和帮助;在试验研究方面,北京首创轮胎有限公司总工程师聂秋海等给予了大力支持,在此表示感谢。

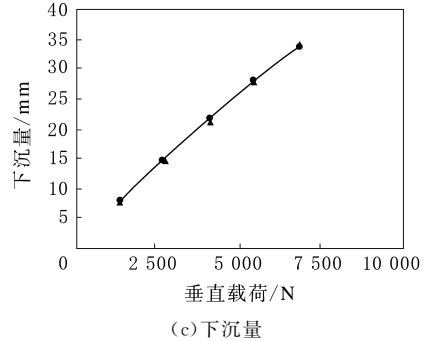
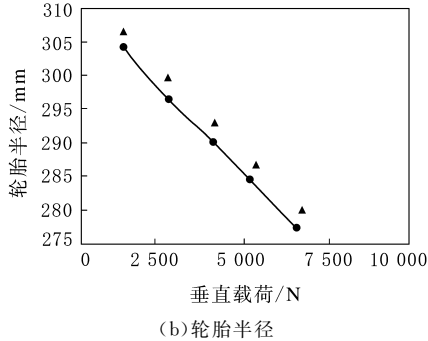
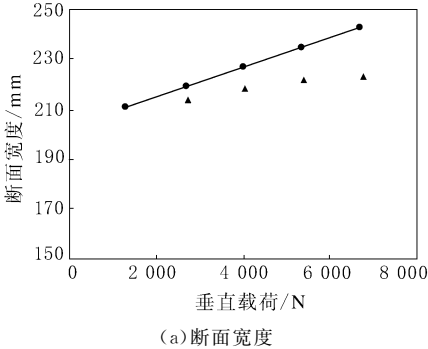


图 11 不同垂直载荷下轮胎的变形

●—CAE 模拟计算结果;▲—试验结果。

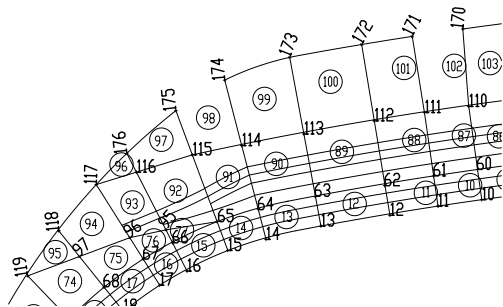


图 12 普通结构带束层(N 型)

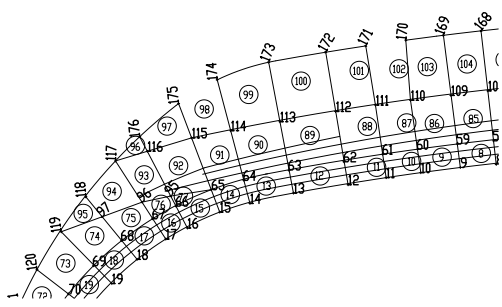


图 16 D 型带束层结构

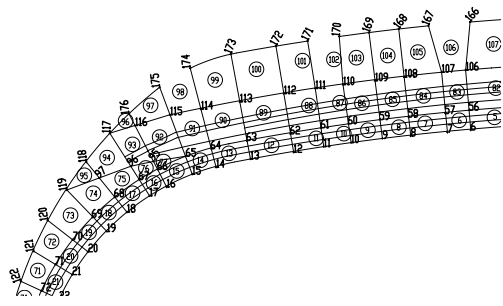


图 13 A 型带束层结构

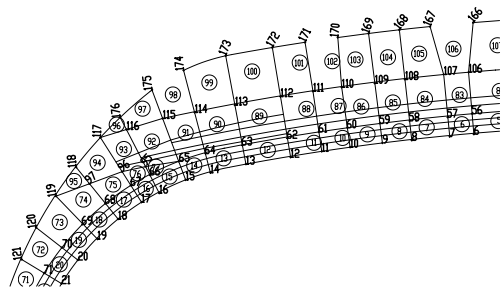


图 14 B 型带束层结构

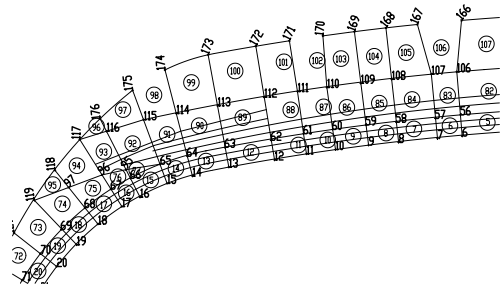


图 15 C 型带束层结构

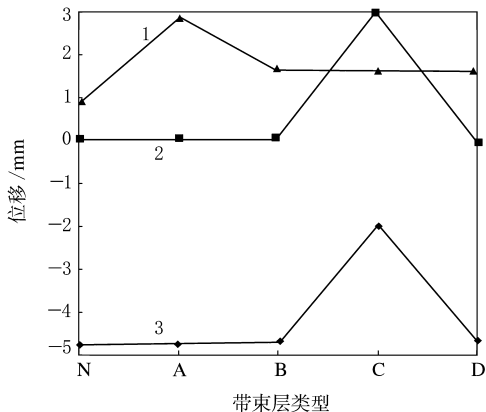


图 17 不同轮胎断面宽及胎冠和胎肩节点位移  
1—胎肩；2—胎冠；3—断面宽。

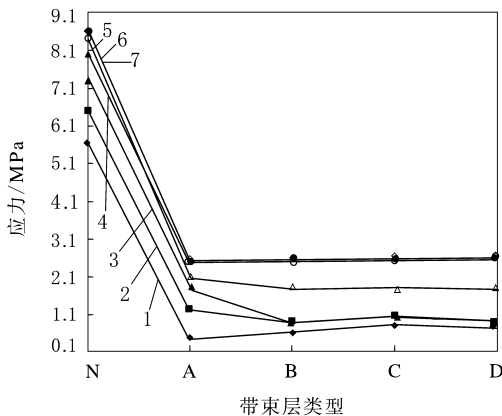


图 18 不同轮胎胎肩部位周向应力

单元:1—62；2—63；3—64；4—65；5—66；6—67；7—68。

参考文献：

[1] 彭 迈,林惠音,俞 淇. 轮胎结构设计[M]. 广州:华南理工大学,1992. 1-3.  
[2] 梁守智,谢遂志,薛虎军,等. 充气轮胎理论基础[M]. 北京:北京橡胶工业研究设计院,1990. 493-564.

[3] 周 建,李 龙. 橡胶复合材料帘子线性能特征[J]. 化工新型材料,1998(7):22-23.  
[4] 刘 力,张立群,冯予星. 绿色轮胎研究的发展[J]. 橡胶工业,1999,46(4):245-248.  
[5] Nakajima Y. 最佳轮胎轮廓理论及其应用[J]. 姚岐轩摘译. 轮胎工业,1998,18(8):462-467.  
[6] 何晓玫,刘天臣,吴桂忠. 低断面轿车子午线轮胎 PDEP-S 设

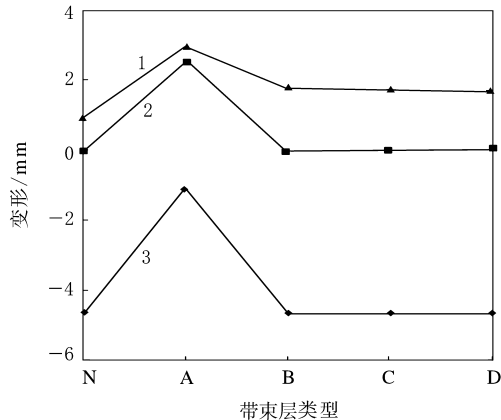


图 19 速度  $150\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时不同轮胎直径的变形  
注同图 17。

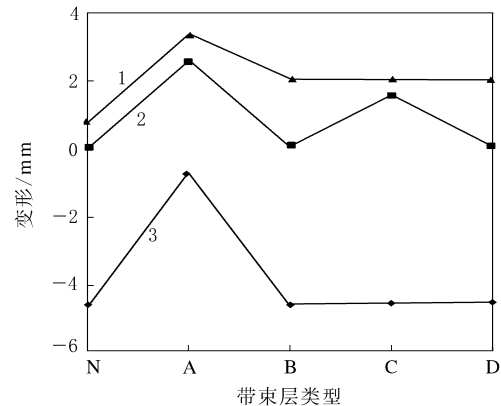


图 20 速度  $300\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时不同轮胎直径的变形  
注同图 17。

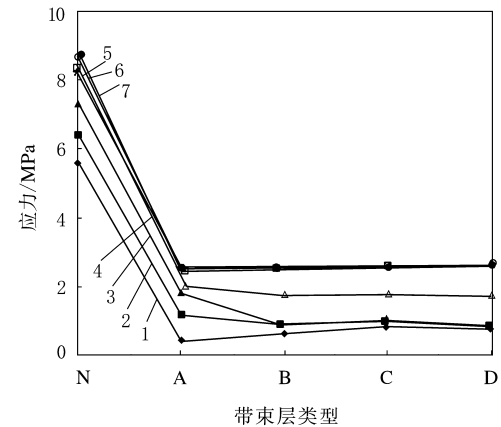


图 21 速度  $150\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时不同轮胎胎肩周向应力  
注同图 18。

计理论[J]. 轮胎工业, 1997, 17(3): 148-152.

[7] 朱兴元, 谢志民, 阎相桥, 等. 子午线轮胎带束层弹性常数预报[J]. 轮胎工业, 1998, 18(1): 20-23.

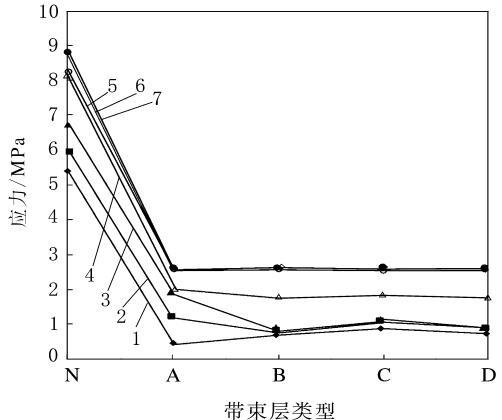


图 22 速度  $300\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时不同轮胎胎肩周向应力  
注同图 18。

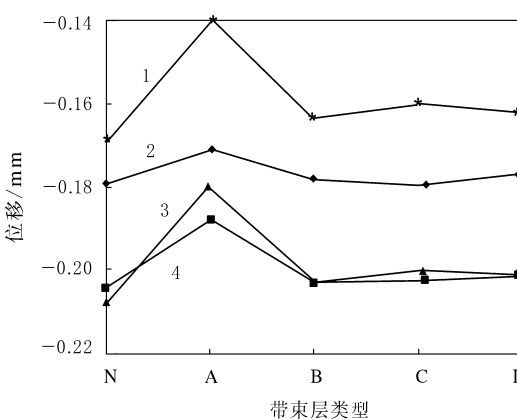


图 23 不同轮胎接地部位胎侧节点位移  
节点: 1—3 725; 2—3 722; 3—3 724; 4—3 723。

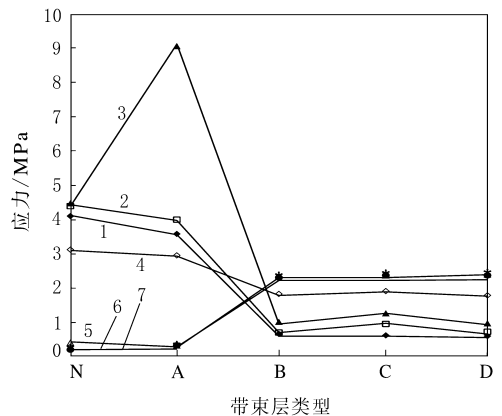


图 24 不同轮胎接地部位胎肩周向应力  
节点: 1—3 662; 2—3 663; 3—3 664; 4—3 665;  
5—3 666; 6—3 667; 7—3 668。

[8] 闫相桥, 王友善, 乌大琨, 等. 子午线轮胎带束层中应力的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(8): 463-467.

[9] Jelsma B. Designing new technology with aramid fibre[J]. Tire Technology International,1997;462-466.

[10] Wrana C, Eisele U, Kelbch S. Measurement and molecular modeling of rolling resistance in tire treads[J]. Kautschuk und Gummi Kunststoffe,2000,53(3):126-128.

[11] Kao B G, Nuthukrishnan M. Tire transient analysis with explicit finite element program[J]. Tire Science and Technology,1997,25(4):230-244.

[12] Abe A, Kamegawa T, Nakajima Y. Optimum Young's modulus distribution in tire design[J]. Tire Science and Technology,1996,24(3):204-219.

[13] Kabe K, Morikawa T. A new tire construction which reduces ply steer[J]. Tire Science and Technology,1991,19(1):37-65.

[14] Weiss M, Tsujimoto S, Yoshinaga H. Belt construction optimization for tire weight reduction using the finite element method[J]. Tire Science and Technology,1993,21(2):120-134.

[15] Yang W M. CAE of the radial tire[A]. JSPP'01 Tech. Tokyo: 2001-05-31.

[16] 刘 勇,杨卫民. 轮胎结构设计理论研究进展[J]. 弹性体, 2001,11(1):45-49.

[17] 杨卫民,崔文勇,徐 鸿,等. 子午线轮胎性能的计算机仿真和优化设计[J]. 橡胶工业,2001,48(1):32-37.

[18] 刘 勇,杨卫民. 带束层对轮胎性能的影响[J]. 橡胶工业, 2002,49(2):90-93.

[19] 刘 勇,杨卫民. 子午线轮胎材料与结构研究进展[J]. 轮胎工业,2002,22(3):131-135.

[20] 黄文龙,杨卫民. 子午线轮胎 CAD 系统与 ANSYS 软件的接口程序[J]. 轮胎工业,2001,21(1):24-26.

[21] 刘 勇,杨卫民. 帘线假定伸张值及其在轮胎性能仿真中的模拟方法[J]. 橡胶工业,2001,48(11):670-673.

[22] 黄文龙,杨卫民,聂秋海,等. 基于 Windows 平台的子午线轮胎 CAD 系统[J]. 北京化工大学学报,2000,27(4):99-102.

[23] 杨卫民,崔文勇,丁玉梅,等. 胎体帘线预伸张率对子午线轮胎性能的影响[J]. 合成橡胶工业,1999,22(3):181.

[24] 杨卫民,崔文勇,丁玉梅,等. 带束层帘线角对子午线轮胎性能的影响[J]. 合成橡胶工业,1999,22(3):182.

[25] 杨卫民,崔文勇,徐 鸿,等. 子午线轮胎的三维非线性有限元分析[J]. 北京化工大学学报,1999,26(4):51-53.

[26] 任巧贤,崔文勇,杨卫民. 子午线轮胎自由状态下的固有频率和振型的三维有限元分析[J]. 中国化工装备,1999,1(3):32-37.

[27] 刘 勇,杨卫民. 轮胎材料力学性质的实验研究[J]. 橡胶工业,2002,49(6):325-328.

[28] 刘 勇,杨卫民. 轮胎复合材料力学性质的实验研究[J]. 橡胶工业,2002,49(5):261-266.

收稿日期:2005-08-22

# CAD/CAE and optimized design of radial tire

YANG Wei-min, CHENG Yuan

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A digitalization method of programming tire profile was established in CAD for tire structure design to significantly increase the flexibility in profile design of tire. Based on this method, a comprehensive analysis system for dynamic simulation (CASDS) of radial tire, which could be effectively run on the computer, was proposed. CASDS could be used to simulate the working conditions of inflated tire, and the deflection and stress/strain of inflated tire rotating at high speed.

**Keywords:** radial tire; structure design; FEA; simulation; CAD; CAE

## 受力轮胎花纹块与胎体 变形量测试装置

中图分类号: TQ336. 1; U467. 4 文献标识码: D

由上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司申请的专利(专利号 01211100. 7, 公开日期 2001-12-26)“受力轮胎花纹块与胎体变形量测试装置”, 主要由加载部分、测试部分和模拟路面部分组成, 采用机械或液压方式加载、激光

测试, 使轮胎和轮胎胎面花纹在多种模拟路面上承受多种载荷, 产生各种变形和力学特征, 通过计算机实时对测试数据进行处理、显示, 可以准确、方便地掌握轮胎承载、变形以及轮胎内部特性与外部特性的关系。该装置测试面广, 操作方便, 价格比进口测试装置低, 便于推广使用。

(杭州市科技情报研究所 王元荪供稿)