

计算机在轮胎结构设计中的应用

刘大众

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 介绍计算机在轮胎结构设计中的应用——轮胎 CAD 系统的主要内容和功能。轮胎 CAD 系统包括技术设计软件、施工设计软件、模具设计软件和数据管理软件 4 个子系统;它是在总结轮胎设计理论和经验的基础上,通过建立一系列数学和力学模型并应用相应的计算方法实现轮胎辅助设计的有效工具。应用该系统可大大提高设计精度和效率,通过多阶段多方案优化设计,减少设计失误,缩短新产品开发周期,提高轮胎质量。

关键词 轮胎,计算机辅助设计

计算机技术的应用得到轮胎行业的广泛重视。为提高轮胎设计效率,改进轮胎质量,加速新产品开发,轮胎设计者使用计算机作为其主要设计工具已成为一种必然趋势。

计算机在轮胎结构设计中的应用,主要指采用 CAD(计算机辅助设计)技术,完成常规的轮胎设计、计算和绘图工作;进而开展轮胎力学性能研究,实现轮胎结构优化设计。

“六五”期间,我院即已开展轮胎 CAD 技术的研究工作。“七五”期间,化工部组织我院完成“计算机在轮胎设计中的应用”项目的技术攻关,率先在国内实现用计算机辅助完成轮胎结构与绘图工作,大幅度提高设计效率和计算精度。“八五”期间,CAD 技术进一步发展,我院先后与二十余家大中型轮胎厂进行技术合作,开发了适用于轮胎厂具体情况的斜交轮胎和子午线轮胎 CAD 软件,并向东南亚的轮胎公司转让 CAD 技术。同期,上海轮胎橡胶集团公司、华南理工大学、浙江大学、青岛化工学院等单位也相继研制轮胎 CAD 软件,形成轮胎行业竞相开发应用 CAD 技术的热潮。经过科研院所、大专院校和轮胎企业的共同努力,已实现“25 个主要轮胎厂在产品设计上采用 CAD 技术”的“八五”科技进步规划目标。

国外一些大轮胎公司亦重视计算机应用技术的开发。在 70 年代,已将 CAD 技术应用

于轮胎设计工作;并陆续投入大量资金购置高性能计算机,深入开展轮胎力学性能研究,应用轮胎优化设计技术,不断推出新产品。

米其林、固特异和普利司通等轮胎公司采用巨型计算机和高性能的软件,除完成轮胎产品设计与绘图工作外,还可研究模拟轮胎动态力学性能;预测轮胎各部件应力-应变、滚动阻力、生热和磨损等。80 年代中期以来,各大轮胎公司陆续提出 CAD 领域新的理论研究成果,诸如 RCOT, PSP, DSOC, CSSOT 等。这些成果推动了新一代轮胎产品的开发^[1]。

1 CAD 系统硬件软件配置

轮胎 CAD 系统由硬件和软件组成。目前建立一套高水平的轮胎 CAD 系统可作如下选择。

1.1 CAD 硬件平台

选用 64 位奔腾计算机是 1996 年的主导趋势。主机性能:CPU Pentium/133/150/166MHz,内存 16MB,硬盘 1.6GB,4 速 CD-ROM,64 位图形加速卡,显示内存 2MB,381mm/432mm(15 英寸/17 英寸)平面直角彩显。

绘图仪是计算机输出图形的重要设备。以前主要选用笔式绘图仪。使用时图纸反复滚动变形,引起图形错位,绘图精度低,速度

慢,且笔墨易堵,难以满足用户的高标准要求。

喷墨绘图仪是近几年发展起来的新型绘图仪,与笔式绘图仪相比,速度快,线型多,色彩丰富,一遍单向走纸成图,绘图质量高,价格适中。因此,更新或选用绘图仪时,应优选高精度喷墨绘图仪。常用的有 HP, Summa 和 Calcomp 系列。性能指标:分辨率 600DPI, A1/A0 幅面,内存 2MB 以上,约 6min 绘制一张 A0 图纸。

数字化仪是一种交互式的图形输入设备。常用 Summa 和 Calcomp 系列。性能指标:分辨率 $100 \text{ 线} \cdot (\text{mm})^{-1}$, A3/A1 幅面。

CAD 硬件应选用性能价格比高,有扩展余地的标准化设备。

1.2 CAD 软件系统

CAD 软件系统包括系统软件、支撑软件和应用软件。软件的技术水平是决定该系统效率和性能的关键因素。

系统软件包括操作系统和语言处理系统等。通常使用 MS-DOS 6.2, 中文 UC DOS 5.0 和中文 Windows 3.2 操作系统。Visual Basic 是可视化的面向对象的编程语言,含有一系列图形工具和高级语言指令,可快速方便地进行程序设计,是开发 CAD 软件的一种优选编程工具。FORTRAN 是用于科学计算的常用高级语言,大多数有限元软件均用该语言编写。

支撑软件是开发 CAD 应用程序所需的各种通用软件,主要包括几何造型、绘图、有限元分析、数据库管理等软件。

Auto CAD 是在工程设计界应用最为广泛的图形软件,已推出 13.0 版本。其中以汉化的 Auto CAD 12.0 版本更为方便实用,具有强大的二维和三维设计绘图功能;提供用 C 语言编程的 ADS 开发系统和 Autolisp 语言,使用户拥有能二次开发的有效工具;可在微机和工作站运行;可配置数十种绘图仪和数字化仪及打印机等外部设备。Auto CAD

可生成基本图形元素:直线、圆弧、圆、椭圆、组合线、多边形、曲面和文本等;具有灵活的图形编辑功能,可用多种方式修改设计图,例如,复制、镜像、阵列、删除、剪切、移动、旋转、偏移、倒角、修改、恢复、扩展等;并可标注尺寸线,绘制阴影线,填充图案,设置图层、颜色,建立图块;亦可通过 DXF 图形交换文件与高级语言程序联接。因此,汉化 Auto CAD 12.0 是优选的 CAD 支撑软件。

有限元软件是进行轮胎结构力学分析的重要工具。通过计算轮胎的应力-应变力学性能为结构设计提供依据。有限元前、后处理程序和计算分析程序构成有限元软件包。前处理程序实现网格自动划分、生成节点、单元、材料、载荷等数据。后处理程序实现计算结果的显示与绘图,生成应力-应变场分布图,显示变形前后结构形态。常用的非线性有限元分析程序有 NASTRAN, ANSYS, ADINA, NFAP 等,可实现二维/三维轮胎力学分析。

轮胎 CAD 应用软件是在系统软件和支撑软件基础上,为完成结构设计任务而研制的专用软件。开发 CAD 应用软件需综合运用设计方法学、计算方法和计算力学、数据结构与管理、计算机图形学等专业技术。研制开发过程包括系统分析、算法和设计、程序编码、调试和运行维护五个阶段。

2 轮胎 CAD 软件的功能

轮胎结构设计包括技术设计,施工设计和模具设计三个阶段,并有大量设计数据需处理。在总结归纳轮胎设计理论和经验的基础上,建立一系列数学模型,例如:轮胎静力平衡微分方程,帘线应力-应变计算公式,机头宽度计算公式,胶料体积计算公式,轮胎花纹坐标三维转换公式,复合材料力学计算公式等。使用 Visual Basic 和 FORTRAN 语言,将上述数学模型按适当的计算方法,编制为应用程序,用以实现轮胎辅助设计。

参照常规设计过程,把轮胎 CAD 软件

分成四个子系统软件:技术设计软件,施工设计软件,模具设计软件和数据管理软件。每个子系统由多个应用程序组成。

技术设计软件包括:轮胎负荷计算;充气平衡轮廓计算与绘图;帘线和钢丝圈应力计算;外胎内外轮廓设计;轮辋曲线图绘制;外胎与轮辋配合图绘制;胎面花纹设计;外胎总图设计;外胎花纹三维图设计等程序。

施工设计软件包括:成型机头曲线设计;单钢圈、双钢圈和三钢圈外胎材料分布图设计;成型机头宽度计算;外胎实心胎面胶体积计算;花纹沟和花纹块体积计算;外胎施工表设计;A型和B型胶囊设计;水胎设计;内胎设计和垫带设计等程序。

模具设计软件包括:A型和B型外胎硫化机模具设计;外胎硫化罐模具设计;水胎模具设计等程序。

数据管理软件包括:外胎数据管理;材料分布图数据管理;A型和B型硫化机模具数据管理,硫化罐模具数据管理以及轮胎设计说明书编制等程序。

以上程序均为中文屏幕提示,且用中文菜单管理。启动轮胎CAD系统时,屏幕上出现主菜单,显示四个子系统软件;根据需要任选一个子系统,回车后即进入子菜单,并显示有关的应用程序;此时将光标移动到选用的程序,回车后即可运行该程序,使用简便易行。

每个程序运行时都需要从有关数据文件中读取结构参数。轮胎的规格、外直径、断面宽等参数是与每个轮胎程序相关的。用这些基本参数建立外胎结构数据文件。花纹设计和机头曲线设计等程序也建立各自的数据文件。每个程序运行时其计算结果均生成数据文件保存。该文件可被有关程序调用,例如,设计外胎材料分布图时,可利用外胎结构数据文件、外胎轮廓数据文件、机头曲线数据文件等,这时只需输入帘布差级、反包高度等少量参数,即可绘制材料分布图。合理确定数据

结构,可以数据资源共享,避免重复输入参数,提高设计效率。

每个轮胎设计程序由通用的计算、绘图、尺寸线标注子程序及专用的计算程序组合而成,采用模块化结构。通用计算子程序用于计算轮胎各个零部件的定形、定位尺寸,例如,计算直线与直线的交点、直线与圆弧的交切点、圆弧与圆弧的交切点;计算弧长、体积、面积等。绘图子程序可绘制直线、圆弧、圆、椭圆、样条曲线等基本图形,由此构成复杂的轮胎图。

每个轮胎设计程序均可生成DXF图形交换文件,进入AutoCAD,实现图形的修改和编辑,直到图形满意后再由绘图机输出,此即所谓的“动态绘图”。以下介绍主要的程序功能。

2.1 薄膜网络理论在轮胎设计中的应用

常规的轮胎设计一直以薄膜网络理论为依据。采用非自然平衡轮廓理论设计轮胎已成为发展趋势。它以设计者的经验为基础,通过求解轮胎静力平衡微分方程组可计算轮胎各种平衡轮廓(包括自然平衡轮廓和非自然平衡轮廓),并可进行轮胎力学分析。

在轮胎制造及使用过程中,往往承受非均匀分布的压力,这通常是由与轮胎接触的物体引起的。例如:硫化时模型与轮胎接触产生的约束作用力;使用时轮胎与地面接触产生接地面压力。这些非均匀分布的压力改变轮胎断面的形状。子午线轮胎带束层对胎体的约束作用也改变胎体原有的平衡形状。用压力函数表示轮胎受到的非均匀分布的作用力。斜交轮胎的压力函数曲线是沿胎体光滑平缓地变化,而子午线轮胎的压力函数则是在带束层和胎体部位取不同的计算公式,即采用不同的压力分担率。因此,斜交轮胎和子午线轮胎的计算平衡内轮廓有很大的区别。

确定轮胎模型内轮廓是技术设计的重要环节。首先由设计者根据经验确定若干结构

边界条件,例如胎里直径、断面宽度、零点直径、胎肩厚度等。用手工绘图法,可设计出多条模型内轮廓线,使其均满足同样的边界条件,设计结果不是唯一的,而经硫化形成的轮胎内轮廓是一种力学平衡轮廓。通过计算得到的内轮廓符合力学原理,其计算结果是唯一的。设计者确定一组边界条件,即可计算出对应的轮胎模型平衡轮廓的几何参数、帘线应力-应变、压力函数、薄膜应力等数据,并可由此绘制有关图形。

在轮胎设计过程中,需要预测轮胎充气外形尺寸,使其符合国家标准;还要掌握胎体、钢丝圈等部件的强度和应力-应变等力学特性,以便对原设计方案进行验证和修改。轮胎充气形状受原材料、结构、工艺等因素影响。使用不同的骨架材料制造的轮胎,其充气外形尺寸不同;采用不同的工艺条件生产的轮胎,充气形状和性能也不同。为了较准确地预测轮胎充气形状,需要掌握骨架材料力学性能,并对工艺条件和轮胎结构特征进行研究。在此基础上,即可由轮胎模型预测充气形状。

根据薄膜网络理论进行结构设计,可满足不同的设计边界条件。由传统的自然平衡轮廓发展到非自然平衡轮廓设计,扩大了薄膜理论的应用范围,可适应轮胎产品多样化的需要。

2.2 轮胎断面轮廓设计及轮辋配合图绘制

在轮胎内外轮廓的初步设计阶段,往往

有多种方案设想。选择不同的外直径、断面宽、圆弧半径等参数,可组成多种轮胎设计方案。用计算机可在短时间内按不同参数组合绘制出数十种设计方案图,供分析和选用。设计每个方案时,还将轮胎内腔空气容积、内轮廓弧长和内表面积等参数计算出来。

轮胎和轮辋配合情况是决定轮胎使用性能的重要因素。配合过松则胎圈易磨损;过紧则钢圈易于断裂。由于轮胎胎圈部位形状与轮辋曲线的差别不大,凭手工绘图很难准确反映其配合位置,往往只能凭经验判断。在 CAD 软件中建立了常用轮辋曲线图形数据库。其中包括:5°深槽轮辋、半深槽轮辋、平底轮辋、平底宽轮辋、全斜底轮辋、对开式轮辋、15°深槽轮辋等七种类型,375 种国内常用和 TRA 推荐使用的轮辋。由于每种轮辋又有数种或十数种许用直径,因此,轮辋曲线图形数据库实际包括数千种不同规格型号的斜交轮胎和子午线轮胎全系列轮辋供选用。对于载重轮胎、轻载轮胎、轿车轮胎、工程轮胎、工业轮胎、农业轮胎、摩托车轮胎等轮辋,只要输入其型号和直径,即可从图形中调用该轮辋,并绘制轮胎与轮辋配合图,为方案论证提供重要依据(参见图 1)。

2.3 轮胎花纹总图和三维图设计

用计算机设计花纹图有两种方法:一种是在屏幕上根据直观判断自由作图;另一种是编制各种花纹程序,输入参数作图。这两种方法各有特点。对于常用的定型的花纹图,例

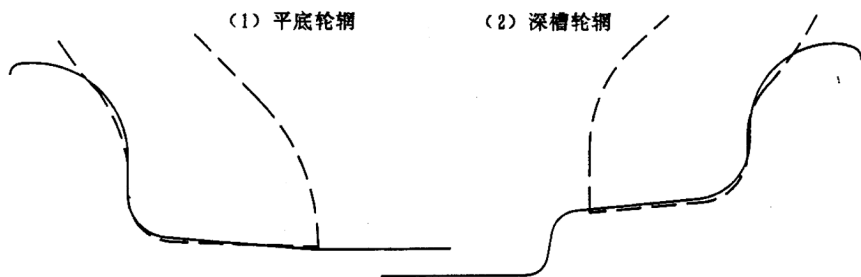


图 1 轮胎与轮辋配合图

如各种烟斗花纹、羊角花纹、曲折花纹和混合花纹等,均为编制专用的花纹设计程序。通过输入参数即可绘制花纹图。只要改变花纹的定位坐标、角度和圆弧半径等参数,即可设计新花纹。对于轿车子午线轮胎,在胎冠和胎肩常采用不等节距及不同排列顺序的花纹,用一般的作图方法很难准确绘制,对此也需要编制专用花纹程序。显然,使用程序设计花纹效率是高的。如欲设计新型的花纹,尚无专用程序,则可用 Auto CAD 软件,在一个花纹节距的框图内,用交互作图方式进行设计。使用花纹程序和 Auto CAD 软件相配合,可完成各种类型的花纹设计。

常规方法只进行二维花纹图设计,直到轮胎产品试制出来才能看见设计意图的体现。用计算机完成具有真实感的三维花纹设计图,则比制造轮胎模型更方便,更经济,且可实现多种花纹三维图方案对比,减少失误。

在完成花纹展开图后,为进行三维坐标转换,首先应建立花纹二维坐标的数据文件。在 Auto CAD 中调用花纹转换程序可完成该工作。以前要用数字化仪手工逐点选取花纹坐标值,速度慢且易漏取线段坐标。经改进,通过使用选择集构造函数和实体名检索函数等,可在屏幕上自动读取所有花纹实体的数

据,并将直线和圆弧进一步细分节点,自动计算并建立花纹二维节点数据文件。与手工取点相比,速度大幅提高,且避免漏取线段。

一个节距内的花纹二维坐标经计算转换为三维坐标后,还要根据花纹等分数,对每个节距进行绕水平 X 轴的旋转变换,变换矩阵为 T_x ;再按观察视角进行绕垂直 Y 轴的旋转变换,变换矩阵为 T_y ;最后,将经过旋转的三维图投影到 XOY 平面上,变换矩阵为 T_h 。三维坐标旋转和投影组合变换矩阵为 T 。

$$T = T_x \cdot T_y \cdot T_h$$

选择不同的观察角度可生成不同的花纹三维图。轮胎花纹总图中的侧视图则是观察视角为 90° 时的三维图的一部分。斜交轮胎通常采用等节距花纹,绕 X 轴是等角度旋转变换,易于计算。而轿车子午线轮胎常用变节距花纹,各种不等节距沿圆周交错排列,不能沿用等节距绘图方法。设计变节距花纹三维图时,需将整个圆周方向的不等节距交错排列规律转换为一个排序数组,每个节距对应一个沿 X 轴的旋转角度。在逐节距计算时,首先将每个花纹节点坐标按该节距的大小进行比例变换;再根据其旋转角度进行旋转和投影组合变换,则可得到变节距花纹三维图(参见图 2)。

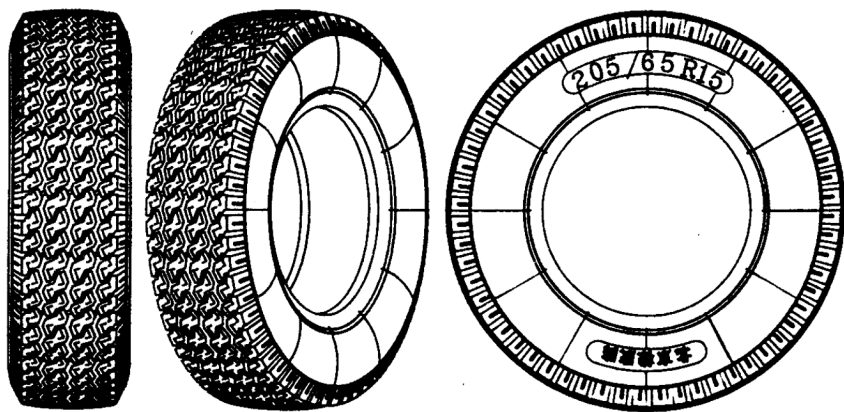


图 2 子午线轮胎不等节距花纹三维图

2.4 轮胎材料分布图设计

施工设计时需将轮胎各部件的形状位置准确地绘制在材料分布图上,以判断设计是否合理。手工绘图时主要凭经验,并无严格的数学模型,因此,绘图速度慢,误差也较大。使用CAD技术绘材料图,关键是将本无严格规律可循的绘图步骤变为精确的数学模型,由此建立了胎体计算、缓冲层计算、钢圈计算、三角胶芯计算等子程序(参见图3)。

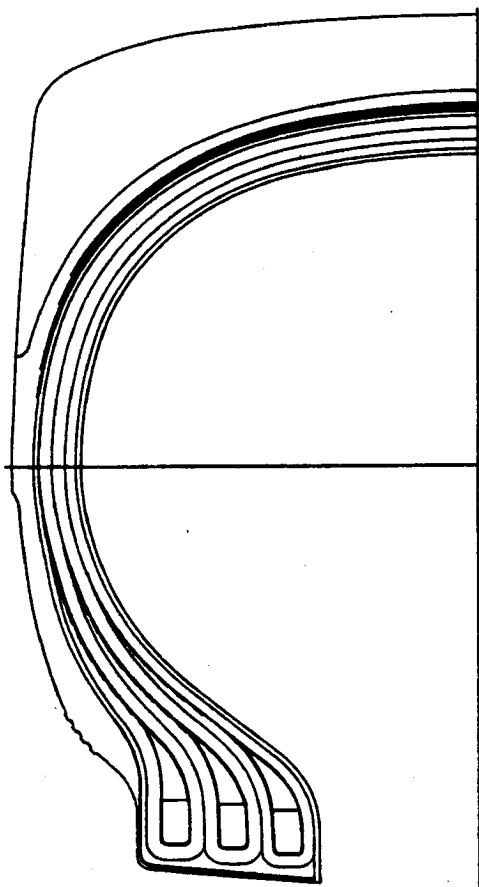


图3 三钢圈材料分布图

轮胎各部位的帘布压缩率不同,胎体厚度也发生变化。传统设计方法受计算及绘图条件限制,往往把胎体画成等厚度的。胎体层数越多,这种方法误差越大。用CAD技术可将胎体厚度绘制成随其纵坐标而均匀变化的。只要设计者根据经验确定外胎在胎冠、胎侧和胎圈三个部位的压缩率,则胎体在其它各个部位的压缩率和厚度均可根据其坐标值

精确计算得到,并用光滑的二次曲线将其绘制。成型机头半成品胎体沿纵坐标而产生的厚度变化也可用同样的方法准确计算并绘制。这是传统设计方法无法做到的。

在绘图过程中,胎体的弧长和平均半径可自动算出。对于用“施墨里雅诺夫”公式计算帘线张力和安全倍数,则非常方便。计算所需的帘布中心层断面周长平均半径 e ,非安全点到回转轴距离 r 等关键数据不用手工到图上量取,而是由计算机自动完成计算,并建立专用数据文件,以供胎体和钢圈强力及安全倍数计算程序调用。

计算胎体帘线张力 L 的“施氏”公式如下:

$$L = Pe[r(2tga + ctga) - etga]/r/N/i$$

外胎缓冲层绘制过程中,亦自动计算每段缓冲层帘线弧长 S_i 和角度 β_i ,总长度 L_M 由下式算出:

$$L_M = \sum S_i / \cos \beta_i$$

根据机头帘线角度 β_d 和假定伸张值 δ_1 ,可由下式计算成型机头缓冲层宽度 D_x :

$$D_x = L_M \cos \beta_d / \delta_1$$

帘布反包在外胎上的位置与在成型机头上的对应位置也可用类似方法计算得出。凡是由外胎绘制半成品时所需的转换数据如 D_x 等均建立在专用数据文件上,供绘制半成品材料分布图程序调用。在绘制成型机头的半成品材料分布图时,每个帘布筒的弧长、帘线角度、长度和帘布筒宽度等施工所需参数也准确算出,建立在施工表数据文件上。

绘制完成材料分布图后,即可运行轮胎施工表计算程序,读取有关数据文件,将每层帘布筒长度和宽度等施工数据打印成所需表格。

使用CAD技术不仅可在数分钟内绘制一张材料分布图,还可完成所需的各种施工设计参数计算,直接用于裁断和成型工艺,提高设计精度,避免人工误差,提高工效百倍以上。

2.5 帘布均匀伸张设计

按传统设计方法,对多钢圈多个帘布筒的轮胎,在确定各层帘布筒的施工参数时,均采用相同的帘布假定伸张值 δ_1 和相同的裁断角度 β_0 ;各层帘布筒的直径则是根据内层帘布筒的外径依次增加相应的帘布层厚度而得.这样设计制造的轮胎,由于忽略了各层帘布筒在定型硫化过程中实际伸张变形的差异,不易实现各层帘布的均匀伸张变形.

采用CAD技术,可以将轮胎由内层到外层每个帘布筒从成型到硫化过程的变形情况分别进行计算分析.图4计算双钢圈轮胎第一和第二个帘布筒半成品和成品之间对应的形状变化状况.第一个帘布筒半成品内轮廓与成型机头曲线一致;根据其机头宽度 B_{s1} 和裁断角度 β_0 ,可计算出假定伸张值 δ_{11} .第二个帘布筒半成品内轮廓是第一帘布筒的外

轮廓;根据其机头宽度 B_{s2} 和 β_0 ,可计算出 δ_{12} .结果表明:各帘布筒的假定伸张值由内层到外层逐渐减小.以9.00-20载重轮胎为例.若第一个帘布筒的假定伸张值 $\delta_{11}=1.035$;第二个帘布筒的假定伸张值 $\delta_{12}\approx 1.025$.对于具有三个或四个钢圈的大型轮胎,其最内层与最外层帘布筒的假定伸张值相差更大.由于各层帘布筒的实际伸张值由内层到外层逐渐减小,胎体帘线产生的伸张应力也逐渐减小,导致钢丝圈的内应力由内层到外层也逐渐减少.各钢丝圈的内应力不均匀,内层钢圈受力大,易于断裂,轮胎的安全系数降低.外层帘布由于伸张不足易于打弯.各层帘布伸张变形不均匀,易于产生脱层等问题.

通过多种方案计算,可采用改变施工参数的方法使帘布伸张变形趋于均匀.改变各层帘布筒的裁断角度 β_0 ,使内层到外层角度逐渐增大,或使外层帘布筒的直径比原设计值有所减小,都可增加外层帘布的伸张变形值,使各层帘布的伸张变形趋于均匀,使每个钢圈的内应力趋于均匀.该方法对解决三钢圈和四钢圈轮胎的钢圈断裂和脱层等质量问题更为有效.

2.6 轮胎设计说明书程序

在进行轮胎技术设计、施工设计和模具设计过程中,已运行的应用程序均将计算结果转为专用数据文件存储在硬盘中.待轮胎计算绘图工作结束后,即可调用轮胎设计说明书程序,完成常规设计工作的最后一步,即说明书的文字与图形处理.在运行该程序时,首先根据提示交互式地输入汽车性能参数和设计要求,随后,即由程序自动读取业已存储在硬盘的各计算结果数据文件.先后自动输入的数据是:轮胎负荷能力计算数据、轮胎内外轮廓设计数据、轮辋数据、胎体帘线和钢丝圈应力及安全系数的数据、成型机头曲线及机头宽度数据、胎面胶体积计算数据、内胎结构设计和施工设计参数、垫带结构设计和施

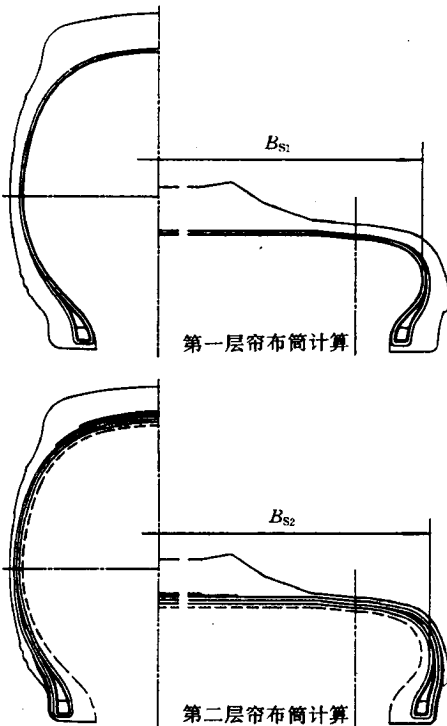


图4 帘布筒伸张值计算

工设计参数、水胎或 A 型或 B 型胶囊结构设计和施工设计参数等所有计算结果。轮胎说明书程序对输入的数据进行加工处理,将说明书目录、各部分的章节标题、所有计算公式以及结果排列有序,建立一个 10K 左右长度的专用说明书数据文件,存储在硬盘中。设计者用 WPS 中文软件可修改编辑该文件,并将已绘制的轮胎断面轮廓图、轮胎曲线图、花纹图、机头曲线图、材料分布图、内胎图、垫带图、水胎或胶囊图以及轮胎施工表等附在相关位置,一份图文齐全的轮胎结构设计说明书即告完成。

3 轮胎有限元分析及其进展

有限元分析是研究子午线轮胎力学性能必不可少的工具。80 年代初期,我院即率先在国内开展非线性有限元在轮胎力学中的应用研究工作;十余年来,轮胎力学有限元研究工作逐步深入,从二维分析发展到三维分析,并开发一系列有限元前后处理程序,对子午线轮胎的优化设计具有指导作用。从 80 年代后期开始,哈尔滨工业大学和上海轮胎橡胶集团公司等单位亦开展有限元应用研究工作,取得了进展。“产、学、研”三者相结合,为国内轮胎力学的深入发展注入新的动力。

应用有限元分析的轮胎设计过程包括以下步骤(参见图 5):①首先用轮胎 CAD 软件按常规方法结合设计者的经验,设计绘制轮胎花纹总图及材料分布图;②在有限元分析的第一阶段,用一系列简化的轮胎网格模型进行方案的快速筛选;③如不符合要求,则修改方案,用 CAD 软件重新设计绘图;④如简化网格分析符合预期目标,则进入第二阶段,将轮胎实体划分为更精细的网格,进行轮胎各部件和各部位的更为详细和深入的应力-应变分析;⑤如果有限元分析结果符合需要,则加工轮胎模具,进而完成轮胎产品试制。通过多阶段多方案的优化设计,减少失误,缩短新产品开发周期,提高轮胎质量。

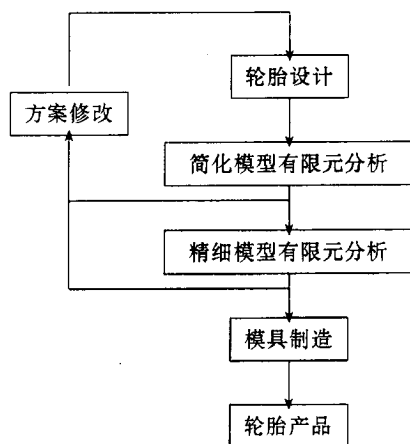


图5 轮胎设计过程框图^[2]

近十余年来,轮胎有限元分析的计算规模从 3000 自由度发展到 80000 自由度;使用的计算机从工作站和巨型机发展到超级并行计算机;使用的软件从通用的非线性有限元程序发展到并行版本的非线性有限元程序,因此,可计算摩擦接触和滚动等复杂问题^[3]。

以下介绍到 1995 年底为止,在《Tyre Science and Technology》上发表的计算规模最大的一项轮胎有限元分析实例,从中可反映计算机应用新的进展。

轮胎的操纵性、牵引性、滚动阻力和磨耗等均与轮胎接地面有关。米其林公司研究载重子午线轮胎在承受垂直负荷低速滚动时的力学性能。轮胎划分有限元网格如图 6 所示,具有 80000 自由度。为研究胎面花纹沟形状对接地面应力的影响,在轮胎周向 30°范围内,按花纹沟的实际形状细分网格,其余部位则简化为光胎面。这样,既可计算花纹沟,又不至过多增加自由度。所谓“低速滚动”是保持轮轴不移动,通过移动地面,并对轮胎接地面和轮辋部位的节点施加力和力矩来模拟实现的^[2]。

计算的接地面花纹块法向应力参见图 7^[2]。沿轮胎滚动方向和花纹块的端部应力均发生变化,这是由于轮胎各部位的刚度不同所引起的。根据接地面应力分布可判断磨耗

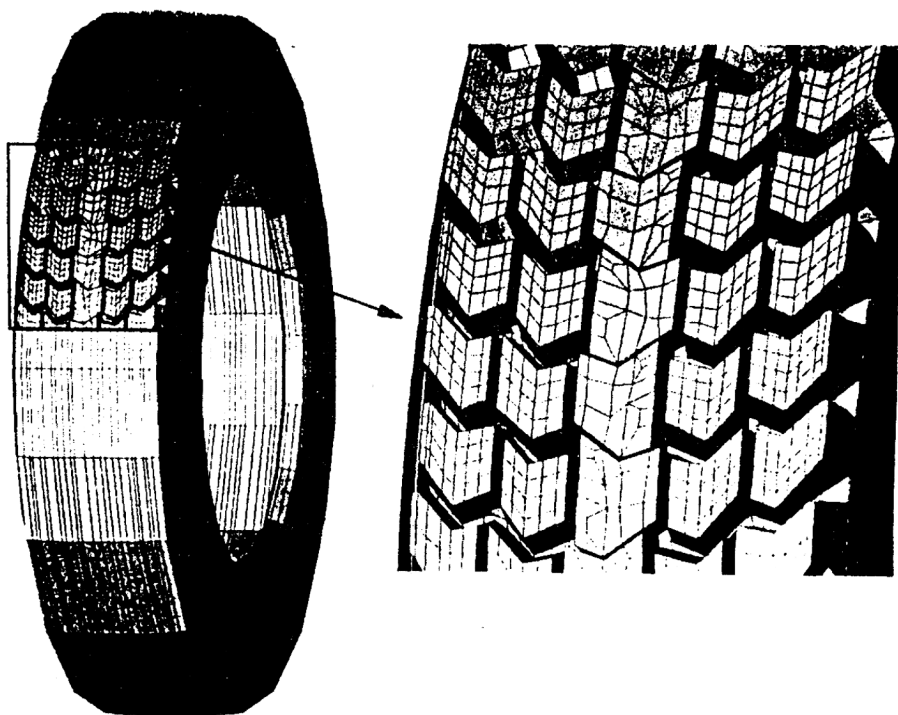


图6 载重子午线轮胎有限元网格

等性能。

进行以上低速滚动接触问题非线性有限元分析,在巨型机 CONVEX C-240 的一个终端上需占用 CPU 机时 4 个月;而在超级并行计算机上(具有 128 个 CPU 处理器)使用并行版本有限元程序,只需占用 CPU 机时 1d^[3]。

4 结语

计算机在轮胎结构设计中的应用已取得很大进展。CAD 技术有待于进一步普及和提高;CAM 技术更有待于开发;轮胎力学的深入开展需要速度更快的计算机和功能更强大的软件;当然,更需要的是训练有素的人。

参考文献

- 1 黄世权. 子午线轮胎设计理论进展述评. 轮胎工业, 1991;(10):3-12
- 2 Gall R *et al.* On the incorporation of frictional effects in the tire/ground contact area. Tyre Science and Technology, 1993;21(1):2-22
- 3 Gall R *et al.* Some notes on the finite element analysis of tires. Tyre Science and Technology, 1995;23(3):175-188

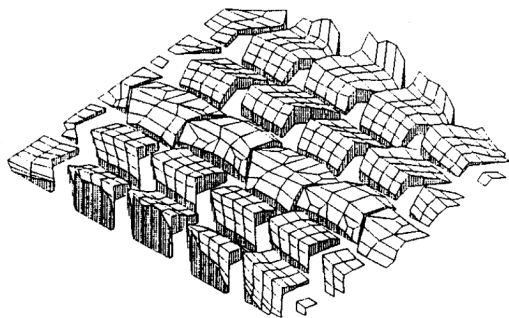


图7 轮胎接地面花纹块法向应力分布