

我国轮胎 CAD 研究进展

田敬华, 刘 波, 辛振祥

(青岛科技大学 高分子科学与工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要:介绍我国轮胎计算机辅助设计(CAD)研究的发展现状,从轮胎配方设计、结构设计和有限元分析模拟三方面进行具体阐述,总结出我国轮胎 CAD 的发展方向:具有尺寸驱动功能的轮胎 CAD 系统、轮胎及模具的三维实体造型技术、参数化有限元模型和具有综合功能的轮胎 CAD 软件。

关键词:轮胎; 计算机辅助设计; 配方设计; 结构设计; 有限元分析

中图分类号:TQ336.1+1; TP391.72 **文献标识码:**B **文章编号:**1000-890X(2004)02-0110-04

为了提高轮胎的设计效率和产品质量,加速新产品开发,轮胎行业普遍采用了计算机辅助设计(CAD)技术。计算机的应用不仅使设计者摆脱了繁琐的手工绘图,提高了绘图的精确度和准确率,而且可以对轮胎的结构参数、配方等进行优化设计,并对轮胎的各种性能进行仿真试验,提高了设计效率和实用性,缩短了设计周期。十几年来,CAD在我国轮胎行业得到了迅速发展。

1 我国轮胎 CAD 的发展

国外一些大轮胎公司在 20 世纪 70 年代已将 CAD 技术用于轮胎设计工作,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^[1]。

我国轮胎 CAD 起步较晚,从 80 年代初期才有一些科研机构和企业陆续借助计算机进行轮胎设计。早期的 CAD 只是进行一些简单二维图的绘制及数学计算。随着计算机软硬件的发展,轮胎 CAD 的含义也更加广泛。有限元技术的推广应用使计算机在轮胎设计中不仅能够绘图、计算,而且能够进行计算机分析模拟。轮胎三维化设计的实现为轮胎的有限元分析、动态力学性能模拟和性能预测奠定了基础。同时,我国自行研制的轮胎专用 CAD 软件陆续出现,其功能也在不断

完善。北京橡胶工业研究设计院、上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司、哈尔滨工业大学、华南理工大学、浙江大学和青岛科技大学等单位相继推出轮胎 CAD 软件,促进了我国轮胎 CAD 的发展。

2 轮胎 CAD 的组成

轮胎 CAD 主要由配方设计、结构设计和有限元分析模拟三部分组成,如图 1 所示。其中有限元分析计算的结果为轮胎结构设计提供依据,并能优化结构设计参数。

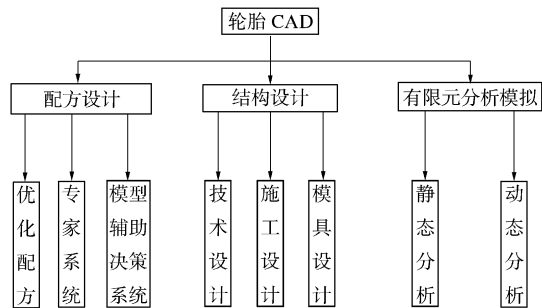


图 1 轮胎 CAD 的组成

2.1 配方设计系统

计算机辅助配方优化设计是集数学分析方法、橡胶及轮胎专业知识、计算机编程及应用等于一体的复合科学。从系统论和质量工程的宏观角度来看,现代配方优化设计应包括试验设计、数学建模、配方优化及质量控制等内容^[2]。配方设计的数学方法包括单因素变量的试验设计和多因素变量的试验设计。常用的单因素变量的试验方法

作者简介:田敬华(1976-),女,河南商丘人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事高分子材料加工和计算机辅助设计方面的研究。

有黄金分割法、平分法、分批试验法、分数法、爬山法和抛物线法等。多因素试验方法有纵横对折法、坐标转换法、平行线法、矩形法、多角形试验设计法、三角形对影法、列线图法、等高线图法、正交试验设计法、组合试验设计法、中心复合试验设计法和均匀设计法等^[3]。

目前,橡胶配方优化设计常用的方法有均匀设计法和神经网络法等。均匀设计法是只考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法,这种方法与正交设计方法相似,但在多因素、多水平试验中更实用且更有效^[4]。神经网络法是人工智能方法,它不像回归方法那样需预先给出基本函数,而是以实验数据为基础,经过有限次的迭代计算而获得一个反映试验数据内在联系的数学模型,具有极强的非线性处理、自组织调整、自适应学习及容错抗噪能力,特别适用于研究材料配方与制品性能之间关系的复杂非线性系统特性^[5]。

现代配方优化设计软件主要包括专家系统和模型辅助决策系统。专家系统主要以数据库的形式存放原材料数据、配方试验条件及胶料的物理性能,并在一定程度上根据专家知识经过推理得出一些定性辅助决策结论。模型辅助决策系统主要是对试验结果进行数学分析,提供定量的辅助决策结论。而近年来出现的集定性决策与定量决策于一体的决策支持系统(DSS)则是现代配方优化设计较为理想的概念模型,包括人机交互系统、数据库系统和模型库系统,既具有信息管理的功能,又具有模型决策辅助分析的功能,同时通过人机交互实现专家实时干预^[2]。

目前我国许多配方设计工作者已开始使用计算机进行相关的研究工作,但由于相关资料较为缺乏,自行研制开发的专用软件较少,并且功能还不完善,与国外仍有较大差距。较早进行计算机配方设计与优化及软件开发的有北京橡胶工业研究设计院和青岛科技大学等单位。

2.2 结构设计系统

轮胎结构设计是轮胎设计中最重要的一部分,直接关系到汽车的安全性、舒适性和美观等使用性能。轮胎结构设计系统主要包括技术设计、施工设计和模具设计。技术设计包括轮胎负荷计

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、胎面花纹设计和外胎总图设计等。施工设计主要包括成型机头曲线设计、成型机头宽度计算、外胎实心胎面胶体体积计算、花纹沟和花纹块体积计算等。模具设计主要包括外胎硫化机模具设计、外胎硫化罐模具设计和水胎模具设计等^[1]。

2.2.1 轮胎结构设计理论

轮胎结构设计是以某种设计理论为基础的。轮胎结构设计理论的发展经历了网格理论、薄膜理论和层合理论等阶段,分析方法也经历了从简单推算到数值模拟的演变过程^[6]。目前我国轮胎结构设计中最常用的理论是薄膜理论。这种分析法忽略了薄壳变形的弯曲影响,并且假定载荷是由帘线-橡胶的薄膜层伸张来支承的。北京橡胶工业研究设计院根据薄膜网络理论,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。非自然平衡轮廓理论是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^[1]。吉林工业大学用薄膜网络理论导出平衡内轮廓方程,再通过估算其它参数来确定外轮廓,从而可确定整个轮胎断面轮廓^[7]。

2.2.2 轮胎花纹设计

轮胎花纹设计的优劣直接关系到轮胎的使用性能及其寿命。因此,改进胎面花纹设计是提高轮胎质量的重要途径之一。轮胎胎面花纹可分为三类:普通花纹、混合花纹和越野花纹。

目前,在花纹设计中主要研究噪声产生的机理及降低噪声的方法、花纹节距排列优化、噪声仿真系统及花纹三维化的实现等。

花纹噪声主要与花纹的大小、节距、形状及沟槽的几何参数等有关。其中花纹形状对噪声的影响机理很复杂,一般只能得出定性的结论,即使使用某些水平较高的计算机仿真软件亦无法得到理想的结果。而花纹的节距和大小对噪声的影响则已有较明确的结论,并已用于产品设计中^[8]。

武汉工业大学的陈理君等^[9]采用声点阵法对轮胎花纹噪声进行分析,得到两个关于轮胎花纹噪声的发声准则:①花纹块的发声与其面积有关,

而与形状无关;②花纹沟槽的发声与其长度、宽度和走向有关,与深度基本无关。并得到一个法则:轮胎花纹的节距比例取不接近整数比的无理数比最好。另外,陈理君等^[10]还将遗传算法应用于轮胎花纹节距优化设计,降噪优化效果显著,可信度高,工程使用性强。同时,此算法为轮胎花纹其它参数的低噪优化提供了一种新颖的研究思路。

武汉工业大学的李先立等^[11]研制出了低噪声轮胎花纹 CAD 系统。为了控制和降低轮胎噪声,可采用变节距花纹,即在轮胎胎面上配置两种以上不同节距的花纹。此系统解决的就是变节距花纹沿胎面周围如何排布才能使噪声最小的问题。另外,此系统还能给出噪声仿真曲线。

北京橡胶工业研究设计院开发的轮胎 CAD 软件具有三维花纹设计的功能。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^[1]。

2.2.3 轮胎模具设计

模具是轮胎的硫化工具,模腔尺寸直接决定了轮胎产品的外形尺寸、花纹形状和表面质量等。优质的轮胎产品离不开优质的模具。轮胎模具可分为两半模和活络模。子午线轮胎硫化一般使用活络模。轮胎模具的制造有传统手工刻花、焊接镶花、数字控制(NC)和电火花加工等方法^[12]。

北京橡胶工业研究设计院开发的轮胎 CAD 软件模具设计系统具有 A 型和 B 型外胎硫化机模具设计、外胎硫化罐模具设计和水胎模具设计等功能^[1]。

华中理工大学研制的轮胎模具 CAD/CAM 系统能够快速完成轮胎花纹的三维曲面造型并用于数控编程。该系统先将二维花纹映射到主曲面上,然后利用扫动曲面生成的方法实现三维花纹造型^[13]。

2.3 有限元分析模拟系统

70 年代末至 80 年代初轮胎结构分析研究中引入了有限元法,到 80 年代中后期,蓬勃兴起了轮胎结构优化设计的理论研究,开发出了动态平衡轮廓设计法。目前国内外许多轮胎公司都

采用三维非线性有限元法研究轮胎结构优化设计方法,并结合提高轮胎的动态性能来开发新产品^[6]。

国内有限元分析(FEA)在轮胎研究和开发中的应用涉及以下几方面:静态受力分析、动态受力分析、温度场分布、不同工况下轮廓形状的变化及滚动阻力和结构参数的优化等^[14]。

目前流行的有限元分析软件主要有 ANSYS, MARC, ABAQUS 和 IDEAS 等^[15]。国内常用 ANSYS 和 MARC 两种软件。

进行有限元分析时,首先要确定单元模型、材料模型和边界条件等。单元模型是根据轮胎具体的结构和材料分布,采用六节点三角形单元或八节点四边形单元或其它单元对轮胎进行有限元划分^[16~18]。由于轮胎是由多种材料制成的,因此要采用一定的模型来确定材料常数,一般包括橡胶材料模型和帘线-橡胶复合材料模型。橡胶材料的物理非线性性能可用 Mooney-Rivlin 应变能密度函数描述,橡胶的不可压缩性用 Lagrangian 乘法解决^[15,16,19,20]。也可采用复合平板模型和 Gough-Tangorra 理论基本公式并配合一定的试验来测算单元材料常数^[21]。边界条件主要是接触问题,包括轮胎与轮辋的接触和轮胎与地面的接触^[17,22],可用可变约束法来处理轮胎与地面、轮胎与轮辋之间的作用^[19]。

除了应用国外现有的有限元分析软件进行各种分析外,国内也有一些单位已开发出或正在开发用于轮胎有限元分析模拟的软件。哈尔滨工业大学开发的有限元分析软件具有分析带束层中的应力、轮胎下沉接地压力分布、轮胎下沉接地面积及形状等功能^[16,19]。另外,上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司轮胎研究所开发的子午线轮胎结构三维非线性有限元分析程序可对自由充气状态、接地状态和稳态滚动下的轮胎结构进行分析计算,分析计算结果与 MARC 有限元程序较一致^[23]。

3 轮胎 CAD 发展方向

(1)具有尺寸驱动功能的轮胎 CAD 系统

华南理工大学开发出了具有尺寸驱动功能的 CAD 系统,此系统可以实时对图形进行修改,并

且各数据之间具有相关性,当修改某一参数时,系统自动修改各相关参数,数据库也自动更新并重新绘制图形^[24]。该系统代表了轮胎CAD的一个发展方向。目前,世界上流行的工业设计软件(如UG和Pro-E等)都具有尺寸驱动的功能。

(2) 轮胎及模具的三维实体造型技术

20世纪70年代,法国的达索飞机制造公司推出了一种全新的三维曲面造型系统(CATIA),标志着CAD技术由二维设计向三维设计的转变^[25]。三维设计比二维设计更直观、更逼真,并且能够预见一些只有在产品生产出来以后才能发现的设计缺陷。精确的轮胎三维实体造型也有利于有限元分析计算结果的精确化。轮胎模具的三维设计使模具加工更现代化,NC、电火花等现代化加工手段大大提高了生产效率及产品的精密化程度。

(3) 参数化有限元模型

轮胎参数化有限元模型可以通过改变如带束层角度和断面宽度等参数来模拟不同的轮胎。如果对分析结果不满意,可以返回到前处理中改变相应的参数继续计算,这就大大节省了建模时间,缩短了产品开发周期^[21]。

(4) 具有综合功能的轮胎CAD软件

现代化轮胎从概念模型到实际产品经历了配方优化设计、结构设计和有限元模拟分析计算等过程,产品的各项性能与这些过程的合理化和精确化等密切相关。将这些功能集成在一个系统下,可以避免文件在不同软件之间的转换,而且便于用户改进设计,提高设计效率及精确度,也有利于系统的整体维护。

参考文献:

- [1] 刘大众. 计算机在轮胎结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 1996, 16(10): 592-600.
- [2] 纪奎江, 范汝程, 程宝家. 21世纪的计算机辅助橡胶配方设计[J]. 合成橡胶工业, 1998, 21(6): 322-323.
- [3] 张殿荣, 辛振祥. 现代橡胶配方设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 351-362.
- [4] 张建明, 赵素合, 张永. 均匀设计方法在S-SBR/BR二元共混胎面胶配方设计中的应用[J]. 橡胶工业, 2002, 49(4):

201-204.

- [5] 曾海泉, 罗跃纲, 连永祥. 神经网络在橡胶配方设计中的应用[J]. 橡胶工业, 2002, 49(2): 73-76.
- [6] 李丽娟, 刘锋, 苏秀平, 等. 轮胎结构力学设计理论研究进展[J]. 轮胎工业, 2000, 20(10): 579-587.
- [7] 王庆年, 赵子亮, 李幼德, 等. 汽车轮胎断面几何轮廓的计算机实现[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2000(2): 1-5.
- [8] 朱国军, 林成花, 尹海山. 低噪声轮胎花纹节距参数的稳健性设计[J]. 轮胎工业, 1999, 19(4): 212-214.
- [9] 陈理君, 张艳堃, 杨立, 等. 低噪声轮胎花纹设计原理与方法[J]. 轮胎工业, 2001, 21(5): 270-276.
- [10] 陈理君, 钟克洪, 张晓红, 等. 基于遗传算法的低噪声轮胎花纹节距排列的优化方法[J]. 轮胎工业, 2000, 20(2): 76-79.
- [11] 李先立, 陈韶频. 低噪声轮胎花纹的计算机辅助设计[J]. 橡胶工业, 1994, 41(2): 92-96.
- [12] 苏超, 刘尊品, 顾骏庭, 等. 轮胎模具的设计制造和表面处理[J]. 橡塑技术与装备, 2001(9): 35-40.
- [13] 王耕耘, 王义林. 轮胎模具CAD/CAM系统的研究[J]. 模具工业, 1997(4): 8-10.
- [14] 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎结构有限元分析应用于轮胎结构优选 II. 带束层宽度的优选[J]. 轮胎工业, 2000, 20(6): 337-344.
- [15] 王登祥, Tim Fry. 轮胎有限元研究(FEA)进展及应用成果[J]. 轮胎工业, 1998, 18(7): 395-403.
- [16] 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.
- [17] 刘锋, 苏秀平, 李丽娟. 汽车轮胎传热性能及温度场的数值模拟分析[J]. 广东工业大学学报, 2000(9): 6-10.
- [18] 李丽娟, 苏秀平. 子午线轮胎结构温度场分布的三维有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(12): 716-720.
- [19] 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎-地面静态接触的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(9): 527-533.
- [20] 张翼, 唐萌, 余美娟. 胎圈-轮辋接触问题的三维有限元分析[J]. 轮胎工业, 1999, 19(2): 83-85.
- [21] 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.
- [22] 徐立, 陈敏玲. 应用MARC/MENTAT程序实现汽车轮胎的三维模拟[J]. 轮胎工业, 1999, 19(6): 331-333.
- [23] 戴元坎, 王章根. 子午线轮胎结构三维非线性分析有限元程序2.0及应用[J]. 轮胎工业, 1999, 19(12): 718-722.
- [24] 张安强, 姚钟尧, 林惠音, 等. 具有尺寸驱动功能的轮胎CAD系统[J]. 轮胎工业, 2002, 22(6): 333-337.
- [25] 高霁, 曹国强. CAD技术发展主流造型技术的特点[J]. 计算机辅助设计, 2001(8): 22-24.

收稿日期: 2003-08-04