

有限元法在汽车轮胎设计中的应用

颜卫卫¹, 马铁军^{1,2}

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州华工百川科技股份有限公司, 广东 广州 510640)

摘要: 阐述汽车轮胎的几种经典分析理论及其局限性, 介绍有限元法在汽车轮胎设计和分析各领域中的应用状况。具体讨论在轮胎结构力学分析中的静态接触、刚度和侧偏特性以及模态等问题的分析与处理, 在轮胎温度场分析中如何建立模型、确定求解策略以及在轮胎破坏机理分析中在裂纹扩展和胎面磨损等方面的应用研究成果。

关键词: 轮胎; 结构力学; 温度场; 破坏机理; 有限元法

中图分类号: TQ336.1; O241.82

文献标志码: B

文章编号: 1000-890X(2014)01-0052-05

轮胎是汽车重要的组成部件之一, 在汽车行驶时承受各种变形、负荷以及高低温作用, 使用环境也复杂多变。轮胎的设计和制造技术一直在不断地发展和改进, 提高轮胎的使用寿命和承载、牵引、缓冲等性能始终是研究的目标。20 世纪 50 年代子午线轮胎工业化生产以后, 由于其性能比斜交轮胎更依赖于合理的结构设计, 轮胎相关设计和分析理论得到了进一步发展, 但是因为涉及到材料科学、力学和机械工程等多个学科, 而且轮胎的力学结构复杂, 轮胎的大变形及其与路面的接触等均为强非线性问题, 使该研究领域极富挑战性, 对轮胎结构设计与性能仿真的研究也仍有待深入和完善。总体而言, 轮胎的理论分析技术已从经典分析理论发展到有限元理论, 并逐步开拓出新领域。

1 经典分析理论

轮胎设计制造理论分为结构设计理论和力学分析理论。轮胎结构设计是对轮胎的强度、刚度梯度、应力应变、轮廓以及花纹等因素进行最佳组合化, 设计理论从自然平衡轮廓理论、最佳滚动轮廓理论发展到动态模拟最佳轮廓理论以及第 2 代预应力和动平衡轮廓设计理论等^[1], 都是伴随着轮胎力学分析理论的发展而产生的, 它们的共同特点是通过分析轮胎的力学性能, 实现轮胎整体

结构性能优化。而轮胎力学分析理论已从网络理论、薄膜理论、薄壳理论、层合理论发展到有限元分析理论^[2], 有限元分析之前的理论可以统称为经典分析理论。

1.1 早期的模型分析方法

最早在轮胎力学结构研究中采用的是在 20 世纪 60 年代建立的弹性基座上环带梁结构的轮胎模型, 其中各结构部件的物理参数借助试验确定, 该模型主要考虑轮胎胎体等因素的影响, 曾被广泛用来预测轮胎的振动、制动、牵引及侧滑效应等。但由于确定模型的等效参数需要做大量试验才能得出, 且该方法只对轮胎特性作定性解释等问题, 因此其应用存在局限性。

1.2 网络分析理论

网络分析理论假设充气轮胎的帘线张力唯一地与充气压力平衡, 帘线的受力变成一个取决于帘线排列方向、弹性性能以及充气压力大小的受力网络。如果假设帘线不能伸张, 则充气后的轮胎形状与充气压力无关, 其特点是由现状确定一系列假设条件, 忽略次要因素, 建立一定的分析模型。网络分析包括计算经向和周向的应力, 并利用半径和轴向柱面坐标确定轮胎的断面轮廓。由于理论假设上存在缺陷, 未考虑或忽略帘线周围橡胶及胎体弯曲刚性的影响, 因此该理论仅能用于中心轴对称的充气分析, 而不能用于垂直加载分析等。该理论可用于薄壁轮胎的近似计算或对称性载荷作用下的轮胎断面形状和应力-应变分析等。

作者简介: 颜卫卫(1987—), 男, 湖南湘潭县人, 华南理工大学在读硕士研究生, 主要从事有限元分析模拟以及过程控制与装备的研究。

1.3 薄膜分析理论

薄膜分析理论把轮胎假设为一个柔软的薄膜旋转体,进一步考虑橡胶承担和传递载荷的作用,其基本假设是载荷由帘线-橡胶层薄膜来承担,充分考虑了橡胶和帘线的材料性质,分别对橡胶和帘线在经向、径向和周向上的应力-应变进行计算,利用柱面坐标确定轮胎的断面轮廓和承载变形后的轮廓及局部微变形情况,因此比网络理论前进了一步,但薄膜分析仍然忽略了弯曲刚度的影响,不能处理几何、材料及载荷上的不连续点。

1.4 薄壳分析理论

薄壳分析理论考虑了薄膜分析理论没有考虑的弯矩影响,因而能够分析接地、胎圈以及有效曲率变化部位的作用,甚至可以应用于轮胎的滚动分析。其假设壳的厚度与壳的曲率半径相比很小,可认为近似为零等。薄壳分析取得了巨大的理论成果,但其局限性在于接触边界条件难以处理,拉弯耦合效应严重等,因此薄壳分析的精度较低,大多数经典薄壳理论不能直接用于轮胎分析。

1.5 复合材料层合壳理论

用复合材料层合壳理论来分析轮胎结构使轮胎力学达到一个新高度。该理论认为轮胎是由多层帘线-橡胶复合材料层组成的,研究了由两层或两层以上的复合材料层组成的整体结构的力学性能,进一步考虑了拉压耦合及弯矩的影响,因此能处理接触区域等有效曲率部位的变化。采用层合模型预测轮胎应力-应变和断面轮廓形状,更接近层合材料表现的总体性能,但其缺点也在于只得到了轮胎层合材料表现的总体性能,忽略了单层之间的影响,材料厚度方向的信息也无法给出,虽然厚壳理论及各种剪切变形理论可以提高层合分析的精度,但仍不能完美处理层间应力、胎圈部位边界条件等因素的影响。

2 有限元分析理论及其应用

有限元法实际上就是一种数值计算方法,起源于 20 世纪 50 年代航空工程中飞机结构的矩阵力学分析,其基本思想是把连续系统理想化为有限个单元的集合体,按一定的规则建立起未知量与单元连接点(即节点)之间的关系,引入边界条件和物理、数学特性关系后,使问题转化为适合于

数值求解的结构型问题的代数方程组^[3]。如前所述,轮胎的梁、膜、壳等简化模型分析都各有缺点和局限性,而有限元分析能够确定轮胎内部每一点的响应,不仅可以预测轮胎的性能,而且可以解释原因。从 20 世纪 70 年代起步发展到现在,有限元法应用于轮胎分析在技术水平上已经历了由二维分析到三维分析两个层次,而随着相关学科的发展,其研究内容将变得更广泛和深入,准确性和可行性也为理论和实践所证明,为研究轮胎性能提供了理论依据,大大推动了轮胎设计和汽车设计进程,已取得了很多工业应用成果。

应用有限元法进行轮胎分析和设计的关键在于力学模型的建立。由于轮胎结构及其力学特征极为复杂,在建立其有限元结构分析模型时,要考虑轮胎工作时存在的几何、材料和边界条件的非线性^[4],具体牵涉到建模过程中的单元选择、材料特性、网格划分、载荷和约束条件及求解方法等。几何上的非线性是指轮胎的柔性结构使其在外力(也包括充气压力)作用下容易发生较大的变形,应变和位移间的关系呈现非线性,在建立模型时,要采用具有大变形和应力硬化功能的单元模拟其几何非线性。材料非线性的主要难点则是非线性材料的本构方程的建立,而为了描述本构方程,关键又在于确定应变能密度函数。目前的橡胶本构模型基本上都是基于连续介质力学理论和热力学统计理论而建立的,其中 Mooney-Rivlin 理论较好地描述了橡胶类不可压缩超弹性材料在大变形下的力学特性,在现阶段橡胶材料分析中得到广泛应用。此外,建立轮胎模型时一般还要对具有强烈各向异性的橡胶-帘线复合材料作特殊处理,如采用加强筋或层合壳模型^[5]构建等。边界非线性是指由于接触体的变形和接触边界的摩擦作用使部分边界条件随加载过程而改变。轮胎的边界条件非线性体现在轮胎与路面的接触及轮胎与轮辋的接触等。通常的求解方法包括 Lagrange 乘子法、罚函数法以及基于求解器的直接约束法。

2.1 结构力学分析

轮胎的结构力学特性不仅直接与汽车的操纵稳定性、舒适性、动力性以及制动安全性相关,而且对轮胎本身的热力学状态和寿命等也起着决定性的作用,轮胎的温度场分析和疲劳损伤分析也

是以此为基础,因此结构力学分析成为有限元法在轮胎设计中应用最广的领域之一。

轮胎结构力学特性包括静态特性和动态特性,静态特性的有限元分析主要包括充气载荷及静态接触问题等,涉及整体及局部变形,内部应力应变分布,载荷-位移曲线,接地面形状、大小和压力及静态刚度特性等。充气压力对轮胎应力分布、接地状态及下沉量有关键性的影响。在有限元分析中应注意充气载荷导致的大变形。为了得到较为精确的分析结果,在求解时需要把充气压力分成若干小步逐步加载,同时把胎圈与轮辋接触视为全约束处理。分析发现,轮胎结构中束层和钢丝圈相对承受较大的应力,而胎侧部位则变形量最大,充气压力升高时,胎冠部位帘线层应力迅速增大,且增幅远大于其他部位^[6]。静态接触问题有限元分析研究的重点是接地状态和下沉量、载荷-变形关系及应力应变分布等,通常也使用逐步加载的方式。按是否考虑地面的变形,这类问题通常分为轮胎-刚性地面接触和轮胎-松软地面接触,但是由于轮胎-地面接触问题复杂,目前还没有模型能够全面表达轮胎-地面接触过程中的所有力学特性。在一般的接触分析中,轮胎与硬路面刚度相差很大,地面可定义为刚体,既缩短计算时间,也不影响精度。在轮胎-松软地面接触研究中,应用有限元法所面临的困难则集中表现在表层土本构关系的描述及边界条件的正确建立上,因此轮胎周围土壤的压力、应力分布和滑移率都对轮胎与土壤的相互作用有影响^[7]。

轮胎动态特性的有限元分析内容包括滚动阻力、刚度和侧偏特性及振动和模态分析等。此处的滚动阻力是指占轮胎总滚动阻力 90% 以上的橡胶和帘线的滞后损失,是轮胎结构力学分析与热力场分析的桥梁。由于是材料的一种应变迟滞,在滚动阻力和能量耗散的分析求解过程中,通常把储能模量、损耗模量和损耗因子($\tan\delta$)视为材料滞后行为参数,使用弹性应变能和材料的 $\tan\delta$ 的乘积来估计能量耗散和滚动阻力,其缺点是不能适当地处理钢丝帘线-橡胶等复合材料的 $\tan\delta$ 各向异性问题,因此较好的方法是用傅里叶级数和粘弹性橡胶材料的应变相位滞后角计算能量耗散的动态粘弹性,试验已表明该方法与实际

情况吻合^[8-10]。

轮胎的刚度和侧偏特性对汽车整车性能都有较大影响,轮胎刚度主要包括径向、侧向、纵向、扭转 4 种刚度,有限元方法已应用到静态加载、自由滚动以及驱动/制动状态的刚度和侧偏特性的分析。设定不同的充气压力、垂直载荷、速度和帘线角度等参数,便可得到相关关系,例如轮胎径向刚度在确定的某一范围内随束层帘线角度的增大而增大、侧偏刚度与充气压力和垂直载荷均成正比等规律^[11-13]。有限元模态分析在轮胎研究和设计领域中有很重要的地位,因为模态是结构自由度的集团响应特性,许多轮胎简化模型都是基于轮胎的模态特性建立和获取参数的。由于受试验手段和设备成本的限制,通过试验获取模态参数是个难题,而有限元方法则可以通过建立与节点位移、加速度相关的振动方程求得振动参数,以更全面地获取各种参数^[14]。此外,模态分析也能为轮胎谱分析提供基础。目前,有限元法分析发现,轮胎的振动模态可以分为侧向弯曲振动、面内弯曲振动和扭转振动^[15]。利用有限元分析方法求解轮胎在不同充气压力下的固有频率、振型随模态阶次的变化及不同约束条件的频率响应等都取得了较好的效果^[16]。

2.2 温度场/热力学分析

在轮胎的滚动过程中,胶料承受周期性载荷,损耗的能量转化为热,其中一部分导致轮胎内部温度升高和热传导,另一部分则与周围环境和腔内气体进行热交换。轮胎的温度场不仅影响其工作性能,而且很大程度上决定了轮胎的使用寿命。因此,轮胎行驶时的热学性能对轮胎质量有重要影响。从试验研究^[17-18]到解析模型分析^[19],再到有限元分析,科研人员一直希望了解轮胎在稳态或动态行驶时的温度场状况及因生热而导致的破坏行为。

采用有限元方法求解轮胎热传导问题的难点还是在于模型的建立,而关键问题可归结为内部热源以及轮胎热边界条件的表征确定。目前通常采用超弹性的材料本构模型进行轮胎结构的变形分析,而内部热源特性(即粘性损耗)则根据变形分析的结果和轮胎胶料的粘弹损耗来确定。轮胎热传导分析的边界条件通常有 3 类:第 1 类是温

度边界条件,即给定边界上的温度值;第 2 类是热流边界条件,即给定边界上的法向热流密度值;第 3 类则是对流边界条件,即给定边界上的对流换热系数以及周围流体的温度。采用第 1 类边界条件是最准确的,但在实际分析中,轮胎表面的温度分布通常无法事先知道,因此只能采用后两类热边界条件^[20]。但是无论哪种条件,目前关于轮胎热边界条件表征中所存在的问题还是严重地制约了轮胎温度场的分析研究。而在求解过程中,因为滚动轮胎的内部热源主要来自轮胎结构受力变形时的粘性损耗,因此轮胎温度场问题的求解不能视为孤立的热传导分析,它同时涉及轮胎结构力学上的应力应变分析(以下简称变形分析);另一方面,轮胎材料温度的变化反过来影响其力学性能,导致轮胎的内部应力应变和生热都发生改变,进而再次影响到轮胎的温度场,因此轮胎结构的应力应变场和温度场之间的作用是相互耦合的,轮胎温度场分析不是单一的有源热传导分析,还必须包括结构力学的变形分析,即是两个边值问题的联立。对此,在 20 世纪 80 年代提出“双向解耦”的迭代求解法,可称之为双向迭代解法^[21]。该方法即为依次独立求解边值问题,并通过温度迭代计及应力应变场和温度场之间的互相影响。双向迭代解法的提出使有限元方法真正成为求解轮胎温度场问题的有效工具。

基于已形成的轮胎稳态温度场的求解策略和分析方法,目前有限元分析在此方面的研究内容主要包括不同工况以及部分结构特征对轮胎稳态温度场的影响等,得到不同工况下轮胎稳态温度场的整体分布趋势不会改变以及轮胎内部最高温度均出现在胎肩部位等结论。当轮胎发生侧倾时,轮胎侧倾一侧的温度随着侧倾角的增大而升高,而另一侧的温度则随着侧倾角的增大而降低;胎冠中部的温度有所降低,但变化幅度很小。结构上,轮胎胎肩、胎冠部的温度随扁平率的减小而有所降低,而胎侧、胎圈部的温度则几乎没有变化。另外,与无花纹轮胎相比,纵向花纹轮胎的胎肩、胎冠部的温度显著降低,而胎侧、胎圈部的温度变化很小^[20-22]。

2.3 破坏机理研究

轮胎的各种性能中,耐久性往往是人们最为

关注的,而轮胎失效主要有机械损坏、疲劳损坏以及热损坏 3 种形式,有限元法在这些研究中都已有较好的嵌入,其应用主要表现在内部裂纹扩展分析和胎面磨损分析等,这也是摩擦学、材料学、断裂力学和损伤理论等在轮胎研究中的应用。

目前有限元法在橡胶材料断裂分析模型方面的应用是以应变能为联接点而展开的。断裂力学试验已证明撕裂能(即应变能释放率)可以有效地解决橡胶大变形试件的疲劳和断裂问题,它是目前公认的解决橡胶疲劳破坏问题最有效的参数^[23-29]。根据撕裂能模型可知,其与应变能密度成正比^[30],从而可以有限元计算结果为基础得到裂纹的扩展过程。如果进一步考虑轮胎中的复合材料部分,则还需要运用复杂复合材料分析技术,如 Irwin 虚拟裂纹闭合技术。该技术的基本思想是假设裂纹扩展了一个微小长度,在此过程中裂纹释放的能量等于裂纹闭合到它原来的长度所需要做的功。在通过有限元法求得的节点力和节点位移基础上再得到应变能状态后,可分析出复合材料的裂纹扩展过程。

胎面磨损研究方法主要包括统计法、路试法和有限元法等。胎面的接地区域根据是否在可恢复弹性滑移范围之内分为粘着区和滑移区,胎面磨损发生在滑移区。胎面磨损有限元仿真的关键也是确立胎面花纹块与路面的接触和滑动模型。目前表征胎面磨损的模型有两种,一种是基于轮胎与地面接地压力和相对滑动的大小,另一种是从胎面与路面的摩擦入手,以摩擦功构造磨损定律以表征磨损。后一种模型使用更广泛,据此建立的摩擦模型包括接触表面的摩擦因数和接触热模型。摩擦因数模型必须考虑橡胶的粘弹性及橡胶与路面接触过程中的粘着摩擦和滞后摩擦,同时通过基于时温等效原理的 WLF 方程引入温度的影响;接触热模型主要考虑热源以及接触热传导模型。

模型建立后采用合适的接触算法,计算可得到应力和热流,通过设定不同的参数即可模拟出不同工况或汽车行驶状态下的磨损过程。此外,系统考虑各种因素导致的非正常磨损即不均匀磨损现象,也已有较多的结论,这些都充分显示了有限元法在该领域的实质作用。

值得一提的是,目前有限元分析软件仍不能在程序内部更新轮胎表面磨损轮廓,以模拟真实的作为连续过程的胎面磨损。作为替代,现在普遍使用增量步骤考虑磨损轮廓对后续磨损过程的影响。

3 结语

正如人们所期望的,有限元方法目前在轮胎设计评估方面是一个非常有效的数值工具,它已成为轮胎设计和分析所依靠的基本手段,有利于减少或取代部分轮胎试验,它的应用提高了轮胎结构的设计水平和效率。但因为轮胎固有的非线性特性和结构复杂性,轮胎的有限元分析技术仍然是一个具有挑战性的研究课题,如何精确地模拟轮胎的结构、建立更真实的轮胎材料模型,怎样设计试验测试方法等都是研究人员目前需要面对的问题。但是随着有限元技术的深入和相关学科的发展,这些问题会越来越好解决,有限元法将大力推动轮胎工业的发展。

参考文献:

- [1] 杨卫民,李锋祥,谭品. 工程子午胎理论分析技术[J]. 橡塑技术与装备,2007,33(12):201-207.
- [2] 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):579-600.
- [3] 李人宪. 有限元法基础[M]. 北京:国防工业出版社,2004:3.
- [4] 李吉忠. 建立轮胎有限元结构分析模型应注意的问题[J]. 轮胎工业,2002,22(4):202-205.
- [5] 尹伟奇,姚振汉,薛小香,等. 加强筋模型在轮胎有限元分析中的应用[J]. 橡胶工业,2004,51(9):543-548.
- [6] 张万枝. 子午线轮胎充气及静态接触状态下的有限元分析[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [7] 薛雪. 车辆轮胎与土壤接触变形的有限元分析[D]. 西安:西北农林科技大学,2010.
- [8] Wei Y T, Tian Z H, Du X W. A Finite Element Model for the Rolling Loss Prediction and Fracture Analysis of Radial Tires[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(4): 250-276.
- [9] Luchini J R, Peters J M, Arthur R H. Tire Rolling Loss Computation with the Finite Element Method[J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(4): 206-222.
- [10] Park H C, Youn S K, Song T S, et al. Analysis of Temperature Distribution in a Rolling Tire due to Strain Energy Dissipation[J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(3): 214-228.
- [11] 贺海留,刘欣然. 影响轿车子午线轮胎静态径向刚度的因素

- [J]. 轮胎工业,2004,24(6):359-362.
- [12] 刘青,郭孔辉. 轮胎侧偏特性研究的特点及其发展[J]. 汽车技术,1997(10):1-8.
- [13] 应卓凡. 子午线轮胎的刚度特性和制动摩擦力的三维有限元分析[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [14] 景立新. 全钢载重子午线轮胎特性有限元分析及验证[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [15] 谷叶水,石琴. 子午线轮胎模态分析的有限元方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(3):249-252.
- [16] 王建武. 汽车轮胎试验系统结构设计及有限元分析[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [17] Conant F S. Tire Temperature[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1971, 44(2): 397-439.
- [18] LaClair T J, Zarak C. Truck Tire Operating Temperatures on Flat and Curved Test Surfaces[J]. Tire Science and Technology, 2005, 33(3): 156-178.
- [19] Clark S K. Temperature Rise Times in Pneumatic Tires[J]. Tire Science and Technology, 1976, 4(3): 181-189.
- [20] 吴福麒. 轮胎稳态滚动温度场的有限元分析[D]. 合肥:中国科技大学,2009.
- [21] Whicker D, Browne A L, Segalman D J, et al. A Thermomechanical Approach to Tire Power Loss Modeling[J]. Tire Science and Technology, 1981, 9(1-4): 3-18.
- [22] 王伟. 基于 ADINA 的轮胎力场和温度场研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2007.
- [23] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Crack Initiation and Propagation under Multiaxial Fatigue in a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(1): 61-72.
- [24] Gao Y G, Chen S H. Large Strain Field Near a Crack Tip in a Rubber Sheet[J]. Mechanics Research Communications, 2001, 28(1): 71-78.
- [25] Sehube P M, Gdoutos E E, Daniel I M. Fatigue Characterization of Tire Rubber[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2004, 42(1): 149-154.
- [26] Mars W V, Fatemi A. A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.
- [27] Legorju-Jago K, Bathias C. Fatigue Initiation and Propagation in Natural and Synthetic Rubbers[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(2-4): 85-92.
- [28] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Stress Effects on Fatigue Behavior of Filled Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 521-529.
- [29] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Multiaxial Fatigue Life Prediction for a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 530-539.
- [30] 缪亚东. 载重子午胎胎圈处裂纹扩展的有限元模拟及寿命预估[D]. 镇江:江苏大学,2006.