

子午线轮胎有限元分析

第1讲 有限元在轮胎设计中的应用发展概况

洪宗跃, 吴桂忠

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82 文献标识码: E 文章编号: 1006-8171(2005)10-0634-05

20世纪70年代以来,随着汽车工业的快速发展,轮胎工业也有了迅猛的发展。大轮胎公司兼并和实现全球化使轮胎工业进一步走向国际化。子午线轮胎以优异的耐磨性和燃料经济性广泛占领了市场,成为标准汽车轮胎,在整个轮胎行业中占有举足轻重的地位。因此,各大轮胎公司、研究院所和高等院校投入了大量的人力和物力对子午线轮胎进行深入的有限元分析研究,以期进一步提高子午线轮胎的性能。

从轮胎设计理论的发展来看,最初是网络理论、薄膜理论和薄壳理论,由于子午线轮胎的几何结构复杂和大变形、材料性质多样性和非线性,对其进行数学分析极其困难,许多性能分析方法也只是近似的定性分析,并不能很好地对轮胎的结构设计进行指导,从而限制了轮胎工业的发展。随着有限元技术的发展应用,以有限元分析为基础的最佳滚动轮廓理论(RCOT理论)、最佳张力控制理论(TCOT理论)、负荷时应变能最小化理论(STEM理论)、动态模拟最佳轮廓理论(DSOC理论)、动态稳定最佳化接地面理论(DSOC-T理论)、预应力轮廓理论(PSP理论)和周期性应力-应变优化理论(CSSOT理论)等逐渐被各大轮胎公司和高等院校接受,指导实际设计和生产,创造了可观的效益。有限元技术在轮胎结构设计中的应用打破了传统设计理论几十年来停滞不前的局面,有力地促进了结构设计理论的发展,使子午

线轮胎结构设计向更精确的定量设计迈出了一大步,为结构设计的进一步发展提供了更多的机会。

自20世纪70年代开始轮胎产品由斜交轮胎向子午线轮胎转换,日本横滨公司的Kaga H等^[1]采用线性有限元法分析轮胎结构,并针对耐久性测试问题分析了转鼓试验机半径变化对带束层端部应变能密度的影响;Ridha R A^[2]计算出轮胎下沉量与载荷的关系曲线,初步求出了帘线受力随周向位置的变化关系;Kennedy R H等^[3]分析了带束层结构参数对充气状态下子午线轮胎受力的影响。这些研究的共同点是都采用线性分析和没有考虑接触问题。但是从那时开始人们就对有限元分析技术在轮胎结构中的应用前景充满了信心。

1 有限元技术在子午线轮胎设计中的应用

随着有限元分析理论的进一步发展,越来越多的有限元大型计算机软件出现,有限元分析技术在轮胎设计中的应用也越来越广泛,并取得了非常大的进步。概括起来,子午线轮胎有限元分析主要涉及下述几个方面。

(1) 帘线-橡胶复合材料力学性能分析

帘线-橡胶复合材料力学性能分析的目的大都是为了分析轮胎实际使用过程中两个最薄弱部位(胎肩和胎圈)的破坏原因。轮胎使用中帘线被拉伸或弯曲时会产生变形。Padovan J等^[4,5]提出,根据微极理论,利用有限元模拟验证帘线端部力传递特性的影响;Pidaparti R M V^[6]用三维有限元模型分析了带束层受扭转作用时耦合作用的

作者简介:洪宗跃(1976-),男,福建漳浦人,北京橡胶工业研究设计院助理工程师,硕士,主要从事轮胎结构设计及有限元分析工作。

影响,指出带束层层间有显著的弯剪和扭剪变形; Ebbott T G^[7] 利用有限元模型计算分析了帘线-橡胶复合材料中裂纹尖端的撕裂能。目前这些研究还停留在材料力学性能的范围内,在轮胎结构分析中暂时还没有直接应用。

(2) 有限元模型的建立

轮胎橡胶材料的非线性和近似不可压缩性、帘线-橡胶复合材料的各向异性、轮胎变形的几何非线性、轮胎与轮辋以及轮胎与地面的接触非线性边界条件^[8]等都是轮胎有限元分析的难点。因此在轮胎有限元分析中,合理的有限元模型的建立将为提高分析的准确性提供极大帮助。在以往的研究中比较注意两方面:一是材料模型的选择;二是计算模型的合理简化。

• 材料模型的选择

轮胎由胎面、胎肩、胎侧、带束层、胎体、内衬层、钢丝圈、三角胶和胎圈包布等组成,结构非常复杂。文献中大多对橡胶基体和帘线分别定义。橡胶基体采用 Mooney-Rivlin 非线性弹性材料模型;帘线采用线弹性模型。

帘线-橡胶复合材料的有限元模型主要有层合壳模型和加强筋模型两种。

层合壳模型的理论基础是纤维增强复合材料的力学理论^[9],复合材料的各组成部分在同一单元中或同一层内的性质用平均值代替,可用正交各向异性或一般各向异性来描述。该模型的优点是概念清晰,但由于应用平均值,而且各层材料的正交各向异性材料参数通常是通过简单的混合公式(如 Halph-Tsai 公式^[10])得到,复合材料中的橡胶基体和帘线只能模拟成线弹性材料,没有考虑橡胶的非线性以及帘线的双模量性质,这些将影响计算结果的精度。

目前,采用加强筋模型越来越多。加强筋模型是将加强筋部分和基体部分分别由加强筋单元和实体单元来表示,即在基体单元中包括一层或更多层不同方向的增强帘线(如图 1 所示)。基体单元和加强筋单元用的是相同的节点,没有引入附加的自由度。加强筋单元可以用来描述加强筋的应变状态,任何材料性质都可以用到加强筋单元上。利用加强筋模型可以将基体和加强筋分别用不同的本构关系来描述,试验得到的组分材料

的材料参数可以直接用于分析中,并且可以分别得到基体和加强筋的应力状态。因此加强筋模型对帘线-橡胶复合材料的几何和物理非线性分析非常有效。

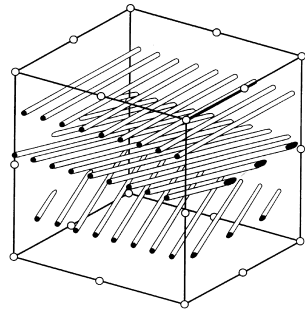


图 1 用加强筋单元模拟增强帘线层

• 计算模型的合理简化

用膜单元模拟胎体层和带束层,用实体单元模拟胎面胶,忽略轮胎结构的其余部分,Goldstein A A^[11]建立了简化的三维有限元计算模型用于分析轮胎的操纵力。Gall R^[12]将轮胎与轮辋的接触边界条件简化为给定位移的约束条件。根据轮胎子午面内应变能总和沿轮胎周向分布受接地面的影响范围,Noor A K 等^[13~16]建议采用轮胎的 1/2 或者 1/4 的简化模型以提高效率。还有很多文献采用对轮胎局部进行网格细化的简化模型。这些在合理情况下的简化大大节省了计算资源和计算时间。

(3) 轮胎的应力-应变场和温度场分析

轮胎的应力-应变场和温度场分析是目前轮胎有限元分析技术最主要的发展和应用方向,而且研究成果已经应用于轮胎结构设计,其研究重点主要是带束层和胎圈。

应用应力-应变场研究带束层应力与轮胎断面高宽比的关系^[17],带束层宽度和结构对轮胎耐久性的影响^[18,19],带束层帘线角度对轮胎变形、带束层和冠带层的应变能密度、正应力、剪应力以及轮胎偏磨的影响^[20];还研究了胎圈与轮辋的接触作用、胎圈在过盈配合下的内应力分布及胎圈和轮辋接触面上的压力分布^[21]等,计算了多种工况下接触面上法向和切向应力的分布特点,为改善胎圈部位结构设计提供了重要信息^[22]。

南京航空学院针对三维内热源的温度场问题,推导了温度场的有限元“刚度”及热载荷,使用

六节点五面体及八节点六面体单元,分析了子午线轮胎的温度场,并用红外热像系统进行了试验验证^[23]。哈尔滨工业大学复合材料研究所提出用3种模块进行分析:采用变形模块进行轮胎稳态结构分析以得到轮胎的变形和应力、应变循环;采用损耗模块进行轮胎的能量损耗和生热分析;采用热模块进行轮胎温度场分析和热、力耦合分析预报轮胎的滚动阻力、内部温度场、应力、应变及变形^[24]。文献[25]将195/75R14轮胎温度场的有限元计算结果与6个实测点的测量结果作了比较,两者吻合得较好,其中4个实测点的温度测量值与计算值仅相差1℃,另两个实测点分别相差2和3℃。这些新的进展还证明轮胎结构中温度最高的位置在胎肩和胎圈部位。

(4) 轮胎接地性能分析

文献[26]建立了10.00R20子午线轮胎的三维非线性有限元模型,以模拟轮胎的轮辋定位-充气-加静负荷的过程。通过有限元分析,得到了子午线轮胎在充气压力和静负荷作用下的变形和应力分布情况以及接地区的压力分布情况,并将计算结果与试验结果进行了比较,两者吻合得很好。文献[11,27,28]利用三维计算模型并定义胎面与地面的摩擦接触条件以分析自由滚动、转向和制动等多种工况下轮胎印迹内的力和力矩以及整个轮胎的转向刚度、制动刚度和回正刚度。文献[29]分析了9.00R20子午线轮胎静态下与地面的接触问题,考察了下沉量、充气压力及静摩擦因数对轮胎静态接地面内压力应变场的影响,指出在一定的充气压力下,随着下沉量的逐渐增大,接地印痕形状从圆形逐渐变为椭圆形和矩形。随着充气压力的升高,下沉量减小;同时,在相同的下沉量下,接地面内的最大应力随充气压力的升高而增大。

(5) 振动特性分析

Chiesa A等^[30]做了许多试验,研究轮胎的振动特性,而Tielking J T^[31]做了大量理论研究,通常将轮胎模型简化为弹性基础上的弹性环。此外,Hunckler C J^[32]利用膜单元和壳单元建立了简单的轮胎有限元模型。Burke A M等^[33]用有限元法进行了轮胎结构的模态分析,计算所得的径向振动和横向振动的固有频率与测试结果非常

吻合,他们的研究还进一步揭示了固有频率随充气压力增大而显著提高但随轮胎行驶速度提高而降低。Mousseau C W等^[34]结合有限元法研究了弹性基础上圆环梁模型在分析轮胎越过障碍问题时的有效性。Zhang Y等^[35]则利用LS-DYNA的求解器把车辆结构也考虑在内,研究了轮胎与冲击物的相互作用,并分析了轮胎质量、尺寸、刚度和充气压力等对冲击力的影响。Kao G等^[36]用显式积分有限元法计算了滚动轮胎的冲击响应,以评价轮胎的乘坐舒适性。Ni J^[37]用有限元计算轮胎结构振动引起的噪声问题,Doan V Q^[38]的研究表明,不仅轮胎的整体结构振动会产生噪声,而且胎面的局部振动对滑行噪声的贡献也不可忽视。Brockman R A等^[39]则利用半解析有限元技术求解了轮胎产生驻波的临界速度问题。

2 轮胎结构有限元分析存在的问题

轮胎结构的有限元分析是一项充满挑战性的工作,目前仍然存在许多亟待解决的问题,例如轮胎中一些几何形状复杂或刚度变化梯度很大的局部区域的有限元计算精度还有待提高;胎圈和胎冠部位的骨架结构复杂,橡胶材料种类也很多,在有限元分析中材料参数有待进一步优化选择;胎面花纹形式对接地性能和胎冠部位的应力和应变分布的影响以及对轮胎噪声的影响等。这其中有很多制约因素的存在。首先,轮胎本身是一个非常复杂的本构物,轮胎数学模型的建立只是尽可能地真实模拟;其次,有限元的算法还有待进一步改进,将网格进一步细化;第三,受试验条件的限制,与有限元模拟结果进行对比的试验精度的提高也是一个比较大的难题。

3 结语

有限元方法在复杂结构轮胎的设计评估方面是一种非常有效的数值工具,可以预测试验很难测量的轮胎内部的应力和应变。通过有限元方法可以比较真实地模拟轮胎的几何形状、载荷、边界条件以及材料性质,与早期的梁、膜、壳等轮胎简化模型相比,可以做尽可能少的简化。有限元分析可以提供非常有用的信息,因此可以降低模具

制造和试验费用,缩短生产周期。有限元分析已成为现代设计所依靠的基本手段,可大幅度提高轮胎结构的设计水平和效率。

参考文献:

- [1] Kaga H, Okamoto K, Tozawa Y. Stress analysis of a tire under vertical load by a finite element method[J]. *Tire Science and Technology*, 1977, 5(2): 102-118.
- [2] Ridha R A. Computation of stresses, strains, and deformations of tires[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1980, 53(4): 849-902.
- [3] Kennedy R H, Patel I P, Mcminn M S. Radial truck tire inflation analysis: theory and experiment[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1981, 54(3): 751-766.
- [4] Padovan J, Ma J, Pardis H. Millipolar theory for twisted cord-reinforced composites [J]. *Tire Science and Technology*, 1995, 23(3): 138-174.
- [5] Padovan J. End effects in twisted cord-rubber composites[J]. *Tire Science and Technology*, 1996, 24(4): 321-338.
- [6] Pidaparti R M V. Torsional analysis of a steel cord-rubber tire belt structure[J]. *Tire Science and Technology*, 1996, 24(4): 339-348.
- [7] Ebbott T G. An application of finite element-based fracture mechanics analysis to cord-rubber structures[J]. *Tire Science and Technology*, 1996, 24(3): 220-235.
- [8] 薛小香, 姚振汉. 子午线轮胎的非线性有限元分析[A]. 固体力学会议论文集[C]. 大连, 2002. 171-176.
- [9] 杜善义, 王 彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] Halph J C, Kardos J L. The Halpin-Tsai equations; a review [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1976, 16(5): 629-639.
- [11] Goldstein A A. Finite element analysis of a quasi-static rolling tire model for determination of truck tire forces and moments[J]. *Tire Science and Technology*, 1996, 24(4): 278-293.
- [12] Gall R. Some notes on the finite element analysis of tires [J]. *Tire Science and Technology*, 1995, 23(3): 175-188.
- [13] Noor A K, Tanner J A. Tim modeling and contact problems; advances and trends in the development of computational models for tires[J]. *Computers & Structures*, 1985, 20(1-3): 517-533.
- [14] Noor K, Peters J M. Reduction technique for tire contact problems[J]. *Computers & Structures*, 1996, 60(2): 223-233.
- [15] Danielson K T, Noor A K, Green J S. Computational strategies for tire modeling and analysis[J]. *Computers & Structures*, 1996, 61(4): 673-693.
- [16] Danielson K T, Noor A K. Finite elements developed in cylindrical coordinates for three-dimensional tire analysis[J]. *Tire Science and Technology*, 1997, 25(1): 2-28.
- [17] Wu G Z, He X M. Effects of aspect ratio on the stresses and deformations of radial passenger tires[J]. *Tire Science and Technology*, 1992, 20(2): 74-82.
- [18] Eskinazi J Z, Ishihara K, Volk H, *et al.* Towards predicting relative belt edge endurance with the finite element method [J]. *Tire Science and Technology*, 1990, 18(4): 216-235.
- [19] 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.
- [20] 程 钢, 赵国群, 管延锦. 子午线轮胎耐磨性能影响因素分析[J]. *橡胶工业*, 2004, 51(4): 201-204.
- [21] 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.
- [22] Jeusette J P, Theves M. Finite element analysis of tire/rim interface forces under braking and cornering loads[J]. *Tire Science and Technology*, 1992, 20(2): 83-105.
- [23] 刘文宁, 蒋文革. 轮胎温度场的有限元分析[J]. *复合材料学报*, 1994, 11(2): 7-13.
- [24] 危银涛, 刘宇艳, 杜星文, 等. 子午线轮胎滚动阻力与温度场非线性有限元分析[J]. *轮胎工业*, 1998, 18(6): 330-335.
- [25] Park H C. Analysis of temperature distribution in a rolling tire due to strain energy dissipation [J]. *Tire Science and Technology*, 1997, 25(3): 214-228.
- [26] 薛小香, 姚振汉, 李 鹏, 等. 子午线轮胎的轴对称非线性有限元分析[J]. *橡胶工业*, 2003, 50(5): 292-297.
- [27] Tonuk E, Unlusoy Y S. Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis[J]. *Computers & Structures*, 2001, 79: 1 219-1 232.
- [28] Burke A M, Olatunbosun O A. Contact modelling of the tyre/road interface[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1997, 18(2): 194-202.
- [29] 赵树高, 杨学贵, 邓 涛, 等. 子午线轮胎接地问题的三维非线性有限元分析研究[J]. *轮胎工业*, 2001, 21(11): 662-669.
- [30] Chiesa A, Oberto L, Tamburini L. High frequency vibration in tires under vertical perturbation and their transmission to the wheels[J]. *Automotive Engineering*, 1964, 54: 520-530.
- [31] Tielking J T. Plane vibration characteristics of a pneumatic tire model[J]. *SAE 65492*, 1965.
- [32] Hunckler C J. The dynamic behavior of an automobile tire [D]. Purdue: Purdue University, 1979.
- [33] Burke A M, Olatunbosun O A. New techniques in tyre model analysis using MSC Nastran[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1997, 18(2): 203-212.
- [34] Mousseau C W, Clark S K. An analytical and experimental study of a tire rolling over a stepped obstacle at low velocity

- [J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(3): 162-181.
- [35] Zhang Y, Hazard C. The effects of tire properties and their interaction with the ground and suspension on vehicle dynamic behavior—a finite element approach[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(4): 227-249.
- [36] Kan G, Muthukrishnan M. Tire transient analysis with an explicit finite element program[J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(4): 230-244.
- [37] Ni J. Radiated noise from tire/wheel vibration[J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(1): 29-42.
- [38] Doan V Q. Investigation into the influence of the construction on coast-by noise[J]. Tire Science and Technology, 1995, 23(2): 96-115.
- [39] Brockman R A, Champion J H, Medzorian J P. Finite element analysis of tire critical speeds[J]. Computers & Structures, 1992, 43(3): 581-593.

VMI 和 马朗贡尼 推出 灵活 轮胎 成型 系统

中图分类号: TQ336.1; TQ330.6⁺6 文献标识码: D

英国《欧洲橡胶杂志》2005 年 187 卷 2 期 23 页报道:

VMI 和 马朗贡尼 工程技术人员合作研制了一种自动轮胎成型系统, 它具有米其林 C3M 和倍耐力 MIRS 的所有优点, 没有任何技术风险。VMI 开发的以普通成型机头为基础的系统采用直接挤出、胶条缠绕和创新带束层结构技术, 能大幅度减小占地面积和能源消耗, 每个加工单元的日产量可达 1 200 条。

该系统称作 MTM (Modular Tyre Manufacturing)。虽然核定该系统的成本为时尚早, 但与普通轮胎成型系统相比, 无论是在总投资方面, 还是在单胎成本方面, 它都具有竞争力。该系统不一定以整套技术方案出售, 而可以把不同部位件组装到现有成型线上。这种全自动设备完全不需要手工参与轮胎制造, 每个加工单元需要 3 个人管理: 1 个工长、1 个操作工和 1 个叉车司机 (在其它两人中的一人休息时供给胎面)。

VMI 已经使用该系统的各个部分制造轮胎, 今年早些时候将推出 1 台完整的原型系统, 同时两家公司将在马朗贡尼公司总部所在地意大利罗韦雷托建一工厂, 生产制造系列轮胎产品所需的各种加工单元。该厂可能于 2006 年年初竣工。

MTM 系统提供了极大的加工灵活性, 可以经济地生产单一规格轮胎, 同时在线改变胎面花纹、帘布结构和其它细节。但是该系统对制造不同轮辋规格的轮胎的适应能力却较低。一旦该系统设定制造某一特定轮辋规格的轮胎, 它将连续制造该规格轮胎, 但它可以采用不同的轮胎内部结构和任意一种模型。该系统也可设定成连续制

造 100 条或 200 条同一规格轮胎。

另一局限性是不能在运行中改变胶料。尽管该系统设计中没有规定挤出机的数量, 但研发小组为其预定了 6 台挤出机, 每台挤出机都挤出一一种特定胶料。

MTM 系统的技术风险最低, 同时具有米其林和倍耐力系统的灵活性以及节省材料、时间和占地空间的优点。该系统可以制造轮辋直径为 355.6~563.2 mm、速度级别在 Z 级以下的各种规格和结构的轿车、运动车和半钢轻型载重轮胎。该系统制造一条轮胎的标准时间仅为 60 s, 从而降低了每条轮胎的制造成本。

就质量而言, 该系统生产的轮胎一致性、均匀性均优于普通一次法成型机。该系统制造的带束层无接头、均匀一致, 十分完美。

每个 MTM 单元包括 1 台四鼓成型机和 6 台提供各个部件的挤出机; 6 台双模液压硫化机; 1 个喷涂站; 1 个材料输送系统; 1 个单元控制器和 1 个质量监控系统。此外, 还有 1 台线外胎圈三角胶制造设备, 它也是全自动的。

MTM 设计得可以尽可能利用现有部件。根据这一原则, 各部件也可用于普通成型鼓。

完美带束层的生产以约 25 mm 宽帘布条为基础。将一小卷钢丝帘线通过一直角机头挤出机挂胶, 制造帘布条。将该帘布条送入一具有摆动臂的可变角度裁断机, 按带束层所需角度裁成一系列小帘布条, 其长度即为带束层宽度。然后将这些帘布条连接成长度精确的带束层。

挤出口型生产的小帘布条具有预定的拼接角度, 每一小帘布条都有斜坡边, 而且材料非常粘, 足以使多条小帘布条粘接成一条具有系列微小接头的均匀帘布条。它们的制造精度保证了成品轮胎的均匀性大大优于仅有单一接头的普通带束层