

1-8-2019

Dynamic Wear Monitoring Based on Stiffness Simulation of Aircraft Radial Tire

Wang Hui

College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Kun Xu

College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Wear Monitoring Based on Stiffness Simulation of Aircraft Radial Tire

Abstract

Abstract: During the wear monitoring for the aircraft tire, the expansion change on the top of tire crown caused inaccuracy for the monitoring results. Considering the aircraft tire cord with high strength, orthogonal anisotropy and tensile deformation, *the main three dimensional nonlinear finite element model of B737-800 passenger aircraft radial tire was built using the Yeoh rubber constitutive model and the Rebar stiffener unit in Abaqus software. The problem of static contact between aircraft tire and road was successfully simulated using adaptive Lagrange algorithm.* Radial tire stiffness, ground imprinting, main area of friction losses and sinkage were obtained by simulation. The problem of the dynamic threshold of sensors during the wear monitoring was solved by the variation curve of the top of tire crown inflation; while the accuracy for monitoring results was improved. The simulation results were compared with the calculated data and the result indicated that the model' reliability was fairly good.

Keywords

aircraft tire, wear monitoring, Abaqus, passenger aircraft, nonlinear, tire stiffness

Recommended Citation

Wang Hui, Xu Kun. Dynamic Wear Monitoring Based on Stiffness Simulation of Aircraft Radial Tire[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3033-3041.

基于航空子午胎刚度仿真的动态磨损监控研究

王辉, 徐坤

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 针对航空轮胎磨损监控中因胎顶膨胀量变化导致监控结果不准确的问题, 考虑到航空轮胎胎内帘线的高强度、正交各向异性和小拉伸变形, 在 Abaqus 软件中采用 Yeoh 橡胶本构模型和 Rebar 帘线加强筋单元建立了 B737-800 民航飞机主子午线轮胎的三维非线性有限元模型。应用自适应接触的拉格朗日算法, 成功模拟了轮胎与机场路面之间的静态接触问题。仿真得出了径向轮胎刚度、接地印痕、主磨损区域和下沉量, 得出的胎顶膨胀量变化曲线解决了磨损监控中传感器动态阈值制定的问题, 提高了监控准确度。通过比较检验, 验证了仿真结果的可靠性。

关键词: 航空轮胎; 磨损监控; Abaqus; 民航飞机; 非线性; 轮胎刚度

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 08-3033-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808026

Dynamic Wear Monitoring Based on Stiffness Simulation of Aircraft Radial Tire

Wang Hui, Xu Kun

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: During the wear monitoring for the aircraft tire, the expansion change on the top of tire crown caused inaccuracy for the monitoring results. Considering the aircraft tire cord with high strength, orthogonal anisotropy and tensile deformation, the main three dimensional nonlinear finite element model of B737-800 passenger aircraft radial tire was built using the Yeoh rubber constitutive model and the Rebar stiffener unit in Abaqus software. The problem of static contact between aircraft tire and road was successfully simulated using adaptive Lagrange algorithm. Radial tire stiffness, ground imprinting, main area of friction losses and sinkage were obtained by simulation. The problem of the dynamic threshold of sensors during the wear monitoring was solved by the variation curve of the top of tire crown inflation; while the accuracy for monitoring results was improved. The simulation results were compared with the calculated data and the result indicated that the model' reliability was fairly good.

Keywords: aircraft tire; wear monitoring; Abaqus; passenger aircraft; nonlinear; tire stiffness

引言

飞机的安全性与轮胎性能息息相关, 飞机轮胎

的刚度特性对整机性能有着非常重要的影响。在轮胎的刚度特性力学仿真方面, Ridha^[1]采用六面体单元建立了汽车轮胎的三维线性仿真模型, 在充气后进行加载仿真模拟, 最终得出加载载荷和轮胎底部下沉量之间的关系。Ghoreishy 等^[2-3]学者为了解决在轮胎仿真中因网格划分过多而造成计算效率低下, 依据机动车辆轮胎的使用情况, 采用非均匀分布的局部加密网格划分方法将轮胎与地面接触



收稿日期: 2016-11-08 修回日期: 2017-07-27;
基金项目: 国家自然科学基金(U1233107), 中国民航局科技创新项目(MHRD20140210);
作者简介: 王辉(1966-), 男, 辽宁本溪, 博士, 教授, 研究方向为轮胎磨损监控和飞行仿真技术; 徐坤(1992-), 男, 山东滨州, 硕士, 研究方向为航空轮胎磨损监控。

<http://www.china-simulation.com>

• 3033 •

部分网格加密, 最终建立的三维非线性有限元模型不仅提高了计算机计算效率, 而且保证了一定的模型精度。杨建等^[4]提出新非自然平衡轮廓设计理论在提高轮胎抓地力的同时减少了磨损并且降低了滚动阻力, 改正了汽车轮胎不同性能间相互矛盾的缺点, 提升了扁平度较小轮胎的整体性能。胡林等^[5]将轮胎轮廓曲线形状数字化后建立了子午胎的三维非线性模型, 采用一对面-面接触的柔性接触单元, 仿真分析了接地轮胎在径向、侧向及切向负荷作用下轮胎的各种应力应变情况。

然而以上大多数文献都局限于轿车轮胎或载重卡车轮胎, 鲜有文章涉足航空轮胎, 也鲜有文献涉及胎内应力与轮胎磨损之间的关系以及胎顶膨胀量的变化。而为减少飞机维修活动, 降低维修成本, 在对 B737-800 型民航飞机主轮胎进行磨损监控时, 建立的轮胎监控模型必须要用到轮胎的刚度值和胎顶膨胀量随胎压和载荷大小的变化关系, 因为其刚度随充气压力及飞机载重的变化直接影响到了监控参数。该机型轮胎自由直径为 563.1 mm, 轮胎胎高为 305.2 mm, 轮胎最大截面宽度为 400 mm, 可该型轮胎具体其它性能参数信息, 国内没有相应的数据资料。因此为进行飞机轮胎磨损监控, 对该轮胎的仿真是十分必要的。

1 轮胎刚度与胎顶膨胀量

航空轮胎的径向刚度是指在规定的装配轮辋和额定充气压力下, 轮胎处于静止状态时轮胎底部径向变形随径向载荷的变化关系。飞机起飞降落过程中在机场跑道滑行时, 由于路面的粗糙性和不平整性, 轮胎的径向刚度的大小直接影响了飞机起落架的落振缓冲性能和摆振稳定性。合适的轮胎径向刚度, 不仅能使机内乘员有一个良好的舒适体验, 还可以在在一定程度上减少轮胎的磨损, 延长使用寿命。

胎顶膨胀量是指轮胎接地时径向离地面距离最大的胎面的膨胀量。而膨胀量是胎面相对于机轮轴中心而言的, 飞机静止时, 胎顶膨胀量随飞机载重和胎内压力的变化而变化, 此结果直接影响到了

磨损监控参数的设定。

2 民航飞机主轮胎三维模型建立

2.1 几何建模

航空轮胎相对于汽车轮胎具有更复杂多变的形状和结构。突出表现在它的扁平化设计, 钢圈数目一般多于两个, 拥有较大的胎侧弧度, 而且断面宽度与轮辋宽度较小, 为了满足其更大的承载性, 胎体帘布层的层数也明显多于车用轮胎。鉴于以上原因, 研究过程中, 直接在 Abaqus 软件中建立二维飞机轮胎模型, 为后续有限元分析提供了方便^[6]。

B737-800 型民航飞机主轮胎充气压力可以达到 1.4 MPa, 而一般汽车轮胎充气压力是 0.2 MPa; 轿车或载重车径向最大载荷能达到 8 到 70 kN, 而航空轮胎最大径向载荷能达到 250 kN。因为需要承受很大的径向载荷, 所以航空轮胎比汽车轮胎补强层层数多。而且在航空子午线轮胎的内部结构设计, 要求带束层必须具有良好的刚性, 通常采用高强度、大角度且耐拉伸的纤维材料, 由带束层承受周向应力, 约束轮胎径向膨胀。

该型号航空子午线轮胎结构主要分为胎面、胎体、胎侧、钢丝圈、带束层和补强层等部分, 如图 1 所示。

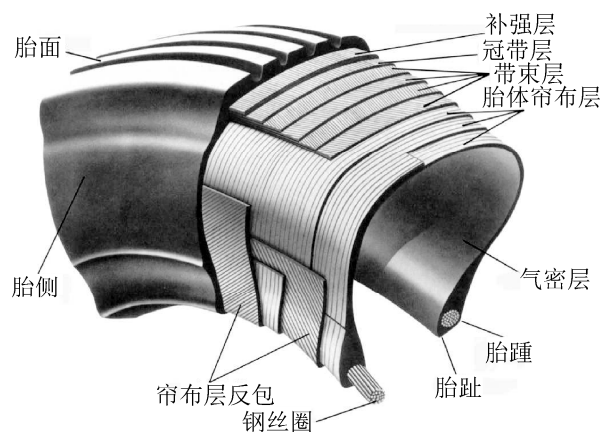


图1 子午线轮胎结构
Fig. 1 Radial tire structure

2.2 轮胎模型简化

航空轮胎是由橡胶、帘布层和带束层等多种材料压制而成的, 具有多层多种结构, 因此其横断面形状相当复杂, 在带束层和胎侧的邻接部位, 由于制造特性, 具有狭长的几何尖角。为保证能够进行合适地网格划分, 得到既满足精度要求又利于计算收敛的航空轮胎有限元模型, 对其几何模型的横断面做以下简化:

- (1) 因为胎侧和翼胶的位置相邻且材料相同, 所以将这两部分合并;
- (2) 在钢丝圈和三角胶邻接部位将狭长尖角倒圆角, 令其平滑过渡;
- (3) 在带束层和胎侧的邻接部位, 也进行倒圆角的平滑过渡处理;
- (4) 由于航空轮胎花纹数较少而且相对规则对称, 文献[7]表明, 胎面花纹对轮胎的静刚度特性影响很小, 所以为提高建模效率, 建模中忽略航空轮胎胎面花纹。

2.3 轮胎材料特性

航空轮胎是由不同类型的橡胶和骨架材料构成的, 本文研究对象为 B737-800 型民航飞机主子午线轮胎。其中, 胎侧、胎面、胎身和胎圈等为弹性模量各异的橡胶材料, 属于超弹性材料, 具有高度非线性和体积不可压缩性。带束层、帘线层、补强层和胎圈等是更为复杂的橡胶-帘线复合材料, 它们具有正交各向异性的特性。

Abaqus 中有 Mooney-Rivlin、Yeoh 以及 Ogden 等可以用来进行橡胶材料分析的模型。文献^[8]指出, 在进行轮胎仿真时, 橡胶材料力学特性不仅受材料自身变形影响, 而且与所选材料模型极为相关。建模时充分考虑了橡胶材料的超弹性和复合材料的各向异性, 以及几何特性和材料特性的非线性, 橡胶材料选中 Yeoh 本构模型(6 个参数)。它能够处理的变形范围比其他模型大, 与橡胶的试验曲线的拟合程度较高; 而且它能在实验数据有限的情况下预测不同变形节点的应力应变行为, 具有可靠

的预测能力。Yeoh 本构模型应变能函数可表达为:

$$F = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 + \frac{1}{D_2} (J^{el} - 1)^4 + \frac{1}{D_3} (J^{el} - 1)^6 \quad (1)$$

式中: F 为应变能; I_1 为橡胶材料中的扭曲度量; J^{el} 为弹性体积比; C_{10} , C_{20} , C_{30} 为材料参数; D_1 , D_2 , D_3 为材料参数。

航空橡胶-帘线复合材料目前普遍使用层合壳模型来表征。层合壳模型^[9]用平均值指代各复合材料组成部分在同一层或同一单元内的力学特性。但是层合壳模型使用了采用平均值假设, 正交各向异性复合材料的各层数据通过 Halph-Tasi 公式^[10]计算得出, 该平均值假设间接影响了模型的计算准确度。此外, 它也没有考虑到帘线的双模量特性和橡胶复合材料的高度非线性。

本文使用的是加强筋模型, 它可以将橡胶-帘线复合材料分为基体部分和加强筋部分, 其中, 基体部分用实体单元来表示, 加强筋部分由 Rebar 加强筋单元表示。本研究在 Abaqus 软件仿真建模过程中, 先将 Rebar 单元定义在面单元上, 然后再将面单元嵌入到相应的橡胶实体单元内, 分别定义钢丝帘线和橡胶基体的材料参数, 该模型没有做相应的前提假设, 可以精确地表征橡胶-帘线复合材料的物理和几何非线性。在软件中模拟加强筋时定义的单元具体参数如表 1 所示。

表 1 Rebar 单元设置参数
Tab. 1 Rebar element set up parameters

名称	面积/mm ²	间距/mm	角度/°
胎体帘线	1.5	1.0	0
钢圈	4.0	0.2	90
带束上	1.5	0.2	75
带束下	1.5	0.2	-75

对航空轮胎各部分材料分段进行单轴拉伸试验, 得到各部分橡胶和帘线材料的测试数据。通过 Abaqus 中转换计算, 得到 Rebar 材料参数和 Yeoh 材料参数分别见表 2~3。

表2 Rebar 材料参数
Tab. 2 Rebar material parameters

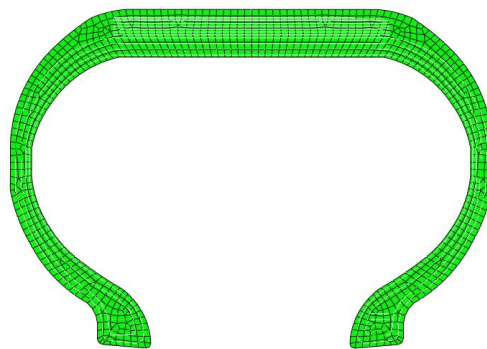
材料名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
芳纶	1 440	11 800	0.38
钢圈	5 840	8 027	0.37
尼龙	1 210	3 790	0.40

表3 Yeoh 模型材料参数
Tab. 3 Yeoh model material parameters

名称	胎侧	胎面	胎圈	胎身
密度/(kg/m ³)	1 500	1 180	1 250	1 180
C_{10}	0.487 6	0.776 9	0.599 8	0.479 5
C_{20}	-0.141	-0.276	-0.122	-0.136
C_{30}	0.038 6	0.095 3	0.026 7	0.043 6
D_1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
D_2	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
D_3	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1

2.4 网格划分

因为轮胎二维几何模型是轴对称的,为方便计算,可以仅对模型右一半或左一半进行网格的划分,然后通过 Abaqus 里对 Inp 文件的编程得到另一半。有限元网格质量的好坏直接影响了计算结果的精度和收敛性,网格单元数目划分过多会使计算效率低下,而过少则不能保证精度。所以在网格划分时应尽量用网格质量精度高而且数量较少的单元来表征超弹性橡胶材料和正交各向异性的复合材料。仿真过程中由于涉及非常大的单元扭曲、大应变分析和非线性接触等计算问题,所以为提高计算精度,应选用扭转线性完全积分单元;而且分析中使用 Standard 求解器,在此求解器下橡胶材料近似不可压缩性由杂交单元表示。因此最终模型中的三角形和四边形单元分别选用 3 节点可扭转轴对称杂交实体线性单元 CGAX3H 和 4 节点可扭转轴对称实体线性单元 CGAX4H,在旋转后对应的三维空间单元分别为 C3D6H 和 C3D8H。胎体帘线胎圈、补强层和带束层等材料的单元类型选用 2 节点扭转轴对称面单元 SFGAX1。划分好的二维网格模型如图 2 所示,该模型共有 956 个单元。

图2 二维轮胎网格模型
Fig. 2 Two-dimensional tire mesh model

3 航空轮胎有限元计算

3.1 三维模型生成

针对航空轮胎的结构特点和建模需要,本文不直接在 CAE 界面中旋转生成轮胎的三维模型,因为直接使用 CAE 生成三维模型后边界条件的设置和载荷加载的方法过于复杂,而且不利于计算,增大了收敛难度。本文通过后处理方式,使用 Inp 文件借助模型生成指令(* Symmetric Model Generation)和结果传递指令(*Symmetric Results Transfer),直接在采用编程的方式设定地面、边界条件和载荷等参数,生成航空轮胎的三维有限元模型。在旋转生成三维模型时,采用 CYLINDICAL 三维圆柱单元,这样可以在保证精度的同时减少计算量。在生成单元时,在旋转方向进行不均匀旋转,对重要的接地区域加密,这样可以减少三维轮胎的总单元数,减少分析时间;但是不均匀分布也同样加大了收敛难度,对模型网格划分质量提出了更高要求。B737-800 型民航飞机主轮胎的充气压力为 1.3 MPa,将二维轮胎充气结果传递到三维,旋转后的三维网格模型如图 3 所示。

该三维模型共有 11 236 个单元、45 546 个节点。在航空轮胎静止接地加载分析中,必须首先指定可能与地面发生接触的区域,该区域可以是轮胎的整体外侧面。然而,本研究中为了节省计算时间,采用了提前指定局部较小接触区域(但确保接触区域包括所有可能与地面发生接触的部位)的方法,

这样更利于计算机分析。本文将精细划分网格处的部分单元定义为 STREAD^[11], 其面的外法线方向全部朝向轮胎外侧。并且使其成为从面, 地面为主面且保证从面网格比主面网格细。

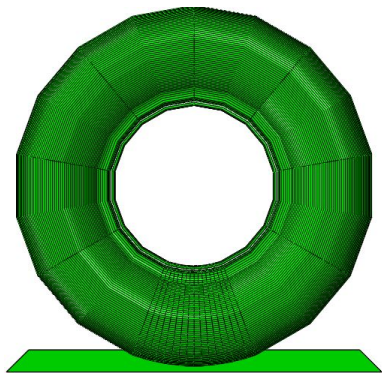


图 3 三维轮胎路面网格模型
Fig. 3 Three-dimensional tire road grid model

3.2 边界条件及加载方式

边界条件设置与实际飞机起落架上轮胎的固定方式基本一致, 通过轮辋来限制轮胎钢丝圈的位置。由于起落架上航空轮胎与轮辋接触挤压后的变形量极小, 相对于接地处的大变形而言几乎可以忽略不记, 而且本文中着重考虑胎圈外侧的变形, 所以在仿真中限制轮胎与轮辋接触面 UX、UY 和 UZ 三个方向的自由度, 使之在计算过程中不形成位移, 增加分析效率。在对轮胎与轮辋、地面接触边界模拟中, 做如下简化: 路面和轮辋模型都定义为解析刚体, 轮胎与地面以及轮胎与轮辋之间的相互作用均定义为自适应接触模型。

在分析轮胎径向刚度特性以及胎顶膨胀量的过程中, 其加载方式分为以下三个阶段:

- (1) 轮胎自由充气工况;
- (2) 给地面施加一径向垂直位移, 来模拟载荷加载过程, 使轮胎发生变形;
- (3) 取消地面的径向位移, 慢慢对路面施加集中载荷, 直至加载至规定载荷为止。

对航空轮胎进行仿真求解计算时, 充分考虑到轮胎内部结构的复杂性、材料的超弹性以及边界条件非线性, 利用 Abaqus/Standard 进行非线性分析

计算, 在有限元求解过程中采用如下措施:

(1) 求解计算中使用牛顿-拉夫森迭代法, 该方法可以将一个分析步分解为多个增量步来分步计算。如果仿真结果不收敛, 可以再返回调小初始增量步。

(2) 虽然轮胎与地面接触中摩擦是一定存在的, 但计算中先按照无摩擦接触定义一个步长较小的初始计算步, 其计算收敛后再定义有摩擦接触, 方便查找计算错误。

(3) 在定义胎面与地面接触时, 为解决过约束问题, 令初始接触面之间有微小间隙, 采用自适应接触算法, 加入容差限度。

(4) 将径向载荷的加载分为 3 个载荷步, 再将其分为 5 个子载荷步, 每一子载荷步根据程序收敛状况自动调整其步长, 加入控制语句, 使每一子载荷步内平衡迭代次数最多能到 100 次, 求解收敛值。

4 轮胎刚度计算与结果分析

4.1 径向刚度

航空子午胎主要依靠带束层来承受着陆带来的冲击力和内压引起的大部分应力^[12]。根据 B737-800 型民航飞机手册得知, 本文研究的主起落架轮胎气压值在[0.83 MPa, 1.41 MPa]范围内, 承载范围在[110 kN, 164 kN]之间, 选择轮胎内衬层的表面施加均布载荷给轮胎充气。

由文献[13]知, 该航空轮胎额定充气压力为 1.3MPa, 因此对二维轮胎内表面施加此压力, 编写 INP 文件将其旋转成三维轮胎, 并且传递充气压力的结果, 采用重启动文件生成三维轮胎模型。将轮胎固定不动, 抬升路面, 使轮胎变形。该机主轮胎额定载重为 13 000 kg, 此为 B737-800 型民航飞机主轮胎在静止状态下主轮胎单胎载重, 为实际工况。假设飞机各轮胎受力均匀, 均为其额定载重, 因此对地面施加一个大小为 130 000 N 的力, 然后按照上节的边界条件和加载方法对航空轮胎进行

仿真计算。通过计算可得轮胎在垂直载荷下径向位移云图，如图4所示。

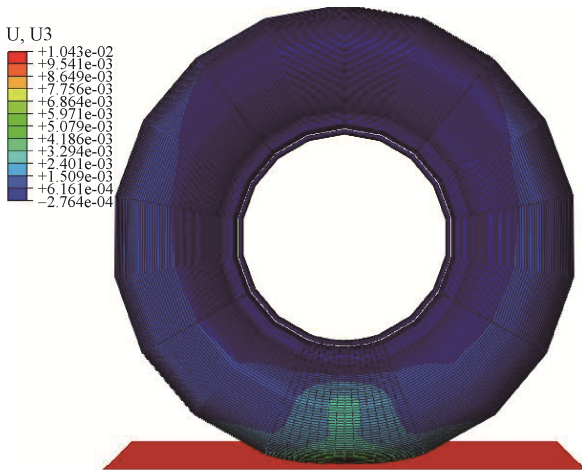


图4 轮胎径向位移云图
Fig. 4 Radial displacement of the tire

从图4中可以看出胎面中心的下沉量即位移变化量最大，而距离刚性路面越远，轮胎的位移变化量就越小。而胎顶膨胀量相对变化较小，可在路面加载影响下，胎顶膨胀量仍有微小的变化。

为了验证B737-800型民航飞机主子午线轮胎刚度仿真的可靠性，根据文献[14]指出航空子午线轮胎径向刚度经验公式如下：

$$F_z = 2.4W \sqrt{WD} (P + 0.08P_t) [(\delta/W) - 0.2] \quad (2)$$

式中： F_z 为径向载荷，单位：N； P 为充气压力，单位：MPa； P_t 为额定充气压力，单位：MPa； W 为横截面断面宽，单位：mm； D 为轮胎外径，单位：mm。

仿真分析了4种不同充气压力工况下轮胎的径向刚度，根据公式2也同时计算出了4种不同充气压力工况下的径向刚度，对比结果如图5所示。

由图5可以看出，当该航空子午胎的径向变形约为 $75 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ 时，理论径向刚度值基本与仿真径向刚度值一致，此时平均相对误差极小，控制在 $\pm 0.5\%$ 左右。然而随着径向变形的增加，平均相对误差也跟着逐渐增大，但在仿真实验范围内误差最大值仍然均小于6.95%。仿真结果与理论估算值之间的误差都没有超过的工程应用范围，误差在可

允许范围之内，说明本文所建立模型的仿真结果是可靠实用的，同时也在一定程度上验证了后续胎顶膨胀量随胎压和载荷变化关系的可信性。

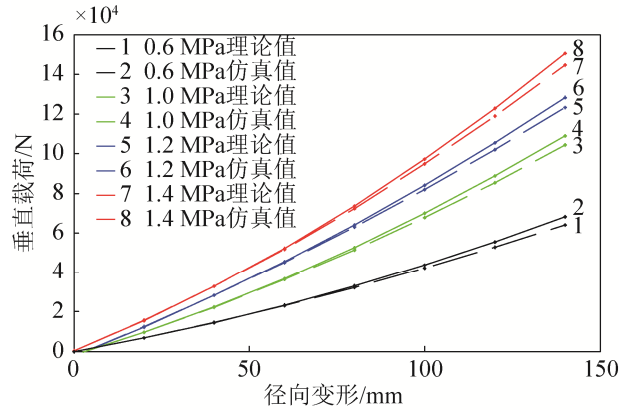


图5 不同工况径向刚度特性曲线
Fig. 5 Radial stiffness characteristic curve of different working conditions

4.2 接地印痕、主磨损区域与下沉量

通常情况下，当汽车轮胎接地时，先接地部位为胎面中心。然后随着地面加载压力的增大，胎肩部位才开始逐步接地，接地印痕由原先的椭圆形逐渐变成矩形^[15]。然而对此航空轮胎进行额定胎压下不同加载压力大小的仿真测试，接地印痕仿真结果如图6所示。由图6可见，航空轮胎与一般汽车轮胎不同，在受到初始较小的静载荷时，是胎面中心最先接触地面，但是一开始便产生了类似矩形状的接地印痕；然后随着静载荷的进一步增大，轮胎的变形和接地印痕面积都开始增大，接地印痕也逐渐开始往椭圆形方向发展，胎肩内侧开始逐渐与地面接触同时胎肩内侧出现应力较大的区域。而且随着静载荷的逐渐增大，与地面接触的最大应力值不是在胎面中心处，反而处于胎肩内侧。航空轮胎接地印痕形状的变化与汽车轮胎相反，是由于轮胎的扁平化设计，以及其非驱动轮，只为从动轮，需要它与地面尽可能大的接触，提供较大的摩擦力来制动飞机，缩短飞机滑行距离；而且其内部较高的胎压和多层多种胎内帘线的布置，使得其具有极高的承载性和抗变形能力。

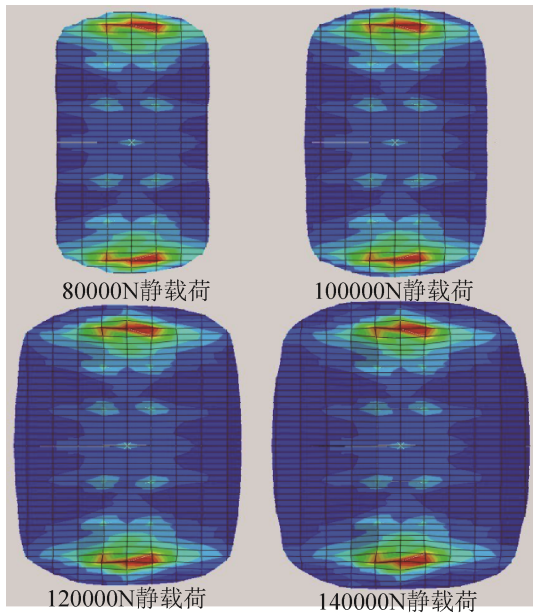


图 6 不同载荷下接地印痕
Fig. 6 Ground marks under different loads

由某航空公司提供的磨损轮胎如图 7 所示, 与仿真结果一致, 在胎肩内侧应力集中区域磨损较严重, 甚至出现了小范围的掉块^[16]现象。在某航空公司换下的轮胎中, 有百分之七十的轮胎主磨损区域都出现在了胎肩内侧, 可见应力集中是其产生磨损的主要原因之一。



图 7 某航空公司磨损轮胎图
Fig. 7 Diagram of one airline tire wears

亦如图 8 胎内断面应力所示, 正因为胎肩内侧的应力比较集中, 所以导致了相同的滑行距离, 胎肩内侧更容易磨损, 这与航空公司给出的数据结果一致。

由图 9 可以看出, 在负荷小于 80 000 N 时,

航空轮胎的下沉量与所受静负荷大小近似成线性关系, 轮胎所受到的静负荷越大, 下沉量也越大。但由于航空轮胎胎体帘线较密, 胎内气压偏大, 相对硬度较高, 所以在负荷大于 80 000 N 后下沉量与静负荷线性关系逐渐减弱, 随着静负荷的增大, 轮胎下沉量明显变小, 表现出航空轮胎较高的承载性。

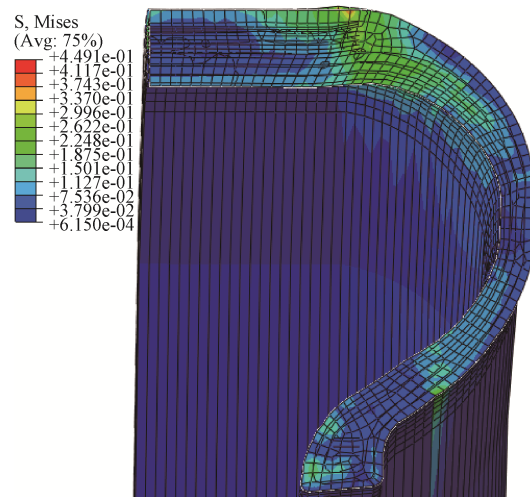


图 8 轮胎截面应力云图
Fig. 8 Stress cloud diagram of tire section

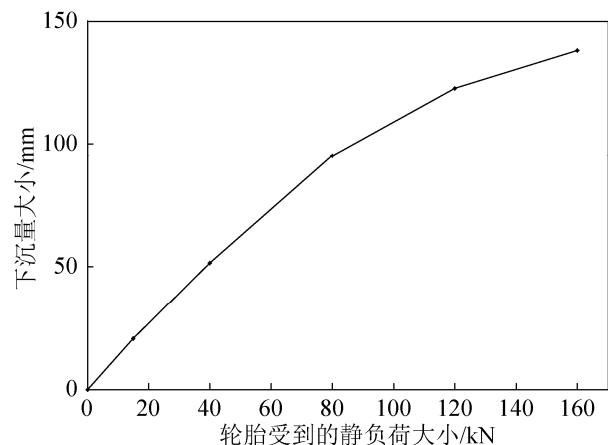


图 9 轮胎下沉量与静负荷关系
Fig. 9 Relationship between the sinking load and static load

4.3 胎顶膨胀量

民航局科技项目中对 B737-800 型民航飞机主轮胎进行磨损监控时, 是在飞机停靠停机坪, 机上乘客及乘务人员下机以后, 当飞机已经静止不动时根据胎面厚度检测航空轮胎的磨损程度, 判断轮胎

是否磨平是否应该更换。该型轮胎胎面厚 42 mm, 轮胎条状花纹深 11 mm, 即固定距离传感器, 假如检测到胎面厚度小于 31 mm, 则发出警告更换轮胎。将传感器装在轮胎胎顶正上方位置, 需要知道在不同飞机重量下, 胎顶膨胀量在不同胎压下的具体数值。根据仿真结果数据, 所绘制出的胎顶膨胀量变化曲线如图 10 所示。

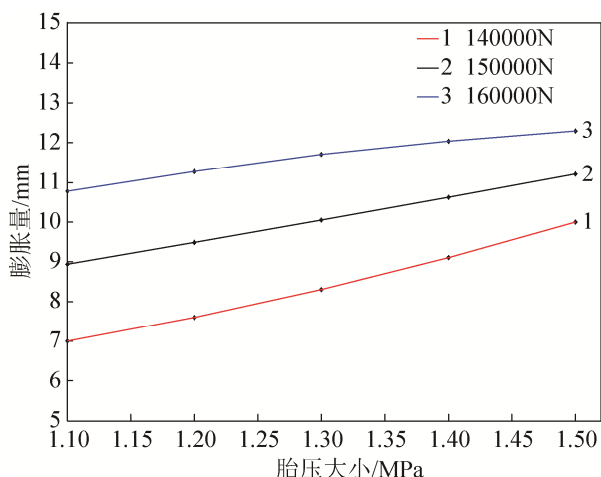


图 10 胎顶膨胀量变化曲线
Fig. 10 Change curve of tire roof expansion

由图 10 可见在固定的飞机重量下, 胎顶膨胀量随胎压的增大而增大, 但增长较为缓慢, 因为航空子午胎带束层紧紧束缚住轮胎的径向膨胀。相对于胎压大小来说, 不同的机身重量更能引起胎顶膨胀量的变化。在飞机工作的可能工况内, 胎顶膨胀量随着机身重量亦或胎压的变化并无大幅度变化, 总体变化范围在[7.1 mm, 12.2 mm]之间, 正是这误差极大影响了传感器的检测, 导致磨损监控预警的不准确性。本文根据可靠地径向刚度仿真结果得出胎顶膨胀量的变化, 对航空轮胎磨损监控传感器的浮动阈值设定起到了帮助作用。

5 结论

(1) 仿真模型采用 Abaqus 中 CGAX3H 和 CGAX4H 超弹性单元以及 Rebar 加强筋单元, 既满足了分析精度, 同时也大大节省单元数, 提高了分析经济性。采用自适应接触控制成功地模拟了

轮胎与刚性地面之间静态接触问题。通过比较验证, 建立的 B737-800 型民航飞机主子午线轮胎模型可以较好地模拟其径向刚度特性。

(2) 仿真得出了不同载荷下的接地印痕图像和轮胎下沉量, 随着载荷的增大, 接地印痕由矩形逐渐向椭圆形过度, 下沉量也逐渐放缓, 验证了航空轮胎较高的承载性和抗变形能力。

(3) 通过分析接地印痕以及剖面应力, 在受力分析上得出了航空轮胎的主要磨损区域为胎肩内侧, 这与航空公司给出的数据一致, 间接验证了仿真分析的可信性。

(4) 在径向刚度仿真验证正确可行的基础上, 得出了胎顶膨胀量在不同胎压不同载荷下的具体变化量, 可以制定相应的传感器动态预警阈值, 提高飞机轮胎磨损监控准确性。

参考文献:

- [1] Ridha R A. Computation of Stresses, Strains, and Deformations of Tires[J]. Rubber Chemistry and Technology (S0035-9475), 1980, 53(4): 849-902.
- [2] Ghoreishy M H R. Finite Element Analysis of Steady Rolling Type with Slip Angle: Effect of Belt Angle[J]. Plastics, Rubber and Composites(S1465-8011), 2006, 35(2): 83-90.
- [3] Ghoreishy M H R. A Parametric Study on the Steady State Rolling Behsteel-belted Radical Type[J]. Iranian Polymer Journal(S1026-1265), 2007, 16(8): 539-548.
- [4] 杨建, 王国林, 万治君. 汽车轮胎性能矛盾相容的新非自然平衡轮廓设计的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(12): 1418-1425.
Yang Jian, Wang Guo-lin, Wan Zhi-jun. A Study on the New Non-natural Equilibrium Contour Design of Vehicle Tires with Conflicting Performance Compatibility [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1418-1425.
- [5] 胡林, 谷正气, 黄晶. 30.00R51 子午线轮胎刚度仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2210-2214.
Hu Lin, Gu Zheng-qi, Huang Jing. Simulation of 30.00R51 Radialtire's Stiffness Characteristics[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8): 2210-2214.
- [6] 潘涛. 子午线轮胎轮廓设计理论的相关研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 18-45.
Pan Tao. Some Theory Study of Contour Design for Radial Tire[D]. Guangzhou: South China University of

- Technology, 2011: 18-45.
- [7] 应卓凡, 臧孟炎, 周涛. 基于复杂花纹的子午线轮胎刚度特性仿真[J]. 汽车技术, 2009, 30(11): 35-37.
Ying Zhuo-fan, Zang Meng-yan, Zhou Tao. Characteristic Simulation of Radial Stiffness of Radial Tire based on Complex Tread [J]. Automobile Technology, 2009, 30(11): 35-37.
- [8] Alkan V, Karamihis S M, Anlas G. Finite Element Modeling of Static Tire Enveloping Characteristic [J]. International Journal of Automotive Technology (S1229-9138), 2011, 12(4): 529-535.
- [9] 石琴, 陈无畏, 洪洋. 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1445-1449.
Shi Qin, Chen Wu-wei, Hong Yang. The Simulation of Tire's Stiffness Characteristics using Finite Element Model [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1445-1449.
- [10] V A Gorelov, A I Komissarov. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire – Rigid Terrain Irregularities Interaction [J]. Procedia Engineering(S1877-7058), 2016, 34(2): 145-151.
- [11] Flanigan C, Beyer L, Klekamp D, et al. Comparative Study of Silica, Carbon Black and Novel Fillers in Tread Compounds [J]. Rubber World(S1671-8232), 2012, 245(5): 18-31.
- [12] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 19-45.
Xu Nan. Study on the Steady State Tire Model under Combined Conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 19-45.
- [13] Xie M, Yao H, Zhao Z. Failure Analysis on Tread Throw of the Tire of B737-800 Airplane[J]. Engineering Failure Analysis(S1350-6307), 2011, 18(2): 789-796.
- [14] 刘长国. 全钢载重子午线轮胎稳态力学特性有限元分析[D]. 吉林: 吉林大学出版社, 2006: 9-27.
Liu Chang-guo. The Finite Element Analysis of the Steady-state Mechanical Properties of Full Steel Load-bearing Radial Tire[D]. Jilin: Jilin University Press, 2006: 9-27.
- [15] 丰世林, 吴江. 基于区间灰色预测模型的飞机轮胎磨损预测技术研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(4): 97-101.
Feng Shi-lin, Wu Jiang. The Research Based on the Extent Grey Prediction Model for the Airplane Tyre Abrasion Forecast[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(4): 97-101.
- [16] Ko J Y, Prakashan K, Kim J K. New Silane Coupling Agents for Silica Tire Tread Compounds [J]. Journal of Elastomers and Plastics(S1530-8006), 2012, 44(6): 549-562.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10% 为国际影响力品牌学术期刊。TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10% 之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。