

基于有限元方法的轮胎振动模态影响因素分析

刘昌波¹, 曹飞², 宋振勇¹, 鞠志明¹, 王园园¹

[1. 浦林成山(山东)轮胎股份有限公司, 山东 荣成 264300; 2. 吉林大学汽车工程学院, 吉林 长春 130022]

摘要:通过建立轮胎有限元模型,采用计算机仿真技术分别在不同充气压力、轮辋约束、负荷以及滚动速度条件下对轮胎进行振动特性分析,并从理论上对仿真计算结果进行研究分析。结果表明:轮辋约束和负荷对轮胎振动影响不大,而充气压力和滚动速度对轮胎振动噪声影响较大。

关键词:轮胎;模态分析;振动特性;有限元分析

中图分类号:U463.341;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2019)11-0652-05

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2019.11.0652



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎是车辆与路面接触的唯一部件^[1],轮胎性能对汽车性能影响很大,如轮胎的振动和噪声会直接影响整车的行驶平顺性、乘坐舒适性和噪声水平。因此,如何降低轮胎的振动和噪声受到轮胎制造商和整车厂越来越多的关注^[2-3]。此外,掌握轮胎的模态特性,对轮胎的合理设计也有着重要的意义。目前,对于轮胎振动模态的测试仍存在不足,由于测试条件的限制,大部分测试只能局限于轮胎静止状态下的振动模态,而轮胎实际滚动状态下的模态特性与静止状态下的模态特性之间存在显著差异。而轮胎模态振动试验必须采用轮胎成品。

本工作对不同充气压力、轮辋约束、负荷和滚动速度下的轮胎进行振动模态分析,以缩短研发周期、节省研发成本。

1 轮胎有限元模型的建立

1.1 几何模型的简化与骨架材料的创建

轮胎是轴对称几何体,因此基模型建立只需处理其二维截面的一半,模型处理好后采用镜像即可。图1所示为处理前材料分布二维图。处理的原则是在保持基本尺寸不变的情况下,尽量简化模型,主要内容如下。

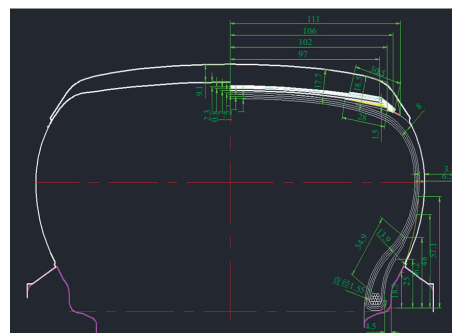


图1 处理前材料分布二维图

(1)忽略细节,只保留主要部件线条。删除尺寸标注、图案填充、定位线和装配线,增加主花纹沟,最后将所有线放在同一图层中。

(2)确定要合并和省略的部件。有限元分析精度受网格影响很大,在保证尺寸准确的同时必须要考虑网格数量和形状,合并内容包括:①由于基部胶厚度较小,对分析影响小,考虑到划分的网格质量,将其与相邻的胎面胶和冠带层合并;②带束层夹胶的位置复杂,尖角过多,且其材料性能与带束层胶相近,因此可合并至带束层胶;③两层长度不同的胎体相连,由于胶料配方相同,二者可以短胎体为标准合并;④钢丝圈与胎体接触的部位形状不规则,且面积较小,可以合并至胎体。

(3)处理圆弧并按部件将线条创建成面域。由于小圆弧非常不利于实际的网格划分操作,考虑到实际的划分要求,将胎面花纹沟的圆弧处理成拐角,钢丝圈则依据轮廓简化为六边形。

(4)创建骨架材料。轮胎胎体使用聚酯纤维

作者简介:刘昌波(1964—),男,山东荣成人,浦林成山(山东)轮胎股份有限公司高级工程师,学士,主要从事轮胎设计与开发工作。

E-mail:540669424@qq.com

增强,冠带层使用锦纶66增强,带束层使用钢丝帘线增强,Abaqus中采用“rebar layer”来描述这种增强关系^[4],即在模型绘制中画出代表增强材料的线,这条线并不代表增强材料实际的排列方式。此外,采用“偏置”命令画出骨架材料。为保证与轮辋接触的正确性,将胎冠最高点坐标定为(0, $D/2$), D 为着合直径,输出文件类型为.igs或.iges格式。

处理后材料分布如图2所示。

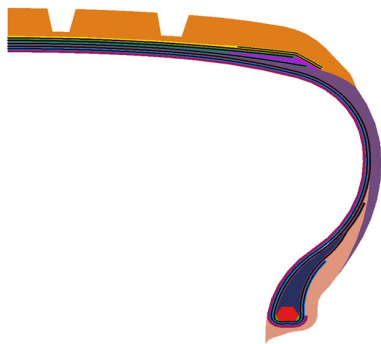


图2 处理后材料分布图

1.2 轮胎模型网格划分

在有限元计算之前需对网格进行合理的划分,在满足计算精度的前提下,尽量减小网格单元数量。本工作采用hypermesh网格划分软件,得到只包含四边形和三角形单元的网格模型,如图3所示。

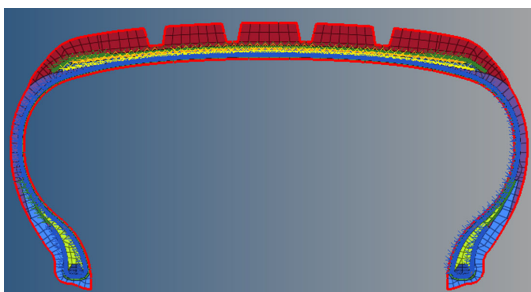


图3 部件划分完毕后的轮胎断面单元

将划分好的网格导入Abaqus中,然后进行如下操作。

(1) Abaqus 使用“*SYMMETRIC MODEL GENERATION, REVOLVE, ELEMENT=a, NODE=b, TRANSPORT”关键字来生成三维模型。

(2) 路面参考节点的 z 坐标是路面充气后胎冠最高点的坐标,可以大1~2 mm。

(3) 地面接触部分分段应稍密,如果不收敛,

就再改密一些,先使用默认的计算。

(4) 三维inp一共分为3步,首先是施加充气压力290 kPa,然后使路面位移,先建立一个小的接触利于收敛,最后施加路面的载荷。

1.3 材料参数的测定

在轮胎有限元计算中,主要考虑橡胶材料和骨架材料两方面的材料。

1.3.1 橡胶材料定义

橡胶作为一种兼具弹性和粘性性能的超弹性材料,其材料特性和几何特性均呈现非线性变化。在应用有限元分析橡胶材料时,一般采用应变能密度函数来表示橡胶材料的力学性能,需要输入橡胶材料的力学性能常数,即应变能密度函数参数。在有限元计算中常用到的应变能密度函数有 Neo-Hookean模型、Yeoh模型、Mooney-Rivlin模型等^[5]。本工作采用通用的Yeoh模型,因为该模型可通过简单的变形试验数据来预测其他变形的力学行为,并且描述的变形范围较宽,该模型的表达式如下:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

式中, W 为应变能密度, C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 为材料常数, I_1 为变形张量不变量。获得方式是使用Abaqus/CAE将应力应变进行拟合,用软件计算出材料常数,然后通过编辑inp文件,将拟合出的参数导入Abaqus。

1.3.2 骨架材料定义

钢丝帘线是一种典型的弹性材料,使用弹性模量和泊松比定义;聚酯帘线和锦纶帘线是高分子材料,但本研究重点考察他们的高强度,而忽略其超弹性(变形很小,不会超出其线性范围),因此仍用弹性模量和泊松比来定义其材料属性。

此外,上述所有材料的密度都经实际测得。钢丝圈虽然也由钢丝组成,但其作用为箍紧轮胎,其受力并不是本工作研究的重点,因此其弹性模量可根据经验取一个较大值即满足需要。最终确定的材料参数见表1和2。

2 结果与讨论

2.1 充气压力对轮胎振动特性的影响

在自由状态下,对轮胎分别施加低充气压力(200, 230, 260 kPa)、标准充气压力(290 kPa)和高

表1 橡胶材料参数

胶料名称	C_{10}	C_{20}	C_{30}	密度/ ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
胎侧胶	0.460 69	-0.142 42	0.037 876	1.099
气密层胶	0.556 51	-0.199 77	0.054 871	1.217
胎面胶	0.700 00	-0.231 89	0.066 149	1.147
冠带层胶	0.748 72	-0.242 33	0.073 993	1.116
带束层胶	0.759 18	-0.252 49	0.089 863	1.147
胎圈耐磨胶	0.796 00	-0.241 56	0.072 545	1.170
三角胶	1.734 13	-0.711 63	0.273 597	1.179
胎体胶	0.628 96	-0.172 43	0.050 921	1.126

表2 骨架材料参数

项 目	带束层 钢丝帘线	胎体聚酯 帘线	冠带层锦 纶帘线	钢丝圈
间距/mm	1.298 7	0.952 4	1.010 1	
直径/mm	0.60	0.66	0.55	
横截面积/ mm^2	0.282 74	0.342 12	0.237 58	
排列角度/($^\circ$)	27	90	0	
密度/($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.85	1.096	0.391 4	7.85
弹性模量/MPa	88 574	4 919	2 477	205 000
泊松比	0.30	0.30	0.30	0.30

充气压力(320,350 kPa),计算不同充气压力下轮胎的振动频率,结果如图4所示。

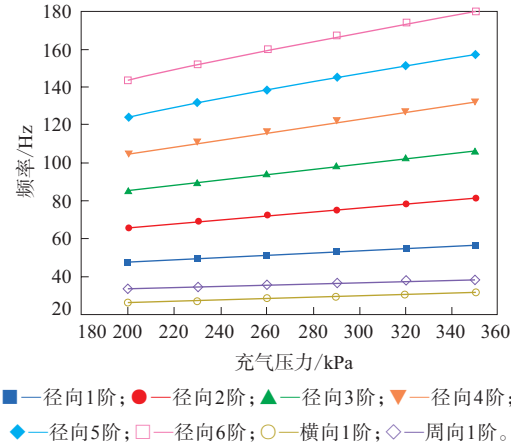


图4 轮胎在不同充气压力下的固有频率

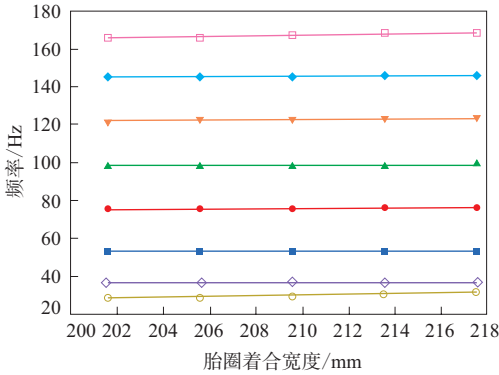
由图4可以看出,随着充气压力的增大,轮胎各阶固有频率逐渐增大,且几乎呈现出线性增长。这是因为充气压力360°作用于内衬层,对各部分单元刚度的影响程度一致。从实际轮胎变化的角度看,充气压力增大,轮胎是整体向外膨胀的,因此固有频率近乎线性增大。

2.2 轮辋约束对轮胎振动特性的影响

在轮胎的结构设计中^[6],胎圈着合宽度的确定很关键,一方面要考虑与轮辋的紧密配合,防止漏气,同时不能过度过盈,以防止胎圈损坏。本工作

研究轮辋约束对轮胎振动特性的影响。

在自由充气状态下,改变轮辋的宽度来间接调整胎圈着合宽度,因为在实际状态下,轮辋在国家标准条件下的变化较小,甚至可以认为是固定的,从轮辋宽度与胎圈着合宽度的相对关系考虑,改变轮辋宽度相当于改变胎圈着合宽度。在充气压力为290 kPa,负荷和转速为零,胎圈着合宽度分别为217.56,213.56,209.56,205.56和201.56 mm的情况下,轮胎固有频率如图5所示。



注同图4。

图5 轮胎在不同胎圈着合宽度下的固有频率

由图5可以看出,随着胎圈着合宽度的增大,轮胎各阶固有频率几乎不变,高阶频率变化较低阶频率大些,但变化依旧很小。这是因为轮辋只约束胎圈的一部分,轮辋宽度的改变影响最大部位也仅仅是胎圈,对于内表面的影响较小,因此对整体刚度的影响较小,固有频率的变化也很小。

2.3 负荷对轮胎振动特性的影响

在转速为零、290 kPa标准充气压力下,分别对轮胎施加2 000,3 000,4 000,6 000,8 000,10 000 N的负荷,计算轮胎振动频率,结果如图6所示。

由图6可以看出以下几点。

(1)与自由状态不同,接地状态下的轮胎振动频率由两个频率组成,如2 000 N负荷下,52.947和53.815 Hz的振型均属于径向1阶,且随着径向阶数的增大,大的频率越来越大,小的频率越来越小。其产生原因可以解释为:以径向1阶为例,虽然其存在两个固有频率,但同时也对应两个振型,因此这种现象不是重根问题。在求解的过程中,先利用特征方程等于零来求出特征值(即固有频率),再利用特征值求出特征向量(即振型),

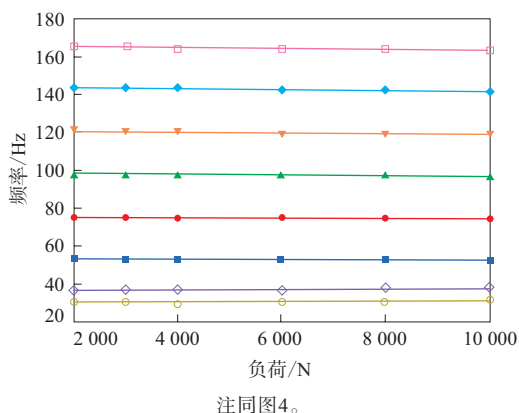


图6 负荷对轮胎固有频率的影响

当两个特征值非常接近时,就会出现特征向量相等的情况,从而导致上述现象出现。由于轮胎每个径向阶都对应两个固有频率,这会增大轮胎发生共振的概率。

(2) 负荷对于轮胎各阶振动频率的影响非常小,各阶的最大值与最小值之差不超过3.2 Hz,这点在小负荷下表现得更好。因为在小负荷下,橡胶材料变形几乎呈现线弹性,径向位移与径向力几乎呈现线弹性,但负荷过大,橡胶的高弹性显现出来,径向位移与径向力也不呈现线性关系,径向刚度会发生变化。

(3) 随着负荷的增大,频率(即横向刚度)的变化很小。

综上所述,单纯负荷变化对轮胎固有频率的影响不明显。

2.4 滚动速度对轮胎振动特性的影响

滚动有稳态滚动和原地滑转两种,本研究采用原地滑转的方式进行仿真,这样才能考虑摩擦产生的阻尼,因此不考虑科氏力。在负荷为8 820 N、充气压力为290 kPa,滚动速度分别为20, 40, 50, 60和80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,均考虑离心力,计算不同滚动速度下的固有频率,结果如图7所示。

由图7可以看出以下两点。

(1) 滚动状态下,径向1—6阶振型依旧对应着两阶固有频率,与受载状态一致,所不同的是:径向1阶的固有频率几乎不变,径向2—6阶每阶的两个固有频率都增大。这是因为离心力是施加在各个单元上的,每个单元的刚度增大,整体的刚度增大,考虑单自由度系统的固有频率公式,刚度的增大必将引起固有频率的增大,所以径向2—6阶每

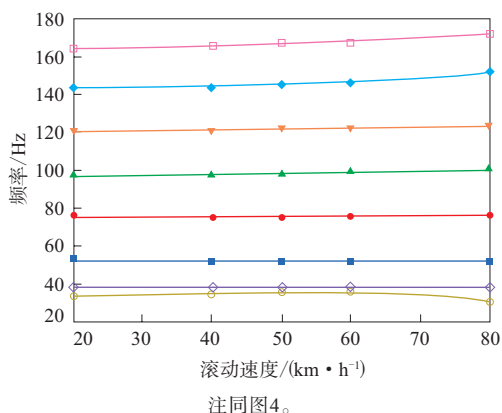


图7 滚动速度对轮胎固有频率的影响

阶的两个固有频率都增大。至于径向1阶保持不变,可以理解为相对于刚度来说,质量对低阶固有频率的影响更重要。

(2) 周向1阶固有频率在60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 之前都是增大的,在较高的速度80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下出现下降,从模态方程的角度分析,侧向刚度影响横向1阶,说明在高速下,轮胎横向摆动的可能性增大。

3 结语

通过有限元技术对不同充气压力、轮辋约束、负荷及滚动速度下的轮胎进行模态分析。结果表明:轮辋约束和负荷对轮胎振动影响不大;随着充气压力的增大,轮胎各阶固有频率逐渐增大,且几乎呈现线性增长;随着轮胎滚动速度的增大,径向2—6阶每阶的两个固有频率都增大,径向1阶保持不变。同时对仿真结果进行详细的理论分析,这对于轮胎振动噪声研究以及整车振动噪声控制具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [2] 冯希金,郑小刚,危银涛,等. 轮胎振动特性的有限元分析及关键影响因素研究[J]. 轮胎工业,2013,33(1):12-20.
- [3] 王琦,翟辉辉,周海超,等. 带束层结构参数对轮胎振动噪声的影响分析[J]. 橡胶工业,2018,65(5):490-494.
- [4] 应世洲,陈方,王国林. 基于rebar单元的载重子午线轮胎模型建立及验证[J]. 轮胎工业,2007,27(8):462-465.
- [5] 杨学贵,赵树高,李丽娟,等. 子午线轮胎振动模态的有限元分析[J]. 振动与冲击,2000,19(1):29-31.
- [6] 安登峰,赵璠,王国林. 结构设计参数对轮胎振动噪声的影响[J]. 橡胶工业,2016,63(10):609-614.

收稿日期:2019-07-20

Analysis of Factors Affecting Tire Vibration Mode Based on Finite Element Method

LIU Changbo¹, CAO Fei², SONG Zhenyong¹, JU Zhiming¹, WANG Yuanyuan¹

[1. Prinix Chengshan (Shandong) Tire Co., Ltd, Rongcheng 264300, China; 2. Jilin University, Changchun 130022, China]

Abstract: By establishing the finite element model of tire, the vibration characteristics analysis of the tire was carried out under different inflation pressure, rim constraint, load and rolling speed by computer simulation technology, and the simulation calculation results were theoretically analyzed. The results showed that the rim constraint and the load had little effect on the tire vibration, while the inflation pressure and rolling speed had great influence on the tire vibration noise.

Key words: tire; modal analysis; vibration characteristics; finite element analysis

新款福特汽车装配韩泰原配胎

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com) 2019年8月12日报道:

韩泰Kinergy GRT轮胎将成为2020福特探险家的原配胎,如图1所示。韩泰轮胎有限公司将为福特汽车公司供应255/65R18豪华旅行全天候轮胎。



图1 装配韩泰Kinergy GRT轮胎的2020福特探险家

韩泰以其Ventus Prime 3轮胎再次与福特合作。韩泰还向福特F-150和全新的福特游骑兵提供轮胎,这反映了韩泰通过其位于田纳西州克拉克斯维尔的子公司韩泰轮胎美国公司和轮胎厂继续致力于在美国发展。

原配胎部门负责人Hyunjun Cho说:“Kinergy GT轮胎为新2020福特探险家提供了各种天气条件下的出色性能,我们很荣幸继续为福特汽车提供优质轮胎。”

结合福特3.0 L V6 EcoBoost燃气发动机和10速变速箱,Kinergy GT轮胎的低滚动轮廓和胎面设计有助于补充和提高SUV已经很强的燃油效率。胎面下方是轮胎结构的核心——高抓着性能的白炭黑胶料。

由平衡胎体帘线组成的多层胎体以及无缝和辅助增强的带束层,都有助于在公路上和越野条件下平稳舒适地行驶。

新款福特探险家配备了驱动模式系统。该系统由中控台上的旋转拨盘控制,可让驾驶员轻松地在“正常、滑溜、小径、深雪/沙、运动、牵引/拖运和生态”模式之间切换。

(赵敏摘译 吴秀兰校)

米其林与大陆拟成立合资公司

近日,米其林宣布将与德国大陆集团、SMAG共同成立一家合资企业,运营天然橡胶(NR)供应链服务业务。其中,SMAG为提供农业软件解决方案的出版商。合资企业将开发一款名为Rubberway的移动应用程序。

Rubberway是为轮胎制造商提供NR监控数据的数据平台,让企业能够收集NR数据,并识别和优化NR供应链。米其林表示,现在大约有600万人、10万经销商、500多家工厂在从事NR供应行业,导致NR供应渠道极为复杂,而Rubberway就是为了理顺供应链关系而创立的。

据悉,米其林将为合资企业提供应用程序的使用权以及该领域的部署经验,通过这种方式为轮胎制造商和设备制造商铺平道路。通过合资企业,Rubberway将变成一个独立的解决方案,让所有NR用户都可以使用该平台,从而使NR供应链更加透明。

(摘自《中国化工报》,2019-09-23)