半钢子午线轮胎的计算模态仿真研究

冷德新,王慎平,张永锋,张伟伟,宫亭亭

[浦林成山(山东)轮胎有限公司,山东 威海 264300]

摘要:研究边界条件、充气压力和部件质量对半钢子午线轮胎各阶径向计算模态的影响。结果表明:轮胎-轮辋摩擦 因数与轮胎各阶径向模态频率呈负相关,且阶次越高,变化程度越小;充气压力每增大50 kPa,轮胎各阶径向模态频率增 大3%~11%,高阶模态受充气压力影响更大;各部件中胎面质量对轮胎各阶径向模态频率影响较大,其质量减小5%,轮 胎各阶径向模态频率增大约0.8%,胎体质量影响其次,胎侧质量影响较小,胎圈质量无影响。

关键词:半钢子午线轮胎;有限元仿真;计算模态;边界条件;充气压力;部件质量

中图分类号:U463.341⁺.6;O241.82 文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2023)03-0184-04 DOI: 10.12135/j.issn. 1006-8171.2023.03.0184



汽车轮胎与路面接触时,将路面的激励传递 给车身,其振动特性对汽车的驾乘舒适性和行驶 平顺性都有直接的影响。近年来随着经济和市场 的发展,消费者对驾乘品质要求逐渐提高,汽车 企业对汽车及零部件的噪声、振动与声振粗糙度 (NVH)性能愈发关注。

轮胎的模态特性与振动特性直接相关。为研 究轮胎在各种复杂激励下的振动和噪声响应,首 先要研究轮胎的模态特性,常用的研究方法有试 验法、解析法和有限元分析法。通过试验法得到 的模态分析结果为试验模态,而通过有限元建模 分析得到的模态分析结果为计算模态。轮胎的质 量、刚度和阻尼分布通过几何建模、边界条件定义 和材料属性赋予得到系统的质量矩阵、刚度矩阵 和阻尼矩阵,进而得到模态参数。计算模态可通 过振动方程求解,得到特征值及特征向量,特征值 对应系统的模态频率,特征向量对应系统的模态 振型。解成能^[1]提出了一种改进轮胎柔性环模型, 研究了不同动力学条件下轮胎模态频率的影响因 素;朱新静等^[2]研究了轮胎带束层结构对固有频率 的影响;李超^[3]对滚动轮胎进行了计算模态仿真 分析,考虑了由于滚动引起的惯性力效应:马心坦 等^[4]对加载工况下的轮胎进行了模态分析;冯希

金等^[5]研究了充气压力、带束层参数及帘线和橡 胶模量对轮胎固有频率的影响。

本工作对205/55R16半钢子午线轮胎进行建 模,利用非线性有限元分析软件Abagus得到轮胎 各阶的计算模态,研究边界条件、充气压力和部件 质量对轮胎各阶径向模态频率的影响。

1 模态分析理论

对于阻尼多自由度系统,其振动微分方程为

 $[M]{\ddot{x}} + [C]{\dot{x}} + [K]{x} = \{f(t)\}$ (1)式中,[M]为系统的质量矩阵, $\{x\}$ 为加速度向量, [C]为系统的阻尼矩阵, $\{x\}$ 为速度向量, [K]为系 统的刚度矩阵, $\{x\}$ 为位移向量, $\{f(t)\}$ 为激励力 向量。

当没有外界激励且忽略阻尼时,系统的自由 振动微分方程可简化为

$$[M]{\ddot{x}} + [K]{x} = \{0\}$$
(2)
其解的形式为

$${x} = {\phi} \sin(\omega t + \varphi)$$
 (3)
式中, $\{\phi\}$ 为系统的模态振型, ω 为系统的模态频
率, t 为时间, φ 为相位角。

将式(3)代入式(2)可得

式中,

$$([K] - \omega^2 [M]) \{\phi\} = \{0\}$$
(4)

式(4)有非零解的充要条件为其系数矩阵为 零,即

$$\left[\left[K \right] - \omega^2 \left[M \right] \right] = 0 \tag{5}$$

作者简介:冷德新(1989—),男,黑龙江绥化人,浦林成山 (山东)轮胎有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎仿真及噪声和 振动性能研究。

E-mail:lengdxsimon@163.com

通过式(5)可得ω,将ω代入式(4)可求得 {φ}。模态频率的求解方法有4种,分别为 Lanczos向量直接叠加法、Ritz向量直接叠加法、 矩阵反迭代法和子空间迭代法。由于Lanczos向 量直接叠加法具有较高的计算效率,本工作采用 该方法计算轮胎的模态频率,并针对其径向模态 频率进行研究。

2 有限元仿真建模

2.1 简化轮胎模型

轮胎是一个复杂的结构体,由胎面、胎侧和 胎圈等部件组成,并与带束层、胎体帘线等骨架 材料组成结构复杂的复合材料。此外胎面花纹有 纵沟、横沟、钢片等复杂的几何形状,胎侧还有轮 胎规格等各种信息的文字。在建立轮胎有限元模 型时,需要对其进行适当简化。考虑到对有限元 仿真结果及建模运算效率的影响,本工作只建立 胎面花纹纵沟,其他横向花纹等未建立详细的模 型。轮辋假设为解析刚性面,不发生形变,在有限 元分析软件Abaqus中用*Rigid Body进行定义^[6]。

轮胎的二维轴对称有限元模型如图1所示。 其网格大小为3 mm,共有3 307个节点、1 867个单 元。橡胶材料单元类型选用四节点可扭转轴对称 杂交实体单元CGAX4H和三节点可扭转轴对称杂 交实体单元CGAX3H,骨架材料选用二节点线性 可弯曲SFMGAX1单元类型。



图1 轮胎二维有限元模型

将二维轴对称模型旋转360°得到轮胎的三维 模型(见图2),其周向均匀划分为120等份,即每3° 一份,生成的模型共420 002个节点、235 562个单 元,相应的单元类型分别变为八节点六面体单元 C3D8H,六节点五面体单元C3D6H和三维四节点 缩减积分面单元SFM3D4R。



图2 轮胎三维有限元模型

2.2 材料本构模型

2.2.1 橡胶材料模型

橡胶是一种典型的非线性材料,在受力后能 发生大形变,需要用超弹性材料模型对其进行定 义。常用的橡胶超弹性材料本构模型有Mooney-Rivlin模型、Neo-Hookean模型和Yeoh模型等。 Mooney-Rivlin模型可以较好地模拟不可压缩橡 胶材料中等应变范围的变形,但是对压缩行为描 述不够;Neo-Hookean模型一般适用于单轴拉伸 变形在40%以下的情况,大应变时不如其他模型精 确;Yeoh模型描述的变形范围较宽,能够产生典型 的S形橡胶应力-应变曲线,适合于模拟大变形的 情况。本工作采用*Hyperelastic,yeoh定义橡胶的 Yeoh本构模型参数。

橡胶材料除了超弹特性之外还具有粘弹特性,通常用Prony系数来定义粘弹性材料参数,在 Abaqus中利用*Viscoelastic,time=PRONY实现橡胶的粘弹性定义。

2.2.2 骨架材料模型

带束层和胎体帘线等骨架材料用rebar单元进 行定义。在Abaqus中rebar单元有3种定义方法, 即常参数方法、角度间距法和抬举平衡方法。本 工作采用常参数方法,通过*rebar layer对骨架材 料的参数如角度、等效面积等进行定义,并利用 *Embedded element将其嵌入到对应的橡胶实体单 元材料中。

2.3 边界条件设置

为提高计算效率,将轮辋及路面定义为解 析刚性面,采用"面-面接触"类型。轮胎与轮辋 之间的面-面接触关系可直接利用*CONTACT PAIR命令进行定义,然后采用*SURFACE INTERACTION命令设置接触的摩擦因数等信息, 最后利用*SURFACE BEHAVIOR命令将轮胎与轮 辋之间的接触关系定义为硬接触。轮辋参考点限 制位移约束,采用中心固定的边界条件设定。

3 结果与讨论

3.1 边界条件

边界条件主要包括轮胎-轮辋的自由度约束 设定和发生接触的接触面参数设置等,可通过改 变轮胎结构的刚度和质量分布从而影响其模态频 率。不同轮胎-轮辋接触摩擦因数的轮胎径向模 态频率如表1所示。

	轮胎径向	可模态频率	Hz
阶次	轮胎-轮辋接触摩擦因数		
	0.50	0.75	1.00
一阶	88.27	87.41	86.68
二阶	107.98	107.05	106.25
三阶	132.85	131.99	131.23
四阶	160.95	160.19	159.48
五阶	190.84	190.17	189.52
六阶	221.78	221.21	220.62
七阶	253.66	253.19	252.66
八阶	286.65	286.27	285.76

从表1可以看出,随着轮胎-轮辋接触摩擦因数的增大,轮胎各阶径向模态频率逐渐减小,越高阶其模态频率减小程度越小。轮胎-轮辋接触摩擦因数对径向模态频率影响较小,摩擦因数增大50%,各阶径向模态频率减小不到1%。

3.2 充气压力

轮胎的充气压力主要影响其刚度,不同充气 压力下轮胎径向模态频率如表2所示。

从表2可以看出,随着充气压力的增大,轮胎刚

表2 不同充气压力下的轮胎径向模态频率 Hz

	充气压力/kPa				
Pr 代-	100	150	200	250	300
一阶	79.28	81.92	84.45	87.41	89.74
二阶	91.01	96.48	101.70	107.05	111.63
三阶	107.77	116.27	124.13	131.99	138.88
四阶	127.99	139.44	149.94	160.19	169.30
五阶	150.28	164.61	177.63	190.17	201.39
六阶	173.71	190.92	206.46	221.21	234.45
七阶	197.94	218.20	236.28	253.19	268.30
八阶	223.31	246.76	267.34	286.27	302.94

度增大,其各阶径向模态频率增大。轮胎充气 压力每增大50 kPa,其各阶径向模态频率增大 3%~11%,且阶次越高,径向模态频率受充气压力 的影响越大。

3.3 部件质量

除刚度外,结构的质量分布也对轮胎的径向 模态频率有较大影响。选取轮胎结构中质量占比 较大的部件,进行单一部件的质量变化影响研究, 得到不同部件的质量变化对轮胎径向模态频率的 影响程度。

3.3.1 胎面

不同胎面质量的轮胎径向模态频率如表3 所示。

表3 不同胎面质量的轮胎径向模态频率 Hz

阶 次		胎面质量指数/%)
	95	100	105
一阶	88.12	87.41	86.71
二阶	107.92	107.05	106.21
三阶	133.04	131.99	130.96
四阶	161.45	160.19	158.95
五阶	191.65	190.17	188.72
六阶	222.92	221.21	219.54
七阶	255.13	253.19	251.30
八阶	288.42	286.27	284.16

从表3可以看出,随着胎面质量增大,轮胎径 向模态频率减小,胎面质量减小5%,轮胎各阶径向 模态频率增大约0.8%。

3.3.2 胎侧

不同胎侧质量的轮胎径向模态频率见表4 所示。

从表4可以看出,当胎侧质量变化5%,轮胎各 阶径向模态频率变化只有0.13%~0.17%,远小于 胎面质量的影响。因此在胎侧质量变化不大的情

表4 不同胎侧质量的轮胎径向模态频率 Hz

阶次	胎侧质量指数/%		
	95	100	105
一阶	87.53	87.41	87.29
二阶	107.19	107.05	106.92
三阶	132.16	131.99	131.83
四阶	160.40	160.19	159.98
五阶	190.43	190.17	189.90
六阶	221.53	221.21	220.89
七阶	253.59	253.19	252.80
八阶	286.75	286.27	285.77

况下,其影响可忽略。

3.3.3 胎体

不同胎体质量的轮胎径向模态频率如表5 所示。

表5 不同胎体质量的轮胎径向模态频率 Hz

阶次	胎体质量指数/%		
	95	100	105
一阶	87.74	87.41	87.09
二阶	107.47	107.05	106.65
三阶	132.50	131.99	131.49
四阶	160.81	160.19	159.57
五阶	190.92	190.17	189.42
六阶	222.09	221.21	220.34
七阶	254.21	253.19	252.19
八阶	287.44	286.27	285.11

从表5可以看出,胎体质量减小5%,轮胎各阶 径向模态频率增大约0.4%,其影响程度介于胎面 质量与胎侧质量之间。

3.3.4 胎圈

作为起主要支撑作用的胎圈,其质量变化对 轮胎各阶径向模态频率无影响,其主要影响轮胎 的刚度矩阵。

4 结论

有限元建模仿真是轮胎模态分析的一种有效 手段,可以低成本、高效率地对轮胎振动模态特性 进行研究。本工作主要研究了边界条件、充气压 力和部件质量对轮胎计算模态的影响,得到如下 结论。

(1)轮胎-轮辋摩擦因数与轮胎各阶径向模态 频率呈负相关,且阶次越高,变化程度越小。

(2)轮胎的充气压力每增大50 kPa,其各阶径 向模态频率增大3%~11%,且阶次越高,径向模态 频率受充气压力的影响越大。

(3)各部件中胎面质量对轮胎径向模态频率 影响较大,其质量减小5%,各阶径向计算模态频率 增大约0.8%。胎体质量的影响其次,胎侧质量影 响较小,胎圈质量无影响。

参考文献:

- [1] 解成能.轮胎柔性环模型的研究与应用[D].长春:长春工业大学, 2020.
- [2] 朱新静,朱作勇,赵鹏翔,等.轮胎带束层结构变化对固有频率的影响研究[J].轮胎工业,2017,37(5):259-263.
- [3] 李超. 滚动轮胎的模态特性研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [4] 马心坦,蔡琼阳.受载子午线轮胎的模态分析[J].中国农机化学报,2016,37(4):148-151.
- [5] 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.
- [6] 曹金凤,王志文,王慎平,等. 基于Python语言和Abaqus软件的轮胎 参数化高效建模技术[J]. 橡胶工业,2021,68(11):816-821.

收稿日期:2022-11-10

Study on Computational Modal Simulation of Steel-belted Radial Tire

LENG Dexin, WANG Shenping, ZHANG Yongfeng, ZHANG Weiwei, GONG Tingting [Prinx Chengshan (Shandong) Tire Co., Ltd, Weihai 264300, China)

Abstract: The effects of boundary conditions, inflation pressure and component mass on the radial computational modal of steel-belted radial tires were studied. The results showed that there was a negative correlation between the tire-rim friction coefficient and the radial modal frequencies of each order of the tire, and the higher the order was, the smaller the degree of significance was. When the inflation pressure increased by 50 kPa, the radial modal frequency of each order of the tire increased by $3\% \sim 11\%$, and the higher-order modal was more affected by the inflation pressure. The tread mass of each component had a great impact on the radial modal frequencies of each order, and when the tread mass was reduced by 5%, the radial modal frequencies of each order of the tire increased by about 0. 8%. Meanwhile, the carcass mass had a second impact, the sidewall mass had a small impact, and the bead mass had no impact.

Key words: steel-belted radial tire; finite element simulation; computation mode; boundary condition; inflation pressure; component mass