

使用因素对滚动轮胎振动特性影响的有限元分析

张颖文, 王国林, 周海超, 杨建

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:以215/75R17.5载重子午线轮胎为研究对象,利用Abaqus/Explicit模拟轮胎在转鼓上的滚动过程并分析其振动特性。为了验证该有限元分析方法的准确性,采用多普勒激光测振仪测量轮胎在转鼓上滚动时胎侧测点在时域下的振动速度响应,应用Matlab中等波纹低通滤波器Firpm函数对测得的时域信号进行滤波,保留20~500 Hz频率间的振动响应信号并对其进行傅里叶变换,与频域下的仿真值进行对比,二者具有良好的一致性,证明了滚动轮胎有限元分析方法的准确性。从有限元仿真的角度分析了使用因素对胎面和胎侧振动特性的影响规律。研究表明:胎面的振动速度分布关于轮胎顶点对称,靠近接地区域振动速度幅值最大,接地后端振动速度大于接地前端;随着速度和充气压力的增大,胎面和胎侧的振动速度随之增大,载荷对胎面和胎侧振动速度的影响较小。

关键词:滚动轮胎;有限元分析;振动速度;滤波;傅里叶变换

中图分类号:O241.82;TQ336.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)11-0000-07

汽车噪声是交通噪声的主要来源之一。相关研究表明,乘用车和商用车速度分别高于40和75 km·h⁻¹时,轮胎的振动噪声将成为车辆噪声的主要来源^[1]。而结构振动噪声是载重子午线轮胎振动噪声的主要部分^[2-3]。因此,研究轮胎振动特性及其影响因素对低噪声轮胎开发具有重要的意义。

轮胎振动噪声产生的机理是其结构的振动引起周围空气的扰动通过空气传播到人耳^[4]。J. Lin等^[5]采用结构模态分析方法分析了轮胎振动特性与辐射噪声之间的关系,结果表明,低阶模态对轮胎振动辐射噪声影响程度较大,并且峰值声压对应的频率往往在轮胎固有频率附近。Trong将轮胎简化为包含剪切应力和非线性效应的圆环,通过有限元分析验证了模型的准确性,并且用此模型分析了轮胎在非滚动和滚动状态下的特性,得到不同速度下轮胎的固有频率不同^[6]。V. Q. Doan等^[7]采用试验测试和有限元分析相结合的方法研究胎面振动加速度与轮胎噪声之间的关系,发现

两者之间关系显著。包秀图等^[8]提出一种轮胎在滚动时频域下的计算方法,将表面节点的振动速度转化为声学计算的频域边界条件,再利用声学边界元技术计算轮胎的低频振动噪声。蔡琼阳^[9]研究了轮胎的振动特性,发现轮胎的振动模态影响其声辐射特性以及关系到车辆的多种性能。许志超等^[10]采用试验方法研究了轮胎通过噪声与速度的关系,得到通过噪声声压级与速度对数呈线性关系的结果。国内外学者研究了轮胎结构部件的振动对噪声的影响,认为两者之间存在紧密的联系。因此,轮胎结构的振动特性可以成为振动噪声的主要评价指标,用于研究轮胎的振动噪声。

为了验证滚动轮胎有限元模拟分析方法的有效性,选取215/75R17.5载重子午线轮胎为研究对象,将试验和有限元仿真所得轮胎胎侧各测点时域下的振动速度进行傅里叶变换。在此基础上,研究轮胎使用因素对轮胎振动特性的影响,以期为解决轮胎在使用过程中遇到的噪声和振动问题提供指导。

1 滚动轮胎有限元分析

1.1 有限元模型的建立

利用文献[11]中的方法建立有限元模型,如图

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605198, 51675240);江苏省青年基金资助项目(KB20160528);中国博士后科学基金资助项目(2015M571681)

作者简介:张颖文(1990—),男,江苏丹阳人,江苏大学在读硕士研究生,主要从事现代汽车轮胎技术的研究。

E-mail:782435171@qq.com

1所示。模型中轮辋和路面定义为解析刚体,橡胶部分采用CGAX3和CGAX4R单元模拟,钢丝帘线采用SFMGAX1和REBAR单元模拟。分析时,轮胎的载荷为10 000 N,充气压力为0.83 MPa。

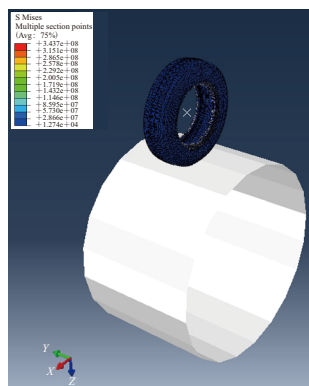


图1 轮胎三维有限元模型

橡胶的本构模型通过单轴拉伸试验获得,将测得的橡胶拉伸数据输入Abaqus中,利用其自带的Ogden,Neo-Hookean和Yeoh等橡胶本构模型分别进行拟合。以胎肩垫胶为例,其材料应力-应变曲线参照文献[12],在名义应变小于0.5时,Yeoh模型拟合的应力-应变曲线与试验结果吻合较好。因此,本研究选用Yeoh模型描述轮胎橡胶的力学特性。轮胎各部位的胶料参数由单轴拉伸试验数据拟合获得。

1.2 滚动轮胎数值仿真

利用Abaqus/Explicit模拟轮胎在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度时的滚动过程。为分析滚动轮胎胎侧的振动特性,在胎侧上布置4个振动测试点,如图2所示。4个测点分布在与接触区域夹角为 $45^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 和 315° 的位置。测点1为接地后端,测点4为接地前端。有限元分析得到各测点时域下的振动速度如图3所示。

从图3可以看出:测点与接地区域距离越近,振动速度幅值越大;接地后端的振动比接地前端剧烈。

2 滚动轮胎胎侧振动试验

2.1 轮胎振动响应试验

滚动轮胎胎侧振动特性试验是在转鼓试验台上进行的,如图4所示。试验时轮胎载荷为10 000 N,充气压力为0.83 MPa,测量速度为30

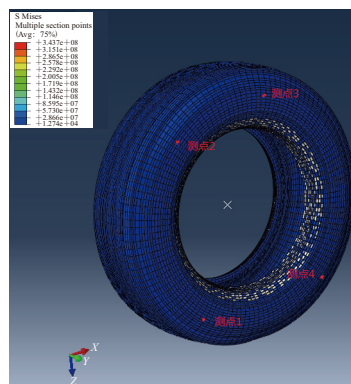


图2 有限元模型胎侧测点位置

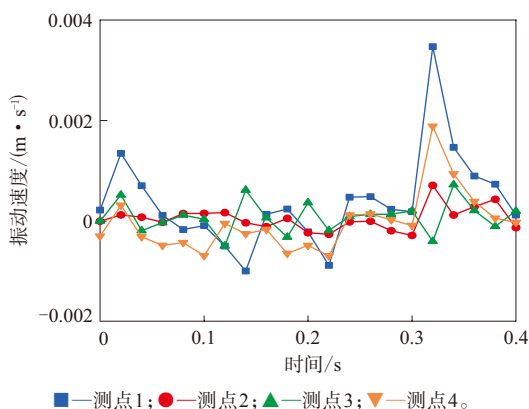


图3 不同测点时域下的振动速度



图4 轮胎振动试验

$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。采用单点式多普勒激光测振仪测量轮胎胎侧的振动特性。为与有限元分析结果进行对比,振动测试点的布置与有限元分析一致。

试验时将多普勒激光测振仪固定在三脚架上,并将其通过数据采集器与电脑连接,如图5所示。三脚架距离被测轮胎大约50 cm,将激光束打到胎侧测点上,旋转调焦旋钮,当激光点最小、最亮时最佳,依次调节三脚架的位置分别对不同测



图5 多普勒激光测振仪

点进行测量。

采样时间(t_s)和频率(f_s)分别设置为

$$t_s = \frac{n_F}{W_B} = \frac{6\,400}{5\,000} = 1.28(\text{s}) \quad (1)$$

$$f_s = 2.4W_B \quad (2)$$

式中, n_F 为频谱数, W_B 为带宽。测试时对每个测点多次测量,结果取平均值。为了方便与有限元分析结果进行对比,对试验数据进行滤波。滤波时采用Matlab中等波纹低通滤波器Firpm函数,其通过频率为20 Hz,截止频率为500 Hz。图6示出了随机测点滤波前后的对比结果。

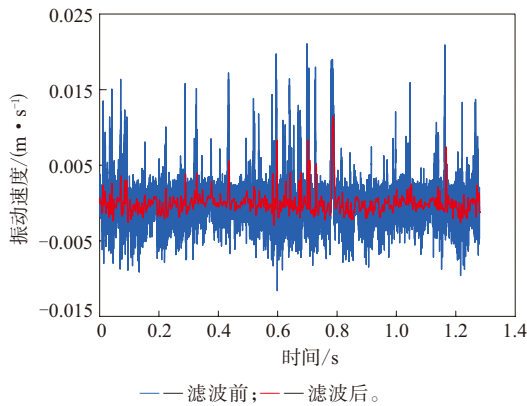


图6 测点滤波前后对比图

从图6可以看出,滤波前后曲线的波动趋势大致相同,峰值分布也类似。

2.2 结果与分析

图7和8分别示出不同测点振动速度以及接地前后端测点振动速度的对比情况。

从图7可以看出,在相同速度下,测点1,2和3的振动速度幅值呈递减的趋势,这说明越靠近接地区域,胎侧的振动越剧烈。这与文献[13]中靠近

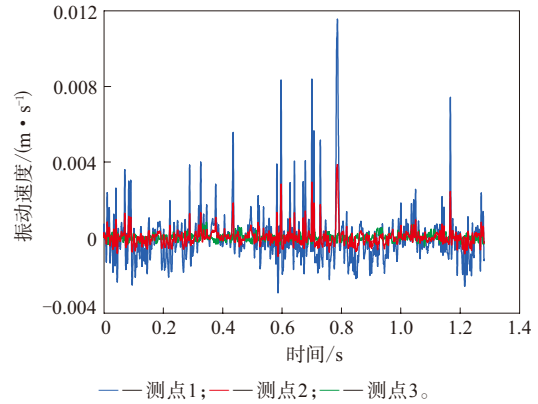


图7 不同测点的振动速度

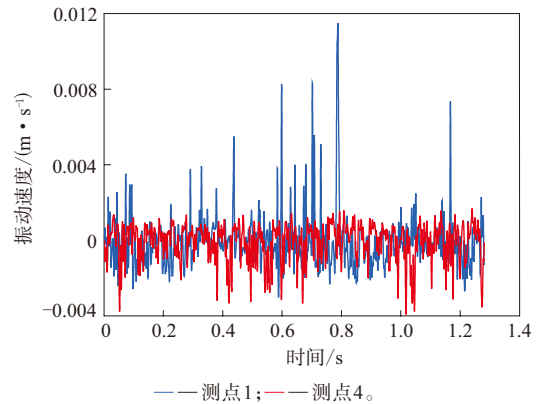
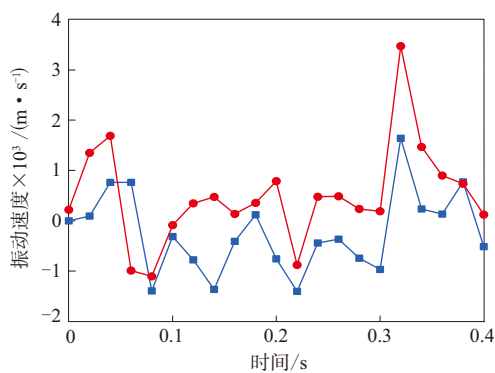


图8 接地前后端测点的振动速度

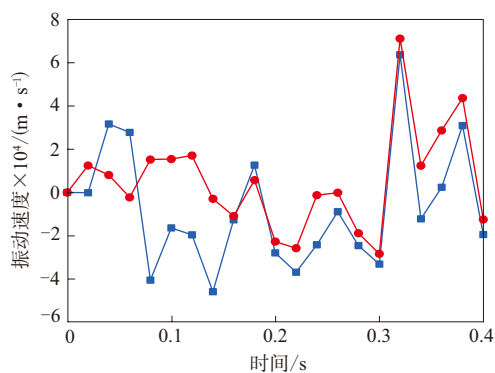
接地区域声能量分布高表明该区域振动剧烈的结论相一致。从图8可以看出,轮胎接地后端的振动响应大于接地前端,接地前端振动速度的峰值明显小于接地后端。文献[14]采用室内转鼓试验测试载重子午线轮胎近场噪声,结果表明,轮胎接地后端的振动噪声声压级大于轮胎接地前端的振动噪声声压级,而振动噪声声压级与振动剧烈程度呈正相关性,这一结果与试验结果相一致。

不同测点时域下实测结果与有限元仿真结果的对比情况如图9所示。

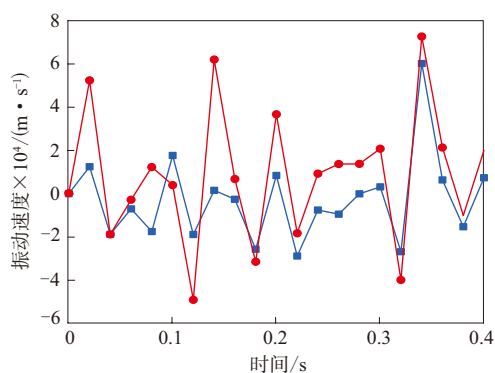
从图9可以看出,3个测点时域下的振动速度曲线变化趋势一致。为了更好地将实测值与仿真值进行比较,将时域下的信号进行离散傅里叶变换,得到频域下的振动速度曲线,结果如图10所示。可以看出,胎侧测点试验和仿真得到的振动速度在频域下的分布具有良好的一致性,证明所建滚动有限元模型有效。



(a) 测点1



(b) 测点2



(c) 测点3

■—实测值; ●—仿真值。

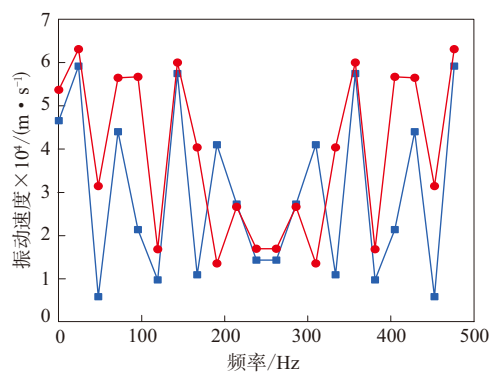
图9 不同测点时域下振动速度实测值与仿真值对比

3 使用因素对轮胎振动特性的影响

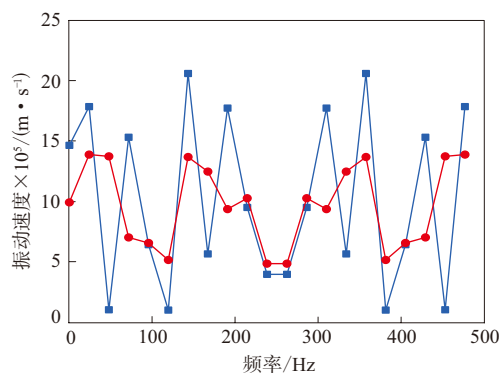
为分析轮胎使用因素对振动特性的影响,采用单一变量法,研究速度、充气压力和载荷对胎面和胎侧振动特性的影响规律。

3.1 滚动速度

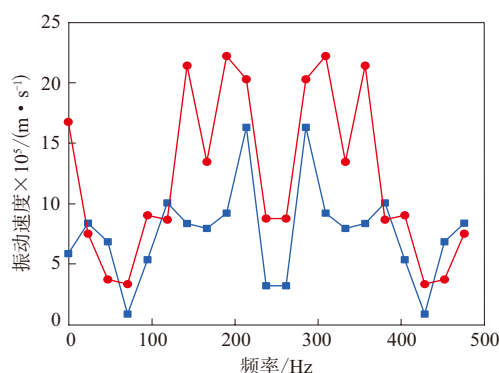
在轮胎充气压力和载荷均为额定值的情况下,研究不同速度下胎侧和胎面圆周上振动速度



(a) 测点1



(b) 测点2



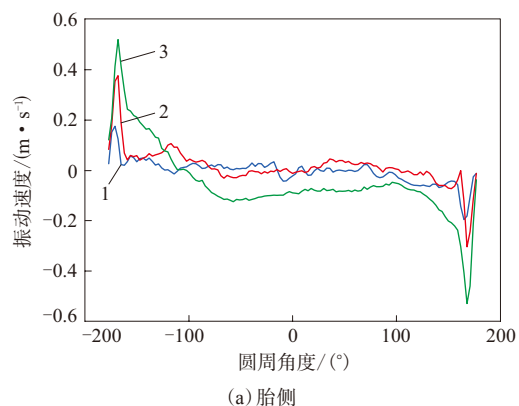
(c) 测点3

注同图9。

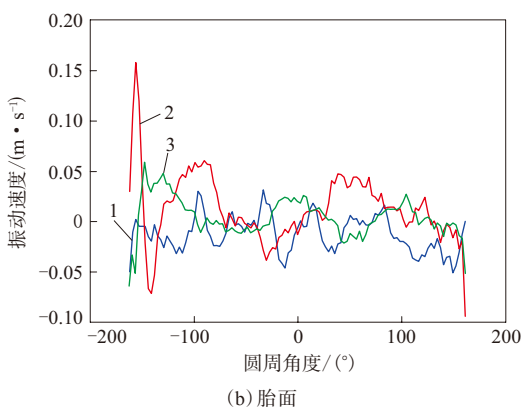
图10 离散傅里叶变换后不同测点频域下振动速度实测值与仿真值对比

分布,结果如图11所示。

图11中坐标轴原点代表轮胎上顶点位置,沿着X轴正方向为轮胎接地前端方向圆周区域,负方向为轮胎接地后端方向圆周区域,图形两边端点即为轮胎的接地中心点。从图11(a)可以看出:胎侧圆周振动速度分布近似关于原点对称;随着速度的增大,胎侧的振动速度也随之增大,在 $\pm 169^\circ$



(a) 胎侧



(b) 胎面

速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$): 1—30; 2—50; 3—70。

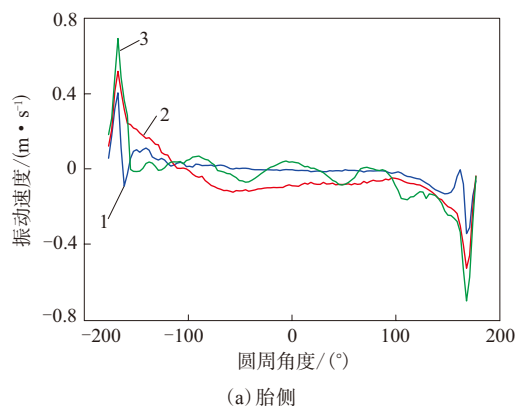
图11 不同速度下轮胎圆周上振动速度分布

的圆周上出现峰值,在 $-150^\circ \sim 150^\circ$ 范围内振动幅值较小,且趋于平缓。从图11(b)可以看出,随着轮胎滚动速度增大,胎面部分的振动速度也随之增大,不同速度下胎面振动速度总体波动较大,在 $\pm 153^\circ$ 圆周点上出现峰值。胎侧、胎面接地后端的振动速度均大于接地前端的振动速度。

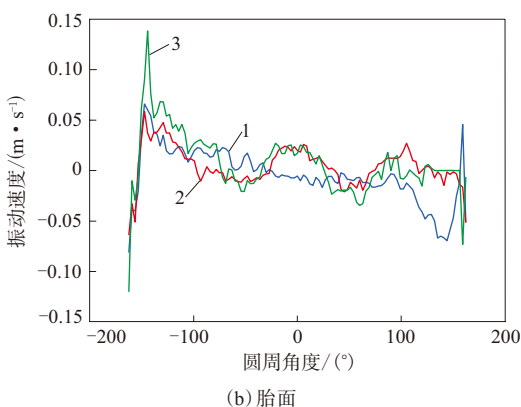
3.2 充气压力

在轮胎滚动速度一定($70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)和载荷为额定负荷的情况下,研究不同充气压力下胎侧和胎面圆周上振动速度分布,结果如图12所示。

从图12(a)可以看出:胎侧圆周振动速度分布关于原点对称;随着充气压力的增大,胎侧的振动速度也随之增大,在 $\pm 169^\circ$ 的圆周上出现峰值,在 $-150^\circ \sim 150^\circ$ 范围内振动幅值较小,且趋于平缓。从图12(b)可以看出,0.9倍额定充气压力和额定充气压力下胎面的振动速度大致相等,1.2倍额定充气压力下胎面振动速度最大;不同充气压力下胎面振动速度总体波动较大,在 $\pm 153^\circ$ 圆周点上出现峰值。胎侧、胎面接地后端的振动速度均



(a) 胎侧



(b) 胎面

1—0.9倍额定充气压力; 2—额定充气压力; 3—1.2倍额定充气压力。

图12 不同充气压力下轮胎圆周上振动速度分布

大于接地前端的振动速度。

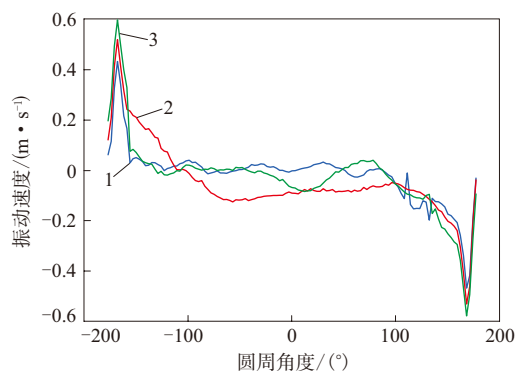
3.3 载荷

在轮胎滚动速度一定($70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)和额定充气压力的情况下,研究不同载荷下胎侧和胎面圆周上振动速度分布,结果如图13所示。

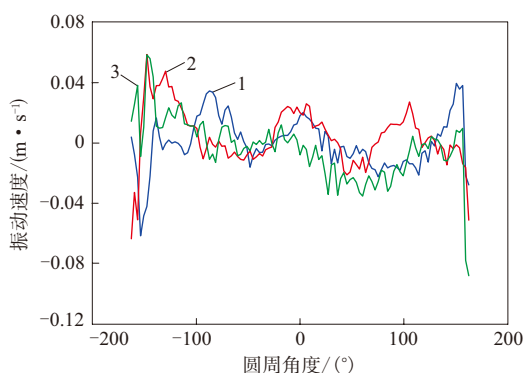
从图13(a)可以看出:胎侧圆周振动速度分布近似关于原点对称;随着载荷的增大,胎侧振动速度变化量较小,在 $\pm 169^\circ$ 的圆周上出现峰值,在 $-150^\circ \sim 150^\circ$ 范围内振动幅值较小,且趋于平缓。从图13(b)可以看出,胎面振动速度随着载荷的增大变化较小,但波动较大。胎侧和胎面接地后端的振动速度均大于接地前端的振动速度。

4 结论

(1) 轮胎滚动有限元模型胎侧测点频域下的振动速度与轮胎转鼓试验时胎侧的振动速度具有良好的一致性,验证了轮胎滚动有限元模型的准确性。



(a) 胎侧



(b) 胎面

1—0.9倍额定负荷;2—额定负荷;3—1.1倍额定负荷。

图13 不同载荷下轮胎圆周上振动速度分布

(2) 胎面的振动速度分布关于轮胎顶点对称,靠近接地区域振动速度幅值最大,接地后端振动速度大于接地前端;随着速度和充气压力的增大,胎面和胎侧的振动速度随之增大,载荷对胎面和胎侧振动速度的影响较小。

参考文献:

[1] Cristobal G D, Peter K, Jason M, et al. Dynamic Behaviour of a

Rolling Tyre: Experimental and Numerical Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 364: 147-164.

[2] Eberhardt A C, Reiter W F. Use of Coherence and Frequency Response Functions to Locate and Define Vibration Noise Sources in Rolling Tires[A]. International Automotive Engineering Congress and Exposition: SAE International. Dallas, USA: 1997: 2814-2822.

[3] Walid Belgacem, Alain Berry, Patrice Masson. Active Vibration Control on a Quarter-car for Cancellation of Road Noise Distribution[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 3240-3245.

[4] Gent A N, Walter J D. The Pneumatic Tire[M]. Washington D C, US: National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, 2005: 20590.

[5] Lin J, Bolton J S. Coupling Mechanism Analysis of Structural Modes and Sound Radiations of a Tire Tread Band Based on the S-mode Technique[J]. Applied Acoustics, 2015, 99: 161-170.

[6] Vu T D, Duhamel D, Abbadi Z, et al. A Nonlinear Ring Model with Rotating Effects for Tire Vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 388: 245-271.

[7] Doan V Q, Brackin D, Nishihata S, et al. Investigation into the Influence of Tire Construction on Coast-by Noise[J]. Tire Science and Technology, 1995, 23 (2): 96-115.

[8] 包秀图, 张涛, 李子然, 等. 轮胎振动噪声的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2008, 27 (11): 556-559.

[9] 蔡琼阳. 轮胎振动特性与噪声控制的仿真研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.

[10] 许志超, 周福强, 危银涛, 等. 商用车轮胎通过噪声与温度、速度和花纹关系的实验研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64 (11): 655-659.

[11] 裴晓鹏, 王国林, 周海超, 等. 轮胎结构振动声学贡献度分析及降噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34 (24): 53-58.

[12] 王琦, 瞿辉辉, 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.

[13] Miller R F, Thrasher D B. Spectral Analyses in Truck Tire Noise Fields[A]. National West Coast Meeting, 1974: 1-8.

[14] 陈亚龙, 王昊, 冯希金, 等. 载重子午线轮胎噪声机理的室内试验研究[J]. 橡胶工业, 2015, 62 (2): 116-122.

收稿日期: 2018-06-17

Finite Element Analysis of Influence Factors on Rolling Tire Vibration Characteristics

ZHANG Yingwen, WANG Guolin, ZHOU Haichao, YANG Jian

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Taking 215/75R17.5 truck and bus radial tire as the object, using Abaqus/Explicit to simulate the rolling process of tire on the drum and analyze its vibration characteristics. In order to verify the accuracy of the finite element analysis method, Doppler laser vibrometer was used to measure the vibration response

of measuring points on tire sidewall in the time domain, and then Matlab corrugated medium low pass filter Firpm function was used to filter the measured time domain signal, vibration frequency response signals between 20 ~ 500 Hz were retained and Fourier transformed, compared with the simulation values of the frequency domain, they had good consistency, which proved the accuracy of the finite element analysis method for rolling tire. Based on the finite element simulation, the effects of velocity, inflation pressure and load on the tread and sidewall vibration characteristics were analyzed. The results showed that the tread vibration velocity distribution was symmetrical about tire vertex, the amplitude of vibration velocity close to the ground was maximum, and the vibration velocity of ground back end was larger than that of ground front end. With the increase of velocity and inflation pressure, the vibration velocity of tread and sidewall increased, and the load had little effect on the vibration velocity of tread and sidewall.

Key words: rolling tire; finite element analysis; vibration velocity; wave filtering; Fourier transform