

花纹结构对轮胎气动噪声影响的风洞试验研究

周海超, 陈青云, 李慧云, 夏琦, 姜震, 王国林

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:对负荷变形后的轮胎花纹进行3D打印重构, 分别对垂直对称花纹、点对称花纹和轴对称花纹3种花纹结构的轮胎模型进行风洞试验, 获得轮胎花纹表面压力脉动(压力脉动)特性和花纹气动噪声(气动噪声)。结果表明, 花纹结构对轮胎压力脉动特性有显著影响, 压力脉动越大, 其对应的气动噪声越高。研究结果为有效控制轮胎压力脉动、降低气动噪声提供了参考。

关键词:轮胎模型; 花纹结构; 气动噪声; 压力脉动; 风洞试验

中图分类号: TQ336.1; TB533⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)11-0821-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.11.0821



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎花纹气动噪声(气动噪声)是车辆噪声的主要来源, 可以导致噪声污染, 影响驾乘人员的乘坐舒适性。影响气动噪声的因素有很多, 如轮胎材料、花纹结构及沟槽数目和尺寸等。在轮胎设计过程中, 研究人员发现花纹结构是影响气动噪声水平的显著因素。因此, 分析不同花纹结构导致的流场特性及其气动噪声, 找到花纹结构、流场特性和气动噪声三者之间的关系, 对低噪声轮胎花纹结构设计具有一定的理论指导和参考价值。

国内外学者对花纹结构对轮胎噪声的影响已经做了一系列研究。F. Stalter等^[1]认为在花纹沟槽变形的情况下, 花纹结构参数对轮胎噪声有直接影响。J. Cesbron等^[2]提出花纹结构参数可以影响轮胎接地压力分布, 进而影响轮胎噪声。Y. Nakajima等^[3]将花纹节距噪声视为一系列的Dirac δ 函数, 量化预测了横向花纹沟角度对轮胎噪声的影响。S. Fujiwara等^[4]采用赫姆霍兹共振腔消声原理, 通过在纵向花纹沟加开纵向辅沟以改变声传播路径, 使轮胎噪声降低了0.8 dB。Z. X. Yu等^[5]基于声学理论提出轮胎气动噪声的半经验计算模型, 指

出轮胎气动噪声随花纹变形量的增大而增大的变化规律。X. Chen等^[6]提出了轮胎花纹噪声与花纹沟长度、宽度及走向有关的结论, 并通过优化结构参数降低花纹噪声。H. C. Zhou等^[7-8]通过对纵向花纹沟添加非光滑结构以改变轮胎周围流场, 从而降低了轮胎气动噪声。由于花纹结构不同可以引起轮胎周围流场的变化, 从而导致气动噪声不同, 因此本研究采用不同的花纹结构来研究轮胎气动噪声。

本研究对负荷变形后的轮胎花纹进行3D打印重构, 分别对垂直对称(直沟槽)花纹、点对称花纹和轴对称花纹3种花纹结构的轮胎模型进行风洞试验, 通过噪声分析, 探讨花纹结构对花纹表面压力脉动(压力脉动)特性的影响, 从而分析花纹结构与轮胎压力脉动特性及气动噪声的关系。

1 压力及噪声测试

1.1 轮胎模型及测压孔设计

基于185/65 R15轮胎, 对负荷变形后的轮胎花纹进行3D打印而重构形成轮胎模型(缩尺比为1:1), 其接地变形的分析方法见文献[9]。为保证试验精度, 3D打印材料采用固化成型(SLA)树脂, 其具有较高的强度和刚度, 几乎不会发生变形, 同时3D打印轮胎完全保留了花纹沟等细节特征, 可以真实反映实际轮胎状况。

轮胎花纹及模型如图1所示, 3种轮胎模型均

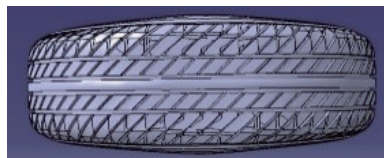
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605198, 51675240); 江苏省青年基金项目(KB20160528); 江苏省“六大人才高峰”项目(JXQC-011)

作者简介:周海超(1984—), 男, 河南许昌人, 江苏大学副教授, 博士, 主要从事汽车轮胎技术、汽车现代设计理论与方法的教学与科研工作。

E-mail: haichaozhou999@163.com



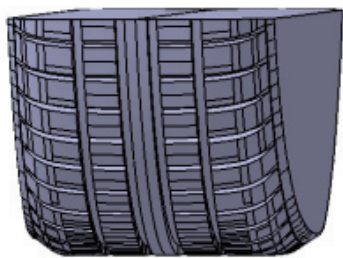
(a) 直沟槽花纹



(b) 点对称花纹



(c) 轴对称花纹



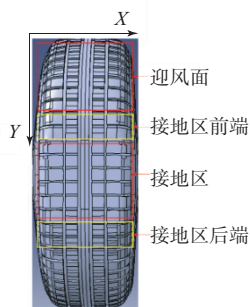
(d) 轮胎模型示意

图1 轮胎花纹及模型

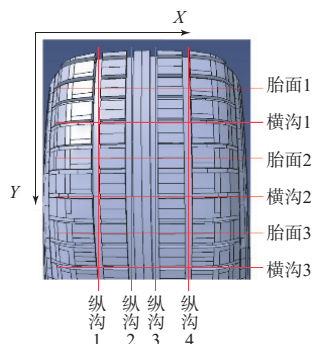
为半胎。由于实际轮胎从地面到翼子板的高度为150 mm左右,因此轮胎模型高度定为150 mm。

为了方便地对数据进行分析 and 说明,将轮胎模型划分为迎风面、接地区前端、接地区、接地区后端4个区域,如图2(a)所示;将纵向沟划分为纵沟1—4,并将迎风面和接地区前端胎面划分为胎面1—3区域和横沟1—3,如图2(b)所示。3种轮胎模型都按此形式进行区域划分。

3种轮胎模型表面均设测压孔(见图3),其直径为1 mm,孔内壁光滑,孔口无毛刺,表面无凸起或凹坑。考虑到风压在不同位置的变化情况,测压孔采用非均匀布置,迎风面测压孔布置较疏,接地区前端和接地区的测压孔较密。3种轮胎模型表面的测压孔位置一致,表面测点位总计114个。



(a) 轮胎模型分区



(b) 胎面、横沟和纵沟

图2 轮胎模型区域划分

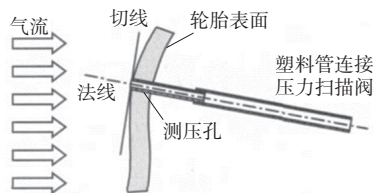


图3 表面测压孔示意

1.2 试验风洞

本研究风洞试验在扬州大学风洞实验室进行。试验风洞为平面回流全钢结构(见图4),有高速试验段和低速试验段,呈串列布置。低速试验段的长度、宽度和高度分别为7.0、3.0和3.0 m,风速范围为 $0 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转盘直径为2 m;高速试验段的长度、宽度和高度分别为3.0、3.0和1.5 m,风速范围为 $0 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转盘直径为1.2 m。动力段轴流风扇由1台额定功率为185 kW的交流电动机驱动。

3D打印轮胎模型安装在高速试验段的一块硬板($0.6 \text{ m} \times 1 \text{ mm}$)上,硬板离地高度为1.5 m,这样既可以保证轮胎模型处于风速较为稳定的区

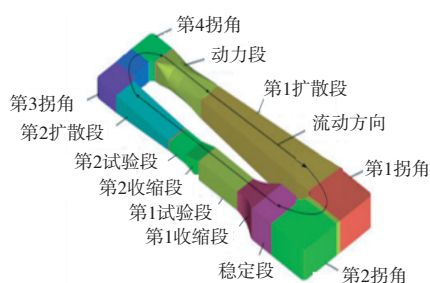


图4 风洞结构示意图

域,同时又可以降低边界层的干扰,从而得到更精确的试验结果。本试验风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,采用固定支座架起传声器进行气动噪声测试。轮胎气动噪声风洞试验安装示意图5。

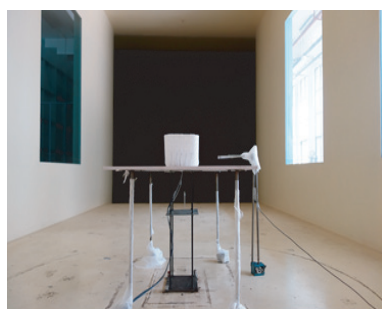


图5 轮胎气动噪声风洞试验安装示意图

1.3 压力测试设备

3D打印轮胎模型表面压力测试采用美国PSI公司生产的电子压力扫描阀(见图6)。该阀共有2个模块,128个通道,量程为 $\pm 2\,500 \text{ Pa}$,最大采样频率为 $1\,200 \text{ kHz}$,系统测量精度为 $\pm 0.05\% \text{ FS}$ 。

1.4 噪声测试设备

噪声测试采用比利时LMS公司的噪声测试仪(见图7),集成Test. Lab试验分析软件与SCADAS III高速数据采集前端,传声器采用丹麦

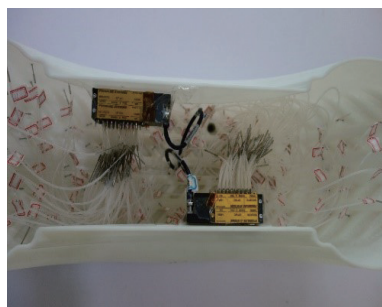


图6 电子压力扫描阀



(a) 噪声测试仪



(b) 传声器

图7 噪声测试仪与传声器

GRAS公司的 6.35 mm ($1/4$ 英寸) 声学传感器与前置放大器。

1.5 试验工况

根据轮胎模型特征,其纵向与风洞内风向平行。试验时先预热电子压力扫描阀,然后打开风洞进行测试,等达到预定风速($15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)并稳定一段时间后,开始采集轮胎模型表面压力数据,每个工况采集时间为 30 s ,每个测点在每个工况下采集 $10\,000$ 个数据,每次轮胎模型的测试时间约为 2 min 。

2 压力测试结果分析

压力测试结果主要包括3种花纹结构轮胎模型的表面压力因数(C_p)分布情况,通过分析,可进一步探索不同花纹结构轮胎模型的 C_p 及其与噪声特性之间的关系。

2.1 各测点位的 C_p 计算

根据所测各点位的表面压力,可以直接计算出各点位的 C_p ,其表达式为:

$$C_p = \frac{p_i - p_0}{p_t - p_0} = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (1)$$

式中, p_i 为作用在所测点位的压力, p_t 和 p_0 分别为试验时参考高度处的总压和静压, U_0 为参考高度处的平均风压, ρ 为空气密度。

2.2 轮胎模型的 C_p 分布

在试验风速下3种花纹结构轮胎模型所测点位的 C_p 分布曲线如图8所示。

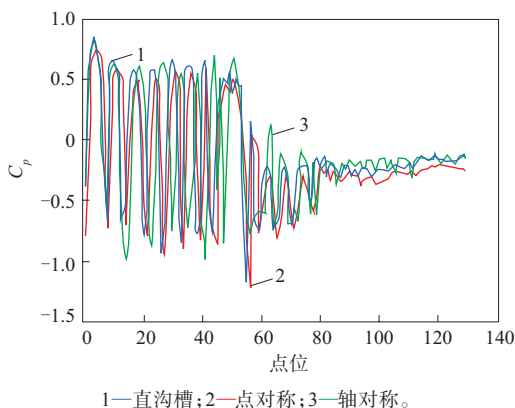


图8 3种花纹结构轮胎模型的 C_p 分布曲线

从图8可以看出,3种花纹结构轮胎模型的 C_p 分布总体趋势一致,其中点对称花纹结构轮胎模型的 C_p 最小,直沟槽花纹结构轮胎模型的 C_p 最大。由于轮胎模型接地地区后端的 C_p 没有太大的波动,下面主要对轮胎模型迎风面、接地地区前端和接地地区的 C_p 进行分析。

由于3种轮胎模型只有花纹结构不同,其整体轮廓和尺寸都是一致的,三者各个位置的的压力变化趋势相近。下面以直沟槽花纹为例分析轮胎模型表面压力分布情况。图9—11分别为直沟槽花纹结构横向胎面、横沟和纵沟的 C_p 分布曲线。

从图9可以看出:迎风面胎面1中心点位的 C_p 最大,并向两侧递减,胎面中心对称点位的 C_p 基本相等;胎面的 C_p 沿着纵向(Y向)逐渐减小且越来越

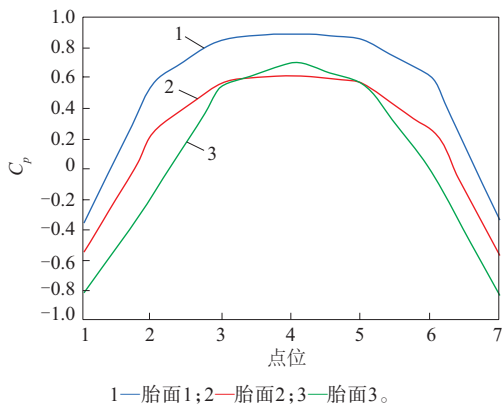


图9 直沟槽花纹结构横向胎面的 C_p 分布曲线

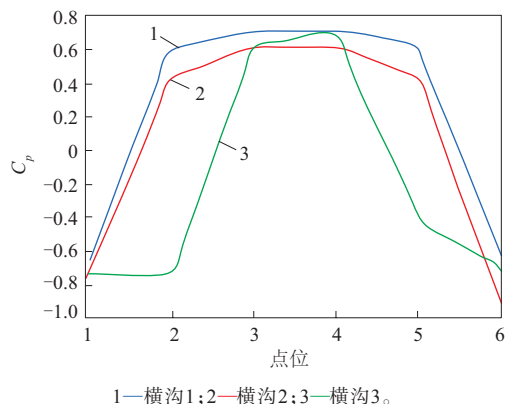


图10 直沟槽花纹结构横沟的 C_p 分布曲线

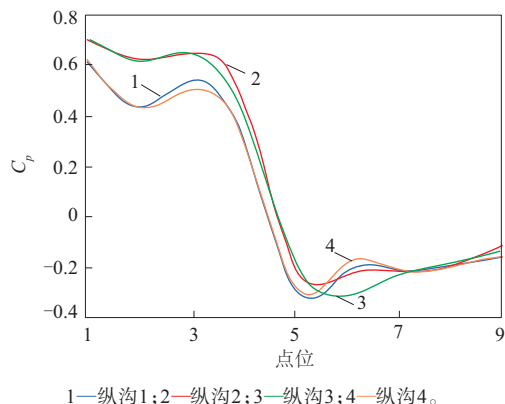


图11 直沟槽花纹结构纵沟的 C_p 分布曲线

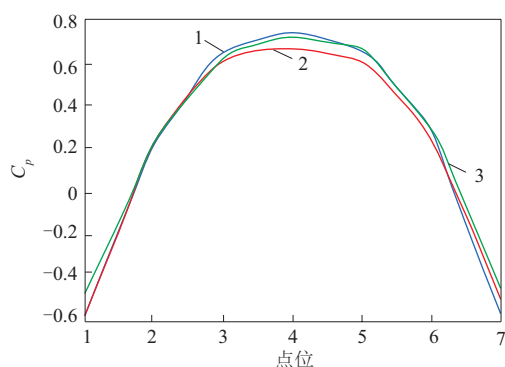
趋向负值。值得注意的是,胎面3中心点位的 C_p 突然变大,这是由于胎面3处于接地地区前端,气流撞击到胎面和接地地区形成涡流,导致此处产生相对较大的压力。

从图10可以看出,横沟的 C_p 分布情况与胎面类似,总体沿Y轴正向减小,且由胎面中心向两侧减小,越来越趋向负值,横沟3中间两个点位的 C_p 相比横沟2相同点位更大。

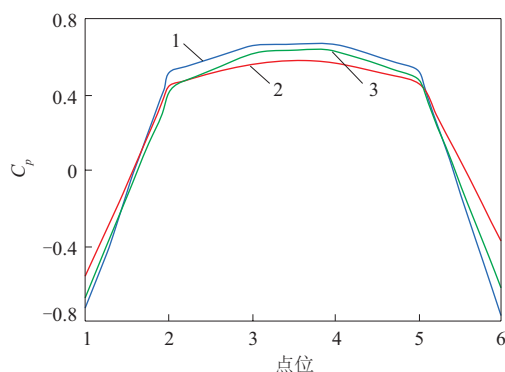
从图11可以看出,轮胎模型4条纵沟的 C_p 整体沿Y轴正向减小,最小点在接地地区中心,当 C_p 降到最小点后,会有小幅增大,之后趋于稳定。纵沟1和4位于两侧,纵沟2和3位于中心,纵沟2和3的 C_p 大于纵沟1和4,说明胎面中心的表面压力大于两侧。

对3种花纹结构轮胎模型横向(X向)相同点位的 C_p 取平均值可以得到胎面和横沟平均 C_p 分布曲线,如图12和13所示。

从图12和13可以发现,胎面和横沟中心点位



注同图8。

图12 胎面平均 C_p 分布曲线

注同图8。

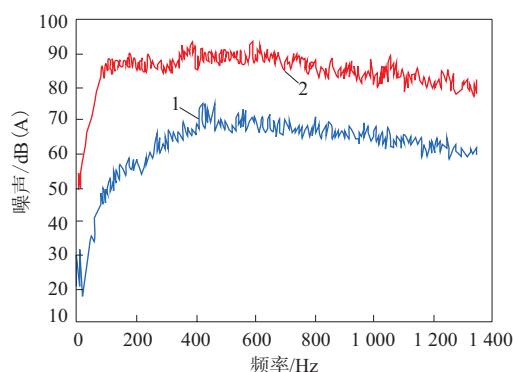
图13 横沟平均 C_p 分布曲线

的平均 C_p 从大到小的花纹结构排序依次为直沟槽、轴对称、点对称, 点对称花纹结构胎面和横沟中心点位的平均 C_p 总是小于其他两种花纹结构, 而两侧部位的平均 C_p 则有不同的分布特征。

3 气动噪声测试结果分析

风洞本身的背景噪声对噪声测试结果有很大影响, 严格控制风洞背景噪声, 可以最大限度地保证试验结果的真实性和准确性。根据 GB 1495—2002《汽车加速行驶车外噪声限值及测量方法》要求, 背景噪声至少要比测量噪声低 10 dB(A)。本试验中风洞背景噪声比测量噪声低 20 dB(A) 以上(测量噪声为试验风速在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时轮胎模型噪声测试结果), 满足测试要求。风洞背景噪声和测量噪声频谱如图 14 所示。

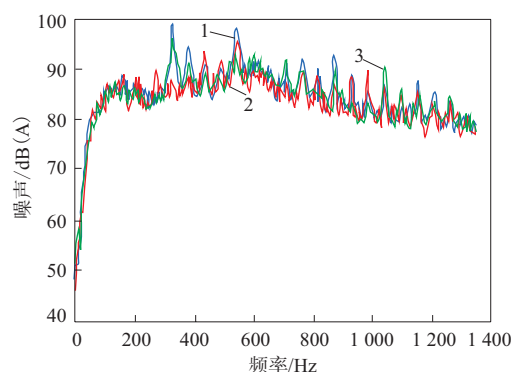
由于流体压力脉动是气动噪声形成的主要原因, 轮胎模型压力脉动特性是影响气动噪声的关键。



1—背景噪声; 2—测量噪声。

图14 风洞背景噪声和测量噪声频谱

3种花纹结构轮胎模型噪声频谱如图 15 所示。从图 15 可以看出: 3种花纹结构的轮胎模型噪声频谱趋势几乎一致, 3种气动噪声都随着频率增大先升高, 随后逐渐降低; 但是不同花纹结构轮胎模型的气动噪声峰则有所不同, 整体上直沟槽花纹结构轮胎模型最高, 为 98.58 dB(A), 其次是轴对称花纹结构轮胎模型, 为 96.59 dB(A), 最低是点对称花纹结构轮胎模型, 为 95.25 dB(A); 在 300~400 Hz 之间, 直沟槽和轴对称花纹结构轮胎模型出现气动噪声最高峰, 而点对称花纹结构轮胎模型在该位置却没有出现。



注同图8。

图15 3种花纹结构轮胎模型噪声频谱

从图 15 还可以看出, 直沟槽花纹结构轮胎模型的噪声最高, 轴对称花纹结构轮胎模型次之, 点对称花纹结构轮胎模型最低, 可知直沟槽花纹结构噪声特性最差。再结合图 12 和 13, 可知直沟槽花纹结构轮胎模型的压力脉动也是三者中最大的, 点对称花纹结构的压力脉动最小。

综上所述, 花纹压力脉动越小, 其对应的气动

噪声也越低。

4 结论

(1) 从3种花纹结构轮胎模型的 C_p 分布曲线可以看出,点对称花纹结构轮胎模型的 C_p 最小,直沟槽花纹结构轮胎模型的 C_p 最大。

(2) 从 X 向来看,迎风面、接地区前端和接地区 C_p 的峰值都在胎面中心,其余点位的 C_p 由中心向两侧递减,离胎面中心的距离越远, C_p 越小;从 Y 向来看,纵沟内点位的 C_p 沿着 Y 轴正向先快速减小再增大,最后趋于平稳, C_p 最小点处于接地区中心,且中间两条纵沟的 C_p 要大于两侧纵沟。

(3) 不同花纹结构对轮胎压力脉动特性有显著影响,压力脉动越大,其对应的气动噪声越高。研究结果为优化花纹结构、减小轮胎的 C_p 、降低气动噪声提供了参考。

参考文献:

- [1] Stalter F, Gauterin F. Research on Selective Manipulation of Tyre/Road Noise under Driving Torque[J]. British Journal of Pharmacology, 1993, 138: 564-573.
- [2] Cesbron J, Anfosso-Ledee F, Duhamel D, et al. Experimental

Study of Tyre/Road Contact Forces in Rolling Conditions for Noise Prediction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320 (1): 125-144.

- [3] Nakajima Y. Theory on Pitch Noise and Its Application[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125 (3): 252-256.
- [4] Fujiwara S, Yumii K, Saguchi T, et al. Reduction of Tire Groove Noise Using Slot Resonator[J]. Tire Science and Technology, 2009, 37 (3): 207-223.
- [5] Yu Z X, Xiao W X. Gas Noise Model of Tyre Trench Pump[J]. Automotive Engineering, 2008, 30 (8): 692-695.
- [6] Chen X, Chen L J, Chen Y Q, et al. Study on the Optimization of Tire Pattern Pitch Parameters by Adaptive Immune Genetic Algorithm[J]. Vibration and Impact, 2010, 29 (8): 94-98.
- [7] Zhou H C, Zhai H H, Ding Y M, et al. Numerical Investigation of Passive Control Flow to Improve Tire Hydroplaning Performance Using a V-riblet Non-smooth Surface[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9 (11): 1-13.
- [8] Zhou H C, Yang J, Liang C, et al. Effect of V-shaped Bionic Non-smooth Structure on Aerodynamic Noise of Tire Tread[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015, 43 (11): 27-32.
- [9] Zhou H C, Liang C, Yang J, et al. Biomimetic Methods for Improving Tire Skid Resistance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (8): 125-130.

收稿日期: 2020-06-20

Wind Tunnel Test Study on Effect of Tread Pattern Structure on Tire Aerodynamic Noise

ZHOU Haichao, CHEN Qingyun, LI Huiyun, XIA Qi, JIANG Zhen, WANG Guolin

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The tire pattern after load deformation was reconstructed by 3D printing, and wind tunnel tests were performed on the tire models with vertical symmetrical pattern, point symmetrical pattern and axial symmetrical pattern respectively. The tire pattern surface pressure fluctuation (pressure fluctuation) characteristics and pattern aerodynamic noise (aerodynamic noise) were obtained. The results showed that the pattern structures had a significant effect on the tire pressure fluctuation characteristics. The greater the pressure fluctuation, the higher the corresponding aerodynamic noise. The results provided a reference for effectively controlling tire pressure fluctuation and aerodynamic noise.

Key words: tire model; pattern structure; aerodynamic noise; pressure fluctuation; wind tunnel test

声明 《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》均不收取审稿费。任何机构、个人以任何名义向作者收取审稿费均为诈骗行为。请广大作者互相转告,勿信诈骗信息。官方投稿网站仅为www.rubbertire.com.cn和www.rubbertire.cn。三刊未与任何第三方机构进行收稿和审稿合作,如有任何疑问请及时与编辑部联系。