

## 特约来稿

基于频谱分析的全钢载重子午线轮胎  
花纹噪声优化张春生<sup>1</sup>, 侯丹丹<sup>1</sup>, 廖发根<sup>1</sup>, 项大兵<sup>2\*</sup>, 危银涛<sup>2</sup>

(1. 中策橡胶集团有限公司, 浙江 杭州 310018; 2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**以全钢载重子午线轮胎为例进行花纹噪声优化。对待优化轮胎和对标轮胎进行通过噪声测试, 基于轮胎噪声的频谱特性及Colormap图, 分析发现待优化轮胎的噪声频谱中存在明显的噪声峰值。通过专业的理论和分析工具诊断出该峰值主要是由花纹节距设计及排列不佳引起, 最后采用节距优化理论对待优化轮胎花纹节距进行优化设计和排列, 通过噪声测试结果及频谱特性分析表明, 优化后轮胎的噪声峰值得到消除, 声压级达到对标轮胎水平, 且其噪声频谱与对标轮胎在相同试验条件下更为接近, 验证了频谱分析法在轮胎噪声源诊断以及噪声性能优化方面的重要作用。

**关键词:**全钢载重子午线轮胎; 花纹噪声; 频谱分析; 节距优化

**中图分类号:**TQ336.1; TB533<sup>+</sup>.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-8171(2020)06-0323-06

**DOI:**10.12135/j.issn.1006-8171.2020.06.0323



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

轮胎噪声的产生机理非常复杂, U. Sandberg等<sup>[1]</sup>将轮胎噪声产生机理分为机械振动机理和空气动力学机理两大类, 实际上两部分噪声会相互耦合, 很难在试验中进行解耦。轮胎噪声性能与花纹结构密切相关, 轮胎花纹结构的优化设计是降低轮胎噪声最有效的方法。对于轮胎花纹的设计开发, 其研究方法主要有试验和模拟仿真。近年来, 随着计算机技术的发展, 采用模拟仿真方法进行轮胎噪声机理的研究逐渐成熟。Y. Nakajima等<sup>[2]</sup>、K. Sungtae等<sup>[3]</sup>、王琦等<sup>[4]</sup>、冯希金<sup>[5]</sup>、余洁冰等<sup>[6]</sup>和赵崇雷等<sup>[7-8]</sup>提出相关仿真分析方法, 对轮胎振动噪声和气动噪声展开大量研究工作。

相比模拟仿真, 测试分析是对轮胎噪声研究最直接有效的方法。常规轮胎花纹开发流程如图1所示。



图1 轮胎花纹开发流程

首先工程师对轮胎花纹进行经验设计, 然后生产实际轮胎并雕刻花纹, 最后进行性能试验和方案改进。

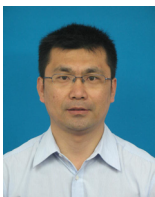
本工作根据上述开发流程, 首先对待优化轮胎与对标轮胎进行噪声测试, 对比分析二者的噪声频谱特性, 诊断出待优化轮胎的主要噪声源。在此基础上, 采用轮胎花纹节距优化理论及节距优化软件对原始花纹进行优化, 并对重新雕刻优化后花纹的轮胎进行噪声测试, 验证轮胎噪声频谱诊断方法的有效性。

## 1 轮胎噪声产生机理

通过噪声频谱分析法改进轮胎花纹设计首先需明确频谱中各峰值所对应轮胎噪声的发声机理, 才能有针对性地提出花纹改进及其优化方向。

在滚动轮胎与路面接触的过程中, 振动噪声和气动噪声的分析可以分为接地前端、完全接地和接地后端3个区域。轮胎接地过程中不同部位的噪声发声机理如图2所示。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51761135124, 11672148)



**作者简介:**张春生(1975—), 男, 黑龙江牡丹江人, 中策橡胶集团有限公司高级工程师, 硕士, 现任中策橡胶集团全钢子午线轮胎研究所常务副所长, 全面负责基础研究和产品开发工作, 组织团队进行各项攻关工作, 主持研发的多项产品获得浙江省“优秀工业新产品”称号, 被评为

杭州市“131”人才。

\*通信联系人(xdb1989@163.com)

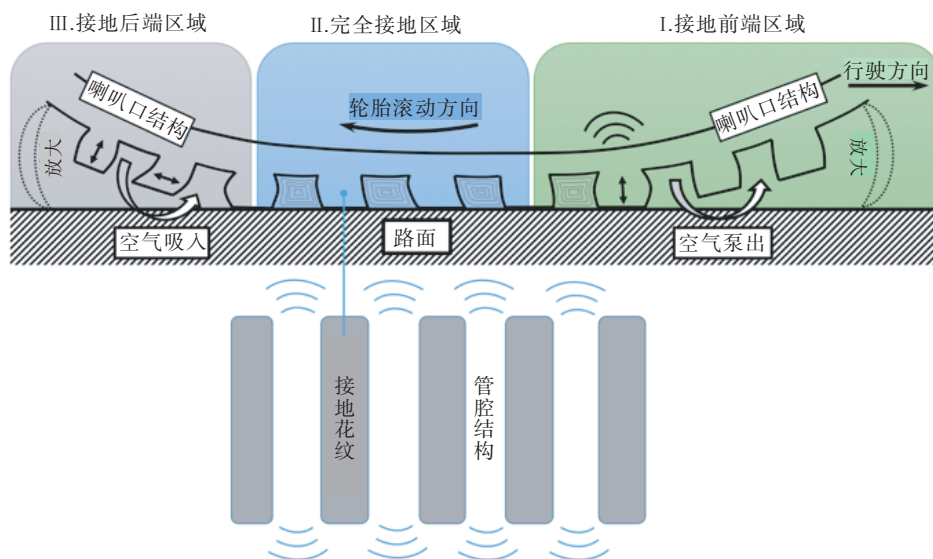


图2 滚动轮胎接地时主要的噪声发声机理

### 1.1 泵浦噪声

轮胎花纹沟从接地前端区域 I 经过完全接地区域 II 再到接地后端区域 III 的过程中, 体积经历压缩和扩张的变化。在接地前端区域 I, 轮胎花纹沟体积减小, 空气从接地前端花纹沟中泵出; 在接地后端区域 III, 花纹体积由封闭状态打开, 体积增大, 空气吸入花纹沟内。接地前后端空气的泵出与吸入的流动形成空气泵浦噪声。

R. E. Hayden<sup>[9]</sup>, S. Samuels<sup>[10]</sup> 和 K. Plotkin 等<sup>[11]</sup>都对泵浦噪声进行了相关研究, K. Plotkin 通过试验得出泵浦噪声远场噪声声压级 ( $p$ ) 的计算公式如下:

$$p = \frac{\rho_0 Q'' V^2}{\pi L} \quad (1)$$

式中,  $\rho_0$  为静态空气密度,  $Q''$  为花纹沟体积变化的二阶导数,  $V$  为车速,  $L$  为测点到声源的距离。

### 1.2 管腔共振噪声

在完全接地区域 II, 如果存在横向或纵向沟槽, 接地区域内花纹沟和路面形成类似两端开口的“管腔结构”, 管腔沟槽在轮胎与路面的相互作用下, 轮胎胎体的振动使沟槽内的气体不断受到挤压和释放, 从横向花纹沟的两侧或纵向花纹沟的前后端排出, 形成管腔共振噪声。由声学理论得知, 其发声的波长 ( $\lambda_n$ ) 和频率 ( $f_n$ ) 取决于路面和轮胎花纹沟的几何形状, 相应公式如下:

$$\lambda_n = \frac{2l_e}{n}, f_n = \frac{c}{\lambda_n} \quad (2)$$

式中,  $l_e$  为管子的有效长度,  $c$  为声速,  $n$  为模态阶次,  $n = 1, 2, \dots$ 。

如果花纹所有节距长度和排列顺序不当, 随着轮胎速度的变化, 当花纹管腔共振频率与花纹泵浦噪声频率吻合时, 管腔共振噪声会明显增大, 而变节距花纹设计和一定的节距排列则可有效改善这种情况。

### 1.3 振动噪声

在接地前端区域 I, 轮胎花纹块撞击路面时发生机械振动并产生振动噪声, 振动噪声是轮胎花纹特性与路面纹理相互作用的结果。在完全接地区域 II, 轮胎花纹受到滚动轮胎振动的影响, 花纹块发生径向、切向和侧向的变形; 同时, 由于滑动摩擦系数随接触时间相对速度增大而减小, 产生粘滑效应, 轮胎的粘附机理一般在轮胎受到较大切向力 (如加速、制动、转向等工况) 时较为明显。在接地后端区域 III, 轮胎花纹脱离路面, 迅速从压缩状态恢复原状, 导致花纹块发生径向和切向振动, 称为振动噪声。轮胎花纹的振动及胎冠振动传递到胎侧引起胎侧的振动, 由胎侧向外辐射噪声。

## 2 轮胎通过噪声测试

### 2.1 试验样品

待优化轮胎型号为 A01, 对标轮胎为国外知名品牌, 型号为 B01, 试验轮胎规格为 275/70R22.5,

花纹样式如图3所示。

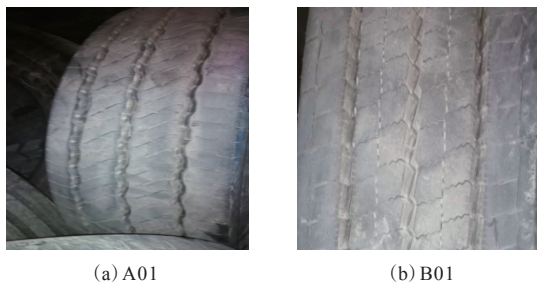


图3 轮胎花纹样式

## 2.2 试验方法

本工作采用的噪声测试方法为欧盟标签法 ECE R117中所规定的轮胎通过噪声测试方法,试验现场如图4所示。试验车辆沿图中所示的竖直中心线C-C'行驶,按指定速度从A-A'端空挡滑行(关闭发动机并切断离合器)经过试验区域至B-B'端,通过两侧的声级计记录车辆每次通过时噪声的最大值<sup>[12]</sup>,同时记录噪声频谱数据。

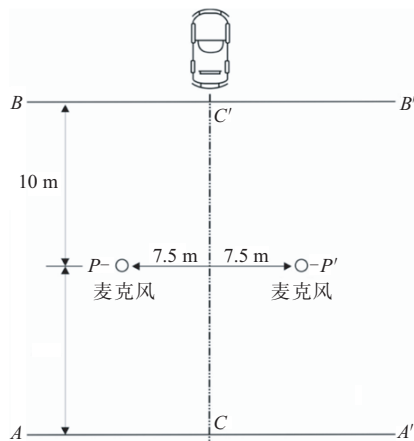


图4 轮胎室外通过噪声测试示意

依据法规要求,每套轮胎在 $60 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度范围内均匀选取8个测试点(测试过程中选择62, 64, 66, 68, 72, 74, 76和 $78 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 共8个测试点,每个测试点控制速度误差在 $\pm 1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内)。最终将8个测试点的数据归一化到速度为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 工况下的等效声压级。

## 3 结果与讨论

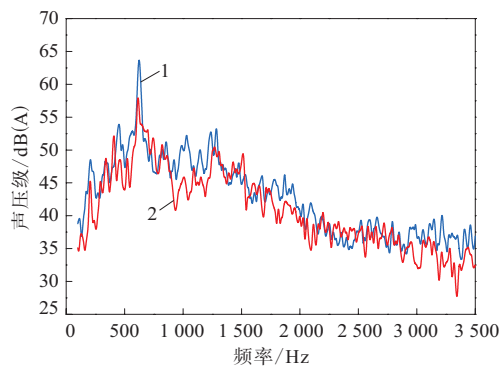
### 3.1 初始花纹方案测试结果

A01和B01两种轮胎的测试噪声声压级分别为73和71 dB(A)。可以看出,待优化轮胎的噪声

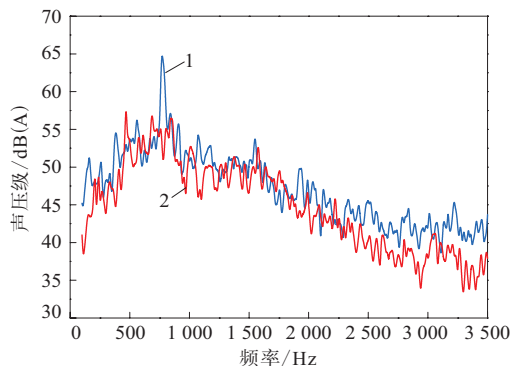
声压级对标轮胎大2 dB(A),因此需要进行频谱分析,以确定噪声优化方向。

### 3.2 频谱分析

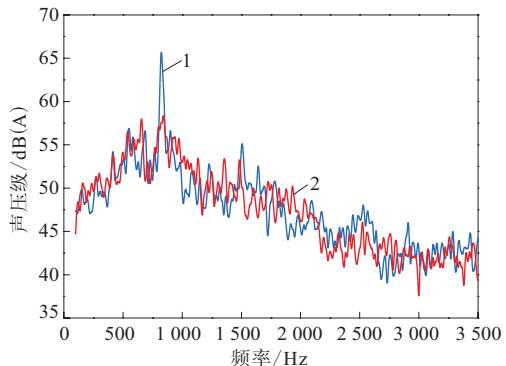
为分析待优化轮胎的主要噪声源,需对其噪声频谱进行分析。在后续分析过程中,选择每种轮胎速度在 $(72 \pm 1) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 工况下的数据作为分析对象。A01和B01轮胎在不同速度工况下的噪声频谱对比如图5所示。



(a) 车速 $62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$



(b) 车速 $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$



(c) 车速 $78 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

1—A01轮胎;2—B01轮胎。

图5 A01和B01轮胎的噪声频谱

从图5可以看出,在100~3 500 Hz频率范围内两种轮胎的声压级变化趋势较为一致,这与两种轮胎花纹在声学特征上高度相似有关。但是,在不同速度下A01轮胎都在600~900 Hz频率范围内出现明显的噪声峰值,而且随着速度的增大,峰值向高频方向移动。结合这两点趋势,初步推断该噪声峰值是由速度相关性声源产生。

为了进一步分析峰值噪声形成的具体原因,重点研究A01轮胎噪声幅值随速度和频率变化的Colormap图(见图6)。从图6可以清晰地看出A01轮胎的噪声Colormap图存在明显的阶次噪声成分(图中表现为黄色倾斜线条)。

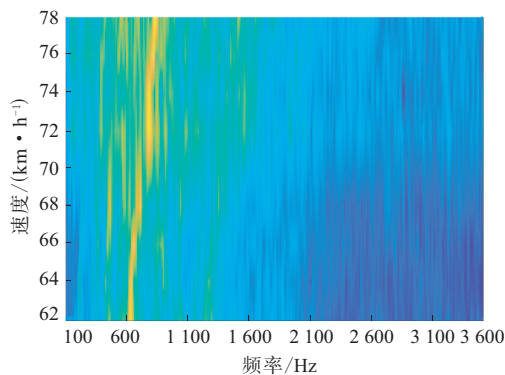


图6 A01轮胎的噪声Colormap图

已知A01轮胎周长为3 034.8 mm,花纹周节数为54。根据节距噪声频率计算公式:

$$f = \frac{v_c}{2\pi r_t} N_p \tag{3}$$

式中, $v_c$ 为轮胎滚动速度, $N_p$ 为花纹周节数, $r_t$ 为轮胎滚动半径。

得到花纹节距噪声峰值频率如表1所示。

| 表1 A01轮胎节距噪声频率理论与试验结果 Hz     |          |          |            |          |            |
|------------------------------|----------|----------|------------|----------|------------|
| 车速/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 节距<br>基频 | 二阶<br>频率 | 试验主<br>峰频率 | 四阶<br>频率 | 试验次<br>峰频率 |
| 62                           | 306      | 611      | 620        | 1 222    | 1 290      |
| 64                           | 315      | 631      | 630        | 1 262    | 1 260      |
| 66                           | 325      | 651      | 650        | 1 301    | 1 290      |
| 68                           | 335      | 670      | 700        | 1 340    | 1 340      |
| 72                           | 355      | 710      | 770        | 1 419    | 1 550      |
| 74                           | 365      | 729      | 770        | 1 459    | 1 550      |
| 76                           | 375      | 749      | 810        | 1 498    | 1 650      |
| 78                           | 384      | 769      | 820        | 1 538    | 1 640      |

从表1可以看出,在不同车速工况下,A01轮胎试验频谱均在二阶节距频率处产生较大峰值,而且在四阶节距频率处再次产生峰值。通过原始设计参数可以分析出该轮胎中节距噪声出现明显峰值的主要原因是其使用了周期性的节距排列方案,导致声能量在频域内过于集中,从而产生较大的节距噪声峰值。后续主要改进方案是对其重新进行节距设计和节距排列优化,以降低噪声的节距峰值,从而降低整体通过噪声水平,使其噪声频谱更加接近对标轮胎。

3.3 花纹优化及测试结果

根据初步诊断结果,A01轮胎噪声偏大的主要原因是花纹节距噪声峰值偏大。通过采用清华大学轮胎力学课题组自主研发的低噪声轮胎花纹节距优化软件对A01轮胎花纹节距个数和排列顺序进行了优化。优化前(A01)和优化后(A01')轮胎花纹的节距参数和排列方式如表2所示。

| 表2 A01和A01'轮胎花纹的节距参数和排列方式 |                |          |      |                |          |      |
|---------------------------|----------------|----------|------|----------------|----------|------|
| 项 目                       |                | A01      |      |                | A01'     |      |
| 轮胎周长/mm                   |                | 3 034.80 |      |                | 3 034.75 |      |
| 花纹节距                      |                |          |      |                |          |      |
| 总数                        |                | 54       |      |                | 60       |      |
| 种类                        | 1              | 2        | 3    | 1              | 2        | 3    |
| 数量                        | 9              | 36       | 9    | 25             | 20       | 15   |
| 长度/mm                     | 51.0           | 56.0     | 62.2 | 46.6           | 51.0     | 56.7 |
| 排列                        | 222213,222213, |          |      | 211233,321112, |          |      |
|                           | 222213,222213, |          |      | 321112,111211, |          |      |
|                           | 222213,222213, |          |      | 211233,221111, |          |      |
|                           | 222213,222213, |          |      | 121231,333312, |          |      |
|                           | 222213,222213  |          |      | 332223,223112  |          |      |

根据优化后的A01'花纹设计方案重新雕刻轮胎花纹进行噪声测试,通过噪声声压级比A01轮胎降低2 dB(A)。轮胎花纹优化后与优化前及对标轮胎的噪声频谱对比如图7所示。

从图7可以明显看出:花纹节距排列优化后的轮胎在不同测试速度下的噪声频谱峰值均得到了有效消除;优化后轮胎不仅在声压级上与对标轮胎一致,而且频谱规律非常相近。因此二者的花纹设计方案在轮胎噪声特性上实现了较为精准的对标。

综合优化前后轮胎的通过噪声声压级、频谱

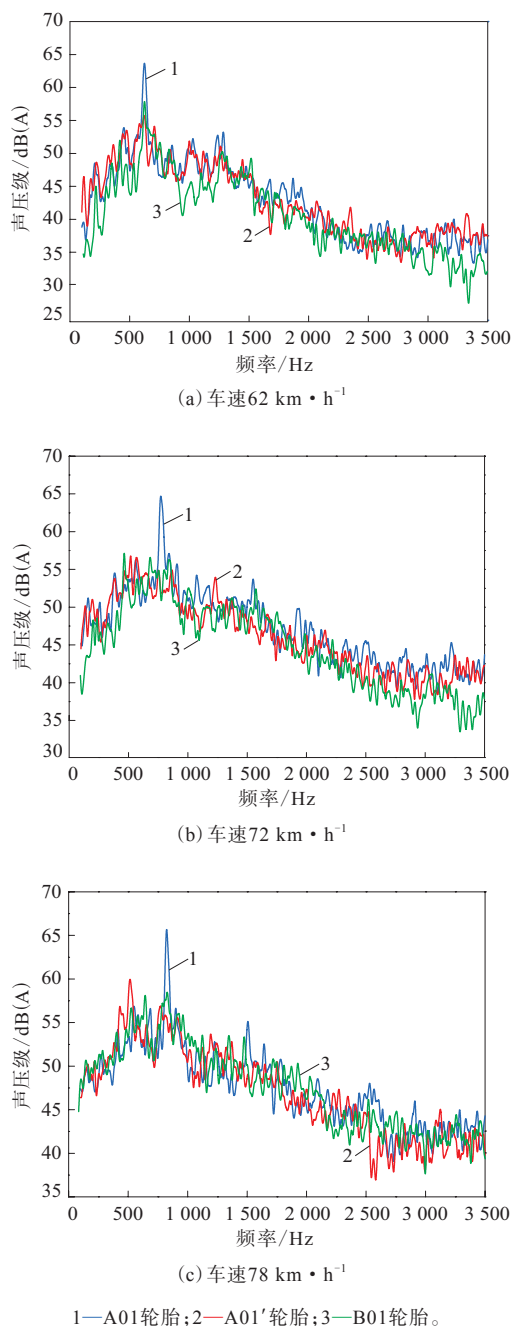


图7 轮胎花纹优化后与优化前及对标轮胎的噪声频谱对比

特性以及优化后轮胎与对标轮胎的频谱结果,验证了该节距优化方法的有效性,同时也体现了频谱分析法在轮胎噪声优化过程中的重要作用。

#### 4 结语

本工作首先对待优化轮胎和对标轮胎进行

通过噪声测试,基于轮胎通过噪声的频谱特性和 Colormap图分析,诊断出待优化轮胎的主要噪声源是由花纹节距设计与排列不当引起的。在此基础上,采用节距优化理论对待优化轮胎花纹进行节距排列和优化,对优化后轮胎进行通过噪声测试,轮胎通过噪声声压级比优化前降低2 dB(A)。进一步分析优化后的轮胎频谱特性,在不同试验速度下的噪声频谱峰值均得到了有效消除,且其噪声频谱更加接近对标轮胎在相同试验条件下的噪声频谱。试验结果表明,对待优化轮胎的噪声源诊断结果是有效的,同时体现了轮胎花纹节距设计与优化在降低轮胎噪声设计中的重要作用。

#### 参考文献:

- [1] Sandberg U, Ejsmont J A. Tyre/Road Noise Reference Book[M]. Sweden:SE-59040 Kisa,2002:202-207.
- [2] Nakajima Y, Inoue Y, Ogawa H. Application of the Boundary Element Method and Modal Analysis to Tire Acoustics Problems[J]. Tire Science and Technology, 1992, 21 (2): 66-90.
- [3] Sungtae K, Wontae J, Yonghwan P, et al. Prediction Method for Tire Air-Pumping Noise Using a Hybrid Technique[J]. Journal of Acoustic Society of American, 2006, 119 (6): 3799-3812.
- [4] 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.
- [5] 冯希金.卡车子午线轮胎振动噪声仿真技术研究[D].北京:清华大学,2015.
- [6] 余洁冰,臧孟炎.轮胎泵气噪声的有限元仿真研究[J].机械设计与制造工程,2010,39(15):48-50.
- [7] 赵崇雷.基于流固耦合仿真的轮胎噪声及湿滑研究[D].北京:清华大学,2018.
- [8] 赵崇雷,黄伟,穆龙海,等.基于四极子声源的轮胎管腔共振噪声研究[J].轮胎工业,2019,39(9):566-571.
- [9] Hayden R E. Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface[C]. Proc. Purdue Noise Control Conference, Purdue University, 1970: 62-67.
- [10] Samuels S. Recent Australian Tyre/Road Noise Research[C]. Proc. International Tire Noise Conference, Stockholm, Sweden, 1979: 111-124.
- [11] Plotkin K, Fuller W, Montroll M. Identification of Tire Noise Generating Mechanisms Using a Roadwheel Facility[C]. International Tire Noise Conference, Stockholm, Sweden, 1979: 127-140.
- [12] 全国轮胎轮辋标准化技术委员会.轮胎惯性滑行通过噪声测试方法:GB/T 22036—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

收稿日期:2020-01-16

## Optimization of Tread Pattern of Truck and Bus Radial Tire to Lower Tire Noise Based on Spectrum Analysis

ZHANG Chunsheng<sup>1</sup>, HOU Dandan<sup>1</sup>, LIAO Fagen<sup>1</sup>, XIANG Dabing<sup>2</sup>, WEI Yintao<sup>2</sup>

(1. Zhongce Rubber Group Co., Ltd, Hangzhou 310018, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Taking truck and bus radial tire as an example, the tread pattern was optimized to lower tire noise. The pass-by noise of tire was tested, and the noise spectrum and Colormap were analyzed and compared with the benchmark tire. The test results showed that there was a significant noise peak in the noise spectrum of the tire to be optimized. It was found that the noise peak was mainly caused by the poor pattern design and arrangement of the pattern pitches. The pitch of the tire pattern was then redesigned and optimized. After the optimization, the peak noise of the tire was reduced, the sound pressure level reached the tested level of the benchmark tire, and its noise spectrum was close to that of the benchmark tire under the same test conditions. This study showed that the spectrum analysis method was effective in the diagnosis of tire noise source and optimization of noise performance.

**Key words:** truck and bus radial tire; pattern noise; spectrum analysis; tire pitch optimization

### 全球首个轮胎工业互联网平台签约

日前,山东玲珑轮胎股份有限公司(简称玲珑轮胎)与腾讯云计算(北京)有限公司(简称腾讯公司)、深圳华制智能制造技术有限公司(简称华制智能)达成战略合作协议,共建全球首个轮胎行业工业互联网平台,通过全要素、全产业链、全价值链的全面连接,助力玲珑轮胎数字化、智能化和全球化发展。

据了解,此次三方携手,将在原有基础上,把数字化创新下沉,通过物联网、5G、人工智能等技术,将生产制造的“硬”环节和分析服务的“软”环节互联集成,实现研发、生产、营销、服务等全价值链数字化管控,为玲珑轮胎提供实时多维度、可视化的数据支持,促进产业链高效协同。

腾讯云将为玲珑轮胎打造营销云,利用企业微信、小程序等连接应用,更高效地触达用户,快速响应市场需求,同时通过电子商城进行线上线下门店的打通,为玲珑轮胎搭建智慧工业后市场云平台。华制智能将结合工业互联网领域的多年实践,为玲珑轮胎构建数字化驾驶舱,通过设备物联、智能生产、智能物流等,统一管控企业数据及

生产运营各系统资源,加强企业生产调度、运营管控、数据交互及智能决策。

玲珑轮胎董事长王锋说,此次三方携手,将通过智能制造、产品创新和技术升级提高生产效率,优化产品结构,提升质量品牌,推进服务体系建设,全面推进玲珑轮胎数字化和智能化转型。

腾讯公司高级执行副总裁、云与智慧产业事业群总裁汤道生表示,腾讯公司将科技能力和用户连接能力注入到玲珑轮胎数字化转型的进程中,做好玲珑轮胎的数字化转型助手,助力玲珑轮胎引入AI、区块链、边缘计算等最新技术,积极开拓中高端市场,塑造国际化品牌形象,打造标杆工厂,抢抓新基建机遇,全面推进数字化、智能化转型。

华制智能董事长夏妍娜指出,在新基建下的新工业中,万物皆互联,制造即服务。华制智能将通过高可配、快部署、易运维、强稳定的工业互联网解决方案,在设备互联、制造协同、运营管控、数据智能等领域为玲珑轮胎提供卓越的产品和深度的应用,助力玲珑轮胎实现数字化转型,打造世界级智能工厂。

(摘自《中国化工报》,2020-04-22)