

载重子午线轮胎噪声机理的室内试验研究

陈亚龙,王 昊,冯希金,危银涛*

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室,北京 100084)

摘要:在半消声室内用模拟路面纹理的静音转鼓进行载重子午线轮胎远场、近场和近场声全息噪声试验,并建立了详细的数据分析方案,包含总声压级、噪声频谱、1/3倍频程、1/12倍频程、噪声色差图和瀑布图。对混合型室内噪声的数据分析发现,载重子午线轮胎近场噪声具有指向性特征,接地后端和前端噪声较大,依次向接地侧面减弱,且接地后端大于接地前端。

关键词:载重子午线轮胎;半消声室;近场噪声;远场噪声;近场声全息;声强

中图分类号:U463.341⁺.3/.6;TB942 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)02-0116-07

随着社会经济的发展,车辆运输在乘客运送和货物运输中所占的比例日益增大。截至2012年,汽车运输在客运量和货运量中所占的比例分别达到了93.36%和78.16%。如今,交通运输所带来的安全、节能和环保问题是研究的热点,交通噪声已经成为最显著的环境危害之一。研究发现,当乘用车时速大于60 km·h⁻¹、商用车时速大于80 km·h⁻¹时,轮胎噪声成为车辆主要的噪声来源。

欧盟轮胎标签法 EC 1222/2009 于2012年11月1日起执行。法规规定,在欧盟销售的轿车轮胎、轻载轮胎、载重轮胎和公共汽车轮胎必须加贴标签,标示出轮胎的燃油效率、湿滑路面抓着力和道路噪声等级。截至2013年11月,装配不符合噪声要求轮胎的车辆将不予认证;截至2016年10月,不符合噪声要求的轮胎将禁止销售和使用。

轮胎噪声主要来源于结构振动噪声、花纹块振动噪声和空气噪声^[1]。这三者在不同速度、不同频段上所占的比例目前难以确定,需要采用试验和仿真结合的方法分别进行分析。

本工作在分析各种噪声测试方法优缺点的基

础上,设计实施了载重子午线轮胎的一种近场、远场和声全息相结合的噪声试验方案。

1 滚动轮胎噪声机理

1.1 泵浦噪声

当胎面花纹进入接地区时,花纹块受压缩变形,花纹沟中的空气被挤压,受压缩的空气从胎前和胎侧被泵出。在轮胎的离地端,花纹沟体积的增大产生负压,使空气从胎后和胎侧被吸入。在空气被泵出和吸入的过程中产生轮胎泵浦噪声^[2-3]。

1.2 冲击噪声

轮胎向前滚动时接地前端的花纹与路面发生撞击,引起花纹块振动产生噪声;轮胎接地后端的花纹块离开地面时回弹,引起花纹块振动噪声。

1.3 模态振动噪声

轮胎在滚动的过程中,受不平路面的激励、花纹块接地撞击和离地回弹的激励、制造不均匀性的激励,会激发轮胎自身的模态振动,胎体的模态振动使轮胎表面变为声源辐射噪声^[4]。

1.4 粘滑振动噪声

轮胎接地区域内的花纹块由于与地面的切向滑移,产生高频粘滑振动,进而引起结构噪声^[5]。

1.5 块粘吸噪声

载重轮胎负荷较大,在高速运行一段时间后胎面胶会因为发热而变粘,橡胶块离地时会与地面产生粘附,在粘附和分离的过程中花纹块产生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275265, 51175286)

作者简介:陈亚龙(1989—),男,新疆阿克苏人,硕士,现在中国北方车辆研究所工作,从事橡胶轮胎的振动声学 research。

* 通信联系人

振动,进而引起块粘吸噪声。

2 现有试验方法综述

现有的轮胎噪声测试标准化方法主要包括室外滑车法、拖车法、室内转鼓法、拖车滑行法和随车声强法等^[6-10]。

2.1 室外滑车法

在测试场地上,装有待测轮胎的测试车辆沿路线中心以预定的速度驶入测试区域,并关闭发动机、断开离合器滑行通过测试区。麦克风记录整个过程的最大 A 计权噪声声压级或频谱。

室外滑车法能够很好地模拟真实情况下轮胎/路面的通过噪声,不需要多余的测试车辆和设备,但测试结果易受测试车辆和测试条件的影响,室外环境变量难以控制,与其他测试方法相比需要更多的测试轮胎^[1]。

2.2 拖车法

待测轮胎安装在拖车上,拖车通过牵引拉杆与牵引车辆连接,在距离待测轮胎 0.5~1 m 处安放若干个麦克风。在麦克风周围一般装有隔音外壳来削减牵引车辆或风产生的噪声。

拖车法的优点是速度快、成本低,可以在同一路面上进行长距离的连续测试;缺点是需要一辆额外的牵引车辆,增加了背景噪声和外界干扰,只能测量近场噪声,隔音外壳内部的吸声材料不可能完全不反射轮胎噪声^[10]。

2.3 室内转鼓法

在能够模拟室外自由声场的半消声实验室内,由直径为 1.5~2.5 m 的转鼓带动轮胎滚动,转鼓可以是钢制光面转鼓,也可以在表面安装模拟不同路面的覆层。通过声压或声强设备采集转鼓上的轮胎噪声。

室内转鼓法易于控制环境变量,不受天气等因素的影响,适于高精度的测量。它可以在很大的速度范围和测试时间内进行测量。缺点是转鼓需要根据路面装配不同的覆层,由于转鼓机械传动装置的影响,背景噪声不易控制^[1]。

2.4 拖车滑行法

拖车滑行法结合了滑车法和拖车法,使用滑车法的方式安置远场麦克风,通过很长的牵引杆连接拖车和牵引车辆,以分隔牵引车辆和拖车的

通过噪声。

相比于滑车法,拖车滑行法不易受到测试车辆的影响,因此测试结果更精确;缺点是由于牵引杆太长,拖车滑行法不适于在实际道路上测试。为了消除拖车噪声对待测轮胎噪声的影响,拖车滑行法往往需要 2 倍以上的重复测试次数^[10]。

2.5 随车声强法

随车声强法是近年新兴的一种轮胎/路面噪声测试方法,与传统测试方法不同的是,采用声强测量取代声压测量。随车声强法在车轮外侧用支架固定两个相隔一定距离的声强计,车辆行驶时实时测量 A 计权声强、平均 A 计权声强等参数。

声强计的指向性特点能有效减弱发动机噪声、排气系统噪声和风噪声的干扰。车声强法不受场地的限制,能够在各种实际路面上进行测试。但是,随车声强法关注的重点在于路面而非轮胎,主要用于评价路面对轮胎噪声的影响。

3 近场-远场-声全息混合试验方案

通过分析现有轮胎噪声测试方法的优缺点,本工作提出近场-远场-声全息混合试验方案,既可模拟远场通过噪声,又可测试近场的噪声频谱,还能通过近场声全息了解噪声源的分布,有助于研究轮胎噪声的产生和传播机理以及轮胎噪声的评估、诊断和优化。

由于室外试验需要控制的因素多,可重复性差,受天气等自然因素影响较大,因此本试验以半消声室内的转鼓试验代替平路面上的室外试验,如图 1 所示。



图 1 室内转鼓噪声试验

整车半消声室性能参数如下:声学环境 符合 ISO 3745 一级精度要求,净空间 25 m×20 m×7.5 m,背景噪声 不大于 25 dB(A),截止频

率 50 Hz,模拟车辆质量 500~12 000 kg,最大前轴负荷 6 000 kg,最大后轴负荷 10 000 kg,转鼓直径 1 909.9 mm,最大测试速度 250 km·h⁻¹,最小测试速度 3 km·h⁻¹,环境控制温度 25 ℃,尾气最大收集流量 6 000 m³·h⁻¹。

车辆行驶速度、轮胎断面宽度、花纹类型以及轮胎的动平衡性、均匀性和不圆度都对轮胎噪声有重要影响。试验选择 2 种断面宽度,6 种花纹,3 个动平衡性、均匀性等级的共 22 条轮胎在 50, 70,90 和 120 km·h⁻¹ 速度下进行近场噪声试验、远场噪声试验以及近场声全息试验。轮胎的选型和分类如表 1 所示。

表 1 待测轮胎的选型和分类

型 号	对标轮胎	均匀轮胎	不匀轮胎	合计
315/60R22.5CM335	1	3	3	7
315/60R22.5CR966	1	3	3	7
385/55R22.5AT557	3	3	2	8
总计	5	9	8	22

3.1 近场噪声试验

自由声场中声源附近声压与质点速度不同相的声场称为近场^[11]。近场区域内声压随距离变化的关系比较复杂。近场噪声试验的目的是分析噪声源附近的频谱、确定不同频段上噪声的大小,分析声源附近的噪声传播指向性规律。

以轮胎接地中心为圆心,1 m 为半径,从轮胎后端开始,分别在 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°,150°,180°位置上沿半圆弧安置 9 个麦克风,如图 2 所示。

进行实车噪声试验时,按照图 2 的方式在轮胎外侧安置 9 个 0.5 英寸传声器,方向均指向轮胎的接地中心。轮胎前后两个传声器配备风球以消除空气剧烈流动对测试结果造成的影响,如图 3 所示。

近场测试时,在每个速度下达到稳态后,使用 B & K 数据采集系统对近场噪声连续采集 3 次,每次持续 15 s。在 4 组稳态测试完毕后,使车速从 120 km·h⁻¹ 匀减速降至 20 km·h⁻¹,记录近场噪声随车速的变化关系,同样连续采集 3 次。

3.2 远场噪声试验

自由声场中距离远大于声源辐射面线度和波

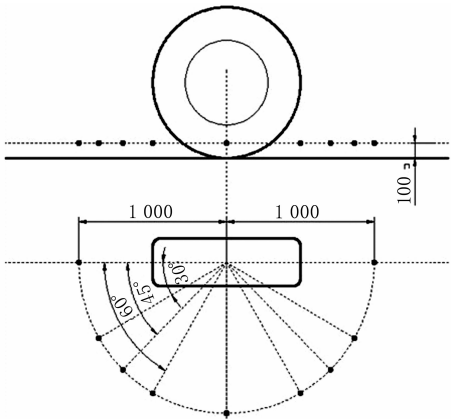


图 2 近场噪声试验

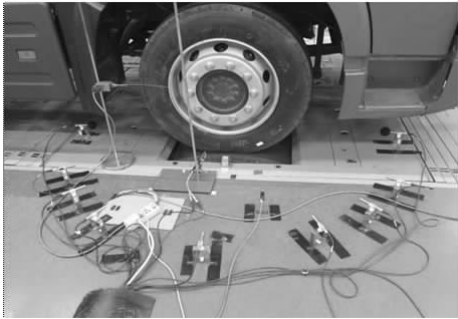


图 3 实车近场噪声试验

长,声压与质点速度同相的声场称为远场^[6]。室内远场噪声试验的目的在于模拟室外通过噪声试验。通过不同轮胎在不同速度下远场麦克风采集到的总声压值,评价轮胎噪声的总体大小。如图 4 所示,在距离轮胎接地中心 7.5 m、与车身方向平行的一条线上以 1 m 为间距安置 5 个麦克风,高度为 1.2 m。按照室外通过噪声试验的麦克风安置方法,通过“空间换时间”的策略,在 5 个远场麦克风中找到噪声最大的一个作为通过噪声的近似值。

远场测试可与近场测试同时进行,当车速在

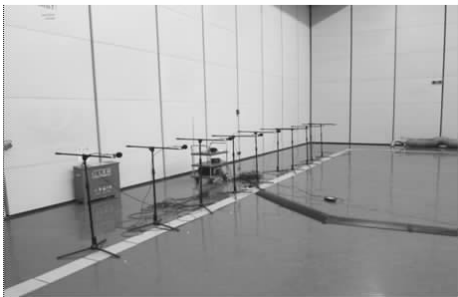


图 4 远场噪声试验

每个速度值下达到稳态后,使用 B & K 数据采集系统对远场噪声连续采集 3 次,每次持续 15 s。在 4 组稳态测试完毕后,使车速从 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀减速降至 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,记录远场噪声随车速的变化关系,同样连续采集 3 次。

3.3 近场声全息试验

声全息术是声学研究中极其重要的技术之一,是利用干涉原理获得被观察物体声场全部信息(振幅分布和相位分布)的声成像技术,能利用声场空间一个已知区域的声场特性预报另一区域的声场特性^[12]。

全息接收面与物体的距离远小于声波波长时称为近场声全息(NAH)技术。这种声全息场变换技术通过包围源的全息测量面做声压全息测量,然后借助源表面与全息面之间的空间场变换关系,由全息面声压重建源面的声场。近场声全息不仅可识别和定位噪声源,也可预测声源在声场中的辐射属性。近场声全息技术已广泛用于噪声源的定位与识别,特别是低频场源特性的判别、散射体结构表面特性和大型结构远场指向性预报等^[12]。

本试验在轮胎接地附近安置 8×8 共 64 通道的近场声全息传感器阵列,主要注重 2 000 Hz 以下的轮胎噪声源的定位,因此传感器阵列与胎面之间的距离为 15 cm,如图 5 所示。

近场声全息测试时,按照图 5 所示安置好声全息传感器阵列,当车速在每个速度下达到稳态后,使用 LMS 数据采集系统对声全息传感器阵列的信号连续采集 3 次,每次持续 15 s。如图 6 所示。

3.4 数据分析

采用 LMS Test. Lab 对近场、远场噪声进行处理和分析。由于每项测试均重复进行了 3 次,其中第 3 次的数据最为平稳,轮胎与转鼓之间磨合等随机因素的干扰最小,因此分析采用第 3 次测试数据。

3.4.1 稳态声压级计算

在 LMS Test. Lab 中,使用 0%重叠率、50 次能量平均的方式对时域信号进行稳态声压级计算。分别比较每个速度下 9 个近场噪声和 5 个远场噪声级,并统计未计权以及 A 计权之后的声压

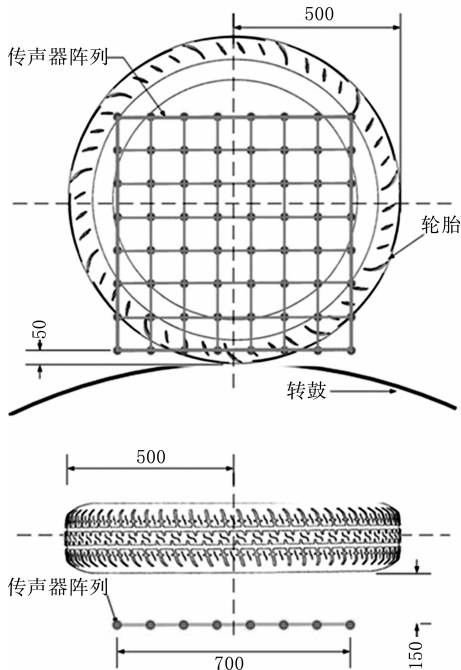


图 5 近场噪声全息测试

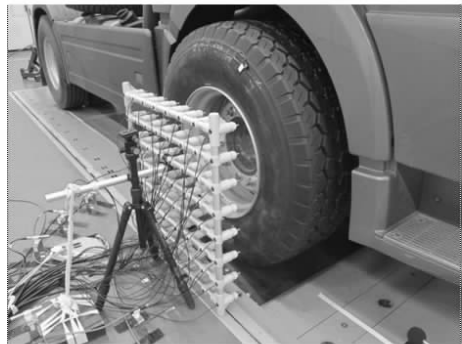


图 6 实车近场声全息试验

级,以获得噪声的空间指向特性,如图 7 所示。

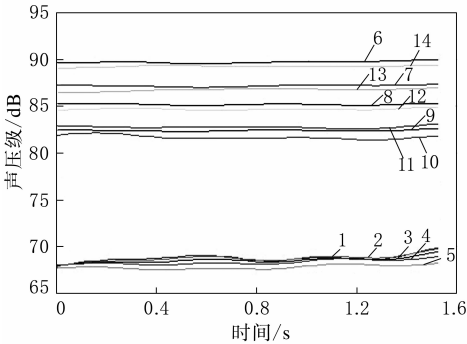
3.4.2 频谱及倍频程分析

使用 16 384 Hz 的带宽、1 Hz 的分辨率、Hanning 窗函数采样,对 9 个近场噪声和 5 个远场噪声进行声压级频谱分析,结果如图 8 所示。通过对单个麦克风采集到的频谱的特定频段进行分析,有助于区分不同类型的噪声来源。

同样方法进行 9 个近场噪声和 5 个远场噪声的 1/3 以及 1/12 倍频程分析,结果分别如图 9 和 10 所示。

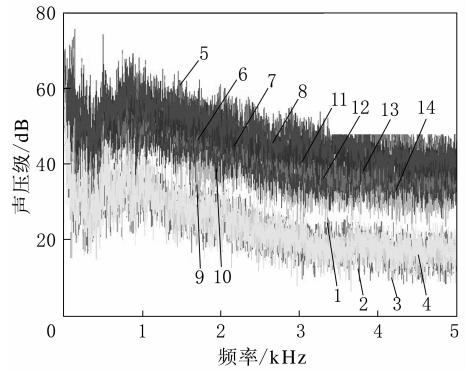
3.4.3 稳态速度瀑布图分析

在获得了各个速度下所有通道的稳态声压级后,找出近场及远场声压级最大的通道,并把 4 个



1—远场通过 1;2—远场通过 2;3—远场通过 3;4—远场通过 4;
5—远场通过 5;6—近场 0°;7—近场 30°;8—近场 45°;
9—近场 60°;10—近场 90°;11—近场 120°;12—近
场 135°;13—近场 150°;14—近场 180°。

图 7 稳态声压级



注同图 7。

图 8 噪声频谱分析

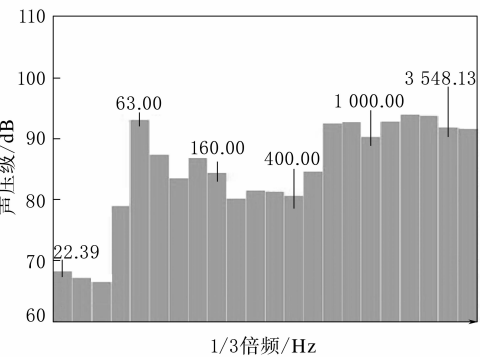


图 9 1/3 倍频程分析

稳态速度的频谱放在同一张瀑布图中,比较不同速度下的频谱,如图 11 所示。

3.4.4 频率-转速的彩色图

为了分离噪声频谱中与速度相关的成分,绘制噪声的频率-转速色差图,如图 12 所示。由图 12 可以看出,随着转速的增大,频率也增大的噪

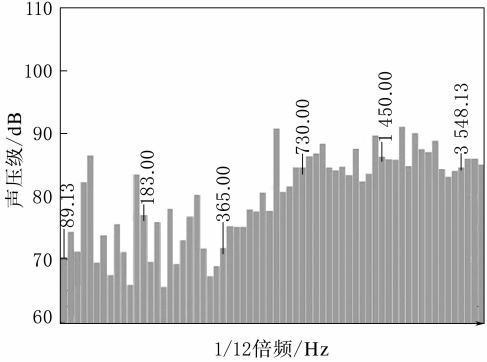
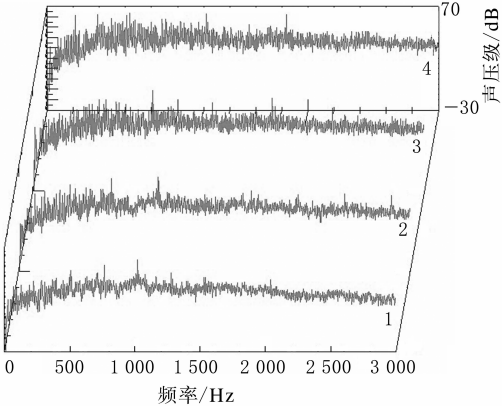


图 10 1/12 倍频程分析



速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$):1—50;2—70;3—90;4—120。

图 11 稳态频谱瀑布图

声成分依赖于转速,即图中不与横坐标垂直的噪声成分;随转速增大,频率基本不变的噪声成分不依赖于转速,即图中与横坐标垂直的噪声成分。依据色差图可以分辨出不同频率成分的噪声来源,如速度依赖性的噪声源于花纹块撞击、回弹以及轮胎制造产生的不均匀性;非速度依赖性的噪声源于轮胎自身模态振动或车辆悬架的振动。同时,能够在色差图中加入谐振阶次曲线帮助分析,

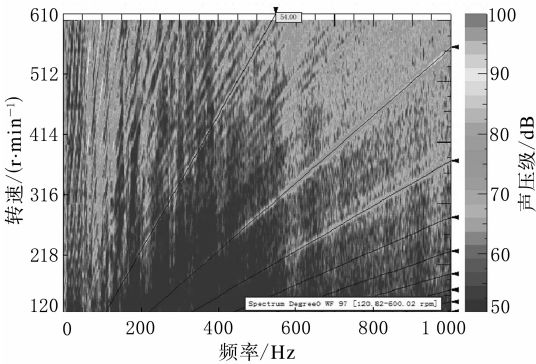


图 12 频率-转速色差图

基频阶次为 54 的噪声具有明显的谐振效应,而此条轮胎的花纹节距数恰好是 54。因此可以断定,此类噪声是花纹块接地撞击和离地回弹产生的速度依赖性噪声。

3.4.5 瞬态速度瀑布图分析

除了稳态频谱瀑布图,还可以建立瞬态降速过程的等时速间距的频谱瀑布图。图 13 所示为速度 $20 \sim 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的频谱瀑布图。通过观察瀑布图中各个速度下波峰的位置随速度变化的规律,可以看出噪声声压级对速度的依赖性。

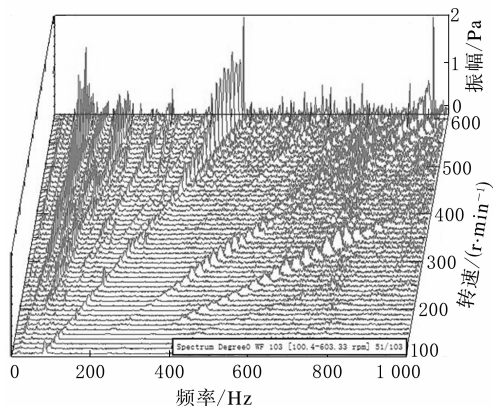


图 13 速度差为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的频谱瀑布图

3.4.6 声全息分析

根据频谱和色差图的分析结果,在各个试验速度中找出噪声出现较大峰值对应的频率,用声全息方法找到该频率对应的噪声源,由此可以验证不同频段噪声的发声机理。图 14 所示为速度为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、频率 357.7 Hz 的声源示意,可以看出此部分噪声集中在轮胎接地后端。

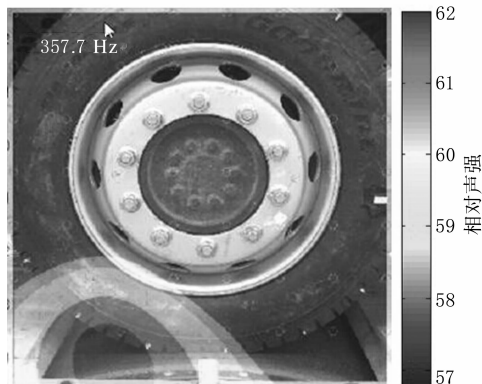


图 14 速度为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的低频声全息图

4 结论

采用远场、近场和近场声全息试验方法在半消声室进行了载重子午线轮胎室内噪声测试,得到如下结果。

(1)结合特定速度下的频谱图和频率-转速色差图可以观察到载重子午线轮胎噪声呈现明显的谐振规律、与速度相关的花纹块噪声以及与速度无关的结构振动噪声。

(2)载重子午线轮胎近场噪声具有指向性特征,接地后端和前端噪声较大,依次向接地侧面减弱,且接地后端大于接地前端。

(3)远场所测得的通过噪声可以模拟室外测试法的通过噪声,两者通过噪声的趋势一致。

(4)相同规格、不同花纹类型的轮胎噪声测试结果表明,块状花纹的噪声大于条状花纹 $4 \sim 6 \text{ dB}$;断面宽度对轮胎噪声有重要影响,断面宽度大的噪声明显较大。

(5)噪声随速度的提高明显增大,测试速度从 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高到 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,声压级增大 10 dB 以上。

(6)声全息法可清晰地显示出轮胎噪声在特定频段的发声部位,有助于识别不同类型的噪声声源。

参考文献:

- [1] Sandberg U, Ejsmont J A. Tyre/Road Noise Reference Book [M]. Kisa, Sweden: Informex, 2002.
- [2] 朱兴元. 轮胎的气泵噪声研究[J]. 噪声与振动控制, 2002, 22 (5): 26-27.
- [3] Plotkin K J, Montroll M L, Fuller W R. Generation of Tire Noise by Air Pumping and Carcass Vibration [A]. Proceedings of the International Conference Noise Control Engineering, Florida; 1980. 80.
- [4] Kindt P, De C F, Sas P, et al. Analysis of Tire/Road Noise Caused by Road Impact Excitations[A]. Proceedings of the International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress. Graz; 2008. 38.
- [5] Larsson K, Barrelet S, Kropp W. Modelling of Tangential Contact Forces[A]. Proc. of the International Congress on Acoustics (ICA). Seattle; 1998.
- [6] 范俊岩. 轮胎噪声研究的现状与发展[J]. 轮胎工业, 2006, 26 (4): 195-197.
- [7] Sandberg U, Ejsmont J A. Development of Three Methods for

Measurement of Tire/Road Noise Emission; Coast-by, Trailer and Laboratory Drum[J]. Noise Control Engineering Journal, 1986, 27(3): 68-88.

[8] 陈理君, 张兰红, 陈弘, 等. 轮胎/路面噪声的测定及分析方法[J]. 轮胎工业, 2008, 28(6): 338-342.

[9] 董芹, 关元洪. 轮胎车外噪声测试与评价方法[J]. 轮胎工业, 1999, 19(5): 259-263.

[10] 范俊岩. 轮胎噪声拖车测试法试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[11] 朱哲民, 龚秀芬, 杜功焕. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.

[12] 高旻. 近场声全息技术方法简介[J]. 现代物理知识, 2007, 19(5): 39-42.

收稿日期: 2014-08-24

Study on Noise Mechanism of Truck and Bus Radial Tire by Indoor Experiment

CHEN Ya-long, WANG Hao, FENG Xi-jin, WEI Yin-tao

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the semi-anechoic room, the far-field noise, near-field noise and near-field acoustical holography experiments for truck and bus radial tire were conducted by using silence drum with simulated road pattern. A detailed experimental scheme was built, including total sound pressure, noise spectrum, 1/3 octave bands, 1/12 octave bands, color-map and water-map. The analysis of the hybrid indoor noise showed that, the near-field noise of truck and bus radial tire had directional feature, the noise in the front end and rear end of tire ground contact area was higher, and the noise in the rear end was higher than that in the front end.

Key words: truck and bus radial tire; semi-anechoic room; near-field noise; far-field noise; near-field acoustical holography; sound intensity

普利司通投巨资在美国建工程机械轮胎厂

中图分类号: TQ336.1; F27 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com) 2014年11月19日报道:

普利司通公司已经扩大了在美国的巨型工程机械子午线轮胎制造规模, 美国的矿业公司将可以配备普利司通的重型载重轮胎。

普利司通美洲公司主席兼首席执行官 Gary Garfield 说: “刚刚盛大开工、斥资 9.7 亿美元的位于南加利福尼亚州艾肯县的越野子午线轮胎厂是有史以来普利司通在美国的单笔最大投资项目。” 13.9 万 m² (150 万平方英尺) 的工厂可生产规格为 49~63 英寸的轮胎, 轮胎高度达 2.4~4.0 m (8~13 英尺), 质量为 1 270~5 897 kg (2 800~13 000 磅)。

该工厂标志着普利司通公司首次在日本以外的地方投资兴建巨型工程机械子午线轮胎厂, 从而节省了成品轮胎运到美国长达 1 个月的运输时间。

普利司通公司副总裁、特种轮胎事业部部长

兼首席质量官 Tomohiro Fukuda 作为公司高管之一从日本启程前往艾肯县出席开工仪式。Fukuda 说: “该工厂开工是我们公司历史上的里程碑, 并且成为为矿业和集料客户提供优质产品业务的一部分。”

工程经理 Adam Barfoot 表示, 施工正从 2014 年 8 月开始, 尽管将增加一些设备用以提高效率, 但预计工厂建设仍会在 2015 年才可完工, 到 2019 年才能完全达产。虽然没有 24 h 连续施工, 但目前保持着每周 7 d 的工作时间。

在工厂开工和剪彩仪式过后, 施工在轻松的气氛中进行。加州当地官员参观了工厂, 并沿途听取员工们的施工过程讲解。(美国 and 加拿大商业集团) 普利司通美洲轮胎运营公司分部总裁 Kurt Danielson 表示, 公司将邀请矿业和集料客户及经销商来参观工厂。Danielson 说: “我认为我们的客户会对此感到兴奋, 他们会觉得这是一件好事。”

(孙斯文摘译 吴秀兰校)