

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.044

# 基于简易轮胎试验模态测试的滚阻特性评价方法

朱成伟<sup>1</sup> 刘洋<sup>2</sup> 庄晔<sup>1</sup> 高学亮<sup>1</sup> 陈强<sup>1</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 长春孔辉汽车科技股份有限公司, 长春 130012)

**摘要:** 通过对现阶段评价轮胎滚阻特性的总结及对轮胎滚阻产生机理的分析, 提出了一种基于简易轮胎试验模态测试的滚阻特性评价方法, 利用半功率带宽法对轮胎试验模态幅频特性进行计算, 得到不同轮胎的阻尼比, 以此评价其滚阻特性。试验结果表明, 轮胎试验模态幅频特性的半功率带宽与其滚动阻力有密切关系, 且呈正相关, 其半功率带宽越大, 一阶共振能量越分散, 轮胎滚动阻力系数就越大。该结果进一步表明, 不同轮胎的模态阻尼比与其滚动阻力系数之间具有很好的一致性, 轮胎的阻尼比越大, 其滚动阻力系数越大。本方法能够定性评价轮胎滚阻特性, 从而提高轮胎滚动阻力测试效率, 降低测试成本。

**关键词:** 轮胎滚阻; 模态参数; 压电薄膜; 半功率带宽

**中图分类号:** U463.341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0371-08

## Evaluation of Rolling Resistance Characteristics Based on Simple Tire Experimental Modal Test

ZHU Chengwei<sup>1</sup> LIU Yang<sup>2</sup> ZHUANG Ye<sup>1</sup> GAO Xueliang<sup>1</sup> CHEN Qiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. KH Automotive Technologies (Changchun) Co., Ltd., Changchun 130012, China)

**Abstract:** Tire rolling resistance has a great impact on the fuel economy of automobiles, accounting for about 20% ~ 30% of the fuel consumption of automobiles. Evaluation of tire rolling resistance had become a difficult problem to solve for the industry. Aiming at the problem of tire rolling resistance testing at the present stage and the mechanism of tire rolling resistance caused by hysteresis effect, a tire rolling resistance evaluation method based on simple experimental modal was proposed. The rolling resistance characteristics of different tire modes were evaluated by calculating different tire modal damping characteristics by using half-power bandwidth method. The experimental results showed that the half-power bandwidth of the different tires amplitude frequency characteristics was closely related to their rolling resistance coefficient and kept positive correlation, the larger the half-power bandwidth of the tire mode amplitude frequency characteristic was, the more dispersed the energy of the first-order resonance energy was, and the larger the tire rolling resistance coefficient was. Furthermore, the experimental results showed that there was good consistency between the modal damping ratio of different tires and tires rolling resistance coefficient. The larger the tire damping ratio was, the larger the tire rolling resistance coefficient was. Therefore, it proved that the method can qualitatively evaluate the tire rolling resistance characteristics, which not only improved the efficiency of tire rolling resistance testing, but also reduced the cost of testing.

**Key words:** tire rolling resistance coefficient; modal parameters; piezoelectric film; half-power bandwidth

## 0 引言

随着国家对于环境保护和能源消耗的日趋重

视, 车辆消耗的能源成为国家重要监测对象。而轮胎滚动阻力占车辆油耗的 20% ~ 30%, 控制轮胎滚动阻力对车辆燃油经济性和环境保护尤为重要, 因

收稿日期: 2019-03-13 修回日期: 2019-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0103704、2018YFB0104804)

作者简介: 朱成伟(1989—), 男, 博士生, 主要从事轮胎动力学研究, E-mail: zcw1989@163.com

通信作者: 庄晔(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车动力学及控制研究, E-mail: yzhuang\_cn@163.com

此低滚阻绿色轮胎已成为国内外研究热点<sup>[1-5]</sup>。影响轮胎滚动阻力因素较多,如材料配方、轮胎结构、载荷、胎压、温度、路况等,这成为研究轮胎滚动阻力的难点之一<sup>[6-11]</sup>,因此,测量轮胎滚阻特性成为本领域的研究重点。目前,由于轮胎滚动阻力在室外道路测试的各种工况参数可控性差,无法形成规范的操作流程,滚动阻力测试精度低<sup>[12]</sup>。因此,轮胎滚动阻力测试主要在室内利用台架试验完成。测试试验机分为转鼓式和平带式。平带式试验机在大负荷、高速运动状态下难以满足路面所有的刚度和平整度要求,测试效果不理想<sup>[13-14]</sup>。目前轮胎滚动阻力测试多是利用转鼓式试验机完成。测试原理为:利用传感器采集轮胎滚动过程中不同变量参数,并通过换算关系得到轮胎滚动阻力<sup>[15-16]</sup>。

国内外研究人员开展了大量轮胎滚动阻力的理论及试验研究工作,并取得一定成果<sup>[17-25]</sup>。国内外轮胎滚动阻力研究主要集中在室内测试方法和有限元模型上,而对轮胎滚阻特性的新评价方法却鲜有报道。

传统轮胎模态参数试验方法主要依赖昂贵的信号采集仪及相关软件,同时需要多个加速度传感器和振动传感器连接多个信号通道一起采集数据信息,试验过程需多次敲击激励轮胎,过程复杂。为了解决评价轮胎滚阻特性问题,本文提出一种基于简易轮胎试验模态测试的滚阻特性评价方法。

## 1 轮胎滚动阻力产生机理

轮胎滚动阻力普遍定义为轮胎在路面上滚过单位距离时转变为热量的机械能<sup>[26-27]</sup>。滚动的轮胎可以简化为周向和径向阻尼和刚度的组合模型<sup>[26]</sup>,如图1所示。滚动的轮胎每转动一个周期,接触区的径向和周向刚度和阻尼就会做功,产生能量转换,并损耗部分能量,损耗的能量产生了轮胎滚阻动力。由于轮胎与地面接触时产生弹性变形,引起轮胎橡胶材料产生粘性迟滞效应,而轮胎的粘性迟滞效应与轮胎阻尼特性关系密切<sup>[26]</sup>,弹性体滞回圈如图2所示, $\sigma$ 和 $\varepsilon$ 为应力和应变,弹性体滞回圈的面积代表能量损耗。

## 2 轮胎阻尼特性

### 2.1 计算原理

轮胎阻尼认为是结构阻尼<sup>[21,28-31]</sup>。对于结构阻尼来说,半功率带宽法是一种计算结构阻尼特性的有效方法之一<sup>[32-34]</sup>。对单自由度系统来说,在激

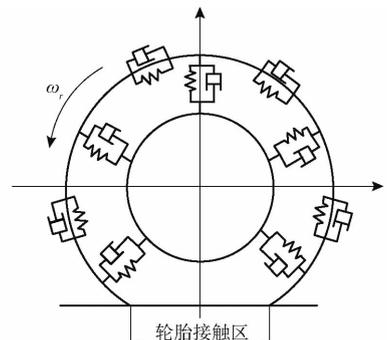


图1 轮胎滚动阻力产生示意图

Fig.1 Tire rolling resistance schematic diagram

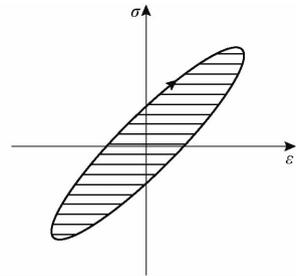


图2 弹性体滞回圈

Fig.2 Elastic hysteresis loop

励力  $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$  作用下,其运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中  $m$ ——质量,kg  $c$ ——阻尼系数, $N \cdot s/m$

$k$ ——刚度, $N/m$   $x$ ——位移,m

$\dot{x}$ ——速度, $m/s$   $t$ ——时间,s

$\ddot{x}$ ——加速度, $m/s^2$

$F(t)$ ——激励力,N

$F_0$ ——激励力幅值,N

$\omega$ ——激励力频率,rad/s

小阻尼情况下,对式(1)求解得该系统总响应为

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} (B_1 \cos(\omega_d t) + B_2 \sin(\omega_d t)) + B \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

其中  $\omega_n = \sqrt{k/m}$   $\zeta = c/(2m\omega_n)$   $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

式中  $B_1, B_2$ ——自由振动系数,m

$B$ ——强迫振动振幅,m

$\varphi$ ——强迫振动相位角,rad

$\omega_d$ ——有阻尼固有频率,rad/s

$\zeta$ ——相对阻尼百分比,%

$\omega_n$ ——无阻尼固有频率,rad/s

式(2)右边第1项为自由振动部分,第2项为强迫振动, $B_1$ 和 $B_2$ 由初始条件决定,将 $t=0$ 时的 $x_0$ 及 $\dot{x}_0$ 代入式(2)并求其对 $t$ 的一阶导数,则

$$B_1 = x_0 + B \sin \varphi$$

$$B_2 = \frac{\dot{x}_0 + \zeta \omega_n (x_0 + B \sin \varphi) - B \omega \cos \varphi}{\omega_d}$$

其强迫振动振幅和相位角为

$$B = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\zeta v)^2}} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \arctan \frac{2\zeta v}{1 - v^2} \quad (4)$$

其中  $v = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n}$       $\zeta = \frac{c}{2\omega_n m} = \frac{c}{c_c}$

式中  $v$ ——频率比

$c_c$ ——临界阻尼系数

当发生稳态强迫振动时,自由振动消失后,强迫振动为系统响应的主要成分,即式(2)变为

$$x = B\sin(\omega t - \varphi) \quad (5)$$

在幅频特性分析中动力放大系数为

$$\beta = \frac{B}{B_0}$$

其中  $B_0 = F_0/k$

式中  $B_0$ ——激振力幅产生的静位移, m

$\beta$ ——动力放大系数

则将式(3)转换为

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\zeta v)^2}} \quad (6)$$

对于小阻尼系统,系统发生共振时  $v = 1$ , 则

$$\beta_{\max} = Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (7)$$

式中  $Q$ ——品质因数,反映阻尼和共振峰陡峭程度

在幅频特性中,共振峰频率两侧的幅频特性曲线可近似认为是对称的,如图 3 所示,在峰值  $Q$  的  $1/\sqrt{2}$  倍处水平线交幅频曲线于  $q_1$  和  $q_2$  两点,该两点为半功率点。两点所对应的频率之差为半功率带宽,则

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$$

式中  $\omega_1$ ——左频率, rad/s

$\omega_2$ ——右频率, rad/s

由式(6)、(7)可得半功率点

$$\frac{Q}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\zeta v)^2}} \quad (8)$$

式(8)的解为  $v_1 = 1 - \zeta$ ,  $v_2 = 1 + \zeta$ , 将其代入式(7), 可得

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{\omega_n}{\omega_2 - \omega_1} \quad (9)$$

因此得到系统的幅频特性曲线,利用半功率带宽原理,可估算出该系统的阻尼比<sup>[33]</sup>。

## 2.2 试验

为了得到轮胎模态参数的阻尼特性,设计了一

种简易基于压电薄膜的轮胎模态阻尼测试方法,试验装置由多条带轮辋轮胎、轮胎支架、压电薄膜 PVDF、电荷放大器、NI PCIe6323 型采集卡、计算机、力锤及 Matlab/Simulink 采集软件等部分组成,如图 4 所示。

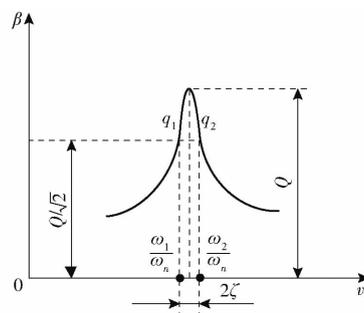


图 3 半功率带宽法原理

Fig. 3 Half-power bandwidth method principle

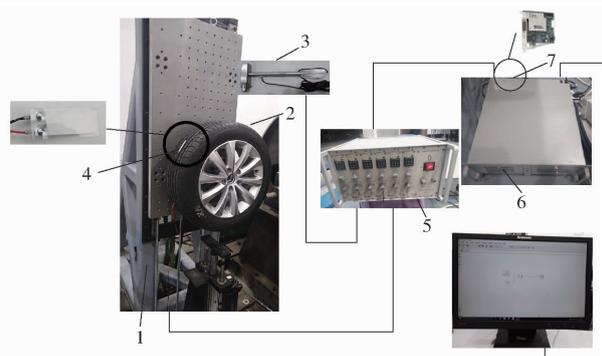


图 4 轮胎模态阻尼试验装置

Fig. 4 Tire modal damping test device

1. 轮胎支架 2. 轮胎 3. 力锤 4. 压电薄膜 5. 电荷放大器
6. 计算机 7. NI PCIe6323 型采集卡

基于压电薄膜的轮胎模态阻尼试验过程如下:首先采用轮胎悬置中心固定方式,压电薄膜 PVDF 沿着轮胎纵向方向贴置,将轮胎轮辋安装于轮胎支架上。其次,压电薄膜连接电荷放大器的输入端,电荷放大器输出端连接到 NI PCIe6323 型采集卡采集信号端口,并根据压电薄膜参数设定电荷放大器上的精度系数和标定系数。然后,将 NI PCIe6323 型采集卡置于计算机内部,实现与计算机实时通讯,使用 Matlab/Simulink 采集模块与 NI PCIe6323 型采集卡通讯进行数据采集。最后,设定 Simulink 采集模块相关参数实现与 NI PCIe6323 型采集卡实时通讯采集,力锤沿着轮胎胎面径向方向敲击激励一次即可完成轮胎模态试验数据采集。力锤敲击激励每条轮胎是单点激励且仅需一个压电薄膜传感器,区别于传统轮胎试验模态测试方法。由于 PVDF 压电薄膜粘贴在轮胎的位置和力锤敲击轮胎位置对轮胎模态试验结果有一定影响。经过反复试验验证,将压电薄膜纵向粘贴在轮胎胎宽中心位置,力锤敲击轮

胎的部位与压电薄膜纵向距离为 30 mm 时得到的轮胎试验模态参数的试验数据比较理想。

PVDF 压电薄膜作为一种柔性压电材料具有柔韧性好, 压电性能稳定, 有较高电压灵敏度, 其属于动态敏感材料, 对于机械应力或应变变化有很高的响应度, 特别适合测量因冲击负荷而发生的变形工况, 有着较宽频率响应范围, 覆盖 0.1 Hz ~ 1 GHz。考虑到 PVDF 压电薄膜以上诸多优点, 特别是高频响应好, 质量轻且灵敏度高, 对轮胎变形影响很小的优点<sup>[35-36]</sup>, 本文采用基于 PVDF 压电薄膜传感器的轮胎模态试验, 其结构如图 5 所示。

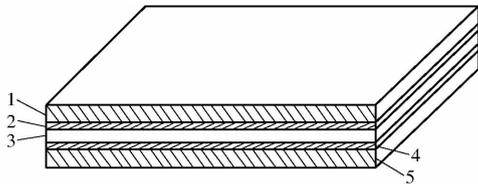


图 5 PVDF 压电薄膜结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of PVDF piezoelectric film

1, 5. 保护层 2, 4. 电极层 3. PVDF 压电薄膜

### 3 轮胎滚动阻力测试

#### 3.1 测试原理

根据轮胎滚动阻力测试相关文献 ISO 28580:2009<sup>[16-17]</sup> 以及欧标 R117:2014, 轮胎滚动阻力测试方法包括减速度法、力法、功率法和扭矩法。由于力法测试精度较高, 计算方便, 故采用以力法为依据的测定轮胎滚动阻力系数测试。轮胎滚动阻力测试原理如图 6 所示。

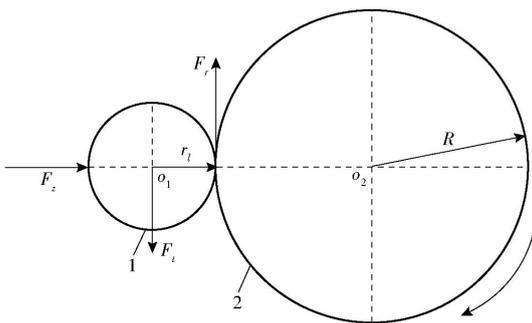


图 6 轮胎滚动阻力测试示意图

Fig. 6 Tire rolling resistance test diagram

1. 轮胎 2. 转鼓

轮胎滚动阻力系数可表示为

$$C_{rr} = \frac{F_r}{F_z} \quad (10)$$

式中  $C_{rr}$ ——轮胎滚动阻力系数, N/kN

$F_r$ ——轮胎滚动阻力, N

$F_z$ ——轮胎垂向负荷, kN

轮胎在稳定负荷状态下, 由力传感器测得轮胎轴力  $F_t$  和轮胎滚动阻力  $F_r$  对转鼓中心  $o_2$  取矩, 根

据平衡原理, 得

$$F_r R = F_t (r_t + R) \quad (11)$$

$$\text{即} \quad F_r = F_t (1 + r_t/R) \quad (12)$$

式中  $r_t$ ——稳定负荷状态下轮辋中心与转鼓外表面距离, m

$R$ ——转鼓半径, m

考虑摩擦、空气等附加损失力, 将式 (12) 转换为

$$F_r = F_t (1 + r_t/R) - F_{pl} \quad (13)$$

式中  $F_{pl}$ ——附加损失力, N

在稳定分离负荷状态下, 轮胎分离负荷在 100 ~ 200 N 为宜, 附加损失力  $F_{pl}$  可表示为

$$F_{pl} = F'_t (1 + r'_t/R) \quad (14)$$

式中  $F'_t$ ——稳定分离载荷状态下轮胎轴力, N

$r'_t$ ——稳定分离载荷状态下轮辋中心与转鼓外表面距离, m

轮胎滚动阻力  $F_r$  是在试验温度 25℃ 下测定, 若室内温度不是 25℃, 轮胎滚动阻力需进行温度修正, 可表示为

$$F_{r25} = F_r [1 + K_t (T - 25)] \quad (15)$$

式中  $F_{r25}$ ——轮胎处于 25℃ 的滚动阻力, N

$K_t$ ——修正系数

$T$ ——测试时温度, °C

#### 3.2 滚阻试验

依托吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室轮胎滚动阻力系数测试系统进行轮胎滚阻系数试验, 如图 7 所示。该轮胎滚动阻力系数测试系统具有乘用车和商用车轮胎两个工位, KistlerS220 型三轴力传感器置于轮轴上与轮胎轮辋连接固定测试轮胎  $x$  和  $z$  方向力信息, 此外温度传感器悬置于轮胎附近实时监测采集轮胎温度以便进行轮胎滚动阻力校正。利用乘用车轮胎工位试验轮胎滚阻系数, 样本为 5 条轮胎。

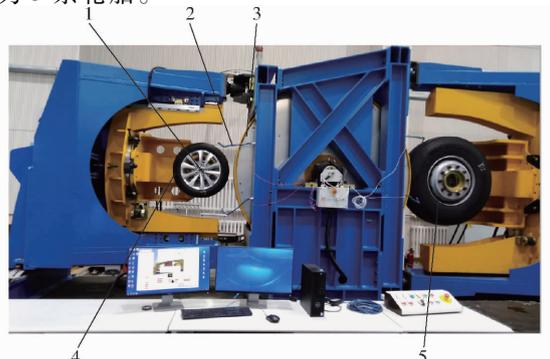


图 7 轮胎滚动阻力系数测试系统

Fig. 7 Tire rolling resistance coefficient test system

1. 力传感器 2. 温度传感器 3. 转鼓 4. 乘用车轮胎工位  
5. 商用车轮胎工位

轮胎滚动阻力系数测试过程如下:将轮胎轮辋安装在轮轴上,开启计算机进入操作软件和驱动电机,相关参数及轮胎胎压如表1所示。轮胎垂向负荷为轮胎负荷的80%,驱动电机驱动转鼓正转驱动轮胎进行30 min 升温转动,待轮胎胎面温度稳定后,转鼓转速稳定在80 km/h 时,采集10 s 轮轴力  $F_{\nu}$ ,为了消除由于摩擦引起的损失力,将轮胎垂向

负荷降至分离负荷150 N 时,转鼓转速保持不变,采集10 s 轮轴力  $F'_{\nu}$ ,待轮胎正转的试验数据采集结束后,将驱动电机反转,各项参数工况与正转工况相同,分别采集稳态负荷下10 s 轮轴力  $F_{\nu}$  和分离负荷下10 s 轮轴力  $F'_{\nu}$ 。无论是轮胎正转与反转,温度传感器实时监测及采集轮胎周围温度以便进行轮胎滚动阻力校正。

表1 轮胎滚阻系数测试相关参数

Tab.1 Tire rolling resistance test related parameters

参数	轮胎型号	轮辋型号	升温时间/min	胎压/kPa	负荷能力/%	转鼓速度/(km·h <sup>-1</sup> )	热平衡时间/h
数值/型号	205/55/R16	7jx16	30	210	80	80	3

## 4 试验结果

### 4.1 轮胎试验模态数据

轮胎模态试验的试样为5个不同滚动阻力系数的轮胎,分别为C1、C2、C3、C4、C5,利用设计的简易基于轮胎试验模态阻尼测试装置,得到不同轮胎模态试验的时域信号如图8所示。

对5个轮胎模态试验的时域数据进行幅频特性分析,得到对应轮胎模态的幅频特性曲线,纵坐标为线性坐标,同时对幅频特性曲线的第一阶共振峰进行基于半功率带宽方法的分析,如图9所示。

由图9可知,锤击法对轮胎进行单点激励模态试验能够把轮胎第一阶固有频率激发出来,可以研究轮胎阻尼特性和轮胎滚动阻力。因此对轮胎试验模态数据的幅频特性曲线进行基于半功率带宽法来计算不同轮胎模态阻尼,是对每条轮胎的幅频特性曲线第一阶峰值进行半功率带宽提取,图9中实线

是轮胎幅频特性曲线,根据半功率带宽原理,虚线部分为频率峰值的  $1/\sqrt{2}$  处频率,计算结果如表2所示,其中  $f_1$  为左频率,  $f_2$  为右频率,  $f_0$  为峰值频率,  $f_2 - f_1$  为半功率带宽。

### 4.2 轮胎滚动阻力系数结果分析

根据上述轮胎滚动阻力系数的力法试验方法得到5个轮胎滚动阻力系数结果如表3所示,由于轮胎结构存在不对称性,轮胎滚动阻力系数力法测试时需要轮胎正转与反转两个工况完成,由于垂向负荷是实时采集,轮胎正转与反转工况的垂向负荷有微小浮动但基本不影响测试结果,对应轮胎滚动阻力的试验结果正值与负值,滚动阻力系数正值与负值,滚动阻力系数正值与负值两者绝对值的平均值作为最终轮胎滚动阻力系数。

根据表2的半功率带宽和表3轮胎滚阻系数结果得到C3轮胎半功率带宽最大,其滚阻系数也是最大的,而C1轮胎的半功率带宽最小,滚阻系数也

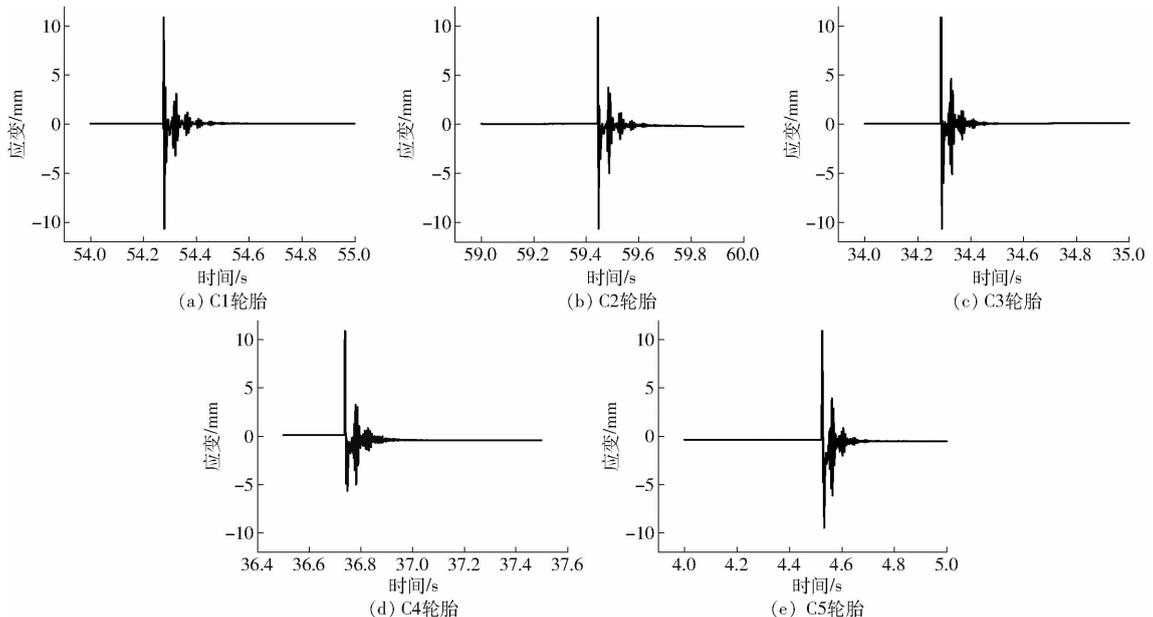


图8 不同轮胎的模态试验时域信号

Fig.8 Different tires time domain signals

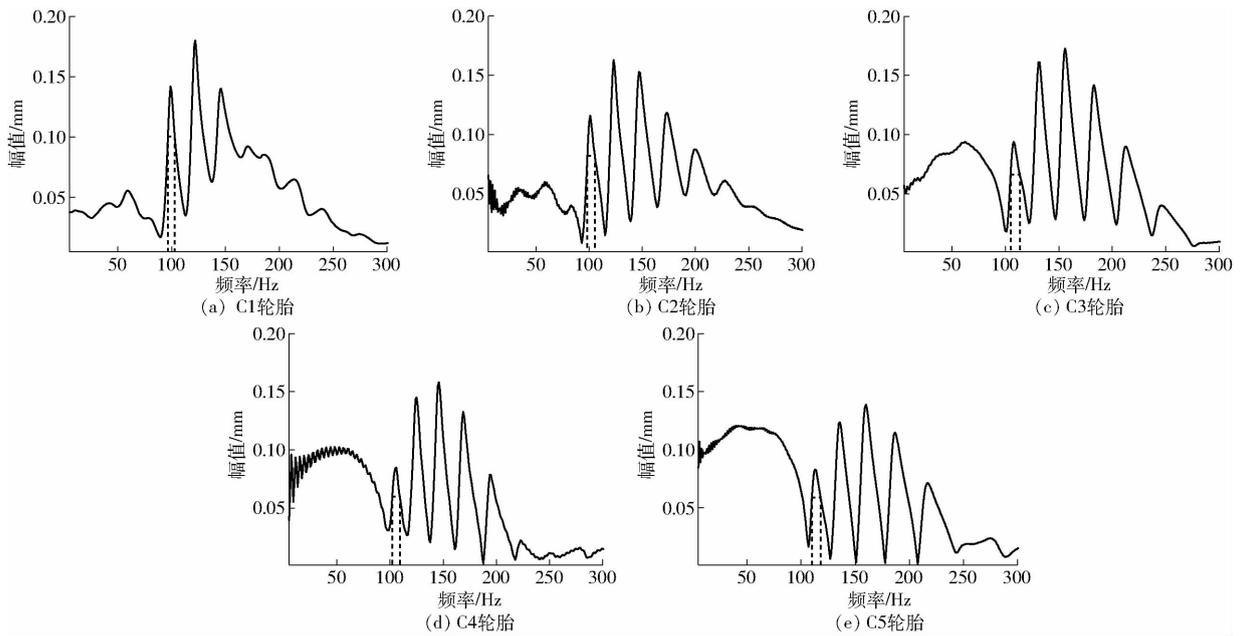


图9 不同轮胎模态幅频特性曲线

Fig. 9 Different tires modal amplitude frequency curves

表2 不同轮胎阻尼比结果

Tab. 2 Different tires damping ratio results

轮胎	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	$f_0/\text{Hz}$	$f_2 - f_1/\text{Hz}$	$1/Q$	$\zeta/\%$
C1	96.488 3	102.675 6	99.581 95	6.187	0.062 132 746	3.11
C2	98.160 5	105.183 9	101.672 2	7.023	0.069 078 863	3.45
C3	104.807 7	113.294 3	109.051 0	8.487	0.077 822 303	3.89
C4	102.019 2	109.172 2	105.595 7	7.153	0.067 739 501	3.39
C5	109.991 6	118.143 8	114.067 7	8.152	0.071 468 084	3.57

表3 不同轮胎滚动阻力系数测试结果

Tab. 3 Test results of different tires rolling resistance coefficient

轮胎	温度/ $^{\circ}\text{C}$	垂向负荷/ $\text{kN}$		滚动阻力/ $\text{N}$		滚阻系数/ $(\text{N}\cdot\text{kN}^{-1})$		最终滚阻系数/ $(\text{N}\cdot\text{kN}^{-1})$
		正转	反转	正转	反转	正转	反转	
C1	19	5.640 3	5.628 8	39.594 0	-52.733 9	7.019 9	-9.368 5	8.19
C2	18	5.622 9	5.562 4	41.174 5	-53.901 9	7.326 2	-9.781 2	8.55
C3	20	5.061 8	5.052 7	49.029 6	-61.517 3	9.686 2	-12.175 2	10.93
C4	19	5.021 4	5.016 9	36.326 7	-46.464 6	7.234 4	-9.261 8	8.25
C5	19	5.034 8	5.027 5	48.700 1	-59.403 9	9.672 6	-11.815 8	10.74

是最小,从整体来看,轮胎模态幅频特性曲线的半功率带宽与轮胎滚动阻力有密切关系且为正相关关系。

根据表2的轮胎阻尼比和表3轮胎滚阻系数结果得到C3轮胎的阻尼比最大,其滚阻系数也是最大的,而C1轮胎的阻尼比最小,其滚阻系数也是最小的,整体来看,5个轮胎的阻尼比与其滚阻系数呈正相关关系。

## 5 结论

(1)利用轮胎试验模态的阻尼特性评价轮胎滚动阻力。提出一种简易的基于压电薄膜传感器测试

轮胎模态阻尼的试验方法。通过此测试方法,利用半功率带宽原理对不同轮胎模态阻尼特性进行试验,用不同轮胎模态阻尼评价轮胎滚动阻力系数。不同轮胎的阻尼比与滚动阻力系数具有很好的一致性,两者之间保持正相关关系。通过计算轮胎阻尼比能够定性评价轮胎滚动阻力。

(2)对不同轮胎进行模态试验时得到半功率带宽,发现不同轮胎幅频特性的半功率带宽与轮胎滚阻系数存在着正相关关系。轮胎模态幅频特性的半功率带宽越大,一阶峰值坡度越小,一阶共振处的能量越分散,滚阻系数越大;反之,轮胎模态幅频特性的半功率带宽越小,一阶模态峰值坡度越大,一阶共

振处的能量越集中,轮胎滚阻系数越小。表现为轮胎的半功率带宽越大,轮胎滚阻系数越大。因此,也可以利用轮胎模态试验的幅频特性半功率带宽评价其滚阻特性。

## 参 考 文 献

- [1] 王登祥. 轮胎滚动阻力文献述评[J]. 轮胎工业, 1997, 17(12): 707-712.  
WANG Dengxiang. Review for papers on tire rolling resistance[J]. Tire Industry, 1997, 17(12): 707-712. (in Chinese)
- [2] EHALL D, MORELAND J C. Fundamentals of rolling resistance[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 74(3): 525-539.
- [3] ANDERSEN L G, LARSEN J K, FRASER E S, et al. Rolling resistance measurement and model development[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 141(2): 04014075.
- [4] BARRAND J, BOKAR J. Reducing tire rolling resistance to save fuel and lower emissions[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2008, 1(1): 9-17.
- [5] GUILLOU M, BRADLEY C. Fuel consumption testing to verify the effect of tire rolling resistance on fuel economy [C]//SAE 2010 World Congress & Exhibition. United States, 2010.
- [6] SCHURING D J. The rolling loss of pneumatic tires[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1980, 53(3): 600-727.
- [7] 王泽鹏, 高峰, 徐国艳, 等. 汽车轮胎温度场影响因素建模与试验分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 37-41.  
WANG Zepeng, GAO Feng, XU Guoyan, et al. Modeling and numerical analysis of temperature field of automobile tire and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 37-41. (in Chinese)
- [8] EJSMONT J, TARYMA S, RONOWSKI G, et al. Influence of load and inflation pressure on the tyre rolling resistance[J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(2): 237-244.
- [9] MAMMETTI M, GALLEGOS D, FREIXAS A, et al. The influence of rolling resistance on fuel consumption in heavy-duty vehicles[C]//SAE International, 2013.
- [10] 初亮, 李杰, 王庆年, 等. 高速滚动轮胎表面稳态温度场的实验研究[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 22-26.  
CHU Liang, LI Jie, WANG Qingnian, et al. Study on steady-state temperature field of a high rolling automobile tire[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6): 22-26. (in Chinese)
- [11] 王建强, 戴建国, 高蔚. 台试轮胎滚动阻力模型应用研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 35-38.  
WANG Jianqiang, DAI Jianguo, GAO Wei. Application of bench-based rolling resistance of tires model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 35-38. (in Chinese)
- [12] 叶进雄. 全钢载重子午胎滚动阻力有限元仿真与试验分析[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
YE Jinxiang. FE modeling and validation of all-steel radial truck tire rolling resistance [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [13] CHELI F, BRAGHIN F, BRUSAROSCO M, et al. Design and testing of an innovative measurement device for tyre-road contact forces[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 1956-1972.
- [14] ORTIZ A, CABRERA J A, CASTILLO J, et al. Analysis and evaluation of a tyre model through test data obtained using the IMM tyre test bench[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(Supp.): 241-252.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 汽车轮胎滚动阻力试验方法单点试验和测量结果的相关性: GB/T 29040—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [16] International Standard Organization. Passenger car, truck and bus tyres-methods of measuring rolling resistance single point test and correlation of measurement results; ISO 28580—2009[S]. Switzerland: ISOCopyright Office, 2009.
- [17] GLEMMING D, BOWERS P. Tire testing for rolling resistance and fuel economy[J]. Tire Science and Technology, 1974, 2(4): 286-311.
- [18] ABE A, KAMEGAWA T, NAKAJIMA Y. Optimum young's modulus distribution in tire design [J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(3): 204-219.
- [19] BECKER A, DORSCH V, KALISKE M, et al. A material model for simulating the hysteretic behavior of filled rubber for rolling tires[J]. Tire Science and Technology, 1998, 26(3): 132-148.
- [20] 管迪华, 代易宁, 谢先海. 利用试验模态参数建立轮胎滚动模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1138-1142.  
GUAN Dihua, DAI Yining, XIE Xianhai. Tire modeling of rolling properties using experimental modal parameters[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(8): 1138-1142. (in Chinese)
- [21] 管迪华, 曾祥生, 范成建. 轮胎动态模型的阻尼和对滚动阻力及动态响应影响的分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(7): 643-646.  
GUAN Dihua, ZENG Xiangsheng, FAN Chengjian. An analysis on different types of damping in tire dynamic model and their effects on rolling resistance and dynamic responses of tire[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(7): 643-646. (in Chinese)
- [22] 危银涛, 刘宇艳, 杜星文, 等. 子午线轮胎滚动阻力与温度场非线性有限元分析[J]. 轮胎工业, 1998, 18(6): 10-15.  
WEI Yintao, LIU Yuyan, DU Xingwen, et al. Non-linear FEA of rolling resistance and temperature profile for radial tire[J]. Tire Industry, 1998, 18(6): 10-15. (in Chinese)
- [23] WEI Y T, TIAN Z H, DU X. A finite element model for the rolling loss prediction and fracture analysis of radial tires[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(4): 250-276.
- [24] DERAFFSHPOUR S, MARDANI A, VALIZADEH M. Evolutionary algorithms application for improving the tire rolling

- resistance based on Wismer-Luth model[J/OL]. *Neural Computing and Applications*, 2019. <http://doi.org/10.1007/s00521-019-04012-3>.
- [25] TAGHAVIFAR H, MARDANI A, KARIM-MASLAK H, et al. Artificial neural network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(8): 3544 – 3551.
- [26] GENT A N, WALTER J D. The pneumatic tire [M]. Washington D. C. : U. S. Department of Transportation, 2006.
- [27] PACEJKA H B. Tire and vehicle dynamics[M]. Butterworth-Heinemann; Elsevier, 2012.
- [28] YAM L, SHANG J, GUAN D, et al. Study on tyre rolling resistance using experimental modal analysis[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2002, 30(3): 251 – 262.
- [29] YAM L, GUAN D, ZHANG A. Three-dimensional mode shapes of a tire using experimental modal analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4): 369 – 375.
- [30] GUAN D, YAM L, MIGNOLET M, et al. Experimental modal analysis of tires[J]. *Experimental Techniques*, 2000, 24(6): 39 – 45.
- [31] 刘任先. 拖拉机轮胎刚度和阻尼特性研究[J]. *农业机械学报*, 1988, 19(2): 17 – 24.  
LIU Renxian. Study of tractor tire stiffness and damping characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1988, 19(2): 17 – 24. (in Chinese)
- [32] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [33] THOMSON W T. Theory of vibration with applications [M]. London; Taylor & Francis, 2010.
- [34] 王慧, 刘正士. 一种识别结构模态阻尼比的方法[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 201 – 202, 169.  
LIU Hui, LIU Zhengshi. A method of identifying structural modal damping ratio[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 201 – 202, 169. (in Chinese)
- [35] 毛海彪. 基于PVDF压电薄膜胎内传感器的有限元纵滑仿真及压电解算[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
MAO Haibiao. Simulation and modeling of the in-tire sensor under longitudinal slip with PVDF film[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [36] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量PVDF阵列传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 167 – 171.  
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 167 – 171. (in Chinese)

(上接第 343 页)

- [15] 郭文川, 林碧莹. 牛奶含水率介电谱结合化学计量学检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 249 – 255.  
GUO Wenchuan, LIN Biying. Detecting moisture content of cow's milk using dielectric spectra and chemometrics [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 249 – 255. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160935&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160935&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.035. (in Chinese)
- [16] GUO W, TRABELSI S, NELSON S O, et al. Storage effects on dielectric properties of eggs from 10 to 1 800 MHz[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(5): 335 – 340.
- [17] 郭文川, 赵志翔, 杨沉陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 188 – 193.  
GUO Wenchuan, ZHAO Zhixiang, YANG Chenchen. Moisture meter for coarse cereals based on dielectric properties [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 188 – 193. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130533&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130533&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.033. (in Chinese)
- [18] GUO W, ZHU X, LIU Y, et al. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(2): 275 – 281.
- [19] CHUA H S, PARKINSON G, HAIGH A D, et al. A method of determining the moisture content of bulk wheat grain [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1155 – 1158.
- [20] 郭文川, 康飞, 朱新华. 频率、温度和 大豆蛋白对牛乳介电特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 274 – 278.  
GUO Wenchuan, KANG Fei, ZHU Xinhua. Influence of frequency, temperature and soy protein on dielectric properties of raw milk [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 274 – 278. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151036&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151036&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.036. (in Chinese)
- [21] 郭文川, 吕俊峰, 谷洪超. 微波频率和温度对食用植物油介电特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 124 – 129.  
GUO Wenchuan, LÜ Junfeng, GU Hongchao. Effect of frequency and temperature on microwave dielectric properties of edible vegetable oils [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 124 – 129. (in Chinese)
- [22] NELSON S O. Density-permittivity relationships for powdered and granular materials [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(5): 2033 – 2040.