

# 基于动态力传递特性的轮胎高速均匀性预测方法

刘凤阳<sup>1</sup>, 于 萍<sup>2</sup>, 刘晓飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中汽零部件技术(天津)有限公司, 天津

<sup>2</sup>中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津

收稿日期: 2024年11月19日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月19日

## 摘 要

本文根据轮胎的实际工作状态, 提出一种轮胎动态力传递函数的测试方法, 获得轮胎在运动状态下的径向一阶频率。在此基础上, 结合对轮胎的均匀性与高阶谐波的研究结果, 能够通过此频率预测出轮胎径向力波动较大的速度, 可以为轮胎在整车配套过程中遇到的NVH问题提供解决方案。

## 关键词

轮胎, 动态力传递函数, 径向力波动, 均匀性

# Prediction Method of Tire High Speed Uniformity Based on Dynamic Force Transmission Characteristics

Fengyang Liu<sup>1</sup>, Ping Yu<sup>2</sup>, Xiaofei Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CATARC Component Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

<sup>2</sup>CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

According to the actual working state of the tire, this paper puts forward a test method of the dynamic force transmission function of the tire and obtains the radial first-order frequency of the tire in the moving state. On this basis, combined with the research results of tire uniformity and high-order harmonics, the speed of tire radial force variation can be predicted by this frequency, which

文章引用: 刘凤阳, 于萍, 刘晓飞. 基于动态力传递特性的轮胎高速均匀性预测方法[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(6): 576-583. DOI: 10.12677/met.2024.136067

can provide a solution for NVH problems encountered in the process of tire matching.

## Keywords

Tire, Dynamic Force Transmission Function, Radial Force Variation, Uniformity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轮胎是汽车与地面接触的唯一零部件, 汽车在行驶过程中的操纵稳定性、行驶平顺性等特性都与轮胎有很大的关系[1]。工程师常使用轮胎力传递函数测试, 获取轮胎在静态下的一阶频率, 对整车的 NVH 问题进行分析[2] [3]。另一方面, 轮胎均匀性对汽车行驶平顺性的影响也尤为明显[4], 本文旨在通过对轮胎均匀性与轮胎动态特性的相关性进行研究, 提出一种基于轮胎动态特性预测均匀性的方法, 为解决轮胎在配套过程中遇到的舒适性、振动、噪声等问题提供解决方向。

## 2. 测试情况

### 2.1. 测试设备及样品

本次研究选取不同规格、不同品牌的 6 款轮胎进行测试, 具体情况见表 1。

Table 1. Test sample information

表 1. 测试样品信息

| 序号 | 规格        | 负荷指数 | 速度符号 |
|----|-----------|------|------|
| 1  | 245/70R17 | 110  | T    |
| 2  | 265/65R17 | 112  | T    |
| 3  | 265/65R18 | 114  | T    |
| 4  | 225/65R17 | 102  | H    |
| 5  | 235/60R18 | 103  | V    |
| 6  | 225/60R18 | 100  | H    |

本次研究主要使用的测试设备是德国 ZF 公司设计制造的 HSU5.3 型高速均匀性测试设备, 是一种专用于测试轮胎在不同速度、不同负荷的运动状态下力学特性的设备。设备配有环境控制系统, 可以控制试验过程中的环境温度。设备转鼓直径 2 m, 能够采集轮胎在高速旋转过程中径向力、切向力及侧向力的波动, 并能使用傅里叶变化对采集数据进行分析, 得到不同阶次的谐波。另外, 设备转鼓表面可以加装不同放置角度、不同尺寸的凸块, 模拟轮胎在不平路面上受到激励后的状态。

### 2.2. 高速均匀性测试方法

目前常用的轮胎均匀性测试方法是 GB/T 18506-2013《汽车轮胎均匀性试验方法》。标准中规定的测试速度为 60 rpm, 线速度约 8 km/h。而车辆常在高速行驶阶段发生抖动、异响等 NVH 问题。为此, 我

们设置起始测试速度为 5 km/h, 并按照 5 km/h 的速度阶梯递增, 最高速度测试设置为样品速度符号对应的速度。

测试流程如下: 将轮胎安装在测试轮辋上, 充气至 210 kPa, 在  $24^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  的环境中放置 2 h 以上后, 调整至测试气压 210 kPa 进行暖胎。暖胎阶段设置速度为 120 km/h, 负荷设置为负荷指数对应载荷的 75%, 暖胎时间设置为 30 min。暖胎结束后开启设备的动平衡补偿功能, 保持负荷不变, 根据上述测试速度进行测试, 获得轮胎从 5 km/h 至最高速度的高速均匀性特性。

### 2.3. 动态力传递特性测试方法

目前常用的轮胎力传递特性的测试方法[5]如下: 将轮胎安装在轮辋上, 充气至试验气压后, 使用柔性绳将轮胎轮辋组合体悬挂, 使其处于自由静止状态, 在指定位置粘贴传感器后, 使用力锤敲击, 通过采集的数据计算得到轮胎的力传递函数。

由于轮胎在实际使用过程中处于不断运动的状态, 并且车辆常在高速行驶阶段发生 NVH 问题, 这都与目前的轮胎力传递特性测试方法中轮胎的边界条件不同。因此, 本次研究设计了一种基于高速均匀性测试设备的动态力传递特性测试方法。

我们在高速均匀性设备的转鼓表面安装截面形状为矩形, 截面尺寸为长 20 mm 宽 20 mm 的横置凸条, 在转鼓的另一侧安装相对应的平衡质量块, 使转鼓自身保持动平衡。为了与均匀性测试搭建一致性的对应关系, 测试气压、测试载荷均与均匀性测试保持一致。测试速度上选择 20 km/h、40 km/h、60 km/h、90 km/h 这四个速度进行测试。转鼓旋转一周, 轮胎与凸块冲击一次, 为一次数据采集周期。在测试前, 进行暖胎, 暖胎阶段, 时间设置为 20 分钟, 速度设置为 30 km/h、试验负荷设置为负荷指数对应载荷的 75%。测试时, 每两个工况采样时间间隔 15 s, 使测试轮胎状态稳定于当前不平路面激励的工况下, 然后以 2000 Hz 的采样频率, 采集 10 个周期的冲击工况中的径向力, 进行频域转化后, 得到其频率特性, 作为轮胎的动态力传递特性进行分析。

## 3. 测试数据分析

### 3.1. 动态力传递特性数据分析

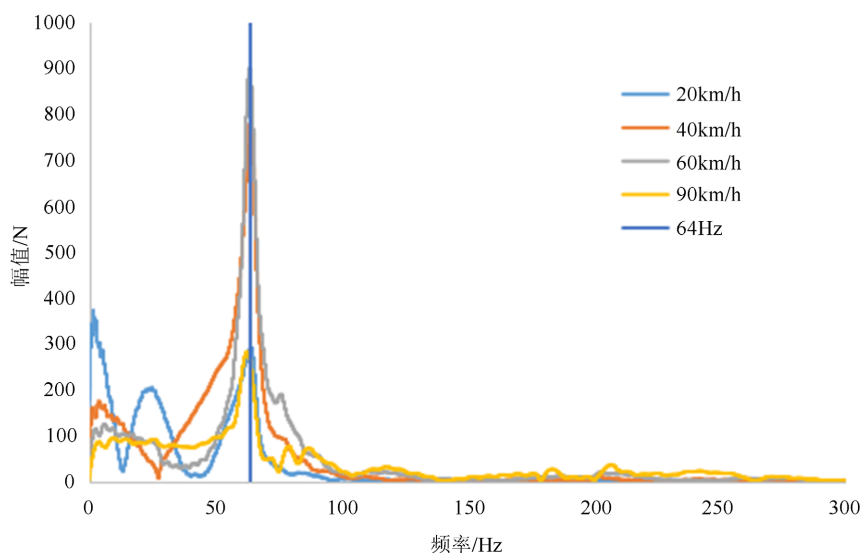
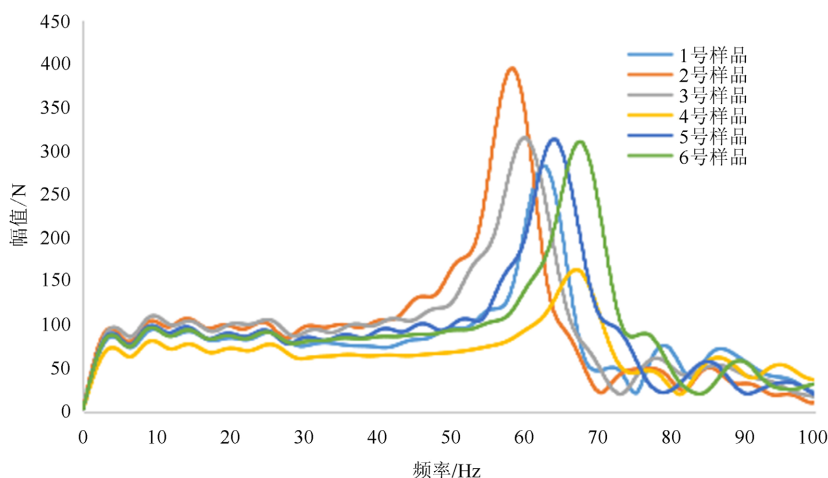


Figure 1. Frequency characteristics of radial force of 1# sample at different speeds  
图 1. 1 号样品不同速度下径向力频率特性

我们以 1 号轮胎为例,由图 1 可见,1 号轮胎在 4 种不同速度的动态的激励下,径向力均会在 64 Hz 频率附近出现波峰,影响轮胎高频动态特性的主要因素有载荷、凸块尺寸、速度等因素,这些因素对轮胎的振动幅值有影响,但是对轮胎在频域上出现波峰时的频率几乎没有影响[6]。我们认为这个频率是轮胎的一种固有属性,即为轮胎的径向动态力传递 1 阶频率。

我们根据上述测试方法能够得到 6 个样品的径向动态力传递 1 阶频率,这 6 个样品的径向动态力传递 1 阶频率分布在 50 Hz~80 Hz 之间。结果如图 2 及表 2 所示。



**Figure 2.** Test results of radial dynamic force transfer of samples  
**图 2.** 样品的径向动态力传递测试结果

**Table 2.** Test results of radial dynamic force transfer of samples  
**表 2.** 样品的径向动态力传递测试结果

| 序号 | 规格        | 径向动态力传递 1 阶频率/Hz |
|----|-----------|------------------|
| 1  | 245/70R17 | 64.00            |
| 2  | 265/65R17 | 58.39            |
| 3  | 265/65R18 | 60.42            |
| 4  | 225/65R17 | 67.43            |
| 5  | 235/60R18 | 64.42            |
| 6  | 225/60R18 | 67.92            |

### 3.2. 均匀性及谐波数据分析

以 1 号轮胎为例,径向力波动(RFV)及其各阶谐波随速度变化的关系如图 3 所示。显而易见,随着速度的不断增加,RFV 在 45 km/h、75 km/h、130 km/h、180 km/h 等速度附近有明显峰值,安装这款轮胎的车辆有可能按照这些速度行驶时有振动等 NVH 问题。

我们从图 3 中也可以看出,RFV 总波在 180 km/h、130 km/h、75 km/h、45 km/h 这些速度下出现了不同程度的峰值,而与此相对应的,在这些速度下,不同阶数的谐波也出现波峰。如径向力 3 阶谐波(RFV3H)在 180 km/h 的速度下出现第一次波峰;RFV4H 在 130 km/h 的速度下出现第一次波峰;RFV7H 在 75 km/h 的速度下出现第一次波峰。RFV12H 在 45 km/h 的速度下出现第一次波峰。其余测试样品也出现了类似的情况,总波 RFV 在某速度下出现波峰,相对应的某阶谐波也会在该速度下出现波峰,并且高速区域相对应的是低阶谐波,低速区域相对应的是高阶谐波。

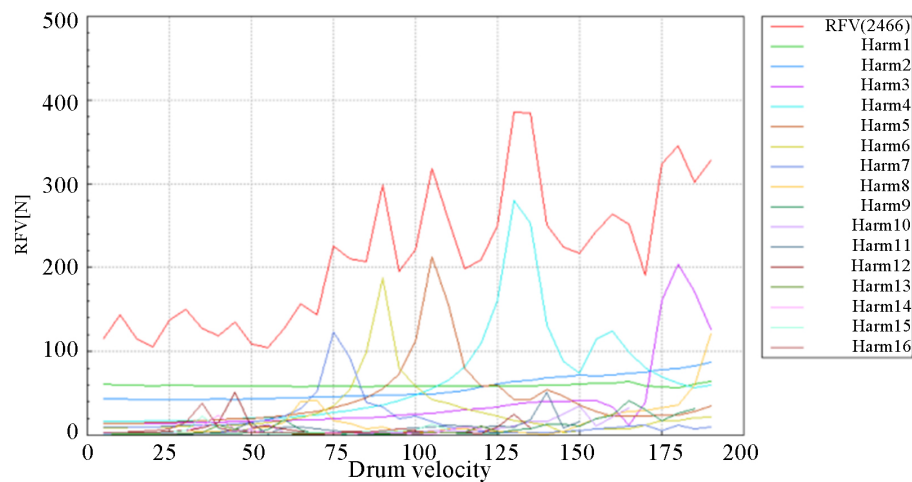


Figure 3. Uniformity test results of 1# sample  
图 3. 1 号轮胎均匀性测试结果

我们可以通过式(3.1) [7]来计算各阶谐波出现第一次波峰时对应速度下的频率值。

$$f = N \times \text{RPS} \tag{3.1}$$

式中， $f$  为频率； $N$  为谐波阶数；RPS 为轮胎每秒转动的次数。

为了获得角速度数据，我们将每个速度下轮胎的滚动周长数据导出，以 1 号轮胎为例，详细滚动周长数据见表 3，其名义周长为 2432 mm，与实际周长略有差异。我们使用实际滚动周长与线速度进行计算，可以获得更准确的 RPS 数据。

在之前的研究中发现[8]，RFV1H 与 RFV2H 几乎不会在现有的测试速度范围内出现波峰，以 1 号轮胎为例，计算 3 阶谐波至 16 阶谐波出现第一次波峰时的频率值，计算结果见表 4，其各阶谐波出现第一次波峰频率的平均值为 64.42 Hz，标准差 1.75。

我们对本次选取的其余 6 个样品进行类似的分析，其结果如表 5 所示。

Table 3. Rolling circumference of 1# tire at different speeds  
表 3. 1 号轮胎不同速度下滚动周长

| 速度/(km/h) | 滚动周长/mm | 速度/(km/h) | 滚动周长/mm | 速度/(km/h) | 滚动周长/mm |
|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| 5         | 2342    | 70        | 2340    | 135       | 2343    |
| 10        | 2342    | 75        | 2340    | 140       | 2343    |
| 15        | 2341    | 80        | 2340    | 145       | 2344    |
| 20        | 2341    | 85        | 2340    | 150       | 2345    |
| 25        | 2341    | 90        | 2341    | 155       | 2346    |
| 30        | 2340    | 95        | 2341    | 160       | 2347    |
| 35        | 2340    | 100       | 2341    | 165       | 2348    |
| 40        | 2340    | 105       | 2341    | 170       | 2349    |
| 45        | 2340    | 110       | 2341    | 175       | 2351    |
| 50        | 2340    | 115       | 2342    | 180       | 2353    |
| 55        | 2340    | 120       | 2342    | 185       | 2355    |
| 60        | 2340    | 125       | 2342    | 190       | 2358    |
| 65        | 2340    | 130       | 2343    | ---       | ---     |

Table 4. First peak frequency of harmonics of 1# sample (Radial)  
表 4. 1 号轮胎各阶谐波第一次波峰频率(径向)

| 谐波阶数            | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 第一次波峰线速度/(km/h) | 180   | 130   | 105   | 90    | 75    |
| 谐波第一次波峰频率/Hz    | 63.75 | 61.65 | 62.30 | 64.08 | 62.32 |
| 谐波阶数            | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| 第一次波峰线速度/(km/h) | 70    | 60    | 55    | 50    | 45    |
| 谐波第一次波峰频率/Hz    | 66.48 | 64.10 | 65.29 | 65.29 | 64.10 |
| 谐波阶数            | 13    | 14    | 15    | 16    | ----  |
| 第一次波峰线速度/(km/h) | 40    | 40    | 35    | 35    | ----  |
| 谐波第一次波峰频率/Hz    | 61.73 | 66.48 | 62.32 | 66.48 | ----  |

Table 5. Average and standard deviation of the first peak frequency of each harmonic of the sample (Radial)  
表 5. 样品各阶谐波第一次波峰频率平均值及标准差(径向)

| 序号 | 规格        | 平均值/Hz | 标准差  |
|----|-----------|--------|------|
| 1  | 245/70R17 | 64.42  | 1.75 |
| 2  | 265/65R17 | 59.87  | 2.03 |
| 3  | 265/65R18 | 61.77  | 1.64 |
| 4  | 225/65R17 | 68.06  | 1.69 |
| 5  | 235/60R18 | 63.32  | 1.72 |
| 6  | 225/60R18 | 67.86  | 1.93 |

这 6 条轮胎径向的各阶谐波在不同速度下出现第一次峰值对应的频率十分接近。结合测试方法进行分析，测试时选择的测试速度增量阶梯为 5 km/h，在选取出现波峰的速度时，该速度是接近速度而非真实对应的速度，这会导致各阶谐波对应的频率值略有差别。因此我们认为轮胎的各阶谐波第一次波峰频率是相同的，是轮胎的一种固有属性。由表 6 及图 2 所示，轮胎的径向动态力传递 1 阶频率在 50 Hz~80 Hz 范围内，都与谐波第一次波峰频率值十分接近，认为谐波第一次波峰频率即为轮胎动态力传递 1 阶频率。

Table 6. Comparison of two kinds of frequencies (Radial)  
表 6. 2 种频率对比(径向)

| 序号 | 规格        | 动态力传递 1 阶频率/Hz | 谐波第一次波峰频率/Hz |
|----|-----------|----------------|--------------|
| 1  | 245/70R17 | 64.00          | 64.42        |
| 2  | 265/65R17 | 58.39          | 59.87        |
| 3  | 265/65R18 | 60.42          | 61.77        |
| 4  | 225/65R17 | 67.43          | 68.06        |
| 5  | 235/60R18 | 64.42          | 63.32        |
| 6  | 225/60R18 | 67.92          | 67.86        |

4. 预测方法

通过上述分析，我们可以对轮胎进行动态力传递函数特性测试，获取其动态力传递 1 阶频率，从而计算出该轮胎从第 3 阶谐波起，各阶谐波第一次波峰时的线速度，即为该轮胎均匀性表现较差的速度值。为此，我们选用另外一条轮胎 265/60R18 进行测试，根据 3.2 中最终确定的测试方法，获取其动态频率特性，见图 4。

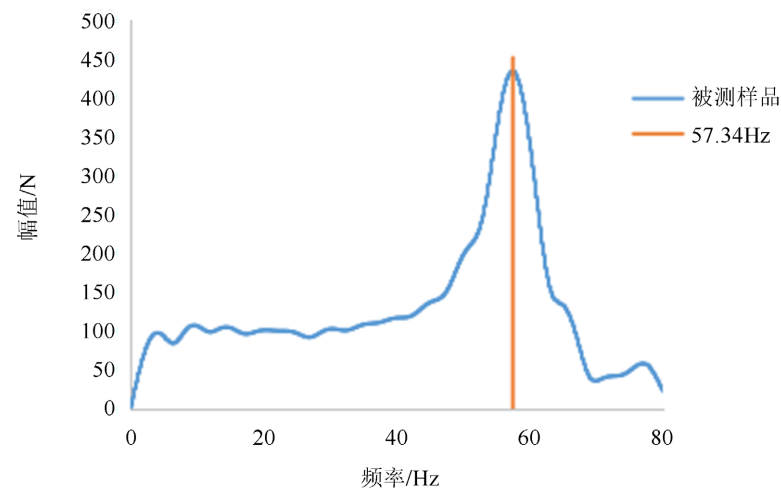


Figure 4. Frequency characteristics of selected sample  
图 4. 所选样品频率特性

本规格轮胎名义周长约 2.4 m，根据式 3.1，计算 RFV 的 3 阶谐波~16 阶谐波出现第一次波峰时的线速度，如表 7 所示。

Table 7. Velocity of each order harmonic of RFV of the tested sample when the peak appears  
表 7. 被测样品 RFV 各阶谐波出现波峰时速度

| 阶数 | 速度/(km/h) | 阶数 | 速度(km/h) |
|----|-----------|----|----------|
| 3  | 165.13    | 10 | 49.54    |
| 4  | 123.85    | 11 | 45.04    |
| 5  | 99.08     | 12 | 41.28    |
| 6  | 82.57     | 13 | 38.11    |
| 7  | 70.77     | 14 | 35.39    |
| 8  | 61.93     | 15 | 33.03    |
| 9  | 55.04     | 16 | 30.96    |

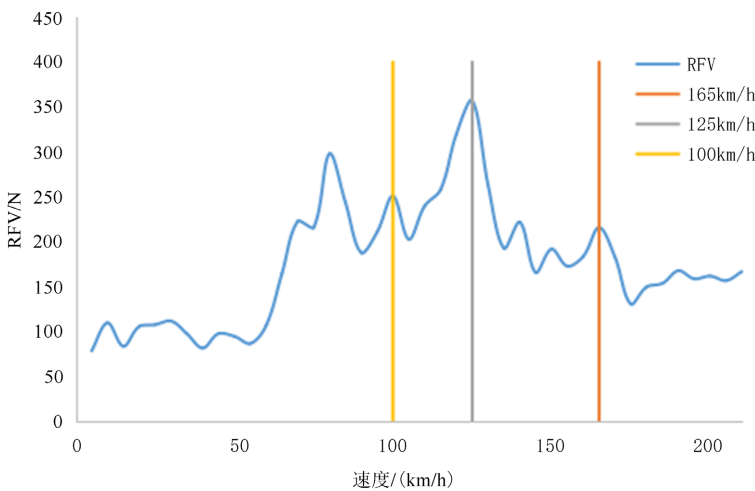


Figure 5. HSU test results of selected sample  
图 5. 所选样品 HSU 测试结果



根据计算结果,预测本规格轮胎会在 165 km/h、123 km/h、99 km/h 这三个速度点 RFV 有较大的波峰。

再根据 2.2 中选用的测试方法,对这条轮胎进行高速均匀性测试。测试结果如图 5 所示,这条轮胎的 RFV 在 165 km/h、125 km/h、100 km/h 这三个速度时均有明显的峰值。这也证明了这种预测方法的可行性。同时我们也可以在轮胎选型中使用这种方法,一定程度上避免底盘零部件间共振情况的发生,降低整车的抖动,以进一步提升整车的平顺性。

## 5. 总结

本文提出了一种轮胎动态力传递特性测试方法,通过对不同规格不同品牌的轮胎进行动态力传递特性测试及高速均匀性测试,针对测试结果中 RFV 及其各阶谐波随速度变化的关系进行分析,进一步结合其动态力传递特性进行研究,得出以下结论。

- (1) 当 RFV 在某速度下出现了较明显的波峰时,会对应某阶谐波在此速度下有较明显的波峰,且对应速度越高,对应阶数越低;
- (2) 轮胎径向动态力传递 1 阶频率在 50 Hz~80 Hz 范围内,该频率值即为其 RFV 谐波共振频率值;
- (3) 我们可以根据轮胎动态力传递特性结果来预测这条轮胎的均匀性表现较差的速度。

## 参考文献

- [1] 冯希金,郑小刚,危银涛,等. 轮胎振动特性的有限元分析及关键影响因素研究[J]. 轮胎工业, 2013, 33(1): 12-20.
- [2] 张浩,张光,罗挺,等. 某车型轮胎高速均匀性与引起的异响问题分析[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 192-196.
- [3] 杨诗豪,徐艳平,鲁媛. 轮胎力传递率在路噪开发中的研究与应用[C]//中国汽车工程学会(China Society of Automotive Engineers). 2022 中国汽车工程学会年会论文集(4). 北京:机械工业出版社, 2022: 6.
- [4] 雷启明. 轮胎均匀性对牵引车行驶平顺性影响试验研究[J]. 汽车科技, 2011(3): 62-66.
- [5] 官声欣,周涛,丁俊杰. 轮胎力传递率试验影响因素的研究[J]. 橡胶科技, 2023, 21(2): 94-97.
- [6] 姜其亮. 轮胎高频动力学特性的试验及模拟[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] Gent, A.N., Walter, J.D., 编. 轮胎理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [8] 刘振国,刘凤阳,张新峰,陈超,陈平. 轿车轮胎均匀性低阶谐波分量随速度变化规律研究[J]. 中国汽车, 2020(8): 11-17, 56.