

基于虚拟路面的整车路噪轮胎参数相关性研究

吴 渊¹, 高丰岭¹, 卜晓兵¹, 陈潇凯²

(1. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300; 2. 北京理工大学 电动车辆国家工程实验室, 北京 100081)

摘 要: 为了在设计阶段保证整车的 NVH 性能, 通过搭建虚拟路面仿真平台探究轮胎关键物理参数对于整车路面振动噪声的影响规律。结合实车采集的试验场 NVH 路面 PSD、高精度物理轮胎 CDTire 模型以及整车声固耦合模型, 建立完整的整车路噪仿真环境。通过某款 SUV 的仿真结果表明, 不同款轮胎及同款轮胎不同批次对整车路面振动噪声有直接的影响。虚拟路面方法可以在整车开发早期甄别出在车辆噪声中起主导作用的频率段, 从而排查明显的 NVH 设计缺陷, 同时, 可以为车型 NVH 正向开发提供轮胎选型依据。

关键词: 虚拟试验场; NVH; 路噪; CDTire; 轮胎参数

中图分类号: U463.82+1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.05.06

Correlation Study on Vehicle Tire Parameters Influencing Tire-Road Noise Based on Virtual Road Surface

WU Yuan¹, GAO Fengling¹, BU Xiaobing¹, CHEN Xiaokai²

(1. CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to evaluate the vehicle NVH performance in the design phase, a virtual proving ground on the simulation platform is established in this paper to study the influence of key physical parameters of tires on the vehicle vibration and noise excited by roads. A complete vehicle road noise simulation environment is constructed by combining the PSD information of the proving ground with NVH surfaces, the high-accuracy physical CDTire model and the full vehicle model of acoustic-solid coupling. The simulation results show that for an SUV, the tire types and batches have direct effects on the tire/road noise and vibration. The obvious NVH design defects in the primary frequency band can be found effectively in the early design stage by the virtual proving ground technique. Besides, the study provides a method for tire selection in the NVH forward development.

Keywords: virtual proving ground; NVH; road noise; CDTire; tire parameters

随着人们对汽车品质要求的不断提高和汽车市场的蓬勃发展, NVH (噪声、振动与声振粗糙度)

性能已成为用户对汽车乘坐舒适性和产品满意度评价的重要指标。路噪是由于轮胎受路面不平度激励,

收稿日期: 2020-08-07 改稿日期: 2020-09-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0103704)

参考文献引用格式:

吴渊, 高丰岭, 卜晓兵, 等. 基于虚拟路面的整车路噪轮胎参数相关性研究 [J]. 汽车工程学报, 2021, 11(5): 354-362.

WU Yuan, GAO Fengling, BU Xiaobing, et al. Correlation Study on Vehicle Tire Parameters Influencing Tire-Road Noise Based on Virtual Road Surface [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(5): 354-362. (in Chinese)



传递到车厢内部的噪声。路面不平度激励引起的车身振动不可避免，其频率约5~60 Hz，以车身板件为主产生的振动噪声在低、中频范围内，为用户容易感知的频率段^[1-3]。因此，如果能在开发初期预测出车内的噪声水平，进行风险规避，对提高汽车产品的竞争力具有十分重要的意义^[4]。

路噪研究一直是NVH领域的一大难题。多年来，多数研究需要依靠样车测试获取车身底盘接点处的载荷进行仿真分析^[5-6]。也可通过采集转向节位置处的加速度，用矩阵求逆获取轮心力分析路噪^[7-8]。这两种方式都需要进行测试获取路噪仿真激励，存在工作量大、成本高、周期长等不足，对样车的依赖严重降低了整车NVH开发前期问题的排查能力。为解决整车开发早期没有载荷谱无法进行整车路噪预测的困境，有部分学者对路谱激励转化进行了研究，基于模态参数轮胎理论建立整车路噪分析模型。由于模态参数是从静止的轮胎试验得到，由静态到稳态只考虑阻尼的影响，没有考虑离心力的影响，同时切向激励切向响应的模态试验和径向激励切向响应的模态试验难度相对较大，导致模态参数轮胎模型的适用性和精准度还有待提高，所以该方法在整车路噪分析的应用还存在一些局限^[9-10]。为了全面反映路面激励引起的车内振动噪声，基于轮胎物理特性开发的CDTire模型，具有精度高、频段宽、通用性广等特点，能较好地捕捉到轮胎的力学特性，其在整车路噪分析中有巨大的应用前景^[11]。

具备可靠的轮胎模型后，在整车结构确定的情况下，研究不同轮胎及同款轮胎不同参数组合对于整车路噪的影响规律，可以在一定程度上为主机厂车型轮胎匹配与优化提供参考依据。

1 整车虚拟路面路噪仿真方法

1.1 路谱采集

粗糙沥青路为国内通用路面，常用于路噪研究。这里以粗糙沥青路作为测试路面，并对该路面的高程信息进行扫描。图1所示为正在采集路谱的试验车，通过激光传感器获取路面不平度数据 $q(l)$ （如图2所示，FL、FR、RL、RR分别为左前轮、左后

轮、右前轮、右后轮）。 $q(l)$ 为时域无限信号，工程中通常截取一段路面长度 L 进行研究。 L 的取值，要保障空间频率分辨率，对于路面不平度信号的空间频率在 $[0.011\ 2.83]\text{m}^{-1}$ 之间，所以最小辨识频率 $dn=1/L\leq 0.011$ 即 $L\geq 91\text{m}$ ^[11]。



图1 采集路谱试验车

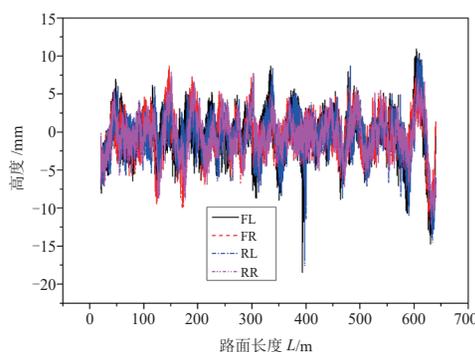


图2 路面不平度

空间长度 L 的路面不平度信号为：

$$q_L(l) = \begin{cases} q(l), l \in [0, L], \\ 0, l \geq L. \end{cases} \quad (1)$$

其自相关函数为：

$$R_q(l) = \frac{1}{L} \int_0^L q(\tau) \times q(\tau + l) d\tau, (l \in [-L, L]) \quad (2)$$

式中： $q_L(l)$ 为空间域有限信号，其空间域频谱为连续谱 $Q(n, L)$ 。根据帕塞瓦尔定理，路面不平度信号的平均功率为：

$$\begin{aligned} \psi_q^2 &= \lim_{L \rightarrow +\infty} \frac{1}{L} \int_0^L |q_L(l)|^2 dl = \\ &= \lim_{L \rightarrow +\infty} \frac{1}{L} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |Q(n, L)|^2 dn \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： n 为空间频率。

由于工程上负频率没有意义，所以使用单边谱密度 $G_q(n)$ ，可由式(4)计算得出：

$$G_q(n) = \lim_{L \rightarrow +\infty} \frac{2}{L} |Q(n, L)|^2 \quad (4)$$

由维纳辛钦定理可换算出路面位移不平度时间域功率谱密度 $G_q(f)$ 为:

$$G_q(n) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_q(l) e^{-j2\pi nl} dl = \int_{-\infty}^{+\infty} R_q(ut) e^{-j2\pi n ut} d(ut) = u \int_{-\infty}^{+\infty} R'_q(t) e^{-j2\pi ft} d(t) = u G_q(f) \quad (5)$$

式中: $l = ut$, 位移等于车速与时间的乘积; $f = nu$, 时间频率等于空间频率与车速的乘积。

功率谱密度用于描述路面不平度的统计特性, 作为整车路面激励输入。以 60 km/h 作为路噪仿真工况车速, 基于以上公式计算得到路面功率谱, 如图 3 所示。

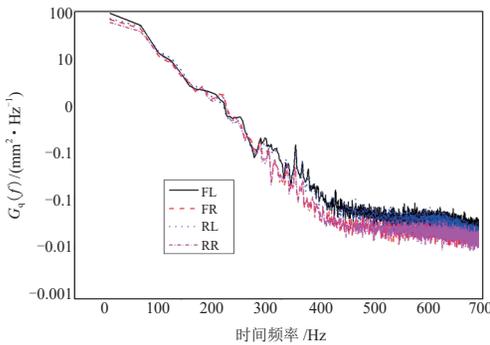


图 3 时间频率路面功率谱密度

1.2 CDTire 轮胎模型

获取一个用于路噪仿真的 CDTire 轮胎模型, 需要对轮胎进行断面扫描, 静态、稳态、动态工况测试。测试工况包括垂向刚度、纵向刚度、侧向刚度、纵滑、侧滑、动态过凸块试验等。为了捕捉轮胎的综合性能, 在同一测试工况组下, 通常需要测试一系列胎压 (如: 80%、100%、120% 参考胎压)、一系列负载 (如: 40%、80%、120% 负载) 以及多种车速 (如: 5 km/h、60 km/h、200 km/h) 下的轮胎力学响应。在获取轮胎测试数据后, 基于 CDTire/PI 平台, 对轮胎断面进行几何建模, 通过仿真反求辨识轮胎参数。其中轮胎参数辨识流程如图 4 所示。

为了度量辨识的质量, 引入了一个层次结构的误差值。在所有的层次结构中, 除了最下面的层次外, 它们都是误差的加权和, 轮胎辨识的总误差 (最

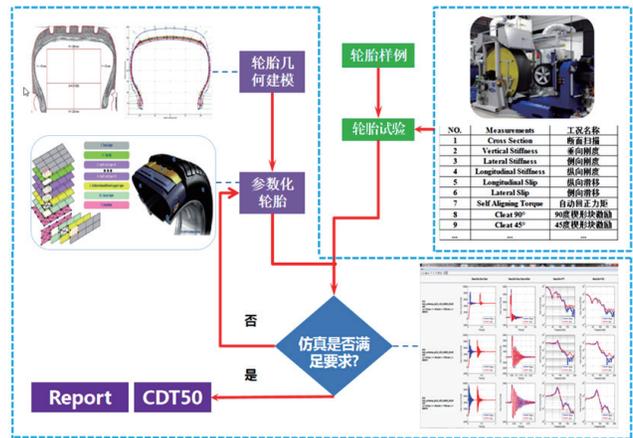


图 4 轮胎辨识流程

顶层) 是所有启用辨识工况组的误差加权和。其方程如下:

$$err_{Total} = \frac{\sum_{exp} err_{exp} \cdot w_{exp}}{\sum_{exp} w_{exp}} \quad (6)$$

式中: err_{Total} 是所有启用辨识工况组的误差加权和; err_{exp} 为每个辨识工况组误差值; w_{exp} 为对应的误差权重因子。

err_{exp} 是基于后处理步骤中计算出的局部信号特征和积分信号特征来估计的, 计算形式如式 (7) 所示:

$$err_{er}(x, y) = e_{rel}(x, y) = \frac{x - y}{|x|},$$

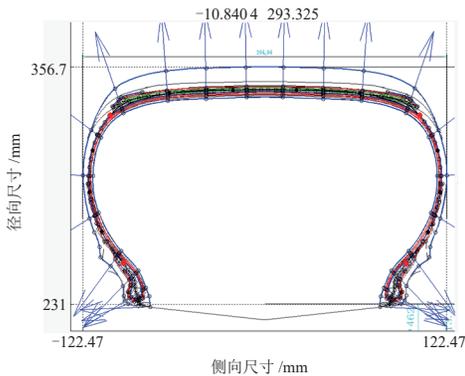
$$err_{er}(f, g) = L_p(f, g) = \frac{\|f - g\|_p}{\|f\|_p},$$

$$\|f\|_p = \begin{cases} \left(\int |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}}, \\ \left(\sum_{x \in I} |f(x)|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \end{cases} \quad (7)$$

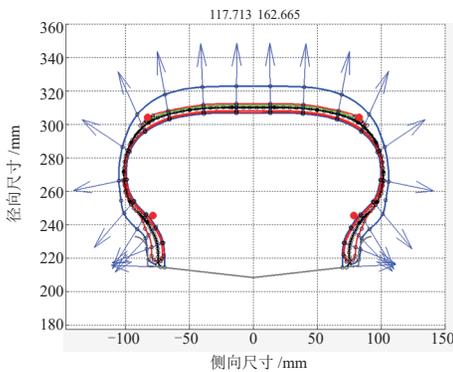
式中: x, y 为试验和拟合曲线局部信号特征值; f, g 为试验和仿真拟合曲线的积分信号特征函数; $\|f\|_p$ 为 f 函数的 P 范数。由上述公式可见, 误差没有边界, 越小越好。在 $error$ 值达到可接受的范围后, 同时结合轮胎仿真与测试曲线的趋势对比, 确定最终满足工程要求的轮胎模型。

本文对两个厂家提供的轮胎 1-245/55 R19 (Tire1)、轮胎 2-205/50 R17 (Tire2) 进行 CDTire 参数辨识

用于整车路噪研究。图 5 给出了这两款轮胎的几何断面模型，最后由带有质量点的中性层作为轮胎的物理模型基础。图 6 为两款轮胎部分仿真结果，可见试验曲线与仿真曲线高度吻合，尤其在动态测试 cleat 工况中，仿真和测试曲线在关键频率点位置几乎重合，因此，CDTire 具有很高的轮胎力学特性描述能力，能够满足整车路噪仿真要求。

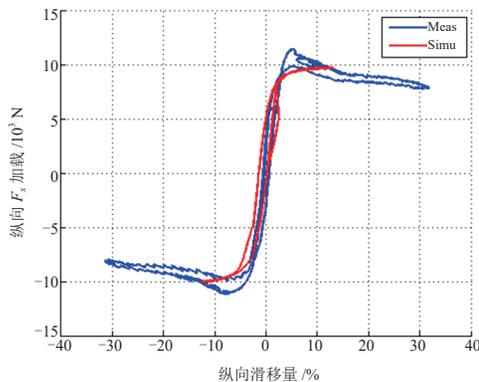


(a) Tire1-245/55 R19

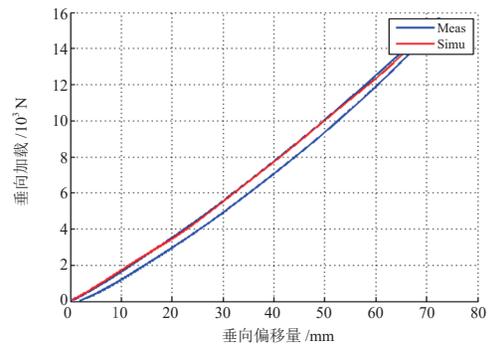


(b) Tire2-205/50 R17

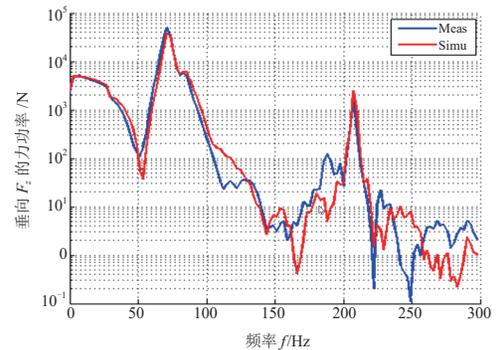
图 5 两款轮胎的几何建模结果



(a) 纵向滑移仿真曲线



(b) 垂向刚度仿真曲线



(c) 动态过凸块仿真曲线

图 6 部分参数辨识结果

1.3 整车路面振动噪声仿真分析

基于 Hyperworks 中 NVHD 平台，搭建用于路面振动噪声分析的声固耦合模型。导入轮胎辨识参数 cdt50 文件，进行线性化生成 fem 文件和 h3d 文件，其中 fem 文件含有生成的节点、显示单元、轮胎的一些基本参数信息，h3d 文件中含有用于计算的刚度、阻尼、质量矩阵。CDTire 线性化后用于路噪仿真的模型如图 7 所示。

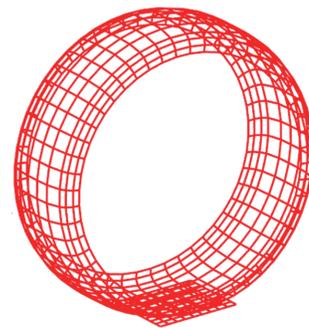


图 7 CDTire 轮胎模型

集成 CDTire 轮胎于整车有限元模型用于路噪分析。图 8 为某 SUV 整车声固耦合模型。

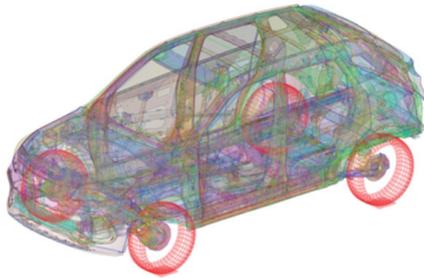


图 8 整车声固耦合模型

基于 NVHD 平台的 Road Load 路噪工具，导入路面 PSD 和整车声固耦合模型搭建整车路噪分析工况。输出驾驶员外耳声压级，方向盘 12 点方向、驾驶员座椅导轨右后安装点振动加速度响应。

2 轮胎参数对路噪的影响

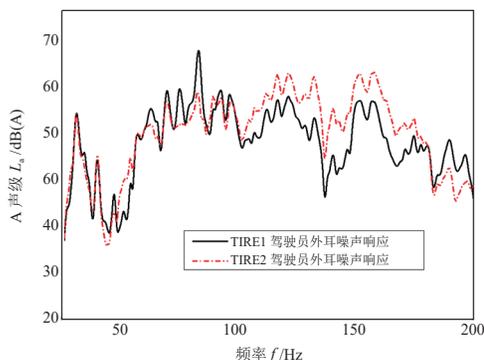
2.1 轮胎型号对路噪的影响

通过对 1.2 节中两个厂家提供的轮胎进行 CD Tire 建模，研究探讨不同轮胎对于路噪仿真的影响。轮胎型号的具体参数见表 1。

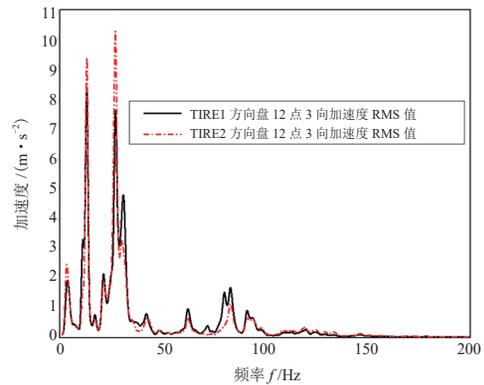
表 1 轮胎型号参数

参数	Tire1	Tire2
断面宽度 /mm	245	205
扁平比	55	50
轮胎结构	R	R
轮辋直径 /mm	482.6	431.8
载重系数	98	93
速度级别	V	V
质量 /kg	12	9.4

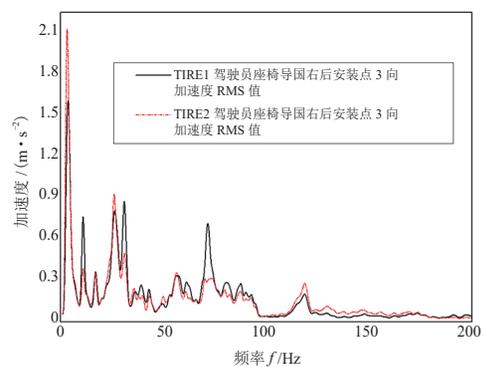
分别将这 2 款轮胎模型线性化后装配在 SUV 上进行路面振动噪声响应分析，得到结果如图 9 所示。



(a) 驾驶员外耳噪声响应



(b) 方向盘 12 点 3 向振动响应 RMS 值



(c) 驾驶员座椅导轨右后安装点 3 向加速度 RMS 值

图 9 不同款轮胎的路噪响应

由驾驶员外耳噪声响应曲线可知，两款轮胎仿真曲线趋势几乎一致，峰值频率点位置几乎不变，说明轮胎对于整车的刚度与质量贡献有限。此外，作为传递路径上的一环，轮胎对于整车噪声响应的影响弱于整车结构。仿真结果的差异主要体现在 56 ~ 85 Hz 与 100 ~ 180 Hz 频率段的峰值，其中在 80 Hz 处两款轮胎的噪声响应峰值差距最大，达到了 8 dB (A)。与噪声结果类似，在方向盘 12 点、驾驶员座椅导轨右后安装点振动响应中，两款轮胎对应的测点 3 向加速度均方根值 (RMS) 趋势一致，全频段内振动响应影响小，但出现较大峰值点。其中方向盘 3 向加速度 RMS 值在 31 Hz 处差距达到 2.55 m/s²，驾驶员座椅导轨右后安装点 3 向加速度 RMS 值在 31 Hz 处差距达到 0.49 m/s²。由仿真经验和仿真结果可知，这一现象是由不同轮胎的模态激励、刚度差异所致。

除了轮胎质量、尺寸等设计差异，两款轮胎模型文件的关键物理参数差异也很大，如表 2 所示，因此，

难以推断轮胎型号对于路噪响应的规律。在下一步的研究中，随着轮胎数据库的积累，可通过对比相同厂家不同型号的轮胎来继续开展这方面的工作。

表 2 两款轮胎主要参数对比

参数	Tire1	Tire2
$R_{Gx}/(N \cdot mm^{-1})$	7	3.75
$C_s/(N \cdot mm^{-1})$	1 500	250
$S_s/(N \cdot mm^{-1})$	2 500	4 500
$B_s/(N \cdot mm^{-1})$	1 700	1 800
$T_{Gx}/(N \cdot mm^{-3})$	0.35	0.22
$T_{Gy}/(N \cdot mm^{-3})$	0.15	0.14
$X_s/(N \cdot mm^{-1})$	13 532	2 256
M_b/kg	7	5.78
$R_{Gd}/(s \cdot mm^{-1})$	0.001	0.002

表 2 中的参数分别为剪切刚度 (R_{Gx})、帘布层刚度 (C_s)、钢丝层刚度 (S_s)、带束层刚度 (B_s)、胎冠 x 与 y 方向剪切刚度 (T_{Gx} 、 T_{Gy})、轮胎 x 方向弯曲刚度 (X_s)、胎侧质量 (M_b) 和橡胶剪切阻尼 (R_{Gd})。

两款轮胎 3 向加速度、噪声响应均方根值见表 3。表中 Noise_RsSM、STR12_RSM、Driver_RSM 分别表示驾驶员外耳全频段噪声 RMS 值、方向盘 12 点 3 向加速度 RMS 值、驾驶员座椅右后安装点 3 向加速度 RMS 值。

表 3 噪声、3 向振动响应 RMS 值

响应类别	Tire1	Tire2	differ/%
Noise_RSM/dB(A)	51.8	53.6	3.48
STR12_RSM/($m \cdot s^{-2}$)	1.401	1.548	10.2
Driver_RSM/($m \cdot s^{-2}$)	0.284	0.294	4.92

由表 3 可知，此款 SUV 搭配 Tire1 比较合适，尤其在 100 ~ 180 Hz 频率段处噪声值相较于 Tire2 优势更明显。

2.2 同款轮胎参数组合对路噪的影响

为了考察同款轮胎不同参数组合对路面振动噪声的影响，结合模型的实际物理意义，基于式 (8) 采用最优拉丁超立方试验设计方法对表 1 中 Tire1、Tire2 模型的 9 个关键物理参数进行组合采样，分别生成 55 个样本轮胎模型后完成整车路面振动噪声分析。

假设在标准域 C^N 上有 N 个设计变量，目标是选取一组样本点，使其均匀地分布在 C^N 上。为了实现此目标，这里采用了 L_2 中心偏差准则，即：

$$CL_2 = \left(\frac{13}{12}\right)^N - \frac{2}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \prod_{l=1}^N \left[1 + \frac{1}{2} |\chi_k^l - 0.5| - \frac{1}{2} |\chi_k^l - 0.5|^2\right] \frac{2}{n_s^2} \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} \prod_{l=1}^N \left[1 + \frac{1}{2} |\chi_k^l - 0.5| - \frac{1}{2} |\chi_j^l - 0.5| - \frac{1}{2} |\chi_k^l - \chi_j^l|\right] \quad (8)$$

Tire1、Tire2 对应的 9 个关键物理参数初值见表 1，除 M_b 的上下变化范围为其初始值的 20% 以外，其余参数上下限变化范围均为初始值的 50%，轮胎的参数变化范围见表 4。

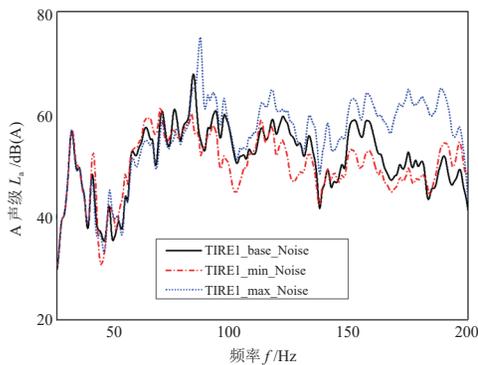
表 4 轮胎的参数变化范围表

设计变量	Tire1		Tire2	
	下限	上限	下限	上限
$R_{Gx}/(N \cdot mm^{-1})$	3.5	10.5	1.875	5.625
$C_s/(N \cdot mm^{-1})$	750	2250	125	375
$S_s/(N \cdot mm^{-1})$	1 200	3 750	2 250	6 750
$B_s/(N \cdot mm^{-1})$	850	2 250	900	2 700
$T_{Gx}/(N \cdot mm^{-3})$	0.175	0.525	0.11	0.33
$T_{Gy}/(N \cdot mm^{-3})$	0.075	0.225	0.07	0.21
$X_s/(N \cdot mm^{-1})$	6 766	20 296	1 128	3 384
M_b/kg	5.4	8.0	4.624	6.936
$R_{Gd}/(s \cdot mm^{-1})$	0.000 5	0.001 5	0.001	0.003

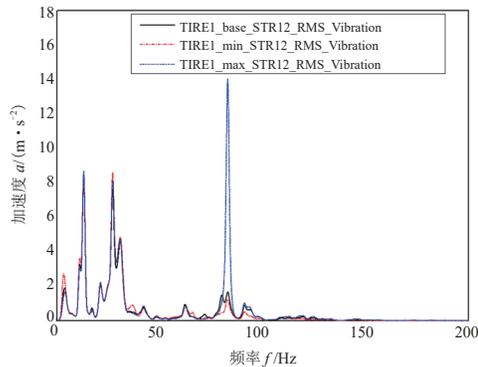
图 10 给出了 Tire1、Tire2 的 55 个模型样本中整车全频段噪声响应最差 (max)、最好 (min) 与真实轮胎模型 (base) 仿真结果的对比。可以看出，两款轮胎样本对应的响应趋势几乎一致，Tire1 轮胎样本响应差异主要体现在 80 ~ 180 Hz 频率段，其中在 83 Hz 处响应峰值差异达到了 8.4 dB(A)；Tire2 样本轮胎响应差异主要体现在 66 ~ 180 Hz 频率段，其中在 94 Hz 处响应峰值差异达到了 7.2 dB(A)。80 ~ 180 Hz 为两款轮胎样本噪声均出现较大差异的频率段，说明在该频率段下轮胎对于噪声的影响较大，而其余频段车本身的影响更大。因此，可以在设计早期针对车辆起主导作用的频率段关键峰值点进行诊断分析，排查明显的 NVH 设计缺陷。振动响应整体影响较小，但 3 向加速度 RMS 值出现

较大峰值差异。Tire1 轮胎样本中, 方向盘 12 点在 83 Hz 差异达到了 18.414 m/s^2 , 座椅导轨右后安装点则在 83 Hz 差异达到了 1.595 m/s^2 。Tire2 轮胎样本中, 方向盘 12 点在 83 Hz 差异达到了 0.557 m/s^2 , 座椅导轨右后安装点在 170 Hz 差异达到了 0.162 m/s^2 , 导致这一现象的原因与 3.1 节中所述类似。

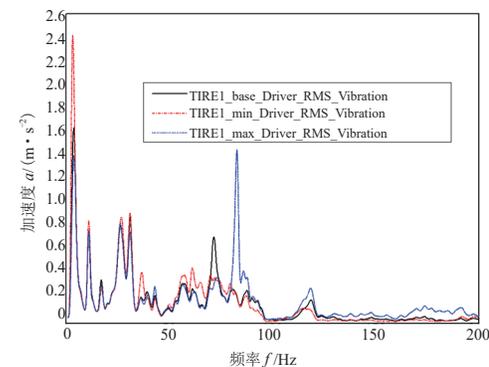
图 11 给出了 Tire1、Tire2 全部样本对应的驾驶员外耳声压级、方向盘 12 点、驾驶员座椅导轨右后安装点 3 向加速度全频段 RMS 值。图中, 横坐标为 55 个样本编号, 纵坐标为每个样本的噪声、振动响应均方根值。



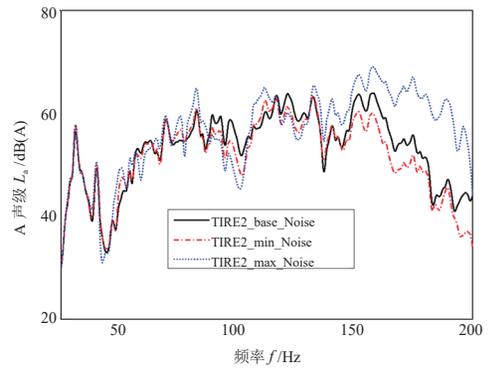
(a) Tire1 驾驶员外耳噪声响应



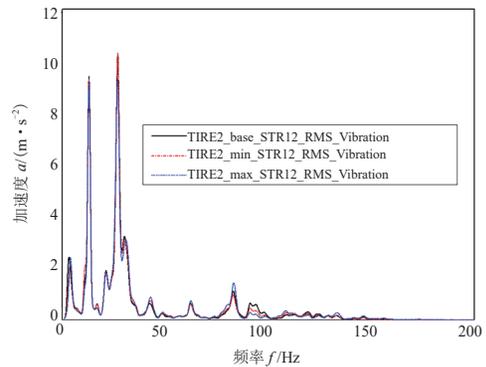
(b) Tire1 方向盘 12 点 3 向加速度 RMS 值



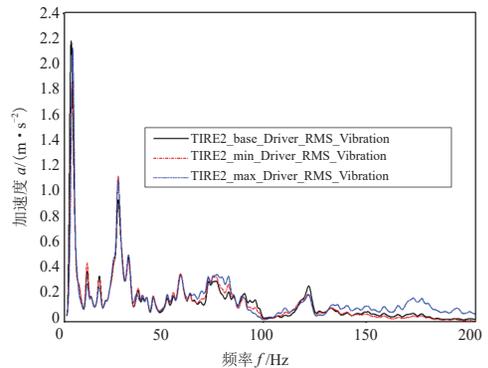
(c) Tire1 驾驶员座椅导轨右后安装点 3 向加速度 RMS 值



(d) Tire2 驾驶员外耳噪声响应

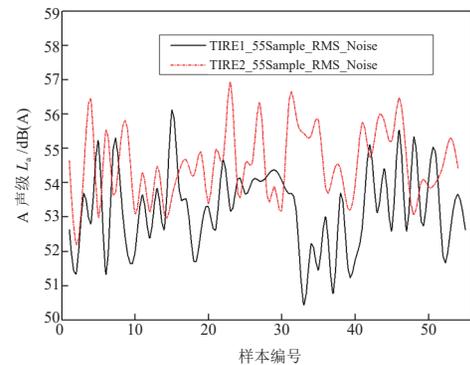


(e) Tire2 方向盘 12 点 3 向加速度 RMS 值

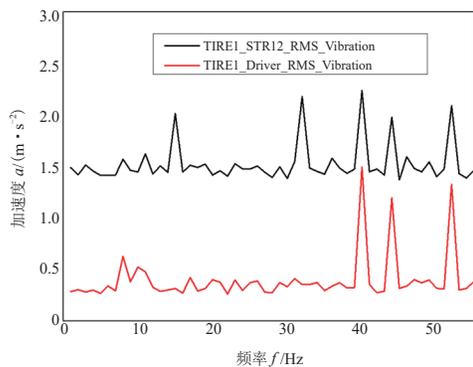


(f) Tire2 驾驶员座椅导轨右后安装点 3 向加速度 RMS 值

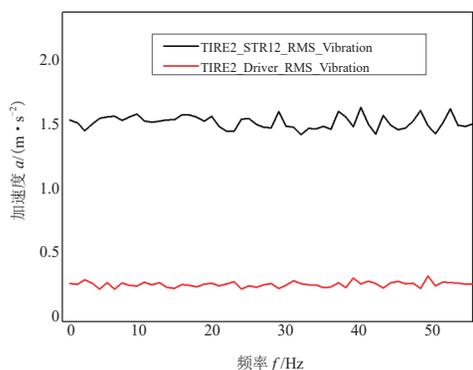
图 10 两款样本轮胎的路噪响应



(a) 两款轮胎对应的 55 样本驾驶员外耳全频段噪声响应 RMS 值



(b) Tire1 对应的 55 样本全频段 3 向加速度 RMS 值



(c) Tire2 对应的 55 样本全频段 3 向加速度 RMS 值

图 11 两款轮胎 55 个样本 3 向加速度、噪声 RMS 值

可以看出, 同款轮胎, 不同的参数组合下, 整车噪声、加速度响应均方根值差异较大, Tire1 样

本中噪声响应均方根值最小达到 50.4 dB (A), Tire2 样本中最小达到 52.2 dB (A)。对于方向盘 12 点、驾驶员座椅导轨右后安装点振动响应均方根值, Tire1 和 Tire2 最小分别可达到 1.365 24 m/s²、1.446 28 m/s², 0.253 23 m/s²、0.242 94 m/s²。由此可见, 在其他结构和系统确定的情况下, 可以通过轮胎的参数优化降低路面激励对整车噪声和振动的影响。在下一步的研究中, 将讨论面向整车路噪性能提升的轮胎参数优化方法, 以便为车型开发中轮胎的选型提供一定参考。

3 结论与展望

本文基于 CD Tire 轮胎模型建立了完整的虚拟路面路噪仿真流程, 探究了轮胎对于整车路面激励振动噪声的影响。通过分析不同款轮胎及同款轮胎不同参数组合与整车路噪响应的关系, 可以在开发早期针对车辆起主导作用的频率段排查明显的 NVH 设计缺陷。同时, 基于 CD Tire 的路噪仿真可以为车型开发中选配轮胎提供方向指导, 更好地保障车型的 NVH 性能。在下一步的研究中, 将对大量轮胎进行参数辨识, 形成轮胎数据库, 同时还将探究面向整车路噪性能提升的轮胎参数优化方法。

参考文献 (References)

- [1] 黄剑锋, 许静超, 王常伟, 等. 基于多参考 TPA 和 ODS 的路噪诊断和优化 [J]. 汽车科技, 2018(7), 72-77. HUANG Jianfeng, XU Jingchao, WANG Changwei, et al. Noise Diagnosis and Optimization Based on Multi-Reference TPA and ODS [J]. Automotive Technology, 2018(7), 72-77. (in Chinese)
- [2] 徐中明, 周小林, 贺岩松, 等. 符合人耳听觉特性的车内异常噪声分析 [J]. 汽车工程学报, 2012, 2(3): 179-183. XU Zhongming, ZHOU Xiaolin, HE Yansong, et al. Analysis of the Abnormal Noise in the Vehicle in Accordance with the Auditory Characteristics of Human Ears [J]. Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(3): 179-183. (in Chinese)
- [3] 沈阳, 黄元毅, 梁静强, 等. 路面谱激励整车噪声分析流程开发研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2019, 38(7), 119-125. SHEN Yang, HUANG Yuanyi, LIANG Jingqiang, et al. Development and Research of Vehicle Noise Analysis Process Under Road Spectrum Excitation [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 38(7), 119-125. (in Chinese)
- [4] 周舟, 周建文, 姚凌云, 等. 整车 NVH 性能开发中的 CAE 技术综述 [J]. 汽车工程学报, 2011, 1(4): 175-184. ZHOU Zhou, ZHOU Jianwen, YAO Lingyun, et al. Overview of CAE Technology in Vehicle NVH Performance Development [J]. Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(4): 175-184. (in Chinese)
- [5] 查朦, 苏小平, 王迪. 路面激励下的车内低频噪声预测及分析 [J]. 制造业自动化, 2015, 37(2): 78-81. ZHA Meng, SU Xiaoping, WANG Di. Prediction and Analysis of Vehicle Interior Low-Frequency Noise with the Consideration of Road Excitations [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(2): 78-81. (in Chinese)

- [6] ASNACHINDA P, PINKAEW T, LAMAN J A. Multiple Vehicle Axle Load Identification from Continuous Bridge Bending Moment Response [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10): 2800-2817.
- [7] 郑松林, 郭正翔, 冯金芝, 等. 基于轴头垂向加速度响应的车轮载荷推断方法研究 [J]. *机械强度*, 2016, 38(6): 1300-1305.
ZHENG Songlin, GUO Zhengxiang, FENG Jinzhi, et al. The Inference Method of Wheel Load Based on the Acceleration of Axle Head [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2016, 38(6): 1300-1305. (in Chinese)
- [8] 靳畅, 周铨, 慕乐. 基于频响函数法的路面激励下车轮轴头力的估计 [J]. *汽车工程*, 2014, 36(4): 469-474.
JIN Chang, ZHOU Hong, MU Le. Estimation of Wheel Spindle Loads Under Road Excitation Based on Frequency Response Function Method [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(4): 469-474. (in Chinese)
- [9] 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.
- FENG Xijin. Research on Vibration and Noise Simulation Technology of Truck Radial Tire [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [10] 乔剑峰. 模态参数轮胎模型的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
QIAO Jianfeng. Research on Modal Parameter Tire Model [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [11] UHLAR S, HEYDER F, KÖNIG T. Assessment of Two Physical Tyre Models in Relation to Their NVH Performance up to 300 Hz [J]. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2019, 1744-5159.
- [12] 杜峰, 葛晓成, 陈翔, 等. 路面功率谱密度换算及不平度建模理论研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(5): 981-986.
DU Feng, GE Xiaocheng, CHEN Xiang, et al. Research on Pavement Power Spectral Density Conversion and Roughness Modeling Theory [J]. *Vibration, Testing and Diagnosis*, 2015, 35(5): 981-986. (in Chinese)

作者简介



吴渊 (1995-), 男, 贵州毕节人, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为汽车振动噪声仿真。

Tel: 15210293896

E-mail: wuyuan@catarc.ac.cn

(上接第 319 页)

https://car.autohome.com.cn/baike/detail_7_18_53.html. Autohome. What is the Vehicle Level [EB/OL]. (2018-08-17) https://car.autohome.com.cn/baike/detail_7_18_53.html. (in Chinese)

- [12] GB/T 3730.1—2001. 汽车和挂车类型的术语和定义 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2001.
GB/T 3730.1—2001. Motor Vehicle and Trailers—Types—Terms and Definitions [S]. Beijing: General Administration of

Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2001. (in Chinese)

- [13] 中国汽车工业协会. 2019 年汽车工业经济运行情况 [EB/OL]. (2020-01-13) http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_39/con_5228367.html.
China Association of Automobile Manufactures. The Economic Performance of the Auto Industry in 2019 [EB/OL]. (2020-01-13) http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_39/con_5228367.html. (in Chinese)

作者简介



李军 (1982-), 男, 安徽长丰人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料力学性能、汽车新材料、汽车轻量化应用技术、汽车轻量化评价技术等。

Tel: 18655333900

E-mail: cancan316@163.com

通信作者



万鑫铭 (1978-), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为汽车安全、汽车结构分析、汽车轻量化技术、轻量化数据库等。

E-mail: wanxinming@caeri.com.cn