DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.06.006

文章编号:1671-2579(2024)06-0059-08

基于轮胎-路面耦合噪声的公路路面 抗滑性能检测技术

叶伟¹,陈飞¹,胡晓阳^{1,2},徐正卫³,李立国³

(1.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆市 400067;2.哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055;3.招商局公路信息技术(重庆)有限公司,重庆市 400067)

摘要:为提高公路路面抗滑性能检测技术,该文在总结传统路面噪声测量方法优缺点的基础上,采用随车法采集轮胎-路面耦合噪声,并对传声器的具体位置参数进行了优化。通过行车速度-等效连续A声级拟合,实现了等效连续A声级的速度修正。利用主成分分析法提取轮胎-路面耦合噪声特征信号,可以对交通噪声、风噪、发动机噪声等干扰信号进行有效抑制,并基于第一主成分分量F1在100~1000 Hz频段上进行积分得到包络声能,用于表征路表纹理构造激励作用下产生的轮胎-路面耦合噪声能量。最后借助 SPSS 数理统计软件对不同磨耗程度路段下的包络声能和横向力系数进行拟合,结果显示两者在幂函数模型下拟合优度最高,R²高达0.978。

关键词:轮胎-路面耦合噪声;测量方法;等效连续A声级;包络声能;横向力系数 中图分类号:U416.2 **文献标志码**:A

Skid Resistance Detection Technology of Highway Pavement Based on Tie-Pavement Coupling Noise

YE Wei¹, CHEN Fei¹, HU Xiaoyang^{1,2}, XU Zhengwei³, LI Liguo³

(1.China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co.,Ltd., Chongqing 400067, China;
2.College of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;
3.China Merchants Roadway Information Technology (Chongqing) Co.,Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to improve the skid resistance detection technology of highway pavement, this paper summarized the advantages and disadvantages of the traditional pavement noise measurement methods, adopted the vehicle-following method to collect the tie-pavement coupling noise, and optimized the specific positional parameters of the microphone. The speed correction of the equivalent continuous A-weighted sound level was realized through the fitting of driving speed and equivalent continuous A-weighted sound level. The characteristic signal of the tie-pavement coupling noise was extracted by the principal component analysis method, and it can effectively suppress interference signals such as traffic noise, wind noise, and engine noise. The envelope noise energy (ENE) was obtained by integrating the extracted first principal component (F_1) in the frequency band of 100–1 000 Hz, so as to characterize the energy of tie-pavement coupling noise generated under the excitation of road surface texture construction. Data fitting of ENE and sideway force coefficient (SFC) in road sections with different degrees of wear was carried out by using SPSS mathematical statistics software. The results indicate that the goodness of fit of ENE and SFC is the highest in the power function model, and R^2 is as high as 0.978.

Keywords: tie-pavement coupling noise; measurement method; equivalent continuous A-weighted sound level; envelope noise energy; sideway force coefficient

作者简介:叶伟,男,硕士,高级工程师. E-mail: 229970548@qq.com

收稿日期:2024-03-15(修改稿)

基金项目:重庆市交通科技项目(编号:CQJT-CZKJ2023-05,CQJT-CZKJ2023-08)

0 引言

公路路面抗滑性能直接影响行车安全,当前业 内对于公路路面抗滑性能主要采用摩擦系数、构造 深度、横向力系数3项技术指标进行评价,其分别对 应的检测方法有摆式仪法、铺砂法、车载式激光构造 深度测试法、横向力系数测定车法^[1-2]。虽然以上检 测方法和评价指标对路面抗滑性能均有所反馈,但 是也存在弊端,如摆式仪法和铺砂法检测效率低、测 量精密度和准确度不够高,横向力系数检测车每次 测试需要对其进行路面温度和行车速度修正,车载 式激光构造深度仪造价昂贵等。

相关研究表明[3-5]:轮胎-路面耦合噪声主要是由 于路面技术状况、环境、车辆特性等因素通过不同机 理的综合作用而形成,相应的声学信号中蕴藏大量 的路面参数信息,最为相关的参数信息包括:路表纹 理构造、吸声系数以及弹性模量。其中,轮胎-路面 耦合噪声对路表纹理构造的反馈最为直接,而路表 纹理构造则是反映路面抗滑性能的重要因素之一。 本文结合现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)^[6]、《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F 40-2004)^[7]、《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018)^[8]、《公路养护工程质量检验评定标准》 (JTG 5220-2020)^[9]等相关沥青路面设计、施工、检 测规范要求,仍主要以横向力系数作为路面抗滑性 能自动化检测的主要评价指标,开发一种能够在行 车过程中实时高频采集轮胎-路面耦合噪声,轻量便 捷,快速高效,而且测量结果与横向力系数具有良好 相关性的路面抗滑性能新型检测装备,对路面抗滑 性能常态化监测、路面行车安全预警以及养护科学 决策将起到积极的推动作用。

1 轮胎-路面耦合噪声测量方法

在路面噪声测量方法方面,国际上通常分为远 场法和近场法两大类。其中,远场法主要包括统计 通过法(Statistical Pass-By Method, SPB)^[10]和控制 通过法(Controlled Pass-By Method, CPB);近场法主 要包括拖车法(Close Proximity Method, CPX)^[11]和 随车声强法(On Board Sound Intensity Method, OBSI)^[12]。由于远场法更多的是反映交通环境综合 噪声,且采集设备需要定点布设,对于轮胎-路面耦

合噪声信号无法实现连续高频采集。拖车法 CPX 可 长距离连续测量轮胎-路面耦合噪声,其特有的密闭 罩可减小牵引车辆噪声、风噪、环境噪声、气流扰动 等因素的影响,也能在一定程度范围内降低反射噪 声,可较准确地测量轮胎-路面耦合噪声。但是拖车 法对测试车辆及测试系统要求非常严格,且对标准 轮胎的控制要求较高,拖车设备造价昂贵,导致其普 及程度较低。随车声强法OBSI测试仪器安装类似 于CPX法,采用两个平行的声强传声器,并在声强传 声器前端放置风罩或鼻锥,测量得到的声强是距离 轮胎侧壁、离路面与轮胎的接触点发出的噪声,这种 方法可在任何车辆及轮胎上集成使用,其安装相比 拖车法更简便,造价更低。但随车声强法OBSI测得 的噪声信号中除轮胎-路面耦合噪声外,还包括车辆 自身噪声、风噪、交通流噪声等干扰[13],目前缺乏相 应的去噪算法研究,不能直接反馈路表纹理构造 差异。

项目组在总结拖车法 CPX 和随车声强法 OBSI 优缺点的基础上,参考 Zhang等^[14]开发的嵌入式交通 漫游巡检感知系统 VOTERS 关于轮胎-路面耦合噪 声的测量方法,将传声器放置在轮胎外侧,可在几乎 不增加车辆配重,不影响车辆正常行驶的状态下随 车行驶采集轮胎-路面耦合噪声信号。并基于不同 路表纹理构造下的轮胎-路面耦合噪声信号测试,对 传声器的具体位置参数进行了优化。当传声器离地 高度为 15 cm、距轮中心长度为 40 cm(图 1)时,得到 轮胎在一定转速下与不同纹理构造的沥青路面磨耗 层耦合噪声的时频图^[15]。SMA13、AC13、微表处 MS3、碎石封层 4种不同磨耗层工况下的轮胎噪声信 号幅值结果如图 2 所示^[16]。







1 500 2 000 300

0

500

1 000

频率/Hz

40

20

0

100

Ht HIIS

200

图 2 不同磨耗层工况下的轮胎--路面耦合噪声时频图 Figure 2 Time-frequency diagram of tie-pavement coupling noise under different degrees of wear

从图2可以看出:幅值呈现出显著差异,表明该 测量方法下的轮胎--路面耦合噪声与路表纹理构造 存在某种相关性。

该系统涉及的主要仪器设备包括:轮胎、传声

器、数据采集系统,并以某品牌多用途汽车 MPV 作 为车载平台。轮胎洗用米其林品牌,型号为235/ 55R17 103W, 胎面宽度 235 mm, 扁平率 55, 轮胎构 造为子午线构造,轮辋直径43.18 cm,支持最大负荷 875 kg、最大胎压 340 kPa、最高速度 270 km/h。车 载传声器采用 46AE 1/2" CCP Free-field Standard Microphone Set麦克风,250 Hz时的灵敏度为50 mV/Pa, 频率响应在 $5\sim10\times10^3$ Hz 时为 ±1 dB, $3.15\sim20\times$ 10³ Hz时为±2 dB,动态量程为17~138 dB。数采系 统采用 VOTERS,该系统由1个信号调制隔离器、1 个 CINCOZE DS-1101 工业计算机和1个 GSC PCIE-24DSI数据采集卡组成,具有12通道模拟输入、 24位模数转换、100 dB动态范围、200 kS/s最大采样 率,最大电压范围±10 V,采样频率设为50 kHz。

包络声能算法 2

行车速度-等效连续A声级拟合 2.1

不同速度下的轮胎-路面耦合噪声信号频谱图 如图3所示。



不同行车速度下轮胎-路面耦合噪声频谱图 图 3 Figure 3 Spectrum of tie-pavement coupling noise at different driving speeds

从图3可以看出:速度对噪声信号幅值有一定影 响,随着车辆行驶速度增大,噪声信号幅值也随之增 大, 谱峰向高频方向延伸且更密集。因此, 需要对噪 声信号进行速度-声压能量拟合,抑制行车速度对轮 胎-路面噪声信号的干扰。

研究表明:A计权声压级最能反映人对噪声的主 观感受[17]。因此,通常在环境噪声的测试中,一般将 A 计权声压级作为主要的评价指标。同时,根据轮胎-路面耦合噪声信号随时间持续变化的特点,引入等 效连续A声压级^[18]的概念,即把声波能量按照时间 平均的方法来量化人耳对噪声的主观感受,具体指 在特定时间内某一随时间变化的A声级,以一个连续稳态A声级来表示该时段内的声波能量大小,计 算模型如式(1)所示。等效连续A声级充分考虑到 道路交通噪声随时间不断变化的特点,将能量进行 平均,等效于1个噪声级。目前,大多数国家均以等 效连续A声级作为噪声的主要量化指标。

$$L_{\rm eq} = 10 \, \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_{\rm l}}^{t_{\rm e}} \left(\frac{P_{\rm A}^2(t)}{P_{\rm 0}^2} \right) {\rm d}t \right] = 10 \, \log \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} 10^{0.1 \cdot L_{\rm A}} {\rm d}t \right)$$
(1)

式中: L_{eq} 为等效连续A声级(dB); P_A 为瞬时A计权 声压(Pa); P_0 为参考声压(2×10^{-5} Pa); L_A 为瞬时A 声级(dB);T为测量时间(s)。

选择一段 500 m长的沥青路面试验路段(磨耗层 混合料级配类型为AC13,基于不同行车速度下的等 效连续A声级实测数据如表1所示,发现行车速度与 等效连续A声级呈现对数线性关系,如图4所示。行 车速度-等效连续A声级的经验模型表达式如式(2) 所示。先将经验模型改写成矩阵形式,利用表1实测 数据求出待估参数*n*=45.56,*m*=12.80。再将待估参 数代入经验模型得出标准速度下的等效连续A声级 计算模型如式(3)所示,标准速度取 80 km/h。最后将 不同速度下的等效连续A声级换算成标准速度下的 等效连续A声级,实现等效连续A声级的速度修正。

表1 不同行车速度下的等效连续A声级实测值

 Table 1
 Measured equivalent continuous A-weighted sound level at different driving speeds

行车速度/	等效	连续A声级	等效连续A声	
$(km \cdot h^{-1})$	测试-1	测试-2	测试-3	级平均值/dB
10	56.21	56.40	57.01	56.54
15	62.89	59.97	62.73	61.87
20	57.69	58.30	60.43	58.81
25	66.23	64.22	63.92	64.79
30	65.18	66.58	62.88	64.89
35	64.59	66.06	64.88	65.17
40	63.55	66.24	67.13	65.65
45	67.78	67.08	66.36	67.07
50	67.60	68.36	69.07	68.34
60	69.88	69.02	68.33	69.07
70	68.31	69.19	68.37	68.62
80	69.62	69.03	69.40	69.35
90	70.10	70.32	70.49	70.30
100	70.54	69.52	71.45	70.50
105	70.27	69.87	70.82	70.32



图 4 行车速度-等效连续 A 声级关系曲线 Figure 4 Relationship between driving speed and equivalent continuous A-weighted sound level

$$L_{\rm A} = n + m \lg V \tag{2}$$

式中: L_A 为等效连续A声级(dB);n为路面类型系数;m为速度系数;V为行车速度(km/h)。

$$L_{\rm n} = L_{\rm c} + 12.8 \lg \left(\frac{V_{\rm n}}{V_{\rm c}} \right) \tag{3}$$

式中: L_n 为标准速度下的等效连续A声级(dB); L_c 为 实际速度下的等效连续A声级(dB); V_n 为标准速度 (80 km/h); V_c 为实际行车速度(km/h)。

2.2 信号降噪处理与包络声能计算

采集的声音信号中除轮胎-路面耦合噪声信号 外,还包括交通噪声、风噪、发动机噪声等干扰信号, 因此采用普减计权法^[19]进行降噪处理。借鉴语音信 号处理的经验做法,利用加性干扰噪声与轮胎-路面 耦合噪声信号不相关的特点,假设噪声统计平稳,用 无轮胎--路面耦合噪声状态下测得的干扰噪声频谱 估计值取代轮胎--路面耦合噪声信号中的干扰噪声 频谱,将含干扰噪声的轮胎-路面耦合噪声频谱与干 扰噪声频谱估计值相减,从而获得去除加性干扰的 轮胎-路面耦合噪声信号的估计值。具体步骤为:将 轮 胎 – 路 面 声 音 信 号 x [n] 加 窗 分 帧 后 形 成 $x_i(m), m = 1, 2, 3, \dots, N, N$ 为每一帧长度,取值 2¹³, 帧移长度为 2^{10} 。针对每一帧 $x_i(m)$ 进行快速傅里叶 变换运算(Fast Fourier Transform, FFT)得到X_i(k), 根据 $X_i(k)$ 分别计算频域相位 $X^i_{angle}(k)$,再根据 $X_i(k)$ 频域带宽进行频域计权增益计算,对第*i*帧将 $X_{i-M}(k), \dots, X_{i}(k), \dots, X_{i+M}(k)$ 等 2*M*+1个帧之间 取相邻帧间功率谱幅度均值,通过试验采集到干扰 噪声长度,FFT变换之后的帧数为N_{NIS},即可计算该 部分干扰噪声功率的平均能量值D(k), 谱减计权之

后得到轮胎-路面耦合噪声信号估计值 $|\hat{X}_{i}(k)|^{\gamma}$ 如式 (4)所示,式中: $a = 1, b = 0.3, \gamma = 1$ 。 $|\hat{X}_{i}(k)|^{\gamma} =$ $\left\{ \begin{vmatrix} X_{amp}^{i}(k) | \cdot G_{db}(f) - a \cdot | D(k) |^{\gamma} & |X_{amp}^{i}(k)| \ge b \cdot | D(k) |^{\gamma} \\ b \cdot | D(k) |^{\gamma} \cdot G_{db}(f) & |X_{amp}^{i}(k)| \le b \cdot | D(k) |^{\gamma} \end{matrix} \right.$ (4)

式中: $X_{amp}^{i}(k)$ 为功率谱幅度均值; $G_{db}(f)$ 为频域计权增益。

主成分分析^[20](Principal Component Analysis, PCA)是一种掌握事物主要矛盾的多元统计分析方 法,也是最为常用的特征提取方法。通过对原始数 据进行加工处理,不仅可以降低数据处理复杂程度, 还可以提高数据的信噪比,改善原始数据的抗干扰 能力。PCA的基本思想是将原来具有一定相关性的 指标(例如n个指标)进行重新组合,形成一组互不相 关的新指标,这些新指标是原来n个指标的线性组 合,并依据新指标的贡献度选取其中贡献度较大的 主成分来代替原来的指标进行后续分析。其中,主 成分的确定是以最大方差准则为基础的,从统计学 观点可知,随机变量的方差代表其含有的信息,方 差值越大则所包含的信息就越多,因此PCA能够 对原始数据进行冗余分析和特征提取。提取的 具体过程如下:对轮胎-路面耦合噪声按照时间 序列进行采样,得到轮胎-路面耦合噪声信号X= $\{x_1, x_2, \dots, x_{m \times n}\}$, 对轮胎-路面耦合噪声信号序列 X 进行加窗重构,将原来的m×n个观测信号进行线性 组合形成n个新的综合信号,如式(5)所示。研究表 明:轮胎--路面耦合噪声信号中第一主成分贡献约占 90%[21]。因此,只需要提取出第一主成分分量F1来 表征轮胎--路面耦合噪声的有效信号即可,从而达到 冗余分析和特征提取的目的。

$$\begin{aligned}
F_{1} &= \omega_{1,1}x_{1} + \omega_{2,1}x_{2} + \dots + \omega_{n,1}x_{n} \\
F_{2} &= \omega_{1,2}x_{1} + \omega_{2,2}x_{2} + \dots + \omega_{n,2}x_{n} \\
&\vdots \\
F_{n} &= \omega_{1,n}x_{1} + \omega_{2,n}x_{2} + \dots + \omega_{n,n}x_{n}
\end{aligned}$$
(5)

式中: F_n 为加窗重构后的第n个信号; ω 为加窗序列。

结合本文第一节轮胎-路面耦合噪声信号时频 图分析可知,轮胎-路面耦合噪声中由于路表纹理构 造激励作用引起的振动噪声频段^[22]主要集中在 100~1 000 Hz。因此,本文提出一个新的概念——包络声能(Envelope Noise Energy, ENE),即将轮胎–路面耦合声音信号通过谱减计权后进行加窗重构^[23],提取第一主成分分量 F_1,F_1 用标准速度下的等效连续A声级表示,计算 F_1 包络曲线在100~1 000 Hz频域围成的面积,表征由路表纹理构造引起的轮胎–路面耦合噪声能量,计算模型如式(6)所示。

$$E_{\rm ENE} = \int_{f}^{f_{\rm a}} P_{\rm PCA} \left\{ F_{\rm FFT} \left[L_{\rm c} + 12.8 \, \log \left(\frac{V_{\rm n}}{V_{\rm c}} \right) \right] \right\} {\rm d}f \quad (6)$$

式中: E_{ENE} 为包络声能(Pa); f_1 为频率下界; f_h 为频率 上界; L_c 为实际速度下的等效连续A声级(dB); V_n 为 标准速度(80 km/h); V_c 为当前行驶速度(km/h); P_{PCA} 为主成分分析; F_{FFT} 为快速傅里叶变换。

风噪、发动机噪声、交通噪声等噪声形式多样复杂。通过采集风噪、发动机噪声、公路路域范围内的 交通噪声,与无明显噪声干扰的轮胎-路面声音信号 进行叠加,然后采用前述算法进行滤波处理,验证算 法对噪声干扰的抑制效果。表2为各种含噪合成信 号滤波前后的包络声能,其中合成信号包络声能代 表无明显噪声干扰的轮胎-路面包络声能分别与上 述干扰噪声信号叠加形成的含噪合成信号包络声 能。验证结果表明:含噪合成信号经滤波后计算得 到的包络声能与无明显干扰噪声的包络声能相当, 可以认为前述设计算法对大部分干扰噪声能够起到 较好的抑制效果。

表 2 各种交通噪声滤波前后包络声能 E_{ENE} 统计 Table 2 Statistics of E_{ENE} before and after traffic noise filtering

干扰噪声 类型	Δτ. 4-1	无明显干扰噪声	合成信号包	滤波后包	
	<u></u> 如 回	的包络声能/	络声能/	络声能/	
	姍丂	$(dB \cdot Hz)$	$(dB \bullet Hz)$	$(dB \boldsymbol{\cdot} Hz)$	
风噪	1	23.58	34.65	23.88	
	2	24.81	33.98	24.07	
	3	24.06	34.19	23.87	
发动机噪声	1	23.97	41.64	24.12	
	2	24.36	42.25	23.68	
	3	23.89	42.67	23.73	
交通噪声	1	24.17	48.21	24.33	
	2	23.69	48.10	24.22	
	3	23.78	47.54	24.05	

3 包络声能-横向力系数拟合分析

本文选取了横向力系数为30~70的9个测试

路段,测试路段要求线形平直、路表干燥且无污染物,除风噪、发动机噪声以及常规交通噪声外无明显其他干扰噪声,测试长度统一选取1000m,路况基本信息如表3所示。利用传统横向力系数测试

车和笔者开发的路面声学检测车对以下试验路段的横向力系数和包络声能进行测试,每个试验路段 平行测试3次,并计算代表值,测试结果如表4 所示。

表 3 测试路段基本信息 Table 3 Basic information of test road

序号	公路名称	技术等级	磨耗层	路表纹理特征	测试长度/m
1	G5013渝蓉高速(四川成都段)	高速公路	MS3	路表完好,纹理粗糙	1 000
2	G75兰海高速(重庆段)	高速公路	MS3	骨料轻度磨光	1 000
3	G248国道(四川阿坝段)	二级公路	MS3	骨料中度磨光	1 000
4	G347国道(安徽芜湖段)	一级公路	SMA13	路表完好,纹理粗糙	1 000
5	G4217蓉昌高速(四川阿坝段)	高速公路	SMA13	骨料轻度磨光	1 000
6	G5001重庆绕城高速	高速公路	SMA13	骨料中度磨光	1 000
7	G210国道(贵州桐梓段)	二级公路	AC13	路表完好,纹理粗糙	1 000
8	X241县道(重庆南泉段)	三级公路	AC13	骨料中度磨光	1 000
9	Y035乡道(重庆南岸区)	四级公路	AC13	骨料重度磨光	1 000

表4 横向力系数C_{SFC}和包络声能E_{ENE}测试结果 Table 4 Test results of C_{SFC} and E_{ENE}

八四左右	磨耗层	横向力系数 C _{SFC}			包络声能 E _{ENE} /(dB·Hz)				
公路名协		1#	$2^{\#}$	3#	代表值	1#	$2^{\#}$	3#	代表值
G5013渝蓉高速(四川成都段)	MS3	72.3	70.7	71.9	71.6	33.6	34.1	31.5	33.1
G75兰海高速(重庆段)	MS3	67.9	68.7	70.1	68.9	30.2	31.1	30.5	30.6
G248国道(四川阿坝段)	MS3	65.4	63.6	66.5	65.2	28.1	26.8	27.9	27.6
G347国道(安徽芜湖段)	SMA13	61.3	60.9	62.6	61.6	24.4	24.9	23.1	24.1
G4217蓉昌高速(四川阿坝段)	SMA13	59.9	58.1	60.3	59.4	24.1	23.4	23.5	23.7
G5001重庆绕城高速	SMA13	54.3	52.6	53.7	53.5	22.5	23.1	22.9	22.8
G210国道(贵州桐梓段)	AC13	50.4	52.6	50.7	51.2	22.6	22.1	20.9	21.9
X241县道(重庆南泉段)	AC13	44.7	42.5	44.1	43.8	17.5	16.8	18.1	17.5
Y035乡道(重庆南岸区)	AC13	32.5	30.4	31.7	31.5	10.4	11.1	9.9	10.5

根据测试路段不同级配类型磨耗层材料的横向 力系数和包络声能测试结果可知,在路表完好、纹理 粗糙的条件下,横向力系数和包络声能测试结果呈 现相同变化趋势:微表处 MS3>沥青玛蹄脂碎石 SMA13>沥青混凝土 AC13。另外,在相同级配类型 条件下,例如磨耗层同为沥青混凝土 AC13,随着路 表纹理粗糙程度的衰减,横向力系数和包络声能同 时表现出下降趋势。

采用 SPSS 数理统计软件对上述不同测试路段 下的横向力系数代表值和包络声能代表值进行曲线 估算^[24],分别在一次函数、二次函数、三次函数、指数 函数、对数函数、幂函数6种模型下进行拟合分析,发 现横向力系数和包络声能在幂函数模型下拟合优度 最高, 拟合优度 R^2 高达 0.978, 拟合曲线如图 5 所示, 利用包络声能 E_{ENE} 换算横向力系数 C_{SFC} 的表达式可 记作 C_{SFC} = 5.39 $E_{\text{ENE}}^{0.74}$ 。



图 5 横向力系数与包络声能幂函数拟合曲线 Figure 5 Power function fitting curve of SFC and ENE

4 结语

以等效连续A声级作为轮胎-路面耦合噪声的 主要量化指标,经速度修正后的等效连续A声级可 采用谱减计权算法去噪,基于主成分分析法对去 噪后的信号提取第一主成分分量F₁,并在100~ 1000 Hz频段上对第一主成分分量F₁进行积分得到 包络声能。结合不同路段下的横向力系数和包络声 能实测结果,经数据拟合分析表明:包络声能与横 向力系数在幂函数模型下拟合优度最高,R²高达 0.978,可实现包络声能与横向力系数之间的有效 换算。

参考文献:

References:

- [1] 谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法 综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32-47.
 TAN Yiqiu,XIAO Shenqing,XIONG Xuetang.Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(4):32-47.
- [2] 陈占权.沥青路面表面纹理的检测方法及其精准度分析
 [J].中外公路,2023,43(6):74-78.
 CHEN Zhanquan.Detection method and accuracy analysis of asphalt pavement surface texture[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):74-78.
- [3] 何虹霖,邹晓翎,叶向前,等.低噪声沥青路面降噪机理及 研究进展[J].中外公路,2022,42(1):55-61
 HE Honglin, ZOU Xiaoling, YE Xiangqian, et al. Noise reduction mechanism and research progress of low-noise asphalt pavement[J].Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(1):55-61.
- [4] 陈鸿毅,高建平,赵翘.基于表面纹理参数评价路面降噪 性能[J].中外公路,2015,35(4):85-89.
 CHEN Hongyi,GAO Jianping,ZHAO Qiao.Evaluation of pavement noise reduction performance based on surface texture parameters[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(4):85-89.
- [5] 梁遐意.低噪声功能路面表面纹理优化研究[D].广州:华 南理工大学,2020.

LIANG Xiayi. Research and optimization of pavement surface texture with low noise function[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2020.

- [6] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017. China Communications Road and Bridge Technology Co., Ltd.. Specifications for design and of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2017.
- [7] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2005.
 Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press,2005.
- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

Research Institute of Highway Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG 5210— 2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[9] 交通运输部公路科学研究院.公路养护工程质量检验评 定标准 第一册 土建工程:JTG 5220—2020[S].北京:人民 交通出版社股份有限公司,2020.

Research Institute of Highway Ministry of Transport. Inspection and evaluation quality standards for highway maintenance engineering section 1 civil engineering: JTG 5220—2020[S].Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2021.

[10] 交通部公路科学研究院.声学一道路表面对交通噪声影响的测量-第1部分:统计通过法:GB/T 20243.1—2006 [S].北京:中国标准出版社,2006.

Research Institute of Highway Ministry of Transport. Acoustics - measurement of the influence of road surface on traffic noise : Part 1: Statistics pass-by method: GB/T 20243.1—2006[S].Beijing:Standards Press of China,2006.

[11] 袁旻忞,李明亮,刘晓霏.一种基于近距法(CPX)改进的低噪声路面降噪效果预估方法[J].中国环境科学,2021,41
 (12):5943-5952.

YUAN Minmin, LI Mingliang, LIU Xiaofei. An improved noise reduction performance prediction method for low noise pavement based on CPX[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5943-5952.

[12] 刘武斌,韩森,陶志金,等.轮胎/路面噪声量测与分析[J].
 中外公路,2009,29(4):63-66.

LIU Wubin, HAN Sen, TAO Zhijin, et al. Measurement and analysis of tire/road noise[J]. Journal of China & Foreign

Highway,2009,29(4):63-66.

[13] 刘策,陈剑,张永斌,等.基于轮胎/路面噪声替换的车辆通 过噪声室内测量实验研究[J].汽车工程,2019,41(11): 1335-1340,1346.

LIU Ce, CHEN Jian, ZHANG Yongbin, et al. An experimental research on indoor pass-by noise measurement of vehicles based on the replacement of tyre/road noise[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(11): 1335-1340, 1346.

- [14] ZHANG Y Y,MCDANIEL J G,WANG M L.Estimation of pavement macrotexture by principal component analysis of acoustic measurements[J]. Journal of Transportation Engineering,2014,140(2):4013004.1-4013004.11.
- [15] 任万艳.沥青路面表面纹理磨耗特性及其对噪声的影响 研究[D].西安:长安大学,2019.
 REN Wanyan. Study on the abrasion characteristic of surface texture and its effect on noise for asphalt pavements[D].Xi'an:Chang'an University,2019.
- [16] 贺岩松,涂梨娥,徐中明,等.汽车声品质研究综述[J].汽车 工程学报,2014,4(6):391-401.
 HE Yansong, TU Li'e, XU Zhongming, et al. Review of vehicle sound quality[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering,2014,4(6):391-401.
 [17] 朱小辉,傅惠南,尚伟.基于MATLAB的等效连续A声级
- [17] 木小峰,博葱南,尚伟. 盔了 MAILAB 的导效连续 A 产级 算法研究与实现[J].机电工程技术,2020,49(10):45-47. ZHU Xiaohui, FU Huinan, SHANG Wei. Research and implementation of equivalent continuous A-weighted sound pressure level based on MATLAB[J].Mechanical & Electrical Engineering Technology,2020,49(10):45-47.
- [18] 高亚洲.基于改进谱减法和共振声学原理的无损检测技术研究[D].太原:中北大学,2022.
 GAO Yazhou. Research on nondestructive testing technology based on improved spectral subtraction and resonance acoustics[D]. Taiyuan: North University of China,2022.
- [19] 徐少平,李崇禧,林官喜,等.基于主成分分析与深度神经

网络的快速噪声水平估计算法[J].电子学报,2019,47(2): 274-281.

XU Shaoping, LI Chongxi, LIN Guanxi, et al. Fast image noise level estimation algorithm based on principal component analysis and deep neural network[J]. Acta Electronica Sinica,2019,47(2):274-281.

- [20] ZHANG Y Y. Use of vehicle noise for roadway distress detection and assessment[D]. Boston: Northeastern University,2015.
- [21] 杨洋,褚志刚.汽车路面噪声多重相干分解方法研究[J]. 振动与冲击,2015,34(19):31-36.
 YANG Yang, CHU Zhigang. Multiple coherence decomposition method for road noise of a car[J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(19):31-36.
- [22] 张立军,张希玉,孟德建.基于NFXLMS算法的车内道路 噪声主动控制系统[J].振动与冲击,2020,39(21):173-178. ZHANG Lijun, ZHANG Xiyu, MENG Dejian. Active control system of vehicle interior road noise based on NFXLMS algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(21):173-178.
- [23] 王松林,张恺,于晓贺,等.沥青路面磨耗指数与抗滑性能 指数相关性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工 程版),2023,47(4):752-756.

WANG Songlin, ZHANG Kai, YU Xiaohe, et al. Study on correlation between wear value of coarse aggregate and anti-sliding performance of asphalt pavement[J].Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2023,47(4):752-756.

[24] 吕镇锋,李波,张正伟,等.刻槽混凝土路面表面纹理及
 其噪声的相关性统计分析[J].公路交通科技,2015,32
 (11):14-19,26

LYU Zhenfeng,LI Bo,ZHANG Zhengwei, et al. Statistical analysis of correlation between surface texture and noise for grooved concrete pavement[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 14-19,26.