

基于道路交通数据不同车型振动信号去噪效果研究

周 伟

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年6月28日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月30日

摘 要

随着国内汽车数量的增加, 城市交通面临着各类交通压力, 地铁、车辆等交通工具运行引起的环境振动及其噪声问题, 都有可能影响到周边人们的生活和工作, 对设备造成不可忽视的影响。为去除交通工程中的噪声干扰, 提出了一种基于小波分析去噪算法, 本文以日常生活中典型的车辆(大货车)所产生的振动信号为研究对象, 利用ABAQUS建立了振动响应模型, 将实测数据作为振源输入, 并与去噪后的数据与做频域能量对比分析, 利用MATLAB软件对含噪声的振动信号进行时频分析和去噪研究。

关键词

交通数据, 信号处理, 时频分析, db5小波函数

Research on the Denoising Effect of Vibration Signals of Different Vehicle Models Based on Road Traffic Data

Wei Zhou

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 28th, 2025; accepted: Jul. 21st, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

With the increase in the number of cars in China, urban transportation is facing various traffic pressures. The environmental vibrations and noise caused by the operation of transportation vehicles such as subways and vehicles may affect the lives and work of people around them, and

have an undeniable impact on equipment. To remove noise interference in traffic engineering, a wavelet analysis based denoising algorithm is proposed. This paper takes the vibration signals generated by typical vehicles (large trucks) in daily life as the research object, establishes a vibration response model using ABAQUS, takes the measured data as the vibration source input, and compares it with the denoised data for frequency domain energy analysis. MATLAB software is used to conduct time-frequency analysis and denoising research on vibration signals containing noise.

Keywords

Traffic Data, Signal Denoising, Time-Frequency Analysis, db5 Wavelet Function

Copyright © 2025 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

地铁、车辆等交通工具运行引起的环境振动及其噪声问题，都有可能影响到周边人们的生活和工作，对设备造成不可忽视的影响。因此，我们需要采集这些噪声信号从而来评估其影响。目前，采集信号时没有办法完全避开其他干扰信号的影响，最终采集的信号总是夹杂着噪声，这些噪声信号具有非平稳和非线性特征，影响数据处理，所以对信号进行消噪是信号处理中的一个重要问题[1]。而在日常的实际应用中，许多信号都包含着各种尖峰、阶跃与突变，而且也不是均匀平衡的白噪声。在对时域信号进行去噪处理时，可采用包括基于经验模态分解(EMD)去噪[2]、小波阈值去噪[3]等去噪方法。本文主要通过小波分析来对非平稳信号进行降噪处理，并通过 Matlab 仿真实验对两种不同车型进行去噪处理，分析小波方法对信号去噪效果的影响，用能量损失百分比以及信噪比 SNR 来评估其去噪效果[4]。

2. 实验设计与信号处理

2.1. 模型建立

(1) 材料参数与有限元模型建立

由地勘报告可以得到，场地土层主要由粉质粘土、淤泥质粉质粘土组成，且研究项目场地平缓，本文模型使用 ABAQUS 建立，模型长为 20 m，宽 10 m，高为 10 m，测点距离道路车辆为 12 m，如图 1。勘测土层参数表如表 1 所示：

Table 1. Table of soil layer parameters

表 1. 各土层参数表

土层	厚度(m)	密度(kg/m ³)	泊松比	弹性模量(GPa)
粉质粘土	3.2	1810	0.3	120
淤泥质粉质粘土	2.0	1770	0.36	100
粉质粘土	4.8	1890	0.4	210

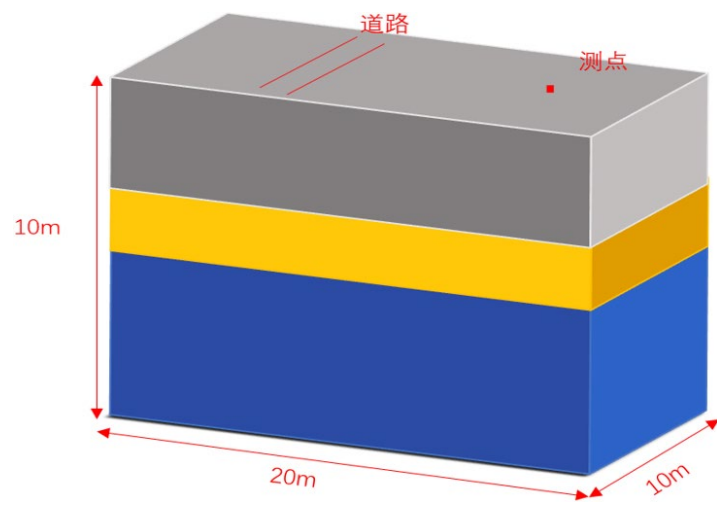


Figure 1. Model schematic diagram
图 1. 模型示意图

(2) 振源的输入

将测点处所测得的一组以大货车的实测数据导入作为模型的输入振源，如图 2，

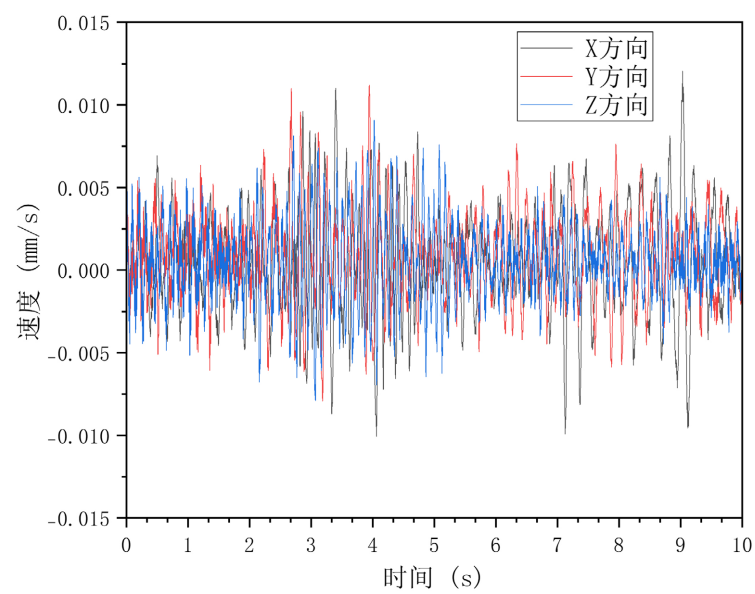


Figure 2. Model input vibration source
图 2. 模型输入振源

2.2. 信号的时频分析

常见的方法有短时傅里叶变换、连续小波变换和经验模态分解。时频分析可以得到时域和频域的联合分布情况，本文对采集到的车辆振动信号数据进行处理，将原始振动信号采用连续小波变换进行时频变换。

连续小波变换(CWT)是为了克服短时傅里叶变换中存在的时频分辨率问题而提出的，具体如下：假设存在一个函数 $\varphi(t) \in L^2(R)$ ，其傅里叶变换 $\varphi(t)$ 满足：

$$C_{\varphi} = \int_R \frac{|\varphi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

此时将 $\varphi(t)$ 称为小波基，将 $\varphi(t)$ 经过伸缩和平移后可以得到下式：

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

其中 a 和 b 分别代表伸缩因子和平移因子。通过调整伸缩因子和平移因子，可以灵活地分析信号在不同尺度和位置上的特征，从而实现对信号的多分辨率分析[5] [6]。

对于任意 $L^2(R)$ 的空间中的函数 $f(t)$ ，其连续小波变换的定义为：

$$\text{CWT}_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

在连续小波变换中，小波基的伸缩和平移操作是其核心特性，目的是能够同时获得信号的时间分辨率和频率分辨率。伸缩操作通过改变小波基的宽度来调整其频率分辨率，平移操作通过改变小波基在时间轴上的位置来提取信号在不同时间点的特征。这种灵活性使得小波变换在分析非平稳信号时特别有用，因为非平稳信号的频率成分随时间变化。

2.3. 车辆振动信号处理

在进行振动信号去噪的过程中，需要选取合适的小波基函数。本文的车辆振动信号频率基本在 100 hz 以内，在根据自己的经验总结以及对比其他学者的研究之后，本文将选用 db5 小波基函数进行信号去噪处理。db5 小波本身没有固定的频率范围限制，其适用频率范围取决于：信号的采样频率、小波分解的层数、信号的具体特性。分解层数越多，频率分辨率越高，能够捕捉更低频的成分。

(1) 小波阈值去噪

db5 小波函数的频率范围可以通过调整分解层数来适应不同的需求，假设信号的采样频率为 f_s ，则信号的最高频率为 $f_{\max} = \frac{f_s}{2}$ ，第 n 层分解对应的高频部分覆盖的频率范围是 $\left[\frac{f_s}{2^{n+1}}, \frac{f_s}{2^n}\right]$ ，低频部分覆盖的频率范围是 $\left[0, \frac{f_s}{2^{n+1}}\right]$ 。尺度函数用于捕捉信号的低频成分，小波函数用于捕捉信号的高频成分，尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 通过以下递归关系定义：

$$\phi(t) = \sum_{k=0}^{10} h(k) \phi(2t-k) \quad (4)$$

$$\psi(t) = \sum_{k=0}^{10} (-1)^k h(10-k) \phi(2t-k) \quad (5)$$

其中 db5 小波基的尺度函数和小波函数由以下滤波器系数定义：

$$h = [0.010597, 0.032883, -0.030841, -0.187035, 0.409165, 0.824495, 0.409165, -0.187035, -0.030841, 0.032883, 0.010597].$$

小波变换可以有效地去除信号中的噪声，同时保留信号的主要特征。它不仅能提高信噪比，而且能保持原信号的奇异性[7]。通过选择合适的小波基和阈值，可以实现对信号的软阈值或硬阈值处理，从而达到去噪的目的，去噪流程如图 3。本文对车辆振动信号进行预处理时，使用 db5 小波函数，进行软阈值处理，分解的层数为 4。

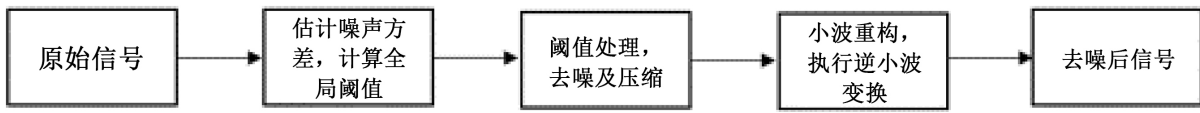


Figure 3. Wavelet denoising process diagram

图 3. 小波去噪流程图

(2) 振动信号去噪处理

对比相同车速下, 大货车和小轿车(下文称为大车和小车)两种不同车型的频域图, 如图 4、图 5, 可以发现两种车型在 y 方向的频率均高于 z 方向上的频率, 大车由于自身重量较大的原因, 其幅值高于小车。

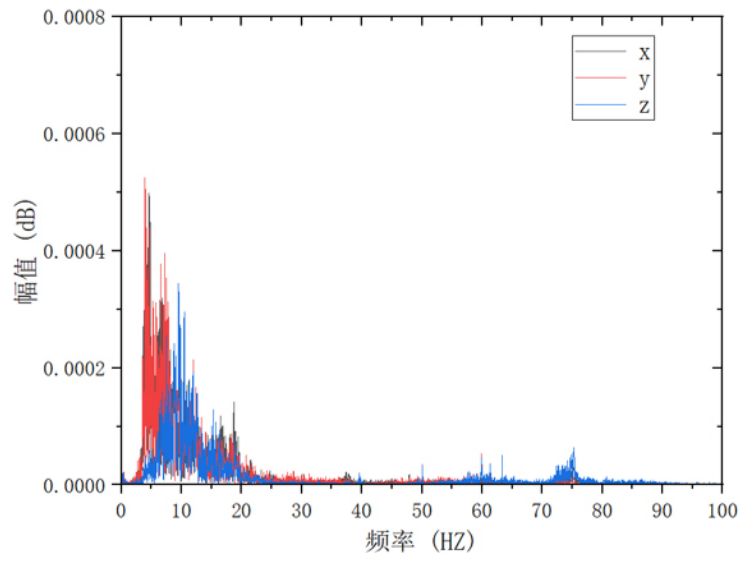


Figure 4. Large vehicle frequency domain diagram

图 4. 大车频域图

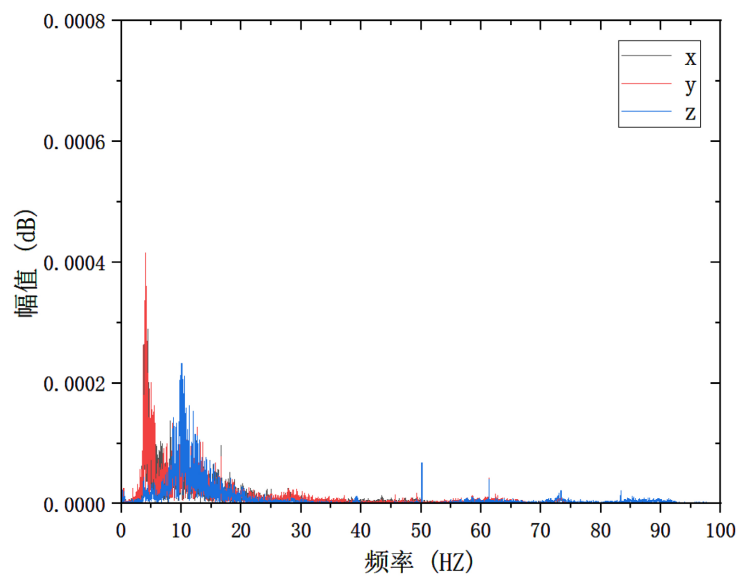


Figure 5. Small vehicle frequency domain diagram

图 5. 小车频域图

以下是大车去噪前后的信号对比，由两个子图组成，上面是原始信号，采样率为 500 Hz，数据点数为 30000，下面是去噪后的信号。可以看出原始信号波动较大，噪声明显，原始信号中存在明显的噪声，表现为信号的高频波动和不规则变化，信号的幅度在时间轴上波动较大，噪声掩盖了信号的主要特征。而去噪后的信号在时间轴上的波动更加规律，波动明显减小，信号的高频噪声得到了抑制，保留了信号的主要特征和趋势，同时尽管噪声被去除，信号中的细节仍然得到了保留，特别是在低频部分。这表明 db5 小波函数在去噪过程中没有过度平滑信号，能够有效保留信号中的重要信息。证明了其在信号去噪中的高效性和可靠性。

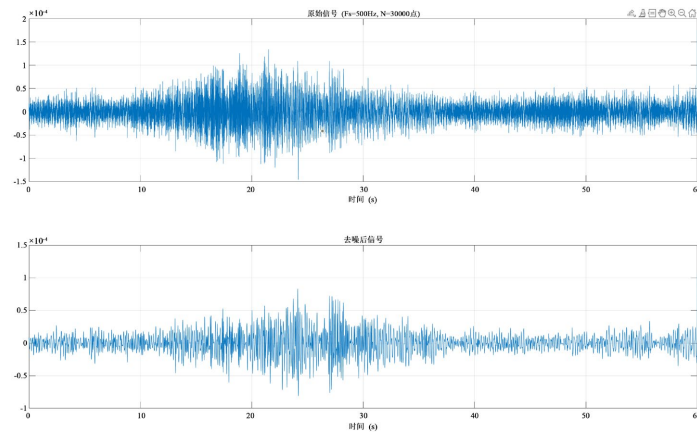


Figure 6. Comparison of signals before and after denoising
图 6. 去噪前后的信号对比

以下是大货车型频域对比图，展示了大车信号在去噪前后的频谱变化。从图 6 和图 7 中可以看出，用小波进行信号的去噪可以很好地保留有用信号中的尖峰和突变部分。原始信号在低频段(0~50 Hz)表现出较高的能量，这可能是信号的主要特征，反映了车辆的低频振动。在高频段(50 Hz 以上)存在明显的噪声，表现为频谱能量较为分散，幅值波动较大。去噪后的信号在低频段(0~50 Hz)保留了主要的能量峰值，表明 db5 小波函数在去噪过程中有效保留了信号的关键特征。在高频段(50 Hz 以上)的能量明显降低，表明高频噪声得到了有效抑制。

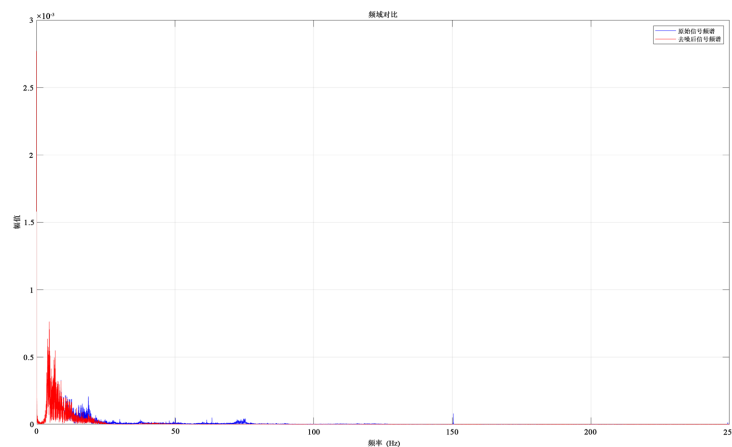


Figure 7. Comparison of frequency domain before and after denoising
图 7. 去噪前后频域对比图

3. 去噪效果评估与模型验证

3.1. 去噪效果的衡量标准

为了客观比较去噪算法的性能，实验中使用输出信噪比 SNR、平滑度 r 以及均方误差 RMSE 衡量指标检验去噪效果，其计算公式分别为：

输出信噪比 SNR：

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N [s^2(n) - \hat{s}^2(n)]} \quad (6)$$

平滑度 r ：

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N [\hat{s}^2(n+1) - \hat{s}^2(n)]}{\sum_{n=1}^N [s^2(n+1) - s^2(n)]} \quad (7)$$

均方误差 RMSE：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [s^2(n) - \hat{s}^2(n)]} \quad (8)$$

式中 $s(n)$ 为原始信号， $\hat{s}(n)$ 为去噪后信号， N 为信号长度。SNR 表示信号最大不失真时的强度与噪声信号的比值，RMSE 衡量了去噪后的信号与原始信号之间的误差，SNR 值越大，RMSE 值越小，平滑度 r 值越小，表明去噪效果越好[8] [9]。

在信号去噪领域，能量损失的范围是衡量去噪效果的重要指标之一。去噪效果好的情况下，信号能量损失通常在较低的范围。去噪后的信号在大部分频率段的能量值低于原始信号，这表明去噪过程导致了一定程度的能量损失。具体能量损失的百分比需要通过计算原始信号和去噪信号的能量差来确定。

3.2. 模型验证

本文以去噪前后能量作为振动响应的量化标准。如图 8、图 9，是去噪前后大车频域能量对比图和能量值对比竖状图，从图中我们可以看出，在去噪前后，很好地抑制了噪声，同时保留了目标信号的主频(50 Hz)，去噪后的信号频域能量分布更加集中，显示出更好的信号质量。大车原始信号能量为 0.44726，去噪后信号能量为 0.41873，能量损失为 6.38%，信噪比 SNR 为 11.7 dB。去噪前后能量损失在误差范围内。

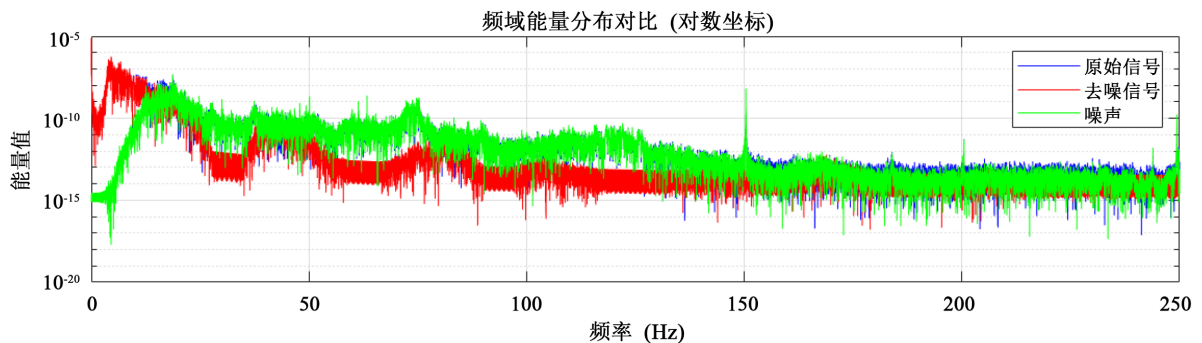


Figure 8. Comparison of frequency domain energy of large vehicles

图 8. 大车频域能量对比

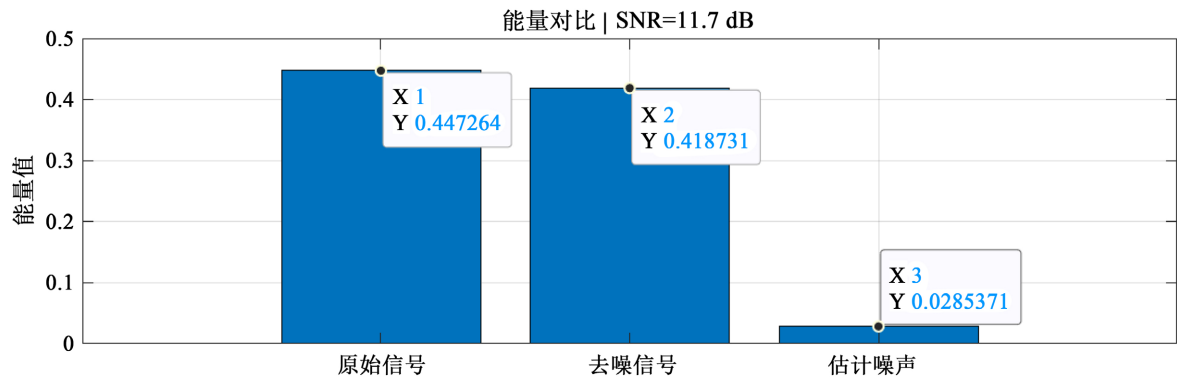


Figure 9. Comparison of energy before and after denoising of large vehicles

图 9. 大车去噪前后能量对比

4. 结论

本文通过对大货车的振动信号进行时频分析与去噪处理,利用 ABAQUS 和 MATLAB 软件,选取 db5 小波基函数,采用通用阈值去噪的降噪方法对车辆原始信号进行去噪处理,发现小波去噪后时域分析更加清楚简洁,并且小波阈值去噪法能有效去除车辆振动信号中的大部分噪声,并有效保留了信号的关键特征和细节,高频噪声得到了有效抑制,频谱更加集中。建立了振动响应模型,将一组实测数据导入作为模型的输入振源,将去噪后的数据与实测数据做频域能量对比分析,同时分析去噪前后振动信号的能量损失和信噪比 SNR,得出两种车型的能量损失均控制在 10%以内,并且均显示出了较高的信噪比,体现出了 db5 小波基函数较好的降噪效果。同时由于 db5 小波不具有对称性,去噪效果依赖阈值函数和阈值参数的选择,缺乏自适应机制,需根据经验或数据特性调整,可能引入过平滑或噪声残留。对于突变剧烈或时变特性强的信号,高消失矩可能导致细节丢失,需要选择具有更灵活时频局部性的小波。

参考文献

- [1] 曹银萍, 郭璐. 基于 MATLAB 的小波分析在信号去噪中的应用[J]. 信息记录材料, 2018, 19(7): 85-87.
- [2] Bai, Y., Lin, T. and Zhong, Z. (2021) Noise Reduction Method of ϕ -OTDR System Based on EMD-TFPPF Algorithm. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 24084-24089. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3107039>
- [3] Qin, Z., Chen, L. and Bao, X. (2012) Wavelet Denoising Method for Improving Detection Performance of Distributed Vibration Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 542-544. <https://doi.org/10.1109/lpt.2011.2182643>
- [4] 位瑞英, 卓坚毅. 基于小波分析的信号去噪研究[J]. 应用数学进展, 2021, 10(4): 7.
- [5] 姜永胜, 王其东. 基于小波变换的汽车振动信号去噪分析[J]. 汽车科技, 2006(4): 23-25.
- [6] 刘杰, 张新敏, 李朝峰, 等. 基于小波分析的车辆平顺性试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(4): 7-10.
- [7] 林克正, 李殿璞. 基于小波变换的去噪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(4): 21-23, 35.
- [8] 肖勇, 李博, 曹敏. 基于小波阈值的电力谐波信号去噪研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 78-83.
- [9] Lyrio, J.C.S.O. (2001) Wavelet Denoising of Gravity Gradiometry Data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 2001, San Antonio, 9-14 September 2001, 1474-1477. <https://doi.org/10.1190/1.1816384>