

地铁隧道衬砌壁后空洞检测试验 与信号去噪方法研究 ——基于 Butterworth 带通滤波与 Daubechies8 小波变换联合去噪法

鲍 艳¹, 裴乐君¹, 唐 超^{2,3}, 王 丽¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

摘 要: 随着城市轨道交通服役年限的增长, 地铁隧道衬砌壁后稳定性每况愈下, 针对衬砌壁后空洞检测难的问题, 冲击回波法被开发作为检测此类病害的新手段, 其中有效提取检测数据复杂信号中的回波振荡特征成为检测壁后空洞的关键。依托“管片-围岩”足尺模型壁后空洞检测试验, 提出基于 Butterworth 带通滤波的信号粗筛策略联合基于 Daubechies8 小波变换的局部噪声平滑的去噪方法。该方法使用 4 阶带通滤波, 设置 1 和 50 kHz 的高、低频截止频率, 有效抑制频段外的信号及噪声; 基于改进的自适应阈值法的小波变换平滑信号尖刺, 精细化去除频段内的残余噪声。结果表明, 试验数据的二维时频图经该方法去噪后, 在频域上抑制高频尖峰, 去除低频离散噪声, 通带内的回波信号得到平滑处理; 在时域上保留回波信号的分布特征, 减少噪声干扰。所提联合去噪法显著改善回波信号振荡特征的提取效果, 为冲击回波法检测地铁隧道衬砌壁后空洞提供前期研究基础。

关键词: 城市轨道交通; 地铁隧道; 壁后空洞; 冲击回波; Butterworth 带通滤波; Daubechies8 小波变换; 信号去噪
中图分类号: U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2026)01-0118-06

Experimental Study on Void Detection Behind Subway Tunnel Lining and Signal Denoising Method: Using a Combined Denoising Method Based on Butterworth Bandpass Filter and Daubechies8 Wavelet Transform

BAO Yan¹, PEI Lejun¹, TANG Chao², WANG Li¹

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2. China University of Geosciences, Beijing, Beijing 100083; 3. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101)

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-07-26

第一作者: 鲍艳, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事重大基础设施智慧运维研究, baoy@bjut.edu.cn

通信作者: 唐超, 男, 博士, 教授级高工, 从事隧道结构数字化检测技术与装备研发, tangchao@cugb.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52378385); 北京市朝阳区科技计划项目(202403001)

引用格式: 鲍艳, 裴乐君, 唐超, 等. 地铁隧道衬砌壁后空洞检测试验与信号去噪方法研究: 基于 Butterworth 带通滤波与 Daubechies8 小波变换联合去噪法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 118-123.

BAO Yan, PEI Lejun, TANG Chao, et al. Experimental study on void detection behind subway tunnel lining and signal denoising method: using a combined denoising method based on Butterworth bandpass filter and Daubechies8 wavelet transform[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 118-123.

Abstract: With the increase of service life of urban rail transit, the stability of subway tunnel lining is getting worse and worse. Aiming at the problem of difficulty in detecting voids behind lining, impact echo method has been developed as a new means to detect such diseases. Among them, effectively extracting echo oscillation characteristics from complex signals of detection data has become the key to detecting voids behind lining. Based on the voids detection experiment behind “segment-surrounding rock” full-scale model, this paper proposes a denoising method based on Butterworth bandpass filter signal coarse screening strategy combined with local noise smoothing based on Daubechies8 wavelet transform. This method uses 4th-order bandpass filter and sets high and low frequency cutoff frequencies of 1 kHz and 50 kHz to effectively suppress signals and noise outside the frequency band; wavelet transform based on improved adaptive threshold method smoothes signal spikes and finely removes residual noise within the frequency band. The results show that after denoising the two-dimensional time-frequency diagram of experimental data by this method, high-frequency spikes are suppressed in the frequency domain, low-frequency discrete noise is removed, and echo signals in the passband are smoothed; the distribution characteristics of echo signals are retained in the time domain to reduce noise interference. The joint denoising method proposed in this paper significantly improves the extraction effect of the echo signal oscillation characteristics, and provides a preliminary research basis for the impact echo method to detect voids behind the lining of subway tunnels.

Keywords: urban rail transit; subway tunnel; void behind lining; impact echo; Butterworth bandpass filtering; Daubechies8 wavelet transform; signal denoising

《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》强调,推进基础设施智能运维将会是未来交通行业发展的重要任务。《城市轨道交通隧道结构养护技术标准》(CJJ/T289—2018)中规定,隧道结构检查周期不少于每季度1~3次,常规定期检查不少于每年1~2次。《标准》中还明确提出在盾构法等各种类型隧道中要对壁后空洞进行不少于3条测线的全检,也是火灾、地震等特殊情况下的重要检查项目^[1]。良好的运维技术,能够有效提高隧道结构的服役性能,有助于城市轨道交通的安全运营。

空洞病害对地铁隧道结构安全服役产生不利影响,石钰锋等通过研究不同深度、面积、位置等多种空洞情况下管片内力、变形及截面安全系数的变化规律,发现随着空洞深度和面积的增加,隧道结构安全系数总体呈下降趋势^[2]。目前隧道结构壁后空洞主要是采用探地雷达进行检测,LAI等采用探地雷达对含有双层钢筋的结构表征脱空进行响应检测,结果表明钢筋对于探地雷达的检测效果具有严重屏蔽效应^[3]。

冲击回波法以检测信号的局部振荡特性作为识别空洞回波的依据,可以实现隧道壁后空洞的检测,但因检测现场的噪声干扰,空洞检测的误判率较高。因此,如何提高振动信号的信噪比,是有效识别空洞回波特征的前提。YAO等发现对于多层介质界面,回波频率特征更加复杂,注浆层存在缺陷下无法准确识别厚度频率,并且发现对于注浆套筒等小型被测物来说,物体自身的振动频率对检测结果有很大影响^[4-5]。WAN等发现块体的边界效应会影响空气耦合的撞击-回波响应^[6]。

针对隧道结构多层异质界面的复杂工况,很多学者提出了不同的去噪方法,以解决数据存在噪声掺杂时有效信号提取识别难的问题。HE等在冲击试验过程中发现相应信号易受到强背景噪声污染,提出了一种基于改进的维纳滤波-最小均方误差短时频谱振幅(WIENER-STSA)估计器的混合去噪法,对稳态和非稳态噪声都有一定效果^[7]。KAWAMURA等提出了一种使用语音频谱相位估计器的冲击噪声抑制方法^[8]。YAO等对原始回波信号进行滤波和频谱平滑,提高了灌浆填充搭接中缺陷的识别精度^[9]。WU等提出了一种基于多尺度稀疏特征提取网络的滤波手段,有效消除了弱回波信号中的盲源噪声,避免了过度滤波引起的“削峰”和“断点”现象^[10]。YANG等对电噪声进行了全面分析,提出了一种时变滤波器经验模态分解(TVF-EMD)联合小波阈值的电噪声去除方法^[11]。

尽管众多学者针对背景噪声、盲源噪声等类型噪声提出了相应的去噪方法,但空洞的回波信号具有非平稳的特点,其有效信号成分多从局部特征获取,目前鲜有学者关注。本文基于回波信号在时域和频域上的局部振荡特征,提出了一种对频带内外噪声进行联合去噪的方法,有助于提取有效信号成分,为识别地铁隧道结构衬砌壁后空洞提供技术支持。

1 试验设计

笔者设计了基于冲击回波法的管片壁后空洞检测试验,如图1所示,试验模型采用“管片-围岩”足尺模型,并在围岩中设置空洞以模拟管片壁后存在空洞的工况。



图1 试验现场

Figure 1 Experimental site

试验选用 PET 充气单元模拟空洞, 包括体积为 1.5 L、5 L、16 L 及组合尺寸 5 L+5 L 和 12 L+12 L 矿泉水瓶, 其高声阻抗差和结构稳定性优于泡沫、硅胶等材料, 可兼顾力学与声学需求^[12]。

冲击仪器和检测仪器分别采用脉冲激光器和多普勒激光测振仪, 对试验模型进行模拟空洞检测。脉冲激光器选择 5 Hz 的冲击频率, 为保证数据的完整性和数量, 采集时间维持 5 s。

试验时, “脉冲激光器-多普勒测振仪”检测系统采用测点重合的光路同轴设计, 有效消除激光信号传播时延引起的相位差, 提高测量精度。

2 环境噪声特性分析

由于试验在室外开放环境中进行, 采集的振动信号易受多源背景噪声干扰, 主要包括: 高斯分布的环境噪声(如空气湍流、电磁干扰)和非平稳有色噪声(如人员走动、设备振动)。

通过调查总结, 噪声基本上可以分为以下 5 种:

- 1) 环境振动噪声。包括风力作用、地表微震、车辆通行和人为走动等因素, 在频域上主要分布在低频部分, 有可能会混杂在有效信号之中。
- 2) 传感器噪声。包括脉冲激光器能量波动产生的噪声和多普勒测振仪激光相位噪声, 多为宽带的白噪声, 符合高斯分布特性, 分布较广。
- 3) 气象条件噪声。包括温差变化、湿度变化和尘埃等因素。温差变化会导致管片出现微小的收缩和膨胀, 湿度会影响空气的折射率, 影响激光光路, 尘埃在空气中也会影响激光的传播。这些因素产生的噪声, 多会导致频域出现超低频漂移和瞬态尖峰。
- 4) 结构耦合噪声。包括结构耦合不足产生的微震和围岩密实度不均导致的应力波异常反射产生的噪声, 多会引起超低频共振。

5) 设备操作噪声。脉冲激光器水冷系统不稳定导致脉冲能量变异和人为设备误触等因素, 可能会导致幅值异常。

3 联合去噪法

根据本文第 1 章分析, 本试验中可能产生的噪声在频域上呈现宽频特性, 大多分布在 1~几百赫兹的超低频和低频中, 高频中分布较少, 从低频基线漂移到高频随机扰动均有显著能量分布。为实现高保真去噪, 本研究采用联合去噪法: 首先通过 4 阶 Butterworth 带通滤波器对高频、低频和超低频数据进行频域粗筛, 再结合改进的自适应阈值 Daubechies8 小波变换去噪法对有效信号和残留噪声进行时频域分解与重构, 平滑处理回波信号, 剔除噪声部分。

3.1 基于 Butterworth 带通滤波的信号粗筛

带通滤波是一种频率滤波, 其允许通带内的信号通过, 抑制阻带内的频率成分, 常用于去除信号中的高频噪声或低频干扰。Butterworth 滤波器在截止频率附近有过渡区域, 具有平稳的频率响应特性, 可以有效地抑制截止频率之外的噪声, 并且可以保持信号的相位不变, 以此保留信号的相对时间信息。

本文采用 Butterworth 带通滤波器以最大程度地保留高、低频截止频率频段内有效信号, 该滤波器的频率响应函数为:

$$\begin{cases} H = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^{2N}}} \\ 0 < f_{\text{low}} < f_{\text{high}} < \frac{f_s}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, H 为滤波器的幅频响应; ω_c 为滤波器的截止频率, Hz; N 为滤波器的阶数; s 为复频率变量, rad/s; f_s 为采样频率, Hz; f_{low} 为低频截止频率, Hz; f_{high} 为高频截止频率, Hz。

滤波器的阶数 N 控制着从通带过渡到阻带的速度。若滤波器的阶数越高, 代表其对阻带的噪声抑制作用越强, 同时也会使振幅偏移或振荡; 但如果阶数过低, 则会导致噪声泄露到通带。研究发现, 当阶数为 5 时, 信号振幅会出现失真, 导致空洞回波信号的峰值提取失败, 无法识别有效信号, 因此滤波器阶数取为 4。

高、低频截止频率是指通带过渡到阻带的频率边界, 其具有对阻带内的噪声抑制和平滑的作用。选择合适的高、低频截止频率, 既能实现信号粗筛, 又有助于保留信号的局部基本特征。低频截止频率可有效

抑制设备振动随机噪声及慢变干扰；高频截止频率则能滤除超声频段的环境共振噪声，同时保留目标信号的瞬态冲击特征。

高、低频截止频率设置过窄，信号会出现畸形，丧失有效局部特征，导致峰值提取失败；高、低频截止频率设置过宽，会引入高、低频噪声，对噪声的抑制变弱。经过调试发现，高频截止频率应保持在 30 kHz 及以上。如图 2 所示，低频截止频率皆取 1 kHz，高频截止频率分别取 30、40 和 50 kHz，以及不进行高、低频截止频率处理的图像进行综合对比。

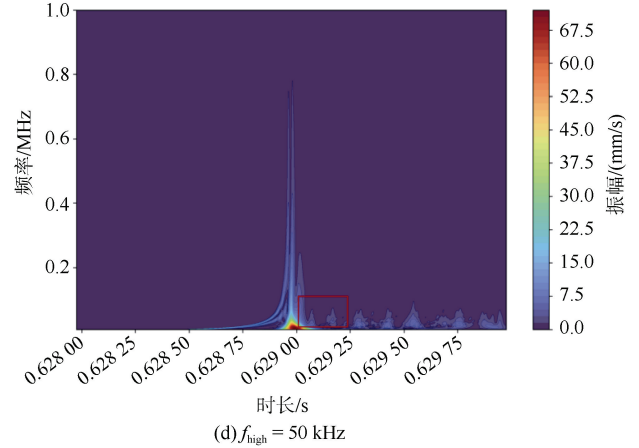
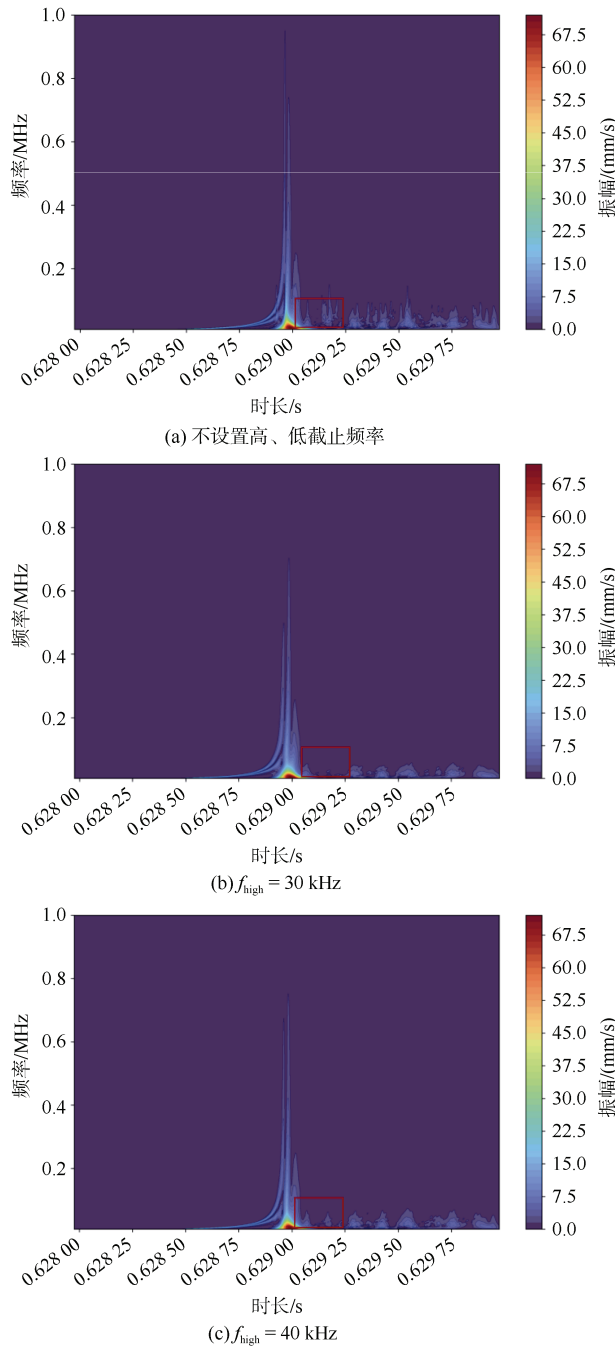


图 2 不同高频截止频率的二维时频图对比

Figure 2 Comparison of two-dimensional time-frequency maps with different high-frequency cutoff frequencies

如图 2(a)所示，当 $f_{\text{high}}=30 \text{ kHz}$ 时，0.629 00 s 至 0.629 25 s 区间内低频数据丢失，其他区间数据的频域分布范围也存在收窄现象，对比时域区间以加图中红框所示；而如图 2(b)和(c)所示， $f_{\text{high}}=40 \text{ kHz}$ 、 $f_{\text{high}}=50 \text{ kHz}$ 时，图像波形和在时频域上的分布特点皆无明显区别。

在冲击回波法中，频率与被测结构传播的深度有关，基于保留更多信号局部细节和更多隧道类型普适性的原则，本文选择频段较宽的 1 kHz 和 50 kHz 分别作为高、低频截止频率。

3.2 基于自适应阈值小波变换的局部噪声平滑去除

基于小波变换的去噪方法是通过将信号分解为不同频带的子信号系数。噪声通常表现为小幅值的小波系数，且分布密集；而有效信号则表现为大幅值的小波系数，但数量稀疏，多分布在突变处。通过设定一个阈值(全局阈值或局部阈值)对小波分解的系数进行处理，去除幅值小且分布密集的小波系数，然后通过小波重构得到去噪后的信号，可以提取信号中的有效成分并抑制噪声^[13-16]。

常用的阈值处理方法包括硬阈值法和软阈值法，本文基于软阈值法提出改进的自适应阈值法，每种方法适用不同的情况。

1) 硬阈值法。小波系数如果超过阈值，保留其原值；否则设为 0。原理为：

$$y = \text{xsign}(x) \quad (2)$$

式中， y 为输出信号，mm/s； x 为输入信号，mm/s； $\text{sign}(x)$ 为输入信号的符号函数。

硬阈值法在处理过程中会在阈值处产生跳跃，可

能会产生断点或不连续点^[17]。

2) 软阈值法。超过阈值的小波系数减去阈值的大小, 小于阈值的系数, 设为 0, 原理为:

$$y = \max(0, |x| - c) \text{sign}(x) \quad (3)$$

式中, c 为阈值; $\max(0, |x| - c)$ 为 $\max$ 函数, 选取这组数值中的最大值。

软阈值法在处理过程中, 虽然可以保留信号的原始特征和波形, 但是阈值设置过高可能会导致信号平滑过度, 阈值的选取对数据处理人员的专业素养要求较高。

3) 改进的自适应阈值法。本文提出一种改进的自适应阈值法, 本方法在软阈值法的基础上进行改进, 根据噪声幅值小且分布密集的特点自适应地调整阈值, 从而在去噪效果和信号保真度之间取得最佳平衡, 可以避免人工经验可能导致的不确定性和误差, 原理为:

$$c = \sigma \sqrt{2 \ln(n)} \quad (4)$$

式中, σ 为噪声的标准差, mm/s; n 为数据点数量。

噪声的标准差 σ 通过在信号每个 0.002 s 时间窗口内计算幅值小且分布密集的小波系数的标准差确定。由于该计算基于时间窗口内的局部噪声特性, 因此这一过程构成了自适应阈值方法的核心。

Daubechies8 小波对于捕捉信号局部突变的特征效果很好, 适合处理有突变、非平稳、非线性的复杂信号。因此在基于小波变换的信号去噪阶段, 针对带通滤波后的残留噪声, 采用 Daubechies8 小波基进行 4 层分解, 提取不同频率成分, 并通过筛选小于自适应阈值的不同尺度小波系数, 去除幅值小且分布密集的噪声成分, 有效地保留了信号的主要特征, 在抑制噪声的同时, 避免边缘振荡效应。

4 试验应用

本研究基于冲击回波法原理, 应力波在空气-混凝土和空气-土界面引起的回波振荡且衰减慢的特征, 选用从时域和频域 2 个角度分析的时频分析方法进行回波特征识别。

在基于冲击回波法的管片壁后空洞检测试验中, 采用本文提出的联合去噪法。首先采用 Butterworth 带通滤波优先消除频带外强干扰, 降低小波分解时的噪声污染风险, 减少后续小波处理的复杂度; 然后采用基于自适应阈值法的 Daubechies8 小波变换专注处理高、低频截止频带内残余噪声, 通过多分辨率信号分析, 实现噪声-信号的时频分离, 再通过小波重构得到去噪后

的数据。通过频域粗筛与时频域精细处理的协同去噪, 有效应对室外试验环境中多源噪声的复杂耦合干扰。

4.1 无空洞试验组检测数据去噪

采用小波变换将无空洞的试验组数据转换为二维时频图, 便于同时分析回波信号的时频域。选取其中一段冲击回波数据, 去噪前后的二维时频图如图 3 所示。

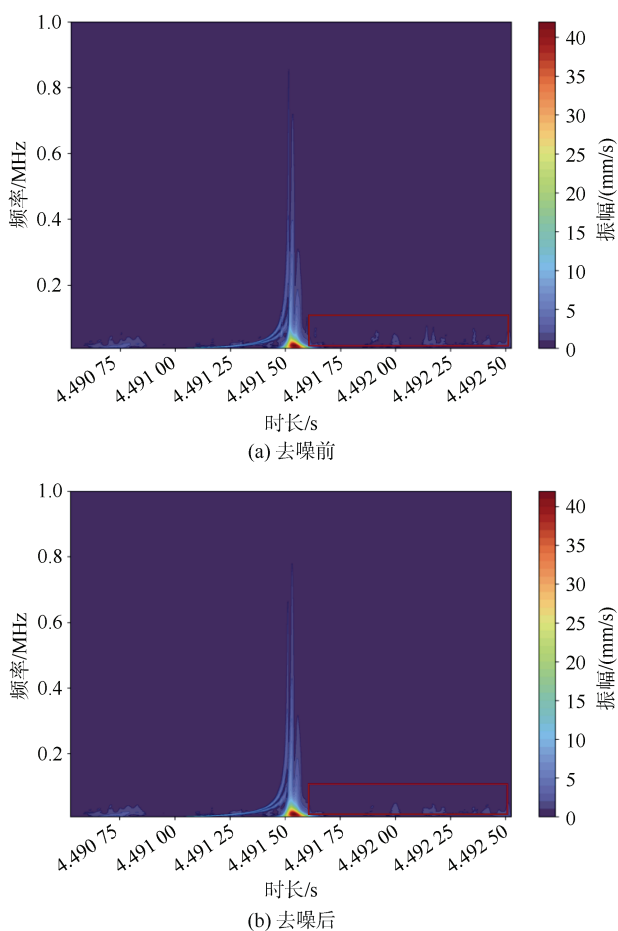


图3 无空洞回波信号二维时频

Figure 3 Two-dimensional time-frequency map of the echo signal without avoid

研究发现:

1) 频域上, 本方法抑制了 ≥ 0.8 MHz 高频频段上的尖峰, 适当削弱了其在高频区域的分布范围。由于试验模型结构组成成分的复杂性, 在低频段出现了偶然性回波, 也作为噪声得到了平滑处理。

2) 时域上, 4.491 75~4.492 00 s 区间内的低频离散信号已成功去除, 4.492 00~4.492 50 s 区间内的频率峰值也得到了平滑处理, 并且其在时域上的分布特征没有改变。

4.2 有空洞试验组检测数据去噪

对于有空洞的试验组数据,因其二维时频图具有复杂的振荡回波,因此本文的联合去噪方法对其效果更为明显,如图4所示。

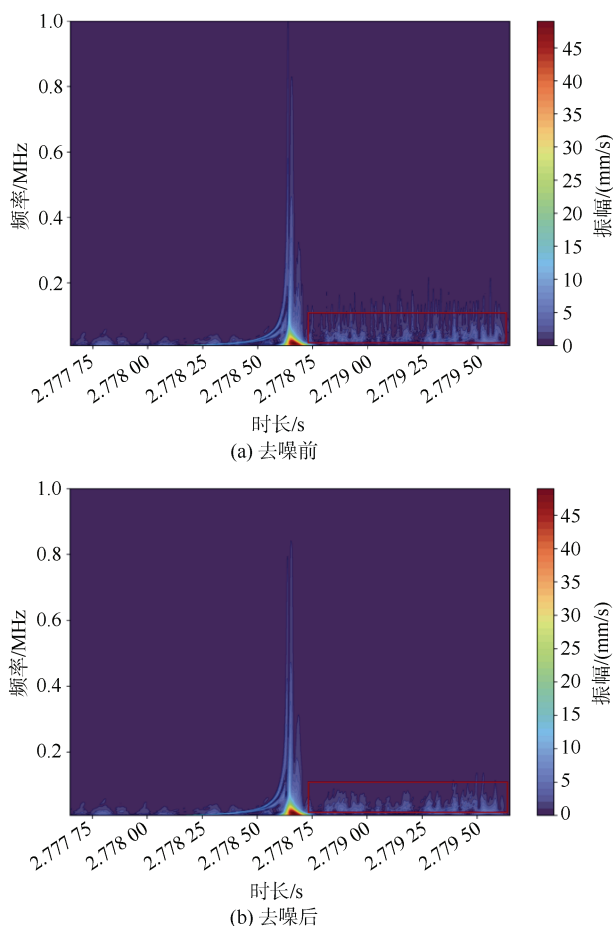


图4 有空洞回波信号二维时频

Figure 4 Two-dimensional time-frequency map of the echo signal with a void

研究发现:

1) 频域上,使用联合去噪法前,瞬时冲击信号的分布范围从0 Hz起,最高达到1 MHz,后续回波振荡信号毛刺较多,分布范围在0~0.2 MHz,会在一定程度上干扰有效信号在频域上的识别。经过联合去噪法处理,毛刺现象显著减弱,信号在频域上的分布范围受到较好地抑制,瞬时冲击信号分布的最高频率降低至0.8 MHz左右,回波振荡信号分布的最高频率降低至0.1 MHz左右,有助于识别回波信号中的有效成分。

2) 时域上,去噪前后的峰值分布基本一致,不会影响回波信号在时域上的波形判断,部分低频数据表现得更加圆滑,并且去除了部分低频离散的噪声信号,

也没有过度削弱时频信号的基本特征。

5 结论

地铁隧道衬砌壁后空洞影响其结构的服役性能与稳定运营,冲击回波法作为一种无损检测的新手段已开始被应用于壁后空洞的检测中。然而,在实际检测过程中,有效提高空洞回波信号的信噪比,依然是影响隧道结构壁后空洞识别效果的关键技术难题。

针对这一问题,本文提出了一种基于带通滤波与基于小波变换相结合的联合去噪方法,得到以下结论。

1) 频域上,该方法能够有效削弱和抑制回波信号中高于50 kHz的高频尖峰信号,重要的是,去除了低频离散噪声,对通带内的小型尖峰信号进行平滑处理,回波信号的频域分布范围得到抑制,为提取有效信息降低难度。

2) 时域上,该方法保持了瞬时冲击信号后续的回波振荡分布特征,减少噪声对有效信号在时域上的识别干扰。

联合去噪法为基于冲击回波法的地铁隧道衬砌壁后空洞检测数据处理提供有效的技术支撑,进一步为地铁隧道结构的健康监测与安全运营提供了有力保障。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 城市轨道交通隧道结构养护技术标准: CJJ/T 289—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Structural Maintenance Technical Standards for Urban Rail Transit Tunnels: CJJ/T 289—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [2] 石钰锋, 胡梦豪, 周宇航, 等. 含壁后空洞盾构隧道管片安全分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 107-115. SHI Yufeng, HU Menghao, ZHOU Yuhang, et al. Safety analysis of a shield tunnel segment with a cavity behind lining, considering the influence of the joints[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 107-115.
- [3] LAI Sicong, YUE Yunpeng, MENG Xu, et al. Void detection behind shield tunnel segments using ground penetrating radar: a laboratory experiment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2651(1): 012044.
- [4] YAO Fei, CHEN Guangyu, SU Jianhong. Experimental research and numerical simulation on grouting quality of shield tunnel based on impact echo method[J]. Shock and vibration, 2016, 2016: 1025276.
- [5] YAO Fei, ABULIKEMU A. Effect of impact source on detection quality in impact echo testing of sleeve grouting[J]. Materials testing, 2020, 62(9): 927-936.

(下转第129页)

- transit, 2024, 37(4): 24-31.
- [5] 毛芾. 车轮状态对地铁列车振动源强的影响及评价方法研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(17): 184-190.
MAO Wei. Effects of wheel condition on vibration source intensity of subway trains and their evaluation method[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(17): 184-190.
- [6] 谢玉梅, 贺玉龙, 徐鸿, 等. 成都市域快轨减振措施效果分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 120-126.
XIE Yumei, HE Yulong, XU Hong, et al. Effectiveness of vibration reduction measures on Chengdu urban express[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 120-126.
- [7] 黄国庆, 孙魁, 陈虹兵, 等. 中等减振梯形轨枕轨道结构关键设计参数[J]. 铁道建筑, 2024, 64(3): 47-51.
HUANG Guoqing, SUN Kui, CHEN Hongbing, et al. Key design parameters of medium damping trapezoidal sleeper track structure[J]. Railway engineering, 2024, 64(3): 47-51.
- [8] 徐庆元, 范浩, 孟亚军, 等. 地铁隧道橡胶浮置板轨道纵向连接理论研究[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 37-44.
XU Qingyuan, FAN Hao, MENG Yajun, et al. Theoretical study of longitudinal connection for rubber floating slab track of subway tunnel[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2013, 13(4): 37-44.
- [9] 余志武, 毛建锋, 谈遂, 等. 车辆参数随机的车桥竖向随机振动分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 97-104.
YU Zhiwu, MAO Jianfeng, TAN Sui, et al. The stochastic analysis of the Track-bridge vertical coupled vibration with random train parameters[J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(1): 97-104.
- [10] 王秋实, 王泽根, 周劲松, 等. 基于迭代修正 DFT 的车轮多边形磨耗状态识别[J]. 振动测试与诊断, 2023, 43(3): 485-492.
WANG Qiushi, WANG Zegen, ZHOU Jinsong, et al. Detection framework of wheel polygon wear state based on iterative modified DFT[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2023, 43(3): 485-492.
- [11] LI Q, WU D J. Analysis of the dominant vibration frequencies of rail bridges for structure-borne noise using a power flow method[J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332(18): 4153-4163.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 123 页)

- [6] WAN X, ZHANG Z, YE G, et al. Boundary effect of foamed cement paste under the influence of air-coupled impact-echo[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1337(1): 012003.
- [7] HE Dan, WANG Xiufeng, FRISWELL M I, et al. Identification of modal parameters from noisy transient response signals[J]. Structural control and health monitoring, 2017, 24(11): e2019.
- [8] KAWAMURA A, FUJIKURA K. Impact noise suppression using speech spectral phase estimator[J]. IEEE transactions on electronics, information and systems, 2018, 138(11): 1410-1416.
- [9] YAO Fei, CHU Jinchao, LU Xingqi. Improved stack imaging of spectral amplitude based on the impact echo method for identification of defects in grout-filled lap connection[J]. Construction and building materials, 2023, 398: 132420.
- [10] WU Haonian, YAN Li, PEIWEN X, et al. Denoising method for weak velocity test signals under laser-induced shock waves based on attention-guided multi-scale convolutional neural network[J]. Optics and lasers in engineering, 2023, 170: 107749.
- [11] YANG Weifeng, WANG Qing, HOU Yuting, et al. Analysis and denoising of electric noise in phased array ultrasonic testing system[J]. NDT & E international, 2024, 146: 103164.
- [12] WANCHOO P, PANDEY A, SHUKLA A. Stress wave propagation and force transmission in polymeric closed cell foams subjected to air shock loading[J]. Extreme mechanics letters, 2023, 63: 102061.
- [13] ZHOU Rui, HAN Jiangtao, GUO Zhenyu, et al. De-noising of magnetotelluric signals by discrete wavelet transform and SVD decomposition[J]. Remote sensing, 2021, 13(23): 4932.
- [14] WINURSITO A, ARIFIN F, NASUHA A, et al. Design of robust heart abnormality detection system based on wavelet denoising algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2111(1): 012048.
- [15] JIANG Hong, LI Dong, ZHANG Xiaoming, et al. Research on de-noising method of fiber grating multiplexing network based on LCEEMD-LWT[J]. Optik, 2021, 247: 167997.
- [16] SAMANN F, SCHANZE T. Finding an optimal dictionary of different wavelet types using sparse modeling to denoise ECG signal[J]. Current directions in biomedical engineering, 2021, 7(2): 125-128.
- [17] PANIGRAHI S K, GUPTA S. Joint bilateral filter for signal recovery from phase preserved curvelet coefficients for image denoising[J]. International journal of image and graphics, 2021, 21(4): 2150049.

(编辑: 傅依萱)