

# 小波分析在瑞利波测试中的应用

王荫江 江泉

(河海大学, 南京 210098)

**摘要:** 本文基于小波模极大值的信号奇异性检测原理对瑞利波法检测所获得的原始信号进行分析处理。考虑到瑞利波法采样信号中噪声类型的多样性和有效信号与噪声在小波变换中有着不同的传播特性, 通过对测试信号的小波处理, 提高了采样信号的信噪比, 使噪声引起的相位谱的虚假折叠得以明显减少, 有利于频散曲线的准确求取, 达到了预期的处理效果。

**关键词:** 瑞利波; 测试技术; 小波; 模极大值

## 1 前言

瑞利波在各向同性弹性介质中, 其速度和频率无关, 即为非频散波; 而对于层状介质的情况, 由于各层介质的模量随深度而变化, 因此瑞利波速度随频率而变化, 此时瑞利波为频散波。在弹性半空间中瑞利波传播所携带的能量为表面震源能量的三分之二左右, 其在浅层土体中所产生的位移远比压缩波和剪切波大, 所以瑞利波传播中携带了较多的介质信息。而且它容易被激发和接收, 因此利用它来检测, 对结构具有无损伤、非侵入的特点, 故在工程应用中有着广泛的前景。20 世纪 80 年代中期, 美国德克萨斯大学的 Stoke 和 Nazarz 总结和概述了 SASW(表面波谱分析法)在岩土工程和道路工程中运用的理论依据和试验结果, 并且把瑞利波现场测试方法简化到切实可行的程度。他们用实测得到的瑞利波频散曲线为依据, 通过反演确定各土层的模量, 由此奠定了瑞利波测试的基本方法<sup>[1-3]</sup>。

瑞利波检测的信号分析是建立在 Fourier 变换基础上的频谱分析。在得到两信号的互功率谱后, 通过计算相位差来求得瑞利波的频散曲线。因此要得到较好的计算结果, 检波器所测得的信号要有较高的信噪比, 且两组检波器之间的信号还需要有良好的相关性。而在实际工程的瑞利波检测中, 现场的实际采样信号很容易遭到随机噪声的干扰。瑞利波测试信号的噪声中不仅仅包括常见的白噪声和脉冲噪声, 由于地下情况复杂, 信号较为容易受到杂波、回波的影响。为了提高检波器采样信号的信噪比, 考虑到瑞利波采样信号中噪声类型的多样性和小波模极大值去噪的理论依据——小波模极大值去噪的依据是信号和噪声在小波变换中有着不同的传播特性, 所以选择小波模极大值方法进行信号的前期处理<sup>[4]</sup>。

## 2 小波模极大值去噪原理

### 2.1 小波变换中信号与噪声的传播特性

设  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 函数  $f(x)$  在  $[a, b]$  上有一致 Lipschitz 指数  $\alpha$  的充要条件是存在一个常数  $k > 0$ , 使得  $\forall x \in [a, b]$ , 小波变换满足

$$|W_{2^j} f(x)| \leq k(2^j)^\alpha \quad (2.1)$$

上式两边取对数, 得

$$\log_2 |W_{2^j} f(x)| \leq \log_2 k + \alpha j \quad (2.2)$$

**作者简介:** 王荫江(1981-), 河海大学土木工程学院硕士研究生, 研究方向为无损检测

由此可知，如果函数  $f(x)$  的 Lipschitz 指数  $\alpha > 0$ ，则该函数的小波变换模极大值将随着尺度的增大而增大；反之，若  $\alpha < 0$ ，则函数  $f(x)$  的小波变换模极大值将随着尺度的增大而减小。

信号的 Lipschitz 指数一般都大于零，即使是不连续的奇异信号，只要在某一领域内有界，也有  $\alpha = 0$ 。然而，噪声所对应的 Lipschitz 指数  $\alpha$  往往是小于零的。比如 Gaussian，它是广义随机分布的，几乎处处奇异，它的 Lipschitz 指数  $\alpha = -1/2 - \varepsilon (\varepsilon > 0)$ 。可以看出，信号和噪声在不同尺度的小波变换下呈现的特性截然相反，所以可以根据这一原理对加噪信号进行处理<sup>[5,6]</sup>。

## 2.2 小波模极大值去噪方法

信号在不同尺度上小波变换的模极大值包含了信号中最重要的信息。模极大值组成的集合是小波系数集的一个子集，可以看成是小波系数在特定意义下的离散采样。

由于信号和噪声在小波变换中有着不同的传播特性，即随着尺度的增大，信号和噪声所对应的模极大值分别是增大和减小，因此，连续作若干次小波变换之后，由噪声对应的模极大值已基本去除或幅值很小，而所余极值点主要由信号控制。基于这一原理，有如下的去噪算法：

(1) 对加噪信号进行二进小波变换，一般为 4-5 个尺度，并求出每一尺度上小波变换系数的模极大值；

(2) 从最大尺度（设为 4）开始，选一阈值  $A = \max [W_{2^j}^d f(n_i)] / J$ ，若极值点对应的幅值的绝对值小于  $A$ ，则去掉该极值点，否则予以保留，这样就得到最大尺度上新的模极大值点；

(3) 在尺度为  $j-1$  ( $j=4, 3$ ) 上寻找尺度为  $j$  上小波变换模极大值点的传播点，即保留由信号产生的极值点，去除由噪声引起的极值点。采用以下步骤：在尺度为  $j$  上的极大值点位置，构造一个领域  $L = (\max(x_1, x'_1), x_2)$ ，其中  $x_1, x_2$  为  $x_0$  的前后两极值点，

$x'_1$  是  $x_1$  的传播点。  $L$  上与  $x_0$  同符号的点  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  中，若

$|a_i - x_0| \leq |a_j - x_0| / 3, \forall j=1, 2, \dots, n, j \neq i$ ，则  $a_i$  为传播点；若没有这样的点，那么使得

$W_{2^j} f[a_i] = \max (W_{2^j} f[a_k])_{k=1 \sim n}$  成立的  $a_i$  为传播点，记为  $x'_0$ ；若  $W_{2^j} f[x'_0] \geq 2 |W_{2^j} f[x_0]|$ ，

则认为  $x'_0$  是噪声所对应的模极大值点，应去掉该点。重复步骤此过程，直至  $j=2$  为止；

(4) 在  $j=2$  时存在极值点的位置上，保留  $j=1$  时相应的极值点，在其余位置上将极值点置为零；

(5) 将每一尺度上保留下来的极值点利用 Mallat 的交替投影 (AP) 算法重构小波系数，然后利用重构得到的小波系数对信号进行恢复，就能得到重构后的信号。<sup>[5,7]</sup>

## 3 应用实例

某一实测采样信号，采样点数为 2048，采样时间间隔为 0.125ms，检波器间距 1m。其中一检波器信号如图 3.1 所示。

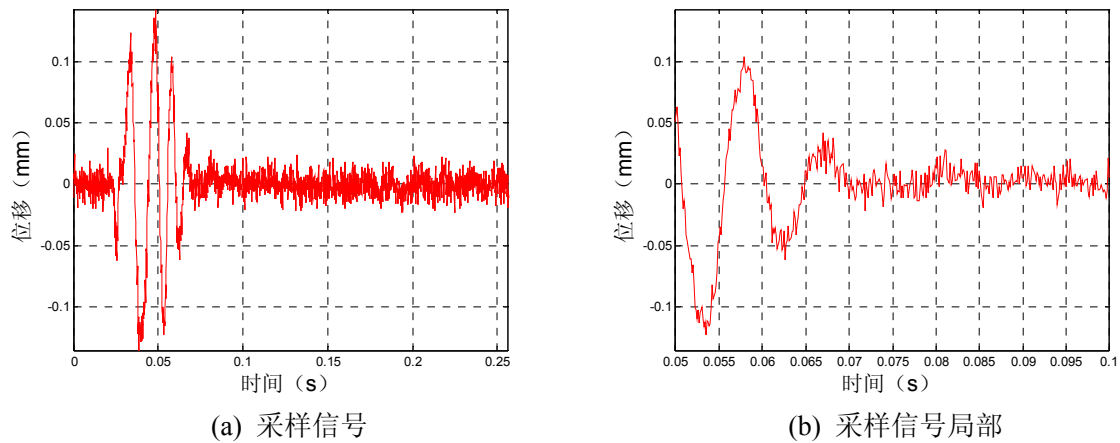


图 3.1 受到随机噪声影响后的信号及其局部

采用db2小波，对信号作4层小波分解，得到如图3.2(a)所示的各尺度小波变换的模极大值。可以看到随着尺度的增大,由于与噪声对应的模极大值点的幅值不断减小，模极大值点逐层减少。运用小波模极大值方法滤去噪声所对应的模极大值点，如图3.2(b)所示。对新的模极大值点，用Mallat的交替投影（AP）算法重构小波，得到重构后的信号，见图3.3。

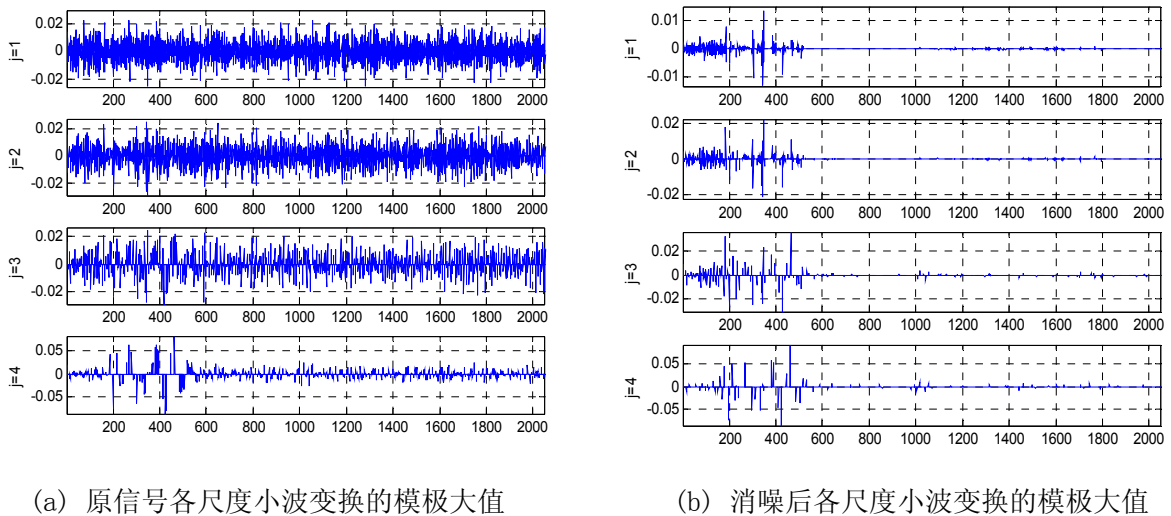
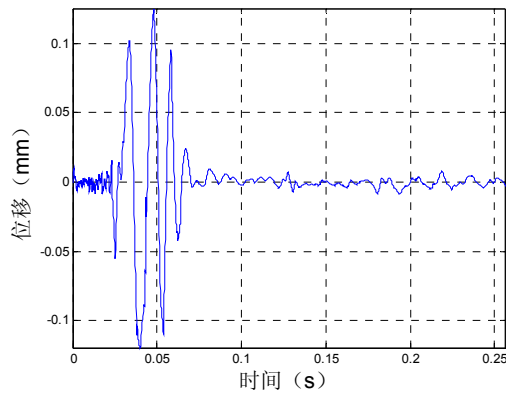
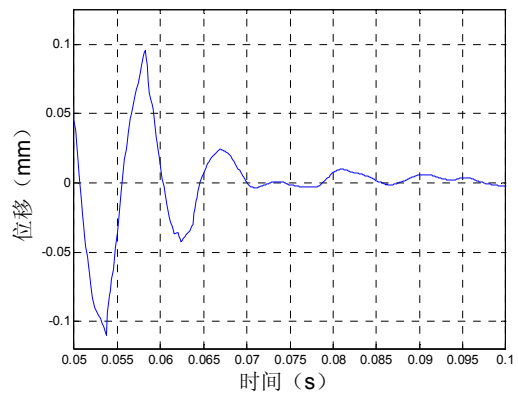


图 3.2 各尺度小波变换的模极大值

比较重构前的信号（见图 3.1）和重构后的信号（见图 3.3），重构后信号的平滑度明显增加。这表明随机噪声对信号的影响得到了抑制。求取去噪前后信号的功率谱密度曲线（见图 3.3），对比去噪前后的信号各频率成分的能量分布情况，信号的有效频率成分在去除了噪声的影响后得以凸现。

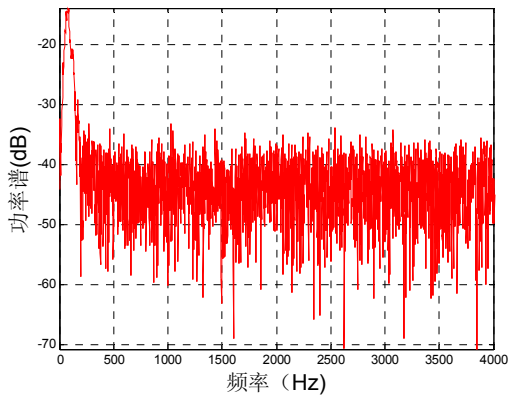


(a) 重构后的信号

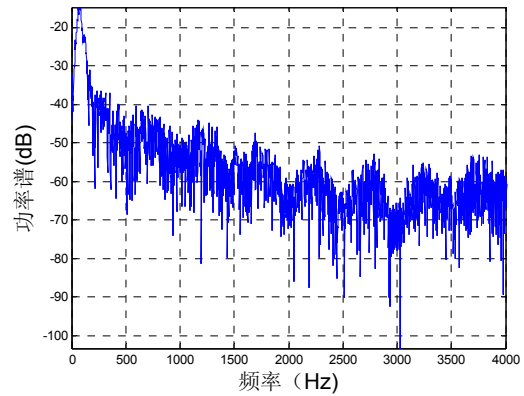


(b) 重构后的信号局部

图 3.3 重构后的信号及其局部



(a) 原信号的功率谱密度曲线



(b) 重构后信号功率谱密度曲线

图 3.4 功率谱密度曲线

## 4 结论

本文旨在将小波模极大值去噪方法引入瑞利波测试，对实测数据的进行前期处理。在信号前期处理中，首先需要考虑噪声的类型，然后再选择适当的小波类型、小波分解尺度进行小波分解。阈值和传播领域的选取也是其中的一个关键性因素。这些都将直接影响到重构后信号的误差。本文以信号受到随机噪声为例，尝试选择 db2 小波，对信号作 4 层小波分解，处理结果符合要求。处理后信号在时间域上的平滑度得到了明显的提高；在频率域中，各有效频率成分得以突出。信号的前期处理为下一步检波器信号间的互功率谱，相位谱的计算作了充分准备。由于去除了噪声的影响，由噪声而引起的相位谱的虚假折叠得以减少，这有利于频散曲线更准确的求取。

## 参 考 文 献

- [1] 杨成林等.瑞雷波勘探[M]: 中国地质出版社, 1993.
- [2] 白冰, 周健. 瑞利波测试技术发展概况及其应用[J].中国煤田地质, 2000, 12(3).
- [3] 肖柏勋, 李长征. 瑞雷面波勘探技术研究述评[J].工程地球物理学报, 2004(01).
- [4] 柴华友, 卢应发, 刘明贵,等. 表面波谱分析影响因素研究[J].岩土力学, 2004(03).
- [5] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰.小波分析·应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] (法)马拉特(Mallat S)著, 杨力华等译.信号处理的小波导引[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 杨宗凯. 小波去噪及其在信号检测中的应用[J].华中理工大学学报, 1997(02).

# The Application of Wavelet Transform in Rayleigh Wave Measuring Technology

Wang Yinjiang    Jiang Quan

(Hohai University, Nanjing 210098)

**Abstract:** Because of the diversity of the noise type in the signal of Rayleigh wave and the characteristic of spread in wavelet transform, the principle of singularity detection by using wavelet transform modulus maximum is presented. Using the technology of wavelet de-noising, the signal to noise ratio is reinforced and the falsity fold of the phase spectrum is reduced. Rayleigh wave dispersion curve can be accuracy received. It's come to the prospective treatment result.

**Key words:** Rayleigh Wave; measuring technology; wavelet; modulus maximum

### 江苏省力学学会学术大会 2006——论文回执

作者姓名	王荫江	性别	男	职 称	硕士研究生
单位名称	河海大学土木工程学院				
通讯地址	河海大学 462#信箱				
邮政编码	210098	电 话	13813920580		
传 真		E-mail	dingo_2046@163.com		
论文题目	小波分析在瑞利波测试中的应用				
拟参加的专题分会场名称			实验力学专题		
论文录用后是否同意在江苏省力学学会网站上发表			同意发表全文 <input checked="" type="checkbox"/> 同意发表摘要 <input type="checkbox"/>		
是否申请参加优秀论文评选			申请 <input type="checkbox"/>	不申请 <input checked="" type="checkbox"/>	
是否是学生			是 <input checked="" type="checkbox"/>	否 <input type="checkbox"/>	
是否需要安排住宿 标准间：210 元/天·间（含 2 份早餐）			是 <input type="checkbox"/>	否 <input checked="" type="checkbox"/>	