

小波分析在无损检测中的应用^{*}

刘晓彬, 杨起明

(广州穗监工程质量安全检测中心, 广东 广州 510150)

摘要: 探讨了小波分析方法在桩基础反射波检测、岩石超声波检测和复合材料损伤检测等三个方面应用的现状, 并对小波分析在无损检测中的应用前景进行了展望。

关键词: 小波分析; 无损检测; 应用

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S1-0170-04

小波变换是一种时频域分析方法, 具有多分辨率分析的特点, 可以在时域和频域内表征信号的局部特征, 很适合用于探测非平稳信号中夹带的瞬态奇性成分, 被用于信号分解、编码、消噪、压缩等各个方面。小波变换突破了 Fourier 分析在时频域中没有任何分辨力的缺陷, 可以对指定频带和时段内的信号进行“切片式”的分析。当实测应力波信号中某个界面反射波到达时, 记录波形在这一时刻会有异常频率成分出现, 小波分析可以采取合适的时间分辨率, 对新的信号成分进行“聚焦”, 从而可准确识别不同时刻的反射波。小波方法允许在低频处使用较大时间间隔以获得更加精确的低频信息, 而在高频处时间轴上窗口尺寸变小以获得高频信息。小波分析最主要的优点是可以实现局部分析。

小波变换的基本思想是将原始信号分解成一系列具有良好频域定位性的基元信号, 利用基元信号的各种特征来表征原始信号的局部特征, 达到对信号的时频域局部化分析。小波函数 $\Psi(x) \in L^2(R)$, 必须满足相容性条件

$$C_{\Psi} = \int_R \left(\frac{|\Psi(\omega)|^p}{\omega} \right) d\omega < +\infty$$

其中 Ψ 为 Ψ 的 Fourier 变换。函数 $f(x)$ 的二进小波变换序列 $\{W_2^k f(x)\} \quad k \in Z$ 定义为

$$W_2^k f(x) = \frac{1}{2^k} \int_R (t) \Psi \left[\frac{x-t}{2^k} \right] dt \quad (1)$$

在实际应用中, 信号的可测分辨率是有限的, 不可能算出所有因子 $2^k \quad (-\infty < k < +\infty)$ 间的小波变换, 一般只将尺度限制在原始信号的分辨率所规定的尺度和一个有限大的尺度范围内。归一化后, 原始信号的分辨率规定的尺度为 1, 且设 2^K 为最大

尺度, 从尺度 2^1 到 2^K 的小波变换 $\{W_2^k f(x)\} \quad 1 \leq k \leq K$ 可以认为是信号 $f(x)$ 在尺度 2^1 到 2^K 间的有用信息。只要 K 足够大, 那么 $f(x)$ 在大于尺度 2^K 上的信息对波形识别已经没有意义了。

1 在桩基础反射波检测中的应用

桩基础是建筑物、构筑物、桥梁、港口和近海结构重要的基础形式, 桩是埋入土层的柱形构件, 和承台一起组成桩基础。反射波法是桩身质量检测的常用方法, 其原理是当桩顶受一冲击力作用时, 便有弹性波沿桩身传播, 在传播过程中, 由于桩身阻抗和边界条件的变化, 会影响弹性波的传播特性, 使弹性波发生变化。因此可以通过弹性波的测量与分析来检验桩的施工质量。但是很多情况下由实测信号直接读取反射波到达时刻存在多方面的困难, 主要是由于桩基实际地质条件的复杂性和具体施工工艺的差别, 多方面噪音的影响, 使得携带在测试曲线中的应力波反射信息是以混合复杂的形式存在的。

基于桩检测信号具体特点以及小波分析本身具有的优良特点, 通过对实测端部响应信号进行小波分解, 灵活的压制测试信号中不良信号成分, 刻画实测信号不同频率成分的非平稳特性, 提取实测信号所包含的对应于实测构件的纵向振动的应力波反射特征的信息。这种分析方法可以实现对反射波方法测试数据更为灵活精细的分析, 消除了由实测信号直接读取反射波到达时刻存在的潜在错误。

某工程桩顶部响应的实测曲线如图 1 所示。由图中可以看出, 实测曲线呈比较复杂的状态, 从中难以确定反射波到达的时刻。采用 D7 小波进行分

^{*} 收稿日期: 2004-04-14

作者简介: 刘晓彬 (1974 年生), 男, 工程师。

解, 分解层数为 4, 分析结果如图 2 所示, 为 C_0 小波分解系数重构信号, 从图中可以清楚判定 A 处为直达波, B, C 对应于两次桩底反射信息, 根据反射波到达的时间间隔可以确定该桩结构完整。

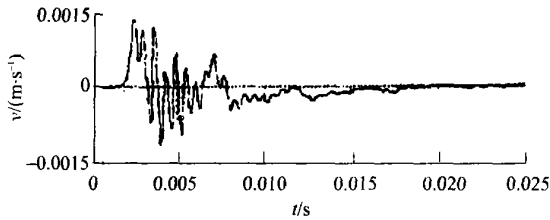


图 1 实测桩顶响应曲线
Fig. 1 Response curve of the pile

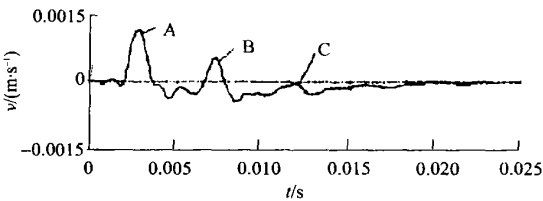


图 2 C_0^4 小波分解系数重构

Fig. 2 Rebuilding of wavelet analytical coefficient C_0^4

通过二进制小波变换提取桩基础断裂面和其它缺陷位置的反射波奇异信号的特征, 进行桩基础完整性的检测与判断, 减少了应用信号的时域分析和频域分析等传统检测方法带来的较大误差, 研究奇异信号的特征与桩基础的结构和完整性之间的关系。

图 3 分别显示各种不同缺陷的桩顶反射波信号 (速度响应)。小波分析方法对信号的高频部分使用短的时间窗, 低频部分使用长的时间窗, 利用这种时-频分析工具来研究桩中缺陷回波信号的频域分布特征可望得到良好的结果。不同缺陷类型的桩在不同尺度 (频带) 内的能量分布存在差异, 根据这一特征量即可准确地确定缺陷的类别。

3 在岩石超声波检测中的应用

超声波在岩体内传播时, 反射波、散射波和透射波的速度和强度均与岩体内部结构及物理力学特性有关。同时, 由于岩石介质的衰减效应, 使超声波在传播过程中不断扩张, 高频成分逐渐衰减。在岩体内传播的超声波携带了反映岩体特性的大量信息。对于这样一个复杂的且带有噪声的任意信号, 只能用多分辨率分析的方法对其进行小波变换。

图 4 (a) 是均匀、完整岩石试件超声波检测信号, 图 5 (a) 是模拟断层超声透射检测信号。

应用小波函数和尺度函数对其进行多分辨率分析, 结果如图 4 (b) 和图 5 (b) 所示。重构的岩体超声检测信号如图 4 (c) 和图 5 (c) 所示。

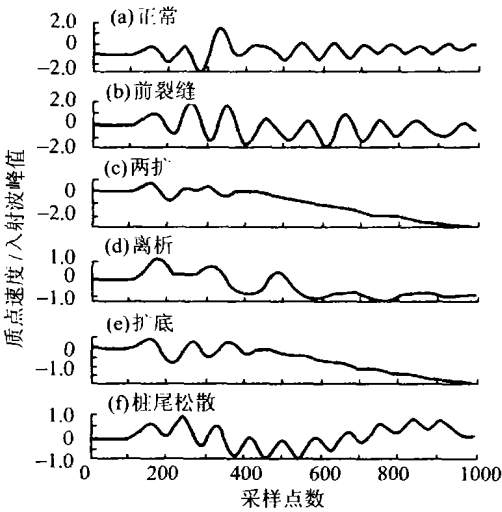


图 3 不同类型缺陷对应的桩顶反射波信号
Fig. 3 Various defects corresponding to the velocity response curves

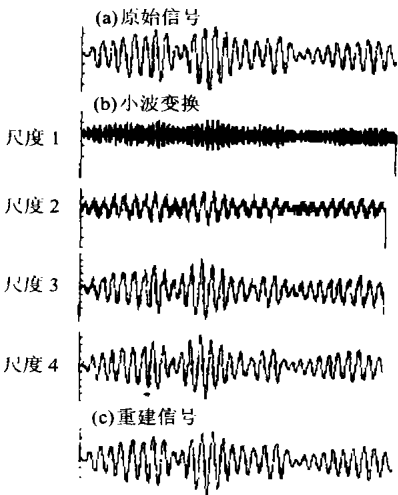


图 4 岩石超声检测信号及小波变换波形
Fig. 4 Signals of ultrasonic testing in rock and their wavelet transform

通过对岩体超声检测信号的处理, 有选择地利用某尺度上或某尺度一定时间段上的小波分量或平滑近似, 而舍弃了在其它尺度和其它尺度一定时间段上的分解值。利用小波变换的时频多分辨率分析去除了信号中的干扰噪声, 提取了反映岩石特性的有价值的声波信息。从模拟断层超声检测实验发现, 模拟断层的超声波透射检测信号与均匀、完整岩石的检测信号无明显差异, 但是经过小波变换和多分辨率分析处理后, 在频域上明显显示出信号奇

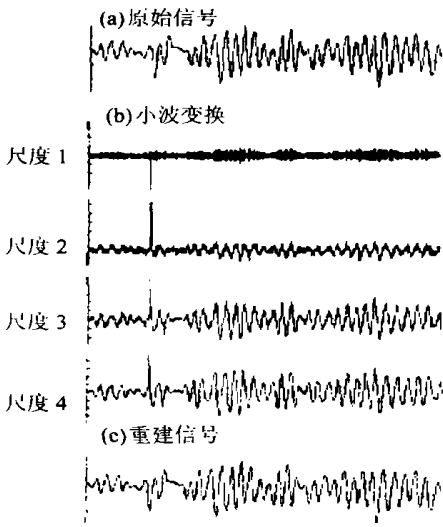


图 5 模拟断层超声检测信号及小波变换波形

Fig 5 Signals of ultrasonic testing for simulated fault and their transform

异点及其奇异性程度即断层位置. 这在时域中是无法得知的. 模拟断层超声检测信号的小波变换处理结果还进一步表明, 小波变换的多分辨率分析可以对指定频带和时间段内的信号成分进行分析, 在时域和频域均具有良好的局部化性质. 小波变换可以准确地抓住瞬变信号的特性, 并且对频率成分采用逐渐精细的时域或空域取样步长, 从而聚焦到信号的任意细节. 小波变换的“变焦”特性对信号的奇异性即奇异点的位置及奇异程度的分析更加有效. 另外, 基于小波变换的岩石超声检测技术还很好地反映了岩石节理、裂隙等岩石的完整程度. 加载实验表明, 岩石荷载情况下频谱的变化反映了岩石内应力及断层、裂隙与突变的发展情况.

小波变换的时频多分辨率特性与岩石超声检测信号的时变谱相适应. 对于非平稳的岩石超声波检测信号, 应用小波变换进行分析处理是非常有效的. 虽然小波变换引入岩石超声检测信号的处理中, 还处于刚刚起步阶段, 有些方面还不够成熟, 但由于其具有傅里叶变换无可比拟的优点, 即局部化和多分辨率分析等优异特性, 可以预见, 小波变换在岩石超声检测信号中的信噪分离、时变滤波、模式识别、波形反演和超声三维成像中有着广阔的应用前景. 为矿山压力研究、地下工程建设提供科学依据.

4 在复合材料损伤检测中的应用

由于复合材料科学的近期发展, 复合材料在航空、航天、航海以及其它领域被逐步应用. 但是由于复合材料的各向异性, 生产过程的复杂性以及

工艺的不稳定性, 其力学行为比较复杂, 对所含缺陷进行无损检测有一定的难度. 利用小波变换良好的时频局部化性质, 从小波变换的模量极大点中提取特征, 初步探讨了基于小波变换模量极大点特征提取的波形识别方法. 对复合材料中出现的无损、断丝、脱层等类型进行了自诊断. 结果表明小波变换在复合材料损伤的研究中具有很大的潜力.

小波变换是检测信号突变的有效工具, 信号 $f(x)$ 的奇异性可以由小波变换的模量极大点来刻画, 因而, 信号的二进小波变换 $W_2^j f(x)$ 的模量极大点可以用来作为信号模式的特征描述, 在实用上, 模量极大点仅沿二进尺度 $2^j (j \in Z)$ 上检测, 在每一尺度 2^j 上记录模量 $|W_2^j f(x)|$ 的局部极大值的位置和在相应位置上 $W_2^j f(x)$ 值, 据于这些信息, 由重构算法可以作为用于恢复原始信号的一种逼近, 该逼近函数与原始信号的误差主要集中在高频. 所以, 在损伤类型中, 对于信号的特征主要表现在中低频的信号, 其特征可以由小波变换的模量极大点来刻画, 并且完备性是可以保证的. 鉴于小波变换的模量极大点包含了原始信号的近似完整的信息, 体现了信号的特征. 但是并非所有的模量极大点都对波形识别具有重要的意义, 次要的和噪声产生的模量极大点需要剔除.

考虑到从实际出发, 只取有限个尺度的线性插值函数 $[M_2^j f(x)] 1 \leq j \leq J$ 表示的局部差异来区别模式, 得到:

$$\|f(x) - g(x)\| = \sum_{j=1}^J \|M_2^j f - M_2^j g\|^2 \quad (2)$$

基于小波变换特征提取的识别方法具有较好的分类效果. 当同一缺陷的位置不同时, 可以在构件上逻辑地划分不同区域, 就得到相应的不同模式, 先建立基准模式样本, 然后将所测的样本跟基准样本比较, 就可判别损伤位置. 当出现多缺陷损伤时, 就需要增加传感器的个数, 按上述方法得到足以区别不同模式的多维基准样本, 然后将所测的样本跟基准样本比较, 就可判别多缺陷损伤情况.

5 结束语

近几年小波分析成为众多学科关注的热点, 已经在许多领域取得了成功的应用. 小波分析广泛的应用于桩基础检测、岩石超声检测、材料及复合材料检测、振动信号分析、机械设备故障诊断、结构损伤检测和结构系统辨识等方面.

小波分析方法能较好地检测信号的突变点位置, 从而可以检测结构损伤的发生时间; 小波分析方法能较好的从含噪声信号中剔除噪声干扰, 达到

对信号的奇异性进行检测的目的；小波分析方法可以对结构损伤的类型进行分类识别。

利用小波分析方法对材料及结构损伤进行检测还有许多重要的研究内容，如利用小波分析方法对结构的损伤位置和损伤程度进行检测，在结构振动过程中对结构的损伤情况进行实时监测等。这些方面的研究工作的开展需要对结构分析、小波变换的波形识别、小波神经网络和结构损伤程度检测理论进行更深入的研究和探讨。

参考文献：

[1] 于开平, 邹经湘, 史桂香. 小波分析在结构系统辨识中的应用[J]. 力学与实践, 1998, 20.

[2] 韩晓林, 彭岳星, 唐新鸣. 基桩检测反射波的非线性小波降噪重建方法[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6).

[3] 张广明, 赵明涛, 王裕文, 等. 超声缺陷检测中小波变换信号处理的参数确定[J]. 声学学报, 2000, 25(5).

[4] 宁佐贵, 王雄祥, 朱长春. 小波分析方法在结构损伤检测中的应用研究[J]. CNIC— 01640, CAEP— 0102.

[5] 宋大雷, 徐殿国, 王卫, 等. 小波分析在钢丝绳无损检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(2).

[6] 闰萍, 吴晓媛, 刘锡顺, 等. 小波分析在桩基检测中的应用[J]. 工程质量, 2002, 5.

[7] 吴耀军, 陶宝祺. 基于小波神经网络的复合材料损伤检测[J]. 航空学报, 1997, 18(2).

[8] 吴耀军, 陶宝祺, 陈进, 等. 小波基特征提取的复合材料

损伤检测振动工程学报[J]. 1998, 11(1).

[9] 吴耀军, 陶宝祺. 小波变换特征提取的复合材料损伤检测[J]. 实验力学, 1997, 12(1).

[10] 韦宏鹤, 杨顺安, 章根德. 基于 MATLAB 小波分析的软地基加固探地雷达检测处理方法[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2).

[11] 秦前清, 杨纵凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.

[12] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[13] 康维新. 基于小波分析的桩基础完整性的检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(2).

[14] 付正文, 邹长春, 尉中良, 等. 利用小波变换检测超声成象测井图像边缘的研究[J]. 现代地质, 2002, 16(3).

[15] 张晓春. 小波变换及其在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 1997, 19(3).

[16] 张晓春, 李富全. 小波变换及其在岩石超声检测中的应用[J]. 黑龙江矿业学院学报, 2000, 10(1).

[17] 张平, 施克仁, 耿荣生, 等. 小波变换在声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(10).

[18] 李录平, 邹新元, 唐月清. 小波变换在声发射信号特征参数检测中的应用[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2).

[19] 张良均, 王靖涛, 李国成. 小波变换在桩基完整性检测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11).

[20] 苑延华. 小波分析在超声检测中的应用[J]. 吉林化工学院学报, 2000, 17(3).

Application of Wavelet Analysis in Nondestructive Testing

LIU Xiao bin, YANG Qi ming

(Suijian Construction Quality & Safety Testing Center of Guangzhou, Guangzhou 510150, China)

Abstract: This paper describes the application of wavelet analysis in three aspects: the testing of pile foundation integrity, rock ultrasonic testing technique, damage detection of the composite structure. And the paper views the applicative foreground in nondestructive testing.

Key words: wavelet analysis; nondestructive test; application