

基于小波变换的桩基缺陷识别方法

方祥

(厦门市建筑设计院有限公司, 福建 厦门 361003)

摘要: 在反射波法的桩基信号检测中主要归纳为检测幅值突变, 当反射信号较弱时, 用一般的时间分析法或频域分析法, 就无法检测桩身质量问题. 用小波分析就可以解决这一问题, 小波分析具有时频局部化特点. 从理论上说, 桩基信号混有反映桩基缺陷的脉冲信号, 通过对称小波变换后, 在一定的尺度范围内其极值点对应原信号的突变位置或时刻. 工程中信号分析如用连续小波变换产生的数据量多, 且计算量大, 分析复杂. 而用离散小波变换可以有效地减少数据量, 并能识别工程信号的奇异性 (缺陷). 论文通过一个在确定位置有微弱幅值变化, 进行小波变换后 (其中小波为二次 B 样条小波), 可以清楚地识别幅值发生突变的时刻. 同时也对工程实际中的一具体桩基用低应变动态检测的数据进行了分析, 根据桩的破坏特征及离散小波变换后计算桩身发生缺陷的位置, 可以确定本例中的桩有 4 处发生了离析. 并且可以有效地对桩基缺陷进行识别.

关键词: 小波变换; 二次 B 样条小波; 反射波; 边缘检测; 脉冲信号

中图分类号: TU 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X (2006) 03-0046-04

Method for Cognizing Deficient Pile Based on Discrete Symmetry Wavelet Transform

FANG Xiang

(Xiamen Architecture Design Institute Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361003, China)

Abstract Amplitude change is the main characteristic for pile signal detection by Reflection Wave Method (RWM). If the reflected signal is weak, the traditional data processing methods are difficult to identify the deficiency of pile such as time-domain analysis or frequency-domain analysis. Whereas wavelet analysis which has local time-frequency characteristics can deal with weak signal perfectly. Signals mixed with impulse signal which is regarded as deficiency in pile by Wavelet Transform (WT), here, wavelet is secondary B spline wavelet. And the procedure is proposed to detect deficiency in pile. Two examples are illustrated in this paper: one numerical example has an explicit mathematic expression with a minute change in amplitude at certain position, and the minute change is detected by the proposed method; the other example is that the singularity of a practical engineering signal of a concrete pile is identified using the tested low-strain dynamic data in pile to estimate the time of deficiency appearance by discrete wavelet analysis, then evaluating the deficiency position with the assumption invariable wave velocity in pile. Considering characteristics of various piles, the example pile has four isolations. So the proposed method is valid for cognizing deficient pile.

Key words wavelet transform; secondary B spline wavelet; reflection wave; edge detection; pulse signal

引言

在高层建筑、重型厂房、桥梁、港口码头等重大工程中, 广泛应用桩基础. 钻孔灌注桩由于避免了打入桩的噪音, 减少了对周围环境的影响, 因而在建筑物密集的城市建设中被广泛采用. 然而, 由于种种原因,

收稿日期: 2005-03-16

作者简介: 方祥 (1972~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 地震工程与与防护. E-mail: fangx_2002@163.com

机械成孔的灌注桩常常出现缩径、断桩、夹泥和沉渣过多等质量问题, 给建筑物安全带来隐患, 不仅严重地影响了整个工程的施工进度, 还会给国家和人民生命财产造成不可估量的损失. 因此, 对桩基的质量的检测就显得尤其重要. 传统的桩基检测手段是静载荷试验和钻孔取芯. 这些方法虽能直观地反映桩的承载力和质量情况, 但需要的时间长、费用高, 且易破坏桩基. 近几年来, 应用低应变的桩基动测技术发展很快, 尤其是瞬态锤击法. 这种方法成本低、效率高、设备轻便, 可以对桩基础进行大批量的检测. 对桩基检测到的信号分析主要是时域分析和频率分析, 其中频率分析是通过傅氏变换进行的. 由于桩身缺陷种类复杂, 实际的地质条件的千变万化, 桩基信号往往是奇异的, 对于奇异信号的确定, 特别是能量比较小的奇异信号, 若利用传统的信号分析方法是难以完成的. 利用小波变换可以解决这一问题, 因为小波变换具有自动改变窗长的功能, 可以很好地把信号在空间和频率上局部化, 赋予了信号的局部奇异性^[1].

本文用小波理论来检测桩基的缺陷, 首先介绍了基于小波变换的边缘检测理论, 其对称小波变换系数的极大值反映了桩基的缺陷. 用对称小波变换检测一个在确定时刻幅值变化微小发生了变化的解析式例子证明该方法的可行性; 最后用低应变动态桩基检测信号通过对称小波变换确定缺陷出现的时刻, 根据波速传播沿整个桩长不变, 可以确定缺陷位置, 并结合不同类型缺陷桩的反射信号特征可以判断本例中的桩有 4 处离析.

1 对称小波变换理论

在桩基工程中常常会碰到一系列突变信号, 它们在许多情况下对应着桩身的缺陷. 因此, 对于这些突变信号的检测具有一定的实用意义. 信号的突变有两方面的含义: 一是位移的急剧变化; 二是频率的急剧变化. 前者有脉冲信号为例, 而后者则隐含了这样一种观点: 信号的频率具有时间局部性, 一段非平稳的时间信号在某段时间内可能是高频振动, 而在另一段时间内又主要是低频振动. 信号突变要从两方面来进行刻划: 确定信号的突变时刻 (奇异性); 区分不同的突变类型^[2].

从时间—位移曲线上可以识别一些大的突变, 但是当突变信号被淹没在其他信号 (如干扰噪声) 中时, 突变时刻就很难确定. 此外, 时间—位移曲线上也很难区分奇异类型. 从信号的频谱曲线上, 也可以看到一些突变的信息. 例如脉冲波具有宽谱的特征. 但是频谱曲线没有时间概念, 不可能给出突变时刻的信息. 突变信号的刻划依赖于这两者的有机结合. 如果承认信号的频谱有时间局部性, 就可以考虑观察给定时刻的频率分布, 同时又可随着时间的推移追踪信号的频率特性的演变情况, 这正是小波方法所追求的目标.

在桩基检测中的低应变瞬态锤击法的无损动测技术中, 产生的信号可以认为是一脉冲信号^[3], 对于脉冲信号, 对于脉冲信号, 小波变换为:

$$W_{a,b} \delta(t) = \delta(t) * \phi_{a,b}(t) \quad (1)$$

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

其中 $\phi_{a,b}(t)$ 是一小波簇.

由小波函数的性质可知, 如小波取反对称小波, 在脉冲产生的位置, 反对称小波变换产生一个过零值; 取对称小波时, 对称小波变换在脉冲产生的位置产生极值.

2 基于对称小波变换的桩基识别

根据反射波的原理^[3], 可知完整摩擦桩底界面, 反射波与入射波同相, 故幅值增加; 完整端承桩底界面, 反射波与入射波反相, 即幅值减小; 桩身缩径, 反射波与入射波同相, 即幅值增加; 桩身扩径, 反射波与入射波反相, 即幅值减小; 桩身离析, 反射波与入射波同相, 即幅值增加 (从时域曲线上很难看出), 且桩底反射不明显; 断桩, 反射波与入射波同相, 即幅值增加, 桩底反射不明显.

由上可见, 可以总结出, 反射波法的桩基信号检测主要归纳为幅值突变. 如直接从时域响应波形来分析、判断桩身质量, 存在效果差, 精度低等问题^[3]. 比如说反射信号弱时, 就无法检测桩身质量问题. 而小波变换就由于它空间局部化好, 就可以检测微弱信号, 也就是说可以解决这一问题.

2 1 基本假设:

1)假设波速沿整个桩长不变 (如存在缺陷, 扩径和缩径波速是不变的: 而未完全断开的桩和缩径是类似的, 也可假定: 离析桩可以认为入射波以原波速有一微弱信号穿过离析部位).

2)假设桩缺陷为边缘.

2 2 小波的选取

由上分析可知, 选取对称小波, 在幅值发生奇异的部位, 小波变换后产生极值: 如选取反对称小波则在奇异部位产生过 0 值. 在实际应用中以采用对称小波变换为佳, 因为经它变换后产生一个峰值, 有利于使用软件识别, 而使用软件识别过零点就困难得多, 因为过零值有多个.

根据以上原则, 及可进行边缘检测的小波, 作者选取了二次 B 样条. 它是对称小波, 又可用于边缘检测^[4]. 其数学表达式为:

$$N_2(t) = N_1 * N_2(t) = \int_0^1 N_1(u)N_1(t-u) du = \int_0^1 (t-u) du = \begin{cases} t & 0 \leq t < 1 \\ 2-t & 1 \leq t < 2 \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

其对应的滤波特性参数为:

$$H(\omega) = e^{-\frac{i\omega}{2}} \left(\cos \frac{\omega}{2} \right)^3 \quad (4)$$

$$h_n = h_{1-n} \quad g_n = -g_{1-n} \quad (5)$$

h_n 与 g_n 的数值如表 1 ($h_n = g_n = 0$ 当 $n > 3$ 时).

表 1 滤波特性参数

Tab 1 Characteristic parameters of filter		
$h_1 = 0.3750$	$h_2 = 0.1250$	$h_3 = 0$
$g_1 = 0.5798$	$g_2 = 0.0869$	$g_3 = 0.0061$

3 应用举例

3 1 仿真例子

为了验证所选取的小波能不能正确检测到对于幅值突变, 先用一已知幅值 (其幅值的变化很小) 突变时刻的信号进行仿真说明. 它的数学表达式如下:

$$f(t) = \begin{cases} \sin t + 0.005 \sin t & \pi/2 \leq t < \pi \\ \sin t & 0 < t < \pi/2, \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

把函数表达式 (6) 及二次 B 样条小波代入式 (1), 结合滤波特性参数, 根据桩基信号检测步骤, 其信号检测结果如图 1. 图 1 中 $f(t)$ 为原始信号图, 其幅值变化情况无法看出, 在较大的尺度 (尺度为 8) 时, 也无法检测出, 当尺度为 1/16, 1/32 时, 对称小波变换系数图中可以清楚地看到其变化点的时刻 (位置). 如采用傅立叶变换, 幅值变化也无法检测出来, 因为傅立叶变换是纯频域分析.

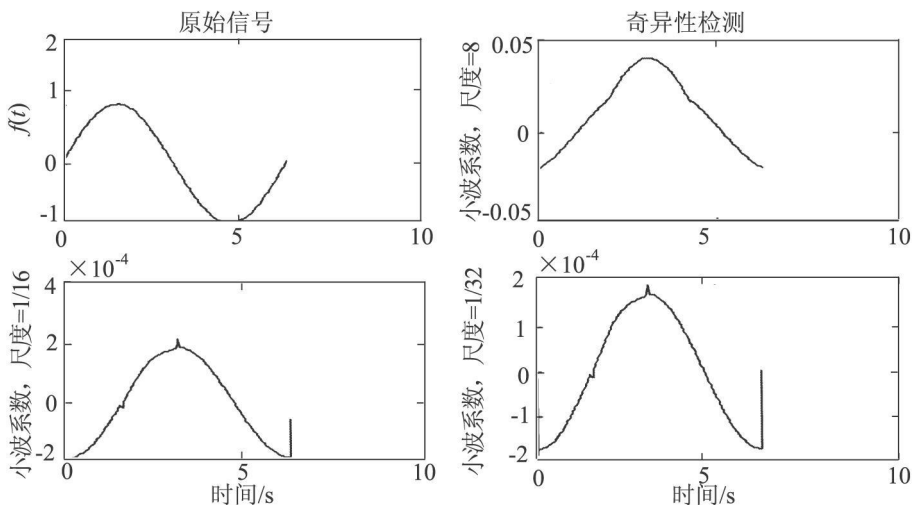


图1 正弦信号的不同尺度的小波变换

Fig.1 Variuos scales of wavelet transform for sinusoid

3 2 桩基实测信号检测举例

本例中采用一个反射波法得到混凝土桩的时域曲线, 桩径为 400mm, 桩长为 13.5m, 从其时域曲线中无法准确判断桩基缺陷, 对该时域曲线 ($f(t)$ 代替 $\delta(t)$) 代入式 (1) 进行离散小波变换, 其中小波为二次样条曲线, 结

合表 1 的滤波特性参数进行小波变换. 经过小波变换就可以清楚地看出桩基存在缺陷. 从实测桩的时域曲线中无法准确判断桩基缺陷, 从 $scale1(2)$, $scale2(2^2)$, $scale3(2^3)$ 就可以看出桩基存在缺陷, 而且从图 2 中可以看出存在缺陷时刻: 2.4ms , 3.6ms , 4.8ms , 6.8ms , 7.6ms , 8.8ms . 根据假定 1 即反射波在桩中的传播是匀速传播的, 也就是速度是一定的; 根据 $v = \frac{s}{t}$, 就可计算桩身缺陷位置. 就可计算桩身缺陷位置, 因为是用边缘检测, 2.4ms 是波至桩的初始时间, 8.8ms 为桩底反射波对应的时间. 具体计算如下.

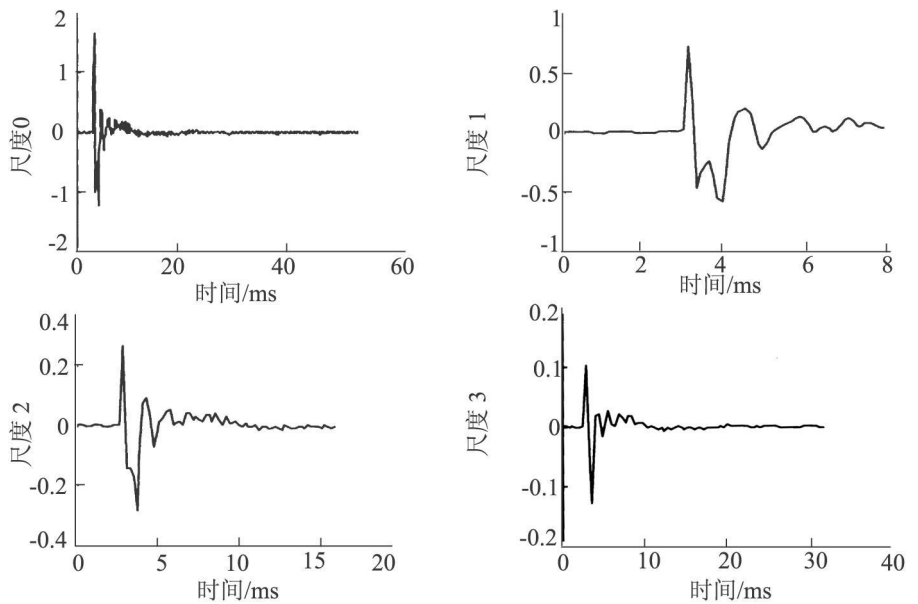


图2 桩基时域曲线及不同尺度下的小波度换
Fig.2 Various scales of wavelet transform for pile time-domain curve

表 2 小波变换后得到信号突变时刻

Tab 2 Singularity time of signal by wavelet transform

信号突变时刻 /ms	2.4	3.6	4.8	6.8	7.6	8.8
缺陷对应时间 /ms	反射波初至时间 /ms	1.2	2.4	4.4	5.2	桩底反射对应时间
缺陷位置 /m	桩起始端	2.53	5.06	9.28	10.97	桩底

波在整个桩传播的时间为: $8.8 - 2.4 = 6.4\text{ms}$. 第一个缺陷对应的时间为: $3.6 - 2.4 = 1.2\text{ms}$. 由速度公式及假定 1, 并假定 X 为缺陷位置:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{13.5}{6.4} = \frac{x}{1.2} \tag{7}$$

根据式 (7) 计算出 $x = 2.53\text{m}$, 同理计算其他缺陷对应的时间及位置.

由于在时域曲线中无法判断桩的缺陷位置, 且桩底反射不明显, 说明桩的缺陷不明显, 根据前面桩的破坏现象可以确定在桩的 2.53m , 5.06m , 9.28m , 10.97m 处, 桩身发生离析.

4 结 论

通过对桩基检测信号分析运用对称小波变换来识别桩基缺陷是可行的. 对称小波变换在一定的尺度范围内, 其极值点对应原信号的突变位置或时刻; 而反对称小波变换的零点对应原信号的突变位置或时刻; 其中小波为二次 B 样条小波, 它是一个对称小波, 因此它和信号的小波变换的极值点就是信号发生突变的时刻. 方法最大的优越之处不仅能识别位移突变较大的信号, 而且能识别位移突变很小的信号, 也就是说能识别能量比较小的奇异信号; 并且能准确地识别突变位置. 通过有确定的解析式例子说明该方法是可行性; 同时也对具体桩基测得的数据进行了分析, 根据桩的破坏特征及小波变换后计算桩身发生缺陷的位置, 可以确定本例中的桩有 4 处发生了离析.

参考文献:

[1] 林京刘, 红星. 小波奇异性检测及其在故障诊断中的应用 [J]. 信号处理, 1997, (6): 182-187
 [2] 蔡志强, 吴雅. 突变性故障特征识别的两种实用小波技术 [J]. 机械工程学报, 1993, (12): 58-64
 [3] 张献民, 刘国辉. 低应变瞬态锤击桩基无损检测技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 11
 [4] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998: 27-28