

小波变换与近似熵原理在桩基检测中的应用

谢洪阳¹, 殷金泉², 黄频波², 于润桥²

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 南昌 330063;

2. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘 要: 桩基混凝土质量评级常采用 PSD 多参数综合方法, 但由于随机扰动的存在和混凝土本身的不连续特性, 在检测过程中会混入奇异信号, 导致对缺陷产生漏判或者误判。文章利用小波变换对桩基的疑似缺陷信号进行分解, 同时引入近似熵定量表征信号的无序程度。结果表明缺陷信号经过小波分解后, 在高频段上信号幅值衰减且波形杂乱、近似熵值大。该方法特别适合判别疑似缺陷, 工程实践证明了其在桩基检测中的有效性。

关键词: 小波分析; 近似熵; 桩基检测

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)04-0035-03

Application of Wavelet Transform and Approximate Entropy in Pile Foundation Inspection

XIE Hong-Yang¹, YIN Jin-Quan², HUANG Pin-Bo², YU Run-Qiao²

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Key Laboratory of Nondestructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: PSD multi-parameter approach is often used in concrete pile quality rating. However, in testing process, because of random disturbance to the inspection signals and discrete features in the concrete pile, singular signals may be produced and lead to miss or misinterpretations of defects. In this paper, suspected defect signal was decomposed by wavelet transform, and the disorder of signal was quantitatively described by introduction of approximate entropy. The results showed that under the wavelet decomposition, the amplitude of defect signal was attenuated in the high frequency band with a clutter waveform and larger approximate entropy. The present method was be fitted for confirming suspected defect and showed good effectiveness in the practical pile foundation inspection.

Keywords: Wavelet analysis; Approximate entropy; Pile foundation inspection

钻孔灌注桩是桥梁工程常用的基础形式, 由于施工过程中存在各种不确定因素, 导致桩体内可能出现断桩、夹泥、缩颈、孔洞等内部缺陷, 直接影响桩基的承载能力, 因此有必要对桩基的匀质性、完整性进行评估。超声波检测是一种常规的无损检测方法, 它测试简便、迅速, 可直接对工程构件重复检测。目前对钻孔灌注桩完整性检测主要采用超声波透射法^[1], 根据穿过混凝土基桩某一侧剖面的超声波的声学参数测量值和变化量, 判别和确定其缺陷的位

置和范围, 并利用 PSD-V-A 多参数综合评定方法评定桩基混凝土质量级别。由于随机干扰的存在和混凝土本身的不连续特性, 往往在检测过程中会混入奇异信号或者某段频带的超声信号发生衰减, 导致 PSD-V-A 法可能漏判或者误判。小波变换^[2-3]是一种多分辨率的时频域分析方法, 它突破了傅里叶分析在时频域中分辨力的限制, 可以聚焦到信号的任意频段, 具有良好的局部化特性, 特别适合处理具有时变谱的非平稳信号。文章采用小波理论对超声波透射信号进行了小波分解和处理, 并定量地分析了透射信号的复杂性, 提出用近似熵^[4-7]表征桩混凝土的匀质程度。

收稿日期: 2010-05-27

作者简介: 谢洪阳(1973—), 男, 副教授, 主要开展工程结构设计与检测方面的研究。

1 理论分析

小波变换的基本思想是将原始信号分解成一族同一空间具有时频局部化特性的简单函数即小波函数系,而小波函数系是通过母小波函数或基本小波函数不同尺度平移和压缩形成的。设 $f(x) \in L^2(R)$ 为平方可积函数,其尺度函数和小波函数分别为 $\varphi(x), \psi(x)$, 则 $f(x)$ 可写成:

$$f(x) = \sum_k c_{j0}(k) \varphi_{j0,k}(x) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(x) \quad (1)$$

式中 c_{j0} 称为第 j_0 层近似值或尺度系数代表信号的平均部分或低频成分; d_j 为第 j_0 层细节或小波系数代表信号的变化部分或高频成分。因此原始信号 s 可分解成小波近似 c 与小波细节 d 之和。将桩基混凝土的不连续状况包括孔洞或裂纹等缺陷看成一系列奇异信号对原始信号作用,往往这种作用使得原始信号特别是高频段信号发生衰减。与 PSD-V-A 法相比,对于含有奇异点或不同奇异程度的超声检测信号,小波变换可将其分解成一系列互相独立的低频和高频成分,从而更迅速地捕捉到奇异点的位置以及有效地分析信号的奇异程度。同时为了定量地评估小波信号的奇异程度,可以引入非线性动力学的近似熵,从统计的角度来反映某时间序列信号的复杂性或无序性,其优点在于避免重建奇异吸引子的全貌,故所需数据少,且近似熵的估计对随机过程和确定性过程都有效。设采集到的原始数据为 $x(i) (i=1, 2, 3 \dots N)$, 给定模式嵌入维数 m 和相似容限 r 的值,则近似熵可通过以下步骤计算得到:

(1) 将序列 $\{x(i)\}$ 按顺序组成 m 维矢量 $\{o(i)\}$

$(i=1 \dots N-m+1)$:

$$o(i) = [x(i) \ x(i+1) \ x(i+2) \ \dots \ x(i+m-1)] \quad (2)$$

(2) 计算每一个 $o(i)$ 与其余矢量 $o(j)$ 之间的距离:

$$d[o(i), o(j)] = \max_{k=0 \dots m-1} |x(i+k) - x(j+k)| \quad (3)$$

(3) 根据相似容限 r 的值,计算 $o(i)$ 与矢量 $o(j)$ 之间相似度,记作 $C_i^m(r)$:

$$C_i^m(r) = \sum_{j \neq i} \frac{d[o(i), o(j)] \leq r}{N-m+1} \quad (4)$$

(4) 将 $C_i^m(r)$ 取对数,并对所有 i 求平均值,记作 ϕ_r^m :

$$\phi_r^m = \frac{\sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r)}{N-m+1} \quad (5)$$

(5) 重复以上步骤,求出 ϕ_r^{m+1} 。

(6) 求出理论上此序列的近似熵:

$$\text{ApEn}(m, r, N) = \phi_r^m - \phi_r^{m+1} \quad (6)$$

近似熵显然与维数 m 和相似容限 r 取值有关,根据 Pincus 的经验^[6-7],维数 $m=2, r=ad_{ST}(x)$, 其中 $d_{ST}(x)$ 是标准差, a 是 r 的权重参数,一般取值范围为 $[0.1 \ 0.25]$ 。近似熵的计算实际上是在确定一个时间序列在模式上的自相似程度,若结合小波分解,可通过求取各小波系数和近似系数的近似熵来评估时间序列。

2 试验结果分析

以南昌县富山乡桥梁工程某钻孔灌注桩基为例,设计桩径 1 200.0 mm,设计桩长 19.0 m,实测桩长 17.5 m,混凝土设计标号为 C25,预埋 3 根声测管,测管距离 AB, BC, CA 剖面分别为 840, 820, 680 mm,测试龄期为 27 d,测试仪器采用 RS-ST01C 非金属超声波检测仪。如图 1 所示,根据声时-PSD 曲线判定桩基在 17.5 m 处的 AB 剖面存在明显的缺陷可疑点,但很难对其它深度的剖面作出肯定评定。将超声透射信号进行小波分解后,就能较清晰地观察到剖面的不连续性状况,特别是在细节波(高频)上检测到奇异扰动。采用二层小波分解树(图 2),即原始信号 $S(0,0)$ 在第一层分解为低频近似值 $S(1,0)$ 和高频细节 $S(1,1)$,在第二层中低

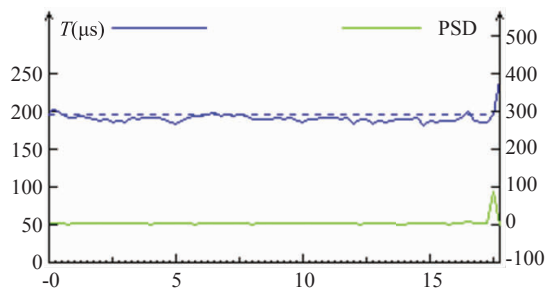


图 1 17.5 m 处 AB 剖面的声时-PSD 曲线

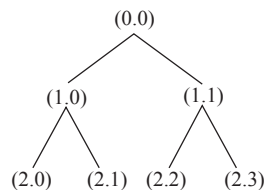
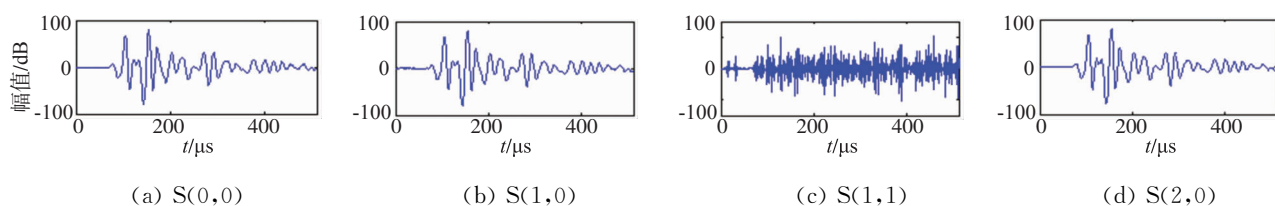
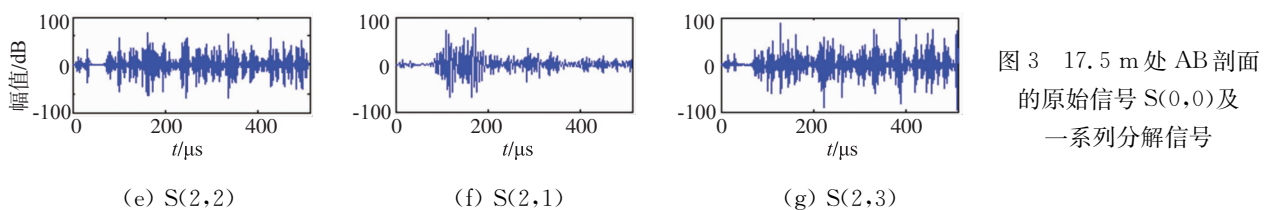


图 2 二阶小波分解树

图3 17.5 m处AB剖面的原始信号 $S(0,0)$ 及一系列分解信号图4 2.5 m处AB剖面的原始信号 $S'(0,0)$ 及一系列分解信号

频 $S(1,0)$ 可以分解为相应的低频近似值 $S(2,0)$ 和细节 $S(2,1)$, 而高频细节 $S(1,1)$ 又可分解为相应的低频近似值 $S(2,2)$ 和 $S(2,3)$ 。现将 17.5 m 处 AB 剖面的穿透信号 $S(0,0)$ 与符合检测规定标准的 2.5 m 处穿透信号 $S'(0,0)$ 小波分解并进行分析, 如图 3 和 4。

由图 3 和 4, 易发现 17.5 m 处的高频信号的幅值相对 2.5 m 处的高频信号处于较低水平, 波形杂乱且未出现突出的奇异点, 这说明在 17.5 m 处的 AB 剖面存在均匀的不连续状况, 可能为分散性泥团、蜂窝状缺陷或桩底沉渣, 导致幅值其衰减; 同时这些缺陷作为一系列扰动信号导致原始信号出现更多的新模式信号从而使得波形复杂无序。如图 5 为各分解信号的近似熵 (模式维数 $m=2$, 相似容限 $r=0.25$, 发现 17.5 m 处高频细节的无序程度远大于 2.5 m 的无序程度, 而低频信号的近似熵 $ApEn(1,0)$ 和 $ApEn(2,0)$ 近似相等且 <0.6 , 这说明了试验中的缺陷扰动使得高频段信号容易产生新模式, 所以近似熵大, 而低频段信号有较强能力抵御扰动保持自身原有的振动模式。比较分析发现, 图 5 中在桩基 16.5 m 处的各分解信号的近似熵与 17.5 m 处的近似熵相似, 故可判断桩基 16.5 m 处 AB 剖面

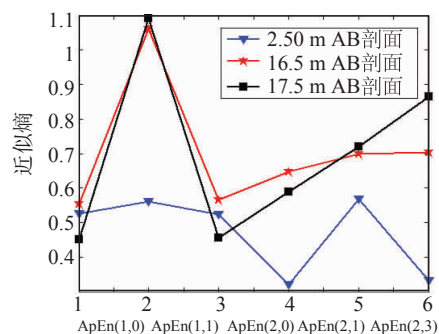


图5 各分解信号的近似熵

存在与 17.5 m 处相似的缺陷。以上结论很难在声时-PSD 曲线中得出, 可见, 通过求取剖面超声信号的近似值和小波细节的近似熵, 可以简便可靠地评估桩基混凝土不同深度不同剖面的匀质性。

3 结论

文章将不同缺陷看成不同的奇异扰动, 采用小波分析方法对钻孔灌注桩检测进行了研究。通过对超声透射信号进行小波分解, 发现存在有缺陷的信号在高频段上幅值会发生衰减且波形复杂。为了定量地评估信号的无序程度, 引入近似熵来衡量信号

(下转第 41 页)

减小扫查速度 v 。在这里,笔者为了提高缺陷识别的准确率和稳定性,同时不降低检测效率,特地定制了一台多功能超声波探伤仪,它可以通过软件灵活调节重复频率 f_h ,调节范围为 500~20 000 Hz。

以一个内部有自然裂纹缺陷的工件为检测对象,将多功能超声波探伤仪重复频率设置为 5 kHz,采用 2.5P6×8 的超声波双晶直探头 A 型检测方式,对工件内部的自然裂纹进行扫查。检测数据采用 DMA 的方式高速存入内存空间,以 Microsoft Visual C++ 6.0 为平台编写多幅相关算法软件,进行缺陷回波的追踪与识别,结果如表 1。

表 1 缺陷识别数据

参数	试验序号		
	1	2	3
相关系数阈值 ρ_{\max}	0.9	0.9	0.9
波形总数 N_f	340	337	336
疑似缺陷波峰序列长度 n_f	162	283	197
缺陷波峰序列长度阈值 F_d	20	20	20
缺陷判定	是	是	是

以表 1 中试验序号为 1 的一系列数据为例,用预设的相关系数阈值 $\rho_{\max}=0.9$ 去处理全部 340 帧检测波形,追踪到一个疑似缺陷波峰的序列,长度为 162,远大于设定的缺陷波峰序列长度阈值 $F_d=20$,因此可充分判定该波峰序列为缺陷回波。图 3 是试验 1 中缺陷波峰序列前 8 次波峰,可以看出在连续检测中缺陷波峰的强相关性。

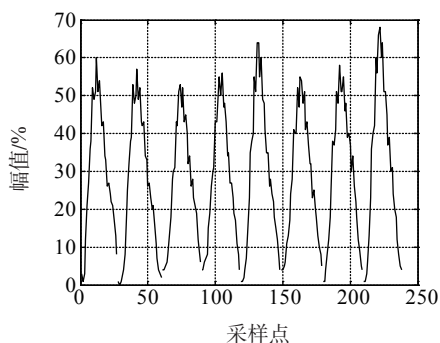


图 3 连续 8 次缺陷波峰序列

笔者通过大量的重复试验得出,采用多幅连续相关法对缺陷回波进行追踪时,合理地设置相关系数阈值 ρ_{\max} ,可以有效去除噪声等随机干扰波,再结合设定的缺陷波峰序列长度阈值 F_d 进行判定,当检测过程平稳、检测到缺陷波的有效检测数据足够多时,缺陷识别的准确率可达到 90% 以上。

4 结语

针对 A 型扫查的大量超声检测数据,根据相邻两次检测数据中缺陷回波的强相关性,以数字相关法为基础,提出了一种多幅连续相关的方法,来追踪和识别缺陷回波。在缺陷识别过程中,将相关系数、缺陷波峰序列长度、检测声程等多个信息融合进行数据处理,不仅有效地去除了随机噪声干扰,而且在缺陷识别上取得了很高的准确率和可靠性。最后通过大量的检测试验,验证了多幅连续相关法的可靠性和准确率,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 黄民,李功. 焊缝超声无损检测中的缺陷智能识别方法[J]. 北京信息科技大学学报, 2009, 24(2): 33—36.
- [2] 师小红,徐章遂,郭怡. 构件裂纹缺陷的超声识别[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 556—558.
- [3] 李伟,罗雄彪. 基于相关技术的超声检测信号处理[J]. 无损检测, 2005, 27(6): 297—299.
- [4] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.



(上接第 37 页)

中产生新振动模式的概率。结果验证了其可简便可靠地评估桩基混凝土不同深度不同剖面的匀质性。

参考文献:

- [1] 吴新璇. 混凝土无损检测技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [2] Daubechies I. The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961—1005.
- [3] 陶新民,徐晶,杜宝祥,等. 基于小波域广义高斯分布的轴承故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2009, 10(45): 62—67.
- [4] 李强,王太勇,冷勇刚,等. 近似熵测度的自适应随机共振研究[J]. 物理学报, 2007, 12(56): 6803—6806.
- [5] 胥永刚,李凌均,何正嘉. 近似熵及其在机械设备故障诊断中的应用[J]. 信息与控制, 2002(6): 547—549.
- [6] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 1991, 88(6): 2297—2301.
- [7] Pincus S M, Goldberger A L. Physiological time-series analysis: What does regularity quantify[J]. The American Physiological Society, 1994, 266 (4Pt 2): H1643—56.