

小波包分析在混凝土检测中的应用

张小琼, 林维正

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 当前, 对混凝土质量判断主要依赖于对接收信号的处理。和小波分析相比, 小波包分析的优势在于其不仅对低频部分进行分解, 对高频部分也进行分解, 并能根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高时频分辨率。本文利用小波分析方法, 对超声接收信号进行小波包分解, 分别提取各个频率成分的信号特征, 并对小波包分解系数重构, 求出各频带信号的总能量。通过构造特征向量, 进行归一化处理, 用实验统计方法确定特征值和容差范围, 通过对不同混凝土试块中传播的超声波进行分析, 判断出混凝土的内部质量。

关键词: 超声波; 小波包; 向量

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A

Wavelet packets analysis in the application of concrete detecting

ZHANG Xiao-qiong, LIN Wei-zheng

(Institute of Acoustics, Tongji University Shanghai 200092, China)

Abstract: The quality estimation of concrete generally depends on the analysis of received waves. The advantage of wavelet packets analysis lies in analyzing the high-frequency part of received waves, as well as the low-frequency part. And according to the character of signal, it can choose the corresponding frequency to improve the resolving power in time domain. The paper gives description of wavelet packets analysis of received waves, by finding the character of different frequency part and reconstructing the decomposing coefficient to get the overall energy of signal. With the statistical methods, the thesis finds out the characteristic value and tolerance range by constructing the characteristic vector. According to the analysis of received ultrasonic waves from different concrete mass, the interior quality of concrete can be judged.

Key words: ultrasonic waves; wavelet packets; vector quantities

1 引言

混凝土结构中内部缺陷的存在, 通常会严重影响整个建筑结构的承载能力和使用寿命, 极易引发事故, 因而在混凝土施工过程中的质量监控以及竣工后的质量评估都有重要的意义。在应用超声法和智能处理技术的混凝土无损检测中, 对混凝土质量判断主要依赖接收信号的处理。当前, 在这方面技术主要有频谱分析, 快速傅立叶变换, 模式识别, 神经网络, 自相关和互相关, 统计分析等等。其中多数是基于傅立叶变换原理。现在, 已经开始应用小波分析对信号进行处理。小波分析是把信号 s 分解成低频 a_1 和低频 d_1 两部分, 在分解中, 低频 a_1 失去的信息由高频 d_1 捕获。在下一层分解中, 又将 a_1 分解成低频 a_2 和低频 d_2 两部分, 低频 a_2 失去的信息由高频 d_2 捕获, 如此类推下去, 可以进行更深层次的分解; 小波包分解则不同, 它不仅对低频部分进行分解, 而且还对高频部分进行分解, 并能够根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带,

使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时频分辨率, 笔者将小波包分析方法用于混凝土缺陷的超声检测, 以满足对缺陷信号分析中高频低频的全面分析, 通过实验, 得到特征向量和混凝土缺陷的相关关系, 取得令人满意的结果。

2 小波包理论

在多分辨率分析中, $L^2(R) = \sum_j \psi_j$, ($j \in Z$) 表明多分辨率分析是按照不同的尺度因子 j 把 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间, $\psi_j(j \in Z)$ 为小波函数 $\psi(t)$ 的闭包(小波子空间), 现在, 我们希望进一步对小波子空间 ψ_j 按照二进制分式进行频率的细分, 以达到提高频率分辨率的目的。

一种自然的做法是将尺度子空间 V_j 和小波子空间 W_j 用一个新的子空间 U_j 统一起来表征, 若令

$$U_j^0 = V_j \quad j \in Z$$

$$U_j^1 = W_j \quad j \in Z \quad (1)$$

则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{j+1} = V_j \dot{\cup} W_j$ 即可用 U_j 的分解统一为

$$U_{j+1}^0 = U_j^0 \dot{\cup} U_j^1 \quad j \in Z \quad (2)$$

定义子空间 U_j^n 是函数 $U_n(t)$ 的闭包空间, 而 U_{2n}^j 是函数 $U_{2n}(t)$ 的闭包空间, 并令 $U_n(t)$ 满足下面

收稿日期: 2001-07-19; 修回日期: 2001-11-16

作者简介: 张小琼(1974), 男, 江西都昌人, 硕士, 从事超声换能器的研究。

的双尺度方程:

$$U_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) U_n(2t - k)$$

$$U_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) U_n(2t - k) \quad (3)$$

式中, $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 即两系数也具有正交关系, 当 $n=0$ 时, 以上两式直接给出

$$U^0(t) = \sum_{k \in Z} h(k) U_0(2t - k)$$

$$U_1(t) = \sum_{k \in Z} g(k) U_0(2t - k) \quad (4)$$

与在多分辨分析中, $\Pi(t)$ 和 $\Psi(t)$ 满足双尺度方程

$$\Pi(t) = \sum_{k \in Z} h_k \Pi(2t - k) \quad \{h_k\} k_z \quad l^2$$

$$\Psi(t) = \sum_{k \in Z} g_k \Psi(2t - k) \quad \{g_k\} k_z \quad l^2 \quad (5)$$

相比较, $U_0(t)$ 和 $U_1(t)$ 分别退化为尺度函数 $\Pi(t)$ 和小波基函数 $\Psi(t)$, 式(4)是式(2)的等价表示。把这种等价表示推广到 $n \in Z_+$ (非负整数), 即得等价表示为

$$U_{j+1}^n = U_j^n \dot{Y} 2U_j^{2^{m+1}} \quad j \in Z; n \in Z_+ \quad (6)$$

3 实验结果

笔者采用同济大学声学研究所研制的 U-sonic 超声检测系统对两种混凝土试块检测研究: 密实试块和缺陷试块, 其尺寸均为 $600 \times 600 \times 300$ (mm)。实验原理图如图 1

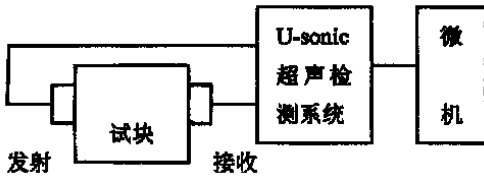


图 1 检测系统框图

用超声脉冲穿透法对试块进行逐点测试, 换能器的频率为 50kHz, 计算机的采样频率为 10MHz, 获取了分别在密实和缺陷情况下的数据。取其两种情况各一组数据, 进行小波包分析。

1 小波包分解

首先对 A/D 采样信号进行 3 层小波包分解, 分别提取第 3 层从低频到高频 8 个频率成份的信号特征, 其分解结构如图 2。

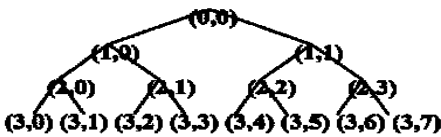


图 2 小波包分解树

图(2)中, (I, j) 表示第 I 层的第 j 个结点, 其中, $I=0, 1, 2, 3; j=0, 1, 2, \dots, 7$, 每个结点都代表声学技术

一定的信号特征。其中, $(0, 0)$ 结点代表原始信号, $(1, 0)$ 结点代表小波包分解的第 1 层低频系数 X_{10} , $(1, 1)$ 结点代表小波包分解的第 1 层高频系数 X_{11} , $(3, 0)$ 结点表示第 3 层第 0 个结点的系数 X_{30} , 其他依此类推。

2 对小波包分解系数重构提取各频带范围的信号

以 S_{30} 表示 X_{30} 的重构信号, 以 S_{31} 表示 X_{31} 的重构信号, 其他依此类推。在这里, 只对第 3 层的所有结点进行分析, 则总信号 S 可以表示为

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37} \quad (7)$$

假设原始信号 S 中, 最低频率成分为 0, 最高频率成分为 1, 则提取的 $S_{3j} (j=0, 1, \dots, 7)$ 8 个频率成份所代表的频率范围见表 1。

表 1 各频率成份所代表的频率范围

信号	S_{30}	S_{31}	S_{32}	S_{33}
频率范围	0-0.125	0.125-0.250	0.25-0.375	0.375-0.500
信号	S_{34}	S_{35}	S_{36}	S_{37}
频率范围	0.500-0.625	0.625-0.750	0.750-0.875	0.875-1.000

3 求各频带信号的总能量。

由于输入信号是一个随机信号, 其输出也是一个随机信号。设 $S_{3j} (j=0, 1, \dots, 7)$ 对应的能量为 $E_{3j} (j=0, 1, \dots, 7)$, 则有:

$$E = \sum_{j=0}^7 \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |X_{jk}|^2 \quad (8)$$

其中, $X_{jk} (j=0, 1, \dots, 7, k=1, 2, \dots, n)$ 表示重构信号 S_{3j} 的离散点的幅值。

4 构造特征向量。

由于试块有缺陷时, 会对各频带内的信号能量有较大的影响, 因此, 以能量为元素可以构造一个特征向量。特征向量的构造如下:

$$T = [E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}]$$

当能量很大时, $E_{3j} (j=0, 1, \dots, 7)$ 通常是一个很大的数值, 在数据分析上带来很大的不便, 由此可以进行归一化处理, 令

$$E = \left(\sum_{j=1}^7 |E_{3j}|^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$T_1 = [E_{30}/E, E_{31}/E, E_{32}/E, E_{33}/E, E_{34}/E, E_{35}/E, E_{36}/E, E_{37}/E]$$

(10)

向量 T_1 即为归一化后的向量。

5 实验统计方法确定特征值和容差范围。

确定在正常和有缺陷状态下, 特征向量的特征值及容差范围, 特征值及容差范围的确定可以通过理论分析方法得到, 同时, 也可以通过实验统计方

法。理论分析方法要靠系统模型,当系统模型比较复杂时,方法显得明显不足,而实验方法不依赖数学模型,在工程应用中有重要的意义,在这里是用实验统计的方法确定特征值和容差范围。设向量第 1 个元素 E_{30}/E 的特征值为 C_0 ,容差范围为 ΔC_0 ,向量第 2 个元素 E_{31}/E 的特征值为 C_1 ,容差范围为 ΔC_1 ,其他依此类推,可以通过下式求得:

$$C_j = (\sum_{k=1}^n x_{jk}) / n \quad (11)$$

如果 C_j 的值较大,可对特征值进行归一化处理,令

$$C = (\sum_{j=0}^7 C_j^2)^{1/2} \quad (12)$$

归一化的特征向量值为

$$T_1 \text{ 特征值} = [C_0/C, C_1/C, C_2/C, C_3/C, C_4/C, C_5/C, C_6/C, C_7/C]$$

容差范围 $\Delta C_j (j = 0, 1, \dots, 7)$ 为

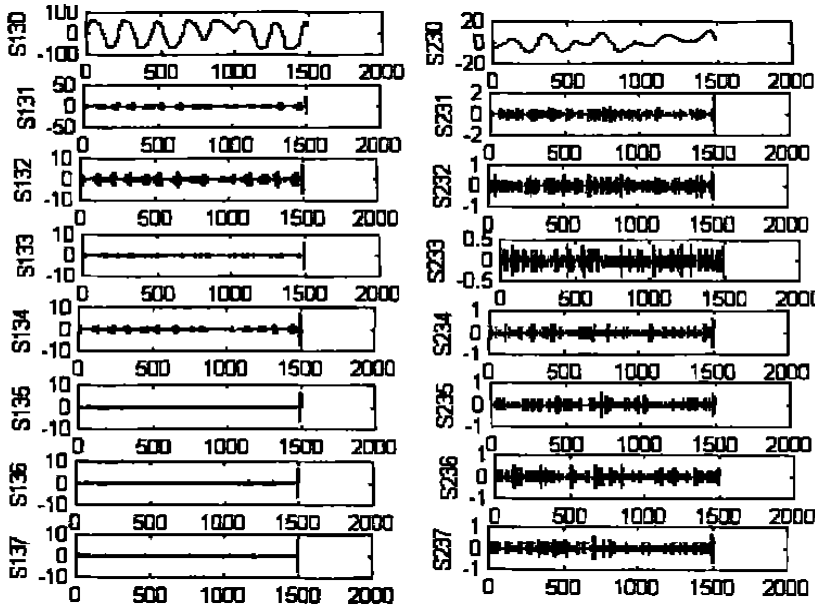
$$\Delta C_j = K\sigma = K([\sum_{k=1}^n (x_{jk} - C_j)^2 / n])^{1/2} \quad K = 3 \sim 5 \quad (13)$$

其中, n 为试验次数,容差范围一般取方差 σ 的 3~5 倍。

如果特征向量的特征值作了归一化处理,则容差范围也作相应的变化,即容差范围向量的每个元素都相应除以 C ,有:

$$\Delta C_j \text{ 容差范围} = [\Delta C_0/C, \Delta C_1/C, \Delta C_2/C, \Delta C_3/C, \Delta C_4/C, \Delta C_5/C, \Delta C_6/C, \Delta C_7/C] \quad (14)$$

对 n 值的要求: 如果实验数据的重复性(或稳



(a) 密实信号及提取的 8 个特征量 (b) 缺陷信号及提取的 8 个特征量

图 3 密实信号和缺陷信号小波分析对比

定性)较大,则实验次数可以取得较小。如果实验数据的重复性(或稳定性)较小,则要求实验次数 n 较大。图 3 是密实信号和缺陷信号的小波包分析对比。

按以上算法步骤,运用 Matlab 对 3 个密实信号和 3 个缺陷信号进行计算,结果如表 2 所示:

表 2 密实试块和缺陷试块的 8 个特征向量

	E_{30}	E_{31}	E_{32}	E_{33}	E_{34}	E_{35}	E_{36}	E_{37}
密实 1	1400	85.2	41.8	9.5	22.8	8.2	8.2	8.2
密实 2	1200	66.2	32	11.3	17.8	10.8	11	10.8
密实 3	1231	75	34.2	15.3	21.7	14.4	15.2	14.3
缺陷 1	121.4	8.7	5.4	4.8	4.7	4.7	5.8	4.4
缺陷 2	118.5	6.9	5.9	5.3	4.6	4.2	6.2	5.1
缺陷 3	98	7.3	7.5	6.3	4.8	4.4	5.6	4.8

从表中可看出,在不同尺度下,密实信号的各项特征向量都明显大于缺陷信号。特别是低频部分的特征参数,两者差距明显。因此可以用它对试块是否完好进行判别。

4 结束语

与传统的傅立叶分析方法相比,小波理论应用于混凝土内部缺陷的超声无损检测有很好的时频特性,小波分析在分析超声接收信号是对两者都可兼顾,小波包分析在这基础上更进一步,在低频和高频两个方向进行分解。通过对不同混凝土试块的超声

接收信号进行小波包分析,发现其特征向量能够表征混凝土内部缺陷,并对混凝土内部缺陷进行有效识别,进一步的工作是对缺陷的大小及深度进行定位。

参考文献

- [1] 何星华,王汉明.混凝土无损检测技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1996. 1-15
- [2] 崔锦泰,程正兴.小波分析导论[M].西安:西安出版社,1995. 297-333
- [3] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,1995. 485-510
- [4] 林维正,杨旭升.混凝土厚度超声反射信号小波分析[J],无损检测,1996. 18(6):211-215