

基于快速傅立叶变换的打桩锤击信息的识别

王新洲¹ 林明华¹ 花向红¹ 徐亚明¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对常规人工记录锤击数的低效情况,在此将打桩现场采集的声音信号运用快速傅立叶变换到频率域,对频谱进行多个统计量的分析,并同时考虑了锤击声音可能受到附近噪音的干扰,从中选取平均绝对值偏差这个统计量作为识别锤击次数的特征,由此探测得到一组可以较为精确识别锤击数目的特征参数,实现了锤击数准确识别的自动化。

关键词:锤击声音;快速傅立叶变换;平均绝对值偏差;贯入度

中图法分类号:P207

水上打桩定位是一个比较复杂的系统,包括平面的定位、高程的定位、贯入度的实时计算等,其中贯入度的计算包括桩顶高程的变化和锤击数目的记录两部分。准确识别出锤击数,结合沉桩过程中的桩顶高程的变化,可以知道在施打桩体过程中的贯入度,从贯入度的数据记录可以获知水下的工程地质状况以及桩体本身的承载力,有利于对沉桩区域的作业计划作适时指导,以保证沉桩质量和工程进度。

通常情况下,锤击数的记录是由专门一个人通过测量仪器目镜里的十字横丝以及桩身上的刻度比较来按间隔记录的,比如沉桩 1 m 锤击多少次或者每锤击 20 次桩沉入多少米。由于有的码头或者大桥等沉桩区域的桩达数百根甚至数万根,如果靠人来数锤击数,既麻烦又枯燥。为提高工作的自动化程度,做到省时省力,同时考虑到锤击声音本身的特性以及现在的模式识别理论,本文利用傅立叶变换理论开发一个自动识别打桩锤击数目的算法。

1 基本理论

1.1 按时间抽选(DIT)的基-2FFT 算法基本原理

设 $N(N=2^M, M$ 为正整数)点信号序列 $x(n)$ 的离散傅立叶变换为 $X(k)$,则有:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-nk} \quad (2)$$

式中, $n=0,1,\cdots,N-1; k=0,1,\cdots,N-1$ 。

将 $x(n)(n=0,1,\cdots,N-1)$ 按 n 的奇偶分成以下两组:

$$x(n) = \begin{cases} x(2r) = x_1(r) \\ x(2r+1) = x_2(r) \end{cases}, r = 0, 1, \cdots, \frac{N}{2} - 1$$

将上式代入式(1)并充分利用系数的周期性和对称性化简,就得到式(3)和式(4)。这样 N 点序列 $X(k)$ 就变为两个 $N/2$ 点序列 $x_1(r)$ 和 $x_2(r)$ 离散傅立叶变换的组合:

$$X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k) \quad (3)$$

$$X(k + \frac{N}{2}) = X_1(k) - W_N^k X_2(k) \quad (4)$$

式中, $k=0,1,\cdots,\frac{N}{2}-1; X_1(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_1(r)W_{N/2}^{rk}$;

$X_2(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_2(r)W_{N/2}^{rk}; W_N^{rk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$ (蝶形系数)。

式(3)和式(4)的运算可以用基本蝶形流图来表示,如图 1 所示。

对于 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 可以继续利用式(3)和式(4)进一步分解,直到分解为对应图 1 的基本两点变换为止。

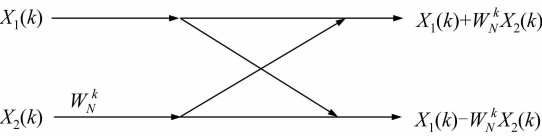


图 1 时选法的基本蝶形流程图
Fig. 1 Butterfly Flowchart Based on DIT

1.2 相关统计量

1) 平均绝对值偏差

样本平均绝对值偏差就是偏差绝对值的算术平均值,具体计算公式为:

d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|

式中, \bar{x} 表示向量元素 x_i 的平均值。

2) 调和平均值

调和平均值 m 就是总体各元素值倒数的算术平均数的倒数,又称为倒数平均数:

m = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}

式中, n 为向量元素 x_i 的个数。

该统计量要求总体中的各元素值不能为 0。本文对为 0 值的元素均赋值为一个微小量(比如 0.000 1)来处理,并不影响统计的性质。

3) 几何均值

当 X 为向量时, m_g = (\prod_{i=1}^n x_i)^{\frac{1}{n}} 即为向量元素 x_i 的几何平均值。

4) 标准差

标准差是反映一组数据离散程度最常用的一种量化形式。当 X 为向量时,标准差 s 的数学涵义为:

s = (\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{\frac{1}{2}}

式中, \bar{x} 表示向量元素 x_i 的平均值。

2 数据采集

将录音设备(如麦克风)放置于桩船驾驶室的窗户外,另一端连接电脑进行录音生成 WAV 文件,采样用的数据特性参数:采样率为 44 100 Hz,单声道,量化位数为 16 位。

图 2 为打桩现场采集的锤击声音波形(文件名为 2-6. wav),里面包含了 6 次锤击,横轴表示采样点,纵轴表示采样点对应的声音幅值,标准化后为[-1, +1]。波形图中密集与稀疏两部分交替出现,波形密集的区域表示对锤击声音的采样,

幅值很大,接近幅值极限±1;而较为稀疏的区域则是相邻两次锤击之间的间隔,是对现场噪音以及锤击声音的余音的采样。

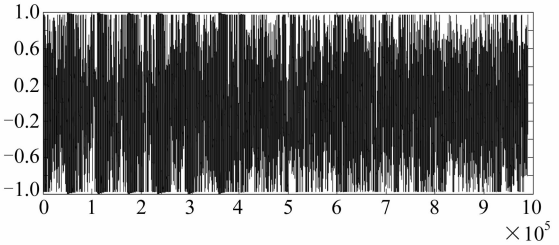


图 2 锤击声音采样的时域波形
Fig. 2 Time Domain Waveform of Piling Sound

3 识别锤击次数的参数探测

可以从能量角度来区分锤击与非锤击。锤击时的声音能量远远大于非锤击时的能量,在时域波形中就反映在锤击的采样点幅值要大于非锤击采样点的幅值。

声音是一维数字信号,而所有的数字信号都有频谱。在数字信号处理中,功率谱密度函数可以反映能量信号在频域中随频率的变化情况。相应地,在统计学中常用的算术均值、几何均值等函数也可以对频谱幅值进行分析,其值也在一定程度上反映了能量信号在频域中随频率的变化情况。在此借用“移动窗口”的思想,即用一个固定宽度的窗口遍历声音信号序列 x(n),相当于把信号序列 x(n)分为若干个单元,然后依次将每个窗口数据作快速傅立叶变换,再对每个窗口的频谱幅值取绝对值后作统计分析,这样就得到相应统计量的序列 X(k)。通过研究序列 X(k)的统计特性,分析出与锤击次数之间的关系,从而找出关于该统计量的特征参数。

首先取任意窗口宽度(比如 window = 3 000),对每个窗口内的时域幅值作快速傅立叶变换为频谱值并取绝对值,然后对这些窗口的频谱幅值进行统计分析。窗口作分析的统计量有最大值、平均绝对值偏差、算术平均值、几何平均值、标准差和调和平均值。图 3 显示了对采样文件 2-6. wav(该采样文件中共发生 6 次锤击)进行以上 6 个统计分析的结果,图中,横坐标为窗口数,纵坐标为频谱统计值。

由于锤击数的识别要求做到实时而不是事后,这就要求既不漏记锤击次数(比如,两次或数次锤击记为一次锤击),也不把一次锤击当作两次或多次锤击来记录,从而对识别特征的选取提出

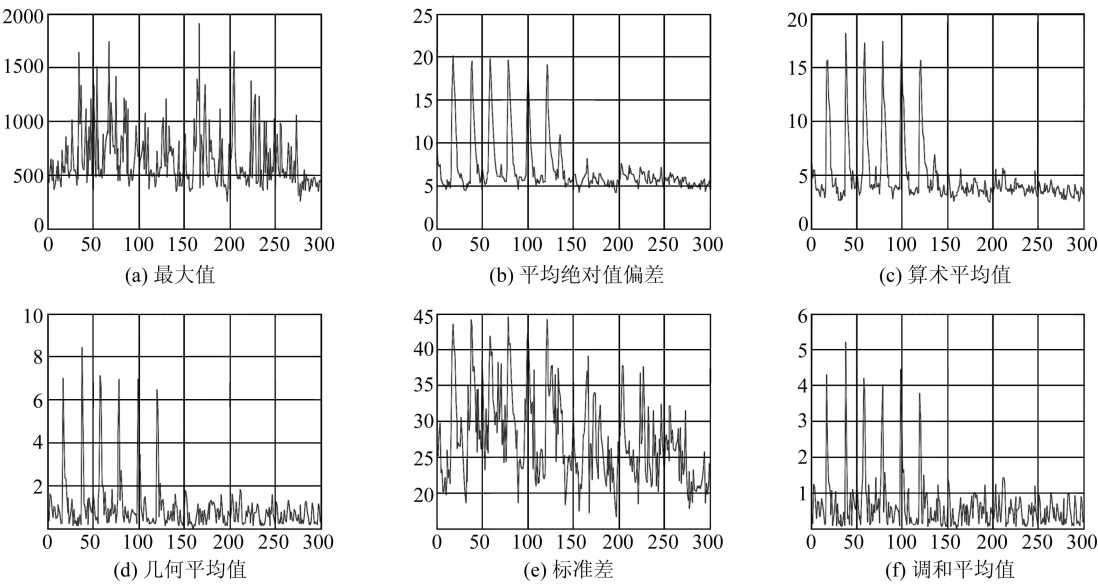


图 3 统计量的选取

Fig. 3 Selection of Statistical Variables

较高的要求。从图 3 中可以看出,平均绝对偏差、算术均值、几何均值、调和平均值这 4 个统计量能很好地识别出锤击的次数。尤其平均绝对值偏差这一统计量的序列在 6 次锤击期间的统计频谱幅值比较稳定,波动很小,而且锤击与非锤击的幅值比值比较大(后面的大量计算也显出这一特点),更能显示出识别锤击数的优越性能。下面就以该统计量来分析由该统计量构成的序列中,不同次锤击的幅值下限 T_1 和相邻两次锤击之间相隔的最少窗口个数 T_2 。

图 4 是对采样文件 10 z. wav 的运算结果的显示,里面包含了 147 次锤击。可以看出,只要 T_1 的值大于 14 均可准确识别锤击数。随后,作者运算了大量的算例,通过分析比较,发现 T_1 取

值 14 比较合适,能够较为准确地识别不同采样文件中的锤击次数。

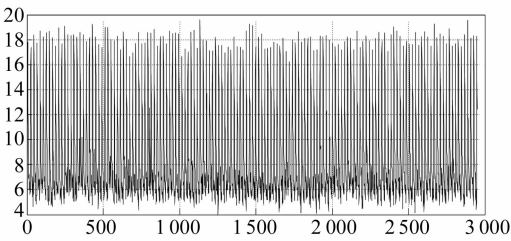


图 4 锤击的幅值

Fig. 4 Values of Piling Sound

表 1 是对不同的锤击声音采样文件用参数 $window=3\ 000$, $T_1=14$, $T_2=9$ 进行锤击数目的识别情况。

表 1 不同采样文件的锤击数目的识别

Tab. 1 Recognition of Piling Sound About Some Sampling Files

采样文件	真值	识别值	T_2	T_3	识别率/%
1-2	2	2	17	1	100
2-6	6	6	18	1	100
3-10	10	10	15/14/13/16	1/2/3	100
4-31	31	31	18/19/17/16	1	100
5-47	47	47	18/16/17/19	1	100
6-50	50	50	18/19/17/12/20/10/46	1/2/8	100
7-84	84	84	17/19/20/18/11	1/7/8	100
79z	79	78	9/10/11/15/16/14/17/13/12/18/19	1/6/5/8/3/2/4/7	99
10z	147	147	18/19/20	1	100
145z	145	152	19/18/20	1	95
9-143	143	143	19/18/20	1	100
11-195	195	196	11/10/12/13/14/15/16/9/18/17	1/2/6/5/4/3	99
112z	112	109	20/18/19	1	97
272z	272	276	19/20/18/17/10/9/11	1/2	99
330z	330	329	11/10/12/15/13/14/16/17/9/18/19	2/5/6/3/4/7/8	99.7
460z	460	460	13/15/17/19/20/16	1/2/6/5/7/8/3	100

表中的 T_3 指的是一次锤击期间,满足条件 T_1 的相邻两个窗口相隔的窗口的个数,在此供分析参考;表中第二列表示采样文件中真实的锤击次数。

文件 6-50. wav 中出现远远大于 18 的间隔为 46,是因为此两次锤击之间有较长的停顿而不是漏掉了某次锤击。对于文件 330 z. wav,其 T_2 最小为 9,最大为 19,波动比较大,是由于受到噪音的干扰所致。仔细倾听该采样文件,发现里面有比较大的噪声干扰,主要是由于捆桩的钢丝扣和卡环在解离桩体后没有固定好,使得在锤击期间由于摆动而碰撞桩体以及龙口架,严重干扰了锤击数的识别。在这种噪声干扰比较强的情况下, T_2 的取值适当与否就与识别率的高低密切相关。

由上表可以看出,在 $T_1=14$ 的情况下取 $T_2=9$,具有很高的识别率,而且抗噪声的能力很强,其识别精度可以达到 98%,完全达到了打桩定位规范对锤击数记录的要求。

4 结 语

本文将锤击声音看作一维信号序列,对锤击声音进行快速傅立叶变换,在频域里用多个统计量对频谱幅值进行了详细的分析,得出了平均绝对值偏差这个较为准确识别锤击数目的锤击声音的统计特征及其相应的参数值。

在实际生产中,不同的打桩船的锤击频率不一样,不同地质条件下锤击声音的强度也不一样,反映在统计量序列的幅值随之不同,也就是说参数 window、 T_1 和 T_2 的值不是惟一的。但是只要抓住平均绝对值偏差这个特征,根据采集的声音确定合适的窗口宽度 window 以及 T_1 和 T_2 ,由此准确识别锤击数目是完全可行的。而精度更高和自适应能力更好的锤击次数识别特征以及算法的选取则有待于更深入的研究。

参 考 文 献

[1] 林明华. 水上打桩模型研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005

[2] 刘建刚, 刘秀芳. 快速傅立叶变换(FFT)在 TIVIS320F206 上的实现[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004(3):67-68

[3] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2002

[4] 张小虹. 数字信号处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2005

[5] 吴湘淇, 肖熙. 信号、系统与信号处理的软硬件实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2002

第一作者简介:王新洲,教授,博士生导师。主要从事空间数据处理理论与应用方面的研究。
E-mail: xzhwang@sgg. whu. edu. cn

Recognition of Piling Sound Based on Fast Fourier Transform

WANG Xinzhou¹ LIN Minghua¹ HUA Xianghong¹ XU Yaming¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: On the basis of the analysis of fast Fourier transform and some basic statistical variables, the piling sound is analyzed in frequency domain; then the character, mean absolute deviation, and corresponding parameters on the piling sound recognition are acquired; thus an algorithm can be developed to count the number of piling sound by rule and line.

Key words: piling sound; fast Fourier transform; mean absolute deviation; penetration

About the first author: WANG Xinzhou, professor, Ph. D supervisor, majors in the theory and application of spatial data processing.
E-mail: xzhwang@sgg. whu. edu. cn