

基于HHT方法的混凝土桩无损检测

黄弈茗^{1,2}, 郑路³, 薛尚铃^{1*}, 刘立平⁴

¹中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆

²重庆致锐远交通工程技术咨询有限公司, 重庆

³福州大学土木工程学院, 福建 福州

⁴重庆大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年11月16日; 录用日期: 2023年12月13日; 发布日期: 2023年12月22日

摘要

由于混凝土桩基在工程中的广泛应用,其无损检测成为一个被广泛关注的课题。而传统的信号处理方式,如傅立叶变换、小波变换等,在处理非线性非稳态信号时存在着一定的不足。本文采用最新的希尔伯特-黄变换(HHT)方法对一个存在不良状况的混凝土桩和一个完整桩的测桩信号作了分析。并且利用边际谱对不同的不良状况引起的频率分布变化进行了探讨,比较了利用HHT方法对桩身不良状况进行定位的准确性,并进一步得出了当机械波通过不同种类的不良状况时,所得信号在HHT边际谱上所表现出的差异性。

关键词

混凝土桩基检测, HHT, 边际谱

The Nondestructive Examination to Concrete Piles Based on the Theory of Hilbert-Huang Transform

Yiming Huang^{1,2}, Lu Zheng³, Shangling Xue^{1*}, Liping Liu⁴

¹CISDI Engineering Co. Ltd., Chongqing

²Chongqing Zhiruiyuan Traffic Engineering Technology Consulting Co. Ltd., Chongqing

³College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian

⁴School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing

Received: Nov. 16th, 2023; accepted: Dec. 13th, 2023; published: Dec. 22nd, 2023

*通讯作者。

文章引用: 黄弈茗, 郑路, 薛尚铃, 刘立平. 基于HHT方法的混凝土桩无损检测[J]. 土木工程, 2023, 12(12): 1455-1466.
DOI: 10.12677/hjce.2023.1212166

Abstract

Because of the widespread use of concrete piles in engineering filed, the study of the methods of concrete piles' nondestructive examination has already become a research subject widely concerned. However, the traditional signal processing methods, such as Fourier Transform and Wavelet Transform, are somewhat defective in processing nonlinear signal or unstable signal. This paper used the latest signal processing method named as Hilbert-Huang Transform (HHT) to analyze detective signals of an integrity pile and a non-integrity pile. We verify the accuracy of defect location by HHT method. Furthermore, based on the theory of marginal spectrum, we also made a discussion about variation of frequency induced by different kinds of defects.

Keywords

Nondestructive Examination, Concrete Piles, HHT, Marginal Spectrum

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

混凝土桩作为一种常见的承载结构被广泛应用于码头、公路以及民用建筑领域。但是由于施工工艺以及现场环境等原因，混凝土桩在灌注的过程中常会出现成品质量不良的情况，例如颈缩，断裂以及夹泥等。这些不良的情况使得桩的完整性和连续性受到破坏，并可能进一步导致桩基承载力和使用寿命的降低。因此，对桩基的无损检测(Non-Destructive Tests)成为一个被广泛研究的课题。

本文所采用的 Reflected Wave Method 属于无损检测的一种方法。Reflected Wave Method 的基本假设是桩为均值弹性结构，在桩顶作用一脉冲力后，其应力波将沿着桩体从上至下传播。同时，通过接受设备记录反射的应力波。由于桩体的不良情况(断桩、颈缩)存在明显的阻抗差异。因此可以通过对记录的信号数据进行信号处理来识别不良情况的位置和种类。目前，现有的施工设备和仪器主要是依靠对信号波形的异常情况进行分析来推测桩身的不良状况所在位置以及不良状况的种类。这种方法虽然简便快捷，但对信号波形的解读主要依靠施工人员的经验判断，这就造成解读结果的随意性较强，从而加大了误判的可能性。因此，通过信号处理的方法被认为能够更准确地判定混凝土结构物的健康状况。例如 Maalej 等通过研究混凝土梁在开裂，腐蚀以及修复后的声发射现象得出结论认为：通过频率的变化来确定混凝土梁的健康状况是一种行之有效的办法[1]，Law 等通过对比边际谱的方式探讨了轴承在不同运行状况下的工作状态[2]。从目前来看，信号处理最常用的方法是傅立叶变换，傅立叶变换可以将信号从时域转换到频域进行研究，这样能够更好地利用信号所包含的信息。但是，对于测桩信号这样的非稳态信号而言，傅立叶变换可能造成信号频谱的极大失真，这对于测桩信号的信息挖掘是非常不利的，而相比较而言，HHT 方法所采用的边际谱则能够更为精确的反映信号在频域中的特征例如 Maalej 等通过试验证明：与 FFT 方法相比，HHT 方法更能反映当波传播经过混凝土梁腐蚀部分及非腐蚀部分时引起的频率的微小波动[1]，Law 等通过对比边际谱的方式探讨了轴承在不同运行状况下的工作状态[2]。

本文通过对长沙市某工程的 0001 号桩及 0085 号桩测桩信号进行采集，采用最新的希尔伯特黄变换 (HHT)对测桩信号进行信号处理。利用信号 IMF 分量的瞬时频率，瞬时幅值以及瞬时相位对信号的异常

部位进行准确定位,从而推导出桩身不良状况的精确位置。同时对时频谱图以及边际谱进行分析,讨论了不同的不良状况与信号频率范围之间的对应关系。

2. Hilbert-Huang Transform (HHT)方法介绍

2.1. 背景介绍

在工程实践中,施工技术人员往往需要得到信号的时间频率信息。然而,信号本身通常不能提供此类信息。因此,相关从业人员需要找到一种合适的信号处理方法。傅立叶变换,小波变换以及 HHT 变换是常用的信号处理方法的代表。而 HHT 是最新发展出来的一种对非线性及非稳态时间序列进行分析的功能强大的方法[3]。

目前研究最为成熟的信号处理方法是傅里叶变换以及以傅里叶变换为基础的一系列信号处理方法,如短时傅里叶变换,快速傅里叶变换等等。但是,傅里叶变换是一种全局变化的信号处理方法,不能同时获得信号的时频域信息,也不能反映信号频率分布随时间的变化规律,因此用傅里叶变换处理声发射信号只能定性的反应不同岩石信号的频率分布的不同。在傅里叶变化的基础上发展出了小波分析。小波分析是一种时频局部化信号处理方法,因此目前小波分析被广泛应用于诸如信号分析、图像处理、CT 扫描、语音识别与合成、工程地震勘察等诸多领域。希尔伯特—黄变换是一种分析数据的经验方法。Li Lin 等曾引用 N.Huang 等人的观点提出:傅立叶频谱分析尽管常用于信号处理,但不能指出频率元素出现的具体时间,因此人们只能将信号假定为稳态的。小波分析是迄今为止最有效的分析非稳态信号的方法。但小波分析仍然被认为是不完备的,因为其本质上是一种自适应的加窗傅立叶变换方法[4] [5] [6]。因此傅里叶变换与小波变换都仅仅适用于线性过程,而自然界的几乎所有数据都是非线性和非稳态的,要分析这些数据,研究人员需要另一种方法。希尔伯特—黄变换是最近几年出现的解决非线性非稳态信号的一种方法,它不仅继承了小波计算的优点,并且能对离散信号进行特征抽取[7]。另外,希尔伯特—黄变换在算法上非常易于理解而且其算法很容易被利用以对数据进行分析。

2.2. HHT 方法

EMD 方法与 Hilbert 变换

EMD 方法的前提条件是由任何信号都是由一组 IMF 分量构成的。而 IMF 分量的定义为满足以下两个条件的函数[8]:

- 1) 函数的极值点个数和过零点数相同或最多相差一个。
- 2) 函数的上下包络关于时间轴局部对称。

为了将信号分解成一组 IMF 分量, N.E.Huang 于 1998 年提出了 EMD 方法,通过计算,当达到终止条件时,可以将原始信号分解成 n 个 IMF 分量与一个残余函数的组合,将每一个 IMF 分量进行 Hilbert 变换得出 Hilbert 谱为:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)dt}$$

将 Hilbert 谱对时间求积分,可以得出 HHT 边际谱为:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega, t) dt$$

3. 试验背景

本文所采用的数据取自长沙市某工程的 0001 号桩及 0085 号桩,其桩长均为 8.2 m,设计桩径均为

500 mm，浇筑桩所选用的混凝土标号为 C25。应力波的波速在 0001 号桩中为 1427 m/s，在 0085 号桩中为 625 m/s。

根据监测报告，得到 0001 号桩桩体存在的三处不良状况如表 1 所示。0085 号桩为无不良状况的完整桩。

试验所采用的仪器为长沙白云电子研究所研发的 CE-9201 岩土工程质量检测仪如图 1 所示，其工作原理为利用锤击产生的声波，通过被测工程件或岩土传播，同时利用锤击信号同步启动仪器工作，仪器接收来自被测工程件或岩土的信号被量化后，按点阵表示成波形并储存在仪器中，对接收的波形传入计算机进行数据分析确定出被测介质的质量特性。

Table 1. The defects of pile 0001#

表 1. 0001 号桩桩体不良状况

不良状况	夹泥	残渣	胶结差
位置(距桩端)	2.6 m	4.5 m	6.2 m



Figure 1. CE-9201 Geotechnical engineering tester

图 1. CE-9201 岩土工程检测仪

4. 信号处理

首先，在桩端处利用锤击的方式产生一个应力波脉冲，同时接收器开始接受并记录反射的应力波信号。将应力波信号去噪后，利用 MATLAB 软件将信号做 EMD 分解。求出各 IMF 分量的能量及其与原始信号的相关系数。然后利用 HHT 变换得到各 IMF 分量的瞬时幅值、瞬时频率以及瞬时相位，并做出时频谱图。最后，得出每个 ms 的边际谱图。

4.1. 信号的 EMD 分解

为了对信号进行 HHT 变换以进一步分析其特征，首先需要对其进行 EMD 分解，桩 0001 的原始信号(信号 1)转换成 6 个 IMF 分量如图 2 所示，桩 0085 的原始信号(信号 2)转换成 7 个 IMF 分量如图 3 所示，可以看到 EMD 分解得出的 IMF 分量按照频率从高到低的顺序排列。

为验证 EMD 分解是否根据信号本身的固有特征进行了自适应的分解，求出了信号 1 和 2 各 IMF 分量的归一化能量以及各 IMF 分量与原始信号的相关系数如表 2，表 3 所示，并且求出信号 1，信号 2 的归一化能量与相关系数之间的相关度分别为 0.9414 以及 0.7212 如图 4 所示，这说明 EMD 方法可以很好地根据原始信号的特征进行分解。

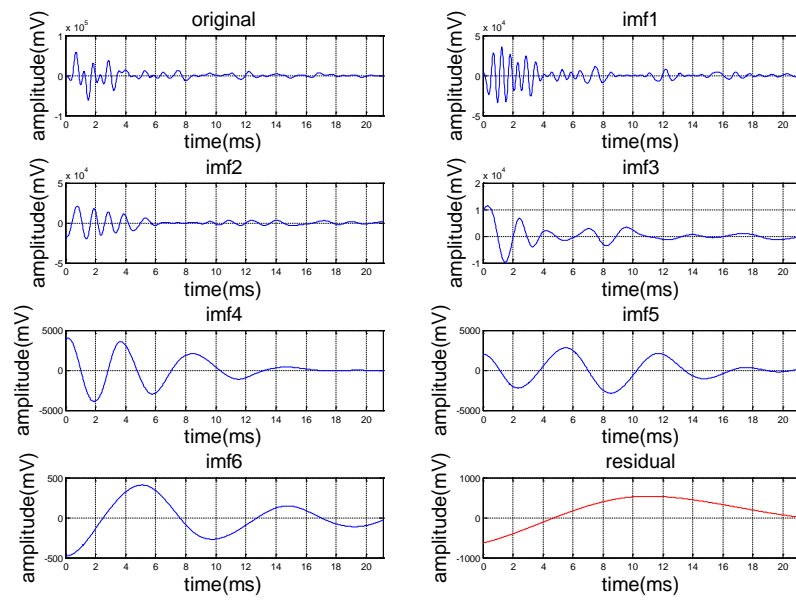


Figure 2. The IMFs and residual of signal #1
 图 2. 信号 1 对应的 IMF 分量和残余

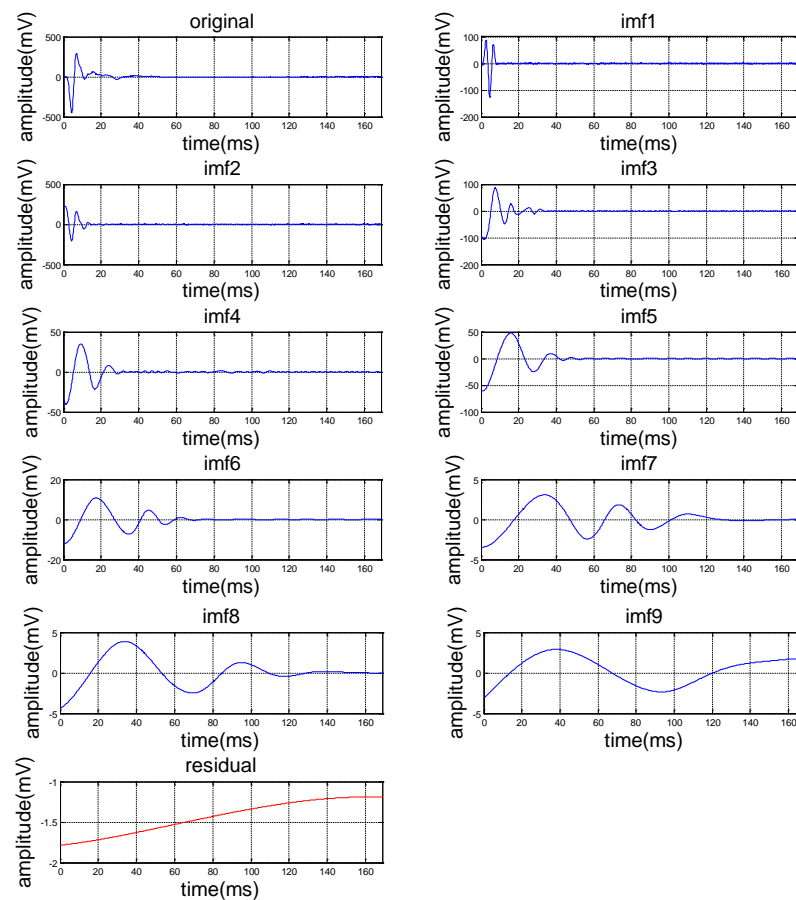


Figure 3. The IMFs and residual of signal #2
 图 3. 信号 2 对应的 IMF 分量和残余

Table 2. The IMFs' normalized energy and correlation coefficient with original signal #1
表 2. 信号 1 各 IMF 分量的归一化能量及与原信号的相关系数

Signal 1	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	Residual
Normalized Energy	0.5834	0.2943	0.0798	0.0229	0.0180	0.0004	0.0012
Correlation Coefficient	0.7669	0.6202	0.3320	0.1603	0.1031	0.0013	0.0154

Table 3. The IMFs' normalized energy and correlation coefficient with original signal #2
表 3. 信号 2 各 IMF 分量的归一化能量及与原信号的相关系数

Signal 2	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	Residual
Normalized Energy	0.0884	0.5759	0.1852	0.0350	0.1043	0.0063	0.0010	0.0015	0.0014	0.0010
Correlation Coefficient	0.6137	0.6794	0.5686	0.3972	0.3664	0.2944	0.0823	0.1098	0.1033	-0.0180

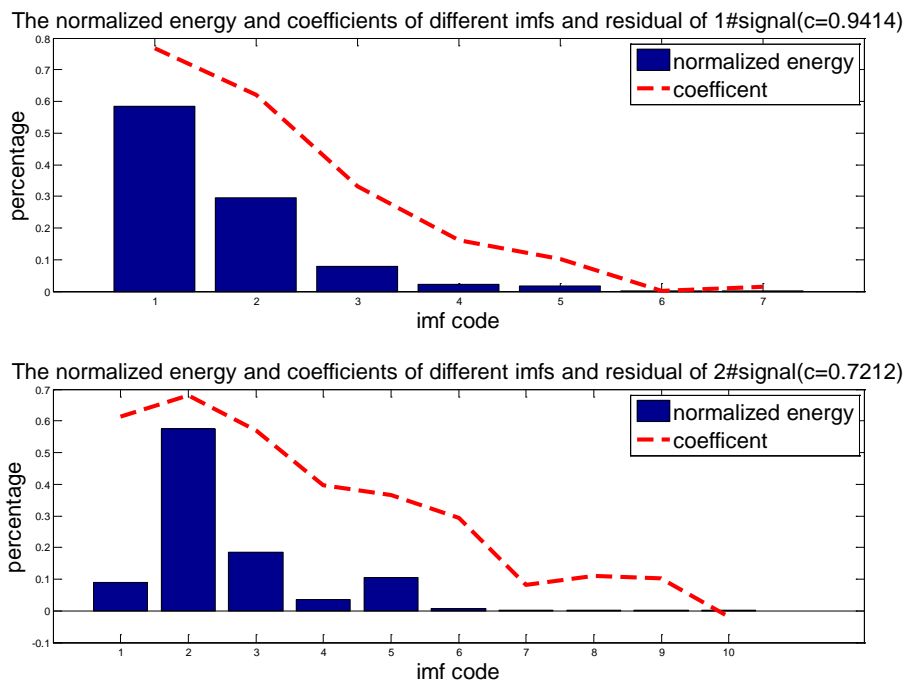


Figure 4. The normalized energy and coefficient of IMFs and residual
图 4. 各 IMF 分量归一化能量与相关系数

4.2. 各 IMF 分量的瞬时幅度，瞬时相位以及瞬时频率

根据信号 1 和 2 进行 EMD 分解所得的 IMF 分量，可以利用 Hilbert 变换得出信号的瞬时幅度以及瞬时相位。一般而言，能量较大的 IMF 分量所包含原始信号的信息也较多。因此在本文中，选取信号 1 的 IMF1, IMF2 分量(归一化能量分别为 0.5834 及 0.2943)，以及信号 2 的 IMF2, IMF3 分量(归一化能量分别为 0.5759 及 0.1852)进行 Hilbert 变换，所得出的瞬时幅度及瞬时相位如图 5 及图 6 所示。

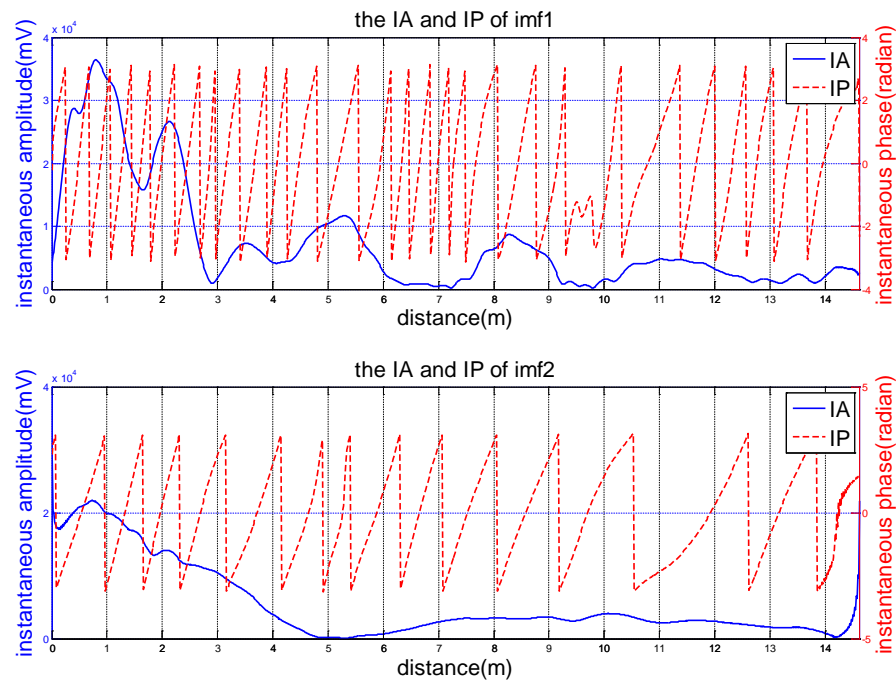


Figure 5. The IA and IP of IMF1 and IMF2 of signal 1#
 图 5. 信号 1 IMF 分量 1 和 2 的瞬时幅度及瞬时相位图

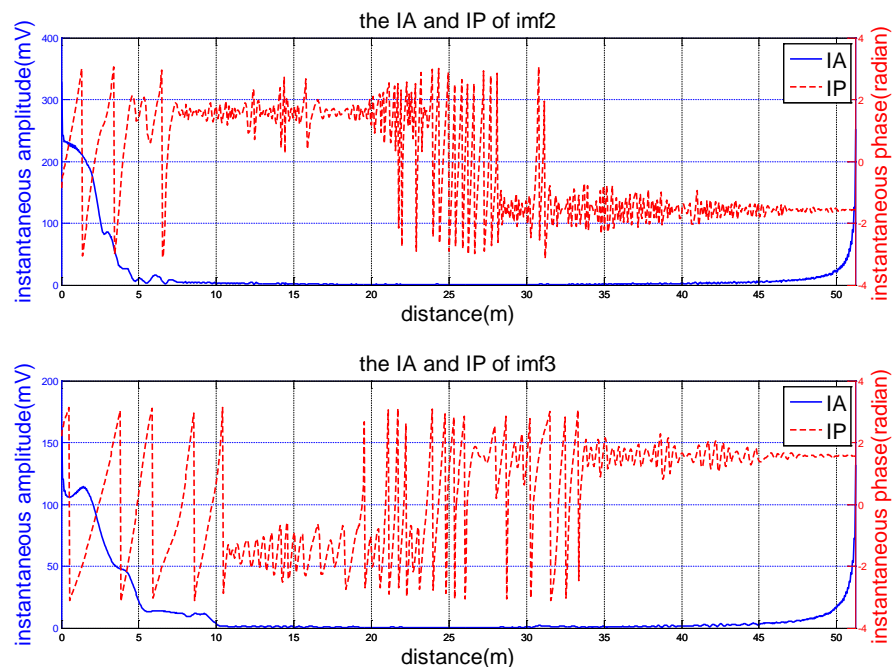


Figure 6. The IA and IP of IMF2 and IMF3 of signal 2#
 图 6. 信号 2 IMF 分量 2 和 3 的瞬时幅度及瞬时相位图

从图中可以观察到, IMF 分量的瞬时幅值随着距离的增加呈现出总体下降的趋势, 在信号的末端端点左右, 瞬时幅值出现增长, 这是由于 EMD 分解时上下包络失真所造成的端点飞翼问题。由于本文中测桩信号端点所处位置早已超过桩底所在位置, 故本文不对其进行讨论。

从图6中可以发现, IMF分量的瞬时相位在约3.0 m, 5.5 m, 7.5 m以及9.2 m处出现变化, 从图7中可以发现, 忽略明显的高频噪声, IMF分量的瞬时相位在约8.0 m及11.0 m出现明显变化。这些变化可能是由于桩身不良状况引起的, 也可能是桩底交界面的反射所造成的。为方便进一步讨论, 将瞬时相位对时间求导, 得出上述IMF分量的瞬时频率。将瞬时频率的高频噪声过滤, 得出IMF分量的瞬时频率如图7, 图8所示。

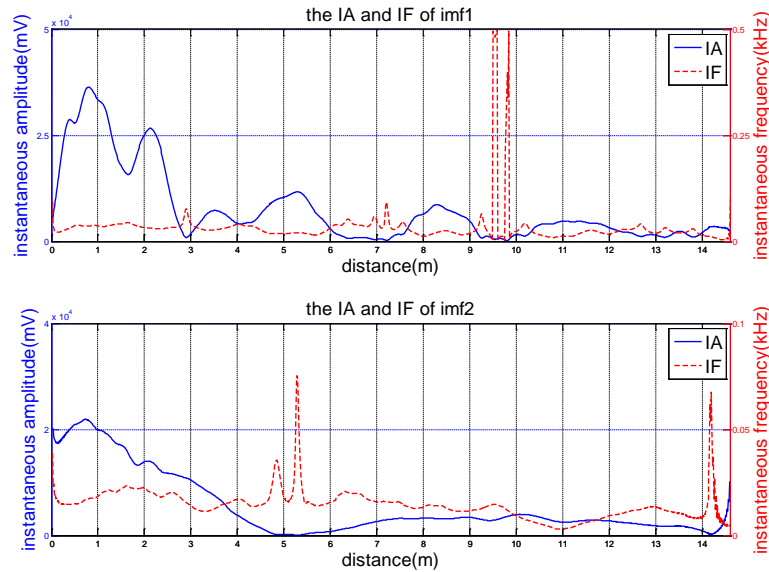


Figure 7. The IA and IF of IMF1 and IMF2 of signal 1#
图7. 信号1 IMF分量1和2的瞬时幅度及瞬时频率图

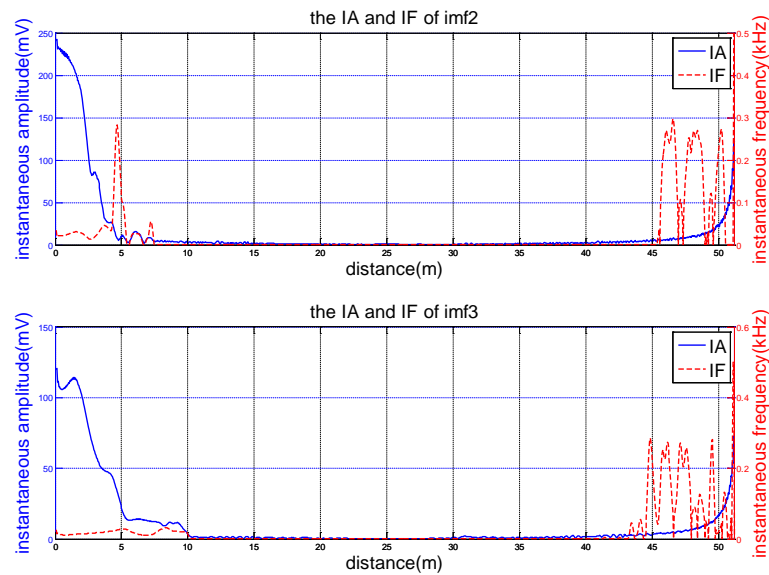


Figure 8. The IA and IF of IMF2 and IMF3 of signal 2#
图8. 信号2 IMF分量2和3的瞬时幅度及瞬时频率图

从图7中可以看出, 信号1的IMF分量的瞬时频率在 distance = 2.9 m, distance = 5.2 m, distance = 7.2 m以及 distance = 9.2 m处存在奇异点。而根据测桩规范, 桩端位置所对应的幅值一般为最大值, 因此桩

0001 的端部位置为 distance = 0.5 m 处, 因此可以计算得出 0001 号桩在距桩端 2.4 m, 4.7 m, 6.7 m 处存在异常, 桩底位置为距桩端 8.7 m 处。与实际情况相对照, 误差率见表 4。

Table 4. The comparison of predicted and actual defect locations of #1 pile
表 4. #1 桩预测缺陷位置与实际情况对照表

状况	夹泥	残渣	胶结差	桩底
实际位置	2.6 m	4.5 m	6.2 m	8.2 m
检测位置	2.4 m	4.7 m	6.7 m	8.7 m
误差率	2%	2%	6%	6%

相对于信号 1 的瞬时频率而言, 信号 2 的瞬时频率相对恒定。其中 IMF2 分量在 distance = 4 m 处存在一个奇异点, IMF3 分量在 distance = 10 m 处有明显的下降, 根据规范得出 0085 号桩的桩端位置为 distance = 1.3 m 处, 因此可以将 IMF3 中的奇异点判定为桩底所在位置, 其误差率为 6%。

4.3. 信号的三维时频图以及边际谱图

为方便讨论桩体不良状况与信号频率之间的关系, 求得信号的边际谱。将边际谱归一化后如图 9 所示。

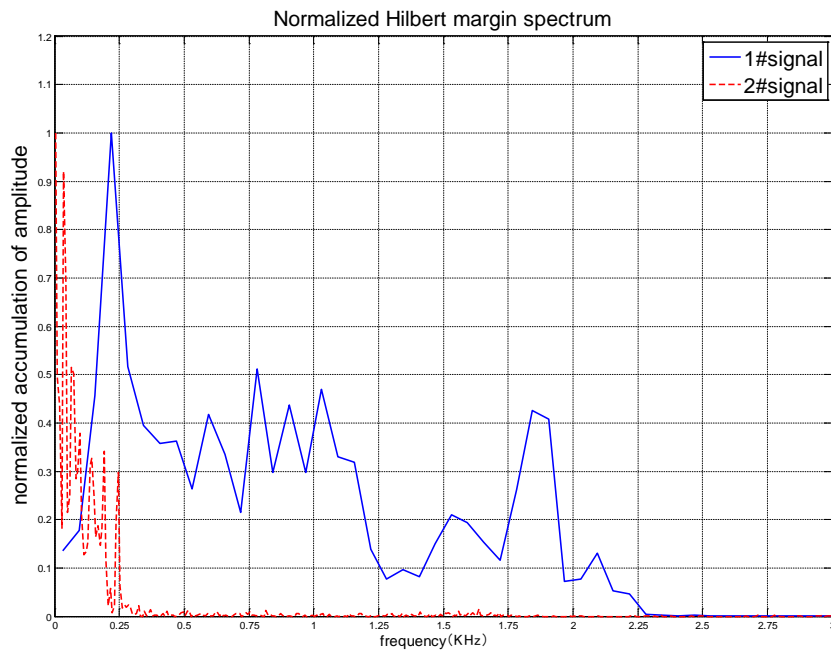


Figure 9. Normalized Hilbert margin spectrum
图 9. 归一化的边际谱图

从图 10 可以看出, 信号 1 和信号 2 的频率分布差别很大。信号 1 的频率主要分布在 0 至 2.25 kHz 频段, 而信号 2 的频率主要分布在 0 至 0.25 kHz 频段。信号 1 的基频为 0.2187 kHz, 信号 2 的基频为 0.0039 kHz。

为方便观察边际谱随着时间变化的规律, 将相同时间间隔的边际谱放入时域内进行观察, 如图 10 所

示。可以看到，信号的边际谱在桩体内(信号 1 约为 0~3 ms 时间段内，信号 2 约为 0~15 ms 时间段内)的波动较大，而当信号穿越桩体进入土体后，边际谱的增长基本处于平稳状态。

在本文中，每隔 25 个采样点作一个边际谱，得出不同时间段的边际谱图如图 11~14 所示。从图 11，图 12 可以发现，在 0.5~1 ms 的时段内，信号的频率增长集中在 0.7~0.9 kHz 以及 1.8~2 kHz 的频段内。

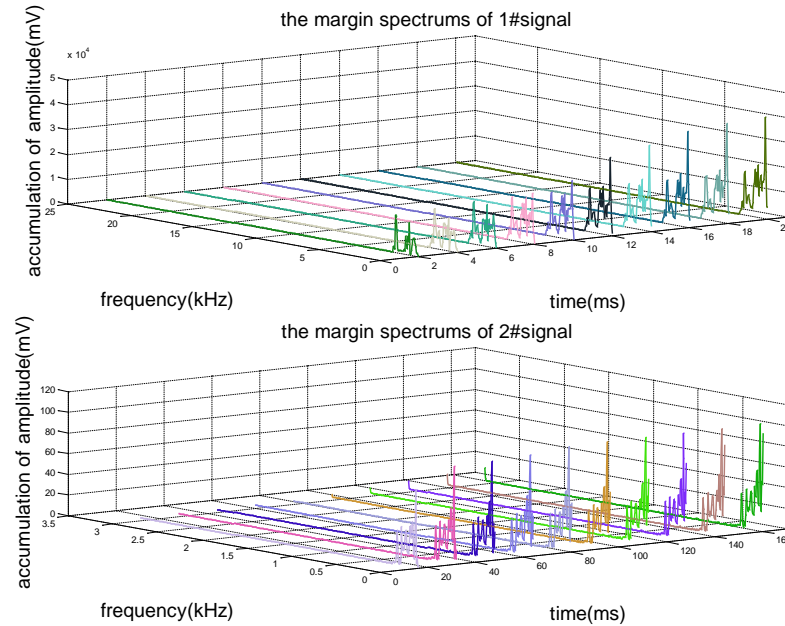


Figure 10. The margin spectrums versus time
图 10. 边际谱图随时间变化的趋势

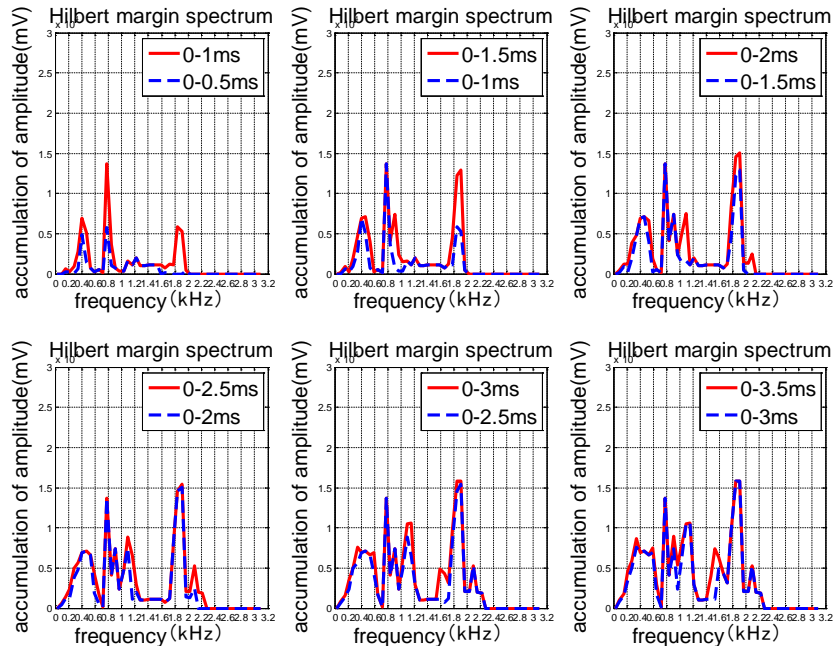


Figure 11. The margin spectrums of signal 1# (0.5~3.5 ms)
图 11. 信号 1 边际谱图(0.5~3.5 ms)

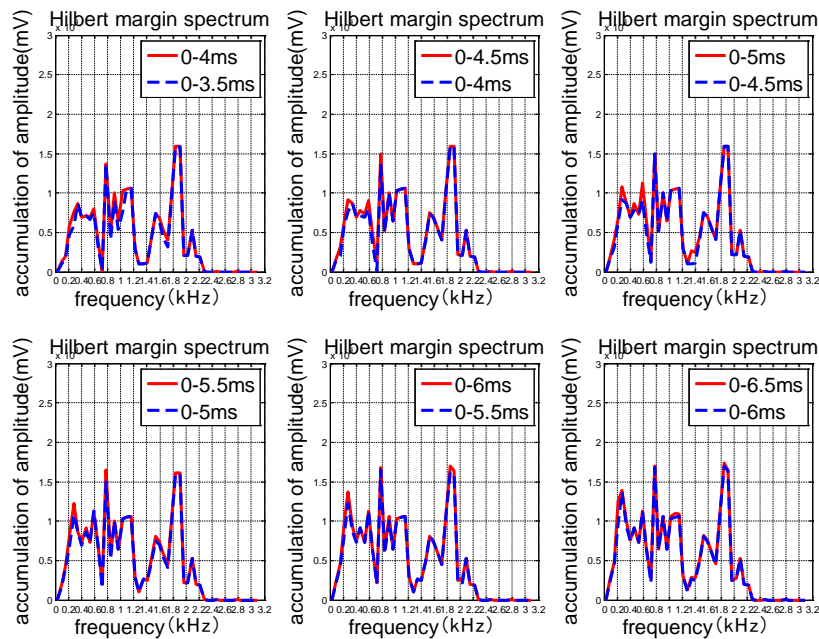


Figure 12. The margin spectrums of signal 1# (3.5~6.5 ms)

图 12. 信号 1 边际谱图(3.5~6.5 ms)

在 1.5~2 ms 的时段内, 信号的频率增长集中在 1~1.2 KHz 的频段内。在 2~2.5 ms 的时段内, 信号的频率增长集中在 2~2.2 kHz 的频段内。以上的频率变化分别对应着桩体内存在的夹泥(存在于 0.85 ms 处), 残渣(存在于 1.53 ms 处)以及胶结差(存在于 2.12 ms 处)。而在大于 3 ms 的时段内, 信号的频率增长则比较稳定。从图 13, 图 14 可以发现, 相比信号 1, 信号 2 在桩内的增长比较单一, 主要集中在 0.3 kHz 的频率处。并且其增长速度相对较为缓慢。

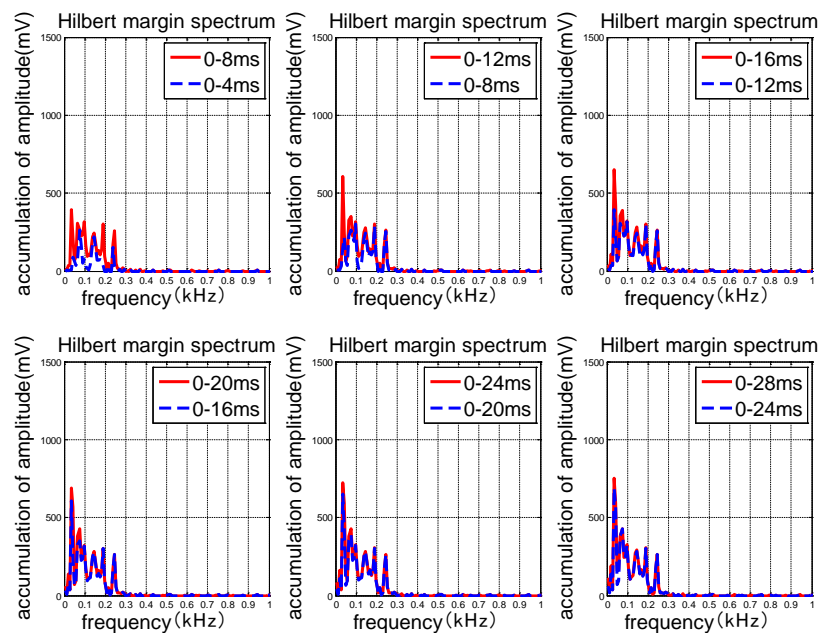


Figure 13. The margin spectrums of signal 2# (4~28 ms)

图 13. 信号 2 边际谱图(4~28 ms)

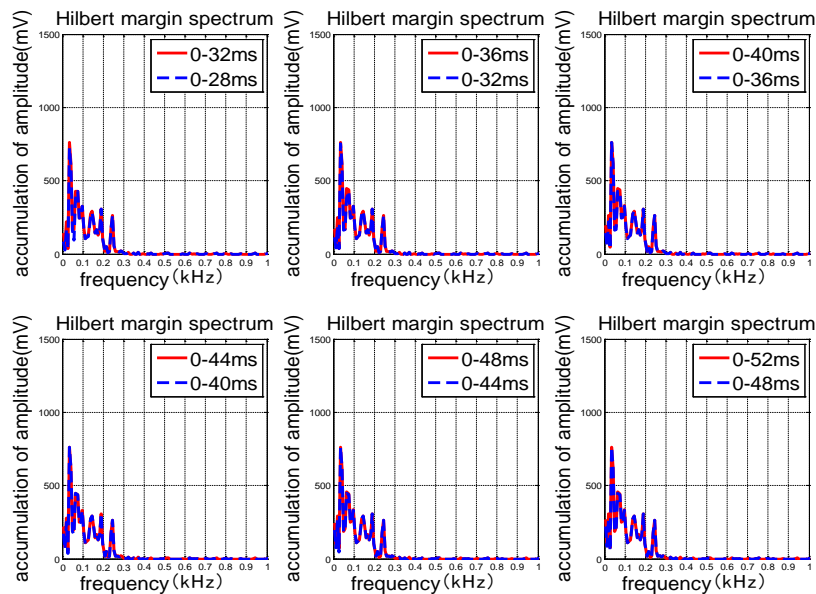


Figure 14. The margin spectrums of signal 2# (28~52 ms)

图 14. 信号 2 边际谱图(28~52 ms)

5. 结论

1) EMD 方法能够较好的根据原信号的特征进行分解, 一般而言, 能量较大的 IMF 分量与原信号的相关度也较高。

2) 对于测桩信号而言, 信号的瞬时频率突变可以较为准确的检测出信号的不良状况所在位置。

3) 在桩体内部的测桩信号边际谱变化不规则, 当信号传出桩体进入桩下土体, 其边际谱的变化则比较稳定。这一现象可以用来检测灌注桩的实际长度。

4) 对于信号在桩体内传导时的边际谱而言, 完整桩所对应的边际谱变化的频带较为单一。而对于有不良状况的桩体而言, 不同不良状况所对应的变化的频带范围也不同, 在本文中, 0001 号桩不良范围所对应的变化的频带为夹泥: 0.7~0.9 kHz、1.8~2.0 kHz; 残渣 1.0~1.2 kHz; 胶结差: 2.0~2.2 kHz。

参考文献

- [1] Maalej, M., Chhoa, C.Y. and Quek, S.T. (2009) Effect of Cracking, Corrosion and Repair on the Frequency Response of RC Beams. *Construction and Building Materials*, **24**, 719-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.036>
- [2] Law, L.-S., Kim, J.H., Liew, W.Y.H. and Lee, S.-K. (2012) An Approach Based on Wavelet Packet Decomposition and Hilbert-Huang Transform (WPD-HHT) for Spindle Bearings Condition Monitoring.
- [3] Chen, H.G., Yan, Y.J. and Jiang, J.S. (2006) Vibration-Based Damage Detection in Composite Wingbox Structures by HHT. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**, 307-321.
- [4] Lin, L. and Chu, F.L. (2011) HHT-Based AE Characteristics of Natural Fatigue Cracks in Rotating Shafts. *Mechanical System sand Signal Processing*, **26**, 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.07.017>
- [5] Huang, N., Shen, Z., Long, S., et al. (1971) The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **454**, 903-995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [6] Babu, T.R., Srikanth, S. and Sekhar, A.S. (2008) Hilbert-Huang Transform for Detection and Monitoring of Crack in a Transient Rotor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **22**, 905-914. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.10.010>
- [7] 行鸿彦, 周月琴. 改进的 HHT 方法在旋转机械不对中故障特征提取中的应用[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(12): 6.
- [8] 金彦. 工程物探回波信号提取方法研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.