

岩土工程勘测中 EH - 4 观测信号的小波分析

沙成满, 王恩德, 毛亚纯, 王述红

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: EH - 4 连续电导率成像系统是新一代数字化的电磁法仪器。针对 EH - 4 信号由于噪声等原因引起的不平稳性问题, 研究了 EH - 4 信号在不同尺度下的小波分解, 由此建立信号的小波分析方法, 并与传统的窗口傅立叶变换的时频分析方法相比较。研究表明, 小波分析方法能从不同尺度对信号进行分析, 诊断出不平稳的病态信号, 对其处理或剔除, 有利于更全面、准确地解译信号。

关键词: 岩土工程; 勘测; EH - 4; 小波分析

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5113 - 07

WAVELET ANALYSIS OF EH - 4 SIGNALS IN EXPLORATION OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

SHA Cheng-man, WANG En-de, MAO Ya-chun, WANG Shu-hong

(School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: EH - 4 is the update numeral instrument of continuous conductivity imaging system with electromagnetic method. The numeral signals transferred by EH - 4 must be transformed into frequency ones. Fourier transform is a kind of full analysis in frequency domain without any analysis function of time domain, and fails to consider the problems of unstable signals caused by noises. It is necessary to cull the noises. The original method culling noises is surveying and its mathematical expectation is used. Its drawback is obvious, that is, all the signals are not examined and therefore some unstable morbid signals are joined into the statistical analysis. The wavelet analysis method means analyzing each signal segment using wavelet function in different scales, and culling or revising unstable morbid signals. This method has full analysis function in both frequency domain and time domain. Through the study of discrete-time orthogonal wavelet decomposition, the signals observed by EH - 4 are decomposed into different scale elements and analyzed in both time domain and frequency domain; subsequently the stability and quality of signals are ascertained in different scales. The study shows that the wavelet analysis method can analyze signals in different scales, detect unstable morbid signals and revise or cull them. It is one of effective means to analyze and detect signals in different frequency scales, and is useful to interpret signals all-round and accurately.

Key words: geotechnical engineering; exploration; EH - 4 system, wavelet analysis

1 引言

EH - 4 连续电导率成像系统(以下简称 EH - 4)

是新一代数字化的电磁法仪器, 以其方便快捷、操作简单、精度较高, 并集有源电探和无源电探的优点于一身, 代表了目前国际上最为先进的一种电磁法勘探手段, 在地下水调查、工程地质勘察、环境

收稿日期: 2004 - 10 - 05; **修回日期:** 2004 - 12 - 28

基金项目: 国家博士后科学基金资助项目(2004036156)

作者简介: 沙成满(1964 -), 男, 博士, 2002 年毕业于东北大学资源与土木工程学院, 现为东北大学博士后、副教授, 主要从事岩土工程、结构控制与健康检测方面的研究工作。E-mail: shachengman@sina.com。

灾变和矿产资源勘察等方面发挥了重要作用^[1]。但对于观测信号的物理解释方面, 却仍然存在许多理论上和实际信号处理方法上的问题, 影响了其作用的发挥。首先, EH-4 观测到的时域上的数字信号, 理论上应该是平稳的, 然而, 由于大地电磁信号源本身的变化, 外界、人类活动产生的电磁信号干扰以及测量系统自身的噪声, 使得观测信号含有不平稳噪声成分。而傅立叶变换是一种完全的频率域的分析, 不具备时域信号的分析功能, 因此, 不具备分析和剔除不平稳噪声成分的能力。为尽可能地剔除噪声信号的影响, 传统的做法是测量多个时段, 一般取 16~18 段, 低频部分 300 ms 一段, 高频部分 20 ms 一段, 取其傅立叶变换后的谱成分加权平均值。对于噪声成分服从某种规律性概率分布(如高斯分布)的情况, 这种加权平均的处理可能没有大的问题, 但对于那种不规律的噪声成分, 这种简单的加权平均会带来很大误差; 其次, 对于那种完全不平稳的测量信号, 可能已不具有解译价值, 傅立叶变换也不能分析其平稳性。

小波分析方法弥补了傅立叶变换不能分析非平稳信号的不足, 能从不同尺度对信号进行时频分析, 剔除局部的误差, 再对信号进行小波重构。本文研究了 EH-4 观测信号的小波变换和小波重构, 并与传统的傅立叶变换方法进行了对比, 提出了 EH-4 信号小波处理的算法, 用于指导生产勘测实践。

2 窗口傅立叶变换与小波变换

对于大多数电磁法观测信号的解释是在频域上进行的, 而实测信号是在时域上测得的, 因此, 时域信号必须经过如下的傅立叶变换转换成频域信号^[2]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为观测到的时域信号, $X(\omega)$ 为变换后的频域信号。

在实际的信号处理过程中, 与如上的理想情况不同, 一方面, 观测到的信号不可能是无限时间, 都具有一定时间长度(T); 另一方面, 所观测到的信号是有一定采样时间间隔的数字信号, 而不是如上的连续模拟信号。因此, 计算中, 式(1)没有实际意义, 而是采用近似的、离散的、有限时长的傅立叶变换, 连续时域信号 $x(t)$ 离散化的信号 $x(k)$ 的离散傅立叶变换定义为^[3]

$$X(\omega) = \sum_{k=0}^n e^{j\omega k} x(k) \quad (2)$$

式中: $x(k)$ 为信号 $x(t)$ 在时域(T)上观测到的一组离散信号, 其中 $k=0, 1, 2, \dots, n$, 观测时间步长 $\Delta t = T/n$; $X(\omega)$ 为连续变换中对应的离散形式, 由于 $X(\omega)$ 是复数形式, 这里的 $X(\omega)$ 指的是幅值 $|x(\omega)|$ 。

由于实际的有限时间长度与理想的傅立叶变换存在误差, 必然造成频谱泄露, 使得变换到频率域的信号在某个频率点上受到邻域污染, 使信号失真, 轻者影响解译效果, 重者使得信号失去解译价值。为解决频谱泄露问题, 通常的做法是在傅立叶变换时乘以一个窗口函数, 称为“加窗”, 降低这种频谱泄露的发生。与式(2)相对应, “加窗”的离散傅立叶变换定义为

$$X(\omega) = \sum_{k=0}^n e^{j\omega k} x(k)^T \omega(k) \quad (3)$$

式中: $\omega(k)$ 为与连续窗口函数 $\omega(t)(t \in [0, T])$ 相对应的离散形式。

有限时间内的信号傅立叶变换的频谱泄露现象不可避免, 窗口函数的作用在于尽可能地降低这种泄露, 但是, 这种降低是以牺牲信号的主频率精度为代价的, 并且, 窗口傅立叶变换的最大缺陷是不能反应时域变化特征。

EH-4 观测到的时域上的数字信号, 理论上应该是平稳的, 然而, 由于大地电磁信号源本身的变化, 外界、人类活动产生的电磁信号干扰以及测量系统自身的噪声, 使得观测信号含有不平稳噪声成分。因此, 需要对信号进行时域上的不平稳性分析, 并尽可能剔除局部的不平稳部分。经典的傅立叶变换是一种频域分析, 虽然它的作用不可替代, 但它没有时域分析的功能, 因此, 不具备分析和剔除不平稳噪声成分的能力。窗口傅立叶变换虽然也具有时频分析的特点, 但对不同的频率使用同一个尺度的窗口函数显然是不合理的。为了克服窗口傅立叶变换单一的缺陷, 数学研究者又提出一种新的时频分析方法, 即小波分析。如果小波函数 $\psi(x)$ 满足:

$$C_{\psi} = \int_{\mathbf{R}^*} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}^* = \mathbf{R} - \{0\}$ 为非零实数全体。

则对任意信号 $f(t)$ 的小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dt \quad (5)$$

相应的逆变换定义为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}^+} \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (6)$$

从小波变换的定义可以看出, 尽管窗口傅立叶变换与小波变换都具有时频分析的特点, 但在性质上差别还是很大。窗口傅立叶变换对不同的频率成分在时域的取样步长是相同的, 而小波变换对不同的频率成分在时域的取样步长是高频者小, 低频者大, 所以, 它能将信号分解成交织在一起的多种尺度成分, 并对于大小不同的尺度成分采用相应粗细的时域或频域取样步长, 从而能够不断地聚焦到对象的任意微小细节, 在不同的频率段分析信号^[4-6]。

对于工程实际问题多采用离散小波变换, 特别是在数字信号领域方面。EH-4 信号是数字信号, 离散小波变换才具有实际意义。将离散小波离散化, 作为一种方便的形式, 即对变换进行二进制离散化, 因此, 一般将离散化的小波变换为二进制小波变换, 一般取 $a_0 > 1, b_0 > 1$ 。定义小波函数:

$$\psi_m(t) = a_0^{\frac{m}{2}} \psi(a_0^m t - nb_0) \quad (7)$$

式中: $m, n \in \mathbb{Z}$ (\mathbb{Z} 为全体整数集合)。

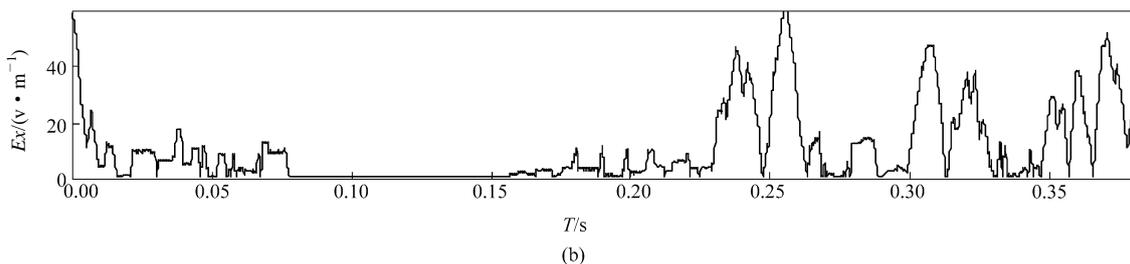
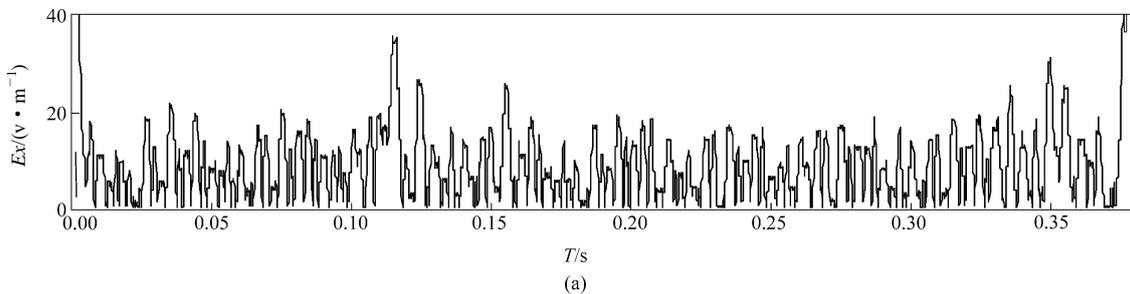
对于 $f(t) \in L^2(-\infty, +\infty)$, 相应的离散小波变换为

$$W_f(m, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{m, n}(t)} dt \quad (8)$$

3 EH-4 信号的小波分析

由于大地电磁信号源本身的不稳定以及外界、人类活动产生的电磁信号干扰(如无线通讯, 临近的高压输电线, 汽车等设施)和测量系统自身的噪声, 使得观测信号不可避免地含有不平稳噪声成分, 因此, 不同的时段信号是不同的。传统的办法是采用统计处理的办法, 将 13 组, 每组分 13 段共 169 段(低频部分)信号进行傅立叶变换, 再对每个频点上的谱值进行统计处理, 取其数学期望值。这样处理的弊端是显然的, 即所有的信号未经过分析, 一些不平稳的严重的病态信号参与了统计, 影响了最终结果的正确性。理想的做法应该是对每段信号在不同尺度上都进行小波分析, 对一些病态信号予以剔除或进行处理。

作者在辽宁某地实测 EH-4 观测信号, 由于数据量非常庞大, 这里只选取其中一个测点计算视电阻率 4 个分量(E_x, E_y, H_x, H_y)中的一个电场分量(E_x)的低频部分为例, 共测数据 13 组, 每组 13 段。本文对这些数据进行了离散正交小波分解^[7-11], 限于篇幅, 选择其中 4 段进行分析, 由于取样点较多(4 560 点), 各种频率成分混杂, 很难对信号的趋势进行分析。图 1 是(a), (b), (c), (d)4 段信号在尺度 $a = 220$ (相当于中心频率 50 Hz)上的小波分解。由于小波的时频分析在低频段时间分辨率高, 频率分辨率低, 高频段频率分辨率高, 时间分辨率低, 所以在 $a = 220$ 这个低频尺度带宽内仍含有较高频率成



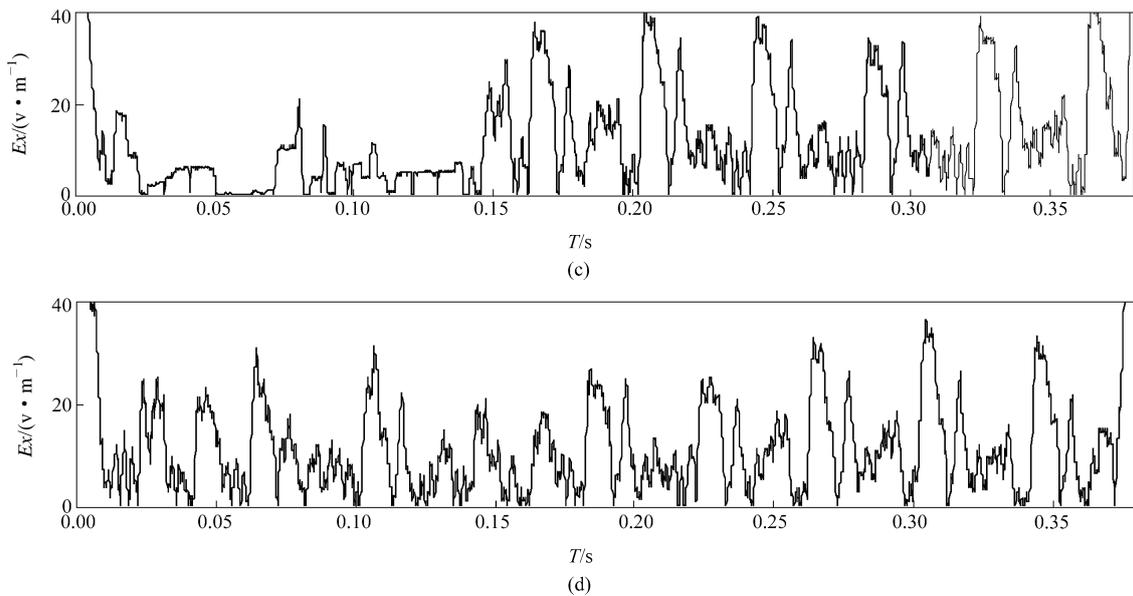
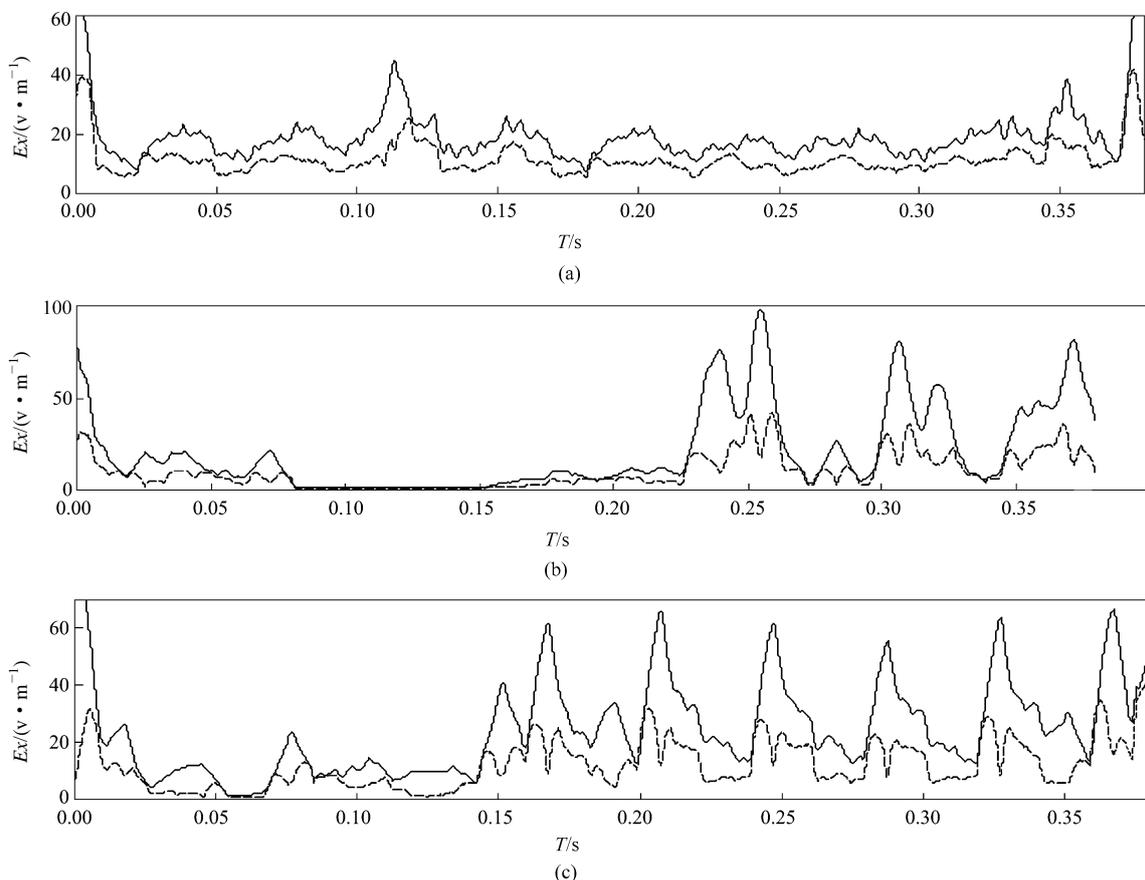


图 1 辽宁某地 EH - 4 观测的 4 段电场信号 $E_x(v/m)$ 小波分解(尺度 $a = 220$, 中心频率 50 Hz)
 Fig.1 Curves of wavelet decomposition of electric field signals $E_x(v/m)$ on 4 section surveyed in EH - 4 on the site in Liaoning(scale = 220, centric frequency = 50 Hz)

分, 为滤掉高频成分, 使得在这个尺度上的信号趋势更明显, 进行了光滑滤波处理(见图 2)。处理方法是相应时间点的数据用该点左右各 50 点数据的期望值代表。图 2 中可以看出, 光滑滤波处理后图形在该尺度上的趋势性更加明显; (a), (d)段信号质量较好, 而(b), (c)段左半部分质量不好。图 3 和图 4

分别是在尺度 $a = 60$ (相当于中心频率 200 Hz)和 $a = 23$ (相当于中心频率 500 Hz)时的小波分解后的信号图形, 展示出不同尺度上时域内的信号趋势。在不同尺度上, 信号在时域内的平稳性一目了然。对于平稳性不好的信号, 有 2 种处理办法, 一种是废弃不用, 另一种方法是在不同尺度上对信号的不平衡



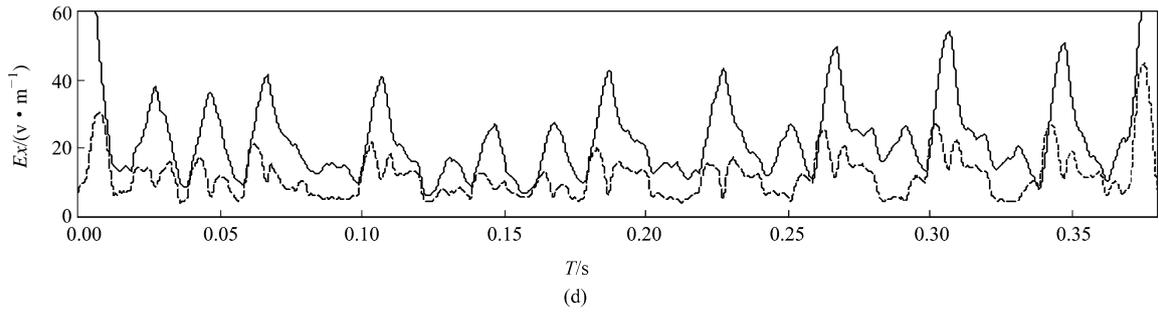


图 2 经光滑降噪的电场信号 $E_x(v/m)$ 小波分解(实线为均值, 虚线为标准差; 尺度 $a = 220$, 中心频率 50 Hz)

Fig.2 Curves of wavelet decomposition of electric field signals $E_x(v/m)$ via reducing noises by smoothing (scale = 220, centric frequency = 50 Hz)

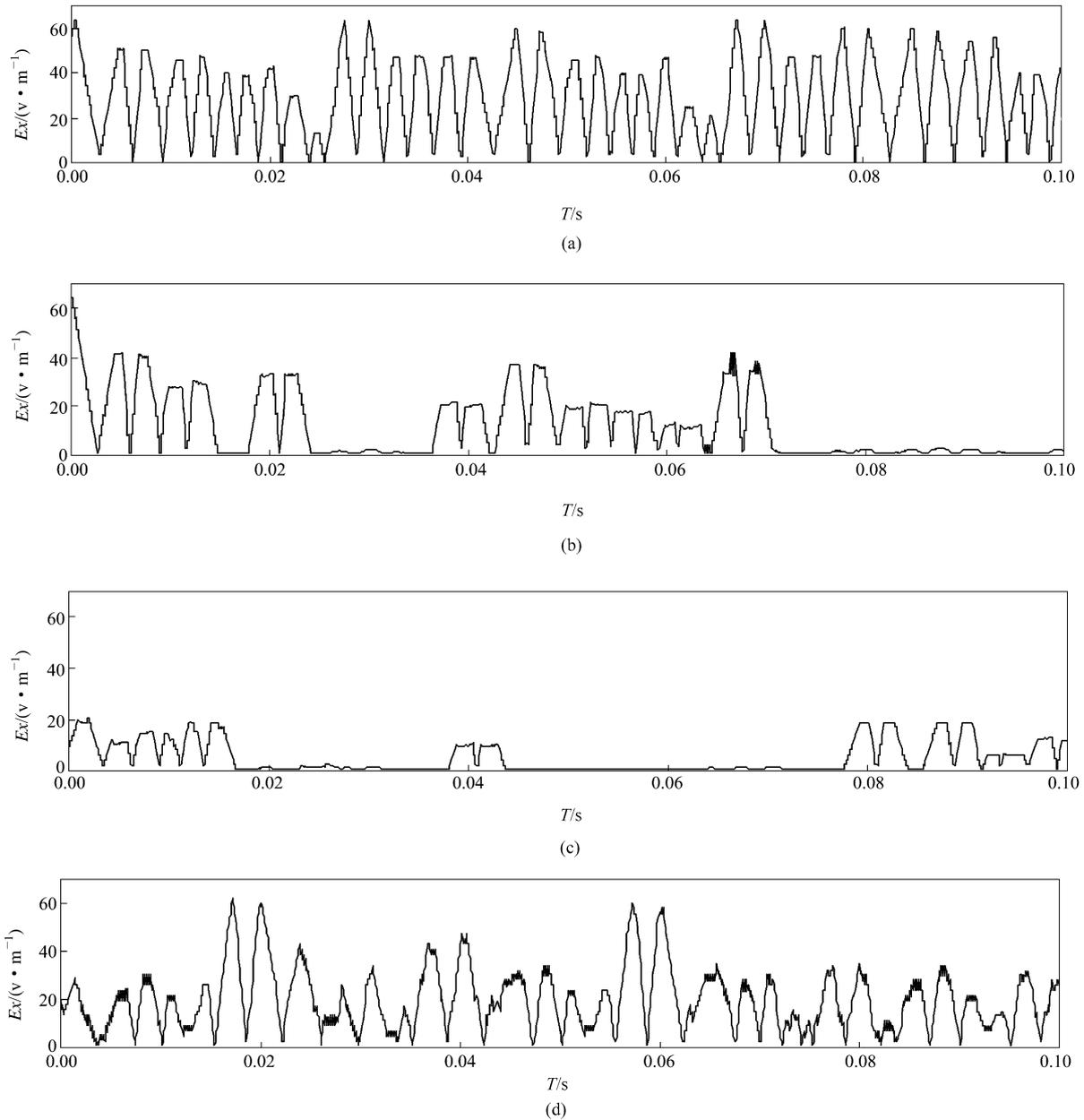


图 3 辽宁某地 EH - 4 观测的 4 段电场信号 $E_x(v/m)$ 小波分解(尺度 $a = 60$, 中心频率 200 Hz)

Fig.3 Curves of wavelet decomposition of electric field signals $E_x(v/m)$ on 4 section surveyed in EH - 4 on the site in Liaoning (scale = 60, centric frequency = 200 Hz)

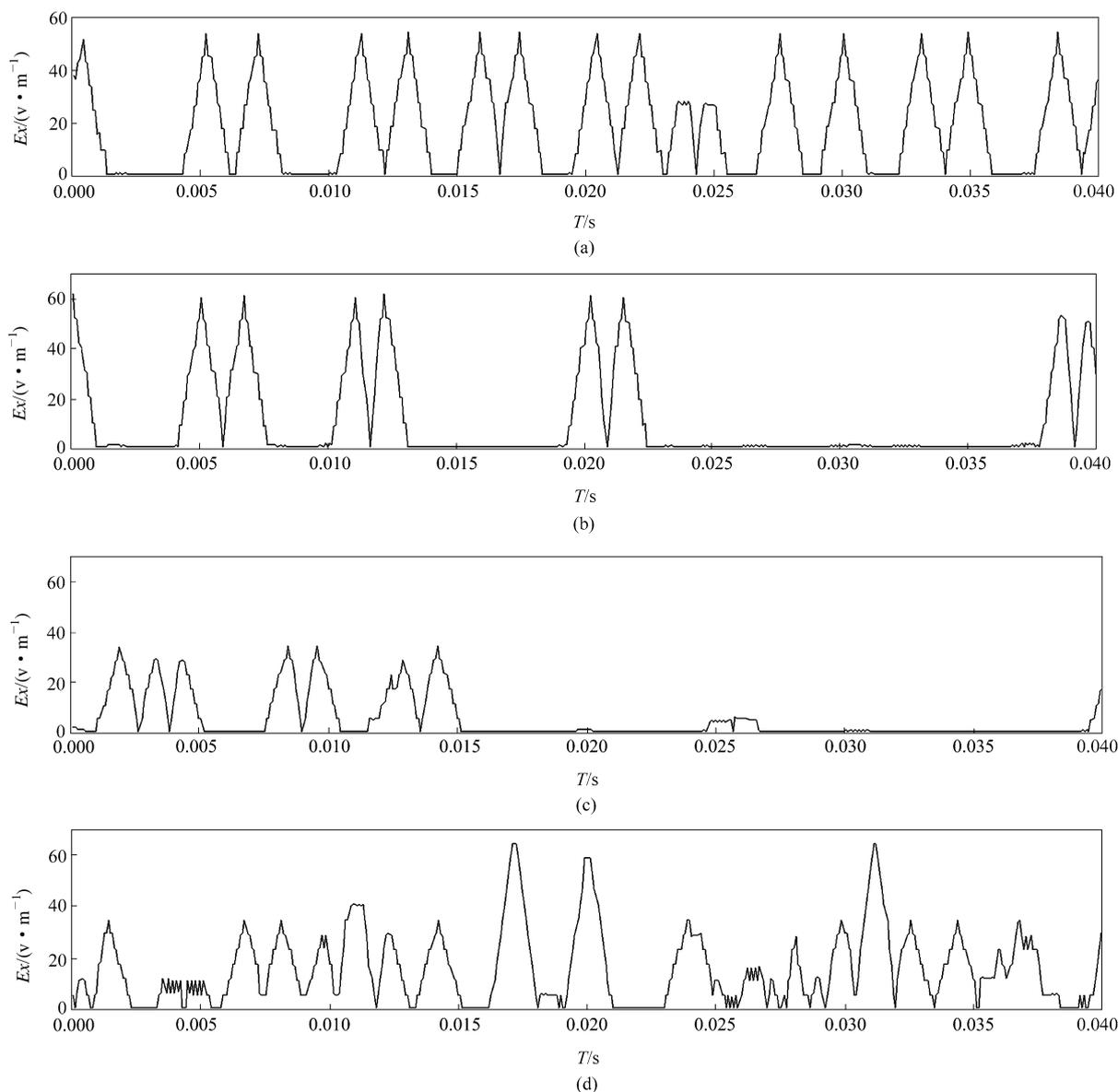


图4 辽宁某地 EH - 4 观测的 4 段电场信号 $E_x(v/m)$ 小波分解(尺度 $a = 23$, 中心频率 500 Hz)

Fig.4 Curves of wavelet decomposition of electric field signals $E_x(v/m)$ on 4 section surveyed in EH - 4 on the site in Liaoning (scale = 23, centric frequency = 500 Hz)

段进行切割处理, 再进行小波重构。

4 结 语

本文通过 EH - 4 观测信号的离散正交小波分解的研究, 将 EH - 4 观测信号分解成不同尺度的小波成分进行时频分析, 进而分析信号在不同尺度上的平稳性和信号质量, 为信号的频谱分析和统计处理提供依据。研究表明, 小波变换是信号在各个频率尺度上的平稳性分析和信号质量研究的有效手段。

参考文献(References):

- [1] 伍 岳, 刘汉彬, 董秀康. EH - 4 电导率成像系统在砂岩型铀矿床上的应用研究[J]. 铀矿地质, 1998, 14(1): 32 - 37.(Wu Yue, Liu Hanbin, Dong Xiukang. Application of imaging system of EH - 4 electric conductivity in uranium deposit of sandstone type[J]. Uranium Geology, 1998, 14(1): 32 - 37.(in Chinese))
- [2] 范世贵. 信号与线性系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.(Fan Shigui. Signals and Linear System[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002.(in Chinese))
- [3] John G, Jesse T, Stamatis V. Java signal processing: FFTs with byte

- codes, concurrency[J]. Practice and Experience, 1998, 10(11): 1 173 - 1 178.(in Chinese))
- [4] Mallat S. Theory for multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674 - 693.
- [5] Fernand S, Athina P, Georgia G, et al. Multimedia digital signal processing laboratory[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000, 8(3): 209 - 215.
- [6] Gordana J, Juan M, Ibarra M, et al. Demo package for mutilate digital signal processing[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000, 8(2): 132 - 138.
- [7] 胡昌华, 李国华, 刘涛, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.(Hu Changhua, Li Guohua, Liu Tao, et al. Systemic Analysis and Design Based on MATLAB—Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.(in Chinese))
- [8] 沙成满, 王恩德, 李维群. 水工勘测中物探观测信号的处理及解译[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 90 - 93.(Sha Chengman, Wang Ende, Li Weiqun. Processing and interpretation of geophysical signals in exploration of hydrogeology and engineering geology[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 90 - 93.(in Chinese))
- [9] Christian H, Mauro G, Ketil I, et al. Applicability of frequency-domain and time-domain electromagnetic methods for mountain permafrost studies[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 12(1): 39 - 52.
- [10] Meyer Y. Wavelet Algorithms and Application[M]. New York: SIAM, 1993.
- [11] 靳建明, 王奎华, 卜发东, 等. 软土密度瞬态锤击测试信号的小波多分辨分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2 271 - 2 275.(Jin Jianming, Wang Kuihua, Bu Fadong, et al. Multi-resolution wavelet analysis on compactness measurement of soft soil by instant hammering method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 271 - 2 275.(in Chinese))