

# Hilbert-Huang 变换在提取阵列声波 信号动力特性中的应用

王祝文<sup>1</sup>, 刘菁华<sup>1</sup>, 聂春燕<sup>2</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 长春大学电子信息工程学院, 长春 130022)

**摘 要** 阵列声波信号是典型的非线性、非平稳信号, 其动力特性的量化提取对于进行地层结构构造分析提供了必要的基础资料. 而 Hilbert-Huang 变换(HHT)是一种处理非线性、非平稳信号的新方法. 它通过经验模态分解(EMD)将信号分解为有限个固有模态函数(IMF), 并对每个固有模态函数进行 Hilbert 变换得到 Hilbert 谱. 本文将这种方法应用于阵列声波信号动力特性的提取, 有效地获得了信号能量的时频分布, 瞬时能量、Hilbert 能量、最大振幅对应的时频分布等动力特性, 显示了 HHT 的优势以及对于进一步实现地层结构构造分析的重要意义.

**关键词** Hilbert-Huang 变换, 阵列声波信号, 动力特性, Hilbert 谱

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0450-06

## Application of Hilbert-Huang transform in extracting dynamic properties of array acoustic signals

WANG Zhu-wen<sup>1</sup>, LIU Jing-hua<sup>1</sup>, NIE Chun-yan<sup>2</sup>

(1. *GeoExploration College of Sci. & Tech., Jilin University, Changchun 130026, China;*

2. *Electronic Information Institute, Changchun University, Changchun 130022, China)*

**Abstract** Array acoustic logging data is a non-linear and non-stationary signal, and its dynamic properties extracting can provided a basic background data for analyzing reservoir formation structural and textural characteristics. Hilbert-Huang transform (HHT) is a new method for dealing with non-linear and non-stationary data. By using this method, any signals can be decomposed into a finite number of intrinsic mode functions (IMF) and then Hilbert spectrum is obtained by Hilbert transform. In this paper, the new method is introduced in extracting dynamic properties of array acoustic signals. The energy time-frequency distribution can be effectively acquired. Several dynamic properties such as instantaneous energy, Hilbert energy and time-frequency distribution are extracted. And the advantage of HHT and its considerable significance for formation structural and textural analysis are shown.

**Keywords** Hilbert-Huang transform, array acoustic signal, dynamic property, Hilbert spectrum

### 0 引 言

我们知道, 声波测井技术发展很快, 到目前为止在应用中主要有全波列测井、阵列声波测井、单极子方式阵列声波测井和偶极横波成像测井. 在井中测得的全波波中, 除了纵波、横波和斯通利波外, 还有高频成分的伪瑞利波<sup>[1~5]</sup>. 同时, 我们也知道, 声波的幅度衰减和频率变化与地下地质条件有密切的

关系, 速度反映地层的运动学特征, 幅度反映地层的动力学特征, 而频谱则反映了地层对各种波的吸收滤波特性. 目前人们的工作重点仍集中在纵波、横波、斯通利波等组分波的速度、衰减的处理分析上, 对与频率特征的分析还缺少足够的重视. 本文就试图对阵列声波测井中的动力学特征进行探讨.

阵列声波信号是典型的非线性、非平稳信号, 其动力特性的量化提取对于进行地层结构构造分析提

收稿日期 2007-10-26; 修回日期 2007-12-01.

基金项目 “九五”国家重大科学工程“中国大陆科学钻探工程”项目(计高技[1999]1423号)资助.

作者简介 王祝文, 男, 1961年生, 广东梅县人, 博士, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事地球物理测井、核地球物理、测井新方法新技术等方面的解释理论和方法的教学与科研工作. (Email: wangzhuwen@email.jlu.edu.cn)

供了必要的基础资料<sup>[6]</sup>. 目前,用于分析阵列声波信号的最常用的方法是 Fourier 变换. 但是, Fourier 变换是一种纯频域分析方法,无法提供时域信息,而且由于 Fourier 变换严格要求系统的线性、数据的周期性或平稳性,因而阵列声波的 Fourier 频谱的实际应用受到了很大的限制<sup>[6~13]</sup>. 也有人尝试过利用小波变换来对阵列声波信号进行分析. 小波分析虽然通过一系列可伸缩平移的小波函数实现了信号时频局部化分析的目的,但在本质上仍然是具有柔性时频窗的加窗 Fourier 变换,它要求小波窗内的信号是短时平稳的,因此还没有根本摆脱 Fourier 变换的局限性<sup>[7]</sup>. 小波基选择时的多样性和使用过程中的不可变更性也影响了它在非平稳信号分析中的适应能力. 而且,小波基的有限长会造成信号的能量泄漏,因而难以对信号作精确的时频分析.

Hilbert-Huang 变换 (HHT) 是由美国宇航局的 N. E. Huang 等人于 1996 年提出的一种全新的信号处理方法<sup>[14]</sup>,它依据数据本身的时间尺度特征将信号分解为有限个固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 然后对各模态分量进行变换从而得到信号能量在时间尺度上的分布规律,实现信号动力特性的量化提取<sup>[14~19]</sup>. 同 Fourier 变换和小波变换相比, HHT 方法在客观性和分辨率方面都具有明显的优越性,能提取到更多、更接近实际的动力特性.

## 1 Hilbert-Huang 变换原理

传统意义上的 Fourier 频率代表着信号的周期性,即平稳性要求<sup>[6,7]</sup>. 而阵列声波动等非平稳信号的特点之一就是无周期性,按 Fourier 变换的方法定义其频率并进行频谱分析将缺乏物理基础<sup>[14~19]</sup>. 因此,引入以时间为自变量的瞬时频率对于研究阵列声波信号的瞬态特性具有重要的意义. 在物理上,瞬时频率只对单分量信号有效,对于阵列声波这样的多分量信号,如果直接对其进行 Hilbert 变换,将不能保证瞬时频率随时间变化的单值性,因而没有实际意义. HHT 的根本创新就在于先通过经验模态分解法将信号分解为单分量信号,再通过 Hilbert-Huang 变换分别计算每个分量的瞬时特性.

### 1.1 经验模态分解

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是将信号分解成一组具有较优变换性能的固有模态函数. 所谓较优 Hilbert 变换性能是指信号经 Hilbert 变换后具有清晰的瞬时振幅和瞬时

频率意义. 有效的固有模态函数必须满足以下 2 个条件<sup>[14~19]</sup>:

(1) 整个数据段内,极值点的个数与过 0 点的个数必须相等或至多相差 1 个. 这一限制条件近似于传统平稳高斯过程中关于窄带的定义.

(2) 在任一时间点上,信号的局部极大值和局部极小值定义的包络均值为 0. 这个条件将传统的全局限定转化为局部限定,这种限定是必需的,它可去除由于波形不对称而造成的瞬时频率的波动.

EMD 分解过程采用的是“筛分”的算法,主要分为 3 个步骤<sup>[14~19]</sup>:

(1) 确定信号所有局部极值点,用 3 次样条曲线连接所有的局部极大值和局部极小值,分别形成上包络线  $x_{\max}(t)$  和下包络线  $x_{\min}(t)$ .

(2) 求出上下包络线的平均值,记为  $m_{1,1}(t)$ ,将原数据序列  $x(t)$  去掉该平均值后得到新数据序列  $h_{1,1}(t)$ :

$$m_{1,1}(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2}, \quad (1)$$

$$h_{1,1}(t) = x(t) - m_{1,1}(t); \quad (2)$$

判断  $h_{1,1}(t)$  是否满足的 2 个要求,如果不满足则将  $h_{1,1}(t)$  作为原始数据重复上述处理过程,直到新数据序列:

$$h_{1,k}(t) = h_{1,k-1}(t) - m_{1,k}(t) \quad (3)$$

满足 IMF 的条件,这样就得到了第 1 个分量  $c_1(t)$ :

$$c_1(t) = h_{1,k}(t). \quad (4)$$

(3) 从  $x(t)$  中分离出  $c_1(t)$ ,得到剩余序列  $r_1(t)$ :

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (5)$$

将  $r_1(t)$  作为 1 个新的原序列,按照以上步骤,依次提取第 2、3、... 直至第  $n$  个固有模态函数  $c_n(t)$ . 当残量  $r_n(t)$  成为 1 个单调函数或小于某一预定值时,分解结束.

分解出的  $n$  个固有模态函数包含了原信号从高到低不同频段的成分,残量则代表了信号的振动趋势.

原信号可以表达为各分量与最终残量的总和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (6)$$

在上述 EMD 筛分过程中,完备性可由式(6)完全保证. 对于其正交性,从 EMD 分解的数学表达式中可得到:

$$C_i \cdot C_j = \int_0^T (m^{i-1}x(t) - m^i x(t)) \times (m^{j-1}x(t) - m^j x(t)) dt, \quad (7)$$

这是任意 2 个内蕴模式函数的点积,如果  $C_i$  与

$C_j$  正交,则要求式(7)为 0. 由于二者的均值均为 0, 故各自的积分应为 0, 那么二者乘积的积分也应为 0, 从而在实际意义上可以认为所有的 IMF 分量都是局部正交的, 且分解的方法、均值的算法直接影响着正交性. 但实际计算中, 由于均值曲线是拟合而成的, 且每个后续 IMF 分量都是前面剩余信号的一部分, 因此理论上各之间的严格正交无法保证, 只能认为是近似正交的.

## 1.2 Hilbert 变换和 Hilbert 谱计算

信号经筛分后分解为若干个单分量信号, 这时分别对各分量进行变换就可以保证得到的瞬时频率具有明确的物理意义.

对于任一固有模态函数  $f(t)$ , 其 Hilbert 变换  $g(t)$  定义为:

$$g(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (8)$$

式中  $P$  为柯西主值, 这样强调了信号的局部属性, 避免了 Fourier 变换中强制拟合产生的实际不存在的频率成分<sup>[14~19]</sup>.

$f(t)$  的解析信号  $z(t)$  可定义为:

$$z(t) = f(t) + ig(t) = a(t)e^{i\theta(t)}, \quad (9)$$

式中,  $a(t)$  和  $\theta(t)$  分别为阵列声波信号  $x(t)$  的瞬时振幅和瞬时相位, 按下式计算:

$$a(t) = \sqrt{f^2(t) + g^2(t)}, \quad (10)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{g(t)}{f(t)} \right]. \quad (11)$$

由瞬时相位可得到阵列声波信号的瞬时频率:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (12)$$

可见, 由 Hilbert 变换得到的振幅和频率都是时间的函数, 由于它打破了 Fourier 变换固定幅值、固定频率的限制, 打破了整个信号长度全局量的限制, 因而对于提取非平稳信号的瞬时特性有明显的优势.

如果把振幅显示在频率-时间平面上, 就可以得到幅值谱  $H(\omega, t)$ , 若将  $H(\omega, t)$  对时间积分, 可得到边际谱:

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\omega_j(t)t}, \quad (13)$$

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt. \quad (14)$$

将振幅的平方对时间积分可定义 Hilbert 能量, 它表达了每个频率在整个时间长度内所累积的能量, 如下式所示:

$$E_s(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt. \quad (15)$$

将振幅的平方对频率积分可定义瞬时能量, 它提供了阵列声波信号能量随时间的变化情况, 如下式所示:

$$E_t(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega. \quad (16)$$

## 2 提取阵列声波信号动力特性

根据前文所叙述的 HHT 原理, 我们试图将其运用于阵列声波测井的分析中, 进而量化提取阵列声波信号的动力特性. 根据前文的简介, 我们知道, HHT 采用的是经验性分析, 这既是该方法的优点也是它的不足之处. N. E. Huang 等人对这些做了充分的论述<sup>[14~19]</sup>, 一方面, 经验性分析能根据数据本身的特点进行分析, 更具有适应性, 但另一方面在具体实施中常常存在着人为的因素. 在这些因素中, EMD 的筛分终止条件和边界处理对变换的结果起到了重要的影响作用.

### 2.1 筛分终止条件的选择

在实际计算中, 由于 IMF 的第 2 个条件往往难以做到, 所以要确定  $h_{1,k}(t)$  是不是一个 IMF 分量必须确定一个合适的“筛分”终止条件. 如果条件选得过于严格, 会导致分量变成纯粹的频率调制信号, 造成幅值恒定; 倘若条件过于放松又会使产生的分量与 IMF 的要求相差太远. 这里采用的是 N. E. Huang 等人提出的仿柯西收敛准则, 即当:

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{1,k-1}(t) - h_{1,k}(t)|^2}{\sum_{t=0}^T |h_{1,k-1}(t)|^2}.$$

在 0.2~0.3 之间时“筛分”终止, 这样既可保证 IMF 的稳定性, 又可使 IMF 具有相应的物理意义.

### 2.2 端点处理方法

在数值仿真过程中, 由于信号的有限长度, 信号的两端点不能确定是极点, 那么在 3 次样条插值时必然使信号的上下包络线在信号两端附近严重扭曲. 对于低频分量, 由于其时间尺度大, 极值间的距离大, 端部边缘效应就传播到信号的内部, 严重影响了 EMD 分解的质量, 使得分解出来的 IMF 分量没有实际的物理意义.

国内外学者对于端点问题的处理进行了大量的研究工作, 提出了许多适合各自专业领域的端点处理方法<sup>[20~23]</sup>. 由于在阵列声波信号的处理中还是首次引入这种分析方法, 参考国内外学者的研究结果,

这里我们采用了在端点处依据附近数据变换趋势添加样条插值起点的方法. 在每一次 IMF 分解前, 先判断待分解系列起始段的变化趋势, 若为上升, 则将第一个局部极大值作为上包络样条插值的起点, 而直接把端点作为下包络样条插值的起点. 若为下降, 则直接把端点作为上包络样条插值的起点, 将第一个局部极小值作为下包络样条插值的起点, 信号另一端按同样方法处理. 该法虽具有一定强制性, 也缺乏明确的理论依据, 但该方法能有效抑制端点效应, 而且由于在此过程中影响正交性的均值计算方法未改变, 因而对各 IMF 之间的局部正交性无影响.

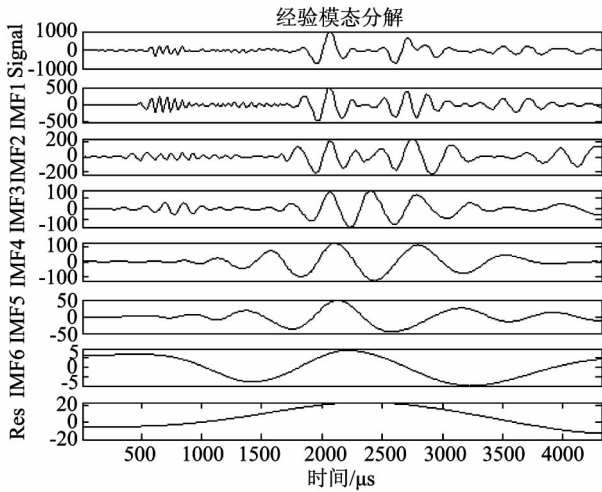


图 1 阵列声波测井的原始波列信号及其各 IMF 分量  
Fig. 1 Array Acoustic Logging Signal and Its IMF Components

### 2.3 动力特性的提取

阵列声波信号经 EMD 分解后, 形成如图 1 所示的 6 个 IMF 分量和 1 个残量. 将分解得到的 IMF 分量实行 Hilbert 变换得到阵列声波动的时间-频率-振幅分布图、Hilbert 边际谱、Hilbert 能量谱和瞬时能量谱(图 2~图 5).

### 3 结果的分析与讨论

(1)图 1 表明, 随着 EMD 分解的进行, 所得 IMF 分量频率逐渐降低, 波长逐渐增加. 各 IMF 分量包含了不同的时间特征尺度, 可以不同的分辨率显示信号特征, 并且这种分辨率是根据信号本身的性质自适应的, 较小波多分辨分析、Fourier 分析等具有优势.

(2)EMD 最先分解出的几个 IMF 分量(IMF1~IMF3)体现了原始信号中最显著的信息, 是该阵

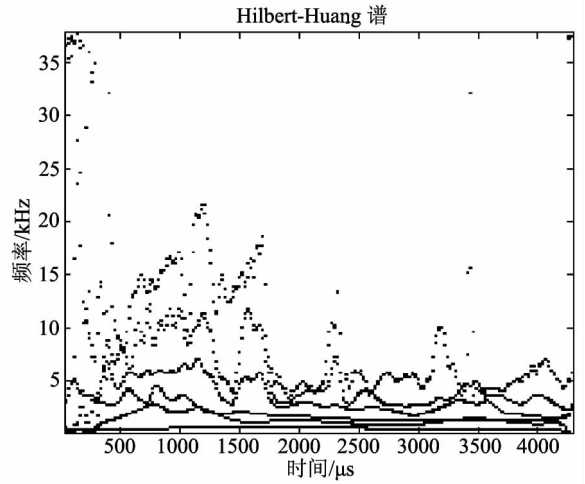


图 2 信号的 Hilbert 幅度谱  
Fig. 2 Hilbert Amplitude Spectrum of Signal

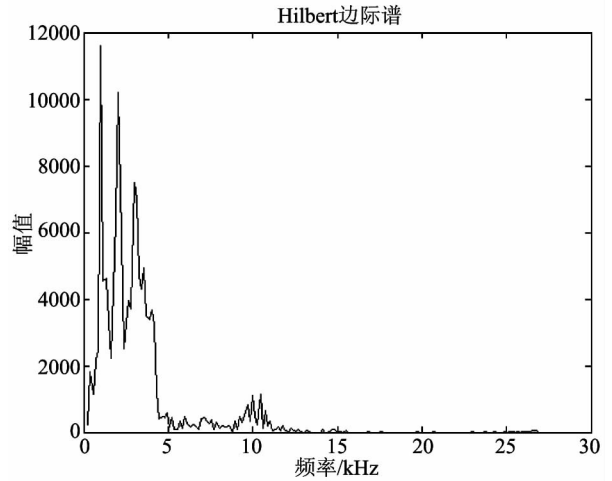


图 3 信号的 Hilbert 边际谱  
Fig. 3 Hilbert Marginal Spectrum of Signal

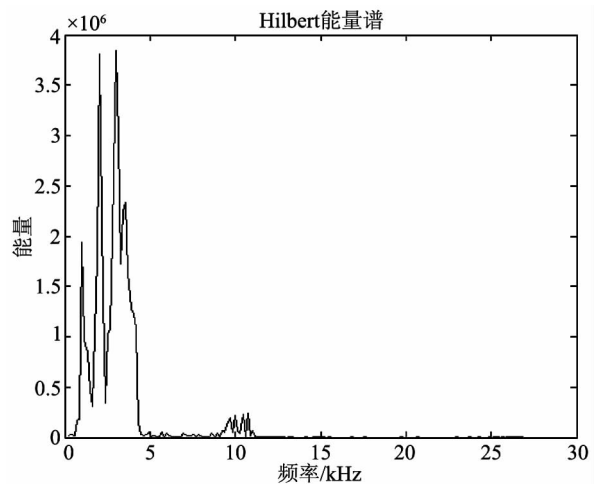


图 4 信号的 Hilbert 能量谱  
Fig. 4 Hilbert Energy Spectrum of Signal

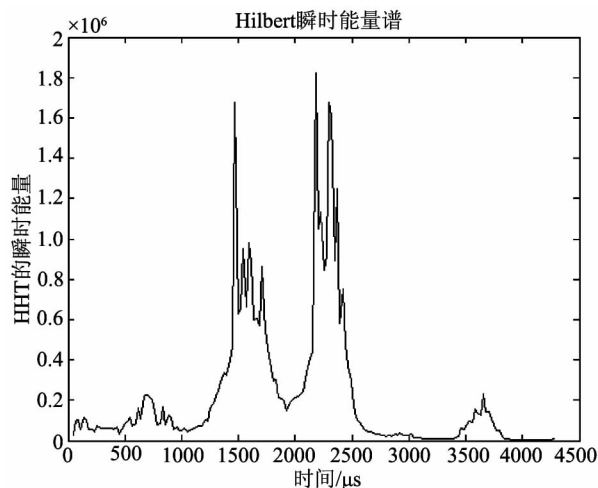


图5 信号的 Hilbert 瞬时能量谱

Fig. 5 Hilbert Instantaneous Energy Spectrum of Signal

列声波信号的优势频段. 依 EMD 的本性而言, 只要有多于 1 个波的波动存在, EMD 就能够把它提取出来. 对于具体的数据资料, 这些振幅很小、频率极低、波长很大的波动可能是事实存在的物理现象, 也可能是由于数据采样率不够和波动衔接等原因造成的.

(3) 图 2 的 Hilbert 幅度谱比较直观地给出了阵列声波波能量在时频域中的分布. 一方面, 可以从中获知在某一时刻频率与波能的关系, 另一方面, 某一频率所拥有波能的时间过程也可确定, 由该图可知阵列声波波动的能量主要集中在 5 kHz 以下.

(4) 图 3 的 Hilbert 边际谱和图 4 的 Hilbert 能量谱分别提供了对于每个频率的总振幅和总能量的量测, 它们直观地显示了这个阵列声波的大部分能量集中在 5 kHz 以下. 相对于 Fourier 变换、小波变换等, Hilbert 边际谱具有明确的统计意义, 频谱相对集中使能量保守.

(5) 图 5 显示, 波能分布是随时间变化的, 能量出现了两个峰值, 第一个主要集中在 1400~1800  $\mu\text{s}$ ; 第二个主要集中在 2100~2500  $\mu\text{s}$ . 同时, 在 500~900  $\mu\text{s}$  和 3600~3800  $\mu\text{s}$  出现了两个次级峰值. 这与测量所得到的波列中所包含的纵波、横波、斯通利波、伪瑞利波是否相关? 同时, 这几个峰值对于储集层岩石结构构造是否具有直接的内在联系? 这都需要进一步的研究.

#### 4 初步结论

HHT 方法克服了其它一些方法的缺陷, 完全取消了窗函数的作用, 其结果不受核函数影响与时

频测不准原理限制, 具有完全的局部时频特性, 可准确描述阵列声波测井信号的时变特征. HHT 方法可在纵波、横波等速度检测、信号分频、频散计算、多孔介质性质类型识别等方面具有潜在的应用价值.

(1) HHT 不必像 Fourier 变换和小波变换一样预先选择基函数, 可自适应分解出有限的 IMF 分量, 十分适用于分析阵列声波动这种典型的非线性非平稳信号.

(2) 通过 HHT 可做出阵列声波信号的时间-频率-振幅图, 可量化提取中心频率瞬时相位、瞬时能量、Hilbert 能量、最大振幅对应的时频分布等动力特性, 这些动力特性的量化对于地层结构构造分析具有重要的作用.

(3) 与 Fourier 变换和小波变换相比, HHT 还处在初创阶段, 理论的研究还有很长的路要走. 例如在 EMD 筛分终止条件、边界效应的处理等方面还不完善. 但通过实例分析可以看出, 尽管 HHT 技术亟待改进, 但它在提取阵列声波信号动力特性方面仍不失为一种有效而先进的方法, 特别是作为常规的 Fourier 变换和近期的小波变换的补充和发展有其不可替代的作用.

当然, HHT 方法还在不断地发展, 本文将 HHT 方法应用到阵列声波测井动力特征信息的提取, 也仅仅是一个尝试. 阵列声波测井信号中所蕴涵的大量信息远没有没开发, 本文的研究仅仅是个开端, 相信随着研究的深入, 在研究岩石中波的传播、衰减规律、结构动态响应特征和储集层特征等方面, HHT 方法有着广阔的应用前景.

**致谢** 本研究得到“九五”国家重大科学工程“中国大陆科学钻探工程”项目工程测井监督室牛一雄教授、潘和平教授、王文先教授以及胜利油田曾文冲总工的大力帮助、支持和鼓励, 在此表示感谢!

#### 参 考 文 献 (References):

- [1] 楚泽涵. 声波测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.  
Chu Z H. Principle of Acoustic Logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [2] 朱留方, 沈建国. 从阵列声波测井波形处理地层纵、横波时差的新方法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 483~488.  
Zhu L F, Shen J G. The new method of processing the slowness of P and S-wave from waveforms of array sonic logging [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 483~488.
- [3] 刘彤, 苏天明, 孙健. 岩石声波差异衰减特征及工程应用前景探讨[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 822~827.  
Liu T, Su T M, Sun J. Study on acoustic diversity attenuation

- properties of rock and foreground of applying in engineering [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2005, 20(3): 822~827.
- [4] 王朝辉, 王祝文. 声波测井的发展及现状[A]. 见: 地震学研究新进展[C]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
Wang Z H, Wang Z W. The development and current situation of acoustic logging[A]. In the *New Developments in Seismic Research*[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [5] 李长文, 余春昊, 王文先. 阵列声波测井资料的分波处理及应用[J]. *测井技术*, 1997, 21(1): 1~8.  
Li C W, Yu C H, Wang W X. Full wavetrain processing of array acoustic logging data and its application [J]. *Well Logging Techniques*, 1997, 21(1): 1~8.
- [6] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
Zhang X D, Bao Z. *Non-stationary signal analysis & processing*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [7] 科恩 L. (美) 著, 白居宪译. 时-频分析: 理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.  
Cohn L. *Time-frequency analysis: theory and application* [M] (in Chinese translated by Bai Ju-xian). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [8] 陈雨红, 杨长春, 曹齐放, 等. 几种时频分析方法比较[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4): 1180~1185.  
Chen Y H, Yang C C, Cao Q F, etc. The comparison of some time-frequency analysis methods[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2006, 21(4): 1180~1185.
- [9] 王祝文, 刘菁华, 聂春燕. 时频分析的重排方法及其在声波测井信号处理中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(5): 1042~1046.  
Wang Z W, Liu J H, Nie C Y. The reassignment method based on time-frequency analysis and its application in the array acoustic logging data processing [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 1042~1046.
- [10] 王祝文, 刘菁华, 聂春燕. 基于 Choi-Williams 时频分布的阵列声波测井信号时频分析[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1481~1486.  
Wang Z W, Liu J H, Nie C Y. Time-frequency analysis of array acoustic logging signal based on Choi-Williams energy distribution[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(5): 1481~1486.
- [11] 林振山, 汪曙光. 天气气候学 10 万年问题的研究[J]. *地球物理学报*, 2004, 11(6): 971~975.  
Lin Z S, Wang S G. A Study on the problem of 100ka cycles of astroclimatology[J]. *Acta Geophysica Sinica(in Chinese)*, 2004, 11(6): 971~975.
- [12] 殷文, 印兴耀. 基于 MPI 的时频分布的改进及应用[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1): 165~169.  
Yin W, Yin X Y. The amelioration and application of time-frequency, distributions on the basis of MPI [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2005, 20(1): 165~169.
- [13] 金雷, 李月, 杨宝俊. 用时频峰值滤波方法消减地震勘探资料中随机噪声的初步研究[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 724~728.  
Jin L, Li Y, Yang B J. Reduction of random noise for seismic data by time-frequency peak filtering [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2005, 20(3): 724~728.
- [14] Huang N E. Computer implicated empirical mode decomposition method, apparatus, and article of manufacture, U. S. Patent Pending, 1996.
- [15] Huang N E, Sheen Z, Steven R L., et al., The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1998, (454): 903~995.
- [16] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, 31: 417~457.
- [17] 刘喜武, 刘洪, 李幼铭, 等. 局域波分解及其在地震信号时频分析中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 364~375.  
Liu X W, Liu H, Li Y M, Nian J B. Local waves decomposition and its applications to seismic signal time-frequency analysis[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(2): 365~375.
- [18] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1585~1590.  
Yang P J, Yin X Y, Zhang G Z. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on HHT[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(5): 1585~1590.
- [19] 王祝文, 刘菁华, 聂春燕. 基于 Hilbert-Huang 变换的阵列声波测井信号时频分析[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2008, (待刊)  
Wang Z W, Liu J H, Nie C Y. Time-frequency analysis of array acoustic logging waveform signal based on Hilbert-Huang transform[J]. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences (to be published)*
- [20] 陈忠, 郑时雄. EMD 信号分析方法边缘效应的分析[J]. *数据采集与处理*, 2003, 18(1): 114~118.  
Chen Z, Zhen S X. Analysis on end effects of EMD method [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 18(1): 114~118.
- [21] 樊金荣. EMD 分析在故障诊断中的应用与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2003.  
Fan J R. *Application and Research of EMD analysis in Fault Diagnosis Systems* [D]. Wuhan: Master Thesis of Wuhan University of Technology, 2003.
- [22] 熊学军, 郭炳火, 胡筱敏, 等. EMD 方法和 Hilbert 谱分析法的应用与探讨[J]. *黄渤海海洋*, 2002, 20(2): 12~21.  
Xiong X J, Guo B H, Hu X M, et al. Application and discussion of empirical mode decomposition method and hilbert spectral analysis method [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohaisea*, 2002, 20(2): 12~21
- [23] 邓拥军, 王伟, 钱成春, 等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理[J]. *科学通报*, 2001, 41(3): 257~263  
Deng Y J, Wang W, Qian C C, et al. EMD method and the boundary-problem-processing in Hilbert transform[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 41(3): 257~263.