

# 希尔伯特—黄变换时频分析在沉积旋回划分中的应用

孙兴刚<sup>1</sup>, 赵 晓<sup>2</sup>, 刘浩杰<sup>1</sup>, 赵翠霞<sup>1</sup>

(1. 中国石化股份胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022;  
2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 青化砭采油厂, 陕西 延安 716003)

**摘要:** 希尔伯特—黄变换是基于地震数据对信号进行经验模态分解的新的时频分析方法, 其克服了原有时频分析方法因受到分辨率和信号平稳性的限制导致沉积旋回划分精度降低的影响, 通过对非平稳信号进行处理得到地震信号不同固有模态分量的瞬时时频特征, 以此为基础, 精细刻画地震资料中的时间、频率和能量之间的关系, 进而依据不同模态分量的瞬时时频特征划分出不同级次的地层沉积旋回。模型数据与实际地震资料的处理结果表明, 地震数据通过希尔伯特—黄变换时频分析能够准确地进行地层沉积旋回划分, 实现的过程简单实用且精确度较高, 从而为地层的沉积旋回划分和精细对比提供了有效方法和参考依据。

**关键词:** 希尔伯特—黄变换时频分析 非平稳信号 固有模态分量 沉积旋回 瞬时时频

**中图分类号:** P631.443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2012)06-0058-03

如何准确、科学地进行高分辨率层序地层分析, 是地层沉积旋回划分和精细对比的关键。传统的高分辨率层序地层分析方法, 主要是依据各级层序界面在钻井、录井剖面和取心结果中确定的识别标志, 对关键井进行测井相识别和测井沉积旋回划分的定性研究<sup>[1-3]</sup>。而在勘探程度相对较低的区域, 传统方法受井资料的限制导致沉积旋回划分的垂向分辨率低, 且容易受主观因素影响。

随着现代信号处理与分析技术的发展, 时频分析逐渐成为研究时间—频率域旋回性空间变化的常规技术<sup>[4-7]</sup>, 其主要是将一维的时间域测井数据或者地震数据变换到二维的时间—频率域, 得到信号的频谱、能量特征随时间的变化关系, 进而研究地震旋回体的各种特征, 从不同角度更合理地划分地层的多期次沉积旋回, 提高对层序单元的识别精度, 实现地层划分和物源方向识别等目的。目前应用的时频分析方法有很多, 主要包括短时傅立叶变换、小波变换、S变换以及希尔伯特—黄(Hilbert—Huang)变换等<sup>[8-9]</sup>。由于地震信号是一种具有短时、突变等特点的典型的非平稳随机信号, 短时傅立叶变换、小波变换和S变换等由于受到分辨率和信号平稳性的限制, 影响了其利用地震信号进行地层沉

积旋回划分的精度。Hilbert—Huang变换时频分析方法被认为是近年来以傅立叶变换为基础对线性和稳态谱进行分析的一个重大突破<sup>[9]</sup>, 主要由经验模态分解方法和Hilbert变换2部分组成。该方法提出了固有模态函数的概念以及将任意信号分解为固有模态函数组成的思路, 使得信号瞬时频率具有了实际的物理意义。由于该方法不受傅立叶分析的全局性限制, 可依据数据本身的时间尺度特征进行固有模态函数分解, 再对各固有模态函数分量进行Hilbert变换, 最终得到信号能量在时间尺度上的瞬时频谱特征。笔者通过分析Hilbert—Huang变换时频分析的原理, 提出了利用不同固有模态函数的瞬时频率镜像进行地层沉积旋回划分的思路, 并对该方法进行了验证。

## 1 原理分析

### 1.1 基本原理

Hilbert—Huang变换时频分析的核心思想是经验模态分解, Huang认为任意信号经过经验模态分解后, 可得到有限个固有模态函数<sup>[10-11]</sup>。固有模态函数满足2个条件: ①在有限的时间序列范围内, 极

收稿日期: 2012-09-14。

作者简介: 孙兴刚, 男, 工程师, 从事勘探综合研究。联系电话: (0546)8791830, E-mail: sunxinggang717.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家“863”项目“油藏地球物理特色设计模块研制与软件系统集成”(2011AA060302)。

值个数与0点个数至多相差1个;②极大值包络信号与极小值包络信号的均值为0。得到固有模态函数后,对每一个固有模态函数分量分别进行Hilbert变换,可以得到对应各分量的瞬时频谱。实现的具体步骤主要包括以下4个方面。

第一,找出原始信号的局部极大值与局部极小值,利用3次样条插值得到包络极大值信号与包络极小值信号,对每个时刻包络信号的局部极大值与局部极小值之和求平均,得到包络信号的平均值为

$$m_0(t) = \frac{m_{\max}(t) + m_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

式中:  $m_0(t)$  为包络信号的平均值;  $t$  为时间, s;  $m_{\max}(t)$  为包络信号极大值;  $m_{\min}(t)$  为包络信号极小值。

第二,利用原始信号减去包络信号的平均值,得到1个包络信号序列,即

$$p_0(t) = x(t) - m_0(t) \quad (2)$$

式中:  $p_0(t)$  为包络信号序列;  $x(t)$  为原始信号。

第三,如果  $p_0(t)$  满足固有模态函数的条件,则其作为第1个固有模态函数分量被分解出来,然后用  $x(t)$  减去  $p_0(t)$ , 得到最终的包络信号序列为

$$r_1(t) = x(t) - p_0(t) \quad (3)$$

式中:  $r_1(t)$  为最终的包络信号序列。

第四,如果  $r_1(t)$  不为单调函数或者常数,则将其作为新的原始信号,重复以上步骤。通过这种筛分处理,直到  $r_n(t)$  变为单调函数或常数,不能再分解出固有模态函数分量为止,此时的  $r_n(t)$  即为余项。把分解出的固有模态函数分量与  $r_n(t)$  相加,可得到原始信号  $x(t)$ 。

通过经验模态分解得到的线性稳态固有模态函数分量非常适合做Hilbert变换得到瞬时频谱特征。由于Hilbert—Huang变换是一种线性变换,如果输入信号是平稳的,那么输出信号也应该是平稳的,且Hilbert—Huang变换强调局部属性,去除了傅立叶变换为了拟合原序列而产生的多余的、事实上并不存在的高、低频成分,也赋予了信号瞬时频率分量的具体物理意义。

## 1.2 模型验证

常规时频分析主要显示信号频率的主要范围,以及某个频率范围内信号的能量强弱不同,而Hilbert—Huang变换时频分析具有更高的时频分辨率。利用主频为40 Hz的时间—振幅曲线模型所做Hilbert—Huang变换后,得到了不同模态分量的信

号时频谱(图1)。与常规时频分析方法对比,Hilbert—Huang变换的时频谱的频率分辨率相对更高,并且能够识别更多的低频信息,有助于精细刻画地震信号的时间、频率和能量之间的关系。

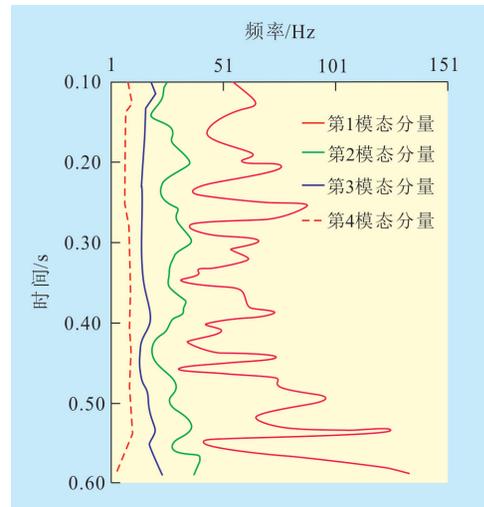


图1 地震数据经Hilbert—Huang变换获取的不同模态分量的时频谱

## 2 沉积旋回划分

### 2.1 沉积旋回与主极值频率对应关系

层序地层单元是由一系列沉积旋回所组成。在单一的沉积体系内,沉积旋回的物性变化具有方向性和连续性的特点<sup>[12-13]</sup>,据此可将地层沉积旋回划分为正旋回(海进型)和反旋回(海退型)2种基本的类型。不同类型的沉积旋回与地震信号时频分析的主极值频率具有较好的对应关系<sup>[1-2,4]</sup>。其中,正旋回沉积的主极值频率从下到上由高频变为低频;反旋回沉积的主极值频率从下到上由低频变为高频;正反旋回沉积的主极值频率从下到上由高频变为低频,然后又由低频变为高频,在正反旋回交界处达到最小值;反正旋回沉积的主极值频率从下到上由低频变为高频,然后又由高频变为低频,在反正旋回交界处达到最大值。因此,可依据上述对应关系来划分地层的沉积旋回。

### 2.2 沉积旋回划分

对地震信号进行Hilbert—Huang变换后可得到不同模态分量信号所对应的瞬时频率,根据不同模态分量的时频特征的分辨率强弱,通过对该瞬时频率采用镜像对比,即可划分不同级次的沉积旋回。

设计1个拥有11个反射界面的采样间隔为2 ms的地质模型(图2),模型单层厚度随着时间增加而逐渐增大,其间隔有薄层。利用主频为26 Hz的

雷克子波与反射系数对该模型进行褶积得到正演模拟地震记录。该正演模拟地震记录经过 Hilbert—Huang 变换后得到的时频特征分布和第 1 模态分量瞬时频率的镜像显示与层位信息基本对应。单层厚度较大的地方,在地震剖面上可以区分出各层,基于 Hilbert—Huang 变换的瞬时频率极值也能区分出各层;单层厚度较薄的地方,在地震剖面无法识别出地层界面,而基于 Hilbert—Huang 变换的瞬时频率极值却能够将其识别出来,地震信号第 1 模态分量的瞬时频率镜像准确地区分出了地层厚度的变化,即较准确划分出了沉积旋回。

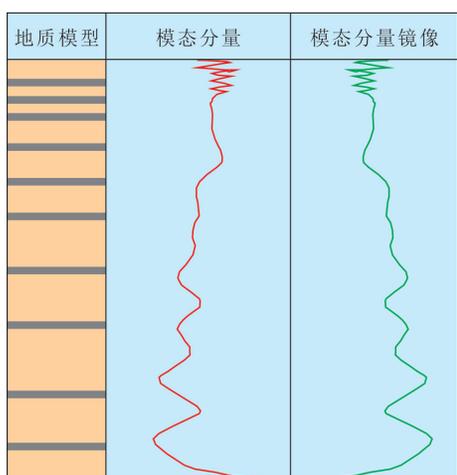


图2 地质模型模拟地震记录 Hilbert—Huang 变换第 1 模态分量的瞬时频率镜像

### 3 应用实例

选取垦 71 地区的 19 道地震数据中的第 2 道数据作为试验道,起始时间为 940 ms,采样间隔为 2 ms。利用 Hilbert—Huang 变换时频分析的沉积旋回划分方法对该地震道的数据进行分层并通过测井分层来验证。根据沉积旋回划分方法,对第 1,2,3 模态分量的瞬时频率分别做出对应的镜像图并进行沉积旋回划分(图 3)。从图 3 中可以看出,依据自然伽马曲线所划分得到的正旋回和反旋回与根据不同模态分量的时频谱特征划分的不同级次的沉积旋回具有较好的对应关系。其中,第 3 模态分量的瞬时频率可以划分出大的沉积旋回,第 2 模态分量的瞬时频率可以将已划分的沉积旋回细化,而第 1 模态分量的瞬时频率在第 2 分量的基础上可以将所有的沉积旋回区分出来。不同分量瞬时频率镜像所划分的沉积层序与依据测井曲线所划分的沉积层序有较好一致性,证明了基于 Hilbert—Huang 变换时频分析划分沉积旋回的可靠性。

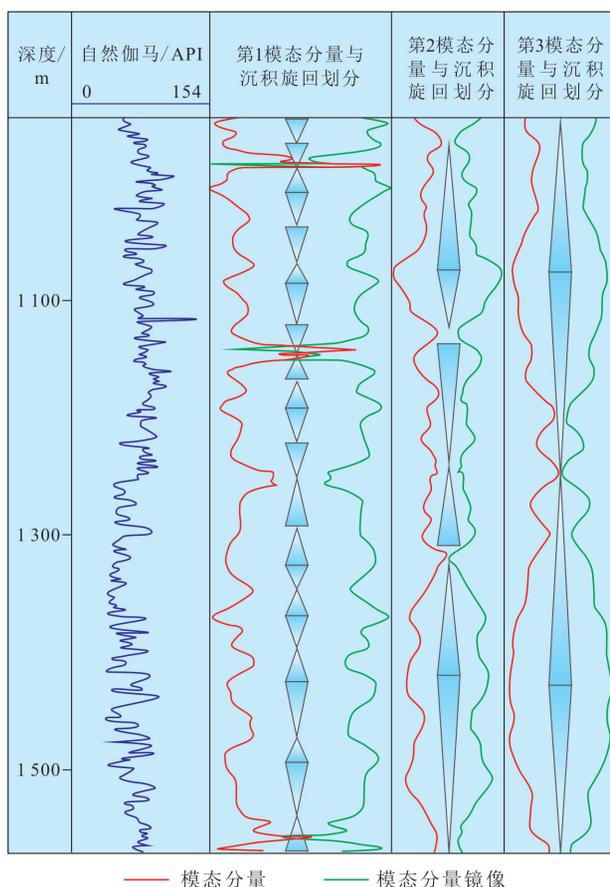


图3 垦 71 地区地震数据 Hilbert—Huang 变换时频分析结果与沉积旋回划分

### 4 结论

通过对 Hilbert—Huang 变换时频分析基本原理的叙述,以及基于该沉积旋回划分方法的基本思路和划分实例的分析,确定了通过对非平稳地震信号的线性化,可以建立以瞬时频率为表征信号变化的基本量,以固有模态信号为基本时域信号的新时频分析方法体系,实现了具有物理意义的地震信号线性瞬时频分析,更加精细地刻画了地震信号的时间、频率和能量之间的关系,依据不同模态信号的时频特征可以划分出不同级次的地层沉积旋回,该划分方法简单实用且精确度较高。

基于 Hilbert—Huang 变换时频分析的沉积旋回划分比地震资料划分结果的分辨率高得多,在低勘探程度地区因测井资料比较少或分布不均匀导致难以确定层序界面的情况下,可以利用获取的不同模态分量的瞬时时频特征替代测井资料进行地层高分辨率沉积旋回划分,从而为地层沉积期次划分和地层精细对比提供了有效方法和参考依据。

(下转第 65 页)