

希尔伯特-黄变换在层序地层划分中的应用 ——以琼东南盆地深水区为例

何丽娟, 张毅, 何小胡, 王亚辉, 陈杨

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 以琼东南盆地深水区中央峡谷黄流组一段和莺歌海组二段为例, 分析希尔伯特-黄变换在层序地层划分中的应用效果。通过对自然伽马曲线进行经验模态分解, 得到不同频率域的本征模态函数, 根据这些本征模态函数的周期性振荡特征与各级层序界面之间建立的对对应关系划分各级层序。结果表明: 希尔伯特-黄变换适用于长期、中期和短期基准面旋回的划分, 该方法为琼东南深水区的层序地层划分提供了一个重要的辅助手段。

关键词: 希尔伯特-黄变换; 经验模态分解; 本征模态函数; 层序地层; 深水区; 琼东南盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

0 引言

希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, 简称 HHT)是由 N. E. Huang 等^[1]提出的一种分析非线性、非平稳信号的处理新方法, 它引入固有模态函数(Intrinsic Mode Function, 简称 IMF)的概念, 在经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD)的基础上, 对每个 IMF 进行 Hilbert 变换得到瞬时频率, 将信号精确表示为时间—频率—幅度的分布, 称为 Hilbert 谱。至今希尔伯特-黄变换已成为信号分析领域人们所关注的热点之一, 其应用涉及地震、潮汐、海洋、金融、雷达、语音信号处理及图像分析等多个领域^[2-6]。HHT 首次于 2007 年应用于陆地油田层序地层的划分^[7], 取得较好的效果。

层序地层的划分是以露头、岩芯、测井和地震资料为基础, 结合相关的沉积环境和岩相古地理解释, 对地层格架进行综合解释^[8]。测井资料作为地层岩性、物性的反映, 包含大量与沉积地层旋回变换有关的地质信息^[9-14]。由于琼东南盆地深水区钻井少、岩芯资料较贵及地震剖面分辨率低, 从有限的测井

资料中获取与地层认识相关的信息并进行层序划分尤为重要。鉴于 Hilbert-Huang 变换可检测信号的突变点, 而这些突变点往往是地层信息变化的表象, 与剥蚀面、转换基准面之间有对应关系, 有助于高精度层序界面的划分。本文依据测井数据的 HHT, 对琼东南深水区中央峡谷陵南段的层序地层进行划分并对比研究。

1 HHT 方法与层序划分依据

1.1 方法原理

HHT 由经验模态分解 EMD 和 Hilbert 谱分析两部分组成。HHT 的基本内容分为: ①通过经验模态分解方法将信号分解成有限数目、具有一定特征的固有模态函数 IMF; ②对每个 IMF 进行 Hilbert 变换并求出瞬时频率, 得到信号时间—频率平面上的能量分布(时间—频率—振幅), 即 Hilbert 谱。

经验模态分解(EMD)算法步骤如下:

第一, 初始化: $r_0(t) = x(t)$, $i = 1$ 。

第二, 求得第 i 个固有模态函数 $c_i(t)$:

①初始化: $h_0(t) = r_{i-1}(t)$, $j = 1$;

收稿日期: 2016-05-16; 责任编辑: 赵庆

作者简介: 何丽娟(1985—), 女, 工程师, 从事琼东南盆地深水区油气勘探综合研究工作。通信地址: 广东省湛江市坡头区南油一区中海油湛江分公司勘探部; 邮政编码: 524057; E-mail: helijuan315926@163.com

②找出 $h_{j-1}(t)$ 的所有局部极值点;

③对 $h_{j-1}(t)$ 的极大、极小值点分别进行插值拟合,求得上、下包络线;

④计算包络线的均值曲线 $m_{j-1}(t)$;

⑤从 $h_{j-1}(t)$ 中去掉均值曲线得到 $h_j(t)$, 即 $h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$;

⑥判断 $h_{j-1}(t)$ 和 $h_j(t)$ 是否满足 2 个固有模态函数条件:其一,信号过零点的个数与极值点的个数相等或最多相差一个;其二,在任一时间点上,由信号极大值拟合的上包络线和极小值拟合的下包络线的局部均值为零。若满足,则第 i 个固有模态函数 $c_j(t) = h_j(t)$, 并转第三步;否则, $j = j + 1$, 转第二步。

第三,计算: $r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t)$ 。

第四,如果 $r_i(t)$ 极值点不少于 2 个,则 $i = i + 1$, 转第二步;否则,分解完成, $r_n(t)$ 为剩余分量。

对于信号 $X(t)$, 经 EMD 分解后可表示为: $X(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t)$, $r_n(t)$ 为剩余分量, $c_j(t)$ 为第 j 个 IMF。

1.2 EMD 分解效果

EMD 既可以从原始信号中有效分解出不同频率域的 IMF, 也可识别出原始信号中的突变点或突变区域。本文通过构建模拟信号对此进行说明。

模拟信号 $f(x)$ 的表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} \cos(2x), & 0 < x \leq 500 \\ \cos(4(x-500)) + 4, & 500 < x \leq 1000 \\ \cos(10(x-1000)) - 4, & 1000 < x \leq 1500 \\ 5\cos(20(x-1501)), & 1500 < x \leq 2000 \end{cases} \quad (1)$$

该模拟信号为分段周期信号,由 2 000 个数据组成,分为 4 段,每段有 500 个数据。其中,第一段、第二段和第三段的振幅值相同;第二段和第三段分别相对于第一段在纵向位置向上偏移 4 和向下偏移 4;第四段相对于第一段未作偏移,但振幅值是第一段的 5 倍。这 4 段的周期分别为 π 、 $\pi/2$ 、 $\pi/5$ 、 $\pi/10$ 。

模拟信号 $f(x)$ 经 EMD 分解后得到 6 个 IMF 数据和剩余分量(图 1),图中横坐标为数据个数,纵坐标为振幅值。从图 1 可见,IMF1 至 IMF6 在频率上从超高频、高频、中频至低频逐渐降低,其中 IMF1 代表超高频,IMF2 为高频,IMF3 为中频,IMF4、IMF5 和 IMF6 为低频;IMF1、IMF2、IMF3、IMF4 在 500、1 000 和 1 500 点(分段点)处,在纵向上振幅值突变现象明显,在横向上振幅值变化范围较小,而相对低频的 IMF5 和 IMF6 在分段点处突变现象不明显。

1.3 层序划分依据

测井信号中的突变点代表地层信息的变化,根据该特点采用 EMD 识别出测井曲线的剧烈变化点,得出与之相对应的具有特殊地质意义的不整合面和沉积转换面,从而指导层序地层的划分。在电阻率曲线、声波曲线和自然伽马曲线等基础测井数据中,自然伽马曲线最能反映沉积物的粒度、分选性及泥质含量,且其形状变化反映旋回特征和沉积环境,为此,本文选取自然伽马曲线研究层序划分。

层序划分的具体方法:

①对自然伽马数据进行预处理,主要有环境校

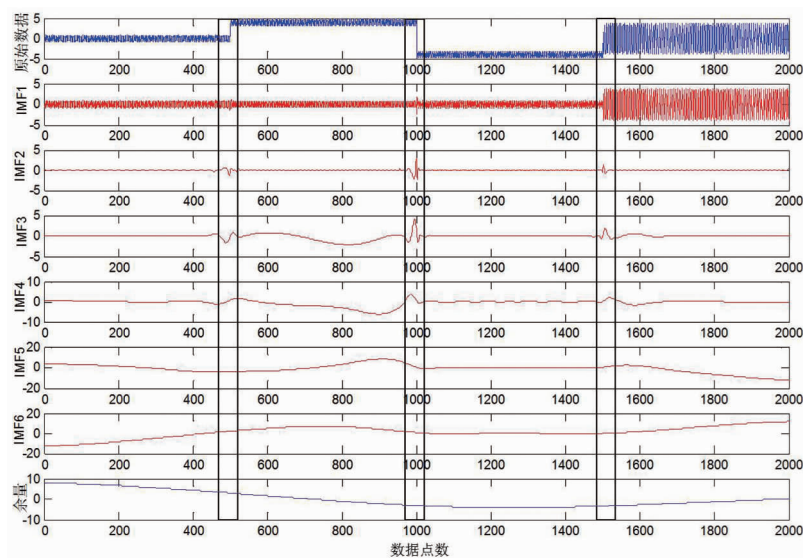


图 1 仿真信号的 EMD 分解

Fig. 1 Empirical mode decomposition of simulation signal

正、标准化处理和奇异值校正等处理过程;

②再对自然伽马数据进行 EMD 分解, 得到不同频率域 IMF 数据(从超高频至低频逐渐变化的固有模态函数);

③根据不同频率域 IMF 数据与不同周期沉积旋回的对应关系进行层序划分及对比。其中, 超高频频率域的 IMF 曲线震荡周期超短, 震荡频率最高, 用于划分超短期旋回, 对应六级层序, 地层单元为单砂体; 高频频率域的 IMF 曲线振荡周期短, 振荡频率高, 用于划分短周期旋回, 对应五级层序, 地层单元为砂层; 中等频率域的 IMF 曲线振荡周期长、频率低, 用于划分中等周期旋回, 对应四级层序, 地层单元为气组; 低频频率域 IMF 曲线振荡周期最长, 频率最低, 用于划分长周期旋回, 对应三级层序, 地层单元为段^[10,15-16]。

2 研究区地质概况

琼东南盆地位于南海海域西北部, 夹持于海南隆起区和永乐隆起区之间, 以 1 号断层与莺歌海盆地相隔, 主要包括北部坳陷、中部隆起、中央坳陷和南部隆起 4 个一级构造单元(图 2)。其中, 中央坳陷深水区部分主要由乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷、陵南低凸起和松南低凸起组成。中央峡谷陵南段位于琼东南盆地深水区中央坳陷带陵水凹陷南部, 水深 1 500~2 100

m, 海底较为平缓。其紧邻乐东凹陷、陵水凹陷和北礁凹陷, 三面环凹, 是凹陷与陵南低凸起之间发育的过渡带, 也是中央坳陷带油气运移的主要指向之一, 为深水区的有利勘探区带。

中央峡谷陵南段石油地质条件优越, 经钻探证实, 该区的油气主要来自于陵水凹陷的两套烃源岩, 即始新统湖相烃源岩和崖城组海陆过渡相烃源岩^[17-21]。储层主要包括上中新统黄流组的浊积水道砂体和上新统莺歌海组的海底扇砂体^[22-26], 莺歌海组上覆大套深海相泥岩是可靠的区域性盖层。油气成藏模式为: 始新统和崖城组烃源岩生成的油气在深部高压的驱动下, 沿着底辟和裂隙构成的主要输导体系, 运移至圈闭内成藏, 具有快速充注、晚期成藏的特点。

本次工作的重点 A 研究区位于中央峡谷陵南段东部, 区内 A-1 构造已被证实为气藏, 已钻探多口气井, 均在莺歌海组二段下部和黄流组一段钻遇海底扇和多套浊积水道砂, 这些浊积水道砂上下相互叠置。根据地震、钻井和古生物综合分析, 认为莺歌海组二段下泥岩沉积时期水体较深, 属于深海环境, 该时期砂岩为浊积砂; 黄流组一段泥岩同属深海环境, 为多期浊积水道砂岩。

3 应用效果分析

本文以中央峡谷陵南段 A-1-1 井为例进行

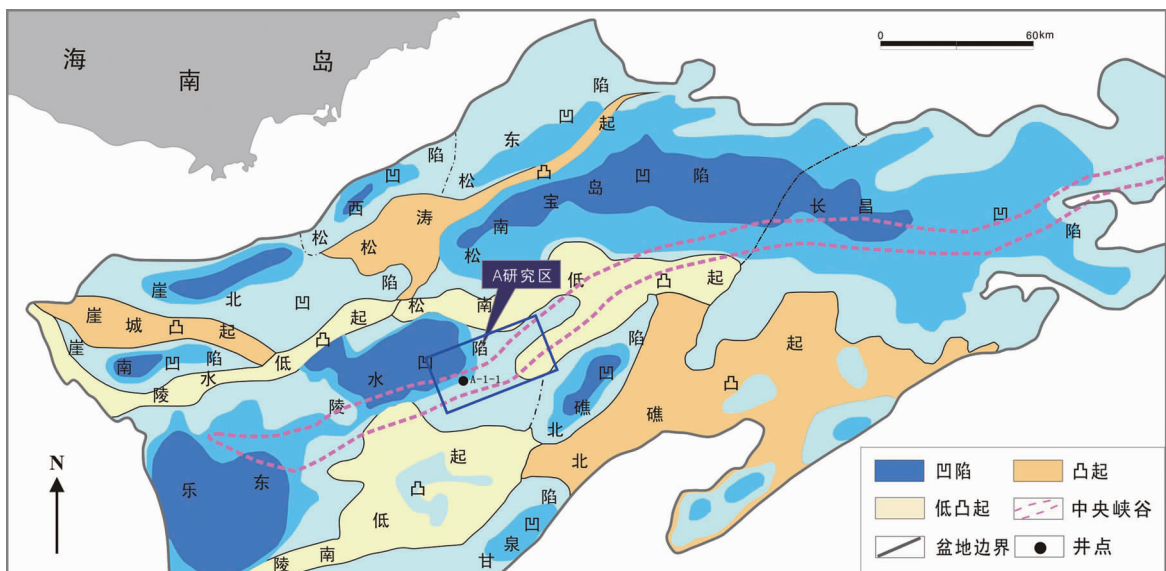


图 2 琼东南盆地构造单元划分图

Fig. 2 Tectonic division of the Qiongdongnan basin

EMD 分解和层序划分。利用 matlab 软件,对 A-1-1 井黄流组一段和莺歌海组二段的自然伽马曲线进行 EMD 分解,经过充分分解后得到 6 个 IMF 数据和余量(图 3)。由图 3 可知,6 个 IMF 曲线的周期性震荡趋势不同,且频率结构和各频段之间的突变区清晰可见。经分析,6 个 IMF 曲线与旋回周期存在以下对应关系:①超高频域的 IMF1 反映超短期基准面旋回,对应层序级别为 6 级;②高频域的 IMF2 反映短期基准面旋回,对应层序级别为 5 级;③中频域 IMF3 反映中期基准面旋回,对应层序级别为 4 级;④低频域 IMF4 和 IMF5 反映长期基准面旋回,对应层序级别为 3 级^[10];⑤低频域 IMF6 曲线近于平直,未能反映旋回特征。由于超短期旋回的划分主要应用于区块勘探后期的开发工程,在勘探阶段区域等时格架的建立中不予研究,本文划分层序的最高级别为 5 级。

根据 IMF 曲线特征与旋回基准面对应关系,选取 IMF2、IMF3 和 IMF4 进行层序划分,在 3 018~3 405 m 层段共识别出 2 个长期基准面旋回、8 个中期基准面旋回和 14 个短期基准面旋回(图 4)。具体划分方法如下:

(1)IMF4 曲线在 3 226 m 点处形成振荡趋势不

同的 2 段:3 226 m 点以上层段 IMF4 曲线震荡性较弱,表现为近于直线;而 3 226 m 点以下层段 IMF4 曲线表现出明显的震荡性。根据地震相特征(图 5),可以看出,3 226 m 之下表现为低频、强振幅、高连续的反射特征,3 226 m 之上表现为中频、弱振幅、较连续的反射特征,从而确定 3 226 m 处为分段点。结合岩性资料可知,在 3 405~3 226 m 层段内,岩性粒度从下至上总体呈由粗→细→粗的正旋回和反旋回相组合的特征,对应 1 个完整长期基准面旋回;在 3 226~3 018 m 层段内,岩性粒度从下至上总体也呈由粗→细→粗的正旋回和反旋回相组合的特征,对应 1 个完整长期基准面旋回。

(2)IMF3 曲线频率结构突变较为明显,各个频率段之间的突变点或突变区域对应于具有地质意义的不整合面和沉积转换面。在 3 405~3 226 m 层段内,IMF3 曲线有 3 个剧烈变化的值点,对应的深度分别为 3 370 m、3 314 m、3 260 m,对应的岩性为砂泥岩相变明显的突变面,可据此将该层段划分为 3 个中期基准面旋回。同样,在 3 226~3 018 m 层段内,IMF3 曲线也有明显的 3 个坎值变化点,与之相对应的深度分别为 3 176 m、3 128 m、3 068 m,依据这 3 个突变点将该层段划分为 3 个中期基准面旋回。

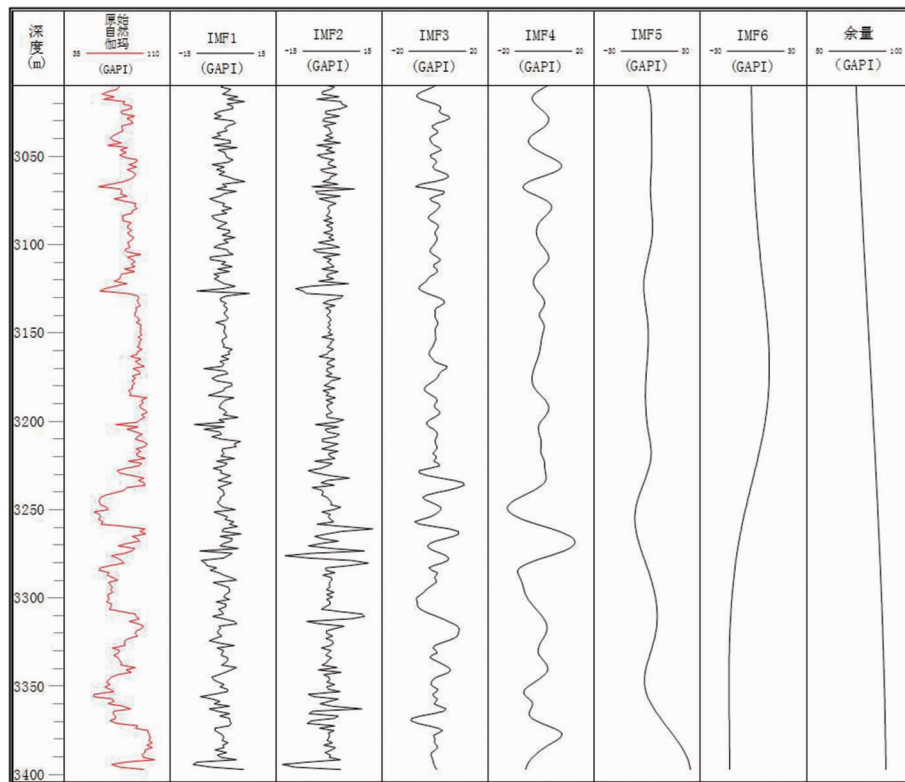


图 3 自然伽马曲线的 EMD 分解结果

Fig. 3 Empirical mode decomposition of natural gamma curve

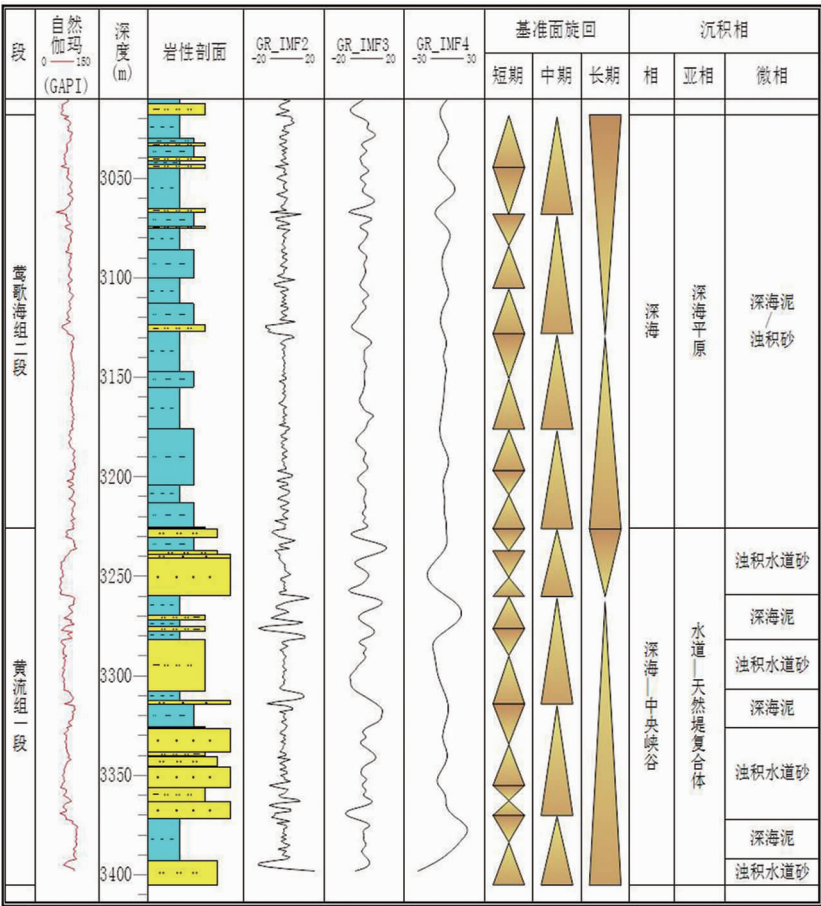


图 4 A-1-1 井层序划分综合图

Fig. 4 The integrated map of sequence division of well A-1-1

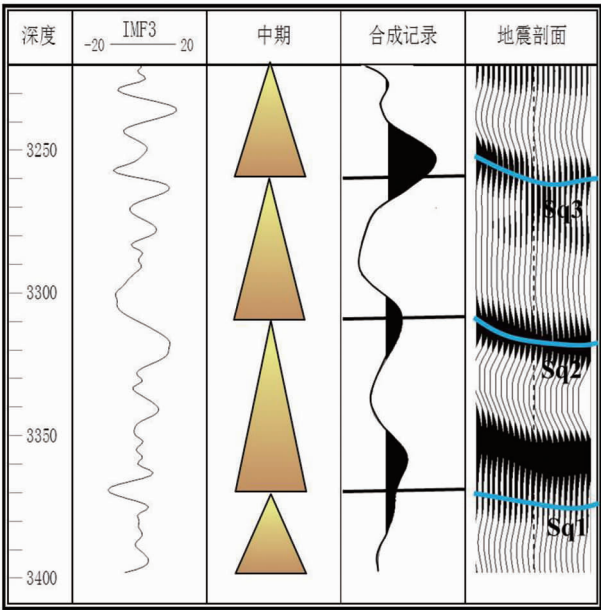


图 5 IMF 曲线与地震层序的关系

Fig. 5 IMF curve vs seismic sequence plot

(3)IMF2 曲线表现为多个周期性振荡特征,对应的突变点或突变区域清晰可见,结合岩性资料可知,这些突变点或突变区域是砂岩转变为泥岩或泥岩转变为砂岩的突变界面,反映多个沉积旋回的岩性组合,据此在目的层段划分出 14 个短期基准面旋回。

4 HHT 变换层序划分的验证

受地震分辨率的影响,地震反射剖面通常用来识别中、长周期基准面旋回。具体方法为:①采用合成记录进行层位标定,把中、低频率的 IMF 曲线与地震合成记录和原始地震剖面进行深度匹配;②分析中、低频率 IMF 曲线与合成记录地震道和地震剖面的对应关系,当中、低频率的 IMF 曲线为局部极小值到局部极大值的转换区时,合成地震道为中、高强波峰反射,对应的地震剖面具有中、高强反射特征。图 5 为局部中频 IMF 曲线与合成记录地震道和地震剖面的匹配图,中频 IMF 曲线的 3 个局部极小值到极大值

的转换区与 Sq1、Sq2 和 Sq3 地震层序界面相对应。可见希尔伯特-黄变换的中、低频 IMF 曲线与地震层序界面有较好的对应关系。

5 结语

(1) 希尔伯特-黄变换应用于层序划分具有优越性,该方法能客观地量化不同频率域的固有模态函数(IMF)与不同级次层序之间的对应关系;根据希尔伯特-黄变换指导层序划分有利于降低在层序划分过程中的人为主观性和多解性。

(2) 不同频率域的固有模态函数(IMF)曲线与各个时期基准面旋回特征关系密切。低频率域 IMF 曲线对应长周期基准面旋回,可用来划分三级层序;中频率域 IMF 曲线对应中周期基准面旋回,可用来划分四级层序;高频率域 IMF 曲线对应短周期基准面旋回,可用来划分五级层序。

(3) 希尔伯特-黄变换在琼东南盆地深水区层序划分中取得较好的应用效果,为该区的层序划分提供了一个重要的辅助手段。由于不同地区存在沉积构造差异,需要根据层序发育特点,重新厘定固有模态函数与各级层序之间的对应关系。

参考文献:

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, 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.
- [2] 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.
- [3] Huang N E, Shih H H, Shen Z, et al. The ages of large amplitude coastal seiches on the Caribbean coast of Puerto Rico[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30(8): 405 - 409.
- [4] Huang N E, Wu M L, Qu W D, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis [J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry. 2003 (19): 245 - 268.
- [5] Nunes J C, Bouaoune E, Delechelle E, et al. Image analysis by bi-dimensional empirical mode decomposition[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12): 1019 - 1026.
- [6] 武安绪, 吴培雅, 兰从欣, 等. Hilbert-Huang 变换与地震信号的时频分析[J]. 中国地震, 2005, 21(2): 207 - 215.
- [7] 文政, 朱筱敏, 金明玉, 等. 基于测井数据 Hilbert-Huang 变换的地层层序划分[J]. 测井技术, 2007, 31(6): 533-536.
- [8] 王华. 层序地层学基本原理、方法与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.
- [9] 邓宏文, 王红亮, 宁宁. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘: 中国地质大学(北京), 2000, 7(4): 305 - 313.
- [10] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249 - 255.
- [11] 王贵文, 邓清平, 唐为清. 测井曲线谱分析方法及其在沉积旋回研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 93 - 95.
- [12] 李庆谋, 刘少华. 地球物理测井序列的小波谱方法[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 78 - 83.
- [13] 王亚辉, 赵鹏肖, 左倩媚, 等. 测井信号小波变换在层序地层划分中的应用: 以南海北部莺歌海盆地 D14 井黄流组为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(4): 58 - 63.
- [14] 王艳忠, 操应长, 远光辉. 小波分析在深水砂砾岩和泥页岩地层层序划分中的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 251 - 258.
- [15] Xu J L, Liu L F, Wang G W, et al. Geophysical methods for the study of Sedimentary cycles[J]. Petroleum Science, 2009, 6(3): 259 - 265.
- [16] 徐敬领, 王贵文, 刘洛夫, 等. 基于经验模态分解法的层序地层划分及对比研究[J]. 石油物探, 2010, 49(2): 182 - 186.
- [17] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] 王子嵩, 刘震, 黄保家, 等. 琼东南盆地深水区中央坳陷带东部渐新统烃源岩分布及评价[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 360 - 371.
- [19] 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1): 7 - 13.
- [20] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 1 - 7.
- [21] 张功成, 米立军, 吴景富, 等. 凸起及其倾没端——琼东南盆地深水区大中型油气田有利勘探方向[J]. 中国海上油气, 2010, 22(6): 360 - 368.
- [22] 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等. 南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(4): 627 - 634.
- [23] 何云龙. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积特征及其成因机制[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012: 6 - 132.
- [24] 许怀智, 蔡东升, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 641 - 650.
- [25] 苏明, 解习农, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 467 - 478.
- [26] 王振峰. 深水重要油气储层——琼东南盆地中央峡谷体系[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 646 - 653.

Application of Hilbert-Huang Transform to Sequence Stratigraphic Division: A case study of Deep-water Area in Qiongdongnan Basin

HE Lijuan¹, ZHANG Yi¹, HE Xiaohu¹, WANG Yahui¹, CHEN Yang¹

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Guangdong, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The first member of Huangliu formation and the second member of Yinggehai formation of the central canyon in deep-water area of Qiongdongnan Basin are taken as the example to analyze the application of Hilbert Huang Transform to sequence stratigraphic division. Through decomposing the natural gamma curve by empirical mode is obtained intrinsic mode functions of different frequency domains, and then divided grade sequence according to the corresponding relationship established between the periodic oscillations of the intrinsic mode functions and the sequence boundaries. The results show that: Hilbert Huang transform is suitable for the long, medium and short term base-level cycles and provides an important supplementary mean for the sequence stratigraphic division in deep-water area of Qiongdongnan Basin.

Key Words: Hilbert-Huang transform; empirical mode decomposition; intrinsic mode function; sequence stratigraphy; deep-water area; Qiongdongnan basin