

基于改进的希尔伯特—黄变换的 岩性油藏识别方法

李 延 顾汉明*

(中国地质大学地球物理与空间信息学院,地球内部多尺度成像湖北省重点实验室,湖北武汉 430074)

李延,顾汉明. 基于改进的希尔伯特—黄变换的岩性油藏识别方法. 石油地球物理勘探,2015,50(2):341-345.

摘要 引入归一化处理方案改进希尔伯特—黄变换(HHT),可使通过HHT获得的瞬时属性更能体现信号的本质变化特征。文中首先介绍了改进的HHT法的基本原理和分解过程,在此基础上计算地震信号的“三瞬”参数;其次,分析对比了改进HHT法、常规HHT法重构的瞬时振幅和从原始信号提取的瞬时振幅,得知改进HHT法重构的瞬时振幅对油层反应最敏感;然后,利用改进HHT法从春光油田实际三维叠后地震数据中提取瞬时振幅属性,该属性值的纵横向分辨率更高,可更清晰地刻画岩性油藏边界,且与研究区已知钻井、测井、试气等资料相吻合。因此,本文的改进HHT法能更有效地体现岩性油藏储层变化特征。

关键词 岩性油藏 储层预测 希尔伯特—黄变换 瞬时振幅

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.02.018

1 引言

岩性油藏主要是因纵、横向岩性变化而聚集在一起,具有较大的隐蔽性,且油层的地震响应微弱,利用常规油气预测方法难以识别该类油藏。因此,有必要探寻适用于特定地区特定岩性油藏储层的地震预测方法。近年推出的希尔伯特—黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)^[1]适用于非线性非平稳的地震信号分析,在地震数据处理和解释中得到了广泛应用。HHT是在经验模态分解的基础上进行希尔伯特变换,该方法是基于信号的自身特点,不需预设任何基函数,其分解结果优于傅里叶变换、小波变换及其他一些时—频方法^[2~7]。其缺点是要要求信号是单分量的,且受Bedrosian定理和Nuttall定理等限制^[8],求取地震信号的瞬时属性存在不足。针对HHT存在的问题,本文采用AM-FM解调和归一化方案进行改进,使其更适用于地震信号的分解;将改进HHT法应用于隐蔽性岩性油藏的储层识别,取得了令人满意的实际应用效果。

2 改进的HHT算法

希尔伯特—黄算法首先要对信号进行经验模态分解^[1],获得原始信号的一系列固有模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF),在此过程中,应用归一化处理将IMF信号 $D(t)$ 分解成包络信号 $a_i(t)$ 和振幅为1的载波信号 $\cos\theta(t)$,再对其结果进行希尔伯特变换,获得信号的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率^[4]。通过如此改进,可弥补Bedrosian定理中信号的瞬时频率受噪声影响,频率会出现周期性间断干扰等不足,且改善了瞬时频率有负值的情况。改进的HHT算法具体步骤简述如下。

(1)对地震信号 $x(n)$ 进行经验模态分解,得到一系列固有模态函数 $D(i)(i=1\sim m)$ 。

(2)计算每一个固有模态函数 $D(i)$ 的绝对值 $|D(i)|$,并寻找 $|D(i)|$ 所有的局部极大值;再通过三次样条曲线连接这些局部极大值,从而形成经验包络信号 $E_1(i)$ 。

(3)对 $E_1(i)$ 做归一化处理

* 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号 中国地质大学地球物理与空间信息学院,430074。Email:hmgu@cug.edu.cn

本文于2014年3月24日收到,最终修改稿于2015年2月15日收到。

本研究受国土资源部公益性行业科研专项课题(201211082-03)资助。

$$y_1(i) = \frac{D(i)}{E_1(i)} \quad (1)$$

当 $|y_1(i)| \leq 1$ 时, 结束归一化处理过程; 否则, 若 $|y_1(i)| > 1$, 则通过步骤(1)获得 $y_1(i)$ 的经验包络函数 $E_1(i)$, 重复归一化步骤(2)和(3), 即

$$\begin{cases} y_2(i) = \frac{y_1(i)}{E_2(i)} \\ \vdots \\ y_n(i) = \frac{y_{n-1}(i)}{E_n(i)} \end{cases} \quad (2)$$

直到 $y_n(i)$ 中所有的点都满足关系式 $|y_n(i)| < 1$, 信号的整个分解才结束, 从而获得信号的一系列新的固有模态函数 $y_n(i)$ 。

(4) 计算三瞬参数: 固有模态函数信号 $D(i)$ 的瞬时振幅可表示为

$$E_{\text{Amp}}(i) = E_1(i)E_2(i)E_3(i)\cdots E_n(i) \quad (3)$$

通过对 $y_n(i)$ 进行希尔伯特变换, 获得

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y_n(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

式中: P 为 Cauchy 积分主值; τ 为时间延迟参数。

可获得的瞬时相位表示为

$$\theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{y_n(t)} \quad (5)$$

最终得到信号的瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

3 岩性油藏储层预测实例

春光探区位于准噶尔盆地西北部车排子地区, 主要发育岩性油藏^[9]。根据沉积层序和岩性等特征^[10], 车排子地区新近系沙湾组从上至下可划分为沙湾组三段、沙湾组二段、沙湾组一段。春光探区于 2005 年在新近系沙湾组获得油藏勘探重大突破, 现已进入勘探开发稳步推进的关键时期, 亟待对规模较小、油层识别更困难的薄储集层油藏进行进一步挖潜。

本次研究的主要目的层是沙湾组二段 T5 砂组油层。该段地层南厚北薄, 地层厚度范围是 50 ~ 110m, 发育巨厚层状棕红色泥岩、厚层状棕红色粉砂质泥岩夹薄层棕红色泥质粉砂岩, 底部常见一层细砂岩, 代表井为 P2 井。泥岩具泥质结构, 粉砂级

颗粒不足 3%, 成分主要为石英、长石, 偶见少量泥晶方解石及帘石类重矿物。细砂岩的主要成分中, 石英含量为 34%、长石为 14%、火成岩岩屑为 20%、变质岩岩屑为 30%、沉积岩岩屑为 2%。中—细粒结构, 粗粒约占 10%、中粒约占 35%、细粒约占 40%、粉粒约占 15%; 颗粒呈次圆状, 分选中等。细砂岩为排 2 井区的主要含油储层。

在勘探开发早期, 利用振幅、频率等地震属性能较好地识别油层、水层^[11,12]。据此类技术布置了 P2-200 和 C9 等井, 出现了“亮点”不是油藏的现象, 且在 T5 砂组录井资料上未见油气显示, 这足以说明该区油藏分布的复杂性。分析主要失利原因是区内带多套砂泥互层, 形成与 P2 井类似的强振幅, 难以从地震资料有效分辨出砂泥互层。而对地震信号进行 HHT 后可能具有更高的分辨率, 提取的瞬时参数对油气具有更高的灵敏度。因此, 本文利用改进的 HHT 对该区油藏进行识别试验, 意在讨论改进 HHT 法的精度及其在岩性油藏识别中的可行性。

3.1 改进 HHT 法与常规 HHT 法的对比

瞬时振幅属性对岩性、断层、流体及储集层孔隙变化等反应灵敏; 瞬时相位则能反映岩性、地层层序变换等; 而瞬时频率能体现岩性、流体等变化, 但通常瞬时频率剖面或平面的连续性较差, 刻画岩性的边界模糊。因此, 本文重点对比分析从原始信号、常规 HHT 法和改进 HHT 法提取的振幅属性对储层的不同反应灵敏性。图 1 是区内南北向 Inline100898 剖面, 其中 N_1S_3 、 N_1S_2 和 N_1S_1 分别为沙湾组三段、二段和一段的底面, 黑色层位为本文目的层 T5 砂层。从该剖面提取过 P2 井的一道地震信号(其波形如图 2 中黑线所示), 对该道地震数据采用常规 HHT 法, 再重构获得瞬时振幅包络(图 2 中蓝线); 然后采用改进 HHT 法, 并按式(3)计算瞬时振幅, 重构后得到瞬时振幅包络(图 2 中红线)及提取的原始地震信号振幅包络(图 2 中品红线)。

结合该区测井、地质等资料进行精细层位标定, 判定图 1 中约 1365ms 处为油层(对应砂层为 T5, 图 1 中黑线)。对图 2 进行对比分析可知: 改进 HHT 法提取的瞬时振幅包络(红线)幅值在油层处最强, 与油层上下的幅值变化的区别明显, 说明改进 HHT 法提取的瞬时振幅最能体现油层的变化特征。

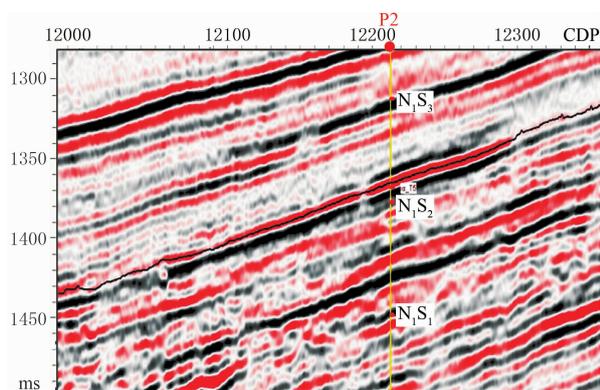


图 1 过 P2 井地震剖面

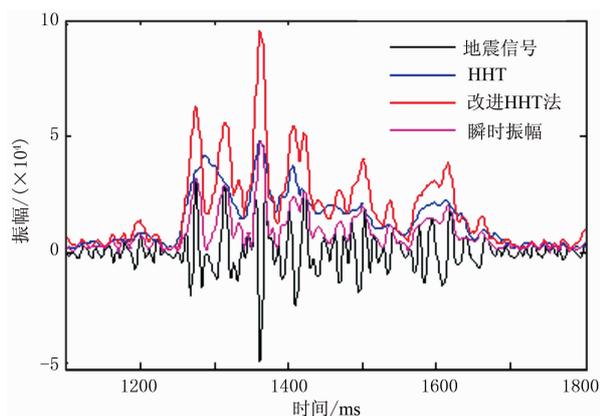


图 2 不同方法提取的瞬时振幅包络

3.2 应用效果

研究区 P2 和 P206 两井都在 T5 砂层获得高产工业油流,而 P2-200 和 C9 两井在 T5 层段录井时均未见油气显示,综合解释为水层。P2和P206井位

于 T5 砂层尖灭带附近,油层段为丘状快速堆砌的砂砾岩,为远岸碎屑流沉积成因的水下扇沉积(远离三角洲前缘),在地震剖面上表现为中强振幅,形成非常明显的“类亮点”特征。在图 3 中:SP 曲线为低值异常,具有箱型特征;AC 曲线呈明显高值异常,表明油层段的速度低;电阻率曲线呈漏斗状高值异常。C9 井 T5 砂层 SP 曲线也具有明显的低值异常,而电阻率曲线也是低值异常;地震剖面上也表现为中强振幅,在平面上同样表现为“类亮点”特征,综合解释为水层。P2-200 井的测井曲线特征与 C9 类似,综合解释也为水层(图 4)。综合以上分析认为:利用 SP 曲线能够有效识别岩性,利用电阻率曲线能够有效识别油层。然而利用地震资料进行油气检测,不能有效区分油层和水层,存在多解性。

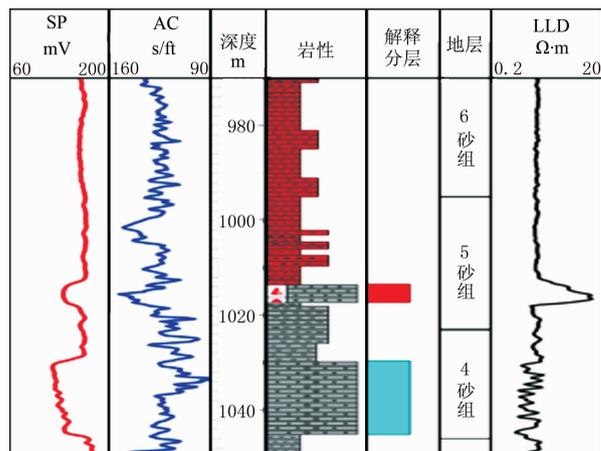


图 3 P2 井综合解释图

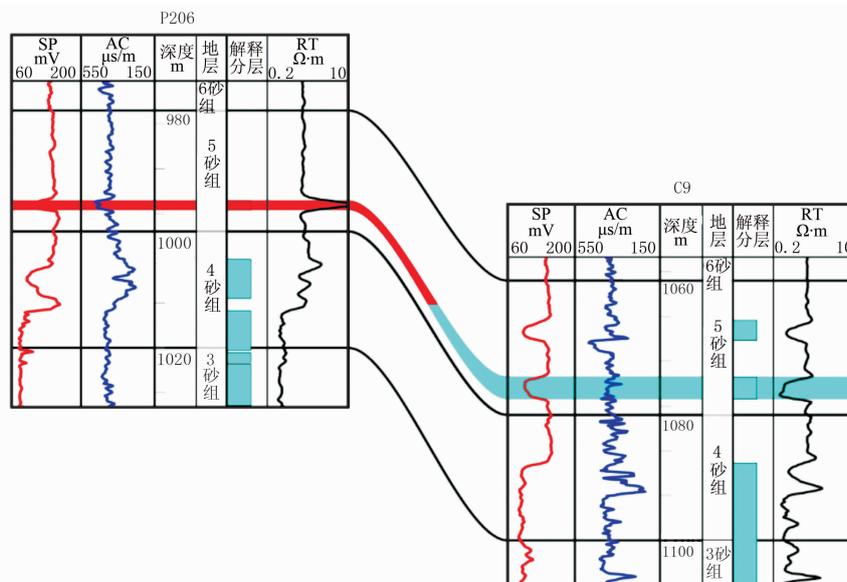


图 4 P206-C9 井油藏剖面图

为此,采用本文的改进 HHT 法重构获得春光探区 P2 井区 T5 砂层的油藏分布。结合图 1 中的分析,得知改进 HHT 法重构的瞬时振幅对 T5 油层反应最为敏感。

首先从图 1 提取其原始振幅的瞬时振幅(图 5)和改进 HHT 法重构的瞬时振幅(图 6),对其作对比分析可知:改进 HHT 法重构的瞬时振幅在 T5 油层纵横向分布更清晰,P2 井中 T5 油层在横向延伸范围也可准确刻画。沿 T5 层提取该区瞬时振幅(图 7),可知 T5 油层的瞬时振幅和均方根振幅在 P2 和 P20 井区都表现为强振幅,常规 HHT 法和改进 HHT 法重构的瞬时振幅也属于强振幅,该地震

属性基本能表征储层分布范围。根据该区现有钻井、试油等资料,P2 和 P206 井在 5 砂组均高产油,且该井区随后针对 5 砂组部署的开发井也获得工业油流。而在图 7a 和图 7b 中 C9 和 P2-200 井所处区域也是强振幅,且 P2-200 井强振幅刻画的圈闭形态也清晰,但这两口井在 5 砂组实钻后确认储层存在,但无油气显示,综合解释为水层。在图 7c 和图 7d 中,C9 和 P2-200 井所处区域对应的瞬时振幅的幅值较小,与 P2 和 P206 井存在明显差异,特别是改进 HHT 法重构的瞬时振幅的幅值更小,这更进一步说明改进 HHT 法重构的瞬时振幅比常规均方根振幅、瞬时振幅能更清晰、有效地刻画 5 砂组油层的分布。

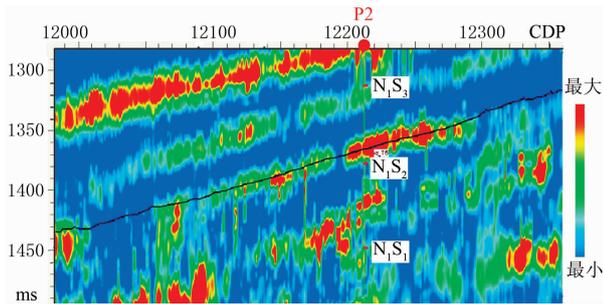


图 5 原始地震剖面提取的瞬时振幅

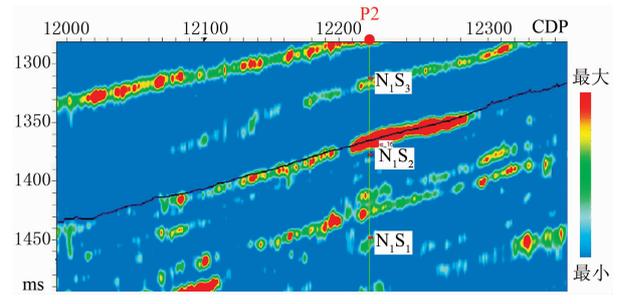


图 6 改进 HHT 法重构的瞬时振幅

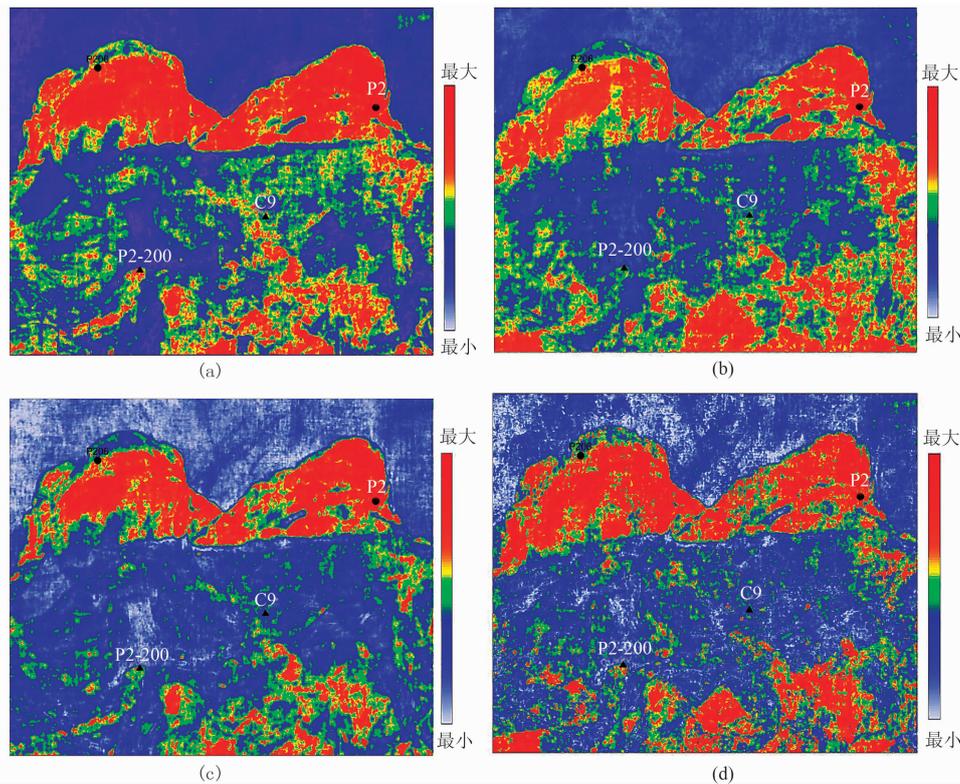


图 7 沿 T5 砂组油层的地震属性

(a)瞬时振幅;(b)均方根振幅;(c)HHT 法提取的瞬时振幅;(d)改进 HHT 法提取的均方根振幅

4 结论

(1)改进 HHT 法弥补了常规 HHT 法的不足,它重构的瞬时振幅比常规 HHT 法重构的瞬时振幅和从原始地震数据提取的瞬时振幅能更有效地体现地震信号的变化特征,对地震信号中蕴含的由流体引起的微弱地震响应更敏感。

(2)在准噶尔盆地车排子春光油田的三维叠后地震数据的应用中,改进 HHT 法重构的瞬时振幅剖面对油层的纵横向分辨率较高,对油层反应较灵敏,与现有的钻井及试油资料更吻合,能更清晰地刻画岩性油藏边界。

(3)虽然本文运用改进 HHT 法替代常规 HHT 法,提高了地震资料的分辨率,但它要求地震资料主频高、频带宽、信噪比高,且需在地质指导下进行综合解释。

参 考 文 献

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [2] Wen Xiaotao, He Zhenhua, Huang Deji. Reservoir detection based on EMD and correlation dimension. *Applied Geophysics*, 2009, 6(1): 70-76.
- [3] Huang Yaping, Geng Jianhua, Zhong Guangfa. Seismic attribute extraction based on HHT and its application in a marine carbonate area. *Applied Geophysics*, 2011, 8(2): 125-133.
- [4] Xue Yajuan, Cao Junxing, Tian Renfei. A comparative study on hydrocarbon detection using three EMD-based time-frequency analysis methods. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 89(2): 108-115.
- [5] Chen C S, Jeng Y. Natural logarithm transformed EEMD instantaneous attributes of reflection data. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 95(8): 53-65.
- [6] 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. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1585-1590.
- Yang Peijie, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extrac-

tion based on HHT. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1585-1590.

- [7] 曹思远, 邴萍萍, 路交通等. 利用改进希尔伯特—黄变换进行地震资料时频分析. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(2): 246-254.
- Cao Siyuan, Bing Pingping, Lu Jiaotong et al. Seismic data time-frequency analysis by the improved Hilbert-Huang transform. *OGP*, 48(2): 246-254.
- [8] Nuttall A H, Bedrosian E. On the quadrature approximation to the Hilbert transform of modulated signals. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(10): 1458-1459.
- [9] 董臣强, 王军. 准噶尔盆地车排子地区新近系沙湾组—砂组油层地震特征分析. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4): 445-447.
- Dong Chenqiang, Wang Jun. Analysis on seismic feature of reservoir in Neogene Shawan Formation first oil-sand layer in Chepaizi area of Junggar basin. *OGP*, 2007, 42(4): 445-447.
- [10] 陈轩, 张尚锋, 张昌民等. 准噶尔盆地车排子地区新近系沙湾组层序地层. *新疆石油地质*, 2008, 29(1): 65-67.
- Chen Xuan, Zhang Shangfeng, Zhang Changmin et al. Sequence stratigraphy of Neogene Shawan Formation in Chepaizi area, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(1): 65-67.
- [11] 穆玉庆. 岩性油藏地震描述技术在准噶尔盆地春光油田的应用. *海相油气地质*, 2010, 15(4): 68-73.
- Mu Yuqing. Application of seismic description technique for lithologic reservoir in Chunguang Oil Field, Junggar Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(4): 68-73.
- [12] 刘传虎. 准噶尔盆地隐蔽油气藏类型及有利勘探区带. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 25-32.
- Liu Chuanhu. Subtle reservoir type and favorable exploration belts in Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 25-32.

(本文编辑:朱汉东)

作 者 简 介



李延 博士研究生, 1986 年生; 2008 年本科毕业于兰州理工大学热能动力工程专业, 2010 年考入中国地质大学地球物理与空间信息学院; 现为该学院地球探测与信息技术专业博士研究生, 主要研究方向为地震资料处理及地震地质综合解释。