

文章编号:1673-5005(2009)05-0001-05

# 利用小波深频分析方法研究沉积储层旋回

徐敬领<sup>1,2</sup>, 王贵文<sup>1,2</sup>, 刘洛夫<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**依据不同旋回类型的地质特征及参数建立相应的地质模型,采用小波深频分析方法对地质模型参数进行处理,获取不同旋回类型的频谱响应特征模型,在此模型的指导下,对预处理后的测井数据(信号)在深度域进行小波变换和频谱特征分析,进而依频谱展宽及其韵律特征识别和研究沉积储层旋回。结果表明:小波深频分析方法具有不受数据剖面长度限制、自动调节尺度大小、分辨率高、沉积储层旋回划分精度高且能自动识别各级旋回界面等优点;高频成分的频率响应对应短周期沉积储层旋回,低频成分的频率响应对应长周期沉积储层旋回;所建立的沉积储层旋回响应特征模型库为油气的勘探开发指明了方向。

**关键词:**测井曲线;小波深频分析;频谱特征分析;沉积储层旋回;响应特征

**中图分类号:**P 539.2;TE 121.2 **文献标识码:**A

## Study of sedimentary reservoir cycles using wavelet depth-frequency analysis method

XU Jing-ling<sup>1,2</sup>, WANG Gui-wen<sup>1,2</sup>, LIU Luo-fu<sup>1,2</sup>

(1. School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Processing in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** According to the geological characters and parameters of different cyclic types, the corresponding geologic models were established, and the spectral response feature models of different cyclic types were gotten using wavelet depth-frequency analysis method to dispose the parameters of geologic models. Based on the response characteristics models, wavelet transform and spectrum feature analysis were done to the pretreatment logging data or signal in depth domain, then the sedimentary reservoir cycles were identified according to the spectral broadening and its rhythmic features. The results show that the wavelet depth-frequency analysis method has the advantages of no limitation of length, automatic regulation scale dimensions, high resolution, division sedimentary reservoir cycles with high precision and identifying all levels cycle interface automatically. The frequency responses of high frequency notches identify short period sedimentary reservoir cycles and frequency responses of low frequency notches identify long period cycles. The response characteristics models of sedimentary reservoir cycles can be used to designate the direction for exploration and development of oil and gas.

**Key words:** well logging; wavelet depth-frequency analysis; spectrum feature analysis; sedimentary reservoir cycles; response characteristics

前人曾对地层中存在的各种各样的周期<sup>[1,4]</sup>(旋回、韵律)进行了研究,如测井曲线的 Milankovitch<sup>[5,6]</sup>天文周期的研究、Hu 等用自然伽马(GR)曲线对加利福尼亚湖相三叠系地层的研究、Prokoph 用测井曲线分析沉积速度的不连续性<sup>[7,8]</sup>及目前开展的国际大洋钻探<sup>[6]</sup>(ODP)项目对古气候的周期研

究等,而储集层沉积周期研究的主体是地层中的小规模旋回即短周期,如何用测井曲线分析周期信息是其中的一个关键性课题<sup>[9]</sup>。笔者利用测井资料,特别是 GR 和自然电位(SP)曲线<sup>[10-11]</sup>,采用小波深频分析方法提取小规模旋回(即高频层序),充分挖掘测井资料所包含的地层信息,建立测井数据向

收稿日期:2009-03-12

基金项目:中石油国家科技重大专项课题(2008ZX050201-01)

作者简介:徐敬领(1982-),男(汉族),山东济宁人,博士研究生,主要从事测井地质及地球物理学方面的研究。

地质目标的映射关系,提取隐藏的地层序列周期性特征,并描述目的层的地质特征,进而更精确地自动划分沉积储层旋回。

### 1 小波深频分析方法的提出

时频分析是一种应用非常广泛且比较成熟的技术手段,特别是在物探领域应用更广泛。而在当今石油勘探开发中,不论是应用地震、测井资料还是其他资料研究地下介质情况,最后都要回到深度域,具体到某个深度是什么样的地质特征,测井数据都是按深度来采样的。因此,要在深度域建立测井数据和地质目标的映射关系,提出小波深频分析方法。与其他频谱分析方法(如傅里叶频谱)比较,小波深频分析方法具有不受取样长度限制、对频谱分辨率较高、精确且自动地反映地下沉积储层旋回特征等优点。

小波深频分析方法是一种新的基于小波变换的沉积储层旋回分析方法,笔者开发了相应的处理软件,主要是应用一维小波变换的算法对测井资料进行处理,然后进行沉积储层旋回分析,指导超薄储层的预测。该方法的核心思想是将深度序列测井数据点通过“沿层分频多尺度自动处理”和“高分辨率剖面重建”等新处理方法,逐步变换成按频率大小依次展开的深频分析剖面,该剖面反映的地质特征与地质目标体一一映射,特别反映了目的层的高频层序旋回特征,其处理流程见图1。

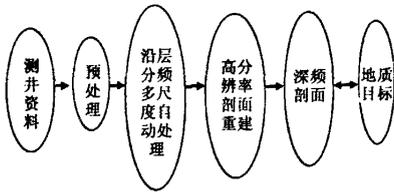


图1 小波深频分析流程图

Fig.1 Flow chart of wavelet depth-frequency analysis

### 2 理论基础

#### 2.1 基于小波深频分析的沉积储层旋回分析原理

地层中存在各种各样的周期<sup>[14]</sup>,使得地层中的层序体具有分级结构特征,分级不连续,且相互包容,作为地质勘探目标的地质体具有多尺度特征,造成沉积地层具有相应的旋回性,这种地质上的旋回性被记录在测井信号中,使得测井信号中波的频谱沿深度方向会出现一定的差异,这正符合小波深频分析方法研究信号的特点(检测奇异性),以确定不

同级别沉积旋回边界;对测井信号进行小波多尺度分解后可获得不同级次的旋回周期,将钻井岩相标定的各个级别沉积旋回界面与测井信号小波分析旋回周期进行对应,建立不同频率尺度对应的沉积旋回级别标准库,然后选取合适的尺度对相应地区进行沉积储层旋回分析。

#### 2.2 基于小波深频分析研究沉积储层旋回的数学理论基础

测井数据的小波分解与重建是测井资料深频处理的基础。把多条测井曲线及多条曲线处理出来的反射系数分解为不同频段的分频剖面是以单条测井曲线或一条反射系数的小波分解为基础的,设测井信号或反射系数为 $f(t)$ ,它的连续小波变换<sup>[11]</sup>为

$$W_{\psi}^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_{\psi}}} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int \Psi\left(\frac{b-\tau}{a}\right) f(\tau) d\tau \tag{1}$$

其中

$$c_{\psi} = 2\pi \int \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega,$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \Psi(t) \exp(-i\omega t) dt.$$

式中, $W_{\psi}^f(a, b)$ 为分析小波或连续小波,在实际处理中为得出的小波系数值; $a$ 为尺度; $b$ 为位置; $\tau$ 为平移点; $t$ 为信号因子; $c_{\psi}$ 为可容许性条件; $\Psi(t)$ 为母小波; $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 频谱,反映旋回的响应特征。由 $W_{\psi}^f(a, b)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 求函数 $f(t)$ 的过程称为 $f(t)$ 的重建或小波反变换:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{c_{\psi}}} \iint |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) W_{\psi}^f(a, b) \frac{da db}{a^2} \tag{2}$$

其中 $f(t)$ 和 $W_{\psi}^f(a, b)$ 应保证一定程度的能量守恒或者同构性。

该技术方法的主要功能:①提高分辨率,由响应特征反演沉积特性;②具有较强的抗干扰能力;③旋回界面显示较清晰,能清楚划分各级旋回及更高级旋回。

#### 2.3 不同旋回地质模型对应的测井响应小波分析沉积旋回模型库的建立

沉积岩旋回的特点是,在单一的层系体内,沉积岩物性的变化具有方向性和连续性,各种级次和规模的旋回都具有这种方向性<sup>[12-13]</sup>。以沉积岩物性的变化特点为依据,将沉积旋回划分为正旋回(海进型)、反旋回(海退型)、正反旋回(海进—海退型)和反正旋回(海退—海进型)<sup>[14]</sup>。这种分类方法是以沉积物粒度成分变化的方向性为基础的。一般来

讲,细颗粒组成的地层较薄,粗颗粒组成的地层较厚。其依据是沉积分选理论,由于粗颗粒沉积速率快,在相同的时间内其沉积层厚度大于细颗粒沉积层厚度。也就是说,地层厚度和颗粒粒度之间有一种同步的相关关系。因此,可以用厚度递变方向不同的地质模型来模拟不同类型的沉积储层旋回,然后结合研究区地质特征获得有关的地层参数(速度、密度等),对这些参数进行处理,建立测井响应小波分析沉积旋回模型库,该模型库由小波分析沉积旋回模型组成,小波分析沉积旋回模型包括反射系数序列和其小波深频分析特征两个主要参数。

笔者主要设计了以下4种典型沉积储层旋回模型:

(1)正旋回。该模型由砂泥岩单层厚度随埋深增加而增加的不等厚互层组成。它反映了正韵律的沉积储层旋回,代表水动力条件由强到弱,沉积物粒度由粗到细,退积型的沉积环境。在小波深频分析成果图(图2)上可以看到,从上到下随着深度的增加,信号的频率成分由高频向低频移动(图2~5中深频分析特征图由左向右为低频向高频过渡),表明旋回顶部富含高频成分,底部富含低频成分。上部粉砂和泥对应的薄层,其调谐波长对应的调谐频率为高频,而下部砂对应的较厚层,其调谐波长对应的调谐频率为低频,即低频成分反映较粗较厚的地质体,高频成分反映较细较薄的地质体。

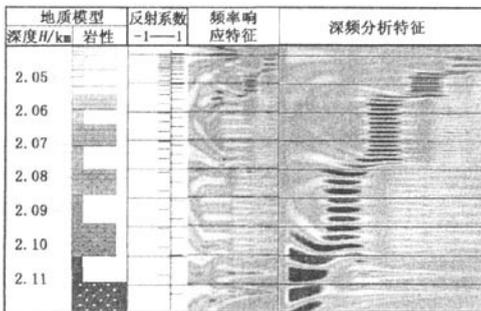


图2 正旋回地质模型及小波深频分析响应特征  
Fig.2 Geological model of positive cycles and response characteristics of wavelet depth-frequency analysis

(2)反旋回。该模型由砂泥岩单层厚度随埋深增加而递减的不等厚互层组成。它反映了水动力条件由弱到强,沉积物粒度由细到粗,进积型的沉积环境。在小波深频分析成果图(图3)上可以看到,从下向上随着深度的减小,信号的频率成分由高频向低频移动,表明旋回顶部富含低频成分、底部富含高频成分。下部粉砂和泥对应的薄层,其调谐波长对

应的调谐频率为高频,而上部砂对应的较厚层,其调谐波长对应的调谐频率为低频。

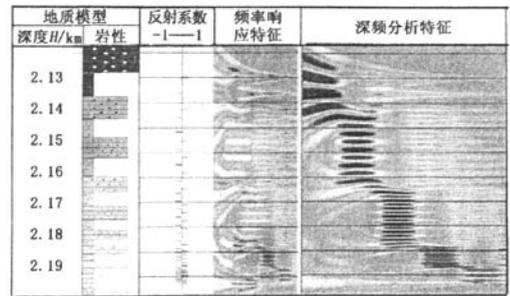


图3 反旋回地质模型及小波深频分析响应特征  
Fig.3 Geological model of negative cycles and response characteristics of wavelet depth-frequency analysis

(3)正反旋回模型。该模型由砂泥岩互层组成,其厚度随埋深增加而变化趋势为厚-薄-厚。它反映了水动力条件由强到弱再到强,沉积物粒度由粗到细再到粗,退积进积型沉积环境。在小波深频分析成果图上(图4),其响应特征为一正旋回和反旋回的组合,是一个完整的旋回,说明地质上正反旋回的小波深频分析响应特征表现为由低频到高频再到低频逐渐过渡。正反旋回结合处为最大洪泛面,相当于凝缩层;在两种不同岩性地层的交界面处对应小尖峰,其小尖峰反映的界面为上下不同波阻抗地层交界面。

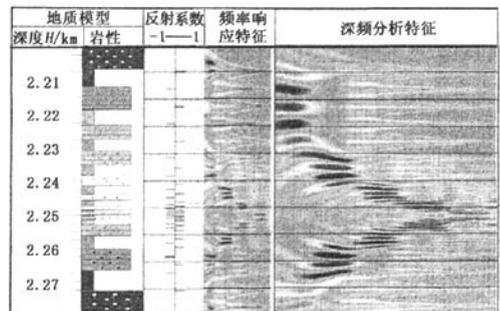


图4 正反旋回地质模型及小波深频分析响应特征  
Fig.4 Geological model of positive-negative cycles and response characteristics of wavelet depth-frequency analysis

(4)反正旋回模型。该模型砂泥岩互层的厚度随深度增加而变化的趋势为薄-厚-薄。它反映了水动力条件由弱到强再到弱,沉积物粒度由细到粗再到细,进积退积型沉积环境。在小波深频分析成果图(图5)上可以看到,其特征为一反旋回和正旋回的组合,说明地质上反正旋回的小波深频响应特征

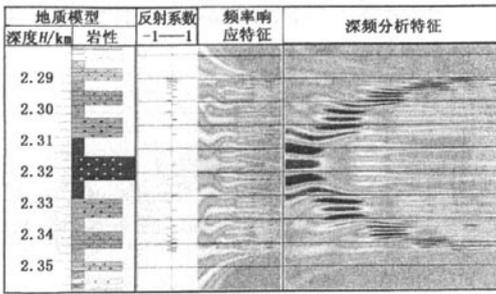


图5 正反旋回地质模型及小波深频分析响应特征  
 Fig.5 Geological model of negative-positive cycles and response characteristics of wavelet depth-frequency analysis

表现为由高频到低频再到高频逐渐过渡。正反旋回结合处为砂多泥少层,往往为层序界面,存在有利储

层;在两种不同岩性地层的交界面处对应小尖峰,其小尖峰反映的界面为上下不同波阻抗地层交界面。

### 3 小波深频分析应用实例

根据以上理论基础及模型库,应用小波深频分析方法及自主开发的相应程序处理软件,对鄂尔多斯盆地多口井地球物理测井资料进行处理分析,以该区某井为例,对综合柱状图和小波分析剖面成果图(图6)进行对比。可看出:每一个地层界面和小波分析剖面成果图所显示的地层界面是完全吻合的;根据岩性剖面和几条测井曲线所划分出来的沉积旋回,可以划分到五级,而小波分析剖面成果图把地下所有的沉积旋回界面都能显现出来,即识别出更高频沉积旋回界面;此成果图反映了地下真实的界面情况,与FMI测井成像图反映的地下界面情况是吻合的。

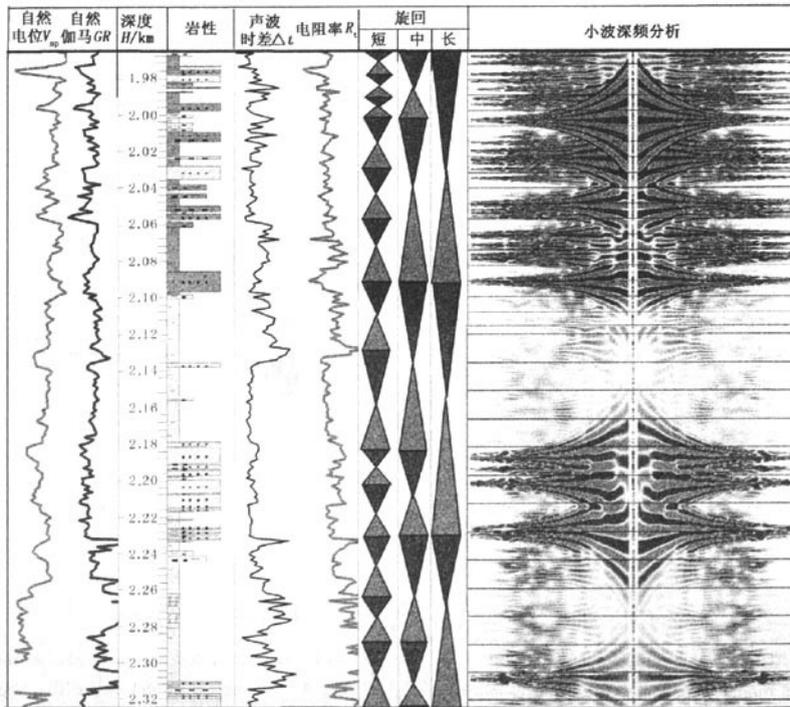


图6 鄂尔多斯某井综合柱状图和小波分析剖面成果图  
 Fig.6 Integrated histogram and wavelet analysis profile results figure of one well in Ordos Basin

### 4 结论

(1)通过沉积储层旋回的地质模型和实际测井资料的小波深频分析响应特征研究建立的沉积储层旋回的地质模型及小波深频分析响应特征模型库,

可以精确地划分沉积储层旋回。

(2)小波深频分析方法具有不受数据剖面长度限制、自动调节尺度大小、频率分辨率高、沉积储层旋回划分精度高且自动识别各级旋回界面等优点。

(3)小波深频分法方法是提取隐藏在测井信号

中周期性地质特征的有力手段,其高频成分的频率响应反映短周期沉积储层旋回,低频成分的频率响应反映长周期旋回。

#### 参考文献:

- [1] 吴瑞棠,张守信. 现代地层学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1991.
- [2] VAIL P R. 层序地层学原理[M]. 徐怀大,译. 北京:石油工业出版社,1994.
- [3] VAN WAGONER J C, MITCHUM R M, CAMPION K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for High-Resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1991.
- [4] DOVETON John H. Geologic log analysis using computer methods[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- [5] BERGER A. Milankovitch theory and climate[J]. Rev Geo-phys, 1988,26(4):624-657.
- [6] SHACKLETON N J, BERGER A, PELTIER W R. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene time Scale based on ODP Site 667[J]. Trans R Soc Edinburgh, 1990,81(4):251-261.
- [7] BOLTON Edward W, MAASCH Kirk A, JONATHAN Mili-Ly, A wavelet analysis of Plio-Pleistocene climate indicators: a new view of periodicity evolution[J]. Geophysical Research Letters, 1995,22(20):2753-2756.
- [8] ANDREAS Prokoph, FRANZ Barthelmes. Detection of nonstationaries in geological time series: wavelet transform of chaotic and cyclic sequences[J]. Computer Geoscience, 1996,22(10):1097-1108.
- [9] XU Jing-ling, LIU Luo-fu, WANG Gui-wen, et al. Geophysical methods for the study of sedimentary cycles[J]. Petroleum Science, 2009,6(3):259-265.
- [10] 王贵文,邓清平,唐为清. 测井曲线谱分析方法及其在沉积储层旋回研究中的应用[J]. 石油勘探与开发,2002,29(1):93-95.
- WANG Gui-wen, DENG Qing-ping, TANG Wei-qing. The application of spectral analysis of logs in depositional cycle studies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002,29(1):93-95.
- [11] 李庆谋,刘少华. 地球物理测井序列的小波波谱方法[J]. 地球物理学进展,2002,17(1):78-83.
- LI Qing-mou, LIU Shao-hua. Wavelet scalogram and application for geophysical well [J]. Progress in Geophysics, 2002,17(1):78-83.
- [12] 赵伟,邱隆伟,姜在兴,等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):18-22.
- ZHAO Wei, QIU Long-wei, JIANG Zai-xing, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):18-22.
- [13] 鲜本忠,王永诗. 基于小波变换基准面恢复的砂砾岩期次划分与对比[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(6):1-5.
- XIAN Ben-zhong, WANG Yong-shi. Division and correlation of glutenite sedimentary cycles based on base-level restoration using wavelet transform[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(6):1-5.
- [14] 雷克辉,朱广生,毛宁波,等. 在小波时频域中研究沉积储层旋回[J]. 石油地球物理,1998,33(1):72-78.
- LEI Ke-hui, ZHU Guang-sheng, MAO Ning-bo, et al. The research of depositional reservoir cycle in wavelet time-frequency field[J]. Petroleum Geophysics, 1998,33(1):72-78.
- [15] 刘振峰,郝天璠,范国章. 沉积储层旋回的地球物理研究[J]. 石油实验地质,2006,26(3):258-262.
- LIU Zhen-feng, HAO Tian-yao, FAN Guo-zhang. Geophysical study of sedimentary cycles[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006,26(3):258-262.

(编辑 徐会永)