

文章编号: 0253-9985(2001)03-0234-04

时-频分析在高分辨率层序地层学中的应用

石万忠¹, 李举子², 李梦溪³, 胡小强¹, 陈新军¹

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学汉口分校, 湖北武汉 430072;

3. 华北油田采油三厂地质大队, 河北任丘 062450)

摘要: 时-频分析方法是利用小波变换原理, 从地震波的时间域和频率域同时对其作出分析。小波变换具有随信号频率升高时间分辨率也提高的特点。这一特点恰好满足对具有多尺度特征信号进行时-频分析定位的要求。经实验发现, 沉积旋回与主极值频率之间有良好的对应关系: 正旋回沉积对应的主极值频率从下到上由高频变为低频; 反旋回沉积正相反。利用这一对应关系可进行层序地层划分和生储盖组合的预测。时-频分析是在层序地层格架中预测生储盖组合, 可有效保证预测的准确性。而时-频分析法研究的对象是对应沉积旋回的频率变化, 因此, 还可用来判识砂体的性质。

关键词: 小波变换; 高分辨率层序地层学; 时-频分析; 主极值频率

第一作者简介: 石万忠, 男, 28 岁, 助教(硕士), 层序地层学

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Cross^[1] 等人认为: 受海平面变化、构造沉降、沉积负荷补偿、沉积物供给、沉积地形等综合因素制约的地层基准面, 是理解地层层序成因并进行层序划分的基础。要对地质历史时期沉积的地层作高分辨率研究, 特别是地表以下的地层, 必须借助一定的技术方法。在实际当中常利用测井、岩芯、地面露头等资料进行高分辨率研究, 但这些方法有一定的局限性, 在待勘探区块或低勘探区块几乎无从下手。时-频分析方法能够对地震波的时间域和频率域同时作出分析, 提高了地震信号的分辨能力, 利用这种地震信号能够对地层沉积作出高分辨率的研究。

1 原理

自然界中的信号, 按照傅里叶分析, 单独从时间域或频率域观察信号都不能充分地描述信号的特征^[2]。只有从时间和频率的角度同时表征信号, 才能更全面、更入微地反映信号的特征。因此需要描述频谱成分怎样随时间变化, 并研究其物理和数学表示。长期以来, 无论是信号处理界还是数学界, 人们寻求信号表示方法, 综合三角函数和 Haar 系两者优点来建立一种函数, 使它能够在时间域和频率域上来分解任意函数。由于傅里叶变换获得的 $S(\omega)$ 仅能确定出信号 $S(t)$ 在整个时间域 R 上的频率特征, 却无法对时间域和频率域实行局部化。1964 年 Gabor 引

入窗口傅里叶变换, 它是通过对信号加窗提取信号在某个局部时间区域的频谱信息, 但加窗傅里叶变换由于其局部化格式固定不变, 在处理频率变化激烈的信号时, 受到相当的限制。为此, Morlet^[3] 提出了小波变换的概念, 将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频率的块信号。1986 年 Meyer 创造性地构造了具有一定衰减性的光滑函数, 其二进制伸缩与平移 $\{\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), j, k \in Z\}$ 构成了 $L^2(R)$ 的规范正交集^[4], 将信号在该正交集上分解, 构成了小波变换^[5]:

$$WT_s(j, k) = C_{j,k} = \int S(t) \psi_{j,k}(t) dt$$

小波变换的基本思想是用一簇函数去表示或逼近一信号或函数, 这一簇函数称为小波函数系。它是通过一个基本小波函数的不同尺度的伸缩和平移构成的。由上述的定义可知, 信号的小波变换 $C_{j,k}$ 反映了信号含有的特定小波分量 $\psi_{j,k}$ 的大小。小波函数 $\psi_{j,k}$ 随尺度参数 j , 时间位移参数 k 的变化对应不同的频段和不同的时间区间。因此, 将信号小波 $\psi_{j,k}$ 作为基函数进行分解的小波变换, 对高频信号具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率; 对低频信号具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率。小波变换这种随着信号频率升高时间分辨率也升高的特性, 恰好满足对具有多尺度特征的信号进行时频分析定位的要求, 也是它与窗口傅里叶变换的区别所在。

2 应用

2.1 旋回分析

2.1.1 模型

地层沉积旋回是否与地震信号的时-频特征具有某种一致性呢? 很多地质学家和物探专家对此展开了研究, 他们做了一系列的实验, 发现地层的旋回与时-频分析的主极值频率有一定的对应关系^[6]。(1) 正旋回沉积: 主极值频率从下到上由高频变为低频(图 1)。(2) 反旋回沉积: 主极值频率从下到上由低频变为高频(图 1)。(3) 正反旋回沉积: 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(图 1)。(4) 反正旋回沉积: 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(图 1)。(5) 正正旋回: 是两个正旋回的叠加, 主极值频率从下到上由高频变为低频, 然后又由高频变为低频, 在两个正旋回的交界处达到最小值(图 1)。(6) 反反旋回: 是两个反旋回的叠加, 主极值频率从下到上由低频变为高频, 然后又由低频变为高频, 在两个反旋回的交界处达到最大值(图 1)。以上这种主极值频率与地层沉积旋回的对应关系得到了自然伽马曲线的验证(图 1), 这充分说明了依据时频分析主极值频率的变化来分析地层的沉积旋回是非常有效的。

2.1.2 划分

目前, 时-频分析技术正处于研究和发展阶段,

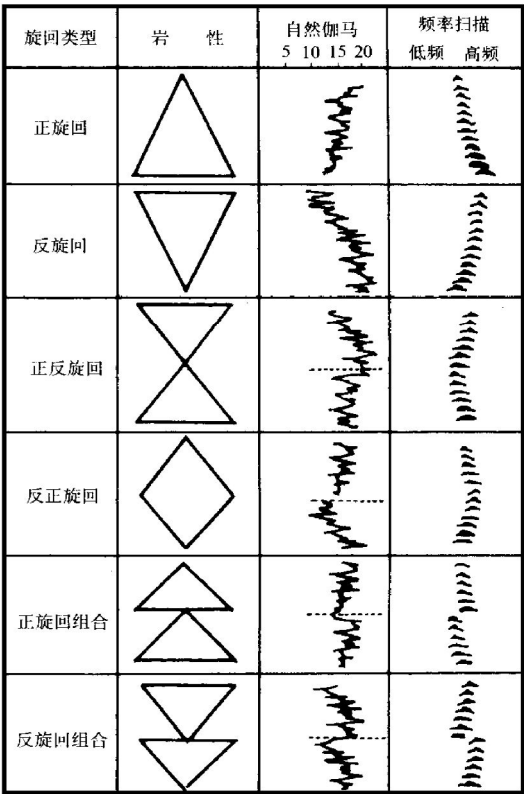


图 1 沉积旋回与主极值频率的对应关系^[6]

Fig. 1 Correspondence between sedimentary cycles and the main extremum frequencies

其应用还处于尝试性的阶段。笔者把这项技术应用到层序地层学中, 起到了很好的效果。对地震剖面上的某一点作时-频分析后, 得到了时间与频率变化的频谱图(图 2A), 但这样的频谱图不直观, 为了在频谱图上更清楚地看到旋回特征, 对该频谱采用镜像对比技术, 把它的镜像频谱图与原图拼在一起(图 2B), 它的旋回性就非常的清楚和明显。

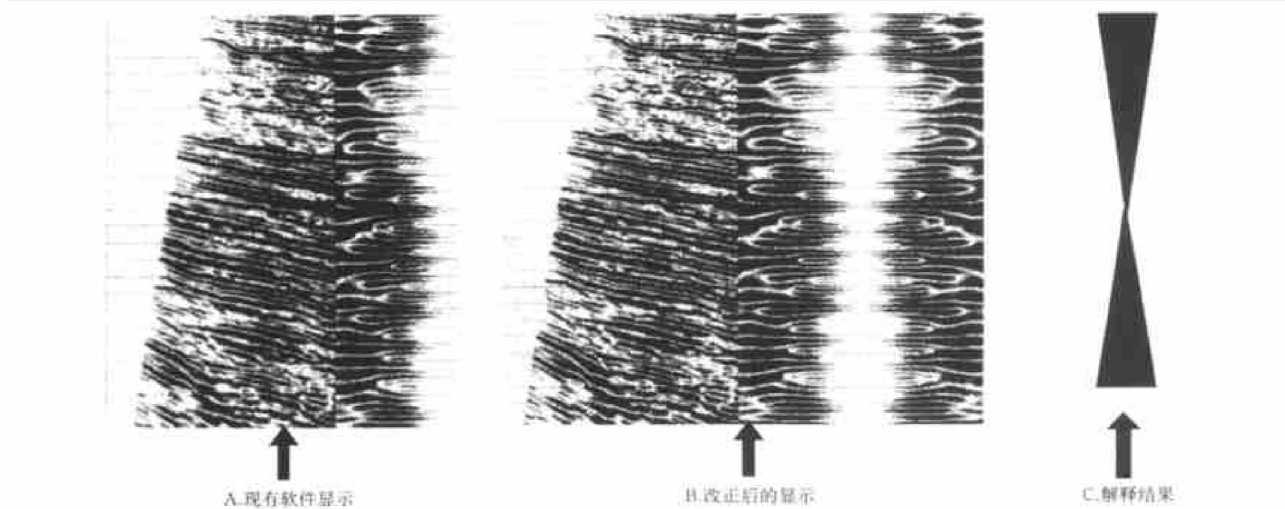


图 2 时-频分析频谱图镜像前和镜像后对比图

Fig. 2 Correlogram of time-frequency analysis spectrum before and after mirror image

在此基础上, 根据上述旋回体模型及其结论, 在频谱图上把主极值频率用线连接起来, 依据主极

值频率的变化规律很容易地划出地层沉积的旋回(图3)。当然,这样的旋回分辨率与地震波的特征

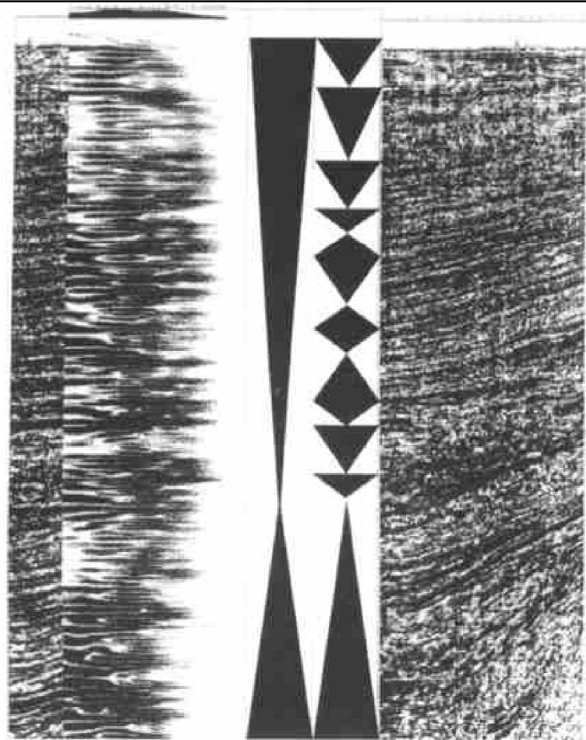


图3 时-频分析频谱图和沉积旋回划分

Fig. 3 Time-frequency analysis spectrum and the division of sedimentary cycles

有关,即地震波的频率越高,相位越稳定,振幅越强,时频分析方法划分出的旋回分辨率越高,反之,旋回的分辨率越低。但可以肯定的是它的分辨率要比地震剖面高得多,而且也很直观。

2.1.3 层序边界

时-频分析图的分辨率要比地震资料的分辨率高得多,如果钻井资料比较少,或钻井分布不均匀,难以确定层序的界面时,时-频分析方法可以起到事半功倍的效果。

依据层序地层学的基本原理,如果把近距离多个点的时-频分析图组合起来进行研究(就如同连井对比一样),可以根据短期基准面旋回、中期基准面旋回或长期基准面旋回的变化规律来确定层序的界面。(1)如果叠置于长期基准面旋回上的中期旋回(或叠置于中期基准面旋回上的短期旋回)呈退积-进积对称型,那么,旋回对称轴是在上升到下降的转换位置处,该位置也是洪泛面的位置,层序的边界不可能在该旋回的边界。(2)如果叠置于长期基准面旋回上的中期旋回(或叠置于中期基准面旋回上的短期旋回)呈以退积为主的退积-进积非对称型,反映在该时期是以水进为主的一个过程,

层序的下边界很有可能就是该旋回的下边界。(3)如果叠置于长期基准面旋回上的中期旋回(或叠置于中期基准面旋回上的短期旋回)呈以进积为主的退积-进积非对称型,反映在该时期是以水退为主的一个过程,层序的上边界很有可能就是该旋回的上边界。如果有钻井资料可以结合使用,效果会更好。

2.2 生储盖预测

2.2.1 提高准确性

长期以来石油地质家对石油生、储、盖的成因类型、发育特征及时空分布的研究是依据沉积相与沉积体系分析来进行的,而以沉积学为基础的生、储、盖分布的研究必须在层序地层格架中进行才能保证生、储、盖预测的准确性。在沉积旋回划分的基础上,就可以对地层的生、储、盖发育段作出预测,为后续的进一步研究提供有利的层段。从时-频分析图(图3)的旋回分析可以得出如下认识。

(1)当中期基准面叠置于长期基准面上升半旋回的中早期时,沉积物以粗碎屑为主,储层发育,缺少良好的生油岩,并有上升半旋回的晚期到下降半旋回的早期的泥岩作为良好的盖层。当短期基准面叠置于中期基准面的上升半旋回时,其中期旋回由退积样式的短期旋回叠加样式为主,以较厚的辫状水道相互切割叠置,发育低可容纳空间的短期旋回。

(2)当中期基准面位于长期基准面下降半旋回时,特别是晚期以陆源碎屑进积作用为主,储层发育。由于该阶段储层封闭性较差,需要有一定的盖层,构造上覆的泥岩等作为封闭条件,才能形成油气藏。同样,中期基准面旋回的下降半旋回是由进积型的短期旋回组成,由冲积扇、三角洲的水下分支河道构成。

(3)当中期基准面位于长期基准面旋回的上升到下降旋回的转换时期时,即最大可容纳空间的发育时期,以水进期的泥岩发育,会形成进积与退积交替出现的砂体,该期是形成生油层的阶段。中期旋回中的短期旋回是呈加积和退积交替出现,以薄层砂泥岩互层,以较厚的泥岩为主且有沼泽存在。

2.2.2 判识砂体性质

在地震剖面上识别和追踪粗碎屑沉积体时,常常会碰到不确信的时候,即使确信沉积体确实存在,但又不知其是偏粗还是偏细。如果没有井的资料,时-频分析是很好的方法之一。我们可以用它

来识别粗碎屑沉积体。

(1) 如果识别出来的沉积体是发育在长期(或中期)基准面上半旋回的早期时,或是发育在长期(或中期)下降半旋回的晚期时,即低可容纳空间的短期旋回叠置的部位,该沉积体极有可能是粗碎屑沉积体,而且岩性偏粗。

(2) 如果识别出来的沉积体是发育在长期(或中期)基准面上半旋回的中期时,或是发育在长期(或中期)基准面下降半旋回的中期时,即中等可容纳空间的短期旋回叠置的部位,该沉积体可能是粗碎屑沉积体,岩性为砂泥岩互层。

(3) 如果识别出来的沉积体发育在长期(或中期)基准面上半旋回的晚期时,或是发育在长期(或中期)基准面下降半旋回的早期时,即高可容纳空间的短期旋回叠置的部位,则该沉积体不可能是粗碎屑沉积体。

3 小结

通过以上尝试性的应用,可以看出时-频分析方法在高分辨率层序地层学中可以用来划分地层

沉积旋回,预测生、储、盖组合,确定层序界面,分析和预测砂体纵向分布。它的分辨能力介于测井和地震资料之间,是一种行之有效的方法。但目前来说,它的应用还很不完善。时-频分析技术对于勘探程度不高的地区来说尤为重要,相信不久的将来,时-频分析技术会得到广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Cross T A. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U. S. A [A]. In: Wilgaus C K, Hastings B S, Kendau C G St C, et al. Sea level change: an integrated approach [C]. SEPM Special Publication, 1988, 42: 371~ 380
- 2 陈明生, 李正斌, 阎述. 瞬变电磁法资料的联合时-频分析初探[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 29(3): 55~ 57
- 3 Morlet J. Wave propagation and sampling theory [J]. Geophys, 1982, 47(2): 203~ 236
- 4 王建中. 小波理论及其在物理和工程中的应用 [J]. 数学进展, 1992, 21(3): 289~ 315
- 5 Rioul O, Duhamel P. Fast algorithms for discret and continous Wavelet algorithms [J]. IEEE Trans, 1992, 38(2): 569~ 585
- 6 陈茂山. 测井资料的两种深度域频谱分析方法及在层序地层学研究中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(1): 58~ 63

APPLICATION OF TIME-FREQUENCY ANALYSIS TO HIGH RESOLUTION SEQUENCE STRATIGRAPHY

Shi Wanzhong¹ Li Juzi² Li Mengxi³ Hu Xiaoqiang¹ Chen Xinjun¹

(1. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei;

2. Hankou Branch of China University of Geosciences, Wuhan, Hubei;

3. Geological Brigade of 3rd Oil Production Factory, Huabei Oilfields, Renqiu, Hebei)

Abstract: Time-frequency analysis method is used to analyze the time domain and frequency domain of seismic waves at the same time according to the principle of wavelet transformation. The time frequency of wavelet transformation increases with the increasing of signal frequency. This can satisfy well time-frequency analysis of multi-graduation characteristic signal. It has been proved by practice that sedimentary cycle possesses good correspondence with the main extremum frequency; the corresponding main extremum frequency of normal sedimentary cycle changes from high frequency to low frequency in ascending order; the anticycle sedimentation is opposite. This correspondence could be used in sequence stratigraphic division and source-reservoir-cap rock assemblage prediction, and also in the recognition of sand body property.

Key words: wavelet transformation; high-resolution sequence stratigraphy; time-frequency analysis; main extremum frequency