

最大熵谱分解结合小波变换技术在层序地层划分中的应用

卢伟,李国福

(中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712)

摘要:由于测井曲线具有良好的分辨率及连续性,因而在高频层序地层划分研究中,其发挥着不可替代的作用。采用最大熵谱分解技术对测井曲线进行预测误差分析,进一步计算得到预测误差趋势曲线。小波变换技术将一维深度域的测井信号转换到二维的深度—尺度域。将两者技术有机结合可以很好地识别出地层多级次的沉积旋回,较大程度地减小了人为因素的干扰。以该方法对巴彦呼舒凹陷的实际测井资料进行了高频地层层序划分,取得了较好的应用效果。

关键词:最大熵谱分解;预测误差;小波变换;沉积旋回;地层层序

中图分类号:TE121.34 **文献标识码:**A

Application of maximum entropy spectrum decomposition combined with wavelet transform in the division of sequence stratigraphy

Lu Wei and Li Guofu

(Exploitation and Development Research Institute, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: Due to the fine resolution and continuity of the well log, it plays an irreplaceable role in the high frequency sequence stratigraphic division. By the adoption of the maximum entropy spectrum decomposition technology to analyze the predication error of the well log, the prediction error trend curve is obtained by further calculation. The wavelet transform technology transforms the one-dimensional depth domain logging signals into the two-dimensional depth and the scale domain logging signals. And the organic combination of the two techniques can well identify the multi-order sedimentary cycles of the stratum, so the interferences of the human factors are greatly reduced. The high frequency stratigraphic sequence division of the actual log data in Bayanhushu Sag is conducted by using this method, and the application effect is good.

Key words: maximum entropy spectrum decomposition, prediction error, wavelet transform, sedimentary cycle, stratigraphic sequence

层序地层学^[1]研究为隐蔽油气藏的勘探提供了理论依据,在石油勘探开发行业中发挥着重要的作用。层序地层分析的关键是划分不同级别的地层层序界面及其内部的沉积旋回。测井资料中蕴含了大量与地层旋回变化相关的信息,可以将其理解为多种不同时期、不同级别的沉积旋回的综合反映的结果,因而在常规的测井曲线上难以直观识别出不同级别的沉积旋回。应用最大熵谱分解技术^[2-5]对相关测井数据处理得到预测误差趋势曲线,同时结合小

波变换的多尺度的特性,对测井曲线进行周期性分析,该技术可以较好地反映地层内部沉积旋回的变化趋势,满足高频层序地层划分的要求。

1 最大熵谱分解与小波变换技术的原理

最大熵谱分解技术就是把信息熵的概念融入信号处理过程中,其实质上是一种自相关函数外推的

收稿日期:2017-04-25。

第一作者简介:卢伟(1983—),男,工程师,储层预测与评价。

基金项目:国家自然科学基金重点项目“四川盆地构造动力学、盆地叠合特征及油气富集规律研究”(41030426)。

方法,在每一步外推过程中,使估计的相关函数包含过程的信息最多,其频率谱具有很高的分辨率。在小波与小波变换的数学定义中:

若存在函数:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

并且满足条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(w)| |w|^{-1} dw < \infty \quad (2)$$

其中,公式(2)中的 $\psi(w)$ 为公式(1)中的 $\psi(t)$ 的傅里叶变换, $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数。对 $\psi(t)$ 进行伸缩平移变换,得到一小波函数簇:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

其中,公式(3)中的 a, b 为实数, a 为尺度因子, b 为位移因子。一维连续测井信号是以深度 x 为自变量的函数,设 $f(x) \in L^2(R)$,其小波变换定义为:

$$w_r(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (4)$$

测井曲线小波变换^[6-10]的原理就是用一小波函数簇 $\psi_{a,b}(x)$ 去逼近测井信号 $f(x)$,将测井曲线从一维深度域转换到二维的深度—尺度域。其尺度因子 a 越小表示小波被压缩,对应测井信号的短周期分量。 a 越大表示小波被拉伸,对应着长周期分量。

2 预测误差分析及预测误差趋势曲线

碎屑岩沉积地层中,自然伽马曲线相较于其它测井曲线,对泥质含量、沉积环境的变换更为敏感,可以较好地反映地层的沉积旋回性及周期性等特征。通过对自然伽马曲线最大熵谱分析预测得到的值代替每一点的真实测量值,在定义的窗口宽度内进行频率分析,被分析的资料产生一套层理波形的模型。这个模型用作预测曲线上的下一个数据点,完美的预测结果为零,否则为非零值。预测误差值中较大的正值和较大的负值为资料不连续点,其可能是地层间断。对选取的伽马曲线在不同大小的滤波窗口中进行中值滤波,获得平缓道,再对其进行最大熵谱分解运算,获得不同波长情况下的地层界限的连续性的有关信息(图1)。从图1中可以看出:大多数值接近于零线,意味着预测误差较小,预测效果

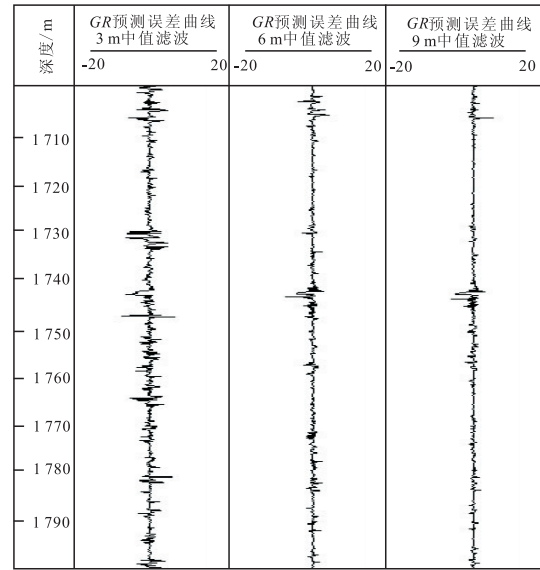


图1 不同中值滤波的预测误差曲线

Fig. 1 Prediction error curves of different median filtering

较好,从一个窗口到另一个窗口资料的频谱特性保持相对不变。预测误差曲线^[11]上出现较长的尖顶状波形是由于频谱特性急剧变化,这一段地层深度可能代表地层界线。通过滤波消除资料中的短波“噪音”,预测误差曲线中深度在1745 m附近连续的尖顶状波形比不连续尖顶状波形具有更大的意义。

对得到的预测误差曲线进行特定的积分处理后,得到预测误差趋势曲线(图2),其可以显示原测井曲

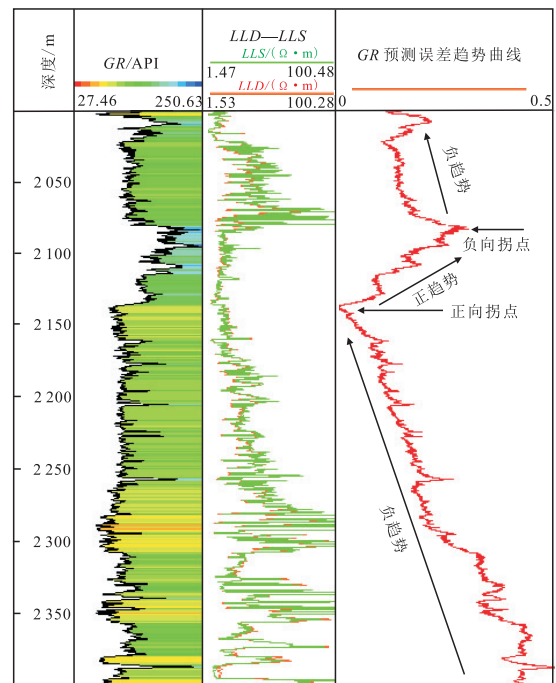


图2 预测误差趋势曲线

Fig. 2 Trend curves of prediction error

线中隐藏的不同级别的旋回趋势信息。向上增加的频谱属性值为正极趋势,向下减少的趋势为负极趋势。正极趋势表明在移动窗口中通过间隔进行的预测误差低估了曲线值,其代表一个时间间段,在该段时间内的曲线上表明泥岩含量要比预测的多,这是一个水进阶段,反之负极趋势则反映一个水退阶段,转折点则代表一个层序界面或层序内部的特征界面,其中正向拐点代表可能的洪泛面,负向拐点则代表可能的层序界面,不同级别的拐点指示不同级别的等时地层界面。预测误差趋势曲线呈现明显的旋回形态,正好对应所测量的沉积地层的旋回性。如果地层本身的旋回性不完整,预测误差趋势曲线也会不完整。

3 应用效果

南屯组下段为巴彦呼舒凹陷勘探的主要目的层,其岩性以砂砾岩、细砂岩、泥质粉砂岩为主,夹杂着凝灰质粉砂岩和黑灰色泥岩。复杂的岩性组合造成岩电关系特征不明显,同时由于缺乏统一的标准层,该区地层划分和对比难度较大。选用反映沉积环境敏感的自然伽马曲线,采用最大熵谱分解结合小波变换技术对该区沉积地层进行了旋回划分,取得了较好的应用效果。图3为运用cyclolog软件对该

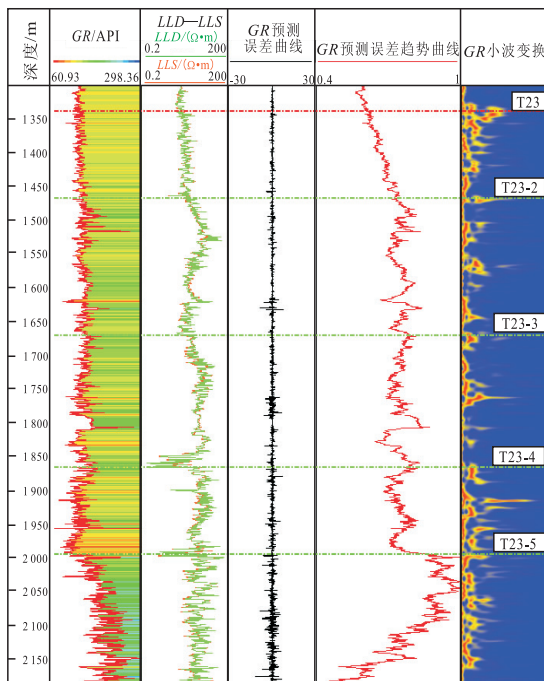


图3 chu5井高频层序划分

Fig. 3 High frequency stratigraphic sequence division of well-chu5

区 chu5 井应用最大熵谱分解结合小波变换技术划分沉积旋回的结果。从该井段预测误差趋势曲线中可以看到一个大的旋回界面(红线标志处)对应着 chu5 井的南一段地层的顶面。在小波变换图谱列也可以看到红线处小波能量值最大,对应着大的尺度,即大的地层旋回界面,相当于该区的三级层序。该井段还可以划分出4个次一级的地层界面,分别对应着南一段二至五砂组的地层顶面(绿线标志处),同时,在小波变化图谱列该位置的能量团与非地层旋回界面处相比能量偏强,比红线标志处的三级层序的能量团偏弱,总体对应该区的四级层序。运用该方法对研究区的所有探井进行了高频层序划分,完成高频层序地层格架的搭建,为接下来的精细构造解释工作提供了良好的前提保障。

4 结论

1) 利用反映沉积环境的测井曲线对其进行最大熵谱分解得到预测误差曲线,再对该曲线进行特定的积分化处理得到预测误差趋势曲线,该趋势曲线中正、负趋势转折点有可能代表一个层序界面或者最大洪泛面。

2) 利用小波变换的技术将一维深度域的测井信号转换到二维的深度—尺度域,不同级别的地层旋回对应着不同尺度的小波能量强度。

3) 将最大熵谱分解技术与小波变换技术相结合,可以很好地识别地层多级次的沉积旋回,较大程度地减小人为因素的干扰,运用该方法在研究区取得了令人满意的效果。

参考文献

- [1] 池秋鄂,龚福华.层序地层学基础与应用[M].北京:石油工业出版社,2001.
- [2] 张文泉,李彦斌.最大熵谱估计及应用研究[J].现代电力,2001,18(1):41-46.
- [3] 陶德元,黄本淑.数字信号处理原理及应用[M].成都:四川大学出版社,1991.
- [4] 高晓峰,徐之海.线型优化最大熵光谱估计方法中自回归模型两种求解方法的比较[J].光谱学与光谱分析,2008,28(11):2717-2720.
- [5] 马海珍,茅金根,王丛彬,等.利用最大熵伯格预测和时频分析法提高地震资料分辨率[J].石油物探,2002,41(1):80-83.
- [6] 余厚全,刘益成,黄载禄.小波变换用于地震测井信号的多分辨率分析[J].石油地球物理勘探,1994,29(4):441-448.

(下转第11页)