

物理勘探

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

陈茂山*

(石油地球物理勘探局第四地质调查处)

摘要

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. 石油地球物理勘探, 1999, 34(1): 57~64

测井资料的深度域频谱分析方法是指在傅里叶变换基础上研究测井资料的频谱信息特征及其与高频层序的关系, 以用于层序地层学研究中的高频层序划分。本文在前人研究的基础上提出了两种基于测井资料的深度域频谱分析方法——深度域频率扫描和滑动窗频谱分析。该项技术已在阿南凹陷层序地层学研究中取得了良好的效果。

主题词 测井资料 深度域 频率扫描 滑动窗 频谱分析

ABSTRACT

Chen Maoshan. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data and their application to sequence stratigraphy research. OGP, 1999, 34(1): 57~64

Depth-domain frequency spectrum analysis method for logging data means to analyse, on the basis of Fourier transform, not only the frequency spectrum character of logging data but also the relation between it and high frequency sequence so as to ascertain high frequency sequence. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data have been developed, which are depth-domain frequency scan and moving-window frequency spectrum analysis. These methods have achieved good effect in sequence stratigraphy research in Anan depression.

Subject heading: logging data, depth domain, frequency scan, moving window, frequency spectrum analysis

引言

层序地层学自问世以来,很快在地质界得到普及和应用。层序地层学主要是根据地震、钻井、测井和露头资料对沉积盆地进行地层解释及有关的沉积环境和岩相的解释。层序地层学研

* Chen Maoshan, Fourth Geological Survey Division, Bureau of Oil Geophysical Prospecting, P. O. Box 13, Bazhou City, Hebei Province, 065704

本文于1998年5月6日收到,修改稿于同年6月25日收到。

究的主体是地层的旋回性,其根据主要是地震资料和测井资料。由于现阶段陆上地震资料的频率分布范围在10~80Hz之间,其主频多在30~50Hz之间,缺少高频成分,分辨率较低,用地震资料不能检测小规模的旋回。因此,要划分小规模的旋回(即高频层序划分)只能最大限度地应用地质露头、钻井和测井等资料。而在这些资料中,测井资料以其数量多、连续性好及其本身的量化特点得以广泛应用,成为小规模旋回划分的主要资料来源。

测井资料的深度域频谱分析是指在傅里叶变换的基础上研究测井资料的频谱信息特征及其与高频层序的关系,以用于层序地层学研究中的高频层序划分。

建立地层旋回性的依据与测井曲线的频谱特征

地质研究早已证明,沉积地层不仅具有成层性,而且具有旋回性。沉积地层旋回性的特点是,在单一的层体系即旋回内,沉积岩物性(结构和物质)的变化具有方向性和连续性。根据沉积岩物性的变化特点,可将地层层系划分为几种基本的类型: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)等,这种分类方法的基础是沉积物粒度成分的方向性变化。由于地震、测井等地球物理资料是地层物性的综合响应,地层的物性参数(如速度、密度、孔隙率等)反映在其变化中,而这种变化主要反映在资料的频率域上,如主频和极性等。

测井曲线是一系列深度域的振动信号序列的组合,在形式上与时间域的地震反射道是一致的。由于不同的测井曲线反映不同的地层特征,其频谱特征也是不一样的。

测井曲线区别于地震资料的一个最重要的特征是其分辨率很高,频带很宽,高频成分多。

测井资料深度域频谱分析方法的基本原理

所谓频谱分析,是指利用傅里叶变换对振动信号进行分解并进而对它进行研究和处理的一种过程。傅里叶变换分为正变换和反变换,其公式如

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (\text{正变换})$$

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (\text{反变换})$$

频谱分析一般是在时间域进行的,在简谐信号的周期(时间)与频谱之间存在如下关系

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

式中, ω 为振动的圆频率, T 为振动的周期。

因此,一个简谐振动信号的时间特征与频率特征之间的关系是一定的,而复杂的振动信号是简谐振动信号的叠加,这种关系同样适用于复杂的振动信号。

既然频谱分析与时间域有密切关系,那么在深度域能不能进行频谱分析呢?答案是肯定的。因为时间域与深度域的振动信号序列具有同样的形式。所不同的是,在深度域进行频谱分析,其频率值只具有相对概念,而不具有绝对概念。

深度域频率扫描的基本原理

深度域频率扫描是指在一定的频率范围内,将测井数据从深度域转换为频率域,在频率域内对测井数据由低频到高频进行滤波扫描产生一系列窄的带通滤波记录,然后反变换到深度域,得到一组柱状记录道。对该柱状记录道以一定方式显示出来,用于分析地层的旋回特征。

深度域频率扫描的关键技术是选择适当的滤波器参数。它所采用的滤波器应满足以下5点要求:

- (1) 滤波器的时间响应为零相位,不改变输入信号的时间特征;
- (2) 滤波器有足够的频带宽度,即要求输出信号延续时间不大;
- (3) 滤波器的频率响应极大值突出,能敏感地检测信号中所包含的中心频率信息;
- (4) 各滤波器的左右两支对数陡度具有可调性和不变性;
- (5) 各滤波器的时间响应基本相似,使不同滤波门的滤波效果具有可比性。

为了满足以上条件,深度域频率扫描采用的滤波器是零相位三角形递归滤波器,如图1所示。

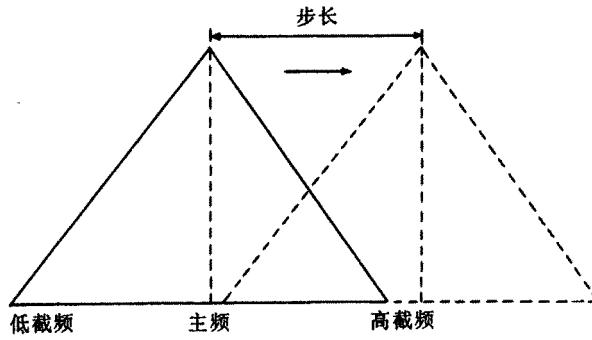


图1 零相位三角形递归滤波器

零相位三角形递归滤波器是镶边带通滤波器的特殊形式,因此它既具有带通滤波器的响应特征,又具有能部分消除吉卜斯效应的能力。

滑动窗频谱分析的基本原理

滑动窗频谱分析是指从一定深度开始,对深度域测井数据确定一个深度范围,对该深度范围内的数据进行快速傅里叶变换,将其转换到频率域,将频谱横向显示在该深度范围的中点;然后按一定步长移动窗口,再次对窗口内的数据进行傅里叶变换。依次类推,得到一个由一系列频谱组成的频谱系列图。其横向为频率,纵向为深度,波形显示可为振幅谱或功率谱。

滑动窗频谱分析与深度域频率扫描不同,它是对测井曲线的某一深度范围内的数据进行分析,以获得该深度范围内的频谱特征。我们把上面提到的深度范围称为滑动窗,当滑动窗的长度足够小时,可把该滑动窗内数据的频谱作为该滑动窗深度中点的频谱。

两种频谱分析方法的基本步骤

测井曲线频谱分析主要分三步完成:测井曲线的预处理,傅里叶变换和带通滤波。具体来说有如下步骤:

(1) 对测井曲线进行预处理。测井曲线的预处理包括去奇异值、环境校正和重采样等。由于原始测井曲线记录的质量不同,来源不同,可能存在一些强烈干扰真实情况的奇异点,如果不能将这些奇异点去掉,可能会影响对真实情况的反映;由于在进行测井时所受到的各种影响

物 质 探 测

因素很多,常常需要在使用前对测井曲线进行多种环境校正,如井壁垮塌、泥浆入侵、深度偏移等;为了能够准确标定频谱的深度值,必须对要进行频谱分析的测井曲线进行重采样以获得等间隔的采样值。

- (2)对深度域的测井数据进行傅里叶变换,将其转换到频率域。
- (3)对变换后所得到的频谱进行频率扫描(滤波);而对滑动窗频谱分析来说对频谱进行一定的数字处理即可。
- (4)将每一次滤波所得到的窄带通频谱进行反傅里叶变换回深度域。
- (5)对处理结果进行显示。

沉积旋回基本模型的建立及其地质含义

与其它测井曲线相比,自然伽马曲线能最敏感地反映泥质含量变化。因此采用自然伽马曲线进行以高频层序划分为目的的频谱分析是最有效的。

为了详细研究深度域的频谱特征与高频层序划分的关系,特从实际资料中选取两段自然伽马曲线作为研究模型。

正旋回模型为一个正韵律沉积,从浅到深泥质含量逐渐减少,砂岩含量逐渐增多,反映在自然伽马值上从浅到深逐渐变小,所代表的沉积旋回是海进体系域(TST);反旋回模型为一反韵律沉积,从浅到深泥质含量逐渐增多,砂岩含量逐渐减少,反映在自然伽马值上是从浅到深逐渐减小,所代表的沉积旋回为高水位期体系域(HST)。

值得指出的是,由于这两个模型是从实际资料中提取出来的,在大的变化趋势(旋回)之上仍包含着多个小规模的变化(旋回)。

为了研究层序分界面在深度域频率扫描图上的变化特征和沉积旋回的两种组合类型,我们对两个基本模型进行组合得到另外4个模型,即正反旋回、反正旋回、正旋回沉积组合和反旋回沉积组合模型,如图2所示。

不同地层旋回类型的基本特征

不同的地层旋回类型具有不同的深度域频率扫描特征。判定深度域频率扫描特征的一个重要方法是根据频率扫描图上主频能量的偏移方向进行分析。图2是不同沉积旋回的深度域频率扫描示意图。

通过对几个模型研究后可得出以下结论:

- (1)正旋回沉积。从上到下主频向频率增高方向偏移,左右两支的主频移动轨迹组成正三角形形态;
- (2)反旋回沉积。从上到下主频向频率降低方向偏移,左右两支的主频移动轨迹组成倒三角形形态;
- (3)正反旋回。从上到下主频先向频率降低方向偏移,在正反旋回交界处达到最小值,其后逐渐向频率增高方向偏移;
- (4)反正旋回。从上到下主频先向频率增高方向偏移,在反正旋回交界处达到最大值,其后

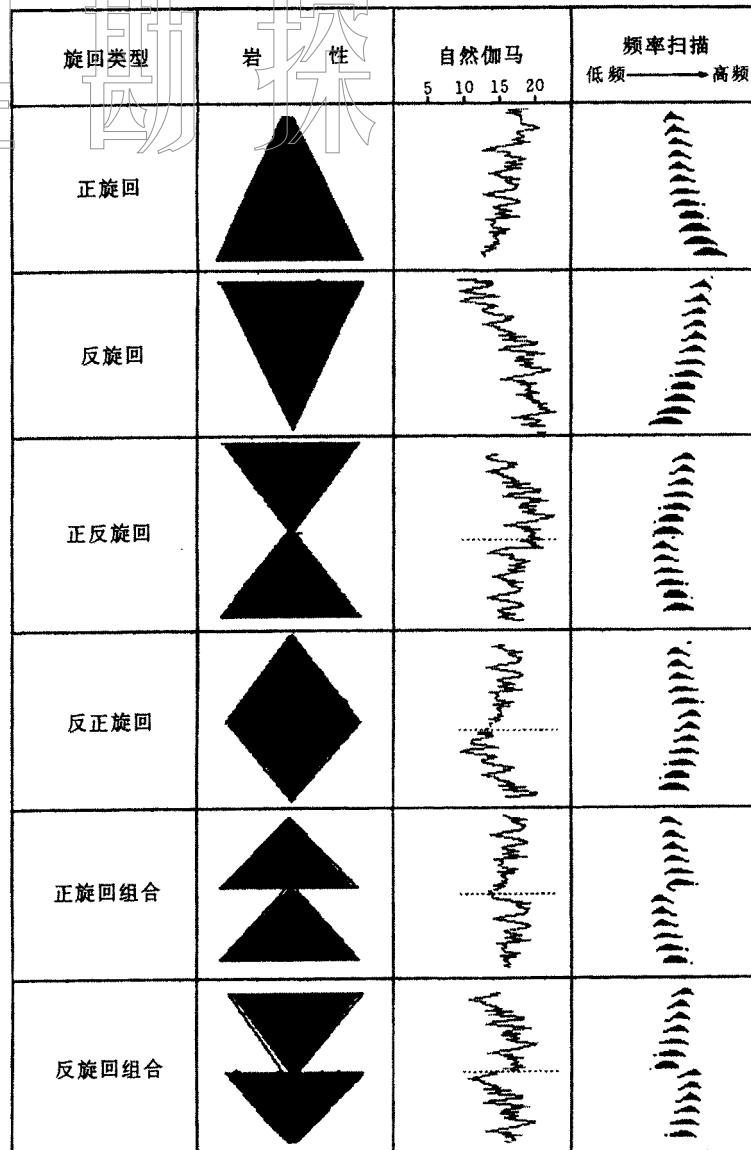


图2 沉积旋回类型与深度域频率扫描示意图

逐渐向频率降低方向偏移;

(5)正旋回沉积组合和反旋回沉积组合的深度域频率扫描说明深度域频率扫描图上的近乎水平的分界面常常对应着沉积间断,即沉积旋回分界面和层序边界。

深度域频率扫描具有如下特点:

- (1)正旋回和反旋回具有明显不同的频率扫描特征;
- (2)在大的旋回中包含着不同数目的次级旋回;
- (3)沉积旋回界面在频率扫描图上具有明显的分界面;
- (4)频率扫描图上的分界面常常对应着层序界面,但并非所有的分界面都是层序界面。

而滑动窗频谱分析特征与深度域频率扫描特征是不同的。从模型分析中可以看出,决定滑动窗频谱分析特征的最主要因素是测井曲线的变化频率,而频率变化所反映的是沉积物沉积

物 质 地 球

速率和沉积持续时间的变化。因此,滑动窗频谱带宽处对应着沉积速率低、沉积持续时间短的地质时期,而滑动窗频谱带窄处对应着沉积速率高、沉积持续时间长的地质时期。图3为正旋回和反旋回沉积的滑动窗频谱分析图。

滑动窗频谱分析具有如下特点:

- (1)滑动窗频谱特征反映了测井曲线在某一深度段内的主频范围;
- (2)滑动窗频谱特征主要受沉积物沉积速率和沉积持续时间控制;
- (3)滑动窗频谱特征与自然伽马值的绝对大小基本无关,即与是正旋回还是反旋回无关;
- (4)自然伽马曲线变化剧烈处即层序界面在滑动窗频谱分析图上一般有明显反映。

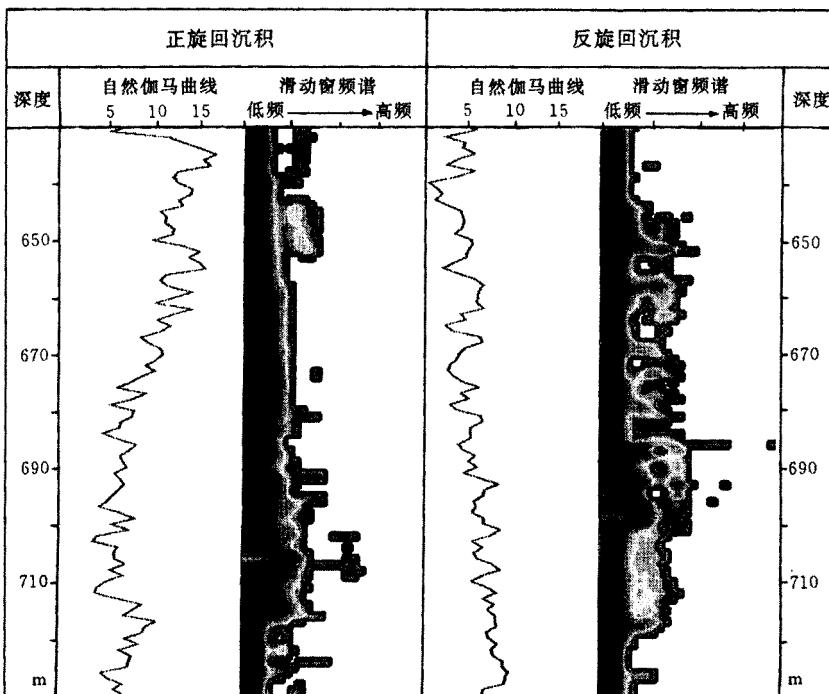


图3 正旋回和反旋回的滑动窗频谱分析图

测井资料的深度域频谱分析在高频层序划分中的应用

由于层序地层学所研究的不仅仅是沉积物的外部构造(主要是层理界线),而且侧重于对沉积物内部结构以及沉积过程本身进行分析,因此测井资料的深度域频谱分析成为层序地层学研究特别是高频层序划分的重要方法之一。

由于高频旋回所导致的层序界面比较模糊,或遭受侵蚀,在地震剖面上不整合特征不够明显,因此高频层序的划分主要依靠测井及岩心资料来进行层序界面的识别。比如,从砂岩到泥岩的沉积旋回反映了一个水体从浅逐渐变深的过程,对应于一次湖泛事件到下一次湖泛事件之间的沉积组合。这种特征在对应的地震剖面上受分辨率的限制使层序界面的特征不明显,并在地震道的时频分析图上亦不能分辨出与之对应的旋回特征。但从对测井曲线进行深度域频谱分析所得到的频率扫描和滑动窗频谱分析图上可明显地观察到高频旋回变化的存在并能

物探研究

对高频层序界面进行准确标定。图4为三连盆地阿南凹陷H20井的深度域频谱分析与高频层序划分对比图,从该图上可以发现频谱图上的地层旋回特征非常明显,并且能够非常准确地标定层序界面。

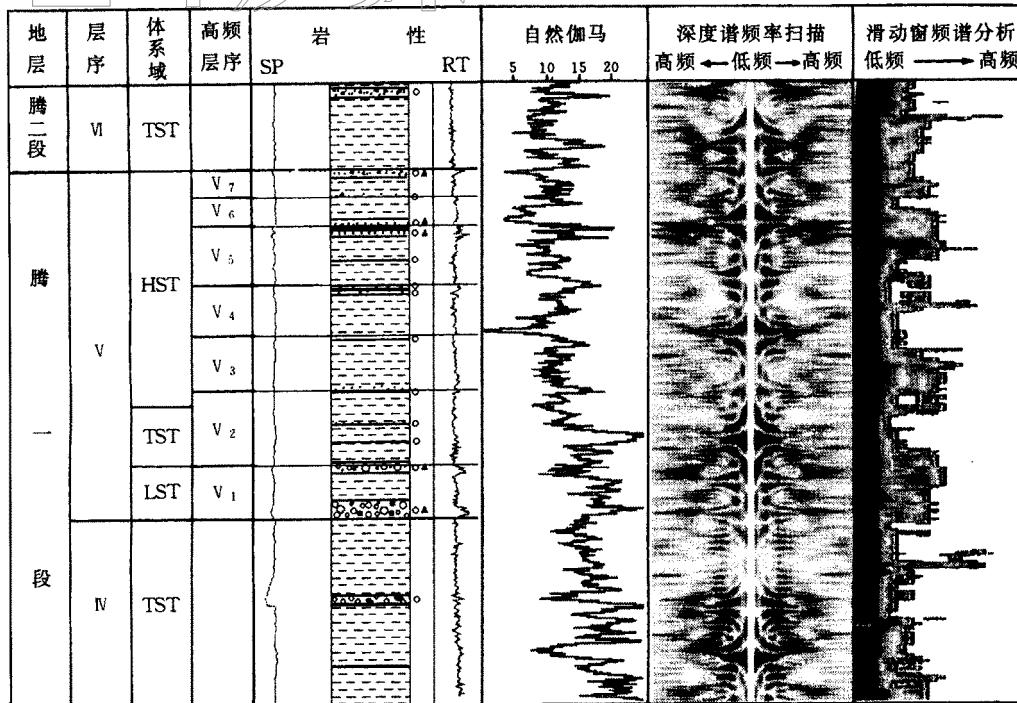


图4 阿南凹陷H20井深度域频谱分析与高频层序划分对比图

深度域频率扫描是在时间域频谱分析(又称时频分析)的基础上发展而来的,其主要作用是用来准确划分层序界线,识别层序(沉积旋回)类型。而滑动窗频谱分析可用来计算沉积速率和沉积持续时间。但由于沉积速率和沉积持续时间均为待求参数,不可能分别求得,因此滑动窗频谱分析实际求得的是沉积速率和沉积持续时间的乘积——沉积厚度。

从理论上来说,只要自然伽马曲线准确,用深度域频率扫描进行层序划分也是准确的,针对不同规模的层序分析和详细程度,可调整滤波器的基本频率范围和步长;而滑动窗频谱分析则不可能非常准确,这是因为每一段沉积记录不可能完全保存着古气候变化所留下的旋回性信息,或者由于层序规模太大或太小而带来的旋回信息重叠或遗漏等。

结 束 语

测井曲线的深度域频谱分析方法是建立在傅里叶变换基础上的一种检测沉积旋回及其沉积特征的有效手段,它们的应用使沉积旋回类型的判定和划分从定性达到定量和半定量的水平,甚至可以通过软件实现沉积层序的自动划分;同时,将测井资料的深度域频谱分析方法用于层序地层学研究大大提高了小规模旋回的识别。

测井曲线的深度域频谱分析方法在三连盆地阿南凹陷层序地层学研究中得到了初步应用,取得了较好效果。

石油地球物理勘探

参考文献

- 1 Броцов Л Ю 等著,李乐天译.层系结构解释中地震资料时间谱的分析方法.国外油气勘探,1990,2(1):56~64
- 2 Creaney S 等著,吉利民译.层序地层构架中总有机碳和油源岩质量模型的建立.石油地质,1994,10(3)
- 3 程乾生.信号数字处理的数学原理,石油工业出版社,1993
- 4 威尔格斯 C K 等著,徐怀大等译.层序地层学原理(海平面变化综合分析),石油工业出版社,1993

(本文编辑:聂升华)

(上接第 44 页)

参考文献

- 1 欧庆贤.欧庆贤石油物探文选.石油工业出版社,1995
- 2 李庆忠.地震高分辨率勘探中的误区与对策.石油地球物理勘探,1997,32(6):751~783
- 3 李套山,钱绍瑚等.虚反射信息的采集及其形成机制、频率响应的理论探讨.石油物探,1997,36(4):38~44
- 4 俞寿朋.高分辨率地震勘探.石油工业出版社,1993
- 5 钱绍瑚,李套山等.炸药震源爆炸机制及激发条件的研究.石油物探,1998,37(3):1~14
- 6 李套山,刘振夏,钱绍瑚.细长药柱震源试验.石油物探信息,1997-07-01
- 7 商建瓴,潘方峰.钱绍瑚等.常规与面元细分三维观测系统浅析.石油地球物理勘探,1997,32(5):709~716
- 8 李庆忠.走向精确勘探的道路——高分辨率地震系统工程剖析,石油工业出版社,1993
- 9 钱绍瑚,李套山等.地层吸收衰减模型的制作及其补偿方法的研究.石油地球物理勘探,1998,33(增刊1):18~24
- 10 李庆忠.高频随机噪声的三分量测定.石油物探,1998,37(1):1~13

(本文编辑:冯杏芝)