

小波变换在高分辨率层序地层划分中的应用

寻知锋¹,余继峰²,张霞³,秦泗伟³,田文琴¹

(1.山东省日照市国土资源局,山东日照 276826;2.山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛 266510;3.山东省第八地质矿产勘查院,山东日照 276826)

摘要:该文秉承前人运用测井数据的连续小波变换进行层序地层划分的依据和思路,详细论述了测井数据连续小波变换进行高分辨率层序地层划分的具体步骤。以济阳拗陷某钻井C-P地层的测井数据为研究实例,重点探讨了测井数据连续小波变换中参数选取(小波基、最大变换尺度值和不同尺度下小波系数尺度值)的不同得出的连续小波变换波谱图和系数曲线对层序地层划分的影响;依据优选出的各种相关参数,对消除噪声以后的测井数据(自然伽马)进行连续小波变换及高分辨率层序地层划分,共划分为5个长期基准面旋回,35个短期基准面旋回。增加了应用测井数据连续小波变换进行高分辨率层序地层划分的可靠性。

关键词:连续小波变换;层序地层;测井数据;济阳拗陷;尺度设置

中图分类号:P53 **文献标识码:**B

引文格式:寻知锋,余继峰,张霞,等.小波变换在高分辨率层序地层划分中的应用[J].山东国土资源,2017,33(9):77-81.XUN Zhifeng, YU Jifeng, ZHANG Xia, etc. Application of Wavelet Transform in High-Resolution Sequence Stratigraphic Classification[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(9): 77-81.

0 引言

测井数据是连续性好、分辨率高的地质数据之一。随着科学技术的发展,测井设备和结果也得到相应的改善,这为高分辨率层序地层学的研究提供了条件。传统的高分辨率层序划分主要是根据各级层序界面在钻井剖面上的识别标志及测井曲线上的响应特征进行定性的划分,这种划分结果人为因素影响很大^[1]。小波变换作为时频分析工具,有良好的时频域分析特性。利用连续小波变换可以将测井数据从一维深度域转换为二维深度域(尺度域),并在多尺度下呈现不同级别的旋回性。测井数据的连续小波变换作为一种手段应用于沉积单元的界面分析、处理和解释测井资料、进行测井层序地层的划分。

自从余继峰等^[2-3]探讨了测井数据小波变换的地质意义后,小波变换应用于测井层序地层研究备受关注。根据中国知网上查询统计,自2010年以来以测井数据小波分析和层序地层为题的论文刊出

60余篇,对应用测井数据小波变换进行了高分辨率层序地层研究^[4-15]。

然而测井数据小波变换进行高分辨率层序地层划分的应用仍然处在摸索阶段,应用层段的地质背景不同,研究工作的详细实施过程及参数选择也不同,研究成果之间缺乏可比性。发展完善测井数据的小波变换手段在层序地层学中的研究,需要进一步开展大量的数据试验研究。该文在论述测井数据小波变换进行层序划分中涉及到关键步骤的基础上,对济阳拗陷C-P地层测井数据进行了小波分析,据此进行了多尺度高分辨层序地层划分,为测井数据小波变换的参数选择及研究区目标层段的层序地层研究提供了更多的参考。

1 测井数据小波变换划分层序的依据

测井数据经过一维连续小波变换后,可以得到一系列与尺度和深度对应的小波变换系数值。由多个不同周期沉积旋回叠加的测井曲线,通过观察小波时频能量图局部能量团的变化和多种伸缩尺度的

收稿日期:2017-01-05;修订日期:2017-03-28;编辑:陶卫卫

作者简介:寻知锋(1984—),男,山东莘县人,工程师,主要从事地质找矿方向科研研究、矿产资源管理工作;E-mail: xunzf123@163.com

周期性震荡特征,可分析地层的旋回性并与各级层序界面建立对应关系^[16]。

识别不同尺度层序界面的方法是:首先参照时频色谱图反映的概貌信息,也就是同一尺度上相同的颜色代表同一时期形成的沉积地层;再者根据连续小波变换系数曲线中同一尺度旋回内小波系数振荡趋势相似的原则,从大到小进行划分,依次识别出层序界面和层序内部划分出的基准面旋回界面;最后再依据钻孔的岩心资料对划分出的界面位置加以适当校正,达到准确划分不同级别层序界面的目的。

小波变换尺度值越大表示对应信号的长周期分量,表明该沉积周期长,地层旋回厚度大,可用来划分层序界面;反之尺度值越小表示对应信号的短周期分量,表明该沉积周期短,对应地层旋回厚度小,可用来划分体系域和基准面旋回^[17]。

2 应用实例

2.1 测井曲线的选择

该文研究的对象是济阳坳陷^[18-19]某钻井的 C-P 地层,选取该井的 GR 测井数据进行重点分析,自然伽玛(GR)测井是在井内测量岩层中的放射性元素(主要为 40K, 232Th, 238U)原子核衰变过程中放射出来的伽玛射线的强度。粘土颗粒细,比表面积大,吸附放射性元素的能力强,砂层则弱。地质上用以确定砂泥比或粒度中值和含砂量。与其他测井曲线相比,自然伽玛(GR)曲线能敏感地反映地层泥质含量的变化,与层序界面识别密切相关。

2.2 测井数据的消噪

在运用 GR 测井数据进行一维连续小波变换前,需对其进行预处理。在各种数据分析技术中,难以避免的问题是数据中存在着不易消除的噪声。噪声是一种不确定的随机现象,严重时还会淹没正常的信号,影响数据分析结果。因此,必需消除信号中夹杂的噪声。该文采用小波分析消噪方法,其有多分辨率的特点,在时间域和频率域都具有表征信号局部特征的能力,能同时在时频域对信号进行处理,因此能有效区分信号中的突变部分和噪声,从而实现信号的消噪。

2.3 测井数据一维连续小波变换

2.3.1 小波基的选取

小波基也称小波母函数。在工程应用中,小波

分析的一个十分重要的问题就是最优小波基的选择问题,因为用不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果。目前在利用连续小波变换划分层序地层应用中主要是通过测井数据的小波变换结果与层序地层界面的判断来判定小波基的好坏,在连续小波变换中用得最多的是 Mexican Hat(墨西哥帽)小波和 Morlet 小波作为小波母函数。通过对比研究,该文选取的小波基是 Morlet 小波,它是一个周期函数,并且是 Gauss 带包络调制的谐波,更适合旋回性信号的分析。

2.3.2 尺度设置

在执行测井数据 GR 一维连续小波变换的过程中,尺度设置是一个很重要的步骤,该文最小尺度和步长都设置为 1,是为了在各个尺度上都有所表达;最大尺度值是一个不确定的数值,根据测井数据的个数确定最大尺度值,其值一般为测井数据个数的 $1/3 \sim 1/4$ 之间,(最大尺度值一般为 2 的 n 次方),最大值的设置如果过大测井数据一维小波变换后得不到一个旋回,就没有地质意义,如果过小则会损失掉大的旋回,得到不完整的结果。测井数据的个数是由测井深度和采样间隔来确定的。

图 1 中部分是原始测井信号 GR 经过预处理后的结果,横坐标表示深度,纵坐标表示幅值大小;中间和下部分横坐标表示的深度序列个数(b),纵坐标表示的是变换尺度(a)。该钻井 C-P 段的测井数据厚度是 576.681 m,其采样间隔经过重采样处理后为 0.609 m,所以测井数据的个数为 947 个,最大尺度值为测井个数的 $1/3 \sim 1/4$ 之间,同时又一般为 2 的 n 次方,故该文最大变换尺度选择的是 256 (2 的 8 次方)。

2.3.3 小波系数尺度值的选择

测井数据经过一维连续小波变换后就意味从一维的深度序列投影到二维的深度—尺度相平面上,有利于提取测井信号的某些本质特征。该文主要研究变换尺度究竟取何值时来识别地层序列中不同周期的沉积旋回,这是利用测井数据小波变换方法划分层序地层的—个关键问题。

测井数据通过小波变换后得出了小波系数尺度值。小波系数尺度值是一个矩阵,行数等于小波变换尺度设置中的最大值,列数则为信号的个数。小波系数各个尺度值(即矩阵的每一行)首先求绝对值然后再求其平均值,得出小波系数尺度值的模平均

值。即利用小波变换在不同变换尺度 a 处对深度序列 b 作模平均值,如图 2 所示,横坐标表示的是变换尺度 a 的大小,纵坐标表示的是不同变换尺度 a 作模后的平均值。对不同变换尺度 a 处的模平均值求极大值,根据极大值的位置,便可确定该测井数据中不同频率成分所对应的最佳尺度因子 a 的大小。通

过对理想信号小波系数尺度值的选择的试验结果可知^[20],图 2 中能够看出该测井信号不同频率成分的最佳小波尺度分别为 37,119 和 231。即用 $a=37$ 来划分基准面旋回,用 $a=119$ 来划分体系域,用 $a=231$ 来划分层序。

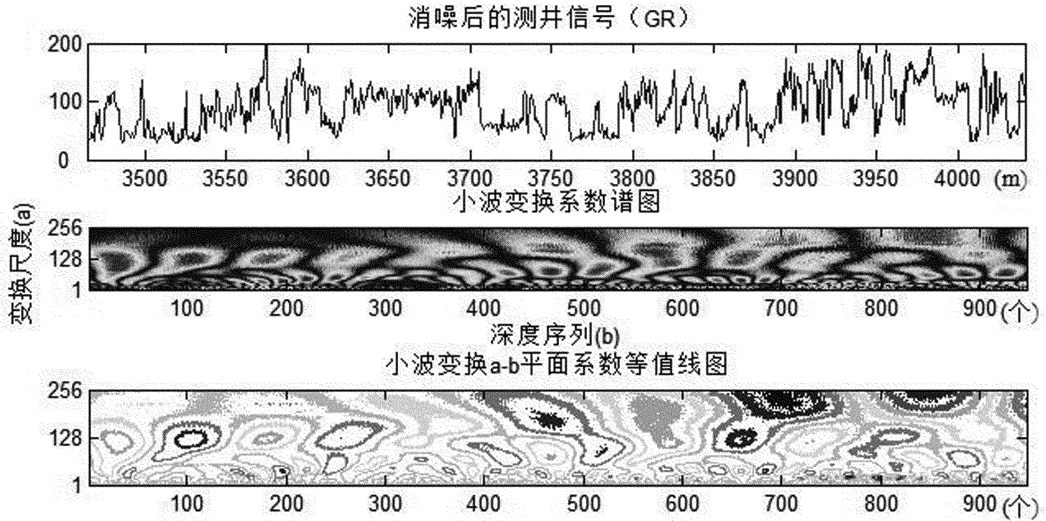


图 1 测井信号 GR 连续小波变换图

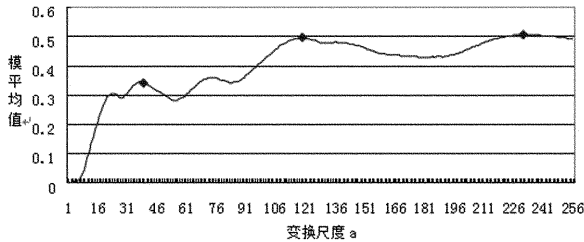


图 2 小波变换在不同尺度值下的模平均值

2.4 层序划分

该文主要应用自然伽马(GR)数据的 Morlet 小波基进行连续小波变换结果,综合录井岩性及声波时差(AC)和自然伽马(GR)原始曲线进行高分辨率层序地层划分研究。根据上述分析结果,选取尺度分别为 231,119,37 的小波系数曲线作为划分层序、体系域和基准面旋回的参考曲线,结合小波系数谱图中过零线(小波系数谱图中的暗线)的走势,以该零线作为划分基准面旋回的边界,其代表着多尺度范围内的多频突变线。依此方法将济阳坳陷该钻井 C-P 地层划分出 5 个层序,35 个基准面旋回,与经典层序地层研究结果具有一致性(图 3)。

3 结论

该文应用测井数据小波变换方法对济阳坳陷的某钻井 C-P 纪(3 464.89~4 042.18 m)地层进行高分辨率层序划分,共划分出 5 个层序,35 个基准面旋回,与用经典方法得到层序地层格架具有一致性,而且地层划分的垂向分辨率更高。

在总结不同测井曲线和不同小波波形的选取匹配拟合后,选取 Morlet 小波在地层多级旋回周期的分析识别中取得较好效果。在测井数据小波变换尺度设置中,最大尺度值可选在测井数据个数的 $1/3 \sim 1/4$ 之间,其中测井数据个数是由采样间隔和测井数据的地层厚度所决定的。在该尺度区间内,计算不同尺度下的模平均值的极大值,极值点处的尺度就是多级旋回分辨的最佳变换尺度值,按照不同极值点尺度下的小波变换系数值来分别划分层序和基准面旋回,使得测井数据小波变换方法在划分高分辨率层序地层研究中更加客观,定量化程度也更高。

小波分析的实际应用为高分辨率层序地层学研究提供了新的思路,为定量描述沉积旋回和识别层序界面等特征提供了新工具。

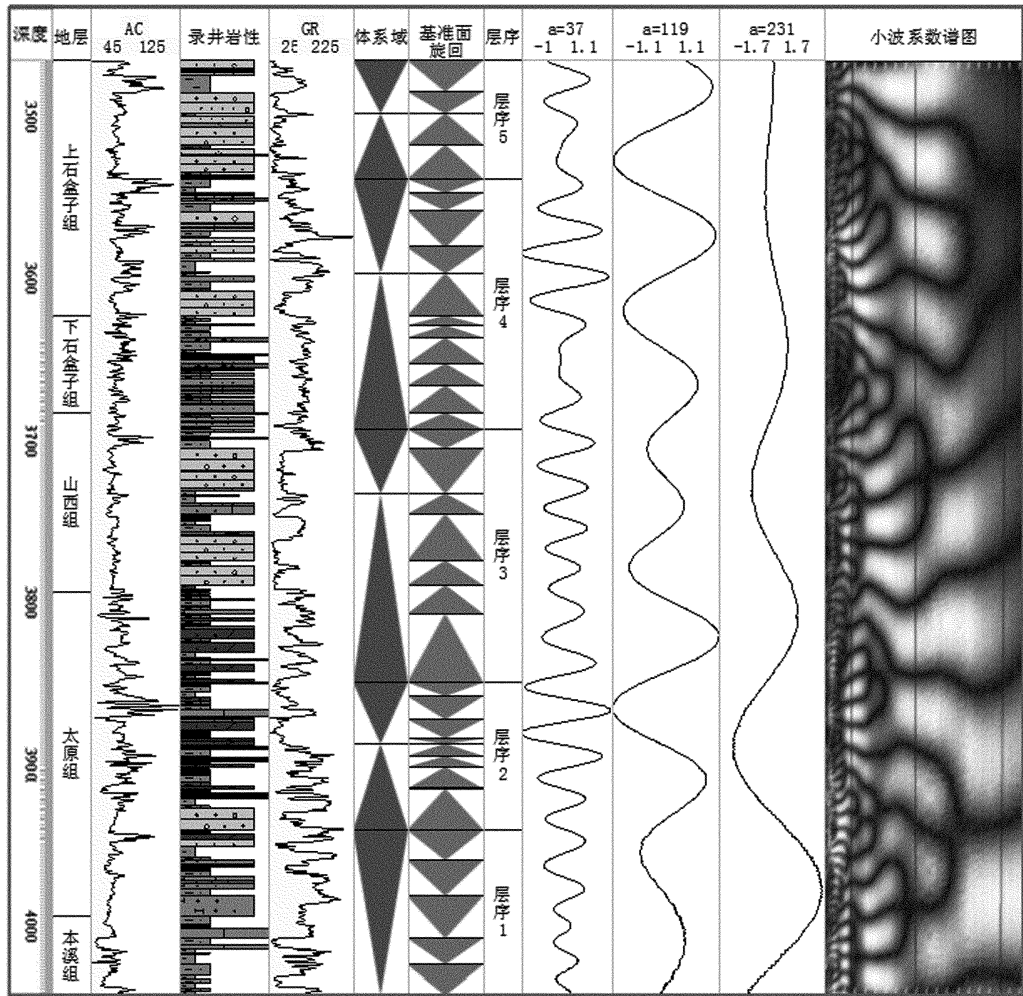


图 3 测井数据小波变换划分层序地层结果图

参考文献:

- [1] 邓宏文,王红亮,祝永军.高分辨率层序地层学——原理及应用[M].北京:地质出版社,2002:243-244.
- [2] 余继峰,李增学.测井数据小波变换及其地质意义[J].中国矿业大学学报,2003,32(3):336-339.
- [3] 余继峰,陆表海聚煤盆地沉积层序特征多分辨率识别及其方法研究——以山东沉积区 C-P 地层为例[D].徐州:中国矿业大学,2003.
- [4] 何欣,卢双舫,张学娟,等.小波变换在高分辨率层序地层划分中的应用[J].内蒙古石油化工,2010,36(6):93-95.
- [5] 王亚辉,赵鹏肖,左倩媚,等.测井信号小波变换在层序地层划分中的应用——以南海北部莺歌海盆地 D14 井黄流组为例[J].沉积与特提斯地质,2011,31(4):58-63.
- [6] 王艳忠,操应长,远光辉,等.小波分析在深水砂砾岩和泥页岩地层层序划分中的应用[J].天然气地球科学,2012,23(2):251-258.
- [7] 赵淑娥,王华,刘小龙,等.基于测井数据的高精度层序地层定量划分方法及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):233-240.
- [8] 姜虹.测井曲线小波变换在层序地层划分中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2014,(6):132-134.
- [9] 寻知锋,余继峰,王光栋,等.测井数据的主成分小波变换在层序地层划分中的应用[A]//2015 地学新进展——第十三届华东六省一市地学科技论坛文集[C],2015.
- [10] 贺聪,苏奥,吉利明,等.SP 测井小波变换在单井层序划分中的应用[J].特种油气藏,2015,(6):25-29.
- [11] 李雪梅,武爱华,乔田玲.基于测井数据小波变换和 Hilbert-Huang 变换的地层层序划分与对比[J].山东农业大学学报(自然科学版),2015,(6):887-891.
- [12] 吴淑玉,刘俊.基于时频分析的高分辨率层序地层[J].海洋地质与第四纪地质,2015,(4):197-207.
- [13] 柳慧敏,李立尧,柳琳琳.基于测井数据的层序地层划分方法综述[J].科技创新与应用,2016,(21):143-143.
- [14] 李翔,刘招君,赵汉卿.小波时频分析技术在松辽盆地陆相深水沉积层序地层单元划分及等时对比中的应用[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(29):24-27.
- [15] 赵庆令,李清彩,田光彩,等.基于主成分分析的济宁市环境承载力研究[J].山东国土资源,2016,32(1):51-55.

- [16] 陈钢花,余杰,张孝珍.基于小波时频分析的测井层序地层划分方法[J].新疆石油地质,2007,28(3):355-358.
- [17] 徐本燕.基于测井信息提取的煤成气储层评价研究[D].青岛:山东科技大学,2007.
- [18] 杨其栋,魏欣伟,王峰,等.济阳拗陷馆陶组层序地层研究[J].山东国土资源,2014,30(1):8-12.
- [19] 贾强,赵坤,牛金,等.梁山煤田高分辨率层序地层与聚煤规律研究[J].山东国土资源,2014,30(6):16-19.
- [20] 寻知锋.测井数据小波分析和层序地层划分研究[D].青岛:山东科技大学,2009.

Application of Wavelet Transform in High-Resolution Sequence Stratigraphic Classification

XUN Zhifeng¹, YU Jifeng², ZHANG Xia³, QIN Siwei³, TIAN Wenqin¹

(1. Rizhao Bureau of Land and Resource, Shandong Rizhao 276826, China; 2. Geological Science and Engineering College of Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266510, China; 3. No.8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Rizhao 276826, China)

Abstract: Based on the arguments and thoughts put forward by other researchers in applying wavelet transform of well logs in sequence stratigraphic classification, the steps of wavelet transform of well logging data in high resolution sequence stratigraphic classification have been introduced in detail. Taking C-P stratum logging data from a certain well in Jiyang depression as an example, the influence of different scalograms and wavelet coefficients to sequence stratigraphic classification caused by different parameter selections (wavelet mother function, maximum scale factor and wavelet coefficients under certain scale) have been studied. According to the optimized correlation parameters, the well logging data have been carried out continuous wavelet transform and high resolution sequence stratigraphic division after eliminated noise (GR). It can be divided into 5 long-term cycles and 35 short-term cycles. The reliability of high resolution sequence stratigraphic classification is improved by using continuous wavelet transform of well log data.

Key words: Continuous wavelet transform; sequence stratigraphy; well-logging data; Jiyang depression; scale setting