

小波分析在高分辨率层序地层研究中的应用

赵军龙¹, 谭成仟^{1,2}, 李娜¹, 李庆春¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 为了研究测井曲线小波变换用于高分辨率层序地层研究的方法效果, 从小波系数模极值点、过零点与信号突变点数学关系出发, 分析高分辨率层序地层研究对测井曲线划分不同级别层序的要求, 探讨了测井小波变换最佳分解级次和适于测井曲线分层的小波函数选择, 以一取心率高钻孔为例, 用2种小波函数对4种测井曲线进行小波变换和高分辨率地层界面解释。研究表明, 选择恰当窗宽小波函数决定测井曲线小波分层精度, 测井数据 sym6 小波分解的小层界面划分效果要稍好于 db4 小波; GR、RT 曲线正则性小波分解可以很好地满足高分辨率层序地层划分要求; 测井曲线小波分层结果与岩心分析结果一致性好。

关键词: 小波系数模; 过零点; 突变点; 高分辨率层序; 分层; 测井曲线

中图分类号: P618.13; TE121.3⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)01-0090-05

Application of Wavelet Analysis in High Resolution Sequence Analysis

ZHAO Jun long¹, TAN Cheng qian^{1,2}, LI Na¹, LI Qing chun¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract For the purpose of studying the method and effect of logging curves wavelet transform in high resolution sequence research, this paper analyzes the demand for high resolution sequence study according to the logging curves in different gradation sequences demarcation, researches the optimum decomposition gradation of wavelet transform in logging curve and the choosing of optimum wavelet function. Taking a hole in Ordos basin which is a good coring hole as an example, it makes the wavelet transform on four curves with two wavelet function. The study indicates that optimum windows width determines the layering precision, interface partition with sym6 wavelet is better than with db4. It also show that canonical wavelet decomposition of GR and RT satisfies the demand, and layering with wavelet correlate well with core analysis.

Key words: wavelet coefficient module; zero crossing point; discontinuity point; high resolution sequence; demarcation; logging curve

0 引言

高分辨率层序地层分析中, 层序划分主要依据其界面物理属性^[1]。测井数据是迄今为止对地层分辨率最高的物性数据。现有方法可以解决一些地质问题, 但难以模拟“由粗到细, 逐级分层”人工测井解释, 往往在一个视觉层次上就完成了

全部地层划分工作, 使地层的整体信息与局部信息混合在一起, 难以分辨清楚^[2]。现有研究成果^[2-7]中提出用小波变换系数极大点对测井信号进行分层、用小波系数震荡点来揭示不同旋回的变化面等, 都很少涉及测井曲线小波变换用于高分辨率层序地层研究的实际方法效果。笔者基于前人研究, 借助于取心率高的钻孔测井曲线, 研究

收稿日期: 2006 06 23

基金项目: 国家 973 项目(2003CB214607)

作者简介: 赵军龙(1970), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 博士研究生, 从事能源与矿产地球物理研究。E-mail: zjl1970@163.com

不同曲线小波变换后的系数特征与不同级次层序界面之间的关系, 探讨小波分析用于高分辨率层序地层研究的方法。

1 小波系数模与信号突变点关系

设 $\theta(t)$ 是某一起平滑作用的二次可导低通平滑函数, 满足条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dx = 1$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0$, 并且定义 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 分别为 $\theta(t)$ 的一阶、二阶导数, 则函数 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 满足小波可容性条件, 可以作为小波母函数。

小波变换就是通过将原信号 $f(t)$ 同伸缩小波卷积得到^[8], 分别以 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波函数, 函数 $f(t)$ 在尺度 a 、位置 t 处的卷积型小波变换定义分别为

$$W_a^{(1)} f(t) = f * \psi^{(1)}(t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi^{(1)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau$$

$$W_a^{(2)} f(t) = f * \psi^{(2)}(t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi^{(2)}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau$$

由 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 的定义得

$$W_a^{(1)} f(t) = f * (a \frac{d\theta_a}{dt})(t) = a \frac{d}{dt}(f * \theta_a)(t)$$

$$W_a^{(2)} f(t) = f * (a^2 \frac{d^2 \theta_a}{dt^2})(t) = a^2 \frac{d^2}{dt^2}(f * \theta_a)(t)$$

由于 $f * \theta_a(t)$ 可以看成是低通平滑函数 $\theta(t)$ 在尺度 a 下对函数 $f(t)$ 进行平滑的结果, 因此, 小波变换 $W_a^{(1)} f(t)$ 与 $W_a^{(2)} f(t)$ 分别是函数 $f(t)$ 在尺度 a 下由 $\theta(t)$ 平滑后再取一阶与二阶导数。当小波函数看作某一平滑函数的一阶导数时, 信号小波变换模的局部极值点对应于信号的突变点(或边缘); 当小波函数看作某一平滑函数的二阶导数时, 信号小波变换模的过零点则对应于信号突变点(或边缘)^[8]。

通常情况下, 信号的奇异性可分为: ①信号在某一时刻, 其幅值发生突变, 引起信号不连续, 信号突变处是第一种类型的间断点; ②信号外观上很光滑, 其幅值没有突变, 但是在信号一阶微分上有突变产生, 且一阶微分是不连续的, 称为第二种类型间断点^[9], 两类间断点都可以通过小波变换进行检测和识别。一般层序界面是物性突变面, 对应测井曲线有一定的突变, 呈现为两种类型间断的复合, 故可采用小波变换系数模的局部极大值或者过零点来进行测井曲线的高分辨率层序分析。

2 小波变换用于层序地层研究的方法

2.1 高分辨率层序地层研究对测井曲线分层的要求

高分辨率层序地层分析以三维露头、岩心、测井和高分辨率地震反射剖面资料为基础, 运用精细层序划分和对比技术, 将钻井的一维信息变为三维地层关系预测的基础, 建立区域油田乃至油藏级储层的成因地层对比格架, 对储层、盖层及生油层分布进行评价及预测^[1]。高分辨率层序作为一次海平面升降旋回的沉积响应, 其分级单位仍是层序, 它具有常规层序一般属性, 并在控制生、储层分布及圈闭岩性分类中具有重要作用。层序是由不整合面或与不整合面对应的整合面作为边界、一个相对整合、有内在联系的地层序列。准层序是层序构成单元, 而纹层、纹层组、岩层及岩层组是准层序基本组成单位^[10-12]。与高分辨率层序地层学有关的高频地层周期约为 $1 \text{ a} \sim 0.5 \text{ Ma}$, 厚度变化仅几米至几百米^[10], 是气候变化和高频短周期海平面变化的综合产物。这些层序单元只有依靠测井和岩心资料进行划分。

要实现高分辨率层序地层划分, 就要根据层序地层学原理的特点, 通过由粗及细、由宏观到微观不同尺度研究才能取得合理地质解释。对不同尺度地质体的研究又必须基于与该尺度相对应的合适研究方法, 其核心是确定关键界面及其围限地层层序类型和级别。

与地震资料相比, 测井资料虽然仅是岩石垂向物性变化的反映, 但其较高分辨率和定量化水平显示了其优势, 常用测井曲线主要包括自然伽马、电阻率、自然电位、声速时差和井径等。层序界面及体系域界面在测井曲线上通常表现为测井值突变和测井曲线上的波峰和波谷^[1, 10], 而穿过体系域的测井曲线则表现为系统变化样式。层序界面识别是高分辨率层序地层学研究基础, 只有将层序边界找准, 后续所做层序对比、层序内部细分及层序演化特征研究才很可靠。高分辨率层序研究的层序划分主要依靠其界面物理属性差异。通常, 由于有些地质与地球物理信息受到外界条件干扰, 直接根据测井曲线进行地层划分。不同级别层序界面划分往往在一个视觉层次上进行, 无法实现高分辨率要求的不同级别层序识别与划分。小波变换具有良好的时间和尺度特性, 对测井曲线实施小波变换后, 曲线上不同频率(周期)信号在相应尺度上清晰

展示出来, 可以实现由粗及细、不同级次层序地层界面划分和测井相研究, 为运用测井信息实现高分辨率层序地层研究提供了良好的技术保证。

2.2 测井曲线小波变换级数和小波选择

小波分解级次不同、尺度不同, 可以揭示不同周期特征的地层层序信息, 但分解级次并不是越多越好, 恰当的小波分解级数可以实现解决问题和节约资源双重目标。根据高分辨层序地层研究要求, 依据采样定理可以确定适于高分辨率层序地层研究的小波分解最大层数。

根据数字信号采样定理^[13], 对一个带限连续信号, 采样频率 f_s 必须大于或者等于信号最高频率 f_{\max} 的 2 倍, 这样采样后的离散信号才可以完全恢复为原来的连续信号。

通常, 测井信号采样间隔为 0.125 m, 每米采样点为 8 个。当某地层厚度为 h 时, 则可采样点为 $8h$, 即该层最小周期为 $8h$, 最大频率为 $1/8h$, 对某种基本窗宽为 l 小波而言, 当其尺度为 a 时对信号进行小波变换, 相当于用宽为 al 的窗进行采样和滤波, 依采样定理有 $1/al \geq 1/4h$, 即有 $a \leq 4h/l$ 。这样的 a 是识别和划分最小厚度地层的最大小波尺度。根据高分辨率层序地层研究中层序分级要求, 选择窗宽为 N 点的 Daubechies 或 Symlet 小波函数可计算相应的最大(优)小波分解级数(表 1)。

表 1 高分辨率层序地层分析的最大小波分级

Tab. 1 Maximum Wavelet Gradation of High Resolution Sequence Analysis			
地层单位	层级定义	厚度/m	最大小波尺度
准层序	一组相对整合的有内在联系	20~100	$a_{\max} \leq 80/N$
	的岩层或者岩层组, 以海泛面及相应界面为界		
岩层组	界面上下岩层成分、结构或沉积构造不同	5~30	$a_{\max} \leq 20/N$
岩层	一组相对整合、有内在联系的纹层或纹层系列	1~5	$a_{\max} \leq 40/N$

从表 1 可以看出, 小波变换所用小波函数的窗宽对最大小波分级数有直接影响。所选择小波函数窗宽越大, 则能分辨的最小层厚度将变大, 即在测井信息采样率一定前提下, 选择恰当窗宽的小波函数决定测井曲线小波分层的精度。

通常, 岩层组和准层序界面在测井曲线上主要表现为第一类突变点特征, 即界面处曲线幅度变化较大, 但薄岩层或者一个中等厚度岩层中的非均

质薄层的界面却表现为第一类和第二类突变点的复合, 进行这样的层序界面识别和划分, 必须选择具有正侧性小波来进行测井曲线小波变换, 反之将无法检测出第二类突变界面。可用于高分辨率层序地层分析的小波主要有 Daubechies 小波、Symlet 小波以及 Coiflet 小波等^[8,9], 但 Daubechies 或 Symlet 小波函数窗宽相对小, 更适合划分较薄岩层。笔者主要选择 Symlet、Daubechies 小波来进行高分辨率层序地层分析研究。

3 测井曲线小波系数对层序特征的解译

为了研究测井曲线小波系数与不同级别层序地层特征之间的关系, 笔者选择鄂尔多斯盆地西北部 Z4 孔, 该孔取心率高(87%), 便于将测井曲线小波系数模极值点或过零点与真实层序界面(岩心分析得到)对照分析。岩心地质分析确定的层系界面深度见表 2。该孔自然伽马(GR)、电位电阻率(RT)、密度(DEN)、声波(AC)曲线质量可靠, 对地层剖面反映灵敏, 可用于地层层序分析。测井小波分析数据处理基于 Matlab 7.0 平台^[9,14]。

表 2 Z4 孔岩心地质分析划分层系界面结果

Tab. 2 Results of Layer Demarcation in Core of Z4					
界	系	组	确定顶界深度/m	确定厚度/m	小波分析确定顶界面/m
新生界	第三系	N ₃	11.00	241.0	10.0
		K ₂	252.00	76.30	252.0
		K ₁	328.30	58.50	328.4
中生界	侏罗系	J ₂ Z	386.80	59.10	386.8
		J ₁ Y	445.90	38.50	445.9
		T ₃ Y	484.35		484.4

3.1 小波系数模过零点对组系界面的反映

分别选择 db4 和 sym6 小波对 100~500 m 井段 GR、RT、DEN、AC 曲线进行小波分解, 利用 Matlab 7.0 中小波系数重构函数得到了 1~6 层的逼近信号和细节信号, 部分结果见图 1~图 3。界面划分主要参考小波系数模极值点、依据模过零点。由于不同测井曲线物性基础不同, 所以, 曲线对不同级别界面、层面敏感性有差异。研究表明, 用小波逼近信号 a5、a6 可以划分“系”界面, 用细节信号 d3 可以准确地划分“组、小层”界面。GR、RT、DEN、AC 的小波逼近信号适宜进行“系”界面划分, GR、RT 划分层系界面效果优于 DEN、AC;

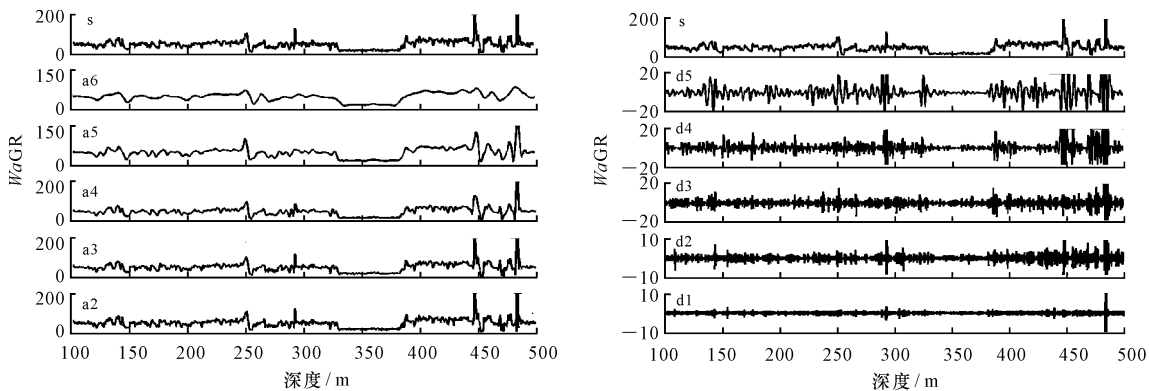


图 1 GR 小波系数的逼近(左)和细节(右)部分(db4 小波)
Fig.1 Approximation and Details of GR Wavelet Coefficients (db4)

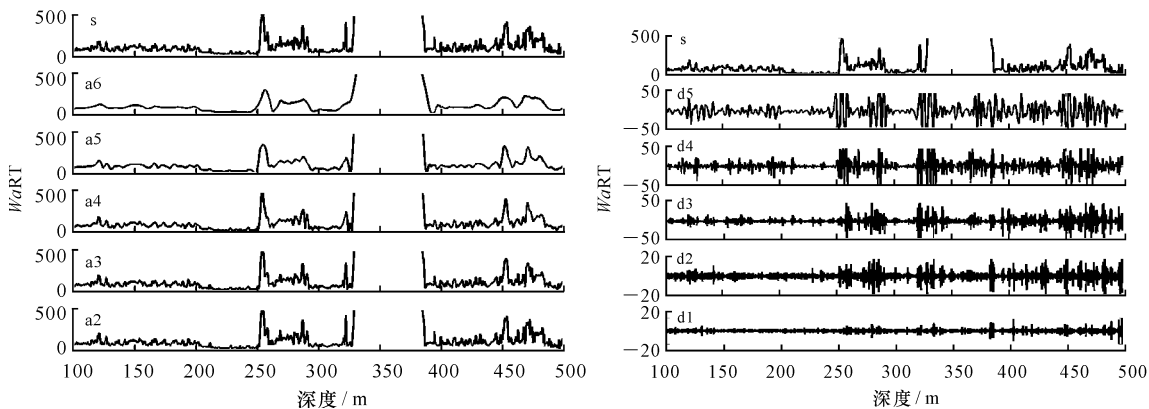


图 2 RT 小波系数的逼近(左)和细节(右)部分(db4 小波)
Fig.2 Approximation and Details of RT Wavelet Coefficients (db4)

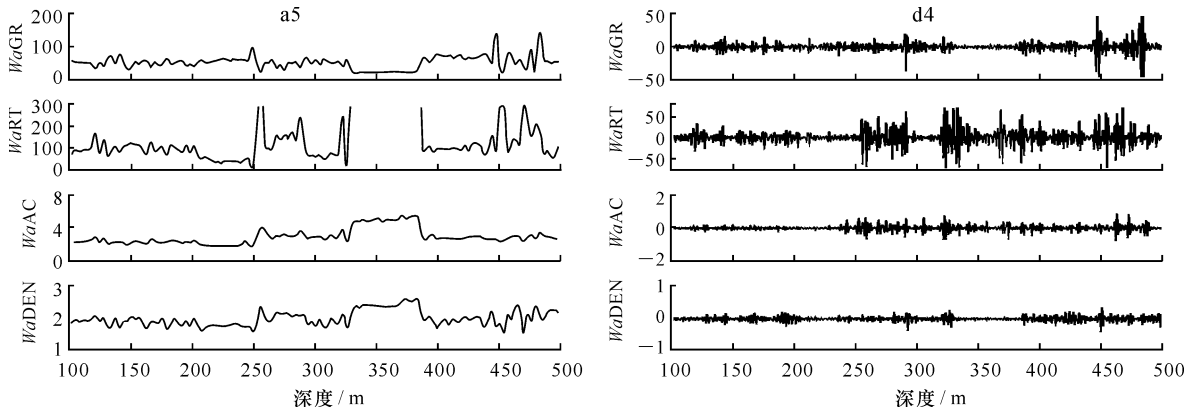


图 3 GR、RT、AC、DEN 小波系数组合解释层系界面(sym6 小波)
Fig.3 Merged Interpretation of GR, RT, AC and DEN Wavelet Coefficients (sym6)

GR、RT 的细节信号适于进行“组、小层”界面划分。2 种小波、4 条曲线对比结果见表 3。小波对该孔组、系界面划分结果见表 2, 可见, 测井曲线小波系数分层结果与岩心分析结果一致性好。

3.2 小波系数模的过零点对组内岩层界面的反映
在上述研究基础上, 分别用 db4 和 sym6 小波对 390~440 m 井段 GR、RT 曲线进行小波分解, 得

到了 1~6 层逼近信号和细节信号(图 4)。研究表明, 用 sym6 小波进行小层界面划分效果要稍好于 db4 小波。GR 曲线 sym6 小波系数 a2 和 d3 对层内非均质性反映明显, 但不适于小层划分, 而 a3 和 d5 对小层界面反映清晰可靠。GR 和 RT 曲线适于组内小层划分, 尤其是小波变换系数组合起来划分小层界面效果更好, 这样解译的小层界面数据与

岩心地质分析结果一致性好。以上原则用于较近的另一钻孔 Z8, 分层效果很好。

表 3 不同曲线不同小波系数划分组系界面比较

Tab.3 Comparison of Different Curves and Different Wavelet Coefficients

内容	Sym 6 小波系数	Db 4 小波系数
自然伽马	a5、a6 可识别 3 个“系”级界面及 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 界面	a4、a5 可识别 3 个“系”级界面及 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 界面 a6 可识别 3 个“系”级界面
(GR)	d3 可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面	d3 可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面
电位	a5 可识别 3 个“系”级及 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 界面。a6 可识别“系”级界面	a5、a6 可识别 3 个“系”级界面及 K_2/K_1 、 J_2Z/J_2Y 界面
电阻率	d3、d2 可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面	d4 可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面
(RT)	a5、a6 仅可识别 3 个“系”级界面	a5、a6 基本可识别 3 个“系”级界面
声波时差	d3、d4 基本可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面	d3、d4 基本可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面, 但划分较难
(AC)	a5、a6 仅可识别 3 个“系”级界面	a5、a6 基本可识别 3 个“系”级界面
密度	d3、d4 基本可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面, 效果欠佳	d3、d4 基本可识别 K_2/K_1 、 J_2Z/J_1Y 、 J_1Y/T_3Y 界面, 效果不佳
(DEN)		

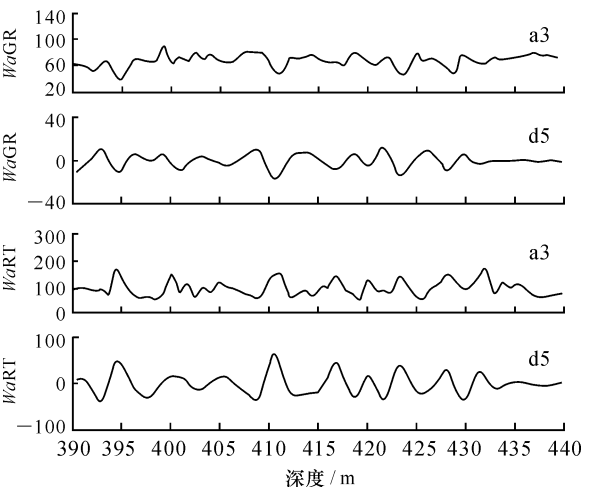


图 4 GR、RT 小波系数组合解释小层界面 (sym6 小波)

Fig.4 Thin Bed Boundary of GR and RT Wavelet Coefficients (sym6)

4 结语

(1)小波变换具有良好地时间和尺度特性,小

波分解后的测井信号可以实现不同级次层序地层界面划分和测井相研究。

(2)在测井信息采样率一定前提下,选择恰当窗宽小波函数决定测井曲线小波分层精度。

(3)用 sym6 小波进行测井数据小波分解,进行小层界面划分效果要稍好于 db4 小波。

(4)选用正则性小波对自然伽马、电阻率曲线进行变换,重构出的自然伽马测井曲线小波系数第 5、6 层逼近信号可以很好地用于系、组级界面划分,第 3 层细节信号更适于组界面划分。

(5)电阻率电位测井曲线小波系数第 5 层逼近信号可以很好地用于系、组级界面划分,第 2、3 层细节信号更适于组界面划分。自然伽马和电阻率曲线小波变换系数组合起来解释划分小层界面效果更好。

(6)声波时差和密度测井曲线小波系数重构出的第 5、6 层逼近信号仅可用于识别“系”界面,无法满足更小数量级的小层界面划分要求。

参考文献:

[1] 宋万超, 刘 波, 宋新民, 等. 层序地层学概念、原理、方法和应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

[2] 阎 辉, 李鲲鹏, 张学工. 测井曲线的小波特性在自动分层中的应用[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 568 573.

[3] 焦翠华, 李 冰. 零通小波用于测井曲线多尺度分层[J]. 测井技术, 1999, 23(3): 173 175.

[4] 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 84.

[5] 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.

[6] 朱剑兵, 纪友亮. 小波变换在层序地层单元自动划分中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 84 86.

[7] 陈新贵, 高 伟, 利 霞, 等. 小波分析在测井储层识别和划分中的应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 38 40.

[8] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[9] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[10] 纪友亮. 层序地层学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.

[11] 赵淑红, 朱光明. 短时傅利叶变换在研究沉积旋回地质体中的应用[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(2): 59 62.

[12] 胡夏嵩, 赵法锁. 运用层序地层学划分工程地质岩组新方法探讨[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(3): 55 59.

[13] 朱光明, 李庆春, 胡建平. 数字信号分析与处理[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 2003.

[14] 周 伟, 桂 林, 周 林, 等. MATLAB 小波分析高级技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.