

沃尔什变换在测井曲线分层中的应用研究

王祝文, 刘菁华

(吉林大学地球物理系, 长春 130026)

[摘要]在岩性复杂的变质岩地区实施的大陆科学钻探, 是通过采集井下不同深度岩石物理化学性质和物理场的各种数据, 研究地壳特征及演化过程的各种科学问题。利用测井资料达到岩性剖面的重建是大陆科学钻探的重要目的之一。文章利用沃尔什变换对钻孔岩性剖面进行分层, 大重建的岩性剖面结果可以看出, 该方法对于变质岩地区不同岩性的划分还是比较有效的。

[关键词]沃尔什变换 测井分层 大陆科学钻探

[中图分类号]P631.8, P631.8 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2003)04-0081-04

0 引言

了解岩性随深度变化, 也就是重建岩性剖面是大陆科学钻探的重要目的之一, 利用测井资料达到这个目的具有重要的现实意义^[1,2]。测井在垂向是连续的, 比岩屑录井获得的岩性剖面有更高的分辨率。要重建岩性剖面, 第一步是要进行分层。我们知道, 在利用测井资料判别岩性、划分储层和识别油气水层时, 首要的一项工作也是进行分层。而地层划分的目的是把地层由上至下切割成不同的片段, 划分出不同等级的地层单位, 即把一个地区的地层进行纵向划分。有关地层的划分有很多种, 其中最为常用的是利用测井曲线的微商极值分层。它可以模拟人工分层, 其数学模型虽然简单, 但与地质工作者惯用的分层方法很相似。较长时间以来, 测井分析工作者主要是根据测井曲线的形态变化特征及其与周围地层之间的差异特征进行人工分层。这种十分原始的手工分层方法, 不仅会由于不同测井分析工作者在使用分层曲线和掌握分层标准的不同造成分层结果的差异, 而且与当前测井计算机处理解释技术高度发展的现实极不相适应。自从上世纪60年代提出测井曲线的计算机自动分层以来, 到目前已发展了很多分层方法^[3-7]。这些方法所采用的数学模型大致可分为两类, 一类是借助于方差分析的概念, 把方差作为分层的指标, 例如方差分析法、马

氏广义距离法、最优极差分割法及最大似然估计法; 另一类是以测井曲线上相邻采样点测井数值的差异为依据, 用极值点或微商分层, 例如零通小波分层法。除此之外, 还有人曾用测井曲线活度指标、灰色关联度指标与分形分维值来进行分层。虽然目前有许多种方法可解决实际解释工作中的许多问题, 但它们离实际应用尚有一定差距, 其主要原因是难以模拟“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的划分工作, 使地层的整体与局部性质混合在一起, 难以分辨清楚。

我们知道, 几乎所有信号都很难直接依据原始数据来解释信号特性, 而是通过提取它的特征来表征。提取何种特征常需要根据信号特征和分析目的来决定, 但也不排斥提取一些具有共性的特征, 如信号的过零点、极值点以及过零间隔等。信号的尖锐变化之处常是分析信号特征的关键。

针对目前这种情况, 我们采用了一种基于沃尔什变换的自动分层方法^[8]。该方法采用一种较简单的沃尔什滤波技术——经滤波后将测井数据转换为方波数据, 即一种消除了随机干扰后的原始数据的模拟, 然后通过对这些数据作一系列变换来实现自动分层。它不仅实现了单一测井曲线的分层方法, 还可以进行综合多条测井曲线的多信息分层方法, 而且还能够在分层过程中同时实现测井值的提取。

[收稿日期]2002-05-09; **[修订日期]**2002-06-10; **[责任编辑]**李石梦。

[第一作者简介]王祝文(1961年-), 男, 1994年毕业于中国地质大学(北京), 获工学博士学位, 教授, 主要从事地球物理测井、核地球物理、构造地球化学、大陆科学钻探地球物理测井等方面的解释理论和教学与科研工作。

1 基本原理

沃尔什变换是以一族列率不同的方波为基函数构成的数学变换,它不同于付氏变换的基函数正、余弦函数,而是由只取“+1”和“-1”两值的完全正交的函数族构成。列率被定义为单位时间内过零点数的一半。这些不同列率的基函数如图1所示。

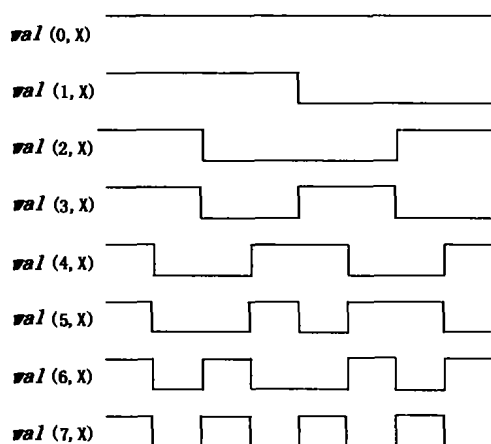


图1 前8个沃尔什函数的图形

沃尔什函数的定义与正余弦函数在性质和作用上有许多相似之处,第一类沃尔什函数的定义如下:

$$\begin{cases} wal_1(k, t) = \prod_{r=0}^{m-1} \text{sgn}(\cos k_r 2^r \pi t) \\ wal_1(k, t) = wal_1(k, t + n) \\ k = \sum_{r=0}^{m-1} k_r 2^r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $0 \leq t < 1$; $n = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$; $k_r = 0, 1$; m 是编号 k 的二进制表示中的位数。函数 $\text{sgn}(x)$ 为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

前8个沃尔什函数的表达式为

$$wal(0, t) = 1$$

$$wal(1, t) = \text{sgn}(\cos \pi t)$$

$$wal(2, t) = \text{sgn}(\cos 2\pi t)$$

$$wal(3, t) = wal(2, t) \cdot wal(1, t)$$

$$wal(4, t) = \text{sgn}(\cos 4\pi t)$$

$$wal(5, t) = wal(4, t) \cdot wal(1, t)$$

$$wal(6, t) = wal(4, t) \cdot wal(2, t)$$

$$wal(7, t) = wal(6, t) \cdot wal(1, t)$$

若用 S_k 表示 $wal_k(k, t)$ 的列率,则有

$$S_k = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ k/2 & k \text{ 为偶数} \\ (k+1)/2 & k \text{ 为奇数} \end{cases}$$

给定连续时间有限函数,它的沃尔什函数展开式为:

$$f(t) = \sum_0^\infty a_n wal(n, t) \quad (3)$$

其中系数 a_n 如下式:

$$a_n = \int_0^1 f(t) wal(n, t) dt \quad (4)$$

$f(t)$ 数值经归一化处理,在区间 $[0, 1]$ 上变化,对测井数据而言,主要为离散数据点,因而上面两式需写成离散形式:

$$\begin{cases} f = \sum_{n=0}^{N-1} F_n wal(n, i) \cdot i & i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ F_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i wal(n, i) & n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_n 为函数 f 的沃尔什变换的离散系数。

2 测井曲线的分层

利用沃尔什变换进行分层的第一步是对测井数据进行归一化。由于不同测井曲线的刻度各不相同,在采用多种曲线进行自动分层时,有必要将测井曲线分别归一化到 $[0, 1]$ 范围内,以消除刻度的影响。

归一化公式为:

$$x_{y1} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中: x 为某条测井曲线上某深度对应的测井值; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 为该测井曲线的极大和极小值; x_{y1} 为该曲线在该深度上的归一化值。

然后对测井曲线作低通沃尔什滤波。滤波的作用有两个,首先是将测井曲线变为步长一定、幅值不同的方波形式,其次是滤除测井数据中的噪声,防止干扰信号对地层边界的划分产生影响。具体的实施采用三侧向电阻率、声波速度、密度、自然电位、自然伽玛、中子孔隙度、声波幅度、1.6 m 和 0.05 m 电位电极系电阻率 9 种曲线综合分层。图2是原始曲线与变换后曲线的重迭图,从图中明显看出变换后曲线仍保留原测井曲线的总趋势,但它的方波特性给地层边界的拾取提供了十分有利的条件。由图2可以看出,在整个信号范围内,台阶宽度是一个常数,它是截止列率的函数,截止列率越低,台阶越宽。实际工作中,台阶宽度代表地层的最小厚度,可根据具体情况决定。

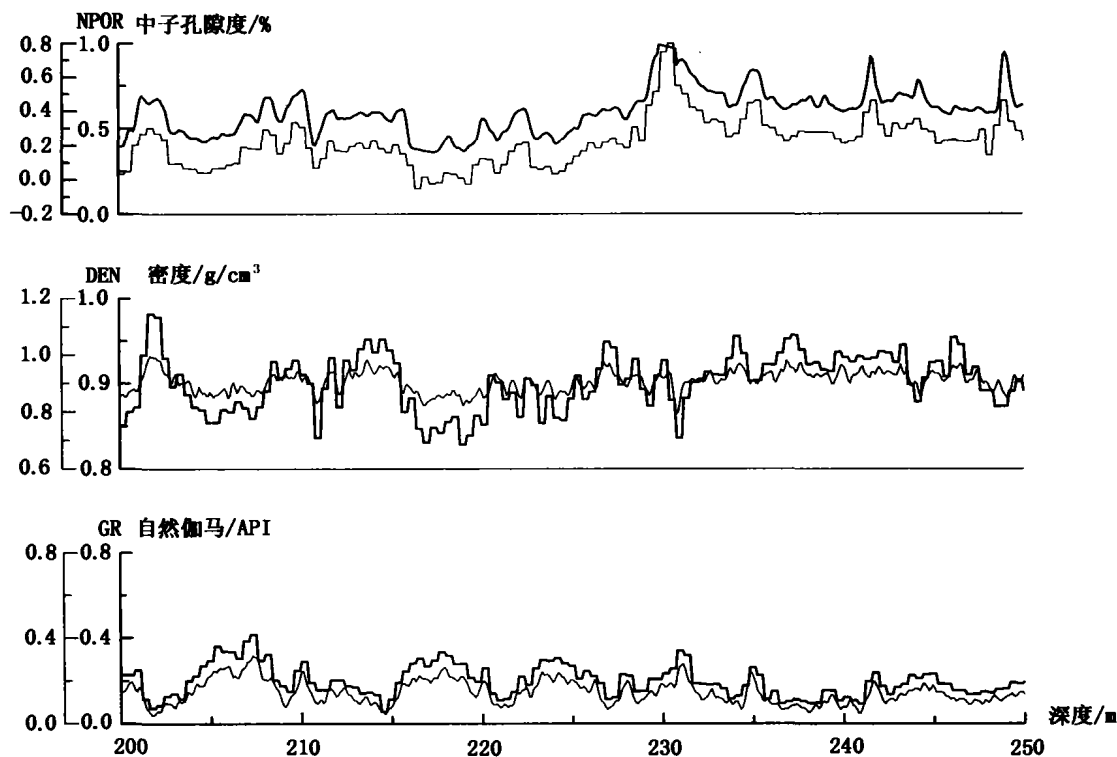


图2 原始测井曲线(归一化后)与变换后曲线的重叠图
(锯齿状线为原始测井曲线、方波状线为沃尔什滤波后的曲线)

将9条曲线沃尔什变换后的幅值加权平均,相邻两个加权平均值的差叫做拾取值。这个拾取值与检验值进行比较,如果拾取值大于检验值,即认为存在一个边界点;否则继续下一步比较,直到找出所有的地层边界点。

从图2所示的结果可以看出,沃尔什变换分出的岩层边界点与实际岩层边界点能够较好地吻合。由于沃尔什变换后曲线变为步长一定的阶梯状,步长的大小与滤波时选取的截止列率有关。越大,步长越窄,反之,越小,步长则越宽。边界点的位置一般均为步长的整数倍。对其改进的一个思路是去掉前面半个步长的数据,重复进行沃尔什变换分层,可使分层的误差控制在正负半个步长之内,从而有效提高分层的准确度。在研究过程中,我们采用了从小到大(从0.1 m到1 m)的步长值进行试验,经过与现场和室内岩芯编录资料的比较,最后我们确定的步长为0.3 m。

此外,测井曲线的选取及其相应加权值的选择也直接影响到分层结果。自然伽马和自然电位是最具代表性的两种方法,也可根据需要选用其他任何一种测井曲线,而且曲线条数也可以任意变化。加权值可

以根据各曲线对于分层结果贡献的大小任意选取。

3 应用效果及讨论

确定出层界就基本上完成了地层的划分,如有必要还需要人工交互修改。

利用测井曲线对变质岩地区的岩性进行分层和识别,现在还处于探索阶段。从图3可以看出,根据测井曲线利用沃尔什变换方法的分层结果比较好地反映了大陆科学钻探钻孔岩性剖面的变化,特别是岩性的界面与中子测井、自然伽马测井和密度测井曲线的变化比较吻合,这也反映了核测井方法在复杂岩性的变质岩地区,识别和区分变质岩岩性也是比较有效的。当然,该方法并非尽善尽美,所重建的岩性剖面^[9]与现场岩芯编录存在一定的差异。这与本文采用的沃尔什变换方法确定的步长及截止列率有关,还与现场岩芯的归位是否准确、识别岩性的参考数据库是否具有代表性有关。

4 结语

利用计算机对测井曲线进行自动分层是目前广泛应用的一项分层技术。它具有处理量大、计算速度

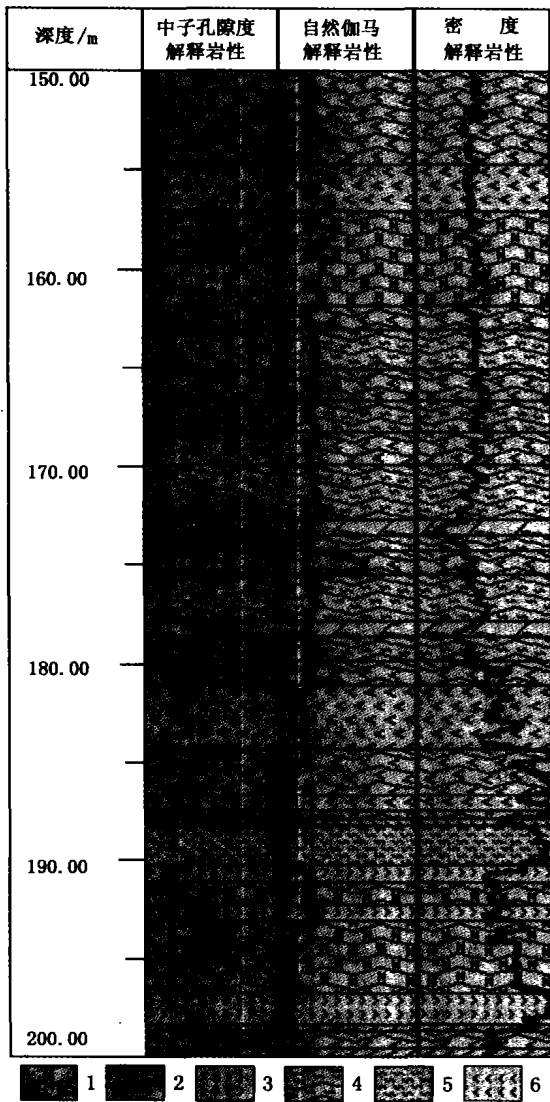


图3 测井曲线与分层及岩性识别结果重叠图
1—斜长片岩;2—角闪片岩;3—榴辉岩;4—混合片岩;
5—混合岩;6—角闪岩

快等一系列优点,从而将人们从繁重的工作中解放出来,提高了人们的工作效率。但利用计算机的自动分层技术也是难度较大、涉及面较广的一项工作。通过实际资料的处理可以认为,沃尔什变换方法具有较好的适应性,且符合人们的分层习惯,是应用于地球物理测井自动分层的一种有益的工具。综合利用多条曲线所具有的测井信息是该方法的又一特点。它不仅能为测井分层解释提供较可靠的分层界面和层特征值,而且具有快速、准确、简便的特点。

[参考文献]

- [1] 许志琴,耿瑞伦,肖庆辉,等. 中国大陆科学钻探先行研究[M]. 北京,冶金工业出版社,1996,3~92.
- [2] 李舟波,王祝文. 德国大陆科学钻探计划的测井技术[J]. 国外地质勘探技术,1998(2),24~31.
- [3] 赵 军. 基于数域上的模糊模式识别在测井曲线分层中的应用[J]. 测井技术,1998,22(4):264.
- [4] 刘争平,杜奉屏. 测井相—岩相自动分析方法在某复杂岩性区的应用[J]. 物探化探计算技术,1995,17(2):59.
- [5] 张献民. 应用计算机实现数字测井的自动分层[J]. 物探化探计算技术,1995,17(1):6.
- [6] 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.
- [7] 夏宏泉,陈福煊,黄继祥. 电相分析的自动分层取值方法研究[J]. 西南石油学院学报,1996,18(2).
- [8] Lanning E N, Johnson D M. Automated identification of rock boundaries: An application of the Walsh transform to geophysical well-log analysis[J]. Geophysics, 1983,48, 197~205.
- [9] 王祝文,刘菁华,李舟波,等. 中国大陆科学钻探预先导孔—II 重建岩性剖面方法研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2002,32(3).
- [10] 姬继法,潘纪顺. 应用地质雷达探测小型不良地质体[J]. 地质与勘探,2002,(1):80~82.

APPLICATION OF WALSH TRANSFORM FOR THE IDENTIFICATION OF ROCK BOUNDARIES WITH LOGGING DATA

WANG Zhu - wen, LIU Jing - hua

(Department of Geophysics, Jilin University, Changchun 130026)

Abstract: The reconstruction of lithological profile is one of the important aims in Continental Scientific Drilling. In metamorphic rock area, it is very important to get this point by making use of logging data. This paper made use of the Walsh transform to identify the rock boundaries, and provided a new and effective method to identify the different kinds of lithologies in metamorphic rock area from the results of the reconstructed lithological profile.

Key words: Walsh transform, identification of rock boundary, Continental Scientific Drilling