

文章编号:1673-5005(2006)02-0138-05

小波变换和沃尔什变换在测井曲线 分层中的联合应用

史清江^{1,2}, 王延江¹, 孙正义², 杨培杰¹

(1. 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田 钻井工艺研究院信息中心, 山东 东营 257017)

摘要:在分析单独利用小波变换或沃尔什变换进行测井曲线自动分层所存在的优势及弊端的基础上,依据沃尔什方法能适用多测井曲线分层和小波方法更能表征信号突变点的特点,提出了一种小波变换和沃尔什变换联合的测井曲线自动分层方法,该方法能有效地结合两者在测井曲线分层中的优势并弥补各自的不足。实际测井资料的处理结果表明,与小波变换分层方法和沃尔什变换分层方法相比,该联合方法简单、快速、有效,更适合实际测井资料的处理。

关键词:小波变换; 沃尔什变换; 联合分层; 测井曲线

中图分类号:TP 274; P 631.84 **文献标识码:**A

Joint application of wavelet transform and Walsh transform for automatic segmentation of well logs

SHI Qing-jiang^{1,2}, WANG Yan-jiang¹, SUN Zheng-yi², YANG Pei-jie¹

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China; 2. Information Center of Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield, Dongying 257017, Shandong Province, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of wavelet transform or Walsh transform for automatic segmentation of well logs were discussed respectively. Due to the ability of Walsh transform to process multiple well logs and wavelet transform to detect signal singularity well, a method for joint application of the wavelet transform and Walsh transform for automatic segmentation of well logs was proposed. It maintains the desirable features of wavelet transform and Walsh transform method and can improve the accuracy. Its simplicity, rapidity and efficiency are demonstrated clearly by the results of processing practical well-log data. Compared with the two segmentation method, the joint method is more suitable for processing practical well-log data.

Key words: wavelet transform; Walsh transform; joint segmentation; well logs

在利用测井资料进行岩性判别、储层划分和油气水测井相识别时,首要的一项工作就是根据测井曲线进行地层划分。随着计算机技术的快速发展,许多学者针对准确、快速、自动地地层分层及岩性识别进行了研究。目前,主要有以下几种基于计算机技术的自动分层方法:(1)方差分析法。它把方差作为分层的指标,比较有代表性的是极值方差聚类分析法^[1],该方法首先在数字化测井曲线上找出层间方差最大、层内方差最小的点作为分层点,然后用聚类分析法对其进行并界处理。(2)以测井曲线上相

邻采样点测井数值的差异为依据,用曲线变换后的极值点(或过零点)作为分层界点,如极值小波分层方法^[2]和零通小波分层方法^[3]。(3)沃尔什滤波方法^[4-6]。该方法通过对测井曲线进行沃尔什滤波,将其变成视觉上容易区分的方波信号,然后进行简单的并界处理。其中,小波分层方法不适合综合多条曲线进行自动分层,方差分层法计算量较大,影响了分层速度,而沃尔什分层方法由于其等步长性影响了分层精度。为此,笔者提出一种基于小波变换和沃尔什变换的联合自动分层方法。

收稿日期:2005-08-05

基金项目:中国石油化工集团公司“十条龙”项目(JP03009)

作者简介:史清江(1980-),男(汉族),浙江上虞人,硕士研究生,从事信号与信息处理及模式识别研究。

1 测井曲线的沃尔什滤波

1.1 沃尔什变换的基本原理

沃尔什变换是一种基于沃尔什正交函数系的正交变换^[9]。函数系中高列率函数可由低列率函数产生(列率表示某种函数在单位区间上函数值为零的零点个数之半,缩写为 ZPS)。在这里,沃尔什函数记做 $Wal(k, t)$, k 表示列率, t 为时间变量, 则

$$Wal(k, t) = \prod_{r=0}^{m-1} \text{sgn}(\cos(k_r \times 2^r \pi t)), \quad (1)$$

并有如下递归形式:

$$\begin{aligned} Wal(2j + q, t) &= Wal(j, 2t) + \\ &(-1)^{j+q} Wal(j, 2t - 1), \\ q &= 1 \text{ 或 } 2, j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

与傅里叶变换类似,同样存在沃尔什变换对。假设 $f_i (i = 1, 2, 3, \dots, N - 1)$ 代表 $f(t)$ 的采样数值, 则离散沃尔什正、反变换分别为

正变换:

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i Wal(n, i) = \mathbf{Wf}, \\ n &= 0, 1, 2, \dots, N - 1; \end{aligned} \quad (3)$$

反变换:

$$f_i = \sum_{n=0}^{N-1} F_n Wal(n, i) = \mathbf{WF}. \quad (4)$$

式中, F_n 为列率域的离散采样值。

同样,沃尔什变换也存在快速沃尔什变换,本文中利用沃尔什-哈达玛变换,它只需 $N \log_2 N$ 次加减运算,而直接沃尔什变换需要 N^2 次运算。

1.2 沃尔什滤波技术

沃尔什测井曲线分层方法首先须对测井曲线进行滤波,形成直观的方波信号。本文中采用一种称为“变换-修正-逆变换”的滤波方法,其矩阵形式为

$$\widehat{\mathbf{S}}(t) = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{GWS}(t). \quad (5)$$

式中, $\mathbf{S}(t)$ 为含噪信号; $\widehat{\mathbf{S}}(t)$ 为滤波信号; \mathbf{G} 为滤波矩阵。

如果 \mathbf{G} 选择正确,由式(5)获得的 $\widehat{\mathbf{S}}(t)$ 为均方差意义下的最佳估值。因此, \mathbf{G} 的选择至关重要。这里采用一种简单有效的滤波方法——列率受限滤波法,即将超过截止列率的对应的 \mathbf{G} 矩阵中的对角线元素设为 0,其他对角线元素设为 1,非对角线元素为 0。其一般的数学形式为

$$f_i \approx \sum_{n=0}^{N_s-1} F_n Wal(n, i).$$

式中, N_s 为截止列率。

图 1 表示某井的原始伽马测井曲线和经过沃尔什滤波后的伽马测井曲线(数据都已归一化)。图中曲线 1 表示原始伽马测井曲线,曲线 2 和 3 分别表示截止列率为 8 和 4 的滤波曲线。显然,利用滤波后的曲线进行分层是很方便直观的,并且截止列率越高,滤除的部分越少,步长越窄。

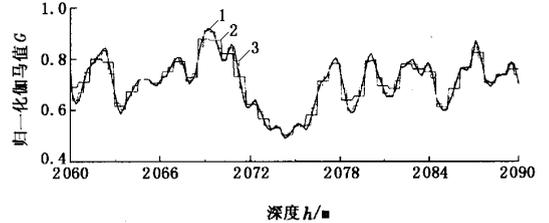


图 1 伽马测井曲线的沃尔什滤波结果

1.3 沃尔什分层特性

文献[5,6]中曾对正弦波和方波进行了沃尔什能谱分析,表明沃尔什函数不适合于谐振(如机械震动,地震波),而对于离散数据或状态发生突变的数据较为适用。显然,将沃尔什变换用于分析测井数据较为适合。但是从图 1 中可以看出,沃尔什滤波后的等步长性使得在合并以后的层位总是在步长的整数倍处,显然这是不准确的。为了提高分层精度,削弱等步长性带来的影响,一般的做法是去掉头尾半个步长的数据^[6],然后进行重复滤波分层,但是误差仍然存在。尽管利用沃尔什滤波方法进行分层存在误差,但是较其他方法,特别是小波分层方法,其最大的优点就是能综合考虑多条曲线情况,进行多曲线的联合分层。

2 测井曲线的小波变换

2.1 信号突变点的表征

许多文献表明^[2,3,8],利用小波变换能够进行信号奇异性检测,找到信号突变点所在的准确位置。

设 $\theta(t)$ 是具有低通性质的平滑函数,以它的一阶、二阶导数($\varphi^1(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, $\varphi^2(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}$)作为小波对 $f(t)$ 作小波变换,不难证明

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\varphi^1} f(a, \tau) &= f(t) \otimes \varphi^1(at) = \\ &a \frac{d}{dt} [f(t) \otimes \theta(t)]. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\varphi^2} f(a, \tau) &= f(t) \otimes \varphi^2(at) = \\ &a \frac{d^2}{dt^2} [f(t) \otimes \theta(t)]. \end{aligned} \quad (7)$$

也就是说,用 $\varphi^1(t)$, $\varphi^2(t)$ 对 $f(t)$ 作小波变换分别相当于 $f(t)$ 被 $\theta(t)$ 平滑后再对 t 求一阶或二

阶导数,对某一固定 a 值, $f(t) \otimes \theta_a(t)$ 的拐点既是 $W_\varphi^1 f(a, \tau)$ 的过零点, 又是 $W_\varphi^2 f(a, \tau)$ 的极值点, 因此可以利用小波变换的零极点来判断信号的突变点。一般认为, 地层界面就是岩性和物性的突变点^[7], 在测井信号上的反映就是信号的突变点, 这些点位于曲线上升沿或下降沿, 所以可以利用测井曲线小波变换的零极点来划分地层。这说明, 与沃尔什滤波方法相比, 利用小波变换零极点来表征地层界面点更为合理、准确。

2.2 小波变换的分层特性

由于数据噪声和所使用的测井方法不同(对岩性和物性的感应不同)等原因, 最终得到的各测井曲线都是极其不规则的(曲线起伏较大且上升沿和下降沿不光滑)。如果利用小波变换求其突变点, 会发现曲线的小波变换存在好多零极点, 而一般认为, 测井曲线上某段总体呈上升趋势的曲线上只存在一个层界点, 所以单独利用小波变换来进行测井曲线自动分层, 需要对零极点进行进一步地筛选判断。文献[2]利用高斯函数的二阶导数作为基小波对实际测井曲线进行不同尺度小波变换, 并随尺度由大到小跟踪极值点变化, 然后经过一系列判断得出最终分层结果。由此看出, 在得到零极点后须做好多决策工作, 虽然合理, 但与其他分层方法相比, 增加了人工干预, 给测井解释人员带来不便, 而且利用小波变换分层(包括文献[3]中的零通小波分层法)并不适合综合多条测井曲线的自动分层, 这是该方法与其他可对多条曲线进行综合分层的方法相比所存在的最大弊端。

3 测井曲线的小波变换和沃尔什变换的联合分层方法

由上述分析可以看出, 单独利用沃尔什滤波分层或小波变换分层都存在一些不足, 小波分层方法不能适用多曲线分层, 且比较繁琐, 而沃尔什分层方法由于其等步长性影响了分层精度。考虑到用信号突变点表征层界点较为合理, 故而提出结合这两种方法的联合分层方法。主要过程如下: 先对测井曲线进行小波变换, 找到可能的分层界点, 同时利用沃尔什分层方法找到分层界点的大概位置, 然后通过与小波变换的分层界点的对比找到精确的分层界点——即找到沃尔什分层界点与小波变换分层界点距离最近的小波分层界点作为最终分层点。图2是其工作流程。

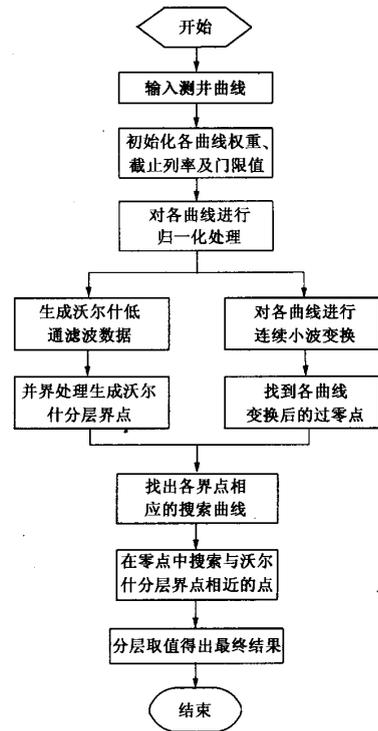


图2 沃尔什变换和小波变换联合分层流程

3.1 测井曲线的归一化

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, 必须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

$$x_{\text{归}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$$

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} 分别为该测井曲线的极大值和极小值; $x_{\text{归}}$ 为该曲线在该深度上的归一化值。

3.2 沃尔什滤波分层

归一化各条曲线后, 就可以进行沃尔什滤波分层。

(1) 对选定的各曲线进行沃尔什滤波, 得到滤波后的阶梯状曲线。

(2) 将起始深度作为一个层界面, 移动一个步长, 并计算每条曲线该步内每一点与上一层内所有测井值的平均之差的绝对值, 然后求其加权总绝对差值。

(3) 选定一个在 $0 \sim 1$ 之间的门限值。如果某步内的值大于或等于该门限值, 则该步的起始深度作为界面, 否则重复该过程直至数据读完为止。至此,

就获得了一系列的层面。它们分别对应于测井曲线上的某深度值。显然通过调节该门限值,可以控制分层的粗细。

3.3 结合小波变换进行联合分层

沃尔什滤波分层以后得到的层位都是步长的整数倍,这样得到的层界面是不准确的。参考小波变换后得到的零极点,即可找出最终的分层界面。

(1) 首先对各归一化后的测井曲线进行小波变换得到各曲线小波变换的过零点(或极值点),即各曲线可能的分层界面点。

(2) 对各沃尔什滤波分层曲线计算在某一层与上一层测井值的加权绝对差,找出差值最大者对应的曲线作为下一步的搜索曲线(也就是对划分此层界面贡献最大的曲线)。

(3) 对该搜索曲线进行零点搜索,即在搜索曲线小波变换得到的零点中找出与此层沃尔什滤波分层界面点最近的点,将这些点作为最终的分层界面点。

4 实例应用

由于单条曲线的处理相对简单,只需对所编制的程序进行适当改变即可应用于单条曲线的自动分层,而且为了说明本方法在多条测井曲线分层中的优势,对胜利油田某井 100 m 井段(2050 ~ 2150 m)的实际测井资料(0.1 m 间隔采样)进行了多曲线的自动分层处理。选取了该井测井曲线中自然伽马、电阻率、自然电位 3 条测井曲线作为预分层曲线,并根据它们对分层的贡献大小及曲线受噪声污染的情况将其权重分别取为 0.5、0.4 和 0.1,通过试验,一般情况下沃尔什滤波时截止频率取为 8 ZPS,基小波可取为高斯函数的一阶导数(即是通过零点表征信号突变点的),小波变换的尺度取 1.0。为了提高分层速度,在搜索零点时采用“1/2 快速查找法”,即每次先比较零点数组中间位置的值,而不是依次比较,如果比中间位置的值大,则在上一段数组中继续搜索,否则就在下一段数组中继续搜索。

综合 3 条曲线自动分层的最终结果如图 3 ~ 5 所示。并界处理时门限值取为 0.1,实验中测井曲线取值时利用了平均值法,即求取各层的测井值的平均值作为测井值,所以图 3 ~ 5 中同一层在各自曲线对应的幅值不同。从图 3 ~ 5 综合对比来看,界面确定都较准确。

图 6 是利用沃尔什滤波分层方法和联合分层方法进行 3 曲线综合分层所得到的结果在伽马测井曲线上的显示对比。图中曲线 1 表示原始伽马测井曲

线,曲线 2 和 3 分别表示沃尔什方法和联合分层方法的分层结果。

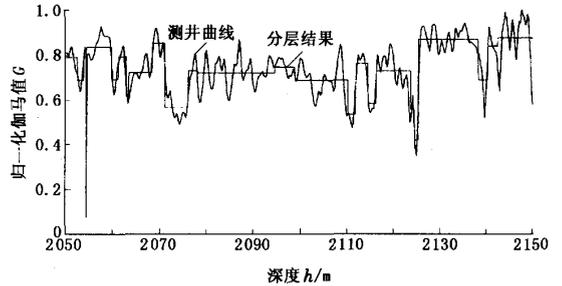


图 3 在伽马曲线上的综合分层结果对比

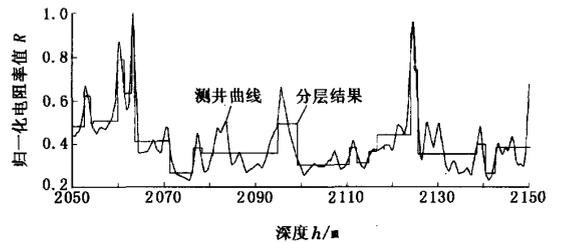


图 4 在电阻率曲线上的综合分层结果对比

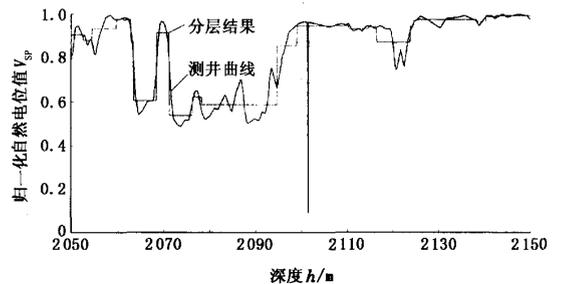


图 5 在自然电位曲线上的综合分层结果对比

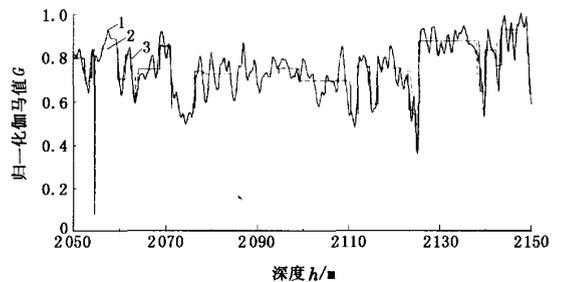


图 6 单独利用沃尔什方法和联合分层方法分层结果在伽马曲线上的显示对比

表 1 给出了利用沃尔什滤波分层方法和联合分层方法进行 3 曲线综合分层所得到的层界面的部分对比结果。为方便比较,表中的数据是测井界面对应的数据点的序号,这里列出了前 500 个数据点的分层界面,而空格表示小波零点搜索后该层被合并到下一层。

从表1和图3~6可以发现,利用联合分层方法即在沃尔什分层方法的基础上利用小波的信号奇异点检测特性进行搜索寻优后,不仅很好地对沃尔什分层结果进行了校正(分层界点位置发生了移动),而且某些无意义的层被合并(从表1可以看出,沃尔什滤波粗分层结果中的第6和第9层在寻优后被合并到下一层,在图3~5中可以看到这是正确的)。

表1 沃尔什分层方法和联合分层方法的部分层界点对比结果

方法	测井界面对应的数据点的序号														
沃尔什分层法	24	40	44	96	112	124	128	136	140	188	212	264	284	448	492
联合分层法	25	38	44	97	112		128	134		184	211	262	282	447	490

5 结束语

不同岩性在各种测井曲线上的数值反映至少是部分不重复的,所以在地球物理测井解释中,为了提高测井解释的地质效果,有必要利用同一井的多条测井曲线进行综合分层。显然,本文中提出的方法在其他参数容易选定的情况下只需简单地设定一个门限值(控制分层粗细),既延续了沃尔什分层方法简单、快速且能综合多条曲线分层的优点,又很好地利用了小波变换过零点来准确定位信号突变点。因此,本方法较以前的方法有着独特的优势,将给测井解释工作带来便利。

本文中并没有考虑数据噪声的影响,如果在分层前利用某些滤波方法去掉那些肉眼就能区分出来的噪声,分层结果的准确性必将得到提高,如何在分层前很好地去除数据噪声值得进一步研究。

参考文献:

[1] 张明玉. 极值方差聚类法在测井分层取值中的应用[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(5): 429-431.
ZHANG Ming-yu. Application of minimax variance cluster analysis method in well log layering data record[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(5): 429-431.

[2] 阎辉, 李鲲鹏, 张学工, 等. 测井曲线的小波变换特性在自动分层中的应用[J]. 地球物理学报, 2002, 43(4): 568-573.
YAN Hui, LI Kun-peng, ZHANG Xue-gong, et al. Wavelet transform properties of well log and their application in automatic segmentation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 43(4): 568-573.

通过调整门限值, 0.5 m 以下的薄层亦能分辨出来。但是并不是分层越细越好, 由于数据噪声的存在, 有些小层并不能反映地层特征的明显变化, 属于无意义的层。因此, 从以上分析可以得出, 在其他参数容易选定的情况下, 只要适当调整门限值, 即可获得满意的分层效果, 从而为测井解释如测井相分析、岩性识别和油气水层评价等提供可靠的依据。

[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.
JIAO Cui-hua, LI Bing. Zero-crossing wavelet for multi-resolution zonation of logs[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(3): 173-175.

[4] 王祝文, 刘菁华. 沃尔什变换在测井曲线分层中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(4): 81-84.
WANG Zhu-wen, LIU Jing-hua. Application of Walsh transform for the identification of rock boundaries with logging data[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(4): 81-84.

[5] 林海燕, 戴云, 肖慈珣. 一种基于沃希变换的测井自动分层方法[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(1): 173-175.
LIN Hai-yan, DAI Yun, Xiao Ci-xun. A well-log automated identification of rock boundaries method based on Walsh transform[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 173-175.

[6] LANNING E N, JOHNSON D M. Automated identification of rock boundaries: An application of the Walsh transform to geophysics well-log analysis[J]. Geophysics, 1983, 48(2): 197-205.

[7] 杜士新. 具有自动分层能力的综合性测井解释程序[J]. 测井技术, 1996, 20(2): 108-112.
DU Shi-xin. Integrated log interpretation program having the ability to separate layers automatically[J]. Well Logging Technology, 1996, 20(2): 108-112.

[8] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[9] BEAUCHAMP K G. 沃希函数及其应用[M]. 常炯, 译. 北京: 科学出版社, 1980.

(编辑 修荣荣)