

改进的小波阈值法在测井曲线去噪中的应用^①

吴雅娟¹, 高兴¹, 王辉¹, 刘晓光², 李国家³

¹(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 大庆 163318)

²(中国石油渤海钻探第一钻井分公司 70025 钻井队, 天津 300270)

³(大庆油田工程有限公司 市场开发部, 大庆 163712)

摘要: 介绍了基于小波阈值法的测井曲线滤波原理, 分析了现有小波阈值函数和阈值特点, 提出了一种改进的小波阈值去噪法. 通过 Heavisine 信号的仿真实验以及测井曲线实例表明, 改进的小波阈值法在有效滤除测井信号中的噪声的同时又可以保留曲线的细节信息, 在测井曲线去噪处理中得到很好的应用.

关键词: 小波阈值法; 阈值函数; 测井曲线; 去噪

Application of Improved Wavelet Threshold Method to Logging Curves Denoising

WU Ya-Juan¹, GAO Xing¹, WANG Hui¹, LIU Xiao-Guang², LI Guo-Jia³

¹(School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

²(No. 70025 Drilling Crew, The First Drilling Company of CNPE Bohai Drilling, Huangshan 245021, China)

³(Department of Market Development, Daqing Oilfield Engineering Co.Ltd, Daqing 163712, China)

Abstract: The paper introduces the logging curves filtering principle based on wavelet thresholding method, analyses the thresholds and wavelet thresholding functions characteristics, then an improved wavelet threshold denoising method is proposed. The simulation experiment of Heavisine signal and logging curves example results show that, the improved wavelet thresholding method can preserve curves details well while reducing noise efficiently and it can get good application in logging curves denoise processing.

Key words: wavelet thresholding method; threshold function; logging curves; de-noising

放射性测井是唯一能够在井下迅速分析且确定岩石及孔隙体中各种化学元素含量的有效方法, 而且这种方式的测量不受环境内介质限制, 能够在裸眼井、套管井、淡水、泥浆、天然气以及空气井中进行测量^[1]. 测井曲线是不同测井方法, 在不同地质条件下、不同地层环境中地球物理化学等信息的数据记录的一种表现方式. 但是由于放射性涨落现象的存在, 会导致一些放射性测井曲线不像电测井光滑, 出现与地层性质无关的统计起伏变化和毛刺干扰^[2]. 而测井曲线是用来研究油气储集层特性以及评价生产能力的主要信息来源, 测井曲线形态特征是地质工作者和测井分析人员进行地质对比、层序地层学研究的主要依据. 因此在对测井曲线分析使用前, 有必要进行滤波处理, 剔除毛刺, 提高信噪比.

目前, 通常采用频率域滤波、简单的平滑处理等对测井曲线做低通滤波. 但是, 平滑滤波容易导致测井曲线薄层识别能力下降; 同时, 由于测井信号包含许多尖峰或突变部分, 以傅里叶变换为基础的频率域滤波可以滤除一定的高频干扰成分, 但不能对测井曲线做局部分析^[3]. 小波变换继承了傅里叶变换的优点, 具有良好的时频局部化性质, 多分辨率分析的方法可以很好的刻画信号边缘、尖峰、断点等非平稳特性, 所以, 以小波变换为基础的测井曲线滤波, 不仅能去除噪声对测井曲线的影响, 还可以保留信号的突变位置和边缘信息, 具有更好的滤波效果^[4].

小波去噪的基本方法有三种: 小波变换尺度间相关性滤波方法是根据信号和噪声的小波变换在各尺度下具有不同传播特性的原理, 将相邻尺度的小波系数

① 基金项目:国家自然科学基金(61170132)

收稿时间:2012-08-08;收到修改稿时间:2012-09-15

直接相乘来增强信号,抑制噪声,该方法去噪效果好,也很稳定,但是需要迭代,计算量大;模极大去噪方法是从所有小波变换模极大值中选择信号的模极大值而去除噪声的模极大值,该方法主要适用于信号中混有较多奇异点的高斯白噪声去噪,对低信噪比信号滤波有其优越性,但该方法计算量大,实际效果一般.小波域阈值收缩去噪方法是根据信号能量在小波域上分布特点,采用阈值收缩的办法将噪声系数减少至零,该方法是实现最简单、计算量最小的方法^[5],并且是针对高信噪比信号的一种有效去噪方法^[6].本文针对测井曲线的特征,选取阈值法对测井曲线进行滤波处理,通过分析现有阈值函数存在的问题,提出一种改进的阈值函数,进一步提高信噪比,达到最佳的滤波效果.

1 基于小波阈值法的测井曲线滤波原理

任何测井曲线都可以被看成是一种信号(真实岩石性质)、随机噪音(包括核测井仪计数率的随机变化)以及系统误差的总和.

测井信号模型可以表示成如下形式:

$$d_i = f_i + \delta \cdot e_i, \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

其中, d_i 为含噪声的原始测井信号, f_i 为有用信号, δ 为噪声级, e_i 为高斯白噪声.

在测井应用中,有用的信号通常表示为低频信号或者是一些相对平稳的信号,但是噪声信号则通常表示为高频信号.采用小波阈值法对测井信号进行多尺度滤波一般有以下几个步骤:

1) 选择合适的小波基及相应的分解层数,对测井信号 $d(i)$ 进行多尺度小波分解,得到一组小波系数 $w_{j,k}$;

2) 选择合适的阈值处理函数以及相应的阈值对

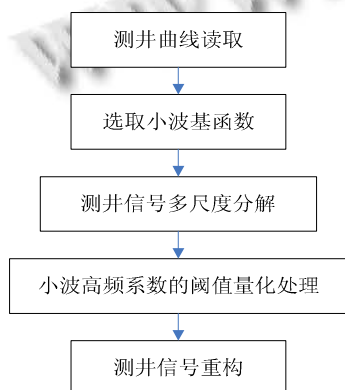


图 1 测井曲线小波滤波流程图

高频小波系数进行阈值量化处理,得到估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$;

3) 根据处理过的高频系数和各层的低频系数进行小波逆变换,对测井信号进行重构,得到估计信号 $\hat{d}(i)$.

测井曲线小波阈值法滤波过程如图 1 所示:

2 小波阈值函数和阈值的选取

测井曲线去噪要求有效消除噪声干扰,不使薄层信息丢失,恢复地层真实曲线形态.使用阈值法对测井曲线进行小波滤波,其去噪效果的好坏取主要取决于以下四个因素:1)小波基的选取;2)分解层数的确定;3)门限阈值的选择;4)阈值函数的选取^[7].其中,阈值函数体现了对小波系数的处理策略^[8],它的基本思想是去除小幅值的小波系数,对幅值较大的系数进行收缩或保留,是重中之重的因素.经典阈值函数主要分为软阈值函数、硬阈值函数和半软阈值函数,使用硬阈值方法对测井曲线进行滤波后,会保留真实信号中的尖峰特征,而使用软阈值方法对测井曲线滤波将会得到较为圆滑的曲线,半软阈值函数是在软阈值和硬阈值方法之间达到很好的折中,效果较好,但是实现两个阈值的估计有一定的难度,很难实际应用^[9].硬阈值函数

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

软阈值函数

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

半软阈值函数

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} 0 & |w_{j,k}| \leq \lambda_1 \\ \text{sgn}(w_{j,k}) \frac{\lambda_2(|w_{j,k}| - \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} & \lambda_1 < |w_{j,k}| \leq \lambda_2 \\ w_{j,k} & |w_{j,k}| > \lambda_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $w_{j,k}$ 表示信号分解的小波系数, $\hat{w}_{j,k}$ 为估计小波系数, λ 为阈值, $\text{sgn}(\ast)$ 为符号函数,即

$$\text{sgn}(n) = \begin{cases} 1, & n > 0 \\ -1, & n < 0 \end{cases}$$

门限阈值的选择也关系着消噪处理的效果, 阈值选取过小, 会使噪声点有所保留, 而阈值选取过大, 又会使信号的有用信息缺失, 影响滤波效果. 目前, 人们提出了多种阈值的选取方法: 1)Stein 无偏似然估计阈值 (“rigrsure”阈值) 2)固定阈值 (“sqtwolog”阈值) 3)启发式阈值 4)最大最小准则阈值^[10], 其中最常用的是固定阈值法, 这种方法采用全局统一阈值 $\lambda = \delta\sqrt{2\log N}$, 其中 δ 为噪声标准差; N 为信号长度.

3 小波阈值去噪方法改进研究

经研究表明, 如式(1)所示, 硬阈值方法是只保留较大的小波系数, 将较小的小波系数置零, 处理后的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 在 λ 和 $-\lambda$ 处不连续, 信号重构后在逼近信号奇异点或快速变化处表现出震荡现象, 即所谓的伪吉布斯现象; 软阈值如式(2)所示, 将较小的小波系数置零, 同时对较大的小波系数向零做了收缩, 处理过的小波系数虽然整体连续性好, 但是 $\hat{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 之间总是存在恒定的偏差, 导致重构信号与原始信号会出现误差; 半软阈值函数是介于软阈值和硬阈值方法之间的一种折衷的方法, 效果虽然较软硬阈值函数有所改善, 但是双阈值的估计有一定的难度. 阈值函数的选取应根据实际测井资料的需要, 本文根据测井曲线情况复杂性, 提出一种改进的阈值函数, 可根据实际应用需要调节动态因子 α , 以求得最佳滤波效果. 本文采用新的阈值函数如式(4)所示:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(w_{j,k}) \left(|w_{j,k}| - \frac{\lambda}{\exp[\alpha(|w_{j,k}| - \lambda)^2]} \right) & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0 & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 为正常数.

新的阈值函数具有连续性, 当 $|w_{j,k}| = \lambda$ 时, 此时, $\hat{w}_{j,k} = 0$, 当 $|w_{j,k}| \rightarrow \lambda$ 时, $\hat{w}_{j,k} \rightarrow 0$, 即 $w_{j,k}$ 在 $|w_{j,k}| = \lambda$ 处是连续的, 而且当 $|w_{j,k}| > \lambda$ 时, 新阈值函数是高阶可导的, 可以进行各种数学处理. 当 $|w_{j,k}| \rightarrow \infty$ 时, $\hat{w}_{j,k} \rightarrow w_{j,k}$, 因此新阈值函数以 $\hat{w}_{j,k} = w_{j,k}$ 为渐近线, 随着 $w_{j,k}$ 增大, $\hat{w}_{j,k}$ 无限趋近于 $w_{j,k}$, 新阈值函数的这个优点克服了软阈值函数中估计小波系数与实际小波系数的恒定偏差问题. 同

时, 通过改变调节因子 α 的值, 可以使新阈值函数根据实际需要改变函数性质, 当 $\alpha = 0$ 时, 新阈值函数为软阈值函数, 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 新阈值函数就变成硬阈值函数. 新阈值函数可以根据测井曲线实际应用的需要, 进行阈值函数的调节, 以取得最佳效果, 具有实用性.

在阈值的选取上, 本文所选取的阈值是针对 VisuShrink 阈值进行的改进, 全局阈值不符合噪声分布规律, 随着信号的分解尺度增大, 噪声的小波系数会逐渐减小, 所以在对信号去噪时, 需要按照噪声的分布规律选取阈值, 所以针对传统阈值的不足, 本文采取一种改进的阈值: $\lambda = \delta\sqrt{2\log N / \log(j+1)}$, 其中, δ 是噪声的标准差, N 为信号的长度, j 是分解尺度. 此阈值选取方式是在统一阈值基础上进行改进的, 在保留了传统统一阈值中标准差和信号长度所做的贡献的同时在分母上添加了分解尺度 j , 使得阈值随着分解尺度的增大而减小, 从而满足了信号经过小波分解后信号和噪声小波系数的分布规律, 减少了小波系数阈值不准确引起的偏差.

4 小波阈值去噪法在测井曲线去噪中的应用

通常作为验证去噪效果的性能指标有两种: 信噪比(SNR)和均方差(MSE), 通常, SNR 越大, MSE 越小, 代表去噪效果越好.

信噪比代表了含噪信号中噪声和信号所占的能量比重, 定义为

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N |d(i)|^2}{\sum_{i=1}^N |d(\hat{i}) - d(i)|^2}$$

其中, $d(i)$ 为原始信号, $d(\hat{i})$ 为估计信号, N 为信号长度.

$$\text{均方误差的定义 } MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d(\hat{i}) - d(i)|^2$$

为了验证新阈值函数在小波阈值去噪算法中的的有效性, 本文在 MATLAB2010 环境下进行了实验. 首先考察仿真曲线的去噪情况, 选取测试信号 Heavysine 作为原始信号, 对原始信号加噪, 信噪比(SNR)为 12.4371dB, 选取的小波基为 db4 小波, 分解层数为 4 层, 阈值 λ 采用改进的 Visushrink 阈值, $\lambda = \delta\sqrt{2\log N / \log(j+1)}$. 对 Heavysine 加噪信号采用传统的软、硬阈值函数和新

阈值函数分别对加噪信号进行去噪处理, 使用信噪比 (SNR) 和均方根误差 (MSE) 来表征去噪结果. 各种消噪方法实验效果图如图 2 所示, 得到的信噪比和均方根误差如表 1 所示.

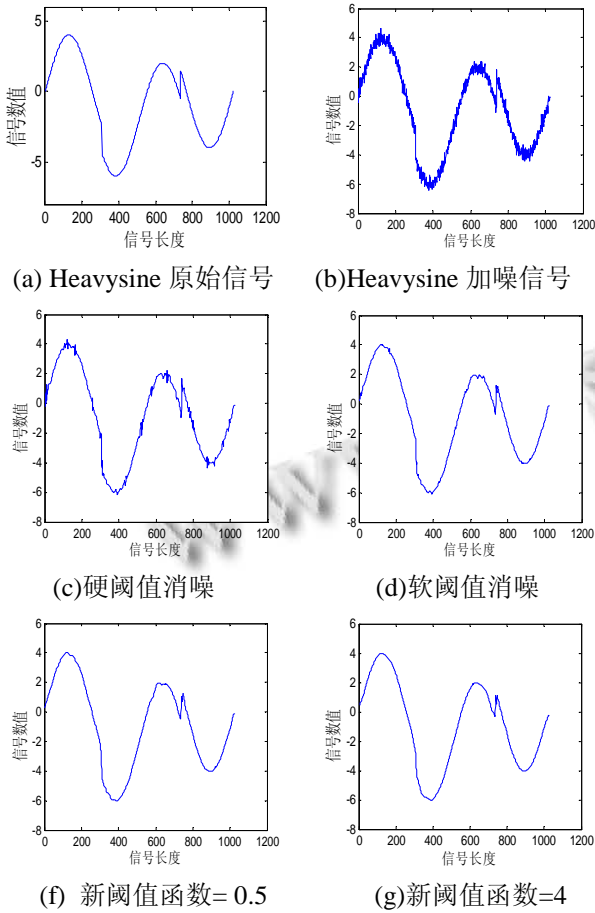


图 2 Heavy sine 信号几种阈值函数去噪效果

表 1 3 种阈值函数对 Heavy sine 信号去噪后的 SNR 和 MSE 比较

| | 硬阈值函数 | 软阈值函数 | 新阈值函数 $\alpha = 0.5$ | 新阈值函数 $\alpha = 4$ |
|--------|---------|---------|----------------------|--------------------|
| SNR/dB | 23.3573 | 24.2132 | 24.3597 | 24.5374 |
| MSE | 0.0814 | 0.0726 | 0.0673 | 0.0648 |

根据实验结果图可以看出, 新阈值函数去噪效果明显优于软硬阈值函数以及半软阈值函数; 硬阈值函数去噪后, 信号明显还存在着较多的震荡点; 软阈值函数去噪后重构效果不够理想. 新阈值函数随着调节因子的改变, 去噪效果有所不同, 得到的信号都较为光滑, 通过对比信噪比和均方误差能明显看出新阈值函数的优势.

实际应用的测井数据来自大庆油田 B1-D1-018 井, 对该井的放射性测井曲线 GR(自然伽马曲线)进行滤波处理, 选取的井段深度为 926.80m-946.75m, 采样间距为 0.05m, 采样点个数 800, 使用本文提出的阈值消噪函数对测井曲线进行处理, 取调节因子 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = 4$ 进行实例计算, 原始曲线和消噪曲线对比效果图分别如图 3、图 4 所示, 横坐标为采样点序号, 纵坐标为曲线幅值. 从实验结果分析, $\alpha = 0.5$ 时比 $\alpha = 4$ 时测井曲线略微平滑, 经过去噪处理的测井曲线更有利于对测井曲线进行地层划分以及形态分析, 而且通过调节 α 的值, 可以更方便灵活的进行测井曲线去噪处理.

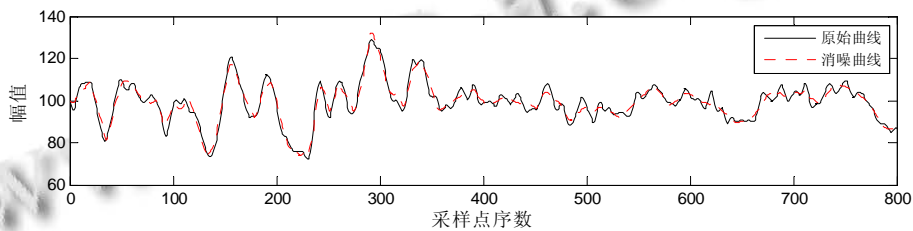


图 3 B1-D1-018 井 GR 曲线新阈值函数=0.5 滤波效果

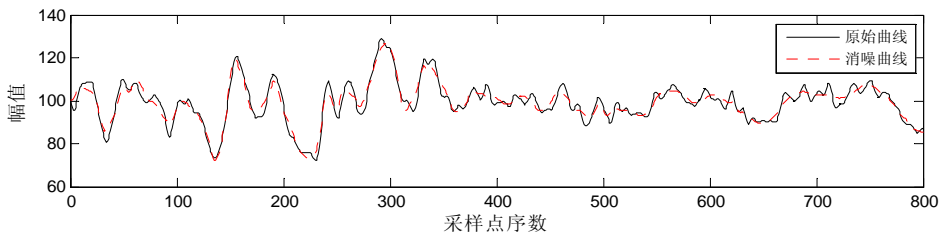


图 4 B1-D1-018 井 GR 曲线新阈值函数=4 滤波效果

(下转第 152 页)

- 4 Yang M, Wang JP, Gao ZG, et al. Coordinated robust routing by dual cluster heads in layered wireless sensor networks. Proc. of the 8th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. IEEE Computer Society, 2005: 454-461.
- 5 徐小良,裘君娜.异构传感器网络中一种能量有效的簇头选择算法.传感技术学报,2009,22(3):395-400.
- 6 Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. Proc. of the 4th IEEE Conf. on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society. 2002: 368-372.
- 7 陈雪娇,李向阳.WSN中LEACH协议的研究及改进.计算机应用,2009,29(12):3241-3243.
- 8 张磊,陈曙.一个新的基于能量和距离的传感网络协议.计算机应用,2008,28(5):1117-1119.
- 9 李成法,陈贵海,等.一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议.计算机学报,2007,30(1):27-36.
- 10 刘昊霖,朱敏,张志宏.一种基于非均匀分层的WSN分簇路由算法.四川大学学报,2010,48(7):803-807.
- 11 卢建刚,乐红兵.基于区域划分的WSN非均匀分簇算法.计算机工程与设计,2011,32(8):2639-2642.
- 12 陈贵海,李成法.EECS:一种无线传感器网络中节能的聚类方案.计算机科学与探索,2007,1(2):170-179.
- 13 Fang Q, Zhao F, Guibas LJ. Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation. Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. ACM Press, 2003: 165-176.
- 14 Tillapart P, Thumthawatwom T, Pakdeepinit P, Yeophantong T, Charoenkrom S, Daengdej J. Method for cluster heads selection in wireless sensor networks. Proc. of the 2004 IEEE Aerospace Conf. Chiang Mai: IEEE Press, 2004: 3615-3623.
- 15 Nghiem TP, Kim JH, Lee SH, Cho TH. A coverage and energy aware cluster-head selection algorithm in wireless sensor networks. ICIC 2009. LNCS 5754, 2009: 696-705.
- 16 Younis M, Youssef M, Arisha K. Energy-Aware routing in cluster-based sensor networks. Proc. of the 10th IEEE Int'l Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems. Fort Worth: IEEE Computer Society, 2002: 129-136.
- 17 周钰川,施荣华,周媛媛.WSN中基于非均匀簇的混合多跳路由协议.计算机应用研究,2011,28(2):642-644.
- 18 张品,姜亚光,陈磊.基于加权优化选择两级簇头的WSN路由协议.传感技术学报,2011,24(3):447-451.

(上接第185页)

5 结论

在碎屑岩沉积地层中,自然伽马曲线能敏感的反应泥质含量的变化,用它做高分辨率层序地层划分最有效,将本文方法实际应用于大庆油田的测井曲线去噪处理,能有效的滤除一些与地层信息无关的统计起伏和毛刺干扰,使测井曲线更加平滑的同时保留了曲线中的细节信息,为测井曲线形态识别以及做进一步的数据分析带来便利,由于测井曲线的噪声情况复杂多变,可以根据实际需要调节可变因子,从而使测井曲线的滤波处理更加灵活,所以本文提出的改进小波阈值消噪法为测井曲线的平滑处理提供了一个有效的方法.

参考文献

- 1 钟雷文.基于MATLAB的煤田核测井信号小波滤波方法研究.科学技术与工程,2009,9(2):398-401.
- 2 房文静.测井多尺度分析方法及应用研究.山东:中国石油大学,2007.
- 3 邹长春,杨欣德.一种基于小波变换的测井曲线去噪新方法.物探与化探,1999,23(6):462-466.
- 4 郭锐.测井数据的小波分析方法.长春:吉林大学,2011.
- 5 赵龙军,谭成仔,等.小波域阈值滤波在测井信号去噪中的应用.西安电子科技大学学报,2007,27,(2):263-267.
- 6 孙延奎.小波分析及其应用.北京:机械工业出版社,2005.
- 7 毛海杰,陈晓辉,等.基于自适应阈值的小波消噪算法研究及应用.甘肃科学学报,2008,20(2):116-119.
- 8 潘泉,孟晋丽等.小波滤波方法及应用.电子与信息学报,2007,29(1):236-242.
- 9 张维强,宋国乡.基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪.西安电子科技大学学报,2004,31(2):296-303.
- 10 叶重元,黄永东.小波阈值去噪算法的新改进.计算机工程与应用,2011,47(12):141-145.