

二维小波变换在成像测井识别 裂缝中的应用研究

张晓峰*^① 潘保芝^②

①东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室,江西抚州 344000;

②吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林长春 130026)

张晓峰,潘保芝. 二维小波变换在成像测井识别裂缝中的应用研究. 石油地球物理勘探, 2012, 47(1): 173~176

摘要 本文首先对电成像测井资料进行水平方向和垂直方向的电导率曲线的小波变换,然后在小波变换后的高频段寻找与裂缝对应的分解信号,再将水平方向和垂直方向的分解信号进行绝对值叠加,再转换成二值信号(即裂缝为1,非裂缝为0)成图,从而增强成像测井中的裂缝信息,为成像测井的人机交互解释中的裂缝识别提供依据。实际应用结果表明,该方法可以准确、直观地显示出裂缝,效果很好。

关键词 二维小波变换 成像测井 裂缝型储层 电导率

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

成像测井能够提供高分辨率的、连续的井周图像,并且可直观、准确地识别储层中的裂缝。因此该方法自20世纪80年代开始形成商业化软件以来,很好地解决了一些常规测井无法解决的问题,在世界多地得到了广泛应用^[1]。

随着成像测井技术的发展,应用成像测井识别裂缝研究也逐渐增多。罗利^[2]在低孔砂岩储集层中用成像测井识别储层中的裂缝,并用成像测井上的裂缝密度刻度常规测井曲线。肖丽等^[3]在碳酸盐岩储层中利用成像测井资料对裂缝发育参数进行标定。孙加华等^[4]利用声电成像测井技术识别裂缝。高霞等^[5]利用地层微电导率扫描测井、人工神经网络等方法对裂缝进行研究。邓模等^[6]针对碳酸盐岩储层裂缝,通过岩心观察及成像资料与常规测井曲线对比,总结出了几种常规测井在裂缝发育段的响应特征,并在该类储层的典型段进行应用。Behzad等^[7]在小波变换后的低频段寻找到与成像测井的裂缝密度相对应的分解信号,并通过这个分解

信号的能量建立与裂缝区域中裂缝数量的对应关系,进而粗略地评价裂缝密度。Zhang等^[8]利用电成像测井的电导率曲线垂向的小波变换来增强成像测井对裂缝的识别能力。成像测井虽然能够直观地反映裂缝存在,但在人机交互解释中存在着人为误差。而小波变换可以增强储层中裂缝的信息,在一定程度上避免了这种误差,但是成像测井垂向的小波变换只能增强低角度缝和水平缝的信息,不能增强诱导缝和高角度缝的信息。

为了更全面地突出裂缝信息,许多人认为利用成像测井的二维小波变换增强储层裂缝信息是一个新的研究方向。本文对电成像测井进行垂向和横向二维小波分解,在分解信号中的高频部分寻找与裂缝之间的对应关系,可增强对裂缝信息的识别能力。

2 电导率曲线的小波变换与裂缝的关系

小波变换方法是一种窗口大小固定,窗口形状可变,时间窗和频率窗都可改变的时频域局部化分析方法,很适合探测正常信号中突变信号的成分^[9]。

* 江西省抚州市学府路56号东华理工大学核工程技术学院地球物理系,344000。Email: zxf11_84@126.com

本文于2011年2月5日收到,最终修改稿于同年12月21日收到。

基金项目:国家重大科技专项大型油气田及煤层气开发专题“复杂含油气盆地构造及其控油气作用”(2008ZX05009-001)

将任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $z(t)$ 在小波基下进行展开,任意函数 $z(t)$ 的连续小波变换为^[10]

$$WT_z(a,b) = \langle z(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R z(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $WT_z(a,b)$ 为小波变换系数, a 和 b 分别代表尺度参数和平移参数; $z(t)$ 为电成像测井的电导率曲线; $\varphi(t)$ 为小波基函数。

因为电成像测井的电导率曲线在裂缝层段会有突变,所以本文对电成像测井的电导率曲线进行各

种小波变换,并在分解信号的高频段寻找与裂缝对应最好的分解信号。通过研究发现,电成像测井的电导率曲线在 coif5 基小波分解后的高频信号 $d1$ 与裂缝对应最好。图 1 为 M 区 A 井单条电成像测井电导率曲线通过 coif5 小波基的小波变换图。图中 $d1 \sim a5$ 依次为由电导率曲线经过 coif5 小波分解后的高频到低频的分解信号。第 1 道为深度,第 2 道为成像测井的电导率曲线,第 3 道至第 8 道为电导率曲线的小波分解信号,第 9 道为成像测井(图上红线为成像测井识别的裂缝)。

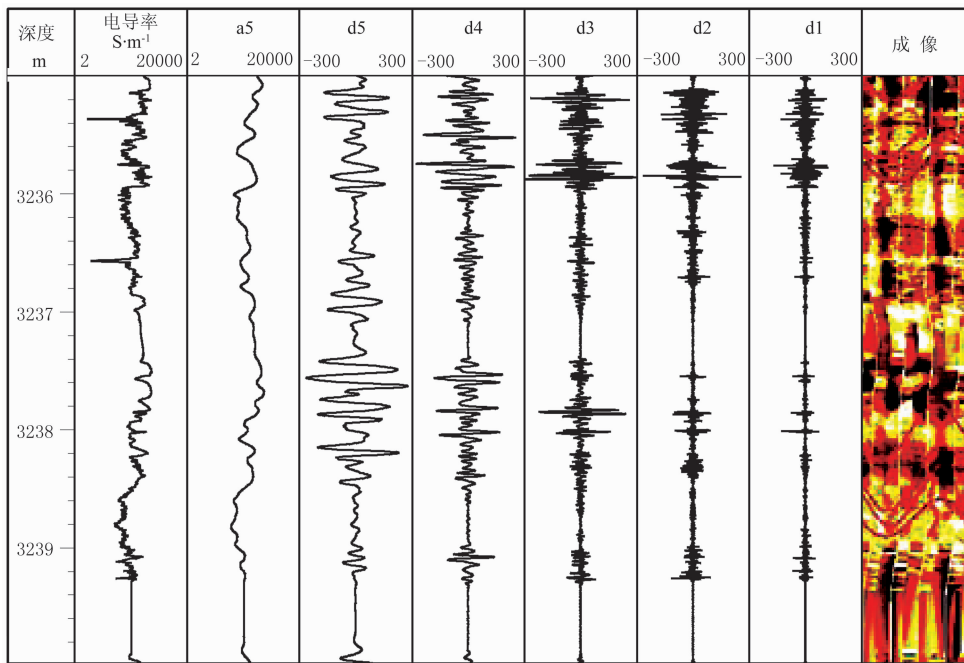


图 1 A 井的成像测井电导率曲线的不同尺度的 coif5 小波变换与成像测井图

3 电成像测井垂向的小波变换

电成像测井仅是由 192 个钮扣电极组成,每个钮扣电极都能测量到一条电导率曲线,由 192 根电导率曲线组成的图像称为成像图。当钮扣电极经过有裂缝存在的储层时,电成像测井的电导率曲线会有突变。本文对电成像测井的 192 条电导率曲线在垂直方向上做小波变换,并在高频部分寻找与裂缝对应的分解信号,再对分解信号进行阈值控制,将分解信号转换成二值信号,以达到增强电成像测井对水平缝和低角度缝的识别,但是它对高角度缝和诱导缝反映不明显。

图 2 为 A 井电成像测井电导率曲线垂向上的 coif5 小波变换增强的裂缝信息与原成像测井的对

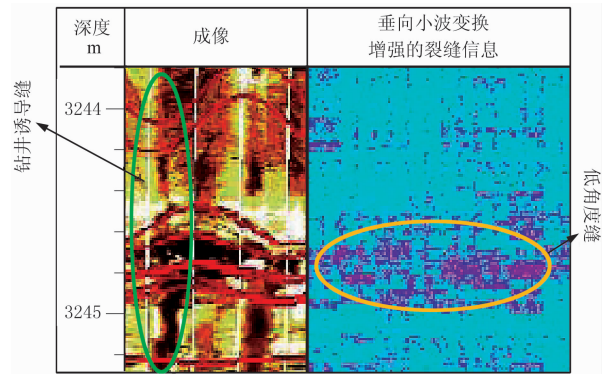


图 2 A 井电成像测井电导率曲线垂向上的 coif5 小波变换增强的裂缝与原成像测井对比图

比图。图中第 1 道为深度,第 2 道为原成像测井(红线为成像测井识别的裂缝),第 3 道为成像测井电导率曲线垂向小波变换增强的裂缝信息。从图中可以看到,电成像测井电导率曲线垂向的小波变换可以很好地显示出水平缝和低角度缝(右侧黄色椭圆)的信息,但对钻井诱导缝和高角度缝,反映不明显(左侧绿色椭圆)。

4 电成像测井水平方向的小波变换

同一深度点上的 192 个钮扣电极测量的数据将形成一条曲线,在单一地层中,这条曲线不会有很大变化,但是遇到有钻井诱导缝或高角度缝存在的地层时,这条曲线会有较大变化或者突变。通过对不同深度点上的曲线的小波变换,可以更好地显示出诱导缝的信息,但是对低角度缝和水平缝的反映不明显。以钮扣电极排列方式使得小波变换后增强显示的钻井诱导缝深度以对称形式出现在图形上(图 3)。

图 3 为 A 井电成像测井水平方向上的 *coif5* 小

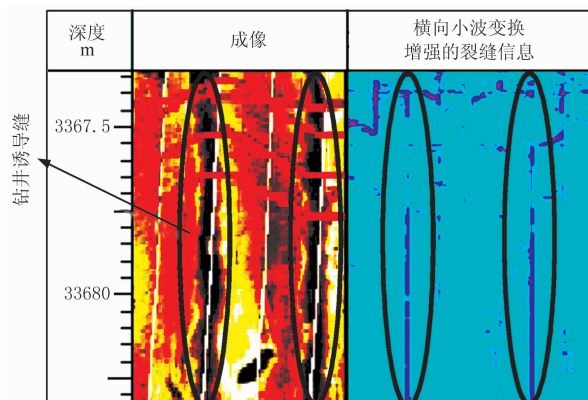


图 3 A 井成像测井水平方向上的 *coif5* 小波变换增强的裂缝信息与原成像测井对比图

波变换增强的裂缝信息与原成像测井的对比图。图中第 1 道为深度,第 2 道为成像测井(红线为识别的裂缝),第 3 道为电成像测井小波变换增强的裂缝信息(椭圆为增强的诱导缝信息)。从图中可以看到电成像测井横向上的 *coif5* 小波变换显示的钻井诱导缝为一条竖线,而对钻井诱导缝的边界进行了削弱。该方法对钻井诱导缝反映明显,可以增强电成像测井对钻井诱导缝的识别;对低角度缝和高角度缝(图 3 中第 2 道的红线)有一定的显示,而对水平缝没有显示。

5 电成像测井的二维小波变换

图 4 为 A 井电成像测井二维 *coif5* 小波变换增强的裂缝信息与原成像测井的对比图。在图中,第 1 道为深度;第 2 道为成像测井;第 3 道为成像测井电导率曲线垂直方向小波变换增强的裂缝信息;第 4 道为成像测井水平方向小波变换增强的裂缝信息;第 5 道为电成像测井二维小波变换增强的裂缝信息。从图中可以看到,电成像测井的二维 *coif5* 小波变换可以很好地显示出低角度缝、水平缝和钻井诱导缝信息,从而增强了成像测井识别裂缝的能力,为成像测井的人机交互解释提供依据。

通过以上研究可以发现,成像测井单一的垂直方向(图 4 中第 3 道)或水平方向(图 4 中第 4 道)的小波变换所显示出的裂缝信息不完全,只有将垂直方向和水平方向成像测井的小波变换相结合(图 4 中第 5 道),才能更全面地显示出裂缝的信息,而不会造成裂缝信息的丢失,从而使得成像测井识别出的裂缝更为准确。

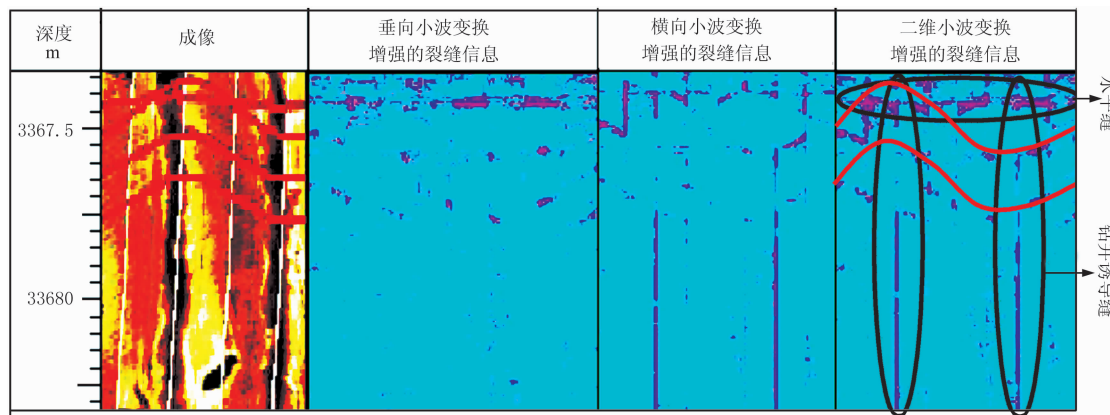


图 4 A 井成像测井二维 *coif5* 小波变换增强的裂缝信息与原成像测井对比图

6 结论

本文利用电成像测井的二维小波变换增强水平缝、低角度缝、高角度缝和钻井诱导缝的信息,从而使得电成像测井识别的裂缝更为准确。其中电成像测井电导率曲线垂向的小波变换可以增强水平缝和低角度缝的信息;电成像测井水平方向的小波变换可以增强钻井诱导缝、低角度缝和高角度缝信息。二者结合,即二维小波变换则可以较全面地反映裂缝信息。电成像测井的二维小波变换增强的裂缝信息,可为人机交互解释中的裂缝识别提供依据。

参考文献

- [1] 李清松,潘和平,张荣. 电阻率成像测井进展. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 304~310
Li Qingsong, Pan Heping, Zhang Rong. The progress of resistivity imaging log. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2005, 2(4): 304~310
- [2] 罗利. 低孔砂岩孔隙度计算方法及裂缝识别技术. 测井技术, 1999, 23(1): 33~37
Luo Li. Porosity calculation and fracture identification for low porosity sandstone. *WLT*, 1999, 23(1): 33~37
- [3] 肖丽,范晓敏. 利用成像测井资料标定常规测井资料裂隙发育参数的方法研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 559~563
Xiao Li, Fan Xiaomin. Study on the method of evaluating fracture intensity from conventional logs calibrated imaging logs. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 2003, 33(3): 559~563
- [4] 孙加华等. 声电成像测井技术在储层裂缝识别中的应用. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(3): 100~102
Sun Jiahua et al. Application of acoustoelectric image-forming logging technique in reservoir fracture identification. *PGODD*, 2006, 25(3): 100~102
- [5] 高霞,谢庆宾. 储层裂缝识别与评价方法新进展. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1460~1465
Gao Xia, Xie Qingbin. Advances in identification and evaluation of fracture. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1460~1465
- [6] 邓模,瞿国英,蔡忠贤. 常规测井方法识别碳酸盐岩储层裂缝. 地质学刊, 2009, 33(1): 75~78
Deng Mo, Qu Guoying, Cai Zhongxian. Fracture identification for carbonate reservoir by conventional well logging. *Journal of Geology*, 2009, 33(1): 75~78
- [7] Behzad Tokhmechi et al. Fracture detection from water saturation log data using a Fourier-wavelet approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, (69): 129~138
- [8] Zhang Xiaofeng, Pan Baozhi, Zhang Chengen. A study of wavelet transform in the identification of fracture of formation micro-conductivity image logging. // The 2nd International Conference on Information Science and Engineering, 2010, 4888~4891
- [9] 苟量,彭真明. 小波多尺度边缘检测及其在裂缝预测中的应用. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 309~313
Gou Liang, Peng Zhen-ming. Multi-scale edge detection of wavelet and application in fracture prediction. *OGP*, 2005, 40(3): 309~313
- [10] 葛哲学,陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用. 北京:人民邮电出版社, 2006

(本文编辑:冯杏芝)

欢迎订阅 2012 年《石油地球物理勘探》

《石油地球物理勘探》是一份创刊于 1966 年、伴随着我国石油工业的飞速发展而迅速成长起来的优秀科技期刊。她于 1992 年、1997 年蝉联全国优秀科技期刊一等奖; 1999 年荣获首届国家期刊奖; 2001 年进入中国期刊方阵, 获“双高期刊”荣誉; 2003 年、2005 年蝉联第二届和第三届国家期刊奖百种重点期刊; 2008 年获中国精品科技期刊。当前为美国工程引文索引(EI)收录的源刊。主要报道石油物探的新理论、新方法、新技术、新经验, 范围涉及地震资料采集、处理、综合解释、非地震勘探、物探仪器及装备的研制等, 为从事石油勘探及相关领域的广大科研和生产人员服务。

该刊为双月刊, 每期定价 50 元, 全年共 6 期正刊(赠送 1 期增刊), 订价 300 元。订阅者可从本刊网站 <http://www.ogp-cn.com> 下载订单, 填写好发行凭证寄回编辑部, 通过银行汇款者请在汇票上注明“订刊”字样。

银行汇款收款单位: 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司

开户银行: 中国建设银行股份有限公司涿州物探分理处 帐号: 13001666209050000633

邮局汇款及订单请寄: 河北省涿州市 11 号信箱《石油地球物理勘探》编辑部 邮编: 072751

查询: (0312)3739320 苏丽霞; Email: ogpslx@sina.com

中国石油学会石油物探专业委员会秘书处