

· 测井技术应用 ·

# 基于测井曲线小波分析与希尔伯特变换的流体识别新方法

赵军龙\*<sup>①</sup> 李新胜<sup>②</sup> 张彬<sup>③</sup>

(①西安石油大学油气资源学院,陕西西安 710065; ②陕西省地矿局物化探队,陕西西安 710043;

③延长油田有限责任公司定边采油厂,陕西定边 718600)

赵军龙,李新胜,张彬. 基于测井曲线小波分析与希尔伯特变换的流体识别新方法. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2):290~294,305

**摘要** 低渗、特低渗及低阻油气等复杂储层的流体性质所对应的测井响应特征较为复杂,流体识别和评价的难度较大,多解性突出。本文以岩心、地质和动态资料为基础,从小波分析和希尔伯特变换原理出发,通过建立理论正演模型,对其测井响应进行小波分解与重构,选择能较好反映流体性质变化的趋势信号,对其开展希尔伯特变换,建立并分析趋势信号的振幅谱和相位谱,得出基于小波分解重构、希尔伯特变换的谱特征与流体性质关系。研究表明,常规测井曲线的小波重构信号可以更好地反映流体性质的纵向分布特征,小波重构测井曲线希尔伯特变换的振幅谱和相位谱可清晰地揭示流体性质的纵向变化及差异。将此方法应用于鄂尔多斯盆地,取得良好效果。

**关键词** 复杂储层 测井曲线 小波分解与重构 希尔伯特变换 流体性质识别

## 1 引言

储层流体识别通常以饱和度测井系列为主,孔隙度测井系列和岩性测井系列曲线为辅,借助阿尔奇公式开展。前人研究中也提出了利用电阻率测井曲线幅度<sup>[1]</sup>、声波时差—深感应电阻率交会图<sup>[2]</sup>,以双电阻率比值为基础<sup>[3,4]</sup>,利用常规声波测井曲线重构电阻率曲线<sup>[5]</sup>,利用多参数逐步判别<sup>[6]</sup>等方法开展流体性质识别,取得了一定的成效。但这些方法的共同点是以电阻率、声波时差等测井曲线为基础,直接通过比值法、交会法及多参数判别法识别流体性质,使用条件限制明显。在实际工作中,由于复杂油气层自身的“复杂性”和“特殊性”,流体性质差异引起的测井响应差异也被“模糊化”,导致油水界面划分困难,油层识别效果不够理想。

在非平稳信号分析中常用的小波分析具有良好的时间和尺度特征,它可以将测井曲线的细节特征和趋势特征清晰展现出来。前人已将小波技术用于重构测井曲线,在地层划分<sup>[7]</sup>和提高纵向分辨率<sup>[8]</sup>方面取得了一定成效。希尔伯特变换则可以把非平稳信

号转换成复数域信号,从振幅和相位角度解译测井曲线包含的信息,前人已将其引入到测井资料处理中,在开展高分辨率层序地层划分<sup>[9,10]</sup>及识别岩石构造破碎带方面<sup>[11]</sup>取得一定效果。笔者试图将小波分析技术和希尔伯特变换结合起来,引入到复杂油气储层流体识别的研究工作中,以期得到更好的结果。

## 2 小波分析与希尔伯特变换基本原理

### 2.1 小波分析与曲线重构

小波变换的数学基础是傅里叶变换<sup>[12]</sup>。小波变换的含义是把称为基本小波的函数  $\Psi(t)$  做位移  $\tau$  后,再在不同尺度  $a$  下与待分析信号  $x(t)$  做内积,即

$$\text{WT}_x(a\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad a > 0$$

若采用的小波满足可容许条件,则其逆变换存在,可根据信号的小波系数精确恢复原信号。小波变换的特点和作用包括:①具有多分辨率特点,可以由粗到细地逐步观察信号;②可把小波变换看成基本频率特性为  $\Psi(\omega)$  的带通滤波器在不同尺度下对信号滤波;③适当地选择基本小波,使  $\Psi(\omega)$  在时域上为有限支

\* 陕西省西安市西安石油大学油气资源学院,710065

本文于2009年2月18日收到,最终修改稿于2009年12月19日收到。

本项研究属陕西省科学技术研究发展计划项目(工业攻关计划)(编号:2009K10-15)。

撑,  $\Psi(\omega)$  在频域上也比较集中, 便可以使小波变换在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力, 这样有利于检测信号的瞬态或奇异点。

Mallat 在图像分解与重构的塔式算法启发下, 根据多分辨率理论, 提出了小波分解与重构的快速算法, 称为 Mallat 塔式算法<sup>[12,13]</sup>, 如图 1。

Mallat 塔式算法的实现可转换为滤波器组  $H$  和  $G$  的设计。滤波器  $H$  的作用是实现函数  $f(t)$  的逼近  $C_j$ , 而滤波器  $G$  的作用为抽取  $f(t)$  的细节  $D_j$ <sup>[9]</sup>。因此, 可运用 Mallat 塔式算法完成测井曲线的小波分解和重构。进行测井曲线的小波分解与重构时, 必须选择正则性小波进行测井曲线小波变换<sup>[14]</sup>, 这些小波主要有 Daubechies、Symlet 以及 Coiflet 小波等。本文中 choice Symlet 小波进行测井曲线的分析研究。

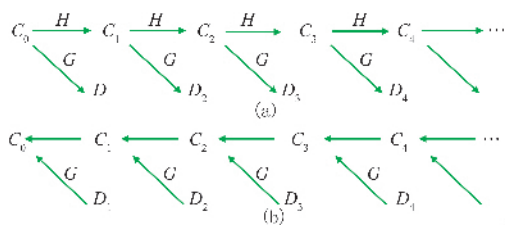


图 1 一维 Mallat 算法(据文献[12,13])  
(a)分解; (b)重构

## 2.2 希尔伯特变换及谱分析

希尔伯特变换可将一个实数信号变换为复数信号, 从而可简化和改进许多信号的处理<sup>[15]</sup>。  $x(n)$  的希尔伯特变换可以看成是信号通过一个幅度为 1 的全通滤波器的输出, 信号  $x(n)$  经过该变换器后, 正频率成分做  $-90^\circ$  的相移, 负频率成分做  $+90^\circ$  的相移。利用希尔伯特变换可以提取信号的振幅和瞬时相位信息<sup>[16]</sup>。

希尔伯特变换器的单位脉冲冲激响应函数  $h(n)$  的定义为

$$h(n) = \frac{1 - (-1)^n}{n\pi} = \begin{cases} 0 & n \text{ 为偶数} \\ \frac{2}{n\pi} & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

设序列  $x(n)$  的希尔伯特变换是  $\hat{x}(n)$ , 则有

$$\hat{x}(n) = x(n) * h(n) = \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{x(n-2m-1)}{2m+1}$$

求出  $\hat{x}(n)$  后, 即可构成  $x(n)$  的解析信号  $z(n) = x(n) + j\hat{x}(n)$ 。

希尔伯特变换的性质主要包括: ①序列  $x(n)$  通过希尔伯特变换后, 信号频谱的幅度不会发生改变;

②序列  $x(n)$  与其希尔伯特变换  $\hat{x}(n)$  是正交的。因此可以利用希尔伯特变换对测井曲线进行振幅谱和相位谱分析, 揭示在常规测井曲线上不能直接看到的更多地质信息。

## 3 理论模型的小波分析与希尔伯特变换

常规测井曲线中既包含流体性质信息, 又包含丰富的地层信息, 直接根据常规测井曲线开展油水界面划分、流体性质识别会受到地层岩性变化、夹层及井径变化等因素的干扰。鉴于地层的流体性质信息往往表现为低频率特征, 而岩性变化、夹层及井径变化信息往往表现为高频特征, 因此, 选用恰当的小波函数对常规测井曲线开展小波分解, 提取能反映地层流体性质的低频成分, 利用低频信息的小波系数重构测井曲线, 可能得到主要反映地层流体性质的新测井曲线。对重构后的测井曲线开展希尔伯特变换, 便可从复数域观察和剖析流体性质的测井曲线特征。

本文基于 MATLAB 平台<sup>[12,17]</sup>, 开展了测井曲线小波分解与重构、希尔伯特变换编程。

### 3.1 小波重构理论模型测井曲线

首先从典型的理论模型入手分析常规测井曲线的小波重构特征。这里主要建立了四种理论模型(图 2): 图 2a 为上油下水(电阻率上高下低突变); 图 2b 为上油下水递变(三级电阻率变化); 图 2c 为低阻油层(电阻率呈上下高中间低); 图 2d 为上油下水的油水渐变(电阻率呈上高下低缓变)。没有高频成分干扰的理论模型测井曲线对油水界面反映清晰, 但实际中测井曲线通常受到岩性变化、夹层和井径变化等高频信息的影响, 油水界面变得模糊不清。为了模拟实际测井曲线受到岩性变化、夹层及井径等影响, 这里给理论模型测井曲线加入了高频干扰, 见图 2 中的加噪曲线。可以看出, 受到噪声干扰的测井曲线界面特征变得模糊。研究表明, 用小波分解的第 4 条近似信号重构的测井曲线(即图 2 中 a4), 可以较为理想地反映油水界面的变化和电阻率变化趋势。

### 3.2 小波重构测井曲线的希尔伯特变换谱特征

图 3 为对上述模型中的重构电阻率测井曲线(a4)开展希尔伯特变换后获得的振幅谱和相位谱。

从图 3 可以看出, 将小波重构测井曲线(a4 即第 4 条近似信号)的希尔伯特变换振幅谱和相位谱相结

合,可以很好地完成油水界面的识别。一般来说,储层中存在上油下水时,从上部油层向下部水层相位谱幅值增大、振幅谱幅值下降,当相位谱幅值达到峰值、振幅谱下降到较低幅值时,对应油水分界面;油层一般对应的是振幅谱的高值段、相位谱的幅值抬高段,而水层一般对应振幅谱的低值段、相位谱的降低段。

研究表明,振幅谱的突变主要是由油层、水层的

电性特征差异引起;而相位谱突变面反映了储层流体性质变化引起电阻率测井曲线相位特征的变化;油水层界面对应 a4 重构测井曲线振幅谱最小值、相位谱的最大值位置;实际测井曲线由于包含大量岩性变化、流体性质变化信息,会出现多个次级相位谱和振幅谱的峰值。因此,应注意综合其他岩性测井系列、孔隙度测井系列曲线,尽可能剔除干扰、提高油水层界面的识别能力。

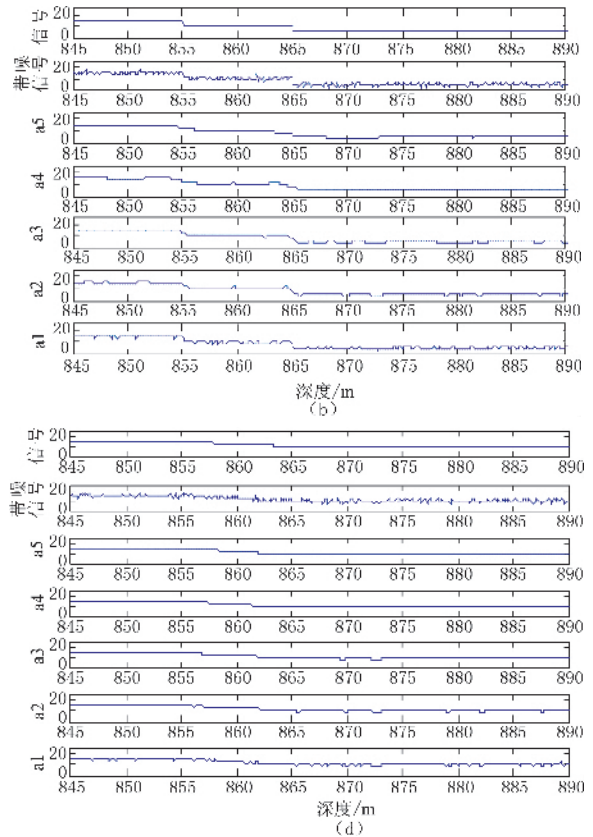
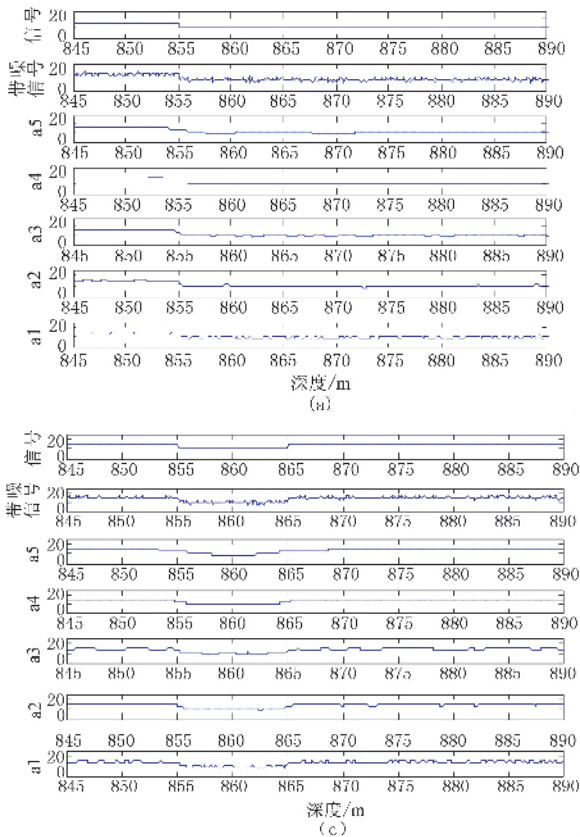


图2 理论模型电阻率测井曲线及小波重构曲线

(a)上油下水; (b)上油下水渐变; (c)低阻油层; (d)上油下水渐变

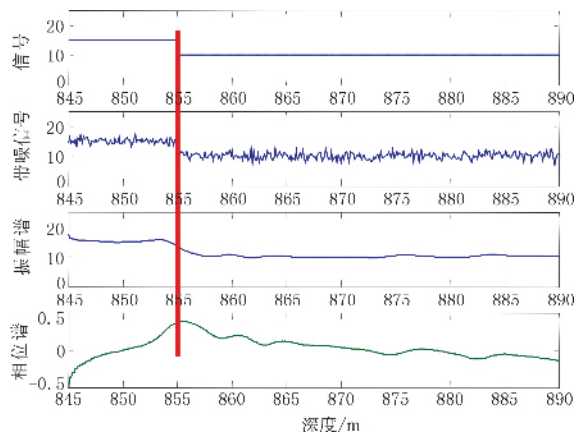


图3a 上油下水模型(图2a)的 a4 振幅谱和相位谱

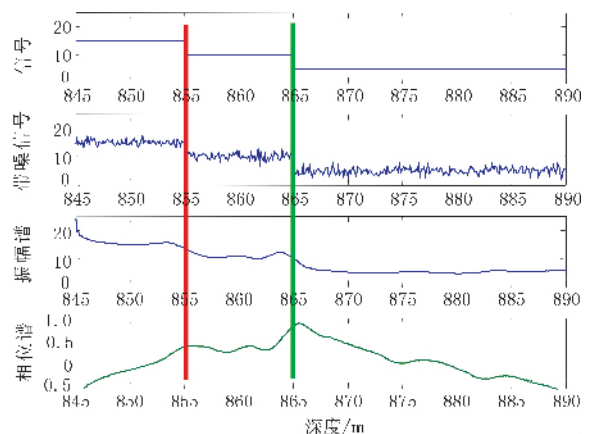


图3b 上油下水渐变模型(图2b)的 a4 振幅谱和相位谱

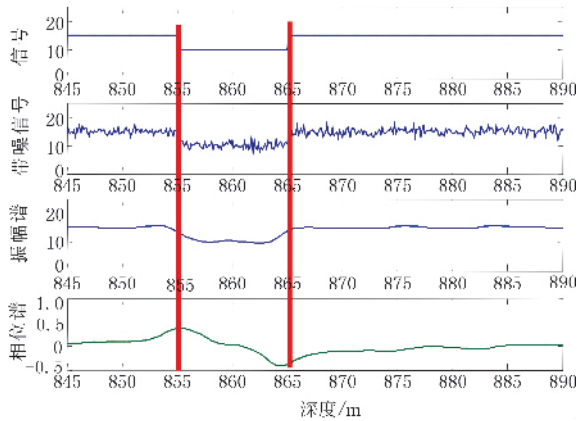


图 3c 低阻油层模型(图 2c)的 a4 振幅谱和相位谱

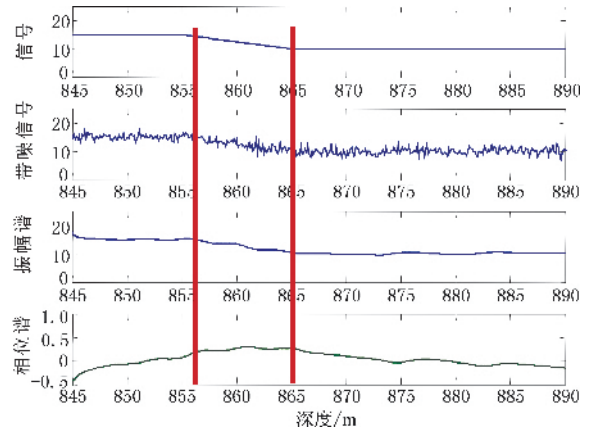


图 3d 上下水渐变模型(图 2d)的 a4 振幅谱和相等

### 4 应用实例

选择鄂尔多斯盆地西北部复杂储层区块内的一口井,开展基于小波域测井曲线希尔伯特变换,并用于流体性质识别研究。

DZ23 井延 9 储层段深感应电阻率  $R_t$  为  $7.35 \Omega \cdot m$ , 中感应电阻率为  $8.89 \Omega \cdot m$ , 八侧向电阻率为  $14.02 \Omega \cdot m$ , 油层并非传统的“油层低侵”。油层组砂体底部含水层深感应电阻率  $R_o$  为  $3.95 \Omega \cdot m$ ,  $R_t/R_o < 2.0$ , 但试油结果为只出油不出水, 日产油为  $23.4 t$ 。该油层为典型的低阻油气层。

直接根据常规测井曲线开展油水层识别及油水界面划分难度大。因此, 研究中先利用岩性测井系列和孔隙度测井系列进行储层划分, 再对目的层段深感应电阻率测井曲线(RILD)开展了小波分解与重构后的希尔伯特变换分析, 结果见图 4。

从图 4a 可以看出, 原始的深感应电阻率测井曲

线(RILD)经过小波分解与重构后, 第 4 条趋势信号(小波分解的第 4 条低频信号重构的近似信号)中剔除了岩性、夹层等的影响, 重构电阻率测井曲线较好地反映了岩性宏观变化和流体电阻率变化趋势。而图 4b 中小波重构的第 4 条近似 RILD 信号的希尔伯特变换振幅谱和相位谱清晰地指示了油水界面的位置(图中红线左边砂体对应油层段, 红线与绿线之间砂体对应油水过渡层段, 绿线右侧砂体对应水层段); 另外, 下部的粉色线对应该段砂岩中的油水界面。

需要指出, 由于岩性纵向变化也会引起重构电阻率测井曲线的相位谱和振幅谱变化, 这与流体性质变化引起的相位谱和振幅谱变化容易混淆, 因此, 如果单纯依据相位谱和振幅谱来判断流体性质会引起较大误差。故在使用本方法时, 应先用岩性测井系列划分出储层和隔夹层, 再运用小波重构及希尔伯特变换技术进行储层流体性质识别。试油资料和生产资料表明, 基于小波域测井曲线希尔伯特变换后的测井解释(图 5)确定流体性质能力好于直接根

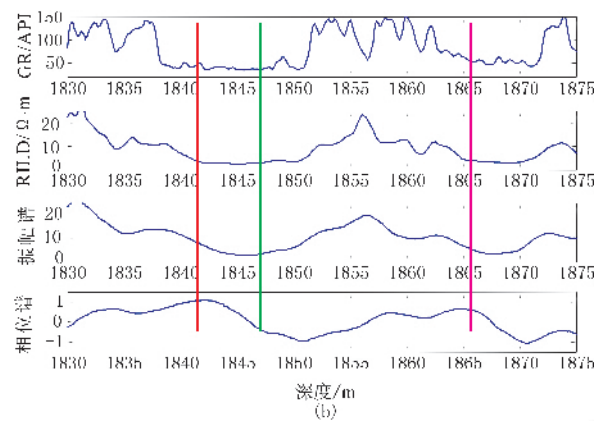
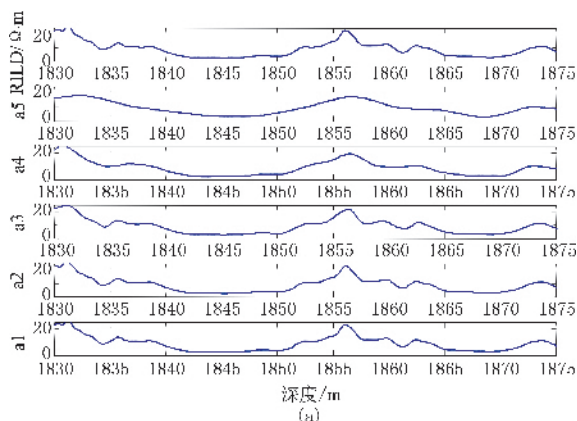


图 4 DZ23 井 RILD 测井曲线振幅谱和相位谱特征

(a) 原始 RILD 曲线小波分解与重构; (b) 重构 RILD 曲线振幅谱和相位谱及自然伽马和 RILD 测井曲线

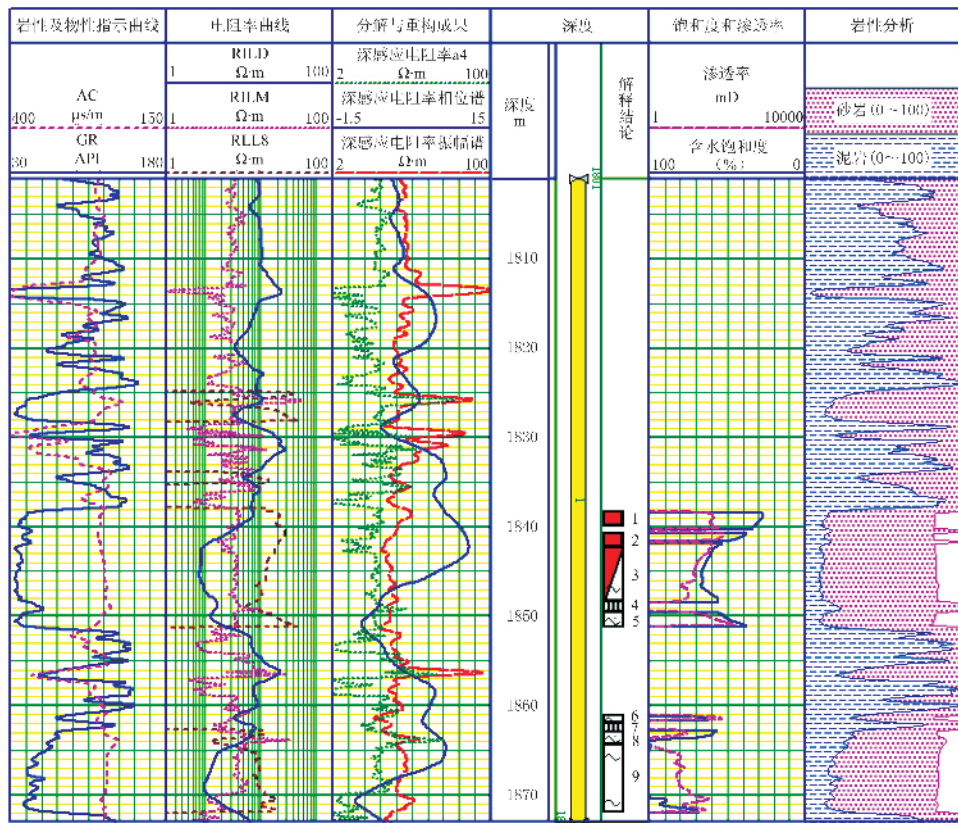


图5 DZ23井综合解释成果图

据常规测井曲线确定油水界面和识别流体。

## 5 结束语

本文首次提出运用小波分解重构技术和希尔伯特变化方法开展油水界面划分及流体性质识别新思路,并在 MATLAB7.0 平台上实现了相关软件编程与技术开发。研究表明:

(1)运用正则性小波进行测井曲线的小波分解与重构可以实现去除高频成分干扰,清晰展示信号趋势特征;对重构测井曲线开展希尔伯特变换,可从振幅谱和相位谱角度认识和分析信号特征,揭示常规测井曲线无法直接获取的地质信息。

(2)由电阻率曲线小波分解第4条近似信号重构的曲线经希尔伯特变换产生的振幅谱、相位谱变化,主要是由于油层、水层的电性特征差异引起。油层一般对应振幅谱的高值段、相位谱的幅值上升段,而水层一般对应振幅谱的低值段、相位谱的下降段;第4条重构测井曲线振幅谱最小值、相位谱的最大值位置与油水层界面对应良好。

(3)由于地层岩性变化、夹层等也会引起重构电阻率曲线相位谱和振幅谱变化,这与流体性质变化引起的相位谱和振幅谱变化容易混淆,应先用岩性测井系列和孔隙度测井系列曲线剔除干扰,再运用小波重构及希尔伯特变换技术进行储层流体性质识别。

(4)本文研究建立的相关技术及开发的程序在低渗储层和低阻储层等非常规油气层的油水界面划分和流体性质识别中取得了较好的效果。

由于实际测井曲线的复杂性,应注重地质约束测井、岩心刻度测井,将多种测井系列的曲线综合分析,以提高本方法的准确性和应用效果。

### 参考文献

- [1] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.山东东营:石油大学出版社,1996,134~138
- [2] 郭方达,陈程.大情字井油田流体性质识别方法.断块油气田,2008,15(3):94~96
- [3] 郑雷清.双电法测井在低电阻率储层流体性质识别中的应用.石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(3):304~306
- [4] 杨洪明,谢丽,马建海等.用侧向与感应电阻率比值识别低渗透率储层流体性质.测井技术,2005,29(1):49~51

(下转第305页)