

小波分析在测井储层识别和划分中的应用^{*}

陈科贵¹ 高伟¹ 利霞² 王刚¹ 伍玉平¹ 赵志恒¹ 陈宇家² 徐静³

(1.西南石油学院 2.中国石油玉门油田分公司 3.新疆石油管理局)

陈科贵等.小波分析在测井储层识别和划分中的应用.天然气工业,2005;25(7):38~40

摘要 小波分析有“数学显微镜”之称,具有多分辨率的特点。实践证明,Mexican Hat 小波函数在用连续小波变换将测井资料转换为小波系数,不同小波尺度对测井信号进行多分辨率处理方面比其它小波函数要好。由于小波系数与储层有很好的相关性,大尺度系数对应厚层的响应,小尺度系数对应薄层的响应,在实际应用中小波尺度以从大到小的方式进行取值,这样用小波系数对储层进行识别和划分,能够取得很好的效果。通过柴达木盆地跃进地区多口井的实际应用和对比,该方法在储层划分,特别是在薄层和薄互层的识别与划分方面具有迅速、准确的优点。同时对 GR 资料和 SP 资料的小波系数划分储层进行对比分析,表明 GR 资料具有不易错划储层和漏划储层的优点。

关键词 波 数据分析 测井解释 油气层 储集层 地层划分

在测井解释中,储层划分的正确与否直接关系到油气的产量、成本和资源的利用率。如何利用纵向分辨率较高的测井资料,对储层进行快速、准确的识别和划分,已成为提高油气勘探开发的成功率的一个关键问题。由于勘探目标的复杂化,许多薄层、薄互层储层出现,这对测井解释要求也越来越高。当在只有常规测井资料时,如何提高测井资料的解释精度成了人们普遍关心的问题。信息科学中的小波分析方法是一种很好的信号处理方法,目前主要应用在地震资料的处理中,在地震资料去噪,子波的识别和重构等方面都取得了较好的效果,而对在测井资料的应用当前研究的不太多。本文把它应用到测井资料的处理上,并用小波系数对储层进行识别和划分也得到了很好的效果。柴达木盆地西部的跃进地区的碳酸盐地层,以基质孔隙为主,储层厚度小且曲线特征不明显,仅仅从测井曲线上识别和划分储层存在一定的困难。利用小波分析方法对测井数据进行处理后,获得了较好的效果。

一、小波分析理论及步骤

小波分析方法是一种信号的时间—尺度(时间—频率)分析方法,具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一

种窗口大小固定不变但其形状可改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。它是在短时傅立叶变换的基础上发展起来的,其最大的特点就是能够根据信号的频率的高低进行调节,使信号分析具有时间局部分析能力^[1,3]。

小波分析是指在 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅立叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$ 。当满足允许条件: $C_{\psi} = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 时,称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波^[1,3]。将母函数经 $\psi(t)$ 伸缩和平移后,就可以得到一个小波序列。 $L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间,即能量有限的信号空间。

对于连续的情况,小波序列为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$$a, b \in R; a \neq 0$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

其窗口形状为两个矩形:

$$[b - a\Delta\psi, b + a\Delta\psi] \times \left[\frac{(\pm\omega - \Delta\psi)}{a}, \frac{(\pm\omega + \Delta\psi)}{a} \right]$$

^{*} 本文得到西南石油学院国家重点实验室开放基金项目 PLN0125 和院 242 项目的支持。

作者简介: 陈科贵,1959年生,副教授,博士;现从事测井解释与工程测井应用研究。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83033397。E-mail:chenkegu@21cn.com

由于 a 、 b 值的变化,让小波变换对不同频率在时域上的取样步长是调节性的,即在低频时小波变换的时间分辨率较差,而频率分辨率较高;在高频时小波变换的时间分辨率较高,而频率分辨率较低,这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点^[1]。

对信号进行小波分析后,可以得到以不同尺度 a 的评估信号在不同时间段的大量系数,即相应的小波系数 $W_f(a,b)$ ^[3]。并可以用图形的方式把它表示出来,在图形中,系数的大小是以灰度的深浅来表示,颜色越深,则变换后的系数 $W_f(a,b)$ 越大(如图 1-a)。

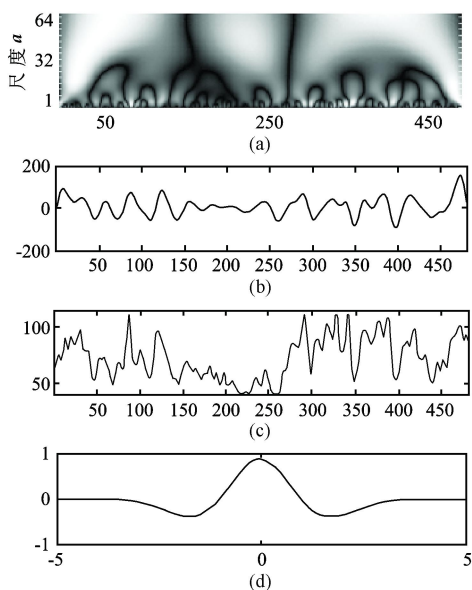


图 1 小波系数曲线图

根据需要可以得到某一尺度 a 时的小波系数曲线(图 1-b)。这条曲线能够直观的显示了小波函数与被分析信号之间的相似程度,并且还可以通过控制 a 的大小,使小波系数曲线能和人们所关心的某些参数具有一定的相关性,比如储层的划分、地层的突变与沉积旋回^[2]、油气水层的识别^[5]等,若它们之间有很好的相关性,就可以根据这条曲线快速、准确的判断相关参数的变化情况。

二、油田应用实例

笔者对柴达木盆地跃进地区几口井的测井数据进行了小波分析处理,提取的资料是跃西构造上的 16 井和 24 井 E_3^2 碳酸岩储层段的 GR 和 SP 数据,该段储层为孔隙性储层,其孔隙类型主要是以次生溶蚀孔隙为主、原生孔隙为辅,中孔、大孔、特大孔仅

见于藻灰岩。由于层位薄,仅仅从测井曲线上划分储层存在一定的困难。用小波分析对这几口井的测井数据处理流程如下:

首先将待分析的测井数据由深度域转换为“时间域”,即按采样点的个数,顺序的将它们排列在坐标轴上。例如,跃西构造 16 井 1530~1590 m 井段的 GR 测井数据,转换后如图 1-c 所示。

第二,选取适合的小波函数对测井数据进行连续小波变换。为了避免二进制小波变换只有 2^n 尺度的情形,笔者采用连续小波变换,而连续小波变换处理的信号也是以离散形式给出的,这给处理离散的测井数据带来了便利。通过试验证明,可能因为 Mexican Hat 小波函数与高斯函数有关系的缘故^[4],从而有很好的处理效果,Mexican Hat 小波波函数如图 1-d。处理后得出类似于图 1-a 的小波系数灰度图,图中纵坐标表示不同的小波尺度 a ,横坐标表示“时间域”。

最后,根据地质条件的不同,选取适合的尺度,得出相应的小波系数,并画出该尺度的小波系数曲线。由于对地质条件的认知程度的不同,对储层的划分也是一个循序渐进的过程:最初只能划分出厚度较大的储层,很难划分出薄层,但是测井是纵向分辨率很高的资料,利用小波变换是信号分析的“数学显微镜”的特点,用不同的小波尺度对测井资料进行小波分析变换处理,可以对储层进行更为精细的划分。在尺度的选取,一般遵循由大到小的原则,尺度越大,意味着小波函数在时间上越长,即被分析的信号区间也就越长,因此,大尺度意味着主要获取的是信号的低频特性,在地质上主要是厚层的响应。反之,尺度越小,意味着只与信号的非常小的局部进行比较,因此,主要获取的是信号的高频特性,在地质上主要是薄层的响应。

图 2-a 是跃西构造 16 井 1530~1590 m 井段 GR 资料采用 Mexican Hat 小波函数,尺度 $a=62$,进行连续小波变换的结果,从图中可以看出,小波系数在 1548~1564 m 处的值低于零线,对应着一个油水同层。当 $a=7$ 时,同样将零线标出,可以识别和划分出更小的储层。从中可以看出:大尺度对应着厚层,小尺度对应着薄层。实际应用中 a 的取值顺序是由大到小,储层的识别顺序也是由厚层到薄层,这样不但能够识别厚层也不会漏掉薄层,而且有快速、准确的优点。

为了进行资料对比,笔者还用该方法对 SP 曲线资料进行了处理,同样选取了 16 井的 1530~1590 m

井段,用不同的尺度 $a=7$ 和 $a=62$ 对该资料进行了处理,得到的结果如图 2-b 所示,从图中可以看出,用 SP 资料对储层进行识别和划分,可能使厚层错划,如图中根据处理结果划分的层厚度大于实际层厚度,同时可能使薄层漏划,如在 1541~1544 m 处的一个油层漏划。因此,对于用小波分析对储层的识别与划分,用 GR 资料比 SP 资料好。

薄层的识别与划分,并应用于实际资料的处理,取得了不错的效果。

在小波尺度的取值时,应该按由大而小的顺序,以识别各种厚度的储层,并且由于该方法是数学方法,因此在应用中应该尽可能的结合各种地质资料,如录井资料,以保证储层划分的准确无误。

通过对 GR 和 SP 资料的处理,对比得出在储层识别和划分方面,用 GR 资料比用 SP 资料好。小波分析在测井资料处理中目前应用较少,对于能否应用测井资料的小波分析解决其它方面的地质问题,比如孔、渗、饱参数的计算等还需要进一步探讨。

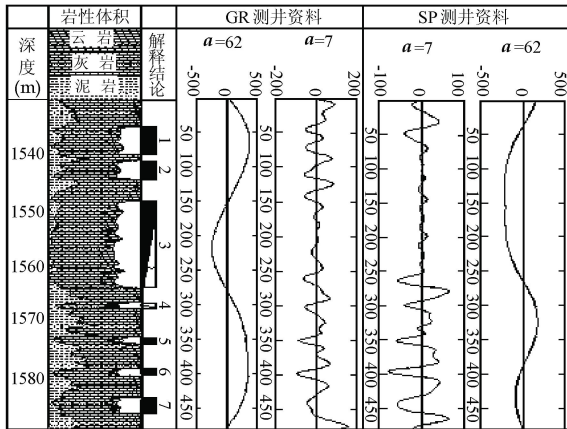


图 2 大、小尺度小波系数曲线与实际储层划分对比

三、结论与建议

将信号分析中的小波分析方法应用于测井解释中的识别和划分储层是充分发挥了小波分析是“数学显微镜”的长处,对识别各种厚度的储层,特别是

参 考 文 献

- 1 胡昌华,张军波,夏军等.基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析.陕西西安:西安电子科技大学出版社,1999
- 2 谭廷栋.测井解释发现油气层.天然气工业,2000;22(6):47~49
- 3 飞思科技产品研发中心.MATLAB 6.5 辅助小波分析与应用.北京:电子工业出版社,2003
- 4 宋隍冰,王兆年.非均质油气藏的测井技术发展方向.天然气工业,2002;22(2):31~33
- 5 司马立强等.川东地区石炭系储层流体性质测井判别方法适应性分析.天然气工业,2002;22(6):45~48

(收稿日期 2005-05-11 编辑 韩晓渝)