

文章编号:1671-8585(2010)04-0275-04

# 基于小波分析的瞬变电磁测深数据处理与解释

冉云<sup>1</sup>, 刘鸿福<sup>2</sup>

(1. 山西省交通规划勘察设计院, 山西太原 030012; 2. 太原理工大学, 山西太原 030024)

**摘要:**煤矿采空区探测中,瞬变电磁测深数据的常规处理与解释方法由于受噪声干扰等因素影响,会出现解释波动范围过大的缺点。通过对测深数据进行小波分析滤波,剔除大部分干扰,并运用小波分析手段检测信号突变点,提高了解释的精度。

**关键词:** 瞬变电磁测深;小波分析滤波;检测;突变点

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

瞬变电磁方法(简称 TEM)是电法勘探的重要分支。近年来,瞬变电磁法勘探发展迅速,不仅广泛应用于金属矿产、石油天然气等领域,而且越来越多地应用于工程探查、考古等其他领域,在煤矿采空区探测中也发挥着重要的作用。

瞬变电磁法仅观测二次场,与其他电性勘探方法相比,它具有体积效应小、纵横向分辨率高、对低阻体反映灵敏等特点。在实际应用中,人工控制的脉冲电磁场包含有各种不同的频谱成分,所观测到的瞬变电磁场实际上是大地对各种频谱成分响应的褶积值,它包含有大地岩层的电性及几何形态等方面的信息。脉冲电磁场源突然切断的瞬间,在地下导电半空间内将产生感应涡流场。在开始的瞬间,涡流集中于地表,然后随时间变化向下、向外扩散,其扩散速度与岩层电性有关,大致与岩层电阻率的平方根值 $\sqrt{\rho}$ 成正比<sup>[1]</sup>。因此,在地表可以观测到反映地电断面的瞬变电磁场。将观测到的电磁场换算成视电阻率值 $\rho_s$ 及二次差分或视纵向电导 $S_s$ 、视探测深度 $H_s$ 等参数加以整理,结合地质资料作出合理地质解释。

在煤矿井田内,未采区与采空后积水区,由于煤层与积水相对围岩为低阻,瞬变电磁测深具有低阻的灵敏性,因而噪声相对较弱;在采空后未积水区,采空区域相对围岩电阻很大,瞬变电磁测深对高阻体反映不灵敏,噪声相对较强。因此,未积水的采空区探测信号处理,仅用常规的拟合滤波等方法往往达不到要求。由于噪声干扰,数据失真及对图纸的解释夹带了太多的人为因素,解释的精度也往往不尽人意。

## 1 小波分析滤波与突变点检测

### 1.1 小波变换

小波变换是一种信号的时间-尺度(时间-频

率)分析方法,具有多分辨分析的特点,在时、频两域中都具有表征信号局部特性的能力,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。它在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率;在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。小波变换分析是针对非平稳信号的处理方法,适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常现象,并展示其成分,所以被誉为分析信号的显微镜。小波变换分析适用于不稳定的信号,尤其是对于那些急剧变化的、高度不稳定的信号效果较好,特别适用于动态、瞬态的信号处理。在瞬变电磁测深法中,得到的实测信号就是动态、瞬变的信号,因此,小波变换处理瞬变电磁测深数据有很大优势。

### 1.2 突变点检测原理

信号的突变点检测是先对原信号在不同尺度上进行“磨光”处理,再对磨光后信号的一阶或二阶导数检测其极值点或过零点<sup>[2]</sup>。

常用的磨光函数 $\theta(t)$ (平滑函数)可选取 Gauss 函数或 B-样条函数。应当满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1$$
$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \theta(t) = 0$$

由卷积性质可得

$$f * \Psi_s^{(1)}(t) = f * \left( s^2 \frac{d^2 \theta_s}{dt^2} \right) = s^2 \frac{d^2}{dt^2} (f * \theta_s(t)) \quad (1)$$

$$f * \Psi_s^{(2)}(t) = f * \left( s \frac{d \theta_s}{dt} \right) = s \frac{d}{dt} (f * \theta_s(t)) \quad (2)$$

收稿日期:2009-12-06;改回日期:2010-03-05。

第一作者简介:冉云(1972—),男,硕士,2010年毕业于太原理工大学地球探测与信息技术专业,现从事电磁法数据处理的研究。

式中： $f * \Psi_s^{(1)}(t)$ 和 $f * \Psi_s^{(2)}(t)$ 表示函数 $f(t)$ 的小波变换； $f * \theta_s(t)$ 称为磨光算子，意思就是 $f(t)$ 的角点磨成光滑弧，使得 $f(t)$ 变成一个光滑函数 $f * \theta_s(t)$ 。

由式(1)和式(2)可以看出， $f(t)$ 的小波变换 $f * \Psi_s^{(1)}(t)$ 与 $f * \theta_s(t)$ 的一阶导数成正比， $f * \Psi_s^{(2)}(t)$ 与 $f * \theta_s(t)$ 的二阶导数成正比。因此，在选取光滑函数 $\theta(t)$ 后，信号 $f(t)$ 的突变点可以通过检测小波变换 $f * \Psi_s^{(1)}(t)$ 和 $f * \Psi_s^{(2)}(t)$ 的模极大值得到<sup>[3]</sup>。

通常选用反对称小波 $\Psi^{(1)}(t)$ 检测阶跃突变点，用对称小波 $\Psi^{(2)}(t)$ 检测局部极值点<sup>[4]</sup>。实际应用中，只有在多尺度检测中都是极值点的位置才是真正的突变点位置。

煤矿采空区探测中，采空区未积水时，相对围岩来说，属相对高阻区。积水后，属相对低阻区。在采空区边缘，视电阻率会发生阶跃式突变。利用小波分析检测信号突变点，就可以确定采空区的边缘。

## 2 小波分析滤波与检测信号突变点步骤

### 2.1 选取适当的小波函数

小波分析中用到的小波函数有很多种，具有非唯一性。主要根据一些常用小波函数的性能，如紧支撑正交性、对称性、消失矩个数、双正交分析、快速算法等方面，结合瞬变电磁信号的特点来选择适当的小波函数。用于信号去噪处理的小波函数一般要求正则性、对称性要好，且小波函数的波形尽可能与信号波形相似；用于信号突变点检测的小波函数，正则性要求较高，且具有较高阶的消失矩。一般地，突变点检测中选用短的小波函数比选用长的小波函数效果更好<sup>[5]</sup>。

对于瞬变电磁测深数据的去噪处理，一般选用sym系小波函数<sup>[6]</sup>。Symlet小波是对Debauchies小波的修改，提高了对称性，保持了近似对称的形式，它具有紧支撑正交性，可进行正交和双正交分析，能够实现精确重构，是有限滤波器，有快速算法<sup>[7]</sup>。图1为sym6小波函数图像及其尺度函数图像。

进行数据突变点检测时，我们经过反复试验，选用了Daubechies小波函数，因为它是非对称性的，正则性非常好，dbN的支撑宽度为 $2N-1$ ，具有N阶消失矩，当N较大时，其正则性约为 $0.2N$ 。图2为

db5小波函数图像及其尺度函数图像。

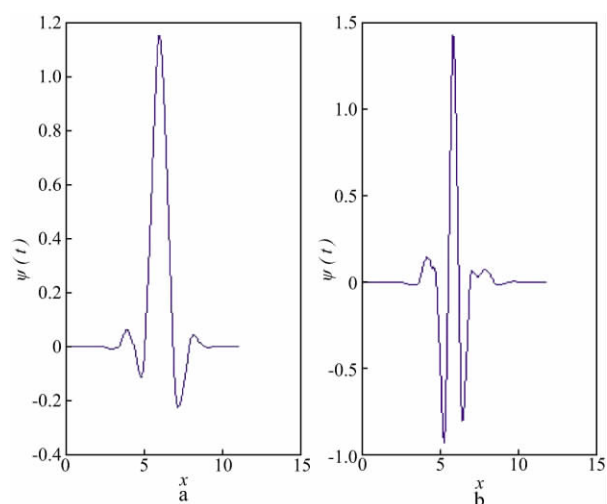


图1 sym6小波函数图像(a)及其尺度函数图像(b)

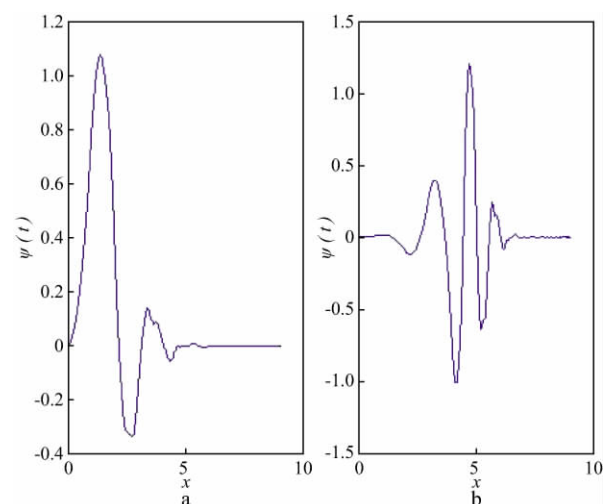


图2 db5小波函数图像(a)及其尺度函数图像(b)

### 2.2 对信号进行滤波处理

野外采集到的信号，含有较多的噪声成分，给解释带来很大的误差，也无法进行突变点检测，必须进行去噪处理。为尽可能保证数据的恢复，对信号的边界数据进行线性延拓处理，即将边界数值向左右各外推 $n/2$ 点数据( $n$ 为滤波器长度)<sup>[5]</sup>。

设信号数据为 $x(0), x(1), \dots, x(a-1), x(a)$ 。对信号左端进行延拓，其值为

$$x(-1) = 2x(0) - x(1) \quad (3)$$

对信号右端进行延拓，其值为

$$x(a+1) = 2x(a) - x(a-1) \quad (4)$$

对阈值的选取，可借助MATLAB的小波工具箱中的阈值选取函数，最好选取多组阈值分别进行

消噪处理,得到不同的结果,并对其进行分析对比,确定能得到最好去噪效果的阈值。

### 2.3 对信号进行多尺度分解

利用处理过的数据,计算出各时间道对应的深度及视电阻率值(以下简称视电阻数据)。

用选取的 db 系小波函数对视电阻数据进行多尺度分解,进行突变点检测,找出突变点对应的点号位置。结合地质资料,给予合理的地质解释。

对视电阻数据进行多尺度分解时,数据的锐变部分会产生大幅值的小波系数,这些小波系数表现了数据(信号)分解的细节(高频)波形,从而通过分析多尺度上的细节波形可以检测出数据(信号)的突变点位置。

## 3 小波分析处理瞬变电磁测深数据

基于上述原理与步骤,我们选取了山西省大同某煤矿的采空区进行试验。

测区位于大同井田中部,为低山丘陵区。井田内地层平缓,倾角一般为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ,呈东南高西北低的趋势。地质构造简单,岩层总体走向近东西向,各时代岩层均无大的含水层。可采的 8#、12#煤层属侏罗系中统大同组。直接顶、老顶为粉细砂岩夹中粗砂岩,伪顶发育炭质页岩,底板为细砂岩。

煤层未开采时,煤层相对围岩为低阻体;煤层采空后,未充水时,相对围岩、煤层为高阻体;充水后,采空区相对围岩、煤层为低阻体。因此,煤层采空后,无论采空区是否充水,它与围岩、未采煤层都有较大的电阻率差异。在煤层开采深度上,视电阻率曲线在采空区边界上会表现出阶跃式突变。利用小波分析可以快速检测到突变点位置,从而划定采空区边界。

煤矿采空区探测一般在井田的局部地区进行,因为探测面积较小时,同一煤层埋深变化不大或近似水平。因此,选择测线上煤层大致埋深深度的数据进行处理,可有效地对测区情况作出判断,对野外施工及下一步布钻验证都有一定的现实意义。

试验线共布置 21 个测点,探测完成后,对实测数据进行了小波变换滤波。图 3 是 8 号点未经处理的感应电压衰减曲线。图 4 是经 sym 6 小波处理后的电压衰减曲线,可以看出,处理后,滤去了大部分高频噪声,曲线变得平滑。长安大学李貅教授曾对这种处理方法发文讨论过<sup>[7]</sup>。从处理后的图像看,单纯的小波分析去噪并不完美。从图 4 可以

看出,尾枝曲线明显被噪声抬高,不符合电压衰减趋势,因此必须结合当地地质条件正演模拟数据进行校正。

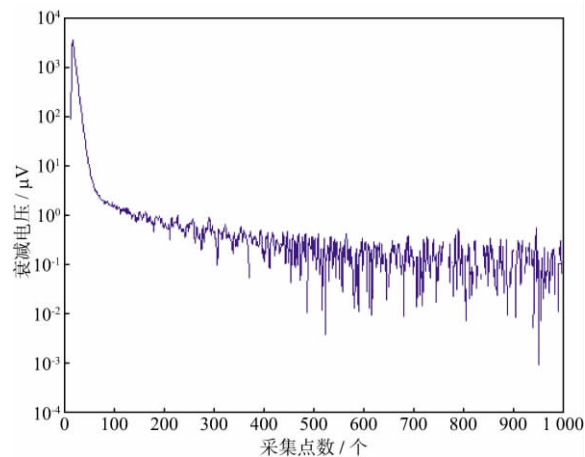


图 3 8 号点衰减电压曲线(未处理)

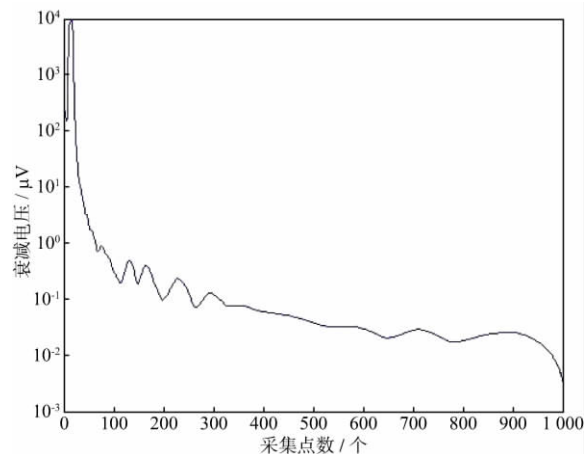


图 4 阈值处理后的 8 号点衰减电压曲线

利用处理过的信号数据,反演计算出对应的视电阻率。图 5 是距地面 160 m 深度的视电阻率曲线及运用 db 5 小波函数进行突变点检测的结果。

对信号进行多尺度分解,从高频系数图来进行分析检测。由图 5 中的  $d_1, d_2, d_3$  三层高频系数图可以看出,信号的小波分解系数模极大值位于 9 号点与 10 号点间,可以解释为视电阻率发生阶跃突变位置,即为采空区边缘。这和矿方提供的数据基本一致(据矿方资料,9 号点为采区边缘)。

为了和常规处理解释方法相对比,又采用二次差分处理。图 6 是利用二次差分曲线分析突变点结果。从图 6 可以看出,10 号点发生视电阻率阶跃式增大,解释为采空区边缘。这是由于二次差分对噪声等影响因素的高敏感性在信号发生跳跃变化时引起的误差。

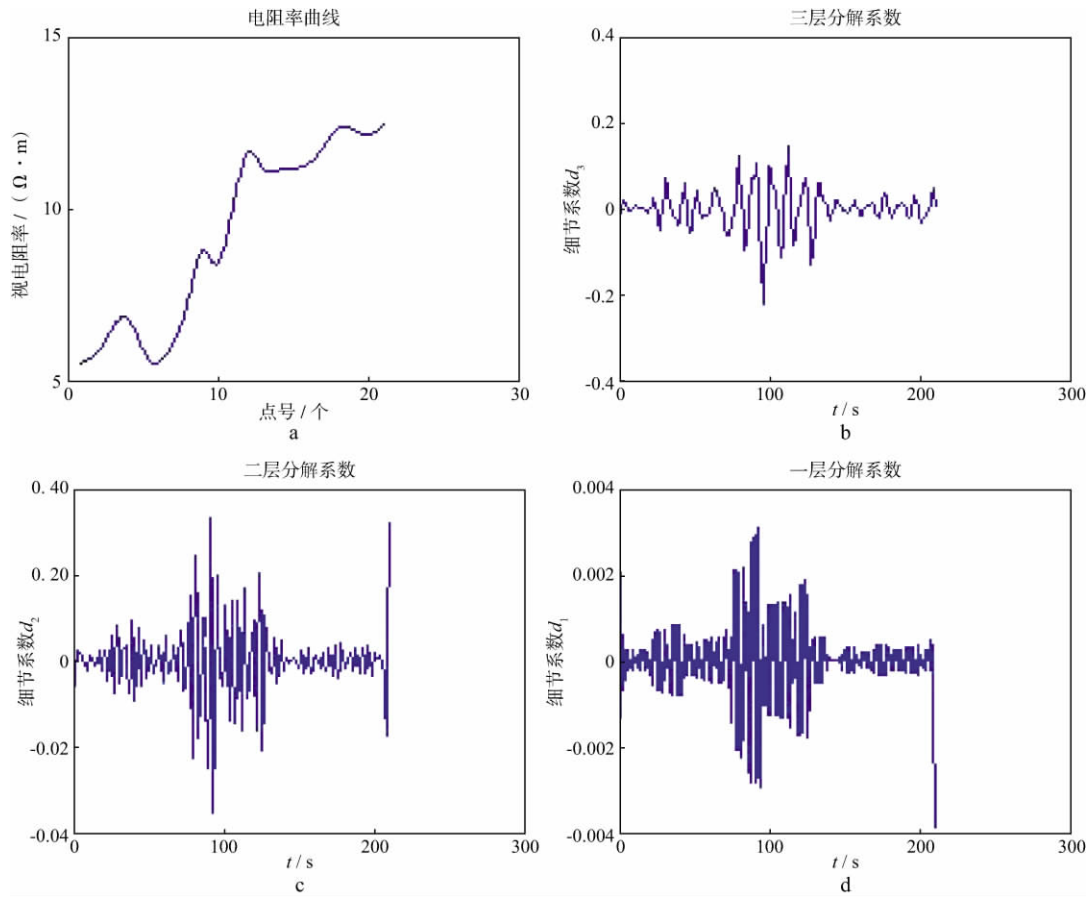


图 5 小波检测突变点结果

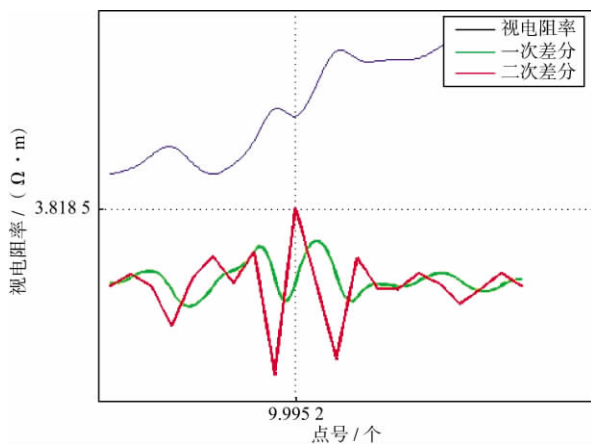


图 6 电阻率二次差分曲线

## 4 结论

1) 运用小波分析处理瞬变电磁测深数据进行突变点检测是可行的,能够缩小解释的浮动范围,提高瞬变电探测数据解释的精度。

2) 对野外取得的数据,要先进行滤波处理,才能进行突变点检测,否则,噪声干扰会使检测无效。

3) 在大量实验的基础上,正确选取小波函数及分解尺度,阈值的选取可以采用默认阈值,也可

以在此基础上取不同数组阈值反复试验,获取最佳阈值。

4) 分析信号的小波分解高频系数图,需从不同的尺度分解图中,选取 2~3 层系数图进行比较,仅在一幅图中表现为突变点,无法确定其为突变点位置。

## 参 考 文 献

- 1 薛年喜. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003. 1~388
- 2 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助小波分析与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003. 1~296
- 3 张书凡,张宁,刘鸿福. 基于小波分析的瞬变电磁信号消噪[J]. 物探与化探,2007,31(增刊):63~65
- 4 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 湖南长沙:中南大学出版社,2007. 1~296
- 5 Mallt S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans IT, 2002, 38(2): 617~643
- 6 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008. 1~328
- 7 李貅,宋建平,马宇,等. 基于小波分析的 TEM 信号提取[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(2):72~75

(编辑:顾石庆)