技术 方法

小波细节的微分特征及其在重力场断裂分析中的应用

杨宇山¹,李媛媛¹,刘天佑¹,林家辉²,付家灿²,张建新²

(1. 中国地质大学地球物理系,武汉 430074;2. 湖北省物化探勘查院,武汉 430056)

[摘 要]利用小波细节的微分特征对重力场进行断裂分析。理论分析和模型计算结果表明,小波 细节具有水平一阶导数的特征,利用该特征对地质体边界的重力场进行小波变换,并结合频谱分析方法 估算重力场小波的场源深度,由此可获得不同深度上断裂的空间位场及特征。与传统的向上延拓和求 水平一阶导数来分析断裂的方法相比,该方法克服了向上延拓异常特征模糊化,使重力场的断裂分析更 加准确和可靠。应用该方法分析了东秦岭地区的断裂分布。

[关键词]小波分析 小波细节 信号奇异性检测 重力场 断裂分析 东秦岭地区 [中图分类号]P631.1 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2003)01-0041-04

0 引言

断裂分析是地球物理资料解释中的一个重要环 节。人们经常根据断裂在地球物理场上所产生的各 种异常特征来进行定性和定量解释,如异常梯度陡 变的等值线密集带;线性的正异常带或羽状排列的 线性异常带;两侧不同性质、不同异常特征的分界 线;剧烈变化的正负异常带;相邻测线异常强度突变 带;异常带轴的水平错动等等。人们还采用相关分 析,水平一阶方向导数,垂向二阶导数,总梯度模,希 尔伯特变换等各种方法来推断解释断裂位置、产状 及性质^[1~3]。为了分析深层的断裂或判断断裂向 下延深的情况,往往通过向上延拓的方法来分析,但 是,随着延拓高度增加,异常变得平坦光滑,即使再 求水平一阶导数,其特征也变得模糊,不仅难以可靠 地分析断裂空间位置,而且异常的信息也大大减少, 这就是以往断裂分析中存在的问题。

小波分析是近年来发展起来的一种新的数学分 析方法,广泛应用于信号与图像处理和石油地震勘 探。利用小波分析人们成功地实现了地震勘探数据 的压缩,地震道的奇性反演,分析石油储层的详细结 构,信号重建与压制面波以及提高地震资料的信噪 比与分辨率;利用小波多尺度分析方法对重力异常 进行分解和多尺度反演,显示了小波分析方法在地 球物理信号处理方面的广阔前景^[4~7]。本文利用 小波细节的微分特征对重力场进行断裂分析。 小波分析及其微分特征

.1 小波分析原理及 Mallat 算法
对信号
$$f(t) = L^2(R)$$
,其连续小波变换为:
 $W_f(b, a) = \langle f, a, b \rangle$
 $= |a|^{-\frac{1}{2}} + f(t) - (\frac{t-a}{b}) dt$

$$\int_{a,b}^{b}(t) \, \mathrm{d}t \tag{1}$$

其中, (t) $L^{2}(R)$ 称为小波母函数, a,b(t)为由 (t) 生成的依赖于参数 a 和 b 的连续小波。在 (t) 的 傅 立 叶 变 换 $\wedge()$ 满 足 条 件 C = +

 $\frac{|\wedge(-)|^{2}}{|-|} d < 的前提下,有小波逆变换公式:$ $f(x) = \frac{1}{C} + |(Wf)(b,a)|_{b,a}(x) \frac{da}{a^{2}} db \quad (2)$

取 $a = a_0^m$, $b = b_0 n a_0^m$, $a_0 > 1$, $b_0 > 0$,则有小波

变换离散形式:

 $W_{f}(m,n) = \int_{m,n}^{+} f(t) \overline{m_{m,n}(t)} dt = \langle f, m_{m,n} \rangle,$ $m_{m,n}(t) = a_{0}^{m/2} (a_{0}^{m}t - nb_{0}), m, n Z (3)$ 相应的小波逆变换为:

$$f(x) = W_f(m, n) _{m, n}(x)$$
(4)

在多分辨分析理论基础上, Mallat 提出了所谓的塔式分解算法, 简述如下:

设(Vj) 是一多分辨分析, 和 分别是相应的

[收稿日期]2002 - 01 - 17;[修订日期]2002 - 03 - 06;[责任编辑]余大良。 [第一作者简介]杨宇山(1977 年 -),男,2000 年毕业于中国地质大学(武汉),获学士学位,在读硕士生,现主要从事地球物理信息处理工作。 尺度函数和小波函数,对于整数 $J_1 < J_2 = Z$,函数 $f(x) = V_j^1$,有以下分解:

$$f(x) = A_{j}^{1}f(x) = A_{j}^{2}f(x) + \sum_{j=J_{1}+1}^{J_{2}} D_{j}f(x)$$
(5)

其中

$$A_{j}f(x) = \int_{m=-}^{+} C_{j,m,j,m}$$
 (6)

$$D_{j}f(x) = d_{j,m,j,m}$$
 (7)

$$\overline{m} \qquad C_{j,m} = \langle J_{1,k}, J_{1+1,k} \rangle C_{j-1,k}$$
$$= \frac{\pi}{k_{k-2m}} C_{j-1,k} \qquad (8)$$

$$d_{j,m} = \begin{cases} < & J_{1,k}, & j_{1+1,m} > C_{j-1,k} \\ + & \\ = & \underbrace{F_{k-2m}C_{j-1,k}} \end{cases}$$
(9)

定义无穷矩阵 $H = (H_{m,k}) = (\bar{\mathbf{x}}_{k-2m})$ 和 $G = (G_{m,k}) = (\bar{\mathbf{x}}_{k-2m}), 则(8)$ 和(9)式可写成矩阵形式

$$C_{j} = HC_{j.1},$$

$$D_{j} = GC_{j.1}, \quad j = J_{1} + 1, \dots, J_{2},$$
(10)

对(10) 式两端同时与函数 _{j,k}(x) 作内积,则 可得 Mallat 重构算法:

$$C_{j} = H^{*} C_{j+1} + G^{*} D_{j+1}, j = J_{2} - 1, ..., J_{1}$$
(11)

上述一维空间的多分辨分析及 Mallat 算法可以 很容易推广到二维空间⁽⁸⁾。

1.2 小波细节的微分特征与信号奇异性检测

在信号处理中,信号中的奇异点及不规则的突 变部分经常带有比较重要的信息,它是信号重要的 特征之一。通常情况下,信号的奇异性分为两类:一 类是信号在某一时刻内,其幅值发生突变;一类是信 号幅值没有突变,但是,信号一阶微分有突变产生。 通常用李普西兹指数(Lipschitz)来描述函数的局部 奇异性^[8,10]。我们知道,小波变换具有空间局部化 和频率局部化性质,因此,利用小波变换来分析信号 的奇异性是比较有效的。

我们知道,对一个信号 f 进行小波分解后,低频 部分 a 是对信号轮廓的描述,而高频部分 d 则是对 信号变化的描述,信号变化大, d 的值大,变化小, d 的值小,在信号突变的位置上,小波变换后的系数具 有模量极大值,因此,小波细节这一特征与一阶微分 类似,本文称之为小波细节的微分特征。

下面将结合小波细节的微分特征及信号奇异性检

测方法,探讨小波分析在重力场断裂分析中的应用。

2 理论模型计算

理论断裂模型由两个上下相互错开的水平板状体 和 组成,剩余密度为 1 = 2 = 0.1g/cm³, 板状体 埋深为5.0~7.5 km,板状体 埋深1.0~ 3.5 km,模型产生的重力异常、经5 阶小波变换后 的各阶重力异常细节及5 阶逼近如图1所示。可以 看到,小波变换后的各阶重力异常细节突出了原重 力异常变化大的部位,即通常所说的梯度带或曲线 拐点位置,而其极值点位置正好对应着断裂错开的 水平位置。由此可见,小波细节与水平一阶导数一 样,具有突出地质体边界的作用。



图 1 小波变换结果: f 重力异常;Dlf~D5f 一阶~五阶小波变换重力异常细节; A5f 重力异常五阶逼近.

3 东秦岭 1 20 万重力断裂分析

采用上述方法首先对东秦岭 52 500 km² 的 1 20万重力异常(图 2)进行小波多尺度分解,然后 对分解后的各阶重力异常细节进行功率谱分析,最 后对该地区的断裂进行不同深度分析。为了验证本 文论述的方法,也利用了传统的求导方法对该地区 的断裂进行了不同深度的分析,并与之相比较。





功率谱。从功率谱上看,三阶小波变换细节主要反 映了深度大约 6~12 km 的断裂分布;四阶小波变 换细节对应于深度大约为 20 km 左右的断裂分布, 基本上反映了切割深度较深的深大断裂。从图 3 可 以看出,该地区断裂主要是由 2 条北西 — 南东方向 深大断裂控制了次级断裂分布和走向。



图 3 东秦岭布格重力异常小波变换三阶和四阶细节灰度图 (灰度图中数据的单位为:g.u.)



为了与传统方法作比较,我们作了不同延拓高度的水平一次导数,它也可以用来解释不同深度断裂分布。图 5(a),(b)分别是上延 5 km 和 10 km 后 45 度水平一次方向导数。通过功率谱分析,小波变

换一阶细节场源深度大约 3.0 km,对应于原平面水 平一次导数,二阶小波变换细节场源深度大约 6.5 km,对应于上延 3 km 的水平一次导数,三阶小波变 换细节场源深度大约 10.2 km,对应于上延 5 km 的 水平一次导数,四阶小波变换细节场源深度大约 22. 3 km,对应于上延 10 km 的水平一次导数。对比图 4 和图 5 两种方法处理的结果,我们可以发现,小波变 换结果与水平一次导数结果大致相同,但小波变换方 法处理结果断裂信息更为丰富而且更加清晰。



(a)上延5km水平一次导数



(b)上延10km水平一次导数

图 5 东秦岭布格重力异常上延 5 km 和 10 km 的水平 一次导数灰度图(45 方向) (灰度图中数据的单位为:g.u./km)

4 结论

小波变换不但具有"数学显微镜'的作用,而且小 波变换细节具有微分特征。利用小波变换细节的微 分特征,结合频谱分析技术,小波变换可以成为重磁 场断裂分析的工具。它与传统的水平一次导数方法 相比具有以下优点:不必经向上延拓,直接利用不同 阶的小波细节就能分析不同深度的断裂,没有向上延 拓的模糊化,异常特征更清晰,断裂信息更丰富。

致谢:感谢苑金臣教授,沈远彤副教授对本项研 究的帮助。

[参考文献]

- [1] 姜 枚,张瑜才,王德夫.试谈统计分析方法在区域重磁资料解
 释中的某些应用[J].物探与化探,1982,6(6):321~327.
- [2] Mohan L, Sundarrajan N, Scshagiri Rao S V. Interpretation of some two dimensional, magnetic bodies using Hilbert transforms
 [J]. Geophysics, 1982, 47(3):376 ~ 387.
- [3] 刘天佑.相关滤波方法及其在扬子地台断裂分析中的应用[J]. 地质科技情报,1993:12,45~50.

- [4] 候遵泽,杨文采.中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报,1997,40(1):85~95.
- [5] 李宗杰,杨 林,王勤聪.小波变换在位场数据处理中的应用[J].石油物探,1997,36(2):86~93.
- [6] 张传银,丘其宪.小波分析及其在地球重力学中的应用展望 [J].地球物理学进展,1998,13(2):73~85.
- [7] 杨文采,施志群,侯遵泽,等.离散小波变换与重力异常多重分 解[J].地球物理学报,2001,44(4):534~541.
- [8] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [9] 徐明才,高景华,刘建勋.东秦岭深地震剖面上莫霍面基本特征的研究[J].地质与勘探,2000,36(1):40~43.
- [10] 胡昌华,张军波,夏 军,等.基于 Matlab 的系统分析与设计
 ——小波分析[M].陕西:西安电子科技大学出版社,1999.
- [11] 徐明才,高景华,柴明涛,等.应用于评价活动断层的地震方法 技术[J].地质与勘探,1999,35(1):36~40.

THE DIFFERENTIAL CHARACTERISTIC OF THE WAVELET DETAILS AND ITS APPLICATION IN FAULT ANALYSIS OF GRAVITY FIELD

YANG Yu - shan¹,LI Yuan - yuan¹,LIU Tian - you¹,LIN Jia - hui²,FU Jia - can²,ZHANG Jian - xin²

(1. Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Hubei Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Wuhan 430056)

Abstract :In this paper, the faults are analyzed in the gravity field based on the differential characteristics of the wavelet details. It is testified by theoretical analysis and model calculation that the wavelet details have the same characteristics as the one - order horizontal derivative. The wavelet transform is applied to the gravity field of the boundary of the geologic body, and the spectrum analysis techniques is also used to estimate the depth of sources for each of wavelet detail, thus, the spatial potential field and its characteristics of different depth can be obtained. Compared with traditional methods, such as upward continuation and the horizontal one - order derivative, the method presented here can overcome anomaly ambiguity in upward continuation, and enable fault analysis in gravity field more accurate and reliable. Typical example for the analysis of the fault distribution is given by using gravity data obtained from eastern Qinling area.

Key words :wavelet analysis ,wavelet details ,strangeness detection of signal ,gravity field ,fault analysis ,eastern Qinling area

2002年铜市场及2003年市场展望

1.2002 年市场回顾

* * *

1)2002年的铜价走势呈现低位窄幅震荡走势。截至11 月底,LME3个月期铜的最低价为1月3日的1434美元/吨,最 高价为6月6日的1719美元/吨,波动范围仅有285美元/吨, 反映出在消费依然低迷的情况下,市场交投气氛不浓。

2)矿山大量减产以及铜价低迷,导致 2002 年铜原料供应 非常紧张,预计 2002 年全球的精铜产量为 1502 万 t,比上年下 降 1.8%;与此同时,全球经济也出现缓慢回升,带动了铜消费 的增长,预计全年精铜消费量为 1490 万 t,比上年增长3.87%, 仍低于 2000 年的水平。尽管产量下降,消费增长,使 2002 年 全球铜市场的供求关系得到改善,但仍存在约 12 万 L的供应 过剩量。

3) 三大交易所(LME, COMEX 和 SHFE)的铜库存之和,自
 2001 年初的 50 万 t 水平增长至当年底的 110 万 t 后,伴随
 LME和 SHFE 铜库存的快速增长,2002 年前几个月交易所总
 库存更是加速增长,并于4 月底5 月初达到峰值——150 万吨
 以上,LME和 SHFE 则分别达到历史以来的最高水平——98
 万 t 和 24.8 万 t。

4)基金持仓换手频繁、尽管 2002 年的铜价波动范围不到 300 美元/吨,但 Connex 基金的净持仓变化量却是历史以来所 少见的,且最大变化量多达5万手以上,反映出虽然今年铜价 的整体波动范围不大,但上下震荡比较激烈。

2.2003年市场展望

 由于铜价长期低迷,2003年仍将有限产行动,从而有望 使铜产量实现低速增长。

BHPBilliton 下屬的 Escon - dida 铜矿, 曾宣布减掉 16 万 t 的 年产量,2002 年 12 月初,该矿又宣布,2003 年将只生产 90 万 t 铜 精矿含铜量及 15 万 t 阴极铜。另外,BHPBilliton 下属 Tin - taya 铜 矿的减产(2002 年减产 9 万 t/a)将至少持续到 2003 年年中,而位 于美国的 Robinson 和 Pinto Valley 铜矿将继续停产。

与此同时,全球最大的铜生产商——智利国营铜公司 (Codelco)称,2003年向国外地区的铜销售量将削减20万t,而 且,只有当交易所铜库存下降至70~80万t时,该公司才会将 这20万t铜重新放入市场。GrupoMexico下属的Asarco公司 10月底宣布,考虑关闭位于美国亚利桑那州 Mis - sion 铜矿 (铜精矿含铜产能为5万t/a)。

据国际货币基金组织预计,2003 年全球的经济增长速度 将达到3.7%,高于今年的2.8%。对于铜消费而言,经济增长 速度加大将明显加快铜需求量。促进铜消费的回升。

2)目前 LME3 个月铜价已向上突破了自 1995 年 8 月份的 高点 3063 美元/吨以来的上升阻力线、铜价的下一上升目标 应该在前期高点 2036 美元/吨。因此预计 2003 年的 LME3 个 月期铜的价格波动区间为 1500~2000 美元/吨,平均价为 1700~1740 美元/吨,约比今年高 8%~10%。