

波数域重力归一化总梯度法中的圆滑滤波因子

张凤旭¹ 孟令顺¹ 张凤琴¹ 杨恕² 赵承民³

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国石油化工集团 新星公司 西南石油局 第二物探队, 四川 德阳 618000; 3. 中国石油化工集团 胜利油田有限公司 河口采油厂, 山东 东营 257200)

摘要: 讨论了波数域重力归一化总梯度法, 提出在位场转换的向下延拓和求导过程中分别引入圆滑滤波因子, 该方法增强了计算的可靠性和稳定性, 扩大了可延拓深度, 通过模型实验和数据分析, 确定了向下延拓和导数因子中圆滑滤波因子指数参数的取值规律, 指出了欲求地质体越浅(深), 采用的谐波数越大(小)的地质体心理深与谐波数 N 之间的变化规律; 发现了均匀密度三度背斜模型和非均匀密度储油背斜模型与二度模型相似的 G^H 场等值线特征, 为地质体心理深计算及储油构造研究提供了思路。

关键词: 波数域, 重力归一化总梯度, 圆滑滤波因子, 背斜模型

中图分类号: P631.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)03-0248-05

谱分析方法自20世纪60年代起广泛应用于位场资料分析工作。近年来, 国内外在波数域的位场理论、位场转换与处理以及反演解释等方面做了大量的研究工作, 并在实际应用中取得了一定的成效。

重力归一化总梯度法是由前苏联学者别列兹金^[1]于20世纪60年代末提出的, 是利用在较高精度下测量的重力异常来确定场源、断裂位置及密度分界面的方法, 可以用于寻找贮油气的构造。常规的重力归一化总梯度的计算大多采用傅氏级数法, 不足之处是缺乏理论模型实验, 其采用的傅立叶级数公式对重力理论模型拟合程度偏差较大, 计算速度慢。波数域重力归一化总梯度法可以弥补其缺点, 但研究程度差, 特别是圆滑滤波因子的引入依然采用常规方法, 使可延拓深度受到限制。为克服以上缺陷, 笔者在波数域位场转换的延拓和求导过程中分别引入圆滑滤波因子, 利用傅立叶快速变换方法^[2,3]编制波数域中重力归一化总梯度计算程序, 计算归一化总梯度场值, 研究归一化总梯度变化规律。

1 方法原理

重力归一化总梯度的出发点在于剩余质量的引力位及导数在场源体以外空间都是解析函数, 而在场源处则失去解析性^[4,5]。使函数失去解析性的点叫做函数的奇点, 根据这一原理可以把确定场源问

题归结为通过解析延拓来确定解析函数的奇点问题, 在奇点处, 归一化总梯度值达到最大, 称为奇点极值, 离开奇点处梯度值将逐渐减小。归一化总梯度法可以将下延过程中的随机噪声分量转化为相对平稳的变化量。由此可见重力归一化总梯度法可以确定场源奇点位置, 对重力资料处理给出定量解释。

别列兹金提出的重力归一化总梯度公式为:

$$G^H(x, z) = \frac{\sqrt{V_{xz}^2(x, z) + V_{zz}^2(x, z)}}{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \sqrt{V_{xz}^2(x, z) + V_{zz}^2(x, z)}}, \quad (1)$$

式中: $G^H(x, z)$ 为 z 方向归一化总梯度值; V_{xz}, V_{zz} 为重力 g 对 x, z 的偏导数; M 为 x 方向采样总点数, 计算时取 $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。

从公式(1)中, 可以看出, 只要求得 V_{xz}, V_{zz} 值, 归一化总梯度值便可以迎刃而解。而 V_{xz}, V_{zz} 可以通过波数域的位场转换求得。设已知地面重力 $V(x, 0) = g(x, 0)$, 由离散傅立叶变换知其频谱为:

$$\tilde{g}_m(u, 0) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} g(x, 0) \exp[-2\pi i(\frac{mj}{M})] \quad (2)$$

其中 $m = -M/2, -(M/2)+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, (M/2)-1$; $j = 0, 1, \dots, M-1$; $x = m\Delta x$ (Δx 为采样间隔); M 为采样点数。

重力归一化总梯度计算的2个关键是异常的向下延拓和导数计算, 根据位场转换理论, 异常的延拓和导数计算只需要由异常的频谱乘以相应的延拓响

应因子和方向导数响应因子即可,延拓响应因子和导数响应因子分别为:

$$\varphi(u, z) = \exp(-2\pi zu) \quad (\text{延拓因子}), \quad (3)$$

$$\psi_x(u, z) = 2\pi i u \quad (x \text{ 方向导数因子}), \quad (4)$$

$$\psi_z(u, z) = 2\pi u \quad (z \text{ 方向导数因子}). \quad (5)$$

由于重力资料实测值中往往带有观测误差及浅部干扰的影响,它们在求导和向下延拓的过程中都会得到放大,同时由于测线端部场的突然间断将引起归一化总梯度曲线出现虚假异常,因此在求导和向下延拓的过程中应配合圆滑滤波响应因子进行滤波,以增强延拓和求导过程的稳定性。笔者依然采用别列兹金提出的圆滑因子:

$$P_n = \left[\frac{\sin(\frac{\pi m}{N})}{\pi m/N} \right]^n, \quad (6)$$

N 为谐波数。

由于向下延拓和求导过程对误差及干扰所带来的影响程度不同,向下延拓和求导过程中采取的圆滑滤波因子的指数也应不同,因此令延拓过程的圆滑因子指数为 n_1 、求导过程的圆滑因子指数为 n_2 。考虑圆滑因子指数的影响,由公式(3)~(6)可以得到实际计算中的圆滑后延拓因子:

$$\varphi(u, z) = \exp(-2\pi zu P_{n_1}), \quad (7)$$

圆滑后 x 方向导数因子:

$$\psi_x(u, z) = 2\pi i u P_{n_2}, \quad (8)$$

圆滑后 z 方向导数因子:

$$\psi_z(u, z) = 2\pi u P_{n_2}. \quad (9)$$

由公式(2),(7)~(9)可得转换后的 V_{xz}, V_{zz} 频谱为:

$$\bar{V}_{xz}(u, z) = \bar{g}_m(u, \rho) \varphi(u, z) \psi_x(u, z), \quad (10)$$

$$\bar{V}_{zz}(u, z) = \bar{g}_m(u, \rho) \varphi(u, z) \psi_z(u, z). \quad (11)$$

将(10)(11)式进行离散傅立叶逆变换得:

$$V_{xz} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \bar{g}(u, \rho) \varphi(u, z) \psi_x(u, z) \cdot \exp\left[2\pi i \frac{mj}{M}\right], \quad (12)$$

$$V_{zz} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \bar{g}(u, \rho) \varphi(u, z) \psi_z(u, z) \cdot \exp\left[2\pi i \frac{mj}{M}\right], \quad (13)$$

将公式(12)(13)式代入公式(1)便可得计算重力归一化总梯度公式。

2 位场转换步骤

- (1) 输入原始数据;
- (2) 对原始数据进行扩边、加权处理;
- (3) 利用(1)式进行快速傅立叶变换,求出原始数据的频谱;

- (4) 在波数域中对原始数据进行位场转换;
- (5) 按顺序给出要计算的深度 H ,利用公式(12)(13)对 $\bar{V}_{xz}, \bar{V}_{zz}$ 进行傅立叶逆变换,求得 V_{xz}, V_{zz} ;
- (6) 计算重力归一化总梯度值,除去扩充点数,使转换前后场的点数一致;
- (7) 按给定顺序的延拓深度返回步骤(5),最后得到各延拓深度的重力归一化深度场值。

3 模型计算

3.1 圆滑滤波响应因子指数取值因素影响分析

文献[6-7]在位场转换中没有将圆滑滤波响应因子直接引入到向下延拓过程中,而是仿照别列兹金的傅立叶级数法,在位场转换中共同乘以一个圆滑滤波响应因子,也就是向下延拓计算中未采用圆滑滤波响应因子。众所周知,波数域位场转换的计算过程中,由于受原始数据信号中的测量误差、高频干扰、采样间隔大小、频域中的离散取样和取样间距的选择等因素影响,均会不同程度地给转换后的场值带来影响或误差。尤其是下延和导数计算会使误差急剧放大,同时在换算过程中,由于采样间隔已经确定,在测线边缘以及重力梯级带密集处数据的换算产生吉布斯效应,使换算后的异常失真。如果在下延的换算中不引入圆滑滤波因子,那么相应的误差和吉布斯效应便得不到较好的抑制。

对公式(7)~(9)分析可以看出,如果存在误差的话,那么转换中误差增长最快的是按 e 指数增长的向下延拓因子。由此可见,下延因子的圆滑滤波是极其重要的,如果下延计算中未采用圆滑滤波响应因子,就会在一定程度上限制可延拓深度。笔者考虑了这方面的原因,将圆滑滤波因子直接引入到向下延拓的滤波算子中。考虑到在下延和导数换算过程中包含了2个圆滑滤波因子,因此位场转换过程中圆滑滤波因子指数参数的取值问题很值得思考和研究。

为了方便地解决圆滑滤波因子取值问题,暂时不考虑圆滑因子级数总项数(即谐波数) N 值影响问题,图1中球心位于测线原点正下方,谐波数 N 的取值均为50,所采用的模型体为半径0.6 km、球心埋深2.0 km、剩余密度 1.0 g/cm^3 的均匀球体,图中明晰地示出了向下延拓和求导圆滑因子指数变化的影响,可以看出无论 n_1, n_2 取何值, G^H 等值线中均示出了单一的极大值,也就是能够找出均匀球体的奇点。当 $n_1 = 1, n_2 = 0, 1, 2$ 时(图1a, b, c),等值线极大值位置与球心埋深位置符合较好;当 $n_1 = 2,$

通过大量的模型实验研究,得到如下参数取值经验。参数相同的地质体,随着埋深的增大,谐波数 N 值呈非线性递减,在埋深为 3~4 km 处, N 值变化最大,两侧变化幅度逐渐减小,当地质体在地表附近, N 值达到最大,最大值可取 95 甚至更大,当地质体埋深为 10 km 以下时, N 最小值可取为 2;随着地质体埋深的增大,归一化总梯度场极大值也呈现非线性递减,递减规律和谐波数相似;延拓深度可达 20 km 以上,和以往的方法相比扩大了可延拓深度。

3.3 背斜模型和储油模型 G^H 场特征分析

采用三度体均匀密度球冠模型来模拟非储油气背斜模型,用三度体非均匀密度球冠模型模拟储油气背斜模型(大多数文献^[6-7]采用的是截面为球冠模式的二度体)。由于篇幅关系,计算三度体球冠重力异常方法不在此介绍。

图 3 给出了一个顶部深 1.5 km,底部深 2.0 km,截取球冠的球体半径 2.5 km,剩余密度 1.0 g/cm³ 的球冠(背斜模型)的重力异常(图 3a)和谐波数 $N=65$ 的 G^H 场等值线(图 3b),图中奇点极值为 6.75,奇点位置和背斜体质心符合较佳,两侧各有一似拇指的等值线图形指向背斜体,拇指中心各有一值为 0.7 的等值线圈闭,经多个不同模型参数的实验,发现球冠的 G^H 场等值线形状大体如此。尽管两侧出现了圈闭等值线,但都不是极大值,极大值出现的位置只有一个,即奇点,这里称单峰异常。

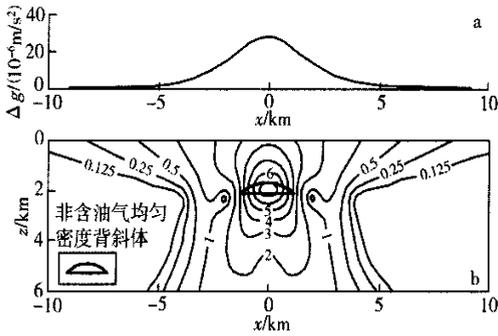


图 3 非含油气均匀密度三度背斜模型 G^H 场等值线

图 4 给出的是一个顶部深 1.5 km,底部深 2.0 km,截取球冠的球体半径 2.5 km,上部含油气(油气底部深 1.7 km),剩余密度 -1.0 g/cm³,下部非含油气,剩余密度 1.0 g/cm³ 的非均匀密度球冠(背斜储油模型)的重力异常(图 4a)和谐波数 $N=65$ 的 G^H 场等值线(图 4b)。图中尽管重力异常曲线只有一个峰值,而且其形状和图 3 中相似,但在 G^H 场中,却出现了双峰异常,等值线图中包含了 3 个圈闭,两侧圈闭等值线数值逐渐增大,极大值均为 4.9,中心圈闭等值线数值逐渐减小,极小值为 1.0,形成了鲜

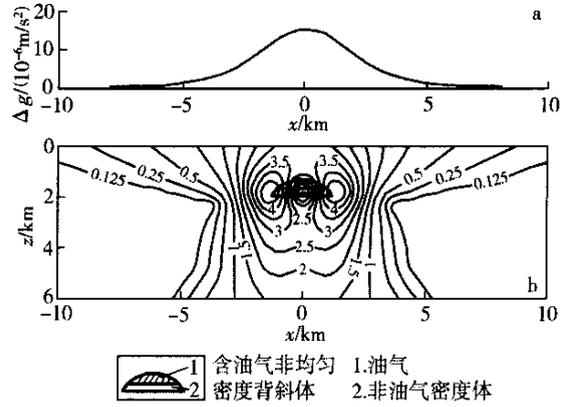


图 4 含油气均匀密度三度背斜模型 G^H 场特征明显的“两高夹一低”特征,此视为寻找油气的典型标志。实际上,图 3、图 4 的 G^H 等值线的基本特征和形状与现有的已发表的其他研究成果大体相同,但是这里研究的模型是三度体,这说明均匀密度三度背斜模型和非均匀密度储油背斜模型与二度模型 G^H 场等值线有相似的特征。

以上分析进一步证明了研究方法的可靠性和稳定性,同时也验证了在方法研究的位场转换的延拓和求导过程中分别引入圆滑滤波响应因子是正确的,方法的引入为重力归一化总梯度法研究地质体质心埋深及储油构造提供了新的思路。

4 结论

通过前面的论述,可以总结出以下几点结论:

- (1) 讨论了重力归一化总梯度在波数域中的计算方法,大量模型的计算证实了方法的有效性;
- (2) 在位场转换的延拓和求导过程中分别引入圆滑滤波响应因子,增加了归一化总梯度计算的可靠性和稳定性,扩大了可延拓深度;
- (3) 给出了延拓圆滑滤波响应因子和求导圆滑滤波响应因子的指数参数相应取值;
- (4) 指出了欲求地质体越浅(深),采用的谐波数越大(小)的地质体质心埋深与谐波数 N 之间的变化规律;
- (5) 发现了均匀密度三度背斜模型和非均匀密度储油背斜模型与二度模型 G^H 场等值线有相似的特征,同时三度背斜模型和储油模型的研究进一步证实了方法的有效性,为地质体质心埋深及储油气构造研究提供了新的思路。

参考文献:

[1] 别列兹金 B.M. 物探数据的总梯度解释法 [M]. 陆克,刘文锦,焦恩富译.北京:地质出版社,1994.
[2] 朱文孝,屠万生,刘天佑.重磁资料电算处理与解释方法 [M].

武汉:中国地质大学出版社,1989.

[3] 布赖姆 E O. 快速傅立叶变换[M]. 柳群 译. 上海:上海出版社,1979.

[4] 肖一鸣,张林祥. 重力归一化总梯度法在寻找油气中的应用[J]. 石油地球物理勘探,1984 (3) 247 - 254.

[5] 王家林,王一新,万明浩,等. 用重力归一化总梯度法确定密度界面[J]. 石油地球物理勘探,1987 22(6) 684 - 692.

[6] 吴文鹏,管志宁. 三度体重力归一化总梯度的计算方法[J]. 物化探计算技术,1996 ,18(1) 47 - 66.

[7] 曾华霖,李小孟,姚长利,等. 改进的重力归一化总梯度法及其在胜利油区油气藏探测中的应用效果[J]. 石油勘探与开发,1999 26(6) :1 - 6.

[8] Talwani M , Worzel J L Landisman M M. Rapid gravity calculation for two-dimensional bodies with application to the fracture zone [J]. Geophy Res , 1959 , 64 : 49 - 59.

A STUDY OF SMOOTHING FILTER OPERATOR FOR NORMALIZED FULL GRADIENT OF GRAVITY ANOMALY IN WAVE-NUMBER DOMAIN

ZHANG Feng-xu¹ , MENG Ling-shun¹ , ZHANG Feng-qin¹ , YANG Shu² , ZHAO Cheng-min³

(1. *Geo-Exploration Science and Technology Institute , Jilin University , Changchun 130026 , China ; 2. No. 2 Geophysical Prospecting Party , Southwest Bureau of Petroleum , SINOPEC , Deyang 618000 , China ; 3. Hekou Production Plant of Shengli Oilfield Corp. , SINOPEC , Dongying 257022 , China)*

Abstract : This paper has discussed the method of normalized full gradient of gravity anomaly in wave-number domain and suggested the introduction of smoothing filter operator in the process of downward continuation and derivation for potential field conversion. This technique helps increase the reliability and stability of calculation and extend the depth of continuation. Based on lots of model experiments and data analysis , the authors have determined the experiential value of exponential parameter about smoothing filter operator in calculating downward continuation and derivation , and pointed out the variational regularity between the depth of the geologic body and the harmonic number N : the lower(deeper) the depth of geologic body , the bigger(lesser) the value of N . It is also discovered that there exist similar characteristics of contour G^H field between the three dimension model of symmetrical density anticline and asymmetric oil storage anticline and the two dimension model , and this offers the new thought for calculating the center of gravity and investigating the oil storage structure.

Key words wave-number domain ; normalized full gradient of gravity anomaly ; smoothing filter operator ; anticline

作者简介:张凤旭(1969 -) ,男,吉林大学讲师,1995年毕业于长春地质学院应用地球物理专业,现在吉林大学地球探测科学与技术学院攻读博士学位,主要从事固体地球物理学研究。



· 新书推荐 ·

环境地球物理学概论

由中国地球物理学会环境地球物理专业委员会组织程业勋、杨进主编的《环境地球物理学概论》一书,已于2005年3月由地质出版社出版发行。

本书分为2篇,共13章。基础篇介绍太阳辐射与地球环境、地球环境污染概述、环境地磁方法、环境电法勘查方法、弹性波勘查方法;应用篇介绍气候变化的地球物理研究方法、废弃填埋场建设与监测、工业泄漏与废液渗漏监测、放射性辐射环境监测、水环境污染的检测与处置、自然灾害的勘查和预报。作者从环境基本问题入手,较系统地介绍了环境地球物理的方法技术和实际应用。该书可供地球物理工作者、环境工作者及高等院校有关专业的师生参考阅读。

有需要者,请登录 <http://www.gph.com.cn> 查询,或与地质出版社邮购部联系。联系地址:北京海淀区学院路31号,100083,电话(010)82324508;电子信箱:zhs@gph.com.cn。