文章编号：1004 —5589（2018）01 —0218 —07

基于重力及重力梯度数据的位场偏移成像

田明阳，吴燕冈，张爽，颜鸿群，张瑞森

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：为了验证位场偏移快速成像方法的有效性以及对比基于重力和重力梯度数据的偏移成像的效果，笔者利用 MATLAB 编写了重力及重力梯度数据位场偏移成像的算法，并进行了模型正演计算，发现基于梯度数据的偏移成像的横向分辨率、抗噪性和抗背景场能力好于重力数据的偏移成像，并且能够较好的确定模型的中心埋深。将此方法应用于葫芦岛市黑鱼沟的某铅锌矿洞的深度计算中，验证了该方法的有效性。

关键词：重力；重力梯度；位场偏移；快速成像

中图分类号：P631.1；P618.4　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.019

Potential field migration for imaging based on gravity and gravity gradient data

TIAN Ming-yang，WU Yan-gang，ZHANG Shuang，YAN Hong-qun，ZHANG Rui-sen

College of Geo-exploration Science and Technology，Jilin University，Changchun 130026，China

Abstract：In order to verify the effectiveness of potential field migration for rapid imaging method and to compare the migration imaging results based on gravity and gravity gradient data，the authors used MATLAB to program the arithmetic of the potential field migration imaging for gravity and gravity gradient data，and proceed the modeling calculation. It was found that the horizontal resolution，noise immunity and the capacity of separating ambient field of migration imaging of gradient data was better than that of gravity data. Moreover，migration imaging of gradient data could determine the depth of the centers of models more precisely. The method was applied to the calculation of the depth of a lead-zinc deposit mine tunnel in Heiyugou of Huludao City，and it was proved to be effective.

Key words：gravity；gravity gradient；potential field migration；rapid imaging

0 引言

目前常见的位场成像方法有[1]：相关成像[2,3]、连续小波变换成像（小波分析）[4]和 DEXP 成像[5,6]。位场偏移成像不同于地震勘探中的偏移，笔者描述的位场偏移成像是把实测场的镜像作为偏移场的场源，然后求取偏移场进行地下成像。

2002 年，Zhdanov M S 提出了位场偏移的概念并进行了扩展，而且描述了重力场偏移到二维密度分布和磁位偏移到二维磁化分布[7]。2011 年，Zhdanov M S，Liu X 等将偏移成像应用于重力梯度数据[8]。笔者在阐述偏移成像基本理论的基础上，进行简单模型试验，最后将位场偏移快速成像方法应用于实测重力数据，检验可行性。

收稿日期：2017-04-24；**改回日期**：2017-11-08

基金项目：青海省共和县恰卜恰地区干热岩重磁法勘查（DJS160707）.

通讯作者：吴燕冈（1954 -），女，教授，主要从事应用地球物理方法技术研究. E-mail：yangang_ wu341@yahoo.com.cn

1　方法原理

1.1　位场偏移概念

笔者描述的位场偏移方法，是通过求实测场的镜像场，再应用偏移算子得到偏移场。偏移场实际上是由实际场源 Z_0 以观测平面为镜面的镜像所产生的（图 1），可以将对实测场进行下延处理视为对镜像场进行上延处理。而位场的向上延拓使用的积分方法，得到的结果是收敛且稳定的，克服了位场向下延拓发散的缺点。

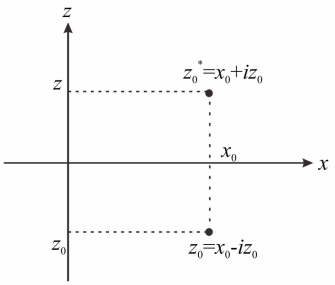


图 1　位场偏移原理示意图

Fig. 1　Principle diagram of potential field migration

1.2　二维重力场和重力梯度场的偏移

2002 年，Zhadnov M S[7] 提出了重力场的复数形式：

$$g(\xi) = -g_x(x,z) + ig_z(x,z)\ ,\ \xi = x - zi \quad (1)$$

$g(\xi)$ 可以作为场源外的一种分析函数。在这种形式下，重力场满足：

$$g(\xi') = -2\gamma\iint_T \frac{1}{\xi - \xi'}\rho(\xi)\mathrm{d}s\ ,\ \xi' = x + zi \quad (2)$$

同时，重力梯度满足：

$$g_T(\xi') = -2\gamma\int_S \frac{1}{(\xi - \xi')^2}\rho(\xi)\mathrm{d}s \quad (3)$$

根据（2）、（3）式的形式 Zhadnov M S[7] 提出了重力伴随算子 A^{g^*} 和重力梯度伴随算子 A_T^*，并介绍了位场偏移的理论公式，重力场的偏移：

$$g^m(\xi) = \frac{i}{4\pi\gamma}A^{g^*}(g)\ , \quad (4)$$

其中[1]：

$$A^{g^*}(g) = 2\gamma\int_{-\infty}^{\infty}\frac{g(x')}{x' - \xi}\mathrm{d}x' \quad (5)$$

式中：γ 为万有引力常数；$g(x')$ 为地下重力场分布关于水平面的镜像场（Zhadnov M S 称伴随场）。根据（4）、（5）式可以看出对重力场进行偏移变换是积分形式，也就是其结果稳定，得到的偏移场 $g^m(\xi)$ 在水平面以下处处解析，是由原始场的镜像场进行变换得到，偏移场保留了原始场源的信息，可以用偏移场进行成像。

对观测到的重力或重力梯度场直接应用伴随算子不能产生足够的地下密度分布图像。必须对偏移场应用一个空间加权算子使场源在正确的位置上成像：

$$W_g = \sqrt{S_g} \quad (6)$$

$$S_g = 2\gamma\sqrt{\frac{\pi}{|z|}}z < 0 \quad (7)$$

按（1）－（7）式的思路，Zhdanov M S 给出了重力偏移密度的公式[7]：

$$\rho_m^g(x,z) = -4\pi\gamma k_g W_g^{-2}(z)\mathrm{Re}[ig^m(\xi)] \quad (8)$$

其中：

$$k_g = \frac{\| W_g A^{g^*}(g) \|_M^2}{\| W_g A^g(W_g A^{g^*}(g)) \|_D^2} \quad (9)$$

对于重力梯度数据而言，

$$g_T^m(\xi) = \frac{i}{4\pi\gamma}A_T^*(g_T) \quad (10)$$

其中：

$$A_T^*(g_T) = 2\gamma\int_L \frac{g_T(x')}{(x' - \xi)^2}\mathrm{d}x' \quad (11)$$

梯度场的深度加权算子：

$$W_T = \sqrt{S_T} \quad (12)$$

$$S_T = \gamma\sqrt{\frac{2\pi}{|Z|^3}} \quad z < 0 \quad (13)$$

依据（10）－（13）式，Zhdanov M S[8-11] 给出了重力梯度偏移密度的公式：

$$\rho_m^T(\xi) = -2\sqrt{2\pi}\,|z|^3 k_T \mathrm{Re}[ig_T^m(\xi)] \quad (14)$$

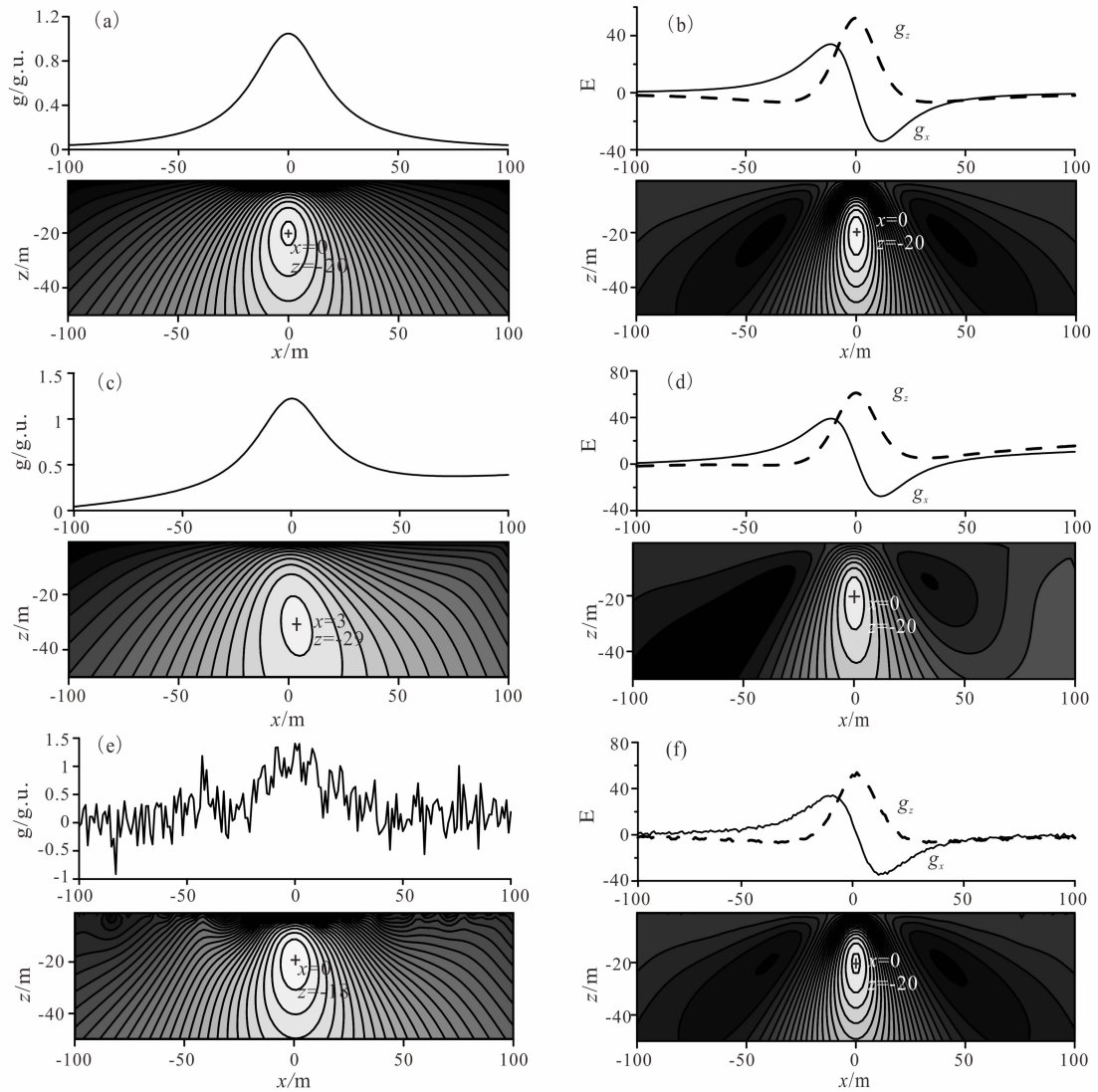
其中：

$$k_T = \frac{\| W_T A_T^*(g_T) \|_M^2}{\| W_T A_T(W_T A_T^*(g_T)) \|_D^2} \quad (15)$$

需要说明的是，对于同一组重力数据（或重力梯度数据）k_g 和 k_T 的值是一常数，故本文进行偏移成像的结果是定性的，代表地下不同地质体密度的相对大小。笔者通过定位成像结果的极值来确定地质体中心位置。

2 理论模型实验

设计一个水平圆柱体模型，其半径为 10 m，密度为 0.5 g/cm^3，中心位置 $x=0$ m，$z=-20$ m，模型的重力异常 g 曲线如图 2a 所示，模型重力异常的水平导数 g_x 和垂向导数 g_z 曲线如图 2b 所示。对模型的重力数据和梯度数据进行偏移成像，结果如图 2a、b 的等值线图所示，成像结果与实际一致。可见在无背景场的情况下，偏移成像对于重力和重力梯度数据都能求出场源的准确位置，验证了此方法的可行性。



a. 重力异常的偏移成像；b. 重力梯度数据的偏移成像；c. 加入背景场的重力异常的偏移成像；d. 加入背景场的重力梯度数据的偏移成像；e. 加入 10% 高斯噪声的重力异常的偏移成像；f. 加入 50% 高斯噪声的重力梯度数据偏移成像.

图 2 单一水平圆柱体重力异常及重力梯度数据的偏移成像

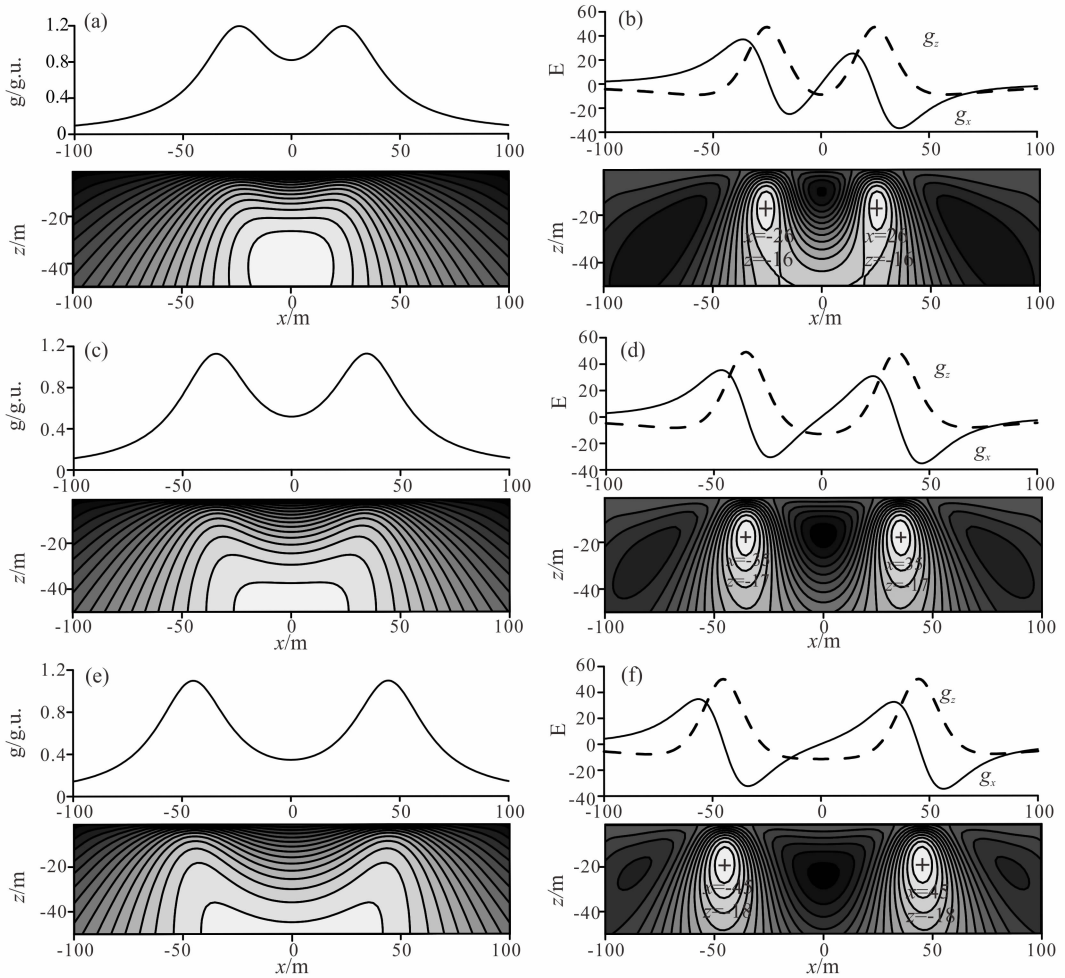
Fig. 2 Migration imaging of gravity anomaly and gravity gradient data caused by a horizontal cylinder

在实际工作中，不存在完全无干扰的情况，所以给模型加上一个一阶线性背景场，其重力异常和梯度曲线如图 2c、d 中的曲线所示。图 2c 中的等值线图为基于加背景场的重力数据的偏移成像结果，可见成像结果的极大值的水平位置为 3 m，埋深 29 m，与实际情况相差较大。图 2d 中的等值线图为基于加背景场的重力梯度数据的偏移成像结果，成像结果与实际相符。对比图 2c、d 的结果可以发现，在加入背景场的情况下，基于重力梯度数据的成像结果能更好的克服背景场的干扰。

为了检验本方法的抗噪性，在原始模型的重力数据里面加入 10% 的高斯噪声，在原始模型的重力梯度数据里面加入 50% 高斯噪声，对加入的噪声的数据进行偏移成像。图 2e 中的等值线图为对加入噪声的重力数据成像的结果，其最大值水平位置 0 m，埋深 18 m，与实际位置接近。图 2f 中的等值线图为对加入噪声的模型重力梯度数据成像的结果，其最大值水平位置 0 m，埋深20 m，与实际相符。可见，基于重力梯度数据的偏移成像的抗噪性要高于基于重力数据的偏移成像的抗噪性。

为了进一步检验基于重力和梯度数据成像的分辨率，设计了三组两个相邻水平圆柱体模型，其半径均为 10 m，密度均为 0.5 g/cm^3，埋深均为20 m，中心水平位置分别为 －25 m 和 25 m，－35 m 和 35 m，－45 m 和 45 m。

图 3a 中的等值线图为两个中心水平距离为50 m



a. 中心水平距离 50 m 的相邻圆柱体的重力异常偏移成像；b. 中心水平距离 50 m 的相邻圆柱体的重力梯度数据偏移成像；c. 中心水平距离 70 m 的相邻圆柱体的重力异常偏移成像；d. 中心水平距离 70 m 的相邻圆柱体的重力梯度数据偏移成像；e. 中心水平距离 90 m 的相邻圆柱体的重力异常偏移成像；f. 中心水平距离 90 m 的相邻圆柱体的重力梯度数据偏移成像.

图 3　相邻水平圆柱体重力异常及重力梯度数据的偏移成像

Fig. 3　Migration imaging of gravity anomaly and gravity gradient data caused by two horizontal cylinders

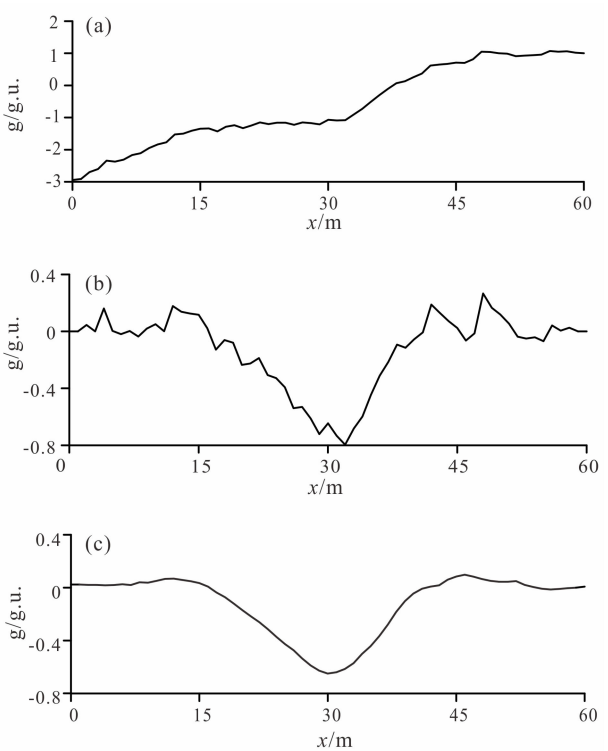
的相邻圆柱体模型的重力数据的偏移成像结果，从图中可以看到成像结果只有一个极大值，无法区分出两个模型；图3b中的等值线图显示了同一模型的重力梯度数据的偏移成像结果，其有两个极大值，分别位于(－26 m，－16 m)和(26 m，16 m)，水平位置和实际基本相符，但成像结果的埋深较浅。图3c中的等值线图为中心水平距离70 m的相邻圆柱体模型的重力数据的偏移成像结果，结果依然只有一个极大值，但是可以看出等值线有两处异常凸起，两处凸起的弧度最小处的水平位置为两个模型体的中心的水平位置；图3d中的等值线图显示了同一模型的重力梯度数据成像结果，两个极大值分别位于(－35 m，－17 m)和(35 m,17 m)，水平位置和实际相符，埋深接近实际。图3e中的等值线图为中心水平距离90 m的相邻圆柱体模型的重力数据的偏移成像结果，结果依然只有一个极大值，但是等值线中的两处异常较图3c中更加明显；图3f中的等值线图为同一模型的重力梯度数据成像结果，两个极大值分别位于(－45 m，－18 m)和(45 m，18 m)，水平位置和实际相符，埋深较图3d更接近实际。

经过图3的对比可以发现，重力梯度数据的偏移成像的分辨率要高于重力数据的偏移成像，基于重力梯度数据进行偏移成像可以更好地区分相邻异常，但是当异常间距较小时，埋深结果可能不准确。

3 实测重力数据应用

选取葫芦岛市杨家杖子镇经济技术开发区黑鱼沟某铅锌矿洞实测得到的重力数据（图4a）。此矿洞上方为兴城上黑鱼沟西山寒武系地层。该矿洞断面为马蹄形，高、宽均为2 m，垂直于重力测线水平延伸近50 m，可以认为是无限长水平圆柱体，矿洞中心埋深距地面重力测线约5 m。图4a是实测重力数据，呈现左低右高的趋势。图4b是异常分离后的剩余重力异常，呈现一个明显的负异常。图4c为圆滑后的剩余重力异常，圆滑的目的是减少测量误差和地表异常的干扰[12]。

对图4a的原始重力异常进行偏移成像，结果如图5a所示，成像结果和原始异常一样呈现左低右高的上升趋势，说明对原始异常成像无意义。对原始异常成像无效的原因是背景场干扰过大，所以



a. 原始重力异常；b. 剩余重力异常；c. 圆滑后的剩余重力异常.

图4 实测重力异常

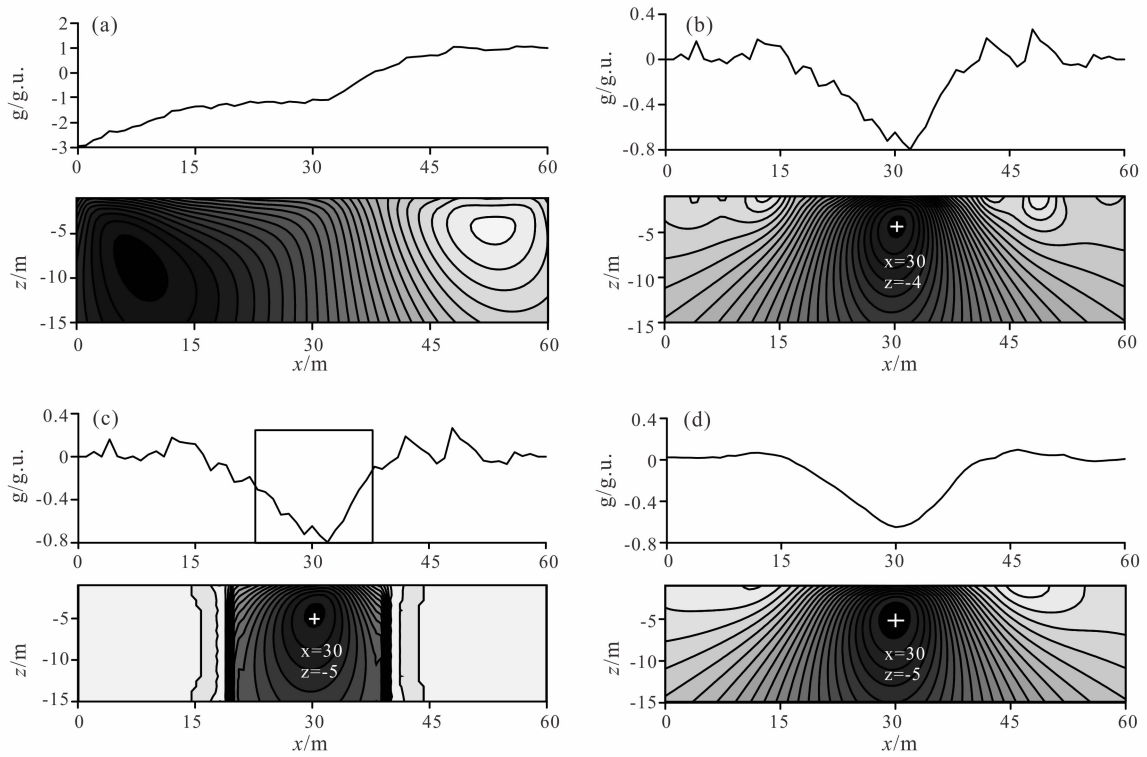
Fig. 4 Observed gravity anomaly

应该先进行位场分离，然后对剩余重力异常进行偏移成像。图5b为剩余异常的偏移成像，其极小值位置（30 m，－4 m），水平位置准确，埋深较浅，这是因为剩余异常的前段和后段仍有噪声干扰，故截取剩余异常干扰较小的20～40 m段进行偏移成像（图5c）。图5c显示的偏移成像结果极大值水平位置30 m，埋深5 m，与实际相符。对圆滑后的剩余重力异常进行偏移成像，其结果如图5d所示，可见极大值位于（30 m，－5 m），与实际相符。经过与前人对同一数据的相关成像进行对比[12]，确定本方法应用于实测重力数据时有效。

4 结论

（1）基于重力和重力梯度数据的位场偏移成像方法可以实现场源的快速定位，基于重力梯度数据的偏移成像的抗噪性和对背景场的去除能力较强。

（2）对于相邻场源产生的叠加异常，基于重力梯度数据的偏移成像具有更好的区分能力。



a. 原始重力异常的偏移成像；b. 剩余重力异常的偏移成像；c. 20～40 m 数据段的偏移成像；d. 圆滑后的剩余重力异常的偏移成像.

图 5　实测重力异常的偏移成像

Fig. 5　Migration imaging of observed gravity anomaly

（3）对于实测重力异常，偏移成像结果有效，对于干扰较大的区域可以截取窗口数据再偏移成像。

参考文献：

[1] Fedi M, Pilkington M. Understanding imaging methods for potential field data [J]. Geophysics, 2012 (77): 13.

[2] 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 重力和重力梯度数据三维相关成像 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (4): 1098-1106.
GUO Liang-hui, MENG Xiao-hong, SHI Lei, et al. 3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (4): 1098-1106.

[3] 赵国兴, 吴燕冈, 王凤刚, 等. 基于窗口数据的重力相关成像 [J]. 世界地质, 2016, 35 (3): 858-864.
ZHAO Guo-xing, WU Yan-gang, WANG Feng-gang, et al. Gravity correlation imaging based on window data [J]. Global Geology, 2016, 35 (3): 858-864.

[4] 徐亚, 郝天珧, 周立宏, 等. 位场小波变换研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21 (4): 1132-1138.
XU Ya, HAO Tian-yao, ZHOU Li-hong, et al. Review of wavelet transform in potential field [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21 (4): 1132-1138.

[5] Fedi. DEXP: a fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources [J]. Geophysics, 2007, 72 (1): 1-11.

[6] 陈玲娜, 曾昭发, 袁园, 等. 利用比值 DEXP 进行重力梯度数据深度成像 [J]. 世界地质, 2015, 34 (4): 1113-1119.
CHEN Ling-na, ZENG Zhao-fa, YUAN Yuan, et al. Using ratio DEXP for depth imaging of gravity gradient data [J]. Global Geology, 2015, 34 (4): 1113-1119.

[7] Zhdanov M S. Geophysical inverse theory and regularization problems [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2002: 181-186.

（下转 308 页）

文章编号：1004—5589（2018）01—0224—08

基于导数迭代法的重力归一化总梯度

李银飞，张凤旭，郜振华，郝梦成

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：针对传统重力归一化总梯度方法对油气藏分辨率不够和深度计算精度较低的问题，本文利用导数迭代法的向下延拓结果，计算重力归一化总梯度。将传统方法和本文方法同时用于模型试验，分析谐波数 N、埋深和充满系数对 G^H 场特征的影响。结果表明，相比于传统方法，本文方法受谐波数 N 的影响较弱，G^H 场对油气藏的分辨率更高，反演的油气藏深度更加准确。通过实际应用，证实了本文方法的有效性。

关键词：重力归一化总梯度；导数迭代法；谐波数；埋深；充满系数

中图分类号：P631.1；P618.13　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.020

Normalized full gradient of gravity based on derivative-iteration method

LI Yin-fei, ZHANG Feng-xu, TAI Zhen-hua, HAO Meng-cheng

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Aiming at solving the problem of low resolution and precision for the detection of oil reservoirs by normalized full gradient of gravity, the authors use downward continuation of the derivative iterative method to calculate normalized full gradient of gravity. The Fourier transform and this method are both used in the model tests. The influence of harmonic number N, depth and fullness coefficient on G^H field are analyzed. The results show that compared with Fourier transform, this method is less affected by the influence from harmonic number N, and the resolution of G^H field to reservoirs is higher and the inversed depth is more accurate. The validity of the method is verified by practical application.

Key words: normalized full gradient of gravity; derivative-iteration method; harmonic number; depth; fullness coefficient

0 引言

重力归一化总梯度法具有不需要预先知道场源剩余密度来确定场源、断裂位置及密度分界面的优点[1,2]，广泛应用在石油勘探中，用来半定量的圈定油气藏构造以及为井位的确定提供佐证[3]。

重力归一化总梯度是由某深度的梯度模与这一深度的平均梯度模相除得到。由此可见，计算重力归一化总梯度场的关键是向下延拓和导数计算。根据位场转换理论，导数计算由异常的频谱乘以方向导数响应因子[4]。向下延拓是个不适定问题，现有延拓方法在位场向下接近场源时会产生剧烈震荡，计算过程很不稳定，理论上不能越过场源[5,6]。为增强计算稳定性，傅里叶级数法、傅里叶变换法和希尔伯特变换法等在重力归一化总梯度的向下延拓计算过程中附加了圆滑因子，有效地解

收稿日期：2017-03-16；**改回日期**：2017-12-07

基金项目：中国地质调查局项目（HYJJ2014003）.

通讯作者：张凤旭（1969-），男，教授，主要从事位场数据处理方法技术研究. E-mail：fxzhang 16@163.com

sensing perspective [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (12): 32777-32795.

[12] Orosei R, Bianchi R, Coradini A, et al. Self-affine behavior of martian topography at kilometer scale from mars orbiter laser altimeter data [J]. Journal of Geophysical Research, Geophys. Res. 2003, 108 (4): 8023-8032. http://dx. doi. org/10. 1029/2002JE001883.

[13] Kreslavsky M A, Head J W, Neumann G A, et al. Lunar topographic roughness maps from Lunar orbiter laser altimeter (lola) data: scale dependence and correlation with geologic features and units [J]. Icarus, 2013, 266 (1): 52-66.

[14] 程婧, 杨瑞琰, 黄定华, 等. 月球表面粗糙度的分形表征 [J]. 中国空间科学技术, 2010, 30 (2): 9-14.
CHENG Jing, YANG Rui-yan, HUANG Ding-hua, et al. Fractal characterization of Lunar surface roughness [J]. Chinese Space Science and Technology, 2010, 30 (2): 9-14.

(上接223页)

[8] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Potential field migration for rapid imaging of gravity gradiometry data [J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59 (6): 1052-1071.

[9] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Rapid imaging of gravity gradiometry data using 2D potential field migration [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 1132-1136.

[10] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Potential field migration for rapid 3D imaging of entire gravity gradiometry surveys [J]. First Break, 2010, 28: 1052-1071.

[11] Zhdanov M S, Cai H, Wilson G A. Migration transformation of two-dimensional magnetic vector and tensor fields [J]. Geophysical Journal International, 2012, 189 (3): 1361-1368.

[12] 李红雨, 杨长保, 吴燕冈, 等. 小波变换在位场资料去噪和位场分离中的应用 [J]. 世界地质, 2014, 33 (1): 200-208.
LI Hong-yu, YANG Chang-bao, WU Yan-gang, et al. Application of wavelet transform for de-noising and potential field separation in gravity and magnetic data processing [J]. Global Geology, 2014, 33 (1): 200-208.