

doi:10.3799/dqkx.2013.111

改进的位场相关成像方法

马国庆, 杜晓娟, 李丽丽

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

摘要: 位场相关成像是根据实测异常与地下不同位置地质体所产生异常之间的相关系数来快速获得地质体的空间位置。现有的相关成像是利用球体模型来模拟地下地质体的形状, 当场源体的实际形状与球体相差较大时, 计算结果势必出现较大误差。为了解决这一问题, 对该方法进行改进, 以不同模型来模拟地下地质体形状, 计算其产生异常与实测数据的相关系数, 理论上使相关系数取得最大值的模型与实际地质体情况一致。因此, 改进后的方法不仅可以获得地质体的位置参数, 还可以对地质体的类型(构造指数)进行估计。磁异常的相关成像计算采用异常的解析信号来完成, 这样可有效地避免磁化方向的干扰, 且计算公式相对简单。通过理论模型试验, 证明此方法可以成功地完成位场数据的反演工作, 且稳定性较高。最后将其应用于上海实测磁异常数据的解释中, 获得了地下未爆炸物的分布情况。

关键词: 地质模型; 位场; 相关成像; 类型; 解析信号; 数据处理。

中图分类号: P31

文章编号: 1000-2383(2013)05-1121-07

收稿日期: 2012-09-17

Improved Potential Field Correlation Imaging Method

MA Guo-qing, DU Xiao-juan, LI Li-li

College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Potential correlation imaging method uses the correlation coefficient of the anomaly generated by the different location of geologic bodies and the observed data to rapidly obtain the location of the causative sources. The existing correlation imaging methods only use the sphere to simulate the shape of the geologic bodies, when the real shape of the source is different from sphere, and the inversion results suffer large errors. To solve this problem, we present improved correlation imaging method, which computes the correlation coefficients of the observed anomaly and the anomalies generated by different types of the model, respectively, and the larger one of the maxima of the correlation coefficients calculated by different models corresponds to the true model. The improved method can both obtain the depth and the nature (structural index) of the source. We use the analytic signal to compute the correlation coefficient of magnetic anomaly, which can avoid the interference of magnetization direction, and the calculation equation is simpler. We try the method on synthetic potential field data, and the inversion results indicate that the method can successfully finish the inversion of potential field data, and produce more stable results. We have also applied it to measured magnetic data, and we obtain the distribution of the unexploited body.

Key words: geologic models; potential field; correlation imaging; nature; analytic signal; data processing.

重磁异常的相关系数用来表征重磁异常的线性相关程度(马国庆等, 2011), 进而判断重磁异常是否同源。Chandler *et al.* (1981) 根据泊松定理推导出了重力异常与化极磁异常之间相关系数的计算方法, 进而分析重磁异常的相关性, 并将其应用于 Michigan and Lake City。Frese *et al.* (1982) 应用该方法分析北美地区的重力和磁数据的相关系数, Turgut and Eseller

(2000) 利用相关系数法进行密度和磁化率比值的计算。Uzgit *et al.* (2006) 讨论了重磁异常相关性与地壳动力学之间的关系。郭良辉等(2009) 从概率成像的概念出发, 通过观测异常与球体异常之间的相关系数来计算场源体的埋深, 该方法具有计算稳定、效率高的优点, 但该方法仅采用球体模型模拟地下地质体的形状, 当异常体的真实形状与球体相差较大时, 计算结

基金项目: 深部探测技术与实验研究专项 SinoProbe-09-01(No. 201011078)。

作者简介: 马国庆(1984—), 男, 讲师, 主要从事位场数据处理和解释方面的研究。E-mail: magq08@mails.jlu.edu.cn

果与实际结果会存在较大的偏差.因此在采用该方法进行异常解释之前,首先要知道地下地质体的类型(构造指数),但地质体的类型往往是难以确定的,尤其是在二维情况下.

本文提出改进的相关成像方法,计算不同类型地质体所产生的异常与观测异常之间的相关系数,使相关系数取得最大值的模型与实际情况相接近,因此改进后的方法能获得地质体的类型和深度信息.采用解析信号进行磁异常相关成像计算,解析信号具有不受磁化方向干扰的特性,且表达式相对简单.通过理论模型试验证明本文方法的可行性,并将其应用于实际磁法数据的解释中,获得了地下地质体的位置.

1 方法基本原理

反映观测异常与不同位置模型 j (图 1)引起异常的线性相关密切程度量的相关系数 R 的表达式为:

$$R_j = \frac{\text{cov}[\Delta g, \Delta g^j]}{\sqrt{D[\Delta g]D[\Delta g^j]}}, \tag{1}$$

式中: Δg 表示实测重力异常; Δg^j 为第 j 个质量元所引起的重力异常,其排布方式如图 1 所示.

$$\begin{aligned} \text{cov}[\Delta g, \Delta g^j] &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[(\Delta g_i - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta g_i) (\Delta g_i^j - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta g_i^j) \right], \\ D(\Delta g) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\Delta g_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta g_i \right)^2, \\ D(\Delta g^j) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\Delta g_i^j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta g_i^j \right)^2. \end{aligned}$$

相关系数 R_j 反映计算窗口内实测异常与第 j 个质量元引起重力异常的相关系数.

第 j 个地质体在观测面上 i 点的重力异常表达式为:

$$\Delta g_i^j = K \rho_j \frac{(z_j - z_i)}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{(N+1)/2}}, \tag{2}$$

式中: K 是与异常幅度相关的一个常数. N 为构造指数,与地质体类型相对应(表 1).

将公式(2)代入公式(1)进行整理后可以得到:

$$R_j = \frac{\text{cov}[\Delta g, \alpha^j]}{\sqrt{D[\Delta g]D[\alpha^j]}}, \tag{3}$$

其中 $\text{cov}[\Delta g, \Delta \alpha^j] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[(\Delta g_i - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta g_i) (\Delta \alpha_i^j - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta \alpha_i^j) \right],$

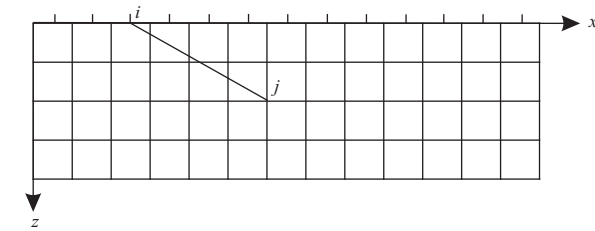


图 1 地质体空间位置分布示意图
Fig.1 The distribution of the location of sources

表 1 构造指数与地质模型之间的关系
Table 1 Correlation between structural indices and geological models

构造指数	磁场反映的构造	重力场反映的构造
0.0	无限薄板盖层	岩墙, 台阶
0.5	垂直接触带	薄板
1.0	板状体, 岩墙	水平圆柱体
2.0	水平圆柱体	球体
3.0	球体	无

$$D(\Delta \alpha^j) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\Delta \alpha_i^j - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta \alpha_i^j \right)^2, \alpha_i^j = \frac{(z_j - z_i)}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{(N+1)/2}}$$
 为结构函数.

利用公式(3)进行重力异常相关成像,相关系数的最大值对应于地质体的空间位置.在利用该方法进行异常解释时,需要事先知道场源体的构造指数,然而一个地区的构造指数往往是难以判断的,尤其是在剖面数据的解释中,地质体的构造指数根本无法判断.从公式(3)中可以看出,当选择的构造指数与实际场源一致时,相关系数取得最大值.因此在进行数据解释时,首先分别计算不同类型地质体的结构函数与实际数据的相关系数,其中使相关系数取得最大值的构造指数与地质体的真实形状相一致,相关系数最大值的位置代表地质体的空间位置.

在进行磁异常相关成像时,其结构函数为磁倾角和磁偏角的函数,形式比较复杂(郭良辉等, 2010),当估算得到的磁化方向与实际磁化方向之间存在偏差时会为计算结果带来较大的误差.为解决该问题,采用磁异常的解析信号来进行相关成像,在二维情况下,解析信号具有不受磁化方向干扰的特性,三维解析信号受磁化方向的影响较小,尤其是在低纬度地区,化极结果能更好地描述异常的真实特征(Rajagopalan, 2003),可直接用于磁异常的解释(Phillips et al., 2007).Phillips et al.(2007)给出

了磁异常解析信号(Rajagopalan, 2003)的基本表达式:

$$AS_i = \frac{K}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{(N+1)/2}} \quad (4)$$

在进行磁异常相关成像时结构函数表示为:

$$\alpha_i^j = \frac{1}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{(N+1)/2}} \quad (5)$$

2 理论模型试验

为了检验上述方法的可行性,分别采用不同模型产生的重力异常来进行相关系数的计算(图2),窗口大小 N 为 19.

从图 2c 和图 2e 中可以看出,构造指数为 2 时的相关系数较大,因此引起图 2a 所示异常的地质体为球体,其位置为(50 m, 10 m),与理论值相一致.从图 2d 和图 2f 中可以看出,构造指数为 1 时相关系数取得最大值,其形状为圆柱体,根据图 2d 可以看出圆柱体的水平位置为 50 m,埋深为 10 m.从图 2 的结果中可以看出,正确的构造指数使相关系数获得最大值,且相关系数最大值的坐标与地质体的位置相一致.下面针对本文方法对于多个地质体产生重力异常的应用效果进行试验,在水平位置 30 m 和 70 m 处分别存在埋深 10 m 和 15 m 的水平圆柱体,图 3a 为原始重力异常.

从图 3c 和图 3e 不同构造指数的重力异常相关成像结果中可以看出,构造指数为 1 时相关系数获得最大值,因此异常体为水平圆柱体.图 3c 成像结果显示地质体的水平位置分别为 30 m 和 70 m,埋深分别为 10.3 m 和 14.6 m,反演埋深与理论值相接近;图 3e 的成像结果显示场源体的位置为 30 m 和 70 m,埋深分别为 13.9 m 和 28.3 m,当构造指数不正确时,成像所得到的结果误差很大.为了检验本方法存在背景异常情况下的应用效果,利用本文方法对水平位置均为 50 m、埋深分别为 10 m 和 20 m 的圆柱体产生的重力异常进行反演,图 3b 为原始重力异常.图 3d 为构造指数为 1 时利用公式(3)计算得到的相关系数,结果显示地质体埋深为 13.4 m,与浅部地质体的理论埋深差距较大,这是由于背景异常的干扰.为了解决这一问题,采用重力异常的垂直导数来进行相关成像操作,公式(3)可变形为:

$$R_j = \frac{\text{cov}[\Delta g_z, \alpha^j]}{\sqrt{D[\Delta g_z] D[\alpha^j]}}, \quad (6)$$

式中: Δg_z 为重力异常的垂直导数;而 $\alpha_i^j = \frac{N \times (z_j - z_i)^2 - (x_j - x_i)^2 - (y_j - y_i)^2}{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{(N+3)/2}}$.

图 3f 为构造指数为 1 时利用公式(6)计算得到的相关系数,图像显示地质体埋深为 10.2 m,与浅部地质体的埋深相接近,导数可有效地去除背景异常的影响,进而获得准确的结果.

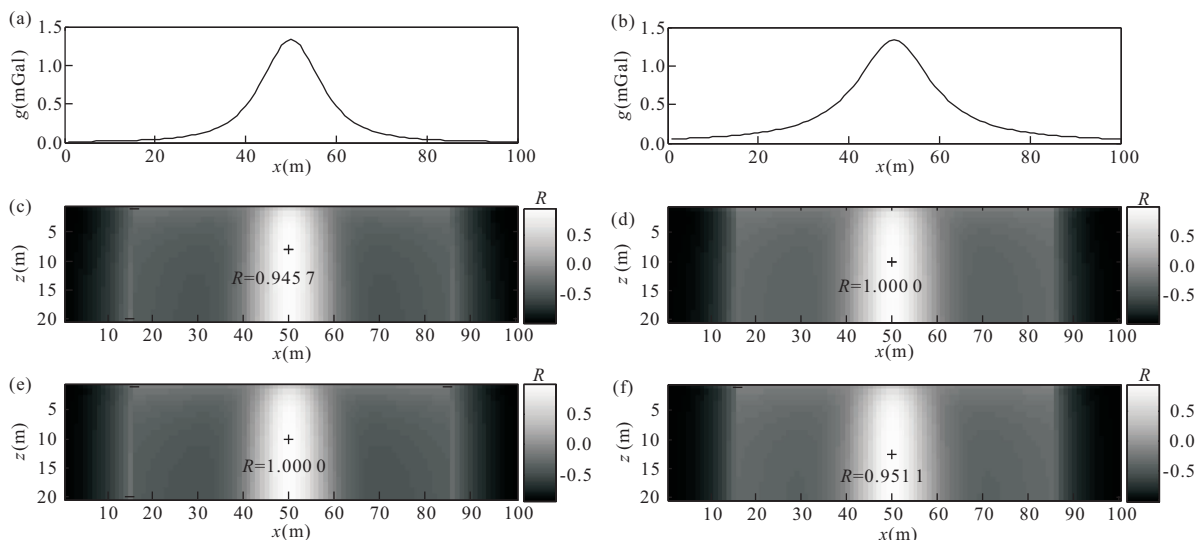


图2 不同模型异常的相关成像结果

Fig.2 Correlation imaging computed by different models

a.深为 10 m 的球体产生的重力异常; b.埋深为 10 m 的圆柱体产生的重力异常; c.构造指数为 1 时结构函数与图 2a 所示异常的相关系数; d.构造指数为 1 时的结构函数与图 2b 所示异常的相关系数; e.构造指数为 2 时结构函数与图 2a 所示异常的相关系数; f.构造指数为 2 时的结构函数与图 2b 所示异常的相关系数. R . 相关系数值

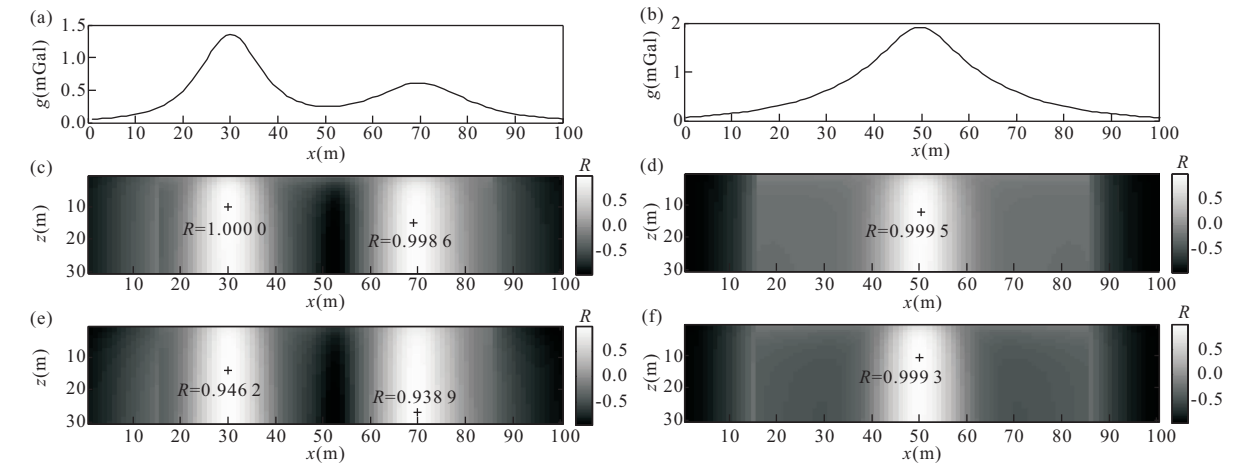


图 3 圆柱体重力异常相关成像结果

Fig.3 Correlation imaging of gravity anomaly of horizontal cylinder

a.埋深分别为 10 m 和 15 m 的圆柱体产生的重力异常;b.位置均为 50 m,埋深分别为 10 m 和 20 m 的圆柱体的重力异常;c.构造指数为 1 的结构函数与图 3a 所示异常的相关系数;d.构造指数为 1 的结构函数与图 3b 所示异常的相关图像;e.构造指数为 2 的结构函数与图 3a 所示异常的相关系数;f.构造指数为 1 的结构函数与图 3b 所示异常的相关系数

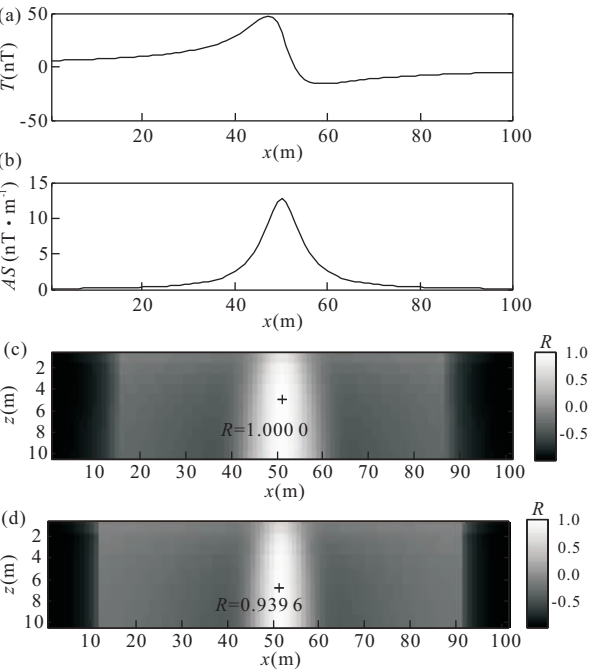


图 4 板状体磁异常相关成像结果

Fig.4 Correlation imaging of magnetic anomaly generated by the dike

a.埋深为 5 m 的板状体产生的磁异常;b.磁异常的解析信号;c.构造指数为 1 的结构函数与解析信号的相关系数;d.构造指数为 2 的结构函数与解析信号的相关系数

为了检验本文方法对于磁异常的适用性,采用板状体产生的磁异常对该方法进行试验(图 4),板状体顶面埋深为 5 m,磁化强度为 20 A/m,磁倾角和偏角分别为 60°和 0°.利用本文方法对异常进行解

释,窗口大小为 19.

从图 4c 和 4d 的对比中可以看出,构造指数为 1 时相关系数取得最大值,根据其结果可判断出异常体为板状体,其水平位置为 50 m,埋深为 5 m.采用解析信号来进行相关成像,不需要考虑当地的磁倾角及磁偏角的影响,简化了计算.

噪声在实际数据处理中是必不可少的因素,在图 4a 所示磁异常中加入均值为 0、方差为 2 nT 的随机噪声,采用本文方法对该异常进行处理(图 5),窗口大小为 19.

从图 5e 和 5g 的对比中可以看出,构造指数为 1 时相关系数取得最大值,因此地质体形状为板状体,根据其结果可判断出异常体的埋深为 4.7 m,其结果与理论值之间差距不大,因此本文方法具有一定的抗噪性.为了获得更加准确的结果,采用 5 点均值滤波器对数据进行去噪处理,图 5b 为圆滑后异常,图 5d 为圆滑后异常的解析信号.采用本文方法对该解析信号进行反演,从图 5f 和图 5h 中可以看出,构造指数为 1 时相关系数获得最大值,根据其图像可知地质体的位置为 50 m,埋深为 4.9 m,与理论值之间的误差减小,因此采用噪声去除计算可有效地提高数据反演精度.

3 实测磁异常数据解释

图 6a 为中国上海某地区实测磁异常,本次测量的目的是为了寻找地下未爆炸物,排除施工安全隐

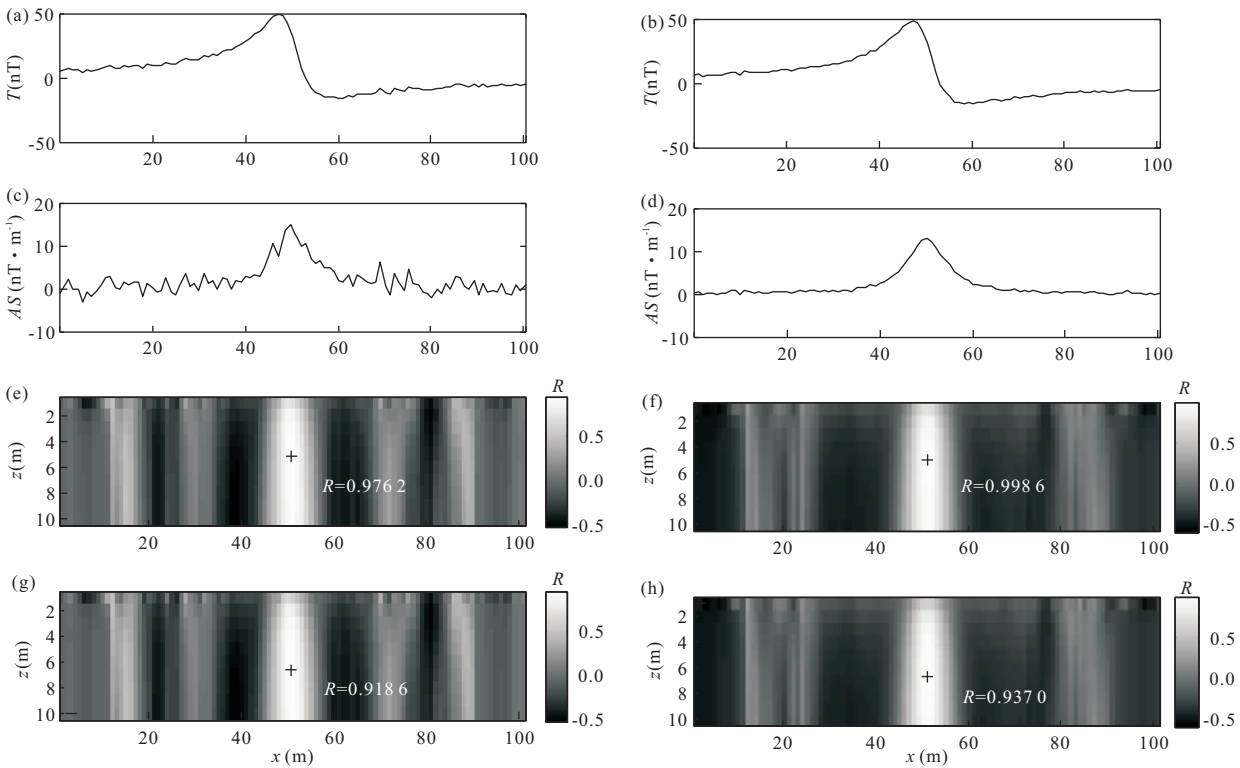


图 5 板状体磁异常相关成像结果

Fig.5 Correlation imaging of magnetic anomaly of dike

a.图 4a 所示异常中加入随机噪声;b.滤波后磁异常;c.含噪磁异常的解析信号;d.滤波后磁异常的解析信号;e.构造指数为 1 时图 5c 所示解析信号的相关系数;f.构造指数为 1 时图 5d 所示解析信号的相关系数;g.构造指数为 2 时图 5c 所示解析信号的相关系数;h.构造指数为 2 时图 5d 所示解析信号的相关系数

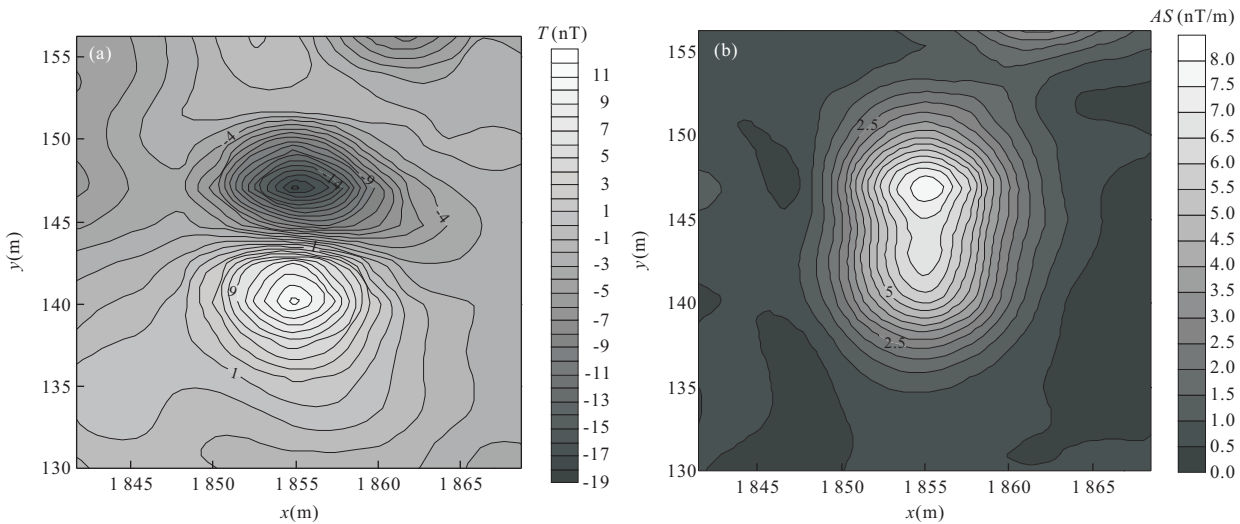


图 6 上海某工地实测磁异常(a)和磁异常的解析信号(b)

Fig.6 Measured magnetic anomaly in Shanghai (a) and analytic signal of the data in 6a (b)

a.实测磁异常;b.磁异常解析信号

患,图 6b 为原始磁异常的解析信号.

采用解析信号的相关成像法对磁异常进行解释,首先计算出不同结构函数与实测异常解析信号

相关系数最大值之间的对应关系(表 2).

从表 2 中可以看出,构造指数为 2.8 时相关系数取得最大值,因此场源体的形状接近球体.异常最

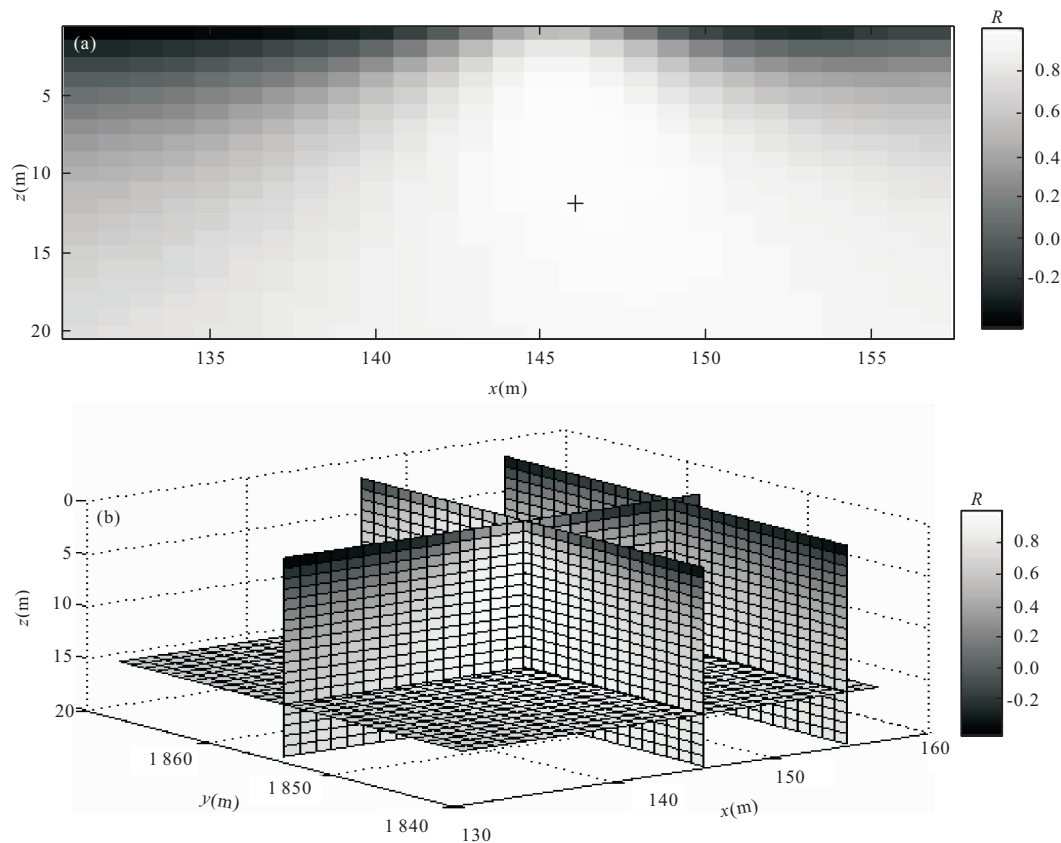


图 7 实测磁异常相关成像结果

Fig.7 Correlation imaging of real magnetic anomaly

a,y=147 处剖面的相关成像结果;b.相关系数结果的三维显示

表 2 构造指数与相关系数最大值之间的对应关系

Table 2 The corresponding relationship between the structural indices and the maxima of correlation coefficients

构造指数	相关系数最大值
2.0	0.856 5
2.2	0.877 1
2.4	0.910 5
2.6	0.939 6
2.7	0.978 2
2.8	0.981 3
2.9	0.975 4
3.0	0.942 7

大值的水平位置(1 853 m,147 m),选取剖面 $y=147$ 处显示地质体的埋深(图 7a),并将相关成像结果进行三维显示(图 7b).

从相关成像结果中可以看出,异常体的埋藏深度为 11.7 m,经挖掘验证地质体为近球形的铁块,埋深为 12.3 m.

4 结论

本文对相关成像方法进行改进,使其能完成场源体深度和类型(构造指数)的计算,改正了已有算法在进行计算时需要知道场源体类型的缺点.在利用本文方法进行磁异常相关系数计算时采用解析信号来进行,避免了磁化方向和剩余磁化的干扰,且计算公式更加简单.通过理论模型试验,证明本文方法能很好地完成重磁异常的反演,在存在噪声和倾斜磁化方向情况下均能得到较准确的结果.最后将其应用于实测磁异常的解释中,获得了地下磁源体的分布.

References

Chandler, V. W., Koski, J. S., Hinze, W. J., et al., 1981. Analysis of Multisource Gravity and Magnetic Anomaly Data Sets by Moving-Window Application of Poisson's Theorem.*Geophysics*, 46(1): 30—39. doi: 10.1190/1.1441136

Frese, R. R. B., Hinze, W. J., Braile, L. W., 1982. Regional

- North American Gravity and Magnetic Anomaly Correlations. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 69(3): 745—761. doi: 10.1111/j.1365—246X.1982.tb02773.x
- Guo, L. H., Meng, X. H., Shi, L., 2010. 3D Correlation Imaging for Magnetic Anomaly ΔT Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(2): 435—441 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L. H., Meng, X. H., Shi, L., et al., 2009. 3-D Correlation Imaging for Gravity and Gravity Gradiometry Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4): 1098—1106 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G. Q., Du, X. J., Li, L. L., 2011. Edge Detection of Potential Field Data Using Correlation Coefficient of Horizontal and Vertical Derivatives. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(S1): 345—348 (in Chinese with English abstract).
- Phillips, J. D., Hansen, R. O., Blakely, R. J., 2007. The Use of Curvature in Potential-Field Interpretation. *Exploration Geophysics*, 38(2): 111—119. doi: 10.1071/EG07014
- Rajagopalan, S., 2003. Analytic Signal vs. Reduction to Pole; Solutions for Low Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*, 34(4): 257—262. doi: 10.1071/EG03257
- Turgut, S., Eseller, G., 2000. Sequence Stratigraphy, Tectonics and Depositional History in Eastern Thrace Basin, NW Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, 17(1): 61—100. doi: 10.1016/S0264—8172(99)00015—X
- Uzgit, Z. D., Hisarli, Z. M., Sayin, N., et al., 2006. Correlation between Gravity and Magnetic Anomalies of Western Anatolia and Its Relation to Tectonic Structures. *Earth Planets Space*, 58(8): 943—949.

附中文参考文献

- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 2010. 磁异常 ΔT 三维相关成像. 地球物理学报, 53(2): 435—441.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等, 2009. 重力和重力梯度数据三维相关成像. 地球物理学报, 52(4): 1098—1106.
- 马国庆, 杜晓娟, 李丽丽, 2011. 利用水平与垂直导数的相关系数进行位场数据的边界识别. 吉林大学学报(地球科学版), 41(S1): 345—348.