

方向 Tilt-Euler 法的简单模型试验及其在海洋磁探中的应用

包江^{1,2}, 倪冉², 牟宗辉², 张陆锋²

(1. 中交水利水电建设有限公司, 浙江 宁波 315200; 2. 宁波上航测绘股份有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 通过对方向(Tilt-Euler)公式的推导, 同时现场试验建立磁化方向不同、形状不同的 4 种理论简单模型, 在此基础上进行磁探物体的三维坐标反演, 同时通过实际的海洋磁探项目进行方法的论证, 探讨方向 Tilt-Euler 法在海洋磁探中的反演优势。结果表明方向 Tilt-Euler 法仅通过磁测数据就可以快速推断出异常体的中心点坐标和大概深度, 相比于 Tilt-Euler 法, 方向 Tilt-Euler 法反演解更加收敛、连续性更好、磁源预测准确度更高、受环境影响小, 实用性更强, 计算更简便。这对于大面积的海洋磁探资料处理具有重要意义。

关键词: 方向 Tilt-Euler; 海洋磁探; 磁力测量; 深度反演; 航道施工障碍物

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)03-0038-05

doi: 10.7640/zggwjs202503006

Simple model test of direction Tilt-Euler method and its application in marine magnetic exploration

BAO Jiang^{1,2}, NI Ran², MU Zong-hui², ZHANG Lu-feng²

(1. CCCC Water Conservancy and Hydropower Construction Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315200, China;

2. Ningbo Shanghang Surveying and Mapping Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315200, China)

Abstract: Through the derivation of the direction(Tilt-Euler) formula and the establishment of four theoretical simple models with different magnetization directions and shapes through on-site experiments, three-dimensional coordinate inversion of magnetic exploration objects is carried out on this basis. At the same time, the method is demonstrated through actual marine magnetic exploration projects to explore the inversion advantages of the direction Tilt-Euler method in marine magnetic exploration. The results show that the direction Tilt-Euler method can quickly infer the center point coordinates and approximate depth of the abnormal body only through magnetic measurement data. Compared with the Tilt-Euler method, the inversion solution of the direction Tilt-Euler method is more convergent, has better continuity, higher accuracy of magnetic source prediction, is less affected by the environment, has stronger practicability and is more convenient to calculate. This is of great significance for the processing of large-scale marine magnetic exploration data.

Key words: direction Tilt-Euler; marine magnetic exploration; magnetic measurement; depth inversion; obstacles in waterway construction

0 引言

随着经济全球化进程加快, 海上运输的需求日益强烈, 港航工程日趋增多。为确保在港航工程施工中船舶设备的安全, 降低施工安全隐患, 需要工前对项目区域进行施工障碍物探测。施工

障碍物一般为磁性物体。在众多探测方法中, 磁探具有成本低、机动性强等优点, 因此在很多项目中广泛使用。其中磁场数据理解释中如何准确推算磁源的边界、深度、规模及磁场分布规律等是项目施工的重要关注问题^[1]。

收稿日期: 2024-07-24 修回日期: 2024-12-16

作者简介: 包江 (1976—), 男, 浙江永康人, 高级工程师, 副总经理, 主要从事海洋测绘和工程数字化建设。E-mail: 67979533@qq.com

目前, 解析信号法和欧拉反褶积方法是近十几年来发展较快的 2 种主要磁场反演解释方法^[2]。解析信号法最早被国外学者应用到二维剖面的磁测资料解释中, 之后推广应用到三维平面网格^[3]。欧拉反褶积反演方法是以欧拉方程为基础, 结合位场的异常和空间导数以及各种地质体的特定“构造指数”来推算异常磁源^[4], 但是这种方法需要已知磁源的构造指数才能够准确预测。2007 年有学者提出了 Tilt-Euler 方法, 避免了以往推算磁源边界和深度必须有已知磁源的构造指数的缺陷, 解决了常规欧拉反褶积方法因构造指数选取对位场资料处理解释的可靠性问题, 进一步推动了欧拉反褶积方法的发展^[5-9]。王明等^[10]将 Tilt-Euler 方法应用磁测资料处理解释, 得到了满意的结果, 验证了 Tilt-Euler 的适用性和有效性。但是 Tilt-Euler 方程存在发散解问题, 需采用有效的措施来压制或消除发散的欧拉解, 改善计算结果, 来提高磁源参数解的稳定性。2019 年, 有研究学者在深入研究 Tilt 梯度方法的基础上^[11-13], 提出了方向 Tilt 梯度概念, 不需要极化, 可以直接计算分析三维磁异常, 同时具有较高的精度。2021 年, 在方向 Tilt 梯度基础上进行导数处理, 获得 6 个方向 Tilt 梯度导数, 增加了不同方向上的磁异常信息^[13-14]。同时, 对常规欧拉反褶积方程进行 3 个方向求导, 将构成的方程组与 6 个改进的方向 Tilt 梯度导数进行结合, 从而构建出了 2 个基于方向 Tilt 梯度导数的快速反演方程组(方向 Tilt-Euler 法), 可用于反演磁源的位置参数。相比于 Tilt-Euler 法, 方向 Tilt-Euler 法反演解更加收敛、连续性更好、磁源预测准确度更高、受环境影响小等优点显现出来。

考虑到海洋磁探测的大规模作业以及水下环境未知的情况, 运用一种高效稳定的磁测资料处理解释方法, 不仅可以减少测量成本, 还可以提高工作效率。因此, 本文基于理论简单模型以及航道疏浚项目中应用方向 Tilt-Euler 法对施工障碍物进行平面位置与深度位置的反演, 通过反演结果来验证方向 Tilt-Euler 法在海洋磁探中的应用效果, 给海洋磁探相关工作提供参考。

1 方向 Tilt-Euler 基本原理

Tilt 梯度^[13]是一种可以平衡不同异常强度的位场数据处理方法, 其理论公式为:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial T}{\partial h} \right) \quad (1)$$

式中: θ 为 Tilt 梯度; $\frac{\partial T}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$; T 为磁异常; z 和 h 分别为位场的垂直方向和水平方向; $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ 分别为位场在 x , y , z 方向的导数。

在此基础上, x , y 方向 Tilt 梯度^[11]的表达式为:

$$\theta^x = \arctan \left(\frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\theta^y = \arctan \left(\frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

对式(2)、式(3)分别求 x , y , z 三个方向的导数, 并对分母进行均方根处理, 得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta^x}{\partial x} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \\ \frac{\partial \theta^x}{\partial y} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \\ \frac{\partial \theta^x}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \\ \frac{\partial \theta^y}{\partial x} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \\ \frac{\partial \theta^y}{\partial y} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \\ \frac{\partial \theta^y}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \end{cases} \quad (4)$$

欧拉反褶积的基本公式为:

$$(x-x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = -NT \quad (5)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为磁源坐标; (x, y, z) 为测量点坐标; N 为构造函数。

通过式(5)对 x , y , z 三个方向求导, 得到:

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} = -(N+1) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} = -(N+1) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (7)$$

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -(N+1) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8)$$

将式(8)乘以 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 减去式(6)乘以 $\frac{\partial T}{\partial z}$, 得到式

(9)的上半段; 将式(8)乘以 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 减去式(7)乘以

$\frac{\partial T}{\partial z}$, 得到式(9)的下半段。将 2 段公式合并可得到式(9):

$$\begin{cases} x_0 \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial x} + y_0 \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial y} + z_0 \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial z} = x \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial x} + y \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial \theta^x}{\partial z} \\ x_0 \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial x} + y_0 \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial y} + z_0 \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial z} = x \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial x} + y \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial \theta^y}{\partial z} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)即是方向 Tilt-Euler 反演方程组, 通过求解超定方程组获得磁源位置反演解(x_0, y_0, z_0)。从式(9)可看出, 方向 Tilt-Euler 反演方程仅含未知磁源坐标, 不包含构造指数, 有效解决了常规欧拉反褶积因构造指数选取不当导致推算的磁源位置可靠性不高的问题。同时在磁场网络的自动反演上具有较强的灵活性, 相对于其他反演方法, 其优点有: 1) 无须先验信息, 可自动反演出磁异常物体的空间坐标; 2) 计算简单、速度快、适用面广; 3) 在大面积的磁场数据中, 具有优势; 4) 无须对磁异常数据进行化极处理。

2 简单模型试验

为验证方向 Tilt-Euler 反演方法对磁异常的处

理能力, 设计 4 个形状不同、磁倾角和磁偏角不同的简单模型(见表 1)。其中, 模型①、③为球体, 模型②和④为长方体。4 种简单模型的磁化率均设为 $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$, 具体参数如表 1 所示, 其中 4 种简单模型的中心坐标均设为 $(0.00 \text{ m}, 0.00 \text{ m})$ 。图 1 分别为 4 种模型的原始磁异常, 其中网格间距为 $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$, 并标出了利用方向 Tilt-Euler 法反演出的简单模型中心位置。

表 1 4 种简单模型参数

Table 1 Four simple model parameters

模型编号	形状	上顶面埋深/m	边长或半径/m	磁倾角/(°)	磁偏角/(°)
①	球体	10.00	5.00	0	0
②	长方体	10.00	5.00×5.00	0	0
③	球体	10.00	5.00	45	45
④	长方体	10.00	5.00×5.00	45	45

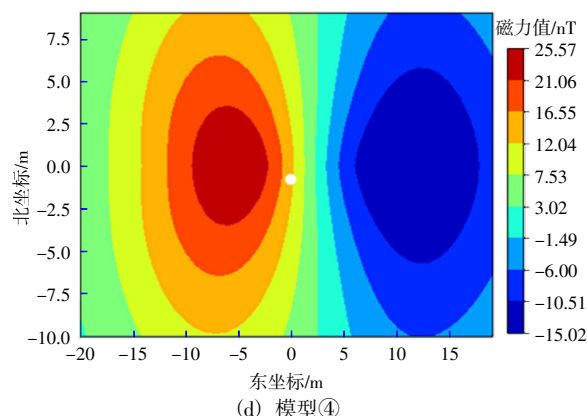
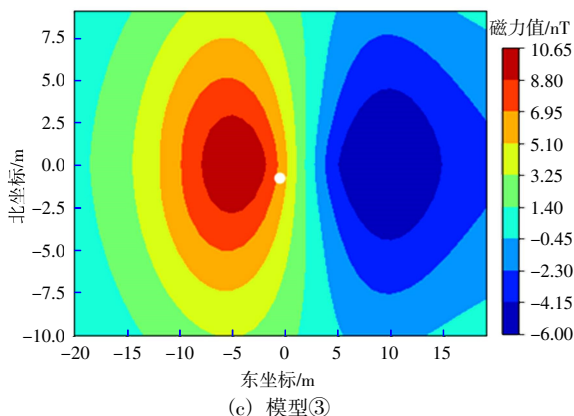
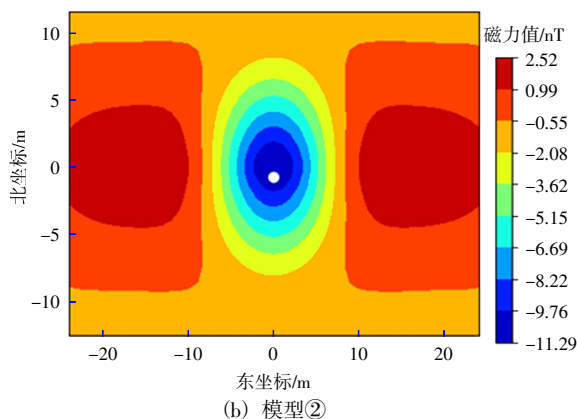
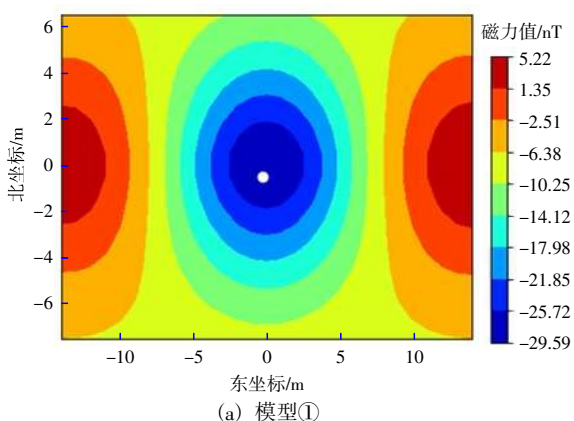


图 1 4 种简单模型磁异常图

Fig. 1 Magnetic anomaly maps of four simple models

从图中可以看出受磁化方向影响, 磁异常与模型形状并无明显关系。当磁倾角与磁偏角为 0° 时, 图 1(a)和图 1(b)磁异常分布相似; 当磁倾角

与磁偏角为 45° 时, 图 1(c)和图 1(d)磁异常分布相似。同时, 根据方向 Tilt-Euler 反演方法得出 4 种模型中心坐标及埋深如表 2 所示。

表 2 模型磁异常反演结果

Table 2 Inversion results of model magnetic anomalies

模型编号	实际中心坐标/m	反演中心坐标/m	中心距离差/m	实际埋深/m	反演埋深/m	埋深差/m
①	(0.00,0.00)	(-0.29,-0.52)	0.60	10.00	5.39	4.61
②	(0.00,0.00)	(-0.08,-0.80)	0.80	10.00	7.39	2.61
③	(0.00,0.00)	(-0.10,-0.75)	0.76	10.00	8.73	1.27
④	(0.00,0.00)	(-0.48,-0.81)	0.94	10.00	8.96	1.04

由表 2 的磁异常反演结果可以看出, 对于磁化方向不同、几何形状不同的模型, 方向 Tilt-Euler 反演方法可以有效识别模型中心点坐标, 达到亚米级。同时, 也可以预测出模型的粗略深度, 最大误差在 4.61 m 左右。通过上述模型试验, 相比于文献[10]中 Tilt-Euler 方法基于重力异常反演的应用, 方向 Tilt-Euler 反演方法无需构造指数来压制或消除方程发散解的问题, 更有效反演出模型中心位置和埋藏深度, 在海洋磁探中的应用更广泛。综上所述, 方向 Tilt-Euler 法更适合应用于大规模海洋磁探。

3 简单模型航道施工障碍物探测应用

为了检验方向 Tilt-Euler 方法在水下实际应用中的效果, 选取台州海域的磁力探测数据进行试验并利用方向 Tilt-Euler 方法进行坐标反演测试。图 2 为本项目航道磁探网格间距 0.5 m 的航道磁异常图, 测量区域位于头门港区进港码头的外港航道, 采用 CGCS2000 坐标系, 高斯投影, 中央子午线 123°。航道全长 24.1 km, 宽 170 m, 磁探面积约 3.81 km²。测线布设间距 10 m, 方向平行于航道, 磁探区域主测线里程约 410 km, 实际总测线里程 466.127 km, 加密测线总里程 63 km。

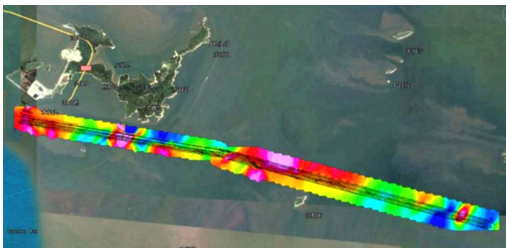


图 2 航道磁异常图

Fig. 2 Channel magnetic anomaly map

本次项目选取 G882 海洋磁力仪(量程 20 000~100 000 nT; 静态噪声为 0.01 nT, 动态噪声受环境和海况等影响, 一般为 0.1~0.3 nT; 绝对精度<3 nT)作为磁力的测量仪器, 拖体距海底泥面不大于 10 m, 天宝 DGPS(动态平面精度为±1.0 m)为定位仪器、质子磁力仪作为日变站。

与图 1 中的磁异常模型进行对比, 图 2 中有个区域磁异常为单峰磁异常, 与模型试验中的模型②的分布十分相似, 故选为本次的研究对象。该子区域的磁异常分布图如图 3 所示。利用方向 Tilt-Euler 法对该区域的数据进行坐标反演, 结果如图 4 所示。

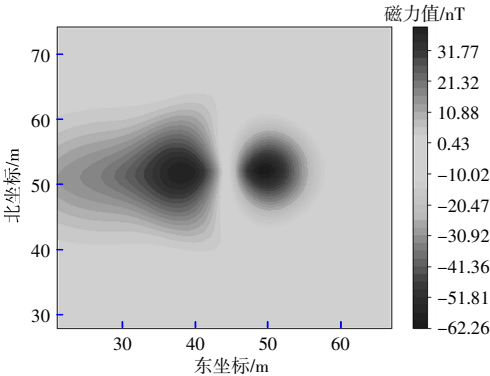


图 3 子区域磁异常分布图

Fig. 3 Distribution map of magnetic anomalies in sub-regions

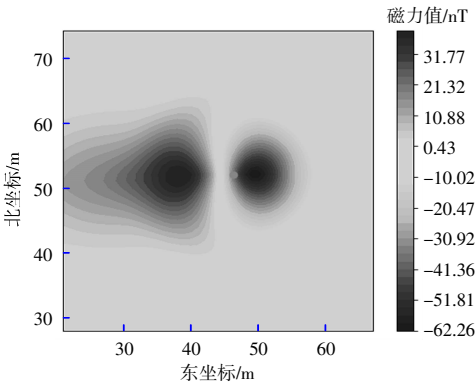


图 4 子区域磁异常反演结果图

Fig. 4 Inversion result map of magnetic anomalies in sub-regions

利用方向 Tilt-Euler 法对工程区子区域的磁异常数据进行反演, 其中心坐标为(383 131.015 m, 3 173 735.530 m, 7.18 m), 测量瞬时水深为 6.90 m, 计算得出该物体埋深为 0.28 m。根据反演所得的坐标进行物体打捞, 打捞时的瞬时水深为 7.5 m, 挖斗船向下放置 8 m 左右, 成功打捞出物体。

实际打捞点的平面位置在反演坐标的 3 m 范围内,埋深差为 0.22 m。本项目采用拖曳式测量,施工障碍物的平面精度评估^[15]见式(10):

$$M_L = \pm 2(m_g^2 + m_c^2 + m_p^2 + m_e^2)^{1/2} \quad (10)$$

式中: M_L 为施工障碍物的平面精度,与磁探的平面精度相同; m_g 为定位设备误差,为 ± 1 m; m_c 为 GNSS 天线到绞车滑轮、滑轮至探头的长度测量和探头入水深度的综合误差,其误差估算值为 ± 1 m; m_p 为探头偏离航迹线的误差,其误差估算值为 ± 2.0 m; m_e 为磁异常测定和数据处理误差,其误差估算值 ± 1.5 m。

计算得 $M_L = \pm 4.12$ m, 该物体平面位置的反演精度为 3 m, 小于探测的平面精度,反演坐标可靠。

4 结语

方向 Tilt-Euler 方法是基于 Tilt 梯度和常规欧拉反褶积法的进一步改进,这种方法最主要的优势在于无需磁源的先验信息便可以快速估计出磁源的位置和深度,无需磁源构造指数,避免了常规反演方法因构造指数选取不正确而产生估计误差。针对海洋磁探的规模大、环境特殊等特点,对于海洋磁测场景构造指数不易获取,方向 Tilt-Euler 法能更清晰反映异常区域范围和异常体中心的平面位置。在台州航道施工障碍物的磁测资料应用中,方向 Tilt-Euler 方法获得的施工障碍物位置信息与实际打捞结果吻合较好,有效证明了该方法在海洋磁测中的适用性。

参考文献:

- [1] 孙海军,祝绪阳. 航道疏浚中大面积海底疑似爆炸物的探测方法与实践[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(9): 63-66.
SUN Hai-jun, ZHU Xu-yang. Suspected explosives detection methods and practice within large area of seabed in harbor channel dredging engineering[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(9): 63-66.
- [2] 郭志宏. 航磁及梯度数据正反演解释方法技术实用化改进及应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2004.
GUO Zhi-hong. The practical improvement and forward and inversion technique on aeromagnetic gradient data and its application [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2004.
- [3] 班丽. 相关约束重磁三维定量反演方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
BAN Li. 3D gravity and magnetic inversion for physical properties based on the correlation constraint[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2009.
- [4] 王闻文. 拉拉铜矿及外围深部隐伏矿体预测中地球物理方法应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
WANG Wen-wen. The geophysical application research on deep concealed ore deposit prediction in LALA copper mines and its peripheral area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [5] HSU S K, SIBUET J C, SHYU C T. High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 373-386.
- [6] THOMPSON D T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data[J]. Geophysics, 1982, 47(1): 31-37.
- [7] REID A B, ALLSOP J M, GRANSER H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution[J]. Geophysics, 1990, 55(1): 80-91.
- [8] SALEM A, SMITH R, WILLIAMS S, et al. Generalized magnetic tilt-Euler deconvolution[C]//SEG International Exposition and Annual Meeting: SEG, 2007.
- [9] SALEM A, WILLIAMS S, FAIRHEAD D, et al. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives[J]. Geophysics, 2008, 73(1): L1-L10.
- [10] 王明,郭志宏,骆遥,等. Tilt-Euler 方法在位场数据处理及解释中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 126-132.
WANG Ming, GUO Zhi-hong, LUO Yao, et al. The application of Tilt-Euler deconvolution method to potential field data processing and interpretation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(1): 126-132.
- [11] 陈国强,马国庆. 位场数据解释的 Theta-Depth 法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2225-2231.
CHEN Guo-qiang, MA Guo-qing. The Theta-Depth method for interpretation of potential field data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6): 2225-2231.
- [12] 李渊,黄理善. 遗传算法在起伏地形下磁异常反演的应用[J]. 矿产与地质, 2016, 30(5): 821-827.
LI Yuan, HUANG Li-shan. Application of genetic algorithm in the inversion of magnetic anomalies in rugged topographical settings[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(5): 821-827.
- [13] 王彦国,罗潇,邓居智,等. 基于改进 tilt 梯度的三维磁异常解释技术[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 685-691.
WANG Yan-guo, LUO Xiao, DENG Ju-zhi, et al. 3D magnetic data interpretation based on improved tilt angle[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 685-691.
- [14] 罗潇,王彦国,葛坤朋,等. 基于方向 tilt-Euler 的三维磁数据快速反演[J]. 地球物理学报, 2021, 64(6): 2127-2140.
LUO Xiao, WANG Yan-guo, GE Kun-peng, et al. Fast inversion of 3D magnetic data based on the directional tilt-Euler method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(6): 2127-2140.
- [15] 赵健虎. 现代海洋测绘[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2023.
ZHAO Jian-hu. Modern marine surveying and charting[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2023.