

【引用格式】赵柏儒, 李厚朴, 张恒磊, 等. 基于矢量磁异常三维成像的隐蔽目标探测[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 528-533.

# 基于矢量磁异常三维成像的隐蔽目标探测

赵柏儒<sup>1,2</sup>, 李厚朴<sup>3,\*</sup>, 张恒磊<sup>1,2</sup>, 朱红巍<sup>1</sup>

- (1. 中国地质大学(武汉) 地质探测与评估教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;  
2. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;  
3. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 磁场异常探测是隐蔽目标探测领域一项重要的探测技术, 磁传感器技术的进步促使磁矢量探测成为当前热点。然而有关矢量磁异常的目标定量探测方法讨论较少, 关于磁矢量探测与磁标量探测的差异性众说不一, 存在巨大争论。基于矢量磁异常三维成像的隐蔽目标精确探测方法, 讨论磁标量探测与矢量探测的差异性, 并通过仿真实验与实际案例讨论了矢量磁异常的探测效能。研究表明: 矢量磁异常三维成像能够更准确地探测隐蔽目标的三维空间分布与目标磁性特征, 能够为隐蔽目标位置圈定以及目标类型识别提供依据。

**关键词** 磁矢量异常; 磁标量异常; 隐蔽目标; 三维成像

中图分类号 P631.2 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2023)05-0528-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.001

## Covert Target Detection Based on 3D Imaging of Vector Magnetic Anomaly

ZHAO Bairu<sup>1,2</sup>, LI Houpu<sup>3,\*</sup>, ZHANG Henglei<sup>1,2</sup>, ZHU Hongwei<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract** Magnetic anomaly detection (MAD) is an important detection technology in the field of covert target detection. The progress of magnetic sensor technology makes vector magnetic detection become a hot spot all over the world. However, there are few discussions about quantitative detection methods of vector magnetic anomaly, and there still is a huge debate on the differences between vector magnetic detection and scalar detection. In this paper, a covert target detection method based on 3D imaging of vector magnetic anomaly is applied to discuss the differences between scalar magnetic detection and vector magnetic detection. The detection efficiency of vector magnetic anomaly is discussed through simulation experiments and field application. The study shows that 3D imaging of vector magnetic anomaly can detect 3D spatial distribution and magnetic characteristics of covert targets more accurately, which can provide a powerful strategy for target location and identification.

**Key words** vector magnetic anomaly; scalar magnetic anomaly; covert target; 3D imaging

## 0 引言

磁法勘探作为一种较为成熟的地球物理勘探手段, 在隐蔽目标探测领域广泛应用。近年来, 随

着舰船静音技术的发展, 利用磁场探测水下舰船等目标受到国内外同行的广泛关注<sup>[1-4]</sup>, 其作为一种被动探测技术具有隐蔽性好、探测精度高等特点。当前我国主要采用磁标量探测, 随着磁传感器技术

收稿日期: 2022-12-20

作者简介: 赵柏儒(1996-), 男, 硕士生, 主要从事高精度重磁方向研究。

\*通信作者: 李厚朴(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋大地测量与海洋地球物理方向研究。

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目“海洋大地测量”(42122025); 国家重点研发计划“潜载磁探测系统及关键技术研究”(2022YFC3104000); 地质探测与评估教育部重点实验室主任基金和中央高校基本科研业务费“水下隐蔽目标磁场三维成像技术”(GLAB2022ZR08)。

的不断进步,磁矢量探测逐渐引起人们的关注。

早在1901–1903年,德国人就开始在南极海区进行地磁场水平分量测量实验,在1972–1975年间,日本东京大学海洋研究所在执行地球动力学计划时开发了一套船载地磁三分量测量系统,并于1977年在四国海盆进行了第一次试验<sup>[5]</sup>。当前,西方发达国家在磁矢量测量领域技术成熟,与磁矢量探测相关磁分量、梯度以及梯度张量探测技术广泛应用,我国使用的某些型号磁矢量测量装备主要进口自西方发达国家<sup>[6]</sup>。周德文等指出,仅从航磁技术本身来看,相比于欧美等发达国家的第三阶段航磁测量,我国刚步入第二阶段航磁测量<sup>[7]</sup>。此外,磁矢量探测由于显著的军事应用价值,相关的高精度测量硬件与数据处理软件被西方国家列为出口管制产品。我国在磁场矢量探测领域起步较晚,近年来,前人围绕磁矢量探测技术与实践应用,开展了一系列研究,推动了我国磁场探测技术水平不断发展<sup>[8–20]</sup>。

关于磁标量探测和磁矢量探测的差异性一直是国内外学者关注的热点问题,但至今还存在很大的争论。总体而言,部分研究指出磁矢量探测相较于磁标量探测拥有各种优势:李青竹等和缪林良等提出,磁标量探测信息过于单一,不能体现磁异常的方向性,限制了探测能力,相比起磁标量探测,磁矢量探测可同时获取地磁场模量大小和方向信息,有效减少反演中的多解性,有助于对磁性体的定量解释,获得更多更准确的反映场源的信息,提高目标体的探测分辨率和定位精度<sup>[20–21]</sup>。遗憾的是,此类结论主要是基于磁标量异常和矢量异常的理论分析得到的,缺乏有关2类异常探测效能的直接比较。此外,虽然可以利用总场磁异常计算得到三分量异常进行反演,这种基于离散2D傅里叶的转换会带来误差<sup>[22]</sup>,特别是在低磁纬度地区,这种转换不稳定,同时,这种转换有个理论前提要求,即测量面需是平面<sup>[23]</sup>。此外,杨力、王昊和吴招才等提到,与磁标量探测相比,磁梯度张量探测的优点有:1)磁化方向影响小,受当地磁倾角和磁偏角影响小;2)传统的磁力勘探方法对日变影响和正常地磁场以及磁化方向要求较高,存在一定的局限性,磁梯

度张量测量基本不受日变影响和正常地磁场等因素的影响;3)具有更丰富的磁场信息,可以利用几个测量点的磁梯度张量快速反演目标的位置和磁矩<sup>[24–26]</sup>。因此,通过磁矢量探测获取磁场3个分量的矢量信息,提高磁矢量反演可靠性具有重要意义。

然而,也有一些学者认为利用磁矢量和磁标量探测,可以得到近似的探测效果。SANCHEZ等通过构建理论模型,利用磁标量和磁矢量三维成像方法,发现在高信噪比条件下,这2种反演方法所得到的结果几乎一致<sup>[27]</sup>。QUEITSCH等在内塞尔格伦德采石场测区利用磁标量方法和磁矢量方法对所测数据进行反演,也得到了相似的认识<sup>[28]</sup>。此外,很多学者研究指出,将标量磁异常利用数值计算方法换算成分量,具有很高的换算精度,暗示了磁标量反演和磁矢量反演的结果具有相似性<sup>[29–31]</sup>。

磁矢量探测具有同时获取地磁场模量大小和方向信息,能够有效减少反演中的多解性、获得更多更准确的反映场源的信息、提高目标体的探测分辨率和定位精度等优点。近年来,一些国内外学者通过大量研究指出,基于传统磁标量和磁矢量的反演可以得到相似的探测效果,这种“消极”的结论造成了磁标量与磁矢量探测差异性的巨大争论,不利于我国磁场矢量探测技术的发展。考虑磁矢量探测是当前国内外的研究热点,有必要从理论和实践2个角度厘清两者之间的探测效能差异。本文基于磁场标量与三分量的理论分析,建立异常模型,分别利用磁标量和磁矢量进行反演对比,明确磁矢量探测的优势,能够为工程应用提供科学依据。

## 1 基本原理

标量磁异常 $\Delta T$ 是测量观测场强度与地磁场强度之差,当目标磁异常 $T_a$ 幅值较小时,标量磁异常 $\Delta T$ 可视为磁异常 $T_a$ 在地磁场 $T_0$ 方向的投影;三分量磁异常是测量磁异常 $T_a$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向上的分量。与传统的航空磁总场测量相比,矢量测量所获得的地磁场模量大小和方向信息能够有效减少反演的多解性,提高地下磁性异常体的探测精度,然而当前对于三分量数据的定量处理与反演研究较少<sup>[32]</sup>,相关探测方法值得深入研究。孙昂、刘

天佑等从 Euler 齐次方程的角度提出了基于磁场三分量异常的目标定位方法:

$$(x-x_0)\frac{\partial f}{\partial x}+(y-y_0)\frac{\partial f}{\partial y}+(z-z_0)\frac{\partial f}{\partial z}=-Nf \quad (1)$$

式中:  $f$  表示磁场三分量,  $\frac{\partial f}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial z}$  表示磁场沿着三方向的梯度;  $N$  为构造指数, 表示不同场源磁场衰减特性的参数, 通常对偶极子场源  $N=3$ ,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  表示测点坐标;  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  表示待定位的目标空间位置<sup>[33-34]</sup>。

上式表明, 假设构造指数已知, 理论上仅需要 3 个点的磁场数据及其对应的导数值, 即可以实现目标定位。但是在实践中磁场的导数值不易观测, 制约了该方法的应用。此外, 根据公式 (1) 仅可以获得目标中心位置, 而难以获得目标大小、磁性强弱等参数。本文拟基于磁场三分量异常, 从三维成像的角度实现对隐蔽目标的探测。磁异常三维物性反演通常是将地下划分为若干小长方体, 每个长方体的物性不同, 由观测数据反演每个小长方体的剩余密度或者磁化强度 (或磁化率) 大小。其正演问题, 可以表示成如下形式:

$$d_i = \sum_{j=1}^M A_{i,j} m_j, \quad i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \quad (2)$$

式中:  $i$ 、 $j$  分别表示第  $i$  个观测点和第  $j$  个模型参数;  $m_j$  表示第  $j$  个长方体的剩余密度或磁化强度大小;  $d_i$  表示第  $i$  个观测点处的观测异常值;  $A_{i,j}$  是核矩阵的元素, 表示第  $j$  个长方体对第  $i$  个观测点处异常响应的影响。将上式表示成矩阵形式如下:

$$d = Am \quad (3)$$

反演问题即是寻找一个合适的模型, 使得该模型产生的正演异常值, 与实际观测异常达到一定的接近程度, 一般目标函数可表示成如下形式:

$$\phi = \phi_d + \alpha \cdot \phi_m \quad (4)$$

式中:  $\phi_d$  表示观测磁异常和正演计算磁异常的均方误差;  $\phi_m$  表示模型粗糙度;  $\alpha$  为正则化因子用来平衡数据与模型的贡献。

LI 和 OLDENBURG 提出采用有限差分计算模型粗糙度:

$$\phi_m = m^T (a_x W_x^T W_x + a_y W_y^T W_y + a_z W_z^T W_z + a_s W_s^T W_s) m \quad (5)$$

式中:  $W_x$ 、 $W_y$ 、 $W_z$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的有

限差分算子;  $W_s$  表示单位矩阵;  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ 、 $a_s$  分别表示各项权系数。

按照以上方式反演结果分布趋于地表附近, 这是由于构造模型的核函数是线性的, 由于磁异常幅值随着距离增大而快速衰减, 核矩阵中数值随深度增加而急剧减小。因此, 反演的“趋肤效应”可以通过引入深度加权函数来克服核函数随深度的衰减。LI 和 OLDENBURG 在磁异常反演中引入深度加权函数

$$w(z) = \frac{1}{(z+z_0)^{\beta/2}} \quad (6)$$

式中:  $z$  为块体单元中心点埋深;  $z_0$  取决于块体单元的尺寸以及观测面的高度;  $\beta$  为深度加权因子, 磁异常反演取  $\beta=3$ <sup>[35]</sup>。

本文采用中国地质大学 (武汉) 研制的磁场三维成像软件 Mag3DImaging, 分别开展本文基于磁标量与磁矢量的目标探测理论模型试验与实测数据的处理解释。

## 2 仿真实验

为了验证基于矢量磁异常的目标探测效能, 本文设计如下理论模型, 长为 1 m, 宽 0.5 m, 高 0.5 m, 磁化强度 10 A/m, 中心坐标 (4.5, 4, 1), 如图 1

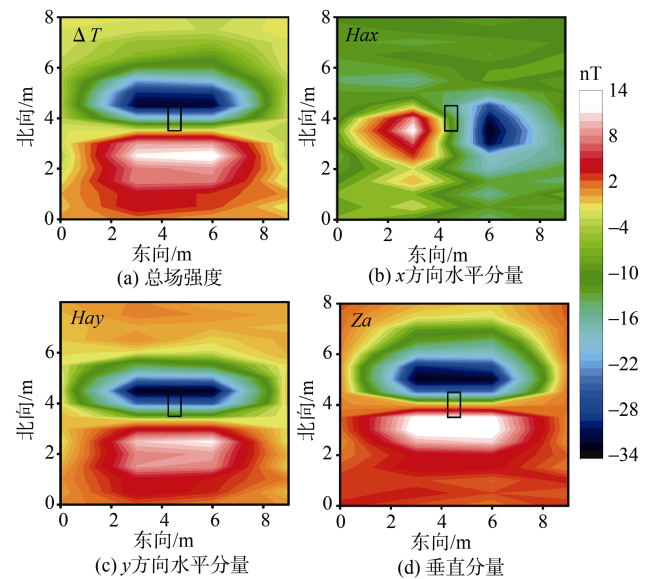


图 1 总场强度  $\Delta T$  及其三分量

Fig. 1 Total field strength  $\Delta T$  and its three components

中黑色线框所示。设定地磁倾角为  $50^\circ$ , 磁偏角为  $0^\circ$ ,  $x$ 、 $y$  方向的采样数据间距分别为 3 m、0.5 m。考虑噪声干扰, 在原始磁异常的基础上添加了 10% 的随机噪声, 其总场强度  $\Delta T$  及三分量磁异常如图 1 所示。

分别采用标量磁异常和矢量磁异常进行三维成像, 沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的模型剖分辨率各为 0.25 m, 深度方向剖分层数设为 10 层, 迭代 30 次。

磁标量反演结果如图 2 所示。可以看出, 磁标量反演得到了 2 个明显的高异常值, 其水平位置分布在真实目标两侧约 1.5 m, 意味着利用磁标量反演得到了 2 个目标体, 与真实模型存在较大差异。基于磁矢量的反演结果如图 3 所示, 该方法较为准确地探测了目标的水平位置以及深度。通过图 2 与图 3 的对比可知, 磁场标量反演的目标磁化强度最大值约 1.9 A/m, 与初设磁化强度 10 A/m 相差较大, 而磁场矢量反演的目标磁化强度最大值约 10 A/m, 与初设数值基本一致。综上所述, 磁矢量反演精度高于磁标量反演。图 2、图 3 中黑色线框为模型实际位置。

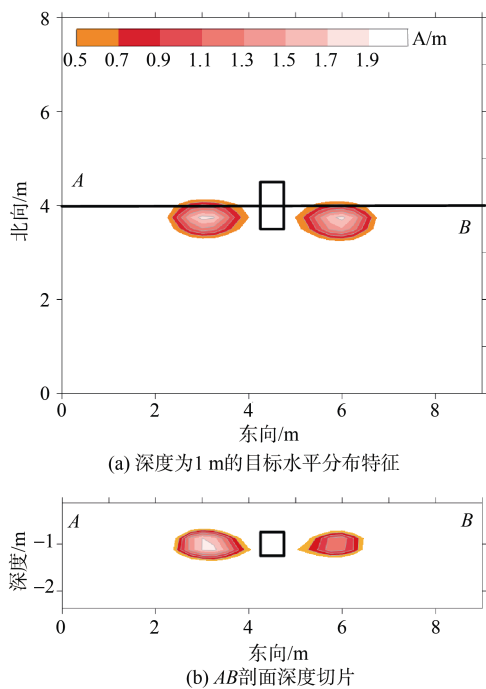


图 2 磁标量反演  
Fig. 2 Magnetic scalar inversion

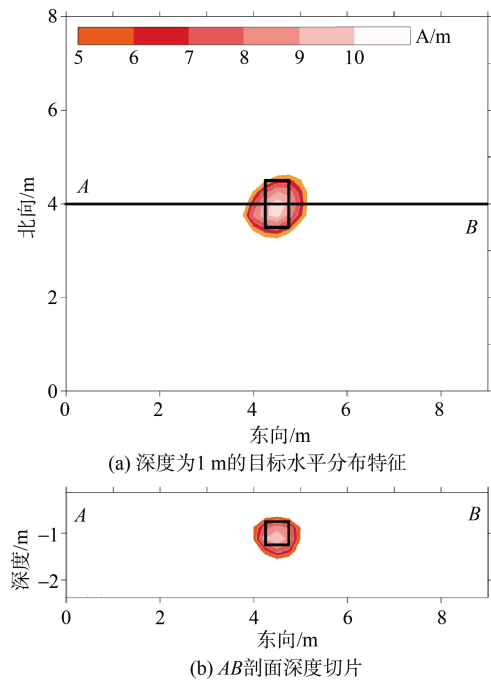


图 3 磁矢量反演  
Fig. 3 Magnetic vector inversion

### 3 应用实例

图 4 反映的是中国地质大学(武汉)校内某地下铁罐产生的磁异常, 铁罐体为圆柱体, 长度 3.5 m, 直径 1.5 m, 罐体上顶、下底埋藏深度分别约 2.6 m、4.1 m。图 4 采样点东西向间距 12.5 m, 南北向间距 0.5 m。分别采用标量磁异常和矢量磁

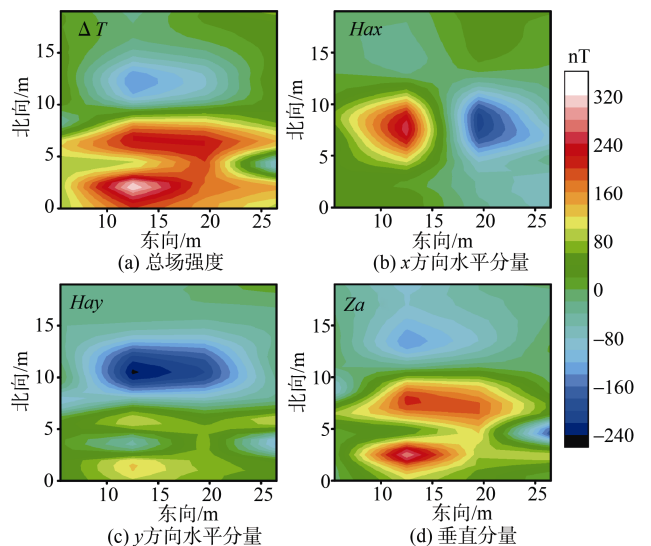


图 4 研究区标量磁异常及磁异常三分量  
Fig. 4 Scalar magnetic anomaly ( $\Delta T$ ) and its three components of research area

异常进行三维成像,反演区域为东西向 0~30 m、南北向 0~20 m、深度方向 0~9.5 m,沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的模型剖分辨率各为 0.5 m。图 5 表示基于磁标量异常的目标探测结果,在东西向水平位置 13 m 和 19 m 处分别分布 2 个强磁性体,中心深度约 3 m 和 6 m;图 6 表示基于三分量矢量磁场的目标探测结果,在东西向水平位置 16 m、中心深度约 4 m 深度分布一个孤立的强磁性体。根据图 5、图 6 中的反演成像可知,基于磁场三分量异常的矢量探测能够更好地反映铁罐体的位置,而传统磁场标量探测在目标中心位置、深度以及分布规模等方面出现较大偏差。

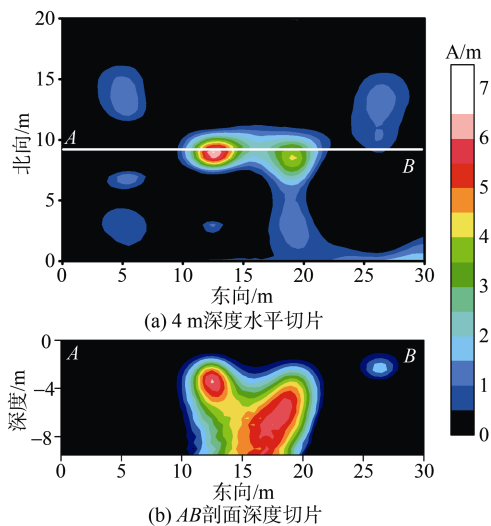


图 5 磁标量目标反演结果  
Fig. 5 Magnetic scalar inversion

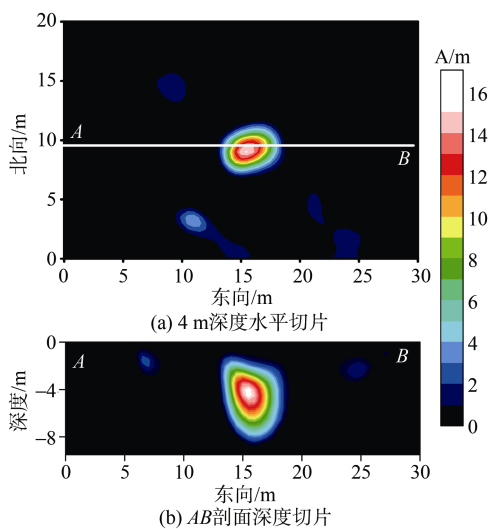


图 6 磁矢量目标反演结果  
Fig. 6 Magnetic vector inversion

磁场标量测量因仅观测磁场的幅值信息而缺乏磁场的方向信息,因此在目标探测中仅依靠磁场的幅值特征确定目标体的位置,存在较大的反演不确定性。如图 5 所示,根据磁场标量异常反演了 2 个主要的目标体,相对图 6 的磁矢量反演结果,磁标量反演将磁异常归结为由“2 个目标体”产生,异常源范围变大,因此推测的目标磁化强度大小远小于磁矢量反演。

#### 4 结束语

磁场标量探测因仅仅观测磁场的幅值而无方向信息,因此在目标探测中存在多解性,难以根据有限的观测数据分析目标准确位置。磁矢量观测不仅观测磁场幅值,而且包含方向信息,因此更有利于目标精确定位。

本文提出利用矢量磁异常三维成像开展隐蔽目标探测研究。仿真实验与某掩埋铁罐体的探测案例表明:矢量磁异常三维成像能够更准确的探测隐蔽目标的三维空间分布与目标磁性特征,对隐蔽目标的水平位置、中心深度、空间分布以及磁性参数的探测效果显著优于磁场标量探测,能够为隐蔽目标探测提供依据。本文结果表明:对于采用磁场标量的航空磁异反潜探测,虽然根据磁场异常可以分析有无目标,但难以直接根据磁场标量异常分析目标位置。在工程应用中,已知不同探测对象的尺寸与磁性参数的先验信息,根据矢量磁异常三维成像的结果,能够为目标类型识别提供依据,因此在磁异反潜探测精确定位、未爆炸物探测、水底管线探测、水下搜救等领域具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 单志超, 郑晓庆, 李大卫, 等. 航空磁异探中反潜机航向的优化选择研究[J]. 指挥控制与仿真, 2023,45(2): 76-81.
- [2] 杨庆宇, 韩雪峰, 谢志越, 等. 基于磁偶极子模型确定水下磁目标测线间距[J]. 声学与电子工程, 2022(3): 20-22.
- [3] 何保委, 周国华, 刘胜道, 等. 标量磁位积分方程法计算舰艇三维静磁场[J/OL]. 兵工学报, 2022: 1-8 [2023-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221027.1405.004.html>.
- [4] 郭成豹, 胡松, 王文井, 等. 利用磁传感器阵列磁场

- 差值的舰船磁场反演建模方法[J]. 兵工学报, 2022, 43 (1): 111-119.
- [5] 吴招才, 高金耀, 罗孝文, 等. 海洋地磁三分量测量技术[J]. 地球物理学进展, 2011, 26 (3): 902-907.
- [6] 管志宁, 侯俊胜, 姚长利. 航磁梯度资料在金矿地质填图和成矿预测中的应用[J]. 现代地质, 1996 (2): 239-249.
- [7] 周德文, 孟庆奎, 杨怡, 等. 航磁全轴梯度异常特征研究[J]. 物探与化探, 2018, 42 (3): 583-588.
- [8] 马成功, 李丕丁. 基于磁通门传感器的铁磁探测系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45 (19): 175-180.
- [9] 丁学振, 李卓轩, 李予国, 等. 基于差分进化算法的磁梯度张量系统误差校正[J]. 地球物理学报, 2022, 65 (12): 4930-4943.
- [10] 郭华, 王明, 姚雨暘, 等. 彩虹-4 无人机航磁三分量测量系统研发及应用研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65 (11): 4485-4494.
- [11] 陈耀飞, 黄欢欢, 陈嘉尧, 等. 磁流体型光纤磁场传感研究进展: 从标量到矢量[J]. 半导体光电, 2022, 43 (4): 655-665.
- [12] 罗建刚, 张峰, 刘静晓, 等. 基于遗传算法的矢量磁测量非对准误差校正[J]. 探测与控制学报, 2021, 43 (4): 51-57.
- [13] 向枫桦, 杨宾锋, 李博, 等. 基于免疫克隆算法的一阶磁梯度张量定位方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2022, 23 (3): 53-59, 81.
- [14] 郭灿文, 郇恒飞, 马永. 利用水平导数与垂向导数标准偏差的相关系数法识别磁源边界[J]. 地质与勘探, 2020, 56 (2): 418-426.
- [15] 谢汝宽, 熊盛青, 段树岭, 等. 基于航磁矢量数据的磁源总磁化方向估算[J]. 地球物理学报, 2021, 64 (9): 3368-3378.
- [16] 马剑飞, 丁凯, 颜冰, 等. 基于水下运动平台的磁性目标跟踪与特征反演[J]. 兵工学报, 2021, 42 (9): 1951-1961.
- [17] 张志厚, 路润琪, 廖晓龙, 等. 基于全卷积神经网络的磁异常及磁梯度异常反演[J]. 地球物理学进展, 2021, 36 (1): 325-337.
- [18] 张涛, 王新华, ZIA U. 测量多阶磁梯度张量的磁传感器阵列[J]. 中国测试, 2019, 45 (8): 93-99.
- [19] 林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62 (23): 2606-2618.
- [20] 缪林良, 米洒洒, 王玮琳, 等. 航磁矢量测量的误差分析和补偿算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (12): 15-23.
- [21] 李青竹, 石志勇, 李志宁, 等. 差分磁梯度张量测量极限估计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11): 1325-1336.
- [22] FOSS C, MCKENZIE B. Inversion of anomalies due to remanent magnetisation: an example from the Black Hill Norite of South Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2011, 58 (4): 391-405.
- [23] LI Y G, SHEARER S E, HANEY M M, et al. Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization[J]. Geophysics, 2010, 75 (1): 3294766.
- [24] 杨力, 周可法, 王金林. 球坐标系下磁化强度矢量反演方法及其应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42 (2): 260-266.
- [25] 王昊, 严加永, 孟贵祥, 等. 地磁梯度测量及其在金属矿勘查中的试验——以拉依克勒克铜铁矿为例[J]. 物探与化探, 2019, 43 (6): 1173-1181.
- [26] 吴招才, 刘天佑. 磁力梯度张量测量及应用[J]. 地质科技情报, 2008, 27 (3): 107-110.
- [27] SANCHEZ V, SINEX D, LI Y G, et al. Processing and inversion of magnetic gradient tensor data for UXO applications[C]// Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Atlanta: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- [28] QUEITSCH M, SCHIFFLER M, STOLZ R, et al. Investigation of three-dimensional magnetization of a dolerite intrusion using airborne full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data[J]. Geophysical Journal International, 2019, 217 (3): 1643-1655.
- [29] 卞光浪, 翟国君, 刘雁春, 等. 水下磁性目标探测中磁异常分量换算方法[J]. 测绘学报, 2011, 40 (2): 232-237.
- [30] LUO Y, WU M P. Reconstructing airborne gravity gradient data based on Fourier transform[J]. Geophysics, 2022, 87 (3): 57-69.
- [31] 骆遥, 吴美平. 适用于变化磁倾角的区域磁异常三分量转换与化极方法[J]. Applied Geophysics, 2022, 19 (1): 107-116, 145-146.
- [32] 李西子, 郭华, 韩松, 等. 航磁三分量向上延拓在判断地质体物性参数上的应用研究[J]. 物探与化探, 2019, 43 (4): 881-891.
- [33] 刘天佑, 高文利, 冯杰, 等. 井中三分量磁测的梯度张量欧拉反褶积及应用[J]. 物探与化探, 2013, 37 (4): 633-639.
- [34] 孙昂, 郭华, 田明阳, 等. 基于欧拉反褶积方法的航磁三分量应用研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4491-4505.
- [35] LI Y G, OLDENBURG D W. 3-D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 1996, 61 (2): 394-408.

(责任编辑: 肖楚楚)