

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.013

# 使用 MAMEA 数据集的海洋磁力测量测线布设方法

熊攀, 刘强, 边刚, 金绍华, 冯金涛

(海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁大连 116018)

**摘要:**地磁基准图是地磁匹配导航的基础,测线的布设是海洋磁力测量的重要内容,对地磁基准图的精度控制和磁力测量效率起着关键作用。目前,在海洋磁力测线布设方向上存在难以利用先验信息合理确定最佳方向,且没有充分顾及测区磁力异常的变化特征。结合海洋磁力测量特点,提出使用 Sobel 算子和差分方程构建海洋地磁数据总体梯度计算模型以计算总梯度最大方向,并将其用于估算磁力测线方向。在没有先验磁测数据的情况下,利用 MAMEA 数据集计算测线布设方向,并通过实测数据验证了所提模型在不同测线间隔下仿真模拟和地磁匹配导航应用中所确定的测线方向的优异性能。结果表明:MAMEA 数据集可以作为磁力测量测线布设方向的先验信息,且利用海洋地磁数据总体梯度计算模型得出的最大总梯度方向可有效提高磁测精度,降低均方根误差,并更大程度反映了地磁异常的细节信息,从而有效提高地磁匹配导航的精度。

**关键词:**测线方向;Sobel 算子;地磁匹配导航;差分方程;MAMEA 数据集

中图分类号:P229.2

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)02-0122-07

## Marine magnetic survey line layout method using MAMEA data

XIONG Pan, LIU Qiang, BIAN Gang, JIN Shaohua, FENG Jintao

(Department of Military Oceanography and Hydrographic & Cartography,  
Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China)

**Abstract:** The geomagnetic reference map is the basis for geomagnetic matching navigation, and the design of survey line layouts is an important part of marine magnetic survey, which plays a key role in the precision control of the geomagnetic reference map and the efficiency of the magnetic survey. At present, it is challenging to determine the best direction reasonably by using priori information in the layout direction of marine magnetic survey line, and it does not fully take into account the changing characteristics of magnetic anomalies within the survey area. To solve this problem, it is proposed to use the Sobel operator and difference equation to construct the total gradient calculation model of marine geomagnetic data to calculate the maximum direction of the total gradient, which is used to estimate the direction of the magnetic survey line. In the absence of a priori magnetic survey data, the MAMEA dataset is used to calculate the direction of the line layout, and the measured data are used to verify the excellent performance of the proposed model-determined line direction in simulations with different line intervals and in geomagnetic matching navigation applications. The results show that the MAMEA dataset can be used as a priori infor-

收稿日期:2024-09-11;修订日期:2024-10-30

作者简介:熊攀(2001—),男,硕士研究生,主要从事海洋地球物理测量方面的研究。

通信作者:刘强(1989—),男,博士,工程师,主要从事海洋地球物理测量方面的研究。

mation of magnetic survey line layout direction, and the maximum total gradient direction derived from the total gradient calculation model of marine geomagnetic data can significantly improve the accuracy of magnetic survey, reduce the root mean square error, and reflect the details of the geomagnetic anomalies to a greater extent, which can effectively improve the accuracy of geomagnetic matching navigation.

**Key words:** Survey line direction; Sobel operator; Geomagnetic matching navigation; Difference equation; MAMEA dataset

## 0 引言

水下地磁匹配导航通过水下载体实时测量地磁场信息,并将所得测线数据与地磁基准图上的数据进行关联度匹配以实现精确定位,具有隐蔽性且匹配对象特征变化明显。对于地磁匹配导航而言,地磁基准图的获取十分关键。在地磁基准图的测量过程中,测量数据的质量受到航线规划合理性的直接影响,通过精心设计航线,可以显著提升地磁基准图的制备精度,增强作业效率<sup>[1]</sup>。海上的调查测量大多采用船载走航式线性测量方式,通常按照测区的划分确定测线布设的方向和间距,测船则按照计划测线进行测量<sup>[2]</sup>。对于线性测量而言,在做不到全覆盖的情况下,测线之间存在未探测到的空白区域,需要通过两侧的测量数据进行插值推算,合理的测线布设将会提高对于空白区域的插值推算精度。然而,合理的测线布设存在两方面的问题,一是测线方向的确定,二是测线间距的确定。在水深测量中,测量对象是海底,为了完整地反映海底起伏变化情况,测线方向通常垂直于等深线<sup>[3]</sup>。对于海洋重力测量而言,由于重力的变化趋势较为平缓,测线方向的选择可采取垂直于重力等值线的方向,即大致为梯度变化的方向<sup>[4]</sup>。而对于磁力测量而言,特别是在磁力变化复杂的区域,等值线的变化非常复杂,且在不同区域都有不同的分布特征<sup>[5]</sup>,难以通过垂直于等值线确定磁力测量的测线方向。在重力测量时,可使用全球重力场模型 EGM2008 (Earth gravitational model 2008)作为先验信息以确定测线的布设方案<sup>[2]</sup>,但对于全球地磁场模型,例如国际地磁参考场(international geomagnetic reference field, IGRF)、地球磁场异常格网(Earth magnetic anomaly grid 2, EMAG2)<sup>[6]</sup>和全球地磁场模型(CSES global geomagnetic field model, CGGM)<sup>[7]</sup>等难以反映东亚海区地磁异常场的细节信息<sup>[8]</sup>,很难将其作为先验信息用于规划测线的布设。因此,需要在没有先验船

测信息的情况下,寻找适合于东亚海区的先验地磁数据集,以确定磁力测线的布设方向。

为了提高匹配导航基准图的精度,本文针对磁力测量时测线方向难以合理确定的问题,提出使用 Sobel 算子<sup>[9]</sup>和差分方程构建了海洋地磁数据总体梯度计算模型,利用测区的先验信息计算出最大总体梯度,并将最大总体梯度作为磁力测量的测线布设方向。鉴于目前全球地磁模型难以反映东亚海区范围内的地磁异常信息,分析了在没有磁力船磁数据作为先验信息的情况下,尝试使用东亚磁异常图(magnetic anomaly map of East Asia, MAMEA)<sup>[10-11]</sup>数据集作为先验信息,利用海洋地磁数据总体梯度计算模型计算测线方向,并通过实测数据验证了在不同测线间距下,测线方向对于海洋磁力成果图精度和结构相似度的影响<sup>[12]</sup>。本文利用实测数据及仿真测线的方式,验证了所提测线方向确定方法和 MAMEA 数据集作为先验信息的可行性。

## 1 总体梯度计算模型

### 1.1 内部数据点梯度计算方法

梯度值是描述该位置变化剧烈程度的重要信息<sup>[13]</sup>,Sobel 算子在图像领域中可用于寻找边缘信息<sup>[14]</sup>,在物理学中可以揭示标量场的变化程度<sup>[15]</sup>。通过 Sobel 算子计算的数值不同于传统地球物理梯度,其数值代表的是磁场中某方向上格网点间的差值,数值越大说明在该方向的变化越剧烈,所蕴含的细节信息就越多,越能反映磁场的变化特征。在地磁匹配导航领域,磁场变化越剧烈的地方越适合作为匹配区域,其匹配的精度就越高,所以在测量时应考虑梯度变化这一重要指标。为进一步反映地磁场数据的总体梯度变化特征,本文使用 Sobel 算子提取磁场内部格网点沿着经度方向和纬度方向<sup>[16]</sup>,共两个方向的梯度变化值,具体的计算公式如下<sup>[17]</sup>

$$G_{lat} = (f(lon + 1, lat - 1) + 2f(lon + 1, lat) + f(lon + 1, lat + 1)) - (f(lon - 1, lat - 1) +$$

$$2f(lon - 1, lat) + f(lon - 1, lat + 1)) \quad (1)$$

$$G_{lon} = (f(lon - 1, lat - 1) + 2f(lon, lat + 1) + f(lon + 1, lat - 1)) - (f(lon - 1, lat + 1) + 2f(lon, lat - 1) + f(lon + 1, lat - 1)) \quad (2)$$

式中,  $f(lon, lat)$  表示在经度格网点  $lon$ 、纬度格网点  $lat$  处的磁场值;  $G_{lat}$  表示纬度方向的梯度大小;  $G_{lon}$  表示经度方向的梯度大小。最后通过矢量合成的方式将位置点  $f(lon, lat)$  处的  $G_{lat}$  和  $G_{lon}$  合成为该点位置处的梯度值, 设其为  $G_{f(lon, lat)}$ 。

采用 Sobel 算子的卷积模板如图 1 所示。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(a) 水平方向模板

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(b) 垂直方向模板

图 1 Sobel 算子水平和垂直卷积模板

Fig. 1 Sobel operator horizontal and vertical convolution templates

## 1.2 差分方程提取边缘梯度值

对于边缘地磁格网点的数, 使用向前差分方程或者向后差分方程提取经度方向和纬度方向的梯度值, 同样使用矢量合成的方式合成边缘点信息的梯度值。下面以右侧和底部的边缘点为例, 给出其梯度值的计算示例如下。

对于纬度方向的右侧边缘点梯度计算公式为

$$G_{lat}^{f(lon_{end}, lat)} = F(lon_{end}, lat) - F(lon_{end} - 1, lat) \quad (3)$$

对应经度方向的底部边缘点梯度计算公式为

$$G_{lon}^{f(lon, lat_{end})} = F(lon, lat_{end}) - F(lon, lat_{end} - 1) \quad (4)$$

## 1.3 最大累积梯度方向计算

为准确反映整个测区总体梯度的最大变化方向, 本文将测区划分为 36 个方向, 每个方向代表  $10^\circ$

的扇形区域; 分别将每个地磁格网点的梯度值投影在划分的 36 个方向上, 并对每个方向上地磁格网点梯度的投影值进行累加求和; 然后统计 36 个方向上的最大值, 以最大值的方向作为该测区的总体梯度最大变化方向, 也就是测线布设的最佳方向。

## 2 案例分析

在使用海洋地磁数据总体梯度计算模型计算总梯度最大方向时, 需要考虑两种情况: 一种是没有先验历史数据的情况下, 需要使用公开数据初步判断该区域的磁力测线布设情况; 第二种是已有先验历史数据的情况下, 需要对其进行重测或者补测时, 则使用已有船测数据判断补测方向或重测方向。下面针对没有先验历史数据的情况, 验证 MAMEA 数据集是否可作为计算测线方向的先验数据, 并分析海洋地磁数据总体梯度计算模型给出的测线布设方向对构图精度和结构相似度的影响。

### 2.1 MAMEA 数据介绍

本文采用最新版本的 MAMEA 数据集, 其主要是由美国、英国、俄罗斯及东亚各国等提供的船载测量数据汇编而成, 在西北太平洋海域, 尤其是日本周边海域, 数据密度较大, 主要由美国和日本提供, 且规则测线覆盖面积较大。而我国近海及赤道附近海域数据相对稀疏, 大部分海域多以航渡线测量数据为主。

本文尝试使用 MAMEA 数据集在没有先验地磁数据的情况下判断磁力测量的测线布设方向。由于 MAMEA 数据集在不同海区的精度差异较大, 因此, 在已有先验地磁数据的情况下, 优先使用先验地磁数据计算测线方向。

### 2.2 使用 MAMEA 数据计算测线方向

本文选择的测区范围在东经 ( $124^\circ \sim 129^\circ$ ), 北纬 ( $27^\circ \sim 33^\circ$ )。假设该测区没有任何可参考的磁力测量数据, 采用公开的 MAMEA 数据集确定测区的测线方向。下面将使用从 MAMEA 数据集中提取的数据, 通过本文模型计算出海洋磁力测线的布设方向。

根据从 MAMEA 数据集中提取的测区数据, 使用海洋地磁数据总体梯度计算模型计算出该区域 36 个方向上的累加梯度大小。将纬度从左向右的方向设置为  $0^\circ$ , 以间隔  $10^\circ$  逆时针旋转平均分布的 36 个方向, 具体累加梯度计算结果分布如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 该区域纵向的梯度值明显大

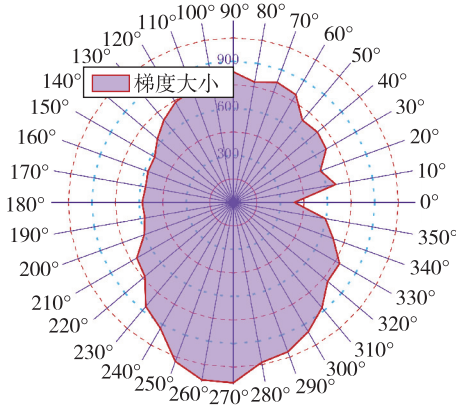


图 2 总梯度大小分布

Fig. 2 Distribution of the total gradient magnitude

于横向,呈现出竖直线状分布特征。由图 2 可见,该区域从左向右计算总体梯度时,也就是 0°方向的总体梯度最小,仅为 389 nT;总体梯度最大方向为从南至北,也就是 270°方向,累加梯度计算结果为 1 150 nT。因此,根据 MAMEA 数据集计算的最大总体梯度值来看,该测区测线布设应该沿着南北向,也就是图 2 中 270°方向布设。

2.3 实测数据验证

为进一步探究测线布设方向对最后构图精度的影响情况,下面使用该区域的实测数据进行验证分析。通过与实测数据对比,选取 MAMEA 数据集在该区域的精度为 47.4 nT。

实测数据为“向阳红 5 号”海洋科考船在我国东海海域的测量数据,数据由国家海洋科学数据中心 (<http://mds.nmdis.org.cn/>) 提供。使用该数据对 MAMEA 数据集计算的总梯度最大方向进行模拟测线布设和构图,先通过克里金插值法将“向阳红 5 号”海洋科考船的实测数据构建为 8 km×8 km 的地磁格网数据。构图结果如图 3 所示。

其后,模拟两种海洋磁力测线布设方向,分析沿着最大总梯度方向和最小总梯度方向布设的测线对成果图精度的影响情况。在进行模拟仿真时,由于原始实测数据构图的格网间隔为 8 km,因此,测线间隔分别设置为 16 km, 20 km, 24 km, 28 km, 32 km, 36 km 和 40 km。把模拟测线数据与原始实测数据进行对比,将原始实测数据设为真实数据,分析不同测线间距在不同测线方向上的构图精度变化情况和结构相似性(structural similarity, SSIM)变化情况,从而分析海洋地磁数据总体梯度计算模型给出的测线布设方向对磁力成果图质量的提升效果。

在利用 0°方向(横向方向)和 270°方向(纵向方

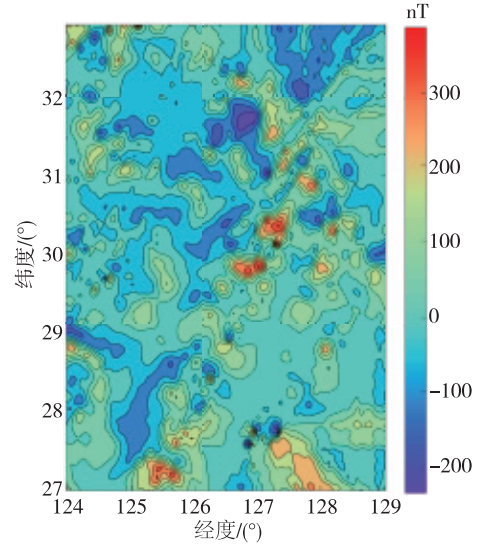


图 3 “向阳红 5 号”海洋科考船实测数据

Fig. 3 Composition result of measured data of “Xiangyanghong 5” ocean research ship

向)在不同测线间隔下仿真所得的测线数据进行构图分析时,同样采用克里金插值法构建出原始实测数据相同分辨率的格网数据,通过计算均方根误差(root mean square error, RMSE)分析构图的精度<sup>[18]</sup>。RMSE<sup>[19]</sup>的计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^M \sum_{n=1}^N (f^d(t, n) - f^m(t, n))^2}{MN}} \quad (5)$$

式中,  $f^d(t, n)$  表示实测数据在横向格网点  $t$  和纵向格网点  $n$  的磁力数据;  $f^m(t, n)$  表示模拟构图数据在横向格网点  $t$  和纵向格网点  $n$  的磁力数据;  $M$  和  $N$  分别为横向格网点数和纵向格网点数。

通过对两个方向进行模拟构图,其不同测线间距计算的 RMSE 变化情况如图 4 所示。

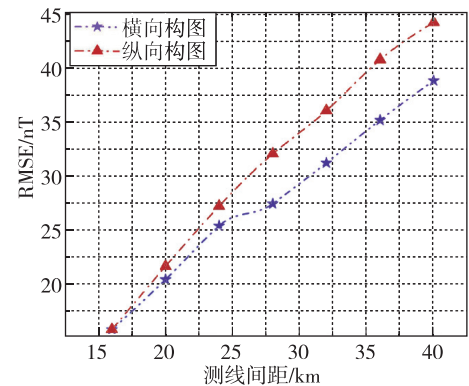


图 4 不同间距及不同方向构图精度变化示意图

Fig. 4 Diagram of composition accuracy changes with different intervals and directions

由图4可见,在相同的测线布设间距条件下,沿着总梯度最大方向也就是南北方向的构图精度明显要高于总梯度最小方向也就是横向方向,并且随着测线间距的增大,精度提升的效果就越显著。

为分析不同测线布设方向对原始实测数据细节保留程度的影响,本文通过计算模拟测线数据与原始实测数据之间的 SSIM 进行分析。SSIM 在图像领域中用于评估两个图像之间的差异程度<sup>[20]</sup>。本文将引入到地磁领域,用于对比分析两种测线布设方式对于原始实测数据的细节保留程度,SSIM 计算方法为

$$SSIM(f^d, f^m) = \frac{SSIM[l(f^d, f^m), c(f^d, f^m), s(f^d, f^m)]}{(6)}$$

式中,  $l(f^d, f^m)$ ,  $c(f^d, f^m)$  和  $s(f^d, f^m)$  分别表示原始实测数据  $f^d$  与模拟构图数据  $f^m$  的亮度相似情况、对比度相似情况和结构相似情况,使用 SSIM 评判构图情况比 RMSE 更加全面。

由图5可见,SSIM 变化情况和 RMSE 的变化情况类似,都是随着测线间距的递增而增大,沿着总梯度最大方向进行测线布设时其优势就越明显,越能保留真实地磁场的细节信息。

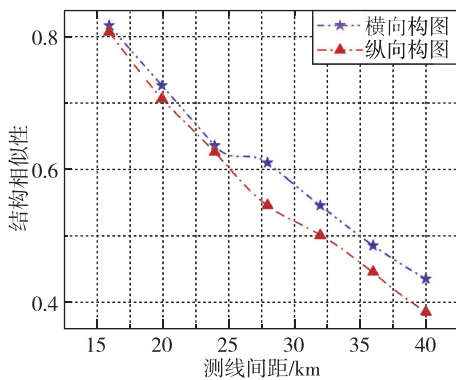


图5 不同间距及不同方向构图的结构相似性变化情况

Fig. 5 Changes in structural similarity of compositions with different intervals and directions

为更加直观体现测线沿着不同方向的构图效果,下面以测线间距为 28 km 为例,分别给出测线沿着总梯度最小方向和最大方向的测线布设方式计算出的构图成果,如图6和图7所示。

图6和图7分别为总梯度最小方向和总梯度最大方向在测线间距为 28 km 时的构图成果示意图,与原始实测数据计算 RMSE 分别为 27.70 nT 和 32.32 nT, SSIM 提高 6.4%。

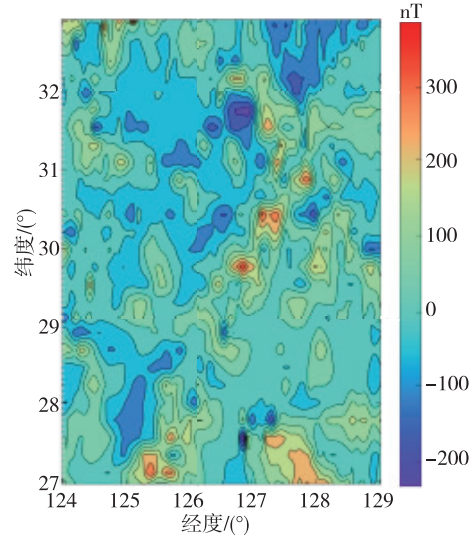


图6 沿着总梯度最小方向测线布设构图成果

Fig. 6 Layout results along the minimum direction line of the total gradient

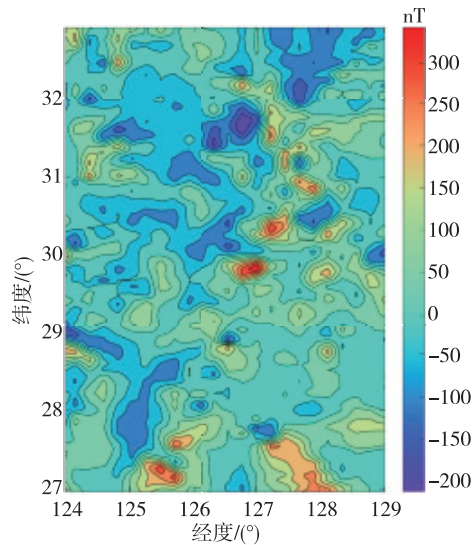


图7 沿着总梯度最大方向测线布设构图成果

Fig. 7 Layout results along the maximum direction line of the total gradient

## 2.4 测线方向对匹配导航的影响

为验证磁力测线方向对地磁匹配导航精度的影响,使用最近等值线迭代(iterative closest contour point, ICCP)<sup>[21]</sup>匹配算法,在沿着梯度最大方向和梯度最小方向测量所构地磁基准图上上进行匹配导航。航迹线选择情况如图8所示,其中惯性导航系统(inertial navigation system, INS)航迹随着时间的累积而增大。计算结果如图8所示。

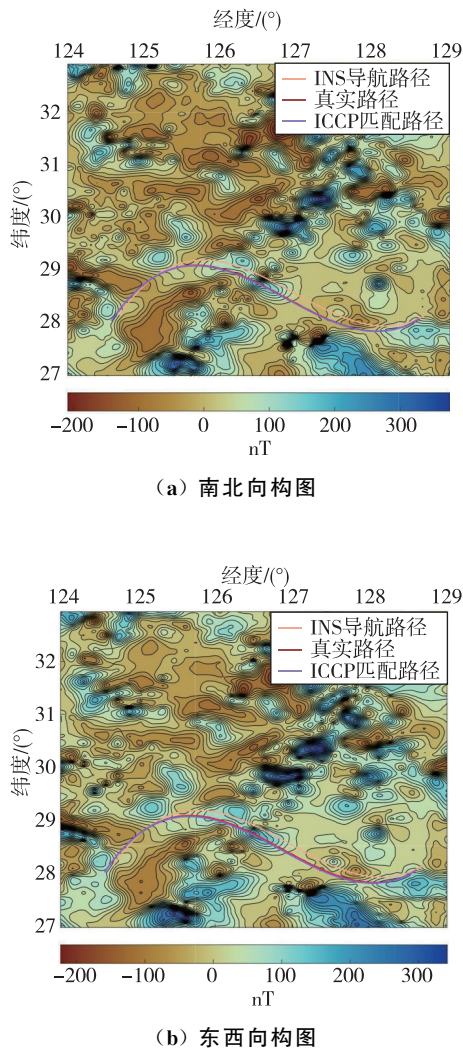


图 8 ICCP 匹配导航图

Fig. 8 ICCP matching navigation map

图 8(a)为梯度最大方向构图结果,图 8(b)为梯度最小方向测线仿真构图结果。经过生成同样的航迹线在不同测线方向所构成的基准图中进行匹配计算,图 8(a)的匹配导航精度为 1.08 km,图 8(b)的匹配导航精度为 2.01 km,可见测线方向对匹配导航精度影响较大。

### 3 结论

本文构建了海洋地磁数据总体梯度计算模型,引入 Sobel 算子计算地磁格网点数据内部梯度以及向前差分和向后差分计算边缘数据点的梯度值,并提出使用 MAMEA 数据集确定磁力测线布设方向。主要结论如下:

1)本文通过实测验证了使用海洋地磁数据总体梯度计算模型和 MAMEA 数据集计算的总梯度最大方向,在不同测线间隔的情况下,其构图精度

都优于总梯度最小方向。

2)MAMEA 数据集可以在没有先验实测数据时用于计算测区总梯度最大方向。

未来将研究 MAMEA 数据集作为先验数据在磁力测线间距确定方面的应用。

### 致 谢

感谢国家科技资源共享服务平台—国家海洋科学数据中心提供的海洋磁力测量数据。

### 参考文献

- [1] 边刚,金绍华,刘强,等. 动力滑翔机航磁系统的海洋磁力测量实践[J]. 海洋测绘, 2022, 42(3): 13-16.  
BIAN Gang, JIN Shaohua, LIU Qiang, et al. Ocean magnetic measurement practices for power glider aeromagnetic systems[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2022, 42(3): 13-16(in Chinese).
- [2] 金绍华,李家彪,吴自银,等. 利用 EGM2008 模型估算海洋重力测量测线布设间距[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(9): 1315-1319.  
JIN Shaohua, LI Jiabiao, WU Ziyin, et al. Estimating the spacing of marine gravity survey lines using the EGM2008 model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(9): 1315-1319(in Chinese).
- [3] 李苏豪,董书琴,刘小虎. 基于多波束测深技术的航线规划模型[C]//第十二届中国指挥控制大会. 北京, 2024.  
LI Suhao, DONG Shuqin, LIU Xiaohu. A route planning model based on multibeam bathymetric techniques [C]// Proceedings of 12<sup>th</sup> China Command and Control Conference. Beijing, 2024(in Chinese).
- [4] 黄谟涛,邓凯亮,欧阳永忠,等. 海空重力测量及应用技术研究若干进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1635-1650.  
HUANG Motao, DENG Kailiang, OUYANG Yongzhong, et al. Some progress in research on gravity measurement and application technology in sea and air [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1635-1650(in Chinese).
- [5] 孙昊,李志炜,熊雄. 海洋磁力测量技术应用及发展现状[J]. 海洋测绘, 2019, 39(6): 5-8+20.  
SUN Hao, LI Zhiwei, XIONG Xiong. Application and development status of marine magnetic measurement technology[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(6): 5-8+20(in Chinese).

- [6] ISHIHARA T, UCHIDA T. Magnetic anomaly map of east and southeast Asia[M]. Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3 Revised. Geological Survey of Japan, 2021.
- [7] 翟世龙, 黄静, 雷晴, 等. CGGM 全球地磁场模型和新疆地区台站主磁场逐月变化的一致性分析[J]. 地震研究, 2024, 47(2): 253-262.  
ZHAI Shilong, HUANG Jing, LEI Qing, et al. Consistency analysis of the CGGM global geomagnetic field model and the month-to-month variation of the main magnetic field at stations in Xinjiang region[J]. Journal of Seismological Research, 2024, 47(2): 253-262(in Chinese).
- [8] 常宜峰, 种洋, 柴洪洲, 等. 世界地磁场模型精度评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1398-1403.  
CHANG Yifeng, ZHONG Yang, CHAI Hongzhou, et al. Evaluation of world magnetic accuracy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(10): 1398-1403(in Chinese).
- [9] 张婧, 郭风成, 左泽丹, 等. 融合多方向 Sobel 算子的相干斑各向异性扩散抑制[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1118-1125.  
ZHANG Jing, GUO Fengcheng, ZUO Zedan, et al. Coherent spot anisotropic diffusion suppression incorporating multidirectional Sobel operators[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1118-1125(in Chinese).
- [10] MAUS S, BARCKHAUSEN U, BERKENBOSCH H, et al. EMAG2: a 2-arc min resolution Earth magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2009, 10(8): Q08005.
- [11] MEYER B, CHULLIAT A, SALTUS R. Derivation and error analysis of the Earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3)[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2017, 18(12): 4522-4537.
- [12] ISHIHARA T, UCHIDA T. Magnetic anomaly map of east and southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Explanatory Note [M]. Geological Survey of Japan, Digital Geoscience Map P-3, Revised, 14p, 2021.
- [13] LIU G, YANG S, WANG G, et al. A decision-making method for machinery abnormalities based on neural network prediction and Bayesian hypothesis testing [J]. Electronics, 2021, 10(14): 1610.
- [14] PENG-O T, CHAIKAN P. High performance and energy efficient Sobel edge detection[J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 87: 104368.
- [15] 马常昊, 胡文惠, 钟海超, 等. 融合 Sobel 算子的 SAR 图像结构优化方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(2): 119-124.  
MA Changhao, HU Wenhui, ZHONG Haichao, et al. A structural optimization method for SAR images incorporating Sobel operators[J]. Journal of Detection and Control, 2024, 46(2): 119-124(in Chinese).
- [16] ZHANG R, XIAO Q, DU Y, et al. DSPI filtering evaluation method based on Sobel operator and image entropy[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(6): 1-10.
- [17] CHANG Q, LI X, LI Y, et al. Multi-directional Sobel operator kernel on GPUs[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2023, 177: 160-170.
- [18] 刘强, 边刚, 殷晓冬, 等. 基于小波分析的海洋磁力测量数据调差方法[J]. 海洋测绘, 2018, 38(2): 12-15.  
LIU Qiang, BIAN Gang, YIN Xiaodong, et al. Wavelet analysis-based method for tuning marine magnetic measurement data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018, 38(2): 12-15(in Chinese).
- [19] YE Q, PAN H, LIU C. A framework for final drive simultaneous failure diagnosis based on fuzzy entropy and sparse Bayesian extreme learning machine [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2015(1): 427965.
- [20] 王昶, 张永生, 王旭, 等. 遥感影像条带噪声去除的小波变分法[J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 1025-1037.  
WANG Chang, ZHANG Yongsheng, WANG Xu, et al. Stripe noise removal of remote image based on wavelet variational method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(8): 1025-1037(in Chinese).
- [21] WANG Y, DENG Z, ZHANG W, et al. An improved ICCP gravity matching algorithm based on Mahalanobis distance[C]// Proceedings of 2021 40<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC). Shanghai: IEEE, 2021: 3503-3508.

(编辑:孟彬)