2024年12月

第48卷第6期

doi: 10.11720/wtyht.2024.0155

罗建刚,李海虎,刘静晓,等.海上拖曳式地磁矢量测量系统研制及海试[J].物探与化探,2024,48(6):1455-1462.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2024.0155

Luo J G, Li H H, Liu J X, et al. Development and sea trials of a marine towed geomagnetic vector measurement system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6); 1455-1462. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0155

# 海上拖曳式地磁矢量测量系统研制及海试

罗建刚<sup>1,2,4</sup>,李海虎<sup>1</sup>,刘静晓<sup>1</sup>,李海兵<sup>1,2,3</sup>,郭子伟<sup>1,3</sup>,

# 孙宁1,3,付碧波1,张峰1,李学砚5

(1. 崂山实验室,山东 青岛 266237; 2. 自然资源部 海洋环境探测技术与应用重点实验室,广东 广州 510300; 3. 北京航天控制仪器研究所,北京 100039; 4. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基 地,山东 青岛 266000; 5. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要: 地磁场是空间中的矢量场,传统海洋磁力测量以地磁总场强度测量为主,丰富的地磁矢量场信息未能被充 分获取和利用。鉴于当前现状,研制了海上拖曳式地磁矢量测量系统,该测量系统可应用于海上动态条件下,并最 终测量获得地理坐标系下的地磁矢量场信息。对该测量系统开展了海上测量试验,完成了网格测线和重复线测 量;海上实测数据经预处理后,重复线内符合精度优于6.7 nT、交叉点内符合精度优于6 nT,表明该测量系统初步具 备了海上地磁矢量场测量的能力,可应用于近海或远海的地磁场测量任务,获得更加丰富的地磁场信息。

关键词:海洋地磁测量;矢量场;磁通门传感器;测量系统;海上试验

中图分类号: P715 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2024)06-1455-08

# 0 引言

海洋磁力测量技术是海洋测量技术的重要组成 部分,是认识海洋、开发海洋的重要手段。海洋磁力 测量可广泛应用于海洋资源探测、海底科学研究、水 下磁目标物探测、水下潜器自主导航等方面<sup>[1-4]</sup>。

地磁场是空间中的矢量场,具有7个要素,分别 是北向分量X、东向分量Y、垂向分量Z、水平分量 H、磁偏角D、磁倾角I、总强度F。传统海洋磁力测 量一般采用质子磁力仪、Overhauser 磁力仪或光泵 磁力仪获取地磁总场强度信息,但丰富的地磁矢量 场信息未能被充分获取和利用<sup>[5]</sup>。目前,地磁矢量 测量可以直接获取地磁场的3个要素,通过进一步 计算可获取地磁场全部要素信息。研究表明,进行 地磁矢量测量可以有效减少反演的多解性、提高目 标物探测分辨率<sup>[6-7]</sup>。国际上,美国、日本、德国等 国家在海洋地磁矢量场测量技术研究方面起步较 早,并取得了诸多研究成果<sup>[8-11]</sup>;在国内,自然资源 部第二海洋研究所开展了基于测量船和 AUV 的地 磁矢量场测量技术研究,将测量的地磁场分量转换 成总场后,测量精度分别为47.56 nT<sup>[12]</sup>和30 nT<sup>[13]</sup>; 吉林大学与广州海洋地质调查局等单位联合开展了 海洋深拖地磁矢量场测量技术研究,海上测量的3个 磁场分量数据的重复线内符合精度优于11 nT<sup>[14]</sup>。 总体上讲,国内海洋地磁矢量场测量技术研究起步 较晚,且在测量精度上尚与国外存在一定差距。

鉴于以上现状,本文作者团队在地磁矢量测量 理论、误差校正和磁干扰补偿方法研究的基础上,研 制了海上拖曳式地磁矢量测量系统,并成功开展了 海上测量试验。本文对所研制拖曳式地磁矢量测量 系统的组成、海试情况、数据处理结果进行了介绍与 总结。

通讯作者:李海兵(1979-),男,研究员,主要从事海洋重磁场测量与导航方面的研究工作。Email:Hbli@qnlm.ac

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-09-29

基金项目:自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金课题(MESTA-2022-A005);崂山实验室科技创新项目(LSKJ202200100); 中国地质调查局项目"无人机航磁测量系统技术升级迭代"(DD20230071)

第一作者:罗建刚(1989-),男,工程师,主要从事海洋磁力测量及应用方面的研究工作。Email:Jgluo@qnlm.ac

· 1456 ·

# 1 系统研制

#### 1.1 测量原理

地磁矢量测量系统中主要包括三分量磁力仪和 姿态仪,通常利用刚性无磁结构件将二者捷联安装, 以实现二者之间高精度姿态传递,如图1所示。在 地磁矢量场测量过程中,三分量磁力仪采集其本体 坐标系  $Ox_m y_m z_m$ 下的地磁矢量场信息,姿态仪采集 其本体坐标系  $Ox_b y_b z_b$ 相对于地理坐标系  $Ox_g y_g z_g$ 的 姿态角信息;磁力信息和姿态角信息在时间上应严 格同步,并且保证  $Ox_m y_m z_m$ 坐标系和  $Ox_b y_b z_b$ 坐标系 处于对准状态,可根据姿态角信息对地磁矢量信息 进行坐标旋转,最终获得地理坐标系下的地磁矢量 场信息<sup>[15]</sup>,过程如式(1):

$$\boldsymbol{B}_{g} = \boldsymbol{R}_{b}^{g} \boldsymbol{B}_{m} \quad , \qquad (1)$$

式中:  $B_m = [B_{mx}, B_{my}, B_{mz}]^T$ 表示磁力仪坐标系下的 地磁矢量信息;  $B_{e} = [B_{ex}, B_{ey}, B_{gz}]^{T}$ 表示地理坐标  $\cos h$ sinh 0 系下的地磁矢量信息;  $R_h^g$  =  $0 \cdot$  $-\sinh$  $\cos h$ 0 0 1 0 [1 0 0 cosr sinr 0 0 1 0  $\cos p$  $-\sin p$ . 为姿态仪

 $\begin{bmatrix} 0 & \cos p & \sin p \\ 0 & \sin p & \cos p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\sin r & 0 & \cos r \end{bmatrix}$ 

坐标系至地理坐标系的旋转矩阵,其中 r、p、h 分别 表示姿态仪输出的横滚角、俯仰角和航向角。上述 过程即实现了动态条件下的地磁矢量场测量。





### 1.2 系统集成

所研制的地磁矢量测量系统(以下简称"测量 系统")主要由电气部分、结构件及水密外壳、上位 机3部分组成。测量系统的电气部分主要包括三分 量磁力仪、高精度姿态仪、主控计算机、数据记录仪、 网络交换机、UPS电源、GNSS天线、监控传感器、光 电复合缆等,系统电气连接示意见图2。



# 图 2 测量系统电气连接示意

# Fig.2 Schematic diagram of electrical connection of the measurement system

三分量磁力仪采用的是国产 HSF113 型低噪声 三轴磁通门传感器,标称频域噪声  $\leq 6 \text{ pT/rms} \sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz,量程为±100 µT,数据采样率200 Hz。由于 三轴磁通门传感器存在转向差,在系统集成前对其 进行了转向差校正,校正后总场标准差优于 3 nT。 高精度姿态仪采用的是国产 POS7100 型光纤捷联 惯性导航系统,其标称姿态精度优于0.015°、航向精 度优于 0.05°,采样率为 200 Hz。经实验室和跑车测 试,在动态组合导航条件下,该光纤捷联惯性导航系 统的姿态精度达到 0.009 7°、航向精度达到 0.004 5°。 三分量磁力仪与姿态仪通过 7075 铝合金结构件捷 联安装,结构件上设计有安装基准面,可使三分量磁 力仪和姿态仪坐标系安装对准;磁力仪与姿态仪间 隔 1.2 m,避免了由姿态仪产生的干扰磁场对磁力仪 产生的影响。

测量系统水密外壳采用 6061 铝合金设计加工, 分为主舱体和磁力密封筒;主舱体为近长方体构型, 其前端面为弧形设计,以减小水阻力,舱体两侧安装 有碳纤维水翼,可提高测量系统在水中的姿态稳定 性;磁力仪密封筒位于主舱体尾端且与主舱体相通, 内部为磁力仪安装结构件的伸长部分,系统外轮廓 示意见图 3。测量系统在水中呈正浮力,在海上测 量中可保证其顶端露出水面。

在测量系统工作过程中,主控计算机实时采集 三分量磁力仪、姿态仪及辅助传感器数据,基于1 pps和MCU为数据准确授时,授时精度优于1ms, 三分量磁力仪和姿态仪数据同步精度优于5ms;测 量数据经打包后分为2路:一路进入数据记录仪存 储,另一路经网络交换机和光电复合缆送至上位机, 上位机可以对测量数据进行实时显示和存储。





#### 2 海上试验

为检验所研制测量系统的性能,在完成实验室 静态测试和水池试验的基础上,开展了海上测量试 验。

海上测量试验于 2021 年 9 月 3~4 日在青岛市 崂山湾海域某海上试验场完成。在构造区划上,测 区属于华北地块东南部的鲁东隆起,邻近陆域及海 域,发育多条 NE 向断裂构造,包括东北部陆上发育 的牟平—即墨断裂带、东南部海域发育的千里岩断 裂。测区邻近陆域部分地层主要为元古宇变质岩、 中生界白垩系碎屑岩和新生界第四系松散堆积物。 测区内海底地形平缓,水深 8~10 m,底质以砂、粉砂 和黏土质粉砂为主。根据前期的磁测资料,测区西 北部范围内磁场变化较为平稳,东南部范围内有近 NE 向展布的磁异常条带,磁场峰峰值约 200 nT,在 此区域内进行试验可以检验测量系统对异常场的分 辨能力。

测区远离主航道且区内无水产养殖设备,通航条件较好。在实际测量试验过程中,海况等级小于2级、海浪高度小于0.5m。海上测量试验所用测量艇长度9m、宽2.5m,艇体为玻璃钢材质,整体磁性较弱。

在海上测量试验中,利用测量艇拖曳该测量系 统在水面上进行航行测量,测量艇航速 5 kn(1 kn= 1 海里/小时),拖曳缆长度设置为 30 m,满足拖曳 距离大于 3 倍船长要求。在测量中,测量系统顶部 露出水面,保证了 GNSS 天线可持续接收到卫星信 号。图 4 为测量系统在向测区航渡的过程,图 5 为 测量过程中某时段测量系统姿态数据曲线,经计算 横滚角标准差为2.59°、均值为-0.13°,俯仰角标准 差为 1.40°、均值为-3.16°,测量系统前端略向下倾, 总体上测量系统姿态较为稳定,满足设计要求。

海上测量试验完成了4×4网格线测量,主测线

(东西测线)有效长度4 km,检查线(南北测线)有效 长度 2.5 km,图 6 为测线轨迹,其位置信息是由测量 系统上,姿态仪与 GNSS 组合导航输出的经纬度投 影到平面坐标的结果,图中位置进行了偏移处理;图 中 Lew1~Lew4 表示主测线,Lsn1~Lsn4 表示检查 线。对上述部分测线进行了 2~3 遍重复测量,共计 完成主测线 8 条、检查线 7 条。为消除测量系统本 身干扰磁场对测量精度的影响,基于磁测资料,在测 区邻近海域选择一处 0.5 km×0.5 km 的区域,该区 域内背景磁场变化平稳且磁总场峰峰值小于 20 nT。在该区域进行了八方位磁补偿航行,获取了补 偿数据,用于计算磁补偿参数,补偿航行路径如图 7 所示。



图 4 海上测量试验过程 Fig.4 Process of sea measurement test



图 5 测量过程姿态角曲线





Fig.6 Relative position diagram of survey line

· 1458 ·



Fig.7 Magnetic compensation sailing path

3 海试数据预处理及精度评价

#### 3.1 数据预处理

在海试中,获取了三分量磁力仪输出的地磁矢 量数据、姿态仪和 GNSS 组合导航输出的姿态、航 向、位置、速度数据以及其他辅助传感器输出的数 据,海试数据处理主要包括磁干扰补偿、磁矢量坐标 系旋转、地磁日变校正、正常场改正、滤波及测线系 统调差等。

测量系统上的结构件及水密外壳为铝合金材 质,其本身具有一定硬磁,在地磁场磁化下会产生感 应磁场,在动态条件下还会产生涡流磁场,另外测量 系统上的各类电子器件同样会产生干扰磁场。虽然 三分量磁力仪距离主舱体有一定距离,在一定程度 上减弱了干扰磁场的影响,但其影响并未完全消除。 为了提高测量精度,需要对测量系统本身的干扰磁 场进行补偿。

经分析与测试,涡流磁场和电子器件磁场的强 度较弱且影响范围有限,因此,在磁干扰补偿时,仅 考虑测量系统的恒定磁场和感应磁场。当考虑硬磁 和感应磁场时,在三分量磁力仪坐标系下,其测量模 型可表示为:

$$\boldsymbol{B}_{m} = (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{M})\boldsymbol{B}_{e} + \boldsymbol{B}_{h} \quad , \qquad (2)$$

式中: $B_m$ 为三分量磁力仪输出的地磁矢量; $B_e$ 为地 磁场在磁力仪坐标系下的投影矢量; $B_h$ 为测量系统 产生的硬磁干扰矢量;I为单位矩阵;M为感应磁场 系数的 3×3 矩阵。

由式(2)可得三分量磁力仪的磁干扰补偿模型:

$$\boldsymbol{B}_{e} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{B}_{m} - \boldsymbol{B}_{h}) \quad , \qquad (3)$$

式中:  $G = (I + M)^{-1}$ ,求取到系数矩阵 G 和硬磁向 量  $B_h$  后,便可根据式(3)对海上实测数据进行磁干 扰补偿。

在海上测量过程中,进行了八方位磁补偿航行 获取了补偿数据,利用该数据计算获得了系数矩阵 *G*和硬磁向量 *B*<sub>h</sub>,分别为:

	0.993806	- 0.008230	0.004055
<i>G</i> =	0.006833	0.993825	0.004083
6	- 0.013901	- 0.002346	1.003669
$\boldsymbol{B}_{h} = [-376.12 \ 169.79 \ 300.44]^{\mathrm{T}}$			

具体求取过程此处不详细展开。根据式(3)和 求取的补偿参数对所有实测数据进行磁干扰补偿。 图 8 为补偿前、补偿后的磁场曲线对比,图中数据已



a-东向分量;b-北向分量;c-垂向分量;d-磁总场

—eastward component; b—northbound component; c—vertical component; d—total magnetic field 图 8 磁补偿前后磁场曲线对比

Fig.8 Comparison of magnetic field curves before and after magnetic compensation

旋转至地理坐标系下且抽稀至5Hz,其中磁总场由 3个分量计算得到。从图中可看出,在磁干扰补偿 前,随着测量系统的移动及转向,磁场分量及总场出 现了明显的波动,在补偿后数据曲线明显更加平稳。 计算补偿前后标准差如表1所示,并且基于参考文 献[16]计算补偿改善率,与文献中不同点在于此处 没有去除背景场的影响。由于补偿区域内受背景磁 场变化的影响,补偿后的磁分量及总场数据曲线仍 然存在一定的波动,导致补偿后的标准差仍然较大。

表1 磁补偿前后标准差及改善率

 Table 1
 Standard deviation and improvement rate

 before and after magnetic compensation

标准差/nT	东向分量	北向分量	垂向分量	磁总场
补偿前	403.21	395.54	279.46	43.87
补偿后	50.05	32.69	22.24	17.36
改善率(倍)	8.05	12.09	12.56	2.52

磁矢量坐标系的旋转,是将磁力仪坐标系下的 地磁矢量旋转至地理坐标系下。完成磁干扰补偿后 的地磁矢量数据仍然位于三分量磁力仪坐标系下, 根据式(1)及姿态仪输出的姿态角和航向角,对地 磁矢量进行坐标系旋转,获得地理坐标系下的地磁 矢量信息。

地磁日变是影响海上地磁测量精度的重要因素。海试中架设了质子标量磁力仪进行日变观测, 其观测数据不能对矢量数据进行校正,故选用国际 地磁台站中与测区纬度相近的韩国青阳地磁台的磁 矢量日变数据,对本次实测数据进行日变校正,青阳 地磁台经纬度为126.85°E、36.37°N,与测区纬度偏 差小于0.2°。另外,对磁分量和总场进行了正常场 改正。

受姿态仪测量精度、三轴磁通门传感器本身性 能、误差校正及磁干扰补偿不彻底等因素的影响,经 上述处理后的数据中仍然包含一定的测量噪声和测 线系统差。因此,对测量数据进行了滤波处理,消除 了部分高频噪声的影响。并对所有测网数据进行了 整体平差,消除了测线系统差。

#### 3.2 精度评价

在海空磁力测量中,一般是通过计算重复线和 交叉点内符合精度的方法,对测量成果进行评价<sup>[17-19]</sup>。本次海上测量中进行了网格测线测量,并 且在一些测线上进行了重复测量,形成了有效的交 叉点和重复线,下面对重复线和交叉点的内符合精 度进行评价。

3.2.1 重复线内符合精度评价

进行多次往返重复线测量时,重复线内符合精 度计算方法为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} \left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{ij}\right)}{(m-1) \times n}} \quad (j = 1, 2, \cdots, m; i = 1, 2, \cdots, n) ,$$
(4)

式中:  $\sigma$  为重复线内符合精度; m 为重复线数量; n 为重复线公共段上的数据点数;  $\delta_{ij}$  为第 j 条重复线 公共段各测点观测值  $F_{ij}$  与该点处各重复线上观测 的平均值  $F_i$  之差,  $f_i$ :

$$\delta_{ij} = F_{ij} - F_i , \ (j = 1, 2, \cdots, m; i = 1, 2, \cdots, n) , \ (5)$$
$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} F_{ij}}{m} , \ (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (6)$$

选取测线 Lew3 进行计算分析,在该条测线上 进行了 3 次重复测量,重复测线分别命名为 Lew3-1 >、Lew3-2<、Lew3-3>,其中">"表示由西向东航行、 "<"表示由东向西航行。图 9 为该重复测线的测量 轨迹,由于受到海流、测量艇手动驾驶等因素的影 响,3 条重复线轨迹存在一定偏差,x 方向最大距离 偏差 35 m。



Fig.9 Trace of repeating line

· 1460 ·

图 10 为 Lew3 测线上各重复线的磁场分量及总 场曲线,从图中可看出,各重复线间磁场曲线整体变 化趋势一致,说明其测量的磁场分量及总场是可信 的。磁场曲线在局部存在一些偏差,推测可能是由



磁干扰补偿及日变校正不彻底、测量轨迹偏差等因 素导致。计算重复线内符合精度如表 2 所示,各磁 场分量及总场的重复线内符合精度均优于 6.7 nT。



a-东向分量;b-北向分量;c-垂向分量;d-磁总场

a-eastward component; b-northbound component; c-vertical component; d-total magnetic field

#### 图 10 重复线磁场曲线

Fig.10 Repeated line magnetic field curve

表 2 重复线内符合精度

Table 2 Accuracy of coincidence within repeated lines

重复线内符合精度/nT						
东向分量	北向分量	垂向分量	磁总场			
6.64	4.06	6.20	5.39			

3.2.2 交叉点内符合精度评价

交叉点内符合精度的计算公式为[19]:



式中:  $\varepsilon$  为交叉点内符合精度; m 为交叉点个数;  $d_i$  为交叉点上主测线和检查线的磁场不符值。

在海上测量试验中,完成主测线8条、检查线7 条,共计形成交叉点56个,计算获得了各磁场分量 及总场在各交叉点上的不符值,如图11所示,从图



-eastward component; b—northbound component; c—vertical component; d—total magnetic field 图 11 交叉点不符值

Fig.11 Crosspoint inconsistency

中可看出,交叉点不符值基本呈正态分布。根据式 (7)计算获得各磁场分量及总场的交叉点内符合精 度如表3所示,结果均优于6nT。

表 3 交叉点内符合精度

Table 3 Accuracy of conformity within the crossing points

交叉点内符合精度/nT							
东向分量	北向分量	垂向分量	磁总场				
5.42	2.64	5.97	4.74				

## 4 结论

通过海上测量试验表明,所研制的拖曳式地磁 矢量测量系统,已初步具备海上地磁矢量场测量能 力,可通过小型测量艇或大型测量船拖曳执行近海 或深远海的地磁矢量场测量任务,使海洋地磁场测 量信息更加丰富。所研制的拖曳式地磁矢量测量系 统全部器件均为国产设备,技术状态自主可控。

在本次海试数据处理中,磁日变校正采用的是 韩国青阳地磁台的矢量日变数据,其台站与测区直 线距离近 600 km,超出了规范要求最大 500 km 的 规定,在一定程度上可能影响了最终的测量精度。

当前用于地磁矢量测量的传感器主要为三轴磁 通门传感器,其测量精度和噪声水平与光泵、Overhauser等标量磁力仪具有一定差距。另外,地磁矢 量场的测量精度还取决于姿态仪精度、误差校正和 磁干扰补偿精度等因素的影响,因此当前地磁矢量 场测量精度与地磁总场标量测量精度尚有一定差 距,但随着新型磁矢量传感器如 SQUID(超导量子 干涉仪)、超高精度姿态仪的应用,有望使地磁矢量 场的测量精度进一步提高。

#### 参考文献(References):

- [1] 翟国君,黄谟涛.海洋测量技术研究进展与展望[J].测绘学报,2017,46(10):1752-1759.
  Zhai G J, Huang M T. The review of development of marine surveying technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1752-1759.
- [2] 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 H, Li Z W, Xiong X. Application and development of marine magnetic surveying technology [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39 (6):5-8, 20.

- [3] 李园洁,魏东平.海底磁异常条带研究综述 [J].地球物理学进展,2016,31(3):949-959.
   Li Y J, Wei D P.Review of research on oceanic striped magnetic anomalies[J].Progress in Geophysics,2016,31(3):949-959.
- [4] 王向磊,田颜锋.基于地磁场的自主导航研究[J].地球物理学

报,2010,53(11):2724-2731.

2017,62(23):2606-2618.

Wang X L, Tian Y F. Autonomous navigation based Geomagnetic research[J].Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11):2724-2731.

[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.

Wu Z C, Gao J Y, Luo X W, et al. Marine measurement of the three-component geomagnetic field [J]. Progress in Geophysics, 2011,26(3):902-907.

- [6] 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.
   Lin J,Diao S,Zhang Y, et al.Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology[J].Chinese Science Bulletin,
- [7] 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.
   Xie R K, Xiong S Q, Duan S L, et al. Estimating total magnetization direction of magnetic sources by using airborne vector magnetic data[J]. Chinese Journal of Geophysics,64(9):3368-3378.
- [8] Gee J S, Cande S C.A surface-towed vector magnetometer [J].Geophysical Research Letters, 2002, 29(14):1-4.
- [9] Seama N, Nogi Y, Isezaki N.A new method for precise determination of the position and strike of magnetic boundaries using vector data of the geomagnetic anomaly field[J].Geophysical Journal International, 1993, 113(1):155-164.
- [10] Engels M, Barckhausen U, Gee J S. A new towed marine vector magnetometer: Methods and results from a Central Pacific cruise [J].Geophysical Journal International, 2008, 172(1):115-129.
- [11] Lee S M, Kim S S. Vector magnetic analysis within the southern Ayu Trough, equatorial Western Pacific [J]. Geophysical Journal International, 2004, 156(2):213-221.
- [12] 王文健,高金耀,吴招才,等.南极普里兹湾船载地磁三分量数 据处理分析 [J].极地研究,2017,29(3):349-356.
  Wang W J, Gao J Y, Wu Z C, et al. Processing and analyses on shipboard three-component magnetometer data from Prydz bay, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2017, 29(3): 349-356.
- [13] 吴涛.西南印度洋脊热液硫化物区近底磁法研究—以龙旂与断桥热液区为例[D].长春:吉林大学,2017.
   Wu T. Near-bottom magnetic study of hydrothermal fields on the Southwest Indian Ridge: Application to Longqi and Duanqiao hydrothermal fields[D].Changchun:Jilin University,2017.
- [14] 李苏芃.海洋水下拖曳式三分量磁测系统误差校正与干扰补偿 方法研究[D].长春:吉林大学,2023.
  Li S P.Research on error correction and interference compensation method of oceanic underwater towed three-component magnetic survey system[D].Changchun;Jilin University,2023.
- [15] 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.
  Luo J G,Zhang F,Liu J X, et al. Misalignment error calibration of vector magnetic measurement based on genetic algorithm[J].Journal of Detection & Control,2021,43(4):51-57.
- [16] 王林飞,薛典军,熊盛青,等.航磁软补偿质量评价方法及软件

实现[J].物探与化探,2013,37(6):1027-1030.

Wang L F, Xue D J, Xiong S Q, et al. The method of quality assessment for digital magnetic compensation and software realization [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6):1027-1030.

[17] 黄谟涛,欧阳永忠,翟国君,等.海面与航空重力测量重复测线
 精度评估公式注记[J].武汉大学学报:信息科学版,2013,38
 (10):1175-1177.

Huang M T, Ouyang Y Z, Zhai G J, et al. Comment on the Formulas of accuracy evaluation for multi-line overlapping measurements in ship-borne and airborne gravity survey[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(10):1175-1177.

- [18] 徐东礼,叶挺明,舒晴,等.航磁重复线内符合精度计算方法
  [J].物探与化探,2016,40(1):125-128.
  Xu D L,Ye T M,Shu Q, et al. The method of calculating internal accord accuracy for repeated lines in aeromagnetic survey[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2016,40(1):125-128.
- [19] GJB7537-2012.海洋磁力测量要求[S].北京:总装备部军标出版发行部,2012.
   GJB7537-2012.Specifications for marine magnetic survey[S].Beijing:Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Equipment Department,2012.

### Development and sea trials of a marine towed geomagnetic vector measurement system

LUO Jian-Gang<sup>1,2,4</sup>, LI Hai-Hu<sup>1</sup>, LIU Jing-Xiao<sup>1</sup>, LI Hai-Bing<sup>1,2,3</sup>, GUO Zi-Wei<sup>1,3</sup>, SUN Ning<sup>1,3</sup>, FU Bi-Bo<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, LI Xue-Yan<sup>5</sup>

(1. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 3. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China; 4. Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China; 5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The geomagnetic field is a vector field in space. However, traditional marine magnetic surveys focus on geomagnetic field intensity, failing to fully acquire and utilize rich information about the geomagnetic vector field. Given this, this study developed a towed marine geomagnetic vector measurement system. This system was designed to operate in dynamic marine conditions and ultimately acquire geomagnetic vector field data within the geographical coordinate system. Through sea trials of the system, grid line and repeat line measurements were obtained. After preprocessing the collected data, the measurement accuracy of repeat lines and crosspoints was better than 6.7 nT and 6 nT, respectively. The results of the sea test indicate that the measurement system has the preliminary ability to measure the geomagnetic vector field at sea, and it can be applied to geomagnetic field measurement tasks near or far sea, obtaining richer geomagnetic field information.

Key words: marine magnetic survey; vector field; Fluxgate sensor; measurement system; sea trial

(本文编辑:王萌)

