

一种适用于海洋磁力测量的地磁日变观测系统的实测结果

贾富昊^{1,2,3,4}, 顾兆峰⁵, 张振波⁶, 周章国^{1,2,4}, 罗强⁷, 张骏韬⁷, 付永涛^{1,2,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 5. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 6. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067; 7. 重庆奔腾数控技术研究所, 重庆 400039)

摘要: 为了解 WCZ-3S 陆地地磁日变观测系统的性能, 分别在江苏盐城和海南三亚将 WCZ-3S 与 Sentinel 基站磁力仪、WCZ-2 磁力仪、WCZ-3 磁力仪进行了同步测量, 通过比较分析的方法, 对 WCZ-3S 的测量精度、测量曲线的准确性、磁暴识别功能进行了检验。测试结果表明: WCZ-3S 的实测精度约为 0.3 nT, 稍逊于 Sentinel 基站磁力仪; WCZ-3S 与其他几台磁力仪所测曲线的幅值、相位保持一致; WCZ-3S 的实时成像功能可帮助台站工作人员对海洋磁力测量期间的磁暴现象进行识别。

关键词: 地磁日变; 质子磁力仪; 测量精度; 海洋磁力测量

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)09-0074-09

DOI: 10.11759/hyqx20190912002

在海洋磁力测量中, 地磁日变受太阳辐射影响, 具有时效性(每日、每时变化都不同), 对地磁日变的校正工作是海洋磁力测量资料处理中重要的改正项目, 关系到测量成果的质量和精度^[1-4], 若不进行校正则无法得到准确的因地质构造或磁性体引起的异常^[5]。同时, 地磁日变受太阳辐射影响, 具有时效性, 每时、每日的观测结果都不相同, 日变数据的缺失、失真等都会导致海洋磁力测量工作的失败, 造成重大的经济损失。因此, 如何消除日变对海洋磁测的影响, 一直是海洋磁力测量中需要优先考虑的问题。从 20 世纪 60 年代至今, 适用于海洋磁力测量的地磁日变观测方法主要包括设立同纬度陆地日变站^[6]、利用锚系系统观测^[7]、海底地磁日变观测技术^[8]、海洋磁力梯度测量^[9]等, 以及各种地磁日变校正的方法^[4, 10-17]。综合考虑上述方法的优劣^[9, 18-20], 现行的主流做法仍是在靠近海上测区的同纬度陆地设立台站进行日变观测^[21-23]。

但在陆地地磁日变观测时需要重点考虑地磁日变具有时效性的特点, 所以海洋磁力测量对于地磁日变观测的磁力仪提出了既能长时间内部存储又能在 PC 端实时成像、报警的需求, 以便在保证数据安全的前提下帮助台站人员及时发现强磁扰或磁暴, 避免海上无效作业。本文介绍的 WCZ-3S^[24]陆地地

磁日变观测系统则实现了这一功能, 且在江苏盐城和海南三亚的实测数据表明其适用于海洋磁力测量中的地磁日变观测。

1 系统简介

WCZ-3S 陆地地磁日变观测系统由 WCZ-3S 磁力仪主机、探头、计算机及配套软件等组成, 是中国科学院海洋研究所和重庆奔腾数控技术研究所, 在 WCZ-3 质子旋进磁力仪基础上进行的改进, 其在基站测量模式下的测量精度优于 0.5 nT, 分辨率可达 0.05 nT。相对于原型号在仪器主机内存存储数据, 且仅能在很小的显示器显示数据, WCZ-3S 磁力仪的改进如下: 磁力仪主机存储测量的地磁总场强度值的同时, 经由实时传输模块通过仪器的 RS232 端口传输到 PC 端, 之后 PC 端的数据处理软件实时绘制数据曲线图, 实现了既能在磁力仪主机内部长时间存储

收稿日期: 2019-09-12; 修回日期: 2019-10-15

基金项目: 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金 (MGE2018KG04)

[Foundation: Open Fund of Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, No. MGE2018KG04]

作者简介: 贾富昊(1994-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 地质工程专业, 现从事海洋重磁测量研究工作, 电话: 18724765521, E-mail: jiafuhao_upc@126.com; 付永涛, 通信作者, 副研究员, 从事海洋重磁测量研究工作, E-mail: ytfu@qdio.ac.cn

又能在 PC 端实时成像的功能。

2 WCZ-3S 陆地地磁日变观测系统 实测结果分析

2018 年在江苏盐城和海南三亚采用 WCZ-3S、Sentinel、WCZ-2、WCZ-3(各仪器部分参数见表 1)

4 台磁力仪同步测量(江苏盐城日变站实测 49 d, 海南三亚日变站实测 37 d)。

2.1 台站简介

在江苏盐城射阳县临海镇头厂村(2018 年 7 月至 9 月)和海南三亚南滨农场(2018 年 10 月至 12 月)分别设立台站进行观测。两台站主机皆设在远离探头

表 1 多型号磁力仪部分性能参数

Tab. 1 Performance parameters of multi-type magnetometer

型号	工作原理	分辨率/nT	梯度容忍度/(nT·m ⁻¹)	采样速度/Hz	量程/nT
WCZ-3S	质子旋进	0.05(精细模式) /0.1(正常模式)	≤ 8 000	≤ 1/3(精细模式); ≤ 1/2(正常模式)	20 000~100 000
Sentinel	Overhauser 效应	0.001	> 10 000	1/60~1	18 000~120 000
WCZ-2	质子旋进	0.1	≤ 5 000	1/60~1/5	20 000~100 000
WCZ-3	质子旋进	0.05(精细模式) /0.1(正常模式)	≤ 8 000	≤ 1/3(精细模式); ≤ 1/2(正常模式)	20 000~100 000

50 m 外的房屋内, 同时周边 50 m 范围内无电线等电磁干扰源, 2 km 范围内无高压电、工厂、变电站等强干扰源。使用 WCZ-3 磁力仪分别对两台站进行了梯度场的八方位测量, 测试结果显示两地梯度变化皆小于 1 nT/m, 符合《海洋调查规范》^[6]的相关要求。

2.2 测量精度分析

分别对 WCZ-3S 在江苏盐城日变站和海南三亚日变站工作期间的观测精度进行计算, 并对不同磁扰情

况下的精度平均值进行了统计(表 2)。可见, WCZ-3S 在不同磁扰情况下的观测精度皆优于 0.5 nT, 符合国标 GB/T12763.8—2007^[6]日变校正测量误差 ≤ 1 nT 的技术标准。精度计算公式如下:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}}$$

其中, δ_i 为第 i 点经过去除跳变与低通滤波后的观测值与原始观测值之差; n 是观测点的个数。

表 2 WCZ-3S 在不同磁扰环境下的实测精度(北京时间)

Tab. 2 Precision of WCZ-3S under different magnetic disturbances (Beijing time)

磁扰类型	统计天数/d		统计天数内观测精度的平均值/nT	
	江苏盐城	海南三亚	江苏盐城	海南三亚
平静型	7	3	0.32	0.19
微扰型	23	14	0.33	0.19
扰动型	10	12	0.33	0.16
强扰型	1	3	0.30	0.16
磁暴型	1	1	0.42	0.30
未划分(数据不完整)	7	4	0.35	0.13

表 2 中对于磁扰环境的分类, 区别于传统磁静日、磁扰日的分类方法。海洋磁力测量中, 地磁日变化分为平静变化和干扰变化, 大多是规则的平静变化叠加一些形态和幅度不同的扰动^[25](如湾扰、钩扰

等现象的出现^[26-28]), 为了消除地磁日变的影响, 对不同的日变化应采取不同的日变改正方法。以往的做法是认定每月 5 个地磁扰动最小的日期为一般磁静日, 但对于实际的日变校正工作仍不够精确。范守

志^[29]根据多年的工作经验,对磁静日和磁扰日进行了更为细致的划分(图 1 为从三亚日变站观测期间选取的与各个磁扰类型划分相对应的日变观测曲线)。上文中对磁扰类型的分类统计即采用了这一分类方法,具体标准如下。

平静型: 没有磁扰。太阳辐射引起的日变化是平稳的。中午时分有主极大,相位清楚。

微扰型: 在平静型上叠加有轻微的干扰成分(幅度在 30 nT 以内),中午时分的主极大仍十分明显。

扰动型: 干扰成分较大,但幅度不超过 60 nT。中午时分的主极大已消失。

强扰型: 干扰成分幅度更大,日变曲线有时快速振动呈大的锯齿状,但还不是磁暴。一两天甚至次日即恢复正常。

作为对比,分别选取江苏盐城和海南三亚两台站多型号磁力仪在地磁平静日内的观测精度进行了对比(表 3),结果证明 Sentinel 的观测精度最高且最为稳定,为 0.1 nT;WCZ-3S 的精度稍次之,优于 0.5 nT,但高于 WCZ-2 的精度。其中 WCZ-3S 质子磁力仪利

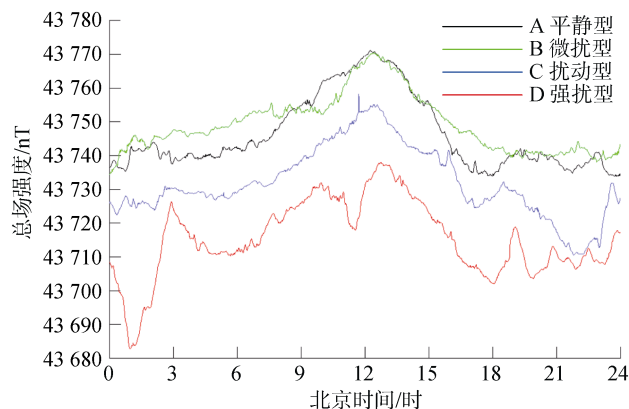


图 1 地磁日变类型划分

Fig. 1 Classification of geomagnetic diurnal variation types

用的是静态激发质子在地磁场内的拉莫尔进动效应测量地磁场。而 Sentinel 磁力仪为 Overhauser 型磁力仪,是在质子磁力仪的基础上利用射频磁场进行动态极化极化,极化时可以和进动信号的测量同时进行,成倍提高了可用信息量和信号能级,因此具有更高的精度和采样频率^[18, 30-31]。

表 3 多型号磁力仪平静日测量精度对比(北京时间)

Tab. 3 Comparison of the measurement precisions of multiple models of magnetometers on quiet days (Beijing time)

磁力仪 类型	实测精度/nT										统计天数内各仪器 精度的平均值/nT	
	江苏盐城					海南三亚					江苏盐城	海南三亚
	7月19日	7月28日	8月4日	8月9日	8月23日	8月29日	9月3日	11月2日	11月17日	11月23日		
WCZ-3S	0.19	0.33	0.25	0.31	0.32	0.34	0.33	0.33	0.09	0.12	0.31	0.18
Sentinel	0.08	0.09	0.12	0.08	0.11	0.11	0.11	0.11	0.08	0.10	0.11	0.10
WCZ-2	0.43	0.38	0.34	/	/	/	/	0.55	0.23	0.22	0.38	0.33
WCZ-3	/	/	/	0.42	0.37	0.44	0.38	/	/	/	0.4	/

注:“/”表示无观测数据。

2.3 多型号磁力仪测量数据对比

WCZ-3S 与 Sentinel、WCZ-2 的相关性系数分别为 0.998 1、0.996 0,数据相关性较好。且三台仪器所测曲线相位一致,幅值差小于 5%,虽然存在一恒定常数差,但消除常数差后所测曲线吻合。

在两个台站的观测期间地磁微扰出现的天数最多,为最常见的地磁环境;磁暴引起的地磁扰动最大,但出现的次数少,受太阳耀斑活动影响^[28],是一种极端的地磁环境。为评价 WCZ-3S 的稳定性,以 11 月 13 日(微扰日)和 11 月 5 日(磁暴日)的观测结果为例,对 WCZ-3S 与其他型号磁力仪在微扰日和磁暴日这两种地磁环境下的测量数据进行了对比

分析。

2.3.1 微扰时的对比

三亚日变站 11 月 13 日(微扰日)WCZ-3S、Sentinel 和 WCZ-2 的观测精度分别为 0.1 nT、0.09 nT 和 0.24 nT。对 3 台仪器采集的地磁日变数据曲线中同步变化的局部极值段进行对比,如图 2 所示,3 条曲线的局部极值出现时间相同、相位一致,曲线变化的幅值相同。此外,WCZ-3S 与 Sentinel、WCZ-2 所测数据的相关系数分别为 0.998 7 和 0.996 9,但是 Sentinel 测得的曲线与 WCZ-3S、WCZ-2 测得的曲线间存在着分别为 10 nT 和 12 nT 的常数差(3 条曲线消除常数差后吻合)。

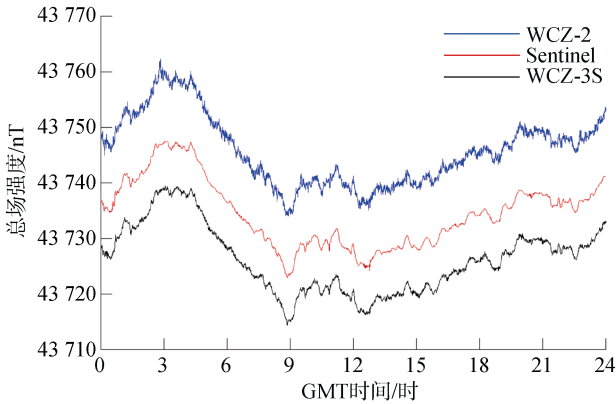


图2 三亚日变站 2018 年 11 月 13 日地磁观测数据曲线
Fig. 2 The geomagnetic diurnal variation curve at Sanya observatory on November 13, 2018

2.3.2 磁暴时的对比

在海洋磁力测量期间,磁暴发生时,将无法进行有效的日变校正,为避免无效作业,应及时中止海上磁测作业。在磁暴期间,地磁场的变化特征最明显的为水平分量 H , 目前作为磁暴判别标准的重要参数。同时,由于水平分量在地磁场总强度的构成中占有极大比重,所以总场的变化与 H 分量的变化在相位、幅值

上是高度相关的,如图 3 所示即为 11 月 5 日磁暴发生时中国科学院三亚地磁台水平分量与总场强度变化的对比(数据来源于国家地球系统科学数据共享平台-地球物理科学数据中心),二者具有高度相关性。因此,尽管 WCZ-3S 磁力仪无法测量水平分量,但其所测总场强度的变化仍可作为磁暴发生时的重要参考,当磁暴发生时,可在 PC 端屏幕上快速识别出磁测曲线有较大的幅度变化(一般为几十或几百 nT),此时可初步判断为“疑似磁暴发生”,进而参考磁暴预警(根据国家空间天气监测预警中心编制的《空间天气预警级别、预警符号及效应分类》, K_p 指数(全球三小时磁情指数)等于或大于 5 时,视为磁暴^[32]),即可最终确认为磁暴。

11 月 5 日磁暴事件中 WCZ-3S、Sentinel 和 WCZ-2 的精度分别为 0.27 nT、0.2 nT 和 0.37 nT; 3 台仪器在磁暴发生时的记录曲线相位一致(图 3); 虽然 Sentinel 测得的曲线与 WCZ-3S、WCZ-2 测得的曲线间存在着常数差,但消除常数差后吻合; 经计算, WCZ-3S 与 Sentinel、WCZ-2 所测数据的相关系数分别为 0.996 2 和 0.996 8, 显示出 WCZ-3S 与 Sentinel、WCZ-2 在磁暴发生时的数据变化的一致性。

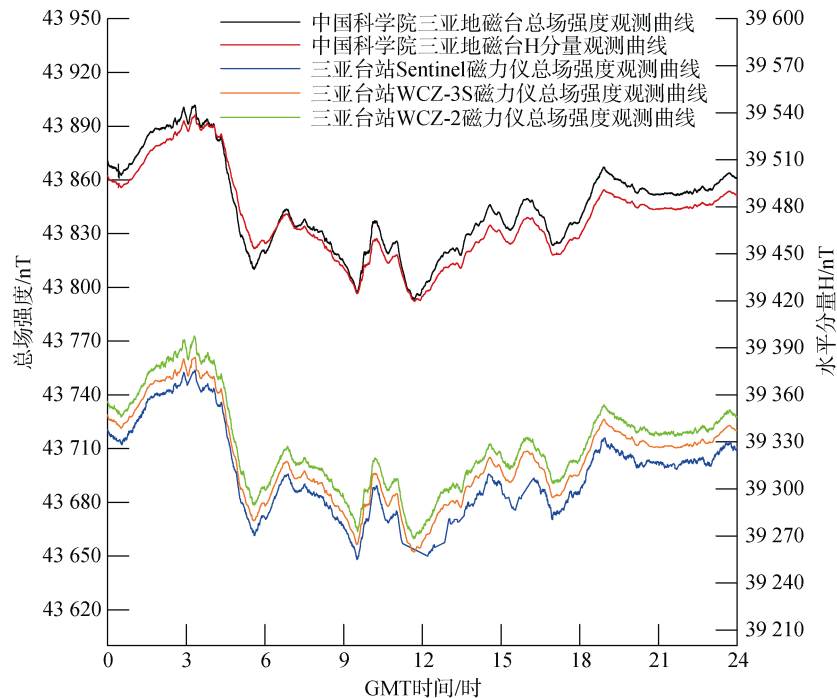


图3 2018 年 11 月 5 日,磁暴期间各观测曲线对比
Fig. 3 Comparison of the observed curves during a magnetic storm on November 5, 2018

此外,台站人员利用 WCZ-3S 还成功识别了另外两次分别发生于 2018 年 8 月 26 日和 11 月 9 日的磁

暴事件,并向海上作业人员发出了磁暴预警。以 8 月 26 日磁暴为例,如图 4 所示,日变曲线首先在高于暴

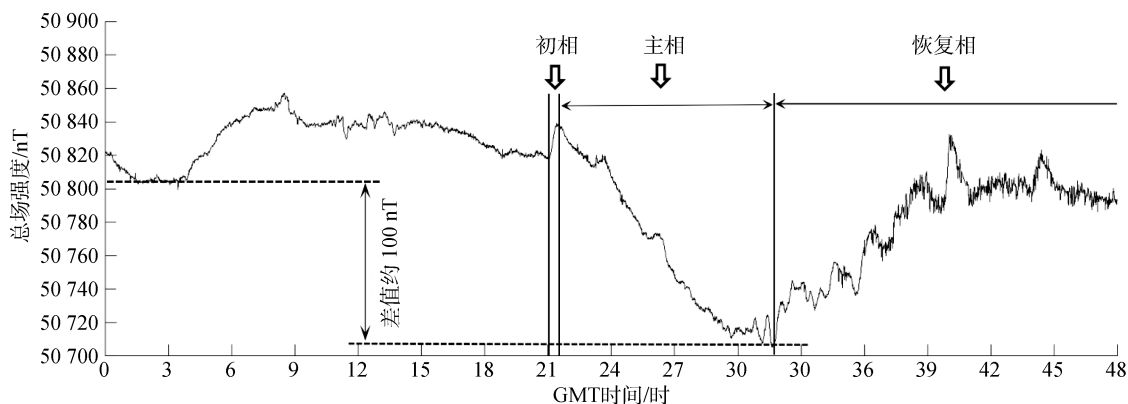


图4 2018年8月26日磁暴发生后48小时内WCZ-3S记录曲线

Fig. 4 The recorded curve of WCZ-3S within 48 hours after the occurrence of the geomagnetic storm on August 26, 2018

前值的水平上起伏变化,可识别为初相;之后,曲线开始下降的阶段可判断为主相;最后开始缓慢上升,并恢复至平静状态,为恢复相^[33]。

3 讨论

如前所述,在海洋磁力测量中最大的误差项是地磁日变改正的误差。由于地磁日变是受太阳辐射电离层引起的,而且受太阳耀斑活动的影响,每一天、每一时刻的变化都无法预估和拟合或反推,即丢失的数据难以得到恢复。因此地磁日变具有极强的时效性,日变数据的缺失、失真等都会导致海洋磁力测量工作的失败。

因此,人们开始尝试一种无需进行额外日变校正的新思路——海洋磁力梯度测量。但在海洋磁力梯度测量中,船只及磁力仪探头易受水流、风向、波浪等因素的影响,测量路径实际上无法严格地保持是一条直线(即无法实现理论上对日变影响的完全抵消),并且车载GPS对探头定位的不同步以及船磁的影响等都会影响日变校正的准确性^[9-10]。

对于海底地磁日变观测,浅海获得的日变观测数据虽优于深海,但易受过往船只及渔船作业的影响,同时近岸的导电海水流动导致的地磁场变化也会对日变观测产生影响^[34];深海测量时,海水层的衰减作用则会变得明显,导致日变数据的失真^[19-20]。若应用系锚技术进行海底观测,磁力仪探头则易受到海流等的影响产生漂移、摆动,影响日变观测的数据质量。此外,不管是浅、深海日变观测还是运用系锚的技术方法皆无法保证地磁日变观测的时效性,不能实时传输数据,无法及时发现磁暴、仪器故障等问题,可导致日变数据的失真、缺失,甚至造成海洋

磁测工作的失败。同时,由于海洋作业环境的复杂性,磁力仪回收的成功率也不能得到有效保障。理想的日变校正方法应是在固定浮标上记录地区磁场值,但因放置和回收仪器困难、场空间变化远大于观测日变等限制,现阶段并不适用于海洋磁测中的日变观测^[35]。

综上,在同纬度设立陆地地磁日变观测站仍是可靠的一种日变校正观测方法。本文介绍的WCZ-3S地磁日变观测系统在测量精度、功能设计(既可内部存储又可在PC端实时成像)等方面,皆可满足海洋磁力测量中对地磁日变观测仪器的需求,并通过2018年江苏盐城日变观测和海南三亚日变观测,对WCZ-3S地磁日变观测系统进行了测量精度、磁暴预警功能等方面的实测分析。在多型号磁力仪同步测量的数据分析中,WCZ-3S在基站模式下的实测精度为0.2 nT至0.3 nT,接近质子旋进原理磁力仪的精度极限^[36-37],与加拿大GEM公司的GSM-19T精度(精度为0.2 nT,采样率可达1/3 Hz,分辨率为0.01 nT)^[38]相当,优于包括WCZ-2、JHC-856T(精度为0.5 nT)等在内的国内同类原理的仪器。同步测量所用到的Sentinel基站磁力仪为Overhauser型磁力仪,由于应用原理的不同,其实测精度优于0.2 nT,采样率可达1 Hz,但无实时传输功能。而G-880/G-882海洋铯光泵磁力仪、SeaSpy海洋磁力仪、GSM-90 Overhauser型磁力仪等虽然能够实现实时传输,但并不具备内部存储功能^[39-41],数据丢失的风险更大。

WCZ-3S既可实现内部存储又可在PC端实时成像,联机后可帮助台站工作人员对探头的工作状态、地磁数据的信号质量、地磁场的变化趋势、有无异常扰动或磁暴做到直观的了解。具有类似功能的还

有朱培育等^[42]改进的视窗版 GSM-19F 质子磁力仪、京核鑫隆公司的 JHC-856T 质子磁力仪等。邹广等^[43-44]则在软件方面编写了噪声检测报警系统,并在新疆地区台站上成功应用。相较 WCZ-3S 地磁日变观测系统,以上三者主要是在原有磁力仪的基础上进行了软件方面的改进,进而实现了磁力仪的实时传输功能。而 WCZ-3S 的软件与硬件在出厂前即作为一个整体进行设计,具备更好的配套性与稳定性。

4 结论

目前,在海洋磁力测量中进行日变校正的主要做法仍是在靠近海上测区的同纬度陆地设立台站开展日变观测,同时地磁日变具有时效性,需对强磁扰、磁暴进行及时预警。实测表明,WCZ-3S 陆地地磁日变观测系统表现良好,并及时地对磁暴进行了识别;在平静日测量时的精度约为 0.3 nT,仅次于 Sentinel 基站磁力仪的 0.1 nT,能够得出准确稳定的测量结果。因此,WCZ-3S 测量精度较高、测量值可靠、能帮助台站人员及时识别磁暴,是一种适用于海洋磁力测量的地磁日变观测系统。

致谢:感谢中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金(项目编号: MGE2018KG04)的支持。

参考文献:

- [1] Chapman S, Bartels J. Geomagnetism[M]. Oxford: Clarendon Press, 1940.
- [2] Riddihough R P. Diurnal corrections to magnetic surveys-an assessment of errors[J]. Geophys Prospect, 1971, 19(4): 551-567.
- [3] 边刚, 刘雁春, 于波, 等. 海洋磁力测量中一种磁扰日地磁日变的改正方法[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 23-24.
Bian Gang, Liu Yanchun, Yu Bo, et al. A method to correct the diurnal variation of geomagnetic disturbance in marine magnetic survey[J]. Science of Surveying and mapping, 2007, 32(5): 23-24.
- [4] 刘宾, 王景强, 张振波, 等. 海洋磁力数据地磁日变时差校正的局部极值比对法[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 73-79.
Liu Bin, Wang Jingqiang, Zhang Zhenbo, et al. The local-extreme comparison on the time difference calculating for geomagnetic diurnal variation correction in marine magnetic data processing[J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 73-79.
- [5] 陆敬安, 柴剑勇, 徐行, 等. 深海磁日变观测系统研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 392-395.
Lu Jingan, Chai Jianyong, Xu Xing, et al. The study on the deep sea magnetic diurnal variation system[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(4): 392-395.
- [6] GB/T12763.8. 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查[S].
GB/T12763.8. Specifications for marine surveys - part 8: Marine geological and geophysical surveys[S].
- [7] 徐行, 廖开训, 盛堰. 海底地磁日变观测站的设计与应用[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 67-69.
Xu Xing, Liao Kaixun, Sheng Yan. Technology and application of the geomagnetism observation mooring system on the seafloor[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005, 25(1): 67-69.
- [8] 张瑶, 孙丽影, 周瑾, 等. 海底日变数据初探[J]. 地质评论, 2017, 63(s1): 251-253.
Zhang Yao, Sun Liying, Zhou Jin, et al. A preliminary study on diurnal variation correction of the seabed[J]. Geological Review, 2017, 63(s1): 251-253.
- [9] 唐勇, 金翔龙, 黎明碧. 利用海洋磁力梯度数据重建总场的方法研究[J]. 海洋测绘, 2008, 28(1): 25-27.
Tang Yong, Jin Xianglong, Li Mingbi. Research on method of total field reconstruction using marine gradiometer data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(1): 25-27.
- [10] Marcotte D L, Hardwick C D, Nelson J B. Automated interpretation of horizontal magnetic gradient profile data[J]. Geophysics, 1992, 57(2): 288-295.
- [11] 刘保华, 刘晨光, 裴彦良, 等. 大洋调查中海山地磁测量的静日变化校正方法[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 94-98.
Liu Baohua, Liu Chenguang, Pei Yanliang, et al. Diurnal variation correction method based on linear least-squares algorithm in exploration of seamounts[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(6): 94-98.
- [12] Auld D R, Law L K, Currie R G. Cross-over error and reference station location for a marine magnetic survey[J]. Marine Geophysica Researches, 1979, 4(2): 167-179.
- [13] 廖开训, 徐行, 王功祥, 等. 不同方式地磁观测数据对磁测精度的影响分析[J]. 海洋测绘, 2017, 37(5): 22-25.
Liao Kaixun, Xu Xing, Wang Gongxiang, et al. Analysis of effects made by using different geomagnetic observation data upon magnetic measurement precision[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(5): 22-25.
- [14] 夏伟, 边刚, 金绍华, 等. 海面与海底地磁日变化差异及其对海洋磁力测量的影响[J]. 海洋测绘, 2015, 35(1): 7-10.
Xia Wei, Bian Gang, Jin Shaohua, et al. Difference of

- geomagnetic diurnal variation between sea surface and ocean bottom and its effects on marine magnetic survey[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(1): 7-10.
- [15] 卞光浪, 刘雁春, 暴景阳, 等. 海洋磁力测量中地磁日变基值的选取[J]. *测绘科学*, 2008, 33(5): 28-30.
Bian Guanglang, Liu Yanchun, Bao Jingyang, et al. Selection of geomagnetic diurnal variation base value with a base station in marine geomagnetic survey[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(5): 28-30.
- [16] 边刚, 刘雁春, 卞光浪, 等. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正值计算方法研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(10): 2613-2618.
Bian Gang, Liu Yanchun, Bian Guanglang, et al. Research on computation method of multi-station diurnal variation correction in marine magnetic surveys[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(10): 2613-2618.
- [17] 王磊, 边刚, 任来平, 等. 时差对海洋磁力测量地磁日变改正的影响分析[J]. *海洋测绘*, 2011, 31(6): 39-41.
Wang Lei, Bian Gang, Ren Laiping, et al. Analyse on Influence of Time Difference in Geomagnetic Diurnal Variation Correction[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(6): 39-41.
- [18] 邵关, 魏碧辉, 刘翀. 地磁日变观测仪器的对比分析[J]. *测绘地理信息*, 2014, 39(5): 69-79.
Shao Guan, Wei Bihui, Liu Chong. Comparative analysis of magnetic diurnal variation measurement instrument[J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(5): 69-79.
- [19] Hill M N, Mason C S. Diurnal variation of the Earth's magnetic field at sea[J]. *Nature*, 1962, 195: 365-366.
- [20] 张锡林. 海水层对地磁日变的影响[J]. *海洋测绘*, 2011, 31(5): 21-23.
Zhang Xilin. Seawater depth influence on geomagnetic diurnal data[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(5): 21-23.
- [21] Parkinson W D, Jones F W. The geomagnetic coast effect[J]. *Rev Geophys*, 1979, 17(8): 1999-2015.
- [22] 姚俊杰, 孙毅, 赵宏杰, 等. 地磁日变观测数据理论分析[J]. *海洋测绘*, 2002, 22(6): 8-10.
Yao Junjie, Sun Yi, Zhao Hongjie, et al. Theoretical analysis of geomagnetic diurnal variation data[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2002, 22(6): 8-10.
- [23] 高金耀, 刘强, 翟国君, 等. 与海洋地磁日变校正有关的长期变化和磁扰的处理[J]. *海洋学报*, 2009, 31(4): 87-92.
Gao Jinyao, Liu Qiang, Zhai Guojun, et al. Processing of secular variation and disturbance related to marine geomagnetic diurnal variation correction[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(4): 87-92.
- [24] 中国科学院海洋研究所, 重庆奔腾数控技术研究所. 一种新型磁力仪[P]. 中国: ZL201820779612, 2019-02-01.
Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing Benteng Digital Control Technical Institute. A new kind of magnetometer[P]. China: ZL201820779612, 2019-02-01.
- [25] 徐文耀. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
Xu Wenyao. *Geomagnetism*[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.
- [26] 杜兴信, 麻水歧. 陕西地区地磁湾扰异常[J]. *地球物理学报*, 1987, 30(1): 52-60.
Du Xingxin, Ma Shuiqi. On the anomalies of geomagnetic bays in Shanxi region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1987, 30(1): 52-60.
- [27] 雷柱, 邢赞扬, 张清和, 等. 地磁钩扰的全球响应特征研究与初步统计结果[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 437-448.
Lei Zhu, Xing Zanyang, Zhang Qinghe, et al. The global characteristic of a magnetic crochet and some statistic results[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 437-448.
- [28] 徐文耀. 地磁活动性概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Xu Wenyao. *Introduction to Geomagnetic Activity*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [29] 范守志. 海南三亚地磁日变站观测工作总结报告: 资料整理技术报告[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
Fan Shouzhi. Summary report on the observation of the geomagnetic diurnal variation station in Sanya, Hainan: Technical report on data collation[R]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [30] 裴彦良, 梁瑞才, 刘晨光, 等. 海洋磁力仪的原理与技术指标对比分析[J]. *海洋科学*, 2005, 29(12): 4-8.
Pei Yanliang, Liang Ruicai, Liu Chenguang, et al. Principle of marine magnetometer and specification comparative analysis[J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(12): 4-8.
- [31] 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 Jun, Diao Shu, Zhang Yang, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(23): 2606-2618.
- [32] 赵文华, 黄江, 单海滨, 等. 2006年12月系列太阳耀斑事件的近地响应分析[J]. *华南地震*, 2007, 27(3): 69-78.
Zhao Wenhua, Huang Jiang, Shan Haibin, et al. An analysis of geospace response to great solar flares in december, 2006[J]. *South China Journal of Seismology*, 2007, 27(3): 69-78.
- [33] 徐东礼, 范正国, 舒晴, 等. 两种典型磁扰对航空磁测的影响[J]. *物探与化探*, 2015, 39(2): 362-365.
Xu Dongli, Fan Zhengguo, Shu Qing, et al. The influ-

- ence of two typical kinds of magnetic disturbance on the airborne magnetic survey[J]. *Geophy Geochem Explor*, 2015, 39(2): 362-365.
- [34] Jones E J W. 海洋地球物理[M]. 金翔龙, 译.北京: 海洋出版社, 2010: 212-213.
Jones E J W. *Marine Geophysics*[M]. Jin Xianglong, Trans. Beijing: China Ocean Press, 2010: 212-213.
- [35] 吴时国, 张健. 海洋地球物理探测[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 228-229.
Wu Shiguo, Zhang Jian. *Ocean Geophysical Exploration*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 228-229.
- [36] 李岳亮. WCZ-1 质子磁力仪的原理及应用[J]. 企业技术开发, 2008, 27(10): 34-36.
Li Yueliang. The principle of WCZ-1 proton magnetometer and its application[J]. *Technological Development of Enterprise*, 2008, 27(10): 34-36.
- [37] 张爽, 何佳泷, 陈曙东, 等. JOM-1 型 Overhauser 磁力仪研制[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2015, 33(4): 409-415.
Zhang Shuang, He Jialong, Chen Shudong, et al. Development of JOM-1 model overhauser magnetometer[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2015, 33(4): 409-415.
- [38] 谈昕, 张毅, 王雷, 等. GSM-19T 质子磁力仪性能测试[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(5): 40-45.
Tan Xin, Zhang Yi, Wang Lei, et al. Main performance test and analysis of GSM-19T proton magnetometer[J]. *Seismol Geomag Obser Res*, 2015, 36(5): 40-45.
- [39] Tungsten Creative Group, Erie Pa. Marine Magnetometer[EB/OL].[2019-03-19].<http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/>.
- [40] 年永吉. 磁力仪在南海海底光缆检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(5): 566-573.
Nian Yongji. Application of seaSPY marine magnetometer to cable detection in South China Sea[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(5): 566-573.
- [41] 北京欧华联科技有限责任公司. 加拿大 GEM 公司的磁力仪系列[J]. 地质装备, 2016, 17(1): 31-33.
Beijing Ouhualian Science & Technology Ltd. Magnetometer series of Canada GEM company[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2016, 17(1): 31-33.
- [42] 朱培育, 赵俊香, 毕波, 等. 视窗版 GSM-19F 质子核旋仪记录程序[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 37(2): 157-160.
Zhu Peiyu, Zhao Junxiang, Bi Bo, et al. The windows version of GSM-19F proton-precession magnetometer recording program[J]. *Seismol Geomag Obser Res*, 2015, 37(2): 157-160.
- [43] 邹广, 陈大柱, 高守全, 等. 质子磁力仪噪声检测报警系统[J]. 内陆地震, 2013, 27(4): 376-382.
Zou Guang, Chen Dazhu, Gao Shouquan, et al. Noise detection and alarm system of proton magnetometer[J]. *Inland Earthquake*, 2013, 27(4): 376-382.
- [44] 邹广, 高守全, 赵刚, 等. 温泉台 FHD-2B 质子磁力仪资料干扰分析[J]. 内陆地震, 2015, 29(4): 371-377.
Zou Guang, Gao Shouquan, Zhao Gang, et al. Interference analysis on FHD-2B Proton magnetometer data in Wenquan seismic station[J]. *Inland Earthquake*, 2015, 29(4): 371-377.

Analysis of a terrestrial geomagnetic diurnal variation observation system for marine magnetic survey

JIA Fu-hao^{1,2,3,4}, GU Zhao-feng⁵, ZHANG Zhen-bo⁶, ZHOU Zhang-guo^{1,2,4},
LUO Qiang⁷, ZHANG Jun-tao⁷, FU Yong-tao^{1,2,4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environmental, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 6. China National Offshore Oil Corporation (China) Ltd. Shenzhen Branch, Shenzhen 518067, China; 7. Chongqing Benteng Digital Control Technical Institute, Chongqing 400039, China)

Received: Sep. 12, 2019

Key words: geomagnetic diurnal variation; proton magnetometer; measurement accuracy; marine magnetic survey

Abstract: To understand the performance of the WCZ-3S terrestrial geomagnetic diurnal variation observation system, a comparison study was made synchronously between WCZ-3S and Sentinel, WCZ-2 and WCZ-3 magnetometers in Yancheng, Jiangsu, and Sanya, Hainan, respectively. The measurement accuracy, measurement curve, and magnetic storm identification capability of WCZ-3S were tested. The results showed that the measurement accuracy of WCZ-3S was about 0.3 nT, which was slightly inferior to that of Sentinel. Moreover, it was consistent with the amplitude and phase of the curves measured by other magnetometers. Using the real-time imaging function of WCZ-3S, the station staff successfully identified the magnetic storm phenomenon during the marine magnetic survey.

(本文编辑: 刘珊珊)