

罗玉芬, 潘飞儒, 徐行, 等. 海底地磁观测技术方法研究和展望[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 63–68. [LUO Yufen, PAN Feiru, XU Xing, et al. Research and Prospect of the Underwater Geomagnetic Observation Technology[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(3): 63–68.]

海底地磁观测技术方法研究和展望

罗玉芬¹, 潘飞儒², 徐行³, 何其武¹

(1. 广东省地震局, 广州 510111; 2. 珠海泰德企业有限公司, 广东 珠海 519085;
3. 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要: 回顾了国内外地磁观测技术的发展历程, 剖析了各类海底地磁观测技术及相关的辅助技术和关键技术, 在结合分析现今海洋科学、资源勘探、国防军事和防灾减灾等领域应用研究中的技术需求的基础上, 对海底地磁观测技术在各领域中的应用做了探讨。指出今后海底地磁观测技术发展和方法研究的方向应重视日益增长的需求分析, 加强海底地磁观测技术装备的研发, 积极开展相关的技术方法研究, 拓宽海洋地磁学在相关领域的应用研究范围。

关键词: 地磁; 观测; 海底; 总场磁力仪; 矢量磁力仪

中图分类号: P318.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) 03-0063-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.03.009

Research and Prospect of the Underwater Geomagnetic Observation Technology

LUO Yufen¹, PAN Feiru², XU Xing³, HE Qiwu¹

(1. *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China*; 2. *Zhuhai Tai-de Enterprises Ltd., Zhuhai 519085, China*; 3. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China*)

Abstract: This paper summarized and reviewed the development of the geomagnetic observation in the domestic and overseas, classified them with terrestrial and undersea magnetometer, and then analyzed the critical technical issues of the geomagnetic observation underwater. By discussing the application in different domains, the future directions of the geomagnetic observation underwater have been oriented: strengthening the equipment research and development, technology method research of the application domains, the site selection of the underwater geomagnetic observation point and network, which all will extend the application fields of the underwater geomagnetic observation.

Key words: Geomagnetism; Observation; Ocean floor; Total field magnetometer; Vector magnetometer

收稿日期: 2017-02-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ100817); 国家自然科学基金重点资助项目(91028007)联合资助

作者简介: 罗玉芬(1981-), 女, 工程师, 主要从事地震监测与管理工作。

E-mail: 563156159@qq.com.

通讯作者: 徐行(1963-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地球物理探测技术方法研究。

E-mail: gz_xuxing@163.com.

0 引言

地磁学的研究目的是确立地磁场形成的原因和与其相关或由其引起的各种现象的起因^[1]。从公元前 800 年人类认识到磁性的存在到今天能观测到高精度地磁场信息,相应的技术方法上已经有了突破性改进。地磁场是一个矢量场,它是空间位置和时间的函数。高质量地磁场观测数据的不断积累,将有助于我们认识地磁场的时空特征,探索地磁场的起源,研究地磁现象和其他自然现象的关系;同时,地磁场的研究也为太阳和其他宇宙天体的研究提供了一把钥匙。因此,地磁观测在近代地球物理学科发展历史上起着举足轻重的作用。

海洋占地球表面积的 70%。长期以来在海洋中一直缺少高精度地磁台站的观测数据,这制约了对全球范围内地球磁场的系统研究。现今相关工作依靠卫星磁测数据来补充,因而高质量地磁观测数据的缺乏影响了地磁学基础研究的成果质量和研究水平。然而,当今海底观测技术已经成为新的热点,海底观测系统标志着海洋研究开发的新时代,海洋科学正在走向一场新的革命^[2]。开展海域的海底地磁观测,不仅仅因为它是研究全球地磁场的不可分割的组成部分,而且也是科学技术发展的需要和必然。通过海底地磁场观测,获取我国海域的地磁场基本数据,可完善我国完整的、高时空分辨率的地磁场基本模型,进而更好地满足在全球构造背景下对全球地球物理场研究的需要。因此,开展海底地磁观测不但有利于传统地磁学和海洋科学的融会贯通,还能提升海洋地质和地球物理学的研究水平。

本文回顾了地磁观测技术的发展历程,剖析了海底地磁观测技术以及相关的核心技术问题,然后结合现今海洋科学、资源勘探、国防军事和防灾减灾发展的需求,针对海底地磁观测的应用领域做了一定分析,最后就相关技术方法和未来技术发展与方法研究中面对的科学技术问题进行了系统讨论。

1 海底地磁观测技术的发展现状

早在十五世纪,意大利人哥伦布开始航海生涯时,人类已经将原始的地磁学测量技术应用于航海。在两次大西洋航行之后,英国天文学家哈雷于 1701 年编制成了大西洋磁偏角图;接着于

1702 年又编制了全球地磁偏角图,这几乎是人类第一批海洋地磁观测成果资料。当时的地磁观测技术仅局限于定向,直至 1799—1804 年,汉博尔特在秘鲁首次用震荡法测得地磁场强度,高斯则发明了更为精确的磁场强度绝对测量方法,使得地磁观测技术实现了新的技术突破^[3]。从初期只能测定磁方位,发展到后期还能测得地磁场场强值,技术是在不断地发展,但这都属于海面上的地磁场观测技术。随着电子技术的发展和质子旋进磁力测量技术的成熟和完善,海洋地磁观测才发展到动态的走航测量方式。高效率、高精度的走航式海洋地磁测量成果也给地质科学发展带来了革命性的推动^[4]。海洋地磁测量成果揭示了海底磁异常在洋中脊两边大致平行分布,古地磁、岩石磁学可精细测定和研究异常区岩石磁性和年龄,这些都为海底扩张、大陆漂移和板块运动提供了强有力的证据^[5]。现今的海洋地磁测量已经成为海洋测绘、区域地质、矿产资源和环境工程调查的重要手段,在海洋科学调查和研究中起着十分重要的作用。

在国外,在海底开展地磁场长期连续和定点的观测可追溯到 1965 年在加利福尼亚外海所建立的海底地磁台^[6],并在洋底记录到了一些小的磁暴。对比其他地磁台,可认为海底的高频波动的衰减和 Z 分量有些异样,分析为海水中感生电流所引起的海岸效应^[6]。在国内,首次海底地磁定点观测始于 2004 年,地磁观测站布设在南海北部陆坡,并成功地获得了地磁观测资料^[7]。因受海底地磁观测技术方法的限制,尤其是在深海环境下开展相关观测,相关技术实现难度很大。后续的成果报道比较少,因而相应的海底地磁观测技术方法的推广以及应用研究相对比较滞后。

2 海底地磁观测技术

在海底开展地磁场长期连续和定点的观测技术分二类,一类是地磁场的总场观测技术,另外一类为地磁场的矢量观测技术。

(1) 总场观测技术。地磁场总场观测主要是测得地磁场的总场强值(F 值),这也是一种绝对测量技术。此类设备通常是由质子旋进磁力仪、OVERHAUSER 增强型质子旋进磁力仪或(铯)光泵磁力仪构成的。一般测地磁场总场强值的仪器由传感器和测量装置两个部分组合而成。传感器产生的模拟信号易受外界环境的影响,传感器产生

的频率和环境地磁场的强度成正比。测量地磁场总场强值的磁力仪在一定程度上也是一种频率计数器。计频的准确性也决定了测量仪器的分辨率、灵敏度、精度等技术指标。通常，质子旋进磁力仪的测量精度可优于 0.5 nT ，OVERHAUSER 增强型质子旋进磁力仪的精度可优 0.2 nT ，而铯光泵磁力仪的精度比前二类高出 $1\sim 2$ 个数量级。

海底的总场磁力观测技术只需保持良好的和稳定的测量环境，地磁观测设备可悬浮在水体之中，图 1 所示为本文作者参与研发的海底地磁日变观测站设备。整个观测系统需配套的辅助设备由声学释放器、玻璃浮球和混凝土块组成。

(2) 地磁场矢量观测技术。地磁场矢量观测大体分几类。① 磁通门磁力仪主要是测得地磁场各个分量的 X 、 Y 和 Z ，是一种地磁场的相对测量技术方法；② FHD 质子旋进式矢量磁力仪，测量地磁场总场强值(F)、水平分量值(H)以及磁偏角(D)；③ DIDDF 矢量磁力仪，测量地磁场总场强值(F)和 δ_i 、 δ_o 、 X 、 Y 、 Z ，经换算可得到 F 、 X 、 Y 、 Z 、 I 、 D 数值。后两者是绝对测量与相对测量的组合型磁力仪，也称为准绝对测量的矢量磁力仪。例如，FHD 质子旋进式矢量磁力仪测量精度一方面取决于测量总场的传感器的测量精度，另外一方面又受跟踪补偿电路精度制约。其中，跟踪补偿电路主要包括压控谐振器电路、相位检测电路、伺服电路和标准正余弦电路等。其工作原



图 1 自主研发的海底地磁日变站在广东肇庆地磁台做对比观测试验

Fig.1 Contrast observation test of the independent development geomagnetic base station in Guangdong Zhaoqing geomagnetic station

理如图 2 所示。DIDDF 矢量磁力仪将质子旋进磁力仪的传感器置于由偏角 D 和倾角 I 组成的两个球形线圈内，两个球形线圈互相正交，且垂直于地磁场方向，测量 δ_i 、 δ_o 、 X 、 Y 、 Z 和 F 。

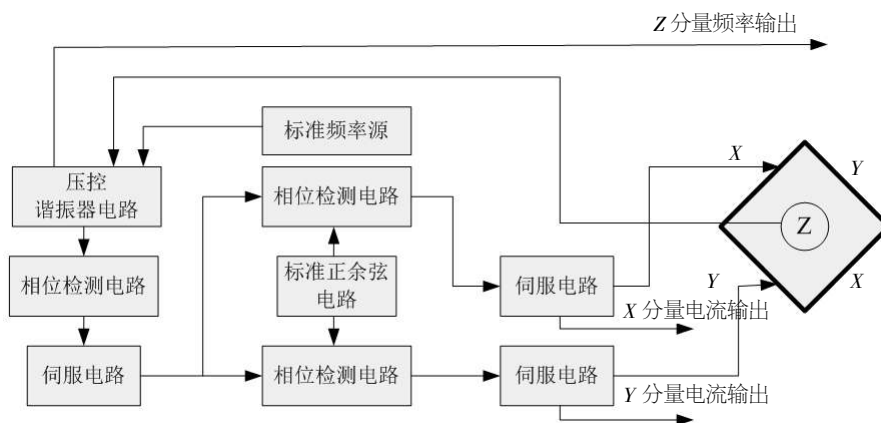


图 2 跟踪补偿电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of tracking compensation circuit

与在海底的地磁场总场测量方式不同，海底地磁场矢量测量系统不仅需要处在良好的和稳定的测量环境，而且设备还需要平稳坐落在海底或者需要安装在固定的支架上以保持固定的姿态。图 3 为德国 STL Systemtechnik Ludwig GmbH 生产

的海底多参量矢量磁力仪观测系统。它是一种基于磁通门测量工作原理的海底矢量磁力仪系统，可用于船磁特征测量，港口和航道的防御，多参量地磁场测试和信号的实时监测。



图3 德国 STL 公司的多参量地磁场测量仪

Fig.3 Multi - parameter magnetic field measuring instrument of Germany STL Company

(3) 辅助观测技术。与陆地固定和移动地磁观测台的设备不同,海底地磁观测设备除了磁测部分一致之外,其它的“时间信号的时间服务系统”和“辅助设备”等都有很大的区别。

陆地设备中的“时间信号的时间服务系统”通常采用 GPS 接收机的授时系统,其授时精度可达数十纳秒乃至数纳秒,且无累积误差。而海底地磁观测设备因工作在海底,无法获得 GPS 的实时信息,只能采用内部时钟作为时间记录的参考设备。目前除价格昂贵的高精度原子钟授时精度可小于 $1\ \mu\text{s}$ 之外,通常只能采用高稳定性的时钟晶振系统,其精度可达数百纳秒,在深海海底 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境下,其每月时钟偏差通常在 $1\ \text{s}$ 左右,甚至会更大一些。采用定时标记法,用分区段的方式来提高时钟的准确度,可降低钟漂的非线性特征带来的误差,目前该项技术已经被广泛地运用于自容式的海底观测设备之中。

陆地设备的“辅助设备”中的供电系统可采用直接连通市电、蓄电池供电、太阳能供电或者综合供电(太阳能/蓄电池综合供电)等供电方式;而海底地磁观测设备在海底连续工作只能依靠高性能的蓄电池。因此,对蓄电池的选择有特殊的技术要求。例如:① 要求体积小,能量密度大;② 适应低温环境性能强;③ 瞬时放电电流大,可以确保启动声纳设备发射和熔断单元能够正常工作。鉴于这些特别要求,可选用能量密度在 $250\ \text{WH/kg}$ 、放电电流普遍可以做到 $1\ \text{C}$ 以上充电聚合物锂电池,同时也可以考虑不可充电的锂亚电池。除此之外,因海底地磁观测设备需长期工作在海底,尤其是在深海海底环境下,对设备封装要求比较高。一般选用抗压高的,耐腐蚀的水密容器

作为仪器舱。例如,玻璃球作为容器,不但无磁性,而且耐压抗腐蚀。地磁观测设备与裸露在外面的声纳设备、其他仪器舱之间的连接需要特殊水密接插件。水下观测设备的螺丝或者其他金属部件要求是耐腐蚀的高标号弱磁性金属材料制作,同时还需对其进行阳极化耐腐蚀处理。

(4) 关键技术。海底地磁观测技术需具备功耗低、存储容量大、体积小和结构合理等特点。宏观而言,相关观测设备工作水深不仅取决于水下封装外壳的承压密封能力,而且还与声学释放器的水声通信能力密切相关;其工作时间取决于仪器的功耗和电池的储能。其它的关键技术是:① 仪器状态监测:对于矢量磁力仪而言,无论是从水面直接投放还是采用有缆可视监控吊放到海底前再投放,均需获得水下设备着底后的高精度的姿态信息;② 地磁干扰问题:由于海底地磁观测系统是多学科的技术集成,因此需要最大程度地降低各设备之间的电磁干扰问题;③ 卫星定位和通讯功能:将卫星定位和通讯技术集成在海底矢量磁力仪设备中,并作为海面搜索辅助功能,可增强设备回收能力。

3 海底地磁观测技术的应用研究

地磁观测技术是一门传统地球物理观测技术,在海洋资源勘探、海洋地质与地球动力学等基础研究、海啸预警与防灾减灾以及国防军事研究领域均起着非常重要的作用。在动态测量过程中,海洋磁测是一种相对测量,需要固定台站的地磁日变观测数据为其最终成果资料的数据处理提供日变改正。由于地磁日变改正资料具有区域性,在远海区布设海底地磁观测站可以弥补缺乏日变改正资料的问题。不论将地磁测量应用于哪个领域,固定台站的地磁观测在地磁测量过程中一直占据着重要的位置。又因为不同领域的应用研究需要进行不同方式的观测,所以对海底地磁仪布设的数量、位置以及技术要求也是不同的。

在海洋矿产资源勘探和区域地质调查中,“重磁先行”已经成为传统调查的主要方法。对于大范围的地质普查和概查阶段,由于重磁位场勘探工作效率高,成本低,能圈闭一些大的地质构造,具有地震勘探不可取代的优势^[9]。对于一些海底泥底辟、岩浆的侵入体等特殊地质体,也可以通过海洋磁力测量判别其岩性,与地震资料解释互为验证,提高资料解释的准确性^[9]。同时充分研

究分析陆地和海域的重磁场特征分布,可以深刻认识海域地质地球物理场特征。海洋地磁测量成果还可以解释洋盆海底的磁异常条带在空间上的展布规律,分布次序。近年来,通过对南海海盆的近底磁测,所获得的数据曲线清晰连续,比海面测量资料具有更高的分辨率和更大的异常值。深拖测量不但提供了第一手重要资料,同时为我国科学家在南海甚至在全球范围内进行深拖测量积累了宝贵经验,积极推动了我国海洋调查技术的发展。

在地磁学研究中,通过在海洋设立连续矢量观测的海底地磁观测站和海底观测网络,可以获得连续的海洋地磁场矢量信息,同时结合陆地地磁观测网,可形成获取连接我国大陆及海洋的地磁场动态变化信息的能力。综合分析海陆地磁场的矢量观测数据,可以在全球框架下研究地磁场特性。完整的、高时空分辨率的地球磁场基本模型,将会提高人类对地球磁场认识的准确性。同时也可在更大范围内开展地磁地震前兆信息的动态监测,防灾减灾和海啸预报等领域的科学研究提供一手资料。

早在第二次世界大战前,磁测技术就开始用于军事目的的探测,如探潜、探雷^[9]。如今的国防工业中的水下兵器中的水雷、鱼雷等仍然采用磁通门磁力仪探测技术作为核心的诱引部件。在国防军事应用研究中,通过科学合理地利用海底专用电缆或当今的海底网络平台,建设海底地磁观测网络,可将海底地磁观测技术用于国防军事。基于磁力仪对铁磁性物质反应灵敏的特性,将高灵敏度海洋磁力仪设立在特定观测点位,开展地磁场动态连续测量,可以实现对观测站点附近一定范围内的水下运动目标物等的活动进行动态监测。高精度矢量海洋磁力仪具有较高的监测能力,包括对探测对象的磁反应灵敏度、探测定向等。通过在主要的航道和港口中布设观测台站,可监视如舰艇等水下运动目标物的进出情况,为军事防御提供预警信息。

“十一五”以来,在国家“863”计划的支持下,广州海洋地质调查局和广东省地震局联合成功研发了海底地磁日变观测站,并运用于海洋调查之中^[11-12]。其它的一些与海底地磁观测的基础研究和技术方法研究成果不断涌现^[9,13]。但这仅仅是地磁场的总场观测范畴,而地磁场矢量观测长期以来缺乏相关技术和成熟产品,导致了海域地磁观测工作一直滞后。2014年,由中国地震局地球

物理研究所作为第一技术支撑单位,珠海泰德企业有限公司牵头、广州海洋地质调查局、国家海洋局第二海洋研究所作为主要应用单位的国家科技部重大仪器设备开发专项“海洋地磁场矢量测量仪开发和应用”项目已经启动^[14]。作为海底地磁场矢量观测技术与方法研究的先驱者,该项目将开展相关技术与设备的研发工作,同步开展海域的相关技术的应用示范研究工作,以填补该领域的空白。

4 讨论和展望

地磁学是地球物理领域的一门学科,既是一门古老的基础学科,又是一门充满活力的应用学科。尤其是海底地磁观测技术不仅用于海洋地质区域调查、资源勘探和防灾减灾与地学相关的领域领域,而且还可以运用于航海和国防军事领域。面临不断增长的技术需求挑战,目前的海底地磁观测技术方法无论从适用范围与实用性,还是技术成熟性均明显不足。笔者就海底地磁观测需解决的主要问题和的发展方向作以下几点探讨:

(1) 海底地磁观测技术需要加快研发和完善。除了将陆地地磁矢量观测技术移植到海洋中之外,海底观测设备的回收率是迫切需要解决的问题。它涉及到声通讯性能、密封性能、抗压性能,还涉及到设备投放到海底之后的姿态的技术方法研究。此外,针对地磁矢量观测技术在海底观测的特殊性,需重点攻克时钟漂移、低功耗、抗干扰、提高检测信号的质量和设备的姿态控制等关键技术问题。

(2) 积极开展海底观测的技术方法研究。我国的海底地磁观测网络建设工作仍然在摸索和尝试的起步阶段,迫切需要加快建设我国大陆架、大陆边缘和岛礁区的海洋地磁(地球物理)综合观测系统,尽早完善我国地磁综合观测网。通过在海洋设立连续运行的地磁矢量观测站点和海底网络,可以获得连续的海洋地磁场矢量信息。同时结合陆地地磁观测网,形成获取覆盖我国大陆及海洋的地磁场动态变化信息的能力,实现对海域地磁地震前兆信息的动态监测。同时,要利用好国家现有的公共资源开展海底的地磁观测工作,如海洋观测浮标和海底网络等。

(3) 做好布置海底地磁观测站的选址工作。无论海洋资源勘查还是区域构造调查,都需要开展高精度海洋磁测获取精细的磁异常。地磁日变

改正是地磁测量过程中的一个重要环节,涉及到磁测的精度问题。只有在探查目标区近距离设立高精度的连续观测站,才能保障海洋磁测数据的有效使用。而具有矢量测量能力的海洋磁力仪,不仅能满足总场测量需要,而且还可为开展海洋矢量磁测数据分析和研究提供数据,因而观测站点或者海底网络的环境选址非常重要。

(4) 拓展海底地磁观测的应用领域,多方位地服务于国家建设。当前海底地磁观测技术在地学研究中的应用程度远高于其他领域。又因为海底地磁矢量观测技术可应用于国防军事,研发相关技术对于国防建设十分重要。因此,要针对国防军事应用中存在的关键问题,改进和完善海底地磁矢量观测技术,提高工作效率,积极开展相应的技术方法研究。

今后在开展海底地磁观测技术及方法的研究中,应以海洋科学、地质学、地球物理学为指导,跟踪国内外海底地磁观测及相关技术的最新进展与应用研究热点问题,积极开展相关观测技术研发及方法研究等研究工作,不断开拓新的应用领域,完善观测技术和制造工艺,更好地服务于科学研究、国民经济发展需要的资源勘探、国防军事与防灾减灾等领域。

参考文献:

- [1] B.M.扬诺夫斯基. 地磁学[M]. 刘洪学, 周姚秀, 译. 北京: 地质出版社, 1984.
- [2] 汪品先. 从海底观测地球-地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2012, 29(3): 125-130.
- [3] V.瓦奎尔. 海底地磁学[M]. 于联生, 杜曾荫, 吴铭先, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 徐文耀. 地磁学 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [5] Cox.C.S, Filloux.J.H, Larsen.J.C. Electromagnetic studies of ocean currents and electrical conductivity below the ocean floor. In:A.E.Maxwell(Editor)[J]. The Sea, Wiley, New, Yoak, 1970(4): 637-693.
- [6] 谢小玲, 孙金龙, 康 英, 等. 海底地震仪对海上地震定位精度的提升作用--以南澳外海域 M_L 2.8 级地震为例[J]. 华南地震, 2015, 35(1): 21-29.
- [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.
- [8] 王一新, 王家林, 王明浩, 等. 石油综合地球物理方法和应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [9] 徐 行, 龚跃华, 王功祥, 等. 海洋磁力梯度测量技术在水合物勘探中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 97-101.
- [10] 黎珠博, 柴剑勇, 黄晖等, 新型质子旋进磁传感器的研制[J]. 华南地震, 2010, 30(2): 106-111.
- [11] 柴剑勇, 陆敬安, 黄晖, 等, 深海全向性质子磁力仪的研制和应用[J]. 华南地震, 2010, 30(S1): 96-100.
- [12] 谭承泽, 郭绍雍. 磁法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983 .
- [13] 徐行, 廖开训, 陈邦彦, 等. 多站地磁日变观测数据对远海磁测精度的影响分析 [J]. 海洋测绘, 2007, 27(1): 38-40.
- [14] 郭衍龙, 胡 昊, 阮爱国, 等. 海底地震仪(OBS)被动源接收函数的意义和方法[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 20-26.