



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Marine Magnetic Survey Data Processing and
Its Application

海洋磁力测量数据 处理方法及其 应用研究

边刚 夏伟 金绍华 于波 卞光波 著



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

海洋磁力测量数据处理 方法及其应用研究

Marine Magnetic Survey Data Processing and Its Application

边 刚 夏 伟 金绍华 于 波 卞光浪 著

测 绘 出 版 社

· 北京 ·

© 边刚 2015

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书系统完善了高精度海洋磁力测量理论,深入研究了海洋磁力测量的技术设计、实施及其数据处理方法,并对海洋磁力测量的应用进行了探讨。主要内容包括海洋磁力测量的基础理论、海洋磁力测量仪器、海洋磁力测量技术设计与实施、海洋磁力测量数据处理、海洋地磁场空间归算的原理及方法、海洋磁力测量的应用。

本书可作为从事测绘、导航、海洋资源探测、地学研究、海洋工程和海上军事应用领域科技工作人员的参考书,也可供本科生和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋磁力测量数据处理方法及其应用研究 / 边刚等著. —北京:测绘出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-5030-3578-4

I. ①海… II. ①边… III. ①海洋—磁测量—数据处理—研究 IV. ①P714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 149089 号

责任编辑	余易举	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasm.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	20.5	彩插 6 面		字 数	397 千字		
版 次	2015 年 6 月第 1 版			印 次	2015 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	001-600			定 价	97.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3578-4/P·762

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

海洋磁力测量是海洋工程测量和军事海道测量的重要内容之一,其目的是获取海域地磁场参数及其分布特征,它与海洋水深测量和海洋重力测量共同组成了当前海道测量的三大研究和发展热点。通过海洋水深测量,可以掌握地球表面海洋底部的几何面貌;通过海洋重力测量,可以了解海洋区域地球内部的物质分布特征和地球空间重力场的特性;地磁场是随时间和空间变化的物理场,海洋磁力测量的任务就是通过各种手段获取海洋区域地磁场的分布和变化特征信息,为进一步研究、解释和应用海洋磁力提供基础信息。海洋磁力测量学作为一门应用科学分支,研究海洋区域地磁场特征获取的手段与方法,并对海洋地磁场的特征与规律进行初步描述和解释。

相对于发达国家,我国正规海洋磁力测量起步较晚。早期海洋磁力测量规模较小,其成果只能满足一些海洋资源勘探和开发的特殊需求,还不能满足地学研究、海洋资源开发、海洋工程建设和军事应用的广泛需求,而且我国尚未制定出海洋磁力测量的国家标准,欠缺详细论述海洋磁力测量理论和方法方面的专著。本书在系统阐述海洋磁力测量基础理论的基础上,对海洋磁力测量的仪器原理、测量方法、数据处理与表示的理论、方法及其应用进行详细的论述。希望能为我国标准化、规范化获取高精度海洋磁场信息提供理论和技术支撑,为我国制定海洋磁力测量国家标准提供理论依据,并在学科意义上丰富和发展海洋磁力测量的理论与方法。

本书是在博士论文基础上,综合了大量国内外参考文献和作者近年来的研究成果编写而成。在本书研究、编著过程中,得到了海军大连舰艇学院刘雁春教授、暴景阳教授和海军海洋测绘研究所翟国君教授三位导师的悉心指导。同时,得到了海军司令部航海保证部王瑞副部长、测绘处马宏达处长、元建胜高工、秦清亮高工、刘敏参谋、孙昊参谋、孙岚参谋的关怀和支持。海军海洋测绘研究所黄漠涛教授、欧阳永忠教授、任来平高工,海军工程大学肖昌汉教授、边少锋教授,天津水运工程勘察设计院裴文斌教授为本书的编写提出了许多宝贵的意见。段福楼高工、许家琨高工、孙毅高工、陈日高高工为本书的编写提供了许多珍贵的资料。海军大

大连舰艇学院海洋测绘系的各位老师为本书的出版提出了许多有益的建议。在此一并表示感谢。本书得到国家自然科学基金(41374108,41476087,41576105)的资助。另外,特别感谢海军司令部航海保证部、测绘地理信息科技出版资金和海军大连舰艇学院“2110 工程”三期整体建设为本书的出版提供资助。

限于水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 海洋磁力测量的任务和作用	1
§ 1.2 海洋磁力测量的历史简述	3
§ 1.3 国内外研究现状及发展趋势	4
§ 1.4 本书的主要内容	13
第 2 章 海洋磁力测量基础理论	14
§ 2.1 稳定磁场的基本定律	14
§ 2.2 地磁要素及其分布特征	20
§ 2.3 地磁场组成及主磁场成因	27
§ 2.4 地磁场的解析表示	32
§ 2.5 地球变化磁场	43
§ 2.6 海洋区域磁异常	53
第 3 章 海洋磁力测量仪器	63
§ 3.1 概 述	63
§ 3.2 机械式磁力仪	65
§ 3.3 磁通门磁力仪	65
§ 3.4 质子磁力仪	68
§ 3.5 光泵磁力仪	70
§ 3.6 超导磁力仪	74
§ 3.7 卫星磁力仪	76
§ 3.8 磁力梯度仪	81
§ 3.9 磁力仪阵列	83
第 4 章 海洋磁力测量技术设计与实施	90
§ 4.1 海洋磁力测量模式	90
§ 4.2 海区技术设计	92
§ 4.3 海洋磁力测量仪器系统检验	94
§ 4.4 海洋磁力测量拖鱼最佳拖曳距离确定	97

§ 4.5	地磁日变站布设	105
§ 4.6	测图比例尺确定与图幅划分	110
§ 4.7	海洋磁力测量测线布设	115
§ 4.8	海洋磁力测量的实施	139
第 5 章	海洋磁力测量数据处理	142
§ 5.1	海洋磁力测量数据表示方法	142
§ 5.2	海洋磁力测量数据处理内容	143
§ 5.3	海洋磁力测量数据处理数学模型	144
§ 5.4	海洋磁力测量测点位置计算	145
§ 5.5	海洋磁力测量正常场校正	161
§ 5.6	海洋磁力测量地磁日变改正	162
§ 5.7	海洋磁力测量船磁改正	184
§ 5.8	海洋磁力测量精度评定	190
§ 5.9	海洋磁力测量系统误差的平差方法	192
§ 5.10	海洋磁力测量数据通化	214
§ 5.11	海洋磁力测量成果形式	217
§ 5.12	海洋磁力测量数据库建立	221
§ 5.13	海洋磁力测量质量评估	222
第 6 章	海洋地磁场空间归算原理及方法	228
§ 6.1	海洋地磁场垂直空间变化分析及归算阈值确定	228
§ 6.2	海洋船载磁力测量空间归算原理及方法	244
§ 6.3	航磁和船磁数据融合方法	259
第 7 章	海洋磁力测量应用	270
§ 7.1	海底磁性目标的探测与识别方法	270
§ 7.2	海洋磁力测量在海洋工程中的应用	289
§ 7.3	海洋磁力测量在海洋资源开发中的应用	294
§ 7.4	海洋磁力测量在地学研究中的应用	297
§ 7.5	海洋磁力测量在军事上的应用	300
参考文献	308
附 录	CGSM 制和 SI 制中磁学物理量对照表	318

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Mission and Function of Marine Magnetic Survey	1
§ 1.2 Brief Introduction of the History of Marine Magnetic Survey ...	3
§ 1.3 Status and Progress of Marine Magnetic Survey	4
§ 1.4 The Content of the Book	13
Chapter 2 Basic Theory of Marine Magnetic Field	14
§ 2.1 Basic Law of the Stable Magnetic Field	14
§ 2.2 Element of Geomagnetic Field and Its Distribution Characteristic	20
§ 2.3 Composition and Origin of Geomagnetic Field	27
§ 2.4 Analysis Expression of Geomagnetic Field	32
§ 2.5 Variable Magnetic Field	43
§ 2.6 Geomagnetic Field of the Sea Area	53
Chapter 3 Marine Magnetometer	63
§ 3.1 Summarization of Marine Magnetometer	63
§ 3.2 Mechanical Magnetometer	65
§ 3.3 Flux Gate Magnetometer	65
§ 3.4 Proton Magnetometer	68
§ 3.5 Optical Pump Magnetometer	70
§ 3.6 SQUID Magnetometer	74
§ 3.7 Satellite Magnetometer	76
§ 3.8 Gradiometer Magnetometer	81
§ 3.9 Magnetometer Array	83
Chapter 4 Technique Design and Implementation of Marine Magnetic Survey	90
§ 4.1 Survey Mode of Marine Magnetic Survey	90
§ 4.2 Technique Design of Marine Magnetic Survey	92
§ 4.3 Testing of Marine Magnetic Survey Instrument	94
§ 4.4 Determination of the Optimum Dagggle Interval	97
§ 4.5 Layout of Geomagnetic Diurnal Variation Base Station	105
§ 4.6 Determination of Plotting Scale and the Map Sheet Division	110
§ 4.7 Design of the Survey Line Layout	115

§ 4.8	Implementation of the Survey	139
Chapter 5	Data Processing of Marine Magnetic Survey	142
§ 5.1	Expression of the Marine Magnetic Survey Data	142
§ 5.2	Content of Marine Magnetic Survey Data Processing	143
§ 5.3	Math Model of Marine Magnetic Survey Data Processing	144
§ 5.4	Calculation of the Survey Point of Marine Magnetic Survey	145
§ 5.5	Correction of the Normal Magnetic Field	161
§ 5.6	Geomagnetic Diurnal Variation of Marine Magnetic Survey	162
§ 5.7	Correction of the Influence Caused by Ship's Magnetic	184
§ 5.8	Evaluation of Precision in Marine Magnetic Survey	190
§ 5.9	Adjustment of Systematic Error in Marine Magnetic Survey	192
§ 5.10	Time Reduction of Marine Magnetic Survey Data	214
§ 5.11	Product Type of Marine Magnetic Survey	217
§ 5.12	Construction of the Database of Marine Magnetic Survey Data	221
§ 5.13	Quality Assessment of Marine Magnetic Survey	222
Chapter 6	Spatial Reduction Theory and Method of Marine Magnetic Survey	228
§ 6.1	Analysis of Vertical Spatial Variation of Marine Magnetic Field and Determination of the Reduction Threshold Value	228
§ 6.2	Theory of Vertical Spatial Reduction and Method of Ship-Borne Marine Magnetic Survey Data	244
§ 6.3	Fusion Method of Ship-Borne and Air-Borne Marine Magnetic Survey Data	259
Chapter 7	Application of Marine Magnetic Survey	270
§ 7.1	Detection and Identification of the Underwater Magnetic Object	270
§ 7.2	Application of Marine Engineering Survey	289
§ 7.3	Application of Marine Resource Exploitation	294
§ 7.4	Application of Marine Geoscience	297
§ 7.5	Application of Military	300
References	308
Appendix	Exchange Relation of Magnetic Unit System	318

第1章 绪论

地磁场是人类赖以生存的自然界的一种重要物理场,是保护地球上万物生灵的一道天然屏障;同时,地磁场与其他的自然现象一样,对其规律的认识和了解也有助于人类的生存与科学的发展。在地球表面进行广泛磁力测量,是人类认识和了解地磁场的主要技术手段和方法。陆地磁力测量起步较早,且目前也日益成熟;而占整个地球表面面积70%以上的海洋磁力测量,由于测量环境和测量设备的复杂性,则起步较晚。随着人类活动空间向海洋拓宽,作为全球磁力测量的重要组成部分,海洋磁力测量的意义和作用变得越来越重要,其地位也日益突出。

§ 1.1 海洋磁力测量的任务和作用

1.1.1 海洋磁力测量的任务

海洋磁力测量是海洋工程测量和军事海道测量的重要内容之一,其目的是获取海域地磁场参数及其分布特征,它与海洋水深测量和海洋重力测量共同组成了当前海道测量的三大研究和发展热点。通过海洋水深测量,可以掌握地球表面海洋底部的几何面貌;通过海洋重力测量,可以了解海洋区域地球内部的物质分布特征和地球空间重力场的特性。地磁场是随时间和空间变化的物理场,海洋磁力测量的任务就是通过各种手段获取海洋区域地磁场的分布和变化特征信息,为进一步研究、解释和应用海洋磁力提供基础信息。海洋磁力测量学作为一门应用科学分支,研究海洋区域地磁场特征获取的手段与方法,并对海洋地磁场的特征与规律进行初步描述和解释。

海洋磁力测量按其测量设备的载体不同分为三种形式:海洋航空(卫星或飞机)磁力测量、海洋船载磁力测量和水下潜水器(包括坐底)磁力测量。海洋船载磁力测量的测量载体一种是无磁性船,另一种是普通船只。其安装方式一种是直接安装在测量载体上的船载式(或机载式或星载式),一种是拖曳式。目前我国的海洋磁力测量主要开展的是拖曳式海洋磁力测量,其主要特点是:①在动态的测量船上进行观测,②测量船本身的固有磁场也在随船的空间位置的改变而改变。

1.1.2 海洋磁力测量的作用

海洋磁力测量是服务于航运业、海上军事活动、海洋资源探测、地学研究和海

洋工程的一项实用性测量工作,为研究地球演变、海底地质构造和地球空间信息提供必要的空间信息。其作用和应用主要体现如下几个方面。

1. 导航

世界上 80% 以上的国际贸易是通过海上进行的。海上贸易是一个国家经济的基础要素。早在公元前 6 世纪人类就发现磁现象,并开始应用磁现象服务于各种生产生活实践;中国船队早在公元前 101 年就借助天然磁石的指北性到达了印度的东海岸(徐文耀,2003;Mabighian et al,2005)。作为中国四大发明的“指南针”传入欧洲后,开辟了以磁罗经为主要导航工具的现代航海。时至今日,磁罗经仍然作为航海的主要工具。同时,磁罗经也是空中飞行器的主要辅助导航工具。

2. 海洋资源探测

海底强磁性铁矿床、弱磁性铁矿床,海底油气、非金属矿床,以及铜、镍、铬、金刚石等各种矿石的分布、性质和基本储量与海洋区域的地磁场存在密切联系。海洋磁力测量就是通过获取海洋区域的海洋磁场信息,利用有效的手段和方法,科学解释海洋资源与海洋区域地磁特征的关系,对海洋资源的性质、构造、分布和储量进行科学估计,为海洋资源开发和利用提供信息。

3. 地学研究

海洋磁力测量获取的信息是研究海洋构造、海地板块漂移及地震研究的重要地学参数之一,可以协助人们认识和了解地球成因和演变过程,掌握火山的活动规律、地震预报等。随着新技术不断地引入,近百年来,海洋磁力测量技术取得重大进展,世界各国陆续研制并投入使用了高精度、高采样率的海洋磁力仪,海洋磁力测量为地学研究提供了更为详细的海洋地磁场信息。

4. 军事

海洋磁场信息不但是保证海上舰船航行的重要信息,而且是反潜技术、反探测、水雷布设和 underwater 预警的基础。随着高精度、高采样率的海洋磁力仪的引入,海洋磁力测量信息在军事上的应用更为广泛。高精度的地磁场信息已成为探测水下潜艇、磁性障碍物、水下未爆炸军火、沉船等的重要信息源,有时海洋磁力仪是发现这些水下目标的唯一有效工具。在海战场环境建设方面,高精度的海洋地磁场信息是海战场环境建设的重要参数,对海洋磁场了解得越详细越彻底,海战场态势就越易把握,反之,在海战中就容易暴露自己,遭受攻击。

5. 海洋工程

随着人类对海洋开发的加快,海岸建筑物建设、海上平台建设、海底管线的布设与探测等,急需必要的海洋区域地磁场信息,以保证海上工程的实施和维护。特别是在掩埋管线探测以及小型或掩埋磁性物体的精细探测方面,海洋船载磁力测量是其他如多波束和侧扫声呐所不能比拟的,有时甚至是唯一手段。

总之,海洋磁力测量在军事、航运业、海洋资源探测以及地学研究上均有重大意义。

§ 1.2 海洋磁力测量的历史简述

最早的磁现象是由公元前6世纪希腊哲学家泰利斯(Thales)发现并阐述的。中国早在公元前4世纪发现了天然磁石的定向性,并且中国船队在公元前101年就采用天然磁石的定向性首次到达了印度的东海岸。12世纪,磁罗经已经在中国广泛应用。1600年,威廉·吉伯特(William Gilbert)首次进行了陆地磁测;1640年,瑞典开始磁法探矿;1870年,泰朗(Thalen)和铁贝尔(Tiberg)研制出勘查磁铁矿的专用磁力仪,推动应用地球物理学迈向了新的发展阶段;1880年,感应式磁力仪研制成功,并用于地磁场测量。到19世纪,磁测成为探测铁矿的主要工具。1931年,磁通门磁力仪研制成功,大大提高了磁测精度,二战中维克多·瓦奎尔(Victor Vacquier)将其应用于飞机探潜(Reford et al, 1964; Hanna, 1990)。1944年,巴赛林(Basely)第一次进行了航磁测量。

早期的海洋磁力测量是通过天文观测测量磁偏角。17世纪后期,爱德蒙·哈雷(Edmond Halley)将此方法应用于大西洋磁场测量,并绘制了磁偏角图,并于1702年出版了世界上第一张全球磁偏角图。在此后的200年,磁偏角测量成为海洋磁测的主要手段。1905—1929年,美国卡内基研究所在太平洋、大西洋、印度洋等海域进行了大规模海洋磁测,取得了大量磁偏角、磁倾角和水平强度资料。到19世纪中期,不仅可以提供不同年代的磁偏角图,还可以提供不同尺度的磁倾角图。1948年,拉穆尔特(Lamout)在大西洋上进行船载磁力测量(Heezen et al, 1953)。1952年和1955年,美国斯克里普斯(Scripps)海洋研究所教授维克多·瓦奎尔在加利福尼亚南海岸进行了二维海洋磁力测量(Mason, 1958),发现了断裂区的磁条纹现象,并最终导致了瓦因-马修斯-莫利(Vine-Matthews-Morley)海底扩张学说的形成(Dietz, 1961; Morley et al, 1964)。19世纪后半段,美国和原苏联建造了无磁性船,其可以将陆地磁测仪安装在船上进行测量,其偏角和倾角测量的精度可达 0.1° ,水平强度的磁测精度可达50 nT。1957年以后,原苏联用曙光号无磁性船完成了印度洋、太平洋、大西洋的磁测,获得了大量总强度、水平分量、垂直分量和磁偏角资料。1955年,高精度海洋质子旋进式磁力仪研制成功并应用于海洋磁力测量。1962年,光泵磁力仪问世,灵敏度从质子旋进磁力仪的1 nT提高到光泵式的0.01 nT,并出现了拖曳式磁力仪,取代了无磁性船。1968年,国际地磁学与高空大气物理学协会建立了国际地磁场参考模型。19世纪80年代出现的海洋梯度仪系统极大地解决了磁力仪载体和地磁日变的影响(Hardwick, 1984)。1990年,全球定位系统(GPS)的出现大大提高了定位精度,为海洋磁测提供了重要保证(金翔龙, 2004)。近年来,磁力仪阵列的出现大大提高了磁探测的能力。

鉴于海洋磁场在军事上的重要性,西方各国如美国、英国、加拿大、俄罗斯和澳

大利亚等都通过航磁测量完成了本国管辖海域的磁场测量工作,并对部分重要海区通过船载磁测进行了详查,随后出版了航磁图。20世纪30年代,原苏联成功研制出感应式航空磁力仪,使磁力勘探步入航空磁测时期,极大地提高了磁测效率和范围。美国海军在1950—1990年的“磁铁”计划对全球进行了航磁测量,并编制了全球地磁图,航磁图的等值线间隔由标准的10 nT提高到中等间隔1 nT,继而又提高到0.1 nT。胡德(Hood)在1965年首次进行了航磁梯度测量。1958年,原苏联发射了第一颗测量地磁场的卫星(“人造地球卫星”3号),以后又有美国的“先锋”3号和原苏联的“宇宙”26号、49号、321号等,这些卫星只携带测量总强度的质子旋进磁力仪和光泵磁力仪。POGO(极轨地球物理观测站)卫星第一次提供了适合用来研究全球地磁场的资料。1979年,美国地质调查局(USGS)和国家航空与航天局(NASA)发射了MAGSAT卫星,并开始矢量卫星磁测(Langel,1989)。

我国的磁测工作始于1938年,1949年以前为起步阶段,为以后磁测工作的开展奠定了基础。20世纪50年代,我国在黄海、东海等海域开展了大面积的地面和航空磁测测量,但是主要用于找矿;20世纪60—70年代,我国自制了地面和航空磁力仪,并逐步改变了从国外引进磁力仪的局面;20世纪80年代开始,由于高精度磁力仪的应用和电子计算技术的迅猛发展,使我国磁测进入了高精度测量和自动解释阶段。我国于20世纪70年代开始,由国土资源部航空物探地质总队对中国附近海域进行航空磁测,其由北向南从黄海、东海及南海北部依次进行,测量面积达130万 km^2 ,1987年编制出版了1:200万比例尺的南海区域地质地球物理系列图集,1989年出版了1:200万比例尺的全国海域及其邻区的地质地球物理系列图集。这些图集包括了我国海域及邻海大陆架区的磁异常图。由于测量的主要目的是为地学基础调查和海洋矿产资源开发服务,并受当时技术条件限制,多数航空磁测资料精度较低,其测量比例尺一般为1:100万~1:50万。

§ 1.3 国内外研究现状及发展趋势

1.3.1 国内外研究现状

任何一个学科的发展,首先是观测工具的发展,其次才是观测方法和理论研究的发展。海洋磁力测量学也不例外。除此之外,海洋磁力测量还包括了从海区技术设计、数据采集、磁测数据处理与成图到科学解释与应用等复杂的过程,其每一项内容都直接关系到磁力测量成果的质量和磁力信息的可靠性。就目前海洋磁力仪的发展水平而言,已经能够满足任何当前不同目的精度要求,但是由于测量模式、监测设备、数据处理的方法不同,导致即使是相同的仪器设备所获得的海洋磁力测量数据质量也存在较大差异。特别是在海洋磁力测量数据处理和各项技术指

标的确定等方面,直接关系到海洋磁力测量成果质量的提高。世界各国对此进行了广泛的研究和分析,在此,本书将国内外海洋磁场测量的研究进展阐述如下。

1. 海洋磁力仪进展

海洋磁力仪器的发展,从1931年世界上出现了第一台磁通门磁力仪到现在广泛使用的光泵磁力仪,海洋磁场探测仪器的测量精度、灵敏度、采样率、稳定性大大提高,并且海洋磁力仪阵列的问世使得海洋磁场探测能力大大提高。

1) 早期的磁力仪

17世纪中叶,瑞典的采矿磁针是最早用于磁探矿的仪器,随后出现了机械式磁力仪。如1915年出现的Askania-Schmidt刃口式磁秤和在20世纪30年代末出现的凡斯洛悬丝式磁秤,它们的磁测精度可达 $10\sim 20$ nT。随后这些仪器很快被感应式磁力仪所代替(Reford et al, 1964; Heiland, 1935; Frowe, 1948; Lundberg, 1947)。

我国于20世纪50年代从国外引进地面悬线式和刃口式磁秤以及磁通门航空磁力仪。在此基础上,20世纪60年代地质部系统开发研制成地面CS₂-61型悬线式和CR₂-69型刃口式磁秤以及CSS-1型悬丝式水平磁力仪,为我国广泛开展地面磁测提供了物质基础(管志宁, 2005)。

2) 磁通门磁力仪

磁通门磁力仪(fluxgate magnetometer)出现于二战期间,主要用于飞机反潜(Reford et al, 1964),战后被广泛应用于海洋磁测、未爆军火探测(UXO)、海底管线探测等(Telford et al, 1990)。

国外较早的磁通门磁力仪有20世纪50年代原苏联研制的ACGM-25型和AЭM-49型航空磁力仪。美国国家航空与航天局1979年发射的MAGSAT磁测卫星就载有磁通门式标量磁力仪。国外典型的磁通门磁力仪还有英国巴订顿公司的MAG系列和地球扫描探测公司的FM系列、芬兰的JH-13型、加拿大先达利公司的FM-2-100型,灵敏度达到0.1 nT。

我国于20世纪60年代,由地矿部物探研究所和航空物探队联合研制出磁通门式航空磁力仪(402型、403型),其灵敏度为10 nT。之后,我国又研制了403型磁通门磁力仪,其灵敏度为1 nT。1975年,北京地质仪器厂生产了CCM-2型地面磁通门磁力仪,而CTM-302型三分量高分辨率磁通门磁力仪的灵敏度可达0.1 nT,被应用于南极地磁场观测。

3) 质子磁力仪

质子磁力仪(proton magnetometer)于20世纪50年代中期间世,在航空、海洋及地面等领域均得到了应用(Hall, 1962)。它具有灵敏度、准确度高的特点,可测量地磁场总强度的绝对值、梯度值。

自20世纪60年代中期以来,法国、原苏联、加拿大等国相继研制了欧弗豪泽

(Overhauser)质子磁力仪,大大提高了磁测灵敏度和采样率,其采样率和分辨率分别达 5 Hz 和 0.01 nT。国外代表性的质子磁力仪有加拿大先达利公司的 IGS-2/MP-4 型(0.1 nT),美国 Geometrics 公司的 G803 型(0.25 nT)、G801 型(0.05 nT)和 G856 型(0.01 nT),加拿大 GEM system 系统公司的 GSM 系列(0.1~1 nT),英国利通锚科学公司的 Elsec820 型(0.1 nT)及美国 Geometrics 公司研制的 G-886 型海洋质子磁力仪,法国 GeoMag SARL 公司的 SMM2III 型 Overhauser 海洋质子磁力仪等。

我国 20 世纪 60 年代初研制成功的 302 型航空质子旋进磁力仪的灵敏度为 1 nT。北京地质仪器厂在 20 世纪 60 年代以来相继研制出 CHD1~CHD6 型质子旋进磁力仪;1983 年鉴定的 CZM-2 型质子磁力仪和 CHKK-1 型海洋质子磁力仪的其灵敏度为 1 nT。20 世纪 80 年代和 90 年代研制的 CZM-2B 型质子磁力仪和 CZCS-90 型分量质子磁力仪的灵敏度为 0.1 nT。

4) 光泵磁力仪

20 世纪 50 年代中期,光泵技术应用于磁力仪研制,它具有灵敏度高、响应频率高、可在快速变化中进行测量的特点,其灵敏度超过 0.01 nT。光泵磁力仪(optical pump magnetometer)体积小、重量轻,不足之处是由于玻璃罩易碎、存在内在的航向误差(Telford,1990)。目前已成为航空、海洋和地面磁测的主要手段。

国外代表性的光泵磁力仪有加拿大的 V-210 型铯光泵磁力仪(灵敏度达 0.01 nT)、加拿大 GEM system 公司的 GSM 系列钾光泵磁力仪,其中 GSMP-20GS3 型磁力仪灵敏度分辨率可达 0.000 1 nT,采样率可达 20 次/秒。美国 Geometrics 公司生产的 G-822 型自振式铯光泵磁力仪,其读数精度为 1 nT;G-833 型亚稳态氩光泵磁力仪,其探头使用扫描技术,消除了通常导致铯蒸气光泵磁力仪的自振荡,提高了仪器的性能。另外,该公司还研制了 G-8XX 系列海洋铯光泵磁力仪,如 G868 型、G877 型、G881 型、G882 型铯光泵磁力仪和 G880G 型铯光泵海洋磁力梯度仪。

我国长春地质学院 1965 年研制出第一台光泵磁力仪样机,1976 年北京地质仪器厂研制成功 CBG-1 型氩跟踪式光泵磁力仪和 CSZ-1 型铯自激式光泵磁力仪以及 GQ-A 型氩光泵磁力仪。在此基础上,地矿部航空物探遥感中心研制出实用的 GQ-30 型氩光泵磁力仪,其灵敏度达 0.25 nT。改进后的仪器型号为 GQ-B 型,其灵敏度达 0.1 nT。并先后于 1985 年和 1990 年研制出 HC-85 型和 HC-90 型高灵敏度氩光泵磁力仪,其灵敏度分别为 0.01 nT 和 0.002 5 nT。1995 年研制成 HC-95 型地面手持式氩光泵磁力仪,其灵敏度为 0.05 nT,成为地面磁力仪的换代产品。2003 年,研制成功的 HC-2000K 型航空氩光泵磁力仪,其主要技术性能指标达到了国际先进水平。另外,中船总公司 715 所还研制了 GB-4 型、GB-5 型、GB-6 型氩光泵磁力仪,其灵敏度可达 0.01 nT。

5) 超导磁力仪

超导磁力仪(SQUID magnetometer)于20世纪60年代中期研制成功,又被称为SQUID磁力仪(即超导量子干涉器件),其灵敏度高出其他磁力仪几个数量级,可达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ nT。它测程范围宽,磁场频率响应高,观测数据稳定可靠(Stuart,1972;Grivet et al,1967)。超导磁力仪在大地电磁、古地磁研究和航空地磁分量测量中有所应用,但还没有得到广泛的应用。主要是因为仪器需要低温,从而降低了超导磁力仪的可移动性。

目前国外先进的超导磁力仪有美国2G-760R型和2G-755型超导磁力仪。我国地质力学所于2002年引进美国2G-755型超导磁力仪,用于古地磁测量。我国北京大学物理学院承担的一项“863”项目“高温超导射频频量子干涉仪”通过鉴定,其技术性能指标已达到国际先进水平。

6) 海洋磁力仪阵列

所谓磁力仪阵列(magnetometer array),就是按一定的几何形状,将多个磁力传感器进行有机集成形成的探测阵列。它的出现大大提高了磁性物质探测的能力和效率。其按阵元的空间排列方式不同,可分为线性阵、平面阵、圆柱阵、球阵、体积阵、共形阵等。磁力仪阵列通常和侧扫声呐或多波束测深系统等设备共同对海底磁性目标进行探测。从军事角度考虑,磁力仪阵列无疑是一种快速高效的扫雷、探潜工具。而从民用的角度来讲,其大大提高了海洋打捞能力。

目前国外代表性的磁力仪阵列有芬兰地质测量局(Geological Survey of Finland,GSF)的磁力仪阵列,由4个铯光泵磁力仪组成,磁力仪间隔1.8 m。另外,德国GeoPro公司使用的磁力仪阵列、加拿大的SeaQuest和SeaSPY磁力仪阵列,测量灵敏度达到了0.01 nT,分辨率达到0.001 nT,测量绝对精度达到0.2 nT。而我国海洋磁力仪阵列的研究还处于起步阶段。

2. 海洋磁力测量海区技术设计

海区技术设计是海洋磁力测量的重要内容之一,海区技术设计的好坏关系到能否高质量地完成测量任务。相对而言,陆地磁力测量起步较早且发展较快,已基本形成了一套较为成熟的理论和实施方法;由于海洋磁力测量的动态性、高投入和数据处理复杂性,其发展落后于陆地磁力测量,而在我国落后状况表现得更为明显。国内外的相关文献中:裴彦良等对海洋磁力仪的原理与技术指标进行对比分析,探讨了各类型磁力仪的适用范围;吴文福探讨了GB-5型海洋氦光泵磁探仪及其应用;边刚等(2006)探讨了海洋磁力测量仪器系统的检验方法;吴乔木(2006)分析了地磁日变站建设中磁测异常现象。加拿大Marine Magnetism公司研制了SENTINEL型海陆两用磁力仪,为海底日变站的布设提供了保证;我国的海洋测量专家徐行等(2005)也对海底日变站的建立方法进行了探讨;边刚等(2008b)提出了测线间距的选择方法;Faggioni等(2002)提出采用日变等相关程度来对日变

站的数目进行优化,以此来评估日变站的控制能力。

3. 海洋磁力测量方法进展

由于磁偏角在导航中的重要性,早期的海洋磁力测量开始于磁偏角测量,17世纪后期以后的200年,磁偏角测量成为海洋磁测的主要目的。1880年,感应式磁力仪问世,开始了地磁场分量测量。随后磁通门磁力仪和光泵磁力仪问世,大大提高了地磁分量磁测精度。20世纪80年代出现的海洋梯度仪系统可以消除日变影响和增强探测目标的能力。磁力仪阵列的出现则大大提高了海洋磁场探测的能力和效率。

就测量载体而言,早期的海洋磁力测量是通过航空磁测进行的,发达国家如加拿大、澳大利亚、芬兰、原苏联、美国等国家,其海洋磁力测量都是通过航空磁测完成的。1948年Lamout首次将磁通门磁力仪安装于船上在太平洋进行了磁测,使得船载磁力测量成为现实。在20世纪的后半叶,美国和原苏联建造了无磁性船,提高了磁测精度。但是到20世纪50年代,拖曳式磁力仪的出现使得普通船取代了无磁性船。后来,海洋梯度仪系统的出现极大地解决了磁力仪载体和地磁日变的影响。另外,1964年COSMOS卫星开始标量卫星磁测,而1979年MAGSAT卫星开始矢量卫星磁测。目前世界上开展磁测的卫星主要有Ørsted卫星、CHAMP卫星,主要用于建立全球地磁参考场模型(Langel,1989;Kramer,1996)。

我国早期海洋磁测也开始于磁偏角测量。随着国外先进磁力仪的引进和我国磁力仪研制水平的提高,目前测量要素包括了总强度、水平分量、垂直分量、磁偏角、磁倾角等,并出现了多分量及梯度测量,使我国的磁测水平达到了国际先进水平。就测量载体而言,20世纪70年代我国开始采用航空磁测方式对大部分海域磁场进行了探测,并采用船载测量方式对部分重点地区进行了详细调查,但是其目的主要为地学基础调查和海洋矿产资源开发服务,一般都是小比例尺测量,而且磁测精度较低,难以达到对海域地磁场分布的详细描述。

4. 海洋磁力测量数据处理进展

海洋磁力测量数据处理的内容包括磁测点位置确定、船磁改正、地磁日变改正、地磁正常场值计算、系统误差的探测与补偿以及磁测成果的可视化显示。

1) 磁测点位置确定

海洋磁力测量中定位信息由船载GPS完成,磁测信息由拖曳式磁力仪完成,为了实现位置信息和磁测信息的融合,必须对磁测点位置进行计算。国外船磁测量中,采用GPS及差分GPS(DGPS)技术提高定位精度的同时,增加了若干辅助测量装置,如压力深度仪、声学高度计、声学超短基线定位系统等,提高了传感器定位和环境噪声改正的精度,甚至实现了GPS一体化技术,实时测出传感器的位置。目前我国的海洋磁力测量中,磁测点位置通常通过拖缆长度直接计算得到。海洋磁力测量的动态特性使得直接概算法会产生很大的误差,为此提出了磁力仪传感