

我国海底大地电磁探测技术研究的进展

魏文博 邓明 谭捍东 金胜

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要 几年以前,我国尚未独立开展过海洋电磁探测,没有获取海洋岩石层电性资料的技术手段。然而,地下岩层的电性参数较之其他物性参数能更好地反映岩石的性质以及岩石所处的物理状态,因此迫切需要发展海底大地电磁探测技术。海底大地电磁探测是把仪器布置在海底,采集海底大地电磁场数据,从而研究海底以下不同深度上介质导电性的分布规律,达到了解地下不同深度地质情况的目的。经过两年的努力,我们已基本实现了海底大地电磁探测技术的研究目标。

关键词 海底大地电磁探测 地壳电性结构 卫星同步

1 引言

我国的海洋地球物理探测以地震为主,重、磁等为辅,前人未开展过海洋电磁探测,缺乏获取海洋岩石层电性资料的手段。这是因为,长期以来人们深信高电导率的海水会妨碍电磁勘探的应用效果,很少注意电磁法在海洋环境中应用的可能性。但是,随着海洋地质调查的进展,人们发现在海底火山岩覆盖区,碳酸盐岩、珊瑚礁、泥底辟等分布区,海洋地震勘探十分困难,迫切需要寻找其他有效的地球物理方法加以配合。相比之下,地下岩层的电性参数(如电阻率等)较之其他物性参数能更好地反映岩石性质(如岩性、组分、孔隙度、水饱和度等),以及岩石所处的物理状态(如温度、压力、熔融、脱水等)。因此,电磁法在海洋领域的应用便日益引起我国海洋地球物理工作者的兴趣。由于大地电磁测深是一种天然场源的方法,设备相对简便,比较容易在海洋条件下施工,不受高阻层屏蔽的影响,对低阻层反映灵敏,探测深度可以达到下地壳和上地幔,因此在电磁法众多的方法技术中,成为海洋电磁探测首选的方法技术。特别是近几年来,大地电磁测深在仪器、数据采集技术、数据处理与反演、解释技术等方面都有了令人瞩目的进展,这大大改善了方法的可靠性和实用性,也为我国研究海底大地电磁探测技术提供了基础条件。

在我国,现阶段陆地上的大地电磁测深技术,已基本和国际接轨。但在海上,大地电磁探测却一直是个“空白”,而发达国家已有 30a 的研究、发展历史。目前,国外海底大地电磁探测主要用于海洋岩石圈结构研究、大陆架区域地质调查和海洋油气资源勘探(Nick et al., 1996),无论在地学基础理论研究或资源勘探开发利用方面都发挥了重要作用。因此,为了加强我国海洋地球物理探测能力,海洋大地电磁探测技术研究已列入国家 863 计划。经过两年的努力,我们已基本实现了海底大地电磁探测技术的研究目标,并争取尽快实用化。

2 海底大地电磁探测技术

海底大地电磁测深即是把仪器布置在海底,采集海底大地电磁场数据,经过处理得出海底

测点上的视电阻率和阻抗相位的频率响应,从而研究海底以下不同深度上介质导电性的分布规律,达到了解地下不同深度地质情况的目的。实际上,它基本是把常规的陆上方法移用过来。从方法的基础理论、数据采集、处理流程和资料解释反演成像方法等方面看,它都与陆地上的大地电磁测深相近。但是,由于海洋和陆地环境的不同,两者在仪器、数据采集作业技术和噪声影响等方面必然存在一些差别。

在海底采集大地电磁场信号,首先面临的是导电海水层对电磁波的衰减。显然,海底的大地电磁场信号要比陆地上微弱得多。因此,要求海底大地电磁仪器有比陆地仪器更高的灵敏度(Steven et al., 1998)。为了适应海洋环境,要求信号采集器尽可能小型化,并实现智能化、大存储量和低功耗,还需要解决仪器、设备的承压、密封技术。此外,海上作业基本是按照“投放仪器→布置海底测站→释放、回收仪器”的流程进行,这都需要有特殊的设备和技术。由此不难看出,实现海底大地电磁探测,关键在于利用现代高新技术研制出性能优良的海底大地电磁仪器,同时还需要研究切实可行的海上作业技术。

图1所示是我们研制的“高精度海底大地电磁数据采集器”硬件原理框图。数据采集器由信道前放板、磁道前放板、主放板、辅助通道板、时钟板、数字板、标定信号板和PC-104主机板等共同构成层叠式电路结构。电路板整体体积为 $90 \times 96 \times 170\text{mm}^3$,重量约1.0kg;采集器使用+5V和±12V三路电源,工作状态下整机功耗7W。根据电路板元器件温度指标估计,采集器正常工作的环境温度为 $-20^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ 。

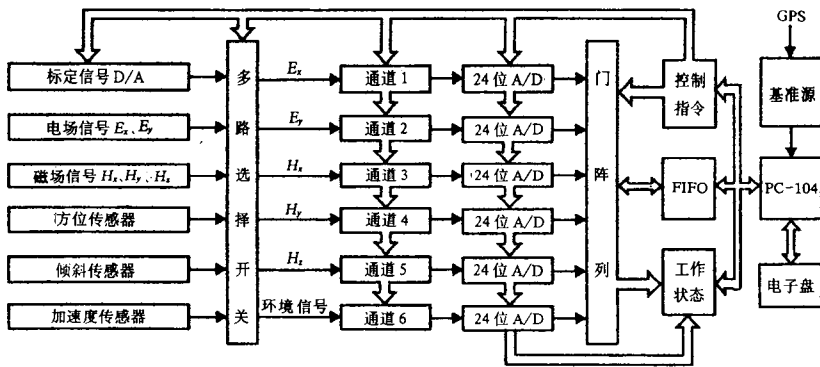


图1 高精度海底大地电磁数据采集器硬件原理框图

Fig. 1 Hardware principle for data acquisition of magnetotelluric survey with high accuracy on the seafloor.

目前所研制的海底大地电磁仪最长记录时间为7d,频率范围 $100 \sim 0.0001\text{Hz}$,综合考虑采集数据量、省电和减少电磁干扰等因素,数据采集器配置容量为144MB的固态电子盘。为了压制干扰,采集器设置2级陷波深度 $>40\text{dB}$ 的50Hz陷波器和2级低通滤波,滤波频率可选择128,16,0.16Hz 3档。

考虑到尽可能拓宽仪器频率范围,以便满足海陆两用的需要,采集器硬件设置4000,1000,500,250,125,64Hz共7个采样频率供选择,而后软件可实现更多的采样频率。图2为“五分量海底大地电磁系统”。它主要由浮球、结构框架、数据采集器、仪器承压密封舱、声学释放器、磁

传感器、磁传感器承压密封舱、海底不极化电极、水密电缆、电极电缆导管、锚系等零部件集合而成。

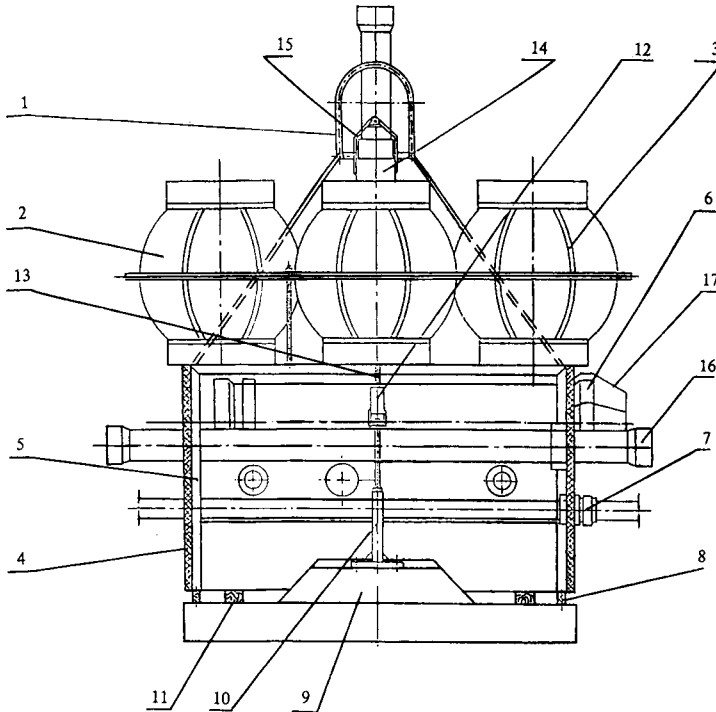


图 2 五分量海底大地电磁系统结构示意图

Fig. 2 Sketch diagram showing the structure of the marine magnetotelluric system.

1 提梁; 2 浮球; 3 浮球外壳; 4 ABS板; 5 不锈钢框架; 6 记录器承压密封舱; 7 电极电缆导管; 8 减震器; 9 锚块; 10 锚杆; 11 方木垫; 12 锚杆螺丝套; 13 锚链; 14 声学释放器; 15 换能器; 16 磁探头承压密封舱; 17 记录器承压密封舱盖保护罩

整机技术指标如下:

频率范围 $100 \sim 0.0001\text{Hz}$

6 道数据记录器, 记录大地电磁场 5 分量的时间序列

采用 24 位 A/D 转换

主控计算机使用 PC-104 嵌入式工控机

电场观测灵敏度: $0.02\mu\text{V}/\text{m}$

磁场观测灵敏度: $0.3\text{V}/\text{nT}$

同步计时精度: 0.01ms

采样频率: 4000, 1000, 500, 250, 125, 64Hz

50Hz 陷波器: 2 级陷波, 陷波深度 $> 50\text{dB}$

滤波: 2 级低通滤波, 频率可选择 128, 16, 0.16Hz

噪声: 3 个磁道的噪声幅值 $< 1\mu\text{V}$, 2 个电道的噪声幅值约 $1\mu\text{V}$, 而辅助道的噪声基本为零

频率特性:测试频率范围为 0.01~120Hz

存储器:144MB 固态电子盘

电源:+5V, ±12V

功耗:7W(工作状态)

记录器体积:90mm×96mm×170mm

记录器重量:约 1.0kg

电极:Ag-Agcl 固态不极化电极(极距 10m)

磁探头:感应式磁传感器

整机体积:1.4m×1.4m×1.6m

整机重量(包括锚系):约 850kg

工作水深:500m 以浅

环境温度:-20℃~+70℃

海底系统的方位测量精度:±1°

海底系统的倾角测量精度:0.5°

震动传感器:工作频带 0.5~200Hz,灵敏度 10V/g

海底温度测量精度:1℃

如前所述,海底大地电磁探测实际测量的是 2 个电场分量和 3 个磁场分量的时间序列。为了得到周期大于 1 000s 以上且可靠的大地电磁响应,一般来说,数据记录时间必需超过 10h。在海上作业,船不可能停泊这么长时间,因此进行海底大地电磁数据采集时,也就不可能带缆作业,只能选择阵列式、自激、同步记录的方式工作。通常,我们是沿海底观测剖面按设计点位逐点投放仪器,设置海底测站进行观测(图 3)。投放前,所有的仪器都通过 GPS 校正各自的计算机时间,并在主控计算机上设置数据采集参数表;投放后,每台仪器都按照所设置的计算机时间同步启动,自动按参数表执行数据采集程序,记录海底大地电磁场信号。在完成数据采集后,逐点释放、回收投放在海底的仪器。

为了进一步检验新研制的“海底大地电磁系统”的性能,也为了研究一套切实可行的海上作业技术,我们在我国东海进行了 2 次试验。第 1 次试验,用半天时间,在 5 个测点上投放了 5 套仪器,水深 136m 左右。在连续采集 4d 数据以后,于第 7 天全部安全回收回到船上,回收仪器也仅占用半个工作日。第 2 次试验,只投放一套五分量仪器。投放点水深 130m,同样连续采集 4d 数据,在第 7 天安全回收。图 4 是在海底采集到的大地电磁场 5 个分量的时间序列曲线。如图所示,所采集的磁场分量和电场分量有一定的相关性;而且,磁场 X 分量和电场 Y 分量的信号幅度都分别大于磁场 Y 分量和电场 X 分量;而磁场 Z 分量,信号极微弱;这些特征完全与大地电磁场信号的理论特征相符合。这

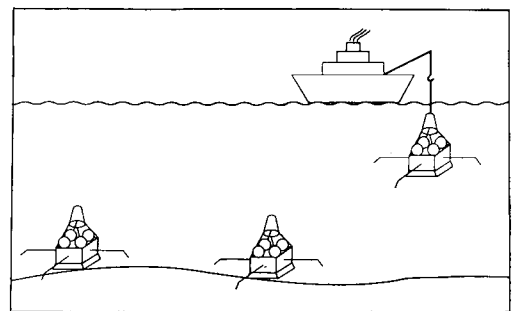


图 3 海底大地电磁探测海上作业方法示意图
Fig. 3 Sketch diagram showing the procedure of the marine magnetotelluric survey.

表明,我们在东海试验点测量到的电磁场信号确实是海底大地电磁场信号。从海上作业的情况看,投放和回收一套仪器都只需要大约 1h(包括 5km 的航行时间),这样的效率基本能满足实际生产的要求。事实表明,我们的海上试验是成功的,通过试验使我国的海底大地电磁探测技术更向实用化迈进了一步,并将成为研究我国海区地壳电性结构最有效的方法技术。

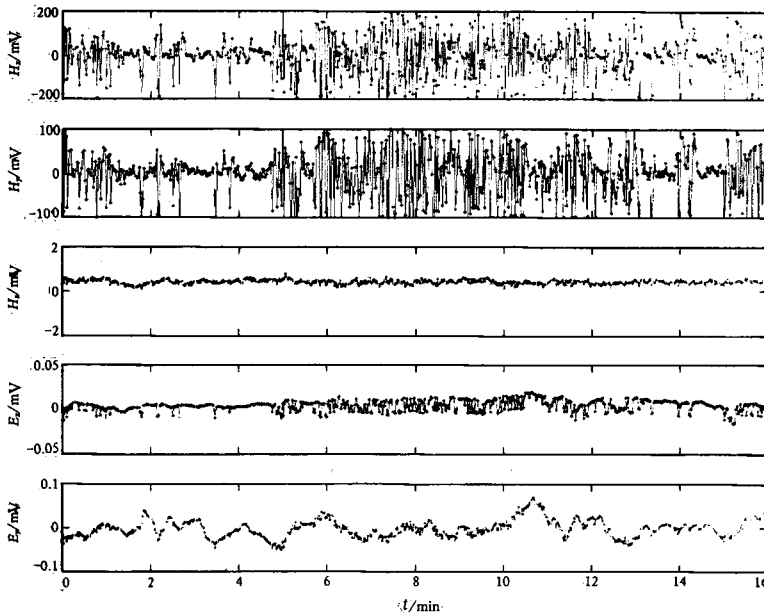


图 4 在东海试验点上采集到的海底大地电磁场时间序列曲线

Fig. 4 Time sequence curves of the marine magnetotelluric field acquired on a test site of East Sea.

3 我国海底大地电磁探测的应用前景

海底地质科学研究主要包括海底深部地质调查和海洋区域地质调查,而海底资源勘测则指油、气,金属矿产和淡水资源的勘测。海底深部地质调查是把整个海洋岩石圈作为对象,研究海底沉积基底面、莫霍面和软流圈以及上地幔的构造特征;讨论大洋板块的碰冲、开裂扩张、俯冲、部分熔融、热液活动和洋中脊上隆等问题。研究这些问题将有助于进行海底成矿预测,盆地分析和油、气成藏规律分析,具有较大的实际意义。

由于海洋地壳的孔隙和渗透性与岩石年龄有关,因此导电性也与岩石的年龄有关(多布林, 1983)。海洋莫霍面由于蛇纹岩化过程被认为是不透水的,电导率低到 10^{-5} S/m。而上地幔通常认为是由橄榄石、辉石及少量其他矿物组成。干而冷的硅酸盐矿物电导率很低,但随着温度升高,电导率呈指数规律增大。当温度升到 1 400℃ 时,将出现局部熔融,使电导率增大(石应骏等, 1985),这即是人们通常所指的“软流圈”,在它下面,地幔电导率又将下降到 0.01 S/m。根据海洋壳幔电性结构特征的分析不难看出,海洋电磁法在进行海底深部地质研究较有效的方法之一。

海洋区域地质调查的主要内容包括:海底地形地貌及地质性质调查、新生代沉积基底及盖层性质调查、地质构造调查、矿产资源远景评价等。很显然,完成这些调查内容主要依靠海洋地球物理方法。其中,海底大地电磁测深可能成为主要手段之一。因为海洋岩石层的电性参数如电阻率等较之其他物性参数能更好地反映岩石性质如岩性、组分、孔隙度、裂隙程度、水饱和度等,以及其所处的物理状态如温度、压力、熔融、脱水等。所以,海洋岩石层电性资料是划分陆壳和洋壳界限、研究大陆自然延伸的重要依据;同时也可以指示一些较陡的不同电性介质的分界面及断裂带等,有效地划分构造单元之间的界线。

我国海洋油、气资源勘查,到目前为止仍以海上地震勘探为主,辅以重力方法等,从未开展过海洋电磁法。但是,从以下两方面考虑,海洋电磁法都是地震探测的最好补充。1)电阻率参数相对速度等参数来说,与岩石性质及所处物理状态有着更为密切的联系,增加有关这一参数的信息将对资料的地质解释十分有益;2)在上部有高速介质覆盖,例如推覆构造、火山分布区、盐丘、碳酸盐岩地区等,往往地震探测的效果不好;然而,在这些地区,海洋电磁法却可能得到较好的资料;我国黄海海域的古生代盆地成油正属于这类问题。

在我国,大部分沿海城市淡水资源紧缺,海岛用水更加困难,严重地制约着沿海城市经济的可持续发展和海岛经济的开发利用。因此,抓紧寻找海底淡水资源十分重要。据海岸带水文地质调查发现,在海洋底床中蕴藏着大量的淡水资源,例如福建古雷半岛东边的莱屿邻近海面上具有海底喷泉。类似的发现,在沿海地区也大约有数十处。所有这些海底含水构造都是和陆地含水构造相连的,并由陆地予以补给。除此之外,在海底海相与陆相交互地层中,陆相地层也有淡水层保存,但它们一般与陆地含水构造不连通,也不能形成海底喷泉。无论是海底含水砂砾层或含水陆相地层,它们都具有相似的地球物理条件,即含水层与上覆地层之间都有明显的电性差异。因此,海底大地电磁探测对于寻找海底淡水层也应有较好的应用效果。

4 结束语

如上所述,我国海底大地电磁探测研究虽刚刚起步,但有广阔的应用前景。作为拥有 37 万平方公里领海和近 300 万平方公里管辖海域的海洋大国,在跨入被称为“海洋开发时代”的 21 世纪后,深入开展海底大地电磁测深研究,并迅速、全面地推广应用,尽快弥补我国海洋地球物理方法不全的缺憾,其意义是显而易见的。

(2001 年 2 月收稿,2001 年 3 月改回)

参 考 文 献

- 陈长寿,王光镔. 1990. 大地电磁测深法. 北京:地质出版社.
- 石应骏,刘国栋,吴广耀,等. 1985. 大地电磁测深法教程. 北京:地质出版社.
- 多布林 B B. 1983. 地球物理勘探概念. 北京:石油工业出版社.
- Nick A, Palshin. 1996. Oceanic electromagnetic studies: A Review. *Surveys in Geophysics*, 17:455~491.
- Steven C, Constable, Amold S, et al. 1998. Marine magnetotellurics for petroleum exploration Part I: A sea-floor equipment system. *Geophysic*, 63, 816~325.

DEVELOPMENT OF MARINE MAGNETOTELLURIC PROSPECTING TECHNIQUE IN CHINA

Wei Wenbo Deng Ming Tan Handong Jin Sheng

(*China University of Geosciences, Beijing 100083*)

Abstract

Because of the difficulties to obtain the conductivity of the rock on the seafloor, no marine electromagnetic prospecting has been done in the field of geophysical prospecting in China till now. But the electrical parameter is the better one in reflecting the lithology and physical state of rock than some other parameters. The development of marine electromagnetic method is strongly needed. The marine magnetotellurics, which studies the distribution of conductivity of medium in different depths through collecting magnetotelluric data on the seafloor, is proved to be an effective method. After two years of hard work, we have accomplished the study of marine magnetotelluric prospecting. Due to the rapid development of society, the need for mineral and energy resources is presently increasing fast, which leads to the decrease of the deposit of important mineral, oil and natural gas, and the lack of the targets for prospecting and exploiting on the land. Relatively, the abundant sea resource is rather attractive. Therefore it is imperative to develop the methods for prospecting the resources on the seafloor in China Sea, which will provide the broad applied prospects for the marine electromagnetic methods.

Key words Marine magnetotelluric method, Electrical structure