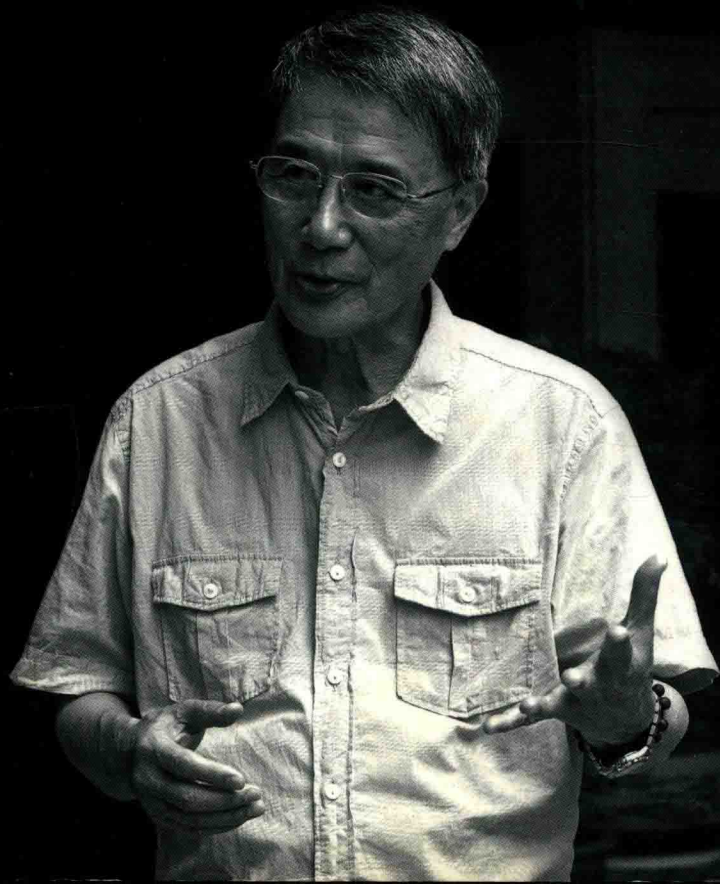


中  
国  
工  
程  
院  
院  
士  
文  
库

[何继善 著]

# 海洋电磁法原理



高等教育出版社

Haiyang Diancifa Yuanli

# 海洋电磁法原理

[何继善 著]



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

探测海洋、查明海底的地质构造和矿产资源,是开发海洋不可缺少的步骤。电磁法勘探是适合于海洋和海底探测,同时应用前景又十分广阔的地球物理方法之一。陆地上的电磁法勘探,经过百年来的研究和应用,已经发展得相当成熟。到20世纪末,随着陆地资源的日渐匮乏,各国纷纷转向开发海洋,以建设海洋强国为国策。本书集成了作者的研究成果及国内外海洋电磁法的科研成果,旨在全面介绍海洋电磁法的基础理论和实际应用,以推动我国海洋电磁法勘探的发展。

本书可供地质矿产、海洋科学、油气、资源环境、工程、水文领域工作者、相应大专院校师生及上述领域政府、企业管理人员参考使用,也可作为海洋科学、地球物理科学专业的研究生教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

海洋电磁法原理/何继善著. —北京:高等教育出版社,2012.9

ISBN 978 - 7 - 04 - 036028 - 8

I. ①海… II. ①何… III. ①海洋资源 - 电磁法勘探 IV. ①P631.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第197243号

策划编辑	王国祥	责任编辑	黄慧婧	封面设计	顾 斌	版式设计	杜微言
插图绘制	尹 莉	责任校对	刘春萍	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京中科印刷有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 16  
字 数 290千字  
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
版 次 2012年9月第1版  
印 次 2012年9月第1次印刷  
定 价 86.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究  
物料号 36028 - 00

## 《中国工程院院士文库》编辑委员会

主任：樊代明

副主任：苏雨恒 刘德培

委员：谭建荣 何新贵 袁士义 屠海令

邹德慈 丁一汇 侯保荣 傅廷栋

王红阳 殷瑞钰 白玉良 杨祥

李仁涵 安耀辉

编辑部：刘静 姬学 王国祥 黄慧靖

# 总序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用，是经济发展和进步的强大动力。自20世纪下半叶以来，工程科技以前所未有的速度和规模迅速发展，其重要作用日益突显，并越来越受到人们的重视。

中国工程院是中国工程科技界的最高荣誉性、咨询性学术机构。中国工程院院士是中国工程科技领域的最高荣誉性称号，授予对中国工程科技发展做出杰出贡献的工程科技工作者。院士们充分发挥群体优势，围绕国家、产业和地方经济社会发展迫切需要解决的重大科学技术问题，开展宏观性、战略性、前瞻性、综合性的咨询研究，为国家决策提供支持。他们的研究代表中国在该领域中的最高学术水平。院士们视发展工程科技、促进国家经济发展和进步为己任，勤奋工作在各自的专业领域，为祖国的繁荣富强、为国防建设和国家安全做出了重要的贡献。院士的学术著作，是院士多年刻苦钻研和辛勤劳动的成果，是他们智慧的结晶，也是整个社会的宝贵财富。这些学术著作，不仅对我国工程科技工作有重要的指导作用，而且具有极高的学术和参考价值，对于促进年轻工程科技人才成长，造就出类拔萃的青年科学家和工程师，推动我国工程科技事业不断发展具有重要作用。

感谢高等教育出版社设立中国工程院学术著作出版基金，资助出版《中国工程院院士文库》，把院士们的学术成果向全社会推广。此举不但有力地支持了我国优秀科学技术著作的出版，也对促进我国科技事业发展、繁荣科技出版事业具有重大意义。

徐匡迪

2005年8月

# 前 言

当我们跨入 21 世纪的第二个十年,人类面临着人口剧增、资源匮乏、环境恶化以及全球金融危机等一系列问题,形势严峻<sup>[18,20]</sup>。开发海洋,是解决这些难题的途径之一。21 世纪必定是“海洋开发的时代”。

探测海洋,查明海底的地质构造和矿产资源,是开发海洋不可缺少的步骤。1996 年 9 月,国家批准“海洋领域”进入高技术研究发展计划(即国家“863”计划),把勘查和开发海洋的高新技术的发展摆到了十分重要的地位<sup>[18]</sup>。要探测被浩瀚海水覆盖的海底,各种地球物理方法无疑是得力的工具。电磁法勘探是适合于海洋和海底探测,而应用前景十分广阔的地球物理方法之一。

经过近百年来研究和应用,陆地上的电磁法勘探已经发展得相当成熟。海洋电磁法勘探,如果从施伦贝尔格(Schlumberger)兄弟的最初尝试算起<sup>[138]</sup>,距今约有 80 年了。但真正地开展起来,只不过是 30 多年,而且还不够深入和广泛。到 20 世纪末,随着陆地资源的日渐匮乏,各国纷纷转向开发海洋,以建设海洋强国为国策。经济需求的刺激加速了海洋电磁法的发展。

我国海洋电磁法勘探起步较晚。20 世纪 60 年代以来,特别是进入 20 世纪 90 年代以后,有些单位陆续进行了少量工作。但大多处在试验研究阶段,离进入市场相距甚远,发表的资料也不多<sup>[10,12]</sup>。为了比较详细和全面地介绍海洋电磁法的基础理论和实际应用,以推动我国海洋电磁法勘探的发展,笔者迫切感到有必要编写一本比较系统和完整的材料。这就是编写本书的目的。

书中材料的来源有两方面,一是作者的研究成果。限于海洋电磁法尚处在初级阶段,不少成果有待通过实践改进和提高。二是对国内外海洋电磁法的文献加以搜集、整理和研究。由于资料浩繁,许多又没有正式发表,难免搜集不全,挂一漏万。因此,目前的这本书仍有许多不完善之处,将它奉献出来,意在抛砖引玉,以飨读者,不足之处望不吝赐教。笔者深信,随着海洋电磁法的推广和应用和提高,会有更多更好的著作问世。

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 探测、开发海洋的重要意义	1
1.2 电磁法在海洋地球物理勘查中的地位	3
1.3 海洋电磁环境的地球物理特点	5
第 2 章 海洋中的自然电场	12
2.1 海洋中自然电场的成因	12
2.2 海洋环境中几种简单形体的自然电位分布	16
第 3 章 海底大地电磁法	31
3.1 大地电磁场的起源	31
3.2 海底大地电磁法的基本理论与特点	34
3.3 层状介质上的海底大地电磁阻抗	39
3.4 均匀交变电磁场中的球体和水平圆柱体	51
第 4 章 直流电阻率类方法与激发极化法	67
4.1 海洋直流电阻率类方法	67
4.2 海底激发极化法的基本原理	75
第 5 章 海洋中的可控源电磁场引论	82
5.1 海洋中的可控源电磁法	82
5.2 电磁场的基本方程与海洋环境的近似条件	84
第 6 章 海底水平电偶极源的电磁场	93
6.1 两均匀导电半空间中的水平电偶极源	93
6.2 水平电偶极子空气-海水-大地三分问题	109
第 7 章 海底垂直电偶极源的电磁场	124
7.1 两个均匀导电半空间中的垂直电偶极子	124
7.2 海水中垂直电偶极子的空气-海水-大地三分问题	128
7.3 多层大地上海水中的垂直电偶极子	132
7.4 海水中的垂直线电源	137
7.5 MOSES 方法原理	142
第 8 章 海洋中水平磁偶极源的电磁场	148
8.1 均匀导电全空间中磁偶极子的电磁场	148
8.2 两均匀导电半空间分界面附近的水平磁偶极子	150

8.3	空气-海水-大地三种介质的海底水平磁偶极子的电磁场 .....	157
8.4	多层海底上水平磁偶极源的电磁场 .....	162
<b>第9章</b>	<b>海底垂直磁偶极源的电磁场 .....</b>	<b>166</b>
9.1	海洋-大地两均匀半空间中垂直磁偶极子的电磁场 .....	166
9.2	空气-海水-大地三种介质的垂直磁偶极子 .....	169
9.3	层状介质上海水中的垂直磁偶极子 .....	172
<b>第10章</b>	<b>海底大回线源的电磁场 .....</b>	<b>177</b>
10.1	大回线附近电磁场的方程和边界条件 .....	177
10.2	海水-大地界面上水平电流环产生的电磁场 .....	180
10.3	空气-海水-大地三种介质分布海底水平电流环的电磁场 .....	185
10.4	海水下层状大地上水平电流环的电磁场 .....	188
<b>第11章</b>	<b>简单电性分布的近似解析公式 .....</b>	<b>193</b>
11.1	海底水平电偶极子场的近似解析表达式 .....	193
11.2	无限长水平线电源的近似解析表达式 .....	198
11.3	垂直线电源(MOSES装置)电磁场的近似解析表达式 .....	208
11.4	磁偶极子电磁场的近似解析表达式 .....	211
<b>第12章</b>	<b>从频率域到时间域的转换 .....</b>	<b>216</b>
12.1	频率域与时间域的等效性及转换原理 .....	216
12.2	阶跃激励下电偶极源的时间域表达式 .....	218
12.3	高阻海底上无限长水平线电源电磁场的时间域表达式 .....	224
12.4	阶跃电流激励下海洋垂直线电源电磁场的时间域表达式 .....	226
12.5	海底磁偶极子电磁场的时间域表达式 .....	227
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>236</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 探测、开发海洋的重要意义

如果乘坐航天飞机或人造卫星回望地球,您将看到一个蓝白相衬、缀以橙黄、晶莹美丽的星体,它美丽的蔚蓝色来自海洋。海洋总面积达 3.6 亿多平方公里,约占地球面积的 71%<sup>[13,20]</sup>。

我们赖以生息、繁衍的地球大约有 45 亿年的历史。人类的出现只不过两三百万年的时间。从原始的细胞进化到人类,从远古的猿发展到现代的人,无不是吸吮地球的“乳汁”,依靠地球提供的资源。进入 20 世纪以来,科学的进步促进了生产的飞跃发展,人类取得了辉煌的成就,同时也暴露出严重的问题。人口急剧膨胀,陆地资源日渐枯竭,生存环境不断恶化,已经使地球不堪重负。尤其我国是世界人口最多的国家,面临的形势更加严峻<sup>[10,18]</sup>。

——根据测算,我们的母亲——地球,最多只能养活 80 亿人。2011 年 10 月 31 日凌晨,作为象征性的全球第 70 亿成员之一的婴儿在菲律宾降生。按照目前人口增长的速度,到 2025 年世界人口将达到 80 亿!我国陆上耕地最多只能养活 16 亿人,到 2011 年底我国人口已达 13.47 亿!

——据统计,我国耕地总面积为 18.26 亿亩(注:1 亩 $\approx$ 667 m<sup>2</sup>)。由于城乡建设对耕地的占用,平均每年减少耕地 2 200 万亩。因气候变迁,环境恶化,平均每年又有 720 万亩耕地沙漠化。照此下去,到 21 世纪 70 年代中期,我们将丧失全部耕地!

——2011 年我国钢铁产量 6.955 亿吨,而我国至 2009 年年底的铁矿石储量只有 93 亿吨。如果不从国外大量进口铁矿石,我国陆地现有的铁矿将很快开采一空!

——中国的煤炭储量到 2009 年年底,保有 1 636.9 亿吨,约占全球的 14%,但煤炭消耗量占全球的 47%,如此下去,我国当前的煤炭产量将只能维持 38 年,而趋于枯竭。

——至 2009 年年底,我国保有石油资源储量 29.5 亿吨,而同年的石油开采量为 3 亿吨左右。如果没有发现新的石油资源,这 29.5 亿吨石油到 2019 年便将告罄。

——虽然我国森林面积居世界第五位,但我国的森林覆盖率只相当于世界

森林覆盖率的 61.3%，全国人均占有森林面积相当于世界人均占有量的 21.3%，人均森林蓄积量只有世界人均蓄积量的 1/8。特别是由于过度采伐和毁损，森林面积不断减少。以最近 10 年森林减少的速度计算，到 2055 年我们将失去全部森林！

——全球性的大气污染、水质污染，生存环境不断恶化，严重破坏了生态平衡，使得平均每 4 小时就有一种动物从地球上消失。植物也受到同样的威胁。长此以往，人类将何以为生？！

——面对如此严峻的形势，必须制止和逆转上述破坏环境的活动，大力推进可持续发展战略，与此同时人们将解决三大难题的期望寄托于海洋。一些有识之士在 50 年前就喊出了“向海洋进军”的口号<sup>[18]</sup>。认识海洋，探测海洋，开发和利用海洋资源，保护海洋，作为人类生存和社会经济持续发展的基础，已成了一股不可逆转的强大潮流。21 世纪必是“海洋开发的时代”！

海洋是生命的摇篮。海水是生命的乳汁。世界上最初的生命就是在海洋中孕育形成的。地球上一百几十万种生物，有 80% 生活在海洋中。当今人类所需的动物蛋白，约有 16% 来自海洋。海洋给人类提供食物的能力，相当于陆地上所有耕地的 1 000 倍。在这个意义上，无边无际的海洋绝不亚于广袤的田野。

海洋是巨大的宝库。海底蕴藏有十分丰富的石油和天然气。仅大陆架可采石油储量就达 2 500 亿吨，相当于陆地储量的 3 倍。预计海底天然气为目前已探明天然气的百倍以上。除了陆地矿床在海底的自然延伸和滨海砂矿之外，海底还赋存丰富的多金属结核和铁锰结壳，其中含有锰、铁、铜、钴、镍、锌等几十种金属元素，加上各种热液矿床，海底地下卤水，估计各种金属总储量达一万亿吨以上，可供人类使用数千年<sup>[10,18]</sup>。

海底是地球科学的生动课堂。正在进行的沉积作用主要发生在海洋中。大陆漂移的动力来自洋底的扩张。在大洋中脊，由于地幔上涌，不断形成新的地壳和新的矿产。乘坐深海潜水器去观察海底，可以看到冒出黑烟的海底热泉、正在进行的热液活动和刚刚形成的硫化矿产<sup>[47,131,157]</sup>。

沿海地区历来是经济发展的重心。得益于温和的海洋性气候、富饶的物产、便利的海上交通和发达的对外贸易，沿海的工农业基础、文化科技水平和经济发展程度都比内地要好。建设海上城市，开办海上工厂，修筑深水海港，架设跨海桥梁，打通海底隧道，已经成了当前的现实。

我国是一个拥有 18 000 多公里海岸线、37 万多平方公里领海、473 万多平方公里海洋国土的大国。有些蛰居内陆的人缺少海洋意识，提到我国国土时，往往忘记了 473 万多平方公里的海洋国土，只记得 960 万平方公里的陆地国土，这是很不准确、很不科学的<sup>[13,18]</sup>。满清皇朝，闭关锁国，海上交通、经贸往来，沿海建设和海洋资源的开发利用得不到应有的重视，它的影响一直延续到近代。改

革开放的政策打开了国门,党和政府把发展沿海经济和开发海洋资源摆到了十分重要的地位。

我国政府于1996年5月15日批准加入了《领海及毗连区法》。明确我国领海宽度为12海里(注:1海里=1.852 km),毗连区宽度为24海里,专属经济区200海里。国家制定批准了海洋“863”计划,组织有关部门开展海洋勘查工作。成立了“中国大洋矿产资源开发研究协会”。向联合国海底筹委会申请批准了15万平方公里的大洋开辟区,至2003年已经在区内进行了6个航次的勘查,初步查明多金属结核资源量达9亿吨。目前在我国海区已发现的含油气构造有一百多个,探明的石油资源量600多亿吨。现已投产的油气田25个,海上石油年产量将超过2000万吨,天然气年产量可达85亿~100亿立方米。固体矿产仅山东龙口矿区一处海底煤田地质储量就有约10亿吨。查明锆石、钛铁矿、金红石、独居石、磷钇矿、砂金、金刚石、石英砂等13个矿种的滨海砂矿191个,矿点135处,总储量(不含石英砂)16亿多吨,其中已经开采的有30多个<sup>[18,20]</sup>。

由此不难看出,加大探测和开发海洋的力度,把我国建设成海洋强国,具有可持续发展的深远战略意义。

## 1.2 电磁法在海洋地球物理勘查中的地位

开发利用海洋资源,首先必须探测海洋,查明资源的分布情形和赋存状态。探测海洋,尤其是探测海底深部,受到海水的阻隔,陆地上常用的直接地质观察方法应用起来困难很大。即使借助于深潜水设备,观察的深度和广度也很有限。必须采用多种综合的方法,其中地球物理勘查是一种主要手段。

自国际地球物理年(1957—1958年)以来,许多国家加强了综合性的海洋地质调查工作。陆续实施了“地壳上地幔计划”、“地球动力学计划”、“深海钻探计划”等。发现了全球裂谷系、海底磁异常条带、洋中脊扩张、海底热泉及热流异常、转换断层等一系列新的重要事实。使魏格纳的“大陆漂移学说”得到证实和发展,并与洋底扩张相结合,诞生了板块构造学说。引发了地球科学上一场深刻的大变革。在这些调查中,各种地球物理方法起了不可替代的作用,作出了不可磨灭的贡献。

几乎所有陆地上使用的地球物理方法,包括重、磁、电、震、放射、地热以及地球物理测井,都能在海洋找到它们的用武之地。加上目前最先进的全球定位系统(GPS)和多波束回声测深(Seabeam)用于海洋定位和海底地形测绘,更使海洋地球物理勘查如虎添翼。

关于探测海底资源,过去存在两个错误观点,一度妨碍了电磁法的发展。一是认为除了大陆架的石油和洋底的锰结核之外,海底是“贫瘠”的,价值不大;二

是认为高电导率的海水“屏蔽”电磁效应,使之不能到达海底<sup>[6,10,131]</sup>。然而,近年发现,洋中脊有强烈的热液活动,多金属硫化矿产的丰度和规模十分可观。锰结核不仅仅含锰,它还含有铁、铜、钴、镍、铅、锌等几十种金属元素,几乎没有非金属成分,应该称为多金属结核。而且它的数量多、分布广。受海水“屏蔽”的主要是高频电磁波,低频电磁信号能“穿过”海水,探测海底。理论研究表明,电磁波在低电导率物质中传播比在高电导率物质中快。海底不如海水导电,因此通过海底的电磁信号首先到达接收点。这就是海底电磁测量的理论依据,也是海洋电磁法的优势所在<sup>[22,24,164]</sup>。

海洋电磁法是一种主要的海洋地球物理方法,它特别适用于其他方法不易分辨而电磁方法拥有优势的地质目标。例如,不久前在墨西哥湾发现了丰富的石油,可是那里的盐丘影响了地震勘探的有效性,而电磁方法探测盐丘可以收到很好的效果<sup>[105,107,108,115]</sup>。此外,碳酸盐礁脉、火山岩覆盖、海底永冻土等都是其他方法效果不好而电磁方法却很适合的区域<sup>[109,116,117,119]</sup>。电磁方法包涵的门类繁多,不同空间、不同波段、不同成因的电磁场均可利用,从而又形成许多分支方法,如大地电磁法、可控源电磁法、自然电位法、激发极化法……可控源方法中,又分频率域电磁法、时间域(瞬变)电磁法<sup>[10,12]</sup>,如此等等。这就使得海洋电磁法适应性强,既适合探测海洋地壳深部构造,又适合勘查油气矿产和固体矿产。对探查洋底扩张带、裂谷体系乃至滨海砂矿都能起作用。电磁法的勘探深度覆盖范围大,浅到几米深的海底沉积物,深到若干公里以下的地幔电导率结构,都在电磁法调查的深度范围内。

电磁法还有一个其他地球物理方法都不具备的独特优点,它可以用来调查海水的运动<sup>[10,67,131]</sup>。例如,黑潮暖流和墨西哥暖流,对全球的气候、动植物分布和生长、生态环境有显著的影响。海水是一种良导体。地球拥有一个巨大的磁场。运动的海水切割地磁场的磁力线,根据电磁感应定律,它们的相互作用将产生电磁场<sup>[56,70,71,81]</sup>。这个电磁场的大小、方向、频率等特征反映了海水运动的相关特点。测量电磁场的这些特征,便可了解海水的运动,特别是深部的运动。因此电磁法可以用来进行海洋学研究<sup>[28,30]</sup>。这是别的地球物理方法所不及的。

不过,电磁法如果脱离其他地质、地球物理方法而孤军作战,效果也不会好。多解性是电磁法的薄弱环节。不同地质原因只要引起相同或相近的电性分布,就可能产生相同或相近的电磁场分布,单靠电磁法本身并不能分辨它们。电磁法中存在所谓的等值原理。不同尺寸和不同电性的目标对电磁场可能产生几乎相同的扰动,电磁法本身无法单一地确定目标的尺寸或者电性。只有与地震、重力等其他地球物理方法或者地质钻探结合起来,对目标体的某些参数加以约束,才能使电磁法取得更好的效果<sup>[54,55,75]</sup>。

### 1.3 海洋电磁环境的地球物理特点

海底环境不同于陆地。进行任何电磁测量之先必须了解海洋环境的特点并予以重视<sup>[83,84]</sup>。海洋环境的最大共同特点是海底上覆盖着一层海水。海水是一种良导电介质,它的电导率变化于3~5 S/m。如果取海水电导率 $\sigma_0=4$  S/m,磁导率 $\mu=\mu_0=1.256\times 10^{-6}$  H/m( $\mu_0$ 为自由空间磁导率),电磁波在海水中的趋肤深度(或穿透深度,m)可表示为

$$\delta = 252/\sqrt{f} \quad (1.3.1)$$

式中, $f$ 为电磁波的频率(Hz)。当 $f=100$  Hz时,穿透深度 $\delta$ 仅为25.2 m,而当 $f=0.01$ Hz时,穿透深度可达2 520 m!可见受海水“屏蔽”的仅仅是高频电磁波。低频电磁信号可以“穿透”海水,到达海底<sup>[10,131,153]</sup>。有的学者把海水比喻为通过低频而抑制高频的“低通滤波器”,真是恰如其分。不加区别地认为海水“屏蔽”所有的电磁波的观点是完全站不住脚的。

海水的低通滤波作用从理论上可定量地加以分析<sup>[5,7,25]</sup>。考虑电导率为 $\sigma_1$ 的大地半空间和绝缘的空气半空间中间夹有一层厚度为 $H$ 、电导率为 $\sigma_0$ 的海水。水面上有一频率为 $\omega$ 的垂直磁偶源。在相距很远的观察点上,它的场可看成垂直入射的平面波。海底水平电磁场 $E_{sf}$ 、 $B_{sf}$ 和海面水平电磁场 $E_{ss}$ 、 $B_{ss}$ 之比的表达式为

$$\frac{E_{sf}}{E_{ss}} = \frac{(1+k_{01})e^{ik_0H}}{1+k_{01}e^{2ik_0H}} \quad (1.3.2)$$

$$\frac{B_{sf}}{B_{ss}} = \frac{(1-k_{01})e^{ik_0H}}{1-k_{01}e^{2ik_0H}} \quad (1.3.3)$$

式中, $k_{01}$ 为海底反射系数,

$$k_{01} = \frac{k_0+k_1}{k_0-k_1} \quad (1.3.4)$$

式中, $k_0=\sqrt{-i\omega\mu\sigma_0}$ , $k_1=\sqrt{-i\omega\mu\sigma_1}$ ,分别为海水和大地的波数。假设场源具有零波数,并设 $\sigma_0=3.2$  S/m, $H$ 分别为5 000 m、500 m、100 m, $\sigma_1$ 分别为0.05 S/m和0.005 S/m,按式(1.3.2)和式(1.3.3)计算的海底、海面水平电场和水平磁场之比随周期的变化示于图1.1。

由图1.1可见,对于长周期(低频), $E_{sf}/E_{ss}$ 和 $B_{sf}/B_{ss}$ 接近于1,即电磁波通过海水后基本没有衰减。而对于短周期(高频),海底的场衰减很大,只有海面的1%甚至1‰。这说明海水的低通滤波作用非常明显。比较图1.1的(a)、(b)两图还可看出,对于海底电导率的变化,海底、海面水平磁场之比 $B_{sf}/B_{ss}$ 相对水平电场之比 $E_{sf}/E_{ss}$ 要灵敏得多。

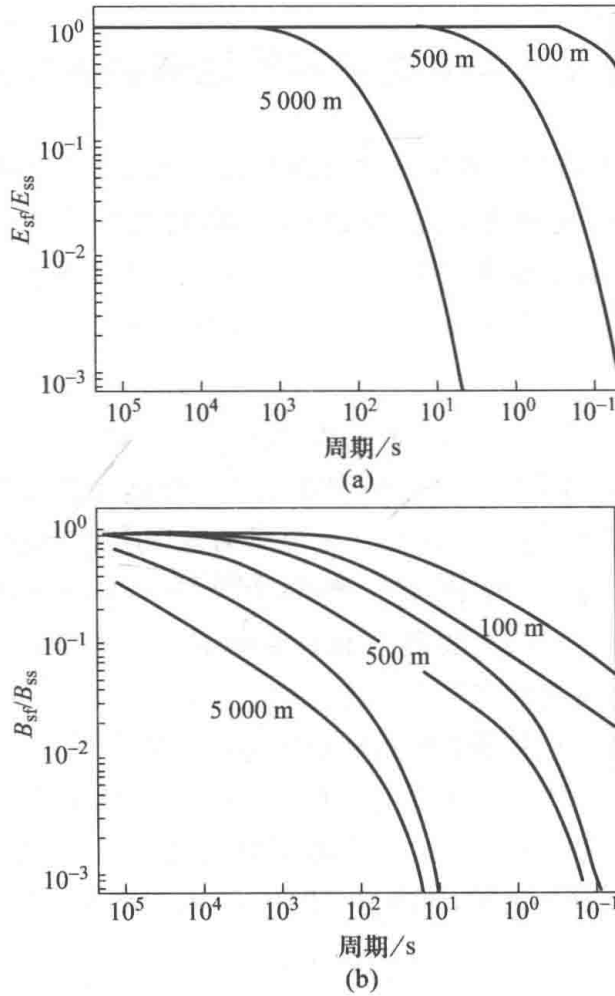


图 1.1 海底、海面水平电场之比  $E_{st}/E_{ss}$  和水平磁场之比  $B_{st}/B_{ss}$  随周期的变化  
 $H$  值如图中注记。  $\sigma_1 = 0.05$  S/m (实线) 和 0.005 S/m (虚线)

在地面进行电磁测量，一般可近似看成空气和大地组成的两个半空间，高导电的大地在下，低导电（几乎是不导电）的空气在上。与此相反，海底环境可看成海水和大地组成的两个半空间，高导电的海水在上，低导电的大地在下。与陆地情况相比，上下颠倒，互为镜像。这种差别可用图 1.2 来形象地表示<sup>[131]</sup>。

在导电介质中，电磁波传播的速度与电导率的平方根成反比。也就是说，在低导电的介质中，电磁波传播要比在高导电的介质中快。所以，在陆地情况下，经由空气传播的电磁信号首先到达，而经由大地传播的电磁波在晚些时候才到达。因此，在陆地的时间域（瞬变）电磁法中，人们感兴趣的、携带了地下介质信息的是晚期信号。相反，在海底情况下，经由大地传播的信号首先到达<sup>[22,136,164]</sup>。携带地下介质信息的、有意义的是早期信号。这是海洋情况与陆地情况截然不同的一个特点。



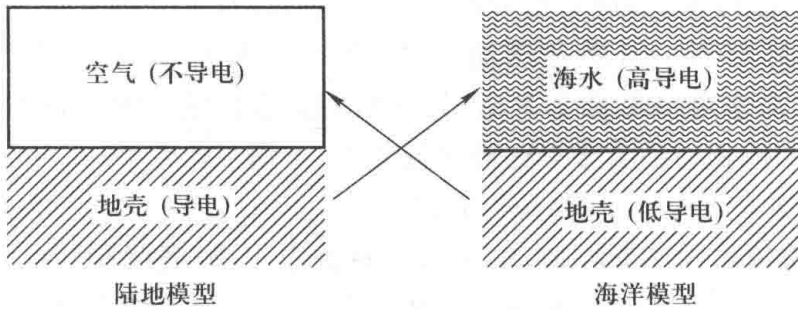


图 1.2 海洋模型与陆地模型相互倒置

纯净的水是不导电的。海水因含丰富的离子而成为良导体,实质上是电解导电。它的导电能力取决于离子的浓度和活性。具体地说,如忽略压力效应,海水电导率主要取决于其温度和含盐度。Accerboni 和 Mosetti<sup>[28]</sup> 总结出如下的半经验公式:

$$\sigma = \left( A + B \frac{T^{1+\lambda}}{1+T^\lambda} \right) \frac{S}{1+S^h} e^{-\varepsilon S} e^{-\xi(S-S_0)(T-T_0)} \quad (1.3.5)$$

式中,  $A = 0.2193$ ,  $B = 0.012842$ ,  $k = 0.0320$ ,  $\lambda = 0.00290$ ,  $h = 0.1243$ ,  $\varepsilon = 0.000978$ ,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\xi = 0.0000165$ ,  $S_0 = 35\text{‰}$ 。  $\sigma$  单位为  $\text{S/m}$ ,  $T$  为  $^\circ\text{C}$ ,  $S$  为千分之含盐度。例如,当  $T = 10^\circ\text{C}$  时,  $S = 30\text{‰}$  (均为海水的常见值),  $\sigma = 3.32 \text{ S/m}$ 。

海水的温度和含盐度比较稳定(除了地球两极附近),因此,可以认为,海水的电导率一般也是稳定的。

海洋地壳与陆地岩石相比,其导电性有很多不同的特点<sup>[40,41]</sup>。由于高的孔隙度和渗透性,所有的海洋地壳上部实际上是海水饱和的,特别是海底的第一、二层(海底沉积物和枕状玄武岩)。其结果使得近地表、小范围的导电不均匀性被大大平均,岩石成分不再像陆地那样成为主宰其导电性的主要因素。相反,决定海洋地壳导电性的是它们的孔隙度和充填其中的孔隙液。非良导矿物组成的、非固结的且未冻结的岩石的电导率,服从如下的阿尔奇(Archie)定律<sup>[36,39,110]</sup>:

$$\sigma_f = \frac{\Phi^m S^n \sigma_w}{A} \quad (1.3.6)$$

式中,  $A$  为常数,  $0.5 < A < 2.5$ ;  $S$  为被水充填的孔隙比;  $n$  为饱和度指数;  $\Phi$  为孔隙度;  $\sigma_w$  为孔隙水电导率;  $m$  为常数,主要取决于孔隙空间的几何形态,称黏结度;对被水饱和的沉积物,  $S = 1$ , 式(1.3.6)简化为

$$\sigma_f = \frac{\Phi^m \sigma_w}{A} \quad (1.3.7)$$

由于  $A$  为常数,显然,当孔隙度和孔隙形状一定时,岩石电导率  $\sigma_f$  完全取决于海

水电导率  $\sigma_w$ ; 反过来, 当海水电导率  $\sigma_w$  一定时, 岩石电导率  $\sigma_r$  完全取决于孔隙的多少和几何形态。如果合理地设  $A = 1, \Phi = 0.5, \sigma_w = 3.32 \text{ S/m}$ , 则  $\sigma_r = 1.17 \text{ S/m}$ , 比海水电导率低 2.8 倍, 处在海底沉积物的实测值范围内。据 Bennett 等<sup>[46]</sup> 海底沉积物的电导率比海水低 1.5 ~ 4 倍。

由式(1.3.6)、式(1.3.7)还可看出:

(1) 随着埋藏深度的增加, 由于成岩固结作用, 海底沉积物的孔隙度降低, 因而电导率也降低。实测海底饱水的枕状玄武岩电导率约为  $0.1 \text{ S/m}$ , 而深部的低孔隙玄武岩却低到  $0.03 \sim 0.001 \text{ S/m}$ 。

(2) 盐丘、碳酸盐岩、玄武岩因孔隙度比周围沉积物小, 其电导率比周围沉积物小 10 倍以上。使得电磁法能够探测这些对地震方法不利的目标体。

(3) 随着温度降低, 以致降到了海水的冰点以下, 不但  $\sigma_w$  将减少, 而且孔隙中的海水固结成冰, 阻塞了离子的孔隙通道, 导致沉积物的电导率大大降低。这使得电磁法在探测海底永久冻土方面有独特的优势。

(4) 海洋地壳的孔隙度和渗透性与岩石的年龄有关。随着年龄增大, 孔隙度减小, 渗透性变差, 电导率随之减小。海底深钻孔电测显示, 岩石年龄从 0 变到 1 000 万年, 电导率下降了三倍。海洋深部莫霍面由于蛇纹岩化, 可以认为是不透水的, 其电导率低到  $10^{-5} \text{ S/m}$  甚至以下<sup>[60,87,131]</sup>。

由地壳进入上地幔, 岩石主要由橄榄石、辉石之类的矿物构成, 那里十分干燥, 孔隙很少, 含水不到 1‰, 其电导率很低。随着深度加大, 温度上升, 电导率呈指数规律增高<sup>[86,106]</sup>。Constable 和 Duba<sup>[43,60]</sup> 指出位于 30 ~ 100 km 的上地幔, 温度从  $850^\circ\text{C}$  上升到  $1400^\circ\text{C}$ , 电导率也升高了两个级次。大地电磁测深观测到 100 ~ 200 km 深处, 电导率有一极大值, 约为  $0.01 \text{ S/m}$ , 可能与从岩石圈进入地幔因温度升高引起的局部熔融有关<sup>[88]</sup>。

Constable<sup>[56]</sup> 根据大尺度电阻率测井, 可控源电磁测深 (CSEM) 和大地电磁测深 (MT) 把海洋地壳岩石电导率随深度变化的情况归纳为图 1.3。

Palshin<sup>[131]</sup> 根据可控源电磁法的结果把海洋地壳的基本电导率模型总结如表 1.1。表 1.1 和图 1.3 代表海洋地壳电性的基本特点。

表 1.1 海洋地壳岩石电导率模型 (据 CSEM 推测)

岩石	电导率/(S/m)	厚度/km	说明
沉积物	0.75 ~ 2.0	>0	取决于孔隙度、温度、各向同性
破碎玄武岩	0.1 ~ 0.5	0.5 ~ 1.5	取决于孔隙度、温度、各向同性
整块玄武岩	0.03 ~ 0.003	≈5	取决于孔隙密度及其方向 以及温度、各向异性



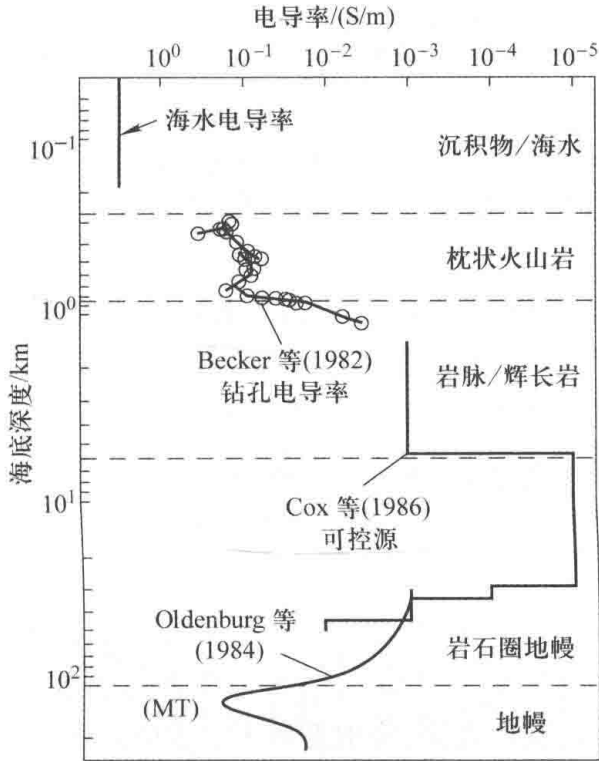


图 1.3 海底电导率随深度的变化(根据钻孔 CSEM 及 MT 资料, 岩石圈年龄为 6.2, 25, 30 m. y)

虽说海水“屏蔽”的主要是高频电磁波,事实上海水对任何频率成分的电磁波都有衰减。只不过频率越高,衰减得越多而已。图 1.4 是根据在圣地亚哥西南距海岸 200 km、水深 3 700 m 的天然电磁场测量结果计算的电场能谱密度<sup>[131]</sup>。图中频率从  $10^{-3}$  Hz 上升到 10 Hz,海底电场的能量密度下降了 8 个级次!注意到场的幅值随进入海水的深度  $z$  按  $E = E_0 e^{-bz}$  呈指数衰减(其中,  $b$  为吸收系数或称衰减常数,也就是趋肤深度的倒数),不难对这种下降作出解释。从图中还可看出,即使是  $10^{-3}$  Hz 这样的低频,海底电场幅值也只有  $10^{-8}$  V/m 的级次,信号是相当微弱的。至于布设在海底的人工场源,也有类似的情况。由于海水的高导电性,大部分电流经过海水形成回路,通过地下介质的电流只占很小的比例,得到的地下介质的信息就更加微弱。必须要求海底仪器具有比陆地仪器更高的灵敏度和精确度。这也是海底环境与陆地不同的又一特点。

海洋地壳具有电的各向异性<sup>[44]</sup>。在洋脊附近,玄武岩喷出在带有狭窄裂隙带的海底,这些裂隙孔隙又为良导性的海水和沉积物所充填。其结果必然观察到平行及垂直洋脊轴方向表现出的电各向异性。随着时间的推移,裂缝又为更具电阻性的低温热液变质作用的产物所充填<sup>[78,123]</sup>。所以在表 1.1 中深部的整