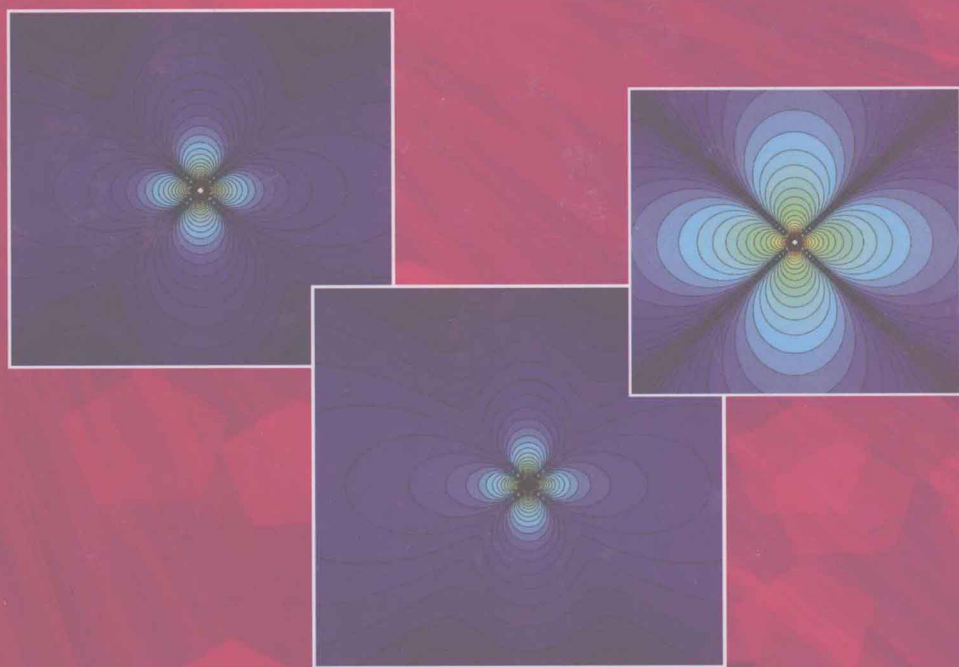


“地—电离层”模式 电磁波传播特征研究

底青云 王妙月 付长民 著
李帝铨 许 诚 卓贤军



科学出版社

“地-电离层”模式电磁波传播特征研究

底青云 王妙月 付长民 李帝铨 许 诚 卓贤军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对“地-电离层”模式下电磁场传播的特征与规律进行了研究,是利用犹他大学的电磁场模拟平台和我们自己搭建的“地-电离层”电磁场模拟平台理论研究成果及数值模拟结果的综合。书中第2章首先介绍通信领域关于电离层电磁波传播的研究成果,试图提高地球内部电磁勘探工作者对这个问题的认识。第3章阐述我们赖以研究的“地-电离层”模式。第4章给出国内利用俄罗斯方法和资料对该模式的一些研究成果。第5章是利用犹他大学平台对“地-电离层”模式所做的一些模拟结果。第6章~第8章为我们自己研究搭建的平台对“地-电离层”所做的一维和三维正演研究成果。第9章是本书对“地-电离层”模式正演研究结果的结论。

本书可供地球物理电磁法行业大中专院校的师生、科研单位的研究人员及相关部门的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

“地-电离层”模式电磁波传播特征研究/底青云等著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037586-5

I. ①地… II. ①底… III. ①电磁场-磁流体波-电磁波传播-研究 IV. ①P353.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第111270号

责任编辑:韩 鹏 张井飞/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年6月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:300 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

“极低频探地（WEM）工程”是以陆建勋院士为首席科学家，组织中国船舶重工集团公司、中国科学院和中国地震局相关电磁方法科学工作者，向国家申请的工程项目。使用大功率固定源发射极低频电磁波进行地下资源勘探，在美国和俄罗斯极低频电磁波的应用研究中都有规划或者计划，但均未正式实施。在项目申请过程中，审查该项目的科学家从对国家负责的角度考虑，比较慎重，历经近 10 年的讨论，最终批准实施了“极低频探地（WEM）工程”项目，在地下资源探测和地震预测两个方向重点开展应用研究，其中地下资源探测的应用研究由中国科学院实施。

WEM 方法和传统的 MT、CSAMT、TEM 等地下资源电磁探测方法不同。由于美国和俄罗斯等发达国家尚在计划之中，没有前人经验可以参考，用大功率固定源激发极低频电磁波探测深部地下资源的理论、方法和技术均是全新的课题。为了确保项目顺利实施，中国科学院地质与地球物理研究所的项目负责人采用走出去和申请中国科学院知识创新项目两条途径开展了项目的预研究。走出去，就是到国际著名的美国犹他大学电磁模拟与反演研究组（consortium for electromagnetic modeling and inversion, CEMI）进行三维电磁勘探理论和方法的学习，利用犹他大学的三维积分方程电磁正反演平台开展含电离层、大气层（或叫空气层）、地球固体层（简称“地-电离层”模式）的电磁波正反演研究。此平台包含用于海洋电磁勘探的三维积分方程电磁波正反演模拟软件，包括内源全空间一维层状介质背景格林函数的计算和海洋中传播电磁波的三维正反演模拟。由于海洋电磁勘探的空间尺度比“地-电离层”模式的空间尺度小很多，因此软件并不能直接应用于“地-电离层”模式，其计算得到的极远场结果不符合理论的预期，也不符合俄罗斯电磁专家公布的结果。经过与犹他大学 Michael S. Zhdanov 教授的共同研究，将软件进行了修改，程序最终可以进行大尺度“地-电离层”模式电磁波的计算。在此基础上，利用这个平台开展了“地-电离层”模式电磁波一维、三维传播特征的数值模拟研究，并在《地球物理学报》等刊物上发表了相应的研究结果。项目负责人回国后将研究工作引向深入，向中国科学院申请了知识创新项目“‘极低频探地工程’大功率电磁勘探理论基础及方法研究”，以此项目为依托，组织研究生及博士后开展了极低频电磁波发射平台用于深部资源勘探的理论方法研究。首先，利用层矩阵法推导了“地-电离层”模式一维层状模型电磁波传播的理论公式，得到了“地-电离层”模式下一维全空间内源格林函数波数域的积分表达式。同时，使用 R 函数法推导了相应的公式，得到了“地-电离层”模式一维全空间内源格林函数的空间域汉克尔积分（贝塞尔函数积分）表达式。在此基础上，得到了采用“地-电离层”模式一维背景格林函数的三维积分方程正演公式，通过与美国犹他大学计算结果及俄罗斯公布的结果反复对比，证明我们的理论公式及软件是完全正确的，并且在处理空气层的处理上，我们的软件严格

考虑了空气层位移电流的影响，这使结果更加完美。

上述研究为项目中资源探测分系统的实施打下了一定的理论基础，本书是这些预研究所取得的成果的综合。为了使本书内容更加完整，同时也编入了通信领域对电离层研究的部分成果，以及采用俄罗斯方法计算的部分结果。

本书第 1 章和第 2 章由王妙月编写，第 3 章、第 5 章与第 9 章由底青云撰写，第 4 章由卓贤军撰写，第 6 章由付长民撰写，第 7 章由李帝铨撰写，第 8 章由许诚编写。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 大功率固定人工源电磁测深新方法的孕育和本书的宗旨	8
参考文献	11
第 2 章 电离层中的电磁波传播	12
2.1 概述	12
2.2 电离层的电性特征和电位移本构方程	12
2.3 均匀各向异性电离层介质中电波的传播	14
2.4 电离层介质中波场的求解	19
参考文献	27
第 3 章 “地-电离层”模式	28
3.1 引言	28
3.2 为什么是“地-电离层”模式	29
3.3 建立“地-电离层”模式的背景知识	30
3.4 “地-电离层”模式的参数	33
参考文献	34
第 4 章 “地-电离层”模式下固体层和地-电离层波导中电磁波场的近似计算	37
4.1 均匀导电半空间表面水平电偶极子的电磁场	38
4.2 不考虑电离层的水平层状介质表面上水平电偶极子和长导线	41
4.3 水平各向异性(二维)介质表面上水平电偶极子	45
4.4 极低频电磁波在波导区传播	48
4.5 模型试验台全国场强分布图	57
参考文献	59
第 5 章 “地-电离层”模式三维积分方程法电磁波场特征模拟	61
5.1 引言	61
5.2 方法	62
5.3 “地-电离层”模式三层介质大尺度有源场的特征	65
5.4 “地-电离层”模式大尺度有源场的多层地球介质及含油储层电磁场特征	70
5.5 “地-电离层”大尺度有源场的典型岩石物性参数的频率响应特征	78
5.6 结论	83

参考文献	83
第 6 章 “地-电离层”模式层矩阵法一维电磁波场特征模拟	86
6.1 层矩阵法	86
6.2 方法的可靠性验证	95
6.3 “地-电离层”模式电磁波场特征模拟	96
6.4 结论	119
参考文献	119
第 7 章 “地-电离层”模式 R 函数法一维和积分方程法三维电磁波场特征模拟	120
7.1 “地-电离层”模式各向同性水平层状大地上电偶源形成的谐变场	120
7.2 “地-电离层”模式三层介质电磁波场特征	124
7.3 “地-电离层”模式多层地球介质电磁波场特征	146
7.4 “地-电离层”模式三维积分方程法正演	157
7.5 小结	171
参考文献	172
第 8 章 不同形状源的电磁波场特征比较及全国场强辐射图	174
8.1 不同类型源的电磁场特征的模拟	174
8.2 全国场强分布图	186
参考文献	191
第 9 章 结论和建议	192

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

地球是一个磁性体,也是一个电性体,地球内部及其周围存在磁场和电场,分别称为地磁场和地电场。随时间变化的地磁场和地电场是相互耦合的,会相互感应,称为地电磁场。研究地球磁场、电场和电磁场的学科称为地球电磁学^[1],简称地电磁学。

地电磁学是研究地磁场、地电场、地电磁场特征和地球内部磁性、电性结构及其应用的科学。它是一门观测科学,需要使用仪器设备对地球内部、地表和空中的电场、磁场及电磁场进行观测,并对观测资料进行地下电性结构、磁性结构及其地质意义的定性和定量的研究和解释。为了进行这种解释,必须事先知道电场、磁场的观测资料和地球内部电磁性结构参数之间的实验和理论关系的定量描述,因而地电磁学也必须进行理论和实验研究,特别是在阐明其地质意义时,必须进行综合研究。

地电磁学既是一门观测科学,也是一门理论、实验和观测相结合的科学。观测设备的研制、探测方法的选择以及观测系统的布设都离不开技术,而且对于地电磁学,观测、实验和技术的这种关系十分紧密。没有先进的技术就不能得到理论研究和地质解释所需的可靠的、高精度的观测资料,没有先进的技术就不能在紧迫的时间限度内迅速完成观测。随着科学技术的发展,电磁法传感器技术不断进步,仪器装备系统趋向智能化、多功能化、集成化,资料处理精细化、解释自动化、软件集成化,方法不断完善,适应性越来越强,这大大促进了地电磁学的发展。同时,方法理论的发展也促进了仪器装备的发展。因此,地电磁学也是一门科学和技术紧密结合的学科。

地球是人类居住的唯一场所,为人类提供了生活必需的粮食、水、能源和矿产资源,同时也给人类带来了诸如火山、地震、海啸等灾难。只有精细了解地球内部(尤其是与人类活动密切相关的表层)的物质、结构和动力学过程,才能充分了解资源、能源的形成和分布规律,才能更准确、更快捷地发现资源与能源,全面认识地质灾害发生、发展过程与机理,从而更准确地预报灾害的发生,最大限度地减轻灾害造成的损失。此外,地下物理参数对国防安全、核原料存储和核废料处理等也具有重要价值。

通过观测和分析地球的地电磁场,可以获得地球内部(包括地壳、地幔、地核)的电性和磁性结构参数,进而揭示地球内部的物质组成、结构及动力学过程。国民经济与可持续发展的需求促进了地电磁学对和人类生存密切相关的浅层电性、磁性及电磁性质结构的应用研究,更促进了电磁科学和技术更紧密的结合,这需要地电磁学和重力地震等其他学科,如地球物理学、地质学、环境科学、工程技术以及电子学、机械学、材料学的综合应用。正是这种国民经济发展和社会进步中对科学和技术的需求、多种相关学科的集成和综合,使得地球电磁学快速发展。20 世纪 90 年代以来,这种快速发展和进步催生了“地-电离

层”模式电磁场特征的研究在通信科学地-电离层波导研究结果的基础上逐步发展起来,国家层面正在资助一种称为固定源大功率 10km 深度范围内一种新的电磁勘探方法(WEM)。这种方法的电磁资料的观测处理和解释需要以“地-电离层”模式的电磁波传播特征的研究结果为基础,因此加速了对这一问题的研究。

1.1.1 地球内部物质的电性、磁性结构和电磁场

地球内部物质的电学、磁学性质作为一级近似是一个圈层结构,可分为地壳、地幔和地核。各圈层内又可分为次一级的圈层。圈层和次一级的圈层既存在垂向和横向变化,也存在一些由于局部地质体或地质构造的物理化学性质异常而形成的局部磁性体和电性体,它们的磁性参数和电性参数与周围物质明显不同。

地球内部存在电场、磁场和相互耦合的电磁场,这些场的起源可分为内源和外源。内源指固体地球内部的源,外源指大气层,特别是电离层、磁层、行星际源,它们主要源于太阳。无论是内源还是外源,它们在地球内部形成的电磁场都和地球的电流体系有关。电磁场除了可由电流体系引起外,也可由物质的磁性、电性性质差异引起。电磁场的分布特征还与地球内部磁性结构和电性结构及其分布有关。对于内源,最初的观点认为地磁场是由磁性物质产生的。1600年, Gilbert 提出地球是一个大磁体的假说^[1]。研究表明,当温度达到居里温度以上时(相应的深度为居里深度,地壳内的这个深度约为 25km)地球介质的磁性消失。因此,除地核以外,在下地壳以下至上地幔以上广大区域,地球物质实际上是没有磁性的。

外源场起源于地表以上的空间电流体系,主要分布在电离层、磁层和行星际空间。这个电流体系主要是由太阳辐射以及太阳内部的源(如黑子、耀斑)造成的电流体系的时间波动,波动形式存在周期和非周期之分。外源场可在地球内部感应出大尺度的电流体系,频率范围从 10^{-5} Hz 到音频,电离层等外电流体系源产生的电磁波在电离层和地球表面电性界面之间来回反射形成导波,具有很大的垂直分量。在离源较远的距离上,这些波成为平面波,可在地球内部穿透很深。Dobrin 在 1960 年已经绘制了全球范围的大地电流系统的分布图^[2]。Sheriff 描述了大地电流体系的一般图样,它们的等值线是螺旋状的,随着太阳位置的变化而变化,在低纬度上每天存在两个极大值和两个极小值,平均方向指向磁经度方向^[3]。地球内部较高频率感应电流体系的外源来自雷电暴,它们在广大区域内分布且具有随机性,然而三个雷电暴中心,巴西、中非和马拉亚(Malaya)岛,则均位于赤道上空。雷电暴的部分电能转换成的音频电磁场在电离层和地球固体界面之间传播,这些场在地面下感应出强度较弱的地电流,形成音频和亚音频的电磁场^[3]。

内源场起源于地壳内的磁性物质和电性物质异常以及外核内的电流体系。外核内电流体系产生的地磁场属于地磁场的主磁场,地壳内的磁性物质产生的地磁场是地磁场的局部异常场,主磁场和局部异常磁场变化缓慢,有时又合称为稳定磁场。内源场还应包括电磁场在地球内部产生的感应场,与稳定场不同的是感应场随时间变化较快。主磁场长期变化的主体特征是向西漂移 0.2° /年和磁极极性的移动和倒转,时间尺度可以很长,大到万年、百万年。感应磁场随时间变化剧烈,时间尺度通常是千分之一秒至几天,主要由

高空电流体系产生,在地球内部产生感应电流和变化的磁场^[4]。此外,还有地壳中的剩磁,它们是在古代某个地质时期的构造运动中形成的,磁场强度和方向常常不变,剩磁方向和岩石形成时的地磁场方向一致。地壳中局部电性物质的电性差异,也可形成局部电场,如溪流两端可产生局部自然电位差异。变化的磁场和电场是相互耦合的,上述外电流体系源在地球内部既感应磁场,也感应电场,统称为感应地电磁场。地电场的时间变化特点和地磁场的时间变化特点是类似的。

电磁场也可由人工源激发,形成人工电场和人工磁场。认识天然源电磁场和人工源电磁场的特征可更好地为由电磁场观测资料研究地球内部电磁参数和结构提供基础。至今已经形成了探测地球内部电性和磁性结构的一系列电磁勘探方法,特别是近20年来,随着国民经济的发展需求,一系列新的有效的电磁勘探方法加速问世。随着市场需求的增加,更新型的电磁勘探方法正在孕育。

1.1.2 电磁勘探方法

地电磁学通过观测、分析和处理地球的磁场、电场、电磁场,来获得地球内部的磁性、电性参数及其分布和结构。由于探测目标、观测设备、观测系统、观测资料及处理和解释方法的不同,形成了多种不同的电磁勘探方法,大致可分为普通地球物理学中的电磁学探测和应用地球物理学中的电磁勘探两大类。

普通地球物理中的电磁探测主要研究低频电磁波(包括零频电磁波)。在地磁学中采用了全球磁异常和区域磁异常的概念,认为全球磁场减去地核主磁场后的主要部分为地壳物质产生的磁场,称为地壳磁场。如果把地核主磁场看成背景正常场,则地壳场为异常地磁场或磁异常。因为地磁的背景场和正常场是相对的,所以存在不同空间尺度的磁异常,如全球磁异常、大陆磁异常、海洋磁异常、区域磁异常和局部磁异常等。利用世界范围分布的地磁台、地电台的地磁和地电观测设备及卫星上的观测设备,可以获得全球和区域的地磁正常场和异常场以及低频的感应大地电流和低频电磁场资料。采用这些资料可以反演地壳磁性结构和地壳至地幔的电导率分布^[1]。利用大地电磁测深原理(magnetotelluric, MT)、各类电磁脉动(pc, pi)观测数据和长周期的地磁变化数据(Sq, Pst, Bay)可获得地壳至下地幔底部的电导率分布曲线^[5]。

徐文耀给出了不同作者利用大陆磁场、海底磁场和海岛磁场测量结果推算的上地幔电导率分布的综合结果^[4]。

这方面的观测和研究结果以及古地磁(剩余磁场)资料的研究结果已被用来确定海底扩张、板块构造边界、地磁极移动和地磁极倒转,这对确定板块构造、运动、驱动力和地球动力学具有重要意义。全球和区域性的背景正常地磁图也可用于飞机和舰船导航。

在地球物理勘探领域,重、磁、电、震、放射性勘探中,电磁勘探方法的分类是最多的,除了应用天然场源的方法以外,还有人工场源的方法。这些方法主要用于资源勘探、工程地质、灾害评估和监测、环境监测等。

1. 天然场源电磁勘探方法

采用天然场源的电磁勘探方法包括自然电位法(self-potential method, SP)、大地电

磁测深法(MT)和音频电磁测深法(audio-frequency magneto-telluric, AMT)等。

1) 自然电位法

自然电位法^[3,6]与普通地球物理中地电台测量大地电流的装置和设备是类似的,即将两根电极埋入地下,测量两根电极之间的电位差,但两者测量的对象有重要差别。后者测量的是大尺度的由外源感应电流体系引起的两点之间的电位差,而将局部的物性差异造成的局部自然电位当成干扰加以去除;前者测的是由地壳浅层物质局部电性差异造成的两点之间的电位差异常,而把大尺度的电流体系造成的电位差当成背景电位差加以消除。有许多这样的局部源可造成两点之间的电位差异常,例如,电阻率为 ρ ,黏滞度为 η 的水溶液流动引起流动路径的两端造成电位差;浓度不同、运动能力不同的多种离子液体的扩散可在两点之间造成电位差异常;页岩电位差;不同的矿物造成的矿化度不同形成的两点之间的电位差;生物化学差异造成的两点之间的电位差等。自然电位法在测量地下水分布和在测井中区分岩性方面有着广泛的应用。

2) 电磁测深法

20世纪50年代初期,Tihonov和Cagniard提出了大地电磁测深法(MT)^[6,7],利用起源于高空电离层和赤道雷击的天然电磁场源,频率范围从 10^{-5} Hz到音频,通过求 E_x 和 H_y (或者 E_y 和 H_x)两者之比,成功地提取到了地下的电学信息。此方法具有探测深度大、成本低、正反演相对简单等优点,但是由于受到场源随机性和距离遥远的限制,信号的频率和大小变化不定,存在着场强较弱、测量精度和工效较低、对测量环境的要求较苛刻等缺点。

另一种利用雷电源在地球内部感应的音频、亚音频天然电磁场的方法称为音频大地电磁测深法(AMT),它和MT是类似的,但探测深度相对较浅。经过近半个世纪的发展,无论是仪器设备还是在资料处理解释上,MT和AMT方法都取得了非常大的进展。

天然场源的信号比较弱,在采集资料时需要进行长时间的垂直叠加,因此完成一个测点数据采集所需的时间比较长,通常观测点距较大,只进行剖面测量,或开展粗网格点的面积性测量,而面积性的细分网格测量难以完成。MT法主要用于地壳上地幔电性结构的探测、油气构造普查和矿产远景构造背景探测等,而AMT方法更适合于进行地壳浅层电性结构的探测。为了解决基于天然场源的MT和AMT遇到的分辨率和信号强度低等问题,人工源探测方法应运而生。

2. 人工源电磁勘探方法

1) 人工源EM法

由于金属矿产勘探的需要,要求电磁场探测地质目标体的分辨率能够得到提高,这促进了人工源电磁勘探方法的问世。从20世纪20年代开始,北欧、美国、加拿大等国家或地区发展了多种人工源电磁法,但是直至20世纪60年代,实用的频率域EM(电磁)发射和接收设备才研制成功,发展了称为FEM或FDEM的频率域电磁勘探方法。早在20世纪30年代,时间域电磁法(TDEM)的研究也已经开始,直到1962年,才有有效的仪器问

世,并在20世纪70年代后迅猛发展^[3]。

1971年Strangway和Goldstein提出了可控源大地电磁测深法(controlled source audio-frequency magneto-telluric, CSAMT)。利用接地导线或不接地回线作场源,在远区观测正交的电磁场分量,计算卡尼亚电阻率。CSAMT经Zonge的实践推广,已经在地热、矿山等各方面得到了广泛的应用。为了满足快速普查矿产资源和地质填图的需要,人工源电磁法也搬到了飞机上,发展了航空电磁法。同一时期零频电磁法(直流电法)特别是高密度电法也一同问世,它们在找矿、工程和环境监测中发挥了重要作用。

2) 激发极化法

虽然地球物理勘探的先驱者Schlumberger兄弟在20世纪早期观测自然电位时就已经发现了激发极化(induced polarization method, IP)现象,但是IP方法直到20世纪50年代中期才被推广应用。激电勘探领域相对于其他勘探方法是一个较新的勘探技术^[3,6,8]。

在直流电法勘探中,人们发现,当向(岩)矿石、地层供入电流时,在供电电流强度不变的情况下,仍能观测到测量电极间的电位差随时间而变,并在相当长时间后趋于某一稳定的饱和值;断电后,测量电极间的电位差并没有即时为零,而是在相当长时间后逐步衰减到接近于零值。这种在充电和放电过程中产生随时间而缓慢变化(时间常数大于 $n \times 10^{-2}$)的附加电场的现象,称为激发极化效应(激电效应),它是岩矿石、地层中的物质在外电场作用下产生随时间可变的极化二次电场的结果。这种勘探方法除了能解释目标区介质的导电率性质外,还能解释目标区介质的离子极化和分子极化的极化率性质。这种多种电性参数的勘探,特别是对矿和水敏感的参数的勘探使得它能更好地确定矿化度、含水性,甚至岩性和岩矿石的蚀变程度等。因此,它在金属矿勘探、地下水勘探、煤田勘探中取得了较好的地质效果^[6]。

激发极化法分为时间域直流激电法和频率域交流激电法。目前采用的交流激电法主要是双频激电法^[9]。观测的激电异常是目前指示浅层各种类型的金属矿是否存在和潜在可能性最直接的方法。然而,它探测的深度尚偏浅,如何加大探测深度或如何应用其他EM方法的复电阻率提取激电参数,是目前研究的一个重点。

3) 探地雷达法

探地雷达法(ground penetrating radar, GPR)是采用超高频电磁短脉冲(1MHz~1GHz)信号传到地下,被目标体反射(散射)回地面被记录,来解释地下电性参数的一种勘探方法。勘探的主要电性参数是介电常数。

将雷达原理用于探地,早在1910年德国的Leimback和Lowy就以专利的形式提出,他们用埋设在一组钻孔中的偶极天线探测地下相对高导电性质的区域,并正式提出探地雷达的概念。1926年,Hulsenbeck指出介电常数不同的介质界面会产生电磁波反射,因此认为可以应用脉冲技术确定地下介质结构。Cook在1960年用脉冲雷达在矿井中作了实验。由于雷达波在地下被介质吸收很严重,20世纪60年代和70年代主要用于探测吸收小的冰层。20世纪70年代,随着数字技术的问世,探地雷达引进了反射地震勘探方

法和处理软件,使得探地雷达的探测分辨率和探测效果都有了很大的提高,已可应用于土层、煤层、岩层等有耗介质的探测,现已在考古、工程地质探测、矿产资源勘探、岩土勘察、无损检测、工程建筑结构调查、地基和隧道地下空洞及裂缝调查、堤坝隧道探查等领域有众多的应用^[6]。探地雷达的分辨率是电磁勘探方法中最高的,可与浅层地震相当。如何既能维持其分辨率,又能进一步提高电磁波的探测深度是当下探地雷达电磁工作者正在努力的方向。

3. 20 世纪 90 年代以来电磁勘探新进展

1) 海洋可控源电磁法

20 世纪 60 年代,为满足军事上海底通信方面的需求,美国海军就开始了海底电阻率探测的研究。他们初步研制成功了海洋电磁勘探用的电场探头和磁场探头^[10]。

美国 Scripps 海洋研究所(SIO)在研究太平洋中洋脊电性结构和洋脊热泉时发现,传统的 MT 方法分辨率无法满足要求,他们借鉴陆地 CSAMT 方法的理念,首次提出了海洋可控源电磁法(marin controlled source electromagnetic method, MCSEM),用来进行海洋岩石圈电性精细结构的探测^[11],并成功研制出深水拖动源^[12]。

技术的进步,加上此方法的分辨率明显高于传统的 MT 方法,使得海洋人工可控源电磁测深法有了新的应用。过去海上油气探测主要采用三维地震,但是在碳酸盐、火山岩、泥底辟等分布区,经常由于信号散射而得不到好的结果。而即使发现了储油构造,构造内储存的是油气、水还是干井也无法判断。含油气的构造在电阻率上表现为高阻,因此可以将海洋电磁勘探方法和地震方法相结合,在地震判断的潜在储油构造上,使用高分辨率的 MCSEM 方法,可以确定潜在的储油构造是否含油气,从而提高打钻的成功率。

由于海洋频率域人工可控源 MCSEM 在找油气上的优点,各大石油企业纷纷进行资助,此方法迅速发展。MCSEM 最成功的标志是,在 2004 年 Exxon Mobil 石油公司在安哥拉地区应用该方法后,部署了 13 个探井,全部获得了工业油气流,从而引发了海洋可控源电磁技术和市场的垄断与瓜分,西方各大石油公司甚至规定没有海洋可控源电磁资料不能钻探,这使得海洋可控源电磁勘探的工作量猛增。

海洋 CSEM 除了使用远场资料,同时也使用近场和过渡场资料,采用电场或磁场资料来解释,而不用卡尼亚电阻率来解释,提高了低频段频率的利用效率,大大增加了探测深度,同时保持了较高的分辨率,这是一个重大的进步。但目前海洋 CSAMT 资料的处理解释手段还比较简单,随着新的处理方法技术和软件的使用,它的探测深度和分辨率有望进一步提高。

2) 陆上和海洋 MTEM

Kaufman^[13]给出了使用时间域瞬变电磁方法(TEM)的理论基础,表明测量电流源的电场可以很好地分辨高阻层。Rocroi^[14]发明了采用偶极电流源发射并在源电流被关掉时接收信号的方法,源电流的波形是正负交替的方波,即测量地球对一系列极性交变阶跃

电流源的响应。Strack 等^[15]介绍了一个长的偶极电流源(1~2km)和长偏移距(离源 5~20km 接收)接收 TEM 的方法,称为 LOTEM(long off set transient electromagnetic method)用于陆上油气探测。MTEM(multi TEM)是在这些传统的瞬变电磁法基础上发展起来的,与传统瞬变电磁法(TEM)的主要差别是其接收电压和输入电流是被同时测量的,通过接收电压的时间记录和输入电流的时间记录求解褶积从而获得地球的脉冲响应。这个方法可以用来探测和确定电阻率异常体的空间位置,并鉴别盐水与新鲜水、低阻与高阻(气、油等碳氢化合物是高阻)。MTEM 方法于 2005 年获得了美国专利局批准。

实际上早于陆上的工作,MTEM 的试验研究先在海上进行了实施,多伦多大学的海底 TEM 成像系统就是一个例子。Edward 等在 1987~1997 年发表了多篇论文并报道了这方面的研究结果,但是他们没有认识到对于每个电流发射和电位接收对的记录都要有实测系统响应的重要性。所以这些早期的海上工作未能使 MTEM 首先在海洋应用上获得突破。而在陆地上,在专利申请前,爱丁堡大学等已在 1992~1998 年在欧盟 THERMIF 计划的资助下,在法国的 Illiers laville 气田上开展了 MTEM 的研究工作,但同样未能使 MTEM 方法用于探测油气水的研究计划获得成功。

1998~2002 年,Ziolkowsk 和他的学生 Wright 继续分析和处理这些在 THERMIF 计划中测量的数据时发现了要对每个电流源发射和电位接收对都必须测量系统响应的真谛^[16]。并在 2004 年按这一要求在法国气田补测了资料,最终使 MTEM 在陆上气田的探测中获得了成功。其后在海上也得到了应用,使 MTEM 在北海油田等探测中获得成功。理论研究表明,当采用编码源时将使其具有更高的垂向分辨率,并显示时间域海上 MTEM 比海上频率域可控源电磁法(MCSEM)具有更好的观测结果^[17]。

3) 广域电磁法

国内何继善院士提出了广域电磁法的概念,放弃了 MT 和 CSAMT 传统上使用的由电磁场分量比值得到的卡尼亚视电阻率,而是直接由对已知源强度的电性源或磁性源产生的大地电场和磁场观测值和观测系统装置系数以及大地对源的理论脉冲响应函数来得到视电阻率。大地响应脉冲函数包含了大地电导率分布的信息,因此可利用这个新定义的视电阻率来反演得到地下电导率分布结构^[18,19]。

该方法相对于传统 CSAMT 法明显的优点是反演可直接使用近场和过渡场的资料,省去了近场与过渡场校正。在传统方法中,通常是将近场、过渡场资料进行切除或者校正,而切除将损失有用的资料,校正则会带来误差。由于近场和过渡场资料的信号强度相对于远场资料明显增强,携带有来自深部的电性信息,因此广域电磁法有希望在保持勘探分辨率的条件下使探测深度突破传统 CSAMT 方法 1~2km 的勘探深度限制。

4) 理论研究进展

前述 20 世纪 90 年代,由于探测洋中脊电性结构和深水油气勘探需求的促进,海洋电磁勘探的设备、方法和技术均有了巨大进步,成为海洋深水探测领域不可缺少的勘探方法。除了设备和方法技术的进步之外,理论研究在促进频率域海洋 CSEM 和时间域海洋 TEM 的进步中也是功不可没。

无论是频率 MCSEM 还是时间域海洋 MTEM 都采用了拟地震的阵列观测,可获得地下电性结构多重覆盖的信息。MCSEM 摆脱了传统上只使用远场资料而把近场资料和过渡场资料当成畸变资料的不利情况。在时间域,传统上虽然也采用近场资料,但是往往采用将观测的早期时间信号切掉的方法来分离空气波和有用信号,这种方法存在较大的误差。新的海洋 MTEM 方法中,采用将观测资料和仪器设备发射和接收系统响应的反褶积的方法直接获得大地的脉冲响应。在获得脉冲响应中,空气波和二次信号场自动分离,从而使地下电性结构的脉冲响应信息更加可靠。此外,无论是频率域还是时间域,由于使用了近场资料,传统的基于卡尼亚视电阻率的处理解释方法不再适用,而是直接采用电场和磁场分量资料来进行处理和解释,这在电磁勘探方法中是一种新的尝试。20 世纪 90 年代以来,经过许多电磁科学工作者的努力,对于一维、二维和三维资料的直接处理在理论上已经得到了比较完善的解决,其中最典型的是电场和磁场的三维积分方程正反演方法^[20]。

前述提到的广域电磁法,虽然使用了近场、过渡场和远场全域资料,但仍然采用了新定义的、与观测装置有关的视电阻率。它的长处是可以和传统的直流电法的装置视电阻率对应,后者已有深入研究,因此在解释观测的视电阻率时有其方便之处,但直接使用电场和磁场的积分方程法进行数据正反演应该是更加方便的。

采用包括近场、过渡场、远场在内的全场资料,或者主要采用近场过渡场资料的优点是,既可以提高探测的垂向横向分辨率,又可以提高探测深度。

1.2 大功率固定人工源电磁测深新方法的孕育和本书的宗旨

1.2.1 时代呼唤大功率固定源电磁探测新方法

随着我国经济的高速发展,建设规模日益扩大,对石油、天然气、煤炭以及各种金属、非金属矿物原料的需求与日俱增。原有的特别是浅部的矿产资源,许多已开采殆尽。保有的资源储量远远满足不了经济发展的需要,许多资源要从国外进口。石油、铁矿石等重要资源的价格不断上涨,资源短缺的态势已经严重阻碍了经济的快速发展,加大深部矿产勘查开发的力度,迫在眉睫,势在必行!

勘查地下地质构造和各类矿产资源的电磁勘探方法,是一种不可或缺的地球物理勘查方法。勘探深度更大、效率更高、更先进的电磁法勘探仪器,是实现深部找矿的必备工具。

前述 1.1.2 节中,20 世纪 90 年代以来发展的电磁勘探新方法,如频率域海洋可控源电磁法 MCSEM 和陆地、海洋时间域 MTEM 以及广域电磁法等,由于应用了阵列信息多次覆盖技术,利用了近场信息,采用了更先进的处理解释方法,使得这些方法既保持了高分辨率,又提高了探测深度,达到了浅层油气的储存深度 2~3km。这可满足我国向深部第二成矿带资源战略目标的部分需求,但是探寻更大深度资源的目标难以达到。

要提高探测深度,除了要采用 1.1.2 节中提到的先进方法技术以外,提高人工源的功率是另一个重要措施。近年来,一种大功率固定源的电磁测深方法正在孕育并渐渐浮出水面,它在保持现有人工源电磁探测法分辨率的基础上有望将探测深度扩大至 10km,关

于这一点的有关文献将在第3章中提到。

1.2.2 大功率固定人工源电磁测深法的基本思路

大功率固定源电磁测深法的基本思路是在高阻区建设一个大型的固定电流发射源,电流源AB极的长度可达百千米的量级,发射0.1~300Hz的电磁波进行资源探测。由于高阻区电流密度可穿透到很深的深度,从而两台500kW的发射设备就能覆盖全国国土量级的范围,发射足够强度的电磁波可以用于0.5~10km深度范围内的资源探测。在离源1000km范围内信号强度可比天然源高出20dB,3000km范围内高出10dB。在发射时,用30~100台(原则上可以使用足够多的观测设备同时观测,使用观测设备的数量可自由增加)观测设备可组成观测剖面或观测方阵,就能够获得较为密集的多次覆盖电磁波数据,从而可以在保持已有人工源电磁观测法分辨率的基础上,使探测深度延伸至10km深。如果此方法获得成功,就可以满足0.5~10km深度范围内资源的普查与详查,特别是在找油气时可和地震方法相结合,在地震工作获得可能的油气圈闭位置(二维剖面;三维面积性)的基础上,布置二维或三维大功率固定源电磁测深点(二维剖面;三维面积性),获得相应的电磁数据。利用与频率域海洋CSEM和时间域陆地、海洋MTEM相似的方法来确定油气圈闭是否含油。当大功率固定人工源电磁测深法用于寻找金属矿时,当然也能像TEM、IP、CSAMT等方法一样,可以获得足够分辨率的电磁测深结果,同时将探测深度大大提高,这是一个诱人的设想。

1.2.3 大功率固定人工源电磁测深法遇到的新问题及解决办法

首先要找到能建设固定源的地区,其次要研制大功率发射源设备及信号同步接收系统(含信号可靠性的监测系统),第三要研究大尺度大功率人工固定电源发射的电磁波传播特征。在CSAMT方法中,由于收发距小于电离层的高度,可以忽略电离层对电磁场的影响,而对于大功率固定源,电离层的影响是不能忽略的。此外,传统的CSAMT采用远场资料进行解释,而大功率固定源激发的场覆盖全国各地,离源不同距离处的近场、过渡场、远场、超远场(波导区的场)的全场资料都要被使用,以勘探相应区域内的地下资源。因此,无论是从对场特征认识的需要,还是从资料处理解释中提取地下电性结构的需要,都需要在考虑电离层、空气层和固体层的情况下,对大功率固定源在全国范围内激发的电磁场特征进行研究。这一方面,对于过去从事地下电性结构勘探的电磁工作者是不考虑的,已有人工源CSAMT、TEM、MTEM、MCSEM等也不进行研究;另一方面对于从事通信科技的工作者,他们感兴趣的是电离层和固体地球表面之间波导层的电磁波传播。对普通地球物理中的空间地球物理工作者,他们则关心电离层中波的传播。事实上,对于地球物理勘探领域关心的是地下电磁波传播、空间地球物理工作者关心的是电离层中电磁波传播以及通信科技工作者关心的是电离层和地表之间波导层的电磁波传播,当考虑大功率固定源电磁勘探时,这三者是相互耦合的,应该建立一个包括电离层、空气层和固体层的“地-电离层”模式来研究大功率固定源在其内部激发的电磁波定量关系和传

播特征。只有对其定量关系和传播特征有了一个很好的认识,再结合已有 MTEM、MC-SEM、CSAMT、广域电磁法等,以及三维电磁波正反演研究的进展,才有可能发展 10km 深度范围内的大功率固定源资源勘探新方法。

1.2.4 本书的宗旨

为了解决 1.2.3 节中所述的大功率固定人工源电磁测深法遇到的问题,作者 2007 年访问了美国犹他大学,以犹他大学电磁场正反演软件系统为平台,开展了“地-电离层”模式电磁场特征研究。由于犹他大学的 Zhdanov 教授参与过海洋电磁法的研究项目^[21,22],因此在这个平台上有计算内源层状介质电流源在层状介质内激发电磁场的执行程序,我们将其修改成“地-电离层”模式。海洋中计算的层状介质是空气层、海水层和固体层,源放在海水中或海水的底部,涉及的水平空间尺度相对较小,且海水层是波的吸收层;而“地-电离层”模式,计算的层状介质是电离层、空气层和固体层,源放在空气层的底部,涉及的水平空间尺度很大,且空气层是一个波导层。在试验中,我们发现,对于如 CSAMT 法电磁测深的电磁场传播问题,犹他大学程序的计算结果正确,而对于数千千米尺度的电磁场传播问题,计算结果错误。我们与 Zhdanov 教授合作共同解决了这个问题,使执行软件能够计算大功率固定源在水平数千千米范围内的空气、固体层中激发的电磁场。在此基础上我们对一系列模型的计算结果进行了研究,包括一维和三维,并对其特征进行了总结。但在该平台上,目前尚未考虑空气层位移电流的影响,而在“地-电离层”模式里,这个影响实际上是不能忽略的。

回国后,为了搭建自己的“地-电离层”模式的电磁波传播模拟平台,我们申请了中国科学院知识创新项目[“极低频探地工程”大功率电磁勘探理论基础及方法研究,kzcx2-yw-121],组织科研人员和学生,从频率波数域层矩阵法和频率空间域 R 函数法两个方向,研究了“地-电离层”的内源有源电磁波传播的理论公式,并编写完成了全部软件。采用电源布设在固体层和空气层的分界面上,空气层考虑为一层,其波数 k 分为考虑位移电流和不考虑位移电流两种情况。电离层考虑为半无穷空间和层状半空间(最上一层为半无穷空间),固体层可考虑为半无穷空间和多层半空间(最下一层为半无穷空间)多种情况。固体层本身又分为考虑和不考虑横向不均匀两种情况,对于考虑横向不均匀的情况,背景场用上述方法求得,不均匀体的异常用三维积分方程法获得。初步搭建了我们自己的“地-电离层”模式电磁波传播模拟平台。这个平台与传统通信领域的“地-电离层”波导模式^[23]有所不同。在后者,主要研究空气中的源在电离层和固体层之间波导层中的波,并采用平板和球层两种情况;我们搭建的平台则主要采用平板模式,可同时计算空气和固体之间的电源在电离层、空气层、固体层中产生的电磁波定量特征。对于水平距离范围小于地球半径的情况,其精度已经足够。

本书是利用犹他大学的电磁场模拟平台和我们自己搭建的“地-电离层”电磁场模拟平台的理论研究结果及对一系列模型模拟结果的综合。为了内容的完整性,增加了通信领域关于电离层电磁波传播的研究成果,试图提高地球内部电磁勘探工作者对这个问题