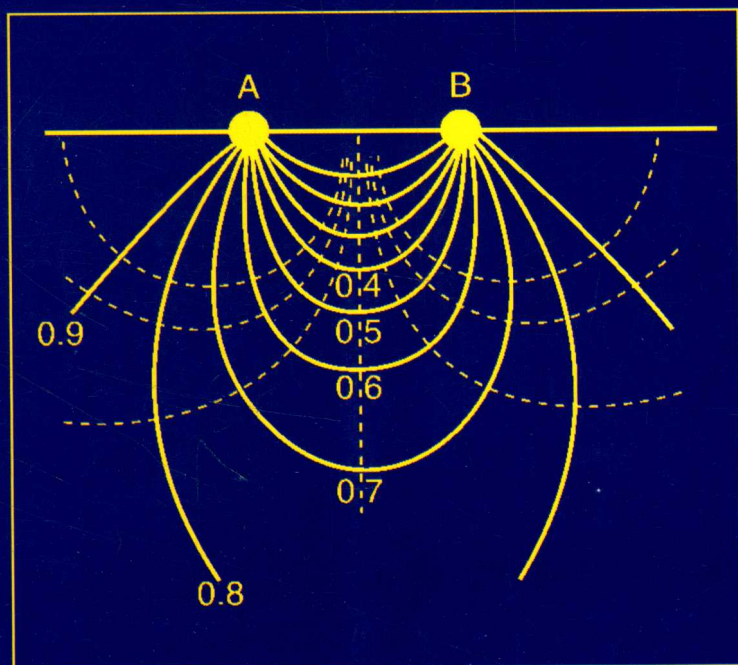


GEOPHYSICAL ELECTROMAGNETIC
THEORY AND METHODS

地球物理 电磁理论与方法

〔美〕 MICHAEL S. ZHDANOV 著
李貅 底青云 薛国强 译



科学出版社

地球物理电磁理论与方法

〔美〕 MICHAEL S. ZHDANOV 著

李 貅 底青云 薛国强 译

科学出版社

北 京

图字：01-2011-7445 号

内 容 简 介

本书详细介绍了地球物理电磁法勘探理论方法与应用，是原著作者多年来在电磁场理论与技术上的研究成果，反映了当今国际上电磁法勘探的前沿问题。

本书可供大中专院校地球物理相关专业师生以及科研、生产单位工程技术人员参考使用。

Geophysical Electromagnetic Theory and Methods

Michael S. Zhdanov

ISBN: 978-0-444-52963-3

Copyright ©2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

This edition of *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods* by Michael Zhdanov is published by arrangement with ELSEVIER BV of Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, Netherlands.

本书英文版 *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*, 作者 Michael Zhdanov, 由 ELSEVIER BV 出版, 地址 Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, Netherlands。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理电磁理论与方法/(美)日丹诺夫(ZHDANOV, M. S.)著; 李貅, 底青云, 薛国强译. —北京: 科学出版社, 2015.11

书名原文: *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*

ISBN 978-7-03-046402-6

I. ①地… II. ①日… ②李… ③底… ④薛… III. ①地球物理场-电磁理论 IV. ①P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 275008 号

责任编辑: 张井飞 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 倩 / 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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 36 1/4

字数: 830 000

定价: 175.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者序言

地球物理方法以对地球介质中各种物理场特性的研究为基础。其中,人工源或者天然源电磁场是地球物理中应用最广泛的方法之一。电磁法是应用地球物理三种主要技术之一(另外两种方法分别是地震方法和位场方法)。本书系统地介绍了电磁场地球物理方法的基础理论和近年来的最新研究成果。

本书共分为四个部分,包括电磁场基础理论与应用以及新兴的海洋电磁勘探方法。第一部分介绍了场的理论,这对于理解地球物理电磁场的理论是很有必要的;第二部分是地球物理电磁场理论的基本要素,包括从麦克斯韦方程组的基本描述到复杂三维地电条件下电磁场的模拟方法;接下来的第三部分介绍电磁法的几个重要问题,包括电磁反问题病态方程正则化解的基本原理、一维和多维电磁场数据成像和反演以及常规解释技术等;最后的第四部分介绍了几种具体的地球物理电磁方法。

地球物理中的电磁场理论是一个半世纪以前在 Ampere、Faraday、Maxwell、Gauss 等众多科学家的研究工作的基础上建立的,最突出的地球物理勘探技术进步发生在 20 世纪末并一直延续到 21 世纪初。在本书中,作者着重强调物理、数学方面的伟大发现和勘探方法的实际应用之间的相互联系。作者也要提醒读者的是,我们所理解的电磁场基本定理直到现在仍然在不断地发展。

麦克斯韦方程组发展并成为公认的电磁场基本定理是在 19 世纪上半叶。在经典理论中,电磁场特性由矢量电场和磁场来刻画,麦克斯韦方程组系统地表示了这些矢量场的微分方程组。

在过去十年中,麦克斯韦方程组的另外一种获得方法也得到了发展,这种获得方法是基于差分形式的代数理论,得出一个非常紧凑和对称的微分形式的方程组,本书也描述了这种差分形式的方程组(第 1 章、第 2 章、附录 A 和附录 B)。这种新的推导方法和对电磁场理论基本定律的理解,对以后电磁法的发展,具有很大的发展推动力。这就是作者把最新研究成果加入到本书中的原因。同时,在第 3 章,使用麦克斯韦方程组的传统吉布斯矢量形式,描述了经典的电磁场理论。对于更注重实践应用而不是注重电磁学理论新发展的读者,可以跳过这些专注于差分形式的章节(第 1 章和第 2 章),直接阅读第 3 章中的有关麦克斯韦方程组的传统理论。

在过去的几十年中,另外一个勘探电磁法的关键发展是与地球物理数据的正演模拟和反演有关的计算方法得到了发展。第 4 章~第 6 章主要论述了各种不同的正演计算方法,首先从地下电磁感应的简单模型开始,研究电磁场在水平层状介质中的传播特性,发展出电磁场在复杂非均匀地电结构条件下数值模拟计算方法。第 7 章~第 9 章主要讨论了电磁数据反演和成像重要问题,这些问题也普遍存在于所有的地球物理方法中。它包括地球物理反问题正则化反演的原理以及有效的反演数值解法,这些方法为电磁数据的反演提供了有效的工具,但是,在目前多发和多收电磁数据采集系统下,局限于巨大的计算量,反问题研究

遇到了一定的困难。然而,存在另一种方法可以解决这一问题,这种方法基于电磁场的全息摄影和偏移成像原理,从光学和无线电的全息成像和地震偏移成像应用扩展到电磁方法。第9章综述了电磁偏移成像的数学物理方法。

这样,本书前三部分主要包括应用电磁地球物理的理论基础,最后第四部分主要包括地球物理电磁法。第四部分的第10章列举了岩、矿石的电磁参数和特性。第11章讲述应用地球物理中的电磁场的激发和测量等实践方面的有关内容。随后的四章中,讲述了广泛应用的地球物理方法,如直流电法和激发极化法、大地电磁法、可控源电磁法,还有海洋、航空、测井以及其他方法等。这几章也包括一些最新内容,这些新内容源于 M. S. Zhdanov 和 G. W. Keller 合著的《勘探地球物理地电方法》(1994)。特别强调的是,第四部分包括如航空电磁感应法、海洋大地电磁以及用于油气勘探的可控源电磁法的基本原理。本书每一章的最后都附有参考文献。

总之,出版本书的目的是向读者提供电磁场理论基础并指导矿产和能源地球物理勘探。

在本书中,作者列出了由电磁模拟及反演联盟 (CEMI) 研究的成果,这些都属于犹他大学地质与地球物理系 (<http://www.cemi.utah.edu/>) 设立的应用地球物理方面的研究和教育项目支持的研究成果。CEMI 是一个由世界上许多石油和矿业公司及地球物理组织发起和资助的联盟,作者特别感谢 CEMI 联盟成员对本研究做出的贡献。

作者同时感谢莫斯科国立大学和犹他大学的众多老师、同事和学生,尤其是长期与作者合作且成果颇丰的 Mark N. Berdichevsky 教授,在他的引导下,作者对电磁地球物理开始产生兴趣。

作者衷心感谢莫斯科国立大学 Vladimir I. Dmitriev 教授,还有科罗拉多矿业学院 George V. Keller 教授,他们为本书提供了部分材料。

作者同时感谢 Frank Brown 教授和犹他大学地质与地球物理系其他同事们,他们为作者的研究营造了便利的环境。也感谢作者众多研究生以及研究助手,他们与作者共同完成了很多令人激动的地球物理电磁法项目。另外,特别感谢作者以前的学生 Leif Cox 博士,他仔细地阅读了样稿并给出了大量建设性的意见和校正。

最后,作者深深地感谢爱妻 Olga Zhdanov 在成稿过程中给予的鼓励。

Michael S. Zhdanov

盐湖城,犹他州

2008年10月

译者自序

作为一种重要的地球物理勘探方法,电磁法广泛用于资源、环境和工程等领域,在我国经济建设中发挥了重要作用。近年来,对电磁场理论的研究以及对电磁法探测技术的改进越来越受到人们的重视。

由国际著名学者考夫曼与凯勒主编、王建谋翻译的《频率域和时间域电磁测深》及由纳比吉安主编、赵经祥等翻译的《勘查地球物理——电磁法(第一卷)》,分别于1987年和1992年在国内出版,这两本专著以及国内众多专家、学者的专著对我国从事电磁法研究与应用的科研人员、工程技术人员起到了重要的指导作用。随着科学技术的飞速发展,知识更新和信息传播的速度越来越快,不少电磁法及相关应用领域的人员希望有一本继考夫曼、纳比吉安译著之后,可以使科研人员、研究生、广大野外工作人员及初学者较方便地了解和学习的、能够反映世界上最新研究成果的专著。美国犹他大学的日丹诺夫教授是国际上著名的电磁学家,由他主编的*Geophysical Electromagnetic Theory and Method*被认为是目前世界上比较全面介绍电磁法勘探原理、方法、技术的书。为了方便不同使用者参阅,在众多合作者的支持和研究生的帮助下,我们决定翻译并出版这本名著。

本书序言由中国科学院地质与地球物理研究所薛国强翻译,中国科学院地质与地球物理研究所底青云和长安大学李貅校对;第1章由李貅翻译,中国科学院电子学研究所武欣和薛国强校对;第2章和第3章由长安大学研究生任志平翻译,底青云校对;第4章和第5章由中国科学院地质与地球物理研究所周楠楠翻译,中国地质大学李建慧和薛国强校对;第6章由李貅翻译,薛国强和东华理工大学研究生崔江伟校对;第7章由长安大学博士生范涛翻译,辽宁工业大学王贺元校对;第8章和第9章由长安大学博士生张莹莹和李貅翻译,王贺元、薛国强、底青云校对;第10章由中国科学院地质与地球物理研究所研究生钟华森翻译,薛国强、底青云校对;第11章~第13章由博士生陈卫营、底青云翻译,薛国强、崔江伟、中国科学院地质与地球物理研究所孔祥儒、付长民校对;第14章~第16章由博士生李海和薛国强翻译,王若、底青云校对;附录由钟华森翻译,王贺元校对。全部译稿由犹他大学万乐教授核对。全书插图由薛国强翻译绘制,底青云校对。

本书得到国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”(ZDYZ2012-1-05)以及多项国家自然科学基金(41174090, 41174108)的资助,特别是得到刘光鼎院士和吉林大学殷长春教授的书面推荐以及科学出版社的大力支持,才顺利出版,谨在此表示衷心感谢。

考虑到中文语言的通顺性,同时兼顾原著的本意,本书采取了逐句翻译和意译相结合的方式。但由于译者水平有限,对原著作者的思想理解得不一定全面、正确,书中疏漏和不妥之处在所难免,欢迎读者提出宝贵意见和建议。

译者

2013年10月25日于北京

Introduction to Chinese Edition

The electrical method was one of the first geophysical exploration methods to become widely used at the end of the 20th and the beginning of the 21st centuries in oil, gas and mineral deposit exploration. The development of a practical use of electrical fields to explore the earth's interior began with the pioneering work of the Schlumberger brothers, Conrad and Marcel, who went on to build one of the world's most successful geophysical service companies.

Since the time when the Schlumberger brothers began their work, electrical prospecting methods have been transformed dramatically, starting from a simple resistivity method and developing into the complicated modern technology based on complex electromagnetic (EM) surveys with both natural and controlled sources. Not only the methods and equipment have changed, but our ideas about EM fields, their generation and measurement, and geoelectrical models used for interpretation have advanced tremendously. For many years, the basic model for interpretation was a one-dimensional (1D) model of a layered earth, or a two-dimensional (2D) model. However, in the last decade of the 20th century and the first decade of the 21st century, geophysicists began using three-dimensional (3D) models for interpretation as well. This advancement has required developing the corresponding mathematical methods of interpretation, based on the modern achievements of EM theory and computer science in numerical modeling and inversion.

It is important to emphasize that the areas of practical application of electrical and EM methods are very diversified. EM measurements are conducted now on land, in the air, in the sea, and within boreholes. These methods are applied in mining industry, oil and gas exploration, geotechnical, engineering, groundwater and environmental geophysics, and regional and crustal tectonic studies. The first successful application of electrical methods was in the exploration for the highly conductive metal ores. They were applied in the exploration for massive sulfide ore fields and disseminated metal ores. Even with the development of other applications in more recent years, the use of electrical methods in the search for metallic ores remains one of the most important commercial applications.

There is a large area of application of electrical methods in groundwater studies as well, because the electrical resistivity of a rock is so closely related to its water content. Another area of application is the search for geothermal resources, because the resistivity of high - temperature geothermal zones is very low. In exploration for oil and gas, joint applications of the seismic and electrical methods have been found to be very successful, especially in recent years.

The diversity of problems defines the variety of electrical and EM methods that can be

applied. The number of different modifications of EM methods is extremely large, because we have the possibility of using different types of transmitters and of measuring the different components of EM fields in a variety of receivers.

This book presents practically all modern geophysical EM methods based on using both the natural and artificial (controlled) sources, which represent the major techniques of geophysical exploration for mineral resources. It was originally published in English by Elsevier. I am very pleased that this book will be available now to a large community of Chinese geophysicists.

I am thankful to Dr. Qingyun Di for her support of this publication, and to Dr. Le Wan for his help in preparation of the Chinese translation.

Michael S. Zhdanov
Salt Lake City, Utah
April, 2015

目 录

作者序言

译者自序

Introduction to Chinese Edition

第一部分 场论介绍

第 1 章 矢量场的微分理论和微分形式	3
1.1 场理论基本微分关系	3
1.1.1 物理场的概念	3
1.1.2 向量的点乘 (标量) 和叉乘 (矢量)	5
1.1.3 矢量微分算子	6
1.1.4 矢量场和标量场积的微分	9
1.2 场积分关系基本理论	9
1.2.1 场的能流密度和通量的概念	9
1.2.2 高斯定理及对应的矢量公式	11
1.2.3 斯托克斯定理及对应的矢量公式	12
1.2.4 格林公式	13
1.3 场理论微分形式	14
1.3.1 微分形式的概念	14
1.3.2 线性形式的外积 (楔积) 运算	17
1.3.3 三维欧氏空间中微分的规范表达	18
1.3.4 外导数	19
参考和推荐阅读文献	21
第 2 章 场论基础	22
2.1 场的产生	22
2.1.1 调和函数和刘维尔定理	22
2.1.2 标量场和矢量场的唯一性判定	24
2.1.3 场产生的条件	25
2.1.4 场源及其物理意义	26
2.1.5 涡流场及其物理意义	28
2.1.6 源场和涡流场	30
2.2 稳态场方程及其解	31
2.2.1 标量场和矢量场的泊松方程	31
2.2.2 点源和狄拉克函数	32
2.2.3 拉普拉斯方程的基本格林函数	33

2.3 稳态场的标量位和矢量位	35
2.3.1 源场的标量势	35
2.3.2 涡流场的矢量势	36
2.3.3 亥姆霍兹定理及矢量场的分类	37
2.4 时变场及其微分形式	39
2.4.1 四维空间中的时变矢量场及其微分形式	39
2.4.2 微分形式方程	40
2.4.3 安培微分形式	42
2.4.4 法拉第微分形式和四元势	43
2.4.5 时变矢量场方程	44
参考和推荐阅读文献	44

第二部分 电磁场理论基础

第 3 章 电磁场方程	47
3.1 麦克斯韦方程及边界条件	48
3.1.1 电磁场基本方程	48
3.1.2 麦克斯韦方程的物理意义	50
3.1.3 矢量场的边界条件	55
3.1.4 均匀介质中的场	58
3.2 时谐电磁场	59
3.3 电磁场能量及坡印亭定理	61
3.3.1 辐射条件	61
3.3.2 时域坡印亭定理	62
3.3.3 时域能量不等式	63
3.3.4 频域坡印亭定理	64
3.4 电磁场的格林张量	66
3.4.1 频域格林张量	66
3.4.2 时域格林张量	67
3.5 互易关系	68
3.5.1 洛伦兹定理	68
3.5.2 格林张量互易关系和电磁场	69
3.5.3 电磁场的格林张量定理	70
参考和推荐阅读文献	72
第 4 章 大地中的电磁感应模型	74
4.1 电磁场模型	74
4.2 稳定电磁场	75
4.2.1 静电场与静电位	75
4.2.2 静电位的边界条件	77
4.2.3 特定电荷分布的静电场计算	78

4.2.4	稳定电流场与静电场的类比	79
4.2.5	直流、稳定磁场和毕奥-萨伐尔定理	81
4.2.6	均匀大地的点源和偶极子源	83
4.2.7	各向异性大地中的直流电位	87
4.3	导电介质中的扩散电磁场	90
4.3.1	单频准静态电磁场	90
4.3.2	均匀介质中的平面电磁波	92
4.3.3	电磁位	96
4.3.4	均匀介质中电偶极源的准静态场	98
4.3.5	球面电磁波	100
4.4	电磁波	103
	参考和推荐阅读文献	104
第 5 章	水平层状介质中的电磁场	105
5.1	层状大地中传播的平面波	105
5.1.1	水平层状介质中的平面电磁波	105
5.1.2	波阻抗的低频特性	110
5.1.3	频率窗的定义	112
5.2	水平层状介质中电磁场计算的波谱法	113
5.2.1	空间域的傅里叶变换	114
5.2.2	水平层状介质中的点源直流场	116
5.2.3	层状大地中的点源电场	124
5.2.4	水平层状介质中的电偶源直流场	126
5.2.5	基于汉克尔变换的水平层状介质中的电场表达式	127
5.3	磁层源在水平均匀介质中产生的电磁场	129
5.3.1	水平层状介质中的波数域电磁场	130
5.3.2	阻抗比的里普斯卡亚-万晏公式	132
5.3.3	水平均匀大地中电场的水平极化和简化的空间波数谱	133
5.4	层状大地中电偶源和磁偶源产生的电磁场	135
5.4.1	水平电偶源在水平层状介质表面产生的频率域电磁场	136
5.4.2	水平电偶源在均匀半空间表面产生的电磁场	140
5.4.3	垂直磁偶源在水平层状大地表面上方产生的频域电磁场	142
5.4.4	垂直磁偶源在均匀半空间表面产生的磁场	144
5.4.5	近区场和远区场	145
5.4.6	计算瞬变电磁场的频率域方法	147
5.4.7	偶极源在均匀半空间内及其表面产生的近区和远区瞬变电磁场	149
	参考和推荐阅读文献	156
第 6 章	非均匀介质中的电磁场	157
6.1	积分方程法	157

6.1.1	电磁场的正常 (背景) 场和异常场	157
6.1.2	异常场的坡印亭定理和能量不等式	158
6.1.3	二维积分方程法	159
6.1.4	二维模型电磁场一次变分 (弗雷谢导数) 的计算	161
6.1.5	三维积分方程法	163
6.1.6	三维模型电磁场一次变分 (弗雷谢导数) 的计算	164
6.2	背景电导率不均匀模型中的积分方程法	166
6.2.1	非均匀背景电导率模型	167
6.2.2	不均匀背景电导率的积分方程法的误差控制	169
6.3	电磁场的线性和非线性积分近似法	171
6.3.1	玻恩和改进玻恩近似	172
6.3.2	准线性近似和张量准线性方程	172
6.3.3	使用多重网格方法的准线性近似	173
6.3.4	三维电磁场的准解析解	174
6.3.5	背景电导率变化模型的准解析近似	176
6.3.6	二维电磁场的准解析解	178
6.3.7	局部非线性近似	179
6.3.8	局部准线性近似	180
6.4	差分方程法	182
6.4.1	场方程和边界条件	182
6.4.2	电磁位方程和边界条件	185
6.4.3	边值问题的差分近似	186
6.4.4	麦克斯韦方程组的交错网格离散化	186
6.4.5	二阶差分方程的平衡法离散化	189
6.4.6	电磁位微分方程的离散化	193
6.4.7	边值问题的有限元解法	195
	参考和推荐阅读文献	197

第三部分 电磁场数据反演成像

第 7 章	求解不适定反问题的原理	205
7.1	不适定反问题	205
7.1.1	适定问题与不适定问题的表述	205
7.1.2	正确子集	206
7.1.3	不适定问题的近似解	206
7.2	正则化理论基础	207
7.2.1	失配泛函的定义	207
7.2.2	正则化算子	210
7.2.3	稳定泛函	210
7.2.4	吉洪诺夫参数泛函	214

7.3 正则化参数	215
7.3.1 正则化参数选择吉洪诺夫方法	215
7.3.2 正则化参数选择 L 曲线方法	217
参考和推荐阅读文献	218
第 8 章 电磁反演	220
8.1 线性反演	220
8.1.1 玻恩反演	220
8.1.2 离散线性电磁 (EM) 反问题	221
8.1.3 线性反演的吉洪诺夫正则化方法	222
8.1.4 模型参数和数据的加权矩阵定义	223
8.1.5 线性反问题的近似正则解	225
8.1.6 勒文伯格-马奎特方法	226
8.1.7 玻恩近似的电导率散射成像	227
8.1.8 迭代玻恩反演	230
8.2 非线性反演	231
8.2.1 非线性 EM 反问题的表述	231
8.2.2 非线性离散 EM 反问题的正则解	231
8.2.3 非线性正则化最小二乘反演的最速下降法	232
8.2.4 非线性正则化最小二乘反演的牛顿法	233
8.2.5 非线性正则化最小二乘反演的牛顿法的数值算法	234
8.2.6 采用共轭梯度法的非线性最小二乘反演	234
8.2.7 非线性最小二乘反演正则化共轭梯度法的数值算法	235
8.2.8 弗雷谢导数计算	236
8.3 准线性反演	238
8.3.1 准线性反演的原理	238
8.3.2 局部准线性反演	238
8.4 准解析反演	239
8.4.1 弗雷谢导数计算	239
8.4.2 基于准解析方法的反演	240
参考和推荐阅读文献	240
第 9 章 电磁偏移	242
9.1 时域电磁偏移	242
9.1.1 电磁偏移的物理定律	243
9.1.2 均匀背景电导率模型中的偏移	243
9.1.3 积分变换偏移法	244
9.2 解析延拓及 (k, ω) 域内的偏移	245
9.2.1 电磁场解析延拓	245
9.2.2 基于谱变换的偏移	246

9.2.3	偏移算子的卷积形式	248
9.2.4	电磁偏移的数字滤波器	249
9.2.5	数字滤波器的谱特性	250
9.3	有限差分偏移	252
9.3.1	二维有限差分偏移	252
9.3.2	三维电磁场的有限差分偏移	255
9.4	地电构造的频域和时域偏移可视化	257
9.4.1	频域的偏移成像条件	257
9.4.2	时间域偏移成像条件	259
9.5	偏移与反演的比较	260
9.5.1	反演问题的公式	260
9.5.2	偏移异常场的基本概念	260
9.5.3	一般偏移成像条件	261
9.5.4	正则化迭代偏移	264
	参考和推荐阅读文献	266

第四部分 地球物理电磁法

第 10 章	岩石和矿物的电磁性质	271
10.1	物性和单位	271
10.1.1	电导率和电阻率	271
10.1.2	介电常数	272
10.1.3	磁导率	273
10.1.4	波数	274
10.2	参数特性	275
10.2.1	岩石及造岩矿物的性质	275
10.2.2	激发极化	285
10.2.3	造岩矿物的介电性	287
10.2.4	矿物的磁性	290
10.3	不均匀多相岩石的有效电导	292
10.3.1	围岩中的导电矿物	292
10.3.2	有效介质理论的基本原理	293
10.3.3	不均匀介质的有效电导率	297
10.4	地电特性的显示方式	298
10.4.1	地电结构和地电剖面的概念	298
10.4.2	水平层状地电断面的纵向电导和横向电阻	299
10.5	大尺度地电结构的特性	301
10.5.1	地电精细结构和宏观结构	301
10.5.2	海洋	302
10.5.3	大气	303

参考和推荐阅读文献	304
第 11 章 应用地球物理中电磁场的激发与测量	306
11.1 电磁场的产生	306
11.1.1 电磁场源	306
11.1.2 电缆	308
11.1.3 接地结构	309
11.2 电场和磁场的测量	312
11.2.1 电压、位势和电场	312
11.2.2 磁场的测量	317
11.3 数据处理	326
11.3.1 取样时间	326
11.3.2 模数转换	327
11.3.3 滤波	328
11.3.4 叠加	332
11.3.5 反褶积	333
参考和推荐阅读文献	335
第 12 章 直流电法与激发极化法	336
12.1 垂直电测深和视电阻率	337
12.1.1 垂直电测深技术	337
12.1.2 三极排列	343
12.1.3 偶极测深	344
12.2 激发极化法	347
12.2.1 激发极化现象	347
12.2.2 频率域和时间域激发极化法	348
12.2.3 美国西南部典型斑岩铜矿的电阻率/IP 模型	350
12.3 IP 现象的物理和数学模型	353
12.3.1 基于有效媒质理论的激发极化现象	353
12.3.2 各向异性极化介质的有效电导率	357
12.3.3 有效电导率的自相容近似	358
12.3.4 IP 数据的各向异性效应	359
12.3.5 基本 IP 模型: 各向同性多相均匀介质中球体模型的有效电导率	360
12.4 基于柯尔-柯尔模型的 IP 数据非线性正则化反演	363
12.4.1 基于 LQL 逼近法的激发极化正演模拟	363
12.4.2 基于 LQL 法的 IP 反演	364
12.4.3 物质特性方程的正则化解	365
12.4.4 IP 数据定量解释的展望	368
参考和推荐阅读文献	368
第 13 章 大地电磁和大地磁变法	373

13.1 天然源产生的地球电磁场	373
13.1.1 平静期的磁场变化	375
13.1.2 微脉动	376
13.1.3 磁暴	378
13.1.4 亚磁暴	379
13.2 大地电磁场吉洪诺夫-卡尼亚模型	379
13.2.1 吉洪诺夫-卡尼亚模型	379
13.2.2 视电阻率和测深的概念	379
13.2.3 大地电磁测深曲线和真实一维电阻率模型的关系	380
13.3 大地电磁和磁变转换函数	387
13.3.1 大地电磁的算子: 阻抗和导纳, 大地电场与磁场	388
13.3.2 感应矢量和电磁场倾子	390
13.3.3 大地电磁阻抗的波谱	391
13.4 水平不均匀介质的大地电磁场	394
13.4.1 电磁场的外部场和内部场以及正常场和异常场的概念	394
13.4.2 异常电磁场及其分类	396
13.4.3 二维不均匀介质中的场以及 E 、 H 极化的概念	396
13.5 大地电磁和磁变勘查	398
13.5.1 MTS, MTP 和 TCM 方法	398
13.5.2 MVS 和 MVP 测深方法	400
13.5.3 CGDS 测量方法	400
13.6 MT 和 MV 数据的处理和分析	401
13.6.1 最小二乘法	401
13.6.2 远参考方法	407
13.6.3 大地电磁矩阵和感应矩阵的 robust 估计	408
13.6.4 大地电磁和感应矩阵的图像表示法	411
13.7 MT 数据的一维解释	413
13.7.1 分析畸变 MTS 曲线	414
13.7.2 快速直接的 MTS 分析	418
13.7.3 一维模型 MTS 曲线的定量解释	420
13.8 MVP 和 GDS 数据的解释	421
13.8.1 将场分离成内部场和外部场	422
13.8.2 将场分为正常场和异常场	425
13.9 基于线性和准线性逼近的快速三维大地电磁反演	425
13.9.1 大地电磁数据的迭代玻恩反演	426
13.9.2 基于准分析法的 MT 反演	427
13.9.3 MT 数据的正则化平滑反演和正则化聚焦反演	429
13.9.4 二次加权正则化反演的原理	429

13.9.5	最小支撑非线性参数化	431
13.9.6	实例研究 1: 沃伊西海湾的 MT 数据反演	434
13.9.7	实例研究 2: 在加拿大安大略省由凤凰地球物理公司获取的 MT 数据的三维反演	435
13.10	严格的三维大地电磁反演	438
13.10.1	MT 全阻抗张量的吉洪诺夫正则化反演	439
13.10.2	弗雷谢算子及其与两个阻抗分量的联合反演	439
13.10.3	大地电磁全阻抗张量反演的弗雷谢算子	440
13.10.4	利用可变背景场的准解析近似计算弗雷谢导数	443
	参考和推荐阅读文献	444
第 14 章	频率域和时间域电磁法	448
14.1	频率域和时间域电磁测深	448
14.1.1	耦合效应	450
14.1.2	频率域电磁测深理论曲线	454
14.1.3	时间域电磁测深	456
14.1.4	时间域电磁测深曲线特征	463
14.2	用“薄层法”进行时间域电磁法数据解释	466
14.2.1	横向电导变化的普利司-什恩曼和吉洪诺夫-德米特里耶夫薄膜模型	466
14.2.2	导电薄层上垂直磁偶极子的瞬变电磁场	468
14.2.3	S 反演法	472
14.3	电磁剖面 and 阵列式探测	474
14.3.1	双回线式电磁剖面	474
14.3.2	大定源式电磁剖面	474
14.3.3	瞬变电磁技术: UTEM, LOTEM 和 MTEM	474
	参考和推荐阅读文献	475
第 15 章	海洋电磁法	478
15.1	海洋大地电磁法	478
15.1.1	海底电磁法装备的主要特征	478
15.1.2	陆地和海底电磁异常比较	481
15.1.3	实例: 海洋大地电磁法在墨西哥湾的应用	481
15.2	海洋可控源电磁法	484
15.2.1	浅水域电法勘探	484
15.2.2	深海电法勘探	486
15.2.3	海洋可控源电磁法在石油资源勘探中的应用	489
15.2.4	海洋可控源电磁法数据解释	492
15.2.5	实例: 珠鲁天然气省 MCSEM 数据的迭代偏移	499
	参考和推荐阅读文献	501