

EXPLORATION WITH
DEEP TRANSIENT
ELECTROMAGNETICS

电性源瞬变电磁 测深技术

[德] Kurt M. Strack 著

薛国强 周楠楠 陈卫营 武欣 译



科学出版社

电性源瞬变电磁测深技术

[德] Kurt M. Strack 著

薛国强 周楠楠 陈卫营 武欣 译



科学出版社

北京

图字：01-2017-7264 号

内 容 简 介

本书详细介绍了电性源瞬变电磁测深原理、方法、技术和实际应用，是原著者多年来在电磁场理论及电性源瞬变电磁探测技术和应用方面的研究成果，反映了当今国际上瞬变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。

图书在版编目(CIP)数据

电性源瞬变电磁测深技术 / (德) 科特·斯特莱克 (Kurt M. Strack) 著; 薛国强等译. —北京: 科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055382-9

I. ①电… II. ①科… ②薛… III. ①瞬变电磁法 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 277224 号

责任编辑: 张井飞 陈姣姣 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 张 伟 / 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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 397 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

本书初稿一部分来自作者为科隆大学外国科学家培训班所做的演讲稿，另外一部分来自以往的项目研究报告，本书终稿是在1989年和1990年举办的“电磁勘探新方法”系列讲座讲义的基础上整理而成的。

本书是地球物理电磁学，或者更准确地说，是定量电磁勘探方法发展史的一个里程碑。20世纪50年代，著名学者Cagniard、Tikhonov和Rikitake提出了大地电磁法，随着技术的不断发展和提高，该方法在地壳研究及油气资源探测中得到了有效应用。

由于天然源电磁法存在一些缺陷，因此人们做出了巨大努力来发展可控源电磁法。特别感谢苏联地球物理学家近30年来在电磁勘探领域做出的贡献。本书的附录应该增加一个全新的俄语参考书目，以此来彰显先驱者的历史地位。

长期以来频率域和时间域电磁法是两种具有竞争性的方法体系。时间域电磁法(TDEM)或瞬变电磁法(TEM)从浅层勘探到深部地壳研究的应用，得到了极大的认可。本书介绍的电性源长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)已得到地球物理学家的广泛使用。电性源长偏移距瞬变电磁法综合了瞬变电磁法、宽频带纯二次场测量和直流电测深等方法的优点，而且可以分辨地下高阻目标体。

Strack早年在美国研究瞬变电磁法，之后在澳大利亚和德国一直开展这一方面的研究工作，他的贡献对瞬变电磁法的研究具有决定性的意义。现代信号处理算法和多测道装备的开发，特别是模型研究，都引起了众多专家的关注。值得一提的是，他克服重重困难，在4个大陆成功地开展了示范性测量工作。

本书也将会产生历史性的影响。

本书是目前瞬变电磁法综合性最强的一本专著。全书共9章，7个附录（译者注：英文版附录6为词汇索引，本书未翻译出版中文版，英文版附录7在本书中改称附录6）。如果你想深入了解瞬变电磁大深度探测技术，那么读懂这本书是非常有必要的。毫无疑问，无论现在还是今后的瞬变电磁领域的专家，想研究仪器设计、数据处理和解释，或者油气资源勘探，本书将会产生深远的影响。

从事勘探的地球物理工程师可重点研读第6~9章，这几章包括方法的可行性研究和应用实例，其中地震和长偏移距瞬变电磁法联合勘探岩性分布、孔隙度和含水性尤为重要。

第1~5章的读者对象主要是大学和石油公司的瞬变电磁学者。当然，对于相关领域

的研究生而言，这本书既简单易懂、内容全面，又具有一定的深度。

从 C. Schlumberger、S. Stefanescu、L. Cagniard、V. Baranov 和 G. Kunetz 开始，多年来我们一直在勘探咨询公司工作，提供包括电磁法在内的综合地球物理方法探测的咨询服务。

我们很高兴借此机会告诉所有读者，如果你们不仅想要理解瞬变电磁深部探测方法，而且还想知道如何把它应用到一个精心设计的勘探项目中，那么，这本书就是为你们而写的。

Gildas Omnes, Pierre Andrieux

1992年2月10日于法国马赛

前 言

在过去的几十年里，电磁技术在油气、地热资源勘探和深部地壳研究中起到了越来越重要的作用，其物理机制是基于对岩石不同物理性质（电阻率）的响应，而地震方法则是反映岩石的弹性性质。在电磁勘探方法中，瞬变电磁测深法引起了学者广泛的兴趣，因为这种方法有可能克服常见的电磁噪声问题及通过优良的发射装置控制来提高系统的分辨率。虽然现在有很多优秀的电磁学理论文献和与电磁方法应用相关的书籍，但是都没有关于瞬变电磁测深法的完整论述，不能帮助地球物理学家从仪器研发到最终数据解释系统地学习该技术。

本书试图通过总结多年的研究成果来填补上述空白。本书主要面向以下几类读者：准备自己设计野外瞬变电磁系统的勘探地球物理专家；试图学习地球物理理论及实际应用的学生；需要进行勘探设计、经费预算和数据解释的勘探地球物理学家。阅读本书会帮助读者更新一些背景知识。本书所有的章节都与勘探实例有密切的联系。章节后面的问题有助于加深读者对本书内容的理解、测试程序及示范技术的应用。学习了这些内容后，初学者可以很快实现对大深度瞬变电磁法的理解和掌握。

第1章是本书的概况部分，介绍了瞬变电磁测深法在地球物理学领域的应用情况，同时解释了岩石电阻率为什么是电磁数据解释时优先考虑的信息。

第2章简述地球物理基本原理，以便地球物理学家在解释工作中把要解决的问题与理论有机地联系起来，这些是进行数据解释必须掌握的基础知识。更多的推导细节见附录1。

第3章论述电磁数据采集和处理中的一个难题，即提高信噪比。使用本章介绍的技术，读者应该能够成功地解决强烈的人文干扰问题。本章也展示了不同数据处理技术应用于人工合成数据和野外实际测量数据的效果。

数据解释部分包括对野外实测数据进行反演的几种途径和对实际资料进行尝试性的综合三维模拟解释。目前数据的三维解释还受限于计算机的计算能力，但它会得到很快的发展。

野外系统部分给出了系统设计标准。设计说明既要简要到能够适用于将来的技术，也要清晰到能够使读者利用现代技术自己设计野外系统。本书讨论的提高信噪比的新方法与标准技术直接相关。

在开展野外工作前，地球物理勘探学家对测量项目的实施进行合理化设计非常重要，特别是对详尽的测量设计参数进行优化和技术成功的可能性进行提升。在很多实例中，勘

测开始前应预先论证使用其他地球物理方法的必要性。测量前可行性研究章节为读者提供了这方面的参考资料。

为了涵盖广泛的应用领域，本书给出了大量的应用实例，包括在煤炭、地热、油气勘探及深部地壳研究等领域，特别是 MT 和 TEM 数据联合反演及高阻层分辨率等内容都体现在本书的油气勘探应用中。本书首次实现了对实际数据的三维解释，说明我们已具备了 TEM 资料三维解释的能力。

许多有用的但不必要的、烦琐的数学推导没有放在正文中，而是在附录中给出。附录同时包含了标准数据格式和正演模拟软件。

To the Readers of the Chinese Translation

I am more than honored that there is still so much interest in my book. Especially, in China where in 1985 the success story of this technology started by visiting the State Seismological Survey then under Prof. Liu Guodong. Unfortunately, at that time communication in different languages was difficult and only many years later we recognized the full value of the experiments. The project at that time was funded mostly by the German government under the project "Demonstration of Deep Transient Electromagnetics for Hydrocarbon Exploration in China and India" .

Within 25 years of the original publication in 1992, several groups have tried to accomplish to build a Lotem system, only for the original German group at University of Cologne and my friends at Yangtze University to be still active in the subject matter. The Chinese researchers added new ways of applying it to hydrocarbon reservoirs and even monitoring while the German group extended it to marine applications with other methodologies towards integration.

The original book was excluded proprietary results like more details on the 'resistive layer' resolution and sub-basalt imaging. The resistive layer case application was much more successful than what got permission to publish and we only realized this once EMGS applied this to the marine environment and gave rise of the marine EM industry. EMGS did an outstanding job taking this part of application to practice and made good business out of it showing the entire community that EM can contribute in many parts to the exploration portfolio. We could not achieve this then in academia. At the time the book was published we were looking for funding to complete our surface-to-borehole and reservoir monitoring experiments which we started in a consortium with Elfquaitaine, Fina, Shell, and Total. Today, 2017, this is still a hot topic and many groups in the West and East are trying to solve this problem. It has now been extended to hydraulic fracture detection and Enhanced Oil Recovery (EOR) . The work in India done well before the book was published was never properly utilized. Only 10 years later ONGC drilled a well based on this work and another 3 years later I connected again with them to complete the circle with on a small overview publication of the results in *The Leading Edge*. At that time, all the techniques described in this book were applied and gave a very good picture sub-basalt which was successfully drilled and even offshore wells confirmed the results. The Indian Petroleum Geophysicist Society still invites me as regular faculty for their short courses.

One of the original motivations to take the system to China was the applications of Earthquake prediction. While we understood the EM methodology, the application was lost in translation. Today, the same Chinese group is showing some very outstanding results using this method with great potential for Earthquake prediction.

After EMGS' success we were also asked by BP to pick up the subject matter and extended their marine EM method version to time domain. The resulting survey in Egypt in 2006, while not yet published, was extremely successful for shallow and deep water depth.

This and building a deep borehole prototype lead to the successful acquisition by two

geophysical companies, only to make my team to buy the company back when our owner had financial problems.

For the work on this subject matter my team received numerous award from the Society of Exploration Geophysicists, Society of Petrophysics and Well Analysis and the Society of Petroleum Engineer. The biggest one, the Cecil H. Green Enterprise Award, given to the founding team (Hanstein, Rueter, Stoyer and Strack) .

After all these praise, I should also mention some downsides of the book. One clear misunderstanding lies in the concept that depth of penetration was related to offset. B. Spies proofed me wrong and our think was simply guided by getting measurable signal with small dynamic range with our homemade amplifiers. Today's instruments are so good that measurement at offset very close to the transmitter is easily achieved (even next to the transmitter) . Today's new equipment used for EM for multiple methods including magnetotellurics, Lotem and frequency domain methods. The same is true for the transmitters. New electronics allows us to make real powerful, reliable units with high degree of safety.

Finally, the application has shifted from exploration to monitoring of hydrocarbon and geothermal reservoirs. Not only for commercial value reasons but also due to environmental concerns.

The software that was originally in the book has been re-written and we asked Interpex to make it as shareware available (LotemSuite) . You can download it form [www. Interpex. com](http://www.Interpex.com) or [www. kmstechnologies. com](http://www.kmstechnologies.com) websites.

Anisotropy has always been our concern and one of the main technical reasons for me to engage in a carrier in building well logging tools. I am very happy that multiple logging companies are now building 3D induction logging tool that allow us to measure anisotropy and vertical resistivities which can be correlated to Lotem. We have seen that in most cases this gives good results. Its design relied heavily on the principles of modeling and inversion given here.

The future lies clearly in 3D: First, in completing inversion using blocky models that allow sensitivity evaluation and better correlation with logs. Second, these must be converted to images directly derived from the data similar as can be done for marine time domain CSEM already. Of course, the data must be acquired by an array system which is the natural successor of the multi-channel system shown in this book. Concurrent to that, experience from logging methods such as focusing the information which means can be refined for surface methods by focusing below the receiver. This is essential to get reliable and realistic images. The images of a carbonates section superimposed on seismic data in this book were 15 years ago the first indication of this need.

Translation of this book has been a truly big task that we attempted several times before but never concluded. This makes my even more appreciation for Prof. Guoqiang Xue's efforts.

A big thanks to him!

Dr. Kurt M. Strack

President, KMS Technologies, Houston Texas USA

Visiting Adjunct Professor, Yangtze University Wuhan, China

Adjunct Professor, Mahidol University, Bangkok, Thailand

Adjunct Professor, University of Houston (EE and Geoscience), USA

译者序

作为瞬变电磁法的重要分支，接地源瞬变电磁法具有探测深度大、对高（低）阻异常分辨能力强的优点，广泛应用于深部油气、矿产资源勘查领域。近年来，随着我国资源勘查区域向山地、森林等地形复杂地区延伸，传统回线源瞬变电磁勘查难度急剧增大，接地源瞬变电磁法越来越引起国内学者及工程技术人员的重视。

由国际著名地球物理学家 Strack 教授编写的 *Exploration with Deep Transient Electromagnetics* 是“电磁勘探新方法”系列中的一本，为便于国内读者理解，译者把书名翻译为《电性源瞬变电磁测深技术》。该书主要包括以下几部分内容：长偏移距瞬变电磁法的发展历史和应用现状；电磁勘探的基本理论、物理实质和基本技术；发射与接收系统信号处理方法和技术；数据反演方法；仪器硬件系统、野外工作方法及工作方案设计；噪声去除和综合解释实例；高阻目标体和大深度探测实例。本书是接地源瞬变电磁法发展的里程碑。

为了方便不同读者参阅，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。本书前言和第 1 章由马振军翻译，周楠楠和吕绍林校对；第 2 章由周楠楠翻译，吕绍林校对；第 3 章由李海翻译，吕绍林和周楠楠校对；第 4 章由卢云飞翻译，薛国强和周楠楠校对；第 5 章由武欣翻译，李海和陈卫营校对；第 6 章由陈稳翻译，薛国强和李海校对；第 7 章由张林波翻译，薛国强、李海和侯东洋校对；第 8 章由李锋平翻译，薛国强、李海和钟华森校对；第 9 章由薛国强翻译，陈卫营和李海校对；附录由黄逸伟、陈稳和张林波翻译，薛国强和陈卫营校对，英文版附录 6 为词汇索引，无需翻译出版中文版；全书由薛国强和周楠楠统稿。

本书得到国家自然科学基金面上项目“SOTEM 法深部探测关键技术”（41474095）的资助。考虑到中英文表达方式的不同，兼顾原著本意，本书在逐句翻译的基础上进行意译的修订。但由于译者水平有限，对原著作者的思想理解不一定完全正确，难免存在疏漏和不妥之处，欢迎读者提出宝贵的意见和建议。

薛国强

2017 年 1 月 25 日于北京

目 录

序言

前言

To the Readers of the Chinese Translation

译者序

第1章 引言	1
1.1 电磁法在勘探中的作用	2
1.2 长偏移距瞬变电磁法的发展历史	3
1.3 勘探中电阻率(电导率)	6
1.4 本章小结	12
第2章 基础理论	13
2.1 物理原理	13
2.2 理论基础	15
2.3 视电阻率	16
2.4 全域视电阻率	20
2.5 数据成像	24
2.6 本章小结	29
第3章 信号的失真及其补偿	30
3.1 现场数据问题	30
3.2 系统响应的反褶积	31
3.3 递归数字滤波器	33
3.4 选择性叠加技术	37
3.5 标定因子	41
3.6 叠前和叠后数据处理	44
3.7 本章小结	46
第4章 数据解释	48
4.1 一维反演	48
4.2 分辨率分析	53
4.3 联合反演	55
4.4 剖面反演	60
4.5 Occam 反演	66
4.6 畸变信号解释(反转)	68
4.7 反转问题的数值模拟	72

4.8	三维模拟	78
4.9	场源复印效应模拟	78
4.10	不同三维模拟程序的对比	82
4.11	本章小结	84
第5章	仪器系统与野外工作方法	85
5.1	系统构成	85
5.2	野外实测步骤	103
5.3	勘探技术	108
5.4	本章小结	118
第6章	勘查可行性研究	119
6.1	基于测井的探测方案设计	119
6.2	探测深部碳酸盐岩体	125
6.3	高分辨率可行性研究	127
6.4	二维结构的可行性研究	129
6.5	本章小结	130
	程序	131
第7章	综合实例	134
7.1	德国鲁尔区北部野外试验	134
7.2	美国丹佛-朱尔斯堡盆地的 LOTEM 地质校准探测实例	144
7.3	澳大利亚悉尼盆地的第一次野外试验	147
7.4	德国明斯特兰盆地的三维解释案例	152
7.5	薄板模型的结果	155
7.6	积分方程模拟的结果	157
7.7	SLDM 模拟结果	158
7.8	三维解释的讨论	160
7.9	本章小结	161
第8章	实例：用长偏移距瞬变电磁法解决高阻层探测问题	162
8.1	高阻层物理概念的扩展	162
8.2	欧洲测区实例	163
8.3	澳大利亚坎宁盆地的实例	167
8.4	中国江苏泰兴地区实例	172
8.5	本章小结	176
第9章	深部探测应用实例	177
9.1	历史实例记录	177
9.2	德国的第一个深部地壳探测演示试验	181
9.3	黑森林测区调查	184
9.4	乌拉赫测区地热探测	190
9.5	在南非卡普瓦尔克拉通的探测实例	194

9.6 在中国用长偏移距瞬变电磁法预测地震的探测试验	199
9.7 本章小结	205
附录	207
附录 1 推导	207
附录 2 数据格式标准	214
附录 3 参考信息	224
附录 4 正演程序 MODALL 的说明书	230
附录 5 符号含义	236
附录 6	238
参考文献	243
致谢	253

第1章 引言

电磁法是探测地表至地下深处电阻率分布的唯一技术途径，因此，在全球范围内开展了大量的地球物理电磁研究。电阻率能够很好地反映地下介质的孔隙度及孔隙中的液体类型，因而对地质解释有很大的帮助。

本书旨在为初学者提供该学科全面的回顾总结，并介绍目前勘探行业中使用的最先进的方法和技術。专家则可以参考本书从而设计自己的深部探测系统并进行野外测量。

为了说明瞬变电磁测深技术的实用性，本书的大部分章节都包括应用实例。这些应用实例来自世界各地，如图 1.1 所示。



图 1.1 本书应用实例的地点分布
数字代表应用实例所在的章节

本章介绍把电阻率与实际地质情况联系起来的背景知识，以及电阻率计算中的不确定性。从麦克斯韦方程组的基本物理知识出发，指导读者把野外数据转化成视电阻率，然后分析电阻率随时间（深度）的变化。在野外采集数据时，必须要解决一个重要的问题——信噪比。这个问题可以采用第 3 章介绍的数据处理技术解决。数据处理之后得到理论上所需要的平滑视电阻率曲线，这些曲线可以用经典的反演方法进行解释，或者在一些实例中采用三维数值模拟技术。

本章在论述瞬变电磁测深法前，首先介绍了勘探地球物理的基本框架。另外，解释人员应该理解电阻率计算方法的局限性。

1.1 电磁法在勘探中的作用

在新能源勘查中,能够找到一个代替反射地震法的勘探方法越来越重要。非震方法在全球地球物理勘查舞台的地位逐步上升,主要是因为在地震数据质量较差的地质环境中发现了新油田。在1983~1987年发现的7个大油田中,有3个(巴西、哥伦比亚、北也门)分布在电磁技术有潜力找到新目标的区域。许多不同的技术方法都被用来改善和提高地震数据质量或者从不同角度解决勘探问题。因为石油工业主要依靠地震法,其他地球物理方法有时被称为非震方法,非震方法可以分为以下五类。

(1) 重力方法:陆地、海洋、直升机、航空、钻孔重力方法探测地质结构密度差异。重力方法在勘探业中举足轻重,其成本低廉,并且对特定勘探问题的用途容易理解。

(2) 磁法:陆地、海洋和航空磁法测量是勘探业的一个基本方法。该方法反映磁导率的差异,它们的用途与重力方法一样容易理解。磁法很少被用在石油勘探中,而在矿产勘探中,磁法比重力方法应用更广泛。

(3) 电磁法:电磁法通常要比重力方法和磁法分辨率高,但与很多地球物理方法相比,电磁法比较难理解。这主要是由于不同电磁方法的电磁感应表现有所不同。勘探人员可以根据勘探要求选用陆地、航空或井中电磁测量方法。井中电磁测量是大多数钻探井中的常规方法;而航空电磁法是矿产和地下水资源勘查(Palacky, 1983)中的一种常规技术。电磁法在石油勘探中应用不广泛,主要是勘探深度受限。陆地电磁法虽然在世界各地广泛应用,但在石油勘探中应用甚少,仅在过去的十年中,有一些大地电磁法的常规应用。虽然地球物理勘探对电磁法的需求日益增加,但是仪器设备的发展及与其他地球物理方法集成都是需要时间的。许多技术都在研讨中,其中最有帮助的是瞬变电磁法,因为其操作简单,数据处理技术与地震方法相似。瞬变电磁法的优点是观测信号与地下电阻率结构耦合最好。因此,本书选择瞬变电磁法作为研究的重点。

(4) 直流电阻率法:直流电阻率法很少用于碳氢化合物的勘探中。这主要是因为当勘探深度要求达到3~4km时,大电极距的体积积分效应很大,造成分辨率的缺失。所以,如果直流电阻率法应用于石油勘探中,也只能用于大尺度普查勘探。直流电阻率法主要用在成像技术,即偶极-偶极成像。

(5) 激发极化法:在过去的30年中,激发极化法在石油勘探中应用有些成功的例子(Oehler and Sternberg, 1984),也有些失败的教训。这种方法严重受到大量的人文因素的影响(如管道等),能产生与地下矿体相类似的激发极化响应。过去几年人们对这种方法的兴趣正逐渐减弱,甚至完全消失。

在众多的勘探问题中,有些问题特别适合用电磁法解决。下面是一些在文献中可以查到的电磁法应用实例。

冻土层:如果仅仅应用地震方法,冻土层的速度和厚度变化会造成对向斜或背斜的解释错误。瞬变电磁法被用来对地震结果进行静校正(Rozenberg et al., 1985)。

油水界面:许多碳氢化合物产地都蕴含富盐原生水或卤水,它们储存在碳氢化合物底部或边缘部位。石油和卤水饱和的储层,地震速度并不总是有太大区别,但导电率差异却

很大。瞬变电磁法在美国和俄罗斯成功地应用于解决这种类型的勘探及生产问题 (Spies, 1983; 地球技术公司, 1985)。

火山岩盖层: 地震波会出现散射, 特别是高频散射问题。同时, 大的波阻抗差异会产生地震波反射。许多不同的非震方法都曾应用到火山岩勘探中, 其中包括重力方法、磁法和电磁法 (Prieto et al., 1985; Keller et al., 1984)。

逆冲断层: 会造成地震波的散射。很多不同的非震方法应用于此, 包括地面重力、井中重力和电磁法。结果令人振奋却不能彻底解决问题。

严重风化的覆盖层: 在一些实例中会给反射地震法静校正带来严重问题。几乎所有的非震地球物理方法都用来解决不同情况下遇到的该类问题 (Christopherson, 1990)。

与上述任一情形有关的复杂地形, 同样造成静校正问题, 由于体积效应大, 非震方法在这些例子中仅作为有效的普查手段。

孔隙度成像: 在一些地方虽然地震数据很好, 但地震法不能确认孔隙变化, 而电磁法有时候非常有效。即使孔隙变化能够凭借地震数据得到解释 (应用 S 波) (Robertson, 1987), 但电磁法依然能够提供补充信息。例如, 一旦有了可用的测井和地震数据, 就可以通过对地震数据进行反演确定构造, 利用测井数据得到电阻率和孔隙度 (或者砂岩和页岩的比) 的校正曲线, 并将数据转化成电阻率。然后可以转变成孔隙度图以帮助勘探人员进行地质解释 (Strack et al., 1989b)。因为世界上大约 40% 的石油储存于碳酸盐岩内, 而这些地方地震法往往不能提供足够的信息来解释其孔隙度, 所以这可能是今后电磁法最重要的应用领域。

深部地壳研究: 为了研究地壳, 深部地震剖面测量在全球范围内得到应用。在许多例子中, 低速体常常出现在地壳上部 10km 以上的剖面中。有时候, 低速带与低阻带相关联 (Strack et al., 1990; De Beer et al., 1991)。在此特定深度范围内, 长偏移距瞬变电磁法能够有效地探测电阻率结构。

块状硫化物矿化: 自然界大多数的铅、锌和铜等金属都产于低阻的块状硫化物矿床, 直接勘探铅、锌和铜等金属硫化物矿已成为包括瞬变电磁法在内的电磁技术发展的主要推动力。

1.2 长偏移距瞬变电磁法的发展历史

在开始探讨电性源瞬变电磁测深方法技术前, 根据本书的需要分类介绍瞬变电磁法的发展历程。关于理论基础的详细内容可以参考 Kaufman 和 Keller (1983) 出版的一本专著。直流电测量起始于 Wenner (1912) 和 Schlumberger (1922) 的早期工作; 而交流电法的应用由一个德国专利 (322040, 1913 年, K. Schilowsky) 和一个美国专利 (1211197, H. Conklin) 记载。第一个电磁测深是由 I. W. Blau (美国专利 1911137, 1933 年) 进行的, 使用一个电偶极子作为发射装置, 通过接地导线向地下发射电脉冲并测量电场的变化。对于采矿业的应用, 读者可参考 Wait (1951a, 1951b) 发表瞬变电磁勘探的基本理论及随后纽蒙特矿业公司申请的专利 (Wait, 1956; 美国专利 1735980) (Nabighian and Macane, 1991), 纽蒙特矿业公司开发并成功地应用于多个系统 (Dolan, 1970)。第一个航空 TEM 系统

(INPUT) 是由 Barringer 于 1958 年开发的 (Barringer, 1962)。同一年, 苏联莫斯科地质勘探学院开始研究并开发了 MPPO-1 瞬变电磁观测系统。1968 年苏联专利 MPPO 在澳大利亚 (澳大利亚专利 415022) 得到应用, 这在当时是一种很有前途的瞬变电磁前沿技术, 因为瞬变电磁能穿过澳大利亚的导电覆盖层。1973 年, Lazenby 和 Wondergem (美国专利 3737768) 获得“利用电磁波的不连续性远程检测导电体的装置”专利授权。加拿大的瞬变电磁系统主要是为了寻找矿体。在澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 工作的 Buselli 研发了第一个计算机化的瞬变电磁系统, 并在 1981 年获得专利 (美国专利 4247821)。他的 SIROTEM 开发重点放在了系统的噪声补偿。1960 ~ 1980 年, 这一段时间的瞬变电磁专利大多是针对矿产勘查的。Rocroi (1985) 在 CGG 公司的专利 Transiel 系统 (美国专利 4535293, 以及有关的法国专利 1979, 7917766 和 1980, 8003159) 主要是用来观测激发极化。专利中申明解释仅是定性的。由于系统也适用地震勘探的需要, 专利可以看出与地震方法的几个相似之处。专利申请涵盖了大量的应用和硬件配置。现今, 只有采用新概念的新一代实用硬件才可能申请专利。

迄今为止, 除了硬件和采集方面, 初始的野外技术本身并没有发生太大的变化, 最主要的改进是对物理现象的理解和如何把观测数据转换成有用的信息来帮助地质人员。在早期, 电磁法应用存在的问题是人们误以为观测信号是由电磁波的反射产生的, 因此电磁法在石油勘探中得到了关注。直到人们完全明白了电磁法理论 (Yost, 1952; Orsinger and Van Nostrand, 1954), 认识到在地球表面观测的数据并不是电磁波反射的时候, 石油勘探业才对电磁法失去了兴趣。从早期到现在, 一些缺乏经验的咨询公司在没有正确理解方法的物理原理的情况下, 就为石油勘探提供相似的技术, 导致石油工业对各类电磁法产生严重的质疑。直到现在, 随着对电磁法 (特别是 MT 方法) 的深入细致研究和计算机技术对地球物理强有力的支撑, 人们才可以看到全新一代经济、高效的勘探方法, 即使这样, 在实际应用中, 对电磁法的质疑声依然存在。

在过去的几十年中, 大多数电磁法在石油工业接受它们之前, 都已经被科研机构认可并应用在科研工作中。Vozoff (1972, 1991) 回顾总结了全球范围内的大地电磁法的测量工作。Geoscience 公司在美国首次尝试该技术 20 年之后, 确立了大地电磁法在勘探业中的地位。由于瞬变电磁法的应用实例少并且至今其理论还未被完全理解, 所以瞬变电磁法在石油勘探中的应用历史不长。几篇关于矿产资源勘探的综述文章介绍瞬变电磁法, 并将其视为多年来矿产勘探最有效的电磁方法 [见 *Geophysics* 瞬变电磁法专辑 49 (7)] (Macnae and Spies 1989)。人们对可控源电磁法兴趣的不断上升, 使得可控源电磁设备大量增加。几乎所有的电磁设备制造商都有或者都准备研发深部瞬变电磁系统。

时间域和频率域的主要区别在于时间域系统观测一次场源不存在时的信号, 而频率域系统测量时一次场信号始终存在。所以时间域信号的观测和解释要容易些。时间域和频率域的源和接收信号的基本模式如图 1.2 所示。在图中, 频率域一次场是比较实用的方波, 接收装置接收的是一次场与二次场叠加的信号, 而时间域在电流关断之前是没有二次场的, 只有电流关断之后一次场不存在时才能观测到二次场信号。

过去的几年中, 瞬变电磁法最有希望的两种系统分别是多伦多大学电磁系统 (UTEM) 和长偏移距瞬变电磁法 (LOTEM)。UTEM 主要由加拿大 Lamontagne 地球物理公