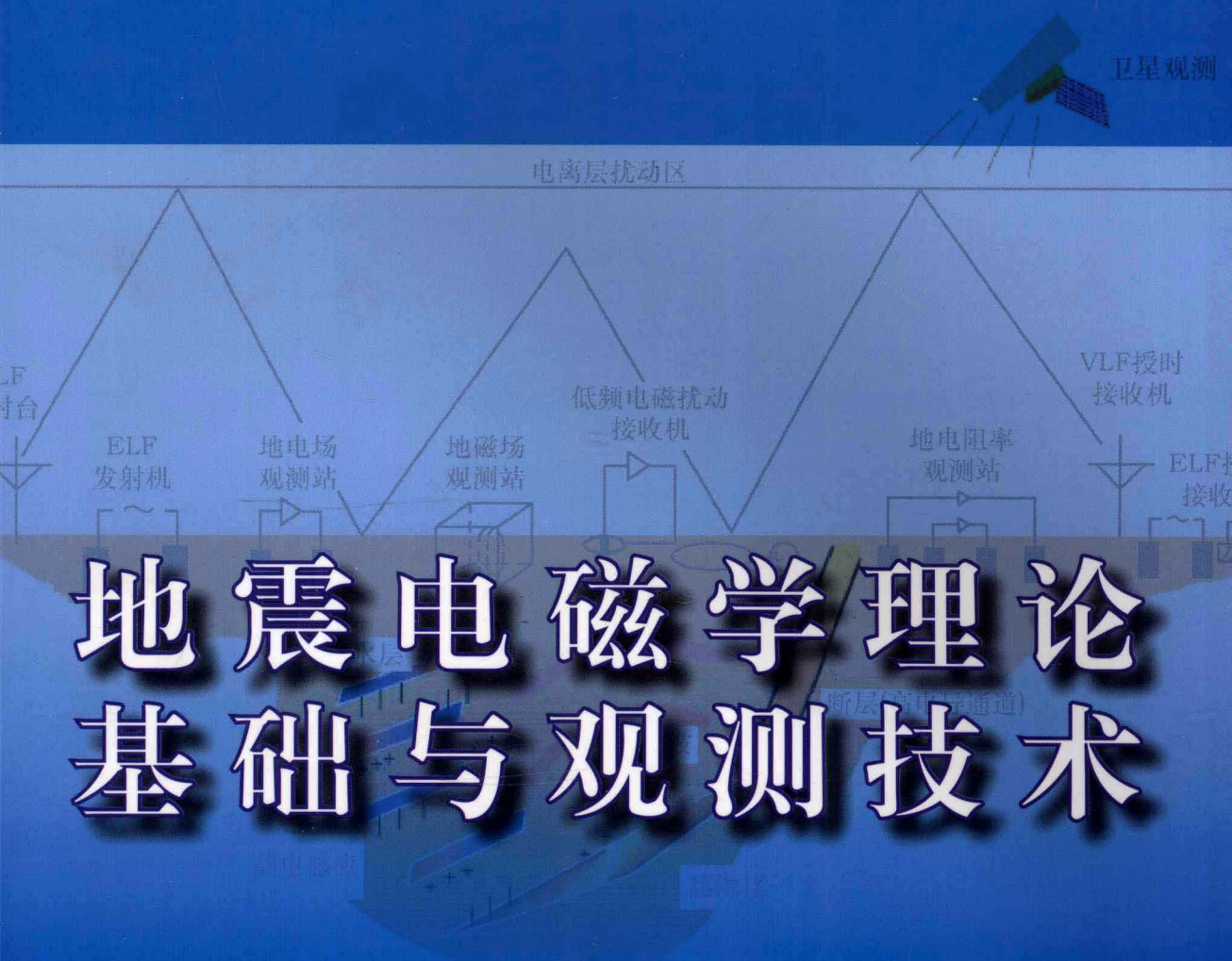


● 全国地震台站观测岗位资格培训系列教材



地震电磁学理论 基础与观测技术

(试用本)

中国地震局监测预报司 编

地震出版社

全国地震台站观测岗位资格培训系列教材

地震电磁学理论 基础与观测技术

(试用本)

中国地震局监测预报司 编

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震电磁学理论基础与观测技术 (试用本) / 中国地震局监测预报司编.
——北京: 地震出版社, 2010. 6

(全国地震台站观测岗位资格培训系列教材)

ISBN 978-7-5028-3698-6

I. ①地… II. ①中… III. ①地震—电磁学—教材 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 004694 号

地震版 XT200500217

地震电磁学理论基础与观测技术 (试用本)

中国地震局监测预报司编

责任编辑: 江 楚

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2010 年 6 月第一版 2010 年 6 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 732 千字

印张: 28.75

印数: 0001 ~ 2000

书号: ISBN 978-7-5028-3698-6/O (4318)

定价: 70.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

《全国地震台站观测岗位资格
培训系列教材》编委会

主 编：李 克

副主编：赵仲和 宋彦云 李 明

编 委：钱家栋 吴忠良 刘耀炜 吴 云 滕云田
余书明 杨心平 孙为民 王 峰 熊道慧

《地震电磁学理论基础与观测技术》
(试用本) 编写组

主 编：钱家栋

成 员：杨冬梅 熊仲华 赵家骝 林云芳 席继楼
王晓美 谭大诚 张素琴 汤 吉 沈启兴
夏 忠 何世根

序

20 世纪 90 年代以来,中国地震局先后在“九五”、“十五”期间实施了数字化、网络化的改造和建设项目,地震监测基本实现由模拟观测向数字化、网络化的重大转变。面对大量数字化设备和新技术的综合应用,如何保障观测网络正常、可靠、稳定、连续地运行,从而提供可靠观测资料,这是广大地震台站工作人员面临的现实挑战。毋庸置疑,只有通过继续教育,领会和接受新技术、新装备,才能熟练应用并使之充分发挥作用。

众所周知,防震减灾事业和地震科学的发展,有赖于观测的创新与拓展、监测技术的革命与进步,地震监测的基础地位与作用是十分重要的,地震台站的首要任务是监测,以便及时获得可靠的观测信息。当然,仅仅如此还不够,应当促进台站监测同科研、预测的有效结合。为此,许多关注和从事地震台站观测工作的同志逐渐达成一种共识,地震台站观测人员需要具备相当的有关学科知识,不断增强自身的业务素质,提高工作的综合水平。另外,许多年轻人员进入地震观测岗位后,要求接受继续教育来学习和掌握相关地学知识的愿望也十分迫切。

同样重要的是进入新世纪以来,国家行政和科技体制改革要求,事业单位今后须实行岗位考核竞争上岗以促进事业的良性发展。中国地震局认真贯彻国家要求,决定逐步推行“观测岗位资格考核制度”,以实现地震监测规范化管理,达到规范观测队伍、提高人员素质、保障监测质量的目的。观测岗位资格考核是一项系统性的工作,在岗位资格考核前,对被考核人员进行必要培训,是保障考核工作顺利开展的重要环节。作为地震观测岗位资格考核与考前培训的基本保障,需要有一套适于培训工作的教材。

基于以上诸多目的,中国地震局监测预报司组织编写了地震监测岗位培训系列教材,包括:《地球物理学概论》、《地震地质学》、《防震减灾法律法规》、《地震台站公用技术》、《计算机基础与网络》、《数字信号处理的 MATLAB 实现》、《地震学与地震观测》、《地震地下流体理论基础与观测技术》、《地震电磁

学理论基础与观测技术》、《地形变测量》。此套系列教材力求内容与地震监测实际工作紧密结合，符合台站技术的需求，理论深入浅出，内容较新、较详尽，既适合作为岗位资质考核的考试用书，也可以作为广大地震监测一线工作人员的自学教材。

我相信，该套教材的出版，将为台站观测岗位考核制度的逐步推行，为提高地震台站人员的业务素质，为奠定地震台站可持续发展的人才基础起到积极的保障和促进作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '陈建斌' (Chen Jianbin), written in a cursive style.

前 言

本书是为适应中国地震局加强地震监测工作规范化管理，实施从事台站电磁学科监测工作人员上岗培训而编写的电磁学科专门教材。

本书的特点，归纳起来有三个方面：第一，它包含了电磁学科基础知识和台站观测工作的基本技能的培训材料，两者的结合有利于台站人员基本素质的提高；第二，本书强调了电磁学科的综合培训要求，在教材的组织上，突出了电磁学科电、磁、电磁扰动三者理论体系之间的关联，为推进电磁学科在地震电磁监测工作的综合管理和预测研究向综合方向发展服务；第三，本书充分注意到地震监测工作数字化、网络化新进展和对监测工作带来的新要求，在观测技术方面，增加了有关管理工作的新内容、新要求，使受培训者能够做到学有所用，适应上岗工作的基本需求。

按照中国地震局监测预报司的要求，本书分为学科基础知识和上岗基本技能两大组成部分。

前五章属第一部分，其中，第一章“地震电磁学基础”是关于地震电磁学学科综合知识的介绍，重点阐述地震电磁学的发展历史、电磁学科各测项（地电阻率、地电场、地磁场、地震电磁扰动）之间的物理联系，以及地震电磁学与地球电磁学之间移植和改造、继承和创新。第二章到第五章，分别介绍地电阻率、地磁场、地电场和地震电磁扰动四个测项的基础知识，其中地电阻率是地震电磁学中专门研究介质电学属性参数变化与地震关系的测项，而后三个测项是地震电磁学中专门研究场量（电场、磁场）变化与地震关系的测项。

后三章即第六章到第八章，属第二部分，是前三个测项中关于基本技能训练的部分，主要包括台站选建、观测和数据处理三大内容；第四个测项目前尚无规范的工作程序，有关内容已合并并在第五章简略介绍。根据不同测项的发展程度和技术特点，各章在材料的具体组织方面有所差异，但重点内容在于对观测系统的基本知识（例如仪器的工作原理、性能特点）、运行管理和维护以及工作质量控制要求等几个主要方面。

本书第一章和第二章由钱家栋负责编写，沈启兴、汤吉参与；第三章由林云芳负责编写；第四章和第八章由席继楼编写；第五章由赵家骝负责编写，钱家栋、何世根参与；第六章由谭大诚编写；第七章由杨冬梅负责编写，张素琴、王晓美、夏忠参与。全书由钱家栋负责统编，熊仲华参与。

本书在每章备有文献供读者查询。一般归纳地引用某些文献中的结果，在文中采用联合注明出处的方式，表明研究结果的归属，特此予以说明。

本书在成书前，中国地震局监测预报司曾组织了四期台站上岗人员培训班，本书编写者多数参与了培训讲授，本书就是在讲授素材的基础上进一步修改后完成的。从第一次培训到现在前后已经有两年左右时间，特别是其间发生了2008年5月12日汶川8.0级大地震，使地震工作者在巨大的沉痛之时，更感到自己肩上担子的沉重。地震预测是一项世界性的科学难题，我国地震预测工作虽然经过了40年的发展，但仍然处于经验性预报的阶段。地震的监测工作和地震的预测工作一样，是在不断地积累经验中，特别是那些大地震的震例经验和检验中发展的。本书本应对汶川地震在监测预报工作中的启示和认识有所反映，但鉴于目前关于汶川地震的反思工作正在全面展开，而关于汶川地震的科学总结，还将要经历一个较长的认识过程，因此本书尚无法就汶川地震的有关内容进行全面介绍，只在个别的段落有所表述。总的来说，本书在全体编写者的努力下终于完成，但由于我们水平有限，难免出现疏漏及错误之处，敬请读者批评、指正。

钱家栋

2010年2月

目 录

第一章 地震电磁学基础	1
第一节 地震电磁学的研究对象和学科特点	1
第二节 电磁场基本理论在地震电磁学中的应用	1
第三节 地震电磁学发展历史	15
参考文献	16
第二章 地电阻率方法基础	18
第一节 地电阻率方法基本知识	18
第二节 地电阻率方法物理基础	57
第三节 地电阻率方法观测与实践	77
参考文献	126
第三章 地磁学方法基础	129
第一节 地磁场及地磁要素	129
第二节 地球主磁场	134
第三节 地壳磁场	150
第四节 地球变化磁场	161
第五节 地球感应磁场	195
第六节 地磁预报地震方法	206
参考文献	220
附录 地磁要素变化量间的关系式	221
第四章 地电场方法基础	222
第一节 地电场基础知识	222
第二节 地电场观测与实践	229
参考文献	239
第五章 地震电磁扰动观测方法基础	240
第一节 地震电磁扰动观测国内外动态	240
第二节 电磁扰动的实验研究和数值模拟	252
第三节 建设新型电磁扰动观测系统的示范研究	265
参考文献	280
第六章 地电阻率观测	282
第一节 台站选建	282
第二节 地电阻率观测工作	300
第三节 数据分析与处理	334
参考文献	345
附录一 台站日常工作疑问及处理	346

附录二 数据异常分析实例	
——嘉峪关 2009 年 9 月地电阻率数据异常落实情况简介	348
第七章 地磁场观测	352
第一节 地磁观测站建设	352
第二节 地磁台站观测仪器	361
第三节 地磁台站的绝对观测	378
第四节 地磁台站的相对记录	385
第五节 仪器的比测与检定	388
第六节 地磁台站观测数据处理	398
第七节 台站观测数据的质量控制	413
参考文献	426
附录 磁通门磁力仪的一种地理式安装方式	427
第八章 地电场观测	429
第一节 台站选建	429
第二节 地电场观测技术	435
第三节 数据分析与处理	445
参考文献	447

第一章 地震电磁学基础

第一节 地震电磁学的研究对象和学科特点

在地震预报的多路探索中，地震电磁学科是其重要的分支之一。它以研究孕震过程有关的电磁现象以及地球介质的电磁性质（主要是电性参数）的变化为主要对象，是孕震过程综合研究的重要组成部分。

目前在地震研究中电磁学科所采用的方法有多种，归纳起来可分为地电学方法、地磁学方法以及地震电磁扰动方法。在电磁扰动方法之前冠以“地震”一词，主要是因为它不是以一般的电磁扰动为研究对象，而是专门寻求可能与地震孕育和发生相关联的物理过程。

地震研究中电磁学科的主要研究内容或观测对象大致可以分为两类：一类属于物质电学属性的测量，例如地球介质电导率（或电阻率）的测量及其他电磁参数的测量；另一类是场量的测量，例如地电场、地磁场以及与地震有关的电磁扰动场的测量等。

地震电磁学科为适应于地震预报和孕震过程的理论研究的需要而兴起，经历了从地球电磁学移植和改造、继承和创新过程。定点地探测与地球电磁学正常动态相区别的异常动态，是地震电磁学方法研究区别于地球电磁学研究的主要特点。因此，从观测技术到理论探索，不仅需要移植和继承，更需要改造和创新。不过，地球电磁学也在实践中发展和创新，因此相互借鉴、移植的过程应当永远不会完结。在本书的论述中，这两门亲缘相近的学科的特殊关联将随处可见。

地震电磁学源于地球电磁学，后者是电磁理论在地球介质环境和条件下应用和发展起来的重要地学分支。地震电磁学和地球电磁学一样，研究介质的电学属性和结构是一个极其重要的内容。这是因为它的观测量是地球的电场和磁场，它们都遵从于统一的电磁场基本理论，而有关场的运动和变化，都是在一定的介质条件下实现的。因此，提取与地震孕育过程相关联的电磁前兆现象，既包括了场的变化信息，也包括了研究区域内固体地球介质性质（电磁属性）变化的信息；而研究区域内固体地球介质电磁属性的变化，将直接影响着前兆信息的提取和物理过程的深入分析和探索，因此它们（场的变化信息和介质电磁属性变化的信息）既是互相协调和联系的，也是相互制约的。在地震电磁学的观测与研究中，深刻认识这一点是十分重要的。鉴于这种认识，下文将从电磁学的基本理论出发，进一步认识地震电磁学各个部分之间的关联。

第二节 电磁场基本理论在地震电磁学中的应用

一、电磁场基本理论——麦克斯韦方程组

由电动力学（曹昌祺，1961）可知，在分区均匀介质的内部，电场 E 、电位移矢量 D 、

磁场 $\mathbf{H}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$ 满足麦克斯韦方程组（高斯单位制）：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\delta_f \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_f + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{j}_f = \sigma \mathbf{E} \quad (1.7)$$

式中， $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 δ_f 、 $\mathbf{j}_f$ 、 σ 均为 CGSE 单位制； $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 均为 CGSM 单位制； ε 、 μ 无量纲，分别称为介质的介电常数、磁导率，真空中 $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$ ； c 为光速， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。 δ_f 、 $\mathbf{j}_f$ 分别为自由电荷与传导电流。

此外在电流 $\mathbf{j}$ 和电荷 δ 之间，应满足电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \mathbf{j} + \frac{\partial \delta}{\partial t} = 0 \quad (1.8)$$

在两个相邻的分区均匀介质的界面上，上述微分方程转化为边值关系（曹昌棋，1961）。在实用单位制（MKSA）下，麦克斯韦方程表述为：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \delta_f \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.4a)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.5a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.6a)$$

$$\mathbf{j}_f = \sigma \mathbf{E} \quad (1.7a)$$

式中， $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 的单位分别是 C/m^2 ， V/m （或 N/C ）， Wb/m^2 （T）和 A/m ， ρ_f 、 $\mathbf{j}_f$ 的单位是 C 、 A/m^2 ； t 的单位是 s ； σ 的单位是 S/m （ $1\text{S} = 1/\Omega$ ），真空中 $\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \text{ C}^2/\text{kg} \cdot \text{m}$ ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{c}^2$ ，（ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）。在分区均匀介质中 $\varepsilon_i = \varepsilon_{ri} \cdot \varepsilon_0$ ， $\mu_i = \mu_{ri} \mu_0$ ，（ $i = 1, \dots, n$ ），即 $\varepsilon_{ri} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}$ ， $\mu_{ri} = \frac{\mu_i}{\mu_0}$ （真空中 $\varepsilon_r = \mu_r = 1$ ，无量纲）。

关于上述方程组，有两点应当引起特别注意：

第一，方程组建立了场及其动态变化与介质电磁性质的密切关联。电磁场方程中包

含有场量 $\mathbf{D}$ (电位移矢量)、 $\mathbf{E}$ (电场强度)、 $\mathbf{B}$ (磁感应强度通量)、 $\mathbf{H}$ (磁场强度) 等物理量, 亦有 μ (导磁率), ε (介电常数), σ (电导率) 或 ρ (电阻率) 等描述介质电磁性质的物理参数, 它充分揭示了场和介质的相互作用, 反映了在介质中场的运动变化规律与物质的性质有密切的关联; 同时启示人们, 可以通过分析场的运动的特殊行为去认识物质电磁性质和内部电磁结构的可能性, 例如物理学中通过测量电压和电流的比值的方法测量一块材料的电阻, 实际上是欧姆定律 (式 1.7a) 在宏观条件下的应用而已。因此, 通过测量这些物理量, 构成了地震电磁学领域中的两大类研究方法: 场量观测方法 (地电场、地磁场、电磁扰动) 和介质电磁性质观测方法 (地电阻率方法、大地电磁测深方法)。因而, 无论是与地震孕育过程有关的电磁场的变化或是介质电磁性质的变化的研究, 都不能不从这些最基本的规律谈起。因此麦氏方程组作为普遍成立的电磁学理论基础, 也是地震电磁学研究的基本出发点。

第二, 方程组给出了场的动态与源 (电荷、电流) 之间的密切关联。这就是说, 归根结底, 电磁场是有源的; 但是, 另一方面电磁场的理论揭示, 当电磁场的源消失后, 电磁场可以继续存在, 并通过电场和磁场的相互转化而向外传播, 从这一点说, 它又是不依赖于源而存在的。因此, 在一些电磁场方程求解中, 源甚至可能成为方程的边界条件或初始条件的一部分而对无源区域的场的存在和变化发生影响。在地震电磁学方法中, 许多方法体现了电磁场问题的这些特点。

二、电磁场理论在地震电磁前兆方法中的应用

(一) 地电阻率方法

在地电阻率法观测中, 在选定的观测区地面上布设四个电极 A 、 M 、 N 、 B , 组成一个固定的装置系统测量地电阻率 (图 1.1), 其中 A 、 B 为供电电极, M 、 N 为测量电极。直流电源 E , 通过开关 K 、电流检测设备、 A 、 B 电极组成的电路向地下供电 (设检测的电流示值为 I_{AB}), 同时在 M 、 N 两个电极间用电压测量设备测量供电产生的附加电位差 (设测得的示值为 ΔU_{MN}), 按照下式计算所得到物理量, 记为该装置系统测得的地电阻率 ρ_s :

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (1.9)$$

式中, K 为与该装置系统的四个电极相对位置有关的常数, 称为装置系数 (configuration coefficient) 或几何因子 (geometric factor), 可由下式算出:

$$K = 2\pi / \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} - \frac{1}{MB} \right) \quad (1.9a)$$

其中, AM 、 AN 、 NB 、 MB 分别是字母所示的电极间的直线距离。

对 ΔU_{MN} 、 I_{AB} 和 K 的量纲分析, 可以看出式 (1.9) 中的 ρ_s , 具有电阻率的量纲, 其结果与测区下方介质的电阻率有着密切的关联。由于它是在介质表面上测量获得的, 在电法勘探中被称为视电阻率, 在地震预测研究中, 用于定点观测测区下方介质电阻率随时间的变

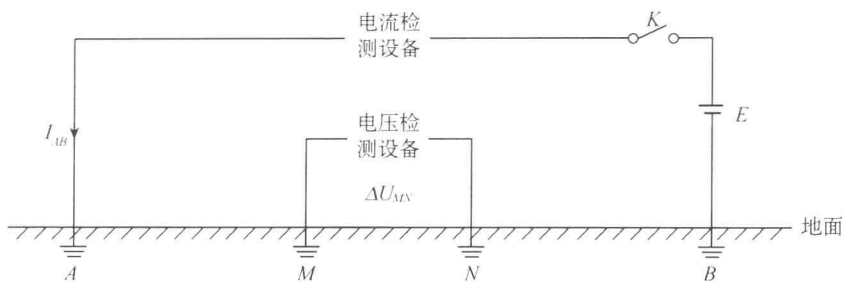


图 1.1 地电阻率装置示意图

化，因此称为地电阻率。电阻率是物质电学属性参数之一，通过人工供电建立的电场与供电电流的比值，确定它的大小，是电磁场理论所提供的基本方法。下文将从电磁场的理论出发，讨论地电阻率观测的原理。

1. 静电场方程

在稳定电流条件下，分区均匀介质中各区麦克斯韦方程组将化为下列形式：

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_i = 0 \quad (1.1b)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_i = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (1.2b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}_i = 0 \quad (1.3b)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_i = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{fi} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{fi} \quad (1.4b)$$

$$\mathbf{j}_{fi} = \sigma_i \mathbf{E}_i = \frac{1}{\rho_i} \mathbf{E}_i \quad (1.7b)$$

由式 (1.2b)， $\nabla \times \mathbf{E}_i = 0$ ，引入电位场 U_i ，可导出：

$$\mathbf{E}_i = -\nabla U_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.10)$$

代入式 (1.1b) 有：

$$\nabla^2 U_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.11)$$

在包含电极 A 在内的分区 ($i=1$)：

$$\nabla^2 U_1 = -\delta(A) \frac{I\rho_1}{2\pi} \quad (1.12)$$

式中， $\delta(A)$ 为狄拉克函数。

在任意两分区均匀的界面上，满足边值关系：

$$U_i = U_k; \quad \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial U_i}{\partial n} = \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial U_k}{\partial n} \quad (1.13)$$

在除电极以外的地表面上，有

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (1.14)$$

在无穷远处有：

$$U|_{\infty} \rightarrow 0 \quad (1.14a)$$

方程组 (1.12) ~ (1.14a) 就是电磁场方程在地电阻率法的具体体现，通过求解该方程组，可以求得通过任意一组布设在地表的供电电极 A （和 B ）的供电回路流过的电流 I_{AB} ，在任意两个布设在地表的测量电极 M 和 N 之间产生的附加电位差 ΔU_{MN} ，从而依据公式 (1.9) 和 (1.9a) 求得相应的地电阻率 ρ_s 。采用人工提供的稳定电流在地表产生的附加电场，来测定介质的电性参数，是这种方法的主要特点。

对于水平层状介质，钱家栋等 (1986) 曾给出过上述方程的解（见本书第二章）：

$$U(r) = U_1(r, 0) = \int_0^{\infty} \frac{I}{2\pi} \lambda Z^{(0)} J_0(\lambda \cdot r) d\lambda \quad (1.15)$$

式中， $J_0(\lambda \cdot r)$ 是零阶贝塞尔函数； I 为通过 A 点向地球介质供电的总强度； $U_1(r, 0)$ 为地面上以供电电极 A 为原点距其 r 处的电位； $Z^{(0)}$ 则满足下列递推公式：

$$Z^{(i-1)} = \frac{\rho_i \lambda Z^{(i)} + \rho_i \cdot \tanh(\lambda \cdot h_i)}{\lambda \rho_i + \lambda Z^{(i)} \cdot \tanh(\lambda \cdot h_i)} \quad (i = n-1, n-2, \dots, 2, 1) \quad (1.16)$$

式中， $Z^{(j)}$ 表示第 $j+1$ 层 ($j=0, 1, \dots, n-2$) 顶面深度处的阻抗值； $\tanh(\lambda h_{j+1})$ 为关于 λh_{j+1} 的双曲正切函数。在利用边界条件确定 $Z^{(n-1)} = \rho_n / \lambda$ 之后， $Z^{(0)}$ 就唯一地通过层面间的阻抗关系式 (1.16) 自下而上递推而确定。

(二) 大地电磁测深法 (石应骏、刘国栋等, 1985)

大地电磁测深法是一种在研究深部电性构造中有着广泛应用的方法。近十几年来，人们将它用于地震危险区定点复测的研究 (张云琳等, 1994, 2001)，研究在一定的时间间隔内，同样地点、同样装置系统下观测结果 (MT 响应函数) 之间的差异，研究这种差异或变化与地震之间的关系，因而亦成为前兆信息的探测方法之一，并且取得了一定的预报效果。

大地电磁法又称 MT (Magnetotelluric) 法，它以地球高空磁层、电离层的电流体系产生的天然变化电磁场作为场源，当其投射到介质表面，一方面在介质内传播，一方面在分区均匀介质界面上反射。这种反射的场又称感应场，对一定结构和一定强度的场源，感应场的结构与强度受到介质电性结构的影响，因而它带出了介质内部电性结构及其变化的信息。因此

MT 也是一种电性结构的探测方法。

1. 定态电磁场

对于变化的天然电磁场, 考虑定态情形, 有:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x, y, z) e^{-j\omega t} \quad (1.17)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}(x, y, z) e^{-j\omega t} \quad (1.18)$$

结合式 (1.5a) 和式 (1.6a), 代入式 (1.1a) 至式 (1.4a):

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_i = 0 \quad (1.1c)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_i = j\omega\mu_i \mathbf{H}_i \quad (1.2c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_i = 0 \quad (1.3c)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_i = \sigma_i \mathbf{E}_i \quad (1.4c)$$

式中, 下角标 $i=1, 2, \dots, m$, 表示第 i 区均匀介质, 其中式 (1.4c) 是在较低频率下忽略位移电流的结果; 而式 (1.1c) $\nabla \cdot \mathbf{E}_i = 0$ 是因为分区均匀介质内部不能积累自由电荷的结果 ($\delta_f = 0$)。

由式 (1.2c) 和式 (1.4c) 可得, $\mathbf{E}_i$ 和 $\mathbf{H}_i$ 分别满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \mathbf{E}_i(x, y, z) + K_i^2 \mathbf{E}_i(x, y, z) = 0 \quad (1.19)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H}_i(x, y, z) + K_i^2 \mathbf{H}_i(x, y, z) = 0 \quad (1.20)$$

式中,

$$K_i^2 = \omega^2 \mu_i \varepsilon_i + j\omega\mu_i \sigma_i \quad (1.21)$$

在真空中,

$$K_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \quad (1.22)$$

在导电介质中, 当 $\omega\varepsilon_i/\sigma_i \ll 1$, 即位移电流相对于传导电流可以忽略时,

$$K_i^2 = j\omega\mu_i \sigma_i \quad (j = \sqrt{-1}) \quad (1.23)$$

在场源为来自高空磁层及电离层的电磁波时, 由电动力学理论 (曹昌棋, 1961), 其在地表以上空间中向下传播满足:

$$\nabla^2 \mathbf{E}_0(x, y, z) + K_0^2 \mathbf{E}_0(x, y, z) = 0 \quad (1.24)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H}_0(x, y, z) + K_0^2 \mathbf{H}_0(x, y, z) = 0 \quad (1.25)$$

其解为平面波:

$$\mathbf{E}_0(x, y, z) = \mathbf{E}_0 e^{j(\mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{r})} \quad (1.26)$$

$$\mathbf{H}_0(x, y, z) = \mathbf{H}_0 e^{j(\mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{r})} \quad (1.27)$$

* 本书中小字体的部分, 内容较深, 供有兴趣的读者参考。

其中,

$$\mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{E}_0 = 0 \quad (1.28)$$

$$\mathbf{H}_0 = \frac{1}{\omega\mu_0} \mathbf{K}_0 \times \mathbf{E}_0 \quad (1.29)$$

$$K_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (1.30)$$

由式 (1.28) ~ (1.30) 可以看出, 在地表以上的空间, $\mathbf{K}_0$ 具有明确的物理意义, 即 $\mathbf{K}_0$ 称为平面电磁波的波矢量, 表示波的传播方向。它与电场 $\mathbf{E}_0$ 和磁场 $\mathbf{H}_0$ 互相正交。在大地电磁测深方法中, 入射方向假定垂直于地表, 则选定 z 轴垂直向下的坐标系, 有:

$$\mathbf{K}_0 = (0, 0, K_{0z}) \quad (1.31)$$

即波矢量仅有 z 方向分量, $K_{0x} = K_{0y} = 0$, $K_{0z} = K_0 = \omega/c$ 。

2. 垂直入射的电磁波在均匀半空间导电介质中的传播

根据电动力学的理论, 当电磁波垂直入射到一个导电介质充满均匀半空间的表面, 则介质内电磁场呈现衰减的传播过程, 其结论有三条:

(1) 波矢量为复数。

$$K^2 = j\omega\mu\sigma \quad (1.32)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}' + j\tau \quad (1.33)$$

$$K' = \tau = \sqrt{\mu\omega/2\rho} \quad (1.34)$$

且 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{K}'$ 与 τ 均只有垂直方向分量。

(2) 介质内电磁场沿垂直方向边传播边衰减:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_0 e^{-\tau z} e^{j(K'z - \omega t)} \quad (1.35)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_0 e^{-\tau z} e^{j(K'z - \omega t)} \quad (1.36)$$

式中, $\mathbf{E}_0$ 和 $\mathbf{H}_0$ 为介质表面 ($z=0$) 处的电场与磁场。定义穿透深度

$$h = \frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \frac{1}{K'} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1.37)$$

是相应波长的 $1/(2\pi)$ 。在 MT 方法中, h 即是趋肤深度。

(3) 介质内电场和磁场矢量方向仍然相互正交, 且与介质表面平行。但由于波矢量为复数, 两者之间有 $\pi/4$ 的相位差, 即:

$$H_z = E_z = 0 \quad (1.38)$$