

地震监测技术系统系列教材

地震电磁观测技术

国家地震局科技监测司



地震出版社

地震科学联合基金资助

地震监测技术系统系列教材

地震电磁观测技术

国家地震局科技监测司

地震出版社

1995

内 容 提 要

本书是国家地震局科技监测司组织多名专家共同编写的地震观测岗位培训教材之一,是一本有关地球电磁学观测技术的教材。全书注重方法和技术的结合,基础知识和最新进展的结合;在介绍地球电磁学的物理基础、实验基础和技术基础之后,着重介绍观测方法,专用仪器设备原理、结构和使用。本书适合地电、地磁、地震电磁波观测台站人员使用,亦适合研究人员和相关专业师生使用。

地震监测技术系统系列教材

地震电磁观测技术

国家地震局科技监测司

责任编辑:姚家楠

责任校对:王花芝

*

地震出版社出版

北京民族学院南路9号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 21.25印张 544千字

1995年10月第一版 1995年10月第一次印刷

印数 0001—1800

ISBN 7-5028-1204-0/P·740

(1597) 定价:20.00元

《地震监测技术系统系列教材》编委会

主 编	孙其政			
副主编	苗良田	张奕麟	李宣瑚	吴宁远
编 委	赵仲和	钱家栋	车用太	陈建民
	周锦屏	赖锡安	耿世昌	陈德福
	傅子忠	夏恩山	林榕光	崔德海
	修济刚	李友博	赵和平	沈建华
	阴朝民	潘怀文	吴书贵	高荣胜
	李 健	(兼秘书)		

《地震电磁观测技术》编委会

主 编	钱家栋	林云芳		
编 委	(按姓氏笔划为序)			
	王德志	王檀义	傅德川	周锦屏
	林云芳	赵家骧	赵和云	钱书清
	钱家栋	程安龙	詹志佳	

序

地震监测预报是防震减灾的一个重要环节，也是整个防震减灾工作的基础。破坏性地震给人类造成的灾难，使地震预报成为人们长期以来追求的目标，成为当代地球科学中最富有魅力的一项前沿性课题。近代科学技术的进步逐渐为实现这种目标提供了可能。特别是经过近30年来艰辛的探索，人们在认识地震发生过程，掌握和应用地震预报理论、技术、方法等方面已经取得了长足的进步。在地震预报的实际应用中所获的某些成功，对减轻地震灾害的经济损失和鼓舞人们实现预报地震的信心起了积极的作用。

地震预报作为一个难度很大的科学问题，期望在短时间内从根本上过关是不切合实际的，它需要几代人做坚持不懈的努力。因此，提高地震预报工作者的业务水平与技术素质是当务之急的大事。为便于现在从事这一领域工作的科技人员学习国内外已取得的成果，也便于未来将要从事这一领域工作的科技人员继承、检验、发展地震预报的理论、技术、方法，国家地震局科技监测司组织有关专家编写了《地震监测技术系统系列教材》和《地震预报系列教材》丛书。

这两套丛书包括了目前地震监测预报实践中各种常用的学科方法，它是广大地震科技工作者长期以来辛勤劳动的结晶，反映了近30年来，特别是近十多年来地震监测预报“清理攻关”、“实用化攻关”、“深入攻关”的成果。这两套丛书既适用于地震监测预报工作人员的培训，也对广大科技人员从事地震科学研究，特别是地震监测预报研究有重要的参考价值。笔者期望并相信这两套丛书的编写、出版，将对提高地震监测预报工作者的业务水平，促进地震监测预报研究的深入开展和进一步减轻地震灾害损失，发挥积极的作用。

陈章立

1994.12.20

前 言

在物理学发展史上,电磁现象早已为人们所感知。指南针的应用和摩擦生电效应是人们最早认识电磁现象的例子。但是,对电磁现象的科学研究,始于18世纪。18世纪80年代所确定的库仑定律奠定了电学的基础;18世纪末伏打电池问世,第一次用运动的电荷给人类提供了稳恒电流。1820年初电流的磁效应由奥斯特所确定,随后描写“电流元对任意方向的磁极的作用力”的毕奥-萨伐尔定律,将电和磁两种现象密切联系起来。1831年电磁感应现象被发现,磁场的变化在周围的闭合导体上产生出感应电流,并最终由麦克斯韦于1862年建立起电磁场理论。这一理论在1887—1898年由赫兹产生电磁波的实验所证实。于是,一个全新的、完整的现代电磁学理论体系宣告诞生。

麦克斯韦电磁理论,以电场和磁场的相互转变以及电磁场与介质的相互作用,为其突出的特点,证实了场的物质性,极大地推进了现代物理学的发展。

地球电磁学是在现代电磁学的基础上推进和发展的。如前所述,尽管人们对地球磁场的认识很早,但对地球磁场的深入认识和本质的探讨,却是在现代电磁场的理论确定之后,并随着探测技术的发展而前进的。地球电磁学实质上是电磁理论在地球介质条件下的应用,从而形成了种种特定的地球电磁学方法。本书着重介绍某些地球电磁学方法在地震研究中的应用。地震是发生在地球内部的一种自然现象,地震的孕育和发生将伴随有介质电磁性质的改变以及产生一些与之相关连的电磁现象。在地震研究中电磁学科的基本任务,就是基于地球电磁学的理论和方法技术,探索与孕震过程有关的地球介质的电磁性质的变化以及相关的规律,为地震预报以及孕震过程的理论研究服务。为了做到这一点,对这些方法的物理内容和技术特点的了解当然是必不可少的。

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辐射方法。在电磁辐射方法之前冠以“地震”一词,主要是因为它不是以一般的电磁辐射为研究对象,而是专门寻求可能与地震孕育和发生相关连的物理过程。

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辐射场的测量等。

和地震研究的所有学科一样,连续的或定期重复地定点监测地球电磁场以及地球介质的电磁属性的时空演化是电磁学科各种方法的基本特点之一。特别注意这种时空演化与地震的孕育和发生过程的物理联系,寻求各种与之有关的异常现象,则是地震研究中电磁学科与地球物理学中同类学科相区别的主要特点。鉴于这种特点,它们在观测技术上与相应的地球物理观测技术,既有密切的联系,又必须加以发展和改进。继承和发展、移植和改造,是两者之间关系密切而又相互区别的最贴切的表达。本书是一本以阐述观测技术为主的教材,在有关部分,读者将会对此有更具体的了解和更深刻的认识。

地震研究的基本任务,决定了地震研究中的电磁学科,如同整个地球科学一样,是一门观测科学,需要首先有一个较为科学而完整的观测台网。由于人们对地震的认识尚处于探索阶

段,地震,特别是大地震其发生的时间、地点和强度存在着相当的不确定性,使台网合理布局的研究受到很大的限制;而大范围均匀密集布台既不科学也不经济。根据20多年来实践的经验,集中在未来一定时间内可能发生地震的区带以及社会政治、经济地位十分重要的地区较密集地布设台网,是当今地震研究中的主要方式和切实可行的对策。

我国地电、地磁台网的大规模建设均在50—60年代,其中地磁台网适应于国际地球物理年的要求,于50年代后期即开始建设。早在1874年在上海佘山建立的地磁观测台,则是世界上较早的地磁观测台之一。我国的地电台站总数为85个,最多时达100余个;地磁台站总数达169个,另加野外流动磁测网800多个测点。它们主要分布在我国各主要活动构造带、地震重点监视区和地震预报实验场。就地震监测的要求而言,我国电磁台站的规模和资料积累时间之长,在世界同行中可属首位,相当多的台站连续观测超过20年,这些资料中包含了地震活跃期的台站观测记录,也包含了地震平静期的结果。强震震例的电磁记录以及不同时期观测结果对比的研究成果,是对世界地震预报研究的重要贡献。同时,地震系统管理着我国的地磁台网,其丰富的观测资料也是我国地球物理学及空间物理学研究的基础素材之一,它承担着国际地磁资料交换的任务,在世界范围的地球科学研究中占有一席重要的地位。

本书是一本电磁学科观测技术的培训教材。和传统的编排方法略有区别,作为一种尝试,它把电磁学科作为一个整体,而在必要时又保持各学科方法的独立性和系统性,以便读者既能掌握学科整体上的联系,又能把握各方法的特色。

本书第一章介绍地球电磁学的基础知识,因为任何技术的发展都必然与一定的基础理论相联系,且在观测技术上各种方法虽有其独立性,但必然也有其相通和共同的基础内容。基础知识的内容包括物理基础、实验基础和观测技术基础。第二章是地电学和地磁学方法的简介。在这一章的最后,我们汇集了一些迄今为止的研究成果,向读者介绍地球的电磁环境及地球的电性结构。第三章到第五章专门论述地电学有关的观测技术、日常观测工作、观测台网建设,以及预报方法简介。第六章到第九章则专门涉及地磁学方面的内容。第十章专门介绍地震电磁辐射方法,这一章内容比较简略,其原因是该方法在地震预报中应用起步稍晚,目前正处于向观测正规化发展的阶段;在经历了长时间地震实践检验之后,这种方法的兴起和发展,正说明了它有着更广阔的发展前景。第十一章则侧重介绍国内外电磁观测技术发展动态与展望以及它在国民经济建设中的作用或应用。这一章涉及内容既广又深,本书将兼顾地震研究中的电磁学科及地球科学中的电磁学科两方面予以综述,以便读者能有更宽的知识面,供有兴趣的读者进一步深入钻研之参考。

按照编书的要求,本书做为台站监测人员自学用书,主要的读者是中专及大专水平的读者,以中专水平的读者为主。

本书在每一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。

本书在国家地震局科技司组织与指导下,由电磁学科观测技术协调组指定的编写组集体编写。参加撰稿人还有(按姓氏笔划为序):马森林、王盛飞、刘昌谋、关华平、安郁秀、陈智勇、吴伯荣、范国华、张德齐、周军成、郑沙樱、赵永芬、赵学敏、姚同起、郝锦绮、高玉芬、袁家治、黄蔚北、曾小苹。

由于我们水平有限,加之时间紧迫,本书编写难免出现疏漏及错误之处,敬请读者批评。

目 录

第一章 地球电磁学基础知识	(1)
第一节 地球电磁学方法的物理基础	(1)
1.1 静电场	(1)
1.2 静磁场	(4)
1.3 交变电磁场	(9)
1.4 岩石和矿物的导电性	(13)
1.5 岩石的磁性	(16)
1.6 地球电磁学两类物理量的观测	(18)
1.7 视电阻率的概念和测量方法	(18)
第三节 与地震有关的电磁效应的实验基础	(21)
2.1 受载岩石变形过程中的电阻率变化实验结果	(21)
2.2 受载岩石变形过程中产生的磁效应	(25)
2.3 与介质电性变化有关的感应磁效应	(28)
2.4 流体运动引起的电效应及磁效应	(30)
第三节 电磁观测技术基础知识	(30)
3.1 测量误差	(30)
3.2 测量仪器的准确度	(35)
3.3 测量仪器的输入阻抗	(35)
3.4 测量仪器的抗干扰能力	(36)
3.5 地震监测工作对电磁观测系统的基本要求	(37)
参考文献	(37)
第二章 地电学、地磁学及地球电磁结构	(39)
第一节 地电学简介	(39)
1.1 地电场	(39)
1.2 直流电法	(41)
1.3 激发极化法	(44)
1.4 大地电磁测深法	(45)
1.5 人工场源交变电磁法	(46)
1.6 地震预报中的地电装置系统	(47)
第二节 地磁学简介	(49)
2.1 地球基本磁场	(49)
2.2 地球的变化磁场	(60)
2.3 地球的电磁感应研究	(70)
第三节 地球的电磁环境与地球的导电结构	(74)

3.1	磁层及磁层电流体系·····	(75)
3.2	电离层及电离层电流体系·····	(76)
3.3	对流层电流·····	(78)
3.4	地球表面电场——地电场·····	(79)
3.5	地球内部电导率分布·····	(80)
参考文献·····		(82)
第三章 地电观测技术及日常观测工作·····		(83)
第一节 地电观测系统的外部设施·····		(83)
1.1	电极·····	(83)
1.2	外线路·····	(87)
第二节 地电观测系统的供电设备·····		(95)
2.1	供电设备的基本要求·····	(95)
2.2	几种常用的供电设备·····	(96)
2.3	2A 稳流电源·····	(96)
2.4	WL-5 稳流电源·····	(98)
第三节 ZD8 数字地电仪·····		(101)
3.1	主要技术指标·····	(101)
3.2	ZD8 地电仪的硬件结构·····	(101)
3.3	主要工作流程·····	(103)
3.4	ZD8 地电仪的报警功能·····	(103)
3.5	ZD8 提高观测精度的主要技术措施·····	(104)
第四节 C·ATS 数字地电仪·····		(105)
4.1	C·ATS 的硬件结构·····	(105)
4.2	C·ATS 的软件系统·····	(110)
4.3	C·ATS 的主要技术指标·····	(114)
第五节 中心设施的安装与调试·····		(115)
5.1	各类测量仪器安装技术要求·····	(115)
5.2	设施运行前的调试·····	(118)
第六节 地电观测系统的辅助设施·····		(120)
6.1	配线板和操作台·····	(120)
6.2	避雷系统·····	(120)
6.3	标定检查仪器·····	(122)
第七节 ZD-9 大地电场仪简介·····		(123)
7.1	概述·····	(123)
7.2	ZD-9 大地电场仪主要技术指标·····	(124)
7.3	ZD-9 大地电场仪主要功能和特点·····	(124)
7.4	ZD-9 大地电场仪工作情况·····	(125)
第八节 地电台站观测工作·····		(126)
8.1	地电观测·····	(126)

8.2 观测数据处理	(127)
8.3 地电观测系统的维护、保养	(130)
第九节 我国地电观测仪器的发展	(134)
参考文献	(137)
第四章 地电观测台网的建设	(138)
第一节 地电台网布设的原则与我国地电台网的分布	(138)
1.1 台网布设的原则	(138)
1.2 监测能力与网内台站密度的基本要求	(138)
第二节 地电台站选建的台址条件及环境条件	(140)
2.1 构造条件	(140)
2.2 测区地下介质结构条件	(140)
2.3 测区地下介质水文条件	(142)
2.4 测区地形地貌条件	(142)
2.5 为减少观测干扰所需的其他条件	(143)
第三节 地电台站选建的工作程序	(146)
3.1 台站选建的主要环节	(146)
3.2 台址位置的粗选	(146)
3.3 资料收集	(146)
3.4 现场勘测工作	(147)
3.5 试记	(148)
3.6 观测室的建设	(149)
参考文献	(149)
第五章 地电预报地震的方法简介	(150)
第一节 典型震例分析	(150)
1.1 唐山 7.8 级地震	(150)
1.2 松潘 7.2 级地震	(155)
1.3 澜沧-耿马 7.6 级地震	(159)
1.4 部分中强震震例	(159)
1.5 我国大地震及中强震前后地电阻率变化的基本特征	(159)
第二节 地电分析预报工作方法与流程	(162)
2.1 数据的整理和预处理	(162)
2.2 地电异常性质的分析与判定	(163)
2.3 地震三要素的预报	(164)
2.4 《地震分析预报方法指南》地电学科方法部分的软件系统	(164)
参考文献	(164)
第六章 地磁观测技术	(165)
第一节 地磁观测系统的基本概念	(165)
1.1 地磁信号的特点	(165)
1.2 地磁观测的基本任务	(165)

1.3	地磁观测系统的实际组成及功能的划分	(165)
1.4	观测仪器组合	(166)
第二节	经典地磁记录仪	(166)
2.1	仪器结构	(166)
2.2	单悬丝式磁变仪	(168)
2.3	刃口式磁变仪	(172)
2.4	磁变仪的温度补偿	(174)
2.5	磁变仪的布局、安装与调试	(175)
第三节	磁通门磁力仪	(175)
3.1	磁通门探头	(175)
3.2	磁通门磁力仪的工作原理及其稳定性	(177)
3.3	磁通门磁力仪的应用	(179)
第四节	光泵磁力仪	(180)
4.1	工作原理	(180)
4.2	光泵磁力仪	(181)
第五节	超导磁力仪	(181)
5.1	超导现象	(181)
5.2	超导磁力仪	(181)
第六节	绝对观测仪器	(183)
6.1	磁偏角的测量	(183)
6.2	磁倾角的测量	(185)
6.3	偏角/倾角磁力仪	(187)
6.4	质子旋进磁力仪	(189)
6.5	质子旋进分量磁力仪	(190)
6.6	其他绝对观测仪器	(194)
第七节	地磁脉动仪器	(195)
参考文献		(198)
第七章	地磁台站的日常观测工作	(199)
第一节	标度值的测定	(199)
1.1	标度值线圈常数	(199)
1.2	强度标度值和角度标度值的换算关系	(199)
1.3	标度值的测定方法	(199)
1.4	标度值测量的要求	(200)
1.5	标度值与纵值 n 的关系	(201)
第二节	基线值的测定	(201)
2.1	基线值的功能	(201)
2.2	基线值的意义与计算方法	(201)
2.3	影响基线值测定结果的主要因素	(202)
第三节	标度值、基线值图件	(202)

3.1	图件内容	(202)
3.2	图件坐标	(203)
3.3	时间段要求	(203)
3.4	图件标注	(203)
3.5	平滑曲线	(203)
第四节	磁照图及其处理	(203)
4.1	换相纸	(203)
4.2	洗相技术	(204)
4.3	量图	(205)
第五节	仪器比较	(206)
5.1	目的意义	(206)
5.2	技术思路	(206)
5.3	比较方法	(207)
第六节	数据常规处理	(207)
6.1	地磁观测报告	(207)
6.2	K 指数报告	(211)
6.3	地磁快变化报告	(215)
6.4	磁暴报告	(217)
第七节	台站观测资料质量的评定	(220)
7.1	标度值的质量检验	(220)
7.2	基线值的质量检验	(220)
7.3	月均值图在资料质量检验中的应用	(221)
7.4	日均值差值曲线的应用	(221)
7.5	对量图质量的检验	(222)
7.6	磁暴分析和 K 指数的检验	(223)
7.7	单台如何进行资料质量检验	(223)
第八节	野外地磁测量	(224)
8.1	地磁测网、测点与梯度测量	(224)
8.2	地磁场总强度测量	(225)
8.3	地磁场总强度测量资料的常规分析处理与质量评定	(227)
8.4	地磁场分量测量	(232)
第九节	地磁脉动观测	(234)
9.1	目的意义及观测条件	(234)
9.2	地磁脉动观测	(234)
9.3	观测记录	(235)
9.4	资料处理	(236)
	参考文献	(237)
第八章	地磁观测台网与测网的建设	(239)
第一节	地磁基本台网的布局原则	(239)

第二节 台站选址.....	(239)
2.1 台址背景资料	(240)
2.2 区域地磁场测量	(241)
第三节 地磁台站的建设.....	(241)
3.1 台站的平面布设	(241)
3.2 建筑材料的磁性检验	(246)
3.3 地磁台场地磁场梯度测量	(246)
3.4 观测室与记录室磁场梯度测量	(246)
3.5 墩差测量	(248)
3.6 仪器布设	(248)
3.7 地磁台站仪器配套	(249)
第四节 观测环境的监测与保护.....	(249)
参考文献.....	(249)
第九章 地磁预报地震方法简介	(250)
第一节 震磁研究的科学思路.....	(250)
第二节 与地震有关的地磁前兆异常现象.....	(251)
2.1 1975年2月4日海城7.3级地震	(252)
2.2 1976年7月28日唐山7.8级地震	(254)
2.3 江苏地区中强震前的地磁异常	(254)
2.4 1991年3月26日大同5.8级地震	(257)
2.5 中强震、强震前地磁前兆的主要特征	(258)
第三节 地磁分析预报工作的基本要求与步骤.....	(261)
3.1 干扰因素及其排除	(261)
3.2 异常的落实与判别	(262)
第四节 地磁分析预报的主要方法.....	(262)
4.1 差值法与统计参量法	(262)
4.2 “低点位移”法	(263)
4.3 地磁转换函数法	(264)
4.4 短周期幅度比法	(265)
4.5 其他方法	(265)
参考文献.....	(267)
第十章 地震电磁辐射方法	(269)
第一节 震前电磁辐射现象和研究概述.....	(269)
第二节 岩石破裂与电磁辐射的实验研究.....	(270)
2.1 实验室实验的主要结果	(270)
2.2 野外试验的结果	(271)
第三节 电磁辐射的观测技术与日常观测工作.....	(271)
3.1 观测系统简介	(271)
3.2 观测资料的常规处理	(272)

3.3	观测资料的质量管理	(273)
3.4	震例观测报告	(273)
第四节	电磁辐射观测台网的选址与布设	(274)
第五节	地震电磁辐射前兆信号的识别与地震短临预报	(274)
5.1	各类干扰波形的识别与排除	(274)
5.2	地震电磁辐射前兆信号的特征与分类	(276)
5.3	典型震例分析	(277)
参考文献		(281)
第十一章	地震研究中电磁学方法发展动态及地球电磁学的应用	(282)
第一节	地震研究中地电方法发展动态与进展	(282)
1.1	国内外发展动态	(282)
1.2	发展趋势	(284)
第二节	地电方法在国民经济建设中的应用	(285)
2.1	电法在经济建设中的服务领域	(285)
2.2	常用探测方法简介	(286)
第三节	地磁观测技术的发展趋势	(291)
3.1	地磁观测的新原理、新仪器和新方法	(291)
3.2	地磁观测的数字化和自动化	(291)
3.3	全球地磁传输台网(INTERMAGNET)	(293)
3.4	卫星磁测和海底磁力仪	(293)
3.5	我国地磁观测技术发展展望	(293)
3.6	震磁前兆及其地震预报的探索研究	(294)
第四节	地磁学研究与应用	(296)
4.1	地磁学研究与应用领域	(297)
4.2	地磁学在国民经济建设中的应用	(298)
第五节	电磁辐射现象在地球科学中的应用	(300)
5.1	国外地震地磁辐射现象的观测和应用	(300)
5.2	电磁波层析技术在工程中的应用	(300)
5.3	地震电磁辐射现象的进一步研究	(303)
参考文献		(303)
附录一	ZD8 地电仪电原理介绍	(305)
1.1	A/D 转换器	(305)
1.2	ZD8 其他部件	(306)
附录二	地磁仪器型号、名称	(323)
2.1	相对记录仪	(323)
2.2	绝对观测仪	(323)
附录三	地磁台站安全距离一览表	(325)
附录四	地磁单位换算	(326)

第一章 地球电磁学基础知识

在介绍电磁学科观测技术之前,学习和了解电磁学特别是地球电磁学的基础知识是十分必要的。在本章中,我们将对地球电磁学方法的物理基础,与地震有关的电磁效应的实验,以及相应的观测技术基础作重点介绍。

第一节 地球电磁学方法的物理基础

地球电磁学包括地电学、地磁学两大分支,其物理基础来自物理学中的电学和磁学以及建立在变化电场和变化磁场研究基础上的电磁感应现象,统称电磁学。

在物理学的发展史上,人们逐渐地认识到电场和磁场分别与电荷和磁铁的存在有关,电荷和磁铁就是它们的源。在变化的电磁场被认识以后,人们发现,即使作为场源的电荷或磁铁“消失”之后,场还可以不依赖于它们而存在。由此可以更加清晰地看出场的物质性和客观性。

此外,早期关于磁场的认识,还将磁场与电场相对比,引入了所谓“磁荷”的磁场的概念。但近代的物理学证明,磁荷是不存在的,磁铁的磁场并不是源于磁铁内部的磁荷,而是源于其中的分子电流。关于这方面的理论,需要在大学教本中加以阐述。

1.1 静电场

1.1.1 点电荷的电场

电场是一种特殊的物质,它由电荷所产生,电场的物质属性用电场强度来表征。首先,我们来讨论一种特殊电荷所产生的电场,即点电荷的电场。所谓点电荷,我们假定载有电荷的物体其几何尺寸是这样的小,以至可以将它看成一个几何上的点,电荷“均匀”分布于(集中于)其上。

定义真空中点电荷 Q 在任意一点 P 的电场强度 $E(P)$ 为:

$$E(P) = \frac{Q}{r_P^3} \mathbf{r}_P \quad (1.1.1)$$

式中 r_P 为自点电荷到 P 点的矢径,当 $Q > 0$ 时, P 点电场的方向与矢径 r_P 的指向相同,当 $Q < 0$ 时则相反。

在电场中的任何点电荷 q 都将受到电场的作用力 $F(P)$,其大小可由下式确定:

$$F(P) = qE(P) = \frac{qQ}{r_P^3} \mathbf{r}_P \quad (1.1.2)$$

这时点电荷 Q 所受力的方向由 qQ 的符号所确定。实际上式(1.1.2)即是著名的库仑定律。在实际介质中式(1.1.1)与(1.1.2)的右方还应乘以因子 $\frac{1}{\epsilon}$, ϵ 为介质的介电常数。这是由于实际介质中存在着束缚电荷, ϵ 的大小反映了束缚电荷对电场的影响。

当实际的电荷载体尺寸不能看作近似为零时,公式(1.1.1)及(1.1.2)中的 Q 将可以视为载体上许多无限小的载体上的点电荷的叠加,即:

$$Q = \iiint_{(V)} \rho(x, y, z) dV$$

或:

$$Q = \iint_{(S)} \omega(x, y, z) dS$$

式中 ρ 和 ω 分别是电荷以体电荷或面电荷形式分布时的体电荷密度和面电荷密度。于是式(1.1.1)变为:

$$E(P) = \iiint_{(V)} \frac{\rho(x, y, z)}{r_P^3} \mathbf{r}_P dV \quad (1.1.3)$$

或:

$$E(P) = \iint_{(S)} \frac{\omega(x, y, z)}{r_P^3} \mathbf{r}_P dS \quad (1.1.4)$$

式中 $\mathbf{r}_P$ 为自 (x, y, z) 点到 P 点的矢径。当电荷载体的线性尺度与载体到 P 点的距离相比小得多时,式(1.1.3)和(1.1.4)中的 $\mathbf{r}_P$ 可视为常矢量,因而可将其移出积分号外。于是(1.1.3)和(1.1.4)均可回归到式(1.1.1)。这说明,尽管实际上点电荷是不存在的,但当所研究的点与载体间的距离足够远时,可近似地将载体视为点电荷。

1.1.2 稳定电流场

在中学物理课本中,导电回路中电流的大小 I (单位:A) 满足欧姆定律:

$$I = V/R \quad (1.1.5)$$

式中 V 是电池或电源的电压(单位:V), R 是电路中的电阻(单位: Ω),它可以根据公式(1.1.5)设计的方法去测量。电阻 R 的大小反映了介质导电性能的高低,与用电器或导线的材料及其几何尺寸有关。

当供电电源电压不变时,供电回路中的电流是个常数,这样在供电回路中有一个稳定的电流在流动,我们称在供电回路中存在一个稳定电流场。

在大学物理教本中,稳定电流场用电流密度矢量 $\mathbf{j}$ (单位:A/m²) 来表征。通过一个导电介质某一截面 S 的电流 I 的大小由下列公式来表式:

$$I = \iint_{(S)} \mathbf{j}(x, y, z) \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1.6)$$

所谓稳定电流场是指,介质中各点电流密度 $\mathbf{j}$ 与通过一定截面的电流强度 I 均不随时间 t 变化,“稳定”一词,即由此而来。电流密度是一个矢量,它除了沿垂直于截面方面的分量外,尚有沿平行于截面方向的分量,它们对穿过截面的电流的大小没有贡献。

在地球物理学中,研究对象地球是连续介质,当向大地提供稳定电流时,必须了解大地电流场的分布。为了阐述清楚这个问题,需要引用大学《电动力学》(曹昌祺,1961)教本中的理论。

在电动力学中关于稳定电流场有下列基本性质:

(1) 均匀导体内部不能积累电荷,在分区均匀的介质中,电荷仅仅积累在两种性质不同导体的分界面上。

(2) 导电介质内部及其表面上的电荷是稳定的,与时间无关;导电介质内部的电场分布唯一地由这些分布电荷所确定,因而导电介质内部的电场是静电场,亦与时间无关

(3) 分区均匀导电介质内部的电流密度分布唯一地由电场和介质的导电性所决定。

足下列公式：

$$j_i(x, y, z) = \sigma_i E_i(x, y, z) = \frac{1}{\rho_i} E(x, y, z) \quad (1.1.7)$$

式中的 σ_i 和 ρ_i 分别是第 i 个分区均匀导电介质的电导率和电阻率 ($\sigma_i = 1/\rho_i$)。由于介质内电场是稳定的, 介质内的电流密度分布亦是稳定的, 与时间无关。

(4) 在分区均匀介质界面两侧, 电场矢量的法向分量及电流密度矢量的切向分量可以不连续, 而电场矢量的切向分量及电流密度矢量的法向分量一定是连续的。因此界面上积累的面电荷密度的大小唯一地由界面两侧电场法向分量的差值所确定, 即:

$$\begin{aligned} \omega_{ik} &= \frac{1}{4\pi} (E_{in} - E_{kn}) \\ &= \frac{1}{4\pi} (\rho_i j_{in} - \rho_k j_{kn}) \\ &= \frac{1}{4\pi} (\rho_i - \rho_k) j_n \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

式中 ρ_i, ρ_k 分别为界面两侧第 i 种介质和第 k 种介质的电阻率; $E_{in}, E_{kn}, j_{in}, j_{kn}$ 分别为界面两侧电场和电流密度矢量的法向分量; n 为界面的法线方向, 从介质 i 指向介质 k ; ω_{ik} 为界面上点 (x, y, z) 处的面电荷密度。记 $j_{in} = j_{kn} = j_n$ 。

这段文字所阐述的物理含义是, 在稳定电流条件下导电介质内表征电流场的电流密度矢量, 是由该点的电场和该点的介质导电性能所决定的, 电荷流动的结果导致只在分区均匀介质的界面上才能积存电荷; 而介质内的电场的分布又唯一地由电荷的分布所确定。根据这一段文字所阐述的原理, 我们可以很方便地将初等物理学中的稳恒电流的概念, 从理论上将其推广到任意形状的物质材料中去。后面的介绍将要说明, 这种分析对于一般导电材料包括地球介质的导电性质的测量将有重要的意义。图 1-1 是用一个直流电源经过电极向均匀半空间导电介质提供稳定电流时在介质内的电流场分布示意图。

1.1.3 点电源的电荷

在向大地提供稳定直流电的条件下, 电流通过电极送入大地, 在大地介质中形成一个稳定的电流场。这里我们把大地视为一个导体。实际上它和金属导体在导电机理上有很大的差别, 并且不同的岩石和土层, 其导电性能会有相当大的差异 (见本章 1.4), 但是只要不是绝对的绝缘体, 前面提到的导电介质的理论就是适用的, 只是导电参数的值不同而已。

如 1.1.2 中所述, 在向大地提供稳定电流的情况下, 只有下列区域可能积存电荷: ① 电极与大地的接触处; ② 大地的表面; ③ 在地下介质中任意两种分区均匀介质的界面上。例如对于层状结构的情形, 积存电荷分布于任意两层之间的界面上; 均匀介质中的一些大的矿物包体、溶洞的表面等等。

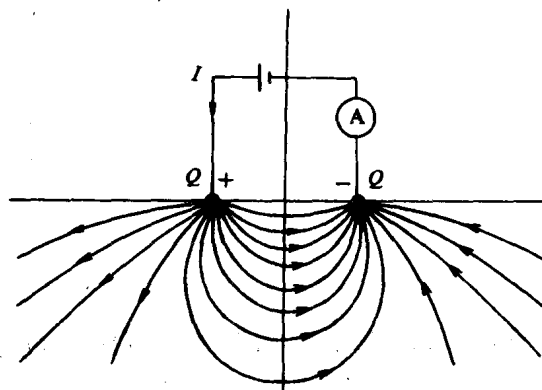


图 1-1 均匀半空间介质中的稳定电流场