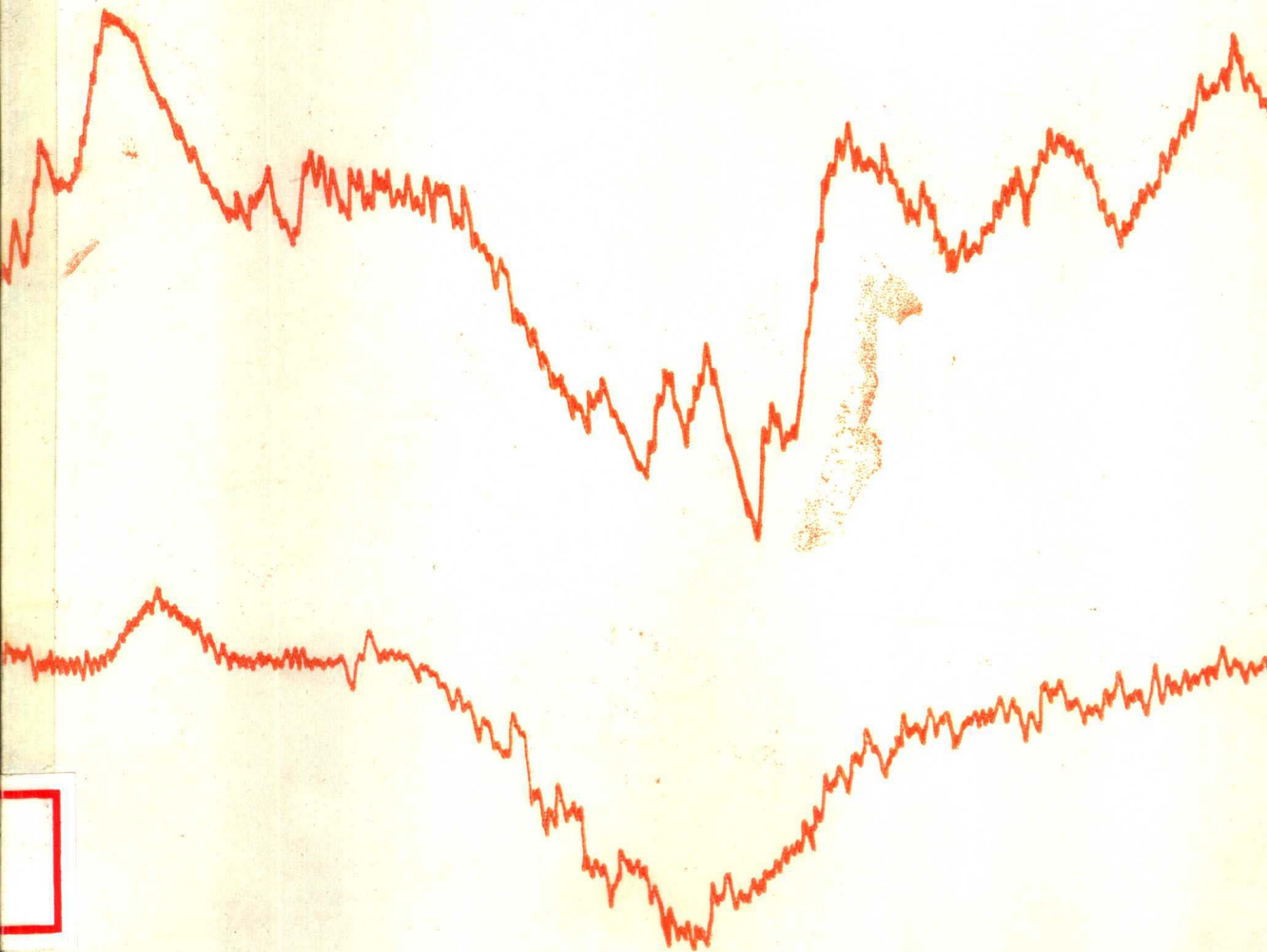


高等学校 教学用书

煤田电法勘探

李志聃 编



中国矿业大学出版社

高等学校教学用书

煤田电法勘探

李志聃 编

中国矿业大学出版社

前 言

《煤田电法勘探》是根据煤炭高等院校勘查地球物理专业本科四年制教学大纲编写的教材。教学时数为130~140学时。本书主要选择煤田物探中广泛应用的、或近年推广使用的、或较有前途的一些主要方法。考虑到教学的需要,以及为物探、地质专业教师及野外工程技术人员提供一本较全面的参考书,书中某些章节作了较详细的介绍,特别是对电法基本理论和数据处理部分进行了全面、系统的阐述。

本书是以中国矿业大学勘查地球物理专业82、83和84级教学讲义为基础,按照电法勘探基础和电法数据处理教学大纲的要求重新编写的,部分内容做了较大的改动(如电测深数字解释和电磁法勘探等)。本书内容侧重于电法勘探基础理论、基本方法和电法数据处理,目的在于使读者从理论到方法全面深入地掌握电法勘探各个工作环节,以便更好的完成找矿勘探的地质任务。

有关电测深处理实用程序研制参加者有高缚麟、李志聘、凌群、孙宏志等同志;本书第十四、十五章部分方法依照原中国矿业大学李志聘、周万澄同志编写的煤田电法勘探讲义为基础,根据国内外交流电法的发展和近年煤田物探引进的新技术,重新做了调整、补充和修编,其中一些野外工作实例是周万澄同志收集、整理提供的。有关充电法和自然电场法实际资料是中国煤田地质局黄治平高级工程师提供的。

本书委托中国地质大学(北京)李金铭教授审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此深表感谢。

由于笔者水平有限、编写时间较紧,肯定会存在一些缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者

1989年8月

绪 论

电法勘探是勘探地球物理学主要学科之一。电法勘探是以研究地壳中各种岩石、矿石电学性质之间的差异为基础,利用电场或电磁场(天然或人工)空间和时间分布规律来解决地质构造或寻找有用矿产的一类地球物理勘探方法,通称为电法。

在电法勘探中,利用矿石和岩石的电学性质有:导电性(用电阻率 ρ 表示)、介电性(用介电常数 ϵ 表示)、导磁性(用导磁率 μ 表示)和激电性(用极化特性参数表示)。由于不同岩石、矿石电学性质上的差异,都可引起电磁场(人工或天然)的空间分布状态和时间分布规律发生显著变化,因此可通过对电磁场的观测、分析和研究它们的分布状态和分布规律,达到寻找矿产资源或查明地下地质构造的目的。

在自然界中,任何一种地质体往往或强或弱地表现出多种电学性质。在查明地质构造或直接找矿中,可以单独利用其表现强烈的一种性质;由于物探解释的多解性,或为了更详尽地从不同方面了解探查对象的状态,亦可同时或分别利用其中两三种或全部电学性质。选用哪几种参数或全部参数进行观测,决定于勘探目标的赋存状态、地电条件和地形地质条件。根据具体条件选用不同的仪器设备和适当的观测方法。按场源形式、工作方式及地质目标等方面的不同,电法本身又派生出许多不同分支方法。目前,在实际工作中得到应用的已有 20 余种,处于实验研究阶段的电法方法,还有很多种。研究煤田构造的煤田电法勘探,是用其中一些主要方法,如电测深法、电剖面法及电磁变频测深法等。

电法勘探较其它物探方法具有研究参数多、场源和装置形式多样化的特点,因而派生出适用于不同探查目标和不同地质地电条件的多种方法。电法方法分支虽很多,但有些方法很类似,为了研究和学习方便,电法勘探常按不同方案来分类。如按观测场所不同分类,可分为:航空电法、地面电法、海洋(或水上)电法和矿井(或井中)电法;如按勘探地质目标来划分,可分为四类:金属电法、石油电法、煤田电法及水文工程电法;更为常用的分类方法是按电磁场时间特性分类,通常可划分三类,即:直流(稳定)电法、交流电法和瞬变场法。到目前为止,尚无统一的分类方案,因为很难用一个标准化的分类方法把各种电法分支方法严格区分开来。根据煤田电法勘探的使用和发展现状,以及教学上的方便,本书采用以场源性质为依据的后一种分类方案,见表 0-1 电法勘探分类表。

电法勘探是一门新兴科学,其历史只有一个半世纪。早在 19 世纪初,P. 福克斯首先在硫化金属矿上观测到自然电流,但只是处于研究阶段,未得到实际应用。直到 20 世纪初,世界许多国家工业迅速发展,对矿产资源需求猛增,电法勘探才从研究领域走向应用阶段。后经不断完善和发展,自然电场法才真正用于找矿(施伦贝尔热,1912 年)。

电阻率法勘探约在 19 世纪末被提出来。20 世纪初提出了视电阻率重要概念(温纳和施伦贝尔热,1915 年),并确定了温纳四极排列和中间梯度装置。

激发极化现象于 1920 年被施伦贝尔热发现,达赫诺夫于 1941 年进行了深入的研究,赛格利于 1949 年提出用激发极化寻找浸染型硫化矿。此后形成了激发极化方法。激电法被用于金属矿勘探。

美国工程师康克宁在1917年提出了电磁感应法,并在1925年首次获得地质效果。此后各种分支电磁方法相继而生。

表 0-1 电法勘探分类表

类别	场的性质	方法名称		应用
直流电法 (稳定场)	人工场	电阻率法	联合剖面法	填图、追索断层破碎带探测基岩起伏、追索陡倾斜煤层露头或高低阻陡倾岩层或接触面;查明岩溶发育带
			对称四极剖面法	
			复合四极剖面法	
			中间梯度法	
			偶极剖面法	
电测深法	对称四极电测深	查明构造,探测基岩埋深,第四系厚度;确定含水层厚度,埋深等		
	三极电测深			
	偶极测深			
充电法		测定地下水流速、流向;追踪充水裂隙带和地下暗河等		
天然场	自然电场法		填绘石墨化,黄铁矿化矿带;水文工程地质等	
不稳定场	直流激发极化法(时间域)		金属矿勘探;水文工程等地质问题	
	交流激发极化法(频率域)			
交流电法 (交变场)	人工场	甚低频法		同直流电阻率法
		变频电磁测深法		研究构造和高阻屏蔽层下的探测构造
		无线电波透视法		查岩溶、断层;矿井下探测小构造
	天然场	大地电磁场法	剖面法 测深法	查明区域性构造

回顾电法勘探的发展历史,在20世纪初电法基本理论和应用方案已初步形成。以后年代,在法国、苏联、瑞典、加拿大及美国、英国等地质勘探中电法应用起来越普遍,应用范围也不断扩大。目前,由于现代物理学、电子学,特别是计算机技术的发展,促进新技术和新仪器更快发展,尤其是野外信息的数字化和资料的计算机处理,使得电法勘探应用范围进一步扩大,地质效果更为明显。

我国电法勘探是解放后在党和国家的重视下才得到迅速发展,尤其是在金属矿勘探中得到有效的应用。此后,在全国各金属矿、石油、煤田等勘探工作中,广泛的发展了电法工作。1952年前后,在淮北广大地区,利用电法勘探解决煤田构造问题取得了丰硕的成果,为煤田进一步勘探提供了重要的基地。以后,在全国各地区均组成了相当规模的电法队,在矿产资源勘探和解决水文工程地质方面问题成为一支不可缺少的队伍。近十几年来,随着先进技术的引进和数据处理技术的发展,更进一步促进了电法技术的发展。尤其是交流电法引入煤田物探工作之后,用于解决煤田地质问题取得了直流无法解决的问题,如勘探高阻屏蔽层下煤系地层赋存问题等。

最后说明,电法各分支方法能否取得良好效果,除决定于不同找矿目标、不同地质条件来合理选择方法技术外,还取决于与其它物探方法的配合,即所谓的综合物探方法。因为物

探方法是借助场分布来间接研究地质问题的,一般来说,其解是多解的,在许多情况下,由于各种复杂条件和各种干扰因素的影响,单靠一种方法很难得出肯定的地质结论,因而各种物探方法的配合,进行综合解释,更有利于解决所面对的复杂地质问题。当然,物探与地质密切结合更为重要,因为物探最终目的是把物探语言变成地质语言,如果不重视,甚至忽视物探与地质资料相结合,必定产生错误的地质结论。

电法勘探随着相邻学科的发展而必然相应得到发展,许多问题,包括一些理论问题均需进一步深入研究。特别是在我国,除引进新技术和新方法进一步推动我国电法工作发展外,需根据我国特点,努力开发适合中国国情的新技术方法,不断总结经验,把我国电法勘探工作推向一个更高的水平,走向世界物探先进行列,为社会主义祖国成为科学技术强国而奋斗。

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 电阻率法勘探基础

第一章 电阻率法理论基础	(1)
第一节 岩石和矿石的导电性	(1)
第二节 地下稳定电流场基本规律	(4)
第三节 均匀各向同性半无限介质点电源电场	(6)
第四节 视电阻率概念	(13)
第五节 电阻率法分类及装置类型	(15)
第二章 垂向电测深法	(18)
第一节 电测深法理论基础	(18)
第二节 电测深理论曲线及其性质	(24)
第三节 图解构造电测深曲线原理	(32)
第四节 电测深野外工作方法与技术	(37)
第五节 电测深资料定性解释方法	(43)
第六节 电测深曲线定量解释	(62)
第七节 岩层电阻率参数的确定	(74)
第八节 电测深法在煤田中的应用	(78)
第三章 电剖面法	(84)
第一节 电剖面法概述	(84)
第二节 联合剖面法	(86)
第三节 对称四极剖面法	(100)
第四节 偶极剖面法	(104)
第五节 电剖面法地形影响和改正	(106)
第六节 电剖面资料数字处理技术	(110)
第四章 电阻率法勘探仪器	(115)
第一节 电子自动补偿法原理及仪器	(116)
第二节 SYSCAL R2 数字电法仪	(119)
第三节 SYSCAL R2 数字处理系统简介	(127)

第二篇 电测深曲线数字解释理论基础及处理程序

第五章 电测深数字解释理论基础	(130)
第一节 核函数的基本概念及其计算公式	(130)

第二节	水平层状介质电测深曲线渐近线的数学分析	(134)
第三节	电测深曲线等值性的数学分析	(139)
第四节	数字滤波基本原理	(141)
第五节	最优化方法简介	(142)
第六章	电测深理论模型曲线计算及微计算机应用程序	(146)
第一节	电测深理论曲线计算的数学模型	(146)
第二节	滤波系数及其计算方法	(148)
第三节	电测深理论曲线正演计算微计算机程序	(151)
第七章	电测深曲线自动解释原理及微计算机处理程序	(159)
第一节	拟合核函数数字解释原理和方法	(159)
第二节	拟合核函数反演解释实用程序	(164)
第三节	拟合视电阻率反演解释原理和方法	(167)
第四节	D.Z. 法自动反演解释	(169)
第五节	电测深曲线数据内插处理程序	(173)
第八章	电测深核函数曲线分层定量解释方法	(200)
第一节	核函数二层量板的编制	(200)
第二节	核函数曲线分层解释原理及方法	(203)
第三节	分层解释方法步骤及实例	(205)
第九章	计算机绘图原理及电法图件绘制实用程序	(207)
第一节	数据网格化处理及实用程序	(207)
第二节	等值线绘制方法及实用程序	(211)

第三篇 充电法、自然电场法和激发极化法

第十章	充电法	(215)
第一节	充电法工作原理及应用条件	(215)
第二节	充电法野外工作方法	(217)
第三节	充电法结果解释和应用	(218)
第十一章	自然电场法	(222)
第一节	自然电场的形成原因	(222)
第二节	自然电场的野外工作方法	(223)
第三节	自然电场法在煤田勘探中的应用	(226)
第十二章	激发极化法	(229)
第一节	激发极化法原理	(229)
第二节	激发极化电位形成的物理化学过程	(232)
第三节	激发极化法的应用	(233)
第四节	交变电流场中激发极化法	(234)

第四篇 电磁法勘探

第十三章 电磁场概念	(237)
第一节 交变电磁场中岩石、矿石的电学性质	(237)
第二节 导电介质中的均匀交变电磁场	(239)
第三节 平面电磁波传播和基本性质	(244)
第十四章 大地电磁测深法	(250)
第一节 地球的天然电磁场	(250)
第二节 均匀大地介质中平面电磁波传播	(255)
第三节 水平层状介质大地电磁场	(259)
第四节 大地电磁测深理论曲线及其正演计算	(262)
第五节 水平非均匀介质中的大地电磁测深	(271)
第六节 大地电磁测深法仪器和工作方法	(276)
第七节 大地电磁测深资料解释	(280)
第十五章 电磁场变频测深法	(287)
第一节 电磁场变频测深法的工作原理	(287)
第二节 电磁场变频测深法的野外工作与仪器工作原理	(303)
第三节 变频测深资料的解释与应用	(307)
第十六章 矿井地球物理勘探方法	(317)
第一节 地质探测雷达	(317)
第二节 无线电波透射法	(322)
参考文献	(328)

第一篇 电阻率法勘探基础

电阻率法勘探是以地下岩石（或矿石）的电性差异为物理基础，通过对地下半空间天然或人工电场分布的研究，来寻找隐伏矿体和解决有关地质问题的一种物探方法。和其它物探方法相比，电法勘探，尤其是电阻率勘探具有方法多样化的优点，而且由于仪器设备比较简单及工作效率较高，因此被广泛用于各种矿产的普查勘探和水文地质、工程地质、供水水源勘探等各个领域，并取得了良好的地质效果。

第一章 电阻率法理论基础

第一节 岩石和矿石的导电性

一、岩石和矿石电阻率

在电阻率法勘探中，用来表征岩石和矿石导电性好坏的参数为电阻率（ ρ ）（或电导率 $\gamma = \frac{1}{\rho}$ ），其单位为欧姆米（即 $\Omega \cdot m$ ）。

按导电方式的不同，可把矿石分为以下三类：

1) 电子导电型 具有大量的自由电子，有很高的电导率。大部分金属矿物属于此类，如天然铜的电阻率为 $1.2 \times 10^{-8} \sim 30 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ；石墨也属电子导电体一类的特殊矿石，导电性也很高，一般平行层理的电阻率为 $3.6 \times 10^{-8} \sim 100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，垂直层理的电阻率为 $28 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ 。

2) 半导体型导电矿物 所有的金属氧化物和硫化物均属此类。大多数金属矿物，如黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和磁铁矿等，其电阻率低于 $1 \Omega \cdot m$ ，而且在较大范围内变化（ $10^{-6} \sim 10^0 \Omega \cdot m$ ）；对于闪锌矿、赤铁矿和铬铁矿等矿物，则电阻率较高（可达 $1 \sim 10^6 \Omega \cdot m$ ），因而，称前者为良导电矿物。

3) 晶体离子导电型 绝大多数造岩矿物，如方解石、石英、云母和长石等，电阻率极高（大于 $10^6 \Omega \cdot m$ ），均属晶体离子型导电。

岩石电阻率的大小，除决定于岩石的矿物组成外，还受其含水性（湿度）和温度的影响。这些复杂的因素造成岩石电阻率的不固定性，且在一个较大范围内变化；也使不同岩石有时可能有相同或相近的电阻率。因此，在电法勘探中，不能仅仅依靠岩石电阻率的一般规律作为布置和进行电法工作的依据，而必须对具体地区、不同条件下岩石的电阻率作具体的测定和研究，方能对所施工地区的岩石电性情况有一正确的概念，以便正确指导野外工作。

常见岩石导电性的好坏，可分为高阻、中阻和低阻三类。火成岩和变质岩的电阻率较高，通常在 $10^2 \sim 10^5 \Omega \cdot m$ 范围内变化（图 1-1）。沉积岩电阻率较复杂，如粘土、泥岩等

属于低阻一类 ($10^0 \sim 10^1 \Omega \cdot m$); 砂岩为中等 ($10^1 \sim 10^2 \Omega \cdot m$); 沉积岩中的某些岩石, 如石灰岩、砾岩等均属高阻, 石灰岩电阻率可达 $10^2 \sim 10^6$ 或更高, 有时比火成岩和变质岩还要高。

值得指出, 煤田物探的研究对象主要是沉积岩层。沉积岩的导电性好坏主要决定于含水性, 而与它的组成成分关系并不密切。如第四系砾石层, 在非常干燥的情况下, 电阻率可达数千至上万欧姆米。当它饱含地下水, 特别是饱含高矿化度地下水时, 电阻率可能降至几十甚至几欧姆米。因此, 在沉积岩地区工作时, 对于区内水文地质情况应有一个较详细的了解, 以利于电法工作的开展。

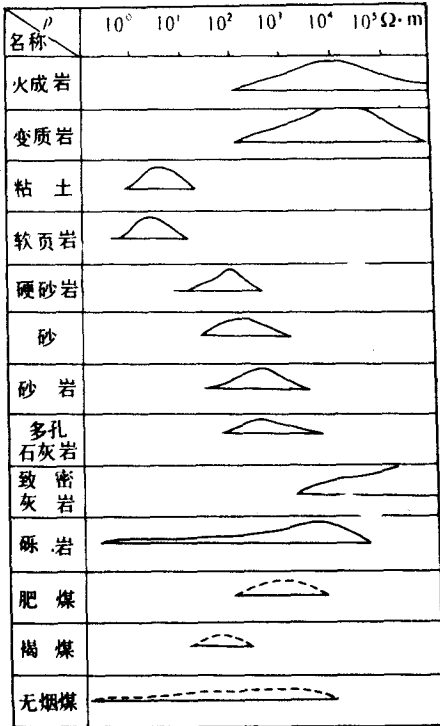


图 1-1 几种常见岩石电阻率变化范围

些沉积岩), 以及可溶性岩石岩溶发育程度等有关。对于固结岩石, 其裂隙愈多、充水性愈好时, 则位于天然状态下的岩石的电阻率就会降低。对于可溶性岩石, 如在岩溶发育地区、且岩溶在地下水位以下, 则在岩溶发育地段的天然岩石的电阻率会出现区域性降低。显然, 上述情况是利用电法勘探来作为研究裂隙或断裂带以及岩溶发育情况的地质基础。

一般来说, 孔隙度小的岩石, 电阻率较高 (如岩浆岩、大部分变质岩和沉积岩中的石灰岩等), 可达数百甚至上千欧姆米; 对于孔隙度大渗透性小的岩石 (如黄土、粘土和各种泥岩等), 电阻率较低, 其值为几至几十欧姆米; 对于孔隙度大而渗透性强的岩石 (如砾岩、砂岩和砾石层等), 其电阻率是随水文地质条件的不同而有较大的变化范围。当后者饱含地下水时, 电阻率只有几十甚至几个欧姆米; 当它们干燥时, 电阻率可高达几千甚至几万欧姆米。

岩石中水溶液的电阻率, 是与所含盐类的浓度有明显关系。含盐度 (矿化度) 大, 电阻率显著降低 (表 1-1)。实验证明, 水溶液电阻率与所含盐的种类关系较小, 主要和含

二、影响岩石电阻率的因素

影响岩石电阻率大小的因素很多, 但主要考虑岩石电阻率与含水性和结构的关系。

1. 岩石电阻率与含水性的关系

岩石电阻率与其含水性有着密切的关系, 尤其是沉积岩, 它在自然状态下主要是离子导电。因此, 岩石或岩层所含水分多少, 以及水溶液的含盐浓度及其在岩石中存在的状态便成为决定电阻率大小的主要因素。

地下水溶液在岩石中的分布状态, 也影响电阻率大小。当水溶液在岩石中呈分散和不连通的方式存在时, 则对岩石电阻率影响较小; 当呈互相连通的状态分布时, 则对岩石电阻率的影响较大, 使岩石电阻率大大降低。

岩石含水性与岩石的孔隙度 (对于多孔沉积岩)、裂隙率 (岩浆岩、变质岩和某些沉积岩), 以及可溶性岩石岩溶发育程度等有关。

对于固结岩石, 其裂隙愈多、充水性愈好时, 则位于天然状态下的岩石的电阻率就会降低。对于可溶性岩石, 如在岩溶发育地区、且岩溶在地下水位以下, 则在岩溶发育地段的天然岩石的电阻率会出现区域性降低。显然, 上述情况是利用电法勘探来作为研究裂隙或断裂带以及岩溶发育情况的地质基础。

一般来说, 孔隙度小的岩石, 电阻率较高 (如岩浆岩、大部分变质岩和沉积岩中的石灰岩等), 可达数百甚至上千欧姆米; 对于孔隙度大渗透性小的岩石 (如黄土、粘土和各种泥岩等), 电阻率较低, 其值为几至几十欧姆米; 对于孔隙度大而渗透性强的岩石 (如砾岩、砂岩和砾石层等), 其电阻率是随水文地质条件的不同而有较大的变化范围。当后者饱含地下水时, 电阻率只有几十甚至几个欧姆米; 当它们干燥时, 电阻率可高达几千甚至几万欧姆米。

岩石中水溶液的电阻率, 是与所含盐类的浓度有明显关系。含盐度 (矿化度) 大, 电阻率显著降低 (表 1-1)。实验证明, 水溶液电阻率与所含盐的种类关系较小, 主要和含

盐量（浓度）有较大的关系。因此，在不同水文地质条件下，对含水性相同的岩石，由于地下水矿化度的差别，其电阻率可能有十分显著的不同。

表 1-1 常见天然水电阻率

名 称	$\rho, \Omega \cdot m$	名 称	$\rho, \Omega \cdot m$
雨水	>100	海水	0.1~10
河水	10~10 ²	矿井水	1~10
地下水	<100	深成盐渍水	10 ⁻¹ ~1

2. 岩石电阻率与层理的关系

大部分沉积岩或变质岩具有层理或片理构造，如泥岩、片岩、板岩及组成煤系地层的岩石。它们相互交替组成薄的岩层。在岩层中，岩石的电阻率具有明显的方向性，即沿层理方向和垂直层理方向导电性不同。这种随方向不同而导电性也不不同的现象称为岩石的各向异性。

为了研究具有各向异性岩石的电性性质，首先用理想模型（图 1-2）来讨论岩石各向异性的特点。假设模型是由厚度为 h_1 和 h_2 、电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 的两种薄层交替组成，当电流分别垂直和平行模型层面方向通过时，由电阻的串、并联关系，便可得到垂直方向和平行方向的电阻率为

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} = \frac{T}{H} \quad (1-1)$$

ρ_n 称横向电阻率。

$$\rho_t = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} = \frac{H}{S} \quad (1-2)$$

ρ_t 称纵向电阻率。式中

$$\text{总横向电阻} \quad T = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (1-3)$$

$$\text{第 } i \text{ 层横向电阻} \quad T_i = \rho_i h_i$$

$$\text{总纵向电导} \quad S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (1-4)$$

$$\text{第 } i \text{ 层纵向电导} \quad S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$$

将式 (1-1) 和式 (1-2) 进行比较，可以看出 $\rho_n > \rho_t$ ，即垂直层理方向的电阻率 ρ_n ，始终大于平行层理方向的电阻率 ρ_t 。为了描述岩石的各向异性大小，引出各向异性系数 λ 参数，即

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (1-5)$$

由于 $\rho_n > \rho_t$, 所以 $\lambda > 1$ 。

应当指出, 由于岩石本身层理构造而产生的各向异性, 称为微观各向异性, 用 λ_μ 表示。但对于具有相当厚且电阻率不同的均匀各向同性岩层所组成的岩层组, 从宏观来看, 这种岩层组也会表现出各向异性。通常把这种各向异性称为宏观各向异性, 用 λ_M 表示。在实际工作中, 不要求区分两种各向异性, 而只考虑其总各向异性的影响就可以了。

各向异性岩层电阻率, 通常用平均电阻率 ρ_m 来表示。 ρ_m 的定义为

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} \quad (1-6)$$

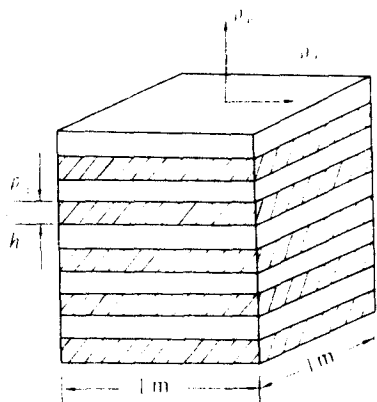


图 1-2 层状岩石模型图

自然界中, 不同岩石或同一岩石的各向异性系数 λ 不同, 并且往往在一个范围内变化。从表 1-2 可以看出, 有些岩石(如石墨化炭质泥岩)各向异性非常显著, λ 变化较大。在煤田电法勘探中, 对岩石各向异性问题应引起足够的注意, 这是由于一般煤系地层经常是由砂岩、泥岩和煤层交替组成, 各向异性也较明显, 如果忽略各向异性的影响, 会给解释带来误差。

此外, 次要因素是岩石电阻率还受温度变化的影响。一般岩石的电阻率是随温度的升高而降低。地壳的温度是随深度而增加, 这对岩石电阻率的影响并不显著, 因而在勘探深度为中等的电法工作中, 不需考虑它的影响。

表 1-2 几种常见岩石各向异性系数

岩石名称	λ	岩石名称	λ
层状粘土	1.02~1.05	泥岩	1.41~2.25
层状砂岩	1.10~1.60	无烟煤	2.00~2.55
板岩	1.10~1.59	石墨化炭质泥岩	2.00~2.80

第二节 地下稳定电流场基本规律

如果将直流电源的两端通过埋设地下的两个电极 (A、B) 向大地供电, 在地面以下的导电半空间建立起稳定电场 (图 1-3)。该稳定电场的分布状态决定于地下不同电阻率的岩层 (或矿体) 的赋存状态。所以, 从地面观察稳定电场的变化和分布, 可以了解地下的地质情况, 这就是电阻率法勘探的基本原理。

一、稳定电流场的基本规律

由电磁场理论可知, 空间任何一点, 其内部没有面电荷和体电荷存在时, 稳定电流场

性质可用以下三个基本公式概括:

(1) 微观欧姆定律为

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} = \gamma \mathbf{E} \quad (1-7)$$

式中, \mathbf{j} 和 \mathbf{E} 分别为电流密度矢量和电场强度矢量。由式 (1-7) 说明, 地下导电介质中任一点的电流密度 \mathbf{j} 和电场强度 \mathbf{E} 成正比, 比例系数为该点处介质的电导率。

(2) 稳定电流场的势场性为

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\text{grad} U \quad (1-8)$$

稳定电流场和静电场一样, 是一种势场。势场是一种无旋场, 电场强度的旋度为零, 即

$$\text{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (1-9)$$

(3) 地中电流的连续性为

$$\text{div} \mathbf{j} = 0 \quad (1-10)$$

电流密度的散度等于零, 说明地下半空间电流的连续性。如果地下任一点处的 \mathbf{j} 的散度为零, 即电流只能通过该点, 而不能以此点为出发点或终止于该点, 这说明了稳定电场是一种无源场。

上述稳定电流场的三个基本方程式说明了稳定电场的基本性质。现把三个基本方程归纳为一个简单的方程式来表示, 即

$$\text{div grad } U = \nabla^2 U = 0 \quad (1-11)$$

称式 (1-11) 为拉普拉斯方程。在电法勘探的理论研究中, 常用的三种坐标系中的拉普拉斯方程表达式如下:

$$\text{直角坐标系} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{柱坐标系} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-13)$$

$$\text{球坐标系} \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} \right) = 0 \quad (1-14)$$

二、边界条件

解决各种场的问题, 在给定的边界条件情况下, 求解拉氏方程问题。在电法勘探中, 边界条件是指不同介质间的电场联系, 交界面处场的特点。它包含以下三个内容 (图 1-4):

(1) 极限条件为

$$r \rightarrow \infty \text{ 时, } U = 0; \quad r \rightarrow 0 \text{ 时, } U = \frac{I \rho_1}{2\pi r}。$$

(2) 地面上(除 A 点以外), 电流密度法线分量为零, 即

$$j_n = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U}{\partial n} = 0$$

(3)在界面处

$$U_1 = U_2$$

$$j_{1n} = j_{2n} \quad \text{或} \quad \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n}$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad \text{或} \quad \rho_1 j_{1t} = \rho_2 j_{2t}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\text{tg}\theta_2}{\text{tg}\theta_1}$$

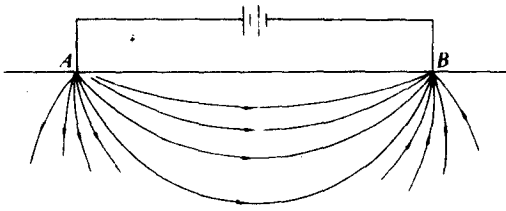


图 1-3 地下稳定电流场装置图

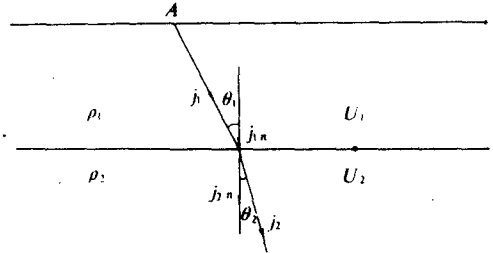


图 1-4 界面处电流密度矢量分布图

第三节 均匀各向同性半无限介质点电源电场

当用电阻率法研究地下地质情况时，首先要是在所研究地区的地下建立稳定电场。通常在地面上，供电装置采用单点电极或双异极性点电极向地下发送电流，因此，研究点电源电场在地下均匀无限半空间的分布是有一定意义的。为研究点源场的分布，首先要把大地和空气分界面看作是一个无限大的水平面（图 1-5a），分界面（地面）上部为空气，电阻率为无限大，界面之下设由均匀各向同性且电阻率为 ρ 的大地组成。

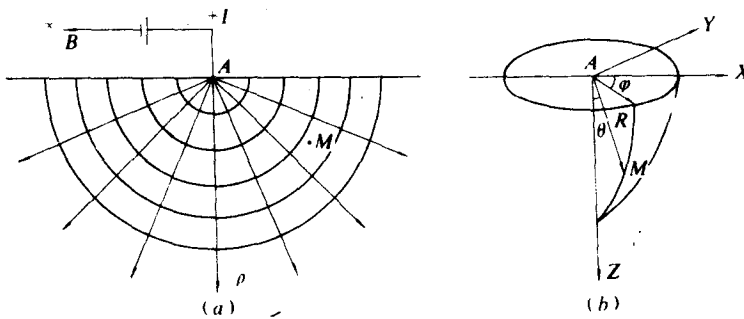


图 1-5 点电源电场

a—点电源电场；b—球坐标系

一、点电源电场

当地面设置一个点电流源 A （另一个异性电极 B 置于无限远处），供电电流强度为 I ，推导地下半空间介质 ρ 中任一点 M 的电位、电流密度和电场强度的表达式。研究这种具有球对称性的电场问题，应采用球坐标系（图 1-5b）的拉氏方程式（1-14）。由于场的对称性，所以任一点的电位与方位角 φ 和极角 θ 无关，方程式（1-14）可简化

为如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial U}{\partial R} \right) = 0 \quad (1-15)$$

对上式两次积分得

$$U = -\frac{C}{R} + D$$

式中, C, D 为积分常数。利用极限条件 $R \rightarrow \infty$ 时, $U = 0$, 故 $D = 0$ 。所以, 地下任一点的电位表达式为

$$U = -\frac{C}{R} \quad (1-16)$$

当确定积分常数 C 时, 首先需求出以 A 点为中心, 穿过半径为 R 的球面上的总电流 I , 即

$$I = \int_S j ds = \frac{1}{\rho} \int_S E ds = -\frac{1}{\rho} \int_S \frac{dU}{dR} ds, \text{ 又知 } \frac{dU}{dR} = \frac{C}{R^2} \text{ 故可求得通过该面的总电流为}$$

$$I = -\frac{c}{\rho R^2} \int_S dS = -\frac{2\pi c}{\rho}$$

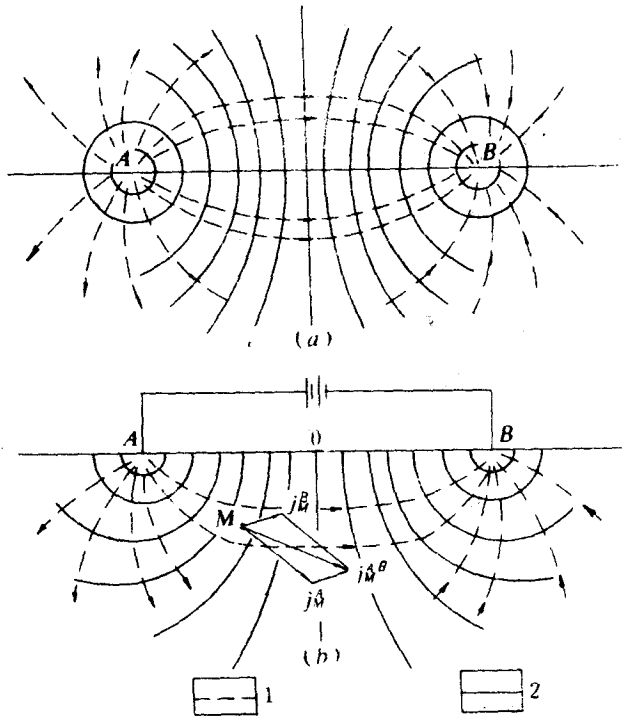


图 1-6 两异极性点电源电场

a —平面图; b —断面图

1—电流线; 2—等电位线

应等于供电电极 A 所发送的电流, 故

$$c = -\frac{I\rho}{2\pi}$$

代入式(1-16), 得

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R} \quad (1-17)$$

式(1-17)就是在均匀各向同性地下半空间介质中, 点电源电场的电位分布公式。

根据式(1-7)和式(1-8), 可以分别求出电场强度 E 和电流密度 j 的关系式为

$$E = \frac{I\rho}{2\pi R^2} \quad (1-18)$$

$$j = \frac{I}{2\pi R^2} \quad (1-19)$$

由此可见, 地下点源场的电位 U 、电流密度 j 和电场强度 E 均与电流强度 I 成正比, 电位 U 与 R 成反比, 电场强度 E 和电流密度 j 与 R 平方成反比。地下半空间的等位面是以点源 A 为中心的同心球壳, 电流线是以 A 为中心的辐射直线。

二、两个异极性点电源电场

根据电场叠加原理, 研究两异极性点电源时, 可以用正电流源 A 和负电流源 B 场的叠加。对地下任一点 M 的电流密度 j_M^{AB} , 应是矢量 j_M^A 和 j_M^B 的矢量和 (图 1-6), 即

$$j_M^{AB} = j_M^A + j_M^B$$

j_M^A 和 j_M^B 的量值可由式(1-19)计算, 方向由作图法确定, 用矢量加法——平行四边形法确定 M 点的总电流密度矢量 j_M^{AB} 。地下逐点求得各点的电流密度大小和方向, 便可得到如 b 图所示的地下半空间电流线的分布轨迹图。由于电场强度 E 也是矢量, 故可用相同方法得到。当供电电极 AB 距离较大时, 在 AB 中点附近 ($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} AB$ 地段) 电流线将平行地表分布, 这个电流线平行场区称为电法勘探均匀场区。在该区, 有利于电法勘探观测。

由于电位是标量, 故可求得 A 、 B 两异极性点源在地下任一点 M 处所产生的电位为

$$U_M^{AB} = U_M^A + U_M^B = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (1-20)$$

由式(1-20)和电流线分布轨迹图可以看出, 在具有两个极性不同接地的情况下, 接地附近等位面是两组半球面, 在 A 和 B 接地的中部等位面是一组与 AB 连线垂直的平面。电流线是由 A 发出, 终止于电极 B 的一簇复杂的曲线。

三、两异极性点电源电流随深度的变化规律

实际工作中, 了解电流向地下穿透的分布规律是十分重要的。这是由于地表附近的电流愈多, 地下深部的电流就愈少, 所能勘探到的深度就愈小, 因此要增加勘探深度, 就要研究电流随深度变化的规律。

根据图 1-7 所示, 现讨论 AB 中垂线上不同深度处电流的分布情况。当供电电流强度分别为 $+I$ 和 $-I$ 的两异性点源布置在地面时, 可计算出 AB 中点 O 的电流密度 j_0