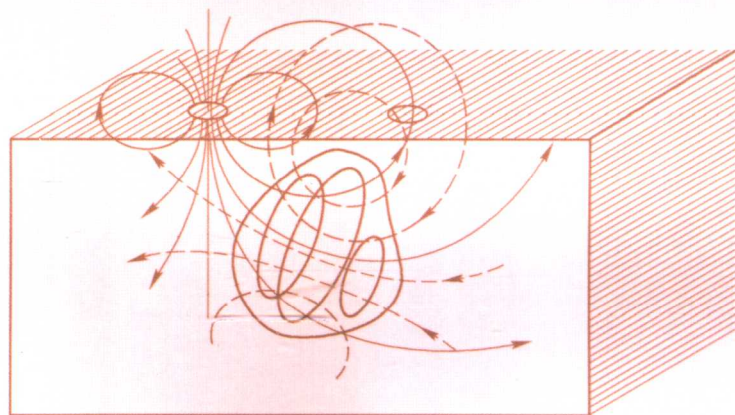


高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

电法勘探教程

程志平 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

电法勘探教程

程志平 主编

北京
冶金工业出版社
2007

内 容 简 介

全书共分为4章,系统地论述了电阻率法、自然电场法、充电法、激发极化法和电磁法的基本理论,各种方法的勘探原理,野外工作方法等并介绍了各种方法的实际应用。

本书可作为高等学校本科地球物理专业、勘查技术与工程专业物探方向的“电法勘探”课程教材,适合学时约70学时,也可作为从事地质工作的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电法勘探教程/程志平主编. —北京:冶金工业出版社,
2007.5
高等学校规划教材
ISBN 978-7-5024-4246-0

I. 电… II. 程… III. 电法勘探—高等学校—教材
IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 056775 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
责任编辑 王之光 美术编辑 李 心 版面设计 张 青
责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4246-0

北京兴顺印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007年5月第1版,2007年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;13.25印张;353千字;205页;1—3000册

27.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

电法勘探是地球物理勘探方法的一个重要分支,广泛应用于矿产地质勘查、工程地质勘察和水文地质调查领域,也可用于考古和环境地质调查。

为了适合本科应用地球物理专业和勘查技术与工程专业(物探方向)的教学需要,按照现行教学计划和教学大纲及“十一五”教材出版的要求,我们编写了本书。全书共分为四章,系统地论述了电阻率法、自然电场法、充电法、激发极化法和电磁法的基本理论,各种方法的原理,野外工作方法,资料处理和解释技术,并介绍了各种方法的实际应用。

根据电法勘探技术近年来的发展趋势,对教学内容进行了一定的调整。与20世纪90年代初期出版的同类型教材相比,电阻率法部分适当地增加了高密度电法的内容,电磁法部分适当地增加了频率电磁测深法和瞬变电磁法方面的内容,删减了大回线法、电磁剖面法和甚低频法等现在应用较少的一些方法内容。各章的主要内容侧重于方法原理和基本知识、基本概念。仪器和设备方面的内容没有详细介绍。在关于各种剖面方法的介绍中,偏重于定性分析,尽量避免繁杂的公式。但对于各种测深方法,则给出了正演计算的基本公式及其求解过程。考虑到课时数限制,将与电磁测深正演计算关系密切、但求解过程相对繁杂的水平层状大地表面垂直谐变磁偶极子和水平电偶极子电磁场的基本公式及其求解的内容放在附录中,可以供研究生和从事电磁法勘探的技术人员学习参考。

为了有利于学生对教学内容的理解和掌握,在各章后面列出了若干习题。为了避免束缚学生的独立思考和创造性思维,没有给出习题的标准答案。授课教师可以选择部分习题进行课堂讨论,以增进学生分析问题和解决问题的能力。

本书第1章由程志平、阮百尧编写,第2章和第3章由贺玉田、程志平编写,第4章由程志平编写,程志平统审全稿。

本书由桂林工学院教材建设基金资助,吕玉增计算并绘制了部分插图;还引用了一些教材和论文、专著中的插图,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中有不妥之处,希望读者批评指正。

编 者
2007年1月于桂林

目 录

绪 言	1
1 电阻率法	3
1.1 电阻率法基础	3
1.1.1 岩石的电阻率及其影响因素	3
1.1.2 稳定电流场的基本规律	8
1.1.3 均匀大地电阻率的测定及视电阻率的基本概念	13
1.1.4 常用电阻率法测量装置	15
1.1.5 电阻率法野外工作的几个问题	18
1.2 电阻率剖面法	20
1.2.1 概述	20
1.2.2 联合剖面法和对称四极剖面法	22
1.2.3 中间梯度法	32
1.2.4 电剖面法的地形影响和校正	35
1.3 电阻率测深法	38
1.3.1 概述	38
1.3.2 电阻率测深法原理	39
1.3.3 水平层状大地对称四极电阻率测深曲线	41
1.3.4 水平层状大地对称四极电阻率测深曲线的解释	49
1.3.5 非水平层地电断面电阻率测深	54
思考题	70
2 自然电场法、充电法	72
2.1 自然电场法	72
2.1.1 自然电场的成因	72
2.1.2 自然电场法的野外工作方法	73
2.1.3 自然电场法的应用	74
2.2 充电法	78
2.2.1 充电法的基本理论	78
2.2.2 充电法的野外工作方法	81
2.2.3 充电法的应用	82
思考题	86
3 激发极化法	87
3.1 激发极化法基本理论	87
3.1.1 激发极化效应及其机理	87

3.1.2	激发极化场的正演计算方法	94
3.1.3	常用装置的激电异常	96
3.2	激发极化法的野外工作方法及其应用	105
3.2.1	激发极化法的野外工作方法	105
3.2.2	激发极化法的资料整理与解释	107
3.2.3	激发极化法的应用	110
	思考题	116
4	电磁法	118
4.1	电磁法理论基础	118
4.1.1	电磁场定解问题	118
4.1.2	岩土在交变电磁场中的电磁学性质	122
4.1.3	模拟准则	123
4.1.4	均匀介质中平面电磁波的传播	125
4.1.5	交变电磁场中局部导体的异常场	127
4.1.6	两种常用场源的电磁场	134
4.2	地面电磁法	141
4.2.1	大地电磁测深法	141
4.2.2	频率测深法	149
4.2.3	瞬变电磁法	162
4.2.4	电磁偶极剖面法	182
	思考题	185
附 录	187
附录 1	水平层状大地表面垂直磁偶极子的电磁场	187
附录 2	水平层状大地表面水平谐变电偶极子的电磁场	192
参考文献	205

绪 言

电法勘探是以岩(矿)石间电磁学性质及电化学性质的差异作为基础,通过观测与研究天然电磁场或人工建立的电磁场的空间和时间分布规律,以解决地质问题的一类地球物理勘探方法。

电法勘探通常可分为两大类,即传导类电法和感应类电法。前者以各种直流电法为主,如电阻率法、充电法、自然电场法和激发极化法;后者以交流电法为主,如大地电磁测深法、频率电磁测深法、瞬变电磁测深法。下表为电法勘探的分类及在地质勘探中的应用。

电法勘探分类和应用

类别	场的性质	方法名称		应用	
直流电法	天然场	自然电场法	电位法	测地下水流向,地下水与地表水的补给关系;石墨化、黄铁矿化地层填图;查河床、水库底渗漏点;寻找金属硫化物矿床	
	梯度法				
	人工场	电阻率法	电剖面法	联合剖面法	填图;追索断层破碎带;确定基岩起伏,追索各种高低阻陡倾斜地电体及接触面;查岩溶发育带
				对称四极剖面法	
				中间梯度法	
				偶极剖面法	
		电测深法	偶极电测深法	划分近水平层位,确定含水层厚度、埋深;划分咸淡水界面;查构造,探测基岩埋深、风化壳厚度等	
			对称四极电测深法		
			三极电测深法		
			环形电测深法		
	高密度电法		应用同电剖面法和电测深法		
	激发极化法	各类剖面法	各类测深法	寻找金属硫化物矿床;地下水勘探;石油勘探	
各类测深法					
充电法		电位法	追索地下暗河、充水裂隙带;了解地下水流速、流向;查坝基渗漏点		
	梯度法				
交流电法	天然场	大地电磁测深法		查区域构造,石油勘探,地壳上地幔研究	
	人工场	频率电磁测深法		应用同直流电测深,适用于大深度探测	
		瞬变电磁测深法		应用同直流电测深,适用于中大深度探测	
		电磁法(地面及航空测量)		填图、找水	

电法勘探具有效率高、成本低、适用性广等优点,在工程地质和水文地质勘察,石油、天然气和煤田地质构造勘查,寻找金属与非金属矿产,环境监测等方面都有广泛的应用。随着生产的需要,这一方法目前还在不断地发展和完善中。另外,为了探查不同地质对象和解决不同的地质问题,电法勘探还可在空间、陆地、海洋、地下等各种区域内进行,因此人们有时也按其工作场地不同而分为航空电法、地面电法和地下电法等,它们在技术上各有不同的特点。

1 电阻率法

电阻率法是以地壳中岩(矿)石的导电性差异为物质基础,通过观测与研究人工建立的地中稳定电流场的分布规律,以解决地质问题的一组电法勘探方法。本章将介绍电阻率法基础、物理和数值模拟方法(正演)、电阻率剖面法、电阻率测深法、实测数据解释方法(反演)以及电阻率法的实际应用。

1.1 电阻率法基础

1.1.1 岩石的电阻率及其影响因素

表示物质导电性的参数是电阻率或电导率。在电法勘探中,人们用得比较多的是电阻率。一种物质的电阻率在数值上等于电流垂直通过边长为 1 m 的该物质组成的单位立方体所呈现的电阻,用 ρ 来表示,单位为欧[姆]米,记作 $\Omega \cdot m$ 。电阻率的倒数称电导率,用 σ 表示,单位为西[门子]每米,记作 S/m。实际工作中,为了方便实用,一般采用 mS/m(毫西[门子]每米)作为电导率的单位,这样一来,大部分岩土体的电导率将落入 1~1000 mS/m 范围内。显然,岩石电阻率越低,电导率越高,则导电性越好,反之导电性越差。

1.1.1.1 岩石的导电机制及影响岩石电阻率的因素

在地表至超过 15 km 深的正常地壳中,绝大部分构成岩石骨架的造岩矿物,如石英、云母、长石等硅酸岩类矿物的电阻率均大于 $10^6 \Omega \cdot m$,基本上都可以认为是不导电的。地下物质的整体电阻率主要由孔隙、裂隙和断层破碎带内的水溶液电解导电控制。电流在相互连通的孔隙、裂隙和断层破碎带内以及沿颗粒边界传导,但极少通过岩石的硅酸盐骨架。因此,对岩石的电阻率变化起主导作用的是岩石的孔隙裂隙发育程度、含水性以及水的矿化度。

虽然岩石的矿物成分也对岩石的电阻率有影响,但只有当岩石含有金属矿物、碳质和黏土矿物等三类导电性优良的矿物时,矿物成分的影响才是明显的。温度、岩石的结构和构造也对岩石电阻率具有一定的影响,它们的影响总体上看比较微弱。

A 阿尔奇公式

讨论孔隙裂隙发育程度、含水性以及水的矿化度对岩石电阻率的影响,就必须提到阿尔奇公式,它是 G. E. Archie 根据对大量多孔岩石电阻率测定、统计结果得出的一个描述岩石的电阻率与其孔隙裂隙发育程度、含水性以及裂隙水的电阻率等参数之间关系的经验公式,它的数学表达式为

$$\rho = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (1-1)$$

式中, ρ 为岩石的电阻率; a 为比例系数,在 0.6~1.5 之间变化; ϕ 为孔隙度(即孔隙体积比),表 1-1 列出了一些常见岩石的孔隙度; m 为孔隙度指数,或称胶结系数,通常在 1.2~2.0 之间变化。这个系数的选取与地质年代有关,如较松散或弱胶结的第三纪沉积物为 1.3 左右,固结良好的古代沉积岩为 1.95 左右,个别沉积建造还会超出此范围; S 为含水饱和度(即水充填空间的比值); n 为饱和度指数,这是一个由实验确定的因子,大约为 2; ρ_w 为充填于孔隙中水的电阻率。

表 1-1 一些常见岩石的孔隙度

岩石类别	岩石名称	孔隙度/%	岩石类别	岩石名称	孔隙度/%
沉积岩	土壤	20.0~69.4	岩浆岩	玄武岩	18.7~
	砂	15.0~63.2		安山岩	6.0~
	黏土	10.1~62.9		辉长岩	0.4~1.9
	砾石	20.2~37.7		花岗岩	0.4~4.1
	页岩	1.5~44.8		辉绿岩	0.2~5.1
	砂岩	2.0~18.4		闪长岩	0.4~4.0
	灰岩	0.7~n×10		正长岩	0.9~2.9
变质岩	结晶石灰岩	0.9~8.6			
	片麻岩	0.4~7.5			
	大理岩	0.1~2.1			

B 影响岩石电阻率的因素

影响岩石电阻率的因素有以下几方面:

(1) 孔隙度和饱水性的影响。从表 1-1 中可见,土壤、砂、砾石等第四系松散沉积冲积物的孔隙度一般都比较髙,如果处于饱水状态,便有比较低的电阻率。沉积岩中的页岩、砂岩的孔隙度居于相对中等水平,其电阻率也居于相对中等水平。岩浆岩和变质岩的孔隙度一般都比较低,便有比较高的电阻率。

风化使岩石的孔隙度增加,因而如果处于饱水状态,便使岩石的电阻率降低。风化的岩浆岩裂隙发育,其电阻率大大低于新鲜岩石。构造破坏也使岩石的孔隙度增加,因而使岩石的电阻率降低。一般来说,断裂破碎带相对于完整岩石大都为低阻带。长期的压实作用使岩石的孔隙度降低,从而使岩石的电阻率增加。从总体上看,比较古老的地层往往比较密实,其电阻率比较高;而年代新的地层往往比较疏松,其电阻率比较低;第四系形成最晚,质地最疏松,其电阻率也最低。

坚硬岩石在长期的地质历史中,由于内力和外力地质作用,发育有构造裂隙、成岩裂隙和风化裂隙;碳酸盐类可溶性岩石发育有溶洞、裂隙、地下暗河等;它们的存在对岩石电阻率影响很大。若在潜水面以下,它们充填了不同矿化度的地下水,同完整的岩石相比,它们的电阻率可降低为原来的几十分之一。岩溶地区,完整灰岩的电阻率一般为数千欧[姆]米,而岩溶发育的灰岩电阻率可低至几百欧[姆]米;位于潜水面以下灰岩中的断裂带、裂隙带和溶洞大都表现为低阻带。若裂隙和溶洞在潜水面以上,空隙充填电阻率为无穷大的空气,则电阻率剧增。根据上述特征,用电阻率法有可能来寻找裂隙带和溶洞。

如果地层是在地下水位以上,并且处于不饱水状态,则孔隙度高的岩石和土层的电阻率反而比较高。由于毛细现象,使地下水位以上一定高度内的地层仍然接近饱水状态。但高出地下水位很多的地层就明显处于不饱水状态,其电阻率甚至可高达 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。

由于岩石的孔隙度与其电阻率有密切的关系,在水文地质中常利用电阻率资料帮助确定地层的孔隙度和渗透性。

(2) 地下水矿化度的影响。水的导电性与它的矿化度和温度有很密切的关系。所谓矿化度,就是指水中溶解的矿物质浓度。纯净的水是不导电的,只有当水中溶解了矿物质时才导电,其电导率与溶解的矿物质多少近似成线性关系,因此,在讨论水的导电性时使用电导率比较方

便。显然,水的电导率不仅与其中溶解的矿物质浓度有关,还与矿物质的种类有关。但是在实际应用上,可以不考虑矿物质种类的区别,而考虑不同矿物质的一种总体平均效应。Todd于1964年提出,对于大多数天然水而言, 10^{-6} 的全溶质(TDS——Total Dissolved Solid)浓度产生的电导率约为 0.16 mS/m ,公式为

$$\sigma_w \approx 0.16 \times 10^6 \text{ TDS} \quad (1-2)$$

或

$$\rho_w \approx \frac{1}{160 \text{ TDS}} \quad (1-2a)$$

地下水的矿化度(全溶质浓度)的变化范围很大。淡水的矿化度约为 1×10^{-4} 数量级,饮用水的矿化度通常限制在 5×10^{-4} 以内。水的矿化度越高,其电阻率就越低。按照式1-2a,矿化度为 1×10^{-4} 的淡水的电阻率约为 $60 \Omega \cdot \text{m}$,矿化度为 5×10^{-4} 的淡水的电阻率则为 $12.5 \Omega \cdot \text{m}$,而电阻率小于 $12.5 \Omega \cdot \text{m}$ 的水便是不适宜饮用的水,一般为咸水或遭到污染的地下水。海水的电阻率可低至 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 。

咸水的矿化度明显高于淡水,因此,含咸水的岩石电阻率比含淡水的岩石电阻率明显偏低。中国长江流域及其以南的内陆地区,地下水基本上都为淡水,其第四系土层的电阻率大都在 $50 \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内。而在华北和西北一些地表为盐碱地、地下水为咸水的地区,第四系土层的电阻率大都在 $10 \sim 30 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内。因为含咸水的岩石电阻率明显低于含淡水的岩石,在岩性变化不大的条件下,有可能在地面和井中均利用电阻率的差异来划分含有咸、淡水的层位。

当地下水发生污染时,其中的全溶质浓度就会增加,土壤的电阻率就会相应降低,可以利用这种特性探测地下水的污染情况。由于电阻率与全溶质浓度成反比关系,而电导率与全溶质浓度近似成线性关系,因此在进行环境勘探确定污染程度时,使用电导率参数更为方便。

(3) 某些矿物成分的影响。虽然绝大部分构成岩石骨架的造岩矿物都是不导电的,岩石的矿物成分在大部分情况下对岩石电阻率的影响很小,但也还有部分矿物具有比较好的导电性,如大部分金属矿物、碳质和黏土矿物。一般说来,富含这三类矿物的岩石电阻率都比较低。

大部分金属硫化矿,例如黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、辉铜矿、辉铋矿等和某些氧化矿,如磁铁矿,当它们为致密块状时,都是低阻体,其电阻率可低至几欧[姆]米到几十欧[姆]米。但当它们为浸染状时,电阻率仍然比较高。表1-2给出了一些常见金属矿物的电阻率。从表中可以看到,除了闪锌矿和钛铁矿外,其余金属矿的电阻率大都比较低。

表 1-2 一些常见金属矿物的电阻率

矿物名称	电阻率值/ $\Omega \cdot \text{m}$	矿物名称	电阻率值/ $\Omega \cdot \text{m}$
斑铜矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	赤铁矿	$10^{-3} \sim 10^6$
磁铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	锡石	$10^{-3} \sim 10^6$
磁黄铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	辉铋矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	软锰矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铁矿	$10^{-3} \sim 10^0$	菱铁矿	$10^0 \sim 10^3$
方铅矿	$10^{-3} \sim 10^0$	铬铁矿	$10^0 \sim 10^6$
辉铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	闪锌矿	$10^3 \sim 10^6$
辉钼矿	$10^{-3} \sim 10^0$	钛铁矿	$10^3 \sim 10^6$

富含黏土矿物的岩石电阻率通常也都比较低,例如,大多数沉积岩的电阻率一般为数百到数

千欧[姆]米的中等水平,但是富含黏土矿物(高岭石、蒙脱石和水云母等)的页岩、泥岩电阻率都较低,一般为 $100 \sim 300 \Omega \cdot m$,可低至几十欧[姆]米。在第四系松散沉积冲积物中,富含黏土矿物的黏土层往往具有比较低的电阻率,而不含黏土矿物的砂砾石层一般具有比较高的电阻率。干的砂砾石,电阻率可高达几千欧[姆]米,饱水的砂砾石电阻率则一般在 $200 \Omega \cdot m$ 上下。在同样饱水的情况下,粗颗粒的砂砾石电阻率比细颗粒的细砂、粉砂高。因此,在第四系地层中,潜水面以下的高阻层位常反映粗颗粒的含水层的存在,作为隔水层的黏土类的电阻率比含水层低。根据上述电性特点,电阻率法可以用于寻找和划分含水层隔水层,并判断其富水性。

(4) 温度的影响。由于温度的变化将引起水溶液中离子活动性的变化,升温会降低水的黏滞性,从而使水中的离子更易于活动。离子活动性增大的结果导致电阻率减小,所以岩石中水溶液的电阻率也将随温度的升高而降低。在地热勘探中,正是利用这一特性来圈定地热异常的。实验结果表明,水溶液保持液态时,岩土电阻率随温度变化不明显;而在冰冻条件下,岩石中的水溶液由于结冰导电性大大降低,岩土的电阻率可增加上百倍。这一点对于在冰冻地区进行冬季施工将产生影响。电阻率随温度变化的规律为

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(t - 18)} \tag{1-3}$$

式中, α 为电阻率的温度系数(约为 $0.025/^\circ C$); ρ_t 为 $t^\circ C$ 时的电阻率; ρ_{18} 为 $18^\circ C$ 时的电阻率。图 1-1 是含水砂岩电阻率随温度变化的实测曲线。从图中可以看出,在 $0^\circ C$ 以上,含水砂岩电阻率随温度增加缓慢降低;在 $0^\circ C$ 以下,由于含水砂岩随温度降低出现冻结现象,其电阻率迅速增高。温度除了在冰冻地区有影响以及对地热勘探略有影响外,在其他勘探中并不是一个主要因素。

(5) 岩石结构和构造的影响。岩石结构和构造对岩石电阻率也具有一定的影响。例如,粒度均匀的砂岩有较大的空隙,因而呈现低电阻率;粒度不均匀的砂岩其孔隙度要低得多,因而呈现高电阻率。玄武岩中有许多不连通的孔隙,因此,即使孔隙度高的玄武岩也可能呈现高电阻率。含金属矿物的岩石,如果其金属矿物的含量一定,则金属矿物为浸染状结构时其电阻率比较高,金属矿物为网脉状结构时其电阻率比较低。

1.1.1.2 岩石的电阻率分布

图 1-2 给出了一些常见岩石的电阻率变化范围,从中可以总结出岩石电阻率的 3 个特点:

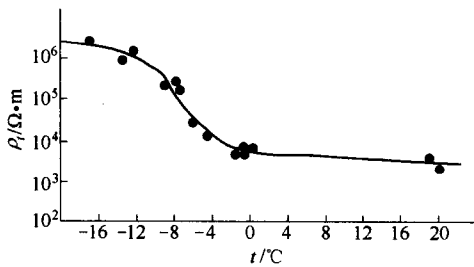


图 1-1 含水砂岩电阻率随温度变化的实测曲线
孔隙度 12%,湿度 1.5%

名称	$\rho/\Omega \cdot m$					
	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5
岩浆岩						
变质岩						
黏土						
软页岩						
硬页岩						
砂						
砂岩						
多孔灰岩						
致密灰岩						

图 1-2 常见岩石的电阻率变化范围

(1) 不同岩石电阻率从高到低的顺序及其电阻率分布范围是:1)质地致密、孔隙度低的岩浆岩、变质岩和沉积岩中的灰岩电阻率最高,其变化范围大约在 $10^3 \sim 10^5 \Omega \cdot m$ (变质岩中的部分岩石如泥质板岩、石墨片岩等较低,大约在 $10^1 \sim 10^3 \Omega \cdot m$);2)大多数沉积岩因为具有中等孔隙度,因而也具有中等电阻率,大约在数百欧[姆]米左右;3)孔隙度比较高、又富含黏土矿物的第四系黏土、页岩、泥岩的电阻率比较低,一般在 $10 \sim 10^2 \Omega \cdot m$;4)致密硫化矿体、(石墨)的电阻率最低,仅有 $10^{-2} \sim 10 \Omega \cdot m$ 。

(2) 同类岩石的电阻率并不完全相同,而是至少有一两个数量级的相当大的变化范围,这是由于同类岩石的不同部分,由于所受到的构造作用不同而具有不同的孔隙度、不同地区的地下水矿化度的不同以及同类岩石的不同部分的物质成分、风化程度、结构等方面都存在差异所造成的。

(3) 不同类型岩石的电阻率变化范围往往相互重叠,这表明仅通过电阻率来区分岩石类型是困难的。

1.1.1.3 层状介质的电阻率

在自然界中大多数沉积岩和一部分变质岩常成层状构造。这种层状岩石的电阻率具有非各向同性的性质。对于由两种薄层交替成层情况,若其电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,两种薄层的总厚度分别为 h_1 和 h_2 ,如图 1-3 所示。按电阻并联和纵向串联的关系,不难得出垂直层理方向的电阻率 ρ_n 和平行层理方向的电阻率 ρ_t 有如下形式

$$\rho_n = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2}$$

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}$$

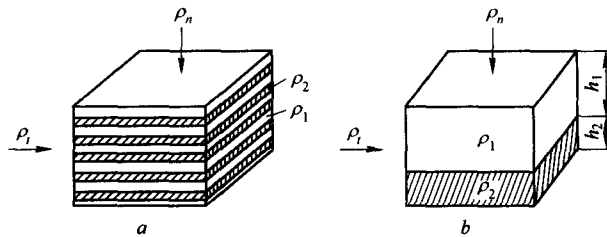


图 1-3 层状岩石的电阻率模型

a—实际岩石; b—等效模型

ρ_n 和 ρ_t 也分别称为横向电阻率和纵向电阻率。从上式可以看出 $\rho_n \geq \rho_t$, 即层状介质横向电阻率总是大于纵向电阻率。

我们用平均电阻率和各向异性系数表示非各向同性岩石的导电性。平均电阻率定义为横向电阻率和纵向电阻率的几何平均值。其表达式为

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_t} \quad (1-4)$$

各向异性系数定义为横向电阻率和纵向电阻率的比值的平方根。其表达式为

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

除层状介质外,一些具有针状、片状矿物结构的岩石也具有非各向同性性质。

表 1-3 列出了几种常见岩石的各向异性系数。从表中可以看出,有些岩石的各向异性系数很大,不同方向测量得到的电阻率将具有比较大的差异。例如常见的泥质页岩,其各向异性系数

在 1.41~2.25 之间,这表明垂直其层理方向的电阻率 ρ_n 将为平行其层理方向的电阻率 ρ_t 的 2~5 倍。

表 1-3 几种常见岩石的各向异性系数

岩石名称	λ	岩石名称	λ
层状黏土	1.02~1.05	泥质页岩	1.41~2.25
层状砂岩	1.10~1.60	无烟煤	2.00~2.55
泥质板岩	1.10~1.59	石墨碳质页岩	2.00~2.80

1.1.1.4 岩石的电阻率测定

岩石的电阻率测定方法有:露头法、标本法和分析法三类。

露头法是对天然露头或人工露头(如探槽、坑道、钻孔等)的岩石用小尺度的对称四极装置或者三极装置(以后介绍)直接测定的一类方法。测定时,可选择在露头较为平坦的面上进行,为减小露头的边界影响,供电电极距 AB 一般应小于露头长度的二分之一和宽度的三分之二。

露头测定法由于在实地进行测量,所得结果,较接近客观实际,但测区不是所有岩石均有露头可供测定,因而不得不采用标本法或其他方法。标本法测定岩石的电阻率方法很多,对大块标本,可采取与露头法相似的方法,即用对称四极法测量;对于岩性标本,可在岩芯两端面供电,测量电极 M 、 N 用铜丝紧箍在标本上并对称排列在标本中部。这样,若岩芯截面积为 S ,测量电极距 MN 为 l ,则根据物理学中欧姆定律及细长导体电阻率实验公式,很容易测得钻井岩芯的电阻率。

$$\rho = R \frac{S}{l} = \frac{\Delta U_{MN}}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (1-6)$$

在野外,可采用下面的简易测量方式测量标本的电阻率:用黏土固定岩芯的两端面,将供电电极(粗铜丝)插在黏土远离岩芯的外端供电,测量电极(保险丝)插在紧靠岩芯端面的黏土处测量(即测量电极距 MN 为岩芯的长度),测量方式如图 1-4 所示。

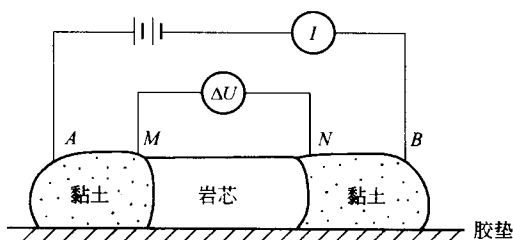


图 1-4 测量标本电阻率装置简图

采用标本法测定岩芯电阻率,问题不在测定方法本身精度有多高,而在于标本难于保证天然条件下的湿度。因此为保证岩芯原有的天然状态,测量时要采取相应措施,如采样后封蜡运输,测量前用标本采集地的地下水浸泡。

正如前所述,同种岩石的电阻率有一定的变化范围,因此,在测定岩石电阻率时,应尽可能地多选择一些露头或标本来测。然后用统计的方法,确定该类岩石的平均电阻率(几何平均值)及变化范围。岩石的平均电阻率(几何平均值)的计算公式为

$$\rho = \sqrt[n]{\rho_1 \rho_2 \cdots \rho_n} \quad (1-7)$$

分析法就是对测量区已有的电法勘探资料进行分析,以了解测量区不同地层的电阻率。

1.1.2 稳定电流场的基本规律

由上节知,各种岩石均有不同的导电性能,若将直流电源的两端通过电极与大地相接,在地下便建立起稳定的电流场,其分布状态决定于地下具有不同电阻率的岩石赋存状态。用各种不同的探测技术去观测该电场的分布以了解地下的地质情况,便是电阻率法的任务。本节将讨论

稳定电流场的基本性质,稳定电流场电位的定解问题,即电位的基本方程和边界条件,并介绍电阻率法常用的地面点电流源、两个异性点电流源和偶极电流源电场的空间分布规律。

1.1.2.1 稳定电流场的基本性质

描写稳定电流场的物理量有电场强度 E 、电流密度 J 和电位 U 。

A 地中电流密度与电场强度的正比性

在地中存在电流场的任意一点上,电流密度矢量 J 与电场强度矢量 E 在数量上成正比,比例系数为该点岩石的电导率,即

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \quad (1-8)$$

这便是欧姆定律的微分形式。由于它对任意一点都成立,因此适用于任何形状的不均匀导电介质和电流密度的不均匀分布。

B 地中电流的连续性

对于稳定电流场,包含电流强度为 I 的电流源的任意闭合面的通量表达式为

$$\oint_S J \cdot n ds = I \quad (1-9)$$

式中, S 为包围电流源的闭合曲面; n 为面元 ds 的单位法线矢量。式 1-9 即电荷守恒定律,它表明电荷既不能无中生有,也不能消灭。如果 S 面内不包含电流源,式 1-9 为

$$\oint_S J \cdot n ds = 0 \quad (1-10)$$

它说明在稳定电流场中电流是连续的,即在任何一个闭合面内,流进电流等于流出电流。其微分形式为

$$\operatorname{div} J = \nabla \cdot J = 0 \quad (1-11)$$

即在稳定电场中,任何一点电流密度的散度恒等于零。

C 稳定电流场的势场性

稳定电流场是一个位场。稳定电流场中任意一点 M 处的电位,等于将单位正电荷从 M 点移到无限远处,电场力所做的功。

$$U = \int_M^{\infty} E \cdot dl \quad (1-12)$$

因此电场强度 E 和电位 U 的关系

$$E = -\operatorname{grad} U = -\nabla U \quad (1-13)$$

势场是一种无旋场,在地中由导电岩石组成的任一闭合回路中,电流场所做的功恒等于零,即

$$\oint_L E \cdot dl = 0 \quad (1-14)$$

式 1-14 的微分形式为

$$\operatorname{rot} E = \nabla \times E = 0 \quad (1-15)$$

1.1.2.2 稳定电流场的定解问题

A 稳定电流场电位的微分方程

根据式 1-4、式 1-11 和式 1-13 得

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} U \right) = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla U \right) = 0 \quad (1-16)$$

在电阻率为均匀的电流场中, $\rho = \text{常数}$, 式 1-16 变为

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U = \nabla^2 U = 0 \quad (1-17)$$

这便是著名的拉普拉斯方程。它表示稳定电流场中不包含电流源在内的空间任何一点的电位只是空间坐标的函数。在直角坐标系 (x, y, z) 中拉普拉斯方程的表达式为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-18)$$

在柱坐标系 (r, ϕ, z) 中拉普拉斯方程的表达式为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-19)$$

在球坐标系 (r, θ, ϕ) 中

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} = 0 \quad (1-20)$$

B 稳定电流场的边界条件

凡是满足式 1-17 基本方程的函数 U 称为该方程的解。一般一个微分方程有无穷多个解，但对所考察的具体问题来说，由于方程解还必须满足边界条件，根据稳定电流场的唯一性定理，它的解是唯一的。以下是稳定电流场的几个边界条件。

(1) 衔接条件：

1) 电流通过介质分界面，界面两边电位连续，即

$$U_1 = U_2$$

2) 界面两边电流密度法向分量和电场强度切向分量连续，即

$$J_{1n} = J_{2n}$$

或

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n} \quad (1-21)$$

(2) 自然边界条件：

1) 接近点电流源的点上，趋于正常电位，在地下

$$r \rightarrow 0, U = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (1-22)$$

在地面上

$$r \rightarrow 0, U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1-23)$$

2) 距场源无限远点，电位趋于零，即

$$r \rightarrow \infty, U \rightarrow 0 \quad (1-24)$$

3) 地面上除电源点外，电流密度法向分量为零，即

$$J_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (1-25)$$

电阻率法的正演问题是根据介质和场源的分布求解稳定电流场分布的过程。解决电阻率法的正演问题有两个途径，一是通过物理模拟的途径，即通过模型实验直接测量得到某种介质和场源分布条件下稳定电流场分布情况；二是通过数学模拟途径，即寻求满足上述边界条件的拉普拉斯方程的解的过程。物理模拟方法主要有土槽、水槽、导电纸等手段。数学模拟又可分为解析法和数值计算方法两种。比较复杂的正演问题一般需要用有限元、有限差分、边界元等数值模拟方法求解，仅有少数介质分布非常简单的正演问题才能用解析法求解。

根据求解稳定电流场定解问题的唯一性定理，在求解稳定电流场分布的物理模拟和数学模拟中，判断两个模型是否等价（即它们的电流场空间分布严格相似），就要看这两个模型的稳定电

流场是否可归结为相同的定解问题。显然,只要两个模型的尺寸按比例相似,各部分介质的电阻率也按比例变化,两个模型的稳定电流场就是等价的。

1.1.2.3 电阻率法常用电流源的正常电场

在地面电阻率法中,通常采用两个电极从地面向地下供电,同时用另外两个电极测量电位差来了解地下电性分布,也就是说,通过研究两个地面异性点电流源的电场了解地下电性分布。有时,人们将两个供电电极中的一个布置得比另一个距离测量电极远很多,以至于这个供电电极的电流场可以忽略,此时,相当于研究单个地面点电流源的电场。有时,两个供电电极距离测量电极差不多远,以至于这两个供电电极的点电流源电场都不可以忽略,此时,相当于研究两个异性点电流源的电场。有时,两个供电电极之间的距离相对于它们到测量电极的距离小得多,以至于这两个供电电极的电流场可以近似视为偶极电流源的电场,此时,就要研究偶极电流源的电场。因此,首先有必要了解均匀大地表面单个点电流源、两个异性点电流源和偶极电流源的电场分布规律。

A 单个点电流源的电场

从场论知识中可知,在电阻率为 ρ 的均匀各向同性介质中,电流强度为 I 的点电流源的电位表达式为

$$U = \frac{I\rho}{4\pi r}$$

式中, r 为观测点到点电流源的距离。

若点电流源位于电阻率为 ρ 的均匀半空间表面,其电场则相当于均匀全空间中 2 倍电流强度的点电流源的电场,其电位和电场强度分别为

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1-26)$$

$$E = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1-27)$$

如图 1-5 所示,其等位面是以点电流源为中心的同心半球面,在均匀半空间表面,其等位线是以点电流源为中心的同心圆。电场强度的方向在径向方向,其大小与到场源距离的平方成反比。在地表,电位为对称曲线,水平电场强度为反对称曲线。

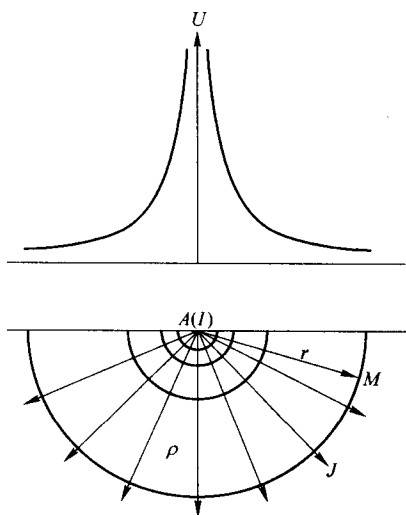


图 1-5 点电流源的电场

B 两个异性点电流源的电场

如果在均匀半空间表面异性点电流源 A 和 B 相距 $2L$, 分别以 $+I$ 和 $-I$ 向介质中供电,此时地下任意一点的电位由两个点电流源的电位叠加而成

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1-28)$$

图 1-6a 所示为地面 AB 连线上电位和电场强度曲线;图 1-6b 所示为地面上等位线和电流线分布平面;图 1-6c 所示为通过 AB 连线的垂直面内等位线和电流线分布断面。从图 1-6a 中可以看出,在地表,靠近 A 、 B 处,电位和电场强度变化剧烈,越靠近供电电极电场强度越强。在 AB 连线中部,电场强度变化比较平缓。从图 1-6b 和 1-6c 中可以看出,在地下,在 AB 连线中部一带,电场强度大致是水平的,其方向大致平行于 AB 连线的方向。

C 偶极电流源的电场

如图 1-7 所示,均匀半空间表面偶极电流源在地下任意一点的电位为

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R_A} - \frac{I\rho}{2\pi R_B} \approx m \frac{\cos\theta}{R^2} = -m \frac{x}{R^3} \quad (1-29)$$