

中等专业学校试用教材

# 电 法 勘 探

上 册

地 质 出 版 社

中等专业学校试用教材

# 电 法 勘 探

上 册

西安地质学院  
长春地质学校 合编

地质出版社

## 内 容 简 介

本书作为中等地质学校物探专业教材，比较系统地讲解了各种方法的基本原理、野外工作方法技术和资料的解释推断。全书共分三篇十一章，以直流电法为基础，激发极化法为重点，对电磁法也作了较详细的介绍。各篇中，在对曲线进行物理分析时，都注意用插图形象地表现电流场或电流磁场的分布，以加强物理概念，并用初等数学近似给出必要的数量概念。在野外工作部分，除简述规定和现象外，还注意讲述其中道理和总结规律。书中还注意了新方法、新技术的介绍。考虑到便于自学，文学叙述也比较详尽。

本书也可供野外物探工作者参考。

## 电 法 勘 探

(上册)

西安地质学院 合编  
长春地质学校

国家地质总局教育司教材室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1979年9月北京第一版·1979年9月北京第一次印刷

印数1—9,240册·定价2.30元

统一书号：15038·教46

## 前 言

1977年11月地质总局教育组下达了关于编写中等地质学校物探专业《电法勘探》教材的任务。在征求所有地质学校意见的基础上，78年3月讨论和修订了教材大纲，确定《电法勘探》分为上、下两册，下册为仪器，并单独开设一门课程。

本书作为上册，比较系统地讲述了各种方法的基本原理、野外工作方法技术和资料的解释推断。在讲述理论时，一方面避免引用高等数学公式，多用插图形象地表现电流场或电流磁场的分布，加强直观物理概念，另一方面亦用初等数学公式近似地给出必要的数量概念。对野外工作部分，既简单写出规范的各项技术要求和介绍野外现象，更注意讲述其中道理和总结规律。

教材内容安排照顾了课程本身的系统性，全书分为三篇十一章，以直流电法为基础，以目前金属矿电法中最常用的激发极化法为重点，对推广中的电磁法也作了较全面地介绍。书中还注意了新方法、新技术的介绍。

鉴于电法的方法分类多，但教学时数有限，故把内容分为重点教学、一般教学和选教三类。编写中注意到不讲选教内容时，对其后章节的学习影响不大。并提出教学控制时数仅供参考。

总时数180~200学时。

第一篇直流电法80学时，其中第一、二章和第三章第一节为重点教学内容；第三章第二至六节以及第四、五章为选教内容。

第二篇激发极化法90学时，其中第六章占74学时为重点教学内容，第七章为一般教学内容，第八章选教。

第三篇电磁法20学时，其中第九章为一般教学内容；第十、十一章选教。

本书第一至五章由长春地质学校王秀芳编写，第六至十一章由西安地质学院袁方编写，最后由袁方统编。书中3/4的图件由西安地质学院濮樊忠清绘。

编写中曾到总局物探组、科技组、情报所、北京市地质局磁激发极化组等单位收集资料，编写第八至十一章时，得到武汉地质学院傅良魁、许洪海老师的答疑帮助及征求了电磁法科研组同志对初稿的意见，在此一并表示谢意。

由于编者水平不高，时间仓促，错误在所难免，恳请使用者提出批评指正和宝贵意见。

编 者

1979.1.

## 序 言

电法勘探是地球物理勘探的主要方法之一，它是以下地岩（矿）石的电性或电磁性质差异为基础的，利用直流或交流电（磁）场来研究地质构造和寻找有用矿产的一种物理勘探方法，简称为电法。

电法勘探所利用的岩石和矿石的电磁学性质主要有四种：导电性，电化学性质，导磁性和介电性质。只要岩（矿）石与周围岩石在电磁学性质上存在着差异，就能使电磁场（天然的或人工的）分布规律发生变化。在实际工作中，通过对电磁场的观测和研究，确定岩石和矿体在地下存在的形态（大小、形状、埋深等）及电性参数值，以达到解决地质问题的目的。

由于电法勘探的物质基础是岩（矿）石的电学和电磁学性质之差异，其物性参数繁多，场源性质亦不同，加上观测参数（电阻率、极化率、电场、磁场等）的改变，因此电法种类很多，一般按照场源性质和方法原理进行分类，分为直流电法、激发极化法和电磁法三大类。每类又分为许多方法，择其主要的列表如下：（见下页）

电法勘探的研究工作是从十九世纪初开始的，于1815年首先在英国康瓦尔铜矿上观察到了由矿体产生的天然电流场（自然电场），当时只限于科学研究，还没有实际应用。

到二十世纪初，由于世界上许多资本主义国家重工业的发展十分迅速，急需矿产原料，科学技术也发展到一定水平，因此产生了地球物理勘探方法，电法勘探是其中之一，并开始进入实际应用阶段。

1920年发表了法国科学家K·什柳姆别尔热关于直流电法勘探的著作。瑞典科学家A·隆德别尔格在1919~1922年间进一步地创立了电法勘探的理论基础。

随着其它科学的不断发展，电法勘探经过50多年迅速发展和创新，尤其近年来在许多工业发达的国家，各种电法得到广泛应用。航空电法工作也在迅速发展。

我国的电法工作，解放前只有一些零星的试验工作。

中华人民共和国成立后，为了适应社会主义革命和建设的需要，党和国家设立了领导发展物探事业的专门机构，并相应建立了几所地质院校，积极培养有关人材，我国的地质和物探事业在党的领导下得到迅速发展，为社会主义建设作出贡献。如1955年辽宁青城子用自然电场法配合联合剖面法找到了大的铅锌矿，接着红透山用自然电场法、联合剖面法配合化探次生晕在片麻岩地区找到了大型铜矿等等。电法工作在我国早已普遍应用，无论在找寻金属和非金属矿床，石油天然气矿产、水文工程地质及预报天然地震等方面，均取得了显著成绩，为社会主义建设事业起了一定作用。

在以英明领袖华主席为首的党中央一举粉碎了“四人帮”反党集团后，抓纲治国，迎来了科学的春天。今后电法勘探也一定会在科学技术百花园中结出硕果，不论在方法理论研究、仪器的研制及新方法的研究推广等方面更会日臻完善，更好地与其它物化探方法相互配合，寻找丰富的矿产资源，更有效地解决各种地质问题，为实现新时期的总任务，加快实现国民经济四个现代化作出贡献。

| 类别    | 场源性质    | 方法名称          |                 | 方法主要变种   |                        | 主要应用范围                 |          |
|-------|---------|---------------|-----------------|----------|------------------------|------------------------|----------|
| 直流电法  | 天然电场    | 自然电场法         |                 |          |                        | 金属、水文工程地质              |          |
|       | 人工电场    | 电阻率法          | 电测深法            | 对称四极测深   |                        | 石油、煤田构造, 金属, 水文工程地质    |          |
|       |         |               |                 | 三极测深     |                        |                        |          |
|       |         |               |                 | 环形测深     |                        |                        |          |
|       |         |               |                 | 偶极测深     |                        |                        |          |
|       |         | 电剖面法          | 联合剖面            |          | 金属, 非金属, 地质填图, 水文工程地质。 |                        |          |
|       |         |               | 对称四极剖面          |          |                        |                        |          |
|       |         |               | 偶极剖面            |          |                        |                        |          |
| 中间梯度法 |         |               |                 | 金属与非金属   |                        |                        |          |
| 充电法   |         |               |                 | 金属, 水文地质 |                        |                        |          |
| 激发极化法 | 人工电(磁)场 | 激发极化法         |                 | 直流激发极化   |                        | 金属   水文地质              |          |
|       |         |               |                 | 交流激发极化   |                        |                        |          |
|       |         |               |                 | 磁激发极化    |                        | 金属                     |          |
| 电磁法   | 天然电(磁)场 | 大地电磁法         |                 |          |                        | 深部构造, 石油构造, 金属与水文工程地质。 |          |
|       |         | 音频电磁法 (AFMAG) |                 |          |                        | 地质填图                   |          |
|       | 人工电磁场   | 低频            | 不接地廻线法          |          |                        |                        | 金属, 地质填图 |
|       |         |               | 偶极剖面法           | 地面       | 各种装置                   |                        |          |
|       |         | 航空            |                 |          |                        |                        |          |
|       |         | 高频            | 甚低频法 (VLF)      |          | 地面                     |                        | 地质填图     |
|       |         |               |                 |          | 航空                     |                        |          |
|       |         | 脉冲            | 感应脉冲瞬变法 (INPUT) |          | 地面                     |                        | 金属, 地质填图 |
|       |         |               |                 |          | 航空                     |                        |          |
|       |         | 电磁波           | 井中无线电波透视法       |          |                        |                        | 金属       |
| 地质雷达  |         |               |                 |          | 采矿, 工程, 地质填图           |                        |          |
| 侧视雷达  |         |               | 航空与航天           |          | 填图                     |                        |          |

## 目 录

## 序 言

## 第一篇 直 流 电 法

|  |    |
|--|----|
| 第一章 电阻率法的基本原理.....   | 1  |
| 第一节 岩石的电阻率及其影响因素.....  | 1  |
| 一、岩石和矿物的电阻率.....   | 1  |
| 二、影响岩、矿电阻率的因素.....   | 3  |
| 第二节 均匀各向同性岩石中，地表一个点电源电流场的分布特征.....                                       | 4  |
| 一、电流密度.....  | 5  |
| 二、电场强度.....  | 5  |
| 三、电位.....  | 6  |
| 第三节 均匀各向同性岩石中，地表正负两个点电源的电流场.....   | 7  |
| 一、主测线上的电位及电场强度.....  | 8  |
| 二、主断面内电位及电流密度.....   | 9  |
| 三、地下半空间的电位和电流密度.....   | 12 |
| 四、固定点 $H$ 的电流密度( $J_H$ )与供电电极距的关系.....                                   | 13 |
| 第四节 均匀各向同性岩石中，地表正、负两平行无限长线电极的电<br>流场——二度场的概念.....                        | 14 |
| 一、二度体(二度场)的定义.....   | 14 |
| 二、均匀各向同性岩石中，一个正线电极的电流场.....  | 14 |
| 三、均匀各向同性岩石中，地表正、负两线电极的电流场.....   | 16 |
| 第五节 岩石电阻率不均匀对电场分布的影响.....  | 18 |
| 一、积累电荷的产生和边界条件.....  | 18 |
| 二、镜像法原理及点电源在垂直接触面附近的电位公式.....  | 20 |
| 第六节 地下电流分布的一般规律.....   | 23 |
| 第七节 用四极装置测定均匀岩石的电阻率.....   | 24 |
| 第八节 视电阻率的概念.....   | 25 |
| 一、视电阻率的概念.....   | 25 |
| 二、影响视电阻率的因素.....   | 25 |
| 三、 $\rho_s$ 曲线定性分析公式 $\rho_s = \frac{J_{MN}}{I_0} \cdot \rho_{MN}$ ..... | 27 |
| 第二章 电阻率剖面法.....  | 29 |
| 第一节 中间梯度装置的 $\rho_s$ 曲线.....   | 29 |
| 一、直立或水平的高、低阻薄岩( $\sigma$ )脉的 $\rho_s$ 曲线特征.....                          | 30 |
| 二、倾斜岩脉上的 $\rho_s$ 曲线.....  | 32 |
| 第二节 联合剖面的 $\rho_s$ 曲线.....   | 32 |
| 一、两种岩石垂直接触时的 $\rho_s$ 曲线.....  | 32 |

|     |                         |    |
|-----|-------------------------|----|
| 二、  | 良导矿脉上的联合剖面 $\rho_s$ 曲线  | 37 |
| 三、  | 高阻直立岩脉上的联合剖面曲线          | 42 |
| 四、  | 复杂地电断面的联合剖面 $\rho_s$ 曲线 | 43 |
| 第三节 | 对称四极剖面法的 $\rho_s$ 曲线    | 44 |
| 第四节 | 电阻率剖面法的野外工作方法           | 45 |
| 一、  | 确定任务                    | 45 |
| 二、  | 测区范围、测网与比例尺             | 46 |
| 三、  | 电极距的选择                  | 47 |
| 四、  | 野外观测及记录要求               | 49 |
| 五、  | 质量检查及精度要求               | 50 |
| 六、  | 野外常见的干扰及其克服             | 51 |
| 七、  | 漏电                      | 54 |
| 八、  | 接地电阻                    | 57 |
| 第五节 | 地表局部不均匀影响和地形影响的消除       | 58 |
| 一、  | 地表局部不均匀影响的消除            | 58 |
| 二、  | 地形影响的改正                 | 59 |
| 第六节 | 应用实例                    | 59 |
| 一、  | 联合剖面法的应用                | 60 |
| 二、  | 中间梯度法在金属矿上的应用           | 62 |
| 三、  | 对称四极剖面法的应用              | 63 |
| 第三章 | 电阻率测深                   | 66 |
| 第一节 | 电测深的基本概念                | 66 |
| 一、  | 电测深的原理                  | 66 |
| 二、  | 双对数坐标的应用                | 68 |
| 三、  | 地电断面和曲线类型               | 69 |
| 第二节 | 二层曲线的特点和解释              | 71 |
| 一、  | 二层理论曲线的特点               | 71 |
| 二、  | 定量解释(反演问题)              | 75 |
| 第三节 | 三层曲线的特点及解释              | 75 |
| 一、  | 三层理论曲线的特点               | 75 |
| 二、  | 三层曲线的等值性                | 77 |
| 三、  | 三层曲线的解释(反演问题)           | 78 |
| 第四节 | 电测深的野外工作方法              | 89 |
| 一、  | 应用电测深的有利条件              | 89 |
| 二、  | 测网的选择                   | 89 |
| 三、  | 电极距 $AB$ 和 $MN$ 的选择     | 90 |
| 四、  | 测点位置的选择                 | 90 |
| 五、  | 布极方向的确定                 | 92 |
| 六、  | 布极的精度要求                 | 92 |
| 七、  | 保证野外观测质量的措施             | 92 |
| 第五节 | 电测深资料的定性解释              | 92 |
| 一、  | 测深曲线的分析及与地质剖面的对应关系      | 92 |



|     |                            |     |
|-----|----------------------------|-----|
| 二、  | 中间层电阻率的确定 .....            | 93  |
| 三、  | 电测深定性图件的绘制 .....           | 97  |
| 四、  | 定性解释及应用 .....              | 99  |
| 第六节 | 其它电测深方法简介 .....            | 102 |
| 一、  | 三极测深 .....                 | 102 |
| 二、  | 环形测深 .....                 | 103 |
| 三、  | 偶极测深 .....                 | 104 |
| 第四章 | 充电法 .....                  | 106 |
| 第一节 | 典型矿体上的曲线特征 .....           | 107 |
| 一、  | 充电球形金属矿体的电位及电位梯度曲线 .....   | 107 |
| 二、  | 充电水平圆柱体的电位及电位梯度曲线 .....    | 110 |
| 三、  | 充电脉状矿体的电位及电位梯度曲线 .....     | 110 |
| 四、  | 两个板状导体的电位梯度曲线 .....        | 112 |
| 五、  | 不等位导电体的电位及电位梯度曲线 .....     | 112 |
| 第二节 | 充电法的野外工作方法和技术 .....        | 114 |
| 一、  | 任务和测网密度 .....              | 114 |
| 二、  | 野外工作布置与技术 .....            | 114 |
| 三、  | 野外观测及质量评价 .....            | 115 |
| 四、  | 观测结果的图示 .....              | 116 |
| 第三节 | 充电法的应用 .....               | 116 |
| 一、  | 追索和圈定金属矿床 .....            | 116 |
| 二、  | 查明矿体之间是否相连及寻找新矿体 .....     | 118 |
| 三、  | 测定地下水的流速和流向 .....          | 118 |
| 第五章 | 自然电场法 .....                | 121 |
| 第一节 | 自然电场法的基本原理 .....           | 121 |
| 一、  | 电子导体上自然电场产生的原因 .....       | 121 |
| 二、  | 离子导体上的自然电场 .....           | 122 |
| 第二节 | 自然电场异常特征 .....             | 124 |
| 一、  | 球形矿体的自然电场 .....            | 124 |
| 二、  | 脉状矿体的自然电场 .....            | 125 |
| 第三节 | 野外工作中的一些问题 .....           | 127 |
| 一、  | 总基点的选择 .....               | 127 |
| 二、  | 测站(或称分基点)的选择和“联站” .....    | 127 |
| 三、  | 对极差的要求 .....               | 129 |
| 四、  | 室内计算 .....                 | 129 |
| 五、  | 电位梯度的观测 .....              | 130 |
| 六、  | 工作质量的评定 .....              | 130 |
| 第四节 | 自然电场法的应用 .....             | 130 |
| 一、  | 自然电场法在××地区含铜黄铁矿床上的应用 ..... | 130 |
| 二、  | 自电在×××黄铁矿型铜矿床上的应用 .....    | 131 |
| 三、  | 在石墨矿床上的应用 .....            | 132 |
| 四、  | 在解决水文地质问题上的应用 .....        | 133 |

## 第二篇 激发极化法

|   |     |
|---|-----|
| <b>第六章 直流激发极化法</b> .....                        | 135 |
| <b>第一节 激发极化法的基本原理</b> .....                     | 135 |
| 一、 激发极化效应产生的原因 .....                            | 136 |
| 二、 岩、矿石的激发极化特性 .....                            | 138 |
| 三、 岩、矿石的极化率及影响因素 .....                          | 143 |
| 四、 视极化率的概念 .....                                | 146 |
| 五、 等效电阻率法 .....                                 | 148 |
| 六、 $\eta$ 曲线的物理分析方法、地下电流偶极子的场 .....             | 153 |
| <b>第二节 各种装置的典型 <math>\eta</math> 曲线分析</b> ..... | 155 |
| 一、 中间梯度装置中，球体的 $\eta$ 曲线 .....                  | 155 |
| 二、 中间梯度装置中，水平圆柱体的 $\eta$ 曲线 .....               | 160 |
| 三、 中间梯度装置中，倾斜矿脉的 $\eta$ 曲线 .....                | 163 |
| 四、 单极梯度装置中，球形矿体的 $\eta$ 曲线 .....                | 165 |
| 五、 脉状矿体的联合剖面 $\eta$ 曲线 .....                    | 172 |
| 六、 激发极化测深 .....                                 | 175 |
| 七、 正交测深 .....                                   | 181 |
| 八、 横向中间梯度 .....                                 | 183 |
| 九、 激发极化法的最大勘探深度问题 .....                         | 185 |
| 十、 激发极化充电法 .....                                | 186 |
| <b>第三节 野外工作方法</b> .....                         | 196 |
| 一、 有关工作布置问题 .....                               | 196 |
| 二、 观测质量问题 .....                                 | 199 |
| 三、 干扰和困难测量条件及其克服 .....                          | 202 |
| 四、 异常的检查研究 .....                                | 205 |
| 五、 成果的图示 .....                                  | 209 |
| <b>第四节 解释推断</b> .....                           | 211 |
| 一、 定性解释 .....                                   | 211 |
| 二、 半定量解释方法 .....                                | 219 |
| <b>第七章 交流激发极化法</b> .....                        | 228 |
| <b>第一节 用低频交流供电时，岩矿石的激发极化现象</b> .....            | 228 |
| 一、 电阻率的频率分散性——激发极化效应在频率域测量中的体现 .....            | 228 |
| 二、 频散率——交流激电观测的主要参数 .....                       | 230 |
| 三、 岩、矿石电阻率的振幅频率特性（幅频特性）及其影响因素 .....             | 231 |
| 四、 视频散率和影响其频率特性的因素 .....                        | 234 |
| 五、 交流激电振幅测量中使用参数的名称、符号对照 .....                  | 235 |
| <b>第二节 野外工作中的几个问题</b> .....                     | 236 |
| 一、 装置 .....                                     | 236 |
| 二、 电磁耦合效应及其克服方法 .....                           | 236 |
| 三、 频率的选择 .....                                  | 242 |
| 四、 极距的选择 .....                                  | 243 |

|     |                                      |     |
|-----|--------------------------------------|-----|
| 五、  | 观测精度要求 .....                         | 243 |
| 六、  | 为保证质量应采取的措施 .....                    | 244 |
| 第三节 | 特殊图件 .....                           | 245 |
| 一、  | 等 $P_s$ 断面图和等 $\rho_{s,r}$ 断面图 ..... | 245 |
| 二、  | 视电阻率的振幅频率特性曲线 (简称幅频特性曲线) .....       | 246 |
| 第四节 | 几种典型形状矿体的偶极剖面标准曲线 .....              | 247 |
| 一、  | 水平板状体的标准曲线 .....                     | 248 |
| 二、  | 直立板状体的标准曲线 .....                     | 249 |
| 三、  | 倾斜板状体的标准曲线 .....                     | 251 |
| 四、  | 水平圆柱体的标准曲线 .....                     | 254 |
| 第八章 | 磁激发极化法介绍 .....                       | 255 |
| 一、  | “磁激发极化法”和“磁电阻率法” .....               | 255 |
| 二、  | 磁激发极化法的特点 .....                      | 258 |
| 三、  | 观测的参数、装置和资料整理 .....                  | 263 |

### 第三篇 电 磁 法

|     |                      |     |
|-----|----------------------|-----|
| 第九章 | 电磁法的基本概念 .....       | 268 |
| 第一节 | 电磁法的简单原理和分类 .....    | 268 |
| 一、  | 低频感应法 .....          | 268 |
| 二、  | 感应脉冲瞬变法 .....        | 269 |
| 三、  | 高频感应类 .....          | 269 |
| 四、  | 大地电磁法 .....          | 269 |
| 五、  | 电磁波法 .....           | 270 |
| 第二节 | 电磁法所利用的岩矿石物理性质 ..... | 271 |
| 一、  | 导电性 .....            | 271 |
| 二、  | 介电性和岩矿石的介电常数 .....   | 271 |
| 三、  | 有效导电率及其与频率的关系 .....  | 272 |
| 四、  | 导磁性 .....            | 273 |
| 第三节 | 实分量和虚分量 .....        | 274 |
| 第四节 | 二次场的频率特性 .....       | 275 |
| 第五节 | 总场的椭圆极化 .....        | 276 |
| 第六节 | 似稳场和辐射场 .....        | 278 |
| 一、  | 似稳场 .....            | 278 |
| 二、  | 辐射场 .....            | 278 |
| 第十章 | 不接地迴线装置 .....        | 280 |
| 第一节 | 不接地迴线的一次场 .....      | 280 |
| 第二节 | 磁偶极子的磁场 .....        | 283 |
| 一、  | 磁位公式 .....           | 283 |
| 二、  | 在球坐标中的磁场强度公式 .....   | 283 |
| 三、  | 磁偶极子场的空间分布特点 .....   | 284 |
| 第三节 | 二次场 .....            | 285 |

|             |                   |            |
|-------------|-------------------|------------|
| 一、          | 良导体               | 285        |
| 二、          | 水平圆柱导体            | 291        |
| 三、          | 薄板状导体             | 294        |
| 四、          | 覆盖层影响             | 298        |
| 五、          | 磁性良导体             | 298        |
| 六、          | 磁性良导倾斜板           | 301        |
| 第四节         | 根据频率特性曲线确定“矿体参数”  | 303        |
| 第五节         | 野外工作方法和实例         | 304        |
| 一、          | 迴线大小及布置           | 304        |
| 二、          | 测网                | 305        |
| 三、          | 工作频率              | 305        |
| 四、          | 补偿信号相角的校准和一致系数的测定 | 305        |
| 五、          | 异常正负号的规定          | 305        |
| 六、          | 野外记录和资料整理         | 306        |
| 七、          | 实例                | 307        |
| <b>第十一章</b> | <b>电磁偶极装置</b>     | <b>310</b> |
| 第一节         | 装置形式              | 310        |
| 第二节         | 几种偶极剖面的典型曲线       | 311        |
| 一、          | 同线 ( $Z, Z$ ) 装置  | 311        |
| 二、          | 旁线 ( $X, Z$ ) 装置  | 313        |
| 三、          | 几种典型剖面曲线          | 315        |
| 四、          | 低阻覆盖层影响           | 315        |
| 五、          | 小结                | 317        |
| 第三节         | 半固定偶极场的应用         | 317        |
| 第四节         | 倾角法及其应用           | 319        |
| 第五节         | 野外工作的几个问题         | 321        |
| 一、          | “收-发距”对异常大小的影响    | 321        |
| 二、          | 发射偶极磁矩方向的规定       | 322        |
| 第六节         | 航空电磁法             | 322        |
| 结束语         | ——电法勘探的发展概况和动向    | 326        |

# 第一篇 直流电法

## 第一章 电阻率法的基本原理

### 内 容 提 要

本章介绍电阻率法的一些基本概念。

第一节 是(叙述)电阻率法的物理前提。

第二、三节 叙述正常电流场的规律。在第二节中突出加深电位、电场强度和电流密度的物理概念。

第四节 为适应导电纸模拟实验的需要,叙述了二度正常电流场的规律,及二度场与三度场的区别。

第五节 简略介绍了在电阻率不同的岩石接触面上,稳定电流场的边界条件和用镜像法求接触面附近点电源的电流场。在附录中还简略介绍了积累面电荷。

第六节 总结稳定电流场分布的一般规律。

第七、八节 叙述了视电阻率的概念及电阻率法的原理。

上述八节综合阐明了一个中心内容,就是研究电流在地下分布的规律,及其对视电阻率观测值的影响。

电阻率法是直流电法勘探之一种,它建立在地壳中各种岩(矿)石具有不同的导电性能,即各种岩(矿)石导电性好坏的基础之上。当人工向地下通以直流电流时,在地表上用仪器就能观测地面电场分布情况,通过研究这种人工电场的分布规律达到寻找地下矿产及解决地质问题的目的。本章主要讨论岩(矿)石的电阻率及影响因素和电阻率法的基本原理。

### 第一节 岩石的电阻率及其影响因素

#### 一、岩石和矿物的电阻率

从物理学中已经了解:一段导体的电阻( $R$ )与沿电流方向的长度 $L$ 成正比,与垂直于电流方向的横截面积 $S$ 成反比,

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad \rho = R \frac{S}{L}$$

式中,  $L$ ——导体的长度(单位为米);

$S$ ——垂直于电流方向的横截面积(厘米<sup>2</sup>);

$\rho$ ——导体的电阻率[单位欧姆·(厘米)<sup>2</sup>/米]。

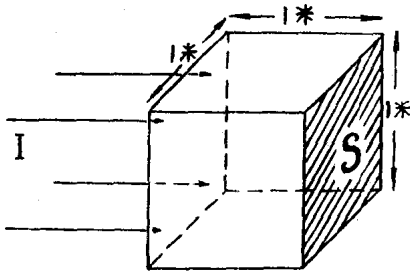


图 1.1-1 岩石电阻率示意图

式中的比例系数  $\rho$  表示了该物质的导电性能。在电法勘探中导体为地壳，可借用上面公式，则电阻  $R$  的单位仍为欧姆，而横截面积 ( $S$ ) 为米<sup>2</sup>，导体长度 ( $L$ ) 为米，所以电阻率单位改为欧姆-米 ( $\Omega\cdot M$ )。我们可以这样定义导体电阻率的大小，即对边各为 1 米的正方体岩 (矿) 石，垂直于一对横截面通电时所产生电阻的大小，即为该导体的电阻率，如图 1.1-1。

常见的岩 (矿) 石电阻率变化范围见下表：

表 1.1-1 常见矿物电阻率表

| $10^{-6}-10^{-3}$<br>(欧姆-米)   | $10^{-3}-1$<br>(欧姆-米)                                      | $1-10^3$<br>(欧姆-米)                                  | $10^3-10^6$<br>(欧姆-米)                  | $>10^6$<br>(欧姆-米)  |
|-------------------------------|--|---|--|--|
| 磁铜矿<br>石墨<br>铜蓝<br>磁铁矿<br>黄铁矿 | 毒砂<br>方铅矿<br>赤铁矿<br>赤铜矿<br>白铁矿<br>辉钼矿<br>黄铁矿<br>辉铜矿<br>黄铜矿 | 辉铁矿<br>辉铋矿<br>黑钨矿<br>赤铁矿<br>锡石<br>软锰矿<br>菱铁矿<br>铬铁矿 | 赤铁矿<br>钛铁矿<br>褐铁矿<br>蛇纹石<br>闪锌矿<br>闪铬矿 | 角闪石<br>闪石<br>石膏<br>盐石膏<br>石榴石<br>方解石<br>石英<br>霞石<br>石油<br>辉石<br>长石<br>云母 |

表 1.1-2 常见岩石电阻率表

| 沉积岩  | 电阻率<br>(欧姆-米)  | 岩浆岩 | 电阻率<br>(欧姆-米) | 变质岩  | 电阻率<br>(欧姆-米) |
|------|----------------|-----|---------------|------|---------------|
| 粘土岩  | $10^{-1}-10^1$ | 花岗岩 | $10^2-10^5$   | 泥质板岩 | $10^1-10^3$   |
| 泥岩   | $10^1-10^2$    | 正长岩 | $10^2-10^5$   | 结晶片岩 | $10^2-10^4$   |
| 粉砂岩  | $10^1-10^2$    | 闪长岩 | $10^2-10^5$   | 大理岩  | $10^2-10^5$   |
| 砂岩   | $10^1-10^3$    | 辉绿岩 | $10^2-10^5$   | 片麻岩  | $10^2-10^4$   |
| 砾岩   | $10^1-10^4$    | 玄武岩 | $10^2-10^5$   | 石英岩  | $10^3-10^5$   |
| 石灰岩  | $10^2-10^4$    | 辉长岩 | $10^2-10^5$   |      |               |
| 泥质页岩 | $10^2-10^3$    |     |               |      |               |

各种水的电阻率 (欧姆-米)

咸水 (苦水)  $10^{-1}-10^2$ ;

海水  $10^{-1}-10^1$ ; 河水  $10-10^2$ ;

潜水  $<100$ ; 雨水  $>100$ 。

由上表可以看出：

1. 同类岩石和矿物的电阻率值都在一定范围内变化。

2. 不同类的矿物电阻率值变化很大，可分为：良导电性矿物，电阻率小于  $1\Omega\cdot M$ ，如金属硫化物、石墨、磁铁矿等；中等导电性矿物，电阻率在  $1\sim 10^6\Omega\cdot M$  范围内，大部分氧化矿物属此类；劣导电性矿物，电阻率大于  $10^6\Omega\cdot M$ ，石英、长石、云母等造岩矿物属此类。

3. 三大岩类中，岩浆岩、变质岩和沉积岩中的化学沉积岩电阻率值均较高，沉积岩中的碎屑岩类电阻率值一般较低。

## 二、影响岩、矿电阻率的因素

同类或不同类岩石、矿物电阻率差别很大的事实说明，决定岩、矿石导电性的因素很繁杂。在分析这些因素之前，首先应抓住物理本质。大家知道，自然界中有两类性质不同的导体——电子导体和离子导体（溶液），矿物靠自由电子导电，一般岩石靠其孔隙水溶液中的离子导电。

影响单矿物电阻率的主要因素是自由电子的多少：造岩矿物缺少自由电子，成为很好的绝缘材料；绝大多数金属硫化矿物及石墨等的自由电子很多，导电性良好；赤铁矿则由于结晶情况和所含杂质的不同，电阻率在相当大的范围内变化。

影响岩石、矿石电阻率的因素较多，下面讨论四种主要因素：

### 1. 岩（矿）石电阻率与矿物成分的关系

矿物是组成岩石和矿石的基本单位，每种岩石或矿石都是由一种或多种矿物组成，而每一种矿物的电阻率值都在一定范围内变化，且就同种岩（矿）石来说，所含各种矿物的成分比还不一样，所以岩（矿）石的电阻率变化范围也比较大。

### 2. 岩（矿）石电阻率与组成矿物颗粒结构的关系

自然界中，大多数岩（矿）石由均匀相连接的胶结物和不同形状的矿物颗粒所组成，因此，岩石的结构，导电矿物在岩石中的相连情况，对岩石的电阻率有很大的影响。

当导电矿物呈致密块状或细脉相连时，岩石的电阻率便很小。如图 1.1—2 a。

当导电矿物在岩石中呈浸染状分布时，由于导电颗粒被不良导电物质相互隔开，所以尽管岩石中良导电矿物含量不少，但电阻率值仍然很大。如图 1.1—2 b。

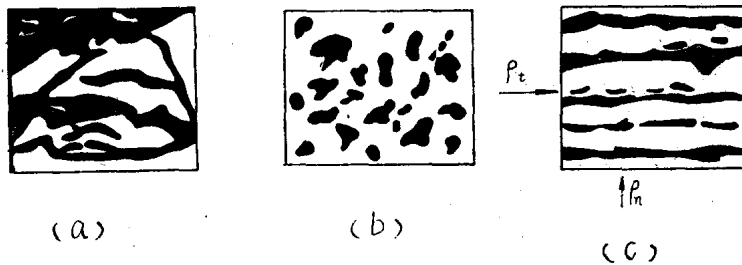


图 1.1—2 岩矿石结构与导电性关系示意图

当岩石中的良导矿物呈定向分布时（如细脉状或片状），与浸染状相比时电阻率前者比后者要小些。但此时岩石的电阻率还和通电流的方向有关，当电流平行于岩石中良导脉的方向时，电阻率就小；若电流垂直于良导脉的方向时，电阻率就大。岩石电阻率随通电方向而变化的这种性质称为“各向异性”，如图 1.1—2 c。（当岩石的电阻率在任何方向上都一样时，称为各向同性）。

一般来说沿岩石片理或层理方向的电阻率（ $\rho_t$ ）要小，垂直于片理或层理方向的电阻率（ $\rho_n$ ）要大，即  $\rho_n > \rho_t$ 。把  $\rho_n$  与  $\rho_t$  的比值的平方根称为岩石的各向异性系数（ $\lambda$ ），

即 
$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \text{ 和 } \rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_t} \dots\dots \text{平均电阻率。}$$

岩石电阻率的各向异性对电法资料的解释、尤其对电测深的解释有重要意义。

### 3. 岩石和矿石的电阻率与湿度的关系

自然界中的岩(矿)石,都各具有不同的孔隙,一般孔隙中都含有或多或少的水分。在单位体积的岩石中,孔隙所占的体积称为孔隙度,而其中水分所占的体积称为湿度,水都充填在孔隙里,所以一般湿度要比孔隙度小,如果湿度等于孔隙度,就说明孔隙充满了水,若靠离子迁移作用来导电,那么水溶液越多,电阻率越低。若湿度为零,则孔隙中全是空气,如干砂,电阻率就很大。

### 4. 岩石和矿石的电阻率与温度的关系

通过实际观察,岩石的电阻率与外界温度有关,而靠电子导电的矿石,其电阻率与温度无关。我国许多地区,一年内的温度在 $-40^{\circ}\text{C}$ — $+40^{\circ}\text{C}$ 的范围内变化,由于岩石孔隙和裂隙中含有水分,温度的改变会引起水的溶解度(溶解盐的能力)的改变,而且盐离子的运动速度(即离子的迁移率)也受温度影响,当温度升高时,水的溶解度增加,离子迁移率增高,使水的导电性增强,岩石的电阻率也就低。当温度降低时,水的导电性就差,岩石电阻率也就升高,尤其当温度降至零下时,水将结成冰,使岩石电阻率急剧增高。因此,冬季寒冷地区电阻率法无法施工。

综上所述,影响岩(矿)石电阻率的因素很多,可归纳为:

1. 金属矿石绝大多数以电子导电为主,因此矿石的电阻率主要决定于金属矿物颗粒的成分形状、含量及其结构,其中金属矿物的结构特征对矿石电阻率的影响最大。此外当金属矿物氧化之后,电阻率值会显著升高。例如,方铅矿氧化后表面生成一层不良导电的铅矾。

2. 各类岩石一般是属于离子导电的,岩石的电阻率主要决定于岩石的孔隙度、湿度及所含水的矿化度。

一般沉积岩的孔隙度和湿度较大,所以电阻率比岩浆岩及变质岩要低。当岩浆岩受风化或构造运动产生裂隙,并充填有水溶液,则电阻率会明显下降。

由于影响岩石电阻率的因素很多,各地区条件也不一样,因此在工作中必须结合当地具体情况具体分析,同时本节所列举的岩(矿)石电阻率值各地情况也不一样,仅供参考。

## 第二节 均匀各向同性岩石中, 地表一个点电源电流场的分布特征

前面讲过电阻率法为直流电法勘探的一种,将直流电源(电池或发电机)的两端通过导线及电极把电能直接输送到地下半空间,于是在地下就建立稳定的电流场,如果地下为均匀的各向同性的岩石组成,就形成正常场。反之地下存在有不均匀体时,在地面用电法仪器观测到的电场分布情况,它与正常场是有区别的,其差别的部分称为异常。电阻率法就是通过研究分析这种异常电场的分布情况,达到找矿或解决其它地质问题的目的。

电流场在地下岩石中的分布情况,一般用电流密度、电场强度及电位等物理量来描述。下面分别进行叙述:



## 一、电流密度

电流密度就是穿过导体横截面上单位面积的电流强度，一般用  $\vec{j}$  来表示。单位为微安/米<sup>2</sup>或微安/厘米<sup>2</sup>。因为电流是有方向的，所以电流密度是向量。

“一个点电源”的正常电流场，是指在下列四个理想条件下，地下电流的分布情况：

1. 假设地下为均匀各向同性的岩石，其电阻率为  $\rho$ ；
2. 有一直流电源通过  $A$  电极向地下供电，另一个电极在无穷远，对所观测的范围内影响可忽略不计；
3. 供电电极入土深度 ( $l$ ) 与电极到观测点的距离 ( $r$ ) 之比很小 ( $r > 10l$ )，可看做是个点源；
4. 地形为无限大的平面。

在上述的条件下，由正极通入地下的电流均匀流出，电流线呈辐射状，各点的电流密度方向都沿半径向外。任意点  $M$  的电流密度大小可求之如下：以  $M$  点到供电电极  $A$  的距离  $r$  为半径，以  $A$  为圆心，作一个半球，则总的电流 ( $I$ ) 都均匀流经整个半球面，即半球面上各点 (包括  $M$  点) 的电流密度大小相同，

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.2-1)$$

式中， $2\pi r^2$  为通过  $M$  点的半球面的表面积，

由上式我们看出， $j$  与  $I$  成正比，与  $r^2$  成反比。当  $r$  增大时， $j$  减小很快，那么  $r$  增加到足够大，则  $j$  就趋于零。

主断面 (通过  $A$  极的任意断面) 上，电流密度的分布见图 1.2-1。

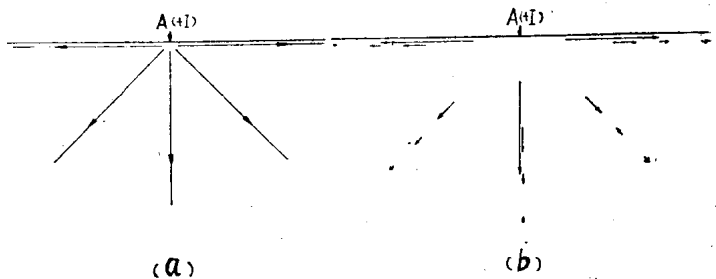


图 1.2-1 一个点电源的正常电流密度分布图  
(a) 电流线图；(b) 电流密度向量图

## 二、电场强度

电场强度是单位正电荷在电场中所受的电场作用力，即  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ 。其中  $\vec{F}$  是电量为  $q$  的正电荷所受的力， $\vec{E}$  表示电场强度。在稳定电流场中的任意一点处，电场强度与电流密度之间都满足以下关系：

$$\vec{E} = \vec{j} \cdot \rho \quad (1.2-2)$$

上式称为“微观形式的欧姆定律”，它表明电场强度与电流密度的方向相同，大小成正比，比例系数为该点介质的电阻率。公式 (1.2-2) 是稳定电流场中通用的最基本的公式。

对于均匀各向同性岩石情况下，地表一个点电源供电时，任意点的电场强度的大小为：

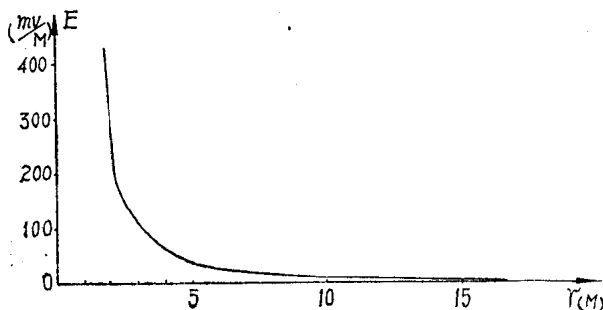


图 1.2-2 点电源的电场强度剖面曲线

$$\left( \text{设 } \frac{l\rho}{2\pi} = 1000 \text{ mV} \cdot \Omega \cdot \text{M} \right)$$