

石油地球物理勘探丛书

# 石油电法勘探



王家映 编

● 石油工业出版社

石油地球物理勘探丛书

# 石油电法勘探

王家映 编

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

### 内 容 提 要

本书讨论了当今国内外用于石油和天然气普查与勘探中的一些有效的电法勘探方法(如直流电测深法(VES),大地电磁测深法(MT),大地电流法(TM),声频大地电磁测深法(AMT),可控源声频大地电磁测深法(CSAMT),频率测深法(FS),瞬变电磁测深法(TEM)以及激发极化法(IP)等)的基本原理和数据采集、资料处理、反演解释方法,并用大量的实例说明这些方法在石油勘探中的应用效果。

书中着重物理概念分析,避免了烦杂的数学公式推导,既保持了方法的系统性和理论性,又扩大了它的适用范围。可供石油物探、石油地质及其他从事电法勘探的科技人员和有关大专院校师生参考。

本书第四章和第五章第四节由刘崧副教授编写。

石油地球物理勘探丛书

石油电法勘探

王家映 编

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京昌平区第一排版厂排版

北京朝阳区北苑印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 14<sup>1</sup>/<sub>2</sub>印张 357千字 印1—1,500

1992年8月北京第1版 1992年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0727-4/TE·687

定价, 6.90元

## 出版者的话

近二十年来，石油地球物理勘探技术日新月异，发展迅速。为了总结地球物理与地质相结合的经验，推广石油物探方法的新技术，我们组织有关专家、教授编写了这套《石油地球物理勘探丛书》，供石油地球物理工程师学习参考，以期做到物探工作中设计的合理性、采集的可靠性、处理的正确性、解释的科学性，提高解决各种复杂问题的能力。

这套丛书以应用为主，对基本概念和基础理论只做简要阐述，侧重于介绍各种新技术、新方法在实际工作中的应用。内容包括石油重、磁、电、地球化学、放射性、地震各种方法的资料采集、数字处理、成果解释、应用等，预计编写二十余册，每册都力图讲述清楚一个课题，它既是石油物探工作者施展才能的园地，又是您工作案旁的良师益友。让我们为发展石油物探技术，来共同编好和使用好这套丛书吧！

## 前 言

电法勘探（简称电法）是勘探地球物理学的主要学科之一。它是基于岩石、矿物的电性差异，通过观测和研究天然的或人工的电场或电磁场的空间和时间分布规律来勘查地质构造和寻找有用矿产的一类勘探方法。因此，就其实质而言，电法勘探是一门利用电学或电磁学知识研究地质和地球物理问题的应用科学。

作为一门应用科学，电法勘探的应用和发展不仅与地质学、物理学中的电学和电磁学有关，而且与许多应用学科都有着紧密的联系。地质学为电法勘探提出地质任务，电学和电磁学为它提供方法和理论，而一些应用科学为它提供手段。

在电法勘探中，目前利用的岩石和矿物的电学性质主要有：电阻率 ( $\rho$ )，磁导率 ( $\mu$ )，介电常数 ( $\epsilon$ ) 和 极化特性（体极化率  $\eta$  和 面极化率  $\lambda$ ）。实践证明，自然界中任何一种地质体都或强或弱地具有几种电性，人们可以单独利用其中的一种性质，也可以同时或分别利用多种或全部电学性质，以便从不同的侧面了解和研究地质目标。于是，由于地质任务不同，以及为解决各种地质任务所利用的电学性质、采用的场源形式、工作方式、观测要素等等方面的不同，便相应地有了不同的电法勘探方法，或者方法的变种和分支。

目前，电法勘探的方法很多。为了科学研究、实际应用和学习的方便，常常从某种角度对它们进行分类。角度不同，分类的方法也不一样。下面仅介绍几种常用的分类方法。

①按勘探的对象分为：a. 金属与非金属电法；b. 石油和天然气电法；c. 水文与工程电法；d. 煤田电法。本书要讲的属于石油和天然气电法。

②按场源的性质分为：a. 人工场或主动场法。这种电法的特点是，场源的形式和功率可以人为控制，既灵活又方便；b. 天然场或被动场法。其特点是不用人工场源，既经济又有效。在石油勘探中使用的电法，既有人工场源法，也有天然场源法。

③按时间域或频率域分为：a. 交流电法或频率域电法。这类方法的特点是供电、观测和解释都在频率域进行，或者供电、观测在时间域，解释却在频率域进行。使用的频率范围不同，解决的地质任务也不一样。因而，按频率范围又可把交流电法分为不同的分支（如高频电法勘探，低频、甚低频电法勘探等）；b. 直流电法。这类方法，供的是直流电场，测量的也是直流电场。供电和测量方式不同，直流电法的名称也不一样；c. 时间域电磁法，或瞬变场法。它研究的是电磁场的瞬变过程，即时间域的特性。在石油勘探中，直流电法、交流电法和瞬变场法都得到了不同程度的应用。

④按工作的场所分为：a. 航空电法；b. 地面电法；c. 海洋电法；d. 井中电法。目前用于石油勘探中的主要是地面电法，也用少量的海洋电法和井中电法。

⑤按产生异常的原因分为：a. 传导类电法。它观测和利用的是地球中由于传导作用而产生的异常场。如电阻率法、自然电场法、充电法和激发极化法等就是属于传导类电法；b. 感应类电法。这类方法观测和利用的是由感应作用产生的异常场。如瞬变场法，大地电磁测深法，频率测深法，无线电波法等。传导类和感应类电法都已广泛地应用于石油勘探中。

除以上几种常见的分类方法外，在不同的场合还有其他的分类方法，这里就不一一介绍了。必须指出，分类只是为了方便，而不是人为地在各种方法之间树立一道屏障。事实上，

按同一种原则分类的各种方法之间，都存在着重叠和交叉，并没有明显的界限。比如，电测深法、频率测深法和瞬变电磁测深法，既属于石油电法，也属于金属电法。除勘探深度各有不同外，从方法原理到资料处理与解释，各种方法用于金属和石油勘探没有任何区别。此外，现有的分类方法也不是固定不变的。随着科学技术的发展，新的勘探方法会不断涌现，现有方法也会不断更新、补充、甚至淘汰，因而必有新的分类方法出现。

应该指出，虽然磁法勘探和被动场电法勘探都利用了地球的磁场分量，但两者有原则区别。前者利用的是地球的基本场，即地磁场的稳定部分，而天然场电法勘探则利用的是地磁场中的可变部分。

就石油电法而言，40年来，经历了从高峰到低谷再到高峰三个发展阶段。从解放初期到60年代初这段时期内，随着社会主义建设的蓬勃发展，电法勘探，主要是电测深法和大地电流法，在我国获得了迅速的发展和成功的应用。在各大盆地的石油普查勘探中，电法勘探都发挥了一定的作用。然而，由于电法勘探的分辨力不高，误差较大等自身的局限性，加之地震反射法在寻找构造油藏时有明显的效果，从60年代中到70年代末，石油物探中的电法勘探进入了低谷。在70年代末，由于数字化仪的出现，大地电磁法如异军突起，特别是它具有不受高阻层屏蔽和对低阻层分辨力高的巨大优越性，使它受到世界各大石油公司的青睐。大地电磁法以及其他一些电磁测深法在许多油田勘探上的成功，也引起了我国石油物探工作者的极大兴趣。在短短几年内，大地电磁仪大批引进，大地电磁队迅速增加。大地电磁法的地质效果，特别是在碳酸盐岩和火成岩覆盖的高阻地区，以及地震勘探难以进行的地区的地质效果，得到了人们的普遍承认。大地电磁法的兴起，以及随之而来的其他电磁测深法和激发极化法等石油的普查和勘探中的应用，成为解放后电法勘探在石油物探中出现第二次高潮的重要标志。石油电法二次高潮的到来，不仅说明电法勘探的研究和应用进入了新阶段，而且也体现了石油物探的进一步深入，找油难度日益加大这一客观现实。因而，综合利用包括岩石电性在内的各种物性、有机地配合各种物探和化探方法，合理地解释包括地质在内的各种资料，是提高勘探效果，有效地寻找油气藏的重要措施和途径。树立综合找矿的思想，充分发挥各种方法的优势，不仅对找金属矿，而且对石油和天然气的探测都有重要意义。

在石油物探中，电法勘探占有重要地位。在区域普查中，它可用于研究区域构造，确定沉积盆地基底起伏，圈定含油气远景区。在火成岩、碳酸盐岩覆盖地区和地震地质条件比较复杂，难以取得良好地震记录的地区，电法勘探是地震勘探的一种重要补充。在条件较好，构造不太复杂的地区，电法勘探甚至也可用来圈定局部构造。

除油气田的勘查外，电法勘探还广泛应用于金属和非金属、煤田、水文工程以及地热田的普查与勘探，甚至在研究地壳和上地幔的电性结构、天然地震的预测与预报方面，电法勘探也可以发挥它的重要作用。

作为石油电法勘探的专业书籍，我们将把精力集中在那些对石油和天然气普查、勘探有效的那些电法勘探方法上，如直流电测深法（VES）、大地电磁测深法（MT）、可控源声频大地电磁测深法（CSAMT）、频率测深法（FS）、瞬变电磁测深法（TEM），以及激发极化法（IP）等。而对那些在石油勘探中很有前途的方法也将给予一定的重视。在论述问题时，本书将侧重于物理实质，而不是数学推导，以便更多的石油物探和石油地质工程技术人员参阅。

# 目 录

<b>第一章 直流电测深法</b> .....	1
第一节 岩石的电阻率.....	1
第二节 直流电测深法的基本理论.....	4
第三节 直流电测深法的仪器装备及野外工作方法.....	21
第四节 电测深资料的解释.....	26
<b>第二章 大地电磁测深法</b> .....	43
第一节 大地电磁测深法的地质、地球物理基础.....	43
第二节 水平均匀层状介质中大地电磁测深理论.....	46
第三节 水平不均匀介质中大地电磁测深理论.....	61
第四节 表层电性不均匀对大地电磁测深曲线的影响.....	70
第五节 大地电磁测深法的仪器和野外工作方法.....	72
第六节 大地电磁测深的数据处理.....	75
第七节 大地电磁测深资料的解释.....	86
<b>第三章 大地电流法和其他电磁测深法</b> .....	110
第一节 大地电流法.....	110
第二节 声频大地电磁测深法.....	114
第三节 可控源声频大地电磁测深法.....	116
第四节 频率测深法.....	134
第五节 瞬变电磁测深法.....	142
<b>第四章 激发极化法</b> .....	160
第一节 激发极化法的基本原理.....	160
第二节 激电异常解释的基本理论.....	174
<b>第五章 电法勘探在石油和天然气普查与勘探中的应用</b> .....	196
第一节 电测深法在石油和天然气普查与勘探中的应用.....	196
第二节 大地电磁测深法在石油和天然气普查与勘探中的应用.....	205
第三节 其他电磁测深法在石油和天然气普查与勘探中的应用.....	211
第四节 激电法在石油和天然气普查与勘探中的应用.....	215
<b>参考文献</b> .....	220

# 第一章 直流电测深法

直流电测深法是根据岩石和矿石导电性的差异，在地面上不断改变供电电极和测量电极的位置，观测和研究所供直流电场在地下介质中的分布，了解测点电阻率沿深度的变化，达到测深、找矿和解决其他地质问题的目的的电法勘探的一组分支。随布极方式不同，直流电测深法又可分为三极、对称四极和偶极测深法等。实践证明，直流电测深法无论在普查金属、非金属矿产方面，还是在能源勘探、地质填图以及水文、工程地质调查等方面，都有良好的地质效果，发挥着重要作用。

## 第一节 岩石的电阻率

虽然在电法勘探中利用的岩石和矿石的电学性质有导电性、导磁性、介电性和极化特性等，但在直流电测深和似稳场的交变电磁测深中，起决定作用的仍然是岩、矿石的导电性。岩、矿石的导电性是电测深法的基础。因此，我们将首先论述影响岩、矿石导电性的电阻率的主要因素。

### 一、岩石电阻率的一般概念

岩、矿石的导电性通常用电阻率 ( $\rho$ ) 或电导率 ( $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ) 来描述。根据物理学的定义，均匀介质中直流电路的电阻 ( $R$ ) 和介质的长度 ( $L$ ) 成正比，和截面积 ( $S$ ) 成反比

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-1)$$

比例系数  $\rho$  称为介质的电阻率。它在数值上等于单位面积 ( $S = 1\text{m}^2$ )、单位长度 ( $L = 1\text{m}$ ) 介质的电阻，其单位为欧姆米，记为  $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越低，物质的导电性越好；反之，电阻率越高，其导电性越差。

影响岩石电阻率的因素很多，如组成岩石的矿物成分和结构，岩石中所含水分的多少及其矿化程度的高低，岩石所处环境的温度和压力，以及岩石在高温高压条件下出现的各种物理化学变化（相变，脱水，部分熔融）等。这些因素使得岩石的电阻率值变化很大，即使是同一种岩石，由于所处的环境不同，彼此间的电阻率值也相差很大，甚至达几个级次。

一般说来，火成岩和变质岩的电阻率较高，通常在  $10^2 \sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$  范围内变化；沉积岩的电阻率较低，如粘土的电阻率约为  $10^{-1} \sim 10^1 \Omega \cdot \text{m}$ ；砂岩的电阻率为  $10^1 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ ；而致密灰岩的电阻率则相对较高，干燥时可达  $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 。从表1-1可以看出，干燥岩石比天然状态下含有水分的岩石之电阻率要高得多。

在沉积盆地中，岩层的地质年代、沉积环境和含水分的多寡不同，电阻率也不一样。因而，用电测深法研究沉积盆地的区域构造，甚至寻找和圈定局部构造是完全可能的。



表 1-1 岩石电阻率表 (单位:  $\Omega \cdot m$ )

分类	岩石名称	天然岩石	干燥岩石
沉积岩	粘土	0.5~30	
	泥页岩	$1.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^6$
	长石砂岩	$6.8 \times 10^2$	$1.0 \times 10^6$
	砂岩	$3.5 \times 10^4$	$3.9 \times 10^5$
	石灰岩	$2.1 \times 10^5$	$2.3 \times 10^7$
变质岩	角闪岩	$8.1 \times 10^3$	$6.0 \times 10^7$
	片麻岩	$6.8 \times 10^4$	$3.2 \times 10^6$
	石英岩	$4.7 \times 10^6$	
火成岩	花岗岩	$1.6 \times 10^5$	$3 \times 10^{13}$
	玄武岩	$2.3 \times 10^4$	$1.7 \times 10^7$
	辉绿岩	$2.9 \times 10^2$	$8.0 \times 10^3$
	橄辉岩	$3.0 \times 10^3$	
	石英闪长岩	$2.0 \times 10^4$	$1.8 \times 10^5$

## 二、影响岩石电阻率的因素

### 1. 组成岩石的矿物成分和结构

岩石由不同的矿物和胶结物组成。矿物的成分和结构不同，岩石的电阻率也不相同。研究表明，组成岩石的矿物颗粒之大小、形状及其电阻率的高低对岩石电阻率影响不大，除非颗粒含量相当大（比如大于60%），与矿物的成分和结构相比，胶结物电阻率之高低及其连通情况更影响岩石电阻率的大小。这是因为矿物颗粒体积含量不大时，颗粒间是彼此孤立的，而胶结物却是连通的缘故。而当颗粒体积含量增大，以致彼此间连通时，对岩石的电阻率才有明显的影响。

在自然界中，大多数沉积岩和部分变质岩常成层状构造，如图1-1所示，此时岩石的电阻率呈各向异性。沿层理方向的电阻率 $\rho_t$ 和垂直于层理方向的电阻率 $\rho_n$ 各不相同。如果岩层分别由电阻率 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ ，厚度 $h_1$ 、 $h_2$ 的两层介质组成，则

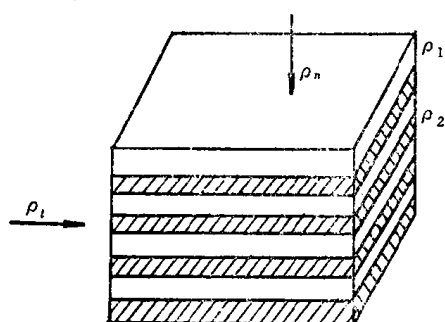


图 1-1 具有层理的岩石之各向异性

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} \quad (1-2)$$

$$\rho_n = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2} \quad (1-3)$$

十分清楚，此时 $\rho_n \geq \rho_t$ 。若定义

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t} \quad (1-4)$$

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

则分别称 $\lambda$ 和 $\rho_m$ 为介质的非各向同性系数和平均电阻率。实际观测表明，某些岩层的电阻率具有明显的非各向同性，如石墨化碳质页岩， $\lambda$ 竟达2~3。在电法资料解释时，应充分考虑岩层的各向异性。

### 2. 岩石的电阻率与所含水分的关系

自然界的岩石或多或少都含有一些水分。岩石中含水量的多寡主要取决于岩石本身的孔

隙度及当地的水文地质条件。由于天然水和地下水的电阻率较低，而且含盐分越高、矿化度越大，天然水和地下水的电阻率越低。在岩石中的水分互相连通的情况下，岩石的电阻率主要取决于其中所含水分的多少（或湿度大小）。

一般讲，岩石越疏松，孔隙度越大。如土壤、砂、粘土、砾石、砂岩、玄武岩等孔隙度较大；相反，岩石致密度越高，孔隙度越小。如石灰岩、花岗岩、大理岩等的孔隙度就很小。在潜水面以下，岩石的孔隙中通常充满了水，这时岩石的含水量便等于孔隙度；而在潜水面以上，由于雨雪的渗透，岩石也不是完全干燥的，岩石的含水量小于孔隙度。在自然条件下，沉积岩孔隙度大，含水分多，电阻率低；火成岩因风化、破坏作用，其裂隙或节理中也含有相当比例的水分，电阻率不会很高；变质岩的电阻率与其变质程度有关，变质越深，岩石越致密，其电阻率越高。

如岩石由高阻球状颗粒和胶结物或水（其电阻率为 $\rho_*$ ）结合而成，可以证明，其电阻率为

$$\rho = \rho_* \frac{3 - \omega}{2\omega} \quad (1-6)$$

其中 $\omega$ 为岩石的含水量或湿度。可见，当湿度较小时，岩石的电阻率几乎与湿度成反比，与 $\rho_*$ 成正比。当 $\omega$ 不大时， $\omega$ 的微小变化，会引起 $\rho$ 的巨大变化。

### 3. 岩石的电阻率与温度的关系

岩石电阻率随外界温度升高而降低，这是因为岩石中所含水溶液的电阻率与温度有明显的关系。图1-2为一块岩石标本电阻率与温度的关系之实测曲线。可见，在0℃以上的正温区，电阻率随温度变化缓慢；而在0℃以下的负温区，湿度降低，电阻率明显升高，其变化可达三个级次。显然，这是岩石中孔隙水溶液冻结后导电性变差的缘故。研究表明，在正温区，温度对岩石电阻率的影响遵循下列公式

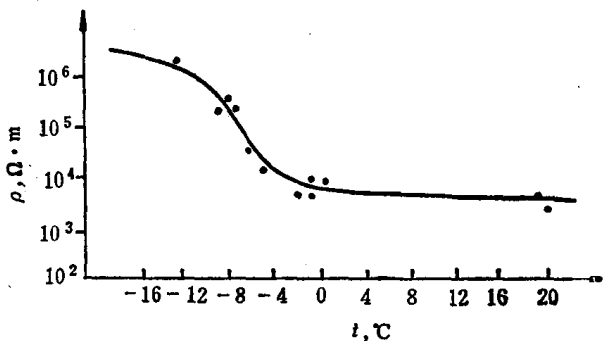


图 1-2 含水砂岩电阻率随温度变化的实测曲线（孔隙度12%，湿度1.5%）（傅良魁，1983）

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_T(T + 18)} \quad (1-7)$$

其中 $\rho_{18}$ 是岩石在18℃时之电阻率， $T$ 是岩石所处环境的温度， $\alpha_T$ 是电阻率的温度系数，大约为 $0.025 \text{度}^{-1}$ 。

在电法勘探中，不但需要考虑四季温差的变化对野外施工的影响，而且还应特别注意地温梯度造成岩石电阻率随深度增加而降低这一因素。在深部电性探测和石油勘探中，这一问题已日益被人们所重视。

## 三、地壳电性分布的一般特点

如前所述，在接近地表的浅层，岩石的电阻率主要决定于其中的水分，岩石的矿物成分和温度是次要的因素。然而，随着深度加大，由于静压力的作用，岩石中孔隙水大量排出，甚至孔隙完全闭合，加之岩石的变质，造成结晶基底的电阻率急剧增加，达到 $10^3 \sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ ，形成高阻区。随着深度的进一步加大，深部岩石处于高温高压的环境中，这时，影响岩石电阻率的主要因素是温度。由于主要造岩矿都属半导体导电，在高温条件下均具有良好的导电

性，因此，地球物理学家确信，在地球深处岩石的电阻率相当低，甚至低于 $1\Omega\cdot m$ 。

由此看来，在地壳和上地幔范围内，岩石电阻率由浅到深可以粗略地看成低阻—高阻—低阻这种三层模型，如图1-3所示。当然，不同地质构造单元中岩石的成分、结构、水分的

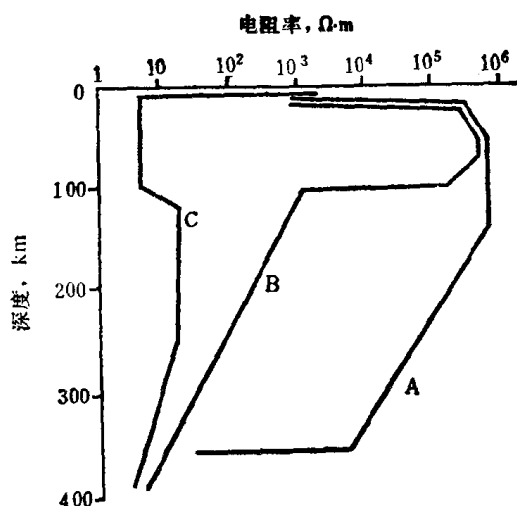


图 1-3 高度理想化的地壳和上地幔的电阻率模型  
A—稳定大陆核；B—活动地壳；C—火山裂谷区 (石应骏等, 1985)

多少，以及温度、压力的分布都有很大的差别，因而它们的电导模型也会有一定的差异。

在某些地区的地壳和上地幔中，还存在着高导层。其层次的多少、厚薄、电阻率的高低都各不相同。研究壳内和幔内高导层的分布状态，以及它和地下热场分布之间的关系，对地壳运动和地质构造的研究都很有意义。

## 第二节 直流电测深法的基本理论

如果把以岩石电阻率的差异为物质基础的电法勘探方法统称为电阻率法的话，那么直流电测深法就是电阻率法中理论最完整、应用最广泛、效果最显著的方法之一。顾名思义，直流电测深法利用的是直流电，探测的是电阻率沿铅直方向的变化。为使直流电测深法的基本理论的论述更为清楚，我们将从点电流源的电场讲起。

### 一、均匀介质中点电流源的稳定电流场

在电阻率为 $\rho$ 的均匀半空间表面，由电极向介质中通以强度为 $I$ 的电流，形成的稳定电流场满足欧姆定律的微分形式

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

它遵守电流的连续性方程

$$\text{div } \mathbf{j} = 0 \quad (1-9)$$

并具有势场特征，即

$$\mathbf{E} = - \text{grad } U \quad (1-10)$$

且

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0$$

其中 $\sigma$ 为介质的电导率， $E$ 和 $j$ 为稳定电流场的电场强度和电流密度；grad, div, 和rot分别表示梯度、散度和旋度； $U$ 是电位。

除满足以上定律外，在边界上，稳定电流场还满足第一类边界条件

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad R \rightarrow \infty \text{ 时, } U &= 0 \\ \textcircled{2} \quad R \rightarrow 0 \text{ 时, } U &= \frac{I\rho}{2\pi R} \end{aligned} \quad (1-11)$$

其中， $R$ 是场源距观测点间的距离。

第二类边界条件

$$j_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (1-12)$$

即在地面上（除点源外），电流密度的法向分量等于零。

第三类边界条件，电阻率为有限时，在界面的两边有

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad U_1 &= U_2, & \text{电位连续;} \\ \textcircled{2} \quad j_{n1} &= j_{n2}, & \text{电流密度的法向分量连续;} \\ \textcircled{3} \quad E_{t1} &= E_{t2}, & \text{电场强度的切向分量连续。} \end{aligned}$$

根据已知的边界条件，解拉普拉斯方程

$$\text{div grad } U = \nabla^2 U = 0 \quad (1-13)$$

就可求得稳定电流场的解。

### 1. 一个点电流源的电流场

假设在电阻率为 $\rho$ 的均匀各向同性的无限介质中，有一点电流源 $A$ ，其电流强度为 $I$ ，在距 $A$ 点的距离为 $R$ 的 $M$ 点处的电位，由拉普拉斯方程求得为

$$U = \frac{\rho I}{4\pi R} \quad (1-14)$$

由(1-10)和(1-8)式不难求得

$$E = \frac{I\rho}{4\pi R^2} \quad (1-15)$$

和

$$j = \frac{I}{4\pi R^2} \quad (1-16)$$

若点电流源位于电阻率为 $\rho$ 的均匀半空间的表面，电流密度应较无限介质中大一倍，故有

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

从而可得

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

和

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

可见，介质中点电流源的电流场之电位、电流密度和电场强度均与供电电流强度 $I$ 成正比

比，而 $U$ 与 $R$ 成反比， $E$ 及 $j$ 与 $R$ 的平方成反比。不难理解，此时的等位面为同心半球面，电流线和电力线都是从电流源出发，或终止于电流源的放射状直线。在均匀半空间的表面，等位线是以电流源为中心的同圆心。

## 2. 两个异性点电流源的电流场

如图1-4所示，在均匀半空间表面布以相距为 $2L$ 的电极A和B，并分别以 $+I$ 和 $-I$ 向介质中供电，根据电场的叠加原理，由(1-19)式便可写出A、B两个点电流源在M点形成的电位

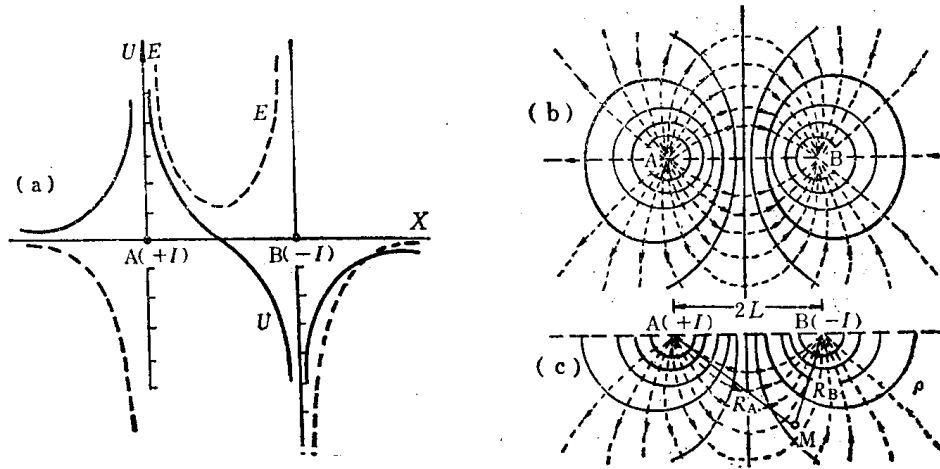


图 1-4 两个异性电源的电场

图 (b), (c) 中实线为等位线虚线为电流线

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (1-20)$$

图1-4(a)表示在地面AB连线上电位、电场强度和电流密度的变化曲线。可以看出，越靠近电极，电位变化越快，在A点附近电位迅速增高，在B点附近电位迅速降低，在AB中点电位为零。在电位变化大的地方，电场强度和电流密度的绝对值也大。在AB中点，电位为零的地方，电场强度和电流密度变化也不大。图1-4(b)为电场分布平面图，图1-4(c)为电场分布断面图。

为了弄清电流场在地下的分布情况，我们来讨论一下A、B连线的中垂面上电流密度的变化情况。

在AB中点的电流密度 $j_0^{AB}$ 为

$$j_0^{AB} = j_0^A + j_0^B = 2j_0^A = \frac{I}{\pi} \frac{1}{L^2}$$

而在AB中点，深为 $h$ 的地方，电流密度为

$$j^h = 2j_h^A \cos\alpha = \frac{I}{\pi} \frac{L}{(L^2 + h^2)^{3/2}} \quad (1-21)$$

因此

$$\frac{j^h}{j_0} = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{h}{L} \right)^2 \right]^{3/2}} = \cos^3\alpha \quad (1-22)$$

图1-5(a)是当深度 $h$ 一定时， $j^h$ 随供电电极距 $L$ 的变化规律。十分清楚，当 $L=0$ 和 $\infty$ 时， $j^h=0$ 。而

$$\frac{\partial j^h}{\partial L} = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{h^2 - 2L^2}{(h^2 + L^2)^{5/2}} = 0 \text{ 时}$$

$$L = \frac{h}{\sqrt{2}} \text{ 或 } AB = 2L = \sqrt{2} h \quad (1-23)$$

即当  $AB = \sqrt{2} h$  时,  $h$  深处的电流密度最大,

如图1-5(a)所示。

电法勘探,是靠在地表观测场值来了解地下矿体分布的。地下不均匀体的存在和分布只有引起地表电场有明显改变才能观测出来。流入地下的电流分布越深,勘探深度也就越大,对深层不均匀体的反映也越明显。为此,让我们来研究一下,通过AB中垂线沿 $z$ 轴向下高度等于 $h$ 并以垂直AB的方向沿两侧无限延伸的矩形面的电流

$$I_h = \frac{IL}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^h \frac{dx dz}{(x^2 + z^2 + L^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{I}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \frac{h}{L} \quad (1-24)$$

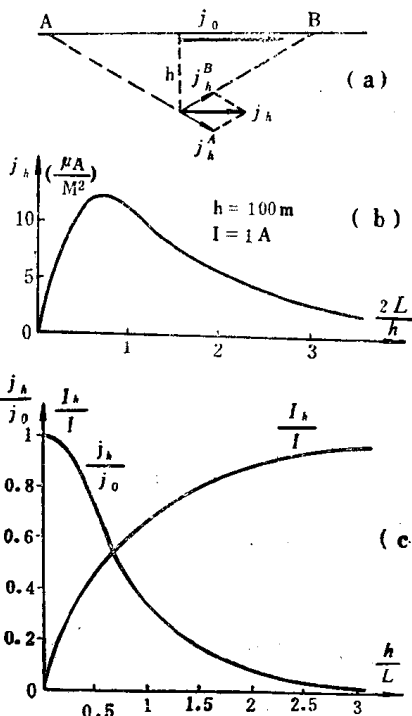
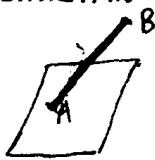


图 1-5 电流密度随深度和电极距的变化

图 1-5(b) 是按上式计算的  $\frac{I_h}{I}$  与  $\frac{h}{L}$  的关系曲线。可见,  $\frac{h}{L} = 0$  时,  $\frac{I_h}{I} = 0$ ;  $\frac{h}{L} = \infty$  时,

$$\frac{I_h}{I} = 1; \text{ 当 } \frac{h}{L} = 2 \text{ 时, } I_h = 0.9I.$$

根据以上讨论,可以得出以下结论:

①在地表由 A、B 供电时,大部分电流集中于 AB 附近。AB 一定时,在地表观测电场只能反映一定深度的不均匀体;

②欲增加勘探深度,必须加大供电电极距 AB,使更多的电流流入深处。如定义  $h = \frac{AB}{\sqrt{2}}$  为勘探深度,显然,要清楚地反映深度为  $h$  的矿体,供电电极距 AB 必须大于  $h$ ;

③在 AB 连线之间,以中点的电流分布最深,电场最均匀,勘探深度最大。因此,在 AB 中间以中点观测最佳,可以最小的电极距达到最大的勘探深度。

以上几点结论对直流电测深法具有重要的意义。

## 二、均匀半空间岩石电阻率的确定和非均匀介质视电阻率的概念

如图1-6所示,设地面水平,地下为均匀各向同性介质,在地面布置供电电极 A、B,向地下供入电流强度为  $I$  的电流,则地表任意两测量电极 M 和 N 之间的电位差

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

因而

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-25)$$

其中

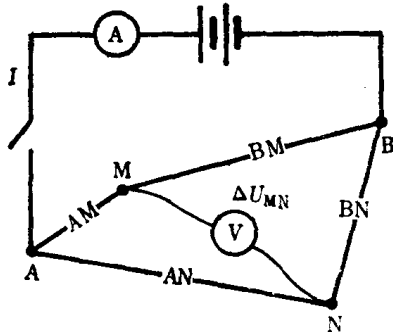


图 1-6 在均匀半空间表面供电和测量回路的布置

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (1-26)$$

称为装置系数，其单位为米，由四个电极间的相对位置决定。

显然，在均匀介质中，无论电极如何布置，也不管电流强度的大小，(1-25) 都是正确的。然而，当地面不水平，地下介质并非均匀各向同性时，情况就不同了。如果此时仍按 (1-25) 计算，结果并非岩石的真电阻率，而

叫视电阻率，表示为

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-27)$$

十分清楚，视电阻率不是岩石的真电阻率，而是地下电性不均匀体和地形起伏的一种综合反映。由此可见，非均匀介质的视电阻率是一个假想的均匀介质的电阻率，在电极排列不变的情况下，用假想均匀介质去置换非均匀介质后， $\Delta U_{MN}$  和  $I$  的比值保持不变。

影响视电阻率的因素很多，但归纳起来不外乎以下几点：①地电断面，②地形，③布极方式以及电极相对于电性不均匀体的位置等。

根据视电阻率的概念，用假想均匀介质（其电阻率为  $\rho_s$ ）去代替非均匀介质后，在电流强度  $I$  不变的情况下，测量电极 MN 处的电场应保持不变。如用  $E_{MN}^*$  表示假想均匀介质情况下 MN 处的电场，则  $E_{MN}^* = \rho_s j_0$ ；如用  $E_{MN}$  表示非均匀介质情况下 MN 处之电场，则  $E_{MN} = \rho_{MN} j_{MN}$ 。因而有

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \quad (1-28)$$

此即视电阻率的微分形式。其中  $j_0$  是在均匀介质情况下，供电电流为  $I$  时，MN 处之电流密度。

(1-28) 式表明，视电阻率  $\rho_s$  与测量电极 MN 间岩石的电阻率  $\rho_{MN}$  及电流密度  $j_{MN}$  成正比。在均匀介质中， $j_{MN} = j_0$ ，所以  $\rho_s = \rho$ 。在高阻体附近，由于矿体排斥电流，使测量电极 MN 间的电流密度  $j_{MN} > j_0$ ，故  $\rho_s > \rho$ ，在高阻体正上方，视电阻  $\rho_s$  出现极大。相反，在导体附近，由于矿体吸引电流，使  $j_{MN} < j_0$ ，故  $\rho_s < \rho$  而在导电矿体的正上方， $\rho_s$  呈现极小。由此看来，利用视电阻率的微分形式，分析视电阻率曲线的变化规律，既简单又清楚。

还必须指出，视电阻率  $\rho_s$  不仅与  $j_{MN}$  有关，而且与 MN 之间的电阻率  $\rho_{MN}$  有关，当测点通过不同电阻率的岩体分界面时， $\rho_{MN}$  有跃变，所以  $\rho_s$  也发生跃变，这是在分析视电阻率曲线时，必须考虑的因素。

### 三、水平均匀层状介质表面点电流源的电场及 $\rho_s$ 表达式

如图 1-7 所示，在水平均匀层状介质的表面，有一供电电极 A，其电流强度为  $I$ 。图中各层的电阻率分别为  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ，厚度分别为  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$ 。

在原点为A、z轴垂直向下的圆柱坐标系中，由于电场对z轴的对称性，与φ无关，故电位U的分布满足下面形式的拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-29)$$

用分离变量法求上式的解，设

$$U(r, z) = R(r)Z(z) \quad (1-30)$$

其中R(r)为仅含自变量r的待定函数，Z(z)为仅含自变量z的待定函数。将(1-30)代入(1-29)式，经整理得

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0 \quad (1-31)$$

上式的第一项为仅含r的函数，第二项为仅含z的函数，要使它们之和等于零，只有它们都等于大小相等符号相反的常数才有可能。设此常数为m<sup>2</sup>，则上式变为二个常微分方程

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + m^2 R(r) = 0 \quad (1-32)$$

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - m^2 Z(z) = 0 \quad (1-33)$$

(1-32)为零阶贝塞尔方程，其解为零阶贝塞尔函数J<sub>0</sub>(mr)和Y<sub>0</sub>(mr)。而(1-33)的解为e<sup>mx</sup>和e<sup>-mx</sup>。由于Y<sub>0</sub>(mr)在z轴上(即r=0)变为无限大，这与电位极限条件不符，应当舍去。于是(1-29)的通解为

$$U(r, z) = \int_0^\infty [A(m)e^{-mz} + B(m)e^{mz}] J_0(mr) dm \quad (1-34)$$

在第i层中

$$U_i(r, z) = \int_0^\infty [A_i(m)e^{-mz} + B_i(m)e^{mz}] J_0(mr) dm \quad (1-35)$$

其中，A<sub>i(m)</sub>，B<sub>i(m)</sub>为第i层中积分变量m的待定函数。

令

$$h_i(m, z) = e^{-mz} + \frac{B_i(m)}{A_i(m)} e^{mz} \quad (1-36)$$

则上式变为

$$U_i(r, z) = \int_0^\infty A_i(m) h_i(m, z) J_0(mr) dm \quad (1-37)$$

在地面，根据边界条件，电流密度的法向分量等于零，故有

$$\left. \frac{\partial U_i(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \int_0^\infty A_i(m) h'_i(m, 0) J_0(mr) dm = 0 \quad (1-38)$$

根据贝塞尔函数的性质

$$\int_0^\infty cm J_0(mr) dm = 0 \quad (1-39)$$

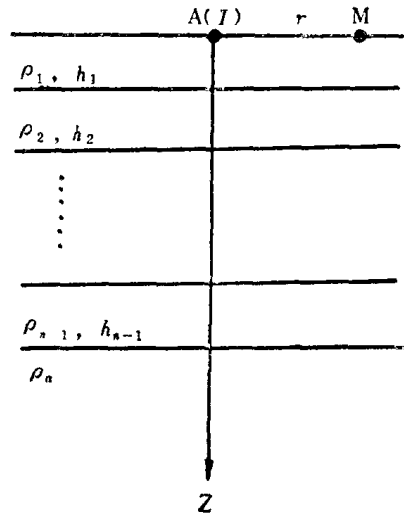


图 1-7 水平均匀层状介质表面的点电源



故

$$A_1(m) = \frac{cm}{h'_1(m, 0)} \quad (1-40)$$

因而代  $A_1(m)$  入 (1-37), 得

$$U_1(r, z) = \int_0^\infty \frac{cmh_1(m, z)}{h'_1(m, 0)} J_0(mr) dm \quad (1-41)$$

显然,  $c$  是一个与介质无关的常数。在电阻率为  $\rho_1$  的均匀介质中

$$\begin{aligned} h(m, z) &= e^{-mz} \\ h'(m, 0) &= -m \end{aligned}$$

此时

$$U(r, z) = \int_0^\infty [-ce^{-mz} J_0(mr)] dm \quad (1-42)$$

根据李普希兹公式

$$\int_0^\infty e^{-mz} J_0(mr) dm = \frac{1}{(r^2 + z^2)^{1/2}} \quad (1-43)$$

(1-42) 式为

$$U(r, z) = -\frac{c}{(r^2 + z^2)^{1/2}} \quad (1-44)$$

如将均匀介质中电位表达式

$$U(r, z) = \frac{I\rho_1}{2\pi(r^2 + z^2)^{1/2}} \quad (1-45)$$

与 (1-44) 对比可知

$$c = -\frac{I\rho_1}{2\pi} \quad (1-46)$$

代  $c$  入 (1-41) 得

$$U_1(r, z) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty T_1(m, z) J_0(mr) dm \quad (1-47)$$

其中

$$T_1(m, z) = -\frac{mh_1(m, z)}{h'_1(m, 0)} \rho_1 \quad (1-48)$$

称为传输函数。在地表  $z=0$  处, 则

$$U_1(r) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty T_1(m) J_0(mr) dm \quad (1-49)$$

由 (1-36) 知

$$T_1(m) = -\frac{mh_1(m, 0)}{h'_1(m, 0)} \rho_1 = \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1} \rho_1 \quad (1-50)$$

十分清楚, 如能求得  $T_1(m)$ , 就不难由 (1-49) 求出地表距点电流源  $r$  处之电位, 从而根据视电阻率的公式计算视电阻率  $\rho_a(r)$ 。为此, 让我们来讨论一下 (1-50) 式, 并由此推导出视电阻率的递推公式。

经简单的数学运算可知 (1-50) 为