

试 用 教 材

# 地 球 物 理 测 井

蔡柏林，周远田，李大心编

武汉地质学院地下物探教研室

一九八四年三月

# 前 言

19.27  
342

由于现代测井技术的发展，地球物理测井资料可视为地下地层的复制品，它能真实地反映地下客观存在的岩、矿石的地质—地球物理特征。因此地球物理测井不论是在石油资源的普查、勘探和开发中，还是在煤田、固体矿产和水文地质的普查勘探工作中都得到了广泛而有效的应用。当代国内外在一些物性条件好的矿种上，由于充分应用了测井资料，找矿—勘探工作中实现了无岩芯钻进，从而提高了钻探工程的效率，缩短了地质工作周期、提高了地质成果的质量，取得了明显的地质效果和经济效益。随着数字化测井技术进一步完善和推广，地球物理测井将更加成为综合地质工作中不可缺少的手段。

本书对现代测井系列中的电测井、核测井和声波测井以及井径、井温测量等测井方法作了系统的阐述；为适合我国国情，对目前国内在煤田、固体矿产和水文地质工作中普遍使用的国产轻便全自动模拟记录仪和若干井下仪器以及专用配件的工作原理、电子线路及其作用做了较详细的讨论；由于目前使用的教材和其他教学参考书中论及非金属矿测井的不多，而在实际工作中，很多非金属矿（如磷、硫、钾、石膏、硬石膏、石墨、高岭土、芒硝、重晶石、岩盐等）上，地球物理测井能解决一系列地质问题，随着非金属矿产品在国民经济中地位的提高，非金属矿测井工作具有广阔的发展前景，为适应这一发展趋势，因此专辟一章论述了查明和评价非金属上的地球物理测井工作，这是本书独具的特点。

本书由蔡柏林主编、周远田参加编写第三、第五两章，李大心参加编写第四、第六两章，全书由王玉和审订。本书在编写过程中，得到国家建材局地质公司的帮助，在此谨致以谢意。

本书可作为各地质院校物探系非石油物探专业的测井参考教材，并可供从事煤田、固体矿产和水文地质测井的工程技术人员使用。

限于编者的水平，书中有不妥之处请读者批评指正。

蔡柏林

一九八四年三月于北京

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 电阻率测井</b> .....	( 1 )
第一节 岩、矿石的导电性.....	( 1 )
一、岩、矿石的导电性机理分类.....	( 1 )
二、岩、矿石电阻率的影响因素.....	( 2 )
第二节 视电阻率测井.....	( 5 )
一、电极系类型.....	( 6 )
二、电测井井场工作中的几个主要技术问题.....	( 8 )
三、视电阻率理论曲线.....	( 10 )
四、几种影响因素的讨论.....	( 17 )
五、视电阻率测井曲线的解释和应用.....	( 20 )
第三节 电流测井.....	( 22 )
一、接地电阻的概念.....	( 22 )
二、单极电流法和滑动接触法.....	( 23 )
三、三电极侧向电流法.....	( 24 )
第四节 三电极侧向测井.....	( 25 )
一、三电极侧向测井的基本原理.....	( 25 )
二、三电极侧向测井电极系的参数.....	( 30 )
三、三电极侧向测井曲线的解释和应用.....	( 32 )
<b>第二章 电化学活动性测井</b> .....	( 40 )
第一节 自然电位测井.....	( 40 )
一、井内自然电位的成因.....	( 40 )
二、自然电位测井曲线.....	( 44 )
三、自然电位曲线的解释.....	( 47 )
四、自然电位测井曲线的干扰.....	( 51 )
第二节 电极电位测井.....	( 53 )
一、电极电位测井的原理和方法.....	( 53 )
二、电极电位测井的作用和异常特征.....	( 54 )
第三节 激发极化测井.....	( 55 )
一、岩、矿石的激发极化机理和特征.....	( 55 )
二、激发极化测井的井场工作方法技术.....	( 61 )

三、视极化率测井理论曲线·····	( 63 )
四、视极化率测井曲线的影响因素·····	( 69 )
五、视极化率测井曲线的解释·····	( 78 )
<b>第三章 核测井</b> ·····	( 83 )
<b>第一节 核物理的基本知识</b> ·····	( 83 )
一、原子核与天然放射性现象·····	( 83 )
二、核反应·····	( 87 )
三、伽马射线与物质的作用·····	( 87 )
四、中子与物质的作用·····	( 90 )
<b>第二节 自然伽马测井</b> ·····	( 97 )
一、自然伽马测井的地质基础·····	( 97 )
二、自然伽马测井的数学物理基础·····	( 93 )
三、自然伽马测井仪的工作原理·····	( 101 )
四、自然伽马测井的影响因素及校正·····	( 102 )
五、自然伽马测井仪的刻度·····	( 107 )
六、自然伽马测井资料的应用·····	( 108 )
<b>第三节 伽马—伽马测井</b> ·····	( 110 )
一、伽马—伽马密度测井·····	( 110 )
二、伽马—伽马密度测井曲线及其应用·····	( 115 )
三、双沉距补偿密度测井·····	( 117 )
四、密度测井仪的刻度·····	( 120 )
五、伽马—伽马光电效应测井·····	( 121 )
<b>第四节 中子测井</b> ·····	( 124 )
一、中子测井的地质基础·····	( 124 )
二、中子测井的理论计算·····	( 126 )
三、中子测井的种类·····	( 134 )
四、中子测井仪刻度·····	( 136 )
五、中子测井的应用·····	( 137 )
<b>第五节 其他核测井</b> ·····	( 139 )
一、能谱测井·····	( 139 )
二、中子寿命测井·····	( 142 )
三、活化测井·····	( 144 )
<b>第四章 声波测井</b> ·····	( 146 )
<b>第一节 岩石的声学特征</b> ·····	( 146 )
一、岩石的弹性·····	( 146 )
二、应力和应变的关系以及弹性模量·····	( 149 )
三、声波在岩石中的传播特征·····	( 152 )

第二节	声速测井	(158)
一、	声波测井原理	(158)
二、	声速测井仪的测量原理	(162)
三、	声速测井曲线及其影响因素	(163)
四、	声速测井的应用	(166)
第三节	其他声波测井方法	(168)
一、	声波电视测井	(168)
二、	声波幅度测井	(170)
第四节	井中声波法	(171)
一、	井中声速法	(171)
二、	井中声透视法	(173)
<b>第五章</b>	<b>井径和温度测井</b>	<b>(175)</b>
第一节	井径测井	(175)
第二节	温度测井	(177)
一、	岩石的热性质	(177)
二、	温度测井的理论基础	(180)
三、	温度测井的测量原理	(184)
<b>第六章</b>	<b>测井仪器和附属设备</b>	<b>(186)</b>
第一节	测井设备概述	(186)
一、	测井附属设备	(186)
二、	测井记录仪	(187)
第二节	JBC—2 A型轻便自动测井仪	(190)
一、	方框图	(191)
二、	记录部分	(192)
三、	控制部分	(198)
四、	仪器的调校	(201)
第三节	JDC—1型电子自动测井仪	(203)
一、	方框图	(203)
二、	测量记录部分	(204)
三、	供电部分	(209)
四、	换向部分	(209)
五、	仪器的调节	(211)
第四节	TYFZ—4组合测井仪	(212)
一、	闪烁计数器	(212)
二、	探管电路	(214)
三、	操纵台电路	(218)
四、	仪器的调校和使用	(222)

<b>第七章 非金属矿产的测井评价</b> .....	( 226 )
<b>第一节 非金属矿产的地质—测井特征</b> .....	( 226 )
一、特种非金属矿产.....	( 226 )
二、化工原料非金属矿产.....	( 227 )
三、建筑材料非金属矿产.....	( 230 )
四、冶金辅助原料及其他非金属矿产.....	( 230 )
<b>第二节 某些非金属矿产的测井评价</b> .....	( 232 )
一、自然硫的查明和评价.....	( 233 )
二、钾盐的查明、鉴别和评价.....	( 239 )
三、石膏、岩盐和天然碱的查明和评价.....	( 246 )
四、利用数理统计方法评价非金属矿.....	( 249 )

# 第一章 电阻率测井

电阻率测井是以研究岩矿石导电性为物理基础的一组测井方法，其中包括：视电阻率测井、电流测井及侧向测井等。

## 第一节 岩、矿石的导电性

由电学理论已知，欧姆定律由下式给出：

$$\Delta V = IR \quad (1.1)$$

式中  $\Delta V$  是电位差以伏特为单位， $I$  是电流以安培为单位， $R$  是电阻以欧姆为单位。这个方程表示在电路中的电流与驱动和保持它所必需的电力之间的比例关系，电阻定义为电压与电流的比例因素。但该公式未给出与导电介质的尺寸和物质有关的概念，因此要描述三维物质的电阻，例如长为  $L$ ，截面积为  $S$  的岩、矿石标本（如图1—1），则由下式确定

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{或} \quad \rho = R \frac{S}{L} = \frac{\Delta V}{I} \frac{S}{L} \quad (1.2)$$

$\rho$  是岩、矿石的电阻率，它是电流通过体积为一立方米的正立方体时的电阻值，其单位为欧姆—米。电阻率低表示其导电性好，反之亦真。物质的导电性也可用电导率  $\sigma$  来度量，它表征在电场作用下电流通过物质进行传导的难易程度，在直流电流情况下各向同性介质中，它是电阻率的倒数 ( $\sigma = \frac{1}{\rho}$ )。单位为：欧姆/米。

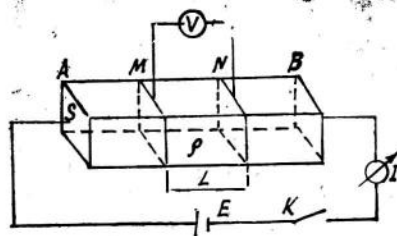


图 1—1

### 一、岩、矿石的导电性机理分类

岩、矿石都是由矿物组成，按其导由性机理的不同常见固体矿物可分为以下三种类型。

1. 金属导体：属于这类导体的是天然单元素金属矿物，这类矿物在地壳中常见的有自然金和自然铜，它们的电阻率都很低，如自然金的电阻率为  $2 \times 10^{-8}$  欧姆—米，自然铜约为  $1.2 \times 10^{-8}$ — $30 \times 10^{-8}$  欧姆·米。此外，单元素的非金属矿物石墨，它是一种具有特殊性质的电子导体，其电阻率也很低，约为  $1 \times 10^{-6}$  欧姆·米。

2. 半导体：大多数金属矿物均属这一类导体，它们多以金属氧化或硫化物的形式赋存于地壳之中，如磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿等，它们的电阻率变化范围很大，且都高于金属导体，其数值为  $1 \times 10^{-2}$ — $1 \times 10^6$  欧姆·米之间。

3. 固体电解质：大多数造岩矿物属于固体电解质，它们多以硅酸盐或其他盐类矿物赋存于地壳之中，如石英石、长石、云母、方解石等，它们的电阻率都很高（大于  $1 \times 10^6$  欧姆·米），在干燥情况下可视为绝缘体。

由于矿物的电阻率值是在一定范围内变化的，同一种矿物的电阻率值往往不同，而不同矿物的电阻率值还可能相同，因此，由多种矿物组成岩石或矿石其电阻率值的变化范围往往很宽，见图1—2。由图可见，火成岩和变质岩的电阻率较高，通常在 $10^2$ — $10^5$ 欧姆·米范围内变化，沉积岩的电阻率一般较低，如粘土为 $10^0$ — $10^2$ 欧姆·米，砂岩为 $10^2$ — $10^3$ 欧姆·米，石灰岩的电阻率则很高。尽管如此，所有的岩石或矿石都是导体，即电荷可以在其中自由流动，按其传导电流的性质可将其分为两类。

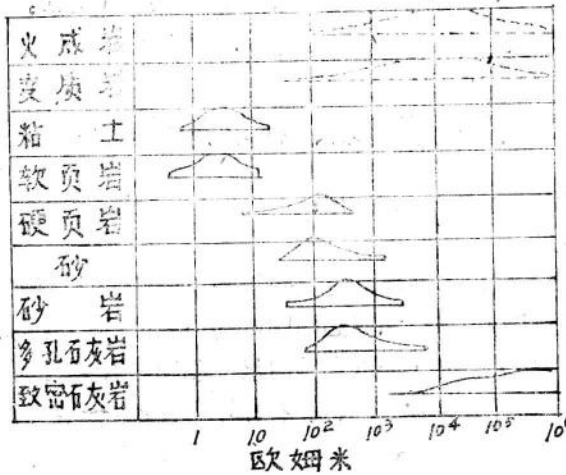


图 1—2

1. 电子导体：大多数金属矿石和石墨属电子导体，它主要靠电子传导电流其电子的活动性很高。

2. 离子导体：大多数岩石属离子导体，它主要靠电解液中离子的迁移传导电流。岩石中的骨架物质多为固体电解质，其电阻率都很高，因此，岩石中电流的传导主要靠存在于孔隙和裂隙中的电解溶液（多为天然状态地层水）。

## 二、岩、矿石电阻率的影响因素

岩、矿石电阻率的大小，主要决定于它们的组成成分、矿物颗粒度及其结构构造、孔隙和裂隙的分布状态及其中所含溶液的性质和数量、以及它们所处的环境温度等因素，现分别叙述如下：

### 1. 岩、矿石电阻率与组成成分和结构的关系

多数岩、矿石可视为由均匀相连的胶结物质与不同成分和形状的矿物颗粒所组成，其电阻率 $\rho$ 不仅决定于胶结物质的电阻率 $\rho_1$ 、矿物颗粒的电阻率 $\rho_2$ 及其百分体积含量 $V$ ，还决定于矿物颗粒的形状。根据等效电阻率的近似理论，不同结构构造的岩、矿石的电阻率有以下表达式：

(1) 矿物颗粒为球形时，岩、矿石的电阻率为

$$\rho = \frac{(\rho_1 + \rho_2) - (\rho_1 - \rho_2)V}{(\rho_1 + \rho_2) + 2(\rho_1 - \rho_2)V} \cdot \rho_1 \quad (1.3)$$

(2) 矿物颗粒为针状（近似于拉长旋转椭球体）时，岩、矿石的电阻率为



$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= \frac{\rho_1 + \rho_2 - (\rho_1 - \rho_2)V}{\rho_1 + \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)V} \cdot \rho_1 \\ \rho_t &= \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + (\rho_2 - V)\rho_2} \cdot \rho_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中 $\rho_n$ 和 $\rho_t$ 分别为垂直和平行矿物颗粒长轴方向的电阻率，实际测定证明无论 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 及其百分体积含量 $V$ 如何变化，总有 $\rho_n \geq \rho_t$ 。

(3) 矿物颗粒为圆片状（近似于压扁旋转椭球体）时，岩、矿石的电阻率为

$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= \rho_1(1-V) + \rho_2 V \\ \rho_t &= \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + \rho_2(1-V)} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

式中 $\rho$ 和 $\rho_t$ 的物理意义同式(1.4)，同样总有 $\rho_n \geq \rho_t$ 。

图1—3示出了根据公式(1.3)(1.4)(1.5)计算的 $\rho/\rho_1$ 与 $V\%$ 的理论曲线。上半部为矿物颗粒是高阻的情况( $\rho_2/\rho_1 = 10^7$ )，下半部为矿物颗粒是低阻的情况( $\rho_2/\rho_1 = 10^{-7}$ )。由图可以看出岩、矿石的电阻率与其组成成分和结构构造的关系。

(1) 无论组成岩、矿石的矿物颗粒是高阻的还是低阻的，也不管它的形状是球状、针状或片状，只要它在整个岩、矿石中所占的百分体含量不太大时( $V < 60\%$ )，岩、矿石的电阻率主要决定于胶结物质的电阻率 $\rho_1$ ；当矿物颗粒在整个岩、矿石中所占的百分体积相当大时( $V > 60\%$ )，岩、矿石的电阻率明显地受矿物颗粒的电阻率 $\rho_2$ 的影响，图1—3中所有曲线的斜率明显增大。

所以当岩、矿石的物质组分一定时其电阻率主要决定于良导物质的连通性。如浸染状的硫化金属矿石其胶结物多为彼此连通的造岩矿物(固体电解质)，故通常显示为高电阻，相反，砂岩、砾岩和裂隙发育的石灰岩，它们虽然多为高电阻矿物组成，但由于富含地层水，其胶结物是低阻的，故通常显示为低电阻岩石。

(2) 无论 $\rho_2 > \rho_1$ 还是 $\rho_2 < \rho_1$ ，总有 $\rho_n > \rho_t$ 。这表明不管矿物颗粒是针状还是片状，只要具有长、短轴的性质，岩、矿石的电阻率就具有方向性。此外，当矿物颗粒属良导性物质时，不管矿物颗粒的形状如何，只要其体积百分含量相同，岩、矿石的 $\rho_n$ 相近，而 $\rho_t$ 相差甚大，含针状矿物的岩、矿石比含片状矿物的岩、矿石要低得多；当矿物颗粒属非良导性物质时，不同形状的矿物颗粒组成的岩、矿石的 $\rho_t$ 相近， $\rho_n$ 相差甚大，由片状矿物组成的岩、矿石的 $\rho_n$ 远大于由针状矿物组成的岩、矿石的 $\rho_n$ 。

由以上分析，岩、矿石电阻率与矿物颗粒含量的多少关系不十分明显，与矿物颗粒的导

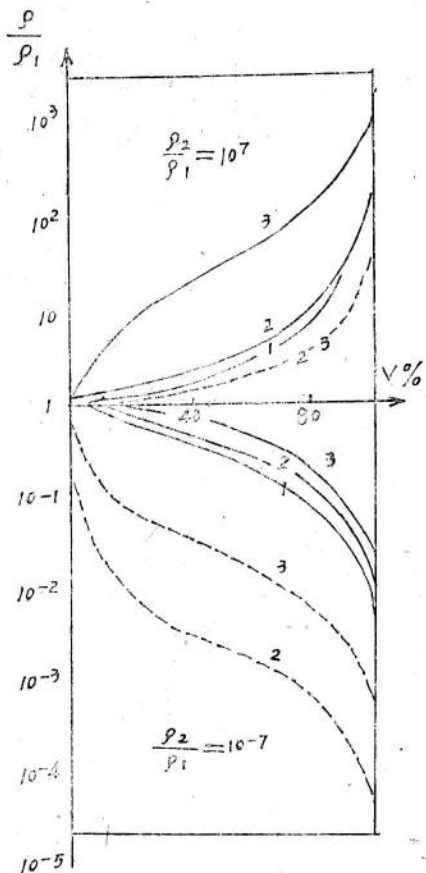


图 1—3

电性质及其结构构造关系密切。而岩、矿石电阻率的各向异性与矿物颗粒的形状关系密切。

## 2. 岩、矿石电阻率与所含水分的关系

天然地层水总是含有一定盐分的，它们的电阻率都比较低，通常小于 100 欧姆·米。而岩、矿石中的含水量主要决定于它们自身的孔隙度与当地水文地质条件，在潜水面以下，岩、矿石的含水量就等于它的孔隙度。因此，岩、矿石的电阻率与其含水量关系密切，现以纯砂岩（指含泥质成分小于 5% 的砂岩）为例，说明岩石的电阻率与所含水分的关系。

砂岩的骨架由长石、石英等高电阻矿物组成，而孔隙中是低电阻的地层水或泥浆溶液，从两者物性显著性差异考虑，可以把砂岩分为由矿物颗粒组成的岩石骨架和孔隙中的流体两部分。由于电阻率测井是研究岩层径向物性变化，可沿井轴方向截取一边长为  $L$ ，体积为  $V$  的立方体的岩层来作等效分析，即将岩石骨架集中到一起，使矿物颗粒间无孔隙，成为物性均匀体积为  $V_{ma} = L \times L \times L_{ma}$  的固体，孔隙部分也集中在一起，体积为  $V_{\phi} = L \times L \times L_{\phi}$ ，如图 1—4。由图可见

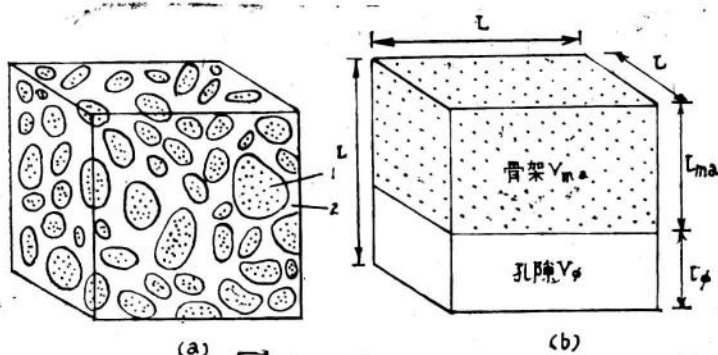


图 1—4

a—岩石结构； b—等效体积  
1—岩石颗粒（骨架）； 2—孔隙空间

$$V = V_{ma} + V_{\phi} = L^2(L_{ma} + L_{\phi}) \quad (1.6)$$

$$\phi = \frac{V_{\phi}}{V} = \frac{L_{\phi}}{L} \quad (1.7)$$

式中  $\phi$  为孔隙度。

按图 1—4 求纯砂岩电阻率时，还要考虑组成岩石骨架的矿物颗粒由于分选度、圆度不

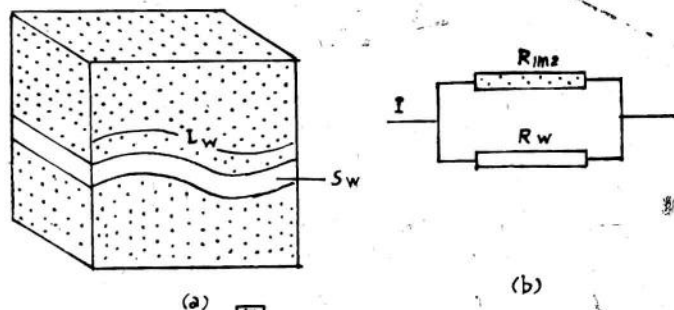


图 1—5

a—岩石等效结构， b—等效电阻

同，孔隙的结构与通道的弯曲程度也不同。因此，需将纯砂岩的等效模型变成如图 1—5 所示，并认定骨架与孔隙是并联关系。

设  $R_t$ 、 $mR_s$ 、 $R_w$ 、 $\beta_t$ 、 $\rho_a$ 、 $\rho_w$  分别表示纯砂岩、骨架和孔隙中的流体的电阻和电阻率。 $L$ 、 $S_w$ 、 $V$  分别表示电流流经长度、截面积和体积，根据电阻并联公式得

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_w} \quad (1.8)$$

考虑到岩石骨架基本不导电， $\rho_a \rightarrow \infty$ ， $R_{ma} \rightarrow \infty$ ，只有充满在曲折孔道中的地层水是电流的通道，故

$$R_t = R = \rho_t \frac{L^2}{V} = \rho_w \frac{L^2}{V\phi} \quad (1.9)$$

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \left(\frac{L_w}{L}\right)^2 \left(\frac{V}{V\phi}\right) = c^2/\phi \quad (1.10)$$

式中  $c = \left(\frac{L_w}{L}\right)$ ，称孔隙导电孔道的曲折度，由于当岩石孔隙度一定时， $c = \frac{L_w}{L}$  为一确定

的常数，故阿尔奇提出如下经验公式

$$\rho_t = F\rho_w = \rho_w \frac{a}{\phi^m} \quad (1.11)$$

式中  $F$  称地层因素或相对电阻率，它反映岩石的孔隙度与孔隙的结构情况， $m$  称胶结因素，它与曲度  $c$  有关， $a$  是反映岩石特性的一个常数。因此地层因素  $F$  是岩性、孔隙度和导电通道曲度的函数，而且与胶结因素  $m$  的关系更密切。在压实地层中，如纯石灰岩可以认为  $a = 1$ 、 $m = 2$  由此得

$$\rho_t = \rho_w / \phi^2 \quad (1.12)$$

(1.12) 式说明，纯砂岩的电阻率决定于地层水的电阻率和孔隙结构。在电阻率测井中，若地层水的电阻率用其他方法取得，则可根据 (1.12) 求出岩石的孔隙度。

$$\phi = \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_t}} \quad (1.13)$$

### 3 岩、矿石电阻率与温度的关系：

实际资料表明，当岩、矿石所处的环境温度发生改变时，其电阻率值也相应发生变化，一般表现为温度升高电阻率值降低，这是由于岩、矿石中所含地层水的电阻率与温度有明显的变化关系之故。进一步的试验表明，高温（40℃以上）和低温（0℃以下）条件下，温度的变化对岩、矿石电阻率影响大，而在通常气温条件下温度的升高或降低对岩、矿石电阻率的影响并不十分明显。因此在中、浅（孔深小于1000米）钻孔的测井中，通常很少考虑地温随深度增加对岩石电阻率的影响。

## 第二节 视电阻率测井

视电阻率测井的测量原理线路如图 1—6，它是由供电电极 A（另一供电电极 B 在地面）和测量电极 MN 所组成的电极系沿井深移动进行测量的。若假定地下半空间介质是均匀各向同性的（不考虑井的影响），其电阻率为  $\rho$ ，并认定供电和测量电极本身大小与电极间的距离相比足够小，可视为点状。这时由供电电极流出的电流  $I$  在测量电极 MN 间产生的电位差为：

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = -\frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \quad (1.14)$$

公式中由于B在地面可视为无穷远极，可忽略其影响，因测量是在地下半空间进行的，可不考虑地球空气分界面影响，所以用 $4\pi$ 。由此可求得介质电阻率

$$\rho = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{MN} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1.15)$$

式中  $K = \frac{4\pi \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{MN}$  称电极系数

可见，若给定电流强度I，对一定的电极系，沿井深连续记录 $\Delta V_{MN}$ ，就可获得电阻率 $\rho$ 。

但实际情况并不像上述假定那样简单，钻孔本身存在，其中充满泥浆，并可能存在泥浆侵入带，钻孔穿透的是厚度和电阻率各不相同的岩矿层等等，所以用上述装置测量的并不是介质的真电阻率 $\rho$ ，而是视电阻率

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1.16)$$

视电阻率 $\rho_s$ 是一物理量，其单位为欧姆一米。它是决定于岩矿层电阻率 $\rho_t$ ，厚度H，泥浆电阻率 $\rho_f$ ，井径d，泥浆侵入带电阻率 $\rho_\Delta$ ，侵入带直径 $d_\Delta$ 以及电极间相互位置间距等一系列变量的复杂函数，以下将逐一进行分析。

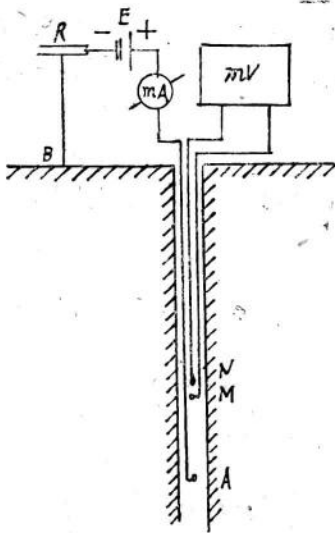


图 1-6

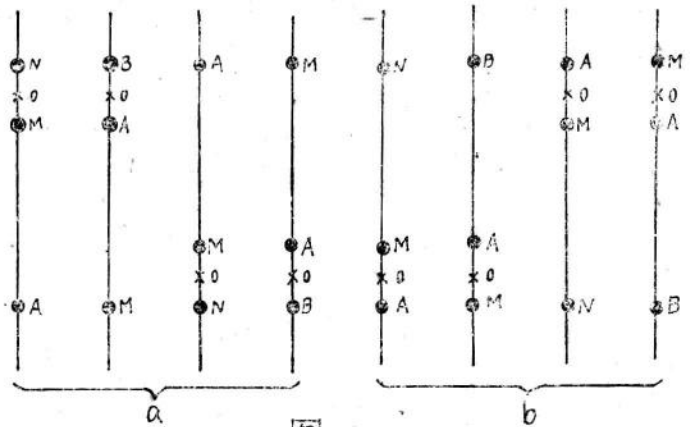


图 1-7

a-梯度电极系; b-电位电极系; x-记录点

### 一、电极系类型

电极系通常由三个电极组成（二个供电一个测量或二个测量一个供电）第四个电极放在地面，安置在靠近井口的泥浆池内或直接接在金属套管上。

电极系中连接在同一线路的两个电极（供电或测量）称成对电极，其中第二个和地面电极相连接的电极称不成对电极。

成对电极在不成对电极下方的叫正装电极系，反之，成对电极在不成对电极上方的叫倒装电极系。

在实际中常依据电极间相互位置间距的特点把电极系分为两大类：

### 1. 梯度电极系

成对电极间距离比中间那个电极到不成对电极间距离小得多的电极系称梯度电极系，如图 1—7a。

梯度电极系的视电阻率公式为

$$\rho_s = 4\pi \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1.17)$$

可见，这时的  $\rho_s$  值系测量电极间电位梯度平均值成正比，所以叫梯度电极系。

若当  $\overline{MN} \rightarrow 0$ ，(1.17) 式变为

$$\rho_s = 4\pi \overline{AO}^2 \frac{E}{I} = \frac{E}{\frac{I}{4\pi A O^2}} = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \quad (1.18)$$

这样的电极系称理想梯度电极系，其  $\rho_s$  值与电场强度成正比，式中  $AO = L$  称梯度电极系电极距，记录点取在成对电极中点  $O$ ， $j_0$  是  $O$  点正常电流密度， $j_{MN}$  是测量电极间异常的电流密度， $\rho_{MN}$  是其电阻率。

实际中成对电极间距离总是有限的，但如果取成对电极间距离为电极距的 0.4 倍或更小，这样的电极系与理想电极系之间的误差不会超过 5%，一般当  $\overline{MN}/L = 0.2 \sim 0.4$  就可满足，但也不能把成对电极间距离取得太小，这样会使测量变得困难。

### 2. 电位电极系

成对电极间距离比中间那个电极到不成对电极的距离大得多的电极系称电位电极系，这种电极系测得的  $\rho_s$  值与  $M$  点电位成正比，如图 1—7b

当  $MN$  (或  $AB$ )  $\rightarrow \infty$  时，称理想电位电极系，这时， $\overline{AN} = \overline{MN}$ ， $V_N \rightarrow 0$ ，其视电阻率公式简化成

$$\rho_s = \frac{4\pi \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{V_M - V_N}{I} = 4\pi \overline{AM} \frac{V_M}{I} \quad (1.19)$$

根据  $M$  点电位的定义 (见图 1—8)

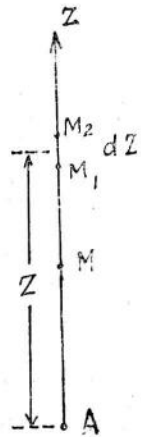


图 1—8

$$\begin{aligned} V_M &= \sum_M \Delta V_{M_1 M_2} = \sum_M \frac{I \rho_s}{4\pi} \left( \frac{1}{AM_1} - \frac{1}{AM_2} \right) = \sum_M \frac{I}{4\pi} \left( 4\pi L^2 \frac{E}{I} \right) \cdot \left( \frac{1}{AM_1} - \frac{1}{AM_2} \right) \\ &= \sum_M \frac{I}{4\pi} \left( \frac{j_{M_1 M_2}}{j_0} \rho_{M_1 M_2} \right) \frac{M_1 \overline{M_2}}{AM_1 AM_2} = \frac{I}{4\pi} \int_{AM}^{\infty} \frac{j_{M_1 M_2}}{j_0} \rho_{M_1 M_2} \frac{dz}{z^2} \end{aligned}$$

将其代入 (1.19) 式得理想电位电极系视电阻率公式

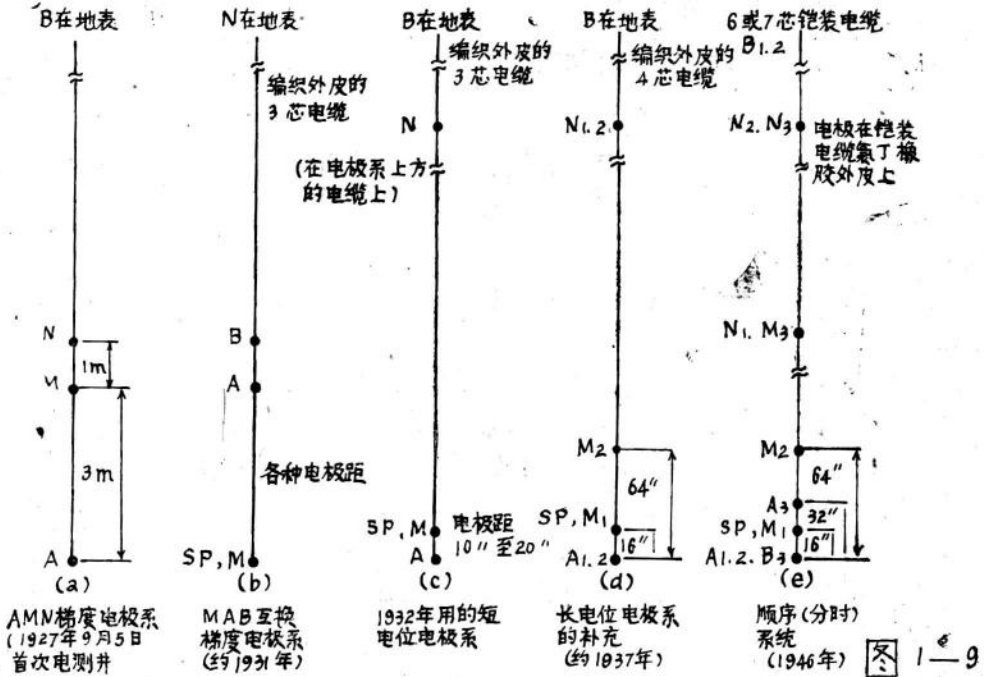
$$\rho_s = \overline{AM} \int_{AM}^{\infty} \frac{j_{M_1 M_2}}{j_0} \rho_{M_1 M_2} \frac{dz}{z^2} \quad (1.20)$$

(1.20) 式说明，理想电位电极系的  $\rho_s$  值与  $M$  电极沿  $AM$  方向直至无穷远介质中的电流密度和电阻率分布有关。这与理想梯度电极系仅决定于  $O$  点电流密度和电阻率大小却成对照。

同理，实际中成对电极间距离总是有限的，但当 $MN/AM \geq 19$ 时，即可视为与理想电位电极系的情况相当，电位电极系的电极距为 $\overline{AM}$ ，记录点在 $\overline{AM}$ 中点。

对比(1.18)和(1.20)式可见，电位电极系的探测范围比梯度电极系要大，理论计算证明，电位电极系测量 $\rho_s$ 的探测半径大约是3—5倍电极距，而梯度电极系则约为1.5—2倍电极距。

图1—9中示出了电测电极系的发展完善过程及其组合测量情况



图中a, b, c, d是国内金属与非金属矿，煤田和水文测井中常用的电极系，其中a, b是梯度电极系，常用电极距为1—3米，c, d是短电位或长电位和自然电位组合测量电极系，所谓短电位其电极距为16吋，即0.4米（国内常用的是0.1—0.5米），长电位的电极差为64吋（1.6米），把这两种装置中底部的一对电极换作MN，把上方的N换作A，就变为梯度电极系。目前引进的数字测井系统中其标准电极系都是c, d两种。e是一种组合得更完善的用时分传输的电极系，它是在d的基础上组合了 $N_3, M_3, A_3, B_3$ 梯度电极系，使得一次下井可同时记录短电位、长电位、自然电位、梯度电极系四种曲线，这种电极系由于组合和系列的统一提高了测量效率。

## 二、电测井井场工作中的几个主要技术问题

### 1. 电缆深度记号标记

(1) 做电缆深度记号，最好在钻孔中进行，绞车距井口要大于深度记号间距，并在挂接与井下仪（电极系）有同等重量的重锤情况下进行丈量。

(2) 若在地面做电缆的深度记号，应选择平直公路或空旷场地中进行，并将电缆的始端固定用绞车将电缆拉直丈量。

(3) 丈量记号长度，必须使用长度大于记号间距的钢尺，每20米之间丈量误差不得大

于5毫米。

(4) 电缆深度记号间距, 测井规范规定为20米, 为便于定深定厚可加密至10米, 起始记号(或称零记号)距记录点约10米左右, 每50或100米记号应作明显识别标记。

(5) 新电缆标记经测量五个钻孔后, 或电缆受过张力发现深度有误差时, 要检查丈量记号长度。

## 2. 起算深度及深度计算

表 1.1

各种电测井方法的记录点

方 法 名 称	记 录 点 位 置
视电阻率电位电极系	电极 A、M 中点
视电阻率梯度电极系	成对电极中点
电流测井	电极系中点
三侧向测井	电极系中点
自然电位测井	M 电极
电极电位测井	刷子电极 M
激发极化测井	与视电阻率测井同

当用深度记号计算深度时, 深度记号的标记并不是以记录点为零作记号的, 同时记号检拾处(器)也并不安放在井口地面上, (手动时任选一地点立标志, 自动传输时在井口滑轮上), 所以进行深度计算时必须加以换算, 如图 1—10, 当第  $n$  个记号位于记号检拾处时, 现要计算井下电极系记录点的深度  $h$ 。

假定记号间距为  $l$ , 零记号至记录点的距离叫第一记号常数  $h_1$ , 记号检拾处距井口地面距离称第二记号常数  $h_2$ , 则

$$h = nl + h_1 - h_2$$

或  $h = nl + h_0$  (1.21)

式中  $h_0 = h_1 - h_2$  称起算深度。手动时通常使它为整数。可见计算深度时只要了解第几个深度记号到达检拾处, 然后再加上起算深度, 就可求得记录点真实井深。

## 3. 横向比例和深度比例尺的选择与计算

横向比例的选择应使主要目的层的异常反映明显, 且大多数不超格, 同一测区尽可能选用同一横向比例记录曲线。为便于对比现将常用电测井方法横向比例的计算公式列于表 1—2

深度比例尺的选择应按测井规范要求, 通常划分钻孔地质剖面时用 1:200 (或 1:500), 详细的研究目的层应采用 1:50 (或 1:20)。

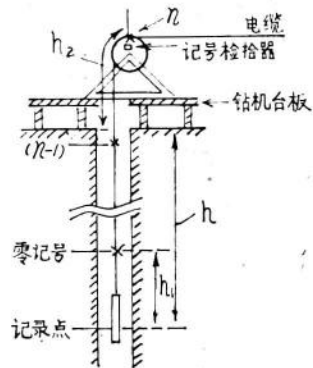


图 1—10

表 1—2

测井方法	横向比例 $n$	单 位
视电阻率 $\rho_s$	$n = K \frac{m}{I}$	欧姆·米/厘米
自然电位 $V_n$	$n = m$	毫伏/厘米
电 流 $I$	$n = \frac{m}{R_0}$	毫安/厘米
井 径 $d$	$n = K_d \frac{m}{I}$	毫米/厘米
井 温 $t$	$n = K_t \frac{m}{I}$	℃/厘米

#### 4. 电极系类型和电极距的选择

视电阻率测井的效果与所选用的电极系类型和电极距大小有密切关系，在一个工区，应根据岩矿层（特别是目的层）的厚度和电阻率，井径和泥浆电阻率等资料，并通过试验来选定最佳电极系，选择时应注意以下几点：

(1) 当所探测的目的层是低阻层时，原则上应用电位电极系和梯度电极系都可以，电位电极系的电极距应为 2—3 倍井径，梯度电极系的电极距则应是 3—5 倍井径，其目的是减小泥浆影响。但同时也应考虑围岩影响，特别是不能使电位电极系的电极距大小接近甚至超过目的层的厚度。为了精确的确定低阻层的顶底界面，最好同时采用正装和倒装梯度电极系。

(2) 当所探测的目的层是高阻层时，选用电位电极系比较适宜，但必须注意到应使电位电极系成对电极之间距离大于目的层厚度。

(3) 当所探测的目的层是中等厚度的高阻层时，可所采用尽可能长的梯度电极系，但不应使电极距大于主要目的层厚度的三分之二。采用电极距为 3—4 倍井径的电位电极系也适宜。

若所探测的主要目的层是高阻薄层，则应选用梯度电极系，但应满足  $\overline{MN} < H$  (层厚) 及  $\overline{AO} \neq H$  这样的条件。

(4) 如果岩层面法线与井轴交角较大，则应采用电位电极系。

### 三、视电阻率理论曲线

由视电阻率  $\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I}$  公式可见，如果选定了电极系类型和电极距大小，且保持供电电流一定，那末，沿井深研究  $\rho_s$  变化问题就归结为在给定岩矿层电阻率、厚度、井径及泥浆电阻率情况下，研究位于井轴上点电源所产生的电场分布问题，对于一些简单情况，可借助于解拉普拉斯方程求解，对接近于实际条件的复杂情况可利用物理模拟或计算机数值模拟获得。在本节中将对一些简单情况，用物理概念分析获得视电阻率理论曲线。

#### 1. 不同电阻率的两种均匀岩层水平接触

设有二种均匀岩层，其电阻率分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ，且不考虑钻孔影响，如图 1—11



解这一问题最简单的方程是用镜像法，它的实质是假想存在一虚电源，用虚电源来替代两种不同电阻率介质分界面对电场分布的影响，如图 1—11 所示，点源 A 位于介质 1 中，它距界面的距离为 Z，由 A 点源流出电源强度 I。当观测点 M<sub>1</sub> 和点源在同一介质中时，虚源为 A<sub>1</sub>，它位于点源 A 对界面的镜像位置，其电流强度用 I<sub>1</sub> 表示。当观测点 M<sub>2</sub> 与点源位于不同介质中时，虚源 A<sub>2</sub> 与点源 A 相重合，其电流强度为 I<sub>2</sub>，引入虚源的目的是在于替代分界面影响，如同把整个空间都用观测点所处介质来替代。由此即可求出

M<sub>1</sub> 点电位

$$V_{M_1} = \frac{\rho_1}{4\pi} \left( \frac{I}{AM_1} + \frac{I_1}{A_1M_1} \right) \quad (1.22)$$

式中  $\overline{AM_1}$  是点源 A 至 M<sub>1</sub> 点距离， $\overline{A_1M_1}$  是虚源 A<sub>1</sub> 至 M<sub>1</sub> 点距离。

M<sub>2</sub> 点电位

$$V_{M_2} = \frac{\rho_2}{4\pi} \left( \frac{I_2}{A_2M_2} \right) \quad (1.23)$$

式中  $\overline{A_2M_2}$  是虚源 A<sub>2</sub> (与 A 重合) 至 M<sub>2</sub> 点距离。

(1.22)，(1.23) 两式中 I<sub>1</sub> 和 I<sub>2</sub> 是两个未知数，它们可用电学理论中的边界条件来确定。

(1) 在相邻介质的界面上，电位函数连续

$$V_1 = V_2 \quad (1.24)$$

(2) 穿过相邻介质界面上的电流密度法线分量不变

$$j_{1n} = j_{2n} \quad (1.25)$$

由 (1.24) 和 (1.25) 式便可解得：

$$I_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} I = K_{12} I \quad (1.26)$$

$$I_2 = \frac{2\rho_1}{\rho_2 + \rho_1} I = (1 - K_{12}) I \quad (1.27)$$

式中  $K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

由此，可把 (1.22) (1.23) 两式改写成

$$V_{M_1} = \frac{1\rho_1}{4\pi} \left( \frac{1}{AM_1} + \frac{K_{12}}{A_1M_1} \right) \quad (1.28)$$

$$V_{M_2} = \frac{1\rho_2 (1 - K_{12})}{4\pi AM_2} \quad (1.29)$$

其中 K<sub>12</sub> 称反射系数，(1 - K<sub>12</sub>) 称透过系数，它们分别反映两种不同电阻率介质分界面反射或透过电流的本领。

对于一定电极距的理想电位电极系或梯度电极系，沿垂直于分界面方向移动时，将有三种不同位置，对应不同位置可求得其视电阻率表达式

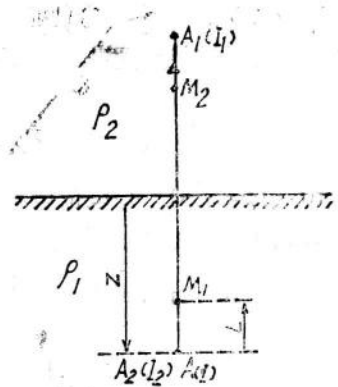


图 1—11