

测井方法基础

王惠濂编著

武汉地质学院地下物探教研室

PDG

前 言

测井方法繁多、应用广泛，这是由于岩石的性质可以用许多物理参量来描述，而现代检测技术，又能够实现几乎所有物理参量的测定。随着材料、工艺、设计特别是电子技术的飞速进步，测井技术还继续会有很快的发展。本书并不全面阐述所有测井方法，仅从基本理论角度出发，简要叙述三类主要的测井方法。目的是使读者获得测井技术的基础理论知识，为进一步开展种种测井方法的应用和研究，提供一定的条件。本书初稿曾用于我院83年举办的全国煤田测井进修班，付印后，将用于84年的测井进修班作为教材。本书可供现场技术人员进修参考，亦可作为高等学校学生教学参考书。限于时间仓促和编者水平，这本书有待进一步完善和提高。敬希读者指正。

编 者 谨 识

一九八四年二月

目 录

第一章 电法测井.....	(1)
§ 1、视电阻率法.....	(1)
一、电阻率测井的物理原理.....	(1)
二、岩石的导电性.....	(3)
三、视电阻率.....	(5)
四、视电阻率理论曲线.....	(6)
五、应用.....	(14)
§ 2、聚流法.....	(18)
一、方法原理.....	(18)
二、三侧向电极的视电阻率公式.....	(19)
三、三侧向视电阻率与真电阻率的关系.....	(20)
四、电极尺寸与探测效果.....	(21)
五、应用.....	(22)
六、其他聚流方法.....	(24)
§ 3、感应法.....	(26)
一、物理原理.....	(26)
二、基本理论.....	(28)
三、解释和应用.....	(32)
§ 4、自然电位法.....	(36)
一、产生自然电位的原因.....	(36)
二、自然电位理论曲线.....	(37)
三、应用.....	(40)
§ 5、人工极化电位法.....	(42)
一、人工极化现象.....	(42)
二、人工极化电位的测量.....	(44)
习题.....	(45)
第二章 放射性测井.....	(46)
§ 1、自然伽马法.....	(47)
一、岩石的自然放射性.....	(47)
二、理论基础.....	(48)
三、测量.....	(50)
四、应用.....	(55)
§ 2、伽马伽马 ($\gamma\gamma$) 法.....	(55)

一、密度测井原理.....	(56)
二、测量方法.....	(59)
三、应用.....	(64)
§ 3、中子法.....	(66)
一、物理原理.....	(66)
二、基本理论.....	(67)
三、测量方法.....	(70)
四、解释与应用.....	(71)
习题.....	(75)
第三章 声波测井.....	(76)
§ 1、声速测井.....	(76)
一、物理基础.....	(76)
二、基本原理.....	(80)
三、应用.....	(83)
§ 2、其他声测井方法.....	(86)
一、声幅测井.....	(86)
二、全波列测井.....	(86)
三、超声成像测井.....	(86)
习题.....	(89)
参考书.....	(89)
附录.....	(90)

第一章 电 法 测 井

这一章阐述电学技术在地下地质介质中的应用。电法测井是测井各类方法中最基本的一类,方法很多。本章仅叙述视电阻率法、聚流法、感应法、自然电位法以及人工极化法五种,并以视电阻率法为代表,着重讲述。

§1. 视电阻率法

一、电阻率测井的物理原理

把电流从电源送入井下岩石中,则岩石介质到处即形成场。场与电流的关系如何,又怎么和岩石介质性质有关?这需要涉及电学的一些基本物理概念。电的概念是从带电粒子(电荷)在介质中的作用开始的。由于电荷的存在,介质中就出现一种力,这就是电场(E), (电场是矢量,应写做 $\vec{E}$,但此处仍以标量 E 表示),可用另一电荷来检验其存在。为说明这种力,可以把电荷看作向各方发出力线的源,力线分布在介质中各处。电荷量越大,电力线数量也越多,力也越大。力线的密集程度就描述了电场的大小,电场的方向规定为由正电荷向外或由正电荷向负电荷。这样电荷沿电场移动,就有功形成,这就是电位(U) (电位是标量)。这样来定义电位 U :取单位正电荷,从无穷远克服电场 E 所做的功为 U 。于是在电场的相反方向上,电位增大。如果是导电介质,则电荷就可沿电场方向自由移动,因而形成电流(I) (电流密度 j 是矢量),其方向是从高电位流向低的电位方向。 E 、 U 、 I 三者显然是互相有关的,关系如下:

i) 由电荷在场中做功关系,知 $\Delta U = -E \Delta x$ 。当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时,写为 $\frac{\partial U}{\partial x} = -E$,这样,电场

是电位在电场方向上的负变率(负梯度)。

ii) 电场与电流线密度成正比,即 $E \propto j$ 。写成等式为 $E = \rho j$ 。力线(电流线)越多即 j 越大, E 也越大,二者成正比关系,其比例系数 ρ 表示了影响力线数的因素。这是与介质性质有关的,介质影响电流线的数量,即电流受不同介质的不同阻力,致使电力线数改变,故称 ρ 为介质的电阻率。上述关系仅在液、固态介质中成立,气态介质中不成立。

iii) 在介质中的某处,一点或小体积中, $\Sigma I = 0$,即电流的变化率为零。流入的电流等于流出的电流。今电流以微分形式 j 表示,则在直角坐标中, j 的变率可表为

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0$$

可以容易地导出联系以上三个关系式的数学式

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

这是直角坐标系中的拉普拉斯方程，它总括了稳定电流场的普遍规律。任何复杂介质条件下的场，均可根据该条件下的不同边界条件，由此方程来解得。

对于均匀无限介质，解上述方程可得

$$U = \frac{\rho l}{4\pi} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

或
$$E = -\frac{\partial U}{\partial \gamma} = \frac{\rho l}{4\pi} \cdot \frac{1}{\gamma^2}$$

γ 为观察点至电流源点的距离。

以上结果的导出方法，不是唯一的，从熟知的电路公式（欧姆定律），也可导出同样结果。实际上，若取一截面为 s 、长为 r 的圆柱体，令电流均匀通过柱体，则柱两端的电位差（图1—1a）

$$\Delta U = U = IR = j \rho s \frac{r}{s} = j \rho r$$

此值与面积无关，式中 R 为圆柱体的电阻，今改圆柱体为均匀无限介质，则 r 处的电流密度为 $j = I / 4\pi r^2$ ，代入上式，得

$$U = \frac{1}{4\pi r^2} \rho r = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho}{r}$$

这一结果与前述结果一致。

对于介质中 r_1 、 r_2 两点，同样可得（图1—1b）

$$\Delta U_{12} = U_1 - U_2 = \frac{1}{4\pi} \rho \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

这一结果可看成是两个同心球之间介质的电阻与电流的乘积。或者当 l 一定时，测量 r_1 及 r_2 两处的电位差 ΔU_{12} ，即可得出这一部分介质的电阻大小。但是，如圆柱体例中所见到的那样，电阻与介质几何形状和尺寸有关，若写成电阻率。

$$\rho = \Delta U_{12} \frac{4\pi}{l} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

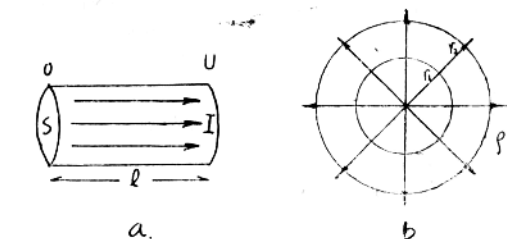


图1—1

这个形式，则是完全描述介质导电性质而与介质形状大小无关的物理量。电阻率测井就是测

量比值,以便反映不同岩性的导电性质变化。式中 $4\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 4\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) =$

$4\pi \frac{AM \cdot AN}{MN} = K$ 是常数,称做电极系常数。这里A、M、N表示三个物理点(称之为电

极)。A点供电, M、N两点测量电位差。上式也可以以电场表示,当 $MN \rightarrow 0$ 时

$$\rho = \frac{\Delta U_{12}}{NM} \cdot 4\pi \frac{AM \cdot AN}{l} \approx \frac{\Delta U_{12}}{-MN} \cdot 4\pi \frac{AO^2}{l} = E \cdot 4\pi \frac{AO^2}{l}$$

这样,电极的组合形式可归为两种(图1—2): 电位电极系, N电极距离较远

$U_2 (U_N) \rightarrow 0, \Delta U_{12} = U_M, \rho = U_M \frac{4\pi AM}{l}$; 梯度电极

系, $MN \rightarrow 0$ 以MN的中点O为电场点, $\rho = E \frac{4\pi AO^2}{l}$ 。这两种

电极系虽按理想条件定名,但实际上仍有三个电极在井下,仅在距离上考虑尽可能接近理想条件。故实际工作中,常数K的计算仍按三电极的实际距离考虑。

二、岩石的导电性

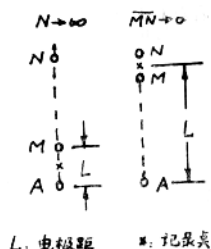
如前所述,介质的导电性以电阻率 ρ 表示,它与介质的几何形状及大小无关, ρ 大者,对电流的阻力大,导电性差; ρ 小者对电流的阻力小,导电性好。岩石也有这种性质。什么因素造成岩石的 ρ 差别? 这是一个专门课题。这一段仅讲述主要规律和结果。

已经测知,不同矿物导电性各异。岩石是一种一定成分的矿物的集合体,因此,岩石的导电性受矿物的影响,但岩石并非简单地只是一种矿物,其含量也非固定,矿物颗粒的大小和形状也各异,因而其排列方式也不同,由此而造成的孔隙大小和孔隙形状也不同,孔隙中尚有充填物,充填物也随岩石而有不同。显然,岩石是一种相当复杂的介质。

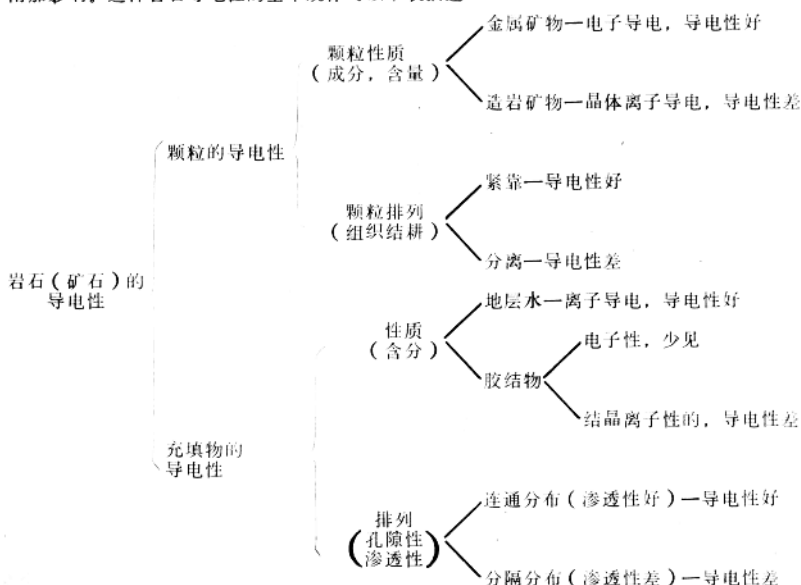
尽管岩石是很复杂的介质,但还是可以把它理一下,并做出实际条件可允许的简化。

例如,以分选很好的砂岩为例,它由大小形状均匀的石英颗粒组成,于是这种砂岩可看成由石英颗粒和孔隙充填物所组成,它的导电性由这些组成物和充填物及其形状三因素决定。于是其导电率就需视颗粒的导电率、充填物导电率以及两者的导通条件而异。

因此,按简化条件来考虑,一般地说,颗粒的导电性应包括颗粒本身的性质和颗粒的排列情况。可以有两种颗粒导电性: 电子导电的颗粒,导电性好,电阻率低,金属矿石即是; 晶体离子导电,一般较微弱,电阻率大,造岩矿物即是。排列的情况也很重要,颗粒互相紧挨着排列的,电流可以直接传导,互相分离排列的,则不易直接导通。充填物的导电性同样也包括充填物本身的导电性以及充填物的分布形状。岩石中充填物可分为岩层水和胶结物两类,水属离子导电,导电性较好,含有盐离子时,导电性将增强; 胶结物则视其成分而异,一般地说,其导电性比水差,甚至差很多。充填物的分布形状与前述颗粒排列情况类似,它可以呈直接导通的形状,也可以是被颗粒阻隔,形成分隔形状。或者就充填物的影响来说,



导电性将变差。对于破碎、风化等非原生现象，也可以按以上简化方式来考虑其对导电性的附加影响。这样岩石导电性的基本规律可以下表描述



根据以上原则，再来考虑分选好的砂岩的导电性，就可以基本上确定其导电性主要决定于充填物(地层水)。因为石英颗粒不导电，而颗粒间的孔隙规则，且连通性好，故一般是孔隙性渗透性越好，导电性也越强，地层水矿化度(含盐量)越高，导电性越好。

除了以上的主要因素以外，其他物理条件如温度、压力也影响导电性，前者主要对孔隙中充液有影响。温度升高时，电阻率越小。后者则影响孔隙，使孔隙率减小(压力增大时)，故电阻率随压力而增大。这两个因素归结起来仍然是对孔隙及含分的影响。

下面分析一下各类岩石的导电性。

沉积岩，由其他岩石的材料组成，其电阻率一般很大，但孔隙中充填物(地层水)的电阻率小得多(18℃的氯化钠含盐浓度为0.1克/升时， ρ 为52.6Ω M)，由于连通性好，岩石的导电性主要地决定于地层水导电性。砂岩的电阻率由 10^3 至几个Ω M；泥岩，粘土因孔隙率比砂岩大故电阻率比砂岩低，约5.60—1Ω M左右；灰岩孔隙小，在沉积岩中，电阻率为最大，可高至5000Ω M，但疏松的或孔隙性石灰岩电阻率却较低，数百以下甚至低达数十欧姆米。含泥质岩石以其泥质颗粒的表面(单位体积表面积)吸附大量水(都是原生水)，使电阻率大降低，例如灰岩含泥质时，电阻率可降低二个级次或更多。

火成岩和变质岩，其造岩矿物电阻率很大(石英 10^{13} — 10^{15} Ω M 长石 10^{12} Ω M 云母 10^{16} — 10^{18} Ω M)，故总的来说，岩石的电阻率也很大(花岗岩为数百至 10^8 Ω M，片麻岩为数百至 10^4 Ω M)。当含有金属矿颗粒且有一定排列方向时，电阻率降低；孔隙增大时电阻率降

低；风化破碎者，电阻率降低。

矿石的电阻率主要决定于组分，金属矿一般地说电阻率都很低，如磁铁矿 $10^3-10^{-4}\Omega M$ ，方铅矿 $10^{-5}-10^{-6}\Omega M$ 。煤的导电性与变质程度关系较大，高炭化、石墨化煤，电阻率很小（如无烟煤可低至 $10^{-2}\Omega M$ ，但烟煤的电阻率则可有数百—数千 ΩM ）。煤岩成分，灰分也影响着煤的导电性，对于高度变质煤，灰分的影响使电阻率升高（电子导电程度减少，离子导电程度增大）；但对于低变质煤，灰分的影响却使电阻率降低（灰分增加了原来的导电性）。褐煤的电阻率比烟煤低得多，为数 $+\Omega M$ ，应主要由所含水的导电性决定。

岩石和矿石常呈层理结构，因此实际上岩石沿层理方向的导电性（ ρ_l ）要好一些，垂直层理方向的导电性（ ρ_n ）差些。这种呈方向导电的性质，即所谓各向导电异性，常以 λ 表示（ $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}}$ ）这种性质在沉积岩中比较明显，如粘土、页岩， λ 值可达1.41—2.25，煤的各向导电异性最剧， λ 值可高达2.55（无烟煤）

图1—3为各种矿物和岩石的电阻率值范围。

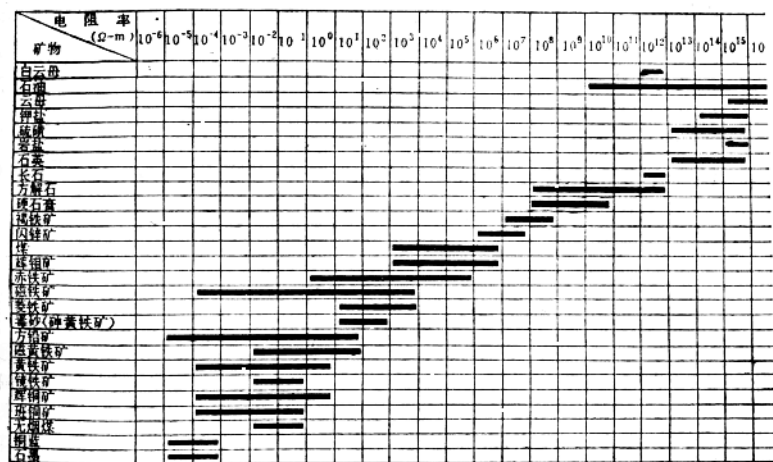


图 1—3 a

三、视电阻率

前面关于电阻率测井原理的讨论是在均匀无限介质中的情况，即全空间介质电阻率是相同的。但是，在实际中，进行测量工作的钻孔充有泥浆或清水，是与周围岩石的导电性不同的；钻孔所穿过的岩层有不同的岩性，至少，若是看成一个岩层，也有上下围岩的不同；此外，泥浆对一些岩性，还有侵入现象。在这样的电性非均匀体中供以电流，虽然，依然有电场形成，各处有电位分布，但是显然，得不到这个非均匀体中任一种介质的电阻率。尽管如此，实用中仍然利用均匀无限介质中的表示式。然而计算得的值不再为电阻率，而称之为视电阻率（ ρ_s ）。它在某种条件下，例如，钻孔很小，层厚很大，无泥浆侵入时，则可能接近

于岩层的真电阻率。或者说，电极系附近的周围介质，影响的成分较大，远离的介质影响小，但是测值终究不可能完全等于真电阻率。在概念上，它只是一种假想的均匀无限介质，该介质的电阻率值等于视电阻率值。

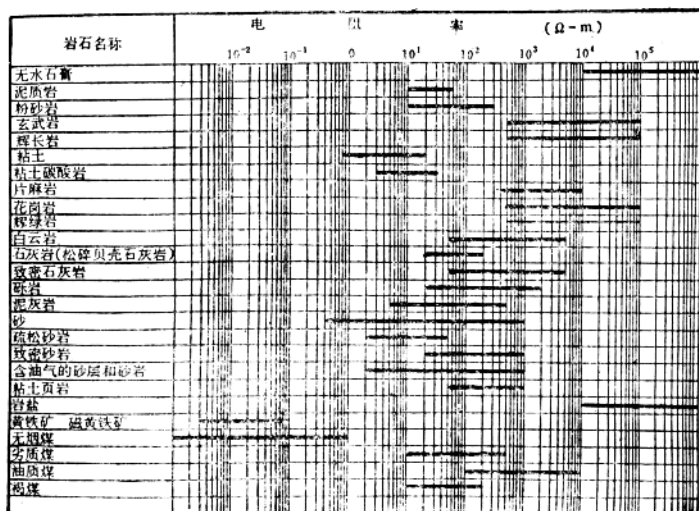


图 1—3b

视电阻率有什么实际意义？它与什么因素有关？这是视电阻率测井法的根本问题。

显然，非均匀体各部分的导电性、它们之间的组合关系（体积范围）以及它们对于电极系之间的距离等因素的改变将改变视电阻率值。可见，视电阻率值与泥浆，岩层，上下围岩等的电阻率有关，与钻孔直径，岩层厚度，电极系大小有关。正因为如此，可以被利用来了解岩层导电性，它的厚度等问题。这些正是实际所要求解决的问题。现在的问题是首先需要了解 ρ_v 与这些因素之间的定量关系。这就是研究视电阻率理论曲线的理由。

四、视电阻率理论曲线

视电阻率理论曲线是通过解拉普拉斯方程，求得测量电极处的电位后，利用视电阻率公式计算出来的。测井实际要求解决的是单一岩层的理论曲线形状。有钻孔存在的这一问题的计算相当复杂。一般采用近似计算或有限元法来计算。这一节中仅介绍纯岩层（无钻孔）的结果和纯泥浆影响（层厚无限），以得出重要的基本规律，然后再综合两因素研究其影响程度。这里不做许多数学上的计算，仅对计算结果作物理概念的分析，以便较好地理解其规律并应用之。

1、物理概念的基础

对于梯度电极系，由视电阻率公式

$$\rho_s = \frac{4\pi L^2}{l} E = \frac{4\pi L^2}{l} j \rho = \frac{j}{j_0} \rho$$

j 、 ρ 各为测点O处的电流密度和电阻率， j_0 则为均匀无限介质中O处电流密度，可见O处的视电阻率，由O处的相对电流密度(j/j_0)和该点的电阻率值决定，当O处的电阻率不变时，只要了解 j/j_0 的变化，即可知道 ρ_s 的变化了。O处实际电流密度 j ，可根据O处附近不均匀介质的导电性的影响程度来估计。例如，电极系靠近高电阻率介质时，由A电极流出的电流线将减少其流向高阻介质的数目，而增加流向低阻介质的数目，这就是所谓的高阻介质的排斥电流线作用，如果此时测点O处于高阻介质一侧，则显然电流密度减小；相反的情形将出现在低阻介质附近，该处将发生吸引电流线的现象，而使处于该侧的测点O处的电流密度增加。

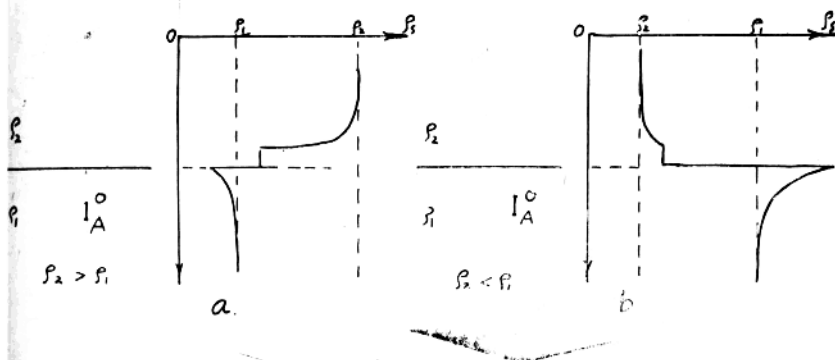
对于电位电极系，只要研究电场与电位的关系之后亦不难利用上述概念来分析理论曲线。实际上，如前所述

$$U = - \int_M^N E dx = - \int_M^\infty E dx$$

可见，对于电位电极系，需要考虑M点以外沿x方向(在AM直线上)直至N(无限远)各处的电流密度和电阻率，虽是很大范围，但事实上只需考虑M以外不远范围(例如AM距离的三倍)即可，并且可以利用此范围内的平均值概念来说明 ρ_s 变化。

2、一个界面的 ρ_s 曲线

两种电阻率不同的岩石互相接触，交界面呈一水平无限平面，这样的一个问题计算结果·如图1—4，这是对梯度电极系的计算结果。



图—4

在图4a中，曲线段①是电极系在下介质 ρ_1 中的情形。测点O处的电流线在高阻的上介质的排斥下， j 值降低，且电极系越靠近界面， j 越小，但整个过程中O处之 ρ 值不变，均等于 ρ_1 ，故 ρ_s 逐渐降低，且小于 ρ_1 ，只有在远离界面处才有 $\rho_s = \rho_1$ (该处的 $j = j_0$ ，故 $\rho_s = \frac{j}{j_0} \rho = \frac{j_0}{j_0} \rho_1 = \rho_1$)。图中②的 ρ_s 最小，因为该处是排斥作用最剧之处，O点过界面时出

现 ρ_s 值的突变, 这是由于O处的电阻率由低阻的 ρ_1 变到高阻的 ρ_2 (电流密度未变, 因为界面本身不会新增加或减小电流线条数) 可见界面上下两边紧靠界面的 ρ_s 值之比为 ρ_2/ρ_1 。图中③段相当于O、A分别处于界面两边的状况, 它使 ρ_s 值保持不变。这是因为上下介质的电阻率是一定的, 故电极A流出的电流线在上下介质中的分配总数也是一定的 ($I_L : I_F = (\rho_1 + \rho_1) : (\rho_1 + \rho_2)$)。又因为界面以上介质的电性不变, 到处都是 ρ_2 , 因此在上部介质中电流线仍然均匀分布, 正如均匀介质中一样 (仅电流线总数减小了)。这样, 上介质中之O点, 其电流密度是不变, 因而 ρ_s 不变。且等于

$$\frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2} (\rho_s = \frac{j}{j_0} \rho_2 = [\frac{I_L}{\frac{1}{4\pi L^2}} / \frac{1}{4\pi L^2}] \rho_2 = [\frac{2R_1}{R_1+R_2}] \rho_2 = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2})$$

式中 I_L 为上部介质中之总电流, R_1, R_2 各为上下介质之相当电阻)。图中④段是A、O均在界面以上的情形。电流受到下面低阻介质的吸引, O处电流密度减小。但随着电极系离界面向上, 这种减小程度越来越弱, 故相对地电流密度是比A刚刚过界时之值要大的。这种增大一直继续到 $\rho_s = \rho_2$ 为止, 此时A、O均离界面甚远 ($\rho_s = \frac{j}{j_0} \rho = \frac{j_0}{j_0} \rho_2 = \rho_2$)。按照

类似的分析方法, 可以得出图4b曲线的物理说明。

*用镜象法可解此问题。M点的电位 (见下图) U_M 等于A源直接在M产生的电位, 加上A的镜象 (以界面为对称面) A' 在M点的电位。 A' 实即为上介质的附加影响, A' 的电流 I' , 可由边界条件求出,

$$K_{12}I' = (\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}) I; M' \text{ 点的电位则为 A 处另一种}$$

电流源对 M' 产生的电位, 其电流 $I'' = (1 - K_{12}) I$, 同样, 也可由边界条件求出, 它是介质 i 的影响结果。这样:

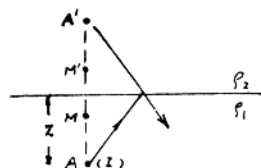


图 1-4'

$$U_M = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_1}{AM} + \frac{I'}{4\pi} \frac{\rho_1\rho_2}{A'M}$$

$$U_{M'} = \frac{I''}{4\pi} \frac{\rho_2}{AM'} = \frac{1}{4\pi} \frac{2\rho_2^2}{\rho_1 + \rho_2} \left(\frac{1}{AM'} \right) = \text{const}$$

图中 Z 为 A 至界面的距离, 把 M 点放在 A 的界面垂线方向上。

3、一个层的 ρ_s 曲线 (图1-5)

厚层: 这里所指的厚层, 是相对地层厚 H 比电极长度 L 大很多者。于是实际上只有一个界面的影响, 另一个界面由于远离电极系而无影响。整个 ρ_s 曲线可看成两条一个界面的曲线 (如图4a的a和b, b在上方, a在下方) 的合成。

中厚层: 与厚层相似, 所差别者仅增加了另一界面的影响。于是, 对于下界面附近的曲线, 其相当于图4a中的②者, ρ_s 值将有所升高, 这是由于增加了上方低阻围岩对电流线的附加吸引, 而使O处电流密度增大; 由于紧靠界面的二边, ρ_s 值之比一定 (等于 ρ_2/ρ_1), 故相当于图1-4a中的③处, ρ_s 也将增大, 且不再为不变的直线, 而是向上逐渐增大, 其理由

与前同；类似地可对上半条曲线进行同样的分析，其主要差别处在⑤⑥两处，⑤处之 ρ_s 值，因增加下方低阻围岩的附加吸引而减小，相应地⑥段在界面处之值也减小，⑥段不再为不变的直线，而是向上逐渐增大。需要注意的是两处特征点②及⑤之值，如图1—5所示，若岩层之电阻率为 $5\Omega M$ ，上下围岩为 $1\Omega M$ ，则③，⑥的界面上值是近乎一定的，它应近似地为

$\frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2} \approx 1.666$ 于是②处极小值为 0.333 ，而⑥处极大值为 8.3 。它们均明显地分别小于 1 和

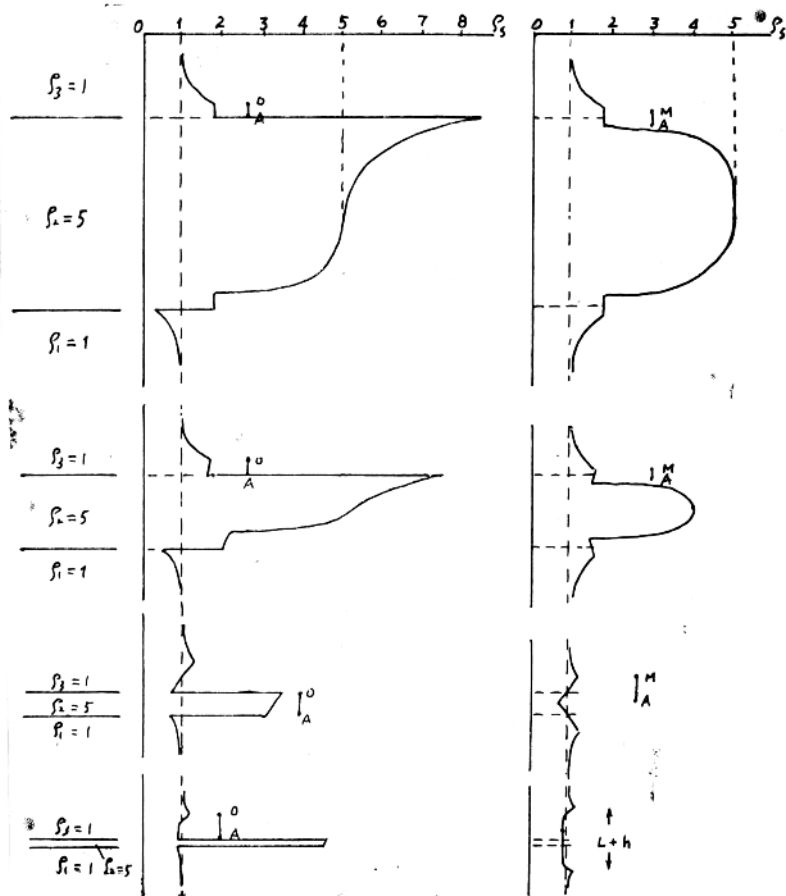


图 1—5

大于5, 这样明显的数值差异为精确划分界面提供了依据。同时, 也可注意到, 不变段在中厚层中变化缓慢, 但数值仍很小, 不影响对整个异常的识别。

薄层: 层厚继续减小时, ρ_s 的主要变化部分仍然是上面提到的那些部分, 仅仅是另一界面的影响不断加强而已。需要注意的是 $H \leq L$ 的情形。在 $H \leq L$ 时, 原④⑤段曲线不复存在 (没有 A、O 均处于岩层内的条件)。③段高度代替了整个岩层异常高度。显然, 由于此时②处之 ρ_s 值提高, (例如 1—5 中 $H=L$, 该处设为 0.6, $H < L$ 为 0.9) 故③的下界面处之值, $H=L$ 者升为 $3 \left(\frac{3}{0.6} = \frac{5}{1} \right)$, $H < L$ 者升为 $4.5 \left(\frac{4.5}{0.9} = \frac{5}{1} \right)$, 而最大值也比 3 或 4.5 为大 (却大大小于厚层或中厚层时之值) 在这种情形下, 要根据这一异常高度区分出岩层还是可以做到的, 但是由于最小值, 最大值不明显, 划分界面不如厚层容易了。并且, 可以看出, 所有不同厚度的异常中, 以 $H=L$ 者异常最小, 显然这是研究岩层最不利的条件。梯度电极系在界面上的 ρ_s 极大值计算值, 见图 1—6a

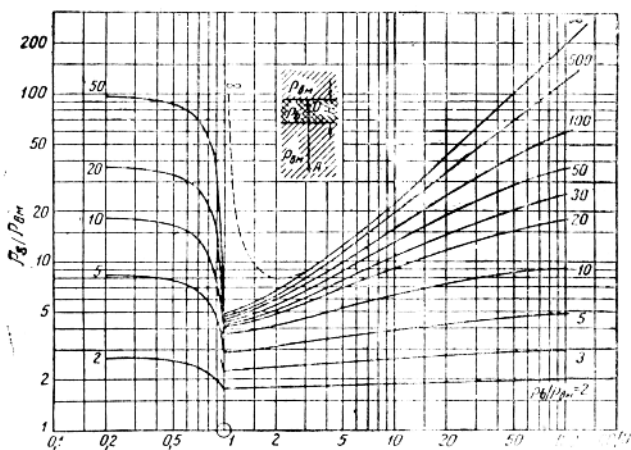


图 1—6a

4. 一个层的电位电极系的 ρ_s 曲线

厚层: 图 1—5b 上部为这种条件下的 ρ_s 曲线 (设 A 电极在下方, M 电极在上方), 其中①段主要是 MN 之间的平均电阻率增大的影响使 ρ_s 升高 (当 M、N 电极位于 A 电极的上方时, MN 之间的电流密度只有 M 到界面这一段是减小的, 界面以上直至 N, 因 A 与所考虑之点分别处在界面两侧故电流密度是不变的, 这样, 电流密度平均值的变化影响较小), 曲线的段②, ρ_s 仍不变这是 A、M 分别跨在界面两侧的情形, 对于很厚层, M 至 N 范围内的电流密度和电阻率均不变。曲线的③段, ρ_s 是增大的这是由于 MN 间电流密度的平均值是增大的 (逐渐远离下界面)。直至电极系离下界很远, $\rho_s \rightarrow \rho_{岩层}$ (MN 间各点的电流密度均等于均匀无限介质之值, 电阻率则均为 $\rho_{岩层}$)。厚层的 ρ_s 曲线上半部是与下半部相同的, 这种对称

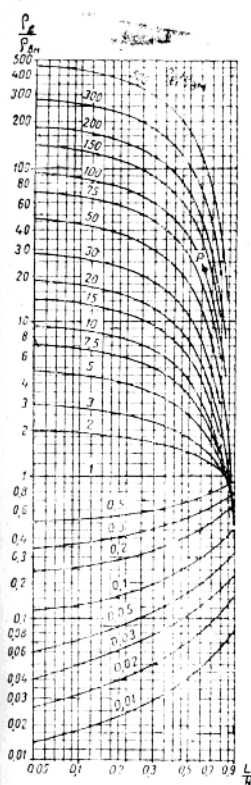


图 1—6b

点, 电流密度减小 (低阻层岩对A处流出的电流线的吸引使O处电流线减小)。倾斜层的理论曲线, 可参阅有关书籍。

6、两个不同相对距离的高阻层, 梯度电极系的 ρ_a 曲线见图1—8。图上左部曲线为L大于两层厚度加上间隔距离, 曲线特征是下层异常降低; 图中右部为L小于两层的间距, 曲线特征是下层异常大大升高。这些特征不难用以上概念分析。

7、泥浆影响问题

这里仅讨论纯泥浆影响, 即不考虑围岩, 岩层厚度为无限。泥浆影响问题应包括钻井本身泥浆柱以及泥浆对岩层的侵入带, 它们都被看作同轴圆柱体, 并且都有理论计算结果。这里只主要地分析泥浆柱的计算结果。图1—9为不同相对电阻率 ($\rho_{\text{岩层}}/\rho_{\text{泥浆}} = \rho_1/\rho_m$) 条件下, 视电阻率相对值 (ρ_a/ρ_m) 与电极距相对于孔径 (L/d) 的关系曲线, (梯度电极

性是电位电极系的互换等值性质所决定的。厚层曲线特征表明, 中心异常接近于岩层的电阻率值, 界面上 ρ_a 值不如梯度电极系那样具有明显的特征, 仅仅有一段长度等于电极距的 ρ_a 平缓段, 然后 ρ_a 上升较快, 平缓段具有 ρ 较低的特征 (其值为

$$\frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}, \text{ 按图1—5左方条}$$

件, 亦应为1.666)。可见划分界面时, 应从曲线的根部去找, 而不是在半幅值处。

中厚层: 与厚层的差别主要是②、③两处。②段不再保持不变, 而是向上逐渐降低, 这是上方低电阻率围岩影响MN之间的平均电阻率值之故。③处之 ρ_a 要比厚层降低, 也主要是这一原因。

薄层: 由于缺失③段曲线 (电极系不可能同时处于岩层中), 因而见不到凸起的异常, 岩层中心反而有凹下的 ρ_a , 因此, 对于这种岩层, 电位电极系的探测是很不利的。

电位电极系的 ρ_a 极大值计算值见图1—6b

5、低阻层和倾斜岩层

和高阻厚层相似, 低阻厚层的 ρ_a 曲线也可由一个界面的曲线组成, 例如顶部梯度电极系 (O在A之上) 的低阻厚层曲线可由图1—4的a和b (a在上, b在下) 合成, 由此, 可以同样地得出因厚度改变所引起的主要特征。对于电位电极系的 ρ_a 曲线, 也可以用同样方法得到。

倾斜层的 ρ_a 曲线 (图1—7) 在层面法线与井轴的交角不大时 (例如60°以下) 基本特征仍然保持。只有当交角大时, 梯度电极系的曲线形状才有显著的变化, 曲线由不对称变为对称并且不易与电位电极系的曲线区分开。这是由于对于高阻层, 原 ρ_a 最小处的O点电流密度加大 (高阻层把A电极流出的电流线排向O方) 原 ρ_a 极大处的O

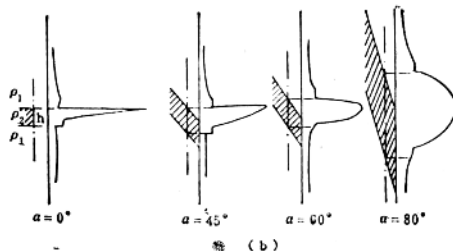


图 1-7 a

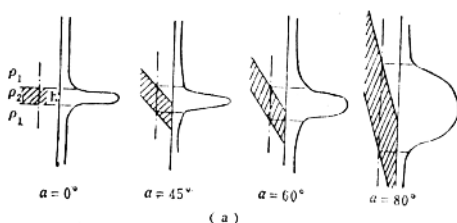


图 1-7 b 岩层倾斜对电位电极系视电阻率曲线的影响

$\rho_1/\rho_2=10$, $A:M=0.2h$, $d=0$

图 1-7 b

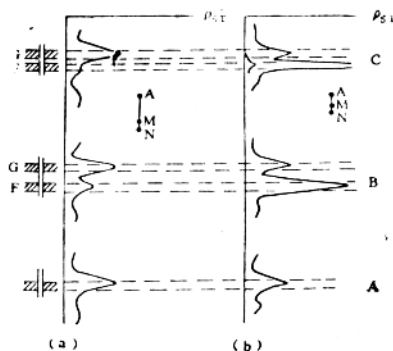


图 1-8

系一实线，电位电极系一虚线）。曲线表示了，由于低阻泥浆的影响，视电阻率低于岩层电阻率。岩石电阻率越高，这种差别越大，这是因为电极系处于低阻泥浆中之故，电极距越小， ρ_s 也越低，只有当电极距很大时才有 $\rho_s \rightarrow \rho_1$ ，这是由于虽然测点电阻率仍为 ρ_m ，但该处受高阻岩层的排斥，电流密度却大大超过均匀无限介质中之值，

（可以证明 $\int_0^j = \frac{\rho_1}{\rho_m}$ ）图上，电极距的相对

值有一段，使 $\rho_s > \rho_1$ ，这一段是受高阻岩层排斥的过剧影响所致。比较梯度和电位两种电极系的结果，可以看出梯度电极系受泥浆影响使 ρ_s 降低的程度，比电位电极系为甚（电位电极系的探测范围比梯度电极系

大)。这可从图中同一岩层条件和同一电极距条件下的比较中看出, 岩石电阻率越高, 两者的泥浆影响的程度差别也越大。

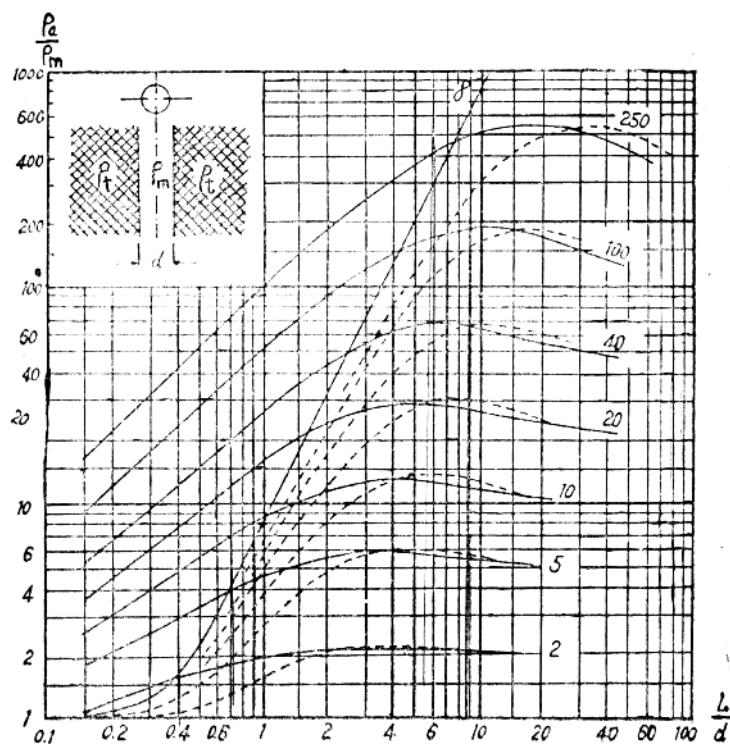


图 1-9

从以上讨论可知:

纯岩层影响的曲线特征, 提供了划分岩层和界面的依据。此外, 它还提供了电极系和电极距选择的一个方面的原则, 即梯度电极系, 应选 $L \ll h$ 或 $L > h$, 对于 $L = h$ 的电极距对探测不利; 电位电极系必须选 $L \ll h$, 对于 $L \geq h$ 的电极距无法获得岩层的应有的异常, 考虑这一问题的出发点是, ρ_a 曲线必须有足够的异常, 并且 ρ_a 值尽可能接近 ρ_t 。

纯泥浆影响的理论计算结果提供了电极系和电极距选择的另一方面原则, 即: 为减小泥浆影响 L/d 要大; 在影响程度相同的条件下, 梯度电极系的电极距要比电位电极系的电极距取得更大。

综合纯岩层和纯泥浆影响问题, 可得出, ρ_a 测量受岩层、电极、泥浆电阻率的影响, 受层厚 h 的影响, 还受电极系和 L 大小的影响。固岩影响使 ρ_a 变化, 出现具有一定特征的值,