

# 地球物理

# 测井方法原理

尚作源  
编

石油地质勘探技术培训教材

石油工业出版社

石油地质勘探技术培训教材

# 地球物理测井方法原理

尚作源 编 王曰才 谭廷栋 审校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书为地质勘探技术培训教材之一。书中着重论述了各种测井方法的基本原理、解释方法及应用范围，是一本比较系统的培训教材，它可作为地质、开发、钻井技术人员的培训教材，也可作为测井技术人员及大专院校有关师生的参考书。

### 石油地质勘探技术培训教材 地球物理测井方法原理

尚作源 编 王曰才 谭廷栋 审校

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外外馆东后街甲36号)  
北京地质印刷厂排版  
北京顺义燕华营印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 10<sup>1</sup>/<sub>4</sub>印张 250千字 印1—2,500  
1987年5月北京第1版 1987年5月北京第1次印刷  
书号: 15037.2698 定价: 2.00元

## 编者的话

本书是根据编者多次为石油地质、油田开发技术培训班讲课时所用的讲稿写成。

从1960年开始，地球物理测井技术得到了迅速的发展，数控测井仪和测井资料数字处理技术的应用，使测井资料在油田勘探和油田开发的各个领域得到了广泛的应用。为了使石油地质和油田开发工程技术人员更好地使用测井资料，本书着重论述了各种测井方法的基本原理、解释方法及应用范围，对近年来新发展的岩性密度测井、电磁波传播测井等新方法，也作了较详细地介绍。

承蒙王曰才教授和谭廷栋工程师审校了全书，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，时间又较仓促，错漏之处，在所难免，敬希读者提出宝贵意见。

编者

一九八五年一月

## 前 言

《石油地质勘探技术培训教材》自1982年内部发行后，受到广大读者的欢迎。当时共印一万套，很快就被读者全部订购。石油勘探司和教材编委会陆续收到数百封来函、来电，给予了较高的评价，并迫切希望得到教材。根据读者的要求和工作的需要，经领导批准，石油工业部石油勘探司决定，适当调整和加强编委会力量；在现有基础上，吸取各方面的有益意见，改进不足之处，补充新内容，删简修订，由石油工业出版社正式出版。

补充修订的原则是：

- 一、反映在石油地质理论上不断打开新领域的进展情况；
- 二、反映当代石油地质勘探技术的新理论、新工艺、新方法；
- 三、列举国内外石油地质勘探技术的新成果；
- 四、满足现场工作者解决理论和方法问题的实际需要。

教材正式出版的宗旨是：

- 一、补充更新现有石油地质技术干部的专业技术知识；
- 二、作为石油地质勘探技术干部进修培训的课本，同时也可作为教学、科研人员的参考丛书；
- 三、推动石油地质勘探事业的发展。

教材内容的选取，既照顾该学科的系统性和完整性，又保证它的新鲜性和实用性。这些书是编委会成员数十年工作、教学、科研经验的积累，也是编委会成员对当前石油地质勘探技术理论观点的结晶。希望能在发展我国石油地质勘探事业中起到应有的作用。

教材编委会的成员有：

郝石生（主编）翁文波 陆邦干 胡朝元 李德生 陈发景 吴崇筠 王曰才  
王鸿勋 张恺 钱绍新 黄第藩 裘亦楠 应凤祥 刘和甫 陆克政 谭廷栋  
尚作源 张一伟 贾振远 樵汉生 彭振南 沈修志 戴金星 戚厚发 陆基孟  
赵澄林 钟国森 曾文冲 欧阳健 何登春 朱恩灵 徐树宝 尚慧芸 李晋超  
郭舜玲 陈丽华 缪昕 成云芯 袁幼庸和王雪吾同志

教材编委会的学术顾问是阎敦实、翟光明、李国玉、查全衡同志

北京石油勘探开发科学研究院、华东石油学院北京研究生部对教材编委会的工作给予了大力支持和帮助，谨致深切谢意。

编委会成员以业余撰写为主，加以时间仓促，水平有限，不足之处恳请读者批评指正。

书中作者名次，按编写顺序排列。

石油工业部石油勘探司

1985年10月

# 目 录

<b>第一章 普通电法测井</b> .....	1
<b>第一节 普通电阻率测井</b> .....	1
一、测量岩样电阻率的原理 .....	1
二、普通电阻率测井的基本原理 .....	2
三、视电阻率曲线的分析和电极系探测范围的概念 .....	6
<b>第二节 微电极测井</b> .....	12
一、微电极测井的提出 .....	12
二、微电极系测量原理 .....	13
三、微电极曲线的应用 .....	14
<b>第三节 自然电位测井</b> .....	17
一、自然电位产生的原因 .....	18
二、自然电位曲线形状的分析 .....	20
三、影响自然电位异常幅度的因素 .....	23
四、自然电位曲线的应用 .....	23
<b>第二章 侧向测井</b> .....	28
<b>第一节 三电极侧向测井</b> .....	28
一、基本原理 .....	28
二、三侧向视电阻率曲线特点 .....	29
三、浅侧向 .....	30
四、利用深侧向和浅侧向的组合求地层真电阻率 .....	30
<b>第二节 七电极侧向测井</b> .....	32
一、基本原理 .....	32
二、七侧向视电阻率曲线的特点 .....	33
三、利用七侧向视电阻率求地层真电阻率 .....	33
<b>第三节 微侧向测井</b> .....	36
<b>第四节 邻近侧向测井</b> .....	38
<b>第五节 球形聚焦测井与微球形聚焦测井</b> .....	39
一、球形聚焦测井 .....	39
二、微球形聚焦测井 .....	41
<b>第六节 双侧向—微球形聚焦组合测井</b> .....	42
一、井眼校正 .....	43
二、围岩校正 .....	44
三、侵入校正 .....	45
<b>第三章 感应测井和电磁波传播测井</b> .....	47
<b>第一节 感应测井的几何因子理论</b> .....	47
<b>第二节 感应测井线圈系的选择</b> .....	51

一、双线圈系的探测特性 .....	51
二、复合线圈系 .....	55
第三节 感应测井仪刻度原理 .....	59
第四节 感应测井视电导率曲线 .....	59
一、无井存在, 上下围岩相同, 单一低电导率和高电导率地层 .....	60
二、无井存在, 上下围岩不同, 单一低电导率和高电导率地层 .....	61
第五节 感应测井曲线的解释 .....	64
一、根据感应测井曲线选取基本值 .....	64
二、感应测井的理论图版 .....	65
三、双感应-聚焦测井组合 .....	70
第六节 电磁波传播测井 .....	73
一、理论基础 .....	73
二、测量原理 .....	75
三、测井资料解释原理及应用实例 .....	78
<b>第四章 声波测井 .....</b>	<b>84</b>
第一节 岩石的声学特性 .....	84
一、岩石的声波速度 .....	84
二、岩石的声波幅度 .....	85
第二节 声波速度测井 .....	86
一、“单发射-双接收”声速测井仪的测量原理 .....	86
二、影响时差曲线的主要因素 .....	88
三、井眼补偿声波测井的原理 .....	92
第三节 声波速度测井资料的应用 .....	94
一、判断气层, 确定油、气、水接触面 .....	94
二、划分地层 .....	96
三、声波测井计算岩石孔隙度 .....	98
第四节 声波幅度测井 .....	102
一、水泥胶结测井 .....	102
二、声波幅度测井 .....	103
第五节 变密度测井 .....	104
<b>第五章 放射性测井 .....</b>	<b>107</b>
第一节 放射性的基础知识 .....	107
一、原子核的衰变及放射性 .....	107
二、伽马射线强度的测定 .....	109
三、中子的探测 .....	110
四、放射性测井的测量原理、计数单位和死时间 .....	111
第二节 利用伽马射线的测井 .....	112
一、自然伽马测井 .....	112
二、自然伽马能谱测井 .....	120
三、地层密度测井(伽马伽马测井) .....	124
四、岩性密度测井 .....	130

第三节 利用连续中子源的测井 .....	138
一、中子源 .....	138
二、岩石的中子特性 .....	139
三、中子伽马测井 .....	139
四、中子测井 .....	144
五、连续活化测井 .....	148
第四节 利用脉冲中子源的测井 .....	149
一、脉冲中子源 .....	149
二、由核反应诱起的伽马射线测井 (O、C、Cl 测井) .....	150
三、中子寿命测井 .....	151
四、循环活化测井 .....	155
参考文献 .....	156



# 第一章 普通电法测井

普通电法测井包括视电阻率测井、微电极测井和自然电位测井，它是地球物理测井中最基本、最常用的方法。岩石电阻率与岩性、储油物性和含油性有密切关系。

## 第一节 普通电阻率测井

普通电阻率测井是把一个电极系放入井内，测量井内地层电阻率变化的曲线，用以研究井所穿过的地质剖面 and 油气水层。它所包含的各种特性，在测井方法中具有一定的普遍性。因此，对于这种最简单的测井方法，我们不仅要注意它的特殊性，更要重视它的一般性，注意把测井工作中常用的一些基本概念搞清楚。

### 一、测量岩样电阻率的原理

埋藏在地下的岩石电阻率，是一个不能直接观察，又不能直接测量的物理量，只能采取间接测量的方法。

我们知道，由电阻率为 $R_t$ 的均匀物质组成的长度为 $L$ 、横截面积为 $S$ 的圆柱状导体，其电阻 $R$ 由下式决定：

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

因此，对于一个给定的圆柱状岩样， $L$ 和 $S$ 为已知，若能测出电阻 $R$ ，其电阻率 $R_t$ 就可按上式算出来。

图1—1是测量岩样电阻率的原理线路。取一块岩性均匀的岩样，将它切成圆柱状，其截面积为 $S$ 。在岩样两端放两个金属板 $A$ 和 $B$ ，作为给岩样供电的电极，称为供电电极。在岩样上任意两点（最好是中部，距离为 $L$ ）放置两个金属环 $M$ 和 $N$ ，作为测量岩样上那两点电位差的电极，称为测量电极。测量流过岩样的电流强度 $I$ 和岩样上 $M$ 和 $N$ 之间的电位差 $\Delta U_{MN}$ ，则岩样 $MN$ 之间的电阻

$R_{MN} = \Delta U_{MN} / I$ ，将此式与(1-1)式比较，可得岩样电阻率

$$R_t = \frac{S}{L} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-2)$$

式中， $K = \frac{S}{L}$ ，当岩样形状和测量电极位置一定时是常数。

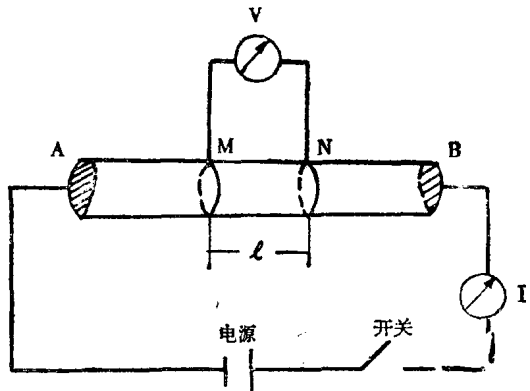


图 1—1 岩样电阻率测量原理线路

## 二、普通电阻率测井的基本原理

测量岩样时，是由供电电极 AB 供给电流，在岩样中形成人工电场，然后用测量电极 MN 测量岩样某两点的电位差  $\Delta U_{MN}$ ，便可算出岩样电阻率  $R_t$ 。要测量任何物质的电阻率，都离不开供电形成人工电场，否则就不能激发物质的导电特性，也离不开对电场中某两点电位差的测量，否则就不知道物质的导电特性。

图1—2是普通电阻率测井的测量原理线路。把由供电电极和测量电极组成的电极系 M AB 或 AMN 放入井内，而把另一个电极放在地面泥浆池中。当电极系由井底向井口移动时，由供电电极 AB 供给电流  $I$ ，由测量电极 MN 测量电位差  $\Delta U_{MN}$ ，电位差  $\Delta U_{MN}$  的变化就反映了井内不同地层电阻率的变化。由此可见，普通电阻率测井的测量原理与岩样电阻率的测量原理是极其相似的。

但是，计算岩样电阻率的方法是特殊的，十分简单的。这是因为岩样电阻率是均匀的。岩样的形状也是有规则的圆柱状。这就使岩样内电位的分布是均匀的，任何两点的电位差都符合欧姆定律，因而很容易算出岩样电阻率。但是井内的情况却复杂得多，不但有岩性不同的地层，而且井内有泥浆和泥浆侵入地层的影响，它们的电阻率常常都是不同的，这时，井内电场电位的分布很复杂，测量电位差  $\Delta U_{MN}$  与岩石电阻率  $R_t$  的关系当然也是很复杂的。

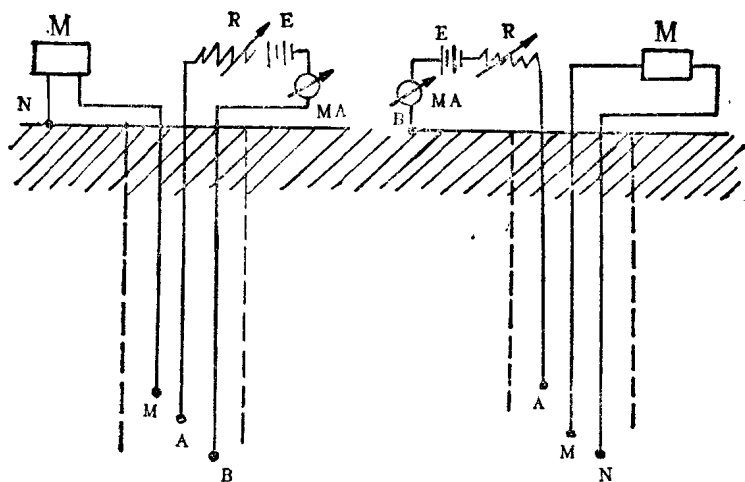


图 1—2 普通电阻率测井测量原理线路

AB—供电电极；MN—测量电极；M—测量仪器；E—电源；R—调节电阻

我们先研究一种最特殊的情况。假定井所穿过的地层有相同的岩性，电阻率都是  $R_t$ ，并且泥浆电阻率也是  $R_t$ 。这种情况叫做均匀各向同性无限分布的介质，简称均匀介质。因为电极 A 周围介质的电阻率是相同的，A 供给的电流应是向各个方向均匀流动的，在以 A 点为中心的各个球面上电位应是相等的（称为等位面）。例如，测量电极 M 所在的球面电位为  $U_M$ ，测量电极 N 所在的球面电位为  $U_N$ ，如图 1—3。我们在空间任取一点 P，它到点电源 A 的距离为  $r$ ，我们来求任一点 P 的电位  $U$ 。

在均匀介质中，微分形式的欧姆定律可写成；

$$E = R_t J$$

而电场强度  $E = -\frac{du}{dr}$

P 点的电流密度  $J = \frac{I}{4\pi r^2}$

故 
$$-\frac{du}{dr} = \frac{R_t I}{4\pi r^2}$$

对上式积分得  $u = -\frac{IR_t}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{IR_t}{4\pi r} + C$

由于  $r \rightarrow \infty$  时,  $u = 0$ ,

故积分常数  $c = 0$

均匀介质中任一点的电位为

$$U = \frac{IR_t}{4\pi r} \quad (1-3)$$

显然, 如果将点电源放在 P 点, 则它在 A 点产生的电位也是  $U = \frac{IR_t}{4\pi r}$ 。电场的这种性质叫做电位的互换原理。对于非均匀介质, 这个原理也是适用的。

又如果在均匀介质中放置  $A_1, A_2, \dots, A_n$  个点电源, 其电流强度分别为  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , 它们距 P 点的距离分别为  $r_1, r_2, \dots, r_n$ 。由于电位是标量, 所有点电源在 P 点产生的电位是各个点电源单独在 P 点产生的电位的代数和即:

$$U = \frac{I_1 R_t}{4\pi r_1} + \frac{I_2 R_t}{4\pi r_2} + \dots + \frac{I_n R_t}{4\pi r_n}$$

电场的这种性质称为电位迭加的原理。

现在, 我们根据上述原理来分析普通电阻率测井法在均匀介质中的测量结果。实际工作中, 图 1—2 的电极系 AMN 或 MAB 都是同轴排列的, 如图 1—4 所示。按在井里供电的方式, AMN 称为单极供电的电极系, MAB 称为双极供电的电极系。其中, 都在井里的电极 MN 或 AB 称为成对电极 (同名电极), 另一个电极 A 或 M 称为不成对电极 (单电极)。根据电位互换和迭加的原理容易证明, 同一个电极系采用单极供电和双极供电的测量结果完全是一样的。所以, 图 1—4 那样的两种电极系, 其电极排列完全相同, 只是供电方式不同, 因其测量结果一样, 因而被称为互换电极系。原则上用哪一种都可以, 我们只分析单

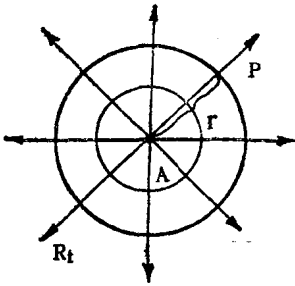


图 1—3 均匀介质中点电源的电场分布

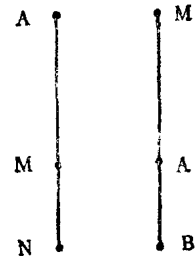


图 1—4 互换电极系

极供电的测量结果就够了。

如图1—2右图，设AMN为点电极，并且是排列在一条直线上的。根据公式(1-3)，测量电极M、N的电位分别为

$$U_M = \frac{IR_t}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} \right) - \frac{IR_t}{4\pi} \left( \frac{1}{BM} \right)$$

$$U_N = \frac{IR_t}{4\pi} \left( \frac{1}{AN} \right) - \frac{IR_t}{4\pi} \left( \frac{1}{BN} \right)$$

因为B电极距MN很远，可以认为它对MN产生的电位为零。上式变为

$$U_M = \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{1}{AM}$$

$$U_N = \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{1}{AN}$$

电极MN之间的电位差为

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{IR_t}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) = \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{\overline{MN}}{AM \cdot AN}$$

由此可得均匀介质的电阻率

$$R_t = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-4)$$

$$K = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}}$$

K称为电极系数，其大小只与三个电极之间的距离有关。上式表明，均匀介质的电阻率与测量电极系的结构、供电电流的大小及测量电位差有关，当电极系结构和供电电流的大小一定时，均匀介质的电阻率与测量电位差成正比。

以上我们都假设电极系所处的整个空间都是电阻率为 $R_t$ 的均匀介质，但实际测井遇到的情况要复杂得多。石油勘探的目的层都是有较好的孔隙性和渗透能力的，用泥浆钻井时，由于泥浆柱的压力高于地层压力，泥浆的滤液（微小的泥质颗粒和水的混合物）向渗透层的孔隙中渗透，在渗透层靠近井的部分形成泥浆滤液的侵入带，并在井壁上形成泥饼，渗透层的厚度也是有限的，常常是1米到4米的薄层较多，其上下都有非渗透的地层覆盖，称为目的层的上下围岩。以上各个部分〔未被侵入的地层部分（原状地层）、泥浆侵入带、泥饼、上下围岩、井内泥浆〕，其电阻率常常是不同的，完全不同于均匀介质。而且，由于钻井泥浆的特性、地层的孔隙度和渗透率、泥浆柱和地层之间的压差各不相同，泥浆滤液侵入带的深度也不一样，并可能形成侵入带电阻率呈现几种变化形态的侵入剖面。图1—5是渗透层情况示意图。图1—6是泥浆高侵的侵入剖面，该图画的都是泥浆侵入带电阻率高于原来地层电阻率的情况，称为泥浆高侵，图1—6a是侵入带呈台阶型变化，即侵入带与原状地层有明显的界面，在界面处侵入带电阻率 $R_x$ 。阶跃地变为地层电阻率 $R_t$ ，这是一种理想的情况。图1—6b中侵入带可划分为冲洗带和过渡带，冲洗带内完全为泥浆滤液所充满，电阻率为 $R_{x0}$ 。在过渡带内是由泥浆滤液和原来的地层中的流体所充满，而且随着距井壁愈远，则泥浆滤液含量愈少，原来的地层中的流体含量愈多，直到最后变为原状地层，在过渡带内电阻率不是一个常数，而是由 $R_{x0}$ 逐渐变为 $R_t$ ，这种情况比较符合井下的实际情

况。图 1—6c 是一种比较特殊的情况，在侵入带和原状地层之间存在一低电阻环带，在环带中主要是原生的地层水含量较多，故其电阻率较侵入带和原状地层电阻率都低，环带对感应测井有一定影响，但环带存在的时间很短。相反如果侵入带的电阻率比原状地层的电阻率低，称为泥浆低侵，读者可自己绘出低侵剖面的示意图。

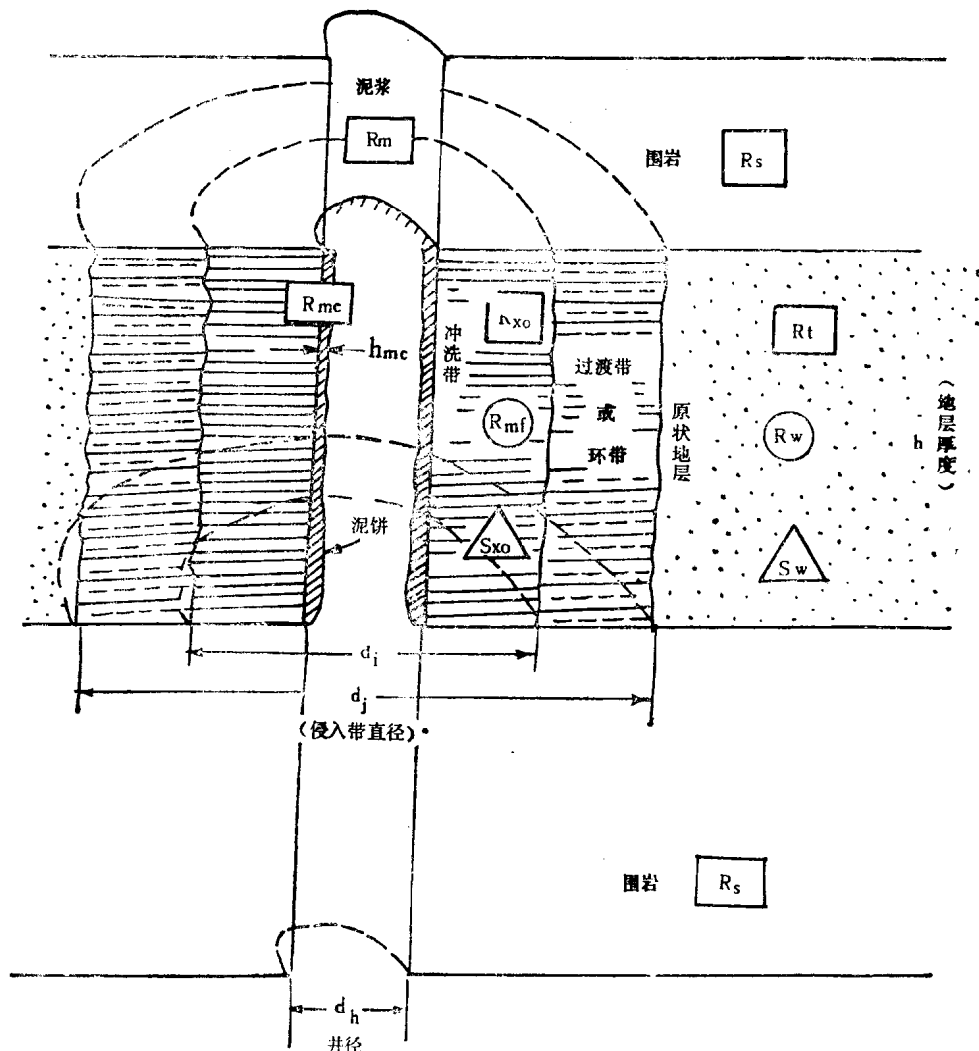


图 1—5 渗透层侵入的示意图

□一带的电阻率；○一带中水的电阻率；△一带中含水饱和度；\*—一对跃变接触的侵入剖面（即无过渡带或环带）， $d_i = d_j$

在这样复杂的地质情况下，测量电位差 $\Delta U_{MN}$ 虽然主要仍受地层真电阻率 $R_t$ 的影响，但它们之间的数学关系式，一般是无法求得的。比较公式(1-2)和(1-4)可以看出，它们在数学形式上是一样的，只是K值不同。这说明此种数学形式反映了普通电阻率测井中某种带有规律性的东西。因此，我们在一般情况下，仍然借用公式(1-4)算出一个电阻率，称为地层的视电阻率 $R_s$ ，计算公式如下：

$$R_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-5)$$

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

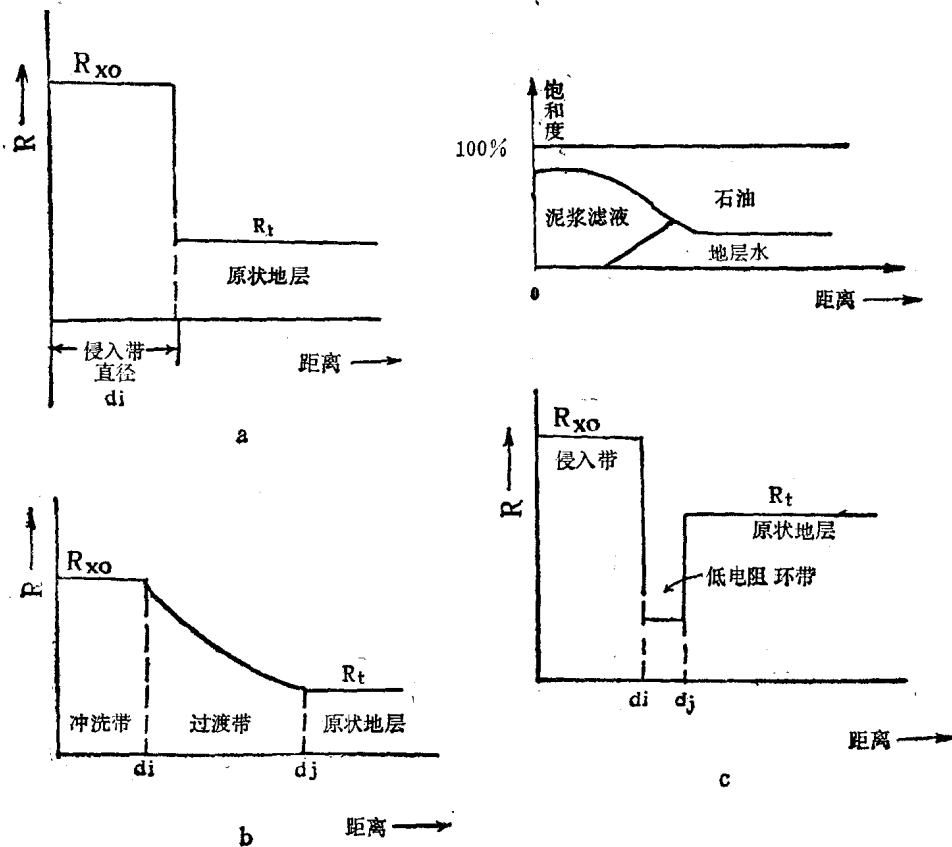


图 1—6 三种泥浆高侵剖面  
a—台阶型；b—过渡带型；c—低电阻环带型

在复杂地质情况下得到的地层视电阻率 $R_s$ ，不同于地层的真电阻率 $R_t$ ，但它们之间有一定的关系。一般，地层真电阻率越大，其视电阻率也越高，因而在井内测量的视电阻率曲线能反映井剖面的地层电阻率的相对变化，可以用来研究井剖面的地质情况。

### 三、视电阻率曲线的分析和电极系探测范围的概念

当电极系由井底向井口移动时，地面测井记录仪器使用公式(1-5)记录出一条随井的深度连续变化的视电阻率曲线。

什么叫梯度电极系和电位电极系？这是按成对电极和不成对电极（单电极）的相对位置及电极间的距离，对电极系进行的分类。如图1—7，如果不成对电极到其相邻的成对电极之间的距离（如 $\overline{AM}$ 或 $\overline{MA}$ ）远大于成对电极之间的距离（如 $\overline{MN}$ 或 $\overline{AB}$ ），这种电极系称为梯度电极系。成对电极之间的中点O，称为梯度电极系的记录点，即梯度电极系所测量的视电阻率算作O点所对井深的视电阻率。不成对电极到记录点O的距离(米)。（如 $\overline{AO}$ ）

或 $\overline{MO}$ ), 称为梯度电极系的电极距, 用 $L$ 或 $\overline{AO}$ 表示。电极距和记录点是电极系的重要参数。

如果不成对电极到与其相邻的成对电极之间的距离(如图1—8的 $\overline{AM}$ 或 $\overline{MA}$ )远小于成对电极之间的距离( $\overline{MN}$ 或 $\overline{AB}$ ), 这种电极系称为电位电极系, 不成对电极到与其相邻的成对电极之间的距离(米), 称为电位电极的电极距, 用 $L$ 或 $\overline{AM}$ 表示。 $\overline{AM}$ 的中点 $O$ , 称为电位电极系的记录点, 即电位电极系测量的视电阻率算作 $O$ 点所对井深的视电阻率。

为了进行理论分析和计算, 还必须引入理想电极系的概念。所谓理想梯度电极系, 是假定成对电极之间的距离 $\overline{MN}$ 趋近于零的电极系, 即认为 $\overline{AM} = \overline{AN} = \overline{AO}$ 。所谓理想的电位电极系是假设成对电极之间的距离无穷大的电极系。实际上, 这两种电极系不可能用于生产, 但只要梯度电极系的 $\overline{MN}/L \leq 0.2 \sim 0.5$ , 电位电极系的 $\overline{MN}/L \geq 9$ , 即可以认为是理想的电极系。

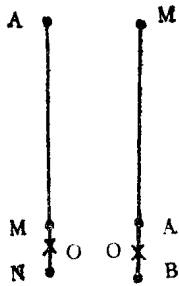


图 1—7 梯度电极系

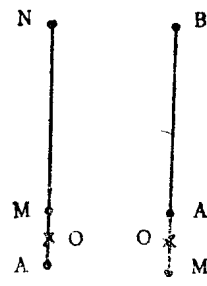


图 1—8 电位电极系

由公式(1-4)得理想的梯度电极系的视电阻率公式如下:

$$R_s = 4\pi \frac{\overline{AMAN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = 4\pi \frac{\overline{AO}^2}{I} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{\overline{MN}}$$

式中,  $\frac{\Delta U_{MN}}{\overline{MN}}$ 表示沿垂直等位面的方向, 每单位长度上电位的变化, 称为电位梯度。由于 $R_s$ 与电位梯度成正比, 梯度电极系就由此得名。由物理学可知, 当 $\overline{MN} \rightarrow 0$ 时, 电位梯度 $\frac{\Delta U_{MN}}{\overline{MN}}$ 在数值上等于记录点 $O$ 的电场强度 $E$ 。因此, 理想梯度电极系的视电阻率公式为

$$R_s = 4\pi \overline{AO}^2 \frac{E}{I} \quad (1-6)$$

根据微分形式的欧姆定律,  $O$ 点的电场强度 $E$ 在数值上等于 $O$ 点的电流密度 $j_o$ 与该点的介质电阻率 $R_o$ 的乘积, 即

$$E = j_o \cdot R_o$$

代入上式, 理想梯度电极系的电阻率公式变为

$$R_s = 4\pi \overline{AO}^2 \frac{j_o R_o}{I} = \frac{j_o R_o}{4\pi \overline{AO}^2}$$

式中,  $\frac{I}{4\pi \overline{AO}^2}$ 表示均匀介质中 $O$ 点的电流密度, 以 $j_o$ 表示, 上式变为

$$R_a = R_o \frac{j_o}{j_{a0}} \quad (1-7)$$

上式表明，理想梯度电极系的视电阻率 $R_a$ 与其记录点O处的电阻率 $R_o$ 和电流密度 $j_o$ 成正比，而与均匀介质在O点的电流密度 $j_{a0}$ 成反比。对一定的电极系， $\overline{AO}$ 是一定的， $j_{a0}$ 是一个常数。当电极系在井内的位置一定时， $R_o$ 便是确定的，也容易知道，而 $j_o$ 则依电极系与地层的相对位置而定，变化比较复杂，是使视电阻率曲线变化复杂的基本因素。因此，要分析视电阻率曲线变化的规律，主要是分析由电极系与地层的相对位置决定的记录点O处电流密度 $j_o$ 变化的规律（与 $j_{a0}$ 比较）。

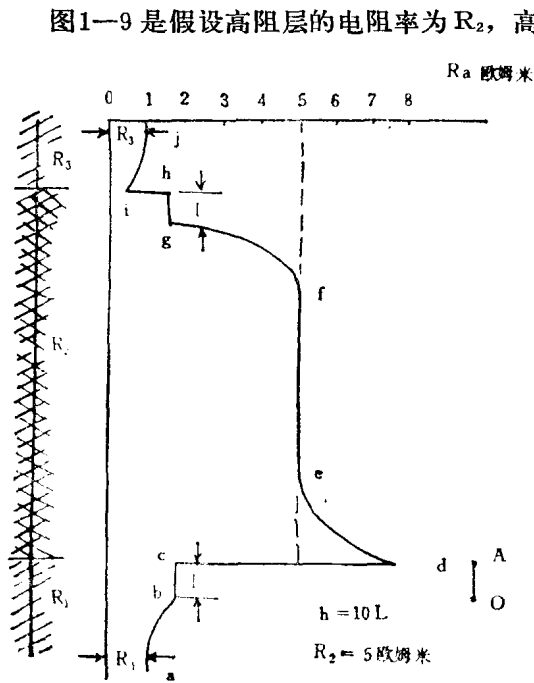


图 1-9 理想梯度电极系的视电阻率曲线（厚层）  
图中hg与cb的距离为L

为 $R_1$ ，上围岩的电阻率为 $R_3$ ，上下围岩的厚度充分大，没有井的存在，经过严格的理论计算得出的理想底部梯度电极系的视电阻率曲线。

为了应用公式(1-7)来分析曲线变化的规律，还需要知道电极系探测范围的概念。所谓电极系的探测范围，是指电极系的测量结果主要是受那个范围电阻率分布状况的影响。一般把电极系的探测范围理解为一个假想的球体，球心位于单电极所在的位置。球的半径大小，称为探测半径，通常讲探测范围也就是指探测半径的大小。有人认为，当这个球体单独存在对测量结果的影响占整个测量结果的50%时，就规定这个球体的大小是电极系的探测范围。以均匀介质为例进行计算，梯度电极系的探测半径大约是一个电极距，电位电极系的探测半径大约是二个电极距。

生产实践说明，关于电极系探测范围的这种规定，虽然是很粗略的，但对于分析实际问题，特别是分析邻层屏蔽影响时，基本上还是可行的。但电极系的探测范围也不可能是一成不变的东西，它的大小与电极系周围介质电阻率的大小，特别是与不同介质的分布状况很有关系，这可能是某些生产实际问题不易从理论上加以充分说明的一个原因。

下面，我们应用公式(1-7)分析一下图1-9所示理想梯度电极系视电阻率曲线形状变化的特点。

当理想底部梯度电极系的记录点还在a点以下时，单电极离高阻层的底界面还比较远，高阻层还在电极系的探测范围之外，相当于电极系处在电阻率为 $R_1$ 的均匀介质中，这时

$$j_o = j_{a0}, R_a = R_1 \frac{j_o}{j_{a0}} = R_1$$

当记录点移到a点以上时，由于高阻层开始进入电极系的探测范围，高阻层使电极A发



出的电流向上流动的减少，而向下流动的增多，即使O点的电流密度增加，使  $j_o > j_{均}$ ，故  $R_a = R_1 \frac{j_o}{j_{均}} > R_1$ 。因此，a点以后， $R_a$  曲线逐渐升高，当电极A' 到达高阻层底界面时，曲线升至b点。

记录点过了b点，电极A 进入高阻层，而记录点还在下围岩中。此时，由于能够穿过地层底界面的电流大小是一定的，使  $j_o$  保持在b点的大小， $R_a$  也就保持在b点的数值，直至记录点移到高阻层底界面为止。此段(bc)  $R_a$  曲线与深度轴平行，其长度等于电极距。

记录点O 进入高阻层时，O点的电阻率由  $R_1$  突然变成  $R_2$ ， $R_a$  曲线则直线升高至d点。

电极系再往上移，逐渐离开下围岩低阻层时，由于低阻层对电流的分流作用逐渐减小，从而  $j_o$  减小，而  $R_o$  仍然是  $R_2$ 。故  $R_a$  曲线由d点下降，至下围岩超出电极系的探测范围时，相当于电极系处在  $R_2$  的均匀介质中，即  $R_a = R_2$ ，曲线变到e点。若高阻层厚度足够大， $R_a$  曲线会出现ef 直线段，相当于电极系在  $R_2$  均匀介质中，上下围岩没有影响。

记录点过了f点，由于上围岩低阻层开始进入电极系的探测范围，使电流向上流动增多，向下流动的相应减小，使  $j_o$  减少， $R_a$  曲线随之降低，直至g点。

从g点开始，A 电极开始进入上围岩。此时，与电极系在底界面时一样， $R_a$  曲线也出现直线段gh，其长度等于电极距。

过了h点，记录点开始进入上围岩， $R_a$  突然由  $R_2$  降为  $R_3$ ， $R_a$  曲线便直线下降至i点。此后，高阻层逐渐远离电极系，使流向高阻层方向的电流逐渐增加，即使  $j_o$  逐渐增加， $R_a$  曲线随之慢慢升高。记录点至j点时，高阻层已超出电极系的探测范围，电极系相当于处在  $R_3$  的均匀介质中， $R_a = R_3$ 。

以上讲的是地层厚度足够大，在地层中部有段  $R_a = R_2$  的直线段(ef)。具有这样厚度的地层称为厚层。图1—10 绘出高阻中厚层和高阻薄层的理想梯度电极系视电阻率曲线。高阻薄层是指地层厚度比较小， $R_a$  曲线在高阻层上变化很快，整个曲线像一个尖峰（如图中  $h = 2L$  和  $h < L$  的地层）。高阻中厚层是指地层厚度比较大， $R_a$  曲线在地层中部虽不出现厚层中部那样的直线段，但变化比较缓慢，不像薄层那样急剧降低（如图中  $h = 5L$  的地层）。由图可见，对于  $h > L$  的中厚层和薄层，视电阻率曲线的形状虽不像厚层那样完整，但除在地层中部差别较大外，曲线其他部分基本相同；而当薄层的厚度  $h < L$  时，在高阻层的下方（成对电极一方）出现一个假极大，假极大值距离高阻层的底界面一个电极距。假极大点b 相当于厚层曲线的b点。下降的bc段，是因为高阻层太薄，当电极A 过了底界面时，上围岩的影响马上显示出来，使  $j_o$  减小， $R_a$  降低。直线段cd是由于电极A 和记录点分居高阻层两侧，电极A 的电流能够穿过高阻层部分保持大小不变。

图1—9和图1—10的各种视电阻率曲线都证明，底部梯度电极系视电阻率曲线的极大值确定高阻层的底界面，其极小值确定高阻层的顶界面。显然，顶部梯度电极系曲线与此相反。这就是应用梯度电极系曲线划分地层界面的依据。但实际测井用的梯度电极系并非理想的，我国使用的短电极系  $\overline{MN} = 0.1$  米，长电极系  $\overline{MN} = 0.5$  米。理论计算和实践都证明， $\overline{MN}$  增大时，视电阻率曲线极大值减小，极大值和极小值均离开地层界面向单电极一方移动  $\frac{\overline{MN}}{2}$  的距离。因此，一般只用短电极系的  $R_a$  曲线系分层。因为短电极系的  $\overline{MN} = 0.1$  米， $\frac{\overline{MN}}{2} = 0.05$  米，分层时可以不考虑  $\overline{MN} \neq 0$  的影响。