



SHIYOU

中等专业学校教学用书

石油测井

郝金泽 刘国范 主编

石油工业出版社

石油测井

郝金泽 刘国范 主编

682/112

石油工业出版社



10625

内 容 提 要

本书着重介绍了石油测井中常用的电法测井、声波测井、放射性测井及其它辅助测井的原理、测井资料的定性解释及测井资料的应用,对油矿地质的部分内容也有介绍。

本书除作为中等专业学校石油开采及有关专业的教科书外,也可作为与测井资料有关的技术人员的参考书。

石 油 测 井

郝金泽 刘国范 主编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 11³/₄印张 1插页 281千字 印1—4,000

1990年7月北京第1版 1990年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0350-3/TE·340(课)

定价: 2.20元

前 言

本书是根据石油天然气总公司人教部（原石油部教育司）1986年11月制定的中等专业学校石油开采专业“石油测井（原定各采油地质）教学大纲”编写的。它是该专业的一门专业课程。主要包括：常用的各种测井方法的原理及应用；钻采地质资料的收集、整理及图表介绍；油层对比及储量计算等。

本书由大庆石油学校负责编写，郝金泽、刘国范任主编。郝金泽编写第一、二、十二、十三章，何志平编写第三、四、五、六章，刘国范编写第七、八、九、十、十一章。

全书由大庆石油学院李占斌副教授主审。张守谦、张淑梅、李茂林副教授参加了审阅和指导，梅曦同志帮助绘制了全部插图，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平所限，参加实践不足，在教材中一定有不少缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

第一章 普通电阻率测井	(1)
第一节 岩石电阻率	(1)
第二节 视电阻率及其测量	(8)
第三节 视电阻率曲线的分析	(14)
第四节 视电阻率曲线的影响因素	(19)
第五节 横向测井	(23)
第六节 微电极测井	(24)
第七节 标准测井	(27)
第二章 自然电位测井	(31)
第一节 井内自然电位产生的原因	(31)
第二节 井内自然电位曲线形状	(33)
第三节 影响渗透层自然电位曲线的主要因素	(35)
第四节 自然电位曲线的应用	(37)
第三章 侧向测井	(42)
第一节 三电极侧向测井	(42)
第二节 七电极侧向测井	(46)
第三节 微侧向测井	(48)
第四章 感应测井	(51)
第一节 感应测井的原理	(51)
第二节 感应测井线圈系的特性	(52)
第三节 感应测井曲线	(56)
第四节 感应测井曲线的应用	(58)
第五章 辅助测井	(62)
第一节 井径测井	(62)
第二节 井斜测井	(63)
第三节 井温测井	(65)
第四节 套管接箍测井	(67)
第五节 泥浆电阻率测井	(68)
第六章 声波测井	(70)
第一节 岩石的声学性质	(70)
第二节 声波速度测井	(71)
第三节 声波幅度测井	(78)
第四节 其它声波测井	(80)
第七章 放射性测井	(84)
第一节 放射性测井基础知识	(84)

第二节	自然伽马测井	(87)
第三节	放射性同位素测井	(90)
第四节	密度测井	(91)
第五节	中子测井	(93)
第八章	生产测井	(101)
第一节	生产测井方法	(101)
第二节	综合测试仪	(101)
第三节	利用测井资料判断水淹层	(104)
第四节	TCW-2磁测井仪测井	(107)
第九章	测井资料的综合解释	(110)
第一节	综合解释的预备知识	(110)
第二节	砂泥岩剖面测井资料的综合解释	(113)
第三节	其它岩性剖面测井资料的综合解释	(120)
第四节	地层参数的计算	(123)
第十章	测井资料的地质分析	(127)
第一节	测井资料在沉积环境分析中的应用	(127)
第二节	地下构造研究中测井资料的应用	(130)
第十一章	钻采地质资料的收集	(136)
第一节	钻井过程中地质资料的收集和整理	(136)
第二节	完井电测、井壁取心	(144)
第三节	完井地质成果图	(144)
第四节	试油试采地质资料	(148)
第十二章	油层对比	(150)
第一节	碎屑岩油层对比	(150)
第二节	碎屑岩油层对比成果图的编制	(159)
第三节	碳酸盐岩油层对比	(164)
第十三章	石油及天然气储量计算	(169)
第一节	储量及其分级	(169)
第二节	储量的计算方法	(171)
第三节	天然气储量计算	(178)
参考文献		(180)

第一章 普通电阻率测井

普通电阻率测井是以研究岩石导电能力为基础的测井方法。它是一种应用最广，且井下装置与测量技术都较为简单的测井方法。其方法是利用一种称为“电极系”的装置，在井内造成人工电场，通过测量电场中电位变化的办法来进行地层电阻率的测定。由于测量是在井内进行的，显然，测量结果要受到井径、井内泥浆和上下围岩电阻率等因素的影响。因此，所测得的电阻率不是地层的真电阻率，而被称为视电阻率。视电阻率值与地层真电阻率值有一定差别，所以这种测井方法又称为视电阻率测井。

岩石的电阻率与岩石的岩性、储油物性和含油性有密切关系。因此，普通电阻率测井测得的岩石电阻率可以用于判断地层的岩性，划分油、气、水层，研究储集层的孔隙性、渗透性和含油性。

第一节 岩石电阻率

各种岩石都具有不同程度的导电能力，岩石导电能力的大小可用电阻率表示。

由物理学知道，导体的电阻 r 与其长度 L 成正比，与横截面积 S 成反比，即

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

式中 R 为比例系数，仅与导体的材料性质有关，而与导体的几何形状无关，称为电阻率，单位为欧姆·米（ $\Omega \cdot m$ ）。

由1—1式可以看出：导体的电阻 r 不仅与导体材料有关，还与导体的长度、横截面积有关。因此，从研究导体性质的角度看，测量电阻 r 这个物理量显然是不行的。因为相同材料的导体，形状不同电阻值也不同，特别是测井中遇到的地层厚度变化很大，即使是相同岩性的地层，由于地层厚度和分布不同，测出的电阻值也不相同。因此，在电阻率测井中，不是测量地层电阻的大小，而是测量仅反映岩石性质的电阻率。

由1—1式可以知道：岩石电阻率 R 的数值等于横截面积为1平方米，长度为1米的单位体积岩石的电阻值。

一、岩石电阻率与岩性的关系

由于各类岩石的成因不同，其导电方式也不相同。大部分岩浆岩、变质岩非常致密、坚硬，且不含地层水，其导电主要靠组成岩石的造岩矿物中极少数自由电子导电，所以电阻率一般都较高。如果岩石中含较多的具有自由电子的金属矿物，则这种岩石的导电性能就好，其电阻率就低。这种依靠自由电子的导电方式，称为电子导电。

沉积岩与岩浆岩和变质岩不同，它们常具有一定的孔隙和裂缝，且孔隙与裂缝中都含有一定数量的地层水。地层水中含有 $NaCl$ 、 $CaCl_2$ 、 $MgSO_4$ 等盐类，这些盐类在水中离解为正离子 Na^+ 、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 等及负离子 Cl^- 、 SO_4^{--} 等，这些离子在外加电场的作用下定向运动而形成电流，这种依靠离子导电的方式称为离子导电。由于沉积岩主要是依靠离子导电，其导电性能较好，所以其电阻率较低。

表1-1列出了一些主要岩石、矿物的电阻率。

表1-1 主要岩石矿物的电阻率

名 称	电阻率, $\Omega \cdot m$	名 称	电阻率, $\Omega \cdot m$
粘 土	1 ~ 200	硬 石 膏	$10^4 \sim 10^8$
泥 岩	5 ~ 60	石 英	$10^{12} \sim 10^{14}$
页 岩	10 ~ 100	白 云 母	4×10^{11}
疏松砂岩	2 ~ 50	长 石	4×10^{11}
致密砂岩	20 ~ 1000	石 油	$10^3 \sim 10^{16}$
含油气砂岩	2 ~ 1000	方 解 石	$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^{12}$
贝壳石灰岩	20 ~ 2000	石 墨	$10^{-8} \sim 3 \times 10^{-4}$
石 灰 岩	50 ~ 5000	磁 铁 矿	$10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$
白 云 岩	50 ~ 5000	黄 铁 矿	10^{-4}
玄 武 岩	500 ~ 10^5	黄 铜 矿	10^{-3}
花 岗 岩	500 ~ 10^5		

从表1-1中可见,不同岩石、矿物的电阻率不相同,而且电阻率变化范围很大。除金属矿物电阻率较低外,主要造岩矿物(石英、长石、云母)电阻率都很高,石油的电阻率也很高,几乎是不导电的。沉积岩的电阻率明显地低于岩浆岩和变质岩的电阻率。

由于世界上所发现的油气田主要都是在沉积岩内,所以沉积岩电阻率变化规律是石油测井的主要研究对象。

二、电阻率与地层水的关系

由于组成沉积岩的造岩矿物大多数是不导电的,所以,沉积岩主要是依靠所含地层水导电。纯水是不导电的,但储存于岩石孔隙、裂缝中的地层水由于溶解了盐类,所以是可以导电的。实验证明:岩石电阻率与地层水电阻率成正比,即地层水电阻率低,岩层电阻率也低;反之则高。而地层水电阻率大小取决于其中溶解盐类的化学成分、溶液的含盐浓度及地层水的温度。下面着重介绍这些因素对地层水电阻率的影响。

1. 地层水电阻率与盐类化学成分的关系

表1-2为地层水中常见盐类溶液在温度为18°C、浓度为10克/升时的电阻率。

表1-2 几种盐类溶液的电阻率($t=18^\circ C$)

盐 溶 液	NaCl	KCl	CaCO ₃	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
电阻率, $\Omega \cdot m$	0.55	0.7	0.47	0.95	1.4

不同的盐类具有不同的电离度,而离子又具有不同的离子价和迁移率,因而使得地层水电阻率也不相同。电离度大,离解的离子数多,导电性能好,地层电阻率就小;离子价高,离子带的电荷多,地层水电阻率亦小;离子迁移率大,运动速度快,地层水电阻率也小。反之,电离度小,离子价低,离子迁移率小,地层水电阻率就高。

在油气田的地层水中,虽然含有各种不同的盐类,但地层水中所含盐类主要是NaCl(约占70%~95%)。因此,一般情况下可以把地层水近似地看成是NaCl溶液,如果在地层水中含较多的其它盐类,则可把每一种离子的含量乘以适当的系数,将其转化为等效的NaCl含量,根据等效的NaCl含量求地层水电阻率。其转化系数换算图版如图1-1。

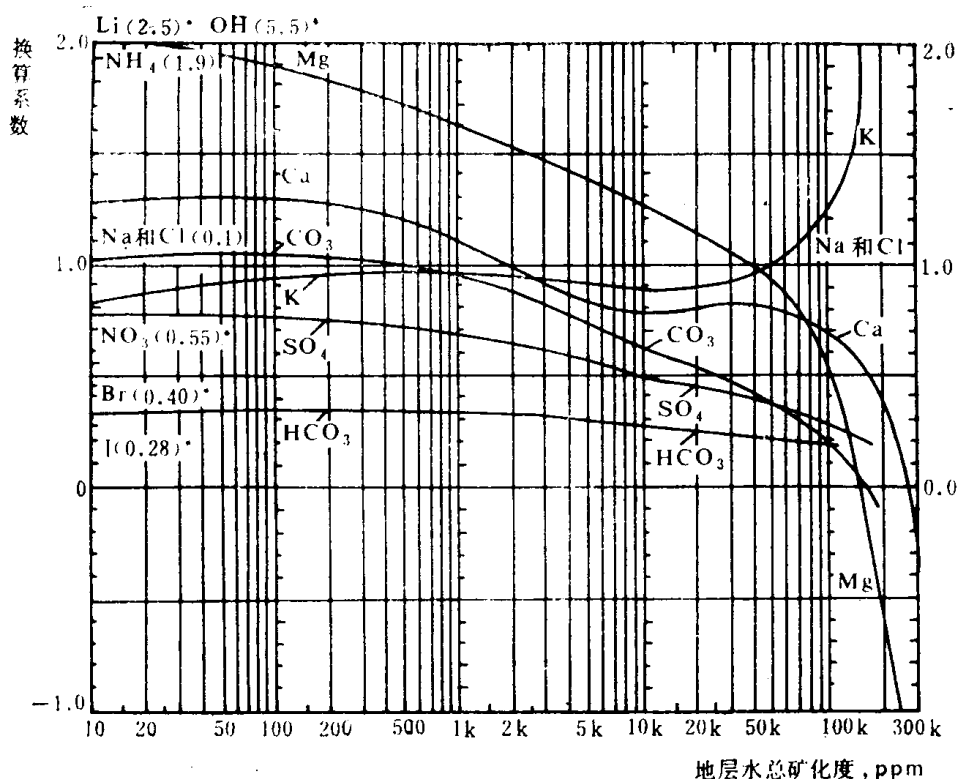


图1—1 求等效NaCl含量换算系数图版

图版的横坐标为地层水总矿化度（即含盐量），单位是ppm（即毫克/升，下同）。纵坐标表示各种离子的换算系数。求等效含盐量时，根据水样总矿化度，从图版的相应曲线上查出各种离子的换算系数，然后分别乘以每种离子的矿化度，把各种离子换算后的矿化度加起来，就得到等效的NaCl矿化度。

例如 某地层水水样的分析结果是： $\text{Ca}^{++}=460\text{ppm}$ ， $\text{SO}_4^{--}=1400\text{ppm}$ ， $\text{Na}^++\text{Cl}^-=19000\text{ppm}$ ，总矿化度为 $460+1400+19000=20860\text{ppm}$ 。

从图版横坐标20860处，查得Ca的系数为0.81， SO_4 的系数为0.45，用相应的系数乘以矿化度的数值，则求得等效NaCl矿化度

$$460 \times 0.81 + 1400 \times 0.45 + 19000 = 20000\text{ppm}$$

2. 地层水电阻率与溶液浓度的关系

地层水含盐浓度增加，使离子数增加，导电性增强，电阻率降低。当地层水浓度不是很大时，地层水电阻率与含盐浓度成反比。如果浓度很高（大于70000ppm），则破坏了这种关系。其原因是由于浓度太大，离子间相互作用力增加，使离子迁移率减小，地层水电阻率反而增大。

3. 地层水电阻率与温度的关系

温度升高，使盐类的溶解度增大，也使离子的迁移率增大，溶液的导电性增强，使地层水电阻率降低。图1—2为NaCl溶液电阻率与浓度及温度之间的关系。

如果知道NaCl溶液的浓度和温度，就可以根据图1—2确定其电阻率。

例如 NaCl溶液矿化度为25000ppm，求79°C时电阻率。从图上找到矿化度为25000ppm的点，由该点沿斜线往下与温度为79°C的水平线相交，交点的横坐标即是79°C时矿化度为

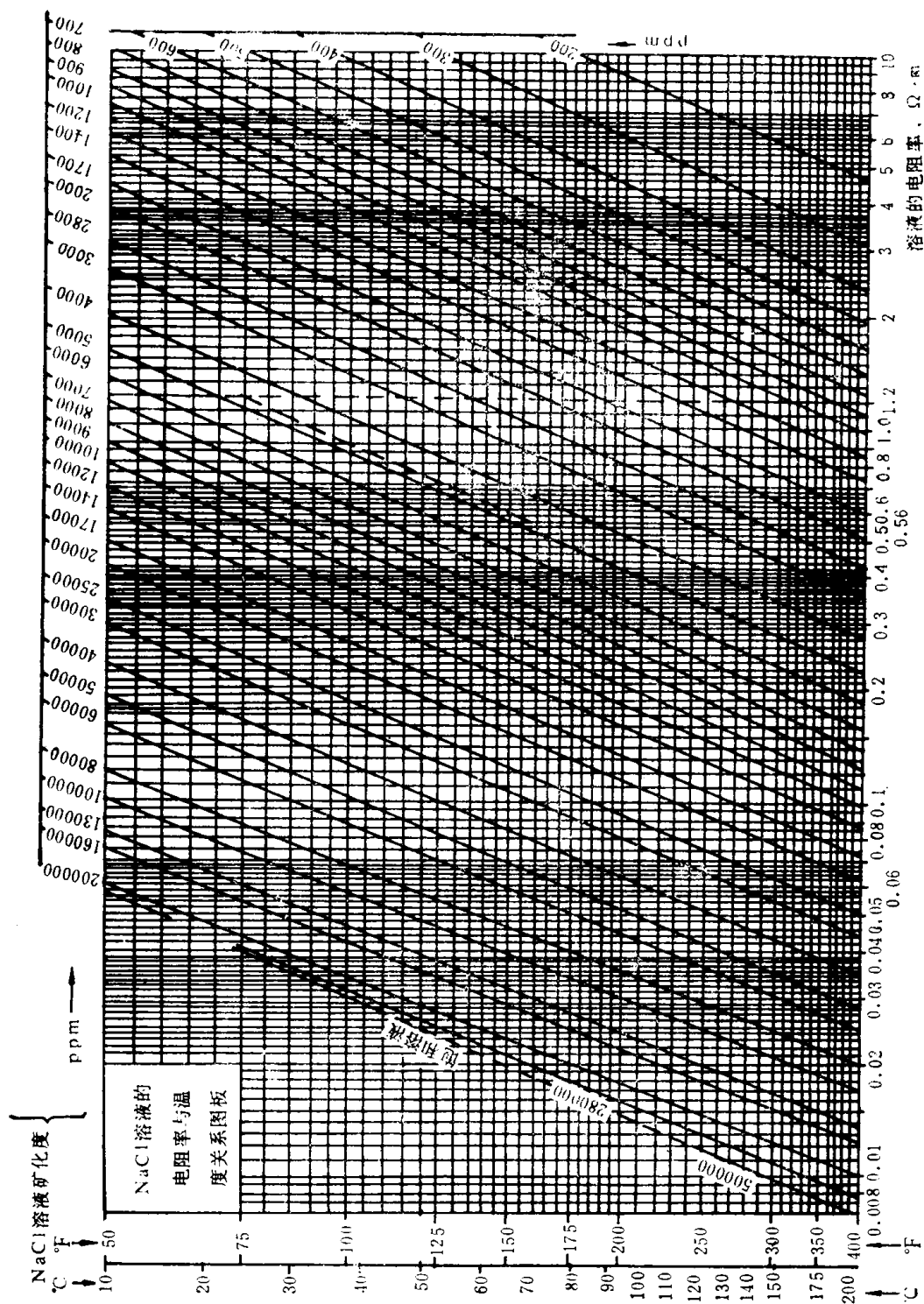


图1--2 NaCl溶液电阻率与矿化度和温度关系

25000ppm的NaCl溶液的电阻率，数值为0.11欧姆·米。

测井时需在井口测量泥浆电阻率，并根据当时的测量温度和电阻率用上述图版换算成18°C时电阻率，填在测井记录原图上。而在进行测井资料解释时，又常要求知道地层温度下的泥浆电阻率，这时可根据当地的地温曲线，求目的层的温度，也可以由当地地温梯度和地表平均温度，利用图1—3估算目的层温度。

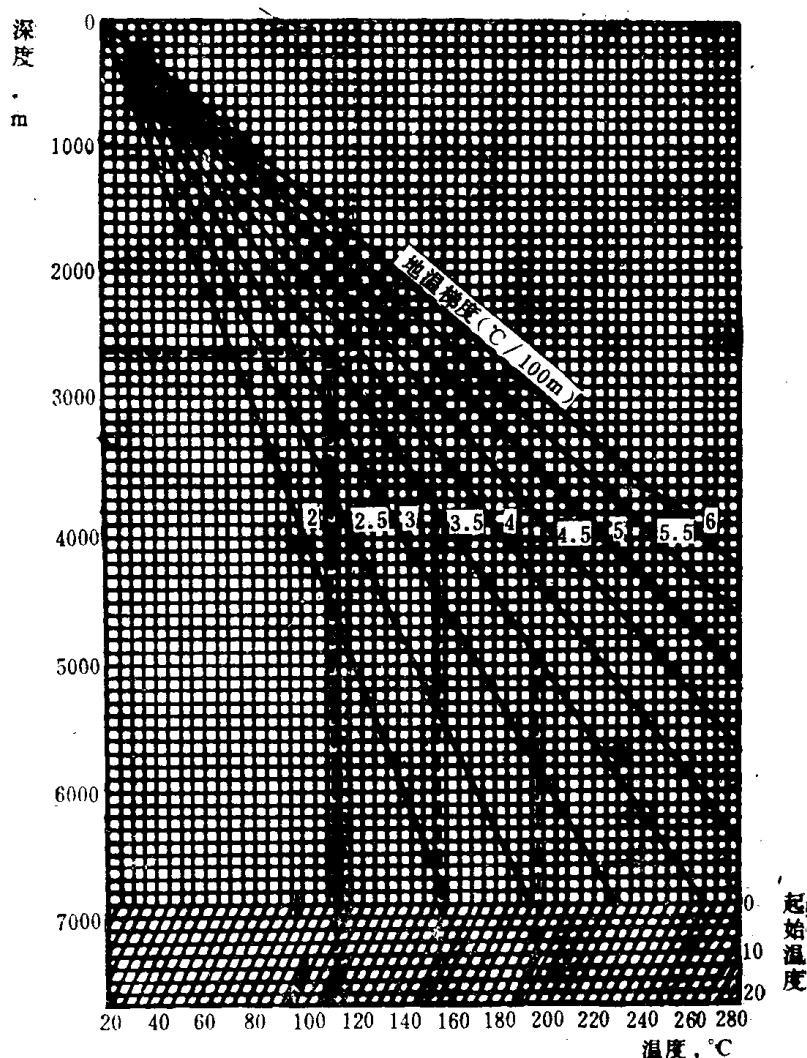


图1—3 估算地层温度图版

例如 某地平均地表温度（起始温度） $t_0=15^{\circ}\text{C}$ ，地温梯度 $K=3.5^{\circ}\text{C}/100$ 米，试确定井深 L 为2650米处的温度 t 。

(1) 计算法

$$t=t_0+KL=15+3.5/100\times 2650=108^{\circ}\text{C}$$

(2) 图版法

在图1—3的纵轴上从深度为2650米的点引平行横轴的直线与地温梯度为3.5的直线相交，过交点引平行于纵轴的直线，与起始温度为 15°C 的直线相交，再过交点沿斜线与横轴相交，即可确定井深为2650米处温度为 108°C 。

当给定井深的地层温度确定后，利用图1—2即可求出地层温度下的泥浆电阻率。

由于地层水的电阻率与温度有关，所以提到电阻率时必须给定其温度。在进行比较时，一般都将任意温度下的地层水电阻率换算成 18°C 时的值。在进行换算时，除利用图1—2外，

还可以用以下公式计算

$$R_{wt} = \frac{R_{w18^\circ}}{1 + \alpha_t (t - 18^\circ)} = R_{w18^\circ} P_t \quad (1-2)$$

式中 $P_t = \frac{1}{1 + \alpha_t (t - 18^\circ)}$ ，表示电阻率随温度变化的系数；

R_{w18° ——在 18°C 时地层水溶液的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

R_{wt} ——在 $t^\circ\text{C}$ 时地层水溶液的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

α_t ——温度系数的平均值，常取0.02。

根据以上讨论可以看出：地层水溶液电阻率与含盐浓度成反比，且随温度增加而降低，温度升高 1°C ，地层水电阻率降低约2%，不同盐类的地层水电阻率不同。由于岩石电阻率与地层水电阻率成正比，所以岩石电阻率与岩石孔隙中所含地层水溶液的性质、矿化度及温度之间的关系，相当于地层水电阻率与溶液的成分、矿化度及温度之间的关系。也就是说岩石电阻率与地层水的矿化度、温度间存在着反比关系。

三、岩石电阻率与孔隙度及孔隙结构的关系

当岩石孔隙中不含油、气，其孔隙全部被一定电阻率的地层水所占据时，岩石孔隙度越大，则地层水含量越多，其电阻率值越低。但是，有时岩石孔隙度相同，所含的地层水电阻率也相同，其岩石电阻率却有差别。这是由于岩石孔隙结构复杂程度不同所造成的，孔隙结构复杂的岩石，其孔隙间连通性差，孔隙的弯曲和截面变化程度大，因此，离子运动距离拉长且遇到阻力增大，相当于离子迁移率降低，则岩石电阻率增大。如果岩石孔隙结构简单，则岩石电阻率降低。

通过大量实验分析资料表明，对给定的岩样，孔隙空间全部被地层水充满时所测得岩石电阻率 R_o 与所含水溶液电阻率 R_w 之间有正比的关系，即

$$R_o = F R_w$$

可写成
$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (1-3)$$

F 为比例常数，当岩性不变时，即使 R_w 改变， F 值仍为常数，这表明 F 与水溶液电阻率无关。如果改变岩样时， F 值就要发生变化。可见 F 值只与岩石本身性质有关，把它称为地层因素或相对电阻。

实验证明：地层因素 F 是孔隙度的函数，与孔隙形状有关。当岩石孔隙形状相同时，孔隙度大， F 就小；孔隙度小， F 就大。当岩石孔隙度相同时，孔隙形状复杂时 F 就大，孔隙形状简单时 F 就小。

在双对数坐标中，如果纵坐标表示地层因素 F ，横坐标表示孔隙度 ϕ ， F 与 ϕ 近似成直线关系，可将其关系写成下式

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{\alpha}{\phi^m} \quad (1-4)$$

式中 R_o ——孔隙中充满地层水时的岩石电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

R_w ——地层水电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

α ——岩石系数，不同岩性有不同数值（见表1-3）；

m ——胶结指数，随岩石胶结程度变化；

ϕ ——岩石有效孔隙度，用百分数表示。

表1-3 不同岩石的 a 、 m 值

岩石 项目 \ 数值	疏松砂岩	弱胶结砂岩	中等胶结砂岩	疏松的贝壳石灰岩及白云岩	中等致密的粗晶质石灰岩及白云岩	致密细晶质的石灰岩及白云岩
a	1	0.7	0.5	0.55	0.6	0.8
m	1.3	1.9	2.2	1.85	2.15	2.3

图1—4是我国一些油田的 F 与 ϕ 关系曲线综合图。

从图1—4可见，在双对数坐标系中，这些关系曲线为直线。与这些直线对应的方程为

$$\text{大庆油田（中等胶结砂岩）} \quad F = \frac{0.57}{\phi^{2.15}}$$

$$\text{江汉油田（潜三段砂岩）} \quad F = \frac{0.824}{\phi^{1.346}}$$

$$\text{大港油田（上第三系砂岩）} \quad F = \frac{0.93}{\phi^{1.64}}$$

例如 大庆油田某井含水砂岩电阻率为8.1欧姆·米，该层地层水电阻率为0.9欧姆·米，求该层孔隙度。

$$1) \quad F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{8.1}{0.9} = 9 \Omega \cdot \text{m}$$

$$F = \frac{0.57}{\phi^{2.15}}$$

$$\lg F = \lg 0.57 - 2.15 \lg \phi$$

$$\lg \phi = \frac{\lg 0.57 - \lg 9}{2.15}$$

$$\phi = 0.276 = 27.6\%$$

2) 查图1—4曲线，得 $\phi = 28\%$

四、岩石电阻率与含油饱和度的关系

石油、天然气电阻率很高，可以认为是不导电的。但实际油气层仍具有导电性，其电阻率随油气层中含油气饱和度和含水饱和度的不同而变化。如果岩石含油饱和度较低（ $<40\%$ ），则孔隙中水占优势，油被水包围，此时虽有不导电的石油存在，但其电阻率与该岩石完全含水时的电阻率相比没有显著增高。如果含油饱和度增高（ $>70\%$ ），这时孔隙中的水被不导电的油分隔开，导电路径加长，则电阻率明显增高。含油饱和度越大，其电阻率增高越显著。由于岩石颗粒表面对水的吸附作用，即使含油饱和度再高，岩石电阻率总是受地层束缚水的影响，使其电阻率不能无限增大。

在油气层中，含油饱和度 S_o 与含水饱和度 S_w 的关系为 $S_o + S_w = 1$ 。实验证明，含油气层的电阻率 R_i 大于该岩层孔隙饱含水时电阻率 R_o ，并且含油饱和度越高， R_i 比 R_o 大得越多，即 R_i/R_o 的比值越大。因此， R_i/R_o 反映了含油气层含油饱和度的大小，称为电阻增大系数，用 I 表示。

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b}{S_w^n} = \frac{b}{(1-S_o)^n} \quad (1-5)$$

式中 I ——电阻增大系数；

R_t ——含油岩石电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

R_o ——岩石完全含水时电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

S_w ——含水饱和度， $\%$ ；

S_o ——含油饱和度， $\%$ ；

b ——岩性系数；

n ——饱和度指数（与岩性有关）。

不同地区的 n 、 b 值不同，可用实验方法确定。图1—5是在双对数坐标中绘制的各油田 I 与 S_o 的关系曲线。根据曲线可以求得地层含油饱和度。

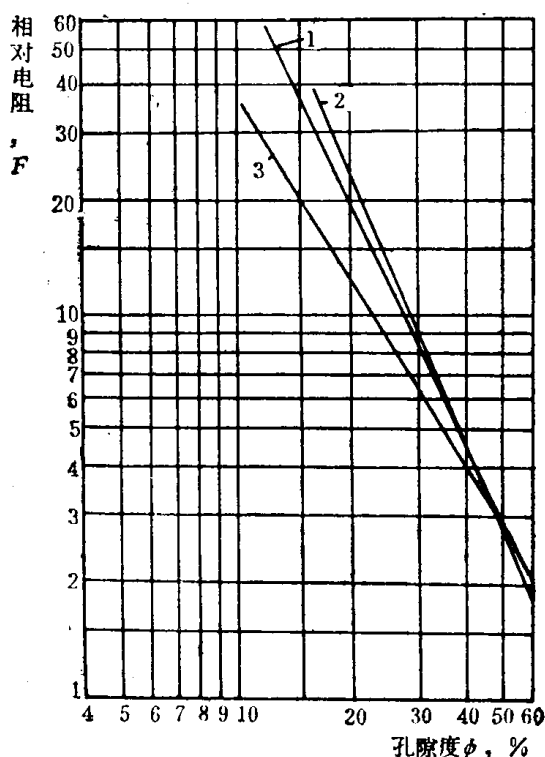


图1—4 我国一些油田的 F - ϕ 关系曲线

1—大庆油田；2—江汉油田；3—大港油田

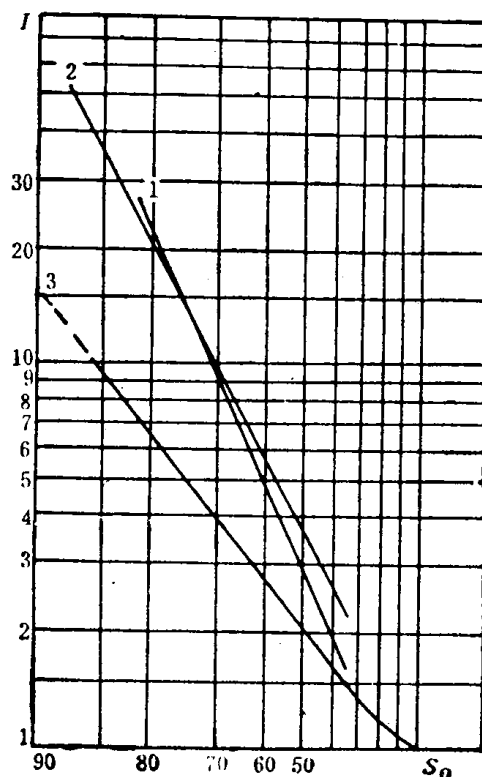


图1—5 我国某些油田的 I - S_o 关系曲线

1—大庆油田；2—江汉油田；3—大港油田

例如 大港油田某油气层电阻率为25欧姆米，该层完全被水饱和时电阻率为2.5欧姆米，求该层含油气饱和度。

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{25}{2.5} = 10$$

查图1—5，得

$$S_o = 86\%$$

第二节 视电阻率及其测量

普通电阻率测井是把一个电极系放入井内，测量井内电阻率变化曲线，用以研究井所钻

穿的地质剖面 and 油气水层。

一、均匀介质电阻率的测量

井下地层剖面岩性复杂，电阻率变化很大，测量比较困难。下面通过对岩样电阻率的测量来说明电阻率的测量原理。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 为

$$r = R_t \frac{L}{S}$$

如果已知导体的 L 和 S ，并能测定其电阻 r ，则电阻率 R_t 就可以计算出来。

图1—6为测量岩样电阻率的原理线路。

取一均匀圆柱状岩样，其横截面积为 S ，两边放金属极板A和B，做为给岩样供电的电极，称供电电极。在岩样上任取两点（距离为 L ）置金属环M及N，作为测量岩样上两点电位差的电极，称为测量电极。测量通过岩样的电流强度 I 和MN间的电位差 ΔV_{MN} ，则岩样MN间的电阻

$$r_{MN} = \frac{\Delta V_{MN}}{I}$$

将上式代入 $r = R_t \frac{L}{S}$ ，可得岩样电阻率

$$R_t = \frac{S}{L} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1-6)$$

式中， $K = \frac{S}{L}$ 。当岩样横截面积和测量电极位置一定时， K 为常数。

对不同的岩样，测量仪器可以自动调节，使 I 保持不变。这样，通过测量电位差 ΔV_{MN} 即可确定岩样的电阻率 R_t 。

从物理学中知道，在均匀介质中微分形式的欧姆定律为

$$\vec{E} = R \vec{j} \quad (1-7)$$

上式表明，在电阻率为 R 的介质中，任一点的电场强度 $\vec{E}$ 与该点的电流密度 $\vec{j}$ 成正比，电场强度的方向与电流密度方向一致。

假定在电阻率为 R 的无限均匀介质中，有一点电源A，其电流强度为 I ，向四周发出电流，如图1—7所示。

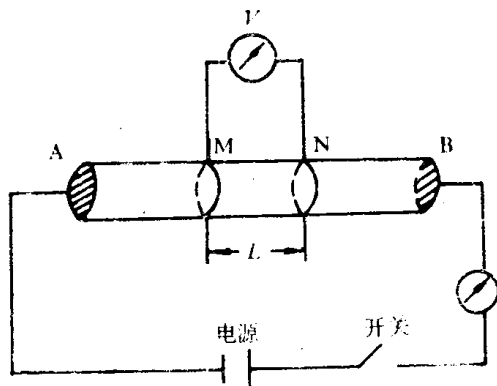


图1—6 岩样电阻率测量原理线路

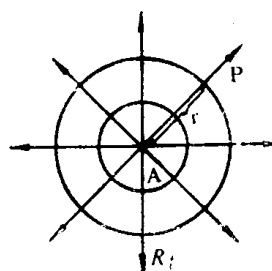


图1—7 均匀介质中点电源的电场分布

以A点为球心， r 为半径做一球（球面积为 $4\pi r^2$ ），则球面上任一点P处的电流密度为

$$j = \frac{I}{4\pi r^2}$$

代入1—7式得

$$E = Rj = \frac{RI}{4\pi r^2} \quad (1-8)$$

由电位和电场强度的关系可知

$$E = -\frac{dv}{dr}$$

所以

$$-\frac{dv}{dr} = \frac{RI}{4\pi r^2}$$

$$V = -\frac{IR}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{RI}{4\pi r} + C$$

根据物理学电位定义可知，当 $r \rightarrow \infty$ 时， $V \rightarrow 0$ ，则积分常数 $C = 0$ ，所以

$$V = \frac{IR}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1-9)$$

由上式可以确定点电源A形成的电场中任一点的电位，知道任一点的电位，就可以求出该点的电阻率 R_t 。

测量无限（体积相当大）均匀的导电介质的电阻率 R_t 的原理线路如图1—8所示。

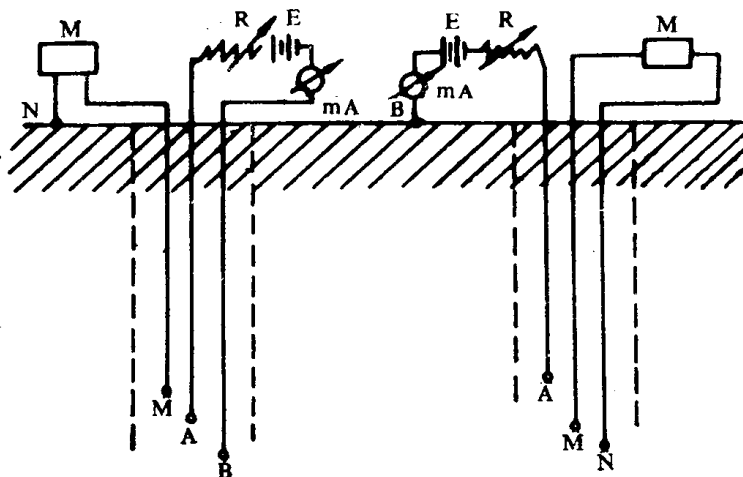


图1—8 普通电阻率测井测量原理路线

AB—供电电极；MN—测量电极；M—测量仪器；E—电源；R—调节电阻

把由供电电极A、B和测量电极M、N组成的电极系AMN或ABM放入井内，另一电极放在地面泥浆池中，从供电电极A流出的电流线是呈放射状均匀分布的，其等位面是以A为球心的任意球面。测量电极M、N之间的电位差 ΔV_{MN} ，可根据公式1—9先求出M和N点的电位 V_M 和 V_N

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

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

二者的电位差为

$$\begin{aligned}\Delta V_{MN} &= V_M - V_N = \frac{IR_t}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \\ &= \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN}\end{aligned}$$

$$\text{则} \quad R_t = \frac{4\pi \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1-10)$$

式中, K 为电极系数, 其大小仅决定于 $\overline{AM}$ 、 $\overline{AN}$ 、 $\overline{MN}$ 的大小。当电极系的几何尺寸固定以后, K 值为常数。

当选用电极系 ABM 时也可得到同样的结果。

上式表明, 均匀介质中的电阻率与测量电极系结构、供电电流的大小及测量的电位差有关。当电极系结构和供电电流大小一定时, 均匀介质的电阻率与电位差成正比。

二、非均匀介质电阻率的测量

上面的分析是假定电极系在整个空间的电阻率都为 R_t 的均匀介质条件下进行的。实际测井所遇到的情况要复杂得多, 从纵向上看钻井剖面的各地层的岩性是不同的, 即使是同一地层, 岩性也不是均质的。从横向上看, 井内充满泥浆。钻井时, 对于渗透层, 由于泥浆柱的压力高于地层压力, 使泥浆滤液向地层中渗透, 在渗透层靠近井壁的部分形成泥浆滤液侵入带, 并在井壁上形成泥饼。同时, 侵入带内泥浆滤液的分布也是不均匀的, 靠近井壁部分泥浆滤液几乎把孔隙中原有的液体全部赶走, 占据了整个孔隙空间, 形成泥浆冲洗带。离开井壁越远, 泥浆滤液逐渐减少。从冲洗带边缘到没有泥浆侵入的边缘, 这一带称为过渡带。冲洗带与过渡带统称侵入带, 如图1—9所示。

在这样复杂的情况下, 电流的分布显然也是很复杂的, 它受上述各种因素的影响, 所测得的电位差 ΔV_{MN} , 虽然主要仍是受地层电阻率 R_t 的影响, 但它是电极系周围各种介质对电场影响的综合结果。在这种条件下, 测量的电位差 ΔV_{MN} 除受地层电阻率 R_t 的影响外, 还要受泥浆电阻率 R_m 、围岩电阻率 R_s 、侵入带电阻率 R_i 和井径 d_k 、侵入带直径 D 、地层厚度 h 及电极系结构等因素的影响。因此, 根据井中实际测量的电位差 ΔV_{MN} 得到的电阻率与地层真电阻率有较大的差别, 我们把这种电阻率称为视电阻率, 用 R_o 表示

$$R_o = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1-11)$$

式中 K 为电极系数。

一般来讲, 地层的视电阻率 R_o 不同于地层的真电阻率 R_t 。但是, 只要选择适宜的电极系和测量条件, 可以使测得的视电阻率反映地层电阻率的变化。因此, 可以用视电阻率曲线来研究钻井剖面地层电阻率的相对变化。

三、电极系

电极系是将几个电极按一定顺序排列组成在一起的简单下井仪器。普通电阻率测量线路中, 一共有四个电极, 其中两个供电电极, 以 A、B 表示, 两个测量电极, 以 M、N 表示。由两个供电电极 A、B 和一个测量电极 M (或两个测量电极 M、N 和一个供电电极 A) 组成电极系 ABM (或 AMN)。另一电极 N (或 B) 为接地电极。在电极系的三个电极中, 属同一线路