



石油工业干部科技学习丛书

电法测井

尚作源 编

石油工业出版社

石油工业干部科技学习丛书

电 法 测 井

尚作源 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是《石油工业干部科技学习丛书》矿场地球物理测井专业的第一分册。内容共分五个部分：1. 介绍岩石的电阻率与岩石孔隙度、含油（气）饱和度的关系，说明电法测井资料解释的根本依据；2. 讨论普通电阻率法测井，即电位电极系、梯度电极系及微电极的测量原理及其资料的应用；3. 自然电位产生的原因，曲线的特点和应用；4. 介绍三侧向测井、七侧向测井以及双侧向测井的设计原理和应用；5. 介绍感应测井的原理及其应用。

石油工业干部科技学习丛书

电 法 测 井

尚作源编

石油工业出版社出版

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张1¹/₂字数22千字印数1—35,006

1979年9月北京第1版 1979年9月北京第1次印刷

书号15037·2114 定价0.13元

内 部 发 行

出版说明

为适应我国社会主义革命和社会主义建设新时期总任务的需要，遵照毛主席关于“要学新本领，要真正懂得业务，懂得科学和技术，不然就不可能领导好”的教导，积极响应华主席关于“极大地提高整个中华民族的科学文化水平”的号召，石油工业战线正在迅速掀起一个学习科学技术的热潮。

为了满足石油战线广大干部学习科学技术的需要，我们组织编写了《石油工业干部科技学习丛书》，作为石油工业干部学习石油科学技术的基本读物。丛书以华东石油学院为主负责编写，并由副院长朱亚傑教授担任主编。

丛书内容包括八个专业，即石油地质、石油地球物理勘探、矿场地球物理测井、钻井、油气田开发开采、石油天然气储运、石油炼制、海洋石油开发等。每个专业又分若干专题编写，分册出版，各专题既可独立成章又有科学上的联系。

丛书内容着重阐述石油科学技术的基础知识和现代科学技术动向，文字力求简明扼要，深入浅出，并

附有思考题。

编写这类丛书还是初步尝试，加之水平所限，时间仓促，不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正，以便修订完善。

石油工业出版社

一九七八年八月

目 录

一、岩石电阻率与孔隙度、含油（气）饱和度的关系	3
(一) 岩石电阻率的基本概念	3
(二) 岩石电阻率与地层水性质的关系	5
(三) 岩石电阻率与孔隙度的关系	6
(四) 岩石电阻率与含油饱和度的关系	9
二、普通电阻率测井	12
(一) 岩样电阻率的测量	12
(二) 普通电阻率测井原理	14
(三) 梯度电极系和电位电极系视电阻率曲线	16
(四) 横向测井	22
(五) 微电极测井	25
三、自然电位测井	28
四、侧向测井	31
(一) 三电极侧向测井	31
(二) 七电极侧向测井	33
(三) 微侧向测井	34
(四) 双侧向测井	35
五、感应测井	39
思考题	43

矿场地球物理测井（地球物理测井）是应用地球物理的一个分支，从二十年代建立以来，得到了迅速的发展，在石油工业、煤炭及矿产勘探中得到了广泛应用。

地球物理测井就是用专门的仪器沿井身测量地层的各种物理参数，并根据这些测量结果判明油气藏及其它有用矿产。

地球物理测井包括的方法很多，主要可分为以下几类：

电法测井——包括有直流电阻法测井、交流电阻法测井和自然电位测井，主要用来研究岩石的电阻率及自然极化，在油气田勘探和开发中有重要作用。

声波测井——主要研究岩石的声学性质，包括有声波速度测井、声波幅度测井及变密度测井。声波测井不仅可用来研究岩石的孔隙性，划分油气层，而且还用于检查水泥的胶结质量等。

放射性测井——包括自然伽马测井，中子伽马测井，中子测井，中子寿命测井，能谱测井，放射性同位素测井等。放射性测井的重要优点是能在套管中进行测量，因此在油田勘探和开发的整个过程中都可以

使用。

地层倾角测井——能够测量地层的产状要素。近年来，利用地层倾角测井并综合地质资料和其它测井资料，成功地研究了岩相古地理的变化，因而成为综合评价油气田的重要方法。

电法测井是地球物理测井的一种重要方法，根据电法测井测得的电阻率测井曲线和自然电位曲线，经过适当的解释工作，即可用来划分地层岩性，确定地层厚度，求出地层孔隙度、渗透率，计算含油气饱和度（或含水饱和度）判断含油气水层，为储量计算提供重要的依据。电法测井与其它测井方法互相配合，组成相应的测井系列，可解决油田勘探与开发中的一系列重要的地质和工程问题。例如，在油田范围内进行油层对比，研究地层岩性在纵向和横向上的变化，绘制各种等值图和构造图。也可在区域构造内进行大段对比，研究区域构造特性。电法测井与放射性测井、声波测井等进行综合应用，可部分或全部代替钻井取心，加快钻井速度，降低钻井成本。

下面先介绍岩石电阻率与岩石孔隙度，含油气饱和度的关系，然后对普通电阻率测井、自然电位测井、侧向测井和感应测井的原理和应用作一简略说明。

一、岩石电阻率与孔隙度、含油（气）饱和度的关系

（一）岩石电阻率的基本概念

根据实际测量结果发现，不同岩石导电能力不同。通常用电阻率 ρ 来表征物体的导电性能。对于组织均匀的导体来说，其电阻 R 与导体的长度 l 成正比，与导体的截面积 s 成反比（图1），可用下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

$$\rho = R \frac{s}{l} \quad (2)$$

式中 l ——导体长度（米）；

s ——导体的截面积（米²）；

ρ ——比例系数，称为电阻率，只与组成导体的材料和性质有关，而和导体的几何形状无关。

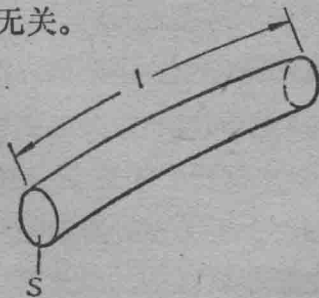


图1 导体示意图

由(2)式可以看出, 岩石电阻率 ρ^* , 相当于截面积为 1 米², 长度为 1 米的单位体积岩石的电阻, 它的单位是欧姆米。

从岩石的导电特点来看, 基本上可分为三类:

1. 离子导电岩石 这类岩石主要是通过岩石孔隙空间所含溶液的正、负离子导电。沉积岩属于这一类, 因此, 这类岩石的电阻率主要与孔隙所含溶液的成分、浓度及含量有关。

2. 电子导电的岩石 这类岩石主要由岩石颗粒本身的自由电子导电, 大部分火成岩属于这类岩石。因此当岩石中含金属矿物愈多时, 导电的自由电子愈多, 导电性好, 电阻率低。这类岩石的电阻率主要决定于金属矿物的含量。

3. 离子-电子导电岩石 这类岩石兼有电子导电和离子导电性。如沉积岩中含有黄铁矿、黄铜矿、无烟煤杂质时, 就属于这类岩石。

在石油勘探和开发中, 主要研究沉积岩。根据实验室测量的结果, 不同岩石, 其电阻率都有一定的变化范围(见下表)。沉积岩的造岩矿物石英, 长石电阻率很高, 基本上不导电。石油的电阻率也很高。一些金属矿物电阻率就很低。因此可以根据电法测井

* 以后电阻率全用 R 表示。

不同岩石的电阻率变化范围

岩石, 矿物名称	电阻率(欧姆米)	岩石, 矿物名称	电阻率(欧姆米)
粘土	$1 \sim 2 \times 10^2$	石英	$10^{12} \sim 10^{14}$
页岩	$10 \sim 10^3$	白云母	4×10^{11}
疏松砂岩	$2 \sim 50$	长石	4×10^{11}
致密砂岩	$20 \sim 10^3$	石油	$10^9 \sim 10^{16}$
贝壳石灰岩	$20 \sim 200$	石墨	$10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$
石灰岩	$600 \sim 6000$	磁铁矿	$10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$
白云岩	$50 \sim 6000$	黄铁矿	10^{-4}
花岗岩	$600 \sim 10^5$	黄铜矿	10^{-3}

资料并配合其它测井方法, 来划分地质剖面中的各种岩性, 找出含油(气)层, 也可用来勘探金属矿、煤等有用矿产。

(二) 岩石电阻率与地层水性质的关系

前面已经提到, 对于沉积岩来说, 其导电能力主要决定于孔隙空间所含溶液的导电能力。根据对地层水的研究表明, 不同化学成分的溶液, 即使浓度相同, 其电阻率也不一样, 因此溶液的电阻率与溶液的化学成分有关。另外, 根据对溶液电阻率的研究表明, 其电阻率与溶液浓度间有近似的反比关系, 即浓度愈大, 导电离子也愈多, 电阻率也愈低; 反之, 浓度愈小, 导电离子少, 电阻率高。溶液电阻率还和温度有关, 温度增高, 溶液中离子的动能增加, 同时溶液粘

度降低，因此导电能力增高、电阻率降低。在测井资料解释中，常常要把泥浆和地层水的电阻率换算到井下温度，以消除温度的影响。

综上所述，溶液电阻率与其化学成分、浓度及温度有关。通过实验室的大量资料证明，岩石电阻率与所含溶液电阻率有近似正比关系，岩石所含溶液电阻率愈大，岩石的电阻率愈高。如岩石中含有盐水时，电阻率就较低，含油时，电阻率就增高。

（三）岩石电阻率与孔隙度的关系

对于储集层来说，一个十分重要的参数就是岩石的孔隙度 ϕ ，孔隙度是岩石孔隙空间所占体积与岩石总体积的比，通常用百分数表示。如我国某油田砂岩的平均孔隙度为25%，这表明岩石中有25%的空间可储存流体。

岩石电阻率与孔隙度间到底有什么关系呢？让我们首先研究含水岩石的电阻率。组成砂岩的固体颗粒，基本上是不导电的，电流主要通过孔隙中的水溶液导电。所以孔隙空间愈大，孔隙孔道愈简单，水溶液电阻率就愈低，砂岩电阻率也愈低。由此可见，岩石电阻率除与水溶液电阻率有关外，还和岩石中水溶液的含量和分布特点有关。而水的含量和分布特点决定于孔隙大小和孔隙形状，所以岩石电阻率与其孔隙

度大小和形状有关（图 2）。

通过大量实验资料分析表明，对给定的岩样，全部含水时岩石电阻率 R_o 与所含水溶液电阻率 R_w 之间有正比关系，即 $R_o = F R_w$ ($F = R_o / R_w$)。当岩样不变时，即使 R_w 改

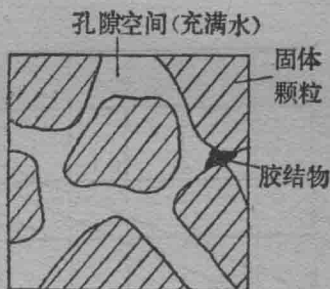


图 2 含水砂岩示意图

变， F 仍为常数，这表明 F 与水溶液电阻率无关。但改变岩样时， F 值却发生变化，可见 F 与岩石的孔隙度的大小形状有关。孔隙形状与岩石的颗粒大小及胶结物有关。根据许多资料的综合， F 与孔隙度 ϕ 之间可用下式表达（阿尔奇公式）：

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (3)$$

式中， F 称为地层因数（或相对电阻）； R_o 是孔隙中全部充满地层水时的电阻率； R_w 是地层水的电阻率； a 为岩性系数，与岩性有关； m 为胶结指数，与岩石的胶结程度有关。

图 3 中画出了 $F = f(\phi)$ 的关系曲线，根据已知的岩性，用电法测井求出 R_o 和 R_w ，即可得出 F ，由图

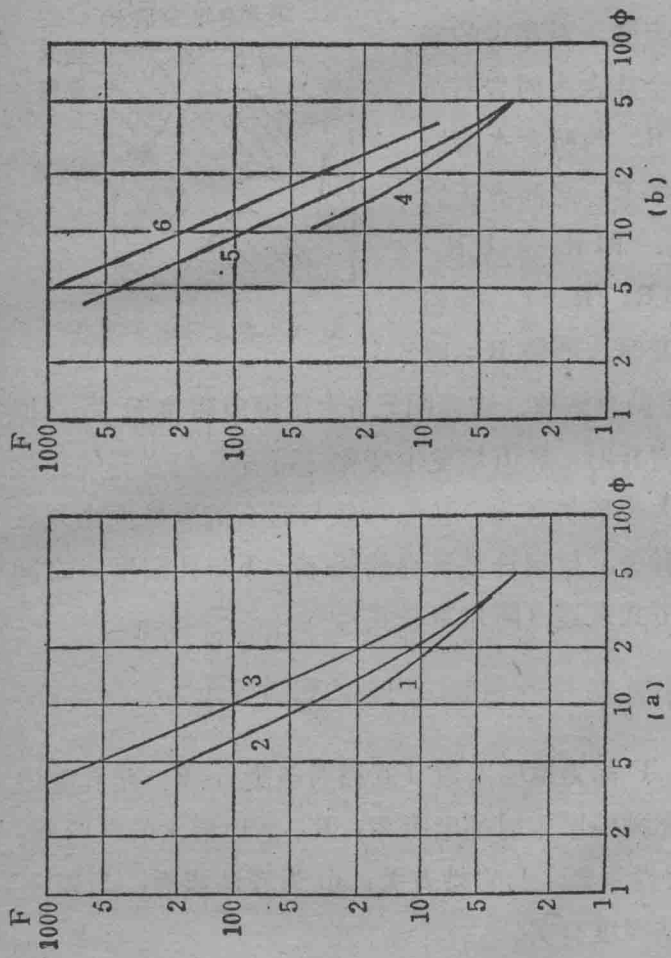


图 3 地层因数与孔隙度关系曲线

中可直接求出孔隙度 ϕ 。

例：弱胶结砂岩， $R_o = 6.3$ 欧姆米， $R_w = 0.7$ 欧姆米。

$F = 6.3/0.7 = 9$ ，由图中第二条曲线求出 $\phi = 22\%$ 。

上述关系曲线，只是一般条件下得出的，对每一个地区应该作出本地区的 $F = f(\phi)$ 关系曲线，才能求得更为准确的孔隙度值。

(四) 岩石电阻率与含油饱和度的关系

测井解释的最终目的是判断地层中究竟含有多少油（气），那么岩石电阻率与含油（气）多少存在什么关系呢？

通常用含油饱和度 S_o 来表征含油（气）的多少，岩石中含油体积与孔隙空间体积之比称为含油（气）饱和度，用百分数表示。岩石电阻率与含油饱和度的定量关系，是通过实验研究确定的。选择具有代表性的岩样，先用地层水饱和测出饱和水时的电阻率 R_o ，然后逐渐往岩样中挤入原油，同时测出在不同含油饱和度（ S_o ）时相应的岩石电阻率 R_t 。在整个测量过程中，务必保持地层水电阻率不变。

为了消除地层水电阻率的影响，引入参数 I ，称为电阻增大系数，即含油岩石的电阻率 R_t 与该岩石

100%含水时电阻率 R_0 之比:

$$I = \frac{R_t}{R_0}$$

由于用 R_t 与 R_0 之比,这就消除了地层水电阻率、孔隙度大小及孔隙形状对参数 I 的影响。在岩性一定的条件下, I 只与含油饱和度有关。将实验室测得的结果用统计方法处理,即可得到 $I=f(S_o)$ 的关系曲线,其表达式为:

$$I = \frac{R_t}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} = \frac{b}{(1 - S_o)^n} \quad (4)$$

式中 n 为饱和度指数, b 为系数,二者都与岩性有关; S_w 为含水饱和度,当孔隙中只含有油和水时, $S_w + S_o = 100\%$ 、 $S_w = 1 - S_o$ 。

图4是某油田的 $I=f(S_o)$ 的关系曲线,根据电测井曲线求出 R_t 和 R_0 ,由图中可得出 S_o 。

例: $R_t = 18$ 欧姆米, $R_0 = 1$ 欧姆米, $I = R_t / R_0 = 18 / 1 = 18$,

由图4求出 $S_o = 75\%$, $S_w = 25\%$,表明该层含油75%,含水25%,基本为油层。

通过上述讨论可以看出,只要通过对岩样的实验室分析,做出 $F=f(\phi)$ 及 $I=f(S_o)$ 的关系曲线,再根据电法测井资料求出每个层的地层电阻率 R_t 及地层

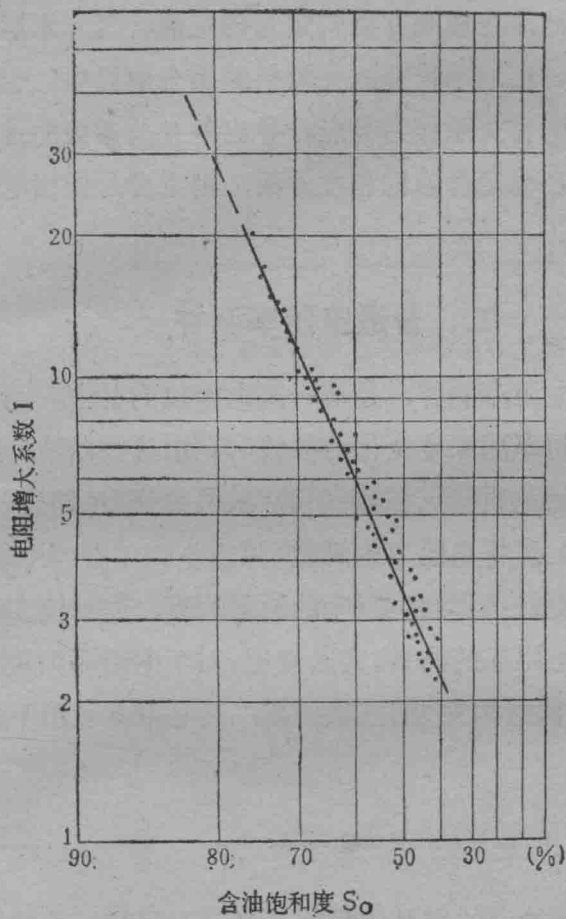


图 4 电阻增大系数与含油饱和度关系曲线