

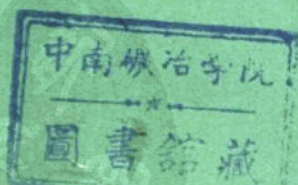
211430

高等学校教材試用本

油矿地球物理勘探

长春地质学院編

只限学校内部使用



中国工业出版社

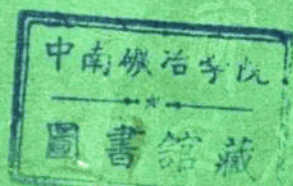
211430

高等学校教材試用本

油矿地球物理勘探

长春地质学院編

只限学校内部使用



中国工业出版社

本书簡述了目前我国常用漏井方法的原理及应用，对各种方法的成果解释作了較詳細的介紹。

本书供高等学校石油地质专业学生作教材用。

油矿地球物理勘探

长春地质学院編

*

地质部地质书刊編輯部編輯（北京西四學市大街地质部院內）

· 中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $8^{13/16}$ · 插頁 1 · 字数 154,000

1961年10月北京第一版 · 1962年4月北京第三次印刷

印数 1,104—2,075 · 定价（10—6）1.10 元

*

統一书号：K15165 · 1089（地质-70）

目 录

緒 言	5
第一章 电阻测井法的基础知識	9
§1 岩石及地层水的电阻率	9
§2 电阻测井理論概述及測井的原理路綫	23
§3 电极系类型及表示方法	30
第二章 视电阻率曲线及其解釋	34
§1 均匀无限介质	36
§2 一个界面的情况	36
§3 两个平行界面的情况	41
§4 有井影响时的视电阻率曲线	47
§5 地层組的视电阻率曲线形状	54
§6 视电阻率与电极距的关系	64
第三章 横向测井及标准测井	77
§1 横向测井的基本概念	77
§2 横向测井曲线的整理	77
§3 电探曲线和MG3量板对比	81
§4 电探曲线和各种理論曲线对比	84
§5 交互层	93
§6 低电阻岩层	93
§7 横向测井解釋結果的整理	94
§8 确定地层电阻率的近似方法	94
§9 标准测井	99
第四章 微电极系测井及側向测井	101
§1 微电极系测井法	101
§2 側向测井	112
第五章 自然电位测井和人工电位测井	115
§1 自然电位产生的理論	115
§2 自然电位曲线的形状	119
§3 人工电位法	124

第六章	放射性测井	134
§1	理论基础	134
§2	自然 γ 测井法 (FK)	143
§3	中子 γ 测井(HFK)	148
§4	放射性同位素测井	153
§5	其它类型的放射性测井	158
§6	放射性测井资料的解释	161
第七章	热测井	178
§1	岩石的热学性质	178
§2	热测井的仪器及测量方法	179
§3	自然热场法及人工热场法	182
第八章	气测井	188
§1	气测井的仪器	188
§2	气体分析器	189
§3	色程气体分析器	194
§4	荧光-靛青分析	196
§5	气测井资料的解释	197
第九章	研究油井的技术情况	201
§1	测定套管外水泥上升高度	201
§2	测定流入井内的水的位置及套管外液体的流动	202
§3	井斜测量	205
§4	井径测量	214
§5	岩层倾角的测定	219
第十章	套管穿孔, 井壁取芯及井内爆炸	222
§1	油井套管穿孔	222
§2	井壁取芯	228
§3	井内爆炸	230
第十一章	测井结果的综合解释	233
§1	划分地层	233
§2	根据测井曲线划分储油层和油气层	238
§3	岩层孔隙度的确定	242
§4	岩层渗透率的确定	257
§5	岩石电阻率和油气水饱和度的关系	262
§6	根据钻井地球物理资料进行区域地质情况的研究	263

緒 言

油矿地球物理是用地球物理方法研究油井的地质剖面和技术情况的一門技术科学(通常被不太正确的称为“测井”),它和其他物探方法一样,是以岩层物理性质的差異为观测基础的。在各种有用矿产勘探中,它已成为极有力的工具之一。特別在石油及天然气的勘探与开采工作中,已成为不可缺少的工作环节。

油矿地球物理的基础是由电测井工作奠定的。到目前已发展为地球物理勘探法的一个独立分支,在理論与技术上已經有了較完整的系統。

在油井中运用地球物理方法可以不取岩芯或少取岩芯,同时又能获得可靠的地质資料。这对于加快勘探速度、降低勘探成本及提高勘探质量有着巨大意义,因此在钻井中正确运用地球物理方法就能使勘探工作符合多、快、好、省的精神。

特別有意义的是,用测井方法(为了方便我們以后也这样称呼,不过要注意它真正的含义)可以得到比岩芯分析更全面、更加正确的資料,例如地层的产状因素、岩层的油气饱和度及孔隙度、渗透率等資料。钻探岩芯获取率即使是百分之百(实际上是很难达到的),一般岩芯也不足以反映变化多端的自然状态下的岩层。况且在取芯过程中岩样已經受到泥浆及其他影响而改变了自然状态下的性质。

由于上述原因,油矿地球物理方法获得了广泛的应用。

和其他物探方法一样,利用岩石的一种物理性质往往不能得到单一的地质解释。因此在任何一个地区都是采用綜合

的方法。

按着利用的物理参数不同，可以分为以下的几套方法：

一、电法：其中包括

(一) 以研究岩石导电性(或电阻率)为基础的一套方法，如：视电阻率法等；

(二) 以研究岩石电化学活动性为基础的一套方法，如：岩石自然极化法(或称自然电位法)及人工电位法；

(三) 以研究岩层中人工电磁场分布规律为基础的一套方法，如：感应法，阴影法等。

二、放射性测井法：随着近代物理学的发展，放射性测井也迅速的发展起来，其中包括：

(一) γ 法：是研究岩层的自然放射性；

(二) 中子—— γ 法：是研究快中子被岩石减速和吸收后放出二次 γ 射线的分布，从而确定岩石的性质；

(三) γ —— γ 法(或散射 γ 法)：是研究岩石对 γ 源放出的 γ 量子的散射特性，这种方法能够按岩层密度来划分剖面；

(四) 同位素法(即示踪原子法)：它在勘探及油田开采过程中都有广泛的应用；

(五) 其他正在实验和部分用于生产的方法有：中子——中子法，能谱分析法等。

三、热测井法：是研究自然热场及人工热场在岩层中的分布，通过岩石的热学性质来研究岩性。

四、机械测井法：是研究不同岩石的机械强度(记录单位时间进尺，或单位进尺所需时间)，从而确定岩性。

五、地球化学法：是研究钻井打开的岩层中油气的分布，其中包括：

(一) 气测井；

(二) 螢光测井。

除了上述方法之外，正在試驗研究着新的测井方法，以提高地质效果。

綜合应用上述方法可以解决下列主要問題：

(一) 确定岩性及岩层产状；

(二) 划分儲油层及确定其儲油特性、孔隙度渗透率，含油饱和度等；

(三) 研究井剖面上其他有用矿物分布特点及結構；

(四) 进行区域地质的研究，如进行岩层对比和构造变化的研究。

另外为了检查钻井的技术情况，开采过程中油层的变化，也广泛的采用着地球物理方法。通常井壁取芯和放炮射孔也由测井队来完成。

从一口井的建立到废弃，从取得最初的地质資料到检查油井技术情况，以至控制开发过程中油层的变化，测井工作都是最有力的工具之一。

因此，要求测井工作者对地质、钻井及采油各项工作都有較全面的了解。

我国的测井工作虽然早在 1939 年已开始，但是在反动政府的統治下，和其他技术一样，得不到应有的发展。解放后在党的关怀下，十多年来我国的测井工作已經有了很大的发展，大部分先进方法都已在我国各油区及一些煤田和金属矿区采用。所获得的資料对于生产起着很大的作用。

我国在测井仪器制造方面也作出了很大的成績，制出了

几种型号的全自动及半自动的测井仪，和各种用途的井下仪器，这对方法本身的发展起很大的推动作用。

当然，测井工作还很年轻，还有很多生产中提出的问题有待解决。相信在党的总路线光辉照耀下，我国油矿地球物理工作将一日千里地向前发展。

第一章 电阻测井法的基础知識

§ 1 岩石及地层水的电阻率

在进行电测井时，我們是研究岩石的导电能力。

但是在实际电测井工作中，一般不是研究岩石的导电率，而是岩石的电阻率。

电阻率是导电率的倒数。在电测工作中，电阻率的大小是指截面积为1平方米，高为1米的正方形单位体积岩石所具有的电阻。电阻率的单位为欧姆-米。导体的电阻率可以用下式計算：

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

式中 ρ ——导体的电阻率；

l ——导体沿电流方向的长度；

S ——导体垂直电流方向的截面积。

如果导体的电阻以欧姆表示，长度以米表示，那么：

$$\rho = R \frac{S}{l} \text{ 欧姆} \cdot \text{米} \quad (1-2)$$

各种不同的岩石电阻率变化范围很大，由几分之一欧姆·米至几百万欧姆-米。岩石电阻率这样大的变化，使我們有可能很便利地根据电测井資料来研究岩石的性质。

几种主要的造岩矿物和金属矿物的电阻率示于表1-1。

岩层在自然状态下，除去組成岩石的矿物外，还含有充滿于孔隙空間中的盐水溶液（地层水）。因此，岩层电阻率

表 1—1 主要造岩矿物和矿产矿物电阻率

矿 物	电 阻 率 (欧姆-米)	矿 物	电 阻 率 (欧姆-米)
无水石膏	10^9	云 母	$10^{14}-2 \times 10^{15}$
方解石	$5 \times 10^7-5 \times 10^{10}$	烟 煤	10^2-10^1
岩 盐	$5 \times 10^{14}-10^5$	无烟煤	$10^{-4}-10^{-2}$
石 英	$1.2 \times 10^{12}-3.2 \times 10^{14}$	黄铁矿	2.4×10^{-4}
石 油	10^9-10^{16}	石 墨	$1.2 \times 10^{-6}-3 \times 10^{-4}$
白 云 母	$4-10^{11}$	磁铁矿	$3.6 \times 10^{-4}-6 \times 10^{-3}$

不仅和組成岩石矿物的电阻率及其在岩石中的百分含量有关，而且主要是和单位体积岩层中所含水溶液的百分数，和这些溶液的化学成分及其浓度有关。除此以外，岩层电阻率还决定于岩石颗粒的形状、大小及岩石的组织结构和温度。

岩层的导电性，按其性质来讲，可分为电子（或金属）导电和离子（或电解）导电两种。金属矿物颗粒具有电子导电性，而造岩矿物和水溶液则具有离子导电性。

对于电子导电性而言，电流是一些自由的负电粒子流——电子流。对于离子或电解导电而言，则主要是一些液体中的分子分解成离子参与导电的过程。

在大多数岩层中，特别是沉积岩类的岩层中，是以离子导电为主。大多数矿物，实际上不通过电流，因为它具有非常高的电阻率（见表1）。因而，岩层导电的原因主要是由于它的孔隙中间充满着矿化水（电解液）的缘故。因此，在研究自然状态下的岩层电阻率之前，有必要先讨论一下影响盐水溶液电阻率的各种因素。

盐水溶液的电阻率

地层水可以分为淡水和盐水两种，它们之间没有绝对的

界限。通常称含盐量不大于1克/升的水为淡水（它的比重近似等于0.1°波美度，在20℃时，它的电阻率等于5~6欧姆-米）。含有大量盐类溶液的水，我们称为盐水。

自然水的含盐量一般在百分之几到40%范围内变化（即每升水中含盐量由零点几毫克到几百克之间变化）。它们相应的电阻率为几百欧姆-米（非常淡的水）到几分之一欧姆-米（强烈盐化的水）。

决定水溶液电阻率的基本因素是溶液中溶解盐类的浓度、成分和溶液的温度。

水溶液的电阻率和溶解盐类的浓度之间存在着反比关系。溶解盐类的浓度愈大，溶液的电阻率就愈小。

溶液的电阻率随着浓度的增加而减少是因为溶液浓度越大，它分解出的带电子数目的缘故。

溶液电阻率和溶液中溶解的盐类浓度之间的关系如表1—2所示。

从表1—2中看出，溶液电阻率随溶解盐类化学成分的变化并不显著。

含有几种溶解盐类的溶液导电性近似等于每一种盐类个别导电性的总和。那一种盐类在溶液中的含量愈多，它对溶液导电性的影响就愈大。

因此，在根据盐类浓度确定多种盐类水溶液的电阻率时，可用溶解盐类中含量最多的一种盐类的等价数量来代替全部的溶解盐类的数量。在石油及天然气矿产地的地层水中，溶解盐类以NaCl为主（占70~95%），因此，在计算地层水的电阻率时，可以认为溶液中仅仅含有氯化钠的盐类。

〔例〕某油田地层M的地层水化学成分（100立方厘米所含的克数）如下：

阴离子

Cl 1.604

SO₄ 1.171CO₃ 0.044

阳离子

Ca 0.007

Mg 0.043

Na 1.011

求该地层水的电阻率 (地层温度为18°C)

解: 该地层水的总矿化度为

$$C = 1.604 + 1.171 + 0.044 + 0.007 + 0.043 + 1.011$$

$$= 2.880 \text{ 克/100 立方厘米} = 28.8 \text{ 克/公升}$$

表 1-2 几种盐类溶液的电阻率及其与
溶液浓度的关系 (15°C时)

溶液中的含盐量 (克/升)	盐类溶液的电阻率 (欧姆·米)			
	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
—	20 × 10 ⁴	—	—	—
0.010	516	548	455	414
0.100	52.5	55.7	47.4	43.2
1.000	5.54	5.84	5.21	4.79
10.000	0.626	6.41	0.625	0.580
50.000	0.149	0.145	0.156	0.147
100.000	0.0826	0.0736	0.0836	0.0885
150.000	0.0609	0.0495	0.0662	—
200.000	0.0510	0.0371	0.0578	0.0715
250.000	0.0493	—	0.0561	—

地层水中盐类 (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, NaHCO₃, CaSO₄ 及 MgSO₄) 的导电性彼此相似, 而 NaCl 的含量按离子所占成分来说, 大大超过了其它盐类的含量, 所以可以认为该地层水相当于浓度为 28.8 克/公升的 NaCl 的溶液, 按表

1—2, 用內插法求得M层的地层水电阻率为0.25欧姆-米。

当温度变化时, 溶液电阻率的变化 ($\Delta\rho$) 正比于溶液电阻率 (ρ_t) 及温度变化 (Δt):

$$\Delta\rho = -\alpha\rho_t dt \quad (1-3)$$

或

$$\rho_{t_1} = \rho_t [1 + \alpha(t - t_1)] \quad (1-4)$$

式中, α 称为温度系数, 它表示温度变化 1°C 时, 电阻率变化的数值。对地层水及泥浆来说, α 通常为0.02。

如果把温度 18°C 当作 t_1 , 则:

$$\rho_{18^\circ} = \rho_t [1 + \alpha(t - 18)] \quad (1-5)$$

或

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ}}{1 + \alpha(t - 18)} = P_t \rho_{18^\circ} \quad (1-6)$$

式中 ρ_{18° ——温度为 18°C 时溶液的电阻率;

$P_t = \frac{\rho_t}{\rho_{18^\circ}}$ ——岩层水电阻率随温度而改变的系数。

为了把温度 18° 时的NaCl 溶液的电阻率 ρ_{18° 换算到温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的溶液电阻率 ρ_t , 可以利用图1—1。

举例, 同上例, 如该地层的温度为 50°C (50°C 为这层在天然情况下的温度), 则由图1—1 换算得, 在 50°C 的地层水的电阻率为:

$$\begin{aligned} \rho_{50^\circ} &= \rho_{50^\circ} \cdot \rho_{18^\circ} \\ &= 0.56 \times 0.25 \\ &= 0.14 \text{ 欧姆-米} \end{aligned}$$

图1—2为NaCl溶液在各种不同的温度时, 其电阻率和浓度的关系曲线。利用它, 我们可以很方便地直接查出NaCl溶液在各种不同的浓度和温度时电阻率的数值。例如, 同样如

上例，我們無須經過換算，直接可以从图上查得該地层水在溫度 50°C 时的电阻率为 0.14 欧姆·米。

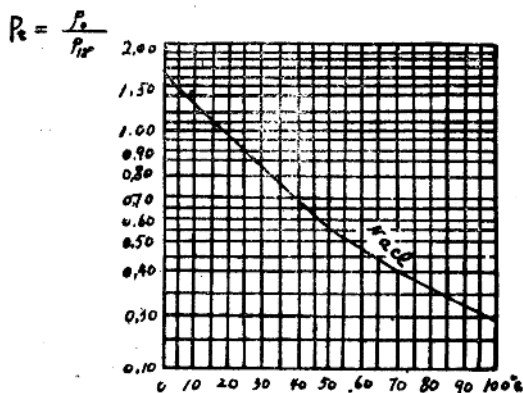


图 1—1 氯化鈉溶液电阻率与溫度的关系

影响岩层电阻率的基本因素

上面已經說過，岩层电阻率在很大的範圍內取决于岩层中所含水的矿化度。例如砂层中如果含有高矿化度的水，它的电阻率只有几十分之一欧姆·米，如果所含的水是淡水，則它的电阻率可以达到几十甚至几百欧姆·米。岩层电阻率和充滿岩层孔隙中水的电阻率、含量及其在岩层中分布的均匀性成正比。

随着地层水电阻率的增加，岩层电阻率增加；当地层水电阻率减小时，岩层电阻率也减小。岩层电阻率与溫度的关系和水溶液电阻率与溫度的关系相同，溫度每增加 1°C ，电阻率約减少 $2\sim 3\%$ 。随着深度的增加、地层溫度升高，因此它的电阻率就降低。

在表1—3中列出了几种常见的、充满地层水的沉积岩类、岩层在自然状态下的电阻率数值。

表 1—3 充满地层水的沉积岩层电阻率

岩 层 名 称	电阻率 (欧姆—米)
含盐水的粘土层	0.5~10
石灰岩	$6 \times 10 \sim 5 \times 10^5$
砾岩	$2.5 \times 10 \sim 1.15 \times 10^4$
泥灰岩	0.5~7 × 10
含淡水的砂层	$10 \sim 10^3$
含盐水的砂层	0.2~4
亚粘土	$10 \sim 4.5 \times 10^2$
砂岩	$3 \times 10 \sim 1 \times 10^5$

在层状岩层中，如果沿层面方向的电阻率 ρ_t 小于垂直层面方向的电阻率 ρ_n ，则这样的岩层，称为各向异性岩层。属于这类的岩层有泥板岩层，粘土质页岩层，煤层，泥灰岩层及夹有薄层砂层的粘土岩层。各向异性岩层的特点是，岩石颗粒在层面上是均匀分布的。它们有着不同的孔隙度、湿度、颗粒大小，因而也有着不同的电阻率。

各向异性岩层的平均电阻率

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} = \lambda \quad (1-7)(1-8)$$

式中 λ ——各向异性系数。

岩层电阻率和组成岩石的颗粒大小有关。在颗粒非常细的岩层中，岩层的电阻率不再和地层水电阻率成正比。例如，饱含高矿化水的粘土层的电阻率通常要比孔隙度相同，并且也饱含同样矿化度水的砂岩电阻率要高。

从上面叙述知道，在自然状态下的岩层电阻率主要决定

于：地层中所含水的成份、矿化度和它在岩石中的分布特性，岩石孔隙度和岩石的组织结构及温度等等。

岩层电阻率和孔隙度及孔隙空间形状的关系

岩层电阻率随着岩层中所含水溶液的减少而增加。岩层电阻率和水溶液含量之间的关系可以看作是岩层孔隙度，(当孔隙空间全部被水所充满时)的函数。

为了消除地层水电阻率 ρ_n 对地层电阻率 ρ_a 的影响，通常采用岩层的相对电阻率 P

$$P = \frac{\rho_n}{\rho_a} \quad (1-9)$$

相对电阻率 P （又叫孔隙系数）仅仅和单位岩石体积中所含水的百分数及其在岩石中的分布有关。因为岩层中水的含量决定于孔隙度，而其分布则决定于孔隙空间的形状（结构），因此，相对电阻率决定于岩石的孔隙度及孔隙形状。岩石孔隙度愈小，并且其孔隙形状愈复杂，其相对电阻率就愈大。

砂层，疏松砂岩，粘土，以及其他一些碎屑岩具有大的孔隙度，因而通常具有不大的电阻率。随着孔隙度的减小，孔隙空间形状的复杂，岩层中水的含量就减少，因而岩层的电阻率就增加。属于这样一类的岩层有：火成岩，致密砂岩，石灰岩，白云岩，硬石膏等。

图1—3是对于一些孔隙形状比较简单的岩层（砂层，砂岩，及石灰岩白云岩等）作出的相对电阻率 $P = \frac{\rho_n}{\rho_a}$ 和孔隙度 K_n 之间的关系曲线。利用这些曲线可以在某种程度上，在已知地层水电阻率及地层电阻率时，近似地求出地层的孔隙度。