

109844

基本馆藏

油矿地球物理学

苏联 С.Я. 立特維諾夫等著



11
022

石油工业出版社

35611
5/0022

109844

35611
5/0022

高等学校教学用书

油矿地球物理学

苏联 С.Я. 立特维诺夫 Л.В. 阿尔哈洛夫著

陆家仕译 王惠濂校订

苏联高等教育部批准作为高等石油学校教材

石油工业出版社

內 容 提 要

本書闡述有关油矿地球物理的基本知識：描述油井地球物理探測的原理、进行探測的技术以及所得結果的地質解釋方法。

本書为高等石油学校非地球物理專業的教材，但也可供从事石油工業的地質師及地球物理工作者参考。

С.Я.ЛИТВИНОВ Л.В.АРХАРОВ

ПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОФИЗИКА

根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1954年莫斯科版翻譯

統一書号:15037·197

油 矿 地 球 物 理 学

陸家仕譯 王惠謙校訂

石油工業出版社出版(地址：北京六部坑石油工業部十号楼)

北京市書刊出版登記證出字第063号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

787×109 $\frac{1}{4}$ 开本 * 印張6 $\frac{2}{3}$ * 141千字 * 印1—5,100册

1957年1月北京第1版第1次印刷

定价(10)1.00元

目 录

緒言

第一章 岩層电阻率和岩層性質的关系 6

§ 1. 导电性 6

§ 2. 含油層及含气層的电阻率 9

第二章 电阻率法測井的理論基础 11

§ 3. 电測井原理 11

§ 4. 电場电位基本原理 11

§ 5. 在各向同性均匀介質中的点电源 14

§ 6. 电測电极系 15

§ 7. 視电阻率 19

§ 8. 在界面为平面的两种介質中的电位分佈 21

§ 9. 具有一个分界面的两种介質的視电阻率 24

§ 10. 在被两个平行界面分开的三种介質中电位的分佈 28

§ 11. 电极系穿过高电阻層时的視电阻率 31

§ 12. 电阻率为無限大的岩層 35

§ 13. 岩層傾角对視电阻率的影响 44

§ 14. 井眼对視电阻率的影响 45

§ 15. 兩層及兩層以上岩層的电阻率曲綫 52

§ 16. 电极系的选择 57

第三章 橫向測井(BK3) 58

§ 17. 橫向測井的任务及实质 58

§ 18. 橫向測井的解釋方法 59

第四章 自然电位法(HC) 70

§ 19. 自然电場 70

§ 20. 根据 HC 曲綫确定岩層性質 75

第五章 电测井用的测量线路和仪器	78
§ 21. 测量的原理线路	78
§ 22. 电位差的测量	80
§ 23. 半自动记录	82
§ 24. 自动记录	85
§ 25. 单芯电缆测井	90
§ 26. 研究薄岩层剖面的方法	93
§ 27. 水和泥漿电阻率的测定	95
第六章 各种形式的测井法	97
§ 28. 放射性测井	97
§ 29. 气测井	103
§ 30. 机械测井	107
§ 31. 地震测井	109
§ 32. 磁测井	109
§ 33. 电解测井	110
§ 34. 井温测量	111
第七章 解决各种油矿地质问题时测井的应用 ^①	112
§ 35. 井剖面的地质—地球物理特性	112
§ 36. 岩层岩性的确定	115
§ 37. 岩层油气性的估计	120
§ 38. 综合矿场地球物理探测法	123
第八章 各种井内作业	123
§ 39. 用电阻计测定井内漏水位置	123
§ 40. 井内温度测量	126
§ 41. 井斜的测定	135
§ 42. 井径测量	144
第九章 与油井生产有关的作业	149
§ 43. 井内液面的测定	149
§ 44. 井内压力的测定	151
第十章 套管穿孔, 井内爆炸及以井壁取心器取样	155

§ 45. 油井套管穿孔.....	155
§ 46. 取岩样。井底取心器.....	161
§ 47. 井内爆炸.....	163
第十章 测井队的装备	164
§ 48. 测井电缆.....	164
§ 49. 测井站及套管射孔站.....	169
§ 50. 井场上工作的进行.....	173
§ 51. 安全技术.....	175
第十二章 油矿地球物理企业的组织和经济	176
§ 52. 生产组织.....	176
§ 53. 工作计划.....	178
参考文献	182

緒 言

油藏开采工業技术要求詳細研究油藏的地質構造。这个任务在頗大程度上要用曾在采油工業成就中起过很大作用的油矿地球物理法来解决。

首次应用油矿地球物理于石油工業方面的是Д. В. 戈盧比亞特尼可夫，他于1906年先在比比-埃依巴特油田，以后又在苏拉汗(巴庫)油田中曾用地球物理測量井內溫度。以后，在油矿地球物理方面又增添了測量鑽井曲率的儀器。苏联巴庫采油工程師沙赫南扎洛夫(1927年)所制造的儀器乃是这种儀器最初的一种。

从1930年开始，在出現了油矿地球物理勘探法中最主要的电測井法以后，油矿地球物理勘探法，就飞快地發展起来；电測井法就是在井里用电流操作的方法。

电測井是获得鑽井資料的最新的一种方法，这种方法是苏联地質学家們，首先是巴庫和格罗茲內地質師(Д. В. 查布列夫，В. А. 舍尔斯基，С. Н. 沙申，А. Н. 斯納尔斯基等人)在Д. В. 戈盧比亞特尼可夫及И. М. 古勃金领导下集体創造的成果。他們指出了电測井的优点，并拟定了运用电測井的方法。

电測井基本的理論部分，首先是由В. А. 佛克院士解决的，以后又經И. М. 阿列平教授解决过。根据他們所解决的理論，技术科学博士С. Г. 科馬洛夫研究出了橫向測井法。在С. Г. 科馬洛夫领导下，在电測井的其他方面，也曾做过大量的工作。

在这方面曾写过許多著作的В. Н. 达哈諾夫教授，在油矿地球物理的理論及实际应用上都有很大的貢獻。

以后，除电測井以外，又出現了許多其他研究鑽井所穿过的岩層性質的方法：放射性測井(В. А. 施派克，Г. В. 哥尔什科夫，

A. H. 格拉馬科夫 1934 年), 气測井(М. И. 巴尔札莫夫 1933 年), 机械測井(З. И. 麦立克-巴沙也夫及 Г. М. 米尼桑 1935 年) 等等。其中以放射性測井及气測井在目前具有最大的作用。

苏联的專家們是發展油矿地球物理自动仪的奠基者。

记录电測曲綫的第一架自动电位計是工程师 Л. Ф. 庫里科夫斯基, С. Я. 立特維諾夫及 К. А. 維尔帕托夫于 1935 年提出来的。当时 В. М. 札波洛施茲曾提出并試用过记录电測曲綫的示波器。以后, 在改进自动化的工作中, 参加的还有另外一些專家: Г. Г. 科馬洛夫, И. Я. 李富金, В. Г. 伏依施維洛及其他一些建立自动电測站以便在各种生产条件下进行工作的專家。

苏联工程师們在油矿地球物理其他各部分: 取岩心, 套管射孔, 井斜測量等方面, 都有許多發明及改进。

油矿地球物理的簡單內容

油矿地球物理是在鑽井內所进行的綜合探測及操作, 其目的在于:

- (1) 研究井眼的地質剖面;
- (2) 研究井眼的技术情况;
- (3) 进行射孔-爆破工作。

研究油井的地質剖面是油矿地球物理的主要任务之一, 它是借助于測定井眼所穿过岩石的物理性質来进行的。

为此, 我們要沿井身測量与岩層地質性質有一定关系的而又能說明某些岩層物理特性的数据, 以便对井眼的地質剖面有一个概念。

每一岩層均具有一定的物理特性(导电性、硬度、彈性等), 但是, 具有这些物理特性之一的岩層不一定是一岩層, 可能是許多种岩層。可是, 如果我們对于岩層的物理特性知道得越多, 那么在接这些特性划分的岩層組中, 其所包括的岩層数目也就越少。

所以在油矿地球物理中，我們要尽可能多测几种物理特性或者是能說明这些特性的因素。

显然，我們最感兴趣的是这样一些因素，即沿井身（由一种岩層过渡到另一种岩層）变化很大的那些因素，特别是那些使井眼剖面中我們要探測的岩層明显地不同于其他相鄰岩層的因素，

遺憾的是，我們在寻求确定井內岩層不同参数的方法方面虽然已作了許多工作，可是直到目前为止仅有不多的几种方法得到实际应用，其中主要的是电測井法及放射性測井法。

其他一些油矿地球物理探測法就是：温度測量，井徑測定，井內漏水点确定，井壁取心器取样，井斜測定，岩層傾角測定，套管穿孔及井內爆破。

下面簡短地敘述一下上列每种方法的实質。

电測井主要是測量沿井身的岩層視电阻率及自然电場电位。

不同岩層具有不同的电阻，并且具有不同的形成自然电場的能力。所以，电測井測量的結果使我們能了解井眼所穿过的岩層的地質特性并确定井眼的剖面。

目前，所有鑽完的井眼都是由电測井法探測过的，而且电測井法探測的結果还常常是确定井眼地質剖面的主要資料。

放射性測井分为两种：伽馬測井——探測岩層的天然放射性；中子伽馬測井——測定中子流作用于岩層所激發的伽馬放射强度的方法。

經驗証明：用这两种方法測量的結果与岩層的岩性有密切的关系，根据測量結果使我們能从本質上确定岩層的地質特点。放射性測量法不同于其他的方法，它既可在未下套管的鑽井中測量，也可在已下套管的鑽井中运用。

温度測量是測定沿井軸的温度，以便确定挤水泥入井时水泥面在井內的高度，探測管外水流动的情况，确定流入井內的水的位置及測定深处岩層的温度。

井徑測定主要為測定井身的真實橫切面，這是正確計算擠入水泥數量時所必須的；同時為了解油井的真實直徑，以便易於進行電測曲綫圖的解釋。此外，這種資料在很多情況下還被用來確定井所穿過岩層的性質。測量井徑所用的儀器是井徑儀。

井斜測定是一種測定井身曲率及方位角的操作。

知道井身彎曲的曲率和方位角，對於研究鑽探的油田的地質構造是必需的，對於確定從油層中選取油樣的位置也是如此。

在鑽定向井時，測定井身彎曲及其方位角，更具有特殊的意義。沒有這類的檢查就不可能鑽這樣的井。

測量井身曲率及其方位角時用井斜儀。

測定岩層的傾角及傾斜方向是研究油田地質構造所必需的。

一般，我們採用岩層傾角儀測定岩層的傾角及傾斜方向。

用井壁取心器採取岩樣，其目的是為了校正電測曲綫圖及確定岩層的性質。目前通常採用的是射擊式取心器，借炸藥筒爆炸使其發射。

套管射孔是為了揭開油層使石油及天然氣能流入油井。

大多數射孔器的構造是根據點燃火藥室中炸藥這一原理製造的（射擊式射孔器）。

子彈在爆炸氣體壓力作用下離開彈道，击穿套管及管外水泥層，射入岩層深處。

有時用炮彈代替子彈，炮彈會在油層中爆炸而造成孔穴，使油層能有更高的采收率。

井內爆炸的目的是為了使油層更好地出油，或者為消除鑽進過程中所發生的各種事故，以及其他一些目的。

除了以上列舉的各項以外，還有許多其他操作，如確定地層水流入井內的地点，測定沿井身的壓力，確定掉入井內的金屬器材（鑽頭，導管等）的地点等。

油矿地球物理的作用

用不太高的成本，花費不太多的時間，油矿地球物理有較高的經濟效果，这是促使油矿地球物理法大大發展的原因。我們只要指出下面一点就够了：用測井法后，我們可以在采油地区鑽油井而不用全取岩心。

套管射孔的运用，使我們有可能广泛地采用無專門篩管的油井結構，这样就可以不必采用效率很低而又粗笨的鑽孔机。

油矿地球物理法与地質、鑽井及采油都有密切的关系。

如果我們細察一下从开始鑽井一直到油井投入生产这一整个过程，就可看到：在鑽进过程中同时进行电測井，这样可以便于地質师繪制油井地質剖面圖；用井壁取心器在井中采取岩样，用井斜仪檢查井身的方向。下套管以前用測徑器(井徑仪)測量井眼直徑。井眼挤水泥后用溫度計測定管外水泥面高度。如在挤水泥以后还没有把井严密封閉，可以用泥漿电阻計或溫度計来确定失漏处(套管破裂，井底未密封)。最后进行套管射孔以备把油井投入生产。有时为了同一目的，在套管射孔同时或以后还要进行井内爆破工作。

由此可见，在油矿工作中油矿地球物理工作佔着很重要的地位。

要想尽可能更准确地了解井眼及井眼剖面的情况，必須仔細地进行油矿地球物理工作，同时要求改进仪器，改进操作仪器的方法，發明新的方法。

第一章 岩層电阻率和岩層性質的关系

§ 1. 导 电 性

电测井时，我們利用岩層的导电性，即岩層导电的能力。

在地面电测以及电测井的实际工作中，一般研究的不是岩層的导电率，而是岩層的电阻。

电阻是导电率的倒数。确定电阻就是要确定物体阻碍电流通过的性質。我們取电阻的單位为欧姆。

一塊截面不变的單位体积岩石，其电阻 R ，像任何导体电阻一样，可以用下列公式表示：

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

式中 l 是沿电流方向所取單位体积的長度；

s 是垂直于电流方向所取單位体积的横截面；

ϱ 是系数，用以計算構成此單位体积的物質（在这里指的是岩石）的物理性質，它称作电阻率。

由公式(1)可見，当 $l=1$ $s=1$ 时， $R=\varrho$ 。因此，物質的电阻率就是長度及截面單位各等于1的导电体的电阻。

在电测井实际工作中，通常取長度單位为1公尺，截面面积單位为1平方公尺。因此，电阻率就是長度为1公尺，截面面积为1平方公尺單位体积岩石的电阻。电阻率的單位可写作：欧姆/公尺²，即欧姆公尺。

表1所列，为几种岩石的电阻率数值。

导电性通常有兩種：金屬导电或称电子导电和电解导电或称离子导电。

表 1

岩	石	电阻率, 欧姆·公尺
粘土		1—50
砂		0.2—1000
石油		$10^8—10^{12}$
油砂		2—150
頁岩		50—500
泥灰岩		5—100
砂岩		1—5000
石灰岩		10—10000
白云石		100—10000
火成岩		200—50000
鹽		1000000以上

金屬导电中荷电的是电子。所有金屬及某些矿物, 如石墨、銅的硫化物等都具有这样的电子。

电解导电中荷电的是鹽、酸、鹼水溶液中的离子。

岩層导电的原因, 主要是由于在岩層空隙間有电解液—矿化水。組成岩石(岩石構架)的矿物, 除了極少数例外, 实际上都是不导电的。所以, 通常岩石中含水的电阻率, 岩石單位体积中水的多寡, 以及含水岩層孔隙的形狀决定岩石的电阻率。

岩層水的电阻率决定于水中鹽溶液的成分、电解液的濃度及温度。

岩層水中主要溶解有氯化鈉(NaCl)。氯化鈉溶液的电阻^①与濃度及温度的关系曲綫如圖 1 所示。

温度改变 1° , 电阻相对改变的数值称为电阻的温度系数 α ; 在自然界所碰到的大部分矿化水, 其温度系数 α 接近于 NaCl 溶液的温度系数 α 。在温度 $10—50^\circ$ 範圍內, 取 α 等于 $0.0231/^\circ\text{C}$ 。

① 在这里以及以后所提到的“电阻”二字都是指电阻率而言。

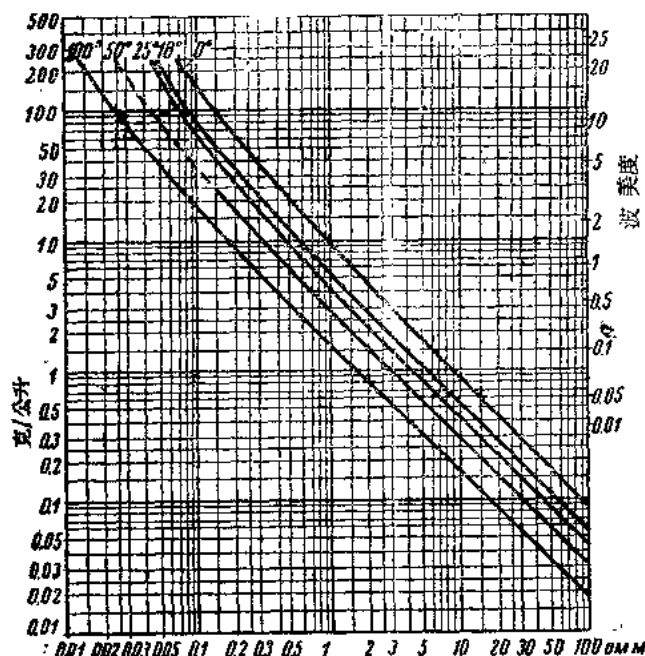


圖 1 氯化鈉溶液電阻率與其濃度及溫度的關係曲線

岩石的電阻率與所飽含水的電阻率成正比。由於岩石中所含水的電阻率隨溫度而變化，因此，岩石的電阻率也隨溫度而變化；岩石的溫度係數，可以取用與上述 α 值相等的數值。

為便於研究岩層的電阻，我們引入岩層相對電阻率的概念，岩層相對電阻率乃是岩層電阻率與其他含水時的電阻率之比。

通常當水充滿了岩石孔隙中時，岩層的相對電阻率決定於：

1. 岩石的孔隙率（岩石孔隙單位體積與此岩石單位體積之比）；2. 孔隙空間的形狀。

岩石孔隙率越小，其相對電阻率越大，可以認為：如其他條件相同，岩石的相對電阻率與其孔隙率成反比。

具有簡單孔隙形狀的碎屑岩石，其相對電阻率與孔隙率的关系曲線如圖 2 所示。

电阻率在很大程度上决定于孔隙空间的形状(結構)。这样,如比較砂層及石灰岩層的相对电阻率,可以看出如兩者的孔隙度相同,石灰岩層的电阻比砂層的电阻要大很多,这是因为在石灰岩層中有許多大的孔隙,这些孔隙由細長通路連接着,由于通路的截面很小,因此,电阻就可能很大。

通路的弯曲以及通路截面的突然变化,是岩層电阻率增加原因之一。

在大多数情形下,砂層的相对电阻率接近于10;孔隙砂岩層的相对电阻率通常在15—40范围以內。膠結性岩層以及由坚硬矿物構成岩石構架的岩層(非碎屑岩岩層)有很大的相对电阻率。因此,多孔的碳酸鹽类岩層的相对电阻率,通常在40—100范围之內。

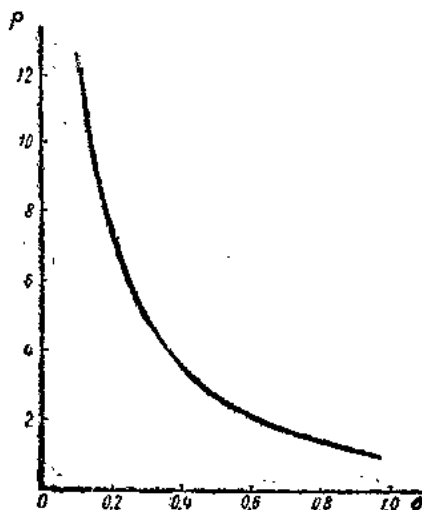


圖 2 碎屑岩岩層的相对电阻率 P 与孔隙率的关系曲线(岩石的顆粒是球狀的)

§ 2. 含油層及含气層的电阻率

因为石油及天然气不是导电体,如油層及气層不含有水分,則它們將不会导电,它們的电阻率將很高。

在含油層及含气層中如有一定数量的水分(电解液),被复着岩石顆粒并佔据一部分孔隙空間,虽会使含油層及含气層的电阻率比岩層孔隙百分之百被水充滿时的电阻率要大許多,但不会很大。

因为石油及天然气对岩層的导电性有同样的影响，因此，在其他条件相同的情形下，含油層的电阻与含气層的电阻率是相同的。

可以用电阻扩增系数 Q 来说明由于岩層孔隙中含有石油及天然气而使岩層电阻率增加，該系数 Q 等于油、气層的电阻率与該油、气層被水充滿时的电阻率之比。

当然，在單位体积岩層中所含的石油及天然气愈多，則含油層或含气層的电阻率扩增系数也就愈大。如果以 K_{m} 表示油、气饱和率(充滿石油或天然气的那一部分孔隙空間)，則可以近似地認為电阻扩增系数 Q 等于：

$$Q = \frac{1}{(1 - K_{\text{m}})^2}.$$

上式指出：当油、气饱和率不大时，油、气層的电阻率与飽含水的岩層的电阻率相差不大；随着油、气饱和率的增加，此种差别就愈来愈大。

根据以上所述，可以得到一个結論：判断岩層油、气饱和率，不应仅根据岩層电阻率的大小，(因为有些含油層，其电阻率可能和孔隙少的岩層的电阻率及含矿化程度低的水層的电阻率一样)，而应根据岩層电阻扩增系数的大小来判断；而且，在估計油、气饱和率时，还应根据电阻扩增系数和岩層油、气饱和率的关系式。

有些岩層在不同方向上具有不同的电阻率。岩層的这种特性，称作各向異性，具有这种特性的岩層称作各向異性岩層，以区别于在各方向具有相同电阻的各向同性岩層。

沉积岩層具有不同程度的各向異性；这种岩層沿岩層層理方向具有較小的电阻率，而在垂直于層理的方向則具有較大的电阻率。

$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_1}}$ 这一数值，称作各向异性系数；式中 ρ_n 是垂直

于岩層層理方向的电阻率； ρ_1 是平行于岩層層理方向的电阻率。

在各种岩層中如有不同电阻率的夾層，那就会大大地增加这些岩層的各向异性。

第二章 电阻率法測井的理論基础

§ 3. 电測井原理

如上所述、电測井就是測量岩層的視电阻率及沿井身電場的
自然(自然产生的)电位。

这两个数值，均根据測量深度，以曲綫形式——电阻曲綫及
自然电位曲綫——記錄在紙帶上。同时記錄下的这两种曲綫，就
是电測井曲綫圖。

我們將視电阻率簡写为 KC ，自然电位簡写为 HO (自然極
化)；分別用“ KC 曲綫”及“ HO 曲綫”标示。

根据 KC 曲綫可以判定一些岩層的电阻率，而根据 HO 曲
綫則可以判定这些岩層对于形成電場的活动性。在許多情況下，
同时研究 KC 及 HO 曲綫能使我們得到关于岩層所具地質性質的
概念，其中包括岩層的含油性。

§ 4. 電場电位基本原理

为了測定視电阻率，必需研究在某种介質中通入电流时所形
成的電場。

我們用電場某点的电位能說明電場的性質，电位的分佈符合
两个基本定律。其中第一个是微分形式的欧姆定律。

假設有某一种各向同性的介質，其中有等电位面(圖 3)。显