

油所地球物理概论

赵人寿编

燃料化学工业出版社

油矿地球物理概论

赵人寿 编

燃料化学工业出版社

本书系主要参考美国R. E. Sheriff, 《Glossary of terms used in well log》(《测井常用术语名词解释》)一书, 结合我国生产实际编写而成。简要地介绍油矿地球物理(测井)的种类, 各种方法的基本原理及其特点。内容包括测井一般概念, 电测井、放射性测井、声波测井和其它方法测井(如气测、核磁测井及生产测井等), 对辅助测井(如地层倾角、井斜、井径等的测量)也作了一定的叙述, 最后介绍测井记录的解释方法等。为了便于读者查阅, 书后附有单位换算表及检字索引。

本稿经华东石油学院测井教研室王曰才、雍世和二同志审阅。

本书可供测井技术工人、领导干部、测井工程技术人员及有关院校师生参考。

油矿地球物理概论

赵人寿 编

燃料化学工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

燃料化学工业出版社印刷二厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

* * *

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $3 \frac{1}{2}$

字数 74 千字 印数 1—4,810

1974年8月第1版 1974年8月第1次印刷

* * *

书号15063·2081(油-51) 定价 0.36 元

目 录

一、油矿地球物理(测井)概述	(1)
(一) 测井的必要性	(1)
(二) 测井的可能性	(2)
(三) 测井的优点	(2)
(四) 测井在石油地质工作中的作用	(3)
(五) 测井在钻井工程方面的作用	(3)
(六) 测井在开发工程方面的作用	(4)
(七) 测井技术在方法和研究方面的发展趋势	(5)
二、油矿地球物理(测井)方法分述	(7)
(一) 通用的一般概念	(7)
1. 测井、测井记录	(7)
2. 松软岩石、软地层	(7)
3. 孔隙度、渗透率、饱和度	(8)
4. 原生水、束缚水、间隙水、地层水	(10)
5. 侵入作用、侵入带	(10)
6. 井壁崎岖性(凹凸性)、井孔影响、补偿测井、误差曲线	(12)
7. 各向异性	(13)
8. 岩心分析、井壁取心	(13)
9. 下井设备、电极系	(14)
10. 臂、座垫、极板、扶正器	(14)
11. 电极距、源距、间隔(或间距)	(15)
12. 探测深度(或探测半径)	(15)
13. 对比	(15)
(二) 电法测井	(15)
1. 自然电位测井	(16)
2. 电阻率测井	(21)
3. 微电阻率测井	(30)

4. 侧向测井	(34)
5. 微侧向测井	(37)
6. 邻近(侧向)测井	(39)
7. 感应测井	(39)
(三) 放射性测井(核测井)	(42)
1. 伽玛射线测井(自然伽玛测井)	(43)
2. 中子测井	(45)
3. 井壁中子测井(“井壁中子孔隙度测井”的简称)	(47)
4. 密度测井(伽玛—伽玛测井)	(47)
5. 核水泥测井	(50)
6. 光子测井	(50)
7. 氯测井(矿化度测井)	(50)
8. 中子寿命测井	(51)
9. 热(中子)衰减时间测井	(51)
10. 活化(激活)测井	(53)
11. 放射性示踪剂测井	(54)
(四) 声波测井	(54)
1. 声速测井(速度测井、连续速度测井)	(56)
2. 井孔补偿声波测井	(58)
3. 水泥胶结测井	(58)
4. 变密度测井(变强度测井)、微地震图测井、三维速度测井 (简称三维测井)	(60)
5. 裂缝测井	(60)
6. 井下声波电视	(63)
7. 特性测井	(63)
(五) 其他方法测井	(63)
1. 气测井	(63)
2. 温度测井(井温测井、热测井)	(65)
3. 核磁测井(核共振测井)	(68)
4. 生产测井	(71)
5. 一些辅助测井和录井	(75)

(六) 测井记录的解释方法	(82)
1. 定性解释	(82)
2. 定量解释	(85)
3. 地层估价	(94)
4. 用计算机解释测井资料	(95)
附表 I 测井在石油工程方面的应用	(98)
附表 II 对各种井眼条件及地层类型, 建议选用的测井 方法一览表	(99)
附表 III 英美制与公制度量衡换算系数表	(101)
附表 IV 呎与米换算表	(101)
检字笔画索引	(102)

一、油矿地球物理（测井）概述

油矿地球物理，或称井孔地球物理，简称测井，是应用地球物理的一个部门，是石油工程不可缺少的一门科学技术。可以说，没有一口井（探井、生产井或注水、注气井等）不曾进行过测井；也可以说，没有一个油田或气田从勘探到开发不是经常地需要进行测井的。

（一）测井的必要性

众所周知，当对某一地区做了详尽的地面石油勘探工作（包括地质调查和地面地球物理勘探），并且作出了可能存在油、气藏的结论之后，要对这结论的正确与否进行验证，把可能性变为现实性，唯一的手段，便是钻井；而且要把有开采价值的油、气资源取出来加以利用，也非钻井不可。

正是由于钻井需要耗费巨大的人力、物力和时间；正是由于地面勘探限于在一个地区地表的广阔方面（横向）的勘探（地面地球物理勘探能够同时得到纵深方向的材料），对于深达数百米至数千米的纵深（纵向）地质剖面，一般难于作出细致、准确的描述（相对于测井记录而言）。对于气、油、水的存在和性质的判断，岩石物理参数的估计，也只能是间接的或推断的。基于这些原因，除去在钻井过程中，注意观察钻速变化、泥浆变化、有无油、气显示，和收集岩屑、岩心、流体样品进行实验室试验分析之外，当然不应放弃利用井孔（裸眼井或套管井）的机会，来取得井下地质剖面的丰富资料。能够完成这一任务的技术，便是测井。为了更好地

完成这一任务，随着现代其他科学技术的发展，测井技术的内容和解决问题的能力，也在不断地发展和提高。

（二）测井的可能性

构成地质剖面的地层，大体上说，则是以一定几何形态分布的具有一定物理性质的物质。并且对相邻的地层来说，这些物理性质，在定性上和定量上，总是存在着差异的。因而利用下井的和地面的仪器设备进行测量，它们的反映也不相同，可以经过比较，把它们分辨出来加以研究。这就是测井技术为什么成为可能。换句话说，就是以构成地质剖面的地层为研究对象，以物理的方法对它进行测量，从而解决有关油、气藏的问题。所以，测井乃是一门涉及到地质学和物理学的边缘科学。

（三）测井的优点

测井的优点在于：（1）下井设备在井孔中距离井壁很近，甚至和井壁相接触，因之能够灵敏地、准确地、细致地反映地层性质和厚度的变化。（2）增长悬挂下井设备的缆线，可以沿纵深方向对全井孔进行测量。（3）通过适当的传动设备，随着下井设备沿井孔逐步下降或上升，可以取得沿全井孔的连续测量记录。（4）钻取岩心来测定岩石物理参数或作其他研究，是昂贵的、费时的，所以很少对每口井都取心和对井下地质剖面全部取心。并且由于岩石的胶结程度不同，也常常难于得到全部岩心（例如良好的含油的疏松砂层不易取得岩心）。但是，利用测井资料可以算出岩石的物理参数，或代替岩心作地下地质剖面的研究。（5）对裸眼井或套管井，可以选用不同的测井方法进行测量。因之对于套管井可以反复测量。对于老井（一般是套管井）有时通过取得补充资料，往往能发现被遗漏的油、气层（早期的放

射性测井就有这方面的事例)。

(四) 测井在石油地质工作中的作用

在石油地质工作方面,通过对测井资料的研究,可以:

(1) 确定井下地质剖面的岩石学类别(如砂岩、页岩、泥岩、石灰岩、白云岩、石膏、无水石膏,等等)和它们的厚度。(2) 划分出渗透性的和非渗透性的地层和它们的厚度。

(3) 指出渗透性地层中是含油、气或水,并估计出它们的饱和度。(4) 确定岩石孔隙度(又称孔隙率)、渗透率。(5) 确定岩石的物理参数(如弹性、密度等),给地面地球物理勘探的解释和研究提供有用资料。(6) 在有多口井测井资料时,可以对储集层构造图(指根据地面勘探所绘制的)进行修正。对储集层进行细致分层,对每层的厚度(主要的是有效厚度)和范围作出更准确的估计。(7) 在有了储集层的含油、气饱和度、孔隙度以及有效厚度等资料,即可对储集层作出估价,亦即估计油、气的可采储量,为设计开发方案提供依据。这是石油地质工作的基本的和首要的任务。

(五) 测井在钻井工程方面的作用

在钻井工程方面,主要的要求是优质、安全、快速,测井技术的应用可以起到重大作用。首先是根据地质剖面资料作出钻井设计,在这里测井资料是不能缺少的(在钻第一口井时,可以取用附近地区的测井资料作为参考)。在钻井过程中,(1) 为了保持井孔的偏斜在允许的角度范围以内;

(2) 为了知道因地层塌落而造成的井径扩大;(3) 为了侦查因井下地质剖面结构的变化(如裂缝、溶洞、断层,等等)而引起泥浆的漏失,或地下水的侵入;(4) 为了预防井喷的严重事故,侦查出超压地层的可能即将到达;(5) 为了下放套管估计所需的水泥量;(6) 为了解除井下钻井事故(如卡

钻、钻具的坠落，等等)；以及(7)为了钻成定向的斜井，皆需进行测井。而最重要的是(8)在下放套管灌注水泥之后，检查水泥胶结质量。这是测井在钻井工程方面的一项重要任务，水泥胶结的质量好坏，将在一口井的全部寿命中发生影响。

(六) 测井在开发工程方面的作用

采收油、气是天然石油工业开发工程的主要目的。在一定条件下，要求生产能达到长期、稳定、高产。换句话说，要对油、气资源取得最高收获率。为了达到这个目的，测井自始至终起着重大作用。(1)首先，在一口井完成之后，需要进行试采。根据测井资料，对于推断为可能的含油、气层，能够准确无误地射孔。(2)在证实为含油、气层，并获得油、气流之后，便需进行一系列测试工作(亦即测井)，取得各项原始资料，判断其有无开采价值，以及确定开采方法，而后投入生产或封闭。(3)因为气、油、水是流体，而且在储集层里常是同时存在的。在开采过程中，常以某种驱动方式(如水驱、溶解气驱，等等)而不断移动。由于储集层的岩性岩相的变化，或者采收技术的不够恰当，以致发生过早减产或水侵现象。通过测试(测井)发现这类现象，作出预防或改进措施(如注水、注气，以保持驱动能力)，达到正常生产。(4)由于钻井工程的某些缺点(如水泥胶结质量不好)，或因较长时期的生产而引起地层结构的变化，以致有套管脱落、井壁窜槽、地下水入侵等等事故。通过测试(测井)，找出事故原因和所在位置，进行修井，恢复生产。(5)在一个储集层需要进行压裂、爆炸、酸化等等处理，进行二次采收时，也要利用测井资料和技术，以提高准确性和工作效能。(6)一口井在作报废处理之前，也应重温该井的测井

资料，或尽可能做一些测井补充工作，而后作出决定，以免贻误。并根据资料作出一些有关报废的措施（防止影响邻井、拔取井下装备——如套管，等等）。

（七）测井技术在方法和研究方面的发展趋势

根据构成井下地质剖面的地层的几何形态和物理性质的一般情况以及井孔的一般条件，产生了多种测井方法，如电法测井、放射性测井（或核测井）、声波测井以及其他测井（如气测井、温度测井、核磁测井、生产测井，等等）。每种测井方法为了适应具体情况和达到特殊目的，又有若干分类，在井下的和地面的仪器设备方面有所不同，在记录和解释方面也有所不同。在现代其他科学技术不断发展的情况下，测井技术也在不断改进和发展。

总的趋势是改进井下的和地面的仪器设备，多种方法组合测量正在相继发展成功，例如双感应—聚焦电阻率系统、声波—中子组合以及某些井壁密度—声波组合系统等。各种声的、核的、电的组合以及可以同时测量一些地层参数的其它类型的设备，都将对于从事测井记录解释的人员极为有利。利用组合测量，可以消除一些可变因素的影响。例如：

（1）在相同井下情况下，取得多种测井曲线，因之它们之间能有更好的对比；（2）在取得多种曲线记录的时间里，井下情况很少变化；（3）在井孔中一次运行，能得到更为完全的资料；以及（4）应用多种曲线测得结果对井估价，则更为全面。所以多种方法组合测量，以一次运行获得多种曲线，这一改进的主要效果是增加可用于地层估价的资料和其他方面，而不显著地增加测井费用和停钻时间。

在资料解释方面，也是对多种方法的记录进行综合整理。为了提高效率，迅速得到解释成果，将模拟信号型式的曲线

记录进行数字化，而后按照设计的计算机程序，应用计算机进行处理。所以测井技术的综合化和计算机化，进一步提高了它的效能和它的准确性与可靠性，更有利于解决石油工程中的有关问题。

测井的研究工作和发展重点，除去上面所述的综合化和计算机化之外，是在声学、脉冲中子、能谱与核共振诸方面，当然其他方法的改进和研究，仍然在进行中。声学研究可能的应用是确定岩性；通过弹性参数确定岩石结构；侦查和估计裂隙和洞穴带；改进产生和侦查压缩波、切变波和管波；更好地估计水泥对地层的固结情况；得到在多种钻井情况下对于地层或套管的声波“图画”或直观记录；确定真实的孔隙度、渗透率以及地层流体类型和饱和度，等等。脉冲中子、能谱研究可能的应用在于通过元素分析以确定岩性；通过元素分析识别地层流体和确定含量；通过套管的补偿的孔隙度测量；非石油矿产的识别；以及关于岩石结构的资料，等等。核共振研究可能的应用在于测定地层渗透率、碳酸盐岩孔隙度、地层流体类型和含量、地层水电阻率、岩性以及也许能得到关于孔隙大小和孔隙状态的指示。由此可见，测井研究工作和发展重点，都将直接或间接提高对含油、气藏的储集层的估价以及解决地质研究和钻井开发有关的工程问题。石油勘探工作者十分重视直接找油的研究。但是，直到目前，尚未取得显著地有效的方法。科学技术是在不断发展的，相信在不远的将来会解决这个重大问题，而测井工作必将占有重要地位。

二、油矿地球物理（测井）方法分述

（一）通用的一般概念

在分述各种测井方法之前，先来叙述一些通用的一般概念。

1. 测井、测井记录

测井技术的目的，是要取得在井内对地层进行一种或多种物理测量并作为深度的函数的记录，称为**测井记录**。有时测井记录是指的一套全部记录，它可以包含表明几种测量的某些曲线。但是，单条曲线本身有时也叫做**测井记录**。对这二者有时作出区别。测井记录的取得，有以下三种途径：

（1）**缆线测井记录**，是**缆线测井**所得的记录，亦即用电缆把装有传感器的下井设备（或电极系）下入井内，进行记录的。例如：电法测井、放射性测井、声波测井以及其他测井（如井温、井径、井斜，等等）。

（2）在地面收集资料的其他类型的测井记录，有时称为**录井**。例如：钻时录井、泥浆录井，等等。

（3）还有一类测井记录，它所表明的量是从其他测量算得的。例如：可动油制图、计算机综合显示测井图，等等。

2. 松软岩石、软地层

成为油、气藏的储集层，一般是沉积岩，岩石松软，所以常称为**松软岩石**。反之，成为矿产矿藏的岩石比较坚硬致密。因之，常以坚密岩石与松软岩石来区别矿产和石油这两

种矿藏。对于固结得差的砂岩—页岩层系，常称为**软地层**。

3. 孔隙度、渗透率、饱和度

对于构成油、气藏储集层的地层，我们首先注意的岩石物理性质，是它的孔隙性、渗透性、以及所含流体类别和含量。这些性质的定量表示，叫做岩石物理参数。除去钻取岩石在实验室测定之外，常可从测井资料求出这些参数。这在石油工程中具有重大经济意义。

(1) 孔隙性、孔隙度

岩石具有良好的孔隙性是成为储集层的必要的重要条件。孔隙性优劣的定量表示，称为孔隙度，亦即在单位体积的地层中，孔隙所占体积的百分数，常以符号 ϕ 表示。可以从声波测井、密度测井、中子测井、或电阻率测井来确定孔隙度。

孔隙度有**原生孔隙度**、**次生孔隙度**和**有效孔隙度**之分。原生孔隙度指的在沉积岩已被压实之后留下的孔隙度，而不考虑到由于以后的化学作用、或者因水流通过沉积岩而有的变化。次生孔隙度是后加的孔隙度，它是由于化学变化，特别是破裂、裂缝、溶洞以及由于白云岩化而产生的孔隙。有效孔隙度是指对自由流体有用的孔隙度，不包括不连通的孔隙、以及束缚水和散布的泥质所占的空间。**次生孔隙度指数**是次生孔隙度的度量，常以 SPI 表示。它是从声波测井，或者结合密度测井、或者结合中子测井算得的孔隙度。

(2) 渗透性、渗透率

在有压力差存在的条件下，能使流体通过岩石的这种作用，叫做渗透作用。地层容许流体流过的性质，叫做**渗透性**。对容许流过的难易程度的定量的度量，叫做**渗透率**。**达西定律**表达了流体流动率和渗透率之间的关系如下：

$$q = \frac{kA}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{X}$$

式中 q ——流体流动率； k ——渗透率； A ——截面积；
 μ ——粘度； X ——厚度； ΔP ——在厚度 X 两侧之间的压力差。

当粘度为 1 厘泊的流体，在每厘米 1 大气压的压力梯度下，以每秒 1 毫升的流体流动率，通过 1 平方厘米的截面积，这样的渗透率，叫做 1 达西。通常所用的单位是千分达西（或毫达西），即 1/1000 达西。

渗透率又可分为绝对渗透率，有效渗透率和相对渗透率。当只有一种流体（油、气、或水）通过岩石时所测定出来的渗透率，叫做绝对渗透率。当有两种或两种以上的流体通过岩石时，对一种流体所测定的渗透率，叫做有效渗透率。通常也以对于其中一种流体的渗透率和当仅有这种流体存在时的渗透率的比值，表示相对渗透率。因为各种流体阻碍相互的流动，存在的所有流体的相对渗透率之和常小于 1。

通常所说紧密的地层，就是指的有很低渗透率的地层。显然，它对油、气藏的采收很为不利。

通常所说污染的或含杂质的（即含页岩质、泥质的）地层，是指散布在间隙中的页岩质（泥质）达到可觉察的份量。这样的页岩质（泥质）将降低渗透率和有效孔隙度，并且影响许多类型测井的读数。反之，通常所说的纯净的地层，指的所含的粘土或页岩质的份量低于可觉察到的程度。这一概念适用于砂岩和碳酸盐岩。泥质（页岩质）含量是指的在明显属于非页岩与非泥岩地层中粘土（或页岩质）的含量。显然，泥质含量的高低与该地层的渗透率有关。

（3）饱和度

岩石孔隙空间所含流体类别和含量常以其饱和度来表示。**含油、气饱和度**是被油或气填充的孔隙体积在全部孔隙中所占的百分数。**含水饱和度**是含有地层水的孔隙体积在全部孔隙中所占的百分数。阿尔奇公式（见电法测井）表明含水饱和度与地层水电阻率及地层电阻率之间的关系，因之由电法测井可以求出含水饱和度，从而得出含油、气饱和度。

束缚水饱和度是在含油、气饱和度最大的储集层中，被水所占的孔隙体积的百分数。它代表附着在岩石表面的、在较小孔隙空间、以及狭窄间隙等等中被捕集的水，它不曾被油、气所置换。束缚水饱和度是一个平衡状态。它和岩心分析所测得的**残余水饱和度**不同，因为后者有泥浆滤液的侵入，并且当岩心从井底移至地面时发生气体的膨胀。这些都将改变岩心的含水饱和度。

4. 原生水、束缚水、间隙水、地层水

原生水是沉积岩在沉积过程中所捕集的水。**束缚水**是被吸收在页岩、石膏或其他物质中的、或与它们化学结合的水，在自然条件下，它不能自由流动。**间隙水**是在地层间隙或孔隙空间的水。这些水都是存在于地层中，所以统称为**地层水**。

区别水的性质，主要的是它的**矿化度**（或称**含盐度**），是指的水中溶解的全部盐类（包括钠、钾、氯化物、硫酸盐，等等）。通常是指在每百万分水溶液中，盐类占有的部分，常以ppm表示。所谓淡水（淡的，清的）是指溶解的盐类很少。有时与正常的海水（它含有溶解的盐分是35000ppm）比较。有时用于以地层水与泥浆滤液比较。淡水含有的溶解盐分少于2000ppm。

5. 侵入作用、侵入带

通常钻井采用旋转钻机，由于为了带出岩屑，以及降低

钻头与地层磨擦产生的温度等等原因，需要循环泥浆。为了防止井喷，通常保持泥浆压力大于地层流体的压力，因而对多孔的可渗透的地层，泥浆液体（常称泥浆滤液）渗透进去，并置换了某些地层流体。这种现象叫做泥浆滤液的侵入作用。围绕着井孔、泥浆滤液已经渗透进去、并置换了某些地层流体（油、气以及地层水）的地带，叫做侵入带（见图1）。

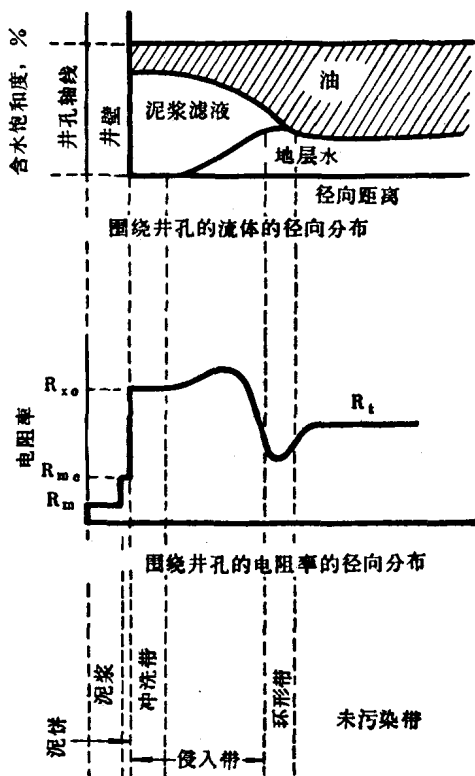


图1 侵入带