石油技工学校统编教材

矿场地球物理测井

中国石油天然气总公司劳资局组织编写

石 油 工 业 出 版 社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书简要而系统地介绍了普通电阻率、侧向、感应、声波、放射性、井径和地层倾角测井等十几种测井方法的基本原理、仪器结构及其测井曲线的定性应用；砂泥岩剖面和碳酸盐岩剖面的测井系列选择、现场快速直观解释成果图，以及地震勘探的简单原理和资料的一般应用。

本书可供石油技工学校钻采地质专业师生使用。

图书在版编目（CIP）数据

矿场地球物理测井/ 中国石油天然气总公司劳资局组织编写 .
北京：石油工业出版社，1998.6
石油技工学校统编教材
ISBN 7 - 5021 - 2292 - 3

Ⅰ. 矿…
Ⅱ. 中…
Ⅲ. 油气田 - 地下物探 - 测井 - 技工学校 - 教材
Ⅳ. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（98）第 12293 号

石油工业出版社出版
（100011 北京安定门外安华里二区一号楼）
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行
*
787×1092 毫米 16 开本 9 印张 218 千字 印 1—1000
1998 年 6 月北京第 1 版 1998 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7 - 5021 - 2292 - 3/ TE·1909
定价：15.00 元

第二版前言

本书是根据中国石油天然气总公司劳资局 1995 年审定的石油技工学校钻采地质专业《矿场地球物理测井》教学计划和教学大纲修编而成。

本次修编除保留了目前现场上仍使用的一些老方法外，还增加了现场上广泛使用的一些新方法。根据审定会要求，在本书中增加了地震勘探的部分基本知识。各校在教学中，可根据本地区使用的测井系列以及学校安排的学时数，对内容进行选择或补充。

本书在修编过程中，华北石油管理局测井公司的曹庆伟、温同礼和物探公司的杨杏娣都给予了极大的帮助，温同礼对全书进行了审核，在此表示衷心感谢。

本书共分五章。第一章由张石固和陆秀云修编，第二章由陆秀云修编，第三、四、五章由宣蓉华修编并统稿、定稿。

由于时间仓促，对书中存在的不足、缺点和错误，请各校师生提出宝贵意见。

修编者

1997 年 12 月

第一版前言

本书根据石油部劳资司 1984 年审定的石油技工学校钻井地质专业《矿场地球物理测井》教学计划和教学大纲编写而成。

目前测井技术在突飞猛进地发展，新技术、新方法、新工艺不断涌现。本书仅介绍几种较常用的测井方法的原理及其测井曲线的定性应用。由于各油田地质特点不一样，选用的测井方法也不完全相同，在教学中，可根据本地区使用的测井系列，以及本校安排的学时数，按照技工学校的标准进行选择、调整或补充。

本书共分四章。第一、三章由陆秀云编写，第二、四章由胜利油田河口技工学校刘丙录编写。

本书在编写过程中，胜利油田河口电测站绘解室的康叔莲同志、胜利油田河口技工学校的赵欠勇同志、胜利油田测井公司测井技校的张洪明同志、四川南充市东观镇技校李全柏同志都给予很大帮助并提出宝贵意见，在此表示感谢。

由于时间仓促，未能广泛征求意见，对书中存在的缺点和错误，希望各校师生提出宝贵意见，以便修订时改正。

编者

1985 年 12 月

目　　录

绪论…… (1)
第一章　电法测井…… (3)
第一节　测井现场和测井原图简介…… (3)
第二节　岩石的导电性…… (4)
第三节　普通电阻率测井 …… (13)
第四节　微电极测井 …… (26)
第五节　自然电位测井 …… (30)
第六节　侧向测井 …… (39)
第七节　感应测井 …… (46)
复习思考题 …… (53)
第二章　非电法测井 …… (55)
第一节　声学基本知识简介 …… (55)
第二节　声速测井 …… (57)
第三节　固井声幅测井 …… (65)
第四节　放射性基本知识 …… (67)
第五节　自然伽马测井 …… (71)
第六节　中子测井 …… (77)
第七节　密度测井 …… (84)
复习思考题 …… (87)
第三章　工程测井 …… (88)
第一节　井径测井 …… (88)
第二节　井斜测井 …… (91)
第三节　井温测井 …… (93)
第四节　流体电阻率测井 …… (97)
第五节　高分辨率地层倾角测井 …… (97)
第六节　磁性定位…… (101)
第七节　生产测井…… (102)
复习思考题…… (102)
第四章　测井资料的综合应用…… (104)
第一节　砂泥岩剖面测井资料解释…… (104)
第二节　碳酸盐岩剖面测井资料解释…… (122)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

复习思考题…… (125)
第五章　地震勘探知识…… (127)
第一节　地震勘探概述…… (127)
第二节　地震勘探的地质基础…… (130)
第三节　地震勘探资料的解释…… (132)
复习思考题…… (134)
参考文献…… (134)

绪　　论

在石油勘探和开发中，认识和掌握地下地质情况的方法大致有两种：一是直接法，即通过钻井取心、井壁取心及地质录井方法，对岩样进行直接地观察、描述、分析和鉴定，确定岩层的地质性质（岩层地质性质一般是指岩层的矿物及化学成分、结构、构造和含油、气、水等性质）；二是间接法，即通过对岩层的地球物理性质（指电学性质、声学性质、热学性质及放射性等）的研究，间接地确定岩层的地质性质。后者就是地球物理测井所担负的任务。

岩层的地质性质和地球物理性质之间存在着密切的关系。一定的地质性质会反映出相应的地球物理特性，当岩层的地质性质变化时，其地球物理性质也随之变化。因此，完全能够通过对岩层地球物理性质的研究，间接地认识岩层的地质性质。

地球物理测井是利用专门的仪器设备，沿钻井井身测量地层的各种地球物理参数的方法。地球物理测井不仅应用在石油勘探和开发中，而且还可用来寻找其它有用矿藏。因此，地球物理测井又称为矿场地球物理测井（简称测井）。

从40年代自制的手动电测仪发展到今天的全自动大型数字测井仪，测井工作已经历了半个多世纪的时间，为我国石油工业的发展作出了巨大贡献。50年代，我国自制的“JD-581型多线式自动井下电测仪”投入生产。60年代又研制了“声、感、侧”新仪器。70年代，引进了3600系列和85型计算机。测井系列更加完善，交会图技术广泛应用。进入80年代以来，我国陆续引进了3700系列、CSU等数字测井仪器和PE3220计算机。90年代是我国数控测井技术的兴盛时期。电子计算机在测井装备中得到广泛应用，从而解决了测井过程的自动化和测井资料的现场快速直观解释，各种影响因素得到了校正，使测井资料能更加切实地解决更多的地质问题。

岩层有各种地球物理特性，相应的地球物理测井方法有：电法测井、非电法测井和工程测井等。

电法测井包括普通电极系测井、微电极测井、侧向测井、感应测井和自然电位测井。非电法测井包括声波测井和放射性测井。此外还有井径、井温、地层倾角等其它测井方法。

测井时，将下井仪器下入井中，以探测岩层的各种地球物理特性，并以电信号的形式将其测井响应通过连接下井仪器与地面仪器的电缆送至地面，由地面仪器记录下来。同时为了确认地知道电信号所代表的岩层位置，在记录信号的同时，还记录产生电信号的深度。由此可见，探测井下岩层地球物理性质的过程，就是记录代表岩层地球物理性质的电信号及其所在深度的过程。

由于油田地质情况复杂，每种测井方法所获取的资料只是间接地、有条件地反映了地质特点的某一个侧面。所以，要全面地认识和掌握岩层规律，进而发现和研究油气藏，往往必须综合使用几种测井方法。对于一个地区，测井方法的选择必须结合该地区的地质地球物理特点，选择最有效的几种测井方法组成测井系列。对所测得的资料要进行综合分析和判断，结合该井的地质录井资料、本地区的地质地球物理特征等，全面、准确地认识地层。

测井虽然是研究岩层地质性质的间接方法，但它与其它录井方法相比，仍具有重要的优

点。其主要优点是效率高、成本低、效果好，只需要很短时间就能取得大量的测井资料，而且这些资料是在岩层的自然条件下测量的，这就更接近于岩层的真实情况。尽管每种测井方法具有其局限性，但采用多种测井资料的综合解释，仍能解决石油勘探与开发中的一系列问题，其中有些问题是其它录井方法所难以解决的。

目前在油气田勘探与开发中，测井配合其它录井资料所能解决的问题主要有：

①详细划分储层，确定岩性，准确地确定储层深度和有效厚度；

②定量或半定量估计油层的孔隙度、渗透率和含油气饱合度；

③进行地层对比，研究地质构造和地层沉积问题等；

④在油田开发中，提供油层动态的部分资料；

⑤研究井下技术情况，如井斜、井径、固井质量等。

在石油勘探过程中，地球物理勘探方法（简称物探）也是很重要的方法。地球物理勘探的方法包括重力、磁力、电法和地震勘探等。地震勘探与其它物探方法相比具有精度高的优点。地震勘探不仅可以查明地下地质构造，提供钻探井位，也可用来研究地层的岩性变化，确定沉积环境等。因此，许多油田和钻井部门都越来越广泛地开始使用地震资料，以便更广泛地进行地质研究。

第一章　电 法 测 井

第一节　测井现场和测井原图简介

一、测井现场简介

目前地球物理测井的一般设施如图 1 - 1 所示。

图 1 - 1　测井现场示意图

1. 下井仪器

下井仪器根据测井项目的需要而定。一般有声—感系列、放射性、双侧向微球、地层倾角、地层测试等下井仪器。

2. 提升系统

提升系统的作用是按测量的需要上提或下放仪器，以及传输供电电流和测量信号。包括：

①绞车控制台、滚筒——由电动机控制的上提、下放下井仪器的动力设备。

②天滑轮与井口滑轮——用来支承电缆，改变电缆受力方向的滑轮。

③马笼头——用以连接下井仪器与电缆各缆芯的接口。

④深度编码器——作用是以光电转换的形式完成深度编码，送出能代表测井速度和深度的电信号。

3. 测量记录系统

在车载计算机测井系统中，整个测井过程是在系统软、硬件的支持下，由程序控制进行的。大致包括测井前的准备工作、仪器的刻度与检验、测井、取得测井信息和深度信息、测井后的刻度、测井资料和回放和现场处理解释。测井时，下井仪器沿井轴方向不断地采集各种测井信息，经特定的通信线路——电缆传到地面，由下井仪器专用接口，将不同形式的测井信号归纳、处理，转换成电子计算机能识别的信息，送入计算机，计算机处理过的数据同时输出到绘图仪和输出磁带机记录，取得测井曲线图和原始测井数据。在现场可对测井资料进行快速直观解释，对地层做出初步评价。

二、测井原图简介

测井信息和深度信息经计算机处理后输到绘图仪（光学照相记录仪），从而在胶片上或相纸上得到清晰的测井曲线图，称为测井原图。测井原图中包括测井刻度线、测井曲线、深度数据等。深度系统可选 SI 或英制，深度比例有很多种，根据测井项目要求而定。胶片上记录的曲线可划分为 3～4 区段，刻度比例有线性和对数两种，如图 1 - 2 所示。从图中可以看出左道采用线性刻度，右道采用对数刻度，中间是深度道。测井原图上均带图头，中间深度道上有时还有一条张力线。

图 1 - 2　测井原图

第二节　岩石的导电性

电法测井是出现最早、应用最广的测井方法，它包括所有以电学性质和电化学性质为基础的测井方法。根据测量参数的不同，可分为电阻率（包括电导率）测井和自然电位测井。

一、岩石电阻率

所有的电阻率测井方法都是建立在各种岩石具有不同的导电性这一基础上的。一种岩石的导电性是指这种岩石传导电流的能力，常用电阻率这一物理量来表示。导电能力差的岩石其电阻率高，而导电能力好的岩石其电阻率低。

由物理学知道，均匀材料所组成的导体，其电阻 r 与导体的横截面积 S 成反比，与导体的长度 L 成正比，可表示为

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

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 Ω·m。

由式（1—1）可以看出，导体的电阻不仅和导体的材料有关，而且和导体的长度、横截面积有关，因此从研究导体性质的角度看，测量电阻这个物理量显然是不确切的。因为相同材料的物质，其长短、粗细不同，则电阻值不同，特别是在测井中遇到的各种地层，它们的厚度变化很大，而同样岩性的地层，由于厚度不同，测出的电阻值也不同。因此，在电阻率测井方法中，不是测量地层电阻的大小，而是测量反映岩层性质的电阻率。

由式（1—1）也可以看出，岩石电阻率 R，数值上等于一个截面垂直于电流方向的、边长为 1m 的立方体岩石的电阻值。当电阻单位用 Ω 时，电阻率的单位为 Ω·m。

岩石由于成因不同，其导电方式也不同。大部分火成岩、变质岩十分坚硬、致密，不含地层水，它们主要依靠组成岩石的造岩矿物中的极少数自由电子导电，所以电阻率很高。如果它们含金属矿物，由于金属矿物具有导电的自由电子，岩石电阻率就比较低。这种依靠自由电子导电的方式，称为电子导电。

沉积岩的导电方式与火成岩不同，沉积岩中具有一定程度的孔隙和裂缝，并且孔隙和裂缝里都含一定的地层水，而地层水中含有一定盐类，这些盐类呈带电离子状态存在，在外加电场作用下，带电离子做定向运动，这种依靠离子导电的方式称为离子导电。

此外泥质成分也使地层具有导电性，泥质的导电方式与上述不同，泥质导电是一种离子交换过程，即在外电场作用下，吸附在泥质颗粒表面的带电离子依次移动前进，由此形成电荷的定向移动，泥质岩石导电以离子交换方式为主。

一般说来，油气是生成于沉积岩并主要储集在沉积岩中，所以这里只讨论沉积岩岩石电阻率的变化规律。

二、岩石电阻率的影响因素

简单地说，沉积岩的结构是有孔隙的矿物结合体，在孔隙中充满地层水或油气。由于主要的造岩矿物和油气是不导电的，因此沉积岩主要由孔隙中的地层水所含的离子导电。离子导电的能力取决于离子的数目和离子运动的速度。影响岩石电阻率的因素可归纳为：

- 沉积岩岩石电阻率
  - 离子数目
    - 地层水的含量
      - 孔隙度（ ）
      - 含油饱和度（S_o）
  - 离子速度
    - 地层水的导电性 —— 地层水电阻率（R_w）
      - 盐的成分
      - 含盐浓度
      - 温度
    - 地层水的分布 —— 孔隙形状 —— 岩性

需要全本请访问 www.ertongbook.com

由此可以看出，影响岩石电阻率的因素主要是：地层水电阻率、孔隙度、含油饱和度和岩性。下面对这些影响因素分别进行讨论。

1. 岩石电阻率与地层水电阻率的关系

纯水是不导电的，存在于岩石孔隙中的地层水所以能够导电是由于它溶解了盐类，盐类在水中离解成为正、负离子。在电场作用下，正、负离子分别沿着电场方向和逆着电场方向移动，带着电荷的离子在溶液中定向移动就形成了电流，溶液就成为导体。

在造岩矿物不导电的情况下，岩石的导电作用仅由地层水来实现。实验证明，岩石电阻率与地层水电阻率成正比关系，即地层水电阻率低，岩石电阻率就低，反之则高。

地层水电阻率又与下列因素有关：

① 盐的化学成分。在油气田的地层水中含有不同的盐类，如 NaCl、KCl、Na_2SO_4、$MgSO_4$、$CaCO_3$、$CaCl_2$ 等。由于这些盐类具有不同的电离度，它们的离子又具有不同的离子价和不同的迁移率，因此地层水电阻率不同。电离度大，盐分子离解为离子的百分比大，离子数多，导电性好，地层水电阻率小；离子价高，离子携带的电荷多，地层水电阻率小；离子迁移率大，离子运动快，地层水电阻率小。反之，电离度小、离子价低、离子迁移率小的，地层水电阻率则高。

②含盐浓度。一般来说，地层水含盐浓度越大，水中离子数越多，其导电性越好，地层水电阻率就越小。反之，地层水含盐浓度越小，地层水电阻率越高。但是，当地层水含盐浓度特别高时，由于离子之间的相互作用增大，离子迁移率减小，地层水电阻率反而升高。

③温度。地层水电阻率随温度的变化而变化。这是由于地层水温度升高，盐类的溶解度增大，从而使地层水中的离子数增加；地层水温度升高，离子移动的摩擦力减小，从而使离子移动的速度加快。所以，温度升高使地层水电阻率降低。

由上述分析可知，地层水电阻率是浓度、温度和盐的化学成分的函数。设地层水电阻率为 R_w，含盐浓度为 C，温度为 T，盐的化学成分为 P，则

$$R_w = f(C、T、P) \qquad (1—2)$$

在研究多因素的函数关系时，往往需要先固定其中某些因素，研究溶液电阻率与浓度和温度的关系时，先固定化学成分这一因素。通常遇到的地层水是以含 NaCl 为主的，可近似看成 NaCl 溶液。我们用实验做出了 NaCl 溶液电阻率与浓度和温度的关系曲线如图 1 - 3 所示。

如果实际地层水含非 NaCl 的盐类极少，则该地层水可视为含 NaCl 溶液，并根据已知地层水的浓度和温度通过图 1 - 3 查得地层水电阻率。

若实际地层水含非 NaCl 的盐类较多，则对溶液矿化度要进行等效校正，即把它换算成含纯 NaCl 溶液的浓度，然后再用等效 NaCl 浓度去查图版，以求得该种地层水的电阻率。

非 NaCl 离子浓度的等效换算是将地层水水样中各种离子的浓度加在一起，为水样的总矿化度，由图 1 - 4 中查得每种离子的换算系数，然后再将各种离子浓度乘以其换算系数后求和，便得到等效 NaCl 浓度。

[例 1 - 1] 某地层水水样化验分析结果见表 1 - 1。

在图 1 - 4 上查得 Ca^{2+} 的换算系数为 0.81，SO_4^{2-} 的换算系数为 0.45，则等效 NaCl 的浓度为

图 1 - 3　NaCl 溶液电阻率与浓度和温度的关系图版

图 1 - 4　不同离子换算系数

表 1 - 1　水样化验分析结果

离子名称	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	$Na^+ + Cl^-$
离子矿化度，mg/ L	460	1400	19000
总矿化度，mg/ L	20860		

460×0.81 + 1400×0.45 + 19000≈20000 (mg/ L)

井下地层水的温度一般可以用两种方法求得：一是利用公式计算；二是利用图 1 - 5 直接查得。

[例 1 - 2] 已知起始温度 t_0 = 15℃，地温梯度 G_{DC} = 3.5℃/ 100m，求井深为 2650m 处的温度。

计算地层温度的公式为

$$t = t_0 + G_{DC} \times H \qquad (1—3)$$

将数据代入式 (1—3) 得

$$t = 15 + \frac{3.5}{100} \times 2650 = 107.75(℃)$$

利用图 1 - 5 可直接查得温度约为 108℃。

图 1 - 5　估计地层温度图版

2. 岩石电阻率与岩石孔隙度及孔隙形状的关系

在沉积岩中，凡是能够储集油气，并允许油气在其中流动的岩层称为储集层。表征储集层储集性能的物理量之一是孔隙度，由于储集层孔隙空间中含有地层水，致使储集层有导电性。因此，岩石孔隙中地层水的含量、孔隙中油和水的分配比例，决定了岩石电阻率的高低。

当岩石孔隙空间百分之百含水时，孔隙度越大，地层水含量越高，岩石中能移动的离子数越多，岩石电阻率越低。

岩石的孔隙形状（如孔道截面变化程度、孔道弯曲程度、孔隙连通情况等）关系到离子运动的阻力（或速度）和参加运动的离子数，从而影响岩石电阻率。当孔隙空间大，且截面变化程度小、弯曲程度小、孔隙连通情况好，以及水溶液电阻率低时，则岩石电阻率低，反之则高。

通过大量实验资料分析表明，对于给定的岩样，孔隙空间百分之百含水时所测岩石电阻

率 R_0 与所含水溶液电阻率 R_w 之间有正比关系，即

$$R_0 = F_R \cdot R_w \text{ 或 } F_R = R_0 / R_w \tag{1—4}$$

式中 F_R 为比例系数。当岩样不变时，即使 R_w 改变，F_R 仍为常数，这表明 F_R 与水溶液电阻率无关。但改变岩样时，F_R 值就要发生变化，可见 F_R 只与岩石本身有关。F_R 称为地层因素或相对电阻率。

在双对数坐标中，纵坐标表示地层因素 F_R，横坐标表示孔隙度 ，F_R 与 有近似直线关系，如图 1 - 6 所示。

对于不同岩性岩石进行研究的结果，都得到规律相同的曲线，其直线段可用通式来表达

$$F_R = R_0 / R_w = a / (\cdot m) \tag{1—5}$$

式中 R_0——百分之百含水岩石电阻率；

R_w——地层水电阻率；

a——岩石系数，与岩性有关；

m——胶结指数或孔隙结构指数，随岩石孔隙结构的复杂程度和胶结程度而变化，如表 1 - 2 所示。

图 1 - 6　某油田地层因素与孔隙度

表 1 - 2　a、m 随岩石孔隙结构和胶结程度的变化关系

名称	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

3. 岩石电阻率与含油气饱和度的关系

含油气饱和度 S_o（岩石中油气体积占孔隙体积的百分数）也影响岩石中地层水含量。因为石油和天然气视为不导电物质，油气进入岩石孔隙时，挤走了同体积的地层水（含油饱和度 S_o 与含水饱和度 S_w 之和等于 1），使岩石中可导电的离子数目减少，岩石电阻率增高，

当含油气饱和度越高，则孔隙中的地层水含量越少，岩石电阻率越高。但是，即使含油饱和度极高，岩石电阻率也不会无限大，这是由于岩石颗粒表面对水的吸附作用，使岩石颗粒表面有一定量的束缚水存在，从而使岩石具有一定的导电性。

岩石电阻率与含油饱和度之间的定量关系是通过实验研究确定的。选取具有代表性的岩样，首先用水饱和，测出饱和水时的电阻率 R_0，然后逐渐往岩样中挤入原油，同时测出具有不同含油饱和度时相对应的岩石电阻率 R_t，在整个测量过程中，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，即含油岩石电阻率 R_t 与该岩石百分之百含水时电阻率 R_0 之比。

$$I = R_t / R_0 \qquad (1—6)$$

R_t 与 R_0 之比，消除了地层水电阻率、孔隙度大小及孔隙形状对电阻增大系数 I 的影响。因此，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，在双对数坐标系中，以纵坐标表示 I，横坐标表示 S_o，即得到它们的关系曲线，如图 1 - 7 所示。

图 1 - 7　电阻增大系数与含油饱和度的关系曲线

根据图中直线段可写出表达式为

$$I = R_t / R_0 = b' S_w^{n} = b' (1 - S_o)^{n} \qquad (1—7)$$

式中系数 b 和指数 n 由岩石的性质决定。

4. 岩石电阻率与岩性的关系

主要岩石和矿物的电阻率如表 1 - 3 所示。

需要全本请访问 www.ertongbook.com