

地球物理测井 基础及应用

〔美〕D.V.埃利斯



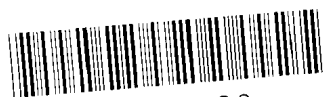
074040



地球物理测井基础及应用

〔美〕D.V.埃利斯

张守谦 顾纯学 译 谭廷栋 校



200313320

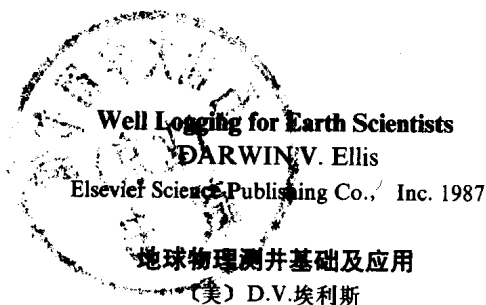


石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书较详细地论述了电测井、核测井和声测井的物理基础, 以及各种测井资料的地质应用。全书以“物理基础”为主线贯穿于各种测井方法中, 深入浅出地讲叙了各种测井方法的原理和应用。易学易懂。本书可用作高等院校测井、地质、物探、开发等专业本科生和研究生的教材, 也适用于从事这方面工作的工程技术人员参考。



张守谦 顾纯学 译 谭廷栋 校

*

石油工业出版社出版
(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

*

850×1168 毫米 32 开本 $18\frac{3}{4}$ 印张 490 千字 印 1-1,500

1993 年 6 月北京第 1 版 1993 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0872-6 / TE · 815

定价: 13.40 元

译 者 的 话

本书根据美国 Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1987 年出版的 WELL LOGGING FOR EARTH SCIENTISTS 译出, 这是美国最新出版的测井教科书。该书内容新颖, 反映出当代测井技术的发展水平; 全书自始至终, 把各种测井方法置于坚实的物理基础之上, 特别注重原理的阐述。正因为如此, 我们把书名转译为《地球物理测井基础及应用》, 而没有直译为《地学家实用测井》。

本书第一~七章、第十八~二十一章由张守谦翻译, 第八~十七章由顾纯学翻译, 全书由中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院高级工程师谭廷栋校订。

译文中的错误或不当之处, 敬请读者批评指正。

译者

1990 年 9 月于大庆石油学院

序

对那些地球物理测井资料的偶然使用者进行民意测验表明,最经常与测井相联系的两个词可能是“黑暗中的魔术”;在学生中间对测井也流传着同样令人沮丧的评价,有可能产生一个简单的与之相关的词“讨厌”。正是在这种气氛下,我应邀撰写这本测井教程,以便能彻底地清除这些消极的联想。我在本书中力图使测井非神秘化,并且为这种经常受嘲笑的地球物理测井方法的研究提供理论基础。读者必将成为我在这方面所做努力已取得成功的见证人。本书是针对即将投身于石油工业的学生而撰写的,但对想更多地了解测井而不是仅限于从中提取资料的实践者来说也是很有用的。应该向愈来愈多的地学家们发出呼吁:地下领域的研究工作也能用测井方法来进行。

本书是我于1985年和1986年冬季在斯坦福(Stanford)大学地学院教课的结果,参加学习的主要是石油工程系、地质系和地球物理系的研究生。Heriot-Watt大学的J. Jenson博士对本书进行了认真的审阅,他的工程硕士研究生曾把本书的草稿本作为测井课程的教材。

直到最近几年,只出版了少数几本测井书籍,而且没有一本特别适合于课堂教学。所用素材都只倾向于提供测井方法肤浅的讨论,很少有关物理基础的讨论,而我强调测井物理基础重要的倾向是贯穿于整个教材之中的。但是,我也试图用一些讨论和习题对此做出均衡,它们能够解释从测井资料中提取通常的岩石物性参数的机理。

本书采取的研讨方法是以概述主要类型的电测井、核测井和声测井作为开始,把所测的物理参数与所需要的岩石物性参数联系起来。作为解释的第一步,要利用实际工程条件和仪器所在的

井眼环境这些限制因素，来检查测量结果。其后几章提供组合测井和从组合测井作业典型解释的讨论及实例。自始至终，本书以斜体印刷的很多章节，一般读者可以跳读。之所以有必要包括这些更详细的章节，目的是让一些人能更多地了解所利用的特殊测量技术，并使他们更具有研究的兴趣。

测井可作为一种实验来加以考虑。进行这种实验的人不是在原始实验室环境下，而是在有很多未知条件的和难于控制的环境下进行的，其目的是利用颇为间接的方法推断有关岩石物性的资料。提取这种资料有时候是根据不很科学的单凭经验来做的方法，有时候是根据物理原理的直接应用。从测井资料提取的基本岩石物性参数是孔隙度和含水饱和度，它们都要根据从前正确的观测结果来加以处理，这就表现出那种不很科学的单凭经验来做的方法的起源和缺点。本书还要讨论根据测井资料估算岩石物性参数不断完善的现代研究方向。各章后面的习题，或者能使熟悉从测井资料获得有用答案的机理，或者用来说明能使石油工业以外的地学家感兴趣的非常规测井的问题。最后，我力图传达这样的消息：如果你对研究地下岩层感兴趣，那么很有必要试一下测井的某些方法。

目 录

第一章 测井概论	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 测井是什么	(2)
第三节 储层岩石的性质	(5)
第四节 测井的应用	(6)
第五节 测量方法	(7)
第六节 其他人如何看测井	(9)
参考文献	(12)
第二章 测井解释引论：寻找油气	(13)
第一节 引言	(13)
第二节 井场初步解释	(13)
第三节 井眼环境	(16)
第四节 定性解释	(18)
第五节 读测井曲线	(21)
第六节 曲线特征和测井显示的实例	(26)
第七节 快速解释实例	(32)
参考文献	(35)
习题	(35)
第三章 电阻率和自然电位的基本概念	(38)
第一节 引言	(38)
第二节 总体电阻率的概念	(38)
第三节 岩石和盐水的电性质	(44)
第四节 自然电位	(48)
第五节 自然电位测井曲线实例	(54)
参考文献	(55)

习题	(56)
第四章 电阻率解释基础	(61)
第一节 引言	(61)
第二节 早期电测井解释	(61)
第三节 定量确定 R_t 的实验方法	(64)
1.阿尔奇地层因素	(64)
2.阿尔奇公式	(67)
第四节 静电学回顾	(70)
第五节 供测井应用的假想实验	(72)
参考文献	(77)
习题	(78)
第五章 电阻率: 电极装置及其发展	(81)
第一节 引言	(81)
第二节 非聚焦电极系	(81)
1.短电位	(81)
2.估算井眼大小的影响	(83)
第三节 聚焦装置	(93)
1.侧向测井原理	(93)
2.球形聚焦测井	(96)
第四节 假几何因子	(100)
第五节 双侧向测井实例	(102)
参考文献	(106)
习题	(106)
第六章 感应测井仪器	(108)
第一节 引言	(108)
第二节 静磁学和感应场	(108)
第三节 双线圈感应测井仪器	(115)
1.双线圈系的几何因子	(117)
2.聚焦双线圈系	(123)
第四节 趋肤效应	(127)

第五节 选用感应测井还是侧向测井	(131)
第六节 感应测井实例	(132)
参考文献	(134)
习题	(134)
第七章 测量冲洗带电阻率的电测井仪器	(136)
第一节 引言	(136)
第二节 微电极仪器	(136)
第三节 R_{xo} 的应用	(142)
第四节 现场评论	(152)
第五节 介电性质	(156)
第六节 测量地层介电性质的仪器	(161)
1. 测量方法	(161)
2. 测井实例	(164)
附录 导电介质中电磁波的传播	(167)
参考文献	(172)
习题	(174)
第八章 测井应用的核物理基础: 伽马射线	(178)
第一节 引言	(178)
第二节 核辐射	(179)
第三节 放射性衰变和统计	(180)
第四节 辐射相互作用	(183)
第五节 伽马射线相互作用基础	(185)
第六节 伽马射线的衰减	(191)
第七节 伽马射线探测器	(192)
参考文献	(198)
习题	(198)
第九章 自然伽马测井仪	(200)
第一节 引言	(200)
第二节 天然放射性源	(202)
第三节 自然伽马测井仪	(206)

第四节 自然伽马射线测量的应用	(208)
第五节 自然伽马能谱测井	(210)
1.测井原理	(210)
2.剥谱	(216)
第六节 有关探测深度的评论	(218)
参考文献	(220)
习题	(221)
第十章 伽马射线散射和吸收的测量	(223)
第一节 引言	(223)
第二节 密度和伽马射线的衰减	(224)
第三节 密度测量方法	(228)
第四节 岩性测井	(237)
第五节 由密度测量估算孔隙度	(248)
参考文献	(250)
习题	(250)
第十一章 测井应用的中子物理基础	(253)
第一节 引言	(253)
第二节 中子相互作用的基础	(253)
第三节 核反应和中子源	(261)
第四节 有用的宏观参数	(262)
第五节 中子探测器	(270)
参考文献	(271)
习题	(271)
第十二章 中子孔隙度仪器	(273)
第一节 引言	(273)
第二节 测量的基本原理	(274)
第三节 测量方法	(280)
第四节 中子孔隙度仪器的响应特性	(286)
1.泥岩影响	(287)
2.骨架影响	(288)

3.天然气影响	(292)
第五节 探测深度	(297)
第六节 测井实例	(300)
附录 核测井仪器的探测深度	(303)
参考文献	(313)
习题	(314)
第十三章 脉冲中子仪器	(317)
第一节 引言	(317)
第二节 热中子衰减测井	(318)
1.热中子俘获	(318)
2.测量方法	(322)
3.仪器和解释	(325)
第三节 脉冲中子能谱	(332)
附录 与时间有关的扩散方程的解	(339)
参考文献	(342)
习题	(343)
第十四章 核磁测井	(345)
第一节 引言	(345)
第二节 核共振磁力仪	(345)
第三节 为什么要进行核磁测井	(347)
第四节 磁陀螺的考察	(347)
1.原子磁体的进动	(349)
2.物质的顺磁性	(351)
第五节 核磁感应的某些细节	(354)
第六节 常规核磁测井仪器的工作	(363)
第七节 解释	(368)
1.影响 T_1 和 T_2 的因素	(368)
2.表面相互作用	(371)
第八节 应用	(374)
1.自由流体指数	(374)

2.由表面积 / 体积信息求渗透率	(374)
3.残余油的测量	(375)
第九节 一种新方法	(377)
参考文献	(380)
第十五章 声波测井概论	(382)
第一节 引言	(382)
第二节 井眼声波测井简史	(382)
第三节 井眼声波测井的应用	(385)
第四节 介质弹性的回顾	(386)
第五节 波的传播	(393)
第六节 声波测井基础	(399)
第七节 解释基础	(401)
参考文献	(403)
习题	(404)
第十六章 岩石中的声波	(406)
第一节 引言	(406)
第二节 实验测量	(406)
第三节 岩石声波模型	(416)
第四节 井眼中的声波	(420)
参考文献	(427)
习题	(428)
第十七章 声波测井方法和应用	(430)
第一节 引言	(430)
第二节 换能器	(430)
第三节 常规声波测井	(431)
1.典型问题	(438)
2.新型仪器	(440)
第四节 声波测井应用	(447)
1.岩性和孔隙流体的识别	(450)
2.地层流体压力	(452)

3.机械性能和裂缝	(452)
4.渗透率	(455)
第五节 超声测井仪	(456)
参考文献	(459)
习题	(460)
第十八章 孔隙度测井识别岩性	(464)
第一节 引言	(464)
第二节 双矿物岩性的图形分析法	(465)
第三节 三种孔隙度测井组合	(472)
第四节 岩性测井: 组合参数 Pe	(477)
第五节 岩性识别的数值法	(480)
参考文献	(484)
习题	(485)
第十九章 用测井方法确定粘土类型和含量	(487)
第一节 引言	(487)
第二节 什么是粘土或泥岩	(488)
1.粘土的分布形式	(491)
2.对测井测量的影响	(495)
第三节 常规的粘土指示法	(496)
第四节 确定粘土含量的一些新方法	(504)
1.泥质砂岩中的 Pe 解释法	(504)
2.粘土矿物参数与中子孔隙度响应	(508)
3. Σ 对粘土矿物的响应	(510)
4.铝活化法	(511)
5.粘土类型 (地球化学测井法)	(513)
参考文献	(522)
习题	(524)
第二十章 饱和度估算	(525)
第一节 引言	(525)
第二节 纯地层	(525)

第三节 泥质地层	(533)
1. V_{sh} 模型	(534)
2. 粘土矿物对电阻率的影响	(537)
3. 偶电层模型	(538)
4. 饱和度方程	(540)
参考文献	(544)
习题	(545)
第二十一章 远离井眼的扩展测量	(547)
第一节 引言	(547)
第二节 探测深度与测井测量的分辨率	(547)
1. 核测井	(548)
2. 电测井	(548)
3. 声波测井	(549)
第三节 地面地震	(552)
第四节 井中地震	(557)
第五节 垂直地震剖面	(559)
1. VSP 的初步处理	(563)
2. 来自 VSP 的信息	(568)
3. 加深横向探测深度: 偏移 VSP	(571)
附录 声阻抗与反射系数	(575)
参考文献	(582)

第一章 测井概论

第一节 引言

1927年发明测井时^{(1), (2)}, 法国人把它译为 Carottage electrique●, 其意为“电取心”, 它相当准确地描述了这种地球物理勘探方法。有少数人直译为“在井内用测量装置记录所穿过的地层的特性”。但是, 测井对不同的人有不同的用途, 对于地质学家来说, 测井主要是一种地下勘探的绘图技术; 对岩石物理学家来说, 测井是评价储层油气生产潜力的一种方法; 对地球物理学家来说, 测井是地面地震分析的一种补充资料。对于油藏工程师来说, 测井可能仅仅为模拟应用提供数值。

测井的最初应用, 是按电导率曲线形态进行逐井地层对比, 有时可以越过大的距离。由于测量方法的改进和增多, 测井的应用开始趋向于定量评价油气层。下面大部分内容将主要说明在地层评价中发展起来的测量装置和解释方法。

虽然测井是由石油工业为评价油气聚集的特殊需要发展起来的, 但是, 它和地学家感兴趣的其它许多领域有关。为了地下绘图而发展起来的新的有用的测量可用于绘制构造图、油藏描述和沉积识别。另外它还可用来识别裂缝或提供地层的矿物组成。在讨论这些应用之前, 先详细分析测量原理。在这个过程中, 测井被看成是需要许多学科的综合体, 例如物理学、化学、电化学、地球化学、声学 and 地质学。

本章将按照传统方法讨论测井在油气层评价中的应用, 描述与岩石物理参数有关的各种物理测量。我们从描述测井过程开

●之所以选择法国的定义有两个原因: 一是承认测井的国家起源; 二是属于一种罕见的情况——在这个实例中, 法语较古英语紧凑。

始，提供一个必须测量的理想实验环境。

第二节 测井是什么

测井过程包括许多组成部分，图 1-1 简要地说明了这些过

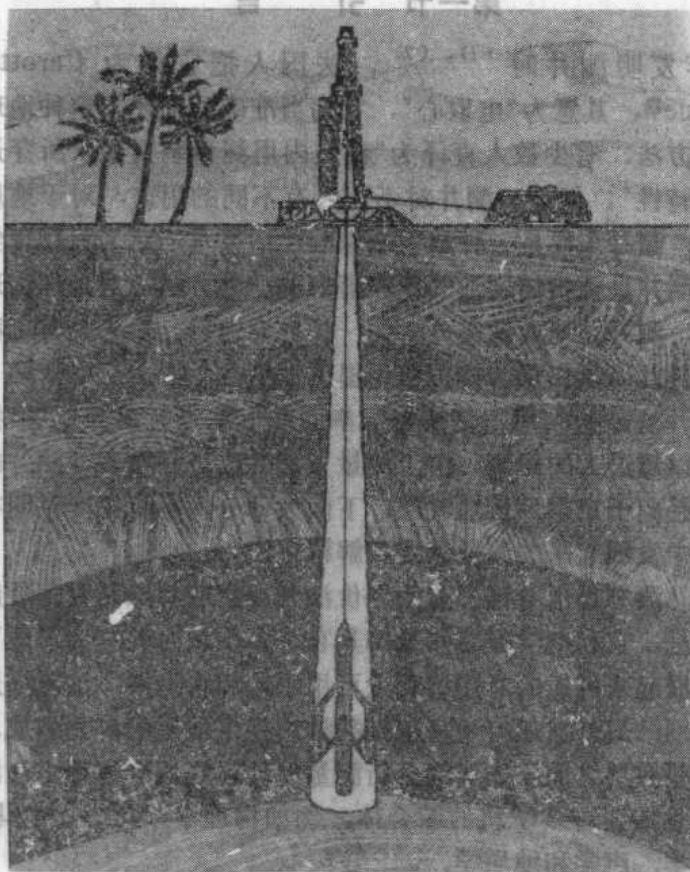


图 1-1 测井的组成部分：井内测量探测器，电缆和活动实验室

(引自斯伦贝谢)

程。我们的主要兴趣是测量装置或探测器。为了满足各种资料的

要求和任务，目前不同类型的测井仪器已超过五十余种，其中一些是无源的测量装置，而另一些是对所穿过的地层产生一些影响的有源装置。它们的测量结果通过特制的铠装电缆传送至地面，叫作电缆测井。

后面的大部分章节讲述测量探测器的基本原理，没有更多地涉及实际仪器的细节，只对探测器的结构作一般性叙述。所有探测器从外形上来看相互类似，一般呈圆柱状装置，直径为 4in 或更小，以便适应在直径小于 6in 的井眼中测量。它们的长度与传感器排列和所需的电子线路的复杂性有关。许多仪器可能同时连接，形成长达 100ft 的仪器串。

一些探测器常被设计成在井内居中位置测量。这种测量利用附着在仪器外部的弓形弹簧或较复杂的水力驱动臂来完成。一些测量要传感器（在这种情况下称为极板）和地层紧密接触，也可利用水力辅助驱动臂完成。图 1-2 说明 4 种不同探测器的测量部分。左起第一个是用 4 个驱动臂使仪器居中的例子，在每个臂的外侧都有一个测量极板，第二个是仪器利用外部的弓形弹簧（图上未画出）使其在井内居中的例子，第三个是一个较复杂的极板装置，图上给出了它完全在扩展位置时的辅助驱动臂，最右边的仪器和第一个装置类似，只是附加了一个传感器极板，使其保持和被测地层紧密接触。

专门设计的这些仪器（通过地面仪器车下放到井内），它们对目的层的一个或多个地层参数很敏感。仪器车（活动实验室）给井下仪器提供电源，以及起下仪器的电缆，并且还拥有数据处理、测量解释和资料永久存储的计算机。

后面各章将要讨论的大部分测量都是连续测量，测量在井下仪器向地面缓慢提升时进行。实际测井速度随仪器的性质而变化。具有统计涨落误差的测量或传感器与地层之间需要机械接触的测量，则测速较慢，每小时在 600~1800ft 之间。某些声波和电法测井仪测速较大。常规采样为下井仪器每移动 6in 采集一个平均测量。纵向分辨率高的某些仪器，采样间隔为 1.2 英寸。用