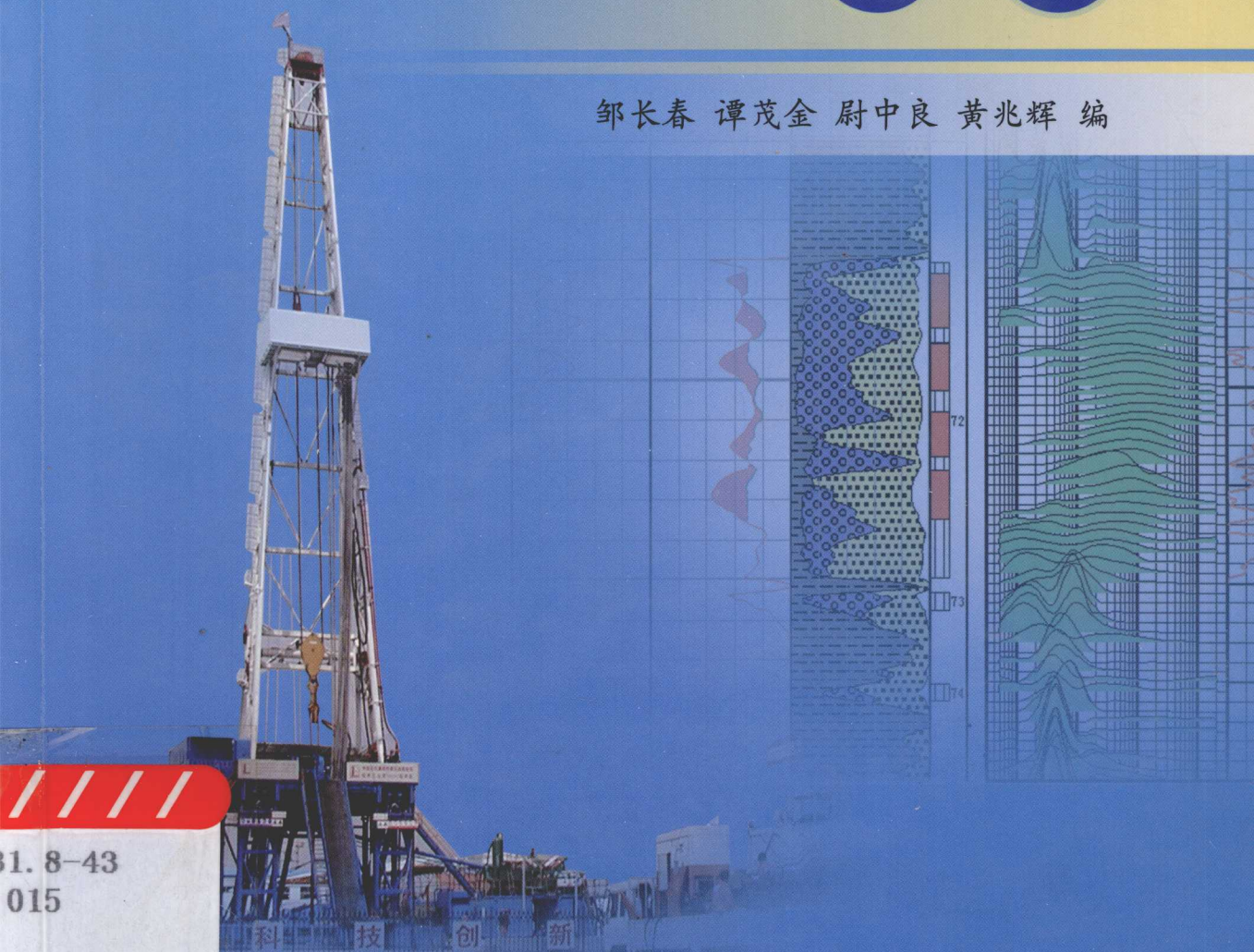


· · · 高等学校教材 · · ·

地球物理测井

教 程

邹长春 谭茂金 尉中良 黄兆辉 编



1. 8-43
015

科技 创新

地质出版社

0771520

高等学校教

P631.8-43
015

地球物理测井教程

(Geophysical Well Logging)

邹长春 谭茂金 编
尉中良 黄兆辉



石油大学 0808216

地质出版社

· 北京 ·

0521750

内 容 提 要

全书共分三篇, 上篇介绍常规测井方法的原理及基本用途, 中篇介绍倾角测井和成像测井原理及应用, 下篇主要介绍油气测井资料处理、解释和储集层综合评价内容, 书中也介绍测井在煤田、金属矿、水文工程等方面的应用。本书主要特色体现在尽量减少以往教材中陈旧内容, 介绍新的测井应用实例, 兼顾测井各个应用领域。

本书系按地球物理学专业本科四年制教学大纲编写的教材, 也适合于资源勘查工程和石油工程等专业学生使用, 亦可供石油勘探开发和地质勘查等方面技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球物理测井教程 / 邹长春等编. —北京: 地质出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-116-07257-2

I. ①地… II. ①邹… III. ①测井 - 高等学校 - 教材
IV. ①P631. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 131382 号

DIQIU WULI CEJING JIAOCHENG

责任编辑: 陈军中

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 82324508 (邮购部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京天成印务有限责任公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 18.5

字 数: 430 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2010 年 12 月第 1 版

印 次: 2010 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-07257-2

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

地球物理测井是地球物理学的一个重要分支学科，其主要特点是方法种类多、技术含量高、更新速度快。自 2003 年以来，笔者在对地球物理学、资源勘查工程和石油工程专业本科生教学过程中，为适应测井学科的发展和满足专业教学的需要，编写了地球物理测井教学讲义，并一直不断地补充和完善教学素材。

地质院校的测井教学具有一定的特殊性，学生毕业后一部分人到油田工作，还有相当一部分学生走向地质勘查行业；测井的教学内容不只是油气测井，还包括煤田、金属与非金属矿、水文及工程地质测井等。当前能体现技术先进性、应用综合性和教学适用性的测井专业教材并不多见，因此笔者有意在原有教学讲义的基础上，编写出版《地球物理测井教程》。

本书是按中国地质大学(北京)地球物理学专业本科四年制教学大纲编写的教材，也适合于资源勘查工程和石油工程等专业学生使用。全书共分三篇，上篇介绍常规测井方法的原理及基本用途，中篇介绍倾角测井和成像测井原理及应用，下篇主要介绍油气测井资料处理、解释和储集层综合评价内容，书中也介绍测井在煤田、金属矿、水文工程等方面的应用。本书的特色之处体现在：强调理论教学服务于实际应用，重点介绍现场最常用的测井方法原理和测井解释技术，期望本科生毕业后，能够与现场生产和科研快速接轨；尽量减少以往教材中陈旧内容，介绍新的测井应用实例，兼顾测井各个应用领域，内容力求精练。

本书由邹长春（主编）、谭茂金、尉中良和黄兆辉合编。其中，邹长春编写绪论、第一章、第二章、第四章、第十章；尉中良、邹长春合编第三章；黄兆辉编写第五章；尉中良、谭茂金合编第六章；谭茂金编写第七章、第八章、第九章。全书由邹长春负责统一修改和定稿。

本书在编写过程中得到了中国地质大学(北京)教务处、地球物理与信息技术学院领导和同事们的帮助和支持；编写过程中参考和引用了大量文献，限于篇幅，正文及参考文献中未能全部列出，在此谨向文献作者表示衷心感谢。

书中的不妥或错误之处，欢迎批评指正，以利改正。

邹长春
2010 年 11 月于北京

目 录

前 言

| | |
|------------------|-----|
| 绪 论 | (1) |
| 0.1 测井学科概况 | (1) |
| 0.2 预备知识 | (6) |

上篇 常规测井方法原理

| | |
|------------------------|-------|
| 第1章 自然电位测井和电阻率测井 | (19) |
| 1.1 自然电位测井 | (19) |
| 1.2 岩石的电学性质 | (28) |
| 1.3 普通电阻率测井 | (32) |
| 1.4 侧向测井 | (41) |
| 1.5 冲洗带电阻率测井 | (46) |
| 1.6 感应测井 | (51) |
| 第2章 声波测井 | (61) |
| 2.1 岩石的声学特性 | (61) |
| 2.2 声波速度测井 | (64) |
| 2.3 声波幅度测井 | (70) |
| 第3章 核测井 | (76) |
| 3.1 自然伽马测井 | (76) |
| 3.2 密度测井 | (85) |
| 3.3 中子测井 | (91) |
| 第4章 井径、井斜和井温测井 | (100) |
| 4.1 井径测井 | (100) |
| 4.2 井斜测井 | (103) |
| 4.3 井温测井 | (105) |

中篇 地层倾角测井和成像测井

| | |
|---------------------|-------|
| 第5章 地层倾角测井 | (108) |
| 5.1 方法原理 | (108) |
| 5.2 资料处理 | (113) |
| 5.3 地质应用 | (118) |
| 第6章 成像测井 | (127) |
| 6.1 成像测井系统的组成 | (127) |

| | | |
|-----|----------------|-------|
| 6.2 | 井壁成像测井 | (130) |
| 6.3 | 阵列成像测井 | (139) |
| 6.4 | 核磁共振成像测井 | (148) |

下篇 测井资料处理、解释及应用

| | | |
|------------------------|-----------------------------|--------------|
| 第7章 | 测井数据处理技术 | (168) |
| 7.1 | 测井数据处理系统简介 | (168) |
| 7.2 | 测井资料预处理 | (171) |
| 7.3 | 测井数据处理程序 | (178) |
| 第8章 | 石油测井资料综合解释 | (195) |
| 8.1 | 测井解释基本理论和方法 | (195) |
| 8.2 | 测井资料定性和快速直观解释 | (198) |
| 8.3 | 测井资料定量解释 | (212) |
| 8.4 | 油气田测井解释实例 | (228) |
| 第9章 | 复杂油气藏测井综合评价 | (237) |
| 9.1 | 低孔渗砂泥岩油气藏测井评价 | (237) |
| 9.2 | 碳酸盐岩油气藏测井评价 | (243) |
| 9.3 | 火山岩油气藏测井评价 | (248) |
| 第10章 | 固体矿产及其他领域的测井应用 | (254) |
| 10.1 | 煤田测井 | (254) |
| 10.2 | 金属矿测井 | (261) |
| 10.3 | 水文工程测井 | (263) |
| 10.4 | 非常规天然气测井 | (269) |
| 10.5 | 科学钻探中的测井应用 | (283) |
| 参考文献和参考资料 | | (287) |

绪 论

首先在绪论部分介绍测井学科的基本情况,包括测井的含义、方法分类、发展历史、基本用途以及仪器设备等;然后介绍一些预备知识。石油、天然气储集层评价是测井技术力量最强、应用最多、效益最好的领域之一,本书多数章节围绕这一领域来阐述测井方法原理和资料处理解释技术,适当介绍储集层、测井方法和测井资料解释的一些基本概念和基础知识,有助于对后续知识理解和学习。

0.1 测井学科概况

0.1.1 测井的含义及方法分类

地球物理测井(或称地球物理测井勘探、地球物理测井勘查、应用地球物理测井、矿场地球物理),简称测井,是地球物理学的一个重要分支学科。它以物理学(电、声、核、磁、热、光、力等)、数学和地质学为理论基础,以井眼及其周围介质为研究对象,采用多种专门的仪器设备,沿钻井剖面测量各种物理参数,通过数据处理和综合研究,揭示测量对象的特征和规律,进而发现油气、煤、金属与非金属、放射性、地热、地下水等矿产资源。近年来它的应用已扩展到工程地质、灾害地质、生态环境、考古研究等应用领域。

测井与地面、航空、海洋地球物理分支学科等具有相同之处,有些测井方法在原理上与其他地球物理方法基本相同,它们也可以用来解决相同的地质问题。不同之处在于,测井必须将仪器放入井中,使其充分接近测量对象,因此测井一般具有更高的测量精度;由于其测量精度高和特有的钻井条件,其他地球物理分支不能实现的测量方法,在测井中可以采用。因此,测井方法的种类更多。

测井与井中物探同属于将仪器放入井中测量的方法,二者的探测空间范围不同,很多文献中均不予严格区分。测井探测范围为“井壁附近”,通常指在垂直于井轴方向(径向)上自井轴向外数厘米或数米,在沿井轴方向上自井口至井底的空间范围;井中物探的勘查范围是井周、井间或井底下方的较大空间,其具体范围决定于所用方法技术及探测目标的状况,目前一般为井轴径向或井底数十至数百米。

钻井目的不同,其深度也有差别。工程和水文钻井,浅的仅数十米;油气勘探开发井,一般深度为1000~6000m,塔里木油田克深7井完钻深度达到8023m;世界上最深钻井位于俄罗斯科拉半岛,原计划钻探到15000m深度,相当于地壳平均厚度30000m的一半,目前只钻至12262m。理论上,钻井有多深,测井也可以探测多深。实际上测井会受井中温度、压力等条件的影响和制约。

测井种类很多,分类方法也很多。根据应用领域的不同,测井可分为油气测井、煤田测井、金属非金属矿测井、水文及工程测井等。根据仪器下井方式的不同,测井可

分为电缆测井和随钻测井。由电缆连接测井仪器，在重力作用下将测井仪器下入井中测井称为电缆测井，它适合直井和井斜角较小的井眼情况，是最常用的测井方式。随钻测井是在钻井过程中，将测井仪器附于钻头处测井，可以减少井眼对测量结果的影响，且适合大斜度井和水平井的情况。根据井眼状况的不同，测井可以分为裸眼井测井和套管井测井。井眼被钻开后，处于裸眼状态时进行测井，称为裸眼井测井。如果井中下入套管，在套管内测井，称为套管井测井。另外，还可以根据探测对象的物理性质不同，进行测井方法分类。

1) 以岩石导电性质为基础的测井方法：普通电阻率测井、侧向测井、感应测井、微电极测井、微侧向测井、微球型聚焦测井和微电阻率扫描成像测井等。

2) 以岩石电化学性质为基础的测井方法：自然电位测井和人工电位测井等。

3) 以岩石弹性或声学性质为基础的测井方法：声波速度测井、声波幅度测井、阵列声波测井和超声波成像测井等。

4) 以岩石核物理性质为基础的测井方法：自然伽马测井、自然伽马能谱测井、密度测井、中子测井、同位素测井、元素俘获谱测井、X射线荧光测井和核磁共振测井等。

5) 其他测井方法：井径测井、井斜测井、地层倾角测井、温度测井和磁化率测井等。

0.1.2 测井的发展历史

测井起源于法国。1927年9月5日，C. Schlumberger 和 M. Schlumberger 在法国 Merkwiller - Pechelbronn 油田一口 500m 深的井中进行普通电阻率测井，获得了世界上第一条测井曲线（图 0.1.1），标志着测井技术的诞生。测井开始在欧洲用于勘探煤和油气，两年后传到美国和苏联。

1939年12月20日，翁文波在四川石油沟一号井主持了中国首次测井工作。1943年至1945年翁文波和赵仁寿在玉门油矿做过 10 余口井的电测井工作；1947年夏至 1949年春，刘永年和王曰才在玉门油矿组建和主持我国第一个电测站。他们对中国测井学科的创立和发展做出了卓越的贡献。

长期以来，测井在石油工业中发挥了重要的作用，占有十分重要的地位。石油勘探开发工作的不断深入和科学技术的进步，又有力地推动了测井技术的发展，逐渐形成了一系列测井方法。根据测井数据采集系统的特点，测井技术的发展历程大致可分为模拟记录、数字测井、数控测井和成像测井等几个阶段（表 0.1.1）。

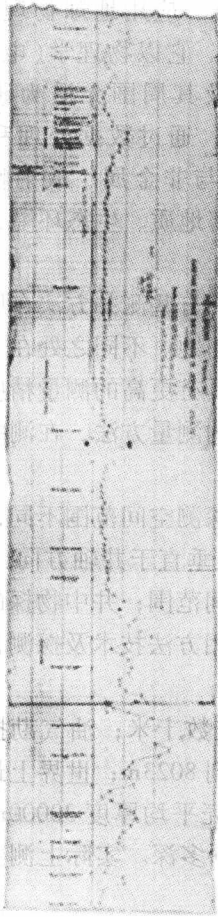


图 0.1.1 世界上第一条测井曲线

表 0.1.1 测井技术发展状况

| 发展阶段 | 模拟测井 (1964 年以前) | 数字测井 (1965 ~ 1972) | 数控测井 (1973 ~ 1990) | 成像测井 (1990 年以后) | |
|------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|--|------------------------------------|
| 地面系统 | 检流计光点照相记录仪 | 数字磁带记录仪 | 计算机控制测井仪 | 成像测井仪 | |
| 测量方式 | 单测为主 | 部分组合 | 多参数组合 | 多参数阵列组合 | |
| 数据传输 | | 单向编码传输 | 双向可控数据传输 (100kb/s) | 双向可控数据传输 (500kb/s) | |
| 下井仪器 | 电阻率 | 三侧向、七侧向 (1951) | 双侧向 (1972) 四臂地层倾角 (1969) | 地层学高分辨率地层倾角 (1982) 地层微电阻率扫描 (1985) | 方位电阻率成像 (1992) 全井眼微电阻率成像 (1992) |
| | 电导率 | 感应 (1948) 深聚焦感应 (1958) | 双感应 (1963) | 数字感应 (1984) | 阵列感应成像 (1991) |
| | 介电 | | 介电测井 (1975) | 电磁波传播测井 (1984) | 多频多探头电磁波 (1995) |
| | 声波速度 | 连续声波 (1952) | 补偿声波 (1964) | 长源距声波 (1978) | 偶极子横波成像 (1990) |
| | 声波幅度 | 水泥胶结 (1959) | 变密度 (1968) | 水泥胶结评价 (1981) 井下声波电视 (1981) | 超声成像 (1991) |
| | 自然伽马 | 自然伽马 (1956) | 自然伽马能谱 (1971) | 补偿自然伽马能谱 (1984) | 复杂环境自然伽马能谱 (1991) |
| | 中子 | 中子伽马 (1941) 单探测器中子 (1950) | 双源距中子 (1972) | 四探测器补偿中子 (1981) | 加速器中子源孔隙度 (1991) |
| | 密度 | 地层密度 (1950) | 补偿地层密度 (1964) | 岩性密度 (1980) | 岩性密度能谱 (1994) 三探测器密度 (1996) |
| | 核磁测井 | | | 核磁测井样机 (1988) | 核磁共振仪 (1991) 核磁共振成像仪 (1996) |
| 地层测试 | 电缆地层测试 (1955) | 重复式地层测试 (1972) | 重复式地层测试 | 模块化地层测试 (1990) 套管井地层测试 (2000) | |

0.1.2.1 模拟记录阶段 (1927 ~ 1964)

测井仪器采用模拟记录方式, 利用检流计光点照相记录仪在照相纸或胶片上记录测井曲线。模拟记录的特点是采集的数据量小, 传输速率低。

这一阶段相继诞生的测井方法包括普通电阻率测井 (1927), 自然电位测井 (1931), 自然伽马测井 (1946), 感应测井 (1948), 地层密度测井 (1950), 七侧向测井和三侧向测井 (1952), 声波测井 (1952), 自然伽马测井 (1956), 等等。

0.1.2.2 数字测井阶段 (1965 ~ 1972)

20 世纪 60 年代, 世界石油产量达到 $10 \times 10^8 \text{t}$, 测井工作量大增。同时, 测井技术的发展使测量信息越来越丰富, 模拟测井仪器已不能满足需要, 人们开始研制数字化测井地

面仪器以及与之配套的下井仪器。

1965年，斯伦贝谢公司首次用“车载数字转换器”（包括模数转换器、数字深度编码和磁带记录装置）记录数字化测井数据，数字测井时代开始。利用数字磁带机进行数字记录，提高了测量精度，增加了可靠性，且便于将测井资料输入计算机进行处理。

0.1.2.3 数控测井阶段（1973~1990）

计算机技术的高速发展，推动测井仪器的更新换代。1973年，首次在现场用计算机采集和处理数据，数控测井时代开始。数控测井仪器是以车载计算机为中心的遥控、遥测系统，各种下井仪器作为计算机的外设，通过电缆通信系统实现数据的交换和计算机对下井仪器的控制。仪器校验、测量数据处理、显示、曲线回放等都通过软件实现。

在这一阶段，增加的测井方法包括：自然伽马能谱测井，岩性密度测井，碳氧比能谱测井，长源距声波测井，电磁波传播测井，地层学地层倾角测井，地层微电阻率扫描测井。这些新的测井方法，能够提取更多的有用信息，扩大了测井的应用领域。

0.1.2.4 成像测井阶段（1990年以后）

石油勘探中，越来越多地遇到裂缝性等各种复杂地层，迫使人们寻求应对复杂地层的测井方法。1986年，微电阻率扫描成像测井仪问世，为裂缝识别和评价提供了全新的手段，引起了人们极大的兴趣和充分重视。之后，其他一些成像测井下井仪器相继诞生。为了满足各种成像测井仪器在大信息量传输、记录、图像处理等方面的要求，研制成像测井地面仪器并将各种成像测井仪器与之集成而形成完整的成像测井系统已成为必然趋势。

20世纪90年代初，斯伦贝谢公司率先推出了MAXIS-500成像测井系统。成像测井是一个集各种先进技术之大成的系统，是高新技术的结晶；成像测井地面系统是计算机技术、遥控遥测技术、高速数据传输、应用软件密切结合的体现。

0.1.3 测井的用途

测井的应用非常广泛，而且在不同的应用领域有不同的用途。

在油气勘探开发中，测井占有非常重要的地位。每个阶段的各类钻井，测井工作都必不可少。对一口油气钻井而言，测井的应用一直要持续到井的报废。测井在储集层评价、油藏静态描述与综合地质研究、油井检测与油藏动态描述、钻井采油工程等方面，起着不可替代的作用。除了前面述及的大多数裸眼井和套管井测井方法外，还有许多生产测井方法，甚至包括射孔、井壁取心等。现代测井在石油工业中是高新技术含量最多的产业部门之一，在我国已列为石油科学的十大学科之一。

煤田也是测井技术重要应用领域之一。测井被广泛用于钻井地质剖面的划分和对比，查明煤层并确定其深度、厚度、结构和品质，提供岩层、煤层的机械力学参数，评价顶底板稳定性，确定含水层位置及补给关系，了解地温数据及井身技术状况等，是煤田勘查、储量计算、开发工程设计不可缺少的手段。我国有关法规、规范要求煤田地质勘查中每口井都必须按设计要求完成测井工作。

在水文及工程勘查中，测井也占有重要地位。水文工程测井可用来查明和划分含水层和隔水层，确定含水层性质和水力联系，估算地层涌水量或吸水量，划分咸淡水界面，评价水的矿化度，检查固井质量及止水效果，以及划分裂隙、岩溶发育带、进行区域地层对比等。在各类工程钻井中测井被用来原位测定岩石土壤的各种力学参数，主要是密度、体

积模量、切变模量、泊松比等弹性参数。除了专门的水文或工程勘查项目外，在各类矿产特别是油气和煤炭勘查开发项目钻井中，有时也包括水文测井、工程测井的任务和内容。

在金属矿勘查中，测井主要用于划出矿化、矿层或富矿段，确定其深度和厚度；确定矿石成分、品位、规模和储量；划分和校验钻井地质剖面，校正钻探岩心编录；为地面或井中物探解释提供所需的物性参数；地层对比，研究矿体产状；解决矿区水文地质问题，如确定出水位置。测井常常与井中物探方法相结合，发现井周、井底、深部盲矿；确定矿体相对于井的位置、形状、大小、产状；圈定矿体或矿化带范围；研究井间矿体的连续性等。

在科学钻探方面，测井也起到了重要作用。科学钻探是人类深入地球内部原位认识和研究地球的唯一途径，包括海洋科学钻探、大陆科学钻探、湖泊钻探和极地钻探。测井在科学钻探中的岩石学、古环境、古气候、构造地质、水文地质、地热和地球化学等方面研究中取得了丰硕成果。

0.1.4 测井仪器设备

在绝大多数情况下，现场使用的电缆测井仪器设备，一般由地面仪器、下井仪器、绞车、电缆、电缆头和井口滑轮等部件组成（图 0.1.2）。

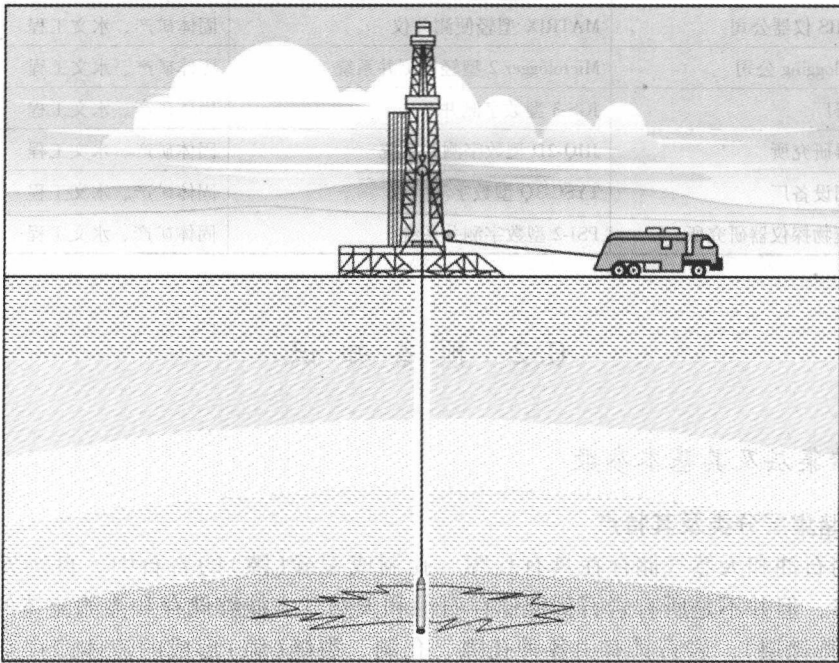


图 0.1.2 电缆测井示意图

国内外的测井仪器生产商很多，生产的测井仪器大致可分为两类：一类主要服务于油气勘探开发，下井仪器种类多、测量精度高、探测深度大，如斯伦贝谢公司、阿特拉斯公司、哈里伯顿公司、西安石油勘探仪器厂、中国石油测井公司、大庆油田及胜利油田等单位生产的测井仪器；另一类为轻便测井仪器系统，主要服务于煤田、金属矿、水文和工程

测井领域，下井仪器直径较小、种类有限、探测深度一般不超过 2000m，英国 RG 公司、美国 MT 公司、重庆地质仪器厂、上海地质仪器厂等生产此类测井仪器。表 0.1.2 列出了部分常用的测井仪器设备。

表 0.1.2 部分常用的测井仪器设备

| 仪器生产商 | 设备名称 | 适用领域 |
|-------------------------|-----------------------|-----------|
| 斯伦贝谢公司 | CSU 型数控测井系统 | 油气勘探开发 |
| | MAXIS-500 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| 阿特拉斯公司 | CLS-3700 型数控测井系统 | 油气勘探开发 |
| | ECLIPS-5700 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| 哈里伯顿公司 | DLL 型数控测井系统 | 油气勘探开发 |
| | EXCELL-2000 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| 中国石油测井有限公司 | EILOG 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| 西安石油勘探仪器厂 | SKC-2000 型数控测井系统 | 油气勘探开发 |
| | ERA-2000 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| 胜利油田测井公司 | SL-3000 型数控测井系统 | 油气勘探开发 |
| | SL-6000 型成像测井系统 | 油气勘探开发 |
| MOUNT SOPRIS 仪器公司 | MATRIX 型轻便测井仪 | 固体矿产、水文工程 |
| Robertson Geologging 公司 | Micrologger-2 型轻便测井系统 | 固体矿产、水文工程 |
| 重庆地质仪器厂 | JGS-3 型数字测井系统 | 固体矿产、水文工程 |
| 上海地质仪器研究所 | JHQ-2D 型数字测井系统 | 固体矿产、水文工程 |
| 渭南煤矿专用设备厂 | TYSC-3Q 型数字测井仪 | 固体矿产、水文工程 |
| 北京中地英捷物探仪器研究所 | PSJ-2 型数字测井系统 | 固体矿产、水文工程 |

0.2 预备知识

0.2.1 储集层及其基本参数

0.2.1.1 储集层分类及其特点

地下的石油和天然气储存在具有孔隙、孔洞或裂缝(隙)的岩石中。自然界中岩石种类虽然很多，但并不是所有岩石都能储存石油和天然气。能够储存和渗滤流体的岩层称为储集层(简称储层)。岩石具有由各种孔隙、孔洞、裂缝(隙)形成的流体储存空间的性质称为孔隙性，而它在一定压差下允许流体在岩石中渗流的性质称为渗透性。孔隙性和渗透性是储集层必须同时具备的两个最基本的性质。

储集层的概念强调了这种岩层具备储存油气和允许油气渗滤的能力，但并不意味着其中一定储存了油气。如果储集层中储存了油气，就称为含油气层；含有工业(商业)价值的含油气层称为油气层；已经开采的油气层称为生产层或产层。在油气勘探开发中，储集层是利用测井资料进行地层评价和油气分析的基本对象。

储集层按岩石类型通常分为三大类：碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其他岩类储集层。前两类是主要的储集层。

0.2.1.1.1 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层是指岩性为砾岩、砂岩、粉砂岩等的储集层。目前，世界上已经发现的油气储量中大约有40%存在于这一类储集层中，这类储集层在我国中、新生代的含油气地层中有广泛分布。

碎屑岩主要是由各种矿物碎屑、岩石碎屑、胶结物和孔隙空间组成。常见的碎屑矿物主要有石英、长石、云母、黏土以及重矿物。岩石碎屑（岩屑）是母岩经机械破碎形成的岩石碎块，一般由两种以上的矿物集合体组成，保留着母岩的结构特点，因此岩屑是判断母岩成分及沉积物来源的重要标志。

粒度是指颗粒的大小，用粒径表示。它是碎屑颗粒最主要的结构，直接决定着碎屑岩的分类命名和性质。根据粒度大小将碎屑分成砾、砂、粉砂三类，表0.2.1是我国广泛采用的碎屑颗粒的粒度分类表。碎屑颗粒的分选性是指颗粒大小的均匀程度。按碎屑岩中主要粒度的含量可将分选性划为好、中、差三等。主要粒度的含量大于75%者为好，含量在50%~70%者为中，含量小于50%者为差。分选差，大小混杂，大颗粒间形成的孔隙就被小颗粒所充填，使岩石的孔隙性和渗透性变差。把松散的砂、砾胶结成整体的物质叫胶结物。最常见的胶结物有泥质、钙质（又称灰质）、硅质及铁质，其中主要是泥质、钙质。通常泥质胶结的砂岩较疏松，孔隙性及渗透性较好；钙质胶结次之；硅质及铁质胶结的砂岩一般均致密坚硬，储油物性差。胶结物不但有粘接碎屑颗粒的作用，同时还会充填颗粒间孔隙，使孔隙缩小和被堵塞。因而胶结物含量是影响储层物性的重要因素，随着胶结物含量的增加，储集层的孔隙性和渗透性变差。

表 0.2.1 碎屑颗粒的粒度分类表

| 碎屑名称 | | 颗粒直径/mm |
|-------|-----|-------------|
| 砾 | 巨砾 | >1000 |
| | 粗砾 | 1000 ~ 100 |
| | 中砾 | 100 ~ 10 |
| | 细砾 | 10 ~ 1 |
| 砂 | 粗砂 | 1 ~ 0.5 |
| | 中砂 | 0.5 ~ 0.25 |
| | 细砂 | 0.25 ~ 0.1 |
| 粉砂 | 粗粉砂 | 0.1 ~ 0.05 |
| | 细粉砂 | 0.05 ~ 0.01 |
| 黏土（泥） | | <0.01 |

碎屑岩储集层孔隙空间的大小和形状是多样的。按孔隙成因，可将碎屑岩孔隙分为粒间孔隙、微孔隙、溶蚀孔隙和微裂缝。粒间孔隙及纹理缝、层理缝是沉积时形成的，属原生成因；微孔隙属原生及次生混合成因；溶蚀孔隙及微裂缝均属次生成因。按碎屑岩孔隙的孔径大小，可把孔隙分为超毛细管孔隙、毛细管孔隙和微毛细管孔隙。对于油气运移、

聚集及开采来说，有用的是那些互相连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙。因为它们不仅可储存油气，而且还允许流体在其中流动。按对流体的渗流情况可把孔隙分为有效和无效孔隙。所谓有效孔隙，就是孔径在 0.0002mm 以上、互相连通、且在自然条件下流体可在其中流动的孔隙空间。所谓无效孔隙（或“死孔隙”）就是岩石中那些孤立的、互不连通的孔隙及微毛细管孔隙。

一般砂岩储集层的储集性质（孔隙度和渗透率）主要取决于砂岩颗粒大小，同时还受颗粒均匀程度（分选程度）、颗粒磨圆程度和颗粒之间胶结物的性质及含量的影响。一般来说，砂岩颗粒越大、分选越好、磨圆程度越好、颗粒之间充填胶结物越少，则其孔隙空间越大、连通性越好，即储油物性越好。

测井分析者认为砂岩的骨架成分是石英，硅质胶结物也被视为石英骨架。当钙质胶结较多时，砂岩骨架则被认为是由石英和方解石组成的双矿物岩性。由于储集层中的泥质除对储集层的岩性、物性和含油性有显著影响外，对各种测井值均有影响，所以测井分析者把泥质当作骨架以外的一种独立成分予以考虑。

碎屑岩储集层的围岩一般是黏土岩类。黏土岩类包括有黏土、泥岩和页岩等。黏土矿物的主要成分有高岭石、蒙脱石和伊利石等。由不同黏土矿物成分构成的黏土岩的测井值是有一定差异的。例如，自然电位测井曲线是以黏土岩类的测井值为基线的，对于不同地质时代的沉积，由于黏土性质和地层水矿化度不同，而可能出现自然电位基线位偏移；不同地区、不同层系的黏土成分不同，在自然伽马测井曲线上的显示也有差别；不同地区、各类黏土岩的电阻率亦不同等等。但是，黏土岩类在岩性和物性等方面都比较稳定，因此，测井解释中常常用黏土岩类的测井值作为参考标准。

碎屑岩储集层的孔隙结构主要是孔隙型的，孔隙分布均匀，各种物性和泥浆侵入基本上是各向同性的。目前，在各类岩性储集层的测井评价中，碎屑岩储集层的效果最好。泥质含量比较重、颗粒很细的储集层评价比较困难，即所谓泥质砂岩的测井解释问题。

0.2.1.1.2 碳酸盐岩储集层

在世界油气田中，碳酸盐岩储集层占很大比重，目前世界上大约有 50% 的油气储量和 60% 的产量来自这一类储集层。我国华北的震旦系、寒武系和奥陶系的产油层，四川的震旦系、二叠系和三叠系的油气层，均属于这一类储集层。

碳酸盐岩属于生物、化学沉积，主要由碳酸盐矿物组成。主要岩石类型是石灰岩和白云岩，过渡类型的泥灰岩也属此类。石灰岩的矿物成分主要是方解石，白云岩的矿物成分主要是白云石。以石灰岩、白云岩为主的地层剖面称为碳酸盐岩剖面。

在石灰岩和白云岩中，常见的储集空间有晶间孔隙、粒间孔隙、鲕状孔隙、生物腔体孔隙、裂缝和溶洞等。

从储集层评价及测井解释的观点出发，习惯于将碳酸盐岩的储集空间归纳为两类：原生孔隙（如晶间、粒间、鲕状孔隙等）和次生孔隙（如裂缝、溶洞等）。前者孔隙一般较小且分布均匀，渗透率较低（孔隙性碳酸盐岩例外）；次生孔隙的特点是孔隙比较大，形状不规则，分布不均匀，渗透率较高。这里要指出，石灰岩重结晶和白云岩化所产生的次生孔隙在测井资料上无法与原生孔隙相区分，所以在测井解释中实际上把它们归入原生孔隙类。

致密的石灰岩和白云岩，原生孔隙小且孔隙度一般只有 1% ~ 2%，若无次生孔隙它

是无渗透性的。当具有次生孔隙时，一般认为包括原生孔隙和次生孔隙的总孔隙度在5%以上，碳酸盐岩即可具有渗透性而成为储集层。

通常根据孔隙结构特点将碳酸盐岩储集层分为三类，即孔隙型、裂缝型和洞穴型储集层。实际的碳酸盐岩储集层，其孔隙类型可能是上述几种类型的复合情况。碳酸盐岩剖面中的测井解释任务，是从致密围岩中找出孔隙型、裂缝型和洞穴型储集层，并判断其含油（气）性。

碳酸盐岩储集层一般具有较高的电阻率，所以须采用电流聚焦型的电阻率测井方法，如侧向测井、微侧向测井等；自然电位测井在碳酸盐岩剖面一般使用效果不好，为区分岩性和划分渗透层（非泥质地层）需采用自然伽马测井。由于储集层常具有裂缝、溶洞，为评价其孔隙度一般需要同时采用中子（或密度）测井和只反映原生孔隙的声波测井方法。

自20世纪70年代后期至今，碳酸盐岩储集层的裂缝测井方法与裂缝储集层的评价技术有了很大发展，其特点是：发展了新的仪器及方法，逐步形成了裂缝测井系列；形成了一套采用各种测井方法组合研究裂缝的综合评价技术；裂缝参数的定量研究有了新进展。

0.2.1.1.3 其他类型的储集层

其他岩类储集层是指除碎屑岩和碳酸盐岩以外的各种岩类储集层，如岩浆岩、变质岩、黏土岩等。它们在世界油气田中所占比例很小。近年来，国内外的一些油田在这类储集层中都获得了具有商业价值的油气产量，因此，这类储集层也越来越受到人们的重视。

(1) 岩浆岩储集层

根据岩浆的冷凝环境，岩浆岩分为侵入岩和火山岩（又称喷出岩）。我国的侵入岩储集层不如火山岩储集层发育和分布广泛，火山岩储集层则是我国中、新生代陆相含油气盆地重要的油气储集层类型之一，其地位仅次于碎屑岩储集层和碳酸盐岩储集层。

火山岩储集层的岩石类型主要为火山碎屑岩和火山熔岩两大类，又以火山碎屑岩为储集层的油田比较常见。火山岩储集层的储集空间包括气孔、粒（砾）间孔、溶蚀孔隙、晶间孔隙、成岩收缩裂缝、风化淋滤裂缝以及构造裂缝等。储集层主要属双重介质储集层，孔隙是流体的主要储集空间，裂缝除储集流体外还可以沟通孔隙，并对流体的渗流起到重要的通道作用。

我国火山岩油气藏分布区域广泛，在克拉玛依、大庆、辽河、胜利、大港及阿尔善油田均发现有火山岩油气藏，发育时代遍及古生代、中生代和新生代。

(2) 变质岩储集层

变质岩储集层是指由变质岩类构成，并由其中的表生风化或构造破裂形成的裂缝作为储集空间和渗流通道的一类储集层，多分布在基岩侵蚀面上。呈基岩出现的变质岩致密坚硬，本不具备对油气储集有意义的孔隙空间，但由于长期且强烈的风化作用和构造破裂等后生改造作用，在其表层常形成一个风化孔隙、裂缝带，使岩石具备一定的储渗条件，成为油气聚集的场所。

变质岩油气藏在国内外均有广泛分布。如酒泉盆地的鸭儿峡油田（千枚岩）、胜利油田的王庄油田（片麻岩）、美国堪萨斯的Bloomer油田（石英岩）等。变质岩油气储集层的分布时代一般都比较老，在我国主要分布在太古—元古宇变质岩系中，少部分分布于古生界变质岩中，且均形成大中型古潜山油气藏。

(3) 泥质岩储集层

泥质岩储集层指泥岩、页岩、钙质泥岩以及砂质泥岩等因欠压实或构造裂隙发育而形成的储集层。过去认为，这类岩石因孔隙很小，排驱压力高，而只能作为致密的盖层。近年来，国内外的油气勘探实践表明：在沉积盆地的泥质类岩石中确实存在油气藏，而泥质岩本身构成了这类油气藏的储集层。

泥质岩之所以能够成为储集层，是由于次生作用（风化、溶蚀、构造运动等）形成了一系列缝洞。泥质岩储集层的储集空间主要由裂缝和孔隙构成，且往往以裂缝为主，包括构造裂缝、异常高压形成的裂缝和成岩收缩缝等。

目前，国内外已经发现了许多以泥质岩为储集层的油气藏。如美国东、西部和南部的墨西哥湾诸盆地，以及俄罗斯的中鄂毕油区已发现多个泥岩裂缝油气藏。我国青海省柴达木盆地油泉子油田也发现了具有工业价值的钙质泥岩油层。江汉盆地潜江组的含石膏泥岩裂隙、晶洞中也见到商业价值的油流。胜利油田、大庆油田等也均有发现。

页岩气是储集在富含有机质的页岩（泥岩）中的天然气，已成为重要的非常规天然气资源，美国在 20 世纪 70 年代就对页岩气进行规模化开采。据估计，页岩气的资源量约是煤层气和致密砂岩气的两倍。

0.2.1.2 储集层基本参数

储集层的基本参数包括评价储集层物性的孔隙度和渗透率，评价储集层含油性的含油气饱和度、含水饱和度与束缚水饱和度，储集层的厚度等。用测井资料进行储集层评价及油气分析，就是要通过测井资料数据处理与综合解释来确定这些储集层参数，并对储集层的性质给予综合评价。

0.2.1.2.1 孔隙度

储集层的孔隙度是指其孔隙体积占岩石体积的比，它是说明储集层储集能力相对大小的基本参数。测井解释中常用的孔隙概念有总孔隙度、有效孔隙度和缝洞孔隙度。

总孔隙度 ϕ_1 是指全部孔隙体积占岩石体积的比：

$$\phi_1 = (V_1/V) \times 100\% \quad (0.2.1)$$

式中： V 、 V_1 分别为岩石体积和孔隙总体积。

有效孔隙度 ϕ_e 是指具有储集性质的有效孔隙体积占岩石体积的比：

$$\phi_e = (V_e/V) \times 100\% \quad (0.2.2)$$

式中： V_e 为有效孔隙体积。

缝洞孔隙度 ϕ_2 是指有效缝洞孔隙体积占岩石体积的比：

$$\phi_2 = (V_2/V) \times 100\% \quad (0.2.3)$$

式中： V_2 为缝洞孔隙体积。 ϕ_2 是表征裂缝性储集层储集物性的重要参数，因为缝洞是岩石次生变化形成的，故常称为次生孔隙度或次生孔隙度指数。

此外，有时还用“残余孔隙度”概念，它表示岩石中的无效孔隙或“死孔隙”体积（即互不连通的孔隙及微毛细管的体积）占岩石体积的比。

一般来说，未固结的和中等胶结程度的砂岩，其 ϕ_e 与 ϕ_1 接近；胶结程度高的砂岩，特别是碳酸盐岩，其中 ϕ_1 通常比 ϕ_e 大很多。同时，随着地层的埋藏深度增加，胶结和压实作用增强，砂岩的孔隙度也降低。砂岩的总孔隙度一般为 5% ~ 30%；储油砂岩的有效孔隙度一般变化于 10% ~ 25% 之间。孔隙度低于 5% 的储油砂岩，除非其中有裂缝、孔穴

之类，一般可认为无开采价值。

在碳酸盐岩储集层中，还要将有效孔隙中的粒间孔隙（又称基块孔隙）与缝洞孔隙加以区别。因为碳酸盐岩一般都比较致密，基质孔隙性和渗透性都比较差，只有裂缝和孔隙比较发育时才具有生产能力。因此，碳酸盐岩的缝洞孔隙度是其产能的重要标志。此外，在碳酸盐岩地层中，孔隙度与深度的关系不如砂岩地层那样明显。

现在，测井资料常常用来计算地层的孔隙度及泥质含量。测井地层评价理论认为：泥质和其他岩石所含泥质的孔隙是微毛细管孔隙，不是有效孔隙；计算的纯岩石孔隙度为有效孔隙度。泥质砂岩中包含混质孔隙在内的孔隙度是总孔隙度 ϕ_t ，泥质岩石中除去泥质孔隙外的孔隙度为有效孔隙度 ϕ_e ，即 $\phi_e = \phi_t - V_{sh}\phi_{sh}$ ， V_{sh} 和 ϕ_{sh} 分别为泥质含量和泥质孔隙度。

0.2.1.2.2 渗透率

在有压力差的条件下，岩层允许流体流过其孔隙孔道的性质称为渗透性。岩石的渗透性的大小是决定油气藏能否形成和油气层产能大小的重要因素。常用渗透率来定量表示岩石的渗透性。根据达西定律，岩层孔隙中的不可压缩流体，在一定压力差条件下发生的流动，可由下式表示：

$$Q = k \frac{A\Delta p}{\mu L}$$

所以

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta p} \quad (0.2.4)$$

式中： Q 为流体的流量， cm^3/s ； A 为垂直于流体流动方向的岩石横截面积， cm^2 ； L 为流体渗滤路径的长度， cm ； Δp 为压力差， Pa ； μ 为流体的黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； k 为岩石的渗透率， μm^2 。

在压力梯度为 $101325\text{Pa}/\text{cm}$ 条件下，黏度为 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的流体在孔隙中作层流运动时，在 1cm^2 横截面积上通过流体的流量为 $1\text{cm}^3/\text{s}$ 时的岩石渗透率为 0.987 (≈ 1) μm^2 。实际工作中，这个单位太大，常用它的千分之一作单位，即 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

达西定律只适用层流以及流体与岩石无相互作用的情况。实践证明，当只有一种流体通过岩样时，所测得的渗透率与流体性质无关，只与岩石本身的结构有关；而当有多种流体（如油和水）同时通过岩样时，不同的流体则有不同的渗透率。为了区分这些情况，常用绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率。

(1) 绝对渗透率

绝对渗透率是岩石孔隙中只有一种流体（油、气或水）时测量的渗透率，常用符号 k 表示。其大小只与岩石孔隙结构有关，而与流体性质无关。因为常用空气来测量，故又称空气渗透率。测井解释通常所说的渗透率，就是指岩石的绝对渗透率。根据岩石绝对渗透率大小，按经验可把储集层分为以下几类： $k = 1 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属差到尚可； $k = 15 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属中等； $k = 50 \times 10^{-3} \sim 250 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属好； $k = 250 \times 10^{-3} \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属很好； $k > 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属极好。

(2) 有效渗透率

当两种以上的流体同时通过岩石时，对其中某一流体测得的渗透率，称为岩石对该流