

YOUQI DIQIU WULI
CEJING YUANLI

油气地球物理测井原理

· 杨 斌 主编



课外借



科学出版社

油气地球物理测井原理

杨斌 主编

科

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了油气勘探开发中地球物理测井技术的各种方法原理和应用、综合解释方法, 主要内容包括电法测井、声波测井、核测井、地层倾角测井、阵列感应、阵列声波、成像测井、核磁共振测井、随钻测井、开发测井的基本原理和应用, 测井资料的定性解释和定量解释、测井综合评价实例等。

本书是高等院校资源勘查工程专业、石油工程专业本科生的测井课程教材, 也可供这些专业及其他有关专业的师生、企事业科技人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气地球物理测井原理 / 杨斌主编. —北京: 科学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-03-054474-2

I. ①油… II. ①杨… III. ①油气测井—研究 IV. ①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 221861 号

责任编辑: 冯 铂 / 责任校对: 江 茂
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 24.25

字数: 600千字

定价: 59.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《油气地球物理测井原理》编写组

主 编：杨 斌

参编成员：邓虎成 谢润成 祝 鹏 陈文玲 刘 岩

前 言

测井技术自 1927 年诞生以来, 不仅为认识地下流体性质、储集层岩性及物性提供有效途径, 而且极大地提高了油气田的开发效益。测井技术已成为油气勘探、油气开发专业技术人员解决地质、工程技术问题重要而必需的资料来源。随着测井技术由数控测井朝着成像测井的飞速发展、在各种复杂油气领域和非常规油气领域的应用的不断扩展, 考虑到资源勘查工程专业和石油工程专业学生的课程学习, 及相关领域科研人员的需要, 编写一本侧重于油气勘探与开发中的系统、新旧方法紧密结合同时又注重理论联系应用的地球物理测井技术教材十分必要。

本书是在编者从事资源勘查工程专业《石油地球物理测井原理》、石油工程专业《测井原理及应用》本科课程教学近十年的教案、讲义基础上, 吸纳了同类教材之优点, 针对高等院校资源勘查工程、石油工程专业的全日制本科设置的地球物理测井课所编写的新教材, 也可以作为专业技术人员在职培训或进修选用的教材。

本书突出“先进性”“实用性”, 全面地介绍油气地球物理测井中的各种方法原理和应用、技术发展趋势、资料综合解释方法, 主要内容包括电法测井、声波测井、核测井、地层倾角测井、阵列感应测井、阵列声波测井、成像测井、核磁共振测井、随钻测井、生产测井等方法技术的基本原理和应用、测井资料的综合解释等, 涵盖了油气勘探与开发测井技术的方方面面, 从测井原理到测井解释, 从常规测井技术到成像测井技术, 从裸眼井测井到套管井测井, 从常规测井到随钻测井, 从碎屑岩测井评价方法到碳酸盐岩测井评价方法等。教材编写中按照基本原理和应用并重的原则, 注重加强教材的易读性、实用性和与时俱进。基本原理部分做到阐述清楚、明了, 能够使不同专业和不同层次的人易于理解; 应用部分则进行较全面的阐述, 体现理论联系实际, 具有启发性, 也可满足现场工程技术人员自学的需要。十分注重阐述测井学科发展的最新技术, 如成像测井、随钻测井、套管井电阻率测井、元素俘获测井、储层监测测井等。

全书共分 14 章。其中第 0 章为绪论, 第 1 章至第 5 章为电法测井篇, 分别介绍了自然电位测井、普通电阻率测井、侧向测井、感应测井、地层倾角测井、微电阻率成像测井的原理和应用; 第 6 章至第 7 章为声波测井篇, 分别介绍了声波速度测井、声波幅度测井、阵列声波测井、声波成像测井的原理和应用; 第 8 章至第 11 章为核测井篇, 分别介绍了自然伽马测井、自然伽马能谱测井、密度测井、中子测井、核磁共振测井的原理和应用; 第 12 章为生产测井篇, 介绍了产出剖面测井、注入剖面测井、过套管电阻率测井、介电测井、工程测井的原理和应用; 第 13 章为测井资料综合解释篇, 介绍了岩性识别、储集层划分、孔隙度和含油气性快速直观解释、测井解释模型、碎屑岩和碳酸盐岩储层测井评价的原理和应用。

本书由杨斌主编, 其中, 第 11 章第 2 节由邓虎成编写, 第 13 章第 1 节由谢润成编

写,第13章第3节由杨斌、祝鹏编写,第12章第1节由陈文玲编写,第8章第1节由刘岩编写,全书其余章节均由杨斌编写并统校。

在本书出版过程中,成都理工大学能源学院和石油工程系、科学出版社给予了大力支持和通力协作,本书在编写过程中参考了多部教材和专著,在此深表感谢。

与飞速发展的测井技术相比,本书介绍的内容还只是整个测井技术中很小的一部分,但是作者衷心地希望,通过这本教材能够让更多的专业人员认识测井、了解测井并进一步充分应用测井技术来解决研究和生产中所遇到的地质、工程问题。由于编者水平有限,教材中必然存在不当之处,在此诚请使用本教材的广大师生和阅读本书的读者提出宝贵意见,以便教材再版时修正。

杨斌

2017年1月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 测井技术概况	1
0.2 测井基础知识	8
第 1 章 自然电位测井	12
1.1 井内自然电位的产生	12
1.2 自然电位测井原理	15
1.3 自然电位曲线的影响因素	17
1.4 自然电位曲线的应用	18
第 2 章 普通电阻率测井	23
2.1 岩石电阻率特性	23
2.2 普通电阻率测井	25
2.3 微电极系电阻率测井	33
第 3 章 侧向测井	37
3.1 三侧向测井	37
3.2 七侧向测井	40
3.3 双侧向测井	41
3.4 冲洗带微聚焦测井	44
3.5 方位侧向电阻率测井	47
3.6 阵列侧向测井	49
3.7 随钻侧向测井	52
第 4 章 感应测井	56
4.1 双线圈系感应测井	56
4.2 复合线圈系感应测井	61
4.3 阵列感应测井	70
4.4 随钻电磁波电阻率测井	77
第 5 章 地层倾角测井和微电阻率成像测井	82
5.1 地层倾角测井	82
5.2 微电阻率成像测井	99
第 6 章 声波速度和幅度测井	114
6.1 岩石的声学特征	114
6.2 声波速度测井	118
6.3 声波测井资料的应用	126

6.4	随钻声波测井	131
6.5	声波幅度测井	132
第7章	井壁声成像测井和阵列声波测井	140
7.1	井壁声波成像测井	140
7.2	长源距声波全波列测井	150
7.3	阵列声波测井	158
第8章	自然伽马及自然伽马能谱测井	166
8.1	自然伽马测井的核物理基础	166
8.2	自然伽马测井	169
8.3	自然伽马能谱测井	178
8.4	随钻自然伽马测井	186
第9章	密度测井	187
9.1	密度测井的核物理基础	187
9.2	密度测井	194
9.3	岩性密度测井	201
9.4	随钻密度测井	208
第10章	中子测井	211
10.1	中子测井的核物理基础	211
10.2	中子—超热中子测井	220
10.3	中子—热中子测井	224
10.4	中子伽马测井	232
10.5	中子寿命测井	235
10.6	脉冲中子伽马能谱测井	240
第11章	核磁共振测井	252
11.1	核磁共振基本原理	252
11.2	核磁共振测井观测模式	257
11.3	核磁共振测井数据处理方法	260
11.4	核磁共振测井资料的地质应用	267
第12章	生产测井	274
12.1	管道内多相流体的流动状态	274
12.2	产出剖面测井	276
12.3	注入剖面测井	290
12.4	过套管电阻率测井	298
12.5	介电测井	306
12.6	电缆地层测试	312
12.7	工程测井	317
第13章	测井资料综合解释	324
13.1	岩性定性识别和储集层划分	324

13.2	岩性和孔隙度的快速直观解释技术	328
13.3	储集层含油气性的快速直观解释	338
13.4	测井解释模型	347
13.5	储层综合评价	361
参考文献		377

第0章 绪论

本绪论首先介绍地球物理测井的定义、目的意义、研究内容、发展历史、现场操作过程、仪器分类、发展方向等，然后介绍一些钻井液侵入、测井测量影响因素等基础知识。

0.1 测井技术概况

0.1.1 测井的含义及方法分类

地球物理勘探分为航空地球物理勘探、海洋地球物理勘探、地面地球物理勘探和地下地球物理勘探。地下地球物理勘探又分为井中地球物理勘探和地球物理测井，地球物理测井则是地球物理勘探的一个重要分支学科。

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, Well Logging, Geophysical Well Logging, Wireline, Borehole Geophysics), 简称测井, 是应用地球物理的方法来研究油气田、煤田和水文工程等方面的钻井地质剖面, 解决某些地下地质问题和钻井技术问题的一门技术。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, 通过在井下放置一定的测量设备, 同时在地面放置对应的记录分析设备(图 0-1-1), 沿井深连续地测量井剖面上地层相应地球物理参数(电阻率、自然电位、中子、密度、声波等等)的变化情况(一次测井就是一次行程的记录, 类似于一条航船的航海日志 log), 通过数据处理用于研究油气田、煤田和水文工程等方面的钻井地质剖面, 用来划分油气层、煤层, 确定油气储集特征、煤质含量和地下分布规律, 评价油气、煤储集层的生产能力, 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, 以及解决其他一些地质问题或工程问题的一门应用科学。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。

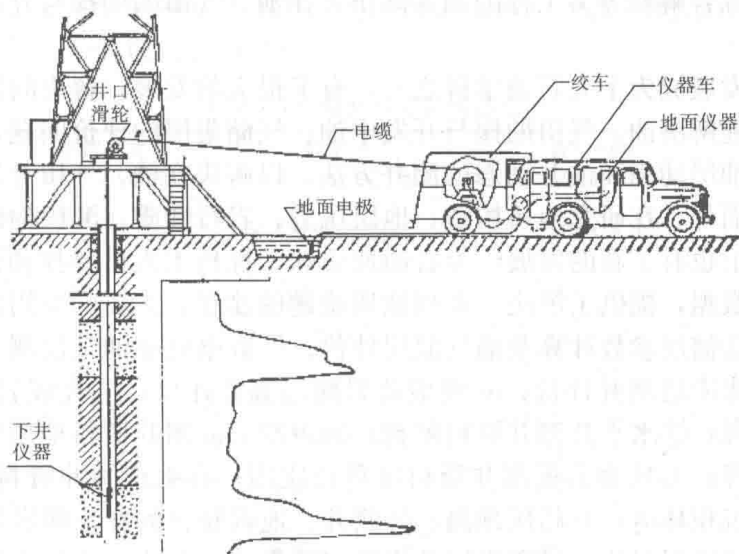


图 0-1-1 测井现场施工地面和地下示意图

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，在测井中均可以采用，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”，通常是指在垂直于井轴方向（径向）上自井轴向井外数厘米或数米，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，其具体范围取决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米至数百米。

地球物理测井作为一门观测学科，是应用物理学方法原理，即采用电子仪器，测量钻井内井壁地层信息的技术学科；作为边缘交叉学科，又是物理学、电子学、信息学、地质学、工程的集成，测井的基础理论是物理学，测井的数据采集中采用多种传感器及数据传输技术，与电子工程、遥测技术等关系十分密切，工作方法是数据采集与数据处理，在一定意义上属于信息科学，主要研究对象是地下地质体，是研究和解决地下地质问题的一种手段，应是地学领域中的一部分。

测井研究的特点是：①测井基础：了解探测对象的物理性质及变化规律；②测量方法：探索探测空间物理场特征及测量方法；③测井仪器：开发适用于井下条件的电子测量仪器；④测量工艺：提高测井仪器设备的应用技巧及效果；⑤资料处理：求取被测量媒质的物理性质参数；⑥测井解释：提取勘探开发直接有用的参数和信息。

在石油勘探与开发过程的地质调查、物探、钻完井、试油与采油等几个阶段中，测井是贯穿在整个过程中的一个不可缺少的环节，作为一种基本手段和“眼睛”，石油地球物理测井已经有将近半个世纪的历史。目前，已成为油、气田勘探和开发过程中一个不可缺少的工作环节。我国的测井技术是在新中国成立之后，随国民经济的发展而发展起来的。特别是大庆油田和以后的一系列大油田的发现，大大地促进了我国测井技术的发展。从无到有、从小到大，已形成一支从测井基础理论研究、测井仪器研制，到现场测井资料的录取、综合解释等多工种的测井队伍，在油、气田的勘探与开发中发挥了自已的作用。

测井目前已发展成为十大石油学科之一，有了很大的发展，解决问题的范围也在逐步地扩大。不仅能解决油、气田勘探与开发中油、气储集层的评价问题，而且还发展了一套研究和测定油层动态和油井动态的测井方法，以解决在油、气田开发过程中出现的一些问题。除此而外，在研究地质构造、地层压力、岩石性质、沉积构造和沉积环境等一系列地质问题上也有了新的发展，为石油地质和工程技术人员寻找和评价油气层提供了重要的资料和数据，提供了解决一系列地质难题的途径。主要的应用领域包括：①岩性划分及识别；②储层参数计算及油气储层评价；③低电阻率油气层测井评价；④天然气测井评价；⑤水淹层测井评价；⑥碳酸盐岩储层测井评价；⑦火成岩储层测井评价；⑧变质岩测井解释；⑨水平井测井资料解释；⑩声波全波测井资料地质应用；⑪声、电成像测井资料解释；⑫核磁共振测井资料解释及应用；⑬生产测井资料解释；⑭地质、测井等综合解释沉积环境；⑮超压预测；⑯测井、地震联合解释，确定岩层产状和绘制地下构造轮廓；⑰地层对比、研究岩层的岩性、储集性、含油气性等纵、横向上的变化规律；⑱地质、测井和地震等综合进行油藏描述；⑲油气层动态监测，油层动态资料、

地下各产层产量的提供；⑳油气井工程监测(井径、固井质量、油套管健康状况等)，对地层机械强度、地层压力的确定，油层酸化、压裂效果分析，出砂问题分析等。

同时，测井技术还是进行煤炭、金属等矿产资源勘探的重要手段，并被扩展到水文及工程等其他领域。

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 Merkwiler-Pechelhronn 油田一口 500m 深的井中进行普通电阻率测井，并且在发现电阻率测量确实反映岩石的电性变化，获得了世界上第一条测井曲线，并且在 1927 年 4 月 28 日发表“钻井电信号研究”，概要地说明了电阻率测井的基本原则，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。1930 年起电阻率测井开始普遍使用。

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。

六十多年来，随着石油工业、电子技术、计算技术等的发展，石油测井已从最简单的电阻率测井发展到较为复杂的聚焦测井，从一种探测深度的电阻率测井到不同探测深度的电阻率侧井组合，从单一的电法测井到核测井、声测井、热测井等多种方法测井，并逐步发展成几套适应各种地质条件，能从不同侧面研究井中地质剖面的较为完善的测井系列；从单一的井下仪器发展到适应各种测井系列的组合测井仪，从地面模拟记录到数字记录，从人工操作到数控操作；从简单的“相面法”半定量解释到快速直观的全井段连续自动解释，从简单地质模型到复杂的地质模型，直到严格的数学运算和统计处理等等。现代测井技术朝着测井方法系列化、井下仪器组合化、测井记录数字化、现场操作程控化及资料解释自动化的方向发展，并且随着勘探领域的不断扩大，面对不断提出新的任务，将推动人们，一方面努力改进现有的方法，一方面去探寻建立在应用新的物理性质基础上的新方法。地球物理测井飞速发展，大致分为模拟记录、数字测井、数控测井和成像测井等几个阶段(表 0-1-1)。

表 0-1-1 测井技术发展历史表

发展阶段	模拟测井 (1927~1964 年)	数字测井 (1965~1972 年)	数控测井 (1973~1990 年)	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)	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)	补充声波(1964)	长源距声波(1978)	偶极子声波成像(1990)

续表

发展阶段	模拟测井 (1927~1964年)	数字测井 (1965~1972年)	数控测井 (1973~1990年)	成像测井 (1990年以后)	
下井仪器	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(1964)	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)
	核磁共振			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)

(1)模拟测井阶段(1927~1964年):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的模拟测井曲线,采集的数据量小,传输速率低,方法少,仪器落后,影响因素多,又可分为半自动测井阶段和全自动测井阶段。

(2)数字测井阶段(1965~1972年):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,以数字式记录方式,提高了测量精度、增加了可靠性,便于计算机测井资料输入和解释。

(3)数控测井阶段(1973~1990年):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、曲线同放等都通过软件实现。方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化、解释自动化。

(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。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。之后,其他一些成像测井系统相继诞生。

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,具有方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化、解释自动化和成果显示图形化等特点。

0.1.3 测井仪器和施工采集

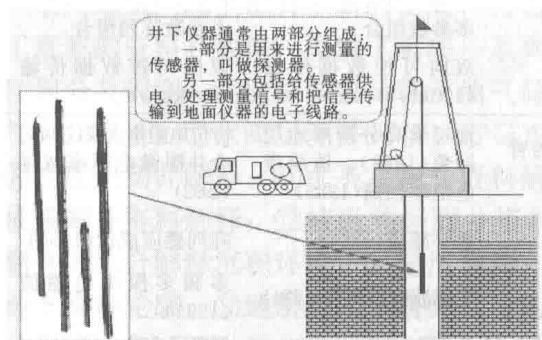


图 0-1-2 井下仪器示意图

测井数据采集阶段包括:①测井施工设计:测量井段、测井系列(拟增加的测井方法);②现场测井施工;③数据传输和记录。资料解释阶段:资料处理和综合解释。

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 0-1-1)。

井下仪器通常由两部分组成:一部分

是用来测量的传感器，称为探测器；另外一部分包括给传感器供电、处理测量信号和把信号传输到地面仪器的电子线路(图 0-1-2)。

由导电芯、绝缘层和钢丝编织层组成的单芯或多芯电缆，是向井内传送下井仪、给下井仪供电、在下井仪和地面仪间传送信息的设备。电缆测井之名由此而来(图 0-1-3)。为了适应大斜度井，逐渐发展了钻杆传输测井 PCL/TLC、随钻测井 LWD 技术。

测井井口设备是天滑轮和地滑轮，天滑轮通常安装在钻机的游动滑车上，地滑轮一般安装在钻台上(图 0-1-4)。

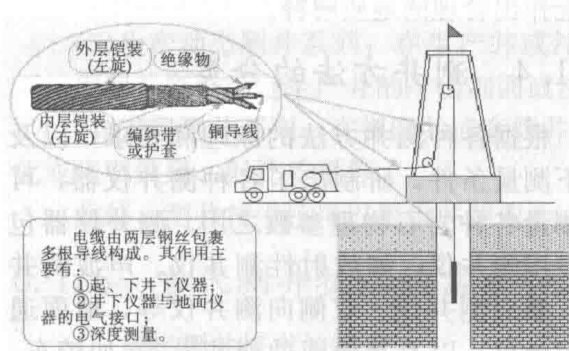


图 0-1-3 测井电缆示意图

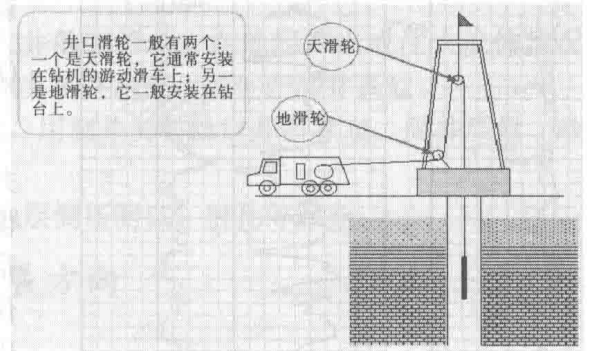


图 0-1-4 测井井口设备示意图

测井绞车包括控制面板和滚筒两大部分(图 0-1-5)。地面仪器如图 0-1-6 所示。

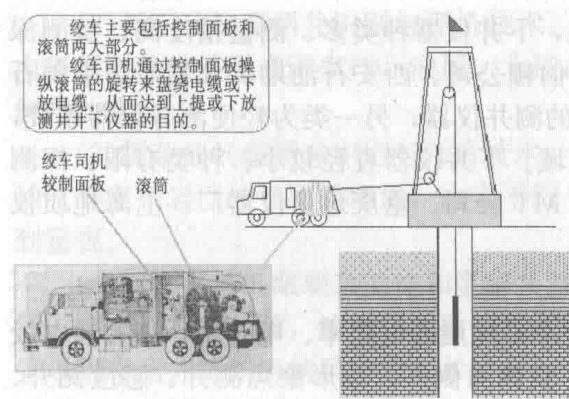


图 0-1-5 测井绞车示意图

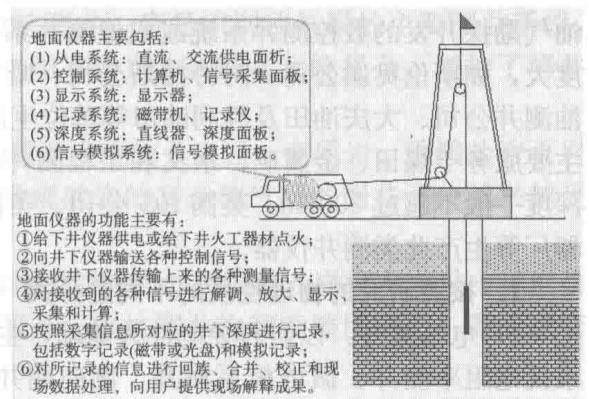


图 0-1-6 地面仪器示意图

测井深度记录：电缆上每隔一定的距离做一个磁记号，在钻台方补心上放置一个磁性记号器，当电缆磁记号经过记号器时向记录仪发出深度记号。因此，测井记录的深度是从钻台方补心的顶面开始计算的，方补心顶面至地面的距离称为补心高度(和地震上的深度有差别)，测井数据的采集一般是在仪器上提的过程中进行的。地面通用记录仪的主要任务就是把反映各种物理参数的电讯号，采用模拟记录以曲线的形式记录下来，也可以转换成数字量，记录在存储硬盘上供计算机处理等。

测井时利用电缆将井下仪器——专用测井仪的井下测量装置，下放到井中，当它沿井身移动时(上测、下测或点测的方式)，反映岩层某种物理量的信息通过电缆传输到专用测井仪的地面控制部分，进行适当处理之后，再送到地面通用记录仪进行记录。地面通用记录仪在记录下该物理量沿井身变化的同时，还须记录下由深度控制系统传输来的、与物理量的变化相对应的深度控制信号，并以连续曲线的形式显示出来。这种物理量沿

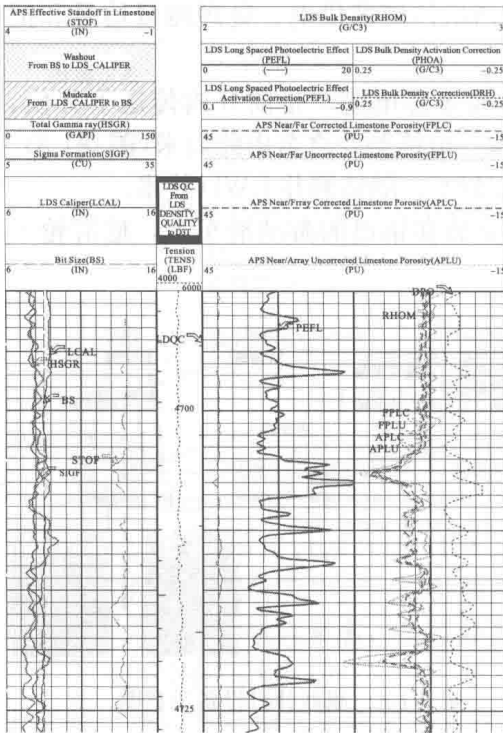


图 0-1-7 测井曲线显示图

井身连续变化的曲线称为测井曲线(图 0-1-7), 是井下不同性质岩层某种物理量的连续反映。所有的测井曲线(或测井数据)与井场数据统称为测井资料。不同的测井方法测得不同的测井曲线, 如视电阻率曲线、自然电位曲线、自然伽马曲线、声波时差曲线等。综合分析这些测井曲线的变化规律, 再结合地质资料就能作出合理的地质解释。

0.1.4 测井方法的分类

根据各种测井方法的原理和要求, 以及井下测量条件, 研制出了各种测井仪器, 可供测量各种岩石物理参数之用。测井仪器包括专用测井仪, 如放射性测井仪、声波测井仪、感应测井仪、双侧向测井仪等, 地面通用记录仪, 以及其他辅助测井设备(如绞车、电缆、井口装置)等。

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

油气勘探开发的数控测井系统或成像测井系统, 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。

1. 按照研究的物理性质的不同的分类

(1) 电法测井: 以岩石导电性为基础, 主要测量地层的电阻率、电导率, 如普通电极系视电阻率测井、微电极系测井、侧向测井、微侧向测井、球形聚焦测井、感应测井、介电测井、阵列感应测井、微电阻率扫描成像测井等。

(2) 研究岩石电化学性质的一组测井方法: 如自然电位测井、人工电位测井。

(3) 研究岩石弹性性质的一组测井方法: 声波速度测井、声波幅度测井、声波电视测井、声波全波列测井(变密度测井)、声波井壁成像测井。

(4) 研究岩石的原子物理及核物理性质的一组测井方法: 如自然伽马测井、密度测井、中子测井、中子寿命测井、能谱测井、活化测井、同位素测井等。

(5) 地层倾角测井: 地层产状(倾角、倾向等)的测量。

(6) 成像测井: 核磁共振测井仪(NMR)、井下声波电视(BHTV)、偶极子声波成像仪(DSI)、微电阻率扫描成像测井仪(FMI、FMR)、阵列感应测井仪(AIL)。

(7) 随钻测井: 随钻电阻率、AND 方位密度中子仪。

(8) 生产测井: 地层压力、温度、孔隙流体体密度及井孔内流体的流量等, 如流量测井、温度测井、压力测井、密度测井、持率测井。

2. 按照技术服务项目不同的分类

提供测井技术服务的产业是测井公司。测井公司要根据地质或工程需要选择几种测井方法,构成一套综合测井方法,称之为测井系列。按测井公司提供的技术服务项目,测井技术主要分为四大测井系列:

(1)裸眼井地层评价测井系列:在未下套管的裸眼井中进行测量获得测井资料,在探井、评价井首先进行。

(2)套管井地层评价测井系列:在已下套管的井中进行测量获得测井数据。探井、评价井后期以及生产井过套管声波、电阻率等。

(3)生产动态测井系列:在生产井或注入井的套管内,在地层产出或注入流体情况下,用测井资料确定生产井的产出剖面或注水井的注水剖面的生产测井系列。

(4)工程测井系列:在裸眼井或套管井内,用测井资料确定井斜状态、固井质量、酸化或压裂效果、射孔质量等。

此外,测井技术还可以提供井壁取心、地层测压测试、射孔等服务。

0.1.5 当代测井技术的需求和发展方向

1. 当代测井技术的需求

(1)低孔低渗油气藏测井识别与评价技术。近年来,在新增探明地质储量中,低孔低渗部分所占比例逐年增加。低孔低渗储层中测井信噪比降低,测井对孔隙度和孔隙(包括裂缝)内流体特征分辨能力降低,测井解释难度增大,需要高精度采集技术与计算模型。

(2)低阻油气藏测井识别与评价技术。电法测井一直是识别油气层的主要测井手段,由于低阻油气储层成因多样,油层、水层的电阻率差别小,油水系统复杂,增加了测井解释的难度。

(3)复杂油气藏测井识别与评价技术。随着新发现的火山岩、变质岩、碳酸盐岩页岩油气等复杂岩性油气藏的增多,这类不同于常规砂岩的复杂油气藏的测井评价越来越受到重视。

(4)高含水油气藏剩余油饱和度测井监测技术。大部分油田进入高含水高采出程度阶段,剩余油高度分散,油水层测井响应规律复杂,电法测井饱和度精度降低,需要过套管电阻率测井等新型储层参数测井技术。

(5)高精度注采剖面测井监测技术。随着地层压力降低,油气水三相流生产测井越来越多,三相流产液剖面测井目前还没有可靠的监测手段。

(6)复杂工程井测井技术。在水平井、大斜度井高温高压井、欠平衡钻井、电潜泵井、螺杆泵井日趋增多,测试通道受限,传统电缆测井数据采集技术受到挑战。

(7)地质评价与工程应用测井技术。

2. 测井技术发展方向

(1)随钻测井技术将日益成熟,地质导向和地层评价作用越来越大。目前,国内外主要油公司都开发出了基本成套的地层评价随钻测井仪器——电测井、核测井和声波测井仪器。在钻井过程中,随钻测井资料主要用于优化钻井作业和地层评价,使得钻井作业更加快速、安全和有效,减少了钻井时间和成本。

(2)套管井测井系列将日益完善,套管井测井评价地层能力不断增强。目前除电成像和核磁共振等少数技术外,几乎所有裸眼井测井项目都可以在套管井中进行。

(3)地层测试技术应用将更加成熟,逐渐成为常规测井项目,将大大降低裸眼井测井

的作业风险。

(4)多分量阵列感应测井技术将成为各向异性储层评价的重要手段。应用实例证明,使用多分量阵列感应测井、全三轴阵列仪对解释薄互层低电阻率产层具有重要意义,也拉开了第五代测井技术研发与投入使用的序幕。

(5)核磁共振测井正在向储层流体识别和定量描述方向发展。在随钻测井与电缆测井等方面,核磁测井仪器都在不断进步,主要方向是开展储层流体识别和定量描述。

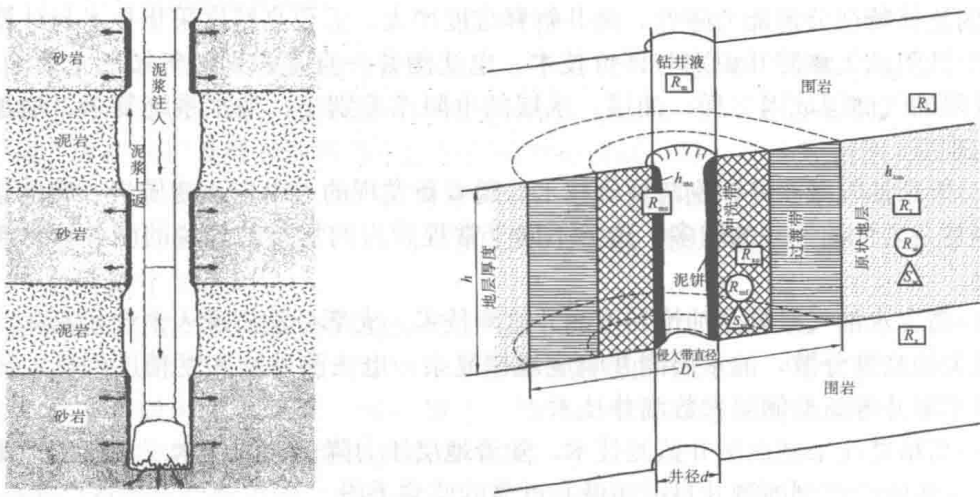
(6)生产井井下实时监测技术将成为未来油气田开发动态监测主导技术。随着电潜泵、水力泵等泵采井、超深井、高温高压井、低产井,特别是较为昂贵的海洋井的增多,井下永久监测方法进行产出剖面与注入剖面实时监测技术受到了油公司和服务公司的高度重视。

(7)岩石物理基础实验将越来越受到重视。

0.2 测井基础知识

0.2.1 钻井液侵入特征

钻井破坏了地层压力平衡。为了平衡地层压力,保证钻井正常进行,要不断地往井内注入钻井液,并随时根据地层压力的变化调整钻井液密度,使井底压力始终与地层压力保持平衡,并使钻井液柱压力略大于地层压力,防止发生井喷[图 0-2-1(a)]。在此压差作用下,钻井液滤液向储集层中渗透,这种渗透存在着径向渗透和纵向渗透两种过程。



(a)钻井过程中和钻井后泥浆的循环和侵入

(b)钻井后泥浆侵入剖面(R_s —围岩电阻率)

图 0-2-1 钻井过程中和钻井后的泥浆侵入剖面图

1. 径向渗透

钻井液滤液开始向储集层渗透后,在不断渗透过程中,钻井液中的固体颗粒逐渐在井壁上沉淀下来形成泥饼。由于泥饼渗透性很差,因此,当泥饼形成后,钻井液滤液的径向渗透过程基本停止。此时,由于泥浆滤液对地层的侵扰,形成了以井轴为圆心的同心环带[图 0-2-1(b)]。

井壁内的环带为泥饼,其电阻率称为泥饼电阻率(R_{mc});井壁附近的岩石孔隙受到钻井液滤液强烈的冲刷,原来孔隙中的自由流体几乎都被挤走,只剩下残余流体(水层为束缚水,油气层则为束缚水和残余油气),这一环带称为冲洗带,其电阻率称为冲洗带电阻率(R_{xo});冲洗带以外是一个过滤带,泥浆滤液渐少,原状地层的流体渐多,直到无泥浆