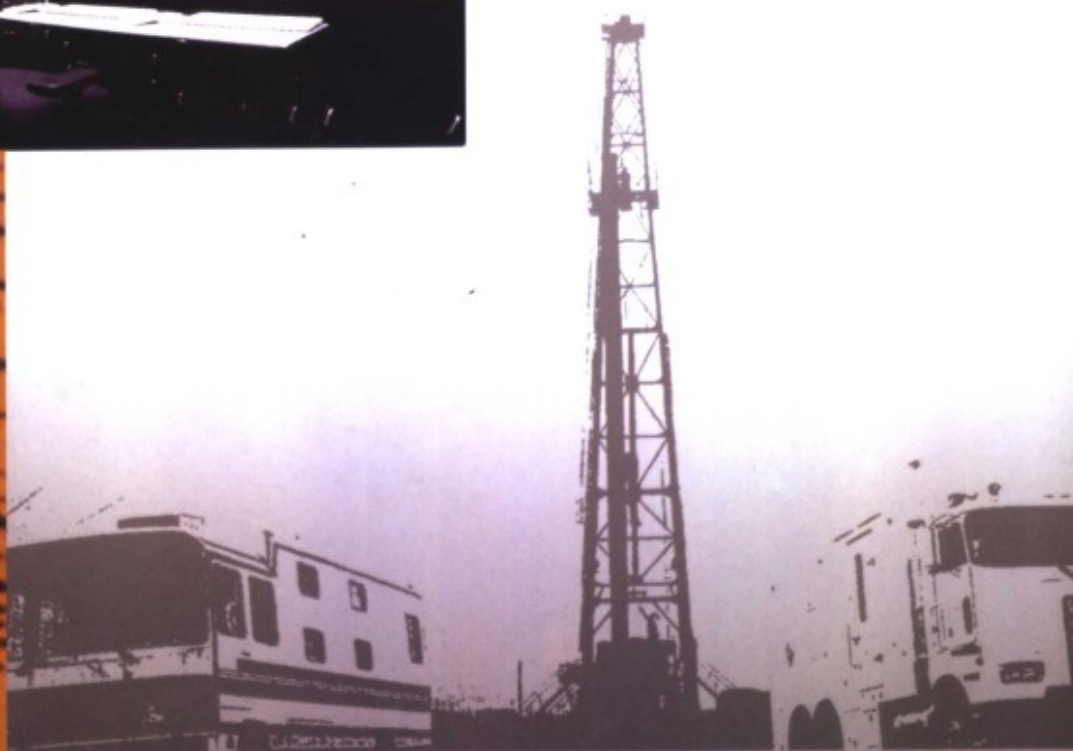
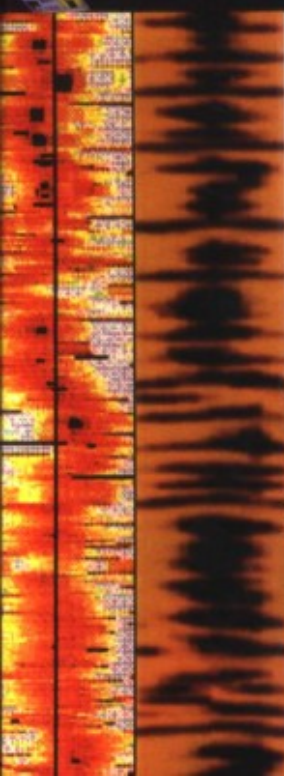
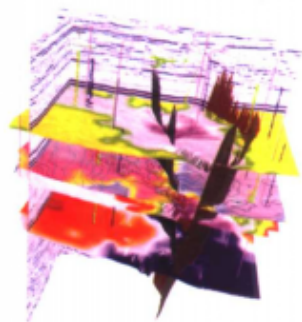


测井新技术 培训教材

中国石油天然气集团公司测井重点实验室 编著



石油工业出版社



责任编辑：庞奇伟

封面设计：赛维钰

责任校对：张智琪

ISBN 7-5021-4628-8



9 787502 146283 >

ISBN 7-5021-4628-8/TE · 3243

定价：60.00 元

测井新技术培训教材

中国石油天然气集团公司测井重点实验室 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以 2000、2001 年培训教材内容为基础,包括管理、基础方法和岩石物理实验分析、仪器开发以及解释处理评价内容。与国内教材相比,本书实现了系统性、新颖性和实用性的统一,特别是电、声、核测井最新进展章节反映了当今测井技术水平,提出了测井技术发展方向。

本书可供测井技术人员、管理人员、作业人员及相关学科人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

测井新技术培训教材/中国石油天然气集团公司测井重点实验室编著.

—北京:石油工业出版社,2004.7

ISBN 7-5021-4628-8

I. 测…

II. 中…

III. 测井-技术培训-教材

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 042145 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:22.75

字数:582 千字 印数:1—2500 册

书号:ISBN 7-5021-4628-8/TE·3243

定价:60.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

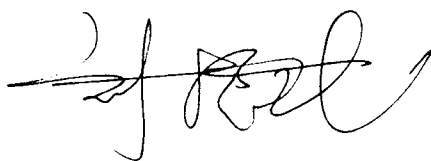
测井技术在石油勘探开发中举足轻重,是石油工业的关键技术之一。我国石油工业亟待解决的多项技术难题中,几乎均与测井技术有关。勘探方面,我国石油储量近 90%是来自以陆相沉积为主的砂岩油藏,天然气储量大部分源于非砂岩气藏和地质条件复杂的砂岩气藏。油田总体规模小,储层条件差、类型多、岩性复杂,储层非均质性严重,物性变化范围大,薄互层及低孔、低渗储层普遍存在。因此迫切需要深探测、高分辨率的测井仪器和方法,以及开发适应性强的配套测井技术。开发方面,国内目前注水开发的储量已占可采储量的 90%以上,受注水影响的产量已占总产量的 80%,综合含水率在 85%以上。多年注水后,油田的地下油气层岩性、物性、含油(水)性、电、声特性等都发生了较大的变化,因此用新的测井方法和技术识别水淹层、确定剩余油饱和度及其分布、多相流监测、计算剩余油/气层产量的要求十分迫切。地质导向钻井、地层压力预测、地应力分析、固井质量检查、套管损坏检测、酸化压裂等增产措施及效果检测等方面,测井的作用也日益重要。电缆测井技术经历了模拟测井、数字测井、数控测井和成像测井四个阶段后,在每个阶段均推出了许多测井新方法、新技术和新装备,特别是 20 世纪 90 年代以来,随钻测井、核磁共振测井、地层测试等井下油气测试技术迅速发展成熟起来。同时,测井数据的应用范围不断拓宽,应用水平不断提高,已经从最初的井间地层对比发展到油气藏综合描述、生产动态监测和工程问题的整体描述与解决。

为建设具有国际竞争力大型跨国企业集团,集团公司提出了实施技术创新战略的任务与模式。按照“一个整体、两个层次”的原则,设计了以建立技术中心为主要形式的新型技术创新体系,这为加强我国测井技术创新,开发具有自主知识产权核心关键技术,克服体制和管理上的分散、重复、转化慢等弊端创造了条件。作为技术创新体系重要环节的测井重点实验室于 1998 年成立以来,联合了中国石油天然气集团公司主要测井研究力量,为解决我国勘探开发中的难题,提高 CNPC 测井基础和测井新方法研究水平发挥了重要作用,并逐步成为测井技术创新基地、人才培养基地和学术交流基地。

进入新世纪,按照中国石油天然气集团公司培训计划安排,结合广大科技和管理人员对新技术的需求,测井重点实验室自 2000 年起每两年召开一次学术交流会,每年举办一期测井新技术培训班,邀请国内外测井界权威专家和教授讲解测井技术的前沿技术和最新发展动态。展现在读者面前的这本培训教材是在学术会议论文和技术培训班资料的基础上进行扩充完善,并作了系统调整后形成的,凝聚了诸多专家、教授、教材作者以及编辑们的心血,是十分宝贵的知识财富。与国内现有教材相比,本书实现了系统性、新颖性和实用性的统一,特别是电、声、核测井最新进展章节反映了当今测井技术水平,提出了测井技术发展方向。

相信此培训教材的出版，对广大科研和管理人员无疑大有帮助，本书也可作为大专院校学生、油田从事测井服务与评价工程技术人员的参考书。

在此，我代表中国石油天然气集团公司科技发展部，对参加该教材编写、编辑出版人员的辛勤劳动表示衷心感谢！

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, flowing characters that appear to be '王德林' (Wang Delin).

前 言

自 2000 年起中国石油天然气集团公司科技发展部委托测井重点实验室每年举办一期测井新技术培训班,国内外测井专家和教授讲授了测井新技术与新装备、解释新方法及管理 etc 篇章。迄今已在 CNPC 系统内培训 200 多人,取得良好效果。

为满足广大技术人员、生产作业人员及相关管理人员学习测井新技术的迫切要求。中国石油天然气集团公司科技发展部组织成立了由相关部门参加的培训教材编写和编辑领导小组(刁顺博士、冯启宁教授、汤天知高级工程师、周家尧编审、张辛耘工程师、马纪副编审),负责培训资料的收集、整理、扩充、完善、编辑与出版等事宜。从 2001 年 10 月开始,先后召开了四次培训教材编写会议,落实具体参与单位、编写人员和任务,协调工作进度和质量要求,使整个教材的编写和编辑有条不紊地进行,并顺利完成了本培训教材的编写和出版工作。

本培训教材以 2000、2001 年培训教材内容为基础,包括管理、基础方法和岩石物理实验分析、仪器开发以及解释处理评价等内容。全书共分四篇,第一篇为综述,包括测井学科发展概况、勘探开发需求和测井市场分析;第二篇为测井新技术,包括电、声、核、核磁共振、随钻等测井新技术;第三篇为测井仪器,包括测井技术装备水平和现状、生产测井仪器水平;第四篇为测井资料处理、解释和应用,包括测井软件水平概述、测井地质应用、测井与地震结合,以及油气藏动态监测技术。本教材基本包含了测井新技术、新仪器和新应用各个方面的发展水平。

本教材由石油大学冯启宁教授主编和主审,参加本书编写人员共计 20 余人,他们是:江汉测井研究所王敬农、钟振干教授、孙宝佃、李长文、汤天知、金鼎高级工程师及张辛耘工程师,中国石油国际工程公司吴铭德教授,中国石油股份公司陆大卫教授和赵培华博士,石油大学陶果、肖立志、吴锡令、乔文孝、王贵文教授、高杰、杨韦华副教授,西南石油学院司马立强教授,石油勘探开发研究院李宁教授,大庆油田公司测试技术服务分公司刘兴斌、郑华高级工程师,大庆石油管理局测井公司童茂松博士,西安石油勘探仪器总厂李安宗、朱军高级工程师。他们在测井技术研究和管 理、测井装备开发与应用等方面多有建树,具备较高学术水平和专业素质,在百忙之中积极地参与教材编写,认真负责,一丝不苟,为本教材的最终出版付出了辛勤劳动。

本书适合测井技术人员、管理人员、作业人员及相关学科人员阅读,因时间和水平所限,书中的错误与不足恳请读者提出宝贵意见。

目 录

第一篇 综 述

第一章 测井学科发展概况	(3)
第一节 国外测井技术发展历程回顾	(3)
第二节 中国测井科技发展历程回顾、启示与对策建议	(12)
第二章 勘探开发需求和测井市场分析	(24)
第一节 油气勘探与生产对测井技术的需求	(24)
第二节 国际测井市场分析	(25)

第二篇 测井新技术

第三章 电测井新技术	(31)
第一节 电法测井总论	(31)
第二节 几何因子理论与阵列感应测井	(35)
第三节 方位电阻率测井和阵列侧向测井	(45)
第四节 井壁电成像测井仪器	(51)
第五节 过套管电阻率测井原理及应用	(51)
第六节 复电阻率测井及其应用分析	(56)
第七节 电法测井反演理论与应用	(64)
第八节 三分量感应测井	(66)
第九节 二维井间电磁成像的正反演计算	(71)
第十节 岩石电化学特性的机理、电测井方法及其应用	(78)
第四章 声波测井新技术	(86)
第一节 长源距阵列声波测井方法	(87)
第二节 多极子阵列声波测井方法	(99)
第三节 井壁声波成像测井新方法	(104)
第四节 扇区水泥胶结评价仪 (SBT)	(112)
第五节 声波反射波测井方法	(116)
第五章 核测井新技术	(126)
第一节 脉冲中子测井新方法	(126)
第二节 综合孔隙度岩性测井方法	(145)
第三节 伽马测井新方法	(151)
第六章 核磁共振测井新进展	(157)
第一节 核磁共振测井原理	(157)
第二节 核磁共振测井资料的应用	(166)
第三节 核磁共振测井仪器新进展	(178)

第七章 随钻测井新技术	(186)
第一节 概述.....	(186)
第二节 随钻测井技术的发展.....	(186)
第三节 随钻测井技术.....	(188)
第四节 随钻测井技术发展趋势.....	(194)

第三篇 测井仪器

第八章 测井技术装备水平和现状	(197)
第一节 成像测井技术装备水平和现状.....	(197)
第二节 国产成像测井技术.....	(200)
第三节 国外成像测井技术.....	(219)
第四节 组合测井系统.....	(223)
第九章 生产测井仪器水平	(230)
第一节 注产剖面测井新仪器.....	(230)
第二节 光纤传感技术及其在测井中的应用进展.....	(241)

第四篇 资料处理、解释和应用

第十章 测井资料处理和解释软件的发展	(251)
第一节 国内外主要测井软件系统简介.....	(251)
第二节 Cif2003 平台简介	(255)
第三节 广义测井曲线理论.....	(255)
第四节 Cif 数据格式	(256)
第五节 Cif2003 平台的多井解释系统	(257)
第六节 网络测井解释一体化是今后的发展趋势.....	(263)
第十一章 常规测井相、成像测井相与沉积相对比	(264)
第一节 常规测井曲线形态及相类型.....	(264)
第二节 常规测井相、成像测井相与沉积相对比.....	(270)
第十二章 测井、地震结合等时地层对比与储层横向预测	(276)
第一节 测井、地震结合的基础与思路.....	(276)
第二节 储层测井地震响应特征分析.....	(278)
第三节 测井地震层序地层特征与分析方法.....	(285)
第四节 井震结合与等时地层对比.....	(291)
第五节 储层预测方法.....	(299)
第十三章 油藏动态监测技术	(311)
第一节 概述.....	(311)
第二节 流动剖面测井方法.....	(313)
第三节 生产动态测井分析.....	(332)
第四节 剩余油监测.....	(345)
第五节 井间示踪监测.....	(350)

第一篇 综 述

第一章 测井学科发展概况

第一节 国外测井技术发展历程回顾

一、世界测井技术的诞生和发展

1927年9月5日, Conrad Schlumberger 和 Marcel Schlumberger 两兄弟在法国 Pechl-brom 油田, 用一个手动绞车和电缆, 将一个电极系下入 488m 深的井中, 测出了世界上第一条测井曲线。曲线清楚地指示出盖层下面的厚层含油砂岩, 测井技术由此诞生, 并很快得到推广应用。

从 1927 年到现在的 75 年时间里, 测井技术从简单的测量逐步演化成了集成化的测量系列, 能完成一套高精度的、相互匹配的测量; 测量数据通过电缆、钻井液等传送到地面。测井技术依据电、声、核、磁等各种物理原理, 采用先进的电子技术和信息处理技术, 采集丰富的地下信息, 经过处理、解释, 对油气层进行评价, 为石油勘探开发提供极为重要的资料, 帮助地质家回答勘探的六个基本问题: 地下是否有油气; 有多少; 是否可开采; 能开采多久; 开采效率如何; 下一口井该布在哪里。根据数据采集系统的特点, 测井技术的发展大致可分为模拟测井、数字测井、数控测井和成像测井四个阶段 (表 1-1)。

表 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
传输			单向编码传输	双向可控数据传输 (100kbps)	双向可控数据传输 (500kbps)
井下仪器	电阻率	七侧向、三侧向 (1951)	双侧向 (1978)、四臂地层倾角 (1969)	地层学高分辨率地层倾角 (1982) 地层微电阻扫描 (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)
	声速	连续声波 (1952)	补偿声波 (1964)	长源距声波 (1978)	偶极子横波成像 (1990)
	声幅	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		闪烁自然伽马 (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)

续表

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)
井 下 仪 器	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 (1998)
	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)
主要地质应用		地层对比和评价	油气藏描述	油气藏精细描述	油气藏评价

测井技术是一项以高新技术为支撑的,为石油勘探开发服务的技术。测井技术的发展显示出两个明显的特点:一方面,测井技术的发展与石油勘探开发紧密联系在一起,勘探开发的需求成为测井技术发展的重要动力;另一方面,测井科技工作者时刻关注着物理学各学科和电子、自动化、计算机等各项技术的最新进展,许多最新的技术成果很快就在测井技术中得到体现。

1. 模拟测井时代 (1927—1964)

在 1927 年测井问世以后,人们将电、声、核、磁等各个领域内的理论和技术应用于测井,一项又一项测井技术相继诞生。1931 年意外地发现了自然电位测井;1946 年自然伽马测井诞生;1948 年,朗格里油田应用油基泥浆进行钻井,在油基泥浆内无法进行直流电测井,迫使人们进行探索,发明了感应测井;1950 年,人们将伽马源与相应的密度测量技术应用于测井,地层密度测井诞生;电磁场理论在测井中的进一步应用,使人们于 1952 年发明了能将电流聚焦的七侧向测井和三侧向测井;同年,人们将超声波技术成功地应用于测井,声波测井诞生;将中子源与相应的放射性测量技术用于测井,中子伽马测井诞生;1956 年,闪烁测量技术被应用于核测井。直到 1964 年,用于地层评价的常规测井系列基本配齐。

2. 数字测井时代 (1965—1972)

进入 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测井资料计算机处理的需要。60 年代初,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。数字测井系统在 60—70 年代初得到广泛应用。

3. 数控测井时代 (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,第一次在现场用计算机记录和处理数据,数控测井时代开始。数控测井地面采集仪器是由车载计算机和外围设备组成的人机联作系统,能完成对井下仪器测量数据的采集和实时记录,并能在井场进行快速直

观处理。数据传送方式由单向编码传输发展为双向可控数据传输, 传送速度大大提高。在这一时期, 人们继续把各种新技术用于测井, 将电视的观念与超声波技术相结合, 发明了井下声波电视测井; 根据电磁波测量原理, 发明了电磁波传播测井; 随着对横波认识的深化, 把横波技术也加入到声波测井的内容中去。人们充分发挥高速数据传输的优势和计算机快速数据处理的优势, 采用多传感器、大信息量的方法, 提高分辨率, 增大探测深度, 提高测量精度和准确度。测井资料可以更加精细地用于油气藏的描述。

4. 成像测井时代 (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, 迫使人们寻求对付复杂地层的测井方法。1986 年, 第一种成像测井仪器 (微电阻率扫描成像测井仪) 问世, 对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。

正当成像测井广泛受到欢迎时, 快测平台测井系统又在酝酿之中。它的开发是基于以下考虑: ①以深、中、浅三个探测深度的电阻率测井和中子、密度、声波三种孔隙度测井为主体的常规测井资料, 在大多数井内可以基本满足地质家的需要; ②各石油公司期望尽量减少测井占用井场的时间, 希望测井快、不返工。于是, 测井公司决定应用各项新技术对常规测井仪器进行了根本性的改造, 研制出一种组合性强、总长度短、可靠性高、测井速度快的常规测井组合仪器。1996 年, 快测平台测井系统问世, 在一只组合仪上集成了多种传感器 (包括电成像测井电极系或线圈系)。由于微机功能的大大增强, 现在的快测平台已经可以挂接各种成像测井下井仪器, 有的外国测井公司已经停止生产原有的成像测井地面系统, 而把各种成像测井下井仪器也都挂接到快测平台地面系统上。

在 20 世纪 80 年代, 人们决定以工作站为核心研制成像测井系统; 到了 21 世纪初, 计算机技术的高速发展使得体积小、价格低的微机具备了十多年前的工作站的功能, 成像测井下井仪又转回到以微机为核心的快测平台系统上去。表面上看是退回去了, 实际上是形成了一个由简到繁、又由繁到简的轮回, 是技术进步的必然。

二、测井学的形成和发展

测井学是根据物理学 (电磁学、声学、核物理学等) 的基本原理对地层进行研究, 并建立起各种物理量与储层特性之间关系的一门学科。测井学与物理学有着紧密的联系, 在原苏联, 学者们把它称为矿场地球物理学 (Промысловая Геофизика); 在西方, 学者们称之为测井学; 也有人把测井理论和方法称为岩石物理学。

测井学是石油领域十大学科之一, 测井技术是为勘探、开发服务的一项技术。其最终目标是配合地质家在地层中找到油气和开发出更多的油气。测井学的理论和方法, 大体包含以下三方面的内容: 其一根据研究对象中有地层及井眼存在的特定条件, 将物理学的理论进行拓宽; 其二建立起各种物理量与储层特性之间的关系; 其三, 研究井下各种因素对物理量与储层特性之间关系所产生的影响。

测井学理论的意义在于: 探索将物理学原理及各种物理量测量技术应用于测井, 形成新的测井方法; 指导测井仪器的研制; 指导测井资料处理 and 解释, 求取储层参数, 并对各种影

响因素进行校正,使最终求得的储层参数和图像能正确反映地下的真实情况。

从物理学原理出发,可以将测井学分为电磁测井、声波测井、核测井等几个大类,另外还有重力测井等。由于电磁测井、声波测井、核测井各有其发展历史,以下通过电磁测井和核测井这两个方面来介绍测井学的形成。

1. 电磁测井的形成和发展

巴黎矿业学校的物理学教授 Conrad Schlumberger 最早萌生电磁测井的想法。依据金属矿藏与周围介质导电性的差异,他想像用一种地下测量办法来找矿。1926 年,他和 Marcel Schlumberger 建立了电法勘测社团。1927 年,测得了第一条电磁测井曲线。

Maxwell 的宏观电磁场论是电磁测井的重要理论基础之一,电磁测井的发展促进了非均匀介质电磁场理论的发展。首先得出圆柱体界面电磁场解析解的是 Φ_{OK} ,在此基础之上,Альпин 发展了横向测井理论,并作出了横向测井图版。

1942 年, G. E. Archie 在对砂岩的电阻率和储层特性进行大量实验研究的基础上,提出了著名的阿尔奇公式。这个公式将电磁测井中得到的地层电阻率与地层的孔隙度、含水饱和度联系在一起,为测井定量解释打下了基础。在这以后,人们发现了泥质的表面导电现象,建立了泥质砂岩物理模型,推出了 Waxman-Smits 公式等一些适合于泥质砂岩的饱和度公式。1948 年,在一篇自然电位理论的奠基性文章中, Doll 在对扩散—吸附电位进行研究的基础上,指出了自然电位产生的原因,建立了自然电位测量值与地层水电阻率的定量关系。

电磁感应理论在测井中的应用,产生了电磁测井的一个重要分支——感应测井。它所述的场已不再是直流电场。为了计算其响应, Doll 提出了几何因子理论。在有井存在的地质条件下,既有平面边界又有柱面边界,无法得到解析解,不得不求助于数值方法。中国的李大潜等人将有限元素法运用到测井中;美籍华人张书恭完成了轴对称条件下交流电场的有限元算法;我国石油大学的张庚骥于 1978 年提出了测井响应的逐次逼近算法 SAM,并进一步将逐次逼近法与快速傅里叶汉克尔变换相结合,形成了 SAM-FFHT 算法;20 世纪 80 年代,美籍华人周永祖提出了半解析、半数字的混合法 NMM。以上这些正演计算是根据地层参数计算测井响应。为了以测井响应计算出地层参数,应进行反演,人们将 Marquardt 反演计算方法应用于电磁测井中,之后进行三参数反演,可以用电磁测井资料计算出目的层真电阻率、侵入带电阻率以及侵入带半径三个参数。

20 世纪 50 年代的横向测井,以具有不同探测深度的电极系得出井壁外不同距离处的地层电阻率。随着计算方法和理论的发展以及计算机功能的增大,过去难于实现的计算得以在极短的时间内完成,并可实现软件聚焦。横向测井的概念推广于感应测井,使感应测井得以飞跃。90 年代,阵列感应测井发展成为非常有效的测井方法,这在很大程度上得到了反演理论的支撑。人们将剖面划分为像素,以阵列感应测井仪中八组接收线圈对测到的丰富信息,对像素的电导率进行反演处理后给出三种纵向分辨率和五种探测深度的曲线,可准确描述冲洗带、过渡带、原状地层电阻率的变化,与孔隙度资料结合可得出饱和度径向变化,准确划分出油气层。

随着油气勘探开发的深化,裂缝性地层、低阻油气层、水淹层等各种复杂地层对电磁测井理论提出了挑战。研究人员从微电阻率测井和地层倾角测井中得到了灵感,提出了用微电阻率测井原理进行井周成像的观念。在对理论、方法深入研究的基础上进行仪器研制,世界上第一支成像测井仪——微电阻率扫描成像测井仪就此诞生。复杂地层的研究推动了人们对

电磁测井的物理参数与地层参数之间关系的认识不断深化。针对不同的研究对象,电磁测井理论向着不同方向出现细分,并进一步发展。

在碳酸盐岩地层中,人们建立了双孔隙介质的物理模型和数学模型,得到了在双孔隙介质中电阻率与地层含水饱和度的关系式。在低电阻油层方面的研究主要是探索产油层内形成低电阻的机理,在此基础上,找到相应的资料解释方法。在水淹层、砂泥岩薄互层的研究中,电磁测井理论也在不断深化。人们注意到了水与油、气介电常数的明显差别,从20世纪70年代开始,对介电测井理论和方法进行研究,以Maxwell方程组导出电磁波的波动方程,通过测量电磁波在传播过程中的相位和幅度变化,来确定地层中的复介电常数。

最新的科学研究表明,在一定条件下电磁场与声场有伴生现象。这一现象引起了国内外测井学者的注意,人们正在探索在电磁测井和声波测井的关联处,发明一种全新的测井理论和方法。

2. 核测井的形成和发展

1896年Becquerel发现了自然放射性,1935—1939年,自然伽马测井得到市场的确认。1932年Chadwick发现中子,科学界研究了中子与物质的相互作用和中子探测技术,并很快把核物理的成果引入到测井,1941年以后中子测井理论、方法和技术日益成熟。随着中子管的发明和脉冲中子测量技术的发展,脉冲中子测井技术也发展起来。

核测井中测到的是脉冲计数率,从脉冲计数率向地层参数的转换依赖于核测井理论和方法。在对铀、钍、钾三个放射性系列进行研究的基础上,建立了自然伽马测井及自然伽马能谱测井计数率与泥质含量及泥质成分的关系;在对中子与氢核作用进行研究的基础上,建立了中子测井计数率与含氢指数的关系,进而建立其与地层孔隙度的关系;在对伽马射线与物质相互作用进行研究的基础上,建立了密度测井计数率与电子密度的关系,进而建立其与地层密度及孔隙度的关系;在对中子非弹性散射及俘获过程中与地层物质相互作用进行研究的基础上,建立了计数率与地层中的碳、氢、铁、钙、硅、硫等各种元素的关系,进而建立其与岩性、孔隙度、含油饱和度的关系。核测井中的量值转换过程比较复杂,为了使测井结果能反映地下的实际情况,依据核测井理论建立起了一批核测井刻度井群和严格的量值转换和量值传递过程。

近年来,核测井中发展最快的是核磁共振测井。1946年,Purcell和Bloch各自独立地进行了核磁共振实验,成功地观测到核磁共振现象,三年之后就产生了核磁共振测井的观念。1949年,Varian观测到地磁场中的核自由运动。1950年,Hahn提出自旋回波核磁共振实验方法。1952年,Purcell和Bloch因观测到核磁共振现象而获诺贝尔物理学奖。1954年,Carr和Purcell提出CP脉冲序列,并进行了扩散测量。1956年,Brown和Fatt对砂岩进行了核磁共振试验,发现岩石中流体的核磁共振弛豫比自由流体核磁共振弛豫明显加快。1960年,Brown和Gamson成功开发核磁共振测井仪器,并测得了核磁共振测井曲线。但是,为进行测井,必须在钻井液中添加磁铁矿粉,当时的核磁共振测井难以成为实用技术。1968年,Timur提出了自由流体指数的概念,以及用核磁共振测量渗透率和含水饱和度、束缚水饱和度的新方法。这件事意义重大,其意义体现在两个方面:一是在当时所有的各种测井方法中,无法建立起测井得到的物理量与地层渗透率的直接联系;二是在当时所有的各种测井方法中,无法区分束缚水与可动流体。而惟有核磁共振测井,可以实现这两点。1973年,Lauterbur、Mansfield和Damadian各自独立提出了基于梯度磁场的核磁共振测量原理。1978年Jasper Jackson的“Inside-out”概念使核磁共振测井在观念上取得突破,按此概念发明了基于反向磁体的

“Inside-out”核磁共振测井仪，不用在钻井液中添加磁铁矿，使核磁共振测井有望成为实用技术。1979年，Brownstein和Tarr提出孔隙介质核磁共振弛豫理论。NUMAR公司于1990年推出第一支商业化的脉冲回波核磁测井仪。1991年，瑞士科学家Ernst因其在脉冲磁共振和多维谱技术方面的开创性成就而获诺贝尔化学奖。

理论和方法研究成果对核磁共振测井的发展起到了决定性的作用。二次世界大战之后不久提出的核磁测井的想法，在将近50年后成为20世纪90年代测井发展中一项突出的成就。1995年，NUMAR推出具有多频探测能力的MRIL-C型仪器，并提出通过 T_2 分布的相减和位移特征识别油气的方法。1997年斯伦贝谢公司开发出CMR-200型仪器，并提出了用核磁共振测井求取地层总孔隙度的方法。近年来，核磁共振测井的理论和方法还在不断发展之中。

三、世界测井技术发展现状

当前，在测井资料采集、处理技术和射孔技术方面，已经形成快测平台测井系列、成像测井系列、随钻测井系列、储藏动态监测系列、测井资料处理技术系列及射孔技术系列等六个技术系列。在测井方法和测井资料解释技术方面，近年来突出表现在对非均质和各向异性地层的研究。20世纪90年代中期以来，世界测井技术的最新成就主要体现在以下几个方面。

1. 成像测井

20世纪90年代初成像测井系统问世以后，在地面系统、井下仪器、数据传输和资料处理解释等方面都得到较大发展。从测量原理来看，成像测井井下仪器主要有四类：电成像、声成像、核磁成像和井下光学照相。从测井信息采集方式来看，成像测井仪器中采用了一些方法。

1) 扫描型井壁成像。在微电阻率扫描成像测井仪、声波扫描成像测井仪中，利用旋转型探头或是能覆盖大部分井眼的极板来得到井壁的成像图，通过直观的成像图以及计算机处理结果来认识地质特征。

2) 阵列型成像及交叉阵列成像。在阵列声波测井仪、阵列感应测井仪、阵列侧向测井仪等仪器中采用这一方法，它是基于这样的考虑：许多常规测井仪器存在着探测深度和垂向鉴别能力的矛盾，源距短的仪器垂向鉴别能力强，但是其探测深度小，易受井眼及侵入带影响，难以得到地层深处的信息；源距长的仪器探测深度大，不易受井眼及侵入带影响，可以得到地层深处的信息，但是其垂向鉴别能力差，对薄层反映能力差。现将多个探头组合在一起，进行大信息量采集，通过计算机处理达到既有较强的垂向鉴别能力，又有很大的探测深度，并可作出径向成像图。提高垂向鉴别能力有利于薄互层的研究，径向成像有利于识别径向上的非均质性。在阵列成像的基础上发展了交叉型阵列成像。在交叉偶极子阵列声波测井仪、三维感应测井仪等仪器中采用了这一方法。这一方法是将探头按不同的方向排列，探测到不同方向上的信号，从而掌握地层的各向异性特征。例如，交叉偶极子阵列声波测井仪可以在裂缝性地层中分别探测到在互成 90° 方向上以不同速度传播的慢波和快波，据此进行裂缝评价。

3) 聚焦型成像。在方位侧向测井仪、核磁共振测井仪等仪器中采用了这一方法。这是利用聚焦方法，使得采集到的测井信息集中于地层中的某些局部，从而得到地层特性在不同方位上的变化特征或是在径向上的变化特征，从而得到地层各向异性或是非均质的概念。例如方位侧向测井仪可以得到在不同方位上的地层电阻率特性。