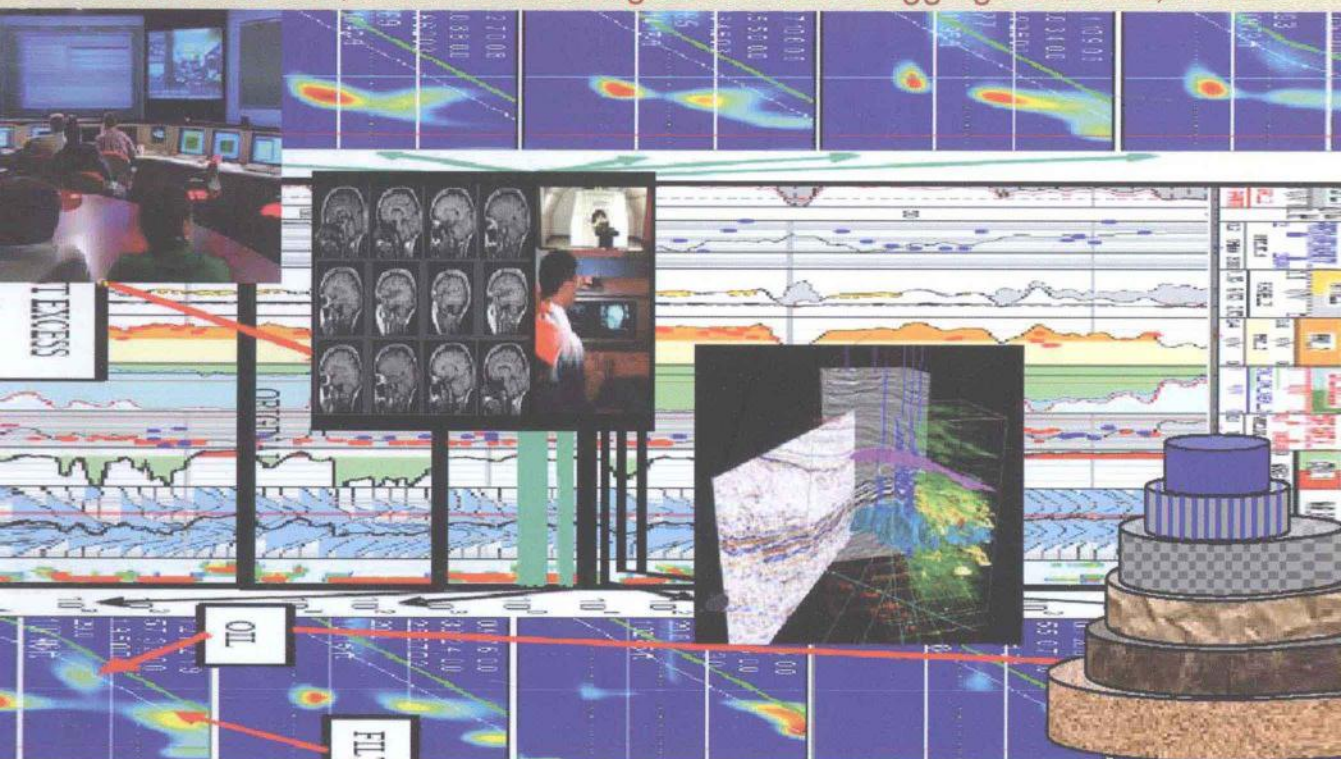


成像测井学基础

肖立志 张元中 吴文圣 付建伟 胡法龙 陈海峰 编著

Lizhi Xiao et.al, Frontiers Investigation in Well Logging Sciences, Vol.III



石油工业出版社

成像测井学基础

肖立志 张元中 吴文圣 编著
付建伟 胡法龙 陈海峰

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

成像测井学基础/肖立志等编著.
北京:石油工业出版社,2010.10
ISBN 978-7-5021-7765-2

- I. 成…
- II. 肖…
- III. 成像-油气测井
- IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 071094 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.cn

编辑部:(010) 64523736 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.75

字数:350 千字

定价:58.00 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

前 言

从 20 世纪 90 年代开始, 由于成像测井技术的成熟和广泛应用, 测井科学正在经历着重要变革。通过测井仪器的阵列化实现对目标体非均质性和各向异性的观测, 是成像测井的主要特征。以此为基础, 形成了相应的一体化探测技术和可视化处理与解释技术。成像测井的信息内容空前丰富, 大量直接的和间接的地下信息被采集到, 信息的提取、解释及应用涉及更加复杂的数学和物理背景知识, 从而使研究者和使用者之间的经常性沟通变得十分重要。在测井产业链方面, 服务公司与油公司的分工更加明确。成像测井的研发投入更大, 周期更长, 风险更高, 发展高性能、高可靠测井传感器, 高效取全取准测井信息, 通过高技术获得市场份额和合理回报, 成为服务公司的主要目标。定位于应用, 跟踪测井新技术, 委托或合作开发特种技术, 注重区域岩石物理和测井应用基础及新技术适应性案例研究, 强调技术上、机理上的有效性和效率上、成本上的可行性, 解决勘探和开发阶段的现实难题, 成为油公司对待测井技术的主要策略。

新世纪里, 国际上测井服务商的格局并没有发生显著变化。斯伦贝谢公司仍然以其无可争辩的技术优势 and 市场份额而稳居第一。哈里伯顿公司与阿特拉斯公司在高新技术研发和市场推广上继续采取“快速跟踪”战略, 并着力发展特种技术。在专利技术“有偿共享”的大框架下, 公司之间高度警戒, 严守各自的种种技术秘诀和商业秘密, 使外人难免雾里看花。

由于历史原因, 我国对斯伦贝谢公司和阿特拉斯公司的测井技术了解较多, 文献也比较详实, 而对哈里伯顿公司的技术了解相对较少。事实上, 以 MRIL—Prime 核磁共振成像测井为代表, 哈里伯顿公司的成像测井特色鲜明, 内涵丰富, 在我国的应用已经相当普遍, 并取得了较好的效果。为了全面系统地反映成像时代的测井科学, 同时也为了油公司更好地使用成像测井技术, 笔者以哈里伯顿公司共振成像测井技术为参考, 编写了这本书。本书的出版首先要感谢哈里伯顿公司中国区测井原总经理彭文军先生, 以及李可、张日文、李德芬、李玉玲、彭跃等的大力支持; 其次要感谢中国石油大庆钻探集团测井公司、中国石油西部钻探集团测井公司的专家的热情帮助。

本书由笔者的课题组集体完成, 参与写作的人员有付建伟(第二章)、张元中(第三章和第六章)、东北石油大学陈海峰(第二章至第六章)、吴文圣(第七章)、中国石油勘探开发研究院胡法龙(第八章)等, 全书由笔者设计和审阅。此书出版历经数年, 由于水平有限, 虽几易其稿, 不满意之处还是很多, 恳请读者原谅。



目 录

第一章 概述	(1)
参考文献	(5)
第二章 井壁电成像测井	(6)
第一节 物理基础和方法原理	(6)
第二节 EMI 仪器结构、指标与使用条件	(8)
第三节 采集的基本信息与数据处理方法	(12)
第四节 图像解释的地质基础及解释方法	(18)
第五节 应用实例	(25)
参考文献	(31)
第三章 井周声成像测井	(33)
第一节 物理基础与方法原理	(35)
第二节 CAST - V 仪器结构、指标与使用条件	(39)
第三节 采集的基本信息与主要用途	(43)
第四节 资料处理与解释方法	(45)
第五节 应用实例	(55)
参考文献	(60)
第四章 核磁共振成像测井	(62)
第一节 物理基础与方法原理	(62)
第二节 MRIL - Prime 核磁共振成像测井仪的结构、指标与使用条件	(66)
第三节 采集的基本信息与主要用途	(69)
第四节 资料处理与解释方法	(85)
参考文献	(94)
第五章 阵列感应测井	(96)
第一节 物理基础与方法原理	(96)
第二节 几何因子理论和高分辨率阵列感应仪器探测特性	(98)
第三节 HRAI 仪器结构、指标与使用条件	(108)
第四节 资料处理与采集的基本信息	(111)
第五节 主要用途及应用实例	(115)
参考文献	(122)
第六章 正交偶极声波测井	(124)

第一节	物理基础与方法原理	(126)
第二节	WaveSonic 仪器结构、指标与使用条件	(132)
第三节	采集的基本信息与主要用途	(138)
第四节	资料处理与解释方法	(140)
第五节	应用实例	(142)
	参考文献	(155)
第七章	脉冲中子能谱测井	(158)
第一节	物理基础与方法原理	(158)
第二节	RMT 仪器结构、指标和特点	(162)
第三节	测量原理、数据采集和质量控制	(164)
第四节	资料处理与解释方法	(170)
第五节	应用实例分析	(178)
	参考文献	(189)
第八章	模块式地层测试器	(190)
第一节	物理基础与方法原理	(190)
第二节	RDT 仪器结构、指标与使用条件	(195)
第三节	核磁共振井下实验室 MRILAB	(200)
第四节	资料采集方法及基本信息	(202)
第五节	资料解释与应用	(206)
	参考文献	(214)

第一章 概 述

所谓成像测井，主要是指在井下采用阵列扫描测量或旋转扫描测量，沿井眼纵向、周向或径向大量采集地层信息，传输到地面后，通过图像处理技术得到井壁的二维或井眼周围某一探测深度内的三维图像，可以方便地对地层信息进行可视化显示。与以往的测井曲线表示方式相比，可以更精确、更直观、更方便地反映地层参数的变化，更好地反映地层参数的复杂性和非均质性。

石油工业界对井下信息的可视化或成像显示的探索，始于 20 世纪 50 年代。当时，Birdwell 公司用 6mm 的镜头捕获到井下的照片。1964 年，壳牌石油公司开始使用一种井下黑白电视照相机，此后，井下电视技术得到持续的发展。1986 年，斯伦贝谢公司推出两个成像极板、两个倾角极板的微电阻率成像测井仪 FMS，两年后又推出 4 个成像极板的 FMS，使测井技术正式进入成像时代。20 世纪 90 年代，适应油公司的迫切要求，以井下探头阵列化和地面采集图像化为主要特征的成像测井技术得到长足发展。世界上三大著名测井公司都开发了各自的电成像测井（FMI，斯伦贝谢公司 1991 年；EMI，哈里伯顿公司 1994 年；STAR-II，贝克阿特拉斯公司，1996 年；非导电钻井液的微电阻率成像测井，斯伦贝谢公司 2001 年）、超声成像测井（CBIL，贝克阿特拉斯公司，1989 年；CAST，哈里伯顿公司，1990 年；UBI，斯伦贝谢公司，1990 年），以及核磁共振成像测井（MRIL，NUMAR/哈里伯顿公司，1991 年；MRIL-Prime，NUMAR/哈里伯顿公司，2000 年；CMR，斯伦贝谢公司，1996 年；MR-Scanner，斯伦贝谢公司，2005 年；MREX，贝克阿特拉斯公司，2005 年）等主导仪器。与此同时，成像测井获得的地层地质/工程信息也得到广泛应用，使测井解决地质勘探和油藏工程问题的能力得到前所未有的提高。如今，较为成熟的成像测井技术体系已经形成，即包括井筒成像（井眼内的流体）、井周成像（套管壁、水泥环和井壁），以及井边成像（冲洗带、侵入带和原状地层），如图 1-1 所示。而井间成像测井技术则发展相对较慢。其中，井筒成像利用光、电、声等技术，对油井的产液情况进行实时检测，对油井工程技术问题进行诊断和预测。井周成像测井以声波测井和电法测井为主，用

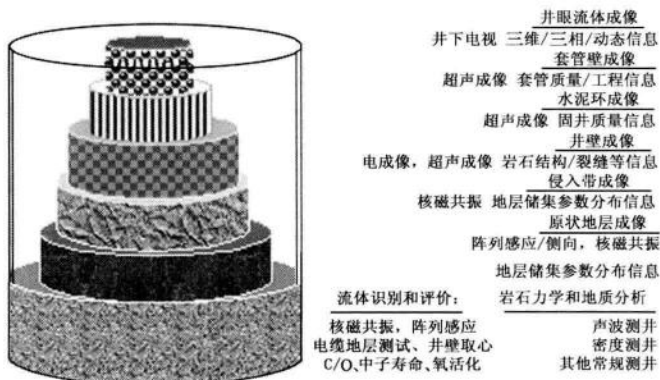


图 1-1 成像测井时代的技术体系：裸眼井、套管井、生产井多层面成像

于裂缝分析、沉积环境识别及工程质量检测。井边成像测井以核磁共振成像测井和阵列感应测井为主，结合声波和核辐射，用于产业性质分析、产层质量评价，以及储量、产量和采收率的预测。井间成像测井以声波测井、电法测井为主，用于构造解释、孔隙间连通性分析。

成像测井是随着非线性和非均质测井理论的发展而产生的。常规测井方法采用的是均质和线性理论，把地层介质看成是简单的、均质的。在其指导下设计测井仪器、数据采集及数据处理，结果往往带有多解性。而实际地层往往是复杂的、非均质的，特别是裂缝性油气层的非均质性最为明显。地层在横向和纵向上的非均质性也很突出。因此，从不同测井信息中提取出来的物理参数很难取得一致。这促使人们开始利用非均质和非线性理论指导测井仪器的设计。成像测井技术可以在更复杂、更隐蔽的油气藏勘探和开发方面有效地解决一系列问题：薄层、薄互层、裂缝储层、低孔隙低渗透层、复杂岩性储层等的评价；高含水油田开发中剩余油饱和度及其分布的确定；固井质量、压裂效果、套管井损坏等工程问题以及地层压力、地应力等力学参数的求取等等。随着计算机技术（硬件和软件）、微电子技术、制造技术以及系统集成技术等进步，成像测井仪器得到快速发展，如今已经成为世界测井技术的主流。

哈里伯顿公司的 Excell-2000 是世界成像测井技术的重要代表之一。它集成了前几代测井技术中所有有价值的、成熟的井下传感器，形成裸眼井测井方法和套管井测井方法（图 1-2 和图 1-3 所示）。

现代意义的地球物理测井于 1927 年产生于法国。最初只能测量视电阻率、自然电位、井温等信息。经过八十多年的发展，如今已成为以电法测井、声波测井、核辐射测井，以及核磁共振测井等方法为基础的、门类齐全的系列测井仪器。地面数据采集系统也经历了四次大的技术革命，包括第一代模拟记录测井系统、第二代数字记录测井系统、第三代数字控制测井系统、第四代成像测井系统，以及正在兴起的第五代网络测井系统。即

- 第一代：模拟记录测井系统，单任务作业，指令单向传递，资料滞后解释；
- 第二代：数字记录测井系统，单任务作业，指令单向传递，资料滞后解释；
- 第三代：数字控制测井系统，单任务作业，指令双向传递，资料滞后解释；
- 第四代：成像测井系统，多任务作业，指令双向传递，资料滞后解释；
- 第五代：网络测井系统，多任务作业，指令多向传递，信息共享并实时解释。

第一代如我国早期开发和使用的 JD-581，第二代如我国 20 世纪 70 年代末引进的 3600；第三代如我国 20 世纪 80 年代引进的 CSU、DDL-V、CLS-3700，以及我国自行研制并且目前仍然广泛使用的大、小数控；第四代如 20 世纪 90 年代开始引进的 Excell-2000、Eclips-5700，以及西安石油勘探仪器厂自行研制的 ERA2000 成像测井系统。这四代测井系统都较好地实现了井下传感器数据的采集和传输，但是，提供的信息是不能实时共享的，资料的处理与解释也都是滞后的，指令传递的方式最多双向（即地面到井下、井下到地面）。网络测井则将实现信息的实时共享和指令的多向传递。

计算机和互联网技术的迅猛发展为测井数据采集方式的变革提供了条件。进入 21 世纪，以“数据共享、提供实时油藏解决方案”为主要特征的网络测井技术正在形成之中^[1]。世界上几个著名的油田服务公司，正在努力实现新技术的转型，哈里伯顿公司从 20 世纪 90 年代末即已开始概念设计，现已经投入使用的。以 Sperry-Sun 的 Insite 为核心的测井系统（Log IQ）的设计理念正是试图通过互联网技术，实现测井数据采集、处理、分析以及解释的远程控制和共享，实现油藏解决方案的实时化和动态化。实际意义在于可以及时地为油公司提供决策依据，大大加快勘探开发进程，显著降低作业成本，增加投资回报。

		可视化		地层评价						岩石特性			取样		井眼条件										
		构造	走向	井眼直径及形态	裂缝评价	薄层、层理分析	产层计算	岩性	孔隙度	含水饱和度	天然气识别	低电阻率层	井眼稳定性分析	出砂分析	压裂分析	渗透率	流体及岩石取样	地层压力	油基钻井液	淡水	盐水	空气			
可视化	井周超声成像测井	●	●	●	●	●	●	●				●						●	●	●					
	微电阻率成像测井	●	●	●	●	●	●	●				●								●	●				
	井下电视	●	●		●	●	●					●									●	●	●		
	六臂倾角测井	●		●	●	●						●								●	●	●	●		
	VSP 垂直地震剖面测井	●																		●	●	●	●		
岩石物理和油气评价	电阻率	阵列感应测井					●			●	●								●	●		●			
		侧向测井、薄层电阻率测井					●	●		●	●										●	●			
		高频介电测井						●	●	●												●			
		微电极测井			●	●				●	●											●	●		
		微球形聚焦测井					●	●	●	●	●	●									●	●	●	●	
	孔隙度及岩性	能谱密度测井			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●	●	
		双源距中子测井					●	●	●	●	●	●				●					●	●	●		
		双源距超热中子测井					●	●	●	●	●	●				●					●	●	●	●	
		核磁共振测井						●	●	●	●	●	●	●	●	●					●	●	●	●	
		自然伽马测井					●	●	●	●	●										●	●	●	●	
	温度	自然伽马能谱测井			●	●	●	●	●	●											●	●	●	●	
井下张力测量										●										●	●	●	●		
岩石机械特性	井眼特性测井									●										●	●	●	●		
	补偿声波测井							●	●	●	●	●	●	●						●	●	●			
	低频偶极声波测井				●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●			
	全波列声波测井				●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●			
	正交偶极声波测井				●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●			
采样	四臂独立井径			●	●	●					●									●	●	●	●		
	井壁取心							●	●		●	●	●	●	●					●	●	●			
	模块式电缆地层测试器	●				●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		

图 1-2 成像时代裸眼井测井方法及其解决的主要问题和应用条件

数据采集系统是测井技术更新换代的重要标志。尽管不同时代的测井技术都有其标志性的下井仪器，但比较而言，井下仪器的发展通常是渐进式的、累计式的，不同时代的下井仪器往往要求具有兼容性。而测井地面采集系统的发展则是跳跃式的、革命性的，不同时代的地面系统一般是不能直接升级的。互联网技术的最大优越性之一是可以按人们的意愿对同一信息进行几乎无限制的共享。而且，宽带技术又突破了信号传输的速度和总量的限制，从而使信息的实时共享和多向控制成为可能。在互联网上，空间距离的概念已经没有意义。空间距离概念的突破对测井作业具有非常重要的意义，尤其是对于一些困难条件下的作业，如海

上、沙漠以及恶劣环境，将会大大提高作业的效率 and 决策的速度。

		水泥评价		储层动态监测				管子评价			使用条件			
		径向水泥成像	定向	含水饱和度	孔隙度	岩性	生产分析	裂缝评价	管子内径	壁厚、残余壁厚	磁通泄漏及涡流	过油管	过钻杆	过套管
固井评价	水泥胶结测井		●											●
	脉冲回波测井	●							●	●				
	井周超声成像	●							●	●				
储层监测	全波列声波测井				●	●		●						
	正交偶极声波测井				●	●		●						
	低频偶极声波测井				●	●		●						
	自然伽马能谱测井					●		●						
	双源距中子测井				●	●	●							
	多门热中子测井			●	●	●	●	●				●	●	
	能谱水流测井					●	●					●	●	
	脉冲伽马能谱测井			●	●	●	●							
	过油管碳氧比测井			●	●	●	●					●	●	
	放射性示踪定向伽马测井					●	●	●				●	●	
	放射性示踪扫描伽马测井	●					●	●				●	●	
	井下电视						●		●					
	生产测井					●	●							
	全井眼持气率						●					●		
电容阵列水流成像						●								
套管井地层测试器						●								
管子评价	多臂井径测井								●			●	●	
	套管探伤仪								●	●				
	多频电磁波测厚仪								●	●				
	管子探伤仪									●	●			

图 1-3 成像时代套管井测井方法及其解决的主要问题和应用条件

网络测井将对现有的井下传感器进行进一步的集成和发展。尽管对哪些方法会成为网络测井的核心方法作出最终判断为时尚早，但是，其发展方向将仍然是井下探头的阵列化，地面采集的图像化，以及更为重要的是信息共享和油藏解决方案的实时化。按照这一标准，组合性快速平台可能成为网络测井的第一要素，而核磁共振测井、阵列感应测井、声电成像测井、交叉偶极声波测井、脉冲中子测井（碳氧比、中子寿命、氧活化）、模块式地层测试技术和井壁取心等方法，通过改进，有望集成到网络测井技术体系中，形成测井识别和评价油气水、测井岩石力学分析、测井地质分析、测井监测油气藏动态等多个实时化测井系列。

随着计算机图形技术的飞速发展，在地层油气资源评价中实现可视化三维及四维定量分析已经是大势所趋。所以，那些有着深刻物理内涵和丰富信息内容的成像测井方法必然会显

示出其旺盛的生命力。历史表明，石油测井仪器的发展与测井方法的创新、传感器技术的发展以及仪器科学的进步息息相关。因此，随着以互联网为特征的信息时代的到来，传统的数据采集、处理、传输方式都面临着挑战，以网络测井为代表的第五代测井技术、随钻测井技术以及以光纤传感器为代表的新型永久性传感器技术将影响成像测井的进一步发展。

本书以哈里伯顿能源服务公司 Excell - 2000 系统中最具代表性的成像测井技术为例，介绍和探讨了成像测井学基础。第二章为井壁电成像测井，第三章为井周声成像测井，第四章为核磁共振成像测井，第五章为阵列感应测井，第六章为正交偶极声波测井，第七章为脉冲中子能谱测井，第八章为模块式地层测试器。分别介绍了它们的物理基础，测量原理，仪器特点，提供的主要信息以及应用实例等。

参 考 文 献

- [1] 肖立志, 柴细元, 等. 新世纪的测井技术——网络测井及其技术体系初探. 测井技术, 2003, 27 (1): 6-10

第二章 井壁电成像测井

电阻率测井是最早使用的测井方法。通过不同的电极系结构设计可以实现不同探测深度和不同纵向分辨率的电阻率测量，在地层评价中发挥着重要作用。微电极测井仪是一种电极距尺寸较小的井下仪器，因此探测深度也比较浅，主要用来测量侵入带电阻率 R_i 或冲洗带电阻率 R_{∞} 。最早的微电极测井仪以电位电极为基础，无聚焦装置，两个电极分别测量较浅处泥饼的电阻率值和较深处冲洗带的电阻率值，二者的差异反应了地层的渗透特性。为了克服由于泥饼存在造成的对高阻地层和高电导率地层的影响，微侧向测井仪采用屏蔽聚焦原理，使得工作电流可以穿过泥饼，测量井壁附近的电阻率。另一种以微球形聚焦方法为基础的装置对泥饼也表现出较小的灵敏度。

为了确定层面的方位，出现了一种基于多极板的微电阻率测井装置——地层倾角测井仪。该仪器由若干个臂组成，测量的时候可以用机械或液压手段把极板压向井壁，装在极板上的微电极可以测量与极板接触点的井壁电阻率，倾斜地层对不同方位不同深度产生电阻率异常，经过处理可以获得地层的产状信息。

在地层倾角测井技术基础之上发展起来的地层微电阻率扫描成像测井仪在极板上安装了许多纽扣状的小电极，由于地层的非均质性，电极接触的岩石成分、结构及所含流体的不同，会引起流向井壁地层电流的变化，电流的变化反映了井壁各处电阻率的变化。通过不同颜色显示不同电阻率值，可以获得井中测遇地层序列岩心般的微电阻率成像图，为测井解释提供丰富的地质信息。世界上著名的石油测井服务公司——哈里伯顿公司、斯伦贝谢公司、阿特拉斯公司分别推出了各自的微电阻率扫描成像仪 EMI、FMI、STAR，它们代表了电成像测井技术的最高水平，已经成为地层成像的重要测井仪器。本章以 EMI 为例，详细讨论了微电阻率成像测井的测量原理、仪器结构、数据处理、资料解释方法及应用。

第一节 物理基础和方法原理

微电阻率扫描成像测井采用阵列式传感器，即在多极板上安装多个纽扣状的测量电极，测量的时候考虑了探测深度、纵向分辨率和周向覆盖范围，使得测井由平均化测量向阵列化测量演变，其结果是突出对地层非均质性做出响应。为了把测量数据转化为图像，必须有足够的采样密度，因此极板和纽扣电极的设计非常重要。为了获得好的图像分辨率，不丢失数据，极板的个数、纽扣电极的尺寸及间隔、采样速度都要经过严格设计。EMI 成像测井仪极板及电极结构如图 2-1 所示。每个极板上有 25 个电极，共有 150 个电极。每个电极阵列包括上下两排电极，上排 12 个，下排 13 个。两排相距 0.3in，相错 0.1in，即上下相邻的两个电极之间有半个电极是重叠的，这样在测量的时候，在电极阵列所控制的横向范围内所有的井壁表面全部被电极扫过，而横向分辨率可以达到 0.1in。每个电极都是由直径为 0.16in 的金属和 0.24in 的绝缘环组成。电极之间采用分立绝缘环，有益于信号聚焦，达到 0.2in 的分辨率。

微电阻率扫描成像测井仪的测量原理如图 2-2 所示，在极板和回路电极之间供一定的

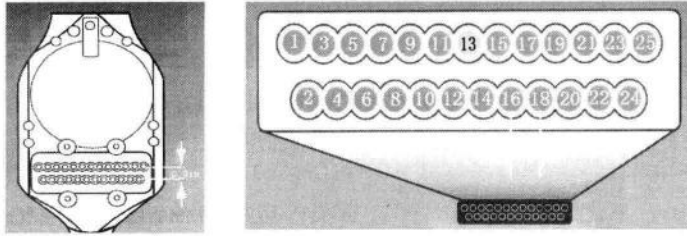


图 2-1 EMI 的极板及电极排列 (哈里伯顿公司提供)

电流, 测量纽扣电极的电流并刻度为电阻率, 该电阻率代表着纽扣电极正对着地层的电阻率。和传统的电测井类似, 定义电极纽扣测得的视电阻率为:

$$R_a = K \frac{U}{I} \quad (2-1)$$

式中 U ——纽扣电极和回路电极之间的电位差;

I ——纽扣电极的发射电流;

K ——电阻率系数;

R_a ——地层的视电阻率。

为了保持较高的纵向分辨率, 同时又有较深的探测深度, 微电阻率扫描成像测井仪采用侧向测井的屏蔽原理, 使得纽扣电极发射出的电流具有聚焦能力, 位于遥测短节外壳上部的电极产生交流电, 交流电通到下部电极。电极的极板为导电金属体, 电极与金属板间保持很好的绝缘性。由电源供给极板和电极相同极性的电流, 并使极板与电极的电位相等, 由电极流出的电流受到极板的屏蔽作用, 沿径向流入地层, 其电流的分布如图 2-3 所示。

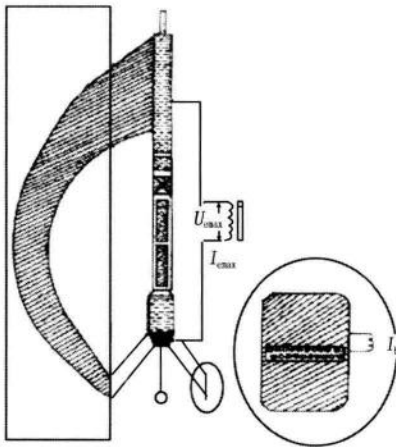


图 2-2 EMI 测井仪的测量原理图
(哈里伯顿公司提供)

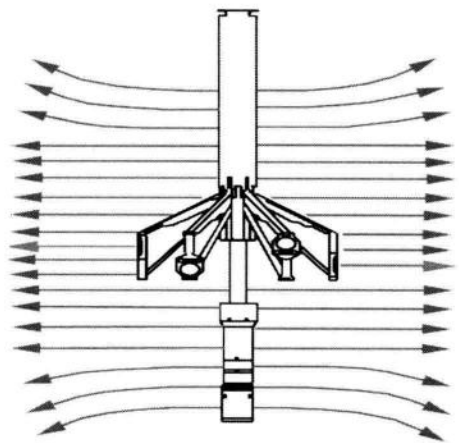


图 2-3 EMI 测量时的电流路径图
(哈里伯顿公司提供)

在极板和电极的电压已定的情况下, 根据欧姆定律, 在不同位置 r 处, 由电极产生的电流密度与该处的电阻率有如下关系式:

$$j = \frac{dU}{Rdr} \quad (2-2)$$

穿过每个电极的平均电流密度等于在其在圆形电极与地层接触面积内的积分如图 2-4 所示, 由下式给出:

$$i(\theta, z) = \int_{r=0}^R \int_{\beta=0}^{2\pi} j(\theta + \frac{r \cos \beta}{R_b}, z + \sin \beta) r dr d\beta \quad (2-3)$$

式中 $i(\theta, z)$ —— 电极对应面的电流密度;
 R —— 电极半径;
 R_b —— 井眼半径。

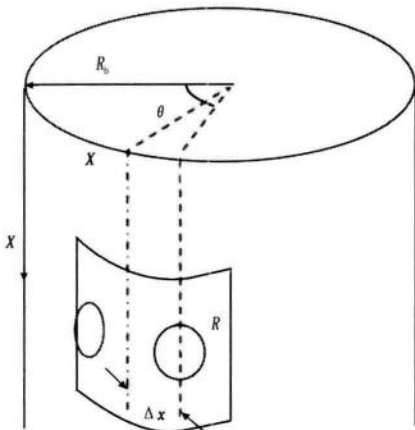


图 2-4 纽扣电流积分 (引自文献 2)

积分结果表明, 地层电阻率高, 电极的接地电阻大, 纽扣电极发射的电流强度变小; 地层电阻率低, 电极的接地电阻小, 电流强度变大。因此测量每个电极的电流变化, 就能够反映井壁上地层电阻率的变化。

微电阻率成像测井仪 EMI 的六个成像测量极板上的 150 个电极, 通过一个低阻抗测量电路与下部电极系相连。测量的电极上的电流强度反映出电极正对的地层部分由于岩石结构或电化学的非均质性引起的电阻率的变化。通过数据处理和图像处理,

可以获得反映纽扣电极覆盖处地层电阻率变化的图像。

从微电阻率扫描成像测井的原理可以看出, 该方法采用了微电极侧向聚焦的测量原理, 因此探测深度与浅侧向测井、数据聚焦测井以及短屏蔽测井的探测深度基本一致, 测量的电阻率反映了地层冲洗带电阻率。探测深度受原状地层和冲洗带电阻率的影响而不同, 如图 2-5 所示。图中可以看到, 在假几何因子为 50% 时探测深度达 10in。

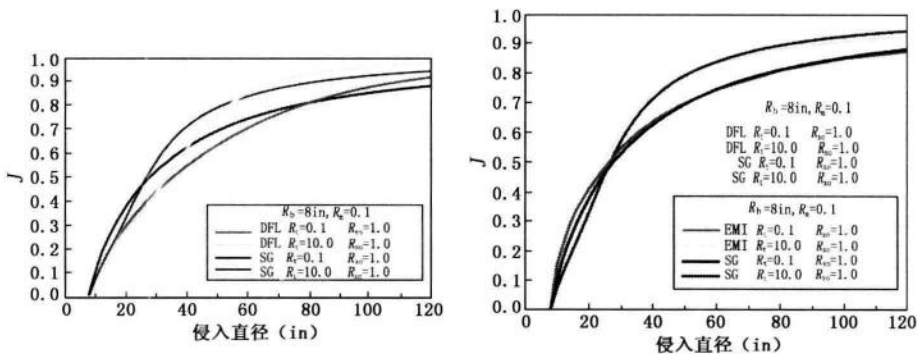


图 2-5 假几何因子与地层侵入的关系 (哈里伯顿公司提供)

第二节 EMI 仪器结构、指标与使用条件

一、仪器结构

哈里伯顿公司的地层微电阻率成像测井仪 EMI 是在获奖技术六臂地层倾角测井 (SED) 技术基础上发展起来的井壁成像测井仪。EMI 的机械部分以 SED 的六个铰接极板为基础,

各极板装在一个独立的支撑臂上，每个臂能够各自独立地伸缩，从而改善了电极与地层的接触。图 2-6 为 EMI 仪器结构示意图，它主要包括以下几个部分：

(1) 隔离短节。

(2) 遥测短节。用于传输数据，由电极采集的地层信息、各种辅助测量和控制测量的信息一起经测井电缆传送到地面。

(3) 电子线路。

(4) 外部绝缘。它把电子线路外壳与探测器分开，使电流从极板流入地层，回到电子线路外壳，且使极板和回路电极间有一定的电位差。

(5) 导航包。EMI 仪器内置一个完整的导航包，它由三个正交的磁感应加速度仪和三个正交的磁倾角仪组成，可提供有关仪器在井中位置、运动方向和方位的精确信息。仪器在测井中采集的大量信息可通过哈里伯顿公司的数字交互式遥测系统 (DITS) 以数字方式传送到地面。

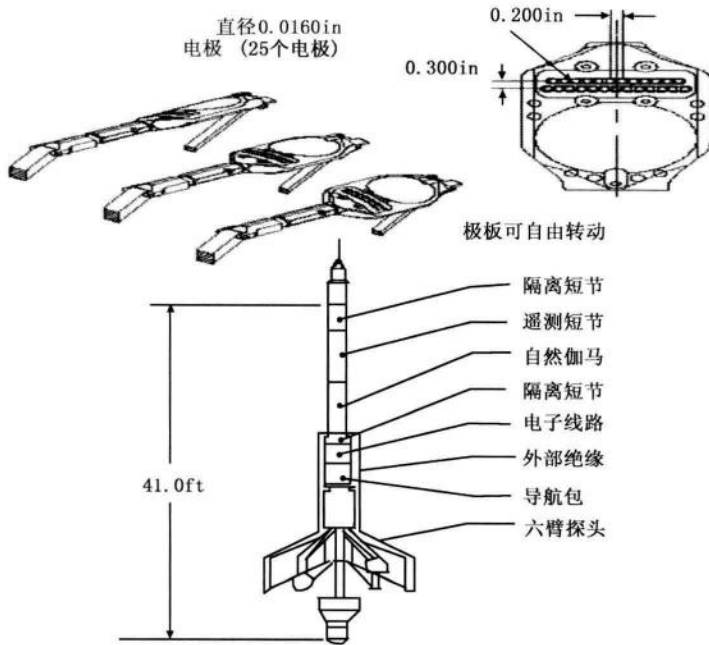


图 2-6 EMI 仪器结构示意图 (哈里伯顿公司提供)

(6) 探头。探头的结构如图 2-7 所示。

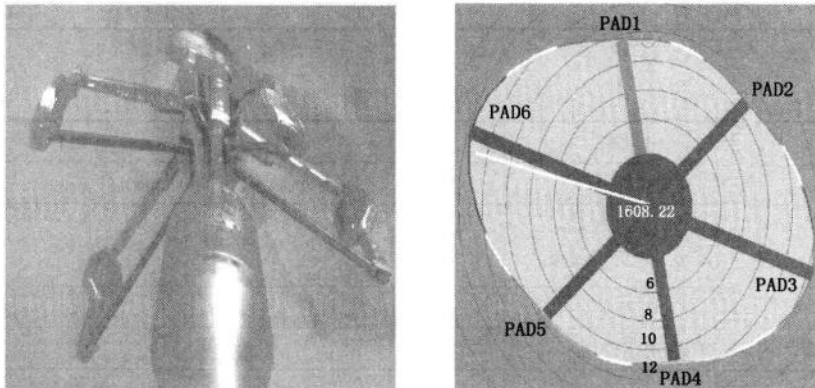


图 2-7 EMI 探头结构示意图 (哈里伯顿公司提供)

EMI 仪器上下部位均采取了居中措施, 从而优化了六个极板在井壁四周的分布, 在水平井和大斜度井中作用尤为明显。EMI 的六个臂彼此独立, 任何一个臂的张开程度与其他臂无关, 把每个臂上的极板安装在一个垂直的轴上, 极板可围绕该轴自由转动, 如图 2-7 右图所示。这种结构使极板和井壁平行, 无论在椭圆形井眼, 还是在斜井中, 甚至在严重不规则的井眼中, 极板和井壁都能保持良好的接触, 这样就保证了图像的质量。

二、仪器指标与使用条件

表 2-1 至表 2-7 给出了仪器的技术指标和使用条件。

表 2-1 尺寸与额定值

耐 温	350°F (177°C)	耐 压	20000psi (137895kPa)
最大外径	5in (12.7cm)	最小井眼	5.875in (14.92cm)
极板长度	24.18ft (7.37m)	最大井眼	21in (53.34cm)
重 量	496lb (225kg)		

表 2-2 井眼条件

井内流体	盐水、淡水、油 (仅适用于倾角模式)	
推荐最大测速	30ft/min	成像模式
	60ft/min	倾角模式
仪器位置	居 中	

表 2-3 硬件特性

信号源类型	感 应 电 流	
传感器类型	共 150 个微电阻率传感器 (共有 6 个旋转极板, 每个极板有 25 个微电阻率传感器)	
传感器间距	共 2 列, 包含 12 个和 13 个传感器, 列间距分别为 0.3in; 每列上传感器间距为 0.2in; 当两列重叠时传感器间距为 0.1in	
采样率	20ft/min, 配接 DITS-I 时; 30ft/min, 配接 DITS-II 时, 120 个采样点/ft	
采样间隔	0.1in (电阻率) 0.3in (井径)	
可组合仪器	可组合其他 DITS 仪器 (要求配接 DITS-I 时, 要求每帧 310byte, 配接 DITS-II 时要求每帧 436 byte)	

表 2-4 测 量

原理	电阻率	方位	旋转	井斜	井径
	微电阻率	高采样率加速度计和磁力计			6 个独立
范围	0.2~2000 $\Omega \cdot m$ $0 < R_t/R_m < 200000$	0~360°	0~360°	0~90°	6~21in
纵向分辨率	0.2 in	无	无	无	无
探测深度	取决于地层	无	无	无	0
灵敏度	无	0.1°	0.1°	0.03°	0.1in

原理	电阻率	方位	旋转	井斜	井径
	微电阻率	高采样率加速度计和磁力计			6个独立
准确性	无	$\pm 5^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 0.4^\circ$	0.1in
主曲线	图像, AZI, HAZI, DEVI, RB, 井径 1-6				
次生曲线	微电阻率, 井斜, 井斜方位, 1号极板方位				

表 2-5 刻 度

一级刻度	外部精密电位器 (电阻率)
	定向试验台 (定位)
	7in 和 15in 的刻度环 (井径)
二级刻度	7in 和 15in 的刻度环井径
井场校验器	极板测试, 人工旋转, 刻度环

表 2-6 物理强度*

硬 件	拉 力	抗压缩能力	扭 矩
仪器接头	130000lb	130000lb	600lb · ft
4.5 in 隔离短节	130000lb	130000lb	600lb · ft

* 这些强度指标适用于在 70°F 和 0psi 条件下的新仪器。

表 2-7 测 量 点

测 量	测量点 (自仪器的底部算起)
安装在低处的成像极板 (推靠臂收回时)	29.03in
安装在高处的成像极板 (推靠臂收回时)	31.44in

三、质量监控方法

为了获取高质量的数据和高清晰的图像, EMI 采取质量控制, 通过对数据的现场处理, 保证测量结果的可靠性。

1. 极板压力监测

图 2-8 显示不同极板压力下获取的图像信息。从图中可以看出, 当极板压力太低的时候会使得某些极板出现模糊不清的现象。通过增加极板压力, 可提高成像质量, 但应该注意的是极板压力太大可能会使仪器遇卡。

2. 重复性监测

改变极板的测量方位, 使得同一地层使用不同的极板测量, 可以提高测量的精度, 减少了由于个别纽扣电极工作不正常引起的测量误差, 还可以判断纽扣电极的工作状态。图 2-9 是对同一地层进行的三次重复测量获取的重复性监测图像。

哈里伯顿公司还推出了增强式微电阻率成像测井仪 XRMI, 专为提供岩心般高精度地层成像而设计的, 该仪器可以在更高的 R_t/R_m 环境下获取高质量的数据, 提高了高矿化度并液条件下的成像质量。通过 32 位的数据采集系统和增加发射功率提高了仪器的应用范围。