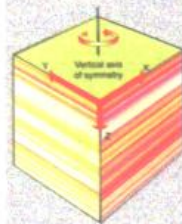
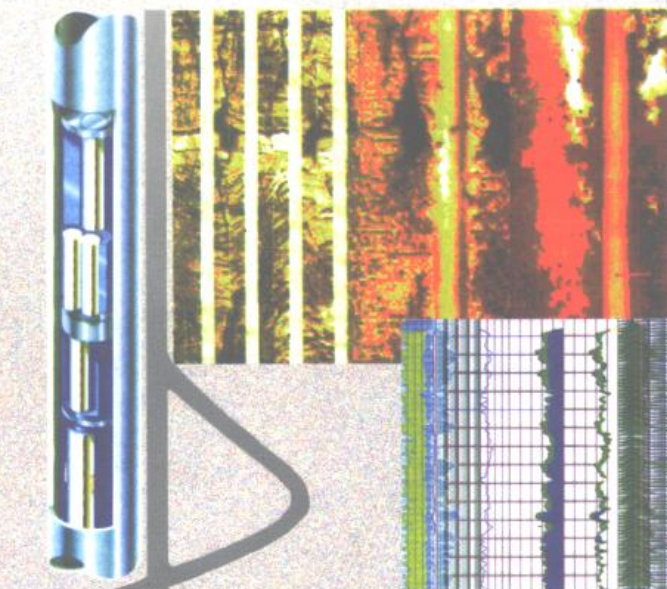


测井新技术应用



- 成像测井
- 核磁共振测井
- 岩电研究



新

石油测井情报协作组 编

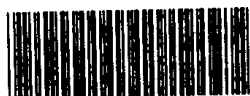
石油工业出版社

登录号	127556
分类号	P631.8
册次号	016

测井新技术应用

成象测井 核磁共振测井 岩电研究

石油测井情报协作组 编



石油0121309

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要论述了成象测井、核磁共振测井和岩电研究的方法原理、实验室研究和现场应用实例，重点论述了这些新的测井方法在解决低阻层、薄层、水淹层和裂缝储层等复杂储层评价方面潜在的优势。

本书适合于现场从事测井、地质和开发等方面工作的工程师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

测井新技术应用：成象测井 核磁共振测井
岩电研究/石油测井情报协作组编 .
北京：石油工业出版社，1998.3
ISBN 7-5021-1782-2

I . 测…
II . 测…
III . 采油井—测井—新技术
IV . TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 03398 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北省徐水县激光照排厂排版
河北省徐水县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 19½ 印张 550 千字 印 1—2000
1998 年 3 月北京第 1 版 1998 年 3 月河北第 1 次印刷
ISBN 7-5021-1782-2/TE·1506
定价：35.00 元

52/69/05

前 言

测井技术进入 90 年代后,取得了重大进展。随着成象测井、核磁共振测井等新一代测井技术的飞速发展,使测井精细描述含油气储层、地层非均质性和薄储层的能力提高到一个新的水平,它标志着测井学科开始进入以井轴为中心的“三维岩石物理学”时代。

为了将这些新进展介绍给我国的测井、地质与油藏工作者,在中国石油天然气总公司勘探局、开发局和科技局的支持下,由测井科技情报协作组协调组织北京勘探开发科学研究院、江汉测井研究所、石油信息研究所和石油大学(北京)等单位的作者,收集整理国内外近五年(截止 1996 年底)公开发表的有关成象测井、核磁共振测井和测井岩电研究等方面的论文约 108 篇,按基本原理、测井及解释方法和地质应用选编成册。分“成象测井、核磁共振测井和岩电研究”三大部分,希望在我国勘探、开发的新形势下,有助于用好测井新技术。

收集的这些论文主要源于美国石油工程师协会(SPE)、美国测井分析家协会 SPWLA 年会及测井分析家杂志和欧洲地层评价会议论文集。其中油公司(包括有关大学)59 篇,占 54.6%;油公司与服务公司合作 29 篇,占 26.9%;服务公司 20 篇,占 18.5%。从这些论文的来源我们不难发现,油公司更注重技术的地质实用性和多学科结合的综合应用,以及岩石物理基础实验与研究。测井公司则更关注技术的先进性和精确性。

成象测井包括井壁成象测井和方位、阵列和多探头组合测井。井壁成象测井是对复杂孔隙结构,诸如裂缝、溶孔、溶洞、层理、井壁崩落等进行描述,用于非均质储层评价以及构造、裂缝、沉积和地应力等地质研究。而方位与阵列等测井通过对复杂的、非均质地层的三维描述,可有效地描述直井、大斜度井、水平井周围的地层与流体特性,成功地表征油藏的实际特征。

核磁共振测井技术是当今测井技术的重大进步之一,它通过测量储层中氢核的核磁弛豫性质,可以评价砂岩与复杂储层的渗透率、孔隙度和孔隙结构、可采储量、剩余油分布及流体的饱和度和粘度等。

立足岩石物理研究与“岩心刻度测井”技术,深入研究油藏条件下用测井资料计算饱和度等储层参数的方法,建立精确的三维解释模型,分析油藏内饱和度分布规律,将使测井、地质、油藏工作者极大地提高对油藏的认识能力。

成象测井部分主要由江国法、储绍坦、赵良孝、谢树琪、郭彦军、李长文等编写。参加翻译的人员有江国法、朱忠文、叶青竹、郭彦军、魏海云、杨继英、张辛耘、李鹤升、陈涛、余卫东、朱涵兵、余春昊、施生华、胡义华、王健、胡新苗等。

核磁共振测井部分第四章由杨虹编写;第五章由王绍民、张广敏编写;第六章由杨元军、王绍民编写。参加翻译的人员有李薇、王雷、杨春胜、朱桂清、杨虹、苗盛、赵彤、王月莲、胡以良、王敬农、张国维、彭石林、李鹤升、杨小伍、曹文杰、张辛耘、刘崇汉、胡新苗、孙宝佃等。

测井岩电研究由欧阳健、毛志强、杨虹编写。

由于编者和译者的水平有限,加之时间仓促,书中存在的不足或错误之处,恳请读者批评指正!

编 者
1998 年元月

目 录

第一章 成象测井方法简介	(1)
第一节 成象测井系统	(1)
一、成象测井技术发展背景.....	(1)
二、成象测井系统的技术组成和特点.....	(2)
三、成象测井技术的发展趋势.....	(4)
第二节 微电阻率扫描成象测井	(4)
一、井壁微电阻率扫描成象测井的测量原理和测量响应岩性分析.....	(5)
二、井壁微电阻率扫描成象测量的数据处理和成象.....	(7)
三、地质特征提取和地质应用.....	(8)
第三节 阵列感应成象测井	(8)
一、感应测井和阵列感应测井测量原理.....	(8)
二、阵列感应测井的数据处理.....	(9)
三、阵列感应测井解释.....	(10)
第四节 方位侧向成象测井	(12)
一、高分辨率方位侧向测井电极系 HALS.....	(13)
二、方位侧向测井的应用.....	(15)
第五节 声波成象测井技术	(15)
一、多极子阵列声波成象测井.....	(16)
二、超声电视成象测井.....	(17)
第六节 随钻电阻率成象	(18)
一、钻头电阻率测量仪 RAB.....	(18)
二、阵列电阻率补偿仪 ARCS.....	(19)
第二章 复杂储层评价方法	(22)
第一节 裂缝性储层识别与评价	(22)
一、四川裂缝性碳酸盐岩储层的成象测井解释.....	(22)
二、用成象测井技术识别天然裂缝和诱导裂缝.....	(26)
三、碳酸盐岩储层裂缝分布和连通性评价.....	(36)
四、用声波横波测井确定地层的裂缝强度和产能.....	(42)
五、成象测井在 SYU 油田裂缝性燧石与白云岩储层中的应用.....	(47)
第二节 薄储层评价	(52)
一、阿拉斯加北坡油田 A 砂岩的薄层模型.....	(52)
二、墨西哥湾深水环境下碎屑岩薄储层的评价.....	(59)
三、成象测井 EMI 定量分析薄层.....	(64)

第三节	成象测井的定量分析方法与应用	(68)
一、	地层非均质的定量描述方法	(68)
二、	砾岩地层的成象测井定量描述	(72)
三、	裂缝性花岗岩的成象测井定量描述	(82)
第三章	成象测井的地质分析	(91)
第一节	沉积体系描述与建模中的应用	(91)
一、	岩心与井眼成象测井的定位及刻度	(91)
二、	用 Diamge 程序研究碳酸盐岩与砂岩	(95)
三、	Fort Worth 盆地 B 气田电成象测井分析地层层序与岩相	(97)
四、	用电成象测井分析沉积环境和特征	(106)
五、	用层序地层学和叠积模式的测井分析来确定砂体和油藏单元的相互连 通性	(111)
第二节	构造模式和油藏形态描述, 提高油气采收率	(113)
一、	用声波成象测井获得盐岩地层构造信息	(113)
二、	油藏盖层与砂体几何形状及连通性分析	(117)
第四章	核磁共振测井	(123)
第一节	核磁共振测井发展概况	(123)
第二节	基本原理	(124)
一、	原子核的磁性	(124)
二、	单个自旋在外加磁场中的行为	(124)
三、	自旋系统在外加磁场中的行为——宏观磁化矢量	(125)
四、	系统在外加磁场中的行为——核磁共振现象	(125)
第三节	测量方法	(127)
一、	自由感应衰减	(127)
二、	反转恢复法	(128)
三、	自旋回波法	(129)
第四节	物质的弛豫特征	(134)
一、	NMR 弛豫机理	(134)
二、	水、油、气弛豫特征	(137)
三、	固体的弛豫	(140)
第五节	核磁共振测井仪	(143)
一、	俄罗斯核磁共振测井仪	(144)
二、	CMR 测井仪	(147)
三、	MRIL 仪器	(153)
第五章	NMR 基础实验研究	(159)
第一节	孔隙度与渗透率	(159)
一、	孔隙度测量	(159)
二、	碳酸盐岩岩心的 NMR 实验	(159)
三、	估算渗透率	(164)
第二节	饱和度、残余油饱和度的测量方法	(166)

一、NMR 测量残余油饱和度的方法	(166)
二、部分饱和岩石中的 NMR 自由流体指数的实验室观察	(168)
三、利用 NMR 研究一种新的砂岩束缚流体指数	(175)
第三节 孔隙结构与岩石胶结指数	(181)
一、碳酸盐岩的沉积结构、岩石物性关系的实验研究	(181)
二、孔洞白云岩的胶结指数	(189)
第四节 裂缝研究	(192)
一、NMR 波谱技术描述裂缝特征	(192)
二、用 NMR 成像法测量裂缝开度	(198)
第五节 富含铁质海绿石砂岩的 NMR 岩心测量	(200)
一、富含铁质储层岩石物理特征	(200)
二、含铁量对 NMR T_2 弛豫时间和束缚水饱和度的影响	(202)
三、铁质含量, T_2 截止时间及 NMR 束缚水饱和度的误差分析	(204)
四、NMR 岩心束缚水饱和度与测井饱和度比较	(205)
五、NMR 测井值同岩心测量值比较	(205)
六、铁含量对表面弛豫的影响	(207)
七、结 论	(207)
第六章 核磁共振测井的应用	(210)
第一节 储层参数解释模型	(210)
一、孔隙度解释模型	(210)
二、渗透率解释模型	(212)
三、饱和度解释模型	(212)
四、流体类型的识别	(214)
五、粘土含量的研究	(214)
第二节 储层参数解释实例	(214)
一、粘土和孔隙度的解释	(214)
二、解释渗透率	(219)
三、提高采收率, 用 NMR 解释含油饱和度和原油粘度	(226)
第三节 核磁共振测井用于探测天然气层	(235)
一、幅度法	(236)
二、谱差分法	(236)
三、谱位移法	(239)
四、回波比法	(241)
第四节 碳酸盐岩、低电阻率油层、低孔低渗等储层评价	(242)
一、碳酸盐岩储层评价	(242)
二、低电阻率油层解释	(247)
三、低孔、低渗储层评价	(251)
第五节 核磁共振测井在黏土注水开发油田的应用	(257)
一、确定剩余油饱和度	(258)
二、划分水淹层	(262)

三、预测产能和打开地层的质量评价·····	(265)
第七章 测井解释油气饱和度岩石物理研究·····	(267)
第一节 确定油层含油气饱和度方法简介·····	(267)
一、岩心直接测定法·····	(267)
二、利用压汞毛管压力资料计算法·····	(268)
三、测井资料解释法·····	(269)
第二节 阿尔奇公式及其发展·····	(269)
一、阿尔奇公式·····	(269)
二、国内外研究现状·····	(270)
第三节 孔隙结构与岩石电学性质·····	(271)
一、孔隙结构·····	(271)
二、阿尔奇公式与孔隙结构·····	(272)
三、塔里木盆地储层岩石孔隙结构对岩石电学性质的控制作用·····	(273)
第四节 高温高压条件下的岩电实验研究·····	(274)
一、压力、温度对胶结指数 m 的影响·····	(274)
二、温度、压力对饱和度指数 n 的影响·····	(275)
第五节 润湿性与孔隙岩样电学性质·····	(275)
第六节 驱替方式及流体分布对岩电实验结果的影响·····	(277)
一、常规驱替流体分布 CT 扫描实验结果分析·····	(277)
二、气(油)水半渗透隔板驱替·····	(277)
三、不同驱替方式 I_r-S_w 实验结果·····	(279)
第七节 “岩心刻度测井”方法·····	(280)
一、可行性分析·····	(280)
二、测井曲线编辑、环境校正与标准化·····	(280)
三、感应测井的侵入校正·····	(281)
四、岩石物理研究与建立测井解释模型·····	(281)
五、测井计算储层参数与成果检验·····	(285)
第八节 泥浆滤液侵入油气层机理与感应测井响应研究·····	(287)
一、对泥浆滤液侵入油气层感应测井响应的定量分析与研究·····	(287)
二、塔里木油田对泥浆浸泡油气层感应测井响应的研究·····	(290)
三、考虑泥浆滤液侵入油气层时重力分异的影响·····	(293)
第九节 三维岩石物理研究·····	(294)
一、具有侵入的倾斜地层响应·····	(295)
二、六个侵入倾斜地层响应·····	(296)
三、水平井中的侵入·····	(297)
四、非圆形的侵入前缘·····	(298)
五、水平井中受浮力影响的侵入·····	(299)
六、各向异性模型·····	(300)
七、应用实例·····	(301)

第一章 成象测井方法简介

第一节 成象测井系统

一、成象测井技术发展背景

随着世界油气资源勘探程度提高,新发现油气藏在规模上趋于小型化。在储层物性及构造形态上趋于复杂化,应用目前的勘探技术和装备发现并评价这类油气藏,勘探成本增加,效益下降。因此早在 80 年代,地震就发展了三维地震成象技术和盆地模拟,钻井发展定向井、水平井钻井技术,而世界各大测井公司已将他们的研究集中于发展新的能更详细地描述油气藏非均质特征,进而提高对油气藏参数定量解释的新测井技术。

地质学家,测井分析家早就梦想带着照相机到井筒中去漫游,仔细审视地下地层结构、流体分布。为实现这个目标,测井工程技术人员已奋斗了 70 年。测井技术的发展也历经了四个阶段:模拟测井、数字测井和数控测井技术阶段。现在正处在成象测井技术阶段。

模拟测井阶段是测井装备配套,测井作业工艺趋于成熟时期,发展了电测井、感应测井、微电阻率测井、声测井、核测井、孔隙度测井系列。记录测量信息的地面装备和联系井下仪器与地面装备的测井电缆,实现配套和作业规范。同时阿尔奇通过实验测量认识到储层孔隙度、电阻率和含水饱和度之间的关系,奠定了测井解释的基础。

数字测井技术阶段,磁记录设备、井下仪器电子接口部件和专用计算单元引入测井地面仪器中,聚焦型深、中、浅三种电阻率测井,三种孔隙度测井形成配套。提出了孔隙度解释的体积模型,地面仪器计算能力达 0.01Mips,测井信息记录量达 200kb/1000ft,测井电缆数据传输率不足 1kb/s,用户参与率不足 10%。

70 年代中期,斯仑贝谢公司的 CSU 系统投入商业应用,标志测井技术进入数控测井阶段,测井地面仪器由通用计算机系统、专用电子接口及专用测井软件构成。计算能力达 0.3Mips,测井工程师通过键盘与系统部件及井下仪器实现交互。发展了配套的测井仪器刻度装置和现场测井质量的控制。测量信号井下数字化,在测井过程中实现地面对井下仪器的控制,电缆的数据传输率达 100kb/s,每千英尺记录的测井信息量达 160kb。现场快速直观解释、测井资料计算机处理和综合解释成为常规,人工参与率达 30%。同时谱分析技术开始应用于岩性密度测井、自然伽马能谱测井及长源距声波测井的波形分析。测井仪器的工作温度和压力达 204℃ 和 100MPa。

测井技术经过多年发展有深厚技术积累。计算机信息技术(硬件和软件)、微电子技术、新材料制备技术、先进制造技术、系统集成技术等相关技术的先进成果应用于测井技术,加速了测井技术的发展。

应用新材料和先进制造技术能制造高机械稳定性、热稳定性和电稳定性的井下仪器阵列测量探头。超大规模集成、高性能微处理器和电子元器件应用于新一代下井仪器实现了对纳伏级微弱地层信号测量,能以 20~24bit 高精度对来自阵列探头大动态范围测量信号进行高

速模数转换，完成对信号的实时电子刻度和复杂过程控制，以 500kb/s 的数据传输率进行井下和地面之间的电缆数据通讯。

测井地面仪器采用工业标准的多机网络硬件和软件平台及智能接口。9~300Mips 的 CPU，大容量内存和外存配置，使地面仪器能运行实时多任务操作系统，完成对阵列测量信号实时软件聚焦和可视化的复杂处理，记录每千英尺 2300kb 的数据信息，井场和处理中心联为一体。多学科交互研究，综合评价，人工参与率达 90%，提高了测井时效和测井质量。

二、成像测井系统的技术组成和特点

早在 60 年代就开始发展井下声波电视和井下照相技术，然而直到 80 年代中期，斯仑贝谢公司研制的地层微电阻率扫描成像测井仪才以其 5mm 的空间分辨率获得同岩心照片一样清晰的井壁微电阻率图象，揭开了成像测井技术发展新的一幕。90 年代中期，斯仑贝谢公司、阿特拉斯公司、哈里伯顿公司先后将他们各自开发的成像测井系统投入商业服务，表 1-1 给出了三种成像测井系统的概况。

表 1-1 三种成像测井系统的技术组成概况

系统名	MAXIS-500		Eclips		Excell-2000	
地面装备	三台以太网连接的 Micro Vax III + cpi3000 阵列处理器计算机测井系统； 实时多任务； 智能接口； 全冗余系统		三台以太网连接的 HP730 工作站计算机测井系统； 实时多任务； 智能接口； 全 CPU 冗余		两台 IBM RS6000 工作站计算机测井系统； 实时多任务； 智能接口； 全冗余系统	
电缆遥测	500kb/s 传输速率可选 兼容 CTS		230kb/s		217.6kb/s 传输速率可选	
井下仪器	地层微电阻率扫描 偶极横波声波 超声波成像 阵列感应 地震成像仪 核孔隙度岩性仪 模块式地层动态测试仪 方位电阻率成像 以及 CSU 系列下井仪	FMI DSI USI AIT CSI NPLT MDT ARI	阵列声波 多极阵列声波 井周声波 微电阻率扫描成像 数字垂直测井 磁共振成像 双相量感应 六臂倾角 高分辨率电阻率成像 通过转换接头 3516，可 与其它非 WTS 仪器连接	DAC MAC CBIL Star Imager DVRT MRIL DPIL HDIP	微电阻率成像 阵列声波 六臂倾角 高分辨率感应 声波扫描 自然伽马 选择式地层测试器 使用 PIO 接口面板，支持 其它非 DITS 传输仪器	EMI SEDT HRI CAST NGRT SFT
解释工作站	ATLANTIS 系统: CHARISMA 数据库软件包 储层工程软件包 数据处理软件包 应用地质软件包 地球物理软件包 岩石物理软件包 生产工程软件包		EXPRESS		DPP	

成象测井系统由成象测井地面仪器、电缆遥传、系列井下仪器和成象测井解释工作站四部分组成。

成象测井地面仪器是一个基于多机网络、智能接口、POSC数据规范、软件规范、图形规范、人机交互规范，具有丰富硬件资源和软件资源的开放式测井数据获取平台。运行实时多任务软件，使数据获取、仪器刻度、现场解释可以同时进行，提高了测井时效。远距离通讯使井场计算机和基地处理中心计算机资源联成一体，资源冗余及质量控制措施增加了可靠性，保证了获取数据的质量和处理成果的质量。

数控测井系统中电缆遥传采用BPSK调制方式，数据传输率达100kb/s。成象测井系统中电缆遥传采用了BPSK调制方式下发命令，传输率最高达40kb/s，上传数据采用QAM调制方式，数据传输率达500kb/s，同时兼容数控测井系统中的电缆遥传方式。

成象测井系统中目前配置的井下仪器有两大类，一类是成象测井仪器，另一类是高垂向分辨率的配套仪器。成象测井仪器有描述井壁地层属性的微电阻率扫描和井下声波电视成象测井仪，有描述地层径向电阻率剖面图象的阵列感应或者高分辨率感应测井仪，有描述井眼轴向电阻率分布图象的方位电阻率成象测井仪，还有精细描述井眼邻域地层构造的井眼地震成象测井仪。配套仪器有核孔隙度岩性测井仪，多极阵列声波测井仪，模块式动态地层测试器，这些仪器获取地下地层的非均质特征及测井环境的丰富信息。

井壁微电阻率扫描成象采用了阵列电扣（FMI采用192个电扣，EMI采用150个电扣，Star Imager采用144个电扣，WDS采用120个电扣）和2.5mm采样间距，得到空间分辨率5mm的沿井壁切片的高清晰度地层岩石及结构图象，在8in井眼中，图象覆盖率达50%~80%。真正成为地质家研究地下地层的显微镜。

斯仑贝谢公司的阵列感应成象测井仪采用多种工作频率，一个发射线圈，8组双线圈组成的接收线圈系阵列。同时测量8组接收线圈上3种频率的实分量和虚分量，记录28条原始曲线。应用软聚焦和分段准线性近似的处理方法，得到30cm、60cm、120cm三种垂向分辨率，25cm、50cm、75cm、150cm、225cm五种径向探测深度，测量范围为0.1~2000 $\Omega\cdot\text{m}$ 的15条处理曲线，形成垂向分辨率匹配，沿深度、径向二维电阻率剖面分布图象。

方位电阻率成象测井仪在保持双侧向电极系结构的基础上，增加12个方位电极，采用三种工作频率实现三种测量模式，独立测量每种模式下的阵列电极电流和电压信号。应用软件聚焦处理方法，获取深、浅双侧向测量曲线和12条方位电阻率曲线，构成描述沿井轴和井周二维电性剖面图象。垂向分辨率20cm。

配套仪器有多极阵列声波波形测井，获得硬地层和软地层纵、横波速度，垂向分辨率15cm；核孔隙度岩性测井仪采用多能窗、阵列探头，垂向分辨率15cm。

成象测井解释工作站实现对来自井下和地面的多学科、多种类、多形态测量数据体进行管理、处理、分析和解释，将它们变为人们易于认识的、可利用的共享资源。它基于先进的计算机和网络技术、系统集成技术，基于规范的数据格式、交互风格、图形工具（POSC标准），由可结构的数据库，数据管理，系统服务和丰富的应用软件包（地质、地震、岩石物理、储层特征描述等）组成。成象解释工作站为储层评价带来了显著变化。一是可视化成象测井把从地下地层中获取的各种信息以地层岩石结构、矿物含量、地层孔隙、流体组分及其空间分布以图象的形式展示在分析者面前，使地层评价工程师集中精力认识储层特征，而不至于面对大量数据和曲线而茫然不知所措；二是人机交互性，充分利用专家知识和经验，提高对储层特征认识的准确性；三是地质、地震、测井、钻井、地面岩心测量多学科协同工作，综合评价，使从地质获得的储层盆地历

史信息、地震获得的储层构造几何信息与测井获得的储层物性相结合，构成对油藏历史的、空间的、物性等特征的生动描述；四是在评价储层参数方法方面，不再经验地把储层认为厚层是均质的，而是先描述储层的非均质特征，然后评价储层参数；五是测井分析家实现了从单井解释到多井综合评价的过渡。测井信息不再只是应用于评价储层参数，而且可以应用于研究储层精细结构和沉积环境，拓宽了测井信息的应用范围。

三、成象测井技术的发展趋势

成象测井技术处于迅速发展和不断完善阶段，发展趋势集中于四个方面：

- (1) 不断发展复杂储层解释技术，提高定量解释精度；
- (2) 根据油田勘探、开发需要，不断改进完善现有成象测井技术，研制、开发成象测井新方法和新仪器；
- (3) 利用成象测井信息对油藏构造、储层结构和流体分布进行三维非均质描述；
- (4) 适应大斜度井、水平井测井需求，继续研究、开发随钻测井成象技术。

第二节 微电阻率扫描成象测井

80年代电成象得到迅速发展。新的地层学地层倾角测井（SHDT）的结构允许采用更短的

（9in）曲线相关对比窗长，检测更小的地质单元，提高了地层学解释和检测高倾角的倾斜地层和裂缝等非均质能力。

80年代中期推出地层微电阻率扫描测井仪器（FMS），在它的初始结构FMS-A中采用两个SHDT极板和两个微电阻率成象极板，每个成象极板上分四排安置27个高分辨率（5mm）电扣，在8in井眼中图象覆盖率达20%，由这种仪器测量获得的高质量井壁地质图象使人们首次通过电缆测井技术得到储层真实复杂性的可视化认识，而且这种测量几乎不受井眼形状、泥浆密度及泥浆中的固体颗粒含量的影响。

井壁微电阻率扫描成象图象在地层评价和地质应用中的价值促进了该项技术的迅速发展，斯仑贝谢公司在研制出FMS-A型仪器后，用了不到3年时间，对FMS井壁微电阻率扫描成象测井仪器做了三次重大改进，研制出FMI全井眼微电阻率扫描成象测

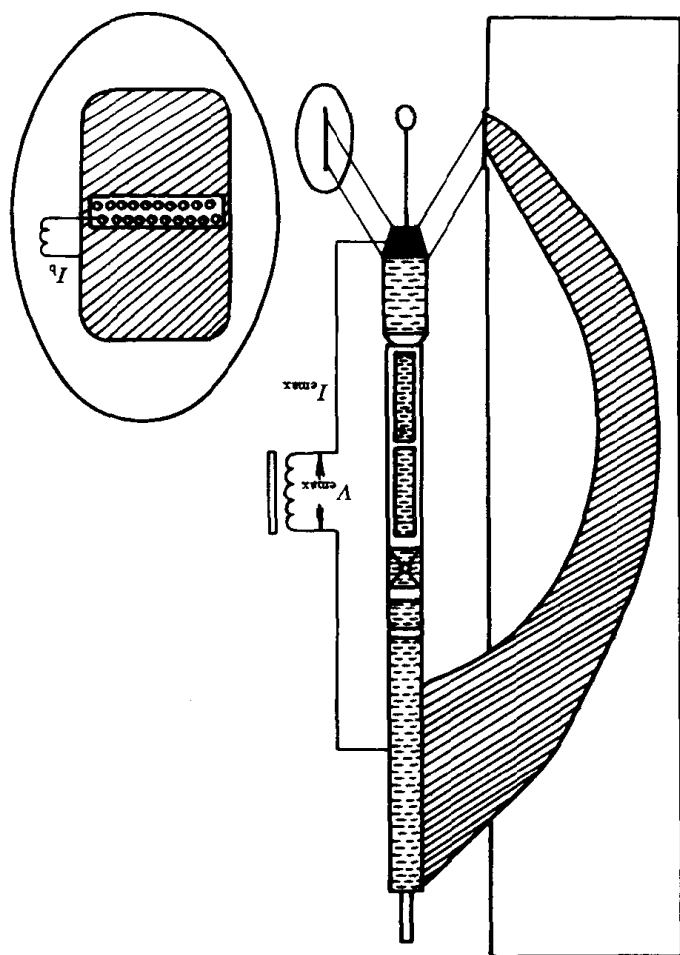


图 1-1 微电阻率扫描成象测井测量原理图

井仪。哈里伯顿公司、西方阿特拉斯公司也先后研制成功了井壁微电阻率扫描成像测井仪器 EMI 和 Star Imager。图 1-1 给出了斯仑贝谢公司和哈里伯顿公司井壁微电阻率扫描成像仪器的特点和部分技术指标。

井壁微电阻率扫描成像测井和其它成像测井方法和仪器提供的丰富信息、先进处理方法，使井眼虚拟漫游成为现实，向建立全三维储层模型的目标接近了。

一、井壁微电阻率扫描成像测井的测量原理和测量响应定性分析

井壁微电阻率扫描成像测井仪的测量原理示意于图 1-2。和地层倾角测量相类似，由推靠器极板体发射一交变电流，使电流通过井内泥浆柱和地层构成的回路而回到仪器上部的回路电极。推靠器、极板体金属连接等电位起到使处于极板中部的阵列电扣流出的电流能垂直于极板外表面（即井壁）进入地层的聚焦作用。测量的阵列电扣上的电流强度反映出电扣正对着的地层邻域由于岩石结构或电化上的非均质性引起的微电阻率的变化。

阵列电扣电流经适当处理可刻度为彩色或灰度等级图象，反映地层微电阻率的变化。

井壁微电阻率扫描成像仪器在均匀介质中测量时，发自极板体的电扣电流 I_b 和推靠臂及推靠器中心支架棒上的聚焦电流 I_f 构成的电流线总是相似的，而与介质的电阻率无关。极板上电流密度随极板上的位置而变化，处在极板中心部位的电流密度较小而均匀，而极板边缘部位的电流密度较大。在均匀介质中每个电扣电流和总电流的比值是确定的。在有井眼的情况下，井眼泥浆电阻率和地层电阻率的不同改变了聚焦电流和电扣测量电流的电流线分布。表 1-2 列出了图 1-2b 中所示极板和电扣结构在不同井眼直径条件下的电扣电流与聚焦电流之比和 R_t/R_m 关系。从表中可以看出，井眼愈大， R_t/R_m 越大， I_b/I_f 越小，测量愈困难。

1. 电扣几何形状、分辨率、采样率之间关系

基于阵列电扣电极的井壁微电阻率扫描成像测井仪器的分辨率是指将仪器测量的微电导率映射地层特征的能力。比仪器分辨率大的地层特征可用几个分辨率单位像素来表示，而比仪器分辨率小的地层特征只能表示成一个分辨率单位。

仪器的分辨率与极板电扣的几何结构密切相关。图 1-2b 示出了极板的阵列电扣电极结构。

(1) 电扣越小，分辨率愈高，井壁微电阻率扫描图象越清晰；

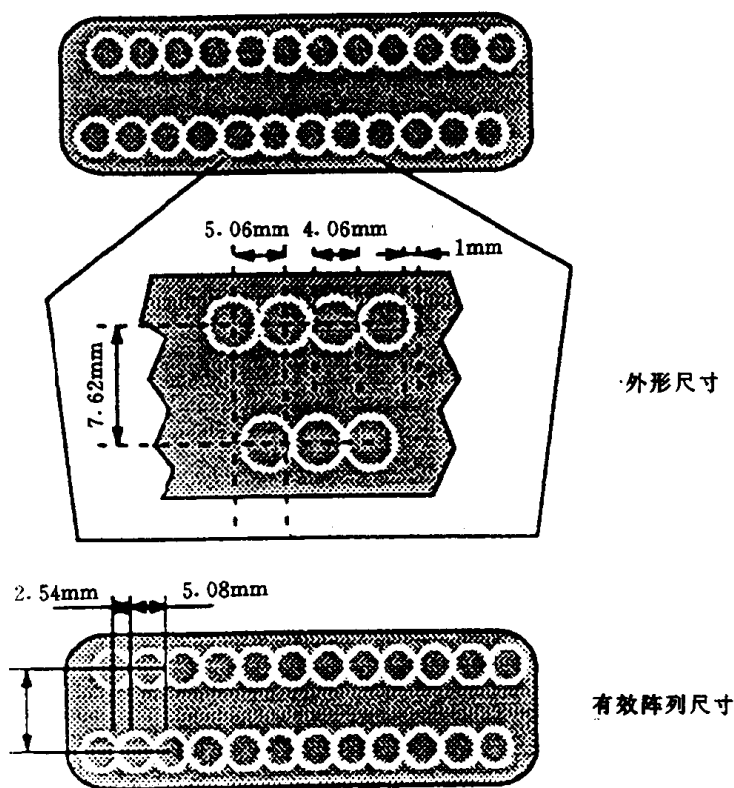


图 1-2 FMI 极板阵列电扣结构示意图

在均匀介质中每个电扣电流和总电流的比值是确定的。在有井眼的情况下，井眼泥浆电阻率和地层电阻率的不同改变了聚焦电流和电扣测量电流的电流线分布。表 1-2 列出了图 1-2b 中所示极板和电扣结构在不同井眼直径条件下的电扣电流与聚焦电流之比和 R_t/R_m 关系。从表中可以看出，井眼愈大， R_t/R_m 越大， I_b/I_f 越小，测量愈困难。

表 1-2 在不同井眼条件下 I_b/I_t 与 R_t/R_m 关系

$I_b/I_t, 1/2000$ D_b, in	R_t / R_m	1	10	100	1000
6		1	0.45	0.27	0.09
8		1	0.4	0.17	0.045
10		1	0.33	0.12	0.04
12		1	0.3	0.1	0.03

(2) 电扣越小, 电扣电流 I_b 越小, $\frac{I_b}{I_t}$ 愈小, 要求仪器灵敏度越高;

(3) 电扣越小, 电扣井壁之间泥饼厚度对分辨率影响愈大, 电扣厚度应和测井中多数泥饼厚度相匹配以保持较好的分辨率, 又不致受泥饼及极板和井壁微小贴合不紧密影响太大;

(4) 电扣周边绝缘环带宽度对仪器测量信噪比有影响。绝缘环带愈宽, 噪音愈低, 信噪比愈大;

(5) 实验表明, 分辨率是由电扣电极有效直径决定的。所谓有效直径是指从金属电扣中心延伸到两电扣电极之间绝缘环带中点的两倍。FMI、EMI、WDS 三种井壁微电阻率扫描成像测井仪的仪器分辨率周向为 0.2in、垂向为 0.2in (5.08mm)。

仪器的数据采样率是仪器所要求的分辨率的函数。信号处理原理(采样定理)要求在等效于仪器分辨率的间距内至少有两个采样点。换句话说, 当井壁微电阻率成像的仪器分辨率要求是 0.2in 时, 仪器的采样率每 0.1in 一个采样点。前面已讨论过, 成像仪器分辨率是二维的, 0.1in 的采样率即满足周向 0.2in 分辨率, 又满足垂向 0.2in 分辨率的要求。FMI、EMI、WDS 三种井壁微电阻率成像仪器中分辨率、采样率及电扣几何形状之间有以下要求:

(1) 第二排电扣在第一排电扣下, 如图 1-2b 所示。两排电扣中心距离是 1.5 倍电扣有效直径。

(2) 仪器采样数据是时间系列的。采样是和遥测总线频率同步的, 每个电扣电极按 62.5Hz 的频率采样。仪器运动的速度用于将采样数据从时间维转换到深度维。速度越低, 采样密度越高。对 FMI 最大测速为 1800ft/h, 用这个速度测井等价于每 0.1in 采样一次数据。

2. 极板和井壁之间间隙对测量响应的影响

极板和井壁之间的间隙会降低仪器垂向分辨率, 而且这种间隙对极板上中心电扣和位于边缘部分的电扣垂向分辨率的影响是不一样的, 对边缘部分的电扣影响更大些。

用图 1-2b 中所示结构的极板和阵列电扣, 使极板和井壁之间间隙分别固定为 0, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$ in, 让极板从 $10\Omega\cdot\text{m}$ 地层跨过边界移动到 $100\Omega\cdot\text{m}$ 地层, 在电极运动过程中测量中心电扣电流在地层边界处的变化。试验表明: 极板和井壁之间间隙为 $\frac{1}{16}$ in 时对仪器垂向分辨率几乎没有影响, $\frac{1}{8}$ in 时分辨率降低不明显, 间隙为 $\frac{1}{4}$ in 时, 分辨率明显降低。

这种结果说明, 在进行井壁微电阻率成像的数据处理和地层解释中应注意极板和井壁的贴合程度。

3. 侵入影响和探测深度

在均匀地层中, 侵入对井壁微电阻率扫描成像测井测量响应中低频分量的影响类似于对浅侧

向 (LLs) 测量响应的影响, 在 $R_t = 100/R_m$, $R_{xo}/R_m = 3$ 的无限厚地层中, LLs 和井壁微电阻率扫描成像测井的测量响应随侵入半径 r_{xo} 的变化表明, 两种仪器探测深度很接近。

在薄互层中, 侵入对井壁微电阻率扫描成像测井测量响应的影响较之厚层时大得多。在厚 6in 的地层中井壁微电阻率成像测井探测深度只有 5in 。

二、井壁微电阻率扫描成像测量的数据处理和成象

井壁微电阻率扫描成像测井测量的是阵列电扣电流和仪器姿态几何信息。从这些测量信息中提取地层地质特征信息需要经过两个过程, 第一个过程是将测量信息映射为井壁微电阻率图象的成象过程, 第二个过程是从新得到的井壁微电阻率图象中提取地层地质特征。

由测量信息映射为井壁微电阻率图象需经过下列处理步骤:

(1) 自动增益和 E_{max} 电流校正。

被测地层电阻率动态范围变化大, 要使测量电扣电流的动态范围变化相应地大, 需通过自动增益控制和改变供电电流强度而实现。

(2) 失效电扣检测及补偿。

通过对每个电扣电流在选择的处理窗口段上的电流分布直方图分析, 去掉那些电扣电流不随地层变化的电扣信息, 利用有效相邻电扣相应测点处的测量值的插值对失效电扣测量进行填补。

(3) 速度校正和电扣方位定位。

第一步应用三分量加速度计测量信息将阵列电扣电流时间域测量信息映射为深度域测量信息, 即确定每个测点的深度。校正方法完全等同于地层倾角测井速度校正。第二步利用三分量磁通量测量信息和加速度测量信息确定每个电扣相对于磁北极的方位角。这个过程确定了每个电扣像素的空间坐标。

值得指出的是可以利用两排电扣之间的已知固定间距和测点之间固定时间间隔序列, 通过两排电扣测量曲线相关对比确定具有最大相关系数时的间距除以两条曲线之间时间差确定仪器速度, 达到两条曲线之间的时间差与两排电扣之间速度校正的同步。

两种速度校正方法均可使用, 相互补充可达到更好的校正效果。

(4) 均衡处理。

为避免由于电扣几何结构 (电扣大小, 电扣在极板上的位置) 和每个电扣电流测量道的电子线路不一致而在图象上产生条带状色彩/灰度条纹, 应对电扣电流做均衡处理。方法是选择均衡处理窗, 在处理窗内要求所有有效电扣电流的平均值和均方差一致。

在求取电扣电流窗口平均值和均方差时应注意排除地层局部结构非均质的影响, 尽可能去掉由于裂缝、溶洞、砾石颗粒存在而引起电扣电流异常增大或减少的情况的影响。

根据不同目的可选择不同窗长。为突出地层局部结构特征, 窗长一般应选短一些, 1m 即可。为表现大段地层的分类, 窗长可选长一些, 甚至整个井段。

(5) 电扣电流像素色彩或灰度等级刻度。

像素色彩或灰度等级刻度是将电扣电流强度按一定关系刻度为像素的色彩或灰度等级。

电流强度映射为像素色彩或灰度的方法是可以选择的。可按电扣电流强度线性刻度, 也可选择确定的刻度阈值。这里介绍一下色彩或灰度等级的等面积刻度方法。

色彩或灰度等级的等面积刻度方法的原则是在所选择的刻度窗口上, 每种色彩或灰度等级的像素总数是相等的。

和图象均衡窗长处理类似, 电扣电流像素色彩或灰度等级刻度窗长也是可以选择的。一种是

将大段或者全井段资料用一个窗口进行刻度。这种图象适用于区别大范围电阻率变化，进行岩性对比。另一种选择较短的窗长，对像素的色彩或灰度进行刻度以突出地层细节的变化。

井壁微电阻率图象上色或灰度只是反映岩性、孔隙度、流体的变化，不代表地层岩石的真实颜色或灰度。

(6) 图象显示。

将电扣电流经过色彩或灰度等级刻度按速度校正中给出的空间位置在图形终端显示图象或硬拷贝到相应的硬设备上。

三、地质特征提取和地质应用

井壁微电阻率图象代表沿井壁的地层电阻率非均质特征变化，电阻率的变化可能是因为岩性、孔隙结构和泥质含量变化所引起，冲洗带的流体性质、井壁不规则也存在某些影响。

如果不知道岩石类型，就难于从井壁微电阻率图象中提取有意义的信息。因此在开始进行有意义的地质特征提取之前，应对比岩心，充分掌握地下地层已知信息，综合分析其它测井资料，实现对井壁微电阻率图象的地质刻度，确定岩性、孔隙度和泥质含量变化对电导率的影响。

井壁微电阻率扫描图象的地质应用正在继续开发，目前主要的应用有：

(1) 裂缝识别和评价；(2) 进行高分辨率薄层评价；(3) 地层沉积环境分析；(4) 地层层内结构分析和地质构造解释；(5) 帮助岩心定位和描述。

第三节 阵列感应成像测井

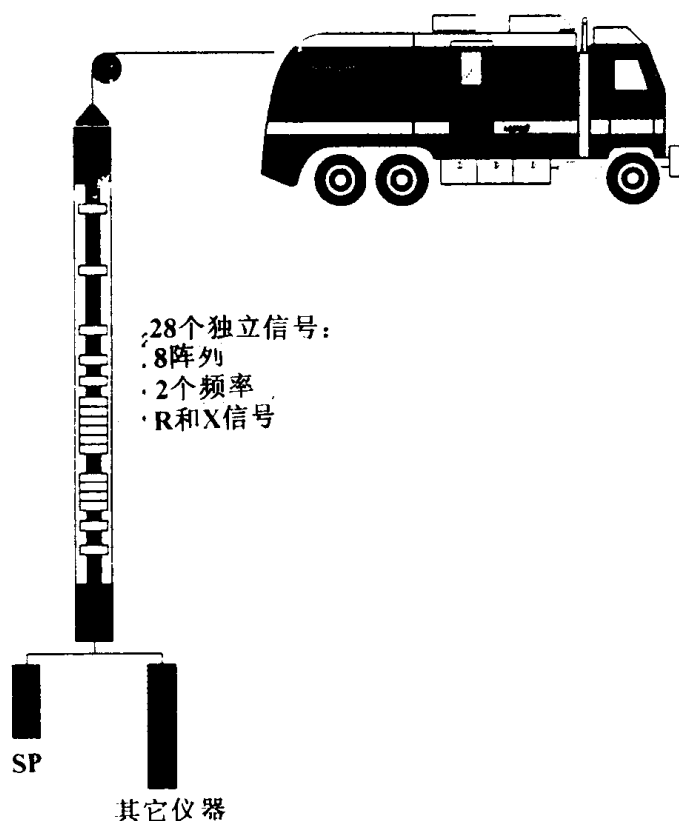


图 1-3 AIT 仪器结构示意图

早在 40 年代，道尔 (H.Doll) 就提出了感应测井几何因子理论，发明了第一支感应测井仪器。以后人们进一步研究了感应测井的传播理论，推出以 6FF40 为代表的多种类型的感应测井仪器，广泛应用于油气勘探与开发中。

随着计算机技术的发展，80 年代，BFB 公司推出早期的阵列感应测井仪器——数字感应测井仪；90 年代，斯仑贝谢公司研制出商业化的 ATF 阵列感应测井仪 (图 1-3)。继斯仑贝谢公司之后，阿特拉斯公司于 1996 也推出自己的阵列感应测井仪器——多道全数字频谱感应测井系统。

一、感应测井和阵列感应测井测量原理

感应测井是利用电磁感应原理测量地层电导率，基本测量单元是双线

圈系，一个发射线圈和一个接收圈。常规感应测井采用复合线圈系结构，根据电磁场的叠加原理，采用多个基本测量单元进行组合，即多个发射线圈和多个接收线圈进行串联，产生具有直藕信号近似为零的多个测量信号矢量叠加，实现硬件聚焦的效果，从而测量具有一种或两种探测深度的地层电导率。

斯仑贝谢公司的 AIT 阵列感应测井仪器线圈系采用三线圈系结构（一个发射，两个接收基本单元）。它运用了两个双线圈系电磁场叠加原理，实现消除直藕信号影响的目的，线圈系由八组基本接收单元组成，共用一个发射线圈，使用三种频率（26.325kHz，52.65kHz，105.3kHz）同时工作，井下仪器测量多达 28 个原始实分量和虚分量信号，传输到地面经计算机处理，实现数字聚焦，得到三种纵向分辨率、五种探测深度的测井曲线（图 1-4）。为了消除井眼环境影响，也开发出了相应软件，在数字聚焦处理前进行井眼环境校正。阿特拉斯公司的多道全数字频谱感应测井仪器由七个接收阵列组成，同样使用三线圈系为基本测量单元，采用八种频率工作，共测量 112 个原始实分量和虚分量信号。类似地，采用软件进行数字聚焦和环境校正，可获得三种纵向分辨率、六种探测深度的测井曲线。

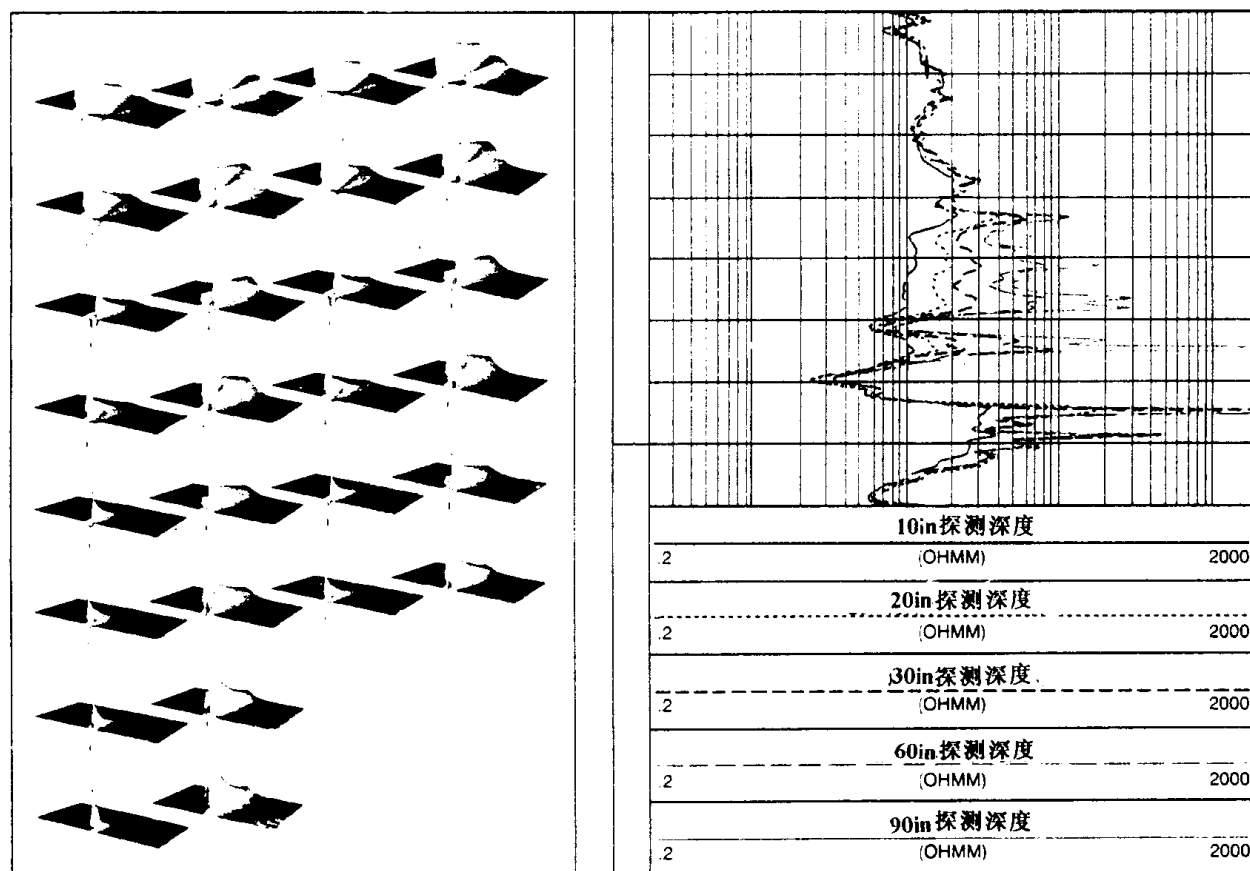


图 1-4 阵列感应测量原始信号及数据处理结果

二、阵列感应测井的数据处理

1. 优化合成处理

根据阵列感应线圈单元响应理论可知，阵列感应测井每个阵列的原始读数是井下每一部分地