

胡澍 主编

高等学校
教学用书

地球物理测井仪器

石油工业出版社

52195



高等学校教学用书

地球物理测井仪器

胡 澍 主编



52195



200313302

52/52/02



石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面地介绍了目前国内外广泛使用的各种测井仪器的测井原理、仪器结构及电路原理,如双侧向测井仪、微球形聚焦测井仪、微侧向/邻近侧向测井仪、双感应聚焦测井仪、电磁波传播测井仪、长源距声波测井仪、水泥评价测井仪、自然伽马与自然伽马能谱测井仪、密度与岩性密度测井仪、补偿中子测井仪等。同时,还介绍了测井信息的电缆传输技术。

本书在阐明测井方法原理的基础上,以一种具有代表性的测井仪器为例,除重点讲述仪器的测量原理、系统结构和电路原理外,还介绍和讨论了仪器使用的传感器,仪器的刻度方法,仪器的设计思想等。

本书为石油高等院校电子仪器及测量技术专业的教学用书,亦可供地球物理测井专业的学生和测井工程技术人员参考。

高等学校教学用书 地球物理测井仪器

胡 澍 主编

*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $24\frac{3}{4}$ 印张 7 插页 624 千字 印 1—4.000

1991 年 8 月北京第 1 版 1991 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0523-9 / TE · 500

定价: 6.95 元

前 言

众所周知，石油是不可更新的能源。世界的石油资源经过 100 多年的工业开采后，石油储量在逐渐减少。这导致当今石油勘探所面临的地质情况越来越复杂。为了解决复杂油气藏的勘探问题，石油工程师要求测井专家提供尽可能多的地质信息。近 20 多年来，测井技术得到蓬勃发展，出现了许多测井新方法和新仪器。特别是由于微电子学和计算机技术的迅速发展，推动了测井仪器不断更新换代，实现了测井仪器组合化、系列化，形成了以计算机为中心的数控测井系统。测井仪器提供了越来越多，越来越丰富的地层学信息。许多专家认为，目前真正的挑战是，测井分析家如何进一步发展和改进对现有测井仪器所提供的信息作出岩石物性的解释。

近 20 多年来测井技术所发生的深刻变革，在较大程度上应归功于测井仪器的发展和改进。编写本书的目的在于，一方面是为电子仪器及测量技术专业提供一本教学用书；另一方面是试图反映近一阶段测井技术的变化和进展，系统地介绍各类测井新仪器。

测井技术是一门边缘学科。但是就测井仪器而论，从信息采集、系统控制、数据传输的角度看，它更多地属于电子学技术领域。因此，在讲授本课程之前，学生必须先学习有关的电子学基础知识。在讲授过程中应安排一定的实验、课堂演示等，以增强学生的感性认识和实验技能。

本书是作者在多年讲授《地球物理测井仪器》课程的基础上编写的。本教材的授课参考学时为 80。

本书共分十四章，由胡澍主编。其中第五、六、七、八章由朱云生编写，第十、十二章由熊晓冬编写，其余各章由胡澍编写。

本书由江汉石油学院李光祖教授主审，在审阅过程中，他为此书提出许多宝贵意见；书中插图由高秀娥、赵鸿斌描绘，在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中的缺点和错误是难以避免的，请读者给以批评和指正。

作者

1989 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 石油和地球物理测井	(1)
第二节 地球物理测井技术及发展概况	(3)
第二章 双侧向测井	(6)
第一节 地层电阻率的测量原理	(6)
第二节 聚焦式电阻率测井法	(8)
第三节 求商式双侧向测井仪	(10)
第四节 功率式双侧向测井仪	(19)
第三章 微电阻率测井	(52)
第一节 微侧向和邻近侧向测井仪	(52)
第二节 微球形聚焦测井仪	(57)
第四章 电阻率测井仪的设计	(72)
第一节 设计的基本要求	(72)
第二节 设计方案的选择	(73)
第三节 仪器参数估算	(77)
第五章 感应测井	(82)
第一节 无限均匀介质中感应测井的传播理论	(82)
第二节 感应测井的几何因子理论	(87)
第三节 复合线圈系的特性表示及其设计思想	(94)
第四节 感应测井仪的电路原理	(101)
第五节 感应测井模拟刻度器	(107)
第六节 褶积滤波器在感应测井中的应用	(114)
第七节 传播效应校正电路的设计	(120)
第六章 电磁波传播测井	(124)
第一节 电磁波传播测井的物理基础	(124)
第二节 电磁波传播测井的测量原理	(127)
第三节 EPT 测井仪的设计	(131)
第七章 裸眼井声波测井	(144)
第一节 裸眼井声波测井的物理基础	(145)
第二节 时差测量原理	(165)
第三节 声波测井仪	(173)
第四节 声波测井仪主要电路的分析	(184)
第五节 声波测井的地面接口	(198)
第六节 SLM 的结构及设计原理	(203)
第七节 仪器的标准化和声波测井表	(219)

第八章 固井声波测井	(224)
第一节 声幅测井仪.....	(224)
第二节 变密度测井仪.....	(229)
第三节 水泥评价测井仪.....	(236)
第四节 超声电视测井仪.....	(250)
第九章 自然伽马测井	(253)
第一节 岩石的自然放射性.....	(253)
第二节 放射性测量的统计涨落.....	(256)
第三节 伽马射线探测器.....	(260)
第四节 自然伽马测井仪.....	(269)
第五节 自然伽马测井仪的刻度.....	(281)
第十章 自然伽马能谱测井	(283)
第一节 测量原理.....	(283)
第二节 仪器原理框图.....	(284)
第三节 稳谱原理.....	(288)
第四节 电路原理分析.....	(290)
第五节 仪器刻度.....	(297)
第十一章 密度测井	(299)
第一节 密度测井的物理基础.....	(299)
第二节 密度测井仪.....	(306)
第三节 密度测井仪的刻度.....	(313)
第十二章 岩性密度测井	(315)
第一节 测量原理.....	(315)
第二节 岩性密度测井仪电路原理框图.....	(318)
第三节 电路原理分析.....	(323)
第十三章 补偿中子测井	(329)
第一节 中子测井方法的原理.....	(329)
第二节 中子探测器.....	(334)
第三节 中子源.....	(335)
第四节 补偿中子测井仪.....	(337)
第五节 仪器刻度.....	(340)
第十四章 测井信息的电缆传输技术	(341)
第一节 脉冲编码调制技术概述.....	(341)
第二节 采样定理.....	(344)
第三节 满贯系统.....	(346)
第四节 电缆遥测系统.....	(357)
参考文献	(387)
附录 石油测井中常用的许用单位与非许用单位换算表	(389)

第一章 绪 论

第一节 石油和地球物理测井

石油是当代最重要的能源，也是最重要的化工原料。没有石油，飞机就不能起飞，轮船不能启航，汽车不能跑动，机器无法运转。在农业上，没有石油提供的化肥和农药，所谓“绿色革命”就只是一句空话。在生活方面，人类生活中不可缺少的合成纤维衣料、合成洗涤剂、染料等都离不开石油。从经济的角度观察，石油产业和石油化工业是当今世界获得超额利润最大的工业部门。例如，沙特阿拉伯以前是个极为贫困的国家，老百姓以卖椰枣和皮革为生。可是不久，这个“浮在石油湖上的沙漠王国”，由于发现了石油，转眼之间一跃成为“暴发户”。仅有一千万人口的国家每天从石油中得到的收入达 3.2 亿美元，使沙特阿拉伯这个由“骆驼加帐篷的社会飞跃到一个喷气飞机加计算机的社会”。

目前我国的石油生产企业和石油化工企业都是为国家上缴利润的大户。我国每年出口原油约 1300~1800 万吨，石油产品 500 万吨左右，占国家外汇收入第一、二位。

在国际贸易中，石油是首屈一指的初级产品。石油价格的波动有时直接冲击世界金融市场。可见，石油对当代人类社会经济生活的影响，已经远远超出它在生产领域充当产品的角色。

石油具有如此重要的作用，但石油工业发展的历史并不长。1859 年，一个名叫 Drake 的美国人，在宾夕法尼亚州的 Titusville 镇，采用原始钻井设备和 4.4kW 的蒸气机为动力，钻成一口深 21.2m 的油井。人们通常把这口井作为近代石油工业的起点。1860 年，美国人 H.D.Rogers 提出背斜学说。同年，世界上第一个石油工作者协会在美国宾夕法尼亚州成立。石油工业便从此开始兴起。虽然距今只有 140 年的历史，但由于本世纪初以来汽车的广泛使用和汽车工业迅速发展的刺激，由于石油化工的发展和石油化工产品越来越深入到人类生活的各个领域，石油工业获得迅速的发展。目前，在世界上形成了六个大的产油区。它们是：中东、美国和加拿大、拉丁美洲和加勒比海、北非、苏联、中国。中东的波斯湾地区是世界上最大最集中的含油气区。这一地区已发现的油气田有 200 多个，石油可采储量 717 亿吨，天然气可采储量 22 万亿立方米。其中，科威特的 Burgan 油田储量最多，约有 100 亿吨，是世界上最大的陆上油田。沙特阿拉伯的 Ghawar 油田次之，约有 85 亿吨。1986 年波斯湾地区产油约 6 亿吨，占世界石油产量的 22%。

石油埋藏在地下深处，浅的油气储集层约 1000 多米，一般为 4000 米左右，有的则更深。这一事实，使得石油勘探成为一种担风险的事业。钻一口井的投资高达数百万美元。这些资金能收回吗？还是全部损失掉？这取决于井内是否有石油。事实上，在勘探新区时人们钻的井相当大的一部分是干井（井内没有石油）。例如，加拿大的 Alberta 油田第一口产油井是经历 30 年的勘探和打了 133 口干井之后才找到的。

人们在绿草如茵的草原钻探，在碧波浩瀚的浅海钻探，甚至在灼热的沙漠、潮湿的丛林以及北极的冻土带钻探，如何能知道地下埋藏有石油呢？这就要借助于地球物理测井技术。

石油形成于数百万年之前。许多国家的若干地区当时都还在海洋下面。浅海之中生活着

极小的动物——“浮游生物”。每年都有无数这样的动物死去并且沉到海底。河流又把大量枯萎的植物和淤泥带下海去，植物与浮游生物混合在一起。然后，淤泥和盐分又把它们覆盖起来，于是在海底形成沉积物。当这些植物和动物腐烂时，沉积物中就开始生成油和气。这一过程不断地进行着。因此，淤泥沉积物逐年越积越深。

海水加在淤泥上的压力很大，以致使淤泥变得十分坚硬。经过很长一段时间，淤泥就变成了岩石，即沉积岩。

沉积岩含有无数细微的缝缝洞洞——孔隙，油和水便保存在这些孔隙中。所有的岩石无非是孔隙、渗透性的，或是非渗透性的。非渗透性岩石非常坚硬。它几乎没有孔隙，因此不能保存油或水。

沉积岩把石油和天然气保存了千千万万年。但是在这漫长的过程中，沉积岩上面逐渐构成了厚实的非渗透性岩层。这种非渗透岩层在沉积岩上面形成“屋顶”，又在沉积岩周围形成“墙壁”。这些坚硬岩层对下面松软岩层施加的压力非常之大。最下层的沉积岩再也不能把石油保持在自己的孔隙中，因为上面的压力太大了。于是，石油缓慢地流过缝缝洞洞，升入部位较高的岩层中去。它越升越高，直至碰到上面的非渗透性岩层。石油再也不能通过这些坚硬的岩层而逃跑。就这样，石油被捕获在一个“陷阱”（即石油圈闭）之中。圈闭有四种主要形态：背斜圈闭、盐丘圈闭、断层圈闭、地层学圈闭。石油总是存在于非渗透性岩层下面的圈闭当中。地球物理测井的作用就是寻找这些油气储集层的位置，估算油气的储量。

事实上，从石油勘探到开发的每一阶段，地球物理测井都可作出贡献。例如，在钻井阶段，利用随钻测井提供的信息（钻压、钻头扭矩、井斜、井眼方位、井下压力与温度等），可以提高钻井效率和指导定向钻井。综合录井除了进行气测录井外，还测量钻井工程参数、泥浆参数、地质参数等，这有利于提高钻井质量，实现最优化钻进。在完井阶段，测井主要用来划分油、气、水层。固井后，测井的任务是检查固井质量，确定水泥面返回高度和进行射孔作业。在开发阶段，测井的任务是研究分层产量（油井）、分层注入量（注水井）以及分层动态。为此，生产测井要测量井内流体流量、井下温度与压力、流体密度及含水率等。

另外，一些工程问题，如套管破裂、变形和腐蚀的情况，窜槽位置，以及压裂设计和试井等都要依靠测井来解决。例如，用井下声波电视和水泥评价测井仪可以检查套管的问题，后者还可以确定窜槽位置。应用长源距声波测井资料可以评价岩石的机械特性，指导钻井施工和压裂设计，预防地层损坏和保护油层。

归纳起来，地球物理测井的传统应用主要在两个领域：地层评价和完井评价。由于经济形势的变化，找油难度的增大以及生产问题的日益复杂，测井所面临的课题将越来越多，越来越难，越来越大。目前，石油工业特别重视从储集层中获得最大产量和建立最经济的管理储量的手段。这种形势变化，要求地球物理测井扩大其应用范围。从80年代初开始，测井分析家开始应用测井资料来描述整个油气藏。油藏描述技术是以测井资料为主，并与地震、地质、油藏工程等资料结合在一起，使用计算机定量描述油藏构造形态、断层、沉积环境；划分油藏类型；画出储集层的油气储量和物性参数的平面及空间分布图。这样可以帮助我们寻找油气富集带，为油田勘探开发作出最佳决策和部署。

由此可见，地球物理测井在石油的勘探和开发过程中起着十分重要的作用。“锐其功必先利其器”，测井技术所起的重要作用首先要归功于测井仪器的不断完善、发展和更新。

第二节 地球物理测井技术及发展概况

一、地球物理测井技术

地球物理测井技术是伴随石油工业而产生和发展起来的一门科学技术。它的传统应用主要是在两个领域：地层评价和完井评价，而目的只有一个，那就是寻找石油和天然气。所以，地球物理测井是，在油气勘探和开发过程中测量、记录、分析井下岩石或流体的物理特性，并对储集层进行油气评价的一种技术。

石油和天然气存在于地层的孔隙内，它们的存在将给岩石的物性带来若干变化。研究岩石的物性，如岩石的电学特性、声学特性、核物理特性、热力学特性等，就构成了各种各样测井方法的物理基础。于是形成了几个主要的测井方法，如电法测井（电阻率测井和感应测井）、声波测井、放射性测井（也叫核测井）等。它们变成硬件就是测井仪器。用测井仪器测井，采集这些地层信息；用计算机来处理和分析这些信息；最后由测井分析家给出评价报告，指出储集层的含油气前景。所以，地球物理测井是一门科学技术，它是科学和技术为依据的。但是，也要看到，每一种测井方法都是从一个侧面来反映储集层；测井仪器是在井下高温高压条件下采集信息；石油埋藏在地下深处，人类无法用眼睛直接看到。因此，测井分析家作出的含油气评价与客观真实情况会有一段距离。为了提高评价的可信度，测井工程师在测井时要组合多种测井仪器下井测量，测井分析家需要用多条测井曲线进行“综合”解释。当井下地质情况非常复杂时，还可使用井壁取心器或地层测试器。井壁取心器直接从井壁上取岩心（岩心长约 20~30mm，直径 18mm）。地层测试器直接从地层中抽取流体样品和测试流体压力。岩心和流体样品经实验室化验，可以帮助测井分析家作出较为客观的评价。为了应付各种各样的地质情况和解决不同的问题，目前在裸眼井和套管井地层评价中应用了 50 多种不同类型的井下测量仪器。

二、地球物理测井技术的发展概况

自从 1927 年法国人 Conrad Schlumberger 和 Marcel Schiumberger 在法国 Pechelbronn 油田记录了第一条电测井曲线以来，地球物理测井技术有了很大的发展。测井仪器从普通电极系和电位差计点测技术开始，经历了照相模拟记录仪，数字磁带记录仪，到 1972 年出现的计算机测井系统等几个发展阶段。计算机测井系统应用计算机控制测井操作，故障诊断，仪器刻度，数据采集以及对测井资料自动按程序处理和井场快速直观解释。井下仪器实现了组合化及系列化。地球物理测井技术的发展大致可以分为以下三个阶段。

1. 定性解释阶段

40 年代以前，测井仪器只能提供梯度电极系、电位电极系等简单的电阻率测井曲线，以及自然电位、自然伽马测井资料。测井方法不多，资料比较单一，所以这一阶段测井技术主要用来进行地层对比，划分渗透性地层以及定性判断油、气、水层。

2. 定量解释阶段

40 年代至 60 年代前后这一阶段，由于第二次世界大战结束，战后经济恢复，科学技术和石油工业得以迅速发展，从而推动了测井技术迅速发展。在这一阶段，发展了很多新的测井方法和仪器。

在电法测井方面，人们一直在设法改进普通电阻率测井，希望测得的电阻率不受泥浆电阻率、井径及地层厚度的影响。直到 1950 年，首批聚焦式电阻率测井才开始商业化使用。

称作侧向测井。第一代侧向测井是三侧向，随后发展了七侧向、八侧向、微侧向等。侧向测井方法出现后，人们开始逐渐淘汰普通电阻率测井方法。

本世纪 30 年代中期，钻井开始采用油基泥浆钻井，以防油层污染。这样一来，上述的以泥浆作导电媒介的电阻率测井方法不能使用。为了解决这个问题，法国人 Doll 提出了感应测井方法。1946 年 5 月 3 日，Doll 所设计的仪器在美国得克萨斯州一个油田的 7 号井中记录了第一条感应测井曲线。1949 年 6 月，Doll 发表了“感应测井及其在油基泥浆井中的应用”一文，并提出了几何因子理论。随后，Schlumberger 公司推出 6FF40 线圈系的感应井下仪，使基本感应测井的发展达到顶峰。

在放射性测井方面，除了自然伽马测井外，又增加了中子伽马测井、中子-热中子测井和伽马-伽马测井等新方法，并列入了常规测井系列。这一阶段由于井下仪器的灵敏度、稳定性和刻度问题得到解决，使核测井列为必须的地质评价测量。

在声波测井方面，Mobil 石油公司和 Shell 石油公司各自于 50 年代早期独立地发展了声速测井。1952 年，Summers 和 Broding 提出了单发双收声波测井仪。1964 年，Schlumberger 公司把它改进为双发双收的井眼补偿声波测井仪。这类声波测井仪是测量声波的纵波在地层中的传播速度，从而导出地层的孔隙度；另一类声波测井仪是测量声波在介质中的能量（幅度）衰减，例如水泥胶结测井。它用来检查固井质量。

在这一阶段最为重要的一件事是 1942 年阿尔奇（Archie）提出了著名的含水饱和度计算公式，即阿尔奇公式：

$$S_w = \sqrt{\frac{FR_w}{\rho}}$$

式中 R_w ——地层孔隙中水的电阻率；

F ——地层因素；

S_w ——地层含水饱和度；

ρ ——含水饱和度等于 S_w 时的地层电阻率。

那么， $(1 - S_w)$ 的地层孔隙体积可能被烃类（油或气）占据。

阿尔奇公式表明了地层含水量与地层电阻率之间的关系。它有助于测井分析家对储集层更好地作出评价，并推动测井技术从定性解释进入定量解释。根据测井资料，测井分析家可以定量地确定孔隙度、渗透率、含油饱和度等重要地层参数，以及计算油气储量，确定残余油饱和度等。

3. 分析评价阶段

60 年代以后至今，这一阶段的最大特点是计算机的推广使用，促进了测井技术的蓬勃发展。

在 70 年代，数家测井公司推出了计算机测井系统，例如 Gearhart-Owen 公司的 DDL，Schlumberger 公司的 CSU，Dresser Atlas 公司的 3700 系统。微机芯片已用到地层倾角测井、伽马能谱测井、阵列声波测井等井下仪器中。

测井仪器引入计算机后，有利于测井操作控制、质量监督、数据采集和处理，从而大大提高了测井效率。更为重要的是测井记录数字化有力推动了测井软件的发展。

早在 60 年代初期，人们就已认识到计算机在测井资料解释中的应用前景。例如，1963 年 Savre 和 Burke 论述了用计算机处理测井资料在地层评价中的应用。随后，发展了许多用

于地层评价的测井解释软件。目前，计算机测井资料解释已发展为三级。第一级是井场测井资料快速直观解释，例如 Schlumberger 公司的 CYBERLOOK 解释软件。它利用 CSU 系统的车装计算机在井场完成测井解释，作出简明的地层评价。第二级是测井工作站解释，例如 TERRASTATION 工作站。工作站以 IBM PC 型微型计算机为中心，加上输入、输出设备组成，配有专门的测井解释软件。第三级是计算中心解释。计算中心有大型或中型的计算机；可以处理较多的测井资料和数据；可以计算复杂岩性情况下的较难测井问题。这方面的测井软件首推由 Schlumberger 公司在 80 年代初发展的 GLOBAL 测井解释程序。

另外，感应测井曲线和自然伽马测井曲线的反演滤波，从声波全波列波形中提取横波和斯通利波，微电阻率扫描测井的图像合成，伽马能谱和地层倾角测井资料处理等都离不开计算机这个有力的工具。在地球物理测井中由于广泛应用计算机，人们将测井的现代阶段定义为数字时代。

这一阶段发展了许多新的测井方法和仪器。在电法测井领域有球形聚焦测井、微球形聚焦测井、双侧向测井、地层倾角测井、微电阻率扫描测井电磁波传播测井等。在声波测井领域有长源距声波测井、井下声波电视、水泥评价测井、直接横波测井、环形声波测井等。声波测井的方法和仪器的研制在这一阶段开始活跃起来。

但是，最引人注目的是在核测井领域研究方面的进展和发展了许多新技术。例如，自然伽马能谱、补偿密度测井、岩性密度测井、超热中子测井、双源距补偿中子测井、中子寿命测井、碳氧比能谱测井。Schlumberger 公司最近发展的伽马能谱仪将中子发生器与选通伽马能谱仪组合在一起。该仪器（叫 GST）可以以两种模式工作。一种是俘获模式，井下仪器获得 256 道俘获伽马谱以及三门热中子衰减测量；另一种是非弹性模式，井下仪器获得 256 道非弹性散射伽马谱。GST 仪器采样的数据经处理后可鉴别和评价八种元素（碳、氧、氯、氢、硅、钙、铁、硫）的含量。

另一种高分辨率伽马能谱测井仪使用²⁵²Cf 中子源。井下仪器由高纯锗探测器、4000 道分析器和一个数字传输系统组成。它的优点是能量分辨率高（小于 0.1%），它可测定煤、铜和铁。

自然伽马能谱测井、岩性密度测井以及伽马能谱测井等核测井方法可以直接指示岩性、岩石的化学成分以及油气的存在。这一点使得它深受人们的重视。

前面已提到，这一阶段的另一个重要进展是地球物理测井已从单井评价走向对整个油气藏的描述研究。它的重要意义在于提高了石油勘探的效益。这一进展既扩大了地球物理测井的传统应用范围，也扩展了测井分析家的视野。今后，地球物理测井在油气勘探和开发过程中将发挥越来越大的作用。

第二章 双侧向测井

双侧向测井是应用最广泛的一种电阻率测井方法，它测量地层的电阻率。电阻率是岩石的重要物理参数之一。在油气井中进行电阻率测井是我们寻找和定量确定油气存在的基本方法。根据所测得的电阻率，可以区分含导电流体（如盐水、泥浆滤液）的地层和含非导电流体（如油气）的地层。应用阿尔奇公式，可以计算出地层中油、气、水的比例：

$$\rho = \frac{FR_w}{S_w^2} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——地层电阻率；
 R_w ——地层水电阻率；
 S_w ——地层含水饱和度；
 F ——地层因素。

电阻率测井是发展最早并一直沿用至今的一种测井方法。最早使用的电阻率测井方法叫普通电阻率测井。它经改进后，发展成为目前广泛使用的聚焦式电阻率测井，或称侧向测井。自 1950 年首批侧向测井仪投入商业使用后，老式的普通电阻率测井方法就逐渐被淘汰。

第一节 地层电阻率的测量原理

为了测量某一电阻的阻值 R ，我们可以应用一个电源给该电阻供电，测量流过该电阻的电流 I 和电阻两端的电压降 V 。根据欧姆定律即可求出该电阻的阻值：

$$R = \frac{V}{I} \quad (2-2)$$

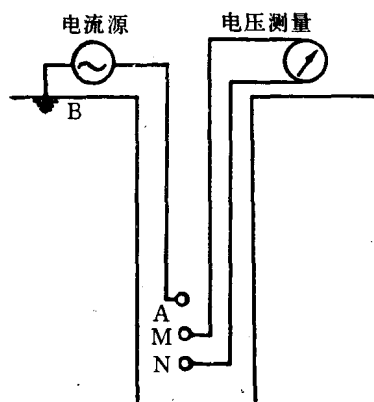


图 2-1 普通电阻率测井法示意图

测量地层的电阻率可以采用与此类似的方法。普通电阻率法是这样做的，在介质中设置一个供电电极 A，回流电极 B 放在距电极 A 无限远的地方，在距电极 A 一定距离处放置一对测量电极 M、N（图 2-1），进行电位差测量。

假定电极为点电极，介质是均匀无限的，介质电阻率为 ρ 。那么，从电极 A 流出的电流则呈辐射状向四面八方均匀散开，等电位面是以 A 为球心的球面。如果测量电极 M、N 与供电电极 A 的距离分别为 \overline{AM} 、 \overline{AN} ，则 M 点的电位为

$$V_M = \frac{\rho I}{4\pi AM} \quad (2-3)$$

N 点的电位为

$$V_N = \frac{\rho I}{4\pi AN} \quad (2-4)$$

式中, I 为电极 A 流出的电流强度。由上两式可得 M、N 两点间的电位差 V :

$$V = V_M - V_N = \frac{\overline{MN}}{4\pi AM AN} \rho I$$

由此可得电阻率

$$\rho = \frac{4\pi AM AN}{\overline{MN}} \cdot \frac{V}{I} \quad (2-5)$$

式中 \overline{MN} 为电极 M、N 两点间的距离。令

$$K = \frac{4\pi AM AN}{\overline{MN}} \quad (2-6)$$

则式 (2-5) 可写成

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (2-7)$$

式中, K 称为电极系常数。式 (2-7) 表明, 普通电阻率测井法是依据欧姆定律来测量介质 (地层) 的电阻率。式 (2-7) 是电阻率测井法的基本公式。

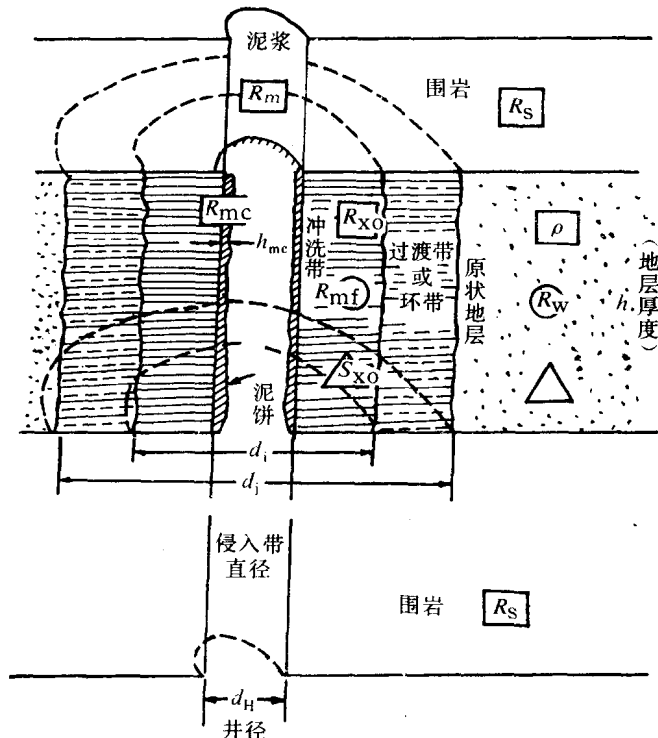


图 2-2 实际的地层介质

ρ —地层电阻率; R_w —地层水电阻率; S_w —地层含水饱和度; R_{xo} —冲洗带电阻率; R_{mf} —泥浆滤液电阻率; S_{xo} —冲洗带含水饱和度; d_i —冲洗带直径; R_s —围岩电阻率; R_{mc} —泥饼电阻率; R_m —泥浆电阻率; h_{mc} —泥饼厚度

供电电极 A、B 和测量电极 M、N 的组合称为电极系。由式 (2-5) 可以看出, 电阻率与 M、N 间的电位梯度有线性关系。因此, 这种电极系称为梯度电极系。M 与 N 的中点为电极系的深度记录点。如果把 N 电极移至“无限远”处, 则可由式 (2-3) 计算出电阻率。这时, 电阻率与 M 点的电位有线性关系。这种结构的电极系叫电位电极系。A 与 M 的中点为电位电极系的深度记录点。根据互换原理, 供电电极 A、B 与测量电极 M、N 互易位置, 所测的电阻率其值不变。

实际测井时, 电极系被置入井眼内, 井内泥浆作为导电媒介。供电电极 A 流出的测量电流经泥浆流进地层。井下地层的厚度是有限的; 不同的地层, 其电阻率各不相同。对于渗透性地层, 由于泥浆滤液的侵入而形成冲洗带。所以, 一个实际的地层介质不能看作是均匀无限的 (图 2-2)。显然, 用普通电阻率测井法测量地层电阻率要受到井筒泥浆、冲洗带以及上下围岩电阻率的影响。

第二节 聚焦式电阻率测井法

聚焦式电阻率测井也叫侧向测井。它包括三侧向、七侧向、双侧向、微侧向、邻近侧向、球形聚焦和微球形聚焦等测井方法。

普通电阻率测井法的主要缺点是测量电流的一部分沿井筒分流, 即测量电流不能全部流进地层; 另外它也不能深入地层很远。所以, 测得的电阻率与地层的真电阻率相差甚远。聚焦式电阻率测井法是针对这一问题, 对电极系加以改进而发展的一种新方法。下面以七侧向为例加以说明。

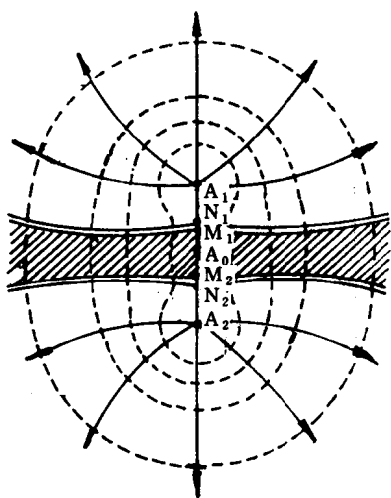


图 2-3 七侧向电极系及其电流线分布

七侧向测井的电极系由七个电极组成, 见图 2-3。其中 A_0 是主电极; M_1 、 M_2 和 N_1 、 N_2 是两对监督电极; A_1 、 A_2 是一对聚焦电极 (也叫屏蔽电极)。这三对电极以主电极 A_0 为中心对称排列。每对电极用短路线连接, 使具有相同的电位。回流电极 B 放在“无限远”处。这种电极系结构相当于在梯度电极系的上下附加了一对供电电极。当主电极向地层发射测量电流 I_0 时 (亦叫主电流), 聚焦电极 A_1 、 A_2 也向地层发射与 I_0 同极性的电流 I_1 (称为屏流)。由于同性相斥, 主电流 I_0 受到屏流 I_1 的强迫作用侧向流入地层, 而不会任意散开。调节 I_1 的大小 (调节 I_0 也可), 直至两个监督电极 M_1 、 N_1 (M_2 、 N_2) 的电位相等。监督电极的电位相等就意味着二者间没有电流流过, 即测量电流 I_0 不沿井筒分流, 而是全部流入地层。 I_0 的这种状态称为聚焦状态。当然, 对 I_1 的调节是由电子线路自动完成的。

图 2-3 示出了电极系在均匀介质中电流线的分布。由图可见, 主电流层厚度 (图中阴影部分) 在距井眼一段距离内保持恒定。实践证明, 对低阻围岩和高阻薄层, 主电流层也基本保持相同形状。主电流层厚度相当于 M_1N_1 的中点与 M_2N_2 的中点之间的距离。由于聚焦作用, 聚焦式电阻率测井方法大大地减小了泥浆的分流作用和低阻围岩的影响。与普通电

阻率测井法相比，它所测的电阻率将更接近地层的真电阻率。

下面推导用七侧向测井方法确定地层电阻率的公式。假定，介质是均匀无限的，电阻率为 ρ ；电极为点状；主电流为 I_0 ；屏流为 I_1 。根据电场叠加原理，监督电极的电位为

$$V_{M_1} = \frac{\rho I_0}{4\pi A_0 M_1} + \frac{\rho I_1}{4\pi A_1 M_1} + \frac{\rho I_1}{4\pi A_2 M_1}$$

令屏主流比 $n = I_1 / I_0$ ，则有

$$V_{M_1} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left[\frac{1}{A_0 M_1} + n \left(\frac{1}{A_1 M_1} + \frac{1}{A_2 M_1} \right) \right] \quad (2-8)$$

同理，有

$$V_{N_1} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left[\frac{1}{A_0 N_1} + n \left(\frac{1}{A_1 N_1} + \frac{1}{A_2 N_1} \right) \right] \quad (2-9)$$

式中， $A_0 M_1$ 、 $A_1 M_1$ 、 $A_2 M_1$ 与 $A_0 N_1$ 、 $A_1 N_1$ 、 $A_2 N_1$ 分别为电极 M_1 、 N_1 与其相应供电电极间的距离。

当 I_0 达到聚焦状态时有 $V_{M_1} = V_{N_1}$ ，根据式 (2-8)、(2-9) 可得

$$n = \frac{A_1 M_1 A_1 N_1 A_2 M_1 A_2 N_1}{A_0 M_1 A_0 N_1 (A_2 M_1 A_2 N_1 - A_1 M_1 A_1 N_1)} \quad (2-10)$$

由式 (2-10) 可看出，在均匀介质条件下，屏主流比 n 有确定的数值（即不变）。

在七侧向测井中测量电位差 $V_0 = V_{M_1} - V_{N_1}$ 。 V_{N_1} 是参考电极 N 的电位，由于电极 N 距离电极 A_0 、 A_1 、 A_2 、B 为“无限远”，所以有 $V_{N_1} = 0$ 。由此得

$$V_0 = V_{M_1} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left(\frac{1}{A_0 M_1} + \frac{n}{A_1 M_1} + \frac{n}{A_2 M_1} \right) \quad (2-11)$$

将式 (2-10) 代入 (2-11)，并利用七侧向电极系的对称关系进行代换，可得

$$\rho = \frac{4\pi A_0 M_1 A_0 N_1 (A_0 M_1 + A_0 N_1)}{A_0 A_1^2 + A_0 M_1 A_0 N_1} \cdot \frac{V_0}{I_0}$$

令电极系常数 K

$$K = \frac{4\pi A_0 M_1 A_0 N_1 (A_0 M_1 + A_0 N_1)}{A_0 A_1^2 + A_0 M_1 A_0 N_1} \quad (2-12)$$

则有

$$\rho = K \frac{V_0}{I_0} \quad (2-13)$$

把式 (2-13) 与式 (2-7) 相比较，可以看出二者在形式上是一样的。二者测量地层电阻率

的基本原理不变，都是依据于欧姆定律。

式 (2-12) 给出的 K 值是在理想条件下计算得到的，它只与电极系的尺寸有关。实际使用时， K 值尚需经实验修正。有时，把电极系放到已知电阻率的介质中进行测量（例如大水池），根据所测得的等效电阻 $R_0 = \frac{V_0}{I_0}$ 来确定 K 值：

$$K = \frac{\rho}{R_0} \quad (2-14)$$

附加的聚焦电流能在主电极周围形成一个沿井轴方向电位梯度为零的地带，在这些地带，所有的电流必须径向流动。也就是说聚焦系统能够保持测量电流 I_0 按相同的模式流动（尽管测井时地层电阻率随时在变化），并与理想模型设计的相一致。这样，探测深度将保持不变，因而等效电阻 ($R_0 = V_0 / I_0$) 和电阻率 ρ 之间的关系就保持不变，见式 (2-11)。它们之间的转换系数就是电极系常数 K 。 K 值是一个很重要的参数。

第三节 求商式双侧向测井仪

双侧向测井方法由于具有较好的聚焦特性，并可以同时进行深、浅两种探测深度的电阻率测量，所以它完全取代了三侧向和七侧向测井。它是目前广泛使用的一种聚焦式电阻率测井方法。

根据阿尔奇公式计算地层中油（气）水的比例，以及确定实际上有多少油气是可动的，需要有深、中、浅三种探测深度的地层电阻率数据。为此，双侧向测井仪通常和微球形聚焦测井仪（或者与微侧向、邻近侧向测井仪）组合下井测量。后者用来测量冲洗带电阻率 R_{xo} 。

一、电极系结构

双侧向的电极系可看成是七侧向电极系再附加一对聚焦电极组成，见图 2-4。它共有 9 个环形电极，镶嵌在一个圆柱形的绝缘棒上。主电极 A_0 位于中央，在电极 A_0 上下对称排列 4 对电极，每对电极分别用短路线连接。电极 M_1 、 M_1' 和 N_1 、 N_1' 为两对监督电极；电极 A_1 、 A_1' 和 A_2 、 A_2' 为两对聚焦电极（即屏蔽电极）。

进行深探测时，屏蔽电极 A_1 与 A_2 (A_1' 与 A_2') 保持等电位，屏流 I_1 与主电流 I_0 为同极性。由于附加的屏蔽电极 A_2 、 A_2' 较长，加强了屏流对主电流的聚焦作用，因此主电流层进入地层深处后才逐渐发散，如图 2-4 左边所示。由于探测深度深，它所测的电阻率接近地层的真电阻率。此时，回流电极 B 位于“无限远”处。

进行浅探测时，电极 A_2 、 A_2' 起着回流电极 B 的作用，即电极 A_1 与 A_2 (A_1' 与 A_2') 为反极性，削弱了屏流对主电流的聚焦作用，主电流层进入地层不远的地方就发散了，如图 2-4 右边所示。由于探测深度浅，所测得的电阻率受侵入带的影响较大。

电极系的探测深度由电极系的尺寸决定。电极系的尺寸决定了测量电流流经多远的路径后才发散。为了测量地层的真电阻率，减小侵入带的影响，主电流层应该流经地层一段长距离之后再发散。通常，双侧向的深侧向主电流层在距井轴 1.8m 之后发散；浅侧向的主电流层在距井轴 0.8m 之后发散。

主电极 A_0 的中点为双侧向的深度记录点。

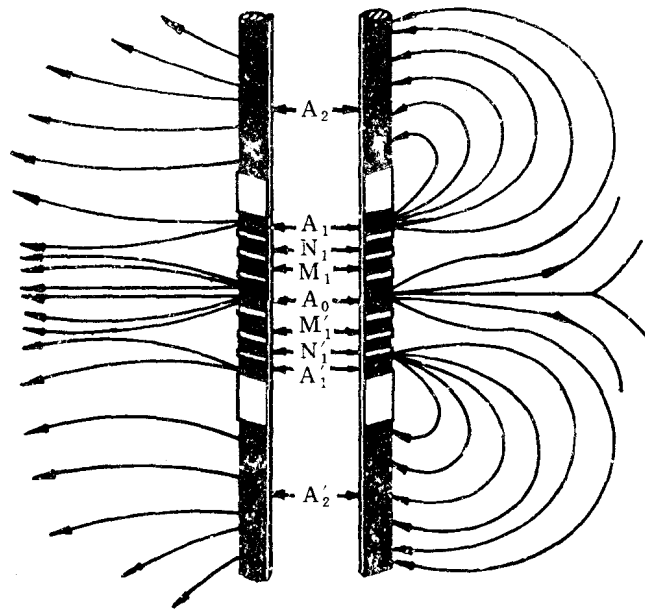


图 2-4 双侧向电极系及电流线分布

二、仪器工作原理框图

井下仪器的原理框图示于图 2-5。它由浅侧向屏流源、深侧向屏流源、监控回路、电压检测、电流检测、直流电源和控制信号发生器等部分组成。浅侧向屏流的工作频率为 128Hz，深侧向屏流的工作频率为 32Hz，深浅侧向同时进行测量。下面以浅侧向为例说明仪器的工作原理（图 2-6）。屏蔽电极 A_1 、 A_1' 首先向地层发射 128Hz 浅屏流（返回至电极 A_2 、 A_2' ），在监督电极 M_1 、 N_1 上将出现电位差。这个电位差被监控回路检测、放大后，立即在主电极 A_0 上产生主电流，并且与屏流有相同的极性。由于极性相同，主电流的出现将迫使监督电极上的电位差趋于减小。这是一个负的反馈过程，所以实际上在 M_1 、 N_1 之间（监控回路输入端）只保留一个很小的剩余电压信号。监控回路的增益愈高，这个剩余信号愈小。这时我们可以认为监督电极 M_1 、 N_1 为等电位。

由此可见，监控回路的作用是产生主电流，并自动调节主电流的大小，以保持监督电极 M_1 与 N_1 电位相等（近似）。监督电极电位相等，即表明主电流处于聚焦状态。

深侧向的工作原理与此完全相同，只是频率不同，为 32Hz。为了能同时进行深侧向和浅侧向测量，必须采用两种工作频率。通常浅侧向的工作频率为深侧向的 4~8 倍，以便于每个系统能独立地进行控制。

主电流进入地层后，主电流的大小和主电流在地层的电压降将随地层电阻率的变化而变化。取样电阻 0.025Ω 上电压的变化将反映主电流的变化。这个变化经电流检测回路检测、放大后，分离成深侧向主电流 I_D 和浅侧向主电流 I_S 。

电压检测电路测量电极 M_1 相对于参考电极 N 的电位差（参考电极 N 为地面端的电缆外皮）。电压检测电路把电压信号放大并分离出深侧向电压 V_D 、浅侧向电压 V_S 。其中深侧向电压的一部分 V_{2D} 用来控制屏流源。