高等学校教材

油矿地球物理测井

杜奉屏　主编



地质出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

高等学校教材

油矿地球物理测井

成都地质学院　杜奉屏主编

地质出版社

内 容 提 要

本书系地质院校石油地质专业用测井教材。全书共七章，前四章主要介绍目前石油测井中应用的测井方法原理及其地质应用；第五、六章介绍测井资料数字处理和地层倾角测井及其地质应用；第七章介绍油田开发测井。

本书以地质应用为线索来介绍测井方法的原理，着重于物理概念的阐述，较少应用数学公式。主要篇幅用于介绍当前石油测井中应用的常规测井方法，但对国内外的新技术新方法也有适当的介绍。

本书系高等院校石油地质专业用教材，也可供石油地质工程技术人员和石油测井技术人员参考。

* * *

本书由王惠濂主审，经地质矿产部井下地球物理编审委员会于1983年1月武汉审稿会审定，同意作为高等学校教材出版。

* * *

高等学校教材

油矿地球物理测井

成都地质学院　杜秉屏主编

责任编辑　周远田

*

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/16　印张：18　字数：422,000

1984年11月北京第一版·1984年11月北京第一次印刷

印数：1—4640册　　定价：2.90元

统一书号：13038·教186

前　言

本教材是根据1980年地质部所属高等院、校在武汉召开的教材工作会议上经“井下地球物理”教材编委会讨论通过的教学大纲，为石油地质专业编写的。本书内容按60—78学时要求安排，前四章为主要内容，后三章可视学时数适当选用。

根据石油地质专业对本课程的要求，以测井方法为基础，以综合测井资料的解释应用为重点，考虑到目前测井方法已基本上形成了几大应用系统的特点，本教材采用了以测井资料实际应用为线索的课程体系。即将主要测井方法分别按照地质应用进行归类，并将它们有机地纳入有关的测井解释系统之中，使测井方法同它们的主要地质应用能密切结合到一起。

全书共分七章。第一章对比测井及其地质应用，第二章岩性-孔隙度测井及其资料解释，第三章饱和度测井及其资料解释，第四章油、气、水层综合解释方法，第五章综合测井资料的计算机处理，第六章地层倾角测井及其地质应用，第七章开发测井。七章中以前四章为重点，后三章可根据学时情况适当取舍一部分内容。

本教材由成都地质学院测井教研室杜奉屏（主编）、肖慈珣、陶淑娴、肖崇礼合编。其中杜奉屏编写第三、第六章，肖慈珣编写第一、第五章，陶淑娴编写第二章和第七章后半部分，肖崇礼编写第四章、绪论及第七章前半部分。最后由武汉地质学院王惠濂副教授审校。

在教材大纲讨论，以及教材初稿的审阅工作中，承蒙蔡伯林副教授、佟文琪、尚林阁、岳玉华、周远田、刘芬霞、周晓翠等同志提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。此外，在整个编写过程中，长春地质学院、华东石油学院、江汉石油学院以及大庆石油学院等兄弟院校的现有教材为我们提供了可贵的参考资料，我们在此也向有关编者一并表示感谢。

由于我们水平有限，加之对这种教材体系还是初次尝试，教学实践也不多，书中必有不少考虑不周甚至错误之处，热诚欢迎同志们批评指正。

编　者

1984年1月

目　录

绪　言 …… 1
第一章　对比测井及其地质应用 …… 4
§1—1　普通视电阻率测井 …… 4
一、普通视电阻率测井的物性前提 …… 5
二、普通视电阻率测井的基本原理 …… 8
三、电极系 …… 12
四、视电阻率曲线的特征 …… 15
§1—2　自然电位测井 …… 28
一、井内自然电位的形成 …… 29
二、自然电位曲线特征及影响因素 …… 34
§1—3　井径测量 …… 38
§1—4　自然伽玛测井 …… 40
一、自然伽玛测井基础 …… 40
二、自然伽玛测井原理 …… 44
三、自然伽玛测井曲线特征 …… 45
§1—5　对比测井的应用 …… 48
一、划分钻井地质剖面 …… 43
二、地层对比 …… 58
三、绘制综合录井图 …… 57
第二章　岩性孔隙度测井及其资料解释 …… 62
§2—1　三种孔隙度测井 …… 62
一、声波速度测井 …… 62
二、密度测井 …… 70
三、中子测井 …… 76
§2—2　确定岩性和孔隙度 …… 81
一、体积模型的概念 …… 82
二、用一种孔隙度测井资料确定岩性和孔隙度 …… 82
三、用两种孔隙度测井资料确定岩性和孔隙度 …… 90
四、用三种孔隙度测井资料确定岩性和孔隙度 …… 97
五、确定岩性的其它方法 …… 103
第三章　饱和度测井及其资料解释 …… 110
§3—1　深、中、浅探测电阻率测井 …… 110
一、侧向测井 …… 110
二、感应测井 …… 118
§3—2　微电阻率测井 …… 128
一、微电极系测井 …… 128

需要全本请访问 www.ertongbook.com

二、微侧向测井 …… 130
三、邻近侧向测井 …… 130
四、微球形聚焦测井 …… 132
§3—3 确定渗透层冲洗带电阻率 …… 133
一、由微电极曲线求冲洗带电阻率 …… 133
二、由微侧向及邻近侧向测井曲线求冲洗带电阻率 …… 135
§3—4 确定含油气地层的真电阻率R_t …… 137
一、侧向测井法 …… 137
二、感应测井法 …… 139
三、电阻率法确定地层真电阻率R_t的讨论 …… 142
§3—5 确定地层水电阻率R_w …… 142
一、根据试水资料确定地层水电阻率R_w …… 143
二、根据自然电位确定地层水电阻率R_w …… 144
三、根据电阻率测井资料求地层水电阻率R_w …… 149
§3—6 确定含水饱和度S_w …… 149
一、纯地层含水饱和度计算方法 …… 150
二、泥质地层含水饱和度的计算方法 …… 153
三、双水法确定含水饱和度S_w …… 154
§3—7 渗透率的估计 …… 157
一、利用电阻率估计渗透率 …… 158
二、根据孔隙度和束缚水饱和度估计渗透率 …… 158
第四章 油、气、水贮层综合解释方法 …… 162
§4—1 划分储集层 …… 162
一、碎屑岩剖面 …… 162
二、碳酸盐岩剖面 …… 164
§4—2 油、气、水层划分方法 …… 166
一、双孔隙度法 …… 167
二、视地层水法 …… 171
三、饱和度法 …… 171
四、径向电阻率法 …… 177
五、可动水分析法 …… 181
第五章 综合测井资料的计算机处理 …… 184
§5—1 测井资料计算机处理流程 …… 185
一、测井记录的输入和预处理 …… 186
二、解释准备和参数选择 …… 191
三、计算机逐点自动解释 …… 198
四、成果显示 …… 200
§5—2 砂泥岩剖面测井分析程序 …… 206
一、SAND 2 程序概述 …… 206
二、程序工作流程 …… 208
三、主要地层参数的定量计算过程 …… 212

§5—3 复杂岩性剖面测井分析程序 …… 220
一、CRA程序概述 …… 221
二、程序工作流程 …… 222
三、主要地层参数的定量计算过程 …… 222
第六章 地层倾角测井及其地质应用 …… 231
§6—1 地层倾角测井原理 …… 231
一、测量地层倾角的原理 …… 231
二、地层倾角仪 …… 231
§6—2 地层倾角测井资料数字处理 …… 233
一、根据地层的法向矢量 $\vec{n}$ 计算地层的倾角和倾斜方位角 …… 233
二、用相关对比法确定高程差 …… 234
三、求地层面上法向矢量 $\vec{n}$ …… 235
四、用坐标变换公式确定地层法向矢量在大地坐标系的坐标 …… 236
五、处理成果显示 …… 239
§6—3 地层倾角测井资料的地质应用 …… 242
一、利用地层倾角测井资料确定岩层真厚度 …… 242
二、地质构造研究 …… 243
三、利用地层倾角测井资料判别古水流方向与识别沉积环境 …… 247
第七章 开发测井 …… 253
§7—1 水淹层测井 …… 253
一、水淹层测井的地质依据 …… 253
二、探测水淹层的测井方法 …… 254
三、水淹层测井综合解释 …… 259
§7—2 工程测井 …… 262
一、井斜测量 …… 263
二、固井声幅测井 …… 263
三、声波变密度测井 …… 264
四、套管磁测井 …… 267
§7—3 油井动态测井 …… 267
一、放射性同位素测井 …… 268
二、流动流体密度及含水率的测量 …… 269
三、井温测量 …… 271
四、井内流量测井 …… 272
五、噪声测井 …… 272
本书所用符号说明 …… 275
主要考参文献 …… 281

绪　言

油矿地球物理测井（简称石油测井），是钻井地球物理的一个分支，是专门在油、气井中采用的各种地球物理测量的一个总称。

油矿地球物理测井是应用地球物理方法，研究油气田钻井地质剖面，解决某些地下地质问题和钻井技术问题的一门应用技术科学。它是以不同的岩石在各种物理性质上存在一定差异为基础，通过相应的地球物理方法，连续地测定反映岩石某种物理性质的物理参数，并在分析研究这些物理参数沿井身剖面的变化规律的基础上，研究钻井地质剖面，油、气储集层的储集特性，油、气储集层的地下分布规律，评价油、气储集层的生产能力以及解决其它一些地质问题或工程问题。

油矿地球物理测井，作为油、气田勘探与开发的一种手段，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。五十年来，随着石油工业的发展，随着电子技术，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测井组合；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，并逐步的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。总之，七十年代以来，现代测井技术正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，还会不断提出新的任务。这些都将推动人们，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。

五十年来，测井技术有了很大的发展，解决问题的范围也在逐步的扩大，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。现阶段，石油测井的任务可以概括如下：

（1）建立钻井地质岩性剖面，划分油、气储集层，定量的估计油、气储集层的储集性能——孔隙度、渗透率以及油、气储集层的深度和厚度；

（2）评价油、气储集层的生产能力，确定油、气储集层的含油、气饱和度，研究油、气储集层的径向饱和特性；

（3）进行地质剖面的对比，研究岩层的岩性、储集性、含油性等在纵、横向上的变化规律，确定岩层产状和绘制地下构造轮廓；

（4）在油田开发过程中，提供油层动态资料；

（5）研究油、气井的技术状况，如井径、井斜和固井质量等；

（6）研究地层压力，岩石强度和其它一些问题。

目前，在石油测井中广泛使用的测井方法有：

（1）研究岩石导电性质的一组测井方法：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：如声波速度测井，声波幅度测井，声波电视测井，声波全波列测井（变密度测井）；

（4）研究岩石的原子物理及核物理性质的一组测井方法：如自然伽玛测井，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）其它一些测井方法：如热测井、核磁测井，介电测井，地层倾角测井，气测井以及检查井内技术状况的一组测井方法。

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，双侧向测井仪等等；和地面通用记录仪，如JD-581型多线电测仪，以及其它辅助测井设备，如绞车，电缆，井口装置等。

专用测井仪是专门用来测量各种岩石物理参数的，其主要作用是把探测器（井下测量装置）所接收到的岩石物理参数的信息，转换成电讯号供通用记录仪进行记录。

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，记录在磁带上供计算机处理等。

测井时，(图绪—1)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，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。这种物理量沿井身连续变化的曲线称为测井曲

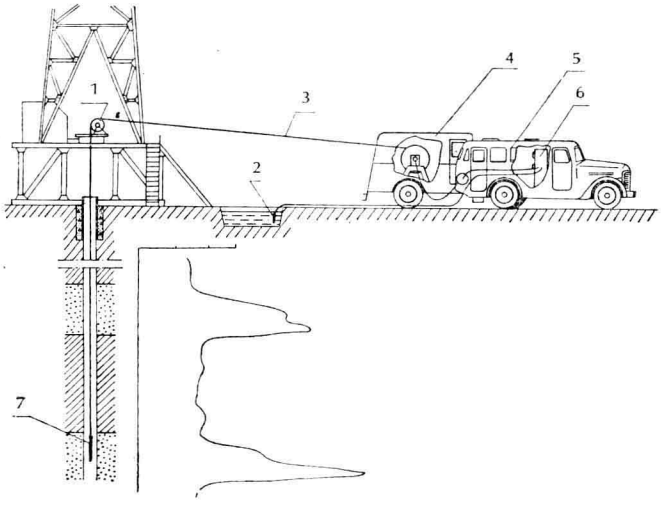


图 绪—1

1—井口滑轮；2—地面电极；3—电缆；4—绞车；5—仪器车；6—地面仪器；7—下井仪器

线，是井下不同性质岩层某种物理量的连续反映。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，自然伽玛曲线，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。

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，大大的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己的作用。

最近几年，在引进了国外先进测井技术之后，更加快了我国测井技术的发展速度。目前我国的测井技术正朝着测井方法系列化，测井记录数字化，测井仪器组合化，资料解释自动化的方向迅速发展，努力赶上和超过世界先进水平，为我国早日实现四个现代化作出应有的贡献。

第一章　对比测井及其地质应用

无论在油气田的勘探阶段还是开发阶段，现场地质工作者的重要任务之一是划分油气钻井的地质剖面。这包括：确定井所穿过的各时代地层的层列顺序、埋藏深度、地层厚度和岩石性质；了解油气储集层的大体位置、岩性特征和含油气情况等。目前，解决这一任务可以有三种方法：一是钻井取芯；二是岩屑录井；三是对比测井。

第一种方法具有直观、准确，分析可靠的优点。但是钻井取芯工作成本高、效率低，除了油田勘探阶段的一批钻井外，许多油气井是不取岩芯的。因此，全靠钻井取芯来建立一口井的地质剖面不切实际。而且取芯井段常常有限，即使取芯，收获率也不可能达到百分之百。岩屑录井能在钻井过程中及时了解钻井地质情况，并能根据对岩屑的分析建立钻井地质剖面。这种方法简便、及时，也能作出较细致的描述。但常常由于种种主观及客观原因，使岩屑录井剖面存在着深度不准、某些地层（特别是层间薄层）岩性描述不完全可靠等。对比测井是一种间接的录井手段。它是以不同性质地层存在着物性差别，在测井曲线上有不同的变化特征为基础，反过来利用测井曲线上显示的规律来划分钻井地质剖面的。当我们对一个地区的井下地质资料同测井资料进行了充分对比，并掌握了不同时代地层的岩性、物性和测井曲线变化特征的相互关系之后，便可利用测井曲线细致、准确地划分钻井地质剖面。

目前，用测井资料划分钻井地质剖面的测井手段是对比测井。它通常由三种测井方法组成。这三种测井方法是：用标准电极系所作的普通视电阻率测井、自然电位测井和井径测量。在某些井下地质情况较复杂的碳酸盐岩地区，常常还补充一种自然伽马测井以帮助识别岩性和分层。这些测井方法共同组成对比测井系列（现场又常称之为标准测井），并已成为每一口油气钻井必需进行的常规测井手段之一。它的测量井段通常由井底到井口，所用深度比例尺为1:500。

对比测井的另一重要用途是利用所测资料进行井间地层对比。在一个地区，大量井间相同层位的对比，可以了解地层的岩性、厚度，甚至油、气、水的横向分布规律；研究断层、地下构造形态，以及岩相变化等。

本章主要介绍对比测井中几种测井方法的物理基础、测量原理以及它们在划分钻井地质剖面和进行地层对比中的应用。

§1—1　普通视电阻率测井

以研究岩石导电能力为基础的一类测井方法称为电阻率测井法。普通视电阻率测井只是这类测井方法中的一种，之所以又称之为视电阻率测井，是因为这种方法测得的电阻率值同岩层的真实电阻率值还有一定的差别，它只是井下探测装置周围介质电阻率的一种综合影响结果。

尽管普通视电阻率测井同其它电阻率测井法——微电极系测井、侧向测井和感应测井

需要全本请访问 www.ertongbook.com

都是以测定井孔周围岩石的电阻率为物理前提，但在测量技术、适用条件以及解决地质问题的范围等方面均各不相同。从地质应用角度出发，微电极系测井、侧向测井和感应测井主要用于研究目的层井段，了解油气层径向电阻率的变化情况和流体的径向饱和特征。这些方法，目前已归属于饱和度测井系列，并同普通视电阻率测井之间有了明显的分工。前者属于定量应用，而后者属于定性应用。

这里要谈的普通视电阻率测井法，是一种发展最早应、用最广，且井下装置和测量技术都最为简单的电阻率测井。它是利用一种称为“电极系”的井下装置，通过给井下供电，并测量电位差的办法来进行视电阻率测定的。由于电极系是处在井内泥浆之中，显然测量结果要受到井径、井内泥浆和上下围岩电阻率等因素的影响。但如果适当选取电极系的类型和长度，所测视电阻率数值仍能较明显地反映井内不同性质岩层之间电阻率的相对变化。因此，这种方法在定性划分钻井地质剖面上，一直起着重要的作用。

一、普通视电阻率测井的物性前提

（一）岩石的电阻率

大家知道，由均匀材料组成的规则导体，其电阻 r 与导体的长度 L 成正比；与它的横截面积 S 成反比。当导体的长度和横截面积一定时，不同材料的导体，其电阻值却不一样。这说明导体的电阻不仅与导体的长短和粗细有关，而且还与组成导体的材料有关。它们之间的关系式为

$$r = R\frac{L}{S} \qquad (1—1)$$

式中 R 为与导体材料有关的系数，称为电阻率。材料一定时，它是一个常数。

一种物质的电阻率，是指这种物质阻止电流通过的能力，是物质本身固有的一种电学属性，而与它的几何形状无关。电阻率越大，表示这种物质导电能力越差，反之导电能力好。

电阻率的单位是欧姆·米（常简写为Ω·m）。这是在假定导体长度单位为米，截面积单位为平方米，电阻单位为欧姆的情况下，由式(1—1)得出的。据此不难知道，数值为1欧姆·米的电阻率，就等于边长为1米的立方导体的电阻。

自然界的岩石和矿石也是一种导电体。根据它们的导电性质，可分为电子导电性和离子导电性两大类。电子导电性靠组成岩石、矿石的基本物质颗粒中的自由电子导电，大部分的金属矿物及石墨等属于此类；离子导电性的岩石，则主要靠岩石孔隙中水溶液的离子导电，我们所研究的沉积岩主要属于此类。

（二）影响岩石电阻率的主要因素

实践证明，不同的岩石具有不同的电阻率值，而且变化范围很大。常见岩石的电阻率值如表1—1所示。由表1—1看出，火成岩的电阻率普遍较沉积岩的电阻率高；沉积岩中，结晶状的硬石膏和岩盐电阻率最高。同时还可看出，同一种岩石的电阻率也没有固定的数值，而且存在着较大的变化范围。

石油测井的主要探测对象是沉积岩。不同沉积岩之间电阻率的差别，以及同种岩石电阻率的变化，是由于多种因素的影响造成的。其中主要的因素是：岩石孔隙度的大小、孔

隙的结构、孔隙中所含流体的电阻率，以及岩石所处的温度等。研究各种因素对岩石电阻率的影响，是利用电阻率测井资料进行地质解释的基础。

表1—1　常见岩石电阻率数值表

岩石名称	电阻率（欧姆·米）	岩石名称	电阻率（欧姆·米）
粘　土	2～10	石灰岩	6×10^{2}～6×10^{3}
泥　岩	10^{0}～3×10^{2}	白云岩	6×10^{1}～6×10^{3}
页　岩	10^{1}～10^{3}	硬石膏	10^{4}～10^{6}
粉砂岩	10^{1}～5×10^{2}	岩　盐	10^{4}～10^{6}
疏松砂岩	2×10^{0}～5×10^{1}	玄武岩	6×10^{2}～6×10^{5}
致密砂岩	$2\times10^{1}\times2\times10^{3}$	辉绿岩	6×10^{2}～6×10^{5}
砾　岩	2×10^{1}～2×10^{3}	花岗岩	6×10^{2}～6×10^{5}
泥灰岩	5×10^{0}～5×10^{2}	无烟煤	10^{-3}～10^{1}
		褐　煤	10^{1}～2×10^{2}

大家知道，岩石是由矿物组成，沉积岩的主要造岩矿物（长石、石英、方解石、云母等）电阻率都在10^{6}欧姆·米以上，因此，大多数沉积岩，当其不含导电流体时，由造岩矿物组成的岩石骨架几乎是不导电的。而许多沉积岩之所以能导电，则是因为它们在地下不同程度的具有一定的孔隙，在其中充填了一定数量的盐水溶液造成的。这些存在于岩石中的盐水溶液，由于盐类离解形成了正离子（如Na^{+}，Ca^{2+}和Mg^{2+}等）和负离子（如Cl^{-}，SO_4^{2-}等）。离子在电场作用下发生运动，就构成了沉积岩中电流流动的媒介物。于是，电流通过孔隙水流过岩石，岩石也因此而具有一定的导电性。

根据沉积岩石的导电机理，不难得出以下推论：

1．当岩石的孔隙中全部为某种电阻率的地层水所饱和时，岩石的孔隙度越大，电阻率值越低。

这是因为孔隙度大，单位体积岩石中的孔隙体积大，饱含的地层水数量多，岩石的导电能力增强，于是电阻率降低。反之，岩石的孔隙度越小，电阻率就增高。

但是，有时即使岩石孔隙度相同，所含地层水的电阻率也一样，其电阻率值也可能存在着差别。这常常是由于孔隙结构复杂程度不相同造成的。所谓孔隙结构，主要是指孔隙的形状、孔隙之间的连通情况、孔隙管道截面积的大小和弯曲程度等。通常，孔隙结构越复杂的岩石，其孔隙之间的连通性就越差，孔道截面积的变化和弯曲程度也会越大，岩石在导电时，离子运移的路径拉长，运动受到的阻力增大，岩石的电阻率就会增高。

岩石的孔隙结构在很大程度上取决于两种因素：第一是岩性。通常，碳酸盐岩的孔隙结构比砂岩复杂，特别是裂缝性的碳酸盐岩地层。第二是岩石颗粒的均匀程度、排列形式和胶结状况。岩石颗粒越均匀、排列越规则、胶结越疏松，其孔隙的连通性就好，电阻率则相应降低。

因此，在研究饱含地层水的岩石电阻率与孔隙度之间的相互关系时，应分别对不同的岩石类型和岩石结构进行考虑。

2．当岩石的孔隙度一定，且孔隙中百分之百为地层水所饱和时，地层水的矿化度*越

---

* 溶液中含某种盐类的浓度。单位是ppm，意即重量的百万分之几。

高，岩石的电阻率越低。

这是因为地层水矿化度高时，单位体积水溶液中的含盐量加大，离子数目增多，使导电性增强的缘故。据此不难解释含高矿化水的贮集层，其电阻率要比相同岩石含淡水时的电阻率低很多的道理。

通常，越靠近地表，地层水较淡或含盐浓度低，随着深度的增加，地层水逐渐变咸。因此，在相同条件下，深部含水层的电阻率一般要比浅层含水层的电阻率低。

实验分析表明，在油气田的地层水中，主要含有NaCl、KCl、$MgCl_2$、Na_2SO_4和$CaCO_3$等盐类，而且在深层水中，以NaCl这一种盐为主，它约占总盐量的70～95%。溶液中不同的盐类具有不同的电离度，它们的离子各有不同的离子价和迁移率*，这些离子在电场作用下的移动，决定了溶液的电阻率。但是，由于油田地层水中NaCl盐类占绝对优势，因此，在研究地层水矿化度对溶液电阻率的影响时，通常可以把地层水看成是单纯的NaCl溶液，并用NaCl与其它盐类转化成等效NaCl之后的总矿化度去代替溶液的矿化度而不会有太大的误差。然后根据等效NaCl溶液的矿化度与电阻率的已知关系，可以求得地层水的电阻率；

3．当岩石的孔隙度一定，但孔隙中不是全部为地层水充填时，含水饱和度越大，岩石的电阻率越低。

这种情况主要出现在含油气岩石中，因为含油气岩石含水饱和度的大小决定着孔隙中油和水的相对含量。如果岩石的含油气饱和度较低，比如小于40%，则孔隙中水占优势，油将被水所包围。这时，尽管岩石中有几乎不导电的石油存在，但其电阻率同该岩石完全含水时相比，并不会有显著增高。而且随着含油气饱和度的进一步降低，它与含水岩石之间的电阻率差别还会更加不明显。反之，如果岩石的含油气饱和度较高，比如大于70%，这时，孔隙中油多于水，这些水就会被不导电的石油分隔成细网状，甚至互不连通，从而导致岩石电阻率同它的孔隙中完全含水时相比显著增高。岩石的含油气饱和度越大，这种增高也会更加突出，但是，即使是含油气饱和度很高的岩石，其电阻率值也不可能无限增大。这是因为岩石颗粒表面对水的吸附作用，使岩石中总是存在着一定数量的吸附水，而具有一定的导电性的缘故。

在实际的含油气地层中，孔隙度相同，含油气饱和度也相同，但所含地层水的矿化度不同时，电阻率也可能有很大的差别。因此，某些含高矿化度地层水的含油气层，尽管电阻率表现得很低，但也不能排除它的工业价值。

此外，孔隙度大小和孔隙的结构也是影响含油气岩石电阻率的因素。因此，在研究岩石电阻率与其中饱含油气的定量关系时，一般不采用岩石电阻率的绝对数值，而采用相对值。

即

$$I=\frac{R_t}{R_0} \qquad (1—2)$$

式中：R_t——岩石的真电阻率；

R_0——该岩石完全充满相同矿化度地层水时的电阻率；

---

* 单价离子在强度为1伏特/厘米的电场作用下的移动速度。

I ——电阻增大系数。它能消除地层水电阻率、岩石孔隙度和孔隙结构的影响，在岩性一定时，就只与岩石的含油气饱和度有关。

4．在上述条件都相同的情况下，岩石所处的温度不同，电阻率也会发生一定的改变。岩石的温度越高，电阻率越低；反之，电阻率越高。

这是因为当温度改变时，水溶解盐类的能力（即溶解度）会发生改变。同时，水溶液的粘滞性（阻碍离子运动的外力）也会发生改变，最后导致岩石的电阻率发生变化。温度增高，盐类溶解加速、离子运动速度加快，于是岩石的导电性加强，电阻率降低。反之，电阻率升高。

5．岩石中的泥质成分也能增强岩石的导电性。

通常，泥质含量（单位体积岩石中所含泥质的体积）越高，岩石的电阻率越低。但是，泥质导电性同上述电解导电性不同，它并不是依靠在溶液中自由运动的离子来传送电流，而是在外电场作用下，泥质颗粒表面吸附的离子沿表面移动（通常是正离子移动）来传送电流的。因此，泥质的导电过程即是离子依次交换它们位置的过程。

泥质含量越高，说明泥质颗粒数量多，表面吸附的离子数也多，在外电场的作用下，就会有大量的离子动移而形成较强的电流，岩石的电阻率随之降低。因此，泥质对岩石电阻率的影响主要取决于泥质含量；另外也取决于泥质的类型及其分布状况。

通过以上对岩石电阻率的分析，可以看出影响岩石电阻率的因素是很多的。但是，一定条件下的岩石，其电阻率应是一个恒定的数值，而且有一定的规律可循。比如在一个地区，同一个时代、同一种岩性的岩石，其电阻率一般是相近的。因此，只要掌握了各种岩石的电阻率特征，便可根据由测井测得的电阻率值来划分钻井的地质剖面，解决有关地质问题。

二、普通视电阻率测井的基本原理

大家知道，一种介质的导电能力或电阻率的大小，必须是在给它通电的情况下才能检测出来。因此，测量地下岩石的电阻率，最基本的一条就是要在井下供电，让电流流过岩石，然后研究供电电流所造成的电场在其中的分布情况。也就是找出电场电位与实际岩石电阻率的基本关系式，进而通过对电场电位的测定来求得所探测岩石的电阻率。

实践表明，研究在井下供电情况下岩石中的电场分布是一项十分复杂的理论问题。因为井孔、探测岩层及其周围岩石所组成的实际介质是极不均匀的。但是，有几种较理想的情况可以通过描述电场分布的基本方程获得理论解，即从理论上导出电场电位与介质电阻率的基本关系式。这几种情况是：

1．均匀各向同性无限分布的介质。

2．均匀各向异性的介质。

3．不同电阻率和不同厚度而互相平行的层状介质。

4．同轴且长度为无限大的圆柱状分界面的介质。

对于其它更为复杂的情况，例如岩层为有限厚，钻孔中泥浆电阻率影响不能忽略时，电场电位与岩石电阻率的关系则主要是通过模型实验来获得。

这里我们不打算去讨论更多的理论问题，而只想通过对一种最简单的介质中电场与介质电阻率关系的分析，来了解普通视电阻率测井的实质。

（一）均匀无限各向同性介质中电场与介质电阻率的关系

这里所说的“均匀无限”是指整个地下空间内岩石的电阻率处处相等。“各向同性”是指岩石的电阻率不具有方向性。这显然是一种理想的、实际并不可能存在的情况。然而，许多复杂问题，也常常是从一些简单的问题入手研究并逐步加以深化的。

现在我们假定在电阻率为R的均匀无限介质中放入一个点电源A，给A供以强度为I的恒定电流。显然，在这种介质中，电流将以A为中心呈辐射状流出，电流线是以A为中心辐射状直线（如图 1—1所示）。

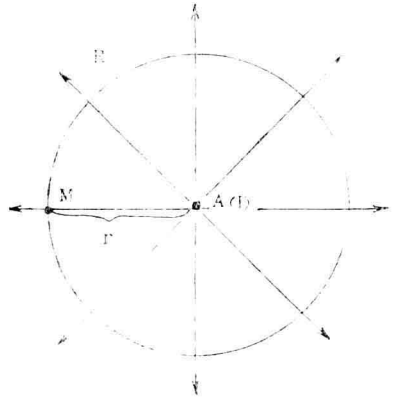


图 1—1　均匀无限介质中点电源的电场

由电流密度的定义可知，距离点电源A为r的任意点M处的电流密度

$$\vec{j}=\frac{I}{4\pi r^2}\vec{r}_0 \qquad (1—3)$$

式中：$4\pi r^2$是以A为中心、半径为r的球面面积，I是自A流出的总电流强度。电流密度$\vec{j}$是一个向量，$\vec{r}$。是单位矢量，数值为1，其方向沿r的方向。

根据微分形式的欧姆定律，可以写出M点的电场强度E的表示式为

$$\vec{E}=R\vec{j}=\frac{RI}{4\pi r^2}\vec{r}_0 \qquad (1—4)$$

式中：R为该均匀无限介质的电阻率。电场强度的方向与电流密度的方向一致。

再根据稳定电流场中电位和电场强度之间的关系——电场强度等于电位梯度的负值

$$\vec{E}=-\mathrm{grad}U, \qquad (1—5)$$

式中：$\mathrm{grad}U$称为电位梯度，它表示电位在变化最大的方向上每单位长度的增量，即

$$\mathrm{grad}U=\frac{dU}{dr}\vec{r}_0 \qquad (1—6)$$

于是有

$$\vec{E}=-\frac{dU}{dr}\vec{r}_0 \qquad (1—7)$$

将式（1—7）代入（1—4）可得

$$-\frac{dU}{dr}=\frac{RI}{4\pi r^2} \qquad (1—8)$$

对式（1—8）进行积分，得

$$U=-\frac{RI}{4\pi}\int\frac{dr}{r^2}=\frac{RI}{4\pi r}+C \qquad (1—9)$$

由于$r\to\infty$时，电位$U=0$，故积分常数$C=0$。最后得

$$U=\frac{RI}{4\pi r} \qquad (1—10)$$

式（1—10）表明，在均匀无限各向同性的介质中，某一点的电位U与介质的电阻率

R及供电电极A所供给的电流强度I成正比，而与该点至电源的距离r成反比。

（二）均匀无限各向同性介质中电阻率的测定

由上述分析可知，要测定均匀无限各向同性介质的电阻率，只须在介质中放入一个点电源，测出某一点的电位，在已知供电电流强度 I 和测点离电源的距离 r 的情况下，便可由式（1—10）求得该介质的电阻率。

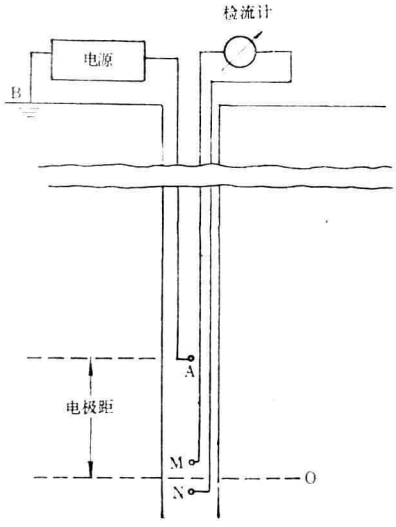


图 1—2 假定井下介质为均匀无限情况下电阻率的测定

讨论均匀无限介质中电阻率的测定虽然是一种理想的情况，但对于我们了解普通视电阻率测井法的实质是有帮助的。比如，我们可以假想井所穿过的地层全部都具有相同的岩性，电阻率为R，并且井内泥浆的电阻率也是R，这就是一种均匀无限各向同性的介质。于是，我们可以按照如图1—2所示的简单装置来测出岩石的电阻率。

图中接在直流供电回路中的两个电极A和B称为供电电极（这里是一个放在井下，另一个放在地面上），电流通过导电泥浆和岩层构成回路。另外两个电极M和N接在测量电位差的回路中，称为测量电极。根据式（1—10），在A电极的电流所形成的电场中，M点的电位为

$$U_M=\frac{RI}{4\pi}\cdot\frac{1}{\overline{AM}} \tag{1—11}$$

N点的电位为

$$U_N=\frac{RI}{4\pi}\cdot\frac{1}{\overline{AN}} \tag{1—12}$$

M和N两个测量电极之间的电位差

$$\begin{aligned}\Delta U_{MN}=U_M-U_N&=\frac{RI}{4\pi}\left(\frac{1}{\overline{AM}}-\frac{1}{\overline{AN}}\right)\\&=\frac{RI}{4\pi}\left(\frac{\overline{AN}-\overline{AM}}{\overline{AM}\cdot\overline{AN}}\right)\\&=\frac{RI}{4\pi}\left(\frac{\overline{MN}}{\overline{AM}\cdot\overline{AN}}\right)\end{aligned} \tag{1—13}$$

由此得介质电阻率

$$\begin{aligned}R&=\frac{4\pi\,\overline{AM}\cdot\overline{AN}}{\overline{MN}}\cdot\frac{\Delta U_{MN}}{I}\\&=K\frac{\Delta U_{MN}}{I}\end{aligned} \tag{1—14}$$

式中

$$K=\frac{4\pi\,\overline{AM}\cdot\overline{AN}}{\overline{MN}}$$

K是与各电极之间距离有关的系数，称为电极系系数。当这些距离固定时，它是一个常数。

可以看出，在这种理想化的均匀无限介质中，通过在介质中供电并测量 MN间的电位

需要全本请访问 www.ertongbook.com