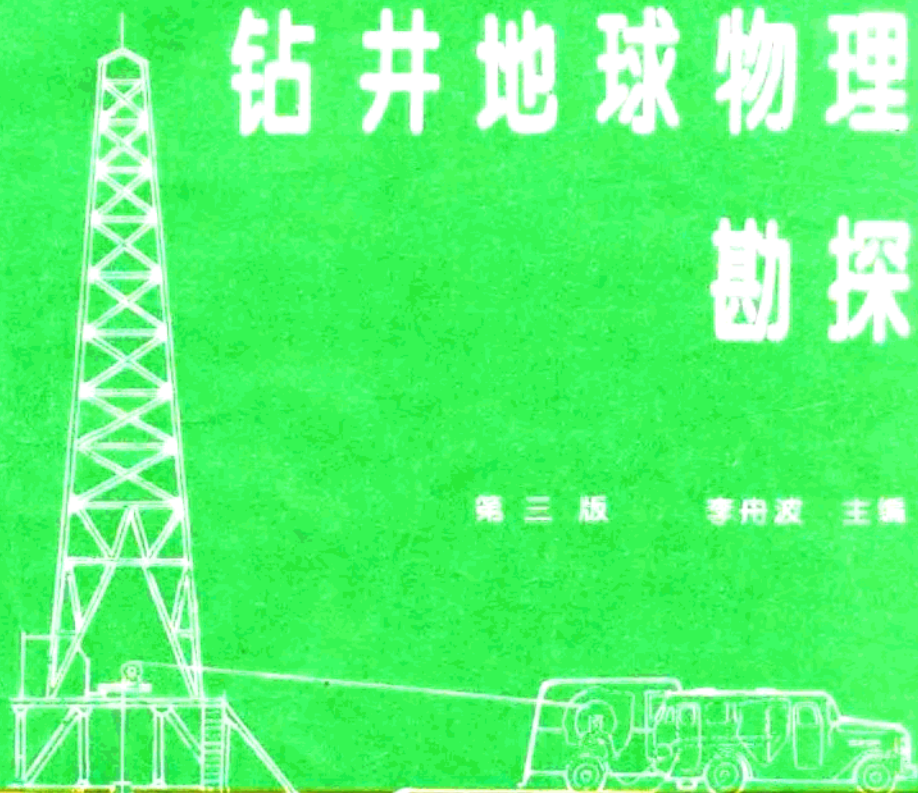




普通高等教育地质矿产类规划教材

# 钻井地球物理 勘探

第三版 李舟波 主编



北京)

1

3)

地质出版社

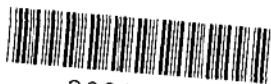


登录号	087880
分类号	P631
种次号	058(3)

普通高等教育地质矿产类规划教材

# 钻井地球物理勘探

李舟波 主编  
(第三版)



200400949

地质出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 085 号

图书在版编目 (CIP) 数据

钻井地球物理勘探/李舟波主编.-3版.-北京:地质出版社,1995.6

ISBN 7-116-01748-8

I. 钻… I. 李… II. 钻井-地球物理勘探 N.①P631 ②TD265.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 00170 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:陈军中

\*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092<sup>1/16</sup> 印张:16.375 字数:380000

1995年6月北京第三版·1995年6月北京第四次印刷

印数:1—500册 定价:9.30元

ISBN7-116-01748-8

P·1402

# 前 言

本书的第二次修改本是1986年出版的,至今已经过去将近八年。根据教学的需要,以及近年来钻井地球物理方法的发展,地质矿产部地球物理测井课程教学指导委员会认为有必要再次修编此书。这是一本以叙述钻井地球物理勘探方法原理为主的书,最初是为地球物理勘探专业编写的,最近几年我们还把它作为矿场地球物理专业的地球物理测井方法原理课程的教材。目前,高等院校的教学正处于改革时期,考虑到多方面的需要,本书仍保留了原书的结构,前十一章介绍各种地球物理测井方法的原理,后两章对评价石油天然气储集层的测井资料综合解释原理和处理方法作了简要介绍。全书仍按80—100学时的教学要求安排,使用时可根据需要作适当增减。本书也可供测井技术人员,以及希望全面了解地球物理测井方法的人员参考。

此次修编过程中,删除了一些近年来已经逐渐淘汰和应用范围很有限的那部分内容,对于变得日益重要的一些新方法,以及随着科学技术进步引入的一些新概念,尽量作了补充。除增加了介电测井一章之外,感应测井、声波测井以及其它一些章节,同前一本书相比,也都作了较大变动。本书使用的单位制,已按规定采用法定单位制,只在个别地方,如某些进口设备的尺寸,还暂时保留了英尺或英寸等。为方便读者,书后附有法定计量单位与非国际单位对照表。

参加本次编写工作的是李舟波和张存和,最后由李舟波对全书作了统编。

中国地质大学王惠濂教授、成都理工学院杜奉屏副教授,地质矿产部地球物理测井课程教学指导委员会各位委员,以及地质矿产部教材室林清溪老师,对本书的内容提出了许多宝贵意见。在此,向上述各位同志表示衷心感谢!同时,向为本书绘制插图和编辑出版给予支持和帮助的同志,表示谢意。

由于我们的水平有限,书中不妥乃至错误之处一定不少,请批评指正。

编者 1994

1  
6  
正  
钻  
井

# 第一版前言

本书是根据地质矿产部“井下地球物理”教材编审委员会审定的“钻井地球物理勘探”教学大纲为地球物理勘探专业编写的。书中主要是叙述了钻井地球物理勘探的方法原理，同时对测井资料综合解释的原理作了简要介绍。全书共十二章，按 80—100 学时教学要求安排，使用时可根据教学需要作适当增减。本书也可供石油测井技术人员参考。

本书是在长春地质学院 1979 年编写的“钻井地球物理勘探”(高等学校试用教材)基础上，修改补充而成。书中删除了近年来已经逐渐淘汰和应用范围有限的那部分内容。在仪器方面主要叙述和方法原理有关的内容，对电路或结构的细节作了精简。书中补充了一些日益变得重要的新方法，如自然伽马能谱测井、岩性密度测井、长源距声波测井等。本书使用的单位制已按国务院有关实行法定单位的规定采用法定单位制，只在个别地方，如某些进口设备的尺寸，还暂时保留了英尺或英寸。为方便各读者，书后附有法定单位与 CGSM 单位对照表。

参加本书编写工作的有：李舟波(主编)、岳玉华、张存和、尚林阁和梅忠武。

成都地质学院杜奉屏副教授任本书主审，在教学大纲讨论和教材初稿评审过程中，杜奉屏同志、武汉地质学院王惠濂副教授、地矿部南京石油物探研究所刘大恒工程师、西安地质学院周思明和成都地质学院肖慈珣老师等提出了许多宝贵意见。在修改过程中，根据大纲要求，都已尽量作了补充。在此，对上述各位同志表示衷心的感谢！同时，对为本书编辑出版给予支持和帮助的同志，表示谢意！

由于我们水平有限，书中不妥乃至错误之处一定不少，请批评指正。

编者 1985

# 目 录

绪 言	1
第一章 普通电阻率法测井	3
§ 1.1 电阻率法测井的基本知识	3
1.1.1 岩石电阻率	3
1.1.2 电阻率测井现场的一般情况	5
1.1.3 描写电场分布的基本方程和边界条件	5
1.1.4 均匀无限各向同性介质中电场的分布	7
1.1.5 泥浆侵入带	8
1.1.6 视电阻率	9
1.1.7 电极系	10
§ 1.2 视电阻率理论曲线	11
1.2.1 一个水平界面	13
1.2.2 一个水平层	15
1.2.3 倾斜地层与非理想电极系	17
1.2.4 高阻邻层的屏蔽影响	18
§ 1.3 视电阻率测井曲线的应用	19
1.3.1 钻井地质剖面的划分	19
1.3.2 岩层真电阻率的估计	20
§ 1.4 微电极系电阻率法测井	22
1.4.1 微电极系测井的基本概念	22
1.4.2 微电极系测井曲线的应用	23
第二章 聚流电极系电阻率法测井	25
§ 2.1 三电极侧向测井	25
2.1.1 基本原理	25
2.1.2 三侧向测井仪工作原理	27
2.1.3 影响视电阻率的因素	27
§ 2.2 七电极侧向测井	33
2.2.1 基本原理	33
2.2.2 影响七侧向视电阻率的因素	34
2.2.3 七侧向测井视电阻率曲线的形状	35
2.2.4 侧向测井的应用	37
§ 2.3 微侧向测井和邻近侧向测井	37
§ 2.4 微球形聚焦测井	40
第三章 感应测井	43
§ 3.1 感应测井的基本理论	43
3.1.1 基本原理	43

105

3.1.2	均匀介质双线圈感应测井的电磁场理论 .....	46
§ 3.2	感应测井线圈系特性 .....	48
3.2.1	双线圈系的纵向探测特性 .....	48
3.2.2	双线圈系的径向探测特性 .....	49
3.2.3	双线圈系存在的问题 .....	50
3.2.4	多线圈系的特性 .....	50
§ 3.3	感应测井曲线的形状 .....	52
§ 3.4	感应测井曲线的解释 .....	53
3.4.1	视电导率曲线的分层和取值 .....	53
3.4.2	井眼校正 .....	54
3.4.3	均匀介质传播效应校正 .....	54
3.4.4	厚度和围岩影响校正 .....	54
3.4.5	确定地层电阻率 .....	56
<b>第四章</b>	<b>介电测井 .....</b>	<b>58</b>
§ 4.1	岩石的介电性质 .....	58
§ 4.2	介电测井的基本理论 .....	59
§ 4.3	介电测井方法 .....	60
4.3.1	浅探测介电测井仪 .....	60
4.3.2	深探测介电测井仪 .....	62
§ 4.4	解释方法 .....	62
4.4.1	EPT 测井曲线的解释方法 .....	62
4.4.2	深探测介电测井曲线的解释方法 .....	67
<b>第五章</b>	<b>自然电位测井 .....</b>	<b>69</b>
§ 5.1	石油钻井中自然电场产生的原因 .....	69
§ 5.2	影响自然电位曲线幅度和形状的因素 .....	72
5.2.1	影响自然电动势的因素 .....	73
5.2.2	影响自然电流分布的因素 .....	74
§ 5.3	自然电位曲线的应用 .....	77
5.3.1	划分渗透性岩层 .....	77
5.3.2	确定地层水电阻率 .....	78
5.3.3	估计泥质含量 .....	80
<b>第六章</b>	<b>声波测井 .....</b>	<b>83</b>
§ 6.1	声波测井的物理基础 .....	83
6.1.1	声波物理性质简述 .....	83
6.1.2	钻孔内的声波 .....	86
§ 6.2	声波速度测井 .....	87
6.2.1	单发双收声波速度测井 .....	87
6.2.2	井眼补偿式声波速度测井 .....	88
6.2.3	长源距声波测井 .....	91
6.2.4	阵列声波测井 .....	92
6.2.5	横波速度的提取和测定 .....	92

§ 6.3	声波速度测井的解释与应用	95
6.3.1	影响声波速度测井曲线形状的因素	95
6.3.2	声波速度测井在储集层研究中的应用	96
6.3.3	确定地层弹性参数	99
§ 6.4	声波速度测井在地震勘探中的应用	100
§ 6.5	固井声波幅度测井	103
§ 6.6	声波电视测井	107
<b>第七章</b>	<b>自然伽马测井</b>	<b>110</b>
§ 7.1	原子核的基本知识和天然放射性	110
7.1.1	原子核的基本知识	110
7.1.2	天然放射性	110
7.1.3	放射性单位	112
7.1.4	岩石的天然放射性	113
§ 7.2	自然伽马测井的测量原理	114
7.2.1	射线探测器	114
7.2.2	自然伽马测井仪的刻度	116
§ 7.3	自然伽马测井曲线特征	117
7.3.1	“统计涨落”的影响	118
7.3.2	计数率线路时间常数和测井速度对曲线形状的影响	119
§ 7.4	井的条件对自然伽马测井曲线的影响	120
§ 7.5	自然伽马测井曲线的应用	123
7.5.1	判断岩性和划分渗透性岩层	123
7.5.2	确定储集层的泥质含量	123
7.5.3	地层对比	124
§ 7.6	自然伽马能谱测井	125
7.6.1	物理原理	125
7.6.2	测量原理	125
7.6.3	应用	126
<b>第八章</b>	<b>伽马-伽马测井</b>	<b>128</b>
§ 8.1	密度测井原理	128
8.1.1	伽马射线和物质的相互作用	128
8.1.2	电子密度与体积密度	130
8.1.3	密度和伽马射线的衰减	131
§ 8.2	影响密度测井的因素	133
8.2.1	源距、 $\gamma$ 射线源的能量和强度的影响	133
8.2.2	研究深度	134
8.2.3	泥饼影响和补偿密度测井	134
§ 8.3	密度测井的应用	138
§ 8.4	岩性测井	139
8.4.1	基本原理	139
8.4.2	测量原理	141



8.4.3 应用.....	142
<b>第九章 中子测井</b> .....	143
§ 9.1 中子测井的物理基础.....	143
9.1.1 核反应与人工放射性.....	143
9.1.2 中子源.....	144
9.1.3 中子与物质的相互作用.....	144
§ 9.2 中子-中子与中子- $\gamma$ 测井理论概述.....	148
9.2.1 热中子空间分布.....	149
9.2.2 中子- $\gamma$ 射线的空间分布.....	152
§ 9.3 中子测井解释与应用.....	153
9.3.1 影响中子测井的环境因素.....	153
9.3.2 解释与应用.....	154
§ 9.4 中子测井测量原理及刻度.....	158
9.4.1 中子测井测量原理.....	158
9.4.2 中子测井刻度.....	161
<b>第十章 中子寿命测井及其它核测井</b> .....	162
§ 10.1 中子寿命测井.....	162
10.1.1 基本理论.....	162
10.1.2 解释方法.....	164
10.1.3 脉冲中子源的原理.....	168
§ 10.2 中子- $\gamma$ 射线能谱测井.....	168
§ 10.3 中子活化测井.....	171
§ 10.4 核磁测井.....	172
<b>第十一章 井径测量、井斜测量、地层倾角测井和热测井</b> .....	174
§ 11.1 井径测量.....	174
§ 11.2 井斜测量.....	175
§ 11.3 地层倾角测井.....	177
11.3.1 地层倾角测井原理.....	177
11.3.2 地层倾角测井数据处理和成果表示.....	179
11.3.3 地层倾角测井结果的应用.....	184
§ 11.4 热测井.....	187
11.4.1 岩石的热学性质.....	187
11.4.2 自然热场法.....	188
11.4.3 人工热场法.....	190
<b>第十二章 测井资料综合解释原理与方法</b> .....	192
§ 12.1 油气储集层的性质.....	192
12.1.1 储集层的岩性.....	192
12.1.2 储集层的储集性和含油性.....	193
12.1.3 储集层的岩性、储集性、含油性与各种物理性质的关系.....	195
§ 12.2 确定岩性和孔隙度.....	201
12.2.1 岩性-孔隙度交会图.....	201

12.2.2	岩性交会图 .....	202
12.2.3	数值法 .....	204
§ 12.3	含油饱和度的确定 .....	206
12.3.1	电阻率-孔隙度组合法 .....	206
12.3.2	径向电阻率比值法 .....	210
12.3.3	可动油法 .....	214
12.3.4	含泥质地层饱和度的确定 .....	214
12.3.5	关于确定地层电阻率和地层水电阻率方法的讨论 .....	217
§ 12.4	渗透率的确定 .....	223
<b>第十三章</b>	<b>测井资料的计算机处理与解释方法</b> .....	<b>225</b>
§ 13.1	泥质砂岩地层的处理方法 .....	226
13.1.1	砂岩中泥质的分布形式 .....	226
13.1.2	泥质对测井读数的影响和解释模型 .....	227
13.1.3	粘土含量的指示方法 .....	229
13.1.4	泥质砂岩解释系统 .....	230
§ 13.2	复杂岩性地层的处理方法 .....	234
§ 13.3	最优化测井解释系统概述 .....	242
	主要参考文献 .....	245
	附录一、本书所用符号说明 .....	246
	附录二、法定计量单位与非国际单位对照表 .....	252

# 绪 言

钻井地球物理勘探也叫做地球物理测井,或简称测井。一度也曾有人把它叫做矿场地球物理或油矿地球物理,总之它们都是在钻孔中进行的各种地球物理勘探方法的一个统称。

测井做为石油勘探的一种手段,已经有半个多世纪的历史。由于它在生产中的显著地质效果,一开始就受到人们的重视,到目前已成为石油勘探和开发过程中的一个不可缺少的工作环节。由于它的研究内容和解决地质任务的能力,以及工作方法和测量设备相对于其它地球物理勘探方法具有不同的特点,同时还有一些只适于在井内条件下使用的地球物理方法,例如密度测井、中子测井等核地球物理方法,因此钻井地球物理勘探已发展成为应用地球物理学的一个独立分支。

测井方法的发展很快,无论从拥有的手段,还是从应用范围,都较初期发生了很大的变化。从评价油气层的角度来看,测井方法的发展大致经历了以下几个阶段。

第一阶段,只拥有普通电极系的电阻率法(或称视电阻率法)和自然电位法等少数几种方法,测量技术和设备都不完善,测量结果受井眼条件影响很大,测得的是视参数,根据这些视参数只能作出定性估计。

第二阶段,研究出了一套由视电性参数确定岩层电性参数的方法(即所谓横向测井方法),同时对于岩层电性参数、储集参数、饱和参数的关系有了初步认识,这样就有可能进行初步的定量解释。但是,从视电阻率求岩层电阻率的方法只适用于一些理想情况,并且由于对物理参数、储集参数、饱和参数之间关系的认识还很肤浅,所以定量解释的范围和精度很有限。

第三阶段,提出了一些带有聚集和贴井壁系统的测井方法,例如感应测井、侧向测井和微侧向测井等。它们受井眼条件和邻层影响小,能比较直接反映岩层电性参数,在有利条件下能直接测定岩层电阻率和泥浆侵入带电阻率。另外,还提出并改进了一些研究岩层孔隙度的方法,如声波测井、密度测井和中子测井等。这些方法使得解释油气层时能更好地考虑岩性变化等因素的影响,解释精度得到进一步提高,在多数情况下可以得到较好的定量结果。

第四阶段,对各种物理参数、储集参数、饱和参数之间的关系有了进一步的认识,特别是由于电子计算机的使用,利用更接近实际岩层的模型,综合多种物理参数,通过解析的方法定量求得岩石成分、储集参数、饱和参数和可采油气数量等成为可能,并能以需要的形式显示出来。

随着评价油气层方法的发展,地球物理测井解决问题的范围也在逐步扩大,不仅能应用于勘探,也能解决开发中的问题,不但能直接解决和含油气有关的问题,而且在研究地质构造、地层压力、岩石强度和沉积环境等一系列地质问题上也有了新的进展,不仅能解决找矿问题,也能解决一些工程问题。目前,石油测井可以解决的任务,概括如下:

1. 划分钻孔的岩性剖面,找出油气储集层,并可定出厚度和深度。
2. 定量或半定量估计岩层的储集性能——孔隙度和渗透率。
3. 确定岩层的含油性能——含油气饱和度和油气的可动性。

4. 研究岩层的产状,进行剖面对比,以及进行岩性、沉积环境和地质构造研究。
5. 在油田开发过程中提供油层动态资料。
6. 研究井的技术情况,如井径、井斜、井温和固井质量等。
7. 研究地层压力、岩石强度。
8. 为地面地球物理勘探资料解释提供必要的参数。
9. 同地质、地震勘探、钻井、测试和实验室分析数据相结合,进行储层空间描述和进行盆地分析。

由于地质条件复杂,需要解决的问题多种多样,因此采用的手段也必须是综合的。目前,在石油钻井中广泛应用的测井方法,按观测的物理性质可以分为以下几类。

1. 以研究岩石电学性质为基础的一套方法,其中包括以研究岩石导电性为基础的一组方法,如普通电极系电阻率法测井、侧向测井、感应测井和各种类型的微电阻率测井;以研究岩石电化学性质为基础的一组方法,如自然电位测井和人工电位测井;以研究岩石介电性质为基础的介电测井等。

2. 以研究岩石中声波传播特性为基础的一组方法,其中包括声波速度测井、声波幅度测井、声波电视测井等。

3. 以研究物质的原子物理和核物理性质为基础的一组方法,其中包括自然伽马测井、伽马-伽马测井、中子测井、中子寿命测井、能谱测井、活化测井、同位素示踪测井和核磁测井等。

4. 其它一些测井方法,如热测井、气测井、地层倾角测井,以及检查油井技术状况的一些测量技术。

此外,还有一些用得较少,或者还处于试验研究阶段的测井方法,如重力测井、雷达测井、核伽马共振测井等。

自本世纪 20 年代末地球物理测井方法产生以来,在这 60 多年中,测井仪器装备随着电子技术和计算机技术的发展不断地更新,从最早的半自动模拟记录,经自动模拟记录,于 60 年代初进入了数字记录阶段。到 70 年代中期,电子计算机被引入野外测井仪后,使测井仪器的发展进入了一个新的阶段——程控数字记录阶段。井下仪器也在向综合化方向发展,多数都采用“积木”式结构,便于按照测井系列的需要进行组合。为了减小井径、泥浆、泥饼和邻层的影响,井下仪器基本上都采用聚集、井眼补偿或贴井壁等方式。

现代测井技术的发展特征,可以概括为:方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化、解释自动化和成果显示图形化。但是,也应该看到,现有的方法多数还是间接的,从观测数据到作出地质结论,要经过许多中间解释环节,在这些环节中往往或多或少地使某些条件理想化了,因而使解释的精度降低,有时难免发生某些错误。随着勘探领域的不断扩大,对测井方法不断提出新的任务。这些都将推动人们一面努力改进现有方法,一面探寻新的方法。

我国的测井工作开始于本世纪 30 年代末,但是真正的发展壮大是在新中国成立之后,特别是大庆油田等许多大油田的发现,大大促进了测井技术的发展。同时,测井技术也在勘探和开发这些油田的过程中,发挥了自已的作用。

# 第一章 普通电阻率法测井

根据岩石导电能力的差异，在钻孔中研究岩层性质和区分它们的方法，称为电阻率法测井。因为通常是用电阻率这个物理量来表示岩石的导电能力，所以这种方法就叫做电阻率法测井。几十年来，在生产实践和科学研究过程中，为了解决勘探中不断出现的新问题，电阻率法测井也发生了很大变化，出现了许多不同形式的电阻率法测井。例如，侧向测井、微电极测井和感应测井等等。这些方法的物理基础都是岩石的电阻率，但在具体方法上、应用范围上都存在一定的差别，因此，我们将分几章来介绍它们。本章介绍普通电阻率法测井，其中包括普通电极系电阻率法测井和微电极系测井。

电阻率法测井的主要任务是根据电阻率曲线划分岩层的厚度、定量确定岩层的电阻率。

在油井中，研究岩层的导电能力具有特殊意义。因为石油是一种电阻率极高的物质，而在天然状态下的水却是一种电阻率较低的物质。因此，在相同岩性的储集层中，含油岩层将比含水岩层的电阻率高。直到目前为止，岩层电阻率的高低仍然是判断岩层含油性的重要标志。

普通电阻率法测井是电阻率法测井中最基本和最原始的形式，它过去能解决的一些任务，现在已经被新出现的更为有效的方法所代替。但是，在划分钻井地质剖面 and 作为判断岩层电阻率的辅助手段时，它仍然被广泛地采用。而且，它的一些基本概念及分析问题的基本观点，在说明一些新方法的原理时还要经常用到。因此，有必要花费一定的篇幅加以介绍。

## § 1.1 电阻率法测井的基本知识

### 1.1.1 岩石电阻率

导体的电阻的概念，例如一根导线的电阻的概念，大家是比较熟悉的。如果导线的长度为  $L$ ，截面为  $S$ ，则它的电阻为

$$r = R \frac{L}{S} \quad (1.1)$$

式中  $R$  是只与导体材料有关的物理量，称为这种材料的电阻率。

可以看出，导体的电阻不仅和导体的材料有关，而且和导体的几何形状有关。因此，在电测井中不宜用电阻这一物理参量，而应该用电阻率来说明岩层的性质。

从 (1.1) 式看出，电阻率的量值等于单位截面积和单位长度的介质的电阻值。当长度单位用米，电阻单位用欧姆  $\Omega$  表示时，电阻率的单位是欧姆·米 ( $\Omega \cdot m$ )。

岩石电阻率的大小受许多因素的影响，如岩石的矿物成分和分布形式、孔隙结构和孔隙度、孔隙中流体的性质、温度等。因此，不仅各种岩石间的电阻率有很大差异，而且同一种岩石的电阻率也不是一个固定的数值。表 1-1 列出了几种常见岩石的电阻率一般变化范围。

表 1-1 几种常见岩石的电阻率变化范围

岩石	粘土	疏松砂岩	致密砂岩	灰岩	白云岩	砾岩	泥灰岩	花岗岩	片麻岩
电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	0.8—30	$0.3-10^2$	$20-5 \times 10^3$	$2-5 \times 10^3$	$1-5 \times 10^3$	$10-2 \times 10^3$	3—500	$5 \times 10^4-10^5$	$10^2-10^4$

构成油气储集层岩石的大多数矿物的导电性都很差(见表 1-2),即使在储层岩石中有少量的金属导电矿物,也是呈分散状分布,一般对岩石的导电性无很大影响。但是,当岩石中含有较多的粘土矿物时,由于其表面吸附离子而造成的表面导电性,对岩石的导电性往往会造成较大的影响。

表 1-2 几种常见矿物的电阻率

矿物	石英	长石	云母	方解石	白云石	高岭石	蒙脱石	黄铁矿	石油
电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	$10^{12}-10^{14}$	$10^4-10^{10}$	$10^{12}-10^{15}$	$10^{10}-10^{12}$	$10^{10}-10^{12}$	<1000	<100	$10^{-4}$	$10^2-10^{12}$

对于大多数油气储集层来说,岩石导电性主要是由岩石的孔隙度和孔隙中流体的导电性质所决定。

综上所述,储集层岩石的电导率,可以表示成如下的一般形式

$$C_t = AC_w + BC_m \quad (1.2)$$

式中  $C_w$  为孔隙中流体的电导率,  $C_m$  表示由粘土矿物表面导电性造成的附加电导率,  $A$  和  $B$  为系数。

对于不含粘土矿物的纯地层,用电阻率来表示其导电性时, (1.2) 式可以写成

$$R_t = A' R_w \quad (1.3)$$

式中  $A'$  为  $\frac{1}{A}$ , 它和岩石孔隙的结构及大小, 以及是否含有油气有关。通常 (1.3) 式写成

$$R_t = F \cdot I \cdot R_w \quad (1.4)$$

$F$  是和孔隙大小、结构有关的系数, 称为地层因素, 根据实验, 可以写成

$$F = \frac{a}{\Phi^m} \quad (1.5)$$

式中  $\Phi$  为孔隙度,  $a$  和  $m$  是和岩性及孔隙结构有关的系数。(1.4) 式中的  $I$  是和岩石含油气有关的系数, 称为电阻率指数, 表示由于岩石含油气之后电阻率增大的倍数, 所以也叫做电阻增大率, 它和岩石的含油气饱和度有关。

$$I = \frac{1}{(1 - S_o)^n} = \frac{1}{S_w} \quad (1.6)$$

式中  $S_o$  和  $S_w$  分别为含油气饱和度和含水饱和度;  $n$  为系数。

从 (1.3) 式和 (1.4) 式可以看出, 地层水的电阻率  $R_w$  对岩石电阻率的影响很大。地层水电阻率的大小和所含盐类的化学成分、浓度以及温度有关。水溶液电阻率的公式可以写成

$$R_w = \frac{1}{CaFn(u+v)} \quad (1.7)$$

式中  $C$  是溶液的克分子浓度,  $a$  是电离度,  $F$  是法拉第常数,  $n$  是离子价,  $u, v$  分别为正负离

子的迁移率。

盐溶液的电阻率随温度增高而降低,如已知  $18^{\circ}\text{C}$  时溶液的电阻率,可以按下式近似换算成  $t$  时的电阻率

$$R_t = R_{18}[1 - \alpha(t - 18)] \quad (1.8)$$

式中  $\alpha$  为水溶液电阻率的温度系数,对 NaCl 溶液近似取 0.02。

### 1.1.2 电阻率测井现场的一般情况

岩层导电能力的大小,或岩层的电阻率,只有当电流通过它的时候才能表现出来。因此,在测量岩层电阻率时,岩层中必须有一定的电流通过,然后研究由于岩层导电性不同对电流分布的影响,即研究电流场的分布,从而达到划分出不同电阻率层的目的。因此,在电阻率法测井的线路中,必然包括产生电场的供电线路和测量电场的测量线路两部分。图 1.1 上部及左侧是测井的现场布置示意图,下部是电阻率法测井的原理图。测井仪器和电缆绞车有的装在一个车上,有的分装在两部车上。测井时,井口装置由车上取下,有的安放在井口,有的井口滑轮可以吊在井架上。绞车安放在距井口大约 30m 左右的地方,要对正井口。井下仪器或电极系由电缆经井口滑轮放入井中。常用的测井电缆有单芯、三芯和七芯的。供电电流由  $A$ 、 $B$  电极供入地层,电场在岩层中的分布受不同岩层的电阻率所控制,因此研究岩层电阻率的电阻率法测井,首先是研究在一定供电电流情况下电场的分布问题,然后再根据电场与电阻率的关系确定出岩层电阻率和划分出不同电阻率的地层。图中  $M$ 、 $N$  是测量电极,当岩层电阻率变化时,由供电电极  $A$ 、 $B$  在  $M$ 、 $N$  电极处所造成的电场也必然发生变化。因此,根据电场的变化便可以推断出岩层电阻率的变化。

测井时,放入井中的几个电极 ( $A$ 、 $M$ 、 $N$  或  $A$ 、 $B$ 、 $M$ ) 组成电极系,电极系通过电缆与地面电源和记录仪器相连接。当电极系在钻井内移动时(通常是在提升的过程中测量),就可以记录出连续的电阻率测井曲线。

### 1.1.3 描写电场分布的基本方程和边界条件

电阻率法测井的理论问题,实质上就是要研究电场的分布。从物理学中已经知道,描述稳定电流场的基本物理量是电场  $E$ 、电位  $V$  和电流密度  $j$ ,它们所遵循的基本规律可以表示为

$$j = \frac{E}{R} \quad (1.9)$$

$$\text{div} j = 0 \quad (1.10)$$

(1.9) 式是欧姆定律的微分形式。(1.10) 式表明了电流线的连续性,是基尔霍夫第一定律的微分形式,它说明在空间除了电源以外的任何点上,电流密度不能增加或减少。另外,根据稳定电流场的性质,电场和电位之间的关系为

$$E = -\text{grad} V \quad (1.11)$$

把 (1.11) 式代入 (1.9) 式,然后再把 (1.9) 式代入 (1.10) 式得

$$\text{div}\left(-\frac{1}{R}\text{grad} V\right) = 0$$

如果介质是均匀各向同性的,则

$$\text{div} \cdot \text{grad} V = 0$$

即得到拉普拉斯方程

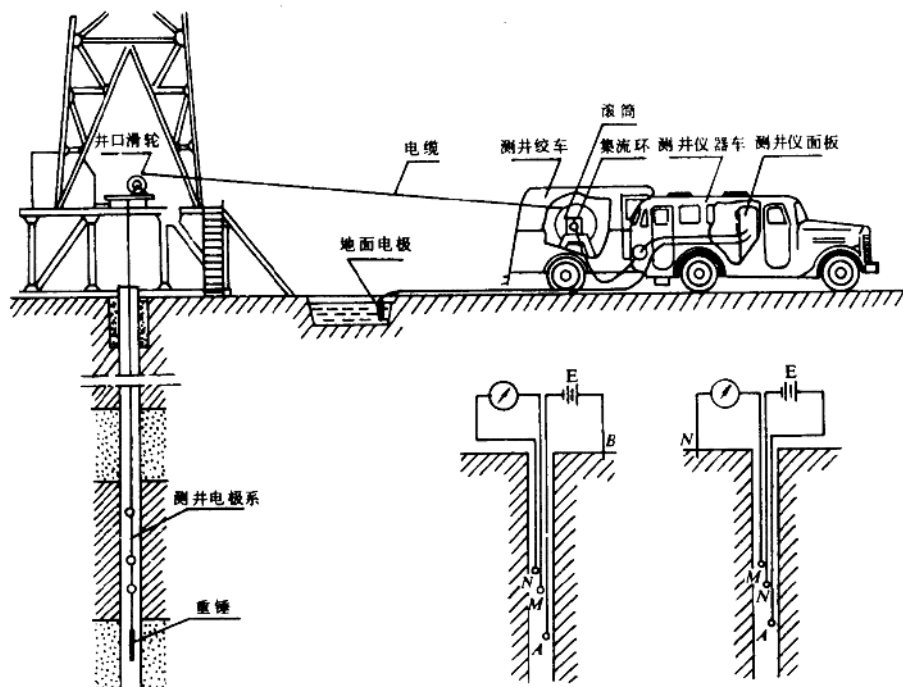


图 1.1 测井现场及电测井原理示意图

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1.12)$$

这是我们研究稳定电流场的基本方程，它给出了这一物理过程所遵循的一般规律。为了得到某一问题的具体解答，还必须给出一些条件，在数学上把这些条件叫做定解条件，其中包括初始条件和边界条件。因为我们研究的是稳定电流场， $V$  和时间无关，所以只取决于边界条件，它们是：

1. 在接近点电源处，电位  $V$  的表示式和在单一介质中的情况相同。
2. 在无限远处 ( $r \rightarrow \infty$ ),  $V \rightarrow 0$ 。
3. 在两种介质的界面上， $V$  是连续的，即

$$V_1 = V_2 \quad (1.13)$$

4. 电流穿过介质的界面时，电流密度的法向分量是连续的，即

$$\frac{1}{R_1} \frac{\partial V_1}{\partial n_1} = \frac{1}{R_2} \frac{\partial V_2}{\partial n_2} \quad (1.14)$$

或

$$j_{1n} = j_{2n} \quad (1.15)$$

根据基本方程和边界条件，就可以算出在一定介质分布情况下电场的分布。在实际生产中，可以根据测得的电场分布情况，按照上述理论知识反过来求得电极系周围介质的分布情况。这是在地球物理勘探工作中常用的工作方法。从一定的介质分布来计算电场的分布，称之为解正问题，从实测的电场分布求介质的分布称之为解反问题。虽然我们在实际



生产中所从事的工作是属于后者，但它必须以正问题的知识作为基础。例如，当我们拿到一条电阻率曲线时，怎样划分岩层的界面呢？曲线上的变化和实际岩层电阻率的变化之间有什么关系？要回答这些问题，必须从研究正问题开始，从而得出一些规律性的认识，作为解决实际问题的指南。

#### 1.1.4 均匀无限各向同性介质中电场的分布

均匀无限各向同性介质是一种理想的情况，但是通过它的讨论，可以得到一些有用的基本关系式。也可以做为运用基本方程解决问题的简单例子。

假设供电电极  $A$  位于坐标原点。因为介质的电性均匀，所以从  $A$  流出的电流线在各个方向上一样，即对于原点对称的。在这种情况下，利用球坐标比较方便。因为这时空间任何一点  $M$  的电位只和到原点的距离  $r$  有关，于是拉普拉斯方程就简化为

$$\frac{\partial}{\partial r}(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}) = 0 \quad (1.16)$$

对这个式子积分后，得

$$V = -\frac{c}{r} + c_1 \quad (1.17)$$

式中  $c$  和  $c_1$  是积分常数。

根据  $r \rightarrow \infty$  时,  $V \rightarrow 0$  的条件, 则  $c_1 = 0$ , 于是

$$V = -\frac{c}{r} \quad (1.18)$$

为了确定常数  $c$ , 我们算一下由  $A$  进入介质的电流值。为此, 以  $A$  为中心作一半径为  $r$  的球面  $S$ , 则

$$\begin{aligned} I &= \int_S j ds = \frac{1}{R} \int_S E ds = -\frac{1}{R} \int_S \frac{dV}{dr} ds \\ &= -\frac{1}{R} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{c}{r^2} r^2 \sin\theta d\theta d\phi \\ &= -\frac{2\pi c}{R} \int_0^\pi \sin\theta d\theta = -\frac{4\pi c}{R} \end{aligned}$$

$$\text{于是} \quad c = -\frac{RI}{4\pi} \quad (1.19)$$

将 (1.19) 式代回 (1.18) 式, 得

$$V = \frac{RI}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.20)$$

根据 (1.11) 式和 (1.9) 式

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{RI}{4\pi} \frac{1}{r^2} \quad (1.21)$$

$$j = \frac{E}{R} = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (1.22)$$

上述 (1.20), (1.21) 和 (1.22) 式是均匀无限各向同性介质中稳定电流场分布的基本公式。等电位面是以  $A$  为中心的一系列同心球面, 电力线和电流线则是与等位面垂直的从  $A$  发出的一簇辐射状直线, 如图 1.2 所示。