

· 高等学校试用教材

钻井地球物理勘探

长春地质学院石油测井教研室 编

地质出版社

钻井地球物理勘探
长春地质学院石油测井教研室 编

*
地质部教育司教材室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*
1979年12月北京第一版·1979年12月北京第一次印刷

印数1—4,240册·定价2.40元

统一书号：15038·教55

前 言

本书是作为地质院校石油物探专业的“钻井地球物理勘探”课教材而编写的。书中主要介绍了钻井地球物理勘探的方法原理和资料综合解释原理，全书分两大部分，共十四章。本书按100学时教学要求安排的，使用时可根据需要作适当增减。本书也可供石油测井技术人员参考。

本书是在我院编写的“钻井地球物理勘探”（试用教材）基础上，修改补充而成。参加本书编写工作的有：李舟波（主编），岳玉华，张存和、尚林阁等。

在编写过程中，得到了许多兄弟院校和野外生产单位的热情支持，特别是对教材大纲提出了许多宝贵意见。在初稿完成之后，武汉地质学院、成都地质学院、河北地质学院、江苏石油物探研究大队、河南石油指挥部数字测井站、江苏第六普查大队测井队参加了对本书的审阅并提出了有益的意见。在修稿过程中，根据大纲的要求，都已尽量吸收到教材中去。最后又蒙武汉地质学院尉中良、王惠濂同志作了全面审编。对上述各单位及个人给予本书编写工作的支持和帮助，我们表示衷心地感谢！此外，还有些单位和个人也给本书编写工作以支持和帮助，我们在此一并表示谢意！

由于我们的水平有限，编写时间仓促，书中不妥之处乃至错误一定不少，请批评指正。

编者 1979

目 录

绪言

第一部分 钻井地球物理勘探方法原理

第一章 普通电阻率法测井	3
§ 1.1 电场与介质电阻率的基本关系式	3
1.1.1 电阻率法测井的基本概念	3
1.1.2 描写电场分布的基本方程和边界条件	4
1.1.3 均匀无限各向同性介质中电场的分布	6
1.1.4 视电阻率	8
§ 1.2 电极系	10
1.2.1 电位电极系	10
1.2.2 梯度电极系	10
1.2.3 电极系的探测深度	11
§ 1.3 视电阻率理论曲线的形状	11
1.3.1 一个水平界面	13
1.3.2 一个水平层	16
1.3.3 倾斜地层与非理想电极系	17
1.3.4 高阻邻层的屏蔽影响	18
§ 1.4 视电阻率测井曲线的应用	19
1.4.1 标准测井	19
1.4.2 根据视电阻率曲线确定岩层真电阻率	23
§ 1.5 微电极系电阻率法测井	23
1.5.1 微电极系测井的基本概念	23
1.5.2 微电极系测井曲线的应用	24
第二章 聚流电极系电阻率法测井	30
§ 2.1 三电极侧向测井	30
2.1.1 基本原理	30
2.1.2 三侧向测井仪工作原理	32
2.1.3 影响视电阻率的因素	33
2.1.4 三侧向测井曲线的解释	38
§ 2.2 七电极侧向测井	40
2.2.1 基本原理	40
2.2.2 影响七侧向视电阻率的因素	41
2.2.3 七侧向测井曲线及其应用	42
§ 2.3 微侧向测井和邻近侧向测井	44
2.3.1 基本原理	44

II

2.3.2 曲线解释	47
第三章 感应测井	49
§ 3.1 感应测井的基本理论	49
§ 3.2 感应测井线圈系特性	52
3.2.1 双线圈系的纵向探测特性	53
3.2.2 双线圈系的径向探测特性	54
3.2.3 双线圈系存在的问题	54
3.2.4 多线圈系的特性	55
§ 3.3 感应测井曲线的形状	58
§ 3.4 确定岩层电阻率	60
3.4.1 井眼校正	60
3.4.2 均匀介质传播效应校正	60
3.4.3 围岩校正	60
3.4.4 侵入带校正	63
§ 3.5 感应测井仪的工作原理	64
第四章 自然电位测井	66
§ 4.1 石油钻井中自然电场产生的原因	66
§ 4.2 影响自然电位曲线幅度和形状的因素	70
4.2.1 影响自然电动势的因素	70
4.2.2 影响自然电流分布的因素	71
§ 4.3 自然电位曲线的应用	75
4.3.1 划分渗透性岩层	75
4.3.2 确定地层水电阻率	75
4.3.3 估计泥质含量	77
第五章 声波测井	79
§ 5.1 声波物理性质概述	79
5.1.1 岩石的弹性	79
5.1.2 声波在岩石中的传播特性	81
5.1.3 声波在介质界面上的传播特性	82
§ 5.2 声波速度测井	83
5.2.1 单发射双接收声波速度测井原理	84
5.2.2 井眼补偿式声波速度测井原理	85
5.2.3 声波速度测井仪测量原理	88
§ 5.3 声波速度测井解释与应用	90
5.3.1 影响声波速度测井曲线的因素	90
5.3.2 声波速度测井应用	91
§ 5.4 声波水泥胶结测井	95
5.4.1 固井声波幅度测井	95
5.4.2 声波全波测井	96
§ 5.5 其它声波测井方法	101
5.5.1 声波电视测井	101

5.5.2 确定地层强度参数的测井方法	103
第六章 自然伽玛测井	106
§ 6.1 原子核的基本知识及天然放射性	106
§ 6.2 自然伽玛测井原理	108
6.2.1 沉积岩的放射性	109
6.2.2 自然伽玛测井仪工作原理	110
6.2.3 自然伽玛测井仪的刻度	111
§ 6.3 自然伽玛测井曲线特征	112
6.3.1 “统计涨落”的影响	113
6.3.2 计数率线路的影响	114
§ 6.4 井的条件对自然伽玛测井曲线的影响	114
§ 6.5 自然伽玛测井曲线的应用	116
6.5.1 判断岩性、划分渗透性岩层	117
6.5.2 确定贮集层的泥质含量	117
6.5.3 地层对比	118
第七章 密度测井	119
§ 7.1 密度测井原理	119
7.1.1 伽玛射线和物质的相互作用	119
7.1.2 电子密度与体积密度	120
7.1.3 吸收方程	121
§ 7.2 影响密度测井的因素	125
7.2.1 研究深度与井眼影响	125
7.2.2 源距、 γ 射线源的能量和强度的影响	126
7.2.3 泥饼的影响	127
§ 7.3 补偿密度测井仪工作原理	127
7.3.1 双源距补偿原理	128
7.3.2 计算器框图	130
§ 7.4 密度测井的应用	131
第八章 中子测井	133
§ 8.1 中子测井理论概述	133
8.1.1 核反应与人工放射性	133
8.1.2 中子与物质的相互作用	134
8.1.3 中子—中子测井和中子— γ 测井理论	137
§ 8.2 中子测井解释与应用	142
8.2.1 中子测井的影响因素	142
8.2.2 解释与应用	142
§ 8.3 中子测井测量原理及刻度	149
8.3.1 中子源	149
8.3.2 中子测井仪	149
8.3.3 中子测井刻度	151

第九章 中子寿命测井及其它核测井	153
§ 9.1 中子寿命测井	153
9.1.1 基本理论	154
9.1.2 解释方法	155
9.1.3 脉冲中子源和中子寿命测井仪原理	159
§ 9.2 能谱测井	160
§ 9.3 活化测井	161
§ 9.4 核磁测井	162
第十章 井径、井斜、井温及地层倾角测井	164
§ 10.1 井径测量	164
§ 10.2 井斜测量	166
§ 10.3 地层倾角测井	167
10.3.1 地层倾角测井原理	168
10.3.2 地层倾角测井仪	172
10.3.3 地层倾角数据处理过程和应用	175
§ 10.4 井温测井	180
10.4.1 岩石的热学性质	180
10.4.2 自然热场法	180
10.4.3 人工热场法	181
10.4.4 井温测井测量原理	184
第十一章 测井结果的数字记录	186
§ 11.1 普通数字测井仪	186
11.1.1 组合下井仪	187
11.1.2 测井面板	187
11.1.3 信号编排与模拟显示	188
11.1.4 多路转换开关	188
11.1.5 模数转换器	189
11.1.6 缓冲存储器	190
11.1.7 格式编排	190
11.1.8 磁带机	190
11.1.9 回放系统	191
11.1.10 控制系统	191
§ 11.2 程控数字测井仪	192
11.2.1 直接数字化测井仪 (DDL)	192
11.2.2 斯仑贝尔赛伯测井装置 (CSU)	193

第二部分 测井资料综合解释概论

引言	195
第十二章 油气贮集层的性质	196
§ 12.1 贮集层的岩性	196
12.1.1 碎屑岩贮集层	196

12.1.2 碳酸盐岩贮集层	197
12.1.3 其它类型贮集层	197
§ 12.2 贮集层的贮集性和含油性	197
12.2.1 孔隙度	197
12.2.2 含油饱和度	198
12.2.3 渗透率	198
§ 12.3 “四性”关系	199
12.3.1 岩性和各物理性质的关系	199
12.3.2 孔隙度和各种物理性质的关系	200
12.3.3 饱和度和电阻率的关系	205
12.3.4 渗透率和电阻率的关系	206
第十三章 综合解释原理与方法	208
§ 13.1 确定岩性和孔隙度	208
13.1.1 岩性—孔隙度交会图	208
13.1.2 岩性孔隙度交会三角形法	209
13.1.3 岩性交会图	210
13.1.4 三种孔隙度测井确定岩性和孔隙度	213
§ 13.2 含油饱和度的确定	214
13.2.1 电阻率—孔隙度组合法	214
13.2.2 径向电阻率比值法	219
13.2.3 可动油法	224
13.2.4 关于含泥质地层	224
13.2.5 关于确定地层电阻率和地层水电阻率方法的讨论	225
§ 13.3 渗透率的确定	230
第十四章 测井资料的计算机处理与解释方法	232
§ 14.1 砂泥岩剖面的处理方法	233
14.1.1 含泥质砂岩中泥质的分布形式	233
14.1.2 泥质对测井读数的影响及解释模型	234
14.1.3 粘土含量的指示方法	237
14.1.4 SARABAND	237
§ 14.2 复杂岩性地层的处理方法	242
14.2.1 CORIBAND的输入信息和输出形式	242
14.2.2 CORIBAND程序结构及其说明	244
附录 本书所用符号说明	253

绪 言

钻井地球物理勘探通常叫做地球物理测井，或简称测井。也曾有人把它叫做矿场地球物理或油矿地球物理，总之它们都是一回事。它是在钻孔中进行的各种地球物理勘探方法的一个统称。

测井做为油田勘探的一种手段，已经有将近半个世纪的历史。由于它在生产中的显著效果，一开始就受到人们的重视，到目前已成为油田勘探和开发过程的一个不可缺少的工作环节。由于它的地质任务和研究内容，以及工作方法和测量设备都和其他地球物理勘探方法具有不同的特点，并且发展了一些只适于在井内条件下使用的地球物理方法，例如中子测井、密度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地球物理勘探方法中的一个独立分支。

无论从拥有的手段，还是从解决问题的范围，和初期相比都发生了很大的变化。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，只拥有普通电极系电阻率法（或称视电阻率法）和自然电位法等少量几种方法，测量技术和设备都不完善，测量结果受井眼条件影响很大，测得是所谓视参数，解释时只能根据这些视参数作出定性估计。

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和贮集参数与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，但是由于只能对一些理想情况从视电阻率求出岩层电阻率，并且由于对物理参数和贮集参数及饱和参数之间关系的认识还是很肤浅的，所以定量解释的范围和精度是很有限的。

第三阶段，提出了一些受井眼条件和邻层影响小，带有聚焦和贴井壁系统的能比较直接反映岩层电性参数的一些方法，例如感应测井、侧向测井和微侧向测井等，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。同时，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，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，对各种物理参数和贮集参数及饱和参数之间的关系，有了进一步认识，特别是由于电子计算机的使用，有可能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、贮集参数、饱和参数和可采油气数量等，并能以需要的形式显示出来。

五十年来，不仅评价油气层的方法有了很大发展，解决问题的范围也在逐步扩大，不仅解决勘探中的问题，而且也能解决开发中的问题；不仅直接解决和含油气有关的问题，而且对研究地质构造、地层压力、岩石强度和沉积环境等一系列地质问题也有了新的进展；不仅解决地质问题，而且还能解决一些工程问题。目前，石油测井可以解决的任务，可以概括如下：

1. 划分钻孔的岩性剖面，找出油气贮集层，并定出厚度和深度；
2. 定量或半定量地估计岩层的贮集性能——孔隙度和渗透率；

3. 确定岩层的含油气性能—含油气饱和度、油气的可动性；
4. 研究岩层的产状，进行剖面对比，以及进行岩性变化和构造的研究；
5. 在油田开发过程中，提供油层动态资料；
6. 研究井的技术状况，如井斜、井温、井径和固井质量等。
7. 研究地层压力、岩石强度和其他一些问题。

由于地质条件是复杂的，需要解决的任务是多样的，因此采用的研究手段也必须是综合的。目前，根据岩层和物质的不同物理性质建立起来的，并且在石油钻孔中广泛应用的测井方法有：

1. 以岩层导电性为基础的一组方法，其中包括普通电极系电阻率法测井、微电极测井、侧向测井、微侧向测井和感应测井等；
2. 以岩石电化学性质为基础的一组方法，其中包括自然电位测井和人工电位测井等；
3. 以岩石的弹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；
4. 以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、活化测井和同位素测井等；
5. 其他一些测井方法，如热测井、气测井、核磁测井、介电测井、地层倾角测井，以及检查井内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研究阶段的测井方法，如重力测井、雷达测井、核伽玛共振测井等。

在这五十年中，测井仪器的水平也随着电子工业的发展，发生几代的更迭，从最早的半自动模拟记录，经历了自动模拟记录，于六十年代初进入了数字记录阶段。到七十年代中期，电子计算机被引入野外测井仪，又进入了一个新的阶段——程控数字记录阶段。井下仪器也向综合化方向有了很大发展，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焦、井眼补偿或贴井壁等方式。

概括起来说，现代测井技术的发展特征，可以称做：方法系列化、仪器综合化、记录数字化、操作程控化和解释自动化。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，还要经过许多中间解释环节，在这些环节中往往不得不包括一些理想化的条件，而使解释的精度降低，甚至在一些情况下发生错误，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方法，一方面去探寻建立在新的物理特性基础之上的新方法。正如毛主席所说：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”

测井技术的发展，和其他各门科学技术的发展一样，从一开始就由生产的发展所决定的。我国的测井技术是在新中国成立之后，随着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，大大促进了测井技术的发展，同时测井技术在发现和勘探这些新的油田中，也发挥了自己的作用。

我国是世界上石油资源丰富的国家，我国石油工业正在迅速发展，让我们高举毛泽东思想的伟大旗帜，沿着党的十一大路线，为把我国早日建成四个现代化的社会主义强国，而勇攀测井技术的世界高峰。

第一部分 钻井地球 物理勘探方法原理

第一章 普通电阻率法测井

电阻率法测井，是根据岩石导电能力的差异，在钻孔中研究岩层性质和区别它们的方法。因为导电能力通常是用电阻率这个物理量来表示的，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矛盾，电阻率法测井也随之发生了很大变化，出现了许多不同形式的电阻率法测井，例如，在高矿化度的盐水泥浆中，为了克服井内泥浆对电阻率法测井结果的严重影响，以及克服薄的高电阻率邻近地层的屏蔽影响等，研究了侧向测井、微电极测井和感应测井等等。虽然这些方法的物理前提都是岩石的电阻率，但在具体方法上，在应用条件和应用范围上都存在一定的差别，因此，我们将分几章来介绍这些方法。本章主要介绍普通电阻率法测井，它包括普通电极系电阻率法测井和微电极测井。

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和定量地确定岩层的电阻率。

在油井中，研究岩层的导电能力具有特殊意义。因为石油是一种导电性极差，或电阻率极高的物质，而在天然状态下的水却是一种导电性较强，或电阻率较低的物质。因此，在相同岩性的贮集层中，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，是电法测井中最基本和最原始的形式，它过去的一些任务，有的已经被新出现的更有效的方法所完成。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，仍然广泛地使用着。同时，它的一些基本概念，一些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，仍然有必要花费一定的篇幅加以介绍。

§ 1.1 电场与介质电阻率的基本关系式

1.1.1 电阻率法测井的基本概念

关于一个导体的电阻的概念，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 ，截面积为 S ，则它的电阻为

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

式中 R 是与物质材料有关的常数，称为电阻率。

可以看出，一根导线的电阻，不仅和导线的材料有关，而且和导线的长短、粗细有关。因此，从研究物质性质的角度来看，电阻的概念显然是不确切的。因为相同材料的物质，当其长短、粗细不同时，电阻值也不同，特别是我们在测井中遇到的介质并不是均匀的。因此，在电阻率法测井中不用电阻的概念，而是用反映介质性质的电阻率的概念。

从 (1.1) 式看出，电阻率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，电阻单位用欧姆表示时，电阻率的单位是欧姆·米。

岩层的导电能力大小，或岩层的电阻率，只有当电流通过它的时候才能表现出来。因此在测量电阻率时，必须向岩层中通入一定的电流，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，从而进一步达到区分不同岩层的目的。因此，电阻率法测井的线路中，必然包括造成电场的供电线路和测量电场的测量线路两部分。图 1.1 是测井的现场布置和电阻率法测井的原理图，我国目前石油测井全部装置（除数字测井仪外）分装在这两部汽车上。一部是仪器车，另一部是电缆绞车。测井时，井口装置由车上取下，安放在井口。绞车车停在距井口大约 30 米左右的地方，车尾对正井口。仪器车并排停在绞车车附近，以便于联系。仪器车、绞车车和井口装置之间通过相应的导线连接。井下仪器或电极系由电缆经井口滑轮放入井中。电流经 A 、 B 电极向地层中供电。电场在空间的分布受不同电阻率的岩层所控制。因此，研究岩层电阻率的电阻率法测井，首先必须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 MN 处造成的电场也必然变化。反过来也可以根据电场的变化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 ）组成所谓电极系，电极系通过电缆与地面上电源和记录仪相连接。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。

1.1.2 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 \mathbf{E} 、电位 V 和电流密度 \mathbf{j} 。他们所遵循的基本规律可以表示为

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{R} \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad (1.3)$$

(1.2) 式是欧姆定律的微分形式。(1.3) 式是表明电流线的连续性，即基尔霍夫第一定律的微分形式，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，根据稳定电流场性质，电场和电位之间的关系为：

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V \quad (1.4)$$

把 (1.4) 式代入 (1.2) 式，然后再把 (1.2) 式代入 (1.3) 式得：

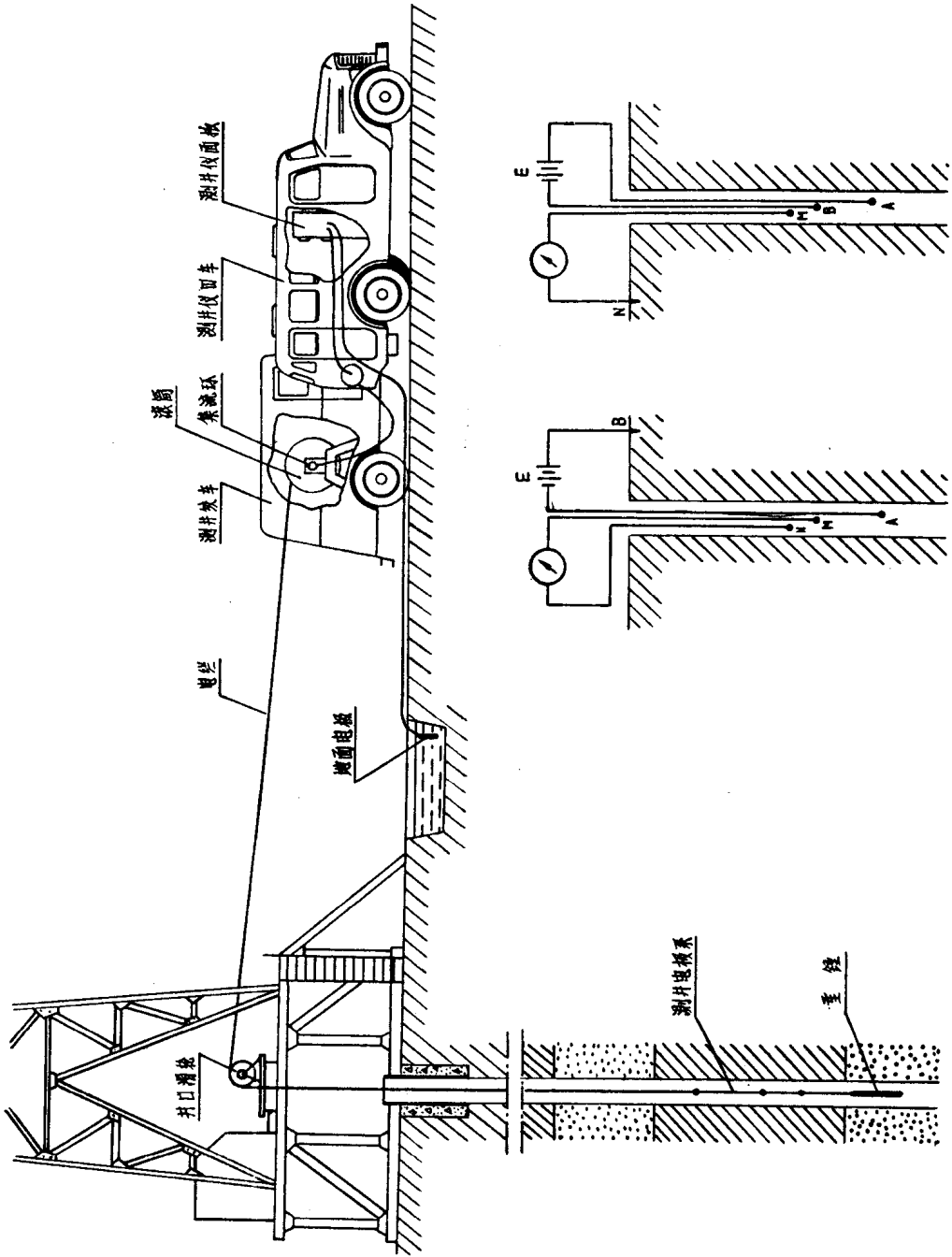


图 1.1 测井现场及电测井原理图

$$\operatorname{div}\left(-\frac{1}{R}\operatorname{grad} V\right)=0 \quad (1.5)$$

如果介质是均匀各向同性的, 则

$$\operatorname{div}\cdot\operatorname{grad} V=0 \quad (1.6)$$

即得到所谓拉普拉斯方程

$$\nabla^2 V=0$$

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, 所以只有边界条件, 它们是:

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

$$V_1=V_2 \quad (1.7)$$

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

$$\frac{1}{R_1} \frac{\partial V_1}{\partial n} = \frac{1}{R_2} \frac{\partial V_2}{\partial n} \quad (1.8)$$

或

$$j_{1,n}=j_{2,n} \quad (1.8)'$$

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, 按照这些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情况称之为解反问题。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样的关系? 要回答这些问题, 我们必须从研究正问题开始, 从而得出一些规律性的认识, 作为我们解决实际问题的指南。

必须指出, 只是对非常简单的, 甚至是理想化了的介质分布情况, 才能用基本方程解出, 大量的正问题解答是靠实验获得的。

1.1.3 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中电场的分布, 显然是一种理想的情况, 即假设电极系是放在电性均匀的一种介质中, 但是通过讨论它, 可以得到一些有用的基本关系式。同时, 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 位于座标原点, 因为介质是电性均一的, 所以从 A 流出的电流线在各个方向上是一样的, 即对于原点对称的。在这种情况下, 利用球座标是比较方便的, 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:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}\right)=0 \quad (1.9)$$

对这个式子积分后, 得

$$V = -\frac{c}{r} + c_1 \quad (1.10)$$

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

$$V = -\frac{c}{r} \quad (1.11)$$

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, 则

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

$$\text{于是} \quad c = -\frac{RI}{4\pi} \quad (1.12)$$

将 (1.12) 式代入 (1.11) 式, 得

$$V = \frac{RI}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.13)$$

根据 (1.4) 式和 (1.2) 式,

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{RI}{4\pi} \frac{1}{r^2} \quad (1.14)$$

$$j = \frac{E}{R} = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (1.15)$$

上述 (1.13), (1.14) 和 (1.15) 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。

在测井时, 是利用和供电电极 A 保持一定距离的测量电极 M 和 N 测量空间两点的电位差的。根据 (1.13) 式, 这个电位差为,

$$\begin{aligned} \Delta V_{MN} &= V_M - V_N = \frac{IR}{4\pi} \frac{1}{AM} - \frac{IR}{4\pi} \frac{1}{AN} \\ &= \frac{IR}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

解出电阻率, 则

$$R = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1.17)$$

式中

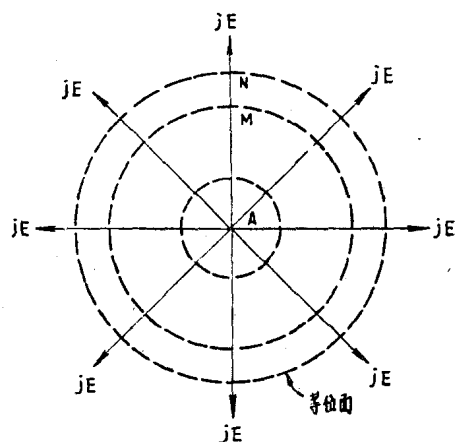


图 1.2 均匀无限各向同性介质中电流和电位分布情况

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

称为电极系数，它只和电极系中各电极之间的距离有关。

(1.17) 式是在均匀介质中电阻率和电场之间的关系式。对于某一个电极系来说， K 值是个常数，因此知道了 I 和 ΔV_{MN} 之后，便可以算出介质的电阻率。在实际生产中，利用泥浆电阻率计测量泥浆电阻率时，就是利用这个公式计算的。

1.1.4 视电阻率

在介绍什么是视电阻率之前，先来看一下泥浆侵入造成井眼周围介质电阻率的径向变化情况。

在钻井过程中，井内泥浆柱的静压力通常大于地层压力，此压力差使泥浆滤液进入渗透性地层，这就是泥浆侵入，而泥浆中固体颗粒则沉淀于井壁形成泥饼。通常泥饼的渗透性较差，因此形成泥饼后渗透速度大大降低。由于泥浆侵入，使得井眼附近岩层的电学性质发生变化，在靠近井壁附近的岩层中，所有地层水几乎全部被泥浆滤液所驱走，这部分叫做冲洗带。在冲洗带外部是一个被混合液体充满的过渡带。冲洗带和过渡带组成侵入带。愈向外，泥浆滤液愈少，地层水的含量愈多，逐渐过渡到未被侵入的部分。在含油气的地层中，由于相对渗透率的差别，油气的流动性比较大，因此，同孔隙水相比，油气被泥浆滤液推动的更快些，在泥浆侵入带和未被侵入的原状地层之间，有时会形成一个含水饱和度较高的低阻环带，这个环带的形成和岩性有关，但随时间会逐渐消逝的。侵入带结构如图 1.3 所示。

从电阻率径向变化特点来看，由于泥浆侵入造成的侵入带有两种类型：

当地层中原始含有的流体电阻率比较低时，较高电阻率的泥浆滤液侵入后，侵入带岩石的电阻率将升高，从井轴沿径向的电性变化如图 1.3 a 所示。这种情况称为增阻侵入，在地层水矿化度较高的水层发生这种侵入。

当地层中原始含有的液体电阻率比较高时，泥浆滤液侵入后，侵入带岩石的电阻率将降低，径向的电性变化如图 1.3 b 所示。这种情况称为减阻侵入，一些地层水矿化度不很高的油层，发生这种侵入。

泥浆侵入带对于我们研究岩层真电阻率来说，是一种干扰因素，在解释测井曲线时需要考虑它的影响。但事物总是“一分为二”的，不利的因素在一定条件下可以转化为有利的因素。有时研究侵入带的特点，可以得到有用的资料。例如，通过侵入带和未被侵入部分的对比，可以了解孔隙中液体的变化特点，进一步研究油层的生产能力。

侵入带不仅改变了岩石的电学性质，其它的物理性质也会发生相应的改变，因此，在应用其它方法时，也常常需要考虑侵入带的影响。

对于均匀介质，电阻率与电位差之间存在着很简单的关系，通过测量电位差，利用 (1.17) 式很容易求出介质的电阻率。但是，实际上，电极系周围的介质要复杂得多，井中有泥浆、上下有围岩，有的岩层还存在侵入带。这些介质的电阻率都不一样，此时电极系测得电位差显然和几种介质的电阻率有关。介质电阻率和电位差之间的这种关系是非常复杂的，以至到目前为止还不能数学准确的计算出来。但经过多次实践人们认识到，只要适当选择电极系尺寸和排列方式，沿井身测得电位差的变化和岩层电阻率的变化之间以及测得电位差和岩层电阻率之间，仍可以找到一定规律。因此，人们引进一个所谓

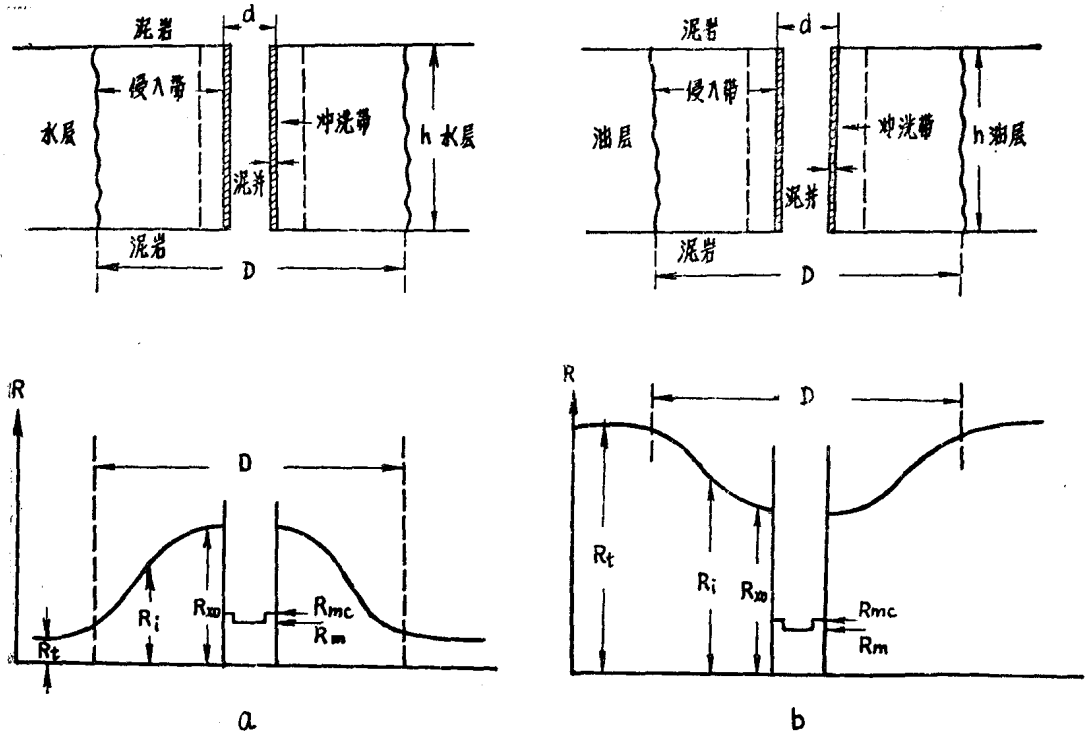


图 1.3 侵入带结构及径向电性变化
a—含水层的泥浆侵入；b—含油层的泥浆侵入

“视电阻率”的概念，由 (1.17) 式所定义，即在任何非均匀介质中测得的电位差 ΔV_{MN} 和视电阻率 R_s 之间有下列简单关系

$$R_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1.18)$$

有了这种关系，就可以把沿井身测得的电位差曲线，直接用 (1.18) 式刻度成视电阻率曲线。只要我们能弄清楚视电阻率变化与岩层真电阻率变化之间的关系，问题也就解决了。因此，我们把电阻率法测井通常也叫做视电阻率法测井。实践证明，只要适当选择电极系，沿井身视电阻率的变化就能在某种程度上正确反映地层电阻率的变化，并根据视电阻率曲线的变化特征，可以直接划分地层剖面。因此，引进视电阻率的概念，对工作方便的。在需要知道地层真电阻率时，问题就变成研究真电阻率与视电阻率之间关系的问题。

视电阻率曲线的特征以及视电阻率与真电阻率之间的关系，一方面和电极系的尺寸、类型有关，另一方面受介质电阻率、厚度、井径等因素影响。在我们进行测井工作时，地层的情况以及钻井的情况是我们不能改变的，但是我们可以选择电极系尺寸和类型来达到我们的目的，使测得的视电阻率曲线能够清晰的反映岩层剖面的变化，进而根据视电阻率曲线划分地层剖面和确定地层真电阻率。因此，在下面几节里我们将要讨论普通电极系电阻率法测井使用的电极系类型、视电阻率曲线形状，以及视电阻率与真电阻率的关系如何受电极系类型尺寸的影响。