

高等学校教学参考书

地下地质测井分析 的原理与计算机方法

[美] John H. Doveton 著



地质出版社

9005731

2
P631/2

111

145

ISBN 7-116-00522-6/P·447

定 价： 2.65 元

高等学校教学参考书

地下地质测井分析的原理 与计算机方法

〔美〕 John H. Doveton 著
李舟波 等译

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书共九章，大体分为两部分。前四章是介绍利用测井方法研究各种地下地质问题的原理，其重点是说明各种测井响应的地质依据，而不是数学物理原理；后五章介绍了各种分析技术的计算机方法，例如图解法、数值法和统计法，以及利用测井资料进行岩性填图等。

自从20世纪70年代初测井资料解释进入综合分析阶段以来，随着计算机技术的发展，已经从单井的油气层评价，逐渐向多井的油气藏描述，和更全面的地质研究，如沉积学、岩石学、构造地质学的研究过渡。

本书是反映这一发展趋势的一本比较好的书，目前国内尚无类似的书。

LOG ANALYSIS OF SUBSURFACE GEOLOGY —Concept and Computer Methods

John H. Doveton 著

原出版者 John Wiley & Sons, Inc.

原出版年月 1986

高等学校教学参考书

地下地质测井分析的原理与计算机方法

[美]John H. Doveton 著

李舟波 等译

责任编辑：岑 峰

地质出版社出版

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：13.125 字数 307000

1989年11月北京第一版·1989年11月北京第一次印刷

印数：1—1105册 定价：2.65元

ISBN 7-116-00522-6/P·447

译者前言

随着许多新的测井方法的出现和计算机技术的发展,以及划分岩性圈闭油气藏和三次采油等方面的需要,测井分析已经从主要根据经典的储集层工程理论进行油气储集层评价,提供孔隙度和饱和度等参数的领域,逐步扩展到结合地质概念进行综合地下地质分析。但是,目前测井分析的大多数著作,还没有充分反映这种变化。John H. Doveton的这本书侧重反映了这方面近些年的新成果。这也就是我们想把这本书翻译成中文的理由。我们相信这本书会引起国内测井解释、石油地质、油气储集层工程、石油物探、沉积岩和构造地质等各方面人员的兴趣。

本书一个重要观点是,现代测井曲线作为强有力的地下地质分析媒介的全部潜力的发挥,最后将依赖于各个相关知识领域的有力结合。这些领域包括测井方法原理、储集层工程的基础知识、数学和计算机处理方法,以及地质基础知识等。

本书共分九章。前四章是常用测井方法的概述。第五章是测井分析中常用的作图法。第六章为岩性分析的数学方法。第七章是根据测井资料进行地下地质趋势和模式的统计分析和信号处理技术。第八章为测井曲线的补充校正。第九章是利用测井曲线进行地质填图。本书的绪论、第四章和第六章由李舟波译,第一到第三章由张存和译,第五章由尚林阁译,第七到第九章由潘葆芝译,全书由李舟波统校。

由于译校者水平有限,难免有不妥和错误之处,敬请指正。

译者

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 绪 论 | 1 |
| 第一章 电阻率测井 | 6 |
| 基础知识 | 6 |
| 岩石电阻率 | 6 |
| 电阻率和孔隙度的定量关系 | 8 |
| 岩石结构特性与电阻率-孔隙度关系 | 10 |
| 结构和电阻率关系的现代模型 | 13 |
| 根据电阻率和孔隙度测井曲线进行相的解释 | 14 |
| 碳酸盐岩的结构-电阻率关系 | 15 |
| 含油气岩石的电阻率 | 17 |
| 利用测井仪器测量电阻率 | 19 |
| 电位电极系 | 20 |
| 感应测井仪 | 20 |
| 侧向测井 | 21 |
| 微电阻率测井 | 22 |
| 纵向分辨率和探测半径 | 22 |
| 参考文献 | 23 |
| 第二章 地层倾角测井 | 25 |
| 根据地层倾角模式进行构造地质解释 | 28 |
| 构造倾角和不整合 | 28 |
| 断层 | 29 |
| 压实披盖弯曲 | 31 |
| 沉积构造和沉积环境的地层倾角解释 | 32 |
| 风成沙丘 | 33 |
| 网状河流沉积 | 35 |
| 弯曲河流边滩 | 36 |
| 三角洲分流河道 | 37 |
| 分流河口沙坝 | 38 |
| 河口湾和潮水河道 | 38 |
| 滨外坝 | 39 |
| 海洋陆架沙体 | 40 |
| 地层倾角测井矢量分析 | 41 |
| 根据地层倾角分析结构方向 | 46 |
| 参考文献 | 48 |
| 第三章 自然电位和自然伽玛测井 | 50 |
| 自然电位测井 | 50 |
| 影响SP测井曲线的因素 | 53 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 应用SP测井曲线形状识别砂岩的沉积环境 | 53 |
| 自然伽玛测井 | 59 |
| 应用自然伽玛测井曲线估计泥质含量 | 60 |
| 根据自然伽玛测井曲线对简单沉积环境的解释 | 62 |
| 自然伽玛测井曲线的一般应用 | 63 |
| 自然伽玛测井的地质放射性源 | 65 |
| 自然伽玛能谱测井的应用 | 68 |
| 第四章 孔隙度测井：声波、密度、中子 | 73 |
| 参考文献 | 71 |
| 声波测井 | 73 |
| 密度测井 | 76 |
| 中子测井 | 79 |
| 泥岩压实趋势的分析 | 81 |
| 孔隙度趋势和模式的地质含义 | 85 |
| 第五章 确定岩性的作图方法 | 89 |
| 参考文献 | 87 |
| 在相同参考刻度上重叠孔隙度测井曲线 | 89 |
| 孔隙度测井的频率交会图 | 92 |
| 三维图：Z图 | 94 |
| 压缩的投影图 | 95 |
| ROMA-UMA交会图 | 100 |
| 泥质砂岩的作图方法 | 101 |
| 作为几何学手段的交会图 | 106 |
| 第六章 根据测井曲线判断岩性的数值法 | 110 |
| 参考文献 | 108 |
| 应用矩阵代数进行组分分析的基础 | 110 |
| 测井曲线的矩阵代数组分分析 | 112 |
| 实例分析1：寒武-奥陶系白云岩分析 | 115 |
| 实例分析2：宾夕法尼亚系砂-泥岩层系的分析 | 117 |
| 泥质的体积分析 | 117 |
| 实例分析3：二叠系蒸发岩 | 119 |
| 估计组分的近代矩阵代数方法 | 121 |
| 欠定系统 | 121 |
| 唯一确定的系统 | 123 |
| 超定系统 | 125 |
| 调整求解步骤 | 126 |
| 标准矿物成分的测井曲线解和实际矿物成分的岩类学 | 130 |
| 第七章 测井曲线趋势和模式的数学分析 | 132 |
| 参考文献 | 131 |
| 组分结合的模式 | 132 |
| 测井数据的时间序列分析 | 136 |

| | |
|---|------------|
| 测井曲线长期趋势的多项式分析 | 136 |
| 短期趋势的多项式滤波 | 138 |
| 循环组分的富里叶分析 | 140 |
| 短期趋势的频谱分析 | 141 |
| 模式识别法 | 144 |
| 主成分分析 | 144 |
| 判别函数分析 | 146 |
| 第八章 测井曲线的补充校正 | 152 |
| 参考文献 | 150 |
| 单井标准化方法 | 152 |
| 应用地层单元刻度 | 152 |
| 应用交会图 | 153 |
| 与岩心分析结果对比 | 153 |
| 双井标准化方法 | 154 |
| 重叠法 | 154 |
| 直方图法 | 154 |
| 多井标准化方法 | 155 |
| 简单填图法 | 155 |
| 趋势面分析法 | 155 |
| 第九章 测井岩相填图 | 161 |
| 参考文献 | 160 |
| 根据单条测井曲线进行简单的岩相填图 | 161 |
| 矩与多项式回归 | 167 |
| 三维剖片图 | 170 |
| 进一步的应用 | 175 |
| 根据多种测井曲线进行复杂岩相填图 | 176 |
| 测井岩相图的解释和效果 | 178 |
| 参考文献 | 188 |
| 附录1 KIWI——根据测井曲线进行组分分析的一种计算机程序 | 186 |
| 附录2 常见地质组分的物理性质 | 193 |
| 索引 | 195 |

绪 论

在1927年9月一个晴朗的日子，一辆旧的客货两用车，经过Alsace乡间驶向Pechelbrom油田。在Scheibi和Jost的帮助下，Henri Doll在Diefenbach 2905井7号搭卸下一个实验性的电阻率电极系，并通过电线与一个临时性的绞车相连。电极系下放到井底，按一米间隔进行了非常费时间的不连续的电阻率测量。返回巴黎后，Doll按深度把电阻率读数画在一张作图纸上，并把相邻的观测值连接起来，得到了第一条电阻率测井曲线。这个历史性记录的一部分，示于图1。

在这之前，Schlumberger公司已从事地面电法研究多年，并且成功地建立了基岩地质和电阻率剖面之间的关系。Pechelbrom公司和Schlumberger就一些地面工作签订合同之后，又对证实井下电阻率测量是否可能帮助地质学家进行地下对比这一问题发生了兴趣。Conrad Schlumberger独立地对这样一种方法的理论进行了探讨，并把实验性电阻率装置的设计和任务委托给它的女婿——Doll。

在Pechelbrom地区，地层方面遇到的问题是如何识别在钻井过程中经常丢失的Hydrobiae泥灰岩的顶界。Doll的第一条电测井曲线清晰地显示出，Hydrobiae泥灰岩层为一个均匀的低电阻率层，上面被砾岩、砂岩和坚硬泥灰岩的混合层系所覆盖，混合层系显示电阻率有较高的峰和谷。在邻近井中进一步的测井工作表明，这样一些电阻率特征可以在横向上对比，于是这个“电取芯”方法被确认是对比的一个有效手段。关于这些早期事件的细节，Allaud和Martin (1977) 已做了介绍。

在这个经历中，有一点是很有意义的。测量第一条测井曲线是为了解决一个特定的地质问题。试验成功地揭示出，井下电阻率测量结果和岩性之间有紧密关系，这个关系对于地层对比是很有用的。从那时起，测井曲线解释的主要重点转移到划分和评价多孔的渗透性含油气层，以及对储集层工程前景的评价。近来，对于测井曲线作为勘探地层圈闭手段所具有的更广泛的意义，愈来愈感兴趣。沉积相和成岩模式的微妙变化，是许多现代研究的关键。很显然，测井曲线用于岩相研究是有潜力的，因为归根到底测井曲线是岩石物理性质的测量。

同初期相比，测井仪器的种类已大大增多了，包括许多种测量电的、热的、核的和声的性质的设备。因此，一口典型的现代钻井的测井系列，要记录大量地下岩层的数字信息。结果表示成随深度变化的模拟曲线，所有测井公司都采用习惯上通用的深度比例。选用的传统表现方法，一方面保持共同的标准，另一方面又可以按有意义的方式显示出多条测井曲线(图2)

有一些作者，例如Jeffries (1965)，不赞成显示多条曲线的现代趋势，认为“曲线太多易引起混乱”。测井分析的新手肯定会同意这种感觉，但是在实际工作中一般都会发现，多条曲线的显示格式，对于确定趋势、模式和鉴别标志是一个有效的手段。

在音乐中可以找到一个有用的譬喻。一种旋律是由一系列划分为拍节和音节的音符所组成。通常，把这个称做水平模式，它要被和音和带有谐音的对位的垂直模式所补充。因

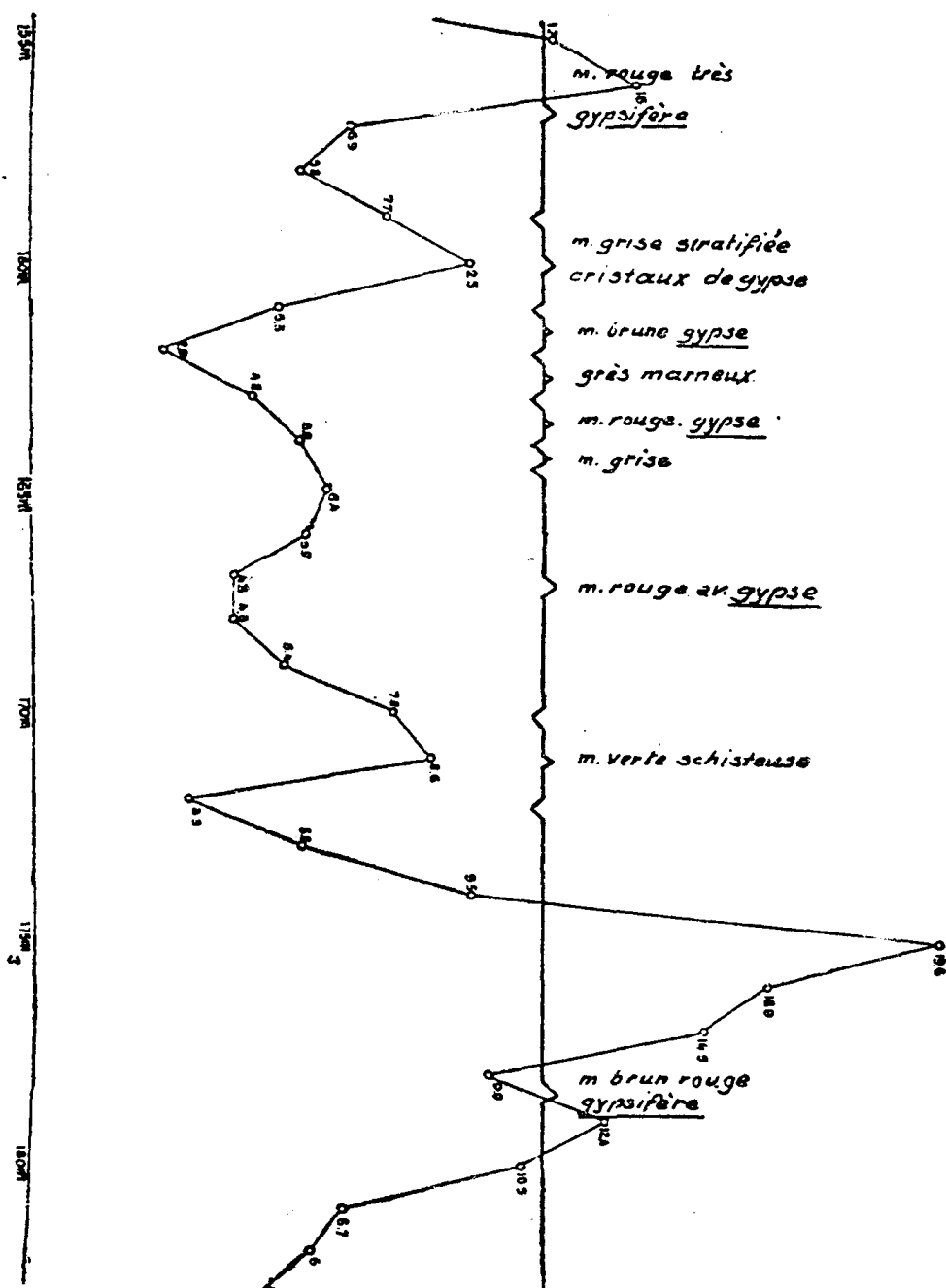


图 1 第一条Schlumberger测井曲线的一部分, Alsace, 1927

此, 一个乐谱的曲调有二维, 即水平旋律和垂直和音。一个乐谱对于非音乐家的意义可能是有限的, 而要达到熟练, 与其说是因为智力发达不如说是通过实践。一个有经验的测井分析家可以看懂和解释一组多条测井曲线, 就像一个音乐家看着一页乐谱就能在钢琴上演奏出来一样容易。测井曲线对各种理想化岩性的响应是主旋律, 它们是沿着地层顺序记录的重复变化的基础。测井曲线组起伏变化的主要成分, 携带着交互层岩性和粗略的储集层性质的“旋律”。曲线之间的差别是“谐音”元素, 它传送有关矿物和结构变化的有用信

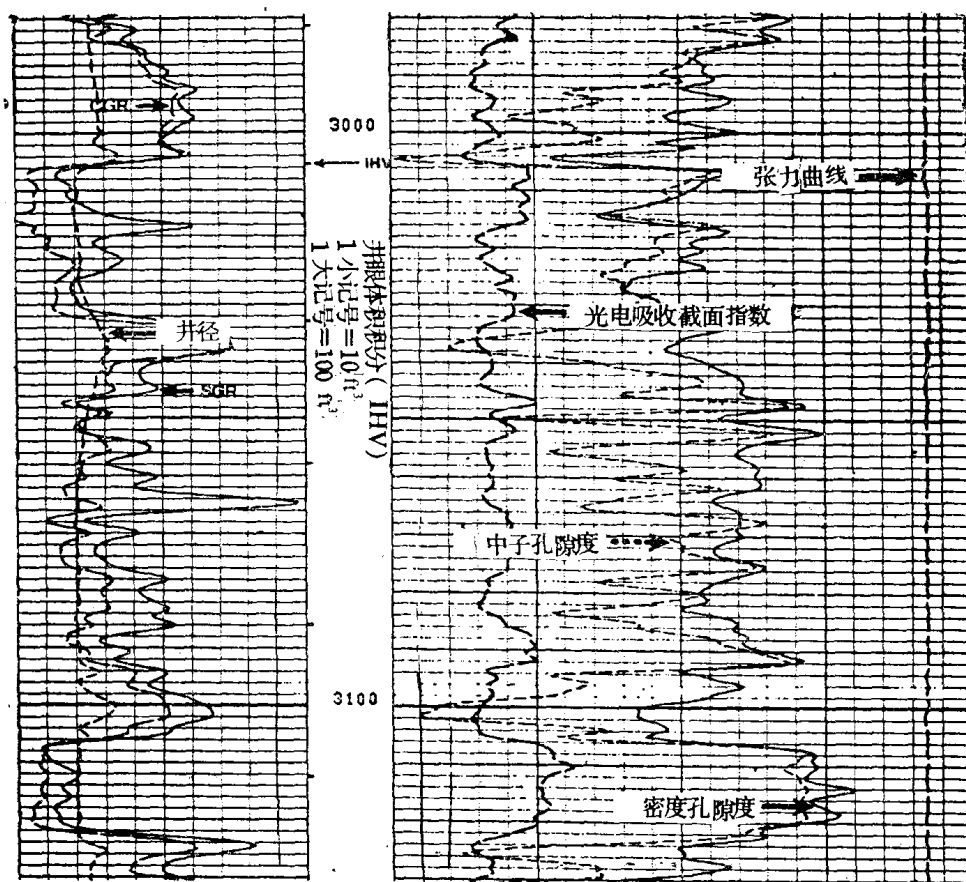


图 2 一种现代测井曲线组合。堪萨斯南部二叠系剖面的井径、自然伽玛、充电指数、密度、中子和张力测井曲线

息。

当然，存在着某种限制。用肉眼解释反映复杂岩性层系的综合测井曲线组合时，可能会受到象读一个完整的交响乐谱一样的挑战。这时，利用计算机分析测井曲线，压缩大量信息变成对地质学家和采油工程师有用的形式，显然是有效的办法。因为测井结果是数字的且数据量很大，所以计算机无论是做为大量处理数据的手段，还是作为关系式的数学分析媒介，都是一个强有力的工具。也许沿着这条路线工作的主要障碍是，为了得到有效的结果需要把地质、数学和测井分析巧妙地结合起来。专业面较窄、对测井曲线了解有限的专家的观点，就像本书封面“三个聪明的猴子”的图画所象征性表示的那样。

多听无妨：地质学家

虽然用测井曲线做为地下地质学作图的基本素材，已经有数十年的历史，可是许多地质学家在应用它们时，概念上几乎没有比分析第一条测井曲线时有多大前进。基本上，测井曲线是用于划分绘制构造图和等厚图所需要的地下地质单元的边界。其次，用地质单元内的测井曲线剖面的“形状”（特别是自然电位、自然伽玛射线和电阻率曲线）做为解释沉积来源（多半是在砂-泥岩层系）的定性手段。测井曲线响应的数值的或物理的含义，直到不久以前还没有得到应有的重视。因为正统的沉积岩相学的数据往往是定性的，或者是粗略定量的，这一点是令人遗憾的。对沉积岩的观察大多数是纯描述性的，按照矿物成分和结构分成大类。定量工作所要求的测量工作，一般既昂贵又费时间。与此相反，测井

仪器的测量结果是直接以数字形式给出的，因此是适于数据分析的资料。当前，根据测井曲线定量分析进行地质解释的主要缺欠是，可以举出有力证据的、成文的研究结果还有限。然而，这是由于疏忽和遗漏造成的，而不是测井曲线信息内容的内在缺欠。正如前面已经指出的，测井曲线是岩石物理性质的记录。

多看无妨：数学家

一口井的测井过程，可以认为是对地下的遥感测量，特别是某些物理量的测量，就像由轨道卫星所进行的测量一样。计算机对卫星和地震数据的处理，是成功地分析这些资料的关键，这也就意味着数学方法在新的测井曲线解释技术中应该是非常重要的。然而，直到目前为止，最普遍的地质应用一直是研究自动对比的方法。每条曲线的深度轴是地质时代的某种函数。不幸的是，按通常的时间序列方法处理测井数据时，由于沉积速率的变化、侵蚀期和沉积间断的长短等沉积历史情况的难以预测，而变得很复杂。这些情况以及其他一些问题是地质数据所特有的。因此，合理的地质模型必然是选择同问题有关的测井方法，以及选择进行分析的数学方法两者设想的依据。

多说无妨：测井分析家

受雇于石油公司的测井分析家，大多数是从事划分有经济价值的油气储集层和对工程性质进行评价的工作。他们主要对孔隙感兴趣，即孔隙的大小、形状、流体性质和含量。对矿物学的兴趣是第二位的，尽管它的重要性在于它是精确确定孔隙度所必需的。因此，测井分析家在分析过程中往往对一些重要的地质内涵注意不够。由于寻找和确定地层圈闭油气藏，以及对复杂储集层有效施工和三次采油项目的需要，这种情况在最近几年才有所改变。在上述这些应用中，测井都是有效的，而且它们所包含的地质信息是非常关键的。定量分析比定性分析更可取，因为分析结果将成为制定勘探钻井计划和选择储集层开发方案等重要决策的基础。

物理学、数学和地质学是测井解释的基础。它们每一个都是与时代和伟大人物的名字相联系的自然科学。测井解释是一个后来者和一个混血儿，它吸收这三个领域的知识，并且有时被夸大地称做“岩石物理学 (Petrophysics)” (由Archie 1942年提出)。在现代，科学的专业化倾向的增长，造成了一些人为界限的产生。这种障碍经常很明显地限制了工程师、地质学家和测井分析家之间成功地互相交流对测井曲线特点的理解。他们对测井分析的共同语言，对于丰富地质解释有很大潜力，并且对于各方都是有益的。

Wiener (1948) 在他的关于控制论发展的回忆录中，对于问题和前景反复做了说明。他的一些话值得广泛地加以引用。他说 (2到3页)，他“怀有同样的信心，即科学最有成效的领域是那些一直被忽视的、界于已经建立的各学科之间的无人之岛……。今天，几乎没有学者可以不加限定地称他们自己是数学家或物理学家，或者生物学家。一个人可以是一个拓扑学家，或者是一个声学家，或者是一个喷气机专家。他们满腹本专业的术语，并知道所有有关的文献和它的分支，但是他们经常把相邻学科看成是属于同一走廊内隔两个房间的同事的事情，并且认为把任何有意义的东西吸收到自己的领域中，都是不可原谅的违犯了互不干扰的原则。但正是这些科学的边缘部分，才为合格的研究人员提供最广泛的机会。同时，这些部分对于已大量投入使用的通用技术和分工方法是最难处理的。如果一个生理学上的难题实质上是一个数学问题，不懂数学的十个生理学家就只能和一个不懂数学的生理学家相当，而不会有更大的作为。如果一个不懂数学的生理学家和一个不懂生理

学的数学家在一起工作，一个人不能用另一个人能够执行的术语说明他的问题，而第二个人也不能用第一个人能够懂得的任何形式提出答案”。

上述论点构成了左右本书的哲学观点。本书的基本目标，是叙述那些获得具有常规地质模型意义的信息的途径和方法。仪器设计的理论、岩石性质、岩石物理关系和数学算法，是做为基本前提条件讨论的。在前面几章中，分别讨论了常用测井方法的测量原理和应用。在接着的一章中，介绍利用重叠法和交会图法进行多条曲线分析的图解法。这些几何解法是后面的数学方法发展的自然前奏。复杂问题的分析是使用计算机最合适的课题。最后，把单井分析岩石层系的方法，扩展到用于二维和三维岩相横向变化的区域填图。

参 考 文 献

Allaud, L. , and Martin, M. , 1977, *Schlumberger, the History of a Techique*, John Wiley & Sons, Inc. , New York, 333pp.

Jeffries, F. , 1965, Wireline logs—the infant oil finding technique, *Canadian Petroleum Geology Bull.*, Vol. 13, No. 2, pp. 291-302.

Wiener, N. , 1948, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, The M. I. T. Press. Cambridge, Mass. , 212 pp.

第一章 电阻率测井

基础知识

1827年 Georg Ohm 在柏林发表了一个小册子, 其中提出在金属导线中的电流是和加在导线两端的电位差成正比。由于这个概念太简单, 在当时遭到很多人的嘲笑, 因此 Ohm 辞去了他在科隆的数学教授职务。经过几年默默无闻的贫穷生活之后, Ohm 终于被证实是对的。他的论点现在被称为欧姆定律, 并表示成如下的关系式

$$E = Ir$$

式中电位差 (E) 和电流 (I) 之间的比例系数是称做电阻的常数。电阻是导电介质的特征值, 其单位为欧姆, 以纪念 Georg Ohm。

与欧姆定律的简单性相一致, 电阻组合的计算也是非常简单的。串联的总电阻由下式给出

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

当一组电阻是并联时, 将有如下不同的关系式

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

任何物体的电阻, 将随它的尺寸和形状而改变。为了能有某种共同的基础, 用来比较岩石中电测量的结果, 我们需要一个能表征每一单位组成部分的参数, 如同使用密度而不用重量一样, 起判断性质的作用。这个参数就是电阻率, 由下式给出

$$R = \frac{rA}{L}$$

式中 A 是物体的横截面, L 是它的长度。这个关系与直觉的知识相符合: 长而细的物体比具有相同体积和由相同材料组成的短而粗的物体的电阻大。电阻率的单位可根据量纲分析得出。电阻的单位为 Ω , 面积的单位为 m^2 , 长度的单位为 m , 电阻率的单位则为 $\Omega \cdot m$ (也写成 $\Omega \cdot m^2/m$)

岩石电阻率

钻孔中的电阻率曲线, 反映组成岩石的矿物和孔隙空间中液相和气相各种物质电阻率的复合测量结果。尽管在世界博物馆中充满着各种奇异的珍藏矿物, 而钻头穿过典型沉积盆地所遇到的矿物组成却是非常有限的。多数沉积地层几乎全是由砂岩、石灰岩、白云岩、泥岩和燧石组成, 偶尔出现蒸发岩和煤层。组成这些岩石的矿物的电阻率都超过 $10^6 \Omega \cdot m$ 。碳氢化合物的油和气也具有类似的高电阻率。实际上所有这些矿物可以被看作是绝缘体, 特别是电阻率测井仪器的有效测量范围一般限制在 0.1 到 $2000 \Omega \cdot m$ 之间。

显然，电阻率测井曲线是受许多因素控制，而不只是受矿物成分电阻率的控制，同时这些因素具有简单的解释。泥岩具有低电阻率，这是由粘土矿物的特性造成的。干粘土矿物具有极高的电阻率。然而，当干粘土含有水分和受到电场的作用时，同粘土矿物节理面有关的离子将移动而形成电流。在任何泥岩中这种导电效应的强度，将根据它的粘土矿物组分、类型和它们的结构而变化。

在不含泥质的砂岩、石灰岩和白云岩中，电流几乎都是由岩石孔隙空间中的水所传递。虽然纯水实际是一个绝缘体，但是所有地下水都含有溶解的矿物，这些矿物的离子解离提供了导电的媒介。地下盐水的电阻率和溶解固体的浓度成反比变化，并受所含离子的相对活动性的影响。一级近似地，通常可以认为孔隙水是简单的盐水溶液，因为氯化钠是最主要的矿物。作为第二个控制因素，盐水电阻率随温度增高而减小。

由于上述两个影响因素的叠加，做为溶解固体的浓度和温度增加的结果，可以观察到地下岩层水电阻率随深度增加而减小的趋势。然而，在地热梯度异常的地层，或被较淡的水渗入的地层，这个一般的趋势将被扰乱。

在不含泥质的岩石中，由于电流基本上是被孔隙中的盐水所传递，所以电阻率曲线的剖面主要是受所含盐水的体积所控制。在不含有油或气的单位体积岩石中，这个体积对应于孔隙度。高电阻率对应低孔隙度；低电阻率指示较高的孔隙度。这个关系可以用来解释某一地下单元的电率测井曲线，以给出简单的孔隙度变化的估计。图1是在堪萨斯中部

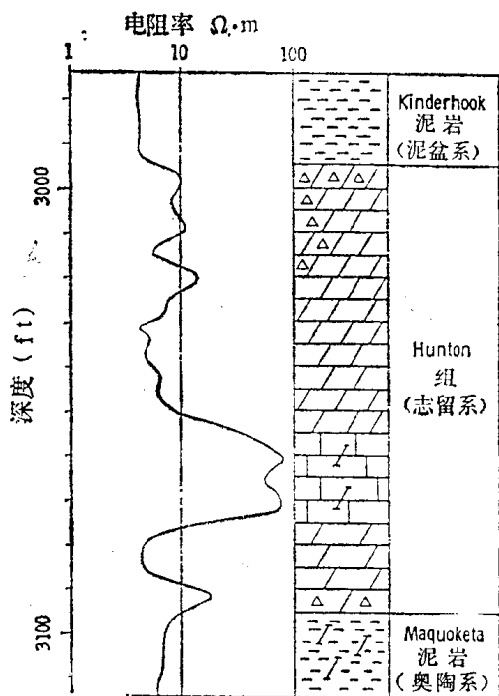


图1 堪萨斯中部一口井中
Hunton组的感应电阻率测井曲线
岩性图例：点线是泥岩；长方形是石
灰岩；斜方块是白云岩；三角形是燧石

一口井中志留系Hunton组的感应电阻率测井曲线，图上同时给出了钻井取芯的岩性说明，以便参考。上覆的Kinderhook泥岩和下部的Maquoketa泥岩由于湿粘土矿物的导电性而显示出低电阻率标志。在Hunton组内部，曲线显示出明显的电阻率分带变化。从图上可以看出一个简单的模式：如按电阻率降低，即孔隙度增大的顺序排列时，为白云质灰岩、燧石白云岩和白云岩。在这个层段中的白云岩对应白云岩化鲕状石灰岩，同未白云岩化的石灰岩存在明显差异 (Lee等人1948)。因此，通过电阻率曲线对体积的响应，它间接地反

映了白云岩化和燧石化的结果。同样，成岩作用是受原始沉积物的结构选择性，即不同碳酸盐岩沉积相传递孔隙流体和同孔隙流体相互作用的能力的差异所控制。

电阻率和孔隙度的定量关系

对于不含泥质的储集层岩石，电阻率依赖于孔隙度的系统模式，从测井一开始就已经了解，并且用于定性解释。然而，用于定量分析的实用数学关系的最初探讨，是以Archie的开拓性文章（1942）为标志。Archie根据实验室对大量砂岩样品的测量结果导出了关系式，但是它的基本结论也可以从简单的理论模型推出。

假定有一块边长为1m的立方体砂岩（图2）。一个极端的下限情况，即砂岩的孔隙度为零时，是一块石英立方体，在简单的测量装置中它的电阻和电阻率实际是无限大的。另一个极端的上限情况，假想的砂岩具有100%孔隙度，是一个电阻率用 R_w 表示的盐水罐。在中间的情况，我们可以人为的造一块砂岩，在 1m^3 石英的表面作 100×100 的网格，在每一个被划分出的小立方体上钻孔，并充以电阻率为 R_w 的盐水。这个“砂岩”立方体的电阻为 r_o ，电阻率为 R_o 。〔这个以1m为边长的立方体是一个很方便的模型，因为它的截面积（ A ）和长度（ L ）都等于1〕。在测井分析中， R_o 表示完全被盐水浸透的岩石的电阻率。盐水电阻率由 R_w 表示。这个“砂岩”块的电阻率很容易计算，因为它可以看作是一堆石英棱镜和一组像并联电阻的盐水管道的。盐水管道的数量等于这个“砂岩”的“孔隙度”乘上10000，或

$$n = 10000\phi$$

按电阻的并联关系，有

$$\frac{1}{r_o} = \frac{n}{\Delta r_w} + \frac{(10000 - n)}{\Delta r_r}$$

式中 Δr_w 为每一个盐水管道的电阻， Δr_r 是每一个石英棒的电阻。于是

$$\frac{1}{R_o} = \frac{10000\phi}{\Delta r_w} + \frac{10000(1 - \phi)}{\Delta r_r}$$

因为石英棒的电阻接近无限大，并且

$$\Delta r_w = 10000R_w$$

则得到

$$\frac{1}{R_o} = \frac{\phi}{R_w}$$

重新排列一下这个等式，变为

$$\frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\phi}$$

换句话说，这个“砂岩”的电阻率和所含盐水电阻率的比值是一个常数，并且受孔隙度控制。比值 R_o/R_w 被称为“地层因素”，通常用 F 表示。

很显然，这个用直线孔道表示孔隙空间的“砂岩”模型是过分地简化了。实际上，盐水介质分布的空间是一个三维迷宫，是由孔隙喉道连通的复杂的分支网络。孔隙铸型和扫描电子显微镜都直接给出了关于这个拓扑问题的真实特性的认识（图3），而这些是很难用普通薄片鉴定提供的二维图形来认识的（图4）。在实际的 1m^3 砂岩中，电流路径将是弯曲的，长度将超过1m。路径长度对起点与终点间直线距离的比值，称为孔隙网络的“弯曲

度”。盐水通路的长度加大将使电阻加大，因此实际砂岩的电阻率将比根据简单模型预计的电阻率大。

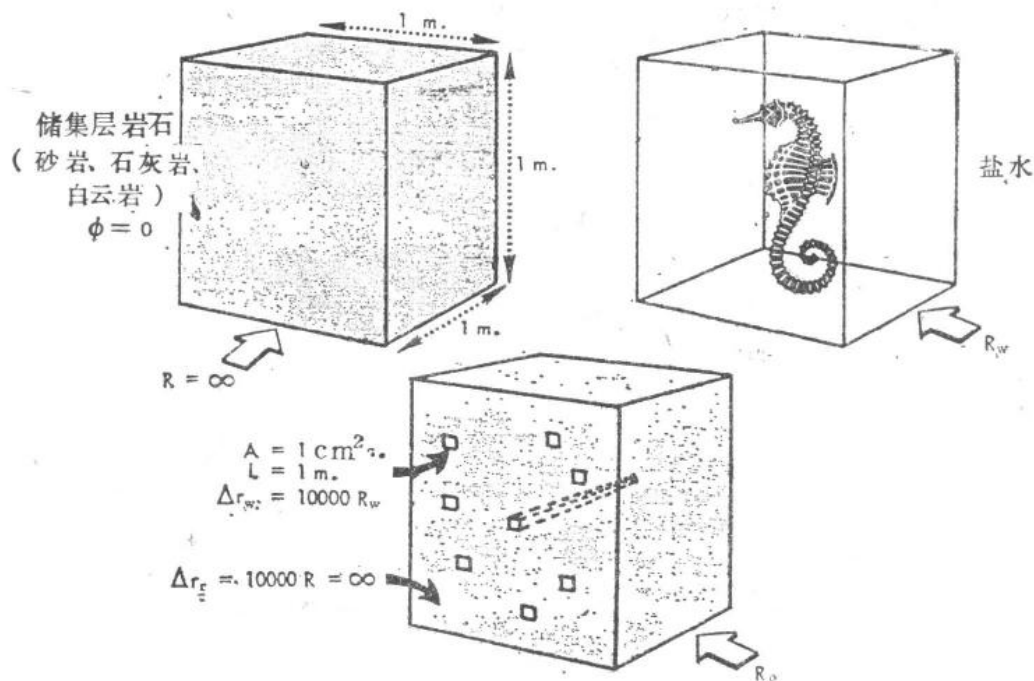


图 2 在简单的立方体模型中地层因素和孔隙度之间的关系



图 3 固结砂岩放大100倍的金属孔隙铸型
根据Collins (1961) 的资料

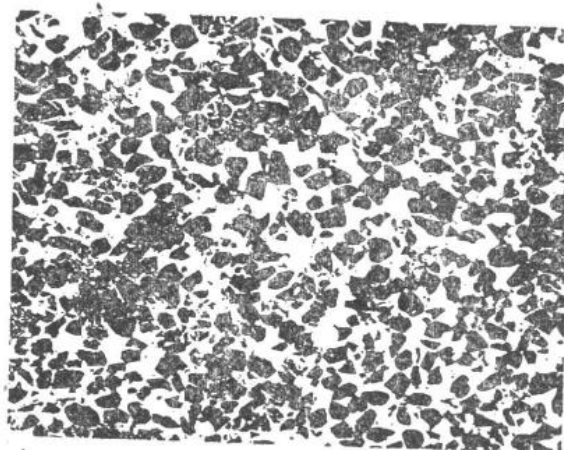


图 4 在薄片上看到的二维孔隙网络图像
堪萨斯Bartlesville砂岩 (宾夕法尼亚系)。大约放大20倍

然而，方程 $F = 1/\phi$ 具有合乎想像的特性，当地层孔隙度为零时，地层因素为无限大，当岩石具有假想的100%孔隙度时， $F = 1$ （注意，在测井分析公式中孔隙度是用小数表示的）。一个能保持两端特点，同时中间分布能更符合较高的地层因素值的改进的关系式为

$$F = \frac{1}{\phi^m}$$