

石油技工学校统编教材

# 矿场地球物理测井

中国石油天然气总公司劳资局组织编写

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书简要而系统地介绍了普通电阻率、侧向、感应、声波、放射性、井径和地层倾角测井等十几种测井方法的基本原理、仪器结构及其测井曲线的定性应用；砂泥岩剖面和碳酸盐岩剖面的测井系列选择、现场快速直观解释成果图，以及地震勘探的简单原理和资料的一般应用。

本书可供石油技工学校钻采地质专业师生使用。

### 图书在版编目（CIP）数据

矿场地球物理测井/ 中国石油天然气总公司劳资局组织编写 .  
北京：石油工业出版社，1998.6  
石油技工学校统编教材  
ISBN 7 - 5021 - 2292 - 3

. 矿...

. 中...

. 油气田 - 地下物探 - 测井 - 技工学校 - 教材

. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（98）第 12293 号

石油工业出版社出版

(100011 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 9 印张 218 千字 印 1—1000

1998 年 6 月北京第 1 版 1998 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 2292 - 3 TE·1909

定价：15.00 元

## 第二版前言

本书是根据中国石油天然气总公司劳资局 1995 年审定的石油技工学校钻采地质专业《矿场地球物理测井》教学计划和教学大纲修编而成。

本次修编除保留了目前现场上仍使用的一些老方法外，还增加了现场上广泛使用的一些新方法。根据审定会要求，在本书中增加了地震勘探的部分基本知识。各校在教学中，可根据本地区使用的测井系列以及学校安排的学时数，对内容进行选择或补充。

本书在修编过程中，华北石油管理局测井公司的曹庆伟、温同礼和物探公司的杨杏娣都给予了极大的帮助，温同礼对全书进行了审核，在此表示衷心感谢。

本书共分五章。第一章由张石固和陆秀云修编，第二章由陆秀云修编，第三、四、五章由宣蓉华修编并统稿、定稿。

由于时间仓促，对书中存在的不足、缺点和错误，请各校师生提出宝贵意见。

修编者  
1997 年 12 月

## 第一版前言

本书根据石油部劳资司 1984 年审定的石油技工学校钻井地质专业《矿场地球物理测井》教学计划和教学大纲编写而成。

目前测井技术在突飞猛进地发展，新技术、新方法、新工艺不断涌现。本书仅介绍几种较常用的测井方法的原理及其测井曲线的定性应用。由于各油田地质特点不一样，选用的测井方法也不完全相同，在教学中，可根据本地区使用的测井系列，以及本校安排的学时数，按照技工学校的标准进行选择、调整或补充。

本书共分四章。第一、三章由陆秀云编写，第二、四章由胜利油田河口技工学校刘丙录编写。

本书在编写过程中，胜利油田河口电测站绘解室的康叔莲同志、胜利油田河口技工学校的赵欠勇同志、胜利油田测井公司测井技校的张洪明同志、四川南充市东观镇技校李全柏同志都给予很大帮助并提出宝贵意见，在此表示感谢。

由于时间仓促，未能广泛征求意见，对书中存在的缺点和错误，希望各校师生提出宝贵意见，以便修订时改正。

编者

1985 年 12 月

# 目 录

绪论.....	(1)
第一章 电法测井.....	(3)
第一节 测井现场和测井原图简介.....	(3)
第二节 岩石的导电性.....	(4)
第三节 普通电阻率测井 .....	(13)
第四节 微电极测井 .....	(26)
第五节 自然电位测井 .....	(30)
第六节 侧向测井 .....	(39)
第七节 感应测井 .....	(46)
复习思考题 .....	(53)
第二章 非电法测井 .....	(55)
第一节 声学基本知识简介 .....	(55)
第二节 声速测井 .....	(57)
第三节 固井声幅测井 .....	(65)
第四节 放射性基本知识 .....	(67)
第五节 自然伽马测井 .....	(71)
第六节 中子测井 .....	(77)
第七节 密度测井 .....	(84)
复习思考题 .....	(87)
第三章 工程测井 .....	(88)
第一节 井径测井 .....	(88)
第二节 井斜测井 .....	(91)
第三节 井温测井 .....	(93)
第四节 流体电阻率测井 .....	(97)
第五节 高分辨率地层倾角测井 .....	(97)
第六节 磁性定位.....	(101)
第七节 生产测井.....	(102)
复习思考题.....	(102)
第四章 测井资料的综合应用.....	(104)
第一节 砂泥岩剖面测井资料解释.....	(104)
第二节 碳酸盐岩剖面测井资料解释.....	(122)

复习思考题..... (125)

第五章 地震勘探知识..... (127)

第一节 地震勘探概述..... (127)

第二节 地震勘探的地质基础..... (130)

第三节 地震勘探资料的解释..... (132)

复习思考题..... (134)

参考文献..... (134)

# 绪 论

在石油勘探和开发中，认识和掌握地下地质情况的方法大致有两种：一是直接法，即通过钻井取心、井壁取心及地质录井方法，对岩样进行直接地观察、描述、分析和鉴定，确定岩层的地质性质（岩层地质性质一般是指岩层的矿物及化学成分、结构、构造和含油、气、水等性质）；二是间接法，即通过对岩层的地球物理性质（指电学性质、声学性质、热学性质及放射性等）的研究，间接地确定岩层的地质性质。后者就是地球物理测井所担负的任务。

岩层的地质性质和地球物理性质之间存在着密切的关系。一定的地质性质会反映出相应的地球物理特性，当岩层的地质性质变化时，其地球物理性质也随之变化。因此，完全能够通过研究岩层地球物理性质的研究，间接地认识岩层的地质性质。

地球物理测井是利用专门的仪器设备，沿钻井井身测量地层的各种地球物理参数的方法。地球物理测井不仅应用在石油勘探和开发中，而且还可用来寻找其它有用矿藏。因此，地球物理测井又称为矿场地球物理测井（简称测井）。

从 40 年代自制的手动电测仪发展到今天的全自动大型数字测井仪，测井工作已经历了半个多世纪的时间，为我国石油工业的发展作出了巨大贡献。50 年代，我国自制的“JD - 581 型多线式自动井下电测仪”投入生产。60 年代又研制了“声、感、侧”新仪器。70 年代，引进了 3600 系列和 85 型计算机。测井系列更加完善，交会图技术广泛应用。进入 80 年代以来，我国陆续引进了 3700 系列、CSU 等数字测井仪器和 PE3220 计算机。90 年代是我国数控测井技术的兴盛时期。电子计算机在测井装备中得到广泛应用，从而解决了测井过程的自动化和测井资料的现场快速直观解释，各种影响因素得到了校正，使测井资料能更加切实地解决更多的地质问题。

岩层有各种地球物理特性，相应的地球物理测井方法有：电法测井、非电法测井和工程测井等。

电法测井包括普通电极系测井、微电极测井、侧向测井、感应测井和自然电位测井。非电法测井包括声波测井和放射性测井。此外还有井径、井温、地层倾角等其它测井方法。

测井时，将下井仪器下入井中，以探测岩层的各种地球物理特性，并以电信号的形式将其测井响应通过连接下井仪器与地面仪器的电缆送至地面，由地面仪器记录下来。同时为了确认地知道电信号所代表的岩层位置，在记录信号的同时，还记录产生电信号的深度。由此可见，探测井下岩层地球物理性质的过程，就是记录代表岩层地球物理性质的电信号及其所在深度的过程。

由于油田地质情况复杂，每种测井方法所获取的资料只是间接地、有条件地反映了地质特点的某一个侧面。所以，要全面地认识和掌握岩层规律，进而发现和研究油气藏，往往必须综合使用几种测井方法。对于一个地区，测井方法的选择必须结合该地区的地质地球物理特点，选择最有效的几种测井方法组成测井系列。对所测得的资料要进行综合分析和判断，结合该井的地质录井资料、本地区的地质地球物理特征等，全面、准确地认识地层。

测井虽然是研究岩层地质性质的间接方法，但它与其它录井方法相比，仍具有重要的优

点。其主要优点是效率高、成本低、效果好，只需要很短时间就能取得大量的测井资料，而且这些资料是在岩层的自然条件下测量的，这就更接近于岩层的真实情况。尽管每种测井方法具有其局限性，但采用多种测井资料的综合解释，仍能解决石油勘探与开发中的一系列问题，其中有些问题是其它录井方法所难以解决的。

目前在油气田勘探与开发中，测井配合其它录井资料所能解决的问题主要有：

详细划分储层，确定岩性，准确地确定储层深度和有效厚度；

定量或半定量估计油层的孔隙度、渗透率和含油气饱和度；

进行地层对比，研究地质构造和地层沉积问题等；

在油田开发中，提供油层动态的部分资料；

研究井下技术情况，如井斜、井径、固井质量等。

在石油勘探过程中，地球物理勘探方法（简称物探）也是很重要的方法。地球物理勘探的方法包括重力、磁力、电法和地震勘探等。地震勘探与其它物探方法相比具有精度高的优点。地震勘探不仅可以查明地下地质构造，提供钻探井位，也可用来研究地层的岩性变化，确定沉积环境等。因此，许多油田和钻井部门都越来越广泛地开始使用地震资料，以便更广泛地进行地质研究。



# 第一章 电 法 测 井

## 第一节 测井现场和测井原图简介

### 一、测井现场简介

目前地球物理测井的一般设施如图 1 - 1 所示。

图 1 - 1 测井现场示意图

#### 1. 下井仪器

下井仪器根据测井项目的需要而定。一般有声—感系列、放射性、双侧向微球、地层倾角、地层测试等下井仪器。

#### 2. 提升系统

提升系统的作用是按测量的需要上提或下放仪器，以及传输供电电流和测量信号。包括：

绞车控制台、滚筒——由电动机控制的上提、下放下井仪器的动力设备。

天滑轮与井口滑轮——用来支承电缆，改变电缆受力方向的滑轮。

马笼头——用以连接下井仪器与电缆各缆芯的接口。

深度编码器——作用是以光电转换的形式完成深度编码，送出能代表测井速度和深度的电信号。

### 3. 测量记录系统

在车载计算机测井系统中，整个测井过程是在系统软、硬件的支持下，由程序控制进行的。大致包括测井前的准备工作、仪器的刻度与检验、测井、取得测井信息和深度信息、测井后的刻度、测井资料和回放和现场处理解释。测井时，下井仪器沿井轴方向不断地采集各种测井信息，经特定的通信线路——电缆传到地面，由下井仪器专用接口，将不同形式的测井信号归纳、处理，转换成电子计算机能识别的信息，送入计算机，计算机处理过的数据同时输出到绘图仪和输出磁带机记录，取得测井曲线图和原始测井数据。在现场可对测井资料进行快速直观解释，对地层做出初步评价。

#### 二、测井原图简介

测井信息和深度信息经计算机处理后输到绘图仪（光学照相记录仪），从而在胶片上或相纸上得到清晰的测井曲线图，称为测井原图。测井原图中包括测井刻度线、测井曲线、深度数据等。深度系统可选 SI 或英制，深度比例有很多种，根据测井项目要求而定。胶片上记录的曲线可划分为 3~4 区段，刻度比例有线性和对数两种，如图 1-2 所示。从图中可以看出左道采用线性刻度，右道采用对数刻

图 1-2 测井原图

度，中间是深度道。测井原图上均带图头，中间深度道上有时还有一条张力线。

## 第二节 岩石的导电性

电法测井是出现最早、应用最广的测井方法，它包括所有以电学性质和电化学性质为基础的测井方法。根据测量参数的不同，可分为电阻率（包括电导率）测井和自然电位测井。

一、岩石电阻率

所有的电阻率测井方法都是建立在各种岩石具有不同的导电性这一基础上的。一种岩石的导电性是指这种岩石传导电流的能力，常用电阻率这一物理量来表示。导电能力差的岩石其电阻率高，而导电能力好的岩石其电阻率低。

由物理学知道，均匀材料所组成的导体，其电阻  $r$  与导体的横截面积  $S$  成反比，与导体的长度  $L$  成正比，可表示为

$$r = R \frac{L}{S} \tag{1-1}$$

式中  $R$  为比例系数，仅与导体的材料性质有关，而与导体的几何形状无关，称为电阻率，单位  $\cdot m$ 。

由式 (1—1) 可以看出，导体的电阻不仅和导体的材料有关，而且和导体的长度、横截面积有关，因此从研究导体性质的角度看，测量电阻这个物理量显然是不确切的。因为相同材料的物质，其长短、粗细不同，则电阻值不同，特别是在测井中遇到的各种地层，它们的厚度变化很大，而同样岩性的地层，由于厚度不同，测出的电阻值也不同。因此，在电阻率测井方法中，不是测量地层电阻的大小，而是测量反映岩层性质的电阻率。

由式 (1—1) 也可以看出，岩石电阻率  $R$ ，数值上等于一个截面垂直于电流方向的、边长为 1m 的立方体岩石的电阻值。当电阻单位用  $\Omega$  时，电阻率的单位为  $\Omega \cdot m$ 。

岩石由于成因不同，其导电方式也不同。大部分火成岩、变质岩十分坚硬、致密，不含地层水，它们主要依靠组成岩石的造岩矿物中的极少数自由电子导电，所以电阻率很高。如果它们含金属矿物，由于金属矿物具有导电的自由电子，岩石电阻率就比较低。这种依靠自由电子导电的方式，称为电子导电。

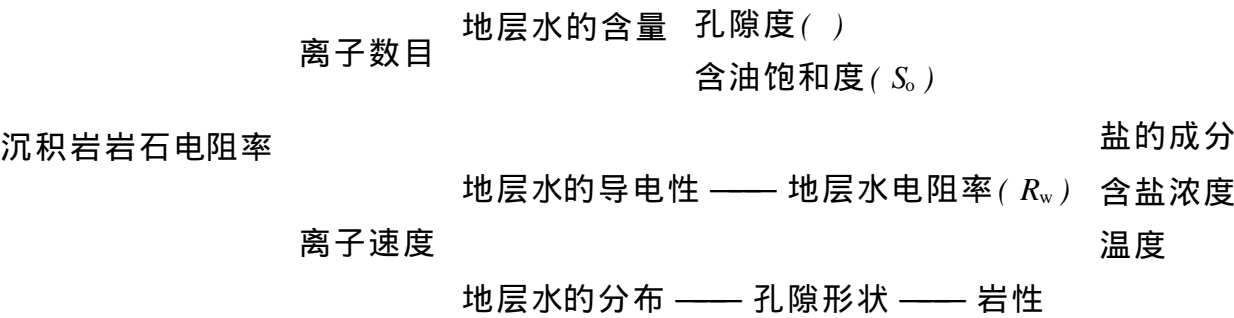
沉积岩的导电方式与火成岩不同，沉积岩中具有一定程度的孔隙和裂缝，并且孔隙和裂缝里都含一定的地层水，而地层水中含有一定盐类，这些盐类呈带电离子状态存在，在外加电场作用下，带电离子做定向运动，这种依靠离子导电的方式称为离子导电。

此外泥质成分也使地层具有导电性，泥质的导电方式与上述不同，泥质导电是一种离子交换过程，即在外电场作用下，吸附在泥质颗粒表面的带电离子依次移动前进，由此形成电荷的定向移动，泥质岩石导电以离子交换方式为主。

一般说来，油气是生成于沉积岩并主要储集在沉积岩中，所以这里只讨论沉积岩岩石电阻率的变化规律。

二、岩石电阻率的影响因素

简单地说，沉积岩的结构是有孔隙的矿物结合体，在孔隙中充满地层水或油气。由于主要的造岩矿物和油气是不导电的，因此沉积岩主要由孔隙中的地层水所含的离子导电。离子导电的能力取决于离子的数目和离子运动的速度。影响岩石电阻率的因素可归纳为：



由此可以看出，影响岩石电阻率的因素主要是：地层水电阻率、孔隙度、含油饱和度和岩性。下面对这些影响因素分别进行讨论。

### 1. 岩石电阻率与地层水电阻率的关系

纯水是不导电的，存在于岩石孔隙中的地层水所以能够导电是由于它溶解了盐类，盐类在水中离解成为正、负离子。在电场作用下，正、负离子分别沿着电场方向和逆着电场方向移动，带着电荷的离子在溶液中定向移动就形成了电流，溶液就成为导体。

在造岩矿物不导电的情况下，岩石的导电作用仅由地层水来实现。实验证明，岩石电阻率与地层水电阻率成正比关系，即地层水电阻率低，岩石电阻率就低，反之则高。

地层水电阻率又与下列因素有关：

盐的化学成分。在油气田的地层水中含有不同的盐类，如  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaCl}_2$  等。由于这些盐类具有不同的电离度，它们的离子又具有不同的离子价和不同的迁移率，因此地层水电阻率不同。电离度大，盐分子离解为离子的百分比大，离子数多，导电性好，地层水电阻率小；离子价高，离子携带的电荷多，地层水电阻率小；离子迁移率大，离子运动快，地层水电阻率小。反之，电离度小、离子价低、离子迁移率小的，地层水电阻率则高。

含盐浓度。一般来说，地层水含盐浓度越大，水中离子数越多，其导电性越好，地层水电阻率就越小。反之，地层水含盐浓度越小，地层水电阻率越高。但是，当地层水含盐浓度特别高时，由于离子之间的相互作用增大，离子迁移率减小，地层水电阻率反而升高。

温度。地层水电阻率随温度的变化而变化。这是由于地层水温度升高，盐类的溶解度增大，从而使地层水中的离子数增加；地层水温度升高，离子移动的摩擦力减小，从而使离子移动的速度加快。所以，温度升高使地层水电阻率降低。

由上述分析可知，地层水电阻率是浓度、温度和盐的化学成分的函数。设地层水电阻率为  $R_w$ ，含盐浓度为  $C$ ，温度为  $T$ ，盐的化学成分为  $P$ ，则

$$R_w = f(C, T, P) \quad (1-2)$$

在研究多因素的函数关系时，往往需要先固定其中某些因素，研究溶液电阻率与浓度和温度的关系时，先固定化学成分这一因素。通常遇到的地层水是以含  $\text{NaCl}$  为主的，可近似看成  $\text{NaCl}$  溶液。我们用实验做出了  $\text{NaCl}$  溶液电阻率与浓度和温度的关系曲线如图 1 - 3 所示。

如果实际地层水含非  $\text{NaCl}$  的盐类极少，则该地层水可视为含  $\text{NaCl}$  溶液，并根据已知地层水的浓度和温度通过图 1 - 3 查得地层水电阻率。

若实际地层水含非  $\text{NaCl}$  的盐类较多，则对溶液矿化度要进行等效校正，即把它换算成含纯  $\text{NaCl}$  溶液的浓度，然后再用等效  $\text{NaCl}$  浓度去查图版，以求得该种地层水的电阻率。

非  $\text{NaCl}$  离子浓度的等效换算是将地层水水样中各种离子的浓度加在一起，为水样的总矿化度，由图 1 - 4 中查得每种离子的换算系数，然后再将各种离子浓度乘以其换算系数后求和，便得到等效  $\text{NaCl}$  浓度。

[例 1 - 1] 某地层水水样化验分析结果见表 1 - 1。

在图 1 - 4 上查得  $\text{Ca}^{2+}$  的换算系数为 0.81， $\text{SO}_4^{2-}$  的换算系数为 0.45，则等效  $\text{NaCl}$  的浓度为

图 1 - 3 NaCl 溶液电阻率与浓度和温度的关系图版

图 1 - 4 不同离子换算系数

表 1 - 1 水样化验分析结果

离子名称	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>
离子矿化度，mg/ L	460	1400	19000
总矿化度，mg/ L	20860		

$460 \times 0.81 + 1400 \times 0.45 + 19000 = 20000$  (mg/ L)

井下地层水的温度一般可以用两种方法求得：一是利用公式计算；二是利用图 1 - 5 直接查得。

[例 1 - 2] 已知起始温度  $t_0 = 15$  ，地温梯度  $G_{DC} = 3.5 / 100\text{m}$ ，求井深为 2650m 处的温度。

计算地层温度的公式为

$$t = t_0 + G_{DC} \times H$$

(1—3)

将数据代入式（1—3）得

$$t = 15 + \frac{3.5}{100} \times 2650 = 107.75( \quad )$$

利用图 1 - 5 可直接查得温度约为 108 。

图 1 - 5 估计地层温度图版

## 2. 岩石电阻率与岩石孔隙度及孔隙形状的关系

在沉积岩中，凡是能够储集油气，并允许油气在其中流动的岩层称为储集层。表征储集层储集性能的物理量之一是孔隙度，由于储集层孔隙空间中含有地层水，致使储集层有导电性。因此，岩石孔隙中地层水的含量、孔隙中油和水的分配比例，决定了岩石电阻率的高低。

当岩石孔隙空间百分之百含水时，孔隙度越大，地层水含量越高，岩石中能移动的离子数越多，岩石电阻率越低。

岩石的孔隙形状（如孔道截面变化程度、孔道弯曲程度、孔隙连通情况等）关系到离子运动的阻力（或速度）和参加运动的离子数，从而影响岩石电阻率。当孔隙空间大，且截面变化程度小、弯曲程度小、孔隙连通情况好，以及水溶液电阻率低时，则岩石电阻率低，反之则高。

通过大量实验资料分析表明，对于给定的岩样，孔隙空间百分之百含水时所测岩石电阻

率  $R_0$  与所含水溶液电阻率  $R_w$  之间有正比关系，即

$$R_0 = F_R \cdot R_w \text{ 或 } F_R = R_0 / R_w \tag{1—4}$$

式中  $F_R$  为比例系数。当岩样不变时，即使  $R_w$  改变， $F_R$  仍为常数，这表明  $F_R$  与水溶液电阻率无关。但改变岩样时， $F_R$  值就要发生变化，可见  $F_R$  只与岩石本身有关。 $F_R$  称为地层因素或相对电阻率。

在双对数坐标中，纵坐标表示地层因素  $F_R$ ，横坐标表示孔隙度  $\phi$ ， $F_R$  与  $\phi$  有近似直线关系，如图 1 - 6 所示。

对于不同岩性岩石进行研究的结果，都得到规律相同的曲线，其直线段可用通式来表达

$$F_R = R_0 / R_w = a' ( \phi^{-m} ) \tag{1—5}$$

式中  $R_0$ ——百分之百含水岩石电阻率；  
 $R_w$ ——地层水电阻率；  
 $a$ ——岩石系数，与岩性有关；  
 $m$ ——胶结指数或孔隙结构指数，随岩石孔隙结构的复杂程度和胶结程度而变化，如表 1 - 2 所示。

图 1 - 6 某油田地层因素与孔隙度

表 1 - 2  $a$ 、 $m$  随岩石孔隙结构和胶结程度的变化关系

名称	疏松砂岩	弱胶结砂岩	中等胶结砂岩	疏松的贝壳石灰岩及白云岩	中等致密的粗晶质石灰岩及白云岩	致密细晶质的石灰岩及白云岩
$a$	1	0.7	0.5	0.55	0.6	0.8
$m$	1.3	1.9	2.2	1.85	2.15	2.3

3. 岩石电阻率与含油气饱和度的关系

含油气饱和度  $S_o$ （岩石中油气体积占孔隙体积的百分数）也影响岩石中地层水含量。因为石油和天然气视为不导电物质，油气进入岩石孔隙时，挤走了同体积的地层水（含油饱和度  $S_o$  与含水饱和度  $S_w$  之和等于 1），使岩石中可导电的离子数目减少，岩石电阻率增高，



当含油气饱和度越高，则孔隙中的地层水含量越少，岩石电阻率越高。但是，即使含油饱和度极高，岩石电阻率也不会无限大，这是由于岩石颗粒表面对水的吸附作用，使岩石颗粒表面有一定量的束缚水存在，从而使岩石具有一定的导电性。

岩石电阻率与含油饱和度之间的定量关系是通过实验研究确定的。选取具有代表性的岩样，首先用水饱和，测出饱和水时的电阻率  $R_0$ ，然后逐渐往岩样中挤入原油，同时测出具有不同含油饱和度时相对应的岩石电阻率  $R_t$ ，在整个测量过程中，保持地层水电阻率不变。

为了消除地层水电阻率的影响，引入参数  $I$ ，称为电阻增大系数，即含油岩石电阻率  $R_t$  与该岩石百分之百含水时电阻率  $R_0$  之比。

$$I = R_t / R_0 \quad (1-6)$$

$R_t$  与  $R_0$  之比，消除了地层水电阻率、孔隙度大小及孔隙形状对电阻增大系数  $I$  的影响。因此，在岩性一定的条件下， $I$  只与含油饱和度有关。将实验室

图 1 - 7 电阻增大系数与含油饱和度的关系曲线

测得的结果用统计方法处理，在双对数坐标系中，以纵坐标表示  $I$ ，横坐标表示  $S_o$ ，即得到它们的关系曲线，如图 1 - 7 所示。

根据图中直线段可写出表达式为

$$I = R_t / R_0 = b' S_w^n = b' (1 - S_o)^n \quad (1-7)$$

式中系数  $b$  和指数  $n$  由岩石的性质决定。

4. 岩石电阻率与岩性的关系

主要岩石和矿物的电阻率如表 1 - 3 所示。

表 1 - 3 主要岩石和矿场的电阻率

岩石名称	电阻率, Ω·m	矿物名称	电阻率, Ω·m
粘土	$1 \sim 2 \times 10^2$	石英	$10^{12} \sim 10^{14}$
页岩	$10 \sim 10^2$	白云母	$4 \times 10^{11}$
泥质页岩	$5 \sim 10^3$	长石	$4 \times 10^{11}$
疏松砂岩	$2 \sim 50$	石油	$10^9 \sim 10^{16}$
致密砂岩	$20 \sim 10^3$	方解石	$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^{12}$
含盐水砂岩	$0.2 \sim 4$	烟煤	$10 \sim 10^4$
含淡水砂岩	$4 \sim 10^3$	无烟煤	$0.0001 \sim 1$
含油气砂岩	$2 \sim 10^3$	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$
贝壳石灰岩	$20 \sim 200$	石墨	$10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$
泥灰岩	$5 \sim 500$	磁铁矿	$10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$
石灰岩	$50 \sim 6000$	黄铁矿	$10^{-4}$
白云岩	$50 \sim 6000$	黄铜矿	$10^{-3}$
玄武岩	$600 \sim 10^5$	—	—
花岗岩	$600 \sim 10^5$		

由表中可以看出，金属矿物电阻率极低，主要造岩矿物（如石英、长石、云母、方解石等）电阻率都很高，它们几乎都是不导电的。尽管不同矿物组成的岩石骨架都是不导电的（粘土和导电矿物除外），但是，不同类型的岩石由于矿物成分不同，沉积条件不同，从而具有不同的岩石结构（如岩石颗粒粗细、颗粒形状、胶结物成分、胶结类型等），以致岩石孔隙度、孔隙形状甚至含油气饱和度都不相同，岩石电阻率变化范围也不相同。而同种类型的岩石由于具有相同的岩石结构，在导电性上有许多共同的特点。下面讨论各种常见岩石在电阻率上的反映。

（1）砂泥质岩石 这类岩石主要包括碎屑岩类和粘土岩类。

碎屑岩主要由碎屑物质（包括矿物碎屑和岩石碎屑）和胶结物组成。由于这类岩石的孔隙是由碎屑的几何形状及成岩过程中胶结不紧密等原因产生，因此孔隙形状比较简单、规则。砂岩的电阻率由几个欧姆米至上千欧姆米。颗粒组、分选性差的砂岩、胶结程度高的致密砂岩、含油气饱和度高及含淡水的砂岩，其电阻率高。碎屑岩的胶结物不同，其电阻率不同。泥质（粘土质）胶结的砂岩较钙质、硅质、铁质胶结的砂岩电阻率低。

砂层的电阻率较砂岩小，地层水矿化度很高的砂层其电阻率可小到十分之几欧姆米，含淡水的砂层其电阻率可达几十至几百欧姆米。

砾岩由于其分选性较差以及孔隙多为胶结物充填，电阻率较砂岩高，一般在几十欧姆米，最高可超过 1000 Ω·m。

粘土、泥岩的电阻率比较低而稳定，这是因为粘土颗粒很细，绝对孔隙度大，并且粘土颗粒还具有负表面电荷，而负表面电荷从溶液中吸引的一部分可动的正离子在电场作用下将相继交换位置，沿粘土颗粒表面移动形成电流，从而增加了岩石的导电性。这种增加的导电

性，称为附加导电性。同时岩石颗粒细，特别在地层水矿化度比较低的情况下，有一部分矿物水解，使溶液中离子数目增加，也使岩石电阻率降低。又因为粘土颗粒的表面电荷量基本相同，岩性稳定，所以粘土、泥岩的导电性比较稳定，电阻率变化范围比较小。页岩比粘土、泥岩致密，电阻率要高些。油页岩电阻率则更高些。当砂岩或砾岩含泥质时，由于泥质的附加导电性，一般将使岩层电阻率有所降低。泥质砂岩电阻率可能低到  $2.5 \cdot \Omega \cdot \text{m}$ 。对于一个具体地区的具体井段，要通过实践总结出岩电关系，然后利用这种关系并根据电阻率特点判断岩性。一般说来，当地层水矿化度较低时，砂岩电阻率大于泥岩电阻率，泥质砂岩电阻率居于其中，当地层水矿化度很高时，砂岩电阻率有可能低于泥岩电阻率。

总之，岩石的矿物成分、粒度、胶结物的差别，是岩石电阻率不同的主要原因。因此，根据岩石电阻率的大小能判断岩石的岩性。

(2) 碳酸盐岩 碳酸盐岩主要由方解石和白云石组成，主要矿物成分比较简单，但碳酸盐岩的成因却十分复杂，即有机械沉积成因的，也有生物和化学沉积成因的。但一般说来，碳酸盐岩的原生孔隙度很小，岩石电阻率较高。致密的石灰岩、白云岩的电阻率可高达五、六千欧姆米。碳酸盐岩岩层由于外界原因可能形成溶洞或裂缝等次生孔隙，使岩层电阻率降低。碳酸盐岩含泥质会降低岩层电阻率的数值，如泥灰岩的电阻率就较低。由于电阻率不能反映碳酸盐岩的成分，因而不能把石灰岩和白云岩区分开。

孔隙性石灰岩（如生物灰岩、鲕粒灰岩、碎屑石灰岩等）的岩石结构与砂岩相似，电阻率特征也和砂岩相似。

(3) 膏盐岩层 膏盐岩层是一种纯化学成因的岩层，由于蒸发作用沉淀而成。这类岩石的孔隙度极小。例如：石膏的孔隙度只有 1%，盐岩只有在溶解状态下正、负离子才能导电，石膏中所含的结晶水不能离解成离子，因此这类岩石电阻率很高。

综上所述，岩石电阻率是岩性、物性、含油性和水性的综合反映。一般地说岩石电阻率判断岩性具有多解性，但在特定条件下，利用岩石电阻率是有可能判断岩性的。方法是：对特定地区、特定层段，根据统计建立岩电关系，然后利用它判断岩性；结合第一性资料，使用各种可能的测井资料作综合解释。

### 第三节 普通电阻率测井

要想利用岩石的导电性来解决油气勘探中的有关问题，就必须设法对埋藏在地下深处的地层电阻率进行测量。

#### 一、测量原理

埋藏在地下深处的岩层，其电阻率是一个既不能直接观察、又不能直接测量的物理量，只能采用间接测量的方法。为了认识普通电阻率测井原理，我们可以从实验测量岩样电阻率的方法中得到启示。

##### 1. 岩样电阻率的测量

实验室中常用“四极法”测定岩石电阻率。取一块钻井取心样品，磨制成圆柱状岩样，两端面连接金属板 A、B，中间任意两点 M、N 为测量电极，如图 1 - 8 所示。

由 A、B 供电，电流强度为  $I$ ，单位 mA；由 M、N 测量，电位差为  $V_{MN}$ ，单位为 mV；M、N 之间的距离为  $L$ ，单位为 m；圆柱体截面积为  $S$ ，单位为  $\text{m}^2$ 。根据式 (1—1) 得到

图 1 - 8 测量岩样电阻率的原理图

$$R = r \cdot \frac{S}{L} = \frac{V_{MN}}{I} \cdot \frac{S}{L}$$

为了测量、计算的方便，使每个岩样的  
 $L$ 、 $S$  相同，则：

图 1 - 9 均匀介质中的电阻率测量

$$R = j \cdot V_{MN} / I \tag{1—8}$$

式中  $j$ ——由岩心几何尺寸决定的比例系数， $j = S / L$ 。

2. 无限均匀介质电阻率的测量

上述岩样电阻率的测量原理具有普遍性。测量任何物质的电阻率都离不开供电造成的人工电场，否则就不能激发物质的导电特性；也离不开电场中某两点电位差的测量，否则就不知道物质的导电特性。

若被测量对象是一无限（体积很大）均匀（各点导电性相同）的导电介质（简称均匀介质），其电阻率为  $R_t$ ，就可以采用图 1 - 9 所示的原理线路进行测量。

图中各电极的作用和图 1 - 8 中相同。放在均匀介质中的电极 A、M、N 称为电极系，B 电极离电极系很远，可视为无限远。

在均匀介质中，从 A 电极流出的电荷（或称电流线）是呈放射状均匀分布的，如图 1 - 10 所示。

图 1 - 10 均匀介  
质中 A 电极电  
流  
线分布示意

以 A 为球心的任何球面都是等电位面，电极 M 和 N 之间的电位差就是 M 和 N 电极所在的两个等电位面的电位之差。为了计算这个电位

差，我们在 M、N 电极间作许多个以 A 为球心的球面，并使相邻球面间的距离非常小，如图 1 - 11 所示。

设这些球面的半径分别为  $r_1$ 、 $r_2$ 、...  $r_n$ ，各球面的电位分别为  $V_1$ 、 $V_2$ 、...  $V_n$ ，这时 M、N 间的电位差等于各相邻球面的电位差之和。

$$\begin{aligned} V_{MN} &= V_M - V_N \\ &= (V_M - V_1) + (V_1 - V_2) + \dots + (V_n - V_N) \end{aligned} \tag{1—9}$$

相邻球面的电位差可由通过两球面的电流强度与两球面间的电阻乘积来确定，例如：

$$V_M - V_1 = I \cdot R_t \frac{r}{S}$$

式中  $r$ ——两球面间的距离，即  $r_1 - \overline{AM}$ ；

$S$ ——两球面间的平均面积， $S = 4 \left( \frac{r_1 + \overline{AM}}{2} \right)^2$ 。

因两球面间的距离很小，可认为  $\left( \frac{r_1 + \overline{AM}}{2} \right)^2 = r_1 \cdot \overline{AM}$ ，  
于是可求得

图 1 - 11 均匀介质中电位的计算

$$V_M - V_1 = I \cdot R_t \frac{r_1 - \overline{AM}}{4 \cdot r_1 \cdot \overline{AM}} = \frac{I \cdot R_t}{4} \left( \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{r_1} \right)$$

同理可以算出

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= \frac{I \cdot R_t}{4} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ &\dots \dots \\ V_n - V_N &= \frac{I \cdot R_t}{4} \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{\overline{AN}} \right) \end{aligned}$$

将这些式子代入式（1—9）

$$\begin{aligned} V_{NM} &= V_M - V_N \\ &= \frac{I \cdot R_t}{4} \left( \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{r_1} \right) + \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \dots + \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{\overline{AN}} \right) \\ &= \frac{I \cdot R_t}{4} \left( \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{AN}} \right) \\ &= \frac{I \cdot R_t}{4} \cdot \frac{\overline{MN}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}} \end{aligned}$$

$$R_t = \frac{4 \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{V_{MN}}{I}$$

设  $4 \cdot \overline{AM} \cdot \overline{AN} / \overline{MN} = k$

则  $R_t = k \cdot V_{MN} / I$  (1—10)

式中  $k$ ——电极系数，仅与电极间的相互距离有关，m。

式（1—10）是在均匀介质中测量电阻率的计算公式，测量时  $k$  为已知，根据测量的

$V_{MN}$ 和供电电流强度  $I$ ,  $R_t$  就可以求得。

### 3. 非均匀介质电阻率的测量

实际测井时, 电极系放入充满泥浆的井中, 井周围介质不是均匀介质。从纵向上看, 目的层和围岩电阻率不同; 从横向上看, 井中充满泥浆。在钻井过程中, 为了防止井喷, 泥浆柱的压力总是稍大于地层压力, 此压力差驱使泥浆滤液向渗透性地层渗透, 泥浆中的固体颗粒逐渐滤积下来粘附在井壁上形成泥饼, 泥饼电阻率用  $R_{mc}$ 表示; 在泥浆滤液向地层渗透的过程中, 井壁附近的岩石孔隙受到泥浆滤液的强烈冲洗, 原来孔隙中可以移动的油、气、水全部被赶走, 这一地带称为冲洗带, 电阻率用  $R_{xo}$ 表示; 离井壁越远, 泥浆滤液越少, 一直到没有泥浆侵入, 这一地带称为过渡带。过渡带和冲洗带统称为侵入带, 其电阻率用  $R_i$  表示。没有泥浆侵入的地层称为原状地层, 电阻率用  $R_t$  表示, 如图 1 - 12 所示。

图 1 - 12 实际测井条件下电极系周围的介质

在这样的条件下, 电流分布是很复杂的, 它受图中所示各种因素的影响, 因此测得的  $V_{MN}$ 是电极系周围各种介质对电场影响的综合结果, 将测得的  $V_{MN}$ 、 $I$  和电极系系数  $k$  代入式 (1—10) 求得的电

阻率称为地层的视电阻率, 用式表示为

$$R_a = k \cdot V_{MN} / I \quad (1-11)$$

从式 (1—11) 可以看出, 只要保持下井电流强度  $I$  不变和  $k$  值不变,  $R_a$  正比于  $V_{MN}$ 。

## 二、电极系

测井时放入井中的那一组电极 (包括供电电极和测量电极) 称为电极系。电极系由三个电极组成: 用途相同 (供电或测量) 的两个电极称为成对电极; 其余的一个和地面电极在同一路 (供电或测量) 中的称为不成对电极。通常用 A、B 表示两个供电电极, 用 M、N 表示两个测量电极。三个电极的排列顺序、相互间的距离及其用途可以根据需要进行组合。

### 1. 电极系的分类

根据电极相对位置的不同, 电极系可以分为梯度电极系和电位电极系两大类, 如图 1 - 13 所示。

(1) 梯度电极系 成对电极间的距离小于不成对电极到靠近它的一个成对电极间距离的电极系称为梯度电极系。

梯度电极系根据成对电极与不成对电极的排列顺序又分为: 底部 (正装) 梯度电极系即成对电极在不成对电极之下的梯度电极系; 顶部 (倒装) 梯度电极系即成对电极在不成对电极之上的梯度电极系。依供电电极的个数, 它们又可分为单极供电和双极供电。单极供电和

图 1 - 13 电极系示意图

双极供电可以互换，其测井曲线形状不变。而底部梯度电极系和顶部梯度电极系测井曲线互为倒置。

(2) 电位电极系 成对电极间的距离大于不成对电极到靠近它的一个成对电极间距离的电极系称为电位电极系。如同梯度电极系一样，电位电极系也有正装、倒装和单极、双极供电之分，如图 1 - 13 所示。

## 2. 记录点、电极距及探测范围

由于电极系具有一定的长度，进行测井时测得的视电阻率算哪一个深度的呢？为此，必须在电极系上规定一个记录点。记录点是表示电极系在井内的深度位置（用“O”表示）。电极系在井中的深度从记录点算起，当电极系在井中某一位置时，认为电极系所测得的视电阻率是记录点所在深度的介质的视电阻率。这样说并不意味着所得视电阻率仅受这一点有关因素的影响，它仍然是电极系周围介质导电性的综合反映。

经研究，梯度电极系的记录点，定在成对电极的中点，如图 1 - 13 所示。这样规定梯度电极系的记录点，对于底部梯度电极系的视电阻率曲线在高阻岩层底界面附近出现极大值，在高阻层顶界面附近出现极小值。而顶部梯度电极系测井曲线则相反。

电位电极系的记录点，规定为  $\overline{AM}$  的中点，如图 1 - 13 所示。这样规定电位电极系的记录点，视电阻率曲线对于岩层中点来说，上下是对称的。

电极距，它是用来表示电极系长度的，用“ $L$ ”表示。梯度电极系的电极距是记录点到不成对电极的距离，如图 1 - 13 所示；电位电极系的电极距是 A 到 M 电极间的距离，见图 1 - 13。

电极系的探测范围，是指电极系的测量结果主要受这一范围内介质影响，如果这一范围内介质对  $R_a$  的贡献占 50% 以上时，此范围即称为该电极系的探测范围。其半径为探测半径。对梯度电极系来说，探测半径约为  $2L$ ，对于电位电极系来说，探测半径为  $2L$ 。因此随着电极距的增大，探测范围也增大，如图 1 - 14 所示。

图 1 - 14a 中，电极距很小，测量结果主要受井内泥浆的影响；图 1 - 14b 中，电极距增大，测量结果受泥饼、侵入带影响，泥浆影响相对降低；图 1 - 14c 中，电极距进一步增大，除受泥饼、侵入带一定影响外，原状地层的影响明显增大，而泥浆的影响则显著减小。由此

图 1 - 14 电极距越长探测范围越深

可见，随探测范围的增大，原状地层的影响成为主要的。

### 3. 电极系的表示方法：

电极系的表示方法一般有两种：一是图示法，在一条纵线上标出电极的位置、符号，并注上相邻电极间的距离（m）；另一种是符号法，以电极在井内自上而下的顺序，从左至右依次写上电极的符号和其间的距离，如图 1 - 13 所示。

对于梯度电极系可根据电极距的大小分为短电极和长电极，短电极即电极距小于或等于 1m 的电极系，成对电极的距离为 0.1m；长电极即电极距大于或等于 2.5m 的电极系，成对电极间距离为 0.5m。

### 三、视电阻率曲线

测井时，将电极系放入井下，在上提过程中测量，记录一条  $V_{MN}$  随井深变化的曲线，称为视电阻率曲线。视电阻率测井曲线的横向比例（记录比例）表示横坐标上每 1cm 代表的电阻率值，常用的横向比例是  $2 \cdot m/\text{cm}$  和  $10 \cdot m/\text{cm}$ 。

视电阻率曲线的纵向比例即深度比例，表示纵坐标上 1cm 代表的地层厚度，常用的深度比例是 1/200 或 1/500，即纵向 1cm 代表地层厚度 2m 或 5m。

在井剖面上，高电阻率地层与低电阻率地层是相对而言的。由于一般情况下，油、气层的电阻率高于围岩，所以我们主要讨论底部梯度电极系和电位电极系在高阻层的测井曲线。图 1 - 15、图 1 - 16 为在模型中用底部梯度电极系和电位电极系测得的视电阻率曲线。各曲线所对应的条件（包括地层电阻率、厚度、电极系类型、电极距等）如图中所注。

为了掌握这些曲线特点，下面讨论曲线变化的原因。

#### 1. 底部梯度电极系在高阻层的测井曲线

对于梯度电极系，电极 M、N 间的电位差可视为 M、N 电极间泥浆的电阻与通过这一电阻的电流强度的乘积（即  $V_{MN} = I_{MN} \cdot r_{MN}$ ）。而 M、N 间的电阻由泥浆电阻率  $R_m$  和井径决定，一般可近似认为不变，因此，讨论梯度电极系测井曲线如何变化时，只要看通过 M、N 电极的电流值是如何变化的即可。下面分厚层和薄层两种情况分别讨论。

（1）厚层（ $h > L$ ） 如图 1 - 17 所示。



图 1 - 15 底部梯度电极系在高阻层的视电阻率曲线

图 1 - 16 电位电极系在高阻层的视电阻率曲线

设  $R_m = R_s$ ，电极系逐渐由下向上移动，当电极系距高阻层较远时，高阻层在探测范围之外，对供电电流的分布基本上没有影响，A 电极的电流线呈放射状分布，电极系如同在均匀介质中， $R_a = R_s$ ，见图 1 - 17 中 1 以下部分。

随着电极系继续向上移动，电极系逐渐靠近高阻层，A 电极发出的电流受到高阻层的屏蔽，电流线发生向下弯曲，流过 M、N 的电流增加， $R_a$  增大。电极系越靠近高阻层，高阻层对电流的排斥作用越大，流过 M、N 的电流迅速增大， $R_a$  上升很快，如图 1 - 17 中 2、3 部分。

当电极系进入高阻层，N 电极刚刚到达高阻层底界时，记录点“O”在 N 电极上方 MN 2 处，曲线出现极大值。这是由于 A 电极发出的电流受到上部高阻厚层的排斥及屏蔽作用，同时下部低阻围岩的吸引作用较大，使得流过 M、N 的电流最大，如图 1 - 17 中位置 4。

电极系继续向上移动，A 电极上方高阻层厚度减小，下方高阻层厚度增大，同时低阻围岩的吸引作用减小，A 电极发出的电流向下流的减少，流过 M、N 的电流减少。当电极系到达高阻层中部，由于 A 电极上下方高阻层的厚度相差不多，上下低阻围岩对 A 电极发出的电流几乎没有影响，电极上移，流过 M、N 的电流没有什么变化， $R_a$  曲线比较平缓，如图 1 - 17 中位置 5。

当电极系继续上移，A 电极越来越靠近高阻层顶界面，A 电极发出的电流受到下部高阻厚度的排斥以及上部低阻围岩的吸引，流过 M、N 的电流迅速减少， $R_a$  降低，如图 1 - 17 中位置 6。

电极系继续上移，当 N 电极到达高阻层顶界面时，A 电极已处于低阻围岩中，A 电极发出的电流受到高阻层的排斥和低阻围岩吸引，电流线向上发生弯曲，流过 M、N 的电流最少， $R_a$  比  $R_s$  还要小，出现极小值，如图 1 - 17 中位置 7。

当电极系离高阻层越来越远，A 电极发出的电流受到高阻层的排斥作用越来越小，流过 M、N 的电流逐渐增加， $R_a$  渐渐升高，如图 1 - 17 中位置 8。当电极系远离高阻层，电极系又处在  $R_m = R_s$  的均匀介质中， $R_a = R_s$ ，如图 1 - 17 中位置 9。

(2) 薄层 ( $h < L$ ) 如图 1 - 18 所示为底部梯度电极系在高阻薄层的测井曲线。它与高阻厚层的曲线相比，最大的差别是：在高阻层下方距底界面一个电极距处出现一个“假极大”值，其次是极小值从顶界面附近略向上移动。下面讨论曲线形成过程。

当电极系由下向上移动，电极系离高阻层很远时，高阻层对 A 电极发出的电流不产生影响，A 电极的电流呈均匀放射状分布， $R_a = R_s$ ，如图 1 - 18 中 1 以下部分。

电极系上提，A 电极逐渐靠近高阻层，A 电极发出的电流受到高阻层的屏蔽，电流线向下弯曲，流过 M、N 的电流增加， $R_a$  升高。当 A 电极到达高阻层底界面时，流过 M、N 的电流最大；当 A 电极再向上移

图 1 - 17 高阻厚层底部梯度电极系  
测井曲线说明图

动，A 电极发出的电流由于受到上部低阻围岩吸引，流过 M、N 的电流开始减少，如图中 1 - 18 位置 2。

电极系继续上移，流过 M、N 的电流继续减少，当 A 电极到高阻薄层的顶界面，高阻薄层对 A 电极发出的电流向上排斥，进入井中的电流向下通过高阻层后迅速分散，此时流过 M、N 的电流最少， $R_a < R_s$ ，如图 1 - 18 中位置 3。

电极系继续上移，M、N 越来越靠近高阻薄层底界面，井中电流虽少，但由于井眼的约束作用，使流过 M、N 的电流增大，当 N 电极到达高阻薄层底界面时，流过 M、N 的电流最大， $R_a$  曲线出现极大值，如图 1 - 18 中位置 4。电流线的分布如图 1 - 18c 所示。

电极系继续上提，A 电极离高阻层越远，A 电极发出的电流进入井中的越少， $R_a$  下降，如图 1 - 18 中位置 5。电流线分布如图 1 - 18b 所示。

当 N 电极离开高阻薄层顶界面，由于电流线在高阻薄层上方呈葫芦状分布，如图 1 - 18a 所示。此时电流线密度最稀，流过 M、N 的电流最少，曲线出现极小值，如图 1 - 18 中位置 6。

图 1 - 18 高阻薄层底部梯度电极系测井曲线说明图

电极系继续上提，受高阻层的影响越来越小， $R_a$  慢慢上升，电极系远离高阻层时，A 电极发出的电流又呈放射状分布， $R_a = R_s$ ，如图 1 - 18 中位置 7。

通过以上讨论，可以总结出底部梯度电极系在高阻层测井曲线的形状特点是：

对着高阻层，视电阻率升高，但曲线不对称于地层中点。高阻层顶界面、底界面分别在极小值、极大值以下  $\overline{MN}/2$  处。

对于厚层，地层中部附近曲线出现平直段或变化平缓，随地层减薄平直段缩短直至消失。该处的视电阻率值最接近于地层的真电阻率。

对于薄层，在高阻层底界面以下一个电极距处，在视电阻率曲线上出现一个“假极大”值，极小值也比厚层略向上移动。

利用这些特点，我们可以把井剖面上的高阻层划分出来，但对于薄层，利用极小值不能准确地确定其顶界面。另外还要注意距离高阻薄层底界面一个电极距处出现第二个极大值，它是高阻层对电流的屏蔽作用产生的，不要误认为此处也有高阻层存在。

## 2. 电位电极系在高阻层的测井曲线

图 1 - 19 是倒装电位电极系在高阻厚层中的视电阻率曲线。

对于电位电极系来说，当  $I$  和  $k$  值不变时，测得的视电阻率与  $V_{MN}$  成正比，M、N 间的电位差可视为从 A 电极发出流经 M 电极到 N 电极的电流值  $I_{MN}$  和 M、N 电极间这个电流所经电阻  $r_{MN}$  的乘积。由于电位电极系的 M、N 电极间的距离很远，而距 M 越远截面越大，电阻越小，因此 M 电极与 N 电极间的电阻值主要部分在 M 上方附近，M 与 N 间的电位降也主要发生在这一部分。从 A 电极流往 M 电极的电流越多，M 上方附近介质电阻率的平均

值（用  $\overline{R}$  表示）越大， $V_{MN}$  就越大，反之则  $V_{MN}$  减小；若二者之中一个增大，另一个减小， $V_{MN}$  的变化趋势则主要取决于变化较大的那个数值，变化大的量是增大， $V_{MN}$  增大，反之则减小。

设倒装电位电极系由下向上移动。为了看图方便，图 1 - 19 中没有画出 N 电极。当电极系距高阻层底界面较远时，电流线呈放射状分布，流过 M 电极的电流与在均匀介质时流向 M 方向的电流一样。M 电极附近介质电阻率的平均值  $\overline{R}$  等于  $R_s$ ，所以  $R_a = R_s$ ，如图 1 - 19 中位置 1 以下部分。

电极系上移，由于高阻层的排斥  $I_{MN}$  下降，但由于接近高阻层， $\overline{R}$  的升高是主要的，所以  $R_a$  升高，如图 1 - 19 中位置 2。

当 M 电极移到高阻层底界面时，A 电极发出的电流线被排斥向下，但由于高阻层对井眼中电流线的约束作用，使  $I_{MN}$  开始升高， $\overline{R}$  也升高，所以  $R_a$  升高，如图 1 - 19 中位置 3。

图 1 - 19 倒装电位电极系在高阻厚层测井曲线

极到达高阻层底界面， $\overline{R}$  最大， $I_{MN}$  也逐渐增大，所以  $R_a$  继续升高，如图 1 - 19 中位置 4。到地层中部， $I_{MN}$  逐渐增大， $\overline{R}$  变化很小，所以地层中部  $R_a$  出现最大值，如图 1 - 19 中位置 5。

过了地层中部， $R_a$  决定于  $\overline{R}$ ， $I_{MN}$  虽然不断增大，但  $\overline{R}$  迅速减小，视电阻率不断下降，如图 1 - 19 中位置 6。

当 M 电极离开高阻层顶界面后， $\overline{R}$  不再变化， $\overline{R} = R_s$ ，但流向上方的电流线却因失去高阻层的“约束”作用而分散，从而使  $I_{MN}$  下降， $R_a$  继续下降，如图 1 - 19 中位置 7。

A 电极离开高阻层顶界面后，离高阻层越远，高阻层对 A 电极的作用越小，流向上方的  $I_{MN}$  越小， $R_a$  继续降低，直到电极系远离高阻层，高阻层对电流的作用消失，电流线又呈放射状分布，此时  $\overline{R} = R_s$ ， $R_a = R_s$ ，如图 1 - 19 中位置 8。

由此可见，电位电极系在高阻层测井曲线的特点是：

正对高阻层处，视电阻率增大，曲线对称于地层中点。

对于厚层，地层中部有最大值，地层厚度越大，极大值越接近地层真电阻率。

曲线变化转折点向上（向下） $\overline{AM}/2$ ，即为高阻层的顶界面（底界面）。

对于高阻薄层，电位电极系的测井曲线特征是：对着高阻层处  $R_a$  降低，极小点正对高

阻层中部，曲线仍然对称于地层中心，见图 1 - 16。我们一般使用小电极距的电位电极系，使其不出现薄层情况。

3. 视电阻率曲线的影响因素

从前面视电阻率曲线特点的讨论中可以看出，视电阻率不仅与地层电阻率有关，而且也受地层厚度的影响。另外视电阻率曲线还受泥浆电阻率，井径、电极距等因素影响。

(1) 不同泥浆电阻率的视电阻率曲线 图 1 - 20 为不同泥浆电阻率条件下，测量的视电阻率曲线。当  $R_t = 10R_m$ 、 $h = 4d$ 、 $\overline{AO} = 2d$  时，由图中可以看出，当  $R_t/R_m = 10$  时，视电阻率曲线有清楚的显示，当泥浆电阻率降低， $R_t/R_m = 100$  时，曲线变得平缓，极大值急剧下降。这主要是泥浆电阻率相对地层电阻率太低时，A 电极电流受到泥浆分流影响严重，从而不能很好反映地层电阻率的变化。而井径的影响，归根结底是由于井内泥浆的影响，井径扩大，低阻泥浆使视电阻率值降低。关于电极距对视电阻率的影响，从电极距与探测范围的关系可知，电极距大，探测范围大；反之；则探测范围小。因此不同电极距对同一岩层测得的视电阻率曲线也不同。

图 1 - 20 不同泥浆电阻率的视电阻率曲线

1 -  $R_1 = R_2 = R_m = 0.1 R_t$

2 -  $R_m = 0.1 R_1 = 0.1 R_2 = 0.01 R_t$

(2) 高阻邻层的屏蔽影响 在实际的井剖面中，往往不只存在一个高阻层，如果有几个高阻层和低阻层交互出现，各高阻层之间的距离与电极距比较起来又不太大，这时任一高阻层的视电阻率曲线都要受邻近高阻层的影响，这种影响为屏蔽影响。下面以底部梯度电极系为例说明高阻邻层的影响。

图 1 - 21 是高阻邻层对视电阻率曲线产生屏蔽影响的示意图。

若电极距大于间互层（两个相邻的高阻层夹低阻层称为间互层）的总厚度，如图 1 - 21a 所示，当记录点位于下方的高阻层时，上部的高阻层正好把 A 电极与记录点分开，由于上部高阻层对 A 电极发出电流的排斥，流向 M、N 的电流减小，于是  $R_a$  下降（使  $R_a$  低于该高阻层单独存在时的数值），形成减值屏蔽。反之，若电极距小于间互层总厚度，如图 1 - 21b 所示，当记录点位于下方的高阻层时，A 电极正位于上部高阻层的下方，由于上部高阻层对 A 电极发出电流的排斥作用，使流向 M、N 的电流增大，于是  $R_a$  升高，形成增值屏蔽。显然屏蔽影响的大小与屏蔽层的厚度、电阻率大小和距离远近等有关。屏蔽层越厚、电阻率越高、距离越近，屏蔽影响就越大。图 1 - 22 是受屏蔽影响的视电阻率曲线实例。

图 1 - 21 高阻邻层对视电阻率曲线的屏蔽影响

从图 1 - 22 中可以看出：在 2.5m 底部梯度电极系的视电阻率曲线上，下部的两个油

图 1 - 22 受屏蔽影响的视电阻率曲线实例

层，由于上部高阻邻层的增值屏蔽影响，曲线幅度升高；在 8m 底部梯度电极系的视电阻率曲线上，下部的两个油层由于受上部高阻邻层的减值屏蔽影响，曲线幅度降低。

因此，在分析视电阻率曲线时，要考虑电极距的大小、地层厚度以及高阻邻层的位置等因素对视电阻率曲线的影响。

#### 四、视电阻率曲线的应用

视电阻率曲线主要用于划分岩层界面，确定岩性及定性判断油、水层。

##### 1. 划分岩层界面

利用底部梯度电极系视电阻率曲线划分岩层界面的原则是：高阻层顶界面（底界面）位于视电阻率曲线极小值（极大值）以下  $\overline{MN}/2$  处。地层比较薄时，顶界面划分不准。在实际生产中常以  $R_a$  曲线的极小值、极大值划分高阻层的顶、底界面，通常选用短电极系测井曲线划分岩层界面，因其电极距短，受围岩影响小。同理也可应用顶部梯度电极系视电阻率曲线划分岩层界面。

对于电位电极系测井曲线则从转折点向上、向下各  $\overline{AM}/2$  处为岩层的顶、底界面。实际生产中，由于  $\overline{AM}/2$  数值很小，习惯选择曲线幅度的半幅点为岩层界面。

在井剖面中，高阻层、低阻层是相对的，当确定了高阻层的顶底界面，低阻层的界面也就确定了。

##### 2. 判断岩性

利用视电阻率曲线判断岩性，必须重视岩心、岩屑录井等第一性资料。一般是把视电阻率曲线与岩心进行对比，通过总结建立起岩性与电性关系，进而利用这些规律去指导岩性的判断。

在砂泥岩剖面中，利用视电阻率曲线判断岩性是比较成功的。一般说来，当地层水含盐

浓度不是很大时，砂岩的电阻率大于泥岩的电阻率，粉砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩电阻率介于它们之间。图 1 - 23 是砂泥岩剖面视电阻率曲线实例。

在碳酸盐岩剖面中，由于石灰岩、白云岩的电阻率都非常大，使井（泥浆）的分流作用严重，因此用视电阻率曲线不能很好地反映岩层电阻率的变化。而且石灰岩和白云岩的电阻率又基本相同，所以也不能利用视电阻率曲线划分其岩层界面。图 1 - 24 是碳酸盐岩剖面实测曲线实例。

图 1 - 23 砂泥岩剖面视电阻率曲线实例

图 1 - 24 碳酸盐岩剖面视电阻率曲线实例

在膏盐岩剖面中，盐岩、石膏、硬石膏等电阻率都很高。但盐岩被钻开后，由于泥浆对盐岩的溶解，使盐岩处的井径扩大，这时井（泥浆）的影响增大，使视电阻率曲线降低，在这种剖面中，判断岩性时参考井径曲线是非常有利的。目前声波时差曲线对无水石膏和盐岩层的划分较为有利。

### 3. 地层对比和定性判断油、水层

这里介绍探测深度不同的两条视电阻率曲线定性判断油、水层的方法。

前面已经讲到，渗透性地层都有泥浆的侵入，通常把渗透层的泥浆侵入特性归纳为两种典型的侵入剖面：高侵剖面（增阻侵入）和低侵剖面（减阻侵入）。用淡水泥浆钻井的水层（ $R_{mf} \approx R_w$ ）一般具有典型的高侵剖面（ $R_{xo}$ 明显大于  $R_t$ ），如图 1 - 25a 所示。

部分具有高矿化度地层水的油气层也可能有高侵剖面，但  $R_{xo}$  和  $R_t$  的差别比相应的水

图 1 - 25 储集层侵入特性示意图

层要小。过渡带为渐变过程。一般油气层具有典型的低侵剖面 ( $R_{xo}$  明显小于  $R_t$ )，如图 1 - 25b 所示。部分水层 ( $R_{mf} < R_w$ ) 也可能形成低侵剖面，但  $R_{xo}$  与  $R_t$  的差别比相应的油气层要小。同样，其过渡带也是渐变的。

0.45m 底部梯度电极系和 4m 底部梯度电极系，由于电极距不同，探测深度也不同，一般认为 0.45m 底部梯度电极系视电阻率曲线主要探测侵入带的电阻率，而 4m 底部梯度电极系测得的视电阻率曲线主要反映地层真电阻率。所以，对于同一储集层，如果 0.45m 底部梯度电极系测井曲线幅度高于 4m 底部梯度电极系测井曲线幅度，该层可能为水层，反之，则可能是油气层。

## 第四节 微电极测井

一种利用特制的短电极系贴附井壁，测量井壁附近的岩层电阻率的测井方法称为微电极测井。微电极测井是在普通电阻率测井的基础上发展起来的。这主要是由于普通电阻率测井在应用上存在这样的问题：第一，普通电极系的视电阻率曲线能够明显地划分井剖面上的高阻层，但是有高阻显示的地层，可能是孔隙性、渗透性良好的储集层，也可能是非渗透性的致密层；第二，由于普通电极系的电极距比较大（太小不能探测到岩层电阻率的变化），受邻层及周围的影响也大，分层能力较差，更不能划分储集层中的非渗透性的致密薄夹层和泥岩薄夹层（而储集层中常有这样的夹层，为了计算储量，需要从砂层中把它们扣除）。为了解决这些问题，采用了带有特殊装置的电极距很小的微电极测井。

储集层与致密层的区别，在于储集层有良好的孔隙性、渗透性，而致密层的孔隙性则极差，几乎是不渗透的，由于储集层具有这种特点，在钻井的条件下，泥浆滤液侵入储集层，在储集层的井壁上形成泥饼，靠近井壁形成泥浆冲洗带。井壁泥饼的厚度一般在 0.1 ~ 2cm，泥饼的电阻率约为泥浆电阻率的 1 ~ 3 倍，泥浆冲洗带的电阻率约为泥饼电阻率的 5 倍以上。而在非渗透的致密层和泥岩层上，不发生泥浆侵入，则没有泥饼和泥浆冲洗带。渗透层和非渗透层的这种差别，是我们划分渗透层和非渗透层的一个依据。

### 一、微电极测井原理

从渗透层和非渗透层的这种差别及渗透层上泥饼电阻率与泥浆冲洗带电阻率的差别出发，我们采用两个电极距很小的电极系，使其中一个主要探测泥饼电阻率，另一个主要探测冲洗带的电阻率。在实际应用中，第一个称为微梯度电极系 A0.025M<sub>1</sub> 0.025M<sub>2</sub>，其电极



距是 0.0375m，另一个称为微电位电极系  $A0.05M_2$ ，其电极距是 0.05m。实验证明，微梯度电极系的探测半径约 4cm，微电位电极系的探测半径约为 8~10cm，前者受泥饼电阻率影响较大，后者受冲洗带电阻率影响较大。但是这样小的电极系如果像普通电极系那样直接放在井中的泥浆里进行测量，两个电极系测出的电阻率几乎都是泥浆的电阻率而不会有什么差别，为此必须采用特殊装置。图 1-26 是微电极系结构图。

在微电极绝缘极板上装有三个铜电极 A、 $M_1$ 、 $M_2$ ，如图 1-26b 所示。绝缘极板又装在下井仪器主体两侧其中的一个弹簧片上，利用弹簧片的力量使得在测井时，极板总是紧贴在井壁上，由于极板朝向井轴的一边是绝缘的，所以井中泥浆的影响基本上消除。这时三个铜电极所组成的两个电极系，即微梯度和微电位就能同时分别反映泥饼电阻率与冲洗带电阻率。由于电极距很小，划分渗透层以及划分渗透中的非渗透夹层的问题也就解决了。

图 1-26 微电极系结构图

微电极系测得的视电阻率仍可用式 (1—11) 进行计算， $R_a = k \cdot V_{MN} / I$ ，这时式中  $k$  为微电极系数。由于  $k$  值不仅决定于电极系尺寸，还与极板形状、大小有关，因此无法计算，一般用实验方法求得。

微梯度和微电位同时进行测量。其测量原理线路图如图 1-27 所示。

## 二、微电极测井曲线的应用

微电极测井曲线主要用来解决下述几个地质问题。

### 1. 详细划分剖面

由于微电极系的电极距小，电极嵌在绝缘极板上且紧贴井壁，它几乎不受围岩、高阻邻层和泥浆的影响，所以在地层界面或地层电阻率不均匀的地方，微电极测井曲线出现明显的变化，因此比普通电极系划分地层剖面更详细、更准确。一般可以划分出 20cm 厚的地层，是目前划分地层界面的主要方法之一。地层界面定在曲线的转折点或半幅点。图 1-28 是微电极曲线详细划分剖面实例。

由于微电极曲线能清楚地划分出储油层中的致密夹层和泥质夹层，因此可求得油层的有效厚度。

图 1-27 微电极测量原理线路图

图 1 - 28 微电极曲线详细划分剖面实例

## 2. 划分渗透层、判断岩性

微梯度和微电位不但同时测量，还使用同一绘图基线，这样在渗透性地层微电极曲线一般显示出正幅度差（微电位曲线的幅度高于微梯度曲线的幅度），或称正差异。而在非渗透性地层没有幅度差，或出现很小的正或负的幅度差。

渗透层在微电极曲线上显正幅度差，数值中等，并且地层的渗透性越好，泥饼越厚，微电位与微梯度的读数越小，二者的幅度差越大，因此，根据微电极曲线的幅度和幅度差大小可以定性判断地层的渗透性好坏，如图 1 - 29 所示。

各种岩性地层的微电极曲线特征简述如下。

(1) 泥岩和粘土 泥岩和粘土均为非渗透性地层，井壁上没有泥饼。当微电极极板和地层紧密接触时，微梯度和微电位曲线的读数都很低，并且没有幅度差，视电阻率接近于泥岩和粘土的真电阻率，如图 1 - 29 中井深 1530m 以上井段。若井径扩大到 40cm 以上，微电极极板不能紧贴井壁，微梯度和微电位主要受泥浆的影响，则曲线读值接近于泥浆电阻率。

(2) 渗透性砂岩 渗透性砂岩在微电极曲线上显示中等幅度和较大的正差异。对于含油砂岩，由于冲洗带孔隙中有残余油存在，在其它条件相同的情况下，含油砂岩比含水砂岩有较高的幅度和幅度差。若泥质含量增大，渗透性变差，正差异变小。

(3) 致密砂岩 致密砂岩（如钙质等胶结很好的砂岩）渗透性很差，没有泥浆侵入和泥饼存在。在微电极曲线上读数很高。由于井壁凸凹不平，微电极极板与井壁接触不好，当电极位于井壁凸处时，视电阻率很高，当电极位于井壁凹处时，极板与井壁间有泥浆存在，视电阻率较低，因此曲线常出现锯齿状变化。钙质砂岩薄层在曲线上呈现“刺刀状”的突起。

图 1 - 29 砂泥岩剖面的微电极曲线

- (4) 渗透性灰岩 渗透性灰岩与渗透性砂岩相近，但曲线幅度更高些。
- (5) 致密灰岩 致密灰岩与致密砂岩相近，曲线幅度高，呈锯齿状，并有正负不定的差异。
- (6) 石膏或硬石膏 石膏或硬石膏地层电阻率高，井壁无泥饼，曲线与石灰岩相似。
- (7) 盐岩 盐岩地层易溶于泥浆，使井径扩大，微电极曲线幅度低。
- (8) 油页岩 油页岩处微电极曲线显示锯齿状，大多数为负差异，曲线幅度高于泥岩。
- (9) 泥灰岩 泥灰岩处微电极曲线显示锯齿状，并有正负不定的差异，幅度较高。

总的来说，渗透性地层由于泥饼的存在，微电极曲线幅度值不高，而且渗透性越好，正幅度差越大。非渗透性地层，则根据地层本身的电阻率高低，以及井径大小而决定。井径不超过 40cm 且井壁光滑的地层，微电极读数与地层电阻率值接近；井壁不光滑，曲线出现锯齿状；井径大于 40cm，微电极读数接近泥浆电阻率值。

但是也有例外情况，例如在高渗透大孔隙地层处，也可能出现负的幅度差。这是因为紧贴泥饼的岩石孔隙中，被泥浆的泥质颗粒所充填，其电阻率大于孔隙中被泥浆滤液充填的冲洗带电阻率，这时微梯度曲线幅度可能大于微电位曲线幅度，从而出现负幅度差。

另外，利用微电极系图版，可确定冲洗带电阻率和泥饼厚度。

## 第五节 自然电位测井

在生产实践中发现，没有人工供电的情况下，测量电极 M 在井内移动，可以测量到一条随井深而变化的电位差曲线。显然，井中的电位是自然产生的，称为自然电位，用 SP 表示。

通过实践证明，井中的自然电位与地层性质有关，它随井剖面上岩性的变化而变化。为此，我们可以利用它来研究地层。

沿井剖面测量自然电位的变化称为自然电位测井，如图 1 - 30 所示。

在井内放一个测量电极 M，地面上放一个测量电极 N，将 M 电极由下向上沿井筒移动，即可测量出一条井内自然电位变化曲线。

自然电位测井方法简单，而实用价值很高，是划分岩性和研究储集层性质的基本方法之一。

### 一、自然电位产生的原因

井内产生自然电位的原因是复杂的，但是对于油井来说，其主要原因是地层水含盐浓度和泥浆含盐浓度不同所引起离子的扩散作用和岩石颗粒对离子的吸附作用。下面分别讨论。

#### 1. 扩散电动势

扩散电动势是由于地层水和泥浆含盐浓度不同，引起离子的扩散而生成，如图 1 - 31 所示。

当纯含水砂岩被钻开后，泥浆滤液与地层孔隙中的地层水直接接触，若砂岩中的地层水

图 1 - 30 自然电位测井原理线路图

图 1 - 31 砂岩与泥浆接触面上的电荷分布

和泥浆滤液均为氯化钠溶液，且地层水含盐浓度大于泥浆滤液的含盐浓度，则高浓度溶液中的离子要向低浓度溶液中移动，力求在溶液中均匀分布，这种现象称为扩散。但是钠离子体积大，扩散速度慢，离子迁移率低。氯离子体积小，扩散速度快，离子迁移率高（约高出1.5倍）。所以扩散的结果，低浓度泥浆滤液中多余氯离子而显负电性，高浓度的地层水溶液中多余钠离子而显正电性，在地层水和泥浆滤液接触面附近产生了自然电场和自然电动势。在这个电场的作用下钠离子移动加快，氯离子移动减慢，当自然电场的电动势使得正、负离子的扩散速度相同时，电荷的富集停止，但离子的扩散作用还在进行，溶液达到动平衡状态，这时电动势保持一个定值。这个电动势是因离子扩散作用产生的，称为扩散电动势或扩散电位，用  $E_{砂}$  表示。

$$E_{砂} = k_1 \cdot \lg \frac{C_w}{C_{mf}} \tag{1—12}$$

式中  $C_w$ ——地层水含盐浓度；  
 $C_{mf}$ ——泥浆滤液含盐浓度；  
 $k_1$ ——扩散电位系数，它与溶液中盐类的化学成分和温度有关。

扩散电动势的单位为毫伏。当两种不同浓度的 NaCl 溶液接触时， $C_w / C_{mf} = 10$ ，温度为 25℃， $E_{砂} = k_1 = -11.6\text{mV}$ 。

当溶液浓度不很高时，溶液的含盐浓度与电阻率成反比关系，则式（1—12）可以写成

$$E_{砂} = -11.6 \lg \frac{C_w}{C_{mf}} = -11.6 \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \tag{1—13}$$

式中  $R_w$ 、 $R_{mf}$  分别为地层水电阻率和泥浆滤液电阻率。

### 2. 扩散吸附电动势

与砂岩层相邻的泥岩井壁上产生扩散吸附电动势。扩散吸附电动势是由于泥岩内地层水与井壁泥浆滤液相接触而产生的。泥岩中所含地层水其成分和浓度一般与相邻的砂岩层中的地层水一样。由于泥岩的结构成分与砂岩不同，所以在泥岩井壁附近形成的自然电位与砂岩相比，不但数值差别很大，而且符号也相反，如图 1 - 32 所示。

对于 NaCl 溶液， $C_w / C_{mf} = 10$ ，在 25℃ 时，泥岩与泥浆接触面附近的电动势高达 +59.1mV。这是由于组成泥岩的粘土矿物颗粒表面具有负电性，粘土颗粒吸引溶液中的正离子组成偶电层，并且泥岩的孔隙为微毛细管孔隙，因此当泥岩与泥浆中不同浓度的 NaCl 溶液进行扩散时，在渗透压力差的作用下，只有钠离子可以通过，所以在泥岩的井壁上主要是钠离子的扩散作用。当  $C_w > C_{mf}$  时，低浓度泥浆中多余钠离子而显正电性，泥岩一边则显负电性，这样形成的电动势称为扩散吸附电动势，用  $E_{泥}$  表示。

图 1 - 32 泥岩与泥浆接触面上电荷分布

$$E_{\text{泥}} = k_2 \cdot \lg \frac{C_w}{C_{\text{mf}}} = k_2 \cdot \lg \frac{R_{\text{mf}}}{R_w} \quad (1-14)$$

式中  $k_2$ ——扩散吸附电位系数。

对 NaCl 溶液，当  $C_w / C_{\text{mf}} = 10$ ，温度为 25℃ 时， $E_{\text{泥}} = k_2 = +59.1 \text{ mV}$ 。

相反，如果  $C_w < C_{\text{mf}}$  时，井中的自然电位与上述讨论结果相反。

## 二、自然电位曲线

### 1. 井内自然电场的分布

在砂泥岩剖面中，主要储集层是砂岩，其围岩多为泥岩，在地层被钻穿的过程中，地层与泥浆相接触，在砂岩与泥浆之间、泥岩与泥浆之间、砂岩与泥岩之间，产生扩散及扩散吸附电动势，使井中产生了自然电位。

若泥岩的地层水含盐浓度为  $C_1$ ，砂岩的地层水含盐浓度为  $C_2$ ，泥浆滤液的含盐浓度为  $C_{\text{mf}}$ ，设  $C_1 = C_2 > C_{\text{mf}}$ ，井中自然电场的分布如图 1-33 所示。

在砂岩与泥浆的接触面上，由于扩散作用产生扩散电动势  $E_2$ 。

$$E_2 = k_1 \cdot \lg \frac{C_2}{C_{\text{mf}}}$$

在泥岩与泥浆的接触面上，产生扩散吸附电动势  $E_1$ 。

$$E_1 = k_2 \cdot \lg \frac{C_1}{C_{\text{mf}}}$$

在泥岩与砂岩的接触面上，产生扩散吸附电动势

$E_3$ 。

图 1-33 自然电场的电流分布和自然电位曲线形状

$$E_3 = k_2 \cdot \lg \frac{C_1}{C_2}$$

在井与砂岩、泥岩的接触面上，自然电流回路的总自然电动势  $E_{\text{总}}$  是每个接触面上自然电动势的代数和：

$$\begin{aligned} E_{\text{总}} &= k_1 \cdot \lg \frac{C_2}{C_{\text{mf}}} + k_2 \cdot \lg \frac{C_1}{C_{\text{mf}}} - k_2 \cdot \lg \frac{C_1}{C_2} \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{C_2}{C_{\text{mf}}} + k_2 \cdot \left( \lg \frac{C_1}{C_{\text{mf}}} - \lg \frac{C_1}{C_2} \right) \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{C_2}{C_{\text{mf}}} + k_2 \cdot \lg \frac{C_2}{C_{\text{mf}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (k_1 + k_2) \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \\
&= k \cdot \lg \frac{C_2}{C_{mf}}
\end{aligned}
\tag{1—15}$$

式中  $k = k_1 + k_2$ ，为自然电位系数，其值与岩性、温度、溶液的化学成分有关。当温度为25℃，地层水和泥浆均为NaCl溶液，岩性为纯含水砂岩和纯泥岩时， $k = 11.6 + 59.1 = 70.7$  (mV)。

## 2. 自然电位曲线

回路总电动势等于扩散电动势和扩散吸附电动势之和。总电动势又称为静自然电位，它相当于回路中没有自然电流时，井内地层上下界面的自然电位差。

井内自然电动势的存在，在井内产生自然电流，由图 1 - 33 可以看出，井内自然电流的分布是不均匀的。在井轴方向上，井内自然电流强度的变化导致自然电位的变化。在离砂岩较远的泥岩段，井内自然电流甚小，所以井内电位变化很小。由于泥岩岩性变化不大，并且电化学特征大致相同，所以，扩散吸附电动势稳定，在自然电位曲线上，常常显示为一条电位不变的直线，称为自然电位测井曲线的基线（零线），如图 1 - 33 中 1 所示。

靠近砂岩层界面，井内自然电流逐渐增强，由于自然电流的方向指向砂岩层中部，所以井内自然电位数值向地层中点方向减小（当  $C_w > C_{mf}$ ），自然电位曲线逐渐偏向负的方向。在界面附近井段，井内自然电流最大，电位降也最大，曲线变化最剧烈。过了地层界面，在砂岩层井段，井内自然电流逐渐减小，电位降逐渐降低，自然电位曲线变化缓慢。若砂岩层很厚，在砂岩层中部，自然电流很小，电位降很小，曲线平直，在砂岩层上部，自然电流又增加，但方向与下部相反，自然电位曲线向正的方向变化。同样在界面附近变化最大，进入泥岩一定距离后又趋向平直。因此，若砂岩岩性均匀，上下围岩岩性相同，自然电位曲线对砂岩岩层中心具有对称性。砂岩层中点的自然电位与泥岩基线的差值称为自然电位曲线的异常幅度，用  $SP$  表示。异常幅度的半幅点为岩层界面，异常幅度的大小等于自然电流在井内的电位降，它总是小于静自然电位。为什么会出现这种现象呢？

假设自然电流流过泥浆、砂岩、泥岩各部分的电阻分别为  $r_m$ 、 $r_t$ 、 $r_s$ 。则回路上的自然电流强度为

$$I = E_{\text{总}} / (r_m + r_t + r_s) \tag{1—16}$$

即

$$E_{\text{总}} = I \cdot r_m + I \cdot r_t + I \cdot r_s$$

所以，只有当砂岩、泥岩的厚度相当大时，可以认为  $r_t$ 、 $r_s$  很小，才可以认为自然电流在井内的电位降  $I \cdot r_m = SP$  接近回路上的总电动势  $E_{\text{总}}$ 。自然电位曲线如图 1 - 33 中 2 所示。

由此讨论可以看出，自然电位曲线异常幅度值大小受下述因素影响。

(1) 岩性、地层水与泥浆含盐度比值的影响 自然电位异常幅度值与总电动势成正比，而总电动势的大小决定于地层的岩性和地层水含盐浓度与泥浆含盐浓度的比值。因此，岩性、地层水含盐浓度与泥浆含盐浓度比值直接影响自然电位曲线的异常幅度值。

(2) 地层厚度、井径的影响 图 1 - 34 为不同厚度纯含水砂岩的自然电位理论曲线。主

要说明在其它条件完全相同的情况下，地层厚度（地层厚度与井径的比值）对自然电位幅度和形状的影响。

从图中可以看出，当地层厚度大于 4 倍的井径时，自然电位异常幅度近似等于静自然电位异常幅度，曲线的半幅点为岩层界面，地层厚度越小，自然电位异常幅度越小于静自然电位异常幅度，岩层界面也不在曲线异常幅度的半幅点。其原因是地层厚度越大，地层的电阻越小，在其它条件不变的情况下，相当井内泥浆电阻增大，所以 SP 增大。若地层厚度不变，井径增大，而井径增大相当井内泥浆电阻减小，使 SP 减小。从图 1 - 34 也可以看出，井径增大，相当  $h/d$  的比值减小，使 SP 减小。

图 1 - 34 不同厚度纯含水砂岩的  
自然电位理论曲线  
(图中曲线参数  $h/d$ )

(3) 目的层电阻率、泥浆电阻率的影响 目的层电阻率增大，相当目的层电阻增大，即  $r_t$  增大，SP 减小。泥浆电阻率的大小决定泥浆电阻的大小，若泥浆电阻率减小， $r_m$  减小，使 SP 减小。

(4) 泥浆侵入带的影响 在渗透性地层，泥浆滤液渗入到地层孔隙中，使泥浆滤液与地层水的接触面移向地层内部，使自然电流流经目的层和围岩的路径增长，即  $r_t$  和  $r_s$  增大，SP 减小。

一般说来，围岩（泥岩）很厚，且导电性较好，对 SP 的影响不大。

综上所述，自然电位曲线具有以下特点：

当地层和泥浆是均匀的，上下围岩岩性相同，自然电位曲线对地层中心对称。

当地层厚度大于 4 倍井径时，曲线异常幅度的半幅点为岩层界面，厚度变薄，岩层界面向曲线异常的顶部移动。

以泥岩为基线，当  $C_w > C_{mf}$  时，对着渗透性地层出现负异常，反之，当  $C_w < C_{mf}$  时，则出现正异常。

### 三、自然电位曲线的应用

前面讨论了自然电位产生的原因及其变化规律，下面分别讨论如何应用自然电位曲线去解决有关的地质问题。

#### 1. 自然电位曲线在砂泥岩剖面中的应用

(1) 划分岩层界面 从自然电位曲线特点中已知，当地层厚度大于 4 倍井径时，自然电位曲线异常幅度的半幅点为渗透层的顶、底界面，岩层变薄，则划分不准。

(2) 分析岩性、确定渗透层 图 1 - 35 为砂泥岩剖面自然电位实测曲线。

自然电位是离子在岩石中的扩散及扩散吸附作用产生的，而岩石的扩散、扩散吸附作用与岩石的性质（岩石成分、结构、胶结物的成分及含量等）有很密切的关系。故可根据自然电位曲线的变化分析岩性。

当地层水含盐浓度大于泥浆含盐浓度时，测得的自然电位曲线是以泥岩为基线，对着渗透性砂岩则为负异常。当砂岩的岩石颗粒变细、泥质含量相应增加时，异常幅度相应减小。



图 1 - 35 砂泥岩剖面自然电位实测曲线

图 1 - 36 用自然电位曲线划分含油砂岩  
和含水砂岩实例

- 1—含油砂岩的自然电位异常幅度；
- 2—含水砂岩的自然电位异常幅度；
- 3—油水分界面；A—一个砂岩层

这是由于岩石颗粒变细，孔隙孔道变小，自由溶液含量相应少，同时由于泥质含量增加，使泥浆中负电荷减少，故使异常幅度减小。砂岩的渗透性与砂岩中粘土含量、岩石颗粒粗细等有关，粘土含量增加，颗粒变细，岩石渗透性由好变差，曲线异常幅度变小，所以根据自然电位曲线异常幅度的大小

可划分砂泥岩剖面中的渗透性地层。对于砾岩，则要看它的分选性和胶结情况，分选好、胶结疏松的砾岩出现较大的异常幅度，而分选不好被粘土致密胶结的砾岩，自然电位与泥岩的显示相似。

(3) 判断油、水层 当地层水含盐浓度大于泥浆含盐浓度时，油、水层在自然电位曲线上均为负异常，在其它条件相同的情况下，含油气砂岩的异常幅度比含水砂岩要小些这是由于：含油气砂岩含水量（参加扩散的离子数）比含水砂岩少；含油气砂岩的地层电阻率较含水砂岩高；石油对负离子有吸附作用，如图 1 - 36 所示。

(4) 判断水淹层位 为了提高油田采收率，现在大都采取早期分片切割注水采油的方法。由于油层渗透性不同，注入水推进的速度也不一样。如果一口井的某个油层见了水，那么这层称为水淹层。水淹层在自然电位曲线上显示的特点较多，要根据每个地区的实际情况进行分析，但部分水淹层（油层顶部或底部见水）在自然电位曲线上的显示特点表现在自然电位曲线的基线在该层上下发生偏移，出现台阶。这种现象是由于注入水的矿化度与油田水不同造成的，如图 1 - 37 所示。

图中  $R_1$  为泥岩地层水电阻率,  $R_2$  为未水淹层地层水电阻率,  $R_3$  为水淹层地层水电阻率,  $R_{mf}$  为泥浆滤液电阻率。

假定  $R_1 < R_2 < R_3 < R_{mf}$ , 砂岩中没有泥岩夹层并且岩性均匀。

在井中未水淹层与泥岩接触面上自然电流回路总电动势  $E_{1.2}$  等于

$$\begin{aligned} E_{1.2} &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2} + k_2 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_1} - k_2 \cdot \lg \frac{R_2}{R_1} \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2} + k_2 \left( \lg \frac{R_{mf}}{R_1} - \lg \frac{R_2}{R_1} \right) \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2} + k_2 \lg \frac{R_{mf}}{R_2} \\ &= (k_1 + k_2) \lg \frac{R_{mf}}{R_2} \end{aligned}$$

图 1 - 37 水淹层的自然电位曲线基线偏移示意图

$$= k \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2}$$

在井中, 未水淹层与水淹层接触面上, 自然电流回路总电动势  $E_{2.3}$  等于

$$\begin{aligned} E_{2.3} &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2} - k_1 \cdot \lg \frac{R_3}{R_2} - k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} \\ &= k_1 \left( \lg \frac{R_{mf}}{R_2} - \lg \frac{R_3}{R_2} - \lg \frac{R_{mf}}{R_3} \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

在井中, 水淹层与泥岩层接触面上, 自然电流回路总电动势  $E_{3.1}$  等于

$$\begin{aligned} E_{3.1} &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} + k_2 \lg \frac{R_{mf}}{R_1} - k_2 \lg \frac{R_3}{R_1} \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} + k_2 \left( \lg \frac{R_{mf}}{R_1} - \lg \frac{R_3}{R_1} \right) \\ &= k_1 \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} + k_2 \lg \frac{R_{mf}}{R_3} \\ &= k \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} \end{aligned}$$

其基线偏移值为

$$E_{SP} = E_{1.2} - E_{2.3} - E_{3.1}$$

$$= k \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_2} - k \cdot \lg \frac{R_{mf}}{R_3} = k \cdot \lg \frac{R_3}{R_2}$$

根据基线偏移的大小，可以估算水淹程度，由统计资料得出，基线偏移大于 8mV，为高含水层；基线偏移小于 8mV，大于 5mV 时，可判断为中含水层；当基线偏移小于 5mV，在分析时要特别注意，它可能为低含水层，也可能是由岩性变化引起的基线偏移。图 1 - 38 为水淹层自然电位曲线实例。

图 1 - 38 水淹层自然电位曲线实例

## 2. 自然电位曲线不能反映碳酸盐岩剖面中地层的孔隙性和渗透性好坏

碳酸盐岩地层中，由于钙质成分对正离子有选择吸附作用，对于较致密的碳酸盐岩来说，以吸附作用为主，当  $C_w > C_{mf}$  时，井中因多余负离子而显负电性；对于碳酸盐岩剖面中的孔隙性、裂缝性及溶洞性碳酸盐岩地层，在同样条件下，由于以扩散为主，井中也因多余负离子而显示负电性，所以，自然电位曲线不能显示碳酸盐岩地层的孔隙性、渗透性好坏，如图 1 - 39 所示。

碳酸盐岩中的泥质成分对自然电位有很大影响，对于含泥量大的碳酸盐岩地层，其自然电位可能与粘土层相近，如图 1 - 40 所示。

所以对于碳酸盐岩地层，自然电位的异常主要反映地层中的含泥量。

## 3. 自然电位曲线不能反映膏盐剖面地层的岩性

在膏盐剖面地层，因盐岩、石膏、硬石膏等都非常致密，基本不含地层水，所以不产生扩散及扩散吸附电动势。这些地层的自然电位曲线与围岩相同。

图 1 - 39 自然电位曲线不能划分  
碳酸盐岩地层中的渗透层

图 1 - 40 用自然电位曲线划分碳酸盐岩  
地层中的含泥质地层实例

## 第六节 侧向测井

在地层电阻率很高，或者泥浆矿化度很高的情况下，用普通电极系测井时泥浆的影响非常显著。因为泥浆的导电性较地层要好的多，结果供电电极的电流大部分被泥浆所分流，地层对电场几乎不产生影响或影响很小，即使地层电阻率有很大变化，对电流线分布影响也不大。另外，当高阻地层很薄时，大量电流线分布在低阻围岩或低阻泥浆中，高阻薄层对电流的分布影响很小。在这些情况下，普通电阻率曲线就不能很好地反映地层电阻率变化。微电极测井不能测得地层真电阻率，微电极测井在以上条件下受低阻泥饼、泥浆薄膜的分流影响也比较严重，为了解决这种矛盾，提出了侧向测井。

侧向测井也称为聚焦测井。它的电极系除了主电极  $A_0$  外，上下设置两个屏蔽电极，从主电极和屏蔽电极流出同一极性的电流，由于同性电相斥，主电极流出的电流受到上下屏蔽电流的排斥，只能垂直于井轴、呈片状地侧向流入岩层，这就大大降低了井内泥浆的分流作用以及围岩和高阻邻层的影响。侧向测井种类繁多，我们以三侧向测井方法为重点，对双侧向、八侧向、微球形聚焦测井做简单介绍。

### 一、三侧向测井

#### 1. 三侧向测井的基本原理

三侧向测井是三电极侧向测井的简称，一般指深三侧向，提及浅三侧向要特别加以说明。三侧向电极系是一个长的金属圆柱，被绝缘物分隔成三部分：主电极  $A_0$  和屏蔽电极  $A_1$ 、 $A_2$ 。 $A_1$  和  $A_2$  用导线连接，B 电极离  $A_1$  电极很远（大于 16m），N 电极位于  $A_1$  和 B 电极的中点。图 1 - 41 为三侧向测井的电极系和电流分布。

测井时，主电极和屏蔽电极分别通以极性相同的主电流  $I_0$  和屏蔽电流  $I_a$ ， $I_0$  保持不变，屏蔽电流可以自动调节，保持  $A_1$ 、 $A_2$  与  $A_0$  的电位始终相等，则主电流受到屏蔽电流的挤压，成片状地垂直于井轴侧向流入地层，如图中斜线部分。主电流流经泥浆、地层，最后返回 B 电极。主电流流经泥浆、地层，在这些电阻上产生电位降（即主电极电位  $V_0$ ）。 $V_0$  的大小与主电流所经各介质的电阻有关。三侧向测井所记录的就是主电极  $A_0$  的电位（或任一屏蔽电极的电位）与 N 电极的电位差。由于 N 电极处于  $A_1$  电极和 B 电极的中点，并且距  $A_1$  很远，可以认为 N 电极的电位是零电位，所以记录  $A_0$  与 N 电极的电位差，实质上相当于记录  $A_0$  与无限远之间的电位差，即  $A_0$  电极的电位  $V_0$ 。视电阻率的计算式为

$$R_{LL3} = k \cdot \frac{V_0}{I_0} \quad (1-17)$$

图 1 - 41 三侧向测井的电极系和电流分布

式中  $I_0$ ——主电极的电流强度（保持不变），mA；  
 $V_0$ ——主电极的电位（测量的电位差），mV；  
 $k$ ——电极系系数；  
 $R_{LL3}$ ——三侧向测井视电阻率。

三侧向电极系系数  $k$  值与电极系尺寸有关，它可以通过检验求得。

$V_0/I_0$  又称接地电阻，即  $V_0/I_0 = r_0$ ，因此式（1—17）可变为

$$R_{LL3} = k \cdot r_0 \quad (1-18)$$

接地电阻  $r_0$  等于主电流在径向流动时所遇各电阻的串联。

即

$$r_0 = r_m + r_i + r_t \quad (1-19)$$

式中  $r_m$ 、 $r_i$ 、 $r_t$  分别为主电流经过部分的泥浆、侵入带、地层的径向电阻。

当三侧向电极系对着高电阻率地层时，由于  $R_t$  高，则  $r_t$  大，接地电阻  $r_0$  也大，又由于  $I_0$  保持不变，所以  $V_0$  值就高，则  $R_{LL3}$  值高。当三侧向电极系对着低电阻率地层时， $R_t$  小、 $r_t$  小、 $r_0$  也小。相应地  $V_0$  值小， $R_{LL3}$  值低。可见三侧向视电阻率曲线的高低，反映了井剖面上岩层电阻率的高低。并且泥浆矿化度越高，地层电阻率越高，三侧向视电阻率曲线的值越接近岩层真电阻率。三侧向电极系的记录点为主电极中点。

## 2. 三侧向测井曲线的影响因素及曲线特点

（1）三侧向测井曲线的影响因素 三侧向测井曲线的影响因素可分为电极系参数的影响和介质参数的影响。制作电极系已经考虑了影响因素，如主电极设计得很短，电极系很长，仪器直径较大等。下面仅讨论介质参数的影响。

层厚和围岩的影响。当目的层厚度大于主电流束的厚度时，围岩对视电阻率不产生影响。当目的层厚度小于或接近于主电流束厚度，视电阻率受围岩影响明显。当目的层电阻率高于围岩电阻率，主电流束受低阻围岩影响而分散，使视电阻率降低，地层越薄，围岩电阻率越小，视电阻率值降低越多；当目的层电阻率低于围岩电阻率，围岩对主电流束产生压缩，使视电阻率升高。

侵入带的影响。当泥浆为高矿化度泥浆，且侵入较浅，侵入影响可以忽略，视电阻率接近地层真电阻率；若侵入很深，则侵入影响不可忽略。在侵入深度相同的条件下，增阻侵入比减阻侵入对视电阻率的影响要大。

（2）三侧向测井曲线的特点 单一高电阻率地层的三侧向视电阻率曲线如图 1 - 42 所示。

从图中可以看出，三侧向视电阻率曲线具有以下特点：

对着高阻层中部视电阻率值最大；

当上下围岩电阻率相等时，曲线对称高阻层中心；

岩层界面对应于曲线急剧变化处

## 3. 深、浅三侧向组合

三侧向测井分为深三侧向和浅三侧向。图 1 - 43 为深、浅三侧向电极系结构对比。

图 1 - 43 深、浅三侧向电极

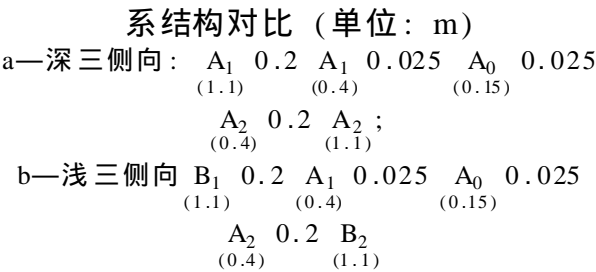


图 1 - 42 单一高电阻率地层的三侧向视电阻率曲线

深、浅三侧向组合测井一般采用一次下井两次测量。进行深三侧向测井时，浅三侧向中的  $A_1$  和  $B_1$ 、 $A_2$  和  $B_2$  之间分别由导线接通，成为  $A_1$  和  $A_2$  两个长的屏蔽电极，B 电极在很远，因此，主电流在屏蔽电流挤压下，进入地层很深，探测范围大，使深三侧向曲线主要反映未被泥浆侵入的地层的电阻率（岩层的真电阻率）。进行浅三侧向测井时（进行换挡），使  $A_1$  和  $B_1$ 、 $A_2$  和  $B_2$  之间断开，B 电极设置在仪器上，这样  $B_1$ 、 $B_2$  与  $A_1$ 、 $A_2$  构成回路，由于屏蔽电极  $A_1$  与  $A_2$  减短，并且 B 电极很近，因此主电流进入地层很浅，探测范围小。图 1 - 44 为浅三侧向电流分布。浅三侧向曲线主要反映泥浆侵入带的电阻率。

4. 三侧向测井曲线的应用

(1) 划分岩层界面 三侧向测井受井眼、层厚、邻层等影响小，分层能力较强。图 1 - 45 为一组不同电阻率地层的三侧向视电阻率曲线与普通电极系视电阻率曲线的比较。

从图中很明显地看出，三侧向视电阻率曲线具有较高的分层能力，特别是划分高阻薄层比普通电极系视电阻率曲线要清楚得多，所以三侧向曲线是碳酸盐岩剖面划分岩层界面的主

图 1 - 44 浅三侧向电流分布 (单位: m)

图 1 - 45 一组不同电阻率地层的三侧向视电阻率曲线与普通电极系视电阻率曲线的比较

要方法之一。一般岩层界面对着曲线急剧变化处。

(2) 判断油、水层 由于深、浅三侧向的探测深度不同。而油层和水层的侵入性质一般情况下又不同，油层多为减阻侵入（低侵），水层多为增阻侵入（高侵）。因此采用两种不同探测深度（深、浅）的三侧向视电阻率曲线，以同一基线绘在一起，采用曲线覆盖（重叠）方法判断油、水层。当深、浅三侧向重叠曲线显示正差异（即深三侧向曲线幅度高于浅三侧向曲线幅度）为油层；重叠曲线显示负差异（即浅三侧向曲线幅度高于深三侧向曲线幅度）为水层，如图 1 - 46 所示。

图 1 - 46 深、浅三侧向重叠曲线在油、水层处的显示

(3) 配合其它曲线在碳酸盐岩剖面划分储集层 在碳酸盐岩剖面中，致密的碳酸盐岩电阻率很高，而孔隙性、裂缝性、溶洞性的可作储集层的碳酸盐岩层则电阻率相对较低，所以三侧向视电阻率曲线较低值段可能为储集层（碳酸盐岩含泥质时电阻率也会降低，可结合自然伽马曲线判别），如图 1 - 47 所示。

(4) 求地层真电阻率 对三侧向曲线进行泥浆侵入、层厚、围岩、井眼校正后，可求得地层真电阻率。

## 二、双侧向测井

双侧向测井如图 1 - 48 所示。

### 1. 双侧向测井原理

双侧向是由深侧向和浅侧向组成的侧向测井。图中  $A_0$  为主电极，供以恒定的主电流  $I_0$ ，屏蔽电极  $A_1$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_2$ 、供以同极性的电流  $I_a$ ，测井时，屏蔽电流  $I_a$  可以自动调节，使监督电极  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_1$ 、 $M_2$  之间没有电流流动，电位差为零。保证主电极流出的



图 1 - 47 碳酸盐岩剖面三侧向实测曲线

电流强度一定，测量  $M_1$  ( $M_2$ ) 与地面电极  $N$  之间的电位差。电位差的大小与主电流流经介质电阻率成正比。在进行深侧向测井时， $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_1$ 、 $A_2$  为上下双屏蔽电极，主电流  $I_0$  在屏蔽电流的挤压下进入地层很深，探测范围大。在进行浅侧向测井时， $A_1$  与  $A_1$  为屏蔽电极， $A_2$  与  $A_2$  为回路电极，其极性与  $A_1$  和  $A_1$  电极相反，至使由主电极流出的主电流和屏蔽电极流出的屏蔽电流流经地层不深便很快返到  $A_2$  与  $A_2$  电极，因此探测深度很浅。深、浅双侧向测井可以依次进行测量，也可以同时并测。电阻率计算公式为

$$R_{LLd} = k_d \cdot \frac{V}{I_0} \quad (1-20)$$

图 1 - 48 双侧向测井示意图

$$R_{LLs} = k_s \cdot \frac{V}{I_0} \quad (1-21)$$

## 2. 双侧向测井曲线的应用

双侧向测井曲线实例如图 1 - 49 所示。

图 1 - 49 双侧向测井曲线实例

双侧向测井曲线同三侧向曲线一样，可以用来划分岩层界面及判断油、水层。由于双侧向比三侧向探测范围大，因此可以较好地求得地层真电阻率。

## 三、八侧向测井

八电极侧向测井，电极系包括一个主电极  $A_0$  和三对电极  $M$  和  $M$ 、 $N$  和  $N$ 、 $A_1$  和  $A_1$  以及一个  $B$  电极。三对电极都以  $A_0$  为对称中心，且相互间短路连接。

电极  $A_0$  通以恒定电流  $I_0$ ，另外通过屏蔽电极  $A_1$  和  $A_1$  发出可调整的电流，使与两对监督电极  $M$  和  $M$ 、 $N$  和  $N$  都保持相同的电位，使测量电流聚焦成为水平方向的层状电流射入地层。由于  $B$  电极就在仪器上，因此层状电流进入地层不深。八侧向测井探测深度比微电极要深，比中感应探测要浅，能较好地反映冲洗带电阻率，且具有较好的分层能力。

## 四、微球形聚焦测井

微球形聚焦测井是在微侧向和邻近侧向测井的基础上发展起来的。微侧向测井在一定程度上克服了微电极受泥饼分流影响的缺点，但它仍受泥饼的一定影响，尤其泥饼比较厚时，影响显著；邻近侧向测井受泥饼影响小得多，因为邻近侧向测井的探测范围大于微侧向，当

侵入深度不是特别大时，邻近侧向的视电阻率受原状地层影响较大。为了更好地测出冲洗带电阻率  $R_{xo}$ ，同时又不受泥饼和原状地层影响，提出了微球形聚焦测井。

1. 微球形聚焦测井原理

微球形聚焦测井电极系及电流线分布如图 1 - 50 所示。

图 1 - 50 微球形聚焦测井电极系及其电流线分布

主电极  $A_0$  呈矩形，参考电极  $M_0$  与辅助电极  $A_1$  呈矩形环状， $M_1$ 、 $M_2$  为监督电极，所有的电极全部装在绝缘耐磨极板上，测井时，利用推靠器使电极与井壁直接接触。由主电极  $A_0$  流出的一部分电流流到与  $A_0$  极性相反的辅助电极  $A_1$  上，称辅助电流  $I_a$ ， $I_a$  主要沿泥饼流动。由主电极  $A_0$  流出的另一部分电流经地层（渗透性地层只是冲洗带部分）回到较远的回路电极  $B$ ，称为测量电流  $I_0$ ，测量过程中，自动调节  $I_a$  和  $I_0$ ，使参考电极  $M_0$  的电位与  $M_1$ 、 $M_2$  电极中点的电位之差等于某一固定的参考电压  $V_{ref}$ ，即维持  $M_0$  电极到  $M_1$ 、 $M_2$  中点之间的电位差不变，与此同时还要使  $M_1$ 、 $M_2$  电极间的电位差近似于零。由于  $A_1$

图 1 - 51 现场试验综合对比图

离  $A_0$  较近,  $I_a$  主要沿泥饼流动, 这样就迫使  $I_0$  电流流入地层, 又由于  $M_1$ 、 $M_2$  电极之间电位差等于零, 所以迫使  $I_0$  只能流向电极 B, 因此,  $I_0$  的变化反映了地层电阻率的变化 (也可以采用恒流法, 使主电流不变, 测得  $M_0$  电极与  $M_1$ 、 $M_2$  中点 O 之间的电位差  $V_{M_0O}$  即反映地层电阻率的变化)。由于 B 电极较近 (即为极板仪器外套), 所以  $I_0$  进入地层也较浅。如果是渗透层,  $I_0$  主要反映冲洗带电阻率的变化。其电阻率计算公式为

$$R_{MSFL} = k_d \frac{V_{M_0O}}{I_0} \tag{1—22}$$

$$R_{MSFL} = k_s \frac{V_{M_0O}}{I_a} \tag{1—23}$$

式中  $k_d$ 、 $k_s$ ——电极系系数, 由实验求得。

2. 微球形聚焦测井曲线的应用

利用式 (1—22)、式 (1—23) 可以分别求得冲洗带电阻率和泥饼电阻率。利用冲洗带电阻率曲线和泥饼电阻率曲线的幅度差, 可定性划分渗透层。图 1 - 51 中两曲线的幅度差远比微电极曲线明显。

当泥饼厚度比较小时, 微球形聚焦测井曲线基本上接近冲洗带电阻率。

第七节 感应测井

前面叙述的普通电极系测井和侧向测井, 都是在测井时给供电电极供电, 供电电极的电流经过泥浆进入地层, 通过连续记录电场中某两点的电位差大小来反映岩层视电阻率的变化。这些方法只能在井中泥浆具有较好的导电性能的条件下才能应用。在实际生产中, 有时为了获得原始含油饱和度资料, 需要油基泥浆钻井; 有时为了避免破坏地层的原始渗透性, 采用空气钻井。在这样的条件下, 井内没有导电介质, 用普通视电阻率测井不能进行测量, 为了解决上述问题, 研究了感应测井。感应测井就是利用电磁感应原理测量地层电导率的一种测井方法。随着感应测井技术的发展, 现在不但在油基泥浆、空气钻井条件下应用, 而且广泛应用于一般淡水泥浆井中。

一、感应测井原理

感应测井井下仪器的上部为无缝钢管外壳, 内装电子线路, 下部为环氧树脂玻璃钢筒, 内装线圈系。线圈系是感应测井的探测器, 与普通电阻率测井的电极系作用相当, 它由相隔一定距离的发射线圈和接收线圈所组成。电子仪器供给发射线圈电流和频率 (常为 20kHz) 恒定的正弦交流电, 并将接收信号放大、检波, 送到地面仪器进行记录。

1. 双线圈系感应测井原理

图 1 - 52 为双线圈系感应测井原理图。

测井时, 仪器下入井内, 给发射线圈 T 通入正弦交流电, 在仪器周围的井和地层中产生交变磁场  $H_1$ 。在  $H_1$  的作用下, 地层中产生感应交变电流  $i$ 。其电流线在地层中以仪器线圈系为中心轴。呈无限个同心圆环状分布, 因此称为涡流。同样, 涡流电流在地层中产生次生交变电磁场  $H_2$ , 在次生交变电磁场  $H_2$  的作用下, 接收线圈 R 中产生感应电动势  $E$ 。当发射线圈的供电电流恒定时, 交变电磁场  $H_1$  的强度值恒定, 涡流  $i$  的强弱与地层电导率成

正比，因此在  $E_2$ 、 $E$  与地层电导率  $\sigma$  成正比。  
即

$$E = k \cdot \sigma \quad (1-24)$$

式中  $k$ ——线圈系常数。

次生交变电磁场  $H_2$  在接收线圈  $R$  中产生的感应电动势  $E$  与地层电导率  $\sigma$  有关，称为有用信号。

发射线圈电流产生的交变电磁场  $H_1$ ，同时直接对接收线圈起作用，这种直接耦合产生的感应电动势  $E$  与地层无关，称为无用信号。

设计线圈系时，要求加强有用信号，削弱无用信号。在电子线路里，设计相敏检波电路，由于无用信号与有用信号的相位相差  $90^\circ$ ，使相敏检波电路只输出有用信号，因此地面仪器记录的是有用信号的大小。

图 1 - 52 双线圈系感应测井原理图

双线圈系感应测井由于其无用信号很大，尽管它们之间有  $90^\circ$  的相位差，可以用相敏检波器区别开，但是，由于数值差别很大，准确地消除无用信号势必增加仪器设计上的困难。并且双线圈系在纵向和径向上的探测特性也不理想（即受井、侵入带、围岩的影响较大），因此并无实用价值。在实际生产中是使用复合线圈系。

2.0.8m 六线圈系

我国广泛使用着 0.8m 六线圈系感应测井仪。图 1 - 53 为 0.8m 测井仪的线圈系结构。

线圈系包括发射线圈和接收线圈。发射线圈有主发射、辅助发射和聚焦发射三个线圈；接收线圈有主接收、辅助接收和聚焦接收三个线圈。各线圈的匝数、连接方法及相对距离（由线圈中点算起），如图 1 - 53 所示。

上述各线圈分别绕在玻璃钢骨架上，绕有线圈的骨架按照一定尺寸固定在玻璃钢棒上，整个线圈系放在充满变压器油、有压力平衡管的玻璃钢管内。

主发射线圈与主接收线圈之间的距离称为线圈距（0.8m），感应测井仪的记录点在线圈距的中点。

测井时，供给发射线圈正弦交流电，接收线圈接收与地层电导率成正比的有用信号。

0.8m 六线圈系由于合理选择辅助、聚焦线圈的距离、匝数等，其总互感电动势只有双线圈系的互感电动势的 1.83%，这样大大削弱了无用信号，改善了探测特性。

在主线圈  $T_0$ 、 $R_0$  之间的  $T_1$  为辅助发射线圈，其线圈的匝数少并且与主发射线圈  $T_0$  反接，这样  $T_1$  线圈在介质中产生的涡流与  $T_0$  线圈所产生的涡流方向相反，由于

图 1 - 53 0.8m 六线圈系结构

$T_1$  线圈匝数少，其产生的涡流主要在井轴附近，因此井轴附近介质中只有较少的涡流（互相抵消），减小了井轴附近介质在读数中所占的比例。同样  $R_1$  为辅助接收线圈，与  $R_0$  线圈反接，则  $T_0$  线圈中的交流电在  $R_1$  线圈中产生的有用信号主要来自井轴附近介质中的涡流， $R_1$  与  $R_0$  两线圈中的总有用信号为二者之差，所减少的值主要是井轴附近介质中的涡流产生的。这样也相应减少了井轴附近介质的读数中所占的比例，从而提高了深部地层对读数的影响，径向探测特性得到改善。

为了改善双线圈系的纵向探测特性，即在接收线圈得到的总有用信号中减小线圈系以外介质（围岩）信号所占的比例，在主线圈外加上匝数较少的聚焦发射线圈  $T_2$  和聚焦接收线圈  $R_2$ ，并且分别与主线圈反接。这样  $T_2$  线圈中的交流电在  $T_2$ 、 $R_0$  之间产生的涡流与  $T_0$  线圈在此处产生的涡流方向相反而互相抵消，这样减小了  $R_0$  下方围岩对读数的影响。 $R_2$  线圈中产生的有用信号主要来自  $T_0$ 、 $R_2$  之间的涡流，这个信号与  $R_0$  线圈中的信号方向相反，这样就减小了  $T_0$  上方围岩对读数的影响，提高了主线圈对之间地层对读数的贡献，使纵向探测特性得到改善。

### 3. 双感应测井

目前现场使用的双感应测井也是复合线圈系，只不过更加复杂。

引进的双感应测井如图 1 - 54 所示。其尺寸为

T <sub>2</sub>	14	r <sub>4</sub>	15	R <sub>0</sub>	6	r <sub>3</sub>	4	R <sub>1</sub>	20	T <sub>1</sub>	10	T <sub>0</sub>	19	r <sub>2</sub>	10	R <sub>2</sub>	5	$\frac{1}{2}$	r <sub>0</sub>	25	$\frac{1}{2}$	r <sub>1</sub>
( - 12)		(8)		(180)		( - 20)		( - 45)		( - 45)		(180)		( - 22)		( - 12)		(160)		( - 80)		

线圈间距离以英寸为单位，括号内表示线圈匝数，负号表示反绕。

深感应是主线圈距为 40in 的六线圈系。三个发射线圈  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  为深感应和中感应共用。 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  为深感应的接收线圈。5 个中感应测井的接收线圈  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ ，为不对称排列，其探测深度约为深感应的一半。双感应测井原理与 0.8m 六线圈系相同。

双感应测井曲线能同时显示原状地层电阻率和侵入带电阻率，从而较好地判断地层侵入特性，直接判断油、水层，如图 1 - 55 所示。

### 4. 感应测井电流线的分析

感应测井的视电导率与地层单元环的涡流强度有关，每个单元环的电流线是以井轴为中心的同心圆环，其横剖面如图 1 - 56 所示。

电流线的环状分布表明井眼、侵入带及原始地层的涡流等效阻抗是并联的。测量结果是井径、泥浆电导率、侵入带直径、侵入带电导率和地层真电导率的函数。

若地层电导率较大（低阻），涡流电流线主要分布在地层内，泥浆、侵入带中的电流线较少，此时，视电导率主要反映地层的电导率，而井眼、侵入带的影响较小。

若地层电导率较小（高阻）或泥浆电阻率较低，如碳酸盐岩剖面或盐水泥浆条件下，涡流电流线的分布情况与上述相

图 1 - 54 双感应测井线圈系

反。涡流线在井眼部分较密集，测量结果受井眼、泥浆侵入带的影响较大。

感应测井与侧向测井电流线的分布差别较大（电流线正交），它们受地层条件变化的影响也不同。侧向测井电流线的分布表明泥浆、侵入带、原始地层三部分的等效电阻是串联的，测量结果受泥浆滤液低侵影响小，受高侵影响大。感应测井电流线的分布表明泥浆、侵入带、原始地层三部分的等效电阻是并联的，测量结果受泥浆滤液低侵影响大，受高侵影响小。在低侵剖面，感应测井探测深度小，在高侵剖面，感应测井探测深度较大。

感应测井适应于地层电阻率低于  $50 \cdot \Omega \cdot \text{m}$ 、泥浆电阻率高于  $0.5 \cdot \Omega \cdot \text{m}$  的砂泥岩剖面，特别适用于油基泥浆井。在泥浆电阻率较低，地层电阻率较高的井剖面，感应测井效果较差，通常使用侧向测井。

## 二、感应测井曲线

### 1. 感应测井理论曲线形状特点

(1) 上下围岩相同、单一低电导率地层的感应测井理论曲线 图 1 - 57 所示感应测井理论曲线形状特点是：

对应低电导率地层，视电导率较小。

上下围岩电导率相同时，曲线对称地层中部。

厚度较大时，随厚度增大，视电导率接近于地层真电导率；厚度较小时，视电导率趋近于围岩真电导率。

当  $h > 2m$ ，地层上下界面与曲线急剧变化的半幅点相对应，因此可以用半幅点划分

图 1 - 55 双感应—八侧向测井曲线

图 1 - 56 感应测井涡流电流线分布

图 1 - 57 上下围岩相同、单一低电导率地层的感应测井理论曲线

地层界面；若  $h < 2m$ ，根据半幅点划分的地层厚度将大于地层实际厚度。

(2) 上下围岩不同、单一低电导率地层的感应测井理论曲线 感应测井理论曲线的特点是：

上下围岩电导率不同，但均高于目的层电导率时，由于受不同围岩的影响，目的层感应测井理论曲线上下不对称，地层视电导率极值位置偏向于地层电导率值差别较小的一侧围岩，如图 1 - 58 所示。

图 1 - 58 上下围岩不同、单一低电导率地层的感应测井理论曲线

目的层电导率介于上下围岩电导率值之间，并且目的层的厚度  $h > 2m$  时，曲线呈现较清楚的台阶形，地层界面也可用半幅点确定，地层视电导率值取地层中点或倾斜台阶的中间部位的平均值； $h < 2m$ ，分层和读值困难，如图 1 - 59 所示。



实测感应测井曲线与其理论曲线较相似，曲线形状、视电导率取值、界面位置等与理论曲线基本一致。

图 1 - 60 为实测感应曲线，其深度比例为 1 200 横向比例为 50 (mS/ m) / cm。为了与普通电极系等视电阻率测井曲线形状一致，感应测井曲线的零值线放在右边，电导率为零值对应的电阻率为无穷大，电导率自右向左增大。

2. 感应测井曲线的应用

(1) 确定岩性、划分岩层界面 在砂泥岩地层剖面，感应测井曲线反映井剖面地层电性的变化较为清楚。如图 1 - 60 中的 1139.5 ~ 1145m 为砂岩地层，该层从顶部向底部粒度变粗，渗透性变好，在微电极曲线上幅度增大，差异增大；在自然电位曲线上异常幅度值增大；同样，感应曲线的视电导率极小值位置偏向地层底界面，曲线上下不对称。感应测井曲线与其它曲线配合，可以区分砂岩、泥岩及钙质砂岩等。在特定的剖面，也可以帮助划分特殊岩性地层。低电阻率地层在感应测井曲线上显示清楚，在有利的条件下可以作为地层对比的标志。如我国某油田一个油区的“手指状泥岩”，在感应测井曲线上的形态似手指状，电导率最高的位置为质纯的泥岩，泥岩层上方是生物灰岩。该层泥岩是良好的区域对比标志，如图 1 - 61 所示。

图 1 - 59 上下围岩不同，目的层电导率介于上下围岩电导率值之间的感应测井理论曲线

由于感应测井对低阻变化显示清楚，因此低阻的岩性变化，如砂岩层夹有泥岩或泥质含量的变化，在感应曲线上都有明显的显示。

当地层厚度  $h > 2m$ ，感应测井曲线可按半幅点确定地层界面。若地层上下围岩电导率不等，应分别用不同幅度的半幅点划分上下界面。 $h < 2m$  的地层，地层界面不在半幅点处。一般情况下，不单独使用感应测井曲线划分界面，在综合解释中，以微电极和短梯度电极系测井曲线为主，参考感应、自然电位等曲线来划分地层顶底界面。

(2) 定性估计油、水层 在淡水泥浆、侵入较浅、地层较厚的条件下，利用感应曲线求得的视电阻率接近地层真电阻率，根据渗透性砂岩视电阻率数值的大小，配合其它曲线，能够估计油层和水层。如图 1 - 62 中，油层和水层在感应曲线上的幅度差别较大，油层电导率  $<$  水层电导率，若自然电位、微电极等曲线的显示，表明地层岩性变化小，那么上部为油层，下部为水层。

根据视电导率可用下式换算成视电阻率。

$$R_a = 10^3 / a \tag{1—25}$$

式中  $a$ ——视电导率，mS/ m；  
 $R_a$ ——视电阻率， $\Omega \cdot m$ 。

图 1 - 60 感应测井曲线实例

图 1 - 61 指状泥岩在感应曲线上的特征

图 1 - 62 用感应曲线划分油、水层

(3) 求地层电阻率 对感应曲线值进行校正后可求地层真电阻率；利用声波、感应组合测井曲线，可进行地层水电阻率、含油饱和度的定量计算。

### 3. 感应测井曲线的读值

为了利用感应测井曲线求得地层真电阻率，必须首先从感应曲线上读得视电导率数值。

(1) 围岩视电导率 均匀单一层取目的层上下各 3 ~ 4m 范围内围岩视电导率的平均值；薄夹层泥岩的感应视电导率受周围砂岩影响较大，测量结果与泥岩实际电导率数值差别较大，一般尽量选取厚层数值。

(2) 目的层视电导率 岩性均匀层取视电导率极小值或极大值；若地层中有薄的泥质夹层或钙质夹层，可扣除夹层部分取平均值；若地层各部分视电导率值有明显区别，可分段取值；由岩性不均或含油不均造成的曲线微小变化，可取平均值。

## 复 习 思 考 题

1. 什么叫岩石电阻率？其单位是什么？
2. 影响岩石电阻率的因素有哪些？岩石电阻率与各影响因素是什么关系。
3. 为什么不同的岩石，其电阻率不同？
4. 沉积岩的导电方式是什么？分析原因？
5. 测得五块岩样电阻率为： $2 \cdot \text{m}$ ； $10 \cdot \text{m}$ ； $500 \cdot \text{m}$ ； $4 \cdot \text{m}$ ； $40 \cdot \text{m}$ 。请判断可能各自取于什么地层？（致密灰岩；含油砂岩；含水砂岩；泥岩；钙质致密砂岩）
6. 简述普通视电阻率测井原理？
7. 什么叫梯度电极系？电位电极系？什么叫成对电极？不成对电极？
8. 把 0.45m、2.5m、4m 底部梯度电极系和 0.5m 正装电位电极系用两种表示法表示出来，在图示法中注上记录点及电极距。
9. 什么叫深度比例？横向比例？
10. 什么叫视电阻率曲线？
11. 底部梯度电极系和电位电极系在高阻层测井曲线的特点是什么？

12. 视电阻率曲线的用途有哪些？
13. 用底部梯度电极系和电位电极系测井曲线怎样划分岩层界面？
14. 判断下面说法哪个正确？说明原因？  
 地层电阻率高一定是油层；  
 地层电阻率高可能是油层。
15. 利用长、短电极系判断油、水层的根据是什么？
16. 什么叫微电极测井？
17. 在微电极曲线上，渗透层和非渗透层的曲线特征是什么？分析原因？
18. 某井有含油砂岩、含水砂岩、泥岩、油页岩、钙质砂岩地层，地层视电阻率及微电极曲线显示如题表 1 - 1 所示，试把它们一一对应。

题表 1 - 1 地层视电阻率及微电极曲线显示

微电极曲线	正差异大	无差异	负差异、锯齿状	刺刀状	正差异大
$R_a, \cdot m$	10	2	5	100	3
对应地层					

19. 自然电位产生的主要原因是什么？
20. 扩散和扩散吸附电位是怎样产生的？
21. 什么叫自然电位异常幅度？影响异常幅度的因素有哪些？
22. 什么叫自然电位曲线？
23. 自然电位曲线有哪些特点？
24. 在砂泥岩剖面，用自然电位曲线如何判断地层渗透性的好坏？
25. 用自然电位曲线如何判断水淹层？
26. 简述三侧向测井原理？
27. 三侧向测井为什么适合在高矿化度泥浆井中使用？
28. 双侧向测井曲线有什么用途？
29. 如何用双侧向曲线判断油、水层？为什么？
30. 微球形聚焦曲线有什么用途？
31. 什么叫感应测井？
32. 画图简述双线圈系感应测井原理？
33. 在实际生产中为什么不用双线圈系而用复合线圈系？
34. 双感应测井有什么优点？
35. 比较普通电极系测井、微电极测井、三侧向测井及感应测井，指出测量目的、电流线的分布、所适应的地质条件等方面的不同之处。

## 第二章 非电法测井

### 第一节 声学基本知识简介

#### 一、弹性体与塑性体

对物体施加外力，物体的体积和形状会发生变化。当外力取消之后能恢复原来状态的物体称为弹性体。弹性体在外力作用下发生的体积和形状的变化，称为弹性形变。反之，若取消外力之后，体积和形状不能恢复原状的物体称为塑性体。它发生的体积和形状的变化称为塑性形变。

在外力的作用下，一个物体产生弹性形变还是塑性形变取决于物体所处的外界环境（温度、压力）、外力的大小、作用时间和频率等。若外力很大，作用时间很长，物体可能产生塑性形变；若外力很小，作用时间很短，则大部分物体都具有弹性的性质。

声波测井的声源（外力）能量较小，作用时间较短，在这种条件下，岩石、泥浆、套管等都可看作是弹性体。

#### 二、声波及声波在弹性介质中的传播

声波是由机械振动而产生的振动波，人们耳朵所能听到的声音就是声波。人耳朵所能听到的声波频率范围是  $20 \sim 20000\text{Hz/s}$ 。一般把频率超过  $20000\text{Hz/s}$  的称超声波，低于  $20\text{Hz/s}$  的称为次声波。

振动可以由弹性体传播，弹性体的某一部分受到外力的作用发生振动（弹性形变）时，由于这部分物体和周围各部分物体有相互作用，周围各部分也随着振动起来，振动在介质中由近及远的向各个方向传播就形成了波。由声源产生的波称为声波。

在传播声波过程中，声源所发生的振动，激起其相邻的介质质点以和声源相同的频率，不断的离开平衡位置，又由于其它相邻质点的弹性力而恢复原来位置，使振动依次传递给相邻的介质质点，即发生了弹性波的传播。在传播过程中，传声介质质点只是绕其平衡位置作各种方式的运动，质点本身并没有随着波的传播方向前进，只是振动的传播，而且由于介质质点的惯性力的作用，在波传过以后，质点仍然要在其平衡位置继续振动。

声波在不同的介质中传播，不同介质促使质点恢复原来位置的弹性力不同，因此声波在单位时间的传播距离不同，即声波的速度不同。

#### 三、声波在介质分界面上的传播

##### 1. 反射波

当声波入射到介质分界面时，一部分能量反射回原来的介质中，形成反射波，如图 2 - 1 中所示。入射波及反射波与界面法线的夹角分别称为入射角  $\theta_i$  和反射角  $\theta_r$ 。

根据反射定律：入射波、反射波位于入射点法线的两侧；入射波和反射波及法线同在一个平面内；反射角等于入射角（即  $\theta_r = \theta_i$ ）。

##### 2. 透射波

当入射波传播到介质分界面时，一部分能量返回第一种介质形成反射波，另一部分能量则透过界面在第二种介质中传播。由于界面两边的介质声波速度不同，改变了入射波原来的

图 2 - 1 声波在介质分界面上的传播

传播方向，形成了透射波，如图 2 - 1 所示。根据透射定律：透射波和入射波位于入射点法线的两侧，入射波、透射波和法线在同一平面内；入射角  $\theta_1$  的正弦和透射角  $\theta_2$  的正弦之比，等于入射波的速度  $v_1$  和透射波的速度  $v_2$  之比，即

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2 \quad (2-1)$$

### 3. 滑行波和折射波

根据透射定律可知，若入射角  $\theta_1$  增大，则透射角  $\theta_2$  也随之增大。当  $v_2 > v_1$  时， $\theta_2 > \theta_1$ ，所以  $\theta_2$  增大到某一角度  $\theta_c$  时，透射角  $\theta_2 = 90^\circ$  于是透射波就在第二种介质中以  $v_2$  的速度沿界面滑行，这种特殊情况下的透射波称为滑行波，如图 2 - 1 所示，这时的入射角  $\theta_1$  称为临界角。

由式 (2—1) 可知，产生滑行波的条件是： $v_2 > v_1$ ； $\sin \theta_c = \sin \theta_2 = v_1 / v_2$ 。

声波的传播实质上就是质点振动的传播。滑行波沿界面向前滑行时，所经过的任何一点，都可以看作是从该时刻开始的一个新的点振源。因为界面上下介质是紧密相接的，所以滑行波所经过的任何一点的振动，必然要引起上层介质质点的振动，这就在第一种介质中形成了一种新波，称为折射波，如图 2 - 1 所示。折射波的特点是：折射角等于临界角  $\theta_c$ 。AM 是折射波的第一条折射波，折射波是一簇平行直线。

### 4. 全反射波

当入射角大于临界角（即  $\theta_1 > \theta_c$ ）时，入射波将全部被反射回第一种介质，这种波称为全反射波，如图 2 - 1 所示。

综上所述，由于声源发射的声波是体积波，它向四面八方传播，声波将以各种角度入射到介质分界面上，于是在介质分界面上（当  $v_2 > v_1$  时），将同时产生反射波、透射波、滑行波和全反射波。

## 四、声波的发射和接收

要在井内测量地层的声学性质，就要在井内发射和接收声波。能够将电能转变为声能（机械能），或是把声能转变为电能的器件称为换能器。发射换能器的作用是把电能转换成声波。接收换能器的作用是把介质中传播的超声波振动转变成电信号。

目前现场常用的换能器是压电型换能器，它具有体积小、成本低、发射强度较稳定等优

点，近年来应用较为广泛。

某些晶体在一定的方向上受到压缩或拉伸时，在一定界面上会出现电荷，这种现象称为压电效应。

压电效应是可逆的，即在晶体上加上电场，它会产生机械形变，若加上交变电场，则晶体会产生机械振动，也称为逆压电效应。利用晶体的这种特性可以制成声波发射器和接收器。

声波测井常用的是人造陶瓷晶体，主要是锆钛酸铅晶体。声波速度测井和声幅测井都采用圆管型换能器，如图 2 - 2 所示。

当在内外两侧面加上脉冲电压时，换能器能够产生胀缩变形，发生呼吸式振动，向径向发射声波。反之接收到径向声波时，能在内外两侧产生电压。

圆管型换能器的固有频率与晶体直径的大小有关，直径大，频率低。声波在地层中传播时，频率高、衰减大，不利接收；但频率过低、干扰也大，并且换能器直径要增大，这对井下工作是不利的。通常声速、声幅测井换能器外径 51mm，内径 45mm，径向振动固有频率 20000 ~ 25000Hz/ s。

图 2 - 2 圆管型换能器

换能器发射和接收范围与其高度有关，即方向开角 与高度  $H$  有关。理论和实验证明  $H$  越小， 越大，为了确保在井内发射时产沿井壁滑行的波，则  $H$  不可过大，一般取  $H$  为 36mm， 角大于 60°。

## 第二节 声 速 测 井

声速测井测量的是地层传播声波的速度，主要用来判断岩性、求孔隙度和判断气层。它是划分油气层的重要手段。

### 一、岩石的声学性质

#### 1. 岩石的声波速度

岩石声波速度的单位是  $m/ s$ 。声速测井常用声波时差来描述岩石的声速，声波时差指的是声波通过单位距离岩石所需要的时间，单位是  $\mu s/ m$ 。

理论和实践证明，岩石的声波速度主要与岩石密度有关，并且是随着岩石密度的增大而增大。对于沉积岩来讲，声波速度的主要影响因素有以下几个方面。

(1) 岩性 不同岩性的岩石其声波速度不同,如表2 - 1所示。不同岩性的岩石它们的

表 2 - 1 常见矿物、岩石声波速度

介 质	声波速度, $m/ s$	声波时差, $\mu s/ m$
空气 (0 , $kg/ cm^2$ )	330	3000
甲烷 (0 , $kg/ cm^2$ )	442	2260
石油 (0 , $kg/ cm^2$ )	1070 ~ 1320	985 ~ 757
水、泥浆、泥 饼	1530 ~ 1620	655 ~ 620
泥 岩	1830 ~ 3962	548 ~ 252

续表

介 质	声波速度， m/ s	声波时差， μs/ m
砂 岩	5500 ~ 5950	182 ~ 168
盐 岩	4600 ~ 5200	217 ~ 193
无水石膏	6100 ~ 6250	164 ~ 163
石灰岩	6400 ~ 7000	156 ~ 143
白云岩	7000 ~ 7940	143 ~ 134
花岗岩	6100	164
套 管	5340	187

密度不同，按一般纯净的致密石灰岩、砂岩、泥岩的顺序依次减小，速度也依次递减。由于地质条件不同，岩石的声波速度差别很大，表 2 - 1 的数据只反映声速的相对大小。

(2) 岩石结构 岩石胶结差、疏松，声波速度小；岩石胶结好、致密，声波速度则大。若岩石中有裂缝、溶洞等，则速度降低。在岩性均匀、胶结物及胶结类型不变时，其声波速度与孔隙度有密切的关系。孔隙度越大的岩层，声波速度越小；反之，孔隙度小的岩层，声波速度大。

(3) 岩石孔隙间的储集物 声波在岩石中传播时，孔隙空间储集物的声速要影响岩石的声速。若岩石孔隙中含有天然气时，声波速度较小；含油时声波速度较大；含水时的岩石声波速度比含油时稍大。

(4) 地层埋藏深度及地质时代 地层埋藏的深浅及地质时代的新老均对声波在地层中传播的速度有影响。岩性和地质时代相同而埋藏深度不同的地层，声波速度是不同的，地层深、压力大、声波速度大；反之，地层浅、压力小、声波小。若岩性和埋藏深度相同而地质时代不同的地层，声速也不一样，老地层比新地层声波速度大。

2. 岩石的声波幅度

声波幅度指的是声波在传播过程中介质质点的振动幅度。

声波在介质中传播时，质点的振动要克服质点相互间的摩擦力，也就是说介质的粘滞、阻尼特性要消耗声波能量，使声波幅度逐渐减小。这种声波幅度衰减的大小与岩石的密度以及声波的频率有关。密度小声速低，幅度衰减大，声波幅度低。因此通过声波幅度的衰减可以了解岩层的特点或固井质量。

声波由一种介质向另一种介质传播，在两种介质形成的界面上，将发生声波的反射和透射。入射波的能量一部分被界面反射，另一部分透过界面在第二种介质中传播。反射波的幅度，取决于两种介质的声阻抗。所谓声阻抗（以符号  $Z$  表示）就是介质密度（ $\rho$ ）与声波在该介质中传播的速度（ $v$ ）的乘积，即

$$Z = \rho \cdot v \tag{2—2}$$

两种介质的声阻抗之比  $Z_1 / Z_2$  称为声耦合率。介质 1 和介质 2 的声阻抗差别大，则声耦合越差。声波能量就不易从介质 1 传到介质 2 中去。通过界面在介质 1 中传播的透射波的能量就越小，而在介质 2 中传播的反射波的能量就越大。如果介质 1 和介质 2 的声阻抗相近时，声耦合得很好，声波几乎都形成透射波通过界面在介质 2 中传播，这种反射波的能量就



很小。

## 二、声速测井原理

### 1. 声波速度测井仪

这里介绍单发射双接收声速测井下井仪，如图 2 - 3a 所示。仪器上部是无缝钢管外壳，内装电子线路，其作用是产生强脉冲电流，供给发射探头电能，并放大接收探头所收到的信号。仪器下部是刻槽钢管，管内装有声系。声系由一个发射探头和两个接收探头组成。发射探头（发射换能器）产生并向地层发射声波，接收探头（接收换能器）则接收声波信号并转变成电信号。仪器下部的刻槽钢管主要用来保护声系免受井壁破坏，并使声波能够径向发射和接收声波；在钢管上交叉刻槽能够延长声波沿钢管外壳直接传播的路程，防止声波直接由仪器外壳传播到接收探头。

发射探头到相邻近的接收探头的距离称为源距，为 1m，两接收探头之间的距离称为间距，为 0.5m。

### 2. 声速测量原理

测井时，发射探头径向发射声波，由泥浆向地层传播，由于泥浆的声速  $v_1$  不同于地层的声速  $v_2$ ，所以在泥浆和地层的界面上将发生波的反射和透射。由于发射探头发射的声波在较大的角度（方向角大于  $60^\circ$ ）内向各个方向传播，其中必有以临界角方向入射到界面的声波，又由于地层的声速  $v_2$ （一般为  $1800 \sim 8000\text{m/s}$ ）大于泥浆的声速  $v_1$ （一般为  $1500\text{m/s}$ ），所以必然产生在地层中沿井壁传播的滑行波。由于泥浆和地层接触良好，滑行波的传播也必然引起泥浆质点的振动，在泥浆中产生折射波，并被接收探头接收，如图 2 - 3b 所示。在这些折射波中首先到达接收探头的波称为首波或初至波。声波速度测井测量的是到达两个接收探头的首波的时间差。

接收探头除了接收到首波外，还会接收不经地层的反射波以及发射探头经泥浆直接传到接收探头的直达波等。但是只要合理的选择源距和间距，能保证接收探头首先接收到首波，并且不接收其它声波。

发射探头在  $t_0$  时刻发射的声波沿  $T \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow R_1$  和  $T \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow R_2$  的路径分别到达第一接收探头和第二接收探头。到达第一接收探头的时间为

$$t_1 = \frac{\overline{Ta} + \overline{bR_1}}{v_1} + \frac{\overline{ab}}{v_2}$$

到达第二接收探头的时间为

$$t_2 = \frac{\overline{Ta} + \overline{cR_2}}{v_1} + \frac{\overline{ab} + \overline{bc}}{v_2}$$

那么到达两个接收探头的时间差为

$$\begin{aligned} t &= t_2 - t_1 \\ &= \frac{\overline{Ta} + \overline{cR_2}}{v_1} + \frac{\overline{ab} + \overline{bc}}{v_2} - \frac{\overline{Ta} + \overline{bR_1}}{v_1} - \frac{\overline{ab}}{v_2} \end{aligned}$$

图 2 - 3 声速测井原理

a—单发射双接收声速测井下井仪； b—声速测井原理图

如果两个接收探头所在的井段，井壁规则，并且仪器居中，则  $\overline{bR_1} = \overline{cR_2}$ ， $\overline{bc} = I$ ，因此

$$t = \frac{\overline{bc}}{v_2} = \frac{I}{v_2} \quad (2-3)$$

在间距  $I$  一定条件下，只要测量出时间差  $t$ ，就能知道地层的声速。这个时差是声波在地层中传播 0.5m 所需要的时间，通过地面仪器，转变成声波在地层中传播 1m 的时间，并将这个时差转变成与其成正比的电位差，送到照相记录仪，便得到一条声波时差曲线。因此声速测井又称为声波时差测井，记录点在两个接收探头的中点处。

### 三、补偿声波测井

由于单发双收声速测井曲线在岩层界面处往往产生界面效应，即当岩层界面处井径发生明显变化时，由于同一个滑行波的首波到达两个接收探头时在泥浆中的路程不等，使曲线在岩层界面处出现误差。当单发双收声速测井仪在井内发生倾斜时，也会使测量值产生误差，为了克服井眼变化及声系倾斜造成的误差，目前经常使用补偿声波测井。

补偿声波测井原理与单发双收基本相同，只是声系结构进行了改进，补偿声波测井的声系结构如图 2 - 4 所示。两个发射器  $T_1$  和  $T_2$  分别装在四个接收器 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ) 的上下，每个发射器用两个相间 2.3in (1in = 2.54mm) 的柱元组成，其中一个元的激发比另一个慢 17μs，合成辐射在水平 30° 方向上具有最大强度，围绕这一 30° 角的声束宽度足以在地

层声速变化的整个范围内进行有效的测井。接收器是宽向接收器，在尽可能宽的角度范围内有高的接收灵敏度。声系外壳也开了槽，以增加从发射器到接收器直达波的传播路径。

测井时，当上发射器  $T_1$  发射时，仪器电子短节的控制线路使得仅能由  $R_2$  和  $R_4$  两接收器测量上发射器发出的能量。下发射器发射时，仪器电子短节控制只测量由  $R_1$  和  $R_3$  接收器接收的能量，发射器发射速率不变。

也有用两个接收器代替四个接收器的，其原理都相同。

补偿声波测井能较好地消除地层界面的影响，对井径变化有一定的补偿作用。如井眼尺寸变化对  $t$  的影响，对于上下两个发射器的影响是相反的，通过两曲线十分匹配的移动，能相当好的抵消井的影响。这实际上是用与每个发射探头相对应的一对接收器来完成的，一对接收探头相距 12.7mm，这个数值是通过实验选择的，对地层变化和井眼尺寸变化是最好的兼顾。再如当声系倾斜，上发射器工作时，记录到的时差  $t$  小了；下发射器工作时，记录到的时差  $t$  就大了，其平均值则没有误差，如图 2 - 5 所示。

图 2 - 4 补偿声波测井声系结构

四、声波时差测井曲线及其应用

1. 声波时差测井曲线的特点

对于岩性均匀的厚地层，曲线上下对称，在岩层中部曲线显示平行于井轴的直线，并且曲线的半幅点与岩层界面相对应。

砂岩（致密砂岩、渗透性砂岩、泥质砂岩、粉砂岩）、泥岩等不同岩性，显示不同的声波时差值。

如果使用单发双收声速测井仪测井，当岩层上下界面处井径严重扩大时，由于同一个滑行波的首波到达两个接收探头时在泥浆中的路程不等，故在岩层下界面处时差增大，曲线

图 2 - 5 声系倾斜时的补偿

出现增高的尖峰，在岩层上界面处时差减小，曲线出现减低的尖峰。补偿声波测井曲线不会出现这种现象。

## 2. 声波时差曲线的应用

(1) 判断岩性 不同岩性的地层，其声波速度是不同的，因此可根据声波时差大小判断岩性。

在砂泥岩地层剖面，粘土、泥岩的时差值较大，砂岩的时差值相应较小，但砂岩的时差值变化范围较大，砂岩时差值与孔隙度大小有关。孔隙度大的渗透性砂岩时差值中等，钙质致密砂岩的时差最小，粉砂岩、泥质砂岩、页岩等时差值界于砂岩与泥岩之间。图 2 - 6 是补偿声波测井曲线，较真实地反映地层声波速度的变化。

碳酸盐岩剖面，致密灰岩、白云岩，声波时差曲线较平直，时差值较低；裂缝性、溶洞性地层，曲线变化较剧烈，时差值增大；泥灰岩随泥质含量增加，时差值增大。

膏盐剖面的盐岩比无水石膏声波时差大，但盐岩地层容易溶解而使井径扩大，测量结果可能是泥浆的声波时差。

(2) 判断气层 气层在声波时差曲线上显示明显的高时差特征或周波跳跃现象。其原因是天然气的时差与油水差别较大。另外，声波在含有气体的砂岩中传播时，由于气体的密度很小，声波的能量大部分被气体所吸收、衰减，使滑行波的幅度变小，甚至不能被接收探头所接收。直达波、反射波等其它波进入接收器。因此时差曲线出现突然的增大或减小，这种现象称为周波跳跃现象。

声波时差曲线是划分气层的有效手段，图 2 - 7 是利用声波时差曲线划分气层的典型实例。在声波时差曲线上，把岩性、物性相近的渗透层进行比较，时差数值较高（一般比油层高 50 $\mu$ s/ m）或具有周波

图 2 - 6 补偿声波测井曲线

图 2 - 7 气层在声波时差和中子伽马曲线上的显示

跳跃现象的可定为气层。在判断气层时，还要配合其它曲线（如感应、微电极、中子伽马等），最好配合气测井或地化录井。当泥浆侵入较深时，气层在声波时差曲线上不一定都有显示。

(3) 确定岩层的孔隙度 岩石密度是控制声速的重要因素，而岩石密度和岩石孔隙度有密切的关系。因此声波时差可确定地层孔隙度。

实践证明，在固结压实的纯地层（包括纯砂岩和具有原生晶间孔隙的碳酸盐岩）中，孔隙度和声波时差的关系近似为

$$t = t_f + (1 - \phi) t_{ma}$$

加以整理后得

$$t = (t_f - t_{ma}) + t_{ma} \tag{2—4}$$

或 
$$\phi = \frac{t - t_{ma}}{t_f - t_{ma}} \tag{2—5}$$

式中  $t$ ——声波时差曲线读值；  
 $t_f$ ——孔隙中流体的声波时差值；  
 $t_{ma}$ ——岩石骨架的声波时差值；  
 $\phi$ ——岩石孔隙度。

对于泥质胶结砂岩在未压实的情况下，由于岩石颗粒间不紧密接触，使声波时差增大，这时利用式（2 - 5）求孔隙度通常偏大，必须引入压实校正，公式为

$$\phi = \frac{t - t_{ma}}{t_f - t_{ma}} \frac{1}{c_p} \tag{2—6}$$

式中  $c_p$ ——压实校正系数。

在正常情况下，地层压力与地层埋藏深度成正比，因此声波压实校正系数与地层埋藏深度有关。根据胜利油田对正常层系的资料统计得出

$$c_p = 1.68 - 0.0002 H$$

式中  $H$ ——地层埋藏深度，m（1000m  $\leq H \leq$  3400m）。

从式（2—4）可见，声波时差与孔隙度成线性关系。

通常许多油田对钻井取心的岩心做实验室分析，求出岩心的有效孔隙度，把它与对应的测井声波时差比较，寻找规律，建立适合该地区该层系的经验公式。例如：

华北油田上第三系：  $t = 141.7 + 746 \phi$

胜坨油田砂二段：  $t = 180 + 570 \phi$

这些关系式是由实际资料统计得到的，式中的数值与式（2—4）中的  $t_{ma}$ 、 $t_f - t_{ma}$  的含义是不同的，并不代表流体或骨架的时差值。在这些关系式中，包含了岩性、压力等因

素的影响，只适应于特定的地区和层系，应用时可以不作压实校正。

另外，声波时差曲线也为地震应用提供地层声速值。

### 第三节 固井声幅测井

声波在介质中传播时，引起质点振动，其能量逐渐被吸收，声波幅度逐渐衰减。声波幅度的衰减在声波频率一定情况下，与介质的密度等因素有关。声波幅度测井的就是通过测量声波幅度的衰减变化来认识地层特点以及水泥胶结情况的一种测井方法。

#### 一、固井声幅测井基本原理

固井声幅测井使用单发射单接收井下仪器进行测井，如图 2 - 8 所示。

从发射探头发出声波，最先到达接收探头的是沿套管传播的滑行波（称套管波）所产生的折射波。这个折射波幅度大小与套管波的能量衰减有关。衰减大则折射波幅度小，反之，折射波幅度大。套管波的衰减与套管内外介质及其分布有关，同时还与套管尺寸、厚度有关。

对于一口井来讲，管内泥浆介质的分布和性质以及全井段的套管可以认为是不变的，因此由它们引起的套管波的衰减是不变的。引起套管波衰减发生变化的只是管外介质的性质及其分布。如果井固得好，即套管与井壁之间的环形空间充满水泥，而且水泥和套管胶结良好（在套管外固结上一层水泥环），固结的水泥和套管的声阻抗差别较小，声耦合得好，这时，套管波能量容易通过水泥环向地层散失出去，使套管波衰减较大，则折射波幅度就小。如果井固得不好，即套管与水泥胶结不好或者管外根本没有水泥，管外只有泥浆存在，泥浆和套管的声阻抗差别很大，声耦合不好，此时套管波能量不易通过管外泥浆或与套管胶结不好的水泥向地层散失，使套管波能量衰减很少，则折射波幅度就大。由此可看出由套管波引起的折射波幅度大小能够反映水泥与套管胶结的情况。

图 2 - 8 声幅测井示意图

测井时，由接收探头接收由套管波引起的折射波的幅度（通常是测量折射波的第一个波峰的幅度），由测量线路把声波幅度转变成与之成正比的电压的大小，并由地面照相记录仪记录。测量是在井内自下而上连续进行，便得到一条随固井质量而变化的声幅测井曲线。

#### 二、固井声幅测井曲线及应用

固井声幅曲线的横向比例为 50mV/ cm，深度比例 1 200，测量井段从井底到水泥面以上 50 ~ 100m 处，测井时把井下仪器放到预计水泥上返高度之上 200 ~ 300m 处的纯泥浆段，调节仪器（检流计光点）使曲线幅度偏转 8 ~ 10cm，这是全井段最大值，然后下到井底，上提测井。固井声幅测井曲线的应用方法如图 2 - 9 所示。

具体说明如下：

（1）确定纯泥浆段 曲线显示幅度最大的井段为纯泥浆段。对应套管接箍的地方出现较小的尖峰，这是因声波在套管中传播遇到接箍时，接箍螺纹间隙造成滑行波有较大的能量损

耗，从而首波幅度变小。

(2) 确定混浆带 曲线由高幅度向低幅度变化的深度位置是环形空间水泥及泥浆的过渡带，称为混浆带。混浆带的底界面是水泥上返高度。

(3) 确定固井质量 应用固井声幅曲线确定固井质量是通过相对幅度进行：

$$\text{相对幅度} = \text{目的层井段声幅曲线幅度} / \text{纯泥浆井段声幅曲线幅度} \times 100\%$$

相对幅度越大，说明固井质量越差，一般规定有如下三个质量段：

相对幅度小于 20%，为固井质量好；

相对幅度介于 20% ~ 30% 为固井质量中等；

相对幅度大于 30% 为固井质量差。

各地区的固井质量标准差别较大。例如固井质量差的相对幅度，江汉油田定为大于 40%，四川地区定为大于 70%。利用声幅测井曲线确定固井质量时还应参考井径曲线，并了解固井施工情况。

(4) 确定套管断裂位置 声幅测井在套管井中除了用来检查固井质量外，尚可用来查找套管断裂位置。在套管断裂处，由于套管波的严重衰减，曲线有一明显的低值尖峰，如图 2 - 10 所示。

图 2 - 9 固井声幅测井曲线图

图 2 - 10 利用声幅测井测定套管断裂位置



## 第四节 放射性基本知识

### 一、原子及原子核的结构

所有地层及孔隙中的流体都是由化学元素组成的，构成元素的最基本单位是该元素的原子。

#### 1. 原子结构

原子是很小的粒子，其直径约为  $10^{-8}$  cm，原子核在中心，电子环绕原子核旋转。原子核带正电，电子带负电，而且原子核所带的电量与其电子带电总量相等，通常原子显中性。不同的元素，电子数不同。核外电子数用“ $Z$ ”表示，称为原子序数。

原子的质量集中在原子核上。原子核直径只有原子直径的几万分之一。绕核旋转的电子的能量分布是不连续的，它们具有一定数值的能量级别——能级。在原子序数为  $Z$  的原子中，共有  $Z$  个电子，它们按照能级增加的次序，形成一层一层的电子壳层，靠近核的壳层电子能量最低，依次向外壳层电子数目增多，能量升高。

当电子吸收外来能量时，它可从低能轨道上跃迁到高能轨道，这种现象称为电子被激发。若电子吸收外来能量较大，使其从轨道上脱离原子核的引力而自由移动，这种现象称为电离。能量最小原理指出：原子中的每一个电子都有一个趋势，要占据最低的空能级。若低能轨道缺少电子，则处于高能轨道上的电子要占据低的空能级，并把多余的能量以电磁波的形式辐射出去，这种现象称为电子跃迁。被激发的电子是不稳定的，往往要发生电子跃迁，过渡到稳定状态。

#### 2. 原子核的结构

原子核主要由质子和中子组成。质子带正电，中子显中性，中子和质子统称为核子。原子核通常用符号“ ${}^A_Z X$ ”表示，其中  $X$  表示某种元素的符号， $A$  表示原子核的质量数即中子数和质子数的总和， $Z$  表示原子序数。

在原子核内部，质子之间有静电场力，这种力是互相排斥的，不能导致原子核的稳定性，所以除了这种静电场力外，还有一种力来克服粒子间的静电斥力，使若干质子以及中子紧紧结合在一起，成为稳定的系统，这种力称为核力。当粒子互相靠近并结合成原子核时，它要释放出大量的能量（即结合能）。实验证明原子核的结合能也有高低之分，最低的能级叫基级，高能级叫激发能级。处于这两种状态的原子核分别为基态和激发态。正常情况下的原子核都处于基态（稳定状态），只有在核反应、核衰变时核可能处于激发态。处于激发态的核是不稳定的，它很快会逐级跃迁到较低能级，最后到达基态，同时把多余的能量以放射性射线的形式辐射出来。

### 二、放射性及放射性射线

#### 1. 放射性

位于元素周期表末尾的许多元素的原子核具有不稳定性。有些元素如铀，能不断地放出一线射线（如  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等），这些射线是不可见的，但能使气体电离，能激发荧光，能使照相底片感光，它具有贯穿可见光不能穿透的一些物质的本领，并能破坏细胞组织，升高本身和周围介质的温度。

铀、镭、钋等元素所具有的能够放出上述射线的性质，称为放射性。具有放射性的元素称为放射性元素。这些元素能自发地放出上述射线，不受人为条件的控制，常称为天然放射性。

原子序数相同、质量数不同的元素具有相同的化学性质，在元素周期表中它们处于同一位置，这些元素称为同位素。例如，氢元素有三种同位素：氢、氘、氚。它们的原子序数都是 1，但质量数不同，氢核质量数为 1，氘核为 2，氚核为 3，它们的符号分别为  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 。

在各种元素的同位素中有些是不稳定的，例如， ${}^3_1\text{H}$ 、 ${}^7_4\text{Be}$ 、 ${}^{11}_6\text{C}$ 、 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 、 ${}^{40}_{19}\text{K}$ 、 ${}^{60}_{27}\text{Co}$  等，它们会自发地发生衰变而放出射线，这类同位素称为放射性同位素。放射性同位素能放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等放射性射线。

2. 放射性射线

射线是一种粒子流，这种粒子就是氦的原子核  ${}^4_2\text{He}$ ，称为  $\alpha$  粒子。这种粒子质量较大，电离本领最强，穿透能力较差，在空气中穿透距离为 2.6 ~ 11.5cm，在岩石中为  $10^{-3}$  cm。其穿透能力很差，因此放射性测井不能应用。

射线是一种高速电子流， $\beta$  粒子相当于一个电子。这种射线电离本领较弱，穿透能力比  $\alpha$  射线稍强，但在金属中的射程只有 0.9cm，连仪器外壳也穿不过。因此在测井中也很少应用。

射线是一种高频率的电磁波或光子流。这种光子流不带电，其能量很高，一般多在几十万电子伏特，并且有很强的穿透能力，在空气中穿透距离可达几百米，在固体和岩石中也有几十厘米的射程。因此在测井中得到了广泛的应用。

除  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线以外，放射性射线中还有中子射线  ${}^1_0\text{n}$ ，中子射线是人为产生的，也是一种高速粒子流，由于这种粒子流不带电，不受核电场力的作用，具有很强的穿透能力，它能够穿透几十厘米的岩石，并且比其它粒子更容易钻进原子核引起核的变化。

三、核衰变与核反应

1. 核衰变

放射性现象是天然发生的原子核衰变过程。放射性元素的原子核，自发地发生分解，转变成另外某种元素的原子核，并放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等射线，这种现象称为核衰变。在核衰变时，这些元素的原子核放出放射性射线，而变成新的可能仍然是不稳定的元素，可以继续发生衰变而产生另一种新元素，直到成为非放射性元素为止。

如放射性元素钋  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  在衰变过程中由钋变为铅  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  同时放出  $\alpha$  射线。



2. 核反应

利用质子、 $\alpha$  粒子等带电粒子或者中子、光子等轰击原子核，都能使原子核发生变化或转换，这种现象称为核反应。

如镭  ${}^{241}_{95}\text{Am}$  放射性元素核衰变时放出  $\alpha$  粒子  ${}^4_2\text{He}$ ，这个  $\alpha$  粒子去轰击铍  ${}^9_4\text{Be}$  原子核时发生核反应，放出中子射线，其核反应方程式为



这是 1930 年发现的人工原子核转变现象， $\alpha$  粒子与铍原子核反应常被用来制造中子源。

四、放射性衰变规律

## 1. 放射性单位

放射性单位的名称较多，通常是针对不同的测量目的而采用不同的单位名称。例如，为了表示放射性物质的质量，用克或毫克作单位；为了表示辐射体的放射性强度（即放射性活度），用居里或毫居里作单位，法定计量单位为贝克〔勒尔〕（Bq）；为了表示物体中放射性元素的含量，用浓度单位；为了表示射线的电离效果和数量，用伦琴（R）作单位，法定计量单位为库（仑）每千克（C/kg）。

（1）放射性强度单位 放射性强度又称为放射性活度，用下述单位表示：

居里（Ci）——每秒钟有  $3.7 \times 10^{10}$  次核衰变的物质放射性强度为 1 居里（Ci）。

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$$

克镭当量——对于伽马源，放出的射线强度与 1g 纯镭所放出的射线相当时，该伽马源的强度是 1g 镭当量。

$$1\text{g 镭当量} = 10^3\text{mg 镭当量} = 10^6\mu\text{g 镭当量}$$

（2）放射性浓度单位 放射性浓度又称为放射性比活度，它表明每单位质量或单位体积的物质中的放射性强度。

若 1g 岩石中含有相当于 1g 镭的放射性物质，其放射性浓度为 1g 镭当量/g。

$$1\text{g 镭当量/g} = 10^6\mu\text{g 镭当量/g} = 10^{12}\text{pg 镭当量/g}$$

（3）放射性剂量单位 剂量（又称照射量）就是表示单位质量的被照射物质所吸收的能量。剂量常以伦琴（R）或微伦琴作单位， $1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$ 。单位时间的剂量称为剂量率，单位是  $\mu\text{R/h}$ 。剂量率与放射性源的强度、射线的能量成正比，与放射性源的距离平方成反比。

## 2. 放射性强度衰变规律

放射性强度是放射性源单位时间内发生核衰变的次数。由于放射性射线是核衰变时放出来的，因此任何放射性元素构成的放射性源的强度都随时间的增长按指数规律衰减。任何外界作用，如温度、压强、电场、磁场等都不能够影响放射性衰减的速度，这速度唯一地取决于放射性元素本身的性质。放射性衰变规律的表示式为

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-9)$$

式中  $N_0$  ——放射性元素的原始含量；

$N$  ——经过  $t$  时间后的放射性元素量；

——衰变常数，表征衰变速度的常数。

式（2—9）表明，随着时间的增长，放射性元素的原子数量减少，当时间  $t$  接近于无限大时，原子的数量趋近于零。

除了用衰变常数来表示衰变的快慢外，还用半衰期来说明放射性元素的衰变速度。半衰

期是指放射性元素从  $N_0$  个原子衰变到一半原子所经历的时间，半衰变  $T$  与  $\lambda$  的关系是

$$T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \tag{2—10}$$

衰变常数越大，半衰期越小，放射性元素衰变越快。半衰期越长，表示该元素衰减缓慢。例如，铀的半衰期  $T = 4.51 \times 10^9$  年；镭的半衰期为 1590 年，即 1g 镭经过 1590 年剩下 0.5g，再经过 1590 年剩下 0.25g。

放射性测井应用的放射源有伽马源、中子源等，这些源的强度同样随时间的增长按指数规律衰减。为了使源强稳定，一般选择半衰期较长的放射源。

五、伽马射线与物质的相互作用

伽马（ $\gamma$ ）射线穿过物质时，与构成物质的原子之间的相互作用，产生下述几种现象。

1. 光电效应（图 2 - 11）

射线穿过物质，与构成物质的原子中的电子相碰撞，光子将其所有能量交给电子，使电子脱离原子而运动，光子本身则整个被吸收。被释放出来的电子称为光电子，这种效应称为光电效应。若伽马射线能量较低，物质的原子序数较大，则主要发生光电效应。

2. 康普顿效应（图 2 - 12）

能量较大的射线穿过物质与电子发生碰撞时，射线把一部分能量交给电子，使电子与射线的初始运动方向成  $\theta$  角的方向射出（此电子称为康普顿电子），射线则朝着与其初始运动方向成  $\phi$  角方向散射。这个过程称为康普顿效应，这种散射称为康普顿散射。若伽马射线的能量中等与物质作用时，主要发生康普顿效应。

图 2 - 11 光电效应

图 2 - 12 康普顿效应

图 2 - 13 电子对效应

3. 电子对效应（图 2 - 13）

若伽马射线能量大于两个电子的静止能量（大于 1.022MeV），伽马射线与物质原子作用产生电子对效应，即产生一个负电子和一个正电子（电子对），而伽马射线本身被吸收。这种过程称为电子对效应。

4. 伽马射线的吸收

伽马射线的强度是单位时间内通过单位面积的伽马射线数，伽马射线数多，射线强度大。伽马射线通过物质时，由于物质会产生康普顿效应及光电效应等作用，伽马射线被吸收，所以伽马射线的数量随着穿过物质的厚度加大而逐渐减少，即伽马射线的强度在逐渐减弱，并且随着吸收物质的吸收系数增大而加剧。实验证明，伽马射线强度和穿过吸收物质的厚度的关系为

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (2-11)$$

式中  $I_0$ 、 $I$  ——分别为未经吸收物质和经过厚度为  $L$  吸收物质的伽马射线强度；

$\mu$  ——总吸收系数 ( $\mu = \mu_m \cdot \rho$ )，与物质的体积密度  $\rho$  和质量吸收系数  $\mu_m$  有关。

从式 (2—11) 可以看出，若物质的厚度不变，伽马射线强度的衰减决定于吸收物质的吸收系数。物质的吸收系数与地层的体积密度成正比关系。地层的体积密度越大，经过一定厚度的伽马射线的强度越小，所以伽马射线强度与体积密度成反比关系。伽马—伽马测井就是通过研究伽马射线强度的变化，确定岩石的体积密度，这种测井方法也称密度测井。

## 第五节 自然伽马测井

自然伽马测井是放射性测井中的最简单的一种测井方法。自然伽马测井是测量井剖面上各深度地层的自然伽马射线强度。根据岩层的自然伽马强度特性了解地层岩性及划分地层，也可用来寻找放射性矿藏。

### 一、沉积岩的自然放射性

沉积岩中含有天然放射性元素，主要是铀、钍和钾的放射性同位素<sup>40</sup>K，这些元素的原子核发生衰变时放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线，但只有  $\gamma$  射线的穿透能力较大，能被测井仪器探测到。

沉积岩中所含的天然放射性元素，主要来自火成岩。当火成岩被风化时，放射性元素被运移或分离。有的放射性元素（例如铀）能形成易溶于水的化合物，以溶液的形式被运移到物理化学环境适当的地方，并随其它物质一起沉积下来。另一些放射性元素（例如钍）不溶于水，则残留原地或被机械地搬运到其它地方沉积下来。

根据放射性浓度的强弱，沉积岩可分为下述三类：

放射性元素含量高的，包括粘土、泥质岩、泥质粉砂岩、火山灰、海绿石砂岩及钾盐等。深海粘土的放射性浓度最大，可达  $90 \times 10^{-12}$  g 镭当量/ g；浅海粘土的放射性浓度为  $(20 \sim 30) \times 10^{-12}$  g 镭当量/ g；钾盐的放射性浓度也很大，可达  $60 \times 10^{-12}$  g 镭当量/ g。

放射性元素含量中等的，包括砂层、砂岩及含有一定量泥质的碳酸盐岩等，它们的放射性浓度为  $(1 \sim 8) \times 10^{-12}$  g 镭当量/ g。

放射性元素含量低的，包括石膏、无水石膏、不含钾盐的盐岩、石灰岩、白云岩、某些钙质致密砂岩及煤等。

由于泥质颗粒细，具有较大的比面，其吸附放射性元素的能力也大，并且沉积时间长，有充分的时间使放射性元素从溶液中分离并与泥质颗粒一起沉积下来，而且泥质本身又含有较多的含钾矿物（正长石、水云母等），所以泥质（粘土）的放射性浓度较大。

一般沉积岩的放射性浓度随着泥质含量增加而增大。例如，在砂泥岩剖面，地层岩性由钙质致密砂岩 泥质砂岩（粉砂岩） 泥岩过渡，其放射性浓度逐渐增大。

### 二、自然伽马测井原理

自然伽马测井仪器包括地面仪器（放射性面板）、照相记录仪和井下仪器。井下仪器主要由放射性探测器和电子线路组成。井下仪器装在一个密封的钢管里，它可以单独测量，也常与中子伽马测井仪组合并测。自然伽马测井仪的示意图如图 2 - 14 所示。

#### 1. 放射性探测器

通常测量放射性射线的强度的方法是把它转变成电脉冲计数率来进行的，实现这一转变的测量元件称为放射性探测器。放射性探测器主要由荧光体（碘化钠晶体 NaI）和光电倍增管组成，如图 2 - 15 所示。井下仪器的深度记录点在探测器的位置上。

若伽马射线射入荧光体时，伽马射线就从 NaI 晶体的原子中打出电子，这些电子具有较高的能量，它们在晶体中运动又使被它们碰撞的电子激发，被激发的电子很快跃迁到稳定状态，同时荧光体闪光，放出光子。因此当一个光子射入荧光体，荧光体便发生一次闪光。光子通过光阴极被转化为光电子，光电子在电场的作用下，通过聚焦电极的聚焦作用飞向第一打拿极，打拿极在光电子的轰击下，能产生更多的二次电子，由于打拿极的电位一个比一个高，因此电子依次由第一打拿极飞向第二打拿极...直到第十三个打拿极，每通过一个电极，电子数就放大几倍，这样最后到达阳极的电子总数是原来光电子数的几十万倍，在阳极上就会产生相应的负电压脉冲输

图 2 - 14 自然伽马测井仪示意图

图 2 - 15 放射性探测器

出。输出的电压脉冲数目与荧光体闪光的次数一致。

显然伽马射线的强度越大，产生的电子数目越多，荧光体闪光的次数越多，因此输出的电压脉冲数正比于伽马射线的强度。

## 2. 测量原理

测井时，岩层的自然伽马射线穿过钢壳射入荧光体后，晶体闪光，放出光子，光子进入光电倍增管产生电脉冲，这些电脉冲被电子线路放大后由电缆输送到地面仪器，地面仪器将单位时间输入的脉冲数（即计数率）转变成电位差并送到照相记录仪。当井下仪器在井内上提测井时，记录仪便记录一条反映地层放射性强度的自然伽马曲线。自然伽马测井曲线的横坐标代表计数率，单位是脉冲/ min（或标准单位： $\mu\text{R/h}$ ）。

### 三、自然伽马测井曲线

#### 1. 自然伽马测井曲线分析

自然伽马测井曲线表示井内各个深度位置的自然伽马射线强度，它主要反映井剖面地层的放射性浓度。若井剖面由纯砂岩和泥岩组成，其放射性浓度分别是  $5 \times 10^{-12}$  和  $10 \times 10^{-12}$  g 镭当量/ g，则自然伽马曲线如图 2 - 16 所示。

图 2 - 16 自然伽马曲线

自然伽马测井的探测范围是以探测器为中心，探测半径为 30 ~ 40cm 的球体，因此自然伽马测井的测量结果反映该球体内介质的放射性浓度。由图 2 - 16 可见，在较厚地层中部，测井计数率反映地层的放射性浓度；若地层较薄或仪器位于地层界面附近，测井计数率会受到围岩的影响，因此，厚度小的砂岩读数高，厚度小的泥岩读数降低；地层界面附近测井计数率渐变。从图中还可以看出，即使某井段中各地层的放射性浓度分布均匀，但是测井曲线幅度仍有许多小的起伏，这是放射性涨落现象造成的，与地层的岩性变化无关。

综上所述，若目的层上下围岩的放射性浓度相同，单一层的自然伽马曲线有以下特点：

对于放射性浓度均匀的地层，曲线具有对称性。

若地层厚度较大（大于三倍探测半径），地层中部的测井曲线较平直，地层界面对应曲线幅度变化的半幅点。

若地层厚度较薄，目的层与围岩的测井曲线幅度差减小，平直段消失。

自然伽马测井曲线不仅受地层厚度的影响，而且还受井参数的影响。若泥浆的放射性浓度比地层低，井径扩大将增加泥浆对来自地层的放射性射线的吸收，造成测井曲线幅度降低。套管、水泥环同样都可能使测井计数率减小。另外测井速度和仪器时间常数对自然伽马测井曲线也具有一定的影响，若测井速度  $v$  和仪器时间常数（积分电路时间常数）较大，则曲线发生畸变，即曲线幅度小，极值向井下仪器移动的方向偏移。因此，进行放射性测井时，要合理选择  $v$ 、数值。在射孔深度计算中，要考虑放射性曲线的深度滞后值。

2. 放射性涨落现象

放射性测井时，即使仪器的稳定性良好，操作正确，对同一个均匀的地层，在相同的条件下进行重复多次测量，每次记录的数值也是不相同的，但是，总是在某一数值附近上下变化，这种现象称为放射性涨落，如图 2 - 17 所示。

放射性涨落和测量条件无关，是由放射性物质的本身造成的，放射性物质中含有许多不稳定的原子核，而每一个原子核的衰变是完全独立的，与别的核无关，哪一个核先衰变，哪一个核后衰变也完全是偶然的，并无先后的次序，由于以上原因使得放射性测井曲线与其它测井曲线相比，在外观上具有较多的小锯齿状。

综上所述，引起放射性测井曲线读数（幅度）的变化有两个因素：一种是由于涨落现象引起的，它与岩性无关；另一种是由岩层的放射性强度的变化引起的，根据这种变化可以评价岩性。由此可见，在应用放射性测井曲线时，不能象对微电极或其测井曲线一样，把曲线上一些微小的变化都当作岩性变化来处理。此外，在利用放射性测井曲线定量解释时，一般取岩层的平均值。

四、仪器的标准化（刻度）

自然伽马测井仪的输出是计数率（脉冲/ min），计数率不仅和地层的放射性强度有关，而且与测量仪的灵敏度有关，即在相同的地层条件下，使用不同的仪器可能测到不同的结果。为了便于资料对比和定量解释，必须消除这种由测量仪器因素对测井曲线产生的影响。因此对各仪器要进行标准化。标准化的基本方法是把各个测量仪器放在同一个已知的放射性标准强度的装置中进行测量，求得各仪器的换算系数。

若标准强度为  $A$ ，单位是  $\mu R/h$ ，标准强度作用下所产生的计数率为  $I$ ，单位是脉冲/min，则该仪器的换算系数为

$$k = \frac{A}{I} \tag{2—12}$$



对该仪器所测的曲线进行刻度，即将横向比例尺的刻度（脉冲/ min）乘  $k$ ，则得到以  $\mu R/h$  为单位的刻度。

## 五、自然伽马测井曲线的应用

自然伽马测井曲线主要用于划分地质剖面、确定储集层的泥质含量以及地层对比。

### 1. 确定岩性

在砂泥岩剖面中，纯砂岩在自然伽马曲线显示为最低值（幅度最小），泥岩显示为最高值（幅度最大），泥质砂岩、粉砂岩介于中间，并随着砂岩中含泥量的增加自然伽马读数增高，如图 2 - 18 所示。

在碳酸盐岩剖面中，粘土岩（泥岩）的自然伽马读数最高，纯石灰岩、白云岩读数最低，而泥灰岩、泥质白云岩介于两者之间，并且随泥质含量增加而增高，如图 2 - 18 所示。

在膏盐岩剖面中，用自然伽马测井曲线可以划分岩性，并找出砂岩储集层。在这种剖面中盐岩、石膏层的数值最低，纯泥岩最高，砂岩介于两者之间，数值靠近泥岩高数值的砂岩其泥质含量较多，是储集性较差的砂岩，而数值靠近石膏低数值的砂岩层，则是较好的储集层。

### 2. 地层对比

利用自然伽马测井曲线进行地层对比有下述优点：

自然伽马测井值与岩石孔隙中的流体性质（油或水）无关。

自然伽马测井值与地层水和泥浆的矿化度无关。

自然伽马测井曲线上容易找到标准层。

在油水过渡带内，同一地层在不同井，地层孔隙所含流体的性质（油、气、水）有很大差异，这就使电阻率曲线、自然电位曲线形状及幅度发生很大变化，造成应用这两种曲线进行地层对比的困难，而自然伽马测井曲线不受孔隙中流体性质的影响。因此在油水过渡带的地层对比中，可利用自然伽马测井曲线进行。

在膏盐岩剖面及盐水泥浆中，电阻率测井和自然电位测井曲线显示不好，更需要用自然伽马测井曲线做地层对比。图 2 - 19 所示是利用自然伽马测井曲线进行地层对比的实例。

自然伽马测井曲线的应用除判断岩性和地层对比之外，还可配合其它测井曲线判断裂缝性碳酸盐岩地层或孔隙性储集层，以及确定岩层的泥质含量等。

图 2 - 18 应用自然伽马，中子伽马曲线判断岩性

图 2 - 19 膏盐剖面利用自然伽马曲线进行地层对比实例

## 六、自然伽马能谱测井

自然伽马能谱测井是对自然伽马测井的新发展。其特点在于对自然界三种最常见的放射性元素铀、钍、钾作出定量的估价。现场实际测井时，可提供以百分含量表示的钾含量，以浓度表示的铀和钍的含量以及合成的自然伽马曲线，还可提供一条无铀自然伽马曲线，它相当于钍和钾含量的叠加。

沉积地层中所含放射性元素的数量和类型主要取决于沉积环境和过程，以及沉积后发生的一系列变化，显然与铀、钍、钾元素的地球化学特性有关。常规自然伽马测井只能提供一条自然伽马曲线，要对地层作出确切的评价，有时显得困难，譬如把火成岩冲积层误认为是泥岩层，或者把高铀显示的碳酸盐岩储集层当成非储集层等。因此，自然伽马能谱测井在确定粘土含量、识别粘土矿物、研究沉积环境等有其独特的用途。

沉积岩中含有的天然放射性元素，主要是铀、钍和钾的放射性同位素 $^{40}_{19}\text{K}$ ，对于每种放射性元素而言，放射出的伽马射线的数量和能量是不相同的， $^{40}_{19}\text{K}$ 只辐射 1.46MeV 的单一能量伽马射线，铀和钍元素则发射多种能量的伽马射线，如图 2 - 20 所示。自然伽马能谱测井同自然伽马测井原理相同，只是仪器更为复杂一些，除了记录一条自然伽马曲线外，还提供三种测量，即评价地层的三种天然放射性 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{40}\text{K}$ 的含量。

自然伽马能谱测井曲线实例如图 2 - 21 所示。

自然伽马能谱测井曲线的应用主要表现在下述几方面。

(1) 识别钾蒸发岩 通常明显的是钾的百分含量极高。

(2) 确定粘土含量 在碳酸盐岩储集层，通常高的铀含量与低孔隙度层段有关。在砂岩地层，钍的数量一般与粘土含量有关（钍被粘土矿物吸附），钾曲线可用于评价云母与长石的含量，高的铀浓度是由于存在有机物质。

(3) 研究沉积环境 某些矿物是某些特定环境的特征，用自然伽马能谱测井识别这些矿物，有助于重现这些沉积环境。由自然伽马能谱测井求出的  $\text{Th}/\text{U}$ 、 $\text{Th}/\text{K}$  比值在研究沉积环境中也很有用。

另外，还用于粘土矿物识别。

图 2 - 20 钾、钍、铀三种元素发射的能量伽马射线

图 2 - 21 自然伽马能谱测井曲线

第六节 中 子 测 井

中子测井主要用来划分储集层、了解岩性确定地层的孔隙度。中子测井使用“中子源”发射一定能量的中子流，中子穿过泥浆进入地层，中子的能量逐渐衰减，最后减速为热中子。热中子被岩石的原子核俘获，便放出伽马射线。选用不同的探测器，记录俘获前的热中子（或超热中子）的方法称为中子—中子测井，记录俘获后核反应放出的次生伽马射线的方法称为中子伽马测井。

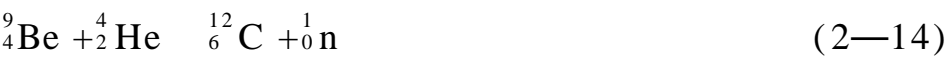
一、中子源和岩石的中子特性

1. 中子源

中子测井使用的中子源，有镅铍中子源、钚铍中子源、镭源等。目前使用较多的是镅铍中子源，它是利用放射性元素镅 (<sup>241</sup><sub>95</sub>Am) 在衰变中产生 α 射线 (<sup>4</sup><sub>2</sub>He)。



用 α 射线去轰击铍 (<sup>9</sup><sub>4</sub>Be) 发生核反应则产生中子。



这种镅铍中子源能产生平均能量是 4MeV 的中子。中子按能量大小可分为下述几种：

- 快中子：能量大于 10<sup>5</sup>eV；
- 中能中子：能量为 10<sup>3</sup> ~ 10<sup>5</sup> eV；

慢中子：能量小于 10<sup>3</sup>eV。其中能量在 0.025eV 左右的中子，具有相当于分子、原子、晶格处于热运动平衡状态时的能量，因此称为热中子，比热中子能量稍大的称为超热中子。

放射性元素镅的衰变是自发的，因此这种中子源发射中子是连续的，不能人为控制。中子伽马测井、热中子测井及超热中子测井，使用的中子源就是这种镅铍中子源。

### 2. 岩石的中子特性

(1) 减速特性 中子源发射的 3 ~ 5MeV 的快中子，高速射入地层后不断的与地层的原子核发生碰撞，使其速度减慢，能量减小。当能量降到 0.025eV 时，即成为热中子。当中子和与其质量相等的核正面碰撞时，能使中子能量全部损失。当中子与质量较大的核碰撞时，将造成中子能量的部分损失。例如 2MeV 的快中子与氢核平均碰撞 18 次就能成为热中子，而与硅核平均碰撞 261 次才能成为热中子。

地层中不同元素对快中子的减速能力是不同的，减速能力的大小可用减速长度来描述，减速长度是指快中子减速为热中子时在地层中所穿越的距离。表 2 - 2 是中子起始能量为 3.7 ~ 7MeV 的减速长度。

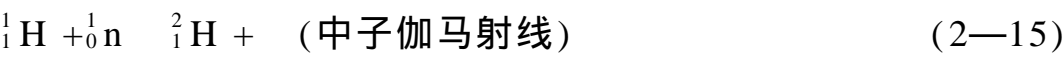
表 2 - 2 几种介质的减速长度

介 质	减速长度，cm	介质	减速长度，cm
水	7.7	砂 + 45% 水	11.0
石油	9.3	砂 + 22% 水	17.0
石膏	11.0	石灰岩	29.0
硬石膏	27.0	干石英砂	55.0

水、石油、含水砂岩和含有大量结晶水（约 52%）的石膏减速长度较小，原因是介质中含有大量的氢。因此沉积岩中决定减速长度的主要因素是地层中的含氢量。

(2) 俘获特性 快中子减速成为热中子后，由于热中子的速度较慢，游移在原子核附近的时间多，容易受原子核的核力作用而被吸收，即被俘获。原子核俘获热中子后处于激发态，并在很短的时间内通过放出伽马射线过渡到基态。

例如，氢核俘获一个热中子时产生的核反应为



各种元素的原子核对热中子的俘获能力不同，我们采用“俘获截面”这个概念来表示原

子核俘获热中子的能力，单位是靶恩。俘获截面越大，表示原子核俘获热中子的能力越强。表 2 - 3 为某些化学元素的俘获截面。

表 2 - 3 几种元素对热中子的俘获截面

元 素	俘获截面， b	元 素	俘获截面， b
氢 (H)	0.32	钙 (Ca)	0.42
碳 (C)	0.0045	钾 (K)	1.97
氧 (O)	<0.0009	镁 (Mg)	0.063
钠 (Na)	0.46	铅 (Pb)	0.20
铝 (Al)	0.22	氯 (Cl)	33
硅 (Si)	0.16	硼 (B)	718

表 2 - 3 表明，在油田岩层常见的元素中，氯、钠、氢、钾的俘获截面较大。若地层水矿化度较低，影响岩层俘获特性的主要是岩层的含氢量；若地层水矿化度较高，影响岩层俘获特性的主要是岩层的含氯量。

二、中子伽马测井

1. 中子伽马测井原理

中子伽马测井仪，由地面仪器（放射性面板）、照相记录仪和井下仪器所组成。通常与自然伽马测井仪组装在一起，同时可测量自然伽马和中子伽马两条曲线。中子伽马—自然伽马组合测井仪的示意图如图 2 - 22 所示。

井下仪器装在一个密封的防水而耐压的钢管里。其中电子线路的作用是给井下仪器各部分供电，并放大和处理探测器的讯号；铅屏蔽是防止中子源的伴生伽马射线直接打到探测器上。中子源到中子伽马探测器的距离称为源距。一般用的为长源距，为 60 ~ 65cm。中子伽马测井仪的记录点在中子源到中子伽马探测器的距离在中点。

测井时，由中子源发射的快中子射入岩层后，与岩石的原子核发生多次碰撞，快中子变为热中子，热中子被岩石的原子核俘获，放出伽马射线，次生伽马射线射入中子伽马探测器，探测器便产生电脉冲，这些电脉冲被电子线路放大后，由电缆输送到地面仪器，地面仪器将单位时间的电脉冲数转变成电位差，然后送到记录仪，便记录出一条中子伽马曲线。中子伽马测井曲线的横坐标代表计数率，单位是脉冲/ min（或条件单位），深度比例为 1 200。

2. 中子伽马测井曲线

中子伽马测井曲线的形状和幅度，不仅与岩层的含氢量有关，还与源距有关。目前现场上常用的是长源距测井仪，源距为 60cm。下面分析长源距测井仪的测井曲线特征，如图 2 - 23 所示，图中左侧为热中子的分布。

在含氢量多的岩层中（如泥岩，孔隙度较大的砂岩等），大量的氢元素对快中子的减速能力很大，快中子在中子源附近很快被减速为热中子，然后被岩层的原子核俘获放出伽马射线，这些伽马射线由于距中子伽马探测器较远而很少被接收，因此中子伽马曲线显示低值（低幅度），如图 2 - 23 的泥岩段。

含氢量少的岩层（如致密砂岩、纯净致密的灰岩、白云岩等），对快中子的减速能力较小，快中子在距中子源较远，而距中子伽马探测器较近的地方才能减速成为热中子，然后被岩层的原子核俘获放出伽马射线，这些伽马射线离探测器较近而被接收的较多，因此中子伽

图 2 - 22 中子伽马—自然伽马组合测井仪

1—中子源；2—铅屏蔽；3—中子伽马探测器；  
4—电子线路；5—自然伽马探测器

图 2 - 23 中子伽马测井曲线分析

马曲线幅度较高。

中子伽马测井曲线的形状与自然伽马测井曲线相似。不同岩性地层的中子伽马曲线幅度不同，地层界面也对应曲线幅度变化的半幅点。

中子伽马曲线的变化主要是反映岩层的含氢量，但中子伽马曲线也受地层厚度、围岩、测速、仪器时间常数以及套管等影响，其影响情况同自然伽马测井。尤其井径扩大，使泥浆环增厚，快中子在中子源附近就变成热中子的机会增加，当井径为 40 ~ 50cm 时，测量结果将反映不出地层含氢量的变化。

### 3. 中子伽马测井仪器的标准化

为了使中子伽马测井的每个仪器都能客观地、一致地对已知的同一地层获得同样的测量结果，故需要进行标准化。标准化的一般作法如下：

把井下仪器吊在空中和放入足够大的水池里（水池深大于 230cm，直径大于 200cm，池内盛满纯净淡水，矿化度  $< 0.5 \text{ g/kg}$ ），分别测量有源和无源时的中子伽马道计数率，根据下式可求标准条件下测量的计数率值。

$$I = I_2 - I_3 - (I_1 - I) \quad (2-16)$$

式中  $I$  ——一个条件单位的计数率；

$I$  ——空中无源中子伽马道计数率；

$I_1$  ——空中有源中子伽马道计数率，显然伴生伽马射线强度为  $I_1 - I$ ；

$I_2$  ——水中有源中子伽马道计数率；

$I_3$  ——水中无源中子伽马道计数率。

$I$  是标准条件下测得的，并消除了本底计数率、伴生等伽马射线的影响，可以作为中子伽马测井计数率相比较的基础，称为“条件单位”。用中子伽马曲线值除以  $I$ ，即得到以“条件单位”为单位的值。中子伽马曲线的横向比例可直接用“条件单位”刻度。

#### 4. 中子伽马测井曲线的应用

中子伽马测井曲线主要用来定性判断岩性、划分储集层、判断气层和确定地层的孔隙度。

(1) 判断岩性 用中子伽马曲线划分岩性，主要是依据各种岩性的含氢量不同。

在砂泥岩剖面（假设地层水矿化度较低）中，泥岩含有大量的束缚水（绝对孔隙度达40%），其含氢量比一般的砂岩多，因此中子伽马曲线上泥岩幅度值低，砂岩幅度值高，而砂质泥岩、泥质砂岩、粉砂岩介于中间，如图2-18所示。

在碳酸盐岩地层剖面，致密的灰岩、白云岩的中子伽马曲线幅度较高；孔隙性、裂缝性的岩层随孔隙度或含泥量的增大其幅度降低。用中子伽马测井曲线与自然伽马测井曲线配合，可将泥岩与孔隙性、裂缝性的碳酸盐岩储集层划分开来。自然伽马测井曲线用以确定泥岩用中子伽马低值（说明含氢量多，即裂缝发育、孔隙度大）确定储集层。因此可利用低自然伽马、低中子伽马这一特征划分碳酸盐岩剖面的储集层。

在膏盐岩地层剖面，石膏含结晶水多，石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的含氢量和孔隙度等于49%的地层大致相等，因此中子伽马曲线幅度为低值。硬石膏、钾盐、盐岩的中子伽马曲线幅度为高值。但是由于岩盐井段常常井径扩大而使测井曲线幅度降低。

(2) 划分气层 若储集层含有天然气时，中子伽马测井曲线幅度将明显升高。这是因为对于相同孔隙度的储集层，气层中的含氢量远小于油层或水层的含氢量。在划分气层时，还要配合声波时差和微电极曲线，以消除岩性、物性的影响。在岩性、物性相近的渗透层中，中子伽马曲线幅度高的是气层，如图2-6所示。

(3) 划分油、水层 当地层水矿化度低时，用中子伽马曲线很难确定油水接触面。因为油和水的含氢量十分近似，在中子伽马曲线上没有什么明显的区别。但当地层水矿化度高时，水中含氯量增加，由于氯原子核的俘获截面大，并且每俘获一个热中子放出2~3个能量较高的量子。因此含氯量高的地层的中子伽马射线强度大。氯主要出现在高矿化地层水中，在油中很少存在，因此在其它条件相同的情况下，水层的中子伽马读值要比油层的高15%~20%。利用中子伽马测井曲线可划分油、水层，了解油水接触面。

(4) 定位射孔计算深度 油层射孔的准确位置是用套管接箍控制的。中子伽马测井的同时还并测套管接箍曲线。对比中子伽马测井曲线和微电极曲线的地层界面深度，把油层位置确定在中子伽马测井曲线上，这样，就可以把相对于套管接箍的油层的射孔位置确定下来。深度计算时要考虑放射性测井曲线的滞后值。

(5) 确定地层孔隙度 在地层水矿化度不高和泥浆含氯量较少的纯地层，用中子伽马曲线可以确定地层孔隙度。

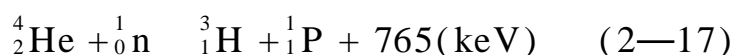
### 三、中子—中子测井

前面已提到中子伽马测井受氯元素的影响，在孔隙度极小的地层中还受到岩石骨架化学成分的影响。为了克服中子伽马测井的不足之处，提出了中子—中子测井。中子—中子测井有两种类型：一种是沿井身测量井中热中子的密度，称为热中子（补偿中子）测井；一种是沿井身测量井中的超热中子的密度，称为超热中子测井。下面主要介绍井壁超热中子测井的方法。

#### 1. 超热中子测井原理

超热中子测井井下仪器主要由中子源、中子探测器和推靠器等组成，如图 2 - 24 所示。

超热中子测井的探测器，采用了加一层镉屏蔽的氦正比计数管，镉能很好地吸收热中子，因此计数管只能记录能量大于 0.4eV 的超热中子。超热中子与氦作用，产生氦和带正电的质子 ( $^1_1\text{P}$ )，核反应式为



质子在计数管中产生电离而获得电脉冲。计数管记录的脉冲数与探测器周围的超热中子的密度成正比关系。因此探测器周围的超热中子密度愈大，超热中子曲线幅度愈高。为了保证探测器周围有较大的超热中子密度，采用较小的源距（如胜利油田测井用的源距为 37cm）。为了减小泥浆影响，超热中子测井采用推靠器将仪器紧贴井壁。

图 2 - 24 井壁超热中子测井示意图

测井时，由中子源发射快中子，快中子在地层中经过多次碰撞减速后成为超热中子，然后变为热中子。在中子的减速过程中，氢是岩石对中子减速的决定因素，因此含氢量的多少就决定探测器周围超热中子的密度的大小。在源距不变的情况下，含氢量多的岩层，中子源发出的快中子，在其附近就迅速减速为超热中子，所以探测器周围超热中子的密度大；含氢量少的岩层，中子要经过较大的距离才能转化为超热中子，因此探测器周围超热中子的密度减小。由于元素原子核对中子的俘获能力是随着中子能量的增加而减小，即氯原子核对超热中子的俘获截面很小，所以超热中子的密度不受地层含氯量的影响，而只与地层的含氢量有密切的关系。中子探测器所记录的超热中子计数率能够较准确地反映地层孔隙度的变化。这种测井能自动进行井眼等影响的校正，并用模拟计算机计算出中子孔隙度，并将其结果输入到照相记录仪，记录出中子孔隙度曲线，如图 2 - 25 所示。

#### 2. 超热中子测井曲线的应用

井壁超热中子测井曲线，主要用于碳酸盐岩剖面 and 复杂岩性的砂泥岩剖面，求岩层的孔隙度、判断岩性及划分储集层。图 2 - 25 是砂泥岩剖面井壁超热中子和密度等其它曲线实例。从图中看出，超热中子测井曲线可直接求出各岩层的孔隙度。例如厚层泥岩的孔隙度为 32.5 %、渗透性砂岩层的孔隙度为 23 %、致密砂岩的孔隙度为 3.5 %。曲线幅度变化的半幅点与岩层界面相对应，因此可利用曲线的半幅点划分岩层界面。



图 2 - 25 井壁超热中子和密度等测井曲线实例

### 3. 补偿中子测井

补偿中子测井也是一种孔隙度测井，显示中子孔隙曲线。由于超热中子测井只探测超热中子，一般超热中子密度大约为热中子密度的十分之一，所以记数低，以致统计误差成为问题。

补偿中子测井采用推靠式一个源和两个不同源距的热中子—超热中子探测器，中子源常采用  $^{18}\text{Ci}$  的镅铍强中子源，用两个  $\text{He-3}$  气体正比探测器探测中子。该仪器测量两探测器计数率的比值，该比值代表地层中中子密度随距离而衰减的速率，减少了环境因素造成的误差，使比值仅和氢指数有关，即与地层孔隙度有关，所以补偿中子测井随井深记录的是地层孔隙度。补偿中子测井由于源强大，源距也大，探测深度也大，从而增加了探测气体的能力。补偿中子测井与其它测井方法组合，也可以确定岩性、粘土含量、含水饱和度等地层参数，因此华北地区把它列为组合测井方法之一。

## 第七节 密度测井

密度测井是一种孔隙度测井，它是通过测量伽马源发射的伽马射线被地层散射后到达探测器的强度，来反映岩层体积密度的一种方法，称为密度测井或伽马—伽马测井。体积密度这一概念用来表示单位体积岩石的总密度，在岩石含有孔隙的情况下，体积密度包括孔隙中流体的密度和岩石颗粒密度。

### 一、密度测井原理

密度测井的井下仪器主要由推靠器和装在金属滑板上的定向伽马源 ( $^{137}\text{铯}$ ) 及两个加屏蔽的放射性射线探测器组成。

进行密度测井时，金属滑板在推靠器的作用下，紧贴井壁，由伽马源发射出的伽马射线与岩石原子中的电子发生作用，由于常用的伽马源 ( $^{137}\text{铯}$ ) 只发射能量为  $0.66\text{MeV}$  单一稳定的伽马射线，排除了形成电子对的可能性，所以伽马射线与地层作用时主要发生康普顿效应，产生散射伽马射线 (即伽马—伽马射线)。密度测井测量的就是这种散射伽马射线的强度。这种射线的强度取决于伽马射线与电子的碰撞，与介质单位体积中的电子数目有关。对大多数沉积岩来说，地层的电子密度与它们的体积密度近似成正比关系，体积密度的单位是  $\text{g/cm}^3$ ，因此地层的体积密度越大，伽马射线在地层中的能量损失越大，探测器记录到的伽马射线强度越低。

为消除泥饼对密度测井测量结果的影响，井下仪装有两个探测器，离源较近的探测器的探测深度较小，受泥饼影响大；离源较远的探测器的探测深度较大，受泥饼影响小。若井壁上没有泥饼，两个探测器测出的数值相等，并且都等于地层密度。如果井壁上有泥饼，两个探测器测出的数值就有差异，其差值反映了泥饼影响的大小。根据这个差值按一定关系对长源距探测器测量的结果通过计算器进行补偿，可直接得到地层密度曲线。

### 二、密度测井曲线的应用

在油气井中，密度测井的主要应用是确定岩层的孔隙度。

岩层的体积密度 ( $\rho_b$ ) 与孔隙度 ( $V_p$ )、孔隙中的流体密度 ( $\rho_f$ ) 以及岩石骨架的密度 ( $\rho_{ma}$ ) 之间的关系为

$$\rho_b = \rho_{ma}(1 - V_p) + \rho_f \quad (2-18)$$

由这个方程式可以求得岩层孔隙度

$$D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \tag{2—19}$$

式中  $\rho_b$  由密度测井曲线直接读出， $\rho_{ma}$  的数值一般是：砂岩、砂层和石英类岩石为 2.65；钙质砂岩或砂质石灰岩为 2.68；石灰岩为 2.71；白云岩为 2.87。

$\rho_f$  的确定：密度测井探测的冲洗带范围内的流体是泥浆滤液以及残余油气。在没有较多的残余油气的情况下，一般淡水泥浆  $\rho_f = 1$ ，盐水泥浆  $\rho_f = 1.1$ 。

利用上述公式，只要知道  $\rho_{ma}$  和  $\rho_f$  就可以根据密度测井读数求得密度测井孔隙度  $D$ 。

密度测井曲线除了主要用来求岩层的孔隙度之外，因不同岩石具有不同的体积密度，所以利用体积密度曲线还可以划分岩层。一些主要岩石的平均体积密度如表 2 - 4 所示。

表 2 - 4 几种主要岩石的平均密度

岩石 (矿物)	平均体积密度, g/ cm <sup>3</sup>	岩石 (矿物)	平均体积密度, g/ cm <sup>3</sup>
岩盐	2.165	砂岩	2.4 ~ 2.7
泥岩	2.2 ~ 2.65	纯石灰岩 ( $\rho = 0$ )	2.71
石膏	2.32	白云岩	2.87
粉砂岩	2.0 ~ 2.6	硬石膏	2.96

从图 2 - 25 也可以看出：厚层泥岩体积密度平均值为 2.31；渗透性砂岩平均体积密度为 2.6；而致密砂岩体积密度可达 2.69。

三、岩性密度测井

岩性密度测井是密度测井的发展，目的在于提高测井对岩性的分辨率。岩性密度测井提供两部分的测量：一是反映岩性信息的  $P_e$  曲线；二是经过改进的体积密度  $\rho_b$  曲线。

岩性密度测井也使用推靠装置和伽马源 (<sup>137</sup> 铯)，伽马源是装在具有准直装置的耐压容器中，长、短源距探测器的源距比密度测井的要短些，探测器窗口由铍组成，铍的原子序数很低，对伽马射线实际上是透明的，探测器按正比计数器方式工作，探测器离源较近，且用钨屏蔽进行充分的准直，因此到达计数器的伽马射线几乎全部是只经历了一次康普顿散射的伽马射线。

一种物质吸收伽马射线的能力用光电效应吸收截面  $\sigma_{pe}$  来量度， $\sigma_{pe}$  表示伽马射线通过地层时，由于发生光电效应而引起伽马射线减弱的程度，其值相当于一个伽马量子在单位长度距离上，由于光电效应而被吸收的几率。 $\sigma_{pe}$  与原子序数  $Z$  的近似函数关系为

$$\sigma_{pe} = K \cdot Z^{4.6}$$

式中  $K$  是表示与源的特性、仪器窗口位置和宽度特性有关的平均系数。  
有效光电效应吸收截面指数  $P_e$  即岩性指数

$$P_e = \rho / Z = K \cdot Z^{3.6}$$

通过仪器设计  $K = 10^{-3.6}$  因此

$$P_e = (\rho / 10)^{3.6}$$

可以看出  $P_e$  主要取决于地层中各组成元素原子序数的大小，所以  $P_e$  曲线对岩性有很高的分辨率。

表 2 - 5 为岩性密度测井典型地层读数。

表 2 - 5 典型地层读数

名 称		$P_e$	$\rho_b$
矿物	白云石	3.142	2.877
	方解石	5.084	2.710
	石英	1.806	2.648
	硬石膏	5.055	2.977
	石膏	3.420	2.350
	岩盐	4.169	2.032
粘土	绿泥石	6.30	2.79
	伊利石	3.45	2.52
	高岭石	1.83	2.41
	蒙脱石	2.04	2.12
煤	无烟煤	0.161	1.683
	烟煤	0.180	1.383
重矿物	重晶石	266.8	4.119
	赤铁矿	21.48	5.150
	钾石盐	8.41	1.862
	锆石	69.10	4.392
液体	淡水	0.358	1.00
	盐水	1.2	1.146
	烃	0.125	0.1
铝	—	2.571	2.596

$P_e$  曲线的应用主要是：

- 根据测井资料的快速直观显示，定性识别岩石骨架性质（岩性）；
- 附加的粘土评价；
- 识别地层中的重矿物；
- 是快速直观显示程序中主要的输入资料。

$\rho_b$  曲线与补偿密度测井曲线一样，但由于采用高效率的探测器，统计起伏误差有了明显降低。

## 复习思考题

1. 声波测井时，能到达接收探头的波有几种？首先到达接收探头的是什么波？产生滑行波的条件是什么？
2. 声波在岩层中传播时，其传播速度与岩层的岩性、物性、储集物有何关系？
3. 什么叫声波时差？何谓声波时差曲线的“周波跳跃”？如何辨认这种现象？它有何用途？
4. 补偿声波测井是如何克服井径变化的影响？
5. 只利用一条声波时差曲线能否确定气层？为什么？
6. 声速测井曲线有什么用途？
7. 根据图 2 - 26 确定固井质量及水泥上返高度？
8. 伽马射线与介质的作用有哪些效应？每种效应的发生取决于什么？
9. 放射性射线探测器是怎样将伽马射线的强度转变成电脉冲的？
10. 自然伽马测井曲线有什么用途？如何用自然伽马曲线判断岩性？自然伽马曲线受哪些因素影响？
11. 自然伽马测井曲线与自然电位曲线在应用上有哪些相似之处？
12. 自然伽马能谱测井曲线有什么用途？
13. 什么叫放射性涨落？什么叫减速长度？
14. 一般来说，沉积岩的放射性浓度与什么有关？为什么？
15. 中子伽马测井曲线有什么用途？
16. 利用中子伽马测井曲线如何判断气层？为什么？
17. 在什么条件下可用中子伽马曲线确定油水层接触面？为什么？
18. 放射性测井仪为什么要进行标准化？
19. 什么是自然伽马射线？中子伽马射线？伽马—伽马射线？它们的强度分别与地层的什么参数有关？
20. 井壁超热中子曲线、补偿中子测井曲线、密度测井曲线各有什么用途？

图 2 - 26 固井声幅测井曲线

# 第三章 工程测井

## 第一节 井径测井

在钻井过程中，由于地层受泥浆的冲洗、浸泡以及钻具的冲击碰撞等原因，实际的井径和钻头直径往往不同。在生产中计算固井水泥用量需要知道井径的数值，同时井径大小在一定程度上反映地层的岩性，是测井解释中不可缺少的参数，所以要进行井径的测量。

### 一、电阻式井径仪的结构及测量原理

电阻式井径仪的外形如图 3 - 1 所示。

一般电阻式井径仪设有四根井径腿，彼此相隔 90°，为了耐磨，井径腿采用硬度较大的钢材制作，井径腿的上端设计为偏凸轮形，下端为一圆柱形，每根井径腿的上部都有一个支柱轴，该支柱轴固定在仪器上，而井径腿可以绕支柱轴上下活动。井径仪的工作原理如图 3 - 2 所示。

图 3 - 1 JJ701 型井径仪外型  
1—接头；2—井径腿；  
3—压力平衡管；4—仪器支柱

图 3 - 2 井径仪工作原理

1—井壁；2—偏凸轮；3—滑动接触片；  
4—测量电阻；5—连杆；6—弹簧；7—支柱轴；8—井径腿

当井径变化引起井径腿张开或收拢时，偏凸轮则顶着连杆作直线运动，连杆又带动测量电阻上的滑动接触片移动，这样就把井径的变化转换成了电阻值的变化。井径变化和电阻变化的关系是

$$r = \quad \cdot \quad d \qquad (3—1)$$

式中  $k$ ——比例系数；  
 $d$ ——井径变化；  
 $r$ ——电阻变化。

根据式（3—1）可知，测出电阻的变化  $r$  就可以知道井径  $d$  的变化。  
 电阻式井径仪有两种线路即滑线式（电位器式）和电桥式线路。以滑线式为例，在滑线式井径仪中，测量电阻有四个，每个井径腿分别控制一个电阻，为了使供电电流恒定，在电路中串联了电阻值较大的镇流电阻  $r_1$ ，其原理线路如图 3 - 3 所示。

在测量井径曲线时，给 A、B 回路提供一适当的恒定电流  $I$ ，MN 端输出电位差为零时的井径称为起始井径，常用  $d_0$  表示，如果井径变化  $d$  时，电阻变化  $r$ ，所测电位差变化  $V_{MN}$ 为

图 3 - 3 滑线式井径仪的原理线路

$$V_{MN} = I \cdot r = I \cdot d = I (d - d_0)$$

则变化后的井径  $d$  为

$$d = d_0 + \frac{V_{MN}}{I} = d_0 + \frac{1}{I} \cdot \frac{V_{MN}}{I} = d_0 + k \cdot \frac{V_{MN}}{I} \tag{3—2}$$

式中  $k$ ——井径仪常数。  
 仪器常数  $k$  和起始井径  $d_0$  值可以通过校验求得，因此利用式（3—2）可确定所测井径的大小。

二、井径曲线的应用

1. 为计算固井水泥量提供平均井径

一般用算术平均法求井径的平均值。其具体求法是：在井径曲线图上作一直线段（纵线）与基线平行，使曲线在直线段一侧的突出部分和另一侧的凹入部分的面积大致相等，则直线所在位置就是该井段的平均井径，如图 3 - 4 所示。

这样分段求出每一段井径的平均值，再将各段井径的平均值相加，再除以段数，即得到全井平均井径值。

2. 划分割面、判断岩性

由于各种岩石的成分和结构不同，泥浆对它们的作用及产生的效果也不同，因此不同的岩性井段其井径不相同，如图 3 - 5、图 3 - 6 所示，现分述如下。

（1）泥岩 井壁附近的泥岩由于在钻井过程中受到泥浆的冲刷和浸泡而易垮塌，井径往往出现扩大现象，在井径曲线上一般是大于钻头直径。

（2）页岩 对于泥质页岩，井径稍大于或接近于钻头直径，但对于膨胀性页岩井径却小于钻头直径。

图 3 - 4 平均井径的求法

图 3 - 5 砂泥岩剖面井径实测曲线

(3) 砂岩 由于渗透性好，一般情况下有泥浆滤液渗入，井壁上形成泥饼，使井径缩小，井径曲线上一一般小于钻头直径，曲线光滑平直。但对于疏松的流砂层井径因垮塌而扩大。

(4) 粉砂岩 粉砂岩在井径曲线上的显示界于砂岩和泥岩之间。

(5) 砾岩和砾石层 致密坚硬的砾岩，井径接近于钻头直径。砾石层因胶结不紧，井径会扩大。

(6) 石灰岩和白云岩 致密坚硬的石灰岩和白云岩，井径等于钻头直径；含泥质的石灰岩、白云岩井径略有扩大；孔隙性石灰岩、白云岩因渗透性较好，井径略有缩小；裂缝性石灰岩、白云岩因井径不规则，井径曲线上呈锯齿状变化。

(7) 盐岩 在膏盐剖面，由于盐岩易溶解于泥浆，井径严重扩大，如图 3 - 6 所示。

(8) 石膏 井径等于钻头直径，或因溶解井径扩大，如图 3 - 6 所示。

根据井径的“缩径”现象，可以把渗透层在井径曲线上划分出来，如图 3 - 7 所示。

现场中，某些井用双井径曲线，以显示井眼的椭圆程度，从而发现裂缝等。双井径的测



图 3 - 7 用井径曲线划分渗透层示例

1—视电阻率曲线；2—自然电位曲线；  
3—井径曲线；4—钻头直径；5—井径缩小带

图 3 - 6 井径曲线划分膏盐剖面实例

量原理与单井径测量原理相同，只是四个井径腿的电阻不是都串联在一起了，而是相对的两个井径腿的电阻串在一起，从而测出两条井径曲线。

## 第二节 井 斜 测 井

由于地质条件和钻井技术的原因，裸眼井轴会发生偏斜，要了解井身是否偏斜和偏移程度,以便及时纠斜，指导直井或定向井的钻进，必须进行井斜测量。

井轴的空间位置可用两个参数表示，即倾角和方位角。倾角是指井轴和铅垂线之间的夹角，方位角则是磁北方向与井轴的水平投影线之间按顺时针方向的夹角，如图 3 - 8 所示。

### 一、井下仪器

井斜仪的类型较多，常用的井斜仪是 JX641 型井斜仪。这种井斜仪适用于裸眼井，以点测方式测定井身的倾角和方位角。

井斜仪是装在铜制的外壳里，壳的下部连

图 3 - 8 倾角和方位角

—倾角； —方位角

接一个 1m 左右长的黄铜制的加重（加重内灌铅），目的是加长仪器，使井斜仪的轴和井轴平行，测量的数值较真实地反映井的实际情况，增加了井斜仪的重量，便于顺利下井。为了防水、防压，下井仪器内部充以一定数量的变压器油。下井仪器可分测量、换挡和支架三部分，倾角和方位角测量是由测量部分完成的，其测量部分如图 3 - 9 所示。

二、测量原理

下井仪器的测量部分是装置在一个可以自由转动的框架内，其轴线和仪器轴线一致。框架底部装有四分之一圆形重块，当井斜仪随着井轴的偏斜而倾斜时，在偏心重块的作用下，使测量框架绕轴转动，最后平衡时，可以保证测量框架面与仪器轴和铅垂线所构成的平面互相垂直。

框架内上部装有一个罗盘，当仪器倾斜时，罗盘在它下面的重块的作用下，能自由绕水平轴 AA 转动，使罗盘面保持水平面的位置，当罗盘静止时，磁针指向南北，磁针北极 N 和井轴在罗盘面上的水平投影线 CC 的顺时针夹角就是井轴倾斜的方位角，如图 3 - 10 所示。

图 3 - 10 方位测量系统  
1—导流环；2—磁针；3—接触铜片；4—方位电阻环

图 3 - 9 下井仪器的测量部分

为了使方位角的变化转换成电讯号的变化，在罗盘面上装有一个带缺口的环形电阻，即方位电阻环 4，其缺口位置是装在框架偏心重块的反方向，当井向某一方向倾斜时，框架转动，相应方位电阻环的缺口位置也转动，罗盘靠其重块的作用永远保持水平，磁针永远指向南北，因此从磁北极 N 按顺时针方向到缺口之间电阻的变化就代表方位角的变化。

罗盘面上装有导流环 1，磁针 2 下面装有接触铜片 3，测量时，磁针向下贴紧，接触片将方位电阻环 4 和导流环 1 接通，部分电阻被短路。地面仪供给一定强度的电流通过方位电

阻环，便产生电位差，这个电位差的大小反映方位角的变化。

倾角测量系统装在框架内下部，如图 3 - 11 所示。

倾角测量部分，一个是带有重块的可以自由转动的导电指针 1，一个是装有弧形电阻的绝缘板 2（也叫倾角电阻板），绝缘板垂直于框架面，当井斜仪垂直时，指针正好与弧形电阻的起点 d 相接触，当仪器倾斜角度时，指针在其重块的作用下沿 BB 转动，保持其铅直位置，指针与弧形电阻的 e 点相接触。如果弧形电阻上通过一定强度的电流，则在 de 电阻上产生的电位差，就代表井斜仪倾角 的大小，即井轴的倾角的大小。

井斜测量按点测进行，一般是每隔 25m 或 50m 测一点，代表测点以上一段的井斜情况，为了严防井斜和打好定向井，可以根据具体情况加密测点。一般为下测，每点停车 5s 以上，方位角和倾角可以依次读出。井斜测量用表格给出测量结果，如表 3 - 1 所示。

图 3 - 11 倾角测量系统  
1—导电指针；2—绝缘板

表 3 - 1 井斜测量结果

井 号			
测 点	井 深， m	倾 角	方 位 角
1	800	2 °	150 °
2	825	1 °	100 °
3	850	1 °	100 °
...	...	...	...

另外，也常以井斜水平投影图直观表示井身的倾斜情况，特别能清楚地表示井底相对于井口位置的总水平位移及方位角。

### 第三节 井 温 测 井

用井温测井仪可以测定井下温度的变化。井下温度随井深变化的曲线称为井温曲线。根据井温曲线上的异常，可以确定套管外水泥上返高度、判断井内出水位置和查找气层等。

井温仪是将温度的变化转变为电阻的变化，我们通过测量电阻变化引起的与其成正比例的电位差来确定井温的变化。

#### 一、井温测量原理

井温仪外貌如图 3 - 12 所示。

井温仪有两个灵敏臂，灵敏臂是用电阻温度系数很大的铜丝绕成（所谓电阻温度系数，就是金属温度升高 1 ，其导体电阻的相对增量），并装在直径适合的紫铜管内，管壁越薄越好，紫铜管下端密封，紫铜管和泥浆直接接触，上端固定在密封盒里，密封盒内装有与灵

图 3 - 13 JW701 型井温仪原理线路

敏臂相连接的两个固定臂，固定臂由电阻温度系数很小的康铜电阻线制成，固定臂和灵敏臂组成电桥电路，如图 3 - 13 所示。

$r_1$ 、 $r_3$  作为随温度变化的两个灵敏臂， $r_2$ 、 $r_4$  为固定臂，当在温度为  $t_0$  时，电桥四个臂的电阻应相等， $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = R_0$ ，这时电桥平衡，M、N 两点间的电位差等于零。当井内温度变化时，则  $r_1$ 、 $r_3$  的电阻值发生变化，使电桥失去平衡，M、N 间出现电位差  $V_{MN}$ 、 $V_{MN}$  的大小与温度的变化  $t$  成正比。

$$t = k \cdot (V_{MN} / I) \tag{3—3}$$

图 3 - 12 JW701 型井温仪

1—接头；2—仪器外壳；  
3—灵敏臂的紫铜管套

式中  $k$ ——井温仪常数；  
 $I$ ——电桥供电电流强度。

那么此时井内温度  $t$  等于

$$t = t_0 + \quad t = t_0 + k \cdot (V_{MN} / I) \tag{3—4}$$

式中  $t_0$ ， $k$  值可通过校验井温仪求得，供电电流  $I$  值恒定，所以通过测量  $V_{MN}$  便可直接记录井内温度  $t$ ，井温仪沿井身由上向下测量，得到一条随井深变化的井内温度曲线。

二、梯度井温测井

梯度井温测井又称微差井温测井，它测量记录的是井内一定深度间隔之间的温度差，即温度梯度。梯度井温测井的井温仪（微差井温仪）其测量原理如图 3 - 14 所示。

梯度井温仪的两个灵敏臂为  $r_1$ 、 $r_2$ ，固定臂为  $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_3 = r_4$ ，灵敏臂  $r_1$ 、 $r_2$  分别装在仪器的上部和下部，相距 1.5m 或 2.5m，若  $r_1$ 、 $r_2$  所在位置的温度相同， $r_1 = r_2$  电桥平衡， $V_{MN} = 0$ ；若  $r_1$ 、 $r_2$  所在位置的温度不同时，则  $r_1$ 、 $r_2$  电桥不平衡， $V_{MN} \neq 0$ ，其数值与温度差  $t$  有关。

$$t = k \cdot (V_{MN} / I) \quad (3-5)$$

式中  $t$ ——两个灵敏臂所在位置的温差；

$I$ ——供电电流强度；

$k$ ——梯度井温仪的仪器常数；

$V_{MN}$ ——测量电位差。

梯度井温仪反映井内温度的变化较为敏感。

### 三、井温曲线的应用

地表以下温度的变化是有一定规律的。观测结果证明，在离地表一定深度范围内（10 ~ 30m），由于太阳辐射热强弱的周期性变化，其温度是呈周期性变化的。在此范围以下，地下温度是随着深度的增加而增加的，所以井温曲线是一条自上而下温度由低而高的倾斜线，如图 3 - 15 所示。

图 3 - 14 梯度井温测井原理线路

图 3 - 15 井温曲线

#### 1. 寻找气层

气体由气层进入井筒，由于压力降低而产生吸热膨胀，因而降低了泥浆的温度，所以气层位置出现井温曲线幅度降低的异常。如图 3 - 16 就是利用气层在井温曲线上的这个特征寻找气层的。

#### 2. 寻找出水层位

一般地层水的温度比泥浆温度高，所以井温曲线上的高温异常对应着出水层位，如图 3 - 17 所示。

#### 3. 寻找漏失层

在漏失层位，由于泥浆大量漏入地层，漏失处在短期内难于恢复其地温梯度，因而造成井温下降的异常变化，如图 3 - 18 所示。

图 3 - 16 利用井温曲线确定气层位置

图 3 - 18 利用井温曲线寻找漏失层

图 3 - 17 利用井温曲线判断水层

#### 4. 检查固井质量

固井时，水泥在凝固过程中放出大量的热，放出热量的多少，与井中水泥量有关，而水泥量取决于套管与井壁之间的环形空间。在注水泥后 12 ~ 28h 内，放出热量最多，最适合进行井温测量。图 3 - 19 是用井温测井曲线确定水泥上返高度。

在水泥面以下，井温曲线的形状产生了急剧的变化，因此利用井温曲线可以确定水泥面返高，也可用来检查水泥封固质量的好坏。因为井温曲线的变化主要决定于水泥环的厚薄，在水泥封固很好时，水泥环的厚薄决定于井径的大小，因此，如果井温曲线偏转大小与井径曲线很好地吻合，就说明水泥封固质量较好，如果吻合不好则应分析原因。

图 3 - 19 用井温测井曲线确定  
水泥上返高度

## 第四节 流体电阻率测井

井内泥浆电阻率是测井资料定量解释中不可缺少的参数。当地层水电阻率和泥浆电阻率差别很大时，还可以利用井内流体电阻率曲线判断出水层位。

### 一、井内流体仪的结构及测量原理

井内流体电阻率测定仪的结构如图 3 - 20 所示。

井内流体电阻率测定仪的电极系由三个环形铅电极组成，并且镶嵌在绝缘橡胶圆筒的内壁上，电极距很小，因此探测范围只局限于泥浆，而不受地层电阻率的影响。测井过程中，泥浆能流畅地通过电极环的空间，其测量原理与普通电极系的测量原理相同，只是由于电极距很小，而且电极不能看成点电极（环形电极），所以  $k$  值不能直接计算。 $k$  值一般由校验求得。

为了防止破坏井内流体的原状，井内流体电阻率的测量一般是由上向下的进行。

### 二、井内流体电阻率曲线的作用

在正常情况下，井内的泥浆是均匀的，各个深度的泥浆性能一致。由于井内不同深度的温度不同，泥浆电阻率也不同，当井深增大、井温升高时，泥浆电阻率随之减小。泥浆电阻率与井温互相对应。只有在泥浆性能变化时，泥浆电阻率测井曲线才出现异常。

若储集层的压力比泥浆柱的压力大，储集物能从地层进入井筒，从而改变了储集层井段的泥浆性能。若储集物是矿化度较高的地层水（ $R_w < R_m$ ），则该井段泥浆电阻率出现低电阻率异常；若储集物是矿化度较低的地层水（ $R_w > R_m$ ），或是油气，则该井段出现高电阻率异常。图 3 - 17 为流体电阻率测井曲线实例，该井段水层的地层水矿化度较高，因此水层井段对应的泥浆电阻率曲线呈现低电阻率异常，井温曲线呈现高温异常。

图 3 - 20 井内流体电阻率测定仪结构

## 第五节 高分辨率地层倾角测井

在地层倾角测井仪制成以前，要想知道地层的倾角，只有从岩心上测量，而利用岩心只能求得倾角而不能求得倾向，通常利用不在一条直线上的三口井的地层对比工作求得地层的倾角和倾向。

地层倾角测井是在裸眼井中探测地层层面的空间位置的测井方法。我们知道地层层面或断裂面等在空间某点位置由其走向、倾向、倾角所确定，由于知道倾向就可知道走向，故地层倾角测井只测量地层层面的倾向和倾角，简称地层倾角测井。

### 一、高分辨率地层倾角测井仪的基本结构及测量原理

高分辨率地层倾角测井仪主要有两大部分：一是四臂极板系统；二是测斜系统。此外还有复杂的机械系统和电子线路。

四臂极板系统由四个贴井壁的极板，两两相隔  $90^\circ$ ，按顺时针依次编号，每个极板上装有一个微聚焦的电极系，各电极系的记录点都在垂直于仪器轴的同一平面内，称为仪器平面或电极平面，仪器轴与仪器平面构成仪器坐标系，当仪器在井内移动时，四个极板上的电极系可连续测量出四条电阻率曲线，称为对比曲线。当电极系跨越地层界面时，由于岩性变化，电阻率曲线幅度发生变化。如果井中地层为水平岩层，微电极系的四个记录点同时通过地层界面四条电阻率曲线的拐点位置将在同一深度上，没有高程差。如果地层倾斜，则四个微电极系的记录点不是同时通过地层界面，这时记录的四条电阻率曲线的拐点位置便出现在不同深度上，拐点间存在高程差，如图 3 - 21 所示。相对的两组电极还同时测量出两条井径曲线，以显示井眼的形状、大小。

图 3 - 21 连续地层倾角测井原理

图 3 - 22 地层倾角测井  
矢量图表示法

利用这些高程差（各拐点深度相差的数值）结合其它一些参数，就可以算出地层的倾角和倾向。所需参数包括：电极系的方位角、以及井轴的倾角和方位角。这些都是由测斜装置测得。井径由微井径测量装置测得。根据测得结果可以人工计算倾角和倾向，也可由电子计算机计算并输出一张连续地层倾角测井图。

## 二、地层倾角测井资料的应用

地层倾角测井最基本、最常用的图件是矢量图，也称为蝌蚪图或箭头图，如图 3 - 22 所示。

在矢量图上纵坐标为井深，横坐标为倾角的度数，纵坐标为上北下南，横坐标为左西右东。黑圆点在纵坐标上的数值表示地层的深度，在横坐标上的数值表示该点地层真倾角的大小，黑圆点上的短线（箭头）所指方向为地层的倾向。横坐标的比例  $R$  是非线性的。除了



矢量图外还有棍棒图、方位频次图等。

地层倾角测井最普遍的应用是根据矢量图倾角和倾向的变化规律，确定地质构造的存在。

图 3 - 23 说明了一个典型断层在地层倾角测井中显示的结果。一个断层在地层倾角测井图上通常表现为一个突变。当井处在下盘中时，地层的倾向、倾角基本不发生变化，当井接近断层面时，由于下降盘的拖拉现象，使靠近断层面的岩层倾角增大，所以在井接近断层面时，地层倾角逐渐增大，到断层面附近倾角最大，井进入上升盘后，地层倾角急剧降低。

但有时层面不发生变形，在地层倾角测井图上显示不出断层，则要靠其它方法判断，如利用钻井剖面上地层的重复或缺失等去判断。

图 3 - 24 及图 3 - 25 说明了不整合在地层倾角测井矢量图上的显示。图 3 - 24 表现为倾向的突变，图 3 - 25 则表现为倾角的突变。

图 3 - 23 断层的矢量图显示

图 3 - 24 不整合的矢量图显示（一）

图 3 - 25 不整合的矢量图显示（二）

地层倾角测井矢量图也可以用来确定各种褶曲和沉积问题。

图 3 - 26 裂缝识别测井曲线

由于高分辨率地层倾角测井有特殊的仪器结构和测量参数，使它不但在构造及沉积研究方面比其它测井方法优越，而且还派生出裂缝识别测井等。

### 三、裂缝识别测井

裂缝识别测井是直接利用高分辨率地层倾角测井资料作出有利于识别和评价天然裂缝储集层的图形显示。岩心分析和生产测试资料表明，裂缝储集层通常是发育有天然裂缝的低孔隙度致密岩层，其生产能力主要是来自与井眼相交的高角度垂直裂缝。较大的垂直裂缝与井眼相交时，井壁受泥浆冲刷和钻井震动，在裂缝方向的井眼往往会明显扩大，使井眼成为椭圆形，其长轴是钻遇裂缝的方向。这时处于裂缝位置的相对两个极板会测出明显高的电导率，且其井径值明显大于钻头直径，而非裂缝位置的两个相对的极板则是低电导率，井径接近于钻头直径。天然小裂缝或人工诱导裂缝分布范围小，裂缝宽度很小，一般只与井壁一侧相交，会在与之相遇的某一条对比曲线引起局部高电导率异常，而井径与钻头直径相近。水平的有渗透性的层理面，将在四条对比曲线上都有局部的高电导率异常形成的尖峰，如图 3 - 26 所示。

## 第六节 磁性定位

在下了套管的油井中，进行固井质量检查和射孔等工作，都需要测量套管接箍位置作为定位的手段，一般用来测量套管接箍位置的仪器称为磁性定位器。

磁性定位器结构大体可分两部分：外部的连接、密封部分和内部的信号部分，如图 3 - 27 所示。永久磁铁是磁性定位器的信号源，两只磁铁要求以同一极性的磁极相对，排列在线圈两端，线圈是配合磁铁产生信号的元件。

测井时，当磁性定位器在套管中滑行经过套管接箍时，由于外界铁磁物质即套管壁的厚度发生变化，使磁力线分布发生变化，从而切割线圈产生感应电动势。磁性定位器在井下运行时，在质地均匀的套管中段不会产生感应电动势，只有在套管接箍处才会产生感应信号，产生的信号通过电缆传到地面仪器和地面仪器中深度部分配合，就可记录出磁性定位接箍曲线，如图 3 - 28 所示。该图是一条单纯的接箍曲线。实际生产中往往和其它仪器组合在一起同时测量，同时记录下几条曲线。如用于射孔校深用的自然伽马曲线和磁性定位接箍曲线就必须同时测量。

用磁性定位器测井也可检查射孔质量。

图 3 - 27 磁性  
定位器外形

图 3 - 28 套管接箍曲线

## 第七节 生产测井

随着油田开采时间的增长，自喷井所占的比例不断递减，抽油井所占的比例逐年递增，各种油井也都程度不同的含水，为了解决自喷井和抽油井的动态监测和油、水井生产中的工程问题，华北油田测井公司于 1986 年 10 月引进了 DDL - 数控生产测井系列。DDL - 数控测井系统由美国吉尔哈特工业公司设计并制造，可以配置的仪器多达数十种，既适于裸眼井测井，又适于套管井测井和生产井测井。生产井测井又包括自喷井测井、抽油井测井和注水井测井。

华北引进三套 DDL - 生产测井系列装备，包括仪器车三台，井口吊车三台，井下仪器七类 22 种 84 支。DDL - 生产测井系列装备和室内计算机可进行以下项目的测井作业和资料的数字处理。

### 1. 自喷井产液剖面测井

自喷井产液剖面测井主要使用流量计、持水率计、流体密度计、温度计、压力计、伽马仪和接箍定位器。

通过数字处理和资料解释可提供产液性质，分层产液量及产液井段。

### 2. 抽油井环空测井

抽油井产液剖面测井采用直径为 1in 环空组合仪，包括流体识别仪、温度仪、放射性示踪仪、伽马仪、流量计和接箍定位器。该仪器能在不停产的条件下检查抽油井的生产动态，直接下到套管与油管的环形空间进行测井，因此得名环空测井。

经数字处理和资料解释后，环空测井可提供主要产液层及分层相对产液量，定性分析产液性质。

### 3. 流体界面测井

流体界面测井主要使用持水率计、流体密度计、井温仪、伽马仪和接箍定位器。

流体界面测井可提供油气界面和油水或气水界面的深度，在注水开发区，可用于观察流体界面的变化情况，用以监测油井和油藏动态。

### 4. 压裂效果监测

为了提高差岩性地层油井的产量，需要对地层进行压裂。用井温仪检查压裂效果，可确定主吸液层位和厚度。

### 5. 工程测井

DDL - 测井设备中，可用 40 臂井径检查套管变形、腐蚀程度和误射孔位置。用水泥胶结测井仪检查套管与水泥、水泥与地层胶结情况，判断微环空现象和油井窜槽现象。用噪声—温度仪确定窜槽位置。

DDL - 生产测井系列经过多年使用已取得了大量的测井资料，为油田的开发建设提供了可靠的依据。在碳酸盐岩裸眼井、砂泥岩套管井、雁翎油田碳酸盐岩油藏第三次采油的界面监测及井下工程方面都取得了明显效果。

## 复习思考题

1. 井径曲线有什么用途？泥岩、渗透性砂岩、致密灰岩、裂缝或溶洞性灰岩在井径曲

线上具有什么特点？

2. 出气层、出水层、漏失层在普通井温曲线上有什么异常显示？为什么？
3. 梯度井温曲线较普通井温曲线有什么优点？
4. 地层倾角测井资料有什么用途？
5. 磁性定位测井资料有什么用途？
6. DDL - 生产测井系列一般能进行哪些测井？解决哪些问题？

## 第四章 测井资料的综合应用

### 第一节 砂泥岩剖面测井资料解释

#### 一、测井系列的选择

一个地区所使用的测井系列，主要是根据地质任务，从井剖面的地质—地球物理特点的实际出发进行实验而确定下来的。

##### 1. 标准测井系列选择

根据本地区的地质—地球物理特点，选择一种或两种电极系，作为标准电极系，与自然电位、井径等测井方法配合，在本地区所有的井中进行全井段（从井底至表层套管鞋）测量，这就是所谓的标准测井或称为对比电测。

为了应用方便，规定一个地区用统一的深度比例 1 : 500，统一的横向比例：一般视电阻率为  $2 \cdot \text{m} / \text{cm}$  ( $10 \cdot \text{m} / \text{cm}$ )；自然电位为  $12.5 \text{mV} / \text{cm}$ ；井径为  $5 \text{cm} / \text{cm}$ 。

由于不同类型和不同电极距的电极系在同一剖面中所测得曲线幅度和形状都不相同，所以在解决地质问题上具有不同的效果。因此选用的标准电极系要符合以下两个基本原则：

在标准电极系的视电阻率曲线上，能将井剖面上电阻率和厚度不同的地层区分开来，并能准确地确定其界面；

视电阻率的数值能尽量反映各岩层的真电阻率，以便根据标准测井曲线初步判断井剖面的油（气）、水层。

在砂泥岩剖面中，多采用底部梯度电极系，以利于根据视电阻率曲线的极大值、极小值划分岩层界面。例如，华北、胜利等油田，地质条件相似，选用 A2.25M0.5N 作为标准电极系，与自然电位组成标准测井系列。

##### 2. 综合测井系列选择

砂泥岩剖面测井解释在油田勘探开发中的地质任务主要是：

详细划分岩层剖面，准确确定岩层深度、厚度及油气层的有效厚度；

划分渗透性地层（储集层）；

判断油、气、水层；

计算储集层的含油饱和度、孔隙度等参数。

#### 二、标准测井曲线的应用

标准测井曲线主要用来绘制“录井综合图”和进行地层对比。

##### 1. 在绘制“录井综合图”中的应用

录井综合图是根据钻井过程中所取得的各种录井资料（包括岩心、岩屑等第一性资料）和标准测井曲线综合绘制而成的一种图件，如图 4 - 1 所示。

从录井综合图上可以了解井剖面上的地层特性（地质时代、地层顺序、岩性、地层厚度和深度等）和含油气情况。

在录井综合图上绘有标准测井曲线，是因为岩屑录井往往不能准确地确定岩性、岩层的

厚度和深度，参考标准测井曲线可以正确地绘制综合解释剖面。

图 4 - 1 录井综合图

(1) 确定岩性、划分地层界面 在砂泥岩剖面，非渗透性泥质地层在自然电位曲线上显示为基值，砂岩随其渗透性的不同、地层水矿化度的变化，显示幅度不同的正、负异常。泥岩在视电阻率曲线上显示最低值，致密砂岩（灰质砂岩、石英砂岩等）电阻率最高，渗透性砂岩电阻率较高，但在地层水矿化度很高时，也可能在曲线上显示出较低的电阻率值。泥质砂岩、粉砂岩在标准测井曲线上的显示是介于砂岩和泥岩之间。页岩的电阻率较泥岩高些，但自然电位曲线显示与泥岩相同。

利用井径曲线一般也可把砂质和泥质的岩层区分开来，泥质岩层在井径曲线上表现为井

径扩大（大于钻头直径），砂质岩层尤其是渗透性好的砂岩在井径曲线上显示为缩径（小于钻头直径），或近似等于钻头直径。

利用标准测井曲线划分地层界面时，两条曲线要综合考虑，一般以 2.5m 底部梯度电极系视电阻率曲线的极大值为准，并参考自然电位曲线的半幅点来划分岩层底界面；以 2.5m 底部梯度电极系的视电阻率曲线的极小值和自然电位曲线的半幅点来划分岩层顶界面。高阻地层被划分出来，低阻地层也相应的被划分出来。但对一些特殊岩性的和有意义的薄层，在标准测井曲线上不能很好地被反映出来，可根据微电极曲线划分界面。

（2）估计油、水层 根据标准测井资料判断油（气）、水层往往是很粗略的。在相同条件下，油气层的视电阻率比水层视电阻率高，因此结合录井资料，比较渗透层视电阻率数值的大小，可以估计油（气）、水层，如图 4 - 1 所示。

目前现场在绘制砂泥岩剖面录井综合图时，还参考组合测井曲线图，以确定岩性和判断油（气）、水层。

## 2. 在地层对比中的应用

绘制录井综合图只能认识一口井的地质剖面，我们要认识区域的地质情况，就需要进行地层对比，通过地层对比可以确定地层在空间的分布情况，了解构造形态以及岩性、岩相变化规律，从而找出油气聚集的有利地区，预测勘探目的层的深度及作钻井地质预告等。

地层对比的方法很多，主要有：岩性对比法、沉积韵律对比法、古生物对比法、测井曲线对比法。在不同的地质条件下各种方法的使用效果不同，为了准确地进行地层对比，这些方法应当互相补充。

各种测井曲线都是井剖面上各地层岩性特征的反映，由于不同层系地层的岩性、地层组合、沉积韵律等都可能存在差别，因此不同层系在测井曲线上的特点也有明显的不同，而它们的这些特点往往在其它井的测井曲线上也有相同或近似的反映。将相邻各井的测井曲线进行对比，就能找出井剖面之间的同一层系、同一地层组、直至同一地层，并能看出它们在深度、厚度、岩性等方面的变化。由于测井曲线对比方法直观、简单、准确，是现场应用最广泛、效果最好的对比方法一。

进行地层对比时，首先分析各口井测井曲线的特点，并找出标准层。选择标准层的原则是：

- 有明显稳定的测井曲线特征，易于与邻层区别；
- 地层连续性好，在整个构造或区域可以连续追踪；
- 岩性稳定，厚度变化小。

一般在砂泥岩剖面选择厚度稳定的纯泥岩、油页岩等作为标准层。

找出标准层后，先把各井同一标准层进行对比，然后根据测井曲线形态、峰尖高低等显示的相似性和差异性，把各井剖面分成“电性段”，并把各井相应的标准层及各电性段用对比线分别把它们连接起来，逐层进行对比。

下面列举一些用标准测井曲线对比解决地质问题的实例。

图 4 - 2 是某油田以海拔高度绘制的标准测井曲线近距离对比图，图中利用点划线连接的一层油页岩是该区非常明显的标准层，根据各井的标准测井曲线的形态，可把该剖面地层分为五个电性段，标准层之下约 200m 左右是一油层组。从图中可以清楚地看到各地层自然起伏情况，并清晰的得到地层的立体概念，尤其能一目了然地看出含油性和岩性的分布规律。



图 4 - 2 测井曲线对比图

图 4 - 3 是利用标准测井曲线对比确定地层超覆现象的一个例子。

从图中六口井的测井曲线对比可以看出，在左部 64 井 A 层直接与 B 层接触，向右各井 A 层与 B 层间出现的其它地层越来越多，A 层与 B 层相距越来越远，B 层以下地层与上覆地层倾角明显不同。对比说明这是由海侵造成的地层不整合接触，即超覆现象。

图 4 - 4 是利用标准测井曲线对比确定逆断层的实例。

在这三口井的测井曲线对比图中，从 3 井的测井曲线看到，该剖面中划分出较明显的 A、B、C、D、E 五个地层。2、3 两井对比发现，2 井从 C 地层开始重复出现。1 井与 2 井（或与 3 井）对比发现，1 井中在 C 层之下从 A 层开始重复，而 3 井中没有发现地层重复现象。这种地层在某井中的重复出现是由于它穿过断层造成的，并在不同井内地层重复部分是

图 4 - 3 测井曲线地层对比实例

不同的。

利用测井曲线的对比之所以能够确定断层是因为当井穿过断层面时，会出现地层的缺失或重复。若两井的同一层在深度上相差悬殊，除两井所在构造部位不同等原因之外，两井间可能有断层存在。

### 三、组合测井曲线的应用

组合测井资料是评价地层的主要依据，其基本任务是详细、准确地划分地层，正确判断井剖面上的油、气、水层，并对油、气层的物性和含油性进行评价。

#### 1. 确定岩性

综合利用测井资料确定岩性是测井解释的首要问题，只有岩性清楚了，才能正确的选择解释方法。这对于钻井地质工作中绘制录井综合剖面也是一项必不可少的、并且是十分重要的工作。

划分岩性是根据有比较才有鉴别的道理，按测井曲线读数的相对大小和明显的曲线特征，并参考岩心及岩屑录井资料进行。这是从长期生产实践中积累的一种划分岩性的方法。

应用这个方法，首先要掌握本地区的地质特点，例如它是什么岩性剖面，基本岩性是什么，特殊岩性是什么，在层系及岩性组合上有什么特点，有什么标志层等。在此基础上就可以使复杂的问题简单化，使某一井段所要划分的岩性只有很少几种，甚至只有一两种岩性，这样根据不同岩性所具的测井曲线特征，就容易把它们划分出来。

应用这个方法，还要详细研究取心岩屑录井资料、比较完整的井的岩性和测井资料，总结各种岩性的曲线特征，并在生产实践中不断完善。表 4 - 1 列有几种主要岩性的测井曲线显示特点。表 4 - 2 是广大测井解释工作人员根据自己的实践总结的几种常见岩性的测井曲线特征。图 4 - 5a、图 4 - 5b 则是应用组合测井曲线判断岩性实例。

应用曲线特征时，不能等同看待。对某一种具体的岩性，常常只有一二个主要特征是区别于其它岩性的。对于同类岩性，如砾状砂岩、砂岩（粗、中、细砂岩）、泥质砂岩、粉砂岩等，它们本质上都是砂岩，基本曲线特征是相同的，不同之处只是量的区别。

图 4 - 4 测井曲线对比实例

由表 4 - 1 可知，纯砂岩和纯泥岩的测井曲线特征差别较大，在纯砂岩和纯泥岩之间的过渡岩性——泥质砂岩和砂质泥岩，其曲线特征介于砂岩和泥岩之间。

泥岩、页岩、油页岩都是泥质岩，页岩与泥岩在自然电位、自然伽马和微电极曲线上相似，页岩比泥岩电阻率高，约在  $6 \sim 20 \cdot \text{m}$ ，中子伽马读数稍高，声波时差较小。油页岩的视电阻率比泥岩、页岩高，约在  $15 \sim 40 \cdot \text{m}$  之间，微电极曲线显示较小的负差异，其它曲线显示与页岩相似。

砂岩的测井曲线显示变化范围较大，受岩性、物性、水性、含油性的影响，表 4 - 1 的中部反映砂岩含水、油、气和含钙致密砂岩的测井曲线特征。当砂岩其它性质不变，只是岩性变化时，其测井参数变化趋势如表 4 - 3 所示。

表 4 - 1 几种主要岩性测井曲线显示特点										
曲线特征 地 层		项 目	视电 阻 率 幅 度 · m	微 电 极		自然电 位异常 幅 度	声波 时差 μs/ m	井 径 ( $d$ ) 钻头直 径 ( $d_0$ )	自然 伽马 幅度	中子 伽马 幅度
				幅 度	差 异					
泥 岩			低、平直 ( 1 ~ 6 )	低	无	基线	> 300 变化大	$d > d_0$	高	低
页 岩	页 岩		较低 ( 6 ~ 20 )	较低	无	基线	比泥岩小	$d < d_0$	高	低
	油页岩		高于一般页岩	较低	负	基线	比泥岩小	$d < d_0$	高	低
砂 岩			由低到高	较高	有	正、负异常	250 ~ 450	$d > d_0$	较低	较高
砂 岩	含盐水		低 ( 0.1 ~ 4 )	较低	负	负异常	中	$d < d_0$	较低	较高
	含淡水		中 ( 10 ~ 100 )	较高	正	正异常	中	$d > d_0$	较低	中
	含 油		高 ( 5 ~ 1000 )	高	正, 较大	正、负异常	中	$d > d_0$	较低	中
	含 气		高 ( 5 ~ 1000 )	高	正, 较大	正、负异常	高	$d > d_0$	较低	高
	致密砂岩 ( 钙质 )		高 ( 20 ~ 1000 )	高	变化大, 刺刀状	异常小或 无异常	低	$d = d_0$	低	高
其它 岩 性	薄层灰岩 白云岩		最高尖峰状 ( 20 ~ 6000 )	最 高	小 ( 正或负 )	异常小或 无异常	最低 < 250	$d = d_0$	最低	最高
	生物灰岩		低于致密灰岩	高	正	负异常	较低	$d < d_0$	最低	较高
	泥灰岩		较 高	较高	小, 正或负	基线	中	$d > d_0$	较高	中等

表 4 - 2 几种常见岩性测井曲线特征									
岩 性		曲 线 特 征							
泥 岩		微电极曲线不分开，电阻曲线平下来，声波时差大起来							
含油砂岩		微电极曲线分开来，自然电位弯进来，电阻曲线鼓起来，声波时差出平台							
含水砂岩		微电极曲线分开来，自然电位弯进来，短电极 ( 0.45m 梯度、0.4m 电位 ) 曲线鼓起来，长电极曲线平下来，声波时差出平台							
生物灰岩		微电极曲线分开来，自然电位弯进来，电阻曲线鼓起来							
致密灰岩 ( 薄层 )		微电极曲线高起来，自然电位平下来，其它曲线尖起来							
油页岩		各种曲线乱起来，自然电位平下来							

表 4 - 3 测井参数变化

影 响 岩 性 变 化	孔 隙 度	渗 透 率	趋 向 岩 性	视 电 阻 率	声 波 时 差	自 然 电 位	井 径	自 然 伽 马	中 子 伽 马	微 电 极	
										幅 度	差 异
含 泥 增 加			泥 岩								
含 钙 增 加			钙 质 致 密 砂 岩				$d \quad d_0$				
粒 度 减 小			泥 岩								

同一砂岩地层，其粒度、泥质、钙质含量是可变的。若泥质含量增大，纯砂岩向泥质砂岩过渡；若钙质含量增大，纯砂岩向钙质致密砂岩转化；若粒度减小，砂岩向粉砂岩过渡。产生上述变化时岩层的孔隙度、渗透率减小，若为油层则含油饱和度减小，向差油层、干层过渡。

由于各种地质条件不同，各种岩性的测井曲线数值范围是不同的。表 4 - 1 只给出各种岩性的测井参数的相对大小。例如，泥岩和粘土电阻率很低，变化范围小，但各地区也不相同，有的  $4 \sim 5 \cdot m$ ，有的  $1 \sim 2 \cdot m$ ，不同层位也有一个变化范围。声波时差、放射性测井也同样如此，但也有特殊情况，例如某地区泥岩时差比砂岩低，砂岩的泥质含量增大时，声波时差将减小。掌握了一个地区各种岩性地层的测井参数（曲线特征）的变化范围，就比较容易地根据测井曲线判断地层的岩性。

2. 划分渗透层

划分渗透层是测井解释的基础工作。要准确地划分渗透层，必须掌握本地区井剖面渗透层的岩性特征、电性特征，以及划分渗透层的基本方法和基本要求。

(1) 岩性特征 砂泥岩剖面渗透层的主要岩性是砂层、砂岩、粗粉砂岩，有时也有生物灰岩等特殊岩性，渗透层的上下都有厚度较大的泥岩隔层（测井解释上称为渗透层的上围岩和下围岩）。

(2) 电性特征 电性特性包括下述内容。

自然电位。当地层水矿化度大于泥浆的矿化度时，渗透层在自然电位曲线上显示负异常；当地层水矿化度小于泥浆矿化度时，曲线显示正异常；渗透层泥质越少，渗透性越好，则自然电位异常幅度越大。

微电极曲线。渗透层在微电极曲线上显示明显的正幅度差，并且幅度较高。渗透性越好，正幅度差越大，渗透性变差，正幅度差减小。非渗透层则无幅度差，曲线幅度低或呈锯齿状尖峰。

井径曲线。渗透性地层由于泥饼的存在，使实测井径通常小于钻头直径，并且曲线比较平直规则，疏松容易垮塌的砂岩例外。

声波时差。渗透层的声波时差曲线较为平直。孔隙性、渗透性好的砂岩，其声波时差较大；孔隙性、渗透性差的砂岩，其声波时差较小。

自然伽马。渗透层的自然伽马测井曲线幅度较低。泥质含量越少，渗透性越好，其幅度越低。

(3) 划分渗透层的基本方法 通常用明显的自然电位异常和明显的微电极正差异确定渗

图 4 - 5 应用组合测井  
a—应用组合测井曲线确定岩性；

曲线判断岩性实例

b—应用组合测井曲线判断特殊岩性

透层的位置，以微电极曲线幅度的半幅点或 0.45m 底部梯度电极系测井曲线极小值、极大值为主，参考自然电位和感应曲线幅度的半幅点，确定渗透层的顶底界面。

在画分层线时，要照顾到所有测井曲线的合理性，分层线必须画在整个毫米线上，并且不得偏斜，应是水平线。

划分渗透层的目的是为了评价一切可能含油气的层位，因此在划分渗透层时，凡是一切可能含油气的层都要划分出来，而且要把油气层上下水层划分出来作为比较，保证做到不漏掉一个油气层。

### 3. 综合判断油、气、水层

从渗透层中区分出油、气、水层，是测井解释工作的重要任务。测井解释的质量，直接影响着油田勘探与开发的速度和效果，如把水层解释为油层，势必给采油工作带来极大的麻烦，若把油层误判为水层，有可能丢掉一些油气层，因此为了提高解释质量，在测井解释中，除了掌握解释的一般原则外，必须深入实际，吃透第一性资料，掌握油气层的地质特点和四性关系（岩性、物性、含油性、电性）。

(1) 熟悉油田总的地质—地球物理特点 油、气、水层并不是孤立存在的，它受地质构造和地层岩性等因素的控制，因此从打第一口探井到打第一批生产井，直到油田开发的整个生产过程，要不断总结油田地质—地球物理的特点，以便完善和指导测井解释工作。

油田的构造特点和油气藏类型，控制着油、气、水纵向和横向的分布。例如一个完整的背斜油气藏，油、气、水的分布比较有规律，气在顶部，油在中间，水在底部，油水界面比较稳定。而断块油气藏则有不同的特点。

各时代地层在纵向和横向上的分布规律，包括油田钻井所遇到的各时代地层的划分情况、分布情况以及可作地层对比的主要标准层和辅助标准层等。掌握这些情况，根据一口井在油田的位置和钻井、地质以及测井获得的资料，可把一口井的地质剖面分为若干大的地层单位。如胜利油田所钻遇地层可分为平原组、明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组等。一个组又可分为若干段，如沙河街组分为沙一段、沙二段、沙三段和沙四段。这些地层划分情况及埋藏深度，常称为地质分层数据。知道这些资料，便可根据组（段）或地层组的划分，把测量井段分为地层水矿化度不同的若干解释井段，便于选择解释参数，或便于同邻井资料对比，并找出本井解释目的层的井段。

油田各主要含油层系的岩性、物性、含油性、电性特点及其在纵向和横向的变化规律。了解这些情况后，可根据本井在构造的位置及测井资料，对油、气、水层做出初步的判断。

(2) 收集直接反映地层情况的第一性资料 第一性资料是我们认识油、气、水层的基础。这些资料主要有岩心（包括钻井取心、井壁取心）、岩屑录井资料、气测资料、试油、试水和实验室分析资料，以及钻井过程中泥浆槽面的油气显示情况等。

(3) 油、气、水层的测井曲线特征 油、气、水层在各种测井曲线上显示不同的特征，如图 4 - 6 所示。

油层。油层的微电极曲线幅度中等，具有明显的正幅度差，并随渗透性变差幅度差减小；自然电位显示正异常或负异常，随泥质含量的增加异常幅度变小；长、短电极视电阻率曲线（0.4m 电位曲线、0.45m 和 4m 底部梯度曲线）均为高阻特征；感应曲线呈明显的低电导（高电阻）；声波时差数值中等，曲线平缓呈平台状；井径常小于钻头直径。



图 4 - 6 砂泥岩剖面测井资料综合解释实例

气层。在微电极、自然电位、井径、视电阻率及视电导率曲线上气层的特征与油层相同，所不同的是在声波时差曲线上出现明显的数值增大或周波跳跃现象，中子伽马曲线幅度比油层高。

油水同层。在微电极、声波时差，井径曲线上，油水同层均与油层相同，不同的是自然电位曲线异常幅度值比油层大一点，而视电阻率曲线幅度比油层小一点，感应视电导率比油层大一点。

水层。微电极曲线幅度中等，具有明显的正幅度差，但与油层相比幅度相对降低；自然电位曲线显示负异常或正异常，且异常幅度值比油层大；短电极视电阻率曲线幅度较高，而长电极视电阻率曲线幅度较低；感应曲线显示高电导值；声波时差数值中等，呈平台状；井经常小于钻头直径。

(4) 定性判断油、气、水层 目前，在判断油、气、水层时，还普遍采用定性解释的方法。即通过对组合测井资料的综合分析，结合录井显示、井壁取心资料（钻井取心）、气测资料，油、气、水的分布规律和岩性特征等的综合分析，来区分油、气、水层。

油、气、水层的定性解释主要是采用比较（对比）的方法来区别它们。在定性解释过程中，主要采用以下几种比较的方法：

纵向电阻率比较法。在水性相同的井段内，把各渗透层的电阻率与纯水层比较，在岩性、物性相近的条件下，油气层的电阻率较高。一般油层的电阻率大于纯水层电阻率的三倍以上。纯水层要求典型可靠，一般典型水层应该厚度大、物性好、岩性纯，有明显的水层特点，而且在录井中无油气显示。

径向电阻率比较法。若地层水矿化度比泥浆矿化度高，泥浆滤液侵入地层时，油层形

成减阻侵入剖面，水层形成增阻侵入剖面。在这种条件下比较探测深度不同的电阻率曲线，分析电阻率径向变化的特征，可判断油、水层。一般深探测（4m 底部梯度电极系测井曲线、深侧向曲线、深感应等）电阻率大于浅探测（0.4m 电位、0.45m 底部梯度、浅侧向、浅感应等）电阻率的岩层为油层。反之，则为水层。有时油层也可能出现深探测电阻率小于浅探测电阻率的现象，但没有水层差别那样大。

邻井曲线对比法。将目的层段的测井曲线做小层对比，从中分析含油性的变化。这种对比要注意储集层的岩性、物性和地层水矿化度等在横向上的变化，如图 4 - 7 所示。

最小出油电阻率法。

对某一构造或断块的某一层组来说，地层水矿化度一般比较稳定，纯水层的电阻率高低主要与岩性、物性有关，所以若地层的岩性、物性相近，则纯水层的电阻率相同，当地层含油饱和度增加，地层电阻率也随之升高。比较测井解释的真电阻率与试油结果，就可以确定一个电性标准（最小出油电阻率），高于电性标准是油层，低于电性标准的是水层，从而利用地层真电阻率（感应曲线所求的电阻率）和其它资料，划分出油（气）、水层。但是，应用这种方法时，必须考虑到不同

图 4 - 7 邻井曲线对比实例

断块、不同层系的电性标准不同，当岩性、物性、水性变化，则最小出油电阻率也随之变化。

判断气层的方法。气层与油层在许多方面相似，利用一般的测井方法划分不开，只能利用气层的“三高”特点进行区分。所谓“三高”即高时差值（或出现周波跳跃）；高中子伽马值；高气测值（甲烷高、重烃低）。

根据油、气、水层的这些曲线特征和划分油、气、水层的方法，就可以把一般岩性的、简单明显的油、气、水层划分出来。但是判断那些岩性比较复杂的油气层，例如低阻渗透性较好油层、低阻渗透性差的油层以及稠油层等，单靠这些曲线特征和基本方法是不够的。目前现场对这些疑难层主要靠自己多年来的地区性经验及测井资料数字处理和其它解释方法进行综合解释，对于疑难层的解释还有待于今后研究。

下面以图 4 - 6 为例来说明测井资料综合解释油、气、水层的方法。

根据微电极和自然电位曲线可划分出 6 个渗透层。

利用 0.5m 和 4m 视电阻率曲线，分析渗透层的径向侵入特性发现，第 1、2、3、4 层属于减阻侵入，5、6 层属于增阻侵入。

分析各渗透层感应曲线，第3层视电导率最小（ $75\text{mS/m}$ ，电阻率为  $13.3 \cdot \text{m}$ ），第6层视电导率最大（可达  $460\text{mS/m}$ ，电阻率为  $2.2 \cdot \text{m}$ ），而第5层介于4层和6层之间。由于第6层是整个井中目的层段电阻率最低的层，并且厚度大、物性好、岩性纯，所以第6层可视为标准水层。除去1层和2层之外，从声波时差曲线看，各渗透层的孔隙性相似，从微电极上看，各渗透层的岩性差别不大，从感应曲线上看，各层的电阻率值都大于标准水层的三倍以上。

根据电阻率的径向对比和纵向对比，1、2、3、4层均为油层显示，但是1层和2层的中子伽马曲线幅度比所有渗透层都高得多，并且第1层的声波时差值明显的高于其它渗透层，第2层具有明显的周波跳跃现象。因此1、2层均为气层，3、4层为油层。第5层根据电阻率的径向变化为增阻侵入，是水层的特点，但是从各渗透层测井曲线纵向对比看，它的电阻率显著高于第6层（水层），低于3、4两油层，考虑到上部是油气层，下部为水层，所以第5层可解释为油水同层。

油、气、水层的解释也还可以利用前面所学公式进行定量计算，求出每层的含油气饱和度的大小来确定油（气）、水层，也还可以利用某些曲线的重叠交会图进行油（气）、水层的判断。

#### 四、砂泥岩剖面数字处理成果图和应用

随着测井技术的发展，计算机技术的广泛应用，测井过程的程序控制取代了人工操作，所测资料直接进入计算机处理，实现了测井现场的快速直观解释，如图4-8所示，在室内也应用电子计算机对测井资料进行自动分析和解释，将解释结果以图形或数据的方式显示出来。图4-9是胜利油田某井砂泥岩剖面测井资料数字处理成果图。

在计算机解释成果图中，除深度道外还有四道连续的曲线显示。第一道为油水判别特征；第二道为地层流体分析，包括含水饱和度和渗透率两条曲线；第三道是可动油分析，包括地层有效孔隙度（ $e$ ）、地层含水孔隙度（ $w$ ）和冲洗带含水孔隙度（ $x_o$ ）三条曲线；第四道为地层体积分析，包括泥质含量和有效孔隙度两条曲线，把地层分为泥质、岩石骨架和有效孔隙度三部分。

##### 1. 油水判别特征（第一道）

油水判别曲线特征，主要用来自动判别油水层。自动判别油水层的方法是：选择一批具有代表性的油水层资料，应用数字处理常规方法计算出各项地质参数（如有效孔隙度、渗透率、泥质含量  $V_{sh}$ 、径向电阻率比值  $n = R_{xo}/R_t$  等），根据这些参数的分布规律，采用某种方法判别分析结果，得出二个判别向量和判别图。测井资料数字处理时，在计算出地质参数后，计算机应用这些判别向量和判别图，自动判别油水层，在成果图上，用不同的符号自动显示出油层、油水同层、水层，如图4-9所示。

##### 2. 地层流体分析（第二道）

含水饱和度（ $S_w$ ）曲线右端为0，左端为100%。

绝对渗透率（ $K$ ）曲线以  $\mu\text{m}^2$  为单位，左端为1，右端为  $10^4 \mu\text{m}^2$ ，对数刻度。两条曲线主要用来划分油（气）、水层，了解地层的渗透性。

##### 3. 可动油分析（第三道）

此道包括有效孔隙度  $e$ 、含水孔隙度  $w$  和冲洗带含水孔隙度  $x_o$  三条曲线，三条曲线的右端均为0，左端均为50%。显然，地层有效孔隙体积中饱和的流体体积，应等于油气和水的体积之和，即

图 4 - 8 现场快速直观解释图

$$e = w + 0$$

同样，在冲洗带

$$e = x_o + or$$

$e - w$  即双孔隙度曲线，两条曲线之差即为油气孔隙度  $\phi_o$ ，主要用来分析地层的含油性，划分油水层及油水接触面，还可做精确的储量计算。

$x_o - w$  显示可动油，两条曲线之差即为可动油。

$e - x_o$  显示残余油，两者之差为残余油孔隙度 ( $\phi_{or}$ )。

图 4 - 9 胜利油田某井砂泥岩剖面测井资料数字处理成果图

“可动油”是指地层中可以流动的即可开采的石油及天然气。地层含油性好、可动油多，说明地层开采价值大；地层含油性虽好，若没有可动油显示，则很可能没有什么开采价值，或采不出油。测井中的可动油概念建立在泥浆侵入的基础上。钻井时，一般保持泥浆柱的静

压力略高于地层压力，这时，泥浆滤液就要向渗透层里渗透，在井壁附近形成泥浆滤液冲洗带。如果渗透层是油层，则冲洗带内一部分油气将被泥浆滤液挤走，使冲洗带的含水饱和度  $S_{xo}$  明显大于未被泥浆侵入的地层的含水饱和度  $S_w$ ，也就是说  $S_{xo} > S_w$ ，其差值就是可动油孔隙度的大小。可动油与地层的渗透性、原油性质及泥浆柱与地层的压力差有关。只在一定的条件下才能在测井解释成果中有显示。

有时在第三道或第二道与三道之间显示出井径差值 ( $d - d_0$ ) 曲线， $d$  为实际井径， $d_0$  为钻头直径，分析解释成果可靠性时，井径差值可供参考。

第二道、第三道结合起来，可划分油（气）、水层，并可估计油气层的产能。

#### 4. 地层体积分析（第四道）

此道即为岩石成分分析，它包括泥质相对体积（泥质含量） $V_{sh}$  和有效孔隙度  $e$  两条曲线。 $e$  曲线左端为 100%，右端为 0； $V_{sh}$  曲线左端为 0，右端为 100%，两条曲线的差值表示砂岩骨架成分的相对体积。

用第四道和渗透率曲线可以分析地层的岩性和物性的特征。例如，可以进一步分析影响有效孔隙度和渗透率的因素，看出在含有泥质的岩层中，随着  $V_{sh}$  增加  $e$  和  $K$  数值明显减小。

#### 5. 单井油气储量

解释成果图（图 4 - 9）左边的累计孔隙厚度表示井剖面孔隙厚度的累加值，以单位孔隙厚度（m）为单位。若某一地层的有效孔隙度都是 25%，则 1 米深度间隔内的孔隙厚度为 0.25m，换句话说，需要 4m 厚的地层累计才能得到 1m 孔隙厚度，即相邻两个尖峰之间的厚度为 4m。地层孔隙度越大，构成单位孔隙厚度的深度间隔越小。

解释成果图右边的累计烃（油气）厚度表示井剖面油气厚度的累加值，以单位油气厚度（m）为单位。若一个地层的有效孔隙度都是 25%，含油饱和度都是 80%，则 1m 深度间隔内的油气厚度为 0.2m，需要 5m 厚的地层累积得到 1m 油气厚度，累计烃厚度反映该井段地层的油气储量。

此外，在深度道的左边还有解释层的厚度和解释结论。深度道右边是解释层号。

从图 4 - 9 中，根据渗透率曲线和第四道岩性分析曲线，可划分出含泥质少、孔隙度大、渗透性好的三个渗透层。从含水饱和度和可动油分析来看，第一层含水饱和度小于 40%，含油性较好，油气孔隙度和可动油孔隙度较大，油水判别特征曲线也明显显示为油气层，所以第一层定为油层。第三层含水饱和度大于 70%，含油性较差，油气孔隙度很小，并且没有可动油显示，油水判断特征曲线明显的显示为水层，因此第三层定为水层。第二层含水饱和度和含油性都介于 1 层与 3 层之间，油水判断特征曲线也显示为油水同层，因此第二层定为油水同层。

图 4 - 10 是华北某井砂泥岩剖面成果图。成果图中除了深度道外，还有五个道。

第一道流体分析包括视泥浆滤液电阻率和视地层水电阻率两条曲线。两条曲线和三、四道配合可以用来划分油水层。

第二道地层特征包括颗粒密度和渗透率两条曲线，和第五道配合可分析地层的岩性和物性特征。

第三道油水分析包括油线、水线、特征线以及地层束缚水饱和度、地层含水饱和度五条曲线。根据特征线与油线、水线的关系，参考地层束缚水饱和度与地层含水饱和度的关系，可划分油、水层。

图 4 - 10   × × 井砂泥岩剖面综合成果图

第四道可动油分析包括总孔隙度、冲洗带含水孔隙度和含水孔隙度三条曲线。对可动油有较好显示，可划分油水层，并可估计油气产能。

第五道地层相对体积包括泥质含量、砂质含量和总孔隙度三条曲线，显示了地层的岩性和物性特征。

对各道进行综合分析，可划分出三个渗透层。3 号层从流体分析、油水分析、可动油分析都可以看出具有油层特征，定为油层，4 号和 5 号层定为水层。

## 第二节 碳酸盐岩剖面测井资料解释

碳酸盐岩主要是石灰岩和白云岩，属于生物、化学沉积岩。以石灰岩、白云岩地层为主的地质剖面，称为碳酸盐岩地层剖面。在碳酸盐岩剖面中，常常还有泥岩、泥灰岩、石膏及盐岩地层。在石油的成因和储集性质上，碳酸盐岩剖面与砂泥岩剖面有显著的区别。因此，了解碳酸盐岩地层的储集性质和地质特点，是合理选择测井系列和解释方法所必须的。

### 一、碳酸盐岩剖面地质特点

碳酸盐岩储集层的分类一般是以孔隙结构特点为依据的，主要分为孔隙型、裂缝型、溶洞型，实际上其孔隙类型多为上述几种类型的复合情况。

孔隙型碳酸盐岩储集层与碎屑岩储集层的储集空间相似，主要是一些粒间孔隙、晶间孔隙以及生物体腔形成的孔隙。其典型岩性主要是鲕状灰岩、生物灰岩等。而裂缝、溶洞为次生孔隙。次生孔隙是指成岩以后，由于受到构造运动作用而产生断裂、地下水的溶蚀作用和白云岩化作用等所生成的裂缝、溶洞。这种孔隙度较大、形状不规则、分布不均匀、渗透性较高的次生孔隙，也是储集油气的重要场所。

碳酸盐岩剖面测井工作特殊性在于：

储集层具有较高的电阻率，井内分流影响严重，普通电阻率、感应测井等方法失效，必须使用有聚焦电极的侧向测井。

储集层是碳酸盐岩，自然电位与微电极测井应用效果较差，而使用自然伽马测井较好。

储集层的裂缝、溶洞等次生孔隙发育，由于声波时差测井反映岩层次生孔隙度较差，因此一般采用中子测井和密度测井或其它测井。

### 二、测井系列的选择

根据碳酸盐岩储集层的特点，通常选择以侧向、放射性、声波测井为主的测井系列。如华北油田碳酸盐岩剖面综合测井系列内容是：双侧向、补偿密度、补偿中子、自然伽马、补偿声波、井径、微球形聚焦或微侧向。标准测井系列内容是：双侧向、自然伽马。

图 4 - 11 是某油田碳酸盐岩剖面综合测井曲线实例。

### 三、碳酸盐岩剖面测井资料解释

碳酸盐岩剖面的储集层，是指致密地层中的缝、洞、裂隙发育带。利用侧向、自然伽马、中子伽马（补偿中子）、声波时差测井的“三低一高”可以将渗透层与致密地层或泥质地层相区别。具体划分储集层时，一般先找低阻高孔隙显示（即双侧向低、补偿中子孔隙度高、补偿声波时差值高），然后利用自然伽马曲线排除掉泥质含量高（高自然伽马）的地层，其它即为储集层。

划分储集层时，要特别重视钻井地质的油气显示井段，以及放空、漏失等井段，然后根据储集层的电性特征进行分层。储集层的界面一般以侧向曲线的半幅点为主，参考其它曲线确定。



图 4 - 11 碳酸盐岩剖面组合测井曲线实例

目前华北、胜利等油田，在碳酸盐岩剖面用测井资料数字处理的方法，由电子计算机自动分出储集层，并根据岩层孔隙度的大小划分出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级储集层。

图4 - 12是某高产油井碳酸盐岩剖面测井资料数字处理成果图。从图中可以看出，本井

图 4 - 12 胜利油田某井碳酸盐岩剖面测井资料数字处理成果图

段 3596m 以上，以白云岩为主，含有石灰岩，3596m 以下，以石灰岩为主，含有白云

— 124 —

岩。3588 ~ 3596m、3619 ~ 3625m 两井段，次生孔隙发育、渗透率较高，是溶洞性较好的储集层定为 级储集层；3579 ~ 3586m 裂缝率较高，但由于孔隙度不大，定为 级储集层；3596 ~ 3605m 由于孔隙度较大，渗透率较高，定为 级储集层；3609 ~ 3616m，孔隙度很小，渗透率很低，但由于裂缝率较高，定为 级储集层。从含油气看，大部分井段都有油气显示，并且与试油结果相符合。

### 复习思考题

1. 标准测井曲线的用途是什么？
2. 什么叫标准测井？本地区砂泥岩剖面标准测井系列的内容是什么？
3. 在砂泥岩剖面标准测井曲线图上，根据下列测井曲线特征判断各是什么地层？  
视电阻率很高，自然电位异常幅度大；  
视电阻率较低，自然电位异常幅度大；  
视电阻率很高，自然电位异常幅度小；  
视电阻率中等，自然电位异常幅度中等；  
视电阻率很低，自然电位无异常幅度。  
(泥岩、泥质砂岩、致密砂岩、含油砂岩、含水砂岩)
4. 利用图 4 - 13 划分地层，并判断油、水层？(砂泥岩剖面)
5. 根据图 4 - 13 试写出三个油层、二个水层、二个泥岩层的顶底界面深度及厚度？
6. 本地区砂泥岩地层剖面组合测井系列的内容是什么？用组合曲线如何划分渗透层？
7. 某井段有三层砂岩层，它们的自然电位异常幅度相近，第一层声波时差较大，第二、三层声波时差相近，第一、二层电阻率值较高，第三层电阻率较低，这三层各是什么地层？(水层、油层、致密层、气层)
8. 某井段相邻四层砂岩地层，从上到下，电阻率、自然电位异常幅度、微电极幅度和幅度差逐层减小，声波时差变大，试判断电阻率下降的原因？(地层致密、地层含油饱和度降低、地层泥质含量增大)
9. 图 4 - 14 是华北砂泥岩剖面的组合测井曲线图，试进行分层并判断油、气、水层？
10. 本地区碳酸盐岩剖面组合测井系列内容和标准测井系列内容分别是什么？
11. 在碳酸盐岩剖面如何划分储集层？在图 4 - 11 中试划分储集层。
12. 在本章所介绍的数字处理成果图中 (图 4 - 9、图 4 - 10、图 4 - 12)，油、水层显示有什么共同特点？

图 4 - 13 砂泥岩剖面标准测井曲线图

图 4 - 14 砂泥岩剖面综合测井曲线图

## 第五章 地震勘探知识

石油勘探工作中，地球物理勘探方法（简称物探）是很重要的方法，它可以提供覆盖地区地下地质构造的信息，寻找生油盆地和储油构造。物探的方法包括重力、磁力、电法和地震勘探等。地震勘探与其它物探方法相比，具有精度高的优点，与钻探相比，又有成本低和可以了解大面积地下地质构造情况的特点，因此地震勘探成为石油勘探中最有效的勘探方法之一。在我国，大庆油田首先是用地震勘探方法发现构造而后突破的，接着胜利、大港、任丘等主要的大油田也是这样。据统计，自大庆油田发现以来，95 % 的新油田都是用地震勘探提供构造的。随着科学技术的发展，地震勘探基本上实现了数字化、高信噪比、高分辨率，三维地震也已广泛应用于生产中，使地震勘探不仅可以查明地下地质构造，提供钻探井位，还可用来研究地层的岩性变化，预测油气田的存在以及确定沉积环境等，三维地震勘探的应用，不但显著提高了详探井的成功率，还在已开发多年的老油气田又发现了新的含油气区块，从而增加了储量，提高了产量，因此许多油田和钻井部门都越来越广泛地开始使用地震资料。对于地质人员更应该掌握一些地震勘探的基本知识，以便利用地震资料进行更广泛的地质研究。

### 第一节 地震勘探概述

所谓地震勘探是通过人工方法激发地震，根据地震波在地下传播情况以查明地下地质构造的一种物探方法。

#### 一、地震波的基本概念

##### 1. 地震波是在岩层中传播的弹性波

我们知道任何一种固体在外力作用下都会发生体积和形状的变化，这种变化称为物体的形变。岩石也是这样，当受力由小逐渐增大时，大体上经历三种状态：外力很小时，在弹性限度以内，外力去掉后岩石立即恢复原状，这是弹性形变；当外力增大到超过弹性限度，在外力去掉后，岩石不能恢复原状，保留了在外力作用下所产生的形变，这是塑性形变；当外力继续增大，超过了岩石的极限强度，岩石就会产生断裂或破碎。地震勘探就是打一口浅井，放入 10 多公斤炸药，称为震源，炸药爆炸产生的强大压力大大超过岩石的极限强度，岩石遭到破坏形成一个破坏圈，随着离开震源距离的增大，压力减小，但仍超过岩石的弹性限度，形成一些辐射状或环状裂隙的塑性形变，随着离开震源距离的进一步增加，压力降低到岩石的弹性强度以内，又因炸药爆炸所产生的是一个延续时间很短的作用力，所以岩石发生弹性形变。因此地震波是一种在岩层中传播的弹性波。

##### 2. 地震波传播的规律

在地震勘探中用炸药激发时，一声炮响之后会产生各种各样的地震波。按照波在传播过程中的传播路径的特点，可把地震波分为直达波、反射波、透射波、全反射波、滑行波、折射波等，如图 5 - 1。

地震波在岩层中的传播情况与几何光学很相似。地震勘探中，地震波向外传播，没有遇

图 5 - 1 地震波种类

到分界面直接到达检波器称为直达波。

地震波在地下岩层中传播，遇到介质分界面会发生反射，形成反射波，其变化规律符合反射定律（在声学基本知识中已讲）。反射定律只讨论了入射波与反射波之间的关系，没有讨论在什么条件下弹性分界面才能产生反射，下面讨论这个问题。设入射波的振幅为  $A_{\lambda}$ ，反射波的振幅为  $A_{\text{反}}$ ，反射波和入射波振幅之比称为反射界面的反射系数，用字母  $C$  表示，即  $C = A_{\text{反}} / A_{\lambda}$ ，根据反射理论，如果波垂直入射到反射界面上，则反射系数

$$C = A_{\text{反}} / A_{\lambda} = (\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1) / (\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1) \tag{5—1}$$

式中  $\rho_1$ 、 $v_1$ 、 $\rho_2$ 、 $v_2$  表示分界面上下两种介质的密度和波在介质中传播的速度； $\rho_1 v_1$ 、 $\rho_2 v_2$  称为波阻抗。

反射系数的物理意义是：地震波垂直入射到反射界面上后，被反射回去的能量的多少，说明了界面上能量的分配问题。从式（5—1）可以看出反射系数的大小决定于上下介质的波阻抗差，波阻抗差别越大，反射波的振幅越大，反之，反射波振幅就小，当  $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$  时，则不会产生反射。所以形成反射波的条件是上下介质的分界面必须是波阻抗的分界面。

表 5 - 1 中列举了几种岩石的波阻抗。

表 5 - 1 几种岩石的波阻抗

岩石名称	速度, m/ s	密度, g/ cm <sup>3</sup>	波阻抗, g/ (s·cm <sup>3</sup> )
土壤	200 ~ 800	1.1 ~ 2.0	2.2 ~ 16
砂层	300 ~ 1300	1.4 ~ 2.0	4.2 ~ 26
粘土	1800 ~ 2400	1.5 ~ 2.2	27 ~ 52.8
砂岩	2000 ~ 4000	2.1 ~ 2.8	42 ~ 112
石灰岩	3200 ~ 5500	2.3 ~ 3.0	73.6 ~ 165
结晶岩石	4500 ~ 6000	2.4 ~ 3.4	108 ~ 204

在实际的沉积岩中，沉积间断形成的侵蚀面（不整合面）是一个明显的波阻抗界面。地下深处的老地层（石灰岩、变质岩等）与上覆沉积岩，由于波速差别很大，因此也是一个很好的反射界面，常得到极强的反射波。

当入射波透过反射界面时形成透射波，可用透射定律说明。透射定律数学式为

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$$

式中，当  $v_2 > v_1$  时， $\theta_1 < \theta_2$ 。地下实际存在着多层分界面，假设速度是递增的，即  $v_3 > v_2 > v_1$ ，则波从第一层传到第三层时，射线是一条折线。

下面讨论透射波的强度，设透射波振幅为  $A_{\text{透}}$ ，透射系数为  $Q = A_{\text{透}} / A_{\text{入}}$ ， $Q$  的物理意义是说明入射波的能量有多少转换成透射波的能量。根据理论证明，当波垂直入射时，透射系数为

$$Q = 1 - C = 2 v_1 / (v_1 + v_2) \tag{5—2}$$

从式（5—2）可知，在地震勘探中，设震源激发的能量在特定条件下是一定的，即入射波的能量一定，如果反射波振幅越强，透射波振幅则越弱。

在实际的沉积岩中，如果  $v_2 \gg v_1$ ，即出现高速层时，临界角很小，能产生透射波的范围也很小，入射波的能量绝大部分被界面反射回去，使地震波不能向深部传播，这种现象在地震勘探中称为“高速层的能量屏蔽”，它影响对中深地层的地震勘探工作。

目前石油勘探中主要使用反射法地震勘探，对于反射法地震勘探来说，反射波能提供地下构造及岩性等信息，我们称它为有效波，妨碍我们记录有效波的其它波称为干扰波，地震勘探中尽量压制干扰波，使有效波能清晰地被记录下来。

## 二、反射波法地震勘探原理

在测线上某点打井放炮，于是就产生地震波向地下传播，地震波遇到两种地层的分界面就会产生反射，透射波再向下传播，又遇到两种地层的分界面也会发生反射，在地面上用精密仪器把来自各个地层分界面的反射波引起地面振动的情况记录下来。然后根据地震波从地面开始向下传播的时刻（即爆炸时刻）和地层分界面反射波到达地面的时刻，得出地震波从地面开始向下传播到达地层分界面，又反射回地面的总时间  $t$ ，再用声速测井或地震测井求出地震波在岩层中传播的速度  $v$ ，利用公式  $H = \frac{1}{2} v \cdot t$  就可得出地层分界面的埋藏深度。沿着地面的测线，一段一段进行观测，并对观测结果进行处理，就可以得到形象地反映地下岩层分界面埋藏深度起伏变化的资料——地震时间剖面图，如图 5 - 2 所示。

从图中可以看出，地层界面 1 是水平的，反射波振幅极大值的连线（同相轴）是一条水平直线。地层界面 2 是隆起的，来自界面 2 反射波的传播时间在各点不一样，在界面埋藏浅的地方传播时间短，埋藏深的地方传播时间长，这个反射波的同相轴就是弯曲的。

在工区内布置许多条测线，组成测线网，并在每条测线上都进行观测之后，就可以得到地下地质构造起伏的完整概况。再结合地质、测井、钻井等各方面资料进行分析、研究，就能查明地下可能储油的构造，确定钻探的井位。

图 5 - 2 地震勘探原理示意图

## 第二节 地震勘探的地质基础

地震波的速度是地震勘探中最重要的一个参数，由于岩石性质不同，地震波在其中传播速度也不同，利用这种关系可以研究地下地质构造。

### 一、影响地震波在岩层中传播速度的地质因素

地震波在岩层中传播的速度与岩石的密度、埋藏深度、地质年代、构造运动等因素有关。

#### 1. 岩性

一般在密度大的致密岩层中波速大，在密度小的疏松地层中波速小，岩石在其它条件相同的情况下，密度又与岩石的孔隙度有关，大多数火成岩、变质岩只有很少或没有孔隙，因此火成岩和变质岩的地震波速度大于各种沉积岩的波速，沉积岩中碳酸盐岩波速大于页岩的波速，页岩的波速大于砂岩的波速，砂岩的波速大于泥岩的波速。

#### 2. 构造历史与地质年代

实际工作中发现，同样深度且成分相似的岩石，当地质年代不同时，波在其中的传播速度也不同，地质年代老的比新的岩层具有较高的速度。

速度的大小还与构造运动有关，在强烈褶皱地区，经常观测到速度的增大，而在隆起构造顶部，一般速度变小。

#### 3. 岩层的埋藏深度

在岩层性质与地质年代等相同的条件下，地震波的速度随岩层埋藏深度的增加而增加，因为埋藏越深，承受上覆岩层的压力越大，使岩石密度越大，因而速度也变大。但对地质年代较老的致密地层，速度随埋藏深度增大不明显。在沉积岩中，速度随深度增加而增大，但到了一定深度之后，速度的增加就不明显了。

#### 4. 孔隙中的充填物



岩石孔隙中充填物的性质对地震波速度也有很大影响，如砂岩孔隙中充填了油气，则波速会大大降低，与围岩组成强的波阻抗分界面，而形成特强的反射波。

二、地震地质条件

在一个地区能否用地震勘探来解决地质问题，很大程度上决定了该地区的地震地质条件，地震地质条件包括表层地震条件和深部地震条件。

1. 表层地震地质条件

表层条件往往决定了地震勘探的激发、接收及波的传播。

低速带。地表附近的地层由于长期遭受风化而变得比较疏松，地震波在该地层中传播，速度很低，因此称为低速带。低速带的存在一方面使深部传上来的地震波向法线方向偏移，在地表要接收这种波，检波器必须设计成接收质点垂直位移的形式；另一方面低速带具有较大的吸收系数，对地震波的高频成分具有很强的吸收作用，当低速带很厚时，很难激发出较强的地震波。

表层潜水面情况。表层潜水面很浅，并且含水量丰富，是比较理想的条件，这样可使钻井方便，并能激发出较强的地震波。

总之，较好的表层地质条件是地表较平坦，低速带较薄，含水层水量丰富，这样有利于地震波的激发和接收。

2. 深部地震地质条件

深部条件关系到用地震方法解决地下地质构造的质量。好的深部条件一般是：

地震层位与地质层位的一致。地震层位指的是反射界面，即波阻抗面，而地质层位指的是岩性界面，如果两者一致，地震勘探中通过对地震界面埋藏深度及其起伏形态的研究，也就达到了对岩性界面的研究，从而可解决地下地质构造的问题。

具有较好的地震标准层。地震标准层和地质标准层一样重要，利用它可以对比连接地震层位，控制构造形态等。

地震标准层指的是反射能量强、能大面积连续稳定追踪，并具有较明显特征的地震波，如图 5 - 3 中 T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 两个标准层。

华北地区地震标准层见表 5 - 2。

表 5 - 2 华北地区地震标准层

标 准 层	现 用 符 号	过去用符号
明化镇组底界	T <sub>N2m</sub>	T <sub>1</sub>
馆陶组底界	T <sub>N1g</sub>	T <sub>2</sub>
东三段底界	T <sub>E3d</sub> <sup>3</sup>	T <sub>3</sub>
沙一段底界	T <sub>E3s</sub> <sup>1</sup>	T <sub>4</sub>
沙二段底界	T <sub>E3s</sub> <sup>2</sup>	T <sub>5</sub>
沙三段底界	T <sub>E3s</sub> <sup>3</sup>	T <sub>6</sub>
沙四段底界	T <sub>E2s</sub> <sup>4</sup>	T <sub>7</sub>
孔店组底界	T <sub>E1k</sub>	T <sub>g</sub> <sup>1</sup>
新生界底界（基底）	T <sub>E1</sub>	T <sub>g</sub>

图 5 - 3 家 1 井合成记录层位标定

### 三、地震波速度

地震波的速度可分很多种，如层速度、平均速度、射线平均速度等，它们之间有一定关系，并利用公式可互相换算。

一个地层剖面从浅到深一般可以分为几个速度层，各层之间在波速上存在较明显的差别，这种速度分层同地层的地质年代、岩性上的分层一般是一致的，但也可能不完全一致，并且速度分层没有地质分层那么细，有时地质年代不同，但岩性相同的一些地层可以成为一个速度层。地震勘探中把某一速度层的波速称为这一层的层速度。利用声速曲线尤其是长源距声速曲线或地震测井，可以求出细致精确的层速度资料，供解释时使用。

所谓平均速度，是指在水平层状介质中，波沿直线传播所走过的总路程与所需总时间之比，平均速度可用地震测井等求取，平均速度的准确与否将直接关系到地震解释成果的可靠性，直接关系到钻探井的深度。在一个工区要作出构造图，首先必须取得工区内的平均速度参数，有时根据地下情况在一个工区内选用几个平均速度，然后，由等  $t_0$  时间图绘制出深度构造图。

平均速度是把不均匀介质简化为均匀介质了，即地震波在这种介质中沿不同方向传播速度是一样的，显然平均速度只是粗略的近似。

## 第三节 地震勘探资料的解释

地震勘探资料解释是地震勘探工作的最后阶段，解释成果的正确与否将直接影响到油气

资源的勘探和开发的进度、成本及经济效益，因此解释工作特别受到重视。目前现场上广泛使用的是三维地震勘探。

三维地震勘探资料的解释工作包括两个方面的内容：一个是将经过计算机处理的数据进行各种显示和作图；另一个是根据所得到的各种图件进行地质解释，通过地质解释获得探区内有价值的地下构造和它的发育史情况、岩性变化和含油气前景等情况。进而结合其它地球物理勘探资料和钻探所得地质资料指出有利于油气存在的位置和地层段等。

### 一、三维地震勘探资料的显示技术

经过三维偏移后的三维地震数据组成的数据体在平面上按 CDP 网格排列分布，在垂向上按深度换算的时间采样组成立体数据网格。由于在处理过程中清除了干扰波，提高了分辨率，经过三维偏移之后的数据体基本上反映了地下的真实地质情况。

#### 1. 三维地震处理结果的显示

常用的三维地震数据显示图件有各种垂向剖面、水平剖面。从垂向剖面和水平剖面的对照观察中可以迅速地地对地下的构造概况有个初步了解。

#### 2. 解释成果的显示

通过人机交互解释在显示屏上可以追踪反射层位，把每个检索出来的层位用某种彩色标志出来。在解释过程中，为了解决断层两侧的层位对比问题，可以把断层两侧的层位上下移动，使层对齐，验证层位对比是否正确。也可以沿某个不整合反射面或沉积间断面进行层拉平工作，然后研究这个面以下的古构造情况。

根据拾取的层位进行交点闭合可把层位的时间值存储在解释数据库内，最后可从数据库把此层位数据调出来在绘图仪上绘出等值线图。

根据水平剖面也可以绘制拾取层的等时图。这个等时图实际上就是某层的时间构造圈，在这个图上可以找到构造图闭及其高点，也可以根据它定出断层、断距和断层的性质。

在三维地震资料解释中需要对速度资料进行分析，既要了解速度的垂向变化，也要了解同一层或同一时间上速度的平面变化，可以绘制相应的速度平面图。这些速度平面图可以与相应的构造或岩性图做对比分析，从中得出速度与构造和岩性变化的关系，供进一步解释用。

### 二、三维地震勘探资料人机交互解释

三维地震勘探资料非常丰富，数据量大，解释过程中一般要进行人机交互解释。人机交互解释工作的基本过程：

将地震资料中有关信息用钻井资料的信息进行层位标定和相关对比。一般是把三维偏移后的数据体与用测井曲线制作的合成地震记录进行连接。其目的是识别地震层的地质层位。图 5 - 3 是实际地震记录，中间有一段与之相当的用声速测井曲线制作的合成地震记录。从二者的相似对比中可以看出它们的层位相当，由此确定出  $T_4$ 、 $T_5$  两个反射层相当于合成地震记录的地质层位是沙一、沙二段底界。

如果工区有很多口井，则每口钻井都应当根据它们的声速测井曲线制作相应的合成地震记录，以便定出各处地震反射层的地质层位。

掌握三维地震数据体内主要反射层构造的基本轮廓、主要断裂系统。用显示在监视屏上的水平剖面 and 立体图，系统地显示感兴趣时间段的水平切片，以了解构造的基本情况、背斜和向斜构造在全区的分布，也可以看到主要断层的走向和空间展布情况。

在对三维地震数据体所反映的基本构造情况了解之后就可以对一些主要地震层位进行

拾取，做详细的构造研究。

为了详细研究三维地震数据体内所反映的大量的构造信息，还必须用垂向地震剖面进行主要地震反射层位的拾取和追踪，一般是从通过各个井的测线连接起来的某种折线开始，简称连井测线。追踪地震层位就从这条折线的垂直时间剖面开始，即解释基干线。在对连井剖面做出解释后，以备下一步闭合时使用。

追踪地震反射同相轴可以人工或自动进行，同相轴即地震时间剖面上波动的相同相位的连线，属于同一反射界面的反射波同相轴具有振幅显著增强、波形相似及同相性等特点，时间剖面上反射波的追踪实际上是同相轴的对比。对比工作先从主测线开始，然后引伸到其它测线上去，引伸到各测线上的反射层位应闭合，即在测线交点处，同一反射层位的  $t_0$  时间应相等。

编绘各种平面图幅。首先考虑编绘某层的等反射时间构造图。把拾取和追踪层位的三维数据及断层点的坐标值从数据库中调出展在测线底图上，再画出等值线，就可以得到这个拾取层用等时间线表示的等  $t_0$  图，人工绘制等值线图的优点在于在绘图过程中可以修改图件，解释完成后就得到一个比较准确的等  $t_0$  图和深度等值线构造图。还可以用拾取的数据绘制某拾取层的等振幅值图，这种图件对该层做进一步的地层岩性解释是有用的。

人机交互解释系统还有一个很有用的层拉平解释选件。这个选件可以拉平任何复杂的层位，用它再现沉积的地质条件，对拉平层下面的层位追踪和作图，可得到古构造图。

地震地层学解释。三维地震资料除了对地质构造问题能够进行详细研究外，还可用来进行地层的、岩性的和油气指标的研究。利用三维地震速度分析资料可以绘制平均速度平面图和层速度平面图，这些速度平面图可以用来分析地层岩性的空间变化和油气圈闭的范围。

三维地震勘探资料除了进行常规的解释与作图外，重要的是进行地质解释。由于三维地震数据量充分、空间采样率高、数据处理质量高，因此在地质解释中，如断层的追踪、断距的确定及对小断层的研究都有理想的效果，对地下地质构造显示得更加细致、准确，使探井的准确率提高。

### 复 习 思 考 题

1. 地震勘探的用途是什么？
2. 地震勘探的基本原理是什么？
3. 影响地震波在岩层中传播速度的地质因素有哪些？

### 参 考 文 献

- [1] 江汉石油学院测井教研室．测井资料解释．北京：石油工业出版社，1981
- [2] 张守谦 李占诚．石油地球物理测井．北京：石油工业出版社，1981