Touch the Petroleum

石油科普系列丛书

走进石油 3

彩色插页

彩色插页



深井测试作业

彩色插页

在井下看油气藏——石油地球物理测井



测井工作现场

石油工业出版社

在井下看油气藏----石油地球物理测井

一、综 合 篇

1. 什么是地球物理测井
2. 为什么需要地球物理测井
3.石油井中的地层是什么样子
4．探测油气层的遥控遥测装置——测井仪器系统
5． 探头——井下的测井仪器
6．我国地球物理测井学科的发展概况

二、电法测井篇

1． 岩石的导电性能
2．什么是电阻法测井
3．侧向测井系列
4．感应测井系列
5．什么是三分量感应测井
6．电磁波传播测井
7．井下照相机——全井眼地层微电阻率扫描成像测井
8．套管井电阻率测井
9． 自然电位测井
10． 激发极化电位测井
11．“眼睛长在钻头上”——随钻测井

三、声波测井篇

前言
1. 声音是什么
2．声音是怎样传播的
3．超声波在井下有什么用处
4．井下岩石能发出哪些声音——地声探密和声波测井
5．声波测井有哪些方法，能解决哪些问题
6．听取井下的声音——声波测井的最基本问题
7．怎样在井下发出声音——井下的单极子和偶极子声学探头
8．井下的听诊器——声波测井的仪器是什么样子
9．声系——在井下发射和接收声波信号
10．纵波和横波，井下岩石的声速测量
11．在井下测量记录的纵波和横波信息有哪些作用
12．井下声波电视测井
13．噪声测井——听听油气井发出的声音
14．怎样检查工业血管的“动脉硬化”——套管和油管技术状况的检查

15．声波在岩石中能走多远

四、核测井(放射性测井)篇

前言
1．透视千米岩层探索核奥秘的神奇眼睛
2．　射线??眼睛看不见的光
3．　射线能谱仪??能看得见　射线的“眼睛”
4．岩石的自然放射性是识别岩性的指路灯
5．自然伽马能谱测井
6．散射　密度计（岩性密度测井）
7．中子源——打开地下宝库的核武器
8．用中子流与地层对话
9．中子探测器——能看见中子的“眼睛”
10．中子测井
11．脉冲中子源在地层中能激发出哪些　射线
12．热中子在地层中的平均寿命有多长——中子寿命测井
13．为什么说稀土元素是中子测井的新亮点
14．地层中的原子核能发射广播信号吗
15．如何用核磁共振方法区分孔隙中的油、气、水

五、生产测井篇

前言
1．温度测井——给油层测“体温”
2．压力测井——给油层“把脉”
3．流量测井——测量油层的“产量”
4．如何识别井内流体的性质——流体识别测井
5．怎样给井下流体流动成像——流动成像测井
6．如何给油井进行“体检”——井身状况检测
7．怎样测试油层生产性质——电缆地层测试

六、测井信息的综合分析

前言
1．怎样确定油层的深度和厚度
2．怎样综合应用测井信息划分油、气、水层
3．划分裂缝性油气藏的实例
4．研究地下构造的先进武器——地层倾角测井
5．如何确定地下油气藏的分布形态——油藏描述
6．打开地层中油气流入井内的通道——油井射孔

石油地球物理测井

一、综 合 篇

1. 什么是地球物理测井

井下地层是由各类岩石组成，不同的岩石具有不同的物理化学性质，为了研究各类岩石的物理性质及井下地层是否含有石油天然气和其他有用矿产，建立了一门实用性很强的边缘学科??地球物理测井学，简称“测井”，它以地质学、物理学、数学为理论基础，采用计算机信息技术、电子技术及传感器技术，设计出专门的测井仪器，沿着井身进行测量，得出地层的各种物理、化学性质、地层结构及井身几何特性等各种信息，为石油天然气勘探、油气田开发提供重要数据和资料。测井的井场作业如图所示，由测井地面仪器、绞车和电缆组成，通过电缆把下井仪器放到井底，在提升电缆过程中进行测量。地球物理测井包括以下方法：

（1）电法测井，如视电阻率测井、侧向测井、感应测井、阵列感应测井等，能在各种井眼条件下测量地层电阻率；

（2）电磁波传播测井，测量岩石介电常数，利用地层电阻率和介电常数能准确地划分出油气层；

（3）地层倾角测井，确定井下地层的产状和构造；

（4）全井眼地层微电阻率扫描成像测井，能研究地层结构、层理及裂缝等，并能给出井壁成像；

（5）声波测井，如声速测井、阵列声波测井、偶极声波成像测井等，可用于确定地层孔隙度、渗透率、裂缝及机械特性等。井下声波电视可提供井壁图像，是成像测井系列的重要方法之一；

（6）核测井（放射性测井），自然伽马测井用于测量岩石的自然放射性，自然伽马能谱测井可确定岩石中铀、钍、钾的含量。用伽马射线源照射地层可确定地层的岩性和密度，称为岩性密度测井。用中子源照射地层可研究地层的中子特性，包括中子测井、中子寿命测井、碳氧比测井、中子活化测井等，用于确定井下地层的岩性、孔隙度及含油饱和度，是划分油、气、水层的重要方法；

（7）近年来又兴起一种新的测井方法??核磁测井，能测量地层孔隙度、束缚水及可动油饱和度；

（8）热测井，测量井下地层温度；

（9）在油井生产过程中能测量各地层的油气产量，这类方法统称生产测井。

地球物理测井已成为勘探地下油气藏、煤田及其他有用矿产的重要方法，在能源、矿产资源建设中起着重要作用。

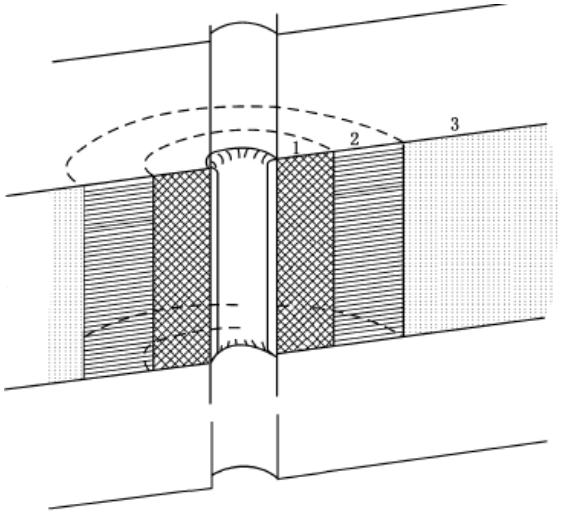
2. 为什么需要地球物理测井

石油和天然气埋藏于数千米的地下，为了找到和开采石油和天然气，就要钻勘探井和开发井。在钻井过程中需及时了解井身是垂直的还是倾斜的（井斜），如果是倾斜的，要测出是向哪个方向倾斜（方位），还要测量井眼直径的大小（井径）。在钻大斜度井和水平井时，要及时控制钻井方向和位置，以保证在有前景的目的层中钻进，就需要工程测井和随钻测井

提供有关信息，指导钻进过程。在钻完井后，要用一系列地球物理测井（简称测井）方法对井下地层进行测量，确定地层是水平的还是倾斜的（产状），是由何种岩石构成，并且划分出含石油天然气地层和含水地层，提供含石油天然气地层的准确深度和厚度，地层储存油气空间（孔隙度●1）的大小，含油气的多寡（含油饱和度●2），以及石油天然气是否能开采出来（渗透率的大小），为计算石油天然气储量和油气田开发设计提供可靠依据。下完套管和固井后，要检查水泥胶结质量，如果水泥胶结质量好，要进行射孔，用射孔枪把油气层部位的套管、水泥环和地层射穿，为石油天然气流入井内提供通道，水泥胶结质量好坏与油气层部位的确定也都要由地球物理测井来完成。在采油过程中要测量各层的油气产量，并监视井下地层还剩有多少石油天然气，注水效果等，需进行生产测井。总之从一口井开钻起，到油层枯竭，油井报废为止，都要进行地球物理测井，地球物理测井是油气勘探和油田开发全过程中最可靠的监测方法，也可以说不进行地球物理测井就无法勘探和开发石油天然气。

3.石油井中的地层是什么样子

钻井穿过地层后，井下地层会是什么样子呢？对于一些松软致密地层，如泥岩等，由于钻井液浸泡，井壁垮塌，井眼扩大（井径明显大于钻头直径），根据井径测井曲线，可划分出泥岩层。这类非渗透性地层，通常不会是油气层。但对一些孔隙性和渗透性地层，要进行仔细研究。所谓孔隙性岩石，是指岩石中有互相连通的孔隙空间，孔隙空间的大小用孔隙度表示。渗透性岩石是指在一定压差下流体能在孔隙中运动，渗透性愈好表示流动性愈好。如果孔隙中储存有油气，那么渗透性好的岩石中比较容易开采出石油。对于渗透性、孔隙性岩石，在钻井过程中，为了防止井喷，一般情况下井内钻井液柱的压力大于地层压力，具有一定的压差，钻井液中的水分（称为钻井液滤液）会侵入到地层中。钻井液滤液将地层中的原生流体驱走，在井壁附近的地层中钻井液滤液会将原生流体全部替换，孔隙中 100%含有钻井液滤液，这一区域称为“冲洗带”。随着离井壁的距离增大，钻井液滤液含量逐渐减少，原生流体含量逐渐增大，直到钻井液滤液含量变为零，到达 100%含有原生流体的地层的原始状态??原状地层。从钻井液滤液含量开始变化到其含量为零的区域叫作“过渡带”，冲洗带和过渡带统称侵入带。对于好的储集层，多形成侵入带，它是寻找油气层的重要标志，但同时给测井带来更复杂的问题。为了探测出冲洗带、过渡带和原状地层的电阻率，要用具有深、中、浅探测深度的组合测井和阵列测井，将在以后条目中介绍。



地层结构示意图

1 冲洗带；2 过渡带；3 原状地层

4．探测油气层的遥控遥测装置——测井仪器系统

在日常生活中，当医生为患者诊断疑难病时，为了确诊，会针对患者病情使用现代医学仪器对患者进行各种检查，诸如心电图、B超、X射线、核磁共振等，这些仪器是利用人体器官的电、声、核、核磁等物理性质检查人体器官的病变。在寻找石油和天然气时，由于含油气地层的电、声、核、核磁等物理性质也不同于不含油气的地层，因此，在石油勘探中，需要在几千米的井中测量所有地层的电、声、核、核磁等物理性质，以确定哪些深度的地层含有油气。把测量上述各种物理性质的仪器组合在一起，并以地面的计算机为中心按照一定的时序对地层的各种物理信息进行采集、传输、处理和快速解释，并在测量过程中实时地对下井仪器进行控制。这就是现代的石油测井仪器系统。

测井仪器的发展和各行各业的测试技术一样，随着科学技术的进步从简单到复杂。最早的测井仪器就是一个大的万用表，将测量电极延伸至井下，测量地层的电阻进而换算成电阻率。随着测井学科的发展，从单一的电测井到包括电、声、核、核磁的各类测井，使下井仪器多样化。更由于材料工业、电子技术、计算机技术和信息技术的飞速发展，使测井仪器从单一的单参数测量发展到对多参数大量信息进行采集、传输到处理、解释，并经历了从模拟记录、数字记录、数字控制到今天的成像测井系统，实时地自动展现井下地层各种物理参数的二维图像。

测井仪器系统由三部分组成：下井仪器、地面仪器和连接两者的电缆。下井仪器包括电测井仪、声测井仪、核测井仪、核磁测井仪以及测量井内温度、井孔直径的井温仪和井径仪等。每种下井仪器都装有对被测物理参数敏感的传感器和对被测信号进行放大、处理的电子器件。地面仪器则由主机和前端机以及绘图仪、打印机、显示器等构成，某些测井系统还增添了同时进行资料解释和绘图的工控机。前端机控制各类数据通道（模拟道、数字道、脉冲道、遥测道等）实现对下井仪器所发送数据的实时采集，主机完成对整个系统的控制和数据处理，并将测量结果以曲线或图像形式显示、打印出来。主机和前端机之间的数据和命令通讯通过总线或以太网实现。计算机间形成局域网共享打印机、绘图仪、文件、数据等硬件资源。

测井时，根据油气田的地质特点选择需要测量的物理参数，将相应的下井仪器挂接在电缆末端放入几千米深的井中。当电缆以均匀速度上提时，操作人员操作计算机,启动测井系统程序,按时序发出命令，通过电缆传送给井下仪器，控制井下仪器的工作流程。井下仪器测得的数据经放大、简单处理和编码后，按帧通过电缆发送到地面。地面计算机系统对数据进行一系列处理后，输出按深度变化的测井曲线或图像，有经验的测井工程师可根据曲线或图像的变化初步确定哪些深度的地层含有油气。对于地质特征复杂的地层或是对含油气地层要做量的计算，则须把测量得到的所有数据送计算中心做进一步的处理、分析和地质解释。

5． 探头——井下的测井仪器

油气层埋藏在地下几千米深，如果人们具有古代神话传说中的千里眼，就可以毫不费力的探寻宝藏，尽管千里眼是人们良好的愿望，但科学的发展使我们可以将复杂的电子仪器下放到为探寻油气层所钻的井中，这就是寻找油气层的“千里眼”??测井下井仪器。当地层含有油气时，它的电、声、核和核磁等物理性质就不同于其他地层。我们将测量电阻率或介电常数、测量声波传播速度或衰减、测量放射性射线能谱和测量核磁共振特性的仪器用电缆下放到几千米深的井中，当电缆上提时，在地面仪器命令的控制下，自动测量地层相应的物理特性。

由于钻探井的直径一般仅 15～20 厘米，且井内充满钻井液，更由于井深和井内的温度、

压力都很高。因此，下井仪器都制作成细长形状，在狭窄的空间内放置对所测物理参数敏感的传感器和其他电子线路，其钢外壳要承受高温、高压，连接处和导线引出处要密封绝缘不受钻井液浸入。下井仪器测量的物理参数，如电阻率大小、声波传播时间的长短、核测井计数率等，其输出信号有的是模拟信号，有的是数字信号，还有脉冲信号，因此，在将各种信号通过电缆发送前必须进行统一处理。为此，每支下井仪器都设置井下仪器接口，将测量的物理参数和仪器工作状态转换为数字信号储存于接口中以备发送。

为了完成地面计算机和下井仪器之间的信息交换，电缆的地面端接地面遥测模块，井下一端接井下遥测短节。地面遥测模块和地面仪器前端机进行数据通信,实现测井的实时采集和传递地面计算机的控制命令；井下遥测短节传递命令实现各下井仪器的数据发送。

测井过程中，地面遥测模块不时地将前端机的命令调制后通过电缆送井下遥测短节，井下遥测短节将接收到的地面命令，如控制电压、电流、进行信息采集等，解调后控制各下井仪器的工作。在进行信息实时采集时，各井下仪器在接到命令后，将按顺序地把接口的待传数字信号送井下遥测短节，并在这里对各种信号按帧进行编码，然后，通过电缆逐帧发送到地面，经遥测模块送前端机。前端机和主机进行数据交换，主机对所测数据进行处理和（或）快速解释后，打印输出测井数据或通过绘图仪输出地层物理参数的二维图像。

6．我国地球物理测井学科的发展概况

我国地球物理测井开始于 20 世纪 30 年代末。1939 年 12 月，我国著名地球物理学家翁文波在四川石油沟 1 号井中测量记录了井下的自然电位和地层的电阻率，并据此划分了气层的位置，这是我国现代测井事业的开端。之后，翁文波和赵仁寿在玉门油矿的十几口井中进行过电法测井。1947 年刘永年在玉门建立了我国第一个专门进行地球物理测井的作业站，1949 年春，王曰才接替调离的刘永年担任地球物理测井站的站长，1949 年 9 月 25 日，王曰才和工友们一起迎接玉门油矿的解放。新中国诞生后王曰才和测井站的同志们改造组装了原来的设备，后来又接收和使用原苏联进口的测井设备，为玉门油矿的发展做出了贡献。但是当时从事测井工作的专家并没有系统地接受过地球物理测井的专业教育，都是从学物理、采矿等行业改行来的。新中国成立以后，全国开始了大规模的经济建设，地质勘探是经济建设的先行行业，地球物理测井又是地质勘探中的新兴学科，急需能从事野外工作的人才，便在当时的中等专业学校??北京石油地质学校设置了测井专业，培养了野外急需的地球物理测井小队的专业技术人员。但这满足不了教学、科学研究等多方面的需要，因此 1952?1953 年在北京陆续组建了北京地质学院、北京矿业学院、北京石油学院，即现在的中国地质大学、中国矿业大学、中国石油大学（北京及华东）的前身。首先在 1953 年 10 月 1 日成立的北京石油学院的地质系开设地球物理测井课程（1954 年），1955 年由我国现代测井事业的奠基人之一王曰才先生负责组建了我国最早的地球物理测井专业。由于西方国家和旧中国的高等学校没有类似的专业，因此专业设置是按照当时苏联高等学校的地球物理测井专业的模式筹建的。第一期学生是从北京地质学院 1953 年入学的学生转学过来的，专业及专业教研室的名称，俄文是“Промысловая геофизика”,原意是“工业（或经济）地球物理”，王曰才将其翻译定名为“矿场地球物理”，这是在我国高等学校中最早设立的地球物理测井专业。1957 年夏天第一批毕业生走上工作岗位，到 1965 年，共有 8 个年级 20 个班的近 600 名大学生从矿场地球物理专业毕业，这些新中国培养的第一代地球物理测井的高等技术人才在我国地球物理测井和地质勘探事业的发展中起了重要作用。

此后于 1961 年组建的东北石油学院（现名大庆石油学院）及后来组建的西南石油学院（在四川南充）、西安石油学院和江汉石油学院（现名长江大学,由原北京石油地质学校迁往湖北江陵后组建）都设置了地球物理测井专业，此外隶属于地质部的北京地质学院、长春地

质学院也设立了地球物理测井专业。除 1965 年以前毕业的几百名大学生外，1977 年高等学校恢复招生以后的 20 多年里，这些院校培养了数千名地球物理测井的专业人才，不仅充实了我国的地球物理测井专业队伍，还有相当一部分人走向世界，成为国外地球物理服务公司或石油公司的从业人员。

我国地球物理测井专业研究生的培养开始于 1955 年，由当时援助我国建设的苏联专家格?亚?车列明斯基（原苏联列宁格勒矿业学院教授）在北京石油学院指导 3 名研究生。我国自己培养地球物理测井专业的研究生是从 1960 年开始的，当时由我国测井界前辈赵仁寿教授和王曰才教授指导 5 名研究生。但当时研究生教育在我国还不普及和正规。1980 年以后，我国开始在高等院校实行硕士和博士研究生培养制度。原来的北京石油学院改名后的中国石油大学（北京及华东）以及地质系统的中国地质大学、长春地质学院、石油和地质系统的科研院所等都积极培养研究生。到 2000 年止已有几十名博士研究生和几百名硕士研究生完成了学位论文，毕业后走上了教学、科研和生产岗位，还有近 10 名获得博士学位的人员完成了博士后研究。随着我国能源事业的高速发展，地球物理测井学科将会迎来更大的发展机遇 。

二、电法测井篇

1. 岩石的导电性能

岩石电阻率表

岩石名称	电阻率（欧姆米）	矿物名称	电阻率（欧姆米）
黏土岩	$1-2\times10^{2}$	石英	$1\times10^{12}-1\times10^{14}$
泥岩	$5-60$	白云母	4×10^{11}
页岩	$10-1\times10^{2}$	长石	4×10^{11}
疏松砂岩	$2-50$	石油	$1\times10^{9}-1\times10^{16}$
泥质页岩	$5-1\times10^{3}$	方解石	$5\times10^{3}-5\times10^{12}$
致密砂岩	$20-1\times10^{3}$	硬石膏	$1\times10^{4}-1\times10^{6}$
含油砂岩	$2-1\times10^{3}$	石墨	$1\times10^{-6}-3\times10^{-4}$
贝壳石灰岩	$20-2\times10^{2}$	磁铁矿	$1\times10^{-4}-6\times10^{-3}$
泥灰岩	$5-5\times10^{2}$	黄铜矿	1×10^{-3}
石灰岩	$60-6\times10^{3}$	黄铁矿	1×10^{-4}
白云岩	$50-6\times10^{3}$	烟煤	$1\times10-1\times10^{4}$
玄武岩	$6\times10^{2}-1\times10^{5}$	无烟煤	$1\times10^{-3}-1$
花岗岩	$6\times10^{2}-1\times10^{5}$		

在实验室中对不同类型的岩石进行测量，发现它们的导电能力是不一样的，一般用电阻率表征物体的导电性能。由电学知识可知，任何物体的电阻 r 与其长度（l）成正比，与截面积（S）成反比，用下式表示

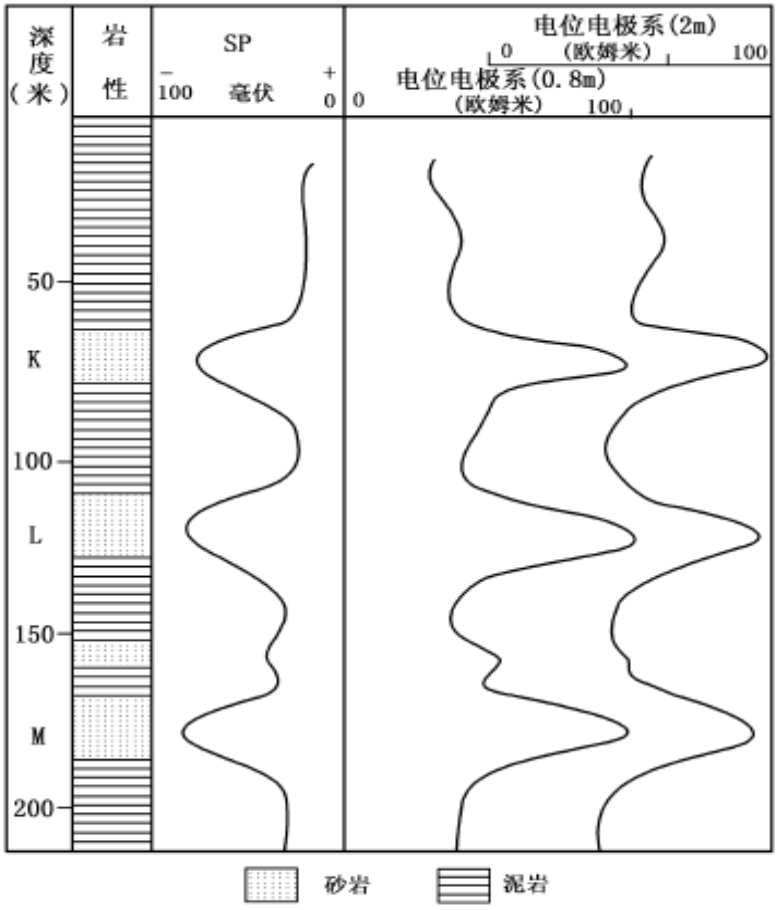
$$r=R?l/S$$

式中，R 为比例系数，又称为电阻率。

假设物体的长度 l=1 米,截面积 S=1 平方米，电阻 r 的单位是欧姆，上式可写为 r=R?l/1,R=r 欧姆米，由此可见，电阻率 R 相当于单位体积物体的电阻，单位是欧姆米。对于岩石来说，岩石的电阻率决定于其成分和结构，与其几何形状无关。实验室测量结果表明，火成岩的电阻率高，沉积岩的电阻率低，不同岩石和矿物的电阻率如表中所示。

不同岩石的电阻率是不一样的，因此可以根据测出的电阻率来区分岩石，判断岩性。同样，当砂岩地层中含石油时，由于石油的电阻率很高，含油砂岩地层的电阻率也高；但当砂岩地层含水时，由于水中含有盐分，有导电离子，导电性能好，所以含水砂岩地层的电阻率低。据此可以划分含油地层和含水地层。在石油天然气勘探与开发过程中，测量井下地层的电阻率是寻找石油天然气层的重要手段，现今已研究出适合于不同地质条件下探测地层电阻率的多种测井方法，如视电阻率测井、侧向测井、感应测井等，统称为电法测井，将在后面予以介绍。

2．什么是电阻法测井



电阻法测井曲线

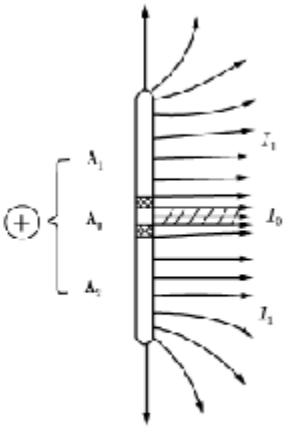
众所周知，电缆的缆芯都是用铜做的，因为铜的导电性能好，电阻率很低（1.72×10-8 欧姆米），而电缆的外皮多用橡胶和塑料等材料制成，这些材料基本上不导电，称为绝缘体。对于地下岩层中不同类型的岩石，其导电能力也不相同，如含盐水的砂岩，导电性能好，电阻率低；石油不导电，因此砂岩中含石油时导电性能差，电阻率高。花岗岩结构致密坚硬，所含矿物多不导电，其电阻率很高。如果能测出地下岩层的电阻率，就可判别地下岩层是由什么岩石构成，其中是否含石油和天然气或者含有地层水。20 世纪 20 年代发明了电阻法测井，其原理类似于实验室用的万用表，它把一个供电电极 A 和两个测量电极 M、N 用电缆放到井下，A、M、N 称为电极系，另一个供电电极 B 放在井口，由电极 A、B 供电，用电极 M、N（类似于万用表的表笔）测量，对着不同的岩层，因导电能力不同，电场分布不一样，电极 M、N 测得的电位值也不一样。通过一定的转换关系，即可得出地层的电阻率，测出沿井深变化的电阻率曲线。根据电阻率曲线的变化，划分不同类型的岩层，确定其厚度

和深度，判别出含石油和天然气层。如我国玉门老君庙油田的“K”、“L”、“M”油层在电阻率曲线上显示三个尖峰，因此只要在这个井段上找出电阻率曲线上的三个尖峰，就能确定这三个油层。由于地下的地质情况很复杂，用简单的 A、M、N 电极系难以得出准确的岩层电阻率，为此又研究出一系列的电阻法测井，如侧向测井和感应测井等系列，将在以后的条目中介绍。

3．侧向测井系列

在有些地区或在海上钻井时，钻井所用的钻井液含盐量高，导电性能好，尤其井周围是高电阻率地层时，用普通电极系测井，供电电极发射的电流，由于井的分流作用，主要经井内钻井液流向回路电极，测量的结果明显低于地层的电阻率，不反映地层的真实情况，会把含油气地层漏掉,给勘探工作带来较大损失。为了解决这个问题，研究出侧向测井，侧向测井的原理很简单，它利用电学中空间任何两点的电位相等时，它们之间不会有电流流动的原理，设计出三电极侧向测井电极系，由三个圆柱状电极构成，主电极为 A0，屏蔽电极为 A1、A2。A0 发射出测量电流 I0，A1、A2 发射出屏蔽电流 I1，I0 与 I1 极性相同，由于电极表面为等位面,因此电流线皆垂直于电极表面向外发射，测量过程中自动调节 I1 的大小，以保持 A0、A1 及 A2 电极的电位相等，在 A1、A2 电极的屏蔽作用下，I0 不会沿井轴流动，而是垂直于井轴方向呈圆盘状流入地层，消除或减弱井眼中导电钻井液和上下围岩的影响，测出的结果等于或近似于地层的电阻率，能够较准确地划分出油、气、水层。

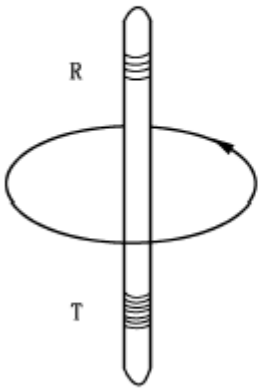
通过调整电极的排列方式，可以使电流深入地层，增大探测深度；也可以使进入地层的电流很快流到回路电极，使探测深度变浅。例如浅三侧向测井，在原有的A1、A2屏蔽电极外侧，加上两个回路电极A1′、A2′，它们的极性与A1、A2相反，因此当I0、I1流入地层后，很快流向回路电极，使探测深度变浅。根据以上原理，研制出具有深浅两种探测深度的双侧向测井，再配以微电阻率测井，组成具有深、中、浅三种探测深度的测井系列，能测量侵入带和原状地层的电阻率。近年来又发明了阵列侧向测井，具有多种探测深度，可以详细研究冲洗带、过渡带和原状地层电阻率的变化。侧向测井系列在四川、陕西、新疆、东北等地区均取


深侧向测井

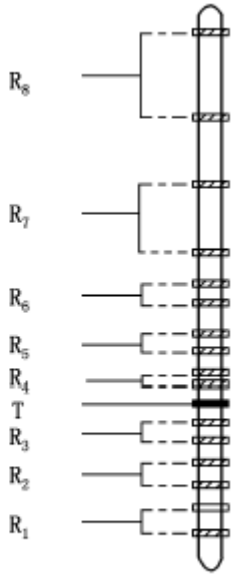
4．感应测井系列

有时为了获取井下地层的原始含油饱和度资料，用油基钻井液钻井;为了不破坏井下地层的渗透率，有时采用空气钻井；这时井中没有导电介质，不能传导电流，为了解决这个问题，发明了感应测井。众所周知，在一个线圈中通以交流电，线圈周围会形成交变电磁场，如果交变电磁场中有导体存在，在导体中会产生感应电流，这就是电磁感应原理。根据这个原理，研制了感应测井仪，感应测井仪包括发射线圈 T 和接收线圈 R，线圈间保持一定的距离。当发射线圈 T 通以交流电时，在井周围的地层中产生感应电流，称为涡流，当发射线圈 T 中的交流电恒定时，地层中的涡流强度与地层电导率成正比。地层中的涡流在接收线圈 T 产生感应电流，感应电流的大小与地层电导率有关，通过一定的刻度，即可测出地层的电导率σ（R=1/σ，R 为电阻率）。现在常用双感应测井仪进行测井，它有两组较复杂的发射和接收线圈系，具有深、浅两种探测深度，能测出井壁附近钻井液侵入带和原状地层的电

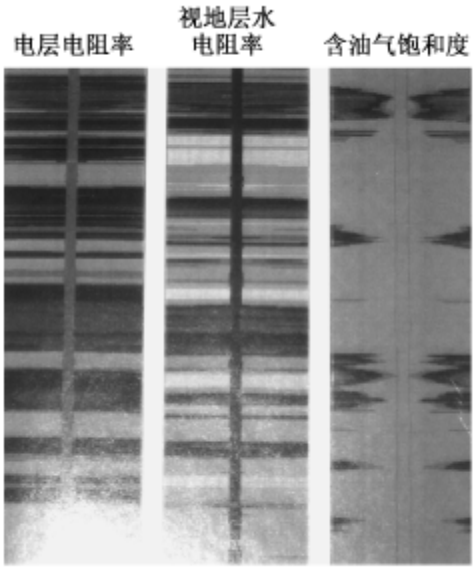
阻率。为了测出地层径向电阻率的详细变化，研制了阵列感应成像测井仪，它有一组发射线圈和八组接收线圈，具有五种探测深度，能较准确地测出地层径向电阻率的变化，与孔隙度测井配合，得出地层径向含油饱和度的变化，可用图像显示，阵列感应是成像测井系列的重要方法之一。感应测井系列是勘探石油和天然气的重要手段。



感应测井示意图



阵列感应线圈排列示意图

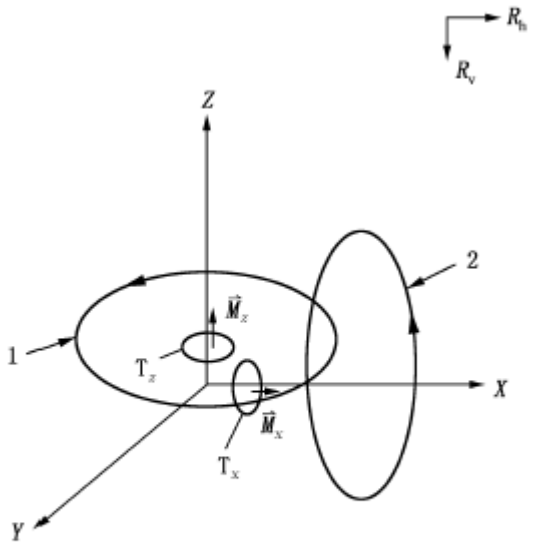


阵列感应成像测井的成像图

5．什么是三分量感应测井

一些片状岩石，垂直于层理面的电阻率大于平行于层理的电阻率，即岩石的电阻率具有方向性，称为各向异性。在油气勘探工作中，常遇到砂岩?泥岩薄交互层组产出石油和天然气，含有石油的薄砂岩层电阻率高，泥岩的电阻率低，砂岩?泥岩薄交互层组具有宏观各向异性，用侧向测井和感应测井得出的电阻率主要受泥岩影响，测出的电阻率值较低，常常把

这类含油气层漏掉。为了解决这一难题，研制出三分量感应测井仪。该仪器采用三组互相垂直的发射?接收线圈系结构，水平发射线圈（磁偶矩平行于井轴）产生的感应电流沿地层方向流动，主要受低电阻率泥岩的影响，其响应相当于水平电阻率；两组垂直发射线圈（磁偶极矩垂直于井轴）产生的感应电流沿垂直和平行于地层的方向流动，其响应相当于水平电阻率和垂向电阻率的平均贡献。三组接收线圈测量出 X、Y、Z 三个方向感应电流的信号，经计算处理得出水平电阻率 Rh 和垂向电阻率 Rv，当 Rv 大于 Rh 时，砂岩?泥岩薄交互层中的砂岩层可能是油气层；对于一般性的地层，当 Rv 不等于 Rh 时，它是各向异性岩石，其电阻率有方向性。三分量感应测井仪可与其他测井仪器进行组合测量，大斜度井和水平井中均可应用。在中东地区，用这种方法在划分砂岩?泥岩薄交互层，判断各向异性岩石等方面，均得到良好效果。这种新型感应测井仪拓宽了应用领域，是研究各向异性地层、划分砂岩?泥岩薄交互层的重要方法，进一步提高了油气勘探工作效率。



三分量感应测井示意图

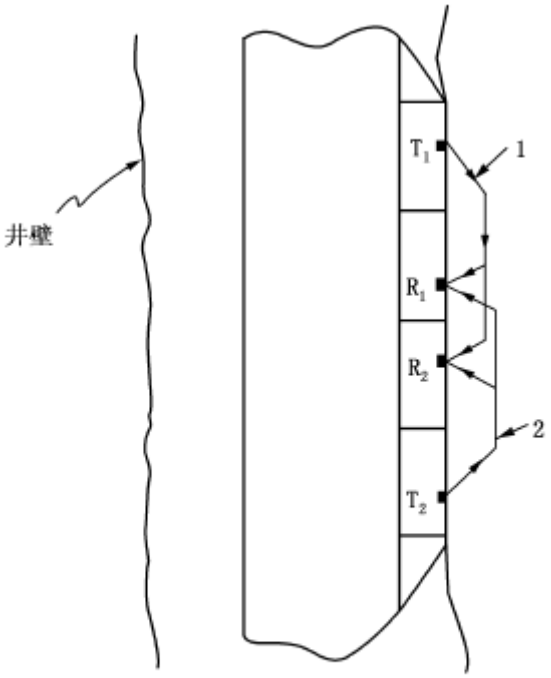
1 水平发射线圈（T_z）产生的感应电流

2 垂直发射线圈（T_x）产生的感应电流

6．电磁波传播测井

在石油天然气勘探中常常会遇到含淡水的地层，淡水层和油气层都显示高电阻率，难以区分；有时也会遇到低电阻率的油气层，其电阻率与含盐水地层的电阻率相近，也会产生混淆，把油气层错划为水层；因此难以用地层电阻率解决这类问题。在实验室中对油、气、水及岩石样品进行介电特性的测量，发现水的介电常数为 70～81，石油的介电常数为 2～2.4，天然气的介电常数近似于 1。各种岩石的介电常数为 4～9.2，其中砂岩为 4.65，石灰岩为 7.5～9.2，白云岩为 6.9。在岩石孔隙度相同的条件下，含水岩石的介电常数明显大于含油气岩石的介电常数，只要能测量出井下地层的介电常数，就可以把含水地层与含油气地层区分开来。为了测量井下地层的介电常数，研制出电磁波传播测井仪，该仪器采用背腔式缝隙天线，天线装在一合金极板上，用液压推靠方式，使极板紧贴井壁，天线排列如图所示，上下为发射天线 T1 和 T2，中间为接收天线 R1 和 R2，天线间的距离为 T18R14R28T2，发射天线 T1 和 T2 交替发射频率为 1.1G 赫兹的信号，电磁波穿过地层后，由接收天线 R1 和 R2 测量出电磁波穿过地层的传播时间 tpl 和幅度衰减值，经换算即可得出地层的介电常数，据此即可划分油、气、水层。这种方法在划分油、气、水层和研究冲洗带特性及裂缝性地层方面均可

获得较好的效果。

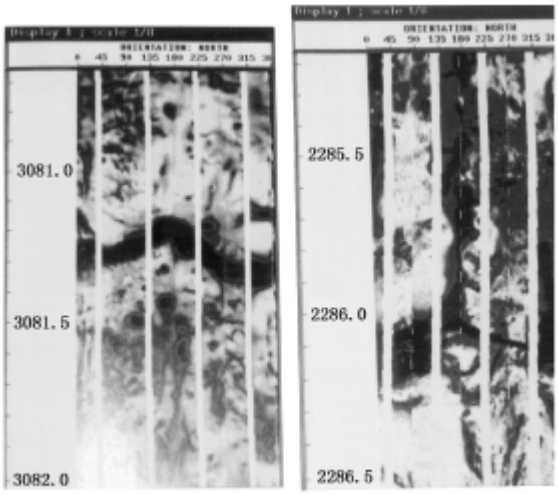


电磁波传播测井示意图

$1T_1$ 发射信号穿行的路径；$2T_2$ 发射信号穿行的路径

7．井下照相机——全井眼地层微电阻率扫描成像测井

石油井深达数千米，地下温度超过 100℃，压力也很高，井内充满洗井液，井下情况较为复杂，如何才能了解井下地层情况？为此发明了地层微电阻率扫描测井仪。这种方法的原理很简单，当向地层发射电流时，在电压一定的情况下，遇有高电阻地层电流强度小；遇有低电阻地层时电流强度大；通过测量电流强度的变化，即可得出地层电阻率的变化。现在已发展到全井眼地层微电阻率扫描成像测井，它有 8 个极板，每个极板上装有两排电极，每排 12 个电极，共有 192 个电极，这些电极与井壁 80%的面积相接触，因此在井周 360 度范围内对每一深度处进行微电阻率扫描测量，根据测得的数据，经处理后得出井壁展开图，显示出地层的结构、岩性、裂缝及断裂等。根据全井眼地层微电阻率扫描成像测井图，可准确描述井下地层情况，如在四川地区，用这种成像方法准确地划分出裂缝发育层段，找出含气地层。在新疆地区，用全井眼地层微电阻率扫描成像测井划分出砾岩层、火山岩层，取得很好的地质效果。如今全井眼地层微电阻率扫描成像测井在陆地和海洋的关键井中成为必测项目，是石油工作者了解地下情况的“眼睛”。



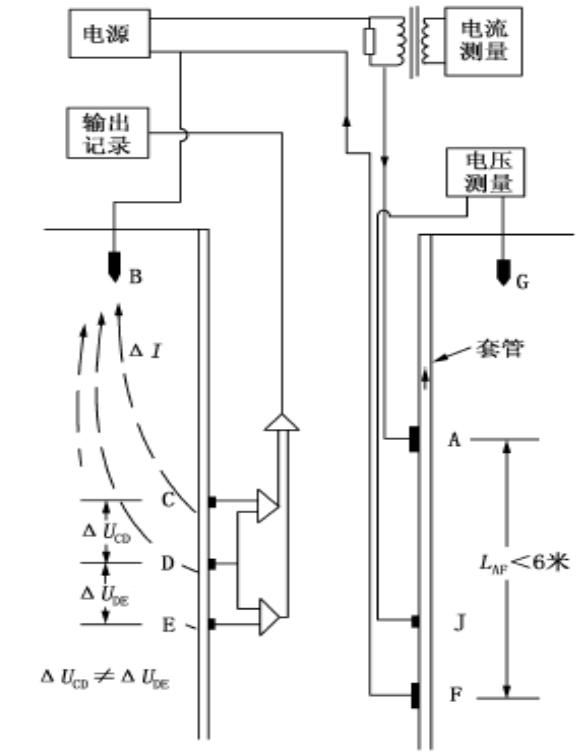
全井眼地层微电阻率扫描成像测井成像图

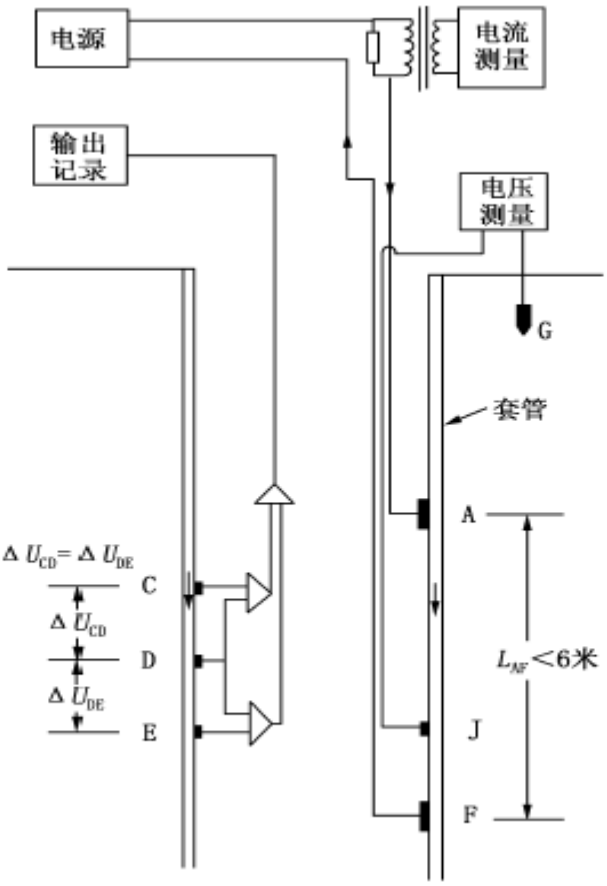
8．套管井电阻率测井

在油田的生产井中为了保护井壁，便于产出油气都要在井内放入钢质套管。金属套管是导电的，在套管内还能用电测井测量管外地层的电阻率吗？初看起来是不行的，因为发射的电流都被钢套管短路了。然而，理论和实践证明，在一定条件下，是可以在金属套管井中进行电测井的。早在 20 世纪 30 年代科学家就提出了设想，由于当时技术条件的限制未能实现。而在今天，由于科学技术的发展，已经研制出了这样的仪器并已开始商用。

从原理上讲，套管井中的电测井采用定点测量，让仪器的供电电极和测量电极与套管内壁保持良好的滑动接触。在地面，在远离井的地方放置供电电流的回路电极 B。只要电源频率选择足够低（一般在 1 赫兹左右），提供的电流足够大（一般在 1 安培以上），虽然绝大部分电流沿套管流动，但少量的电流会沿套管漏失，穿过管外地层流向地面回路电极 B。只要在每个深度点上，测出漏入地层的电流ΔI 和该点套管与地面 G 电极间的电位，就可以计算该深度点附近的地层电阻率。实际测量分两步进行：首先将电流送入电极 A，经套管流向电极 F，形成回路，只要 A 电极与 F 电极间的距离 LAF 小于 6 米，可以认为电流只沿套管流动，不会漏入地层，因此电极 C、D 之间的电位差ΔUCD 与电极 D、E 之间的电位差ΔUDE 相等，放大器 H 的输出为零。然后将电源的一端与地面电极 B 相接，仍经 A 电极供电，此时大部分电流经套管返回电极 B，仅有少量电流经地层流向回路电极 B，这时电极 C、D 之间的电位差ΔUCD 与电极 D、E 之间电位差ΔUDE 不再相等，放大器 H 有信号输出，信号的大小相当于经 C、D、E 电极间流入地层的总电流ΔI，同时测出电极 J 与接地电极 G 之间的电位差ΔUJD，经换算可得出套管外地层的电阻率。

由于穿过套管进入地层的电流很少，因此，在电极 C 、D 间或电极 D 、E 间，电压降信号只有纳伏级（10-9 伏特），属微弱信号检测。要在井下高温、高压环境，噪声电平高的情况下检测如此小的电平是困难的。既然技术如此之难，各服务公司为何要相继投入巨资进行研发？这是因为在油田开发过程中，地层的含油、气状况在不断改变，需要通过套管中测井来监测油藏动态，而套管井中电阻率测井是计算储层油气饱和度、了解开发过程中油气分布变化的重要手段。此外，还可以找到在油田勘探初期由于技术水平不高而漏失掉的油气层。


电源
电流测量
输出记录
电压测量
B
G
ΔI
套管
A
C
ΔU_CD
D
ΔU_DE
E
L_AF<6米
J
F
ΔU_CD≠ΔU_DE


电源
电流测量
输出记录
电压测量
G
套管
A
ΔU_CD=ΔU_DE
C
ΔU_CD
D
ΔU_DE
E
L_AF<6米
J
F

9. 自然电位测井

早期的测井是将电极系放到井下，在供电电极供给电流时，地面用电位计观察测量电极间电位差的变化。然而，在供电电极停止供电后，当提升电极跨过地层界面时，仍然观察到电位计指针的变化。于是，发现了自然电位测井。

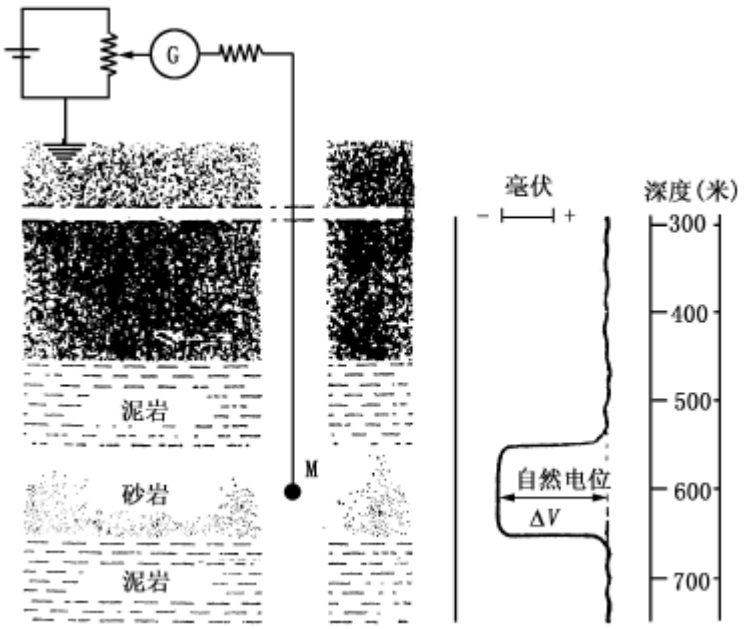
生活中，当我们信步在绿草花丛中，会闻到阵阵花香；当我们穿行于茶市酒楼间，会飘来茶香酒香，这都是气体分子在空气中的扩散。同样，液体中也会发生扩散，把墨水滴入水中，颜色范围就会逐渐扩大，即使同一种液体，由于浓度不同也会发生高浓度向低浓度的扩散。

从化学实验中知道，当浓度不同的氯化钠盐水用渗透性膜隔开时，会发生扩散，即高浓度盐水的离子穿过渗透膜移向低浓度。然而，钠离子和氯离子的迁移率是不同的，氯离子的迁移率大于钠离子。于是，在渗透膜的低浓度一侧负离子增多，呈现负电荷；而高浓度一侧正离子增多，呈现正电荷。此时，若把连接电位计的两个电极分别放到高浓度和低浓度溶液中，则可观察到电位计指针的变化，这种由于扩散作用产生的自然电位称扩散电动势。

油气井中，砂岩地层孔隙中通常饱含盐水，其氯化钠浓度常常高于井内钻井液的盐浓度，因此，在正对砂岩地层处，井壁钻井液一侧呈现负电荷，而砂岩地层呈现正电荷。

由于离子扩散而引起自然电位只是产生自然电位的一种原因，由于吸附、压差、氧化还原等原因也会引起自然电位。在石油勘探中，主要是扩散、吸附产生的自然电位。

在上述诸多原因的作用下，井内自然电位的分布如图所示。泥岩层的自然电位为“正”，砂岩层的自然电位为“负”。如果以泥岩的自然电位为基线，则砂岩的自然电位向负偏，且砂岩的渗透性愈好，其自然电位相对泥岩愈“负”。由于油、气、水都是贮藏在孔隙性好、渗透性好的砂岩中，因此用自然电位测井曲线找出渗透性地层，然后再配合其他测井曲线分辨油、气、水层。



10． 激发极化电位测井

俗话说“一把钥匙开一把锁”，在石油勘探、开发中，油气藏的地质情况和储层参数是多种多样的，在开发过程中更是千变万化，要用测井资料对油气层做出正确的评价，必须选用合适、可行的测井方法，就像医生看病一样“对症下药”。

在油田开发过程中，由于压力递减采用注水驱油，而注入水不同于原来地层孔隙中饱含的盐水，常常是淡水。因此，注水开发过程中，储层饱和的水是原来的地层水和注入水（淡水）的混合液。混合液的电阻率在开发过程中是变化的，求准混合液电阻率就成为判断油、水层的关键问题。于是发展了激发极化电位测井。

砂岩地层由矿物颗粒和颗粒间的孔隙构成，孔隙中含有盐水。砂岩颗粒是不导电的，而通过盐离子进行导电。由于矿物颗粒大小不一，颗粒间的孔隙也是大小不一，孔隙间有的连通，有的不连通，连通的喉道也常常是弯曲的。当外加电场后，盐水中的正离子向负极迁移，负离子向正极迁移，由于喉道的弯曲和大小不一，致使正离子和负离子的迁移会像公路上堵车一样，在某些喉道处发生聚集，形成局部的电场，称为浓差极化，即由于正、负离子浓度变化产生的极化电位。当外加电场去掉后，局部聚集的正、负离子又会通过扩散恢复到原来的分布。

此外，当砂岩含黏土矿物时，由于黏土矿物的特殊性质，其表面带负电，它会吸附盐水中的正离子，因此在黏土表面形成双电层，达到电平衡，正离子在黏土表面有紧密层（固定吸附）和扩散层之分。外加电场后，扩散层的正离子会发生迁移，破坏双电层的电平衡，使双电层畸变产生局部电场，称双电层极化。外加电场去掉后，双电层又恢复到平衡态，极化消失。

上述靠外加电场产生的极化电位，称激发极化电位。当外加电场去掉后会逐渐消失，极化电位的大小以及随时间的变化主要与地层水的盐浓度等因素有关，即和地层水电阻率有关。在油田开发过程中，通过激发极化电位测井可以比较准确地求准混合液电阻率，从而增大用测井资料判断油、水层的准确性。

测量激发极化电位的方法是对井下电极供给方形脉冲电流，在通电期间激发地层产生极化电位，在断电的某一时刻测量极化电位大小，并计算极化率。激发极化电位和自然电位同时测量可以扩大应用范围。

11．“眼睛长在钻头上”——随钻测井

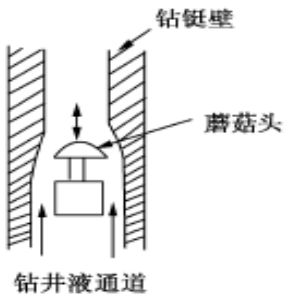
在油气田勘探、开发过程中，钻井之后必须进行测井，以便了解地层的含油气情况。但是，测井资料的获取总是在钻井完工之后，用电缆将仪器放入井中进行测量，然而，在某些情况下，如井的斜度超过 65 度的大斜度井甚至水平井，用电缆很难将仪器放下去；此外，井壁状况不好易发生坍塌或堵塞也难取得测井资料。由于钻井过程中要用钻井液循环，带出钻碎的岩屑，钻井液滤液总要侵入地层。因此，钻完之后再测井，地层的各种参数与刚钻开地层时有所差别。于是人们在想，如果把测井仪器放在钻头上，让钻头长上“眼睛”，一边钻进一边就获取地层的各种资料，这就是随钻测井。这样不仅对任何状况的井，特别是水平井可以进行测井，而且利用测得的钻井参数和地层参数及时调整钻头轨迹，使之沿目的层方向钻进。由于随钻测井获得的地层参数是刚钻开的地层参数，它最接近地层的原始状态，用于对复杂地层的含油、气评价比一般电缆测井更有利。

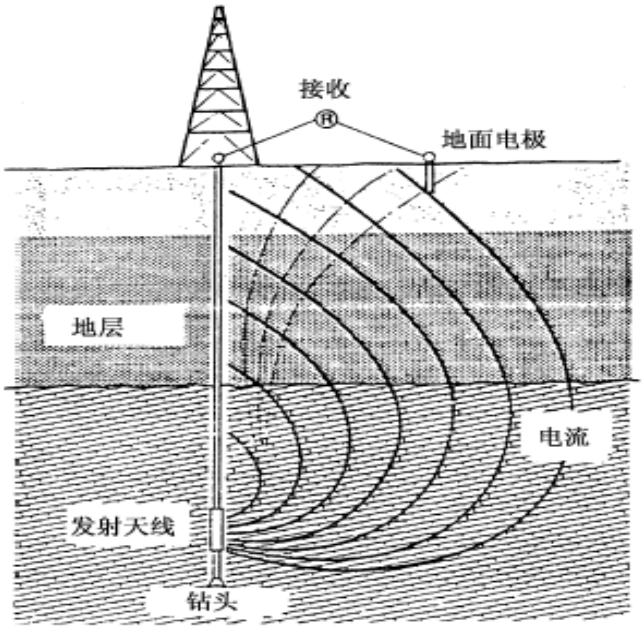
随钻测井仪器放在钻铤内，除测量电阻率、声速、中子孔隙度、密度等常规测井和某些成像测井外，还测量钻压、扭矩、转速、环空压力等钻井参数。由于钻头钻进过程中环境恶劣，温度很高，压力极大，振动强烈，因此，随钻测井仪器的可靠性至今仍是商家最为重视

的问题。

随钻测井的关键技术是信号传输，目前广泛使用的是钻井液压力脉冲传输，这是目前随钻测井仪器普遍采用的方法，它是将被测参数转变成钻井液压力脉冲，随钻井液循环传送到地面。其简要原理如图所示，被测参数经数字化编码后，变成高（“1”）、低（“0”）电信号，由它控制钻井液脉冲发生器的蘑菇头，当编码为“1”时，蘑菇头上移，使流经锥形口的钻井液阻力增加，产生附加压力。当编码为“0”时，蘑菇头向下回到原位，压力降至正常。这是正脉冲传输系统。类似的还有负脉冲传输系统，连续波传输系统。钻井液压力脉冲传输的优点是经济、方便，缺点是数据传输率（每秒传送的数据位数）低。近年来，为提高传输率又开始试用电磁波传输技术，它是将随钻测井仪器放在非磁性钻铤内，非磁性钻铤和上部钻杆之间，有绝缘短节，以便于载有被测信息的低频电磁波向井周地层传播。在地面，作为钻机与地面电极之间的电压差被探测出来。早期的电磁波传输由于信号衰减大、传输距离短且成本高而未能商用，近年来由于技术改进已开始进入市场，其优点是传输率高，不受钻井液性能影响。此外，还有井下存储方式，将全部数据存于井下存储器中，待起钻后回收数据。优点是成本低，数据保存可靠。缺点是地面不能实时得到数据，无法指导钻进。对于数据量很大的随钻测井，如随钻成像测井，通常采用实时传输和井下存储相结合的办法，对关键井段采用实时传输，而其他井段采用井下存储。

由于随钻测井既能用于地质导向，指导钻进，又能对复杂井、复杂地层的含油气情况进行评价，已是世界各石油服务公司争相研究、不断推出新方法新技术的热点。





三、声波测井篇

前言

声波在地层中传播时，对于不同的岩石，它的传播速度和幅度衰减是不一样的，声波测井可测量地层的声学性质，本篇介绍声波测井的基本原理和一些测井方法。

1. 声音是什么

声音，本质上是一种空气振动的现象。物体受到敲打或激发就会振动，因而发出声音，这现象很早就为人们所发现并且加以利用。比如利用丝弦振动发声的弦乐器，琵琶、小提琴等；利用棒的振动发声的木琴和风琴；利用薄板振动发声的锣、钹等，电话听筒中的金属片也是利用薄板发声的。如今人们更懂得通过机械力、电磁力等方式来发出声音。

声音的响度也叫音量，是指声音携带的能量大小。在日常生活中，衡量它的单位是“贝”，这是为了纪念电话的发明人贝尔。但最常用的单位是贝的 1 / 10，称为“分贝”。一个正常人，只要是 1 分贝以上的声音都能听见。风吹过树林的飒飒风声一般是 1～5 分贝；人们日常谈话时是 10～20 分贝；而打雷声则有 100～110 分贝；装修房间时用的气压凿孔机声达到 130 分贝。现在人们非常关心周围噪声的大小，这是因为超过 90 分贝的持续声音就会损害人的听觉，大约超过 130 分贝的声音会使人的听觉器官产生疼痛感。长期处在噪声过大的环境中，会引起听力损失或噪音性耳聋，甚至导致产生某些疾病。

口哨的声音和炸药爆炸的声音是不同的，前者是一种尖锐的高音，而后者是深沉的低音。这种差异是由于音调不同造成的。音调不同也就是振动的频率不同，频率越高，声音就会越尖锐。频率的单位是“赫兹”，也叫“赫”，1 秒钟内完成 1 次完整的振动，频率就是 1“赫兹”。人的耳朵能够听见频率大约在 20～17000 赫兹之间的声音。频率低于 20 赫兹的声音，称作次声，地震和地下爆炸都会产生次声。频率高于 17000 赫兹的声音称作超声。在井下测量记录与岩石有关的声波测井中使用的主要就是频率为 20000 赫兹的超声，这是人耳听不到的。

2．声音是怎样传播的

我们知道，把一块石头扔进平静的水面，会出现一波波的涟漪，并以同心圆的形式向外扩展。值得注意的是，水并没有朝着水波扩散的方向前进，它只是上下运动。我们可以通过实验来验证一下水的这种垂直运动：将一块软木塞放在水面，当水波经过的时候，软木塞会上下浮动，一旦波动停止，软木塞仍将停留在原来的地方，不会移动到别处。

形成声音的空气振动也是以这种运动方式传播的。水的波浪式传播与声音的波浪式传播完全相同。声音的振动从一组分子传递到另一组分子，就像骨牌一样，当其中一个被推倒，推力就会传递下去，使后面的骨牌陆续倾倒。物质的密度越大，声音传播得越快，就像骨牌之间靠得越近，倾倒的速度就越快。而声音的强度随着距离的增加而减弱，因此越靠近发出声音的地方，听到的声音就越大。物质振动时振动的幅度叫振幅。也就是说越靠近发声的地方，振动的幅度也越大。

声音需要介质才能传播，而在真空中没有传送声波的介质，因此声音无法在真空中传递。科学家能“听”到宇宙间的声音，指的是接收到电磁辐射，并不是真正的声音。通常声波在密度高的物质中传播的速度快，因此声波在固体中比在液体或气体中更易传递而且速度更快。但如果声音同时发出，一条路径要经过液体?固体?液体，另一条是直接从液体中传播，谁走得快就要计算一下了。这个问题就是我们声波测井中的最小接收距离问题，我们以后再说。当振动传播到两种介质的分界面时，声波会像光波一样出现折射和反射，声波测井中利用的

就是折射原理。

声音在固体中传播的速度是 4000～6000 米／秒，在水中是 1440 米/秒，而在空气中的平均速度是 340 米/秒。而且声音在空气中的传播速度与空气的温度、湿度和风速有关。空气的温度越高，音速越快。在 20℃无风的干燥空气中，音速约为 343 米/秒，但在 0℃时，音速仅约为 331 米/秒。这和声波测井中遇到的岩石在不同温度、不同孔隙度、不同压力以及不同含水等条件下所表现出的声波传播速度差异性质是相同的。

3．超声波在井下有什么用处

频率在 17000 赫兹以上的声音称为超声波。它已经不在人的听力范围以内。但某些动物能够听见超声波，比如狗能听到特制的警笛发出的频率在 20000 赫兹左右的超声；蝙蝠和海豚不但能听见而且还能发出超声波，它们利用自身发出的超声波及其回波，判断周围物体的远近、大小及类别，以此作为觅食的方式，以及在黑暗中行动的依据。

超声波最早在军事侦察上使用。例如第一次世界大战末期利用超声波侦测潜水艇，其原理与蝙蝠的超声波相同。但由于材料的限制，超声波的产生曾困扰过许多研究人员。直到人们发现了像石英这样的材料，才解决了这个问题。这类材料的表面在遇到压力时，会产生电压；在石英的两端的外加电压变化时，它的表面压力也会产生变化，并引起振动。这种振动频率，正是人们所需要的超声波。在声波测井中发射超声和接收超声的关键部分就是这样的压电材料，但并不是石英，而是压电陶瓷。

在石油勘探开发中，为了了解几千米的井下，哪里是水层，哪里是油层；哪里是孔隙丰富的砂岩，哪里是致密的泥岩；另外，为了检查套管上有没有裂缝和孔洞；为了获得井壁的直观图像，都可以利用超声波。根据超声波通过地层和井壁后所携带的信息去了解几千米下地层的情况，找到石油在哪里。除此以外，超声波的应用范围相当广泛。比如在医疗上，利用超声波扫描，可以摄取人体内部的图像，不需要开刀即可进行诊断；超声波还可以用来击碎肾脏和尿道里的小结石。在工程上，它也有多种用途，比较重要的是检测材料的内部结构。样品接受声波扫射后，用特殊仪器处理反射来的回波，便可呈现出材料的内部结构。在井下，上述的测量方法也有相应的变种，例如有测量记录超声波速度和幅度的声波测井，有以获得井壁表面及井壁附近介质分布图像为目的的井下超声电视测井等。

4．井下岩石能发出哪些声音——地声探密和声波测井

地球上除了大气层和海洋外，其余绝大部分是固体。固体地球除了是声音传播的介质外，也蕴藏着丰富的声音，这就是地声。固体的地球并不是一块死寂的石头，而是在不停的运动当中，因此，也会发出声音。

通常把地层岩石中每秒钟振动 20 次以上（即频率为 20 赫兹）的纵波（即介质质点振动方向与声波传播方向一致的波动），称为地声。人听到的地声主要来自地壳，如地震发生前可以听到的类似于雷鸣、撕裂、轰鸣的声音就是地震地声。另外，火山喷发、泥石流、山体滑坡、矿井的崩塌，油气井井下有石油、天然气或水涌出，都会发出声音。

人在承受力达到极限，吃不消或感到疲劳时，往往会大吼一声或者发出呻吟。固体也有这种现象：1969 年 12 月，一架美国的超音速战斗机在穿云飞行中，突然从机身右侧传来“劈啪”的声音，紧接着，一声巨响，飞机坠毁在地。后来的事故调查证实，飞机坠毁的原因是机身金属材料“疲劳”产生了损伤，坠毁前听到的“劈啪”声，就是右侧机身产生裂缝时发出的。固体在发生破裂前发出声音的现象叫声发射，这种现象最早是在岩石中发现的。公元前 27 年，古埃及发生的一次地震使一尊由花岗岩雕成的石像被拦腰折断，从此，每天清晨，石像

的断裂处都会发出清晰可闻的哼声，好像在“呻吟”。后来，人们将石像的两截对好，填堵了裂缝，用胶结物粘好，此后，石像再也不“呻吟”了。按照现代物理学的解释，岩石一类的固体在产生了裂缝后，由于移动或冷缩热胀，裂缝还会扩大，在岩石裂缝扩大时，使原来的岩石结构改变，岩石的分子产生振动，因而发出声音。每天清晨，是一天中温度变化最明显的时刻，由于岩石的冷缩热胀，裂缝在扩展，也就发出了声音。把裂缝填上胶结物，使之不再扩大，当然也就不再发出声音了。

现在，科学家已经根据固体在破裂或损坏前会发出声音的原理，研制了材料的探伤仪器，例如，检查铁路钢轨内部是否有裂缝、缺陷，是否会断裂等。在石油天然气井下，则可以根据井下钢套管或岩石发出的声音的测量记录，预测套管或岩层是否有断裂、破损的征兆，避免事故（如套管断裂）发生，还可以检查作业效果（如岩石被钻头破碎或压裂的情况）。另外，钻头在破碎岩石时发出的声音也会因岩石的种类不同而异，根据对这种声音的测量记录，可以识别井下岩层的性质和变化。

大体上说，在井下测量记录到的地声，可分为三类：岩层自然发出的声音，对这种声音的测量记录，是“被动”的；由于井下机械作业引起的声音；测量记录由井下专门的发声器件（声学探头）发出的、经过要研究分析的岩层时的声音。后两种声音都是“主动”测量记录的，最后一种则是现代应用最广泛的井下岩石声学性质测量方法，即声波测井。

5．声波测井有哪些方法，能解决哪些问题

前面讲到了声波在不同物质中的传播速度不同，也介绍了超声波的各种用处。在井下测量记录岩石声学性质的各种方法就是声波测井方法。像钢轨的声速和水与空气的声速不同一样，井下各种岩层的声速也有明显的差异。例如我国华北任丘油田的主要产油层是古老的震旦系白云岩，岩石样品和建筑物用的汉白玉非常接近，非常致密、坚硬，其声速甚至超过钢轨的声速，达到 7000 米/秒以上；而大庆油田的储油层则是声速比钢轨略低的砂岩（声速约 3000～4000 米/秒，而通常在砂岩油层上面作为盖层的泥岩，声速仅 2000 米/秒左右。因此，如果在井下能够测量记录井壁岩层的声速，就可以判断岩层的性质和深度。

有孔隙的岩石，其孔隙内往往是被声速低得多的油或水充满，因此，孔隙丰富的岩石的声速要比致密岩石的声速低。例如，上面提到的声速在 7000 米/秒以上的白云岩，如果有孔隙和裂缝，其声速降低到 6000 米/秒以下。这样声波测井测量记录的岩石声速可以计算出岩石中的孔隙大小，即为岩石的孔隙度。声波信号通过含水、含油、含气的岩层后，其幅度、频率都可能发生变化，因此声波测井还可能识别储集层中是含水、含气还是含油。另外，根据超声波信号在井壁附近的反射，还可以了解井壁岩层或套管上是否有裂缝、孔洞等，并获得井壁的直观图像。所以，声波测井按其功能可分为以识别岩性和孔隙度为主要目的的声速测井，以及以获得井壁附近直观图像为主要目的的井下超声电视测井，井下是黑暗的，光学摄像机看不到图像，这时，声波测井方法就要派上大用场了。

声波测井方法是 20 世纪 50 年代初在国外出现的。最早的方法就是声波速度方法。通过测量声波在 1 米厚岩层内传播所需要的时间，这在物理学上叫“慢度”，在地球物理测井中习惯叫“声波时差”。其倒数就是地层的声速。像碳酸盐岩的声速就非常大，为 6500 米/秒；通常能作为石油天然气储集层的砂岩的声速则只有 3000 米/秒；而石油的声速仅为 1300　米/秒。声速测井是目前工作量最大、并为国内各油田普遍采用的一种方法。在近几十年的发展中，又先后发展了用于检查水泥胶结质量的声幅测井；能够得到井壁上孔洞、裂缝分布情况直观图像的井下声波电视测井，以及在此基础上发展起来的三维体积扫描测井；20 世纪 70 年代末出现了不仅可以测量记录井下岩层声速，还可以了解井下声波信号在穿过地层后有哪些变化的声波全波列测井；20 世纪 80 年代中期，又出现了将井下接收声波信号的传感器排

成阵列的阵列声波测井仪；20 世纪 90 年代还出现了专门测量记录地层中特有的横波的偶极子和多极子横波测井仪；还有前面提到的测量记录井下自然声场的噪声测井（自然声场测井）。声波测井方法家族便日益壮大起来了

6．听取井下的声音——声波测井的最基本问题

医生看病，重要的诊断手段是听诊，通过听诊了解病人的身体状况：心律（心脏跳动的频率）是否规则、肺部是否有“罗音”、腹部是否有“肠鸣”。总之，可以通过听诊了解肉眼不能直接看到的脏器工作是否正常。

和医生听诊一样，石油工程师了解上千米深的油气井的工作情况也要听井下发出的声音。油气从地层流向井内，由于油气类流体在运动时与岩层和井下管道产生摩擦，会发出声音，因此也可以通过“听诊”检查其工作状况：石油和天然气是否能正常的从地层流向井内？井下地层的压力是否正常？井下的油管、套管是否会因为结了一层蜡垢而像人体血管的动脉硬化一样而使油气流动的通道变得狭窄？都可以通过“听诊”，即用专门的仪器设备来倾听井下的声音，并对在井下接收到的声波信号进行分析，来判断油气井的工作是否正常，是否出了毛病。这样的工作方法叫做声波测井，所用的仪器设备在原理上和医生的听诊器是类似的：在井下放置接收声波信号的探头或水听器（类似于听诊器的听诊头），将声波信号变化为电信号后经过电缆传输到地面（听诊器则是通过胶管内的空气传递声波信号），在地面则有专门由电脑控制的仪器记录和分析声波信号，根据对接收到的声波信号的处理，就可对井下情况作出判断。

在井下，更多的是像医生“叩诊”一样，用声学探头发出特殊的声音，然后记录经过地层传播并折回到井内的声波信号，测量记录声波的速度（即经地层传播后折回井内的声波信号到达时间的早晚）、幅度（即接收到声音的响度）、频率（即接收到的声信号的音调）。根据这些测量结果，可以判断井壁上哪些地层是致密的，哪些地层是疏松、有孔隙的，因而是可能储存石油和天然气的。还可以像医学上的超声层析成像(CT)一样，作出井的横剖面的层析成像图，在图上标明井周围空间哪些位置上是套管，哪些位置上是水泥（用来固定套管和地层的相对位置），哪些位置上是可能含有石油和天然气的疏松的储集岩石。还可以在电视屏幕上看到井下各个深度处，井壁表面的直观图像（这种方法叫井下超声电视）。由于井下的条件比地上复杂得多，因此，井下的声学测量远比医学上的声学诊断复杂。在井下测量记录声波信号的方法、技术和相应的理论形成一门专门的学科，即岩石声学和声波测井。所包括的内容有：岩石的声学性质研究，井周围声场分布的研究，在井下发射和接收声波的技术研究，对所接收到声波信号进行处理的研究，以及根据测量记录到的地层声学参数做出对井下情况诊断的理论和方法研究等。

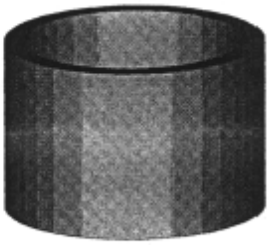
7．怎样在井下发出声音——井下的单极子和偶极子声学探头

在空气中，人们说话、演奏乐器都会产生声音，自然界里的风雨、雷电、地震过程也有声音发出。产生声音的条件是有振动和有传播振动的介质，这些介质可以是空气、水和岩石、钢铁等，即气体、液体、固体。发出振动的物体叫做声源，根据声源在介质中产生的振动的特征，声源又可分成单极子和偶极子声源。球形的炸弹爆炸，振动使空气同时膨胀，然后又使空气同时收缩，这样就在空气中产生分子疏密不同的分布，以声源（炸弹）为中心对称地向外辐射能量并有声音向外传播，这就是单极子声源。如果敲击铜锣，振动的锣面一侧使空气受到压缩而使分子密集，另一侧则因空气膨胀而使分子稀疏，锣的两侧空气分子稀疏和密集分布是相反或不对称的，这就是偶极子声源。

自然界中，石英一类的晶体在某些方向上受到压力作用时，在其表面上会产生电荷，这叫做压电效应；如果沿石英晶体的某些方向施加交变电场，则石英会产生与外加的电场频率相同的振动，这就是逆压电效应。通常，用这种效应在海洋中或在井下，使海水或井内的流体（钻井液或水）中产生声波，这就是人工声源，可在井下产生有一定频率和幅度的声波信号。但是，石英的压电效应很微弱，在石英晶体表面上加 1000 伏的电压，由于电场作用而产生的使石英的厚度变化仅千分之二微米（2 纳米）。1950 年以后，人们发现烧结后的钛酸钡(BaTiO3)陶瓷在经过加高压电场处理后（叫做极化），有比石英明显得多的压电效应，因此这类材料叫做“压电陶瓷”。现在用得最普遍的是锆钛酸铅(PZT)类的压电陶瓷，这种材料可以加工成任意形状，并可改变压电陶瓷的尺寸（如厚度、高度等）来调节振动的频率，这就是井下所用的人工声源。通常，在井下用锆钛酸铅类压电陶瓷做成圆管状，施加交变电场，使之成为单极子声源；也可以将压电陶瓷加工成片状，通过在片状陶瓷的两侧施加不同相位的电场，使之产生像锣面一样的振动，这就是井下的偶极子声源图。

压电陶瓷的电能—机械能转化效率高、加工方便，因此广泛的用来做井下声学测量的声源和接收声波信号的传感器，叫做声学换能器或叫声学探头。如对压电陶瓷施加电场，使之产生振动，这样的压电陶瓷叫做声波发射探头。如果压电陶瓷接收到声波信号，则会产生可记录到的电信号，这样用途的压电陶瓷叫做声波接收探头。

以前，还用过镍片一类铁磁性材料在磁场作用下产生的伸缩效应（叫做磁致伸缩效应）在井下发射声波信号。这类材料的价格比陶瓷贵，而且在井下温度较高时，辐射声波的能力减弱，因此已经很少应用。



单极子声源



偶极子声源

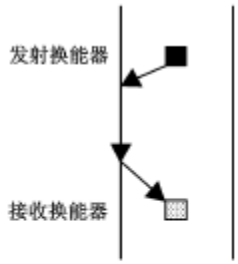
8．井下的听诊器——声波测井的仪器是什么样子

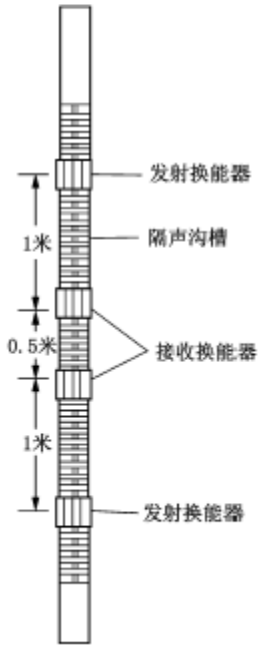
前面谈到了医生的听诊器，并把声波测井称为石油工业中的听诊器。那么这种听诊器是什么样子呢？

首先要说明的是，医生用听诊器听到的是心脏、肺和其他脏腑的声音，而声波测井虽然也可以接收井下自然发出的声音，但更多的是先由人工产生一种声音，然后再接收经过井壁地层传播的声音。声波测井中有用的声音是在地层与井内之间的界面上折射后再传过来的。可以用图来说明声波在井下的的行程。

图中两个方形框代表仪器中发出声音和接收声音的两个装置，叫做换能器，因为它们是通过能量转换实现发声和接听的。上面的换能器发出的声波要在井内和地层的分界面上发生折射，然后折射的声波要在地层里穿行一段后，再次发生一次折射，被下面的换能器接收到。为什么上面发射出的声波不能直接传播到下面被接收呢？这是因为想要了解地层的信息，必须是在地层里传播的声音，携带了地层的信息才有用，而这种直接来的声波就是一种干扰信号了。上下两个换能器之间的距离一般是 1 米以上。所以声波仪器的样子也是一个圆管，换能器放在钢制的管里，为了消除直接传播过来的波的干扰，在钢管上刻了很多互相垂直的沟

槽，让它们在传播时衰减掉。所以如果你看到测井仪器中有一个是刻了很多沟槽的钢管，那它就是声波测井仪器了。





9．声系——在井下发射和接收声波信号

声波测井首先要解决的问题是在井下发射一种特殊的声波信号：有一定的频率范围，有一定功率，可以调控，可以重复。通常，声波测井在井下发射的是一种频率为 20 千赫（即每秒钟振动 2 万次）的超声波脉冲。由于声波信号在 1 米厚的岩层中传播的时间也就是 100～600 微秒，假设接收声波的换能器距离发射声波的换能器有 3 米，则在 3 米厚的岩层中声波传播时间约是 300～1800 微秒，两次声脉冲发射的间隔时间是 5 万微秒，可以保证每次发射声脉冲后，有足够的时间传播到接收换能器，而且上一次发射的声波在岩层中完全消失后才进行下一次的发射。

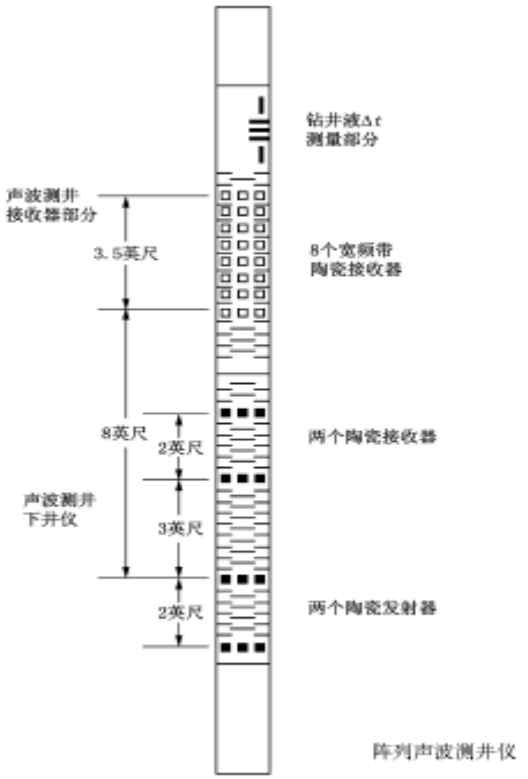
在井下，往往是由一个发射声波信号的发射换能器和与之相距 1～3 米的几个接收换能器组成井下测量记录的组合，在声波测井中叫做“声系”，即声学测量系统。只要测量记录同一次发射的声脉冲到达各个固定距离上的接收换能器的时间，就可以换算出岩层的声速或慢度（声波时差）。

声学换能器是用锆钛酸铅或钛酸钡类压电陶瓷制作，利用其在电场作用下产生的机械振动作为声源；利用其在声波振动作用下产生电信号作为接收换能器。

最早使用的声波测井仪器只有一个发射换能器和一个接收换能器，即两个相距约 1 米的换能器组成最简单的声系，这种声系只能测量记录沿井壁传播的纵波，所了解的井下地层的

信息有限。为了能测量记录到更多的地层信息，测井工程师首先加长了发射和接收换能器的距离，使传播速度比纵波速度慢的横波等能在到达时间上与纵波分开。就像 100 米赛跑时，运动员几乎同时到达终点，难以分清名次，而马拉松赛跑则由于跑的路程长，运动员在到达终点的时间上有明显的差别。

随发射和接收换能器距离的增加，接收换能器的数目，也从一个增加到两个，最多甚至可达八个，这样可以更准确地测量记录声波在各段岩层中传播情况的变化，其效果就像在马拉松赛跑时，在距离终点不同的位置上设多个时间记录站，这样可以了解各个运动员在各段跑程上速度的变化。这样有多个（通常是两个）发射换能器和多个接收换能器（最多达八个）组成的声系叫做阵列声系，相应的声波测井仪器叫做阵列声波测井仪。



10．纵波和横波，井下岩石的声速测量

如果用锤子敲击一面铜锣的中心，由于铜锣的振动，在介质中就会产生声波。实际上这时产生的声波分为两类。一类是由于锣面的振动引起附近空气质点的振动：在某个瞬间空气质点彼此靠近，形成密布；在另外一些瞬间，空气质点彼此疏远，形成疏布，在空气中交替产生的密布和疏布向外传播，产生气压的波动，就可将声音传入人耳。这种在空气中传播的、空气质点振动方向和声波传播方向一致的波叫纵波。与空气中的纵波同时产生的还有另一类波，在锣面上没有被锤子敲击的各处，在一定时间后也会重复被敲击振动，这就是说，存在一种沿锣面传播的波动，这种波的特点是，锣面上固体（铜）质点运动的方向（与铜锣的表面垂直）与波动的传播方向（沿锣面）垂直，这类波叫横波。横波只能在固体中传播，而纵波则在固体和流体中都能传播，固体中纵波的速度明显大于横波速度。

路工人为了判断远处的火车是否开来时，往往是将耳朵靠近钢轨，从钢轨中去寻找火车运动的迹象。这是因为火车发出的声音在钢轨中的传播速度（纵波，约 5500 米/秒）要比在空气中快得多（空气中声速仅 340 米/秒），而且声音沿钢轨传播的能量损失也比在空气中小

得多。一般来说，声音在固体中的声速比在液体中高，液体中的声速又比在气体中高。

在井下的岩层中，有些岩石的纵波声速（如用来做建筑材料的大理石和白云石）甚至比钢轨还高（达 7000 米/秒以上）；有些岩石，如地面以下较浅处的黏土或泥岩，其纵波声速约 1800 米/秒，仅略高于水（1450 米/秒）；砂岩（最可能储集石油天然气或水的岩石）的纵波声速可在 3000 米/秒至 5000 米/秒之间。这样在井下可以通过测量记录岩石的纵波声速来判断岩石的种类或性质，其方法是在井下放置一个发射声波信号的探头，并在固定的距离上再放置一个或几个接收声波信号的探头，测量记录在固定距离上各种岩石中纵波信号到达声波接收探头的时间（好像在比赛跑 100 米），根据在不同岩层中声波纵波信号到达接收探头时间的早晚，可计算出岩石的纵波速度。通常，在固定距离（例如 1 米）上，纵波信号最先到达接收探头的，是速度快的岩石，例如大理岩、白云岩、花岗岩等致密的（密度大）的岩石，最后到达的则是速度慢的、疏松的（密度小）的泥质岩石。这样，通过对井下岩石声速的测量记录就可以将不同种类的岩石区分开来：声速快的是致密坚硬的大理岩、白云岩、花岗岩等岩石；而声速慢的则是泥岩、页岩等疏松的岩石。

我国华北平原第三系泥岩的声波速度仅 1820 米/秒，砂岩声波速度约 2650 米/秒，任丘油田著名的震旦系石灰岩、白云岩的声波速度则达 6500 米/秒以上。而任丘油田的石油天然气，浅层是在第三系的砂岩中，深层则是在震旦系的石灰岩、白云岩中。这样只要根据声波速度找出砂岩、石灰岩和白云岩，再在这些岩层中找孔隙、裂缝明显的层段，就有希望找到石油天然气。

11．在井下测量记录的纵波和横波信息有哪些作用

上面提到在岩石这样的固体介质中传播可能有两种声波：纵波和横波，而且还可以根据测量记录到的岩石的声波速度来区分岩石，即识别岩性，那么除此以外在井下测量记录的纵波和横波信息还有哪些作用呢？

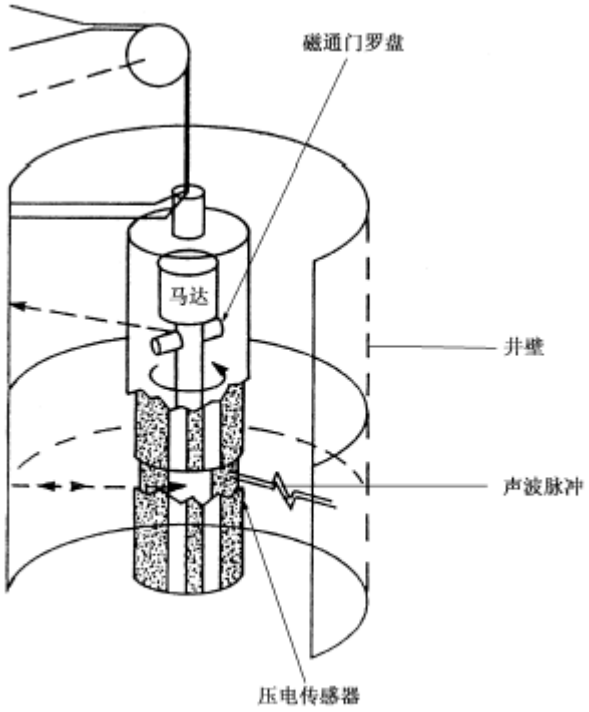
通常，储集石油天然气的是有孔隙或裂缝的砂岩、石灰岩、白云岩。在一个地区，或者是在一口井内，如果储集石油天然气的岩石是同一种类型（例如都是砂岩），则孔隙、裂缝多的，由于其中充满了声速比岩石低的石油天然气或水，其纵波速度要比同类的、孔隙和裂缝少的岩石的纵波速度低，这就是说，相同的岩石随其孔隙裂缝的增多（单位体积岩石中，孔隙、裂缝所占的百分比叫做孔隙度）其密度降低，相应的，其纵波速度也会下降。这样根据纵波速度测量记录的结果，可以计算出储集石油天然气岩层的一个重要参数??岩层的孔隙度。如果能探明储集了石油天然气的岩石的分布面积，通过在井下测量记录到这段岩石的厚度，再通过声波测井测得的纵波速度计算出该岩层的孔隙度，如果再能测量出孔隙中石油天然气所占的比例（叫做含石油天然气的饱和度），就可以计算石油天然气的储量。根据测量记录到的岩石的纵波速度计算岩石的孔隙度，可以达到很高的精度，例如测量大庆油田的砂岩储集层，孔隙度约 25%，用纵波速度计算出的孔隙度和岩心分析结果的误差仅为 1%～2%。

前节提到，纵波能在固体和流体中传播，而横波只能在固体中传播。因此，一般说来，纵波速度对岩石中孔隙度的大小或流体的多少反应非常灵敏，如致密的砂岩，其纵波速度可达 5500 米/秒，与钢铁的纵波速度接近，而孔隙度在 20%以上的同样砂岩，纵波速度只有 3000 米/秒左右，仅比木材的纵波速度略高。科学家发现，岩石类固体介质的横波速度对岩石固体部分的变化非常敏感，例如，在钻井或井下作业过程中使岩石产生了裂缝或发生断裂，则其横波速度明显下降。这样根据横波速度的差异就可以判断井下岩石固体部分的变化。为了在井下岩层中产生横波，采用前面提到的偶极子声学探头在岩层中激发横波，其效果就像用锤子敲击井壁，在井壁发生与井轴方向垂直的运动的同时，产生沿井轴方向传播的横波，这样发展起来的测井方法叫偶极子横波测井。

井下的岩层，有的在各个方向的横波速度是不相同的。例如，页岩和板岩，沿其层面和垂直于层面方向的横波速度有明显差异；另外，在有裂缝的岩层中，沿裂缝延伸的方向和与裂缝垂直的方向，横波速度也明显不同，这叫做岩层的各向异性，如果能在井下测量记录到在各个方向上的横波速度的差异，就可以查明井下岩层的各向异性。例如，找到裂缝延伸的方向，从而发现高产的油气层。因此，可在井下放置两对偶极子声学探头，使之在井下互相垂直的两个方向上产生横波，根据在这两个方向上测量记录到的横波速度的差异判断岩层的各向异性。这样的测井方法叫正交偶极子横波测井。

12．井下声波电视测井

日常生活中的电视机是观看光学摄像机摄录的图像，前提是要有可见光，即只有在人眼看得见的地方，才能用摄像机摄录图像。在井下，各种地球物理测井方法能测量记录电阻率、声速、天然放射性强度等物理参数，而且可以得出这些参数随深度变化的曲线。但是，这究竟还不是井下的直观图像。在几百米到几千米深的、充满钻井液或石油的井下，是没有可见光的，即使有强光源照明，也很难进行通常的光学摄像。对井下情况就不能用电视来观察了吗？这时，科学家想到声波可以穿透可见光所不能穿透的介质，据此发明了井下声波电视。



井下声波电视示意图

在井轴上设置一个可绕井轴旋转的声学换能器，使之发射一束束的声波信号（叫做声脉冲，就像探照灯发出断续的光一样），这样的声波信号可以穿透井内的钻井液（或石油），到达井壁后会形成反射（就像光线照在物体上被反射一样），反射信号的强弱与井壁介质的软硬、是否光滑有关，还和入射声波与井壁介质表面所成的角度有关。例如，井壁是光滑的、坚硬的、表面与声波入射方向垂直的钢质套管，则反射声波信号强，而井壁上有被泥质、石油或水充填的孔洞或裂缝，则反射信号变弱。经过井壁反射的声波信号再穿过井内的泥浆（或石油）回到声学换能器，这时的换能器被用来作为接收反射声波信号的器件，并将接收到的反射声波信号按其强弱变换为相应的电信号，再经过电缆传输到地面。地面的仪器设备会根

据井下传输上来的电信号的强弱，将其变换为电视机荧屏上的明亮或黯淡的信号。这就是将声波信号转换为电视机上图像的过程。

井下声波电视测井时如图所示，井下的声学换能器在绕井轴旋转（每秒钟转 3～5 周）的同时，向井壁发射高频的声波脉冲（每秒钟约 3000 次），换能器每旋转一周，向井壁约发射并接收到 500 个声波脉冲。这在换能器旋转一周时产生的 500 个声波信号最后是变成电视机荧屏上的一条迹线，即换能器旋转一周，荧屏上产生一条迹线（这个过程叫“同步”）。这样电视机的荧屏上，每秒钟就有 3～5 条迹线出现，这就是井壁的平面展开图，所看到的图像就是井壁表面的声学的直观图像。但这种图像是反映井壁界面声学性质的差异，和光学成像的图形并不完全相同。

井下声波电视测井就是用声学成像的方法得出井壁的直观图像，在这种图像上，可以看到井壁上有没有孔洞、裂缝，以及井壁岩石性质的变化，甚至可以看到岩层的倾斜。

13．噪声测井——听听油气井发出的声音

我们在前面提到的声波测井方法之一是通过地下的自然发出声音来识别地下岩层的情况，找到石油和天然气或是其他矿物。医生用听诊器可以听到病人肺部的罗音、消化系统蠕动的“肠鸣”以及心脏的正常声音和不正常杂音。这就会提出一个问题：地下油气井发出的声音是什么样的，和日常生活里的各种声音一样吗？是像汽笛一样尖厉？还是像小鸟唱歌一样婉转动听呢？

在油气井生产时，地层中的油、气、水在地层压力的驱动下，流向井内。流动的油、气、水在遇到井内的套管时，由于摩擦产生声音。如果是油气或油水或水气一起流动（叫做双相流动），而且地层压力不很大，这时产生的振动频率为 200 赫兹，发出的声音和钢琴键盘上 C 调的“1”（频率为 256 赫兹，唱名为“哆”）差不多，但这还只是井下“合唱”的低音声部。如果井下流动的是单一的油、气或水（叫做单相流动），发出的振动频率约为 500 赫兹，声音接近 C 调的“1”（频率为 512 赫兹），这还只是中音声部。如果井下流动的是气体，而且由于地层压力高而流速快，与套管摩擦产生振动的频率可达 1000～2000 赫兹，比 C 调的“1”要高两个 8 度音程，这才是井下的高音声部。但是井下流体与套管摩擦产生的振动没有旋律，因而不是音乐，故被称为噪声。除了不同性质的流体流动会发出不同频率的噪声以外，由于流体流过的路径上流通通道尺寸的变化、油气层压力的变化以及流量、流速的变化，都会使噪声频率（音调）、强度（响度）发生改变。测量记录井下由于流体流动而产生的噪声的频率和强度，可以识别井下流动流体的种类或性质（是油、气，还是水）及其流量，这种方法叫做噪声测井，所测量记录的信号是自然产生的声音。

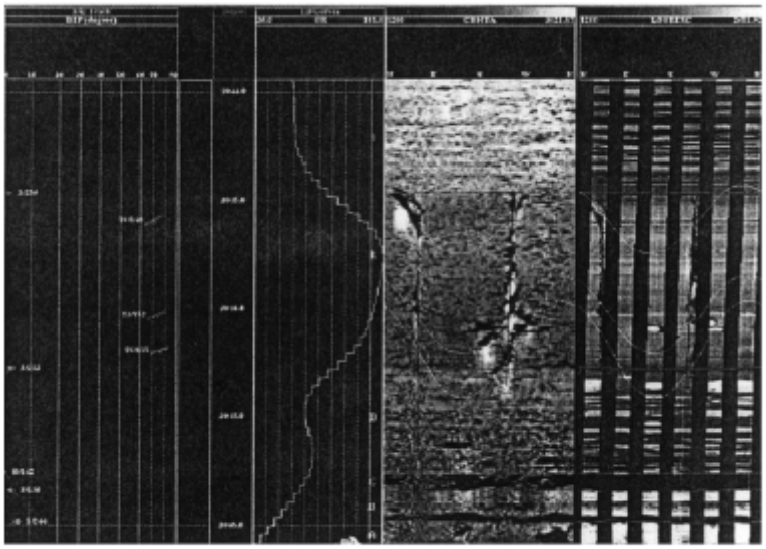
和前面提到的几种声波测井不同的是，噪声测井在井下没有人工的声源，只有灵敏度很高的声波接收探头。测井时，通过电缆将仪器放到井下一定深度，然后测量记录 3 分钟内接收到的声波信号，这种测量记录方法叫“点测”，即声波接收探头在井下静止的条件下进行测量记录，这样可以避免声学仪器在井下运动过程中产生的摩擦噪声。

14．怎样检查工业血管的“动脉硬化”——套管和油管技术状况的检查

一口生产石油的井钻完后，要先下一层钢质的套管，并用水泥将套管和井壁之间的环形空间封固，这样可以保证井壁不垮塌，也可以将井壁上含水和含石油、天然气的层段分隔开，以免水窜进含油气层。在石油天然气开采前，要用特别的炮弹将正对油气层的套管和水泥环射穿，以使油气能从地层流向井内。有时还要在套管内再下一根直径小一些的也是钢质的油管，使石油天然气能从油气层通过油管流向井口。

由于石油中总是有石蜡、沥青和石油胶质，从地层流出后，由于温度和压力降低，会使石蜡、沥青等物质积淀在套管或油管上。这样使工业血液??石油，通过的“血管”??套管和油管，就会结上一层蜡质，这叫做“结蜡”，相当于人体血管积淀了胆固醇，发生动脉硬化一样。套管和油管结蜡后，也会影响石油天然气的流动。流动的管道空间狭小，流动阻力增大，导致油气产量下降。所以石油天然气井每隔一段时间，要用机械的方法（例如，用“刮蜡片”刮去套管壁上积淀的石蜡）或热学和化学方法清洗（例如，用蒸汽除去石蜡或用溶剂溶解石蜡）。

但是，怎么发现套管上是否结蜡呢？可以用井下声波电视测井来检查：将声波电视测井仪器放到井下，并向套管壁发射声脉冲，如果套管壁上没有结蜡，声波的反射信号会由于钢质套管壁的反射而很强；若套管壁上结蜡，则由于石蜡对声波的反射很弱，接收到很弱的反射信号，而且，接收到反射波的时间也会由于石蜡层的加厚而提前。这样在井下声波电视测井的荧屏上，结有石蜡的地方，出现暗色区域，而没有结蜡的区域则是明亮的，这样就可以发现结蜡的位置，就好像医生经过检查查明人体动脉硬化的位置一样。用这种方法，还可以查明套管壁上是否发生了腐蚀（往往是由石油和地层水中的硫化物引起），是否发生了变形（套管在井下受力不均匀引起），是否有裂缝等。声波电视测井仪是石油工程师的“眼睛”，可以诊断出石油天然气井的许多“毛病”。



声波电视测井发现套管裂缝

15．声波在岩石中能走多远

到医院检查身体时，医生为了诊断人体内部器官是否有病变，通常做两种检查：X 光透视和超声检查。因为人的肉眼是不能直接看到人体的内部的，只有 X 光和超声波能够穿透人体。

地球物理学家的研究对象是地球，或是地球某个局部的岩石。用肉眼观察，只能看到地表，而使科学家感兴趣的地球内部，则是肉眼、甚至通常的光学方法所不能及的。X 光可以透视人体，用在实验室检查岩石薄片的结构也还可以，但要穿透大块的岩石就比较困难了。看来能穿透岩石，能对地球内部结构进行探测的工具，只有声波了。在地球内部传播的声波，叫做弹性波或地震波。实际上能在岩石中传播的是一种在弹性介质中传播的机械波或弹性波。地震波是由于在天然地震和人工诱发地震时能观察到的一种波。地震波的频率要比超声

波的频率低得多。在医院用来检查人体的超声波由于频率高，携带的能量少，因此穿透人体还可以，但穿透不了岩石层。

虽然都是弹性波，为什么超声波穿透不了岩石层，而地震波能穿透岩石层呢？这里有两方面的原因，一是波携带的能量，二是波长。地震波和超声波都是介质的机械振动，这两种波在地层中的传播速度是相同的，但由于其频率不同，其波长也不相同（波长=波速/频率）。例如在地层中超声波和地震波的速度都是 4000 米/秒，但超声波的频率是 20000 次/秒（频率的单位：1 次/秒叫做 1 周或 1 赫兹），其在岩层中的波长仅 0.2 米，而频率仅为 2 次/秒的地震波的波长达 2000 米，两者相差 1 万倍！

为了说明波长大的地震波和波长小的超声波的穿透距离不同，可以打个比方：波长小的超声波的波长相当于一个小孩走路的步长（假设是 0.2 米），地震波的波长则相当与大人走路的步长（假设是 1 米）。如果遇到一条沟，步长大的一步就过去了，而小孩就迈不过去。这样走不了多远，步长小的小孩，或者被沟挡住，或者虽然过了沟，但已经使出了吃奶的力气，实在走不动了。而步长大的大人，一条沟根本不算回事，可以比小孩走得远得多。如果假想有一个巨人，其步长是普通人步长的 1 万倍，就像地震波和超声波波长的差别一样，那么，可以想象，这个巨人可以迈过大江大河，甚至可以跨过小岛越过太平洋。而步长只有 1 米的普通人，如果不依靠交通工具，则只能望洋兴叹了。

另外，地震波是通过地震或人工爆炸产生的，其能量远大于用人工方法产生的超声波。因此，能量弱、波长短的超声波在岩层中传播才几米就消耗殆尽，而能量大、波长长的地震波则可以穿越几十、甚至几百千米的岩层，频率在 1 赫兹以下的地震波甚至可以穿透整个地球。通常频率为几十赫兹的地震波可在地层中穿透几十至几百千米，而声波测井所用的频率则是接近超声波的 20000 赫兹的信号，其在岩层中的传播距离仅几厘米至几十厘米。

四、核测井(放射性测井)篇

前言

不同的岩石具有不同的放射性强度，含有不同的放射性核素，用中子源或伽马源照射地层时会产生不同的核反应，因此用放射性测井能测量地层的核物理性质。下面介绍自然伽马（自然伽马能谱）测井、中子测井、中子寿命测井、岩性密度测井、核磁测井等。

1．透视千米岩层探索核奥秘的神奇眼睛

人有一双值得骄傲的眼睛，视力所及，山川、湖泊、海滩、沙漠均能一目了然。众所周知，在地面上识别砂子、黏土、砂岩、石灰岩、水和原油绝非难事，只要视力正常稍有常识即可。但同样是这些实物，若埋藏在几千米深的地下，再要我们用这双眼睛去观测一番就勉为其难了。

在地层深处储存着石油、天然气，人类离不开它们。为了寻找和开发这些宝贵资源，我们的视力必须延伸到地球的内部，而且要看得透、看得细、看得全，这就需要有一双特殊的“眼睛”。由此，核测井应运而生。

核测井也称原子核地球物理，是核物理学和地球物理学的交叉科学，是能透视千米岩层探索核奥秘的神奇眼睛。用核测井技术，能揭示地层深处原子和原子核的奥秘，探寻石油、天然气和其他矿藏。

核测井能看得透。透过厚厚的钢套管和水泥环能看到后面的地层，能看清这些地层是砂

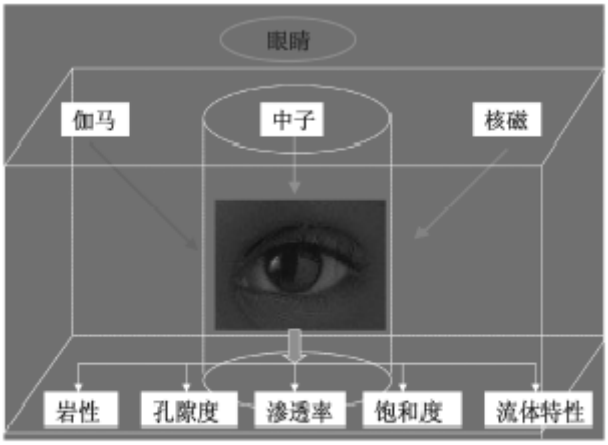
岩、石灰岩、白云岩还是火山岩，能看清地层的孔隙度有多大，能分辨孔隙中的流体是原油还是水，甚至能看出有多少油能采出来。

核测井能看得细。它能细到原子核，能识别铀、钍、钾、氢、碳、氧、硅、钙、铁、钴、氯、碘、硼、镉、钆、钡等元素和各自的同位素，能认出这些元素的化合物，分辨出硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐和氯化物。

核测井能看得全。它能看得见伽马（g）射线、中子和核磁信号，能观测原子核和地层的天然放射性、中子特性、核磁特性，能测量中子在地层中的寿命，甚至还能给油层做核磁成像检测。

核测井测量的 g 射线、中子和核磁等三类信号，携带着来自地层的极其丰富的信息，就像红、黄、蓝三基色一样能调和出色彩斑斓的多种图像，以适应地质和工程应用。靠这双特殊眼睛，测井分析家能把地层深处的核现象看得一清二楚，能追溯地球演变史中的原子核演化过程，进而重现几亿年前的地质景观和生油环境。

核测井伴随着油田从勘探到开发的整个过程，关注着每一项工程的实施及其效果。不论是地质家、油藏工程师还是管理干部，没有这双特殊的“眼睛”，就很难成为一个明白人。



核测井——揭示地层深处原子和原子核奥秘的眼睛

2. 射线??眼睛看不见的光

发射、散射和吸收光子是物质的普遍特性，我们举目所见的物质世界都与光子的作用过程相联系。我们的眼睛能看到太阳和萤火虫，是因为它们能发射光子，或者说能发光；我们能看到红花、绿草，是因为这些物体能分别反射太阳光中红色和绿色的光；而我们在天空中看到的彩虹，是太阳光经过悬浮于空中的小水珠的折射而分解成的七色光。

光子是一种电磁波，每个光子的能量与它的频率成正比，或者说与它的波长成反比。人的眼睛能够感觉到的光子，称为可见光，平均波长约为 550 纳米，即十亿分之一米，其中波长长的是红光，而波长短的是紫光。在可见光的范围内，我们的眼睛是一套精巧的摄像机，能根据物体发射、反射、折射或透射光的强度、方向和颜色（即波长）把它们区分开，从而看到一个五彩缤纷的物质世界。但令人遗憾的是，波长在这个范围以外的光，如紫外线和红外线，我们却什么都看不见。g 射线是 g 光子流，是波长比可见光短得多的电磁波，是一种人的眼睛看不见的光，要借用 g 射线探测器才能“看见”它们。

g 光子是原子核从较高的能级跃迁到较低的能级时释放出来的，而 X 射线却是核外电子能级跃迁时释放出来的，通常 g 光子比 X 射线的光子能量高，即波长短。做胸部透视时，X 射线能透过肌肉而不能穿透骨骼。而半米厚的岩石仍阻不断 g 光，g 射线能携带着丰富的信

息从地层中穿出来。

原子核释放的 g 光子能量组成不同，或者说具有不同的能谱。测量 g 射线的强度和能谱，我们就能了解地层的放射性、密度、岩性、孔隙度和与地层压力有关的参数。

3. 射线能谱仪??能看得见 射线的“眼睛”

人的视觉对可见光是很灵敏的，例如每秒有5个波长为500纳米的蓝绿光子射到视网膜，就会有光的感觉。而对波长非常短的 g 光子，即使射线的强度已能对眼睛造成伤害，却仍无光的感觉。为扩大我们的视觉范围，需要有一种能看得见 g 射线的“眼睛”。

为观测 g 光子研制了一种仪器，它既能测量每个 g 光子的能量又能对 g 光子按能量分组计数，这就是“g 射线能谱仪”。这种仪器能把 g 光子按能量大小转变成幅度不同的电信号，进而可变换成人能看得见、看得懂的数据图表。

核测井常用的 g 射线能谱仪是一种能在几千米深的井眼中正常工作的闪烁谱仪，如图所示，它的作用过程可分为下述几个相互联系的步骤：

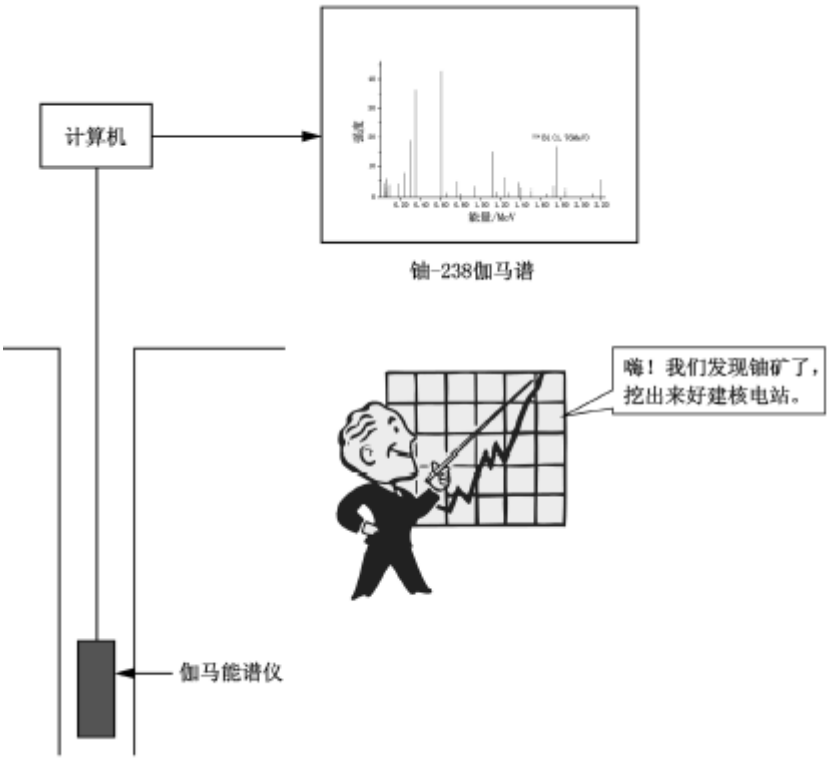
（1）一个个入射的 g 光子，被转变为一束束能量低得多的光子，即发生闪烁；

（2）能量低的光子经光电转换产生电子，称为光电子；

（3）光电子经过倍增，放大为电子流，产生电脉冲，其幅度与入射光子被吸收的能量成正比；

（4）对电脉冲的幅度进行分析，分组计数，经编码传输到地面；

（5）解码后，经计算机处理，输出人能看得懂的图表和数据。



4. 岩石的自然放射性是识别岩性的指路灯

提起放射性就会想到核武器，就会联想到氢弹、原子弹、贫铀弹，产生恐惧感。其实放

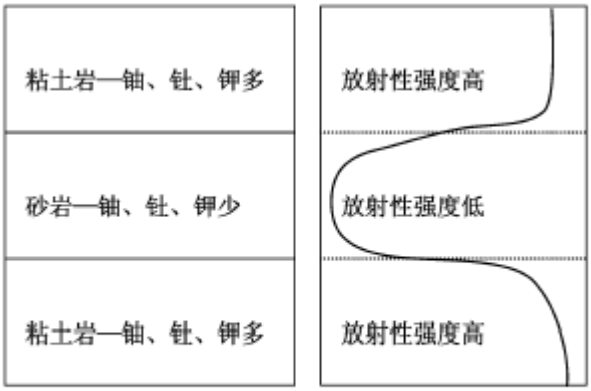
射性是物质的普遍特性，放眼世界几乎到处都有放射性物质。我们的身体含有碳和钾，而碳的同位素碳-14（14C），钾的同位素钾-40（40K）都是放射性核素。但从来没有那位同学害怕同桌好友身上的钾-40，也不会彼此认为对方是一枚核武器。木材、蔬菜和粮食也都含钾，也有放射性。我们所处的环境就是放射性的，躲不开也离不了。

岩石中含有天然放射性元素钾、铀和钍，具有天然放射性。严格地说，没有任何一种岩石是非放射性的，只是放射性的水平有高低。每吨纯石英砂岩含铀不到 0.5 克；而每吨铝土含铀可高达 30 克。黏土岩和花岗岩中含有较多的铀、钍和钾，具有较高的放射性。

研究表明，天然岩石的放射性不会对人造成伤害。在放射性水平高一些的地区，常住居民的 T 细胞活性比较强，修复能力优于低放射区。

石油测井的主要研究对象是沉积岩，其次是岩浆岩。能生油的岩石主要是有机质含量高的黏土岩，铀含量高，放射性强；而能储油的岩石主要是比较纯的砂岩、石灰岩、白云岩和玄武岩，放射性元素含量低，放射性弱。

地下岩石的放射性是石油核测井的指路灯，高放射性地层通常没有产油能力，而放射性比较低的地层往往能产油。几乎所有测井综合图中都有一条自然伽马测井曲线，指示岩石天然放射性强度随深度的变化，地质家主要就在放射性低的那些地层中找石油。



岩石的自然放射性

5．自然伽马能谱测井

视力正常的人都会看红绿灯，知道“红灯停绿灯行”。此时，我们的眼睛就是一台光谱仪，能快速准确地识别红色和绿色光。在可见光中，红光与绿光属于两个不同的谱段。红光光子能量最低，而绿光光子能量较高，“红”和“绿”只是眼睛对能量不同的两组光子流的感觉。

深藏于地层中的铀、钍和钾是天然放射性元素，都能“发光”。但它们发射的光子能量不同，就像三种具有不同光谱的灯，各有各的能谱。探测这些元素在地层中的分布，需要采取一种专门的地球物理方法，即自然伽马能谱测井。

铀元素包括两个放射系，是一个 16 代子孙同堂的大家族。家族中每种核素发射的 g 射线能量和强度都不同，g 能谱非常复杂。但在铀系中，能量为 1.76MeV 的 g 射线最容易识别，找到它就算发现了铀。钍系也是一个放射性核素大家族，g 谱中能量为 2.62MeV 的 g 射线能量高、强度大，根据它的强度可测定钍在地层中的含量。40K 只有能量为 1.46MeV 的一种 g 射线，就用它来确定钾的含量。

用自然伽马能谱测井仪，将这三种能量不同的 g 射线转变成幅度不同的电脉冲，由此可确认这三种元素。这好像按身高分开的三组学生，组内身高都相等，而各组成员的身高分别为 1.46 米、1.76 米和 2.62 米（假定真有这样的巨人），那么根据身高就可知道你是哪个组的

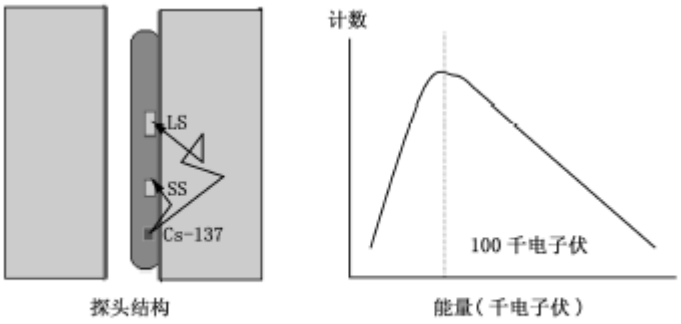
成员。

实测的地层自然伽马能谱是非常复杂的，很难分清铀、钍和钾各自的贡献，解决这一问题需要专门知识和技术。核测井专家设计了专用的计算机程序，对能谱数据进行处理，即可得到地层中铀、钍和钾的含量，进而可划分岩性，研究沉积环境，确定泥质含量并识别黏土矿物，区分生油层和储油层，寻找铀矿和钾盐。

6．散射　密度计（岩性密度测井）

我们的眼睛就是一套光子计数器，天气晴朗时能见度高，能接收到从远处透射过来的光子流，物像清晰。而在浓雾中，由远处物体发射或反射的光子经雾的散射和吸收，能到达眼睛的光子流强度很弱，图像不清晰，甚至完全看不到。由此可见，能观测到的散射光子的强度与散射体的密度有关。

含有孔隙的地层能存储石油、天然气和地层水。这些流体的密度都比岩石骨架密度低，所以岩石的孔隙度越大密度就越低，而致密地层的密度高。不同的岩石，如砂岩、石灰岩和白云岩，岩石骨架的密度也不相等。在实验室，用眼睛就能分辨岩石的岩性，用量体积和称重量的方法即可测量出样品的密度；而要测定数千米以下地层的密度和岩性，就需要一种专用散射 g 密度计，称为散射 g 能谱测井仪。



能谱示意图

散射 g 能谱测井仪的探头结构如图所示，测井时仪器被推压到井壁的一侧，以减少井眼内钻井液的影响。在仪器的下端装有一个铯-137（137Cs）g 源，向地层发射能量 0.662 兆电子伏的 g 射线，在上部有两个 g 射线探测器（SS 和 LS），探测在不同范围内经地层散射回来的 g 射线的能量，并按能量分组计数，即记录散射 g 射线的能谱。

在仪器的背面和源与探测器之间有光子屏蔽体，从源发射的 g 射线不能直接到达探测器，需要经过一次或多次散射，经过曲折的路径才能被记录。

测得的散射 g 能谱在 100 千电子伏附近有一散射峰，将散射 g 能谱分成两部分。经理论和实验研究证明：

（1）分界点的右边，记录到的散射 g 射线能量比较高，计数率的变化主要反映地层密度的变化，密度越高能到达探测器的能量较高的光子就越少。

（2）分界点的左边，记录到的散射 g 射线能量比较低，计数率虽然仍与密度有关，但对岩石的矿物成分更敏感，当地层中原子序数大的元素较多时，对低能光子的吸收能力就强，能记录到的这部分光子就少，所以用这一谱段可识别地层的岩性（化学成分），能区分砂岩、石灰岩和白云岩。

测量时，孔隙地层和仪器之间有一层泥饼，影响测量结果的精确度，用两个探测器测量不同范围内的地层与泥饼的组合，用适当的计算方法可消除泥饼的影响。

散射 g 能谱测井的主要用途是鉴别岩性和求孔隙度，同时还能用以求地层的波阻抗、反

射系数和预测超压地层等。

7．中子源——打开地下宝库的核武器

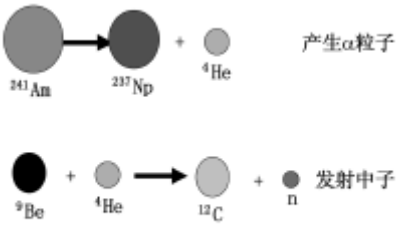
提起中子弹会使人毛骨悚然，这种武器能杀死坦克和装甲车里的士兵，却不破坏这些装置，真可谓杀人不见血、不毁物，而核测井专家却利用同样的原理为人类造福。中子流对钢管、水泥和岩石的穿透能力很强，能在地层中与各种原子核发生核反应，激发出不同能量的g射线，据此就能知道地层里有什么。

中子源是能发射中子的装置，就像是小型中子弹。产生中子的办法主要有以下两种。

第一种办法是使a射线与铍-9原子核（9Be）发生核反应，产生足够的能量而使中子发射出来。若a射线是由镅-241（241Am）衰变产生的，这种装置就叫镅-铍中子源。a射线就是氦-4（4He）的原子核，用它轰击铍-9的原子核，二者结合后转变成碳-12原子核，并发射出一个中子，核反应式见图。这类中子源通常称为同位素中子源，每秒钟可发射几百万个中子供我们使用。

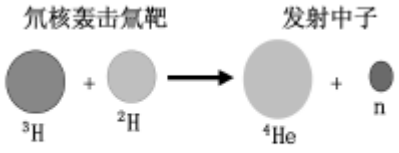
第二种办法和制造氢弹的原理基本相同，如图所示。氘核（2H）加速后，轰击氚（3H）靶，生成a粒子（4He）和能量为14兆电子伏的中子（n），这是氢核的聚合反应。这类源是一种小型加速器中子源，也叫井下中子发生器，每秒钟能产生几十亿个中子。

上述第一种中子源发射中子是连续的，不管使用还是存放在源库里，它都在不停地工作；第二种中子源是可控的，不使用时不通电也就不发射中子，使用时可按设计好的程序发射中子。



镅－铍中子源工作原理图

有了这样两种小型“中子弹”，我们就有了打开地下宝库的核武器。



井下中子发生器工作原理图

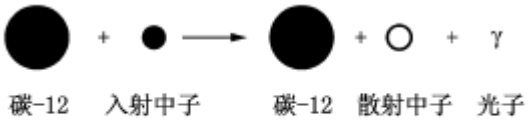
8．用中子流与地层对话

同位素中子源，发射的中子能量比较低；而加速器中子源发射的中子能量大约为前者的三倍。采用不同类型的中子源，就能用不同能量的中子流轰击地层，发生不同的核反应，使地层中各种元素作出特定的响应。这样，就像用中子语言与地层对话，每种元素都能用自己的“语言”报告它的位置和数量。

中子与地层中的原子核主要有下述核反应：

（1）快中子与原子核的非弹性散射

加速器中子源发射的中子，能与地层中的碳、氧、硅、钙发生非弹性散射，激发出特定能量的 g 射线。例如中子与碳-12 发生非弹性散射，如图所示，可激发出能量为 4.43 兆电子伏的 g 射线，据此可确定地层中有碳元素，进而可推算含碳化合物在地层中的含量。用同样的方法，根据特定能量的 g 射线能认识氧、硅和钙。若用别的方法能测定氢，那么氢、碳、氧、硅、钙正是组成水、原油、石英和方解石四种化合物的五种元素。



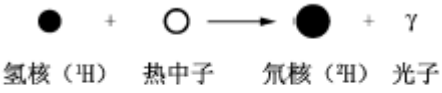
快中子与碳原子核发生非弹性散射激发出光子

（2）快中子与原子核的弹性散射

同位素源发射的中子，能与地层中的各种原子核发生弹性散射，中子损失能量逐渐慢化 。氢是最强的中子减速剂，其次是碳。含氢高的地层对快中子的减速能力强，据此可了解地层中含氢物质的多少，即了解石油、天然气和地层水的含量及孔隙度。

（3）辐射俘获核反应

原子核俘获一个热中子，转变为另一种核，并释放出一个或几个光子，这就是辐射俘获核反应。如氢核俘获一个热中子后转变为氘核，如图所示，并放出一个能量为 2.22 兆电子伏的 g 光子。对这种能量的 g 光子进行计数，就能知道地层里有多少含氢物质。同理，根据特定能量的光子强度可找到地层中含有钙、氯、硅、铁等元素的多种矿物。



氢核俘获热中子发射 γ 光子

（4）中子活化核反应

中子与某些核素的原子核相互作用，能使原来的稳定核素转变为放射性核素，即发生了中子活化核反应。这些放射性核素衰变时有确定的半衰期，并发射特定能量的 g 光子，据此可确认硅、 铝、钠等许多元素和相应的矿物。

9．中子探测器——能看见中子的“眼睛”

从能量的角度看，我们的眼睛就是一对换能器，能把可见光光子的能量转变成视觉神经和相关脑神经能够感知的生物电信号。中子探测器就像是能看得见中子的眼睛，它能把中子的能量转变为电脉冲。这些信号再经处理，就可变为人能看得懂的数据、图表或图像。

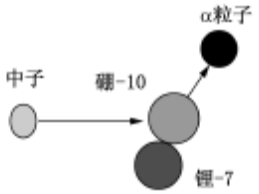
做核物理实验时，可用的探测中子的方法很多，而在核测井中，几乎只用核反应法。以核反应法为基础的中子探测器，主要有以下三种。

（1）含硼气体计数管

测量中子用的三氟化硼正比计数管，通常称 BF3 计数管。管内充 BF3 气体，中子和硼的一种同位素硼-10（10B）发生核反应的几率比一般核素高 3 到 4 个数量级，也就是说反应截面特别大。硼-10 与中子相互作用生成锂-7 核及 a 粒子，如图。a 粒子是带电粒子，容易测量，记录 a 粒子就可得到中子计数。这种计数管测量热中子和慢中子的效率都很好，若在计数管外面加一层中子慢化剂，也可用以测量快中子。

中子。对热中子的探测效率极高，几乎可达 100%。随着中子能量的增加，探测效率逐渐降低。

（2）闪烁探测器



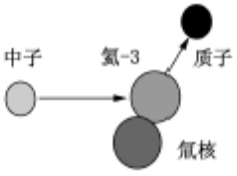
如碘化锂闪烁晶体和锂玻璃（含锂闪烁玻璃）等。计数时利用中子和锂-6的核反应生成氚和?粒子，氚和?粒子使闪烁体发光，并转换为电脉冲，测量电脉冲数就可得到中子计数。

这种闪烁体适用的中子能量范围较宽，可测量热中子和超热

（3）氦-3 计数管

是超热中子测井中常用的一种探测器，其核反应过程如图所示。中子和氦-3 的核反应生成氚和质子，利用带电粒子的电离作用产生电脉冲，从而得到中子计数。

除上述三种中子计数器外，在中子物理实验中还用半导体探测器组成中子谱仪。它是把两个金硅面垒型探测器面对面地靠在一起，中间夹一层含锂-6的薄膜。由锂-6（n,?）T反应产生的?和T分别被两个金硅面垒型探测器所记录，输出脉冲并相加，由此可同时记录中子的能谱和强度。



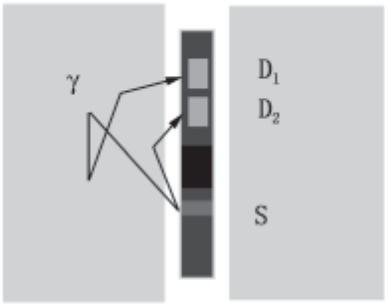
氦－3 计数管

10．中子测井

在人们的印象中，中子很可怕而水却是温和的，但中子遇到氢却只有死路一条。热中子在中子源周围的分布范围，主要决定于地层的含氢量。每秒钟能飞行两万千米的（能量为 2 兆电子伏）快中子，与氢核平均碰撞 18 次，就被慢化为每秒钟只能飞行 2.2 千米（0.025 电子伏）的热中子。而对碳、氧、硅和钙来说，要达到同样的慢化效果，则分别需要碰撞 114、150、260 和 364 次。

地层水和原油含氢量高，对快中子的减速能力强；石英中不含氢，只有氧和硅，减速能力很低；方解石是碳酸钙，因为含碳减速能力稍微大一些，但淡水的宏观减速能力仍超过方解石的 30 倍。氢原子是中子迁移的拦路虎，它不仅能快速消耗掉中子的能量，而且能将飞得慢的中子“吃掉”。地层的含氢量越高，中子能到达的范围就越小。

在井中探测热中子的仪器叫热中子测井仪，如图所示。在仪器的下部装有中子源（S），通常在离源 30～50 厘米左右安装两个热中子探测器（D1，D2），对经过地层减速且能到达探测器的热中子进行计数。

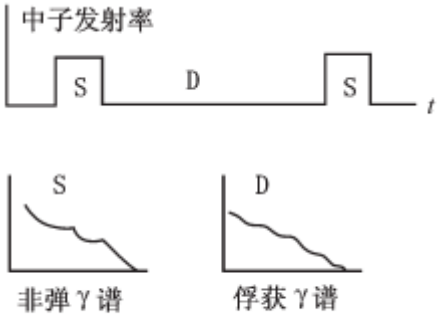


双探测器中子测井仪

这样得到的原始数据就是随井深变化的中子计数率，离源近的探测器计到的中子多，计数率高；而离源远的探测器计到的中子少，计数率低。两个计数率的比值，反映地层里中子密度或通量密度随源距加大而衰减的速率。地层中含氢量越高，两个探测器的计数率差别越大。反过来说，两个探测器的计数率差别越大，地层的孔隙度也越大。

11．脉冲中子源在地层中能激发出哪些　射线

脉冲中子源以一定的脉冲宽度和重复周期向地层发射中子束，如图所示。中子进入地层，在中子发射期间（S），与地层中某些核素的原子核发生非弹性散射，并发射“非弹性散射”g 射线。其后，在中子发射间隔期内（D），主要作用过程是弹性散射，使中子慢化并产生俘获辐射。所以利用发射时间差可以把非弹性散射 g 射线与俘获辐射 g 射线区别开。



中子发射和γ能谱

（1）非弹性散射 g 射线

飞行速度达到每秒 52000 千米(14 兆电子伏)的中子进入地层，氢核无法使它慢化，而是先与硅、钙、碳、氧发生非弹性散射，产生“非弹 g 射线”，其能量分别为 1.78 兆电子伏、3.73 兆电子伏、4.43 兆电子伏和 6.13 兆电子伏。

测井时记录的“非弹地层谱”，主要包含原油、地层水、石英和方解石四种矿物中的碳、氧、硅、钙的贡献，更确切地说是四种核素的贡献。实际测得的能谱非常复杂，要用专用的计算机解谱程序才能把碳、氧、硅、钙的贡献分离开，进而可分辨石灰岩和砂岩，并区分地层中的油和水。

（2）俘获 g 射线

中子飞行速度减速到每秒 40000 千米后，主要通过与氢原子核的弹性散射逐步慢化为热中子。地层中热中子俘获截面大，对俘获 g 计数贡献较大的核素主要有 1H、28Si、35Cl、40Ca 和 56Fe，它们的特征能量列于下表。

核　素	^{1}H	^{28}Si	^{35}Cl	^{40}Ca	^{56}Fe
γ能量（兆电子伏）	2.23	3.54；4.93	6.11；6.64；7.42	6.42	7.64

（3）活化 g 射线

脉冲中子也能使地层中的一些稳定核素转变成放射性核素，衰变时能发射 g 射线。

碳氧比能谱测井就是利用脉冲中子源激发的前两类 g 射线携带的信息区分油水和识别岩性的，它能隔着钢套管“看到”井眼外面的地层中有多少石油。

12．热中子在地层中的平均寿命有多长——中子寿命测井

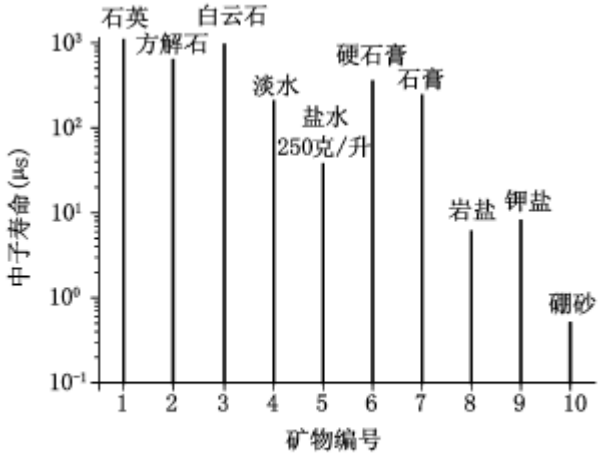
提到寿命，首先会想到人类自己。人的个体寿命是随机的，可能在几秒钟内夭折，也可能长命百岁；而大的群体，平均寿命（或称期望寿命）是比较稳定的，它是民族、社会、经济、环境的综合指标。人自称为万物之灵，但直到现在还说不清自己的极限平均寿命究竟有多长。

在稳定核素的原子核中，中子数不变，中子寿命似乎是无限的。而当中子一旦脱离原子

核，中子的寿命就与它处的环境相关。中子在真空中将自发衰变，半衰期为 11.7 分钟，平均寿命为 18 分钟，这是中子最高平均生存时间。

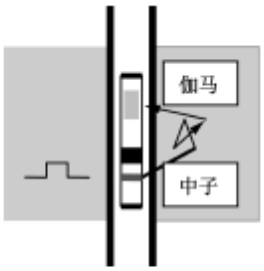
中子进入地层后，从具有初始能量到慢化为热中子，平均只需百分之几微秒，而热中子的平均生存时间却可达到数百或超过一千微秒。热中子寿命 t，是指热中子从产生的瞬时起到被俘获的时刻止所经过的平均时间。由计算可知，它等于热中子已有 63.2%被俘获而剩下的还有 36.8%所经过的时间。考虑到岩石中热中子寿命的数值范围，t 的单位选为微秒（ms）。

热中子在石英中最为长寿，寿命可高达 1070 微秒，而在淡水中为 205 微秒，原油和淡水相近。一个氯原子“吃掉”热中子的能力几乎是氢原子的 100 倍，当水中溶有大量氯化钠时，中子寿命就比在原油中短得多。在岩盐、钾盐、硼砂和含钆矿物中，中子就像是狼群中的兔子，寿命会非常短。常见矿物的 t 值见图所示。



常见矿物的热中子寿命

储油岩石的主要骨架矿物，如石英、方解石、白云石的热中子寿命都很长，而孔隙流体的热中子寿命比大部分骨架矿物小很多，所以孔隙度高的地层热中子寿命较短。含盐度高的地层水比原油热中子寿命短很多，孔隙度相同的地层含水饱和度高的中子寿命短。地层中含天然气时，热中子寿命比较长。矿物中含硼、汞、钆等元素时热中子寿命特别短，在岩石骨架或孔隙流体中，微量的硼、汞、钆就能使热中子寿命明显降低。



中子寿命测井示意图

为测量地层的热中子寿命研制了中子寿命测井仪，如下图，在发射中子的间隔期测量热中子被俘获时放出的?射线。??????射线计数率随时间的衰减速率反映探测范围内热中子数的衰减速率，经数据处理可得到地层的热中子寿命。反过来，由中子寿命的长短可在套管井中识别地层中的油、气、水，或推测其他有经济价值的矿藏。

13．为什么说稀土元素是中子测井的新亮点

稀土元素包括钪、钇和镧系元素，在元素周期表中属 IIIB 族，通常呈正三价。稀土矿物主要是稀土元素的氧化物、硅酸盐、磷酸盐和氟化物，在地壳中总的分布量为 153 克/吨。

我国稀土矿物储量占世界第一位，而 98%在内蒙古自治区的白云鄂博矿区。稀土元素中有许多核素吸收热中子的能力特别强，如果把它们用作示踪剂，则可为核测井开辟一片新领域，成为中子测井的新亮点。

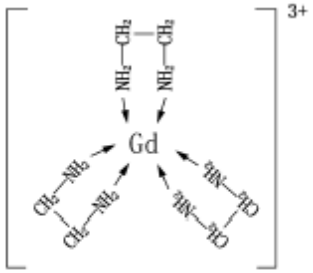
原子核吸收热中子的能力是用“截面”表示的，单位是 10-24 平方厘米，称作靶（b）。在表中，列出了氢(H)、硅(Si)、钙(Ca)和稀土核素铕(Eu)、钆(Gd)、镝(Dy)、镱(Yb)及镥(Lu)的热中子俘获截面。从表中看出：①只要含有微量稀土元素，就能显著地改变地层的中子特性；②钆是稀土中俘获热中子能力最强的元素，是最优秀的中子示踪剂。

表 4—2　热中子俘获截面

核素	截面（b）	核素	截面（b）	核素	截面（b）
^{1}H	0.33	^{151}Eu	9200	^{164}Dy	2700
^{28}Si	0.13	^{155}Gd	61000	^{168}Yb	3470
^{40}Ca	0.43	^{157}Gd	254000	^{176}Lu	2100

已经知道，每俘获一个热中子，一个钆-157 原子核能发射 3 个伽马光子，而氢核只能发射 1 个光子。一个钆-157 原子核，俘获热中子的能力是一个氢原子核的 17 万倍，所以该核素产生光子的能力是氢的 51 万倍。但天然钆是由多种核素组成的，每个钆原子核的平均热中子俘获截面是 49000×10-24cm2，是氢的 15 万倍，产生光子的能力是氢的 45 万倍。注入少量的含钆物质，就能使地层的热中子宏观俘获截面、热中子寿命、伽马射线的发射强度和能谱发生重大改变，因而用中子测井容易找到钆。

钆是一种稀有金属，它的氧化物、氢氧化物均不溶于水，但氯化物是易溶的。氯化钆溶于水后生成一种称之为水合物的物质，钆离子被 6 个水分子团团包围起来，而它与氯离子的联系却减弱了。化学家还制造出一种叫作三氯三乙二胺合钆的化合物，其正离子结构如图所示。三个乙二胺分子环绕着钆离子，整体显示为正三价，而与氯的负离子结合较弱。每个乙二胺分子有两个氮原子与钆成键（称为配位键），像螃蟹的一对大螯与钆结合，故称为螯合物。在这种螯合物中，钆离子就像是稳坐在一条潜水艇里，虽然自己不会“游泳”，但仍能处于水中任何位置，并且十分安全。当测井人员向钆发出中子信号时，它们将相当准确地回答出所在位置、周围流体的种类和所占空间的大小。当然来自任何信息源的数据，都需要用其他手段进行验证。



三乙二胺合钆螯合离子

三氯三乙二胺合钆稳定性强，能与水或醇混溶，耐温150℃，耐压140兆帕，适于做水示踪剂。科学家正在寻找钆的另一种化合物，它能在水中和原油中按一定比例分配。用这种“可分配中子示踪剂”，将可能在井间研究地层的连通性和尚未开采出的原油还有多少。

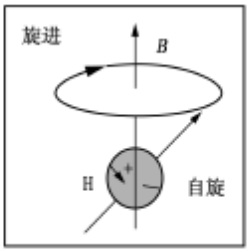
稀土元素为亲石元素，原矿物就是“土”，容易与石油工程中的堵剂、裂缝支撑材料和其他物料混合和加工。

14．地层中的原子核能发射广播信号吗

我们每天都听广播，根据频率就能选定电台和节目。有些元素的原子核，在磁场中能吸收和发射射频信号。这样，每一个原子核就像一个小电台，能按一定的频率给我们送节目。不过这些信号非常弱，用普通的收音机收不到，需要用精密仪器放大、记录和处理，而后才能知道信号是由那种原子核发射的，并计算出在探测范围内相应的元素有多少。

氢（1H）原子核带正电，有自旋，就像一个带电的陀螺，具有磁矩，从外部看就是一块小磁体，如图所示。除氢外，还有碳（13C）、钠（23Na）和氯（35Cl）等原子核是磁性核，而那些中子和质子都是偶数的原子核，如 12C、28Si、40Ca 等都是非磁性核，其磁矩为零。

在没有外加磁场时，氢核磁矩的指向是随机的，从宏观上看含氢介质（比如一杯水）并不显示磁性。但当有外加稳定磁场（B）作用于含氢介质时，氢核的取向就逐渐排列有序了，这个过程叫磁化。磁化后，核磁矩的矢量总和与外磁场的方向平行，包含有大量氢核的整个系统处于低能态。



氢核旋进

在没有外加磁场时，氢核磁矩的指向是随机的，从宏观上看含氢介质（比如一杯水）并不显示磁性。但当有外加稳定磁场（B）作用于含氢介质时，氢核的取向就逐渐排列有序了，这个过程叫磁化。磁化后，核磁矩的矢量总和与外磁场的方向平行，包含有大量氢核的整个系统处于低能态。

在稳定磁场中，氢核除自旋外，核磁矩的指向还要绕外磁场的方向旋进，其圆频率与磁通密度 B 成正比，这就是氢的核磁共振频率，氢核只能吸收或释放与这一频率相同的电磁信号的能量。在与稳定磁场垂直的方向上加一交变磁场，当交变磁场的频率与氢核的核磁共振频率相同时就会发生核磁共振，处于低能态的氢核将吸收能量，转变为高能态的核。发生共振时就像用力把一张弓拉开，整个系统储存了能量。

当交变磁场停止作用后，能量高的氢核要释放能量，这个过程叫做弛豫。就像把张开的弓放开，系统储存的能量释放出去，恢复到低能态。弛豫包括纵向弛豫和横向弛豫，纵向弛豫是原子核在磁场中的能量转变为分子的热能，而横向弛豫是氢核之间交换能量。弛豫的快慢可用两个时间常数来描述：其一称为纵向弛豫时间，用 T1 表示；其二称为横向弛豫时间，用 T2 表示。

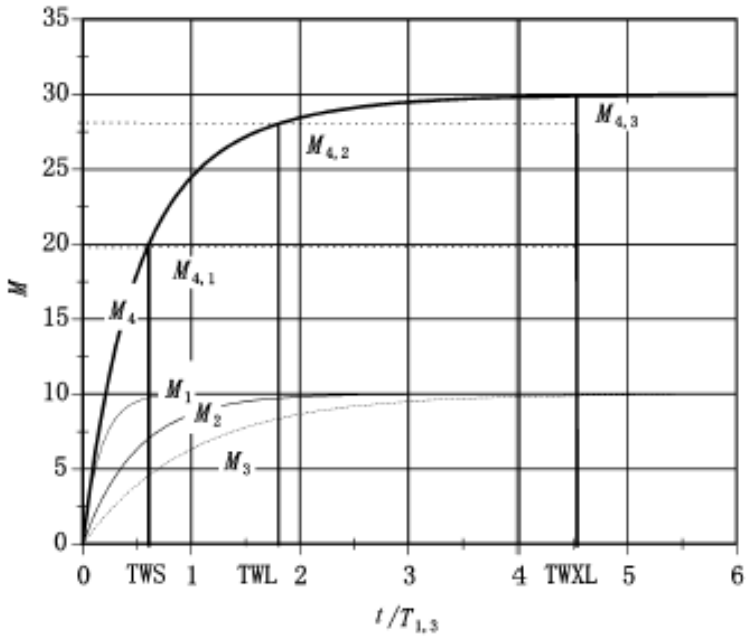
在弛豫过程中原子核能发射幅度按指数衰减的电磁波。核磁测井氢核的共振频率范围在 580～760 千赫之间，属广播电台的中波频段。而在实验室测岩石样品时，激发出的核磁共振信号频率属无线电短波频段。核测井专家使氢核按广播电台的频率发射信号，根据这些信号携带的丰富信息可探寻埋藏于地层深处的奥秘。

若将磁化场的磁通密度 B 设计成空间坐标的函数，那么共振频率就也成了坐标的函数，我们就能根据频率确定信号来自什么位置，由此可实现核磁成像。就像医生给病人做核磁成像检查一样，核测井专家也能给地层做诊断。

15．如何用核磁共振方法区分孔隙中的油、气、水

含氢地层在恒定磁场中随时间按指数规律被磁化，磁化程度可用磁化强度 M 表示，核磁测井信号（回波）的初始幅度与磁化强度成正比。时间 t 足够长时地层可充分磁化，M 达到它的平衡值，而测到的核磁信号初始幅度可达到最大值。若孔隙中同时含有水、油和气，则地层的磁化强度应包括这三种含氢流体的贡献。磁化的快慢是由时间常数 T1 确定的，流体的 T1 越大磁化越慢。水磁化最快，轻质油次之，天然气最慢。M1、M2、M3 和 M4 分别表示水、油、气和地层总磁化强度随时间 t 的变化，如图所示。图中纵坐标为三种流体和地层的磁化强度，横坐标为磁化时间 t 与天然气 T1 的比值，并设定三种流体磁化强度的平衡值均为 10 个单位，而地层的磁化强度的平衡值为 30 个单位。

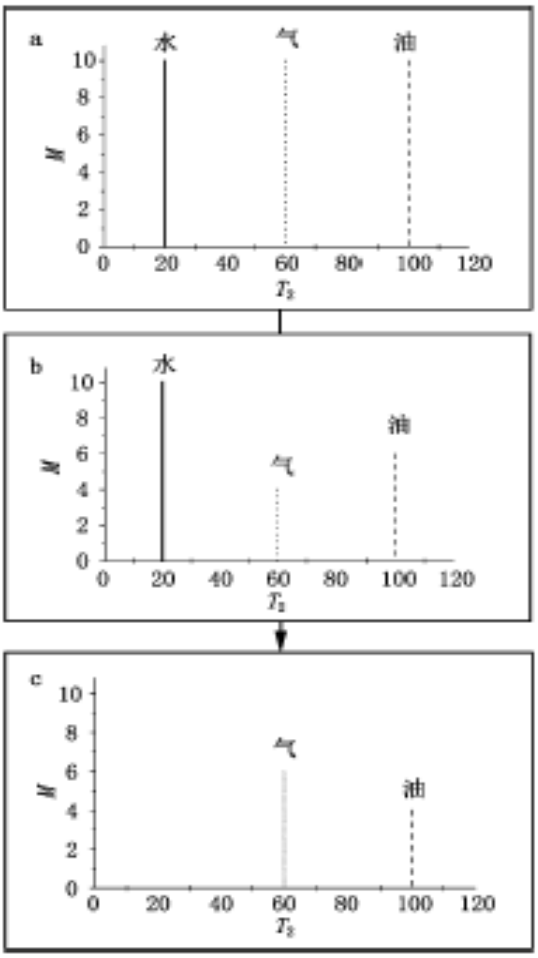
识别流体的第一类方法是以 T1 的差别为依据的。在采集信号之前先要等待地层磁化，所以把磁化时间常称为等待时间，并用 TW 表示。若等待时间对水、油和气都足够长（TWXL），可保证三种流体都能充分磁化，在测得的初始信号幅度中将包含完全的三种分量的贡献；若等待时间很短（TWS）只能使水充分磁化但不足以使油和气充分磁化，则测量信号中包含的信息对水来说是完全的，而油和气只有部分贡献；而当等待时间较长（TWL）能使水和油都充分磁化，但不足以使气充分磁化，则测量信号中包含的信息对水和油来说是完全的，而气只有部分贡献。



用核磁测井识别油气水

核磁信号是在弛豫时间里，即当系统释放能量时采集的，此时信号的幅度将按指数规律随时间衰减。衰减的快慢由时间常数 T2 确定，T2 越大衰减越慢。在孔隙中水的信号衰减得快，油的信号衰减得慢，而气的信号衰减速度介于两者之间。若在 T2 域中，用图 a 和 b 分别表示对应于等待时间 TWXL 和 TWS 时的测量结果，两图相减其差则为图 c 所示。由此可断定地层中有油、气。

实际地层孔隙结构和流体特性都很复杂，图 a、b、c 中三种流体的 T2 分布是相互重叠的，用两幅连续的 T2 谱相减所得的差谱判断是否有油气的方法称为差谱法，或双等待时间法（DTW）。



区分孔隙中油、气、水的第二类方法是以扩散系数的差别为依据。天然气的扩散系数大，当改变测量参数使扩散系数的影响增大时，显示天然气的那部分信号有明显变化，而油和水变化不明显。

五、生产测井篇

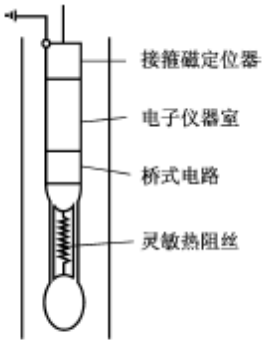
前言

生产测井是一套专门用于套管井的测井系列，用来测量井下地层的油气产量、地层压力、地层温度以及油井的技术状况等，下面予以介绍。

1．温度测井——给油层测“体温”

人们对身体的温度再也熟悉不过了，不仅看医生的时候往往先要查一下体温，许多人自己就备有温度计，不舒服时量一下体温是否正常，以判断有没有疾病。这是因为从物理学角度讲，温度是构成人体的分子运动能量的表征，正常情况下人体温度保持约 37℃的恒温。若身体出了毛病，肌体内分子运动的能量往往会发生变化，从而体温产生异常。

油井内流体和岩石的温度在一定情况下保持稳定，当情况发生变化时，井温也会表现出一些异常来。与人们查体温相似，测量到井温及其变化数据，可以推断井下与温度变化有关的情况和问题。不过，测量从地表到数千米深的油井内的温度不像查体温那么简单，必须采用专门的井下温度计才行。井下温度计是利用惠登斯电桥原理制成的电子仪器，采用铂电阻作为灵敏臂，康铜电阻作为固定臂，其结构如图所示。由于铂的温度系数比康铜高800多倍，测量探头处的温度稍有变化，电子仪器输出的信号就有不同的量值，可以使测量精度达到0.01℃。



温度测井仪的结构

世界上一切事物都是通过比较进行鉴别的。简单说来，地球物理测井是通过观测研究对象的物理信息，然后利用各部分介质的物理性质差异，分析解决油气勘探和开发中有关问题的。鉴于油气开发的许多方面都会引起油井内温度场的变化，因此利用温度测井可以研究解决诸多生产问题，其定量应用需要求解复杂的井下温度场，定性应用则通常采用对比分析方法。

一口油井往往同时开采多个油层，合理开发需要确切了解各层产出流体的性质。当井下油层产油时，由于油流来自温度较高的油层深处，可能造成产出部位附近的流体温度升高，所以根据井温曲线上显示的增温异常，便可以知道究竟是哪些地方产油。当井下油层产气时，由于气体来自压力较高的油层深处，而产出部位附近的压力较低，可能因体积膨胀致使温度降低，所以根据井温曲线上显示的降温异常，可以判断产气层的位置。

为了提高原油采收率，我国许多油田采用注水方式驱替地层内的原油。当向油井内注水时，由于吸水井段的温度主要取决于注入水的温度，而其下部未吸水地层的温度主要受原始地层温度的影响，从而根据井温曲线上明显的台阶状变化，可以确定二者的界面位置。如果停止向油井内注水，间隔几小时多次测量井温曲线，由于吸水地层的温度受注入水的温度影响大而恢复慢，未吸水地层受的影响小恢复得快，从而根据井下不同部位温度恢复情况，还可以确切知道究竟有哪些地层吸水。

为了提高油气产量，经常采用对油层进行酸化、压裂等处理措施。当对油层进行酸化时，进入地层内的酸溶液会发生放热反应，造成相应部位的温度升高，所以根据井温曲线上显示的增温异常，便可以判断哪些油层见到了酸化效果。当对油层进行压裂时，进入地层内的低温压裂液会导致温度降低，从而根据井温曲线上显示的低温异常，可以判断哪些油层被压裂开了。

2．压力测井——给油层“把脉”

人体中血液的压力是重要的健康表征。西医在诊病的时候，往往用血压计先量一量血压。中医看病一般首先要“把脉”，根据血管中压力的波动情况，诊断患者得何种疾病。但是你是否知道，地下的油层也需要“把脉”，通过压力测量来判断它的“健康”状况，评价它能否正常生产石油？

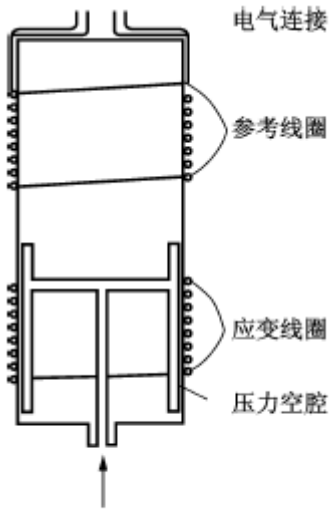
“压力就是动力”这句俗话说得好，其中包含着科学道理。当你打开水龙头时，自来水会流出来，是由于水管中水的压力比大气压力高。同样道理，要想把地下数千米深的油层内的油采出来，也必须使得油层内的压力高于同一深度油井内的压力。因此，开采石油必须要准确地知道油层和油井内的压力。

人们在长期科学研究中发明了各种各样的测量压力的方法。测量大气的压力和血管的压力，只需采用简单的水银压力计即可。但是，测量地下数千米深的油井和油层内的压力，必

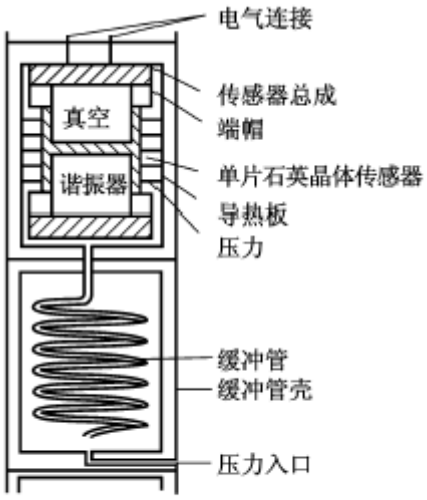
须采用复杂的电子仪器，称之为井下压力计。它是由压力传感器和复杂的电子线路组成的，测井时通过计算机系统自动控制，测量信号由电缆传输到地面记录和显示。

目前常用的井下压力计主要有两种。一种是应变式压力计，是根据金属导体发生机械变形时将产生电阻变化的原理设计的，其结构如图所示。由于可以检测到金属导体极微小变形产生的电阻值变化，因此应变式压力计能够测量快速变化的压力。另一种是石英压力计，是根据石英晶体受外力作用后将产生表面束缚电荷的原理设计的。石英压力计的传感器采用两个石英晶体，可以对温度的变化影响作出校正，具有很高的测量分辨率和精确度。

压力测井有多种测量方式，测量数据的用途也非常多。一种方式是测量油井内流体的压力，可以根据压力的大小估计流体的物理性质参数，也可以根据垂向每米的压力变化（称之为压力梯度）大小估计油井内流体的密度，还可以结合测量的油层压力，评价油层的生产能力。另一种方式是测量油层内的压力，可以根据压力梯度大小估计油层内流体的性质，也可以根据油层内压力传播过程的变化，估计岩石的渗透性，确定地层的边界和断层影响情况。



应变式压力计结构



石英压力计传感器简图

3．流量测井——测量油层的“产量”

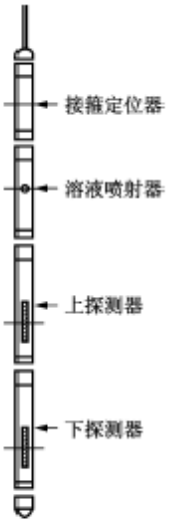
当你打开水龙头时，水表就开始计量你用了多少水。这个水表就是流量计，通常采用的是电磁流量计或浮子流量计。当人们开采石油时，需要知道每个油层的产量是多少，以便掌握油层的产能发挥出来没有，也必须应用流量计测量产量。

石油是从地下数千米深处的地层里往外开采的，要想测量油层的产量，需要把流量计沿油井下到油层所在的部位去测量，这就叫流量测井。由于油井内数千米深处的压力高达数百个大气压，温度往往超过 100℃，并且油井的直径一般只有 10 厘米左右，因此必须采用特殊的井下流量计。它是由流量传感器和复杂的电子线路组成的，测井时通过计算机系统自动控制，测量信号由电缆传输到地面记录和显示。

流量测井采用的流量传感器有好几种，目前最常用的是涡轮流量计。涡轮流量计的传感器由装在枢轴上的叶片组成，枢轴上装有磁键或不透光键，轴承一般采用非常耐磨的工业蓝宝石，其结构如图所示。由于涡轮的叶片具有一定倾角，当流体流过叶片时会产生一个转动力矩，使得涡轮转动。流体的速度越高，涡轮的转速也越快，通过刻度可以建立二者之间的关系。测量记录涡轮每秒转动的周数，便可以推算流体的速度，再乘以流动截面积，就得到流体的体积流量。



涡轮流量计



核示踪流量计

流量测井常用的还有一种核流量计，它的传感器是由一个喷射器和两个伽马探测器组成的，其结构如图所示。核流量计测量时，首先用喷射器向井内流体中喷射放射性同位素液团，使之随着流体一起流动，然后用间隔一定距离的两个伽马探测器记录放射性强度。当放射性液团经过伽马探测器所在位置时，会产生高放射性异常。通过测量记录可以读出放射性液团经过两个伽马探测器所用的时间，去除间隔距离便可推算流体的速度，进而求得流体的体积流量。

4．如何识别井内流体的性质——流体识别测井

石油和天然气是从地下油气藏里开采出来的。由于油气藏形成过程中底部往往会同时储集一些水，并且在开发过程中往往通过向油气层注水驱替油气和保持地层压力，因此开采油气的同时，不可避免地也要采出一些水来。但是，如果采出的流体中含水过多，就会影响油气的生产。我国大部分油田目前已进入开发的中、后期，油井产液的平均含水率已超过 80%，所以必须测量找出水是从什么地方产出来的，以便采取技术措施控制水对油气生产的不利影响。

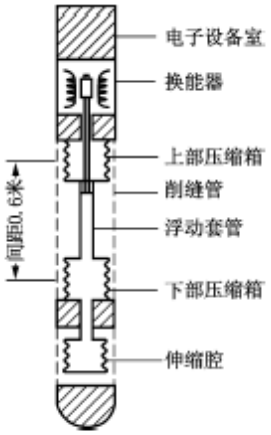
流体识别测井是专门用来测量区分井内流体是油气还是水的。测量原理是根据油、气、水的物理性质差异，采用人工物理场方法，测量出井内流体的物理性质参数，进而识别流体的性质。目前常用的测量方法有压差流体密度测井、伽马流体密度测井、电容持水率测井和放射性持水率测井。

压差流体密度测井利用间距约 60 厘米的两个压敏箱，测量流体的压力梯度，求出井内混合流体的密度，其结构如图所示。由于井下油、气、水的密度不同，根据密度大小不仅可以判断流体性质，并且可以求出就地体积分数。

伽马流体密度测井利用一个伽马源和一个电子计数管构成探测器，伽马源放出中等强度的伽马射线，穿过流体时发生康普顿效应而衰减，衰减大小与流体密度有关，从而可以测出井内混合流体的密度。

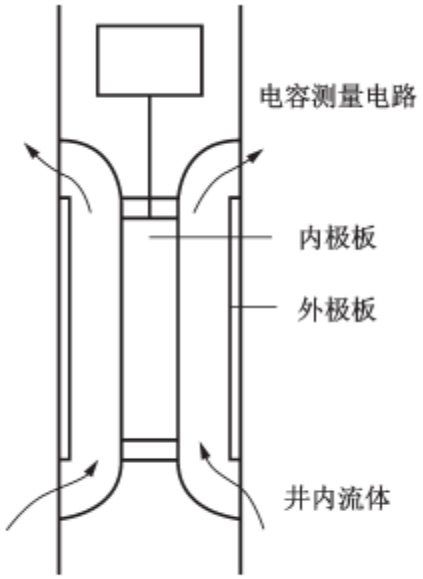
电容持水率测井的探测器采用柱状电容器，测量时流体作为电介质从内、外电极中间流过，其结构如图所示。由于油气与水的电容率相差几十倍，于是测量记录与电容量有关的振荡频率，便可以判断流体性质，求出持水率，也就是水的就地体积分数。

放射性持水率测井采用109镉作为放射源，它可以同时放出低能光子和中能光子。利用中能光子可以测出井内混合流体的密度。



压差密度计的结构

而低能光子穿过流体时发生光电效应而衰减，氧元素和碳元素产生的衰减大小不同。由于油气是碳氢化合物，而水是氢氧化合物，从而可以利用低能光子的衰减特性测出持水率来.



电容持水率计的结构

5．怎样给井下流体流动成像——流动成像测井

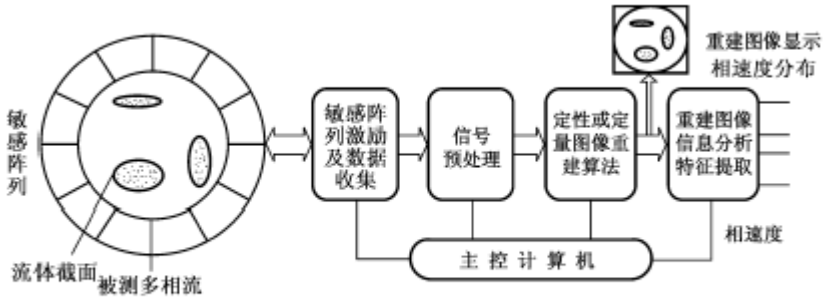
随着科学技术的进步，成像观测技术也越来越先进。就拿检查身体来说，从原来的 X 光照射，到后来的 CD 二维层析成像，发展到目前的三维核磁共振成像，技术水平不断提高，检测效果越来越好。

油气井内多相流体的流动属于非均匀介质动态问题，需要采用非线性测量方法研究解决。传统测量技术采用的是局部空间上平均的线性测量方式，无法获取流体介质空间分布信息，难以提供油井内流动剖面的详细情况。流动成像测井可以对井内流动进行实时检测，获

取多相流体的二维或三维分布信息，通过处理给出相分布廓形，实现流型辨识和确定相含率、相速度，从而为各类油井的生产状况评价和油藏动态分析提供准确可靠的依据。

成像测量的实质是运用一个物理可实现系统来完成对被测物场某种特性分布的 Radon 变换和逆变换。从基本原理上说，流动成像测量与医学成像检测是相同的。但是由于测量对象、测量目的以及运行环境不同，无论是信息的获取方式和处理方法，还是测量结果的分析方法和解释技术，流动成像测量技术均有显著不同，其特点如下：①被测物场始终处于剧烈运动、变化的状态，要求测量系统具备在线获取物场信息的能力和对信息实时处理的功能；②被测物场具有很强的非均匀性，造成物场与敏感场之间相互作用的非线性特性严重，使得图像重建比较困难；③被测物场环境和测量条件往往较差，要求测量系统不仅与被测管道的几何形状和机械特性实现“匹配”，而且必须适应被测对象的物理环境（如压力、温度）和化学特性（如腐蚀性）；④被测物场的图像重建和分析比较复杂，不仅需要阐明重建图像的物理意义，而且需要提取与流体运动变化有关的特征参数。

流动成像测井的基本内容包括三个部分：一是采用特殊设计的敏感器空间阵列，通过不同方向的投影测量获取井内流体中某种既定特性分布的信息，目前采用的有电容法、电导法和电磁法等测量方法；二是运用信息处理技术及图像重建算法，实时重建和显示流体流动截面的图像；三是通过对重建图像信息的分析和解释，获得井内流体的分布状态及其流动变化特征。典型的流动成像测井系统构成如图所示。



流动成像测井系统构成示意图

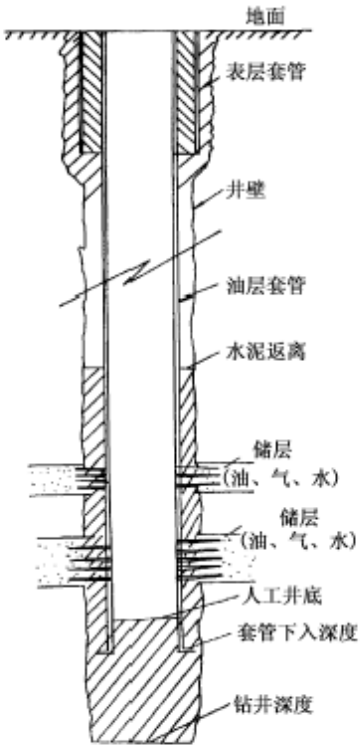
6．如何给油井进行“体检”——井身状况检测

人们为了保障健康需要进行身体检查。油气开采井为了保证科学合理地生产，也需要进行“体检”。

油气井的“身体”非常长，从地面一直延伸到地下数千米深的油气层下面。井身结构如图所示，主要包括钢铁质套管、水泥环和地层几部分。水泥环的作用是把不同的地层封隔开来，只在目的油气层的部位用炮弹射开孔眼，让地层与套管连通。套管相当于油气井的“身体骨架”，一方面防止地层坍塌，支撑着整个井身；另一方面防止其他异物进入井内，为油气提供良好的产出通道。由于地层在产出油气的同时，往往还产出一些高盐分的水和酸性物质，对钢铁质套管会产生腐蚀作用，加之地下应力作用，致使套管变薄、穿孔、变形、破裂，从而油气不能正常生产。目前我国大部分油田已进入开发的中后期，每年有上千口油气井内的套管发生损坏。检测套管的机械状况，可以了解套管是否发生损坏，及时采取有效措施，保证油气的正常生产。

检测井身状况的简单方法是测量套管的内径，称之为井径测井。井径测井仪器有多个探测臂，各个臂都可以独自伸到套管的内壁表面。每个探测臂都和一个可变电阻器相连接，伸出的臂长不同，输出的电压就不一样，经过刻度转换为井径量值，可以测量1毫米左右的变化。测量出来的井径量值与标准值进行比较，可以发现套管是否变薄和变形。

管柱分析测井仪器可以比较全面地检测井身机械状况。该仪器利用套管的电磁特性，可以进行磁漏和涡流两种测量，获得套管是否腐蚀、穿孔、破裂的信息。磁通量漏失测量是根据磁场与钢铁质套管耦合过程中，缺陷部位会产生与正常磁通量不同的信号。涡流测量是通过激发高频电磁信号，检测套管内表面产生的感应电流大小，缺陷部位的涡流较弱。结合两种测量信息，可以知道套管有否缺陷，问题是发生在内侧或是外侧。



井身结构示意图

超声成像测井是目前检测井身机械状况最先进的仪器。该仪器利用超声波在介质中的传播和反射特性，由超声波换能器发射超声波，并接收套管内壁反射波的幅度和时间，经过处理和图像显示，可以给出井下套管的纵剖面图、横截面图、立体图和井径曲线，直观判断井身状况。

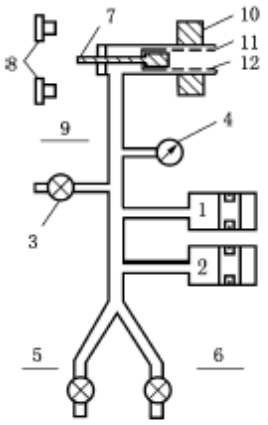
7．怎样测试油层生产性质——电缆地层测试

电缆地层测试可以测取地层压力传播数据，采集地层流体样品，从而对地层的压力、有效渗透率、生产率、连通情况、衰竭情况等进行评价，为建立最佳的完井和开发方案提供依据。因此，电缆地层测试仪器又称之为储层描述仪，是目前求取地层有效渗透率和油气生产率最直接有效的测井方法。同一般的钻杆测试相比，它具有简便、快速、经济、可靠的优点，在石油开发中有重要作用。

电缆地层测试目前应用的主要是组件式电缆地层测试器，仪器结构包括电气组件、双探头组件、石英压力计组件、流动控制组件和样品筒组件几部分。根据用户的需求，可以单独测量地层压力及压力梯度，或者同时采集多个地层流体样品。

电缆地层测试器的工作原理如图所示。仪器下井后，用自然电位或自然伽马曲线控制仪器探测器对准要求的测试点。操作工程师首先启动马达，当马达加至足够的转速，电磁阀打开，泵开始向推靠管线供油，封隔器(10)、推靠板(8)和探测器(11)立刻移向井壁，同时平衡阀(3)关闭。推靠板贴紧井壁后，反向推压封隔器，使之牢牢贴在井壁上，隔绝了井内流体和别的层位的流体。

然后自动控制阀打开，使探测器活塞(7)收缩，地层通过过滤器(12)与流动管线(9)连通。随着推靠管线内压力继续上升，另一移控阀打开，使油通过并顺次打开两个容量一定的预测试室，压力计(4)显示预测试压力，由压力计读数可以判明仪器取样口密封是否成功，也可以判断测试点地层有否渗透性。如果有渗透性，则压力逐渐恢复，地层流体将以一定的流量进入预测试室，通过压力变化及充满时间可以定性估计渗透率。如果用户认为该测试点的流体有必要取样，则打开一个密封阀(5、6)，让流体进入一个取样筒。如果预测试后认为不必取样，就打开平衡阀，收拢仪器，移至下一个测试点。收拢仪器的同时，能够自动地抽空预测试室，为测试下一个层作好准备。



预测试和取样原理

1、2 预测试室；3 平衡阀；4 压力计；5、6 密封阀（分别到上、下取样筒）；7 探测器活塞；8 推靠板；9 流动管线；10 封隔器；11 探测器；12 过滤器

电缆地层测试器可以分为两种类型，分别用于裸眼井和套管井内的测量。用于套管井内的电缆地层测试器与裸眼井内仪器相比，主要区别是仪器尺寸比较小，能下入套管内，并且必须采用聚能射孔弹射孔取样测试，然后通过一个挤水泥装置再封堵住射孔孔眼。除此之外，两种仪器的主要结构和功能相似，测取地层压力和流体样品的分析与应用相同。

六、测井信息的综合分析

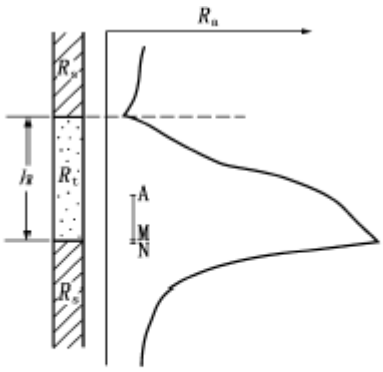
前言

通常一种测井方法只能得出一种岩石物理参数，为了求得各种岩石物理参数进行综合分析与应用，就要用多种测井方法进行测量，我国用双侧向测井（双感应测井）?微电阻率测井、中子测井?声波测井?岩性密度测井（三孔隙度测井）、自然电位测井、自然伽马测井、井径测井进行综合测量，得出九条测井曲线，对这些测井曲线进行综合分析，求得地层的厚度、孔隙度、含油饱和度、渗透率，对一口井做出综合评价。也可以对一个油田的多口井进行综合分析，结合地震资料，进行油藏描述，得出油藏的空间形态和分布，为油田勘探和开发方案设计提供重要依据。

1．怎样确定油层的深度和厚度

在油气勘探中，最后要计算石油和天然气的储量，因此如何能准确地得出油、气层的厚度非常重要。那么在深到几千米的地下如何得到油层的厚度呢？简单地说就是把测井仪器下到含油层段进行测量，根据测出的测井曲线，经过手工计算或计算机处理，即可得出准确的地层厚度。地球物理测井专家们不仅能提供一口井的某个油层厚度，还可得到一个层段内、一个油田和一个区域内的油层的总厚度，正因为有了油层的精确厚度，才能计算出各种级别的油田储量。有多种测井方法可以确定油层的厚度，如视电阻率法、微电阻率法、侧向测井等。这里仅介绍用视电阻率法确定地层厚度的方法，使用电极系（AMN）进行测井（见“什么是电阻率测井”一节），测出一条视电阻率曲线，如图所示，对于高电阻率地层，视电阻率

曲线在地层的顶界面显示极小值，在地层的底界面显示极大值，根据地层顶底界面对应的深度，即可得出准确的地层厚度。使用多种测井方法综合测量，根据这些测井曲线的特征值，经过计算机处理后，可准确地求出油层、气层、油水同层的厚度，为地质家和油藏工程师计算油气储量、进行油藏模拟提供最可靠的数据。测井不仅能准确得出地层的厚度，而且能确定岩性，计算出地层的孔隙度、含油饱和度及渗透率，地球物理测井已成为油气勘探和开发的最重要的方法和手段。

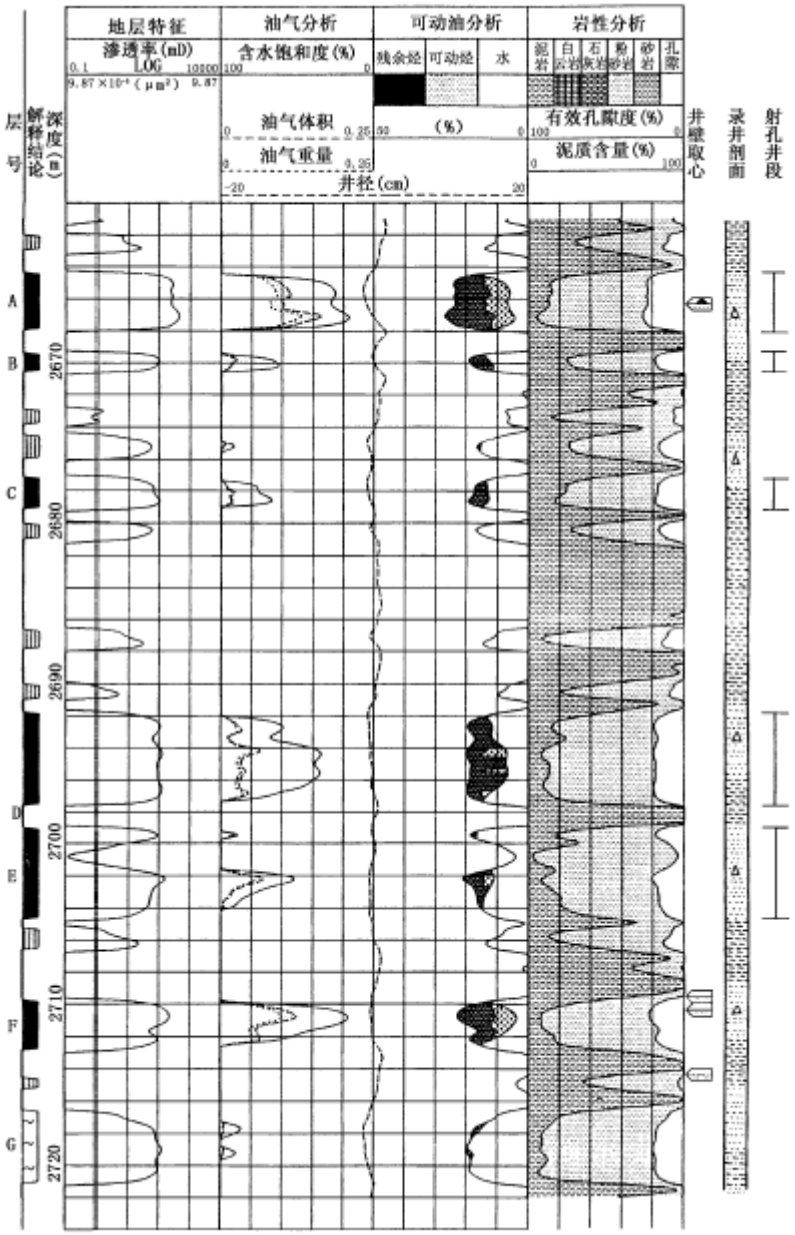


用 AMN（AM ⩾ MN）电极系的电阻率曲线
划分地层厚度（h），$R_t \geqslant R_s$

2．怎样综合应用测井信息划分油、气、水层

我国最深的油气井深达五千米以上，石油井直径多为 10～25 厘米，与农村用的水井完全不同，水井井深多为几米到几十米，井的直径可达 1～2 米，人能下到井中了解井下出水的情况。石油井直径很小，井下是高温高压的恶劣环境，人是下不去的。那么石油和天然气储存于哪些地层中？这些地层的深度和厚度是多少？地层中含有多少石油和天然气？能开采出多少来？哪些地层中含有地层水？而且要把油气层与水层区分开。为了解决这些问题，就要用专门的仪器下到井中进行测量（这类仪器要耐高温高压，耐温 150～175℃，耐压 20000psi），即进行地球物理测井，常用的地球物理测井系列有：双侧向（双感应）?微电阻率测井，其测量结果主要用于划分油、气、水层，计算地层的含油饱和度（So）。三孔隙度测井?声速测井、补偿中子测井、岩性密度测井，用于划分岩性和确定孔隙度。自然电位测井和自然伽马（或自然伽马能谱）测井用于划分岩性和确定泥质含量。还要进行井径测量，用于确定井径的大小和井眼形状。我国把这九条测井曲线称为标准测井系列，在一般的地质条件下，利用这九条测井曲线，结合地质录井资料，即可准确地得出油气层所在的深度和厚度，利用地层电阻率（Rt）、地层孔隙度（Φ）和地层水电阻率（Rw）计算出地层的含油饱和度（So）。根据钻井液侵入地层的情况，可计算出地层的可动油饱和度（Smo），即能采出的石油数量。对于地质条件复杂油田，也可加测碳氧比（C/O）测井或核磁共振测井。大港油田在 20 世纪末的一口深达 3541 米的井中，进行了双侧向测井?微球形聚焦测井、中子测井、岩性密度测井、声速测井、自然伽马测井、自然电位测井、井径测量，共九条测井曲线，经计算机处理解释，划分出 A、B、C、D、E、F、G 七个层位，如图所示，其中 A、D、F 层，岩性纯，为细砂岩和粉砂岩，孔隙度为 18%～25%，含油饱和度大于 60%，渗透性好，为油层。A、F 两层在三孔隙度测井曲线上显示出气层特征，岩性密度低，中子孔隙度低，声波时差大。B、C、E 三层岩性更细，多为粉砂岩，泥质含量高，孔隙度为 15%～18%，含油饱和度为 40%。G 层的电阻率低，自然电位幅度大，含油饱和度低，是明显的含水地

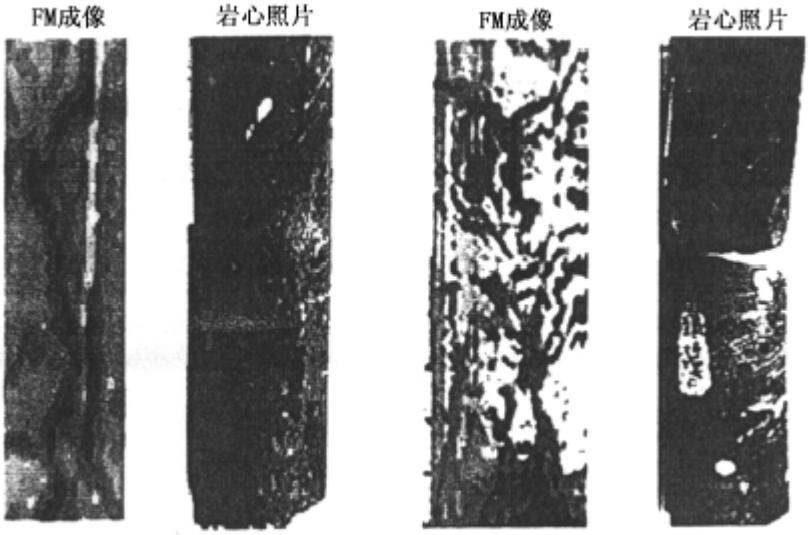
层。完钻后，A、B、C、D、F 五层合试，用 6 毫米油嘴，日产油 106 吨，日产天然气 33834 立方米，是一口较好的油气井。



3．划分裂缝性油气藏的实例

在我国一些油气田中，储集层的岩性为碳酸盐岩、火成岩及复杂岩性，这类岩石的孔隙结构复杂，孔隙度较小（5%～10%），但仍有较高的油气产量，这是由于岩石中有裂缝存在，石油和天然气能沿裂缝流动，如我国华北和四川地区就有这类油气田。为了勘探和开发这类油气田，就要找出哪些地层具有裂缝。只要判别出存在裂缝的层位，再配以确定油气的电法测井和核测井，基本上就能划分出含油气层的井段。现在常用地层微电阻率扫描成像测井、井下声波电视、双侧向测井、方位侧向测井（ARI）及环形声波测井等来划分裂缝性地层。究竟选用何种测井方法，要根据地区的地质特点来决定，如塔里木地区多用地层微电阻率扫描成像测井和双侧向测井来寻找裂缝性地层，而四川地区用地层微电阻率扫描成像测井、方

位侧向测井（ARI）及环形声波测井等。例如四川省开江县某井，完钻深度为 4125 米，主要层位是石炭系，目的层段为 4007.5～4125 米，上部岩性为细晶、粉晶石灰岩、溶孔白云岩、粉晶白云岩，下部为灰绿色泥岩，灰褐色云质石膏。主要利用双侧向测井、方位侧向测井（ARI）及地层微电阻率扫描成像测井寻找裂缝带。该层段主要测井特征为：双侧向测井的读数较邻层低，且呈现正幅度差（RLLD>RLLS），声波时差较高（Δt=45～70 微秒/英寸），补偿中子测井得出的孔隙度较低（ΦN=2%～9%），这些特征表明应有裂缝带存在。方位侧向测井（ARI）成像图显示，除石炭系底部较致密外，其他层段孔隙和裂缝发育，在 4062～4073 米方位侧向电阻率变化平缓，均质性较好。4014～4021 米井段，方位侧向电阻率变化大，非均质性强，裂缝发育。在地层微电阻率扫描成像测井图中，该层段顶部和中部网状裂缝发育，下图是地层微电阻率扫描成像测井图与岩心照片的对比，两者的裂缝分布、形状基本一致，左侧是一条高角度裂缝，右侧是网状裂缝。上述结果表明，该井段裂缝发育，具有生产工业油气流的条件。经试井，日产天然气 13000 立方米，为该地区进一步勘探提供了可靠依据，后来找到了较好的气田。



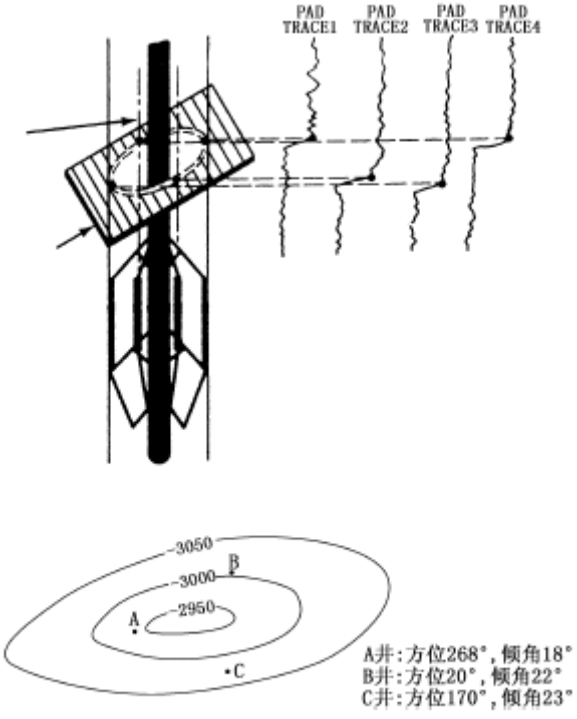
4．研究地下构造的先进武器——地层倾角测井

石油、天然气埋藏在地下几百米至几千米的地层中，这类地层有储存油气的孔隙或缝洞，称为油气藏。油气藏的形态多种多样，有的像个小山包，有的像个反扣的瓦盆，有的像条黄瓜等。一个油气藏从平面上看小则几百平方米，大到若干平方公里。为了掌握地下油气藏的延伸范围，计算其储存油气的数量，经济高效地勘探开发油气藏，就必须了解地下油气藏的分布形态。钻井穿过油气藏自然是了解其形态的直接手段，但一口井揭开的面积只有几十平方厘米，难以概全。如何通过“一孔之见”了解油气藏就成为地质学家和地球物理学家们多年来的研究课题。

实践证明，应用地层倾角测井来描述油气藏的形态是诸多方法中最为经济有效的方法之一。什么是地层倾角测井呢？这种方法能测出岩层面向哪个方向倾斜（岩层倾向）及其倾斜角（岩层倾角），该仪器像一把雨伞，有四个可伸缩的臂，它们之间相隔90度，互相垂直，每个臂的末端装有极板，极板上镶嵌一个（或两个）小电极，由于电极小其分辨能力高，可测出井壁上只有几厘米距离的地层电阻率的微小变化。测井时四个极板推靠井壁，使小电极与井壁密切接触，可同时测出四个方位上的地层电阻率曲线，通过对比四条电阻率曲线，可计算出地层的倾角和倾斜方位。



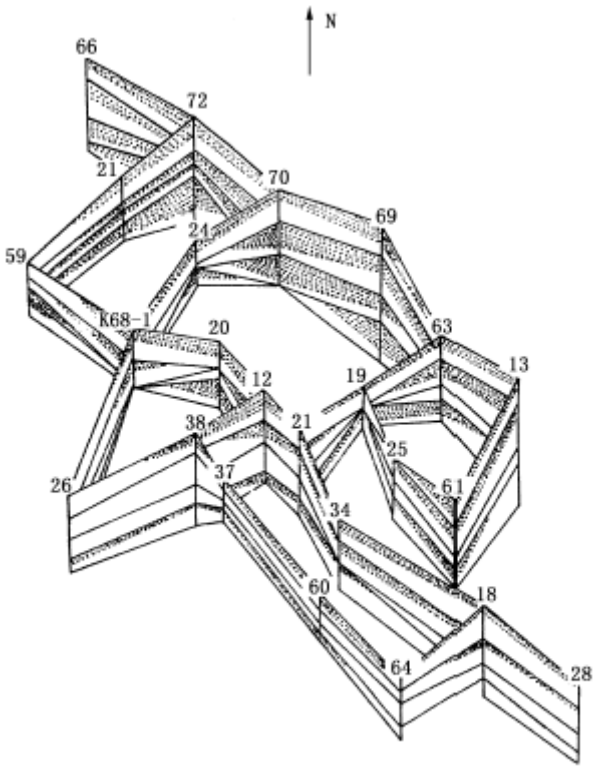
如图所示：假设某一高电阻率薄地层（其上下为低电阻率地层）被井钻穿。如果地层是水平的，测井时四个极板上的电极就会同时通过地层界面，四条地层电阻率曲线的特征值就会出现在同一深度上。假若地层是倾斜的，测井时四个电极不能同时通过地层界面，所测四条电阻率曲线出现深度差，地层倾角愈大，深度差愈大。如果求出井剖面上每个地层界面在四条电阻率曲线上的深度差并对其进行井斜校正，就能算出地层的倾角和倾斜方位角。有了不在同一直线上的三口或三口以上井的地层倾角和倾斜方位数据，就能绘制出某一地层的构造平面图，如图所示。如果把在同一个油气藏上打的多口井的地层倾角测井资料及其他测井资料加以对比分析，就可做出油气藏的剖面图和立体图，把油气藏在地下的形态描述出来，根据构造位置的高低提供下一步最佳布井方案，最大限度地找到油气储量，提高油气藏的勘探开发效益和水平。



据三口井地层倾角测井资料所绘某地层顶界构造示意图

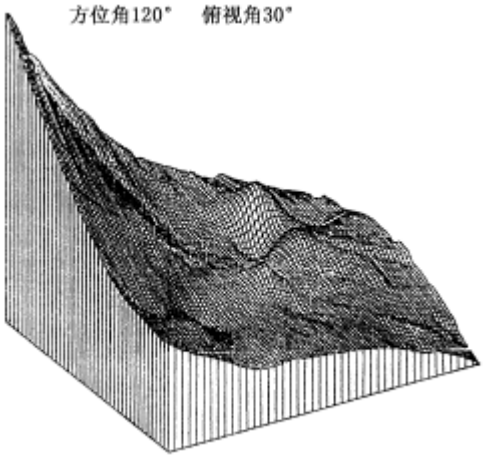
5．如何确定地下油气藏的分布形态——油藏描述

在地面要想了解一个山包的形态，可通过地面测量或航空测量来确定它的分布范围和山体形状。但油气藏埋藏于几千米的地下，没有办法用一般的测量仪器来描述它的几何形状，只有在地面进行地震勘探和在井下进行地球物理测井。近年来创建了一项综合技术??油藏描述，它是以地球物理测井资料为主，结合地震、地质录井资料，应用计算机技术进行精细解释和综合分析研究，得出油气藏的空间形态和分布范围，划分出油气藏的各类岩性，计算出油气藏的储层物理性质。油藏描述技术主要有以下几方面。



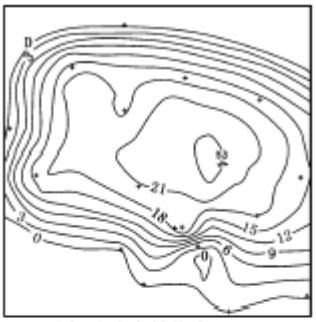
油层的三维栅状图

首先要在一个地区钻几口关键井，并进行钻井取心，选用标准测井系列（九条曲线）进行测井，同时加测地层倾角及所需的其他测井方法，如电缆地层测试器、核磁测井等。根据测井资料确定出油层的深度和厚度，计算出地层的孔隙度、渗透率和含油饱和度。利用地层倾角资料确定井下地层的构造形态，将关键井和其他井进行对比分析，得出三维栅状图，再与地震资料结合，得出井间地层的连续分布形态，最后给出油气藏的立体分布图以及油层等厚图、等孔隙度图、等渗透率图、等含油饱和度图等。

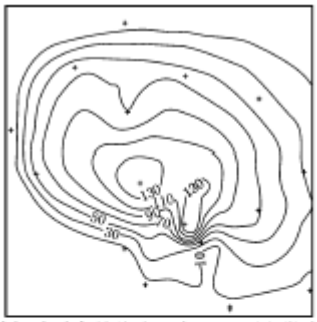


储层厚度三维立体图

例如，华北地区某油田钻了七口井，其中三口是关键井，进行了钻井取心。选用双感应?微球形聚焦测井、三孔隙度测井、自然电位和自然伽马测井、井径测量，共九条测井曲线，另外还进行了地层倾角测井。利用这些资料对比分析，得出油层的三维栅状图，如图所示，再与地震资料结合，给出油层的三维空间立体图，如下图。根据所得的资料绘制出油层的等厚图，以及等孔隙度图、等渗透率图、等含油饱和度图。有了这些图件和资料，就能准确地计算油气藏的地质储量，同时为油田开发方案设计提供可靠依据。



油组孔隙度等值线图（%）



油组渗透率等值线图（×10⁻³平方微米）

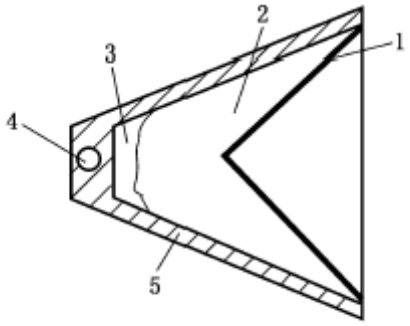


油组饱和度等值线图（%）

6．打开地层中油气流入井内的通道——油井射孔

钻完井后，经过测井，确定地下含油气层的准确深度和厚度，在井中下钢套管，将水泥注入套管与井壁之间的环形空间，使环形空间全部封堵死，防止井壁坍塌，不同的油气层和水层之间也不会互相窜流。为了使地层中油气流到井中，就要进行油井射孔，在套管、水泥环及地层之间形成通道。一般条件下应用聚能射孔弹进行射孔，聚能射孔弹的原理与军用打

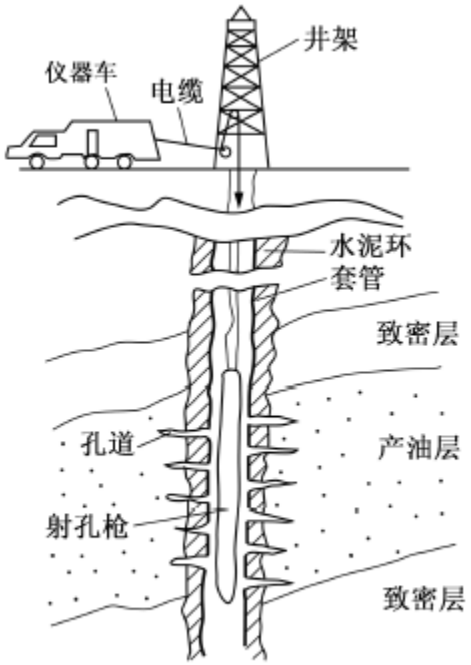
坦克的火箭穿甲弹类似，其结构如图所示，由金属锥型壳 1、炸药柱 2、起爆药 3、导爆索 4 以及弹壳 5 构成。起爆时，金属壳在锥形中轴线上形成高速金属粒子流，速度可达 6000～7000 米/秒，具有强大的穿透力，能将套管、水泥环及地层射开，形成通道，使地层中的油气流到井中。对不同的地层，每米厚地层射开的孔数不同，应根据地层的岩性、结构及疏松程度选择射孔密度（孔数/米），可在 4～16 孔/米的范围内选用。



聚能射孔弹结构示意图

1 锥形金属壳；2 炸药柱；3 起爆药；4 导爆索；5 弹壳

射孔作业时将自动跟踪射孔仪器车开到井场，用电缆把射孔枪下放到目的层的位置，通过电缆点火，使聚能射孔弹爆炸，高能喷射金属粒子流将套管、水泥环和地层射穿，打开地层中油气流入井内的通道，如图所示。射孔完成后，将电缆和射孔枪提出井口，将该井交给采油部门，安装采油树和集输设施（见油藏工程分册），调试后，即可投入生产。



井场射孔作业示意图