

# 测井技术

1975

---

江汉石油管理局电测站

## 前 言

一九七五年我站科研队伍在毛主席革命路线指引下，在上级党委的正确领导下，在深入贯彻执行毛主席一系列重要指示的基础上，全站职工认真学习无产阶级专政理论，以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，坚持科研为无产阶级政治服务，科研为工农兵服务，科研与生产劳动相结合的方针。坚持领导干部、工人、技术人员和研究、试制、使用两个三结合，放手发动群众，以大庆为榜样，发扬独立自主，自力更生，土法上马，土洋结合的革命精神，为进一步发展石油工业的大好形势，怀着与帝修反争时间，抢速度的雄心壮志，大干快上，经过几年的时间，在测井攻关方面取得了一定的进展，特编印成册，以便与兄弟单位互相交流共同前进。

几年来，长沙工学院，六机部612厂，石油化工部物探局，常州罗溪农机厂，长沙电子管厂，上海复旦大学，北京橡胶工业研究所，北京橡胶工业制品研究所，黄河水利委员会科学研究所等有关单位对我们进行了热情的指导和有力的支援，在此，对他们这种共产主义的大协作精神表示诚挚的感谢。

由于时间仓促，水平有限，错误一定很多，恳切欢迎批评指正。

# 毛主席语录

政治工作是一切经济工作的生命线，在社会经济制度发生根本变革的时期，尤其是这样。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

放手发动群众，一切经过试验。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

世上无难事，只要肯登攀。

# 目 录

## 前言

三侧向测井在石灰岩地区的应用.....	( 1 )
自然伽玛能谱找钾测井.....	( 7 )
双探测器补偿密度测井.....	(11)
我国第一台测井液压推靠器试制成功.....	(19)
电极系连续曲线程序简况.....	(23)
用物理模型研究微侧向测井.....	(30)
微侧向测井的数学方法 (报告提纲) .....	(41)

# 三侧向测井在石灰岩地区的试验

## 内 容 提 要

三侧向测井方法在石灰岩地层中的应用，进一步扩大了该方法仅在砂泥岩地层中使用范围。从两年来现场试验取得的地质效果来看，三侧向测井方法能应用于盐水和淡水泥浆的石灰岩剖面的井中。

目前用该方法在石灰岩地区划分地层；读出地层的视电阻率；与自然伽玛配合确定地层中的裂缝带及裂缝带的深度和厚度；与其他方法（如井温、气测、中子伽玛等测井方法）综合解释可以定性地判断裂缝性储气层和储水层。

### 一、三侧向测井方法在石灰岩地区的试验。

从1973年开始开展灰岩三侧向测井的研究。先后在××地区和××地区的9口井中，取得了16次侧向测井资料。在石灰岩地层中划分裂缝性储气层取得了较好的效果。

起初只是按照石灰岩地层电阻率很高的特点，把一支只测一条深三侧向曲线的仪器进行改动，把测量范围调到10欧姆米至10000欧姆米；把输出功率提高到4瓦。先后在××地区和××地区6口井中取得了三侧向测井资料，见到了较好的地质效果。但仪器还存在一些问题，主要的是当仪器进入到石灰岩地层中，基线和标准信号线随地层电阻率的高低而变化。基线最大变化15公分，标准信号线最大变化17公分。

三侧向测井仪器基线和标准信号线随地层电阻率变化而变化的问题不解决，三侧向测井这种方法就不能在石灰岩地质剖面中使用。抓住了这一个主要矛盾以后，我们遵照毛主席的“实践、认识、再实践、再认识”的教导。在室内和现场经过反复的实践，找出造成基线和标准信号线随地层电阻率的变化原因，是仪器的A<sub>1</sub>电极与地线接在一起，解决的办法是把仪器改为B电极与地线接在一起同时电缆外壳为B电极。

从1974年12月至1975年8月在××地区又进行了9次测井，取得了基线基本上是直线，标准信号线最大变化小于1.5公分，重复性误差小于10%的资料。（附图一）

三侧向仪器通过多次试验的基础上，根据仪器存在的问题，又设计制造了新的灰岩侧向仪器。该仪器与旧仪器基本一样，只是把测量道的线性范围由原来不到1000倍增加到3000倍以上。把原来用半导体二极管检波改为电子管检波，提高了仪器在高温下的稳定性。功率输入变压器改用双三极电子管电压放大和倒相。新仪器在1975年7至8月又在××地区取得了三口井的合格资料，并在××气矿的生产解释中得到了试用。

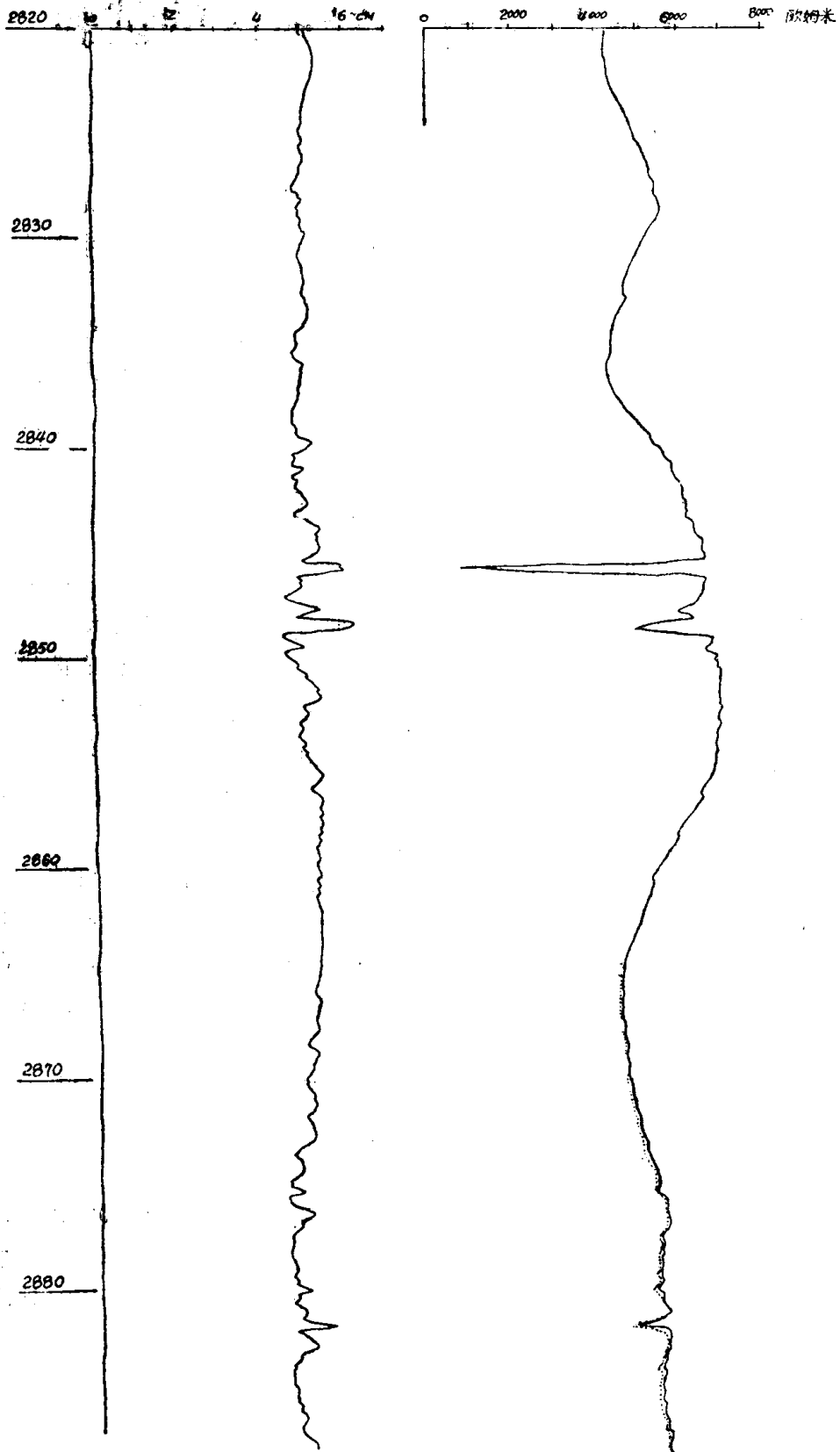
### 二、三侧向石灰岩仪器：

#### 1. 仪器的基本原理：

基线

标准纹号线

重复曲线



图—1 三侧向试验曲线

三侧向测井是聚焦测井方法的一种。下井仪器有二个对称的屏蔽电极A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和一个主电极A<sub>0</sub>。三个电极电位基本上是相等的。屏蔽电极A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>射出的屏流，将主电极A<sub>0</sub>射出的主电流聚焦后流入地层，通过地层回到屏蔽电极回路电极B。仪器测量的是主电极A<sub>0</sub>的接地电阻。

$$\text{即： } \rho_K = K \frac{\Delta V}{I_0} = K \cdot R_0$$

$\rho_K$  ——地层视电阻率。

$K$  ——电极系常数。

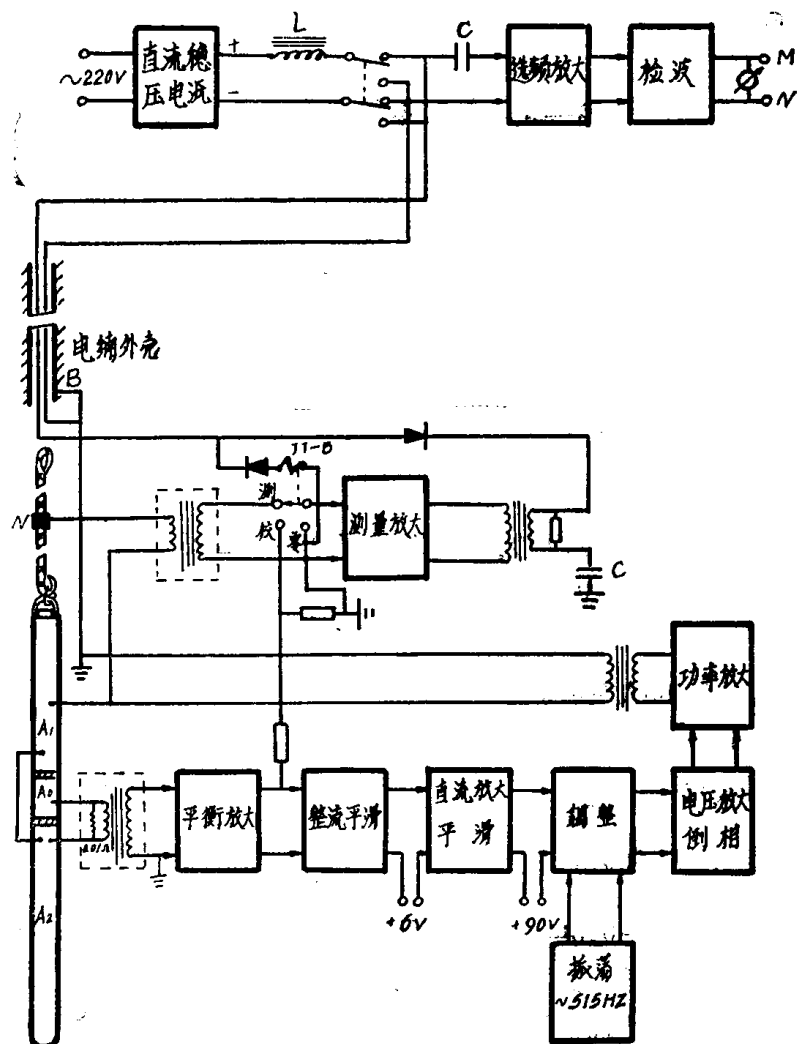
$\Delta V$  ——电极表面至远电极的电位差。

$I_0$  ——主电流强度。

$R_0$  ——主电极接地电阻。

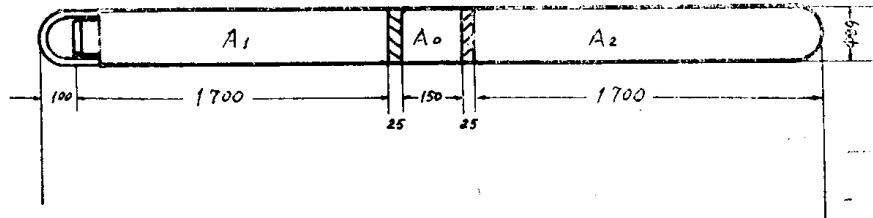
若想测准地层的视电阻率，就必须做到主电流保持稳定不变。下井仪器电子线路自动控制功率放大部分，就是保证主电流稳定。电极表面与N电极之间的电位，由测量放大器放大后经电缆输送到地面接收仪器，再经地面接收仪器选频放大和检波后，输送到测量仪器加以记录的。（附图二）

## 2. 仪器结构：



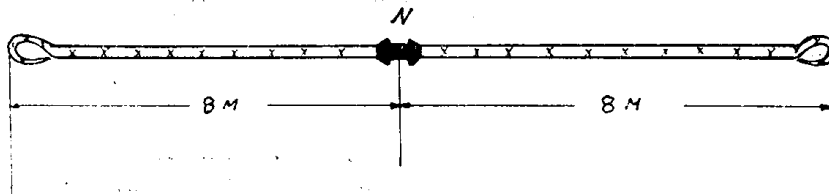
图一 2 三侧向石灰岩仪器线路原理

仪器全长3.7米。主电极（A<sub>0</sub>）长为15公分，屏蔽电极（A<sub>1</sub>）（A<sub>2</sub>）各长为1.7米，A<sub>1</sub>与A<sub>2</sub>间的绝缘层厚度为2.5公分。屏蔽电极（A<sub>1</sub>）钢体内装有电子线路，A<sub>0</sub>、A<sub>2</sub>是钢空筒子，A<sub>1</sub>与A<sub>2</sub>钢体用导线接通。A<sub>0</sub>电极是在玻璃钢上包上铜皮制成。电极系经过计算的K值是0.234米。（附图三）



图一3 下井仪器结构示意图

下井仪器的加长电极长16米，N电极在中点，电缆外壳为B电极。在气井中，加长电极要用钢丝绳制作。（附图四）



图一4 加长电极示意图

### 3. 仪器的主要技术指标：

#### （一）综合面板：

##### ① 直流稳压电源：

电压输出范围：220V—420V。（负载1.5KΩ）

电流可调范围：170mA—300mA（负载1.5KΩ）

输出电压变化：每分钟小于0.005%

最大波动电压：小于30mV。

##### ② 面板接收仪器：

选频坪区范围：460~560周/秒，坪区弯曲部分小于±2%。

线性范围：3mV~1500mV

#### （二）下井仪器：

① 供电电流强度：240mA左右。

② 振荡器频率：515周/秒，±15周/秒。

③ 自动平衡控制装置：

主屏流比： $\frac{I_0}{I}$  大于2000倍。

主电流强度：0.2mA~0.5mA（按测量范围调节）

最大输出功率：不小于4瓦（负载10Ω）

前置平衡放大器最大干扰信号：小于1000mV（RP = 40Ω）

④ 测量道线性范围：2MV~6000MV。



⑤使用条件:

仪器测量范围: 可按需要调节如下指标:

$5\Omega-M \sim 10000\Omega-M$ ;  $2.5\Omega-M \sim 5000\Omega-M$ ;  $1\Omega-M \sim 2000\Omega-M$ 。

测速: 2000米/小时。

耐温:  $115^{\circ}\text{C}$ 可连续工作两小时。

最大承受压力: 不小于400大气压。(设计600大气压, 只试压到400大气压)

(附图五)

(附图六)

### 三、三侧向测井在石灰岩地区井中所取得的地质效果:

三侧向测井是一种聚焦的电阻率测井方法, 它具有以下特点:

1. 分层清楚;
2. 受井的影响小;
3. 受围岩影响小;
4. 探测半径不太深;

由于有以上特点, 三侧向仪器就能把石灰岩地层电阻率的真实情况反映出来, 测井曲线不至于受到很大的歪曲。从目前石灰岩地质剖面测井系列所测得的测井曲线径分析, 三侧向测井分层能力很强, 它能把30公分以上的薄层很清楚的划分出来。并且, 从曲线上能较准确地读出地层的视电阻率。在石灰岩地层中若有裂缝带, 三侧向测井曲线就能很清楚地显示出来, 在曲线上是低值。三侧向测井在裂缝带是低阻显示, 是因为地层压力小于井内泥浆液柱压力时, 裂缝带中就充满泥浆, 泥浆电阻率要比石灰岩地层电阻率低得多; 而且侵入裂缝带中很深, 很可能远远超过三侧向仪器的探测半径。

三侧向测井在石灰岩地层中与自然伽玛测井配合, 定性的确定裂缝带, 并能准确地确定裂缝带的深度和厚度。要确定出裂缝带中含气或者含水, 就必须与其他方法配合综合解释。

图七、图八、图九是三侧向测井与其他方法综合测井曲线图。裂缝性储气层的划分是由三侧向、中子伽玛测井曲线与气测资料配合综合解释所确定的。在没有以上测井方法综合解释之前, 只是用2.5米底部梯度曲线与井温曲线相配合划分储气层。所划分储气层的深度和厚度都不准确, 对有的储气层也没有划分。

图七是 $\times\times$ 地区 $\times\times$ 气井中实测综合测井曲线图。地层是石灰岩, 井中是盐水。三侧向测井取得了分层能力强, 裂缝带显示好的资料。井深3218.4米至3221.6米, 三侧向曲线是低值, 视电阻率是700欧姆米; 自然伽玛曲线是低值; 井温负异常0.15度; 气测全烃含量80%, 是储气层。

井深3232米至3234米, 在未与三侧向曲线和气测资料综合解释之前将该层未划分。通过三侧向曲线、自然伽玛曲线和气测资料综合分析, 该层应是储气层。三侧向曲线在该层是低阻显示, 视电阻率1250欧姆米; 自然伽玛曲线也是低值, 该层是一层裂缝带。井温在该井段虽没有明显的负异常, 但气测显示很好, 全烃含量90%。应解释为储气层。经测试结果在以上井段日产气54.84万方。

图八是 $\times\times$ 地区气井中实测曲线图。井深3014米至3054米, 三侧向测井曲线是低阻显

示；自然伽玛曲线是低值；井温有 $0.2^{\circ}\text{C}$ 的负异常；气测甲烷含量 $0.4\%$ 。声波时差曲线也有显示，从 $15$ 微秒/米至 $190$ 微秒/米的变化。中子伽玛曲线也有较明显的变化。是裂缝性储气层。

井深 $3077.3$ 米至 $3090.5$ 米，三侧向测井曲线是低阻显示；自然伽玛曲线是低值；井温有 $0.15^{\circ}\text{C}$ 的负异常；气测甲烷含量在 $3090.5$ 米处有 $19.6\%$ 。在该井段中子伽玛曲线也有较明显的变化；声波时差曲线有稍微的变化。是一层储气层。从三侧向曲线上可以明显的划分出几个夹层和几个低阻显示的裂缝性储气层。从井深 $2943.37$ 米至 $3087.5$ 米，测试结果日产 $2$ 万方气。

图九是 $\times\times$ 地区另一口气井中实测曲线图。井深 $3112.4$ 米至 $3159$ 米，三侧向测井曲线是低阻显示；自然伽玛曲线是低值；井温曲线最大负异常 $1.25^{\circ}\text{C}$ ；气测全烃含量是 $13\%$ ；中子伽玛曲线也有明显的变化，是储气层。该井段经测试日产气 $3.6$ 万方。在该井段用三侧向曲线可以明显地划分出几个夹层和几个裂缝性储气层。

三侧向测井在石灰岩地区中所见到的地质效果还是初步的。从电阻率观点对裂缝带中储气和储水的特征，还有待于今后的实践来区分。石灰岩地层裂缝性储气层和储水层的真电阻率，用什么方法进行综合解释还待今后在实践中探讨。

# 自然伽玛能谱找钾测井

## 内 容 摘 要

自然伽玛能谱找钾测井是用于勘探和评价钾盐矿床的。三年多来，我们在兰田物探所自然伽玛能谱找钾测井方法的基础上将该仪器经改进后应用于油田深井找钾测井中，经多次试验证明是行之有效的。今年我们又研制成了带有自稳装置的自然伽玛能谱测井仪。

本仪器的优点是可以单独进行勘探钾盐矿床，与井径测井组合后尚可计算氧化钾视的含量。

### (一) 基 本 原 理

沉积岩的自然放射性几乎全部来自铀、钍、钾及它们的衰变产物。在天然钾中，钾有三种同位素，但只有 $K^{40}$ 是放射性同位素，它的含量仅占天然钾的0.0119%，半衰期为 $1.27 \times 10^9$ 年。

$K^{40}$ 衰变时，只放射出能量为1.46MeV(百万电子伏特)的特征伽玛射线(占衰变总数的11.6%)。

图1是放射性矿物的伽玛射线谱。图中可见。(1)钍系和镭——铀系虽放出几十种能量的 $\gamma$ ——射线，但并不放射1.46MeV的 $\gamma$ ——射线；(2)每种能量的 $\gamma$ ——射线其发射率很不相同，在1.33——1.56MeV的区域内，除 $K^{40}$ 外其它元素，放射的 $\gamma$ ——射线其发射率都特别低，所以干扰的射线很少。因此，利用具有一定精度的自然伽玛能谱测井仪，就可以把铀、钍系和钾放射出的 $\gamma$ ——射线分开。

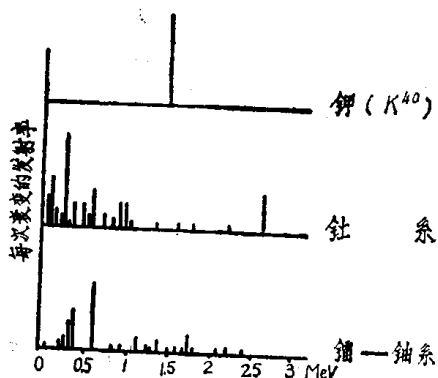


图1. 放射性矿物伽玛射线谱

### (二) 仪 器 原 理

DF——1型自然伽玛能谱测井仪，有井下仪器、地面仪器和电源三部分组成。仪器工作原理见图2。来自地层的自然 $\gamma$ ——射线被井下仪器探头接收，转换成电压脉冲，并加以放大，经输出级由电缆将讯号送到地面仪器进行记录。规定左积分曲线只记录能量大于或等于1.33MeV的 $\gamma$ ——射线。右积分曲线只记录能量大于或等于1.65MeV的 $\gamma$ ——射线通过资料分析就能确定钾盐层。

测井步骤：本仪器与普遍自然伽玛测井方法步骤相似。不同的是仪器在下井前务必进行能量标定。其方法是：下井前仪器接上电缆，用标准源铯、钍、钾进行标定，示于图3。在能量与道址为坐标的直角坐标上，找出能量为1.33和1.56MeV的对应道址为A道和B道，即

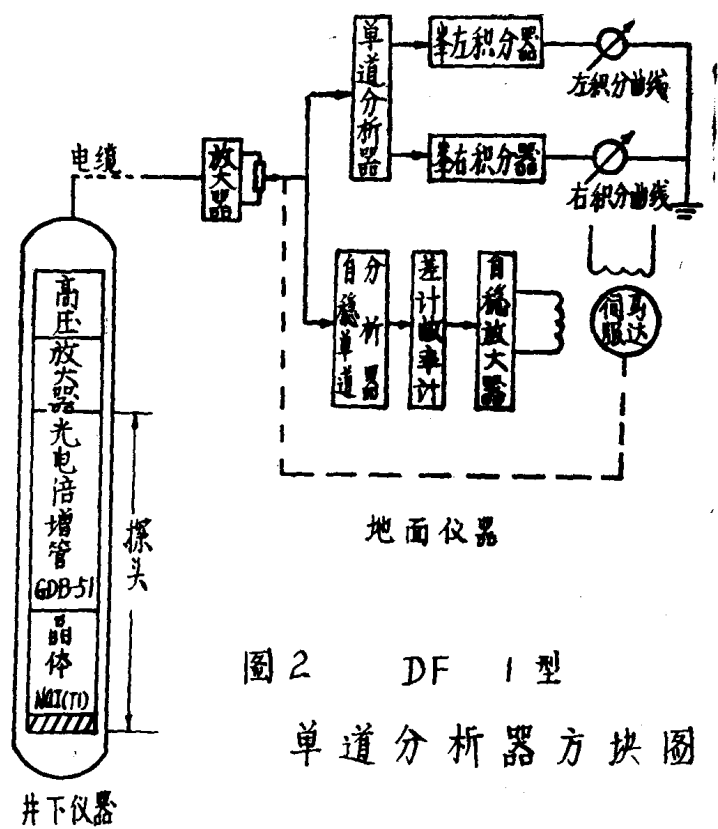
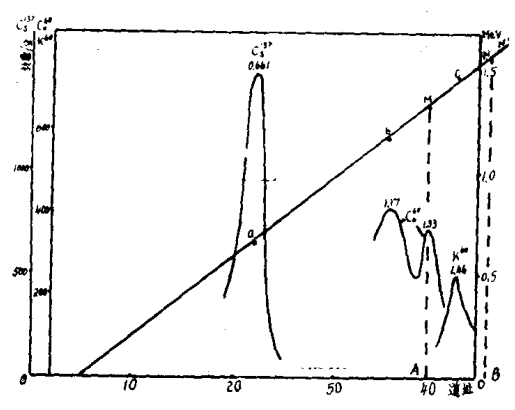


图2 DF 1型  
单道分析器方块图



图—3 标定曲线

为左、右积分道址，然后下井，进行测量。

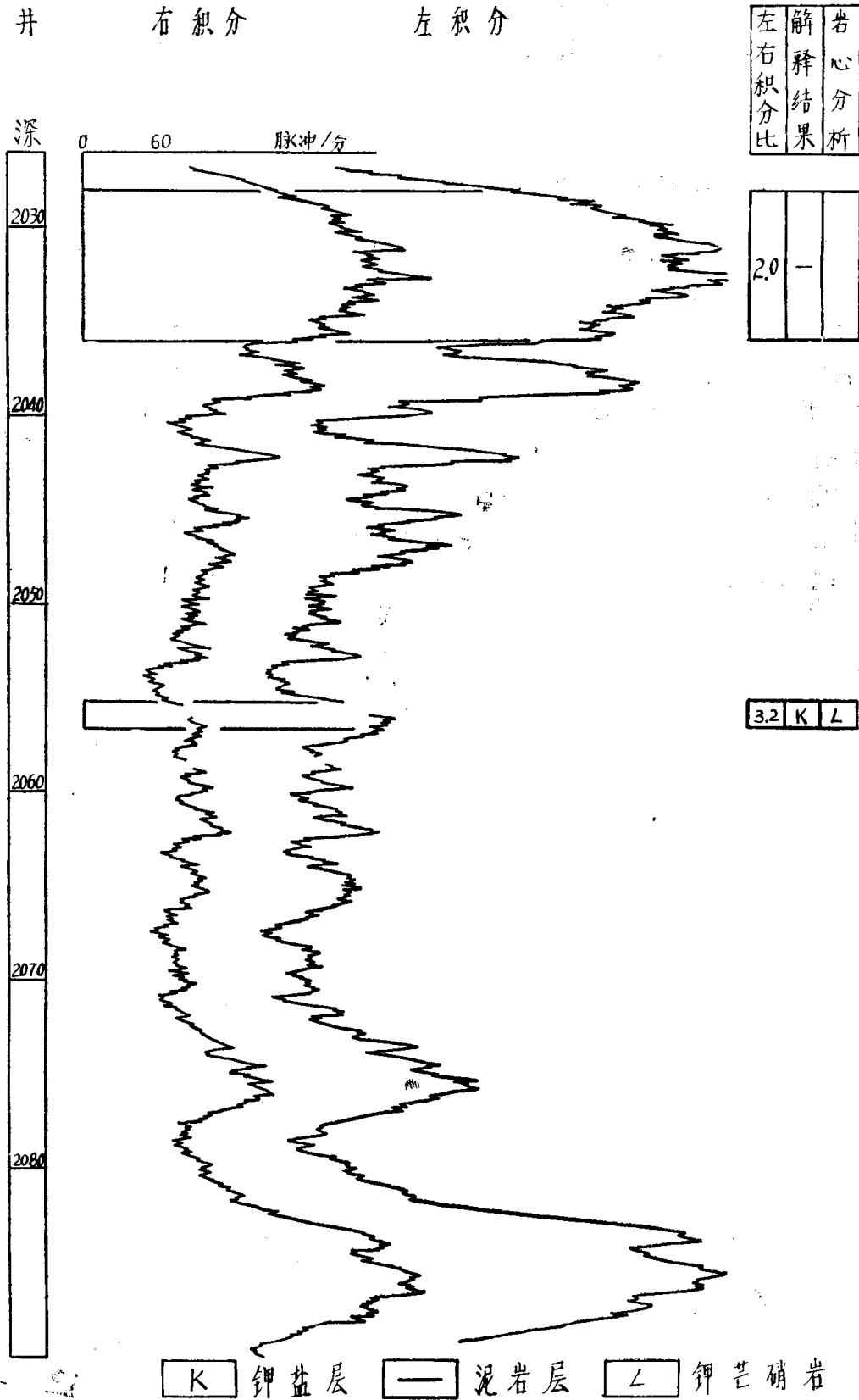
### (三) 解释方法及地质效果

#### 1. 定性解释方法—左、右积分读数比值法

由测井曲线上读出地层所对应的左、右积分读数，并分别经过泥浆放射性校正，求出比值。实验表明，本地区一般泥岩层的左、右积分比值在2.0—3.4之间，而钾盐层比值比同井泥岩层比值大。

为消除一些系统误差，定性解释时采用标准泥岩层作参考层。试验表明，油田钾盐

层其左、右积分读数的比值比同井标准泥岩层的比值约大0.5倍以上。凡小于标准泥岩层的比值的层均解释为非含钾层。凡比值为标准泥岩层比值的1.0—1.5倍之间的地层，应进行综合分析，再作出判断。无标准泥岩层时，可采用辅助标准泥岩层。



图—4 井自然伽玛能谱测井图

## 2. 测井实例:

图4是×30井自然伽玛能谱测井成果图。图中可见,井深2055.2—2056.6米可解释为钾盐层。因为其左、右积分读数经泥浆放射性校正后分别为96和30脉冲/分,所以比值为3.2而标准泥岩层(井深2030.0—2036.2米),其左、右积分读数分别为492和244脉冲/分,所以比值为2.02。可见两者比值差1.58倍,因此解释为钾盐层。解释结果与岩芯资料相符。

## (四) 存在问题及今后努力方向

1. 测速很低: 为了不漏掉具有工业品位的钾盐层, 目前仪器的测速选为100米/小时。由于测速很低, 不适宜大面积的全井普查钾盐矿床。为克服这一弱点, 目前进行了仪器改进, 还采用了 $\phi 50 \times 80$ 的NaI (Tl) 大晶体, 使计数提高较多, 为将测速提高到200米/小时打好了基础。但与其它测井方法的测速相比, 仍然是慢的。为此, 油田钾盐普查工作目前由自然伽玛测井、声速测井和井径测量三条曲线组成, 在普查中发现有可疑钾盐层时再进行自然伽玛能谱测井详查。

2. 带有自稳装置的新型的DF—1型自然伽玛能谱测井仪器有待于进一步完善和定型。目前定量解释方法还不成熟, 需要进一步作系统的模拟实验, 作出定量解释图板。

3. 自然伽玛能谱测井与井径测井组合虽可确定钾盐层和氧化钾视含量, 但是它不能区分钾盐矿种。确定钾矿种还有待于进一步研究, 尤其是要研究岩性测井资料的应用问题。

# 双探测器补偿密度测井

## 一 内容提要

密度测井是确定储集层孔隙度，对复杂岩性的地层进行评价的有效方法。

江汉石油管理局电测站攻关队设计的密度测井仪，采用了双探测器补偿装置校正泥饼的影响，液压式推靠器使滑块紧贴井壁，力量适中动作灵活，滑块上特制的犁形曲率板可以切掉一部分软泥饼。仪器配备有井径测量系统，校验装置及解释图版。该仪器于1975年10月在油田××井及××井试验成功，取得了较好的地质资料。

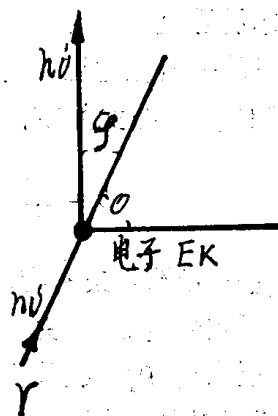
## 一、基本原理

### 1. 基础理论

密度测井的物理基础是康普顿效应。能量为0.2—1.0Mev的伽玛射线和地层物质作用时主要发生康普顿效应。此时伽玛射线被看作是高速粒子，它与地层中的电子发生弹性碰撞，每碰撞一次便损失掉一部分能量，并偏离前进方向 $\varphi^\circ$ 角散射。损失的能量转换为反冲电子的动能，电子沿 $Q^\circ$ 角方向运动。伽玛射线散射后能量改变的比值为

$$\frac{E_K}{h\nu} = \frac{Z\lambda\sin^2\frac{\varphi}{2}}{\lambda + Z\lambda\sin^2\frac{\varphi}{2}}$$

式中 $h\nu$ 为伽玛射线初始能量， $E_K$ 为损失的能量， $h$ 为普朗克常数， $\nu$ 及 $\lambda$ 分别为伽玛射线的频率和波长， $\lambda$ 为康普顿波长。由公式可见，伽玛射线的散射角越大，损失的能量越多。



图—1

由于康普顿效应所形成的物质对伽玛射线的吸收可以用吸收系数 $\mu$ 来表示：

$$\mu = \frac{Z}{A} N_0 \sigma_E \rho$$

式中 $\rho$ —体积密度， $N_0$ —亚弗加得罗常数， $\sigma_E$ —散射截面，可近似看作常数， $\frac{Z}{A}$ —原子序数

与原子量之比。对于油田常见的沉积地层，如石灰岩、砂岩均属于中等元素，比值 $Z/A \approx$

$$\frac{1}{2}。$$

公式指出，如果单独地考虑康普顿效应，表征物质对伽玛射线吸收的唯一特性是它的体积密度，物质的化学成份是没有影响的（重元素例外，比如Ba）。

探测器所记录的散射伽玛射线强度I可以用吸收方程近似表达：

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\left(\frac{Z}{A} N_0 \sigma_{Lx}\right) \cdot \rho}$$

式中 $I_0$ —源强， $x$ —源距，对于给定仪器 $I_0 x$ 是定值。由方程式可以看出，仪器的读数I只是体积密度 $\rho$ 的函数，随着体积密度的增大，读数按指数规律衰减。所以，建立在康普顿效应基础上的密度测井方法可以测定地层的体积密度。

### 2. 补偿原理

储集层的井壁上往往附着有泥饼，这样在测量时仪器和地层间任何残留的泥饼或泥浆（由于井壁不平整）均被视为地层的一部分，加以记录。因此读数必须校正。本仪器设有两个探测器，可以作出如图二所示的关系曲线，校正泥饼的影响。当没有泥饼时，长短探测器的读数将交会在直线A上，由线A直接给出体积密度值 $\rho$ 。当有泥饼时，由于在仪器设计时使得长探测器主要反映地层的影响（泥饼影响相对要小），而短探测器主要反映井壁附近的影响（泥饼影响相对要大），这种差异使得长短探测器读数的交会点将偏离线A，而落在线B上，泥饼越厚偏离越大。比如交会点落在线B<sub>2</sub>的Q点上，此时B<sub>2</sub>与A的交点Z的读数，即是经校正的体积密度值，而无需对泥饼的密度和厚度作任何直接的测量。

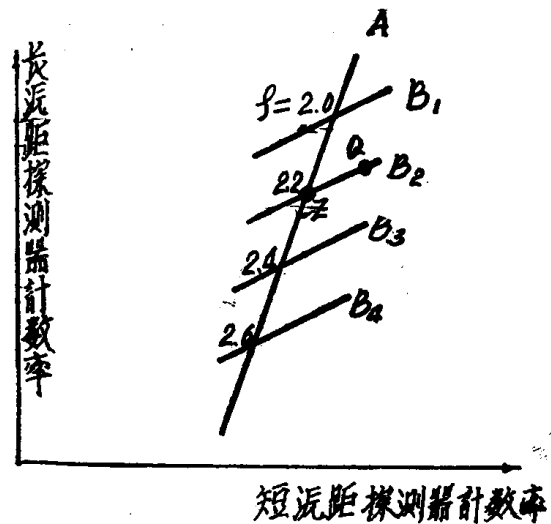
### 3. 求孔隙度

对于单一岩性地层，可以由体积密度计算出孔隙度 $\phi$ ，公式如下：

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho}{\rho_{ma} - \rho_f}$$

式中 $\rho_{ma}$ —岩石骨架密度，砂岩为2.65克/厘米<sup>3</sup>，石灰岩为2.71克/厘米<sup>3</sup>，白云岩为2.87克/厘米<sup>3</sup>。 $\rho_f$ —孔隙中流体的密度。在仪器探测范围内的渗透性地层孔隙中，所含流体主要为泥浆滤液。它的密度依矿化度、温度、压力而定，其值约在1.0克/厘米<sup>3</sup>左右。

对于复杂岩性，密度测井和中子、声波测井交会可以确定孔隙度和判别岩性。



图—2 泥饼校正图版

## 二、方法试验

### 1. 设计建造地层模型

密度测井由于探测深度浅（约15公分左右），因而能够在地面建立实体模型以模拟井下情况，在模型上制作定量解释图板，以及对仪器刻度。



地层模型尺寸要求大于探测深度二倍以上，每一块作成半圆柱体形状，直径为80公分，并眼为7<sup>3</sup>/<sub>4</sub>"，厚度90公分。

模型材料选用天然的石灰岩露头，它具有如下优点：

(1) 岩性满足方法原理要求。石灰岩成份为  $C_aCO_3$ ， $\frac{\sum Z}{\sum A} = 0.4996$ ，非常接近 1/2，从而排除了化学成份的影响。

(2) 天然露头接近井下真实情况。

(3) 易于找到纯度高，岩性均匀，不同体积密度（不同孔隙度）的露头。

地层模型的材料要分析化验化学成份，测定密度及孔隙度。为了保证资料准确，样品化验由两个单位完成，在模型上许多具有代表性的部位选取样品，就是要化验15个样品，然后取平均值。数据列于表一。

黄石大理石分析数据

表 1

岩样 编号	φ %		ρ克/厘米 <sup>3</sup>		CaO %		Mg %		SiO <sub>2</sub> %
	地质处	江陵	地质处	江陵	地质处	武大	地质处	武大	武大
井眼上	0.36	0.15	2.73	2.75					
井眼中	0.38	0.19	2.74	2.76					
井眼下	0.44	0.22	2.73	2.74					
1	0.53		2.76		48.43	47.97	6.00	6.64	0.23
2	0.54		2.72		50.94	51.51	4.40	3.64	0.13
3	0.58		2.73		49.55	49.72	5.00	5.24	0.23
4	0.48		2.74		51.44	50.35	3.80	4.46	0.18
5	0.52		2.74		48.98	47.82	5.60	6.90	0.16
6	0.67		2.74		47.42	46.97	6.83	7.51	0.18
7	0.56		2.75		49.54	49.40	5.92	6.93	0.16
8	0.60		2.72		50.65	50.06	4.08	4.44	0.20
9	0.52		2.74		48.71	48.58	6.60	5.83	0.18
10	0.64		2.74		48.99	47.00	5.60	7.07	0.13
11	0.54		2.74		50.66	49.95	4.01	4.52	0.23
12	0.56		2.74		50.66	49.48	4.40	5.14	0.09
平均值	0.53		2.74		49.66	49.07	5.19	5.69	0.18

经过对湖北贵州等九个省区的实地调查，最后选定了三块天然灰岩露头，体积密度分别为2.70、2.10、1.90克/厘米<sup>3</sup>。另外，用不同粒度的砂子和水泥浇铸了二块人工地层模型。