

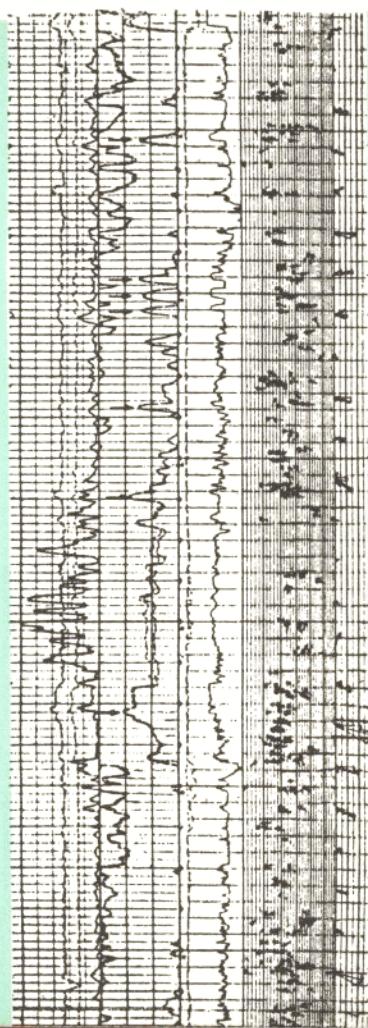
测井培训丛书

# 电磁波传播测井

631.81  
L3

石油工业出版社

新华书店  
PDG



测井培训丛书

# 电磁波传播测井

尚作源 编译      冯启宁 审校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书为测井培训丛书之一。书中主要介绍了电磁波传播测井的物理基础、测井原理、仪器的方框图及操作、维修和质量控制。它是测井操作人员、维修人员、现场解释人员的培训教材,也可作为测井技术人员、大专院校测井专业师生的参考书。

测 井 培 训 丛 书

**电磁波传播测井**

尚作源 编译 冯启宁 审校

\*

石油工业出版社出版发行

(北京安定门内外外馆东后街甲36号)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

\*

787×1092 毫米 16 开本 3<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 印张 71 千字 印 1--2,500

1986年3月北京第1版 1986年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2667 定价: 0.68元

**内 部 发 行**

## 出版者的话

为了做到在引进国外测井仪器的同时,要注意消化、吸收和掌握国外先进的测井技术,提高我国石油测井技术人员的技术水平,我们出版了《测井培训丛书》。该丛书主要根据斯伦贝谢公司CSU数控测井系列编译的,包括有:

- 数控测井
- 声波测井
- 感应测井
- 双侧向测井
- 微球形聚焦测井
- 电磁波传播测井
- 高分辨率地层倾角测井
- 补偿中子测井
- 自然伽马与自然伽马能谱测井
- 岩性密度测井
- 电缆通信系统
- 核测井仪器模块
- 重复式电缆地层测试器
- 打捞技术

《测井培训丛书》每一分册的内容一般分为两部分,第一部分是操作、维修和现场解释人员必须具备的知识,介绍了测井方法原理,测量技术,仪器的基本框图、结构和技术特性,操作与维修须知,刻度与环境校正,质量控制与资料解释。第二部分是需要更深入了解的知识,主要介绍了测井方法的理论基础,详细框图以及需要详细说明的关键技术问题。因此该丛书可做为数控测井操作与维修技术人员、资料解释与技术管理人员的培训教材,也可做为测井技术人员及大专院校测井专业师生的参考书。

在《测井培训丛书》的编译出版过程中,石油部地质勘探司做了大量的组织工作;石油部科学技术情报研究所、华东石油学院承担了编译工作;大庆石油管理局测井公司、中原石油勘探局测井公司给予了大力支持和帮助;四川石油管理局井下作业处、华北石油管理局测井公司、大港石油管理局测井公司、江汉石油管理局测井公司、江汉石油管理局测井研究所、江汉石油学院物探系、辽河石油勘探局测井公司、西安石油勘探仪器总厂也给予了积极的支持和帮助,在此一并表示感谢。

## 前 言

电法测井的主要用途是鉴别孔隙地层中流体的含量，通常电阻法测井可以区分含烃和含盐水地层，但这种以水的矿化度为依据的方法，对划分含淡水地层是不可靠的。

电磁波传播测井(EPT)是测量侵入带的介电常数。

岩石骨架和烃的介电常数 $\epsilon$ 都很低，由于水具有特殊的分子结构，所以水是唯一具有高介电常数( $\epsilon$ )的普通物质，实际上其介电常数与水的矿化度无关，EPT测井能够探测地层中水的含量。

EPT得出的水的含量与流体总含量进行比较，就可得出地层中残余烃的含量，而在淡水条件下，电阻法测井得不出这一结果。

# 目 录

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| <b>第一章 电磁波传播测井原理及仪器操作和校验</b> .....  | ( 1 )  |
| 第一节 电磁波的传播.....                     | ( 1 )  |
| 1.1 波的传播.....                       | ( 1 )  |
| 1.2 能量损耗.....                       | ( 2 )  |
| 1.3 普通材料的介电常数.....                  | ( 2 )  |
| 第二节 电磁波传播测井仪.....                   | ( 3 )  |
| 2.1 原理.....                         | ( 3 )  |
| 2.2 测量技术.....                       | ( 4 )  |
| 2.3 EPT 操作概述.....                   | ( 6 )  |
| 2.4 PCD 动力控制井径仪.....                | ( 7 )  |
| 2.5 与其它仪器组合.....                    | ( 8 )  |
| 2.6 应用范围.....                       | ( 8 )  |
| 2.7 探测深度.....                       | ( 8 )  |
| 2.8 纵向分层能力.....                     | ( 8 )  |
| 2.9 EPT孔隙度和快速直观解释.....              | ( 8 )  |
| 第三节 安全.....                         | ( 13 ) |
| 3.1 人身安全.....                       | ( 13 ) |
| 3.2 仪器安全.....                       | ( 13 ) |
| 第四节 仪器.....                         | ( 14 ) |
| 第五节 操作仪器须知.....                     | ( 15 ) |
| 5.1 工作前仪器的校验.....                   | ( 15 ) |
| 5.2 测井质量控制.....                     | ( 16 ) |
| 第六节 维修须知.....                       | ( 19 ) |
| <b>第二章 电磁波传播测井理论基础及仪器原理电路</b> ..... | ( 22 ) |
| 第一节 介电特性概述.....                     | ( 22 ) |
| 1.1 电介质极化.....                      | ( 22 ) |
| 1.2 电子极化.....                       | ( 22 ) |
| 1.3 原子极化.....                       | ( 22 ) |
| 1.4 偶极子极化.....                      | ( 22 ) |
| 1.5 面电荷极化.....                      | ( 23 ) |
| 1.6 交流外电场.....                      | ( 23 ) |
| 1.7 各向异性非均匀介质.....                  | ( 23 ) |
| 第二节 麦克斯韦方程.....                     | ( 23 ) |
| 第三节 波的反射和透射.....                    | ( 24 ) |
| 第四节 频率和源距的选择.....                   | ( 27 ) |

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 第五节 电磁波传播测井仪的设计..... | ( 27 ) |
| 5.1 天线.....          | ( 29 ) |
| 5.2 微波部分.....        | ( 29 ) |
| 附录.....              | ( 43 ) |

# 第一章 电磁波传播测井原理及仪器操作和校验

## 第一节 电磁波的传播

### 1.1 波的传播

#### 1.1.1 在自由空间

电磁波以近似于  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  的速度在自由空间传播 (图1—1为波的传播示意图)。

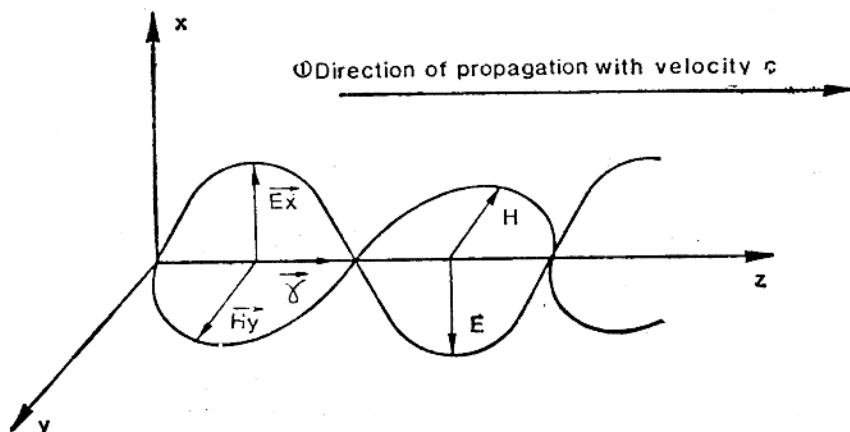


图1—1 波的传播示意图

① 电磁波的传播方向，波速度为  $c$

电磁波的波长用下式表示：

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中  $c$ ——自由空间电磁波的传播速度；

$f$ —— $E$ 场和 $H$ 场的振荡频率。

$\vec{k}$ 是传播常数，它垂直于 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 矢量所确定的平面。

#### 1.1.2 在介电常数为 $\epsilon$ 的介质中

假设介质的磁导率为  $\mu$ ，而且与自由空间的  $\mu_0$  值相等，波长可用下式确定：

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{c}{f}$$

式中  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ——相对介电常数；

$\epsilon_0$ ——自由空间的介电常数。

我们认为，电磁波在电介质中传播时：



(1) 波长减小或相反,

波的传播速度减小 $1/\sqrt{\epsilon_r}$ , 用下式表示:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

(2) 对 $E_x$ 和 $E_y$ 的振荡频率没有影响。

$\lambda$ 的单位为米(m)。能量按正弦规律传播, 它是距离 $Z$ 的函数, 这一点不要与 $E$ 和 $H$ 的正弦波相混淆, 因为 $E$ 和 $H$ 还是时间的函数。

## 1.2 能量损耗

随着离开源的距离增加电磁波的能量降低, 必须研究两种类型的衰减。

### 1.2.1 自由空间的衰减

能流密度(按球面向外传播)与距离的平方成反比, 因而导致能量的衰减, 这是几何因素( $4\pi R^2$ )引起的衰减。无论在什么介质中都会产生几何衰减, 并具有复杂的函数形式, 这种衰减也称为发散损耗。

### 1.2.2 损耗衰减

在电介质中会产生介电或电导率损耗, 信号幅度按指数规律衰减, 当电导率损耗增大时, 信号幅度衰减很快。传播常数 $\gamma$ 不再垂直于电磁波的平面, 而且 $E$ 矢量和 $H$ 矢量之间也存在相位差。

图1—2中给出波在两种介质中传播一个波长时产生的相位移, 注意这里的相位移指的是空间距离。因此对于给定的传播距离, 只要知道相位移, 并对衰减进行校正, 就可得出介电常数 $\epsilon$ 的值。

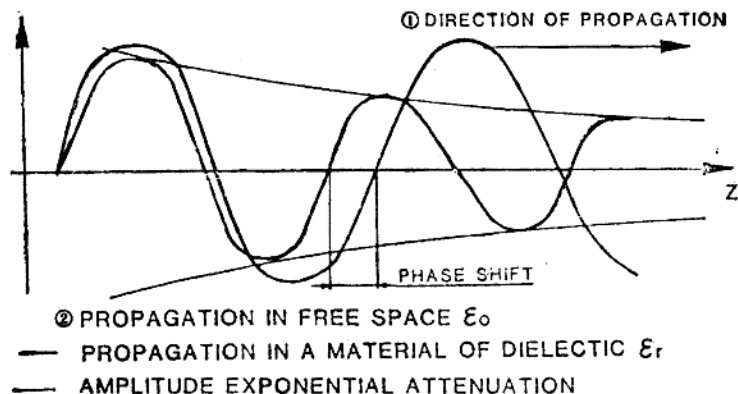


图1—2 在自由空间和损耗介质中波的传播对比图

①传播方向; ②在介电常数为 $\epsilon_0$ 的自由空间传播; ③相位移

——在介电常数为 $\epsilon_r$ 的介质中传播;

——波的幅度按指数衰减

## 1.3 普通材料的介电常数

表1中给出了某些岩石矿物在频率为1.1GHz时的相对介电常数, 相对介电常数 $\epsilon_r$ 为介质的介电常数与空气介电常数之比。为了实用的目的, 可以认为空气的介电常数等于自由空间的介电常数 $\epsilon_0$ 。

表 1 电磁波的频率: 1.1 GHz

| 矿 物      |   |   | 相 对 介 电 常 数 $\epsilon_r$ |
|----------|---|---|--------------------------|
| 砂        |   | 岩 | 4.65                     |
| 石        | 灰 | 岩 | 7.5—9.                   |
| 白        | 云 | 岩 | 6.8                      |
| 硬        | 石 | 膏 | 6.35                     |
| 流体       |   |   |                          |
| 天        | 然 | 气 | 1                        |
| 石        |   | 油 | 2.2                      |
| 淡水 (5°C) |   |   | 79                       |

由表中可以看出, 与其他物质相比水的 $\epsilon_r$ 很大。因此, 在频率为 1.1GHz 时测出的地层介电常数主要是含水孔隙度的函数。

## 第二节 电磁波传播测井仪

### 2.1 原理

EPT测井仪向地层发射频率为 1.1GHz 的微波能量, 并在两个接收器之间测量电磁波的相位移和幅度衰减, 相位移 (以度为单位) 可用时间来刻度, 根据两接收器间的距离, 就可导出电磁波在地层中的传播速度 (图1—3)。

对单位标准化后, 记录的曲线是:

$T_{pl}$  = 传播时间 (ns/m)

EATT = 衰减 (dB/m)

根据上述测量结果就可得出EPT视孔隙度。

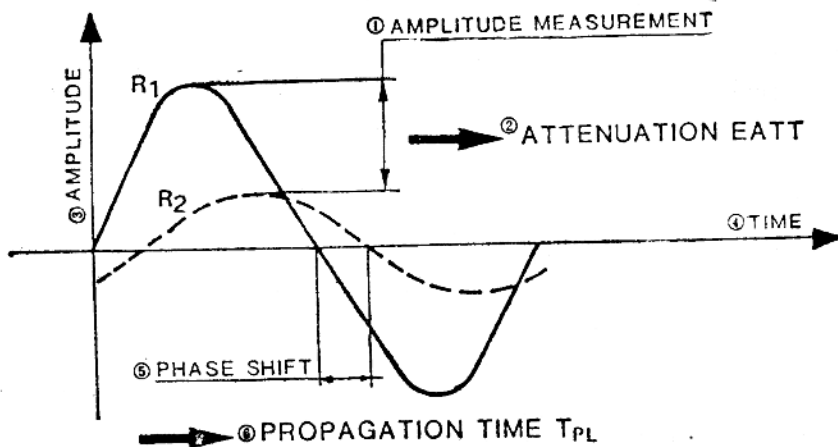


图1—3 测量原理

①幅度测量; ②衰减EATT; ③幅度; ④时间; ⑤相位移; ⑥传播时间 $T_{pl}$

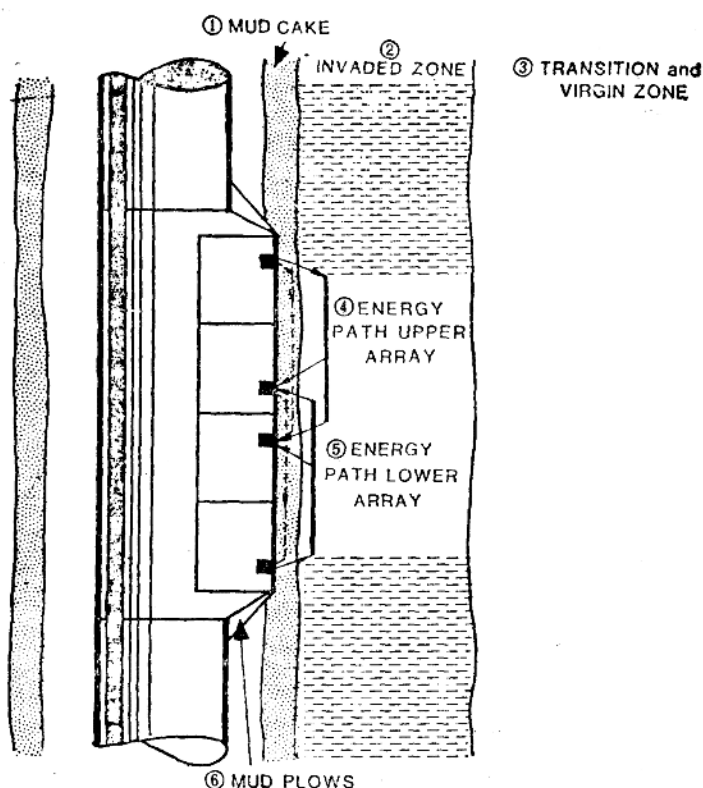


图1—4 EPT仪器示意图

①泥饼；②侵入带；③过渡带和原状地层；④上发射时能量传播路径；⑤下发射时能量传播路径；⑥刮泥饼器

## 2.2 测量技术

EPT-D是一种圆柱状的仪器，其天线极板牢固地装在仪器主体上。

利用动力机械臂PCD或扶正器弹簧，使天线极板与井壁紧密接触，刮泥饼器能使天线穿过泥饼时部分地刮掉泥饼。

天线极板上装有两个发射天线和两个接收天线(图1—4)，这种双发双收系统是以井眼补偿方式工作，可以对泥饼厚度变化、极板倾斜以及仪器不稳定状态进行校正。单发单收排列不仅受泥饼厚度和仪器倾斜的影响，而且也受电路中同轴电缆传输特性的影响。

两个发射天线交替激发，每次发射时测量两个接收器之间的相位移和幅度衰减。

### 2.2.1 衰减测量

通过自动增益控制电路完成衰减测量，该电路能保持接收器电路中的功率电平处于恒定的最小值(即阈值)并监视要求接收器保持阈值电平所需的衰减。

这个设计可用示意图表示，该电路能保证接收器道总是在恒定功率电平工作。 $P_1$ 是远接收天线和近接收天线收到的变化的功率电平，用插入一衰减器和自动增益控制(AGC)反馈回路来保持恒定功率电平 $P_2$ 。衰减控制电压的监测给出天线接收到的信号幅度，即远天线电

压和近天线电压都与插入衰减成线性关系（图1—5）。

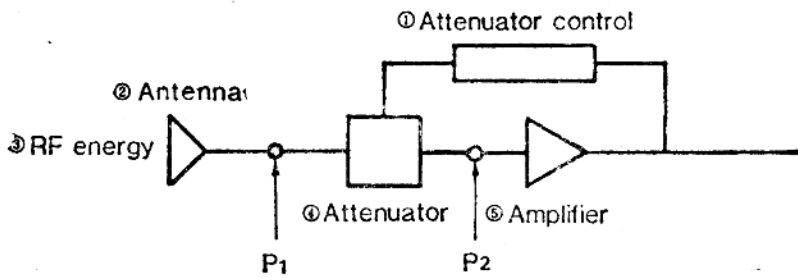


图1—5 衰减测量原理电路图

① 衰减器控制；② 天线；③ 射频能量；④ 衰减器；⑤ 放大器

图1—6中，dBF是用分贝表示的远接收天线的衰减值，dBN是近接收天线的衰减值。应注意到，近接收天线的电平比远接收天线的电平高，因近接收天线的信号强，这就需要增加衰减。

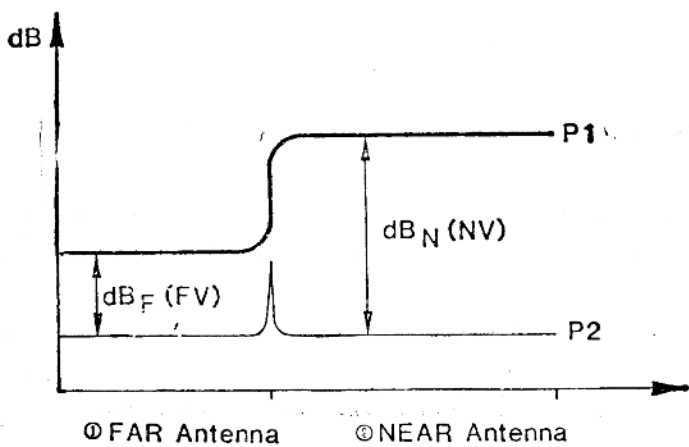


图1—6 远、近接收天线功率电平图

① 远接收天线；② 近接收天线

### 2.2.2 相位移测量

为了测量相位移，将接收到的 频率为1.1GHz 的信号转换成频率为 4kHz 的信号，在这样的频率下能准确地测量相位移。当顺序地进行频率 转换时，就能保持在频率为1.1GHz 时所观测到的相位移。

### 2.2.3 刻度

每次上、下发射天线的工作序列后，要对测量衰减的系统进行 刻度，用已知的参考信号输入到接收器部分。

由于使用了锁相环路和数字技术，没有必要对相位移进行刻度。图1—7为测量顺序图。

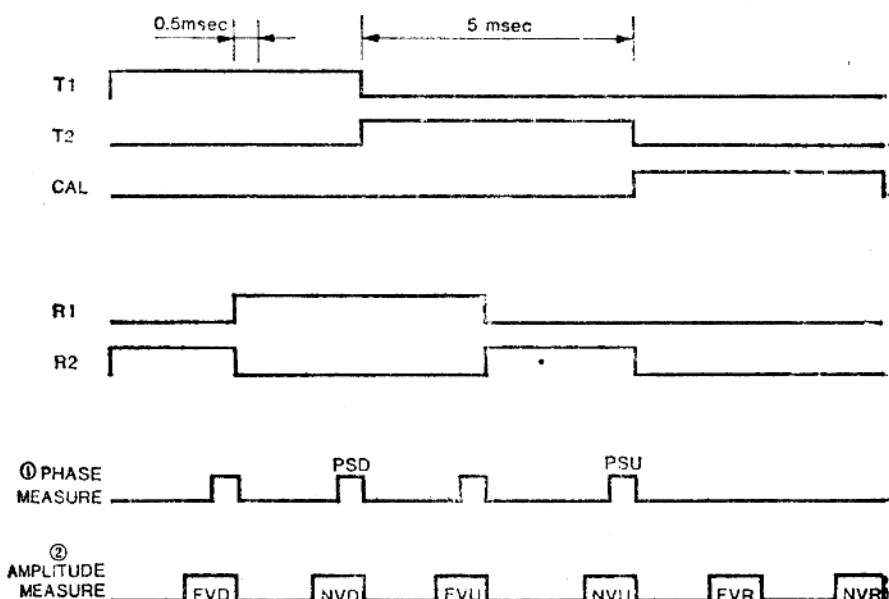


图1-7 测量顺序

① 相位测量；② 幅度测量

## 2.3 EPT操作概述

发射器是一高频固体电路，能产生大于2瓦的输出功率，接收器能处理0.3微微瓦的信号。在低损耗地层中没有必要发射最大的功率输出，否则高灵敏度的接收器会饱和。必要时可用压变衰减器使发射器功率输出衰减60dB ( $10^6:1$ )，压变衰减器位于功率振荡器和发射器输出之间。

该系统的设计，使其在所有时间内输出必须的最小功率，这样就能保证输出能量低于射频辐射的安全标准（见安全部分）。

由两个接收器端口或由精密刻度电路来的信号依次输入这个系统。

### 2.3.1 幅度测量

为了测量两接收信号电平之差，由两个接收天线来的信号顺次送入接收器电路，并测量其相应的电压变化，该电压正比于接收信号电平之差（以dB表示）。

为了准确地求出比例常数，给接收器输入两个已知的精确的刻度信号，并测出其电压值，用井眼补偿方式测量平均衰减值的步骤如下：

#### 1) 下发射测量

激发上部的发射天线，测量远接收器的信号电压，即测量“远—电压—下”自动增益电压（FVD）。再测量近接收器的信号电压，即测量“近—电压—下”自动增益电压（NVD）。

#### 2) 上发射测量

激发下部的发射天线，测量远接收器的信号电压，即测量“远—电压—上”自动增益电压（FVU）。再测量近接收器的信号电压，即测量“近—电压—上”自动增益电压（NVU）。

测量远接收器的刻度信号电压，即测量“远—电压—参考”自动增益电压。再测量近接收器的刻度信号，即测量“近—电压—参考”自动增益电压。用下式计算出平均衰减（dB/m），

$$\text{衰减} = K_1 \frac{\frac{(NVU + NVD)}{2} - \frac{(FVU + FVD)}{2}}{NVR - FVR} \quad (\text{dB/m})$$

式中  $K_1$ ——固定常数。

### 2.3.2 相位移测量

为了测量相位，接收器输出信号的频率为 100MHz，然后再同步转换为 4kHz，在这个频率下能精确地测量相位移，由于使用单测量道，所以也要顺次测量相位移。

为了测量两个接收天线信号的相移差，首先提取远接收器的信号，把转换为 4kHz 的信号与 4kHz 的参考信号进行比较，测量它们之间的相位差，并将结果存在数字存储器中。然后再提取近接收器的信号，如前述，把转换为 4kHz 的信号与 4kHz 的参考信号相比较。测出它们之间的相位差，再与存储器中的第一个值相减，就得出两个接收天线 1.1GHz 信号之间的相位差。

为了用井眼补偿方式计算平均相位差，先激发上部发射天线，测量相应的“相位差一下”（PSD），再激发下部发射天线，测量相应的“相位差一上”（PSU），得出的平均相位差为  $(PSU + PSD)/2$ ，平均传播时间为

$$\text{平均传播时间} = K_2 \frac{(PSU + PSD)}{2} \quad (\text{ns/m})$$

式中  $K_2$ ——固定常数。

衰减的精度为 1—2dB；相位差的精度为  $1^\circ \sim 2^\circ$ 。

测出的电压和相位差都以数字形式存储起来，每 1/60 秒完成一次井眼补偿式测量，并经 CCS 传送到地面仪器中，在地面把测量值累加起来，并在 2 英寸的间隔或其它间隔内进行平均。

每一间隔内的平均测量次数决定于测井速度，并用下式计算：

$$N = \frac{18000 \times D}{LS}$$

式中  $N$ ——每一间隔内的平均采样点数；

$D$ ——平均间隔，in（英寸）

$LS$ ——测井速度，ft/h（英尺<sup>●</sup>/小时）。

例如，测井速度为 2400 英尺/小时，平均间隔 2 英寸，平均采样点数为

$$\frac{18000 \times 2}{2400} = 15$$

## 2.4 PCD 动力控制井径仪

籍助于动力井径仪的机械臂使 EPT 仪器偏离井轴，动力控制井径仪（PCD）有两个臂，

<sup>●</sup>1 英尺 = 0.3048 米

小井径臂压力弱, 且与天线极板位于同一方向。大井径臂的末端装有微电极极板, 它恰好位于天线极板和小井径臂的反面。小井径臂能指示井壁的凹凸不平, 小井径臂和大井径臂变化之和即为井径, 大井径上的极板能给出标准的微电位和微梯度的信号, 根据微电极的结果能探测泥饼和指示渗透性。象用EPT仪器一样, PCD的数据也都数字化, 并经CCS送到地面。

## 2.5 与其它仪器组合

EPT仪器可与任何具有支援软件的 CCS 兼容仪器同时测量, 一种标准组合是 LDT-CN-T①PCD-EPT, 在CNT上面的2个AH-80连接器能在井下应用CNT测井。

EPT用CCC-A/AB时, 能用一般方式或自动方式为孔隙度计算输入温度, 用CCC-B时只能用人工输入温度。

## 2.6 应用范围

EPT测井要求淡水泥浆和薄的泥饼。

1) 侵入带的电阻率值应该保证衰减测量可靠, 也就是说仪器要发射出足够大的功率, 使远接收器能收到足够强的信号。一个较典型的下限是 $R_{xo} > 0.5 \Omega \cdot m$ 。对于低孔隙度地层, 泥浆滤液的电阻率可低到 $0.05 \Omega \cdot m$  ( $R_{mf} = 0.05$ , 井底温度)。

2) 泥饼厚度应小于 $3/8"$ , 高于这个值时, 测量结果主要受泥饼特性的影响。

3) 在钢套管或导电的塑料套管井中不能使用EPT测井, 由于解释上的原因在非导电性塑料套管井中也应避免使用这种测井方法。

4) 井眼垮塌和井壁凹凸不平对EPT测井有不利的影响。

可以预料到, 在油基泥浆和空气钻井条件下, 这种仪器对地层不灵敏。在极板与泥饼之间即使存在很薄的原油或天然气, 都会使发射器和接收器之间的能量被分流, 但对这种条件下的测井还没有什么经验。

## 2.7 探测深度

EPT的探测深度很浅, 根据地层中的传播损耗, 其探测深度约为1—3英寸。也可用趋肤深度近似为探测深度, 趋肤深度与电磁波的衰减常数成反比, 这就表明, 衰减增大, 探测深度减小。在大多数情况下, EPT只能探测到侵入带, 记住这一点是很重要的。

## 2.8 纵向分层能力

接收器之间的间距短, 所以EPT有很好的纵向分层能力(当使用适当的采样率时, 分层能力近似为2英寸)。由于EPT的探测深度浅, 只要井壁的凹凸不平没有引起错误的测量, 即使测井图上有很窄的尖峰, 其重复性也很好。

## 2.9 EPT孔隙度和快速直观解释

CSU计算出视EPT孔隙度, 该孔隙度反映了充满水的孔隙空间, 据此可估算含水体积。

用 $T_{po}$ 法计算孔隙度, 假设地层的无损传播时间与骨架传播时间和地层所含水的传播时间之间有线形关系, 并假设烃的传播时间等于骨架的传播时间。

$$T_{po} = \Phi_{EPT} T_{pwo} + (1 - \Phi_{EPT}) T_{pma}$$

式中  $T_{po}$ ——无损传播时间;

$\Phi_{EPT}$ ——视EPT孔隙度;

$T_{pwo}$ ——对温度和损耗作了校正的水的传播时间;

$T_{pma}$ ——岩石骨架传播时间(一般为无损耗)。用对 $T_{p1}$ 作损耗校正的方法求 $T_{po}$ ,  $A_c$ 为

①CNT—补偿中子测井, LDT—岩性密度测井。——译注

总衰减的一部分。

### 1) 快速直观解释

用 $\Phi_{EPT}$ 与总孔隙度 $\Phi_T$ 对比的方法能指示出残余油的存在, 用密度-中子交会图求 $\Phi_T$ , 如果 $\Phi_T > \Phi_{EPT}$ , 表明有残余油。

计算 $S_{xo}$ 。

$T_{po}$ 法可把地层中的油(气)水当成混合物, 较准确地计算侵入带的含水饱和度。

$$T_{po} = S_{xo}\Phi_T T_{pwo} + (1 - S_{xo})\Phi_T T_{ph} + (1 - \Phi_T) T_{pm}$$

式中  $T_{ph}$ ——烃的传播时间。

整理后得出:

$$S_{xo} = \frac{T_{po} - T_{pm} + \Phi(T_{pm} - T_{ph})}{\Phi_T(T_{pwo} - T_{ph})}$$

### 2) 泥质校正

上述方法也可推广到多骨架成分, 或者岩石中含有泥质成分。

例如, 岩石是单矿物成分, 含有泥质, 孔隙中含有水和烃,  $T_{po}$ 可用下式表示:

$$T_{po} = S_{xo}\Phi_T T_{pwo} + (1 - S_{xo})\Phi_T T_{ph} + V_{cl}T_{pcl} + (1 - V_{cl} - \Phi_T) T_{pm}$$

式中  $V_{cl}$ ——泥质的相对体积含量;

$T_{pcl}$ ——泥质的传播时间。

因为泥质的 $T_{pl}$ 可由7ns/m变到16ns/m, 所以输入泥质的 $T_{pl}$ 很困难。通常是根据邻近的泥岩层来估算 $T_{pl}$ 。还要注意, 泥质成分使视EPT孔隙度增大。

记录出的总衰减还是几何发散损耗 $A_{s1}$ 的函数,  $A_{s1}$ 随 $T_{pl}$ 而变化, 但也可以近似地认为 $A_{s1} = SOdB/m$ , 所以得出:

$$A_c = EATT - A_{s1} = EATT - 50$$

对 $T_{pl}$ 校正得出 $T_{po}$ :

$$T_{po} = \sqrt{T_{pl}^2 - \frac{A_c^2}{3604}}$$

适当地选取岩石骨架传播时间和地层温度后, 即可得出

$$EPI = \Phi_{EPT} = \frac{T_{po} - T_{pm}}{T_{pwo} - T_{pm}}$$

$\Phi_{EPT}$ 即为水所充满的孔隙空间。



图1—8为CSU流程图, 图1—9为EPT快速直观曲线示意图, 图1—11为测井解释成果图。

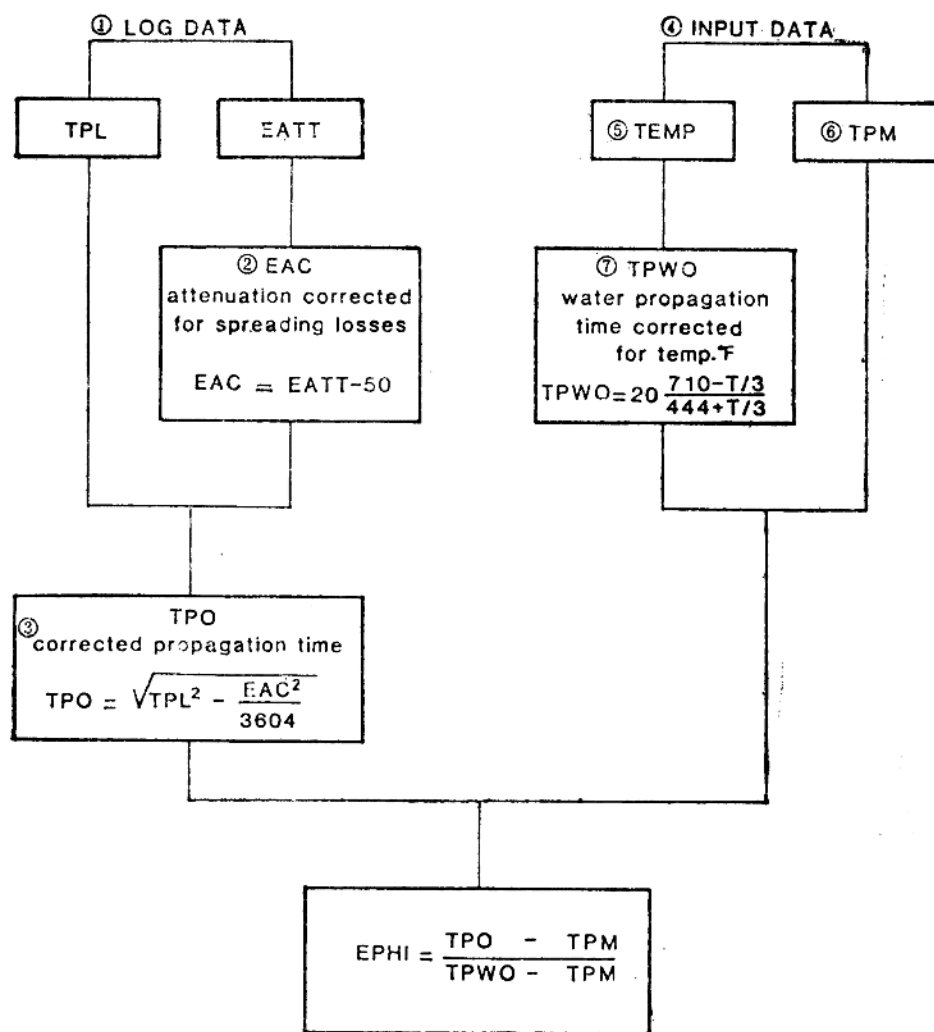


图1—8 CSU流程图

①测井数据; ②对EATT作几何发散损耗校正; ③对传播时间作校正; ④输入数据; ⑤温度; ⑥骨架传播时间; ⑦对水的传播时间作温度校正(°F)