

电磁测井的物理基础

王明达 王秀江

(吉林大学物理系)

摘 要

本文介绍电磁场理论在石油测井中的应用,主要介绍感应测井和相位介电测井的基本原理。感应测井涉及变化频率较低的似稳电磁场问题,可由测量感应电动势的振幅来区分油气层与非油气层。相位介电测井涉及高频变化的电磁场问题,可由测量电动势的位相差来解决区别油气层与水淹层的问题。两种测井方法所测的电动势都是由变化电磁场的非辐射场部分产生的,因此它们是这部分非辐射场在工业技术上应用的重要例子。

石油一般都埋藏在 1000 多米以下的地层中,有的油层深达 5—6km。石油储藏在砂岩的孔隙中,含油砂岩是层状分布的,这种岩层称为油层。一个油田往往有许多油层,各油层的厚度差别很大,薄的油层只有几十 cm,厚的油层可达十几 m 以上。各油层之间是其它岩层,如泥岩或水层,这些岩层的厚度也各不相同。在油田中除了油层,还有天然气层。不同的油田,油层的多少和分布状况也都不同。油层数量多、面积广、厚度大、含油程度高的,石油储藏量就丰富。

要把石油从地层里开采出来,第一步是钻井。一般井深都在 1000m 以上。第二步是测井,即用仪器测出油层的位置、厚度、含油程度(称为含油饱和度)以及石油在油层中的流动能力(称为渗透率)。测井所取得的资料是石油开发的重要依据。第三步是固井,即在油井中下一根钢管(称为套管),并用水泥把钢管和地层固定起来。固井是为了防止井壁倒塌。在固井后,油井并不立即产油。第四步是铺设输油管线。在分析测井资料的基础上,估算出油井的产油量,根据产油量,进行地面输油管线建设。如果产油量估算不准,管道设计不合适,管道太粗会造成浪费,管道太细,石油输送不出去,就会发生生产事故。油田地面建设完成以后,才

能正式投入生产。第五步是射孔输油。它是按照测井资料,确定所要开采的油层的位置,对钢管进行射孔。射孔以后,储藏在砂岩中的石油,在地层压力作用下,从小孔流入套管,在套管中,再下一根较细的油管,石油就从油管喷射到地面上来,经输油轨道流到油库。如果油层位置和厚度测得不准确,误把水层当油层,则射孔以后,就不出油而会出水,油井变成水井,这口井就会报废,造成大量人力和物力的浪费。

因此,测井在石油开采中是关键的一步。在油田勘探中,测井资料也是判断有无石油和估算油田储藏量的主要依据。本文介绍电磁场理论在石油测井中的应用,主要介绍感应测井和相位介电测井的基本原理。

一、电磁测井的基本思想

根据电磁场理论,我们知道反映介质电磁性质的三个主要参量是:导电率 $\sigma = 1/\rho$ (为电阻率 ρ 的倒数)、介电常数 $\epsilon = \epsilon_0\epsilon^*$ 和磁导率 $\mu = \mu_0\mu^*$ 。在油田为沉积岩的条件下,相对磁导率 $\mu^* \simeq 1$, 而导电率 σ 和相对介电常数 ϵ^* 则变化较大。表 1 列出了某油田地层的电磁特性参量。

从表 1 可以看出,各地层的电阻率和介电

表 1

参 量	地 层			水淹层	水 层	气 层	泥 岩	泥 浆
	差	中	好					
$\rho(\Omega \cdot m)$	25—40	40—80	100—200	25—100	12	100	3—5	4
ϵ^*	6	6	6	10	18	4	32	60

常数都有一定的数值，相差较大。如果能把各地层的电阻率或介电常数测出来，就能判断哪些是油层，哪些是水层，哪些是泥岩，并可从这些参量中提供含油饱和度和渗透率的资料。

电磁测井的基本装置如图 1 所示。在井筒中放置一个水平发射线圈 T，由发射机供给高频变化电流 $I = I_T e^{-i\omega t}$ ，在周围地层介质中激发变化电磁场，电磁场的分布与地层的 σ 和 ϵ^* 有关。在与发射线圈 T 的距离为 L 处放置一个或两个接收线圈 R。L 称为电极矩。由 R 所接收到的电磁场信号，可获得周围地层的 σ 或 ϵ^* 的资料。由此可见，设计一种电磁测井仪器，关键在于计算出在周围地层中发射电流所激发的电磁场的分布。由电磁场理论可知，其计算的内容可归结为在给定介质条件下求解麦克斯韦方程组的问题。

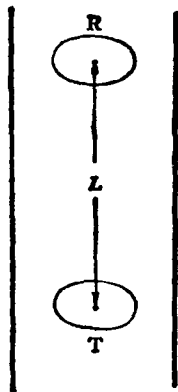


图 1 电磁测井的基本装置

在油井中，实际的物理条件是很复杂的，图 2 简单地表示出油井周围的地层分布状况。在井筒中充满泥浆。由于钻井时循环泥浆压力很高，高压泥浆向井筒附近地层渗透，形成浸入

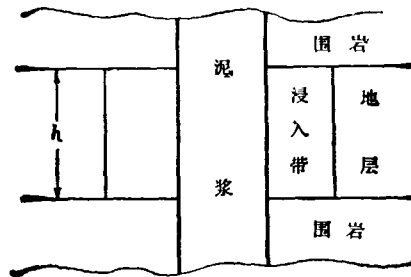


图 2 井筒周围地层分布示意图

带。浸入带的电参量与井筒内部和周围地层的电参量都不同，严格地说，浸入带本身的电参量也不是均匀的。此外地层在纵向也有许多层。油层和水层都是渗透性地层，渗透性地层上下的地层称为围岩。即使假定浸入带、围岩和渗透性地层都是均匀的，空间区域也存在许多介质分界面。在这样复杂的边界区域中，严格求解麦克斯韦方程组是很困难的，在实际计算时，必须作各种近似。

一般井筒半径为 10 cm，浸入带半径约为 20—30cm。为了突出电磁测井的基本思想，我们作最粗糙的近似，即假定发射线圈处在均匀地层介质中。在这种近似下，问题就变成计算在均匀地层介质中发射线圈电流所激发的电磁场分布。

二、均匀介质中磁偶极子的电磁场

在发射线圈 T 中，变化电流为 $I = I_T e^{-i\omega t}$ 。因为在电磁测井仪器中，发射线圈半径 $\rho_T = 2.5$ cm，而接收线圈距离发射线圈在 1m 以上，即电极矩 $L > 1m$ 。因观测点离场源的距离远大于发射线圈的半径，故可把发射线圈当元电流处

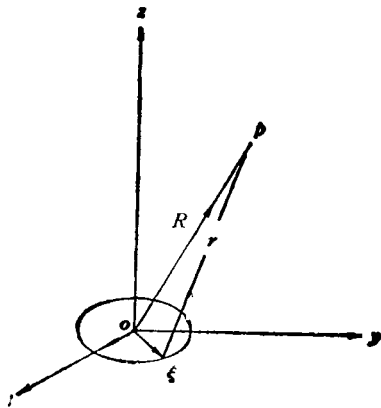


图 3

理,它等效于一个磁偶极子,其磁矩为

$$\mathbf{m} = \mathbf{M}_T e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{M}_T = \pi \rho_T^2 I_T \mathbf{k} = I_T S_T \mathbf{k}.$$

取坐标系如图 3 所示,原点在发射线圈中心, \mathbf{m} 沿 z 轴方向。振荡磁偶极子在均匀介质中所激发的电磁场为

$$\mathbf{E} = \frac{i\omega\mu}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{M}_T) \left(\frac{1}{R^2} - \frac{iK}{R} \right) e^{-i(\omega t - KR)}; \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = -\frac{i}{\omega\mu} \nabla \times \mathbf{E}$$

$$= \frac{1}{4\pi} \left\{ [(\mathbf{n} \times \mathbf{M}_T) \times \mathbf{n}] \frac{K^2}{R} \right.$$

$$\left. + [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{M}_T) - \mathbf{M}_T] \left(\frac{1}{R^3} - \frac{iK}{R^2} \right) \right\}$$

$$\times e^{-i(\omega t - KR)}. \quad (3)$$

在场源附近的区域 ($R \ll \lambda$),主要是似稳场,与磁偶极子所激发的静磁场在形式上是相同的。而在远离场源的区域 ($R \gg \lambda$),主要是辐射场,与 R 一次方成反比,场能以电磁波形式向外辐射。

因为接收线圈也放在 z 轴上,故我们只要研究在轴线上距离场源为 z 处的电磁场。这时 $\mathbf{n} = \mathbf{k}$,与磁矩方向一致,并且 $R = Z$,故由(2)和(3)式可得

$$\mathbf{E} = 0;$$

$$\mathbf{H} = \frac{M_T}{2\pi Z^3} (1 - iKZ) e^{-i(\omega t - KZ)} \mathbf{k}. \quad (4)$$

又因为周围是导电介质,故波矢量为复数

$$K = a + ib, \quad (5)$$

其中

$$a = \left[\frac{1}{2} \omega^2 \epsilon \mu \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$b = \left[\frac{1}{2} \omega^2 \epsilon \mu \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}. \quad (7)$$

代入(4)式得

$$H_z = \frac{M_T}{2\pi Z^3} (1 + bZ - iaZ) e^{-bZ} e^{-i(\omega t - aZ)}$$

$$= \frac{M_T}{2\pi Z^3} [(1 + bZ)^2 + (aZ)^2]^{1/2} e^{-bZ} e^{-i(\omega t - aZ + \theta)}, \quad (8)$$

其中

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{aZ}{1 + bZ}. \quad (9)$$

在导电介质中电磁场有一个衰减因子 e^{-bZ} ,这是因为变化电磁场在导电介质中产生感应涡流,消耗能量,所以振幅逐渐衰减。

三、感应测井

感应测井的原理图如图 4 所示, T 为发射线圈,共有 N_T 匝,每匝面积为 S_T ,故磁偶极矩的振幅为

$$M_T = I_T N_T S_T. \quad (10)$$

R 为接收线圈,共有 N_R 匝,每匝面积为 S_R 。电极矩 $Z = L$,由于接收线圈处有变化的磁场,因而在接收线圈中将出现感应电动势。每一匝

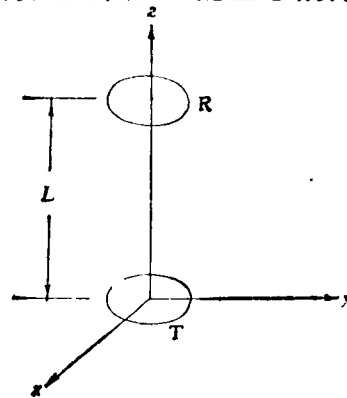


图 4 感应测井原理图

线圈中感应电动势为

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}. \quad (11)$$

接收线圈很小,故可近似地认为在整个线圈面积范围内磁场是均匀的,与线圈中心处的磁场相同,即

$$\iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{S}_R = \mu S_R \frac{\partial H_z}{\partial t}. \quad (12)$$

N_R 匝线圈中的总电动势为

$$\mathcal{E} = -N_R \iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} = -\mu N_R S_R \frac{\partial H_z}{\partial t}. \quad (13)$$

由(8)式对 t 求导数可得

$$\mathcal{E} = \frac{i\omega\mu M_T N_R S_R}{2\pi L^3} [(1+bZ)^2 + (aZ)^2]^{1/2} e^{-bZ} e^{i(aZ-\theta)} e^{-i\omega t} \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad \theta = \text{tg}^{-1} \frac{aL}{1+bL}. \quad (15)$$

$$\text{令} \quad \mathcal{E}_0 = \frac{i\omega\mu M_T N_R S_R}{2\pi L^3}, \quad (16)$$

则电动势可写成

$$\mathcal{E} = (\mathcal{E}_m + \mathcal{E}_s) e^{-i\omega t}. \quad (17)$$

其中

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_0 [(1+bL)^2 + (aL)^2]^{1/2} e^{-bL} \times \cos(aL - \theta), \quad (18)$$

$$\mathcal{E}_s = i\mathcal{E}_0 [(1+bL)^2 + (aL)^2]^{1/2} e^{-bL} \times \sin(aL - \theta). \quad (19)$$

在感应测井的具体条件下,上式公式还可简化. 感应测井中使用的频率 $f = 20\text{kHz}$, 对于 $\sigma = 0.01\text{s}$, $\epsilon^* = 6$ 的油层,满足条件

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \cong 1.5 \times 10^3 \gg 1.$$

由此可将(6)和(7)两式化简为

$$a = b = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \quad (20)$$

当 $L = 1\text{m}$ 时,

$$aL = bL = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} L \cong 2.81 \times 10^{-2} \ll 1.$$

对(18)和(19)两式,可作如下近似处理:

$$[(1+bL)^2 + (aL)^2]^{1/2} \cong 1.$$

$$e^{-bL} \cong 1 - bL \cong 1.$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{aL}{1+bL} \cong \frac{aL}{1+bL} \cong aL(1-bL).$$

$$\cos(aL - \theta) \cong 1.$$

$$\sin(aL - \theta) \cong aL - \theta \cong (aL)^2.$$

$$\text{最后得} \quad \mathcal{E}_m \cong \mathcal{E}_0; \quad (21)$$

$$\mathcal{E}_s \cong i\mathcal{E}_0(aL - \theta) \cong i\mathcal{E}_0(aL)^2 - (aL)^2 \mathcal{E}_0 e^{-i\pi/2}. \quad (22)$$

从(21)和(22)两式看到: $|\mathcal{E}_m| \gg |\mathcal{E}_s|$, \mathcal{E}_m 和 \mathcal{E}_s 之间位相差为 $\pi/2$. 因为 \mathcal{E}_m 与地层的电参量无关,对我们测量地层电参量没有用处,称为无用信号,而

$$\mathcal{E}_s = i\mathcal{E}_0(aL)^2 = -\frac{\omega^2 \mu^2 M_T N_R S_R}{4\pi L} \sigma. \quad (23)$$

与地层的电导率 σ 成正比,称为有用信号,只要测出 \mathcal{E}_s ,就可确定地层的电导率 σ . 但无用信号很强,有用信号很弱,可利用相敏检波器来解决这一困难,通过相敏检波器,将无用信号 \mathcal{E}_m 去掉,只接收与 \mathcal{E}_m 位相差 $\pi/2$ 的有用信号 \mathcal{E}_s .

$$\mathcal{E}_s = K\sigma,$$

$$\text{其中} \quad K = -\frac{\omega^2 \mu^2 N_T S_T N_R S_R}{4\pi L} I_T \quad (24)$$

称为仪器常数. 在感应测井仪上直接按 σ 刻度,故记录的读数就是地层的电导率.

感应测井从五十年代初就开始广泛应用到石油勘测工作中来,目前它还是我国某些油田的主要测井方法之一.

四、相位介电测井

我国某些油田开发,采用早期注水驱油的办法. 在一排油井旁再打一排注水井,用高压将水注入地层,使地层内的石油始终保持足够的压力,达到油田维持稳产高产的目的. 但油田开发到一定阶段,原来的油层会部分或全部被注入水所浸入,这种油层称为水淹层. 被注入水浸入太厉害的一些油井就不能用了. 因此在油田开发到一定时期后,在原有油井之间,需要打一些调整井. 在调整井中,往往也存在水淹层,如对水淹层进行射孔,就会大量出水. 因此

对测井不仅要求能确定油层的位置，而且还要要求能把水淹层和油层区分开来，最好还能确定油层被水淹的程度。因为水淹层和油层的电阻率差别不大，所以靠感应测井是无法完成区分油层和水淹层的任务的。必须研究新的测井方法，相位介电测井就是为了解决区分油层和水淹层的问题而提出来的。

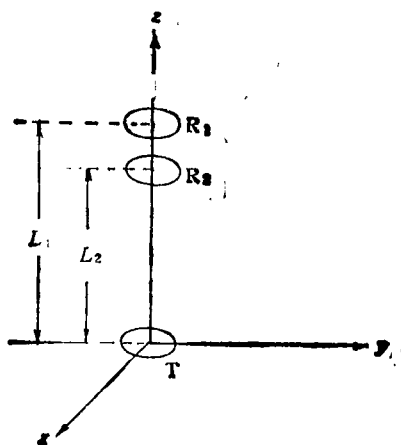


图5 相位介电测井原理

相位介电测井的原理图如图5所示。相位介电测井不是测量电动势的振幅，而是测电动势的位相差。它有两个接收线圈 R_1 和 R_2 ，分别处于 L_1 和 L_2 。根据(14)式，接收线圈中的电动势为

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 [(1 + bL)^2 + (aL)^2]^{1/2} e^{-bL} e^{-i(\omega t - (aL - \theta))} \quad (25)$$

其中 $\theta = \text{tg}^{-1} \frac{aL}{1 + bL}$ 。

在接收线圈 R_1 中，电动势 \mathcal{E}_1 的位相为

$$\phi_1 = aL_1 - \theta_1 = aL_1 - \text{tg}^{-1} \frac{aL_1}{1 + bL_1} \quad (26)$$

在 R_2 中，电动势 \mathcal{E}_2 的位相为

$$\phi_2 = aL_2 - \theta_2 = aL_2 - \text{tg}^{-1} \frac{aL_2}{1 + bL_2} \quad (27)$$

这两个线圈中电动势的位相差为

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = a(L_1 - L_2) - \left(\text{tg}^{-1} \frac{aL_1}{1 + bL_1} - \text{tg}^{-1} \frac{aL_2}{1 + bL_2} \right)$$

$$= a\Delta L - \text{tg}^{-1} \frac{a(L_1 - L_2)}{1 + b(L_1 + L_2) + (a^2 + b^2)L_1 L_2} \quad (28)$$

从(28)式看到，位相差 $\Delta\phi$ 与地层参量之间的关系比较复杂，但第一项只与 $\Delta L = L_1 - L_2$ 成正比，而与 L_1 和 L_2 本身大小无关。在最初试制的相位介电测井仪中，频率 $f = 60\text{MHz}$ ， $L_1 = 1.2\text{m}$ ， $L_2 = 1\text{m}$ 。在这些条件下，根据计算发现，略去(28)式的第二项，只取第一项，即使 $\Delta\phi \cong a(L_1 - L_2) = a\Delta L$ ，(29)所引起的误差不超过百分之五。这就意味着，位相差主要与两接收线圈 R_1 和 R_2 之间的地层有关，而与接收线圈到发射线圈之间的地层关系不大。因此，在精度要求不太高时，可取(29)式作为测量的基础。对于 $\sigma = 0.01\text{s}$ ， $\epsilon^* = 6$ 的油层，

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = \frac{0.01 \times 36\pi \times 10^9}{2\pi \times 60 \times 10^6 \times 6} = 0.5 < 1.$$

所以 $a = \omega \sqrt{\epsilon\mu} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 + \dots \right]$

$$\cong \omega \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{\omega}{C} \sqrt{\epsilon^*} \quad (30)$$

由此可见，对于高电阻率的地层，所测得的位相差只与地层的介电常数 ϵ^* 有关，由 $\Delta\phi$ 就可求得 ϵ^* 。故这种测井方法，称为相位介电测井。对于低电阻率的地层，所测得的位相差，除与介电常数 ϵ^* 有关外，还与电导率 σ 有关，因此必须进行电阻率校正，才能求出地层的介电常数。从表1可以看出，水淹层和油层电阻率差别不大，但它们的介电常数却相差较大，所以介电测井对区分油层和水淹层是一个很有用的方法。

电磁场理论在石油勘探和测井中有着广泛的应用。随着生产发展的需要，不断提出各种新的方法，设计出各种新的仪器。电磁测井在石油生产中越来越显示着它的重要性。

【1】 吴式枢、王明达、杨善德，吉林大学学报，No. 2(1973)，64。