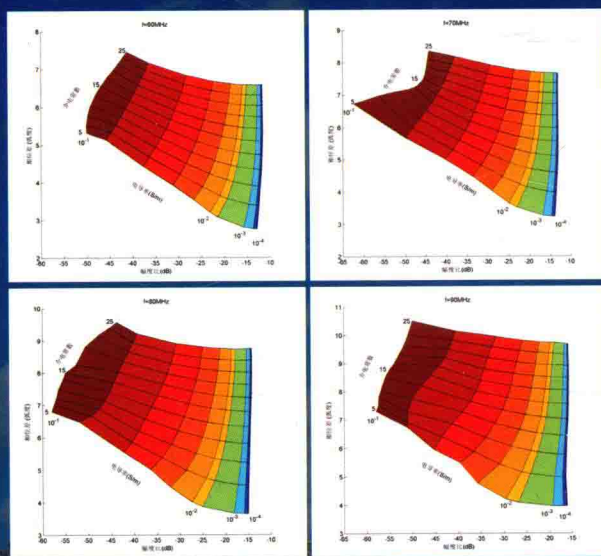


ELECTROMAGNETIC LOGGING:
METHOD, PRINCIPLE, AND APPLICATION

电磁波测井方法 原理及应用

刘四新 冉利民 赵永刚 李健伟 编著



科学出版社

电磁波测井方法原理及应用

刘四新 冉利民 赵永刚 李健伟 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

电磁波测井又叫介电测井,是一种利用电磁波的传播原理来测量井周围的电阻率和介电常数的技术。由于油气和水在介电常数上的巨大差异,电磁波测井可用于低阻等复杂油气储集层的评价。本书按照电磁波测井的不同仪器来介绍。第1章介绍电磁波传播测井(EPT)方法的物理基础,仪器原理,解释方法及应用实例。第2章介绍深电磁波传播测井(DPT)的原理、校正方法以及解释应用等。第3章介绍双频电磁波传播测井的方法原理和应用。第4章介绍最新的介电扫描仪。第5章介绍国内研究的情况。

本书是在总结和分析了迄今为止几乎所有与电磁波测井有关资料的基础上编写而成的,目的是给从事与石油测井有关的专业技术人员提供一本比较全面详细的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁波测井方法原理及应用/刘四新等编著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046243-5

I. ①电… II. ①刘… III. ①电磁波测距—研究 IV. ①P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第262326号

责任编辑:韦 沁 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京盛源印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:290 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电磁波测井可以同时测量井眼周围地层的电导率和介电常数，这些参数对评价钻孔附近一些特殊储集层具有非常重要的意义。具体可以解决两方面的问题：①低阻油层的问题，这是一种油层和水层同为低阻或高阻的情况；②油田开发过程中水淹层测井，开发过程中注水的电阻率是不一定的。对于这一类特殊的储集层来说，用常规测井方法很难区分油水层，但利用电磁波测井所测介电常数可在高阻淡水层或低阻油层的情况下很容易的区分油水层，这是由于水的介电常数比石油的介电常数高出数倍。另外，电磁波测井受地层水矿化度影响较小，且不受井中泥浆和套管的绝缘性的影响，可在油基泥浆和玻璃钢套管井中应用，判断油汽水。经过多年的实践，电磁波测井取得了一些发展，同时还存在一些问题，有待科学工作者做进一步的努力。

开展电磁波测井研究较早的当数原苏联。有关介电测井的工作是由B. H. 达赫诺夫开始的。1966年，达也夫提出了一种高频测井方法，其原理是测量离开发射线圈一定距离的两个线圈间电磁场的相位差，当应用频率为几十兆赫时，相位差主要取决于岩石的介电常数。后来，莫斯科地质学院、苏联科学院西伯利亚分院地质和地球物理研究所等单位在高频测井领域进行了大量的工作：完成了理论研究、制造了实验样机，在井内进行了顺利的试验工作，高频测井开始应用于生产。因此，电测井中形成了新方法——利用几百千赫到几十兆赫的频率的电磁波测量井内岩石的介电常数和电导率的井中测量方法。同时，在均匀介质、存在井眼及有限层厚的地层条件下电磁波场理论研究取得了全面的进展，研究了井眼对观测结果的影响及消除办法，确定了消除井眼的最有效的方法是测量场的相对特性，如相位差和幅度比。

在美国以几个大的石油公司为主，与休斯敦等地的多个大学的研究单位协作开展了大量的研究，先后发表了近百专利。最具代表性的是斯伦贝谢测井公司研制的电磁波传播测井（EPT）仪，并很快地推向生产。由于其操作频率为1.1GHz，主要能测井壁附近的介电常数，径向探测深度只有几英寸^①。另外，斯伦贝谢测井公司还开发了25MHz的深电磁波传播测井（DPT）仪，在泥浆电阻率和地层电阻率满足一定条件的井中，可测得原状地层的电性参数。阿特拉斯公司推出的47MHz和200MHz的双频电磁波测井仪器，具有不同的径向探测深度，由于两个频率的差别太大、岩性频散明显，因此无法组合进行有效的解释工作。斯伦贝谢测井公司以及哈里伯顿公司等还各自开发了自己的用于随钻测量（MWD）的操作频率为2MHz的电阻率传感器，它可对地层进行实时评价。由于其操作频率较低，测量的电磁波的幅度衰减和相位差主要反映地层的电导率。幅度电阻率和相位电阻率具有不同的探测特性。

在我国，电磁波测井的研究和开发始于20世纪60年代并取得了一系列的成果。大

^① 1in（英寸）=2.54cm。

庆测井公司地球物理研究所与多家单位协作，在电磁波测井方面进行大量的研究工作。在理论推导、仪器研制、实验室高频岩石电性等方面与吉林大学理论物理教研室、哈尔滨工业大学、中国石油大学、黑龙江自动化研究所（前期）和中国电波传播研究所（后期）等单位开展了大量的协作。先后研制出多种频率的电磁波测井仪，其中包括：测相位差来求解地层介电常数的 60MHz 的仪器，实验了既测相位差又测幅度比的 25MHz 的介电测井仪，研制成功了相当于斯伦贝谢公司 1.1GHz 电磁波测井的介电测井仪，实验了用于随钻测井的 2MHz 的相位差的相位电阻率仪器。

由于多频电磁波测井能够测量不同深度的介电常数和电导率，因而受到了广泛的关注。佟文琪等在国家自然科学基金资助下进行了多频电磁波测井资料反演方法和井壁成像技术研究，并已研制出室内的实验样机。沈金松也进行了多频电磁波测井资料反演成像的研究。刘四新等在日本研究开发了基于网络分析仪的多频电磁波测井仪，并给出了油水层界面以及不同厚度薄层的数值模拟结果和在日本某地的实验结果。该系统采用具有一定带宽的偶极子天线作为发射和接收天线，能够同时测量 40~90MHz 范围的介电常数和电导率。

电磁波测井从出现到现在，已有几十年的历史，然而它的应用范围一直不像其他常规方法一样普遍，它的优点一直没有得到充分的发挥。原因在于有些技术方面的问题还没有得到很好的解决，现有的仪器不能很好地解决石油工业中存在的问题。而开发能够测量井旁一定范围内的介电常数和电导率的多频电磁波测井仪确是一种很好的选择。

2008 年斯伦贝谢公司推出的介电扫描仪，能同时测量 20MHz、100MHz、500MHz、1000MHz 四个频点的数据，采用频散模型进行数据处理和解释。

需要指出的是，本书重点介绍几十 MHz 以上的、全面利用电磁波传播特性、确定地层参数的测井方法，不包括频率较低的各类感应测井，如俄罗斯的 Vikiz 和 2MHz 随钻电阻率测井仪等。

本书编写过程中，吉林大学地球探测科学与技术学院的各位老师给予了大量的支持和帮助，研究生傅磊、王飞、雷林林、孟旭、王宪楠、蔡佳琪、刘新彤、王文天等在翻译工作、图件准备方面付出辛勤劳动，特此感谢。尽管作者付出很大努力，但书中一定还有许多缺点和错误，恳请专家批评指正。

作者

2014 年 9 月 30 日于长春地质宫

目 录

前言

第 1 章 电磁波传播测井	1
1.1 EPT 测井的物理基础	1
1.1.1 岩石的介电特性	1
1.1.2 物理基础	3
1.2 EPT 的测量原理	5
1.2.1 衰减测量	6
1.2.2 传播时间的测量	8
1.2.3 无损耗传播时间的计算	9
1.3 EPT 仪器原理	9
1.3.1 天线系统	10
1.3.2 微波电路	12
1.4 改进型仪器 EPT-G	14
1.4.1 偶极子传播	14
1.4.2 轴向辐射天线和垂射天线的辐射图形	18
1.4.3 EPT-G 的间隙和井眼不规则响应	21
1.4.4 探测深度	25
1.4.5 测井实例	26
1.4.6 小结	30
1.5 解释方法及应用实例	31
1.5.1 基本解释方法	31
1.5.2 CTA 方法	37
1.5.3 在碳酸盐岩中应用	40
1.5.4 在砂泥岩中的应用	48
参考文献	60
第 2 章 深电磁波传播测井	62
2.1 深传播电磁波测井的测量原理	62
2.2 DPT 环境校正	64
2.2.1 侵入带	65
2.2.2 层边界/角效应	68
2.2.3 井眼影响	75
2.2.4 小结	76
2.3 DPT 解释及应用	77

2.3.1	DPT 的定性使用	77
2.3.2	DPT 的定量解释问题	77
2.3.3	在恒定矿化度或者是淡水环境下的定量 DPT 解释	83
2.3.4	在矿化度变化的环境下定量的 DPT 解释	85
2.3.5	DPT 的未来发展方向和应用	97
2.3.6	小结	99
	参考文献	99
第 3 章	双频电磁波传播测井	100
3.1	理论方法	100
3.1.1	介电测量原理	100
3.1.2	仪器实现方法	100
3.2	仪器原理	102
3.3	解释方法及实例	104
3.3.1	大港油田应用介电测井资料定性识别油水层	104
3.3.2	介电测井在下二门油田应用效果	108
3.3.3	介电测井在新庄稠油低阻油层测井解释中的应用	110
3.3.4	用于变化矿化度井段的介电测井解释法——流体电阻率与相移角交会法	111
	参考文献	125
第 4 章	介电扫描仪	126
4.1	介电频散理论	126
4.1.1	电子极化: 岩石骨架介电常数	129
4.1.2	分子极化: 水的复介电常数	129
4.1.3	界面极化: 多孔岩石的介电性能	130
4.2	新型宽频介电工具	132
4.2.1	多源距操作	133
4.2.2	重要参数	134
4.3	数据处理方法	135
4.3.1	衰减和相移	135
4.3.2	失衡质量控制	135
4.3.3	空间灵敏度函数	135
4.3.4	各向异性响应	138
4.3.5	均质地层处理方法	138
4.3.6	垂直分辨率	139
4.3.7	径向勘探	139
4.3.8	岩石物理分析	141
4.3.9	径向耦合分析 (coupled radial) 和岩石物理分析	142
4.3.10	LQC 和不确定性控制	142
4.4	应用实例	142

4.4.1 地层水矿化度变化的地层	142
4.4.2 含泥岩薄层的砂岩储层中的饱和度	143
4.4.3 稠油油藏中饱和度剖面	144
4.4.4 碳酸盐岩结构分析	145
参考文献	148
第5章 国内研究情况	149
5.1 早期电磁波测井基础理论的研究	149
5.2 早期电磁波测井仪的研究	150
5.2.1 60MHz 仪器	150
5.2.2 25MHz 仪器	152
5.2.3 1.1GHz 仪器	153
5.2.4 大庆油田岩石介电常数特征	153
5.2.5 小结	153
5.3 电磁波测井资料反演的研究	153
5.3.1 DIEL 资料的反演	154
5.3.2 XJC 资料的反演	161
5.4 多频电磁波测井的研究	166
5.4.1 测量原理	167
5.4.2 数值结果	169
5.4.3 实验结果	171
5.4.4 小结	172
参考文献	173
附录 I 点状磁偶极子的辐射	175
附录 II 点状磁偶极子的辐射图形	177
附录 III 传播常数和折射系数	178
附录 IV NaCl 溶液的介电传播	179
附录 V 频散	185
附录 VI 三相储集层模型的推导	187

第1章 电磁波传播测井

对地层介质的电磁特性,可用一些物理参数来表述: $\rho, \sigma, \mu, \epsilon$ 。普通电阻率和侧向测井都是测电阻率 ρ ;感应测井测量的是电导率 σ ;对于沉积岩来说,除非含有较多的铁磁性矿物,否则它的磁导率就和真空磁导率没有什么差别。因此,在以沉积岩为主要目的层的油、气勘探中,磁导率 μ 这参数没什么作用,不予考虑。

介电常数 ϵ ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为介质的相对介电常数)是反映介质电学性质的另一个重要物理量。由于地层水(淡水)的介电常数为80~81,原油的介电常数为2.0~2.4,天然气介电常数为1.0,岩石骨架介电常数为4~9,当储层的孔隙度达到一定数值时,含油、气层的介电常数与水层的介电常数有明显的差别,据此可以划分油、气、水层。普通电阻率测井、侧向测井和感应测井都是利用地层孔隙流体的导电性质来区分含油、含气和含水地层。当地层水是淡水(或水矿化度极低)时,地层水的导电性已不再和油气、岩石骨架的导电性存在明显的差别,上述测井方法就无法对地层孔隙中的油、气、水含量做出正确的判断,在此情况下就要用到电磁波传播测井(electromagnetic propagation tool, EPT)了。电磁波传播测井又称为介电测井,可用来测量井下地层的介电常数。

1.1 EPT测井的物理基础

1.1.1 岩石的介电特性

从物理学知道,凡能在电场中极化的物质称电介质。物质的介电性质或者说它的极化能力一般用介电常数表示。在交变电场下,用复介电常数表示

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.1)$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (1.2)$$

式中, ϵ' 是介电常数的实部,即通常所指的介质的介电常数; ϵ'' 表示介质的损耗,通常用损耗角正切 $\tan\delta$ 表示。损耗包括导电损耗和介质损耗两部分,在射频频率下主要是导电损耗,在1GHz以上才需考虑介质损耗(主要是极性分子向极化转化引起的损耗)。

岩石的介电常数主要取决于岩石骨架的介电常数和孔隙中所含流体的介电常数,也和组成岩石颗粒的分布和结构有关,主要造岩矿物和石油、天然气的相对介电常数与水的相对介电常数相比,有很大的差别。因此,当储集层的含水饱和度为不同值时,岩石的介电常数就呈现较大的差异,以此区别油、水层会有较好的效果。表1.1给出各种地层和造岩矿物的介电特性。

表 1.1 地层及主要矿物的介电特性

介质	相对介电常数	传播时间/(ns/m)	损耗角正切 $\tan\delta$
真空	1	2.3	
空气	1.000585	3.3	
水	80	29.81	1.15
石英	3.8	6.5	0.1×10^{-3}
黑云母	5.4	7.75	0.3×10^{-3}
正长石	4	6.7	
方解石	7.5	9.1	
天然气	1	3.3	
石油	2~4	4.7~6.7	
泥岩	5~25	7.46~16.6	
硬石膏	4.18~6.5	6.8~8.5	
石灰岩	7.5~9.2	9.1~10.2	
白云岩	6.8~6.9	8.7~8.75	
砂岩	4.65	7.2	
岩盐	5.0~6.35	7.6~8.4	

地层的介电常数相对地受水的矿化度影响较小，地层水含盐量在 300.00ppm (1ppm= 10^{-6}) 以下时，其影响可以不予考虑，这是介电测井的一大优点。由于介电常数表征介质的极化能力，而介质的各种极化现象是和外加电场频率密切相关的，因此，岩石的介电常数也随外加电场的频率而变化，这种现象称为频散。图 1.1 表示各种极化形式对介电常数的贡献与频率的关系。主要的极化类型是表面电荷极化，发生在非均匀介质的相

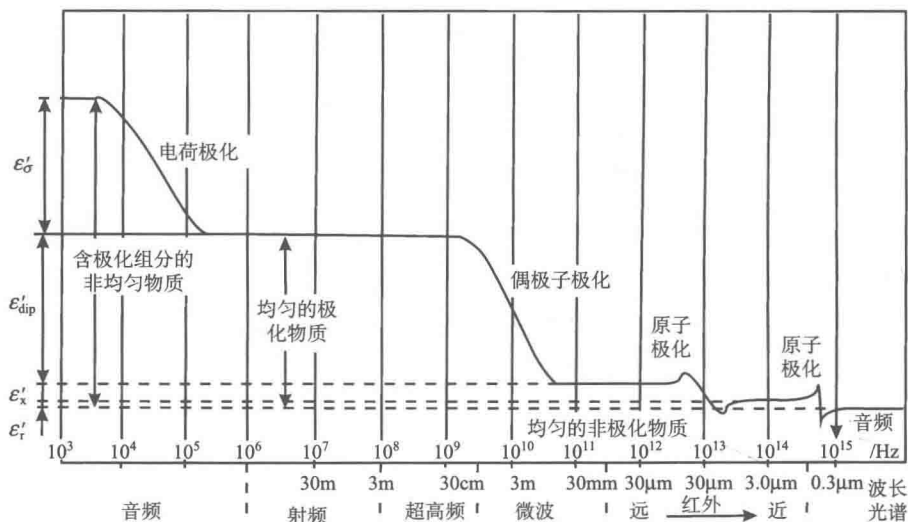


图 1.1 介电常数与频率的关系

界面上；极化分子的转向极化，发生在 MHz 到 GHz 范围内；微波频率以上就只存在原子、电子的位移极化。水是极化分子，油、气勘探的主要目的之一是区分水和油。因此，各个国家和各个公司研制的介电测井仪器的工作频率都是在 20M~1GHz 这个频段，以研究水分子的转向极化为主要对象，关心的也是这段范围内岩石介电常数的频散现象。

岩石饱含淡水或饱含稍咸的水时，介电常数没有变化，但是当水的矿化度继续增高时，就会观察到岩石的介电常数稍微增大，这主要是不同相界面上表面电荷积累引起的。

水是极性分子，当温度升高后，分子无规律的运动加剧，阻碍水分子的转向极化，因此介电常数随温度升高而下降，含水孔隙岩石的介电常数也随温度升高而下降。但是，岩石介电常数与温度的关系这方面的实验工作做得甚少。

1.1.2 物理基础

在稳态条件下，电磁波在耗散介质中传播的电场强度 E 满足亥姆霍兹方程，即

$$(\nabla^2 + k^2)E = 0 \quad (1.3)$$

其中，

$$\begin{aligned} k^2 &= \omega^2 \mu \tilde{\epsilon} \\ \tilde{\epsilon} &= \epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中， ω 为电磁波角频率； μ 为介质磁导率； ϵ 为介质介电常数； σ 为介质电导率； $\tilde{\epsilon}$ 称为耗散介质的复介电常数。

令 $\epsilon' = \epsilon$ ， $\epsilon'' = \sigma/\omega$ ，则复介电常数可表示为

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.5)$$

式中，复介电常数实部 ϵ' 表征介质的介电特性；虚部 ϵ'' 表征介质的耗散特性。

k 为电磁波传播的波数。对耗散介质情况， k 也是复数，不妨写为

$$k = \beta - i\alpha \quad (1.6)$$

式中， α 为衰减常数； β 为相位常数。式(1.3)沿 z 方向的平面波解为

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kz)} = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1.7)$$

式中， E_0 为 $z=0$ 处的电场强度。于是，在真空中，因

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \omega (\mu\epsilon_0)^{1/2} \end{cases} \quad (1.8)$$

平面电磁波将以相速度

$$v = (\mu\epsilon_0)^{-1/2} \quad (1.9)$$

(约 3×10^8 m/s)沿 z 方向作无衰减传播。

在介电常数 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 的绝缘介质中

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \omega (\mu \epsilon_r \epsilon_0)^{1/2} \end{cases} \quad (1.10)$$

平面电磁波也将沿 z 方向作无衰减传播, 但相速度为 $v = (\mu \epsilon_r \epsilon_0)^{-1/2}$, 随介质相对介电常数的增加而降低。因此, 对绝缘介质来说, 介质的相对介电常数可以通过测量电磁波在介质中传播的相速度而得到。在实际测量中, 更多的是用测量传播时间来代替对相速度的测量。用 T_{p1} 代表传播时间, 它表示平面电磁波通过 1m 介质所需的时间。

$$T_{p1} = \frac{1}{v} \quad (1.11)$$

对于具有复介电常数 $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$ ($= \epsilon - i\epsilon''$) 的导电介质

$$\begin{cases} \alpha = \omega \sqrt{\mu (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \arctan \frac{-\epsilon''}{\epsilon'}\right) \\ \beta = \omega \sqrt{\mu (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}} \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \arctan \frac{-\epsilon''}{\epsilon'}\right) \end{cases} \quad (1.12)$$

这时, α 为负实数, 意味着平面电磁波在沿 z 方向的传播过程将按指数规律衰减。由于复介电常数的虚部 ϵ'' 与角频率 ω , 电导率 σ 都有关, 因此电磁波传播的相速度具有频散性, 且受介质电导率 σ 的影响。这说明, 介质的导电性不仅会损耗介质中传播的电磁波能量, 同时也在一定程度上改变了电磁波传播的相速度。对于某一固定频率的电磁波, 它在耗散介质(此处指导电介质)中的传播时间 T_{p1} 不是介质介电常数 ϵ 的单一函数, 而是 ϵ 和 σ 的函数。图 1.2 为单频平面电磁波在耗散介质中的传播示意图。

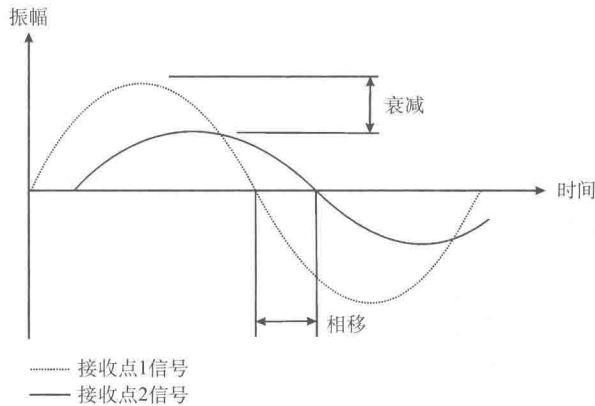


图 1.2 在耗散介质中平面电磁波的传播

一般来说, 测井所遇到的地层都应被认为是耗散介质, 当然就不能忽视因地层电导率的变化给传播时间 T_{p1} 带来的影响。为此对式(1.4)~式(1.6)进行简单的代数运算, 并考虑到 $T_{p1} = \beta/\omega$, 可得关系式为

$$\epsilon' = \frac{T_{p1}^2}{\mu} - \frac{\alpha^2}{\omega^2 \mu} \quad (1.13)$$

$$\varepsilon'' = \frac{2\alpha T_{p1}}{\omega\mu} \quad (1.14)$$

式(1.13)中的传播时间 T_{p1} 是在耗散介质中的实际测量值, 它反映了介质介电常数 ε' 的变化, 也包含介质电导率变化的影响。如果引入无损耗传播时间 T_{p0} , 并定义为

$$\varepsilon' = \frac{T_{p0}^2}{\mu} \quad (1.15)$$

合并式(1.13)和式(1.15), 得

$$T_{p0}^2 = T_{p1}^2 - \frac{\alpha^2}{\omega^2} \quad (1.16)$$

式(1.16)是对传播时间 T_{p0} 的修正公式。 T_{p0} 是 T_{p1} 经过对耗散影响修正后的传播时间。由式(1.15)知道, T_{p0} 与介质电导率无关, 它的取值反映地层介质介电常数的变化。从而可用 T_{p0} 来代替地层介质的介电常数, 并用于评价地层的含水孔隙度, 这就是电磁波传播测井解释中普遍使用的 T_{p0} 法。

对于含水地层, 根据单矿物骨架岩石的体积模型, 用无损耗传播时间计算岩石孔隙度的响应方程为

$$T_{p0} = \phi_{EPT} T_{p0w} + (1 - \phi_{EPT}) T_{pma} \quad (1.17)$$

式中, T_{p0} 为地层的无损耗传播时间; ϕ_{EPT} 为视 EPT 孔隙度; T_{p0w} 为地层水的无损耗传播时间; T_{pma} 为岩石骨架传播时间。

电磁波传播测井工作于微波频段, 其径向探测深度很小。对于渗透性地层, 它的作用范围仅限于冲洗带。于是用 T_{p0} 来指示残余油的存在, 计算冲洗带的含水饱和度 S_{x0} 便成为电磁波传播测井的一个重要用途。其响应方程为

$$T_{p0} = S_{x0} \phi_T T_{pw} + (1 - S_{x0}) \phi_1 T_{ph} + (1 - \phi_1) T_{pma} \quad (1.18)$$

式中, T_{ph} 为油、气的传播时间; T_{pw} 为水的传播时间; T_{pma} 为骨架的传播时间; ϕ_1 为地层总孔隙度, 可由密度-中子交会图求出; S_{x0} 为含水饱和度。

1.2 EPT 的测量原理

由 1.1 节分析知道, 求取地层上损耗传播时间 T_{p0} 的前提是, 测量地层的传播时间 T_{p1} 和衰减系数, 本节就对这些物理量的测量原理和计算方法进行讨论。按照实际测井的习惯, 定义 T_{p1} 为传播时间(ns/m); E_{att} 为能量衰减(dB/m)。

电磁波测井仪通过微波发射天线向地层辐射 1.1GHz 的单频微波能量, 两个不同源距的接收天线(即近接收天线和远接收天线)接收经地层沿井轴方向传来的微波信号。设两个接收天线间的距离为 z , 则通过对两个接收信号的功率电平分析, 可得到衰减 E_{att} ; 通过对两个接收信号的相位分析, 可得到两个接收信号间的相位差 $\varphi(^{\circ})$, 进而求得传播时间为

$$T_{p1} = \frac{2\pi\varphi}{360\omega z} \quad (1.19)$$

图 1.3 是测量原理示意图，图中给出了对远、近接收信号 R_2 和 R_1 进行传播时间 T_{pl} 和能量衰减 E_{att} 测量的示意图。

实际的电磁波传播测井仪上设有两个发射天线和两个接收天线，是按井眼补偿方式工作的双发射双接收天线系统。图 1.3 是 EPT 仪器的示意图。测井时，上、下两个天线交替发射，仪器将分别测出上发射和下发射时微波信号的衰减和传播时间，并取这两次发射测得结果的平均值作为井眼补偿的 E_{att} 和 T_{pl} 的测量值。井眼补偿工作方式可以在一定程度上消除泥饼厚度变化、极板倾斜和仪器不稳定给测量值带来的影响。为了减少井内泥浆的影响，EPT 仪器的天线系统被安装在一块推靠极板上，测井时极板张开保持紧贴井壁。

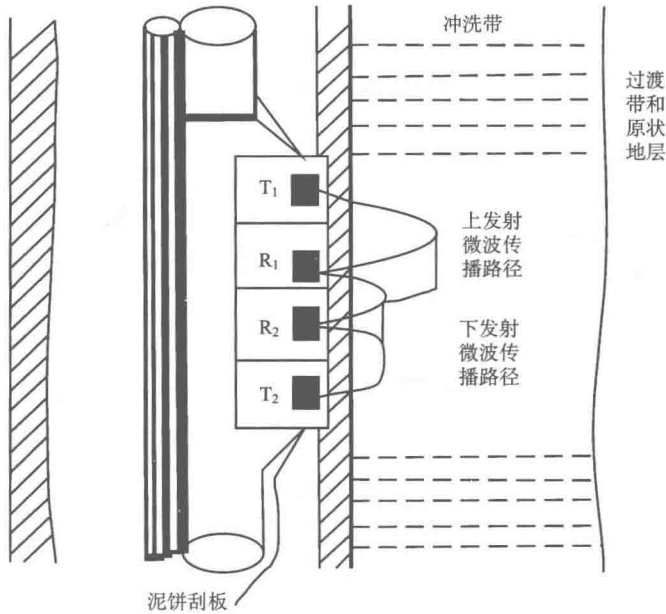


图 1.3 EPT 仪器示意图

1.2.1 衰减测量

定义 $E_{att} = |\alpha|$ ， α 为电磁波的振幅衰减系数。若假设近接收天线源距为 z_1 ，远接收天线源距为 z_2 ，则 $z = z_2 - z_1$ ，由式(1.7)得近远接收天线处电场强度的幅度分别为

$$E_1 = E_0 e^{-\alpha z_1}$$

$$E_2 = E_0 e^{-\alpha z_2}$$

经简单运算得

$$E_{att} = |\alpha| = \frac{20 \lg |E_1| - 20 \lg |E_2|}{z} \quad (1.20)$$

在微波信号的强度分析中，经常使用功率电平的概念，若微波信号功率为 P

(mW)，则其功率电平 p (dBm) 的定义为

$$p = 10 \cdot \lg P \quad (1.21)$$

根据式(1.21)的定义，功率为 1mW 的微波信号的功率电平为 0dBm，信号功率每增加(或减小)十倍，其功率电平值将增加(或减小)10dBm。用功率电平表示微波信号的强度，把微波信号的振幅与幅度增益(或衰减)有机地结合起来了。例如，功率电平为 p_1 的信号通过某个系统后，其输出信号的功率电平为 p_2 ，那么， $p_2 - p_1$ 的值就是该传递系统的增益，单位为 dB。

对于 EPT 仪器，若设近接收信号的功率电平为 p_{1n} ，远接收信号的功率电平为 p_{1f} ， p_2 为某个固定信号的功率电平，则

$$E_{\text{att}} = \frac{p_{1n} - p_{1f}}{z} = \frac{(p_{1n} - p_2) - (p_{1f} - p_2)}{z} = \frac{NV - FV}{z} \quad (1.22)$$

式中， NV 和 FV 分别为将近接收信号和远接收信号降至功率电平为 p_2 信号的衰减量。

在实际仪器中，系统可提供相当于地层衰减 E_{att} 等于某个刻度值 k_1 的近、远天线的参考接收信号，其功率电平分别为 p_{1nr} 和 p_{1fr} 。令 $NVR = p_{1nr} - p_2$ ， $FVR = p_{1fr} - p_2$ ，有

$$E_{\text{att}} = k_1 = \frac{NVR - FVR}{z} \quad (1.23)$$

联合式(1.22)、式(1.23)得

$$E_{\text{att}} = k_1 \frac{NV - FV}{NVR - FVR} \quad (1.24)$$

式中， k_1 为 E_{att} 的刻度值。式(1.24)是仪器按单发射双接收方式工作时的衰减计算公式。对于井眼补偿测量方式， E_{att} 应取上、下发射时测得的衰减的平均值。因此

$$E_{\text{att}} = k_1 \frac{\frac{NVU + NVD}{2} - \frac{FVU + FVD}{2}}{NVR - FVR} \quad (1.25)$$

式中， NVU 、 NVD 分别是上、下发射时近接收信号的功率电平降至 p_2 的衰减量； FVU 、 FVD 分别为上、下发射时远接收信号的功率电平降至 p_2 的衰减量。

由式(1.24)、式(1.25)，对地层衰减 E_{att} 进行测量的关键在于如何把一个功率电平为 p_1 的射频信号衰减为功率电平等于 p_2 的信号，并测出其衰减量 NV (或 FV 、 NVR 、 FVR)。这个测量过程可以由图 1.4 的自动增益控制电路来完成。

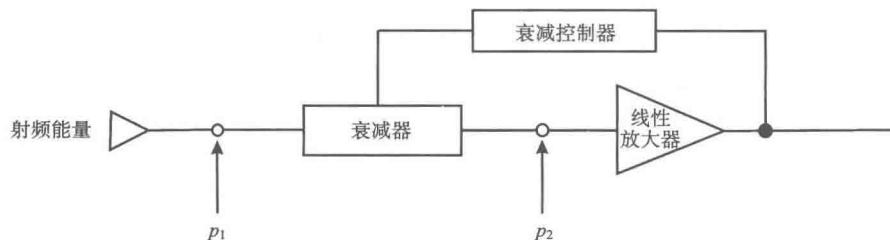


图 1.4 衰减测量原理电路图

电路由衰减器、线性放大器和衰减控制器组成。线性放大器的阈值功率电平为 p_2 ，并使 p_2 的值保持恒定，且小于输入信号的功率电平 p_1 。在衰减控制器的作用下，衰减器的衰减量（即对输入信号衰减的分贝数）与放大器的输出电平成正比。电路工作时，功率电平为 p_1 的输入信号经衰减器衰减后与功率电平 p_2 的阈值信号进行比较，比较差值经放大器放大并通过衰减控制器对衰减器的衰减量进行调节，这个调节过程将在极短时间内自动完成，调节结果使衰减器输出信号的功率电平值逼近 p_2 ，此时，调节过程结束，电路达到平衡。电路平衡意味着衰减器衰减量恰好等于使功率电平为 p_1 的信号衰减到功率电平为 p_2 的衰减量，而这时放大器的输出电平就是该衰减量的指示电平。

目前，EPT 衰减测量的绝对误差可以做到小于 $1\sim 2\text{dB}$ 。

1.2.2 传播时间的测量

如果 EPT 的设计能够保证远、近接收天线上接收信号的相移不超过 360° ，则可通过检测这两个接收射频信号的相位差来求取传播时间。对单发双收天线系统，若两接收天线间的距离为 z ，接收信号的相位差为 $PS(^\circ)$ ，则传播时间 T_{p1} 为

$$T_{p1} = K_2 \cdot PS \quad (1.26)$$

式中， $K_2 = \frac{10^9}{360fz}$ ， f 为射频信号频率，GHz。

对双发双收天线系统，传播时间取上、下两次发射测量的传播时间的平均值，即

$$T_{p1} = K_2 \cdot \frac{PS_U + PS_D}{2} \quad (1.27)$$

式中， PS_D 为下发射时测得的相位差； PS_U 为上发射时测得的相位差。

在 EPT 中，远、近接收信号的相位差 PS 是通过对两接收信号同相位点之间的时间差的测量间接得到的。可是，对于 1.1GHz 的射频信号，当相位差为 360° 时所对应的时间差还不到 1ns，因此直接对 1.1GHz 的射频接收信号进行相位差测量是很难保证测量精度的，对射频信号进行外差降频，然后在低频情况下进行相位差测量是提高测量精度的有效方法。

降频测量相位差的原理是：对于两个相位差为 θ ，频率都为 f_1 的高频信号：

$$\begin{aligned} a(t) &= A \cos(2\pi f_1 t) \\ b(t) &= B \cos(2\pi f_1 t + \theta) \end{aligned} \quad (1.28)$$

让它们分别与频率 f_2 ($f_2 \neq f_1$) 的信号 $C \cos(2\pi f_2 t)$ 进行外差，所得差频信号分别为

$$\begin{aligned} a'(t) &= \frac{AC}{2} \cos[(2\pi(f_2 - f_1)t)] \\ b'(t) &= \frac{BC}{2} \cos[(2\pi(f_2 - f_1)t) + \theta] \end{aligned} \quad (1.29)$$

如果 f_2 比较接近 f_1 ，则外差的结果使高频信号 $a(t)$ 和 $b(t)$ 变换成了相应的低频

信号 $a'(t)$ 和 $b'(t)$, 并且 $a'(t)$ 和 $b'(t)$ 之间的相位差 θ 与原高频信号 $a(t)$ 和 $b(t)$ 间的相位差保持不变。

EPT 仪器在进行相位差测量时, 把 1.1GHz 信号通过外差方法降至 4kHz 的低频信号, 这样 360° 相位差所对应的等相位时间差为 25×10^4 ns, 与 1.1GHz 射频信号相比, 相当于把相位差所对应的时间差放大了数十万倍, 保证了相位测量的精确度。

1.2.3 无损耗传播时间的计算

根据式(1.16), 平面电磁波在耗散介质中的无损耗传播时间的计算公式为

$$T_{p0} = \sqrt{T_{pl}^2 - \frac{E_{att}^2}{4\pi^2 f^2}} \quad (1.30)$$

但是 EPT 测井仪的发射天线不可能以平面波的形式向地层辐射微波, 这种非平面波在介质中传播时其能量会随传播距离的增加而发生几何扩散, 因此实际测量到的电磁波衰减 E_{att} 是由几何扩散衰减和介质损耗衰减共同作用的结果。在使用式(1.30)时, 有必要把 E_{att} 值修正为 A_c , A_c 应等于 E_{att} 扣除掉因几何扩散引起的衰减量。斯仑贝谢公司通过实验方法确定出该公司生产的 EPT 测井仪的这项修正为 50dB/m, 即

$$A_c = E_{att} - 50 \quad (1.31)$$

把式(1.30)中的 E_{att} 用 A_c 代替, A_c 的单位仍为 dB/m, 取传播时间的单位为 ns, 并考虑到微波频率 $f = 1.1\text{GHz}$, 无损耗传播时间 T_{p0} 的计算公式为

$$T_{p0} = \sqrt{T_{pl}^2 - \frac{A_c^2}{3604}} \quad (1.32)$$

式中, T_{pl} 为传播时间测量值, ns; A_c 为经几何扩散修正后的衰减测量值, dB/m。

1.3 EPT 仪器原理

电磁波传播测井仪由天线系统、微波电路、降频电路、测量电路、控制电路、测接口和供电电源等部分组成, 仪器各组成部分的连接及信号的流通过图 1.5。图中 T_1 、 T_2 为上、下发射天线, R_1 、 R_2 为两个接收天线, 自上至下按 T_1 、 R_1 、 R_2 、 T_2 的顺序将四个天线安装在一块推靠极板上, 构成 EPT 仪器的天线系统; 微波电路在控制信号的作用下按一定的频率交替地向发射天线 T_1 和 T_2 提供射频(1.1GHz)激励信号, 并接收来自接收天线 R_1 和 R_2 上的微波探测信号。

微波电路将完成对接收信号的衰减测量及输出衰减测量电平信号(即 AGC 电平信号), 同时将 1.1GHz 的接收信号变换为 100MHz 的中频测量信号送至降频电路。此外, 微波电路还向降频电路提供 100MHz 的中频参考信号; 降频电路包含两级外差式降频电路, 它把来自微波电路的 100MHz 的中频测量信号依次降至 500kHz、4kHz, 降频电路将经过频率变换, 已降至 4kHz 的低频测量信号送相位测量电路进行相位差测