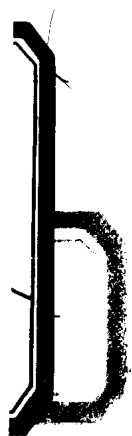


〔苏〕Д. С. 达耶夫 著



高频电磁测井方法

石油工业出版社

高频电磁测井方法

〔苏〕Д.С.达耶夫 著

耿秀文 赵耀五 卢达 译

沈志成 校

石油工业出版社, 25996

内 容 提 要

本书是根据莫斯科《大地》出版社1974年出版的《高频电磁测井方法》一书翻译的。

书中分析了测量岩石介电常数和电导率方法的物理原理、理论、仪器及解释方法，给出高频($10^5 \sim 10^7$ 赫兹)条件下岩石电学性质的特征，举出了主要用于油井的介电测井实例。

本书在波动理论的基础上，对高频电磁测井中所发生的各种现象的物理本质进行了清晰的阐述，特别注意了对这些方法探测深度的研究。

本书可供地球物理工作者、地质工作者和地球物理专业高年级学生使用。

Д. С. ДАЕВ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

МОСКВА 1974

*

高频电磁测井方法

〔苏〕Д.С.达耶夫 著

耿秀文 赵耀五 卢达 译

沈志成 校

*

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 1/32开本 7印张 155千字 印1—1,800

1981年5月北京第1版 1981年5月北京第1次印刷

书号：15037·2293 定价：0.74元

目 录

概论	1
第一章 高频电磁场中岩石的电学性质	5
电介质理论概述	5
矿物的介电常数	7
岩石的介电常数	9
岩石的电阻率和介电常数与场的频率的关系	13
第二章 高频测井方法的基础	23
一、高频场幅度和相位特性与介质电性的关系	23
基本定理	23
均匀介质中的双线圈系	28
均匀介质中的三线圈系	38
均匀介质中的螺线管探头线圈系	45
二、用高频和分离的线圈测量井下岩石介电常数 和电阻率的方法	47
高频测井中现象的波动解释	48
基于测量场的相对特性的高频测井方法	55
基于测量场的幅度的高频测井方法	62
第三章 高频测井的理论计算	67
圆柱界面介质中双线圈系的高频测井近似理论	69
圆柱层状介质 (n 层介质) 中垂直磁偶极子的场	80
圆柱层状介质中场的数值计算方法	86
存在有限厚地层时的垂直磁偶极子场	91
第四章 井眼和侵入带对高频测井结果的影响	96
有井眼条件下的双线圈系	96
有井眼条件下的三线圈系	104

在泥浆滤液侵入地层条件下多层介质模型的基础	112
有侵入带和井眼时的双线圈系	118
有侵入带和井眼时的三线圈系	123
高频测井的探测深度	128
第五章 层厚对高频测井结果的影响	138
存在有限厚地层时的双线圈系	138
存在有限厚地层时的三线圈系	142
考虑到井眼影响时的有限厚地层中的场	156
第六章 高频测井仪器	161
仪器和线圈系的基本参数	161
波动介电测井仪器	168
介电感应测井仪器	175
仪器结构件对其特性影响的检验	178
第七章 高频测井资料的解释及其应用实例	180
波动介电测井曲线的解释	180
波动电导率测井曲线的解释	187
波动介电测井资料的综合地质解释	192
高频测井的应用条件及范围	211
参考文献	213
附录：单位、符号和缩写词	218

概 论

提高钻井地球物理的地质效果与新的测井方法的创造密切相关。岩石的介电常数(ϵ)属于到目前为止测井中尚未利用的参数。很明显,测量这个参量是合理的。岩石介电常数与其中饱和流体的种类、数量密切相关。由于水的介电常数等于80个相对单位,而石油的等于2.5个相对单位,所以含水与含油岩石的介电常数有显著的差异。在低矿化度水的情况下,含油和含水岩石不能用电阻率来区分时,仍能保持着介电常数的这种差异。介电常数的测量在其它情况下同样有意义,包括水文地质和工程地质井的测井。

岩石介电常数仅在频率等于几十兆赫时才对电磁场有明显影响,所以研究该参数应采用高频测量方法。

同样,可以应用高频电磁场来研究井内岩石的电导率。(此时,应用频率是兆赫级的)。这里有可能创造出比已知电导率测井具有某些优越性的测量方法。

建立井内测量岩石介电常数方法的最初尝试属于马尔井申^[88,89]。他建议用两种方法测量 ϵ 值。第一种方法是将一个有圆筒状极板的开放式电容器下至井内,可以把此电容器看作是电偶极天线。天线-电容器的复合阻抗取决于周围岩石的介电常数和电导率。方法的第二方案及相应的装置是用线圈感应激发场。测量线圈的阻抗就能够描述周围介质的介电常数和电导率特征。1959年布赫盖依给出了基于测量线圈阻抗方法的理论基础^[84]。

在苏联，有关介电测井的研究工作是B. H. 达赫诺夫开始的。Г. Я. 切尔涅克和C. M. 阿克谢利劳德在这方面做了进一步的工作^[5,2,80]。他们的方法同马尔井申的电容法在许多方面是一样的。下入井内的装置的基本单元仍然是带有筒状极板的电容器，构成振荡回路的一部分。切尔涅克与阿克谢利劳德的方法与仪器的特点是测量振荡回路的电流频率与电压两个参数。原理上它能够确定周围介质的介电常数与损耗角正切，但是到目前为止介电测井的电容方案没有得到推广。这是由于该方法的理论基础研究不够以及它的探测深度小。所以在完善电容法的同时应继续探寻其他介电测井方案。

1963~1964年，在苏联科学院西伯利亚分院作者和A. A. 卡乌夫曼开始建立测量 ϵ 新方法的工作，该方法的原理是在井内激发高频电磁场并在距发射源一定距离处测量次生场的幅度。尔后，该方法被称为介电感应测井。由于接收点离开振荡源有一定距离，所以该方法的探测深度比测量电容或线圈的阻抗时大。电场强度矢量与不同电学性质介质间的界面不互交，利用这种结构比较简单的场是该方法的一个重要特点。

1966年，作者提出一种高频测井方法，其原理是测量离开发射线圈一定距离的两个接收线圈间的电磁场相位差^[29]。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。为了奠定方法的基础和解释所发生的现象的物理本质，利用了电磁波的概念，电磁波从场源发射出来，在传播的路径上经受了相位移和衰减，相位移和衰减的大小取决于介质的参数。稍后，居依和列伟在法国获得了类似方法的专利，此法在几百千赫到几兆赫的频率下测量井内岩石的电导

率^[86]。测量相位差的同时还考虑了测量分开的接收线圈中激发信号的幅度比。1967年，И. М. 扎斯劳诺夫独立地提出了利用幅度比的方法来研究岩石电导率的方案^[43]。

近几年来，一系列科研、设计和生产单位（莫斯科地质勘探学院、苏联科学院西伯利亚分院地质与地球物理研究所、西伯利亚地质地球物理和矿物资源研究所、中央地球物理考察队、石油工业部鞅鞅石油地球物理托拉斯和秋明石油地球物理托拉斯、基辅地球物理仪器制造特别设计局等）在高频测井领域完成了大量的工作。完成了理论研究，制造了试验样机，在井内进行了顺利的试验工作，高频测井开始应用于生产^[31, 34, 15, 65, 44]及其他。因此，电测井中形成了新方向——利用几百千赫到几十兆赫的频率和线圈分开的下井仪来测量井内岩石介电常数和电导率的一组测量方法。测量是在振荡源的波动区或中间区进行的。这点决定了测量方法的特点和解释出现各种现象的物理本质的特点。

在均匀介质、存在井眼及有限厚地层的条件下，理论研究工作取得了足够全面的资料来描述高频电磁场的特性。这些工作允许就最佳工作频率、线圈系尺寸与类型、要测量的高频场特性等做出有根据的结论。

研究过井眼对观测结果的影响及消除它的方法原理。确定了消除井眼影响的最有效的方法是测量场的相对特性，如相位差或幅度比。测量这些相对特性直到几十兆赫时都能消除井眼的影响。

用波动理论来解释高频测井中各种现象的物理基础有很重要的意义。例如，它说清了高频测井的探测深度及影响探测深度的各种因素这样重要的问题，证实了即使频率为40~60兆赫、线圈系长度为1米时探测深度有0.3~0.4米。这使

介电测井有可能解决油矿地质的实际问题，首先是测定地层的饱和特性。至于使用 1 兆赫频率来研究岩石电导率的高频测井，其探测深度不亚于感应测井。

研制的高频测井仪主要适用于油井条件。自然主要的测井工作量是在油田完成的（罗马什金等），但这并不意味着高频测井在工程地质、水文地质测井中前途有限，相反，在这些井中进行的最新测井工作表明，高频方法在详细划分剖面、确定含水井段、确定岩性方面很有效。

还没有在煤井、矿井应用高频测井的经验。但是，总的看来很明显，在这些井中用高频测量到的钻井地球物理参数——介电常数和电导率是十分有意义的。

第一章 高频电磁场中岩石的电学性质

电阻率 ρ ，介电常数 ϵ ，导磁率 μ 表征着岩石的电磁性质。沉积岩的实际导磁率与真空条件下的导磁率没有差异，因此下面不作讨论。影响岩石电阻率的因素已作过很好的研究，并在一系列电法勘探和钻井地球物理手册中作了详尽的分析。相反，岩石介电常数只在不多的著作中^[36,55,66]有较全面的说明。所以下面先对岩石介电常数做基本介绍，然后再讨论高频场中的电阻率和介电常数。

在转入叙述矿物和岩石的介电性质之前，先介绍一下物质极化理论的个别定理。

电介质理论概述

在电场的作用下，极化介质中由于电子、原子和离子的位移产生了原有偶极分子或新组成的偶极分子的定向排列。这导致了附加次生场的出现，并同原始场相叠加。用极化矢量 $\overline{P}$ 对极化作定量描述，它可以用单位体积的偶极矩来确定^[10]。电场中，极化一般都与极化场成比例：

$$\overline{P} = \alpha \overline{E} \quad (1.1)$$

式中： α ——介质的极化率；

$\overline{E}$ ——电场强度。

能在电场中极化的物质叫作电介质。这一名词的应用经

常有更狭义的概念，它指不具有任何明显导电性的物质或物体。一般情况下，所有的物质都具有一定的导电能力和极化能力，也就是说既是导体又是电介质。

物质的介电性质，或说极化能力一般用介电常数来描述：

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\alpha \quad (1.2)$$

如果真空的介电常数用 ε_0 来表示，那么

$$\varepsilon = \varepsilon^* \cdot \varepsilon_0 \quad (1.3)$$

式中： ε^* ——相对介电常数，它指出给定介质的介电常数比真空的介电常数大多少倍。

极化分几种形式：电子极化，离子极化，原子极化，转向极化（松弛极化），体积极化等。所有极化形式可以合成三大组：1）位移极化；2）转向极化（松弛极化，偶极子极化）；3）结构极化（体积极化）。

第一组中的各种极化（电子、离子、原子极化）的共同特征是在外电场作用下弹性连结的电荷的位移。这一作用的结果使物质体积中原来中性的单元具有了偶极矩。电子位移极化与电子相对于原子核的弹性位移有关。由这种类型极化所造成的介质的介电常数一般都不大。位移时间约 10^{-15} 秒，所以电子位移极化在所有频段（直到光频）与频率无关。在固体、液体和气态物质中都能观察到这种极化。

离子位移极化是弹性拉力所连结的正负离子间的相对位移。这种类型的极化出现在有离子晶架的固体中。由这种离子位移产生的介电常数一般有4~15个相对单位。个别的结晶体，如钛酸钡的介电常数能达到很大的数值（300相对单位）。离子位移时间为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 秒。

原子极化出现在价晶体物质中，其分子中的原子通过价电子的交互作用来连结。在这种极化类型中产生了价电子相

对于原子核的弹性位移。有这种极化的电介质的介电常数可达到15个相对单位。像前两种类型一样，原子极化是很快的。

转向极化与电介质中具有极性分子有关。它是水和其他极性液体的特征极化，在这些液体极化时产生的偶极子按外电场方向转向。转向极化在数值上显著高于位移极化。例如，温度为20℃的水的介电常数等于80个相对单位。由于热运动阻碍分子的转向，转向极化与温度有关，它随温度的升高而减小。离子极化是转向极化的一种特殊类型，极化时作热运动的离子作重新排列。在离子连结较弱的晶体中能观察到这种极化。

主要在于非均匀物质，如多相岩石中可观察到结构极化。结构极化的出现是由于累积在相界面上的离子运动的结果。与其他极化不同，这种类型极化是缓慢的，它比其他极化要求更长的形成时间。在射频段实际上观察不到结构极化。相反，在频率等于几十、几百赫时，它能够起主要作用。

矿物的介电常数

矿物的介电常数在相当宽的范围内变化。水的特点是 ϵ 数值高，它具有明显的转向极化，某些钛、锰化合物，如金红石也具有高 ϵ 值（达170相对单位）。但是绝大多数矿物具有电子和离子位移极化，它们的介电常数较低，约为4~12个相对单位。主要造岩矿物的 ϵ 是4~7个相对单位。

正如 B. H. 尤布兰诺娃所指出^[55]，矿物的介电常数与其密度有关。如果认为物质极化随着单位体积中极化粒子数量的增加而升高，那么这种关系完全是规律的。表1中列出了许多矿物的介电常数资料。应该指出，不同作者给出的数字有时相差很大，这是因为实验室条件下测定样品的 ϵ 很

表 1

矿 物	ϵ (相对单位)	矿 物	ϵ (相对单位)
石 英	4.0~5.0	硬石膏	5.7~6.3
钾长石	4.5~6.0	岩 盐	5.6~6.4
白云母	6.2~8.0	钾 盐	4.7~4.8
黑云母	4.8~6.0	褐铁矿	10.0~11.0
滑 石	4.5~6.0	磷灰矿	7.4~10.5
方解石	7.5~8.0	方铅矿	18.0
白云石	6.8~10.0	闪锌矿	7.8~8.3
菱铁矿	7.0~7.5	金红石	90.0~170.0
石 膏	4.2	石 油	2.0~3.0

困难，例如样品的湿度对测量结果有很大影响，测量结果与测量方法有关，等等。

矿物介电常数在一定程度上与温度有关。这种关系对水表现得特别明显，这很好理解，因为随着温度的升高热运动越来越阻碍偶极分子按电场方向的转向。

水的介电常数随温度的变化示于表 2。

表 2

t, °C	0	20	40	60	80	100
ϵ (相对单位)	88	80	73	67	61	55

水的介电常数受溶解其中的盐的矿化度的影响很弱。在双电解质的简单情况下这种关系有如下公式

$$\epsilon_F^* = \epsilon_B^* + 3.79 \sqrt{\kappa} \quad (1.4)$$

式中： ϵ_F^* ——溶液的相对介电常数；

ϵ_B^* ——纯水的相对介电常数；

κ ——溶液浓度，克分子/升。

根据公式 (1.4)，NaCl水溶液的浓度等于1克分子/升，也就是等于57克/升时，同蒸馏水相比介电常数只增加5%。

值得指出，温度为 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的冰有很高的 ϵ 值 (79 个相对单位)。

岩石的介电常数

岩石一般是各种不同成分组成的复杂体系。它的介电常数与构成岩石的固体、液体、气体的成分和相对百分比有关。电磁场的频率和温度也影响 ϵ 的大小。像上面指出的那样，主要造岩矿物的介电常数等于 $4\sim 8$ 个相对单位，而水等于80个相对单位，所以具有较大孔隙度的岩石（经常是沉积岩）的介电常数主要取决于它的含水量。这种岩石骨架的矿物成分对 ϵ 值的影响比对低孔隙度岩石的影响小。含有较多泥质的岩石除外，它们的介电常数与泥质含量有明显的关系。很多火成岩的孔隙度常常只有千分之几， ϵ 主要取决于造岩矿物的 ϵ ，一般变化范围为 $6\sim 12$ 个相对单位。当饱和岩石的流体是石油时 ($\epsilon^*=2.5$)，其介电常数同样不大，为 $6\sim 8$ 个相对单位。

我们详细分析一下岩石中含水量与介电常数的关系。这里主要依据Г. Я. 切尔涅克^[80]和С. М. 阿克谢利劳德^[7]的研究结果。

在室内试验中，切尔涅克研究了饱含淡水砂子的孔隙度和介电常数间的关系。可以认为这种情况下的孔隙度等于砂子的体积含水量。测量是在特殊电容器上进行的，频率为12兆赫。图1表示了不同孔隙度样品 ϵ 的测量结果。图中可见， ϵ 与孔隙度 K_v 间有线性关系。应当指出，试验资料同计算的 ϵ

值符合得较好。计算是根据欧杰列夫斯基建议的公式完成的^[62]，公式适用于各组分电性参数有明显差别的混合物。建立公式时假定岩石是“统计”混合物，颗粒和孔隙度的分布是杂乱无章的。双相混合物的公式是

$$\epsilon_c^* = B + \sqrt{B^2 + (\epsilon_1^* \epsilon_2^* / 2)} \quad (1.5)$$

式中： $B = [(3\theta_1 - 1)\epsilon_1^* + (3\theta_2 - 1)\epsilon_2^*] / 4$

ϵ_c^* ——混合物的相对介电常数；

ϵ_1^* 和 ϵ_2^* ——组分的介电常数；

θ_1 和 θ_2 ——组分的体积百分数。

欧杰列夫斯基公式没有考虑电解质同岩石骨架间互相作用产生的效应，包括双电层对 ϵ 值的影响。但是实验与计算资料较好的符合，说明高频下，至少在低矿化度的情况下这种效应的作用很小。

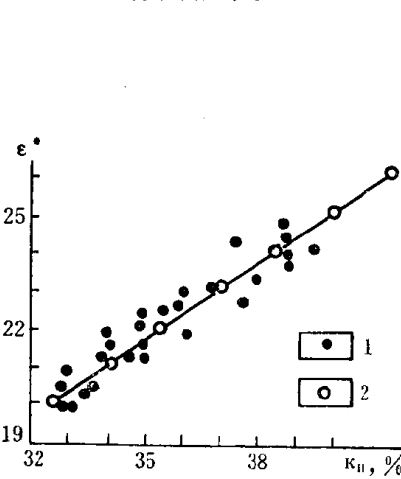


图 1 含水石英砂的介电常数与孔隙度的关系曲线

1—实验点；
2—根据欧杰列夫斯基公式
(1.5) 计算的点

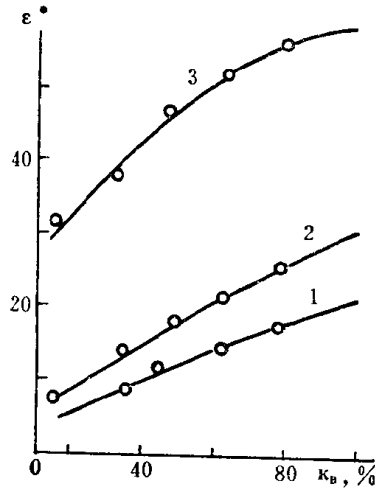


图 2 岩样介电常数与含水饱和度的关系曲线

($\rho_B = 18$ 欧姆米, $K_n = 37.5\%$)
1—石英砂；
2—粒状灰岩；
3—泥岩

C. M. 阿克谢利劳德在实验中研究的介电常数与含水饱和度 K_B 之间的关系很有意义。实验用电容谐振法进行, 频率为10兆赫。图2中给出了砂子, 直径为0.5~0.25毫米的粒状灰岩以及泥岩的 ε 测量结果。所有样品的关系特征是一样的——观察到介电常数随 K_B 的增加而增大。但是 ε 值因骨架物质的不同而有很大的变化。泥岩的 ε 值很高, 竟达到50~60个相对单位, 对此应引起注意。其他研究人员也指出过这种情况。泥岩的高介电常数可用泥岩中含有大量的弱束缚水来解释。

前面指出过, 水的介电常数与其矿化度的关系较差。与此相应, 岩石孔隙中所含水的矿化度同样不应对其介电常数有很大影响。实际上与水不同, 岩石是一个多相系统, 如在固相和液相界面处形成双电层等表面现象可以对介电常数起一定的作用。C. M. 阿克谢利劳德用石英砂样品 ($K_n = 37\%$) 作的实验中, 当饱和溶液的电阻率 ρ_p 由18降到2欧姆米时, ε 值由20~22变化到18~30相对单位。这时, 岩石电阻率变化了9倍, 即与溶液电阻率 ρ_p 成比例的变化。用四氯化碳对岩样进行处理之后, ε 值与溶液电阻率的关系几乎消失了。这可以使我们用固相和液相界面处双电层的影响来解释观察到的现象。在此期间, Г. Я. 切尔涅克指出, 溶液中NaCl含量由0.1变至2克/升 ($\rho_p = 50$ 到3欧姆米) 时, 岩样的介电常数几乎没有变化。

看来, 可以认为水的矿化度对岩石介电常数的影响较小。这种影响的特征是: 水的矿化度增大导致岩石介电常数 ε 有某些增加。

岩石介电常数 ε 与温度关系的问题是很有意义的。已经指出过, 对孔隙性岩石、偶极子转向类型的极化起主要作

用，此时岩石中的水的极性分子按外电场定向。可以预料，由于温度升高带来水分子热运动的增加，岩石的介电常数将下降。十分遗憾，岩石介电常数 ϵ 与温度关系的研究工作做得太少。Г. Я. 切尔涅克在实验中^[80]研究了岩样 ϵ 值随温度的变化过程，岩样是由洗过的小颗粒石英砂作成，孔隙度为33%，工作频率12兆赫。岩样分别用蒸馏水、0.1 标准浓度的NaCl水溶液和石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 饱和水溶液饱和。得到的资料指出，饱和矿化水的岩样的介电常数 ϵ 与温度有明显的关系，但饱和蒸馏水的岩样却没有这种关系。这种现象的原因尚不清楚。

在致密或低含水岩样实验中得到了不同的介电常数与温度的关系。原则上，致密岩石的介电常数是由各种位移极化所决定的，由于温度升高，原子、电子和离子间的弹性连结减弱，可以预料到 ϵ 增大。像切尔涅克的资料指出的那样，从20℃起，随温度的升高 ϵ 有规律的增大。同期，在 A. T. 班达连柯的实验中，工作频率为5兆赫，仅在温度为 300~400℃时才开始出现温度对 ϵ 的影响^[16]。根据 T. Л. 切利捷的

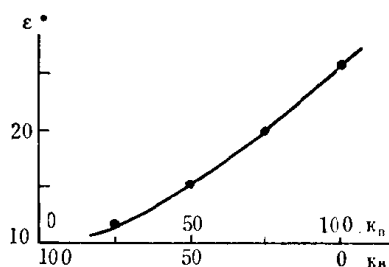


图 3 砂岩样品介电常数随含水、含油饱和度的变化曲线 ($K_n = 25\%$)

实验结果，电场频率对温度关系影响极大^[79]。

在说明岩石介电常数 ϵ 与温度关系研究的一般情况时应该指出，实验工作还较少、对观察到的关系缺少满意的物理解释、不同作者的互相矛盾的资料说明测量方法的不完善等