

网络分析仪法测量稠油介电常数

魏爱军 金友煌 王颖
(西安石油学院 邮编 710065)

[摘要] 本文阐述了用网络分析仪在X波段8~11.5GHz的6个频率点上,对大港、胜利、辽河油田稠油的介电常数进行测量,并对测量结果进行误差源分析。测量结果可以为微波采油工艺中的井下辐射器的设计及微波能利用率的估算提供理论依据。

[关键词] 稠油,介电常数,X波段,网络分析仪

Heavy oil's dielectric permittivity measurement by network analyzer

Wei Aijun Jin Youhuang Wang Ying
(Xi'an Petroleum Institute P.C 710065)

Abstract: The authors described that heavy oil's dielectric permittivity measured by network analyzer. Those heavy oil come from Dagang, Shengli and Liaohe oilfield respectively. their dielectric permittivity were measured at six frequency points in the frequency region from 8GHz to 11.5 GHz in X-band. And measurement error's sources was analysed simply. Results of measurement can provide theoretical foundation for evaluation of microwave power efficient and the design of microwave radiator on extracting heavy oil downhole.

Key words: heavy oil, dielectric permittivity, x-band, network analyzer

概 述

微波开采稠油主要是将微波能辐射到储层中去,将微波能转变成热能,储层温度升高,稠油粘度降低,从而流入井筒被开采出来。因此,测量储层中稠油的介电常数在微波开采稠油中至关重要,尤其是在微波采油过程中,天线浸泡在稠油中,稠油的复介电常数对于天线技术参数的设计必不可少。

因此,稠油介电常数的测量,对于微波采油现场推广,井下辐射天线设计,储层中微波穿透深度研究,微波能的利用率等提供了必要的理论依据。

一、介电常数测量的基本原理

1. 介电常数的基本概念

一种给定的均匀材料,介电特性一般的描述方法是用介电常数表示,

实际应用中，又常用相对介电常数 ϵ_r 表示。即

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

其中 ϵ' —— 相对介电常数，表示储能能力；

ϵ'' —— 损耗因子，表示介质损耗。

通常，上式又可表示为

$$\epsilon_r = \epsilon' (1 - j \tan \delta) \quad (2)$$

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3)$$

$\tan \delta$ 称为损耗角正切，它表征了每周期内介质损耗与储能的比值。

2. 介质样品 ϵ_r 的测量原理

把介质样品放入波导管内，如下图 1 所示。可把试样看作是一个双端口等效网络，介质试样的两个端面分别为 T_{11} 和 T_{22} 。

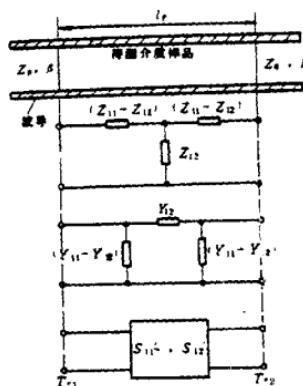


图 1 介质样品双端口等效网络

图 1 表示将波导中介质样品分别等效为阻抗网络、导纳网络和散射网络。由于试样是对称的，这三种表示法也是对称的，导纳表示法的行列式的

值 $y_r = \det[Y]$ 只与介电常数有关，它与 Z 参数和 S 参数的关系可由下式表示为

$$y_r = Y_{11}^2 - Y_{12}^2 = \frac{1}{Z_{11}^2 - Z_{12}^2} \\ = \frac{(1 - S_{11})^2 - S_{12}^2}{(1 + S_{11})^2 + S_{12}^2} \quad (4)$$

y_r 一般是复数，它可表示为

$$y_r = G_r + jB_r \quad (5)$$

又因为 y_r 同填充介质波导的特性阻抗 Z_r 和特性导纳 Y_r 的关系为

$$y_r = \left[\frac{Y_r}{Y_0} \right]^2 = \left[\frac{Z_0}{Z_r} \right]^2 = \left[\beta_r / \beta_0 \right]^2 \quad (6)$$

式中 Y_0 、 Z_0 和 β 分别是填充空气波导的特性导纳、特性阻抗和传输常数。

假定波导中传输单一主模 TE 模，则空气填充波导的特性阻抗为

$$Z_0 = 120\pi / \sqrt{1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2} \quad (7)$$

此时，介质填充波导的特性阻抗为

$$Z_r = 120\pi / \sqrt{\epsilon_r - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2} \quad (8)$$

$$\text{于是有 } \frac{Z_0}{Z_r} = \sqrt{\epsilon_r - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2} / \sqrt{1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2} \quad (9)$$

$$y_r = \left[\frac{Z_0}{Z_r} \right]^2 = [\epsilon_r - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2] / [1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2] \quad (10)$$

式中 λ_c 为该波导在主模时的截止波长， λ_0 为自由空间波长，因为有

$$\frac{1}{\lambda_c^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} + \frac{1}{\lambda_0^2} \quad (11)$$

以代(11)入(10)可得到

$$\epsilon_r = [y_r + (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2] / [1 + (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2] \quad (12)$$

$$\varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{[Ge + (\frac{\lambda_s}{\lambda_e})^2] + jB_0}{1 + (\frac{\lambda_s}{\lambda_e})^2} \quad (13)$$

在测量时,矩形波导中传输 TE_{10} 模,则 $\lambda_e = 2a$,于是可得到

$$\varepsilon' = \frac{G_0 + (\frac{\lambda_s}{2a})^2}{1 + (\frac{\lambda_s}{2a})^2} \quad (14)$$

$$\varepsilon'' = \frac{-B_0}{1 + (\frac{\lambda_s}{2a})^2} \quad (15)$$

式中 λ_s :空气填充波导的波导波长;
a:波导宽边尺寸。

二、测量系统

依据上述基本原理分析,我们将待测油样填充于一段 BJ—100 型波导中,作为两端口待测元件(DUT)。测试过程中,在网络分析仪测试电缆同

轴波导转换的法兰与待测元件的法兰之间隔一层聚四氟乙烯薄膜。测量系统如图 2 所示。网络分析仪为 HP8720D,待测稠油填充波导 $a \times b = 22.86\text{mm} \times 10.16\text{mm}$,长度 40mm。

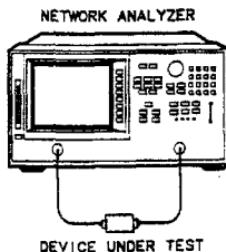


图 2 网络分析仪测量系统

三、测量数据处理

先将大港油田的油样填充一段直波导中,按图 2 测量系统连接,测试其 S 参数如下表 1

表 1 大港稠油油样 S 参数

频率(GHZ)	S ₁₁		S ₁₂		S ₂₁		S ₂₂	
	S ₁₁	ArgS ₁₁	S ₁₂	ArgS ₁₂	S ₂₁	ArgS ₂₁	S ₂₂	ArgS ₂₂
8.00	0.5227	137.35°	0.7943	-132.09	0.7989	-131.52	0.4751	133.77
9.50	0.5423	-178.00	0.8750	130.67	0.8740	130.46	0.4536	-141.23
10.00	0.4382	144.44	0.8640	57.33	0.8640	56.97	0.4594	150.05
10.50	0.1489	106.42	0.9473	16.20	0.9495	15.75	0.1597	99.98
11.00	0.2727	-127.48	0.9354	-31.25	0.9354	-31.49	0.2883	-118.42
11.50	0.4709	-162.36	0.8472	-69.45	0.8463	-69.98	0.4845	-162.82

显然,待测网络为互易对称网络,理论上 $S_{12} = S_{21}$, $S_{11} = S_{22}$ 。从上表的数据看出, S_{12} 和 S_{21} 、 S_{11} 和 S_{22} 它们的模与幅

角都很接近,于是我们不妨令新的网络 $[S']$

$$\begin{cases} |S'_{11}| = \frac{1}{2}(|S_{11}| + |S_{21}|) \\ \text{Arg } S'_{11} = \frac{1}{2}(\text{Arg } S_{11} + \text{Arg } S_{21}) \\ |S'_{12}| = \frac{1}{2}(|S_{12}| + |S_{22}|) \\ \text{Arg } S'_{12} = \frac{1}{2}(\text{Arg } S_{12} + \text{Arg } S_{22}) \end{cases}$$

用上述方程组对表 1 进行处理，得到不同频率点数射参数 $[S']$ ，将其代入(4)式，通过计算可得到大港油田稠油的介电常数如表 2 所示

表 2 大港油田稠油介电常数

参数 频率(GHZ)	ϵ'	ϵ''
8.00	2.5312	0.4962
9.50	2.2772	0.0177
10.00	2.3801	0.0478
10.50	2.4484	0.6666
11.00	2.5683	0.0469
11.50	2.4667	0.0853

同理我们可测得辽河、胜利油田稠油复介电常数如下表 3、表 4

表 3 辽河稠油介电常数

参数 频率(GHZ)	ϵ'	ϵ''
8.00	4.3641	0.5668
9.50	4.0664	0.7053
10.00	3.7563	1.2516
10.50	3.5481	1.1254
11.00	3.6805	0.6929
11.50	3.8960	0.3702

表 4 胜利油田稠油的介电常数

频率(GHZ)	ϵ'	ϵ''
8.00	2.3036	0.2050
9.50	2.4764	0.1705
10.00	2.2646	0.3079
10.50	2.1746	0.3331
11.00	2.2649	0.2824
11.50	2.4049	0.1882

四、测量的误差源分析

网络分析仪法测介电常数的误差源主要是样品的处置。在本文中，测量介质为流体，在介质样品填充波导两端有聚四氟乙烯薄膜如图 3，所以，我们所测的 S 参数，是聚四氟乙烯—稠油—聚四氟乙烯填充波导的 S 参数，它是三个网络的级联。

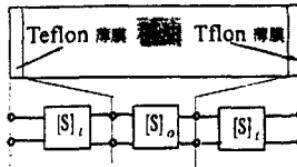


图 3 DUT 的等效网络

$[S]_1$ 、 $[S]_2$ 分别表示聚四氟乙烯薄膜和稠油填充波导部分的等效网络的 S 矩阵，首先第一级 $[S]_1$ 与第二级 $[S]_2$ 级联的散射矩阵为

$$[S]_{12} = \begin{bmatrix} S_{11}^1 + \frac{S_{12}^1 S_{21}^1 S_{11}^1}{1 - S_{22}^1 S_{11}^1} & \frac{S_{12}^1 S_{12}^1}{1 - S_{22}^1 S_{11}^1} \\ \frac{S_{12}^1 S_{12}^1}{1 - S_{22}^1 S_{11}^1} & S_{22}^1 + \frac{S_{21}^1 S_{12}^1 S_{12}^1}{1 - S_{22}^1 S_{11}^1} \end{bmatrix}$$

$[S]_L$, $[S]_M$, $[S]_T$ 的三级联就是 $[S]_M$ 再与 $[S]_T$ 的两级联网络, S 参数如下

$$[S]_{tot} = \begin{bmatrix} S_{11}^M + \frac{S_{12}^M S_{11}^T S_{21}^T}{1 - S_{22}^M S_{11}^T} & \frac{S_{12}^M S_{12}^T}{1 - S_{22}^M S_{11}^T} \\ \frac{S_{21}^M S_{21}^T}{1 - S_{22}^M S_{11}^T} & S_{22}^M + \frac{S_{21}^M S_{22}^T S_{12}^T}{1 - S_{22}^M S_{11}^T} \end{bmatrix}$$

我们测量的网络参数实际就是 $[S]_{tot}$, 即 $[S]_M = [S]_{tot}$, 要得到比较精确的稠油的介电常数, 就必须从 $[S]_M$ 中“分离”出 $[S]_T$, 那么就需要知道 $[S]_T$, 理论上就可以从 $[S]_{tot}$ 中“分离”出 $[S]_T$ 。实际上, 从 $[S]_{tot}$ 与 $[S]_M$ 和 $[S]_T$ 的关系出发“分离” $[S]_T$, 工作量很大。我们在实验中所用薄膜, 厚度仅为 0.1mm, 而且它的介电常数($\epsilon_r = 2.1$)与稠油相差并不是很大, 因而, 稠油与薄膜间的反射并不大。

如果我们令 $[S]_T = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, 则 $[S]_M = [S]_T$ 。

我们对薄膜进行测量, 在 $[S]_T$ 中 $\max(|S_{11}|, |S_{22}|) \leq 0.022$, $\min(|S_{21}|, |S_{12}|) \leq 0.998$ 。

在数据处理中, 用 $[S]_M$ 直接代替 $[S]_T$ 将会给介电常数测量带来误差, 但是以 $[S]_T$ 的取值范围看, 误差是可以容忍的。

其次, 稠油中含有的带电离子以及未能充分脱净的水份, 对稠油介电常数测量值也带来误差, 前者使 ϵ'' 值偏大, 后者主要引起 ϵ' 偏大。

总的说来, 对于像稠油这种中等介电常数、低损耗的介质, 利用填充波

导 S 参数法、测量得到的 ϵ' 值作为工程应用还是比较可靠的。

结束语

通过测量 S 参数, 间接测量介电常数, 这是一个很传统的方法, 但是本文采用网络分析直接测量 S 参数快速准确, 与传统的测量法比较, 减小了测量误差, 提高了测量结果的可靠性, 测量结果有很大实际意义。因为在微波采油中, 天线浸泡在油中, 在频率一定时, 影响天线设计尺寸的因素是 $\sqrt{\epsilon'}$, 而估算微波在储层中的穿透深度, 以及能量的利用率主要与 ϵ'' 有关。我们把测量结果与国外资料对照, 认为是可靠的。

参考文献

- 董树义编著.《近代微波测量技术》1995. 电子工业出版社
- U. Raveendranath, J. Jacob and K. T. Mathew. Complex permittivity measurement of liquids with coaxial cavity resonators using a perturbation technique, Electronics letters 1996. Vol32, No. 11
- C. Wan, B. Nauwelaers, W. De Raedt and M. Van Rossum. Complex permittivity measurement method based on asymmetry of reciprocal two-ports. Electronics Letters 1996. Vol. 32. No. 16
- David V. Blackham, Roger D. Pollard. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. IEEE Trans on instrumentation and measurement 1997 Vol 46. No. 5

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，推出多套微波射频以及天线设计培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>

微波射频测量仪器操作培训课程合集



搞硬件、做射频，不会仪器操作怎么行！对于射频工程师和硬件工程师来说，日常电路设计调试工作中，经常需要使用各种测试仪器量测各种电信号来发现问题、解决问题。因此，熟悉各种测量仪器原理，正确地使用这些测试仪器，是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能，该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟悉掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器；该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装，包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材，能够帮助微波、射频工程师快速地熟悉掌握矢量网络分析仪使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器，因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解，也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解，能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>