

基于同轴谐振腔法的材料电参数测量

薛冰^{1,2} 纪奕才^{1,2}

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 以岩石电参数测量为背景,根据岩石材料的电性特点,对谐振腔法测试电参数进行了比较详细的研究。利用仿真软件设计并改进了常规谐振腔的结构,设计了一种小型化和有效的测量仪器,以方便携带和使用。然后,利用微扰法和建立等效电路模型对谐振腔进行建模,推导出电参数和谐振腔参数直接的关系,再通过拟合的办法得到关系式的参数信息。对模型进行仿真测试,比较了等效电路模型和微扰法的精度,可以看出等效电路模型的测量误差小于5%。最后搭建了测试系统,对一些材料进行测试,得到了满足测试要求的结果,并分析了测量系统的不足以及改进方法。

关键词: 电参数测量;等效电路法;微扰法

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Measurement of electrical parameters of material based on coaxial resonant cavity method

Xue Bing Ji Yicai

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the measurement of electrical parameters of the rock, a detailed study employing resonant cavity method has been carried out by simulation, according to the electrical characteristics of rocks. The performance of the conventional resonator has been improved by designing a miniaturized measure instrument, which is convenient to be carried out and used. Then, the perturbation method along with the equivalent circuit method has been both employed to simulate this resonator. The relationship of electrical parameters and resonant parameters has been deduced. Furthermore, the exact relationship of them has been elicited by the method of fitting. The model has been tested by simulating, and the accuracy between equivalent circuit model and perturbation method has been compared. Measurement error using equivalent circuit model is under 5%. Finally, some materials are measured, and the deficiency and the improving methods are analyzed based on the built measurement system.

Keywords: the measurement of the electrical parameters; equivalent circuit method; perturbation method

1 引言

人类对矿产以及石油资源的应用不断增多,对地下矿产和石油的探测显得尤为重要。探地雷达发射出一定频率的电磁波,对地下传播媒质进行探测;以区分各类岩石和石油资源。然而通过这种方法得到的电参数受到环境的影响,不能反映出真实的岩矿石电参数。为了获得真实的岩矿石电参数,指导电磁波对地下资源的探测,将采集的岩矿石在实验室测量是十分有意义的^[1-5]。测试材料电参数的方法有很多文章探讨^[6-12],其中主要分为电路法和微波测量方法。电路法主要是利用平板电容器在加载介质之后电容量和Q值发生变化,通过公式计算就可以得到相应的复

介电常数。该方法在半导体电路元件不断发展的过程中,依托电路的发展,测试精度在不断提高^[4]。但是这种方法主要是应用在低频测量中,一般需要将岩矿石处理成表面光滑且要保证一定形状才能保证精度要求。微波测量的方法主要分为两类,一类是频域测量方法,利用连续的周期电磁波作为测量的信号源,通过分析电磁波的频域特性来进行测量,其中包括传输反射法^[6-7]、探头法^[8-11]、谐振腔法^[12]、微带线法^[13]等。这类测量方法发展的时间很长,都是基于建立网络参数和电参数之间的关系进行测量的。虽然已经有很成熟的理论和技术,但是随着技术的不断进步,尤其是矢量网络分析仪的发展,科研工作者们又向其中添加了很多新的元素。另一类是时域测量方法,利用脉冲电

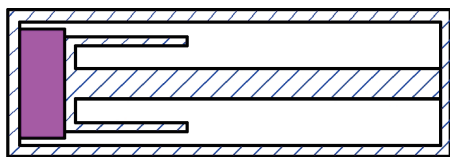
磁波作为探测信号源,研究被测物体的瞬态响应^[14-15]。这种方法利用时域天线发射和接受电磁波,根据时域特性来得到电参数和传输反射系数的关系。

基于发展的需要,本文提出一种低频小型化谐振腔。建立了谐振腔和电参数之间的电路模型,搭建了一种低频谐振腔测试系统,并且实现了利用微扰模型和电路模型对介质的测量。

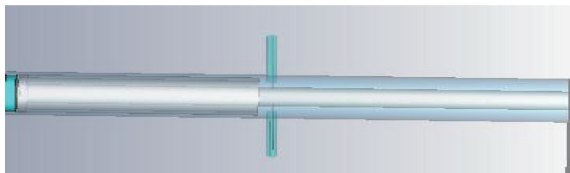
2 建立理论模型

2.1 谐振腔的设计

谐振腔的设计影响着电参数的测试精度,测量的方式,是构成系统中非常重要的部分。由于需要测试的频率较低,所以腔体很长。为了减少腔体的尺寸,本文基于重入式谐振腔,引入具有弯曲内导体的电容加载体于同轴谐振腔。枝节的引入可以充分增加谐振腔的电容,降低谐振频率,以减少谐振腔的长度。影响该谐振腔的谐振频率的主要因素是弯曲内导体的长度和谐振腔的谐振部分的长度^[12]。为了建立 150 MHz 左右的小型化测试系统,所以设计的曲折枝节长度为 100 mm,腔长 110 mm,如图 1 所示。当加载的介质的介电常数越高,谐振频率就会越低,这样频率属性就可以表征介电常数。



(a) 示意图



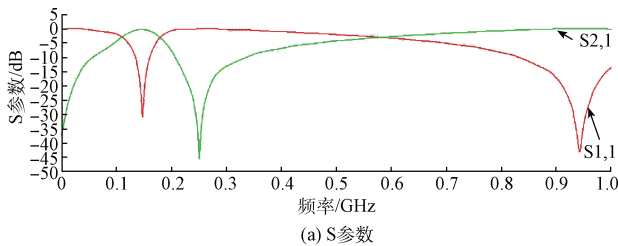
(b) 模型图

图 1 弯曲内导体谐振腔示意图和模型图

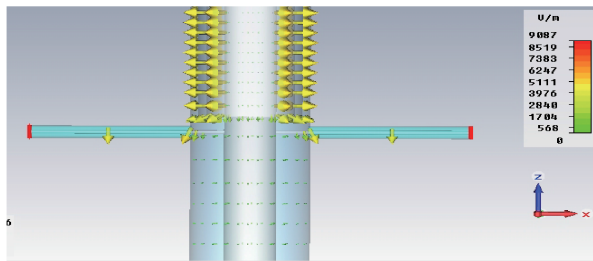
本文设计的谐振器采用探针馈电。在加入探针后,通过仿真软件的仿真,可以得到图 2 所示的仿真曲线。通过图 2(a)可以看出,该谐振腔第一个谐振模式的 S11 < -30 dB。可以满足设计的要求。图 2(b)所示的为该谐振腔谐振时的电流分布。电流主要分布在电容加载的地方。

2.2 微扰法模型

微扰即对场的状态进行微小的扰动,通常都可以利用近似简化处理。微扰法在量子力学领域中处理微观粒子的“态”及在理论力学的领域中处理行星运动的摄动等方面都有广泛应用。微扰分为形状微扰和材料微扰,本文运用的方法为介质微扰,填充腔材料的部分或全部的介电常数或磁导率的改变使腔的场分布受到的扰动。若 E_0 和 H_0 是原



(a) S参数



(b) 电场分布

图 2 弯曲内导体谐振腔 S 参数和电场分布

始腔的场,则通过推导可以得到式(1)。其中 ω 为微扰后的频率, ω_0 为微扰前的频率。 V_0 为谐振腔的体积。

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{-\int_{V_0} (\Delta\epsilon |E_0|^2 + \Delta\mu |H_0|^2) dv}{\int_{V_0} (\epsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2) dv} \quad (1)$$

通常微扰材料存在复介电常数时,有:

$$\begin{cases} \omega'_0 \approx \omega_0 + j \frac{\omega_0}{2Q_0} \\ \omega' \approx \omega + j \frac{\omega}{2Q} \end{cases} \quad (2)$$

在不考虑磁导率微扰的情况,可以得到:

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \approx \frac{\int_{\Delta V} \epsilon'' |E_0|^2 dv}{\int_{V_0} \epsilon |E_0|^2 dv} \quad (3)$$

其中, Q 为品质因数。通过微扰理论可以看出,通常谐振频率和微扰介质的尺寸以及微扰的介电常数有一定关系。品质因数和微扰介质的损耗角正切有关系。由于谐振腔为空气谐振腔,所以可以化简式(2)和(3),得到式(4)和(5),其中 ϵ' 为相对复介电常数的实部, ϵ'' 为相对复介电常数的虚部, η 为形状因子。选取一定介质材料测量的谐振频率和介电常数,建立关系图可以得到图 3。图 3 不是一条直线,说明微扰的介质的体积很大,影响了微扰后的场。所以微扰理论求解该模型,理论上误差较大,但是在一定误差范围内的结果还是可行的。

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{(\epsilon' - \epsilon_0) \eta}{2\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = \frac{\epsilon'' \eta}{\epsilon_0} \quad (5)$$

2.3 等效电路模型

微扰法最适用于微扰介质的尺寸远小于谐振腔体或者

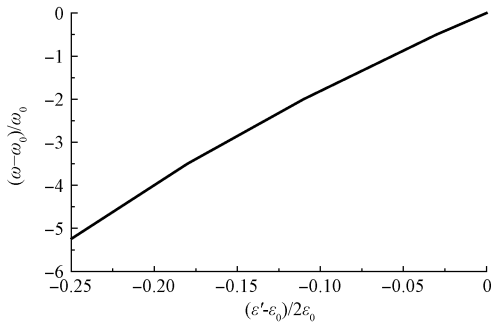


图3 形状因子变化

是微扰介质的介电常数较小时的情况。当谐振频率较小时,若微扰的介质体积比较大,当介质的介电常数发生变化时,就会造成谐振腔中电场和磁场发生较大的变化。微扰理论忽略了场的变化,可能会造成较大的误差。所以本文就该谐振腔建立了电路模型。将测量介质加入到谐振腔对应位置后,可以将谐振腔除了放置待测物体位置的其它部分等效成一个并联谐振电路。对于测量的部分,在放置物体后,物体与谐振腔壁存在空隙,不可能完美接触在一起。这种情况会造成相当于待测物体等效的电容串联了一个小电容,所以可以等效为一个电容和加载介质的电容串联(如图4所示)。

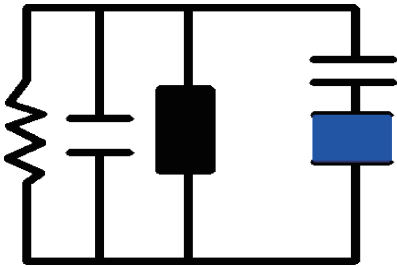


图4 谐振腔等效电路

通过 $\omega = 1/\sqrt{L(C_0 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2})}$, 可以得到频率和介电常数的关系式(6)。

$$f^2 = \frac{k_1 + k_2 \epsilon}{k_3 + k_1 \epsilon} \quad (6)$$

根据传输线理论,损耗角正切的表达式为:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon' - 1}{2\epsilon'} \frac{f_{r2}}{f_{r1} - f_{r2}} \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right) \quad (7)$$

f_{r1} 和 f_{r2} 为改变测量介质前后的谐振频率。 Q_1 和 Q_2 为改变测量介质前后的品质因数。为建立起谐振频率与介

电常数之间的关系,通过对2.1节建立的谐振腔系统可以得到谐振频率和介质介电常数关系,如表1所示。应用拟合工具式(6)进行拟合求解,可以将式(6)表示为式(8),通过代入测试频率就可以反推出介电常数。

$$f = 100 \sqrt{\frac{273.2 + 0.2458\epsilon}{124.1 + 3.945\epsilon}} \quad (8)$$

表1 介电常数仿真结果

ϵ	1	2.1	5	8
f/MHz	146.1	144.0	138.0	133.1

2.4 仿真比较

利用微扰法和等效电路模型对一定介电常数的材料加以仿真测试,通过利用式(4)和(8)建立起来的关系式,可以得到如表2所示的结果,其中直接拟合是利用MATLAB2012a软件的工具箱直接拟合得到的关系,用以作为比对。通过表2可以得到,电路法测量的数据最为准确,好于微扰和直接拟合的方法。在一定程度上可以比较精确的测量介质的介电常数。微扰理论在测量介质的介电常数较小的材料的时候也能保证一定的测试精度,但是在介电常数较大时就偏离了测量精度。

表2 几种介电常数的测试结果

ϵ	3	8	10	13	15
微扰模型	2.834 2	7.642 5	9.626 26	11.818 2	13.881 8
电路模型	3.130 62	8.182 3	10.216 7	13.026 8	14.931 9
直接拟合	3.082 3	8.422 6	10.645 7	13.525 7	14.163 1

3 测试系统的搭建

将测试零件装配好,连接在矢量网络分析仪上。谐振腔的谐振频率较低,所以零件尺寸大,需要合适的支撑物固定。在连接测试件后,需要对谐振腔进行调试,以满足测试的要求。选取标准测试物聚四氟乙烯材料($\epsilon = 2.1$)进行调整测试,最终满足和仿真结果近似。然后,对几种材料进行测试。测试材料由于加工的不确定性问题,通过查阅资料,只有估计数值,但是仍然可以反映一定的测试效果。其中玻璃钢A为丁苯玻璃钢,玻璃钢B为聚酯玻璃钢,玻璃钢C为DAP玻璃钢,玻璃钢D为环氧玻璃钢,材料介电常数的测试结果如表3所示。

表3 材料介电常数的测试结果

材料	木材	硅胶	玻璃钢A	玻璃钢B	玻璃钢C	玻璃钢D
ϵ	2.3~2.6	3.3~3.6	3.5~4.0	4.0~4.8	4.0~4.8	4.7~5.2
测试结果	2.35	3.40	3.87	4.53	4.38	4.91

矢量网络分析仪的测量结果要经过多次取数求平均来避免偶然误差和增加测量的稳定性,本文测试结果通过测量20次后求平均得到,通过测试结果可以看出,该测试系统可以得到较为准确的测试精度的介电参数测量。在测试的时候要保证测试材料的厚度和尺寸满足要求。在谐振腔多次取用的时候会造成零件的松弛,一定情况下影响谐振频率,所以在每次测量的时候,都要尽量保证测试的环境尽量不变,并且用已知材料进行校准。



(a) 零件图



(b) 测试系统图

图5 谐振腔零件和测试系统

4 结 论

本文设计的谐振腔体可以很好的应用于电参数的测量。通过仿真,建立的电路模型比微扰模型有更好的测试精度,误差在5%以下,因此可以在需求范围内测量出材料的介电常数。此外,本文设计的测试系统要求测试的材料尺寸有较高的精度,对待测的物体要求具有相同的尺寸,否则会造成较大误差。最后搭建的测试系统测量材料介电参数具有良好的测试效果,在一定精度需求下测量材料的介电常数。下一步工作,考虑测试物的尺寸于测试模型中,建立尺寸与频率之间的关系,这样测试精度会进一步提高。

参考文献

- [1] 邹大军,李锡文,张嘉琪,等. 一种粉末相对介电常数测试方法与装置的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2):368-373.
- [2] 任水生. 微波板材介电常数 ϵ 的测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3):38-41.
- [3] ZHANG Y, XU S Z, ZHAO W Z, et al. Review on common measuring methods of dielectric constant[J]. Electromagnetic Analysis Applications, 2013(2): 31-38.
- [4] 王政平,任维赫. 材料复介电常数测量方法研究进展[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1):93-96.
- [5] 黄云志,郑亮,汪蓓蓓. 多波长边缘电场传感器介电测量系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6):853-859.
- [6] 赵才军,蒋全兴,景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 695-700.
- [7] 何存富,杨玉娥,吴斌. 反射系数法微波检测热障涂层厚度的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2590-2595.
- [8] 吴俊军,刘四新,董航,等. 基于开口同轴法的岩矿石样品介电常数测试[J]. 地球物理学报, 2011, 24(2): 457-465.
- [9] 张康,武彤,滕俊恒. 开口同轴探头横电磁波模型法测量液体复介电常数[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7):945-952.
- [10] 孙珊珊,黄卡玛. 双同轴高温垃圾复介电常数测量装置与方法[J]. 微波学报, 2015, 31(4):89-92.
- [11] 花国良,王国栋. 开口同轴探头去嵌入技术的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11):982-986.
- [12] 王洪军,肖夏. 测量溶液浓度的微波谐振腔优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(10):911-916.
- [13] 巩宏博. 介电常数测量的微带短路线法及实现[J]. 电子测量技术, 2013, 36(1):37-40.
- [14] 王依超,郭高风,王娟,等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺, 2014(1):107-111.
- [15] 刘君,许卫东,刘珩,等. 基于微波反射率波动特性的混凝土介电常数测量方法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(1):141-146.

作者简介

薛冰,1991年出生,毕业于电子科技大学,现为中科院电子所硕士研究生。目前主要研究方向为计算电磁学、微波滤波器和天线、微波测量。

E-mail: xuebing14@mails.ucas.ac.cn

纪奕才,1974年出生,毕业于西安电子科技大学,现为中科院电子所研究员。目前主要研究方向雷达天线、微波测量。