

# 自由空间法测量电磁材料电磁参数

王依超 郭高凤 王娟 李恩 郑虎

(电子科技大学电子工程学院,成都 611731)

**文 摘** 基于对自由空间法测试材料电磁参量原理的研究,对传统方法进行分析及改进,解决了测试过程中透射系数存在的相位模糊性和由于  $S_{11} \rightarrow 0$  时导致的半波谐振问题,最后搭建了测试系统,并使用该系统对常见的微波介质材料在 2~18 GHz 频带下进行了电磁参数的测试。结果表明,由于天线性能特性的限制,此测试系统 4~14 GHz 范围内具有良好的效果。此测试系统具有测试速度快、结构简单、方便准确的定位、测试精度高等特点。

**关键词** 自由空间法,相位模糊性,半波谐振性,加脊喇叭天线

中图分类号:TP39

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.022

## Measurement of Electromagnetic Parameters of Electromagnetic Materials by Free-Space Method

WANG Yichao GUO Gaofeng WANG Juan LI En ZHENG Hu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

**Abstract** Based on the research on the measurement of electromagnetic parameters, through analyzing and improving the traditional method, the phase shift ambiguity problem and the half-wavelength divergence were solved, and finally a set of test system to test the electromagnetic parameters of common materials in the bandwidth from 2 to 18 GHz was built. Due to the restrictions of performance of antenna, the measure result is not accurate between 2 to 4 GHz and 14 to 18 GHz frequency range. This test method has the feature of fast, simple structure, convenient and accurate positioning, high test accuracy and so on.

**Key words** Free-space method, Phase shift ambiguity problem, Thickness resonance problem, Double-ridged horn antenna

### 0 引言

自由空间法是一种开场电磁特性参数测试技术<sup>[1]</sup>,属于传输/反射法的一种。此方法最早由 A. L. Cullen 利用菲涅尔公式推出的自由空间测量材料电磁参数理论引出。此后, M. H. Umari 利用自由空间双静态校准技术对不同极化波入射的平板样品的复反射系数进行了测量<sup>[2]</sup>。测试中利用了点聚焦透镜天线,有效的减小了天线之间的多重反射及其外界环境的绕射,并通过引入修正因子,减小了斜入射的散焦影响<sup>[3]</sup>,从而促进了自由空间法对介质材料电磁参数测试的发展。自由空间法对样品的要求较低,

只需足够大的一块双面平行的平板,原因在于可以减小外界环境的绕射及其表面不平滑带来的漫反射。

国内外有关自由空间法测试电磁参数的文章比较的多,但主要涉及的是介质材料部分电磁参数的测试。诸如文献[3]只是从理论方面的分析,缺少实验验证。文献[4-5]只测量了一个散射参数  $S_{21}$  或  $S_{11}$ ,利用数值迭代法进行求解,有关求解中出现的半波谐振问题及其相位模糊性问题没有给出相关的解决。Baker-Jarvis 等人采用迭代法解决了半波谐振问题,但难于预估所得电磁参数值的准确性<sup>[6]</sup>。Boughriet 等人也纷纷通过引入等效电磁参数的方法消除了半

收稿日期:2013-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助(61001027)

作者简介:王依超,1988年出生,硕士研究生,主要从事电磁材料研究。E-mail:xiao00yi2008@qq.com

波谐振的不合理极值问题<sup>[7]</sup>。文献[8]测量了散射参数  $S_{21}$  和  $S_{11}$ , 但只是利用了它们的幅度值来获得介质的电磁参数。考虑到测试中采用的是准 TEM 模式, 故此方法可以实现宽频带的测试。文献[9]研究表明, 在国外只有美国宾夕法尼亚大学研制的一套高精度的自由空间测试系统, 还有一套由英国利物浦大学提出的一种改进方法, 测试频段达到 0.1 ~ 300 GHz。在国内有关此方面的研究还处于研究阶段。

本文基于自由空间法测试材料电磁参数的原理, 分析和解决了相位模糊性和半波谐振问题, 通过构建如图 1 所示的测试系统, 测试了样品, 得到了良好的测试结果。

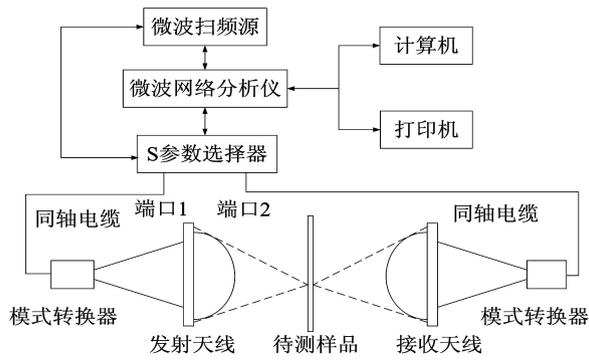


图 1 自由空间法材料测试系统框图

Fig. 1 Materials testing system diagram of free-space method

## 1 自由空间法测量理论

自由空间法是网络参数法的一种, 将被测材料视为双端口网络, 其测试算法同样也可以采用 NRW 传输/反射算法。设待测介质材料为各向同性, 均匀分布的平板状材料, 其厚度为  $d$ , 介质的复介电常数和复磁导率分别为  $\epsilon$  和  $\mu$ 。由矢量网络分析仪自带的扫频源产生一个频率为  $f$  的电磁波信号, 经同轴传输线馈入到加脊 TEM 喇叭天线并向空间辐射出去。同轴-矩形波导转化器起到了模式转化的作用, 即 TEM 模转化为  $TE_{10}$  模。位于天线焦平面处的线极化均匀平面波垂直入射到待测介质材料上, 由于介质表面处的不连续性, 致使电磁波在介质与空气界面处发生多次反射和透射。反射信号被天线接收后进入矢量网络分析仪, 利用耦合信号与参考信号的比值获得反射系数, 同理, 透射信号经接收天线接收后进入矢量网络分析仪的 2 端口, 通过与参考信号的比值得到透射系数。设介质表面的入射电压为  $V_i$ , 总的反射电压和透射电压分别为  $V_r$  和  $V_T$ , 则它们与散射参数之间的关系满足<sup>[10]</sup>:

$$V_r = S_{11} V_i \quad (1)$$

$$V_T = S_{21} V_i \quad (2)$$

利用菲涅尔定理, 考虑电磁波在媒质中传播的实际情况, 可得如图 2 所示的原理示意图。

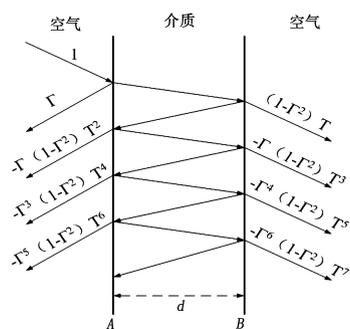


图 2 待测样品对电磁波的反射与传输

Fig. 2 Reflection and transmission of electromagnetic waves caused by the sample

$\Gamma$  表示材料无限长时在界面 A 处的反射系数, 由对称性可得, 界面 B 处的反射系数为  $-\Gamma$ ,  $T$  为有限长材料中的透射系数, 由此可得总的反射电压和透射电压的表达式为:

$$V_r = \Gamma - [(1 - \Gamma^2) / \Gamma] \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^{2n} T^{2n} \quad (3)$$

$$V_T = (1 - \Gamma^2) T - (1 - \Gamma^2) T \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^{2n} T^{2n} \quad (4)$$

令入射电压  $V_i$  为 1, 则  $S_{11}$  和  $S_{21}$  就分别与总反射电压和透射电压相对应。即:

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (6)$$

令  $K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$ , 可得:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (7)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21}) \Gamma} \quad (8)$$

式(7)中,  $\pm$ 号的选择取决于  $|\Gamma|$  是否小于 1。另外, 由等效二端口理论可得:

$$\Gamma = \frac{\eta_r - 1}{\eta_r + 1} \quad (9)$$

$$T = e^{-\gamma d} \quad (10)$$

式中,  $\eta_r$  表示待测材料的归一化特性阻抗,  $\gamma$  表示波在介质中的传播常数。由式(9)和(10)可得:

$$\eta_r = \frac{\Gamma + 1}{1 - \Gamma} \quad (11)$$

$$\gamma = -\frac{\lg T}{d} \quad (12)$$

基于此测试系统的工作模式为准 TEM 模式, 所以  $\eta_r$  和  $\gamma$  与电磁参数之间满足:

$$\eta_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (13)$$

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (14)$$

式中,  $f$  表示电磁波的工作频率。则由式(11)~式(14)可得:

$$\epsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{(1 - \Gamma)}{(1 + \Gamma)} \quad (15)$$

$$\mu_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{(\Gamma + 1)}{(1 - \Gamma)} \quad (16)$$

式中,  $\gamma_0$  表示自由空间的传播常数, 即  $\gamma_0 = j2\pi/\lambda_0$ 。利用上式就可得到相应介质的电磁参数。

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r, \mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$$

## 2 相位模糊和半波谐振问题

考虑到传输常数  $T$  是一个复数, 则具有周期性, 则对应传播常数的波必存在不确定性, 从而导致式(15)和(16)求解出的电磁参量具有多值性, 为解决由函数周期性带来的相位模糊性问题, 采用了一种虚部补偿法, 即利用电磁波在介质中传播时相移的变化是连续递增的这一条件, 对  $\lg(1/T)$  进行虚部补偿<sup>[11]</sup>。其主要的理论基础是传播常数的虚部随频率的变化关系是线性增加的, 而不是周期性变化的, 如图3所示。此方法相对于群延时法更简洁、快速, 但是存有对最低频率点处  $n$  值进行估算的缺点。测试中  $n$  的确定步骤为:

(1) 当初始测试频率很低时, 一般取  $n=0$ , 否则采用  $n = \text{int}(d/\lambda)$  的方式对其进行估算。int() 表示取整的意思。

(2) 由于测试系统采用的是扫频测试, 则随着频率的升高 ( $f_m < f_{m+1}$ ),  $\gamma$  的虚部应该是线性增加的。由于在进行数值分析中, 三角函数逆运算的定义域为  $[-\pi, \pi]$ , 因此若  $\text{imag}(\gamma(f_{m+1})) < \text{imag}(\gamma(f_m))$ , 则表示发生了跳变。需要用  $n+1$  代替之前频率的  $n$ 。通过对每个步进频率进行判断, 观察  $\gamma$  的跳变, 使  $n$  以 1 为步进间隔增加, 实现传播常数的唯一确定。

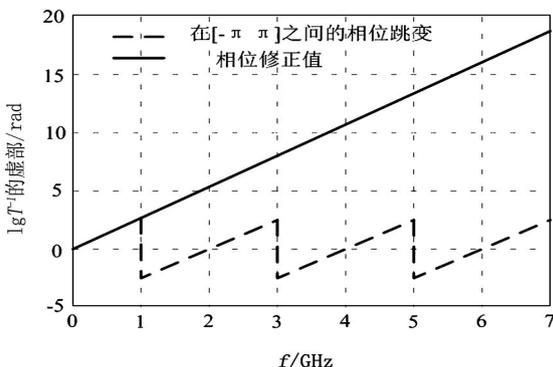


图3 虚部补偿法原理图

Fig. 3 Principle of imaginary compensation method

由因子  $K$  的表达式可得, 当  $S_{11}$  近似为 0 时,  $K \rightarrow \infty$ , 引起了求解过程中的不稳定性<sup>[12]</sup>。通过传输线二端口网络分析可知,  $S_{11} \rightarrow 0$  等价于介质板的厚度为介质波长的一半。所以为了降低由于不稳定性带来的计算误差, 要求介质板的厚度应小于工作波长的一半, 但是这样会增加样品制作的难度。对于高损耗材料的测试, 半波谐振现象不会出现, 原因在于高损耗介质的传输系数的幅值随频率的增加是递减的。对于非磁性材料, 也可以采用测得的  $\epsilon_r, \mu_r$  代替  $\epsilon_r$ , 来消除厚度谐振问题。

## 3 关键器件研制和测试系统的建立

### 3.1 超宽带聚焦天线的研制

作为自由空间法测试系统中的重要器件, 天线负责对电磁波进行发射和接收, 天线的性能对测试的带宽性能以及测试结果的准确性有着重要影响。由于本系统测试材料的频率范围是 2 ~ 18 GHz, 因此必须设计在该频率范围内, 性能指标良好的超宽带天线。本文采用了加脊的 TEM 喇叭天线, 天线的实物如图4所示。

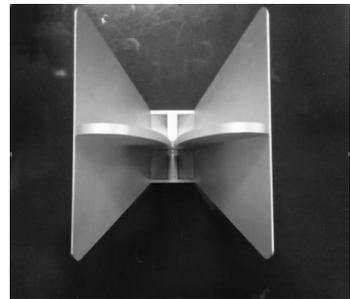


图4 加脊 TEM 喇叭天线实物图

Fig. 4 Physical map of plus ridge TEM horn antenna

通过加工制作, 采用矢量网络分析仪对其驻波进行测试, 测试结果如图5所示。

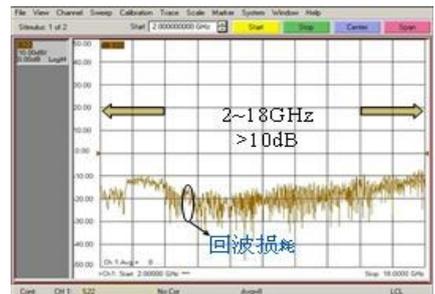


图5 天线驻波实测

Fig. 5 Measured results of the antenna

测试结果表明, 在 2 ~ 18 GHz 频带内, 天线的回波损耗均大于 10 dB, 具有良好的匹配性能, 且由于天线本身结构的特点, 其波瓣不会出现分裂, 且后向

波的增益很小,要消除后向波对测试产生的结果,只需在天线后表面加载吸波材料即可。同时,为了减弱电磁波在样品加载处的绕射效应,在垂直于天线辐射方向加载焦距为 300 mm 的聚四氟乙烯聚焦透镜,如图 6 所示。

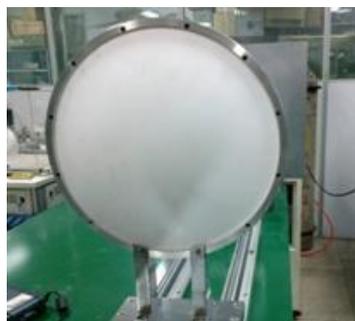


图 6 透镜实物图

Fig. 6 Physical map of the lens

### 3.2 系统的建立

建立好的测试系统如图 7 所示。该系统包括,聚焦透镜天线、样品加载板、移动支架、计算机以及矢量网络分析仪。

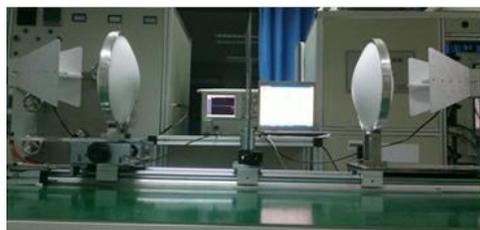


图 7 测试系统实物图

Fig. 7 Physical map of the system

### 4 实验结果

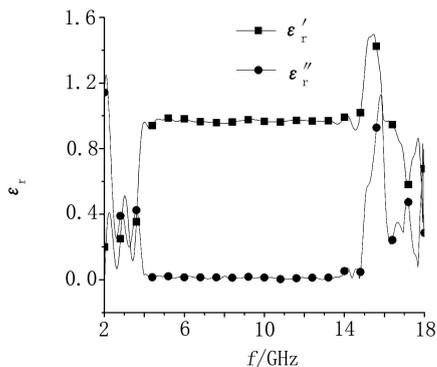
根据上述的理论和系统平台,本文首先利用 6 mm 空气柱作为标准样品进行实验验证。然后分别对聚四氟乙烯和玻璃钢两种样品给予了相应的测试。

图 8 给出了厚度为 6 mm 空气柱的电磁参数的实测曲线,测试结果显示:在 4 ~ 14.5 GHz,  $\epsilon_r' = 1.00 \pm 0.02$ ,  $\mu_r' = 1.00 \pm 0.02$ ,而复介电常数和复磁导率的虚部均在 0 附近,与常温下空气的实际情况相吻合。验证了本文测试系统的正确性。

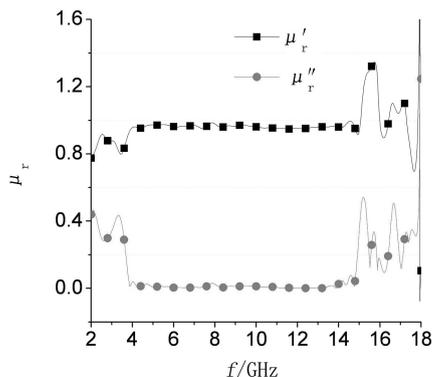
图 9 给出了厚度为 2 mm 的聚四氟乙烯介质材料的电磁参数的测试曲线,在 4 ~ 14.5 GHz,测试值为  $\epsilon_r' = 2.08 \pm 0.15$ ,  $\mu_r' = 1.00 \pm 0.02$ ,其虚部除有部分波动外均在 0.1 附近,与文献[4]中聚四氟乙烯在 X 波段的测试结果  $\epsilon_r' = 2.04 \pm 0.01$  对比发现结果一致。图 10 给出了厚度为 3.75 mm 的玻璃钢介质材料的电磁参数的测试曲线,在中间频段范围内,测试值为  $\epsilon_r' = 5.4 \pm 0.4$ ,  $\mu_r' = 1.00 \pm 0.02$ ,介电常数的虚

部略有波动,磁导率的虚部在 0.25 附近。为了对比测试结果,通过高 Q 腔对直径为 50 mm 的玻璃钢样品进行了相应的测试,在 7.31 GHz 处,  $\epsilon_r' = 5.56 - j0.115$ 。相比可得,此系统的测试结果与高精度测试性能的高 Q 腔法基本一致。

从测试结果不难发现,在低于 4 GHz 和高于 14 GHz 时,数据出现了抖动性,通过对校准效果和天线性能的分析,初步估计由于天线在低频处的增益较小,并且波束较宽;在高频处,高于 12 GHz 时会出现波瓣分裂现象,尤其高于 14 GHz 最为明显,这与测试中出现的现象相吻合。



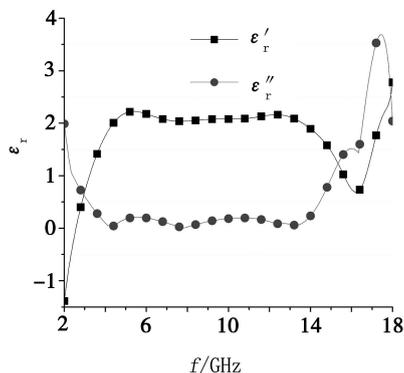
(a) 复介电常数



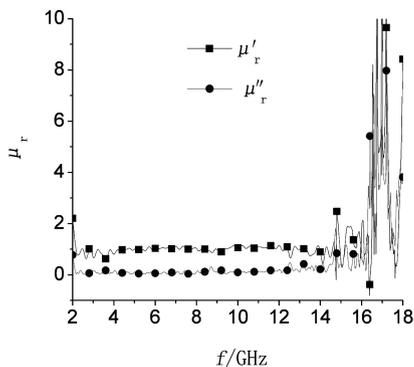
(b) 复磁导率

图 8 6 mm 厚空气柱电磁参数实测

Fig. 8 Measured results of air clumnn with a thickness of 6 mm



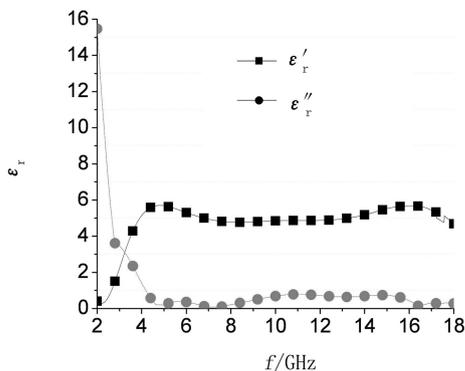
(a) 复介电常数



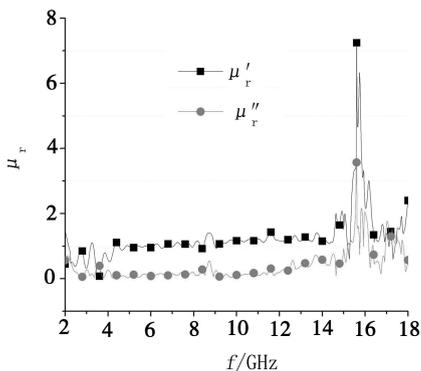
(b) 复磁导率

图9 2 mm厚聚四氟乙烯电磁参数实测

Fig.9 Measured results of PTFE with a thickness of 2 mm



(a) 复介电常数



(b) 复磁导率

图10 3.75 mm厚玻璃钢材料电磁参数实测

Fig.10 Measured results of FRP with a thickness of 3.75 mm

## 5 结论

本文系统地说明了自由空间法测试材料电特性参量的原理和方法。对其中遇到的相位模糊性和半波谐振问题进行了探讨和解决,基于建立的测试系统平台,测试了空气柱、聚四氟乙烯和玻璃钢三种样品,

测试结果显示,在4~14.5 GHz,基于该系统的自由空间法具有比较高的精确度,可以满足测试要求。

## 参考文献

- [1] 张军英,张雨,姜维维. 微波材料的电磁参数测试方法[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(5):107-110
- [2] 卢子焱. 微波介质材料自由空间测试方法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006
- [3] 兰康,赵愉深,林为干. 介质材料的宽带测试技术的研究[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(2):147-152
- [4] Ghodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1990, 39(2): 387-394
- [5] Rene Grignon, Afsar M N, Wang Yong, et al. Microwave broadband free-space complex dielectric permittivity measurements on low loss solids[C]. IMTC 03. Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE, USA, 2003: 865-870
- [6] James Baker Jarvis, Vanzura E V, Kissick W A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(8):1096-1103
- [7] Abdel Hakim Boughriet, Christian Legrand, Alain Chapoton. Noniterative stable transmission/reflection method for low-loss material complex permittivity determination [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(1): 52-57
- [8] Varadan V V, Hollinger R D, Ghodgaonkar D K. Free-space, broad-band measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(5): 842-847
- [9] 张娜,王立春,张国华. 自由空间法测试材料电磁参数的探讨[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(3):22-25
- [10] 姜山. 电磁参数测试系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006
- [11] 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
- [12] Osamu Hashimoto, Atsuki Sato, Masahiro Hanazawa. A study on measurement of dielectric constant by free space transmission method at C band[C]//Electronics and Communications in Japan, 2004: 87

(编辑 任涛)