

# 微波电介质材料复介电常数的扫频测量

卢子焱, 唐宗熙, 张 彪

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了测试电介质材料复介电常数的新方法, 获得了利用两个散射参数同时求解材料复介电常数的表达式, 解决了自由空间法测量电介质材料的相位模糊性问题, 建立了测试系统, 讨论了该系统的校准方法。通过在X波段对电介质材料复介电常数的测量, 证明该测试方法的正确性。

**关键词** 复介电常数; 相位模糊性; 测试; 微波

中图分类号 TM931; TM260

文献标识码 A

## Measurement of Complex Permittivity of Dielectric Materials at Microwave Frequencies

LU Zi-yan, TANG Zong-xi, ZHANG Biao

(School of Electronic Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new method of measuring the complex permittivity parameter is presented, and the expressions for solving electromagnetic parameters are obtained by using two scatter parameters, and the phase-shift ambiguity problem of thick samples is solved. The test system is established, and the method of calibration is discussed. Several dielectric samples are measured at X band. It is proved by the experiment that the presented method is valid.

**Key words** complex permittivity; phase-shift ambiguity; measurement; microwave

微波电介质材料已广泛地应用于介质波导、介质透镜天线、模式转换器、耦合器、介质振荡器、放大器、倍频器等方面。但是在应用前, 需要准确地知道其微波特性。因此, 对电介质材料复介电参数进行测量是必须的。测量介质材料复介电参数的方法很多<sup>[1-2]</sup>, 主要分为谐振法和传输法。谐振法对低损耗介质材料具有较高的测试灵敏度和测试准确度, 但不适于宽频带测量和较大损耗的介质材料测量。波导法、同轴线法等方法属于传输法, 但它们要求介质样品的外形尺寸应与波导壁完全接触, 否则会产生较大的测试误差。自由空间法<sup>[3-5]</sup>也属于传输法, 但它克服了上述缺点, 与其他方法相比, 具有如下优点: (1) 因为所采用的电磁波为线极化平面波, 所以可对材料进行取向测试, 以满足常规测试和某些特殊测试的需要; (2) 可实现对介质材料复介电常数的宽频带测量; (3) 在某些场合可完成非损伤测试。

文献[2-3]讨论了利用散射参数求解电介质材料的复介电常数的方法。在计算复介电常数时, 用一

个已知的散射参数通常只能采用数值迭代法求解, 这要求对数值解初值的估计应接近真值。在未知材料的情况下, 估计初值较困难。同时, 若样品较厚, 其数值解可能会出现相位模糊性问题, 使测试的正确性和可靠性难以得到保证。为了克服这些问题, 本文提出了测试两个散射参数求解电介质材料的复介电常数的新方法。

### 1 测试原理

设被测介质材料为各向同性、横向尺寸足够大、厚度为 $d$ 的平板材料, 其复介电常数为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (1)$$

在自由空间中, 设线极化均匀平面波由自由空间向被测平板介质材料垂直入射, 相位常数为 $k_0$ , 传播方向为 $z$ 向, 如图1所示。入射波在 $z=0$ 面遇到了不连续性, 一部分波被反射回去, 另一部分进入被测电介质材料平板, 并向前传播; 在 $z=d$ 面又遇到不连续性, 其中一部分波又被反射, 另一部分波透过该交界面形成透射波。将被测材料作为二端口网络,

当 $z=0$ 和 $z=d$ 时, 根据电磁波满足的边界条件和散射参数的定义可得:

$$S_{11} = \frac{(1 - e^{-j2k_1d})}{(\eta_r + 1)^2 - (\eta_r - 1)^2 e^{-j2k_1d}} \quad (2)$$

$$S_{21} = \frac{4\eta_r e^{-jk_1d}}{(\eta_r + 1)^2 - (\eta_r - 1)^2 e^{-j2k_1d}} \quad (3)$$

式中  $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}$  为电介质材料中的传播常数;  $\eta_r = 1/\sqrt{\epsilon_r}$  为本质阻抗。式(2)、(3)均为非线性方程。为了解决数值解存在的模糊性问题, 由式(2)、(3)作如下变换:

$$\epsilon_r = \frac{k_1}{\eta_r k_0} \quad (4)$$

式中

$$\eta_r = \pm \sqrt{\frac{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2}} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{j}{d} \ln \left( \pm \frac{S_{21}(\eta_r + 1)}{S_{11}(\eta_r - 1) - (\eta_r + 1)} \right) + \frac{2n\pi}{d} \quad (6)$$

式中 根据 $\eta_r$ 和 $k_1$ 的物理意义,  $\pm$ 号应满足计算后的 $\text{Re}(\eta_r) > 0$ 和 $\text{Re}(k_1) > 0$ , 其中 $n=0,1,2,3,\dots$ , 与介质材料中的波长 $\lambda$ 和样品厚度 $d$ 有关。因此,  $n$ 值的确定可通过对下式取整求得:

$$n = \sqrt{\text{Re} \left( \frac{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2} \right)} \frac{fd}{c} \quad (7)$$

式中  $c$ 为光速;  $f$ 为频率。由式(4)可见, 求解复介电常数的表达式已为显函数。因此, 当测得散射参数后, 就可由式(4)~(7)直接计算出电介质材料的复介电常数, 从而避免了数值求解可能出现的相位模糊性问题, 提高了测试结果的可靠性。

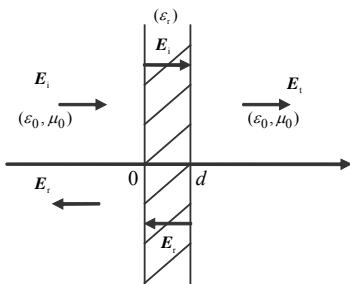


图1 电磁波通过电介质平板的传播

## 2 测试系统

介质材料复介电参数测试系统的示意图如图2所示, 工作频率为X波段。测试系统由喇叭聚焦透镜天线、矢量网络分析仪HP8510B、扫频信号源HP8341和控制微机组成。两个天线之间的距离为天线焦距的二倍, 且固定在水平支架上, 其中接收天

线可进行位置移动, 以适应校准和测试不同厚度样品的需要。安装在可移动天线上的位置调节装置可进行精密调距, 其准确度优于0.01 mm。经精密加工的样品架, 置于两天线的共焦面处, 用于支撑和放置被测板状样品。因天线具有聚焦能力, 当测试样品的截面尺寸大于聚焦面上天线3 dB波束宽度的3倍时, 样品边缘的绕射效应可以忽略不计<sup>[5]</sup>。

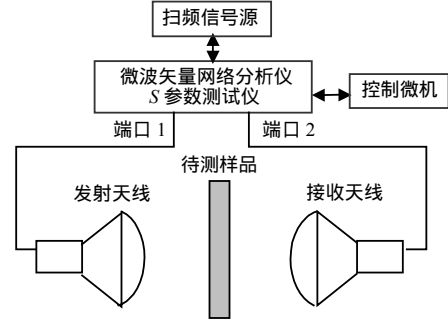


图2 测试系统

矢量网络分析仪端口传输线采用同轴线, 工作模式为TEM波。因被测材料需要线极化平面波, 所以应将同轴线的TEM波转换为矩形波导的 $TE_{10}$ 波, 然后经过聚焦透镜天线发射。通过对反射波的测量, 可以测得由被测材料形成的二端口网络的散射参数 $S_{11}$ 。另一部分波进入被测样品, 在被测样品的另一面, 部分电磁波将穿过交界面形成透射波。透射波被聚焦透镜天线接收, 经过模式转换, 将矩形波导的 $TE_{10}$ 波转换为同轴线的TEM波, 然后进入矢量网络分析仪的端口2。通过对透射波的测量, 可以测得该二端口网络的散射参数 $S_{21}$ 。所测得的 $S_{21}$ 和 $S_{11}$ 已携带了被测材料的复介电常数信息。将 $S_{21}$ 和 $S_{11}$ 代入式(4)~(7)可以得到被测材料的复介电常数, 从而完成测试工作。因电磁波在收发天线和被测样品处遇到了不连续性, 将会产生多次的来回反射。通过TRL校准技术和时域门技术可以修正多次来回反射对测试结果的影响。测试所用的仪器设备可通过GPIB线与计算机进行通信, 采用所编制的自动测试软件实现计算机对测试仪器的自动控制、数据交换和数据处理, 完成介质材料介电性能的自动测量。

## 3 校准及测量误差

在测试之前必须对测试系统进行校准。矢量网络分析仪校准方法有多种, 最适合于自由空间测试的校准方法为TRL法<sup>[6]</sup>。因为该方法不仅校准精度高, 而且可用于许多特殊情况下的校准。校准的主要步骤为: 首先取矢量网络分析仪两个端口的参考面为收发天线的共焦面, 在该状态下进行直通(Thru)

校准；然后在参考面上放置金属短路板进行反射(Reflect)校准；最后去掉短路板，将接收天线远离参考面，移动距离为中心频率的1/4波长，进行传输(Line)校准，完成校准过程。将校准数据存入矢量网络分析仪的存储器中，以便在测试时调用。为了进一步减少天线与被测材料板之间电磁波的来回反射，测量时开启矢量网络分析仪的时域门功能，以提高测试准确度。校准完成后，系统还存在较小的校准剩余误差。通过实测，得到直通散射参数 $S_{21}$ 幅度误差在整个频带范围内小于 $\pm 0.05$  dB，相位误差小于 $\pm 0.5^\circ$ 。短路散射参数 $S_{11}$ 幅度误差在整个频带范围内小于 $\pm 0.04$  dB，相位误差小于 $\pm 0.4^\circ$ 。

由公式(4)~(7)可见，复介电常数仅与散射参数 $S_{21}$ 、 $S_{11}$ 、频率 $f$ 以及样品厚度 $d$ 有关。因为 $f$ 对误差的贡献很小，可以忽略，所以散射参数 $S_{21}$ 、 $S_{11}$ 和样品厚度 $d$ 的测量误差是复介电常数的测量误差的主要来源。本文的样品厚度由千分尺测得，其最大测量误差为 $\pm 0.01$  mm。散射参数 $S_{21}$ 、 $S_{11}$ 的测量误差主要由两部分组成，一部分由矢量网络分析仪产生，其值可由性能手册查得；另一部分是系统校准后的剩余误差。本文采用均方根误差统计方法，通过编程计算，得到复介电常数实部的相对误差小于 $\pm 2\%$ ，虚部的绝对误差小于 $\pm 0.04$ 。

## 4 实验结果

为了验证本文理论分析的正确性和测试系统的准确性，采用空气作为标准样品进行测试验证。空气样品的形成是将两聚焦透镜天线与参考面的距离增加7.5 mm，这相当于在测试样品架上放置了一个7.5 mm厚的空气样品。对厚度为7.5 mm的“板状”空气介质样品进行测量，测得的结果如图3所示。空气介电常数测试值为 $\epsilon_r' = 1.000 \pm 0.002$ ，与空气介电常数的理论值 $\epsilon_r' = 1$ 进行比较，吻合较好，说明该测试方法是正确的，测试系统是可靠的。同样，本文采用该测试方法和测试系统对聚苯乙烯、聚四氟乙烯、玻纤环氧板介质材料进行了测试。图4给出了厚度为3.15 mm的聚苯乙烯材料复介电常数的实测曲线，实测值为 $\epsilon_r' = 2.52 \pm 0.02$ ，与文献[7]报道的聚苯乙烯材料复介电常数 $\epsilon_r' = 2.55$ 比较，吻合较好。图5给出了厚度为4.43 mm的聚四氟乙烯材料复介电常数的实测曲线，测试值为 $\epsilon_r' = 2.04 \pm 0.01$ ，与文献[2]测试的聚四氟乙烯的复介电常数 $\epsilon_r' = 2.02 \pm 0.04$ 比较，也吻合较好。图6给出了厚度为2.60 mm的自制玻纤环氧板介质材料样品复介电常数实测曲线。

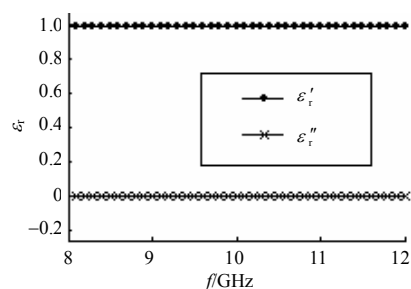


图3 7.5 mm的空气样品复介电常数测试曲线

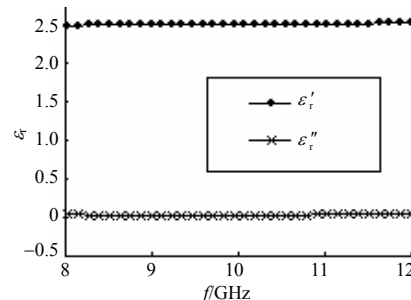


图4 聚苯乙烯样品复介电常数测试曲线

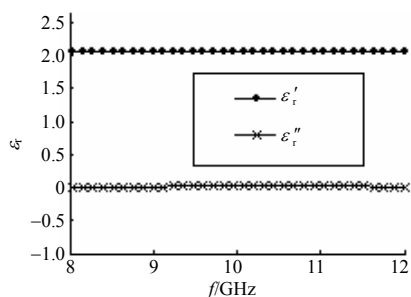


图5 聚四氟乙烯样品复介电常数测试曲线

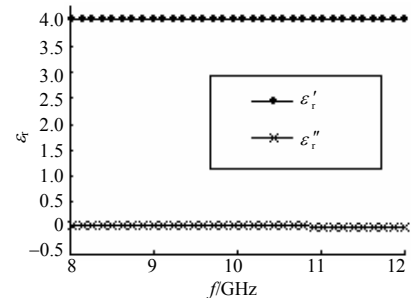
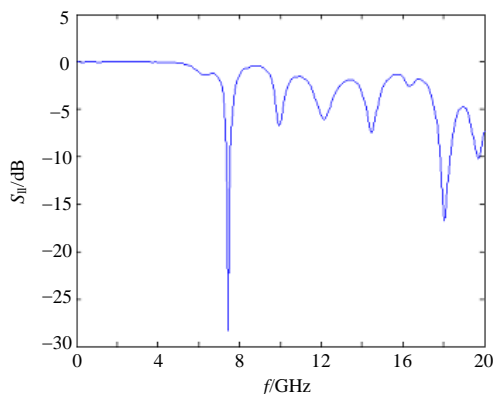


图6 玻纤环氧板样品复介电常数测试曲线

## 5 结束语

本文从麦克斯韦方程和边界条件出发，讨论了电磁波在电介质样品板中的传播特性，找到了板状被测样品构成的二端口网络散射参数与复介电参数之间的关系，获得了求解复介电常数的方程式，解决了计算中出现的多值解问题，确保了测试结果的正确性和可靠性。同时，建立了介质材料复介电常数测试系统，讨论了测试系统的校准方法，并采用

(下转第69页)



b. 本软件仿真结果

图6 微带馈电金属贴片端口特性

## 5 结束语

本文介绍了开发的三维实体有限差分网格自动剖分系统,给出了网格剖分的主要思想及计算机流程,实现了多材质自动识别、复杂实体的三维差分网格自动剖分,并用实例验证了其正确性和实用性。本研究结果表明:(1)利用AutoCAD作为FDTD三维数值模拟前处理是目前微机上一一种很有效的方法;(2)利用AutoCAD的二次开发工具VBA,方便、准

确地实现了三维网格自动剖分及显示;(3)利用DXF接口文件分析AutoCAD实体,对图形中有用的信息进行提取,可供其他程序调用;(4)三维网格自动剖分软件,可以实现多材质的复杂铸件或其他实体的三维网格自动剖分;(5)在与FDTD计算程序结合后,可以计算微带线传输特性、复杂目标的电磁散射特性等。

### 参 考 文 献

- [1] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 12.
- [2] COTTINGHAM M. AutoCAD VBA从入门到精通[M]. 孔祥丰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2001: 1.
- [3] 吉晓民. AutoCAD12.0绘图软件包的使用与二次开发技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997: 253-266.
- [4] 吴士平. 凝固数值模拟中铸件三维实体造型及三维网格自动剖分的研究[J]. 铸件技术, 1995, (6): 10-12.
- [5] 吴士平, 林汉同. Auto CAD下的铸件三维网格自动剖分[J]. 铸造设备研究, 1996, (5): 25-26.
- [6] GEDNEY S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices[J]. IEEE Transactions Antennas and Propagation, 1996, 44(12): 1630-1639.

编辑 孙晓丹

(上接第46页)

时域门技术提高了测试系统的准确度。采用所建立的测试系统对多种电介质材料进行了实测,其结果与国内外相关文献提供的介电常数参考值进行比较,吻合较好。因此,本文的测量方法和建立的测试系统测量电介质材料的复介电常数具有较好的准确性,且具有实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 曹江. 介质材料电磁参数测量总述[J]. 宇航计测技术, 1994, 13(3): 30-34.
- [2] 杨勇, 羊恺, 罗正祥. 基于反射和传输方式的误差网络校准方法[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(5): 11-13.
- [3] GHODGAONKAR D K, VARADAN V V, VARADAN V K. A free space method for measurement of dielectric constants

and loss tangents at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1989, 37(3): 789-793.

- [4] VARADAN V V, HOLLINGER R D, GHODGAONKAR D K, et al. Free-space, broadband measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1991, 40(5): 842-846.
- [5] 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.
- [6] 陈国强, 李琦, 刘金亮. HP8510C非同轴系统TRL校准技术[J]. 微波学报, 1998, 14(3): 238-243.
- [7] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.

编辑 漆蓉