

# 基于矢量网络分析仪的相对介电常数 扫频测量

秦凡 韦高

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

**摘要** 采用波导短路法对介质材料的相对介电常数进行扫频自动测量, 通过VC++开发了一套宽频带(8GHz~18GHz)复介电常数自动测量系统。用矢量网络分析仪对波导采样器进行扫频测量, 不仅可以得到被测材料介电常数的频率特性, 而且能够解决超越方程多值解的判断问题, 并减少了测量中的误差。通过对介质样品的实际测量, 可以发现, 该自动测量系统操作简单、测量速度快, 测量结果能够达到较高准确度, 结果令人满意。

**关键词** 矢量 网络分析仪 电容率 波导 短路

## Measurement with Sweeping Frequency for Complex Permittivity Based on VNA

QIN Fan WEI Gao

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129)

**Abstract** The waveguide method of measuring the complex permittivity parameter is used, and then an automatic measure system (8GHz~18GHz) based on VC++ is built. The measurement using VNA (Vector Network Analyzer) with sweeping frequency not only could get the frequency characteristic of complex permittivity but also make the choice of correct result in the different results of transcendental equation convenient, and the accuracy of measure results is improved too. Through actual measurement, the automatic measure system is easy to operate and works at high speed. The tested results reach high accuracy and satisfy the requirements of project.

**Key words** Vector Network analyzer Permittivity Waveguide Short circuit

## 1 引言

复介电常数是表征介质材料电磁特性最重要的参量之一。为使其付诸使用, 必须准确地知道介质材料的复介电常数。介质材料的复介电常数可表示为:  $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan\delta_\epsilon)^{[1]}$ , 只要能够计算出相对介电常数  $\epsilon'$  和损耗角正切  $\tan\delta_\epsilon$ , 就可以得

到介质材料的复介电常数。

本文采用矢量网络分析仪进行材料复介电常数扫频测量, 通过计算机程控矢量网络分析仪读取测量数据并进行分析计算, 不但实现了测量过程自动化, 而且大大提高了测量准确度、缩短了测量时间, 同时利用扫频测量数据可以方便地解决超越方程多解判断问题, 为介质材料复介电常数的扫频准确测

量提供了一套理想的解决方案。

## 2 测量原理

基于矢网的相对介电常数扫频测量系统结构<sup>[2-3]</sup>如图 1 所示。该系统采用短路波导法<sup>[1-4]</sup>进行测量, 矢量网络分析仪对采样波导的复反射系数进行测量, 根据加载被测样品前后短路波导复反射系数的变化, 即可算出样品的介电常数。

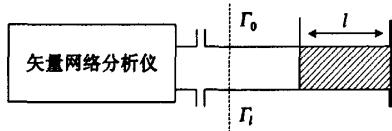


图 1 基于矢网的相对介电常数测量系统图

如图 1 所示, 其中  $l$  为被测介质样品的厚度,  $\Gamma_0$  为矢量网络分析仪在参考面测得的未加载介质样品时短路空波导的复反射系数,  $\Gamma_1$  为加载介质样品后短路空波导的反射系数。由微波传输线理论可得<sup>[5]</sup>

$$\frac{\gamma h l}{\gamma l} = \frac{1 - \frac{\Gamma_1}{\Gamma_0} e^{-2\beta_0 l}}{j\beta l} \frac{1 - \frac{\Gamma_1}{\Gamma_0} e^{-2\beta_0 l}}{1 + \frac{\Gamma_1}{\Gamma_0} e^{-2\beta_0 l}} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$ —介质样品填充波导的复传播常数;  $\gamma = \alpha + j\beta$ ,  $\alpha$ —介质填充波导的衰减常数;  $\beta$ —介质填充波导的相位常数;  $\beta_0$ —空气波导中的传播常数。由复超越方程(1)解得  $\alpha, \beta$ , 即可代入下式求出相对介电常数  $\epsilon_r$  和损耗角正切  $\tan\delta_\epsilon$ <sup>[2]</sup>。

$$\epsilon_r = \left( \frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 - \alpha^2 \right] \quad (2)$$

$$\tan\delta_\epsilon = \frac{2\beta\alpha}{\left( \frac{\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 - \alpha^2} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_0$ —测试频率下自由空间的波长;  $a$ —波导宽边尺寸。

由上式所得的相对介电常数和损耗角正切为多值解, 可通过以下判断得出正确解<sup>[2]</sup>:

若已知介质材料相对介电常数的范围, 可直接在多值解中判断出正确的相对介电常数和损耗角正切; 若未知介质材料的介电常数范围, 需要对同一样品的两个频点或同一材料的两个不同长度的样品进行测量。由于一般材料相对介电常数在有限的频率范围内变化不大, 因此两次测量计算出的多值解中

变化最小的一组解, 即为正解。

对于点频测量, 该方法的缺点是需要对同一材料准备不同尺寸的样品, 这样不仅使测量过程变得繁琐, 而且不同尺寸样品的制作误差有所差异, 从而会对测量误差产生影响。同时, 在多次波导装卸过程中也容易产生误差。若采用扫频测量, 则可一次性测量多个频率点, 并做出各组解随频率变化的曲线, 观察其斜率, 其中斜率最小的即为正解。这样, 就有效地解决了上述点频测量存在的问题。

## 3 自动测量系统设计

如图 2 所示, 测量系统中计算机作为程控设备, 矢量网络分析仪作为测量仪器, 一段终端短路的空波导作为采样器, 同轴-波导转换器实现同轴到波导之间的转换。数据通过 LAN 口进行传输。该测量系统运用两套波导系统实现宽频带 (8GHz ~ 18GHz) 测量, 其中 X 波段 (8GHz ~ 12GHz) 采用 BJ-100 矩形波导, KU 波段 (12GHz ~ 18GHz) 采用 BJ-140 矩形波导。

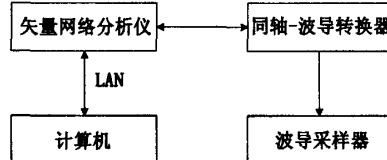


图 2 自动测量系统硬件构成图

该测量系统以 Visual C ++ 作为开发平台, 开发出了一套界面友好的自动测量系统。程序设计总体流程如图 3:首先, 启动程序实现仪器与计算机的连通; 然后, 对测量的基本参数进行设置; 再次, 分别对空波导和加载样品波导进行测量; 最后, 根据两次测量结果对相对介电常数和损耗角正切进行计算, 判断正解并加以显示。

在对矢量网络分析仪的程控方面, 文中涉及到了 VISA 库函数以及 SCPI 语言。

VISA 是标准化的 I/O 函数库及其相关规范的总称。一般称这个 I/O 函数库为 VISA 库。它驻留于计算机系统之中执行仪器总线的特殊功能, 是计算机与仪器之间的软件层连接, 可实现对仪器的操作。

SCPI 语言是仪器程式标准命令的缩写, 其字符串可以通过任何仪器接口被发送。表 1 列出了编程中所用到的个别 VISA 库函数和 SCPI 命令。

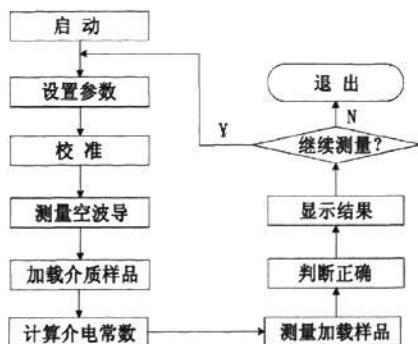


图3 自动测量系统总体流程图

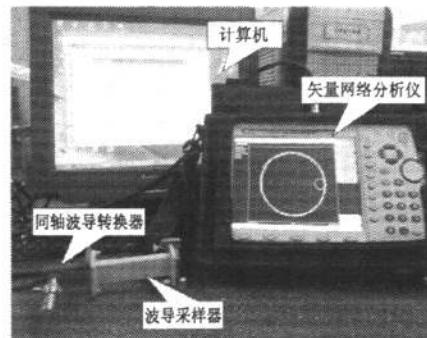


图4 测量系统实物图

表1 VISA库函数与SCPI命令

VISA库函数	
viOpenDefaultRM(&defaultRM)	初始化并定位VISA系统
viWrite(instr, char, buffersize, &retCount)	发送仪器控制指令
SCPI命令	
SYSTem:PRESet	初始化仪器
SENSe:FREQuency:STARt	设置起始频率
SENSe:CORR:COLLECT:ACQUire	计算校准结果

下面简要说明该测量系统操作过程：首先，按照规范将硬件设备连接好，如图4所示；然后，启动该测量系统，对矢量网络分析仪进行初始化及基本参数设置，包括起始频率、终止频率、点数以及校准类型的选择，如图5所示；第三步，系统会提示进入矢网校准阶段，按照提示对矢网进行校准；第四步，进入测量阶段，首先输入待测样品厚度，下来按照系统提示分别对空波导和转载介质波导进行测量；最后，根据两次测量数据进行样品的相对介电常数和损耗角正切的计算，如图6所示，其中计算结果的第一列为频率，后面依次为各组解的相对介电常数和损耗角正切。整个测量过程操作简单，为工程应用带来了方便。

## 4 测量结果及分析

该测量系统采用扫频测量。通过以上讨论知道，可分别做出各组解随频率变化的曲线，观察其斜率来判断正解。需要指出的是，超越方程的求解为无穷多组解，这在计算相对介电常数中显然是不需要也是不可取的。因此，该测量系统在计算之前可对相对介电常数设置一个范围，只计算出该范围以

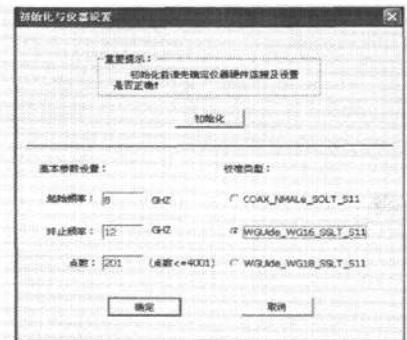


图5 基本参数设置界面图



图6 结果显示界面图

内的解，不在此范围的默认为0。

文中分别在X波段和KU波段对聚四氟乙烯进行了测量，在1到50的范围内得到三组解。表2列出了聚四氟乙烯在KU波段上个别频点（总的测量点数为201点）的测量结果，其中所测聚四氟乙烯样品厚度为4.82mm。聚四氟乙烯相对介电常数标称值为2.05，损耗角正切为 $4 \times 10^{-4}$ 量级<sup>[5]</sup>，可用来检测系统测量误差。

表 2 聚四氟乙烯相对介电常数多值解

$f/\text{GHz}$	第一组解		第二组解		第三组解	
	$\epsilon_r(f)$	$\tan\delta$	$\epsilon_r(f)$	$\tan\delta$	$\epsilon_r(f)$	$\tan\delta$
12.75	2.049 36	0.004 403	14.039 7	0.000 642	38.020 40	0.000 237
14.25	2.041 90	0.004 052	11.672 53	0.000 823	30.873 82	0.000 383
15.75	2.013 96	0.005 635	9.989 34	0.001 448	25.721 87	0.000 581
16.50	2.047 49	0.005 243	9.414 11	0.001 233	23.770 40	0.000 529
17.01	2.026 38	0.024 953	9.017 58	0.009 320	22.541 04	0.004 136
18.00	2.018 91	0.002 878	8.387 85	0.001 208	20.511 20	0.000 560

图 7 所示为三组解随频率变化的曲线,从图中可以很直观的判断出斜率最小的为第一组解。因此,第一组解即为聚四氟乙烯相对介电常数的正解。对于一般材料而言,在有限的频率范围内,其相对介电常数的变化足够小,可近似认为不变,故可通过对各个频点的正解相加求平均值的方法,进一步减小测量结果的误差。对正解进行平均后得到聚四氟乙烯相对介电常数  $\epsilon_r = 2.026 0$ , 损耗角正切  $\tan\delta = 0.005 36$ 。

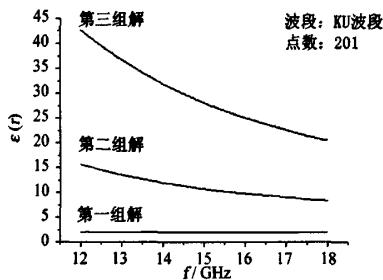


图 7 聚四氟乙烯相对介电常数多值解曲线图

在 KU 波段测得的聚四氟乙烯相对介电常数与标称值很接近,说明该系统具有较高的准确度。文中又对蜂窝介质等其他样品进行了测量,测量结果见表 3。

表 3 其他样品测量结果

样 品	波 段	厚 度 mm	相 对 介 电 常 数	损 耗 角 正 切
聚四氟乙烯	X	14.82	2.039 98	0.001 24
蜂窝介质	X	8.46	1.061 52	0.004 81
环氧玻璃布层压板	X	3.71	4.605 88	0.021 27
某天线罩陶瓷材料	KU	10.04	3.598 26	0.016 76
某复合材料	KU	2.85	3.039 44	0.017 66

从测量结果可以发现,介电常数测量准确度与稳定性较高,对于聚四氟乙烯等低损介质,其损耗角正切的测量误差较大。这是因为对低损介质而言,其插

入传输线时对复反射系数幅度的影响远低于对相位的影响,故损耗角正切的测量难度大于介电常数;测量系统由普通波导组成,其加工准确度有待提高,测量过程中人为装卸波导及波导自身不均匀性引入的误差会对损耗角正切的测量准确度产生较大影响。因此,可通过适当增加样品厚度,提高样品制作准确度,采用高准确度波导等方法提高测量准确度。

## 5 结束语

文中构建的基于矢量网络分析仪的相对介电常数宽频带扫频测量系统能够完成从数据采集到数据处理再到结果显示等一系列的自动测量。整个测量过程自动化程度高,操作方便,并且具有较好的稳定性和较高的测量准确度。特别是扫频的应用,使得在多值解中判断正解变得直观方便。一次性对多个频率点的测量,大大提高了相对介电常数工程测量的效率,同时减少了不必要的人为误差。

## 参考文献

- [1] 周清一. 微波测量 [M]. 北京: 国防工业出版社. 1964.
- [2] 彭胜, 许家栋, 韦高, 张磊. 六端口反射计测量复介电常数的改进方法 [J]. 计测技术. 2007, 27(2): 27~29.
- [3] 韦高, 许家栋, 吴昌英, 杨金孝. 天线罩点厚度与材料电参数六端口测量系统设计 [J]. 强激光与粒子束. 2007, 19(8): 1 347~1 351.
- [4] 李英. 微波、毫米波传感器与非电量检测 [M]. 北京: 电子工业出版. 1991. 207~216.
- [5] HU X P. Using six-port reflectometer measurement of complex dielectric constant [J]. IEEE Trans on IM, 1987, 36(2): 537~539.
- [6] 谭浩强. C++ 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社. 2004.
- [7] 安立 MS2028B 矢量网络分析仪编程手册 [S]. 217~210.
- [8] NI-VISA User Manual [S], February 1996 Edition Part Number 321074A-01. 18~22.

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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>