

微波陶瓷介电性能自动测试系统设计

陈赐海¹, 李秀燕¹, 肖 芬²

(1.漳州师范学院 福建 漳州 363000; 2.厦门大学 福建 厦门 361005)

摘要: 开路型微波陶瓷材料介电性能自动测试系统的设计包括系统的测试原理、系统硬件和软件组成。利用操作界面友好的自动测试程序,可在程序面板上控制网络分析仪,实现测试数据的实时采集、分析计算与显示存储,从而提高测试效率与精度。实测表明,利用该系统能对高介电常数、低损耗的微波陶瓷材料复介电常数进行快速、准确、无损的自动测试。

关键词: 介电性能; 介质谐振器; VEE; 自动测试

中图分类号: TP29, TN99

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X(2008)16-160-03

Design of Automatic System for Measuring Dielectric Properties of Microwave Dielectric Ceramics

CHEN Cihai¹, LI Xiuyan¹, XIAO Fen²

(1.Zhangzhou Normal College, Zhangzhou, 363000 China; 2.Xiamen University, Xiamen, 361005 China)

Abstract: Design of open automatic system for measuring dielectric properties of Microwave Dielectric Ceramics(MWDC) is introduced, including testing principle, system hardware and software. The automatic measurement program provides a friendly interface between the VNA and the experiment operators, it can be applied to control the network analyzer, sample and compute the testing data, the results can be obtained and saved instantly, the measurement efficiency and precision are improved. It is shown that the system can be used for the rapid, accurate, nondestructive and automatic measurement of the high ϵ_r' and low $\tan \delta$ of MWDC materials.

Keywords: dielectric properties; dielectric resonator; VEE; automatic measurement

微波陶瓷是指应用于微波电路中作为介质材料完成一种或多种功能的陶瓷,是一种经济型电子元器件材料。评价微波陶瓷在微波频段介电性能的参数主要有:相对介电常数 ϵ_r' (以下简称介电常数)、介质损耗 $\tan \delta$ 、谐振频率温度系数 τ_f 。这些参数的准确测试是研究材料微波特性和设计电子器件的重要环节之一,一般采用的测试方法是短路型介质谐振器法^[1,2],但对于高介电常数和低损耗材料,由于介质样品端面与两金属导电板直接接触,传导损耗较大,使得低 $\tan \delta$ 陶瓷材料测试引入较大的误差。为提高测试效率与精度,采用开路型介质谐振器方法,在硬件基础上开发自动测试软件,构建开路型微波介质陶瓷材料的自动测试系统。

1 理论分析

在短路型平行板介质谐振器的基础上,把样品与金属板拉开一定的距离,减少直接接触的影响,形成开路型的系统结构见图 1。

利用 Weinstein 计算本征值的变分法^[3],把两金属板包含的空间分成是柱内 ($r < a$) 和柱外 ($r > a$) 两部分,考虑电磁场在 $r = a$ 处连续,求解 Helmholtz 方程。分析轴对称模式 $TE_{01\delta}$ ^[4],得到谐振频率和介电常数关

系的矩阵方程:

$$\det W(f_0, \epsilon_r', a, L', L_1, L_2) = 0 \quad (1)$$

通过数值算法,把测量的谐振频率 f_0 值代入方程(1)求解,可以算出样品的介电常数。

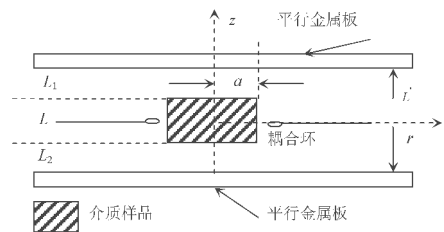


图 1 开路型平行板介质谐振器

对于样品的 Q 值,谐振时,大部分能量储存在样品中,一般直接把介质的 Q_d 当作样品的 Q 值^[5],但这种做法对于低损耗的材料会引入一定的误差。为准确测出样品的 Q 值($Q^{-1} = \tan \delta$),把传导损耗也考虑进来,采用 Kajfez 等提出的方法^[6,7],结合微扰理论可得:

$$\begin{cases} Q_{cu} = \left[\frac{f_0}{-\frac{\Delta f_0}{\Delta L_1}} \right] \delta \\ \frac{1}{Q_c} = \frac{2}{Q_{cu}} \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)中: δ 是导体的趋肤深度; Q_c 是表征总的传导损耗的 Q 值。系统结构对称,认为上下金属板损耗

相等。

从介质 Q 因素定义出发, 应用微扰法, 可得:

$$Q_d = \frac{f_0}{2 \left[\frac{-\Delta f_0}{\Delta \epsilon_r'} \right] \epsilon_r'} \cdot \frac{1}{\tan \delta} \quad (3)$$

把式(2), (3)以及方程式: $\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$ 联合, 可得到谐振器材料的损耗角正切 $\tan \delta$

2 自动测试系统

2.1 硬件系统

开路型介电参数自动测试系统硬件主要由几部分组成: Agilent 网络分析仪(VNA)^[8], GPIB to USB 接口卡、计算机和测试夹具等。系统连接示意图如图 2。

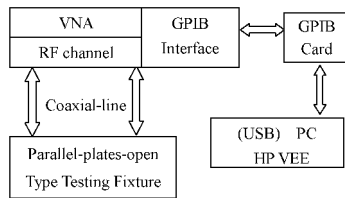


图 2 自动测试系统示意图

矢量网络分析仪是具有测量双端口网络反射和传输特性等功能的射频微波仪器。实验中通过测量 S_{21} 传输参数, 经过一系列的数据处理, 达到测试微波介质陶瓷介电性能的目的。

GPIB 接口卡是计算机 USB 接口与网络分析仪 GPIB 接口之间的转接卡, 通过编程, 建立计算机与网络分析仪之间数据通信, 是实现自动化测试一个重要环节。

开路型平行板测试夹具主要由两块抛光镀银处理过的圆形金属板组成, 以提高平行板介质谐振腔 Q 值, 提高测试精度。为方便样品的放置与精确测试, 夹具上安装有可以上升和下降的测微螺旋。设计 2 个对称的半刚性同轴电缆与样品距离调节的三维耦合环定位装置, 方便同轴耦合电缆的高度定位和进行耦合量调节, 促使其有效地激励特定的工作模式。

测试中使用圆柱形介质谐振器, 样品厚度 L 一般大于 3 mm, 大于半刚性电缆的直径, 为保证样品能激励起 $TE_{01\delta}$ 模, 根据平行板介质谐振腔的模式图, 应避免 $TE_{01\delta}$ 谐振峰的重叠及谐振处于泄漏态, 对于平行板开路型介电谐振器, D 为谐振器直径 ($D = 2a$), 一般情况下, 只要选取 $L/D \leq 0.7$, 就可以保证谐振器的最低次模是 $TE_{01\delta}$ 模。

2.2 软件系统

系统的自动测试程序在 Agilent VEE 图形化编程环境下进行编写^[9], 能够实时采集测试数据并分析计算

与存储。通过监视与控制矢量网络分析仪, 方便了测试人员操作, 提高了测试效率。用 VEE 图形化控件架构程序, 整体程序流程图如图 3。

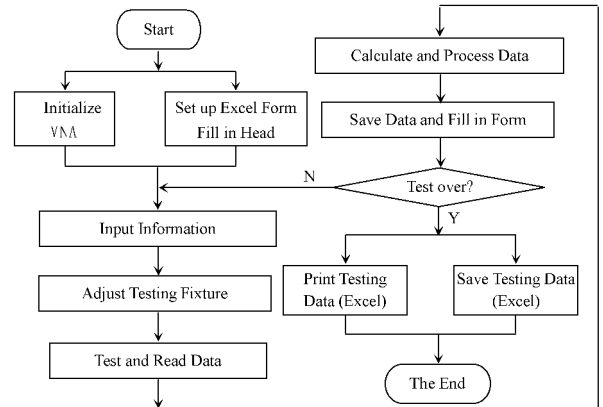


图 3 程序流程图

程序用到的几个模块有: 仪器控制、频率扫描、数据采集、计算处理、曲线获取、数据存储与打印模块等(篇幅有限, 不一一介绍)。当网络分析仪通过 GPIB 接口卡与计算机连接后, 可进一步实现两者的数据通信。首先通过仪器管理对话框 (Instrument Manager) 找到测试仪器原驱动器, 并添加相应仪器设备, 表示仪器的功能控件已进入开发环境, 可以进行程序控制与数据通信。接着通过调试控制仪器与设备初始化模块, 判断数据通信是否正常, 同时对网络分析仪的工作参数进行初始化设置, 比如: 扫描功率, 扫描的数据点数, 显示曲线的选择和曲线的平均点数等。

计算处理程序部分 (见图 4) 接收采集到的测试参数和测试人员从程序界面输入的介电陶瓷样品的尺寸参数, 调用 Matlab 脚本程序, 利用相关公式进行求解 (包括贝塞尔函数等)。计算得到的结果有相对介电常数, 损耗角正切等。

最后是 Excel 数据表文档处理, 程序进入表格初始化部分, 首先要创建和宣告几个应用到的全局变量, 存放到 UserFunction 控件中, 接着用 Call 命令调用全局变量。启动 Excel 程序, 并创建一新的空白表格, 指定数据存放在 sheet1, 在当前窗口下显示 Excel 数据文档, 自动在表格第一行填写设定的表头值, 并命名窗口标题。

为操作方便, 设计友好的运行界面。在测试过程中程序界面图 (见图 5)。程序总体操作流程为: 运行测试程序, 点击 Start 按钮, 开始进入网络分析仪的初始化, 程序自动生成 MS Excel 文档 Test_result.xls, 同时打开数据记录表格, 并设置表格的框架、数据填写格式等, 接着程序弹出对话框提示开始输入样品尺寸等, 并自动填入表格文档, 估算初始频率, 进入自动搜索过程, 把找

到 $TE_{01\delta}$ 模谐振峰值信息记录下来,对数据进行分析计算,填入表格,同时在电脑屏幕测试面板界面上显示测试的相关数据,把谐振峰图形数据也采集显示到面板上,操作人员可直接观察谐振峰是否对称等。接着询问是否继续下一个测试,测试完后,可以进行数据文件的存储、打印。

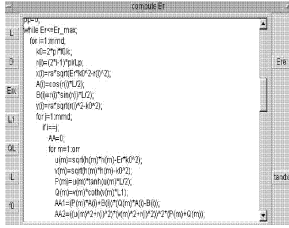


图4 计算处理 VEE 程序图

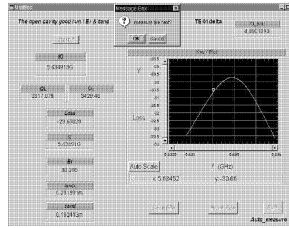


图5 程序操作界面

3 测试结果与比较

利用自动测试系统,测试过程中调节两耦合环与介质样品的相对位置,尽量使得 $TE_{01\delta}$ 模谐振峰对称。同时使两耦合环与介质样品之间的耦合量适当。通过标定平行金属板导电率,测得几组数据并与开路型方式比较如表 1 所示。

表 1 测试结果比较

样品	开路型方式测试				短路型方式测试			
	f_0 /GHz	ϵ_r'	$\tan \delta$ ($\times 10^{-5}$)	$f_0 \cdot Q$ /GHz	f_0 /GHz	ϵ_r'	$\tan \delta$ ($\times 10^{-5}$)	$f_0 \cdot Q$ /GHz
BCZN	4.956	36.94	9.74	50 967	6.164 *	36.89 *	13.80 *	44 667 *
3-1340	5.066	36.24	8.81	57 038	6.317 *	36.01 *	11.60 *	54 457 *
3-1440	5.402	32.34	16.73	32 289	6.920	32.24	23.06	30 009
1-1440	5.634	30.30	22.22	25 355	7.284	30.22	30.34	24 008
3-1360	5.284	34.29	14.75	35 823	6.752	34.23	19.73	34 222

注:带 * 表示数据为电子科大测试结果

从表上数据可以看出,使用开路型介质谐振器法测试时,上下金属平行板没有与介质样品直接接触,因而传导损耗小,对介质损耗测试所造成的干扰最小,所测试的无载 Q_u 值就有可能最接近真值。说明开路型方式所测的介质损耗角正切值更加准确。此外,开路法测试的频率值比短路型方式较小,两种方法所得到 ϵ_r' 的值有一点差别,但基本吻合。

对某样品进行多次测量,结果见表 2。其中, $\overline{\epsilon_r'} = 108.01$, $\overline{\tan \delta} = 80.68 \times 10^{-5}$ 。则 ϵ_r' 和 $\tan \delta$ 的相对误差分别为: $\frac{\Delta \epsilon_r'}{\epsilon_r'} \leq 0.01\%$, $\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta} \leq 0.23\%$ 。由此可见,

测试结果有很好的重复性。

表 2 单样品五次测试结果

次数	f_0 /GHz	ϵ_r'	$\overline{\epsilon_r'}$	$\tan \delta$ ($\times 10^{-5}$)
1	3.894 0	108.01		80.81
2	3.893 9	108.02		80.82
3	3.893 9	108.01	108.01	80.49
4	3.894 1	108.00		80.45
5	3.894 0	108.01		80.82

4 结 语

在 VEE 开发环境中,通过内嵌 Matlab 实现图形化测试程序,实现对矢量网络分析仪的控制及测试数据的读取、分析计算与存储。实际的使用证明,自动测试系统提高了测试效率,使得微波介质陶瓷材料介电参数测试变得简单、直观,测试的大部分工作能在软件控制下完成,具有较好的精确度和实用性。对生产和研制使用微波介质谐振器起到一定的促进作用。

参 考 文 献

- [1] Kobayashi Y, Tamura H, Robin H. Test on a Dielectric Resonator Method for Measuring Complex Permittivity at Microwave Frequency [J] . IEICE Trans. Microwave Theory Tech. , 1994, 77(6): 882-887.
- [2] 唐宗熙. 介质谐振器介电参数频响特性及频率温度参数的测量 [J] . 计量学报, 2002, 23(1): 57-61.
- [3] Gould S H. Variational Methods for Eigenvalue Problems [M] . Toronto, Canada; University of Toronto Press 1966.
- [4] Jaworski M, Pospieszalski M W. An Accurate Solution of the Cylindrical Dielectric Resonator Problem [J] . IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1979, MTT-27: 639-643.
- [5] Lee J, Lim S H, Lee S H, et al. Q-Factors of a Ring Dielectric Resonator in an MIC Structure [C] . Radio and Wireless Conference, IEEE, RA WCON 99, 1999: 195-198.
- [6] Kajfez D. Incremental Frequency Rule for Computing the Q factor of a Shielded TE_{0np} Dielectric Resonator [J] . IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1984, MTT-32: 941-943.
- [7] Kobayashi Y, Aoki T, Kabe Y. Influence of Conductor Shields on the Q-Factors of a TE_0 Dielectric Resonator [J] . IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1985, MTT-33: 1 361-1 366.
- [8] Agilent Technologies. PNA Series E8362B Network Analyzer Help. 2004.
- [9] Agilent Technologies. Agilent VEE Pro 6. 0 Help. 2000.

作者简介 陈赐海 男, 1973 年出生, 福建漳州人, 硕士, 讲师。研究方向为射频微波理论与应用、微波测量、应用电子技术等。