

X波段低损耗材料复介电常数自动测量系统

李 巍^{1,2} 韦 高¹ 杨金孝¹

(1 西北工业大学 电子信息学院,西安 710072)

(2 山东航天电子技术研究所,烟台 264001)

文 摘 介绍了用圆柱谐振腔测量低损耗介质材料复介电常数的自动测量系统。该系统可根据加载介质前后圆柱谐振腔的谐振频率和品质因数,计算出被测材料的相对介电常数 ϵ_r 和损耗角正切 $\tan \delta$ 。系统设计时,采用对固定尺寸的圆柱谐振腔进行扫频测量的方法,提高了测量精度;采用反相馈电和在腔壁开槽的方法来抑制干扰模式。用此系统对几种低损耗材料进行测量,结果令人满意。

关键词 圆柱谐振腔,介电常数,损耗角正切,品质因数

An Automatic System for Complex Permittivity Measurement of Low-Loss Materials at X Band

Li Wei^{1,2} Wei Gao¹ Yang Jinxiao¹

(1 School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Shandong Aerospace Electro-Technology Institute, Yantai 264001)

Abstract A realization of automatic system for the complex permittivity measurement of low-loss materials by using a cylindrical cavity is described in this paper. According to the frequency and the quality factor of the cylindrical cavity unloaded and loaded, the system can calculate the permittivity ϵ_r and the loss angle tangent $\tan \delta$ of the materials being tested. In order to improve the precision of the system, the cylindrical cavity of fixed length is measured with sweeping frequency method; in order to avoid disturbing modes, the cylindrical cavity is inspired with signals of reverse phases and is made with some notches on the inside surface. The results of some low-loss materials tested under this system are quite satisfactory.

Key words Cylindrical cavity, Permittivity, Loss angle tangent, Quality factor

0 引言

低损耗介质材料被广泛应用于制造雷达天线罩,其介电性能直接影响天线罩的透波率及天线的瞄准精度,是材料选择的主要依据。描述低损耗介质材料微波电特性的最基本参数是其复介电常数,因此复介电常数的精确测量对雷达天线罩的设计有重要意义。低损耗材料的复介电常数可表示为 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$

$= \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r'(1 - j\epsilon_r''/\epsilon_r') = \epsilon_r'(1 - \tan \delta)$ ^[1],只要能够分别测出相对介电常数 ϵ_r' 和损耗角正切 $\tan \delta$,就可以得到其复介电常数。

用高 Q 谐振腔(本文实际使用圆柱谐振腔)测量低损耗介质材料的复介电常数精度较高,是一种广泛应用的测量方法^[2~3]。本文采取固定圆柱谐振腔腔体尺寸进行扫频测量的方法,大大减少了点频

收稿日期:2006-01-17;修回日期:2006-03-16

作者简介:李巍,硕士,主要从事微波测量技术的研究工作

测量过程中调谐腔体尺寸所引起的误差;采用计算机控制矢量网络分析仪实时读取测量数据进行分析计算,不但实现了测量过程自动化,而且大大提高了测量精度、缩短了测量时间,为低损耗介质材料复介电常数的精确测量提供了一套理想的解决方案。

1 测量原理

在空腔底部插入介质片时,如图 1 所示,介质的相对介电常数与空气不同,会引起圆柱谐振腔体的等效轴向距离变化,导致谐振频率改变;同时由于介质损耗的存在,导致圆柱谐振腔品质因数下降,由此可根据加载介质前后圆柱谐振腔的谐振频率和品质因数计算出插入介质的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 。

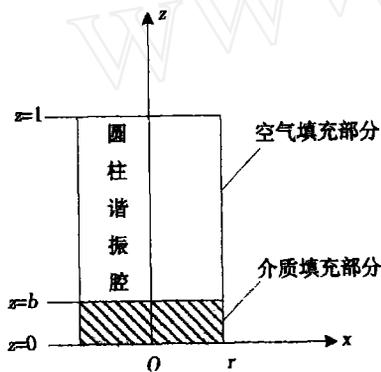


图 1 有介质的圆柱谐振腔

Fig 1 Schematic graph of cylindrical cavity with loaded material

1.1 相对介电常数 ϵ_r 的求解

当圆柱谐振腔加载介质谐振后,由其谐振时的边界条件可得^[4]:

$$\frac{\tan \frac{b}{c} + \tan \frac{\epsilon_0(l-b)}{c}}{\epsilon_0} = 0 \quad (1)$$

式中, $\epsilon_0^2 = \frac{c^2}{\mu_0} \epsilon_r - k^2$, $\epsilon_0^2 = \frac{c^2}{\mu_0} - k^2$, $k = \frac{\mu_0 \omega}{r}$, $\omega = 2\pi f$, l 为腔体长度, r 为腔体半径, b 为被测介质的厚度, $\mu_0 = 3.832$ 为第一类零阶贝塞尔函数导数的第一个根, ϵ_0 、 ϵ_0 为圆柱谐振腔的空气部分和加载介质部分的传播常数, f 为加载时的谐振频率, c 是实验条件下的光速,对于非导磁介质, $\mu_r = 1$,即方程 (1) 中只有一个未知数 ϵ_r ,可由解方程求得。

1.2 损耗角正切 $\tan \delta$ 的求解

由加载后的圆柱谐振腔有载品质因数 Q_d 的定义可推出^[4]:

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_d} - \frac{D}{Q_0} \quad (2)$$

式中:

$$A = \frac{2x \epsilon_r + (B - \epsilon_r) \sin 2x + (2l - 2x) P}{\epsilon_r (2x - \sin 2x)},$$

$$B = \left(\frac{c}{\omega r}\right)^2, D = \frac{F+G}{E}, E = \epsilon_r \left[\frac{c^2}{\omega^2} + \frac{2r(1-\epsilon_r^2)}{l} \right],$$

$$F = \frac{c^2}{\omega^2} \frac{2x + (B - 1) \sin 2x + (2l - 2x) P}{2x - \sin 2x},$$

$$G = 2 \frac{r \left[\frac{c^2}{\omega^2} (\epsilon_r - \epsilon_r^2) + (1 - \epsilon_r^2) P \right]}{2x - \sin 2x}, P = \sin^2 x + B \cos^2 x,$$

$x = \frac{b}{r}, q = \frac{\mu_0 c}{2\pi f}, Q_0, Q_d$ 为空腔和加载的腔体品质因数。

2 圆柱谐振腔的设计

圆柱谐振腔是一种结构简单的波导空腔谐振器,其性能直接影响介质测量精度,是测量系统中一个关键部件。圆柱谐振腔中可存在 TM 模和 TE 模,多种模式的存在对测量有较大的影响^[5]。本文只使用 TE 模中的 TE_{01p} 模来进行测量,其他干扰模可采取措施滤除。 TE_{01p} 模品质因数较高,能够满足测量低损耗介质材料的要求; TE_{01p} 模是圆电模,根据 TM、TE 模的场分布,可采取反相馈电法和在圆柱谐振腔腔壁上开槽的方法滤除 TM 模的干扰;采取合理选择腔体尺寸的方法,可以避免高次 TM 模的干扰。

2.1 圆柱谐振腔的尺寸设计

圆柱谐振腔的尺寸设计包括腔体长度 l 和腔体半径 r 的确定,设计的指标为工作频率 f_0 和品质因数 Q_0 。当工作模式为 TE_{01p} 时,圆柱谐振腔的谐振频率和品质因数分别满足条件:

$$f_0^2 = \left(\frac{c}{2l}\right)^2 p^2 + \left(\frac{d_{01}}{2r}\right)^2 \quad (3)$$

$$(Q_0 - 1)_{TE_{01p}} = \frac{0.336/l \cdot 49 + (pr/l)^2}{1 + 1.34p^2 (r/l)^3} \quad (4)$$

式中, p 为谐振模式, d_{01} 为腔体材料的趋肤深度。当要求 f_0 在 8~12 GHz 范围内、 $Q_0 > 25000$ 时,可以根据 (3)、(4) 式计算出满足条件的腔体尺寸。

本文设计的圆柱谐振腔由黄铜制作,尺寸为 $l = 290$ mm, $r = 27.5$ mm,此时谐振模式 p 与 f_0, Q_0 的对应关系如图 2 所示,可以看出,当模式 $p = 9 \sim 19$ 时,腔体 f_0 为 8~12 GHz,而且对应的 $Q_0 > 25000$,满足设计指标,同时可以看出该尺寸下的高次 TE 模 TE_{02p}, TE_{03p} 的最低 f_0 都在 12 GHz 以上,达到了避免

高次模式干扰的目的。

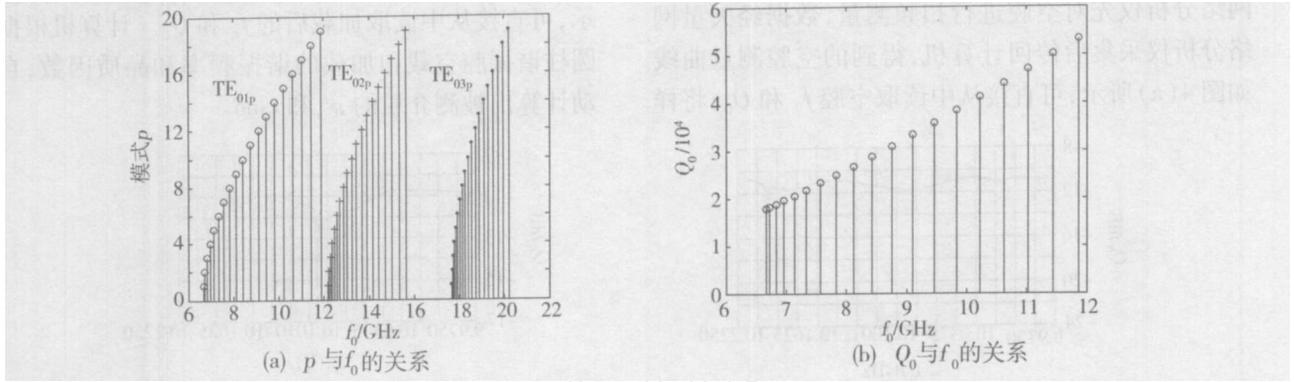


图 2 谐振模式 p 与 f_0 、 Q_0 的关系

Fig 2 Relations of p to f_0 and Q_0

2.2 TM 干扰模式的抑制

根据 TM 模式的场分布,采用反相馈电法和在圆柱谐振腔壁上开槽法对 TM 干扰模加以滤除。反相馈电法是由反相功分器将激励信号反相后经耦合器分别耦合入圆柱谐振腔,这种耦合方式可激励起 TE 模但对 TM 模有较大的抑制;在腔壁上开槽可以阻断纵向壁电流的传播,使没有被滤除的 TM 模得到较大的衰减,减小其对测量过程的影响。

2.3 腔体尺寸修正

加工过程存在误差,实际加工好的腔体与设计腔体在尺寸上存在差别,在代入腔体尺寸计算时,必须采用修正后的真实尺寸,否则会引入较大的计算误差。对于固定尺寸的腔体,每个谐振模式对应的谐振频率是不变的,可根据实际谐振频率和对应模式数据对腔体尺寸进行修正。TE_{01p} 模圆柱谐振腔的 f_0 满足关系式 (3), 设 $y = f_0^2$, $x = p^2$, $c_0 = (\frac{d\mu_{01}}{2r})^2$, $c_1 = (\frac{c}{2l})^2$, 则 (3) 式可写为:

$$y = c_1 x + c_0 \quad (5)$$

由测量得到的若干个实际 f_0 和对应的模式 p , 用最小二乘法对方程 (5) 进行曲线拟合, 确定 c_0 、 c_1 的值, 即可求出真实的腔体尺寸 r 和 l 。本文设计的腔体尺寸为 $l = 290 \text{ mm}$ 、 $r = 27.5 \text{ mm}$, 任选测量到的一组 f_0 和对应模式 p 数据见表 1。

用表 1 数据进行修正, 可得实际的腔体尺寸为:

$l = 290.45 \text{ mm}$ 、 $r = 27.49 \text{ mm}$ 。

表 1 实测 f_0 和对应的模式 p

Tab 1 Relations of resonant modes to f

p	f_0 / GHz	p	f_0 / GHz
10	8.415587	18	11.421281
13	9.444082	19	11.843715
15	10.202567		

3 测量系统及测量方法

测量系统由计算机、矢量网络分析仪、反相功分器和耦合器、圆柱谐振腔等四个部分组成, 如图 3 所示。Agilent 82357A 是 USB - GPIB 转换接口, 用以连接计算机和矢量网络分析仪。本文选用的矢量网络分析为 Agilent 8720D, 该型号的矢量网络分析仪具有很好的稳定性并可以由计算机程控, 参见矢量网络分析仪 Agilent 8720D 的使用手册, 其内部有仪器的编码及编程规则, 可以由 VC、VB 等计算机语言编程控制实现大部分功能。本文采用 VC 编写了控制界面, 实现了计算机对矢量网络分析仪的控制。

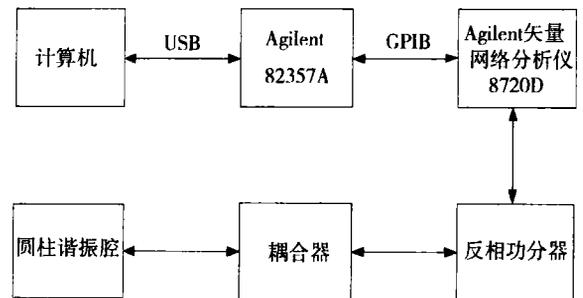


图 3 测量系统框图

Fig 3 Frame of measuring system

测量时,根据测量频段要求,由计算机控制矢量网络分析仪先对空腔进行扫频测量,数据经矢量网络分析仪采集后传回计算机,得到的空腔测量曲线如图 4(a)所示,可直接从中读取空腔 f_0 和 Q_0 ;将样

品放入谐振腔中,得到的加载测量曲线如图 4(b)所示,可直接从中读取加载后的 f 和 Q_d 。计算机根据圆柱谐振腔空载和加载的谐振频率和品质因数,自动计算出被测介质的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 。

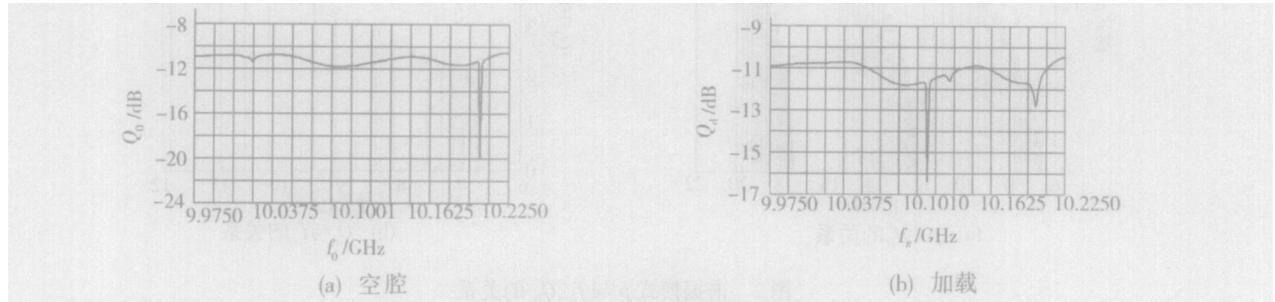


图 4 圆柱谐振腔空腔和加载的测量曲线

Fig 4 Measurement curve of unloaded and loaded cylindrical cavity

4 测量结果分析

$l=290.45 \text{ mm}$, $r=27.49 \text{ mm}$, $c=299.713.300 \text{ m/s}$ 聚四氟乙烯复介电常数参考值^[6]:

$$\epsilon_r = 2.1, \tan \delta = 2.5 \times 10^{-4}$$

(1)样品 1 (聚四氟乙烯):厚度 $b=9.03 \text{ mm}$
样品 1 的复介电常数测量结果见表 2。

表 2 样品 1 的测量结果

Tab 2 Results of sample 1 (PTFE)

f_0/GHz	f/GHz	Q_0	Q_d	ϵ_r	$\tan \delta / 10^{-4}$
8.415638	8.295671	35710	23570	2.0851	2.1628
9.444389	9.298507	42790	29830	2.0840	2.0773
11.42177	11.26121	46420	36520	2.0812	2.0036

(2)样品 2 (聚四氟乙烯):厚度 $b=6.11 \text{ mm}$
样品 2 的复介电常数测量结果见表 3。

表 3 样品 2 的测量结果

Tab 3 Results of sample 2 (PTFE)

f_0/GHz	f/GHz	Q_0	Q_d	ϵ_r	$\tan \delta / 10^{-4}$
8.415587	8.373564	35180	26690	2.1097	2.1240
9.444082	9.371097	42130	27980	2.1058	2.0432
11.42127	11.29761	46220	29540	2.0985	2.1476

测试过程中发现,测试用的样品尺寸对测量有较大影响,如果介质半径比圆柱谐振腔半径小,即样品放入腔体后与腔壁之间有空隙,对复介电常数的测量有较大的影响;且放入的样品与圆柱谐振腔的相对位置改变时,也会对测量结果有影响,即样品本

身的不均匀性对测量结果也有较大影响。

5 结论

对低损耗介质材料复介电常数的精确测量系统,从圆柱谐振腔空载和加载的测量曲线中可以看出,本文采取的干扰模抑制方式取得了很好的抑制效果,能滤除大部分干扰模,没有滤除的部分干扰模式也得到了较大的衰减,对测量过程几乎没有影响;从每次测量得到的圆柱谐振腔谐振频率和品质因数数值及计算得到的复介电常数结果分析可以看出,系统具有较好的稳定性和较高的测量精度;采用 VC 编程实现对矢量网络分析仪的控制,使得整个测量过程自动化程度高,操作使用方便。

参考文献

- 周清一.微波测量.北京:国防工业出版社,1964
- 何小瓦,李恩等.介质材料复介电常数变温测量技术综述.宇航材料工艺,2005;35(1):20~23
- 黎义,李健保,何小瓦.采用谐振腔法研究透波材料的高温介电性能.红外与毫米波学报,2004;23(2):157~160
- Ni E, Stumper U. Permittivity measurements using a frequency-tuned microwave TE_{01} cavity resonator. IEE Proceedings, 1985;32(1):27~32
- 董树义.近代微波测量技术.北京:电子工业出版社,1995
- 顾茂章,张克潜.微波技术.北京:清华大学出版社,1989

(编辑 李洪泉)