

# 材料电磁特性参数测试平台

## 1 背景

新材料与信息工程、能源工程及生物工程并列为当今世界上新技术革命的四大支柱。材料的发展在一定程度上反映了一个时代的生产力发展水平，它的品种、产量和质量情况是衡量一个国家科学技术与经济发展水平的一个重要标志。电子材料的发展在整个电子科技领域中总是处于最前沿的，它是电子工业和电子科学技术发展的物质基础，是电子技术进步的原动力。这不仅表现在电子产品的性能直接依赖于电子材料的特性，还表现在新型电子材料的开发能促进许多新型电子元器件的发展。

针对不同外形尺寸、电气参数、物理状态和使用频段的介质材料，需要有对应的测量测量方法、测量夹具、分析计算方法。本文档描述材料电磁特性参数测量技术方案。涉及液体、固体、粉末、薄膜材料的介电常数/磁导率、反射率（吸收率）测量的技术途径、仪器设备、测量夹具、分析软件等方面。采用的测量方法包括谐振腔法、传输/反射法、空间法、探针法等。

## 2 材料电磁特性测量

### 2.1 谐振腔法

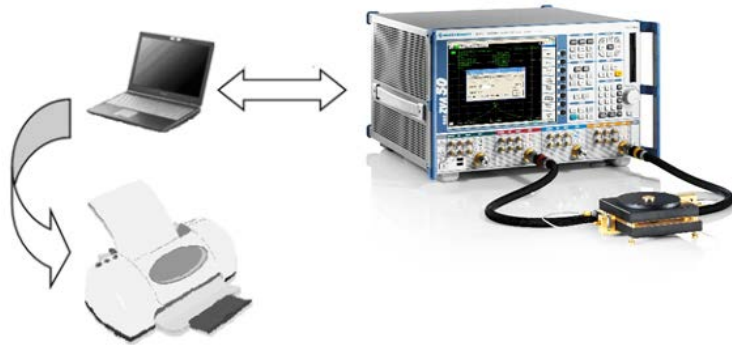


图1 谐振腔法测量系统

谐振腔法测量系统可以在一个点频频率上测得复数介电常数和表面电阻。由于谐振腔一般具有极高的品质因数（Q值），因此测量精度很高。

在测量中，首先利用矢量网络分析仪测量谐振器的谐振频率（ $f_0$ ）和品质因数（ $Q_0$ ）；然后加入待测材料，测量此时的谐振器的谐振频率（ $f_s$ ）和品质因数（ $Q_s$ ）；通过计算谐振频率的变化（ $\Delta f$ ）和品质因数的变化（ $\Delta Q$ ），可计算待测材料的复数介电常数。

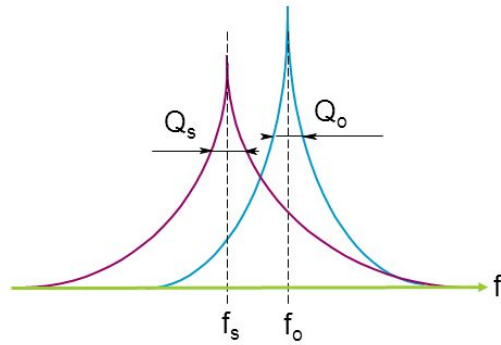


图2 谐振腔法测量测量原理

根据待测材料的不同，可以采用高 Q 值谐振腔、微扰谐振腔和分离式介质谐振腔。

### 2.1.1 高 Q 值谐振腔：

高 Q 值谐振腔一般采用圆柱形谐振腔，待测材料需加工成圆柱状。



图3 高 Q 值谐振腔

表1 高 Q 值谐振腔主要技术参数

测量参数	介电常数 $\epsilon_r'$ : $>10$ ; 介电损耗角正切 $\tan \delta$ : $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$
测量精度	$ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'  \leq 1\%$ $ \Delta \tan \delta  \leq 15\% \times \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$
频率范围	800 MHz – 18 GHz
样品要求	正圆柱体

### 2.1.2 微扰谐振腔：

微扰谐振腔一般采用圆柱形谐振腔或矩形谐振腔，待测材料需加工成直径较小的圆柱体，粉末材料可放置于石英玻璃等圆柱形容容器内。

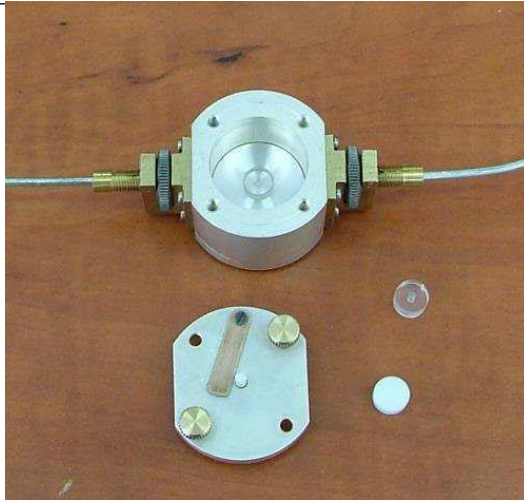


图4 微扰谐振腔

表2 微扰谐振腔主要技术参数

测量参数	介电常数 $\epsilon_r'$ : 2~30; 介电损耗角正切 $\tan \delta$ : $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$
测量精度	$ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'  \leq \pm(0.0015 + \Delta h/h)$ $ \Delta \tan \delta  \leq \pm \max(2 \times 10^{-5}, 0.03 \tan \delta)$
频率范围	1 GHz – 20 GHz
样品要求	圆柱体

### 2.1.3 分离式介质谐振腔:

分离式介质谐振腔适用于薄膜材料测量。

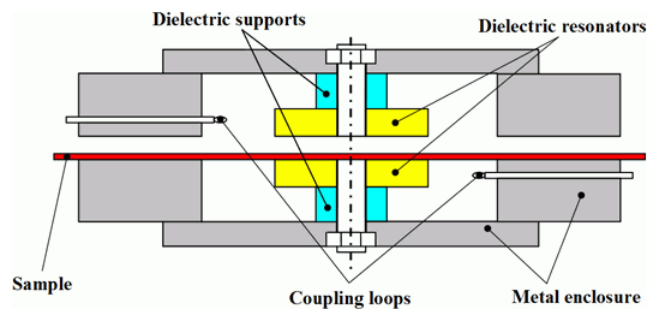


图5 分离式介质谐振腔

表3 分离式介质谐振腔主要技术参数

测量参数	介电常数 $\epsilon_r'$ : 2~10; 介电损耗角正切 $\tan \delta$ : $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$
测量精度	$ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'  \leq \pm(0.0015 + \Delta h/h)$ $ \Delta \tan \delta  \leq \pm \max(2 \times 10^{-5}, 0.03 \tan \delta)$
频率范围	1 GHz – 15 GHz
样品要求	薄膜

## 2.2 传输/反射法:

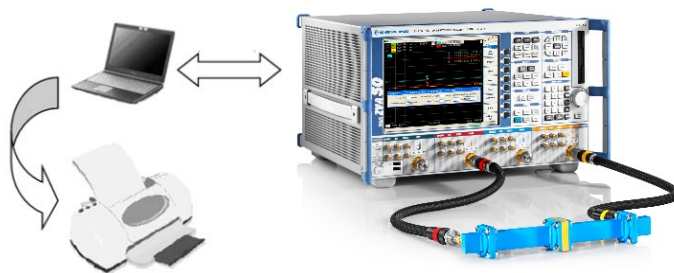


图 6 传输/反射法测量系统

传输/反射法是将被测材料填充在传输线内构成一个双端口网络，通过测量散射矩阵，可以计算被测材料的电磁特性参数。传输/反射法可以实现宽带测量。

根据使用的传输线不同，分为波导传输/反射法和同轴传输/反射法。

### 2.2.1 波导传输/反射法:

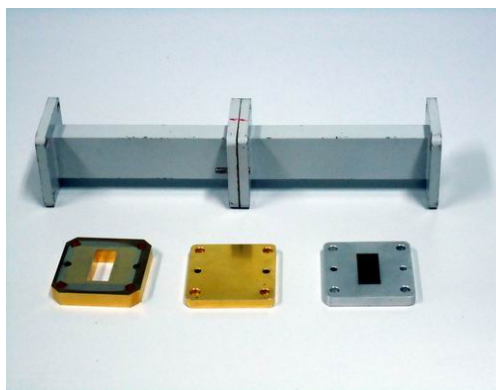


图 7 波导传输/反射法测量夹具及校准件

波导传输/反射法主要用于片状材料样品微波电磁参数的测量，测量样品较小，容易制作。测量系统基于波导传输测量法，采用 TRL 法在波导端面校准，利用矢量网络分析仪测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。

表 4 波导传输/反射法主要技术参数

测量参数范围	介电常数 $\epsilon_r'$ : 2 - 50; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$ : 0.1 - 1; 磁导率 $\mu_r'$ : 0.3 - 10; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu$ : 0.1 - 1.5;
测量精度	$ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'  \leq 10\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\epsilon  \leq 10\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.05$ ; $ \Delta \mu_r' / \mu_r'  \leq 10\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\mu  \leq 10\% \times \tan \delta_\mu + 0.05$ ;
频率范围	2.6 GHz - 40 GHz
样品要求	均匀片状材料

对于较薄的材料，可以直接夹在波导之间测量：

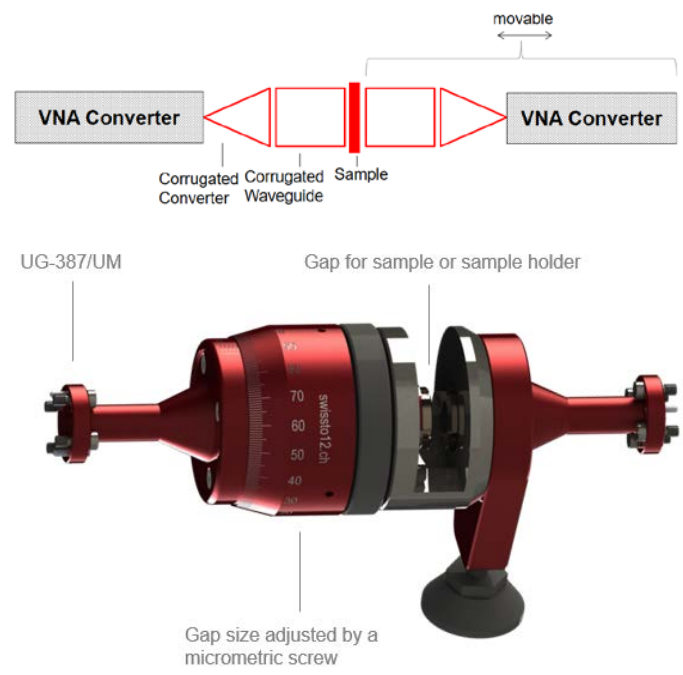


图 8 波导传输/反射法测量薄膜材料夹具

表 5 波导传输/反射法测量薄膜材料适用范围

波导型号	频率范围 (GHz)	最大样品厚度 (mm)
WR-15+	45-75	18
WR-12+	55-60	18
WR-10+	67-110	18
WR-8	90-140	18
WR-6.5	110-170	8
WR-5.1	140-220	8
WR-3.4	220-330	8
WR-2.2	330-500	5

### 2.2.2 同轴传输/反射法：

同轴传输/反射法主要用于圆环状材料样品微波电磁参数的测量，测量频段宽。测量系统基于同轴传输测量法，利用矢量网络分析仪测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。



图9 同轴传输/反射法测量夹具

表6 同轴传输/反射法主要技术参数

测量参数范围	介电常数 $\epsilon_r'$ : 1 - 50; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$ : 0.1 - 1; 磁导率 $\mu_r'$ : 0.3 - 10; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu$ : 0.1 - 1.5;
测量精度	$ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'  \leq 10\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\epsilon  \leq 10\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.05$ ; $ \Delta \mu_r' / \mu_r'  \leq 10\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\mu  \leq 10\% \times \tan \delta_\mu + 0.05$ ;
频率范围	0.5 GHz - 18 GHz
样品要求	圆环形

### 2.3 空间法:

自由空间测量方法与自动测量系统主要用于板状吸波材料样品微波电磁参数的测量。测量系统基于自由空间传输测量法，采用TRL法直接在测量样品端面校准，利用矢量网络分析仪 R&SZVA 测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。

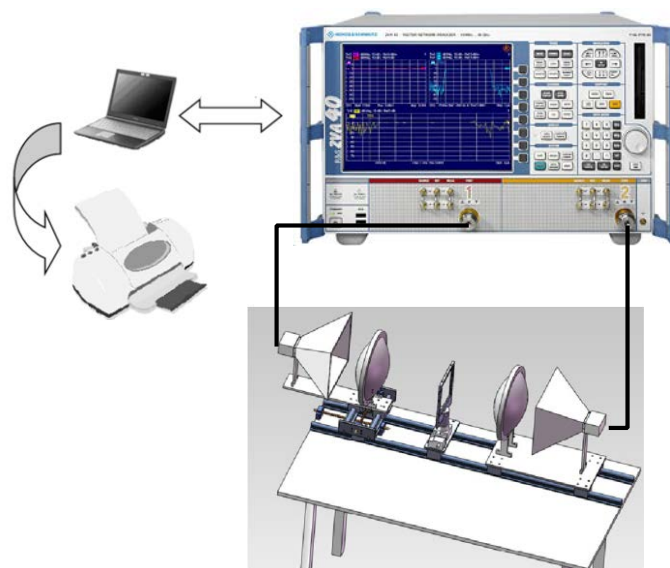


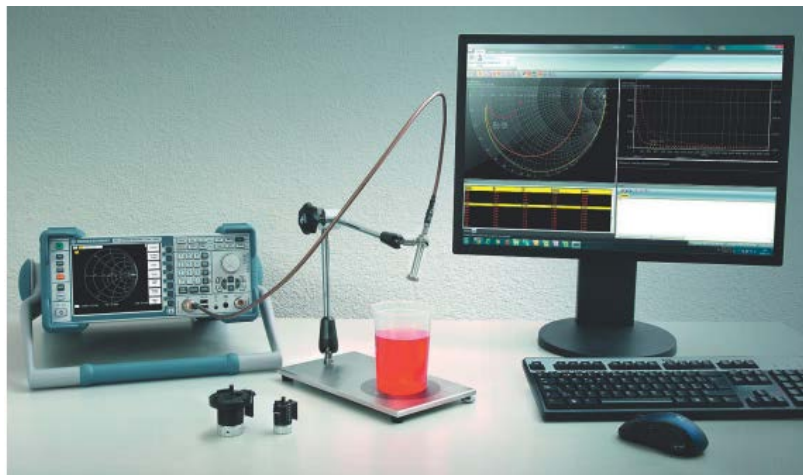
图10 空间法测量系统



**表 7 空间法主要技术参数**

测量参数范围	介电常数 $\epsilon_r'$ : 1 – 50; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$ : 0.2 – 1; 磁导率 $\mu_r'$ : 0.3 – 10; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu$ : 0.2 – 1.5;
测量精度	$ \Delta\epsilon_r'/\epsilon_r'  \leq 15\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\epsilon  \leq 15\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.2$ ; $ \Delta\mu_r'/\mu_r'  \leq 15\%$ ; $ \Delta \tan \delta_\mu  \leq 15\% \times \tan \delta_\mu + 0.2$ ;
频率范围	8 GHz – 40 GHz
样品要求	均匀板状

## 2.4 同轴探针法:



**图 11 同轴探针法测量系统**

同轴探针法适用于液体材料电磁参数测量。将同轴探针放入待测液体材料中，通过测量端口反射系数的幅度相位，计算材料的介电常数与损耗角正切。

**表 8 同轴探针法主要技术参数**

测量参数范围	介电常数 $\epsilon_r'$ : 1 – 100; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$ : $10^{-5}$ – 10;
频率范围	0.01 GHz – 50 GHz
样品要求	均匀液体或半固体

## 2.5 小结:

不同测量方法的对比如下表:

**表 9 测量方法对比**

测量方法		适用材料	测量夹具/软件提供商	优点
谐振腔法	高 Q 值谐振腔	片状固体	电子科技大学	高精度、适合测量低损耗材料
	微扰谐振腔	固体、粉末	QWED	
	分离式介质谐振腔	薄膜	QWED	

传输反 射法	波导	片状固体	电子科技大学/Swissto12	宽带
	同轴	圆环状固体	电子科技大学	宽带
空间法		片状固体	西安恒达微波	宽带、高低温
同轴探 针法		液体、半固体	Speag	简单



## 3 订购信息

### 基本单元

R&S®ZVA 矢量网络分析仪

R&S®ZNB 矢量网络分析仪

### 校准件

R&S®ZV-Z53 300 kHz 到 3GHz

R&S®ZV-Z54 10 MHz 到 40 GHz

R&S®ZV-Z55 10 MHz 到 50 GHz

### 测量夹具

---

高 Q 值谐振腔	定制
微扰谐振腔	定制
分离式节制谐振腔	定制
波导传输/反射测量夹具	定制
同轴传输/反射测量夹具	定制
聚焦天线	定制
同轴探针 DAK-12	10 MHz 到 3 GHz
同轴探针 DAK-3.5	200 MHz 到 20 GHz
同轴探针 DAK-1.2	5 GHz 到 50 GHz
同轴探针 DAK-1.2E	5 GHz 到 67 GHz

**测量软件**

材料电磁特性测量软件	定制
------------	----