

# 片状介电常数测试系统方案

# 1. 引言

## 1.1 系统功能

本测试系统适用于均匀、各向同性的低损耗材料的复介电常数测量，采用带状线谐振器覆盖 1-18GHz 的测试频率，针对 PCB 板材、工程塑料、玻璃盖板及陶瓷盖板满足 IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL 标准，能耐高低温 -40-150 度。采用圆柱谐振腔覆盖 20GHz、40GHz 的测试频点，采用光学谐振腔覆盖 80GHz 的测试频率，耐高低温 -40-150 度。

序号	产品型号	描述	对应标准	耐温范围
1	QL2019-18	微带线 1-18G 夹具	IPC2.5.5.5C/ GB/T12636-90	-40-150 度
2	QI2019-20-40	STDR 1-40G	GB/T 5597— 1999	-40-150 度
3	QI2019-80	光学谐振腔 80G	GB9534-88	-40-150 度

测试设备原理性组成框图如图 1 所示。

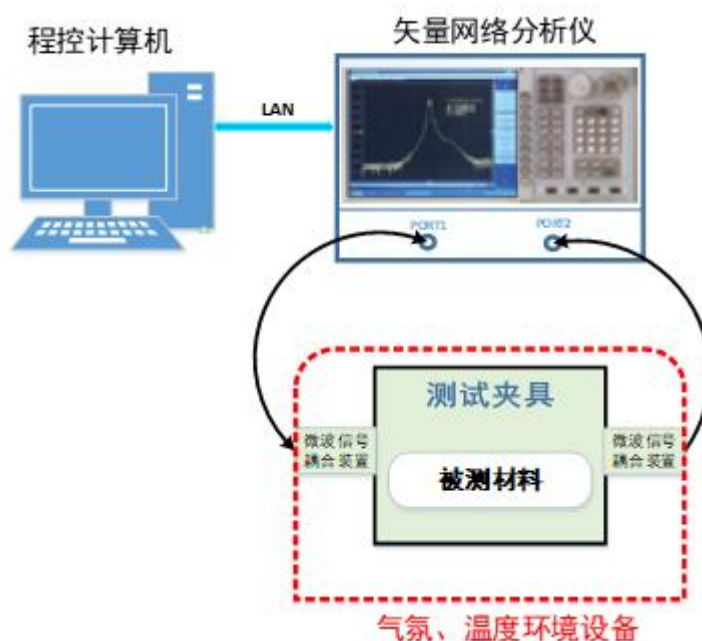


图 1 材电参数原理性测试框图

---

## 1.2 主要技术指标

### (一) 带状线谐振器测试系统

测试频率：多频点覆盖 1-18GHz

测试范围：

介电常数  $\epsilon_r'$ ：1.2 ~ 20.0

电损耗角正切  $\tan\delta\epsilon$ ： $8 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-2}$

室温测试误差：

$$|\Delta\epsilon_r' / \epsilon_r'| \leq 2.5 \%$$

$$|\Delta\tan\delta\epsilon| \leq 25\% \tan\delta\epsilon + 5 \times 10^{-4}$$

### (二) 圆柱腔法测试系统

测试频率：20GHz,40GHz 附近

测试范围：

介电常数  $\epsilon_r'$ ：1.03 ~ 10.0

电损耗角正切  $\tan\delta\epsilon$ ： $8 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-2}$

室温测试误差：

$$|\Delta\epsilon_r' / \epsilon_r'| \leq 2.0 \% \quad \epsilon_r' = 2 \sim 10$$

$$|\Delta\epsilon_r'| \leq 2.0\% \epsilon_r' + 0.01 \quad \epsilon_r' = 1.03 \sim 2$$

$$|\Delta\tan\delta\epsilon| \leq 15\% \tan\delta\epsilon + 1 \times 10^{-4}$$

### (三) 光学谐振腔法测试系统

频率范围：80GHz 附近

测试范围：

相对介电常数 $\epsilon_r$ ：1.05 ~ 10

损耗角正切  $\tan\delta\epsilon$ ：  $8 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-2}$

室温测试误差：

$$|\Delta\epsilon_r' / \epsilon_r'| \leq 2.0 \% \quad \epsilon_r' = 2 \sim 10$$

$$|\Delta\epsilon_r'| \leq 2.7\% \epsilon_r' + 0.03 \quad \epsilon_r' = 1.2 \sim 2$$

$$|\tan\delta\epsilon| \leq 20\% \tan\delta\epsilon + 3 \times 10^{-4} \quad \tan\delta \leq 5 \times 10^{-2}$$

## 2. 测试系统

### 2.1 带状线谐振器测试装置和原理

带状线法将被测材料制作成带状线谐振器进行测试。利用多模技术、模式识别技术和杂模抑制技术，进行宽频测试。测试出的结果为电场垂直于被测样品表面的复介电常数。被测试样品为方形片状，在两块尺寸一致的被测材料中间压入内导体金属薄片，形成如图 2 所示的带状线谐振器，工作模式选用  $TEM_{00n}$  模。

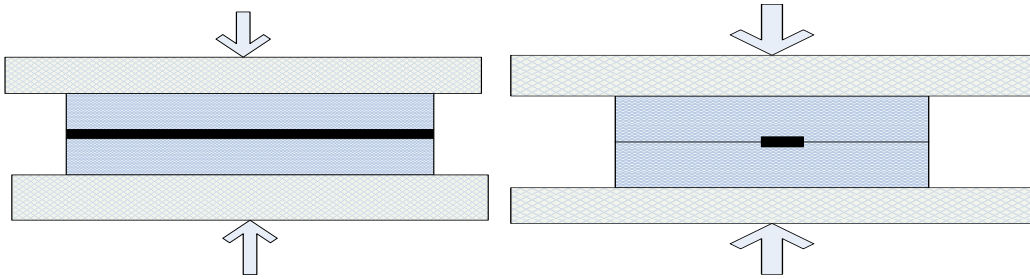


图 2 带状线谐振器原理图

当带状线的有效长度等于半导波波长的整数倍时，即：

$$L + 2\Delta L = n \frac{\lambda_g}{2} \quad (1)$$

将会产生谐振。 $n$  表示当带状线谐振器谐振时，沿着谐振器中心导体带轴向分布的驻波半波长数目，与上式联立，可得第  $n$  个谐振模式的谐振频率为：

$$f_n = \frac{nc}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (n=1,2,3\dots) \quad (2)$$

因此，介电常数可以表示为：

$$\epsilon_r' = \left[ \frac{nc}{2f_n(L + 2\Delta L)} \right]^2 \quad (n=1,2,3\dots) \quad (3)$$

$n$  值可以由下式求得：

$$n = \left| \frac{f_n}{f_n - f_n'} \right| \quad (4)$$

式中  $f_n'$  代表第  $n+1$  或者  $n-1$  个模式的谐振频率。  
 $\Delta L$  可以由下式推出：

$$\Delta L = \frac{f_n L / n - f_m L' / m}{f_m / m - f_n / n} \quad (5)$$

其中： $m$  表示当中心导体带沿着  $L'$  方向放置时，沿导体带分布的驻波半波长数目。

带状线谐振器的品质因数可以表示为：

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_r} \quad (6)$$

其中：

$Q_c$  表示由导体损耗引起的品质因数

$Q_d$  表示由介质损耗引起的品质因数

$Q_e$  与  $Q_r$  分别表示由两端与侧边辐射损耗引起的品质因数

实际测量表明，大多数情况下，带状线谐振器的辐射损耗很小， $1/Q_e + 1/Q_r$  多数情况下小于  $1/Q_0$  的 1%，可以忽略不计。

因此，上式 (6) 可以近似表示为：

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (7)$$

对于具有较小衰减常数  $\alpha$  的传输线，谐振器品质因数与衰减常数  $\alpha$  的关系可以表示为：

$$Q = \frac{\pi \sqrt{\epsilon_r}}{\alpha \lambda} \quad (\text{假设 } \alpha \leq \beta \text{ 以及 } \alpha l \leq 1) \quad (8)$$

其中：

$\beta$  表示复传播常数的虚部

$l$  表示传输线谐振器的长度

介质衰减常数  $\alpha_d$  与损耗角正切  $\tan \delta$  的关系可以表示为

$$\alpha_d = \frac{\pi \sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_0} \tan \delta \quad (9)$$

其中， $\lambda_0$  表示自由空间波长。

因此，把上式代入公式（8）可以得到：

$$\frac{1}{Q_d} = \tan \delta \quad (10)$$

通过测量该带状谐振器的谐振频率和无载品质因数，可以计算得到介质的介电常数和介质的损耗角正切。

## 2.2 圆柱测试腔体及原理

选择  $TE_{0mn}^0$  模式圆柱测试腔，其测试原理的物理模型如图 3 所示：

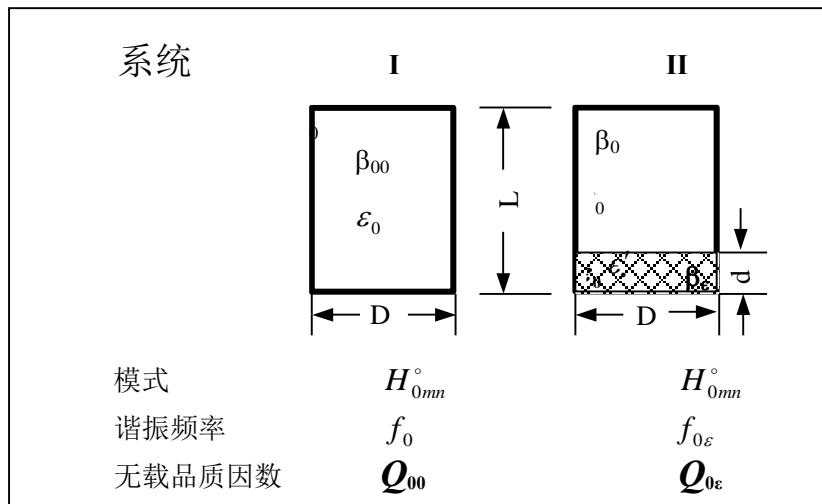


图 3 圆柱腔测试物理模型

系统 I 为未置入试样的空腔，腔长为  $L$ ，直径为  $D$ ，对  $TE_{0mn}^0$  模有谐振频率  $f_0|_{0mn}$ ，它们有各自的无载品质因数  $Q_{00}$ 。

系统 II 为同一空腔中置入厚为  $d$  的试样，它的复介电常数为  $\varepsilon'$  和  $\tan \delta$ ，此情况下有无载品质因数  $Q_{0\varepsilon}$ 。

参照国标 GB/T5597-1999 和 F.Horner 的模型，可以写出如下方程：

对系统 I 有：

$$(f_0 D)^2 = \left( \frac{c}{\pi} X_{0m} \right)^2 + \left( \frac{cn}{2} \right)^2 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \quad (1)$$

对系统 II 有：

$$\beta_\varepsilon^2 = \left[ \left( \frac{2\pi f_{0\varepsilon}}{c} \right)^2 \varepsilon' - \left( \frac{2X_{0m}}{D} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\beta_0^2 = \left[ \left( \frac{2\pi f_{0\varepsilon}}{c} \right)^2 - \left( \frac{2X_{0m}}{D} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\frac{\tan \beta_\varepsilon d}{\beta_\varepsilon} + \frac{\tan \beta_0 (L-d)}{\beta_0} = 0 \quad (4)$$

式中  $X_{0m}$  为贝塞尔函数的根，其中  $D, n, X_{0m}$  以及光速  $C$  为已知的，测得  $f$ 。即可求得  $L$ ，测得  $f_{0\varepsilon}$  即可求得  $\beta_0$ ，解超越方程 (4) 可求得  $\beta_\varepsilon$ ，从而求得  $\varepsilon'$ 。

在系统 II 中，根据场的储能和耗能的关系可以求得：

$$\tan \delta = \left( 1 + \frac{u}{pv\varepsilon'} \right) \left[ \frac{1}{Q_{0\varepsilon}} - \frac{1}{Q_{00}} \right] \quad (5)$$

式中

$$\frac{1}{Q_{00}} = \frac{1}{Q_{0\varepsilon}} \left( \frac{f_0}{f_{0\varepsilon}} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{\left[ \left( \frac{2X_{0m}}{D} \right)^2 (pv+u) + D(p\beta_\varepsilon^2 + \beta_0^2) \right]}{(pv\varepsilon' + u) \left[ \left( \frac{2X_{0m}}{D} \right)^2 \left( 1 - \frac{D}{L} \right) + \left( \frac{2\pi f_0}{c} \right)^2 \frac{D}{L} \right]} \quad (6)$$

$$p = \left[ \frac{\sin \beta_0 (L-d)}{\sin \beta_\varepsilon d} \right]^2 \quad (7)$$

$$u = 2(L-d) - \frac{\sin 2\beta_0 (L-d)}{\beta_0} \quad (8)$$

$$v = 2d - \frac{\sin 2\beta_\varepsilon d}{\beta_\varepsilon} \quad (9)$$

测得空腔品质因数  $Q_{00}$  和置入试样后空腔的品质因数  $Q_{0\varepsilon}$ ，代入上述方程组即可求得  $\tan \delta$ 。

### 2.3 光学腔测试腔体及原理

光学谐振腔法采用  $TEM_{00n}$  模，由于采用的是平凹腔中的  $TEM_{00n}$  模实现复介电常数测试，测试出的结果为电场平行于测试样品的复介电常数。如图 4 所示为测试示意图。

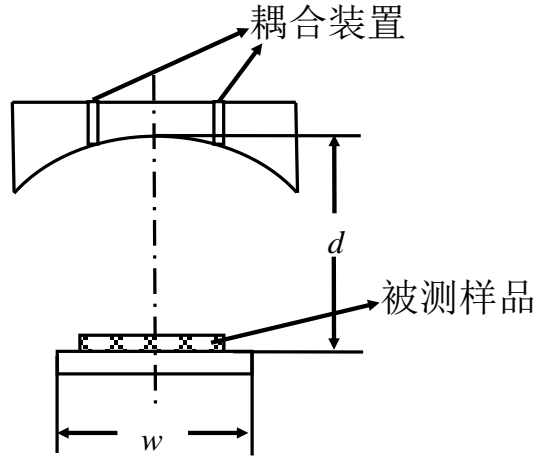


图4 光学腔结构原理图

空腔状态下，准光腔的谐振频率为：

$$f_0 = \frac{c}{d} \left\{ q+1 + \frac{2p+l+1}{\pi} \arctan \left[ \left( \frac{d}{R-d} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1)$$

其中  $d$  为谐振腔的高度， $R$  为球面镜的半径， $p$ 、 $l$ 、 $q$  为谐振模式  $TEM_{plq}$  的系数， $q$  代表腔体高度方向的系数，当选用  $TEM_{00q}$  为工作谐振模式时， $p=l=0$ 。加载厚度为  $t$ ，介电常数为  $\varepsilon_r'$  的介质材料后，根据场分布和边界条件，可得到特征方程：

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \cdot \tan(\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t - \phi_t) + \tan(k \cdot (D-t) - \phi_{D-t}) = 0 \quad (2)$$

其中  $k$  为传播常数， $\phi_t$  和  $\phi_{D-t}$  分别为由于准光腔内的高斯波束在样品区域和自由空间区域产生的附加相位。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f_{0s}}{c} \quad (3)$$

$$\phi_t = \arctan \left( \frac{t}{\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot z_0} \right) \quad (4)$$

$$\phi_{D-t} = \arctan \left( \frac{d''}{z_0} \right) - \arctan \left( \frac{t}{\varepsilon_r' \cdot z_0} \right) \quad (5)$$

$$z_0 = \sqrt{d'' \cdot (R_0 - d'')} \quad (6)$$



$$d'' = d + \frac{t}{\varepsilon_r'} \quad (7)$$

$f_{0s}$  为加载测试样品后的谐振频率， $c$  为光速。

被测试样品的损耗角正切为：

$$\tan \delta = \frac{2\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t \cdot (d + t \cdot \Delta)}{Q_e \left\{ 2\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t \cdot \Delta - \Delta \cdot \sin(\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t - \phi_t) \right\}} \quad (8)$$

其中：

$$\Delta = \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r' \cdot \cos^2(\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t - \phi_t) + \sin^2(\sqrt{\varepsilon_r'} \cdot k \cdot t - \phi_t)} \quad (9)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{0s}} - \frac{1}{Q_l} \quad (10)$$

$$Q_l = Q_{00} \cdot \frac{2 \cdot (t \cdot \Delta + d)}{D \cdot (\Delta + 1)} \quad (11)$$

其中  $Q_{00}$  和  $Q_{0s}$  分别为准光谐振腔加载测试样品前后的无载品质因数。

通过加载样品前后腔体的谐振频率和无载品质因数的测量，求解超越方程可以计算得到介质的介电常数和介质的损耗角正切。

### 3、此类夹具应用的单位

罗杰斯；中国科学院上海硅酸盐研究所；TCL 医疗；长安汽车；上海三菱电梯；中国科学院上海微系统研究所；上海大学；交通大学