

实验 12 绝缘材料介电常数和介电损耗（Q 表法）的测试

【实验目的】

1. 了解 Q 表法测量绝缘材料介电常数和介电损耗的原理；
2. 学会用 Q 表法测量绝缘材料的介电常数和介电损耗；
3. 了解影响测量结果准确性的因素及避免方法。

【仪器用具】

WY2851 Q 表+WY915 介电损耗测试装置+电感器一套，印刷电路板（PC 板）、聚四氟乙烯和石英玻璃样品各一个。

【原理概述】

1. 一些基本概念

1.1 相对介电常数和绝对介电常数

电容器的电极之间及电极的周围空间全部充以绝缘材料时，其电容 C_x 与同样电极构成的真空电容 C_0 之比就定义为该绝缘材料的相对介电常数 ϵ_r ，用公式可表示为：

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1)$$

在标准大气压下，干燥空气的相对介电常数为 1.00053，因此，用同样电极构成的空气电容 C_a 来代替 C_0 测量绝缘材料的相对介电常数也有足够的精度。

绝缘材料的介电常数（或绝对介电常数） ϵ 定义为该绝缘材料的相对介电常数 ϵ_r 与真空介电常数 ϵ_0 的乘积。在国际单位制中，真空介电常数 ϵ_0 为：

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \quad (2)$$

如果不考虑边缘效应，以绝缘材料为介质的平行板电容器的电容可表示为：

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (3)$$

式中 S 和 d 分别为平行板电容器的极板面积和间距，单位均取国际单位制。将(2)式代入(3)式可得：

$$C_x = \frac{\epsilon_r S}{36\pi d} \times 10^{-9} \text{ F} = \frac{\epsilon_r S}{36\pi d} \text{ nF} = \frac{100\epsilon_r S}{3.6\pi d} \text{ pF} \quad (4)$$

由(4) 式可得：

$$\epsilon_r = \frac{3.6\pi d C_x}{100S} \quad (5)$$

式中，电容以 pF 为单位，电容器的极板面积和间距分别以 m^2 和 m 为单位。

如果平板电极呈圆形，当其直径为 D 时，相对介电常数的计算公式可表示为：

$$\epsilon_r = \frac{3.6\pi d C_x}{100S} = \frac{14.4d C_x}{100D^2} \quad (6)$$

式中，极板直径和间距均以 m 为单位，电容以 pF 为单位。

1.2 介电损耗角（dielectric loss angle）和介电损耗因数（dielectric dissipation factor）

介电损耗角 δ ：由绝缘材料作为介质的电容器上所施加的电压与由此而产生的电流之间的相位差 θ 角的余角 δ ，即 $\delta=90^\circ-\theta$ 。

介电损耗因数：介电损耗角的正切值（ $\tan \delta$ ）。

如图 1 所示，有损耗的电容器在任何给定的频率下可以用电容 C_s 和电阻 R_s 的串联电路表示，或者用电容 C_p 和电阻 R_p 的并联电路表示。

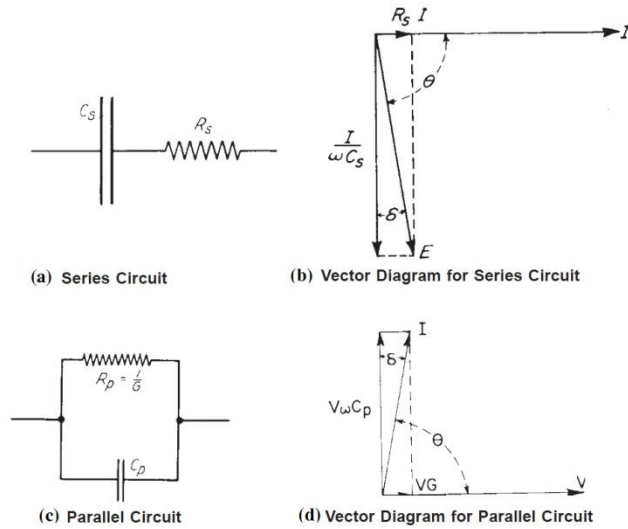


图 1 有损耗的电容器的串联或并联等效电路图及相应的电流和电压相位图

如图 1(b)和(d)可知，

$$\tan \delta = \omega R_s C_s = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (7)$$

虽然以并联电路表示一个具有介电损耗的绝缘材料通常是合适的，但在单一频率下，有时也需要以串联电路来表示。串联元件与并联元件之间满足如下关系：

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (8)$$

$$R_p = \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}\right) R_s \quad (9)$$

1.3 品质因数（quality factor）Q

品质因数 Q：表示一个储能器件（电容或者电感）在谐振电路中每个周期所储存的能量与每个周期因介电损耗损失的能量之比，在数值上等于介电损耗因数 $\tan \delta$ 的倒数。

1.4 复介电常数（relative complex permittivity）

在交变电场作用下，电介质的介电常数为复数，复介电常数 ε^* 定义为：

$$\varepsilon^* = \varepsilon_r - i\varepsilon'' = \varepsilon_r - i\varepsilon_r \cdot \tan \delta \quad (10)$$

式中， ε_r 是相对介电常数， ε'' 是损耗指数（loss index），在数值上等于该绝缘材料相对介电常数 ε_r 与介电损耗因数 $\tan \delta$ 的乘积。

2. 测试方法及原理

介电损耗是指电介质材料在外电场作用下因发热而引起的功率损耗。在直流电场作用下，电介质的损耗主要是由漏导电流造成的电导损耗。在交流电场作用下，介电损耗除了漏导电流造成的电导损耗外，还有各种交流损耗譬如极化损耗。由于电场频繁转向，电介质中的损耗要比直流电场下的损耗大得多，有时甚至大几千倍，因此，从某种意义上说介电损耗通常是指交流损耗。在实际应用中，介电损耗不但会消耗电能，使元件发热影响其正常工作，而且还可能因为介电损耗过大造成元件热击穿而失效。因此，介电损耗是应用于交流电场特别是高频电场中电介质的一个重要品质指标，对其进行测试具有重要的意义。

对绝缘材料的介电常数和介电损耗的测量方法主要有电桥法（譬如西林电桥法）和谐振法。本实验采用基于 LC 串联共振原理的谐振法进行测量。谐振法可对材料在 1—100MHz 的介电常数和介电损耗进行测量。

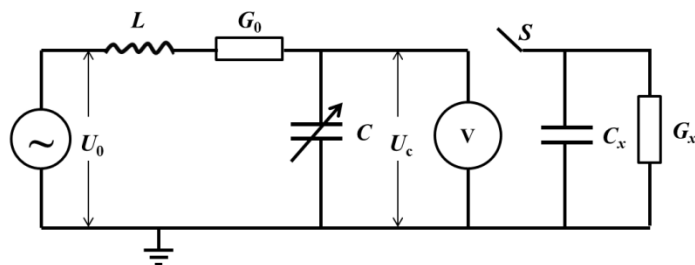


图 2 谐振法（Q 表法）测量电介质介电常数和介电损耗的原理简图

图 2 给出了谐振法（Q 表法）测量电介质介电常数和介电损耗的原理简图。如图所示，该测试线路由一个频率可调的信号发生器、可变电容 C 和电感 L 组成的 LC 串联谐振电路、连接在电容器两端的电压表 V 和一个夹有测试样品的平行板电容器 C_x 组成。电键 S 断开时，调

节可变电容使电路发生谐振，此时电路中的最大电流为 $I=G_0U_0$ ，式中的 G_0 表示串联谐振电路中总的有效电导（备注：电导为电阻的倒数）。根据 Q 值和损耗因子的定义，由 R 和 C 串联组成的有损耗电容器的等效电路的损耗因子的计算公式(7)式可知

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{G_0}{\omega C} \quad (11)$$

谐振时， $U_0=I/G_0$ ， $U_c=I/\omega C$ ，代入上式可得：

$$Q = \frac{G_0}{\omega C} = \frac{U_c}{U_0} \quad (12)$$

上式表明回路的 Q 值等于电容器两端的电压 U_c 与电源（信号发生器）电压 U_0 的比值。如果信号发生器输出的电压 U_0 保持恒定，电压表上的读数可以用 Q 值来定标，这样就能直接从电压表上读出回路的 Q 值。这就是 Q 表的工作原理。

本实验是利用“WY2851 Q 表+WY915 介电损耗测试装置（样品架）+电感器”这套实验装置对电介质的介电常数和介电损耗进行测量的。谐振法测试分为两步：

(1) 将信号发生器的频率调到某一频率譬如 1MHz 输出，在 Q 表上接入适当电感值的电感譬如 100 μH 。在 WY915 介电损耗测试装置上的平行板电容器中插入电介质样品，转动螺旋测微头直到听到“吱吱”的声音，确保电极板夹紧样品。假设夹持有电介质的平行板电容器的电容为 C_x ，将 WY915 介电损耗测试装置接入到 Q 表的电容接线端。调 C 到 C_1 使电路谐振

$$\frac{1}{Q_1} = \tan \delta_1 = \frac{G_0 + G_x}{\omega(C_x + C_1)} \quad (13)$$

$$\text{而且 } \omega L = \frac{1}{\omega(C_x + C_1)} \quad (14)$$

(2) 转动螺旋测微头，松开平行板电极，取出电介质样品。转动螺旋测微头使平行板电极的间距与夹持电介质样品时的距离（即样品的厚度 d ）相同。假设极板间距等于电介质厚度 d 并且以空气作为介质的平行板电容器的电容为 C_p ，调 C 到 C_2 使电路谐振

$$\frac{1}{Q_2} = \tan \delta_2 = \frac{G_0}{\omega(C_p + C_2)} \quad (15)$$

$$\text{而且 } \omega L = \frac{1}{\omega(C_p + C_2)} \quad (16)$$

由(14)式和(16)式，可得

$$C_x + C_1 = C_p + C_2 \Rightarrow C_x = C_p + (C_2 - C_1) \quad (17)$$

根据电介质介电常数的定义，我们有

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_p} = \frac{(C_2 - C_1) + C_p}{C_p} \quad (18)$$

由(4)式可得平板电极半径为 r （单位为 cm ）、极板间距为 d （单位为 cm ）的空气介质平行板电容器的电容为：

$$C_p = \frac{100\epsilon_a S}{3.6\pi d} \text{ pF} = \frac{100 \times 1.00053 \times \pi r^2 \times 10^{-4}}{3.6\pi d \times 10^{-2}} \text{ pF} \approx \frac{r^2}{3.6d} \text{ pF} \quad (19)$$

至此，可利用(18)和(19)式求出电介质样品的相对介电常数。

电介质样品的介质损耗因子可表示为：

$$\text{tg} \delta_x = \frac{G_x}{\omega C_x} \quad (20)$$

由(14)式和(16)式，我们有 $\omega(C_x + C_1) = \omega(C_p + C_2)$ ，所以

$$\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} = \frac{G_0 + G_x}{\omega(C_x + C_1)} - \frac{G_0}{\omega(C_p + C_2)} = \frac{G_x}{\omega(C_p + C_2)} \quad (21)$$

将(21)式代入(20)式，可得：

$$\text{tg} \delta_x = \frac{G_x}{\omega C_x} = \frac{C_p + C_2}{C_x} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right) = \frac{C_p + C_2}{C_p + C_2 - C_1} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right) \quad (22)$$

至此，可利用(22)式求出电介质样品的介电损耗因数。

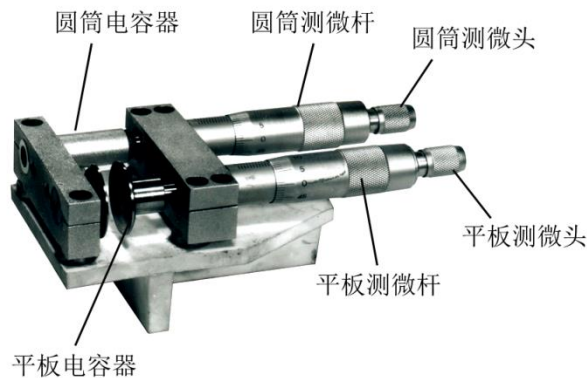


图3 WY915 介电损耗测试装置（样品架）

事实上，本实验所使用的 WY915 介电损耗测试装置除了配备有用来夹持电介质样品的平行板电容器之外，还配有一个电容量线性 0.33pF/mm 、长度调节范围为 $0\text{—}25\text{mm}$ 、分辨率高达 0.0033pF 的线性微可变电容器（圆筒电容器）。如图3所示。电介质材料的介电常数和介电

损耗因子既可以通过将被测试样放进/或不放进平板电容器观察谐振时的调谐电容值和 Q 值（谐振法）来确定，还可以利用变电纳法测量电介质材料的介电常数和介电损耗因子。与谐振法相比，变电纳法的操作较复杂，且要求测试架上配备有微调电容（圆筒电容器），优点是变电纳法具有更高的灵敏度和测试精度。变电纳法的测试方法如下：

调节平板电容器的测微头，使两极板接触，读取刻度值记为 D_0 ，这时测微杆应处于 0mm 处附近；松开两极板，把被测样品插入两极板，调节测微头直到两极板夹紧样品（注意：一定要调节测微头，不能直接转动测微杆，以免损坏螺旋测微器，听到“吱吱”的声音即可），读取刻度值记为 D_1 ，这时样品厚度为 $D_2=D_1-D_0$ ；将平行板电容器夹持有电介质样品的 WY915 介电损耗测试装置接入 Q 表的电容接线端；把圆筒电容器置于 10mm 处；设置 Q 表的测试频率譬如 1MHz，将合适的电感譬如 $100\ \mu\text{H}$ 连接到电感接线端；调节 Q 表调谐电容使电路谐振，读取 Q 值；调节圆筒电容器（也叫可变空气微调电容器）将电路调离谐振点，使 Q_m 降到 Q （譬如 $Q_m/2$ ），而 Q 位于最大谐振点的两端，由此可确定出与 Q 对应的两个电容的差值 ΔC_s ，如图 4 所示。举个例子，谐振时 Q 值为 200，先顺时针方向转， Q 值下降到 100 时圆筒刻度计为 8mm，再逆时针转至再次出现 Q 值降为 100 时，圆筒刻度计为 11mm，两者的差值为 $M_1=3$ 。再调节圆筒电容器，使电路再次谐振，即圆筒电容器重新回到 10mm 处。取出平行板电容器中的样品，这时电路再次偏离谐振；调节平板电容器，使电路再次谐振，读取测微杆上的数值 D_3 ，其变化值为 $D_4=D_3-D_0$ ；再次调节圆筒电容器使电路偏离谐振，用类似的方法确定出与以空气作为介质的平行板电容器相对应的 Q_m ， Q 和 ΔC_a 。假定圆筒电容器两次刻度的差值为 M_2 ， M_2 总比 M_1 小。根据这些测量结果，可利用下面的公式计算被测样品的相对介电常数和介电损耗因子：

$$\varepsilon = \frac{D_2}{D_4} \quad (23)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{K(M_1 - M_2)}{2C_p} \quad (24)$$

式中， K 为圆筒电容器线性变化率，其值为 0.33pF/mm 。 C_p 是 WY915 介电损耗测试装置中的极板间距为样品厚度 d 、以空气作为介质时的平行板电容器的电容，其计算公式由(19)式给出。

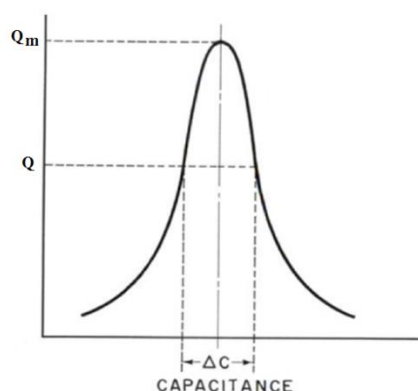


图 4 调节圆筒电容器使电路离开谐振点后一个 Q 值对应于两个电容值

一般按以上公式计算的结果，其精度和重复性可以满足用户要求，但是，对于介电常数大的被测样品（即样品放入和取出时平行板电容器的电容变化较大），边缘效应电容对测试结果会有显著影响。这时，可按照下面的公式计算：

$$\varepsilon = \frac{C_2 + C_{F2} - C_F}{C_1} \quad (25)$$

$$\tan \delta = \frac{K(M_1 - M_2)}{3.46(C_2 + C_{F2} - C_{F1})} \quad (26)$$

式中， C_1 为平行板电容器在 D_1 刻度时以空气为介质的电容量（见附录图 1）， C_2 为平行板电容器在 D_3 刻度时以空气为介质的电容量（见附录图 1）， C_{F1} 为平行板电容器在 D_1 刻度时的边缘效应电容量（见附录图 2）， C_{F2} 为平行板电容器在 D_3 刻度时的边缘效应电容量（附录图 2）。

【实验内容】

1. 利用谐振法（或 Q 表法）测量 1MHz 下三种样品（印刷电路板、聚四氟乙烯和石英玻璃）的介电常数和介电损耗。
 - (1)在不谐振（没有接入电感和电容）的状态下检查 Q 表的指针是否指零。如果不为零，应调节 Q 表调零旋钮，使 Q 表的指针指零。
 - (2)检查 Q 表是否正常工作，具体做法是将 $100 \mu\text{H}$ 的电感接入到 Q 表的电感接线端（即 L_x ）上；将频率调至 1MHz；微调电容置于 0pF 处，调主调电容使电路谐振，此时 Q 值应该在 190 左右，调谐电容刻度在 249pF 左右。如果通过调主调电容，电路确实发生谐振且示数相仿，则说明 Q 表工作正常。
 - (3)用游标卡尺测量样品的直径，用螺旋测微器测量样品的厚度。
 - (4)检查 WY915 介电损耗测试装置（样品架）上的平板电容器螺旋测微器的零点。具体做法是

调节平板电容器的测微头（注意：一定要调节测微头，不能直接转动测微杆，以免损坏螺旋测微器，听到“吱吱”的声音即可），使两极板接触，这时螺旋测微器的读数应该为 0mm；如果螺旋测微器的读数应该不为 0mm，读取两极板接触时的刻度值记为 D_0 。

(5) 将 WY915 介电损耗测试装置（样品架）接入 Q 表的电容接线端（即 C_x ）上。松开 WY915 介电损耗测试装置上的平板电容器两极板，将样品插入两极板，调节测微头直到两极板夹紧样品，读取刻度值记为 D_1 ，这时样品厚度应为 $d=D_1-D_0$ 。把圆筒电容器螺旋测微器置于 10mm 处（圆筒电容器螺旋测微器调节范围为 0~25mm）。将 Q 表频率置于 1MHz。调节 Q 表主调谐电容使电路谐振，进一步调节 Q 表微调谐电容使 Q 表指针指到最大，记下此时的 Q_1 值；与此同时，记下此时主调谐电容和微调谐电容的刻度值，求出两者的和记为 C_1 。

(6) 松开 WY915 介电损耗测试装置上的平板电容器两极板，取出样品。重新将两极板间距调到样品厚度处，即平板电容器螺旋测微器处于刻度 D_1 处。圆筒电容器螺旋测微器处于 10mm 处不变。Q 表频率处于 1MHz 不变。调节 Q 表主调谐电容使电路谐振，进一步调节 Q 表微调谐电容使 Q 表指针指到最大，记下此时的 Q_2 值；与此同时，记下此时主调谐电容和微调谐电容的刻度值，求出两者的和记为 C_2 。根据公式可计算出材料的介电常数和介电损耗。

根据实验记录数据，填下以下表格。

表 1 1MHz 下三种样品的介电常数和介电损耗测试数据（谐振法）

样品名称	Q_1	C_1 (pF)	Q_2	C_2 (pF)	d (cm)	r^2 (cm ²)	C_p (pF)	介电常数 (ϵ_r)	介电损耗 ($\tan\delta$)
印刷电路板									
聚四氟乙烯									
石英玻璃									

注：式中 d 为样品厚度， r 为样品半径， C_p 为以空气为介质的极板间距为 d 的结构电容

2. 利用谐振法（或 Q 表法）测量 10MHz 下三种样品（印刷电路板、聚四氟乙烯和石英玻璃）的介电常数和介电损耗。

与测试频率为 1MHz 时选用 100 μ H 的电感器不同，测试频率为 10MHz 时应选用 1 μ H 的电感器。除此以外，10MHz 下的介电常数和介电损耗的测试方法和步骤与 1MHz 下的类似。以下不再赘述。

表 2 10MHz 下三种样品的介电常数和介电损耗测试数据（谐振法）

样品名称	Q_1	C_1 (pF)	Q_2	C_2 (pF)	d (cm)	r^2 (cm ²)	C_p (pF)	介电常数 (ϵ_r)	介电损耗 ($\tan\delta$)
------	-------	------------	-------	------------	----------	--------------------------	------------	-----------------------	-----------------------

聚四 氟乙 烯										
石英 玻璃										

注： C_p 为以空气为介质的极板间距为 d 的结构电容

【注意事项】

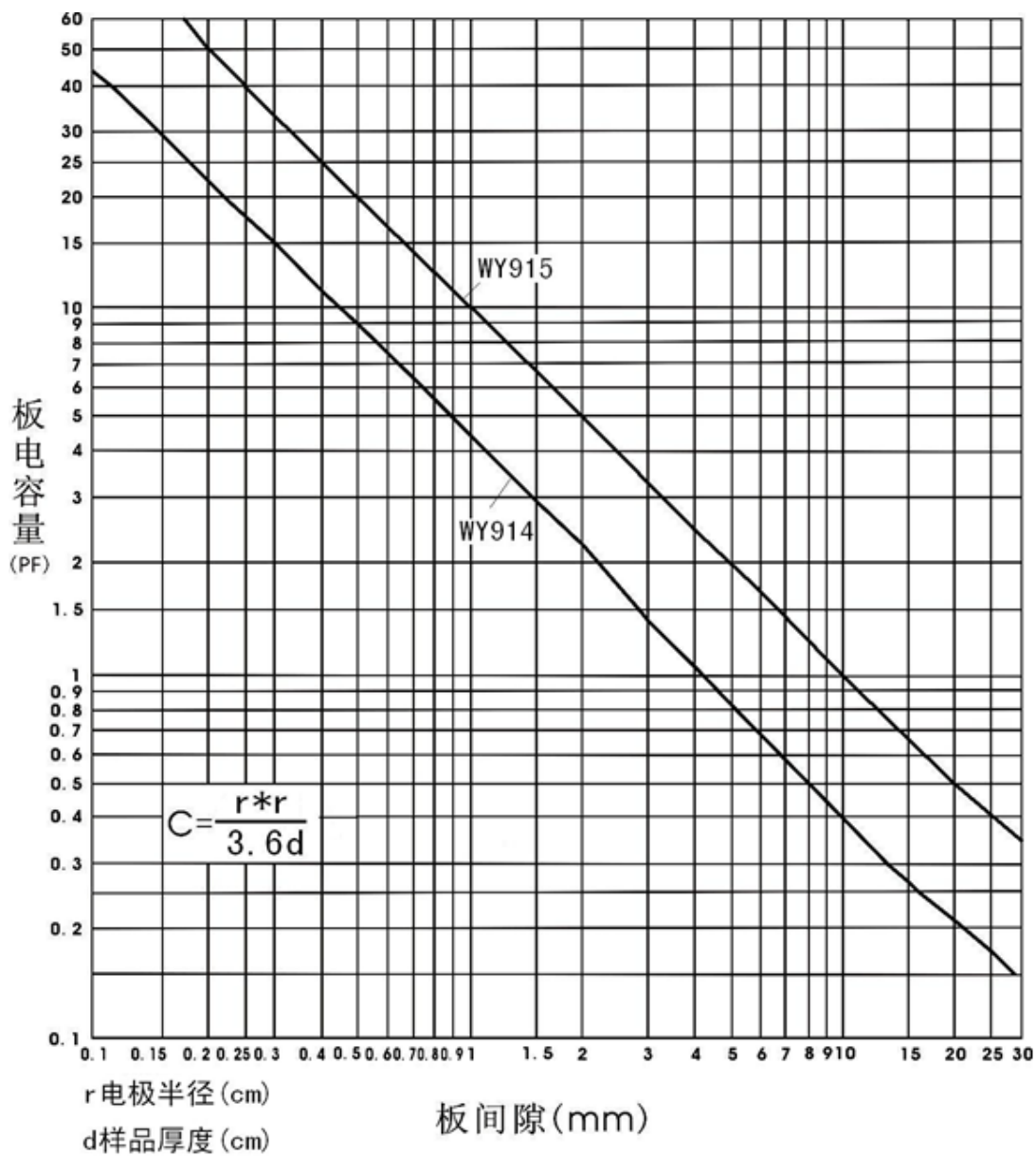
测量介电常数和介电损耗时，需要注意以下事项：①平行板电容器极板与样品的接触情况是影响测试结果精度的关键。为了减少空气隙的干扰，在用极板夹持样品时，应旋转样品，使得平行板电容器螺旋测微器上的示数最小。此外，要使样品表面尽可能平整，以使样品与极板无缝接触。②应保证样品表面清洁、无灰尘和无油脂。应使用镊子取放样品，避免用手直接接触样品，以免沾污样品。③测试之前，应注意将 Q 表调零。此外，要注意检查平行板电容器螺旋测微器的零点，如果不为零，应记下此时的读数 D_0 。④环境温度和湿度对介电常数和介电损耗测试结果有较大的影响。当温度较低时，介质常数随温度的增加而增大，但是，当温度很高时介质常数又会随温度的增加而减小。当温度较低时，介电损耗随温度的增加先增大后减小；当温度很高时，介电损耗和电导一样随着温度的增加而指数增长。一般来说，介电常数和介电损耗都随着湿度的增加而增大。

【思考题】

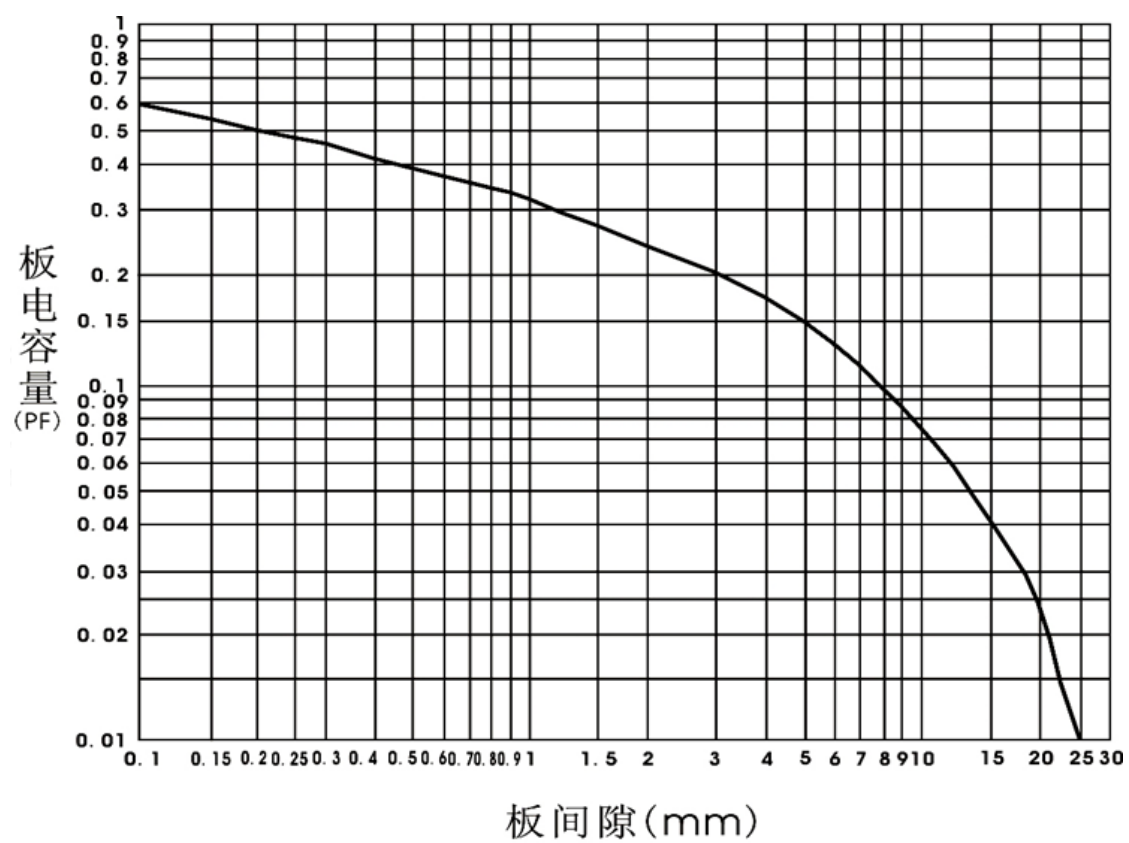
1. 介电损耗的根源是什么？
2. 影响测量结果准确性的因素有哪些？应如何做才能保证测试结果的精度？

【附录】

1. 平板电容器空气介质电容量图和边缘效应电容量图



附图 1 平板电容器空气介质电容量图



附图 2 边缘效应电容量图