

材料科学基础实验报告

实验名称： 绝缘材料的相对介电常数和介质损耗因数测试

学 号： 22301077 姓 名： 张蕴东 班 级： 22高分子

合作者： 无 桌 号：

指导教师： 艾斌

实验日期： 2024.3.8

实验考核

项目	实验预习	实验过程	分析与讨论	总评
评价				

1 实验目的

- 了解 Q 表法和变电容法测量绝缘材料相对介电常数和介质损耗因数的原理
- 学会用 Q 表法和变电容法测量绝缘材料的相对介电常数和介质损耗因数
- 了解影响测量结果准确性的因素及避免方法

2 实验原理

2.1 基本概念

本实验涉及的基础理论主要有（更多延申理论和公式不在此列举）：

1. 当电容器的两个极板之间充以绝缘材料时，其电容 C_x 与两个极板之间充以真空时的电容 C_0 之比就定义为该绝缘材料的相对介电常数 ε_r 。平行板电容器的电容： $C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}$
2. 在交流电路中，由于理想电容的电流始终超前电压 90° 相位，所以理想电容在充放电过程中不会消耗能量。作为对比，由绝缘材料作为介质的实际电容器在充放电过程中会消耗能量，其原因是电介质内部的电荷在外加交变电场的作用下被反复极化，电荷的频繁极化运动（取向极化或位移极化）需克服材料内部的摩擦力做功，另一方面，还有一部分能量以漏电流产生焦耳热的形式消耗。这两种能量消耗都以热能的形式释放并造成电容器温度升高。
3. 圆柱状薄片电介质构成的平行板电容器可用一个理想电容和一个电阻的并联来描述它在交流电路中的性能，它们应具有相同的阻抗和介质损耗因数。介质损耗角 δ 被定义为由电介质材料组成的实际电容器上的电压 U 与电流 I 之间的相位角 φ 的余角 δ ，即 $\delta = 90^\circ - \varphi$ ，而介质损耗因数 D 被定义为介质损耗角 δ 的正切值 $D = \tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}$ 。品质因子 Q 则表示储能器件（电容或者电感）在谐振电路中每一个周期所储存的能量与每一个周期因介质损耗损失的能量之比，它在数值上等于 $\left(\frac{1}{\tan \delta}\right)$

2.2 测试原理

介质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。直流电场中电介质的损耗主要是由电导电流造成的电导损耗。此外，交流电场作用中电介质的损耗还有极化损耗。由于电场频繁转向，电介质的极化损耗要比电导损耗大得多，故介质损耗通常是指交流损耗。介质损耗不但会消耗电能，使元件发热影响其正常工作，而且还可能因介质损耗过大造成元件热击穿而失效。因此，介质损耗是应用于交流电场特别是高频电场中的电介质材料的一个重要品质指标，对其进行测试具有重要的意义。

根据电介质材料应用领域（频率域）的不同，测量电介质材料相对介电常数和介质损耗因数的方法可分为：电桥法（小于 MHz），谐振法（在 MHz~100 MHz），同轴探针法（MHz~GHz），传输线法（MHz~100 GHz），自由空间法（GHz~100 GHz）等。

本实验利用 WY2851 Q 表、WY915 介质损耗测试装置（测试架）和标准电感组成的实验装置测量电介质材料的相对介电常数和介质损耗因数。该实验装置可提供两种方法（Q 表法和变电容法）测量材料的相对介电常数和介质损耗因数。

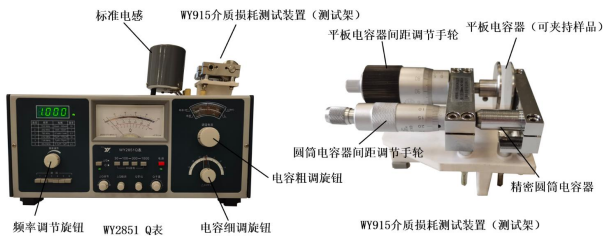


图 1: 整个实验装置的实物照片（左图）和测试架的实物照片（右图）

1. Q 表法（谐振法）测量绝缘材料相对介电常数和介质损耗因数的原理：WY2851 Q 表由一个频率可调的信号发生器、可变电容 C 和连接在电容器两端的电压表 V 组成。当接入标准电感 L 时，就形成了 LC 串联振荡电路。当该 RLC 电路谐振时，电路的品质因子 Q 等于谐振时感抗 (ωL) 或容抗 ($\frac{1}{\omega C}$) 与电阻 ($\frac{1}{G_0}$) 之比，进一步推导可知当信号发生器输出的电压 U_0 保持恒定时，电压表上的读数 U_c 可以用谐振回路品质因子 Q 来标定，这样就能直接从电压表上读出谐振回路品质因子 Q，这就是 Q 表的工作原理。

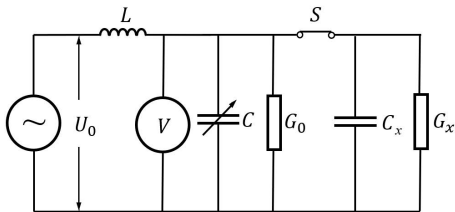


图 2: 谐振法（Q 表法）测量电介质材料相对介电常数和介质损耗因数的原理简图

2. WY915 测试架除了配备有平行板电容器之外，还配备了一个电容线性变化率为 0.33 pF/mm 、长度调节范围为 $0 \sim 25 \text{ mm}$ 、分辨率为 0.0033 pF 的圆筒电容器，如图 1 所示。该圆筒电容器为我们提供了另外一种测量电介质材料相对介电常数和介质损耗因数的方法（变电纳法）。与谐振法相比，变电纳法通常具有更高的测量精度。

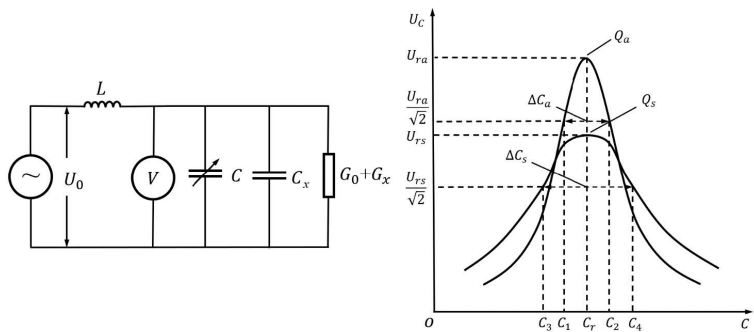


图 3: 变电纳法测量绝缘材料相对介电常数和介质损耗因数的电路图（左）和原理图（右）

3 实验仪器

WY2851 Q 表, WY915 介质损耗因数测试架, $1\mu\text{H}$ 标准电感, $100\mu\text{H}$ 标准电感, 被测样品 (印刷电路板、聚四氟乙烯和石英玻璃)。

4 实验过程

4.1 利用谐振法 (或 Q 表法) 测量 1 MHz 下三种样品 (印刷电路板、聚四氟乙烯和石英玻璃) 的相对介电常数和介质损耗因数

1. 在 Q 表没有接入标准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 使 Q 表的指针指向零点。
2. 检查 Q 表是否正常, 具体做法是将频率调至 1 MHz; 将 30-100-300 三个量程按钮全部按下。将 $1\mu\text{H}$ 的标准电感接入到 Q 表的电感接线端 (即 L_x) 上; 将微调谐电容置于 0 pF 处, 调节主调谐电容使电路谐振, 此时 Q 值应该在 190 左右, 调谐电容的值在 249 pF 左右。如果调节主调谐电容, 电路确实发生谐振且示数相仿, 则说明 Q 表工作正常。
3. 检查 WY915 介质损耗测试装置 (测试架) 上的平行板电容器的螺旋测微器的零点: 调节平行板电容器的螺旋测微器, 使两极板接触, 这时螺旋测微器的读数应该为 0 mm。如果螺旋测微器的读数不为 0 mm, 读取两极板接触时的刻度值记为 D_0 (调节螺旋测微器时应注意操作规范)。
4. 将 WY915 测试架接入 Q 表的电容接线端 (即 C_x)。调节螺旋测微器手轮松开 WY915 测试架上的平行板电容器两极板, 将样品插入两极板, 调节测微器手轮直到两极板夹紧样品, 读取刻度值记为 D_1 , 则样品厚度为 $d = D_1 - D_0$ 。把圆筒电容器螺旋测微器置于 12 mm 处 (圆筒电容器螺旋测微器的调节范围为 0—25 mm)。检查 Q 表频率是否为 1 MHz, 如果不是, 将 Q 表频率调节到 1 MHz。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, 记下主调谐电容和微调谐电容之和, 记为 C_1 。
5. 调节螺旋测微器手轮, 松开 WY915 测试架上的平行板电容器的两极板, 取出样品。重新将两极板间距调到样品厚度处, 即平行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 12 mm 处不变。Q 表频率处于 1 MHz 不变。调节 Q 表主调谐电容使电路再次谐振, 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, 记下主调谐电容和微调谐电容之和, 记为 C_2 。根据以上实验记录数据、可计算材料的相对介电常数和介质损耗因数。需要说明的是, WY915 测试架上的平行板电容器的极板半径为 1.9 cm。

4.2 利用谐振法（或 Q 表法）测量 10 MHz 下三种样品的相对介电常数和介质损耗因数

与测试频率为 1 MHz 时选用 $100\mu\text{H}$ 的标准电感不同，测试频率为 10 MHz 时应选用 $1\mu\text{H}$ 的标准电感。除此以外，10 MHz 下相对介电常数和介质损耗因数的测试方法和步骤与 1 MHz 下的类似。

4.3 利用变电纳法测量 1 MHz 下三种样品的相对介电常数和介质损耗因数

1. 调节 Q 表的频率至 1 MHz，将 $100\mu\text{H}$ 的标准电感接到 Q 表的电感接线端。将 WY915 测试架接入 Q 表的电容接线端。
2. 调节 WY915 测试架上的平行板电容器螺旋测微器的调节手轮，使两极板接触，读取刻度值，记为 D_0 ，这时测微杆应处于 0 mm 附近。松开两极板，把被测样品插入两极板。调节测微器直到两极板夹紧样品，读取刻度值记为 D_1 ，这时样品厚度为 $D_2 = D_1 - D_0$ 。把圆筒电容器螺旋测微器置于 12 mm 处，调节 Q 表主调谐电容和微调谐电容使电路谐振，读取 Q_s 值（对应的电压为 U_{rs} ）。调节圆筒电容器将电路调离谐振点，使电压值降到 $\frac{U_{rs}}{\sqrt{2}}$ ，而对应于同一个电压值（ $\frac{U_{rs}}{\sqrt{2}}$ ）有两个电容值，且位于最大谐振点 Q_s 对应的电容值 C_r 的两边，取这两个电容的差值 ΔC_s 。举个例子，假设谐振时 U_{rs} 的值为 200，先顺时针方向调节圆筒电容器螺旋测微器，使电压值下降到 141.4 时测微器刻度为 4 mm，再逆时针调节圆筒电容器螺旋测微器直至电压值再次降为 141.4，此时测微器刻度为 20 mm，两者的差值为 $M_1 = 16\text{ mm}$ 。再次将圆筒电容器螺旋测微器调回到 12 mm 处，此时电路再次谐振。取出平行板电容器中的样品，此时电路再次偏离谐振。调节平行板电容器的极板间距，使电路再次谐振，读取谐振电压 U_{ra} 和螺旋测微器的刻度 D_3 ，并计算使电路发生谐振的空气隙的厚度 $D_4 = D_3 - D_0$ 。再次调节圆筒电容器螺旋测微器使电路偏离谐振，用类似的方法确定出与以空气为介质的平行板电容器相对应的 $\frac{U_{rs}}{\sqrt{2}}$ 和 ΔC_s 。假定圆筒电容器螺旋测微器两次刻度的差值为 M_2 。 M_2 总比 M_1 小。

5 实验数据

版面有限，见最后页。

6 不确定度分析

可计算的不确定度主要来源为螺旋测微器（精度为 0.01 mm ），可调电容读数（精度为 0.2 pF ）。Q 表读数引入的不确定度难以确定，因此不得不忽略；平行板电极直径的测量不确定度讲义中未提及，同样忽略。假定矩形分布来评估仪器精度引入的不确定度。此处计算 B 类不确定度，可以得到下表：

本次误差传递时采用 Wolfram Mathematica 语言编写的程序进行自动处理。介绍编程语言并非本实验的目的，源代码如下，EP 为合成不确定度，EPF 为误差传递方程：

直接测量量	精度	B类不确定度
螺旋测微器	$\pm 0.01\text{mm}$	0.0057735
可调电容	$\pm 0.2\text{pF}$	0.11547

$$\begin{aligned}
 In[*] &:= EPF = \text{Function} \left[\{f, param\}, \sqrt{\text{Total} @ \left((\partial_{\#} f u_{\#})^2 \& / @ param \right) ;; ;, 1]} \right] /. \\
 &\quad \text{[纯函数]} \\
 &\quad \text{Thread}[param ;; ;, 1] \rightarrow param ;; ;, 2] \sim \text{Join} \sim \text{Thread}[(u_{\#}) / @ param ;; ;, 1] \rightarrow param ;; ;, 3] \\
 &\quad \text{[逐项作用]} \quad \text{[连接]} \quad \text{[逐项作用]} \\
 &\quad (*param \text{ 以} \{\{\text{参数名}, \text{参数值}, \text{参数不确定度}\}, \dots\} \text{格式给出} *) \\
 EPF &= \text{Function} \left[\{f, param\}, \sqrt{\text{Total} @ \left((\partial_{\#} f u_{\#})^2 \& / @ param \right) ;; ;} \right] ; \\
 &\quad \text{[纯函数]} \\
 &\quad (*param \text{ 以} \{\{\text{参数名}, \dots\} \text{格式给出} *) \\
 In[*] &:= EPF \left[\frac{n R T}{V} (*p*), \{n, V, R, T\} \right] \\
 Out[*] &= \sqrt{\frac{R^2 T^2 u_n^2}{V^2} + \frac{n^2 T^2 u_R^2}{V^2} + \frac{n^2 R^2 u_T^2}{V^2} + \frac{n^2 R^2 T^2 u_V^2}{V^4}}
 \end{aligned}$$

对谐振法测量印刷电路板相对介电常数和介质损耗因数进行分析，过程如下：

```

In[17]:= 
$$\mathbf{e}_p[c p_-, c1_-, c2_-] := \frac{(c2 - c1) + c p}{c p};$$

In[18]:= 
$$c_p[d_-] := 3.61 / (3.6 d);$$

In[19]:= EPF[ $\mathbf{e}_p[c_p[d], c1, c2], \{c1, c2, d\}$ ]
Out[19]= 
$$\sqrt{0.994468 d^2 u_{c1}^2 + 0.994468 d^2 u_{c2}^2 + \left(0.99723 \left(-c1 + c2 + \frac{1.00278}{d}\right) - \frac{1}{d}\right)^2 u_d^2}$$

In[23]:= EP[ $\mathbf{e}_p[c_p[d], c1, c2], \{\{c1, 199.8, 0.2/\sqrt{3}\}, \{c2, 226.2, 0.2/\sqrt{3}\}, \{d, 0.1670, 0.001/\sqrt{3}\}\}$ ]
Out[23]= 0.0311549
In[24]:= 
$$\mathbf{U} = \mathbf{k} \star \%23 /. \mathbf{k} \rightarrow 2$$

Out[24]= 0.0623098
In[25]:= 
$$\tan\delta[c p_-, c1_-, c2_-, Q1_-, Q2_-] := \frac{c p + c2}{c p + c2 - c1} \left( \frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2} \right);$$

In[26]:= EPF[tan $\delta[c_p[d], c1, c2, Q1, Q2], \{c1, c2, d\}$ ]
Out[26]= 
$$\sqrt{\left( \frac{\left( c2 + \frac{1.00278}{d} \right)^2 \left( \frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2} \right)^2 u_{c1}^2}{\left( -c1 + c2 + \frac{1.00278}{d} \right)^4} + \left( - \frac{\left( c2 + \frac{1.00278}{d} \right) \left( \frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2} \right)}{\left( -c1 + c2 + \frac{1.00278}{d} \right)^2} + \frac{\frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2}}{-c1 + c2 + \frac{1.00278}{d}} \right)^2 u_{c2}^2 + \left( \frac{1.00278 \left( c2 + \frac{1.00278}{d} \right) \left( \frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2} \right)}{\left( -c1 + c2 + \frac{1.00278}{d} \right)^2 d^2} - \frac{1.00278 \left( \frac{1}{Q1} - \frac{1}{Q2} \right)}{\left( -c1 + c2 + \frac{1.00278}{d} \right) d^2} \right)^2 u_d^2 \right)}$$

In[29]:= EP[tan $\delta[c_p[d], c1, c2, Q1, Q2], \{\{c1, 199.8, 0.2/\sqrt{3}\}, \{c2, 226.2, 0.2/\sqrt{3}\}, \{d, 0.1670, 0.001/\sqrt{3}\}, \{Q1, 136, 0\}, \{Q2, 198, 0\}\}$ ]
Out[29]= 0.0000780907
In[30]:= 
$$\mathbf{U} = \mathbf{k} \star \%29 /. \mathbf{k} \rightarrow 2$$

Out[30]= 0.000156181

```

最后得到的拓展不确定度为：

$$\varepsilon_r = (5.396 \pm 0.063) \quad (1)$$

$$\tan \delta_x = (0.01649 \pm 0.00016) \quad (2)$$

其中在“ \pm ”号后的数为扩展不确定度 $U = ku_c$ 的数值, U 是由 u_c 和 $k = 2$ 确定的, k 是基于矩形分布得到的, 自由度在讲义中未提到。确定区间的包含概率在讲义中未提到。

关于谐振法其他的样品与频率的误差分析, 采用相同的公式和方法。对变电纳法测量印刷电路板相对介电常数和介质损耗因数进行分析, 亦可采用该方法, 但我个人认为变电纳法在调节时, 由于读取Q的误差较大, 因此实验结果的实际误差和不确定度不应当忽略Q表的测量误差, 故本次不对其进行不确定度分析。

综上所述: 可以通过以下方法来提高不确定度的精度:

1. 多次测量取平均值
2. 换用数字型的Q表而非机械模拟表

7 结果分析与讨论

对比谐振法中不同频率下相对介电常数与介质损耗因数变化, 可以粗略得出相对介电常数与介质损耗因数都会随着频率改变的结论, 进一步研究发现: 介电常数随着频率的增加而减小, 并且其变化趋势与频率的幂次关系有关。这是因为在高频率下, 介电函数的实部往往较小, 虚部较大。这意味着在高频率下, 物质储存电荷的能力较弱, 能量的损耗较大。同样还有介质损耗因数, 在中等频率范围内, 偶极子一方面能跟着电场变化而运动, 但运动速度又不能完全适应电场的变化, 偶极取向的位相落后于电场变化的位相, 一部分电能转化为热能而损耗, 频率升高, 只有电子极化能跟上电场的变化, 偶极取向极化来不及进行, 所以介质损耗因数降低到很小。可以看出本次实验测得的介质损耗因数变化与理论存在一定出入, 值得进一步研究和实验来判定究竟是实验操作误差还是理论有误。

从实验数据还可以看出, 考虑测量误差的情况下, 谐振法与变电纳法得到的结果仍有一定偏差。这也跟Q表示数不稳定, 实验时间跨度大有关。

8 思考题

8.1 介质损耗的根源是什么?

介质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。直流电场中电介质的损耗主要是由电导电流造成的电导损耗。此外, 交流电场作用中电介质的损耗还有极化损耗。由于电场频繁转向, 电介质的极化损耗要比电导损耗大得多, 故介质损耗通常是指交流损耗。

8.2 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?

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。为了减小空气隙的干扰, 在用极板夹持样品时, 应旋转样品, 使平行板电容器螺旋测微器上的示数取最小值。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. 污渍 → 由于样品的重复使用，样品上的灰尘和油污也会影响测试结果，可以先用酒精清洗再测试，测试时戴手套、用镊子夹持。
3. 测试前 Q 表是否调零了。
4. 环境温度和湿度对相对介电常数和介质损耗因数测试结果有较大的影响。本次实验已经记录了温度和湿度数据，但由于实验台靠近窗边，因此实验前后温度和湿度可能有较大变化。

实验数据

谐振法	样品名称		Q1	C1(pF)	Q2	C2(pF)	d(cm)	r^2(cm^2)	Cp(pF)	相对介电常数	介质损耗因数	气温
	1MHz	印刷电路板	136	199.8	198	226.2	0.167	3.61	6.00465735	5.39658726	0.01649875	16.8
		聚四氟乙烯	199	212.22	200	224.2	0.0995	3.61	10.0781686	2.18870803	0.00026686	湿度
		石英玻璃	199	216.4	200	227.6	0.2105	3.61	4.76378992	3.35106925	0.00036572	60%
	10MHz	印刷电路板	45.0	234.4	155	257.6	0.167	3.61	6.00465735	4.86366759	0.14234737	签名
		聚四氟乙烯	192	244.8	195	254.8	0.098	3.61	10.2324263	1.97728532	0.00104963	
		石英玻璃	178	249.2	180	260.5	0.2095	3.61	4.78652877	3.36079224	0.00102941	
变电容法	样品名称		D0(mm)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	M1(mm)	M2(mm)	Cp(pF)	相对介电常数	介质损耗因数
	1MHz	印刷电路板	0.010	1.645	1.635	0.289	0.279	13.758	8.334	0.61331974	5.86021505	0.02490022
		聚四氟乙烯	0.010	0.988	0.978	0.513	0.503	8.438	8.305	1.02533515	1.944334	0.00110078
		石英玻璃	0.010	2.072	2.062	0.610	0.600	8.544	8.510	0.48631318	3.43666667	0.00033567