

电介质材料的介电常数与介电损耗的频率特性

电介质是以极化方式传递、储存或记录外电场作用和影响的物质。介电性能是电介质材料最基本的性能，通常用介电常数（又称电容率）、介电损耗等进行表征。对于时变电磁场，物质的介电常数和频率相关。电介质材料是基板、电容器、谐振器、滤波器等电子元件的关键材料，在现代电子与信息技术中占有十分重要的地位。

【目的与要求】

1. 加深对电路谐振和 Q 值定义的理解。
2. 学习用谐振法（Q 表法）测量电介质的常数和介电损耗。
3. 研究电介质的介电常数和介电损耗的频率特性。

【原理】

电介质特征是以正、负电荷重心不重合的电极化方式传递或记录（存储）电的作用和影响；在其中起主要作用的是束缚电荷。通常情形下电介质中的正、负电荷互相抵消，宏观上不表现出电性，但在外电场作用下可产生如下三种类型的变化：畸变极化、位移极化、转向极化。

1. 介电常数和介电损耗

在交变外电场作用下，电介质的介电常数 ε 是频率 ω 的函数 $\varepsilon(\omega)$ 。随着频率的增加，分子固有电矩的转向极化逐渐落后于外场的变化，这时，介电常数取复数形式

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (1)$$

其中，实部 $\varepsilon'(\omega)$ 称为介电常数。虚部 $\varepsilon''(\omega)$ 反映了极化弛豫过程中的能量损失，代表电介质材料的损耗，这一损耗是通过热耗散把电场的电能消耗掉的。

电介质的介电损耗一般用损耗角正切（介质损耗因数） $\tan\delta$ 表示：

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

一个有损耗的电容器可以用一个纯电容 C_s 和一个电阻 R_{cs} 的串联来表示（如图 1）。

电容器的介质损耗因数定义：

在电阻上损耗的功率与电容 C_s 上的无功功率之比。如果流过的电流为 I ，则该电容器的介质损耗因数为：

$$\tan\delta = \frac{I^2 R_{cs}}{I^2 \frac{1}{\omega C_s}} = \omega C_s R_{cs} \quad (3)$$

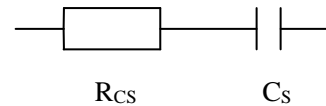


图 1 电容器串联等效电路

由此可知，介质损耗因数与工作频率、电容器的电容值、电容器的损耗电阻值有关。

3. 平板电容器的电容量与介电常数测量

如不考虑边缘效应，平板试样的电容量可用下式表示：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (\text{F}) \quad (4)$$

式中， S 为电极的面积，米²； d 为介质的厚度，米； ϵ_r 为介质材料的相对介电常数。

相对介电常数 ϵ_r 的测量原理：使用一个极片间距可变的平板电容器，设夹持介质后

材料的厚度为 d_1 （即平板的间距），则： $C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_1}$

取出介质材料，平板电容器成空气介质，减小极片间距为 d_2 ，使 $C_0 = C_x$ ，则有：

$$\epsilon_r = \frac{d_1}{d_2} \quad (5)$$

3. 含有电抗元件的电路及其谐振

电阻 R 、电感 L 、电容 C 串联电路如图2所示。

电路的总阻抗为：

$$Z = R + X_L + X_C = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (6)$$

当 $X_L = -X_C$ 时， $Z = R$ ，电路呈纯电阻性，称之电

路处于谐振状态，相应的频率称谐振频率，记为 ω_0 并有：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\omega_0 = 2\pi f) \quad (7)$$

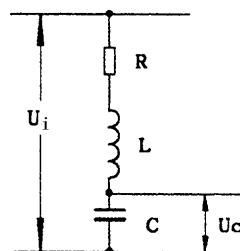


图2 RLC 串联谐振电路

4. Q 表工作原理

Q表是根据串联谐振原理设计，以谐振电压的比值来定位Q值。

“Q”表示元件或系统的“品质因数”，其物理含义是在一个振荡周期内贮存的能量与损耗的能量之比。对于电抗元件(电感或电容)来说，即在测试频率上呈现的电抗与电阻之比。

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$$

$$\text{或 } Q = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C / R} = \frac{1}{2\pi f C R} \quad (8)$$

在图2所示的串联谐振电路中，所加的信号电压为 U_i ，频率为 f ，在发生谐振时，回路中电流

$$i = \frac{U_i}{R} \quad (9)$$

故电容两端的电压

$$U_c = i|X_c| = \frac{U_i}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f C} = U_i Q \tag{10}$$

由此可得，

$$Q = \frac{U_c}{U_i} \tag{11}$$

即谐振时电容上的电压与输入电压之比为Q。Q表就是按上述原理设计的。

5. 介质损耗因数与元件品质因数 Q 值之间的关系

一个有损耗的电容器品质因数 Q 定义为在电容 C_s 上的无功功率与在电阻上损耗的有功功率之比

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} \tag{12}$$

介质损耗因数 $\tan \delta$ 与元件品质因数 Q 值互为倒数。

【仪器】

AS2853A 高频 Q 表，S916 数显介质损耗测试装置，圆片状电介质试样（1~5mm 厚度，50mm 直径）若干，LKI-1 电感组（含增补电感）。

AS2853A 型 Q 表的工作原理框图如图 3 所示，其能在较高的测试频率（0.1~160MHz）条件下，测量高频电感、电容或谐振回路的 Q 值等。调谐电容有步进马达带动，根据不同电容值由 CPU 计算脉冲数去控制马达。

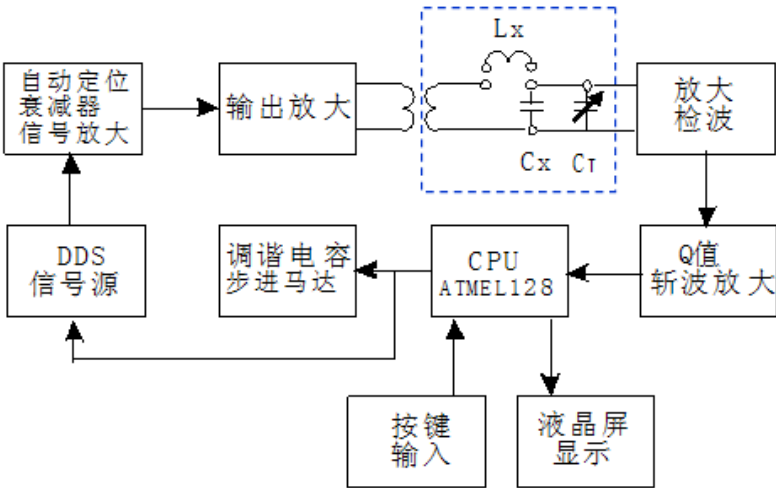


图3 Q表的工作原理框图

AS2853A型Q表前面板示意图及各功能键说明如图4所示。

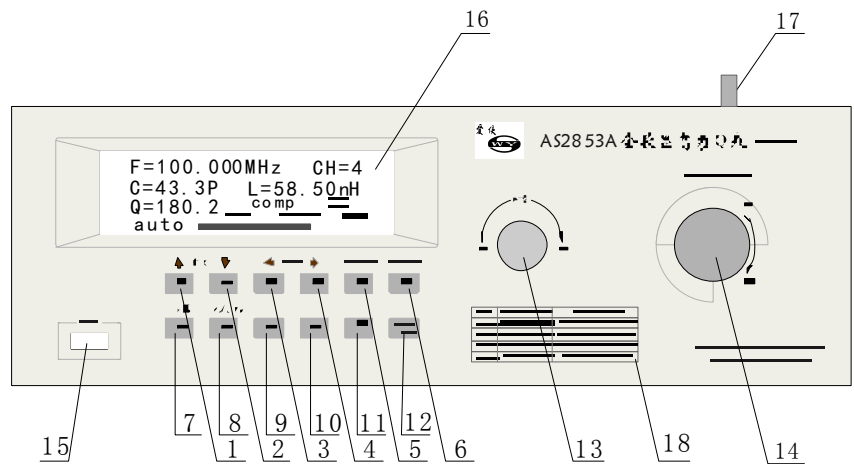


图 4 Q 表前面板示意图

1. 工作频段选择/1按键； 2. 工作频段选择/2按键； 3. Q值低一档量程选择（手动方式时有效）/3按键；
4. Q值高一档量程选择（手动方式时有效）/4按键； 5. 谐振点频率搜索/5按键； 6. 谐振点电容搜索/6
按键； 7. Q值合格范围比较值设定/7按键； 8. Q值量程自动/手动控制方式选择/8按键； 9. 数字键9；
10. 数字键0； 11. 小数点键； 12. 复合键频率/电容按键； 13. 频率调谐数码开关； 14. 电容调谐数码
开关； 15. 电源开关； 16. 液晶显示屏； 17. 测试回路接线柱，AS2853A后边两个为电感接入端，前
边两个为外接电容接入端； 18. 电感测试范围所对应频率范围表。

Q表自动搜索功能的使用方法介绍如下：

1. 谐振点频率自动搜索功能的使用

如果无法确定电感元件的数值时，可用该功能来帮助寻找出它的谐振频率点。

- 1) 把元件插入接线柱上；
 - 2) 主调电容旋钮调到约中间位置；
 - 3) 按一下频率搜索按键，显示屏左下部显示“FSWEEP”，仪器就进入搜索状态。
- 仪器从最低工作频率一直搜索到最高工作频率，如果元件谐振点在频率覆盖区间内，搜索结束后，将会自动停在元件的谐振频率点附近。

如果临时要退出搜索状态，可再按一次搜索键，仪器会退出搜索操作。

2. 谐振点电容自动搜索功能的使用

如果需要在某一频率下找出被测量器件的谐振点，可用该功能帮助确定合适的主调电容。

- 1) 把元件插入接线柱上；
 - 2) 频率设置为所需的频率；
 - 3) 按一下电容搜索按键，仪器就进入电容搜索状态，显示屏左下部显示“CSWEEP”，
- 仪器从最小电容一直搜索到最大电容，如果你的元件谐振点在电容覆盖区间内，搜索结束后，主电容将会自动停在元件的谐振频率点附近。

如果临时要退出搜索状态，可再按一次搜索键，仪器会退出搜索操作。

【实验内容与步骤】

测量三个以上不同样品的相对介电常数和介质损耗因数的频率特性（频率范围：0.1～50MHz）。

1. 测试准备工作

- 1) 将 Q 表的电容调节旋钮置于较小电容量。
- 2) 把 S916 装置插入到 Q 表测试回路的“电容”两个端子上。
- 3) 从 LKI-1 电感组中选择与测试频率相适应的电感线圈，如：1MHz 时电感取 250uH，15MHz 时电感取 1.5uH。
- 4) 短按 S916 装置的 ON/OFF 按键，打开液晶显示屏。调节平板电容器测微杆，使平板电容器二极片相接为止，长按 SET 按键将初始值设置为 0。

2. 介电常数 ϵ 的测试

- 1) 调节平板电容器，使二极片夹住样品（注意调节时要用测微杆，以免夹得过紧或过松），读取测试装置液晶显示屏上的数值，即样品的厚度 d 。调节电容旋钮，改变 Q 表上的主调电容容量，使 Q 表处于谐振点上（也可使用谐振点电容自动搜索功能）。
- 2) 取出平板电容器中的样品，这时 Q 表又失谐。保持其它参数不变，调节平板电容器间距，使 Q 表再回到谐振点上，读取平板电容器间距，记为 d_0 。
- 3) 根据式（5）计算被测样品的相对介电常数。

3. 介质损耗因数的测试

- 1) 重新把被测样品插入二极片之间，改变 Q 表上的主调电容容量，使 Q 表处于谐振点上，读得 Q 值，记为 Q_1 ；电容读数记为 C_1 。
- 2) 取出平板电容器中的样品，这时 Q 表又失谐，再改变 Q 表上的主调电容容量，使 Q 表重新处于谐振点上。读得 Q 值，记为 Q_2 。电容读数记为 C_2 。
- 3) 然后取下测试装置，再改变 Q 表上的主调电容容量，重新使之谐振，电容读数记为 C_3 ，此时可计算得到测试装置的电容为 $C_z = C_3 - C_2$ 。
- 4) 计算被测样品的介质损耗因数（下式可自行推导）

$$\tan \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1 Q_2} \cdot \frac{C_2 + C_z + C_0}{C_2 - C_1}$$

式中： C_z 为测试装置的电容（平板电容器二极片间距为样品的厚度 d ）

C_0 为测试电感的分布电容（参考 LKI-1 电感组的分布电容值，见附表 1）

【数据处理与分析】

1. 列表记录不同样品的相对介电常数和介质损耗因数的频率特性的测量数据。
2. 计算各样品在不同频率下的相对介电常数和介质损耗因数。
3. 作出各样品的相对介电常数和介质损耗因数的频率特性曲线，并对结果进行分析和讨

论。

【注意事项】

- 1. 接通电源后，预热30分钟。避免振动和碰撞，要求在不含腐蚀气体和干燥的环境中使用和保存。
- 2. 被测件和测试电路应接触良好、可靠，以减少因接线电阻和分布参数所带来的测量误差。
- 3. 手不得靠近试件，以免人体感应影响造成测量误差，有屏蔽的试件，屏蔽罩应连接在低电位端的接线柱。
- 4. S916测试装置使用结束后，请及时关闭液晶显示屏的电源，可延长电池的寿命。如果电池发出电压低报警，应及时更换电池保证测量的精度。
- 5. 当接近谐振点时，请缓慢调节主调电容旋钮。

【预习思考题】

- 1. 简述电介质的种类及其极化类型。
- 2. 电介质的介电常数与哪些因素有关？
- 3. 电容的测量有哪些实验方法？简述谐振法测量电介质的介电常数过程。
- 4. 实验中选择电感线圈的依据是什么？

【分析讨论题】

- 1. 为了减少测量误差，在实验过程中应采取哪些措施？

附表 1 LKI-1 电感组的相关参数

电感No	电感量	准确度%	Q值≥	分布电容约为
10	250mH	±5	50	15pF
9	25mH	±5	70	10pF
8	5mH	±5	100	10pF
7	1mH	±5	100	14pF
6	250 μ H	±5	150	9pF
5	50 μ H	±5	150	12pF
4	10 μ H	±5	150	7pF
3	2.5 μ H	±5	150	7pF
2	0.5 μ H	0.05 μ H	200	5pF
1	0.1 μ H	0.05 μ H	100	5pF