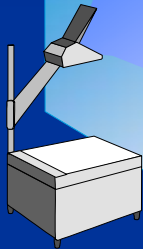


第6章 阻抗测量

- 6.1 引言
- 6.2 阻抗标准
- 6.3 阻抗的模拟测量法
- 6.4 阻抗的数字测量法

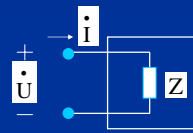


第1页

6.1 概述

6.1.1 集总参数元件特性表征

1. 阻抗定义及表示方法



阻抗定义图

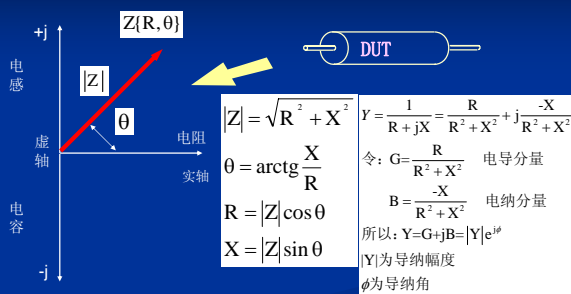
$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX$$

$$Y = \frac{1}{Z}$$

导纳

第2页

阻抗两种坐标形式的转换关系为：



第3页

品质因数

表示振荡一周内回路中储存的能量和消耗的能量之比。

定义为: $Q = 2\pi \frac{\text{磁能或电能的最大值}}{\text{一周期内消耗的能量}}$ 一般表示为: $Q = \frac{X}{R}$

损耗因数 D 和损耗角 δ

$$D = \frac{1}{Q} = \tan \delta \approx \delta$$

第4页

2. 电阻器、电容器、电感器的电路模型

电阻器

理想电阻



考虑引线电感和分布电容时

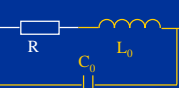
$$f_{0R} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

考虑引线电感



当 f 小于 f_{0R} 时, 等效电路为感性, 当 f 大于 f_{0R} 时, 等效电路为容性,

考虑引线电感和分布电容



第5页

电容器

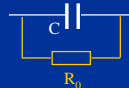
理想电容



当频率较高时, R_0 影响可以忽略, 等效电路可以看作 LC 串联谐振回路。

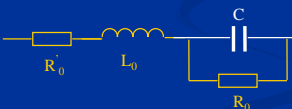
$$f_{0C} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

考虑泄漏、介质损耗等(低频)



当 f 小于 f_{0C} 时, 等效电路为容性, 当 f 大于 f_{0C} 时, 等效电路为感性,

考虑泄漏、引线电阻和电感



第6页

➤ 电感器

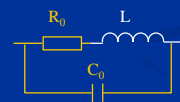
理想电感



考虑导线损耗



考虑导线损耗和分布电容

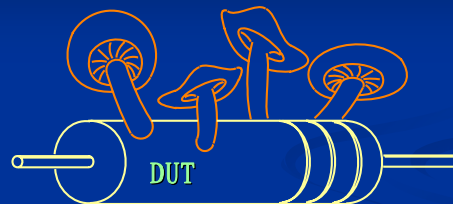


分析类似于电阻器

当 f 小于 f_{0L} 时, 等效电路为感性, 当 f 大于 f_{0L} 时, 等效电路为容性,

第7页

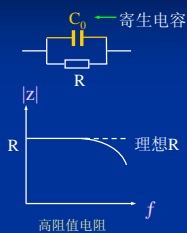
- (1) 真值, 有效值和指示值 (使指示值接近有效值)
- (2) 元件的影响因素



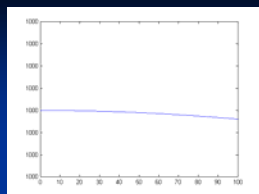
频率、电平、直流偏置、温度、其它影响因素

第8页

① 测试信号频率:

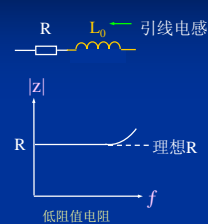


电阻器的频率响应

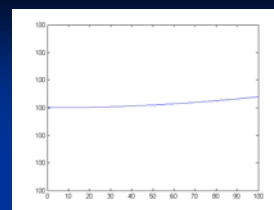


$R=1000$;
 $C=0.00000000001$;
 $f=0:0.1:100$;
 $w=2*\pi*f$;
 $z=R./(1+C*C*R*(w.*w))-$
 $i.*(C*R*R.*w./(1+C*C*R*R*(w.*w)));$

第9页

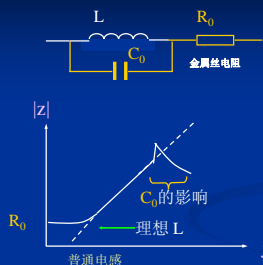


电阻器的频率响应



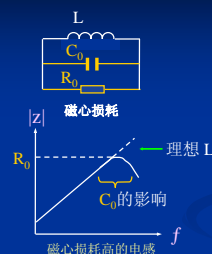
$R=100$;
 $L=0.000001$;
 $f=0:0.1:100$;
 $w=2*\pi*f$;
 $z=R+i*2*\pi*f*L$;

第10页



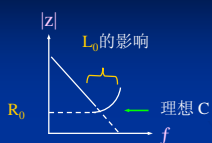
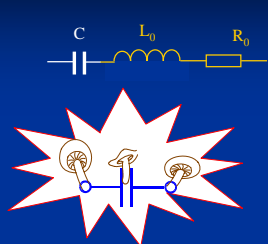
电感器的频率响应

第11页



电感器的频率响应

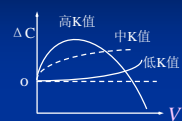
第12页



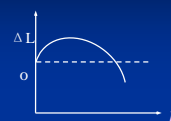
电容器的频率响应

第13页

②测试信号电平:



(a) 测试电压(AC)



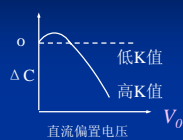
(b) 测试电流(AC)

与AC电压有关的陶瓷电容器 与AC有关的磁芯电感器

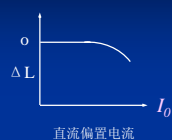
测试信号 (AC) 电平对电容器和铁芯电感器的影响
K介电常数

第14页

③直流偏置



与直流偏置电压有
关的陶瓷电容器

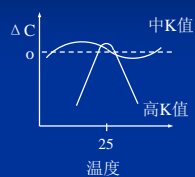


与直流偏置电流有
关的磁芯电感器

陶瓷电容器与铁芯电感器的直流偏置影响

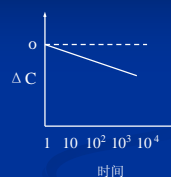
第15页

④温度



陶瓷电容器的温度相关性

⑤其他影响因素



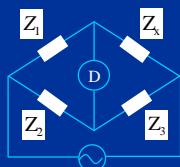
陶瓷电容器的老化相关性

第16页

6.1.2元件参数测量的基本技术

1. 测量方法概述

➤电桥法



$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

第17页

电桥法的优缺点和频率范围

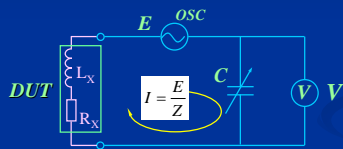
- 高精度 (0.1%典型值)
- 使用不同电桥可得到宽频率范围
- 价格低
- 需要手动平衡
- 单台仪器的频率覆盖范围较窄
- 频率范围: DC ~ 300MHz

第18页

➤ 谐振法

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C)$$

- 改变电容C直到电路谐振
- 谐振时 $X_L = X_C$, 仅有 R_X 存在



$$X_C = \frac{V}{I} = \frac{R_X V}{E}$$

$$Q = \frac{|X_L|}{R_X} = \frac{|X_C|}{R_X} = \frac{|V|}{E}$$

第19页

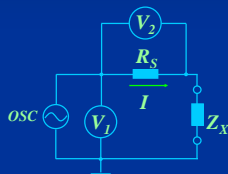
谐振法的优缺点和频率范围

- 可测很高的Q值
- 需要调谐到谐振
- 阻抗测量精度低
- 频率范围：10KHz ~ 70MHz

第20页

➤ 电压电流法

- 由测量的电压值和电流值计算被测阻抗 Z_X
- 电流通过它所流经的 R_S 上的电压计算



$$Z_x = \frac{V_1}{I}$$

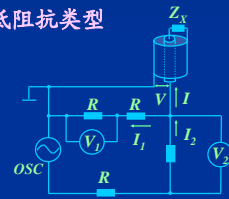
$$= \frac{V_1}{V_2} R_s$$

第21页

➤ RF电压电流法

- 射频电压电流法与低频电压电流法的原理相同
- 有两种连接电压表和电流表的方法

(a) 低阻抗类型

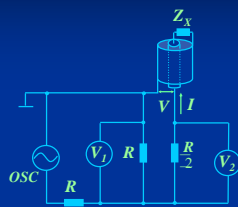


$$Z_x = \frac{V}{I} = \frac{2V_1}{I_2 - I_1}$$

$$= \frac{2V_1}{\frac{V_2}{R} - \frac{V_1}{R}} = \frac{2R}{\frac{V_2}{V_1} - 1}$$

第22页

(b) 高阻抗类型



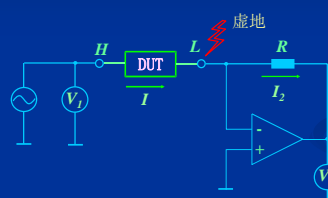
$$Z_x = \frac{V}{I} = \frac{V_1 - V_2}{V_2 / \frac{R}{2}}$$

$$= \frac{R}{2} \left[\frac{V_1}{V_2} - 1 \right]$$

第23页

➤ 自动平衡电桥法

- 通过DUT的电流也通过电阻R
- “L”点的电位保持为0V（称为虚地）



$$I = I_2$$

$$V_2 = I_2 R$$

$$Z = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{I_2} = \frac{V_1 R}{V_2}$$

第24页

网络分析法

- 通过测量输入信号与反射信号之比得到反射系数
- 用定向耦合器或电桥检测反射信号
- 用网络分析仪提供激励并测量响应



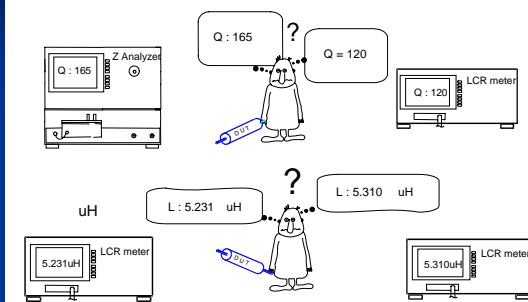
第25页

网络分析法的优缺点和频率范围

- 高频率范围
- 当被测阻抗接近特征阻抗时得到高精度
- 改变测量频率需要重新校准
- 阻抗测量范围窄
- 频率范围：300KHz ~ 3GHz

第26页

哪个值正确？



第27页

选择正确的测量方法

- 每种方法都有其各自的优缺点
- 必须首先考虑测量的要求和条件，然后选择最合适的方法
- 需要考虑的因素包括频率覆盖范围、测量量程、测量精度和操作的方便性
- 没有一种方法能包括所有的测量能力，因而在选择测量方法时需折衷考虑

第28页

频率和测量方法



第29页

2. 仪器分类

阻抗测量仪器分为两种

一种是模拟阻抗测量仪器

- 采用电桥法的：万用电桥；惠斯登电桥等各种电桥仪器
- 采用谐振法的：Q表
- 采用电压-电流法的：多用表；可变电阻器；参数测量仪

第30页

另一种是数字阻抗测量仪器

- 采用RF电压电流法的：射频阻抗分析仪
- 采用自动平衡电桥法的：LF阻抗测量仪
- 采用网络分析法的：网络分析仪

第31页

3. 测试连接头

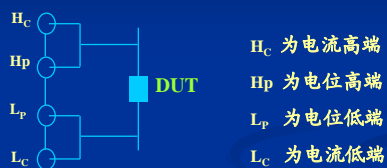
所有阻抗测试都涉及连接头的问题. 常用的连接方法有:

- ◆ 两端接线柱式 (或香蕉插头) 适用于Q表等低准确度谐振式阻抗仪器
- ◆ 有极性的同轴的连接头
- ◆ 中性精密同轴连接头
- ◆ 三端连接头、四端连接头、五端连接头
- ◆ 四端对连接头

第32页

阻抗的连接图、示意图和测量范围

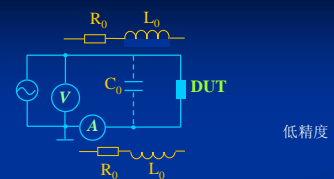
➤ 两端连接头



(a) 连接图

第33页

(b) 示意图

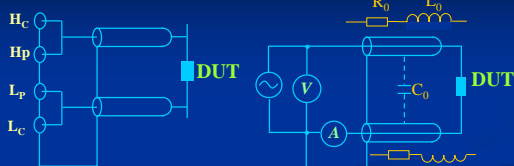


(c) 阻抗测量范围 (Ω)



第34页

➤ 三端连接头

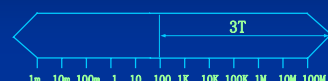


(a) 连接图

(b) 示意图

减小测试线间的分布电容的影响

第35页



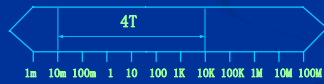
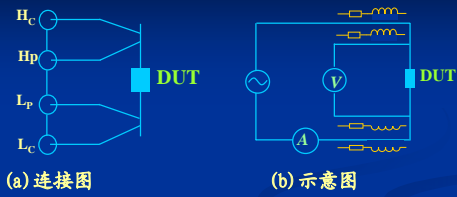
(c) 阻抗测量范围 (Ω)

阻值升高会使得杂散电容的影响加大

第36页

➤四端连接头

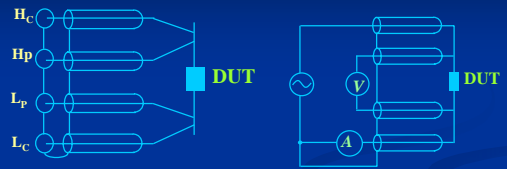
减小引线阻抗的影响
但要考虑电缆间的互感耦合误差



(c) 阻抗测量范围 (Ω)

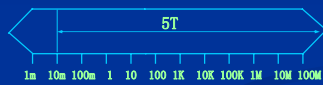
第37页

➤五端连接头



消除了引线电阻、电感、分布电容的影响
但互感问题仍然存在

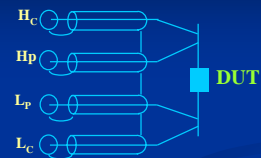
第38页



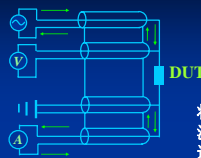
(c) 阻抗测量范围 (Ω)

第39页

➤四端对连接头

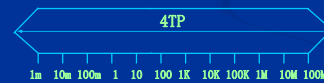


(b) 示意图



(c) 阻抗测量范围 (Ω)

将电压检测电缆和信号电流通路分离，返回电流通过电缆的外导体，抵消了内导体产生的磁通。
有效消除引线间互感影响



第41页

每种连接方法各有优缺点，必须根据DUT的阻抗和要求的测量精度，选择最适合的连接方法。

第42页

6.2 阻抗标准

6.2.1 电阻标准

- 1) 标准概况
- 2) 标准电阻器

6.2.2 电容标准

- 1) 标准概况
- 2) 标准电容器

6.2.3 电感标准

- 1) 标准概况
- 2) 标准电感器

第43页

6.2.1 电阻标准

1) 标准概况

量子化霍尔电阻标准

$$R_H = h / (N e^2) = 25812.807 \Omega \quad R_H (R_H = U/I = K \cdot B, d = B / nqd)$$

在低温下，霍尔电阻会随着B的变化出现一系列量子化平台
电阻计量标准器具分为一等和二等两个等级

一等电阻标准包括 $10^{-3}\Omega$, $10^{-2}\Omega$, $10^{-1}\Omega$, 1Ω , 10Ω , $10^2\Omega$, $10^3\Omega$, $10^4\Omega$, $10^5\Omega$ 9个标称值及一等电阻标准装置。
二等电阻标准除上述9个标称值及电阻标准装置外，还有 $10^6\Omega$ 和 $10^7\Omega$ 及其相应装置。

第44页

2) 标准电阻器

阻值稳定
温度系数小
对铜的热电动势小

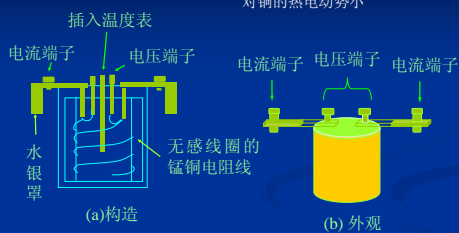


图6-8 标准电阻器

采用四端连接方式，减小引线和接线电阻的影响

第45页

6.2.2 电容标准

1) 标准概况

标准电容器分为三等。

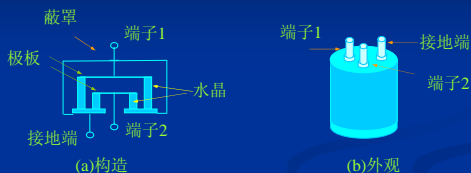
一等和二等标准电容量具采用标称值分别为1PF, 10PF, 100pF和1000PF的标准电容器。它们的差别在不确定度和年稳定度。

三等标准电容量具采用标称值为 10^{-4} PF-1F的标准电容器。

第46页

2) 标准电容器

频率和温度变化不引起电容量变化
介电损耗小(空气、云母)
绝缘良好，耐反压高



无损耗型空气电容器

第47页

6.2.3 电感标准

1) 标准概况

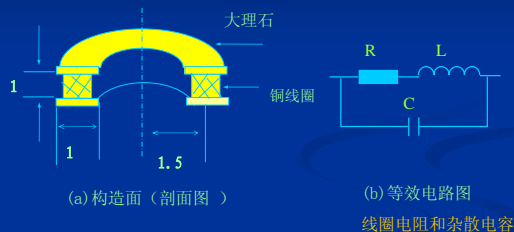
采用标称值为 $1\mu\text{H}$ -10000H的标准电感器作为标准电感量具。标准电感量具分成0.01级、0.02级、0.05级、0.1级、0.2级、0.5级和1.0级，对应的级别指数a为0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5和1.0，对应的最大允许误差 δ 和年稳定度 γ 为a%。

$1\mu\text{H}$ —1H 在1000Hz下定级

1H— 在100Hz下定级

第48页

2) 标准电感器 作为单位量的电感值不随电流和频率的大小而改变



第49页

6.3 阻抗的模拟测量法

6.3.1 电压电流法

6.3.2 电桥法

6.3.3 谐振法测量元件参数

6.3.4 Q值测量

第50页

6.3.1 电压电流法

电压-电流法又叫伏安法，即利用欧姆定律，用测量的电压值和电流值计算被测阻抗值：

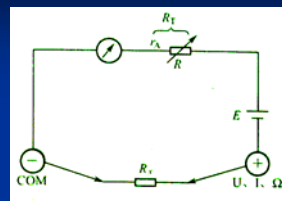
$$Z_x = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX$$

被测器件的导纳为：

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB = |Y|e^{j\theta}$$

第51页

用三用表欧姆档测量电阻

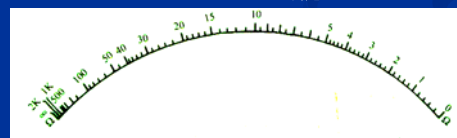


$R_x=0$ 时，刻度为0。（要调节 R_t ，满刻度）
 R_x 开路时，电流为零，刻度为 ∞
 R_x 在0和 ∞ 之间时：（非线性刻度）

$$I = \frac{E}{R_t + R_x} = \frac{E}{R_t \left(1 + \frac{R_x}{R_t}\right)} = \frac{I_m}{1 + \frac{R_x}{R_t}}$$

$R_x=R_t$ 时，中值电阻。

要注意测量二极管、三极管时的极性问题



第52页

6.3.2 电桥法

1) 电桥的平衡条件

$$Z_x Z_4 = Z_2 Z_3$$

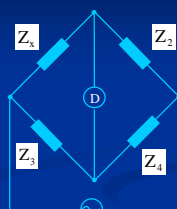
用指数形式表示

$$|Z_x|e^{j\theta_x} \cdot |Z_4|e^{j\theta_4} = |Z_2|e^{j\theta_2} \cdot |Z_3|e^{j\theta_3}$$

上式必须同时满足

$$|Z_x| \cdot |Z_4| = |Z_2| \cdot |Z_3|$$

$$\theta_x + \theta_4 = \theta_2 + \theta_3$$



交流电桥

交流时要调节两个元件
 为方便，常使两个臂为纯电阻

第53页

2) 交流四臂电桥基本组成

测量电阻时用直流
 测量电感和电容时用交流

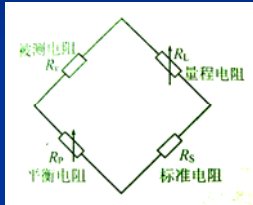


精密万用电桥方框图

第54页

测量电阻(直流电桥)

可采用惠斯登电桥，电桥平衡时：

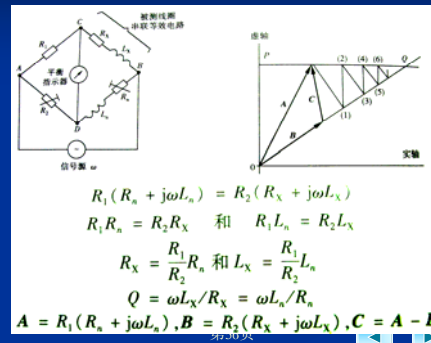


$$R_x = R_L R_P / R_S$$

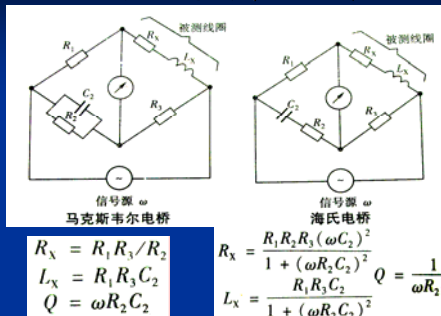
第55页

测量电感

电桥测电感的调节过程



测量电感的常用电桥

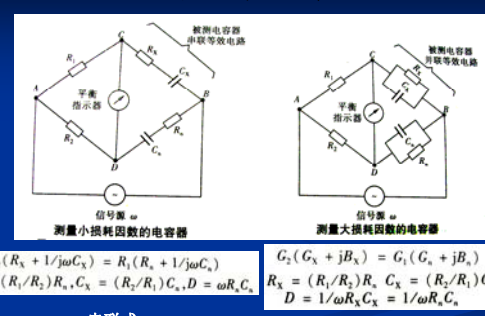


适合于测量小Q值电感

适合于测量大Q值电感

第57页

测量电容电桥



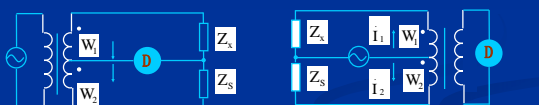
串联式

若D较小，则需要较大的R₀₁标准电阻的R值一般没有这么大

第58页

3) 变压器耦合臂电桥

两电桥的平衡条件都为 $Z_x = \frac{W_1}{W_2} Z_s$



电压比例臂构成的桥路
端电压与线圈匝数成正比

电流比例臂构成的桥路
绕组中的电流与匝数成反比

第59页

4) 电桥法测量集总参数元件的误差

①标准元件值的误差

②电桥指示器的误差(灵敏度)

③屏蔽不良引起误差:

寄生耦合和外界电磁场的干扰也会引起误差。

第60页

6.3.3 谐振法测量元件参数

测量精度低于交流电桥法，但线路简单，且测量条件符合实际工作情况。

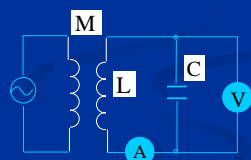
当回路达到谐振时：

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$



谐振法测量原理图

第61页

(1) 直接测量

根据谐振角频率 ω_0 (MHz) 和已知的标准电容值 C (PF)，可求得电感 L (未考虑 L 的引线电感和电容的寄生电感)

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

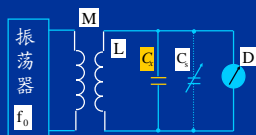
根据谐振角频率 ω_0 (MHz) 和已知的标准电感值 L (μ H)，可求得电容 C (线圈的分布电容容易引入误差)

第62页

(2) 替代法 (间接测量)：

1) 并联替代法测电容

选择适当电感 L (不必为标准电感)，接入标准可变电容 C_s (如虚线所示)，调回路至谐振 (C_{s1})，然后接入被测电容 C_x ，再调回路使谐振 (C_{s2})



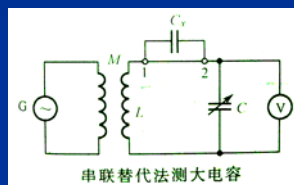
当 C_x 较小时

$$C_x = C_{s1} - C_{s2}$$

用于测量小电容，可以通过调小 C_s 重新获得谐振。

第63页

串联替代法测电容



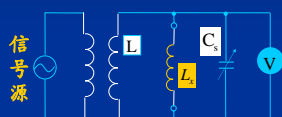
当 C_x 较大时 C_x 应和 C_s 串联接入

$$C_x = \frac{C_{s1} C_{s2}}{C_{s2} - C_{s1}}$$

第64页

2) 替代法测电感

① 并联替代法 (大电感)



并联替代法测量电感的原理图

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$

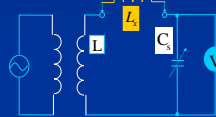
$$\frac{1}{L} = 4\pi^2 f^2 C_{s1}$$

$$\frac{1}{L_x} + \frac{1}{L} = 4\pi^2 f^2 C_{s2}$$

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 (C_{s2} - C_{s1})}$$

第65页

② 串联替代法 (小电感)



串联替代法测电感

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{s1}}$$

$$L_x + L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{s2}}$$

$$L_x = \frac{C_{s1} - C_{s2}}{4\pi^2 f^2 C_{s1} C_{s2}}$$

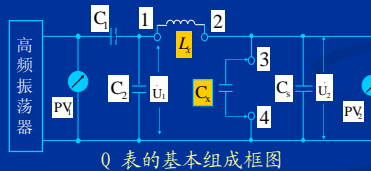
第66页

6.3.4 Q 值（品质因数）测量

1. Q 表组成原理及测量原理

Q表是根据串联谐振原理制成的，能直接读出Q值的测试仪器，又称为品质因数测量仪。

由高频振荡器、测量电路和输入、输出指示器等组成。

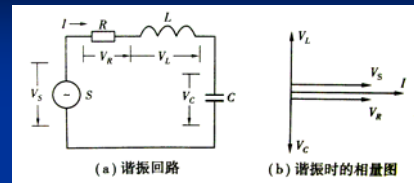


Q 表的基本组成框图

高频振荡器多频段，根据工作频率范围选择
C₅为标准可调电容，用来调节谐振
C₁、C₂分压，C₂远大于C₁、C₅，所以在测试过程中（调整C₅），认为U₁为恒压源（交流）。

第67页

测量电感时



等效为串联谐振回路（L₀忽略、C₀修正）

谐振时，X_L=X_C，V_L和V_C大小相等，方向相反，回路阻抗为纯电阻R（等效串联损耗电阻，主要是L_x的贡献）

所以谐振时： $I_0 = \frac{V_s}{R} V_{L0} = V_{L0} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} Q = \frac{1}{\omega_0 RC}$

所以： $V_c = I_0 X_c = \frac{V_s}{R} \frac{1}{\omega_0 C} = Q V_s$

对Q表来说：

$$Q = \frac{U_2}{U_1}$$

可以直读Q

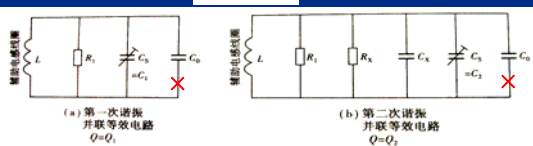
由于X_L=X_C

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_s}$$

测量电容时

接入辅助电感，按照不接入和接入被测电容（并联），分为两次测量，分别调整C₅达到谐振，得到C₁、C₂，读出Q₁和Q₂。

$$C_x = C_1 - C_2$$



第一次谐振：Q₁ = ω₀ C₁ R₁

第二次谐振：Q₂ = ω₀ (C_x + C₂) / (R₁ + R_x) = ω₀ C₁ R₁ / (R₁ + R_x) = Q₁ / (R₁ + R_x)

所以：R_x = (R₁ Q₂ / (Q₁ - Q₂)) = (1 / (ω₀ C₁)) * (Q₁ Q₂ / (Q₁ - Q₂))

$$D = \tan \delta = \frac{1}{\omega_0 R_x C_x} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 Q_1 Q_2} \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2}$$

6.4 阻抗的数字测量法

6.4.1 矢量电流-电压法

1. 矢量电流-电压法的原理

(1) 固定轴法

(2) 自由轴法

2. 智能化LCR测量仪的基本组成

6.4.2 自动平衡电桥

第70页

6.4.1 矢量电流-电压法

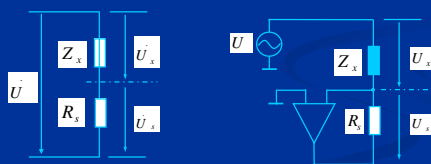
1. 矢量电流-电压法的原理

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX$$

接入标准阻抗R_s

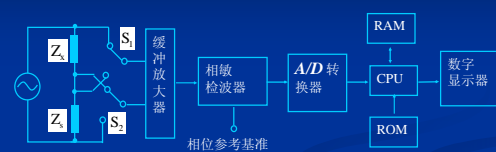
$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_s}{R_s}, \bar{Z}_x = \frac{\bar{U}_x}{\bar{I}} = \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_s} R_s$$

I、U均为为矢量，矢量电压比



第71页

2) 阻抗的数字测量法原理图



$$\bar{Z}_x = \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_s} R_{ss}$$

第72页

相敏检波器

- 在微处理器控制下产生精确的正交基准信号，输入信号经过处理，得到在参考轴上的投影分量。

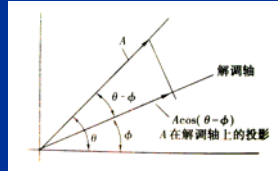
- 采用调幅波相干解调的原理：

- 调幅波：

$$A \sin(\omega t + \theta)$$

- 解调波：

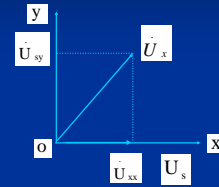
$$2 \sin(\omega t + \phi)$$



$$A \sin(\omega t + \theta) \times 2 \sin(\omega t + \phi) = A \cos(\theta - \phi) - A \cos(2\omega t + \theta + \phi) = A \cos(\theta - \phi) - \dots$$

第73页

(1) 固定轴法



$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX$$

$$I = \frac{U_s}{R_s}, Z_x = \frac{U_x}{U_s} R_s$$

$$\dot{U}_s = U_s + j0 = U_s$$

$$Z_x = R_s \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_s} = R_s \left(\frac{U_{xx}}{U_s} + j \frac{U_{xy}}{U_s} \right)$$

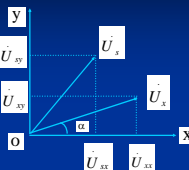
固定轴法矢量关系图

将参考电压方向固定在 U_s 方向上；
采用锁相和较相电路来实现；
硬件复杂，容易产生相位误差。

同时，采用数字的方法，可以方便的通过计算得到多种阻抗参量。

第74页

(2) 自由轴法



自由轴法矢量关系图

参考电压与被测信号之一保持固定的相位关系。
硬件电路简化，提高了精度。

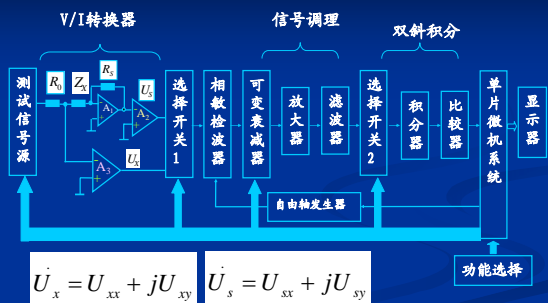
$$\dot{U}_x = U_{xx} + jU_{xy}$$

$$\dot{U}_s = U_{sx} + jU_{sy}$$

$$Z_x = R_s \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_s} = R_s \frac{U_{xx} + jU_{xy}}{U_{sx} + jU_{sy}} = R_s \left(\frac{U_{xx}U_{sx} + U_{xy}U_{sy}}{U_{sx}^2 + U_{sy}^2} + j \frac{U_{xy}U_{sx} - U_{xx}U_{sy}}{U_{sx}^2 + U_{sy}^2} \right)$$

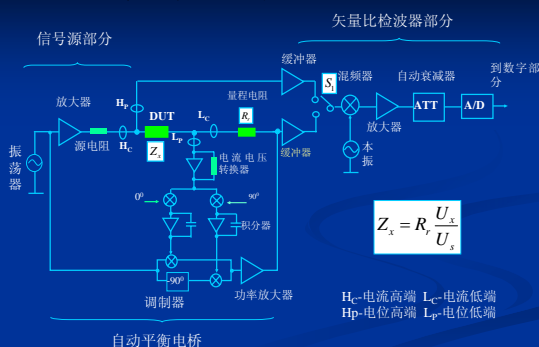
第75页

2 智能化LCR测量仪的基本组成



第76页

6.4.2 自动平衡电桥



第77页

小结

- ① 阻抗测量有多种方法
- ② 电桥主要用来测量低频元件
- ③ Q表主要用来测量高频元件
- ④ 阻抗的数字测量法

第78页