现代电子测量技术

阻抗测量

西安交通大学

电子物理与器件教育部重点实验室

等离子体与微波电子学研究所

张小宁

2020年01月

阻抗的测量

一、阻抗元件特性

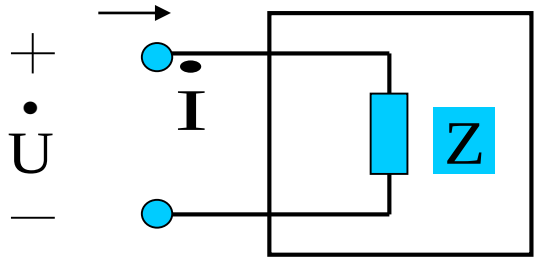
二、阻抗的电桥法测量

三、阻抗的谐振法测量

四、阻抗的数字化测量

一、阻抗定义及其表示方法

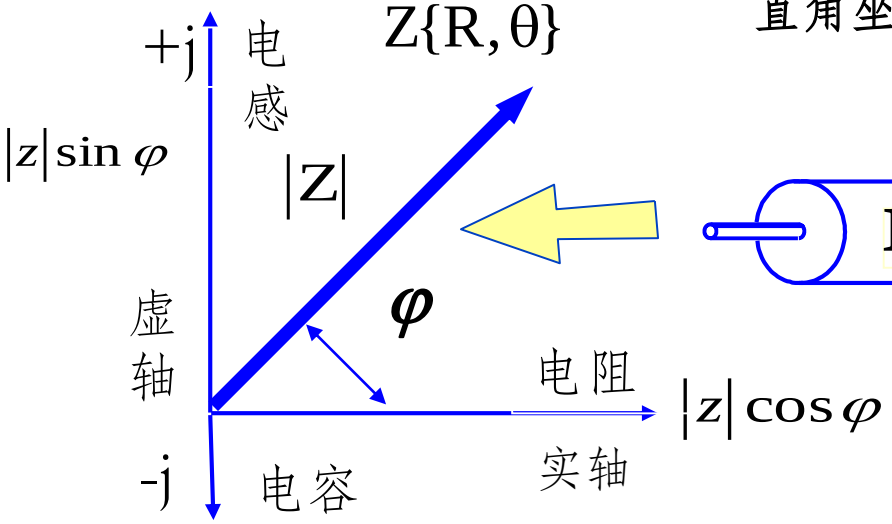
阻抗是描述网络和系统的一个重要参量，对于无源单口网络，阻抗定义为



阻抗定义图

$$Z = \dot{U} / \dot{I}$$

在阻抗测量中，测量环境的变化，信号电压的大小及其工作频率的变化等，都将直接影响测量的结果。



直角坐标和极坐标表示

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \operatorname{arctg}\frac{X}{R}$$

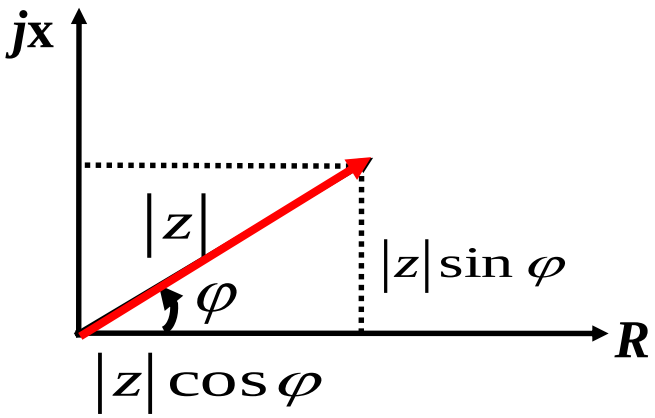
$$R = |Z|\cos\theta$$

$$X = |Z|\sin\theta$$

一、阻抗元件特性

阻抗两种坐标形式的转换关系为：

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \\ \varphi = arctg\dfrac{X}{R} \end{cases} \qquad \begin{cases} R = |Z|\cos\varphi \\ X = |Z|\sin\varphi \end{cases}$$



导纳Y是阻抗Z的倒数，即：

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{R}{R^2 + X^2} + \mathrm{j}\frac{-X}{R^2 + X^2} = G + jB$$

其中：

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

$$B = \frac{-X}{R^2 + X^2}$$

导纳的极坐标形式：$Y = G + \mathrm{j}B = |Y|e^{\mathrm{j}\theta}$

二、阻抗元件的电路模型

阻抗标准

- 电阻标准
  - 标准概况
  - 标准电阻器
- 电容标准
  - 标准概况
  - 标准电容器
- 电感标准
  - 标准概况
  - 标准电感器

一、阻抗元件特性

电阻标准-标准概况：

(1) 电阻计量标准器具分为一等和二等两个等级 。

(2) 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。

(3) 电阻工作计量器具有13个标称值,从$10^{-4}\Omega$到$10^{8}\Omega$。每个标称值又有0.000 05级到0.2级不等的7到9个准确度等级。

一、阻抗元件特性

电容标准-标准概况：

1) 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。

2) 三等标准电容量具采用标称值为10-4pF－1F的标准电容器。

电感标准-标准概况：

采用标称值为1μH－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%。

一、阻抗元件特性

元件的影响因素

1) 测试信号频率

由于存在寄生参数，频率对所有实际元件都有影响

2) 测试信号电平

对于某些元件，施加的测试信号（AC）可能会影响测试结果

3) 直流偏置 电压和电流

4) 温度

大多数元件都存在温度影响因素。对于电阻器、电容器和电感器，温度系数是一项重要的技术指标

5) 其它影响因素 （环境，湿度，老化等）

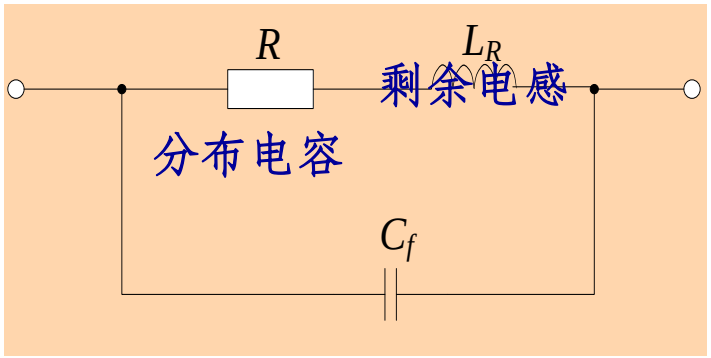
其它物理和电气环境，如湿度、磁场、光、大气条件、振动和时间都会改变阻抗值

一、阻抗元件特性

阻抗元件的电路模型：

一个实际的R、L、C元件都含有三个参量：电阻、电感和电容。

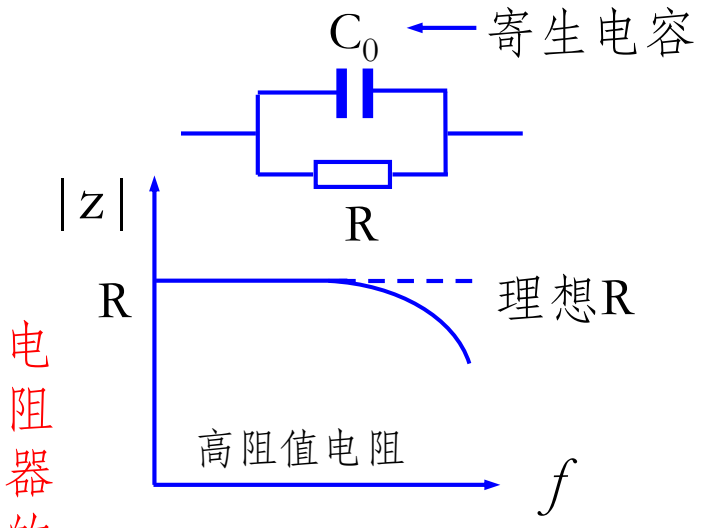
（1）电阻器

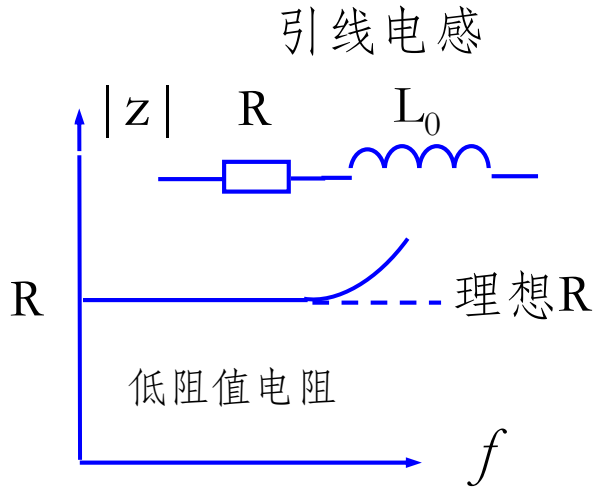


若固有谐振频率为：$f_{OR}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_f}}$

当 $f < f_{OR}$ 时，等效电路呈感性；当 $f > f_{OR}$ 时，等效电路呈容性。

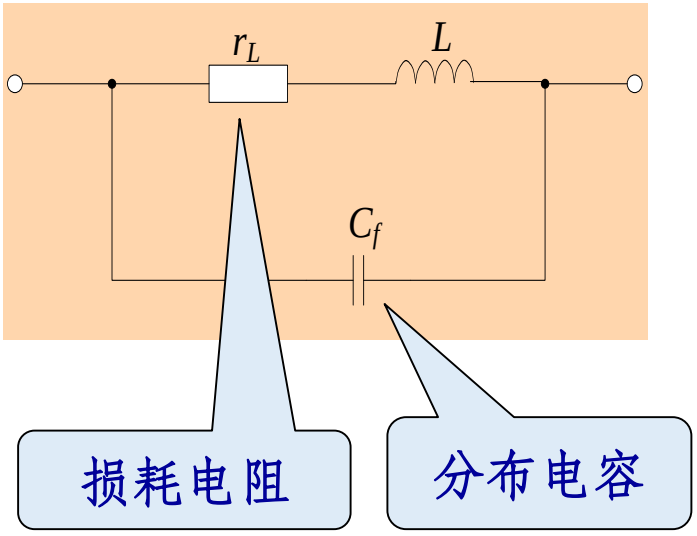
电阻器的频率响应





（2）电感线圈

$$Z_{dx} = R_{dx} + j\omega L_{dx} \approx \frac{r_L}{\left[1-(\frac{\omega}{\omega_{oL}})^2\right]^2} + j\omega\frac{L}{1-(\frac{\omega}{\omega_{oL}})^2}$$

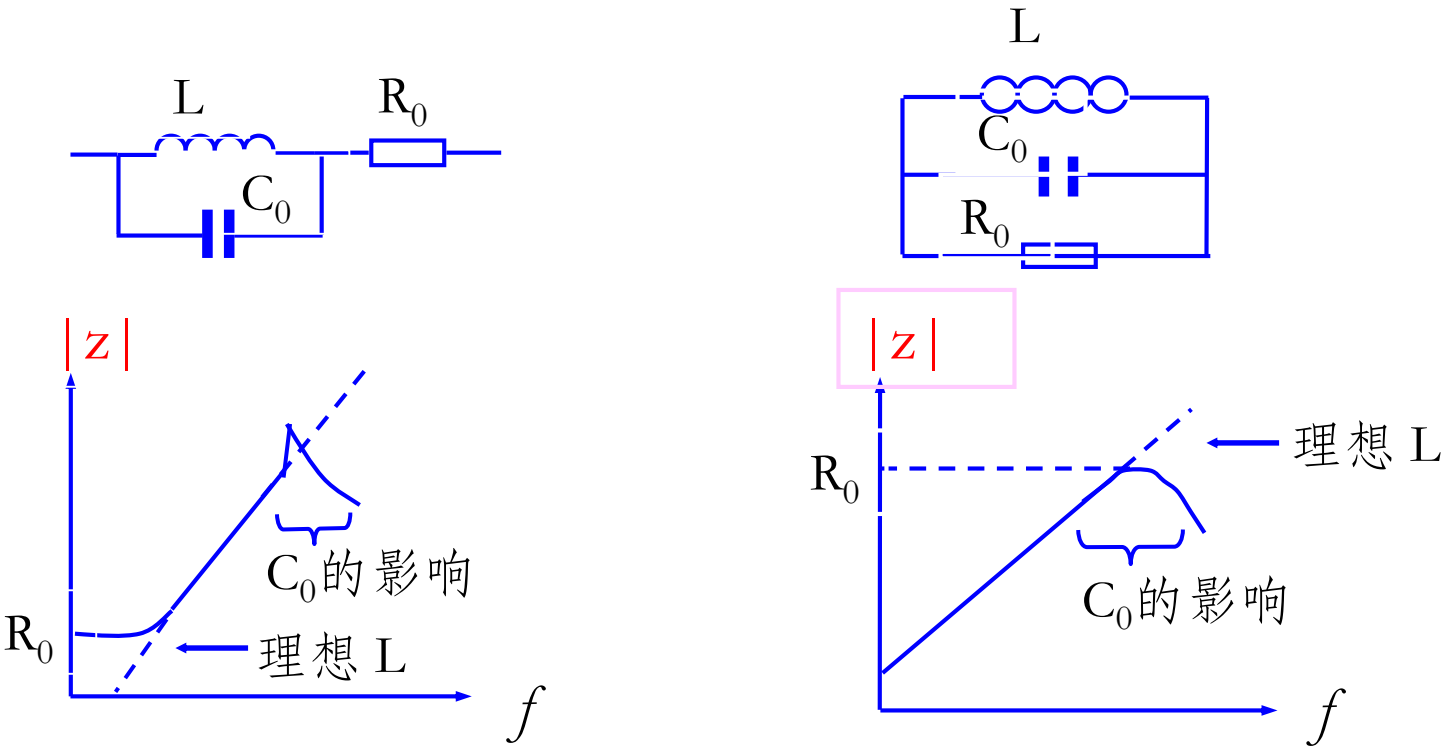


当 $f < f_{oL} = \frac{\omega_{oL}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_f}}$ 呈感性；

当 $f > f_{oL} = \frac{\omega_{oL}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_f}}$ 呈容性；

当 $f = f_{oL} = \frac{\omega_{oL}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_f}}$ 为高阻。

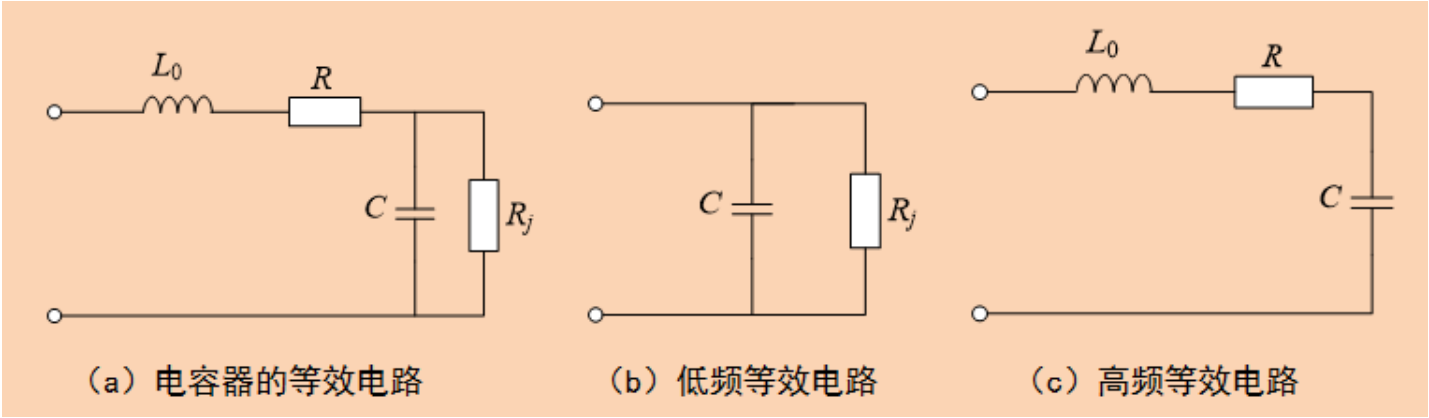
一、阻抗元件特性



电感器的频率响应

一、阻抗元件特性

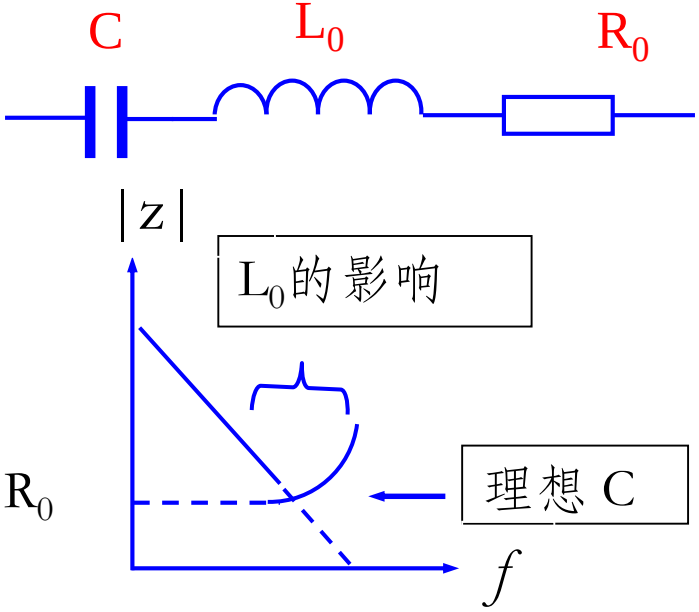
（3）电容器



（a）电容器的等效电路　（b）低频等效电路　（c）高频等效电路

若固有谐振频率为：$f_{oc}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$

当 $f<f_{OC}$ 时，呈容抗；当 $f>f_{OC}$ 时，呈感抗。当 $f=f_{OC}$ 时，呈纯电阻。



（4）Q值

通常用品质因数**Q**来衡量电感、电容以及谐振电路的质量：

Q=2π磁能或电能的最大值 / 一周期内消耗的能量

对于电感可以导出 $Q_L = \dfrac{2\pi fL}{r_l} = \dfrac{\omega L}{r_L}$

对于电容器，若仅考虑介质损耗及泄漏因数，品质因数为 $Q_C = \dfrac{1}{\varpi CR}$

在实际应用中，常用损耗角**δ**和损耗因数**D**来衡量电容器的质量。损耗因数定义为**Q**的倒数，即

$$D = \frac{1}{Q} = R\varpi C = tg\delta \approx \delta$$

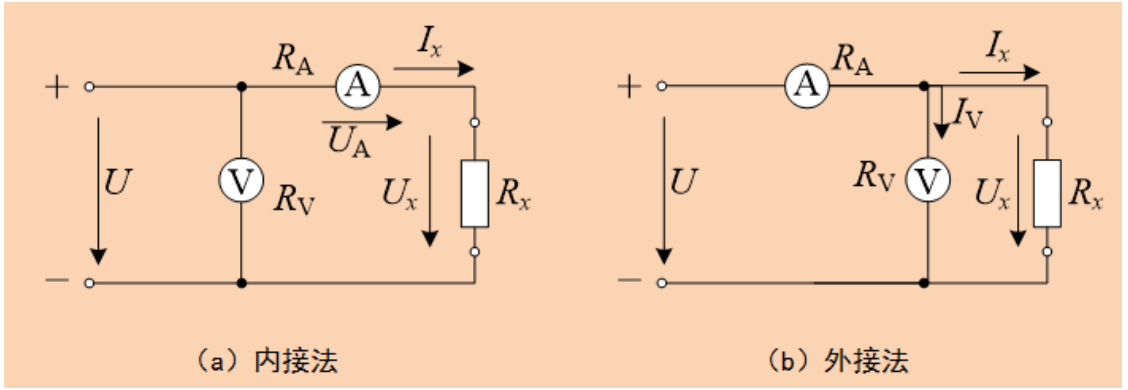
三、 阻抗的测量方法

1) 保证测量条件与工作条件尽量一致：测量时所加的电流、电压、频率、环境条件等必须尽可能接近被测元件的实际工作条件，否则测量结果可能无多大价值。

2) 解RLC的自身特性：在选用RLC元件时就要了解各种类型元件的自身特性。

3) 测量阻抗参数最常用的方法：伏安法、电桥法、谐振法（Q表法）和现代数字化测量法。

伏安法测量直流电阻



若被测元件为电感器，由于　　则 $\omega L = U/I$　　$L = U / 2\pi f I$

若被测元件为电容器，由于　　则 $1/\omega C = U/I$　　$C = I / 2\pi f U$

阻抗的测量

一、阻抗元件特性

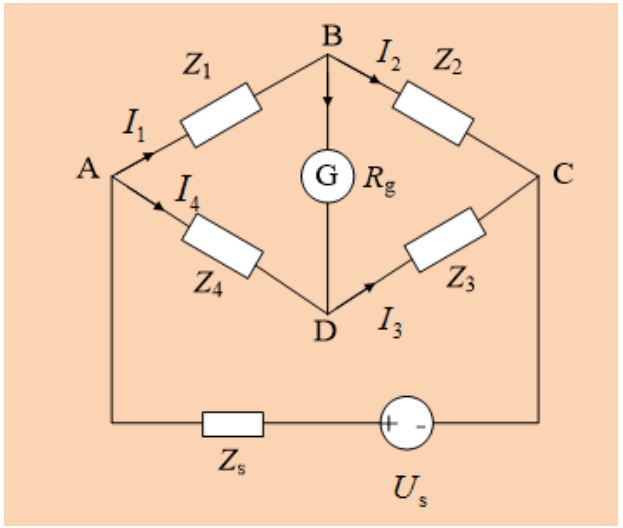
二、阻抗的电桥法测量

三、阻抗的谐振法测量

四、阻抗的数字化测量

二、阻抗的电桥法测量

1. 电桥法测量阻抗的原理



电桥平衡条件：

模平衡条件：$|Z_1|\cdot|Z_3|=|Z_2|\cdot|Z_4|$

相位平衡条件：$\theta_1+\theta_3=\theta_2+\theta_4$

电桥平衡必须同时满足两个条件：

- 模平衡条件和相位平衡条件，即相对臂的阻抗模乘积必须相等，且相对臂阻抗角之和必须相等。
- 为使交流电桥满足平衡条件，至少要有两个可调元件。

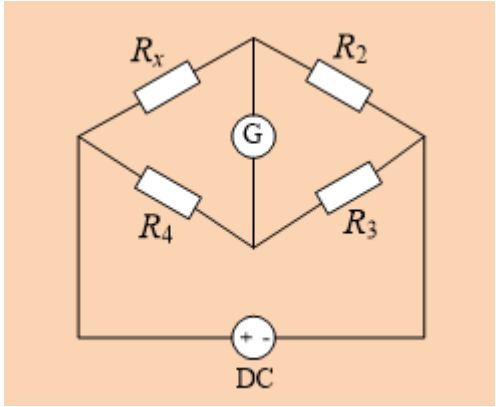
高精度（0.1%典型值）
使用不同电桥可得到宽频率范围
价格低

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

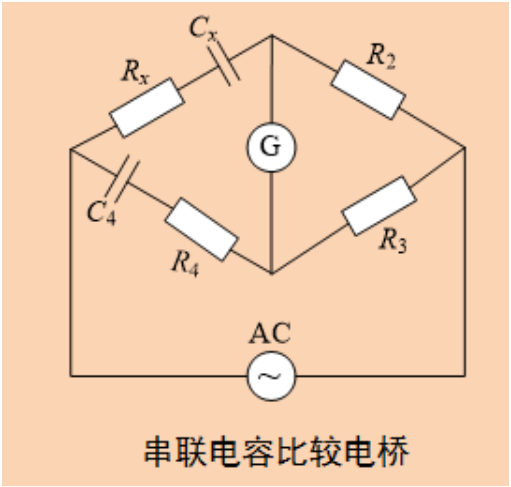
二、阻抗的电桥法测量

2、电桥法测量电阻

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} R_4 = KR_4$$



3、电桥法测量电容



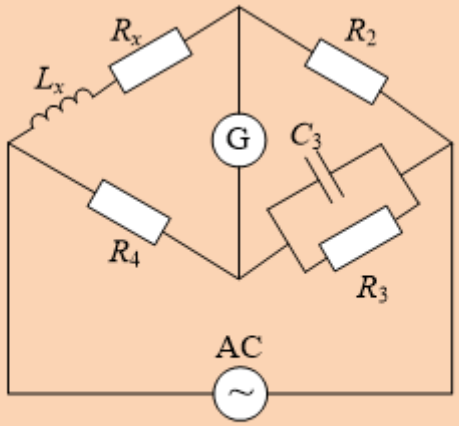
串联电容比较电桥

$$\begin{cases} R_x = \dfrac{R_2}{R_3} R_4 \\ C_x = \dfrac{R_3}{R_2} C_4 \end{cases}$$

$$tg\delta = \frac{1}{Q} = \omega C_4 R_4$$

二、阻抗的电桥法测量

4、电桥法测量电感



麦克斯威—文氏电桥

电桥设计要注意以下几点：

1) 为使结构简单，通常设计两臂为电阻。

2) 为使电桥易于平衡，通常若相邻两臂为电阻，另两臂为同性阻抗；若相对两臂为电阻，另两臂则为异性阻抗。

3) 多采用标准电容作标准电抗，这样比采用标准电感精度要高。

$$\left.\begin{aligned} R_x &= \frac{R_2}{R_3} R_4 \\ L_x &= R_2 R_4 C_3 \end{aligned}\right\}$$

$$Q = \omega C_3 R_4$$

例1：某交流电桥如图所示。当电桥平衡时，C1=0.5μF，R2=2KΩ，C2=0.047μF，R3=1KΩ，C3=0.47μF，信号源 的频率为1 kHz，求阻抗Z4的元件。

阻抗的测量

一、阻抗元件特性

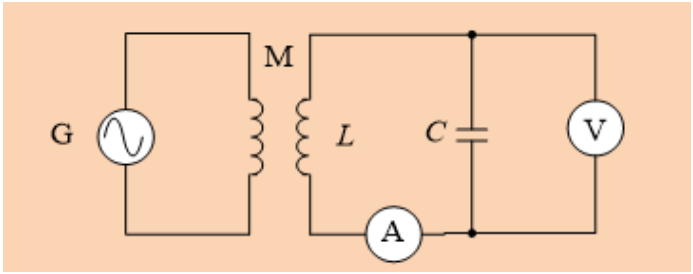
二、阻抗的电桥法测量

三、阻抗的谐振法测量

四、阻抗的数字化测量

三、阻抗的谐振法测量

谐振法测量阻抗的原理



$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

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

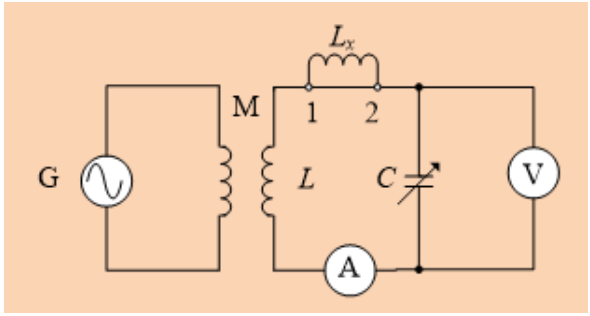
1）串联替代法测量电感：

当电感线圈的电感量较小时，属于低阻抗测量，采用该方法。

- 首先将1、2短路，调节可变电容C到大电容值位置，调节信号源频率，使电路谐振，有:
- 断开1、2，将被测电感Lx接入，调节可变电容C，使电路再次谐振，有:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_1} \qquad L_x + L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_2}$$

两式相减整理，得 $$L_x = \frac{C_1 - C_2}{4\pi^2 f^2 C_1 C_2}$$



三、阻抗的谐振法测量

2）并联替代法测量电感：

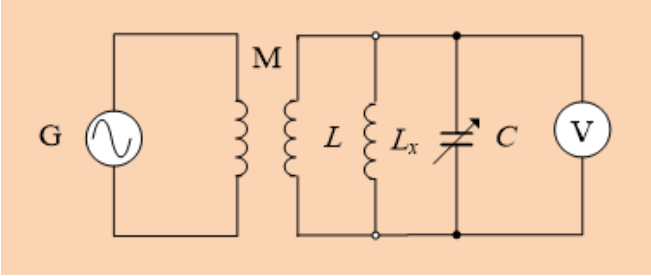
测量电感量较大的电感器这些高阻抗元件需要采用并联替代法测量元件参数。

首先不接被测元件Lx，调节可变电容C到小电容值位置，调节信号源频率，使电路谐振，有 $\frac{1}{L}=4\pi^2 f^2 C_1$

将被测电感Lx并接在可变电容C的两端，再次调谐振，有

$$\frac{1}{L}+\frac{1}{L_x}=4\pi^2 f^2 C_2$$

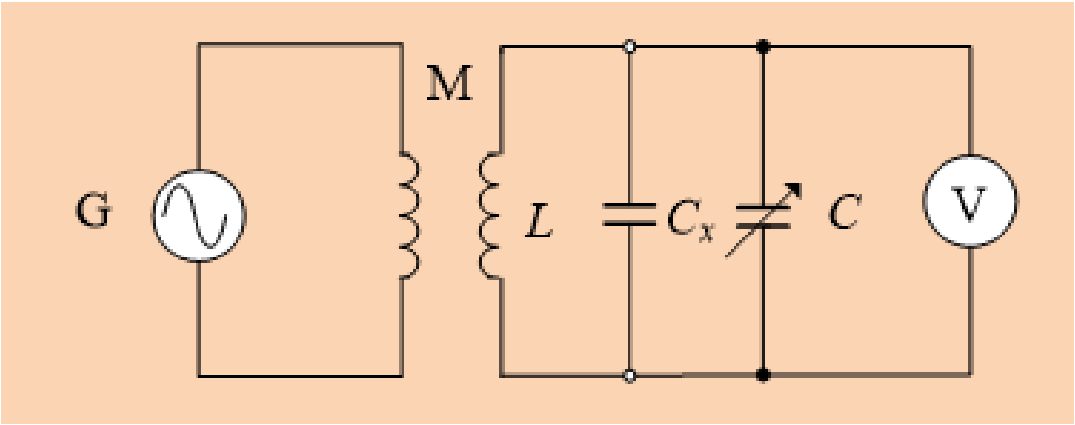
两式相减再取倒数，得 $L_x=\frac{1}{4\pi^2 f^2 (C_2-C_1)}$



3）并联替代法测量小电容量的电容

在不接C_x的情况下，将可变电容C调到某一容量较大的位置，设其容量为C_1，调节信号源频率，使回路谐振。然后并联接入被测电容C_x，信号源频率保持不变，此时回路失谐，重新调节C使回路再次谐振，这时C为C_2，那么被测电容

$$C_x = C_1 - C_2$$

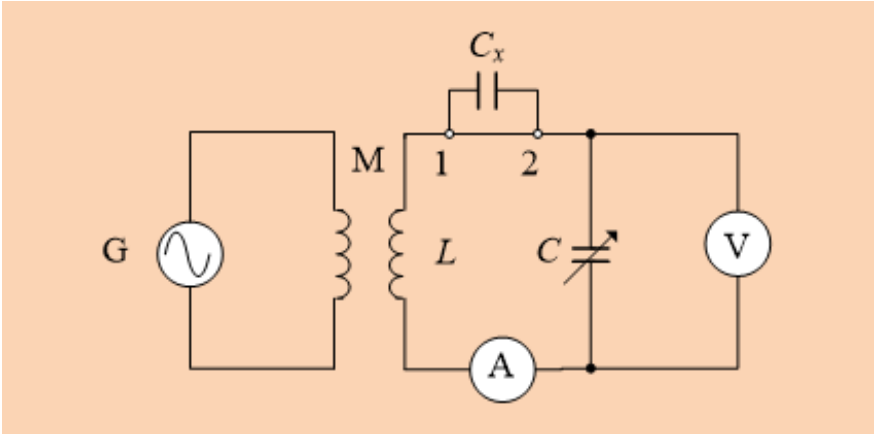


三、阻抗的谐振法测量

4）串联替代法测量大电容量的电容

先将图中1、2两端短路，调节电容C至较小值位置，调节信号源频率，使回路谐振。设此时的电容量为C_1。然后去掉1、2间的短路线，将C_x接入回路，保持信号源频率不变，调节可调电容器C，使回路再次谐振。

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}$$



三、阻抗的谐振法测量

四、Q表的工作原理

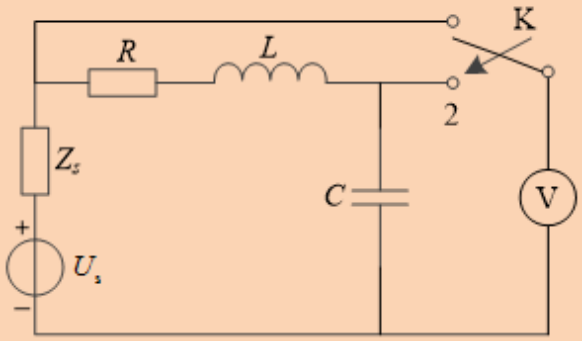


图 7-20 Q 表原理图

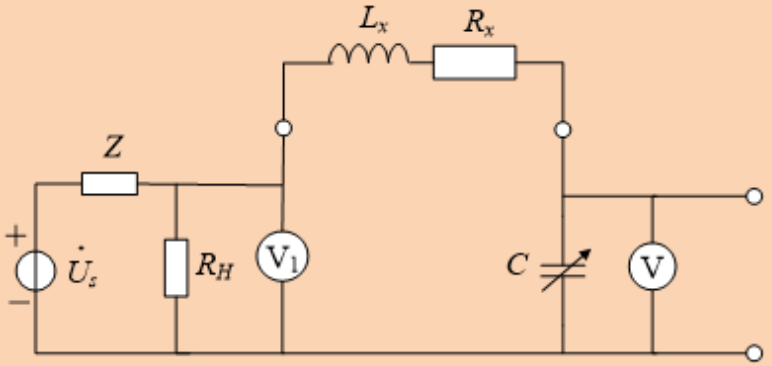


图 7-21 电阻耦合法 Q 表原理图

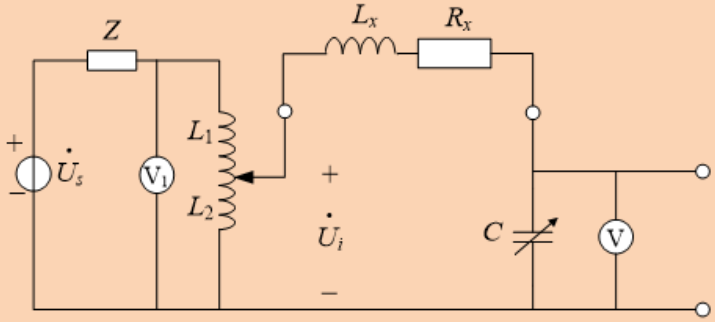


图 7-22 电感耦合法 Q 表原理图

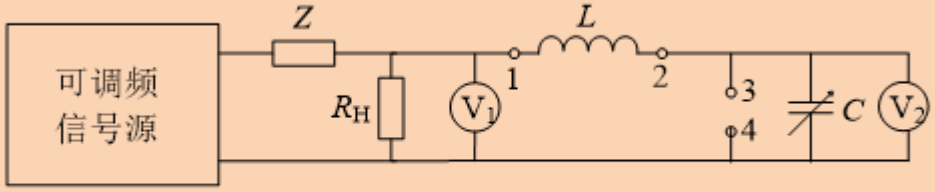


图 7-23 Q 表组成原理图

阻抗的测量

一、阻抗元件特性

二、阻抗的电桥法测量

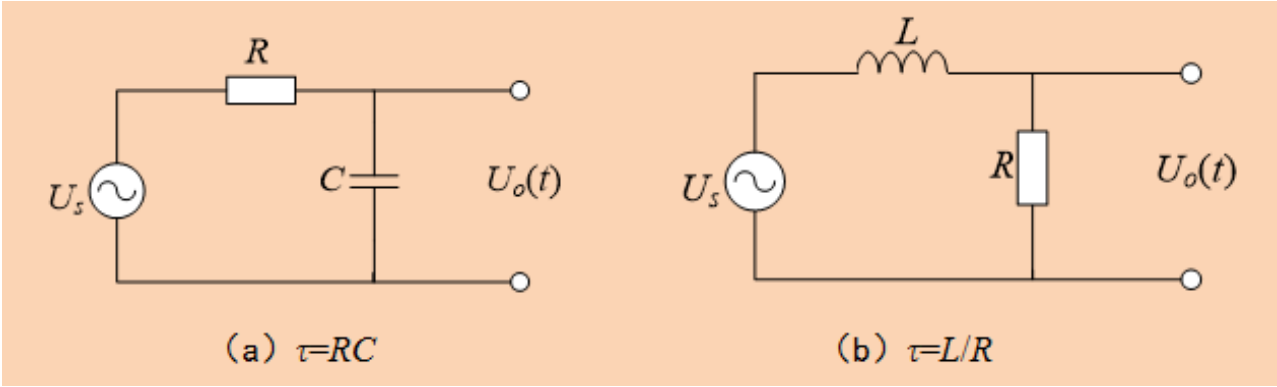
三、阻抗的谐振法测量

四、阻抗的数字化测量

四、阻抗的数字化测量

一、阻抗-时间变换法测量阻抗

时常数法测量阻抗原理

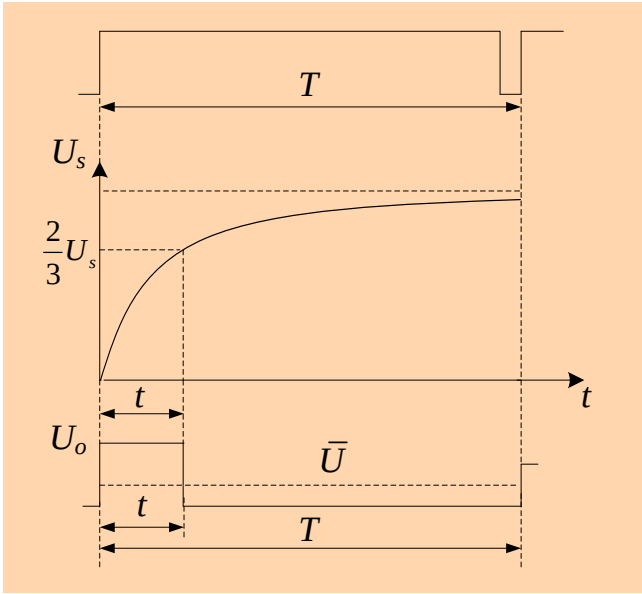


1. 时常数法测量电容： 当电路中加入阶跃电压U_s时，电容上电压即电路输出电压U_o是随着充电时间t变化的。其输出电压为

$$U_o(t)=U_s(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$$

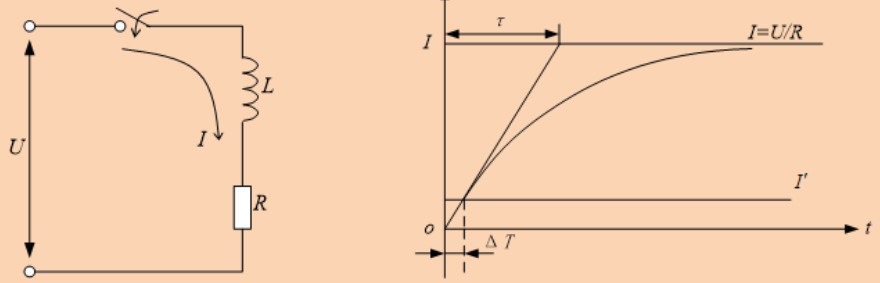
由输出电压表达式可以推出输出电压U_o达到输入电压U_s的2/3大小时的时间t，即

$$t=\tau\ln 3=RC\ln 3=(R\ln 3)C$$



四、阻抗的数字化测量

2. 时常数法测量电感



（a）基本原理图　　（b）时间关系图

图 7-26 时常数法测量电感的基本原理

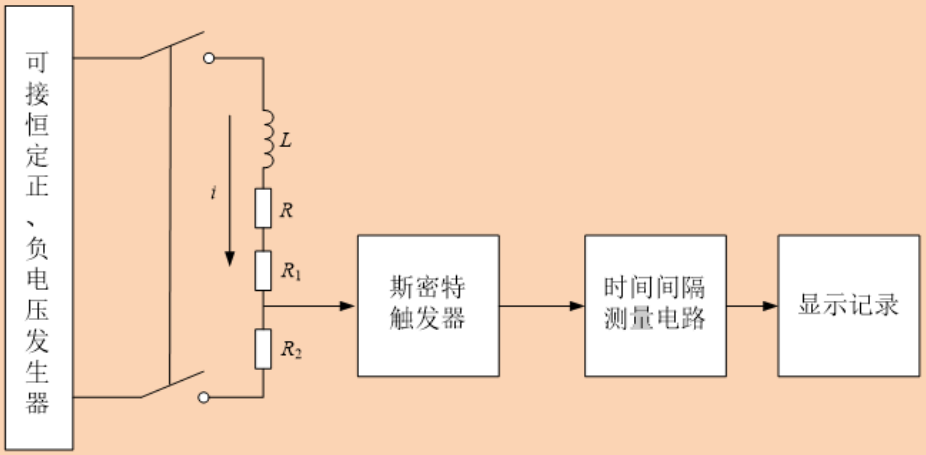
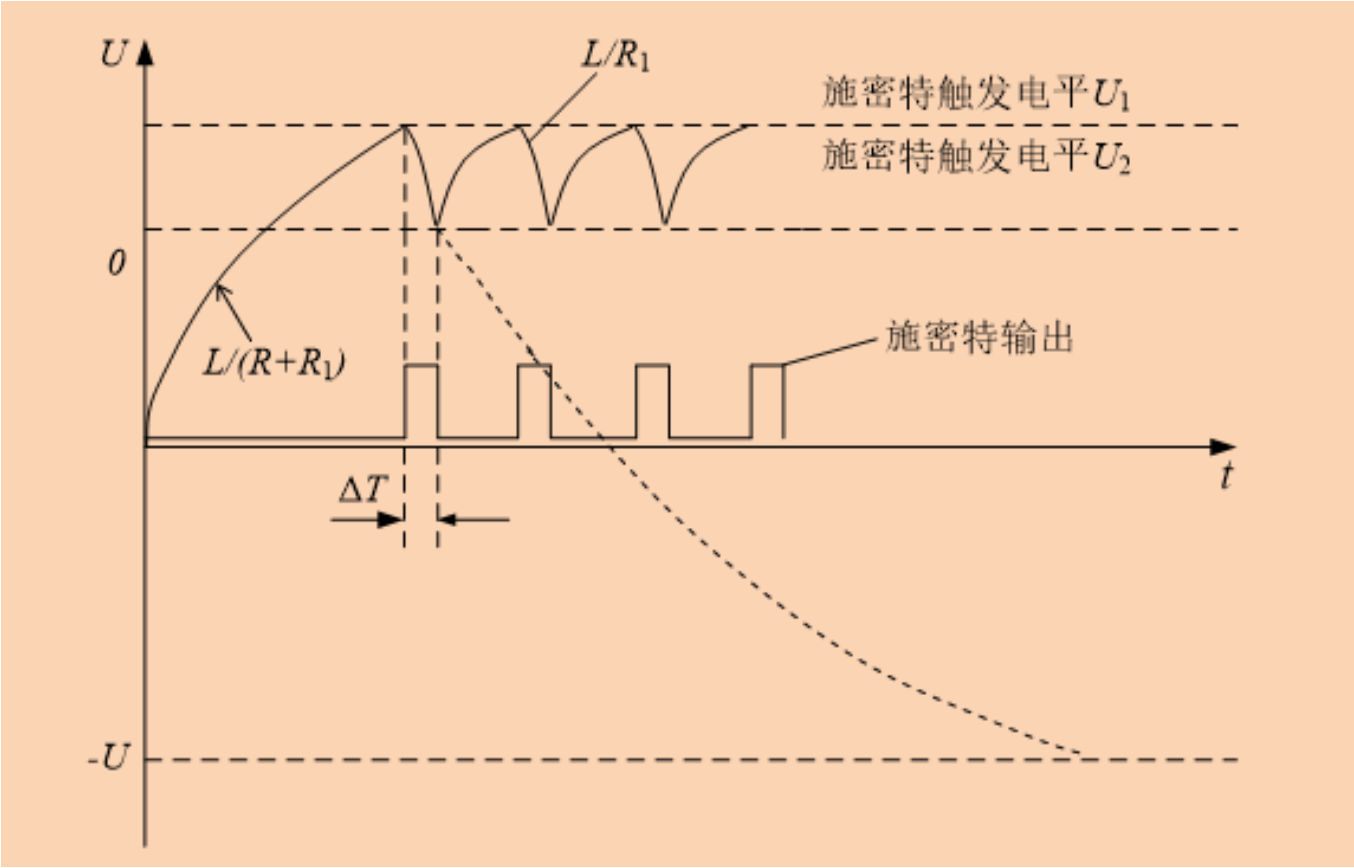


图 7-27 时常数法电感测量仪的原理框图

四、阻抗的数字化测量

2. 时常数法测量电感

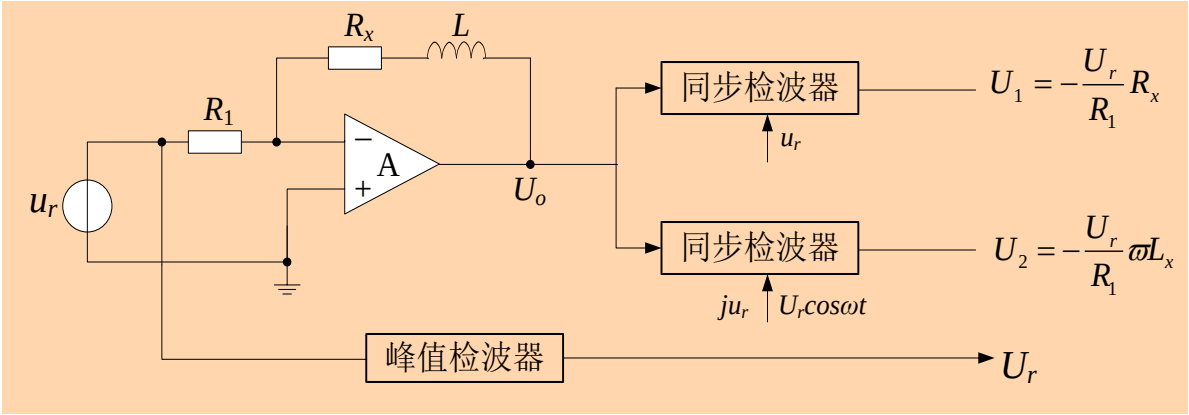


四、阻抗的数字化测量

二、阻抗-电压变换法测量阻抗

1. 电感、电容-电压变换法

1）电感—电压（L-V）变换器



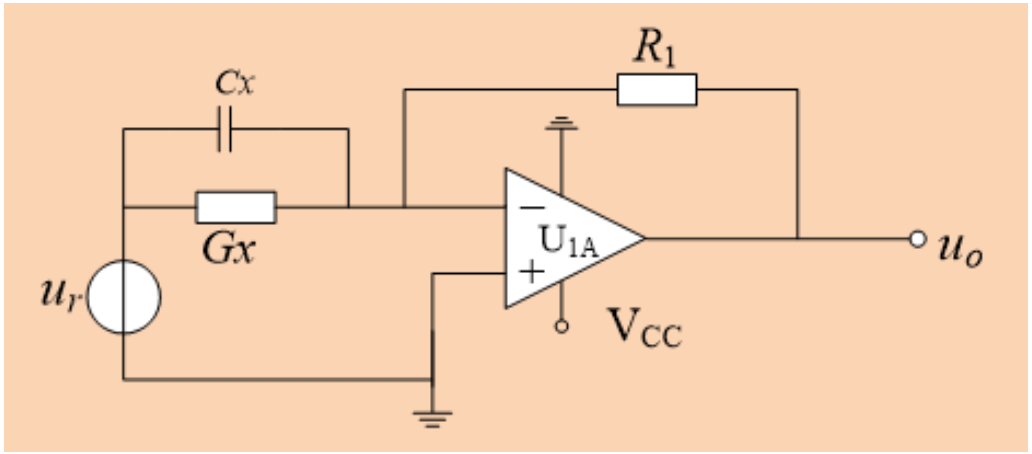
R_x的测量：$$R_x = \frac{R_1}{N_1} N_2$$

L_x的测量：$$L_x = \frac{R_1}{N_1 \omega} N_2$$

Q值的测量：$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{N_1} N_2$$

四、阻抗的数字化测量

2）电容-电压（C-V）变换器



$$C_x = \frac{1}{\varpi R_1 N_1} N_2$$

$$G_x = \frac{1}{R_1 N_1} N_2$$

$$D_x = \tan\delta = \frac{1}{N_1} N_2$$

四、阻抗的数字化测量

三、智能化LCR测量仪

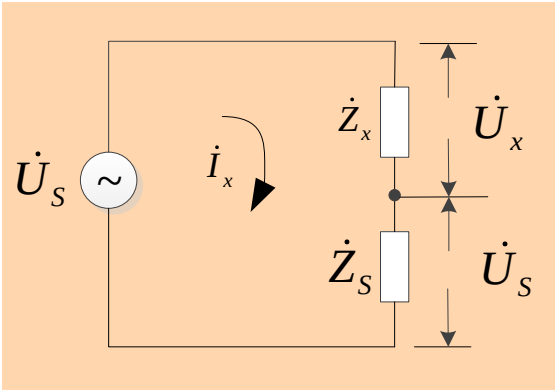
带微处理器的智能化LCR测量仪都是根据欧姆定律，采用矢量电压-电流法。即将阻抗看成正弦交流电压与电流的复数比值。

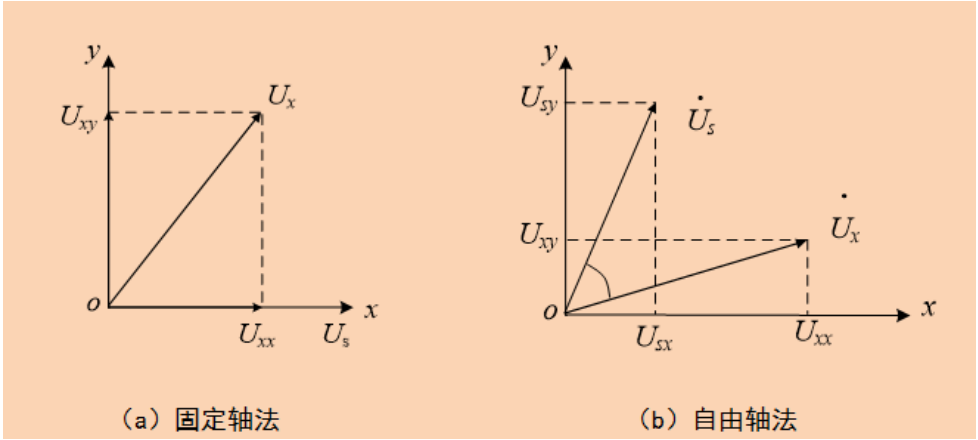
$$\dot{Z}=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=R+jX$$

测量思路：先将矢量电压电流比转换成两个矢量电压比，再将两个矢量电压比转换成两标量电压比。

$$\dot{Z}_x=\frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_S}\cdot\dot{Z}_S$$

完成两个矢量电压的测量方法通常是用一台电压表通过开关转换,分时测量 Ux和Us 实现两个矢量除法运算有固定轴法和自由轴法，将矢量除法转换成标量除法。





（a）固定轴法　　（b）自由轴法

四、阻抗的数字化测量

矢量电压用坐标轴投影的标量电压表示为

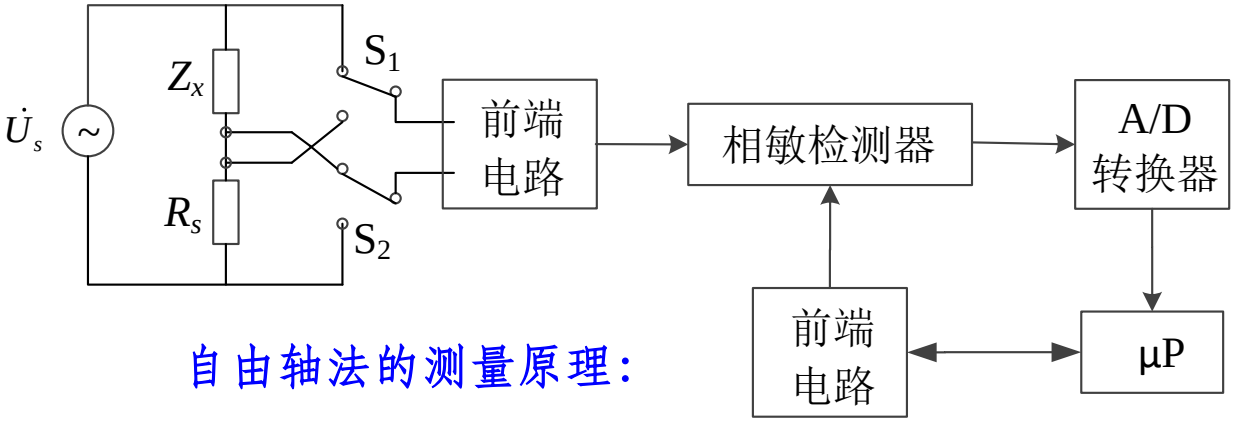
$$\dot{U}_x = U_{xx} + jU_{xy}$$

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

由此可将被测阻抗测量表达式中的矢量电压，用标量电压表示为

$$\dot{Z}_x = R_s \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_s} = R_s \frac{U_{xx} + jU_{xy}}{U_{sx} + jU_{sy}}$$

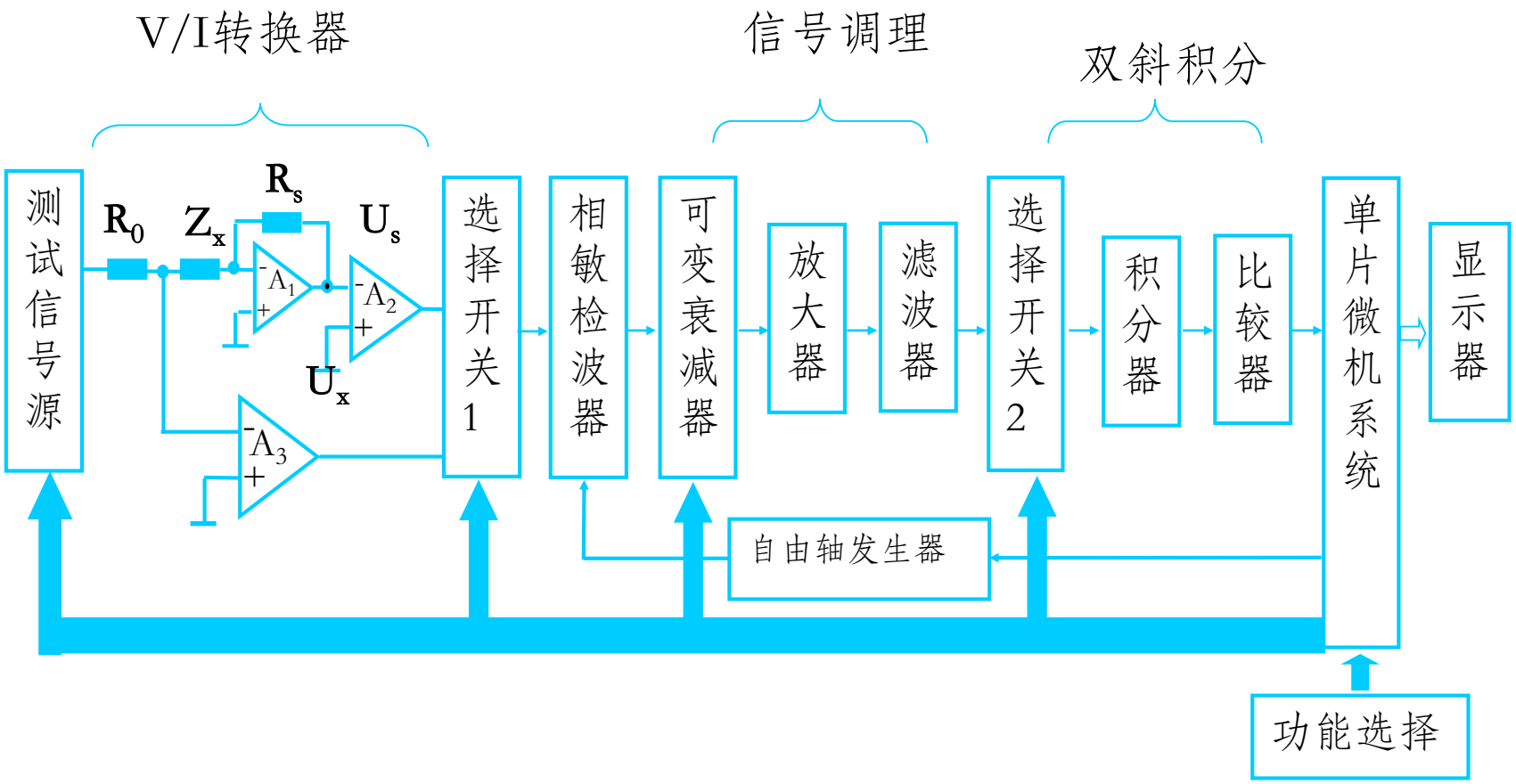
$$= R_s \left(\frac{U_{xx}U_{sx} + U_{xy}U_{sy}}{U_{sx}^2 + U_{sy}^2} + j \frac{U_{xy}U_{sx} - U_{xx}U_{sy}}{U_{sx}^2 + U_{sy}^2} \right)$$



自由轴法的测量原理：

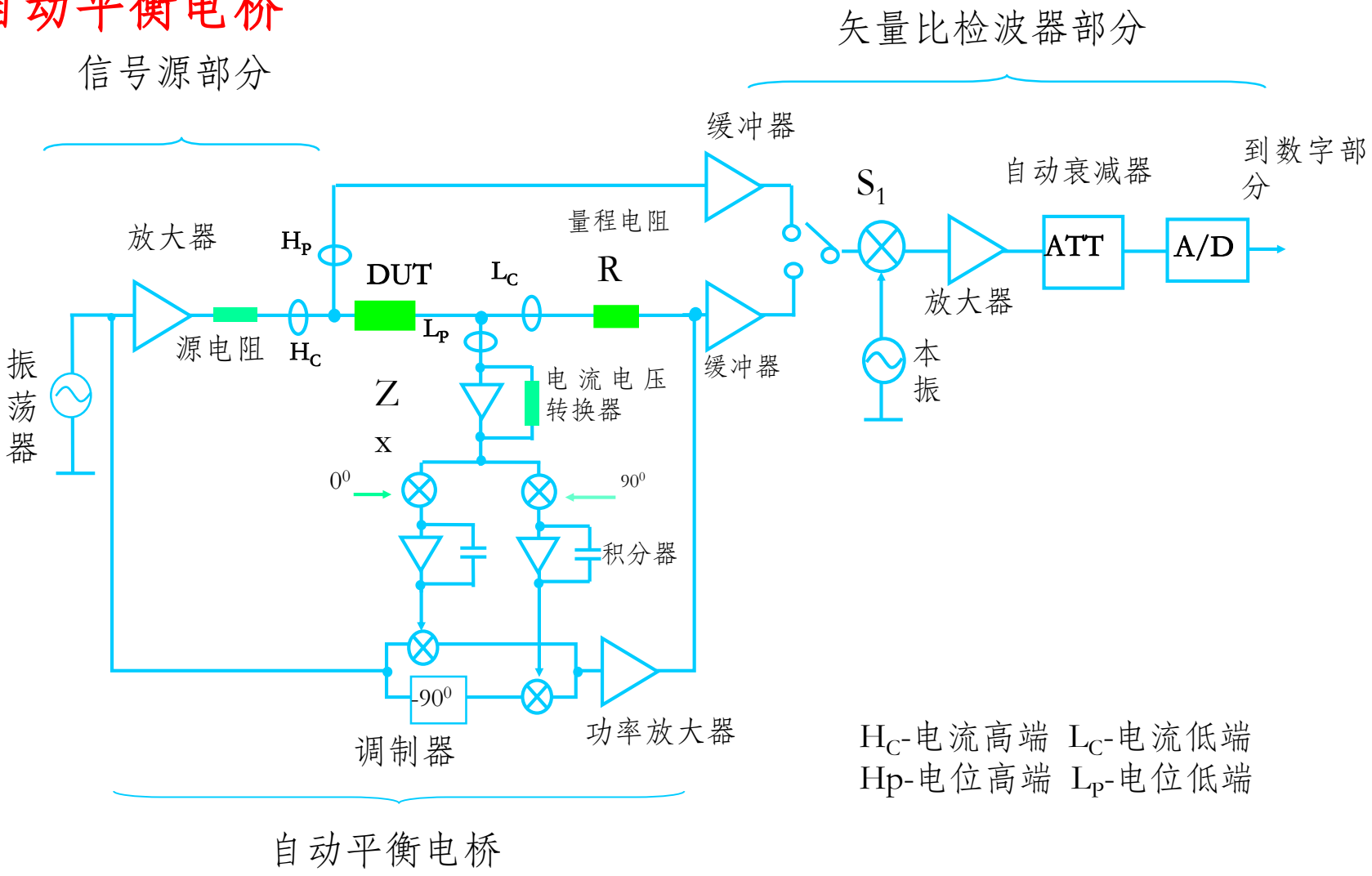
四、阻抗的数字化测量

2 智能化*LCR*测量仪的基本组成



四、阻抗的数字化测量

自动平衡电桥



H_C-电流高端 L_C-电流低端
Hp-电位高端 L_P-电位低端

下一节内容：

时间和频率的测量