# 电路原理



信息学院　常　青

changqing@ecust.edu.cn

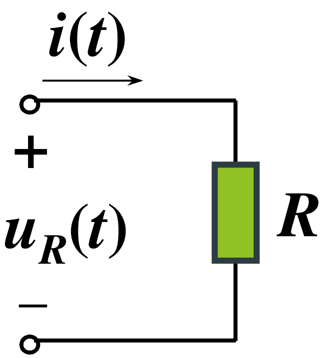
# 第9章 正弦稳态分析

------正弦激励下动态电路的稳态响应

# 9.1　阻抗和导纳

## 一、元件特性的相量形式

**1. 电阻**




已知　$i(t)=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\psi)$

则　$u_R(t)=Ri(t)=\sqrt{2}RI\sin(\omega t+\psi)$

相量形式：

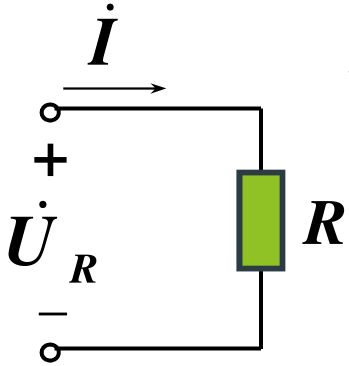
$\dot{I}=I\angle\psi$

$\dot{U}_R=RI\angle\psi$

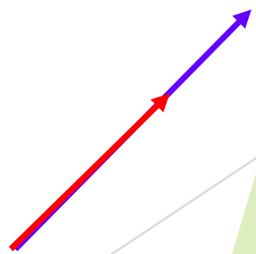
有效值关系：$U_R=RI$

相位关系：$u$ , $i$ 同相

相量关系

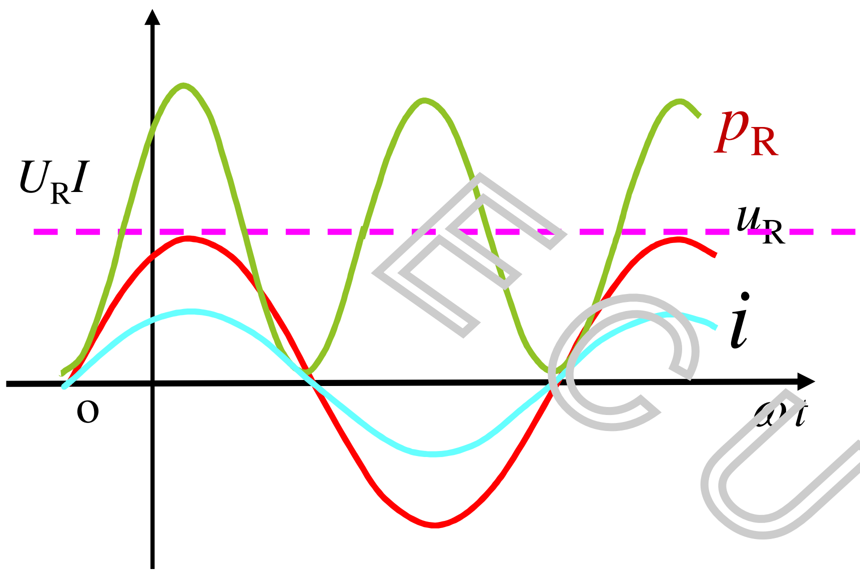


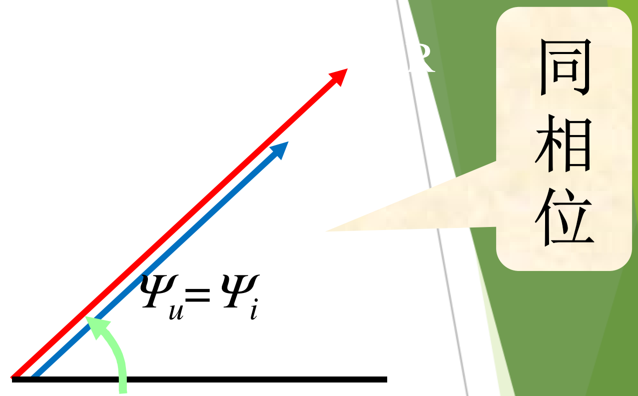

相量模型



相量图

波形图及相量图



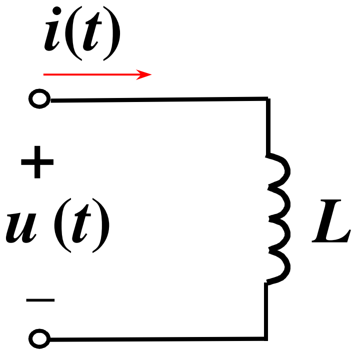




瞬时功率 $p_R = u_R i = \sqrt{2}U_R \sqrt{2}I\cos^2(\omega t+\Psi_i)$

$= U_R I[1+\cos 2(\omega t+\Psi_i)]$

瞬时功率以2ω交变，始终大于零，表明电阻始终吸收功率

## 2. 电感




时域模型

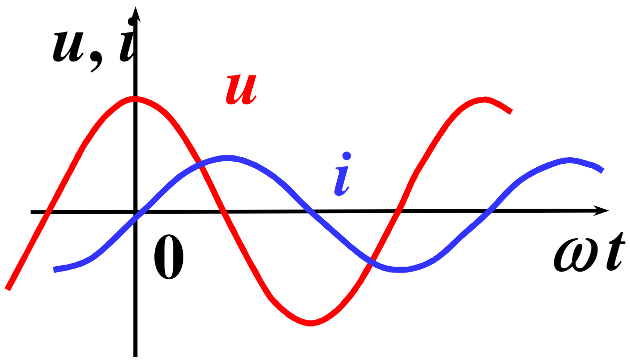
**时域**

$$i(t)=\sqrt{2}I\sin\omega t$$

$$u(t)=L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$$

$$=\sqrt{2}\omega L I\cos\omega t$$

$$=\sqrt{2}\omega L I\sin(\omega t+90^\circ)$$




波形图

**频域**

$$\dot{I}=I\angle 0^\circ$$

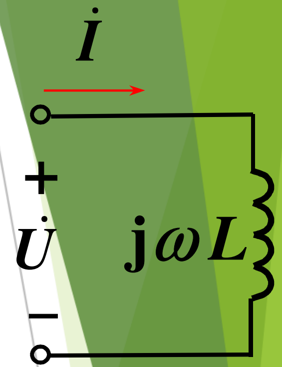
$$\dot{U}=\mathrm{j}\omega L\dot{I}$$

有效值关系

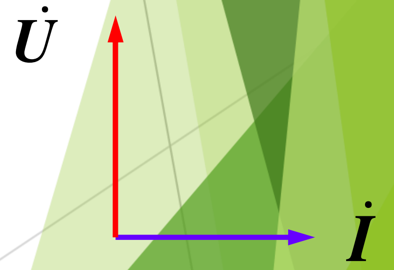
$U=\boxed{\omega L}\,I$

相位关系

$u$ 超前 $i$ 90°




相量模型




相量图

$U=\omega L I$

$X_L = U/I = \omega L = 2\pi f L$，　单位：Ω

感抗(*inductive reactance*)

错误的写法

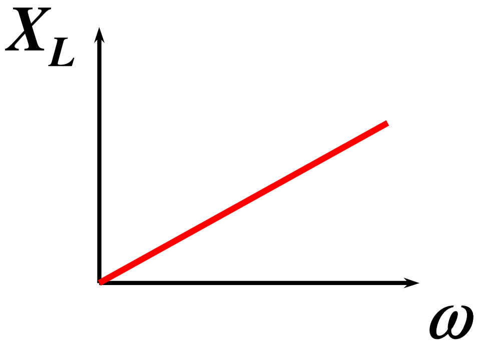
$\omega L \neq \dfrac{u}{i}$

$\omega L \neq \dfrac{\dot{U}}{\dot{I}}$

感抗的物理意义：

(1) 表示限制电流的能力；

(2) 感抗和频率成正比。

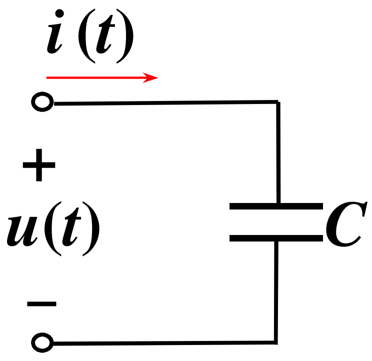



$\omega = 0$(直流)，$X_L = 0$，短路；

$\omega \to \infty$，$X_L \to \infty$，开路；

(3) 由于感抗的存在使电流落后电压。

## 3．电容




时域模型

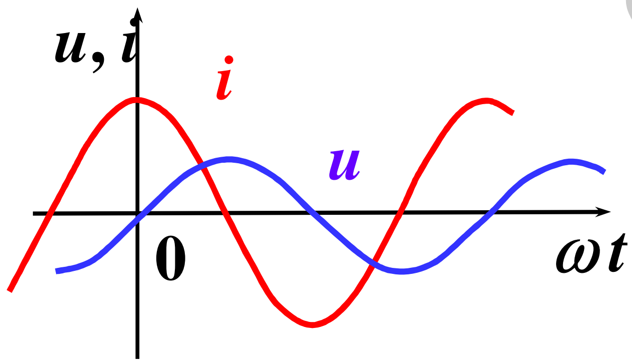
时域

$$u(t)=\sqrt{2}U\sin\omega t$$

$$i(t)=C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}$$

$$=\sqrt{2}\omega CU\cos\omega t$$

$$=\sqrt{2}\omega CU\sin(\omega t+90^\circ)$$




波形图

频域

$$\dot{U}=U\angle 0^\circ$$

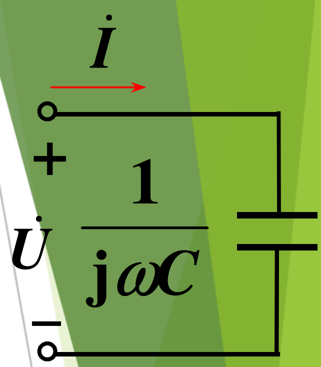
$$\dot{I}=\mathrm{j}\omega C\dot{U}$$

有效值关系

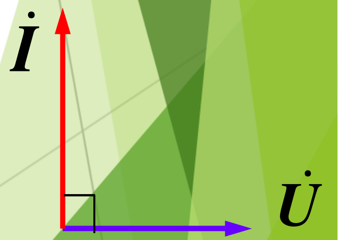
$I=\omega C U$

相位关系

$i$ 超前 $u$ 90°




相量模型




相量图

$I=\omega CU$

$$\frac{U}{I}=\frac{1}{\omega C}$$

$$X_C=-\frac{1}{\omega C}$$

容抗 (*capacitive reactance*)

错误的写法

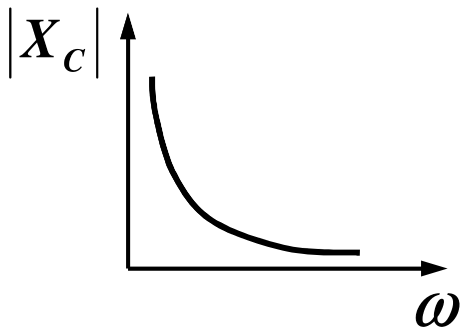
$$\frac{1}{\omega C} \cancel{=} \frac{u}{i}$$

$$\frac{1}{\omega C} \cancel{=} \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

容抗的物理意义：

**(1)** 表示限制电流的能力；

**(2)** 容抗的绝对值和频率成反比。




$\omega=0$(直流), $|X_C|\to\infty$, 隔直作用；

$\omega\to\infty$, $X_C\to 0$, 旁路作用；

**(3)** 由于容抗的存在使电流领先电压。

# 二、电路定律的相量形式和电路的相量模型

## 1.  基尔霍夫定律的相量形式

$$\sum i(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum \dot{I} = 0$$

$$\sum u(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum \dot{U} = 0$$

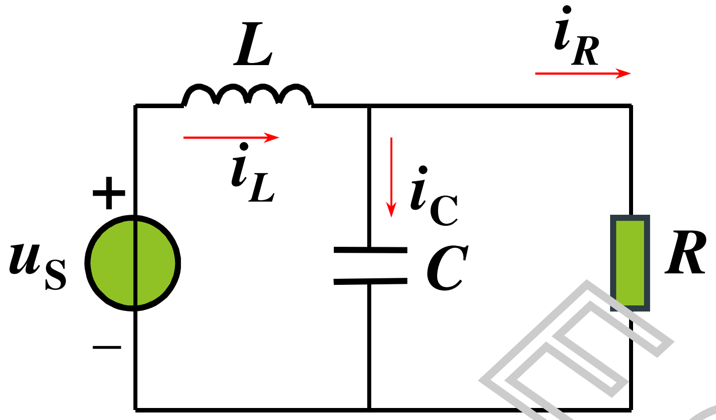
## 2. 电路元件的相量关系

$$u = Ri \qquad \dot{U} = R\dot{I}$$

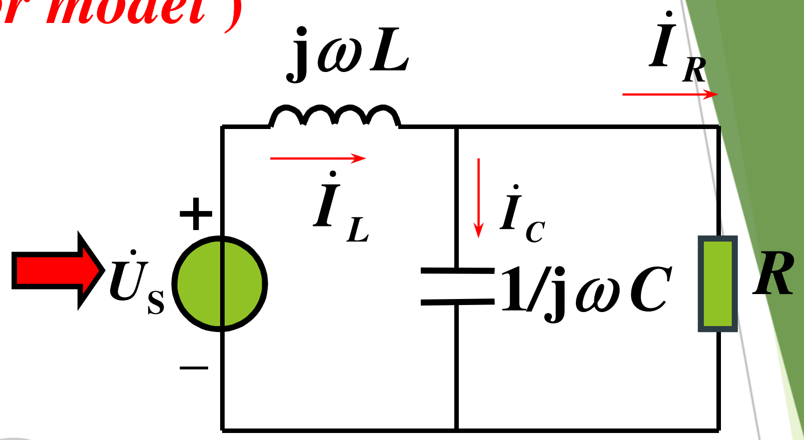
$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \qquad \dot{U} = \mathrm{j}\omega L\dot{I}$$

$$u = \frac{1}{C}\int i\,\mathrm{d}t \qquad \dot{U} = \frac{1}{\mathrm{j}\omega C}\dot{I}$$

## 3. 电路的相量模型 (*phasor model* )




时域电路




相量模型

$$\begin{cases} i_L = i_C + i_R \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} + \dfrac{1}{C}\displaystyle\int i_C \mathrm{d}t = u_S \\ R i_R = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int i_C \mathrm{d}t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{I}_L = \dot{I}_C + \dot{I}_R \\ \mathrm{j}\omega L \dot{I}_L + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}\dot{I}_C = \dot{U}_S \\ R\dot{I}_R = \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}\dot{I}_C \end{cases}$$

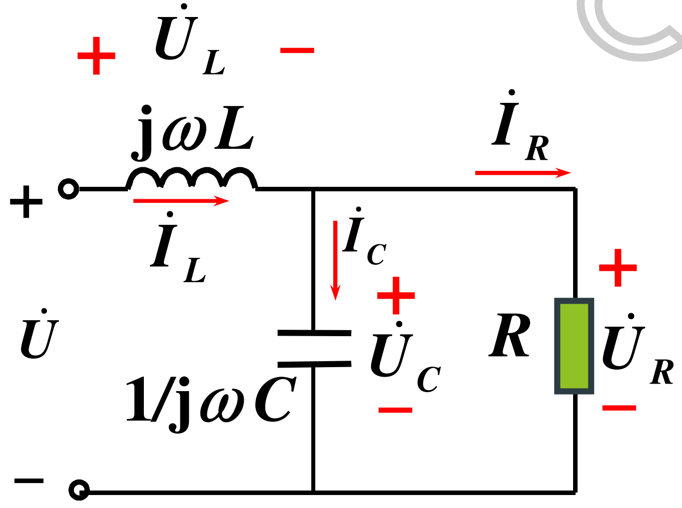
时域列写微分方程 相量形式代数方程

## 4. 相量图(*phasor diagram*)

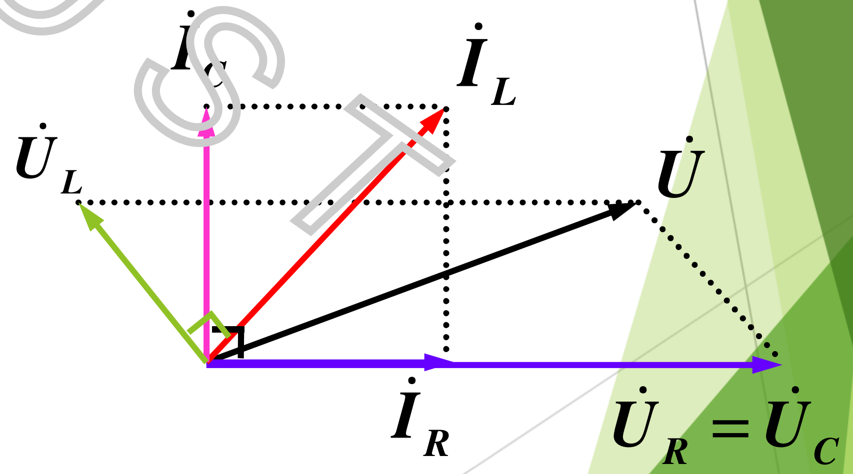
（1） 同频率的正弦量才能表示在同一个相量图中；

（2） 相量以$\omega$角速度逆时针方向旋转；

（3） 选定一个参考相量(设初相位为零)。

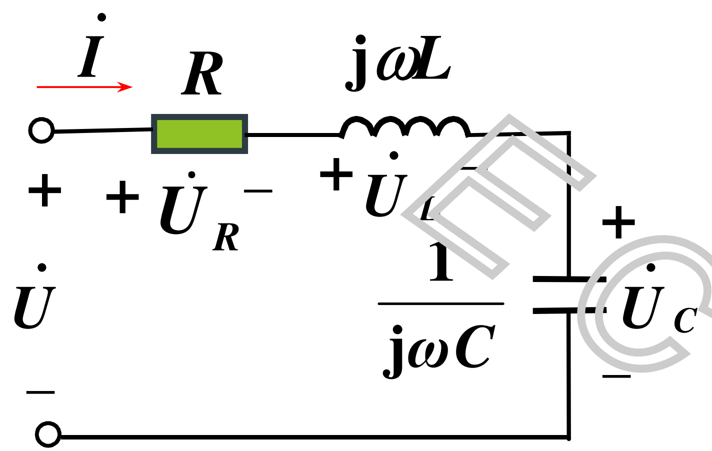



选$\dot{U}_R$为参考相量



## 三、复阻抗和复导纳

### 1. 复阻抗(*complex impedance*)




复阻抗 $Z=\dfrac{\dot{U}}{\dot{I}}=\dfrac{\dot{U}_R+\dot{U}_L+\dot{U}_C}{\dot{I}}$

$$=R+\mathrm{j}\omega L+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}$$

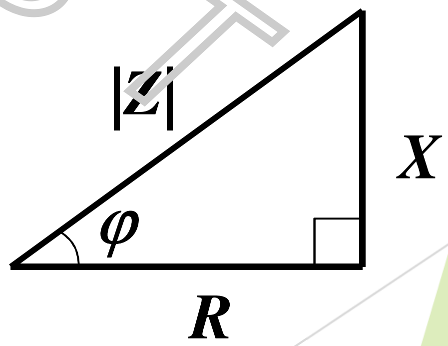
$$=R+\mathrm{j}(\omega L-\frac{1}{\omega C})$$

$$=R+\mathrm{j}X$$

电阻　电抗

$$Z=R+\mathrm{j}X=|Z|\angle\varphi$$

$$\begin{cases}|Z|=\dfrac{U}{I} & \text{阻抗模}\quad \text{单位：}\Omega\\ \varphi=\psi_u-\psi_i & \text{阻抗角}\end{cases}$$




阻抗三角形

## 具体分析一下 *RLC* 串联电路：

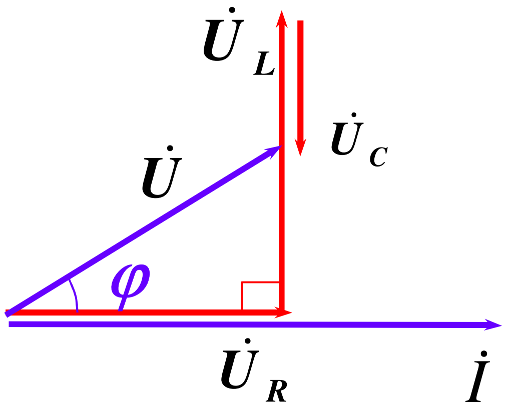
$$Z=R+j(\omega L-1/\omega C)=|Z|\angle\varphi$$

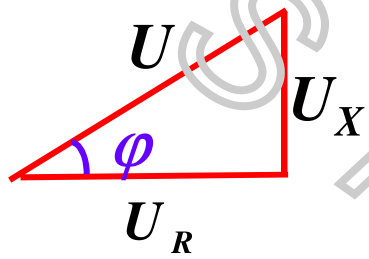
$\omega L > 1/\omega C$ ，$X>0$， $\varphi>0$，电压领先电流，电路呈感性；

$\omega L<1/\omega C$ ，$X<0$， $\varphi<0$，电压落后电流，电路呈容性；

$\omega L=1/\omega C$ ，$X=0$， $\varphi=0$，电压与电流同相，电路呈电阻性。

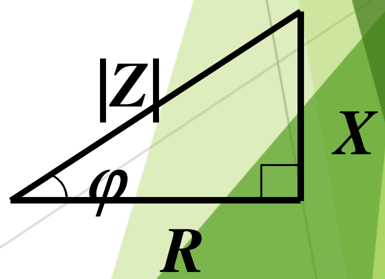
画相量图：选电流为参考向量($\omega L > 1/\omega C$ )



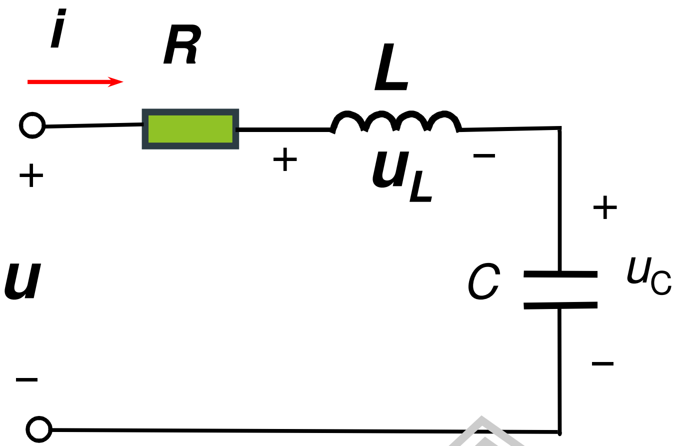

电压三角形

$$U=\sqrt{U_R^2+U_X^2}$$




阻抗三角形

例

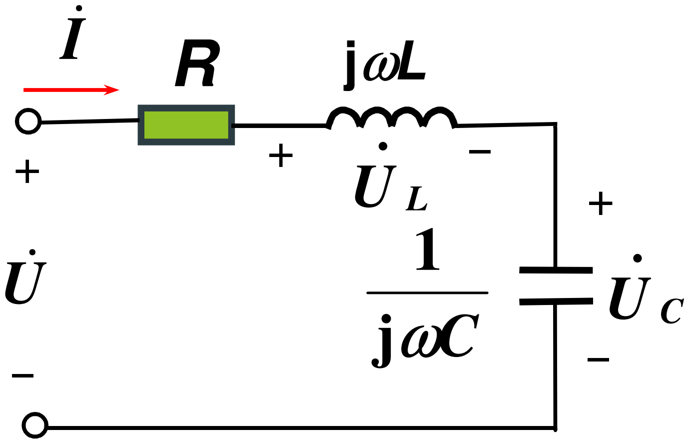



已知：$R$=15Ω, $L$=0.3mH, $C$=0.2μF,

$$u = 5\sqrt{2}\sin(\omega t + 60°)\,\mathrm{V}, \quad f = 3\times 10^4\,\mathrm{Hz}$$

求 $i$ , $u_R$ , $u_L$ , $u_C$ 。

解　其相量模型为




$$\dot{U} = 5\angle 60°\ \mathrm{V}$$

$$\mathrm{j}\omega L = \mathrm{j}2\pi\times 3\times 10^4\times 0.3\times 10^{-3} = \mathrm{j}56.5\Omega$$

$$-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C} = -\mathrm{j}\frac{1}{2\pi\times 3\times 10^4\times 0.2\times 10^{-6}} = -\mathrm{j}26.5\Omega$$

$$Z = R + \mathrm{j}\omega L - \mathrm{j}\frac{1}{\omega C} = 15 + \mathrm{j}56.5 - \mathrm{j}26.5 = 33.54\angle 63.4^{\circ}\ \Omega$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{5\angle 60^\circ}{33.54\angle 63.4^\circ} = 0.149\angle -3.4^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{U}_R = R\dot{I} = 15 \times 0.149\angle -3.4^\circ = 2.235\angle -3.4^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{U}_L = \text{j}\omega L\dot{I} = 56.5\angle 90^\circ \times 0.149\angle -3.4^\circ = 8.42\angle 86.4^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{U}_C = -\text{j}\frac{1}{\omega C}\dot{I} = 26.5\angle -90^\circ \times 0.149\angle -3.4^\circ = 3.95\angle -93.4^\circ\ \text{V}$$

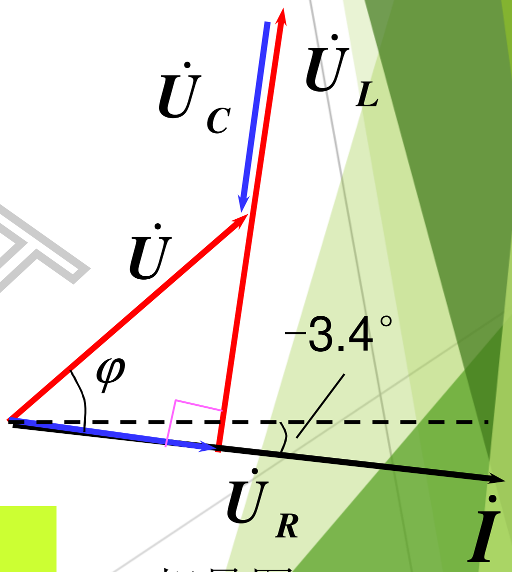
则

$$i = 0.149\sqrt{2}\sin(\omega t - 3.4^\circ)\ \text{A}$$

$$u_R = 2.235\sqrt{2}\sin(\omega t - 3.4^\circ)\ \text{V}$$

$$u_L = 8.42\sqrt{2}\sin(\omega t + 86.6^\circ)\ \text{V}$$

$$u_C = 3.95\sqrt{2}\sin(\omega t - 93.4^\circ)\ \text{V}$$

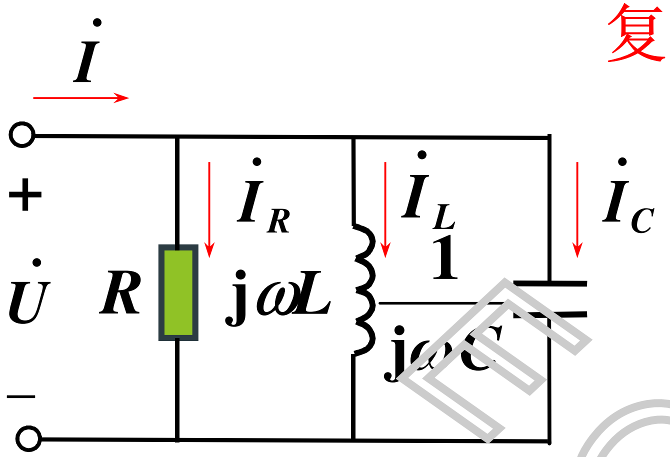



相量图

**$U_L$=8.42V>$U$=5V**，分电压大于总电压，

为什么？

## 2. 复导纳(*admittance*)




复导纳 $Y=\dfrac{\dot{I}}{\dot{U}}=\dfrac{\dot{I}_R+\dot{I}_L+\dot{I}_C}{\dot{U}}$

$$=\frac{1}{R}+\frac{1}{\mathrm{j}\omega L}+\frac{1}{1/\mathrm{j}\omega C}$$

$$=G-\mathrm{j}\frac{1}{\omega L}+\mathrm{j}\omega C$$

$$=G+\mathrm{j}(B_L+B_C)$$

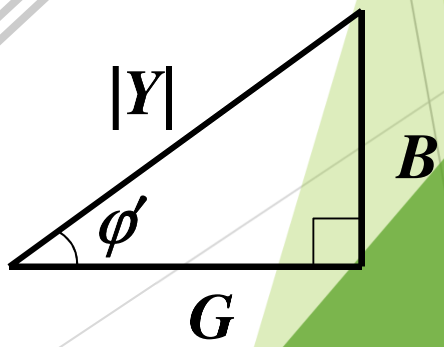
$$=G+\mathrm{j}B$$

电导　　电纳

$$Y=\frac{\dot{I}}{\dot{U}}=G+\mathrm{j}B=|Y|\angle\varphi'$$

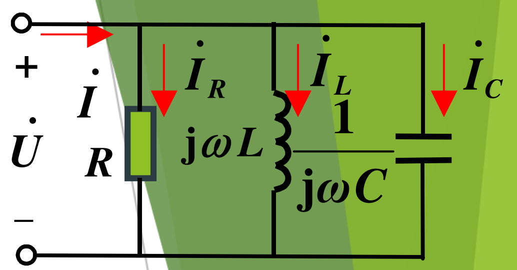
$$\begin{cases}|Y|=\dfrac{I}{U} & \text{导纳的模} \\ \varphi'=\psi_i-\psi_u & \text{导纳角}\end{cases}$$

单位：S




导纳三角形

## 具体分析一下 *RLC* 并联电路

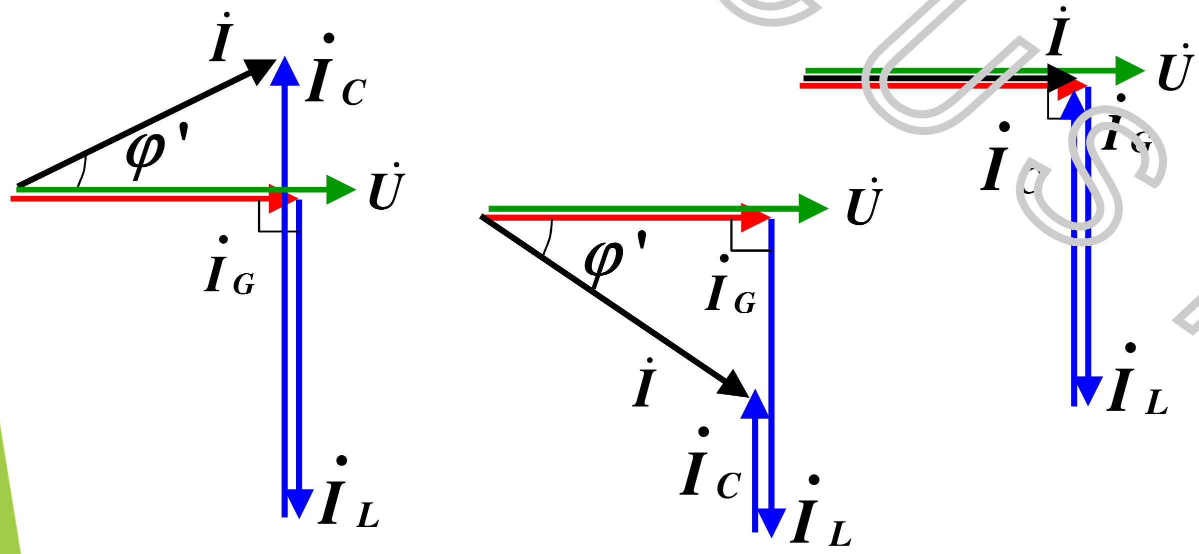


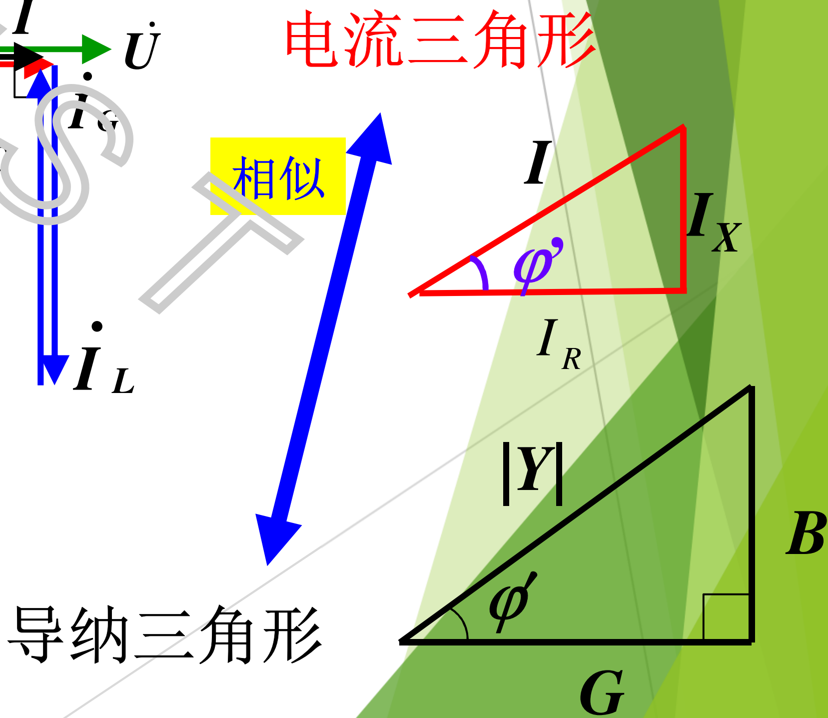

$$Y=G+j(\omega C-1/\omega L)=|Y|\angle\varphi'$$

$\omega C > 1/\omega L$，$B>0$， $\varphi'>0$，电压落后电流， 电路呈容性；

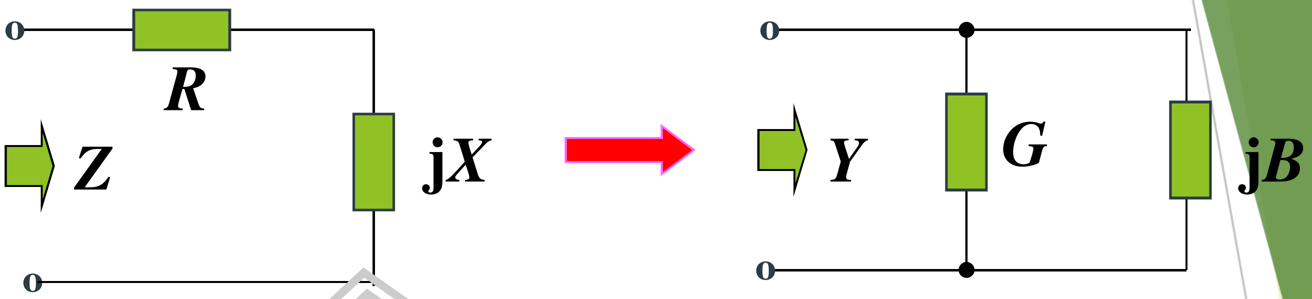
$\omega C<1/\omega L$ ，$B<0$， $\varphi'<0$，电压领先电流， 电路呈感性；

$\omega C=1/\omega L$ ，$B=0$， $\varphi'=0$，电压与电流同相， 电路呈阻性。



# 3. 复阻抗和复导纳的等效变换



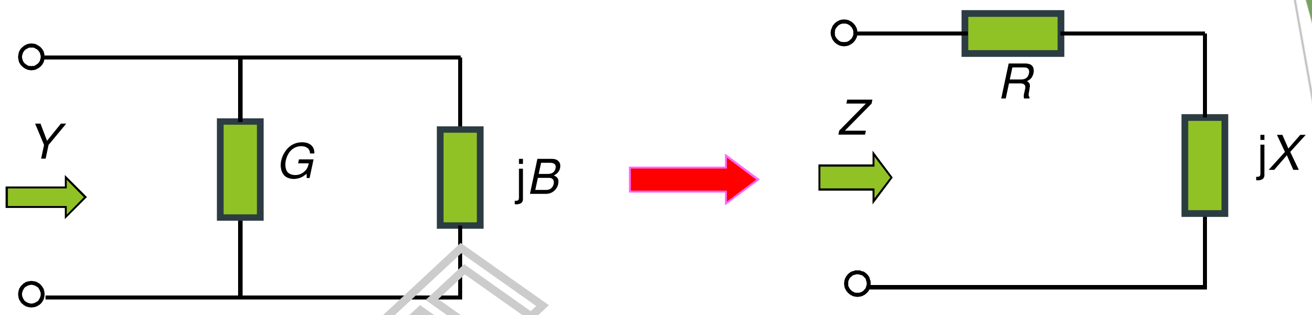

$$Z = R + \mathrm{j}X = |Z|\angle\varphi \quad \Rightarrow \quad Y = G + \mathrm{j}B = |Y|\angle\varphi'$$

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

$$\therefore \quad G = \frac{R}{R^2+X^2}, \quad B = \frac{-X}{R^2+X^2} \qquad |Y| = \frac{1}{|Z|}, \quad \varphi' = -\varphi$$

一般情况 $G \neq 1/R \quad B \neq 1/X$

同样，若由$Y$变为$Z$，则有：




$$Y = G + \mathrm{j}B = |Y|\angle\varphi',\qquad Z = R + \mathrm{j}X = |Z|\angle\varphi$$

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

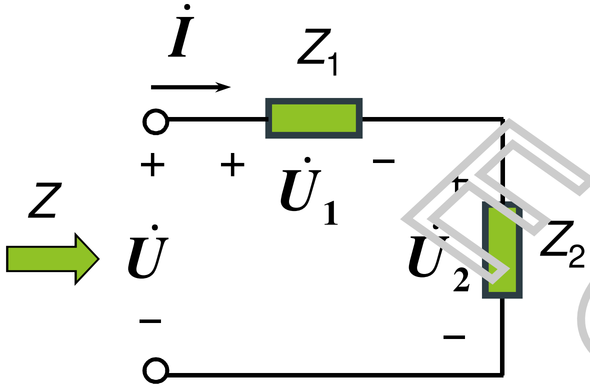
$$\therefore\quad R = \frac{G}{G^2+B^2},\qquad X = \frac{-B}{G^2+B^2}$$

$$|Y| = \frac{1}{|Z|},\quad \varphi = -\varphi'$$

## 4. 阻抗串、并联

$$\dot{U}=\dot{U}_1+\dot{U}_2=\dot{I}Z_1+\dot{I}Z_2=\dot{I}(Z_1+Z_2)$$

两个阻抗串联



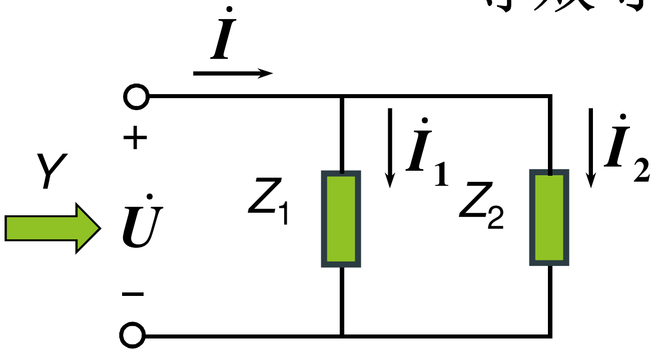

等效阻抗 $Z=Z_1+Z_2$

分压公式 $\dot{U}_1=\dfrac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot{U}$, 

$$\dot{U}_2=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot{U}$$

两个阻抗并联

等效导纳 $Y=Y_1+Y_2=\dfrac{1}{Z_1}+\dfrac{1}{Z_2}=\dfrac{Z_1+Z_2}{Z_1Z_2}$




等效阻抗 $Z=\dfrac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}$

分流公式 $\dot{I}_1=\dfrac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot{I}$, $\dot{I}_2=\dfrac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot{I}$

## $n$个阻抗串联

等效阻抗 $$Z=\sum_{k=1}^{n}Z_k$$

分压公式 $$\dot{U}_k=\frac{Z_k}{\sum_{k=1}^{n}Z_k}\dot{U}\qquad(k=1,2,\cdots n)$$

## $n$个导纳并联

等效导纳 $$Y=\sum_{k=1}^{n}Y_k$$

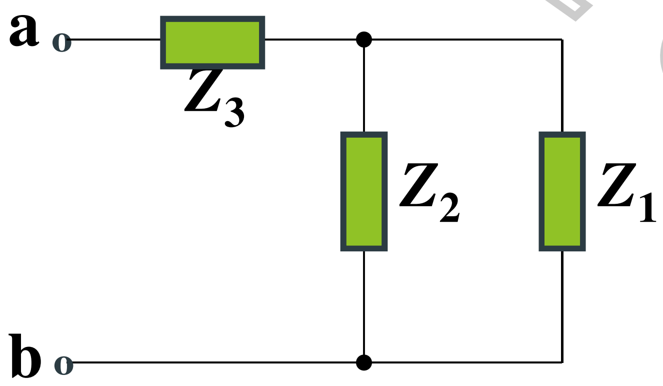
分流公式 $$\dot{I}_k=\frac{Y_k}{\sum_{k=1}^{n}Y_k}\dot{I}\qquad(k=1,2,\cdots n)$$

例1　已知 $Z_1$=10+j6.28Ω

$Z_2$=20−j31.9 Ω

$Z_3$=15+j15.7 Ω

求 $Z_{ab}$。




$$Z_{ab}=Z_3+\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}=Z_3+Z$$

$$Z=\frac{(10+j6.28)(20-j31.9)}{10+j6.28+20-j31.9}$$

$$=\frac{11.81\angle 32.13^{o}\times 37.65\angle -57.61^{o}}{39.45\angle -40.5^{o}}$$

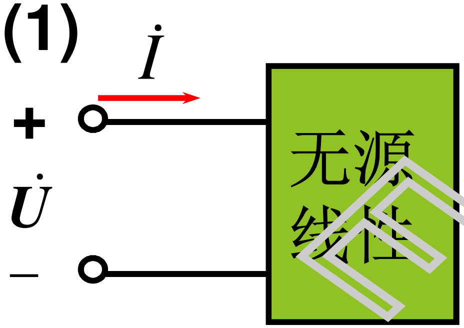
$$=10.89+j2.86\Omega$$

$$\therefore Z_{ab}=Z_3+Z=15+j15.7+10.89+j2.86$$

$$=25.89+j18.56=31.9\angle 35.6^{o}\ \Omega$$

## 小结：

(1)




$$Z=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}\qquad \dot{U}=\dot{I}Z$$

$$Y=\frac{\dot{I}}{\dot{U}}\qquad \dot{I}=Y\dot{U}$$

相量形式

欧姆定理

(2) ***Z***是与***u,i***无关的复数。

(3) 根据***Z***、***Y***可确定无源二端网络的性能

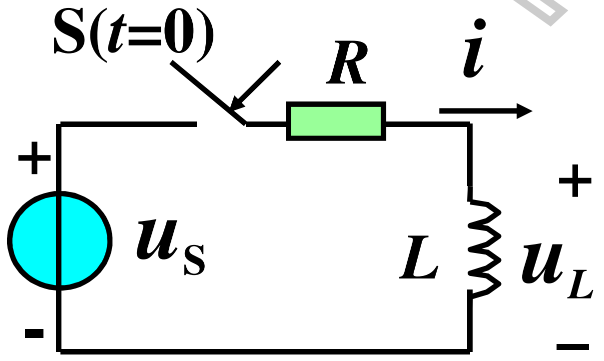
(4) 一般情况***Z***、***Y***均是$\omega$的函数

## 9-3 用相量法分析电路的正弦稳态响应

步骤：① 画出电路的相量模型　　$R, L, C \to$ 复阻抗

② 列相量代数方程　　$i, u \to \dot{U}, \dot{I}$

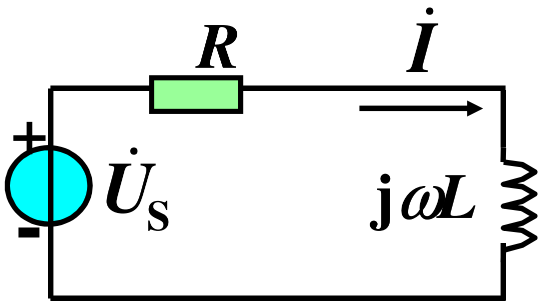
例2　正弦激励下的过渡过程。




$u_S = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$　$i(0^-)=0$　求：$i(t)$

$$i(t) = i(\infty) + [i(0^+) - i(\infty)\big|_{0^+}]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

用相量法求$i(\infty)$



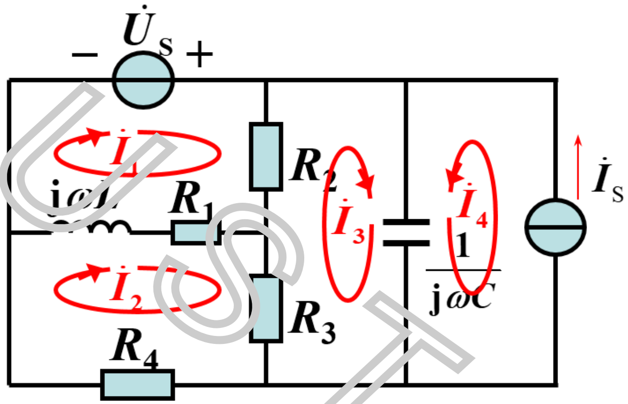

$$\dot{I} = \frac{U_m/\sqrt{2}\angle\psi_u}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}\angle\arctan\left(\omega L/R\right)}$$

$$I = \frac{U_m/\sqrt{2}}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}\qquad \varphi = \psi_u - \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$i(\infty)=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\varphi) \qquad i(\infty)\Big|_{0^+}=\sqrt{2}I\sin\varphi$$

$$i=\left(\sqrt{2}I\sin(\omega t+\varphi)-\sqrt{2}I\sin\varphi \mathrm{e}^{-\frac{Rt}{L}}\right)\varepsilon(t)$$

例3 列写电路的回路电流方程。






解:

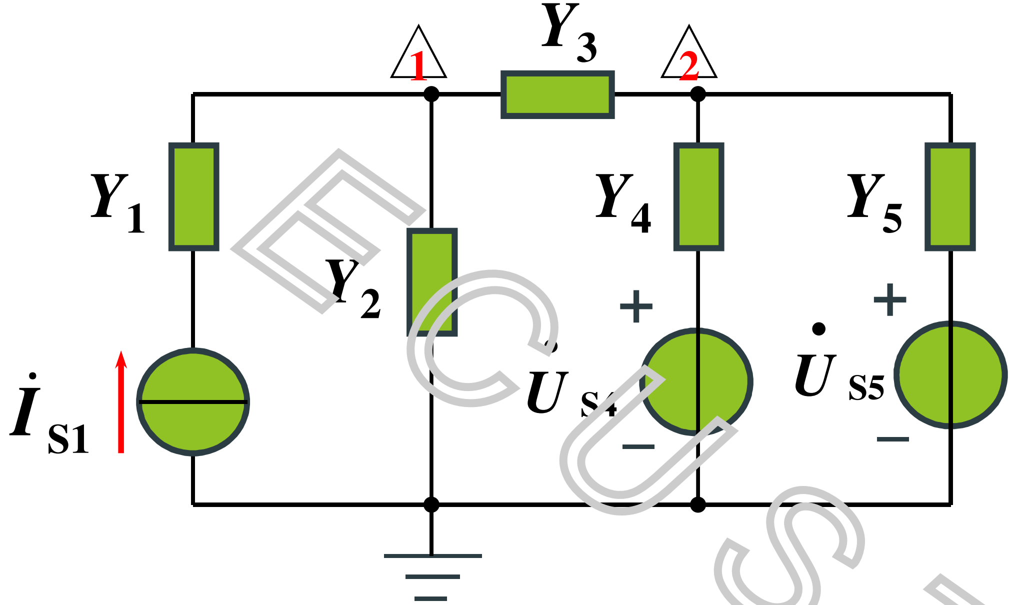
$$(R_1+R_2+\mathrm{j}\omega L)\dot{I}_1-(R_1+\mathrm{j}\omega L)\dot{I}_2-R_2\dot{I}_3=\dot{U}_S$$

$$(R_1+R_3+R_4+\mathrm{j}\omega L)\dot{I}_2-(R_1+\mathrm{j}\omega L)\dot{I}_1-R_3\dot{I}_3=0$$

$$(R_2+R_3+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C})\dot{I}_3-R_2\dot{I}_1-R_3\dot{I}_2+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}\dot{I}_4=0$$

$$\dot{I}_4=\dot{I}_S$$

例4　列写电路的节点电压方程



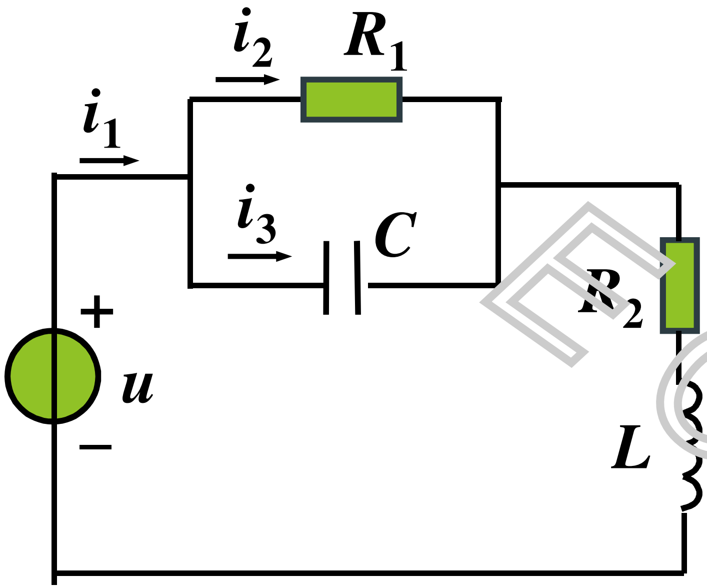


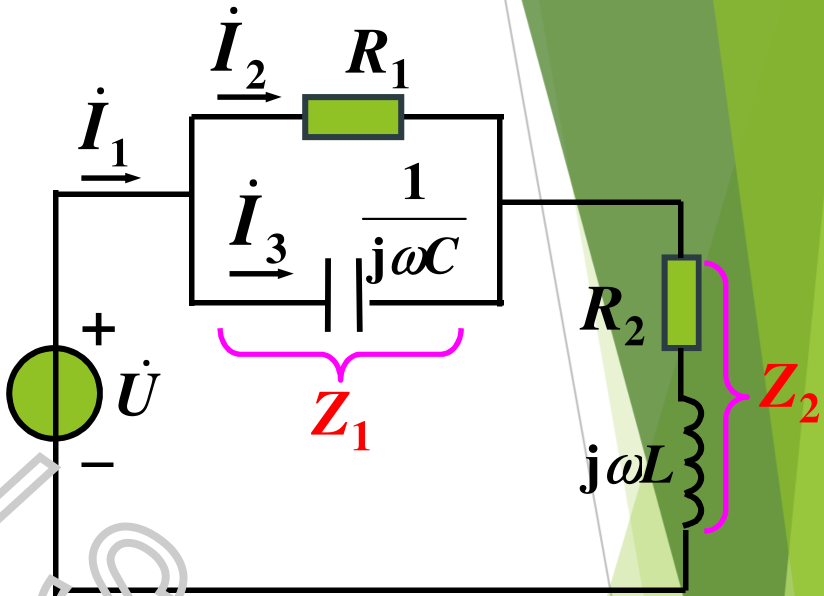

解：

$$(Y_2+Y_3)\dot{U}_1-Y_3\dot{U}_2=\dot{I}_{S1}$$

$$-Y_3\dot{U}_1+(Y_3+Y_4+Y_5)\dot{U}_2=Y_4\dot{U}_{S4}+Y_5\dot{U}_{S5}$$

例 5　已知：$R_1=1000\Omega$, $R_2=10\Omega$, $L=500\text{mH}$, $C=10\mu\text{F}$, $U=100\text{V}$, $\omega=314\ \text{rad/s}$。求各支路电流。



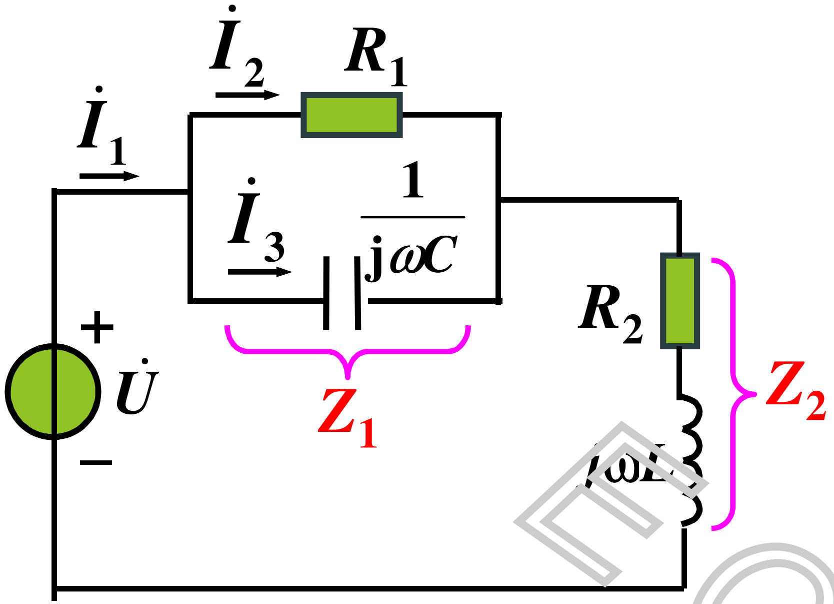




解：画出电路的相量模型

$$Z_1=\frac{R_1\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R_1+\frac{1}{j\omega C}}=\frac{1000\times(-j318.5)}{1000-j318.5}=\frac{318.5\times10^3\angle-90^\circ}{1049\angle-17.67^\circ}$$

$$=303.6\angle-72.32^\circ=92.20-j289.3\ \Omega$$

$$Z_2=R_2+j\omega L=10+j157\ \Omega$$



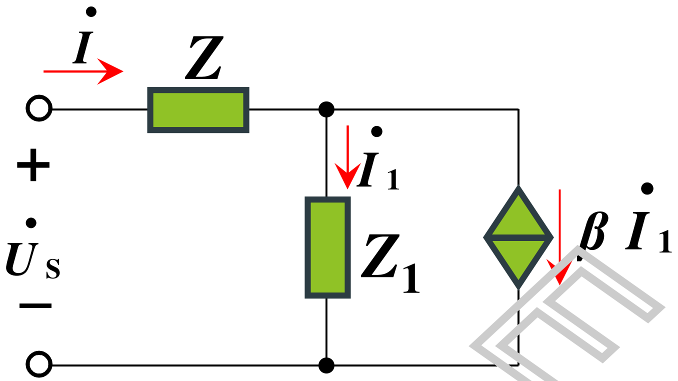

$$Z = Z_1 + Z_2$$
$$= 92.20 - j289.3 + 10 + j157$$
$$= 102.2 - j132.3$$
$$= 167.2\angle -52.31^\circ\ \Omega$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{100\angle 0^\circ}{167.2\angle -52.31^\circ} = 0.598\angle 52.3^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1/j\omega C}{R_1 + \dfrac{1}{j\omega C}}\dot{I}_1 = \frac{-j318.5}{1049\angle -17.67^\circ} \times 0.598\angle 52.3^\circ = 0.182\angle -20.0^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{R_1}{R_1 + \dfrac{1}{j\omega C}}\dot{I}_1 = \frac{1000}{1049\angle -17.67^\circ} \times 0.598\angle 52.3^\circ = 0.570\angle 70.0^\circ\ \text{A}$$

**例6** 已知：$Z=10+j50\Omega$ , $Z_1=400+j1000\Omega$。




问：$\beta$等于多少时，$\dot{I}_1$和$\dot{U}_S$相位差$90^{\circ}$？

分析：找出$\dot{I}_1$和$\dot{U}_S$关系：$\dot{U}_S = Z_{in}\dot{I}_1$

$Z_{in}$实部为零，$\dot{U}_S$ 与$\dot{I}_1$ 相位差为$90^{\circ}$.

**解:**

$$\dot{U}_S = Z\dot{I} + Z_1\dot{I}_1 = Z(1+\beta)\dot{I}_1 + Z_1\dot{I}_1$$

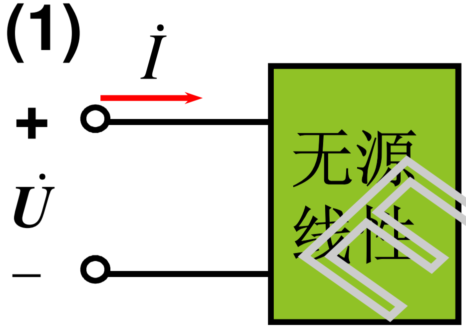
$$\frac{\dot{U}_S}{\dot{I}_1} = (1+\beta)Z + Z_1 = 410 + 10\beta + j(50 + 50\beta + 1000)$$

令 $410 + 10\beta = 0$ ， $\beta = -41$

$$\frac{\dot{U}_S}{\dot{I}_1} = -j1000$$ 故电流领先电压 $90^{\circ}$.

## 小结：

(1)




$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \qquad \dot{U} = \dot{I}Z$$ 相量形式

$$Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} \qquad \dot{I} = Y\dot{U}$$ 欧姆定理

(2) ***Z***是与***u,i***无关的复数。

(3) 根据***Z***、***Y***可确定无源二端网络的性能

(4) 一般情况***Z***、***Y***均是$\omega$的函数

# 用相量图分析电路

1. 定性画相量图方法

关键：选择合适参考相量

串联电路以电流为参考相量，并联电路以电压为参考相量。

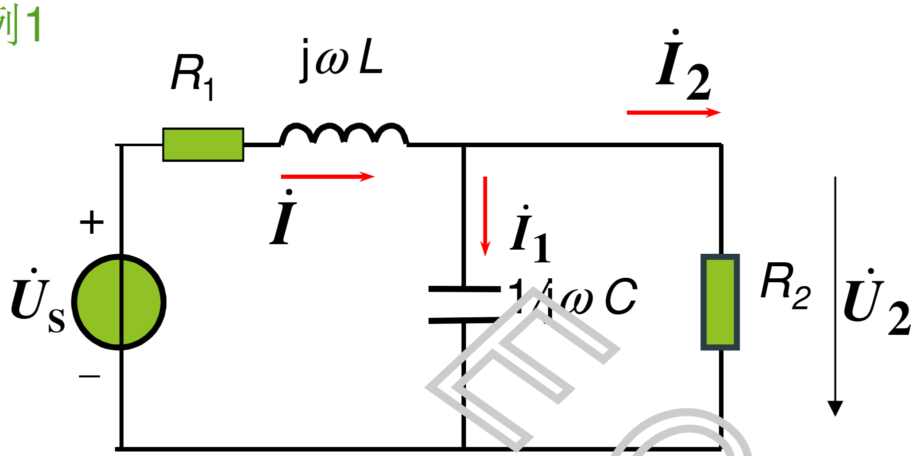
明白元件和支路的电压、电流相量关系：

元件：
- *R*：电压与电流同相
- *L*：电压超前电流90º
- *C*：电流超前电压90º

支路：
- *RL*支路：电压超前电流$\varphi$角
- *RC*支路：电流超前电压$\varphi$角

$90^\circ > \varphi > 0^\circ$

例1

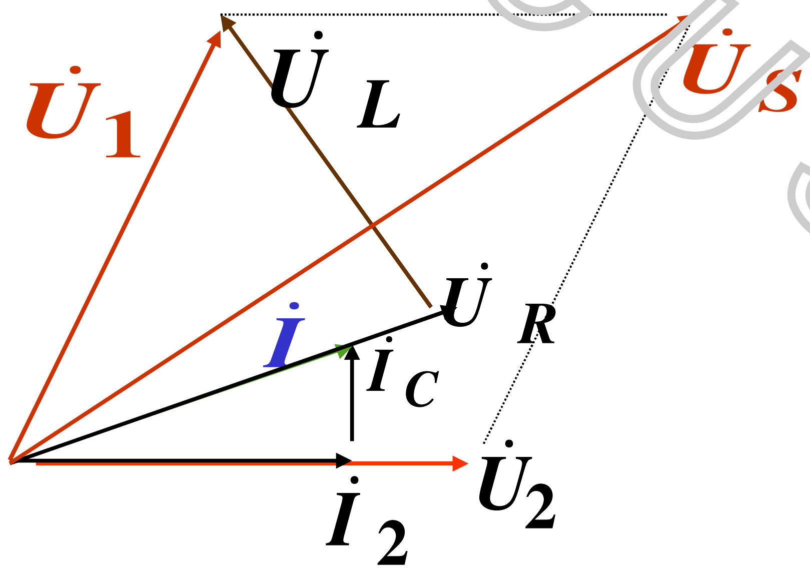



以$\dot{U}_2$为参考相量

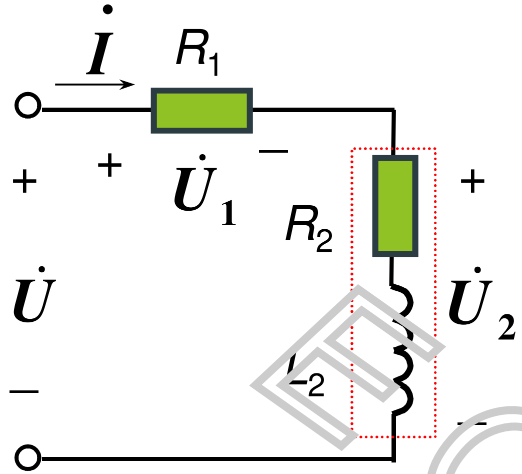
$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_R + \dot{U}_L$$

$$\dot{U}_S = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$$



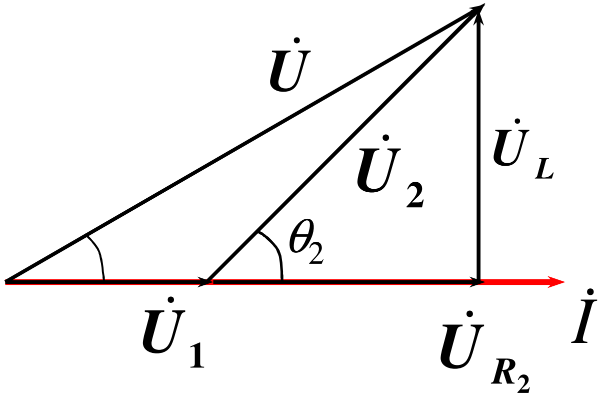
例2.




已知：$U$=115V，$U_1$=55.4V，$U_2$=80V，$R_1$=32Ω，$f$=50Hz

求： 线圈的电阻$R_2$和电感$L_2$。

解一用相量图分析。




$$I = U_1 / R_1 = 55.4/32 = 1.73\text{A}$$

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos(180^\circ - \theta_2)$$

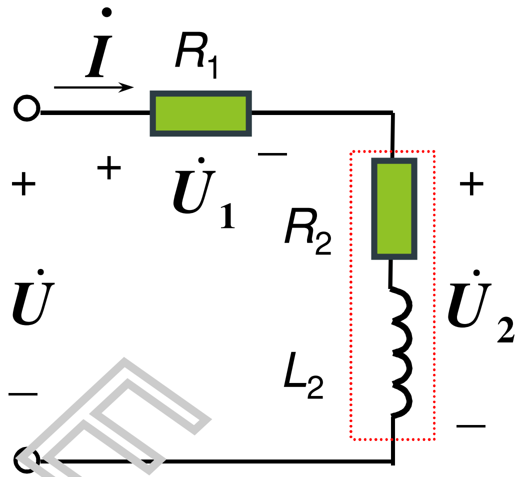
$$= U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2\cos\theta_2$$

$$\therefore\ \theta_2 = 64.9^\circ$$

$$U_L = U_2 \sin\theta = 72.46\text{V}$$

$$X_L = \frac{U_L}{I} = 41.88\Omega \qquad L = X_2/(2\pi f) = 0.133\text{H}$$

$$U_R = U_2 \cos\theta = 33.92V \qquad R = \frac{U_R}{I} = 19.6\Omega$$




解二 $$I = U_1 / R_1 = 55.4/32 = 1.73\text{A}$$

$$I = \frac{115}{\sqrt{(32+R_2)^2+(\omega L_2)^2}} = 1.73$$

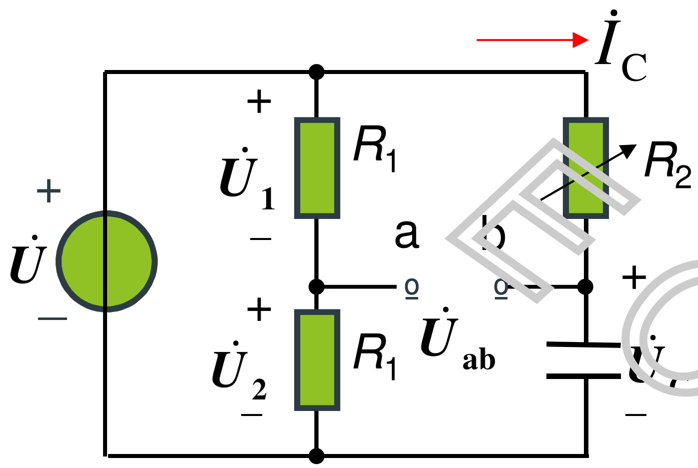
$$I = \frac{80}{\sqrt{R_2^2+(\omega L_2)^2}} = 1.73$$

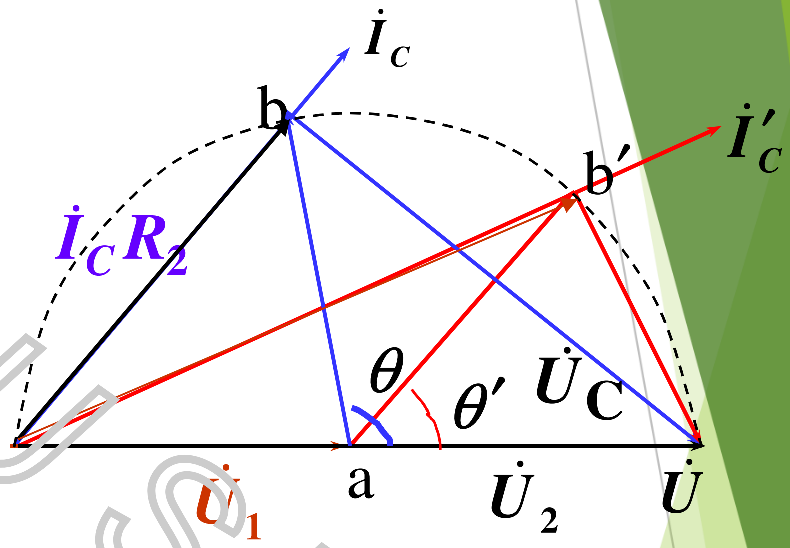
解得：

$$R_2 = 19.58\Omega,\quad L_2 = \frac{41.86}{2\pi f} = 0.133\text{H}.$$

例3. 移相桥电路。当$R_2$由0→∞时，

$\dot{U}_{ab}$大小不变，相位从 $180^\circ \to 0$ 说明其工作原理。




解： 用相量图分析

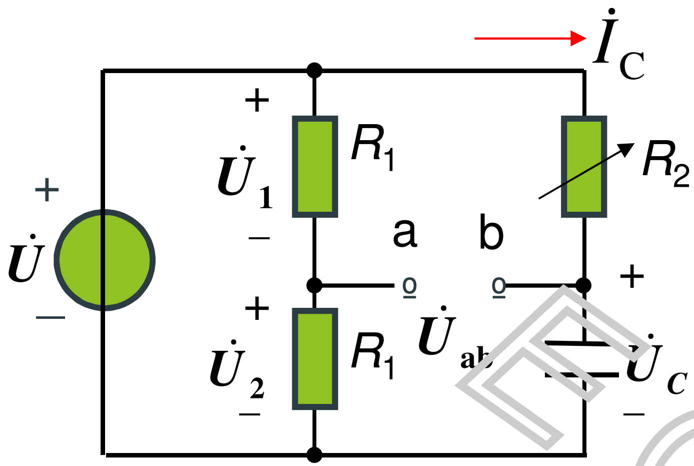
1)选$\dot{U}$为参考相量

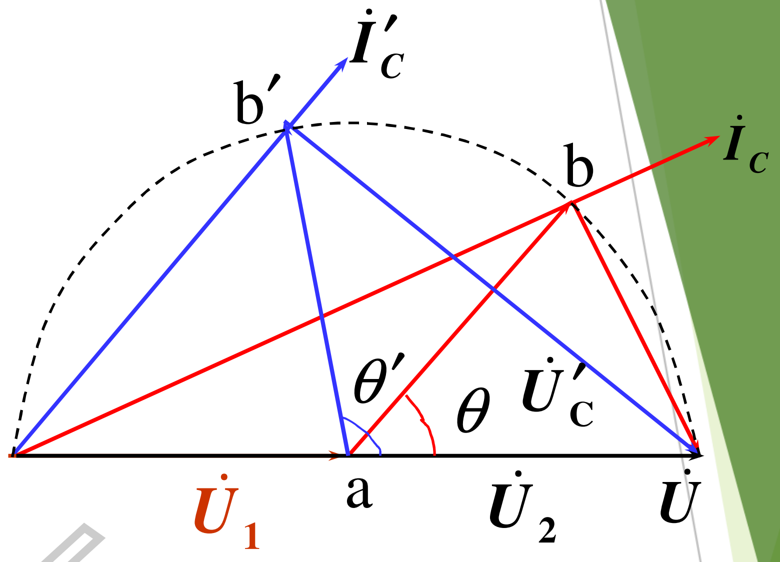
2)$\dot{U}_1, \dot{U}_2$与$\dot{U}$同相

3)$\dot{I}_C$超前$\dot{U}$ $\varphi$角

4)$\dot{U}_{ab} = -\dot{U}_1 + \dot{I}_C R_2$

5)改变$R_2$(红线示)




由相量图可知，当$R_2$改变，$\dot{U}_{ab}$大小不变，相位改变；

且$R_2\uparrow$，$|\theta|\downarrow$。 当$R_2\to\infty$，$\theta=0°$。

当$R_2=0$，$\theta=180°$；

**$\theta$为移相角，移相范围：$180^{o} \sim 0^{o}$**