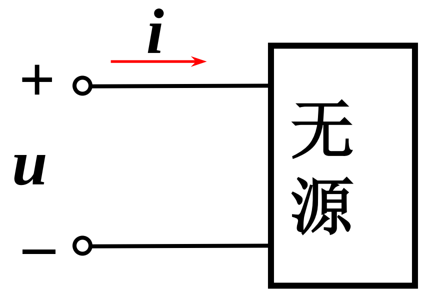
第11章
正弦稳态电路的功率

11.2 瞬时功率 (*instantaneous power*)

1. 定义

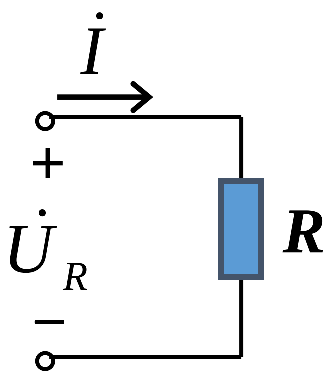


$$p = ui$$

单位：瓦[特]，符号W

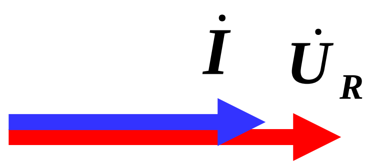
瞬时功率守恒：电路中所有元件在任一瞬间吸收的功率代数和为零。

2. 电阻的瞬时功率



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

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



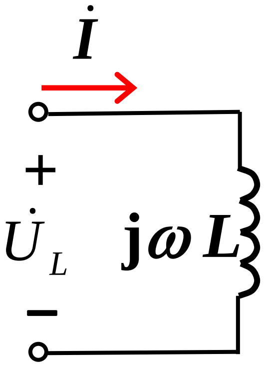
$$p_R = u_R i$$

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

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

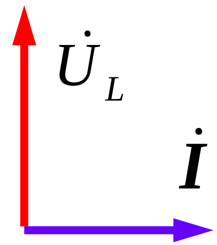
电阻总是吸收功率

3. 电感的瞬时功率



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

$$u_L(t)=\sqrt{2}U_L\sin(\omega t+90°)$$



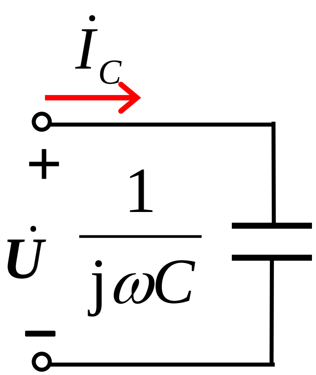
电感吸收功率与发出功率交替进行

$$p_L=u_L i$$

$$=\sqrt{2}U_L\sin(\omega t+90°)\sqrt{2}I\sin(\omega t)$$

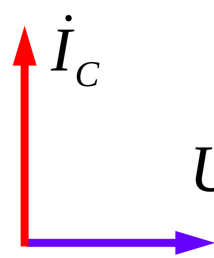
$$=-U_L I\cos(2\omega t+90°)=U_L I\sin(2\omega t)$$

4. 电容的瞬时功率



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

$$i_C(t)=\sqrt{2}I_C\sin(\omega t+90°)$$



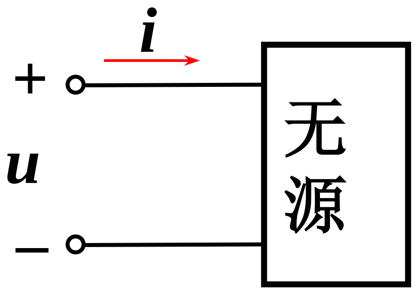
电容吸收功率与发出功率交替进行

$$p_C=ui_C$$

$$=\sqrt{2}U\sin(\omega t)\sqrt{2}I_C\sin(\omega t+90°)$$

$$=-UI_C\cos(2\omega t+90°)=UI_C\sin(2\omega t)$$

5. 任意无源一端口网络吸收的瞬时功率



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

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

$$p(t) = ui = \sqrt{2}U\sin\omega t \cdot \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi)$$

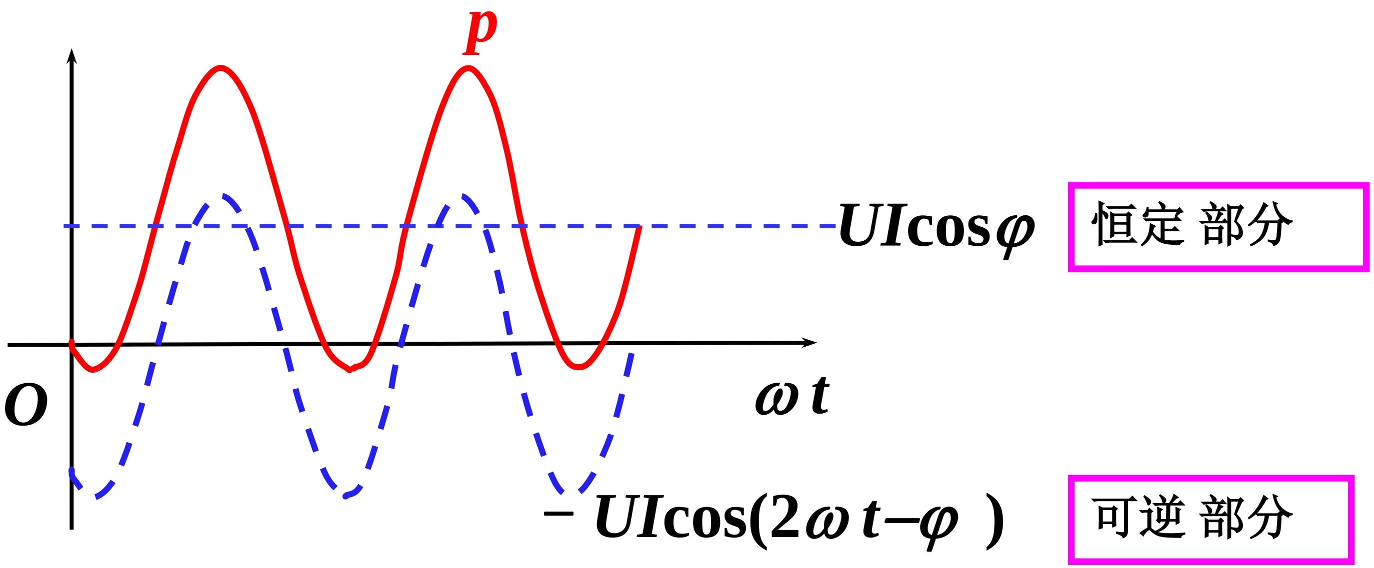
$$= 2UI\sin\omega t\sin(\omega t - \varphi)$$

$$= UI[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

$$= UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t - \varphi)$$

第1表达式

$$p(t) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t - \varphi)$$



- p有时为正，有时为负；
- $p>0$，电路吸收功率；
- $p<0$，电路发出功率。

11.3 有功功率和无功功率

1. 定义

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

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

瞬时功率的平均值

$$p(t)=UI\cos\varphi-UI\cos(2\omega t-\varphi)$$

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T[UI\cos\varphi-UI\cos(2\omega t-\varphi)]\mathrm{d}t$$

$$=UI\cos\varphi$$

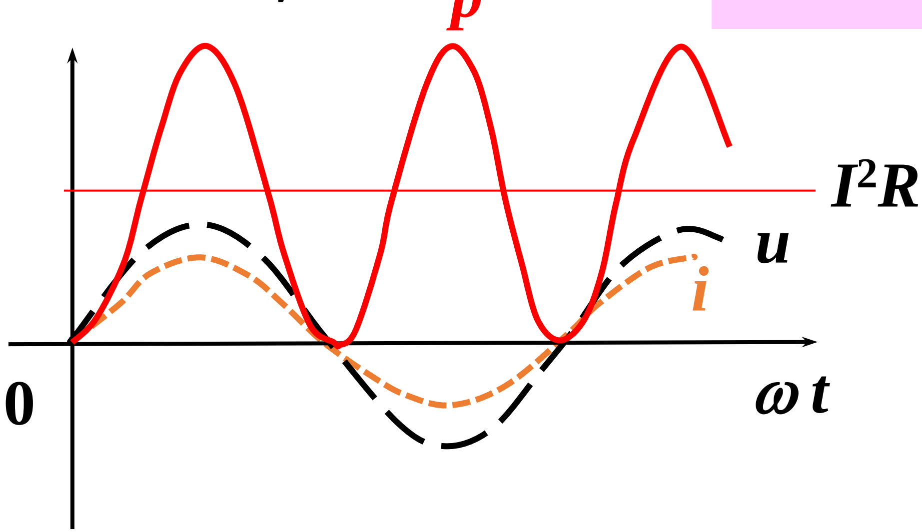
P 的单位：**W**（瓦）

$\cos\varphi$：功率因数。

$\varphi=\psi_u-\psi_i$：功率因数角。对无源网络，为其等效阻抗的阻抗角。

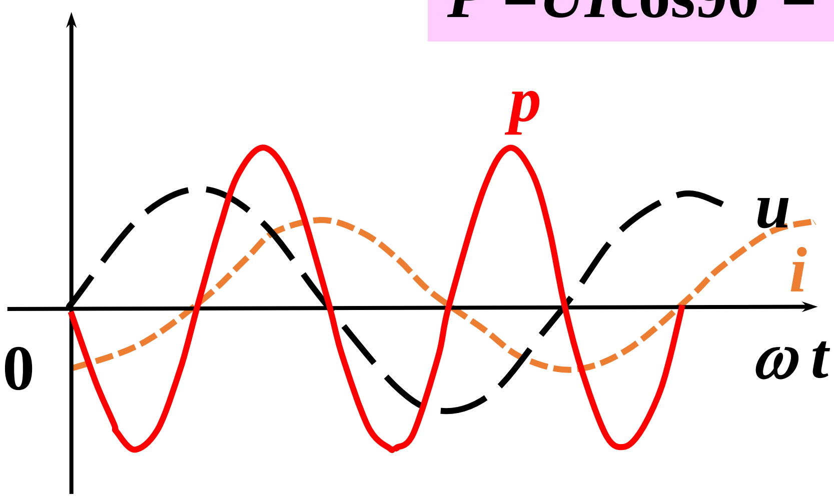
纯电阻 $\varphi = 0^\circ$

$$P = UI\cos\varphi = UI = I^2R = U^2/R$$



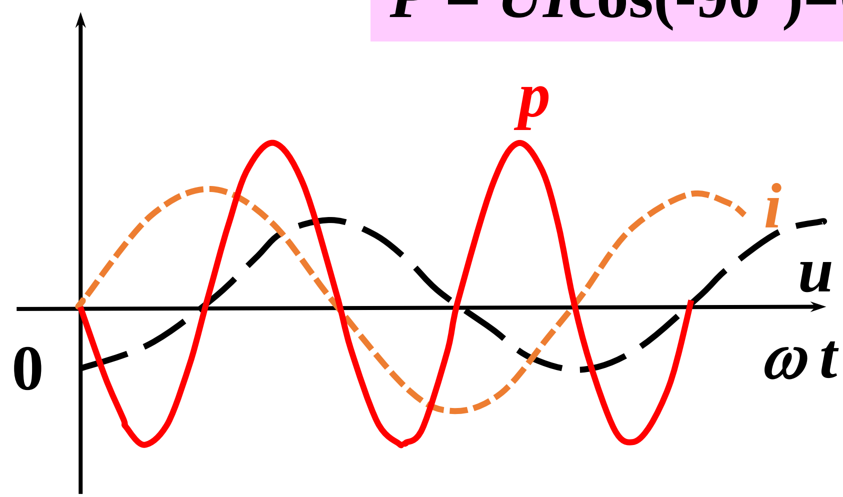
纯电感 $\varphi = 90^\circ$

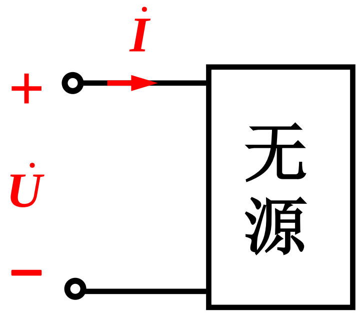
$$P = UI\cos 90^{o} = 0$$

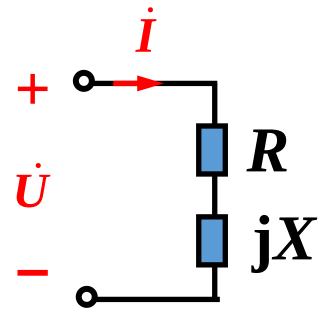


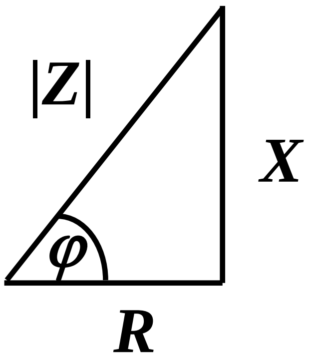
纯电容 $\varphi = -90^\circ$

$$P = UI\cos(-90^{o}) = 0$$









$$P = UI\cos\varphi = |Z|\ I\ I\cos\varphi = I^2|Z|\cos\varphi = I^2R$$

平均功率为消耗在电阻上的功率

↓

有功功率(*active power*)

↓

定义 $P = UI\cos\varphi$

功率因数 $\cos\varphi$ $\begin{cases} 1, & \text{纯电阻} \\ 0, & \text{纯电抗} \end{cases}$

一般地，有 $0 \le \cos\varphi \le 1$

无功功率 *(reactive power) Q*

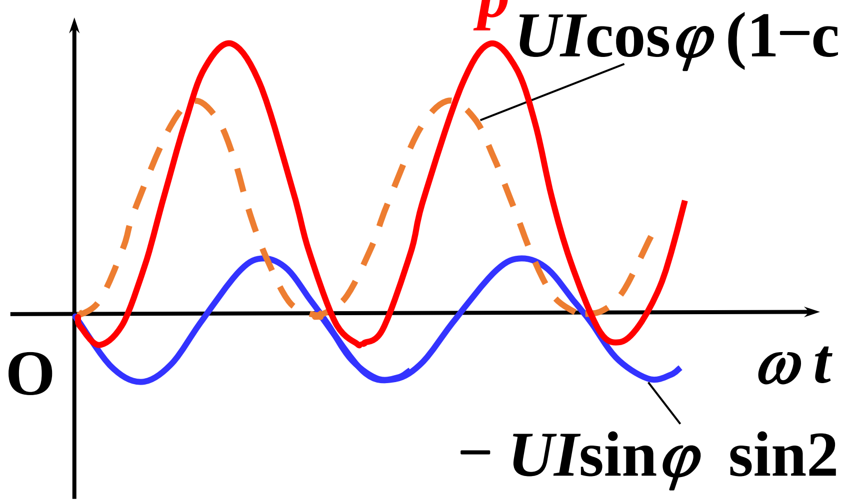
瞬时功率的另一种分解方法:

$$p(t) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t - \varphi)$$

$$= UI\cos\varphi\,(1-\cos 2\omega t) - UI\sin\varphi\sin 2\omega t$$

第2表达式

电阻部分　　　　电抗部分

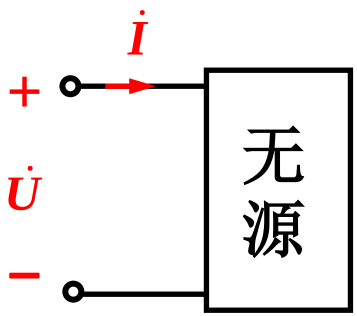


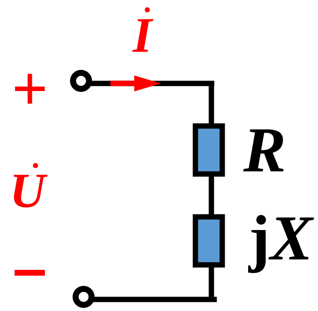
$UI\cos\varphi\,(1-\cos 2\omega t)$ 不可逆部分

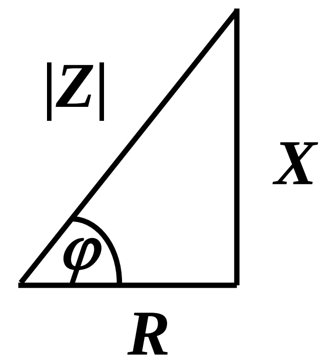
$-UI\sin\varphi\ \sin 2\omega t$ 可逆部分

- **部分能量在电源和一端口之间来回交换。**

无功功率 (*reactive power*) *Q*







定义 $Q = UI\sin\varphi$　　　$\varphi = \psi_u - \psi_i$：功率因数角。

单位：var (voltage-ampere reactive，乏)

- Q >0，表示网络吸收无功功率；
- Q <0，表示网络发出无功功率。
- Q 定义为网络与电源往复交换功率的**最大速率**，是由储能元件L、C的性质决定的

4. 视在功率S

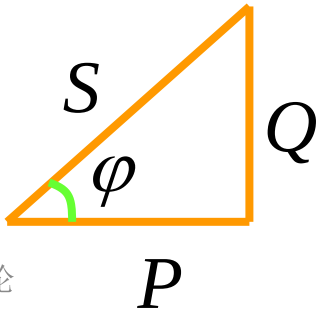
电气设备的容量

$$S \overset{\text{def}}{=} UI \qquad \text{单位：VA (伏安)}$$

有功，无功，视在功率的关系：

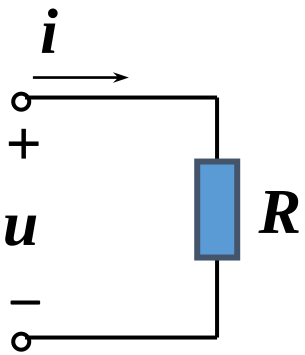
有功功率：	$P=UI\cos\varphi$	单位：W
无功功率：	$Q=UI\sin\varphi$	单位：var
视在功率：	$S=UI$	单位：VA

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}$$



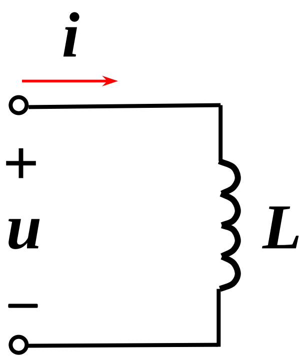
功率三角形

2. *R*、*L*、*C*元件的有功功率和无功功率



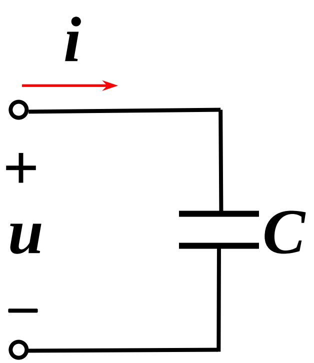
$$P_R = UI\cos\varphi = UI\cos 0^\circ = UI = I^2R = U^2/R$$

$$Q_R = UI\sin\varphi = UI\sin 0^\circ = 0$$



$$P_L = UI\cos\varphi = UI\cos 90^\circ = 0$$

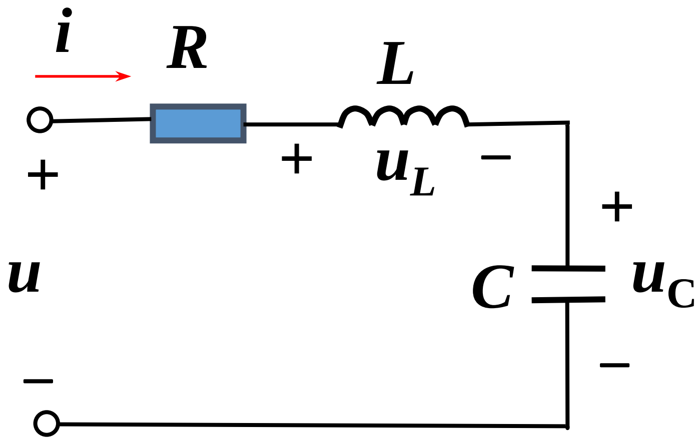
$$Q_L = UI\sin\varphi = UI\sin 90^\circ = UI = I^2X_L$$

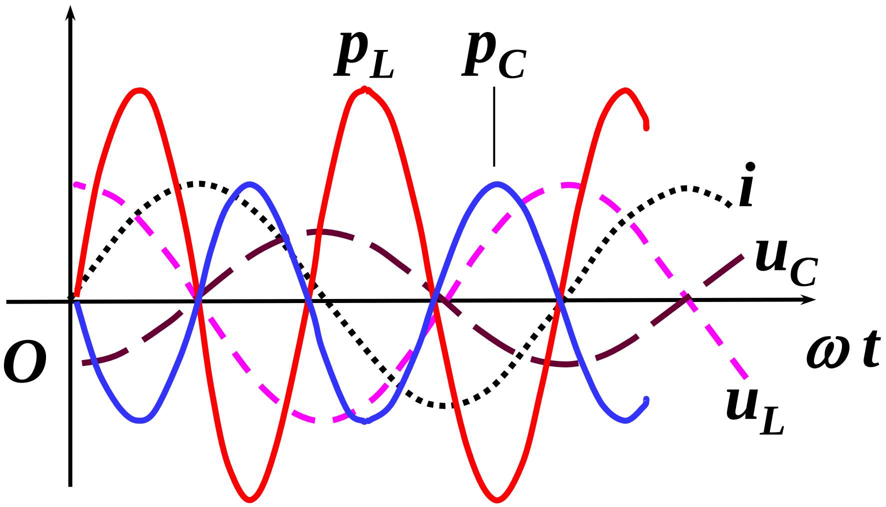


$$P_C = UI\cos\varphi = UI\cos(-90^\circ) = 0$$

$$Q_C = UI\sin\varphi = UI\sin(-90^\circ) = -UI = -I^2X_C$$

电感、电容的无功补偿作用：



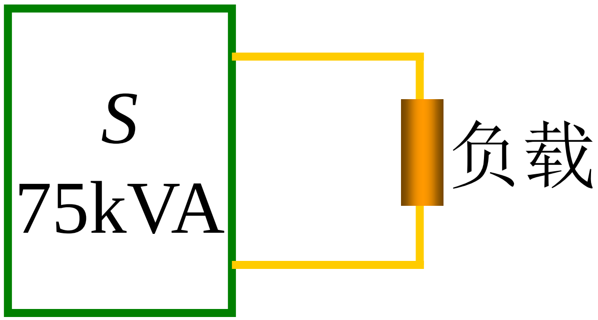


- 当*L*发出功率时，*C* 刚好吸收功率，因此*L*、*C* 的无功具有互相补偿的作用。
- 约定：*L*吸收无功、*C*发出无功。
- 约定：$\varphi > 0$，感性，滞后功率因数；$\varphi < 0$，容性，超前功率因数（以电压为参考）

7. 功率因数的提高

功率因数低带来的问题：

①设备不能充分利用，电流到了额定值，但功率容量还有；



$$P=UI\cos\varphi=S\cos\varphi$$

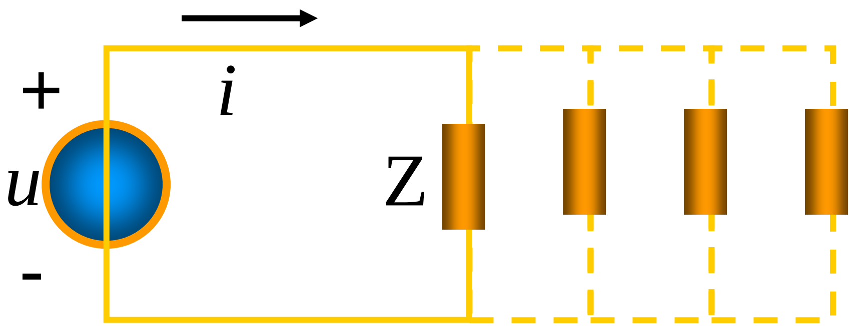
$\cos\varphi=1$, $P=S=75\text{kW}$

$\cos\varphi=0.7$, $P=0.7S=52.5\text{kW}$

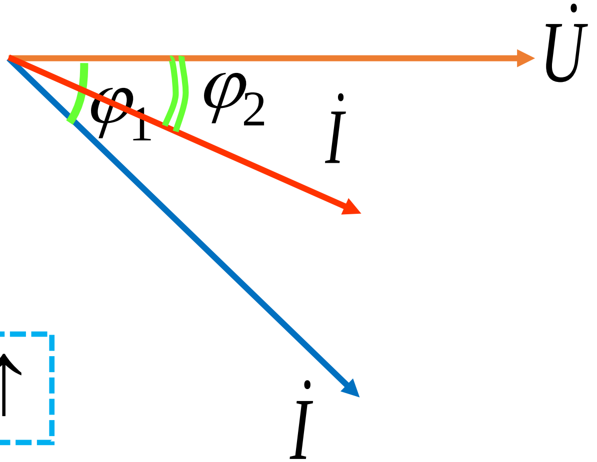
设备容量 S (额定)向负载送多少有功要由负载的阻抗角决定。

日光灯 $\cos\varphi=0.45\sim0.6$

② 当输出相同的有功功率时，线路上电流大，$I=P/(U\cos\varphi)$，线路压降损耗大。

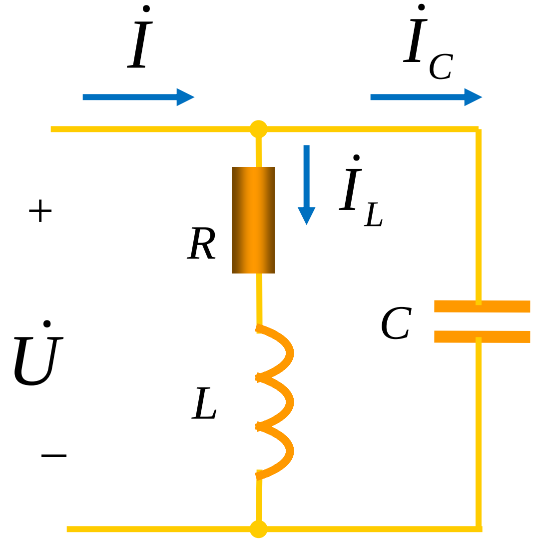


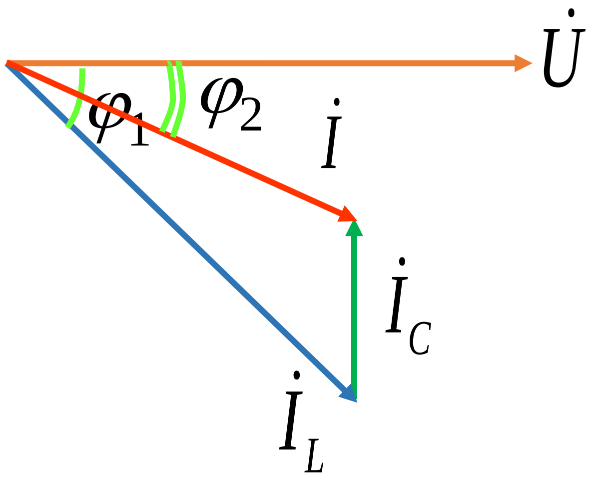
$P = UI\cos\phi$ $I\downarrow$ $U\uparrow$ $\cos\phi\uparrow$



解决办法：

1. **高压传输**
2. **并联电容(实际中大部分是感性负载)，提高功率因数。**



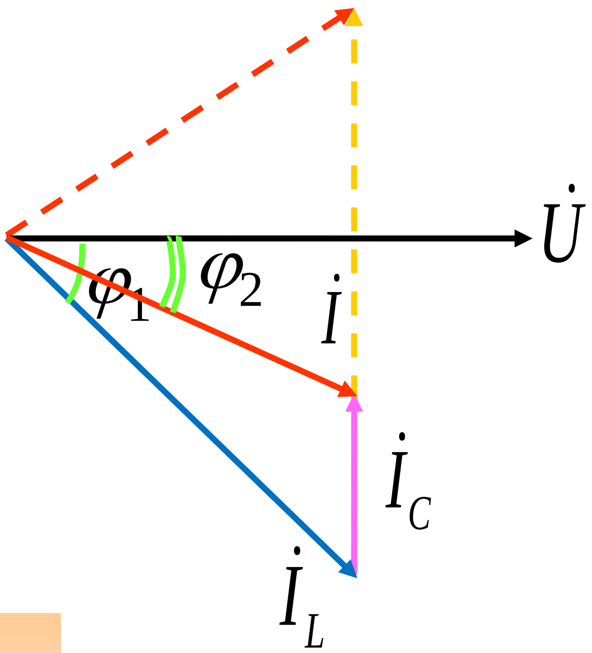


- 并联电容后，原负载的电压和电流不变，吸收的有功功率和无功功率不变，即：**负载的工作状态不变,但电路的功率因数提高了。**
- 并联电容后，电源向负载输送的有功不变，但是电源向负载输送的无功减少了，**减少的这部分无功由电容“产生”来补偿**，使感性负载吸收的无功不变，而功率因数得到改善。

并联电容的确定：

$$I_C = I_L \sin\phi_1 - I\sin\phi_2$$

将 $I = \dfrac{P}{U\cos\phi_2}$ ， $I_L = \dfrac{P}{U\cos\phi_1}$ 代入

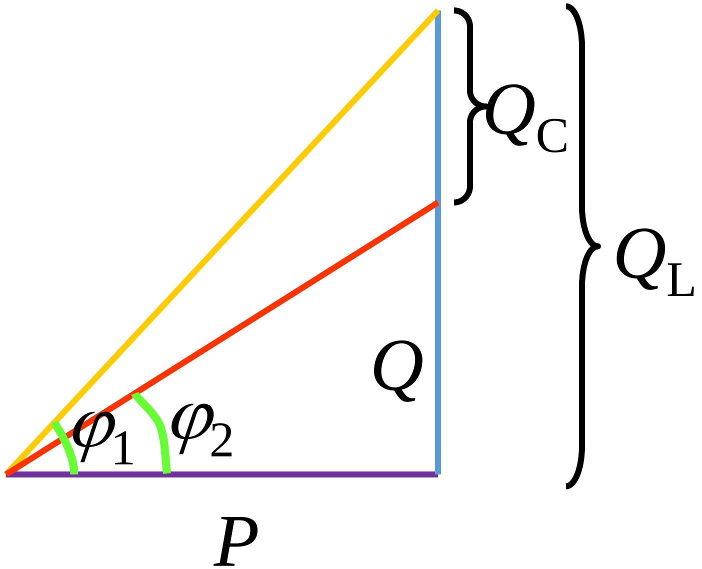


$$I_C = \omega CU = \frac{P}{U}(\mathrm{tg}\phi_1 - \mathrm{tg}\phi_2)$$

$$\rightarrow \quad C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2)$$

补偿容量不同
- 欠补偿
- 临界补偿
- 过补偿

并联电容也可以用功率三角形确定：

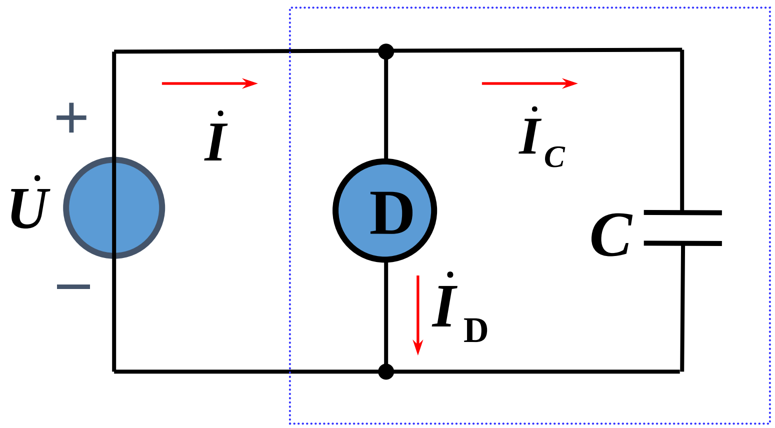


$$\left|Q_C\right| = \left|Q_L - Q\right| = P(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2)$$

$$\left|Q_C\right| = \omega C U^2$$

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2)$$

例 已知：电动机 P_D=1000W，U=220V，f=50Hz，C=30μF，$\cos\varphi_D$=0.8(滞后）。求负载电路的功率因数。



解： 设 $\dot{U}=220\angle 0^{\circ}\ \text{V}$

$$I_D=\frac{P}{U\cos\varphi_D}=\frac{1000}{220\times 0.8}=5.68\text{A}$$

$$\cos\varphi_D=0.8(\text{滞后}) \quad \varphi_D=36.9^{\circ}$$

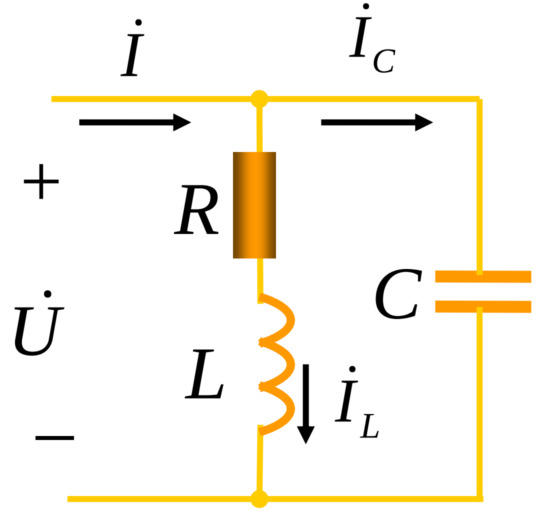
$$\dot{I}_D=5.68\angle -36.9^{\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_C=\text{j}\omega C 220\angle 0^{\circ}=\text{j}2.08\ \text{A}$$

$$\dot{I}=\dot{I}_D+\dot{I}_C=4.54-\text{j}1.33=4.73\angle -16.3^{\circ}\ \text{A}$$

$$\therefore\ \cos\varphi=\cos[0^{\circ}-(-16.3^{\circ})]=0.96\ \ (\text{滞后})$$

例　已知：f=50Hz, U=220V, P=10kW, $\cos\varphi_1$=0.6，要使功率因数提高到0.9 , 求并联电容C，并联前后电路的总电流各为多大?



解

$$\cos\varphi_1 = 0.6 \quad \Rightarrow \quad \varphi_1 = 53.13^{\circ}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.9 \quad \Rightarrow \quad \varphi_2 = 25.84^{\circ}$$

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2)$$

$$= \frac{10\times10^3}{314\times220^2}(\mathrm{tg}53.13^{\circ} - \mathrm{tg}25.84^{\circ}) = 557\mu\,\mathrm{F}$$

未并电容时：$I = I_L = \dfrac{P}{U\cos\phi_1} = \dfrac{10\times10^3}{220\times0.6} = 75.8\mathrm{A}$

并联电容后：$I = \dfrac{P}{U\cos\phi_2} = \dfrac{10\times10^3}{220\times0.9} = 50.5\mathrm{A}$

若要使功率因数从0.9再提高到0.95，试问还应增加多少并联电容，此时电路的总电流是多大?

解

$$\cos\varphi_1 = 0.9 \quad \Rightarrow \quad \varphi_1 = 25.84^{\circ}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.95 \quad \Rightarrow \quad \varphi_2 = 18.19^{\circ}$$

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2) \qquad I = \frac{10\times10^3}{220\times0.95} = 47.8\mathrm{A}$$

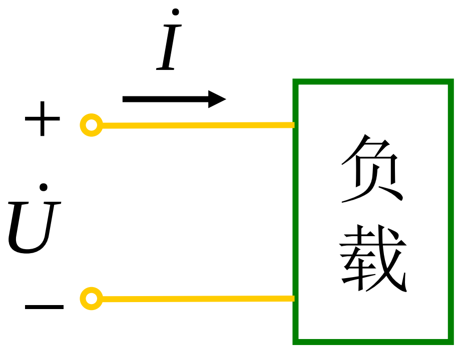
$$= \frac{10\times10^3}{314\times220^2}(\mathrm{tg}25.84^{\circ} - \mathrm{tg}18.19^{\circ}) = 103\mu\ \mathrm{F}$$

注意 $\cos\varphi$ 提高后，线路上总电流减少，但继续提高$\cos\varphi$ 所需电容很大，增加成本，总电流减小却不明显。因此一般将$\cos\varphi$ 提高到0. 9即可。

11.5 复功率

1. 复功率

为了用相量$\dot{U}$和$\dot{I}$来计算功率，引入“复功率”



定义：$\overline{S} = \dot{U}\dot{I}^{*}$ 单位 VA

$$\overline{S} = UI\angle(\Psi_u - \Psi_i) = UI\angle\varphi = S\angle\varphi$$
$$= UI\cos\varphi + \mathrm{j}UI\sin\varphi = P + \mathrm{j}Q$$

也可表示为：

$$\overline{S} = \dot{U}\dot{I}^{*} = Z\dot{I}\cdot\dot{I}^{*} = ZI^{2} = (R+\mathrm{j}X)I^{2} = RI^{2} + \mathrm{j}XI^{2}$$

or $\quad \overline{S} = \dot{U}\dot{I}^{*} = \dot{U}(\dot{U}Y)^{*} = \dot{U}\cdot\dot{U}^{*}Y^{*} = U^{2}Y^{*}$

结论

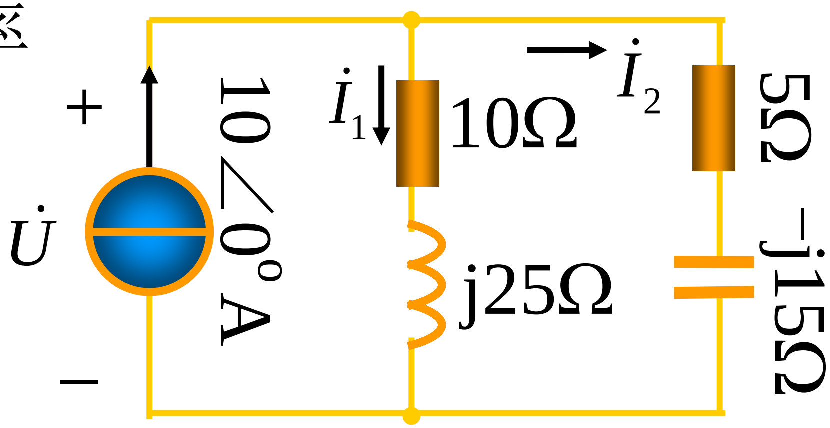
- $\bar{S}$ 是复数，而不是相量，它不对应任意正弦量；
- $\bar{S}$ 把 P、Q、S 联系在一起，它的实部是有功功率，虚部是无功功率，模是视在功率；
- 复功率满足守恒定理：在正弦稳态下，任一电路的所有支路吸收的复功率之和为零。即

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{b} P_k = 0 \\ \sum_{k=1}^{b} Q_k = 0 \end{cases} \longrightarrow \sum_{k=1}^{b}(P_k + \mathrm{j}Q_k) = \sum_{k=1}^{b}\bar{S}_k = 0$$

$$\because U \neq U_1 + U_2 \quad \therefore S \neq S_1 + S_2$$

注意 复功率守恒，视在功率不守恒。

例　求电路各支路的复功率



解1

$$Z=(10+j25)//(5-j15)$$

$$\dot{U}=10\angle 0^{\circ}\times Z \;=236\angle(-37.1^{\circ})\text{V}$$

$$\bar{S}_{发}=236\angle(-37.1^{\circ})\times 10\angle 0^{\circ}=1882-j1424\ \text{VA}$$

$$\bar{S}_{1吸}=U^2Y_1^*=236^2\left(\frac{1}{10+j25}\right)^*=768+j1920\quad \text{VA}$$

$$\bar{S}_{2吸}=U^2Y_2^*=1113-j3345\ \text{VA}$$

$$\bar{S}_{1吸}+\bar{S}_{2吸}=\bar{S}_{发}$$

解2

$$\dot{I}_1 = 10\angle 0^{\circ} \times \frac{5-\mathrm{j}15}{10+\mathrm{j}25+5-\mathrm{j}15} = 8.77\angle(-105.3^{\circ}) \quad \mathrm{A}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_S - \dot{I}_1 = 14.94\angle 34.5^{\circ} \quad \mathrm{A}$$

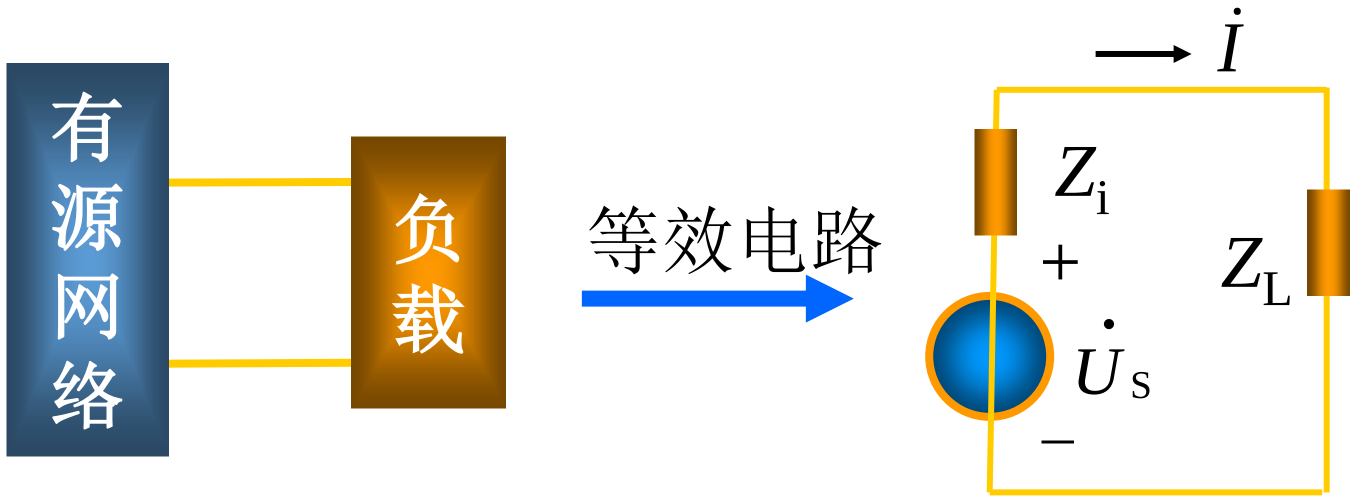
$$\bar{S}_{1吸} = I_1{}^2 Z_1 = 8.77^2 \times (10+\mathrm{j}25) = 769+\mathrm{j}1923\ \mathrm{VA}$$

$$\bar{S}_{2吸} = I_2{}^2 Z_2 = 14.94^2 \times (5-\mathrm{j}15) = 1116-\mathrm{j}3348\ \mathrm{VA}$$

$$\bar{S}_{发} = \dot{I}_1 Z_1 \cdot \dot{I}_S{}^{*} = 10 \times 8.77\angle(-105.3^{\circ})(10+\mathrm{j}25)$$

$$= 1885-\mathrm{j}1423\ \mathrm{VA}$$

11.6 最大功率传输



$$Z_i = R_i + jX_i,\quad Z_L = R_L + jX_L$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S}{Z_i + Z_L},\quad I = \frac{U_S}{\sqrt{(R_i + R_L)^2 + (X_i + X_L)^2}}$$

有功功率 $$P = R_L I^2 = \frac{R_L U_S^2}{(R_i + R_L)^2 + (X_i + X_L)^2}$$

讨论 正弦电路中负载获得最大功率P_{max}的条件

$$P=\frac{R_L U_S^2}{(R_i+R_L)^2+(X_i+X_L)^2}$$

$$P_{max}=\frac{U_S^2}{4R_i}$$

①若$Z_L= R_L + jX_L$可任意改变

a) 先设 R_L 不变，X_L 改变

显然，当$X_i+X_L=0$，即$X_L=-X_i$时，P 获得最大值。

b) 再讨论 R_L 改变时，P 的最大值

当$R_L= R_i$时，P 获得最大值

$R_L= R_i \quad X_L=-X_i$ → $Z_L= Z_i^*$

最佳匹配条件

②若$Z_L = R_L + jX_L$只允许X_L改变

获得最大功率的条件是：$X_i + X_L = 0$，即 $X_L = -X_i$

最大功率为 $$P_{\max} = \frac{R_L U_S^2}{(R_i + R_L)^2}$$

③若$Z_L = R_L$为纯电阻

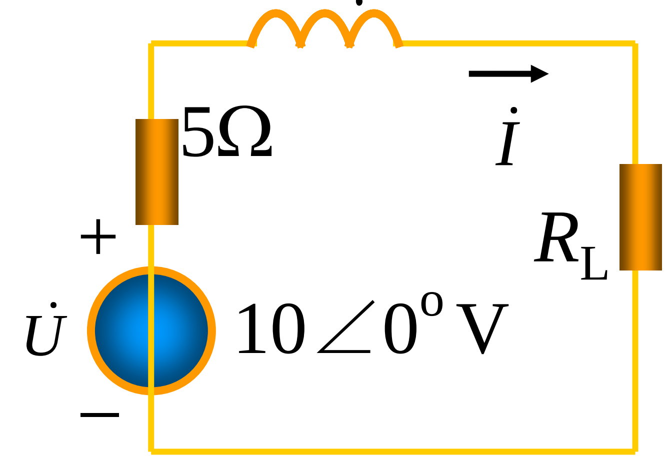
电路中的电流为：$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S}{Z_i + R_L}, \quad I = \frac{U_S}{\sqrt{(R_i + R_L)^2 + X_i^2}}$$

负载获得的功率为：$$P = \frac{R_L U_S^2}{(R_i + R_L)^2 + X_i^2}$$

模匹配

令 $\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}R_L} = 0 \Rightarrow$ 获得最大功率条件：$R_L = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} = |Z_i|$

例　电路如图，求：1.R_L=5Ω时其消耗的功率；
2. R_L=?能获得最大功率，并求最大功率；
3.在R_L两端并联一电容，问R_L和C为多大时能与内阻抗最佳匹配，并求最大功率。



解

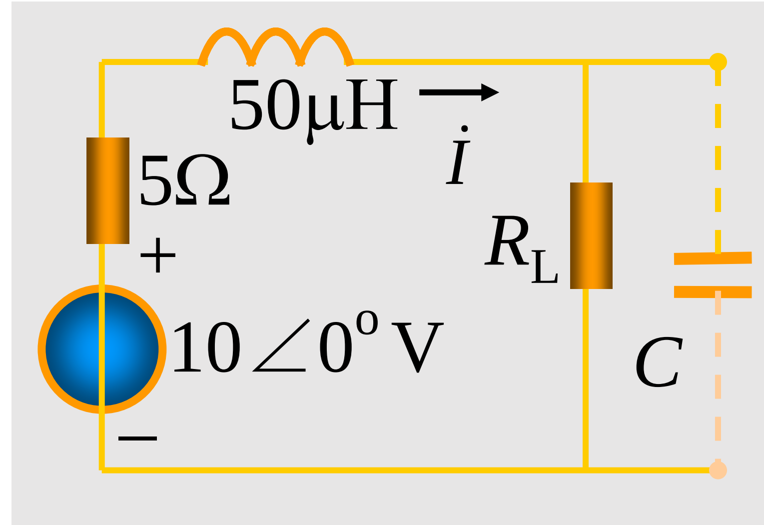
$$Z_i = R + jX_L = 5 + j10^5 \times 50 \times 10^{-6}$$
$$= 5 + j5 \ \ \Omega$$

1. $$\dot{I} = \frac{10\angle 0^{o}}{5 + j5 + 5} = 0.89\angle(-26.6^{o})\text{A}$$

$$P_L = I^2 R_L = 0.89^2 \times 5 = 4\text{W}$$

2. 当 $R_L = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7.07\Omega$ 获得最大功率

$$\dot{I}=\frac{10\angle 0^{\circ}}{5+\mathrm{j}5+7.07}=0.766\angle(-22.5^{\circ})\mathrm{A}$$



$$P_L=I^2R_L=0.766^2\times 7.07=4.15\mathrm{W}$$

3. $$Y=\frac{1}{R_L}+\mathrm{j}\omega C$$

$$Z_{\mathrm{L}}=\frac{1}{Y}=\frac{R_L}{1+\mathrm{j}\omega CR_L}=\frac{R_L}{1+(\omega CR_L)^2}-\mathrm{j}\frac{\omega CR_L^2}{1+(\omega CR_L)^2}$$

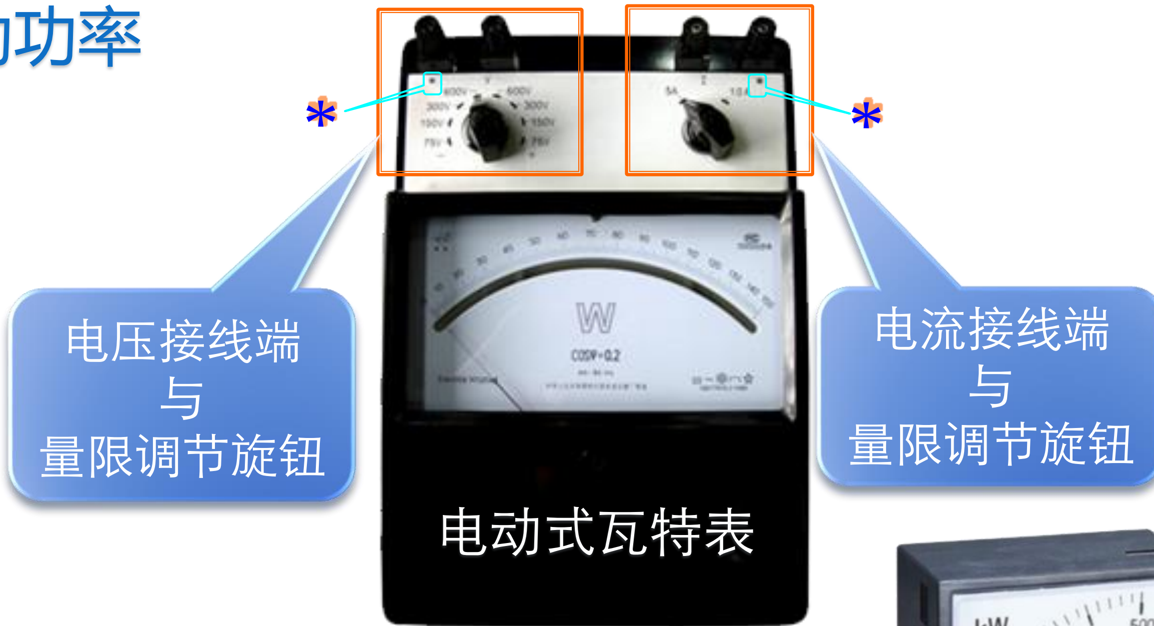
当 $$\begin{cases}\dfrac{R_L}{1+(\omega CR_L)^2}=5\\[2ex] \dfrac{\omega CR_L^2}{1+(\omega CR_L)^2}=5\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}R_L=10\Omega\\ C=1\mu F\end{cases}$$ 获最大功率

$$\dot{I}=\frac{10\angle 0^{\circ}}{10}=1\mathrm{A}$$

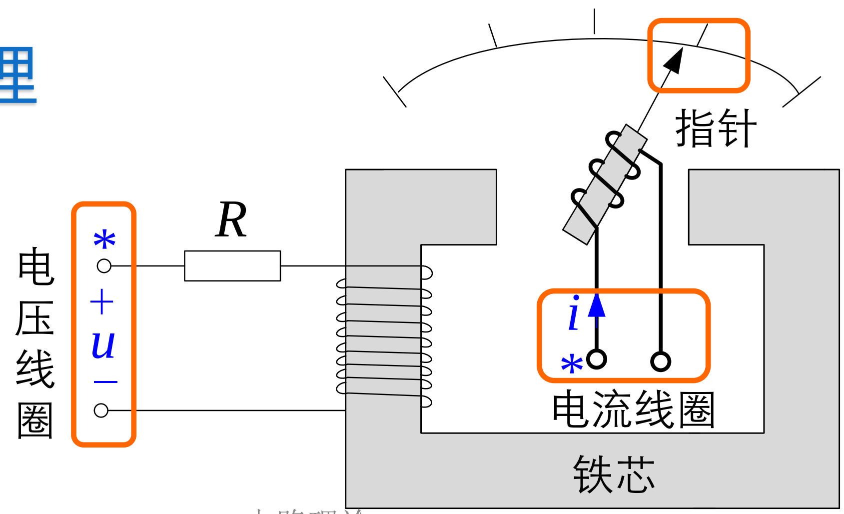
$$P_{\max}=I^2R_i=1\times 5=5\mathrm{W}$$

11.8 有功功率测量

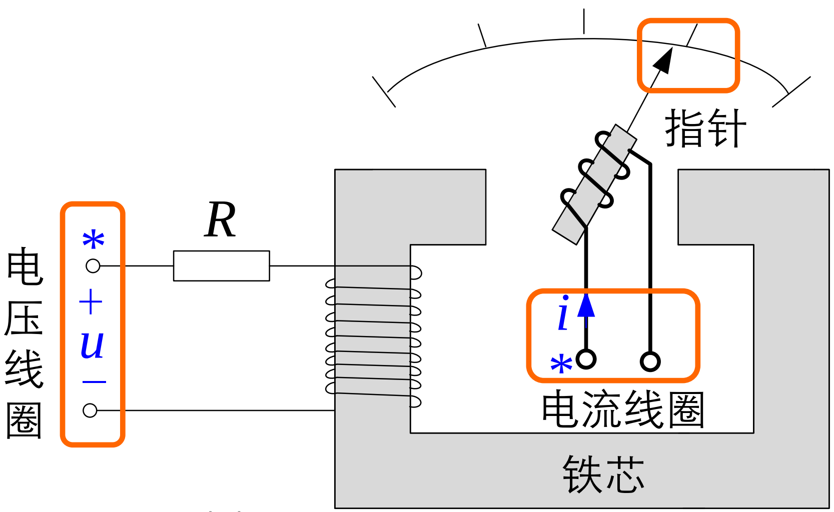
☞瓦特表测量有功功率



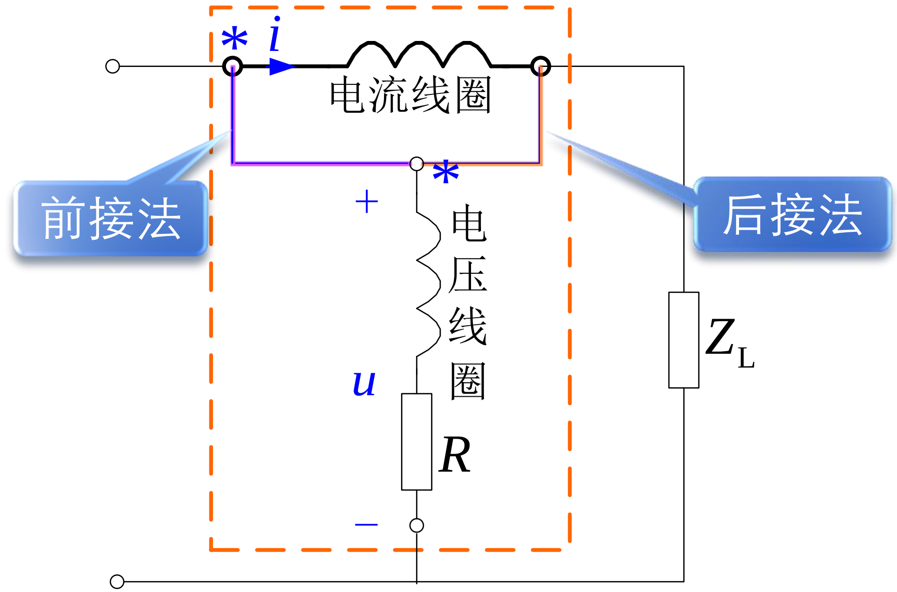
☞电动式瓦特表原理



11.8 有功功率测量



☞ 瓦特表的接线方式



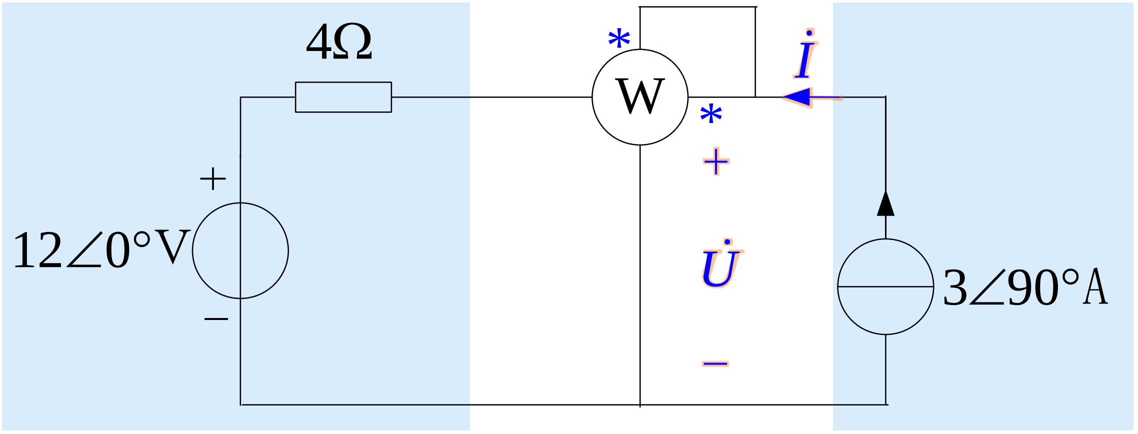
电流线圈与负载串联
电压线圈与负载并联

☞ 瓦特表的读数

$$\boxed{P=}\frac{1}{T}\int_0^T uidt=\boxed{\mathrm{Re}[\dot{U}\times\dot{I}^*]}$$

11.8 有功功率测量

Practice 确定瓦特表的读数，及读数的物理含义。



瓦特表的读数 $P = \text{Re}[\dot{U} \times \dot{I}^*]$

$$\dot{U} = 4 \times 3\angle 90° + 12\angle 0° = 12\sqrt{2}\angle 45° \text{ V}$$

$$P = \text{Re}[12\sqrt{2}\angle 45° \times 3\angle -90°] = 36\text{W}$$

是电流源发出的有功功率，

也是电压源和电阻吸收的有功功率之和。

作业

- 11.3节：11-2
- 11.5节：11-7
- 11.6节：11-9
- 11.7节：11-13