第一部分 电路原理

第一节 电路基本概念与定律

一 电路基本物理量

1. 电位、电压、电流、功率
2. 参考方向、关联参考方向

二 电路元件的基本特性

1. 电阻、电感、电容
2. 独立源和受控源的基本特性
3. 受控源的概念与分类

三 电路基本定律

1. 电路结构基本概念
2. 基尔霍夫电流定律（KCL）
3. 基尔霍夫电压定律（KVL）

第二节 直流电路求解

一 等效变换

1. 等效变换的概念
2. 电阻串并联的等效
3. 电源的等效

二 电路求解

1. 支路电流法

三 线性电路定理

1. 叠加定理
2. 线性定理
3. 戴维宁定理与诺顿定理 及 相关参数求解

第三节 正弦交流电路求解

一 正弦交流电路的描述

1. 描述正弦交流电路的物理量
2. 正弦量的相量表示

二 相量法计算正弦交流电路

1. 正弦交流电路中的三大元件
2. 正弦交流电路中的基尔霍夫定律
3. RLC 串联电路中的阻抗
4. 正弦交流电路的功率

三 谐振电路

1. 串联谐振（电压谐振）
2. 并联谐振（电流谐振）

四 三相交流电路

1. 三相交流电路模型
   ① 电源 ② 负载 ③ 电源与负载的连接
2. 对称三相电路求解
   ① 定义与特点 ② 求解方法 ③ 功率特点

第四节 电路的瞬态分析

一阶电路的瞬态分析

1. 换路定律
2. 三要素法求解 RC、RL 电路
   ① 三要素公式
   ② 三要素求解

第一节 电路基本概念与定律

知识梳理

（一）电路基本物理量

名称	符号	单位	方向	> 0 的意义	< 0 的意义
电位	φ	V	——	高于参考点	低于参考点
电压	U/u	V	高电位 → 低电位	方向与参考方向相同	方向与参考方向相反
电流	I/i	A	正电荷运动的方向	方向与参考方向相同	方向与参考方向相反
功率	P/p	W	——	关联：消耗功率 非关联：产生功率	关联：产生功率 非关联：消耗功率

直流量用大写字母表示，交流量用小写字母表示

1\. **电位** 将单位正电荷从某点移至参考点，电场力所做的功 → φ_A 与电场中的位置 A 一一对应

· 电位是相对的，因此要规定参考点（任意选择，规定参考点电位为 0）

2\. **电压** 单位正电荷从 A 点移至 B 点，电场力所做的功 → A、B 两点间的电位差 $U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B=-U_{BA}$

· 方向：电路图中在两点标“+ −”，表示正方向由高电位（+）指向低电位（−）

3\. **电流** 电路中带电粒子在电源作用下的规则运动

· 方向：正电荷运动方向，电路图中在导线上画箭头表示

· 电压与电流是绝对的，为代数量，有正负，与参考方向相关

> **参考方向** 解题前给每个电压和电流预先假定的正方向，然后用这些方向去列式子解题
>
> 计算得到的值为正 → 实际方向与参考方向一致
>
> 计算得到的值为负 → 实际方向与参考方向相反

4\. **功率** 元件两端电压与通过电流的乘积

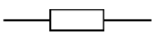
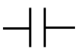
· 关联参考方向下，$p>0$ 代表消耗功率，$p<0$ 代表产生功率

非关联参考方向下，$p<0$ 代表消耗功率，$p>0$ 代表产生功率

> **关联参考方向** 某元件的电压与电流的参考方向相同，称为关联参考方向
>
> 某元件的电压与电流的参考方向相反，称为非关联参考方向

（二）电路元件的基本特性

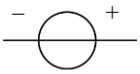
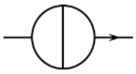
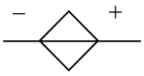
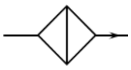
1\. 电阻、电感、电容

名称	符号	单位	元件符号	电压电流关系	直流特性	特点
电阻	R	Ω		$u=Ri$	——	
电感	L	H		$u=L\dfrac{di}{dt}$	视为短路	通直流、阻高频交流
电容	C	F		$i=C\dfrac{du}{dt}$	视为开路	隔直流、通高频交流

· 本课一般只考虑线性元件（R、L、C 为常数）

- 电压电流关系为关联参考方向下，非关联参考方向下的电压电流关系在其中一侧取负号即可
- 电感和电容都具有记忆与储能作用

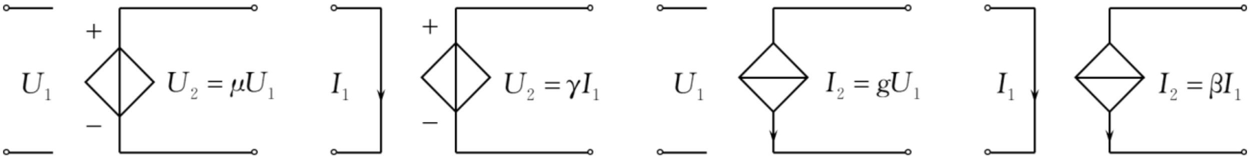
2. 独立源和受控源

名称	符号	元件符号	电压	电流	置零	注意事项
独立电压源	U_S		自身决定	由外电路决定	短接导线	禁止短路
独立电流源	I_S		由外电路决定	自身决定	断开导线	禁止开路
受控电压源	—		由控制支路决定	由外电路决定		
受控电流源	—		由外电路决定	由控制支路决定		

- 独立源和受控源的电压、电流采用非关联参考方向

3. 受控源的概念与分类

受控源用于分析半导体器件等新式元件，其电流/电压由控制支路的电流/电压决定，有以下 4 种类别

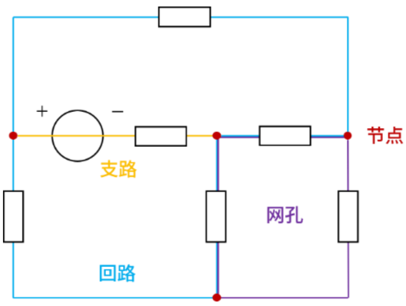


电压控制电压源　　电流控制电压源　　电压控制电流源　　电流控制电流源

* 受控源边上要写出控制量与受控量间的关系

（三）电路基本定律

1. 电路结构基本概念



① 节点　三个及以上电路元件的连接点

② 支路　连接两个节点之间的电路

③ 回路　电路中任一闭合路径

④ 网孔　电路中最简单的单孔回路（内部没有支路）

2. 基尔霍夫电流定律（KCL）

① 定律　电路中任一节点上电流的代数和为 0　$\boxed{\sum i=0}$

② 说明　规定：流出节点的电流取正号，流入节点的电流取负号

本质：电流连续性原理

拓展：电路中任意封闭面上电流代数和为 0（广义 KCL）

3. 基尔霍夫电压定律（KVL）

① 定律　电路的任一闭合回路中各支路电压代数和为 0　$\boxed{\sum U=0}$

② 说明　规定：沿回路绕行方向，当元件电压参考方向与回路绕行方向一致时取正号，相反时取负号

本质：能量守恒定律

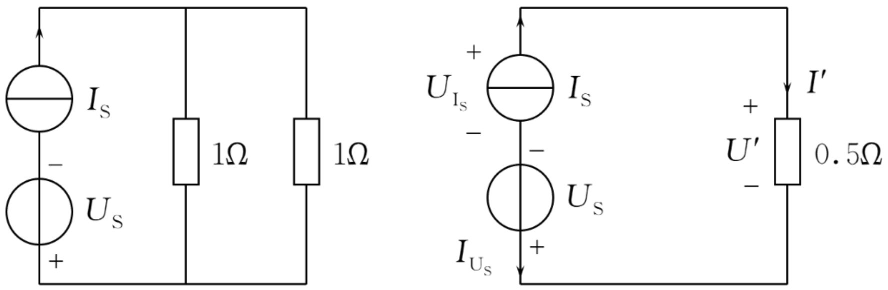
拓展：结合欧姆定律，可以改写为　（元件压降）$\sum Ri=u_S$（电压源提供的电压）

考点解析

考点一　电源功率状态判断

例 1　图示电路中，已知$U_S=2V$，$I_S=2A$，则输出电功率的是

A.电压源　　B.都不是　　C.电压源和电流源　　D.电流源



解　① 标注参考方向（如图所示）

② 电压源电流$I_{U_S}=-I_S=-2A$，由$U_S=2V$，得$p=-2A\times2V=-4W$

因为使用非关联参考方向，因此$p<0$代表电压源消耗功率

③ 将右边的两个电阻并联，得到$R'=0.5\Omega$，$I'=I_S=2A$，$U'=1V$

因此由$-U_{I_S}+U_S+U'=0$得到电流源电压$U_{I_S}=3V$，$p=2A\times3V=6W$

因为使用非关联参考方向，因此$p>0$代表电流源输出功率

本题考查　参考方向、独立源的特性、功率的定义与意义、串并联变换、基尔霍夫电压定律

注　关于参考方向

1.求解电路的第一步就要规定参考方向

养成电阻、电感、电容上的电压、电流规定为关联参考方向，电源上的电压、电流规定为非关联参考方向的习惯。这样在规定时，只需要标出电流，无需标出电压的正负号，让电路图简洁

2.在运用基尔霍夫定律及其它定理列方程时，一定要根据规定的参考方向确定正负号

比如是$I+I_2+I_3=0$还是$I_1+I_2-I_3=0$，和规定的参考方向有关

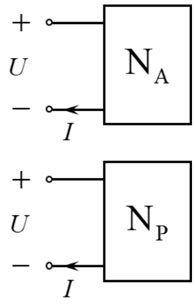
3.前两步严格执行后，才能根据算出来的正负号确定电压电流的实际方向以及功率情况

第二节 直流电路分析方法

知识梳理

（一）等效变换

1. 等效变换的概念



① 二端网络：通过两个连接端钮与外电路相连的网络（复杂电路），分为有源和无源

② 等效：若两个内部结构不同的二端网络端口上的伏安特性完全相同，则二者等效

替换等效的二端网络不会对外电路造成影响

2. 电阻串并联的等效

只含电阻的二端网络可由串联（$R=R_1+R_2$）与并联（$R=R_1//R_2$）等效为一个电阻

3. 电源的等效

① 电压源的串并联

- 多个电压源串联等效为一个电压源，其值为各电压源的代数和（与等效源方向相同取正，相反取负）
- 相同大小电压源并联等效为一个电压源，不同大小的电压源不能并联
- 电压源与电阻并联等效为一个相同大小的电压源

② 电流源的串并联

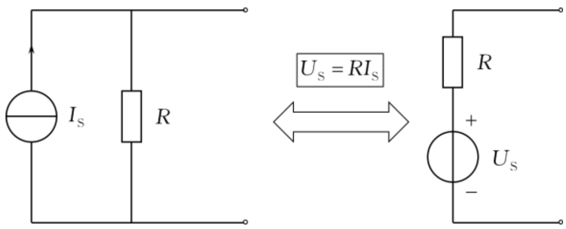
- 多个电流源并联等效为一个电流源，其值为各电流源的代数和（与等效源方向相同取正，相反取负）
- 相同大小电流源串联等效为一个电流源，不同大小的电流源不能串联
- 电流源与电阻串联等效为一个相同大小的电流源

③ 电压源与电流源串并联

- 电压源与电流源串联，保留电流源；电压源与电流源并联，保留电压源

④ 实际电源

实际电源由理想电压源串联电阻或理想电流源并联电阻等效，两者间存在等效变换



（二）电路求解 — 支路电流法

1. 概述

以支路电流作为未知量，根据 KCL 和 KVL 建立电路方程组，求解方程组解出各支路电流，再求其它量

对于含有n个节点，b个支路的电路，需要b个独立方程（$n-1$个 KCL，$b-n+1$个 KVL）

2. 方法

① 对各支路、节点编号，选择各支路电流的参考方向，然后得到电压的参考方向

② 根据 KCL 列出节点电流方程（$n-1$个）

③ 根据 KVL 列出回路电压方程（$b-n+1$个） 一般选网孔，因为网孔必相互独立（类似向量线性无关）

· 如果含有电流源，则其所在支路电流为已知量

· 如果含有受控源，则需要额外列受控源方程

④ 求解方程组

（三）线性电路定理

1. 叠加定理

· 线性电路中任一支路电流（电压）等于各个独立源分别单独作用下产生的电流（电压）代数和

① 计算每个独立源的作用时，其它独立源要置零（电压源短路，电流源开路）

② 只适用于求线性电路（只含有线性元件的电路）的电压和电流

③ 含有受控源的线性电路也适用，但受控源不能置零

2. 线性定理

· 线性电路中若所有独立源以相同比例缩放，则所有物理量也以该比例缩放

3. 等效电源定理

① 定理内容

戴维宁定理 任一线性有源二端网络对其余部分而言可以等效为一个电压源串联电阻的电路

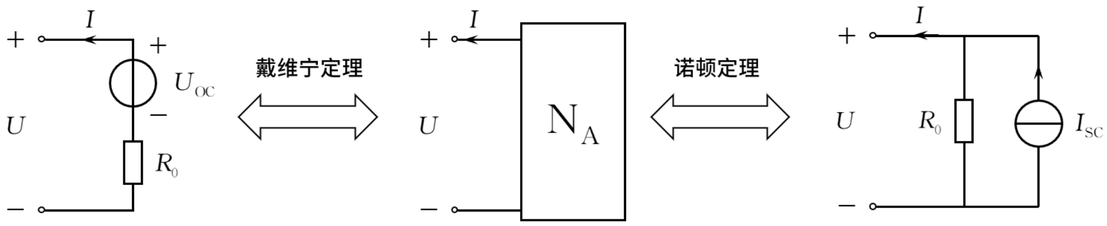
· 电压源电压：该二端网络的开路电压U_{OC}，正极与开路端口的高电位点对应

· 电阻：该有源二端网络内所有独立源置零时构成的无源网络的等效电阻R_0

诺顿定理 任一线性有源二端网络对其余部分而言可以等效为一个电流源并联电阻的电路

· 电流源电流：该二端网络的短路电流I_{SC}，由端口的低电位点流向高电位点

· 电阻：该有源二端网络内所有独立源置零时构成的无源网络的等效电阻R_0



② 等效参数求解

开路电压U_{OC}：将要等效的网络以外的部分（a 和 b）断开，求 ab 间电压

短路电流I_{SC}：将要等效的网络以外的部分（a 和 b）短路，求 ab 上的电流

等效电阻R_0：方法 1 电阻串并联（没有受控源的前提下可用）

方法 2 开路电压 除以 短路电流 $R_0 = U_{SC} / I_{SC}$

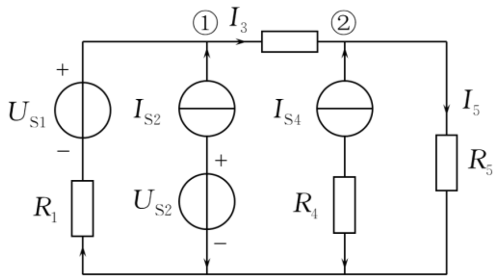
方法 3 在端口处加独立源，求端口电压U与电流I（其一自定） $R_0 = U / I$

考点解析

考点一　直流电路求解

1. 全电路求解 — 支路电流法

例 1　如图所示电路中，$U_{S1}=4V$，$U_{S2}=5V$，$I_{S2}=2A$，$I_{S4}=4A$，$R_1=1\Omega$，$R_3=3\Omega$，$R_4=4\Omega$，$R_5=5\Omega$，求各支路电流



解　规定参考方向如图 2 所示

取节点①和②列 KCL：

节点①　$I_1-I_{S2}+I_3=0$

节点②　$-I_3-I_{S4}+I_5=0$

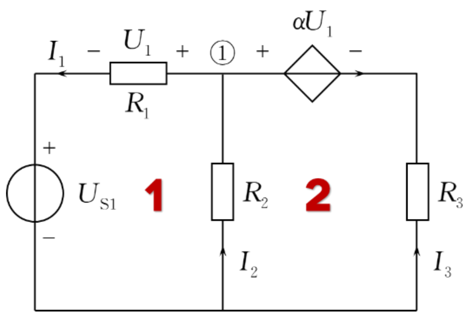
取最外圈的回路 1 列 KVL：

$I_1R_1+I_5R_5+I_3R_3=U_{S1}$

联立，解得　$I_1=-3.89A$　$I_3=-1.89A$　$I_5=2.11A$

注　本题中电路含有电流源，其所在支路电流为已知量，因此所需的方程数会减 1
同时由于电流源的电压由外电路确定，因此所列 KVL 的回路应不包含这一支路
在解出支路电流后，再由包含该支路的回路 KVL 列方程，得到电流源电压

例 2　如图所示电路中，$U_{S1}=1V$，$R_1=1\Omega$，$R_2=2\Omega$，$R_3=3\Omega$，$\alpha=3$，求各支路电流



解　规定参考方向如图所示。该电路共有 2 个节点，3 条支路，需要 KCL×1，KVL×2

对节点①列 KCL：$I_1-I_2-I_3=0$

对网孔 1 列 KVL：$-I_1R_1-I_2R_2-U_{S1}=0$

对网孔 2 列 KVL：$\alpha U_1-I_3R_3+I_2R_2=0$

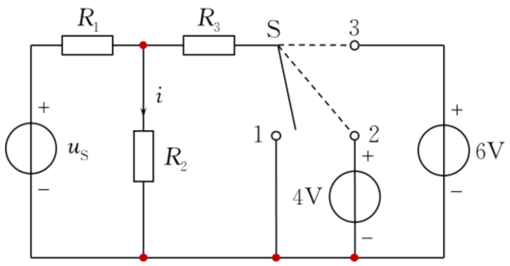
电路中含有 1 个受控源，因此需要一条附加方程：$U_1=I_1R_1$

联立，解得　$I_1=-1A$　$I_2=0A$　$I_3=-1A$

注　含有受控源的电路需要额外列方程，当然也可以直接用对应的支路电流表示

2. 利用叠加定理与线性定理

例 1 如图所示电路，当 S 在 1 时，$i=40$ mA；S 在 2 时，$i=-60$ mA。当 S 在 3 时，i 为



A.-80mA　　B.-100mA　　C.100mA　　D.-110mA

解 ① S 在 1 时，只有电压源 u_S，即 u_S 独立作用于电路时，$i=40$mA

② S 在 2 时，有电压源 u_S 和 4V 电压源，共同作用时，$i=-60$mA

由叠加定理，结合①②，得到 4V 电压源单独作用时，$i=-60-40=-100$mA

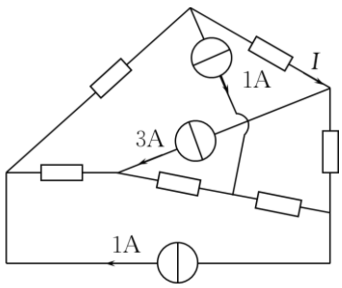
由线性定理，得到 6V 电压源单独作用时，$i=-100\text{mA}/4\times6=-150$mA

③ S 在 3 时，有电压源 u_S 和 6V 电压源

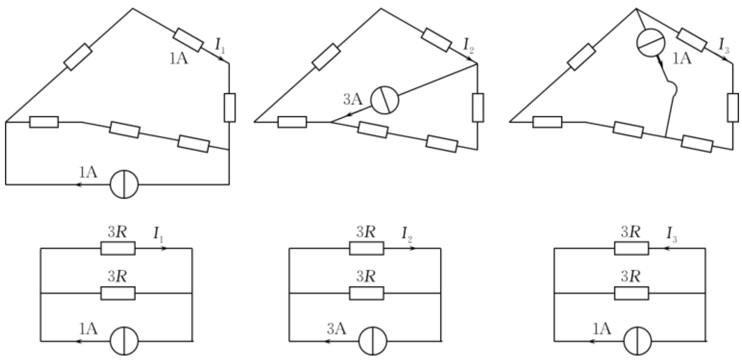
∴ 由叠加定理，S 在 3 时，$i=40\text{mA}-150\text{mA}=-110\text{mA}$，选 D

注 本题中所有电阻都是未知量，如果使用支路电流法求解，将会非常麻烦
由于电路为线性电路，且开关 S 的切换只是让作用的独立源发生变化，因此考虑用叠加定理

例 2 如图所示电路中所有电阻均为 R，求 I



解 考虑利用叠加定理，分别计算单个电源作用时的电流 I_1,I_2,I_3

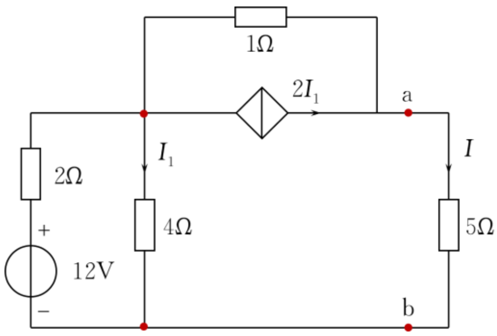


∴ $I=I_1+I_2+I_3=1.5\text{A}$

注 本题中电路结构比较复杂，观察可知这种复杂实质是由电流源引起的，若除掉电流源电路结构就会变得很简单。这时就可以考虑叠加定理。

3. 利用戴维宁定理与诺顿定理

例 1　如图所示直流电路，先将 AB 端左侧进行等效化简，求电流 I



解　① 求开路电压 U_{OC}。首先将 ab 断开，此时电路如图 1 所示：

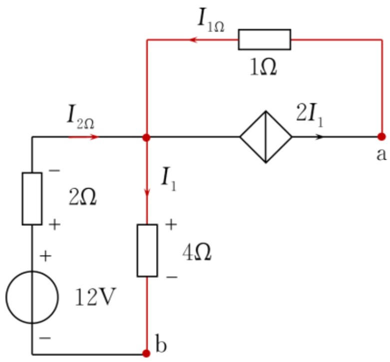


图 1

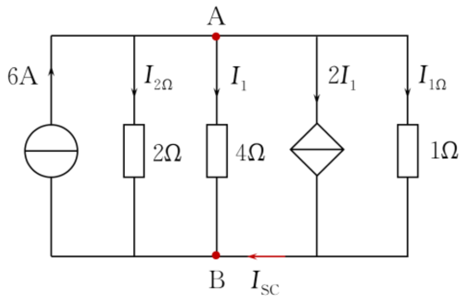


图 2

· 由广义 KCL，可得 $I_{1Ω}=2I_1$、$I_{2Ω}=I_1$

对左下网孔列出 KVL，解得 $I_1=\dfrac{12\text{V}}{2Ω+4Ω}=2\text{A}$

· 取红线所示路径，得 $U_{OC}=\varphi_a-\varphi_b=4Ω\times I_1+1Ω\times 2I_1=12\text{V}$

② 求短路电流。现在将 ab 短路，并将电压源等效为电流源，如图 2 所示

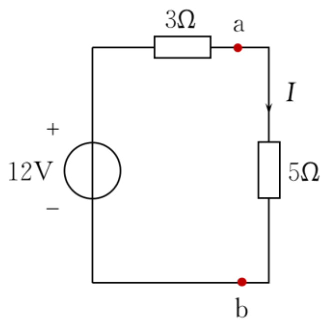
· 由并联分流，$4Ω\times I_1=2Ω\times I_{2Ω}=1Ω\times I_{1Ω}$

· 由节点 A 的 KCL：$I_1+I_{2Ω}+I_{1Ω}+2I_1=6\text{A}$，解得 $I_1=\dfrac{2}{3}\text{A}$

· 由节点 b 的 KCL：$I_{SC}=2I_1+I_{1Ω}=6I_1=4\text{A}$

③ 作出等效电路

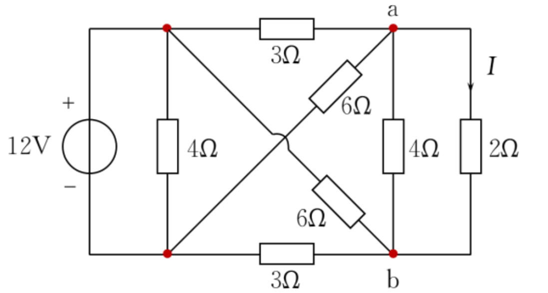
· 等效电阻 $R_0=\dfrac{U_{OC}}{I_{SC}}=\dfrac{12\text{V}}{4\text{A}}=3Ω$，等效电路如图所示：



· $I=\dfrac{12\text{V}}{3Ω+5Ω}=1.5\text{A}$

注　运用等效电路定理求解时，若电路内含有受控源，则不能用电阻串并联求等效电阻
此时更推荐求出开路电压和短路电流，因为这两个参数总是要求出其中一个
在求开路电压和短路电流时，还是会用到 KCL 与 KVL。为了让计算变得简单，首先应通过等效变换与重新画图简化电路，然后利用串联分压、并联分流等特性，避免用支路电流法列方程求解

例 2　用诺顿定理如求图所示电路的电流 I



解　① 求短路电流

短接 ab，得到电路如图 1 所示，重新画图如图 2 所示，并规定参考方向：

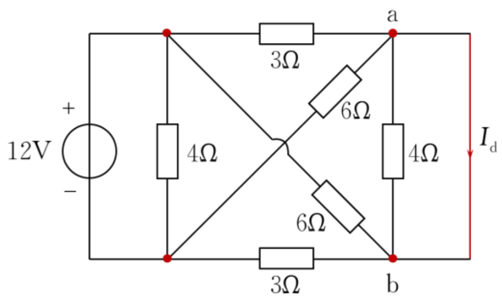


图 1

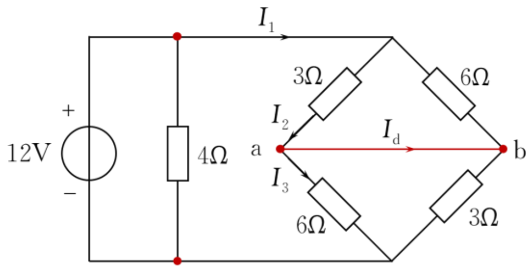


图 2

· 由 KCL：$I_d = I_2 - I_3$　　· 由并联分流特性：$I_2 = \dfrac{6\Omega}{6\Omega+3\Omega}I_1$，$I_3 = \dfrac{3\Omega}{6\Omega+3\Omega}I_1$

· 将 4Ω外的电阻并联，得到 $I_1 = \dfrac{12\text{V}}{3\Omega//6\Omega+6\Omega//3\Omega} = 3\text{A}$　　∴ 解得 $I_d = 1\text{A}$

② 求等效电阻

除源后作串并联（如图 3 所示），得到 $R_0 = (3//6+3//6)//4 = 2\Omega$：

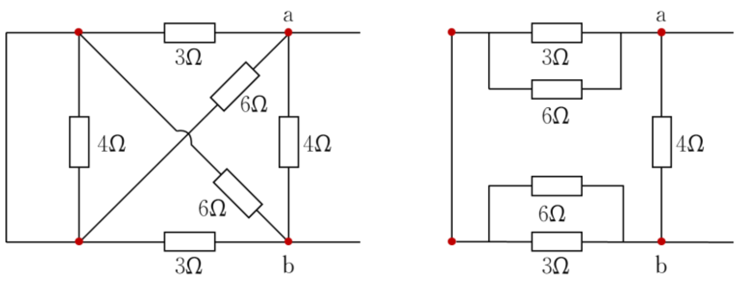


图 3

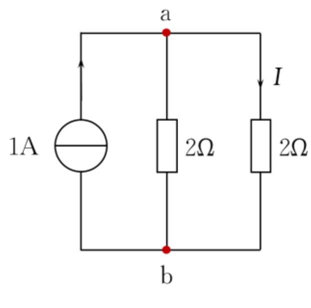


图 4

因此诺顿等效电路如图 4 所示，解得 $I = \dfrac{2\Omega}{2\Omega+2\Omega}I_d = 0.5\text{A}$

注　求解电路前，尽量使用串并联等效简化电路，尤其是出现了本题中线路交叉的情况

重新画电路图的一个小技巧是，首先数清楚电路中有多少节点，画图时先画出这些节点，然后依次看各个支路连接了哪两个节点，在新图中连起来，做到不遗漏、不重复

对于有 4 个节点且相邻两点间都有连接的电路，可以像本题图 2 一样画成电桥的形式

第三节 正弦交流电路分析

知识梳理

（一）正弦交流电路的描述

1. 描述正弦交流电路的物理量

正弦交流电路 交流电流/电压的大小、方向随时间按正弦规律 $\begin{cases} u(t)=U_m\sin(\omega t+\varphi_u) \\ i(t)=I_m\sin(\omega t+\varphi_i) \end{cases}$ 变化

频率相关 ① 周期 T s 正弦交流电重复变化一次所需的时间 $\boxed{T=\frac{1}{f}}$

② 频率 f Hz 正弦交流电每秒内变化的周期数

③ 角频率 ω rad/s 正弦交流电相位每秒内变化的角度 $\boxed{\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f}$

幅值相关 ① 瞬时值 i u 任一时刻正弦量的值，是时间 t 的周期函数

② 最大值 I_m U_m 瞬时值变化过程中出现的最大值

③ 有效值 I U 瞬时值的平方在一个周期内的方均根值（产热等效）

对于正弦量：$\boxed{U_m=\sqrt{2}U}$ $\boxed{I_m=\sqrt{2}I}$

相位相关 ① 初相位 φ_i φ_u $t=0$ 时的相位，单位用弧度和角度均可

· 对于同一元件上的电流电压：若 $\varphi_u>\varphi_i$ → “电压超前电流” $\varphi_i>\varphi_u$ → “电流超前电压”

! 最大值、角频率、初相位称为正弦量的三要素

2. 正弦量的相量表示

· 正弦量的 ω 一定时，相量 $\dot{I}$ 与正弦量 i 间存在一一对应关系

· 相量 $\dot{I}$ 为复数，其模长为有效值 I，幅角为初相位 φ_i，可在相量图上表示

· 同频率正弦量的加减、求导等运算可以映射为更加简便的相量运算（本质是复数运算）

（二）正弦交流电路的计算

1. 正弦交流电路中的三大元件

	相量关系	电抗	有效值关系	相位关系
电阻	$\dot{U}=R\dot{I}$	——	$U=RI$	电压电流同相
电感	$\dot{U}=\mathrm{j}X_L\dot{I}$	感抗 $X_L=\omega L$	$U=X_LI$	电压超前电流 90°
电容	$\dot{U}=-\mathrm{j}X_C\dot{I}$	容抗 $X_C=1/\omega C$	$U=X_CI$	电流超前电压 90°

2. 基尔霍夫定律的相量形式

· $\boxed{\sum\dot{U}=0}$ $\boxed{\sum\dot{I}=0}$ → 相量图中，所有的相量构成一个闭合多边形

3. RLC 串联电路中的阻抗

RLC 串联电路中 电抗 $\boxed{X = X_L - X_C}$ 阻抗 $\boxed{Z = R + jX}$ 是复数，不是相量，有模长和幅角

对于整个 RLC 串联电路：$\boxed{\dot{U} = Z\dot{I}}$ → 所有 RLC 元件都可以视为阻抗，可以像电阻一样串并联

· 二端网络的等效阻抗 Z 的幅角 $\varphi > 0$ 时，电路呈感性；$\varphi < 0$ 时，电路呈容性

4. 正弦交流电路的功率

瞬时功率 p 电路某一瞬间放出的功率 $p = ui$（不能用相量计算）

有功功率 P p 的周期均值（平均功率）$\boxed{P = UI\cos\varphi}$，功率因数 $\boxed{\lambda = \cos\varphi}$，功率因数角 φ

无功功率 Q 储能元件瞬时功率最大值 $\boxed{Q = UI\sin\varphi}$，单位乏（var）

电阻功率为有功功率 $P = I^2R$，电感电容功率为无功功率 $Q = I^2X$

视在功率 S 电路电压有效值与电流有效值的乘积 $\boxed{S = UI}$，单位伏·安，表示电源设备的容量

> 三个功率 P,Q,S 的关系可以用功率三角形表示 $P^2 + Q^2 = S^2$

功率因数提高 目的：充分利用电源容量、减少线路损耗 方法：并联电容（大多数设备是感性负载）

（三）谐振电路

1. 串联谐振（电压谐振）

① 定义 RLC 串联电路中，某个频率 ω_0 下 $X_L = X_C$，电压与电流同相，电路呈现电阻性

② 特点 · 等效阻抗虚部为 0，模长达到最小 · 电压 U 一定时，电流有效值 I 达到最大

· $\dot{U}_L = -\dot{U}_C$，两者相互抵消 · 当 $\omega > \omega_0$ 时，电路呈感性；$\omega < \omega_0$ 时，电路呈容性

③ 相关概念

特性阻抗 ρ 串联谐振时，电感的感抗或电容的容抗（两者相等）

品质因数 Q 串联谐振时 U_L 与 U 之比 $Q = U_L / U$

电流谐振曲线 电源电压有效值不变时，电路中电流有效值随频率变化的曲线

通频带 电路电流 $I \geq \dfrac{I_0}{\sqrt{2}}$ 时的频率范围 $f_{BW} = \dfrac{f_0}{Q}$

∴ 品质因数越高，通频带越窄，电路对频率的选择性越好

2. 并联谐振（电流谐振）

· 并联电路中，总电流 I 与端电压 U 同相，电路呈现电阻性，称为并联谐振

· 特点 ① 等效阻抗模长达到最大（其倒数虚部为 0） ② 电压 U 一定时，电流有效值 I 达到最小

（四）三相交流电路

1. 三相交流电路模型与概念

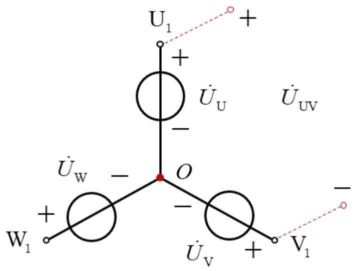
① 三相交流电源

· 三个幅值相等、频率相同，并且相位依次相差 120°的正弦交流电源

相序 U→V→W

· 规定三个相分别为 U、V、W 相：U 相超前 V 相 120°，V 相超前 W 相 120°，W 相超前 U 相 120°

三相电源电路采用星形联结方式（三个绕组的尾端/电源负极连在一起）：



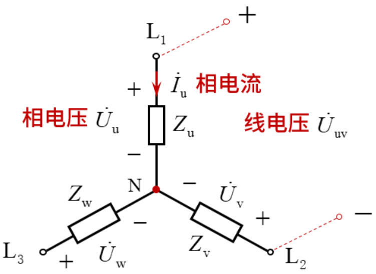
· 中性点（零点） 三个绕组的连接点 O

· 电源相电压 $\dot{U}_U$：单相电源的电压，方向指向中性点

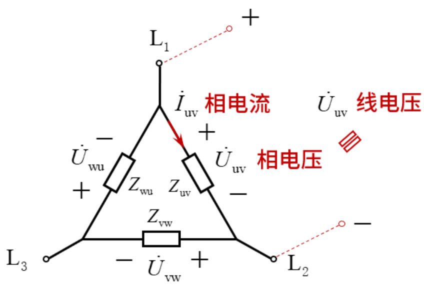
· 电源线电压 $\dot{U}_{UV}$：相线之间的电压（如 AB 两点间的电压）

电源线电压的有效值是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，且相位超前 30°

② 负载



星形联结 Y



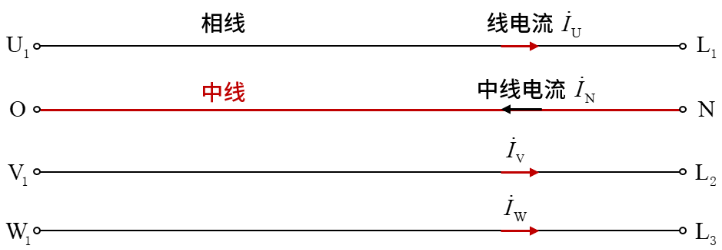
三角形联结 Δ

· 相电流 $\dot{I}_u$：流经各相负载的电流，常用参考方向如图所示

· 负载相电压 $\dot{U}_u$ 或 $\dot{U}_{uv}$：负载两端的电压

· 负载线电压 $\dot{U}_{uv}$：负载侧两个端点间的电压

③ 电源与负载的连接



· 相线（端线、火线） 由三相绕组的三个始端引出的线

· 中线（零线） 从中性点引出的线（电路存在中线称为三相四线制，否则为三相三线制）

· 线电流 $\dot{I}_U$ 端线上的电流

· 中线电流 $\dot{I}_N$ 中线上的电流

！若不考虑线路上的压降，则负载线电压 = 电源线电压

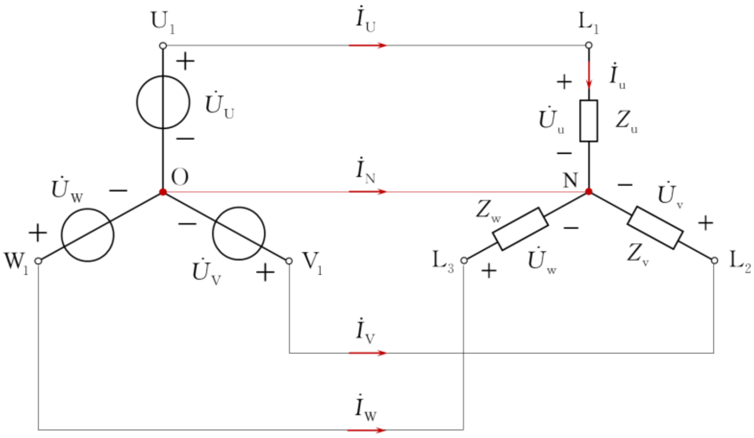
2. 对称三相电路求解

① 定义

各相电源、负载（阻抗相同）、线路均对称的三相电路

② 特点

负载星形联结（Y）

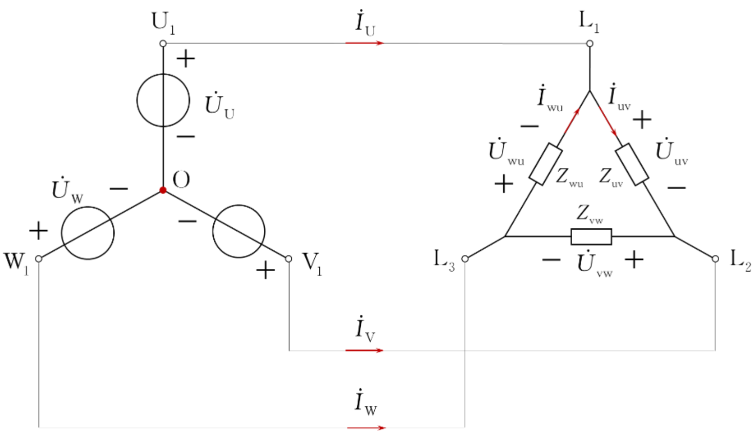


- 负载端相电压 $\boxed{\dot{U}_u=\dot{U}_U}$
- 相电流 $\boxed{\dot{I}_u=\dfrac{\dot{U}_u}{Z}}$
- 线电流 $\boxed{\dot{I}_U=\dot{I}_u}$
- 负载端线电压 $\boxed{\dot{U}_{uv}=\sqrt{3}\dot{U}_u}$

  有效值是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍

  相位超前对应相电压 30°
- 中线电流 $\dot{I}_N=0$

负载三角形联结（Δ）



- 负载端相电压 / 线电压

  $\boxed{\dot{U}_{uv}=\dot{U}_{UV}}$
- 相电流 $\boxed{\dot{I}_{uv}=\dfrac{\dot{U}_{uv}}{Z}}$
- 线电流 $\boxed{\dot{I}_U=\sqrt{3}\dot{I}_{uv}}$

  有效值是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍

  相位落后对应相电流 30°

③ 求解方法

对称三相电路中的关键物理量为相电压、线电压、相电流、线电流，它们均是三相对称的

∴ 求解方法：① 取出一个相，根据 Y 和Δ连接下各物理量间的关系求得该相物理量

② 再根据对称关系得到其它相的物理量

④ 对称三相电路的功率

- 瞬时功率 $p=3U_PI_P\cos\varphi$
- 有功功率 $P=3U_PI_P\cos\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi$
- 无功功率 $Q=3U_PI_P\sin\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi$
- 视在功率 $S=3U_PI_P=\sqrt{3}U_LI_L$

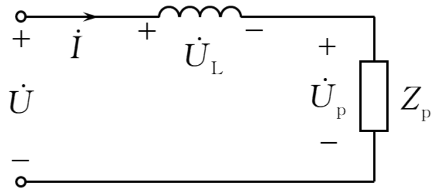
注意：这里的 φ 是相电流与相电压的相位差

考点解析

考点一　正弦交流电路求解

1. 简单电路计算

例 1　如图所示电路，已知：$U=380\text{V}$，$X_L=22\Omega$，Z_p 为感性负载，阻抗角 30°且 $U_p=U_L$，求 I、U_p 的有效值



解　选择 $\dot{U}$ 作为参考相量

· 对于感性负载 Z_p，有

$$\dot{U}_p=Z_p\dot{I} \quad ①$$

对于电感 L，有

$$\dot{U}_L=\mathrm{j}X_L\dot{I} \quad ②$$

由 $U_p=U_L$，结合 ①② 得

$$z_p=X_L=22\Omega$$

由 Z_p 感性负载且阻抗角 30°，得 $Z_p=22\angle 30°$

· 由基尔霍夫定律：

$$\dot{U}=\dot{U}_p+\dot{U}_L \quad ③$$

因此有

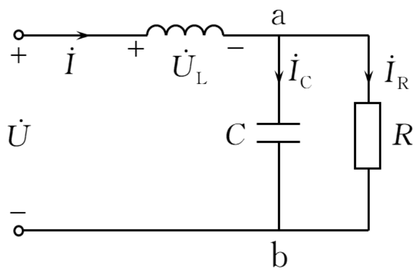
$$\dot{U}=(22\angle 90°+22\angle 30°)\dot{I}=38\angle 60°\dot{I}$$

· 由 $\dot{U}=380\angle 0°\text{V}$，结合 ③ 得

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{Z}=\frac{380\angle 0°}{38\angle 60°}=10\angle -60°\text{A}$$

$\therefore\ I=\boxed{10\text{A}}$，结合 ① 得 $U_p=Iz_p=10\times 22=\boxed{220\text{V}}$

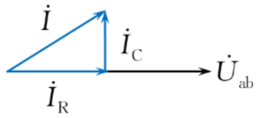
例 2　如图所示电路，已知：$I_C=6\text{A}$，$I_R=8\text{A}$，$X_L=10\Omega$，$\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 同相，求 R、X_C



解　选择 $\dot{U}_{ab}$ 作为参考相量

· 对电容C，有 $\dot{I}_{C}=\mathrm{j}\dfrac{1}{X_{C}}\dot{U}_{ab}$ ① ， 对电阻R，有 $\dot{I}_{R}=\dfrac{\dot{U}_{ab}}{R}$ ②

由 $I_{C}=6\mathrm{A}$，$I_{R}=8\mathrm{A}$，结合 ①② ，画出相量图



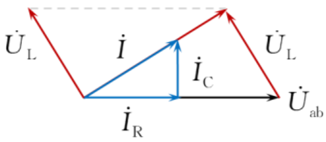
· 由基尔霍夫电流定律 $\dot{I}=\dot{I}_{C}+\dot{I}_{R}$ ，可画出$\dot{I}$，并得到 $I=10\mathrm{A}$

· 对电感L： $\dot{U}_{L}=\mathrm{j}X_{L}\dot{I}$ ③，可确定$\dot{U}_{L}$的幅角，并得到$U_{L}=X_{L}I=100\mathrm{V}$

由$\dot{U}$与$\dot{I}$同相，可确定$\dot{U}$的幅角

· 由基尔霍夫电压定律 KVL：$\dot{U}=\dot{U}_{L}+\dot{U}_{ab}$，三者相量构成三角形（如图所示）

得到 $U_{ab}=500/3\mathrm{V}$

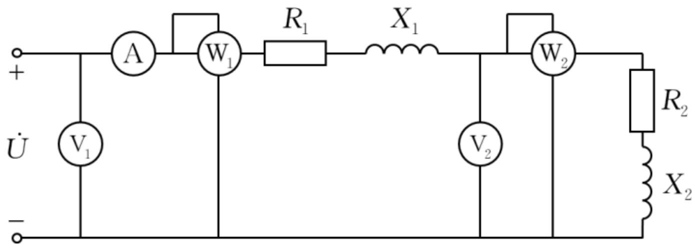


∴ $R=\dfrac{U_{ab}}{I_{R}}=20.83\Omega$， $X_{C}=\dfrac{U_{ab}}{I_{C}}=27.78\Omega$

注 求解正弦交流电路，首先要选择参考相量。建议选择与其它相量联系紧密的相量（如串联电路中的总电流，并联电路中的总电压，混联电路中并联部分的电压等）。然后根据电路中的元件关系以及基尔霍夫定律、题给条件等，建立各相量间的关系，画出相量图。借助相量图可以较为轻松地解题。

2. 功率相关

例 1 已知电流表读数 5A，电压表 V1 和 V2 读数分别为 220V 和 200V，功率表 W1 和 W2 分别为 650W 和 620W。求电路参数R_1，X_1，R_2，X_2的值



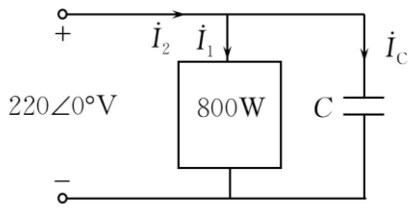
解 功率表 W1 测的是R_1和R_2的有功功率，W2 测的是R_2的有功功率

因此$R_{2}=\dfrac{P_{2}}{I^{2}}=24.8\Omega$， $R_{1}=\dfrac{P_{1}-P_{2}}{I^{2}}=1.2\Omega$

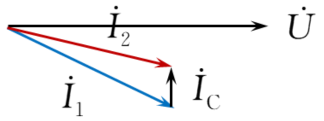
$$S_{2}=U_{2}I=1000\mathrm{V\cdot A}\ \rightarrow\ Q_{2}=\sqrt{S_{2}^{2}-P_{2}^{2}}=784.6\mathrm{var}\ \rightarrow\ X_{2}=\frac{Q_{2}}{I_{2}^{2}}=31.38\Omega$$

$$S_{1}=U_{1}I=1100\mathrm{V\cdot A}\ \rightarrow\ Q_{1}=\sqrt{S_{1}^{2}-P_{1}^{2}}-Q_{2}=102.8\mathrm{var}\ \rightarrow\ X_{1}=\frac{Q_{1}}{I^{2}}=4.1\Omega$$

例 2　一台单相异步电动机接到 50Hz，220V 的供电线路上，如下图所示。电动机吸收有功功率 800W，功率因数 $\cos\varphi_1 = 0.7$（电感性）。今并联一电容器使电路的功率因数提高到 0.9，求所需的电容 C 及补偿后供电线路电流 I_2



解　选择 $\dot U$ 作为参考相量，则可画出相量图

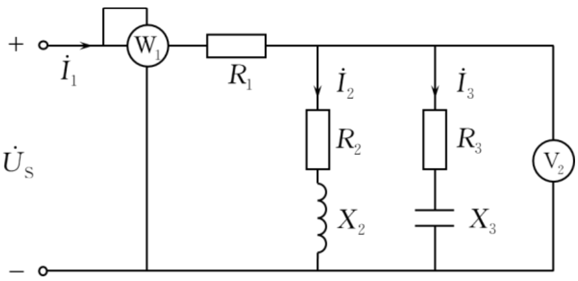


则 $P = U_2 I_1 \cos\varphi_1 = 800\text{W}$，可解得 $\dot I_1$，结合几何关系可以解得

$\dot I_C = \mathrm{j}\omega C \dot U_2 \ \rightarrow\ C = 28.23\mu\text{F}$，$I_2 = 4.05\text{A}$

3. 综合计算

例 1　如图，已知 $I_1 = I_2 = I_3$，$R_1 = R_2 = R_3$，$U_S = 150\text{V}$，瓦特表读数 1500W，求 R_1、R_2、R_3、X_2、X_3 和电压表读数 U_2

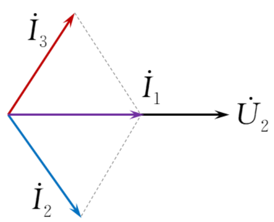


解　选择 $\dot U_2$ 作为参考相量。 由电路元件特性：

$$① \ \dot I_2 = \frac{\dot U_2}{R_2 + \mathrm{j}X_2} \quad ② \ \dot I_3 = \frac{\dot U_2}{R_3 + \mathrm{j}X_3}$$

$\because\ I_2 = I_3$　$\therefore$ 代入①和②：$\dfrac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \dfrac{U_2}{\sqrt{R_3^2 + X_3^2}}$　又由 $R_2 = R_3 \ \rightarrow\ |X_2| = |X_3|$

$\because\ X_2$ 是电感，X_3 是电容　　$\therefore\ X_2 = -X_3$



$\because\ \dot I_1 = \dot I_2 + \dot I_3$，且 $I_1 = I_2 = I_3$

$\therefore\ \dot I_1$ 的幅角为 0，即与 $\dot U_2$ 同相，$\dot I_2$ 幅角 60°，$\dot I_3$ 幅角−60°

$\because\ \dot U_{R1} = \dot I_1 R_1$　且 $\dot U_{S1} = \dot U_{R1} + \dot U_2$

$\therefore\ \dot U_{R1}$、$\dot U_2$、$\dot U_S$、$\dot I_1$ 同相 $\ \rightarrow\ \cos\varphi = 1$

$\because\ P = U_S I_1 \cos\varphi$，代入数据解得 $I_1 = I_2 = I_3 = 10\text{A}$

$\because\ P = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = 3R_1 I_1^2$，代入数据解得 $R_1 = R_2 = R_3 = 5\Omega$

由 $\arg\dfrac{\dot U_2}{\dot I_2} = \arg(R_2 + \mathrm{j}X_2) = 60° \ \rightarrow\ X_2 = 5\sqrt{3}\Omega \ \rightarrow\ X_3 = -5\sqrt{3}\Omega$

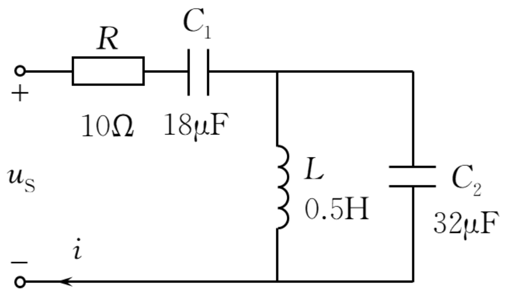
$U_2 = I_2 |R_2 + \mathrm{j}X_2| = 100\text{V}$

考点二　电路谐振条件计算

例 1　如图，已知 $u_s = 100\sqrt{2}\sin\omega t\,\text{V}$，当电源改变频率时

（1）求电流 i 有效值达到最大值时的角频率；

（2）除（1）外，当频率为何值时也会发生谐振？指出此时的谐振类型



解　（1）电压 U 一定，电流 I 达到最大值 → 串联谐振

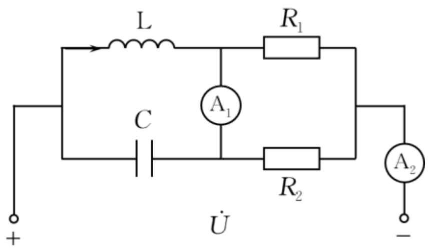
∴ 电路等效阻抗 $Z = R - \text{j}\left[\dfrac{1}{\omega C_1} - \dfrac{1}{\dfrac{1}{\omega L} - \omega C_2}\right]$ 虚部为 0 → $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$

代入数据，得 $\omega = 200\,\text{rad/s}$

（2）L 和 C_2 间会产生并联谐振，此时 $\omega L = \dfrac{1}{\omega C_2}$ → $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC_2}}$

注　当储能元件存在混联（既有串联，又有并联）关系时，电路会存在多种谐振可能。这之中有所有储能元件共同谐振，也有部分元件间的谐振，需要根据谐振特点计算对应的谐振频率

例 2　如图，已知 $U = 240\,\text{V}$，$L = 40\text{mH}$，$C = 1\mu\text{F}$，电流表内阻忽略不计，求谐振时角频率以及电流表 A1、A2 的读数



解　该电路中 LC 为并联关系，只可能发生并联谐振，此时等效阻抗倒数虚部为 0

$\dfrac{1}{Z} = \text{j}(\omega C - \dfrac{1}{\omega L})$ → $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC}} = 5000\,\text{rad/s}$

此时有 $\dot{I}_L + \dot{I}_C = 0$ → A2 读数为 0

A1 读数为 I_L，有 $I_L = \dfrac{U - IR}{X_L} = \dfrac{240 - 0}{5000 \times 0.04} = 1.2\text{A}$

考点三　三相交流电路计算

注　本课程中三相交流电路要求较低，因此并入《概念考查专题》中

第四节 电路的瞬态分析

知识梳理

一阶电路的瞬态分析

1. 换路定律

换路：电路中电源接通、断开，电路参数、结构改变 · 瞬间完成，规定 $t=0^-$ 换路前，$t=0^+$ 换路后

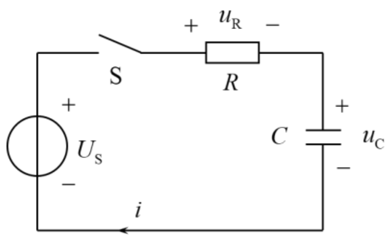
换路定律：换路前后 ① 电容电压不能突变 $\boxed{u_C(0^+)=u_C(0^-)}$ ② 电感电流不能突变 $\boxed{i_L(0^+)=i_L(0^-)}$

注意：电容电流和电感电压可以突变

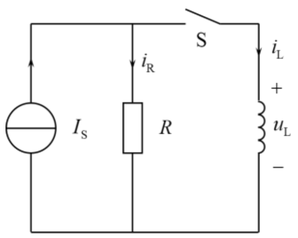
2. 三要素法求解 RC、RL 电路

· 在 RC 电路中，电容电压 $\boxed{u_C(t)=u_C(\infty)+\left[u_C(0^+)-u_C(\infty)\right]e^{-t/\tau}}$ $\boxed{\tau=RC}$

在 RL 电路中，电感电流 $\boxed{i_L(t)=i_L(\infty)+\left[i_L(0^+)-i_L(\infty)\right]e^{-t/\tau}}$ $\boxed{\tau=\dfrac{L}{R}}$



RC 电路



RL 电路

· 求出以下参数，代入三要素方程，得到 $u_C(t)$ 和 $i_L(t)$，再得到其它物理量

① 初始值 $u_C(0^+)$ 求解换路前的稳态电路得到 $u_C(0^-)$，再由换路定律得到 $u_C(0^+)$

② 稳态值 $u_C(\infty)$ 求解换路后的稳态电路

③ 时间常数 τ 将换路后的电路等效为上图中的 RC/RL 电路，则 $\tau=RC$

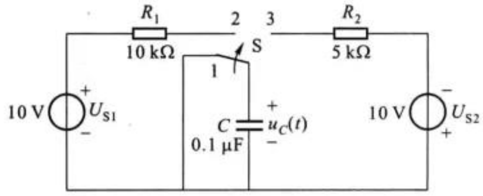
物理意义：u_C 与稳态值之差为初始值与稳态值之差的 0.368 倍时经过的时间

τ 越大意味着过渡的时间越长

考点解析

考点 三要素法求解一阶 RL、RC 电路

例 1 RC 电路如图所示，已知 $U_{S1}=U_{S2}=10\text{V}$，$R_1=10\text{k}\Omega$，$R_2=5\text{k}\Omega$，$C=0.1\mu\text{F}$，在 $t<0$ 时开关 S 处于位置 1，电容无初始储能。当 $t=0$ 时，开关 S 与 2 接通。经过 1ms 以后，开关 S 又突然与 3 接通。试用三要素法求 $t\geq 0$ 时 $u_C(t)$ 的表达式，画出波形图，并求电容电压 $u_C(t)$ 变为-6.32V 所需的时间



解 开关位于 1 时，电容电压

$$u_C(0^-)=0\text{V}$$

在 $t=1\text{ms}$ 时，开关由 1 切换至 2，由换路定律，初始值

$$u_C(0^+)=u_C(0^-)=0\text{V}$$

开关位于 2 且达到稳态时，可求出稳态值与时间常数

$$u_C(\infty)=10\text{V}$$

$$\tau_1=R_1C=1\text{ms}$$

由三要素法

$$u_C(t)=u_C(\infty)+\left[u_C(0^+)-u_C(\infty)\right]\mathrm{e}^{-t/\tau}=10\times(1-\mathrm{e}^{-t/1\text{ms}})\qquad(0\le t\le 1\text{ms})$$

因此，当 $t=1\text{ms}$ 时

$$u_C(1\text{ms}^-)=10\times(1-\mathrm{e}^{-1})=6.32\text{V}$$

在 $t=1\text{ms}$ 时，开关由 2 切换至 3，由换路定律，初始值

$$u_C(1\text{ms}^+)=u_C(1\text{ms}^-)=6.32\text{V}$$

开关位于 3 且达到稳态时，可求出稳态值和时间常数

$$u_C(\infty)=-10\text{V}$$

$$\tau_2=R_2C=0.5\text{ms}$$

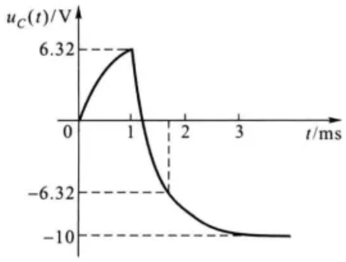
由三要素法

$$u_C(t)=u_C(\infty)+\left[u_C(1\text{ms}^+)-u_C(\infty)\right]\mathrm{e}^{-t/\tau}=-10+16.32\,\mathrm{e}^{-t/0.5\text{ms}}\quad(t\ge 1\text{ms})$$

综上

$$u_C(t)=\begin{cases}10\times(1-\mathrm{e}^{-t/1\text{ms}})\text{V}, & 0\le t\le 1\text{ms}\\ -10+16.32\,\mathrm{e}^{-(t-1)/0.5\text{ms}}\text{V}, & t>1\text{ms}\end{cases}$$

图象如下



令 $u_C(t)=-6.32\text{V}$，解得 $t=1.74\text{ms}$

注 · 本题中的 RC 电路是最简形式，若遇到的 RC 电路或 RL 电路不是最简形式，一定要等效成最简形式，才能正确求出时间常数

· 本题中出现了换路时刻不是 $t=0$ 的情况，这时一定要注意三要素公式里的 t 要“平移”