

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

直流流量用大写字母表示，交流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 $\rightarrow \varphi_A$ 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 $\rightarrow A、B$ 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

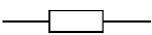


参考方向 解题前给每个电压和电流预先假定的正方向，然后用这些方向去列式子解题
 计算得到的值为正 \rightarrow 实际方向与参考方向一致
 计算得到的值为负 \rightarrow 实际方向与参考方向相反

- 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		$u = L \frac{di}{dt}$	视为短路	通直流、阻高频交流
电容	C	F		$i = C \frac{du}{dt}$	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

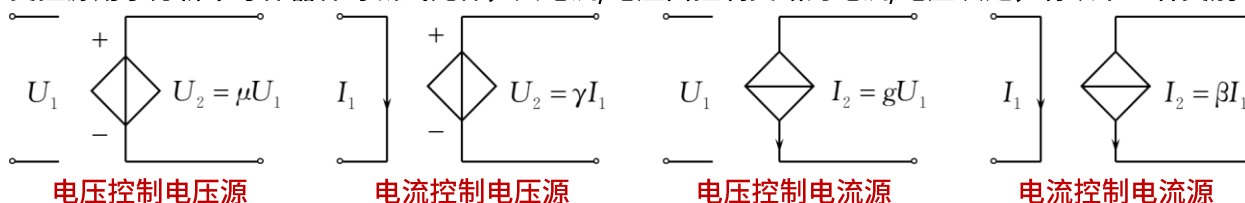
2. 独立源和受控源

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

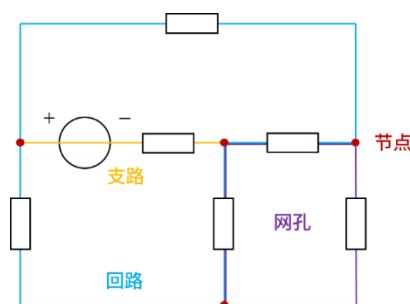


* 受控源边上要写出控制量与受控量间的关系

(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 $\sum i = 0$
- 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 $\sum U = 0$
- 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

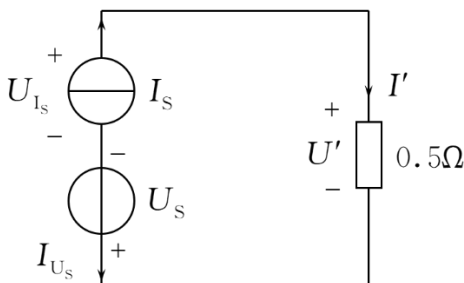
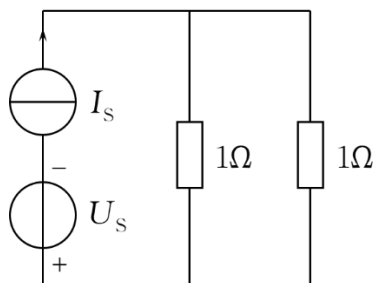
例 1 图示电路中, 已知 $U_S = 2V$, $I_S = 2A$, 则输出功率的是

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 $p = -2A \times 2V = -4W$

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 $U_{I_S} = 3V$, $p = 2A \times 3V = 6W$

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

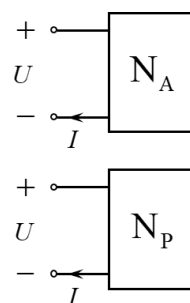
第二节 直流电路分析方法

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

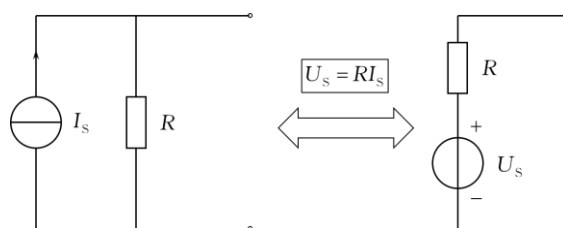
- 多个电流源并联等效为一个电流源，其值为各电流源的代数和（与等效源方向相同取正，相反取负）
- 相同大小电流源串联等效为一个电流源，不同大小的电流源不能串联
- 电流源与电阻串联等效为一个相同大小的电流源

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

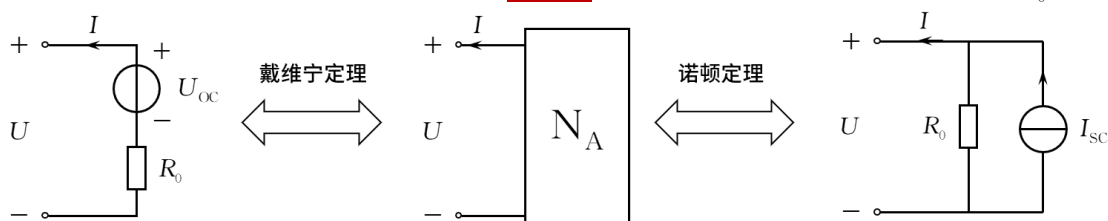
① 定理内容

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 $R_0 = U_{oc} / I_{sc}$

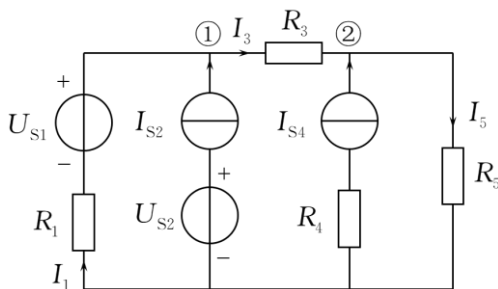
方法 3 在端口处加独立源, 求端口电压 U 与电流 I (其一自定) $R_0 = U / I$

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, $U_{S1}=1V$, $U_{S2}=5V$, $I_{S2}=2A$, $I_{S4}=4A$, $R_1=1\Omega$, $R_3=3\Omega$, $R_4=4\Omega$, $R_5=5\Omega$, 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:

$$\text{节点① } -I_1 - I_{S2} + I_3 = 0$$

$$\text{节点② } -I_3 - I_{S4} + I_5 = 0$$

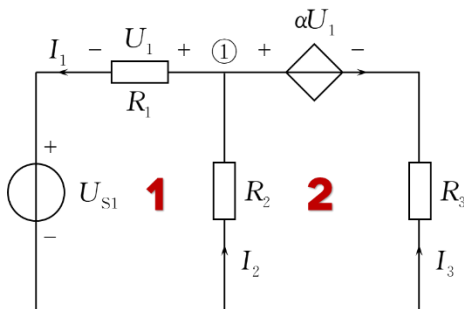
取最外圈的回路 1 列 KVL:

$$I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_3 R_3 = U_{S1}$$

$$\text{联立, 解得 } I_1 = -3.89A \quad I_3 = -1.89A \quad I_5 = 2.11A$$

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 $\times 1$, KVL $\times 2$

$$\text{对节点①列 KCL: } I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{对网孔 1 列 KVL: } -I_1 R_1 - I_2 R_2 - U_{S1} = 0$$

$$\text{对网孔 2 列 KVL: } \alpha U_1 - I_3 R_3 + I_2 R_2 = 0$$

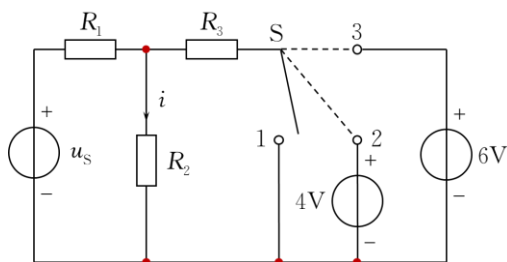
电路中含有 1 个受控源, 因此需要一条附加方程: $U_1 = I_1 R_1$

$$\text{联立, 解得 } I_1 = -1A \quad I_2 = 0A \quad I_3 = -1A$$

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， $i = 40 \text{ mA}$ ；S 在 2 时， $i = -60 \text{ mA}$ 。当 S 在 3 时， i 为



A. -80 mA

B. -100 mA

C. 100 mA

D. -110 mA

解 ① S 在 1 时，只有电压源 u_s ，即 u_s 独立作用于电路时， $i = 40 \text{ mA}$

② S 在 2 时，有电压源 u_s 和 4 V 电压源，共同作用时， $i = -60 \text{ mA}$

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

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

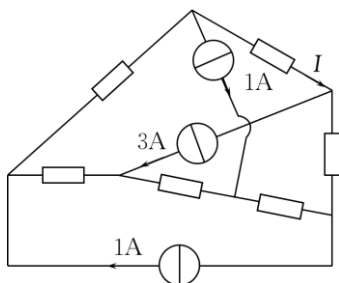
③ S 在 3 时，有电压源 u_s 和 6 V 电压源

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

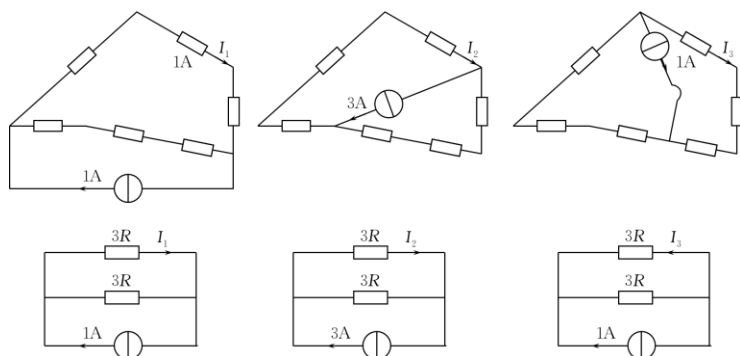
注 本题中所有电阻都是未知量，如果使用支路电流法求解，将会非常麻烦

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

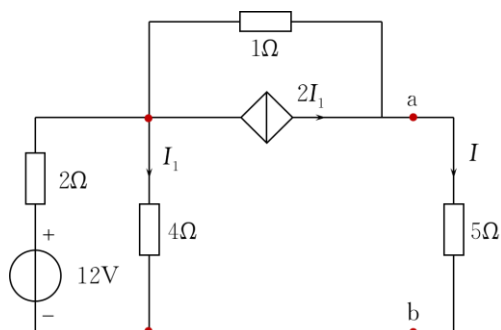


$$\therefore I = I_1 + I_2 + I_3 = 1.5 \text{ A}$$

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：

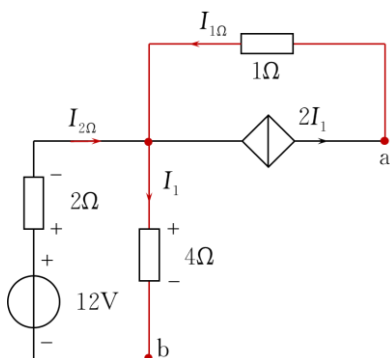


图 1

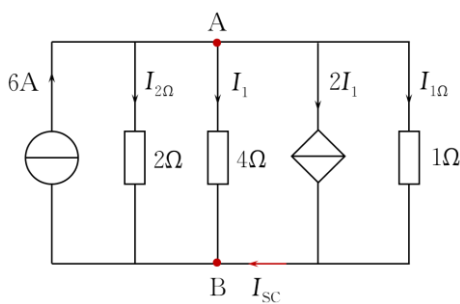


图 2

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

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

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

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， $4\Omega \times I_1 = 2\Omega \times I_{2\Omega} = 1\Omega \times I_{1\Omega}$

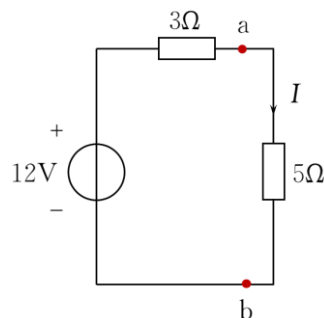
· 由节点 A 的 KCL： $I_1 + I_{2\Omega} + I_{1\Omega} + 2I_1 = 6A$ ，解得 $I_1 = \frac{2}{3}A$

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

③ 作出等效电路

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

· $I = \frac{12V}{3\Omega + 5\Omega} = 1.5A$

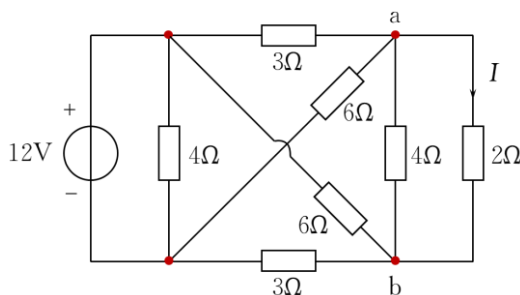


注 运用等效电路定理求解时，若电路内含有受控源，则不能用电阻串并联求等效电阻

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：

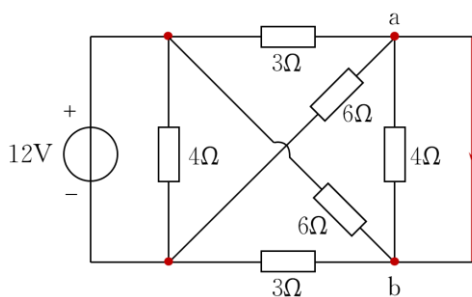


图 1

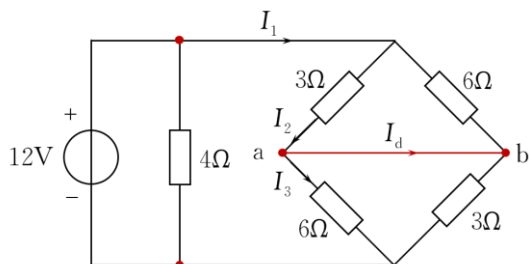


图 2

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

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

② 求等效电阻

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

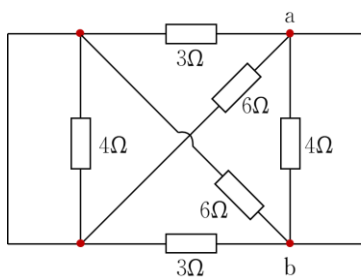


图 3

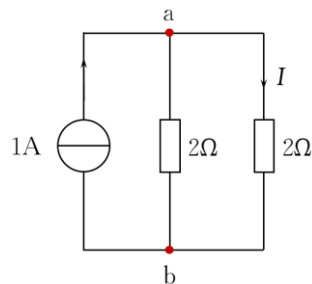
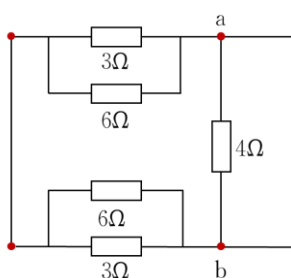


图 4

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

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变化

$$\begin{cases} u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \\ i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \end{cases}$$

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

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

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

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：

$$U_m = \sqrt{2} U \quad I_m = \sqrt{2} I$$

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 $\varphi_u > \varphi_i \rightarrow$ “电压超前电流” $\varphi_i > \varphi_u \rightarrow$ “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	$\dot{U} = jX_L\dot{I}$	感抗 $X_L = \omega L$	$U = X_L I$	电压超前电流 90°
电容	$\dot{U} = -jX_C\dot{I}$	容抗 $X_C = 1/\omega C$	$U = X_C I$	电流超前电压 90°

2. 基尔霍夫定律的相量形式

· $\sum \dot{U} = 0$ $\sum \dot{I} = 0$ \rightarrow 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** $X = X_L - X_C$ **阻抗** $Z = R + jX$ 是复数, 不是相量, 有模长和幅角

对于整个 RLC 串联电路: $\dot{U} = Z\dot{I}$ \rightarrow 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) $P = UI \cos \varphi$, **功率因数** $\lambda = \cos \varphi$, **功率因数角** φ

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

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

视在功率 S 电路电压有效值与电流有效值的乘积 $S = UI$, 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 $I \geq \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ 时的频率范围 $f_{BW} = \frac{f_0}{Q}$

\therefore 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

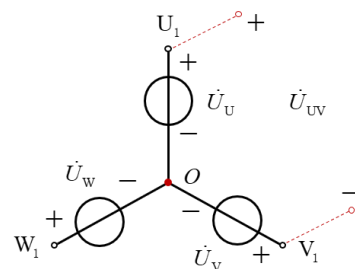
- 三个幅值相等、频率相同，并且相位依次相差 120° 的正弦交流电源
- 规定三个相分别为 U、V、W 相：U 相超前 V 相 120° ，V 相超前 W 相 120° ，W 相超前 U 相 120°

相序 U→V→W

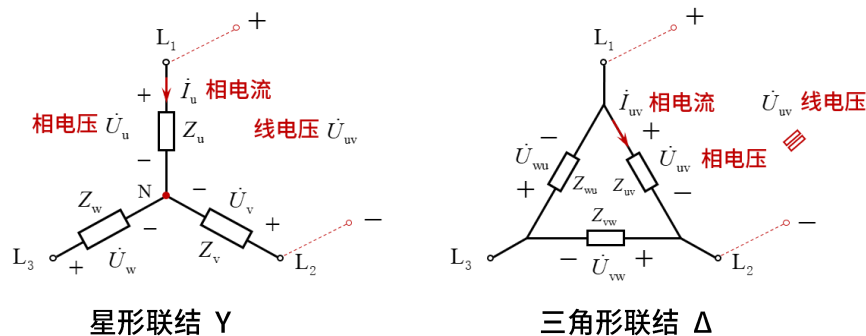
三相电源电路采用星形联结方式（三个绕组的尾端/电源负极连在一起）：

- 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°

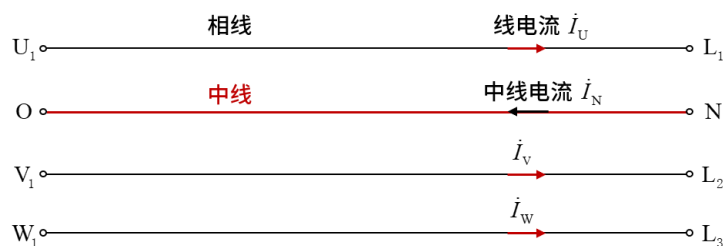


② 负载



- 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

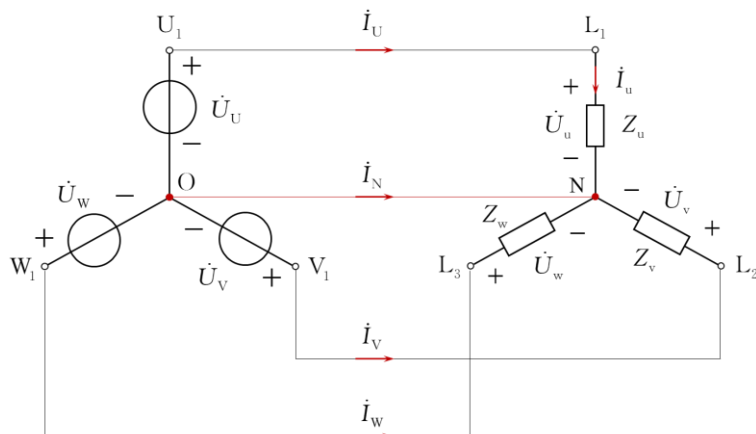
2. 对称三相电路求解

① 定义

各相电源、负载（阻抗相同）、线路均对称的三相电路

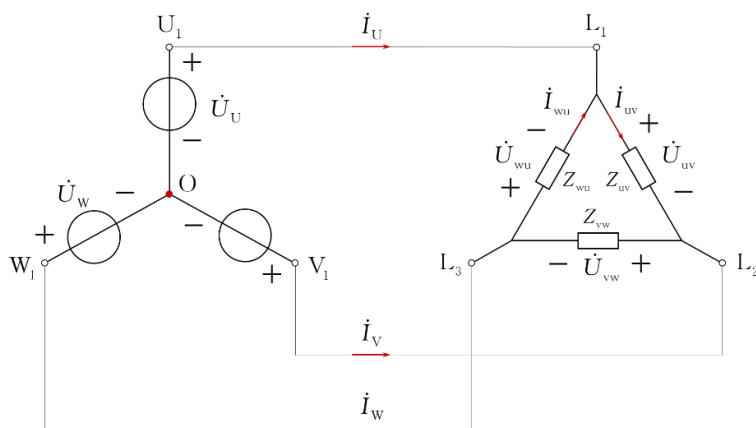
② 特点

负载星形联结 (Y)



- 负载端相电压 $\dot{U}_u = \dot{U}_U$
- 相电流 $\dot{I}_u = \frac{\dot{U}_u}{Z}$
- 线电流 $\dot{I}_U = \dot{I}_u$
- 负载端线电压 $\dot{U}_{uv} = \sqrt{3}\dot{U}_u$
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 $\dot{U}_{uv} = \dot{U}_{UV}$
- 相电流 $\dot{I}_{uv} = \frac{\dot{U}_{uv}}{Z}$
- 线电流 $\dot{I}_U = \sqrt{3}\dot{I}_{uv}$
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 $p = 3U_P I_P \cos \varphi$
- 有功功率 $P = 3U_P I_P \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$
- 无功功率 $Q = 3U_P I_P \sin \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$
- 视在功率 $S = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_L I_L$

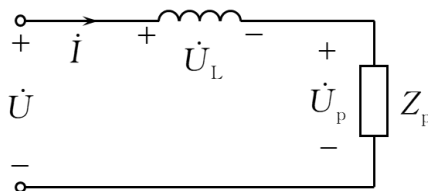
注意：这里的 φ 是相电流与相电压的相位差

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

$$\dot{U}_L = jX_L \dot{I} \quad ②$$

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 $Z_p = 22\angle 30^\circ$

· 由基尔霍夫定律:

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

因此有

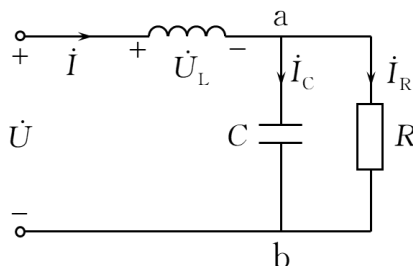
$$\dot{U} = (22\angle 90^\circ + 22\angle 30^\circ) \dot{I} = 38\angle 60^\circ \dot{I}$$

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

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

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

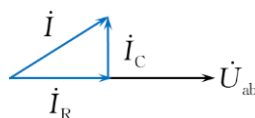
例 2 如图所示电路, 已知: $I_C = 6\text{A}$, $I_R = 8\text{A}$, $X_L = 10\Omega$, \dot{U} 与 \dot{I} 同相, 求 R 、 X_C



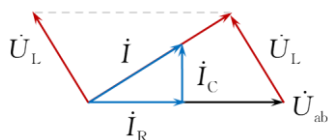
解 选择 \dot{U}_{ab} 作为参考相量

- 对电容 C , 有 $\dot{I}_C = j\frac{1}{X_C}\dot{U}_{ab}$ ①, 对电阻 R , 有 $\dot{I}_R = \frac{\dot{U}_{ab}}{R}$ ②

由 $I_C = 6A$, $I_R = 8A$, 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 $I = 10A$
- 对电感 L : $\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$ ③, 可确定 \dot{U}_L 的幅角, 并得到 $U_L = X_L I = 100V$
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 $U_{ab} = 500/3V$

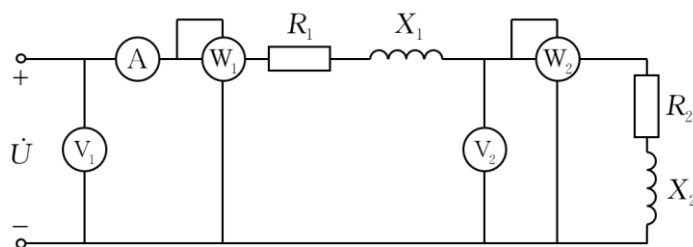


$$\therefore R = \frac{U_{ab}}{I_R} = 20.83\Omega, X_C = \frac{U_{ab}}{I_C} = 27.78\Omega$$

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 V_1 和 V_2 读数分别为 $220V$ 和 $200V$, 功率表 W_1 和 W_2 分别为 $650W$ 和 $620W$ 。求电路参数 R_1, X_1, R_2, X_2 的值



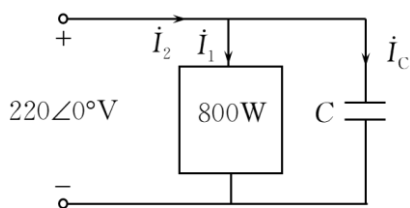
解 功率表 W_1 测的是 R_1 和 R_2 的有功功率, W_2 测的是 R_2 的有功功率

$$\text{因此 } R_2 = \frac{P_2}{I^2} = 24.8\Omega, R_1 = \frac{P_1 - P_2}{I^2} = 1.2\Omega$$

$$S_2 = U_2 I = 1000V \cdot A \rightarrow Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 784.6 \text{ var} \rightarrow X_2 = \frac{Q_2}{I^2} = 31.38\Omega$$

$$S_1 = U_1 I = 1100V \cdot A \rightarrow Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} - Q_2 = 102.8 \text{ var} \rightarrow X_1 = \frac{Q_1}{I^2} = 4.1\Omega$$

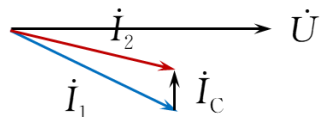
例 2 一台单相异步电动机接到 50Hz, 220V 的供电线路上, 如下图所示。电动机吸收有功功率 800W, 功率因数 $\cos \varphi_1 = 0.7$ (电感性)。今并联一电容器使电路的功率因数提高到 0.9, 求所需的电容 C 及补偿后供电线路电流 I_2



解 选择 \dot{U} 作为参考相量, 则可画出相量图

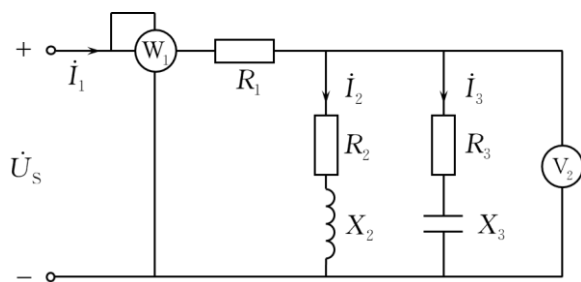
则 $P = U_2 I_1 \cos \varphi_1 = 800\text{W}$, 可解得 I_1 , 结合几何关系可以解得

$$\dot{I}_C = j\omega C \dot{U}_2 \rightarrow C = 28.23\mu\text{F}, I_2 = 4.05\text{A}$$



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:

$$\textcircled{1} \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_2 + jX_2} \quad \textcircled{2} \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_2}{R_3 + jX_3}$$

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

$$\because X_2 \text{ 是电感, } X_3 \text{ 是电容} \quad \therefore X_2 = -X_3$$

$$\because \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3, \text{ 且 } I_1 = I_2 = I_3$$

$$\therefore \dot{I}_1 \text{ 的幅角为 } 0, \text{ 即与 } \dot{U}_2 \text{ 同相, } \dot{I}_2 \text{ 幅角 } 60^\circ, \dot{I}_3 \text{ 幅角 } -60^\circ$$

$$\because \dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 R_1 \text{ 且 } \dot{U}_{S1} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_2$$

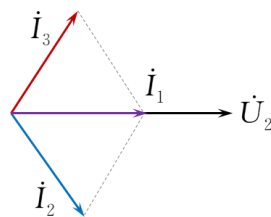
$$\therefore \dot{U}_{R1}、\dot{U}_2、\dot{U}_S、\dot{I}_1 \text{ 同相} \rightarrow \cos \varphi = 1$$

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

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

$$\text{由 } \arg \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \arg(R_2 + jX_2) = 60^\circ \rightarrow X_2 = 5\sqrt{3}\Omega \rightarrow X_3 = -5\sqrt{3}\Omega$$

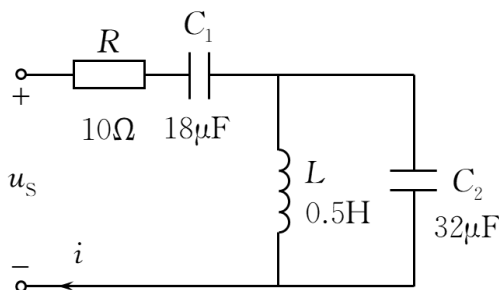
$$U_2 = I_2 |R_2 + jX_2| = 100\text{V}$$



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 \rightarrow 串联谐振

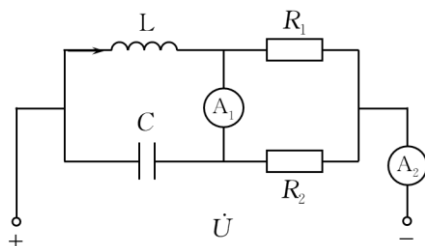
$$\therefore \text{电路等效阻抗 } Z = R - j \left[\frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\frac{1}{\omega L} - \omega C_2} \right] \text{ 虚部为 } 0 \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$$

代入数据, 得 $\omega = 200 \text{ rad/s}$

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

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 A_1 、 A_2 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

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

此时有 $\dot{I}_L + \dot{I}_C = 0 \rightarrow A_2$ 读数为 0

$$A_1 \text{ 读数为 } I_L, \text{ 有 } I_L = \frac{U - IR}{X_L} = \frac{240 - 0}{5000 \times 0.04} = 1.2 \text{ A}$$

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 $u_C(0^+) = u_C(0^-)$ ② **电感电流** 不能突变 $i_L(0^+) = i_L(0^-)$

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

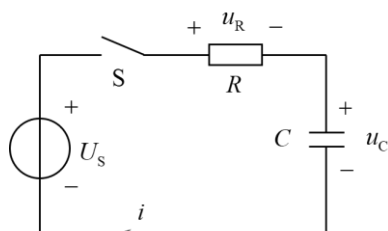
· 在 RC 电路中，电容电压 $u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0^+) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau}$

$$\tau = RC$$

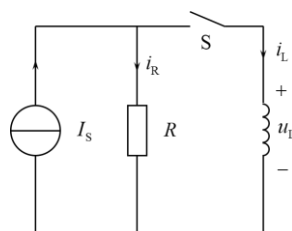
在 RL 电路中，电感电流

$$i_L(t) = i_L(\infty) + [i_L(0^+) - i_L(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$



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 $\tau = RC$

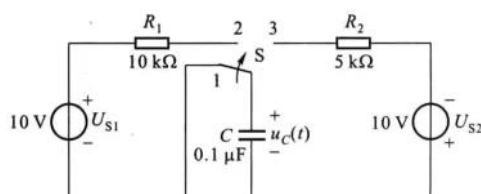
物理意义： u_C 与稳态值之差为初始值与稳态值之差的 0.368 倍时经过的时间

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 $U_{S1} = U_{S2} = 10V$ ， $R_1 = 10k\Omega$ ， $R_2 = 5k\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ ，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

$$u_C(0^-) = 0V$$

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

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = 0V$$

开关位于 2 且达到稳态时, 可求出稳态值与时间常数

$$u_C(\infty) = 10V$$

$$\tau_1 = R_1 C = 1ms$$

由三要素法

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0^+) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau} = 10 \times (1 - e^{-t/1ms}) \quad (0 \leq t \leq 1ms)$$

因此, 当 $t = 1ms$ 时

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

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

$$u_C(1ms^+) = u_C(1ms^-) = 6.32V$$

开关位于 3 且达到稳态时, 可求出稳态值和时间常数

$$u_C(\infty) = -10V$$

$$\tau_2 = R_2 C = 0.5ms$$

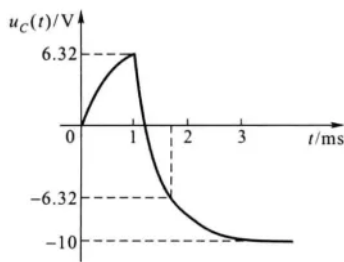
由三要素法

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(1ms^+) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau} = -10 + 16.32 e^{-t/0.5ms} \quad (t \geq 1ms)$$

综上

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

图象如下



令 $u_C(t) = -6.32V$, 解得 $t = 1.74ms$

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”