

# 电工学讲义

冉诗勇



# 简介

---

本讲义用于电工学教学, 配合本校所使用的教材秦曾煌版《电工学 (上册)》, 根据本校教学实际 (大学物理 + 电工学 96 学时) 对讲授内容进行了取舍和增补.



# 目录

---

<b>第一章 电路的基本概念与基本定律</b>	<b>1</b>
1.1 电路的作用与组成部分	1
1.2 电路模型	2
1.3 电压和电流的参考方向	2
1.4 欧姆定律	2
1.5 电源有载工作、开路与短路	3
1.6 基尔霍夫定律	4
1.7 电路中电位的概念及计算	5
<b>第二章 电路的分析方法</b>	<b>7</b>
2.1 电阻串并联连接的等效变换	7
2.1.1 电阻的串联	7
2.1.2 电阻的并联	7
2.1.3 电阻混连电路的计算	7
2.2 电源的两种模型及其等效变换	8
2.2.1 电压源模型	8
2.2.2 电流源模型	8
2.2.3 电源两种模型之间的等效变换	8
2.3 支路电流法	9
2.4 结点电压法	10
2.4.1 2个结点的结点电压方程的推导	10
2.5 叠加定理	11
2.6 戴维宁定理与诺顿定理	11
2.6.1 戴维宁定理	11
2.6.2 诺顿定理	12
2.7 非线性电阻电路的分析	12
2.7.1 非线性电阻	12

<b>第三章 电路的暂态分析</b>	<b>13</b>
3.1 电阻元件、电感元件、电容元件	13
3.1.1 电阻元件	13
3.1.2 电感元件	13
3.1.3 电容元件	14
3.2 储能元件和换路定则	14
3.3 RC 电路的响应	15
3.3.1 RC 电路的零输入响应	15
3.3.2 RC 电路的零状态响应	16
3.3.3 RC 电路的全响应	16
3.4 一阶线性电路暂态分析的三要素法	17
<b>第四章 正弦交流电路</b>	<b>19</b>
4.1 正弦电压与电流	19
4.1.1 周期与角频率	19
4.1.2 幅值与有效值	19
4.1.3 相位与初相位	19
4.2 正弦量的相量表示法	20
4.3 单一参数的交流电路	20
4.3.1 电阻元件的交流电路	20
4.3.2 电感元件的交流电路	21
4.3.3 电容元件的交流电路	23
4.4 电阻、电感与电容元件串联交流电路	24
4.5 阻抗的串联与并联	26
4.5.1 阻抗的串联	26
4.5.2 阻抗的并联	26
4.6 交流电路的频率特性	27
4.6.1 RC 低通滤波电路	28
4.6.2 RC 高通滤波电路	28
4.6.3 RC 带通滤波电路	28
4.7 谐振电路	28
4.7.1 串联谐振	29
4.7.2 并联谐振	29
4.8 功率因数的提高	29
<b>第五章 三相电路</b>	<b>31</b>
5.1 三相电压	31
5.2 负载星形联结的三相电路	32
5.3 负载三角形联结的三相电路	33

## 目录

5.4	三相功率	33
<b>第 六 章</b>	<b>工业企业供电及安全用电</b>	<b>35</b>
6.1	电力系统	35
6.2	工业企业配电	35
6.3	安全用电	35
6.3.1	电流对人体的危害	36
6.3.2	人体触电方式	36
6.3.3	接地与接零	36





# 第一章 电路的基本概念与基本定律

电气技术已经成为现代化生活的基石之一。电路是电气技术的核心之一，电路中的电流、电压等基本物理量的变化和转换，支撑了我们生活中众多的电子设备和电器。因此，理解电路的基本概念和基本定律对于我们掌握电气技术具有重要的意义。

在中学物理中，我们学习了欧姆定律，可用于分析一些简单的电路。但如果电路比较复杂，其计算和分析会比较繁琐和困难。这就要求我们进一步研究电路的基本规律，并应用适当的定律、定理以简化电路分析。简而言之，电路分析就是已知电路的结构和元件参数，求解电路的电流、电压和功率等物理量，以对电路的性能有准确的认知。

## 1.1 电路的作用与组成部分

**电路** 为了某种需要由电工设备或电路元件按一定方式组合而成的电流的通路。按电流性质可分为直流电路和交流电路。结构复杂的电路又称为**网络**。规模较大的电路又称为**电网**。

**电源** 将其它形式的能量转化为电能的设备。

**负载** 将电能转化为其它能量的设备。

**中间环节** 中间环节包括导线、开关以及各种输配电设备等。

所有的电路都由电源（或信号源）、中间环节和负载三大部分组成。以图1-1所示的电力系统电路为例，发电机用于将其它形式的能量转化为电能，然后通过升压变压器送入输电线路传输，在使用终端经降压变压器后通过配电网路输送给用户，可用于各种负载如电灯、家电等设备将电能转化为光能、热能、机械能等，以达到使用的目的。

图1-2所示的扩音电路则是用于信号的传递和处理。首先利用话筒等声电传感器将语音信号转化为电信号，然后通过放大器放大后驱动扬声器将电压信号转化为声音信号。

### 电路的作用

- 1) 实现电能的传输、分配与转换。
- 2) 实现信号的传递与处理。

**激励** 电源或信号源的电压或电流称为**激励**，它推动电路工作；由激励

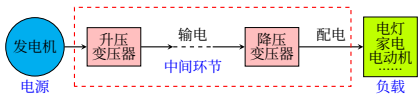


图 1-1 电力系统电路示意图

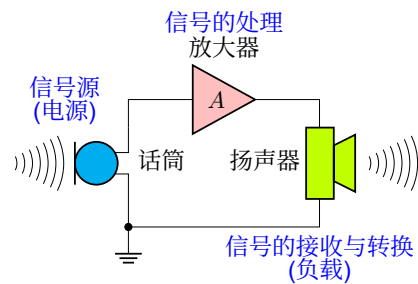


图 1-2 扩音电路示意图

所产生的电压和电流称为**响应**。

## 1.2 电路模型

**❓ 问题** 白炽灯通过电流, 消耗电能, 产生磁场; 灯丝还具有一定的电感, 可以储存磁场能量。如何分析电路?

**Q 电路模型** 在实际分析中, 可将实际电路**理想化**, 即在一定条件下突出主要的电磁性质, 忽略起次要因素的影响, 由一些**理想元件**组成**电路模型**。

**Q 电路分析** 在已知电路结构和参数的条件下, 讨论**激励与响应的关系**。今后分析的都是指电路模型, 简称**电路**。

## 1.3 电压和电流的参考方向

电流  $I$ 、电压  $U$  和电动势  $E$  是电路的基本物理量。关于电压和电流的方向, 有**实际方向**和**参考方向**之分。

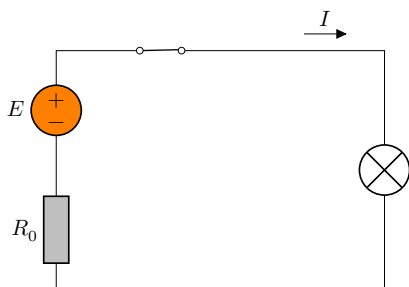


图 1-3 手电筒电路模型

**⚙️ 思考** 电阻元件、电容元件以及电感元件分别考虑了什么主要的电磁性质?

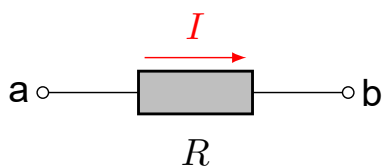


图 1-4 电流参考方向表示

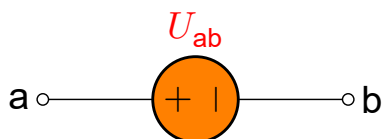


图 1-5 电压参考方向表示

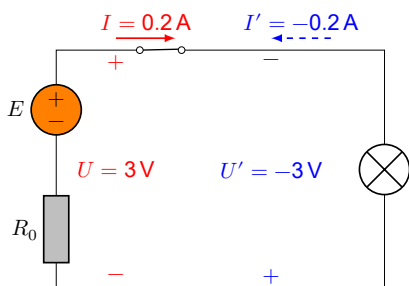


图 1-6 选定的参考方向不同, 相应的电流或电压会有正负区别

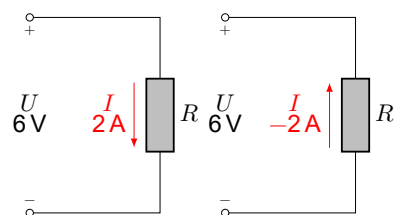


图 1-7

### 电路基本物理量的实际方向

习惯上规定

- 电压的实际方向: 由**高**电位端指向**低**电位端;
- 电流的实际方向: 正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向;
- 电动势的实际方向: 由**低**电位端指向**高**电位端。

### 参考方向的表示方法

- 1) **参考方向**: 在分析与计算电路时, 对电量任意假定的方向。
- 2) 参考方向的表示方法: 电流用**箭标**; 电压标**极性**和**双下标**( $U_{ab}$ )。

### 注意

在参考方向选定后, 电流 (或电压) 值才有正负之分。

### 实际方向与参考方向的关系

- 实际方向与参考方向一致, 电流 (或电压) 值为正值;
- 实际方向与参考方向相反, 电流 (或电压) 值为负值。

## 1.4 欧姆定律

### 欧姆定律

- $U$ 、 $I$  参考方向相同时  $U = IR$ 。
- $U$ 、 $I$  参考方向相反时  $U = -IR$ 。

表达式中有**两套正负号**:

- 1) 式前的正负号由  $U$ 、 $I$  参考方向的关系确定。
- 2)  $U$ 、 $I$  值本身的正负则说明实际方向与参考方向是否相同。
- 3) 通常取  $U$ 、 $I$  参考方向相同。

**例 1.1** 应用欧姆定律对图1-7电路列出式子, 并求电阻  $R$ 。

## 1.5 电源有载工作、开路与短路

🔍 **线性电阻** 遵循欧姆定律的电阻称为**线性电阻**, 它表示该段电路电压与电流的比值为**常数**.

🔍 电路端电压与电流的关系称为**伏安特性**.

线性电阻的伏安特性是一条**过原点**的直线 (图1-8).

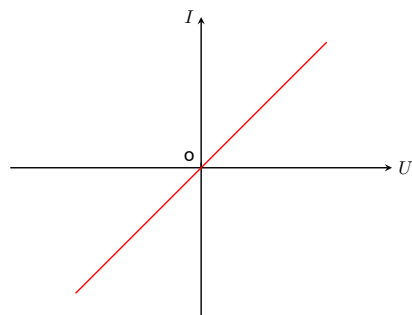


图 1-8 线性电阻的伏安特性

## 1.5 电源有载工作、开路与短路

开关闭合, 接通电源与负载,  $I = \frac{E}{R_0 + R}$ , 负载端电压  $U = IR$  或  $U = E - IR_0$ .

### 总结

- 1) 电流的大小由负载决定;
- 2) 电源有内阻时,  $I \uparrow \rightarrow U \downarrow$
- 3) 当  $R_0 \ll R$  时, 则  $U \approx E$ , 表明当负载变化时, 电源的端电压变化不大, 即带负载能力强.

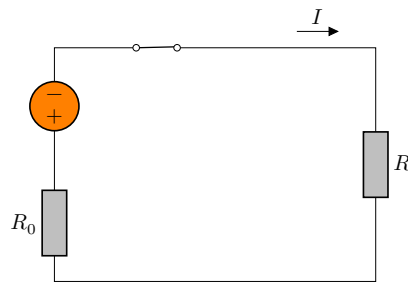


图 1-9 电源有载工作

$$\left. \begin{array}{l} U = E - IR_0 \\ P = UI \end{array} \right\} \Rightarrow UI = EI - I^2 R_0 \Rightarrow P = P_E - \Delta P$$

$\Delta P$ : 电源内阻消耗功率,  $P_E$ : 电源产生功率,  $P$ : 负载取用功率

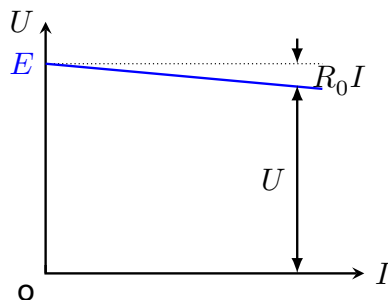


图 1-10 电源的外特性

### 总结

电源输出的功率**由负载决定**.

### 如何判别电源与负载

- 1) 根据  $U$ 、 $I$  的实际方向判别
  - 电源:  $U$ 、 $I$  实际方向相反, 电流从 + 端流出; (发出功率)
  - 负载:  $U$ 、 $I$  实际方向相同, 电流从 - 端流出. (吸收功率)
- 2) 根据  $U$ 、 $I$  的参考方向判别
  - $U$ 、 $I$  参考方向相同,  $P = UI > 0 \rightarrow$  负载,  $P < 0 \rightarrow$  电源;
  - $U$ 、 $I$  参考方向相反,  $P = UI > 0 \rightarrow$  电源,  $P < 0 \rightarrow$  负载;

🔍 **例 1.2** 如图1-11, 已知: 电路中  $U = 220\text{V}$ ,  $I = 5\text{A}$ , 内阻  $R_{01} = R_{02} = 0.6\Omega$ . 求: (1) 电源的电动势  $E_1$  和负载的反电动势  $E_2$ ; (2) 说明功率的平衡关系.

🔍 **额定值** 电气设备在正常运行时的规定使用值 ( $I_N$ ,  $U_N$ ,  $P_N$ ).

### 注意

电气设备工作时的实际值不一定都等于其额定值, 要能够加以区别.

电气设备的三种运行状态

- 1) 欠载 (轻载):  $I < I_N$ ,  $P < P_N$  (不经济)

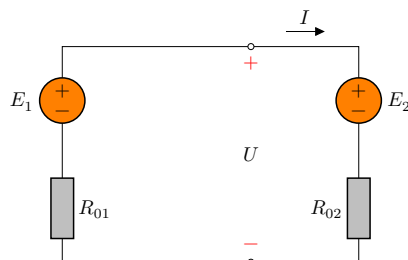


图 1-11

2) 过载 (超载):  $I > I_N$ ,  $P > P_N$  (设备易损坏)

3) 额定工作状态:  $I = I_N$ ,  $P = P_N$  (经济合理安全可靠)

**例 1.3** 一只 220 V, 60 W 的白炽灯, 接在 220 V 的电源上, 试求通过电灯的电流和电灯在 220 V 电压工作时的电阻. 如果每晚工作 3 h (小时), 问一个月消耗多少电能?

**电源开路** 特征: 开关断开.

- $I = 0$
- 电源端电压  $U = U_0 = E$
- 负载功率  $P = 0$

**电源短路** 特征: 电源外部端子被**短接** (图1-12).

- 短路电流 (很大)  $I = I_s = \frac{E}{R_0}$
- 电源端电压  $U = 0$
- 负载功率  $P = 0$
- $P_E = \Delta P = I^2 R_0$ : 电源产生的能量全被内阻消耗掉

为防止事故发生, 需在电路中接入**熔断器**或**自动断路器**, 用以保护电路.

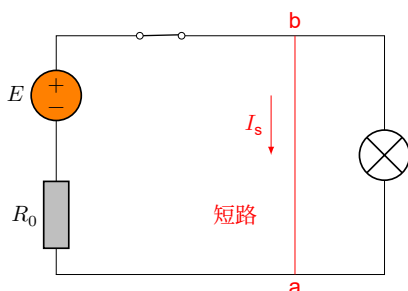


图 1-12 电源短路

## 1.6 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律可用于分析电路, 包括第一定律和第二定律. 第一定律应用于电路**结点**上的电流分配, 称为基尔霍夫电流定律 (KCL). 第二定律应用于**回路**中的电压分配, 称为基尔霍夫电压定律 (KVL). 我们先定义一些与电路相关的概念.

**支路** 电路中的每一个分支. 一条支路流过一个电流, 称为**支路电流**.

**结点** 三条或**三条以上**支路的连接点.

**回路** 由支路组成的**闭合**路径.

**网孔** 内部**不含支路**的回路.

### ★ 例子

支路: ab、bc、ca、... (共 6 条)

回路: abda、abca、adbca ... (共 7 个)

结点: a、b、c、d (共 4 个)

网孔: abd、abc、bcd (共 3 个)

### 基尔霍夫电流定律 (KCL 定律)

在任一瞬间, 流向任一结点的电流等于流出该结点的电流. 或者: 在任一结点上, 各电流的代数和等于 0.

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

以图1-13为例, 对结点 a:  $I_1 + I_2 = I_3$  或  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ .

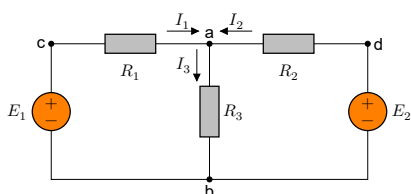


图 1-13

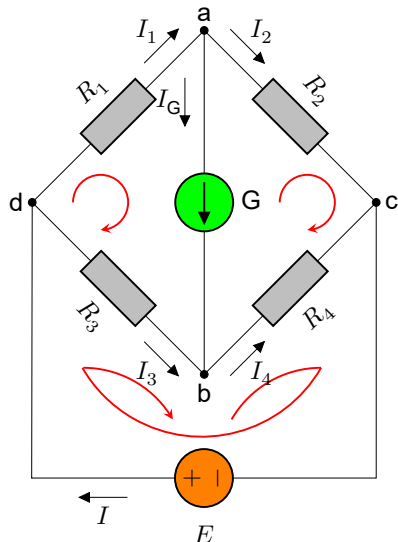


图 1-14

## 1.7 电路中电位的概念及计算

KCL 定律体现了电流在结点处是连续性的, 即结点对电流只起分配作用, 在结点处既不会有电荷的积累, 也不会有电荷的消失. 这是电荷守恒定律在电路中的体现.

电流定律可以推广应用于包围部分电路的任一假设的闭合面. 如图1-15, 对于包围电路的 A 或 B, 有  $I_1 = I_2$ .

### 基尔霍夫电压定律 (KVL 定律)

在任一瞬间, 沿任一回路绕行一周回到原处, 回路中各段电压的代数和恒等于零. 或者: 在绕行方向上, 电位降之和等于电位升之和.

$$\sum U = 0$$

如图1-16, 对回路 1:  $I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0$ ; 对回路 2:  $I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0$ .

KVL 定律表明: 单位正电荷从电路的任一点沿任一闭合回路绕行一周过程中, 获得的电能等于失去的电能. 这是能量守恒定律在电路中的体现.

### 注意

- 1) 列方程前标注回路循行方向;
- 2) 应用  $\sum U = 0$  列方程时, 项前符号的确定: 如果规定电位降取正号, 则电位升就取负号.
- 3) 开口电压可按回路处理. 例如对图1-17所示开口电压电路

$$\sum U = 0 \Rightarrow I_1 R_1 - E_1 + U_{BE} = 0$$

### ★ 例子

以图1-14为例, 对网孔 abda:  $I_G R_G - I_3 R_3 + I_1 R_1 = 0$

对网孔 acba:  $I_2 R_2 - I_4 R_4 - I_G R_G = 0$

对网孔 bcd b:  $I_4 R_4 + I_3 R_3 - E = 0$

对回路 adbca, 沿逆时针方向循行: 应用  $\sum U = 0$  列方程

$$-I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_2 R_2 = 0$$

对回路 cadc, 沿逆时针方向循行:

$$-I_2 R_2 - I_1 R_1 + E = 0$$

**例 1.4** 如图1-18, 若  $U_1 = -2\text{V}$ ,  $U_2 = 8\text{V}$ ,  $U_3 = 5\text{V}$ ,  $U_5 = -3\text{V}$ ,  $R_4 = 4\Omega$ , 求电阻  $R_4$  两端的电压及流过它的电流.

## 1.7 电路中电位的概念及计算

在大学物理的静电场一章中, 我们引入了**电势**这一概念. 在电工学里, 我们通常把电势称为**电位**.

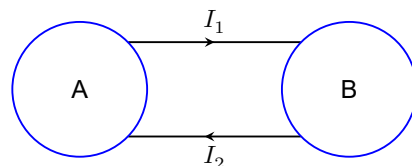


图 1-15 基尔霍夫电流定律推广应用于包围部分电路的 A 或 B

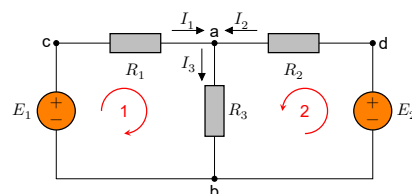


图 1-16 基尔霍夫电压定律图示

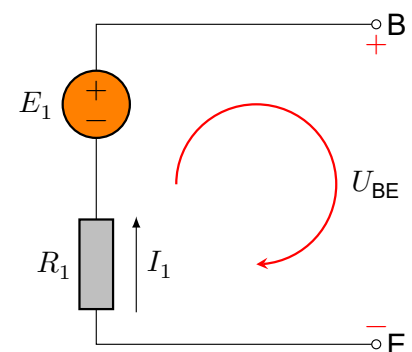


图 1-17 开口电压电路图示

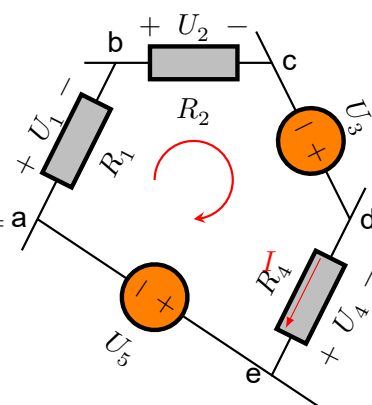


图 1-18

**Q 电位** 电路中某点至参考点的电压, 记为“ $V_x$ ”. 通常设参考点的电位为零.

### 电位计算步骤

- 1) 任选电路中某一点为参考点, 设其电位为零;
- 2) 标出各电流参考方向并计算;
- 3) 计算各点至参考点间的电压即为各点的电位.

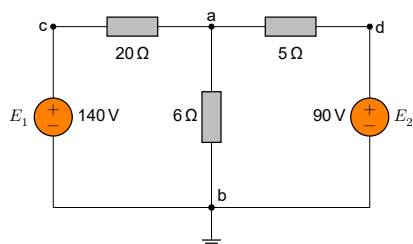


图 1-19

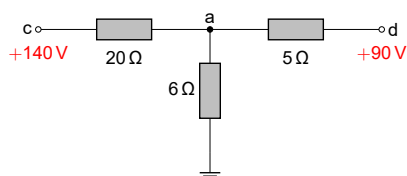


图 1-20

**例 1.5** 分别以  $a, b$  为参考点求图1-19中各点的电位:  $V_a, V_b, V_c, V_d$ .

### 说明

- 1) 电位值是相对的, 参考点选取的不同, 电路中各点的电位也将随之改变;
- 2) 电路中两点间的电压值是固定的, 不会因参考点的不同而变, 即与零电位参考点的选取**无关**.

借助电位的概念可以简化电路作图, 如图1-20.

## 第二章 电路的分析方法

### 2.1 电阻串并联连接的等效变换

#### 2.1.1 电阻的串联

- 1) 各电阻一个接一个地顺序相连;
- 2) 各电阻中通过同一电流;
- 3) **等效电阻**等于各电阻之和:  $R = R_1 + R_2$
- 4) 串联电阻上电压的分配与电阻成正比.

**应用:** 降压、限流、调节电压等.

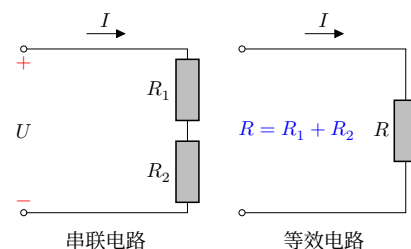


图 2-1 电阻的串联

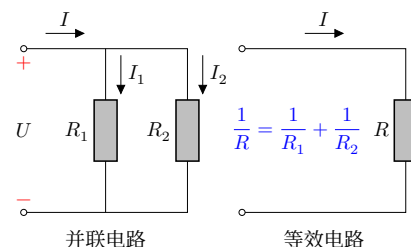


图 2-2 电阻的并联

**思考** 为什么深夜的灯比傍晚的灯要亮?

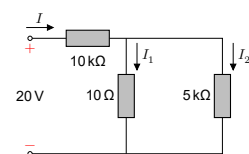


图 2-3

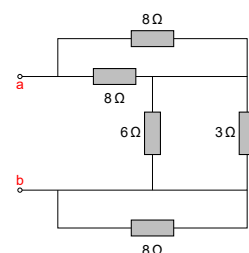


图 2-4

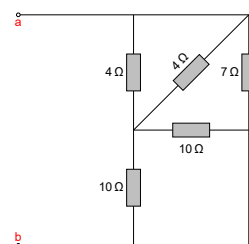


图 2-5

#### 三 总结

- 1) 一般负载都是并联运用的. 负载并联运用时, 它们处在同一电压下, 任何一个负载的工作情况基本上不受其它负载的影响.
- 2) 并联的负载越多 (负载增加), 则总电阻越小, 电路中的总电流和总功率也就越大. 但是每个负载的电流和功率却没有变动.
- 3) 有时不需要精确的计算, 只需要估算. 阻值相差很大的两个电阻串联, **小电阻的分压作用**常可忽略不计; 如果是并联, 则**大电阻的分流作用**常可忽略不计.

**例 2.1** 估算图2-3电路中的电流.

#### 2.1.3 电阻混连电路的计算

**例 2.2** 计算图2-4和图2-5电路中 a、b 间的等效电阻  $R_{ab}$ .

## 2.2 电源的两种模型及其等效变换

### 2.2.1 电压源模型

**Q 电压源模型** 由电动势  $E$  和内阻  $R_0$  **串联** 的电源的电路模型。

- $U = E - IR_0$ ,
- 若  $R_0 = 0$ ,  $U = E$ , 是**理想电压源**。
- 若  $R_0 \ll R_L$ ,  $U \approx E$ , 可近似认为是理想电压源。

#### ≡ 总结 理想电压源特点

- 1) 内阻  $R_0 = 0$ 。
- 2) 输出电压是一定值, 恒等于电动势, 对直流电压,  $U = E$ 。
- 3) 恒压源中的电流由外电路决定。即电流随负载变化。

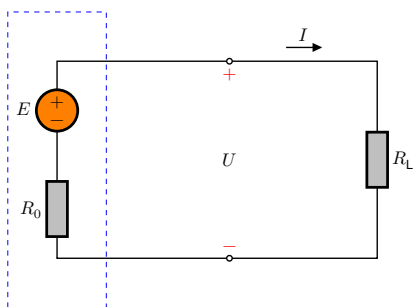


图 2-6 电压源模型

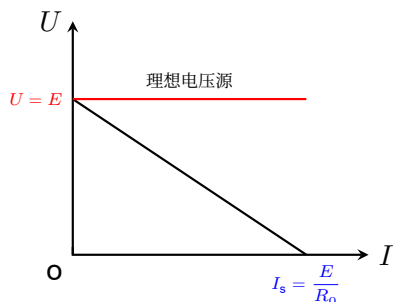


图 2-7 电压源特性

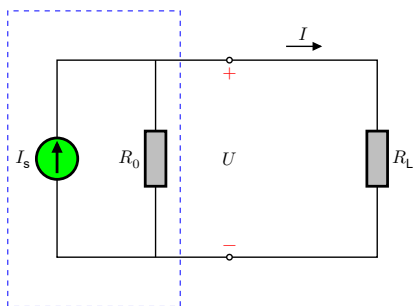


图 2-8 电流源模型

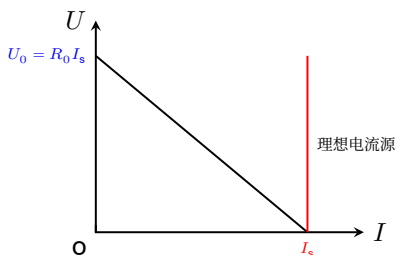


图 2-9 理想电流源

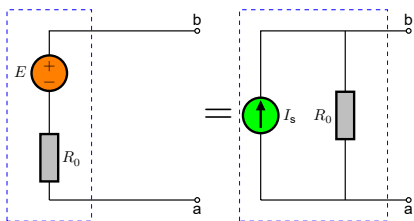


图 2-10 电压源与电流源的等效变换

### 2.2.2 电流源模型

**Q 电流源模型** 电流源是由电流  $I_s$  和内阻  $R_0$  **并联** 的电源的电路模型。

- 1)  $I = I_s - \frac{U}{R_0}$ 。
- 2) 若  $R_0 = \infty$ , 理想电流源:  $I = I_s$ 。
- 3) 若  $R_0 \gg R_L$ ,  $I \approx I_s$ , 可近似认为是理想电流源。

#### ≡ 总结 理想电流源特点

- 1) 内阻  $R_0 = \infty$ 。
- 2) 输出电流是一定值, 恒等于  $I_s$ 。
- 3) 恒流源两端的电压由外电路决定。即电压随负载变化。

### 2.2.3 电源两种模型之间的等效变换

由图2-10左,  $U = E - IR_0$ , 由图2-10右,  $U = I_s R_0 - IR_0$ 。

#### 🎓 等效变换条件

$$E = I_s R_0$$

$$I_s = \frac{E}{R_0}$$

#### 💡 注意

- 1) 电压源和电流源的等效关系**只对外电路**而言, 对电源**内部**则是**不等效**的。
- 2) 等效变换时, 两电源的参考方向要一一对应。
- 3) 理想电压源与理想电流源之间**无**等效关系。
- 4) 任何一个电动势  $E$  和某个电阻  $R$  串联的电路, 都可化为一个电流为  $I_s$  和这个电阻并联的电路。



## 2.3 支路电流法

**例 2.3** 求图2-11中各电路的等效电源.

**例 2.4** 试用电压源与电流源等效变换的方法计算图示电路中  $1\ \Omega$  电阻中的电流.

**例 2.5** 电路如图2-13.  $U_1 = 10\text{ V}$ ,  $I_S = 2\text{ A}$ ,  $R_1 = 1\ \Omega$ ,  $R_2 = 2\ \Omega$ ,  $R_3 = 5\ \Omega$ ,  $R = 1\ \Omega$ . (1) 求电阻  $R$  中的电流  $I$ ; (2) 计算理想电压源  $U_1$  中的电流  $I_{U_1}$  和理想电流源  $I_S$  两端的电压  $U_{I_S}$ ; (3) 分析功率平衡.

## 2.3 支路电流法

**支路电流法** 以支路电流为未知量、应用基尔霍夫定律 (KCL, KVL) 列方程组求解.

以图2-14为例. 对该电路,

- **支路数**  $b = 3$ ,
- **结点数**  $n = 2$ ,
- **回路数**  $= 3$ ,
- 单孔回路 (**网孔**)  $= 2$ .

### 支路电流法的解题步骤

- 1) 有多少支路, 就需要列多少个方程.
- 2) 在图中标出各支路电流的参考方向, 对选定的回路标出回路循行方向.
- 3) 应用 KCL 对结点列出  $n - 1$  个独立的结点电流方程.
- 4) 应用 KVL 对回路列出  $b - (n - 1)$  个独立的回路电压方程.
- 5) 联立求解  $b$  个方程, 求出各支路电流.

- 1) 对结点 a,  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$
- 2) 对网孔 1,  $I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1$
- 3) 对网孔 2,  $I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$

**例 2.6** 如图2-15, 试求检流计中的电流  $I_G$ .

### 总结

支路电流法是电路分析中最基本的方法之一, 但当支路数较多时, 所需方程的个数较多, 求解不方便.

**例 2.7** 如图2-16, 试求各支路电流.

### 注意

- 1) 当**支路中含有恒流源时**, 若在列 KVL 方程时, **所选回路中不包含恒流源支路**, 这时, 电路中有几条支路含有恒流源, 则可少列几个 KVL 方程.
- 2) 若**所选回路中包含恒流源支路**, 则因恒流源两端的电压未知,

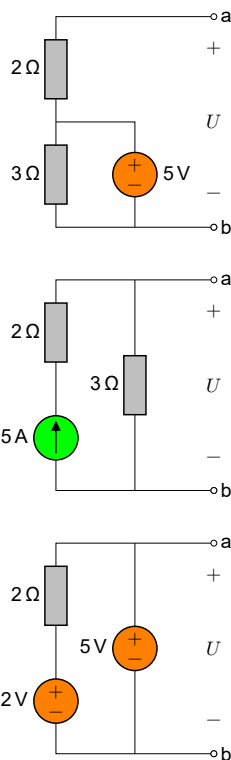


图 2-11

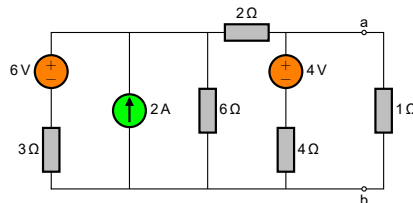


图 2-12

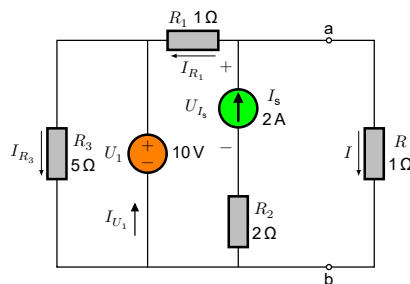


图 2-13

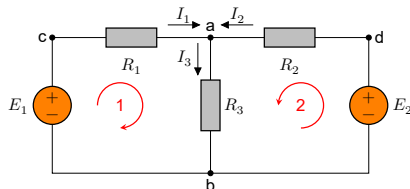


图 2-14 支路电流法示意图

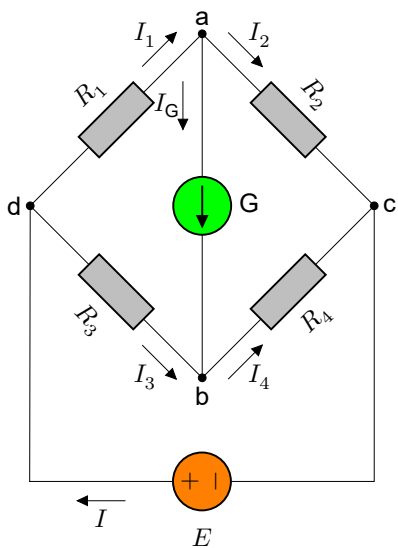


图 2-15

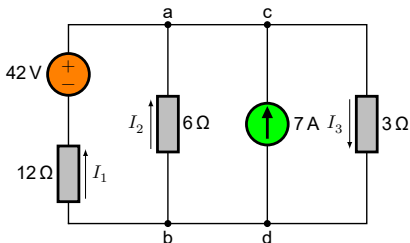


图 2-16

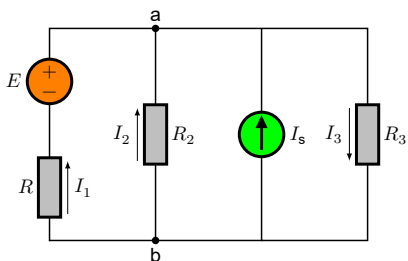


图 2-17 电路中只含有两个结点, 若设 b 为参考结点, 则电路中只有一个未知的结点电压

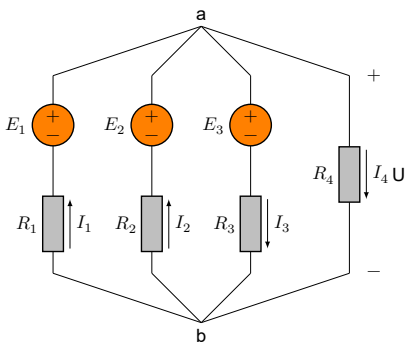


图 2-18 结点电压方程的推导用图

所以, 有一个恒流源就出现一个未知电压, 因此, 在此种情况下不可少列 KVL 方程。

## 2.4 结点电压法

**结点电压法** 任选电路中某一结点为零电位参考点 (用  $\perp$  表示), 其它各结点对参考点的电压, 称为**结点电压**。结点电压的**参考方向**从结点指向参考结点。以结点电压为未知量, 列方程求解。

在求出结点电压后, 可应用基尔霍夫定律或欧姆定律求出各支路的电流或电压。

结点电压法适用于**支路数较多, 结点数较少**的电路 (图2-17)。

### 2.4.1 2 个结点的结点电压方程的推导

设:  $V_b = 0$  V, 结点电压为  $U$ , 参考方向从 a 指向 b。

- 1) 用 KCL 对结点 a 列方程  $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$
- 2) 应用欧姆定律求各支路电流

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{-E_3 + U}{R_3}$$

$$I_4 = \frac{U}{R_4}$$

- 3) 将各电流代入 KCL 方程则有

$$\frac{E_1 - U}{R_1} + \frac{E_2 - U}{R_2} = \frac{-E_3 + U}{R_3} + \frac{U}{R_4} \Rightarrow$$

$$U = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

即结点电压公式

$$U = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}}$$

#### 注意

- 1) 上式仅适用于两个结点的电路。
- 2) 分母是各支路电导之和, 恒为正值; 分子中各项可以为正, 也可以为负。
- 3) 当**电动势** $E$  与结点电压的参考方向**相反**时取**正**号, **相同**时则取**负**号, 而**与各支路电流的参考方向无关**。

**例 2.8** 如图2-16, 试求各支路电流。

## 2.5 叠加定理

### 叠加定理

对于线性电路, 任何一条支路的电流, 都可以看成是由电路中各个电源 (电压源或电流源) 分别作用时, 在此支路中所产生的电流的代数和。

如图2-19,  $E_1$  单独作用时

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + R_2 // R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} E_1$$

$E_2$  单独作用时

$$I_1'' = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \times \frac{E_2}{R_2 + R_1 // R_3} = \frac{R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} E_2$$

$$I_1 = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_1 - \left( \frac{R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_2$$

同理:

$$I_2 = -I_2' + I_2'' \quad I_3 = I_3' + I_3''$$

### 注意

- 1) 叠加定理只适用于线性电路。
- 2) 线性电路的电流或电压均可用叠加定理计算, 但**功率  $P$  不能用叠加定理计算**。
- 3) 不作用电源的处理:  $E = 0$ , 即将  $E$  短路;  $I_s = 0$ , 即将  $I_s$  开路。
- 4) 解题时要标明各支路电流、电压的参考方向。若分电流、分电压与原电路中电流、电压的参考方向**相反**时, 叠加时相应项前要**带负号**。
- 5) 应用叠加定理时可把电源分组求解, 即每个分电路中的电源个数可以多于一个。

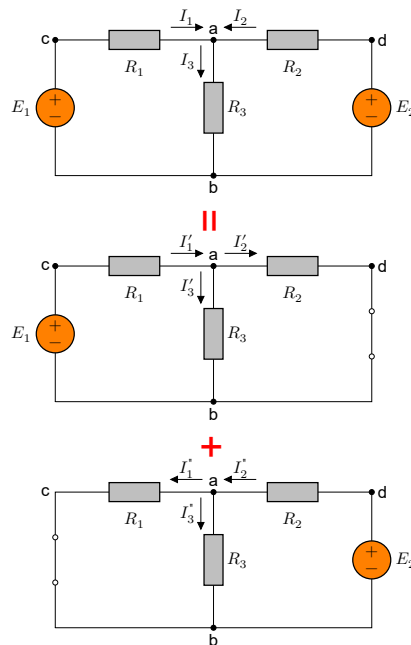


图 2-19 叠加定理

**例 2.9** 如图2-20, 已知  $E = 10\text{ V}$ ,  $I_s = 1\text{ A}$ ,  $R_1 = 10\ \Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 5\ \Omega$ , 试用叠加原理求流过  $R_2$  的电流  $I_2$  和理想电流源  $I_s$  两端的电压  $U_{I_s}$ 。

## 2.6 戴维宁定理与诺顿定理

**二端网络** 具有两个出线端的部分电路。

**无源二端网络**: 二端网络中没有电源。

**有源二端网络**: 二端网络中含有电源。

### 2.6.1 戴维宁定理

#### 戴维宁定理

任何一个有源二端**线性**网络都可以用一个电动势为  $E$  的理想电压源和内阻  $R_0$  串联的电源来等效代替。

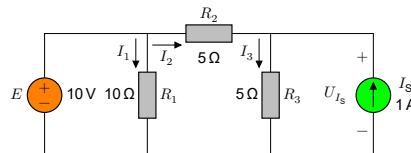


图 2-20

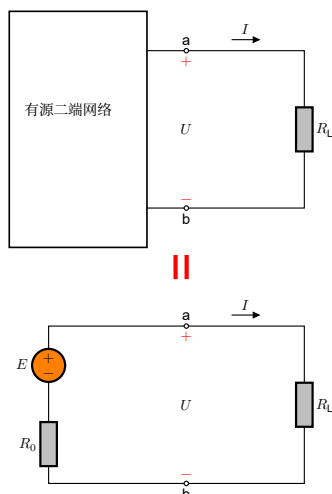


图 2-21 戴维宁定理

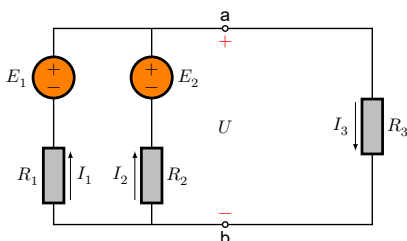


图 2-22

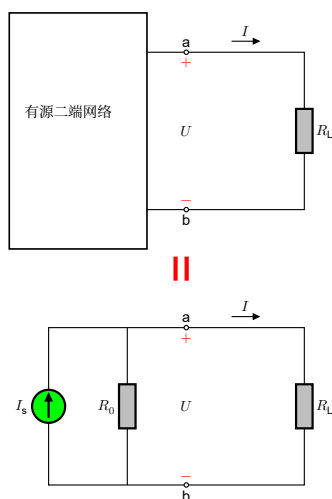


图 2-23 诺顿定理

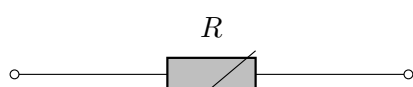


图 2-24

1) **等效电源的内阻  $R_0$**  等于有源二端网络中所有电源均除去 (理想电压源短路, 理想电流源开路) 后所得到的**无源二端网络 a、b 两端之间的等效电阻**.

2) **等效电源的电动势  $E$**  就是有源二端网络的开路电压  $U_0$ , 即将**负载断开后 a、b 两端之间的电压**.

**例 2.10** 电路如图2-22, 已知  $E_1 = 40\text{ V}$ ,  $E_2 = 20\text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = 4\ \Omega$ ,  $R_3 = 13\ \Omega$ , 试用戴维宁定理求电流  $I_3$ .

**例 2.11** 如图2-15, 已知:  $R_1 = 5\ \Omega$ ,  $R_2 = 5\ \Omega$ ,  $R_3 = 10\ \Omega$ ,  $R_4 = 5\ \Omega$ ,  $E = 12\text{ V}$ ,  $R_G = 10\ \Omega$ , 试用戴维宁定理求检流计中的电流  $I_G$ .

## 2.6.2 诺顿定理

### 诺顿定理

任何一个有源二端线性网络都可以用一个电流为  $I_s$  的理想电流源和内阻  $R_0$  并联的电源来等效代替.

1) **等效电源的内阻  $R_0$**  等于有源二端网络中所有电源均除去 (理想电压源短路, 理想电流源开路) 后所得到的**无源二端网络 a、b 两端之间的等效电阻**.

2) **等效电源的电流  $I_s$**  就是有源二端网络的短路电流, 即将**a、b 两端短接后其中的电流**.

**例 2.12** 如图2-15, 已知:  $R_1 = 5\ \Omega$ ,  $R_2 = 5\ \Omega$ ,  $R_3 = 10\ \Omega$ ,  $R_4 = 5\ \Omega$ ,  $E = 12\text{ V}$ ,  $R_G = 10\ \Omega$ , 试用诺顿定理求检流计中的电流  $I_G$ .

## 2.7 非线性电阻电路的分析

### 2.7.1 非线性电阻

**线性电阻** 电阻两端的电压与通过的电流成正比. 线性电阻值为一常数.

**非线性电阻** 电阻两端的电压与通过的电流不成正比. 非线性电阻值不是常数. 画电路图时用图2-24符号表示非线性电阻.

由于非线性电阻的阻值随电压或电流而变化, 计算其电阻时必须指明其工作电流或工作电压.

非线性电阻元件的电阻有两种表示形式.

1) **静态电阻**(直流电阻):  $R = \frac{U}{I} = \tan \alpha$ . 等于工作点  $Q$  的电压  $U$  与电流  $I$  之比.

2) **动态电阻**(交流电阻)  $r = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} = \tan \beta$ . 等于工作点  $Q$  附近电压, 电流微变量之比的极限.

由于非线性电阻的阻值不是常数, 在分析与计算非线性电阻电路时一般采用图解法.

## 第三章 电路的暂态分析

前两章中, 我们接触到的电路可归为电阻元件电路. 电源断开或接通时, 电路马上处于稳定状态. 但当电路中含有电感或电容元件时, 电路并不会立即处于稳态, 一般需要一个短暂时间才能到达稳态, 即存在一个暂态过程.

🔍 **稳定状态** 在指定条件下电路中电压、电流已达到稳定值.

🔍 **暂态过程** 电路从一种稳态变化到另一种稳态的过渡过程.

研究暂态过程有如下实际意义:

- 1) 利用电路暂态过程产生特定波形的电信号, 如锯齿波、三角波、尖脉冲等, 应用于电子电路.
- 2) 控制、预防可能产生的危害. 暂态过程开始的瞬间可能产生过电压、过电流使电气设备或元件损坏.

### 3.1 电阻元件、电感元件、电容元件

#### 3.1.1 电阻元件

金属导体的电阻与导体的尺寸及导体材料的电性能有关, 表达式为:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

电阻的能量

$$W = \int_0^t ui \, dt = \int_0^t Ri^2 \, dt \geq 0$$

#### ≡ 总结

电能全部消耗在电阻上, 转换为热能散发. 电阻是**耗能**元件.

#### 3.1.2 电感元件

电感

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Psi}{i} \quad (\text{H})$$

自感电动势

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

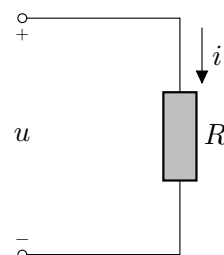


图 3-1 电阻元件电路

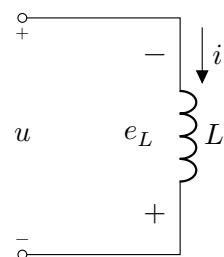


图 3-2 电感元件电路

根据基尔霍夫定律:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow$$

$$\int_0^t ui \, dt = \int_0^t Li \, di = \frac{1}{2} Li^2$$

磁场能

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

### 总结

电感将电能转换为磁场能储存在线圈中, 当电流增大时, 磁场能增大, 电感元件从电源取用能量; 当电流减小时, 磁场能减小, 电感元件向电源放还能量. 电感元件不消耗能量, 是**储能**元件.

### 3.1.3 电容元件

$$C = \frac{q}{u} \quad (\text{F})$$

当电压  $u$  变化时, 在电路中产生电流:

$$i = C \frac{du}{dt}$$

将上式两边同乘上  $u$ , 并积分, 则得:

$$\int_0^t ui \, dt = \int_0^t Cu \, du = \frac{1}{2} Cu^2 \Rightarrow W = \frac{1}{2} Cu^2$$

### 总结

电容将电能转换为电场能储存在电容中, 当电压增大时, 电场能增大, 电容元件从电源取用能量; 当电压减小时, 电场能减小, 电容元件向电源放还能量. 电容元件不消耗能量, 也是**储能**元件.

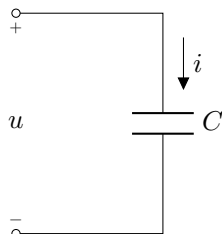


图 3-3 电容元件电路

## 3.2 储能元件和换路定则

### 总结

储能元件的能量不能跃变会导致电路的**暂态过程**.

### 换路定则

电感元件上的电流和电容元件上的电压不能跃变.

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

$$u_C(0_-) = u_C(0_+)$$

$t = 0$ : 换路瞬间;  $t = 0_-$ : 换路前的终了瞬间;  $t = 0_+$ : 换路后的初始瞬

### 3.3 RC 电路的响应

间.

**例 3.1** 确定图3-4所示电路中各电流和电压的初始值. 设开关闭合前电感元件和电容元件都未储能.

#### 总结

- 1) 换路瞬间,  $u_C, i_L$  不能跃变, 但其它电量均可以跃变.
- 2) 换路前, 若储能元件没有储能, 换路瞬间 ( $t = 0_+$  的等效电路中), 可视**电容元件短路**, **电感元件开路**.
- 3) 换路前, 若  $u_C(0_-) \neq 0$ , 换路瞬间 ( $t = 0_+$  等效电路中), 电容元件可用一理想电压源替代, 其电压为  $u_C(0_+)$ ; 换路前, 若  $i_L(0_-) \neq 0$ , 在  $t = 0_+$  等效电路中, 电感元件可用一理想电流源替代, 其电流为  $i_L(0_+)$ .

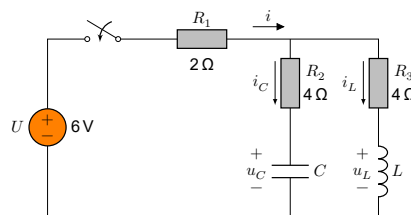


图 3-4

### 3.3 RC 电路的响应

#### 3.3.1 RC 电路的零输入响应

如图3-5, 换路前电路已处稳态

$$u_C(0_-) = U$$

$t = 0$  时, 开关  $S \rightarrow 1$ , 电容  $C$  经电阻  $R$  放电.

- 1) 电容电压  $u_C$  的变化规律 ( $t \geq 0$ ):

- 1) 列 KVL 方程:

$$u_R + u_C = 0$$

$$u_R = iR \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

$$\text{代入上式得} \quad RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

- 2) 解得

$$u_C = U e^{-\frac{t}{RC}} = u_C(0_+) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0$$

- 2) 电流及电阻电压的变化规律:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

电阻电压:

$$u_R = i_C R = -U e^{-\frac{t}{RC}}$$

#### 时间常数

$$\tau = RC$$

单位: s, **时间常数**  $\tau$  决定电路暂态过程变化的**快慢**.

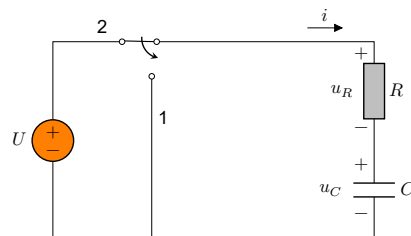


图 3-5

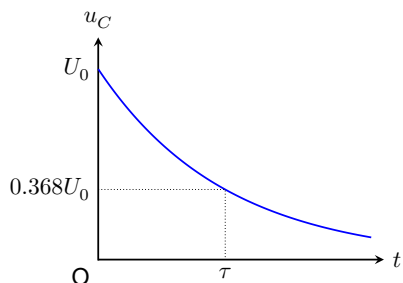


图 3-6  $u_C$  的变化曲线

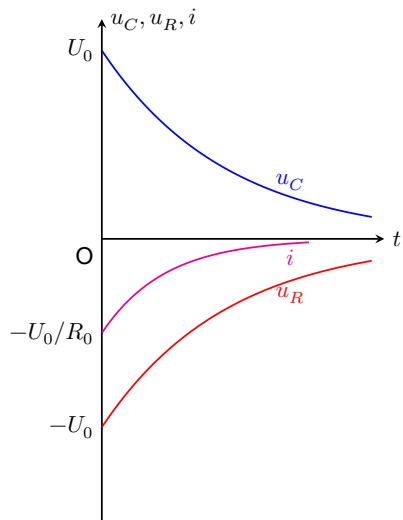


图 3-7  $u_C, u_R, i$  的变化曲线

物理意义:

$$u_C(t) = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$$

当  $t = \tau$  时,  $u_C = Ue^{-1} = 36.8\%$ . 即时间常数  $\tau$  等于电压  $u_C$  衰减到初始值  $U_0$  的 **36.8%** 所需的时间.

理论上认为  $t \rightarrow \infty, u_C \rightarrow 0$  电路达稳态, 工程上认为  $t = (3 \sim 5)\tau, u_C \rightarrow 0$  电容放电基本结束.

### 3.3.2 RC 电路的零状态响应

**零状态响应** 储能元件的初始能量为零, 仅由电源激励所产生的电路的响应.

如图3-8, 在  $t = 0$  时, 合上开关 S, 此时, 电路实为输入一个如图3-9所示的阶跃电压  $u$ . 电压  $u$  表达式

$$u = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ U, & t \geq 0 \end{cases}$$

1)  $u_C$  的变化规律:

1) 列 KVL 方程:

$$\begin{aligned} u_R + u_C &= U \\ RC \frac{du_C}{dt} + u_C &= U \end{aligned}$$

2) 解方程

$$u_C = U - Ue^{-\frac{1}{RC}t} = U(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}) = U(1 - e^{-t/\tau})$$

2) 电流  $i_C$  的变化规律:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

3) 电压  $u_R$  的变化规律:

$$u_R = Ri = Ue^{-t/\tau}$$

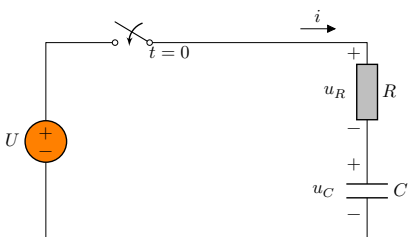


图 3-8 RC 充电电路

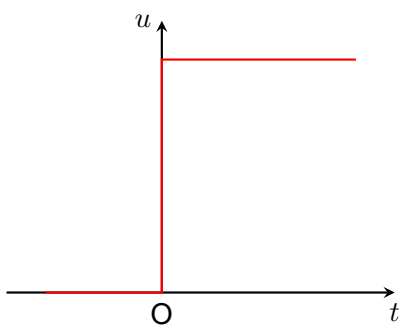


图 3-9 阶跃电压

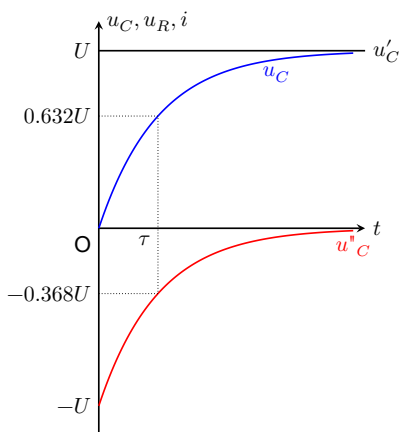


图 3-10 RC 充电电路的  $u_C$  变化曲线

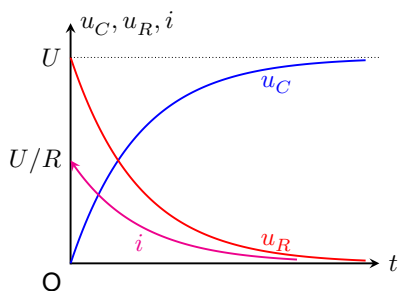


图 3-11 RC 充电电路的  $u_i, u_R$  变化曲线

#### 时间常数 $\tau$ 的物理意义

当  $t = \tau$  时

$$u_C(\tau) = U(1 - e^{-1}) = 63.2\%U$$

$\tau$  表示电容电压  $u_C$  从初始值上升到稳态值的 **63.2%** 时所需的时间.

### 3.3.3 RC 电路的全响应

**全响应** 电源激励、电容元件的初始状态**均不为零**时电路的响应.



### 3.4 一阶线性电路暂态分析的三要素法

#### 叠加定理

全响应 = 零输入响应 + 零状态响应 = 稳态分量 + 暂态分量

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} + U \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (t \geq 0)$$

### 3.4 一阶线性电路暂态分析的三要素法

**一阶线性电路** 仅含一个储能元件或可等效为一个**储能元件**的线性电路, 无论简繁, 它的微分方程都是一**阶常系数线性微分方程**. 对应的电路称为 **一阶线性电路**.

#### 三要素法

在直流电源激励的情况下, 一阶线性电路微分方程解的通用表达式:

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

$f(t)$ : 代表一阶电路中任一电压、电流函数

$$\begin{cases} f(0_+): & \text{初始值} \\ f(\infty): & \text{稳态值} \\ \tau: & \text{时间常数} \end{cases}$$

利用求三要素的方法求解暂态过程, 称为**三要素法**. 一阶电路都可以应用三要素法求解, 在求得  $f(0_+)$ 、 $f(\infty)$  和  $\tau$  的基础上, 可直接写出电路的响应 (电压或电流).

#### ② 如何确定响应中的三要素

- 1) 稳态值  $f(\infty)$  的计算: 求换路后电路中的电压和电流, 其中**电容**  $C$  视为**开路**, **电感**  $L$  视为**短路**, 即求解直流电阻性电路中的电压和电流.
- 2) 初始值  $f(0_+)$  的计算.
  - 1) 由  $t = 0_-$  电路求  $u_C(0_-), i_L(0_-)$ .
  - 2) 根据换路定则求出  $u_C(0_+) = u_C(0_-), i_L(0_+) = i_L(0_-)$ . 注意: 在换路瞬间  $t = 0_+$  的等效电路中, 如果  $u_C(0_-) = U_0 \neq 0$ , 电容元件用恒压源代替, 其值等于  $U_0$ , 若  $u_C(0_-) = 0$ , 电容元件视为短路. 如果  $i_L(0_-) = I_0 \neq 0$ , 电感元件用恒流源代替, 其值等于  $I_0$ , 若  $i_L(0_-) = 0$ , 电感元件视为开路.
- 3) 由  $t = 0_+$  时的电路, 求所需其它量的  $u(0_+), i(0_+)$
- 3) 时间常数  $\tau$  的计算. 对于一阶 RC 电路,  $\tau = R_0 C$ .

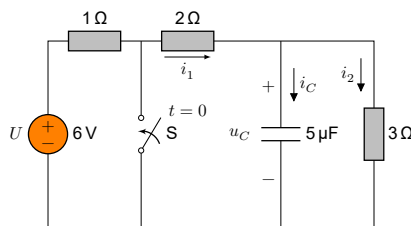


图 3-12

**例 3.2** 电路如图3-12, 开关  $S$  闭合前电路已处于稳态.  $t = 0$  时  $S$

闭合, 试求:  $t \geq 0$  时电容电压  $u_C$  和电流  $i_C$ 、 $i_1$  和  $i_2$ 。

## 第 四 章 正弦交流电路

### 4.1 正弦电压与电流

🔍 **正弦量** 随时间按**正弦**规律做周期变化的量。

🔍 **正弦交流电路** 含有正弦电源 (**激励**) 而且电路各部分所产生的电压和电流 (**响应**) 均按**正弦**规律变化的电路。

#### 4.1.1 周期与角频率

🔍 **周期  $T$**  正弦量变化一周所需的时间。

频率:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz})$$

🔍 **角频率**

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{Hz})$$

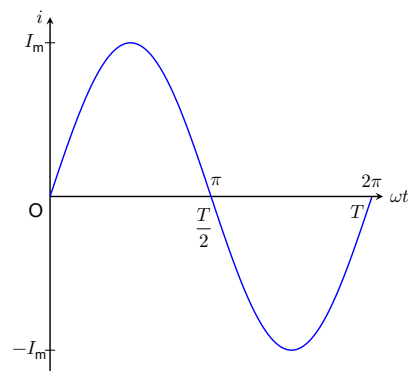


图 4-1 正弦电流

#### 4.1.2 幅值与有效值

🔍 **瞬时值** 正弦量在任一瞬间的值。

🔍 **幅值** **瞬时值**中的最大值。用  $I_m, U_m, E_m$  表示。

🔍 **有效值** 与交流**热效应相等**的直流定义为交流电的**有效值**。

$$\int_0^T i^2 R dt = I^2 RT \Rightarrow I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

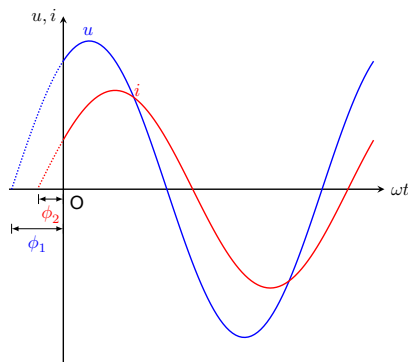


图 4-2 相位差.  $u$  的初相位大于  $i$  的初相位, 说明  $u$  比  $i$  要提前到达幅值

#### 🔍 注意

交流电压、电流表测量数据为**有效值**。交流设备名牌标注的电压、电流均为有效值。

#### 4.1.3 相位与初相位

正弦量所取计时起点不同, 其初始值 ( $t = 0$ ) 时的值及到达幅值或某一特定时刻的值就不同。

🔍 **相位与初相位**

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

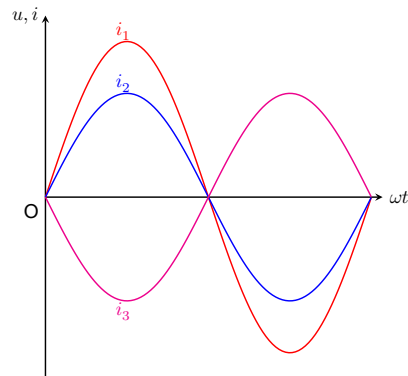


图 4-3 同相与反相

$\omega t + \phi$  称为**相位**。正弦量在  $t = 0$  时的相位  $\phi$  称为**初相位**。

**Q 相位差** 两同频率的正弦量之间的**初相位之差**。如为  $0$  则称两者**同相**，如为  $180^\circ$  则称两者**反相**。

## 4.2 正弦量的相量表示法

正弦量有如下三种表示方法：

- 1) 波形图。
- 2) 三角函数： $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$
- 3) **相量**： $\dot{U} = U \angle \psi$

相量表示法是基于复数的表示法，这里先复习一下复数。

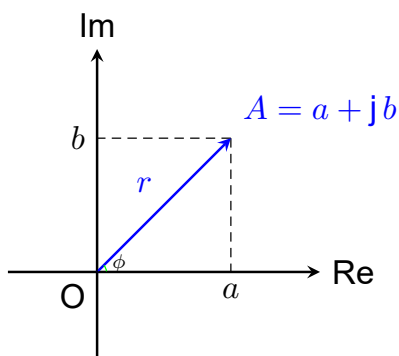


图 4-4 复数表示

### 正弦量的相量表示法：用复数表示正弦量

- 1) 代数式： $A = a + jb = A = r \cos \psi + jr \sin \psi$
- 2) 指数式： $A = re^{j\psi}$
- 3) 极坐标式： $A = r \angle \psi$

### 总结

一个正弦量由**幅值**(或有效值) 和**初相位**就可确定。复数的**辐角**即为正弦量的**初相角**。复数的**模**即为正弦量的**幅值**(或有效值)。

**Q 相量** 为了与一般的复数相区别，把表示正弦量的复数称为相量，表示时在大写字母上加  $\cdot$ 。如正弦电压  $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$  用相量式表示为

$$\dot{U} = U(\cos \phi + j \sin \phi) = Ue^{j\psi} = U \angle \psi$$

**思考** 正弦电压  $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$  等于相量  $\dot{U}$  吗？

### 相量的两种表示形式

- 1) 相量式： $\dot{U} = Ue^{j\psi} = U \angle \psi = U(\cos \psi + j \sin \psi)$
- 2) 相量图：把相量表示在复平面的图形。

只有同频率的正弦量才能画在同一相量图上。

**例 4.1** 已知同频率的正弦量的解析式分别为  $i = 10 \sin(\omega t + 30^\circ)$ ,  $u = 220\sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ)$ ，写出电流和电压的相量  $\dot{I}$ ,  $\dot{U}$ ，并绘出相量图。

## 4.3 单一参数的交流电路

### 4.3.1 电阻元件的交流电路

#### 电压与电流的关系

根据欧姆定律： $u = iR$

设  $u = U_m \sin \omega t$

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = \frac{\sqrt{2}U}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

- 1) 频率相同。

### 4.3 单一参数的交流电路

2) 大小关系:  $I = \frac{U}{R}$ .

3) 相位相同, 相位差为  $0$ ,  $i = I \angle 0^\circ$ ,  $\dot{U} = U \angle 0^\circ = \dot{I}R$ .

#### 功率关系

**瞬时功率**  $p$ : 瞬时电压与瞬时电流的乘积.

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

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

$$p = u \cdot i$$

$$= U_m I_m \sin^2 \omega t$$

$$= \frac{1}{2} U_m I_m (1 - \cos 2\omega t)$$

#### 总结

$p \geq 0$  (耗能元件), 且随时间变化.

#### 平均功率 (有功功率)

瞬时功率在一个周期内的平均值.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_m I_m (1 - \cos 2\omega t) \, dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T UI (1 - \cos 2\omega t) \, dt = UI$$

$$P = U \times I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ 单位: 瓦 (W)}$$

#### 注意

通常铭牌数据或测量的功率均指**有功功率**.

**例 4.2** 一只额定电压为 220 V, 功率为 100 W 的电烙铁, 误接在 380 V 的交流电源上, 问此时它接受的功率为多少? 是否安全? 若接到 110 V 的交流电源上, 功率又为多少?

### 4.3.2 电感元件的交流电路

#### 电压与电流的关系

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt}$$

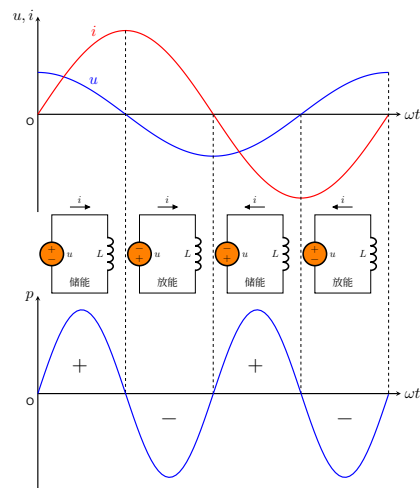


图 4-5 电感元件的交流电路

设:  $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$ , 则

$$\begin{aligned} u &= L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} \\ &= \sqrt{2}I\omega L \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

- 1) 频率相同.
- 2)  $U = I\omega L$ .
- 3) 电压超前电流  $90^\circ$ , 相位差  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$ .

### 感抗

$$X_L = \omega L = 2\pi fL(\Omega)$$

则

$$U = I\omega L = IX_L$$

### $X_L$ 与 $f$ 的关系

$$X_L = 2\pi fL \begin{cases} \text{直流: } f = 0, X_L = 0, \text{ 电感 } L \text{ 视为短路} \\ \text{交流: } f \uparrow \rightarrow X_L \uparrow \end{cases}$$

### 总结

电感  $L$  具有**通直阻交**的作用.

相量式:

$$\dot{U} = j\dot{I}\omega L = \dot{I} \cdot (jX_L) \quad \text{电感电路相量形式的欧姆定律}$$

### 功率关系

#### 瞬时功率

$$p = i \cdot u = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin(2\omega t)$$

#### 平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin(2\omega t) dt = 0 \quad \text{非耗能元件}$$

**无功功率** 无功功率 $Q$  用于衡量电感电路中能量交换的规模. 规定**无功功率**的等于瞬时功率  $p_L$  的**幅值**. **平均功率**则称为**有功功率**.

$$Q = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L} \quad \text{单位: var}$$

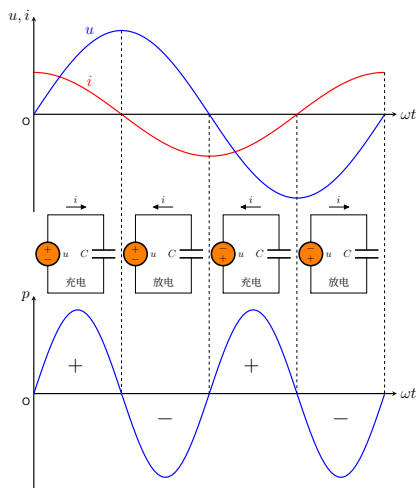


图 4-6 电容元件的交流电路

## 4.3.3 电容元件的交流电路

## 📖 电流与电压的关系

$$i = C \frac{du}{dt}$$

设  $u = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$  则

$$i = C \frac{du}{dt} = \sqrt{2}UC\omega \cos(\omega t) = \sqrt{2}UC\omega \sin(\omega t + 90^\circ)$$

- 1) 频率相同.
- 2)  $I = U\omega C$ .
- 3) 电流超前电压  $90^\circ$ , 相位差  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$ .

## 🔍 容抗

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} (\Omega)$$

则

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

📖  $X_L$ 

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \begin{cases} \text{直流: } X_C \rightarrow \infty \text{ 电容 } C \text{ 视为开路} \\ \text{交流: } f \uparrow \rightarrow X_C \downarrow \end{cases}$$

## ≡ 总结

电容  $C$  具有**隔直通交**的作用.

相量式:

$$\dot{U} = -jI \frac{1}{\omega C} = -jIX_C \quad \text{电容电路相量形式的欧姆定律}$$

## 📖 功率关系

## 瞬时功率

$$p = i \cdot u = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin(2\omega t)$$

## 平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin(2\omega t) dt = 0 \quad \text{非耗能元件}$$

🔍 **电容性无功功率** 无功功率  $Q$  用于衡量电容电路中能量交换的规模.

$$Q = -UI = -I^2 X_L = -\frac{U^2}{X_C} \quad \text{单位: var}$$

注意这里电容性无功功率为**负值**, 而电感性无功功率为**正值**.

**例 4.3** 下图中电容  $C = 23.5 \mu\text{F}$ , 接在电源电压  $U = 220 \text{ V}$ 、频率为  $50 \text{ Hz}$ 、初相为零的交流电源上, 求电路中的电流  $i$ 、 $P$  及  $Q$ . 该电容的额定电压最少应为多少伏?

## 4.4 电阻、电感与电容元件串联交流电路

### 电流与电压的关系

直流电路两电阻串联时,

$$U = IR_1 + IR_2$$

RLC 串联交流电路中, 设  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t)$ , 即  $\dot{I} = I \angle 0^\circ$  则

$$\dot{U}_R = \dot{I}R$$

$$\dot{U}_L = \dot{I}(jX_L)$$

$$\dot{U}_C = \dot{I}(-jX_C)$$

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \\ &= \dot{I}R + \dot{I}jX_L + \dot{I}(-jX_C) \\ &= \dot{I}[R + j(X_L - X_C)]\end{aligned}$$

根据  $\dot{U} = \dot{I}[R + j(X_L - X_C)]$ , 令

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (\text{阻抗})$$

### 复数形式的欧姆定律

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

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U \angle \phi_u}{I \angle \phi_i} = |Z| \angle \varphi = \frac{U}{I} \angle \phi_u - \phi_i$$

**阻抗模:**  $|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

**阻抗角:**  $\varphi = \phi_u - \phi_i = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

### 注意

$Z$  是一个复数, 不是相量, 上面不能加点.

### 总结

阻抗角由电路参数决定.

1)  $X_L > X_C$ :  $\varphi > 0$ ,  $u$  超前  $i$ , 呈**感性**.



#### 4.4 电阻、电感与电容元件串联交流电路

- 2)  $X_L < X_C$ :  $\varphi < 0$ ,  $u$  滞后  $i$ , 呈**容性**.
- 3)  $X_L = X_C$ :  $\varphi = 0$ ,  $u$ 、 $i$  同相, 呈**电阻性**.

#### 功率关系

##### 瞬时功率

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i = U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin(\omega t) \\ &= \underbrace{U_m I_m \cos \varphi \sin^2(\omega t)}_{\text{耗能元件上的瞬时功率}} + \underbrace{UI \sin \varphi \sin(2\omega t)}_{\text{储能元件上的瞬时功率}} \end{aligned}$$

##### 平均功率 P(有功功率)

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)] \, dt \\ &= \boxed{UI \cos \varphi} = U_R I = I^2 R \end{aligned}$$

**功率因数:**  $\cos \varphi$ , 用来衡量对电源的利用程度.

##### 无功功率 Q

$$Q = (U_L - U_C)I = \underbrace{I^2(X_L - X_C)}_{\text{电感和电容与电源之间的能量交换}} = \boxed{UI \sin \varphi}$$

#### 视在功率

电路中总电压与总电流有效值的乘积.

$$S = UI = |Z|I^2 \quad (\text{V} \cdot \text{A})$$

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

#### 注意

- 1)  $S_N = U_N I_N$  称为发电机、变压器等供电设备的容量, 用来衡量发电机、变压器可能提供的**最大有功功率**.
- 2)  $P, Q, S$  都不是正弦量, 不能用相量表示.

#### 阻抗三角形, 电压三角形, 功率三角形

将**电压三角形**的有效值同乘  $I$  得到**功率三角形**, 将电压三角形的有效值同除  $I$  得到**阻抗三角形**.

**例 4.4** 在 RLC 串联交流电路中, 已知

$$R = 30 \, \Omega, L = 127 \, \text{mH}, C = 40 \, \mu\text{F}, u = 220\sqrt{2} \sin(314t + 20^\circ) \, \text{V}$$

求: (1) 电流的有效值  $I$  与瞬时值  $i$ ; (2) 各部分电压的有效值与瞬时值; (3) 作相量图; (4) 有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和视在功率  $S$ .

**例 4.5** 在 RC 串联交流电路中, 已知

$$R = 2 \, \text{k}\Omega, V = 0.1 \, \mu\text{F}, \text{输入电压 } U_1 = 1 \, \text{V}, f = 500 \, \text{Hz}$$

(1) 求输出电压  $U_2$ , 并讨论输入和输出电压之间的大小和相位关系; (2) 当将电容  $C$  改为  $20\ \mu\text{F}$  时, 求 (1) 中各项; (3) 当将频率改为  $4000\ \text{Hz}$  时, 再求 (1) 中各项.

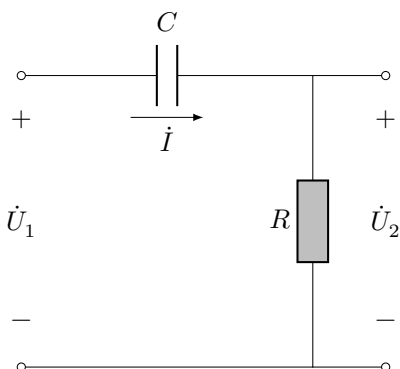


图 4-7

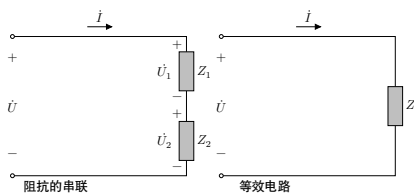


图 4-8 阻抗的串联

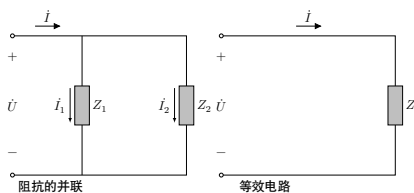


图 4-9 阻抗的并联

## 4.5 阻抗的串联与并联

### 4.5.1 阻抗的串联

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

令  $Z = Z_1 + Z_2$ , 则

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

分压公式

$$\dot{U}_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U} \quad \dot{U}_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U}$$

⚠ 注意

对于阻抗模, 一般  $|Z| \neq |Z_1| + |Z_2|$

例 4.6 有两个阻抗  $Z_1 = 6.16 + j9\ \Omega$ ,  $Z_2 = 2.5 - j4\ \Omega$ , 它们串联接在  $\dot{U} = 220\angle 30^\circ\ \text{V}$  的电源; 求  $\dot{I}$ ,  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$ , 并作相量图.

### 4.5.2 阻抗的并联

$$\left. \begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_1} + \frac{\dot{U}}{Z_2} \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}}{Z} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \Rightarrow Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

等效阻抗计算通式

$$\frac{1}{Z} = \sum \frac{1}{Z_k}$$

⚠ 注意

对于阻抗模, 一般  $\frac{1}{|Z|} \neq \frac{1}{|Z_1|} + \frac{1}{|Z_2|}$ .

分流公式

$$\dot{I}_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{I} \quad \dot{I}_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{I}$$

例 4.7 有两个阻抗  $Z_1 = 3 + j4\ \Omega$ ,  $Z_2 = 8 - j6\ \Omega$ , 它们并联接在  $\dot{U} = 220\angle 0^\circ\ \text{V}$  的电源上; 求  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{I}$  并作相量图.

## 4.6 交流电路的频率特性

若正弦量用相量  $\dot{U}, \dot{I}$  表示, 电路参数用复数阻抗 ( $R \rightarrow R, L \rightarrow j\omega L, C \rightarrow -j\frac{1}{\omega C}$ ) 表示, 则直流电路中介绍的基本定律、定理及各种分析方法在正弦交流电路中都能使用.

### 相量形式的欧姆定律

$$\dot{U} = \dot{I}R, \dot{U} = \dot{I}(jX_L), \dot{U} = \dot{I}(-jX_C), \dot{U} = \dot{I}Z$$

### 相量形式的基尔霍夫定律

$$\text{KCL: } \sum \dot{I} = 0 \quad \text{KVL: } \sum \dot{U} = 0$$

有功功率:

$$P = \sum_1^i I_i^2 R_i, \text{ 或 } P = \sum_1^i U_i I_i \cos \varphi_i$$

无功功率:

$$Q = \sum_1^i I_i^2 (X_{Li} - X_{Ci}), \text{ 或 } Q = \sum_1^i U_i I_i \sin \varphi_i$$

### 一般正弦交流电路的解题步骤

- 1) 根据原电路图画出相量模型图.

$$R \rightarrow R, L \rightarrow jX_L, C \rightarrow -jX_C, u \rightarrow \dot{U}, i \rightarrow \dot{I}, e \rightarrow \dot{E}$$

- 2) 根据相量模型列出相量方程式或画相量图.
- 3) 用相量法或相量图求解.
- 4) 将结果变换成要求的形式.

## 4.6 交流电路的频率特性

在电力系统中, 交流电路的频率一般固定. 但在电子技术和控制系统中, 通常需要改变频率, 研究不同频率下电路的工作情况. 这就要求我们必须弄清楚响应与频率的关系, 即电路的**频率特性**.

前面几节讨论电压与电流都是**时间的函数**, 在时间领域内对电路进行分析, 称为**时域分析**.

### 频域分析

电压与电流是频率的函数; 在频率领域内对电路进行分析, 称为**频域分析**.

当电源电压或电流 (激励) 的频率改变时, 容抗和感抗随之改变, 从而使电路中产生的电压和电流 (响应) 的大小和相位也随之改变.

**幅频特性:** 电压或电流的大小与频率的关系.

**相频特性:** 电压或电流的相位与频率的关系.

**Q 滤波** 即利用容抗或感抗随频率而改变的特性, 对不同频率的输入信号产生不同的响应, 让需要的某一频带的信号通过, 抑制不需要的其它频率的信号。

滤波电路主要有

- **低通**滤波器
- **高通**滤波器
- **带通**滤波器

#### 4.6.1 RC 低通滤波电路

1) 电路:  $U_1(j\omega)$  **输入**信号电压  $U_2(j\omega)$  **输出**信号电压

2) **传递函数**: 电路输出电压与输入电压的比值。

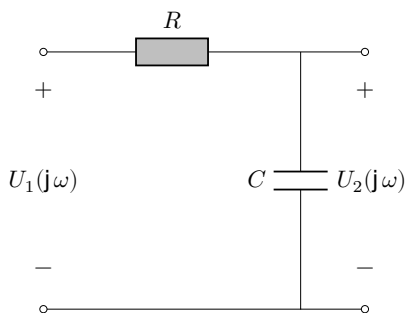


图 4-10 低通滤波器

$$T(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

令  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ , 则

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \angle -\arctan \frac{\omega}{\omega_0} = |T(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

**Q 通频带** 把  $0 < \omega < \omega_0$  的频率范围称为低通滤波电路的**通频带**.  $\omega_0$  称为**截止频率**(或半功率点频率、3 dB 频率)。

#### ≡ 总结

一阶 RC 低通滤波器具有**低通滤波**特性。

#### 4.6.2 RC 高通滤波电路

#### ≡ 总结

一阶 RC 高通滤波器具有**高通滤波**特性。

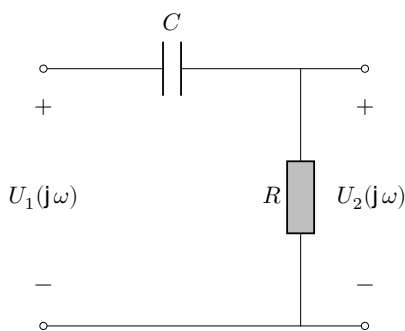


图 4-11 高通滤波器

#### 4.6.3 RC 带通滤波电路

#### ≡ 总结

一阶 RC 带通滤波器具有**带通滤波**特性。

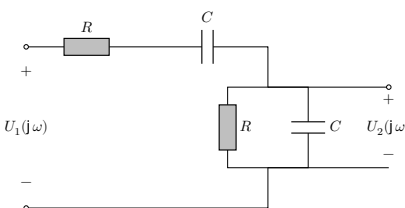


图 4-12 带通滤波器

### 4.7 谐振电路

**Q 谐振** 在同时含有 L 和 C 的交流电路中, 如果总电压和总电流**同相**, 称电路处于**谐振状态**. 此时电路与电源之间不再有能量的交换, 电路呈**电阻性**.

- 串联谐振: L 与 C 串联时,  $u, i$  同相。
- 并联谐振: L 与 C 并联时,  $u, i$  同相。

## 4.8 功率因数的提高

研究谐振的目的, 就是一方面在生产上充分利用谐振的特点 (如在无线电工程、电子测量技术等许多电路中应用). 另一方面又要预防它所产生的危害.

### 4.7.1 串联谐振

串联谐振电路在无线电中应用较多, 如收音机中用于选择信号.

#### 串联谐振条件

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

#### 串联谐振的特征

- 1) 阻抗模值**最小**, 电流最大.
- 2) 电路和电源不发生能量交换, 能量互换只发生在电感和电容之间.
- 3) 电源电压  $\dot{U} = \dot{U}_R$ .

### 4.7.2 并联谐振

并联谐振在无线电和电子技术中也常用于选择信号或消除干扰.

#### 并联谐振条件

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

#### 并联谐振的特征

- 1) 阻抗模**最大**.
- 2) 电路对电源呈电阻性.
- 3) 并联支路的电流近似相等, 比总电流**大很多倍**.

## 4.8 功率因数的提高

直流电路中, 功率等于电流与电压的乘积. 但在交流电路中, 电压与电流有相位差  $\varphi$ , 平均功率

$$P = UI \cos \varphi$$

上式中  $\varphi$  称为 **功率因数**. 功率因数不为 1 时, 电路中出现无功功率, 即发生了能量互换, 会导致以下问题:

- 1) 发电设备的容量**不能充分利用**.

$$P = U_N I_N \cos \varphi$$

2) 增加电路和发电机绕组的**功率损耗**.

$$\Delta P = rI^2 = \left(r \frac{P^2}{U^2}\right) \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

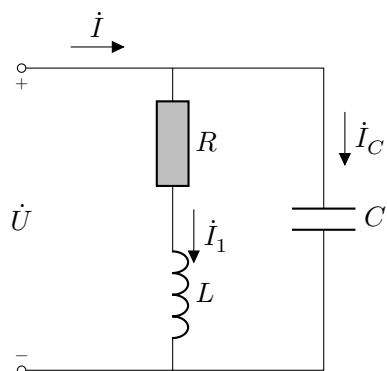


图 4-13 并联电容提高功率因数

### ② 如何提高电源的功率因数

与电感性负载**并联静电电容器**(置于用户或变电站中). 这样可减少电源与负载之间的能量互换, 电感性负载所需的无功功率大部分由电容器供给, 从而使发电机容量得到充分利用.

**例 4.8** 一感性负载, 其功率  $P = 10 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0.6$ , 接在电压  $U = 220 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  的电源上. (1) 如将功率因数提高到  $\cos \varphi = 0.95$ , 需要并多大的电容  $C$ , 求并  $C$  前后的线路的电流. (2) 如将  $\cos \varphi$  从 0.95 提高到 1, 试问还需并多大的电容  $C$ .

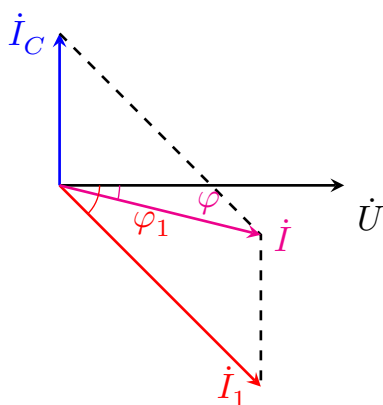


图 4-14

## 第五章 三相电路

生产生活中,发电、输配电和使用大部分都采用三相交流电.这是因为三相交流电路相对于单相电路具有很多优点.本章主要介绍三相电路的结构、负载接法,以及电压、电流和功率的计算.

### 5.1 三相电压

#### 发电机结构

- 1) **定子**: 铁心; 三相绕组 (匝数相同, 空间排列互差 $120^\circ$ ).
- 2) **转子**: 直流励磁的电磁铁.

#### 三相电压瞬时表示式

- $u_1 = U_m \sin \omega t$
- $u_2 = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$
- $u_3 = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$

#### 相量表示

- $\dot{U}_1 = U \angle 0^\circ = U$
- $\dot{U}_2 = U \angle -120^\circ = U(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$
- $\dot{U}_3 = U \angle 120^\circ = U(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$

#### 总结

三个正弦交流电压满足以下特征:

- 1) 最大值相等; 频率相同; 相位互差 $120^\circ$ .
- 2) 三相电压瞬时值之和为 0.

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad \text{或} \quad \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$$

🔍 **相序** 三相交流电压出现正幅值 (或相应零值) 的顺序称为 **相序**.

🔍 **相电压** 端线与中性线间 (发电机每相绕组) 的电压.

🔍 **线电压** 端线与端线间的电压.

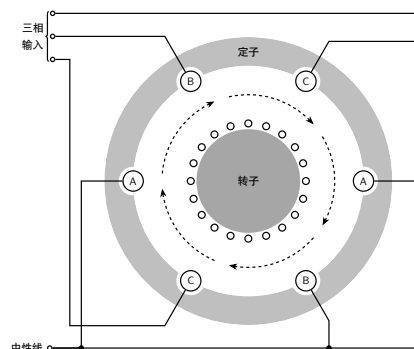


图 5-1 发电机结构

根据 KVL 定律

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

$$\dot{U}_{23} = \dot{U}_2 - \dot{U}_3$$

$$\dot{U}_{31} = \dot{U}_3 - \dot{U}_1$$

$$\dot{U}_{12} = \sqrt{3}\dot{U}_1\angle 30^\circ$$

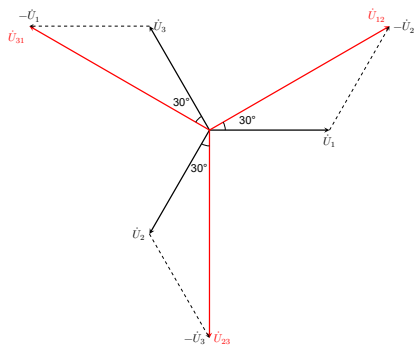


图 5-2

≡ 总结

电源 Y 形联结时, 线电压等于相电压的  $\sqrt{3}$  倍.

$$U_l = \sqrt{3}U_p$$

且超前相应的相电压 $30^\circ$ , 三相线电压也对称.

5.2 负载星形联结的三相电路

▣ 负载分类

- 1) 三相负载. 需三相电源同时供电. 如三相电动机等.
  - 1) 对称三相负载.  $Z_1 = Z_2 = Z_3$ .
  - 2) 不对称三相负载.
- 2) 单相负载. 只需一相电源供电. 如照明负载, 家用电器.

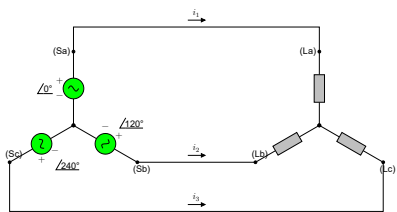


图 5-3 负载星形联结电路

▣ 三相负载的联结方法

三相负载也有 Y 形和三角形联结方法. 采用哪种方法要根据负载的额定电压和电源电压确定.

- 1) 电源提供的电压 = 负载的额定电压.
- 2) 单相负载尽量均衡地分配到三相电源上.

🔍 **相电流** 流过每相负载的电流.

🔍 **线电流** 流过端线的电流.

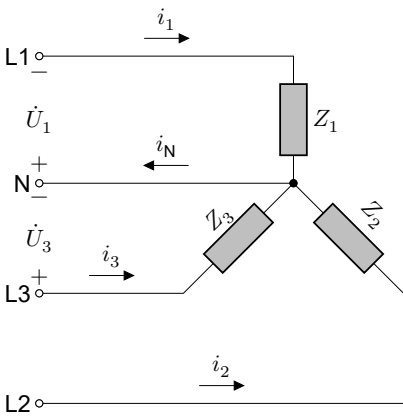


图 5-4 负载星形联结

≡ 总结

负载 Y 形联结时, 线电流等于相电流.

- 1) 负载端的线电压 = 电源线电压
- 2) 负载的相电压 = 电源相电压
- 3) 线电流 = 相电流
- 4) 中线电流  $\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$

≡ 总结

负载 Y 联结带中性线时, 可将各相分别看作单相电路计算.



### 5.3 负载三角形联结的三相电路

因为三相电压对称, 且  $Z_A = Z_B = Z_C$ , 所以负载对称时, 三相电流也对称。

#### 总结

负载对称时, 中性线无电流, 可省掉中性线。只需计算一相电流, 其它两相电流可根据对称性直接写出。

**例 5.1** 一星形联结的三相电路, 电源电压对称。设电源线电压  $u_{12} = 380\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)$  V。负载为电灯组, 若  $R_1 = R_2 = R_3 = 5\Omega$ , 求线电流及中性线电流  $I_N$ ; 若  $R_1 = 5\Omega, R_2 = 10\Omega, R_3 = 20\Omega$ , 求线电流及中性线电流。

### 5.3 负载三角形联结的三相电路

1) 负载相电压 = 电源线电压

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_l = U_p$$

2) 相电流

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_{12}} \quad \dot{I}_{23} = \frac{\dot{U}_{23}}{Z_{23}} \quad \dot{I}_{31} = \frac{\dot{U}_{31}}{Z_{31}}$$

3) 线电流

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31} \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12} \quad \dot{I}_3 = \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23}$$

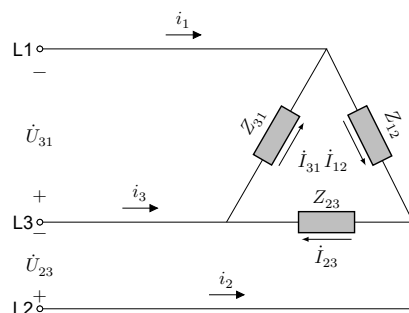


图 5-5 负载三角形联结

#### 总结

对称负载  $\Delta$  联结时, 线电流  $I_l = \sqrt{3}I_p$ , 且落后相应的相电流  $30^\circ$ 。

三相电动机绕组可以联结成星形, 也可以联结成三角形, 而照明负载一般都联结成星形 (具有中性线)。

#### 总结 三相负载的联接原则

应使加于每相负载上的电压等于其额定电压, 而与电源的联接方式无关。

- 1) 负载的额定电压 = 电源的线电压  $\Rightarrow \Delta$  联结
- 2) 负载的额定电压 =  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  电源线电压  $\Rightarrow Y$  联结。

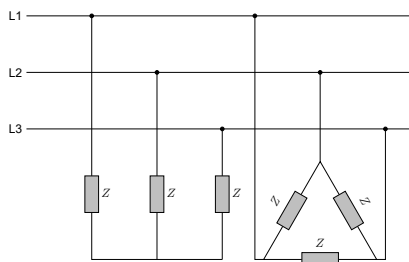


图 5-6 负载星形联结与三角形联结电路

### 5.4 三相功率

无论负载为 Y 或  $\Delta$  联结, 每相有功功率都应为

$$P_p = U_p I_p \cos \varphi_p$$

当负载对称时,  $P = 3U_p I_p \cos \varphi_p$


对称负载 Y 联结时,  $U_p = \frac{1}{\sqrt{3}}U_l, I_p = I_l$

对称负载  $\triangle$  联结时,  $U_p = U_l, I_p = \frac{1}{\sqrt{3}}I_l$

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi_p = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi_p$$

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi_p = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi_p$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_p I_p = \sqrt{3}U_l I_l$$

 **例 5.2** 有一三相电动机, 每相的等效电阻  $R = 29\Omega$ , 等效感抗  $X_L = 21.8\Omega$ , 试求下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的功率, 并比较所得的结果: (1) 绕组联成星形接于  $U_l = 380\text{V}$  的三相电源上; (2) 绕组联成三角形接于  $U_l = 220\text{V}$  的三相电源上.

## 第 六 章 工业企业供电及安全用电

---

### 6.1 电力系统

**Q 电力系统** 发电厂、变电站、输电设施、配电所直到各个用户等环节所组成的电能生产消费系统。

电力系统由发电、输电和配电系统组成。

**Q 发电** 发电是将水力、火力、风力、核能和沼气等非电能转换成电能的过程。

**Q 输电** 将电能输送到用电地区或直接输送到大型用电户。

**Q 配电** 由 10 kV 级以下的配电线路和配电 (降压) 变压器将电能降为 380/220 V 低压再分配到各个用户。

### 6.2 工业企业配电

低压配电线路是由配电室 (配电箱)、低压线路、用电线路组成。

从车间变电所或配电箱到用电设备线路属于低压配电线路。其联接方式主要是放射式和树干式两种。

#### 放射式供电线路

- 特点: 供电可靠性高, 便于操作和维护。但配电导线用量大, 投资高。
- 适用场合: 负载点比较分散, 而每个点的用电量又较大, 变电所又居于各负载点的中央。

#### 树干式供电线路

- 适用场合: 负载比较集中, 各负载点位于变电所或配电箱的同一侧时。
- 特点: 供电可靠性差。但配电导线用量小, 投资费用低, 接线灵活性大。

### 6.3 安全用电

在生产中, 不仅要提高劳动生产率, 减轻繁重的体力劳动, 而且要尽一切可能保护劳动者的人身安全。以下介绍安全用电的几个问题。

### 6.3.1 电流对人体的危害

人体触电时, 电流对体会造成两种伤害:

- 1) 电击: 是指电流通过人体, 影响呼吸系统、心脏和神经系统, 造成人体内部组织的破坏乃至死亡.
- 2) 电伤: 是指在电弧作用下或熔断丝熔断时, 对人体外部的伤害, 如烧伤、金属溅伤等.

### 6.3.2 人体触电方式

#### 接触正常带电体

- 1) 电源中性点接地的**单相触电**. 这时人体处于**相电压** (220 V) 下, 危险较大.
- 2) 电源中性点不接地系统的单相触电.
- 3) **双相触电**. 这时人体处于**线电压** (380 V) 下, 触电后果更为严重.

#### 接触正常不带电的金属体

当电气设备内部绝缘损坏而与外壳接触, 将使其外壳带电. 当人触及带电设备的外壳时, 相当于单相触电. 大多数触电事故属于这一种.

#### 跨步电压触电

在高压输电线断线落地时, 有强大的电流流入大地, 在接地点周围产生电压降. 当人体接近接地点时, 两脚之间承受跨步电压而触电. 跨步电压的大小与人和接地点距离, 两脚之间的跨距, 接地电流大小等因素有关.

### 6.3.3 接地与接零

为了人身安全和电力系统工作的需要, 要求电气设备采取接地措施. 按接地目的的不同, 主要分为**保护接地**和**保护接零**.

#### IT 系统: 保护接地

在中性点不接地的三相三线制供电系统 (I) 中, 将用电设备的金属外壳通过接地装置与大地进行良好的导电连接 (T), 这种保护措施称为**保护接地**. 该系统在我国的煤矿等地方普遍采用.

#### TN 系统: 保护接零

在电源中性点接地的三相四线制供电系统 (T) 中, 将用电设备的金属外壳与零线可靠连接 (N), 这种保护措施称为**保护接零**. 采用该保护措施时, 一般从电源中性点引两根零线, 一为工作零线, 用 N 表示, 一为保护零线, 用 PE 表示.

#### TT 系统

电源中性点接地, 而用电设备采用保护接地的系统称为**TT 系统**. 为提高 TT 系统的灵敏度, 国家标准规定由 TT 系统供电的用电设备采用漏电电流动作保护装置 (**漏电开关**).

### 6.3 安全用电