

# 第 1 章 电路模型与电路定律



- 理解电压、电流的概念及参考方向的意义，电功率的概念及其计算。
- 理解并能正确应用电路元件的伏安关系。
- 了解电路的负载、开路及短路状态和额定值的意义。
- 理解并能正确应用基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律。
- 理解电位的概念，会分析计算电路中各点的电位。

电路是电工技术和电子技术的基础，是为学习电子电路、电机电路以及控制与测量电路等打基础的。

本章介绍电路的作用及组成、电路的基本物理量及其参考方向、电路基本元件的电压和电流关系(简称伏安关系)、电路的 3 种工作状态、电气设备的额定值、基尔霍夫电压定律和电流定律，以及电路中电位的概念及其计算。这些基本概念和基本定律是电路分析的重要基础。

## 1.1 电路及基本物理量

### 1.1.1 电路的组成与作用

#### 1. 电路的组成

电路是为了某种需要而将某些电工设备或元件按一定方式组合起来所构成的电流通路。

不论电路结构的复杂程度如何，其组成都包括电源、负载和中间环节 3 个基本部分。

电源是提供电能的设备，如干电池、蓄电池、发电机等，其作用是将其他形式的能量转换为电能。此外，还有将某种形式的电能转换成另一种形式的电能的装置，通常也称为电源，如直流稳压电源就是将交流电转换为直流电，并在一定范围内保持输出电压稳定。

负载是取用电能的设备，如电灯、电炉、电动机等，其作用是将电能转换为其他形式的能量，如电灯把电能转换成光能和热能，电动机将电能转换成机械能等。

中间环节在电路中起传递、分配和控制电能的作用。最简单的中间环节是开关和连接导线，一般还有保护和测量装置。更为复杂的中间环节是各种电路元件组成的网络系统，电源接在它的输入端，负载接在它的输出端。

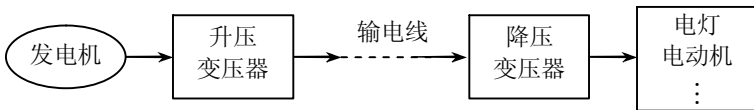
## 2. 电路的作用

电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的。按工作任务划分，电路的主要功能有两类。

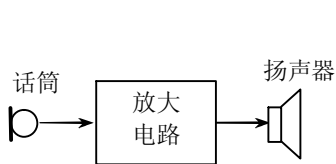
电路的第一类功能是实现能量的转换、传输和分配，如电力系统电路，可将发电机发出的电能经过输电线传输到各个用电设备，再经用电设备转换成热能、光能、机械能等，其示意图如图 1-1 (a) 所示。

电路的第二类功能是实现信号的传递和处理等。输入信号称为激励（或信号源），输出信号称为响应，如扩音机电路，先由话筒把语言或音乐（通常称为信息）转换为相应的电压和电流，即电信号，通过放大和转换（称为信号的处理）后传递到扬声器，把电信号还原为语言或音乐，其示意图如图 1-1 (b) 所示。

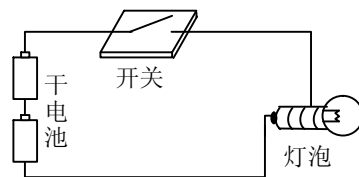
更简单的电路如图 1-1 (c) 所示的手电筒电路。



(a) 电力系统电路



(b) 扩音机电路



(c) 手电筒电路

图 1-1 电路的例子

研究电路的基本规律，首先要掌握电路中的电流、电压和功率等基本物理量。

### 1.1.2 电流

电流是由电荷有规则的定向运动形成的。电流是一种物理现象，又是一个表示电流强弱的物理量，在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电量。

在如图 1-2 所示的导体内，设在时间  $dt$  内，通过导体横截面  $S$  的电量为  $dq$ ，则导体中的电流为：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

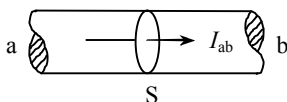


图 1-2 导体中的电流

如果电流不随时间变化，即  $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$ ，则这种电流称为恒定电流，简称直流。直流电流用大写字母  $I$  表示，所以上式可改写为：

$$I = \frac{q}{t}$$

如果电流的大小和方向都随时间变化，则称为交变电流，简称交流。交流电流用小写字母  $i$  表示。

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安（A）。计量微小电流时，常以毫安（mA）或微安（ $\mu\text{A}$ ）为单位，它们之间的关系为：

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

习惯上把正电荷定向运动的方向（或负电荷运动的相反方向）规定为电流的实际方向，但在分析较为复杂的直流电路时，往往难于事先判断各支路中电流的实际方向；对于交流电流，其方向不断改变，在电路图中很难表示它的实际方向。为此，在分析与计算电路时，常任意选定某一方向作为电流的方向，称为正方向或参考方向，它并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与参考方向一致时，电流为正值，如图 1-3（a）所示；当电流的实际方向与参考方向相反时，电流为负值，如图 1-3（b）所示。可见，在参考方向（正方向）选定之后，电流的值才有正负之分。



(a) 电流的实际方向与参考方向一致

(b) 电流的实际方向与参考方向相反

图 1-3 电流的实际方向与参考方向的关系

电流的参考方向除了用箭头表示外，还可用双下标的变量表示。如图 1-2 中的  $I_{ab}$  即表示参考方向由 a 指向 b 的电流。如果参考方向选定为由 b 指向 a，则为  $I_{ba}$ 。 $I_{ab}$  和  $I_{ba}$  两者之间相差一个负号，即：

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

今后在电路中所标注的电流方向都是参考方向，不一定是电流的实际方向。在未标定参考方向的情况下，电流的正负值毫无意义。

### 1.1.3 电压、电位及电动势

#### 1. 电压与电位

电压是衡量电场力做功能力的物理量。如图 1-4 所示，a 和 b 是电源的两个电极，设 a 极带正电，b 极带负电，因此在两极之间产生电场，其方向从 a 指向 b。如果用导线将 a 和 b 连接起来，在电场力的作用下，正电荷将从 a 极沿导线移至 b 极（实际上是导线中的自由电子从 b 极移至 a 极，两者是等效的），这表明电场力对电荷做了功。

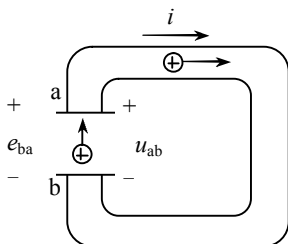


图 1-4 电压及电动势

为了表示电场力做功的能力，引入电压这一物理量。电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功，称为 a、b 两点间的电压，用  $u$  表示。设电场力将正电荷  $dq$  从 a 点移动到 b 点所做的功为  $dW$ ，则 a、b 两点间的电压  $u$  为：

$$u = \frac{dW}{dq}$$

大小和极性都不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压，直流电压用大写字母  $U$  表示，所以上式可改写为：

$$U = \frac{W}{q}$$

大小和极性都随时间变化的电压称为交流电压，交流电压用小写字母  $u$  表示。在国际单位制中，电压的单位为伏特，简称伏（V），也可用千伏（kV）、毫

伏 (mV) 或微伏 ( $\mu\text{V}$ ) 表示。它们之间的关系为:

$$1\text{kV} = 10^3 \text{V}$$

$$1\text{V} = 10^3 \text{mV} = 10^6 \mu\text{V}$$

电路中某一点到参考点之间的电压, 称作该点的电位。参考点也称零电位点, 所以电位还可以定义为: 在电路中, 电场力把单位正电荷从某一点 a 移到零电位点所做的功等于该点的电位。

电路中任何一点的电位值是与参考点相比较而得出的, 比其高者为正, 比其低者为负。电位的单位与电压相同, 用伏特 (V) 表示。

电路中两点间的电压也可用这两点间的电位差来表示, 即:

$$U_{ab} = U_a - U_b$$

电路中任意两点间的电压是不变的, 与参考点的选择无关, 但电位是一个相对量, 其值随参考点选择的不同而不同。

习惯上把电位降低的方向规定为电压的实际方向, 用正、负号表示, 也可用箭头或双下标的变量表示。

计算较复杂的电路时, 电压与电流一样, 实际方向较难确定, 因此任意选定某一方向作为电压的参考方向, 当电压实际方向与其参考方向一致时, 电压为正值; 当电压实际方向与其参考方向相反时, 电压为负值。

电压、电流的参考方向都是任意的, 彼此可互相独立假设, 但为方便起见, 常采用关联参考方向。关联参考方向是指假定的电压正极到负极的方向也是假定电流的流动方向, 即电流与电压降参考方向一致, 如图 1-5 (a) 所示; 若电压与电流参考方向不一致, 则称非关联参考方向, 如图 1-5 (b) 所示。图中方框加两个端钮, 表示任意二端元件。



图 1-5 关联参考方向和非关联参考方向

当电压与电流参考方向关联时, 为了简便起见, 只需在电路图上标出电流参考方向或电压参考方向中的任何一种即可, 如图 1-6 所示。



图 1-6 关联参考方向

## 2. 电动势

如图 1-4 所示，在电场力的作用下，正电荷从高电位端 a 沿着导线向低电位端 b 移动，电极 a 因正电荷的减少而使电位逐渐降低，电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高，其结果是 a 和 b 两电极间的电位差逐渐减小到零。与此同时，导线中的电流也会相应减小到零。

为了维持导线中的电流连续并保持恒定，必须使 a、b 间的电压保持恒定，即必须有另一种力能克服电场力而使电极 b 上的正电荷经过另一路径移向电极 a。电源就能产生这种力，称为电源力。电源力将单位正电荷由低电位端 b 经过电源内部移动到高电位端 a 所做的功，称为电源的电动势，用  $e$  表示。

在发电机中，电源力由原动机（内燃机、水轮机、汽轮机）提供，推动发电机转子切割磁力线产生电动势。在电池中，电源力由电极与电解液接触处的化学反应而产生。电源力克服电场力所做的功使电荷得到能量，把非电能转化为电能。

电动势的实际方向与电压实际方向相反，规定为在电源内部由低电位端指向高电位端，即电位升高的方向。

电动势的单位与电压相同，用伏特（V）表示。

### 1.1.4 电功率

一个电路最终的目的是要将一定的功率传送给负载，供负载将电能转换成工作时所需形式的能量。因此，电能传送和负载消耗功率是一个很重要的问题。

电场力在单位时间内所做的功称为电功率，简称功率，用  $p$  表示。设电场力在  $dt$  时间内所做的功为  $dW$ ，则功率为：

$$p = \frac{dW}{dt}$$

在国际单位制中，功率的单位为瓦特，简称瓦（W）。

在电路中，人们更关注的是功率与电流及电压之间的关系。根据电压及电流的定义式，可推出功率与电流及电压之间的关系。

设元件的电压和电流为关联参考方向，由  $u = \frac{dW}{dq}$  得  $dW = udq$ ，所以：

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

因为：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

故得：

$$p = ui$$

值得注意的是，如果元件的电压和电流为非关联参考方向，则功率计算公式应为：

$$p = -ui$$

根据以上两式计算， $p > 0$  表示元件吸收功率，起负载作用； $p < 0$  表示元件放出功率，起电源作用。

**例 1-1** 计算如图 1-7 所示各元件的功率，并指出该元件是作为电源还是作为负载。

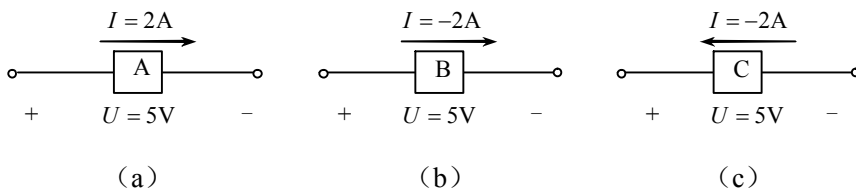


图 1-7 例 1-1 的图

**解** 图 1-7 (a) 中电流  $I$  与电压  $U$  是关联参考方向，所以：

$$P = UI = 5 \times 2 = 10 \text{ (W)}$$

$P > 0$ ，说明元件 A 吸收 10W 功率，为负载。

图 1-7 (b) 中电流  $I$  与电压  $U$  是关联参考方向，所以：

$$P = UI = 5 \times (-2) = -10 \text{ (W)}$$

$P < 0$ ，说明元件 B 产生 10W 功率，为电源。

图 1-7 (c) 中电流  $I$  与电压  $U$  是非关联参考方向，所以：

$$P = -UI = -5 \times (-2) = 10 \text{ (W)}$$

$P > 0$ ，说明元件 C 吸收 10W 功率，为负载。

**例 1-2** 在如图 1-8 所示电路中，已知  $I = 1\text{A}$ ， $U_1 = 10\text{V}$ ， $U_2 = 6\text{V}$ ， $U_3 = 4\text{V}$ 。求各元件的功率，并分析电路的功率平衡关系。

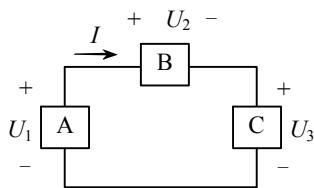


图 1-8 例 1-2 的图

**解** 由于元件 A 的电流与电压是非关联参考方向，所以：

$$P_1 = -U_1 I = -10 \times 1 = -10 \text{ (W)}$$

$P_1 < 0$ ，说明元件 A 产生 10W 功率，为电源。

由于元件 B、C 的电流与电压是关联参考方向，所以：

$$P_2 = U_2 I = 6 \times 1 = 6 \text{ (W)}$$

$$P_3 = U_3 I = 4 \times 1 = 4 \text{ (W)}$$

$P_2 > 0$ ，说明元件 B 吸收 6W 功率，为负载。 $P_3 > 0$ ，说明元件 C 吸收 4W 功率，为负载。

各元件的功率之和为：

$$P_1 + P_2 + P_3 = -10 + 6 + 4 = 0$$

计算结果表明，该电路中产生的功率与吸收的功率相等，符合功率平衡关系。

## 1.2 电路模型

为了便于对电路进行分析计算，首先需要建立起电路模型。

### 1.2.1 电路模型的概念

实际电路都是由一些起不同作用的实际电路元件组成的，如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等。实际电路元件的电磁关系较为复杂，最简单的例子如白炽灯，白炽灯除具有消耗电能的性质（电阻性）外，当有电流通过时还会产生磁场，说明白炽灯还具有电感性。因白炽灯的电感非常微小，可以忽略不计，所以，可认为白炽灯是一个电阻元件。

为了便于对电路进行分析计算，常常将实际元件理想化（也称模型化），即在一定条件下突出元件主要的电磁性质，忽略次要因素，用一个足以表征其主要特性的理想元件近似表示。由理想电路元件组成的电路，称为电路模型。理想电路元件（此后理想两字略去）主要有电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源、理想电流源等。前 3 种元件不产生能量，称为无源元件，后两种元件是电路中提供能量的元件，称为有源元件。这些元件分别由相应的参数来表征。

如图 1-1 (c) 所示的手电筒电路，其电路模型如图 1-9 所示。干电池是电源元件，其参数为电动势  $E$  和内电阻  $R_0$ ；灯泡是电阻元件，其参数为电阻  $R$ ；筒体是连接干电池和灯泡的中间环节（还包括开关），其电阻忽略不计，认为是一个无电阻的理想元件。

今后所分析的都是电路模型，简称电路。电路中的各种元件用规定的图形符号表示。



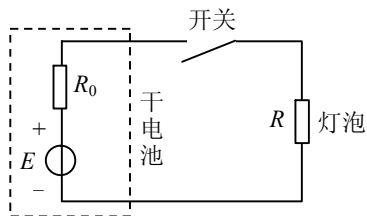


图 1-9 图 1-1 (c) 所示电路的电路模型

元件有线性与非线性之分，线性元件的参数是常数，与所施加的电压和电流无关。非线性元件的参数不是常数，随着电压或电流变动。

## 1.2.2 理想电路元件

### 1. 电阻元件

电阻元件是反映消耗电能这一物理现象的电路元件，符号如图 1-10 所示。在电压、电流为关联参考方向时，如图 1-10 (a) 所示，线性电阻元件的电压与电流成正比，即：

$$U = IR$$

这个关系称为欧姆定律，比例常数  $R$  称为电阻，是表征电阻元件特性的参数。当电压的单位为 V，电流的单位为 A 时，电阻的单位为欧姆，简称欧 ( $\Omega$ )。

如果电阻元件的电压、电流为非关联参考方向时，如图 1-10 (b) 所示，欧姆定律改写为：

$$u = -iR$$

电阻元件的功率为：

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

可见电阻元件总是消耗电能的。



图 1-10 电阻元件的符号

### 2. 电感元件

将导线绕成螺旋状或绕在铁心或磁心上，就构成了常用的电感器，当线圈中有电流流过时，会在线圈内部产生磁场。电感元件是反映电流产生磁场、存储磁场能量这一物理现象的电路元件，符号如图 1-11 所示。



图 1-11 电感元件的符号

当电流  $i$  变化时，磁场也随之变化，并在线圈中产生自感电动势  $e_L$ 。根据法拉第电磁感应定律，当电压、电流为关联参考方向时，如图 1-11 (a) 所示，自感电动势为：

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

所以，电感两端的电压为：

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

比例常数  $L$  称为电感，是表征电感元件特性的参数。当电压的单位为 V，电流的单位为 A 时，电感的单位为亨利，简称亨 (H)。

上式表明，电感两端的电压与流过电感的电流对时间的变化率成正比。也就是说，电感元件任一瞬间电压的大小并不取决于这一瞬间电流的大小，而是与这一瞬间电流的变化率成正比。电感电流变化越快，电压越大；电感电流变化越慢，电压越小。在直流电路中，电感元件虽有电流，但电流不变，故电压为零，这时电感元件相当于短路。

由于电感电压取决于电感电流的变化率，即电流只有在动态情况下才能在电感两端产生电压，故电感元件称为动态元件。

如果电感元件的电压、电流为非关联参考方向，如图 1-11 (b) 所示，其伏安关系为：

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

设  $t=0$  时流过电感的电流为零，则在任意时刻  $t$ ，电感元件中存储的磁场能量为：

$$W_L = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = \int_0^t L \frac{di}{dt} i dt = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2$$

### 3. 电容元件

相互绝缘且靠近的两块金属极板就构成了常用的电容器。当在电容器两端加电压时，两块极板上将出现等量的异性电荷，并在两极板间形成电场。电容元件就是反映电荷产生电场、存储电场能量这一物理现象的电路元件，符号如图 1-12 所示。



图 1-12 电容元件的符号

电容器极板上的电量  $q$  与外加电压  $u$  成正比，即：

$$q = Cu$$

比例常数  $C$  称为电容，是表征电容元件特性的参数。当电压的单位为 V，电量的单位为库仑 (C) 时，电容的单位为法拉 (F)。

当电容上的电压  $u$  和电流  $i$  为关联参考方向时，如图 1-12 (a) 所示，两者的关系为：

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

上式表明，流过电容的电流与电容两端电压对时间的变化率成正比。也就是说，电容元件任一瞬间电流的大小并不取决于这一瞬间电压的大小，而是取决于这一瞬间电压变化率的大小。电容电压变化越快，电流越大；电容电压变化越慢，电流越小。在直流电路中，电容元件上虽然有电压，但电压不变化，故电流为零，这时电容元件相当于开路。

由于电容电流取决于电容电压的变化率，即电压只有在动态情况下才能有电容电流，故电容元件也称为动态元件。

如果电容元件的电压、电流为非关联参考方向，如图 1-12 (b) 所示，其伏安关系为：

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

设  $t = 0$  时电容两端的电压为零，则在任意时刻  $t$ ，电容元件中存储的电场能量为：

$$W_C = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = \int_0^t C \frac{du}{dt} u dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2$$

#### 4. 理想电压源

理想电压源是一种能产生并能维持一定输出电压的理想电源元件，又称恒压源。恒压源的符号如图 1-13 (a) 所示，其中  $u_S$  为恒压源的电压。

恒压源的电压  $u_S$  为确定的时间函数，与流过的电流无关。如果恒压源的电压是定值  $U_S$ ，则称为直流恒压源。直流恒压源也可用如图 1-13 (c) 所示的符号表示，如图 1-13 (d) 所示是直流恒压源的电压电流关系曲线（简称伏安特性曲线）。

恒压源不能短路，否则流过的电流为无限大。

根据恒压源所连接的外电路，如果电流的实际方向由低电位端流向高电位端，则恒压源发出功率，如图 1-13 (a) 所示。如果电流的实际方向由高电位端流向低电位端，则恒压源吸收功率，如图 1-13 (b) 所示，这时恒压源是电路的负载，如蓄电池被充电。

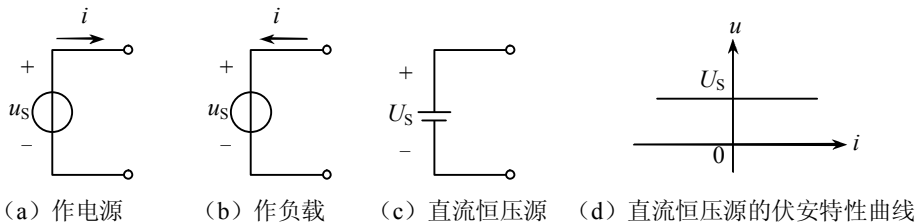


图 1-13 理想电压源

恒压源中的电流可为任意值，其值由外电路决定。

### 5. 理想电流源

理想电流源是一种能产生并能维持一定输出电流的理想电源元件，又称恒流源。恒流源的符号如图 1-14 (a) 所示，其中  $i_s$  为恒流源的电流。

恒流源的电流  $i_s$  为确定的时间函数，与两端的电压无关。如果恒流源的电流是定值  $I_s$ ，则称之为直流恒流源，如图 1-14 (c) 所示是直流恒流源的伏安特性曲线。

恒流源不能开路，否则其两端的电压为无限大。

根据恒流源所连接的外电路，若恒流源两端电压的实际方向与电流方向相反，则恒流源发出功率，如图 1-14 (a) 所示。若恒流源两端电压的实际方向与电流方向相同，则恒流源吸收功率，如图 1-14 (b) 所示，这时恒流源是电路的负载。

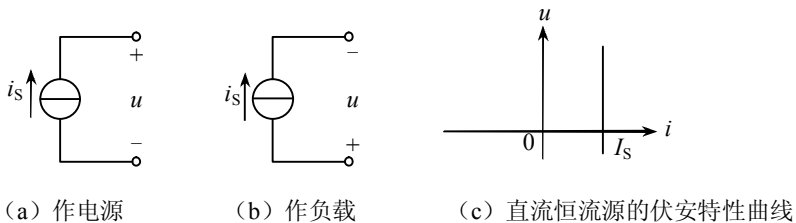


图 1-14 理想电流源

恒流源两端的电压可为任意值，其值由外电路决定。

### 1.2.3 实际电源的两种模型

#### 1. 电压源

理想电压源实际上是不存在的，电源内部总是存在一定电阻，称之为内阻，用  $R_0$  表示。以电池为例，当电池两端接上负载并有电流通过时，内阻就会有能量损耗，电流越大，损耗越大，输出端电压就越低，因此电池不具有恒压输出的特性。由此可见，实际电压源可以用一个恒压源  $U_S$  和内阻  $R_0$  串联的电路模型来表示，如图 1-15 (a) 所示虚线框内的电路。图中  $R_L$  为负载，即电源的外电路。

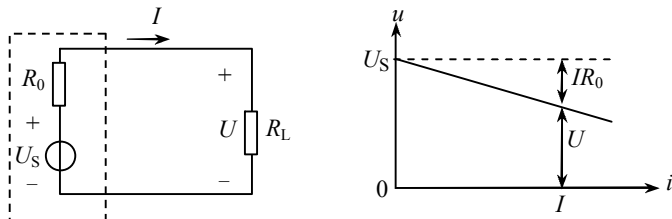
分析该电路的功率平衡情况，有：

$$U_S I = UI + I^2 R_0$$

从而得电压源的伏安关系为：

$$U_S = U + IR_0$$

上式说明，实际电压源端电压  $U$  低于恒压源的电压  $U_S$ ，其原因是存在内阻压降  $IR_0$ 。如图 1-15 (b) 所示为实际直流电压源的伏安特性曲线。由上式或伏安特性曲线可以看出， $IR_0$  越小，其特性越接近恒压源。工程中常用的稳压电源及大型电网工作时，输出电压基本不随外电路变化，在一定范围内可近似看作恒压源。



(a) 电路模型

(b) 直流电压源的伏安特性曲线

图 1-15 实际电压源

#### 2. 电流源

理想电流源实际上也是不存在的，由于内电阻的存在，电流源的电流并不能全部输出，有一部分将在内部分流。实际电流源可用一个恒流源  $I_S$  与内电阻  $R'_0$  并联的电路模型来表示，如图 1-16 (a) 所示虚线框内的电路表示一个实际电流源的电路模型。

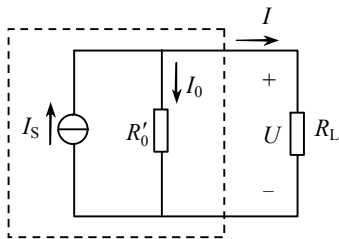
分析该电路的功率平衡情况，有：

$$UI_S = UI + \frac{U^2}{R'_0}$$

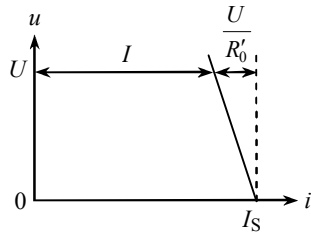
从而得电流源的伏安关系为：

$$I_S = I + \frac{U}{R'_0}$$

显然，实际电流源输出到外电路的电流  $I$  小于恒流源电流  $I_S$ ，其原因是内电阻  $R'_0$  上产生分流  $I_0 = \frac{U}{R'_0}$ 。如图 1-16 (b) 所示是实际直流电流源的伏安特性曲线，实际电流源的内阻  $R'_0$  越大，内部分流越小，其特性就越接近恒流源。晶体管稳流电源及光电池等器件在一定范围内可近似看作恒流源。



(a) 电路模型



(b) 直流电流源的伏安特性曲线

图 1-16 实际电流源

实际使用电源时，应注意以下 3 点：

(1) 电工技术中，实际电压源简称电压源，常指相对负载而言具有较小内阻的电压源；实际电流源简称电流源，常指相对于负载而言具有较大内阻的电流源。

(2) 实际电压源不允许短路。由  $U_S = U + IR_0 = IR_L + IR_0$  可以看出，当负载电阻  $R_L$  很小甚至为零时，端电压  $U$  为零，这种情况叫电源短路。短路电流  $I_{SC} = \frac{U_S}{R_0}$ ，由于一般电压源的  $R_0$  很小，短路电流将很大，会烧毁电源，这是不允许的。平时，实际电压源不使用时应开路放置，因电流为零，不消耗电源的电能。

(3) 实际电流源不允许开路处于空载状态。由式  $I_S = I + \frac{U}{R'_0}$  可以看出，负载电流  $I$  愈小，内阻上电流  $(I_S - I)$  就愈大，内部损耗  $(I_S - I)^2 R'_0$  就愈大，所以不应使实际电流源处于空载状态。空载时，电源内阻把电流源的能量消耗掉，而电源对外没送出电能。平时，实际电流源不使用时应短路放置，因实际电流源的内阻  $R'_0$  一般都很大，电流源被短路后，通过内阻的电流很小，损耗很小，而外电路上短路后电压为零，不消耗电能。

## 1.3 电气设备的额定值及电路的工作状态

### 1.3.1 电气设备的额定值

任何电气设备都有一个标准规格，在电工术语中称为额定值，例如一盏白炽灯的规格有 220V、60W 或 220V、40W，电动机的规格为 380V、10kW 等。

每一种电气设备的额定值可以有好几项，不同的设备除了有它自己的特殊要求外，所有电气设备都规定了额定电压与额定电流或额定功率。

#### 1. 额定电压

电气设备的绝缘材料并不是绝对不导电的，如果作用在绝缘材料上的电压过高，绝缘材料就会因承受太大的电场强度而被击穿。所谓击穿，就是指绝缘材料丧失了绝缘性能而变成了导体。为了保证电气设备的正常运行，通常规定一个设备正常使用所施加的电压数值，此值称为该电气设备的额定电压，用  $U_N$  表示。

#### 2. 额定电流和额定功率

电气设备在额定电压下运行时，由于导体有电阻，所以有电流通过时导体要发热，电气设备的温度会升高。如果电流过大，使电气设备温度过高，绝缘材料会因过热而损坏。为了保证电气设备的正常运行，通常规定一个设备正常使用所施加的电流数值，此值称为该电气设备的额定电流，用  $I_N$  表示。电气设备在额定电流和额定电压下工作，其相应的功率叫额定功率，用  $P_N$  表示。对电阻性负载而言， $P_N = I_N U_N$ 。电动机、变压器等设备的额定电流、额定电压和额定功率常标在铭牌上，也可从产品目录中查得。

不同电气设备所标的额定值有所不同，电阻器通常都标明额定电阻与额定电流或额定功率。例如，变阻器标明的额定电阻与额定电流有 300Ω、1A；75Ω、3A 等等；电子线路中所用电阻器都标明额定电阻与额定功率（100Ω、 $\frac{1}{2}$ W；2kΩ、 $\frac{1}{8}$ W 等）；白炽灯、电烙铁等电气设备利用电流的热效应，这类设备的额定值主要为额定电压和额定功率。金属导体本身虽不是电气设备，但在输送电流时也要发热，因此规定了安全载流量。任何电气设备在使用时，都不应该超过它的额定值。电气设备工作在额定情况下称为额定工作状态。

必须注意的是，电气设备或元件的电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。原因有二，一个是受外界影响，例如，电源额定电压为 220V，但电源电压经常波动，稍低于或稍高于 220V。这样，额定值为 220V、40W 的电灯上所加的电压不是 220V，实际功率也就不是 40W 了。另一原因是在一定电压下电

源输出的功率和电流取决于负载的大小，负载需要多少功率和电流，电源就给多少，所以电源通常不一定处于额定工作状态，但是一般不应超过额定值。对于电动机也是这样，它的实际功率和电流也取决于它轴上所带机械负载的大小，通常也不一定处于额定工作状态。

### 1.3.2 电路的工作状态

电路可以处于下面几种状态中的某一状态：负载状态、开路（空载）状态和短路状态。现在分别讨论每一种状态的特点。

#### 1. 负载状态

如图 1-17 所示为直流电源对负载（用电器）供电的电路。将开关 S 合上时，电路接通，有电流通过负载  $R$ ，这种状态称为负载状态，此时电源输出的电流  $I$  取决于外电路中并联的用电器的数量。为能在额定电压下工作，用电器之间一般采用并联连接。由欧姆定律可得电路中的电流：

$$I = \frac{U_S}{R_0 + R}$$

式中， $R$  是全部用电器的等效电阻。电路中所接的用电器常常是变动的，当并联的用电器增多时，其等效电阻  $R$  减小，而电源  $U_S$  通常为一恒定值，且内阻  $R_0$  很小，电源的端电压  $U$  变化很小，这时电源输出电流和功率将随之增大，这种情况称为电路的负载增大。反之，当并联的用电器减少时，其等效电阻增大，电源输出电流和功率将随之减小，这种情况称为电路的负载减小。

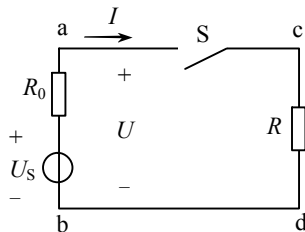


图 1-17 电路的工作状态

当电源输出的电流和电压均为额定值时，电源达到额定工作状态，或称为满载状态。一般而言，电气设备在额定工作状态时是最经济合理和安全可靠的，并能保证电气设备有一定的使用寿命。若继续增加负载，电源输出的电流将超过额定值，这时称为过载。电气设备在短时间内少量的过载，因温度的升高需要一段时间，并不会立即导致电气设备损坏，但是过载时间过长，温度超过了它的最高工作温度，就会大大缩短使用寿命，严重情况下，甚至会使电气设备很快烧毁。



负载两端的电压为：

$$U = IR$$

在忽略导线的电阻时，电源输出的电压就等于负载两端的电压。

由以上两式得：

$$U = U_S - IR_0$$

由此可见，电源端电压小于电动势，两者之差等于电流通过电源内阻所产生的压降  $IR_0$ 。内阻压降与负载电流的大小有关，电流愈大，电压降  $IR_0$  也愈大。

将上式中的各项乘以电流  $I$ ，得到功率平衡式：

$$UI = U_S I - I^2 R_0$$

即：

$$P = P_E - \Delta P$$

式中  $P_E = U_S I$  —— 电源产生的功率；

$\Delta P = I^2 R_0$  —— 电源内阻上损耗的功率；

$P = UI$  —— 电源输出的功率。

根据上面的分析可知，在负载状态下，电源的输出功率和电流取决于负载的大小，并且，电源产生的功率等于负载消耗的功率与电源内阻上损耗的功率之和，符合能量守恒定律。

## 2. 开路（空载）状态

在如图 1-17 所示电路中，当开关 S 断开时，电路处于开路（空载）状态。

由于开路时电路未构成闭合回路，电路中的电流为零，负载两端的电压也为零，负载不消耗功率，这时电源的端电压在数值上等于电动势，称为开路电压或空载电压，用  $U_{OC}$  表示。由于电路的电流为零，故电路不输出功率。

由上所述，开路时电路的主要特征可归纳为：

$$\left. \begin{array}{l} I = 0 \\ U = U_{OC} = U_S \\ P = 0 \end{array} \right\}$$

## 3. 短路状态

在如图 1-17 所示电路中，当电源的两端 a 和 b 由于某种原因而直接接通，即外电路电阻等于零，称电源被短路，如图 1-18 所示。这时电流仅由内阻  $R_0$  限制，在  $R_0$  很小的情况下，电流会达到很大的数值，这个电流称为短路电流，用  $I_{SC}$  表示。

电源短路时，由于外电路的电阻为零，所以电源的端电压也为零，电源的电动势全部降落在内电阻上。

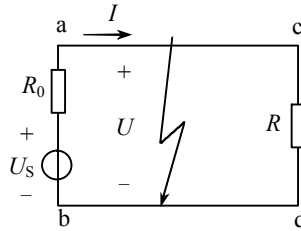


图 1-18 电路的短路状态

由上所述，电源短路时的特征可归纳为：

$$\left. \begin{aligned} U &= 0 \\ I &= I_{SC} = \frac{U_S}{R_0} \\ P &= 0 \\ P_E &= \Delta P = I^2 R_0 \end{aligned} \right\}$$

短路通常是一种事故，应尽量避免。为了防止短路事故的危害，通常在电路中安装熔断器或其他自动开关等保护装置，一旦发生短路，能迅速切断故障电路，从而防止事故扩大，以保护电气设备和供电线路。

有时由于某种需要，人为地将电路的某一部分短路，如图 1-19 所示电路中，为防止电动机 M 的起动电流对电流表 A 的冲击，在起动时用开关 S<sub>2</sub> 将电流表短路，使起动电流从开关 S<sub>2</sub> 旁路通过，待起动结束，再断开 S<sub>2</sub>，恢复电流表的作用。这种人为地将电路某一部分短路称作“短接”。

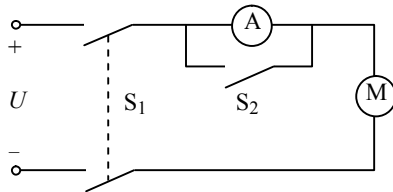


图 1-19 开关将电流表短接

**例 1-3** 设图 1-20 所示电路中的电源额定功率  $P_N = 22\text{kW}$ ，额定电压  $U_N = 220\text{V}$ ，内阻  $R_0 = 0.2\Omega$ ， $R$  为可调节的负载电阻。求：

- (1) 电源的额定电流  $I_N$ ；
- (2) 电源开路电压  $U_{OC}$ ；
- (3) 电源在额定工作情况下的负载电阻  $R_N$ ；
- (4) 负载发生短路时的短路电流  $I_{SC}$ 。

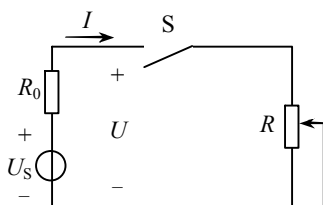


图 1-20 例 1-3 的图

解 (1) 电源的额定电流为:

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{22 \times 10^3}{220} = 100 \text{ (A)}$$

(2) 电源开路电压为:

$$U_{OC} = U_S = U_N + I_N R_0 = 220 + 100 \times 0.2 = 240 \text{ (V)}$$

(3) 电源在额定状态时的负载电阻为:

$$R_N = \frac{U_N}{I_N} = \frac{220}{100} = 2.2 \text{ (}\Omega\text{)}$$

(4) 短路电流为:

$$I_{SC} = \frac{U_S}{R_0} = \frac{240}{0.2} = 1200 \text{ (A)}$$

## 1.4 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析电路问题最基本的定律。基尔霍夫定律有两条，即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。在介绍基尔霍夫定律之前，先结合如图 1-21 所示电路介绍几个与基尔霍夫定律有关的电路名词。

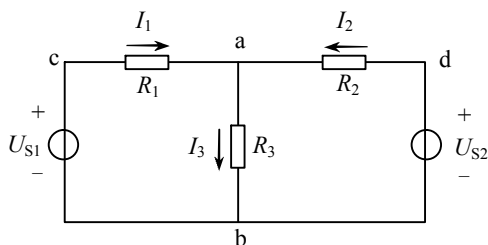


图 1-21 具有节点的多回路电路

(1) 支路。电路中两点之间通过同一电流的不分叉的一段电路称为支路。图 1-21 中共有 3 条支路: ab、acb、adb。其中 ab 支路不含电源,称为无源支路; acb、

adb 支路含有电源，称为有源支路。

(2) 节点。电路中 3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点。图 1-21 中共有两个节点：节点 a 和节点 b。

(3) 回路。电路中任一闭合的路径称为回路。图 1-21 中共有 3 条回路：acbda、acba 和 abda。

#### 1.4.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律是描述电路中任一节点处各支路电流之间相互关系的定律。

因为电流具有连续性，在电路中任一节点上均不可能发生电荷堆积现象，所以在任一瞬时流入节点的电流之和必定等于从该节点流出的电流之和，即：

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

这一关系称为基尔霍夫电流定律，通常又称基尔霍夫第一定理，简称为 KCL。KCL 实质上是电流连续性原理的具体反映。

在图 1-21 中，设电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的参考方向如图中所示，对节点 a 运用 KCL，有：

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

上式可写成：

$$\sum I = 0$$

所以 KCL 还可以表述为：在任一瞬时，通过任一个节点电流的代数和恒等于零。

运用上式列方程时，可假定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负；也可以作相反的假定，即设流出节点的电流为正，流入节点的电流为负。

根据计算的结果，有些支路的电流可能是负值，这是由于选定的电流参考方向与实际方向相反所致。

基尔霍夫电流定律可推广应用于包围部分电路的任一假设的闭合面。

如图 1-22 所示电路，设流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，分别对节点 a、b、c 列 KCL 方程，有：

$$I_1 - I_4 - I_6 = 0$$

$$I_2 + I_4 - I_5 = 0$$

$$I_3 + I_5 + I_6 = 0$$

将以上 3 式相加，得：

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

这一结果与把封闭区域看成一个节点，应用 KCL 列方程的结果完全相同，所以基尔霍夫电流定律不仅适用于节点，也可推广应用于包围部分电路的任一假设的封闭面，不论被包围部分的电路结构如何，流入此封闭面的电流代数和恒等于零。

**例 1-4** 如图 1-23 所示电路，已知电流  $I_1 = 6\text{A}$ ， $I_2 = 5\text{A}$ ， $I_3 = 4\text{A}$ ，试求  $I_4$ 。

**解** 设流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，由 KCL 有：

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 = I_1 - I_2 - I_3 = 6 - 5 - 4 = -3 \text{ (A)}$$

负号说明电流  $I_4$  的实际方向与图中所标的方向相反。

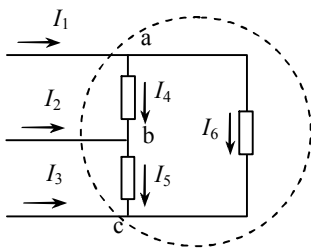


图 1-22 KCL 的推广应用

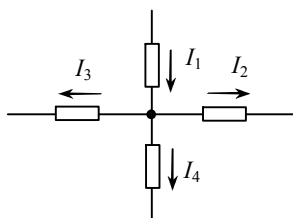


图 1-23 例 1-4 的图

## 1.4.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律是描述电路中任一回路上各段电压之间相互关系的定律。

能量守恒定律是自然界中普遍存在的规律，电路也必须遵守能量守恒法则。若某段时间内，电路中某些元件得到的能量有所增加，则其他一些元件的能量必然有所减少，以保持能量的守恒，这就要求电路中各电压之间必须满足一定的关系。

从回路中任意一点出发，以顺时针方向或逆时针方向沿回路绕行一周，在这个方向上升高的电压之和应等于降低的电压之和，回到原来的出发点时，该点的电位值不发生变化，即电路中任意一点的瞬时电位具有单值性，即：

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}}$$

这一关系称为基尔霍夫电压定律，通常又称基尔霍夫第二定理，简称为 KVL。KVL 实质上是能量守恒定律的具体反映。

从如图 1-21 所示电路中取出一个回路  $adbca$ ，并重新画在图 1-24 中，依次标出各元件上的电压  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_{S1}$ 、 $U_{S2}$ 。对每个回路要规定绕行方向，在图中用虚线和箭头表示。

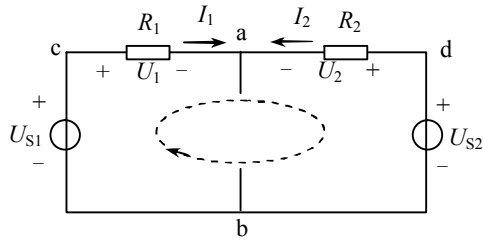


图 1-24 基尔霍夫电压定律用图

在图 1-24 中，设各电压、电流的参考方向及回路绕行方向如图所示，运用 KVL，有：

$$U_1 + U_{S2} = U_{S1} + U_2$$

上式可改写为：

$$-U_1 + U_2 + U_{S1} - U_{S2} = 0$$

即：

$$\sum U = 0$$

所以 KVL 还可以表述为：在任一瞬间，沿任一回路绕行方向绕行一周，回路中各段电压的代数和恒等于零。

运用 KVL 时，一般假设电压参考方向与回路绕行方向一致时电压取正号，电压参考方向与回路绕行方向相反时电压取负号。

根据欧姆定律， $U_1 = I_1 R_1$ 、 $U_2 = I_2 R_2$ ，所以上式又可改写为：

$$-I_1 R_1 + I_2 R_2 = -U_{S1} + U_{S2}$$

即：

$$\sum IR = \sum U_S$$

上式为 KVL 在电阻电路中的另一种表达式，它表示在任一回路绕行方向上，回路中电阻上电压降的代数和等于回路中电压源电压的代数和。运用上式时，电流参考方向与回路绕行方向一致时  $IR$  前取正号，相反时取负号；电压源电压方向与回路绕行方向一致时  $U_S$  前取负号，相反时取正号。

基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合回路，也可推广应用到不闭合电路上，但要将开口处的电压列入方程。例如，图 1-25 (a) 所示的电路中，a、b 两点没有闭合，沿着图示回路方向绕行，可得方程：

$$U_{ab} + U_{S3} + I_3 R_3 - I_2 R_2 - U_{S2} - I_1 R_1 - U_{S1} = 0$$

对于图 1-25 (b) 的电路可列出方程：

$$-U - IR + U_S = 0$$

或：

$$I = \frac{U_S - U}{R}$$

这就是一段有源电路的欧姆定律表达式。

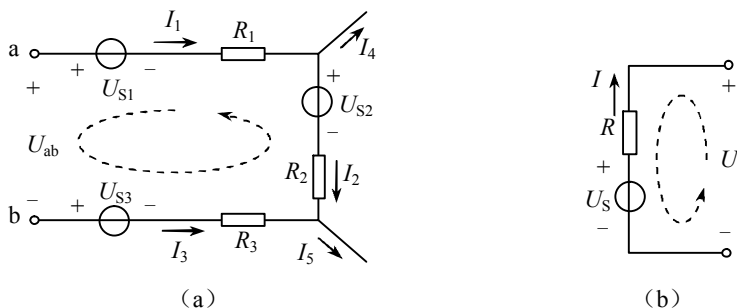


图 1-25 KVL 的推广应用

**例 1-5** 在如图 1-26 所示电路中, 已知  $U_1 = 5\text{V}$ ,  $U_3 = 3\text{V}$ ,  $I = 2\text{A}$ , 试求  $U_2$ 、 $I_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $U_S$ 。

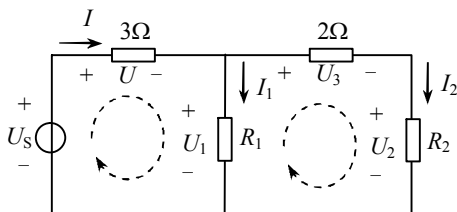


图 1-26 例 1-5 的图

**解** (1)  $I_2$  为通过  $2\Omega$  电阻的电流, 在此电阻上的电压已知为  $U_3 = 3\text{V}$ , 故:

$$I_2 = \frac{3}{2} = 1.5 \text{ (A)}$$

(2)  $R_1$ 、 $R_2$  和  $2\Omega$  电阻构成一闭合回路, 由基尔霍夫电压定律得:

$$U_2 + U_3 - U_1 = 0$$

所以:

$$U_2 = U_1 - U_3 = 5 - 3 = 2 \text{ (V)}$$

(3) 由欧姆定律可求得:

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2}{1.5} = 1.33 \text{ (}\Omega\text{)}$$

(4) 根据基尔霍夫电流定律有:

$$I_1 = I - I_2 = 2 - 1.5 = 0.5 \text{ (A)}$$

于是由欧姆定律可求得：

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{5}{0.5} = 10 \quad (\Omega)$$

(5)  $U_S$ 、 $R_1$  和  $3\Omega$  电阻构成一闭合回路，由基尔霍夫电压定律得：

$$U + U_1 - U_S = 0$$

所以：

$$U_S = U + U_1 = 2 \times 3 + 5 = 11 \quad (\text{V})$$

**例 1-6** 在如图 1-27 所示电路中， $U_{S1} = 12 \text{ V}$ ， $U_{S2} = 3 \text{ V}$ ， $R_1 = 3 \Omega$ ， $R_2 = 9 \Omega$ ， $R_3 = 10 \Omega$ ，试求开口处 ab 两端的电压  $U_{ab}$ 。

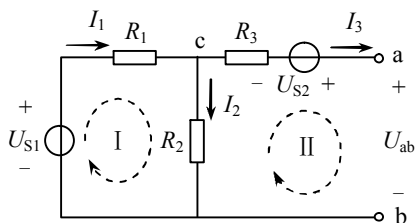


图 1-27 例 1-6 的图

**解** 设电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的参考方向及回路 I、II 的绕行方向如图中所示。因 ab 处开路，所以  $I_3 = 0$ 。对节点 c 列 KCL 方程，有：

$$I_1 = I_2$$

对回路 I 列 KVL 方程，有：

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = U_{S1}$$

所以：

$$I_2 = I_1 = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} = \frac{12}{3 + 9} = 1 \quad (\text{A})$$

对回路 II 列 KVL 方程，有：

$$U_{ab} - I_2 R_2 + I_3 R_3 - U_{S2} = 0$$

所以：

$$U_{ab} = I_2 R_2 - I_3 R_3 + U_{S2} = 1 \times 9 - 0 \times 10 + 3 = 12 \quad (\text{V})$$

## 1.5 电位的概念及计算

在 1.1.3 节中已对电位的概念作了初步介绍，这里对电位的概念及电位的计算方法作进一步阐述。



### 1.5.1 电位的概念

电位的概念对实际电路的测量十分重要。一个复杂电路的元器件数目相当可观，为了了解其工作状态，需要用万用表、示波器等仪器进行测量。若要测出任意元器件两端的电压，可以把仪器两个输入端中的一个固定接在被测电路选定的参考点（零电位点）上，即可单手操作测量各点的电位，进而求出任意两点间的电压。这种测量方法既方便又安全。

应用电位的概念对电路进行分析可使问题简化。分析电子电路时，往往需要分析、计算电路中某些点的电位，这样会使问题更加简单明确。例如，对于二极管，只有当阳极电位高于阴极电位时才导通，否则截止。

虽然电路中选定的参考点一般并不与大地相连接，但也称为“地”。在电路图中，参考点用符号“ $\perp$ ”表示。

根据上述特点，画电路图时不一定将电压源的正、负端全部画出并且连成闭合回路，这样可使整个电路图看起来较为简捷，这就是电路的习惯画法，即电压源不用图形符号表示，而改为只标出其极性及电压值。如图 1-28 (a) 可改画为图 1-28 (b)，在 a 端标出  $+U_{S1}$ ，b 端标出  $+U_{S2}$ ，表示电压源  $U_{S1}$  的正极接在 a 端， $U_{S2}$  的正极接在 b 端，a、b 两点的电位值分别等于两个电压源的电压值  $U_{S1}$  和  $U_{S2}$ ，而负极都接在参考点。为了清楚起见，常将电压源的电位标在图的上、下、左、右，尽可能不画在中间，如图 1-28 (b) 所示。

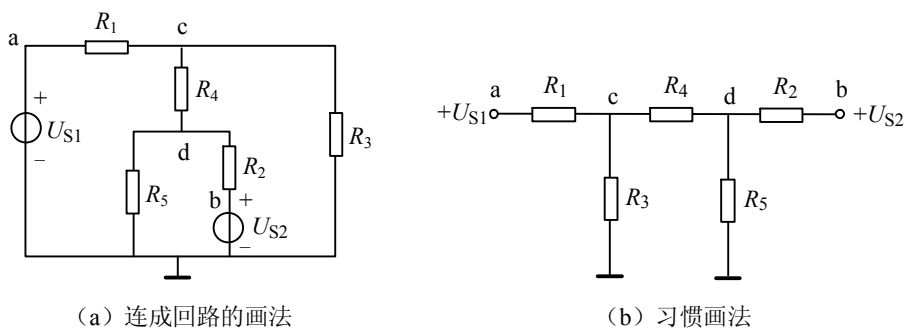


图 1-28 电路的两种画法

显然，电路中各电压源若无公共端，就不能采用上述习惯画法，如图 1-29 所示。

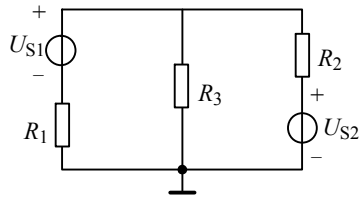


图 1-29 不能采用习惯画法的电路

### 1.5.2 电位的计算

计算电路中各点的电位时，应首先选定电路中某一点作为参考点，并规定参考点的电位为零，则电路中其他各点的电位就等于各点与参考点之间的电压。所以，电路中电位的计算也就是电压的计算。

实际应用中，参考点可以任意选取，但一个电路只能选定一个参考点。参考点选定后，电路中各点电位就只有惟一的值，即某点电位具体到同一电路中具有单值性。

在如图 1-30 (a) 所示电路中，如果选 b 点为参考点，如图 1-30 (b) 所示，则有  $U_b = 0$ ，其他各点的电位分别为：

$$U_a = U_{ab} = 10 \times 6 = 60 \text{ (V)}$$

$$U_c = U_{cb} = 140 \text{ (V)}$$

$$U_d = U_{db} = 90 \text{ (V)}$$

计算结果表明，a、c、d 三点的电位均比 b 点高，具有正电位。

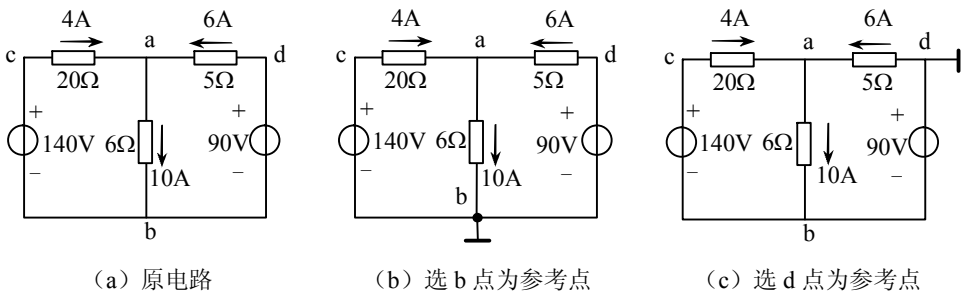


图 1-30 电位计算示例

在电路中，知道各点电位后，任意两点间的电压就能由两点间的电位差求得。例如，c、d 两点间的电压为：

$$U_{cd} = U_c - U_d = 140 - 90 = 50 \text{ (V)}$$

同一个电路，若选用不同参考点，各点电位的数值也不同。如图 1-30 (a) 所

示的电路，若选取 d 点为参考点，如图 1-30 (c) 所示，则 d 点电位  $U_d = 0$ 。其他各点的电位计算如下：

$$U_a = U_{ad} = -6 \times 5 = -30 \text{ (V)}$$

$$U_b = U_{bd} = -90 \text{ (V)}$$

$$U_c = U_{cb} + U_{bd} = 140 - 90 = 50 \text{ (V)}$$

计算结果表明，c 点电位比参考点电位高 50V，具有正电位。a、b 点电位比参考点电位低，具有负电位。c、d 两点之间的电位差（即电压）为：

$$U_{cd} = U_c - U_d = U_c = 50 \text{ (V)}$$

由此可见，电路中任意两点间的电压不随参考点的改变而改变。

从电位计算的一般原则来说，参考点的选取虽然是可以任意的，但大部分情况下，将支路汇集最多的节点选为参考点可使计算较为方便。此外，作图时，一般也将参考点画在电路的底部，分析计算比较方便。

**例 1-7** 在如图 1-31 所示电路中，已知  $U_{S1} = 5 \text{ V}$ ， $U_{S2} = 20 \text{ V}$ ， $U_{S3} = 30 \text{ V}$ ， $U_{S4} = 15 \text{ V}$ ， $U_{S5} = 60 \text{ V}$ ， $R_1 = 7 \Omega$ ， $R_2 = 20 \Omega$ ， $R_3 = 15 \Omega$ 。求图示各点的电位，并计算电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  上的电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$ 。

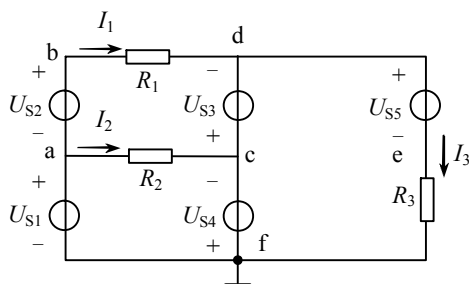


图 1-31 例 1-7 的图

**解** 根据电位的概念，有：

$$U_a = U_{S1} = 5 \text{ (V)}$$

$$U_b = U_a + U_{S2} = 5 + 20 = 25 \text{ (V)}$$

$$U_c = -U_{S4} = -15 \text{ (V)}$$

$$U_d = U_c - U_{S3} = -15 - 30 = -45 \text{ (V)}$$

$$U_e = U_d - U_{S5} = -45 - 60 = -105 \text{ (V)}$$

由上可得：

$$U_{bd} = U_b - U_d = 25 - (-45) = 70 \text{ (V)}$$

$$U_{ac} = U_a - U_c = 5 - (-15) = 20 \text{ (V)}$$

$$U_{ef} = U_e - U_f = U_e = -105 \text{ (V)}$$

所以，可由各点电位计算各电阻上的电压，然后计算各电阻上的电流，为：

$$I_1 = \frac{U_{bd}}{R_1} = \frac{70}{7} = 10 \text{ (A)}$$

$$I_2 = \frac{U_{ac}}{R_2} = \frac{20}{20} = 1 \text{ (A)}$$

$$I_3 = \frac{U_{ef}}{R_3} = \frac{-105}{15} = -7 \text{ (A)}$$

**例 1-8** 在如图 1-32 (a) 所示电路中，求出开关 S 断开和闭合两种情况下的 a 点电位。

**解** (1) S 断开时，电路如图 1-32 (b)。设电流  $I$  方向如图，由欧姆定律得：

$$I = \frac{12 - (-12)}{20 + 4 + 6} = 0.8 \text{ (A)}$$

a 点电位为：

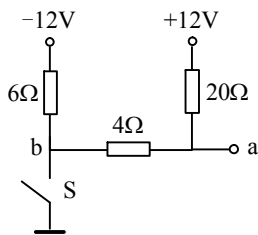
$$U_a = 12 - 0.8 \times 20 = -4 \text{ (V)}$$

(2) S 闭合时，电路如图 1-32 (c)， $U_b = 0$ 。设电流  $I_2$  方向如图，由欧姆定律得：

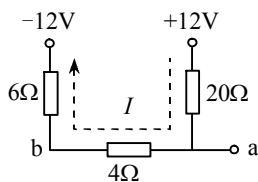
$$I_2 = \frac{12}{20 + 4} = 0.5 \text{ (A)}$$

a 点电位为：

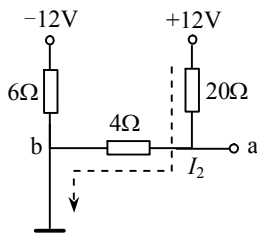
$$U_a = 0.5 \times 4 = 2 \text{ (V)}$$



(a) 原电路



(b) S 断开时



(c) S 闭合时

图 1-32 例 1-8 的图



(1) 电压、电流是电路的两个基本物理量。电压、电流的参考方向是假定的方向。在电路分析中引入参考方向后，电压、电流是代数量。电压、电流大于零表示电压、电流的实际方向与参考方向一致；电压、电流小于零表示电压、电流

的实际方向与参考方向相反。

(2) 电阻、电感、电容和恒压源、恒流源都是理想电路元件。在关联参考方向的情况下, 各种电路元件的电压、电流关系分别为

$$\text{电阻元件: } u = Ri$$

$$\text{电感元件: } u = L \frac{di}{dt}$$

$$\text{电容元件: } i = C \frac{du}{dt}$$

直流恒压源: 两端的电压不变, 流过的电流可以改变。

直流恒流源: 发出的电流不变, 两端的电压可以改变。

(3) 电路有负载、开路(空载)和短路3种不同的工作状态。负载时  $U = U_S - RI$ , 电源输出的电压就等于负载两端的电压, 电源输出的电流就等于负载中的电流。开路时  $I = 0$ 、 $U = U_{OC} = U_S$ 。短路时  $U = 0$ 、 $I = I_{SC} = \frac{U_S}{R_0}$ , 短路

是电路的故障状态, 应采取保护措施。

(4) 基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律, 是分析电路问题最基本的定律。

基尔霍夫电流定律描述了电路中任一节点处各支路电流之间的相互关系。基尔霍夫电流定律说明, 在任一瞬间, 通过任一节点电流的代数和恒等于零, 即  $\sum I = 0$ 。基尔霍夫电流定律可推广应用于广义节点。

基尔霍夫电压定律描述了电路中任一回路各段电压之间的相互关系。基尔霍夫电压定律说明, 在任一瞬间, 沿任一回路绕行方向绕行一周, 回路中各段电压的代数和恒等于零, 即  $\sum U = 0$  或  $\sum U_S = \sum RI$ 。基尔霍夫电压定律可推广应用于假想的闭合回路。

(5) 电路中某点与参考点之间的电压称为该点的电位。参考点不同, 各点电位值也不同, 但电路中任两点间的电压不随参考点变化。



1-1 在如图 1-33 所示各电路中。

- (1) 元件 1 消耗 10W 功率, 求电压  $U_{ab}$ ;
- (2) 元件 2 消耗 -10W 功率, 求电压  $U_{ab}$ ;
- (3) 元件 3 产生 10W 功率, 求电流  $I$ ;
- (4) 元件 4 产生 -10W 功率, 求电流  $I$ 。

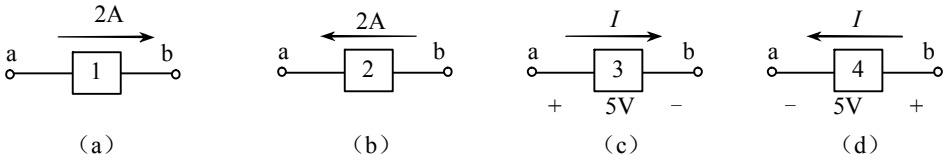


图 1-33 习题 1-1 的图

1-2 求如图 1-34 所示各电路中各电源的功率，并指出是吸收功率还是放出功率？

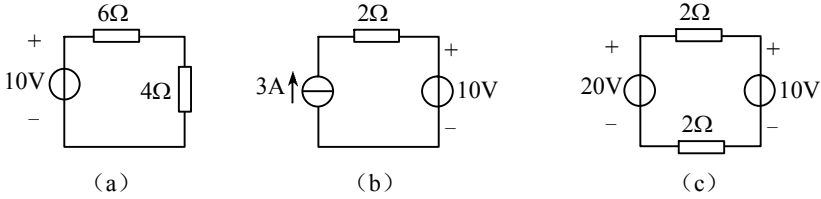


图 1-34 习题 1-2 的图

1-3 在图 1-35 中，5 个元件电流和电压的参考方向如图中所示，今通过实验测量，得知  $I_1 = -4\text{A}$ ， $I_2 = 6\text{A}$ ， $I_3 = 10\text{A}$ ， $U_1 = 140\text{V}$ ， $U_2 = -90\text{V}$ ， $U_3 = 60\text{V}$ 。

- (1) 试标出各电流的实际方向和各电压的实际极性（可另画一图）；
- (2) 判断哪些元件是电源？哪些是负载？
- (3) 计算各元件的功率，电源发出的功率和负载取用的功率是否平衡？

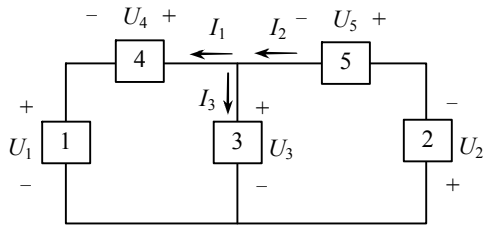


图 1-35 习题 1-3 的图

1-4 在图 1-36 中，已知  $I_1 = 3\text{mA}$ ， $I_2 = 1\text{mA}$ 。试确定元件 N 中的电流  $I_3$  和它的两端电压  $U_3$ ，并说明它是电源还是负载。校验整个电路中的功率是否平衡。

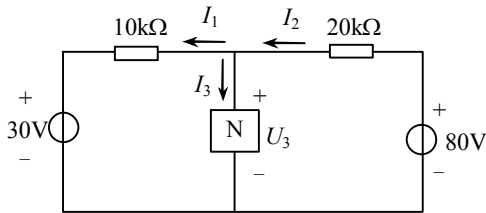


图 1-36 习题 1-4 的图

1-5 用如图 1-37 所示电路可以测量并绘制实际电源的伏安特性曲线。今测得某直流电压源的空载电压为  $U_{OC} = 225 \text{ V}$ ；负载时的电流和电压分别为  $I = 10 \text{ A}$ 、 $U = 220 \text{ V}$ 。试绘制此电源的伏安特性曲线，并建立此电源的电压源模型及电流源模型。

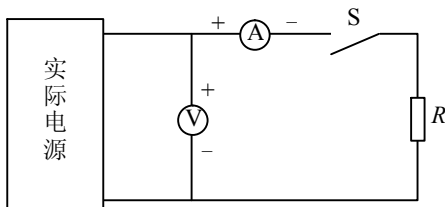


图 1-37 习题 1-5 的图

1-6 一直流发电机，其额定电压为  $U_N = 220 \text{ V}$ ，额定功率为  $P_N = 2.2 \text{ kW}$ 。

(1) 试求该发电机的额定电流  $I_N$  和额定负载电阻  $R_N$ ；

(2) 将 10 只  $220\text{V}$ 、 $40\text{W}$  的灯泡并联作为该发电机的负载，这些灯泡是否能正常工作？为什么？

1-7 一直流电源，其开路电压为  $110\text{V}$ ，短路电流为  $44\text{A}$ 。现将一个  $220\text{V}$ 、 $40\text{W}$  的电烙铁接在该电源上，该电烙铁能否正常工作？它实际消耗多少功率？

1-8 求图 1-38 所示电路 a、b 两点之间的电压  $U_{ab}$ 。

1-9 如图 1-39 所示的电路中，已知  $U_S = 10 \text{ V}$ ， $R_0 = 0.1 \Omega$ ， $R = 1 \text{ k}\Omega$ 。求开关 S 在不同位置时，电流表和电压表的读数各为多少？

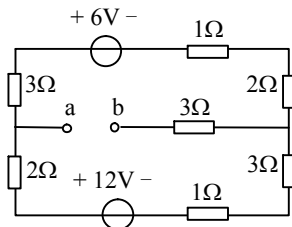


图 1-38 习题 1-8 的图

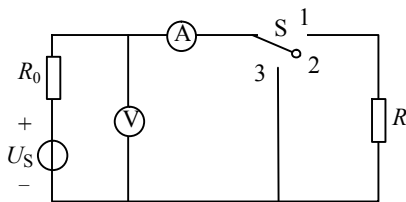


图 1-39 习题 1-9 的图

1-10 求如图 1-40 所示电路中负载吸收的功率。

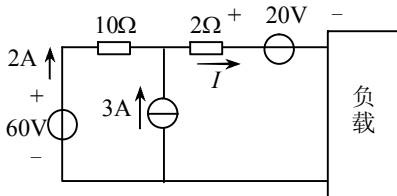


图 1-40 习题 1-10 的图

1-11 求如图 1-41 所示电路中的电压  $U_{ac}$  和  $U_{bd}$ 。

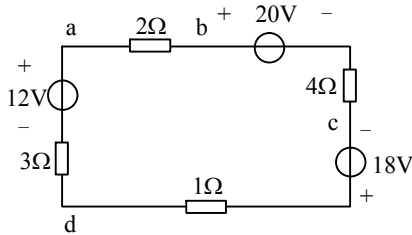


图 1-41 习题 1-11 的图

1-12 在如图 1-42 所示的电路中，已知  $U_{S1} = 12V$ ， $U_{S2} = 8V$ ， $R_1 = 0.2\Omega$ ， $R_2 = 1\Omega$ ， $I_1 = 5A$ ，求  $U_{ab}$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $R_3$ 。

1-13 计算图 1-43 所示电路各电源的功率。

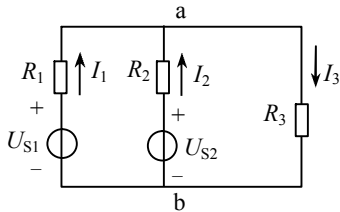


图 1-42 习题 1-12 的图

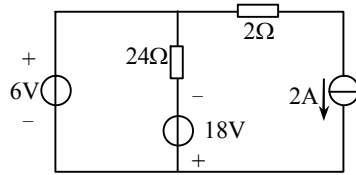


图 1-43 习题 1-13 的图

1-14 指出如图 1-44 所示电路有多少节点和支路，并求电压  $U_{ab}$  和电流  $I$ 。

1-15 在如图 1-45 所示电路中，已知流过电阻  $R$  的电流  $I = 0$ ，求  $U_{S2}$ 。

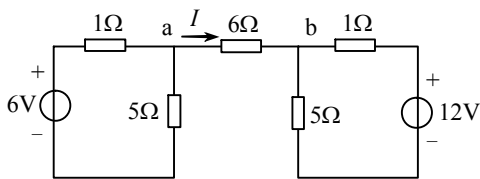


图 1-44 习题 1-14 的图

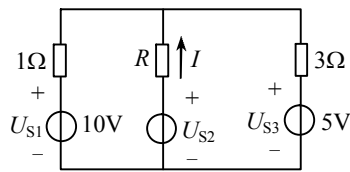


图 1-45 习题 1-15 的图

1-16 在如图 1-46 所示电路中，已知  $U_2 = 6V$ ，求  $U_1$ 、 $U_3$ 、 $U_4$  和  $U_{ae}$ ，并比较 a、b、c、d、e 各点电位的高低。

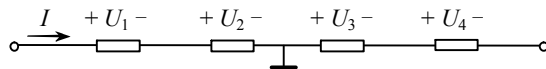


图 1-46 习题 1-16 的图



1-17 试求如图 1-47 所示电路中 a 点的电位。

1-18 试求如图 1-48 所示电路中 a 点和 b 点的电位。如将 a、b 两点直接连接或接一电阻，对电路工作有无影响？

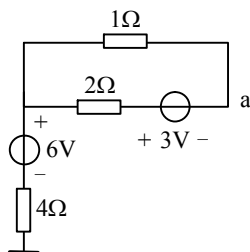


图 1-47 习题 1-17 的图

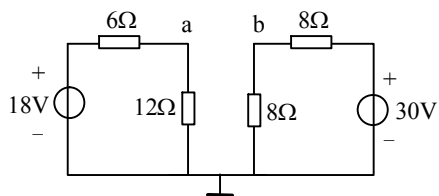


图 1-48 习题 1-18 的图

1-19 在图 1-49 中，已知 a 点电位为  $U_a = -10\text{V}$ ，求电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

1-20 在图 1-50 中，如果  $15\Omega$  电阻上的电压降为  $30\text{V}$ ，其极性如图所示，求电阻  $R$  及 a 点电位。

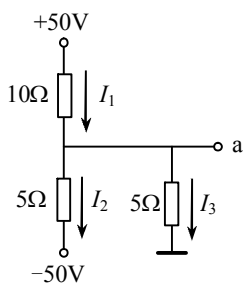


图 1-49 习题 1-19 的图

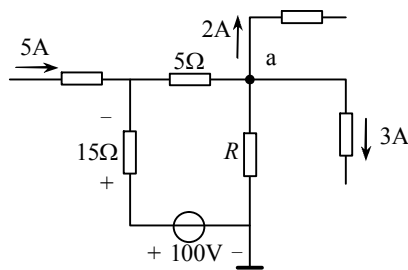


图 1-50 习题 1-20 的图