

电路的基本概念和基本定律

本章是电工电子技术课程的重要基础,所介绍的基本概念和基本定律不仅适用于直流电路,而且适用于(或稍加扩展后适用于)交流电路。本章主要介绍电路的基本概念、电路的基本物理量及其参考方向和电路的基本定律等内容。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成及作用

电路就是将各种电气元件或装置按一定的方式组合起来提供电流的通路,一个完整的电路是由电源、负载、中间环节三个部分按一定方式组成的。

在一个简单照明电路中,如图 1-1 所示。干电池是电源,它是把非电能转化为电能的装置;灯泡是负载,其作用是将电能转换为其他形式的能量——热能和光能;导线和开关为中间环节,它是连接电源和负载的部分,起传递、分配和控制电能的作用。

一般常把负载和中间环节组成的电路称为外电路,而把电源内部的电路称为内电路。

电路按其功能可分为两类:一类是电力电路,实现电能的传输、分配和转换;另一类是信号电路,实现信号的传递和处理。

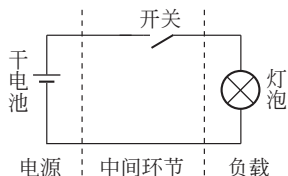


图 1-1 照明电路

1.1.2 电路的基本物理量及其参考方向

1. 电流

带电粒子的定向运动形成电流。

1) 电流强度

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称为电流,用字母 i (或 I) 表示。

若电流不随时间变化,电流用大写字母 I 表示;若电流随时间变化,电流用小写字母 i 表示。

在国际单位制(SI)中,电流强度的单位是安培,简称安,用符号 A 表示。计量微小的电流时,还可以用毫安(mA)、微安(μA)为单位。它们之间的换算关系是 $1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$ 。

2) 电流的方向

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的流向,称其为电流的实际方向,在电路中用虚线箭头表示。

但在对电路进行分析与计算时,常任意选定某一方向作为电流的参考方向,也称为正方向,在电路中用实线箭头表示。

若电流的实际方向与参考方向一致,则电流为正值,即 I (或 i) > 0 ; 若电流的实际方向与其参考方向相反,则电流为负值即 I (或 i) < 0 。这样,在选定了参考方向之后,电流值的正负就可以反映出电流的实际方向。

图 1-2(a)表示电流的实际流向与参考方向相同;图 1-2(b)表示电流的实际流向与参考方向相反。

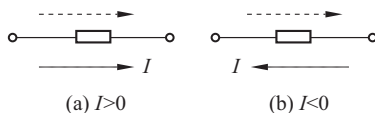


图 1-2 电流的参考方向

电路图上所标出的电流方向,如果没有特别说明,一般指的是参考方向。

2. 电压

电场力把单位正电荷从电场中的 a 点移到 b 点所做的功称为 a 、 b 间电压,用 u_{ab} (或 U_{ab}) 表示。

在 SI 中,电压的单位为伏特,简称伏,用字母 V 表示。换算关系如下:

$$1\text{kV}(\text{千伏})=10^3\text{V}; \quad 1\text{V}=10^3\text{mV}(\text{毫伏})=10^6\mu\text{V}(\text{微伏})$$

电压的实际方向为电位降低的方向,在电路中用虚线箭头表示,也可以用极性“+”“-”表示;参考方向既可以用实线箭头表示,也可以用极性“+”“-”表示,还可以用双下标表示,如 U_{ab} 。

当电压的参考方向与其实际方向一致时,电压为正值 U (或 u) > 0 ; 当电压的参考方向与其实际方向相反时,电压为负值 U (或 u) < 0 。图 1-3(a)表示电压的实际极性与参考极性相同;图 1-3(b)表示电压的实际极性与参考极性相反。

在对电路进行分析和计算时,原则上电压和电流参考方向的指定是任意的。但为了方便起见,一般都把元件上电压和电流的参考方向取为一致,这种参考方向称为关联参考方向;否则为非关联参考方向,如图 1-4 所示。

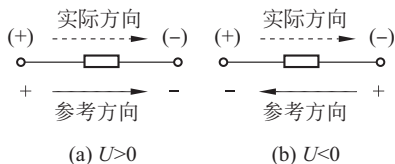


图 1-3 电压的参考方向

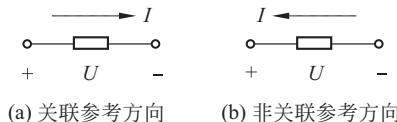


图 1-4 关联参考方向与非关联参考方向

3. 电动势

非电场力把单位正电荷在电源内部由低电位端移到高电位端所做的功,称为电动势,用字母 e (或 E) 表示。

电动势的实际方向在电源内部由低电位指向高电位,其单位与电压的单位相同。

电压 U_{ab} 是电场力把单位正电荷从外电路 a 点移到 b 点所做的功,由高电位指向低电位。电动势 E_{ba} 是非电场力在电源内部把单位正电荷从 b 点移到 a 点克服电场力所做的

功,其方向由低电位指向高电位,如图 1-5 所示。

4. 电功率

电能量对时间的变化率,也就是电场力在单位时间内所做的功,称为功率,用字母 P 表示。对于直流电路,电源功率 P_s 表示电源在单位时间内输出的电能,电源功率等于电源电动势与通过电源的电流的乘积;负载的功率 P 代表负载在单位时间内消耗的电能,负载功率等于负载上的电压降与通过负载的电流的乘积。在一个电路中,电源产生的功率与负载、导线以及电源内阻上消耗的功率遵守能量守恒定律。

功率的单位是瓦特,简称瓦,用字母 W 表示。换算关系如下:

$$1\text{kW}(\text{千瓦})=10^3\text{W}; \quad 1\text{W}=10^3\text{mW}(\text{毫瓦})$$

电流在一段时间内所做的功,称为电能。电能等于功率与时间的乘积。电能的单位是焦耳,用 J 表示,换算关系为 $1\text{J}=1\text{W}\times 1\text{s}=1\text{W}\cdot\text{s}$ 。

1 度电就是功率为 1 千瓦的负载,在 1 小时内消耗的电能,即 1 千瓦·时($1\text{kW}\cdot\text{h}$)。

在电路分析中,不仅需要计算元件(或某部分电路)功率的大小,有时还要判断该元件(或某部分电路)是产生功率还是消耗功率。根据电压和电流的实际方向可以确定电路元件的功率性质如下。

当 U 和 I 的实际方向相同,即电流从“+”端流入,从“-”端流出,则该元件(或某部分电路)是消耗(取用)功率,属负载性质。

当 U 和 I 的实际方向相反,即电流从“+”端流出,从“-”端流入,则该元件(或某部分电路)是输出(提供)功率,属电源性质。

1.1.3 电路模型及理想电路元件

由理想电路元件构成的电路称为电路模型。基本的理想电路元件有理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件、理想电压源和理想电流源五种。电阻元件、电感元件、电容元件具有负载性质。电压源的特点是具有恒定的电动势,能输出恒定的电压,其端电压不随输出电流而变化;电流源的特点是输出恒定的电流,其电流不随输出电压而变化。

1. 电阻元件

电阻元件一般用来表示实际电路中的耗能元件,其图形符号如图 1-6(a)所示。

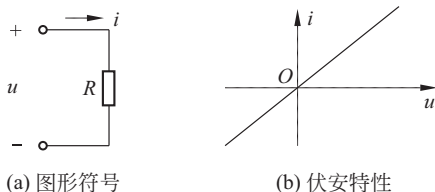


图 1-6 电阻元件的图形符号及伏安特性

元件端电压和流过的电流之间的关系称为元件的伏安特性。在关联参考方向下,电阻元件的伏安特性为

$$u = Ri \quad (1-1)$$

电阻元件的伏安特性是一条过原点的直线,直线的斜率与电阻 R 成正比,如图 1-6(b)所示。通常把伏安特性为直线的电阻称为线性电阻。在 SI 中,电阻的单位是欧姆,用 Ω 表示。电阻元件消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-2)$$

2. 电感元件

电感元件是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。当电感线圈中通过电流后,将产生磁通,在其内部及周围建立磁场,储存能量。根据电磁感应定律,有

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-3)$$

电感元件两端的电压与电流对时间的变化率成正比,比率系数 L 为自感(系数)或电感。线性电感元件的图形符号如图 1-7 所示。

当电感元件中流过直流电流时,电感元件相当于短路。在 SI 中,电感的单位是亨利,简称亨,用 H 表示。

电感元件中储存的磁场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-4)$$

3. 电容元件

电容元件是从理想电容器中抽象出来的理想化模型。电容元件的图形符号如图 1-8 所示。

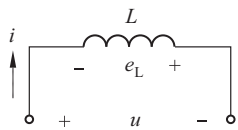


图 1-7 电感元件的图形符号

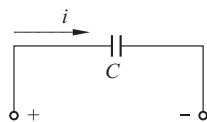


图 1-8 电容元件的图形符号

电容器极板上储存的电量 q 与两端的电压 u 之间的关系为

$$q = Cu \quad (1-5)$$

比例系数 C 称为电容。在 SI 中,电容的单位是法拉,简称法,用 F 表示,换算关系为 $1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$ 。当电压、电流的参考方向为关联参考方向时,则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-6)$$

当电压为直流电压时,电容相当于开路。电容元件储存的能量为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-7)$$

4. 理想电压源

无论流过多大电流,都能提供恒定电压的电路元件称为理想电压源,简称电压源。它相当于一个只产生电压 U_s 而没有内部能量损耗的电源。理想电压源的图形符号及伏安特性曲线如图 1-9 所示,其伏安特性曲线为一条平行电流轴的直线。

理想电压源实际上并不存在,但如果电压源的内阻远小于负载电阻,则其端电压基本恒定,就可忽略内阻的影响,认为是一个理想电压源。

若电流流过电压源时,是从低电位流向高电位,则电压源向外提供电能;若电流流过电压源时,从高电位流向低电位,则电压源吸收电能,作为负载来用,如电池被充电。

5. 理想电流源

在电路中,无论其端电压是多少,都能提供恒定电流的电路元件称为理想电流源,简称电流源。至于它的端电压 U ,则由与之相连接的外电路决定。理想电流源图形符号及伏安特性曲线如图 1-10 所示,其伏安特性曲线为一条平行电压轴的直线。

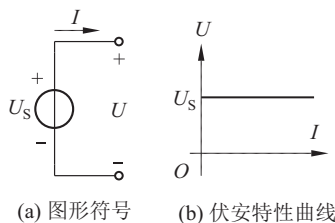


图 1-9 理想电压源的图形符号及伏安特性曲线

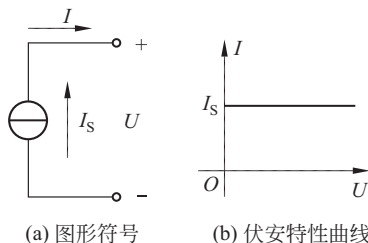


图 1-10 理想电流源的图形符号及伏安特性曲线

理想电流源实际上也不存在,但如果电流源的内阻远大于负载电阻,则其电流基本恒定,就可认为是理想电流源。电流源既可以对外电路提供能量,也可以从外电路接收能量,视其端电压的极性而定。

1.1.4 电路的工作状态

电路分有载、开路和短路三种基本工作状态。

1. 有载工作状态

在图 1-11 所示电路中,当开关 S 闭合后,电源与负载接通,有电流流过负载 R_L ,这种状态称为电路的有载工作状态,或称之为负载状态。流过电阻 R_L 的电流、电阻 R_L 两端的电压及电阻 R_L 消耗的功率分别如下:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_s}{R_0 + R_L} \\ U &= IR_L = U_s - IR_0 \\ P &= UI = I^2 R_L \end{aligned}$$

式中: R_0 为电源的内阻。

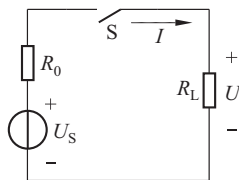


图 1-11 有载工作状态

2. 开路状态

开路状态又称为断路状态或空载状态。在图 1-12 所示电路中,当开关 S 打开时,电路处于开路状态。开路时外电路的电阻对电源来说等于无穷大,电路中的电流等于零。电源的端电压称为开路电压或空载电压,在数值上等于电源的电压,用 U_{OC} 表示,即 $U_{OC} = U_s$ 。电路不输出功率,即 $P = 0$ 。

3. 短路状态

如果由于某种原因使电源的两端直接连接在一起,则称电源被短路,如图 1-13 所示。

此时的电流称为短路电流,用 I_{SC} 表示,即 $I_{SC} = \frac{U_S}{R_0}$ 。电源短路时,负载的端电压 $U=0$ 。电源对外输出的功率和负载所吸收的功率均为零,电源产生的功率 P_S 全部消耗在内阻上,即 $P_S = U_S I_{SC} = R I_{SC}^2$ 。短路通常是一种严重的事故状态,应该尽力预防和避免。

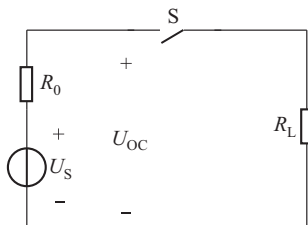


图 1-12 开路状态

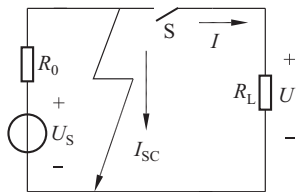


图 1-13 短路状态

1.1.5 电位的概念与计算

电位是度量电路中各点所具有的电位能大小的物理量,它必须是相对于某个特定的参考点而言的。电位在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所做的功。

参考点的电位值一般设为零,因此也称为零电位点。

电路中任意一点的电位就是该点与参考点之间的电压,而电路中任意两点之间的电压则等于这两点的电位之差。

零电位参考点可以任意选定,它只是作为一个电位比较标准。在电路图中用“ $\perp$ ”符号表示。在工程上,把大地作为零电位参考点;在电子技术上,以机壳或导线汇交点作为零电位参考点。

以图 1-14 所示的电路为例来讨论电路中各点的电位。

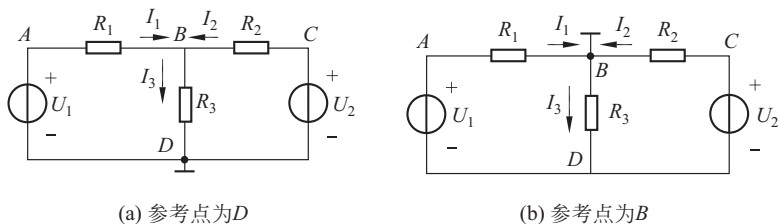


图 1-14 电位举例

设 $U_1 = 30V$, $U_2 = 40V$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $R_3 = 10\Omega$, $I_1 = 1A$, $I_2 = 1A$, $I_3 = 2A$ 。若将 D 点设为参考点[见图 1-14(a)],则各点的电位值

$$V_D = 0V \quad V_A = U_1 = 30V$$

$$V_B = I_3 R_3 = 20V \quad V_C = U_2 = 40V$$

若将 B 点作为参考点[见图 1-14(b)],则各点的电位值

$$\begin{aligned} V_B &= 0\text{V} & V_A &= I_1 R_1 = 10\text{V} \\ V_C &= I_2 R_2 = 20\text{V} & V_D &= I_3 R_3 = 20\text{V} \end{aligned}$$

选择不同的参考点,各点的电位值变了,但任意两点间的电压是不变的。综上所述,可得出以下两点结论。

- (1) 电路中某一点的电位等于该点与参考点(零电位点)之间的电压。
- (2) 参考点选得不同,电路中各点的电位值不同,但是任意两点间的电压是不变的。所以各点电位的高低是相对的,而两点间的电压是绝对的。

1.2 电路的基本定律

1.2.1 欧姆定律

流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比,这就是欧姆定律。当电压和电流为关联参考方向时,如图 1-15 所示,电路的欧姆定律表达式为

$$U = IR \quad (1-8)$$

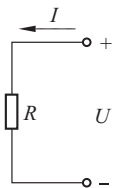


图 1-15 电压与电流之间的关系

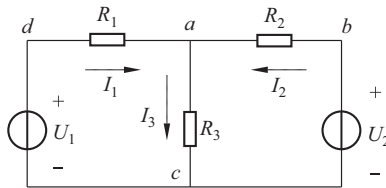


图 1-16 支路、节点、回路和网孔

1.2.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包含两条定律：一条是研究电路中相关支路电流之间关系的基尔霍夫电流定律；另一条是研究电路中各支路电压之间关系的基尔霍夫电压定律。下面先介绍几个基本概念。

(1) 支路：电路中的每一分支称为支路，一条支路流过同一个电流。如图 1-16 中的三条支路，即 adc 、 ac 和 abc 。

(2) 节点：电路中三条或三条以上的支路相连接点称为节点。在图 1-16 中共有两个节点，即 a 和 c 。

(3) 回路：由一条或多条支路所组成的闭合路径称为回路。在图 1-16 中共有三个回路，即 $abca$ 、 $acda$ 和 $abcda$ 。

(4) 网孔：未被其他支路分割的回路称为网孔。在图 1-16 所示电路中共有两个网孔，即 $abca$ 、 $acda$ 。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律指出：在任一瞬间,对于任一节点,流入节点的电流之和必定等于流出该节点的电流之和,用数学表达式表示为

$$I_{\text{入}} = I_{\text{出}} \quad (1-9)$$

基尔霍夫电流定律又可表述为：在任一瞬间，流入任一个节点电流的代数和恒等于零，即

$$\sum I = 0 \quad (1-10)$$

这里的代数和是按照事先规定的电流方向决定的，例如，若流入节点的电流取“+”，则流出节点的电流取“-”。基尔霍夫电流定律也可以推广应用于电路中任何一个假定的闭合面，如图 1-17 所示。

在任一瞬间，通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零，即 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ 。

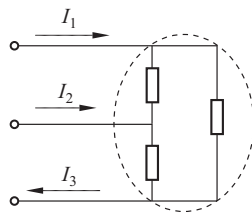


图 1-17 KCL 关于广义节点

2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律指出：在电路中任何时刻，沿任一回路循行一周，所有支路的电压降的代数和等于零，用数学表达式表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-11)$$

在电路的某一回路中应用 KVL 时，必须首先假定各支路的电压参考方向，并指定该回路的循行方向(顺时针或逆时针)，若支路电压与回路方向一致时取“+”，相反时则取“-”。

例 1-1 在图 1-18 所示电路中，已知 $R_1 = 3\Omega, R_2 = 2\Omega, R_3 = 1\Omega, U_1 = 3V, U_3 = 1V$ ，试求电阻 R_2 两端的电压 U_2 。

解：各支路电流和电压的参考方向如图 1-18 所示。根据欧姆定律和 KVL、KCL 有

$$\begin{cases} \text{回路 1: } -U_1 + R_1 I_1 + U_2 = 0 \\ \text{回路 2: } -U_2 + R_3 I_3 + U_3 = 0 \\ \text{节点 } a: I_1 - I_2 - I_3 = 0 \end{cases} \quad (1-12)$$

将各元件参数代入式(1-12)，得

$$U_2 = R_2 I_2 = 0.818(V)$$

基尔霍夫电压定律对于开口电路也同样适用，但需要在开口处假设电压，在列电压方程时，要注意开口处电压方向。

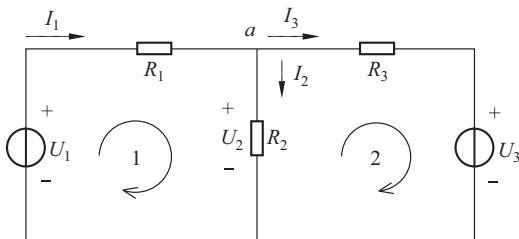


图 1-18 KCL 和 KVL 举例

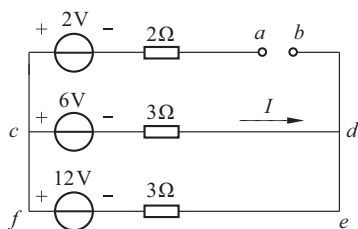


图 1-19 KVL 举例

例 1-2 试求图 1-19 所示电路的开口电压 U_{ab} 。

解：首先指定各回路的绕行方向均为逆时针，在回路 $cdef$ 中，根据 KVL，有 $6 + 3I + 3I - 12 = 0$ ，解得 $I = 1A$ 。在回路 $abdefca$ 中，根据 KVL，有 $2 + U_{ab} + 3I - 12 = 0$ ，解得

$$U_{ab} = 7V。$$

基尔霍夫定律对由各种不同元件所构成的电路都是适用的。另外,这两个定律对于任何变动的电压和电流也同样适用。

习 题

1-1 根据图 1-20 所示参考方向,判断元件是吸收还是发出功率,其功率各为多少。

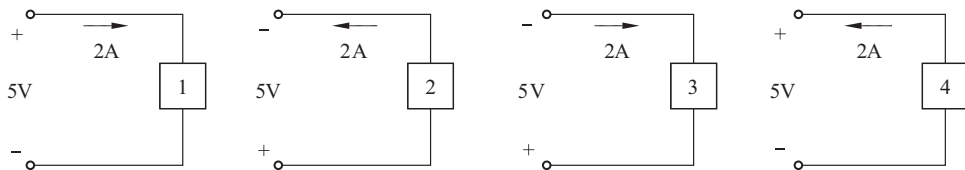


图 1-20 习题 1-1 图

1-2 各元件的条件如图 1-21 所示。

- (1) 若元件 A 吸收功率为 $10W$, 求 I_a 。
- (2) 若元件 B 产生功率为 $-10W$, 求 U_b 。
- (3) 若元件 C 吸收功率为 $-10W$, 求 I_c 。
- (4) 求元件 D 吸收的功率。

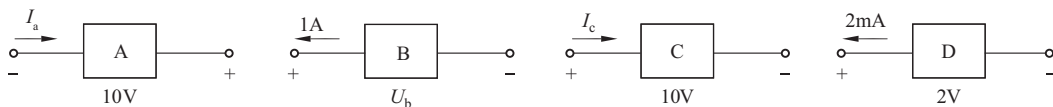


图 1-21 习题 1-2 图

1-3 求图 1-22 所示电路中的电压 U_{ab} 。

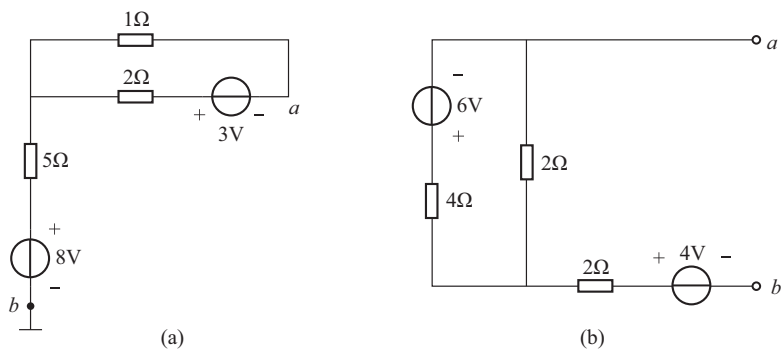


图 1-22 习题 1-3 图

1-4 求图 1-23 所示电路中的电压 U_{ac} 、 U_{ab} 和电流 I 。

1-5 电路如图 1-24 所示。

- (1) 计算电流源的端电压。

(2) 计算电流源和电压源的电功率, 指出是吸收还是提供电功率。

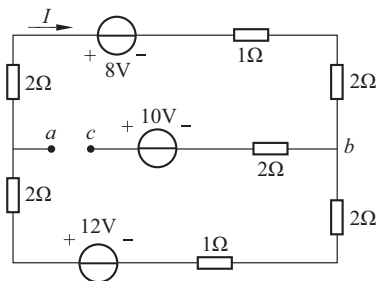


图 1-23 习题 1-4 图

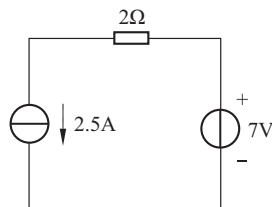


图 1-24 习题 1-5 图

1-6 电路如图 1-25 所示。

(1) 计算电流 I_1 和 I 。

(2) 计算电路中各元件的电功率, 指出是吸收还是提供电功率。

1-7 在图 1-26 所示电路中, 已知: $I_S = 2A$, $U_S = 12V$, $R_1 = R_2 = 4\Omega$, $R_3 = 16\Omega$ 。分别求开关 S 断开和闭合后 a 点电位 V_a 。

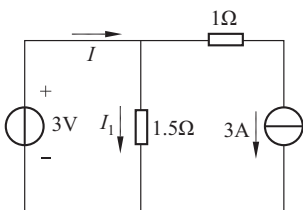


图 1-25 习题 1-6 图

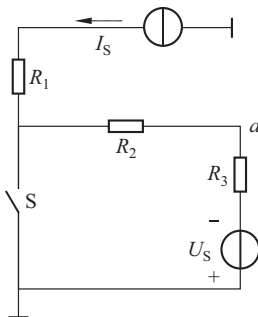


图 1-26 习题 1-7 图

1-8 如图 1-27 所示, 在开关 S 断开和闭合时, 分别计算 a 、 b 、 c 三点的电位。

1-9 在图 1-28 所示电路中, 已知 $U = 3V$, 试求电阻 R 。

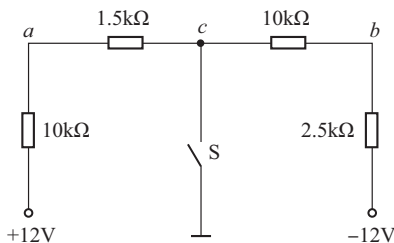


图 1-27 习题 1-8 图

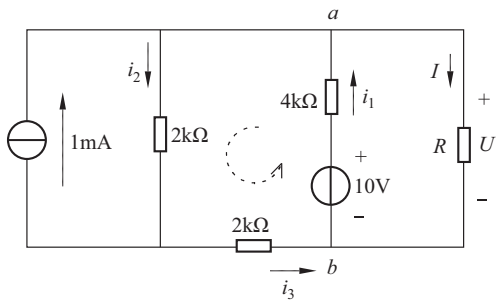


图 1-28 习题 1-9 图