第1部分　电 路 原 理

随着电子设备在日常工作和生活中应用得越来越广泛，各式各样的实际电路随处可见，如电气电路、计算机电路、通信电路、自动控制电路、电力电路等，尽管这些电路的外形、功能、结构等各不相同，但它们都建立在同一个理论基础上，这个理论就是电路理论。

电路原理包括电路分析和电路综合两方面的内容。电路分析是讨论如何在已知的电路中，求出给定激励（输入）的响应（输出）；而电路综合则是研究如何设计一个对给定激励有预期的响应的电路。本书主要面向非电类的本科生和研究生，特别是软件工程、教育技术学、信息安全等专业的学生，因此本书只讨论电路分析中的直流电路的内容。在本书中，随时间变化的物理量一般用小写字母表示，如 $u(t)$、$i(t)$，不随时间变化的物理量一般用大写字母表示，如 U、I、P 等。

第 1 章　电路模型和电路定律

主要内容：

（1）理解电路模型，掌握电流、电压及其参考方向和功率的定义和计算。
（2）了解电阻、电容和电感的定义，理解并掌握独立电源和受控源等电路元件。
（3）掌握基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律及适用条件。

1.1　实际电路和电路模型

实际电路（Circuit）是由一些电气设备和元器件（如电动机、变压器、晶体管、电容等）按一定方式连接而成的。复杂的电路呈网状，又称网络（Network），“电路”和“网络”这两个术语通常是相通的。电路的作用主要有两个：①实现电能的传输和转换，如各类电力系统；②实现信号的处理，如收音机和电视机中的调谐放大电路。

1.1.1　实际电路

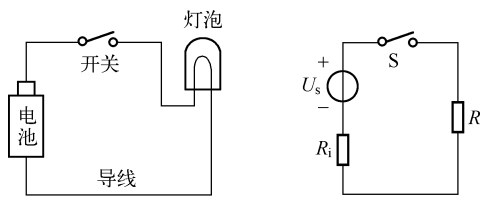
无论电路结构多么复杂，它们都由三大部分组成：电源或信号源、中间环节和负载。

图 1.1-1（a）是最简单的手电筒实际照明电路。它由三部分组成：

（1）提供电能的能源（图中为电池），简称电源或激励源或输入。电源把其他形式的能量转换成电能。

（2）用电设备（图中为灯泡），简称负载。负载把电能转换为其他形式的能量。

（3）连接导线，导线提供电流通路。



(a) 实际电路　　(b) 电路模型

图 1.1-1　手电筒实际照明电路

电路中产生的电压和电流称为响应。

根据元件的不同特性，电路可分为以下几种。

- 根据电路元件参数可分为分布参数电路和集总参数电路。分布参数电路是必须考虑电路元件参数分布性的电路。参数的分布性指电路中同一瞬间相邻两点的电位和电流都不相同。在电力系统中，高电压远距离的电力传输线是比较典型的分布参数电路。而集总参数电路是由集总参数元件构成的电路。集总参数思想是电路原理的最基本也是最核心的思想。
- 根据电路元件参数是否随时间变化可分为时变电路和时不变电路。时变电路是含有时变参数元件的电路。电阻参数随时间变化的电阻器，电感（互感）参数随时间变化的电感器，电容参数随时间变化的电容器，都是时变参数元件。时不变电路是其电路参数不随时间改变的线性电路。
- 根据表征电路元件特性的代数关系可分为非线性电路和线性电路。非线性电路是指

含有非线性元件的电路。这里的非线性元件不包括独立电源。线性电路是完全由线性元件、独立源或线性受控源构成的电路。

1.1.2 电路模型

电路分析的研究对象不是实际电路或一个实际的电路部件，而是将实际电路抽象成理想化的电路模型，通过对电路模型的分析来代替对实际电路的分析。在电路原理中，将这些理想化的电路模型称为电路。而电路是由一些理想化的电路元件组成的。在一定条件下对实际电路器件加以理想化，抽象出一些反映单一电磁现象的理想化电路元件，简称为电路元件。

电阻元件（Resistance）是表示消耗电能的元件，如图 1.1-2 所示。

电容元件（Capacitor）能表示各种电容器产生电场、储存电能的作用，如图 1.1-3 所示。

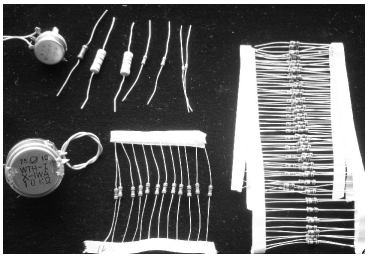


图 1.1-2　电阻元件

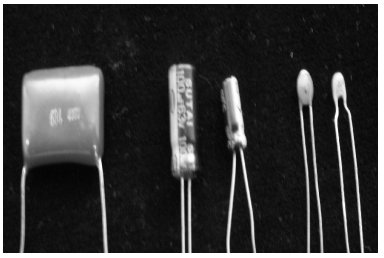


图 1.1-3　电容元件

电感元件（Inductor）能表示各种电感线圈产生磁场、储存磁能的作用，如图 1.1-4 所示。

电源元件（Source）是表示各种其他形式的能量转换成电能的元件，如图 1.1-5 所示。

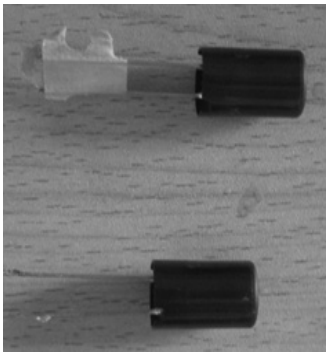


图 1.1-4　电感元件

图 1.1-5　电源元件

这样，电阻元件、电感元件和电容元件就是抽象化了的理想电路元件。将这些元件按一定方式连接起来，逼近实际电路的特性，便构成了实际电路的模型。例如，图 1.1-1（b）为图 1.1-1（a）所示实际电路的电路模型。在这个模型中，电池用一个电压为 U_s 的电源和一个与它串联的内阻 R_i 表示，灯泡用一个电阻 R 表示，连接导线用理想导线（其电阻设为零）或线段表示。

把各种理想的电路元件连接而成的电路，称为理想电路，也称为电路模型。而实际电路

是把各种实际电路元件连接而成的电路。应当指出，用理想电路元件的组合来模拟实际电路，只能在一定条件下近似地反映实际电路中所发生的物理过程。但大量实践证明，只要电路模型建立恰当，对电路模型分析的结果就会与实际电路的测试结果保持基本一致。

电阻元件、电感元件和电容元件都是二端元件，它们分别集总地代表实际电路中耗能作用、磁场作用和电场作用，每个元件中都有确定的电流，端子间都有确定的电压，将这些元件称作集总参数元件。它们是只表示一种电或磁特性的元件。而由集总参数元件构成的电路，称作集总参数电路。实际电路用集总参数电路来近似是有条件的，即当电路元件的尺寸 L 远小于正常工作的波长 λ 时，元件的尺寸与工作波长相比可忽略不计，元件的特性参数可用集总参数表示。电路分析是以集总假设为前提的，其中的基本定律及分析方法必须满足集总假设。未加特殊说明的情况下，本书中的电路均为集总参数电路。

思考与练习

1.1-1　实际电路与电路模型有何区别？

1.1-2　电路模型的适用条件是什么？

1.1-3　画出由 1 节干电池、1 个开关、1 个灯泡、2 个电阻和若干导线组成的并联电路及其模型。

1.1-4　画出由 1 节干电池、1 个开关、1 个灯泡、4 个电阻和若干导线组成的串并混联电路及其模型。

1.2　电流、电压参考方向及功率的计算

电路的变量有电流、电压、电荷、磁链、功率及能量，其中电流、电压、功率是用得较多的三个变量，电流、电压是最基本的变量。在电路分析中，不仅要知道它们的大小，还要知道它们的方向。

1.2.1　电流参考方向

电荷在导体中的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来表示，是单位时间内通过导体横截面的电荷量，可简称为电流。电流的方向习惯上规定为正电荷定向移动的方向。在电路分析中，每个元件中的电流的实际方向往往无法预先判断，而且有时电流的实际方向随时间不断变化，因此很难在电路中标明电流的实际方向。由此引入“参考方向”的概念。

参考方向是在电路分析中任意假设的电流方向，因此所选的参考方向不一定是电流的实际方向。电流的参考方向在电路中一般用画在元件旁或元件引线上的箭头表示。如图 1.2-1 所示电路中，用实线箭头标出了电路元件中电流的参考方向。在参考方向选定后，在指定的电流参考方向下，电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。“$i>0$”表示实际方向与参考方向相同；“$i<0$”表示实际方向与参考方向相反。例如图 1.2-1 所示电路中，若解出电流 $i=-5\text{A}$，表示电流 i 的大小为 5A，电流实际方向与参考方向相反，即由 B 指向 A。可见只有参考方向而无代数表达式就不能确定实际方向；反之，没有参考方向，表达式就没有意义，同样不能知道实际方向。电流的参考方向也可用双下标表示，如 i_{AB}，表示电流的参考方向由 A 指向 B。需要指出的是，用双下标表示电流参考方向对并联电路不适用。

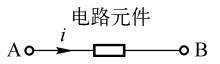


图 1.2-1　电流参考方向

值得注意的是，在求解电路时，先标定电流的参考方向，参考方向是分析计算电路的依据。特别需要指出的是，电流是一种物理现象，是客观存在的，电流方向也是客观存在的，而电流的参考方向仅是为了计算方便而引入的。

1.2.2 电压参考方向

在电路中，单位正电荷由 A 点移动到 B 点所获得或失去的能量为 A、B 两点间电位差，即 A、B 间的电压。电压的真实方向是使电荷电能减少的方向，也是库仑电场力对正电荷做正功的方向，从高电位指向低电位。电压的实际方向也有两种，可以选定任意一个方向为电压的参考方向。在电路中，电压的参考方向可用正（+）、负（−）极性表示，正极性指向负极性的方向就是电压的参考方向。有时为了图示方便，可用一个箭头表示电压的参考方向，如图 1.2-2 所示；也可用双下标表示，如 u_{AB}。若“$u>0$”表明实际方向与参考方向极性一致，若“$u<0$”表明实际方向与参考方向相反。

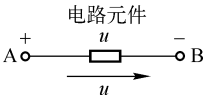


图 1.2-2 电压参考方向

值得注意的是，在对电路进行分析时，都应该先指定各处的电流和电压的参考方向。参考方向在电路分析中起着重要的作用，没有参考方向，复杂电路的分析将难以进行。

1.2.3 关联及非关联参考方向、功率的计算

一个元件的电流和电压的参考方向都可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压“+”极性的一端流入，从标以电压“−”极性的一端流出，即电流的参考方向和电压的参考方向一致，这种参考方向称为关联参考方向，如图 1.2-3（a）所示。当两者不一致时，称为非关联参考方向，如图 1.2-3（b）所示。

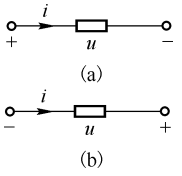


图 1.2-3 关联和非关联参考方向

在电路分析和计算中，能量和功率的计算十分重要。电功率与电压和电流密切相关。正电荷从元件上电压的正极经元件运动到电压的负极，电场力做正功，元件吸收能量；相反，正电荷从元件上电压的负极经元件运动到电压的正极，电场力做负功，元件向外释放能量。

根据电压的定义，A、B 两点间的电压等于电场力将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时所做的功，可知 dt 时间内将电荷 dq 由 A 点移动到 B 点电场力所做的功为

$$\mathrm{d}w = u\mathrm{d}q$$

该瞬间电场力做功的速率称为该瞬时的电功率，用 p 表示。

若电压 u 和电流 i 为关联参考方向，如图 1.2-3（a）所示，则

$$p = \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} = u\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = ui$$

式中，p 是元件吸收的功率。但 u、i 的值可能为“+”，也可能为“−”，因此 p 的值也有“+”或“−”的可能。若 p 为“+”（即 $p>0$），则表示该元件实际吸收功率。若 p 为“−”（即 $p<0$），则表示该元件实际发出功率。

若电压 u 和电流 i 为非关联参考方向，如图 1.2-3（b）所示，则 $p=ui$ 表示发出功率。

$p>0$ 表示该元件实际发出功率；$p<0$ 表示该元件实际吸收功率。此时 $p=-ui$ 表示吸收功率，$p>0$ 表示该元件实际吸收功率；$p<0$ 表示该元件实际发出功率。实际计算时，为不致混淆，可加下标来区别，若 u、i 为关联参考方向，则用 $p_{吸}=ui$ 表示；若 u、i 为非关联参考方向，则用 $p_{发}=ui$ 表示。

在国际单位制中，电压的单位是伏特（Volt），简称伏（符号为 V）；电流的单位是安培（Ampere），简称安（符号为 A）；功率的单位是瓦特（Watt），简称瓦（符号为 W）。

例 1.2-1 图 1.2-4 所示直流电路中，$U_1=5\text{V}$，$U_2=-6\text{V}$，$U_3=8\text{V}$，$I=2\text{A}$。求各元件吸收的电功率。

解：图中元件 1 和元件 2 的电压、电流为关联参考方向，所以

$$P_{1吸}=U_1I=5\times2=10\text{W}\quad\text{（实际吸收 10W）}$$

$$P_{2吸}=U_2I=-6\times2=-12\text{W}\quad\text{（实际发出 12W）}$$

元件 3 的电压、电流为非关联参考方向，所以

$$P_{3发}=U_3I=8\times2=16\text{W}\quad\text{（实际发出 16W）}$$

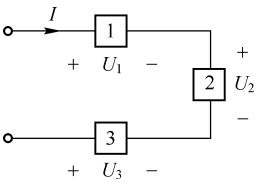


图 1.2-4 例 1.2-1 图

需要注意的是，当电流和电压为关联参考方向时，如果 $p=ui$ 表示吸收功率，则 $p>0$ 表示实际吸收功率，$p<0$ 表示实际发出功率；当电流和电压为非关联参考方向时，如果 $p=-ui$ 表示吸收功率，则 $p>0$ 表示实际发出功率，$p<0$ 表示实际吸收功率。

思考与练习

1.2-1 求解图 1.2-5 所示直流电路中的电流 I_1。

1.2-2 求解图 1.2-6 所示直流电路中的电压 U_1。

1.2-3 已知电压 $U=5\text{V}$，$I=-1\text{A}$，求图 1.2-7 所示直流电路中电阻 R 的吸收功率。

1.2-4 已知电压 $U=4\text{V}$，$I=-2\text{A}$，求图 1.2-8 所示直流电路中电阻 R 的发出功率。

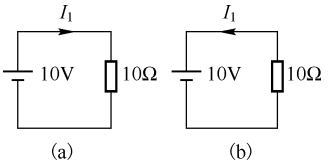


图 1.2-5 题 1.2-1 图

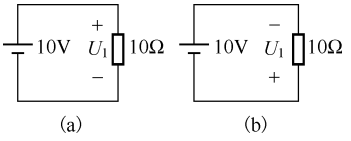


图 1.2-6 题 1.2-2 图

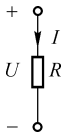


图 1.2-7 题 1.2-3 图

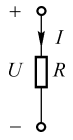


图 1.2-8 题 1.2-4 图

1.3 无源电路元件

本节主要介绍电阻元件、电容元件和电感元件。各种元件都有精确的定义，由此可确定电压和电流之间的关系，简称 VCR（Voltage Current Relation），这种关系是电路分析的基础之一。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是电路基本元件之一，是用来模拟电能损耗或将电能转换成热能等其他形式能量的理想元件，例如电阻器、灯泡、电炉等。当电压和电流参考方向为关联参考方向时，线

性电阻元件的电压和电流符合欧姆定律，如图 1.3-1 所示，即

$$u = Ri \qquad (1.3\text{-}1)$$

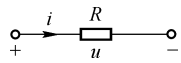


图 1.3-1　电阻元件（关联参考方向）

电压 u 的单位为伏特（V），电流 i 的单位为安培（A），电阻 R 的单位为欧姆（Ω）。线性电阻 R 是一个与电压和电流无关的正常数。

如果把电阻元件的电流 i 取为横坐标，电压 u 为纵坐标，画出电压电流的关系曲线，这条曲线称为该元件的伏安特性，它是一条通过原点的直线，如图 1.3-2 所示。

令 $G = 1/R$，则式（1.3-1）变为

$$i = Gu$$

式中，G 称为电阻元件的电导（Conductance），电导的单位为西[门子]（S）。如 $R = 10\,\Omega$，则 $G = 0.1\text{S}$。

如果电阻元件的电压和电流为非关联参考方向，如图 1.3-3 所示，则欧姆定律应写为

$$u = -Ri \quad i = -Gu$$

由式（1.3-1）及图 1.3-2 可知，在任何时刻电阻元件的端电压（或电流）是由同一时刻电流（或电压）决定的，而与过去的电流（或电压）无关，所以电阻元件是一种无记忆元件。

当电流和电压为关联参考方向时，任何时刻电阻元件吸收（消耗）的电功率为

$$p = ui = Ri^2 = u^2/R = Gu^2 = i^2/G$$

式中，R 和 G 是正实常数，故功率 p 恒为非负值，电阻吸收功率。

在电流和电压为非关联参考方向时，任何时刻电阻元件吸收（消耗）的电功率为

$$p = -ui = -(-Ri)i = Ri^2$$

由于这时有 $u = -Ri$ 或 $i = -Gu$，因此功率 $p = -ui = -(-Ri)i = Ri^2$ 仍为正值，这说明电阻元件仍吸收功率，即在任何时刻它是不可能发出功率的。所以，线性电阻元件是无源耗能元件。

从 t_0 到 t 内，电阻元件产生的热量为

$$W = \int_{t_0}^{t} Ri^2(\xi)\mathrm{d}\xi$$

当一个电阻元件的端电压不论为何值时，流过它的电流恒为零值，就把它称为“开路”（Open Circuit），其伏安特性与 u 轴重合，如图 1.3-4 所示，这相当于 $R = \infty (G = 0)$。当流过一个电阻元件的电流不论为何值时，它的端电压恒为零值，就把它称为“短路”（Short circuit），其伏安特性与 i 轴重合，如图 1.3-5 所示，这相当于 $R = 0\ (G = \infty)$。

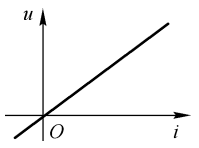


图 1.3-2　线性电阻元件的伏安特性

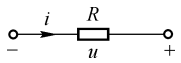


图 1.3-3　电阻元件（非关联参考方向）

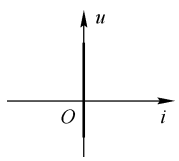


图 1.3-4　电阻元件的伏安特性（$R = \infty$）

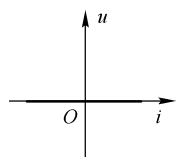


图 1.3-5　电阻元件的伏安特性（$R = 0$）

如果电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面上不是通过原点的直线，此元件称为非线性电阻元件；如果电阻元件的伏安特性不随时间改变，则称为定常电阻元件。为叙述方便，把线性电阻元件简称为电阻，所以本书中“电阻”这个术语及其相应的符号 R 既表示一个电阻元

件，又表示这个元件的参数。实际电阻元件除了标注电阻值外，还标注额定功率，使用电阻元件时，电阻吸收的功率应小于额定功率。

1.3.2 电容元件

电容器应用很广泛，它是由绝缘介质隔开的两块金属极板构成的。加上电源后，两块极板上分别聚集起等量异性电荷，在介质中建立起电场，并储存有电场能量。电源移去后，电荷继续聚集在极板上，电场继续存在。因此，电容器是一种能够储存电场能量的实际器件。电容器（Capacitor）是实际电容器的理想化模型。

线性电容元件的图形符号如图 1.3-6 所示，$+q$ 和$-q$ 是该元件正极板和负极板上的电荷量。若电容元件上电压的参考方向规定由正极板指向负极板，则任何时刻正极板上的电荷 q 与其两端的电压 u 的关系为

$$q = Cu$$

式中，C 称为该元件的电容，是一个正实常数。当电荷和电压的单位分别用库仑（C）和伏特（V）表示时，电容的单位为法拉（F）。图 1.3-7 中以 q 和 u 为坐标轴，画出了电容元件的库伏特性，它也是一条通过原点的直线。

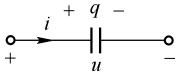


图 1.3-6　电容元件图形符号

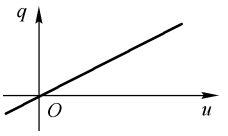


图 1.3-7　电容元件的库伏特性

库伏特性描述的是 q 和 u 的关系，但在电路分析中感兴趣的是电容元件的伏安关系。如果电容元件的电流 i 和电压 u 取关联参考方向，如图 1.3-6 所示，则有

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(Cu)}{\mathrm{d}t} = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{1.3-2}$$

式（1.3-2）就是电容元件的 VCR，该式表明电流和电压的变化率成正比，电容元件的电压与电流具有动态关系，因此电容元件是一个动态元件。

若电容端电压 u 与电流 i 取非关联参考方向，则

$$i = -C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$

当电压不随时间变化时，电流为零。故电容在直流情况下其两端电压值恒定，相当于开路，或者说电容有隔断直流（简称隔直）的作用。

式（1.3-2）的逆关系为

$$u = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{0} i(\xi)\mathrm{d}\xi + \frac{1}{C}\int_{0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$= u(0) + \frac{1}{C}\int_{0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

该式表明，电容元件的电压除与 0 到 t 的电流值有关外，还与 $u(0)$的值有关，因此，电容元件是一种记忆元件。

在电压 u 和电流 i 为关联参考方向时，电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$

从 $t=-\infty$ 到 t 时刻，电容元件吸收的电场能量为

$$W_C=\int_{-\infty}^{t}u(\xi)i(\xi)\mathrm{d}\xi=\int_{-\infty}^{t}Cu(\xi)\frac{\mathrm{d}u(\xi)}{\mathrm{d}\xi}\mathrm{d}\xi$$

$$=C\int_{u(-\infty)}^{u(t)}u(\xi)\mathrm{d}u(\xi)=\frac{1}{2}Cu^2(t)-\frac{1}{2}Cu^2(-\infty)$$

若 $u(-\infty)=0$，电容元件在任何时刻 t 储存的电场能量将等于它吸收的能量，即

$$W_C(t)=\frac{1}{2}Cu^2(t)$$

从 t_1 到 t_2 内，电容元件吸收的能量为

$$W_C=C\int_{u(t_1)}^{u(t_2)}u\mathrm{d}u=\frac{1}{2}Cu^2(t_2)-\frac{1}{2}Cu^2(t_1)=W_C(t_2)-W_C(t_1)$$

当电压的绝对值$|u|$增大时，$W_C(t_2)>W_C(t_1)$，$W_C>0$，电容元件吸收能量，且全部转换为电场能；当电压的绝对值$|u|$减小时，$W_C(t_2)<W_C(t_1)$，$W_C<0$，电容元件将电场能量释放出来并转换成电能。可见它并不把吸收的能量消耗掉，而是以电场能量的形式存储起来，所以电容元件是一种储能元件。同时，电容元件不会释放出多于它吸收或储存的能量，所以它又是一种无源元件。

一般的电容器除有储能作用外，也会消耗一部分电能，这时，电容器的模型就必须是电容元件和电阻元件的组合。由于电容器消耗的电功率与所加电压直接相关，因此其模型也是两者的并联组合。

如果电容元件的库伏特性在 u-q 平面上不是通过原点的直线，此元件称为非线性电容元件；如果电容元件的库伏特性随时间改变，则称为时变电容元件。为了叙述方便，把线性电容元件简称为电容，所以本书中“电容”这个术语以及相应的符号 C 既表示一个电容元件，也表示这个元件的参数。

1.3.3 电感元件

电感元件（Inductor）是实际线圈的理想化模型。假想它由无电阻的导线绕制而成，且周围无铁磁物质（铁、钴、镍及其合金），线圈通过电流 i 时，将产生磁通 Φ_L。若 Φ_L 与 N 匝线圈都交链，则磁通链 $\Psi_L=N\Phi_L$，如图 1.3-8 所示。

Φ_L 和 Ψ_L 都是由线圈本身的电流产生的，分别叫做自感磁通和自感磁通链。规定 Φ_L 和 Ψ_L 的参考方向与 i 的参考方向之间满足右手螺旋定则，则任何时刻电感元件的 Ψ_L 与 i 成正比，即

$$\Psi_L=Li$$

式中，L 称为该元件的自感或电感，是一个正实常数。

在国际单位制中，磁通和磁通链的单位是 Wb（韦伯，简称韦）；当电流的单位采用 A 时，则自感或电感的单位是 H（亨利，简称亨）。

线性电感元件的韦安特性是 $\psi-i$ 平面上一条通过原点的直线，如图 1.3-9 所示。

线性电感元件在电路中的图形符号如图 1.3-10 所示。

韦安特性描述的是 ψ 和 i 的关系，但在电路分析中感兴趣的是电感元件的伏安关系。如果电感元件的电流 i 和电压 u 取关联参考方向，如图 1.3-10 所示，则当磁通链 Ψ_L 随时间变化时，在线圈的端子间产生感应电压 u。如果 u 的参考方向与 Ψ_L 满足右螺旋关系，则根据电磁感应定律，有

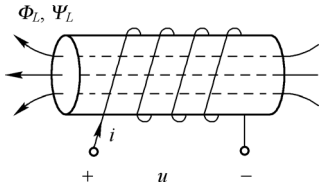


图 1.3-8　线圈

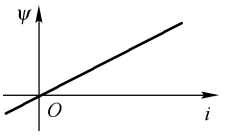


图 1.3-9　线性电感元件的韦安特性

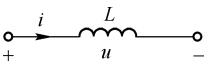


图 1.3-10　电感元件的图形符号

$$u=\frac{\mathrm{d}\Psi_L}{\mathrm{d}t} \tag{1.3-3}$$

将 $\Psi_L=Li$ 代入式（1.3-3），即得电感元件电压与电流的关系式为

$$u=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1.3-4}$$

若电感电压 u 与电流 i 取非关联参考方向，则有

$$u=-L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

式（1.3-4）的逆关系为

$$i=\frac{1}{L}\int u\mathrm{d}t \tag{1.3-5}$$

式（1.3-5）写成定积分形式为

$$i=\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t}u\mathrm{d}\xi=\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{0}u\mathrm{d}\xi+\frac{1}{L}\int_{0}^{t}u\mathrm{d}\xi=i(0)+\frac{1}{L}\int_{0}^{t}u\mathrm{d}\xi$$

或

$$\Psi_L=\Psi_L(0)+\int_{0}^{t}u\mathrm{d}\xi$$

可以看出，电感元件是动态元件，也是记忆元件。

在电压 u 和电流 i 取关联参考方向时，电感元件吸收的功率为

$$p=ui$$

从 t_1 到 t_2 内，线性电感元件吸收的磁场能量为

$$W_L=L\int_{i(t_1)}^{i(t_2)}i\mathrm{d}i=\frac{1}{2}Li^2(t_2)-\frac{1}{2}Li^2(t_1)=W_L(t_2)-W_L(t_1)$$

由于在 $t=-\infty$ 时，$i(-\infty)=0$，电感元件无磁场能量，因此，从 $-\infty$ 到 t 的时间段内吸收的磁场能量为

$$W_L=\frac{1}{2}Li^2\geqslant 0$$

这是线性电感元件在任何时刻的磁场能量表达式。

当电流的绝对值 $|i|$ 增大时，$W_L(t_2)>W_L(t_1)$，$W_L>0$，电感元件吸收能量并全部转变为磁场能量；当电流的绝对值 $|i|$ 减小时，$W_L(t_2)<W_L(t_1)$，$W_L<0$，电感元件将磁场能量释放出来并转换成电能。可见它并不把吸收的能量消耗掉，而是以磁场能量的形式存储起来。所以，电感元件是一种储能元件。同时，电感元件不会释放出多于它吸收或储存的能量，所以它又是一种无源元件。

如果电感元件的韦安特性在 $\psi-i$ 平面上不是通过原点的直线，则称为非线性电感元件；如果电感元件的韦安特性随时间改变，则称为时变电感元件。为了叙述方便，把线性电感元件简称为电感，所以本书中“电感”这个术语以及相应的符号 L 一方面表示一个电感元

件，另一方面也表示这个元件的参数。

思考与练习

1.3-1　列出电阻元件、电容元件、电感元件的不同之处。

1.3-2　画出电阻元件、电容元件、电感元件的电路符号。

1.4　独 立 电 源

电源是提供能量的器件，是一种有源的电路元件，是各种电能量（电功率）产生器的理性化模型。独立电源可分为独立电压源和独立电流源。加“独立”二字是为了与以后介绍的受控源相区别。

1.4.1　独立电压源

电压源是一种理想的有源二端电路元件，它的端电压 $u(t)$为

$$u(t)=u_{\mathrm{S}}(t)$$

式中，$u_{\mathrm{S}}(t)$ 为给定的时间函数。即电压源的端电压 u 是已知的；而电流 i 是未知的，它由外电路决定。也就是说，电压源的两个特点为：

（1）电压源对外提供的电压 $u(t)$是由自身确定的时间函数，与外电路无关，不会因所接的外电路不同而改变；

（2）通过电压源的电流是由外电路决定的，随外接电路不同而不同。

电压源的电路符号如图 1.4-1（a）所示，一般为计算方便，常取电流和电压为关联参考方向。当 $u_{\mathrm{S}}(t)$ 为常数，即 $u_{\mathrm{S}}(t)=U_{\mathrm{S}}$ 为常数，这种电压源称为直流电压源，用图 1.4-1（b）所示的图形符号表示，其中长划线表示电源的“+”端，该图也是用来表示电池的图形符号。

图 1.4-2（a）为直流电压源在 i-u 平面上的伏安特性，它是一条与电流轴平行的直线，截距 U_{S} 表示直流电压源的电压值。如果 $u_{\mathrm{S}}(t)$ 是随时间而变化的，则平行于电流轴的直线也随之改变其位置，它在电压轴上的截距表示不同时刻时变电压的电压值，如图 1.4-2（b）所示的 $u_{\mathrm{S}}(t_1)$ 和 $u_{\mathrm{S}}(t_2)$ 分别表示 t_1 和 t_2 时刻电压源的电压值。

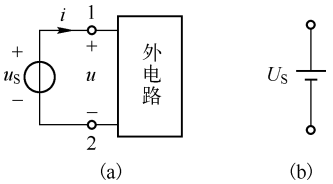


图 1.4-1　电压源电路符号

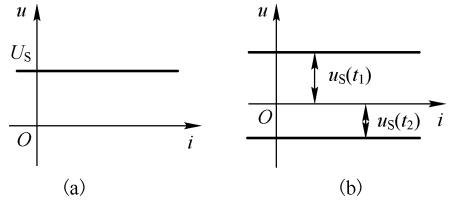


图 1.4-2　电压源伏安特性

电压源没有外接电路时，电流 i 的值总为零，这种情况称为“电压源处于开路”，这时电压源既不发出功率也不吸收功率。当电压源接有外电路时，由于电压源的电压是给定的，但电流的大小和方向则与外电路有关，因此电压源可能对外电路提供能量，也可能从外电路吸收能量。如果电压源的电压及其电流为非关联参考方向（一般取为非关联参考方向），此

时，电压源发出的功率为

$$p(t)=u_S(t)i(t)$$

它也是外电路吸收的功率。$p>0$，表示电压源发出功率；$p<0$，则表示电压源吸收功率。

常见的实际电源（如发电机、蓄电池等）的工作原理比较接近电压源，但它们都具有内阻。在进行电路分析时，应采用电压源和电阻的串联组合作为电压源的电路模型。

1.4.2 独立电流源

电流源也是一个理想二端电路元件。电流源发出的电流 $i(t)$为

$$i(t)=i_S(t)$$

式中，$i_S(t)$ 为给定的时间函数。与电压源相反，通过电流源的电流与电压无关，而总是保持为给定的时间函数。电流源的两个特点为：

（1）电流源向外电路提供的电流 $i(t)$是由自身确定的时间函数，与外电路无关，不会因所接的外电路不同而改变。

（2）电流源的端电压 $u(t)$是由外电路决定的，随外接电路不同而不同。

电流源的图形符号如图 1.4-3（a）所示。如果电流源的电流 $i_S(t)$ 为常数，即 $i_S(t)=I_S$ 为常数，这种电流源称为直流电流源，图 1.4-3（b）为直流电流源在 i-u 平面上的伏安特性，它是一条与电压轴平行的直线，截距 I_S 表示直流电流源的电流值。如果 $i_S(t)$ 是随时间而变化的，则平行于电压轴的直线也随之改变其位置，它在电流轴上的截距表示不同时刻时变电流的电流值，其伏安特性如图 1.4-3（c）所示。

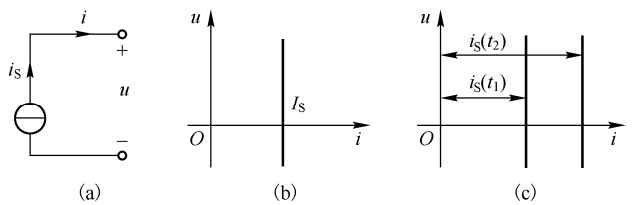


图 1.4-3　独立电流源及其伏安特性

如果电流源的电压、电流为非关联参考方向（一般取为非关联参考方向），此时，电流源发出的功率为

$$p(t)=u(t)i_S(t)$$

它也是外电路吸收的功率。$p>0$，表示电流源发出功率；$p<0$，则表示电流源吸收功率。当电流源短路时，u=0，这时电流源既不发出功率也不吸收功率。

常见的光电管、光电池等器件的工作原理比较接近电流源。在进行电路分析时，应采用电流源和电阻的并联组合作为电路模型。

在求解电路时，需要注意的是，电压源和电流源，其源电压和源电流都是给定的时间函数，不受外电路的影响，故称为独立源。“独立”二字是相对下一节要介绍的“受控”电源来说的。独立电源也叫激励源，源电压和源电流都是给定的时间函数，不受外电路的影响。

思考与练习

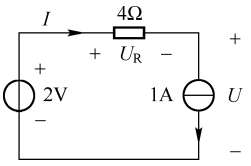


图 1.4-4　题 1.4-3

1.4-1　独立电压源的特点是什么？

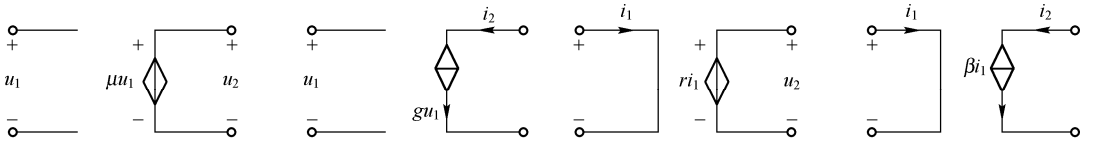
1.4-2　独立电流源的特点是什么？

1.4-3　计算图 1.4-4 所示直流电路中电压源发出的功率以及电阻消耗的功率。

1.5　受　控　源

在电子电路中有这样一类元件，它们具有有源元件的一些特性，但其电压或电流不是给定时间的函数，而是受电路中某个电压或电流的控制，将这类元件称作受控源或非独立源。受控源是四端元件，是一类具有放大作用的电子元件（如电子管、晶体管、场效应管等）的电路模型，是电子电路的重要元件。

受控电压源或受控电流源因控制量是电压或电流，因此受控源电路可分为四种，包括电压控制电压源（Voltage Controlled Voltage Source，VCVS），电压控制电流源（Voltage Controlled Current Source，VCCS），电流控制电压源（Current Controlled Voltage Source，CCVS），电流控制电流源（Current Controlled Current Source，CCCS）。如图 1.5-1 所示。为了与独立源相区别，用菱形符号表示其电源部分。



(a) VCVS, $u_2=\mu u_1$　(b) VCCS, $i_2=gu_1$　(c) CCVS, $u_2=ri_1$　(d) CCCS, $i_2=\beta i_1$

图 1.5-1　受控电源

其中 u_1、i_1 为控制量，u_2、i_2 为被控量，μ、g、r、β 为控制系数，分别称作转移电压比、转移电导、转移电阻、转移电流比。当 μ、g、r、β 均为常数时，称作线性受控源。本书中只考虑线性受控源，一般略去“线性”二字，简称受控源。

注意：受控源与独立源是有所不同的，独立源在电路中是起“激励”作用，在电路中产生电压和电流。而受控源则不同，它的源电压或源电流受电路中其他电压或电流控制，当这些控制电压或控制电流为零时，受控源的源电压或源电流也为零。因此，受控源只是反映电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流这一现象而已，它本身不直接起“激励”作用。

例 1.5-1　图 1.5-2 所示电路中，I_s=2A，U_2=0.5U_1，R_1=5Ω，R_2=2Ω，计算 I_2。

解：先求出控制电压 U_1，由图中左边电路有

$$U_1 = 5I_1 = 5I_s = 5\times 2 = 10\text{V}$$

$$U_2 = 0.5U_1 = 5\text{V}$$

由欧姆定律，可得　　$I_2 = U_2 / R_2 = 5/2 = 2.5\text{A}$

若 $I_s = 0$，则 $U_2 = 0$，说明控制源起作用，它才是激励源。

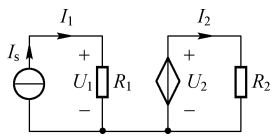


图 1.5-2　例 1.5-1 图

思考与练习

1.5-1　受控电压源的特点是什么？

1.5-2　受控电流源的特点是什么？

1.5-3　受控源与独立源的区别是什么？

1.6　基尔霍夫定律

古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824—1887），1824 年 3 月 12 日生于普鲁士的柯尼斯堡（今为俄罗斯加里宁格勒），1887 年 10 月 17 日卒于柏林。基尔霍夫在柯尼斯堡大学读物理，1847 年毕业后去柏林大学任教，3 年后去布雷斯劳任临时教授。1854 年由化学家本生推荐任海德堡大学教授。1875 年到柏林大学任理论物理教授，直到逝世。1845 年，21 岁时他发表了第一篇论文，提出了稳恒电路网络中电流、电压、电阻关系的两条电路定律，即著名的基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL），解决了电器设计中电路方面的难题。

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's Current Law，KCL）和基尔霍夫电压定律（Kirchhoff's Voltage Law，KVL）。它反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的基本规律，是分析集总参数电路的基本定律。基尔霍夫定律与元件的 VCR 构成了电路分析的基础。在叙述基尔霍夫定律之前，以图 1.6-1 所示典型电路为例介绍几个有关的电路名词。

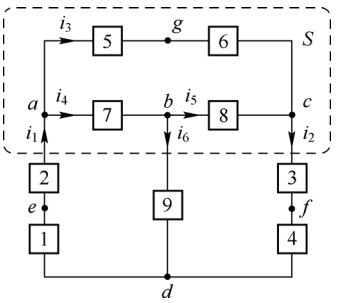


图 1.6-1　典型电路

（1）约束。电路一经给定，各支路电压、电流必然受到两种约束，即元件约束和拓扑约束。元件约束是元件的特性造成的约束（VCR），反映了元件上的电压电流关系。例如，线性电感元件的电压电流之间必然满足 $u = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$（电压电流取关联参考方向）的关系。拓扑约束，又称为结构约束，是由元件连接方式、电路结构给支路电流电压带来的约束，只取决于连接方式，与元件性质无关，描述这类约束的就是基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

（2）支路（Branch）。将组成电路的每个二端元件称为一条支路。按此定义，图 1.6-1 所示电路有支路 1 至支路 9 共 9 条支路。

（3）节点（Node）。支路的连接点称为节点。图 1.6-1 中共有 7 个节点，即 *a*、*b*、*c*、*d*、*e*、*f*、*g*。

（4）回路（Loop）。由若干支路组成的闭合路径，且每个节点只经过一次，这条闭合路径称为回路。图 1.6-1 中有 7 个回路，即 *abdea*、*bcfdb*、*abcga*、*abdfcga*、*agcbdea*、*abcfdea*、*agcfdea*。

关于支路和节点另外一种定义为：

（1）将电路中流过同一电流的一个分支称为一条支路。图 1.6-1 中有 6 条支路，即 *aed*、*cfd*、*agc*、*ab*、*bc*、*bd*。

（2）将三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1.6-1 中有 4 个节点，即 *a*、*b*、*c*、*d*。

对于同一电路，采用这种定义，得出的支路数、节点数一般比前述规定得出的要少。因此，为方便起见，本书中一般采用这种定义来确定支路和节点。

1.6.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（KCL）指的是在集总参数电路中，任何时刻，对任一节点，流出一个节点的所有支路电流的代数和恒等于零，即

$$\sum i = 0$$

上式中，流出节点的电流前取“+”，流入节点的电流前取“−”，而电流是流出节点还是流入节点均按电流的参考方向来判定。

基尔霍夫电流定律又称基尔霍夫第一定律，它反映了任一节点各支路电流之间的相互约束关系。

对图 1.6-1 中的节点 a 应用 KCL，有

$$-i_1 + i_3 + i_4 = 0 \tag{1.6-1}$$

式（1.6-1）可以写成

$$i_1 = i_3 + i_4 \tag{1.6-2}$$

式（1.6-2）表明在集总参数电路中，任何时刻，流入一个节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

KCL 不仅适用于一个节点，也适于一个包围部分电路的封闭面。

例如，图 1.6-1 中，封闭面 S 包围着节点 a、b、c，在这些节点处有

$$-i_4 + i_5 + i_6 = 0,\quad -i_1 + i_3 + i_4 = 0,\quad i_2 - i_3 - i_5 = 0 \tag{1.6-3}$$

把式（1.6-3）的各式相加，则流出封闭面的电流的代数和为

$$-i_1 + i_2 + i_6 = 0$$

即

$$\sum i = 0$$

因此，流出（或流入）一个封闭面的电流的代数和也恒等于零；或者说，流出封闭面的电流之和等于流入封闭面的电流之和，这就是电流的连续性。基尔霍夫电流定律也是电荷守恒定律的体现。

值得注意的是，利用 KCL，对于节点 a、b、c、d，有

$$\begin{cases} -i_1 + i_3 + i_4 = 0 \\ -i_4 + i_5 + i_6 = 0 \\ i_2 - i_3 - i_5 = 0 \\ i_1 - i_2 - i_6 = 0 \end{cases}$$

将上述四个方程加起来，则方程两边均为零。这说明四个方程不是相互独立的，是相关的。但从这四个方程中任意去掉一个，其余三个都是独立的。因此，利用 KCL，对一个有 n 个节点的电路列 KCL 方程仅能列$(n-1)$个，这$(n-1)$个节点也称为独立节点。

1.6.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律（KVL）指的是在集总参数电路中，任何时刻，沿着一个回路所有支路电压的代数和恒等于零，即

$$\sum u = 0$$

列写 KVL 方程式之前，先要指定回路的绕行方向，凡支路电压的参考方向与回路绕行方向一致时，此电压前面取“+”号；而支路电压的参考方向与回路绕行方向相反时，则电压前面取“−”号。回路的绕行方向可用箭头表示，也可用闭合节点序列来表示。

如果一个闭合节点序列不构成回路，如图 1.6-1 中节点（a、d、e、a），在节点 a、d 之间没有支路，但节点 a、d 之间有开路电压，KVL 同样适用于这样的闭合节点序列，则有

$$u_{ad} + u_{de} + u_{ea} = 0$$

所以在集总电路中，任何时刻，沿任何闭合节点序列，全部电压之代数和恒等于零。这是 KVL 的另一种形式。上式可改写为

$$u_{ad} = -u_{de} - u_{ea} = u_{ae} + u_{ed}$$

此外，对回路 *abdea*，应用 KVL 有

$$u_{ab} + u_{bd} + u_{de} + u_{ea} = 0$$

因此，电路中任意两点间的电压是与计算路径无关的，是单值的。KCL 和 KVL 只与电路中元件相互连接方式有关，而与元件的性质无关。所以这种约束称为“拓扑约束”。KCL 表明在每一节点上电荷是守恒的；KVL 是能量守恒的具体体现（电压与路径无关）。不论电路中的元件是线性的还是非线性的，时变的还是非时变的（定常的），只要是集总参数电路，KCL 和 KVL 就总是成立的。

例 1.6-1 已知图 1.6-2 所示回路中各元件电压分别为：U_1=4V，U_2=−3V，U_3=6V，求 U_4。

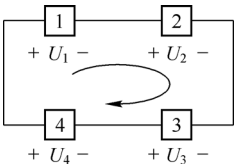


图 1.6-2 例 1.6-1 图

解：确定回路绕行方向为顺时针方向，则由 KVL 有

$$U_1 + U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

$$U_4 = U_1 + U_2 - U_3 = 4 + (-3) - 6 = -5\text{V}$$

例 1.6-2 电路如图 1.6-3（a）所示，求电流 I 和电压 U_{ab}。

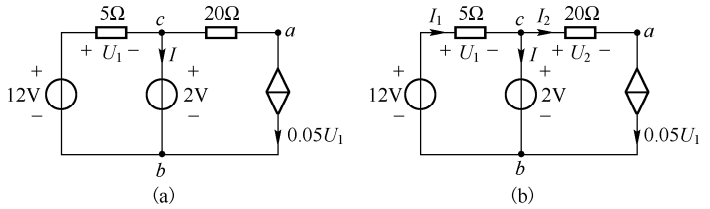


图 1.6-3 例 1.6-2 图

解：各元件电压、电流参考方向如图 1.6-3（b）所示。

由 KVL 得 $U_1 = 12 - 2 = 10\text{V}$

根据欧姆定律得 $I_1 = U_1 / 5 = 10 / 5 = 2\text{A}$

则 $I_2 = 0.05U_1 = 0.05 \times 10 = 0.5\text{A}$

根据欧姆定律有 $U_2 = 20I_2 = 20 \times 0.5 = 10\text{V}$

由 KVL 有 $U_{ab} = -U_2 + 2 = -10 + 2 = -8\text{V}$

由 KCL 有 $I = I_1 - I_2 = 2 - 0.5 = 1.5\text{A}$

例 1.6-3　直流电路如图 1.6-4 所示，求电路中各元件的电流和功率。

解：在电路中标出各支路电流的参考方向。根据 KVL，有

$$U_{12}=U_{14}-U_{24}=30-20=10\text{V}$$

$$U_{23}=U_{24}-U_{34}=20-10=10\text{V}$$

$$U_{13}=U_{14}-U_{34}=30-10=20\text{V}$$

根据欧姆定律，三个电阻中的电流分别为

$$I_1=U_{12}/10=10/10=1\text{A},\ I_2=U_{23}/20=10/20=0.5\text{A},$$

$$I_3=U_{13}/5=20/5=4\text{A}$$

对节点①、②、③列 KCL 方程，可得三个电压源中的电流为

$$I_4=I_1+I_3=1+4=5\text{A},$$

$$I_5=I_2-I_1=0.5-1=-0.5\text{A}$$

$$I_6=-I_2-I_3=-0.5-4=-4.5\text{A}$$

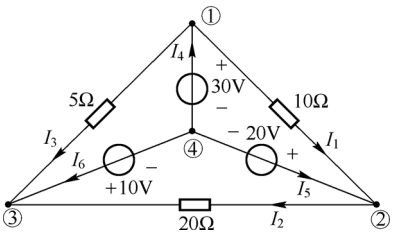


图 1.6-4　例 1.6-3 图

各电阻吸收的功率为　　$P_1=10I_1^2=10\times1^2=10\text{W}$

$$P_2=20I_2^2=20\times0.5^2=5\text{W},\quad P_3=5I_3^2=5\times4^2=80\text{W}$$

各电压源发出的功率为　　$P_4=30I_4=30\times5=150\text{W}$

$$P_5=20I_5=20\times(-0.5)=-10\text{W},\ P_6=10I_6=10\times(-4.5)=-45\text{W}$$

思考与练习

1.6-1　基尔霍夫电流定律的内容和适用条件。

1.6-2　基尔霍夫电压定律的内容和适用条件。

1.6-3　求图 1.6-5 所示直流电路中的电压 U 和电流 I。

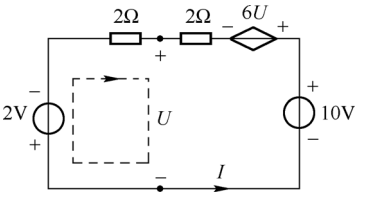
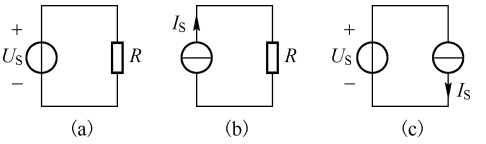


图 1.6-5　题 1.6-3

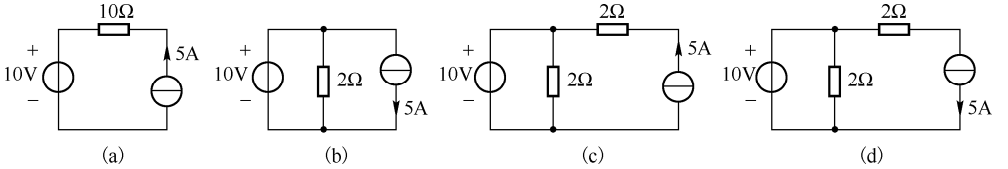
习题 1

1-1　如题 1-1 图所示，已知 $U_S=8\text{V}$，$I_S=5\text{A}$，$R=4\Omega$，求各元件的电流、电压和功率。



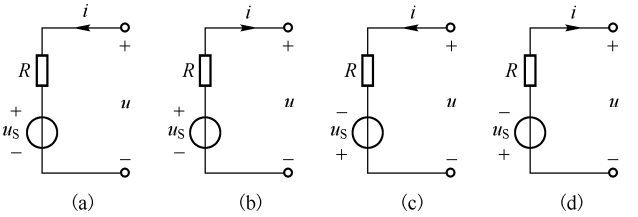
题 1-1 图

1-2　求题 1-2 图中各元件上的电流、电压和功率。



题 1-2 图

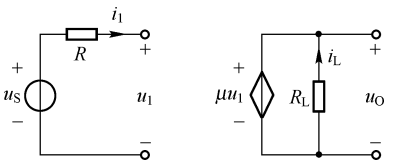
1-3　求题 1-3 图所示电路的伏安特性（即 u-i 关系）。



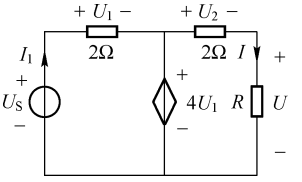
题 1-3 图

1-4　求题 1-4 图中 u_O 与 u_S 的关系，并求受控源的功率。

1-5　题 1-5 图所示直流电路中，I_1=3A，U_2=4V。求 I、U、U_S 和 R，并求 U_S 发出的功率。



题 1-4 图



题 1-5 图