

# 第1章 基本概念

电路是电工技术和电子技术的基础，在通信、控制、计算机和电力等众多科学领域都广泛使用各种类型的电路。本课程的主要任务是研究各种电路所共有的基本规律和基本分析方法，为学习电气工程技术、电子技术、通信和信息工程技术等建立必要的理论基础，并且能利用所学的知识分析解决一些简单的电路问题。

本章介绍电路模型的概念，以及电路分析中的基本物理量——电压、电流及功率，重点阐述电阻元件、独立源和受控源的伏安特性及基尔霍夫的两个定律。

## 1.1 电路及电路模型

在现实生活中所遇到的各种实际电路都是由一些电子元器件按一定方式相互连接而构成的。例如，常用的日光灯照明电路是由灯管、镇流器、启辉器、开关和交流电源相互连接而组成的；收音机是由一定数量的晶体管（或集成电路器件）、电容器、电感器、扬声器及直流电源等元器件组成的。不同的电路可以实现不同的应用任务。当实际电路的元器件中通有电流时，一般会在其两端产生电压。根据物理学知识，有电流就有磁场存在，有电压就有电场存在，而在电压、电流的作用下几乎都有能量损耗，所以电场效应、磁场效应和能量损耗是实际器件的三个基本效应。若以实际电路为研究对象，必然使实际元器件的电磁性能交织在一起，处理起来较为复杂，甚至无法进行研究，因而在分析、研究电路的工作时，总是把构成电路的实际器件抽象成一些理想化模型的组合。这些理想化的模型叫做理想电路元件（简称电路元件）。由电路元件构成的电路即是实际电路的模型，如用导线干电池、小灯泡串联起来的电路就可用图 1.1.1 所示的电路模型表示，其中干电池用电压源  $U_s$  和电阻元件  $R_s$  的串联组合作为模型，小灯泡用电阻  $R_L$  作为模型，连接导线用理想导线（其电阻设为零）或线段表示。

须指出，一个实际电路，工件条件不同，则表征的电路模型也不同。例如，一个电感线圈在直流稳定状态下，可用一个电阻模型来描述；在交流低频情况下，可用电阻与电感的串联组合模型来描述；而在高频情况下，线圈绕组之间的电容效应就不能忽略，此时可用电阻和电感串联组合后再与电容并联构成的模型来描述。

当实际电路的尺寸远小于使用其最高工作频率所对应的电磁波波长（即满足集总假设条件）时，理想化的电路模型所表示的电路器件可以不计其空间尺度，并且特性集中在空间一点，称为集总参数元件。每一种集总参数元件都只表示一种基本的电磁过程，反映一个物理本质特征，且可以用数学方法精确定义。例如，电阻元件只具有电能的消耗性质，电感元件只具有磁场能量的储存性质，电容元件只具有电场能量的储存性质，而电源元件则反映实际

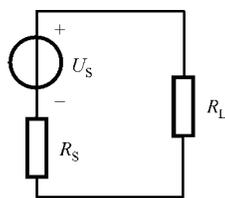


图 1.1.1 电路模型

电路中将其他形式的能量转化为电能的性质。由这些集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。但是，当电路的工作频率所对应的电磁波波长与实际电路的几何尺寸可以相互比拟时，则必须采用分布参数电路模型进行分析。

我国电力用电工作频率为 50Hz，对应的波长为  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6000\text{km}$ ，其中， $c$  为光速。

显然，一般家用电器设备的实际尺寸远小于最高工作频率所对应的电磁波波长，满足集总假设条件，所以是集总参数电路。而输电线路不满足集总假设条件，所以不是集总参数电路，本书研究的电路均为集总参数电路。

电路的一个重要功能就是伴随着电流在电路中的流动，可以实现电能的传输、分配和储存，并进行能量转换。如照明电路，它将电源提供的电能传输至照明灯，并转化为光能。电路的另一个重要功能是传递和处理信号，如收音机、电视机，它们通过接收天线接收载有声音、图像信息的电磁波信号后，经过选频、放大和处理，最后由扬声器或显像管复原出原信号。

不论电路所起的作用是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，都是通过电流、电压和功率来实现的，所以在进行电路分析之前，首先讨论电路的几个基本物理量。

## 1.2 电路分析中的基本物理量

### 1.2.1 电流和电流的参考方向

电流是由电荷的有规则的定向运动而形成的。电流的大小或强弱取决于导体中电荷量的变化，通常把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流，用符号  $i(t)$  表示，其数学表达式为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

式中，电流的单位为安培 (A)，且 1 安培 = 1 库仑/秒，其常用单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 ( $\mu\text{A}$ )。换算关系为：1kA =  $10^3\text{A}$ ，1mA =  $10^{-3}\text{A}$ ，1 $\mu\text{A}$  =  $10^{-6}\text{A}$ 。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。如果电流的大小及方向都不随时间变化，则称为恒定电流，简称直流 (简写 DC)，用大写的斜体字母  $I$  表示。否则称为时变电流，用  $i(t)$  表示 (简写  $i$ )，若时变电流的大小和方向都随时间作周期性变化，则称为交流电流 (简写 AC)。电流的方向是客观存在的，但在分析较为复杂的直流电路时，往往难以事先判断某支路电流的实际方向，如果是交流电路，则它的实际方向不断在变化，就更难判断了，因此在电路分析中，引进了参考方向的概念。

所谓电流参考方向，是任意假定的电流方向，在电路中用实线箭头来表示。例如，图 1.2.1 所示的一段电路，其中方框表示一个两端元件。

在图 1.2.1(a) 中，电流的参考方向与实际方向一致，则  $i > 0$ ，电流为正值；在图 1.2.1(b) 中，电流的参考方向与实际方向相反，则  $i < 0$ ，电流为负值。所以只有在选定了参考方向后，电流才有正负之分。注意，电路图中标明的电流方向均为参考方向，一般不标明实际方向，电流的实际方向是由电流的参考方向和该电流数值的正、负极性一起加以判断的。

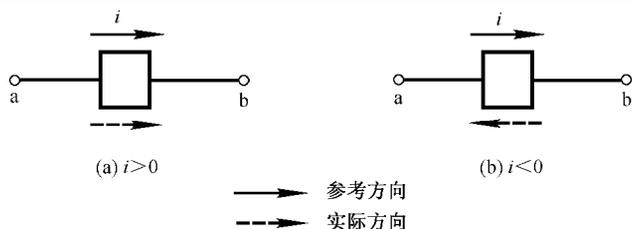


图 1.2.1 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

**【例 1.2.1】** (1) 图 1.2.2(a)中的方框用来泛指元件, 若流过图中所示元件的电流实际方向由 a 指向 b, 其大小为 3A, 试求电流  $i_1$ ; (2) 假设图 1.2.2(b)中的电流  $i_2 = -3A$ , 请指出电流的实际方向。



图 1.2.2 例 1.2.1 图

**解:** (1) 由于电流  $i_1$  的参考方向与实际方向一致, 故  $i_1 = 3A$ ;

(2) 由于  $i_2 = -3A$ , 故电流参考方向与实际方向相反, 实际方向是由 a 指向 b。

## 1.2.2 电压和电压的参考方向

电路中 a、b 两点间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 其数学表达式为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.2)$$

电压  $u_{ab}$  (简写  $u$ ) 的单位是伏特 (V), 且 1 伏特 = 1 焦耳/库仑, 电压的常用单位有千伏 (kV) 和毫伏 (mV)。换算关系为:  $1kV = 10^3V$ ,  $1mV = 10^{-3}V$ 。

电压反映了单位正电荷由 a 点运动到 b 点所获取或失去的能量。例如, 正电荷由 a 点运动到 b 点时失去能量, 即 a 点能量高, b 点能量低, 则 a 为正极, b 为负极。

如果电压的大小和极性都不随时间而变化, 则称为恒定电压或直流电压, 用大写的斜体字母  $U$  表示。如果电压是时间  $t$  的函数, 称为时变电压, 用小写的字母  $u$  表示。

**电压的实际极性 (也称为实际方向) 规定由高电位指向低电位, 即电压降方向。** 在电路中可用 “+”、“-” 极性表示, 如图 1.2.3 所示。“+” 极性指向 “-” 极性就是电压降的方向, 另外电压的参考方向还可以用双下标表示,  $u_{ab}$  表示 a 为正极性, b 为负极性, 而  $u_{ba}$  正好相反, 并且有  $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

如同需要为电流规定参考方向一样, 也需要为电压规定参考极性 (也称为参考方向), 电压的参考方向是任意指定的电压降方向。同样, 电路图中标明的电压方向均为参考方向, 若电压的实际方向与参考方向一致, 则电压  $u$  为正值, 即  $u > 0$ , 若电压的实际方向与参考方向相反, 则电压  $u$  为负值, 即  $u < 0$ 。因此只有在电压参考方向选定后, 电压才有正负之分, 根据电压的正负值及参考方向, 可判断电压的实际方向。

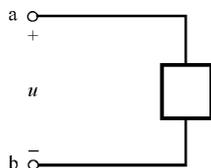


图 1.2.3 电压的方向

一般情况下, 电路在工作时, 其电路元件上既存在电流, 又存在电压, 所以既要为元件的电流假设参考方向, 又要为元件两端的电压假设参考方向。彼此可以独立无关地任意假定, 但为了方便起见, 引入了关联参考方向 (简称关联方向) 和非关联参考方向 (简称非关联方向)。在图 1.2.4(a) 中, 电流从电压的正端流入, 即电流的参考方向与电压的参考方向一致, 称为关联参考方向, 图 1.2.4(b) 中正好相反, 称为非关联参考方向。在对电路进行分析时, 应尽可能选用关联参考方向。

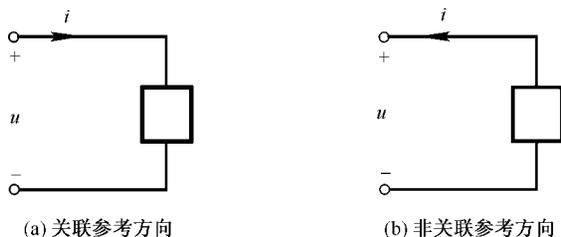


图 1.2.4 关联和非关联参考方向

引入关联参考方向后, 只需在电路图中标出电流参考方向或电压参考方向中的任何一种就可以了。一旦选定了参考方向, 在电路分析计算过程中就不允许改变。

在电子电路分析计算中, 经常要用到电位的概念。电路中某点电位是指该点与参考点之间的电压, 用符号  $V$  表示, 如 a 点电位为  $V_a$ 。a、b 间的电压为 a 点电位减去 b 点电位, 即  $U_{ab} = V_a - V_b$ 。参考电位可以任意选定, 并规定其电位为零。在电力电路中, 通常选择大地作为参考点, 在电路图中用符号 “ $\perp$ ” 表示接大地, 而在电子电路中, 通常选定与金属外壳相连的点作为参考点, 在电路图中用符号 “ $\perp$ ” 表示接机壳或接底板。

**【例 1.2.2】** 在图 1.2.5 所示的电路中, 选 d 为参考点, 已知  $V_a = 2V$ ,  $V_b = 3V$ ,  $V_c = 1V$ 。(1) 若选 a 为参考点, 试求  $V_b$ 、 $V_c$  和  $V_d$ ; (2) 分别求出当选定 a、d 为参考点时的电压  $U_{ab}$ 、 $U_{cb}$  和  $U_{bd}$ 。

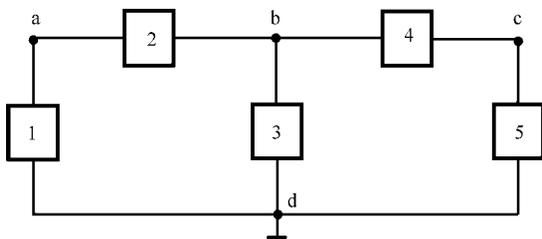


图 1.2.5 例 1.2.2 图

**解:** (1) 当选 a 为参考点时, 则电位

$$V_b = U_{ba} = U_{bd} + U_{da} = U_{bd} - U_{ad} = 3 - 2 = 1V$$

$$V_c = U_{ca} = U_{cd} + U_{da} = U_{cd} - U_{ad} = 1 - 2 = -1V$$

$$V_d = U_{da} = -U_{ad} = -2V$$

(2) 当选 a 为参考点时, 则  $V_a = 0V$ , 其他各点电位如 (1) 中计算结果, 故电压

$$U_{ab} = V_a - V_b = 0 - 1 = -1V$$

$$U_{cb} = V_c - V_b = (-1) - 1 = -2V$$

$$U_{bd} = V_b - V_d = 1 - (-2) = 3V$$

当选 d 为参考点时, 其他各点电位在题中已给出, 则电压

$$U_{ab} = V_a - V_b = 2 - 3 = -1V$$

$$U_{cb} = V_c - V_b = 1 - 3 = -2V$$

$$U_{bd} = V_b - V_d = 3 - 0 = 3V$$

可见, 选择不同的参考点, 电位会发生变化, 而任意两点间的电压不会改变。因为电位与参考点的选择有关, 而电压与参考点的选择无关。

### 1.2.3 功率和能量

与电压和电流一样, 功率和能量也是电路分析中的重要物理量。这是因为电路在工作状态下总伴随有电能与其他形式能量的转换或相互交换。人们都知道, 使用和消耗了电能, 就要向供电商付费, 另一方面, 电气设备和电路部件本身都有功率的限制。

**电功率 (简称功率)** 可以用来反映电能转换的快慢, 定义为单位时间内吸收 (或产生) 的电能量, 功率用  $p(t)$  表示 (简写  $p$ ), 即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.3)$$

由于  $i = \frac{dq}{dt}$ ,  $u = \frac{dw}{dq}$ , 当  $u$  与  $i$  为关联参考方向时, 瞬时功率为

$$p = ui \quad (1.2.4)$$

在直流电路中

$$P = UI \quad (1.2.5)$$

当  $u$  与  $i$  为非关联参考方向时, 计算功率的公式为

$$p = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI \quad (1.2.6)$$

在利用式 (1.2.4)、式 (1.2.5) 和式 (1.2.6) 计算功率所得的结果中, 若  $p > 0$ , 表明该段电路吸收 (消耗) 功率; 若  $p < 0$ , 表明该段电路提供 (产生) 功率。以上有关功率的讨论不仅适用于一段电路, 而且也适用于一个元件, 若元件在电路中提供功率起到电源作用的称为电源; 若元件为吸收功率起到负载作用的则称为负载。一般来说:

$$\text{吸收功率} = -\text{产生功率}$$

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W), 1 瓦=1 焦耳/秒, 功率的常用单位还有毫瓦 (mW)、千瓦 (kW) 和兆瓦 (MW), 且有  $1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$ ,  $1\text{kW} = 10^3\text{W}$ ,  $1\text{MW} = 10^6\text{W}$ 。

根据式 (1.2.3) 可求得能量

$$w = \int_{-\infty}^t p dt \quad (1.2.7)$$

在国际单位制 (SI) 中, 能量的单位是焦耳, 简称焦 (J), 度量电力的单位是瓦特·小时 (Wh),  $1\text{Wh} = 3600\text{J}$ 。

**【例 1.2.3】** 一台 3kW 的空调，2 小时需要消耗多少电能？

解： $w = pt = 3000 \times 2 \times 3600 = 21600000(\text{J}) = 21600\text{kJ}$

或用瓦特·小时表示  $w = pt = 3000 \times 2 = 6000\text{Wh}$

**【例 1.2.4】** 图 1.2.6 所示的电路由 5 个元件组成，已知  $U_1 = 2\text{V}$ ， $U_2 = 5\text{V}$ ， $I_1 = 1\text{A}$ ， $I_2 = 4\text{A}$ ， $I_3 = 3\text{A}$ ， $I_4 = -2\text{A}$ ， $I_5 = 1\text{A}$ 。求：(1)  $U_3$ 、 $U_4$  和  $U_5$ ；(2) 每个元件的功率，并指出哪些是电源，哪些是负载。

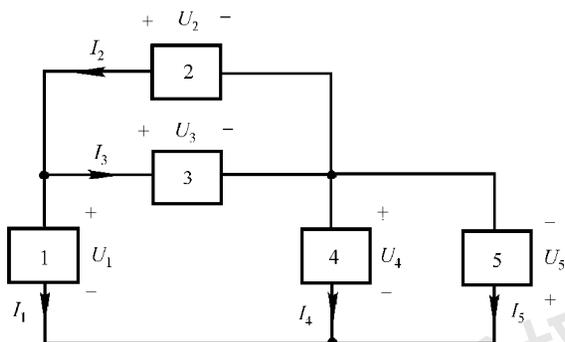


图 1.2.6 例 1.2.4 图

解：(1)  $U_3 = U_2 = 5\text{V}$ ， $U_4 = -U_2 + U_1 = -5 + 2 = -3\text{V}$ ， $U_5 = -U_4 = 3\text{V}$

(2) 每个元件的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 = 2 \times 1 = 2\text{W} \quad (\text{吸收})$$

$$P_2 = -U_2 I_2 = -5 \times 4 = -20\text{W} \quad (\text{产生})$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 5 \times 3 = 15\text{W} \quad (\text{吸收})$$

$$P_4 = U_4 I_4 = (-3) \times (-2) = 6\text{W} \quad (\text{吸收})$$

$$P_5 = -U_5 I_5 = -3 \times 1 = -3\text{W} \quad (\text{产生})$$

所以，元件 1、3 和 4 是负载，2 和 5 是电源，而且  $P_1 + P_3 + P_4 = -(P_2 + P_5)$ ，即所有元件提供的功率与吸收的功率相等，满足功率平衡条件。

## 1.3 电阻元件

电路中表示材料电阻特性的元件称为电阻器，常用的电阻器有碳膜电阻器、金属膜电阻器、线绕电阻器及电位器等，电阻元件是从实际电阻器中抽象出来的模型。线性电阻元件的符号如图 1.3.1(a)所示，它是一个二端元件，其两端的电压和电流的关系称为伏安关系，简称为 VAR，两者服从欧姆定律，当电压与电流参考方向关联时，有

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

式中， $R$  为常数，是线性电阻的电阻值，单位为  $\Omega$ 。常用的电阻单位还有千欧 ( $\text{k}\Omega$ ) 和兆欧 ( $\text{M}\Omega$ )。换算关系为  $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$ ， $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ 。

欧姆定律体现了电阻器对电流呈现阻力的本质。若  $u$  与  $i$  为非关联参考方向，则欧姆定律应改为

$$u = -Ri \quad (1.3.2)$$

如果把电阻元件的电压取为纵坐标，电流取为横坐标，在  $i-u$  平面上绘出的曲线，称为电阻元件的伏安特性曲线。显然，线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线，电阻值可由直线的斜率来确定，如图 1.3.1(b)所示。

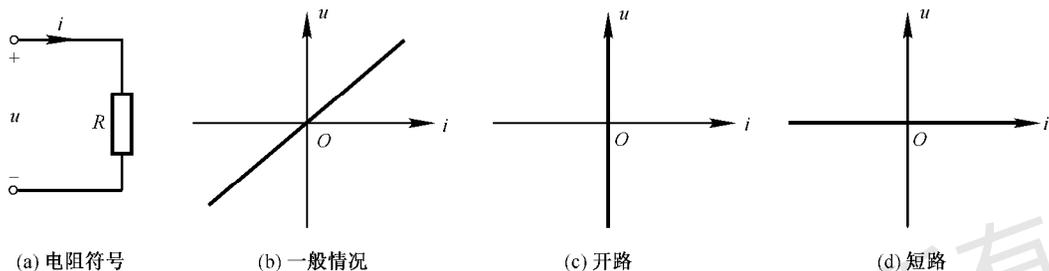


图 1.3.1 线性电阻元件的符号及其伏安特性

电阻元件还可用另一个参数——电导表示，电导  $G = \frac{1}{R}$ ，单位为西门子（符号为 S）。用电导表征线性电阻元件时，当  $u$  与  $i$  为关联参考方向时，欧姆定律为

$$i = Gu \quad (1.3.3)$$

从线性电阻元件的伏安特性曲线可以看出，任一时刻电阻的电压（或电流）是由同一时刻的电流（或电压）所决定的。也就是说，线性电阻的电压不能“记忆”电流在“历史”上起过的作用，所以称为无记忆元件。对于任一个二端元件，只要电压、电流之间存在代数关系，都是无记忆元件。

线性电阻有两个特殊情况——开路和短路。当电阻元件开路（即  $R = \infty$ ）时，无论电压为何值，其上的电流恒等于零，如图 1.3.1(c)所示。当电阻元件短路（即  $R = 0$ ）时，无论电流为何值，其两端的电压恒等于零，如图 1.3.1(d)所示。

当实际电路出现开路或短路现象时，多数情况是电路出现故障，需排除后方能正常工作，但有些场合则需要利用开路或短路现象，如电焊机就是利用短路引起的大电流工作的。

如果电阻不是常数，其值随电压或电流的大小甚至方向而改变，则称为非线性电阻，二极管是典型的非线性电阻，图 1.3.2(a)所示是二极管的电路符号。它的特性曲线由整条伏安特性曲线表示，如图 1.3.2(b)所示，所以不能笼统地说是多少欧姆的电阻。

电阻元件除了区分线性和非线性外，还有时变和非时变（或时不变）之分，特性曲线不随时间变化的称为非时变的，否则称为时变的。本书所论及的电阻均假设为线性时不变电阻。

最后讨论线性电阻元件的功率问题，当电压和电流为关联参考方向时，有

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.3.4)$$

若  $R$  和  $G$  是正实常数，则功率  $p > 0$ ，为吸收功率，说明电阻元件消耗能量，因此它是

一个无源元件。工程上常用电阻器消耗电能转化为热能的效应制作各种电热器，如电烙铁、电炉和电灯等。

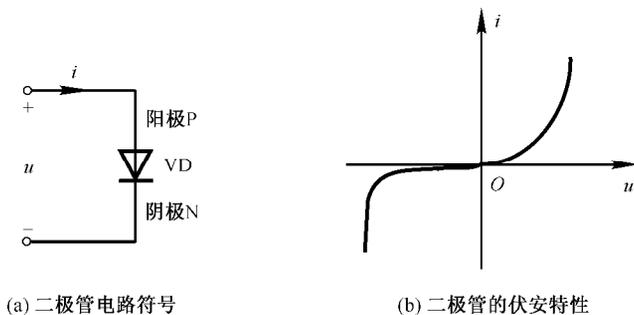


图 1.3.2 二极管的符号和伏安特性

另外，利用电子电路可实现负电阻，即  $R < 0$ ，此时  $p < 0$ ，对外提供能量，属于有源元件，本书讨论的电阻均为正电阻。

电阻元件在电路中最常用的一种元件，在实际使用时，不但要知道它的阻值，还需要知道它的额定功率。事实上，为了使各种电气设备和器件能安全、可靠和经济地工作，制造厂家对每个电气设备和器件都规定了工作时允许的最大电流、最高电压和最大功率，这些数值称为额定值。如某一盏电灯的额定电压是 220V、额定功率是 40W，虽然实际工作时不一定处于额定状态，但一般不应超过额定值。若超出额定值过多，可能会使电气设备或器件损坏，而当远低于额定值时，不仅得不到正常合理的工作情况，而且也不能充分利用设备的能力。

## 1.4 独立源

任何实际电路要维持连续不断的运行，必须有电源的作用。电路中常遇到两类电源：一类电源如稳压电源，当接上负载后，在一定范围内，其输出电流随负载的变化而变化，但电源两端的电压保持为规定值，这类电源常称为独立电压源（简称电压源）；另一类电源如光电池等，当负载在一定范围内变化时，其两端电压随之变化，但电源的输出电流保持为规定值，这类电源常称为独立电流源（简称电流源）。

### 1.4.1 电压源

一个二端元件，如果端电压总是保持定值  $U_S$  或是一定的时间函数  $u_S(t)$ ，而与通过它的电流无关，则该元件称为电压源。理想电压源的电压是由它本身确定的，而流过它的电流由与之连接的外电路决定。

电压源符号如图 1.4.1 所示，其中图 1.4.1(a)所示为直流电压源符号，图 1.4.1(b)所示为一般电压源符号（含直流电压源），其电压源伏安特性曲线如图 1.4.2 所示，其中图 1.4.2(a)所示为直流电压源特性曲线，而图 1.4.2(b)所示为电压源在  $t_1$  时刻的伏安特性曲线，它是一条不通过原点且与电流轴平行的直线。当  $u_S(t)$  随时间改变时，这条平行于电流轴的直线也将随之改变位置。

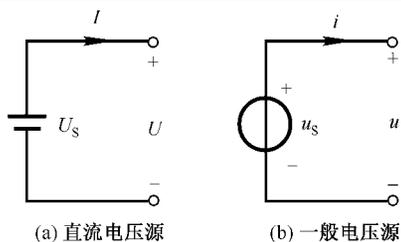


图 1.4.1 电压源符号

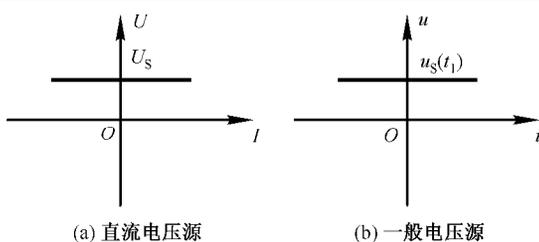


图 1.4.2 电压源伏安特性曲线

由特性曲线可看出, 当  $i \rightarrow \infty$  时, 由于电压源的电压与流过它的电流变化无关, 故  $p \rightarrow \infty$ , 即理想电压源能提供无穷大的能量, 显然实际电压源是不可能实现的。但理想电压源确实提供了几种实际电压源的合理近似, 如汽车蓄电池有 12V 端电压, 只要流过它的电流不超过几安培, 其端电压基本保持常数, 又如新的干电池、大型电力网等, 基本上能维持端电压不随外部连接电路的变化而变化, 所以理想电压源是从实际电压源中抽象出来的模型。

实际电压源两端的电压总是随着电流的增加而有所下降, 这是由于实际电压源有内阻存在, 当它向外提供电功率时, 本身内阻要消耗功率, 所以实际电压源可用电压源与内阻的串联模型表示, 其模型如图 1.4.3(a)所示, 伏安特性曲线如图 1.4.3(b)所示。

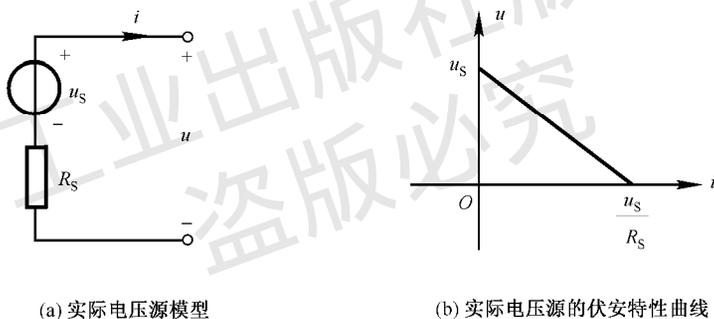


图 1.4.3 实际电压源

实际电压源的伏安关系为

$$u = u_S - R_S i \quad (1.4.1)$$

**【例 1.4.1】** 图 1.4.4 所示为实际直流电压源接负载  $R_L$  的电路, 已知负载的额定功率  $P = 60\text{W}$ , 额定电压  $U = 30\text{V}$ , 内阻  $R_S = 0.5\Omega$ , 负载  $R_L$  可调。试求: (1) 额定工作状态下的电流  $I$  及负载电阻  $R_L$ ; (2) 负载开路时的开路电压  $U_{OC}$ ; (3) 负载短路时的短路电流  $I_{SC}$ 。

解: (1)  $I = \frac{P}{U} = \frac{60}{30} = 2\text{A}$ ,  $R_L = \frac{U}{I} = \frac{30}{2} = 15\Omega$

(2) 额定工作状态下  $U_S = U + IR_S = 30 + 2 \times 0.5 = 31\text{V}$

$$U_{OC} = U_S = 31\text{V}$$

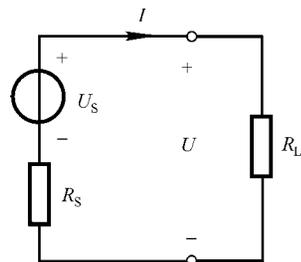


图 1.4.4 实际直流电压源电路图

(3) 短路电流 
$$I_{SC} = \frac{U_s}{R_s} = \frac{31}{0.5} = 62A$$

由此可见，例 1.4.1 中短路电流是额定电流的 31 倍。由于一般电压源的内阻  $R_s$  较小，故不可以将电压源短路，否则会因为短路电流太大而烧毁电压源，因此电压源在实际使用时必须加短路保护。

### 1.4.2 电流源

电流源也是从实际电源中抽象出来的一种模型。其定义为：一个二端元件，如果其输出电流总是保持定值  $I_s$  或是一定的时间函数  $i_s(t)$ ，而与其两端电压无关，则该二端元件称为电流源。一个理想的电流源，其电流由它本身确定，而它两端的电压由与之连接的外电路决定。

电流源的符号如图 1.4.5 所示，其中图 1.4.5(a)所示为直流电流源符号，图 1.4.5(b)所示为一般电流源符号（含直流电流源），其电流源伏安特性曲线如图 1.4.6 所示，其中图 1.4.6(a)所示为直流特性曲线，而图 1.4.6(b)所示为电流源在  $t_1$  时刻的伏安特性曲线。

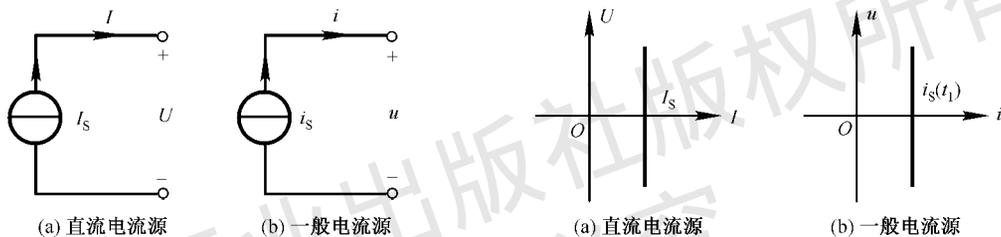
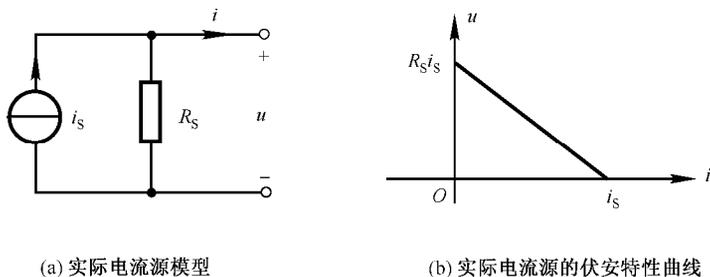


图 1.4.5 电流源符号

图 1.4.6 电流源伏安特性曲线

当  $u \rightarrow \infty$  时， $p \rightarrow \infty$ ，显然实际电流源不可能提供无穷大的功率。实际电流源提供的电流总是随着电压的增加而有所下降，所以实际电流源可用电流源与电阻的并联模型表示，其模型如图 1.4.7(a)所示，伏安特性曲线如图 1.4.7(b)所示。



(a) 实际电流源模型

(b) 实际电流源的伏安特性曲线

图 1.4.7 实际电流源

实际电流源的伏安特性为

$$i = i_s - \frac{u}{R_s} \tag{1.4.2}$$

**【例 1.4.2】** 计算图 1.4.8 所示直流电路的电流  $I$ 、电压  $U$  及每个元件的功率。

解：串联回路电流等于电流源电流，即  $I = 2A$ ；

$$U = 5 \cdot I + 4 + 3 \cdot I = 20V$$

由于电流源的电流参考方向与电压参考方向非关联，故

$$P_{2A} = -2 \cdot U = -2 \times 20 = -40W \quad (\text{产生功率})$$

即电流源提供 40W 功率；

电压源的电压参考方向与流过它的电流参考方向一致，为关联参考方向，故

$$P_{4V} = 4 \cdot I = 4 \times 2 = 8W \quad (\text{吸收功率})$$

即电压源吸收的功率为 8W ；

$$P_{5\Omega} = 5 \cdot I^2 = 5 \times 2^2 = 20W \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_{3\Omega} = 3 \cdot I^2 = 3 \times 2^2 = 12W \quad (\text{吸收功率})$$

由此可见，电压源和电流源在电路中不一定都提供能量，例 1.4.2 中电流源提供功率，起电源作用，而电压源和电阻均吸收功率，起负载作用。

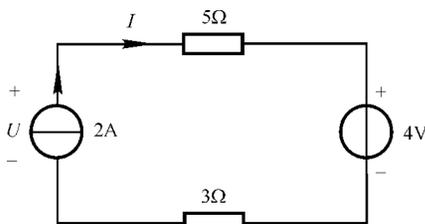
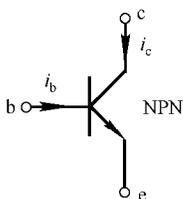


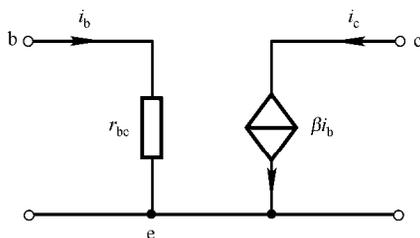
图 1.4.8 例 1.4.2 图

## 1.5 受控源

前述电压源和电流源都是独立源，因为电压源的电压和电流源的电流是不受外电路的控制而独立存在的。然而电子电路中还有一种非独立源，这种非独立电压源的电压和电流源的电流受到同一电路中其他支路的电压和电流控制，通常把这种非独立源称为受控源，为了与独立源区别，受控源用菱形符号表示。借助于受控源可以表征有源电子器件（如晶体三极管、运算放大器等）的电路模型。图 1.5.1(a)所示是 NPN 三极管符号，图 1.5.1(b)所示是 NPN 晶体三极管在放大模式下的小信号电路模型。其中  $r_{be}$  是晶体三极管的输入电阻， $\beta$  是其发射结交流电流放大倍数，图中  $i_c = \beta i_b$ ，即输出电流  $i_c$  受输入电流  $i_b$  的控制，所以  $i_b$  称为控制量， $i_c$  称为受控量。



(a) 符号



(b) 小信号电路模型

图 1.5.1 NPN 晶体三极管

理想集成运算放大器（简称理想运放）的符号如图 1.5.2(a)所示，理想运放模型如图 1.5.2(b)所示。对于理想运放，有输入电阻  $R_i \rightarrow \infty$ ，输出电阻  $R_o \rightarrow 0$ ，开环差模电压放大倍数  $A \rightarrow \infty$ ，差动输入电压  $u_{id} = (u_+ - u_-) \rightarrow 0$ ，输出电压  $u_o = Au_{id} = A(u_+ - u_-)$ ，即运放输出电压受差动输入电压的控制。

综上所述，受控源含有两条支路，一条是控制支路，一条是被控支路，且控制支路和被控支路既可以是电压，也可以是电流，因此受控源有 4 种类型：分别为电压控制电压源

(Voltage-Controlled Voltage Source, 缩写 VCVS)、电压控制电流源 (Voltage-Controlled Current Source, 缩写 VCCS)、电流控制电压源 (Current-Controlled Voltage Source, 缩写 CCVS)、电流控制电流源 (Current-Controlled Current Source, 缩写 CCCS), 其理想受控源模型如图 1.5.3 所示。

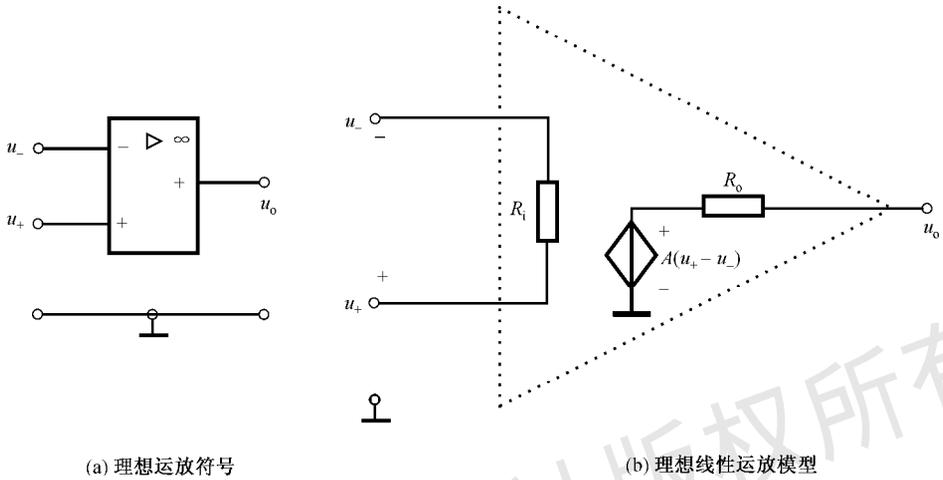


图 1.5.2 集成运算放大器

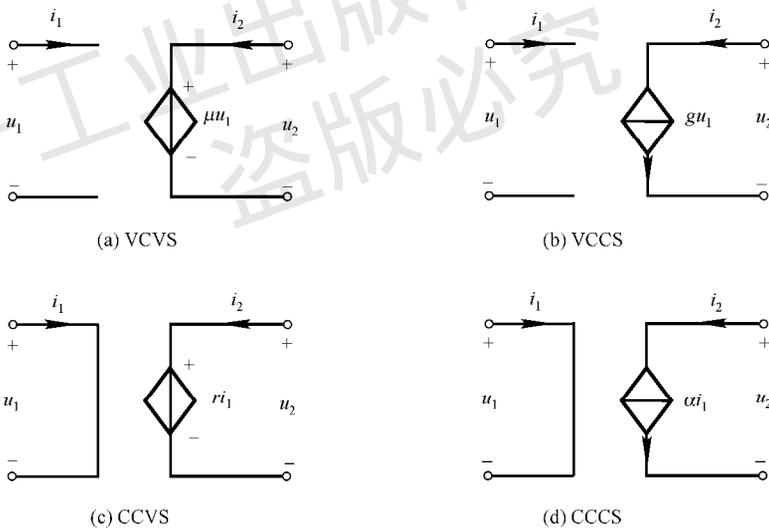


图 1.5.3 理想受控源模型

4 种受控源的 VAR 为

$$\text{VCVS} \quad u_2 = \mu u_1 \quad (1.5.1)$$

$$\text{VCCS} \quad i_2 = g u_1 \quad (1.5.2)$$

$$\text{CCVS} \quad u_2 = r i_1 \quad (1.5.3)$$

$$\text{CCCS} \quad i_2 = \alpha i_1 \quad (1.5.4)$$

式中,  $\mu$  和  $\alpha$  无量纲,  $g$  的单位是电导 S,  $r$  的单位是电阻  $\Omega$ 。

若控制系数  $\mu$ 、 $g$ 、 $r$ 、 $\alpha$  是常数，则受控源是线性受控源。

受控源与独立源有本质区别。独立源是发电机、电池、信号发生器等实际电源或信号源的理想化模型，它是能量的来源，在电路中起激励作用，它能单独引起电路中电压、电流的响应，而受控源是描述电子器件中某支路对另一支路控制作用的理想化模型，由于受控源的输出电压（电流）的大小和方向是由控制支路的电压（电流）控制的，所以受控源不能单独引起电路中电压、电流的响应，在电路中不起激励作用。另一方面，由于受控源具有类似独立源的输出特性，只要控制支路不变，被控支路总保持输出不变，因此在分析含有受控源的电路时，通常把受控源作为独立源处理，列写电路方程，但要注意受控量与控制量的关系。

**【例 1.5.1】** 求图 1.5.4 所示电路中  $5\Omega$  电阻上的电压  $u_2$ 、电流  $i_2$  及受控电流源的功率。

**解：** 图 1.5.4 所示的电路是电压控制电流源的电路，其控制量为

$$u_1 = 0.5 \times 10 = 5\text{V}$$

受控电流源的电流

$$i_2 = 0.4u_1 = 0.4 \times 5 = 2\text{A}$$

由于  $u_2$  与  $i_2$  非关联，故

$$u_2 = -5 \times i_2 = -10\text{V}$$

受控电流源的电流与其两端电压为关联

参考方向，故

$$p = u_2 \cdot i_2 = -10 \times 2 = -20\text{W}$$

即受控电流源提供功率 20W。

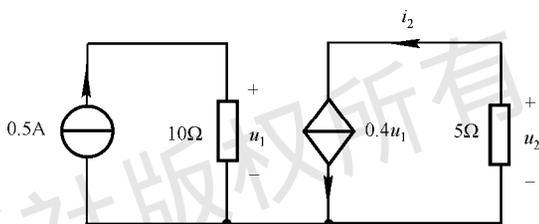


图 1.5.4 例 1.5.1 图

## 1.6 基尔霍夫定律

集总参数电路是由集总参数元件按一定规律连接而成的。

电路中把每一个二端元件视为一条支路，而把两条或两条以上支路的连接点称为节点。

流过支路的电流称为支路电流，支路两端的电压称为支路电压。图 1.6.1 所示的电路由 5 个元件构成，所以有 5 条支路及 a、b、c、d 这 4 个节点。在电路分析中，为方便起见，通常将流过同一电流的几个元件的串联组合称为支路，则图 1.6.1 中电压源  $u_{S1}$  和电阻  $R_1$  串联成一条支路，其支路电流为  $i_1$ ，同时 c 点不再作为节点，而电压源  $u_{S2}$  和电阻  $R_2$  也串联成一条支路，其支路电流为  $i_2$ ，同时 d 点也不再作为节点，这样定义后，就只有 3 条支路及 a、b 两个节点。因为支路数和节点数都减少了，未知的支路电流或支路电压就有所减少，直接导致相联系的求解方程数也减少，所以有助于电路的分析、计算。

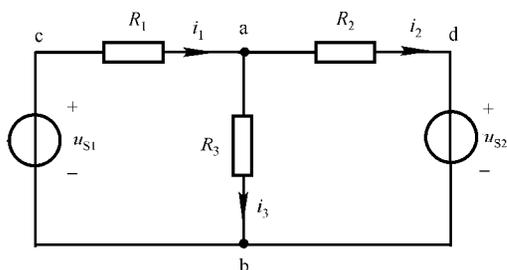


图 1.6.1 电路举例

图 1.6.1 中共有 3 个回路，即 adbca、abca 和 adba，共有两个网孔，即 abca 和 adba。

由支路构成的任一闭合路径称为回路，在回路内部不含有任何支路的回路称为网孔。

电路中的各支路电流和支路电压受到两类约束：一类是由元件特性造成的约束，即每个元件上的电压与电流自身存在的一定关系，称为元件约束，如线性电阻元件的电压与电流的VAR为 $u = Ri$ ；另一类是元件的相互连接给支路电流之间和支路电压之间带来的约束，称为拓扑约束，这类约束由基尔霍夫定律体现。一切集总电路中的电压、电流无不为这两类约束所支配。其中，基尔霍夫定律包括电流定律和电压定律。

### 1.6.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL)：在集总参数电路中，任一时刻，对任一节点，流出（或流入）该节点的所有电流的代数和等于零，即

$$\sum i = 0 \quad (1.6.1)$$

或者说，在集总参数电路中，任一时刻，对任一节点，所有流入该节点的电流之和等于所有流出该节点的电流之和，即

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1.6.2)$$

实际上，基尔霍夫电流定律可由节点推广到任意一个闭合面，即通过一个闭合面的支路电流的代数和恒等于零，或者说流入闭合面的电流等于流出闭合面的电流。

**【例 1.6.1】** 求图 1.6.2 所示电路的电流  $i_1$ 、 $i_2$  和  $i_3$ 。

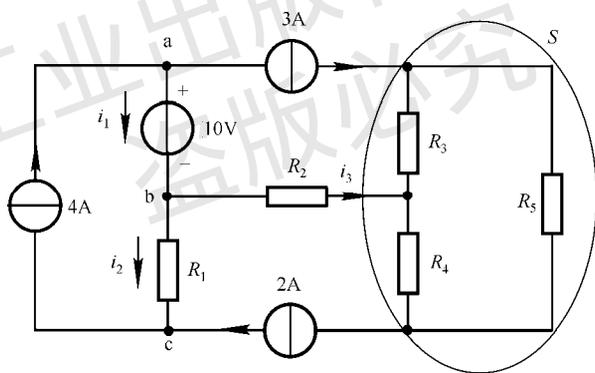


图 1.6.2 例 1.6.1 图

**解：** 设流入节点 a 的电流为正，则节点 a 的 KCL 方程为

$$4 - 3 - i_1 = 0, \text{ 解得 } i_1 = 1\text{A}$$

同理，节点 c 的 KCL 方程为

$$i_2 + 2 - 4 = 0, \text{ 解得 } i_2 = 2\text{A}$$

$i_3$  可由节点 b 的 KCL 方程求得，即

$$i_3 = i_1 - i_2 = -1\text{A}$$

另外还可以通过图 1.6.2 中由  $R_3$ 、 $R_4$  和  $R_5$  构成的闭合面  $S$  求  $i_3$ 。若将闭合面  $S$  看做一个闭合表面缩小后的一个点，则列写 KCL 方程有

$$i_3 + 3 = 2, \text{ 解得 } i_3 = -1\text{A}$$

## 1.6.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL): 在集总参数电路中, 任一时刻, 对任一回路, 沿着指定的回路绕行方向, 各元件两端的电压的代数和为零, 即

$$\sum u = 0 \quad (1.6.3)$$

应用式 (1.6.3) 时要注意, 当元件两端的电压方向与回路绕行方向相同时取正号, 相反则取负号。回路方向可取顺时针方向, 也可取逆时针方向。

**【例 1.6.2】** 求图 1.6.3 所示电路的  $u_1$  和  $u_2$ 。

**解:** 取网孔 1 和网孔 2 的顺时针方向为绕行方向。

对网孔 1 列 KVL 方程, 有  $u_1 + 2 - 5 = 0$ , 得  $u_1 = 3\text{V}$ 。

对网孔 2 列 KVL 方程, 有  $u_2 - 3 - 2 = 0$ , 得  $u_2 = 5\text{V}$ 。

图 1.6.4 所示的回路是由电压源和电阻构成的, 设回路的绕行方向为逆时针方向, 由 KVL 得

$$R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + U_{S2} - U_{S1} = 0$$

或  
即

$$R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = U_{S1} - U_{S2}$$

$$\sum RI = \sum U_S \quad (1.6.4)$$

此式为基尔霍夫定律在电阻电路中的另一种表达式, 即在任一绕行回路中, 电阻上电压降的代数和等于回路中电压源电压升的代数和。

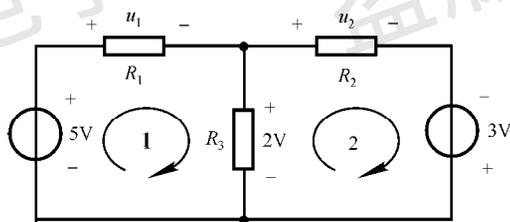


图 1.6.3 例 1.6.2 图

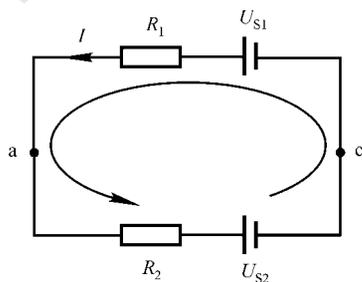


图 1.6.4 回路

基尔霍夫电压定律不仅可以应用于闭合回路, 也可以把它推广应用于回路的部分电路中。仍以图 1.6.4 为例, 求 a、c 两点之间的电压  $U_{ac}$ 。

列 KVL 方程, 有  $U_{ac} - U_{S1} + R_1 \cdot I = 0$ , 得  $U_{ac} = U_{S1} - R_1 \cdot I$

或  $U_{ac} - U_{S2} - R_2 \cdot I = 0$ , 得  $U_{ac} = U_{S2} + R_2 \cdot I$

基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律是集总参数电路的基本定律。KCL 描述了电路中任一节点处各支路电流的约束关系, 实质上是电荷守恒原理的体现, KVL 描述了电路中任一回路中各支路电压的约束关系, 实质上是能量守恒原理的体现。KCL 和 KVL 不仅适用于线性电路, 也适用于非线性电路, 不仅适用于时不变电路, 也适用于时变电路。

## 习 题

- 1.1 若流入某元件正端的电流  $i(t) = 2e^{-3t}$  mA, 求  $0 < t < 4$ s 期间流入该元件的总电荷量。
- 1.2 试计算一台平均功率为 5kW 的空调在 2 小时内消耗多少电能。
- 1.3 图 1.1 所示为某电子元件两端的电压和流过的电流波形, 求该元件在  $0 < t < 4$ s 期间吸收的总能量。

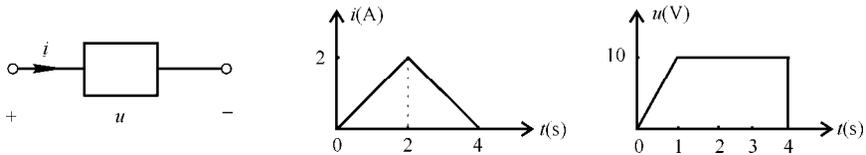


图 1.1 习题 1.3 电路及波形图

1.4 求图 1.2 所示图中各元件的功率。

- (1) 求元件 1 吸收的功率  $P_1$ ;      (2) 求元件 2 吸收的功率  $P_2$ ;  
 (3) 求元件 3 产生的功率  $P_3$ ;      (3) 求元件 4 产生的功率  $P_4$ 。

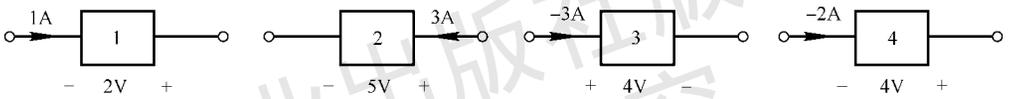


图 1.2 习题 1.4 电路图

1.5 各元件的电压、电流参考方向如图 1.3 所示。

- (1) 若元件 1 吸收功率为 10W, 求  $U_1$ ;      (2) 若元件 2 吸收功率为 -10W, 求  $I_2$ ;  
 (3) 若元件 3 产生功率为 10W, 求  $I_3$ ;      (4) 若元件 4 产生功率为 20W, 求  $U_4$ 。

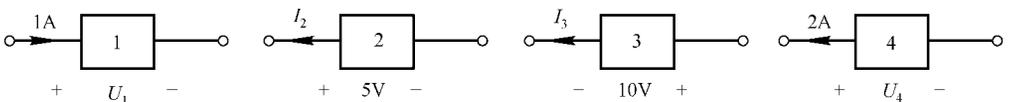


图 1.3 习题 1.5 电路图

1.6 一个 30W 的白炽灯接于 220V 的电源上, 一直在楼梯暗处点亮着, 求:

- (1) 流过灯泡的电流;  
 (2) 若按 0.6 元/kWh 计算, 求该灯不间断地亮一年所需的电费。

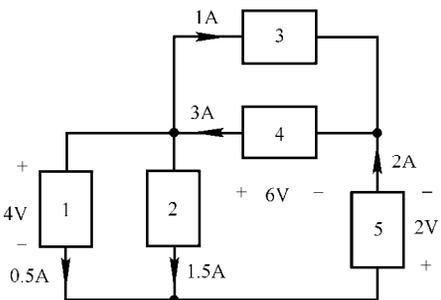


图 1.4 习题 1.7 电路图

1.7 求解电路后, 验证结果是否正确的方法之一是核对电路中所有元件的功率是否平衡, 即一部分电路元件提供的总功率等于另一部分电路元件吸收的总功率。试校验图 1.4 所示电路的解答是否正确。

1.8 求解图 1.5 所示电路中的  $U$ 、 $I$  及电压源和电流源的功率。

1.9 求图 1.6 所示电路中的  $U_s$ 、 $I$  和  $R$ 。

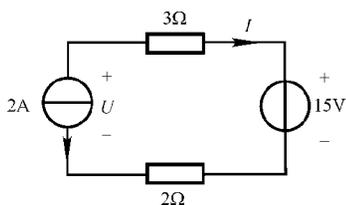


图 1.5 习题 1.8 电路图

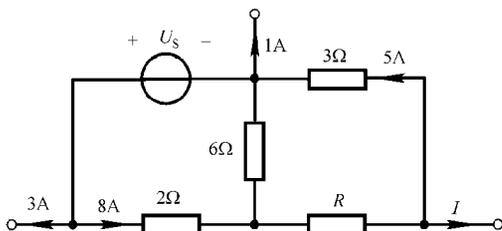


图 1.6 习题 1.9 电路图

1.10 求图 1.7 所示电路中的电流  $I_1$ 、 $I_2$  及各电源提供的功率。

1.11 在图 1.8 所示电路中，求出  $I_S$  与  $U$  的值。

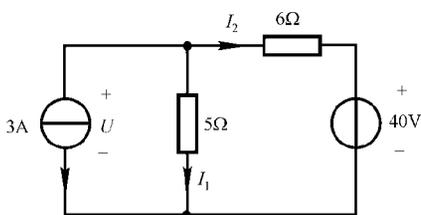


图 1.7 习题 1.10 电路图

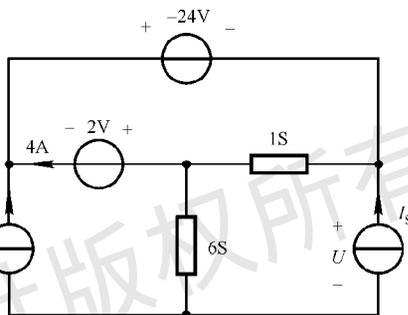


图 1.8 习题 1.11 电路图

1.12 求图 1.9 所示电路中 a 点电位及 b 点电位。

1.13 图 1.10 所示电路中，若  $I = 0A$ ，求  $R$  的值。

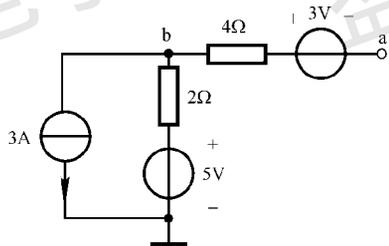


图 1.9 习题 1.12 电路图

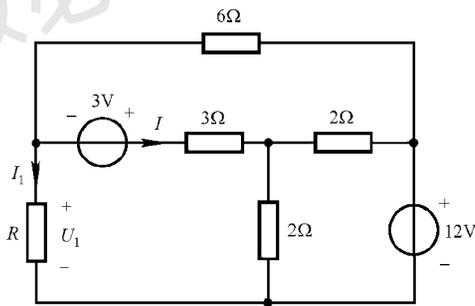


图 1.10 习题 1.13 电路图

1.14 电路如图 1.11 所示，求受控源的功率。

1.15 求图 1.12 所示电路中的电流  $I$ 。

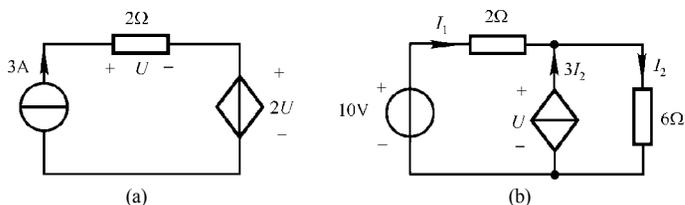


图 1.11 习题 1.14 电路图

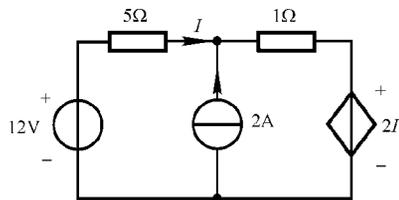


图 1.12 习题 1.15 电路图