

第一章 电路模型与基尔霍夫定律

在人们习以为常的用电过程中，您是否了解和考虑过，没有电的日子我们将如何度过？电在我们的日常生活中怎样发挥着它的巨大作用？电的传输和利用都有哪些规律？工程师们是如何让电为我们人类服务的？下面我们就从电路的最基本的知识开始讨论。

1-1 电路与电路模型

电的传输一般是通过电路进行的，根据电路完成的不同功能，电路的组成又有很大差别。一般情况下，最基本电路是由电源、负载和导线三部分组成，电源提供电路所需的能量，负载是用电设备，导线则是将电路的各个组成元件连成统一的整体。当然，一个实际电路还应包含有各种开关及控制设备。在电力系统中，电路的功能是要完成电能的传输、存储、转换和变换。在通讯系统中，电路主要作用是完成信号的传递、存储和信号处理。通常把输入电路的信号称为激励，而把经过传输和加工处理后所得到的信号称为响应。各种实际电路都是由电源、电阻器、电容器、电感线圈、集成电路等具体的元器件和设备相互连接组成的，例如图 1-1-1 所表示的是手电筒的结构示意图与电路模型。

由于环境的复杂性与元件工作条件以及电路结构的多样性的影响，为分析电路带来了一定难度。因此在一定条件下忽略它的次要因素，用一个足以表征主要性能模型来表示元件。当实际电路的几何尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时，可以定义出“集总参数元件”（以后简称元件），用来构成实际电路模型。每一种元件只反映一种基本电磁现象。例如，制作一个电阻器，主要是要利用其对电流的阻碍作用，忽略了电阻器在电流通过时产生的磁场效应，电阻元件只表现消耗电能的特性。由集总参数元件组成的电路，称为实际电路的集总电路模型，简称集总电路。如图 1-1-1（b）所示。应该强调的是，电路模型仅用于理论分析计算，它不是实际的电路。

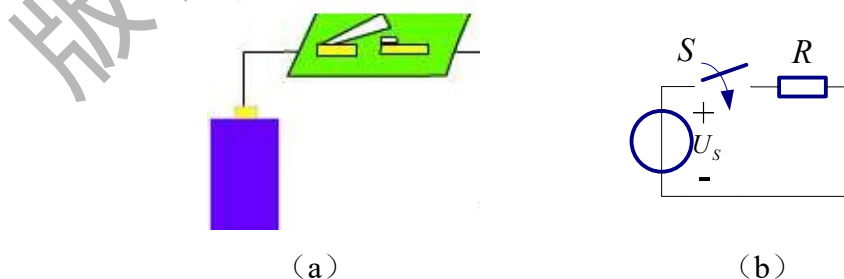


图 1-1-1 手电筒示意图与电路模型

我国工业用电的频率为 50 赫兹，其对应的波长为 6000 km ，对于实验室的元件尺寸相比这一长度都可以不计，因此可以使用集总参数模型。对于不满足上述条件的情况，例如

远距离电路通信线路和远距离电力输送等可以采用分布式参数分析的方法或者相关电磁场理论来分析。

1-2 电路分析中基本变量

集总参数电路分析中最常用到的变量是电路中各支路的电流、电压和功率。

1-2-1 电流及其参考方向

1747 年美国的富兰克林根据实验提出：在正常条件下电是以一定的量存在于所有物质中的一种元素；电跟流体一样，摩擦的作用可以使它从一物体转移到另一物体，但不能创造；任何孤立物体的电总量是不变的，这就是通常所说的电荷守恒定律。摩擦时物体获得的电的多余部分叫做带正电，物体失去电而不足的部分叫做带负电。在人类以后的科学研究中发现，自然界存在两种电荷：正电荷与负电荷。正电荷由原子核中的质子运载，负电荷由原子中的电子运载。正电荷与负电荷所带电荷多少称为电量。正电荷与负电荷所带电量很小，用作基本单位很不方便，在国际单位制（SI）中使用库仑（C）作为电量的单位，1 库仑电量等于 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量。

电荷之间存在作用力（电场力），同性电荷相斥异性电荷相吸。电路中电荷总量守恒（总量保持不变）——电荷不生不灭。

1、电流的定义

通常的物质，按其导电性能的不同可分两种情况：导体和绝缘体。导体内存在可运动的自由电荷。在电场的作用下，导体内存在的自由电荷将产生有序移动，其定向流动形成电流。定义单位时间内通过导体横截面的电量为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称电流，通常用符号 i 表示。即：

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

电流的大小和方向若不随时间变化，则称其为直流（Direct Current，简记为 DC）。若电流的大小和方向随时间变化，则称其为交流（Alternating Current，简记为 AC）。在国际单位制中电流的单位是安培(Ampere)，符号记为 A。

2、参考方向：

正电荷移动的方向规定为电流的方向，也称为电流的真实方向。实际分析中往往很难在电路图中标明电流的真实方向。例如，当电路比较复杂时，电流的真实方向很难事先预判。而当电流为交流时，则每时刻的真实方向都在变化。因此，在电路分析中要引入参考方向（Reference Direction）这一概念。

参考方向是预先任意假定的电流流向，这个任意假定的参考方向在电路中需要用箭头表示出来，我们就可以在这个参考方向的基础上进行电路的分析过程。

在引入参考方向后，我们对电流的正负规定为：如果电流的真实方向与参考方向一致，电流为正值；若两者方向相反，则电流为负值。

如图 1-2-1 所示，

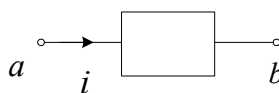


图 1-2-1 电流的参考方向

若 $i = 1A$ ，说明该电流的真实方向就是该参考方向的指向，大小为 1 安培；

若 $i = -1A$ ，则说明电流的真实流向与参考方向相反。

这样，有了电流的参考方向和电流的正负值，就可以确定电流的真实方向。显然，在未标示参考方向的情况下，电流值的正负是毫无意义的。

今后，若未加说明，本书出现的电流方向箭头均为参考方向的含义。

1-2-2 电压及其参考方向

1848 年基尔霍夫从能量的角度考查，定义了电位差、电动势、电场强度等概念。电荷在电路中流动形成电流，就必然伴随着能量的交换。我们引入电压这一物理量来度量电荷流经电路的某些元件，其获得或失去能量。

1、电压的定义

电压也称为电位差， ab 两点之间的电压表示单位正电荷由 a 点移动到 b 点获得或者失去的能量。即：

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-2)$$

其中 dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量，单位为库仑（C）； dw 为电荷转移过程中的能

量交换，单位为焦耳（J）。电压的国际单位是伏特（Volt），符号记为 V。与电流一样，电压也分直流电压和交流电压。

2. 电压的极性

正电荷在转移过程中电能的获得或失去体现为电位的升降。如果正电荷由 a 点移动到 b 点失去部分能量，则电位下降， a 点为高电位， b 点为低电位；如果由 a 点到 b 点获得能量则电位升高， a 点为低电位， b 点为高电位。高电位用 “+” 表示，即电压的正极；低电位用 “-” 表示，即电压的负极。如同对电流规定参考方向一样，对电压我们同样规定参考极性。即在元件或某支路的两端用 “+” “-” 号预先标明其电压，该电压的极性可以任意选定，不一定是其真实极性。和电流方向正负的规定一样，电压的参考极性结合其正负值最终标明其真实极性。

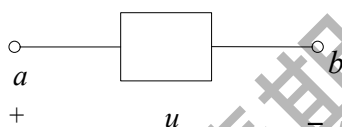


图 1-2-2 电压的参考方向

如图 1-2-2 所示，电压 u 在图中所取的参考极性下，若 $u > 0$ ，表示真实极性与参考极性相同；若 $u < 0$ ，则电压的真实极性与选定的参考极性相反，即真实的情况是 a 点为实际低电位， b 点为实际高电位。

可见电压在没有标注参考极性的情况下，其正负值同样是没有意义的。所以在电路分析过程中必须要预先指定电压的参考极性。

1-2-3 电流、电压关联参考方向

在集总电路模型中，电流的参考方向与电压的参考极性是任意选定的，各自独立无关的。因此，电流的参考方向与电压的参考极性之间就存在两种对应关系。

若电流的参考方向由电压参考极性的正极指向负极。如图 1-2-3 (a) 所示，则称电流和电压符合关联参考方向；反之，若电流的参考方向由电压参考极性的负极指向正极，如图 1-2-3 (b) 图所示，即为非关联参考方向。

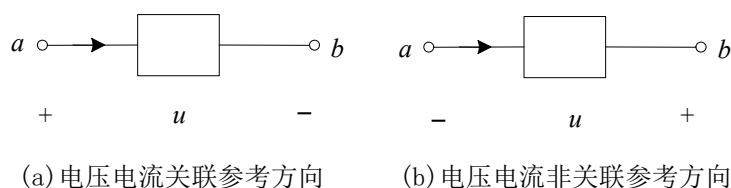


图 1-2-3

为了电路分析过程方便起见，往往采用关联参考方向的取法，在关联参考方向下，指定了电流的参考方向或电压的参考极性，则另一变量就不须特别标明。

一般情况下，电压和电流都是时间的变量，我们表示某时刻 t 的电流、电压应记做 $i(t)$ 和 $u(t)$ ，但为简便，我们通常用小写字母简写为 i 和 u 。

1-2-4 功率

元件在电路中的能量交换，不是吸收能量就是供出能量。电路中元件在单位时间内吸收或者供出的能量称为功率。

若电流电压取关联方向，如图 1-2-3 (a) 所示，则该电路吸收的功率可表示为：

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-2-3a)$$

在非关联参考方向下很容易给出功率的表示形式：

$$p = -u \cdot i \quad (1-2-3b)$$

在国际单位制中，功率的单位为瓦特，简称瓦 (W)。功率的定义实际是指电路吸收的功率，由式 (1-2-3a)、(1-2-3b) 两式计算出功率为正，表示这段电路吸收了功率；如果功率值为负，表示这段电路供出功率。

【例题 1-1】 已知电压 $u=5V$ ，计算下述各图中元件的功率，并且判断是吸收功率还是供出功率。

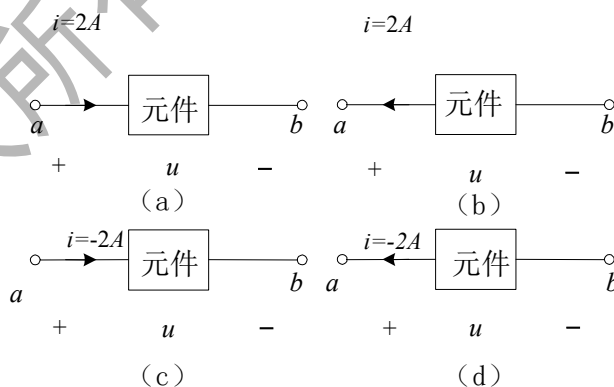


图 1-2-4 例题 1-1 的图

解：图 a： 电压与电流是关联参考方向，故

$$p = u \cdot i = 5 \times 2 = 10W > 0, \text{ 该元件吸收功率}$$

图 b： 电压与电流是非关联参考方向，故

$p = -u \cdot i = -5 \times 2 = -10W < 0$ ，所以该元件供出功率。

图 c：电压与电流是关联参考方向，故

$p = u \cdot i = 5 \times (-2) = -10W < 0$ ，所以该元件供出功率。

图 d：电压与电流是非关联参考方向，故

$p = -u \cdot i = -5 \times (-2) = 10W > 0$ ，所以该元件吸收功率。

1-3 基尔霍夫定律

1-3-1 基尔霍夫定律的发现

基尔霍夫定律（Kirchhoff laws）是电路中电压和电流所遵循的基本规律，是分析和计算较为复杂电路的基础，1845 年由德国物理学家 G.R.基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887）提出。从 19 世纪 40 年代，由于电气技术发展的十分迅速，电路变得愈来愈复杂。某些电路呈现出网络形状，并且网络中还存在着一些由 3 条或 3 条以上支路形成的交点(节点)。这种复杂电路不是串、并联电路的公式所能解决的，刚从德国哥尼斯堡大学毕业，年仅 21 岁的基尔霍夫在他的第 1 篇论文中提出了适用于这种网络状电路计算的两个定律，即著名的基尔霍夫定律。该定律能够迅速地求解任何复杂电路，从而成功地解决了这个阻碍电气技术发展的难题。基尔霍夫定律建立在电荷守恒定律、欧姆定律及电压环路定理的基础之上，在稳恒电流条件下严格成立。当基尔霍夫第一、第二方程组联合使用时，可正确迅速地计算出电路中各支路的电流值。

1-3-2 电路中的常用名词

在集总电路中，任意时刻流经元件的电流以及元件的端电压都是明确的物理量。若将每一个二端元件视为一条支路，那么流经的电流就为该支路的支路电流，元件的端电压则为支路电压。如图 1-3-1 所示

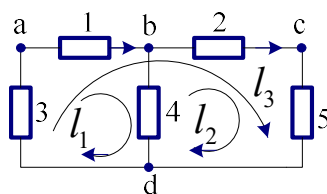


图 1-3-1 节点、回路概念说明图

如 ab, bc, ad, bd 和 cd 分别为支路。也可以将流过同一个电流的几个串联元件视为一条支路，如 bad 。支路与支路的连接点称为节点。在图 1-3-1 中共有 a, b, c, d 四个节点。显然，节点是两条或者两条以上支路的连接点。电路中任一闭合路径称为回路。如闭合路径 $l_1 l_2 l_3$ 都是回路。在回路内部不含支路的回路称为网孔。如在回路 l_1, l_2, l_3 中只有 $l_1 l_2$ 是网孔，因为 l_3 中包含支路 4，所以不能称为网孔。

1-3-3 基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law)

电荷守恒和能量守恒是自然界最基本的规律。在集总电路中，与任意节点相连接的各项支路之间遵守电荷守恒规律，任意回路中的各条支路之间遵守能量守恒规律。电荷守恒和能量守恒在电路中则体现为基尔霍夫定律。

基尔霍夫电流定律，也称基尔霍夫第一定律，缩写为 KCL，它体现了电路中某节点相连的各支路电流之间应遵循的约束关系。KCL 可表述为：对于任一集总电路中的任一节点，在任一时刻，流出（或流入）该节点的所有支路电流的代数和为零。数学表达式为：

$$\sum_{k=1}^b i_k(t) = 0 \quad (1-3-1)$$

其中， b 为与节点相连的支路数， $i_k(t)$ 为第 k 条支路电流。

在电路中，由于节点不产生电荷也不消耗电荷，所以在任意时刻流入节点的电流等于流出节点的电流，则 KCL 也可以表示为：

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-3-2)$$

KCL 不仅适用于一个节点，还可以推广为任意封闭面。这个封闭面称为广义节点。如图 1-3-2 电路中，对于虚线围成的广义节点（即封闭面 S ）KCL 仍然成立，即有：

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (1-3-3)$$

实际上，上式可由封闭面 S 内 A、B、C 三个节点的 KCL 方程相加得到。分析如下：

$$\text{A 节点} \quad i_1 - i_4 + i_5 = 0$$

$$\text{B 节点} \quad -i_2 - i_5 + i_6 = 0$$

$$\text{C 节点} \quad -i_3 + i_4 - i_6 = 0$$

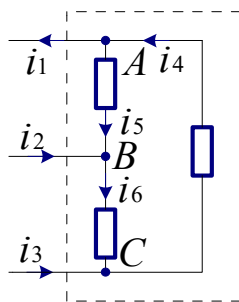


图 1-3-2 广义节点示意图

将以上三个方程相加就得到式 1-3-3。

KCL 方程表明：

(1) KCL 的实质是电荷守恒定律的体现。电荷既不能创造也不能消灭，在任何时刻流入节点的电流等于流出节点的电流。

(2) KCL 说明了节点上各支路电流的线性约束关系，各支路电流是线性相关的，KCL 方程是一个线性齐次代数方程。

(3) KCL 与支路元件性质无关，只决定于电路的结构。对于特定的电路连接形式其对应的 KCL 约束关系必定是固定的。这种类型的约束关系称为拓扑约束。

【例题 1-2】图 1-3-3 是一个复杂电路中的部分电路，求支路电流 i_0 和 i_1 。

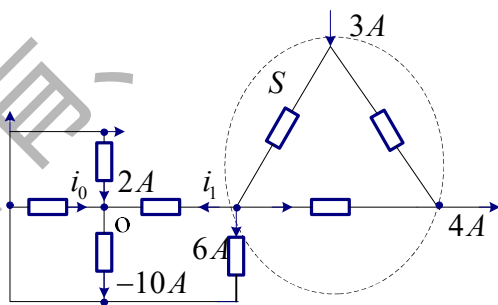


图 1-3-3 例题 1-2 的示意图

解：先用广义 KCL 求 i_1 ，

对于封闭面 S，列写 KCL 方程

$$i_1 + 6 + 4 = 3$$

$$i_1 = -7A$$

对于节点 O，列 KCL 方程

$$i_0 + i_1 + 2 = -10$$

所以： $i_0 = -5A$

1-3-4 基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law)

基尔霍夫电压定律也称基尔霍夫第二定律，简记为 KVL。它表明电路回路中各支路电压之间必须遵循的规律。KVL 可表述为：对任一集总电路中的任一回路，在任一时刻，沿该回路的所有支路电位降（以参考方向而定）的代数和为零，即：

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = 0 \quad (1-3-4)$$

其中， K 为回路中的支路个数， $u_k(t)$ 为第 k 条支路电压。

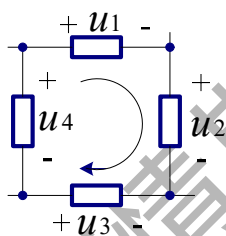


图 1-3-4 某一回路

以图 1-3-4 为例，列写回路 KVL 方程，各元件电压的参考极性如图所示，首先任意选取回路的绕行方向，图中选取的是顺时针方向，支路电压极性与绕行方向一致，电压前面取正号，反之则取负号。然后沿回路绕行一周，列写 KVL 方程如下：

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

或 $u_1 + u_2 = u_3 + u_4$

上式左端表示电位降之和，右端表示电位升之和，KVL 可表示为：

$$\sum u_{\text{升}} = \sum u_{\text{降}} \quad (1-3-5)$$

此式表明，闭合回路中电位升等于电位降。即单位正电荷沿回路绕行一周，所获得的能量必须等于所失去的能量，在从高电位向低电位移动过程中失去能量，在从低电位向高电位移动过程中获得能量。

KVL 方程表明：

(1) KVL 是能量守恒的体现。

(2) KVL 说明，在集总电路中，回路中各支路电压的线性约束关系，即支路电压是

线性相关的。

(3) KVL 与支路元件性质无关, 仅与支路元件的连接方式有关, 也是一种拓扑约束。

【例题 1-3】 对于图 1-3-5 的电路, (1) 求所有未知电压和电流; (2) 求各支路吸收的功率; (3) 验证电路的功率平衡关系。

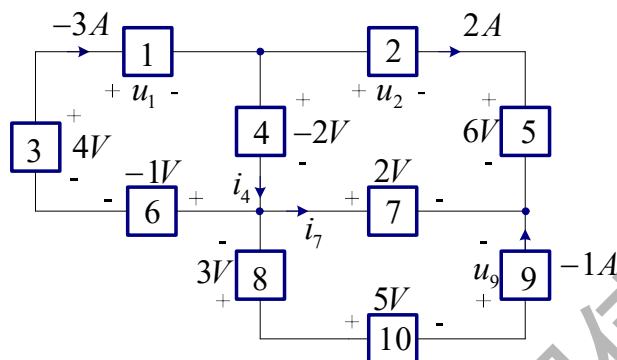


图 1-3-5 例题 1-3 的电路图

解: (1) 设元件 1, 2, ..., 10 的
电流、电压和功率分别记做

$$i_1, i_2, \dots, i_{10}; u_1, u_2, \dots, u_{10}; p_1, p_2, \dots, p_{10}$$

求得电流和电压为

$$i_4 = i_1 - i_2 = -3 - 2 = -5A$$

$$i_7 = -i_5 - i_9 = -2 + 1 = -1A$$

$$u_1 = u_3 - u_4 - u_6 = 4 + 1 + 2 = 7V$$

$$u_2 = u_4 + u_7 - u_5 = -2 + 2 - 6 = -6V$$

$$u_9 = u_7 + u_8 - u_{10} = 2 + 3 - 5 = 0V$$

各支路吸收的功率为

$$p_1 = u_1 i_1 = (-3) \times 7 = -21W$$

$$p_2 = u_2 i_2 = 2 \times (-6) = -12W$$

$$p_3 = -u_3 i_3 = 3 \times 4 = 12W$$

其它元件吸收的功率为

$$p_4 = 10W; p_5 = 12W; p_6 = 3W; p_7 = -2W; p_8 = 3W; p_9 = 0W; p_{10} = -5W;$$

电路的总功率

$$p = \sum_{i=1}^{10} p_i = 0$$

即，电路中所有支路供出的功率之和恒等于吸收的功率之和，此关系称为功率守恒。

1-4 电路中的基本元件

1-4-1 电阻元件

1、电阻

在物理学中，用电阻（resistance）来表示导体对电流阻碍作用的大小。导体的电阻越大，表示导体对电流的阻碍作用越大。

如果一个元件的端电压 $u(t)$ 和通过的电流 $i(t)$ 是关联参考方向，其伏安关系（Voltage Current Relationship 简称 VCR）是通过原点的曲线 $f(u, i) = 0$ ，这个元件就是电阻元件。实际电阻器是电子电路中使用最多的元件，它的理想模型就是电阻元件，电路符号如图 1-4-1（a）所示。

若电阻的伏安关系曲线是经过原点在第一、三象限且斜率固定的直线时，如图 1-4-1（b）所示，直线所对应的电阻元件称为线性时不变电阻，电阻值 R 是正的常量，表示了直线的斜率，其 VCR 就是我们所熟知的线性时不变电阻的欧姆定律。

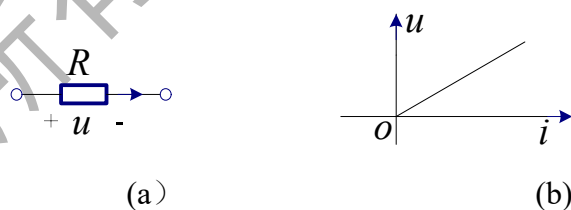


图 1-4-1

在电流电压取关联参考方向时，有

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-4-1)$$

也可以表示为 $R = \frac{u(t)}{i(t)}$

电阻的国际单位是欧姆（ Ω ）， $1\Omega = \frac{1V}{1A}$ 。比较大的单位有千欧（ $k\Omega$ ）、兆欧（ $M\Omega$ ）

（兆=百万）。

式 (1-4-1) 表明, 当电压一定时, 电阻越大, 电流越小, 电阻对电流有阻力, 电流通过时要消耗电能。不同的导体, 电阻一般不同, 电阻是导体本身的一种性质。电阻的种类很多, 根据制造材料的不同有: 碳膜电阻、金属电阻、线绕电阻等: 根据使用功能不同又有: 光敏电阻、热敏电阻等, 如图 1-4-2 所示。实际中, 电阻器、电烙铁、电灯泡等都具有消耗电能的电阻的特性, 在电路模型中都可以用电阻表示。



(a) 光敏电阻



(b) 热敏电阻

图 1-4-2 电阻器

电阻在电路中起分压、降压、限流、负载、分流、匹配等作用。

当电压和电流为关联参考方向时, 电阻吸收的功率为:

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-4-2)$$

由于电阻值是正的常量, 电阻吸收的功率总是正值, 即任何时刻电阻元件总是吸收功率的, 从能量关系上看, 电阻是将吸收的电能转换为热能消耗掉的一种耗能元件。电阻吸收的能量可表示为:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \geq 0 \quad (1-4-3)$$

2、电导

电阻还可以用电导表示, 电导的符号为 G , 其定义为:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-4-4)$$

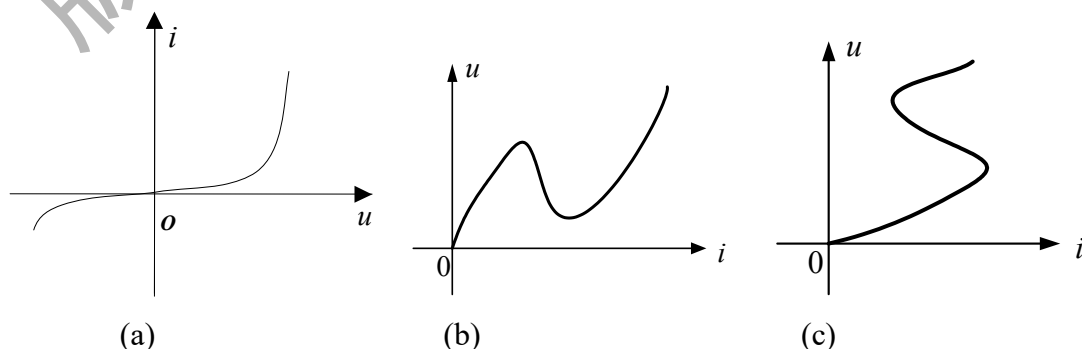


图 1-4-3 非线性电阻 VCR 特性图例

电导表示的是元件对于电流的导通特性，电导值越大，电流的导通特性越好。电导值也是正的常量，电导的国际单位为西门子（ S ）。

如果电阻的伏安特性曲线不是过原点的直线，而是类似于图 1-4-3 所示曲线，这种电阻称为非线性电阻。从曲线可以看出，非线性电阻的 VCR 特性中，电压与电流关系可以是单值函数，如图（a），也可以是多值关系，如图(b)是流控电阻，图(c)是压控电阻。实际上，某些电子元器件如半导体二极管等都可以表示为非线性电阻。本书中的电阻元件都为线性且电阻值不随时间变化的定常电阻。

1-4-2 独立电源

在电路中只要含有能量消耗元件，电路就需要不断的补充能量，这就要求电路中必须要有能量的来源---电源，否则电路无法工作。电源可分为独立电源和受控电源。顾名思义独立电源为能够单独向电路或者网络提供能量的电源，其提供的电压或者电流是由自身特性决定的不受外界其它电路或者磁场的控制。独立电源按照为电路提供恒定电压或者电流的不同划分为电压源和电流源。

1. 电压源

理想电压源简称电压源，是一种端电压总能保持确定值的二端元件，是发电机、蓄电池、干电池等实际电源的理想模型。电压源的电路符号如图 1-4-4（a）所示。应该注意的是，对于电压源两端表示极性的正负号，仍取参考极性的含义，不过对于已知的直流电压源通常取参考极性与已知实际极性一致。

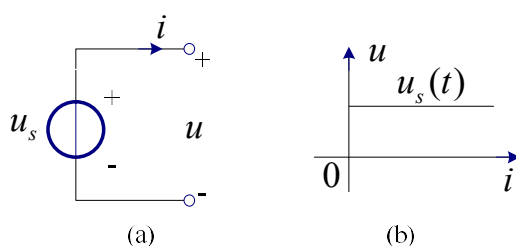


图 1-4-4 理想电压源电路模型和 VCR 特性曲线

电压源的端电压为确定的值且与流过的电流无关。直流电压源的电压是常数，交流电压源的电压 $u_s(t)$ 是稳定的时间函数，例如实际生活中使用的工频市电，其供出的电压是稳定的正弦函数。无论直流还是交流电压，电压源的对外输出电压不受与它相连的外电路影

响，是由本身特性决定的，因此也叫独立电压源。

直流电压源的 VCR 曲线如图 1-4-4 (b) 所示，表示了在规定时间内，电压源的电压与通过的电流大小无关。流过电压源的电流是任意的，就是说流过电压源的电流由与它相连的外电路决定。外电路不同，流过电压源上的电流也就不同。

电压源是一种有源元件，但不总是对外提供能量，它有时也可以吸收外部的能量，这要视具体电路而定。理论分析中，电压源不能短路，因为短路时电流为无穷大，这是不允许的，对于分析问题没有任何意义。

理想电压源实际是不存在的，某些电源在一定条件下可近似当做电压源模型进行分析讨论，对于实际电压源模型，可由理想电压源与电阻的串联构成。其电路模型和 VCR 分别如图 1-4-5(a)和 1-4-5(b)所示。电阻 R_s 可视为电源的内阻，由图 1-4-5 (b) 可知，内阻的大小决定了曲线的倾斜程度，内阻越小，其 VCR 越接近理想的电压源特性曲线。

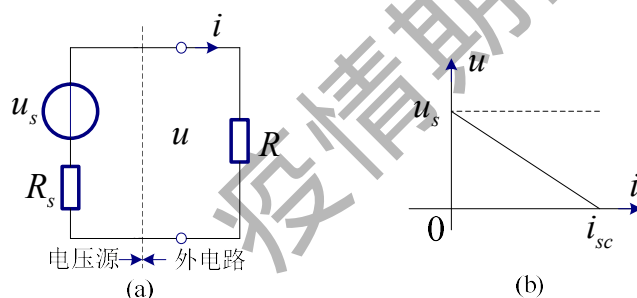


图 1-4-5 实际电压源的电路模型和 VCR 特性曲线

【例题 1-4】一个单回路电路如图 1-4-6 所示，已知 $u_{s1}=12V$ ， $R_3=1.4\Omega$ ， $u_{s2}=6V$ ， $R_1=0.2\Omega$ ， $R_2=0.1\Omega$ ， $R_4=0.3\Omega$ 。求回路电流及电压 u_{ab} 。

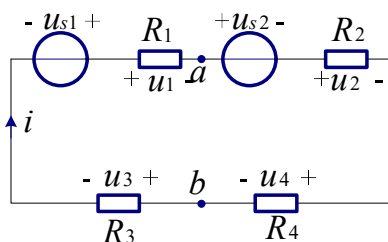


图 1-4-6 例题 1-4

解：设回路电流 i 的参考方向和各电阻的电压参考极性如图 1-4-6 所示，根据 KVL 可得：

$$u_{s2} + u_2 + u_4 + u_3 - u_{s1} + u_1 = 0 \quad (1-4-5)$$

由欧姆定律有

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i \\ u_2 = R_2 i \\ u_3 = R_3 i \\ u_4 = R_4 i \end{cases} \quad (1-4-6)$$

将式 (1-4-6) 式代入 (1-4-5) 式, 得:

$$u_{s1} - u_{s2} = i(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\text{所以 } i = \frac{u_{s1} - u_{s2}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{12 - 6}{0.2 + 0.1 + 1.4 + 0.3} = \frac{6}{3} = 3A$$

(i 为正值说明实际方向与参考方向一致)

根据上图所标极性, 沿右半回路计算 u_{ab} :

$$\text{所以: } \therefore u_{ab} = u_{s2} + u_2 + u_4 = u_{s2} + R_2 i + R_4 i = 6 + 1.5 \times (0.1 + 0.3) = 7.2V$$

(u_{ab} 为正值, 说明 a 点电位高于 b 点电位)

若沿左边路径计算, 结果也一样, 这说明两点之间电压与计算路径无关。

【例题 1-5】电路中某段含源支路 ab , 如图 1-4-7 所示, 已知 $u_{s1} = 6V$, $u_{s2} = 14V$, $u_{ab} = 5V$, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, 求电流 i 。

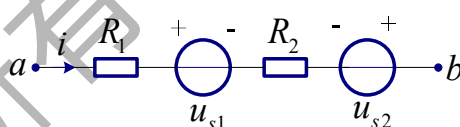


图 1-4-7 例题 1-5

解: 先标注各电阻上电压的参考极性, 如图 1-4-8 所示,

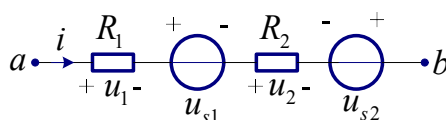


图 1-4-8

列写 KVL 方程为:

$$u_{ab} = R_1 i + u_{s1} + R_2 i - u_{s2}$$

$$\therefore i = \frac{u_{ab} - u_{s1} + u_{s2}}{R_1 + R_2} = \frac{5 - 6 + 14}{2 + 3} = \frac{13}{5} = 2.6A$$

若对电阻上电压的参考极性换一种设法，如图 1-4-9 所示

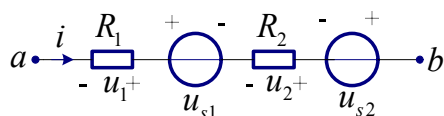


图 1-4-9

则有： $u_{ab} = -u_1 + u_{s1} - u_2 - u_{s2} = -(-R_1 i) + u_{s1} - (-R_2 i) - u_{s2} = R_1 i + u_{s1} + R_2 i - u_{s2}$

两次计算结果相同。说明参考极性是可以随意设定的，但无论怎样设定，并不影响最终结果。只是要注意：在电流电压取非关联参考方向时，欧姆定律的形式应为 $u = -iR$ 。

2. 电流源

理想电流源简称电流源，是能输出恒定电流值或电流是一定时间函数的二端元件，是光电池或某些电子电路实现的实际电流源的理想模型。电流源的符号和 VCR 曲线如图 1-4-10(a),(b)所示。

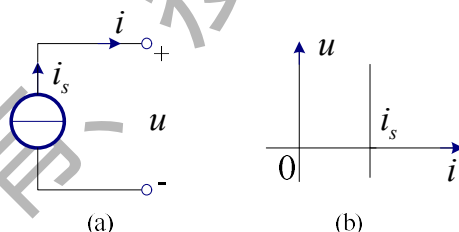


图 1-4-10 理想电流源电路模型和 VCR 特性曲线

电流源有如下特性：

1) 电流源的输出电流与端电压无关。即电流源的电流值不受外电路影响，是由本身特性决定的，也称独立电流源。

2) 电流源的端电压是任意的，或者说由与它相连的外部电路决定，外电路不同则端电压也相应改变。

电流源也是一种有源元件，它既可以对外提供能量也可以从外部吸收能量，视端电压的极性而定。电流源两端不能开路，因为开路时电流源端电压为无穷大，这是不允许的。当实际电流源的内阻无法忽略时，也可以使用电流源与电阻的并联结构来表示实际电流源模型，如图 1-4-11 所示。其中并联电阻 R_s 反映了内阻对电源输出特性的影响， R_s 值越大，

电流源的 VCR 越接近理想特性曲线。

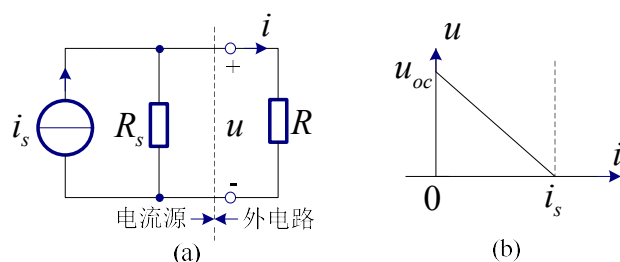


图1-4-11 实际电流源的电路模型和VCR特性曲线

对于电压源与电阻串联和电流源与电阻并联两种结构，都可以作为实际电源电路模型。使用电压源与电阻串联的形式，是以对外提供电压的角度来反映电源的表现，而电流源与电阻的串联模型则是从对外提供电流来反映电源的表现。不管采用哪种模型都不反映电源的内部结构，它们只是以不同角度来表征电源端口处的 VCR 而已。

【例题 1-6】计算图 1-4-12 电路中电阻两端电压，电流源的端电压及电流源和电压源吸收的功率。

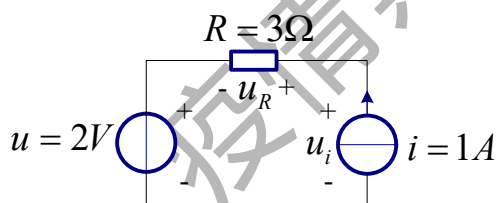


图 1-4-12 例题 1-6

解： R 与电流源串联，其电流即为电流源的电流

$$u_R = i \cdot R = 1 \times 3 = 3V$$

再由 KVL 得：

$$u_i - u - u_R = 0$$

$$\text{所以： } u_i = u + u_R = 2 + 3 = 5V$$

电流源吸收的功率为：

$$p = -u_i \cdot i = -5 \times 1 = -5W$$

功率为负，说明电流源供出功率。

电压源吸收的功率为：

$$p = u \cdot i = 2 \times 1 = 2W$$

功率为正，说明电压源吸收功率。通过上面例题可以看到，在电路中，独立源的

功率可正可负， $p > 0$ 独立源吸收功率； $p < 0$ 则独立源供出功率。

1-4-3 受控电源

上面讨论的电流源和电压源都是独立电源。独立电源的输出电压或电流是由电源本身决定的，不受电源外部电路的控制。从能量关系上看，独立电源是电路的能量来源。

受控电源，简称受控源，又称非独立源。受控源可分为受控电压源和受控电流源，其电路模型如图 1-4-13 所示。

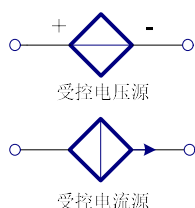


图 1-4-13 受控源的电路表示

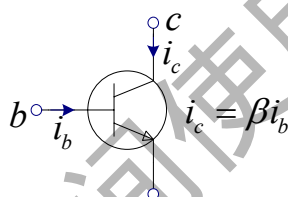


图 1-4-14 三极管电路模型

与独立电源不同的是，受控电源的电压或电流要受电路中某一支路的电压或者电流控制。若将受控源的控制支路考虑在内，受控源是一种具有控制支路和受控支路的二端口元件。实际电子电路中的晶体管、场效应管、运算放大器、变压器等器件的电路模型都可以用受控源表示。例如，晶体三极管，如图 1-4-14 所示，其中，集电极电流 i_c 受基极电流 i_b 控制， $i_c = \beta i_b$ ， β 为电流放大系数。对于三极管的这种特性，在电路分析中就可以用电流控制的电流源来表示。

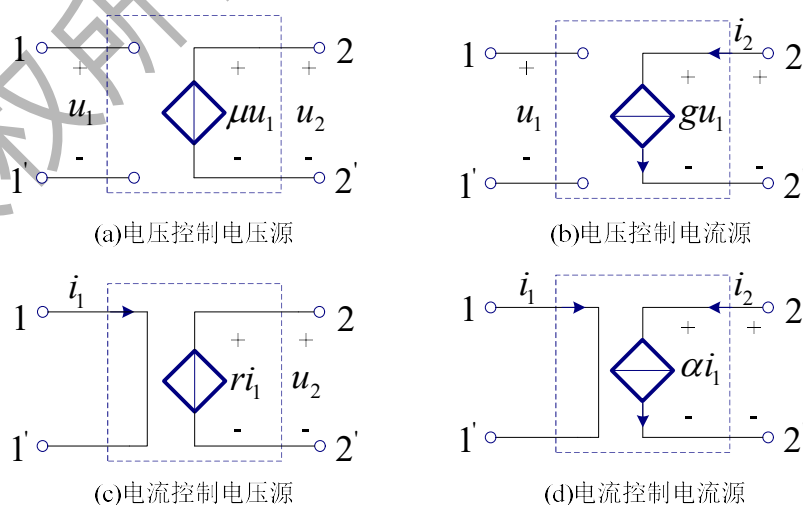


图 1-4-15 各种受控源的电路符号图

根据控制量和被控制量的不同，受控源可以分为的四种类型：电压控制电压源

(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电流控制电压源(CCVS)和电流控制电流源(CCCS)。电路符号如图 1-4-15 所示。其中, μ 称为电压放大系数, α 称为电流放大系数, 都是无量纲的; g 称为转移电导, 具有电导的量纲, r 称为转移电阻, 具有电阻的量纲。本书讨论的受控源都是线性元件, 即相关的控制系数 μ 、 α 、 g 和 r 都为常数。

受控源虽然也称为电源, 但是与独立电源相比有本质的区别。各支路电流或电压都是在独立源的“激励”作用下产生的, 而受控源是用来表达电路内部某部分电流和电压变量之间特定的控制和被控制关系, 或称为耦合关系。当控制量改变时, 受控源也随之改变; 当控制量为零时, 受控源消失。

分析含有受控源电路时, 可把受控源作为独立源处理, 但要注意受控源的电压或电流取决于控制量。

【例题 1-7】电路如图 1-4-16 所示, 求电压源电压 u_s 及受控源的功率。

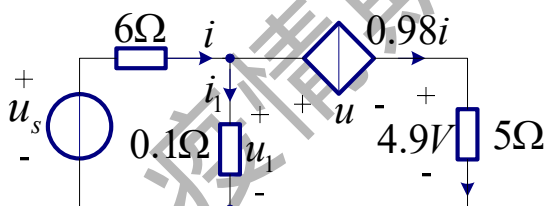


图 1-4-16 例题 1-7

解: 由图 1-4-16 可知, 电路中的受控源是一个支路 i 控制的电流源。欲求受控源的功率, 须求电压 u 和电流 i 。

$$i_2 = \frac{4.9}{5} = 0.98A$$

$$\text{又 } i_2 = 0.98i$$

$$\therefore i = 1A \quad u_1 = (i - 0.98i) \times 0.1 = 0.002V$$

根据 KVL, 有

$$u = u_1 - 4.9 = -4.898V$$

$$u_s = u_1 + 6 \cdot i = 6.002V$$

受控源吸收的功率为

$$p = u \cdot 0.98i = -4.8W$$

功率为负值, 说明受控源能够向外供出功率。因此, 受控源属于有源元件。

习 题

1-1 若某用电设备上通过的电流分别由 (a) 4 秒内 60 库仑；(b) 2 分钟内 15 库仑电荷稳定形成的，求电流大小。

1-2 一电灯泡内有 $0.5A$ 电流通过，时间为 4 秒，共产生 $240J$ 的能量，求电灯泡的电压降。

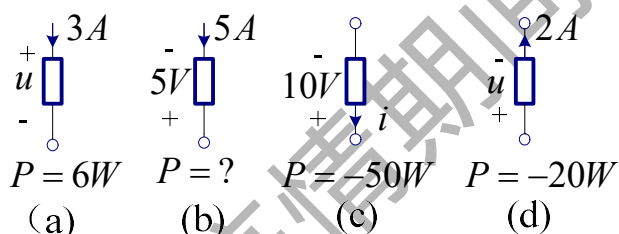
1-3 日常生活中常用的电能衡量单位为度，1 度电 = 1 千瓦时，求：

① $60W$ 灯泡消耗 1 度电可持续多长时间？

② $100W$ 电灯泡 1 小时消耗多少焦耳热量？

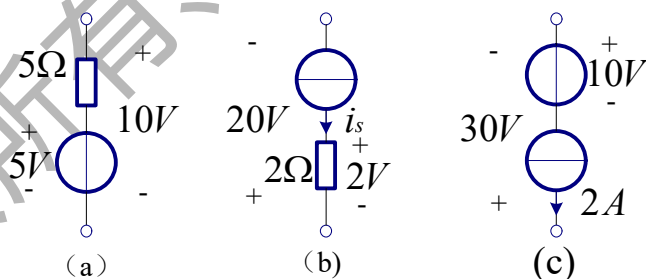
1-4 $12V$ 汽车蓄电池向启动电动机提供 $250A$ 电流，设电池共有 4×10^6 焦耳化学能，问可以持续多长时间？

1-5 已知电路某段支路中各电量如题图 1-1 所示，求图中未知电量。



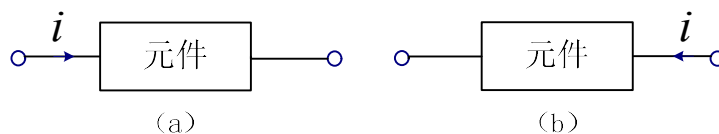
题图 1-1

1-6 求题图 1-2 各段电路上各元件的功率。



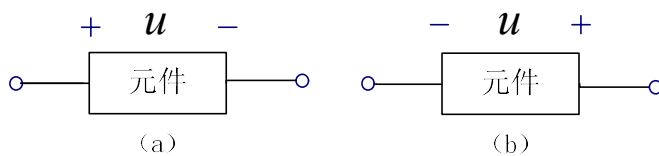
题图 1-2

1-7 已知题图 1-3 的各支路放出功率 $P = 50W$ ，电流 $i = 10A$ ，求元件的电压 u ，并标明电压的真实极性。



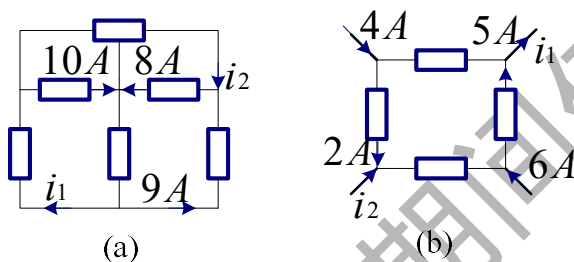
题图 1-3

1-8 已知题图 1-4 的各支路吸收功率 $P=80W$ ，电压 $u=16V$ ，求元件的电流 i ，并标明支路电流的真实方向。



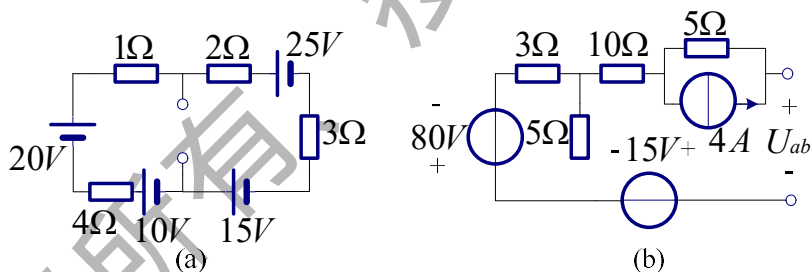
题图 1-4

1-9 已知某电路如题图 1-5 所示，求电流 i_1 和 i_2 。



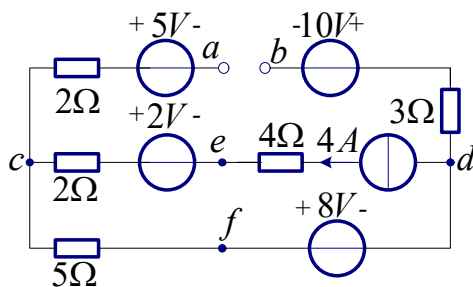
题图 1-5

1-10 求题图 1-6 所示电路的电压 U_{ab} 。



题图 1-6

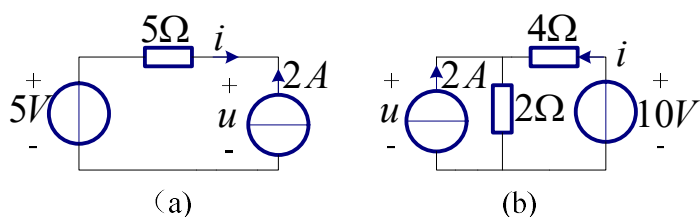
1-11 求题图 1-7 中的电压 U_{ab} 、 U_{cd} 、 U_{ef} 。



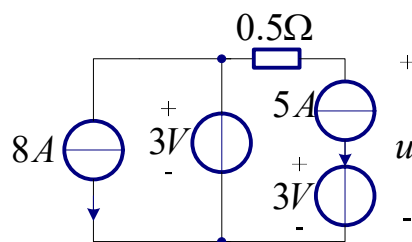
题图 1-7

1-12 求题图 1-8 中电压 u 和电流 i 的值。

1-13 求题图 1-9 所示电路中的电压 u 。

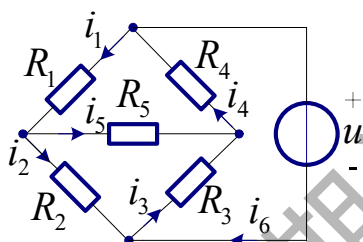


题图 1-8



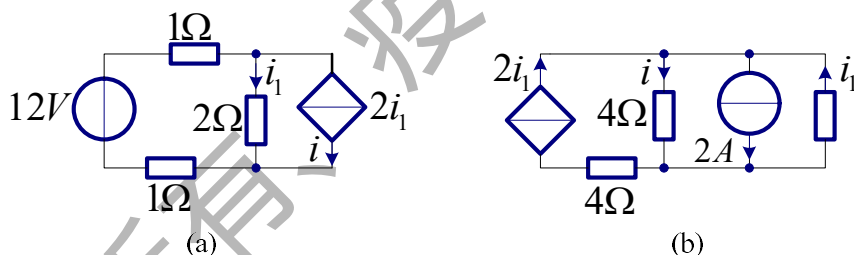
题图 1-9

1-14 在题图 1-10 的电路中，有几个节点？几条支路？几个网孔？写出每个节点的 KCL 方程和每个回路的 KVL 方程。



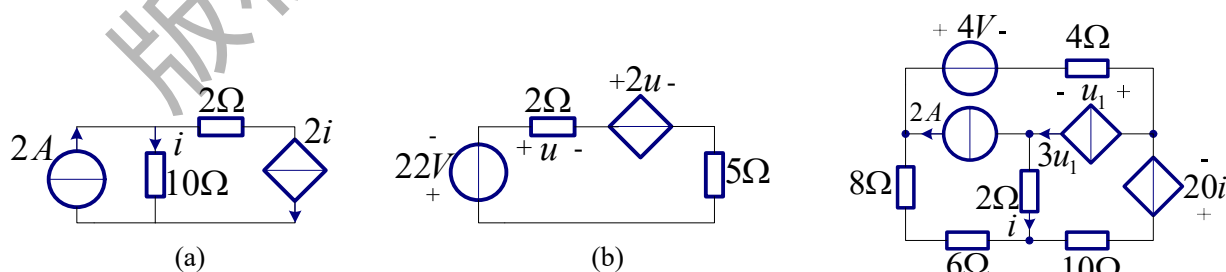
题图 1-10

1-15 求题图 1-11 电路中的电流 i 的值。



题图 1-11

1-16 求题图 1-12 所示电路独立源和受控源的功率，并验证功率平衡关系。



题图 1-12

题图 1-13

1-17 电路如题图 1-13 所示，求图中各电源（包括受控源）输出的功率。