

第 1 章 电路模型和电路元件

随着社会的发展,时代的进步,电在工农业生产、教学科研和人们的日常生活中的作用越来越重要。现今,无论人类生活、科学技术活动及物质生产活动都已离不开电。想象一下,如果没有了电,现代人们的生活将回到什么样的境地!本章就先从电路理论中最基本的知识开始讨论。

1.1 电路和电路模型

电的传输是通过电路进行的,而根据不同的用途和作用,电路的组成又有很大的差别,有的很复杂,有的很简单。电路的几何尺寸也相差很大,有的很大,有的很小。例如,传输电能的庞大且复杂的电力系统的几何尺寸很大,绵延几千米甚至几十、几百千米;而无线电收音机就是一个几何尺寸很小的电子设备,只有几十厘米甚至几厘米;集成电路芯片更小,只有几厘米或几毫米甚至更小,但其电路并不简单;手电筒电路则是一个非常简单的电路。无论电路简单与否、电路的几何尺寸大小如何,它们都由一些基本的元器件组成并完成一定的功能。实际电路是由电阻器、电感器、电容器、电源等部件(component)和晶体管等器件(device)相互连接而成的,具有传输、分配、控制、转换电能和处理信号等功能。例如,电力系统的作用就是完成电能的传输、分配,收音机就是进行信号的处理,手电筒则完成了能量转换的功能。

按照电路各部分的功能划分,实际电路主要由电源、负载和连接设备组成。电源是提供能量的部件,如电池、发电机等。负载是消耗能量的部件,如电灯、扬声器、电炉等。连接设备起传输、分配和控制电能的作用,如导线、开关等。

由于实际电路的几何尺寸相差很大,实际元器件的性能也呈现多样性,并受周围环境的影响,所以,要对电路进行研究,必须抽象出其理想化的电路模型。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(波长 λ 、电磁波的速度 v 和频率 f 三者之间的关系为 $\lambda=v/f$,真空中电磁波的速度与光速相同,为 $3\times 10^8\text{m/s}$),电磁波通过电路的时间是非常短暂的,这种情况下可以忽略电场与磁场之间的相互作用,此时,可以由实际元件抽象出能反映其主要电磁特性的理想化模型,称为集总参数元件(lumped parameter element)或理想元件(ideal element)。二端集总参数元件用图 1-1 所示的符号表示。电路分析中常用的集总参数元件主要有电阻元件(R)、电感元件(L)、电容元件(C)、电压源(u_s)和电流源(i_s),其符号如图 1-2 所示。对理想元件来说,电阻元件只反映消耗电能的性质,电容元件只反映储存电场能量的性质,电感元件只反映储存磁场能量的性质,电压源和电流源则只反映提供能量的性质。

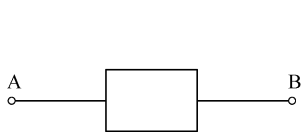


图 1-1 二端集总参数元件符号

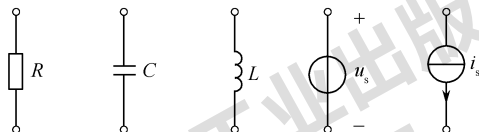


图 1-2 常用集总参数元件符号

实际的电路元件可用理想元件组成的模型表示。根据其应用场合不同,同一种电路元件有不同的表示模型。例如,一个用导线绕成的线圈,如果不考虑导线的电阻,则就用一个电感元件

表示,如图 1-3(a)所示;在直流和低频情况下,可以用电阻元件和电感元件的串联组合表示,如图 1-3(b)所示;在高频情况下,还要考虑电容效应,用电阻元件、电感元件和电容元件的组合模型表示,如图 1-3(c)所示。

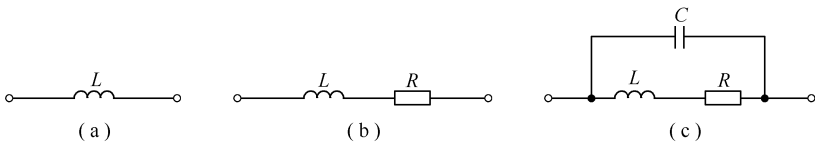


图 1-3 实际线圈的几种理想元件模型

由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。图 1-4(a)是实际手电筒电路的示意图,图 1-4(b)就是由此抽象出的电路模型。今后本书讨论的电路都是这种经过抽象的电路模型。

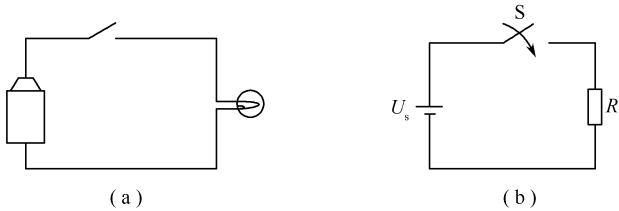


图 1-4 实际手电筒电路的示意图和电路模型

与集总参数电路相对应的另一种电路是分布参数电路(distributed parameter circuit)。当实际电路的几何尺寸大于其最高工作频率所对应的波长或两者属于同一数量级时,就不能忽略电场与磁场之间的相互作用,这时就需要用分布参数的概念去分析。本书只讨论集总参数电路。

电路理论是一门研究网络(network)分析和网络综合的学科。网络分析是根据已知的电路结构、元件参数和电源(在系统理论中称为激励)求解电路中的某些物理量(在系统理论中称为响应),而网络综合是一个相反的过程,要求设计在给定激励下满足响应要求的电路。本书只讨论网络分析的基本内容。

1.2 电 路 变 量



描述电路性能的物理量有电流、电压、电荷、磁通(或磁链)、功率和电能。本节主要介绍电路分析中最常用的电流、电压和功率 3 个物理量。

1.2 节讲解
视频

1. 电流及其参考方向

现实世界中存在两种带电粒子,一种是带有正电荷的质子(proton),另一种是带有负电荷的电子(electron)。带电粒子所带电荷的多少称为电量(quantity of charge),用符号 q 或 Q 表示(小写字母代表随时间变化的量,大写字母代表不随时间变化的量,以后出现的其他字母具有同样的意义,不再说明)。电量的单位是库仑,符号为 C。带电粒子的流动就形成了电流。

将单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,简称电流(current),并用符号 i 或 I 表示。即

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{1-1}$$

电流的单位是安培,符号为 A。除此之外,还有毫安(mA)和微安(μA)等。

习惯上将正电荷流动的方向规定为电流的真实方向。电流方向的表示方法有两种,一种是箭头表示法,箭头所指的方向即为电流的方向,如图 1-5 所示;另一种是双下标表示法,对应

图 1-5 所示的电流方向又可表示为 i_{AB} , 表明电流由 A 端流向 B 端, 即由第一个下标所示点流向第二个下标所示点。

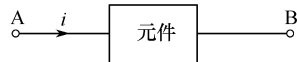


图 1-5 电流方向的表示

实际进行电路分析时,有时事先并不能确定电流的真实方向,而要对电路进行分析,必须已知电流的方向才能列方程进行求解,为此,引入参考方向(reference direction)的概念。参考方向是任意选定的方向,也称为正方向。根据计算结果可以判定电流的真实方向。

如果电流为正值,即 $i > 0$, 表明参考方向与真实方向一致;否则,如果电流为负值,即 $i < 0$, 则表明参考方向与真实方向相反。今后电路中所给定的方向如无特别说明,都表示参考方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,则称为直流电流(direct current),简称直流或简写为 DC,可用符号 I 表示,否则称为时变电流(time varying current)。如果电流的大小和方向都随时间做周期性变化,则称为交变电流(alternating current),简称交流或简写为 AC。

2. 电压及其参考方向

由物理学知,电荷在电场中移动需要电场力对其做功,电荷由此获得或失去能量。为了衡量电荷获得或失去的能量,引入电压(或电位差)的概念。定义单位正电荷在电场中由 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量为 a、b 两点间的电压(voltage)或电位差,并用符号 u 或 U 表示,即

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

电压的单位是伏特,符号为 V。除此之外,还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)等。式(1-2)中的 ω 是能量的符号,单位为焦耳,符号为 J。

电压的真实方向(或真实极性)定义为由高电位点到低电位点的方向,即电位降的方向。电压方向的表示方法有 3 种,分别是箭头、正负号和双下标。若用箭头表示,则箭头所指的方向就是电位降的方向;若用正负号表示,则正号表示高电位端,负号表示低电位端;双下标表示法则表明第一个下标所示点是高电位点,第二个下标所示点是低电位点。 u_{AB} 与如图 1-6 所示的两种表示法是一致的。

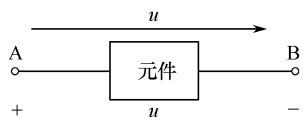


图 1-6 电压方向的表示

与电流类似,实际进行电路分析时,有时事先并不能确定电压的真实方向,而要对电路进行分析,必须已知电压的方向才能列方程进行求解,为此,引入参考方向的概念。参考方向是任意选定的方向,也称为正方向。根据计算结果可以判定电压的真实方向。

如果电压为正值,即 $u > 0$, 表明参考方向与真实方向一致;否则,如果电压为负值,即 $u < 0$, 则表明参考方向与真实方向相反。今后电路中所给定的方向如无特别说明,都表示参考方向。

如果电压的大小和方向都不随时间变化,则称为直流电压,可用符号 U 表示,否则称为时变电压。如果电压的大小和方向都随时间做周期性变化,则称为交流电压。

3. 关联参考方向

综上所述,在进行电路分析时,首先要选定电压、电流的参考方向。理论上电压、电流的参考方向可以任意选定,但为了分析方便,通常将电压、电流的参考方向选为一致,即电流从电压的正极性端流到电压的负极性端,如图 1-7(a)所示,并称这样选定的参考方向为关联参考方向(associated reference direction)。这样,在图中只需标出电压或电流参考方向的任何一种即可;否则就称为非关联参考方向,如图 1-7(b)所示。

在今后的学习中将会看到,元件的电压、电流是否取关联参考方向,决定了元件电压、电流关系式前的正、负号。

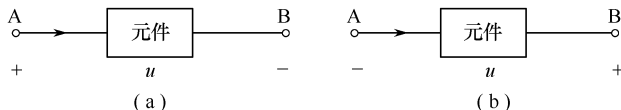


图 1-7 关联参考方向与非关联参考方向

4. 功率

如前所述,电荷在电场中移动需要电场力对其做功,电荷由此获得或失去能量。为了衡量电荷获得或失去能量的速度,引入电功率的概念,简称功率(power),定义为单位时间内电荷获得或失去的能量,并用符号 p 或 P 表示。所以有

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

根据式(1-2)有

$$d\omega = u \cdot dq$$

所以

$$p = u \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-4)$$

上式是在电压和电流为关联参考方向下的功率计算式。如果电压、电流为非关联参考方向,则上式前加负号“—”,即

$$p = -u \cdot i$$

如果电压的单位为伏特,电流的单位为安培,则功率的单位就是瓦特,符号为 W。除此之外,还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)和微瓦(μ W)等。

元件或电路获得能量还是失去能量可以根据计算出的功率的正、负确定。如果功率为正,即 $p > 0$,表示获得(或吸收、消耗)能量(或功率);否则,如果功率为负,即 $p < 0$,则表示失去(或提供)能量(或功率)。按照以上功率计算式,无论电压、电流是关联参考方向还是非关联参考方向,均用上述规则进行判断。

例 1-1 判断图 1-8 所示支路是吸收功率还是提供功率。

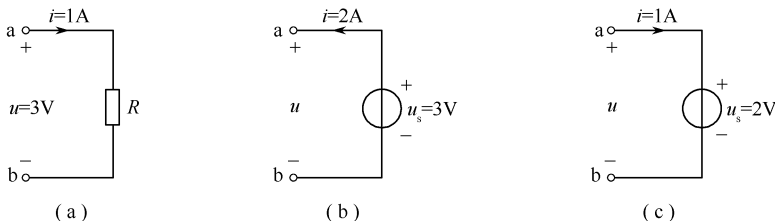


图 1-8 例 1-1 电路

解 (a) $p = ui = 3 \times 1 = 3\text{W} > 0$, 吸收功率。

(b) $p = -ui = -3 \times 2 = -6\text{W} < 0$, 提供功率。

(c) $p = ui = 1 \times 2 = 2\text{W} > 0$, 吸收功率, 电源处于充电状态。

5. 单位间的换算关系

前面介绍的一些物理量的单位——C、A、V、J、W——都是 SI 单位,即国际单位制单位。但在实际使用中,有时感到这些单位太小或太大,例如,在电力系统中用安培和伏特来计量电流和电压就显得太小,而在电子电路中用安培和瓦特来计量电流和功率则显得太大,不便于使用。所以,常常在这些单位前加上词头,形成 10 的倍数(正幂次或负幂次)单位。下面将一些常用词头及其倍数关系列于表 1-1 中。

表 1-1 常用词头及其倍数关系

词头名称		符 号	因 数
英文	中文		
giga	吉	G	10^9
mega	兆	M	10^6
kilo	千	k	10^3
milli	毫	m	10^{-3}
micro	微	μ	10^{-6}
nano	纳	n	10^{-9}
pico	皮	p	10^{-12}



1.3 基尔霍夫定律

在集总参数电路中,电压和电流都要满足某种约束,这种约束称为拓扑约束。1.3 节讲解
将这种约束以定律的形式给出,就是本节要介绍的基尔霍夫定律,它是集总参数 视频
电路普遍适用的定律,是电路的基本定律。在介绍该定律之前,首先引入几个电路名词。

1. 电路名词

支路:连接于电路中的每个二端元件就定义为一条支路(branch)。通过该支路的电流及该
支路两端的电压则分别称为支路电流和支路电压。支路电流和支路电压是电路分析中的主要研究
对象。

有时也将某些元件的串联、并联组合看作一条支路,图 1-9 所示就是一种标准的复合支路。
图中符号的意义今后会陆续介绍。在本书中,只使用电压源和电阻串联的复合支路及电流源和
电阻并联的复合支路。

节点:电路中支路的连接点称为节点(node)。

根据上面介绍的支路和节点的定义,在图 1-10 所示电路中,共有 5 条支路、4 个节点。如果
将元件 1、3 和元件 2、5 分别看作一条复合支路,则就有 3 条支路、2 个节点。所以,支路的不同
取法影响电路中的支路数和节点数,进而影响到电路的方程数,这在随后的学习中将体会到。

回路:电路中任一闭合的路径称为回路(loop)。

网孔:内部不含支路的回路称为网孔(mesh)。

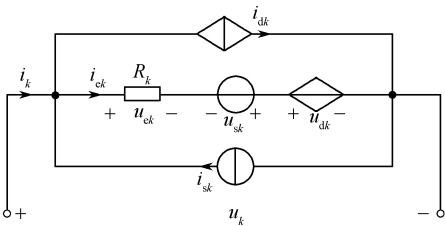


图 1-9 标准复合支路

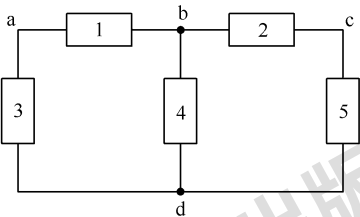


图 1-10 一个电路

例如,在图 1-10 中,元件 1、3、4 和元件 2、4、5 分别形成一个回路,同时也是网孔,但元件 1、
2、3、5 形成的就是回路而不是网孔,因为在这个回路中包含了一条支路,即元件 4 所构成的支
路。因此,该电路中有 3 个回路、2 个网孔。

电荷守恒和能量守恒是自然界的基本法则,它们在集总参数电路中的体现就是基尔霍夫电

流定律和电压定律。

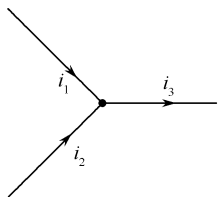
2. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law),简称 KCL,是对集总参数电路中节点处电流的约束,其内容为:

在集总参数电路中,任一瞬间,流入(或流出)任一节点的电流代数和恒等于零。其数学表示为

$$\sum i = 0 \quad (1-5)$$

根据电荷守恒原理,电荷既不能创造也不能消失,但可以储存,而节点只是支路的汇合点,并不是一个电路元件,不能储存电荷,所以节点处的电荷不能堆积,即 $\frac{dq}{dt} = \sum i = 0$ 。这也表明了电流的连续性。



因为式(1-5)表示的是电流的代数和,所以就有正、负之分。通常规定:流出节点的电流为正,流入节点的电流为负。当然,也可以规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负。这对节点的 KCL 方程没有影响。

根据 KCL,对图 1-11 所示部分电路有

$$i_3 - i_2 - i_1 = 0 \quad \text{或} \quad i_3 = i_1 + i_2$$

图 1-11 电路中的
某个节点

由此可得出如下关系

$$\sum i_{\text{出}} - \sum i_{\text{入}} = 0 \quad \text{或} \quad \sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (1-6)$$

根据上式,得到 KCL 的另一种表述,即:在集总参数电路中,任一瞬间,流出任一节点的电流恒等于流入该节点的电流。

KCL 不仅应用于节点,也可以推广应用于一个闭合面(可称其为广义节点)。即:在集总参数电路中,任一瞬间,流入(或流出)任一闭合面的电流代数和恒等于零。

下面以图 1-12 电路为例进行说明。对图示闭合面中的两个节点 c、d 分别列 KCL 方程,有

$$\text{节点 c: } i_6 - i_3 - i_1 = 0$$

$$\text{节点 d: } i_4 - i_5 - i_6 = 0$$

上面两式相加得

$$i_4 - i_5 - i_3 - i_1 = 0$$

此式恰好是虚线所示闭合面的 KCL 方程。

3. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law),简称 KVL,是对集总参数电路的回路中电压的约束,其内容为:

在集总参数电路中,任一瞬间,沿任一回路各支路电压的代数和恒等于零。其数学表示为

$$\sum u = 0 \quad (1-7)$$

由 1.2 节有关电压的描述可知,电荷沿回路移动会失去或获得能量,根据能量守恒原理,失去和获得的能量必然相等,所以回路中的电位升等于电位降,即回路中各支路电压的代数和等于零。

因为式(1-7)表示的是电压的代数和,所以也有正、负之分。KVL 方程中电压的正、负与回

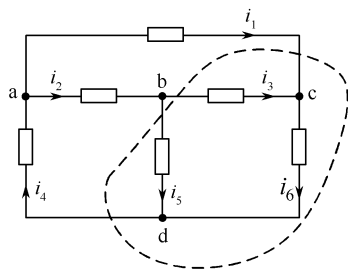


图 1-12 KCL 的推广

路的绕行方向有关,所以在列 KVL 方程之前,要先规定回路的绕行方向(顺时针或逆时针)。如果支路的电压参考方向与回路绕行方向一致,则为正,否则为负。

根据 1.2 节中关于电压的介绍可知,如果支路的电压参考方向与回路绕行方向一致,即表明沿回路该支路电压为电位降;如果支路的电压参考方向与回路绕行方向相反,则表明沿回路该支路电压为电位升。据此,又可得出 KVL 的另一种表述形式,即:

在集总参数电路中,任一瞬间,任一回路中支路电位降等于电位升。其数学表示为

$$\sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}} \tag{1-8}$$

在图 1-13 所示电路中,回路 1 和回路 2 的 KVL 方程分别为

$$\begin{aligned} -u_3 + u_4 - u_5 + u_9 - u_6 &= 0 & \text{或} & & u_4 + u_9 = u_3 + u_5 + u_6 \\ u_4 + u_8 - u_7 &= 0 & \text{或} & & u_4 + u_8 = u_7 \end{aligned}$$

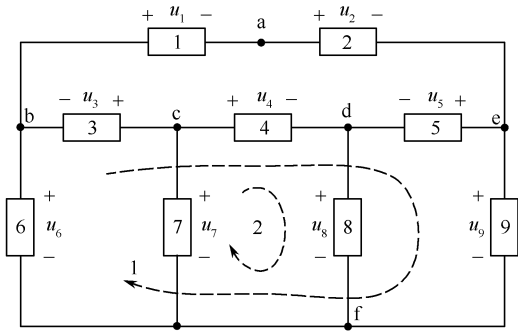


图 1-13 一个电路

KVL 不仅应用于闭合回路,也可推广应用于闭合的节点序列,即:在集总参数电路中,任一瞬间,沿任何闭合节点序列,前一节点与后一节点之间的全部电压的代数和恒等于零。

例如,对于图 1-14 所示某电路中的一部分,元件 R_1, R_2, R_3 并不形成闭合回路,但节点(1,2,3,4,1)是一个闭合节点序列。此时,可设节点 1、4 之间的电压为 u_{14} ,则 KVL 同样适用于此闭合节点序列,有

$$u_{12} + u_{23} + u_{34} - u_{14} = 0$$

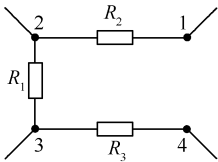


图 1-14 某电路中的一部分

通过前面的讨论可以看出,KCL 描述了电路的任一节点处电流应该服从的约束关系,KVL 描述了电路的任一回路中电压应该服从的约束关系,它们只涉及电路的拓扑结构(拓扑是指电路的连接性质),与组成电路的元件性质无关,所以称为电路的拓扑约束。无论是线性电路还是非线性电路、时变电路还是非时变电路,只要是集总参数电路,节点处的电流都服从 KCL、回路中的电压都服从 KVL。所以,KCL 和 KVL 是集总参数电路的基本定律。

在列 KCL、KVL 方程时,需要和两套符号打交道。一套是方程中各项前的正、负号,对 KCL 来说,这取决于支路电流是流入节点还是流出节点,对 KVL 来说,这取决于支路电压参考方向与回路绕行方向是一致还是相反;另一套是电压、电流本身数值的正、负号,这由具体电路给出。

在求解电路中的电压、电流时,除要知道电路的拓扑约束外,还需要知道元件本身的电压、电流的约束关系,称为元件约束。下面就讨论几种电路元件及其电压、电流的约束关系。

1.4 电阻元件

电阻元件是由实际电阻器(resistor)抽象而来的理想化二端元件,只反映电阻器对电流呈现

阻力的性质,其数学定义为:在任意时刻,如果二端元件的电压 u 和电流 i 之间存在代数关系 $f(u,i)=0$,即为 $u-i$ 平面上的一条曲线,则称此二端元件为电阻元件。

电阻元件分线性和非线性、时变和非时变,本书主要讨论线性、非时变电阻元件,今后就简称线性电阻元件或电阻元件。对非线性、非时变电阻元件只做简单介绍。

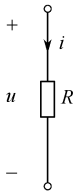


图 1-15 线性电阻元件的符号

线性电阻元件(linear resistor)的符号如图 1-15 所示,其电压、电流关系,简称 VCR(Voltage Current Relation),服从欧姆定律。在图 1-15 所示的电压、电流参考方向下,有

$$u=Ri \tag{1-9}$$

如果电压、电流为非关联参考方向,则其 VCR 为

$$u=-Ri$$

由式(1-9)可得

$$R=\frac{u}{i} \tag{1-10}$$

将 R 称为电阻器的电阻(resistance)。习惯上, R 既表示电阻器的电阻,也表示电阻元件,今后二者不加区别。

如果电压的单位为伏特,电流的单位为安培,则电阻的单位就是欧姆,符号为 Ω 。比欧姆更大的常用单位还有千欧(k Ω)和兆欧(M Ω)。

将电阻的倒数称为电导,并用符号 G 表示,即

$$G=\frac{1}{R}$$

电导的单位为西门子,符号为 S。用电导表示的欧姆定律为

$$u=\frac{1}{G}i \quad \text{或} \quad i=Gu \tag{1-11}$$

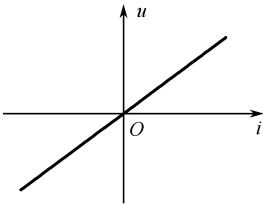


图 1-16 线性电阻元件的伏安特性曲线

如果以电压为纵坐标(或横坐标),以电流为横坐标(或纵坐标),将电阻元件的电压、电流关系用曲线表示出来,则称此曲线为电阻元件的伏安特性曲线。由式(1-9)可知,线性电阻元件的伏安特性曲线是 $u-i$ 平面上一条过原点的直线,如图 1-16 所示。

非线性电阻元件的电压、电流关系不是线性关系,伏安特性不是 $u-i$ 平面上一条过原点的直线,而是一条曲线,所以,其电阻值也不是一个常数。

非线性电阻元件的符号如图 1-17 所示,图中 R 只表示该元件为电阻元件,并不表示其阻值。图 1-18 是充气二极管的伏安特性曲线,在电子电路中,通常将充气二极管看作非线性电阻处理。

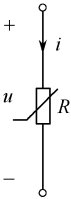


图 1-17 非线性电阻元件的符号

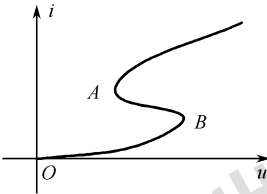


图 1-18 充气二极管的伏安特性曲线

关于非线性电阻的其他内容在第 4 章再作介绍。

时变和非时变的概念是指电阻元件的电压、电流关系是否随时间而变化。如果 VCR 不随时间而变化,则为非时变电阻元件,否则就是时变电阻元件。如图 1-19(a)、(b)所示分别为线性时变和非线性时变电阻的伏安特性曲线。

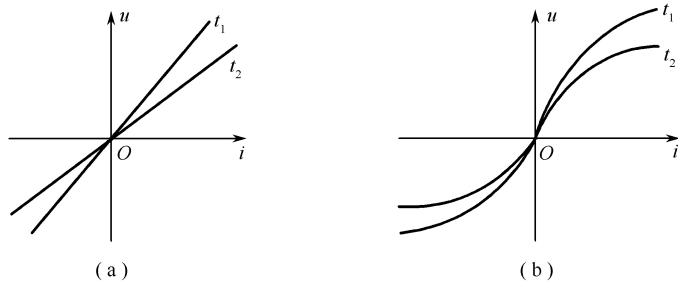


图 1-19 线性时变和非线性时变电阻的伏安特性曲线

在电压、电流为关联参考方向下,电阻元件的功率为

$$p = u \cdot i = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-12)$$

由上式可以看出,如果 $R \geq 0$,则 $p \geq 0$,说明实际电阻元件总是消耗能量的,所以,电阻元件是一种耗能元件。但根据电阻的定义,电阻也可以是负值。例如,图 1-18 所示曲线的 AB 段,此时,其动态电阻 $R_d < 0$ (关于动态电阻的概念将在第 4 章介绍), $p < 0$,电阻不是消耗能量,而是提供能量。由此,再引出有源元件和无源元件的概念。

对所有的 $t \geq -\infty$ 及所有的 u, i 组合,当且仅当元件吸收的能量满足

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \geq 0 \quad (1-13)$$

时,称该元件为无源元件(passive element);否则,就称为有源元件(active element)。

线性电阻是一种无源元件。又因为某时刻电阻上的电压(或电流)只与该时刻的电流(或电压)有关,所以,它又是一种无记忆元件。

根据欧姆定律,流过电阻的电流为

$$i = \frac{u}{R}$$

当 $R = \infty$ 时, $i = 0$,将此种情况称为“开路”;当 $R = 0$ 时, $u = 0$,将此种情况称为“短路”。这是电路分析中的两种特殊情况,今后会经常提到。

对于实际电阻元件来说,电阻值是一个正实常数,而且有固定的系列标称值。表 1-2 所示为精度为 5% 的碳膜电阻的标称值。系列值是指实际的电阻阻值以表 1-2 所列值为基础成 10 倍的变化,例如可以有 47Ω、470Ω、4700Ω、…。对于不同类型的电阻,其标称值和精度要求也不同。

表 1-2 精度为 5% 的碳膜电阻标称值

1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

实际工程中,需要根据理论计算选定与理论计算值相近的标称值。因为本门课程主要侧重理论研究,所以随后的计算数据仍然保留两位小数。

1.5 电 压 源

一个电路要工作,必须有提供能量的元件。独立电源(source)就是能够提供能量、产生电压和电流的二端元件,所以是有源元件。独立电源,今后简称电源或独立源,分电压源(voltage source)和电流源(current source)。本节先来介绍电压源。电压源又分理想电压源和非理想电压源。

具有下列性质的电压源称为理想电压源:①端电压是定值或是确定的时间函数,与流过的电

流无关;②流过电压源的电流由与之相连接的外电路决定。

根据理想电压源的性质,可得出其伏安特性曲线。用 u_s 表示电压源的电压。如果电压源的电压是定值,则称为直流(direct source, DC)电压源,其伏安特性曲线如图 1-20 所示,此时可将其电压写为 U_s 。日常生活中常用的干电池就是一种直流电压源,常用如图 1-21 所示的符号表示。如果电压的大小和方向随时间有规律地变化,则称为交流(alternating source, AC)电压源。日常照明用的 50Hz 电源就是一种按照正弦规律变化的交流电源。

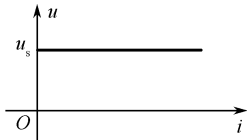


图 1-20 直流电压源的伏安特性曲线



图 1-21 干电池的符号

图 1-22 所示电路中,输出电压 $u=u_s$,与电阻 R_L 无关。流过电压源的电流 $i=u_s/R_L$ 随负载电阻 R_L 的改变而变化。如果 $R_L=0$,则流过电压源的电流将为无穷大,电压源会被烧毁,所以理想电压源绝不能短路。

理想电压源由实际电压源抽象而来,是实际电压源的理想化模型,本书只研究理想电压源,今后就简称电压源。

那么实际电压源又如何表示呢?下面再来看图 1-22 所示电路。如果 ab 左端为恒压源,则无论 R_L 取何值,恒有 $u=u_s$,但对于一个实际电压源来说, u 将随着 R_L 的变化而变化。如果 R_L 减小,电流 i 增加,而 R_L 上的电压 u 减小;反之,如果 R_L 增加,电流 i 减小,而电压 u 增大;只有当 $R_L=\infty$,即 ab 端开路时,才有 $u=u_s$ 。ab 端的电压、电流关系曲线如图 1-23 所示,此即为实际电压源的伏安特性曲线。为什么曲线会随着负载电阻的减小而下降呢?原因在于电源本身有电阻,称为电源的内阻,并用 R_s 表示。由于 R_s 的存在,造成电源内部有内阻压降,随着电流增加,内阻压降也增加,所以输出电压减小。因此,对于实际电压源来说,希望内阻越小越好。

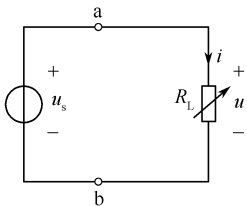


图 1-22 一个电路实例图

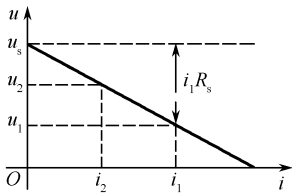
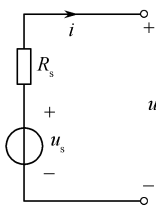
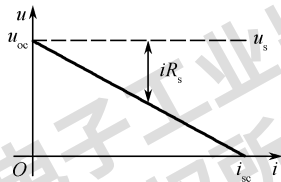


图 1-23 实际电压源的伏安特性曲线

通过上述讨论可以得出,实际电压源可用理想电压源与电阻 R_s 的串联组合表示,如图 1-24(a) 所示,端口的电压、电流关系为 $u=u_s-iR_s$,伏安特性曲线如图 1-24(b) 所示。由图可以看出,当 $i=0$,即开路时,开路电压 $u_{oc}=u_s$;当 $u=0$,即短路时,短路电流 $i_{sc}=\frac{u_s}{R_s}$ 。



(a)



(b)

图 1-24 实际电压源及其伏安特性曲线

1.6 电 流 源

电流源也分理想电流源和非理想电流源(或称实际电流源)。

具有下列性质的电流源称为理想电流源:①供出的电流是定值或是确定的时间函数,与其两端的电压无关;②电流源两端的电压由与之相连接的外电路决定。

根据理想电流源的性质,可得出其伏安特性曲线。用 i_s 表示电流源的电流。如果电流源的电流是定值,则称为直流电流源,其伏安特性曲线如图 1-25 所示,此时可将其电流写为 I_s 。如果电流按正弦规律变化,则称为正弦交流电流源。

图 1-26 所示电路中,输出电流 $i=i_s$,与电阻 R_L 无关。电流源两端的电压 $u=i_s R_L$ 随负载电阻 R_L 的改变而变化。如果 $R_L=\infty$,则电流源两端的电压将为无穷大,电流源会被烧毁,所以理想电流源绝不能开路。

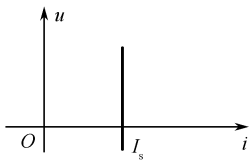


图 1-25 直流电流源的伏安特性曲线

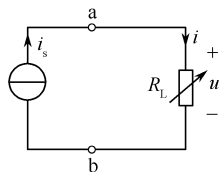
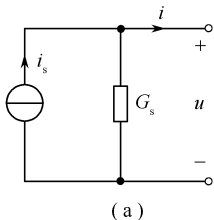
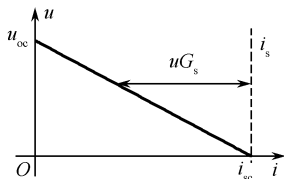


图 1-26 一个电路实例图

理想电流源也是由实际电流源抽象而来的理想化模型,本书只研究理想电流源,今后就简称电流源。实际电流源可看作理想电流源与电导 G_s 或电阻 R_s 的并联组合,如图 1-27(a)所示,端口的电压、电流关系为 $i=i_s-uG_s$,伏安特性曲线如图 1-27(b)所示。由图可以看出,当 $i=0$,即开路时,开路电压 $u_{oc}=i_s R_s$;当 $u=0$,即短路时,短路电流 $i_{sc}=i_s$ 。



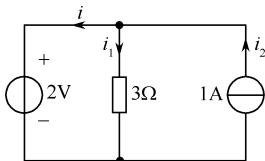
(a)



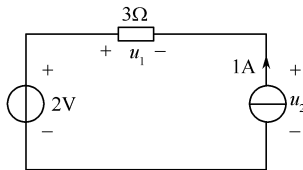
(b)

图 1-27 实际电流源及其伏安特性曲线

例 1-2 求图 1-28(a)所示电路中的电流 i_1 、 i_2 和 i 及图 1-28(b)中的电压 u_1 和 u_2 。



(a)



(b)

图 1-28 例 1-2 电路

解 (a) $i_1 = \frac{2}{3} \text{ A}$, $i_2 = 1 \text{ A}$, $i = -i_1 + i_2 = -\frac{2}{3} + 1 = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ A}$

(b) $u_1 = -3 \times 1 = -3 \text{ V}$, $u_2 = 2 - u_1 = 2 - (-3) = 5 \text{ V}$

1.7 受控源



1.7 节讲解
视频

前面介绍的电压源和电流源产生的电压与电流都是独立存在、不受电路中其他元件限制的,是独立源。在电路分析中,除独立源外,还引进受控源(controlled source)的概念。

受控源是由实际电子器件抽象而来的一种模型,这些电子器件都具有输出端的电压或电流受输入端的电压或电流控制的特点。例如,图 1-29(a)所示晶体三极管的集电极电流 i_c 受基极电流 i_b 的控制,图 1-29(b)所示耗尽型 N 沟道 MOS 管的漏极电流 i_D 受栅源电压 u_T 的控制,图 1-29(c)所示运算放大器的输出电压 u_o 受输入电压(u_+ — u_-)的控制。这些电子器件的模型可以分别用如图 1-29(d)、(e)、(f)所示的不同类型的理想受控源表示。

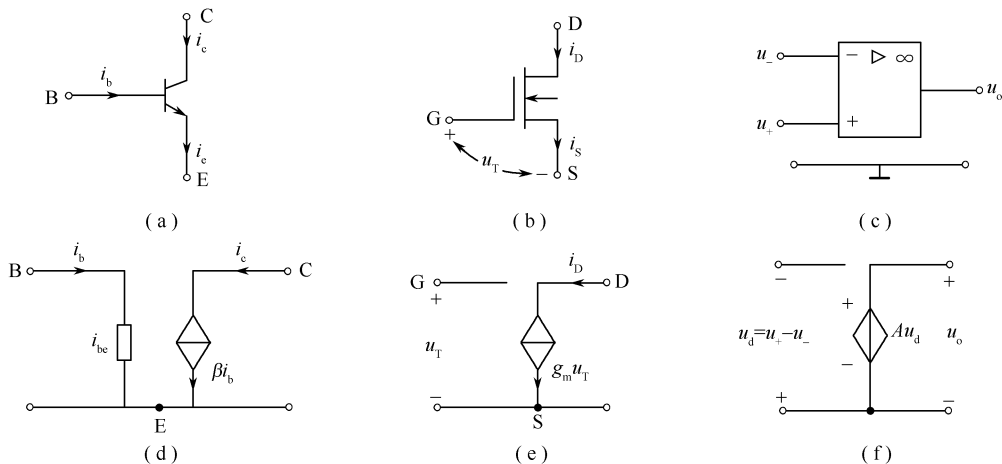


图 1-29 几种电子器件符号及其受控源电路模型

由图 1-29 可以看出,这些电子器件与前面介绍的电阻、电源不同,它们不是二端元件,所以,表示它们的受控源也不是二端元件。

下面先来引入端口的概念。所谓端口(port)是指电路中具有以下性质的一对端点:从这对端点中的一端流入的电流等于从另一端流出的电流。有一个端口的网络称为单端口网络,简称单口网络(one-port network),有两个端口的网络称为二端口网络(two-port network)。所以,二端元件又可称为单口元件。受控源不是单口元件,而是一种二端口元件。

受控源也分线性受控源和非线性受控源,本书只涉及线性受控源,今后就简称受控源。因为受控源的电压或电流受电路中另一支路电压或电流的控制,所以根据控制量是电压还是电流,受控的是电压源还是电流源,受控源共有 4 种类型,分别是: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)和电流控制电流源(current controlled current source, CCCS),符号如图 1-30(a)、(b)、(c)、(d)所示。图中 1—1' 为控制支路,2—2' 为受控支路。

由图 1-30 可知,各种类型受控源的电压、电流有以下关系:

VCVS—— $u_2 = \mu u_1$, 其中 μ 称为电压比系数;

CCVS—— $u_2 = r i_1$, 其中 r 称为转移电阻;

VCCS—— $i_2 = g u_1$, 其中 g 称为转移电导;

CCCS—— $i_2 = \alpha i_1$, 其中 α 称为电流比系数。

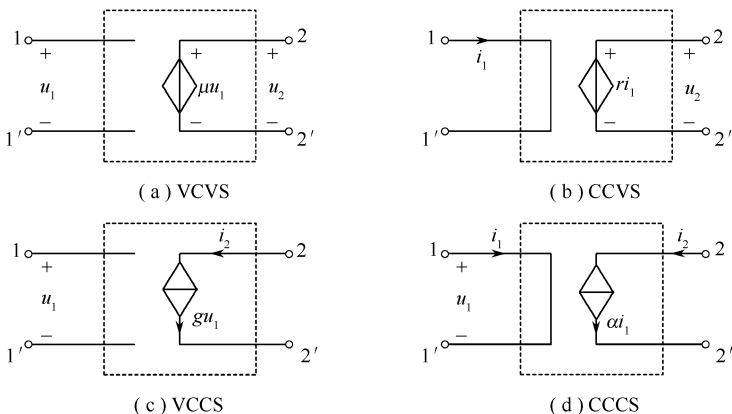


图 1-30 4 种类型的受控源

根据上面的介绍可知, 晶体管、MOS 管及运算放大器分别可以用 CCCS、VCCS 和 VCVS 作为其模型, 如图 1-29(d)、(e)、(f) 所示。

如果受控源的控制支路和受控支路的电压、电流均采用关联参考方向, 则受控源的功率为

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2$$

但由图 1-30 可知, 控制支路不是开路就是短路, 所以恒有 $u_1 i_1 = 0$, 因此受控源的功率为

$$p = u_2 i_2 \quad (1-14)$$

即受控源的功率就是受控支路的功率。

例 1-3 图 1-31 所示为一简化的晶体管微变等效电路, 已知 $\beta = 30$, 求 u_o / u_s 。

解 由图知

$$i_1 = \frac{u_s}{5 + 10} = \frac{u_s}{15}$$

$$u_o = -\beta i_1 \times 100 = -30 \times \frac{u_s}{15} \times 100 = -200 u_s$$

所以

$$u_o / u_s = -200$$

即输出电压是输入电压的 200 倍, 说明该电路具有放大作用

(负号说明输出电压与输入电压反相)。

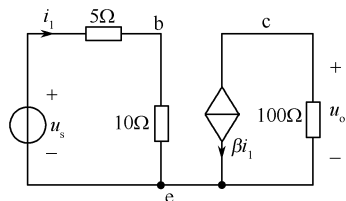


图 1-31 例 1-3 电路

例 1-4 已知图 1-32(a) 所示电路中, $i_s = 7\text{A}$, $r = 0.5\Omega$, 求受控源的功率。

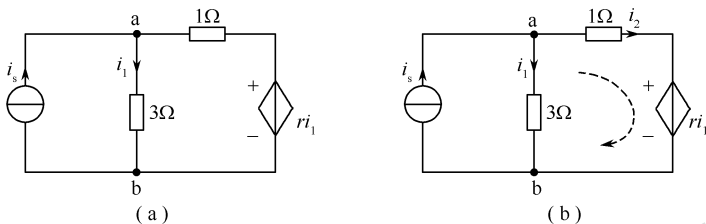


图 1-32 例 1-4 电路

解 设流过 1Ω 电阻的电流为 i_2 , 方向如图 1-32(b) 所示。

对节点 a 列 KCL 方程, 有 $i_s = i_1 + i_2$, 即

$$i_1 + i_2 = 7 \quad (1)$$

对右边网孔按图示绕行方向列 KVL 方程, 有 $i_2 + r i_1 - 3 i_1 = 0$, 即

$$-2.5i_1 + i_2 = 0$$

(2)

方程(1)、(2)联立可解得

$$i_1 = 2\text{A}, i_2 = 5\text{A}$$

受控源的功率为 $p = r i_1 \times i_2 = 0.5 \times 2 \times 5 = 5\text{W}$ (吸收功率)

通过本例题可以看出,在实际电路中,通常并不是如图 1-30 所示那样表示受控源,而是采用一种简单的画法,即只画出受控支路,控制支路不再单独画出,只需正确地标出控制量即可。因为控制支路功率为零,所以,受控源也仅指受控支路。

需要说明的是,受控源与独立源有着本质的区别。独立源在电路中起着“激励”的作用,其电压或电流是独立存在的,而受控源的电压或电流则受电路中其他支路电压或电流的控制,如果控制量为零,则受控源也不再存在。所以,受控源只表示了电路中某一支路电压或电流受另一支路电压或电流的控制关系。另外,在进行电路分析时,通常先把受控源当作独立源对待,解方程时将控制量代入即可。

1.8 电阻的等效变换、输入电阻

由非时变线性无源元件、线性受控源和独立源组成的电路称为非时变线性电路,这是本书研究的主要内容,所以今后就简称线性电路。如果组成线性电路的无源元件均为线性电阻,则称为线性电阻电路,简称电阻电路。电阻电路包含有受控源的电路。如果电路中的电源均为直流电源,则称为直流电路。在随后两章中,将以直流电路为对象研究电路分析的基本理论和基本方法。

首先说明,从拓扑结构观点来看,一个电路可以称为一个网络,但通常网络比电路的规模更大,不过,今后在本书中电路和网络不再区分。下面引入电路分析中一个非常重要的概念——等效(equivalent)。如果一个单口网络 N 和另一个单口网络 N' 的端口电压、电流关系完全相同,即它们在 $u-i$ 平面上的伏安特性曲线完全重合,则称这两个单口网络是等效的,即这两个网络的端口 VCR 相同。注意,这里讲的等效是对外电路而言的,即这两个网络对与其相连接的外电路的作用是等效的,但两个网络内部的各电路部分不一定等效。

1. 电阻元件的等效变换

图 1-33(a)是 n 个电阻串联的电路 N_1 ,根据 KVL, N_1 端口的 VCR 为

$$u = u_1 + u_2 + \cdots + u_n = R_1 i + R_2 i + \cdots + R_n i = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) i$$

对图 1-33(b)所示的网络 N_2 有

$$u = Ri$$

如果

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

则两个网络的端口伏安特性完全相同,即网络 N_1 和 N_2 等效,将 R 称为网络 N_1 的等效电阻。等效电阻通常用 R_{eq} 表示。

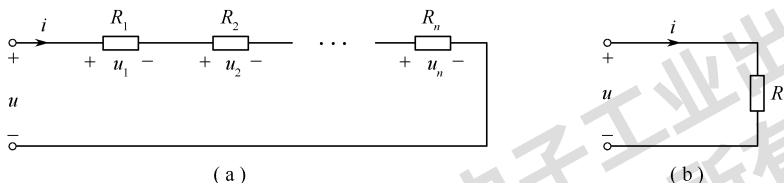


图 1-33 电阻的串联及其等效

n 个电阻串联时, 每个电阻上的分压为

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i = \frac{R_1}{R_{\text{eq}}} u \\ u_2 &= R_2 i = \frac{R_2}{R_{\text{eq}}} u \\ &\vdots \\ u_n &= R_n i = \frac{R_n}{R_{\text{eq}}} u \end{aligned}$$

即

$$u_k = R_k i = \frac{R_k}{R_{\text{eq}}} u \quad (1-15)$$

由此可见, 串联电阻上的分压与其电阻值成正比, 电阻值越大, 分压也越大。对于两个电阻串联的情况, 各电阻上的分压计算公式为

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u, u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u$$

这两个公式就是欧姆定律的应用结果。

下面再来讨论功率。 n 个电阻串联消耗的总功率为

$$p = \sum p_k = \sum i^2 R_k = i^2 (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) = i^2 R_{\text{eq}}$$

可见, n 个电阻串联时, 等效电阻消耗的功率等于各串联电阻消耗的功率之和。

图 1-34(a) 是 n 个电阻并联的电路 N_1 , 根据 KCL, N_1 端口的 VCR 为

$$i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n = G_1 u + G_2 u + \cdots + G_n u = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n) u = G_{\text{eq}} u$$

所以, n 个电阻并联的电路同样可以用一个电阻等效替代, 如图 1-34(b) 所示, 等效电阻的电导为

$$G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + \cdots + G_n$$

用电阻表示则为

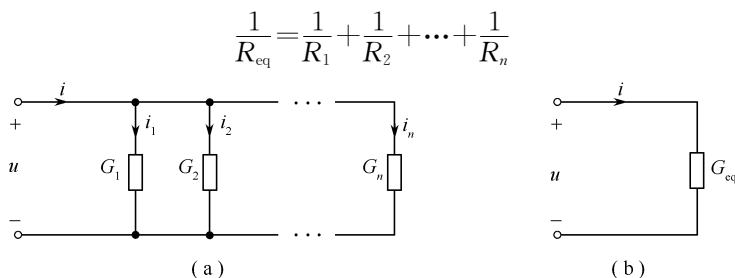


图 1-34 电阻的并联及其等效

每个电阻上的分流为

$$\begin{aligned} i_1 &= G_1 u = \frac{G_1}{G_{\text{eq}}} i \\ i_2 &= G_2 u = \frac{G_2}{G_{\text{eq}}} i \\ &\vdots \\ i_n &= G_n u = \frac{G_n}{G_{\text{eq}}} i \\ i_k &= G_k u = \frac{G_k}{G_{\text{eq}}} i \end{aligned}$$

即

$$(1-16)$$

由此可见, 并联电阻上的分流与其电导值成正比(即与电阻值成反比), 电导值越大, 分流也越大。对于两个电阻并联的情况, 等效电阻为

$$R_{eq}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

各电阻上的分流计算公式为

$$i_1=\frac{R_2}{R_1+R_2}i,i_2=\frac{R_1}{R_1+R_2}i$$

以上 3 个公式在以后的计算中经常用到, 要牢记。

同理, n 个电阻并联时, 等效电阻消耗的功率等于各并联电阻消耗的功率之和。
实际电路中经常遇到电阻既有串联又有并联的情况, 称为串并联或混联。此时要根据具体情况进行分析。

例 1-5 求图 1-35 所示电路 ab 端的等效电阻。

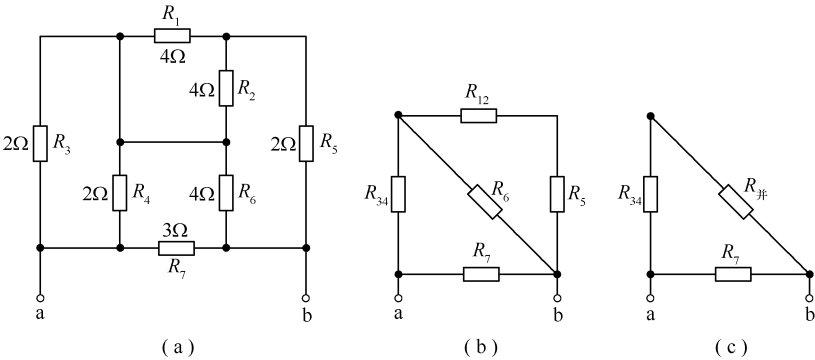


图 1-35 例 1-5 电路

解 $R_{12}=R_1\parallel R_2=2\Omega,R_{34}=R_3\parallel R_4=1\Omega$
电路等效为图 1-35(b)。
 $R_{\text{串}}=R_{12}+R_5=2+2=4\Omega,R_{\text{并}}=R_{\text{串}}\parallel R_6=2\Omega$
电路等效为图 1-35(c)。

$$R_{ab}=(R_{\text{并}}+R_{34})\parallel R_7=1.5\Omega$$

观察图 1-36(a) 所示电路可以看出, 电阻 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{24} 、 R_{31} 、 R_{34} 的连接关系既非串联也非并联, 所以, 用串并联的方法不可能求出 1、4 端的等效电阻, 需要寻求另外一种方法。

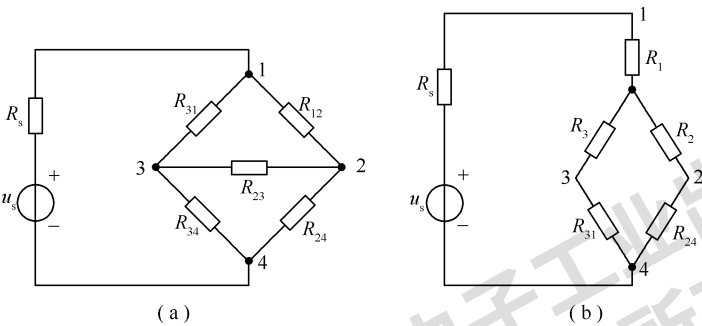


图 1-36 T 形和 Π 形连接的电路

仔细观察可以看出,这些电阻的连接关系由两种连接形式构成,即如图 1-37(a)所示的 T 形电路(也称为星形、Y 形)和图 1-37(b)所示的 Π 形电路(也称为三角形、 Δ 形)。这两种形式的电路都有 3 个端与外电路相连,根据等效的概念,如果这两个电路的对应端间的电压、电流关系相同,则二者就等效,这样二者就可以进行变换。

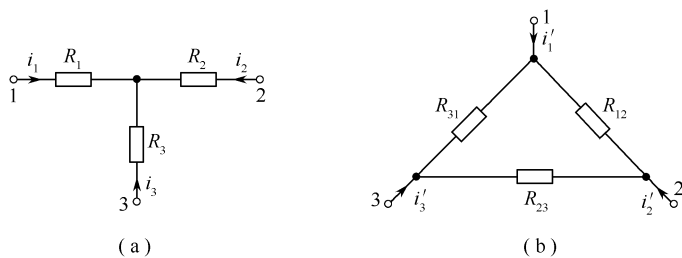


图 1-37 T 形电路和 Π 形电路

假设图 1-37 所示两个电路的 3 个对应端间的电压彼此相等。

对 T 形电路有

$$\begin{cases} u_{12} = R_1 i_1 - R_2 i_2 \\ u_{23} = R_2 i_2 - R_3 i_3 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases}$$

3 个方程联立求解,并考虑到 $u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0$,可得

$$\begin{cases} i_1 = \frac{R_3 u_{12}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} - \frac{R_2 u_{31}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \\ i_2 = \frac{R_1 u_{23}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} - \frac{R_3 u_{12}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \\ i_3 = \frac{R_2 u_{31}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} - \frac{R_1 u_{23}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \end{cases}$$

对 Π 形电路有

$$\begin{cases} i'_1 = \frac{u_{12}}{R_{12}} - \frac{u_{31}}{R_{31}} \\ i'_2 = \frac{u_{23}}{R_{23}} - \frac{u_{12}}{R_{12}} \\ i'_3 = \frac{u_{31}}{R_{31}} - \frac{u_{23}}{R_{23}} \end{cases}$$

此时,如果流入 3 个端的电流也彼此相等,即 $i_1 = i'_1, i_2 = i'_2, i_3 = i'_3$,则二者等效。根据对应系数相等的原则可求得:

由 T $\rightarrow$ Π 形电路时电阻间的关系为

$$\begin{cases} R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{cases} \quad (1-17)$$

由 $\Pi \rightarrow$ T 形电路时电阻间的关系为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases} \quad (1-18)$$

如果将式(1-17)用电导表示,则有

$$\begin{cases} G_1 = \frac{G_{12}G_{31}}{G_{12} + G_{23} + G_{31}} \\ G_2 = \frac{G_{23}G_{12}}{G_{12} + G_{23} + G_{31}} \\ G_3 = \frac{G_{31}G_{23}}{G_{12} + G_{23} + G_{31}} \end{cases} \quad (1-19)$$

这样式(1-18)和式(1-19)具有相同的形式,这就是将在 3.8 节中介绍的对偶关系的体现。式(1-17)和式(1-18)还可用文字表述如下

星形电阻 $R_i = \frac{\text{三角形中连接于 } i \text{ 的两电阻的乘积}}{\text{三个电阻之和}}$

三角形电阻 $R_{ij} = \frac{\text{星形中电阻两两乘积之和}}{\text{星形中接在除 } i, j \text{ 端以外的电阻}}$

对于图 1-36(a)电路,可以将 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} 或 R_{23} 、 R_{24} 、 R_{34} 构成的三角形转换为星形,也可以将 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{24} 或 R_{23} 、 R_{31} 、 R_{34} 构成的星形转换为三角形,这样电路的结构就转变为串并混联形式。将 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} 转换为星形后的电路如图 1-36(b)所示,随后的计算就很容易了。

如果三角形和星形中的 3 个电阻相等,即 $R_1 = R_2 = R_3$, $R_{12} = R_{23} = R_{31}$,则进行相互转换后的 3 个电阻也相等,分别为

$$R_{\Pi} = 3R_{\text{T}}$$

$$R_{\text{T}} = \frac{1}{3}R_{\Pi}$$

2. 输入电阻

对不含独立电源(可以含有受控源)的单口网络,定义端口的电压与电流之比为该单口网络的输入电阻 R_i (或入端电阻),即

$$R_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{u}{i} \quad (1-20)$$

式中,def 表示定义(define)的意思。

虽然等效电阻和输入电阻的概念引出不同,但从式(1-20)可以看出,它们是相等的。因此,单口网络的等效电阻也可利用式(1-20)求得。特别对于含有受控源的单口网络,不可能用串并联和 T→Π 变换的方法求得。

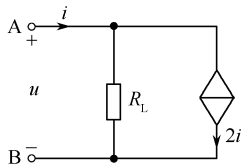


图 1-38 例 1-6 电路

例 1-6 求图 1-38 所示单口网络的输入电阻 R_i 。

解 由 KCL 得

$$i = \frac{u}{R_L} + 2i, \quad -i = \frac{u}{R_L}$$

$$R_i = \frac{u}{i} = -R_L$$

可见,从输入端口看去,该单口网络相当于一个负电阻。通过本例题也说明,对于不含独立源但含有受控源的单口网络,可以等效为一个电阻,而且等效电阻还可能为负值。

1.9 电源的等效变换



1.9 节讲解
视频

由多个电阻组成的单口网络可以用一个电阻等效替代,由多个电源组成的单口网络同样也可以用一个电源等效替代。

1. 电压源的等效变换

n 个串联连接的电压源可以用一个电压源等效替代,即图 1-39(a) 可以等效为图 1-39(b),等效电压源的电压为相串联的各电压源电压的代数和,即

$$u_s = u_{s1} + u_{s2} + \cdots + u_{sn} = \sum_{k=1}^n u_{sk} \quad (1-21)$$

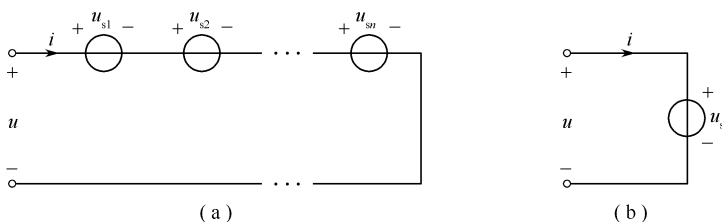


图 1-39 电压源的串联及其等效

根据电压源的特性可知,只有电压值相等且电压极性一致的电压源才允许并联,而且对外电路来说,其作用与一个电压源的作用等效。同理,任何元件与电压源并联,对外电路来说,都等效为一个电压源。

2. 电流源的等效变换

n 个并联连接的电流源可以用一个电流源等效替代,即图 1-40(a) 可以等效为图 1-40(b),等效电流源的电流为相并联的各电流源电流的代数和,即

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} + \cdots + i_{sn} = \sum_{k=1}^n i_{sk} \quad (1-22)$$

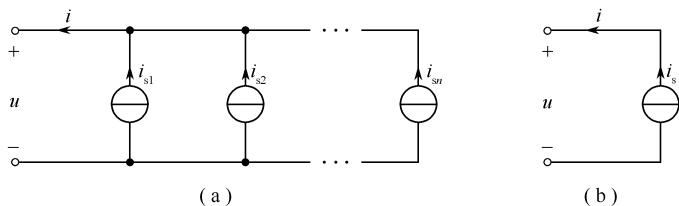


图 1-40 电流源的并联及其等效

根据电流源的特性可知,只有电流值相等且电流方向一致的电流源才允许串联,而且对外电路来说,其作用与一个电流源的作用等效。同理,任何元件与电流源串联,对外电路来说,都等效为一个电流源。

3. 实际电压源模型与实际电流源模型间的等效变换

对于图 1-41(a) 所示的实际电压源模型,其端口的 VCR 为

$$u = u_s - R_s i$$

对于图 1-41(b) 所示的实际电流源模型,其端口的 VCR 为

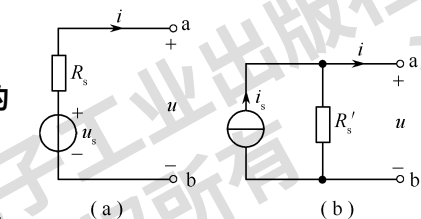


图 1-41 两种实际电源模型

$$i = i_s - \frac{u}{R'_s} \quad \text{或} \quad u = R'_s i_s - R'_s i$$

欲使二者等效,则应使其端口的 VCR 相等,比较上面两式可得

$$\text{当} \begin{cases} u_s = R'_s i_s \\ R_s = R'_s \end{cases} \text{时,二者等效}$$

因此,由电压源模型转换为电流源模型时,内阻不变,电流源的电流为 $i_s = \frac{u_s}{R_s}$ 。由电流源模型转换为电压源模型时,内阻不变,电压源的电压为 $u_s = R_s i_s$ 。变换时,注意电压源的电压极性和电流源的电流方向。

例 1-7 将图 1-42(a)所示单口网络化为最简形式。

解 利用电源的等效变换将图 1-42(a)电路逐步化简为图 1-42(d)或图 1-42(e)所示最简电路,变换过程如图 1-42(b)、(c)所示。

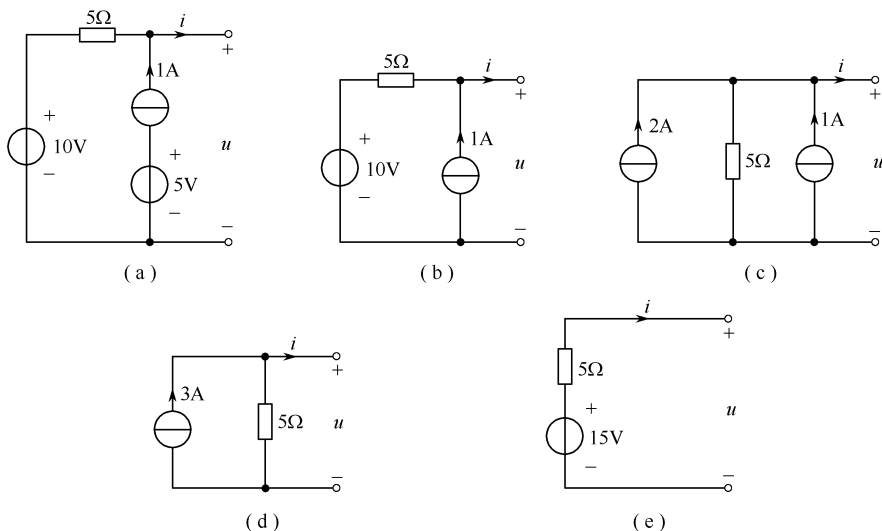


图 1-42 例 1-7 电路及其变换过程

两种电源模型进行等效变换后对外电路提供相同的功率,但电源内部不再等效。以图 1-42 所示电路为例,假设外接负载电阻 $R_L = 4\Omega$,则两种电源模型对负载提供的功率均为

$$P_L = \left(\frac{15}{5+4} \right)^2 \times 4 = \left(3 \times \frac{5}{5+4} \right)^2 \times 4 = \frac{100}{9} = 11.11\text{W}$$

而在电源内部,电压源内阻消耗的功率为

$$P_{u_s} = \left(\frac{15}{5+4} \right)^2 \times 5 = \frac{125}{9} = 13.89\text{W}$$

电流源内阻消耗的功率为

$$P_{i_s} = \left(3 \times \frac{4}{5+4} \right)^2 \times 5 = \frac{80}{9} = 8.89\text{W}$$

可见,电源内部是不等效的。

在分析电路时,与电压源串联的电阻和与电流源并联的电阻都可以视为电源的内阻进行处理。对于受控源,可同样进行变换。

有时利用电源等效变换可以使解题变得容易一些。

例 1-8 求图 1-43(a)所示电路中的电流 i 。

解 利用电源的等效变换将图 1-43(a) 电路逐步化简为图 1-43(d)所示电路,变换过程如图 1-43(b)、(c)所示。对图 1-43(d)可求得电流为

$$i = \frac{9-4}{1+2+7} = 0.5 \text{ A}$$

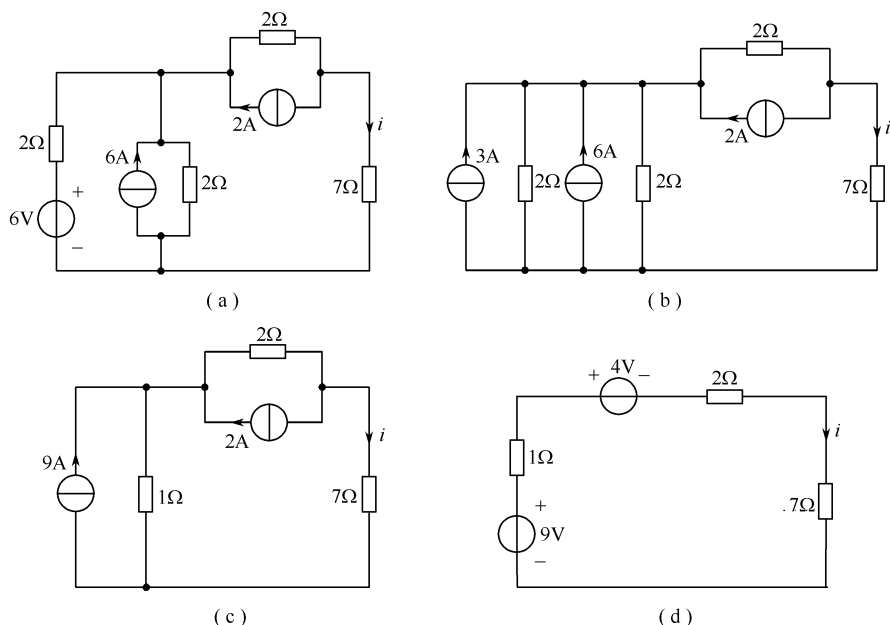


图 1-43 例 1-8 电路及其变换过程

例 1-9 将图 1-44(a)所示电路简化成等效电压源。

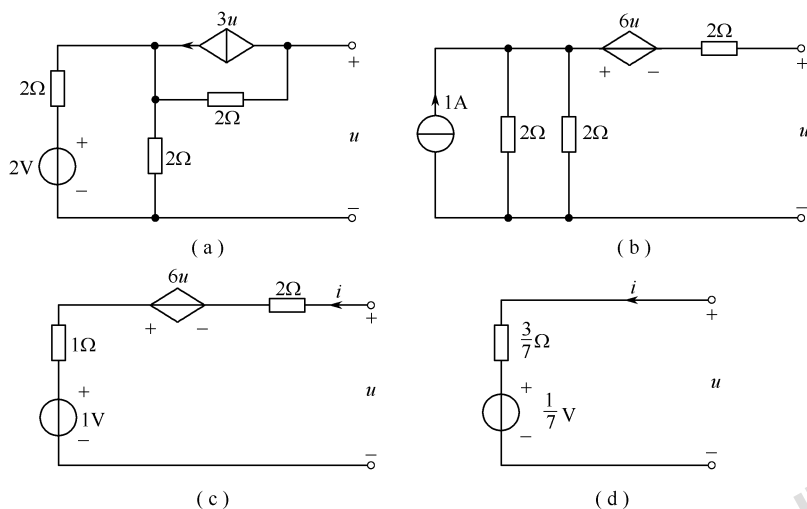


图 1-44 例 1-9 电路及其变换过程

解 先对电路进行等效变换,过程如图 1-44(b)、(c)所示。对图 1-44(c)求端口的 VCR,有

$$u = 2i - 6u + i + 1$$

$$u = \frac{1}{7} + \frac{3}{7}i$$

即

等效电压源如图 1-44(d) 所示。

例 1-10 求图 1-45(a) 所示单口网络的等效电阻 R_{ab} 。

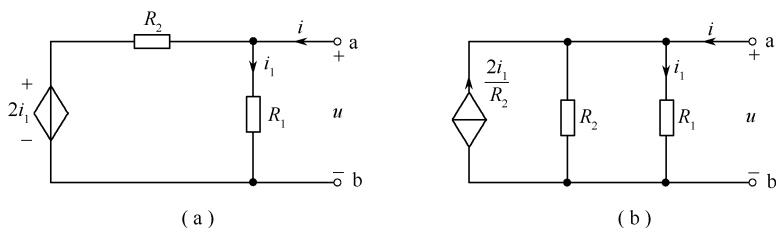


图 1-45 例 1-10 电路

解 先将电路等效变换为如图 1-45(b) 所示, 由图可得

$$i = i_1 + \frac{u}{R_2} - \frac{2i_1}{R_2} = \left(\frac{R_2 - 2}{R_2} \right) i_1 + \frac{u}{R_2}$$

而 $i_1 = \frac{u}{R_1}$, 代入上式后整理可得

$$i = \frac{R_1 + R_2 - 2}{R_1 R_2} u$$

所以

$$R_{ab} = \frac{u}{i} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 - 2}$$

当 $R_1 + R_2 > 2$ 时, $R_{ab} > 0$; 当 $R_1 + R_2 < 2$ 时, $R_{ab} < 0$ (为负电阻)。

注意: 例 1-10 中对图 1-45(b) 不能再进行化简, 因为继续化简将使控制量 i_1 消失。在含有受控源的电路中, 一定要保留控制量。

例 1-11 放大电路可以将输入的电压或电流放大, 放大电路的等效模型如图 1-46(a) 所示, 左侧端口为输入端, 右侧端口为输出端, R_i 是放大电路的输入电阻、 R_o 是放大电路的输出电阻, A_u 为放大电路的电压放大倍数。

(1) 当放大电路用于对电压信号进行放大时, 如图 1-46(b) 所示, 为使得负载 R_L 获得更大的电压, 放大电路的输入电阻和输出电阻应具有何种特点?

(2) 当放大电路用于对电流信号进行放大时, 如图 1-46(c) 所示, 为使得负载 R_L 获得更大的电流, 放大电路的输入电阻和输出电阻应具有何种特点?

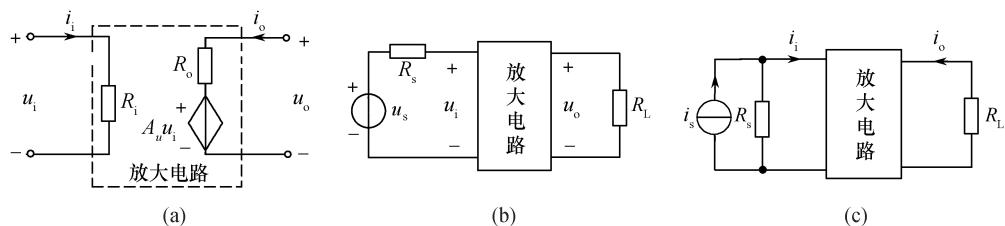


图 1-46 放大电路的等效模型

图 1-46 中, R_s 为电源内阻, 如果是多级放大电路相接, 则其是前一级放大电路的输出电阻。对于实际电压源来说, R_s 通常较小, 以便使放大电路的输入端获得较大的分压; 对于实际电流源来说, R_s 通常较大, 以便使得放大电路的输入端获得较大的分流。

解 (1) 根据图 1-46(a) 所示放大电路的等效电路模型, 将图 1-46(b) 电路等效为图 1-47 所示形式。

根据串联电阻分压公式, 放大电路的输入电压 u_i 为

$$u_i = u_s \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

当放大电路的输入电阻 R_i 较大时,放大电路可以获得较大的输入电压 u_i ,从而使 R_L 获得更大的电压。

R_L 两端的电压 u_o 为

$$u_o = A_u u_i \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} = A_u u_s \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

当放大电路的输出电阻 R_o 较小时,负载 R_L 可以获得更大的电压。

(2) 根据实际电压源和实际电流源模型之间的等效变换原理,将图 1-46(c) 电路等效为图 1-48 所示形式, A_i 为放大电路的电流放大倍数,同一个放大电路的 A_i 和 A_u 可以根据等效关系进行换算。

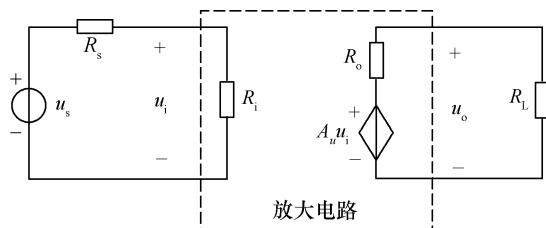


图 1-47 图 1-46(b)的等效电路

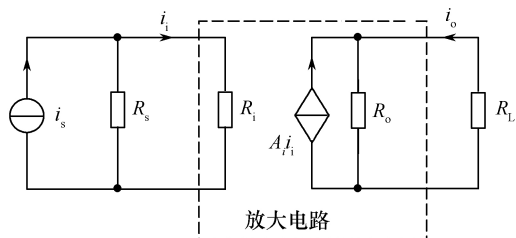


图 1-48 图 1-46(c)的等效电路

根据并联电阻分流公式,放大电路的输入电流 i_i 为

$$i_i = i_s \cdot \frac{R_s}{R_s + R_i}$$

当放大电路的输入电阻 R_i 较小时,放大电路可以获得较大的输入电流 i_i ,从而使 R_L 获得更大的电流。

R_L 的电流 i_o 为

$$i_o = -A_i i_i \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L} = -A_i i_s \cdot \frac{R_s}{R_s + R_i} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

当放大电路的输出电阻 R_o 较小时,负载 R_L 可以获得更大的电流。

根据以上分析可知,在设计放大电路时,应根据放大信号的差异,设计合适的电路结构,使之具有适合的等效输入电阻和输出电阻。

读者可以进一步思考,如果某放大电路在输入端接入实际电流源,但希望负载 R_L 获得尽可能大的电压,其输入电阻和输出电阻应具有何种特点。

1.10 工程应用

1. 人体电阻与安全用电

我们目前的生活处处离不开电,电给人们带来了便利,但在使用过程中也注意安全用电,否则会造成人身伤亡。此处仅从人体电阻方面讨论安全用电问题。

通常人体电阻由体内电阻和皮肤电阻两部分组成。体内电阻基本恒定,大约为 500Ω 。皮肤电阻的大小则随皮肤表面的干燥程度而变化,皮肤越干燥,电阻越大,而且也因人而异,通常在几十到几百欧之间。除此之外,皮肤电阻还与接触电压有关,接触电压升高,皮肤电阻下降。图 1-49(a)是一个简化的人体电路模型,其中 R_N 表示头颈部电阻, R_A 表示手臂电阻, R_T 表示躯干电阻, R_L 表示腿脚电阻。

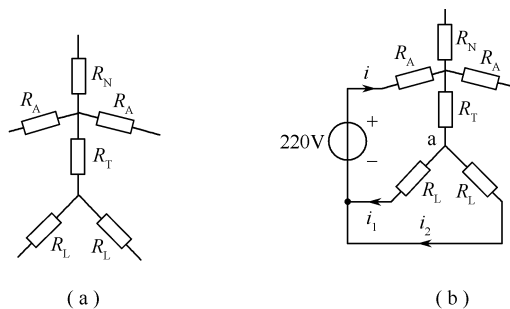


图 1-49 人体电路模型

电流通过人体后会对人体造成伤害,伤害的程度取决于通过的电流大小。电流对人体的伤害主要是神经系统,当电流只通过骨骼时,会造成暂时的麻痹或肌肉收缩,通常不会有生命危险。但是,当电流通过神经系统和肌肉时,由于它们控制大脑的供养,因此会造成严重后果。肌肉的暂时麻痹会引起呼吸停止,突然的肌肉收缩会扰乱有规律的心跳,最终可能会使得供给大脑的氧和血暂停,如果不及时抢救,就会导致死亡。表 1-3 列出了人对流过体内不同电流值的生理反应。根据国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)的标准,人体的安全电流是 10mA。

表 1-3 人对电流值的生理反应

生理反应	电流范围(mA)
几乎没有感觉	3~5
非常疼痛	35~50
肌肉麻痹	50~70
心跳停止	500

如何确定通过人体的电流呢?下面通过一个例子来说明。以我国的工业用电标准——220V、50Hz 为例,假设我们触电,则通常的形式是一只手和双脚形成回路,如图 1-49(b)所示。如果 $R_A=400\Omega$, $R_T=50\Omega$, $R_L=200\Omega$,则对 R_A 、 R_T 、 R_L 和电压源构成的回路及两个 R_L 构成的回路分别按照顺时针绕行方向列 KVL 方程,对节点 a 列 KCL 方程,得

$$400i + 50i + 200i_1 - 220 = 0$$

$$200i_2 - 200i_1 = 0$$

$$i - i_1 - i_2 = 0$$

解上述方程组可得

$$i = 400\text{mA}, i_1 = i_2 = 200\text{mA}$$

可见,在这种情况下,通过人体的电流已经远远超过了安全电流,接近死亡极限。

2. 散热风扇的转速控制

电阻器在电路中的一个应用就是控制电流,就像大坝控制河的水流一样。根据欧姆定律 $U=RI$ 可知:如果电阻上的电压保持不变,则高的电阻值将导致小的电流,而低的电阻值导致较大的电流,这种性质就可应用于调节散热风扇的转速。

图 1-50 所示是汽车散热风扇电路原理图。图中的 3 个电阻串联连接,在连接点处又伸出接线端与一个转换开关相连。

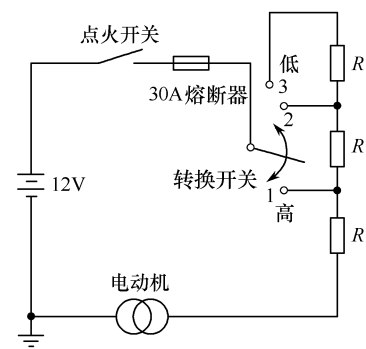


图 1-50 汽车散热风扇电路原理图

根据本章所学内容可知,串联的总电阻阻值是各串联电阻阻值之和。因此,当转换开关处在低位(位置3)时,电路中的电阻值为3个串联电阻阻值之和,达到最大,所以,电路中的电流最小,电动机功率小,所以电扇的转速慢。当转换开关移到位置2时,一个电阻器被移除,使得电路中的电阻值减小,因此允许较大的电流通过,从而使得风扇的转速增大。相继向下移动转换开关的位置,则相继移除电路中的电阻,电扇的转速就相继增大。

由图可以看出,串联的电阻越多,风扇的调速级别就越多。

3. 充电宝简介

(1) 衡量移动电源容量的“毫安时”与“瓦时”

伴随各类便携式电子产品的不断出现,充电成为生活中的一种常见行为。充电是电路传递能量功能的典型体现,特别是利用有线连接方式进行充电。通过所学的电路与物理学知识,可以对充电中遇到的一些相关问题进行解读。

移动电源(power bank),俗称“充电宝”,是一种便于携带的储能设备,它是由电池或电池组、相应的电路及外壳组合而成,可以提供稳定的、直流输出的非固定式电源系统。充电宝主要用于为各类小型电子产品特别是消费类电子产品充电。

移动电源的额定容量(rated capacity)是指移动电源的有效放电容量,单位是安培时(Ah)或毫安时(mAh),通常用mAh表示。1mAh的含义是能够以1mA的电流持续放电1小时(即3600s)。“毫安时”也可以看作是电荷的计量单位,表明在某个放电电压条件下,设备充满电后可释放的电荷总数。根据库仑=安培×秒可以推出

$$1\text{mAh}=3600\text{mA}\cdot\text{s}=3.6\text{A}\cdot\text{s}=3.6\text{C}$$

即1毫安时等于3.6库仑。

但由于“毫安时”不对放电电压进行描述,因此“毫安时”不能被看作是一个能量单位,当然更不是功率单位。为了描述设备储存能量或释放能量的能力,通常采用Wh(瓦时)这个单位来描述其额定能量(rated energy)。

移动电源所使用电池或电池组的“额定能量”是电池或电池组的额定容量乘以电池或电池组的额定电压。1Wh的含义就是能够以1W的平均功率持续放电1小时,可以推出

$$1\text{Wh}=3600\text{W}\cdot\text{s}=3600\text{J}$$

即1瓦时等于3600焦耳。

通常正规厂商生产的移动电源会在包装、铭牌或说明书等位置注明一个“标称电压”,即移动电源的可释放电荷总数是在该电压条件下计算的。例如,某移动电源的标称电压为3.7V,额定容量为10000mAh,则表明在3.7V的输出电压下,该移动电源可释放的电荷总数为10000mAh,其额定能量为

$$10000\text{mAh}\times 3.7\text{V}=37\text{AV}\cdot\text{h}=37\text{Wh}$$

(2) 关于充电宝的几点说明

① 不同厂商所使用的标称电压各有不同。例如,某些厂商会使用3.85V的标称电压,因此对于同样是10000mAh的移动电源,其额定能量为38.5Wh。

② 当使用USB接口对外部设备进行充电时,其输出电压通常为5V或更高。对于标称电压为3.7V、额定容量为10000mAh的移动电源来说,其总能量为37Wh,此时可释放的电荷总数(输出容量)为

$$37\text{Wh}\div 5\text{V}=7400\text{mAh}$$

③ 对于实际的移动电源来说,并非所有储能都能有效输出,还需要考虑能量的“转化率”,以及设备老化、环境温度等因素。

2014 年,中国民用航空局发布了《关于民航旅客携带“充电宝”乘机规定的公告》,其中规定:“严禁在托运行李中携带充电宝”、“严禁在飞行过程中使用充电宝”、“严禁携带额定能量超过 160Wh 的充电宝;携带额定能量超过 100Wh 但不超过 160Wh 的充电宝,必须经航空公司批准且不得超过两个。”下面通过一个例题说明具体如何确定充电宝的额定能量。

例 1-12 假设某品牌“充电宝”的标称容量为 20000mAh,标称电压为 3.7V,则该设备的额定能量是否超出中国民用航空局的规定?

解 该“充电宝”的额定能量为

$$20000\text{mAh} \times 3.7\text{V} = 74\text{Ah} \cdot \text{V} = 74\text{Wh} < 100\text{Wh}$$

因此该设备额定能量未超出中国民用航空局的规定。

扩展阅读:电压、电流源、受控源

1. 电压

为了讨论电压方便,我们先从元件开始。用一个矩形框来表示一个电路元件,元件有与其他元件相接的两个端钮,分别用 A 和 B 表示,我们称之为二端电路元件,如图 1-51 所示。常见的电炉、白炽灯、干电池等都可以用二端电路元件来表示。

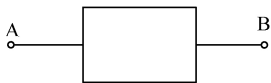


图 1-51 二端电路元件

为了理解电压的概念,我们可以类比一下水在水渠中流动的现象。在没有外力的作用下,让水从一段水渠流过,水渠两端必须有高度差。如果水渠两端的高度差用两端距离地面或者海平面的差值表示,从能量的角度看,实际是重力在水流过水渠时所做功的大小。物理学上定义,若 1 牛顿的力做功 1 米,则消耗 1 焦耳(J)的能量。水渠两端的高度差是有方向的,我们会说一端比另外一端高或者低多少。当水渠中没有水流时,虽然没有水的重力做功,但水渠两端的高度差仍然存在。

电流是电荷的移动形成的,电荷从 A 端到 B 端通过元件,则 A、B 两端需要有电位差(也称为电势差),即电压。

推动电荷流过元件需要能量。在图 1-51 中,我们用推动电荷流过元件做功的大小来度量电路元件两端的电压大小。电流单位为安培($1\text{A} = 1\text{C/s}$),即 1 秒有 1 库仑(C)的电荷流过时电流是 1A。电压的单位用伏特表示,电压在国际单位制中的规定是“在载荷 1 安培恒定电流的导线上,当两点之间导线上的功率耗散为 1 瓦特($1\text{W} = 1\text{J/s}$)时,这两点之间的电位差为 1 伏特(V)”。也就是说,功率是 1W、电流是 1A 时,耗散的能量是 1J,那么 1 伏特就是 1 焦耳/库仑(J/C)。简言之,若 1 库仑的电荷经过元件所消耗的能量是 1 焦耳,此时元件两端的电压是 1 伏特。

在电路中,也有与如上所述水渠客观存在的高度差情况。对某些元件来说,当元件中没有电流时,电压仍然存在,例如一个没有接入电路的电池,其两端电压一直存在。但对有些耗能元件则并非如此,例如电阻元件。

电压也有方向,那么如何定义电压的方向呢?一个元件的电压真实方向由元件两端的电位高低确定,所以先讨论如何定义电位的高低。电位用电荷在电场中不同位置的电势能表示,类似一个物体在相对地面(地面为 0 势能)的重力势能。当电场推动的电流方向,即正电荷运动方向是从 A 端流入、B 端流出时,这时电场力做功为正,电荷在运动中电势能减少,我们说 A 端的电位比 B 端的电位高,把 A 端定义为高电位端,B 端定义为低电位端,则定义电压的方向是从 A 端到 B 端。从 A 端到 B 端方向的电压是正值,而从 B 端到 A 端方向的电压是负值,即定义电压的

真实方向是从高电位端指向低电位端。

从能量存在形式的角度描述,如果正电荷从 A 点移动到 B 点,在这个过程中电能转化为其他形式的能量,比如光能(照明灯)、热能(电热器),则说 A 点电位比 B 点电位高,反之,则 B 点电位比 A 点电位高。例如,图 1-52 中的白炽灯,电能转换为光能和热能,灯泡 A 端比 B 端的电位高,从 A 端到 B 端的电压为正。而电池则不同,电池将其他形式的能量转化成电能,在图 1-52 中,电流从 D 端经过电池到 C 端后,电势能增加了,所以 C 端的电位高于 D 端的电位,从 D 端到 C 端的电压为负。

2. 电流源

电流源是与电压源不同的供电电路,是为了实现使特定支路具有特定的电流值而设计的,可能需要用一些晶体管、场效应管等元件来构建电流源电路。图 1-53 所示为一个电流源电路的原理图,其中 I_0 为支路的电流。

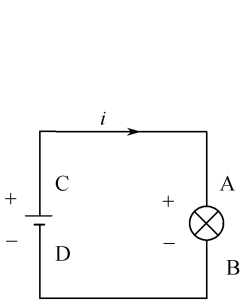


图 1-52 白炽灯电路示意图

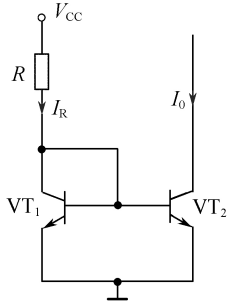


图 1-53 电流源电路原理图

图 1-54 是用 Multisim 软件实现的图 1-53 所示的电路,在 I_0 所在支路接一个负载电阻,其余部分为供电电路。当负载电阻 R_2 为 5Ω 时,如图 1-54(a) 所示,安培表 A2 的读数为 0.885mA 。如果将负载调整为 10Ω ,如图 1-54(b) 所示,则安培表 A2 的读数为 0.884mA 。电流基本上没有变化,这就说明供电电路基本实现了电流的稳定输出,即不受负载影响。我们用电流源作为此类电路的模型。

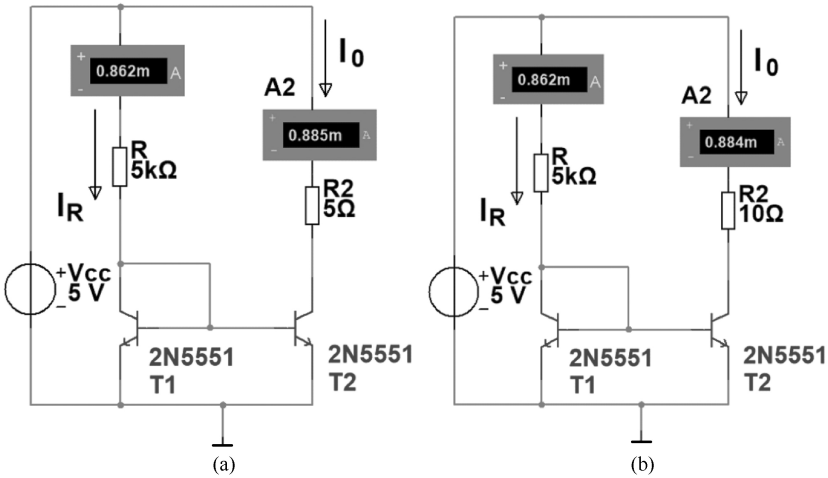


图 1-54 电流源电路 1

如果需要进行不同电流值的电流源,可调整供电电路。图 1-55 所示电路就调整了供电电路的内部电阻,在负载电阻为 10Ω 的情况下,电流约为 2.2mA ;当负载电阻为 5Ω 时,其电流也约

为 2.2mA。可见,负载支路的电流由供电电路决定,而不是由负载大小决定,其微小的差别在误差允许范围内,可以忽略。

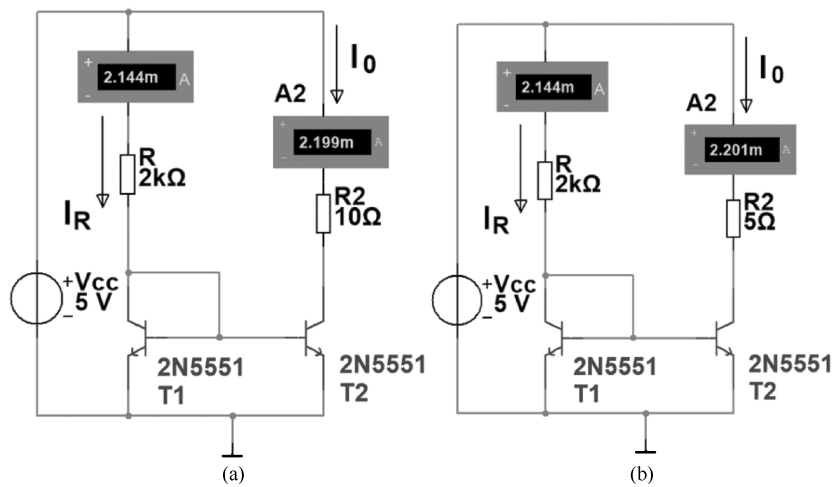


图 1-55 电流源电路 2

3. 受控源

受控源不同于独立源,是由有源器件实现的、具有特定功能的电路模块。为了便于分析,用有源器件作为其模型,下面用一个例子进行说明。图 1-56 是由运算放大器(简称运放,这一部分内容将在第 2 章介绍)和一些其他元件构成的集成电路,其中,输出电压即 R_L 两端的电压受独立电压源电压 u_{in} 的控制。应用 Multisim 软件搭建如图 1-57 所示仿真电路,可以看具体的效果。在图 1-57 所示电路的元件参数值下,可以测得运放输出端 1 所接电阻 R_L 两端的电压为 3V。如果将 R_L 换为 2kΩ 的电阻,如图 1-58 所示,其两端电压不变,这说明 R_L 的大小并不影响运放输出端的电压。

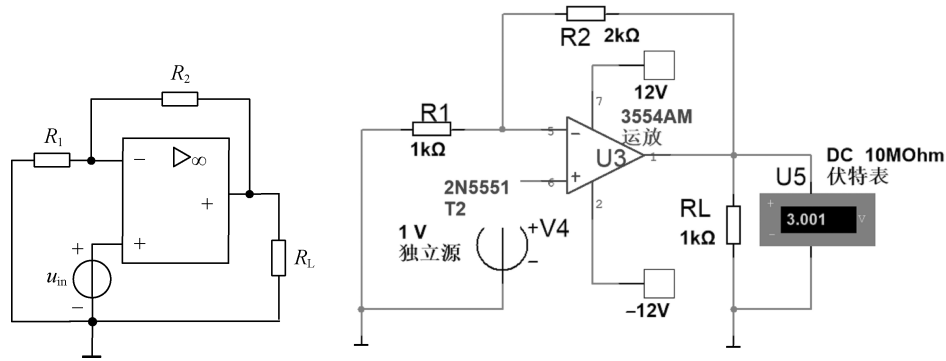


图 1-56 由运放构成的
集成电路原理图

图 1-57 仿真电路图 1

如果把连接到运放输入端(端子 6)的电压源的电压调整为 2V,如图 1-59 所示,此时可以测得端子 1 的输出电压为 6V。这说明端子 1 的输出电压随着输入的独立电压源电压的变化而变化,即它受另外一条支路电压的控制。如果继续将输入电压调整为 3V,可以测得输出电压为 9V。由此可以看出,输出电压与输入电压有确定的比例关系。在图 1-59 所示电路的元件参数值下,输出电压是输入电压的 3 倍。

除运算放大器电路外,还有其他电路也有类似的特性。为了进行电路分析,我们需要用电路

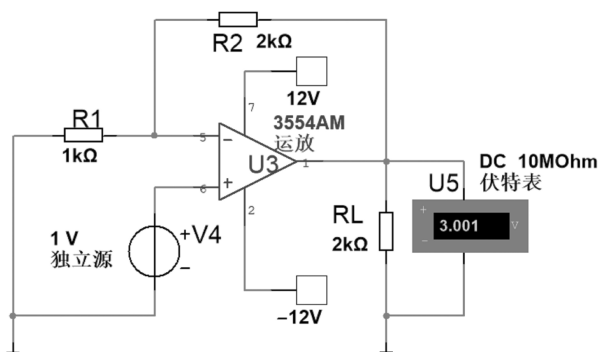


图 1-58 仿真电路图 2

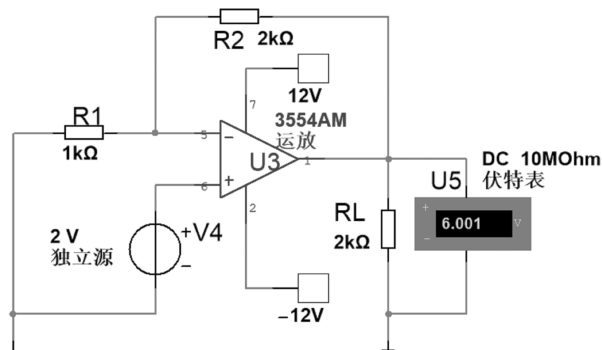


图 1-59 仿真电路图 3

模型来描述此类现象,这就是受控源。

由仿真结果可知,对图 1-56 所示电路,其输出电压受输入电压的控制,所以可用电压控制电压源模型来描述,如图 1-60 所示。图中,端口 11' 对应图 1-56 中独立电压源所在支路,端口 22' 对应图 1-56 中 R_L 所在支路, R_L 是外接负载。

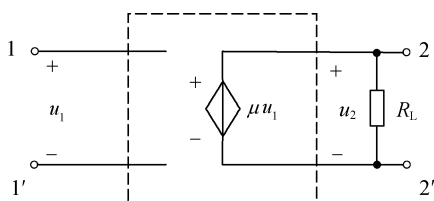


图 1-60 电压控制电压源模型

本章小结

本章主要介绍了电路模型的概念,电压、电流的参考方向和关联参考方向,功率的计算及判断,基尔霍夫电流定律和电压定律,电阻元件,电压源、电流源、受控源及其基本特性,等效的概念,电阻元件的等效及输入电阻的概念,电源的等效变换,两种实际的电源模型及其相互之间的等效变换。

本章的思维导图如图 1-61 所示。

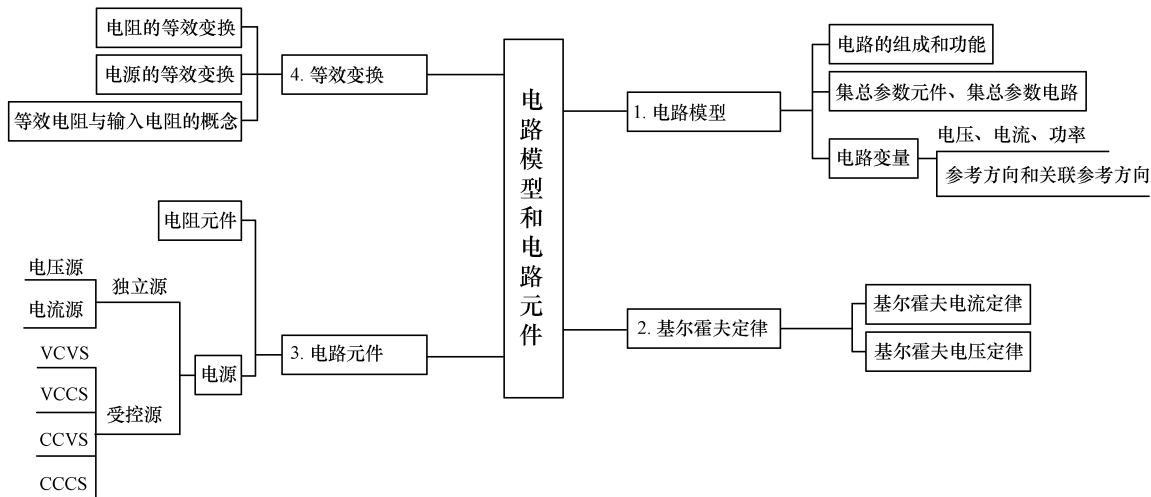


图 1-61 第 1 章思维导图

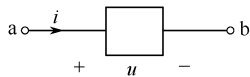
习 题

1-1 已知在如图 1-1 所示电路的电压、电流参考方向下, $u=5\text{V}$, $i=-2\text{A}$, 请标出电压、电流的实际方向。

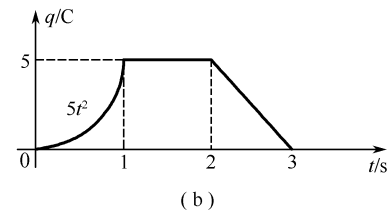
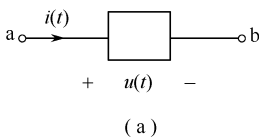
1-2 已知通过某二端元件的电荷 $q(t)=2\sin(3t)\text{C}$, $t>0$, 求电流 $i(t)$ 。

1-3 已知通过某二端元件的电荷 $q(t)=(10+5e^{-3t})\text{C}$, $t>0$, 求通过此元件的电流。

1-4 设通过题图 1-2(a)所示元件的电荷波形如图 1-2(b)所示。若单位正电荷由 a 端移至 b 端时获得的能量为 2J , 求流过元件的电流 $i(t)$ 及元件的功率 $p(t)$, 并画出 $i(t)$ 与 $p(t)$ 的波形。

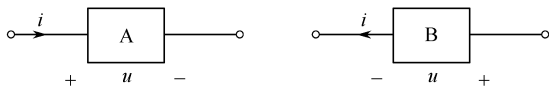


题图 1-1



题图 1-2

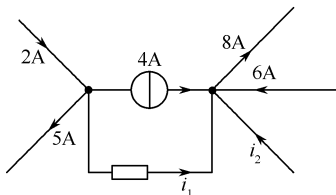
1-5 已知在题图 1-3 所示电压、电流参考方向下, 元件 A 的电压、电流分别为 $u=-3\text{V}$, $i=5\text{A}$, 元件 B 的电压、电流分别为 $u=5\text{V}$, $i=-2\text{mA}$, 试求两元件吸收的功率。



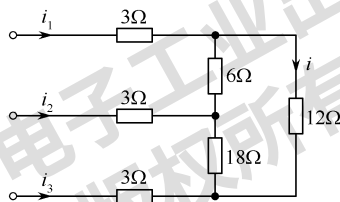
题图 1-3

1-6 求题图 1-4 所示部分电路中的电流 i_1 和 i_2 。

1-7 题图 1-5 所示电路为某电路的一部分, 已知 $i_1=6\text{A}$, $i_2=-2\text{A}$, 求图中电流 i 。



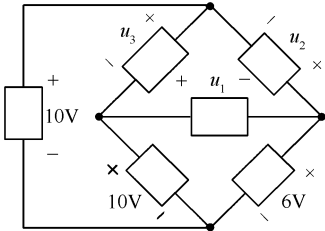
题图 1-4



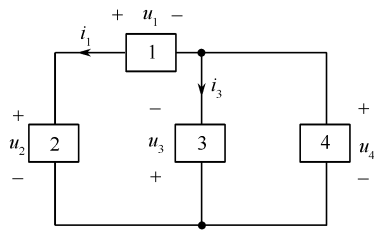
题图 1-5

1-8 求题图 1-6 所示电路中的电压 u_1 、 u_2 和 u_3 。

1-9 电路如题图 1-7 所示,已知 $i_1=2\text{A}$, $i_3=-3\text{A}$, $u_1=10\text{V}$, $u_4=-5\text{V}$,试求各元件吸收的功率。

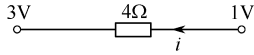


题图 1-6

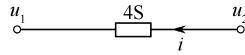


题图 1-7

1-10 电阻元件两端的对地电压如题图 1-8 所示,求通过各电阻元件的电流 i 。



(a)

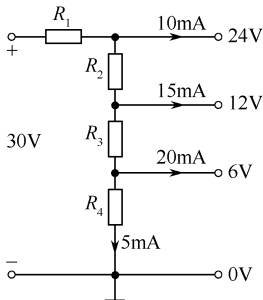


(b)

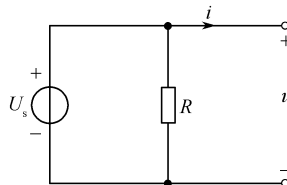
题图 1-8

1-11 电阻电路中各点对地电压及各支路电流如题图 1-9 所示,求各电阻的阻值。

1-12 电路如题图 1-10 所示,其中 U_s 为理想电压源,试判断当外电路不变,仅电阻 R 变化时,将会引起电路中哪条支路电流的变化。



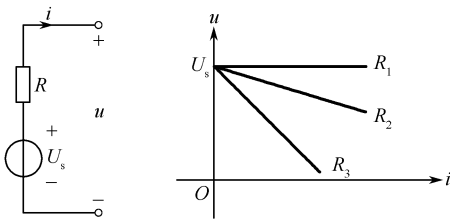
题图 1-9



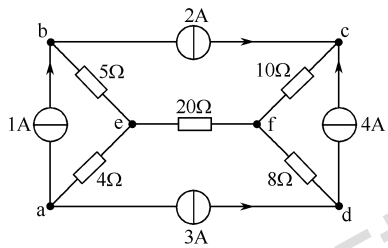
题图 1-10

1-13 一段含源支路及其 $u-i$ 特性如题图 1-11 所示,图中 3 条直线对应于电阻 R 的 3 个不同数值 R_1 、 R_2 、 R_3 ,试根据该图判断各电阻的大小关系。

1-14 求题图 1-12 所示电路中的 u_{ac} 、 u_{be} 、 u_{cf} 、 u_{df} 、 u_{ef} 。



题图 1-11

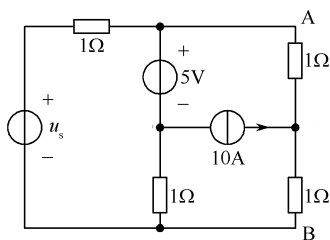


题图 1-12

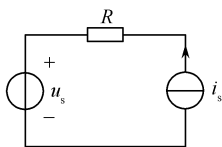
1-15 电路如题图 1-13 所示,欲使 $u_{AB}=5\text{V}$,问电压源电压 u_s 应是多少?

1-16 电路如题图 1-14 所示,若 $u_s>0$, $i_s>0$, $R>0$,请指出电路中各元件是吸收功率还是提供功率。

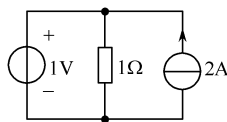
1-17 电路如题图 1-15 所示,试验证该电路功率守恒。



题图 1-13



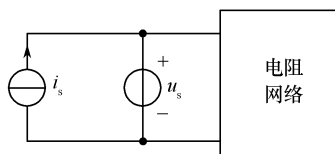
题图 1-14



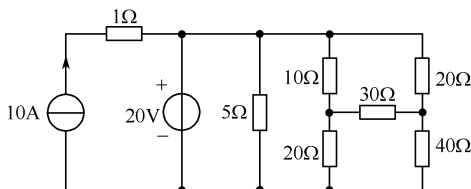
题图 1-15

1-18 题图 1-16 所示电路中,若电压源 $u_s=10V$, 电流源 $i_s=1A$, 试说明电压源和电流源是否一定都在提供功率。

1-19 求题图 1-17 所示电路中电流源和电压源提供的功率。



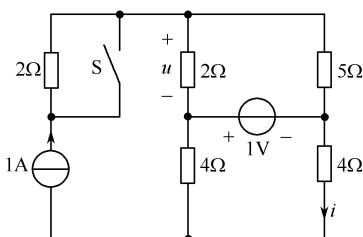
题图 1-16



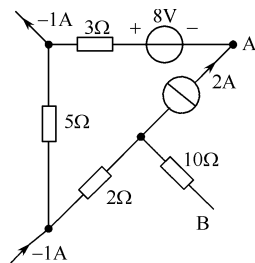
题图 1-17

1-20 电路如题图 1-18 所示,试判断当开关 S 由打开到闭合时,电路中的电压 u 和电流 i 是否发生变化。

1-21 求题图 1-19 所示部分电路中 A、B 两点间的电压 U_{AB} 。



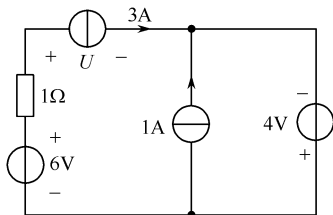
题图 1-18



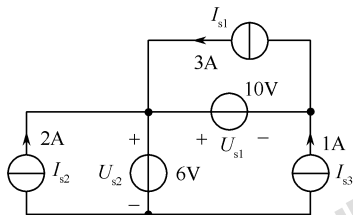
题图 1-19

1-22 电路如题图 1-20 所示,求 $3A$ 电流源两端的电压 U 。

1-23 电路如题图 1-21 所示,求各个电源提供的功率。



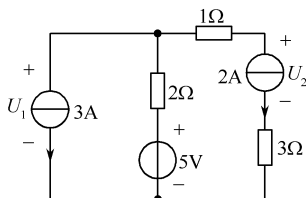
题图 1-20



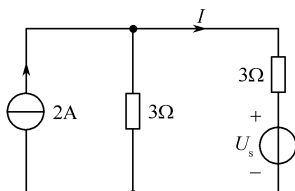
题图 1-21

1-24 电路如题图 1-22 所示,求两个电流源两端的电压 U_1 、 U_2 。

1-25 电路如题图 1-23 所示,求电流 $I=0.5A$ 时的 U_s 。



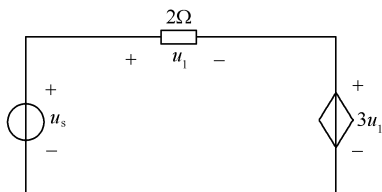
题图 1-22



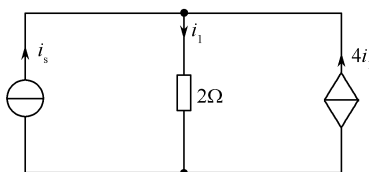
题图 1-23

1-26 电路题图 1-24 所示,求在下列条件下受控源的电压:(1) $u_s = 2V$; (2) $u_s = 8V$ 。

1-27 电路题图 1-25 所示,求在下列条件下受控源的电流:(1) $i_s = 1A$; (2) $i_s = 3A$ 。



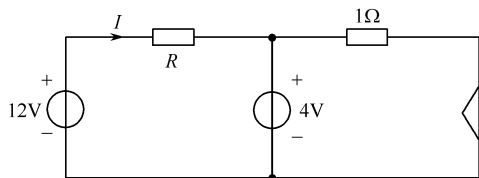
题图 1-24



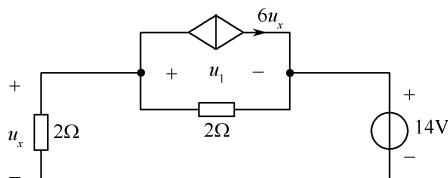
题图 1-25

1-28 电路如题图 1-26 所示,求:(1) 当 $R=2\Omega$ 时受控源提供的功率;(2) 欲使受控源吸收 $4W$ 的功率,则电阻 R 应为多少?

1-29 求题图 1-27 所示电路中受控电流源吸收的功率。



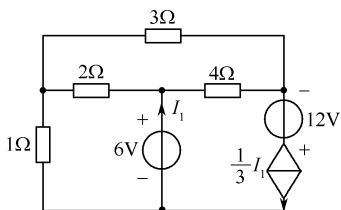
题图 1-26



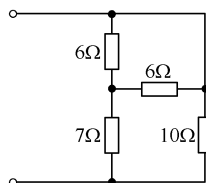
题图 1-27

1-30 题图 1-28 所示电路中各参数已给定,试求受控电流源的功率,并说明是吸收功率还是提供功率。

1-31 求题图 1-29 所示单口网络的等效电阻。



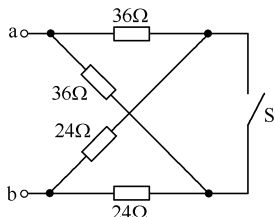
题图 1-28



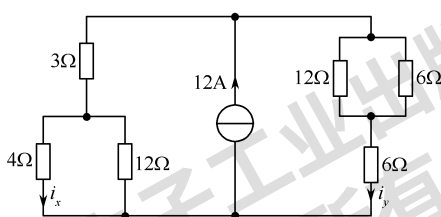
题图 1-29

1-32 求题图 1-30 所示单口网络分别在开关 S 打开和闭合时的等效电阻。

1-33 求题图 1-31 所示电路中的电流 i_x 和 i_y 。



题图 1-30

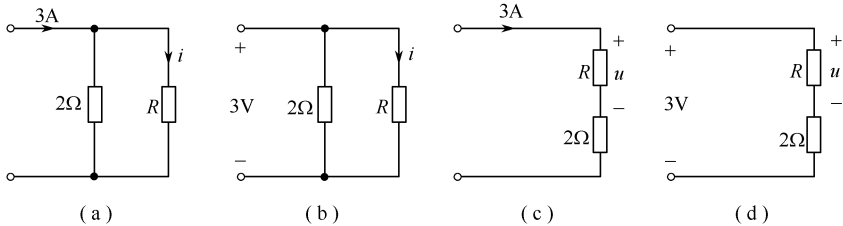


题图 1-31

1-34 求题图 1-32 所示各电路中的电阻 R 。

(1) 图(a)电路中 $i = \frac{2}{3} \text{ A}$; (2) 图(b)电路中 $i = \frac{2}{3} \text{ A}$;

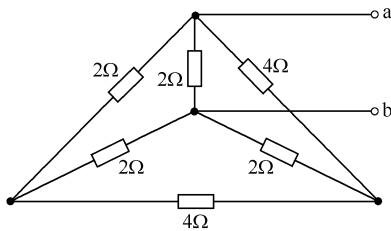
(3) 图(c)电路中 $u = \frac{2}{3} \text{ V}$; (4) 图(d)电路中 $u = \frac{2}{3} \text{ V}$ 。



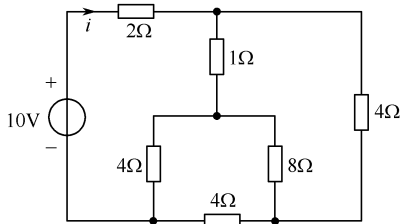
题图 1-32

1-35 求题图 1-33 所示电路 ab 端口的等效电阻。

1-36 求题图 1-34 所示电路中的电流 i 。



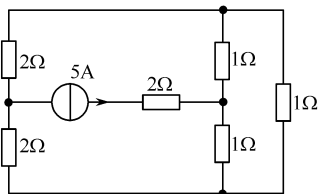
题图 1-33



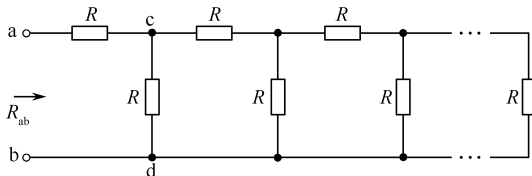
题图 1-34

1-37 求题图 1-35 所示电路中电流源提供的功率。

1-38 题图 1-36 所示电路为具有无限多级的梯形电路,求输入端 a 、 b 之间的等效电阻 R_{ab} 。



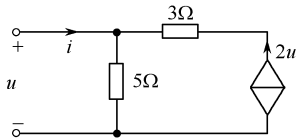
题图 1-35



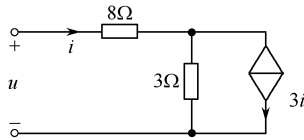
题图 1-36

1-39 求题图 1-37 所示单口网络的输入电阻。

1-40 求题图 1-38 所示单口网络的输入电阻。



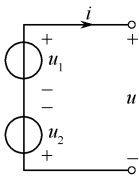
题图 1-37



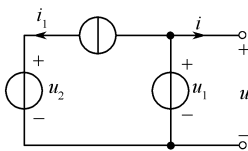
题图 1-38

1-41 写出题图 1-39 所示各电路的端口电压 u 与各独立电源参数的关系。

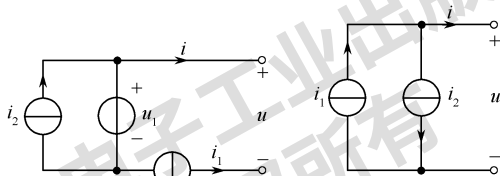
1-42 写出题图 1-40 所示各电路的端口电流 i 与各独立电源参数的关系。



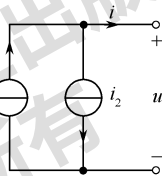
(a)



(b)



(a)

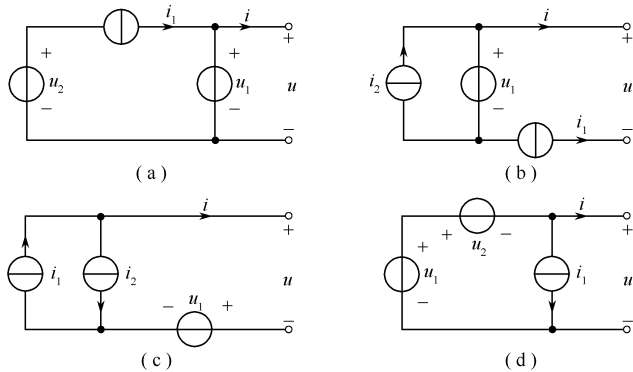


(b)

题图 1-39

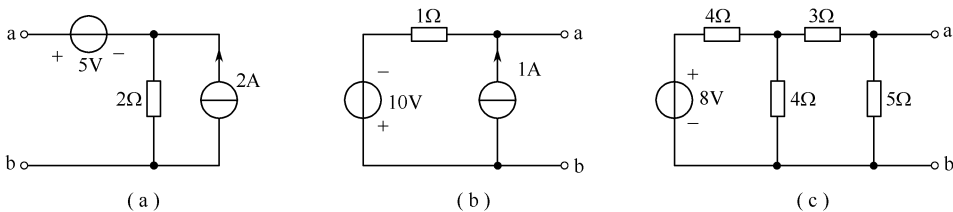
题图 1-40

1-43 将题图 1-41 所示各电路化为最简形式。



题图 1-41

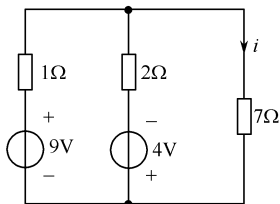
1-44 画出题图 1-42 所示各电路的最简形式。



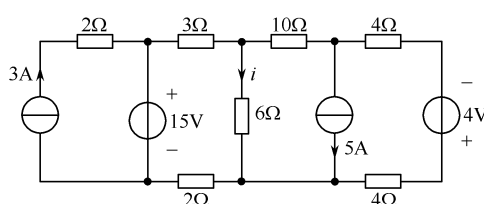
题图 1-42

1-45 利用电源等效变换求题图 1-43 所示电路中的电流 i 。

1-46 利用电源等效变换求题图 1-44 所示电路中的电流 i 。



题图 1-43

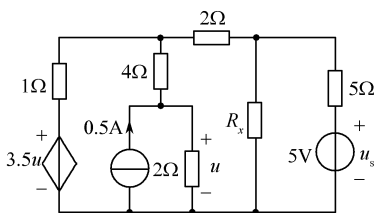


题图 1-44

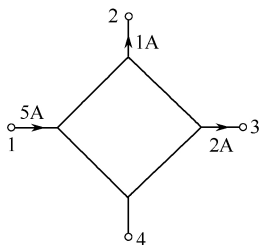
1-47 如题图 1-45 所示电路,欲使电压源 u_s 中的电流为零,试确定电阻 R_x 的值。

1-48 已知题图 1-46 所示四端网络的外部电压分别为 $U_{12}=5V, U_{32}=10V, U_{41}=-15V$, 1、2、3 端的电流分别如图中所示,试求此四端网络吸收的功率。

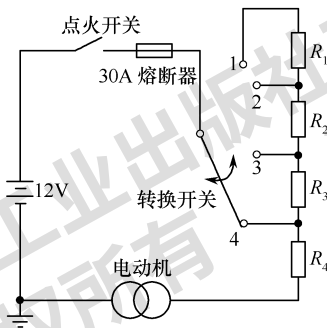
1-49 题图 1-47 所示为散热风扇的转速控制电路原理图。假设开关置于 1 时的风扇转速为 v_1 ,现要求开关置于 2、3、4 时风扇的转速分别为 $3v_1, 4v_1$ 和 $5v_1$,且假设风扇转速与通过电动机的电流成比例,电动机看作电阻元件,电阻为 $R_L=100\Omega$ 。试确定电阻 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的标称电阻值。



题图 1-45



题图 1-46



题图 1-47