

第1章 直流电路

本章介绍电路模型的概念，电路的基本物理量——电压、电流及功率；结合直流电路介绍电阻元件、独立电源、受控电源及它们的伏安关系 VAR，重点讨论电路的基本定律、基本定理和基本分析方法，为后续的专业课程学习奠定基础。

1.1 电路及电路模型

现实生活中遇到的各种实际电路都是由一些电子元件按一定方式相互连接而组成的。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件组成的。不同电路可以实现不同的应用任务，其电路的具体形式多种多样，所使用的元件也是多种多样的，往往一个实际元件呈现多种物理性质。比如一个用导线绕成的线圈，当通有电流时不仅会产生磁通，形成磁场，而且还有能量的消耗。此外，线圈的匝与匝之间还存在分布电容，因此该元件不仅具有电感性质，还有电阻性质及电容性质。

由此可见，若以实际电路为研究对象，必然使所有实际元件的电磁性能交织在一起，处理起来较为复杂。为了便于对电路进行分析计算，在一定条件下，需要对实际元件加以近似、理想化，即用一个表征其主要物理特性的理想元件来代替它，这种理想化的元件称为理想电路元件，简称为电路元件。它是实际元件的模型，任何实际电路元件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表征。如小灯泡，只用一个电阻元件 R_L 作为它的模型，而干电池则要由电压源和电阻元件串联构成。由于理想元件没有体积，特性集中在空间的一点上，故又称为集总参数元件，由集总参数元件组成的电路称集总电路，它是实际电路的模型。电路理论分析的是电路模型，而不是实际电路。

电路的一个作用是实现电能的传输与转换，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；另一个作用是传递和处理信号，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、电压和电动势来实现的，所以在分析电路之前，首先讨论电路的几个物理量。

1.2 电路变量

1.2.1 电流和电流的参考方向

电流是由电荷有规则地定向运动而形成的。其大小用电流强度表示：把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，用符号 $i(t)$ 表示，其数学表达式为

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

电流方向规定为正电荷运动的方向。如果电流大小及方向都不随时间变化，则称恒定电流，简称直流（简称为 DC），用大写的斜体字母 I 表示。如果 $i(t)$ 是时间 t 的函数，称为时变电流，简称为 i ，时变电流的大小和方向都随时间做周期性变化，故称为交流电流（简称为 AC）。

在国际单位制（SI）中，电荷的单位是库仑（C），时间的单位是秒（s），电流的单位是安培（A），则有 $1(A) = \frac{1(C)}{1(s)}$ 。常用的电流单位还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）。安培（A）是电流的基

本单位, 换算关系为: $1\text{kA} = 10^3\text{A}$, $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

在对电路进行分析时, 如果电路较为复杂, 一般预先无法知道电流的实际方向, 因此先设定一个方向, 称为参考方向。电流的参考方向可任意选择, 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。

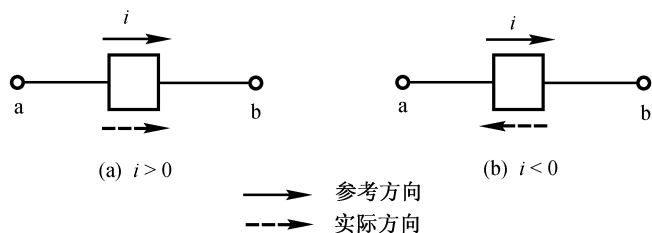


图 1.2.1 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

图 1.2.1(a)中, 电流的参考方向与实际方向一致, $i > 0$ 电流为正值; 图 1.2.1(b)中, 电流的参考方向与实际方向相反, $i < 0$ 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, 一般不标实际方向, 电流的实际

方向是用电流的参考方向 and 该电流数值的正、负号一起加以判断的。

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

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.2)$$

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。

规定电路中两点之间由高电位指向低电位, 即电位降方向为电压的实际方向。电压的方向用+、- 极性表示, 也可用箭头来表示, 还可以用双下标来表示, 如图 1.2.2 所示。 u_{ab} 表示 a 为正极性, b 为负极性, 而 u_{ba} 正好相反, 并且有 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。同电流一样, 对一个较复杂的电路, 电压实际方向也是预先无法知道的, 因此也要假设一个参考方向。当电压的实际方向与参考方向一致时, 电压值为正, 反之为负。

如果电压大小和极性都不随时间而变化, 则称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, 用小写的斜体字母 u 表示。

在国际单位制 (SI) 中, 能量的单位是焦耳 (J), 电荷的单位是库仑 (C), 电压的单位是伏特 (V), 则有 $1(\text{V}) = \frac{1(\text{J})}{1(\text{C})}$ 。此外, 电压的常用单位还有千伏 (kV) 和毫伏 (mV), 且有 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ 。

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, 而电压和电流都有各自的参考方向, 这样就有关联参考方向 (简称关联方向) 和非关联参考方向 (简称非关联方向) 两种。图 1.2.3(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极性一致, 称关联参考方向, 图 1.2.3(b)正好相反, 称非关联参考方向。在对电路进行分析时应尽可能选用关联参考方向。

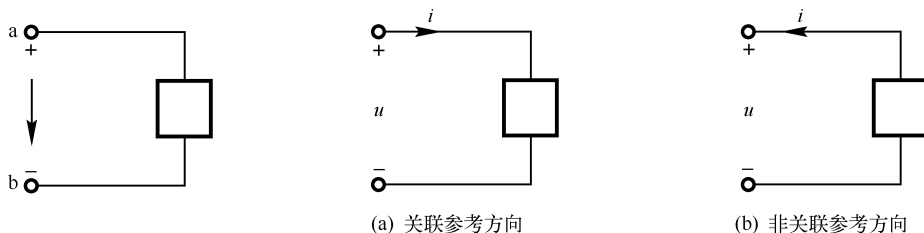


图 1.2.2 电压的方向

图 1.2.3 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极性中的任何一种就可以了。

1.2.3 功率和能量

除电压和电流外，功率和能量的计算在电路分析中也是很重要的。

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，即

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

$$\text{由于 } i(t) = \frac{dq}{dt}, \quad u(t) = \frac{dw}{dq}, \quad \text{所以} \quad p(t) = u(t)i(t) \quad (1.2.4)$$

$$\text{在直流电路中} \quad P = UI \quad (1.2.5)$$

把能量传输的方向定为功率方向，当电压、电流为关联参考方向时，计算功率时采用式（1.2.4）；若为非关联参考方向时，则 $p(t) = -u(t)i(t)$ 。计算结果中，若 $p(t)$ 为正值，表明该元件吸收电功率；若 $p(t)$ 为负值，表明该元件提供功率或产生功率。元件在电路中提供电功率，起到电源作用的称为电源；吸收电功率，起到负载作用的称为负载。一般来说：

吸收功率 = -产生功率

在国际单位制（SI）中，能量的单位是焦耳（J），时间的单位是秒（s），功率的单位是瓦特（W），则有 $1(W) = \frac{1(J)}{1(s)}$ 。功率的常用单位还有毫瓦（mW）、千瓦（kW）和兆瓦（MW），且有 $1mW = 10^{-3}W$ ， $1kW = 10^3W$ ， $1MW = 10^6W$ 。

$$\text{根据式 (1.2.3) 可求得能量} \quad w(t) = \int_{-\infty}^t P(\lambda)d\lambda \quad (1.2.6)$$

在 $t_1 \sim t_2$ 时间内，元件的能量变化为 $\int_{t_1}^{t_2} P(\lambda)d\lambda$ 。

【例 1.2.1】 图 1.2.4 所示电路由 6 个元件组成，已知 $U_1 = 2V$ ， $U_2 = 3V$ ， $U_3 = 5V$ ， $U_4 = -3V$ ， $U_5 = U_6 = 2V$ ， $I_1 = 2A$ ， $I_2 = 1A$ ， $I_3 = -3A$ ， $I_4 = -2A$ ， $I_5 = -1A$ ；求每个元件的功率，并指出哪些是电源，哪些是负载。

解： $P_1 = U_1 I_1 = 2 \times 2 = 4(W)$ （吸收）

$$P_2 = U_2 I_1 = 3 \times 2 = 6(W) \quad (\text{吸收})$$

$$P_3 = U_3 I_2 = 5 \times 1 = 5(W) \quad (\text{吸收})$$

$$P_4 = -U_4 I_3 = -(-3) \times (-3) = -9(W) \quad (\text{产生})$$

$$P_5 = U_5 I_4 = 2 \times (-2) = -4(W) \quad (\text{产生})$$

$$P_6 = U_6 I_5 = 2 \times (-1) = -2(W) \quad (\text{产生})$$

所以，元件 1、2 和 3 是负载，4、5 和 6 是电源，而且 $P_1 + P_2 + P_3 = -(P_4 + P_5 + P_6)$ ，即所有元件提供的功率与吸收的功率相等。

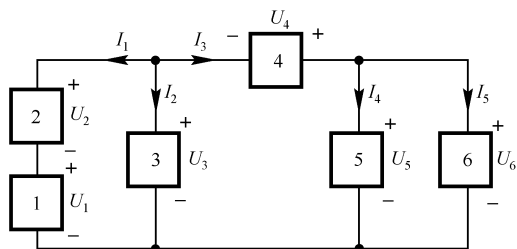


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

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，电阻元件是从实际电阻器中抽象出来的模型。线性电阻元件在电压与电流参考方向关联时，如图 1.3.1(a)所示，其两端的电压和电流的关系服从欧姆定律，即有

$$u = R i \quad (1.3.1)$$

式中， R 是常数，称为电阻，单位为欧姆（ Ω ）。常用的电阻单位还有千欧（ $k\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）。

换算关系为 $1k\Omega = 10^3\Omega$ ， $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。

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 $u = -Ri$ 。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标，电流取为横坐标，可绘出 $i-u$ 平面上的曲线，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。

电阻元件还可由另一个参数电导表示，电导 $G=1/R$ ，单位为西门子，符号为 S。用电导表征线性电阻元件时，欧姆定律为

$$i = Gu \quad (1.3.2)$$

从线性电阻元件特性曲线可以看出，任一时刻电阻的电压（或电流）由同一时刻的电流（或电压）所决定。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。对于任意一个二端元件，只要电压和电流之间存在代数关系，就是无记忆元件。

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。当电阻元件短路时，无论电流为何值，其上电压恒等于零，如图 1.3.1(d) 所示。

如果电阻不是常数，其值随电压或电流的大小或方向而改变，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) 所示为二极管的电路符号。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，所以不能笼统地说它是多少欧姆的电阻。

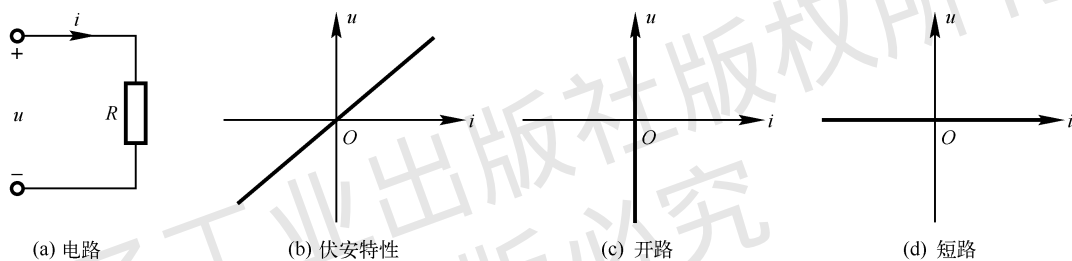


图 1.3.1 电阻元件及其伏安特性

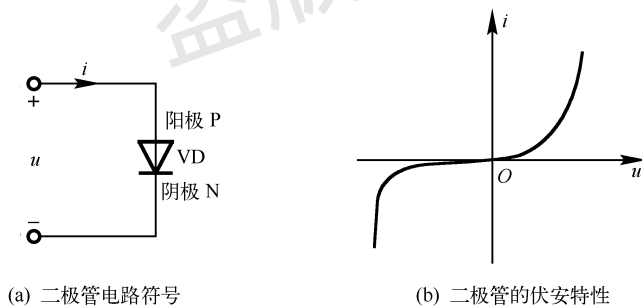


图 1.3.2 二极管

电阻元件除了线性和非线性外，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。

线性电阻元件在电压和电流的关联参考方向下

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1.3.3)$$

若 R 和 G 是正实常数，则功率 p 为正值，说明电阻元件消耗能量、吸收功率。

电阻器在电路中常用作电压调整、电流调整和作为负载电阻，电阻器的主要参数包括：电阻值、允许偏差、额定功率等。

(1) 标称阻值和容许误差

标称阻值是指电阻器上标出的名义阻值。而实际上，阻值往往与标称阻值有一定的偏差，这个偏差与标称阻值的百分比称为容许误差，简称容差，容差越小，电阻器精度越高，国家标准规定普通电

阻器的容差有 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 三个等级。商用电阻元件的标称阻值是按下列标准给出的：容差为 $\pm 20\%$ 的廉价电阻在 $0\sim 10\Omega$ 之间分为6挡，每挡大约相差1.5倍，即前一挡阻值乘以1.5，取两位有效数字就是后一挡阻值，一共有6种阻值：1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8；阻值在 $10\sim 100\Omega$ 之间也分6挡，其值在上述阻值上乘以10，依次类推，每升一级，加一个0，就得到 $\pm 20\%$ 容差的整个系列的标称阻值。

容差为 $\pm 10\%$ 的电阻每挡大约相差1.222倍，共有12种阻值：1.0、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2。

容差为 $\pm 5\%$ 的电阻每挡大约相差1.105倍，有24种阻值：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、7.6、8.2、9.1。

(2) 额定功率

额定功率是指一个电阻可以耗散的最大功率。小型电阻器的外形尺寸及体积反映了其额定功率大小，通常额定功率有 $1/20\text{W}$ 、 $1/16\text{W}$ 、 $1/8\text{W}$ 、 $1/4\text{W}$ 、 $1/2\text{W}$ 、 1W 、 2W 、 5W 、 10W 等。常用的色环电阻的功率是 0.25W ，比 0.25W 大的是 0.5W ，底色是蓝色的。 1W 以上的底色是灰色的，功率小于 1W 的没有标注，大于 1W 的很多类型的电阻上会直接标注功率。

1.4 电压源与电流源

独立电源是二端器件，有电压源和电流源两种，每种又分为理想电源和实际电源。

1.4.1 理想电压源

理想电压源（简称电压源），是从实际电源抽象出来的一种模型。它是一个二端元件，其两端总能保持一定的电压而与流过的电流无关。如果端电压是常数（固定不变），称为直流电压源，其符号如图1.4.1(a)和(b)所示，其伏安特性如图1.4.1(c)所示。

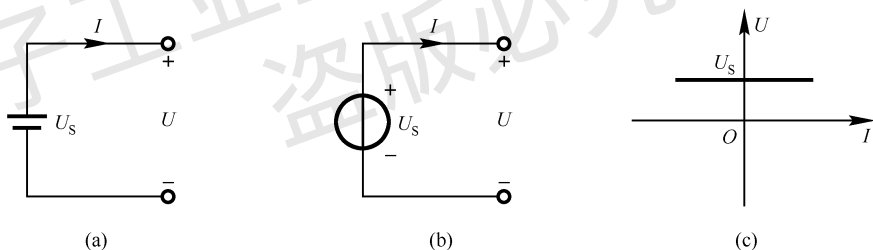


图 1.4.1 直流电压源符号及伏安特性

理想电压源的电压是定值，由它本身确定，而流过它的电流则是任意值，由与之连接的外电路决定。

1.4.2 理想电流源

理想电流源（简称电流源），也是从实际电源抽象出来的一种模型。它是一个二端元件，从其端钮上总能提供一定的电流而与端电压无关。如果电流为常数，称为直流电流源，其符号如图1.4.2(a)所示，伏安特性如图1.4.2(b)所示。

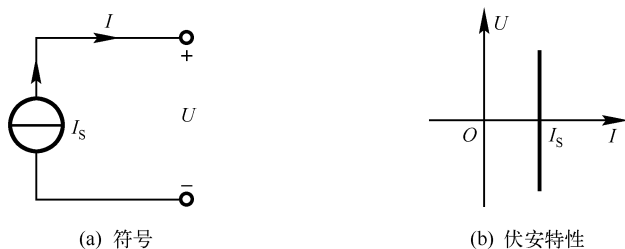


图 1.4.2 直流电流源

理想电流源的电流是定值，由它本身确定，而它两端的电压则是任意值，由与之连接的外电路决定。

1.4.3 实际电源的两个电路模型

实际电源有干电池、蓄电池、光电池、发电机等。实际电源的电路模型由产生电能的电源元件和消耗电能的电阻元件组合而成。

1. 实际电压源

实际电压源模型如图 1.4.3(a)所示，其电阻 R_S 称为电源的内电阻，一般是比较小的。实际电压源伏安特性如图 1.4.3(b)所示。图中虚线 1 是理想电压源的伏安特性，虚线 2 是电阻的伏安特性，显然虚线 1 减去虚线 2 等于实线部分，它是实际电压源的伏安特性，故实际电压源的伏安关系（VAR）为

$$U = U_S - R_S I \quad (1.4.1)$$

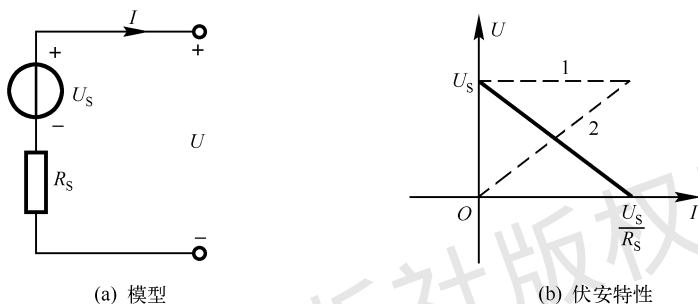


图 1.4.3 实际电压源

从图 1.4.3 可见，实际电压源的外特性是工作电压 U 随着电流的增加而下降，也就是说，实际电压源在向外提供电功率时，本身（在 R_S 上）也要消耗电功率，一个实际电压源的内阻越小，越接近理想电压源的特性。

当实际电压源接负载时，如图 1.4.4 所示。

根据负载情况的不同，可能会出现 3 种状态。

(1) 有载状态：此时 $U = IR_L$ ， $I = \frac{U_S}{R_S + R_L}$ ，若电路中电压、电流及功率的实际值等于额定值

（所谓的额定值，是挡制造厂商为保证电路正常工作，在电器的铭牌上或产品说明书上所规定的电压、电流或功率的值），电路工作在额定状态，即满载状态时，设备的容量可得到充分利用，当然实际电路不一定就工作在额定状态。

(2) 开路状态：此时 $R_L = \infty$ ， $I = 0$ ，即空载状态，开路时的电压用 U_{OC} 表示，开路电压最高， $U_{OC} = U_S$ 。

(3) 短路状态：此时 $R_L = 0$ ，短路时的电流用 I_{SC} 表示， $I_{SC} = \frac{U_S}{R_S}$ ，短路时电流最大。

【例 1.4.1】 在图 1.4.5 所示直流电路中，已知额定功率 $P = 60\text{W}$ 、额定电压 $U = 30\text{V}$ ，内阻 $R_S = 0.5\Omega$ ，负载 R_L 可调，试求：（1）在额定工作状态下的电流 I 及负载电阻 R_L ；（2）开路电压；（3）短路电流。

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

（2） $U_{OC} = U_S = U + IR_S = 30 + 2 \times 0.5 = 31(\text{V})$

（3） $I_{SC} = \frac{U_S}{R_S} = \frac{31}{0.5} = 62(\text{A})$

由此可见，本题中短路电流是额定电流的 31 倍。由于一般电压源内阻 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源。因此，电压源在实际使用时必须加短路保护。

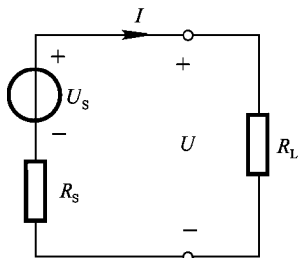


图 1.4.4 有载电压源电路

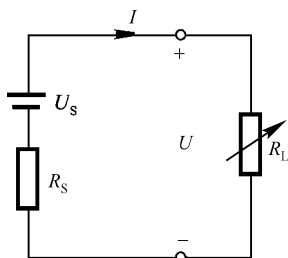


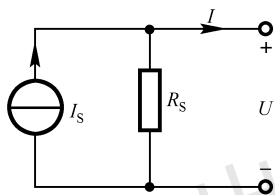
图 1.4.5 例 1.4.1 电路

2. 实际电流源

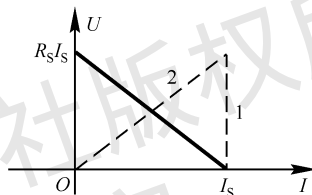
图 1.4.6(a)所示为实际电流源的符号，其中， R_s 称为电流源的内阻，一般比较大。

图 1.4.6(b)中虚线 1 是理想电流源的伏安特性，虚线 2 是电阻的伏安特性，显然虚线 1 减去虚线 2 等于实线部分，它是实际电流源的伏安特性。其伏安关系为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} \quad (1.4.2)$$



(a) 模型



(b) 伏安特性

图 1.4.6 实际电流源

【例 1.4.2】 计算如图 1.4.7 所示电路中电流 I 、电压 U 及理想电压源和理想电流源的功率。

解： 串联回路电流等于电流源电流，即 $I = 1\text{A}$

$$U = 2 \cdot I + 5 + 3 \cdot I = 10(\text{V})$$

由于电流源电流参考方向与电压参考方向非关联，故

$$P_{1A} = -1 \cdot U = -1 \times 10 = -10(\text{W}) \quad (\text{产生})$$

即电流源提供 10W 功率。

电压源功率 $P_{5V} = 5 \cdot I = 5 \times 1 = 5(\text{W})$ (吸收)

若求电源提供的功率，还可采用另一种方法，即当电流 I 与电压 U 为非关联参考方向时， $P = UI$ ，若为关联参考方向时 $P = -UI$ ，计算结果 $P > 0$ 为提供功率，而 $P < 0$ 为吸收功率。

电流源提供功率 $P_{1A} = 1 \cdot U = 1 \times 10 = 10(\text{W})$ ；电压源提供的功率 $P_{5V} = -5 \cdot I = -5 \times 1 = -5(\text{W})$ ，所以电压源吸收功率 5W。

可见，电压源和电流源在电路中不一定都提供能量，有可能吸收能量，起负载的作用。

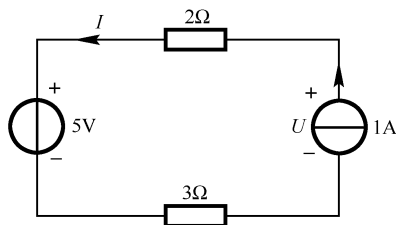


图 1.4.7 例 1.4.2 电路

1.5 基尔霍夫定律

当元件相互连接组成具有一定几何结构形式的电路后，电路中便出现了节点和回路，与一个节点相连接的各支路，其电流必须受到基尔霍夫第一定律即电流定律（简称为 KCL）的约束，而与一个回路相连接的各支路，其电压必须受到基尔霍夫第二定律即电压定律（简称为 KVL）的约束。为了说明基尔霍夫定律，先介绍支路、节点、回路和网孔等几个电路术语。

支路: 每一个两端元件视为一个支路, 流经元件的电流和元件两端的电压分别称为支路电流和支路电压。

节点: 两条或是两条以上支路的连接点称为节点。

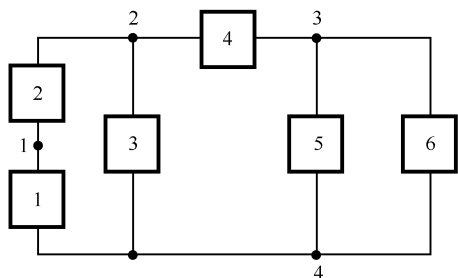


图 1.5.1 支路、节点和回路

图 1.5.1 中有 6 条支路, 4 个节点。为方便起见, 也可以把支路定义为多个元件串联组成的一段电路, 图中元件 1 与元件 2 串联形成一条支路, 而元件 1 与元件 2 之间的连接点也不再作为节点, 这样定义后, 支路数和节点数都将减少, 有助于电路的分析和计算。

回路: 电路中任一闭合路径称为回路, 图中有 6 个回路。

网孔: 在回路内部不另含支路的回路称为网孔, 该图有 3 个网孔。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律: 在集总参数电路中, 在任一时刻, 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

$$\sum I = 0 \quad (1.5.1)$$

或者说, 对任何一个节点, 流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

KCL 说明了电路中节点处各个支路电流之间的约束关系。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总是等于零, 或者说流入闭合面的电流等于流出该闭合面的电流。

【例 1.5.1】 求如图 1.5.2 所示电路的电流 I_1 、 I_2 和 I_3 。

解: 设流入节点 a 的电流为正, 则节点 a 的 KCL 方程为

$$4 - 3 - I_1 = 0, \text{ 即 } I_1 = 1(\text{A})$$

同理, 节点 c 的 KCL 方程为

$$I_2 + 2 - 4 = 0, \text{ 即 } I_2 = 2(\text{A})$$

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, 还可以通过由 R_3 、 R_4 和 R_5 构成的闭合面 S 求 I_3 。在如图 1.5.2 所示的闭合面 S 中, 若将它看做是一个闭合表面缩小后的一个点, 流入 S 的电流有 3A 和 I_3 , 流出电流有 2A, 则 $I_3 + 3 = 2$, 故 $I_3 = -1(\text{A})$ 。

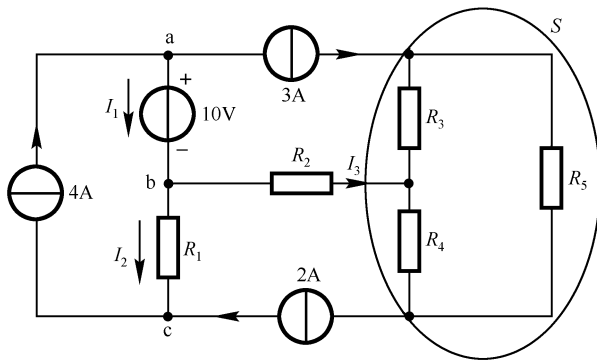


图 1.5.2 例 1.5.1 电路

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律：在集总参数电路中，在任一时刻，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

$$\sum U = 0 \quad (1.5.2)$$

应用式 (1.5.2) 时要注意，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。回路绕行方向可取顺时针方向，也可取逆时针方向。

基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合回路，也可以把它推广应用于不闭合回路或某一条支路，其电路中任意两点之间的电压等于以这两点作为端点的任意路径上各个电压之和。

【例 1.5.2】 如图 1.5.3 所示电路，求 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

$$U_1 + 2 - 5 = 0$$

求得 $U_1 = 3(\text{V})$ 。

对网孔 2 列 KVL 方程，有

$$U_2 - 3 - 2 = 0$$

求得 $U_2 = 5(\text{V})$ 。

【例 1.5.3】 求图 1.5.4 所示电路的 U_{ab} 和 U_{ac} 。

解：列 KVL 方程，有

$$5 \cdot I + 3 \cdot I + 2 - 6 = 0$$

求得

$$I = \frac{6-2}{5+3} = 0.5(\text{A})$$

$$U_{ac} = 3 \cdot I + 2 = 3.5(\text{V})$$

由于 $U_{ac} = U_{ab} - 4$ ，求得 $U_{ab} = 3.5 + 4 = 7.5(\text{V})$ 。

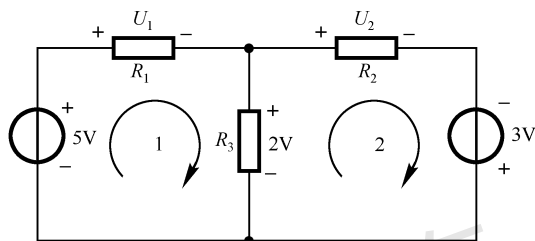


图 1.5.3 例 1.5.2 电路

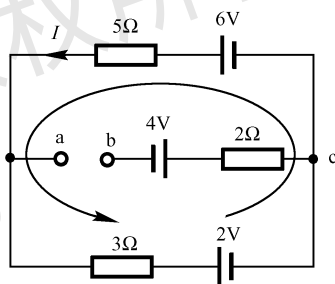


图 1.5.4 例 1.5.3 电路

1.6 单口网络及等效

单口网络是指只有一个端口与外部电路连接的电路。所谓端口，是一对端钮，流入一个端钮的电流总等于流出另一个端钮的电流。单口网络又称为二端网络。

单口网络在端口上的电压 U 和电流 I 的关系称为单口网络的伏安特性。如图 1.6.1 所示，两个单口网络 N_1 和 N_2 ，在相同的电压 U 和电流 I 参考方向下，

如果 N_1 的伏安特性和 N_2 的伏安特性完全相同，或在 U - I 平面上的 VAR 特性曲线完全重叠，则称这两个单口网络是等效的， N_1 和 N_2 互为等效电路。

注意：等效是指对外电路等效，用 N_1 或用 N_2 连接，端口上的电压 U 和电流 I 对外电路的作用相同，并不一定要求 N_1 和 N_2 的内部结构完全一样。



图 1.6.1 单口网络

1.6.1 电阻的串并联及等效

图 1.6.2(a)所示为两个电阻的串联，显然是一个单口网络，其伏安特性为

$$U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I \quad (1.6.1)$$

图 1.6.2(b)所示为一个电阻的单口网络，其伏安特性为

$$U = RI \quad (1.6.2)$$

显然，当 $R = R_1 + R_2$ 时，式 (1.6.1)

和式 (1.6.2) 相同，称图 1.6.2(b)所示电路是图 1.6.2(a)所示电路的等效电路。根据

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}, \text{ 可得} \quad \begin{cases} U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{cases} \quad (1.6.3)$$

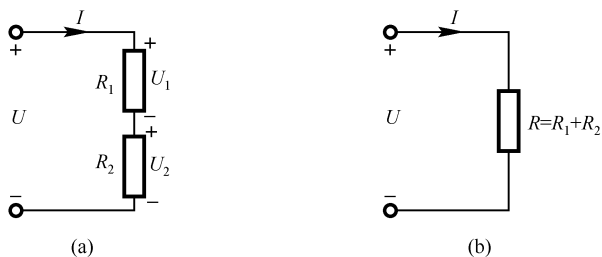


图 1.6.2 两电阻的串联及等效

式 (1.6.3) 称为分压公式。由式 (1.6.3) 可知，串联电阻中的任一电阻的电压等于总电压乘以该电阻对总电阻的比值。显然电阻值大的分配到的电压也高。对于 n 个电阻的串联，伏安特性为

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) I = RI \quad (1.6.4)$$

所以串联电路的等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1.6.5)$$

第 k 个电阻的电压为

$$U_k = \frac{R_k}{\sum_{i=1}^n R_i} U \quad (1.6.6)$$

串联电阻电路起分压的作用，而并联电阻电路则起分流作用。图 1.6.3(a)所示为两个电阻的并联，两个并联电阻的总电流为 I ，两端的电压为 U ，则由 KCL 及欧姆定律得

$$I = I_1 + I_2 = G_1 U + G_2 U = (G_1 + G_2) U = GU$$

$$\text{根据 } U = \frac{I}{G_1 + G_2}, \text{ 可得} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I \\ I_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I \end{cases} \quad (1.6.7)$$

若用电阻表示，则

$$\begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases} \quad (1.6.8)$$

对于正电阻，如 $R_1 > R_2$ ，则 $I_1 < I_2$ ，表明电流在流动时主要沿着电阻小的路径流动。

若有 n 个电导并联，如图 1.6.3(b)所示，有

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) U = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n) U = GU$$

其等效电路如图 1.6.3(c)所示，并联电路的等效电阻为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1.6.9)$$

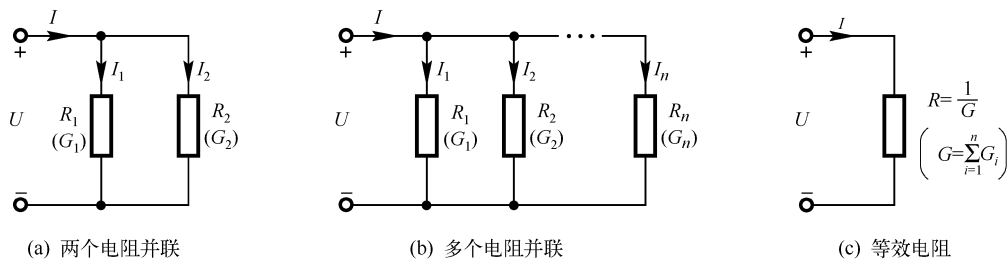


图 1.6.3 电阻的并联及等效

若两个电阻并联，则有

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.6.10)$$

并联电路的等效电导为

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n \quad (1.6.11)$$

第 k 个电导的电流为

$$I_k = \frac{G_k}{\sum_{i=1}^n G_i} I \quad (1.6.12)$$

由此可知：并联电导中流过任一电导的电流等于总电流乘以该电导对总电导的比值。显然电导值大的分配到的电流也大。

【例 1.6.1】 求图 1.6.4 中的各支路电流及电压 U 。

解： 将图 1.6.4 的电阻进行串并联等效，其等效电阻为

$$R = 3 + \frac{(2+4) \times (2+1)}{2+4+2+1} = 5(\Omega)$$

则电流

$$I = \frac{5}{R} = 1(\text{A})$$

利用分流公式得

$$I_1 = \frac{2+1}{2+4+2+1} \times I = \frac{1}{3}(\text{A})$$

根据 KCL 得

$$I_2 = I - I_1 = \frac{2}{3}(\text{A})$$

$$U = 4 \times I_1 - 1 \times I_2 = \frac{4}{3} - \frac{2}{3} = \frac{2}{3}(\text{V})$$

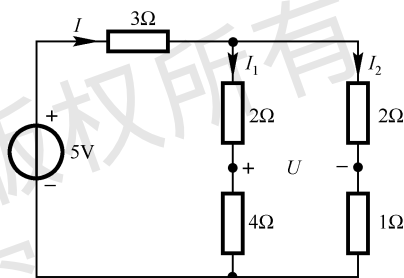


图 1.6.4 例 1.6.1 电路

1.6.2 理想电源的等效变换

1. 电压源的串联及等效

电压源串联支路可以用一个等效的电压源替代。图 1.6.5(a) 为 n 个电压源的串联，可以用图 1.6.5(b) 中的单个电压源等效，这个等效电压源的端口电压为

$$u_S = u_{S1} + u_{S2} + \cdots + u_{Sn} = \sum_{k=1}^n u_{Sk} \quad (1.6.13)$$

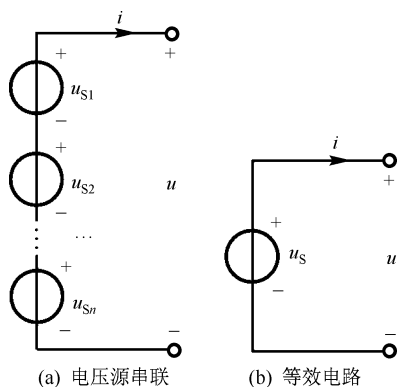
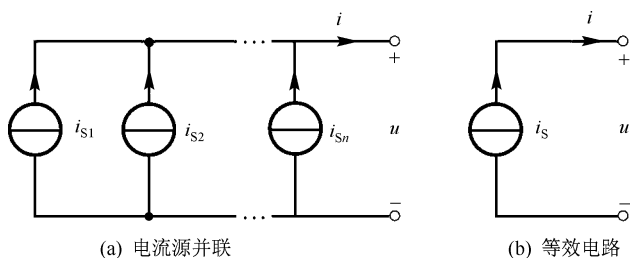
如果 u_{Sk} 的参考方向与图 1.6.5(b) 中的等效电压源 u_S 的参考方向一致，则式 (1.6.13) 中 u_{Sk} 的前面取 “+” 号，不一致时取 “-” 号。

2. 电流源的并联及等效

电流源并联支路可以用一个等效的电流源替代。图 1.6.6(a) 为 n 个电流源的并联，可以用图 1.6.6(b) 中的单个电流源等效，这个等效电流源的电流为

$$i_S = i_{S1} + i_{S2} + \cdots + i_{Sn} = \sum_{k=1}^n i_{Sk} \quad (1.6.14)$$

如果 i_{sk} 的参考方向与图 1.6.6(b) 中的等效电流源 i_s 的参考方向一致, 则式 (1.6.14) 中 i_{sk} 的前面取“+”号, 反之取“-”号。

图 1.6.5 n 个电压源的串联及其等效图 1.6.6 n 个电流源并联及其等效

3. 电压源与元件的并联

图 1.6.7(a) 所示为电压源与元件的并联结构, VAR 为 $U = U_s$, 与图 1.6.7(b) 所示的 VAR 相同, 即图 1.6.7(a) 与图 1.6.7(b) 所示电路等效。

可见, 电压源与元件并联后等效成电压源本身, 如果并联的元件也是电压源, 要求两电压源的极性和大小必须相同, 否则不允许并联。

4. 电流源与元件的串联

图 1.6.8(a) 所示的 VAR 为 $I = I_s$, 与图 1.6.8(b) 所示的 VAR 相同, 即图 1.6.8(a) 与图 1.6.8(b) 所示电路等效。

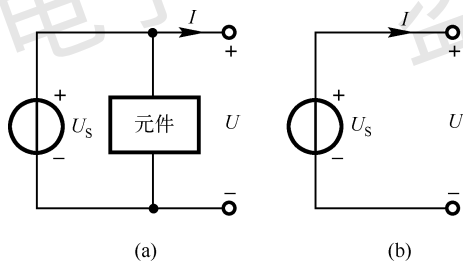


图 1.6.7 电压源与元件的并联及等效

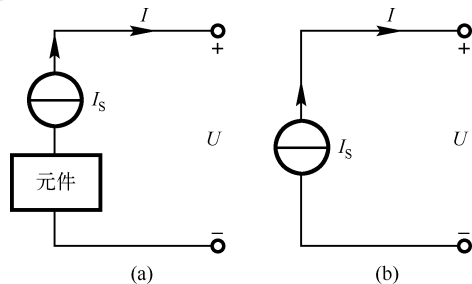


图 1.6.8 电流源与元件的串联及等效

图 1.6.8 表明, 电流源与元件的串联等效成电流源本身, 如果串联的元件也是电流源, 则要求两个电流源的方向和大小必须完全相同, 否则不允许串联。

1.6.3 实际电压源和实际电流源的等效

图 1.6.9(a) 所示为实际电压源模型, 图 1.6.9(b) 所示为实际电流源模型, 两图中的 U 和 I 参考方向相同。

图 1.6.9(a) 的 VAR 为 $U = U_s - RI$

图 1.6.9(b) 的 VAR 为 $U = R' \cdot (I_s - I) = R'I_s - R'I$

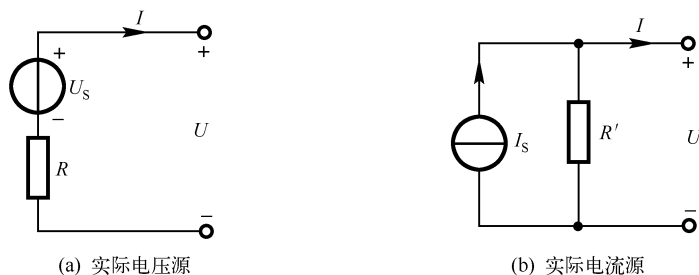


图 1.6.9 电源的等效变换

比较两图的 VAR 可以看出, 当满足 $R = R'$, 且 $U_S = R'I_S$ 或 $I_S = \frac{U_S}{R'}$ 时, 两个 VAR 完全相同, 即这两个电路是等效的, 这就是所谓的电源间的等效变换。在等效变换时, 不但要注意数值关系, 还要注意电压源的极性和电流源的方向, 应始终保持电压源的正极性和电流源的箭头方向一致。

【例 1.6.2】 将图 1.6.10(a)所示电路简化为最简单形式。

解: 最简单形式是指仅由一个电压源串联一个电阻或由一个电流源并联一个电阻所组成的电路。将原电路逐次化简的过程如图 1.6.10(b)、(c)、(d)、(e)所示。

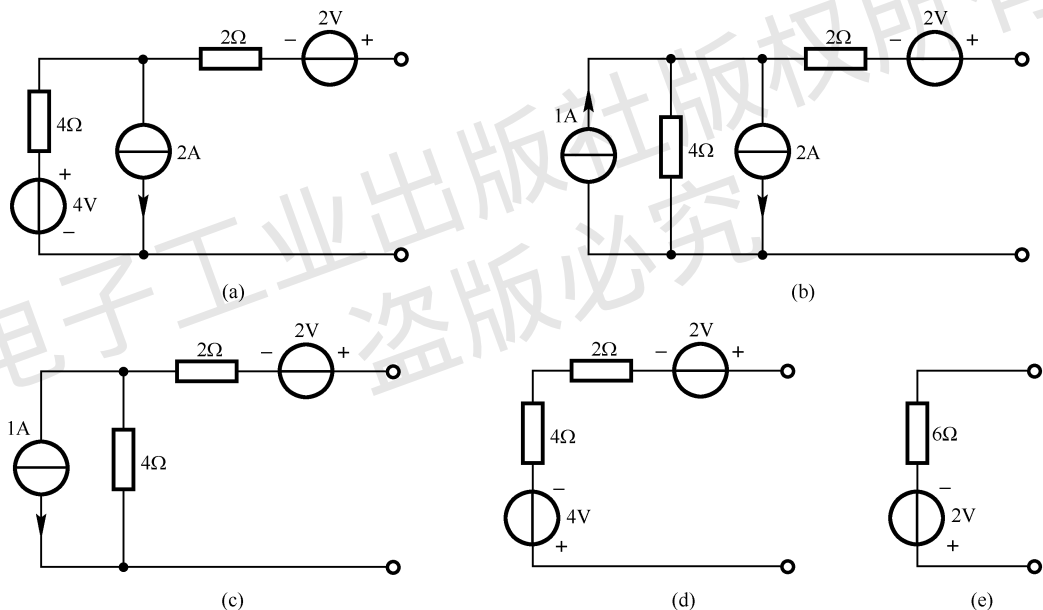


图 1.6.10 等效电路过程

在进行等效电源变换时, 如遇到两支路并联时, 可以将电压源串联一个电阻等效成电流源并联一个电阻, 如图 1.6.10(a)到图 1.6.10(b)的转换, 因为在并联电路中电流源可直接进行加减运算。同理, 在遇到串联支路时, 可将电流源并联一个电阻等效成电压源串联一个电阻, 如图 1.6.10(c)到图 1.6.10(d)的转换, 因为在串联电路中电压源可直接进行加减运算。

【例 1.6.3】 将图 1.6.11(a)所示电路简化为最简单形式。

解: 由于电压源与元件并联后等效为电压源, 而电流源与元件串联后等效为电流源, 故图 1.6.11(a)可转换成图 1.6.11(b), 再根据串联支路等效成实际电压源, 而并联支路等效成实际电流源的原则, 进一步化简电路, 最后得到图 1.6.11(e)所示的最简单形式。

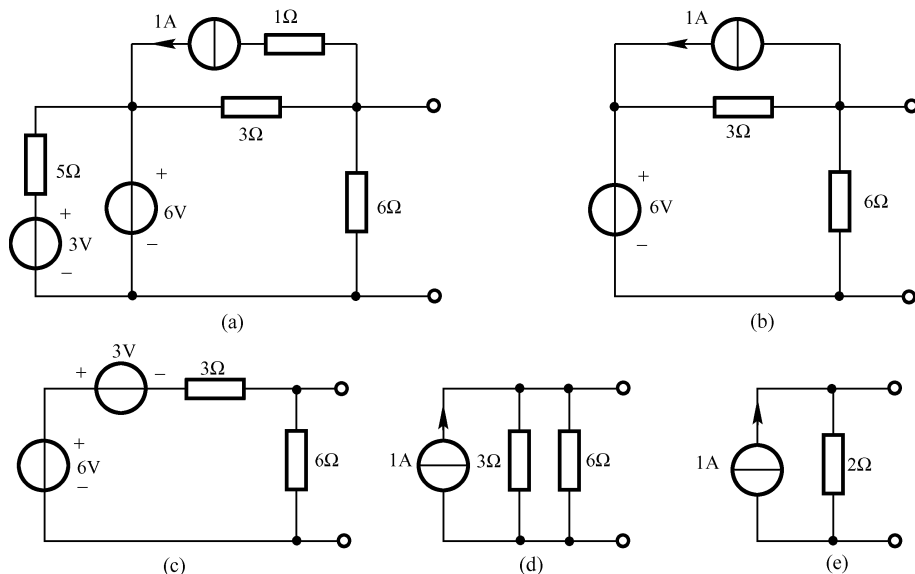


图 1.6.11 等效电路过程

若图 1.6.11(a)中的 6V 理想电压源改为 3V 电压时, 则图 1.6.11(c)中的两个电压源电压大小相等, 方向相反, 此时电压为零相当于短路, 而图 1.6.11(d)中的电流源为零相当于开路, 因此最终的等效电路仅为 2Ω 电阻支路。

1.7 电位的概念与计算

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, 并将其规定为零。当参考点电位改变时, 各点电位随之改变, 但两点之间的电位差不会改变。谈到电位, 电路中必有一个参考点, 也只能有一个参考点。通常在电力电路中, 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。

利用电位可以将电路简化。如在图 1.7.1(a)中, $V_a = U_{S1} = +15V$, $V_c = U_{S2} = -5V$, 将图 1.7.1(a)中的电源符号省去标出电位值 (大小和极性), 如图 1.7.1(b)所示, 该电路是电子电路的习惯画法。

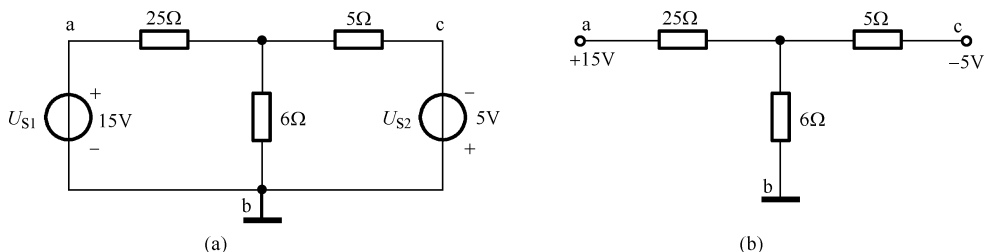


图 1.7.1 将电压源用电位表示

【例 1.7.1】 求图 1.7.2 电路中的 a 、 b 和 c 各点电位。

$$\text{解: } I = \frac{5-15}{2+3} = -2(\text{A})$$

$$V_a = 5 - 3 \times (-2) + 3 = 14(\text{V}), \quad V_b = 15 + 3 = 18(\text{V}), \quad V_c = 3(\text{V})$$

【例 1.7.2】图 1.7.3 所示电路，当开关 S 断开和闭合时，求 a 点的电位 V_a 。

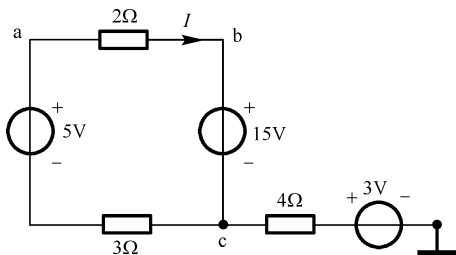


图 1.7.2 例 1.7.1 电路

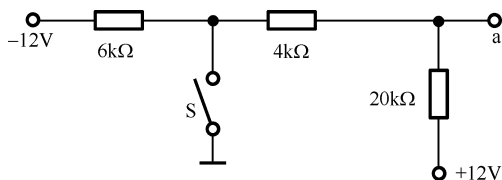


图 1.7.3 例 1.7.2 电路

解：(1) S 断开时，电路为单一支路，3 个电阻流过同一电流

$$I = \frac{12 - (-12)}{6 + 4 + 20} = 0.8(\text{mA})$$

流过 $20\text{k}\Omega$ 电阻的电流方向为由下向上，有 $12 - V_a = I \times 20$ ，所以

$$V_a = 12 - 0.8 \times 20 = -4(\text{V})$$

(2) S 闭合时， $4\text{k}\Omega$ 电阻和 $20\text{k}\Omega$ 电阻流过同样的电流，a 点电位等于 $4\text{k}\Omega$ 电阻上的电压。

$$V_a = \frac{12}{4 + 20} \times 4 = 2(\text{V})$$

1.8 支路电流分析法

以支路电流为求解变量的分析方法称为支路电流法。假设电路具有 n 个节点、 b 条支路，则应根据基尔霍夫定律列出 b 个独立方程式。其整个分析过程如下：

- (1) 标出每个支路电流以及参考方向；
- (2) 根据 KCL 列出 $n-1$ 个独立的节点电流方程；
- (3) 选定所有独立回路并指定每个回路的绕行方向，再根据 KVL 列出 $b-(n-1)$ 个回路电压方程；
- (4) 求解 (2)、(3) 所列的联立方程组，得各支路电流；
- (5) 根据需要，利用元件 VAR 可求得各元件电压及功率。

下面以图 1.8.1 为例进行分析。

电路中有 6 条支路、4 个节点，根据基尔霍夫电流定律可列出任意 3 个独立的 KCL 方程，本题列出节点 1、2、3 的 KCL 方程为

$$\text{节点 1:} \quad I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{节点 2:} \quad I_2 - I_4 - I_5 = 0$$

$$\text{节点 3:} \quad I_3 + I_5 - I_6 = 0$$

应用基尔霍夫电压定律列出 3 个独立的 KVL 方程为

$$\text{回路 1:} \quad R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 - U_{S1} = 0$$

$$\text{回路 2:} \quad R_3 I_3 - R_5 I_5 - R_2 I_2 = 0$$

$$\text{回路 3:} \quad -R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_6 I_6 + U_{S2} = 0$$

【例 1.8.1】用支路电流法求图 1.8.2 中各支路电流及电流源功率。

解：与图 1.8.1 比较，图 1.8.2 所示电路只是 R_4 电阻支路改为电流源支路，由于电流源支路的电流为已知电流，故 6 条支路中只需列出 5 个独立方程就可以了。其中独立的节点方程数仍为 3 个，另外两个为回路方程。在列回路方程时应避开电流源支路，因为电流源两端的电压由与之连接的外电路决定，所以无法直接写出来。

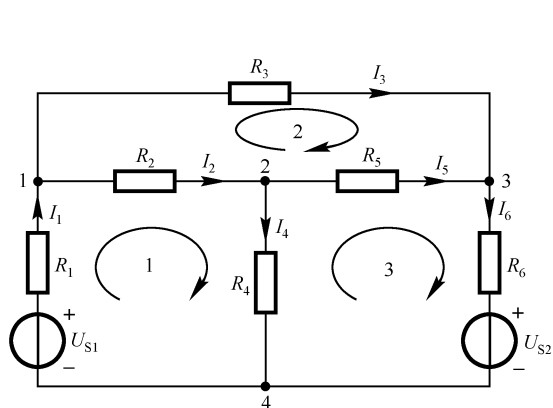


图 1.8.1 支路电流分析

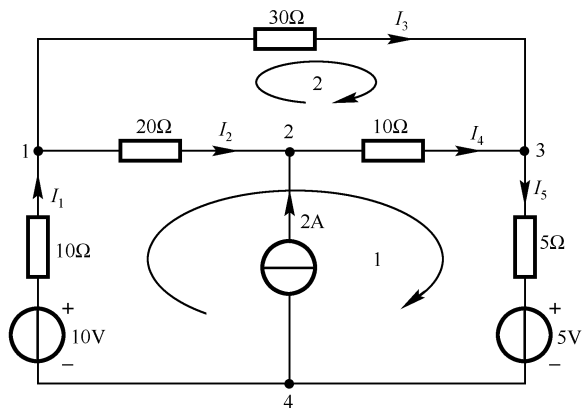


图 1.8.2 例 1.8.1 电路

其 KCL 方程为

$$\text{节点 1: } I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{节点 2: } I_2 + 2 - I_4 = 0$$

$$\text{节点 3: } I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

由 KVL 列写的回路方程为

$$\text{回路 1: } 10 \cdot I_1 + 20 \cdot I_2 + 10 \cdot I_4 + 5 \cdot I_5 + 5 - 10 = 0$$

$$\text{回路 2: } 30 \cdot I_3 - 10 \cdot I_4 - 20 \cdot I_2 = 0$$

联立解得

$$I_1 = -\frac{1}{2}(\text{A}), I_2 = -\frac{7}{12}(\text{A}), I_3 = \frac{1}{12}(\text{A}), I_4 = \frac{17}{12}(\text{A}), I_5 = \frac{3}{2}(\text{A})$$

电流源支路两端电压 \$U\$ 取上正下负, 则

$$U = 10 \cdot I_4 + 5 \cdot I_5 + 5 = \frac{80}{3}(\text{V})$$

电流源功率为 \$P = -2 \cdot U = -53.3(\text{W})\$, 即电流源提供功率是 53.3W。

支路电流法是最基本的方法, 因为它是以 KCL、KVL 为依据, 但当支路数目较大时, 求解方程数较多, 计算量也比较大, 因而在此基础上引出了节点分析法。

1.9 节点分析法

如果在电路中任选一个节点作为参考节点 (设此节点电位为零), 则其他节点到参考节点的电压降称为该节点的节点电压。以节点电压为未知量, 将各支路电流用节点电压表示, 利用 KCL 列出独立的电流方程进行求解, 此种方法称节点分析法。

图 1.9.1 所示电路共有 4 个节点。以节点 4 为参考节点。

对节点 1、2、3 列 KCL 方程有

$$\begin{cases} I_{S1} - I_1 - I_2 - I_{S2} = 0 \\ I_1 - I_3 - I_4 = 0 \\ I_{S2} + I_2 + I_4 - I_5 = 0 \end{cases} \quad (1.9.1)$$

根据元件 VAR, 又可得

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_1}, I_2 = \frac{V_1 - V_3}{R_2}, I_3 = \frac{V_2}{R_3}, I_4 = \frac{V_2 - V_3}{R_4}, I_5 = \frac{V_3}{R_5}$$

将电流表达式代入式 (1.9.1), 整理后可得

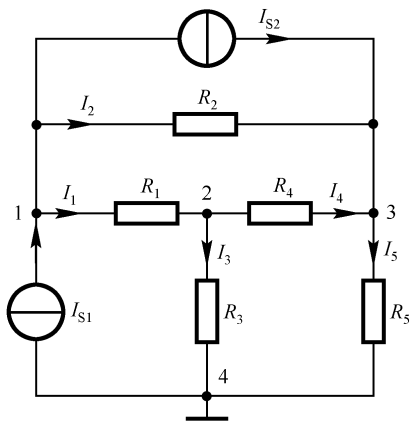


图 1.9.1 节点分析法电路

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)V_1 - \frac{1}{R_1}V_2 - \frac{1}{R_2}V_3 = I_{S1} - I_{S2} \\ -\frac{1}{R_1}V_1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)V_2 - \frac{1}{R_4}V_3 = 0 \\ -\frac{1}{R_2}V_1 - \frac{1}{R_4}V_2 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right)V_3 = I_{S2} \end{cases} \quad (1.9.2)$$

式(1.9.2)是以节点电压为变量所列的方程,故称节点电压方程。

一个具有 n 个节点的电路,由于假定了一个参考点,并设该点电位为零,所以未知的节点数只有 $n-1$ 个。将这 $n-1$ 个节点作为独立节点,恰好可以列出 $n-1$ 个独立的节点方程。节点分析法与支路电流法比较,可节省回路电压方程数。这对于节点少、支路多的电路来说是非常适用的。

【例 1.9.1】 用节点分析法求图 1.9.2(a)中各节点电压。

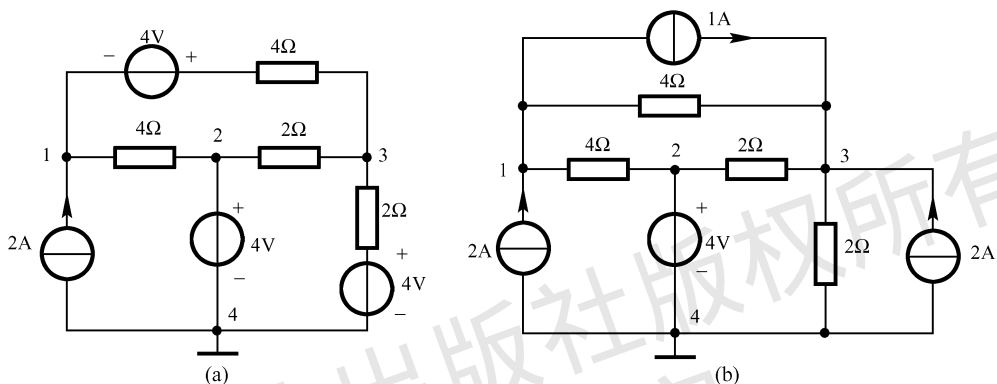


图 1.9.2 例 1.9.1 电路

解: 为便于列出节点电压方程,可将图(a)中的实际电压源等效成图(b)中的实际电流源后再列方程,由于本题中节点 2 电压为已知电压,故只需列节点 1 和节点 3 的 KCL 方程即可。

$$\text{节点 1: } \frac{V_1 - 4}{4} + \frac{V_1 - V_3}{4} + 1 - 2 = 0$$

$$\text{节点 3: } \frac{V_3 - V_1}{4} + \frac{V_3 - 4}{2} + \frac{V_3}{2} - 1 - 2 = 0$$

$$\text{整理得 } \begin{cases} 2V_1 - V_3 = 8 \\ -V_1 + 5V_3 = 20 \end{cases}$$

$$\text{解得 } V_1 = \frac{20}{3}(\text{V}), V_3 = \frac{16}{3}(\text{V})$$

说明:电路中含有独立电压源支路时,尽可能选电压源一端作为参考点,则另一端电位为已知电位,可节省方程数。本题中选 4 为参考点,则 $V_2 = 4\text{V}$ 。

【例 1.9.2】 求图 1.9.3(a)所示电路的 a 点电位。

解: 图 1.9.3(a)是电子线路的习惯画法,标出了电位的大小和极性,省去了电压源符号,但通常列节点方程时,常转换成以电压源形式表示的电路,如图 1.9.3(b)所示,其节

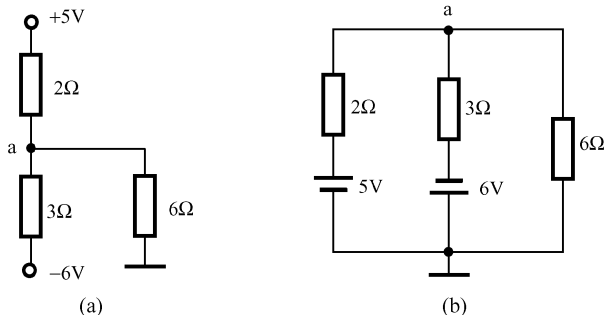


图 1.9.3 例 1.9.2 电路

点 a 的 KCL 方程为

$$\frac{V_a - 5}{2} + \frac{V_a + 6}{3} + \frac{V_a}{6} = 0$$

整理得

$$6V_a = 3$$

解得

$$V_a = 0.5(\text{V})$$

1.10 叠加定理

叠加定理又称叠加原理, 是电路分析中的一个重要定理, 它反映了线性电路的一个基本性质, 即叠加性。叠加定理表述为: 在线性电路中, 由多个独立电源共同作用在某一支路中产生的电压(或电流)等于电路中每个独立电源单独作用时在该支路产生的电压(或电流)的代数和。当某一独立源单独作用时, 其余的独立源置为零, 即独立电压源短路, 独立电流源开路, 而其余元件应保留。

图 1.10.1(a)所示电路中, 含有两个独立电源, 当两个电源共同作用时, 可将实际电流源等效成实际电压源, 如图 1.10.1(b)所示。

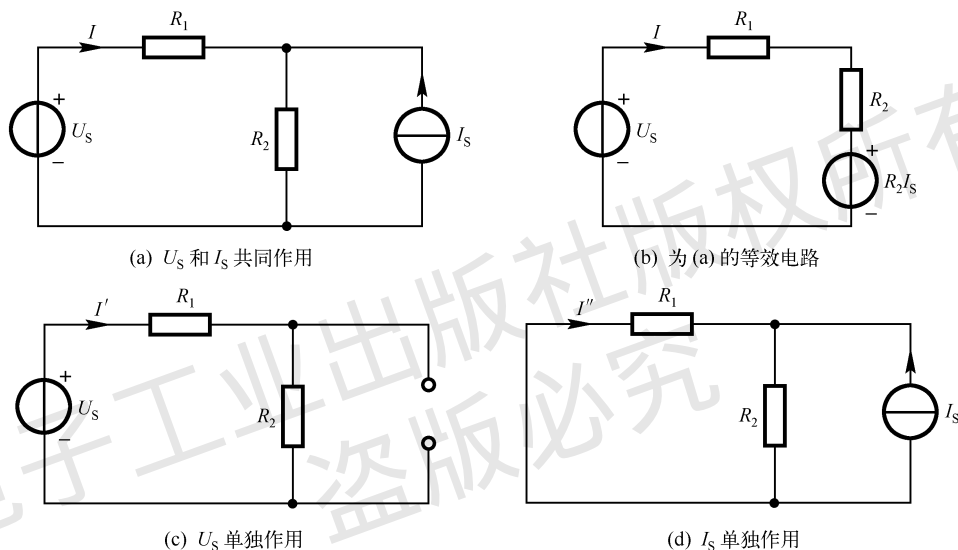


图 1.10.1 叠加原理的验证

由图 1.10.1(b)所示电路, 可得

$$I = \frac{U_s - R_2 I_s}{R_1 + R_2} = \frac{U_s}{R_1 + R_2} - \frac{R_2 I_s}{R_1 + R_2} \quad (1.10.1)$$

当 U_s 单独工作时, 如图 1.10.1(c)所示

$$I' = \frac{U_s}{R_1 + R_2} \quad (1.10.2)$$

当 I_s 单独工作时, 如图 1.10.1(d)所示

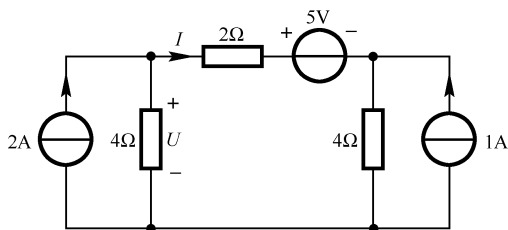
$$I'' = -\frac{R_2 I_s}{R_1 + R_2} \quad (1.10.3)$$

比较式 (1.10.1)、式 (1.10.2) 和式 (1.10.3) 可得 $I = I' + I''$ 。即图 1.10.1(a)所示电路中支路电流 I 等于图 1.10.1(c)所示电路中电流 I' 和图 1.10.1(d)所示电路中电流 I'' 的代数和。这一结论也适用于其他支路电流和电压的计算。

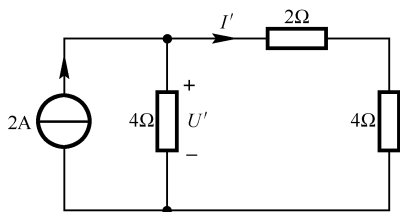
必须指出, 叠加原理只限于线性电路的电流和电压的计算, 不适用于功率的计算。因为功率不是电源电压或电流的一次函数。当电压、电流分量的方向与总量的方向一致时, 叠加取正, 相反时取负。

【例 1.10.1】 用叠加原理计算图 1.10.2(a)所示电路中的电流 I 、电压 U 及 2Ω 电阻消耗的功率。

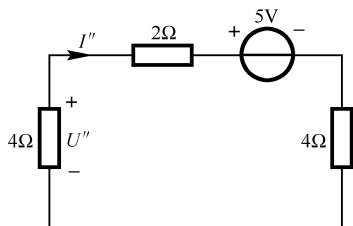
解：画出每个独立源单独作用时的分电路，如图 1.10.2(b)、(c)和(d)所示。



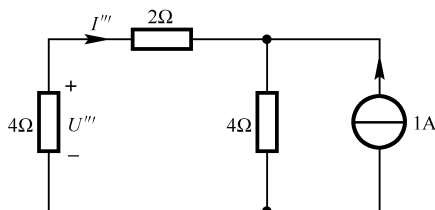
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.10.2 例 1.10.1 电路

(1) 2A 电流源单独工作时，如图 1.10.2(b)所示，利用分流公式求得

$$I' = \frac{4}{4+2+4} \times 2 = 0.8(\text{A})$$

$$U' = (2+4) \cdot I' = 4.8(\text{V})$$

(2) 5V 电压源单独工作时，如图 1.10.2(c)所示，此时

$$I'' = -\frac{5}{4+2+4} = -0.5(\text{A})$$

$$U'' = -4 \cdot I'' = 2(\text{V})$$

(3) 1A 电流源单独工作时，如图 1.10.2(d)所示，利用分流公式求得

$$I''' = -\frac{4}{4+2+4} \times 1 = -0.4(\text{A})$$

$$U''' = -4 \cdot I''' = 1.6(\text{V})$$

原电路 1.10.2(a)的电流和电压分别为 $I = I' + I'' + I''' = -0.1(\text{A})$

$$U = U' + U'' + U''' = 8.4(\text{V})$$

2Ω 电阻消耗的功率为 $P = 2 \cdot I^2 = 2 \times (-0.1)^2 = 0.02(\text{W})$

显然

$$P \neq 2 \cdot I'^2 + 2 \cdot I''^2 + 2 \cdot I'''^2$$

1.11 等效电源定理

在电路分析中，若只需求出复杂电路中某一特定支路的电流或电压时，应用等效电源定理计算比较方便。

这种方法是把待求支路从网络中拉出来，把它看做外电路，而把其余部分看做是线性有源单口网络。无论该网络多么复杂，对其外部电路来说，总可以用一个等效电源模型代替。当等效电源模型为实际电压源时，则对应的是戴维南定理；若等效电源模型为实际电流源时，则对应的是诺顿定理。

1.11.1 戴维南定理

戴维南定理：任意一个线性有源单口网络，如图 1.11.1(a)所示，就其对外电路的作用而言，总可以用一个理想电压源和一个电阻串联的支路来等效，如图 1.11.1(b)所示。

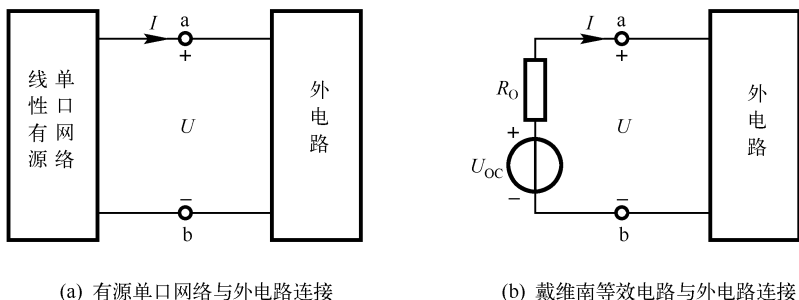


图 1.11.1 戴维南定理示意图

理想电压源的电压等于有源线性单口网络的开路电压 U_{OC} ，串联电阻 R_O 等于该网络中所有独立电源置零时的等效电阻。通常把电压源串联电阻支路称为戴维南等效电路。

根据图 1.11.1(b)所示电路的电压 U 与电流 I 的参考方向，可以得到端口电压-电流的伏安关系 (VAR) 为

$$U = U_{OC} - R_O I \quad (1.11.1)$$

【例 1.11.1】 电路如图 1.11.2(a)所示，试用戴维南定理求电压 U 。

解：应用戴维南定理求解时，先将待求支路（即 24Ω 电阻支路）看做是外电路，再求其余部分的戴维南等效电路。

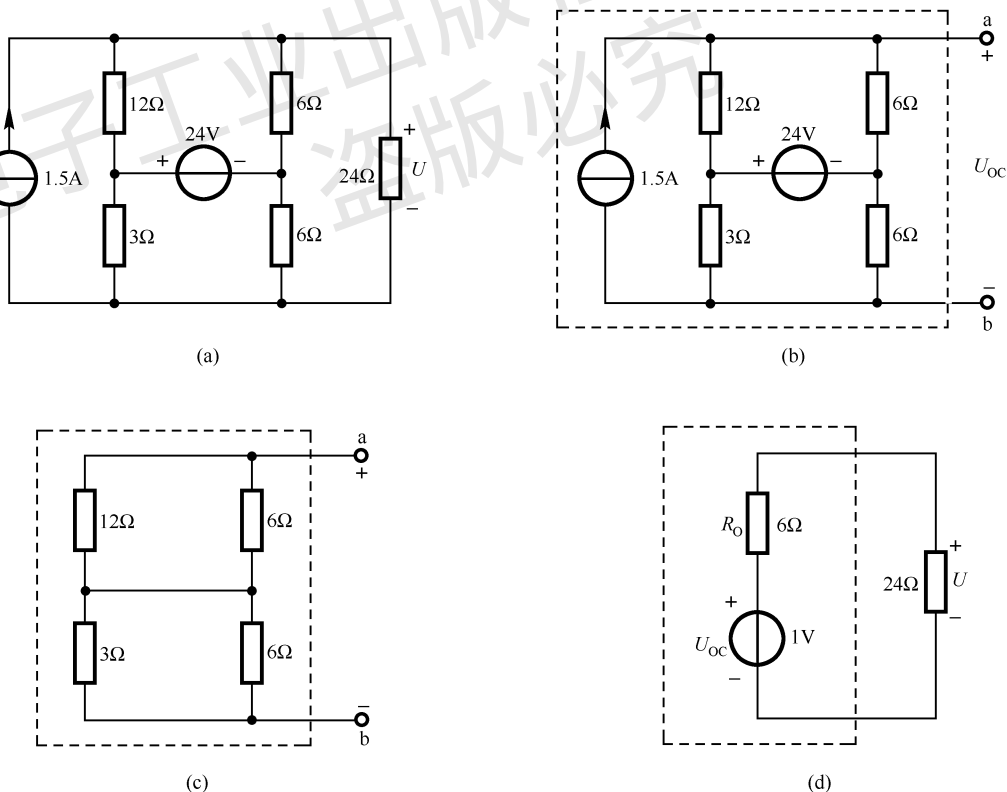


图 1.11.2 例题 1.11.1 的电路

(1) U_{OC} 的计算

为求得 U_{OC} ，应将待求支路（即 24Ω 电阻支路）断开，如图 1.11.2(b)所示，利用叠加原理求

U_{oc} 。

1.5A 电流源单独工作时，将 24V 电压源短路，得

$$U'_{oc} = 1.5 \times \left(\frac{12 \times 6}{12+6} + \frac{3 \times 6}{3+6} \right) = 9(V)$$

24V 电压源单独工作时，将 1.5A 电流源开路，由分压公式得

$$U''_{oc} = \frac{6}{12+6} \times 24 - \frac{6}{3+6} \times 24 = -8(V)$$

根据叠加定理可得

$$U_{oc} = U'_{oc} + U''_{oc} = 1(V)$$

(2) R_0 的计算

将图 1.11.2(b)所示含源单口网络中的两个独立电源置零，即电压源短路，电流源开路，如图 1.11.2(c)所示。

显然，a、b 两端的等效电阻为

$$R_0 = \frac{12 \times 6}{12+6} + \frac{3 \times 6}{3+6} = 6(\Omega)$$

(3) U 的计算

图 1.11.2(d)虚框内的电路即为图 1.11.2(b)所示电路的等效电路，由图 1.11.2(d)可求出

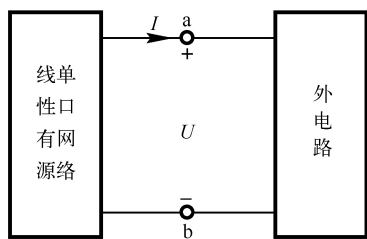
$$U = \frac{24}{R_0 + 24} \times U_{oc} = \frac{4}{5} = 0.8(V)$$

1.11.2 诺顿定理

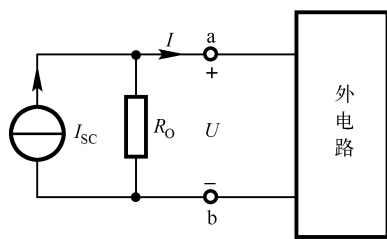
诺顿定理：任意一个有源线性单口网络，如图 1.11.3(a)所示，就其对外电路的作用而言，总可以用一个理想电流源和一个电阻 R_0 并联来等效，如图 1.11.3(b)所示。其中电流源的电流等于有源线性单口网络的短路电流 I_{sc} ，并联电阻 R_0 等于将此网络中所有独立电源置零后的等效电阻。通常把电流源与电阻的并联组合称为诺顿等效电路。

根据图 1.11.3(b)所示电路的电压 U 和电流 I 的参考方向，可列写端口 VAR 为

$$I = I_{sc} - \frac{U}{R_0} \quad (1.11.2)$$



(a) 有源单口网络与外电路连接



(b) 诺顿等效电路与外电路连接

图 1.11.3 诺顿定理示意图

在 1.6 节已讨论过，实际电压源可以等效为实际电流源。因此，含源单口网络的戴维南等效电路和诺顿等效电路对外电路来讲也是彼此可以等效的，所以诺顿定理中等效电阻的计算与求戴维南等效电阻的计算方法完全相同。由式 (1.11.1) 和式 (1.11.2) 容易导出

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \quad (1.11.3)$$

即等效电阻 R_0 可用开路电压除以短路电流得出。

【例 1.11.2】 利用诺顿定理求图 1.11.4(a)所示电路的电流 I 。

解：将图 1.11.4(a)中的电压源串联电阻等效成图 1.11.4(b)中的电流源并联电阻，为求短路电流，

将待求支路（即 3Ω 电阻支路）短接，如图 1.11.4(c) 所示，求得

$$I_{SC} = 3 - 1 = 2(\text{A})$$

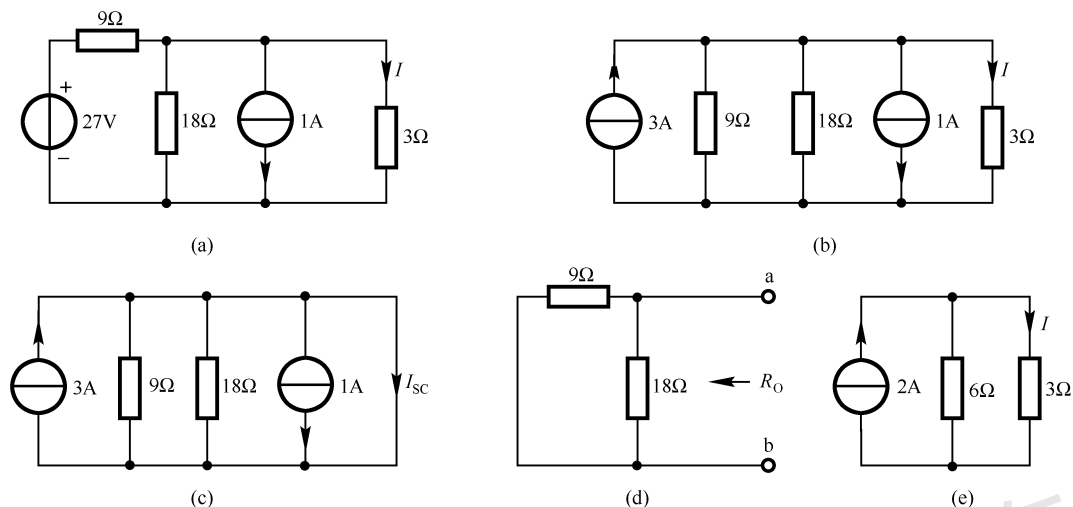


图 1.11.4 例 1.11.2 电路

为求等效电阻，将图 1.11.4(a) 中的待求支路断开，并将所有独立源置为零，如图 1.11.4(d) 所示，可得

$$R_O = \frac{9 \times 18}{9 + 18} = 6(\Omega)$$

画出诺顿等效电路，并与待求支路连接，如图 1.11.4(e) 所示，根据分流公式求得

$$I = \frac{6}{6+3} \times 2 = \frac{4}{3}(\text{A})$$

1.12 含受控源的电阻电路

1.12.1 受控电源

前面讲的电压源和电流源都是独立电源，这种电压源的电压和电流源的电流是不受外电路控制而独立存在的。然而电子电路中往往还有另外一种类型的电源，它的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或电流控制，这种电源称为受控源。为与独立源区别，受控源用菱形符号表示。借助于受控源能得到有源电子器件（如晶体三极管、运算放大器等）的电路模型。

根据受控源支路是开路还是短路，以及控制支路是电压源还是电流源，可以将受控源分成 4 种类型，分别为：电压控制电压源（VCVS, Voltage-Controlled Voltage Source）、电压控制电流源（VCCS, Voltage-Controlled Current Source）、电流控制电压源（CCVS, Current-Controlled Voltage Source）、电流控制电流源（CCCS, Current-Controlled Current Source），其理想受控源的模型如图 1.12.1 所示。

由图 1.12.1 可得 4 种受控源的伏安关系 VAR 为

$$U_2 = \mu U_1 \quad (\text{VCVS}) \quad (1.12.1)$$

$$I_2 = g U_1 \quad (\text{VCCS}) \quad (1.12.2)$$

$$U_2 = r I_1 \quad (\text{CCVS}) \quad (1.12.3)$$

$$I_2 = \alpha I_1 \quad (\text{CCCS}) \quad (1.12.4)$$

式中， μ 和 α 无量纲， g 使用电导单位 S ， r 使用电阻单位 Ω 。

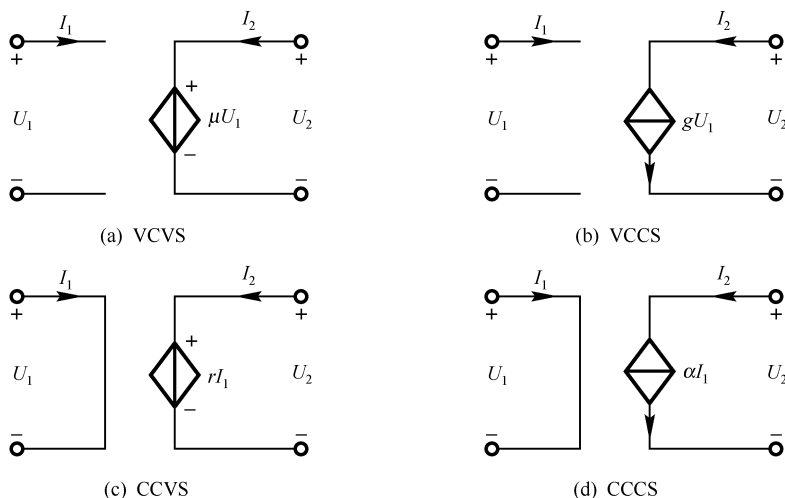


图 1.12.1 受控电源

如果控制系数 μ 、 g 、 r 、 α 是常数，则受控源是线性受控源。

【例 1.12.1】 求图 1.12.2 中各元件的功率。

解： 本题的受控源为电压控制电压源 (VCVS)

控制量为 $U = 2 \times 0.5 = 1(\text{V})$

电流源提供功率为 $P = 0.5 \times (U + 3U) = 2(\text{W})$

受控源吸收的功率为 $P = 3U \times 0.5 = 1.5(\text{W})$

电阻吸收的功率为 $P = 0.5^2 \times 2 = 0.5(\text{W})$

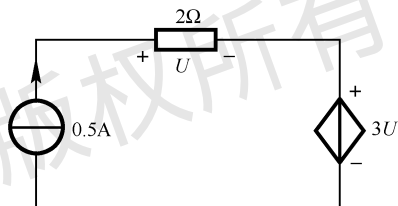


图 1.12.2 例 1.12.1 电路

1.12.2 含受控源电阻电路的分析

当电路中含受控源时，仍可采用前面介绍的支路电流法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理等进行分析，但要注意，由于受控源的输出要通过控制量来确定，因此，对含受控源电路进行等效时，应在电路中保留控制量支路。

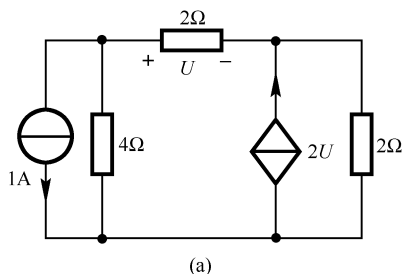
【例 1.12.2】 求图 1.12.3(a) 中的电压 U 。

解： 本例中可将受控源视为独立源来处理，但由于控制量 U 在 2Ω 电阻支路上，因此该控制支路予以保留。将图 1.12.3(a) 所示电路的实际电流源等效成图 1.12.3(b) 所示电路的实际电压源。

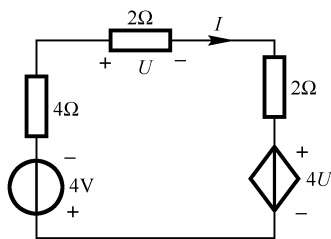
由图(b)列 KVL 方程

$$\begin{cases} 2 \cdot I + 2 \cdot I + 4U + 4 + 4 \cdot I = 0 \\ I = \frac{U}{2} \end{cases}$$

求得 $U = -0.5(\text{V})$ 。



(a)



(b)

图 1.12.3 例 1.12.2 电路

【例 1.12.3】 用支路电流法求图 1.12.4 中各元件的功率。

解: 电路仅 1 个独立节点, 其 KCL 方程为 (节点 1)

$$I_1 - I_2 + 3I_2 = 0$$

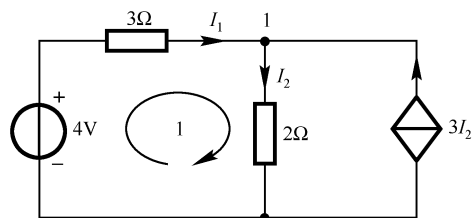


图 1.12.4 例 1.12.3 电路

KVL 方程为

$$3 \cdot I_1 + 2 \cdot I_2 = 4$$

联立求解得

$$\begin{cases} I_1 = 2(\text{A}) \\ I_2 = -1(\text{A}) \end{cases}$$

$$P_{4\text{V}} = -4 \cdot I_1 = -8(\text{W}) \quad (\text{产生}), \quad P_{\text{受控源}} = -3 \cdot I_2 \times 2 \cdot I_2 = -6(\text{W}) \quad (\text{产生})$$

$$P_{3\Omega} = 3 \cdot I_1^2 = 12(\text{W}) \quad (\text{吸收}), \quad P_{2\Omega} = 2 \cdot I_2^2 = 2(\text{W}) \quad (\text{吸收})$$

【例 1.12.4】 用叠加原理求图 1.12.5(a)所示电路的电流 I 、 I_1 及受控源吸收的功率。

解: 本例电路含有受控源, 运用叠加原理时要注意受控源不是独立源, 不可单独作用, 受控源应和电阻一样保留在电路中。当控制量发生改变时, 被控制量也要同时发生改变。

图 1.12.5(b)所示为 12V 电压源单独作用时的电路, 由 KVL 得

$$(4 + 6) \cdot I' + 2I' = 12$$

解得

$$I' = I'_1 = 1(\text{A})$$

图 1.12.5(c)所示为 1A 电流源单独作用时的电路, 由 KVL 及 KCL 得

$$\begin{cases} 4 \cdot I'' + 6 \cdot I''_1 + 2I'' = 0 \\ I'' = I''_1 + 1 \end{cases}$$

解联立方程得

$$I'' = 0.5(\text{A}), \quad I''_1 = -0.5(\text{A})$$

根据叠加定理可得

$$I = I' + I'' = 1.5(\text{A})$$

$$I_1 = I'_1 + I''_1 = 0.5(\text{A})$$

受控源吸收的功率

$$P = 2I \cdot I_1 = 1.5(\text{W})$$

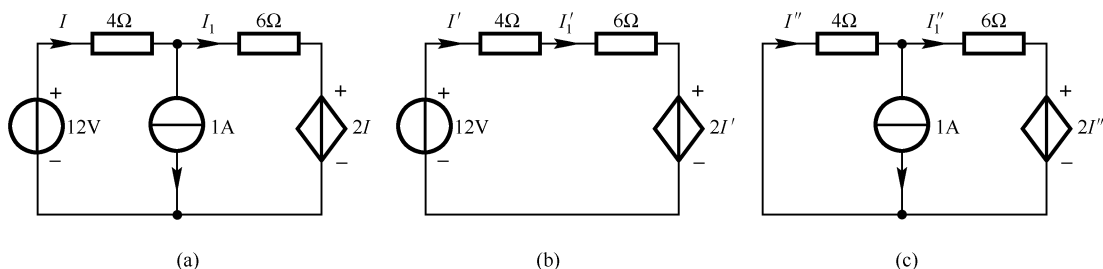


图 1.12.5 例 1.12.4 电路

【例 1.12.5】 图 1.12.6(a)所示含受控源电路中 $\beta = 40$, 求从负载电阻 R_L 端口看入的等效电阻 R_0 。

解: 用外施电源法求等效电阻 R_0 , 其方法是把所有独立源置为零, 受控源保留, 将负载电阻 R_L 断开, 在其端口外接一电压源 U , 如图 1.12.6(b)所示, 有 $I = \frac{U}{R_c} - (1 + \beta)I_b$, 而 $I_b =$

$$-\frac{U}{r_{be} + (R_b // R_s)}, \text{ 所以 } I = \frac{U}{R_e} + \frac{U}{r_{be} + (R_b // R_s)(1 + \beta)}$$

则等效电阻

$$R_o = \frac{U}{I} = R_e // \frac{r_{be} + (R_b // R_s)(1 + \beta)}{1 + \beta} = 5.6 // \frac{1.63 + (10 // 240)}{1 + 40} = 0.26(\text{k}\Omega)$$

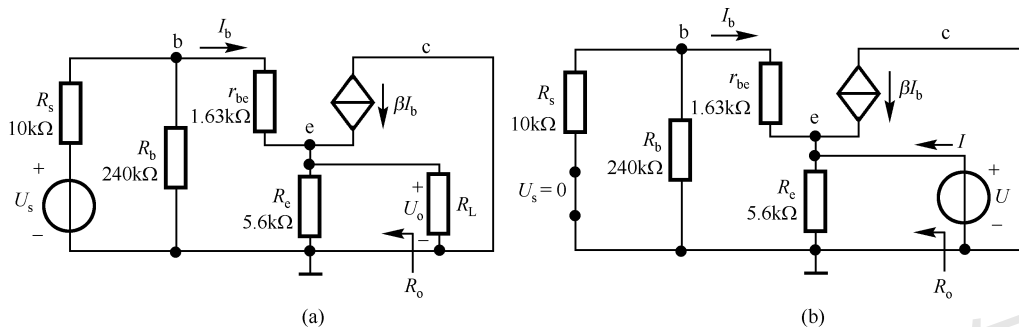


图 1.12.6 例 1.12.5 电路

注意：当网络中含受控源时，求等效电阻时，必须考虑受控源的作用，不能像处理独立源那样把受控源也用开路和短路代替，除非控制量为零。所以在一般情况下，对含受控源的等效电阻计算不能直接用简单的串并联求解。

【例 1.12.6】求图 1.12.7(a)所示电路 a、b 端口戴维南等效电路和诺顿等效电路。

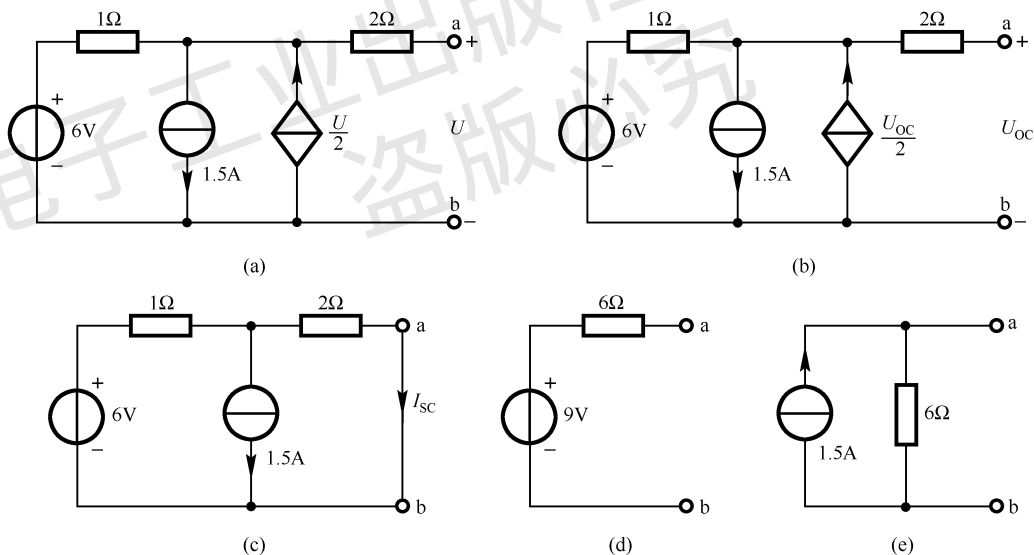


图 1.12.7 例 1.12.6 电路

解：由图 1.12.7(b)可求出单口网络的开路电压 U_{OC}

$$U_{OC} = 1 \times \left(\frac{U_{OC}}{2} - 1.5 \right) + 6$$

解得

$$U_{OC} = 9(\text{V})$$

求单口网络的短路电流 I_{SC} 时，将 a、b 端短路，显然 $U = 0$ ，受控电流源的电流 $\frac{U}{2} = 0$ ，故可将受控电流源看做开路，如图 1.12.7(c)所示，根据叠加定理可得

$$I_{SC} = \frac{6}{1+2} - \frac{1}{1+2} \times 1.5 = 1.5(\text{A})$$

则等效电阻

$$R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} = \frac{9}{1.5} = 6(\Omega)$$

根据已求出的 U_{OC} 、 I_{SC} 及 R_0 画出如图 1.12.7(d) 所示的戴维南等效电路及图 1.12.7(e) 所示的诺顿等效电路。

值得注意的是，戴维南定理和诺顿定理要求等效网络必须是线性的，而对外电路则无此要求。当电阻 $R=0$ 或 $R=\infty$ 时，只含有戴维南等效电路或诺顿等效电路。在此情况下，戴维南等效电路和诺顿等效电路是不能进行等效变换的。

通过以上分析可知：应用戴维南定理和诺顿定理的关键是如何正确求出含源单口网络的开路电压 U_{OC} 、短路电流 I_{SC} 及等效电阻 R_0 。其中，开路电压 U_{OC} 及短路电流 I_{SC} 的计算可以采用前面介绍的支路电流法、节点分析法、叠加定理等方法进行求解，而等效电阻 R_0 的计算有如下 3 种方法。

(1) 方法一：电阻串、并联法

对不含受控源的电路，将单口网络所有独立源置为零，利用电阻的串、并联等效关系，求出从 ab 端看进去的等效电阻 R_0 。

(2) 方法二：外施电源法

将所有独立源置为零，受控源保留，得无源二端网络，在 ab 端外加电压源 U ，写出 ab 端口的 VAR 关系式，对于该无源二端网络来说，在电压、电流参考方向关联时，可得等效电阻 $R_0 = \frac{U}{I}$ 。

(3) 方法三：开路短路法

对含受控源的电路，先求开路电压和短路电流，再根据 $R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$ 求等效电阻 R_0 。

1.13 基于 Multisim 仿真的设计与讨论

1.13.1 基尔霍夫定律的验证

构建如图 1.13.1 所示电路，对两个网孔验证 KVL，在节点 a 验证 KCL。

如图 1.13.2 所示，添加电压表测量 R1、R2、R3 两端的电压，添加测量探针测量节点 a 的 3 个支路电流。运行仿真，得到测量结果如图 1.13.2 所示。

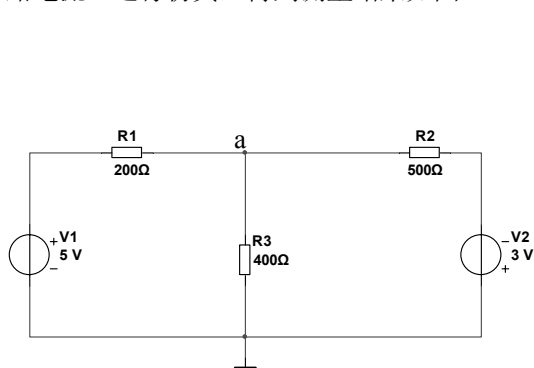


图 1.13.1 基尔霍夫定律验证电路图

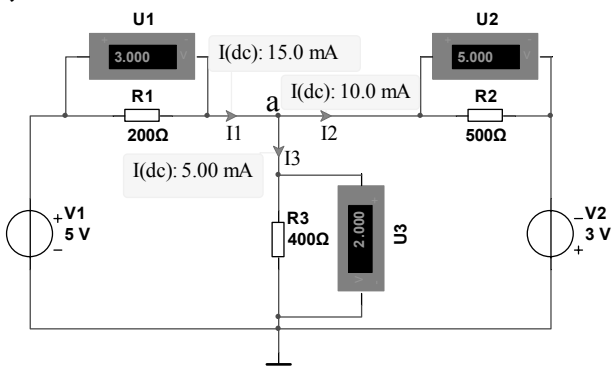


图 1.13.2 测量结果

- ① 根据测量结果验证 KVL 和 KCL。
- ② 改变 V1 和 V2 的值，重新测量电压和电流，验证 KVL 和 KCL。
- ③ 改变 R1、R2、R3 的值，重新测量电压和电流，验证 KVL 和 KCL。

1.13.2 叠加定理的验证

依照图 1.10.2(a)所示的电路结构, 构建仿真电路如图 1.13.3 所示。(小贴士: 单刀双掷开关 S1~S3 的接入是方便对独立源进行置零, 其中电压源置零对电路而言相当于短路, 但电压源自身禁止短路; 电流源置零对电路而言相当于开路, 但电流源自身禁止开路。)

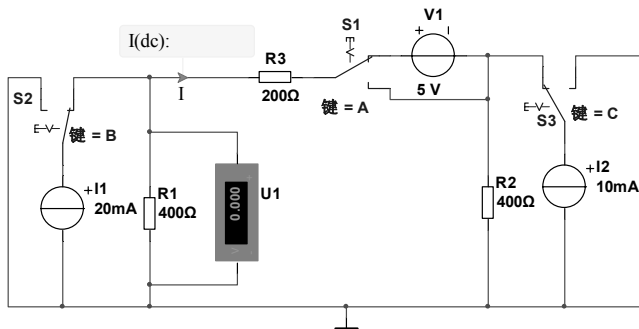


图 1.13.3 叠加定理验证电路图

- ① 运行仿真, 得到 3 个电源共同作用时的 U_1 和 I 。
- ② 改变 S1、S2、S3 的状态, 使 3 个电源分别单独作用, 得到 U_1' 、 I' , U_1'' 、 I'' , U_1''' 、 I''' , 根据测量结果验证叠加原理。
- ③ 改变 R_1 的值, 重复①和②。

1.13.3 含受控源的电阻电路分析

1. 认识受控源

在 Multisim 中构建 CCVS ($r = 2k\Omega$) 电路, 如图 1.13.4 所示。

- ① 运行仿真, 测量 I_i 和 U_o , 改变 R_2 的阻值 ($1 \sim 5k\Omega$), 观察 U_o 的变化。
- ② 改变电流源 I_1 的输出电流为 4mA、8mA, 重复①, 根据测量结果验证 U_o 和 I_i 之间的关系。
- ③ 对图 1.13.4 进行直流扫描仿真, 设置 I_1 的扫描范围为 $0 \sim 10mA$, 扫描增量为 1mA, 得到其传输特性曲线如图 1.13.5 所示。

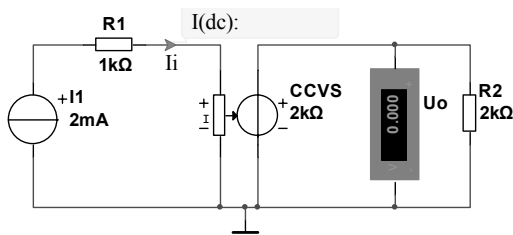


图 1.13.4 CCVS 电路

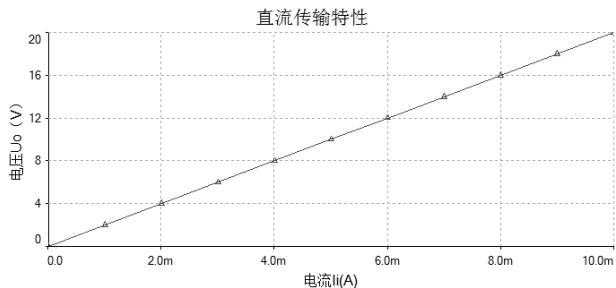
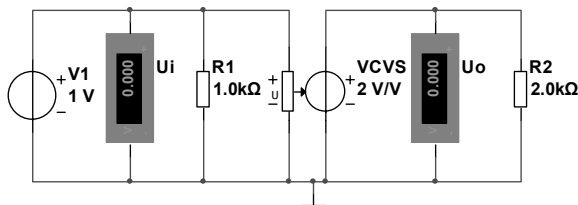
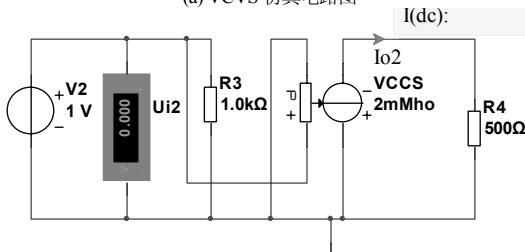


图 1.13.5 受控源 CCVS 的传输特性曲线

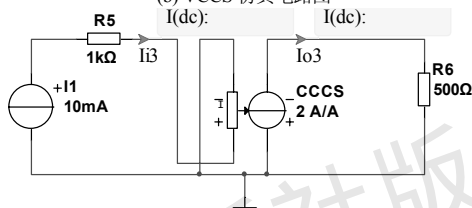
④ 构建 VCVS ($\mu = 2$)、VCCS ($g = 2mS$)、CCCS ($\alpha = 2$) 电路, 如图 1.13.6 所示。(小贴士: Multisim 软件中受控电流源流向采用 “+” “-” 极性标注, 表示电流从 “+” 极流向 “-” 极, 所以请注意 VCCS 和 CCCS 的连接方法。) 验证它们的输入输出关系。



(a) VCVS 仿真电路图



(b) VCCS 仿真电路图



(c) CCCS 仿真电路图

图 1.13.63 种受控源仿真电路

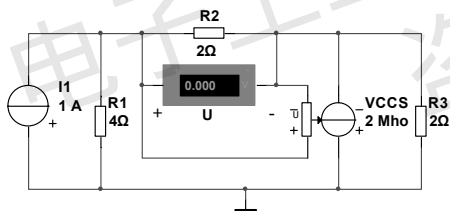


图 1.13.7 含受控源的电阻电路分析

⑤ 根据构建的 VCVS、VCCS、CCCS 电路，绘制它们的传输特性曲线。

2. 含受控源的电阻电路分析

根据图 1.12.3(a)所示电路图构建 Multisim 仿真电路，如图 1.13.7 所示。

- ① 运行仿真，得到待求量 U 。
- ② 仿真分析例 1.12.3~1.12.4。

1.13.4 设计仿真题目

1. 试利用电源、开关（单刀单掷、单刀双掷、双刀双掷等）和白炽灯等元件为 T 型过道设计一个“一灯三控”电路。

白炽灯安装在 T 型过道中间的过道交叉点，一盏灯照亮“—”和“|”两个过道，3 个开关分别位于 T 型过道的 3 个入口，在每个入口都能够独立地控制灯的亮灭。

用 Multisim 绘制出电路图并仿真验证设计结果（电路图绘制时就要体现出 T 型路口来）。

2. 仿真分析含受控源的电阻电路。

- ① 用 Multisim 仿真测量图 1.13.8 中的各支路电流。
 - ② 用 Multisim 仿真测量图 1.12.6(a)所示电路的输出电阻 R_o 。
 - ③ 用 Multisim 仿真求解图 1.12.7(a)所示电路的戴维南等效电路。
3. 实验室有一个 15V 的直流电压源，可调电阻有 500Ω、1kΩ、2kΩ、5kΩ、10kΩ、20kΩ 和

50k Ω 各一个, 固定电阻有 10 k Ω 、20k Ω 、33k Ω 、47 k Ω 、51k Ω 、82 k Ω 和 100k Ω 各一个。试用 Multisim 设计仿真调压电路, 使之输出需要的直流电压 (电位器可调端子最后的位置应位于 30%~70%间)。

- ① 输出 0.1V、0.2V 和 0.4V。
- ② 输出 0.5V、1V 和 1.5V。
- ③ 输出 1V、3V 和 5V。

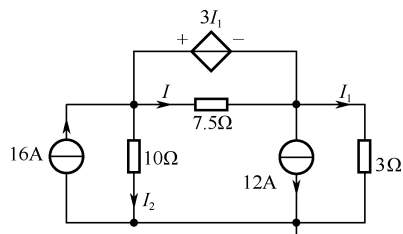


图 1.13.8 仿真 2 电路图

习 题 1

- 1.1 求图 1.1 中各元件的功率, 并指出每个元件起电源作用还是负载作用。
- 1.2 求图 1.2 中的电流 I 、电压 U 及电压源和电流源的功率。

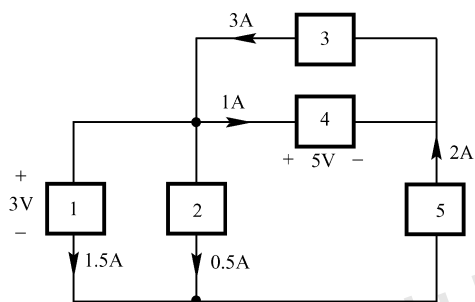


图 1.1 习题 1.1 电路图

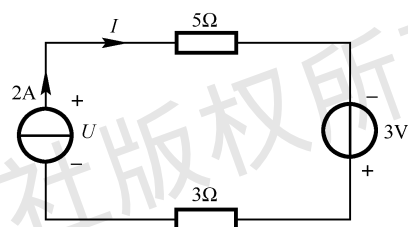


图 1.2 习题 1.2 电路图

- 1.3 求图 1.3 电路中的电流 I_1 、 I_2 及 I_3 。
- 1.4 试求图 1.4 所示电路的 U_{ab} 。
- 1.5 求图 1.5 中的 I 及 U_s 。
- 1.6 试求图 1.6 中的 I 、 I_x 、 U 及 U_x 。

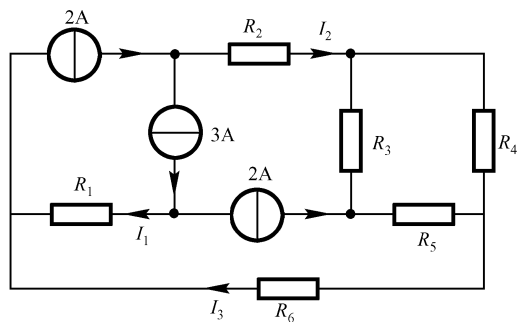


图 1.3 习题 1.3 电路图

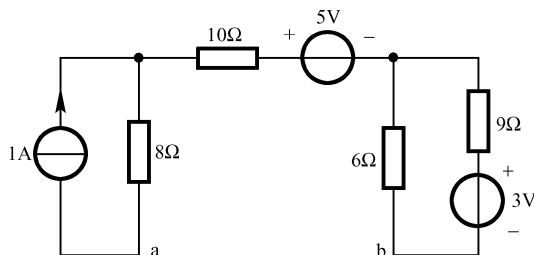


图 1.4 习题 1.4 电路图

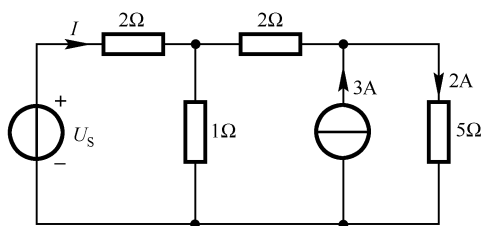


图 1.5 习题 1.5 电路图

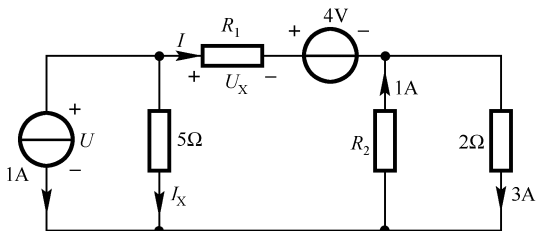


图 1.6 习题 1.6 电路图

1.7 电路如图 1.7 所示。(1) 求图(a)中的 ab 端等效电阻;(2) 求图(b)中电阻 R 。

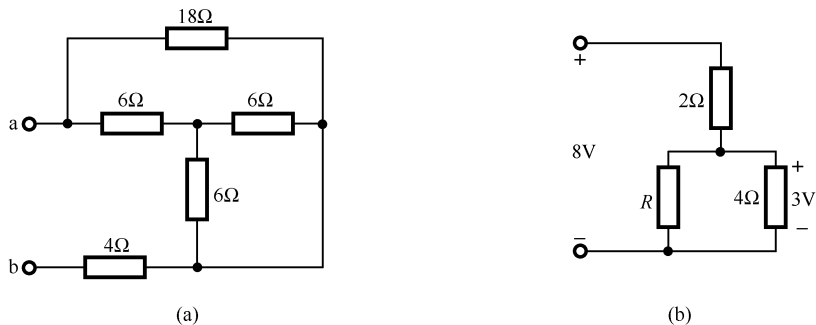


图 1.7 习题 1.7 电路图

1.8 电路如图 1.8 所示。(1) 求图(a)中的电压 U_S 和 U ; (2) 求图(b)中 $U=2V$ 时的电压 U_S 。

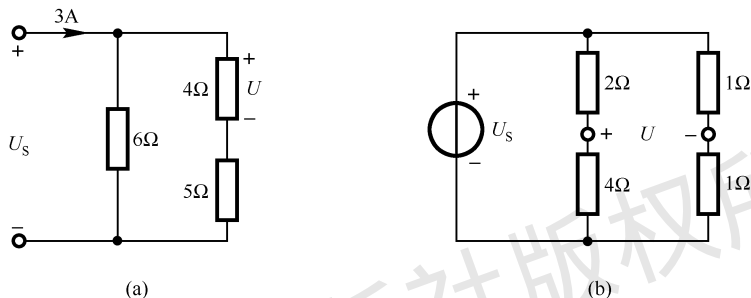


图 1.8 习题 1.8 电路图

1.9 滑线电阻分压器电路如图 1.9(a)所示, 已知 $R=500\Omega$, 额定电流为 $1.8A$, 外加电压 $500V$, $R_1=100\Omega$, 求 (1) 输出电压 U_0 ; (2) 如果误将内阻为 0.5Ω , 最大量程为 $2A$ 的电流表连接在输出端口, 如图(b)所示, 将发生什么结果?

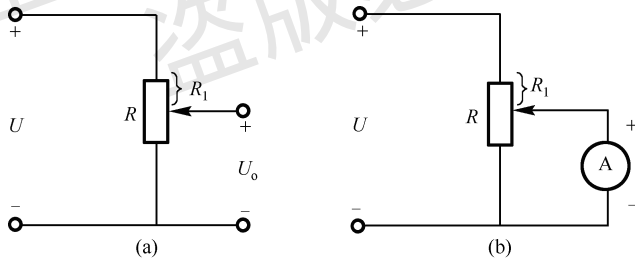


图 1.9 习题 1.9 电路图

1.10 计算图 1.10 中各支路电流。

1.11 为扩大电流表量程, 要在电流表外侧接一个与电流表并联的电阻 R_m , 此电阻称为分流器, 其电路如图 1.11 所示, 已知电流表内阻 $R_g=5\Omega$, 若用 $100mA$ 电流表测量 $1A$ 电流时, 需接多少欧姆的分流器? 该电阻的功率应选择多大?

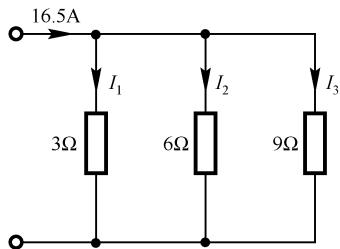


图 1.10 习题 1.10 电路图

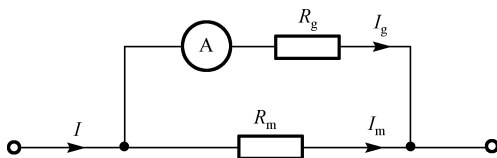


图 1.11 习题 1.11 电路图

1.12 将图 1.12 所示电路化为最简形式。

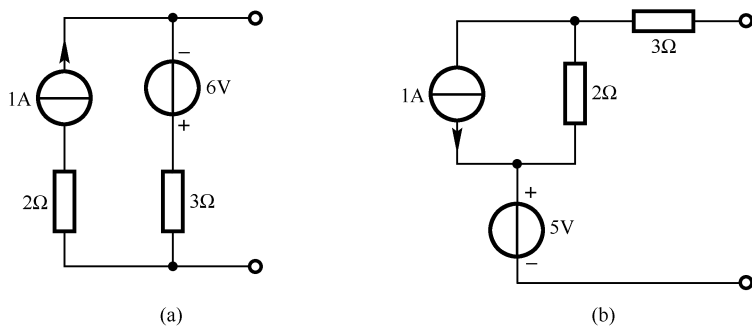


图 1.12 习题 1.12 电路图

1.13 用电源等效变换求图 1.13 中的电流 I 。

1.14 求图 1.14 所示电路的 a 点电位和 b 点电位。

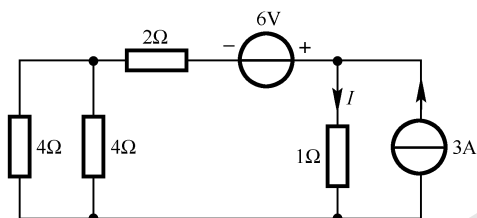


图 1.13 习题 1.13 电路图

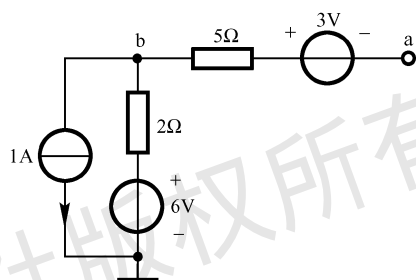


图 1.14 习题 1.14 电路图

1.15 利用支路电流法求图 1.15 中各支路电流。

1.16 利用支路电流法求图 1.16 所示电路的电流 I_1 、 I_2 及 I_3 。

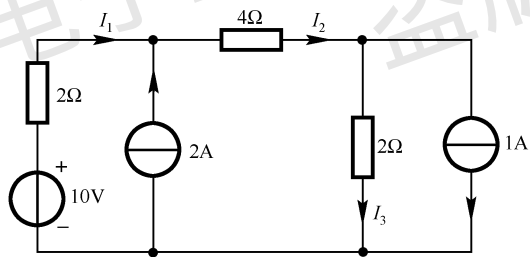


图 1.15 习题 1.15 电路图

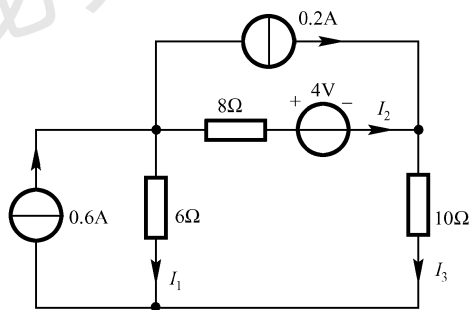


图 1.16 习题 1.16 电路图

1.17 用节点分析法求图 1.17 中的电压 U 。

1.18 求图 1.18 所示电路的节点电压 V_a 。

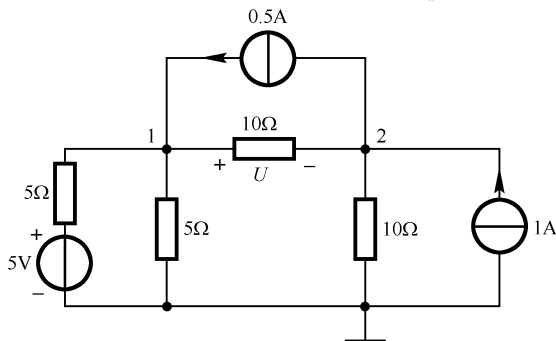


图 1.17 习题 1.17 电路图

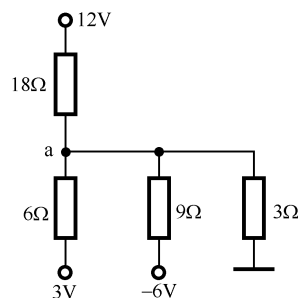


图 1.18 习题 1.18 电路图

1.19 用叠加原理求图 1.19 所示电路的电压 U 。

1.20 用戴维南定理求图 1.20 所示电路的电流 I 。

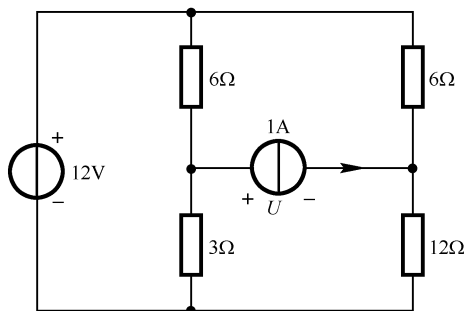


图 1.19 习题 1.19 电路图

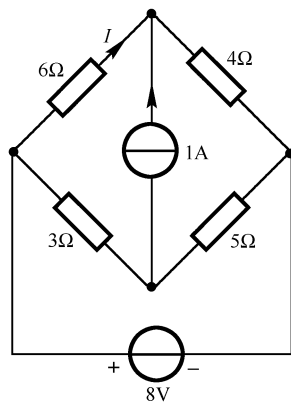


图 1.20 习题 1.20 电路图

1.21 用戴维南定理求图 1.21 所示电路的电压 U 。

1.22 用诺顿定理求图 1.22 所示电路的电流 I 。

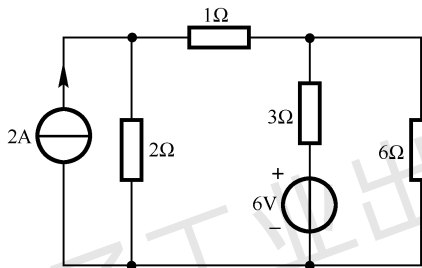


图 1.21 习题 1.21 电路图

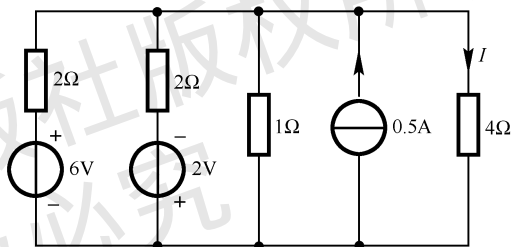


图 1.22 习题 1.22 电路图

1.23 试求图 1.23 所示电路的电流 I 及受控源功率。

1.24 用电源等效变换求图 1.24 中的电流 I 及电压源功率。

1.25 利用支路电流法求图 1.25 中的电流 I_1 及 I_2 。

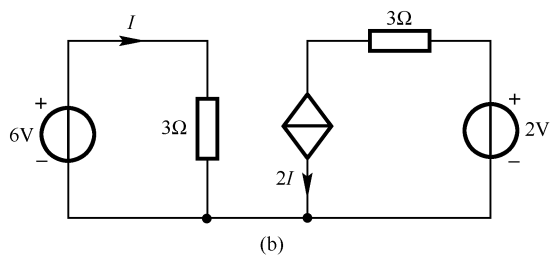
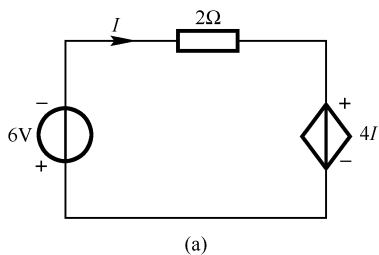


图 1.23 习题 1.23 电路图

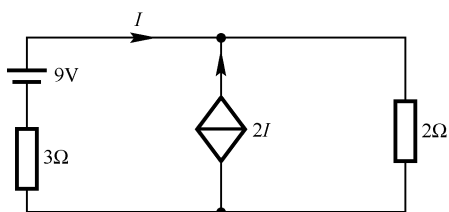


图 1.24 习题 1.24 电路图

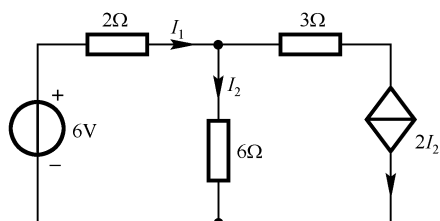


图 1.25 习题 1.25 电路图

1.26 利用节点分析法求图 1.26 所示电路的各节点电压。

1.27 用叠加原理求图 1.27 所示电路的电流 I 和电压 U 。

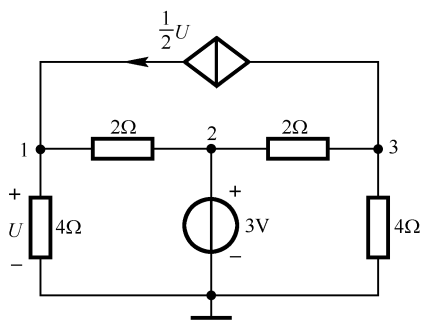


图 1.26 习题 1.26 电路图

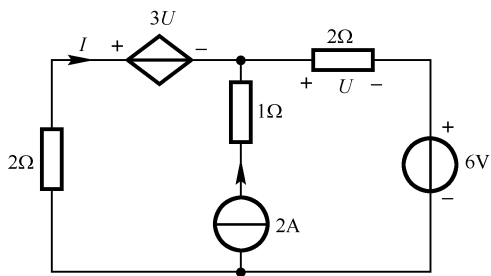


图 1.27 习题 1.27 电路图

1.28 在图 1.28 所示电路中, 试用戴维南定理分别求出 $R_L = 5\Omega$ 和 $R_L = 15\Omega$ 时的电流 I_L 。

1.29 试用外施电源法求图 1.29 所示电路输入端口的等效电阻 R_i , $\beta = 50$ 。

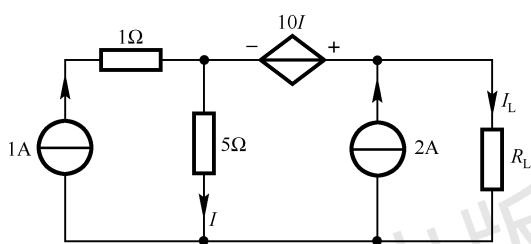


图 1.28 习题 1.28 电路图

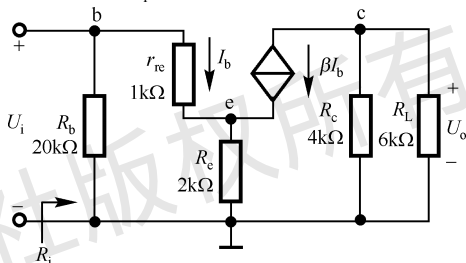


图 1.29 习题 1.29 电路图