

电路基础

赵启立

人工智能学院

机器人与信息自动化研究所

Email: zhaoqili@nankai.edu.cn

电路基础课程简介

■ 教材

《电路》

邱关源主编, 高等教育出版社



■ 参考教材

1. 《Electric Circuits》,

James W.Nilson, Prentice Hall

1. 《电路基础教程》, 张永瑞主编

2. 《简明电路分析基础》, 李汉逊主编

电路基础课程简介

■ 课程内容

- 1、电阻电路的分析方法和定理；
- 2、动态电路和正弦稳态电路分析；
- 3、三相电路、非正弦信号电路、二端口网络的分析方法

课程内容

第一章 电路模型和电路定律

- § 1-1 电路和电路模型
- § 1-2 电流和电压的参考方向
- § 1-3 电功率和能量
- § 1-4 电路元件
- § 1-5 电阻元件
- § 1-6 电压源和电流源
- § 1-7 受控电源
- § 1-8 基尔霍夫定律

第二章 电阻电路的等效变换

- § 2-1 引言
- § 2-2 电路的等效变换
- § 2-3 电阻的串联和并联
- § 2-4 电阻的Y形联结和 Δ 形联结的等效变换
- § 2-5 电压源、电流源的串联和并联
- § 2-6 实际电源的两种模型及其等效变换
- § 2-7 输入电阻

第三章 电阻电路的一般分析

- § 3-1 电路的图
- § 3-2 KCL和KVL的独立方程数
- § 3-3 支路电流法
- § 3-4 网孔电流法
- § 3-5 回路电流法
- § 3-6 结点电压法

第四章 电路定理

- § 4-1 叠加定理
- § 4-2 替代定理
- § 4-3 戴维宁定理和诺顿定理
- § 4-4 最大功率传输定理
- § 4-5 特勒根定理
- § 4-6 互易定理
- § 4-7 对偶原理

课程内容

第五章 含有运算放大器的电阻电路

~~§ 5-1 运算放大器的电路模型~~

~~§ 5-2 比例电路的分析~~

~~§ 5-3 含有理想运算放大器的电路的分析~~

第六章 储能元件

§ 6-1 电容元件

§ 6-2 电感元件

§ 6-3 电容、电感元件的串联与并联

第七章 一阶电路和二阶电路的时域分析

§ 7-1 动态电路的方程及其初始条件

§ 7-2 一阶电路的零输入响应

§ 7-3 一阶电路的零状态响应

§ 7-4 一阶电路的全响应

~~§ 7-5 二阶电路的零输入响应~~

~~§ 7-6 二阶电路的零状态响应和全响应~~

~~§ 7-7 一阶电路和二阶电路的阶跃响应~~

~~§ 7-8 一阶电路和二阶电路的冲激响应~~

~~§ 7-9 卷积积分~~

~~§ 7-10 状态方程~~

~~§ 7-11 动态电路时域分析中的几个问题~~

第八章 相量法

§ 8-1 复数

§ 8-2 正弦量

§ 8-3 相量法的基础

§ 8-4 电路定律的相量形式

第九章 正弦稳态电路的分析

§ 9-1 阻抗和导纳

§ 9-2 电路的相量图

§ 9-3 正弦稳态电路的分析

§ 9-4 正弦稳态电路的功率

§ 9-5 复功率

§ 9-6 最大功率传输

第十章 含有耦合电感的电路

§ 10-1 互感

§ 10-2 含有耦合电感电路的计算

§ 10-3 耦合电感的功率

§ 10-4 变压器原理

§ 10-5 理想变压器

课程内容

第十一章 电路的频率响应

- § 11-1 网络函数
- § 11-2 RLC串联电路的谐振
- § 11-3 RLC串联电路的频率响应
- § 11-4 RLC并联谐振电路
- § 11-5 波特图
- § 11-6 滤波器简介

第十二章 三相电路

- § 12-1 三相电路
- § 12-2 线电压（电流）与相电压（电流）的关系
- § 12-3 对称三相电路的计算
- § 12-4 不对称三相电路的概念
- § 12-5 三相电路的功率

第十三章 非正弦周期电流电路和信号的频谱

- § 13-1 非正弦周期信号
- § 13-2 非正弦周期函数分解为傅里叶级数
- § 13-3 有效值、平均值和平均功率
- § 13-4 非正弦周期电流电路的计算
- ~~§ 13-5 对称三相电路中的高次谐波~~
- ~~§ 13-6 傅里叶级数的指数形式~~
- ~~§ 13-7 傅里叶积分简介~~

第十四章 线性动态电路的复频域分析

- ~~§ 14-1 拉普拉斯变换的定义~~
- ~~§ 14-2 拉普拉斯变换的基本性质~~
- ~~§ 14-3 拉普拉斯反变换的部分分式展开~~
- ~~§ 14-4 运算电路~~
- ~~§ 14-5 应用拉普拉斯变换法分析线性电路~~
- ~~§ 14-6 网络函数的定义~~
- ~~§ 14-7 网络函数的极点和零点~~
- ~~§ 14-8 极点、零点与冲激响应~~
- ~~§ 14-9 极点、零点与频率响应~~

课程内容

第十五章 电路方程的矩阵形式

~~§ 15-1 割集~~

~~§ 15-2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵~~

~~§ 15-3 矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系~~

~~§ 15-4 回路电流方程的矩阵形式~~

~~§ 15-5 结点电压方程的矩阵形式~~

~~§ 15-6 割集电压方程的矩阵形式~~

~~§ 15-7 列表法~~

第十六章 二端口网络

§ 16-1 二端口网络

§ 16-2 二端口的方程和参数

~~§ 16-3 二端口的等效电路~~

~~§ 16-4 端口的转移函数~~

~~§ 16-5 端口的连接~~

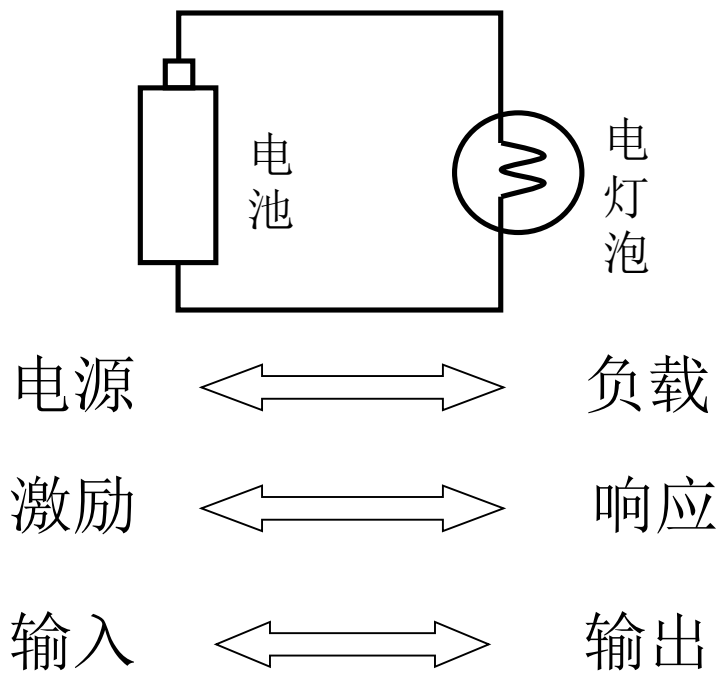
~~§ 16-6 回转器和负阻抗变换器~~

第一章 电路模型和电路定律

- 电路和电路模型
- 电流和电压的参考方向
- 电功率和能量
- 电路元件:电阻、独立电源、受控电源
- 基尔霍夫定律

§ 1-1 电路和电路模型

- 电路完成的主要功能
 - 能量转换
 - 信息传输

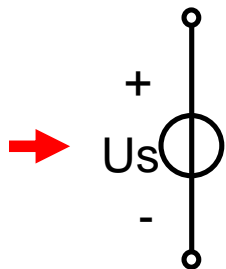


§ 1-1 电路和电路模型

■ 理想电路元件：



电池



恒压源



导线

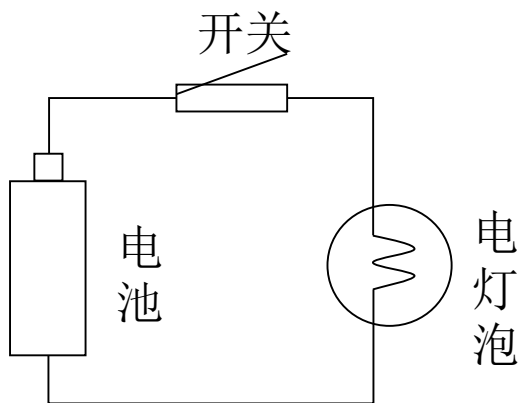


理想导线

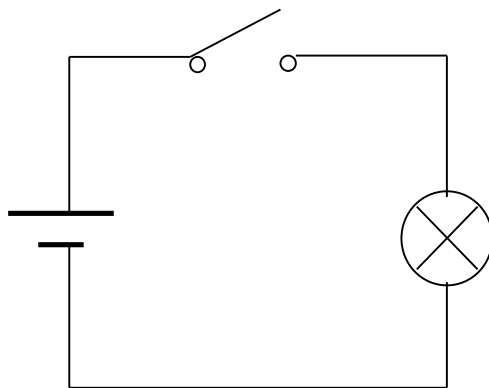
理想元件具有某种电磁性质，并且有**精确数学定义**的基本结构。

§ 1-1 电路和电路模型

■ 电路模型：由理想元件组合而成

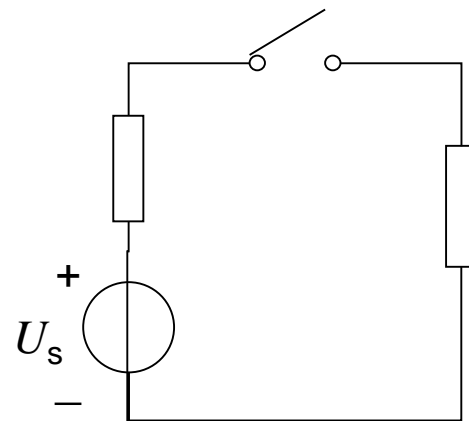


实际电路



电路原理图

实际电路的标准图形表示，用于实际电路的安装维护

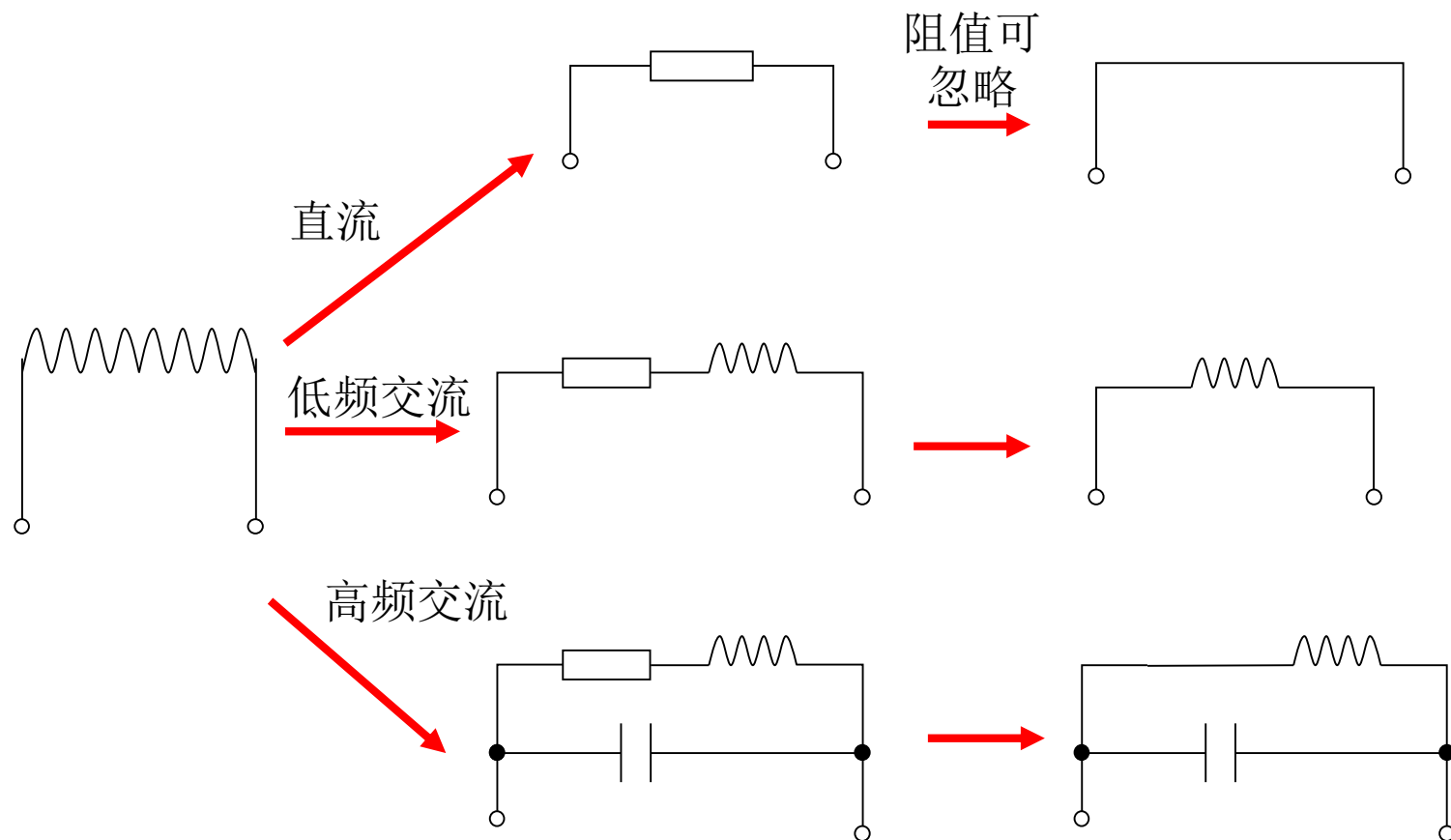


电路模型

由理想电路元件构成的模型，用于电路的电气特性分析

§ 1-1 电路和电路模型

■ 建模注意：



§ 1-1 电路和电路模型

■ 电路中常用元件：



电阻



电容



电感



集成芯片

§ 1-1 电路和电路模型

■ 电路中常用仪器：



直流电源



信号发生器



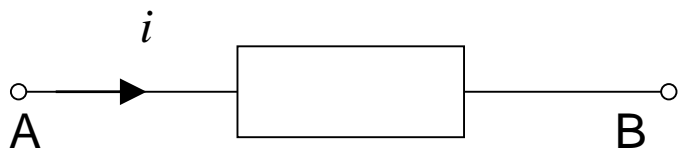
数字万用表



示波器

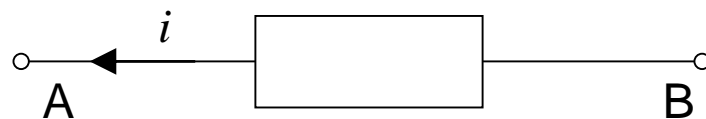
§ 1-2 电压和电流的参考方向

- 电路分析中，为进行计算，通常对某元件或某一部分电路指定其电流或电压的参考方向。
- 电流的参考方向



实际电流方向▶

$$i > 0 \quad (i_{AB} > 0)$$



实际电流方向▶

$$i < 0 \quad (i_{BA} > 0)$$

§ 1-2 电压和电流的参考方向

- 电位：电路中某点与参考点之间的电压，称为该点的电位，参考点的电位为零。

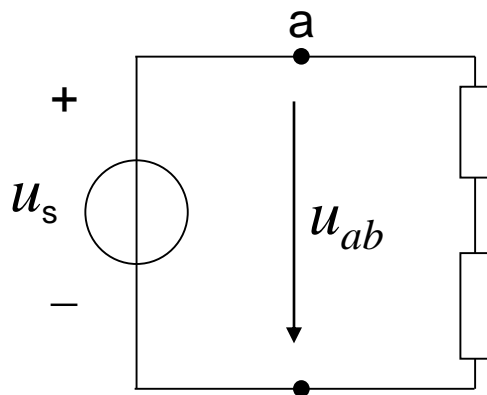
电位用 φ 表示。

两点之间的电压指的也就是两点之间的电位之差。

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

如果 $\varphi_a > \varphi_b$, $u_{ab} > 0$;

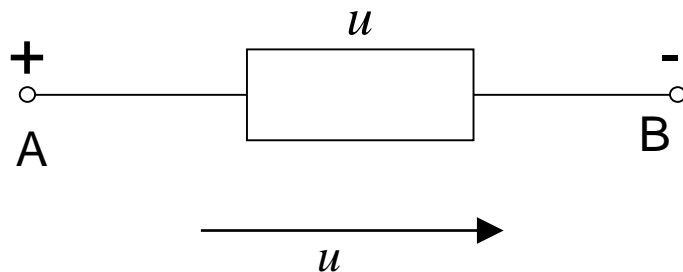
如果 $\varphi_a < \varphi_b$, $u_{ab} < 0$, 则有 $u_{ab} = -u_{ba}$



§ 1-2 电压和电流的参考方向

■ 电压的参考方向

表达两点间的电压时,用正极性(+)表示高电位,负极性(-)表示低电位,而正极指向负极的方向就是电压的参考方向。



u_{AB} : 参考方向为A指向B

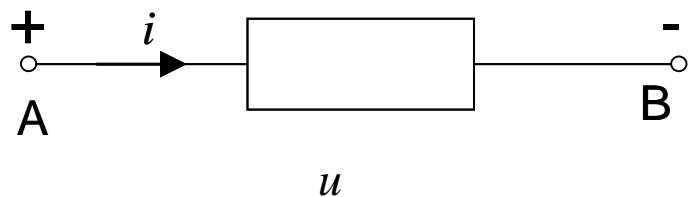
如果A点电位确实高于B点电位, 则 $u_{AB} > 0$

如果A点电位确实低于B点电位, 则 $u_{AB} < 0$

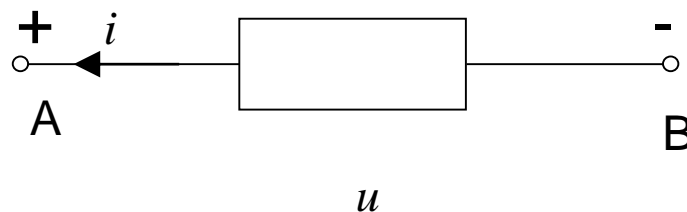
§ 1-2 电压和电流的参考方向

■ 电压和电流的关联参考方向

- 如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端，即两者的方向一致，则把电压和电流的这种参考方向称为**关联参考方向**；
- 当两者不一致时，称为**非关联方向**。



关联参考方向

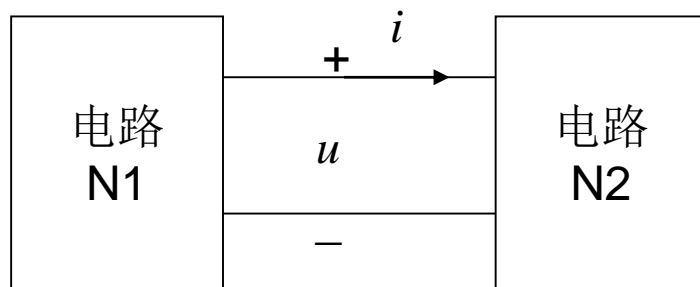


非关联参考方向

§ 1-2 电压和电流的参考方向

■ 注意

1、对一部分电路为关联参考方向，对另外一部分电路可能就是非关联的。



对电路N2来说，其电压和电流是关联参考方向；

而对电路N1来说，其电压和电流是非关联参考方向

2、电压和电流的参考方向任意指定。为了计算方便，电压和电流可采用关联参考方向。

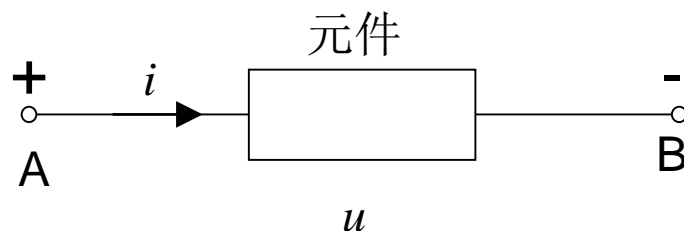
§ 1-3 电功率和能量

■ 指定元件的电流和电压取关联参考方向时

如果在 dt 时间内，有 dq 的电荷自元件的“+”极到达“-”极，
则： 电流 $i=dq/dt$

元件吸收的能量 $dW=udq$

元件吸收的功率 $p = dW/dt = ui$



由 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的能量为

$$W(t) = \int dW = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

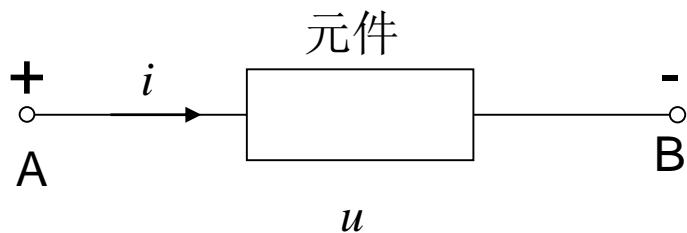
电流：安（A） 电压：伏（V）

能量：焦（J） 功率：瓦（W）

$$1\text{度} = 1000\text{瓦时} = 1000\text{焦耳/秒} \times 3600\text{秒} = 3600000\text{焦耳}$$

§ 1-3 电功率和能量

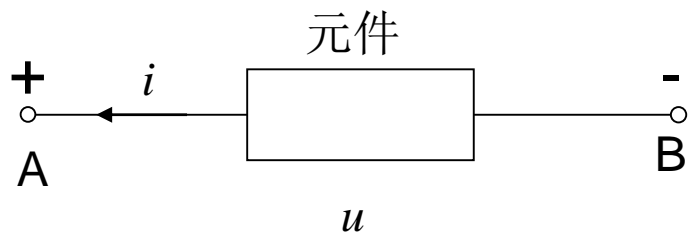
■ 吸收和释放能量



■ 电压取关联参考方向:

当 $p>0, W>0$ 时, 元件吸收功率和能量;

当 $p<0, W<0$ 时, 元件释放功率和能量;



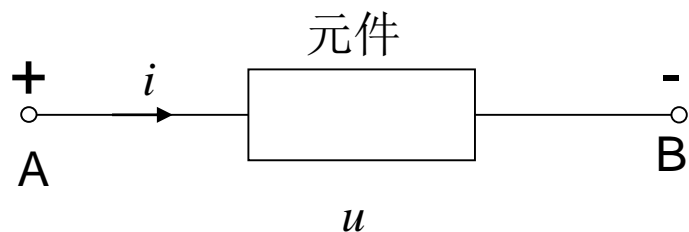
■ 电压取非关联参考方向:

当 $p>0, W>0$ 时, 元件释放功率和能量;

当 $p<0, W<0$ 时, 元件吸收功率和能量;

§ 1-3 电功率和能量

例：

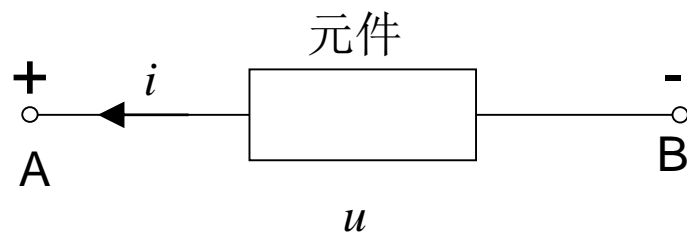


$$u = 2\text{V}$$

$$i = -1\text{A}$$

元件吸收的功率： $p = ui = -10\text{W}$

所以该元件实际**释放**功率。



$$u = 2\text{V}$$

$$i = -1\text{A}$$

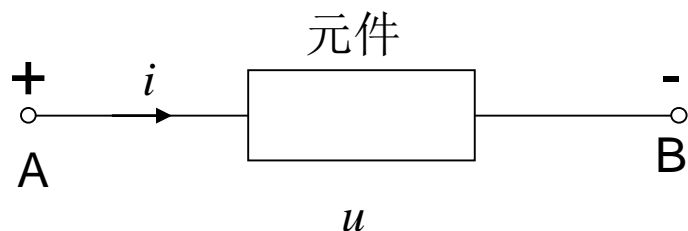
元件释放的功率： $p = ui = -10\text{W}$

所以该元件实际**吸收**功率。

§ 1-4 电路元件

■ 集总元件

在任何时刻，流入二端元件一个端子的电流等于从另一端子流出的电流，且两个端子之间的电压为单值量。



■ 线性元件

如果表示元件特性的代数关系是一个线性关系，则该元件称为线性元件。

■ 无源元件和有源元件

- 电子元器件工作时，其内部没有任何形式的电源，则这种器件叫做无源器件
- 电子元器件工作时，其内部有电源存在，则这种器件叫做有源元件。

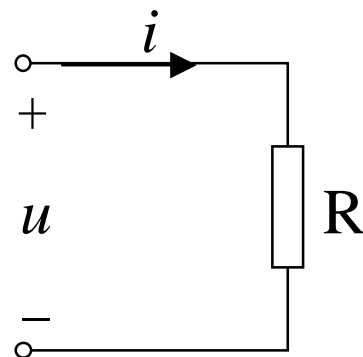
§ 1-5 电阻元件

1、定义：在电压和电流取关联参考方向下，在任何时刻它两端的电压和电流关系符合欧姆定律： $u = R i$

u ：电压，单位：伏（V）；

i ：电流，单位：安（A）；

R ：电阻，单位：欧姆（ Ω ）

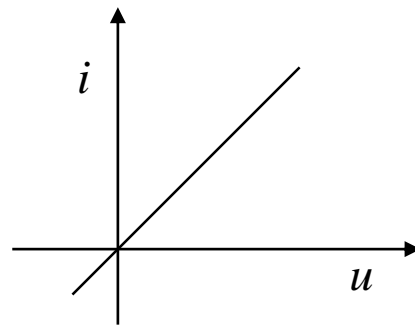


元件的VCR方程是电路分析的基础。

电导： $G = 1/R$

单位：西门子（S）

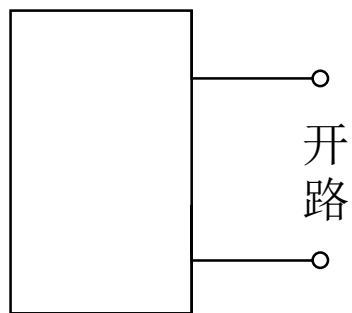
此时有： $i = G u$



电阻元件及其伏安特性

电阻元件

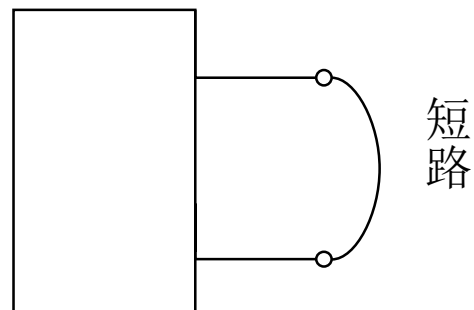
2、开路和短路



开路

$$R = \infty$$

i 恒等于 0



短路

$$R = 0$$

u 恒等于 0

电阻元件

3、电阻元件的功率

当电压和电流取关联参考方向时，
电阻消耗的功率：

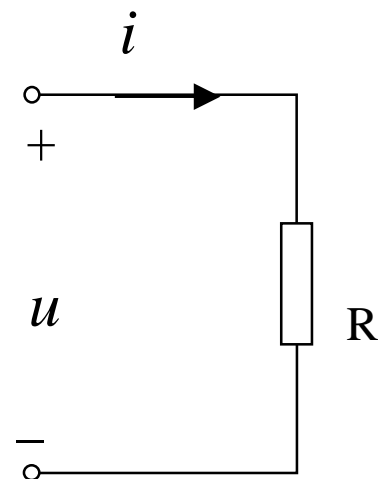
$$p = ui = Ri^2 = u^2/R$$

可看出， p 恒为非负值。

从 t_0 到 t 的时间内，电阻吸收的电能

$$W = \int_{t_0}^t R i^2(\xi) d\xi$$

注意：当电路中的电量随时间变化时，一般用小写字母表示；当变量为恒定量时，一般用大写字母标示。



电阻元件

4、说明

- 1) 选择电阻元件时应注意的电阻参数：封装形式、功率、精确度。

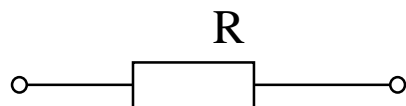


电阻元件

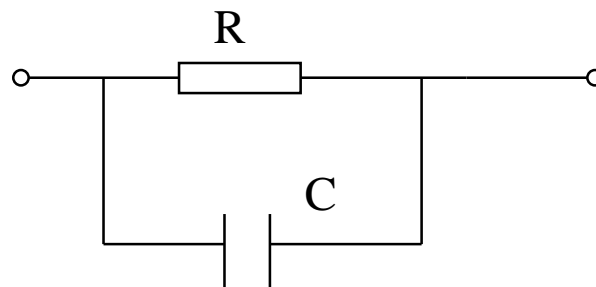
2) 所讨论的电阻元件是一种理想元件。

(1) 实际电阻阻值与温度等参数有关。

(2) 电阻实际等效电路



理想电阻元件



电阻实际等效电路

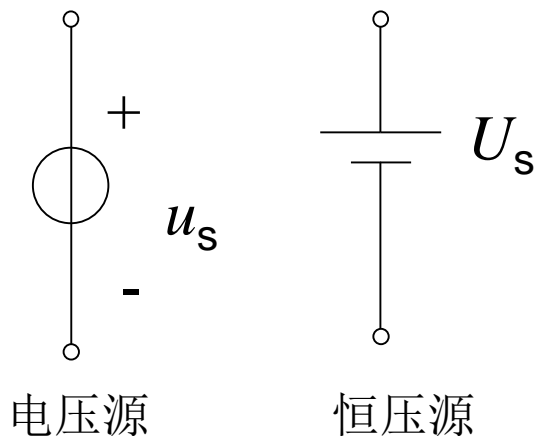
§ 1-6 电压源和电流源

■ 电压源的特性：

端电压 $u(t)=u_s(t)$

$u_s(t)$ 为给定的时间函数，与流过的电流大小无关

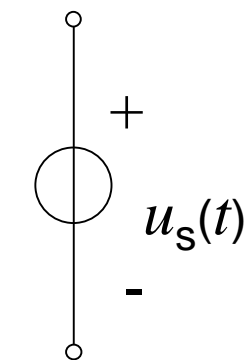
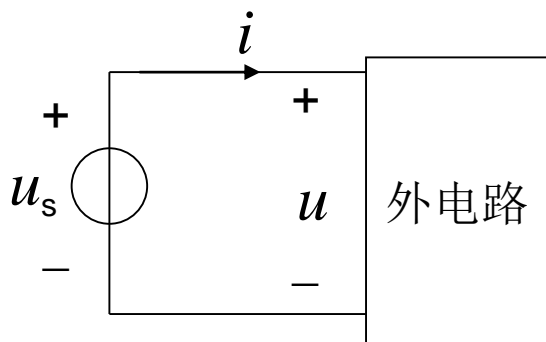
■ 电压源的符号表示



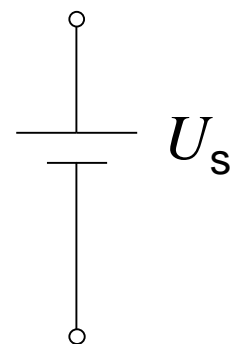
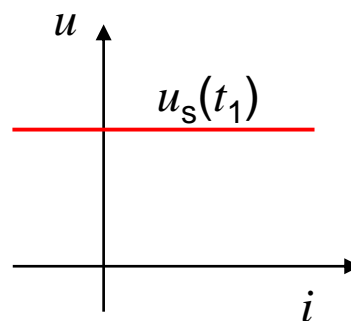
注意：当电路中的电量随时间变化时，一般用小写字母表示；当变量为恒定量时，一般用大写字母标示。

§ 1-6 电压源和电流源

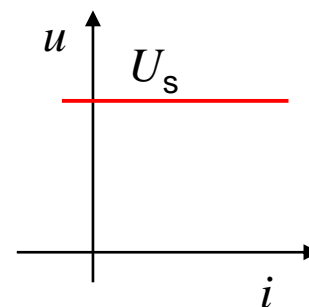
■ 电压源的伏安特性



电压源



恒定电压源



■ 电压源发出的功率: $p(t) = u_s(t) i(t)$

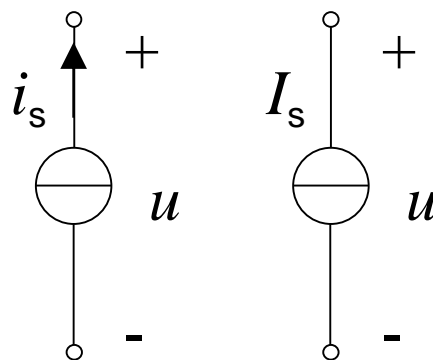
§ 1-6 电压源和电流源

■ 电流源的特性：

电流源发出的电流： $i(t) = i_s(t)$

$i_s(t)$ 为给定的时间函数，与端口电压大小无关

■ 电流源的符号表示

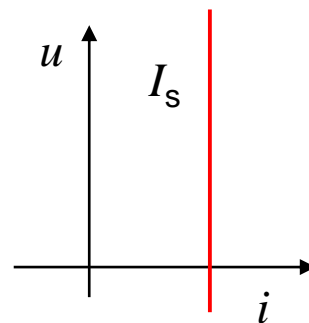
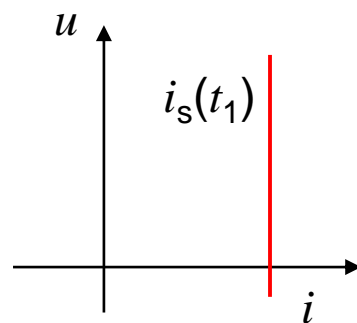
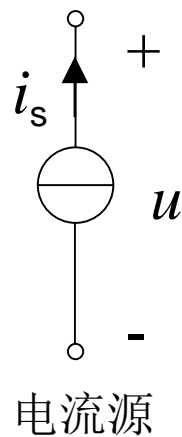
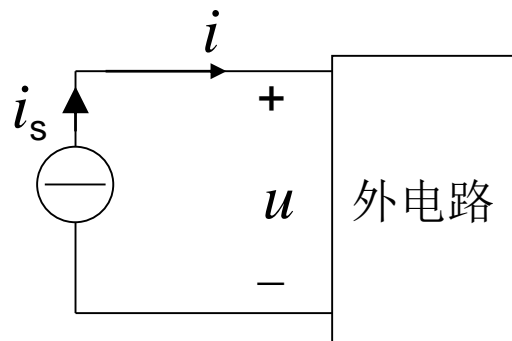


电流源

恒流源

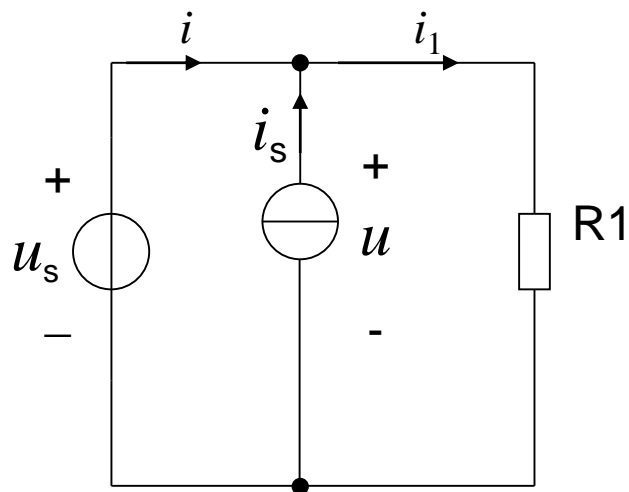
§ 1-6 电压源和电流源

■ 电流源的伏安特性

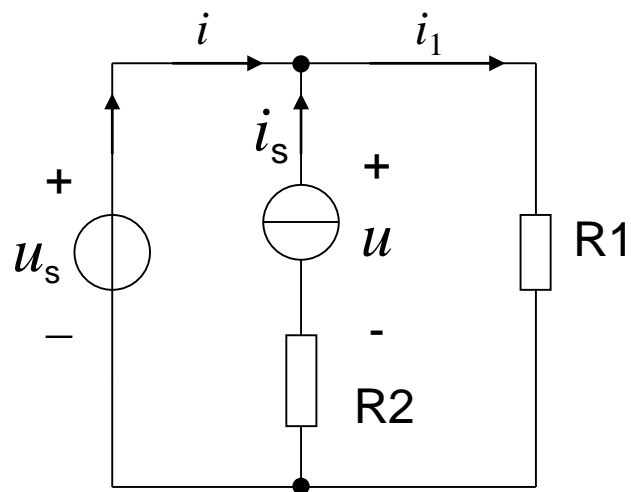
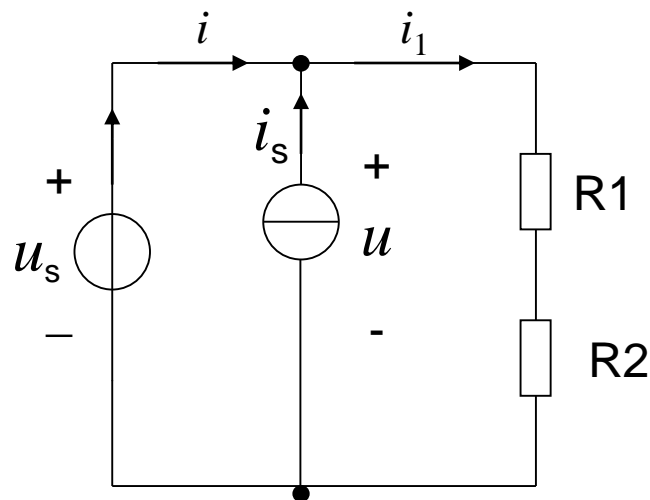


■ 电流源发出的功率: $p(t) = u(t) i_s(t)$

§ 1-6 电压源和电流源

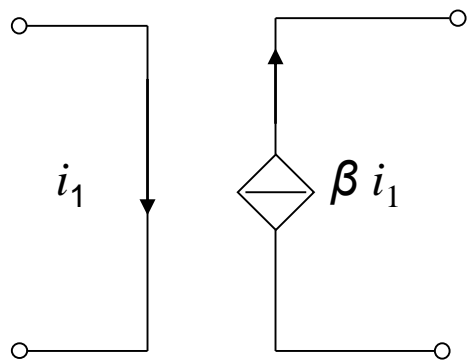


- 在上图的不同支路上分别串入R2后，电压源、电流源和电阻R1中哪个元件的功率会有变化？



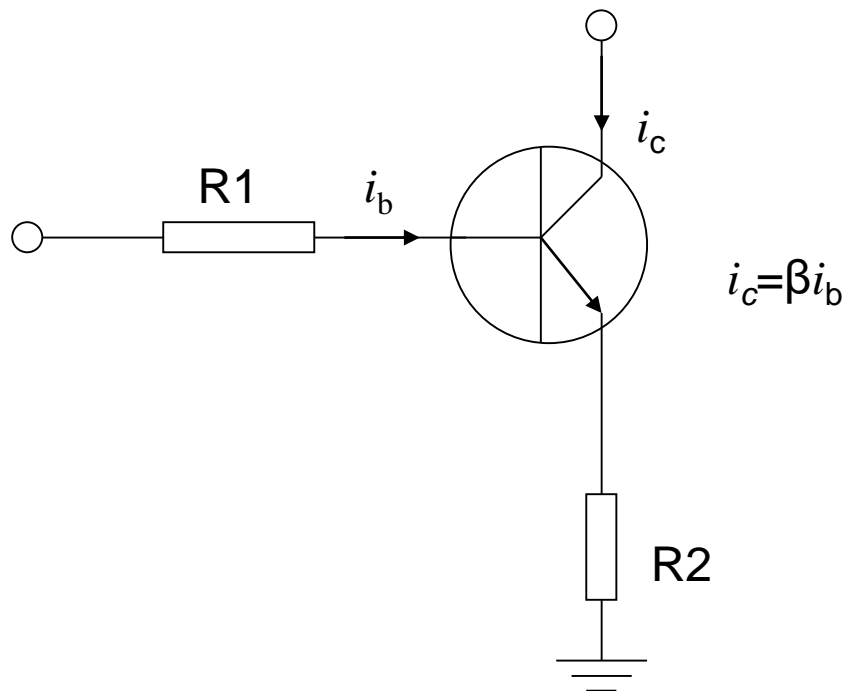
§ 1-7 受控电源

受控电源：



电流控制电流源

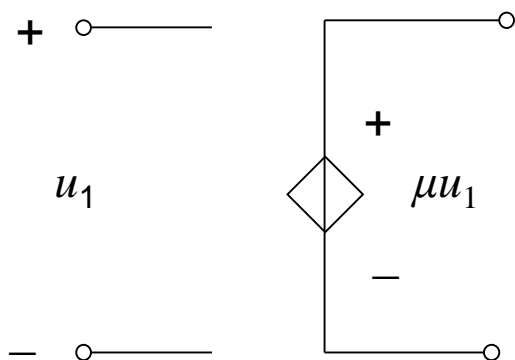
CCCS



三极管电路

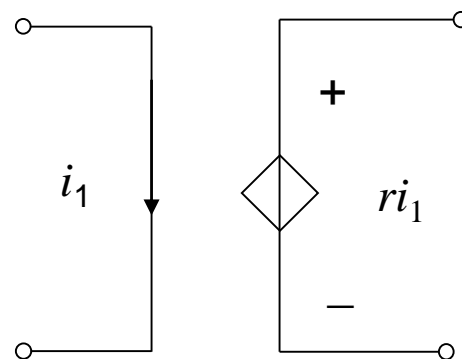
§ 1-7 受控电源

- 受控电压源：端电压受电路中某个电压或电流的控制。



电压控制电压源

VCVS

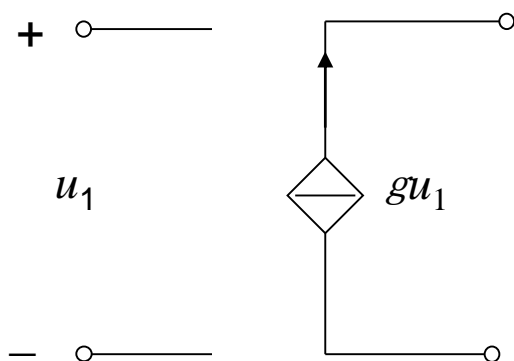


电流控制电压源

CCVS

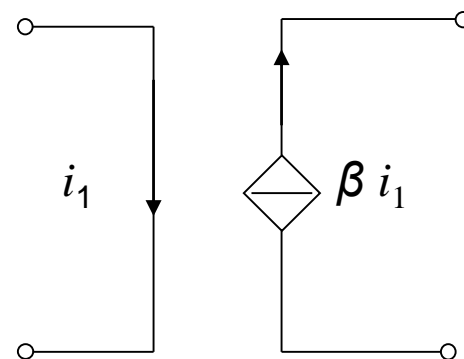
§ 1-7 受控电源

- 受控电流源：供出的电流受电路中某个电压或电流的控制。



电压控制电流源

VCCS



电流控制电流源

CCCS

§ 1-7 受控电源

■ 注意：

1、受控电源的系数具有不同的单位和意义。

VCVS: μ 电压比

CCVS: r 转移电阻

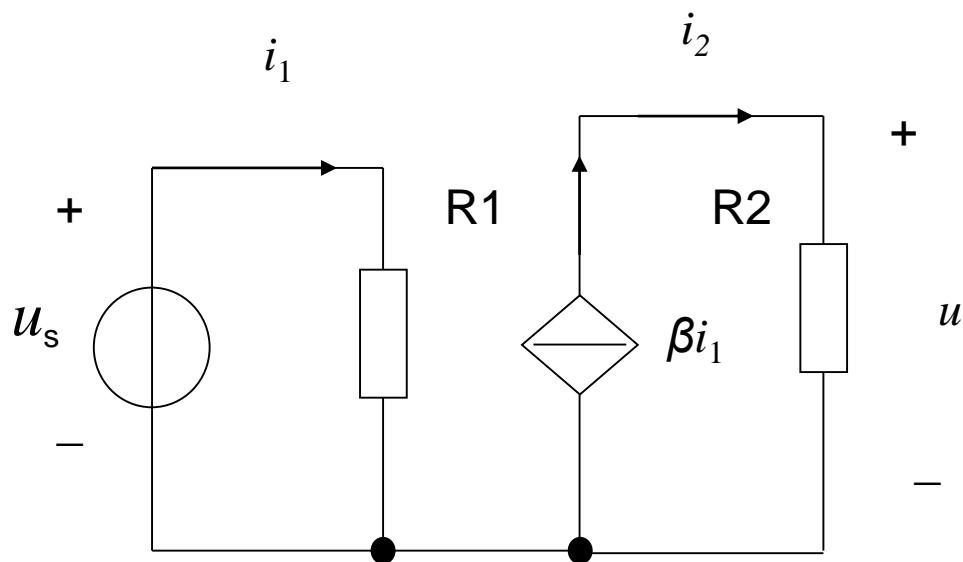
VCCS: g 转移电导

CCCS: β 电流比

§ 1-7 受控电源

■ 注意：

2、受控电源在电路中不起“激励”作用，它反映电路变量之间的耦合关系。



已知: $u_s = 1\text{V}$

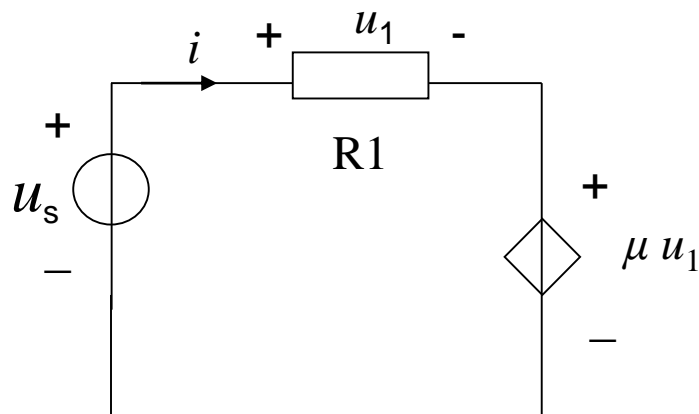
$R_1 = R_2 = 10\Omega$

$\beta = 1$

求: u

§ 1-7 受控电源

受控电压源



受控电压源相当于一个多大的电阻？

3、受控电源具有双重特性：

- a、其特性符合电源的外特性；
- b、本质上是一个电阻参数。

在电路分析过程中，一般把受控电源作为独立电源处理。

4、控制量为零时，受控电压源相当于短路；受控电流源相当于开路。

例 1-1 图 1-12 中 $i_s = 2\text{ A}$, VCCS 的控制系数 $g = 2\text{ S}$, 求 u 。

解 由图 1-12 左部先求控制电压 u_1 , $u_1 = 5i_s = 10\text{ V}$; 故 $u = 2gu_1 = 2 \times 2 \times 10\text{ V} = 40\text{ V}$ 。

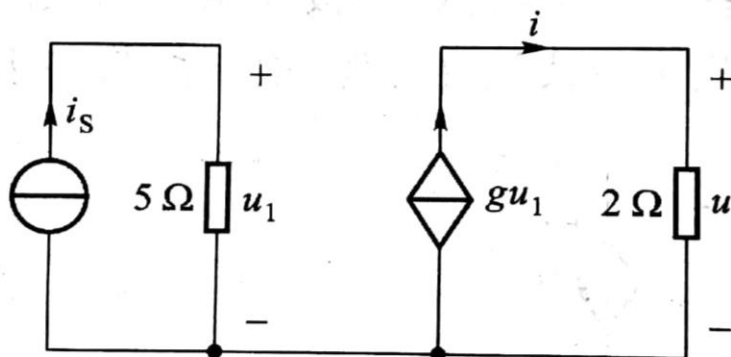


图 1-12 例 1-1 图

§ 1-8 基尔霍夫定律

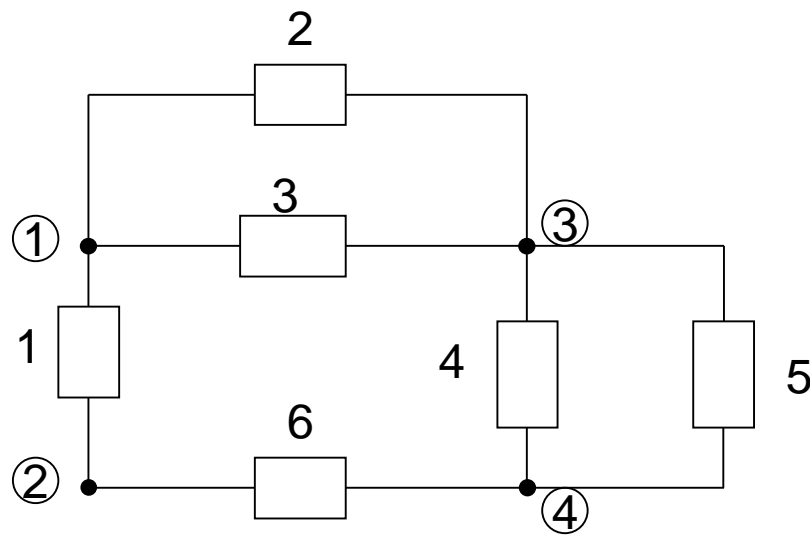
■ 基本概念

支路： 每个二端元件称为一条支路,其电流和电压称为支路电流和支路电压;

结点： 支路的连接点

回路： 由支路组成的闭合路径

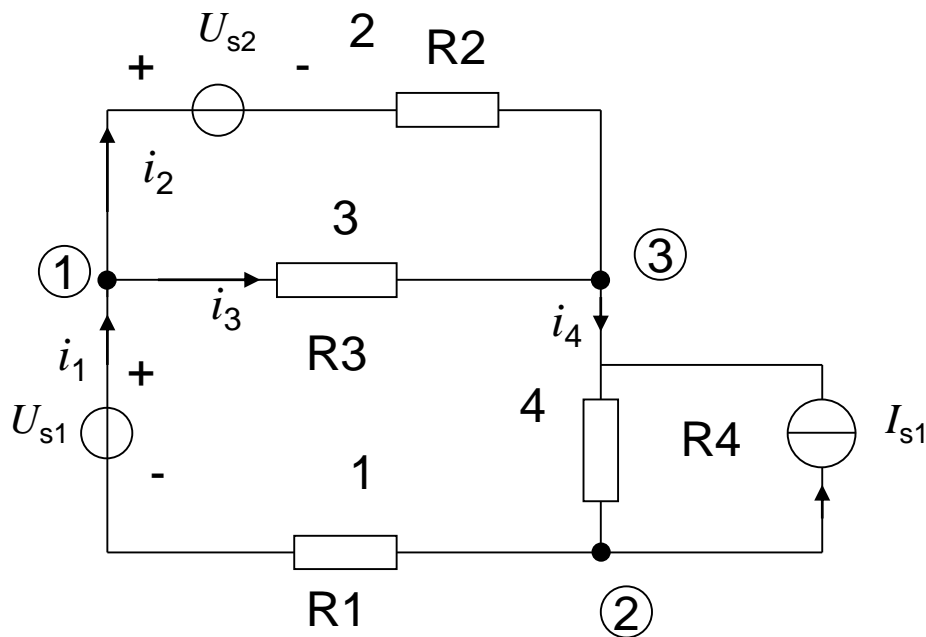
网孔： 内部不含支路的回路



§ 1-8 基尔霍夫定律

■ 举例说明

为了方便计算，规定每条支路只有一个支路电流和一个支路电压，所以两个二端元件的串联和并连可以看成一条支路。



§ 1-8 基尔霍夫定律

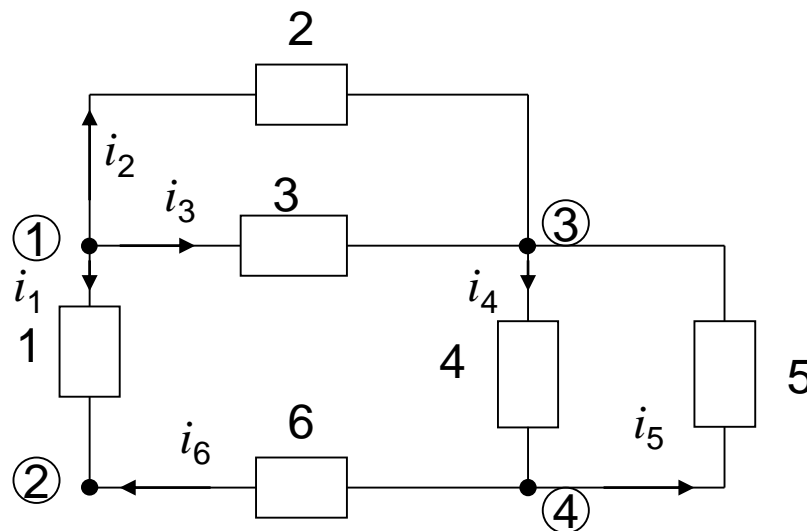
■ 基尔霍夫电流定律(KCL):

在集总电路中，在任何时刻，对任一结点，所有流出结点的支路电流的代数和恒等于零。即：

$$\sum i = 0$$

计算方法：

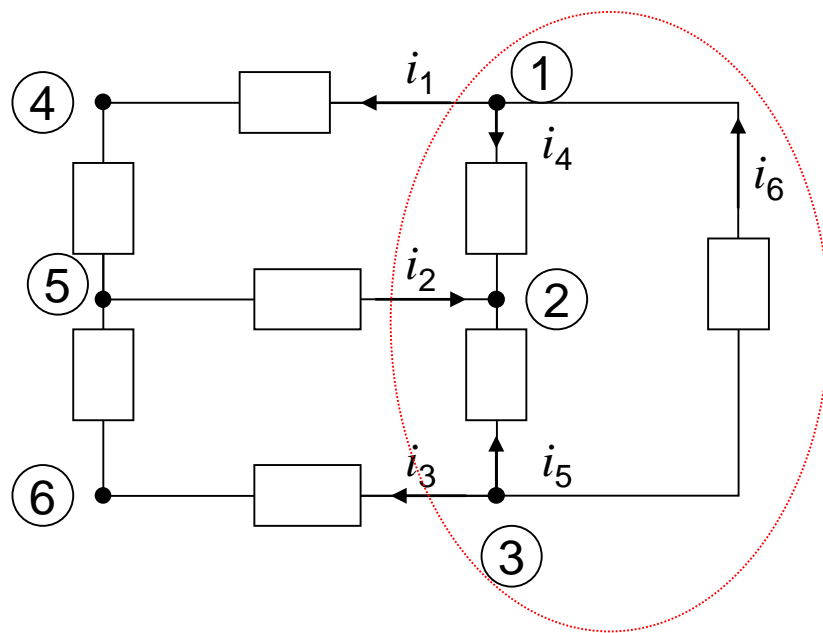
- 1、流出结点的电流前面取“+”，流入结点的电流前面取“-”。
- 2、电流是流出结点还是流入结点，由参考方向判断。



§ 1-8 基尔霍夫定律

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

$$\Rightarrow i_1 - i_2 + i_3 = 0$$



■ 电流连续性

通过一个闭合面的支路电流的代数和为零。闭合面又称为广义结点。

§ 1-8 基尔霍夫定律

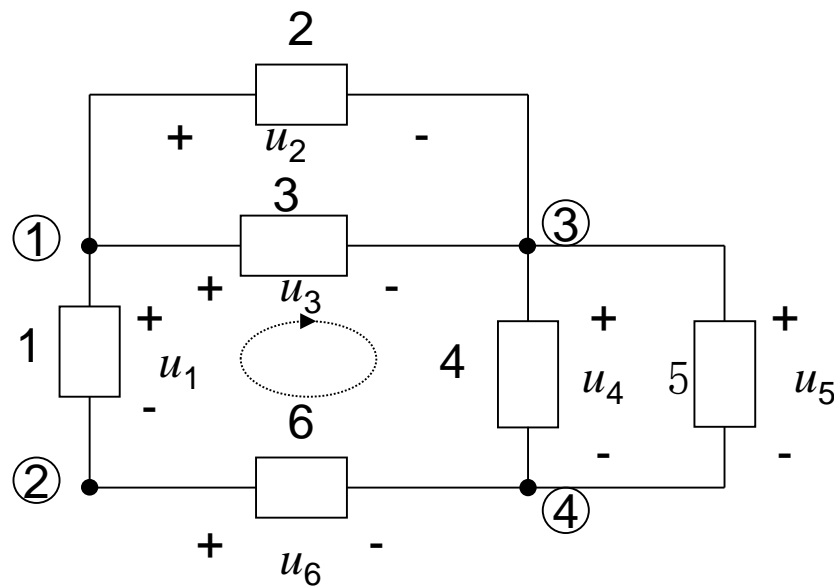
■ 基尔霍夫电压定律(KVL):

在集总电路中，在任何时刻，沿任一回路，所有支路电压的代数和恒等于零。

$$\text{即: } \sum u = 0$$

计算方法:

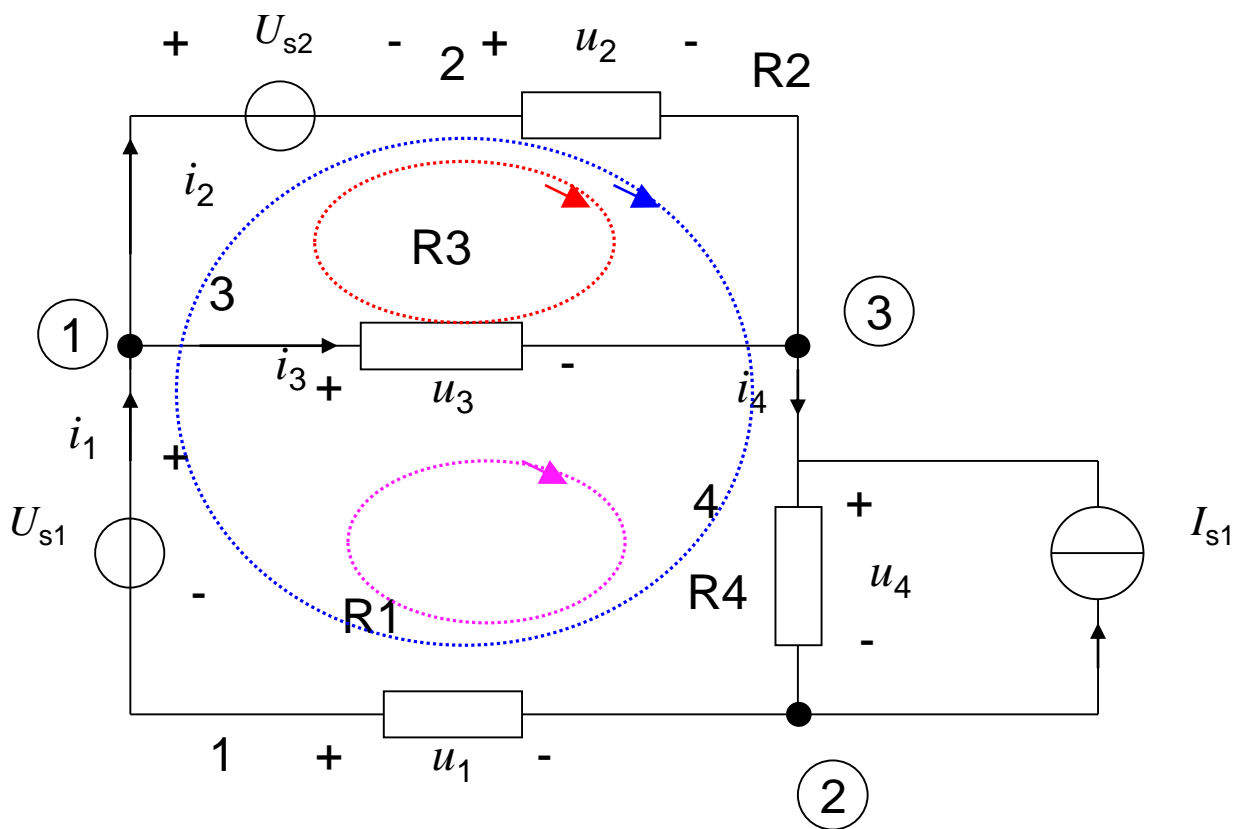
- 1、任意指定一个回路的绕行方向
- 2、若支路电压参考方向与回路绕行方向一致，该电压前面取“+”；若相反，则取“-”。



§ 1-8 基尔霍夫定律

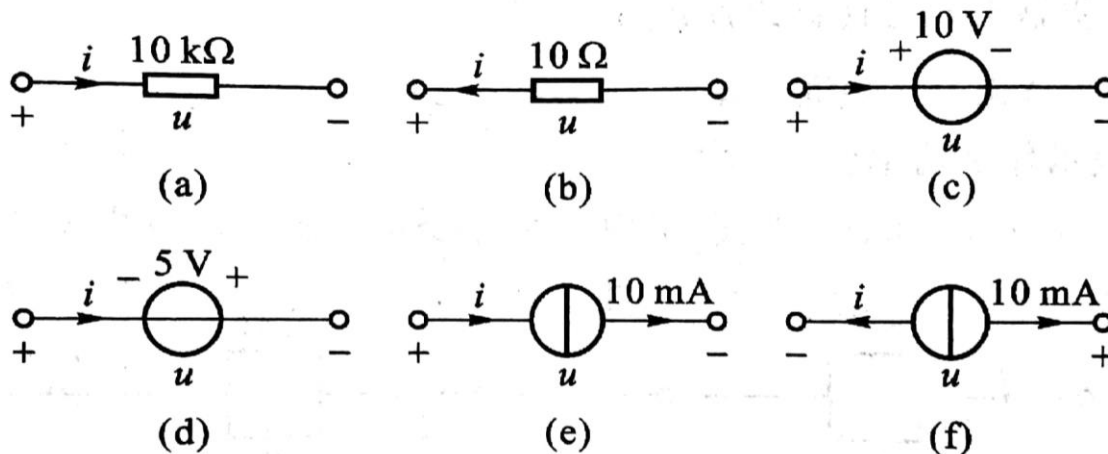
■ 举例说明

列出所选回路的KVL方程：



课后作业

✓ 1-4 在指定的电压 u 和电流 i 的参考方向下, 写出题 1-4 图所示各元件的 u 和 i 的约束方程(即 VCR)。

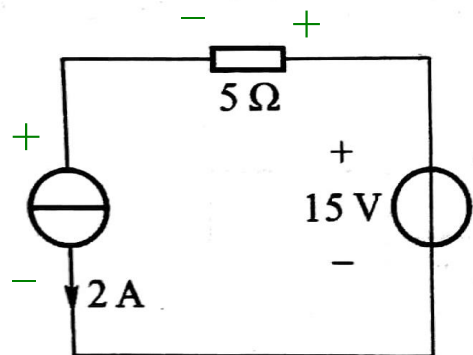


题 1-4 图

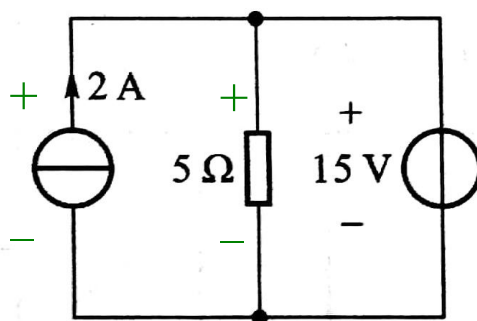
- (a) u 、 i 是关联参考方向, $u = 10 \times 10^3 i$
- (b) u 、 i 非关联参考方向, $u = -10 i$
- (c) u 与电压源的激励电压方向一致, $u = 10\text{ V}$
- (d) u 与电压源的激励电压方向相反, $u = -5\text{ V}$
- (e) i 与电流源的激励电流方向一致, $i = 10\text{ mA}$
- (f) i 与电流源的激励电流方向相反, $i = -10\text{ mA}$

课后作业

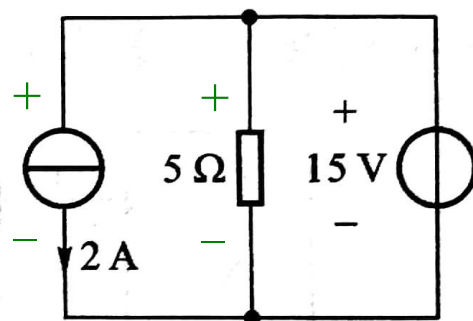
✓ 1-5 试求题 1-5 图中各电路中电压源、电流源及电阻的功率(须说明是吸收还是发出)。



(a)



(b)



(c)

- (a) 电压源：电压与电流非关联参考方向， $15 \times 2 = 30\text{W}$ ，发出功率。
电阻： $2 \times 5 = 10\text{V}$ ， $10 \times 2 = 20\text{W}$ ，吸收。
电流源： $15 - 10 = 5\text{V}$ ， $5 \times 2 = 10\text{W}$ ，吸收。
- (b) 电流源：电压与电流非关联参考方向， $15 \times 2 = 30\text{W}$ ，发出功率。
电阻： $15 / 5 = 3\text{A}$ ， $15 \times 3 = 45\text{W}$ ，吸收。
电压源： $3 - 2 = 1\text{A}$ ， $15 \times 1 = 15\text{W}$ ，发出。
- (c) 电流源：电压与电流关联参考方向， $15 \times 2 = 30\text{W}$ ，吸收功率。
电阻： $15 / 5 = 3\text{A}$ ， $15 \times 3 = 45\text{W}$ ，吸收。
电压源： $3 + 2 = 5\text{A}$ ， $15 \times 5 = 75\text{W}$ ，发出。

例 1-2 图 1-16 所示电路中, 已知 $u_1 = u_3 = 1 \text{ V}$, $u_2 = 4 \text{ V}$, $u_4 = u_5 = 2 \text{ V}$, 求电压 u_x 。

解 对回路 I 和 II 分别列出 KVL 方程(支路的参考方向和回路的绕行方向如图 1-16 所示)

$$-u_1 + u_2 + u_6 - u_3 = 0$$

$$-u_6 + u_4 + u_5 - u_x = 0$$

u_6 在方程中出现两次, 一次前面为“+”号(与 I 绕行方向相同)、一次为“-”号(与 II 绕行方向相反)。将两个方程相加消去 u_6 , 得

$$u_x = -u_1 + u_2 - u_3 + u_4 + u_5 \text{ ①} = 6 \text{ V}$$

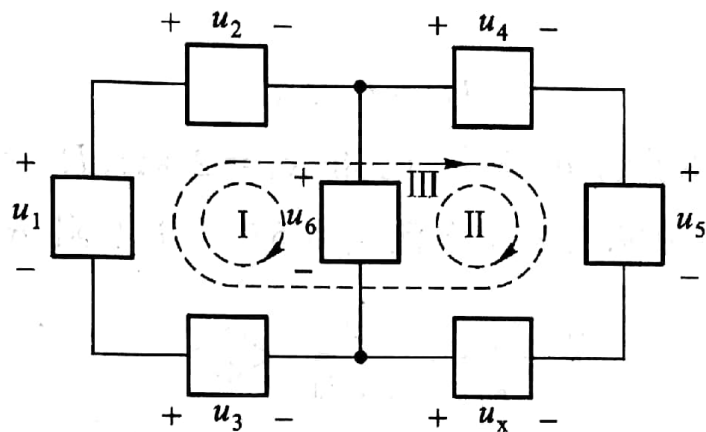


图 1-16 例 1-2 图

例 1-3 图 1-17 所示电路中,电阻 $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $U_{S1} = 3 \text{ V}$, $U_{S2} = 1 \text{ V}$ 。求电阻 R_1 两端的电压 U_1 。

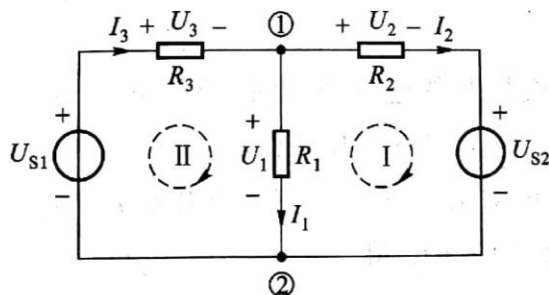


图 1-17 例 1-3 图

解 求解本题时,须同时应用 KCL、KVL 以及元件的 VCR。各支路电压与电流的参考方向如图 1-17 所示。现将支路电流 I_1 、 I_2 与 I_3 都以求解的未知量 U_1 来表示。有 $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_1}{1} = U_1$; 并据 I、II 回路由 KVL 可得 $U_1 = U_{S1} - R_3 I_3$ 与 $U_1 = R_2 I_2 + U_{S2}$, 从而得到

$$I_3 = \frac{U_{S1} - U_1}{R_3} = \frac{3 - U_1}{10}$$

与

$$I_2 = \frac{U_1 - U_{S2}}{R_2} = \frac{U_1 - 1}{2}$$

在结点①使用 KCL, 有 $I_3 = I_1 + I_2$, 即

$$\frac{3 - U_1}{10} = U_1 + \frac{U_1 - 1}{2}$$

从而解得

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

例 1-4 图 1-18 所示电路中, 已知 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 500 \text{ }\Omega$, $R_3 = 200 \text{ }\Omega$, $u_s = 12 \text{ V}$, 电流控制电流源的激励电流 $i_d = 5i_1$ 。求电阻 R_3 两端的电压 u_3 。

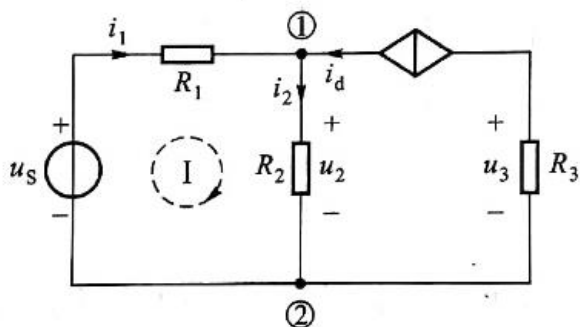


图 1-18 例 1-4 图

解 这是一个有受控源的电路, 宜选择控制量 i_1 作为未知量先求解, 解得 i_1 后再通过 i_d 求 u_3 。可分以下步骤进行:

(1) 在结点①使用 KCL, 可知流过 R_2 的电流 $i_2 = i_1 + i_d = i_1 + 5i_1 = 6i_1$ 。

(2) 在回路 I 中使用 KVL, 得

$$u_s = R_1 i_1 + R_2 i_2 = (R_1 + 6R_2) i_1$$

代入 u_s 、 R_1 、 R_2 的数值, 可得

$$i_1 = 2.4 \text{ mA}$$

(3) R_3 两端的电压 u_3 为

$$u_3 = -R_3 i_d = -R_3 \times 5i_1 = -2.4 \text{ V}$$

第一章 总结

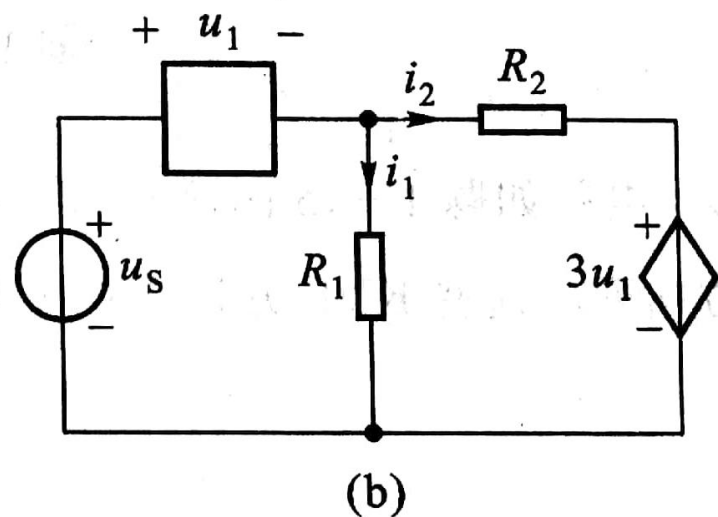
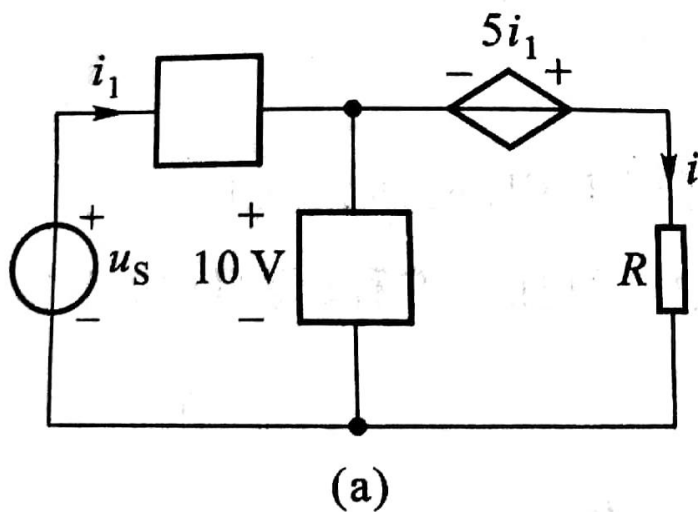
- 电压电流的关联参考方向和非关联参考方向
- 电压电流的关联参考方向和非关联参考方向情况下的欧姆定律表示
- 电压源和电流源的特性
- 受控电源的特性
- 基尔霍夫定律

课后作业

■ P30 1-18 1-19 1-20

(1-18) (1) 已知题 1-18 图(a)中, $R = 2\ \Omega$, $i_1 = 1\ \text{A}$, 求电流 i ;

(2) 已知题 1-18 图(b)中, $u_s = 10\ \text{V}$, $i_1 = 2\ \text{A}$, $R_1 = 4.5\ \Omega$, $R_2 = 1\ \Omega$, 求 i_2 。



题 1-18 图

课后作业

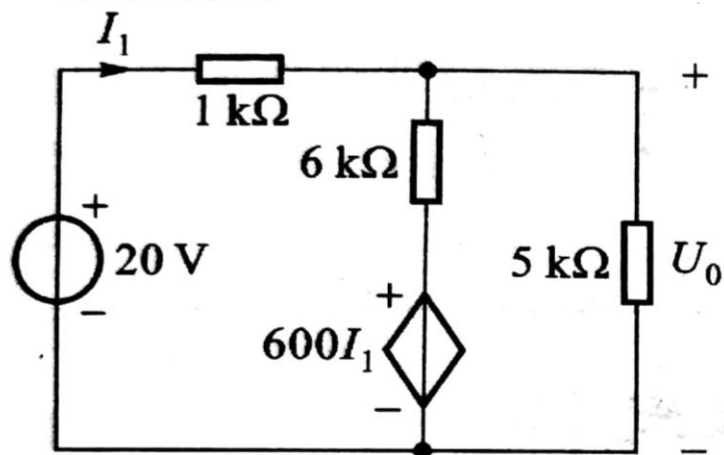
■ P30 1-18 1-19 1-20

1-19

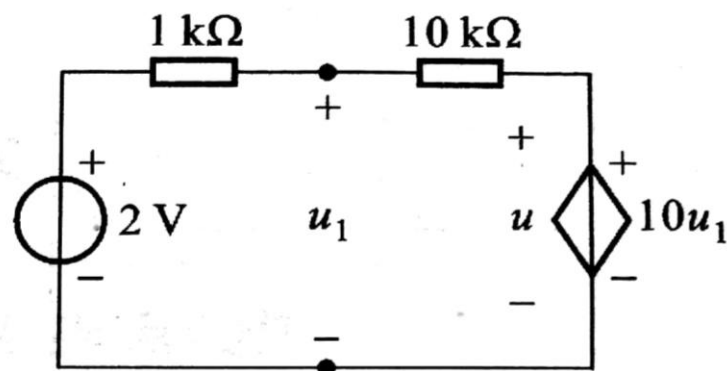
试求题 1-19 图所示电路中控制量 I_1 及电压 U_0 。

1-20

试求题 1-20 图所示电路中控制量 u_1 及电压 u 。



题 1-19 图



题 1-20 图