



电路基础

(Fundamentals of Electric Circuits, INF0120002.07)

2019年02月26日

唐长文 教授

zwtang@fudan.edu.cn

<http://rfic.fudan.edu.cn/Courses.htm>

复旦大学/微电子学院/射频集成电路设计研究小组

版权©2019，版权保留，侵犯必究

第一章 电路元件和电路定律

- 电流和电压及其参考方向
- 吸收和发出电能与电功率
- 电路和电路元件
- 线性电阻元件
- 独立直流电源
- 受控直流电源
- 基尔霍夫定律

电流和电压及其参考方向

- 电路理论中涉及的物理量主要有：电流、电压、电荷和磁通。
 - 电流：用小写字母*i*或者大写字母*I*表示
 - 电压： v 、 V
 - 电荷： q 、 Q
 - 磁通： φ 、 Φ
- 电功率和电能也是重要的物理量。
 - 功率： p 、 P
 - 电能： w 、 W

电压符号：中国标准为u和U，美国标准为v和V。

符号使用规范(1)

- 根据字体样式判断
 - 正体： e 、 π 、 j ，表示常数或者常量
 - 斜体： i 、 v 、 q 、 φ ，表示变量

符号使用规范(2)

- 根据字体和下标的大小写判断
 - 字体大写、下标大写: V_A , 表示直流量
 - 字体大写、下标小写: V_a , 表示幅值
 - 字体小写、下标大写: v_A , 表示即时量
 - 字体小写、下标小写: v_a , 表示变化量
- 根据括号中变量判断
 - 变量 t : $v(t)$, 表示时间域变化量
 - 变量 s : $V(s)$, 表示复频域变化量
 - 变量 $j\omega$: $V(j\omega)$, 表示相量域变化量

电流

- 定义：在单位时间内，通过某横切面的电荷量

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- 方向：正电荷运动的方向
- 单位：电荷的单位为库[仑](C)，时间的单位为秒(s)，电流的单位为安[培](A)

电压

- 定义：单位正电荷从一点移动到另一点，电场力对电荷做的功

$$v = \frac{dw}{dq}$$

- 方向：从高电位指向低电位的方向
- 单位：功的单位为焦 [耳](J)，电荷的单位为库[仑](C)，电压的单位为伏 [特](V)

电压也称电位差！

电压需要参考点，参考点通常称零电位，常用符号 $\frac{1}{0}$ 表示。

国际单位制倍数和分数词头

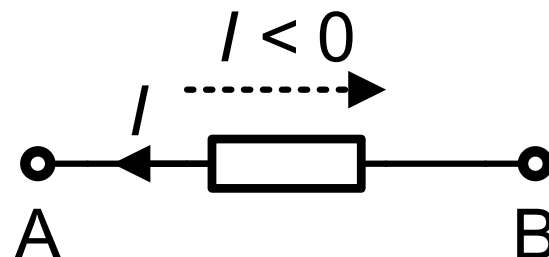
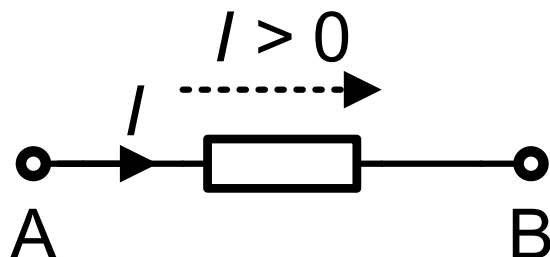
倍率	词头名称词		词头符号	倍率	词头名称词		词头符号
10^{24}	尧[它]	yotta	Y	10^{-1}	分	deci	d
10^{21}	泽[它]	zetta	Z	10^{-2}	厘	centi	c
10^{18}	艾[可萨]	exa	E	10^{-3}	毫	milli	m
10^{15}	拍[它]	peta	P	10^{-6}	微	micro	μ
10^{12}	太[拉]	tera	T	10^{-9}	纳[诺]	nano	n
10^9	吉[咖]	giga	G	10^{-12}	皮[可]	pico	p
10^6	兆	mega	M	10^{-15}	飞[母托]	femto	f
10^3	千	kilo	k	10^{-18}	阿[托]	atto	a
10^2	百	hecto	h	10^{-21}	仄[普托]	zepto	z
10	十	deca	da	10^{-24}	幺[科托]	yocto	y

参考方向

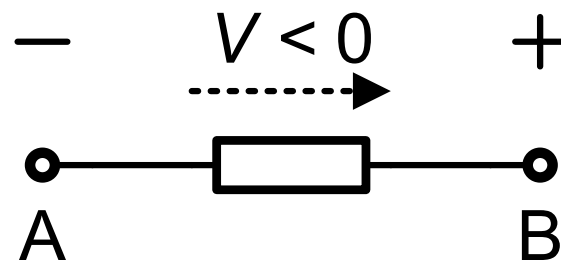
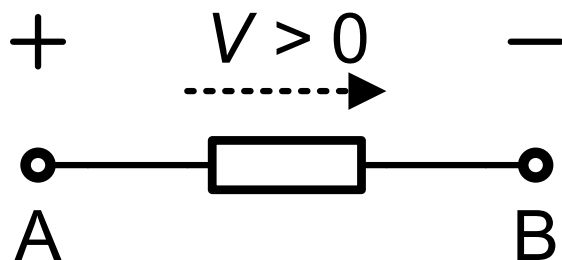
- 定义：人为规定的方向
- 目的：
 - 代数值的正和负可以反映实际方向
 - 能写出随时间变化的函数式
- 方式：
 - 用箭头“ $\rightarrow$ ”表示
 - 用双下标表示

箭头表示参考方向

• 电流



• 电压

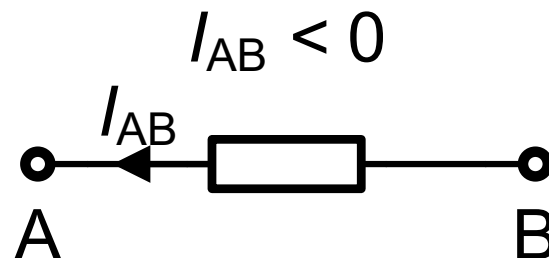
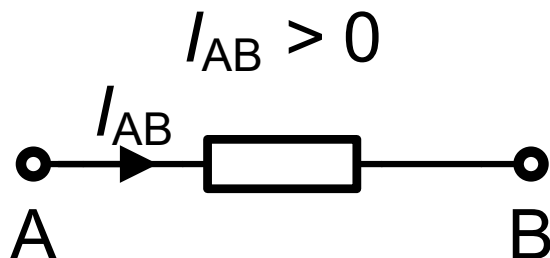


“+”表示高电位，“-”表示低电位。

双下标表示参考方向

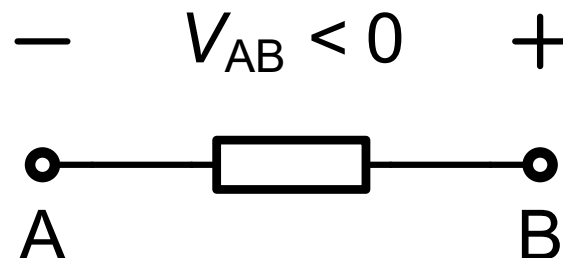
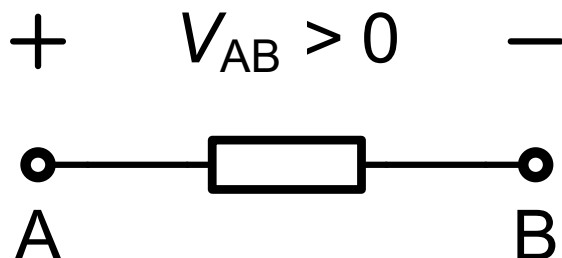
- I_{AB} 表示电流参考方向是由A到B

$$I_{AB} = -I_{BA}$$



- V_{AB} 表示电压参考方向是由A到B

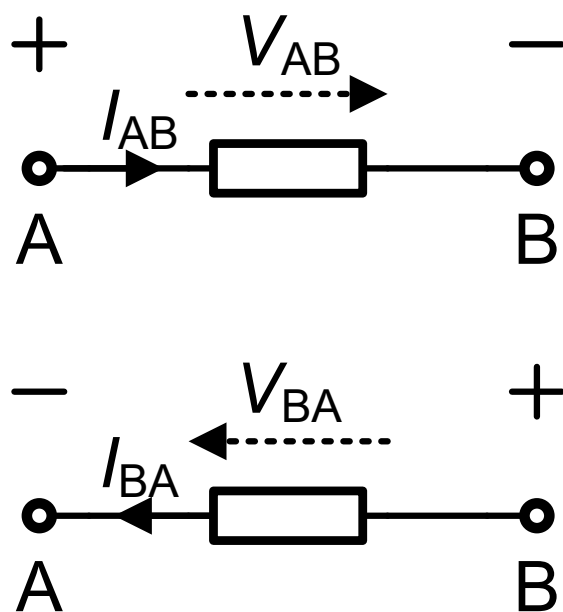
$$V_{AB} = -V_{BA}$$



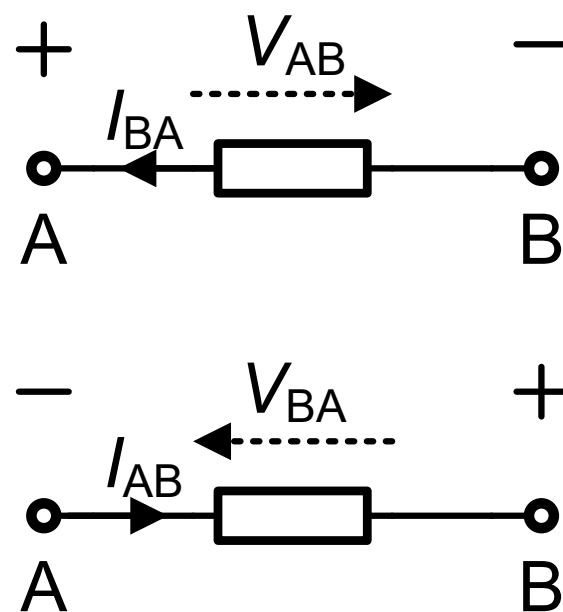
关联参考方向

一个元件上的电压和电流的参考方向取成相同的，称为关联参考方向；否则，称为非关联参考方向。

关联参考方向

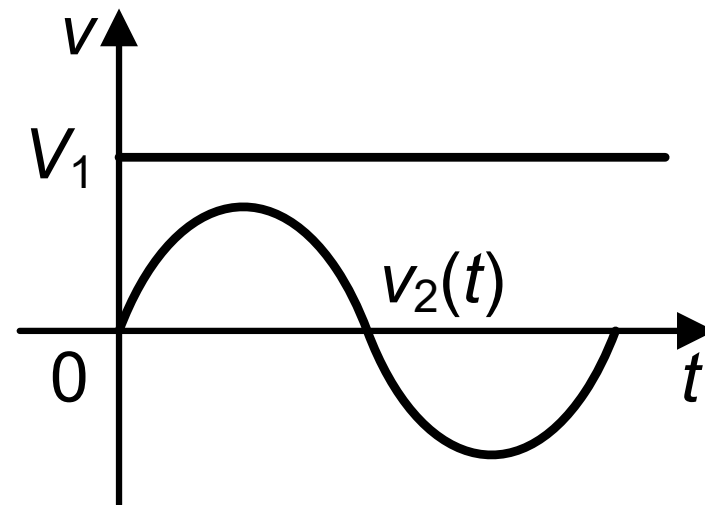


非关联参考方向



直流(DC)和交流(AC)

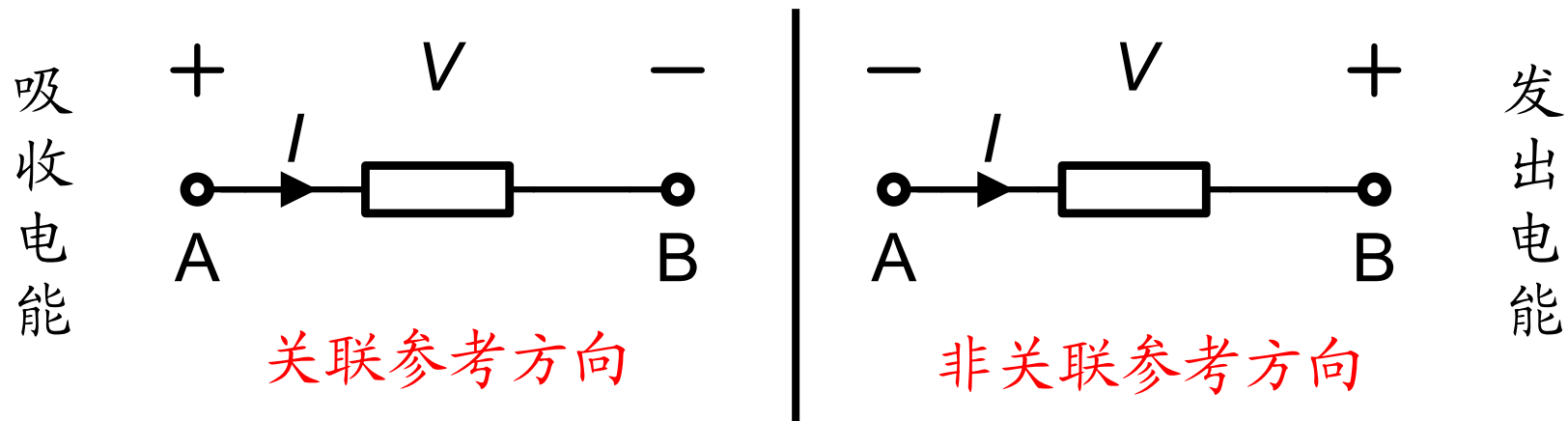
- 直流：量值和方向不随时间变化，通常用大写字母表示。例如： I 、 V
- 交流：随时间作周期性变化且平均值为零，通常用小写字母表示。例如， $i(t)$ 、 $v(t)$



吸收和发出电量以及电功率

• 吸收和释电量

当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时，电场力要对电荷做功，这是，元件吸收电量；反之，正电荷从电压的“-”极经元件运动到电压“+”极时，电场力做负功，元件发出电量。



电功率

- 定义：在单位时间内，吸收的电能量

$$p = \frac{dw}{dt}$$

- 当电压和电流为关联参考方向，根据电流和电压定义，

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = v \times i$$

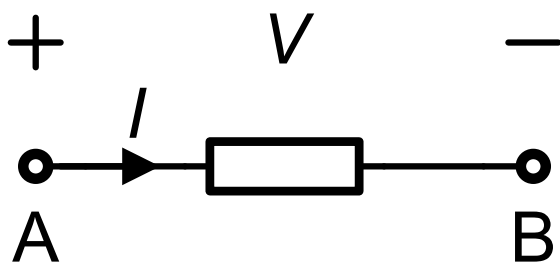
- 单位：功的单位为焦 [耳](J)，时间的单位为秒(s)，电功率的单位为瓦[特](W)

思考

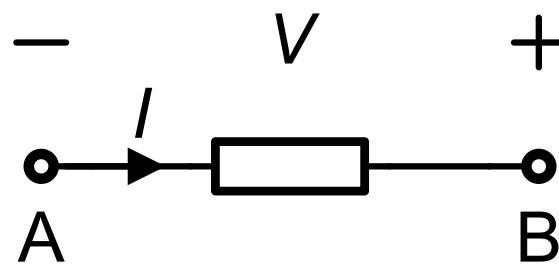
- 电流和电压能有负值吗？
- 电压和电流的正负值反映了什么？
- 功率和能量能有负值吗？
- 功率和能量的正负值反映了什么？

例题1

- (a) 电压 $V = 5\text{ V}$ ，电流 $I = 2\text{ A}$ ，元件吸收功率是多少？发出功率又是多少？ $P = VI = 10\text{ W}$ ， $P = -VI = -10\text{ W}$
- (b) 电压 $V = -5\text{ V}$ ，电流 $I = 2\text{ A}$ ，元件发出功率是多少？吸收功率又是多少？ $P = VI = -10\text{ W}$ ， $P = -VI = 10\text{ W}$



(a)



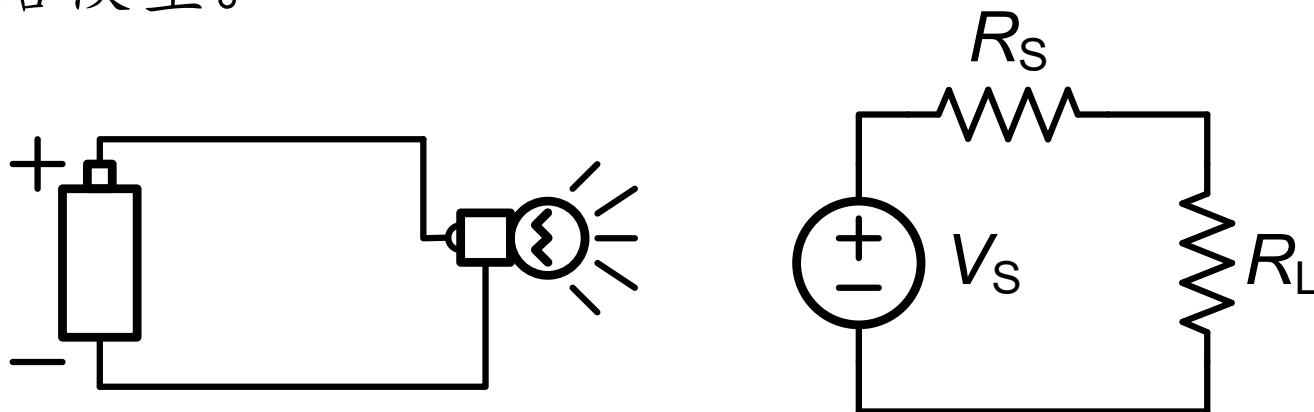
(b)

电路、电路模型和电路元件

实际电路的电路模型是由理想电路元件相互连接而成。

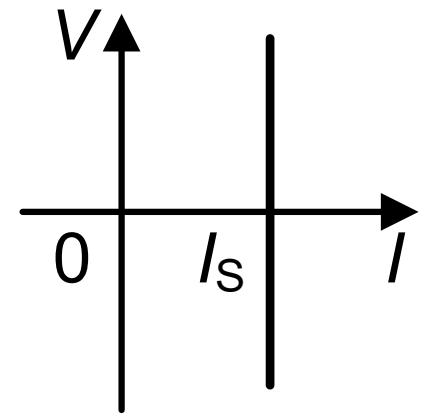
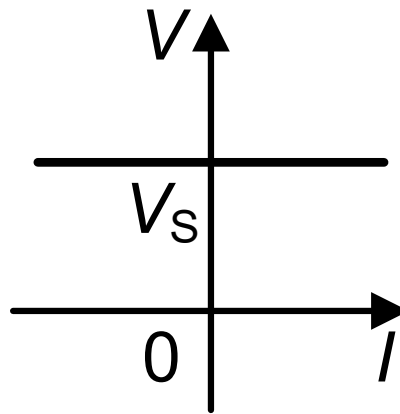
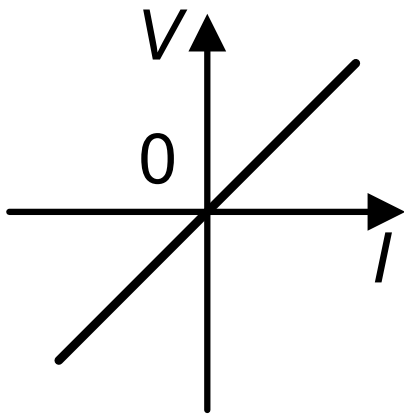
电路元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种特定电磁特性并有精准数学定义的基本结构。

本课程讨论的对象不是实际电路而是实际电路的电路模型。



元件的伏安特性

- 元器件端口的电压和电流的关系 (VCR, voltage current relation) 称为元件的伏安特性。



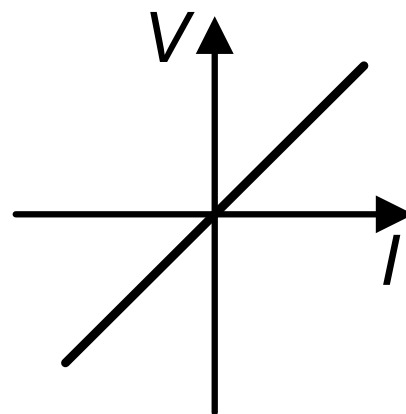
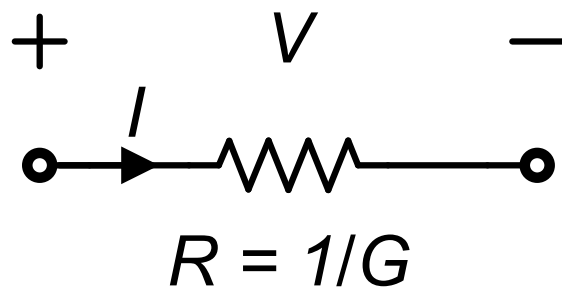
线性电阻元件

在电压和电流为关联参考方向是，在任何时刻电压和电流服从欧姆定律，

$$V = RI$$

$$I = GV$$

R 称为电阻，单位为欧[姆](Ω)； G 称为电导，单位为西[门子](S)。



正电阻和负电阻

电阻吸收的电功率 $P = VI = RI^2 = GV^2$

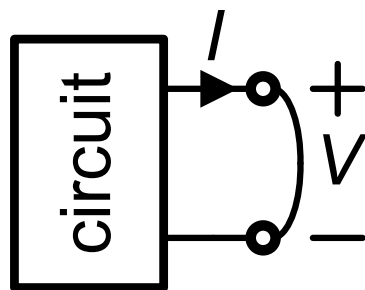
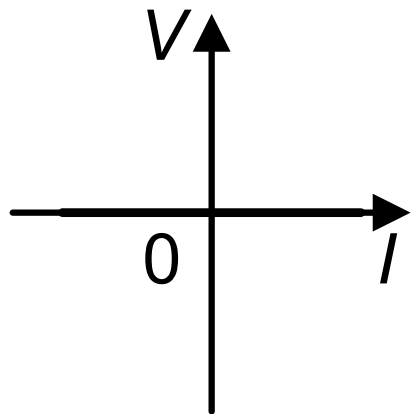
R 和 G 为正值，则 P 为非负，只能吸收电能不能发出电能，这样的电阻为耗能元件。电压和电流的关系位于第I和第III象限。

R 和 G 为负值，则 P 为非正，能发出电能，称为负电阻。电压和电流的关系位于第II和第IV象限。

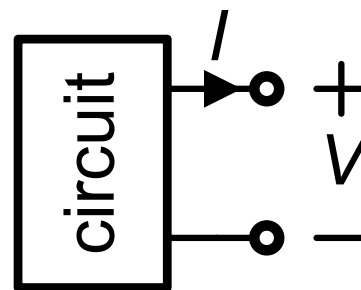
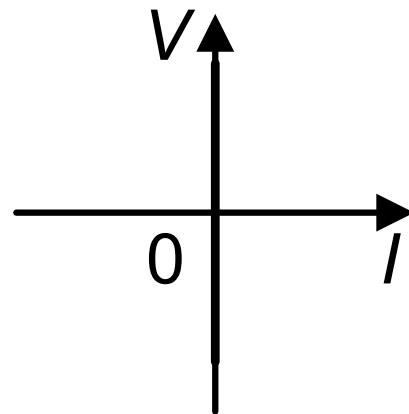
无源元件(Passive element)和有源元件(Active element)

短路和开路

- 短路： $R = 0$ ， $V = 0$ ， I 可以任意值
- 开路： $G = 0$ ， $I = 0$ ， V 可以任意值



short

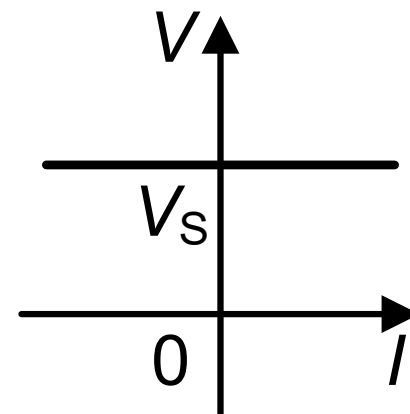
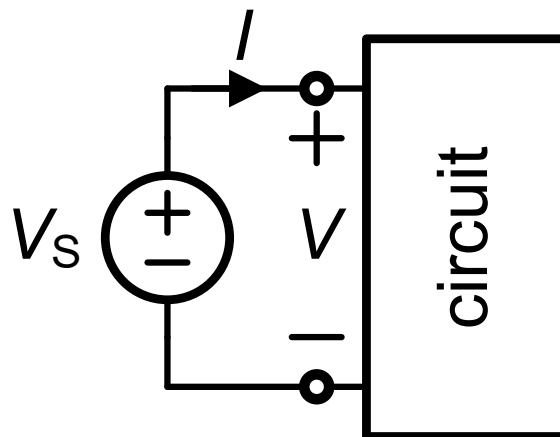


open

独立直流电源

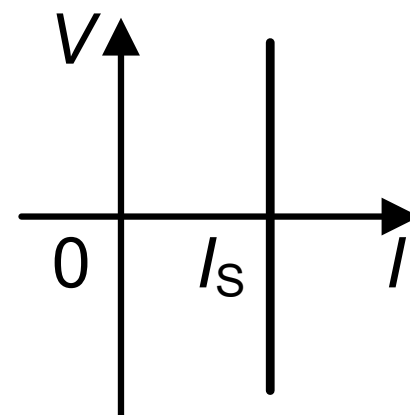
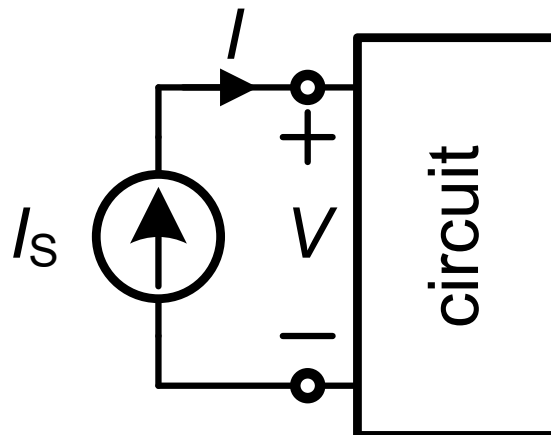
- 直流电压源
电压恒定为 V_S ，
电流任意值。

禁止短路！



- 直流电流源
电流恒定为 I_S ，
电压任意值。

禁止开路！



受控直流电源

- 受控电压源

- 电压控制电压源(VCVS), $V = \alpha V_1$

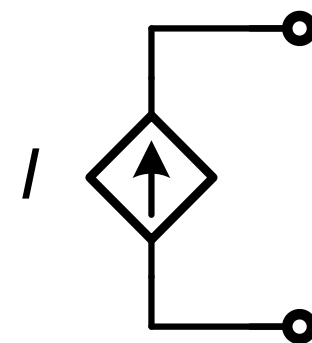
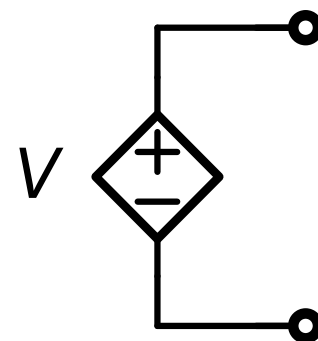
- 电流控制电压源(CCVS), $V = rI_1$

- 受控电流源

- 电压控制电流源(VCCS), $I = gV_1$

- 电流控制电流源(CCCS), $I = \beta I_1$

V_1 和 I_1 分别表示控制电压和控制电流，控制系数 α 和 β 是无量纲量，控制系数 r 和 g 的量纲分别是电阻和电导。

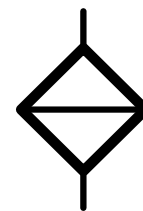
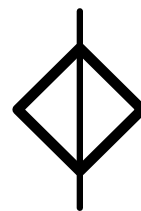
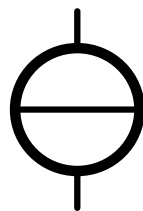
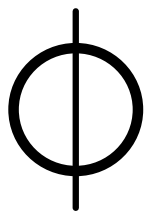


思考

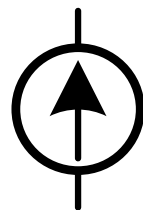
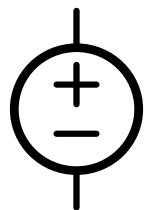
- 独立直流电源能吸收电功率吗？
- 受控电源能发出电功率吗？
- 受控电源能吸收电功率吗？

元件符号

- 中国标准 (欧洲标准)



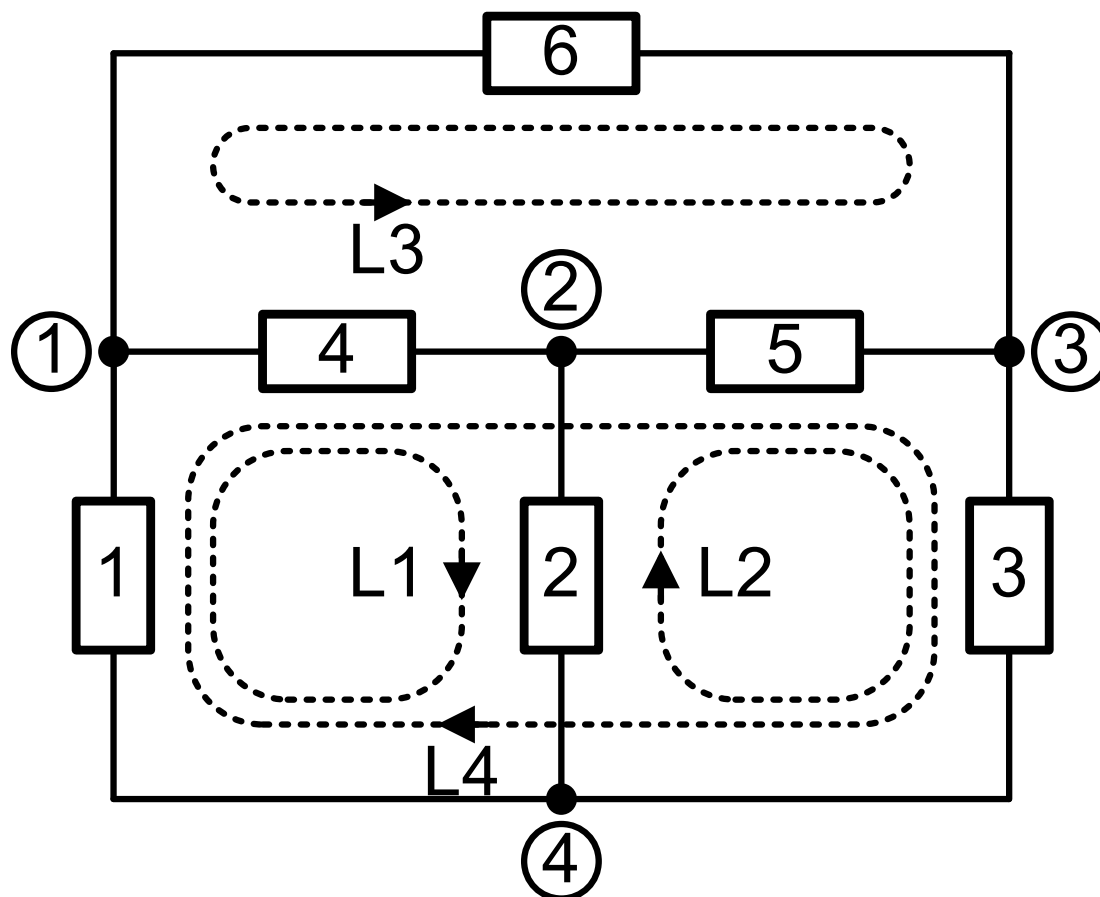
- 美国标准



基尔霍夫定律

• 电路结构

- 支路
- 节点
- 路径
- 回路
- 网孔
- 平面电路



基尔霍夫电流定律

基本定律：任一时刻，流出(或流入)任一节点的支路电流代数和等于零。

$$\sum I_k = 0$$

I_k 参考方向为流出节点时， I_k 的前面取“+”号，流入节点时， I_k 前面取“-”号。

广义定律：任一时刻，流出(或流入)任一闭合边界的支路电流代数和等于零。

任一时刻，流出任一节点(或闭合边界)支路电流的代数和等于流入该节点支路电流的代数和。

节点KCL方程

节点1:

$$I_1 + I_4 + I_6 = 0$$

节点2:

$$-I_2 - I_4 + I_5 = 0$$

节点3:

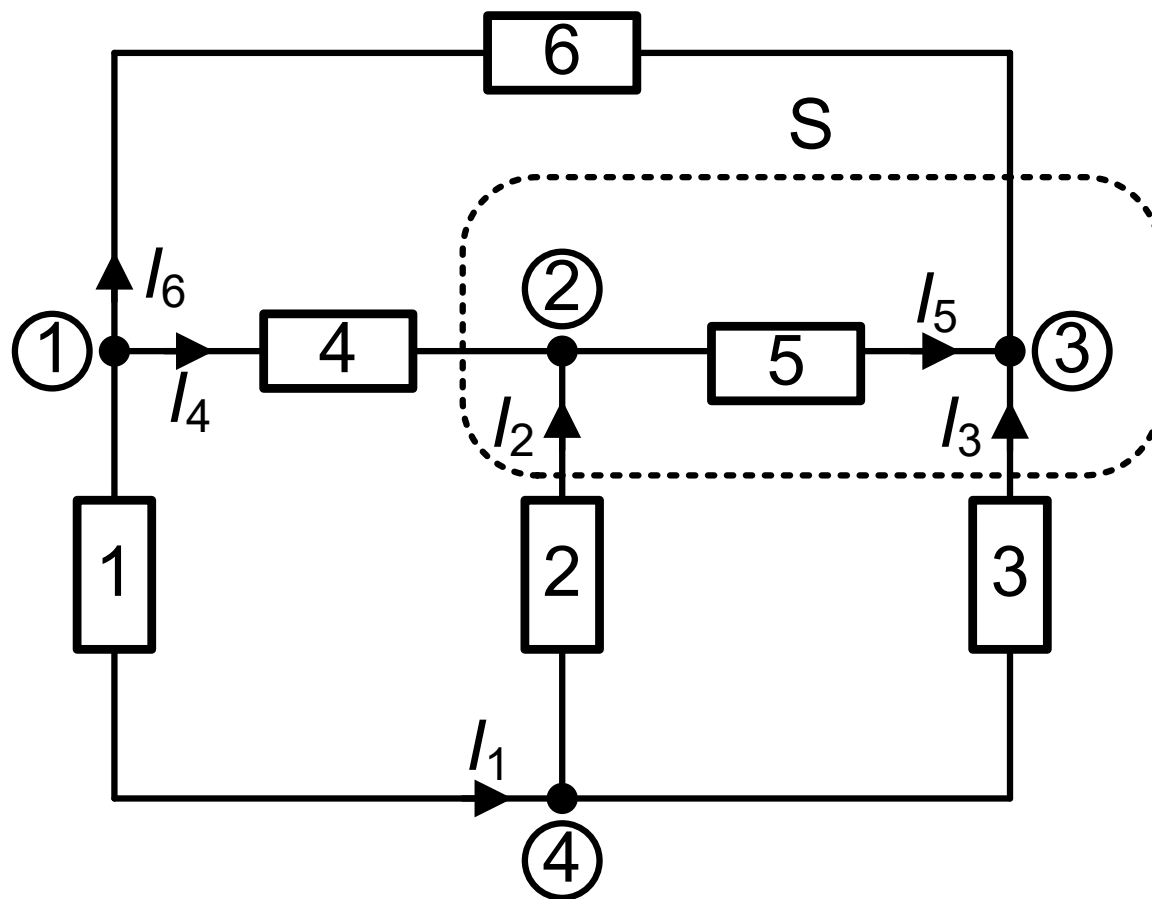
$$-I_3 - I_5 - I_6 = 0$$

节点4:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

闭合边界S:

$$-I_2 - I_3 - I_4 - I_6 = 0$$



由节点2和节点3的KCL方程相加得到

基尔霍夫电压定律

基本定律：任一时刻，沿任一回路的支路电压代数和等于零。

$$\sum V_k = 0$$

V_k 参考方向与回路方向相同时， V_k 的前面取“+”号，方向相反时， V_k 前面取“-”号。

沿任一回路，各支路电压降的代数和等于电压升的代数和。

任意两点之间的电压具有确定值，与计算路径无关。

回路KVL方程

回路1:

$$-V_1 + V_4 + V_2 = 0$$

回路2:

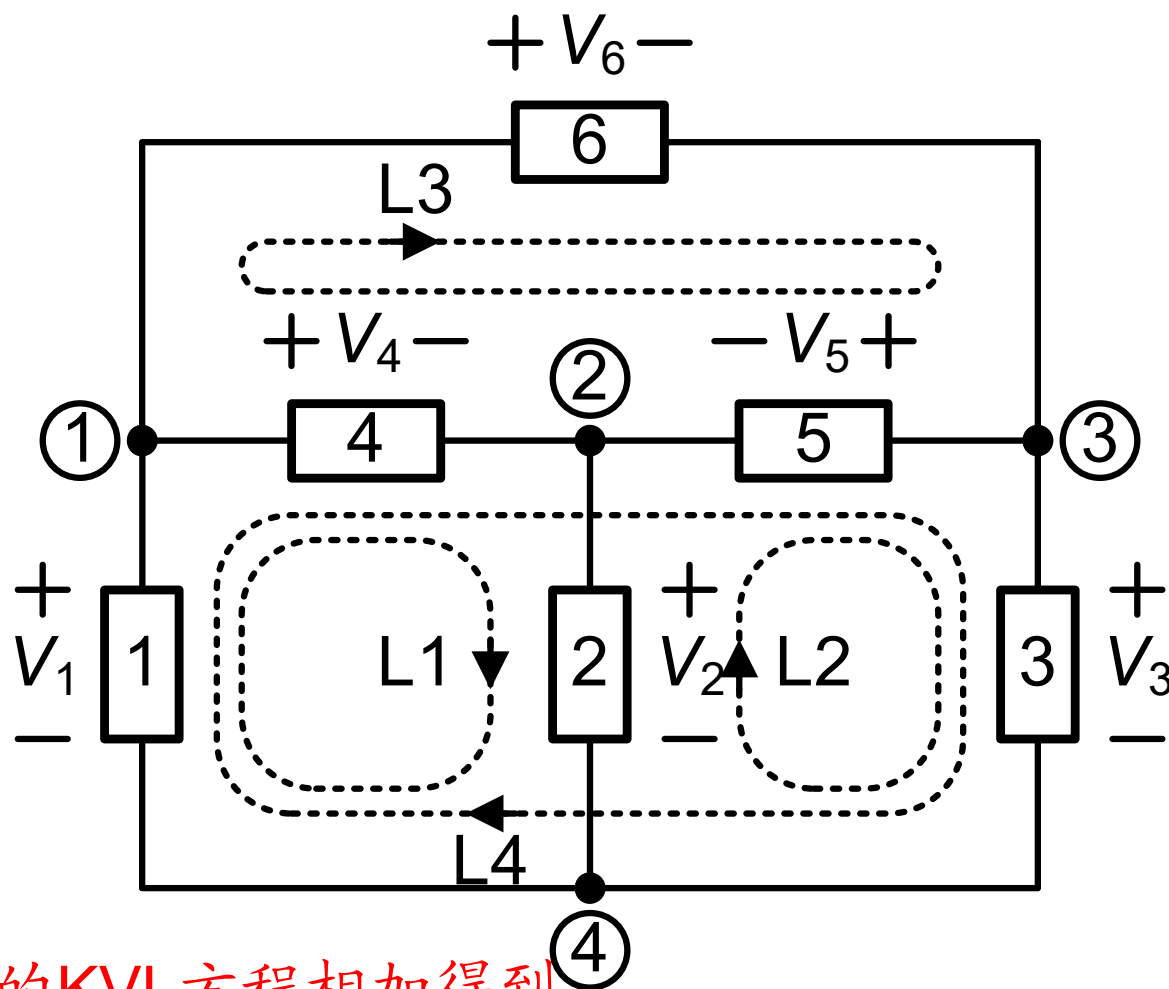
$$-V_2 - V_5 + V_3 = 0$$

回路3:

$$-V_4 + V_6 + V_5 = 0$$

回路4:

$$-V_1 + V_4 - V_5 + V_3 = 0$$



回路4由回路1和回路2的KVL方程相加得到

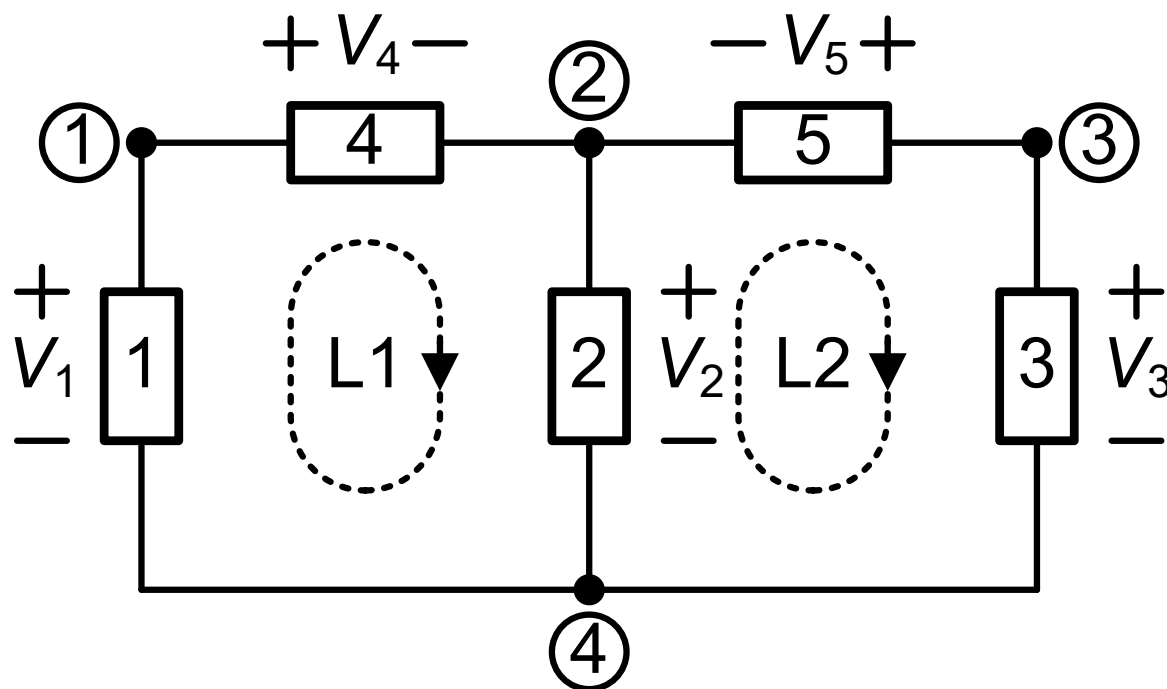
节点KCL方程和回路KVL方程

在含有 n 个节点和 b 条支路的电路中，任意 $(n - 1)$ 个节点的KCL方程是一组独立方程； $b - (n - 1)$ 个网孔的KVL方程是一组独立方程。

$$n = 4, b = 5$$

3个节点KCL方程

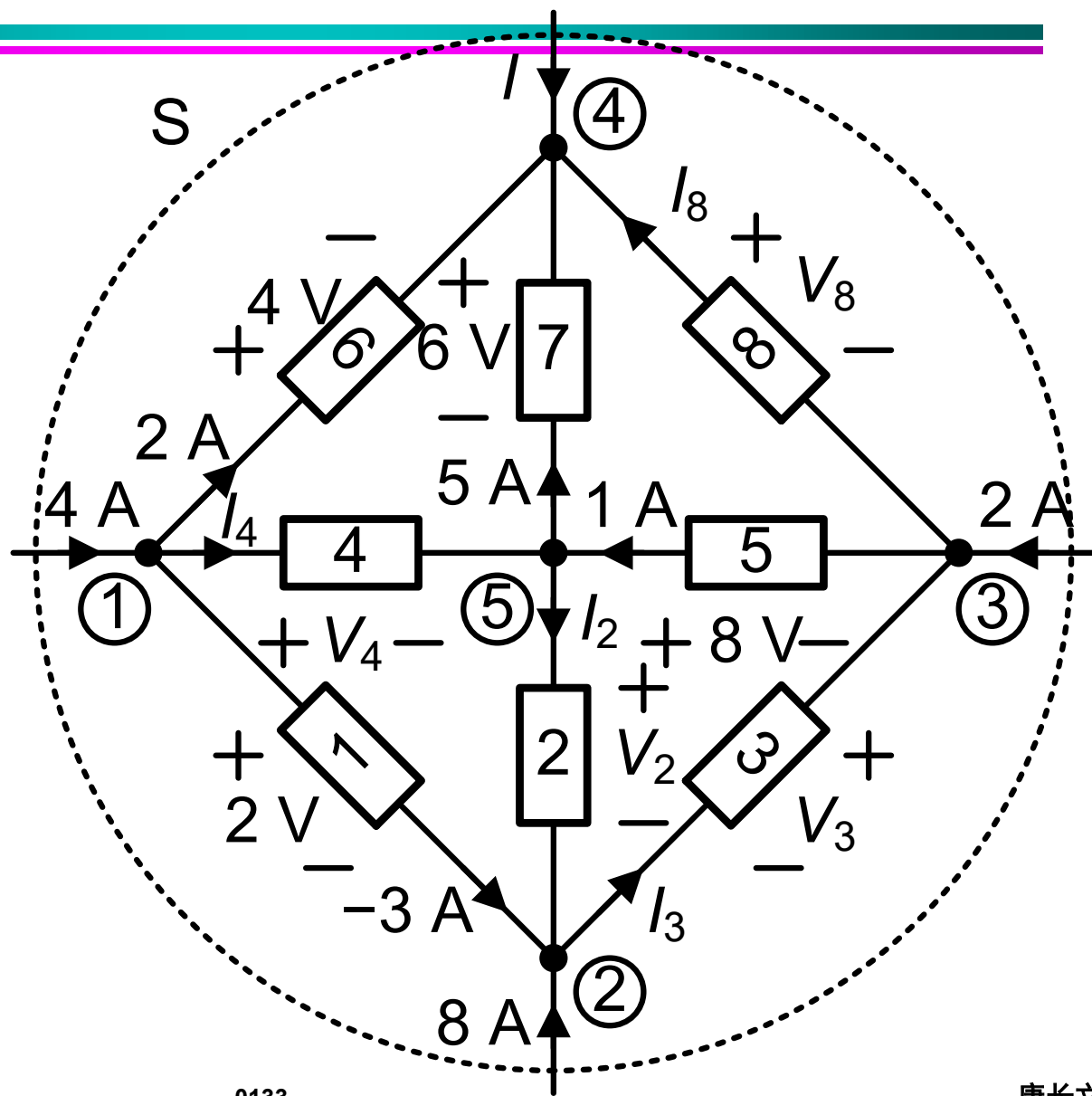
2个网孔KVL方程



例题2

已知部分支路的电压和电流，求其他支路电压和电流。

$$\begin{aligned} V_4 &= 10 \text{ V}, \quad V_2 = -8 \text{ V}, \\ V_3 &= -16 \text{ V}, \quad V_8 = 14 \text{ V}, \\ I_4 &= 5 \text{ A}, \quad I_2 = 1 \text{ A}, \\ I_3 &= 6 \text{ A}, \quad I_8 = 7 \text{ A}, \\ I &= -14 \text{ A} \end{aligned}$$



例题3

如图所示，已知 $R_1 = R_2 = 1\ \Omega$ ， $\beta = 2$ ， $V_{S1} = 1\text{ V}$ ， $V_{S2} = 3\text{ V}$ ， $V_{S3} = 2\text{ V}$ 。求每个独立源和受控源发出的功率。

$$V_1 = -1\text{ V}$$

$$V_2 = 2\text{ V}$$

$$I_1 = -1\text{ A}$$

$$I_2 = 2\text{ A}$$

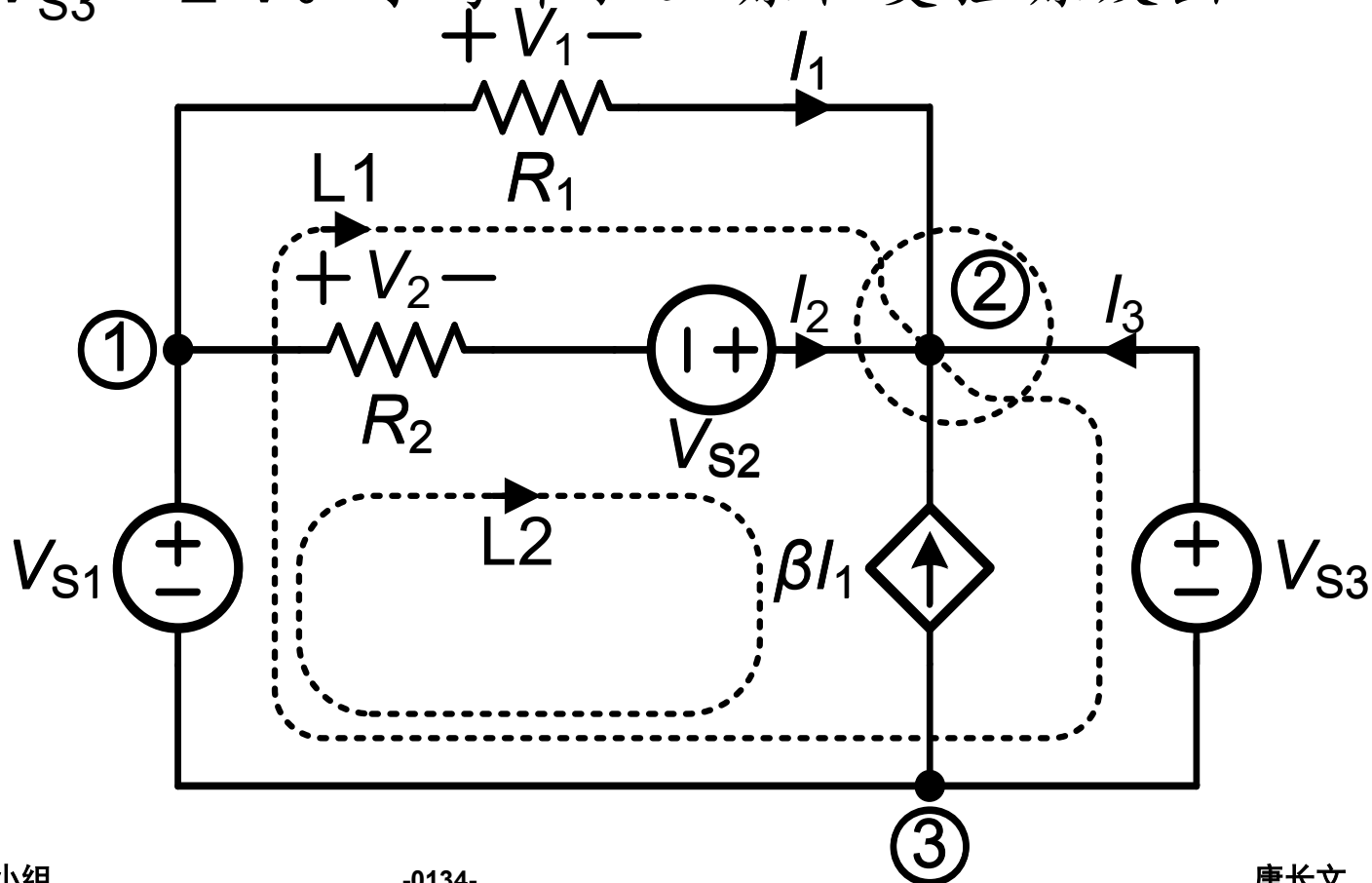
$$I_3 = 1\text{ A}$$

$$P_1 = 1\text{ W}$$

$$P_2 = 6\text{ W}$$

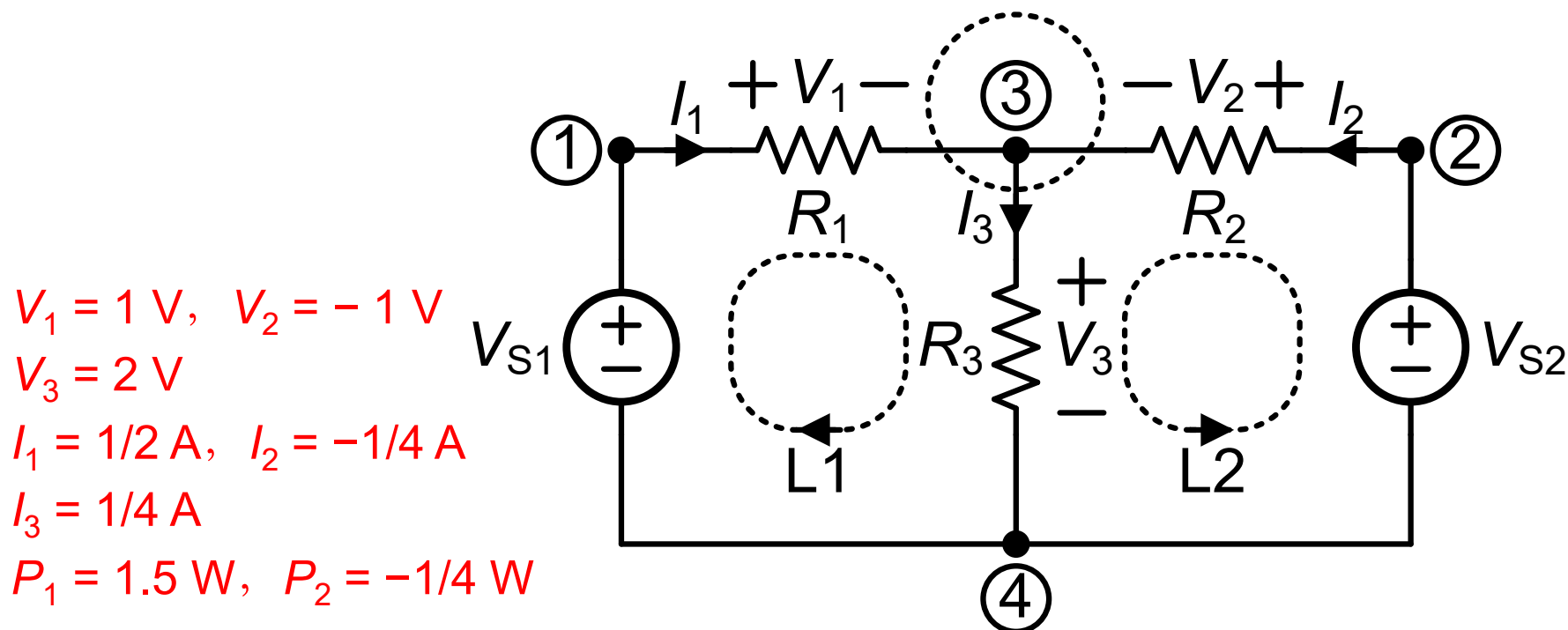
$$P_3 = 2\text{ W}$$

$$P_4 = -4\text{ W}$$



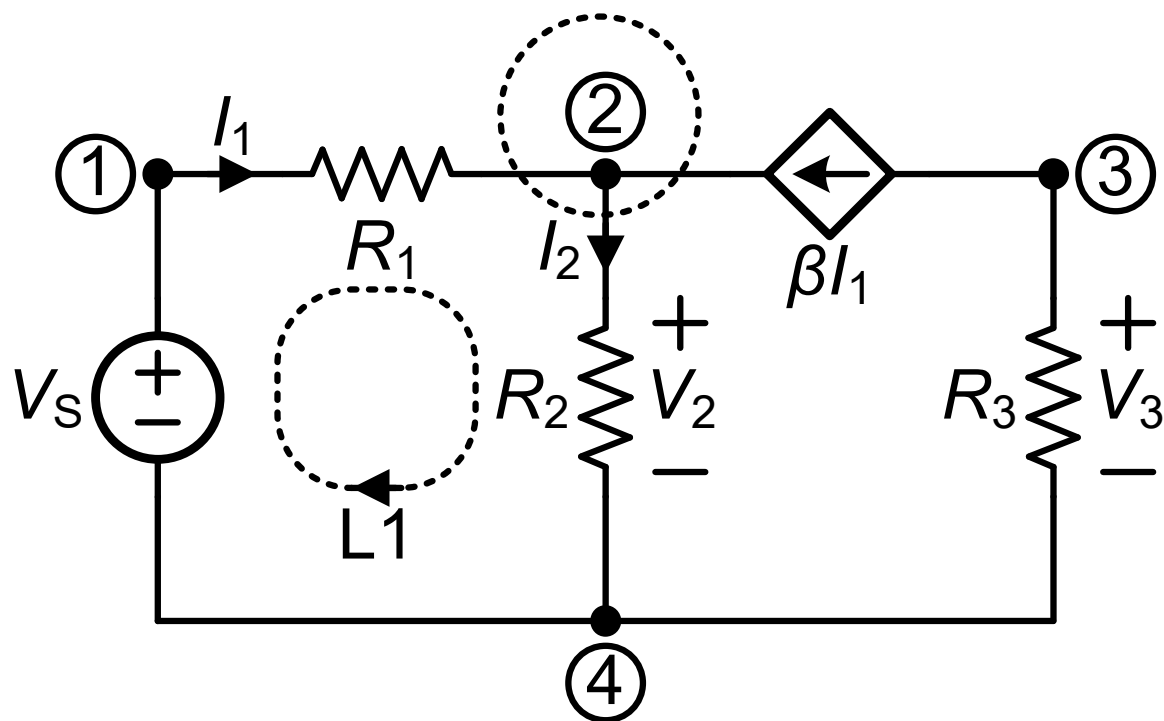
例题4

如图所示，已知 $R_1 = 2 \Omega$ ， $R_2 = 4 \Omega$ ， $R_3 = 8 \Omega$ ， $V_{S1} = 3 \text{ V}$ ， $V_{S2} = 1 \text{ V}$ 。求电阻 R_3 两端的电压 V_3 和每个电压源发出的功率。



例题5

如图所示，已知 $R_1 = 1\ \Omega$ ， $R_2 = 2\ \Omega$ ， $R_3 = 4\ \Omega$ ， $\beta = 3$ ， $V_S = 9\text{ V}$ ，求电阻 R_3 两端的电压 V_3 和独立电源和受控电源发出的功率。



$$I_1 = 1\text{ A}, I_2 = 4\text{ A}$$

$$V_3 = -12\text{ V}$$

$$P_1 = 9\text{ W}, P_2 = 60\text{ W}$$

关于电路基础的参考书目

- ◆ 邱关源原著, 罗先觉修订. 电路. 第5版. 北京:高等教育出版社, 2013
- ◆ 孙立山, 陈希有主编. 电路理论基础. 第4版. 北京:高等教育出版社, 2013
- ◆ 陈希有主编. 电路理论教程. 北京:高等教育出版社, 2013