



电路与模拟电子技术

北京理工大学自动化学院

2023. 9. 13



课程名称： 电路与模拟电子技术

课程组成： 电路分析基础+模拟电子技术基础

学分： 6学分（理论学时： 80 实验学时： 32）

适用专业： 电子信息类各专业

课程性质： 电类专业必修的专业基础课

授课教师： 肖烜

E-mail: bitxxuan@bit.edu.cn

北京理工大学自动化学院



《电路分析基础》课程的地位、任务

《电路分析基础》是电路理论的入门课程，是电类各专业的基础课。它将着重阐述线性非时变电路的基本概念、基本规律和基本分析方法，为后续课程打下牢固的分析基础，是电类各专业本科生的核心课程之一。

通过本课程的学习，学生不但能获得电路分析的基本知识，而且可以在抽象思维能力，分析计算能力，总结归纳能力和实验研究能力诸方面得到提高。本课程的先修课程是《高等数学》和《大学物理》。



学习本课程的目的和任务

21世纪是高科技发展的世纪，21世纪将是知识经济占国际经济主导地位的时代。面向21世纪的高等教育质量目标，概括地说，就是注意**素质和能力**培养，加强**基础**，拓宽专业，造就研究型大学，培养全面适应新世纪的**创新性人才**，满足21世纪对信息类专业人才的要求。

学习本课程的目的：

本课程是专业基础理论课，主要使学生获得有关电路分析方面的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课程以及今后从事工程技术工作打好基础。



推荐参考书及资料来源

教材：李瀚荪. 电路分析基础（第5版）上. 高等教育出版社，2022年

指导书：李瀚荪，吴锡龙. 简明电路分析基础教学指导书. 高等教育出版社，2003年8月.



课程意义及解决的问题

一、课程内容

电路分析：在已知电路结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

激励：电源或信号源的电压或电流，它推动电路工作，即产生电路各部分电压或电流的原因。

响应：激励在电路各部分产生的电压和电流，即研究电路中因果关系。



课程意义及解决的问题

二、学习方法：

要找出与中学物理“电学”部分的联系与不同，
是在其基础上的延续和加

中学——是从研究某一问题的特殊性入手。

大学——是从问题的普遍性（共性）入手，建立物理量间的函数关系→得到其特殊性。



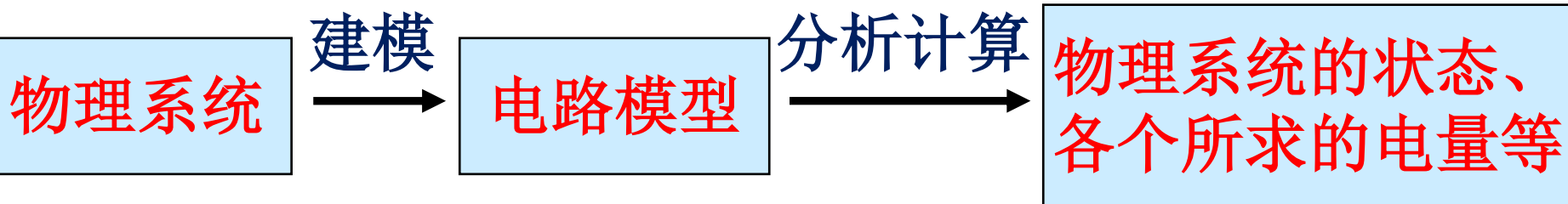
学习方法

- ✓ 掌握理论知识，大量演算习题
- ✓ 把握电路规律，注意知识内在联系
- ✓ 思考，讨论，实验，交流
- ✓ 教学与自主学习的指导思想



课程意义及解决的问题

任何一个门类的知识均包含着“分析”与“综合”两个部分，本课程着重在于“分析”



本课程研究的对象为电路模型，非实际电路
《电路分析》课程研究的内容为求解电路的状态，研究系统中能量的变化



课程结构

电路



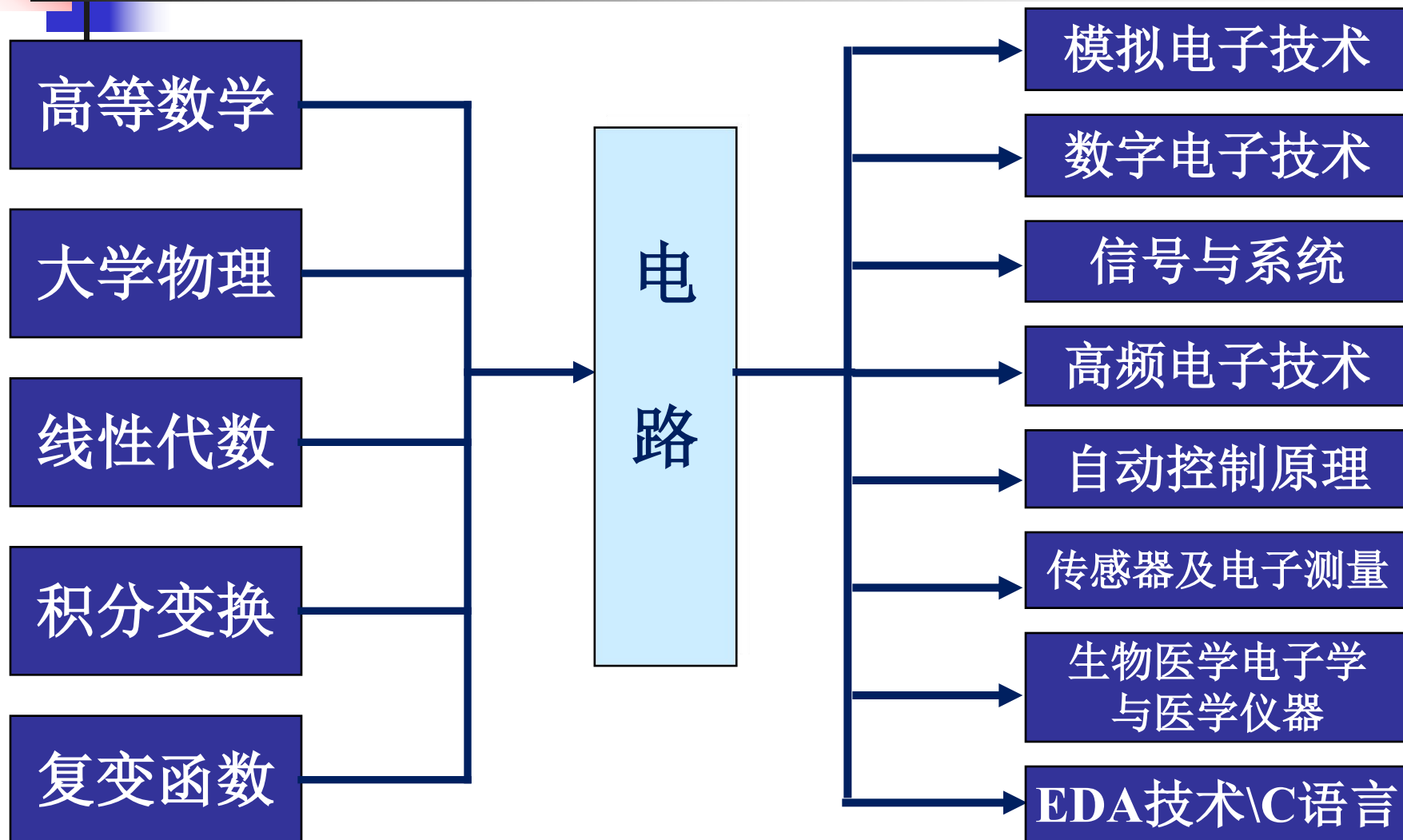
```
graph TD; A[电路] --> B[电阻电路的分析<br/>(第一、二、三、四章)]; A --> C[动态电路的分析<br/>(第五、六章)]; A --> D[正弦稳态的分析];
```

电阻电路
的分析
(第一、二、
三、四章)

动态电路
的分析
(第五、六章
)

正弦稳态
的分析

前后续课程及联系





课时分配

课时分配

第1章	集总参数电路中电压、电流的约束关系	8学时
第2章	网孔分析和节点分析	6学时
第3章	叠加方法与网络函数	6学时
第4章	分解方法及单、双口网络	6学时
第5章	电容元件和电感元件	3学时
第6章	一阶电路	3学时
共计：		32学时



作业要求和成绩评定

- 1、在认真复习的基础上，**独立完成**作业。
- 2、作业要书写整洁，图要标绘清楚，要注明单位。
- 3、以班为单位交作业，每章交一次，全体同学均交。
- 4、作业在下次上课前交。

课程最后成绩评定方法：

期末考试卷面**占70%**，平时**占30%**。



第1章

集总参数电路中电压、电流的约束关系

- 1. 1 电路及集总电路模型
- 1. 2 电路变量，电流、电压及功率
- 1. 3 基尔霍夫定律
- 1. 4 电阻元件
- 1. 5 电压源
- 1. 6 电流源
- 1. 7 受控源
- 1. 8 分压公式和分流公式
- 1. 9 两类约束，KCL、KVL方程的独立性
- 1. 10 支路分析：支路电压法和支路电流法



第1章

集总参数电路中电压、电流的约束关系

作业：1-3，1-6，1-10，1-14，1-16，1-21，1-23
1-24，1-29，1-32（1-30），1-34（1-31）
1-37（1-32），1-38（1-33）
（括号内代表第四版的题号）

注意事项：

- 1 标注题号，必须抄图；
- 2 后面的作业还要画出中间过程图；
- 3 图中元件、电压、电流名称序号必须清晰；
- 4 做题依据计算公式必须明确，步骤过程必须完整。



本章的主要内容

基本概念：

电路及电路模型、集总假设、电路变量、电流、电压、功率、独立电源、受控源、参考方向及关联参考方向。

基本定律：

基尔霍夫定律，欧姆定律VAR。



本章的重点和难点

重点：

- 1、参考方向
- 2、几种元件的基本概念
- 3、基尔霍夫定律

难点：

- 1、深入理解基尔霍夫定律重要意义
- 2、熟练地解决简单电路的计算问题



第一篇 总论和电子电路的分析

不论我们选教什么学科，务必使学生理解改学科的**基本结构**……，与其说是单纯掌握事实和技巧，不如说是教授和学习结构

— 布鲁纳 《教育过程》

结构是各知识点（各种定理、方法、概念、定义）之间**相互关系的理论框架**。



§ 1.1 电路及集总电路模型

电路的作用

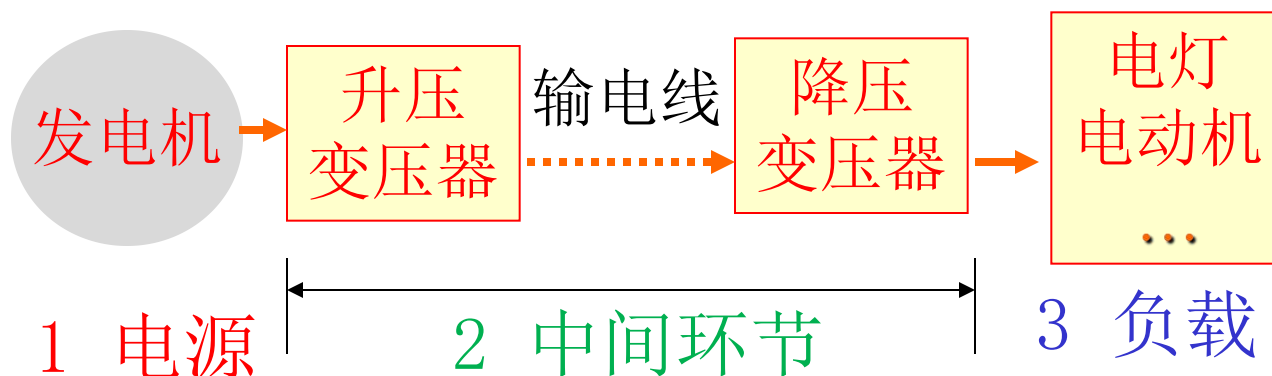
电的应用主要是两大领域：**能量和信息**。都是利用**电能几乎可以瞬时传送到远处**的这一性质。

能量：电力系统

信息：数据通讯，网络，Wifi

§ 1.1 电路及集总电路模型

能量的输送与转换



其它形式的能量→电能

连接电源和负载，传输、分配电能

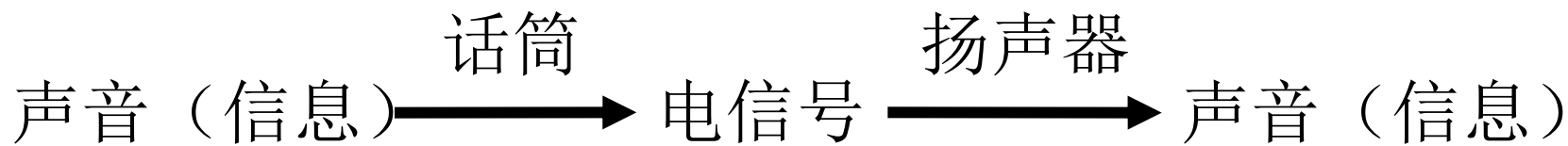
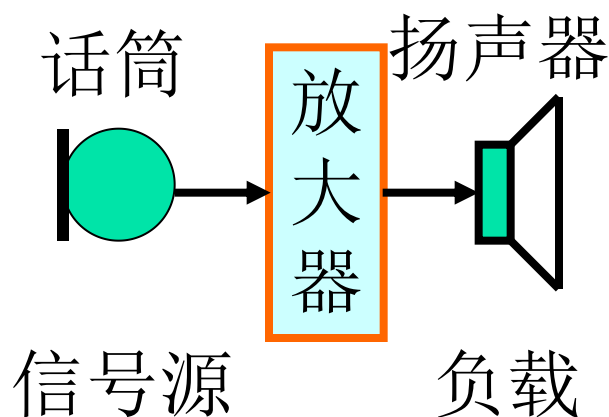
电能→其它形式的能量

其他形式能量→电能→机械能，热能，光能，化学能

§ 1.1 电路及集总电路模型

信号的传递和处理

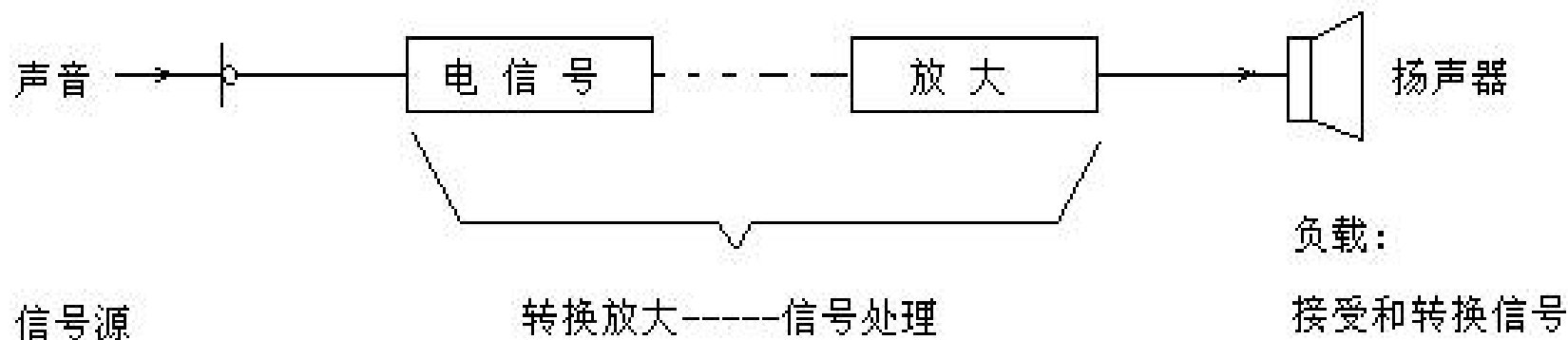
电用作信息处理和交换的媒介已成为当代社会的显著特征



§ 1.1 电路及集总电路模型

信号的传递和处理信号

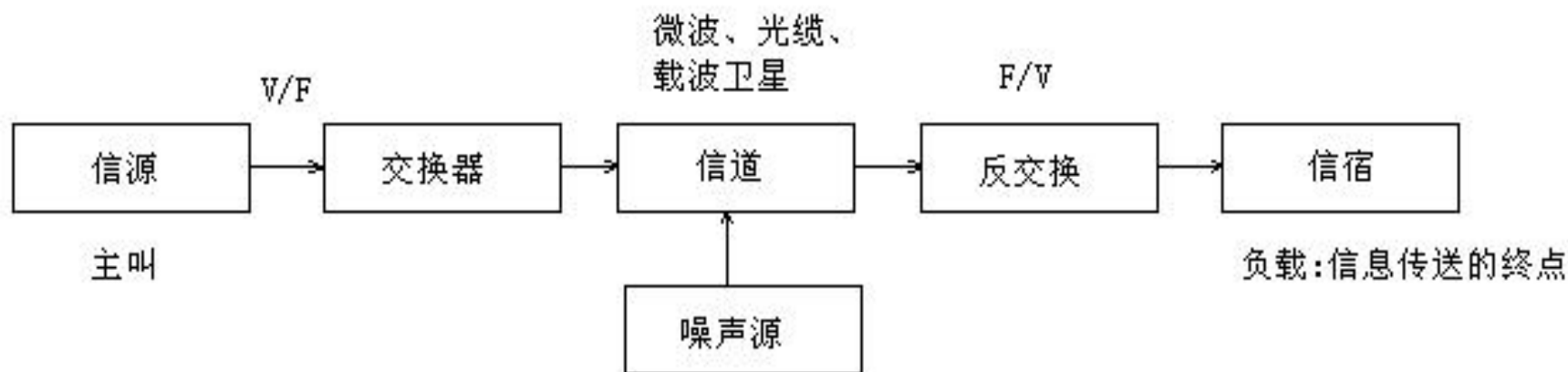
例1：卡拉OK



§ 1.1 电路及集总电路模型

信号的传递和处理信号

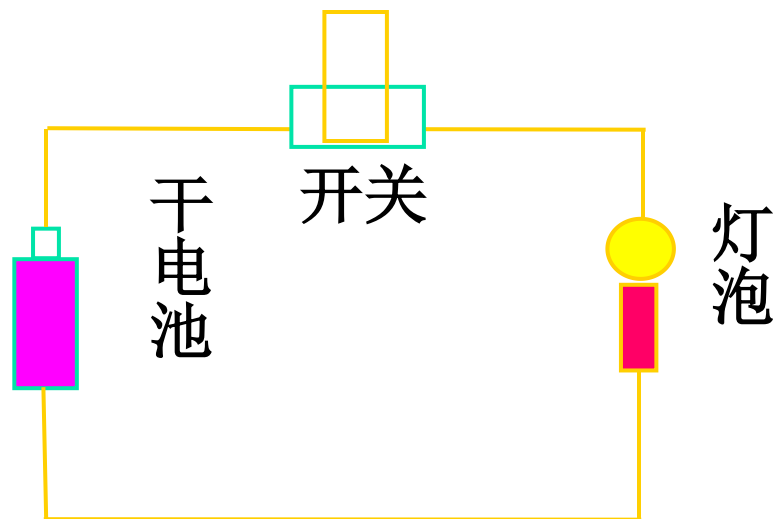
例2：打电话——将一个用户的信息传送给另一个用户通过通信系统——完成信息的传递和交换



§ 1.1 电路及集总电路模型

若干个电气设备或电子器件按照一定的方式连接起来构成电流的通路叫作电路

例如手电筒电路：

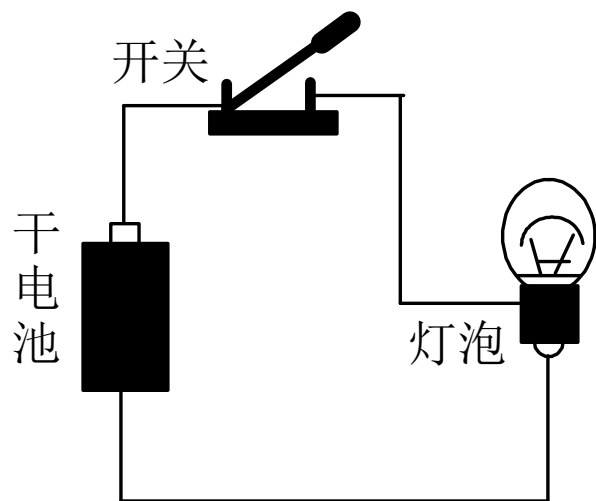


定义：

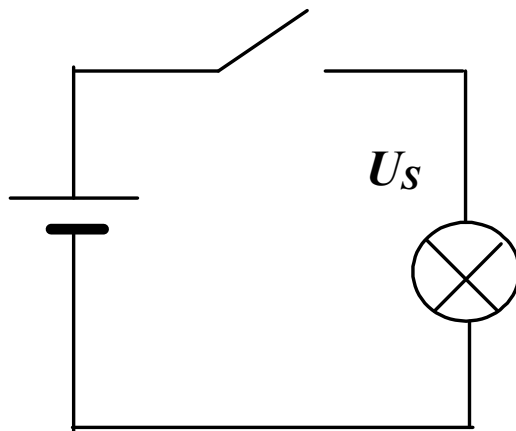
电路是电流的通路，它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

§ 1.1 电路及集总电路模型

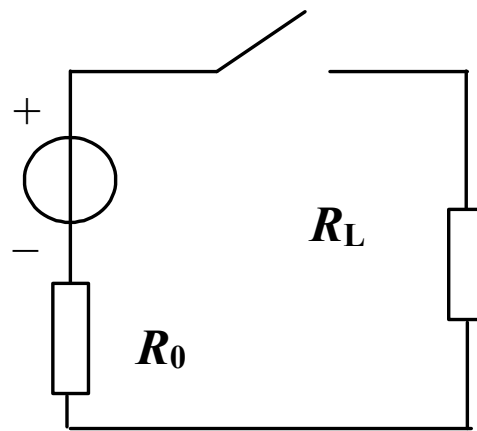
电路分析理论所研究的对象都是由理想电路元件组成的实际电路的电路模型



实际电路







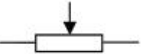









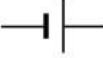

电气图



电路图

§ 1.1 电路及集总电路模型

常用电气图形及符号

名称	图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号	
电阻		R	位置开关(行程开关)	常开		SQ
可变电阻		R		常闭		
电位器		RP		复合		
电容器		C	按钮开关	常开		SB
极性电容器		C		常闭		
可调电容器		C		复合		
指示灯		HL	三极电源开关		QS	
直流电源 电池		DC	低压 断路器		QF	



§ 1.1 电路及集总电路模型

模型 (model) :

与原型相对应的，是原型（实际存在的客体）的替代物。

模型是实物的近似替换物而不是等效物。

电阻：电流呈现阻力的性质（忽略电感的性质）

质点：一定质量没有大小和形状的抽象物体。



§ 1.1 电路及集总电路模型

实际元件的模型

一个实际元件在某种条件下都可以找到它的模型。有些实际元件的模型比较简单，可以由一种理想元件构成，有些实际元件的模型比较复杂，要用几种理想元件来构成。



§ 1.1 电路及集总电路模型

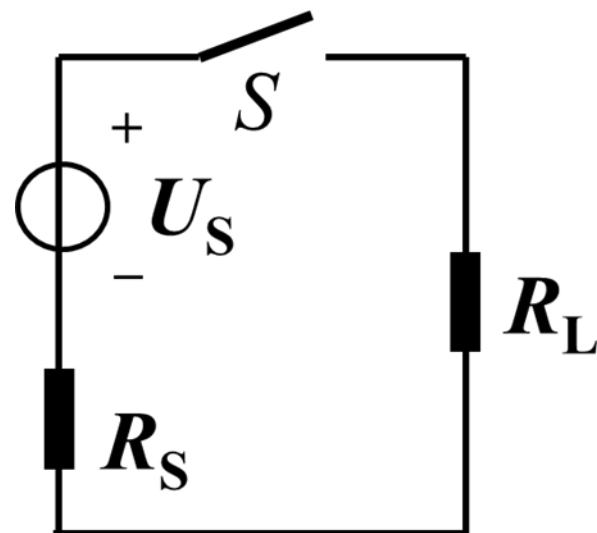
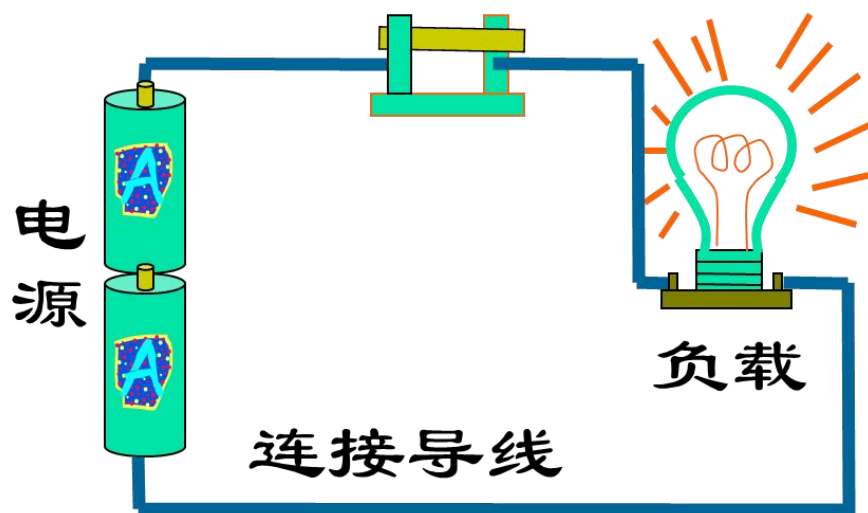
集总假设（反映一种基本电磁现象）

在器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长时，可将它所反映的物理现象分别进行研究，即用三种基本元件表示其三种物理现象，这就是集总假设。（不考虑电磁波现象）

采用集总假设的条件：实际电路的尺寸远小于电路使用时其最高工作频率所对应的波长。

§ 1.1 电路及集总电路模型

由集总（理想）元件构成的电路叫电路模型。我们所研究的是**电路模型**而不是实际电路。



§ 1.1 电路及集总电路模型

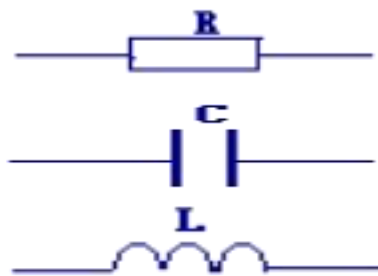
集总参数电路

当实际电路的尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时，可以定义出几种“集总参数元件”用来构成实际部、器件的模型。

电阻元件： 只表示消耗电能的元件

电容元件： 只表示储存电场能量的元件

电感元件： 只表示储存磁场能量的元件





§ 1.1 电路及集总电路模型

除以上三种(电阻 电容 电感)集总元件外, 还有**电源**元件(**电压源**、**电流源**)和**耦合**元件。

二端元件: 电阻、电感、电容、电压源、电流源

四端元件: 受控源、耦合电感、理想变压器。

有源元件: **独立源**: 电压源、电流源

受控源: 电压控制电压源、电流控制电压源
电压控制电流源、电流控制电流源

无源元件: 电阻、电容、电感、耦合电感、理想变压器



§ 1.1 电路及集总电路模型

由电阻、电容、电感等集总参数元件组成的电路称为**集总电路**，分**电阻电路**和**动态电路**两大类。

只含**电阻**和**电源**元件的电路称为电阻电路。

各种实际电路一般都是由电阻器、电容器、线圈、电源等部件(component)和晶体管等器件(device)相互连接组成的。



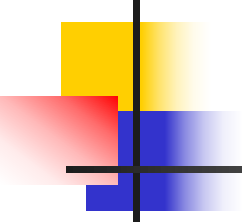
§ 1.1 电路及集总电路模型

实际的电路都是由电气设备和器件组成，如：发电机、变压器、电池、晶体管、电阻、电容……

我们在本课程中研究的不是这些实际设备而是理想化了的元件。

由于电磁能量的相互转换，许多设备的性质往往比较复杂，表现出两重性或多重性。例如导线往往用电阻表示，但在一定的条件下它还表现出电容性、电感性。

在一定的条件下可把实际元件理想化，用其主要的电磁性质来代替——成为理想元件——集中（总）参数元件。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

- **电路分析**：在已知电路结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。
- **激励**：电源或信号源的电压或电流，它推动电路工作，即产生电路各部分电压或电流的原因。
- **响应**：激励在电路各部分产生的电压和电流，即研究电路中因果关系。



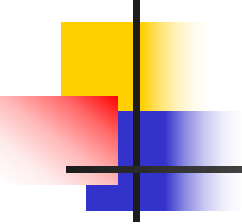
§ 1.1 电路及集总电路模型

电路分析：

给定电路结构及电路参数，求各部分的电压、电流叫电路分析。

采用**集总电路模型**意味着不考虑电路中电场与磁场的相互作用，不能考虑电磁波的传播现象，认为电能的传送是瞬间完成的。

当电路的尺寸大于最高频率所对应的波长或两者属于同一数量级时，便不能作为集总电路处理，应作为**分布参数**电路处理。



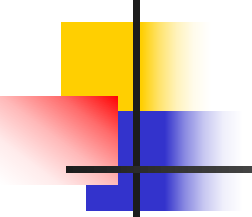
§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电子：负电荷

质子：正电荷

电量：

1库仑 (C) = 6.24×10^{18} 个电子的电荷量



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电流

带电粒子的定向运动形成电流。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流的大小。正电荷运动的方向即为电流方向`

$i(t)=dq/dt$ —— 电荷的变化率（1A=1C/s，安培）

大小和方向都不随时间改变的电流称为恒定电流，简称**直流DC**。
(Direct Current)

大小和方向随时间变化的电流称为交变电流，简称**交流AC**。
(Alternating Current)。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电压和电流参考方向：

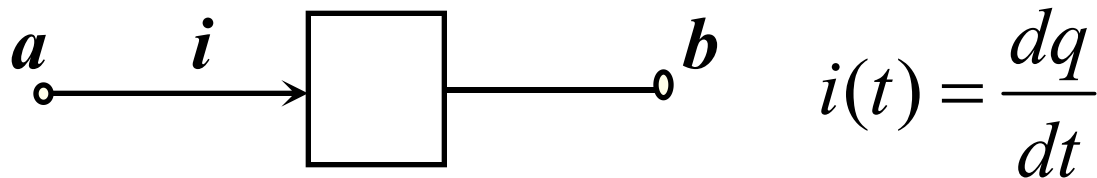
对电路进行分析计算时，不仅要算出电压、电流、功率值的大小，还要确定这些量在电路中的**实际方向**。但是，在电路中各处电压（电位）的高低、电流的方向等很难事先判断出来。因此电路内各处电压、电流的实际方向也就不能确定。为此引入**参考方向**的概念。

二端元件的电压、电流参考方向可以**任意**给定，给定参考方向后不要修改参考方向，均作为判断真实方向或真实极性的**参照**。

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电流的参考方向：

预先假定的方向，用箭头表示，也称为电流的正方向。（任意选定）



根据所设方向进行计算，

如果求出 $i > 0$ ，则真实方向与参考方向一致

如果求出 $i < 0$ ，则真实方向与参考方向相反

分类—— 交流电流与直流电流



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

(1) 在电路分析中，电路中标出的电流方向都是参考方向。如果没有方向，自己要设一个参考方向，在图上标出，按所标参考方向进行计算。不设参考方向，算出的结果没有意义。

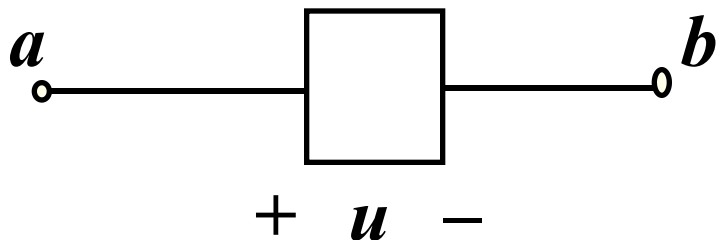
(2) 算得结果的正负配合参考方向就可确定真实方向，但不要把参考方向改为真实方向。

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电压：

单位正电荷由 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量，即 a, b 两点之间的电压（电位差）。

大小和极性不随时间改变的电压叫恒定电压，大小和极性随时间改变的叫交变电压。



$$u(t) = dw/dq$$

若 a 点电位低(-)， b 点电位高(+)，则正电荷获得能量。

若 a 点电位高(+)， b 点电位低(-)，则正电荷失去能量。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电压参考极性：

+, -号表示, 任意选定参考方向

"+"号表示高电位, "-"表示低电位。

u_{ab} 指 $a \rightarrow b$ 的电压降

按所设参考极性进行计算

如果求出 $u_{ab} > 0$, 则真实极性与参考极性一致。

如果求出 $u_{ab} < 0$, 则真实极性与参考极性相反。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

关联参考方向

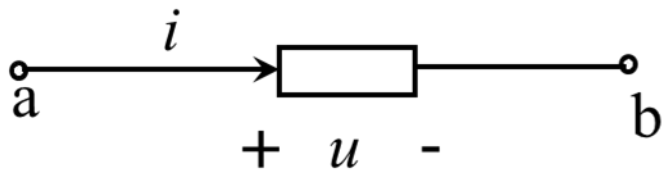
在电路分析中，对一个元件既要假设通过它的电流参考方向，又要假设它两端电压的参考极性（方向），两个都可任意假定，而且彼此独立无关。但是，为方便起见，通常引入关联参考方向。

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

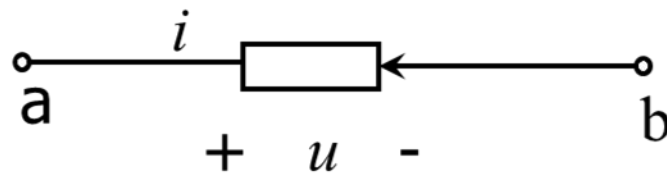
关联参考方向：

电流由高电位流向低电位

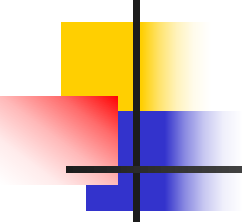
电流与电压降参考方向一致



关联参考方向



非关联参考方向



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

习惯上规定：

电流的实际方向：正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向。

电压的实际方向：由高电位端指向低电位端。

电动势的实际方向：在电源内部由低电位端指向高电位端。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

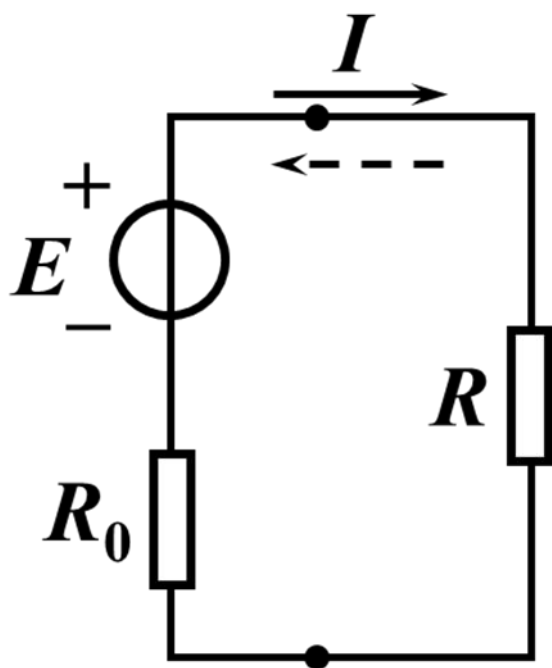
电压电流参考方向：任意假定

电流的参考方向用箭头表示；电压的参考方向除用极性“+”、“-”外，还用双下标 U_{ab} 或箭头表示。

当参考方向与实际方向相同时，其值为正，反之则为负值。

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

例如：图中



(1) 若 $I=3\text{A}$ ，则表明电流的实际方向与参考方向相同；

(2) 若 $I=-3\text{A}$ ，则表明电流的实际方向与参考方向相反。

在电路图中所标电压、电流、电动势的方向，一般均为参考方向。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

注意

- (1) 电路图中标注的均为参考方向。
- (2) 参考方向一经选定，电压和电流均为代数量。
- (3) 解题时，要将待求的电压和电流的参考方向在电路图上标示出来，否则计算结果没有意义。



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电压和电流的参考方向

电压、电流实际方向与参考方向

相同为正值，相反为负值

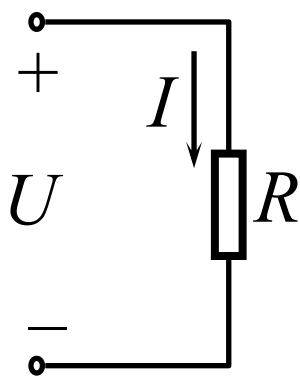
例如： $E=3V$ ，若假定电路中 U 的参考方向为上 “+” 下 “-”，则 $U=3V$ 或 $U_{AB}=3V$ 。

例如： $E=3V$ ，若假定电路中 U 的参考方向为上 “-” 下 “+”，则 $U=-3V$ 或 $U_{BA}=-3V$ 。

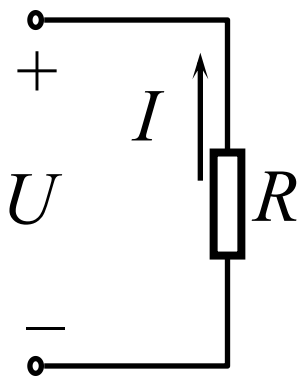
§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

注意：电路分析的定律和公式是在规定参考方向下得到的，参考方向改变，公式也要作相应变化。

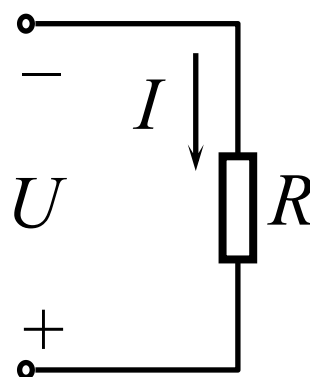
例如欧姆定律



图A



图B

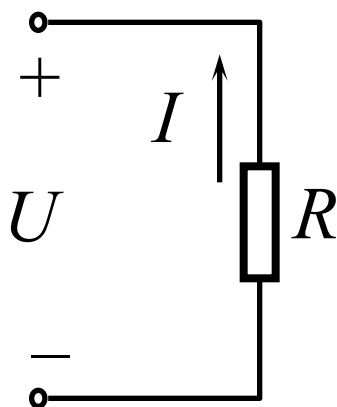


图C

图A中 U 、 I 参考方向相同 表达式 $U = IR$

图B、C中 U 、 I 参考方向相反 表达式 $U = -IR$

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率



图中若 $I = -2\text{A}$, $R = 3\Omega$, 则 $U = -(-2) \times 3 = 6\text{V}$

电压与电流
参考方向相反

电流的参考方向
与实际方向相反



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

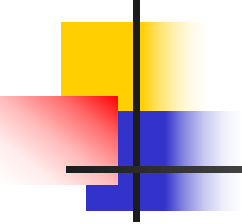
功率

单位时间内能量的变化。把能量传输（流动）的方向称为功率的方向，定义式为：

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t) i(t)$$

符号—— p (P)
单位——瓦 W

说明：当选取电压电流参考方向关联，
功率 $p(t) > 0$ ，为吸收功率，吸收能量
功率 $p(t) < 0$ ，为发出功率，发出能量



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

电能计算：

在电压电流取定关联参考方向时，在任意时刻
电路部分所吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi$$

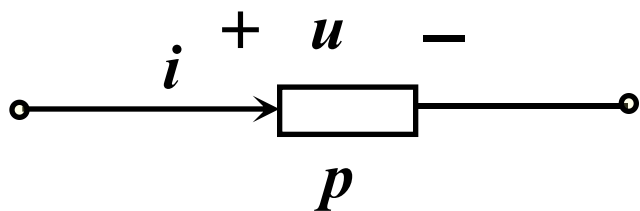
符号—— w (W)

单位——焦J



§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

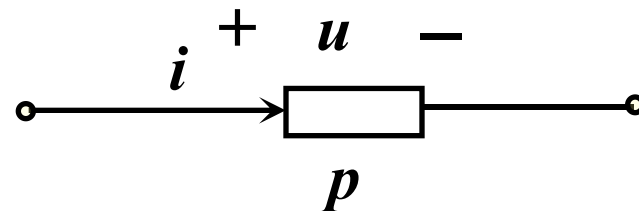
例题：求下图的 $p(t)$ ：



$$u = -2\text{V}, \quad i = 1\text{A}$$

$$p(t) = ui = (-2) \times 1 = -2\text{W} < 0$$

产生功率



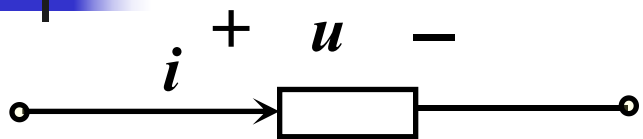
$$u = 2\text{V}, \quad i = 1\text{A}$$

$$p(t) = ui = (2 \times 1) = 2\text{W} > 0$$

吸收功率

注：功率公式不仅适用于任何一个元件，对任一部分电路也适用。

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

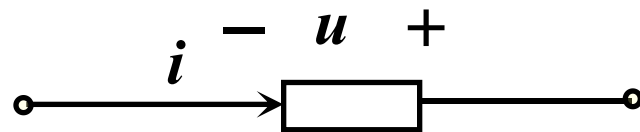


关联参考方向

$$P(t) = u(t) * I(t)$$

$P(t) > 0$ 吸收功率
消耗功率
负载

$P(t) < 0$ 放出功率
提供功率
电源



非关联参考方向

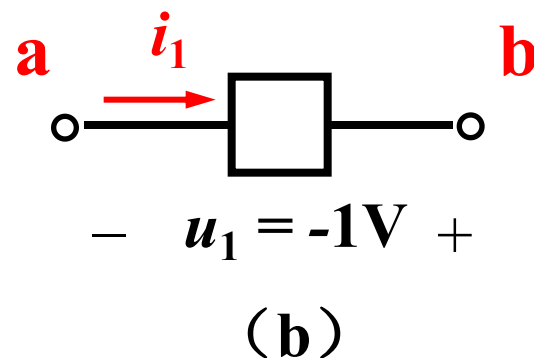
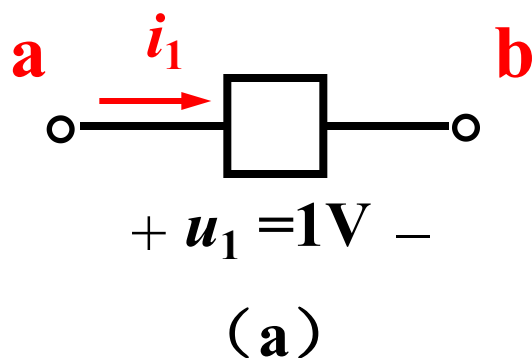
$$P(t) = -u(t) * I(t)$$

$P(t) > 0$ 吸收功率
消耗功率
负载

$P(t) < 0$ 放出功率
提供功率
电源

§ 1.2 电路变量：电流电压及功率

例1-2: P9-P10



1. 已知 $i_1 = 2A$ ，求两元件吸收的功率？
2. 在图（b）中，若元件提供的功率为4W，求电流



§ 1.3 基尔霍夫定律

一、拓扑术语：

支路： 电路中每一个二端元件构成为一条支路

节点： 电路中各支路连接点

回路： 电路中任一闭合路径

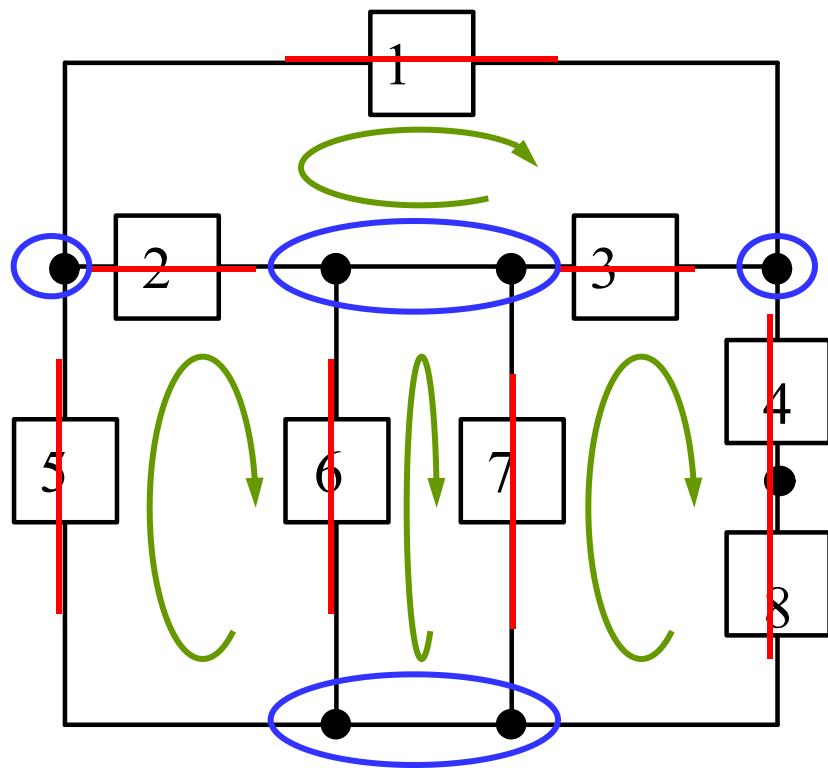
网孔： 内部不含其他支路的回路

§ 1.3 基尔霍夫定律

共7条支路——拓扑学中
为8条支路，即4和8为不
同支路

共4个节点——拓扑学中
为5个节点，即4和8之间的
联接点算作节点

共4个网孔
共10个回路



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL)

对于任一集总电路中的任一节点，在任一时刻，流进（或流出）该节点的所有支路电流的代数和为零。如果 $i_k(t)$ 表示流入（或流出）节点K的电流，有下面的式子成立：

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0$$

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

另一种描述：

对于任一集总电路中的任一节点，在任一时刻，流进该节点的所有支路电流的和等于流出该节点的所有支路电流的和。即：

$$\sum i_{\text{流入}} = \sum i_{\text{流出}}$$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

显然上述结论适用于任何电路的任何节点，而且对任意波形的电流来说，这一结论在任一瞬间也是适用的。

KCL可表述为：在电路的任何一个节点上，同一瞬间电流的代数和等于零。用公式表示，即 $\sum i = 0$
在直流电路中为 $\sum I = 0$

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

关于定律的说明：

- 1) 适用于集总电路，表征电路中各个支路电流的约束关系，与元件特性无关
- 2) KCL是各支路间的电流约束关系
- 3) KCL定律可推广到任意闭合面（广义节点、高斯面）
- 4) 使用时，直接用参考方向列写方程

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

KCL的推广应用：广义节点

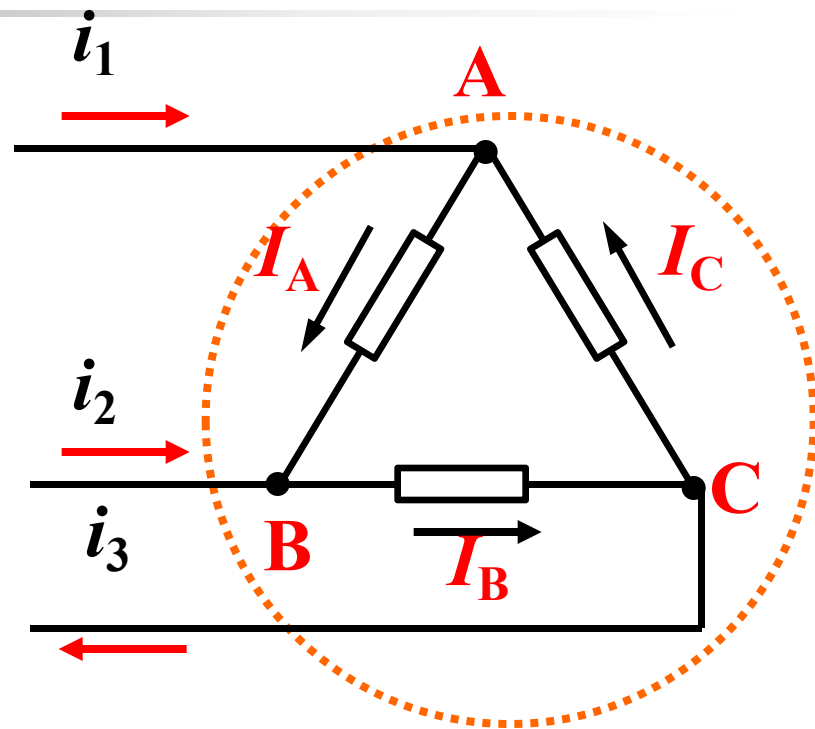
KCL可推广应用于电路

中的任何一个假定的闭合面

例如对右图所示电路

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

闭合面具有与结点相同的性质因此称为广义节点



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

关于KCL的几点说明：

1) KCL阐明了电路中与任一节点有关的各电流之间的关系，其反映的是**电流连续性（电荷守恒）**原理。集总参数电路中的节点不能聚集电荷，有多少电荷流入就必须有多少电荷流出。

2) KCL具有普遍适用性。既适用于任一瞬时任何变化的电流，也适用于由各种不同元件构成的电路。此定律与元件性质无关，是对支路电流所加的约束。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

3) KCL不仅适用于任一节点，而且还适用于电路中任何一个假定的闭合面（广义节点）。

4) 应用KCL列任一结点的电流方程时，一定要先在电路图上标出电流的参考方向。

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

例1: 若 $I_1 = 9\text{A}$ $I_2 = -2\text{A}$

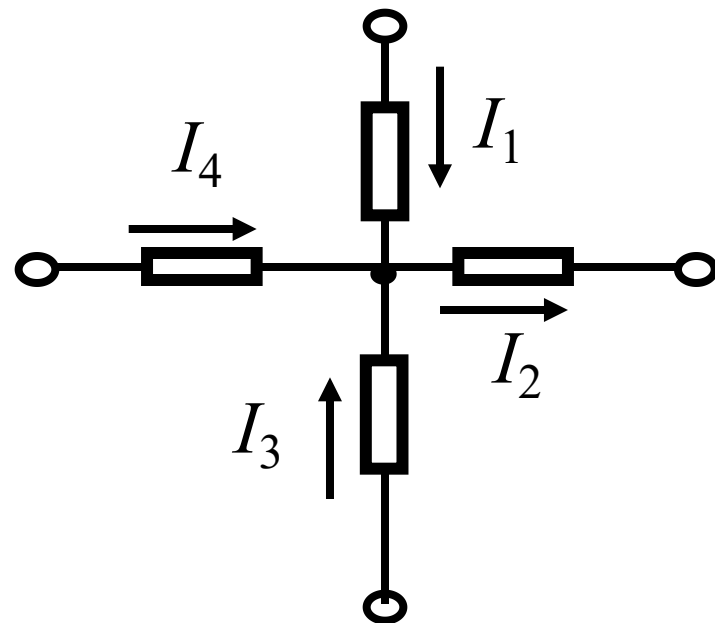
$I_1 = 8\text{A}$ 求: I_3

解: $I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$

KCL

$$9 - (-2) + I_3 + 8 = 0$$

得到: $I_3 = -19\text{A}$

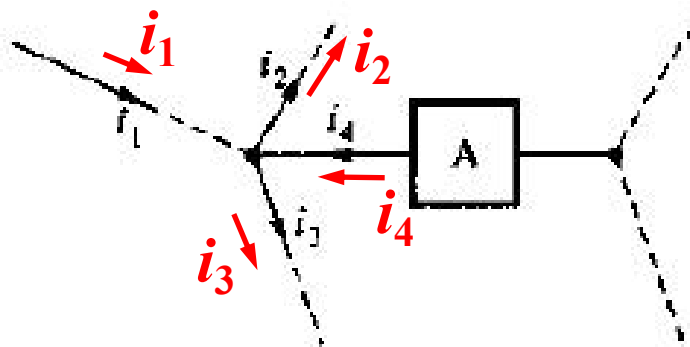


电流的参考方向
与实际方向相反

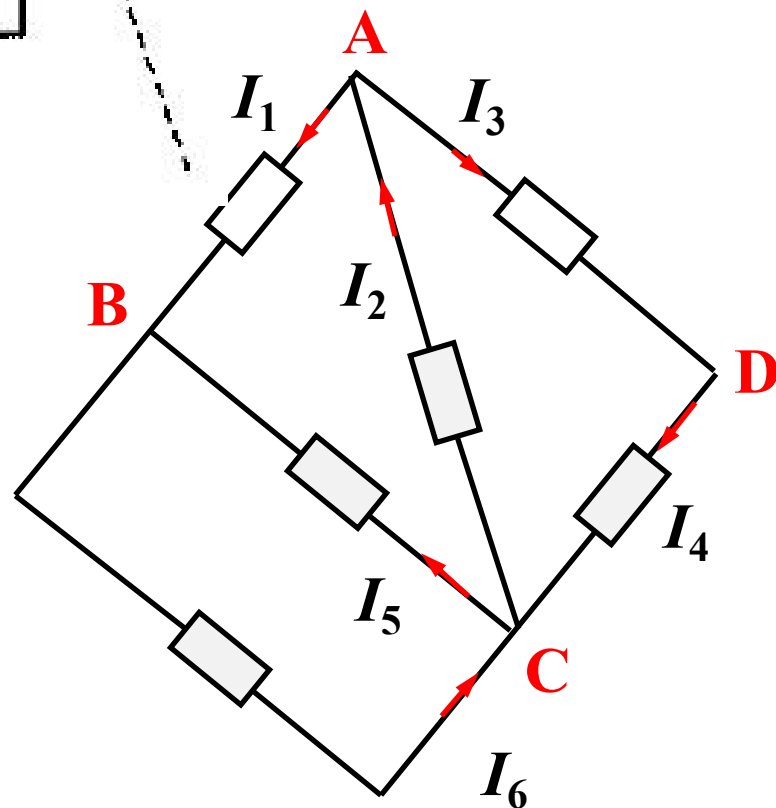
§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

例2: P14例1-3



例3: 在图示电路中, 已知 $I_1=2\text{A}$, $I_2=-1\text{A}$, $I_6=4\text{A}$, 求未知电流 I_3 , I_4 , I_5 。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

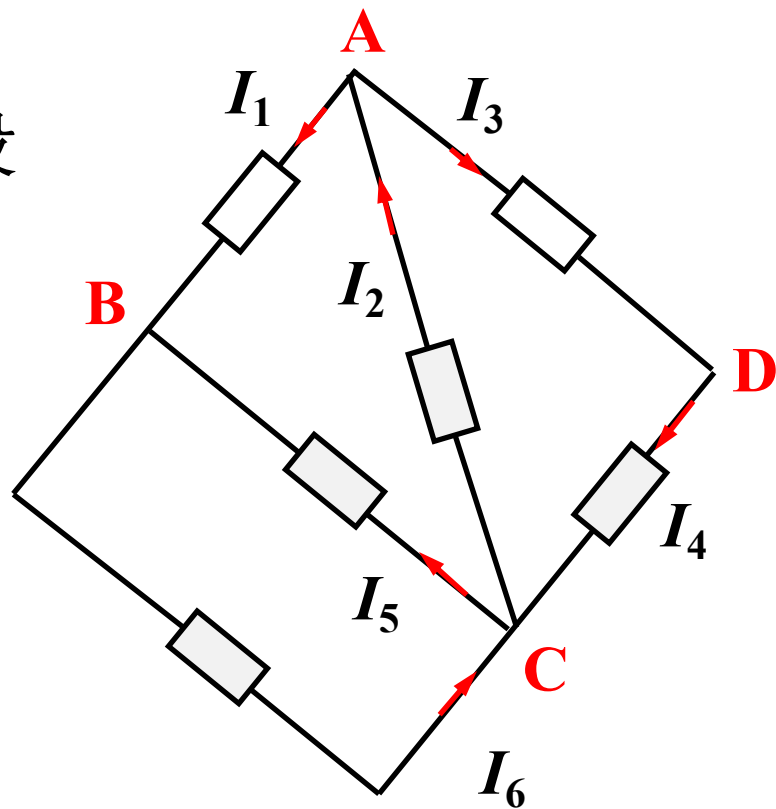
解：(1) 对节点A列KCL方程，设
电流流出为正，则

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$I_3 = -I_1 + I_2 = -2 + (-1) = -3\text{A}$$

∴ I_3 的真实方向与参考方向相反

$$I_4 = I_3 = -3\text{A}$$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

(2) 对节点C列KCL方程

$$I_2 - I_4 + I_5 - I_6 = 0$$

$$I_5 = -I_2 + I_4 + I_6$$

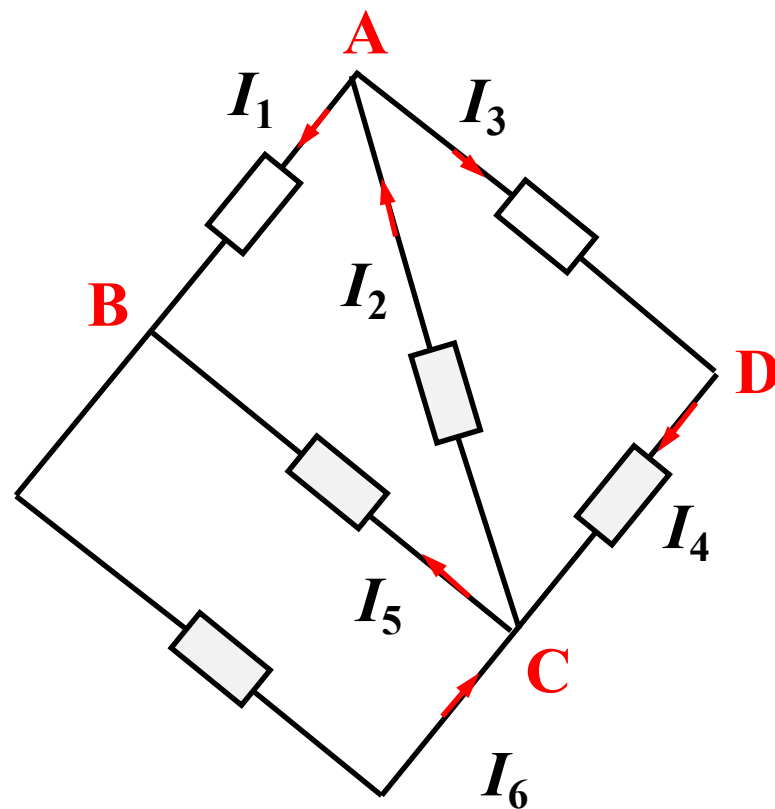
$$= -(-1) + (-3) + (4) = 2A$$

真实方向与参考方向相同。

也可用节点B求：

$$-I_1 - I_5 + I_6 = 0$$

$$I_5 = -I_1 + I_6 = (-2) + (4) = 2A$$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.1 基尔霍夫电流定律

总结:

(1)注意两套符号:

括号前的符号取决于参考方向相对于节点的关系。设流出为正，流入为负，是列方程出现的符号

括号里的符号是电流本身的符号，反映真实方向和参考方向的关系，正的相同，负的相反

(2)求出的值无论正负，都不要把参考方向改成真实方向

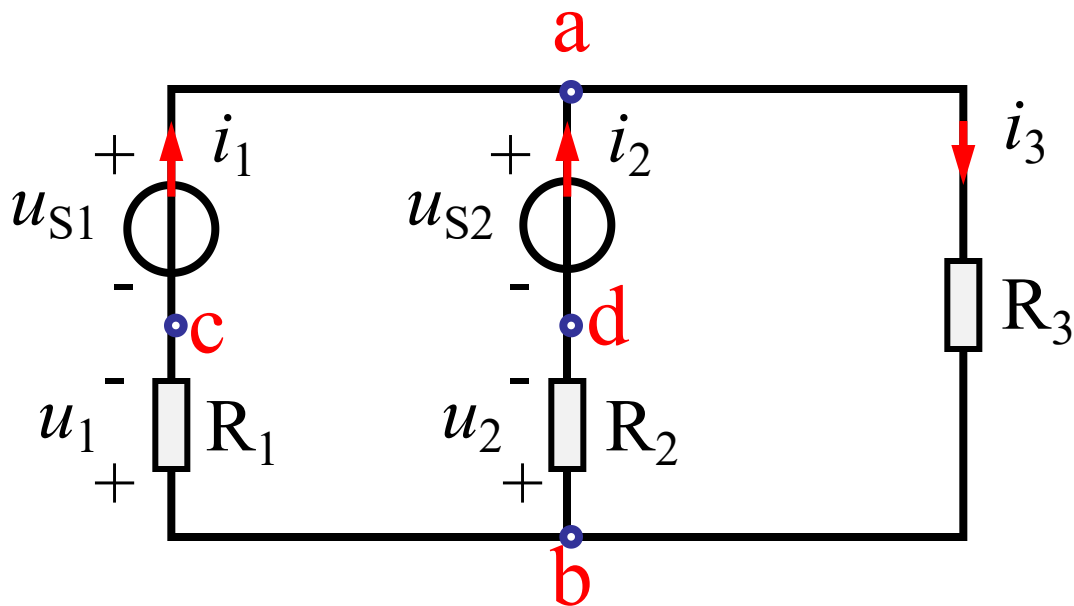
§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

回路和网孔 (LOOP & MESH)

回路：由电路元件组成的闭合路径称为回路。如上图中有 $adbca$ 、 $abda$ 和 $abca$ 三个回路。

网孔：未被其它支路分割的单孔回路称为网孔。如上图中有 $adbca$ 和 $abda$ 两个网孔。





§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL)

对于任一集总电路中的任一回路，在任一时刻沿着该回路的所有支路电压降的代数和为零。

如果 $u_k(t)$ 表示回路中第 k 条支路电压， k 为回路中的支路数，有下面的式子成立

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = 0$$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

另一种描述：

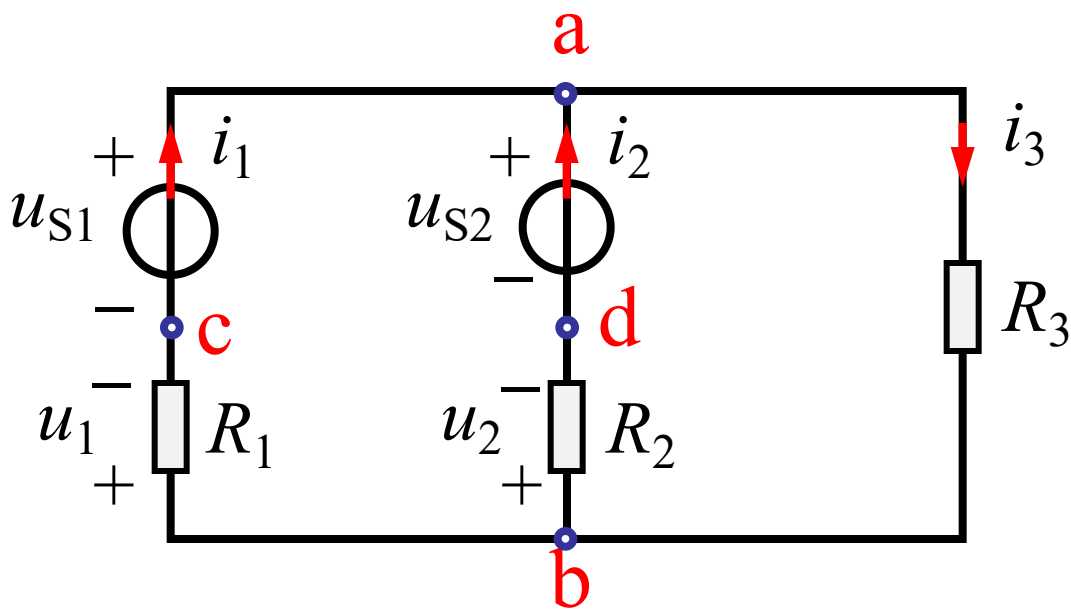
对于任一集总电路中的任一回路节点，在任一时刻沿着该回路的所有支路的电压降的和等于沿着该回路的所有支路的电压升的和相等。即：

$$\sum u_{\text{升}} = \sum u_{\text{降}}$$

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

对于任一集总参数电路中的任一回路，在任一时刻，沿回路电压降的代数和为零。



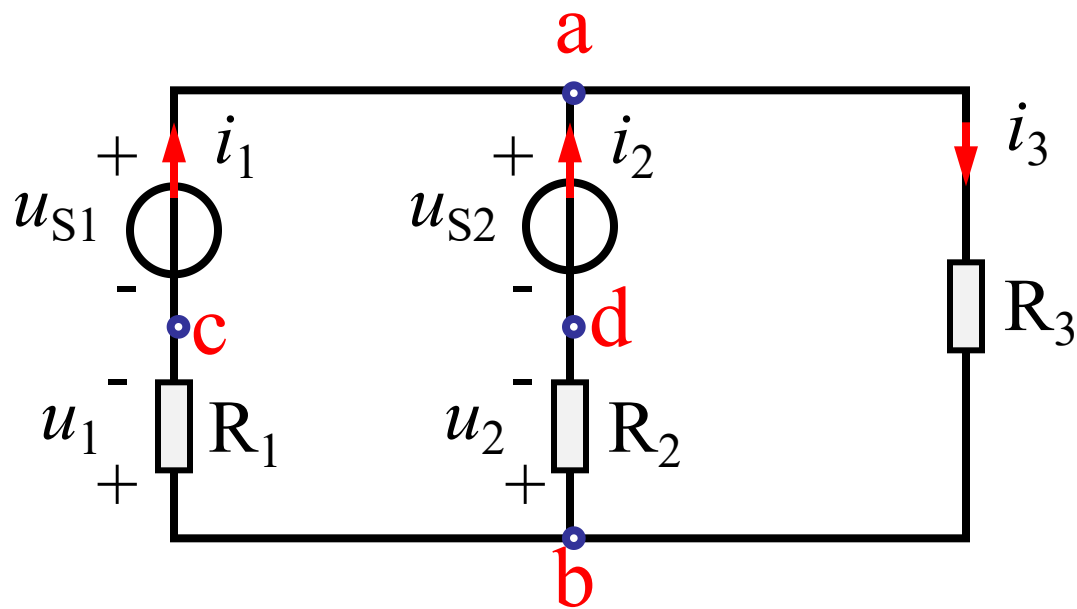
$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0$$

KVL是能量守恒法则的反映，或者说是电位单值性原理的反映。

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

例如对图中的回路adbca而言，由于电位的单值性，若从a点出发，沿回路环行一周又回到a点，则在此回路上的电位降之和等于电位升之和。即



$$u_{S2} + u_1 = u_2 + u_{S1}$$

$$u_{S2} - u_2 + u_1 - u_{S1} = 0$$

与回路环行方向一致的电压前面取正号，与回路环行方向相反的电压前面取负号。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

显然上述结论也适用于任何电路的任一回路，而且对任意波形的电压来说，这一结论在任一瞬间也是适用的。

KVL可表述为：在电路的任何一个回路中，沿同一方向循行，同一瞬间电压的代数和等于零。

用公式表示，即

$$\sum u = 0$$

在直流电路中为

$$\sum U = 0$$

§ 1.3 基尔霍夫定律

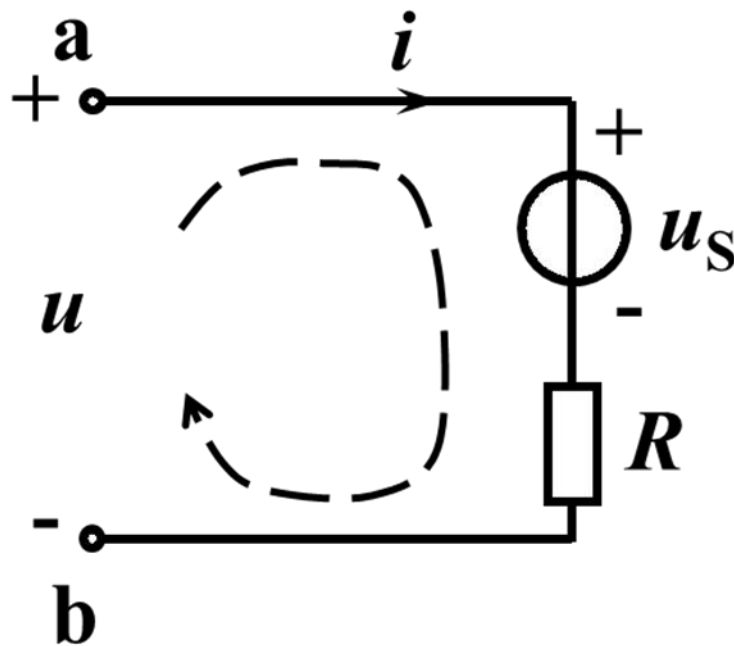
§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

KVL的推广应用：

KVL可推广应用于任何一个假定闭合的一段电路。

例如对右图所示电路

$$u_S + Ri - u = 0 \text{ 或 } u = u_S + Ri$$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

关于KVL的几点说明：

1) KVL阐明了电路中与任一回路有关的各电压之间的关系，其反映的是电位单值性原理。或者说此定律反映了能量守恒原理，单位正电荷从 A 点出发绕行一周回到A点得到或失去的能量为零。

2) KVL具有普遍适用性。既适用于任一瞬时任何变化的电压，也适用于由各种不同元件构成的电路。KVL与元件性质无关，是对支路电压所加的约束。

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

3) KVL不仅适用于电路中任一闭合的回路, 而且还可以推广应用于任何一个假定闭合的一段电路。

4) 应用KVL时应注意, 首先选定回路的循行方向, 规定与回路循行方向一致的电压前面取正号, 与回路循行方向相反的电压前面取负号。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

关于定律的说明：

- 1) 适用于集总电路，表征电路中各个支路电压的约束关系，与元件特性无关；
- 2) 由KVL定律可知，任何两点间的电压与路径无关；
- 3) 使用KVL定律时，直接用参考方向根据选定的绕行方向列写方程。

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

例3： 已知 $U_1 = -2\text{V}$, $U_3 = 8\text{V}$,

$E_1 = 5\text{V}$, $E_2 = -3\text{V}$

求： $U_2 = ?$

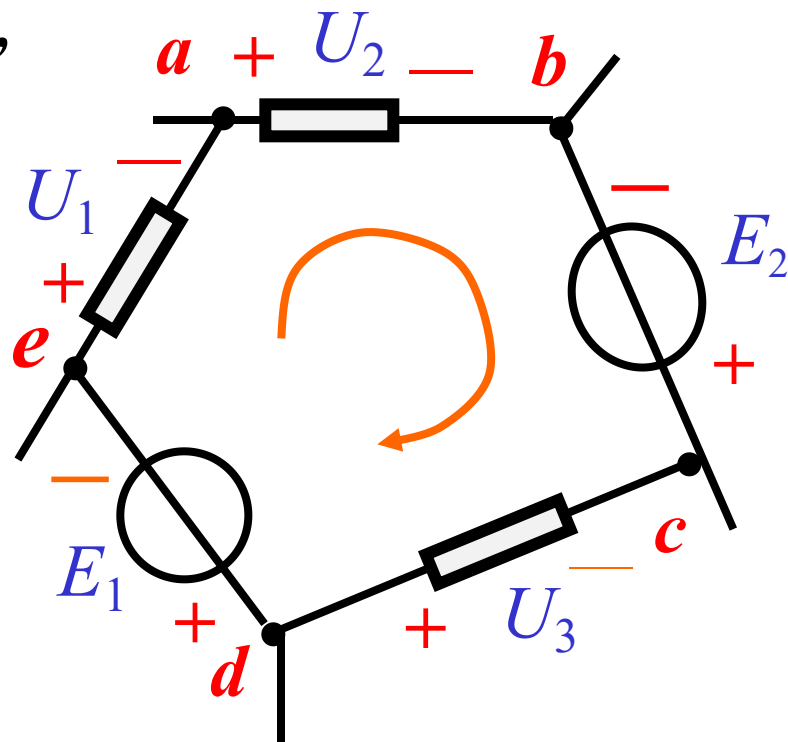
解： 应用KVL

KVL

$$U_2 - E_2 - U_3 + E_1 + U_1 = 0$$

$$U_2 - (-3) - 8 + 5 + (-2) = 0$$

电压的实际方向
与参考方向相反



$$U_2 = 2\text{ V}$$

§ 1.3 基尔霍夫定律

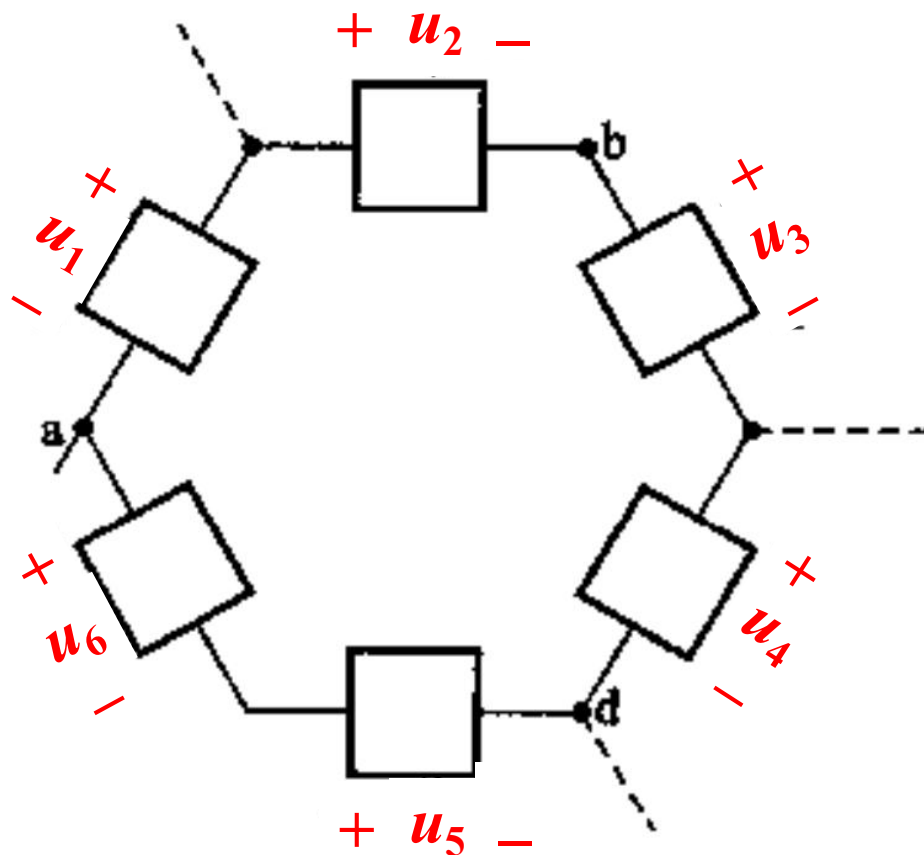
§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

例：已知 $u_1 = u_6 = 2\text{V}$,

$$u_2 = u_3 = 3\text{V},$$

$$u_4 = 7\text{V},$$

求： $u_5 = ?$



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

解 根据 KVL, 这 6 个支路电压线性相关, 给定任何 5 个电压即可求得另一电压。为此, 应先列出 KVL 方程。

设 u_5 的参考极性如图中所示。从 a 点出发, 顺时针方向绕行一周, 由 (1-16) 式可得

$$-u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - u_5 - u_6 = 0 \quad (1-17)$$

式中: 凡参考极性所表示的电压降方向与绕行方向一致者取正号, 如 u_2 、 u_3 、 u_4 , 否则取负号, 如 u_1 、 u_5 、 u_6 。

将已知数据代入 (1-17) 式得

$$-(2 \text{ V}) + (3 \text{ V}) + (3 \text{ V}) + (-7 \text{ V}) - u_5 - (2 \text{ V}) = 0 \quad (1-18)$$

解得

$$u_5 = -5 \text{ V}$$

u_5 为负值说明 u_5 的实际极性与图中所假设的极性相反。

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

例1-2:求图中 ab 两点之间电压

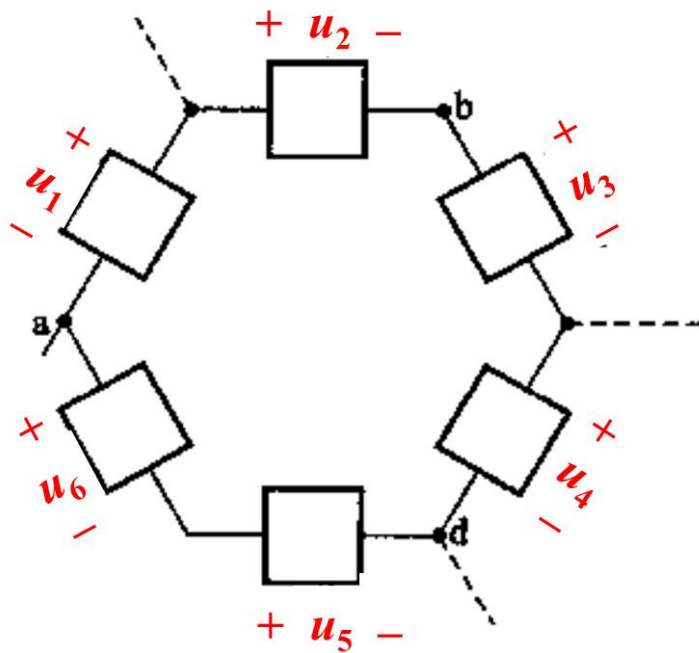
解:求解这类问题时常采用双下标记法, 如 u_{ab} 。

双下标字母即表示计算电压时所涉及的两点, 其前后次序则表示计算电压降时所遵循的方向。

例如: ab 表示由 a 点到 b 点的电压降。

$$u_{ab} = -u_1 + u_2 = -(2V) + (3V) = 1V$$

任何两点间的电压与计算时所选择的路径无关!



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

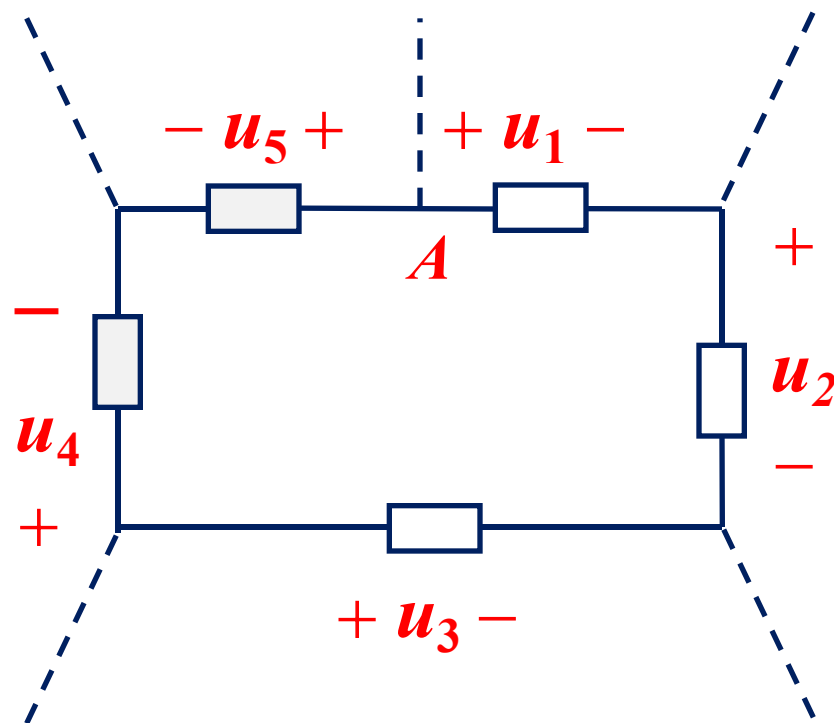
KVL: 回路电压方程

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0$$

从A点出发，沿顺时针方向（也可相反），电压降取正，电压升取负。

$$u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - u_5 = 0$$

这五个电压线性相关。如果只有一个未知电压，未知电压可求。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

KVL:

(1) 此定律反映了能量守恒原理，单位正电荷从A点出发绕行一周回到A点得到或失去的能量为零。

(2) KVL与元件性质无关，是对支路电压所加的约束。

KVL是各支路间的电压约束关系

§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

例 2：求图示电路中的 U_1 、 U_2 、 U_3

解： $U_1 - (6) - (2) = 0$

$$U_1 = 6 + 2 = 8\text{V}$$

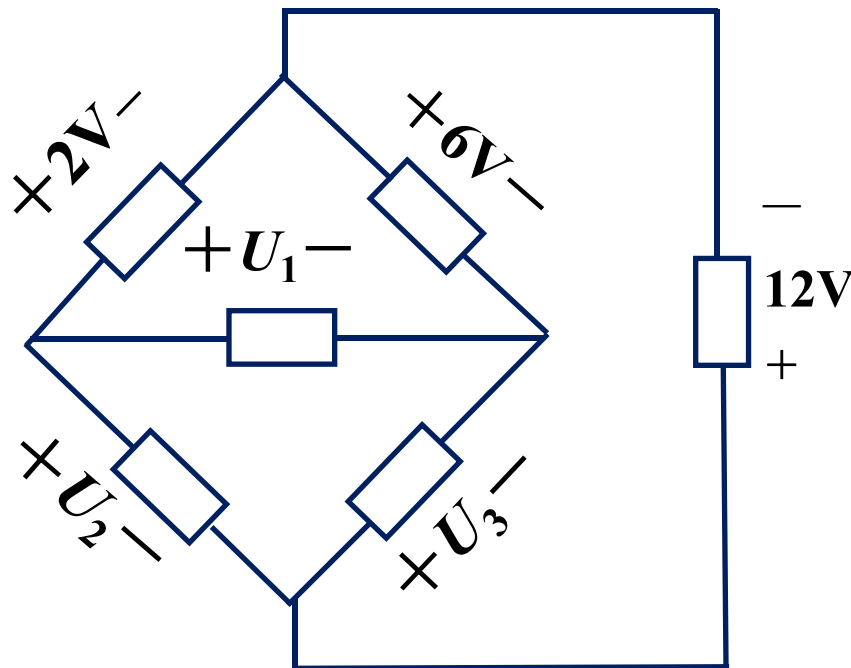
$$U_3 - (6) - (12) = 0$$

$$U_3 = 6 + 12 = 18\text{V}$$

$$U_2 + U_3 - U_1 = 0$$

$$U_2 = -U_3 + U_1$$

$$= -(18) + (8) = -10\text{V}$$





§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

KVL解题中需要注意的问题：

(1) 两套符号：

一是参考极性与绕行方向的关系，遇电压降取正，电压升取负，即括号前的符号。

二是数值本身的符号，即括号里的符号，反映参考极性与真实极性关系。

(2) 求出的值无论正负，都不要把参考方向改成真实方向。



§ 1.3 基尔霍夫定律

§ 1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电路方程的独立性

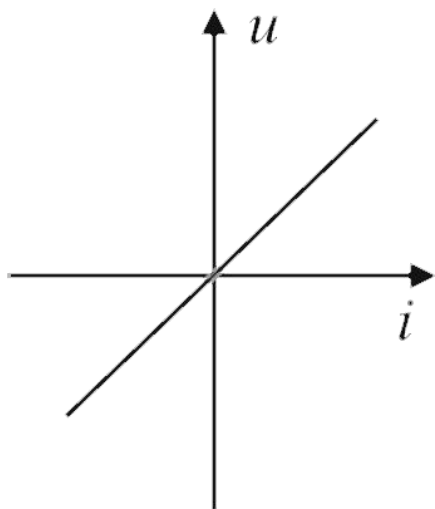
对于具有 n 个节点、 b 条支路、 m 个网孔的平面电路，独立的KCL方程为 $n-1$ 个，独立的KVL方程为 m 个，其中 $m = b - (n - 1)$

定向图：有向线段（支路）+节点

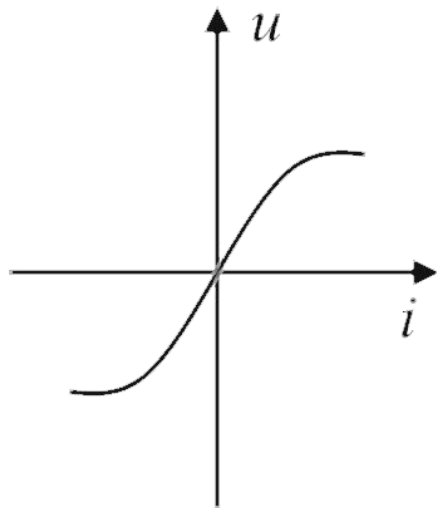
§ 1.4 电阻元件

电阻：

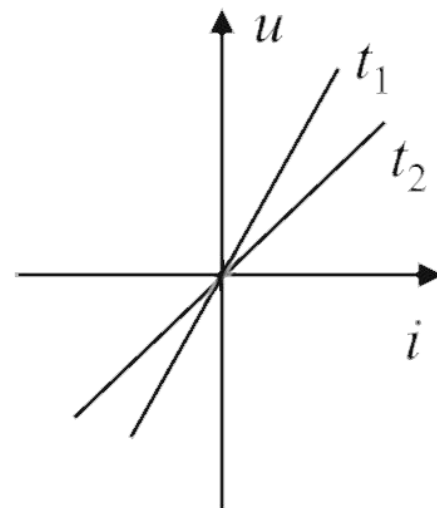
如果一个二端元件，在任一瞬间其端电压和电流之间的关系可由 u - i 平面上的一条曲线所决定，则此二端元件称为电阻。反映对电流的阻碍性能。



线性非时变电阻



非线性电阻



线性时变电阻

§ 1.4 电阻元件

欧姆定律:

对于线性非时变电阻:

电阻: $R(\Omega)=u/i$

欧姆定律: $u(t)=R*i(t)$

电压电流关系 **VCR**

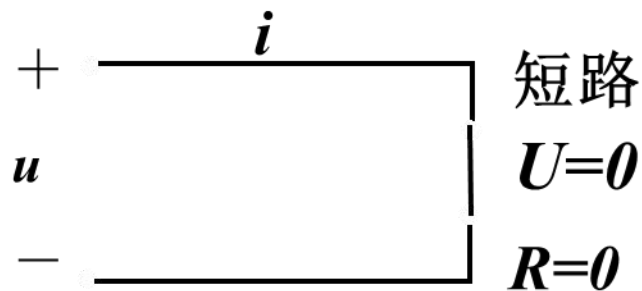
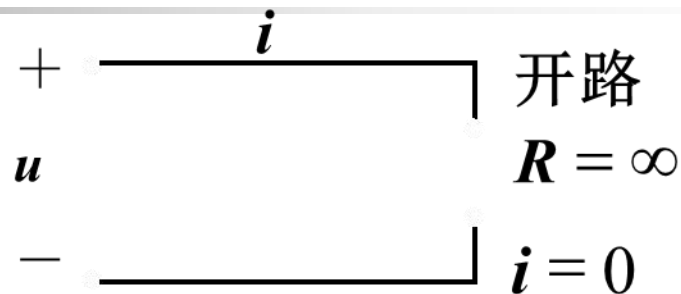
(voltage current relation)

元件约束

线性电阻对原点对称且具有双向性。

电导 $G = 1 / R$, 单位: 西门子(S)

$$i(t)=G * u(t)$$



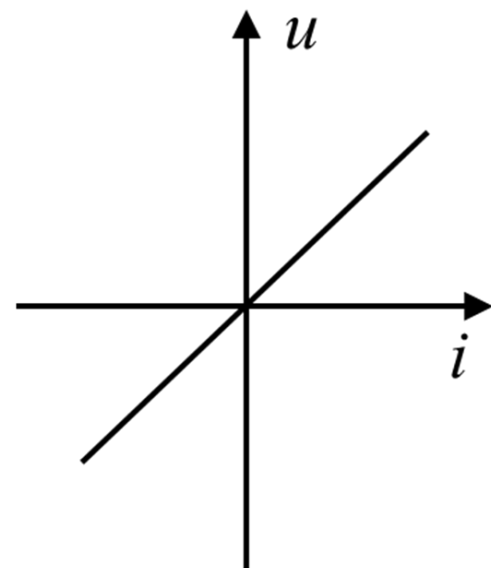
§ 1.4 电阻元件

线性电阻：电阻的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线。(双向、无记忆性)

$$f(u,i)=u-Ri=0, f(u,i)=i-Gu=0$$

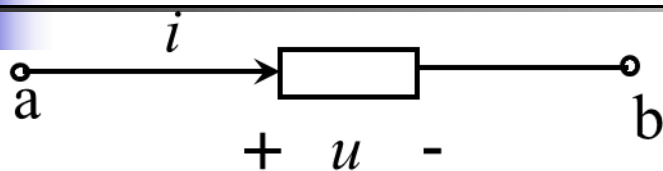
非时变电阻：电阻的伏安特性曲线不随时间变化。

线性非时变电阻：其伏安特性曲线是一条不随时间变化的且经过坐标原点的直线。

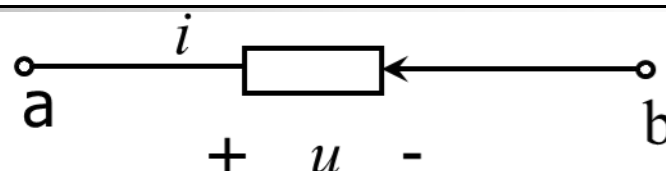


线性非时变电阻

§ 1.4 电阻元件



关联参考方向



非关联参考方向

$$R = u(t)/i(t)$$

$$R = -u(t)/i(t)$$

$$u(t) = Ri(t)$$

$$u(t) = -Ri(t)$$

$$P(t) = u(t)I(t)$$

$$P(t) = -u(t)I(t)$$

$P(t) > 0$ 吸收功率、消耗功率（负载）

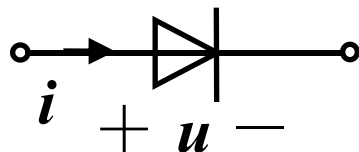
$P(t) < 0$ 放出功率、提供功率（电源）

§ 1.4 电阻元件

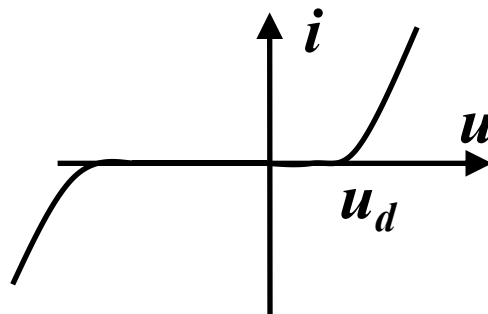
典型的非线性电阻：二极管



二极管实例



二极管符号

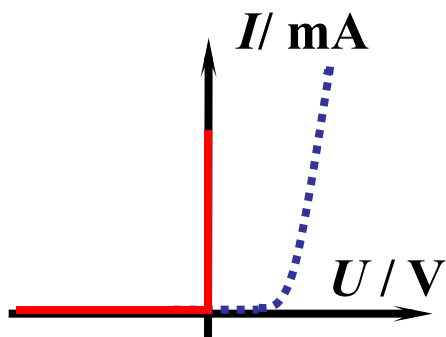
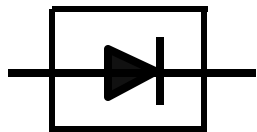


二极管特性曲线

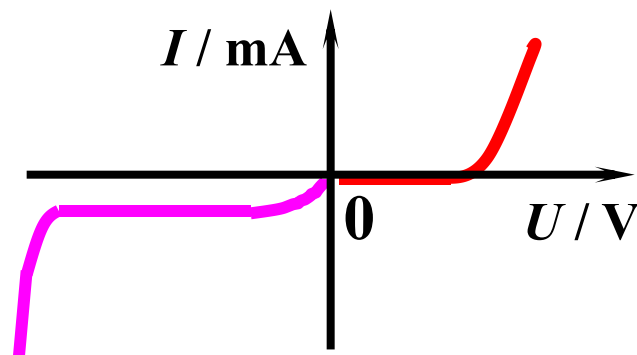
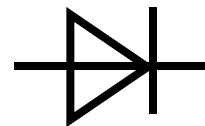
正向偏置、正向连接：二极管的电阻很小，而电流很大。

反向偏置、反向连接：加反向电压时，电流很小，电阻很大

理想二极管



实际二极管



特

性

正向连接: 导通

$$U=0 \quad I>0 \quad R=0$$

反向连接: 截止

$$I=0 \quad R=\infty$$

正向连接: 二极管的电阻很小, 而电流很大。

反向连接: 加反向电压时, 电流很小, 电阻很大



§ 1.4 电阻元件

电阻的功率：

$$P = U \times I = I^2 R = \frac{U^2}{R} = \frac{I^2}{G}$$

电阻元件上电压电流的真实方向总是一致的，所以 p 总是大于零的，电阻是耗能元件。

直流：

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi$$

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \geq 0$$

正电阻元件为无源元件，从不向外电路提供能量；
负电阻元件为有源元件，可向外电路提供能量。

§ 1.4 电阻元件

例 1-6 有一个 $100\ \Omega$ 、 $1\ \text{W}$ 的碳膜电阻使用于直流电路,问在使用时电流、电压不得超过多大的数值?

市售的碳膜、金属膜电阻通常分为 $\frac{1}{8}\ \text{W}$ 、 $\frac{1}{4}\ \text{W}$ 、 $\frac{1}{2}\ \text{W}$ 、 $1\ \text{W}$ 及 $2\ \text{W}$ 。功率损耗较大时可选用线绕电阻。

本题解答如下:

$$|I| = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}}\ \text{A} = \frac{1}{10}\ \text{A} = 100\ \text{mA}$$

$$|U| = R|I| = 100 \times 100 \times 10^{-3}\ \text{V} = 10\ \text{V}$$

故在使用时电流不得超过 $100\ \text{mA}$, 电压不得超过 $10\ \text{V}$ 。



§ 1.4 电阻元件

电阻元件分线性和非线性；时变和非时变。

我们研究的电阻元件：

(1) 是线性，非时变，二端元件

(2) 通过它的电流与加在它两端的电压服从欧姆定律

i , u 取关联参考向时： $u(t) = Ri(t)$

i , u 取非关联参考向时： $u(t) = -Ri(t)$

(3) 其 u - i 特性（伏安特性、VCR特性）曲线是通过原点的一条曲线。



§ 1.4 电阻元件

(4) 在并联电路中常用它的倒数 $G=1/R$

——电导 单位S（西门子）

(5) R , G 对偶

(6) 电阻元件是将电能→热能的元件，中学已知：

$Q=RI^2t$ （焦尔热），在 dt' 时间内元件消耗的热能：

$RI^2(t')dt'=dW(t')$ ，在时间 $[t_0, t]$ 内电阻元件消耗的热能：

$$W[t_0, t] = \int_{t_0}^t p(t') dt' = R \int_{t_0}^t i^2(t') dt'$$



§ 1.5 电压源

电源：

1) 独立电源：

u ， I 是独立存在的，可以用两种不同的模型等效：

①电压源 ②电流源

二端元件（单口元件）

2) 受控源（相关电源）

其电压和电流是受电路中其他部分的电压或电流控制的，这些电压或电流不存在时该电源也不复存在。

四端元件（双口元件）



§ 1.5 电压源

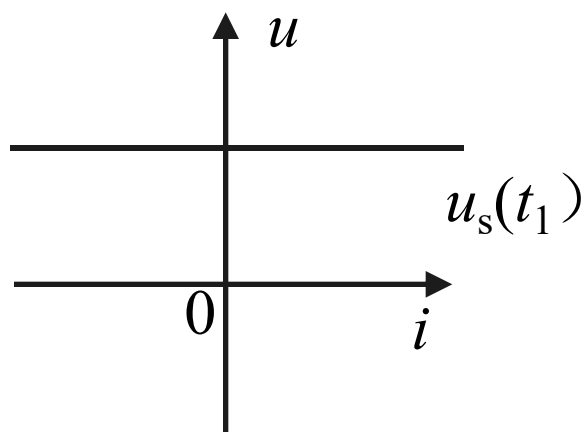
电源是向电路提供能量的有源元件，作为电路的输入，也叫激励。电源分电压源和电流源。

电压源是内阻 $R_0=0$ 的电源，是一个二端元件

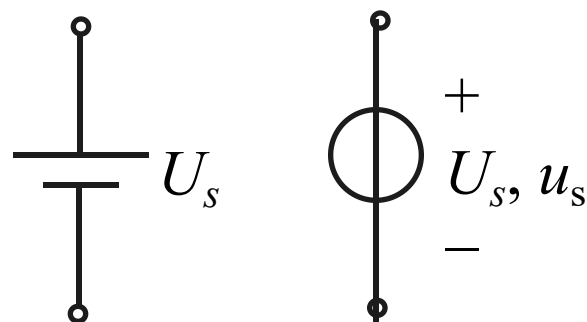
电压源其端电压为定值或一定的时间函数，与流过的电流无关，流过它的电流为不定值，其大小由与之相联的外电路决定。

用理想电压源和电阻元件的串联组合，可以构成实际电压源的模型。

§ 1.5 电压源



t_1 时刻的伏安特性



电压源符号

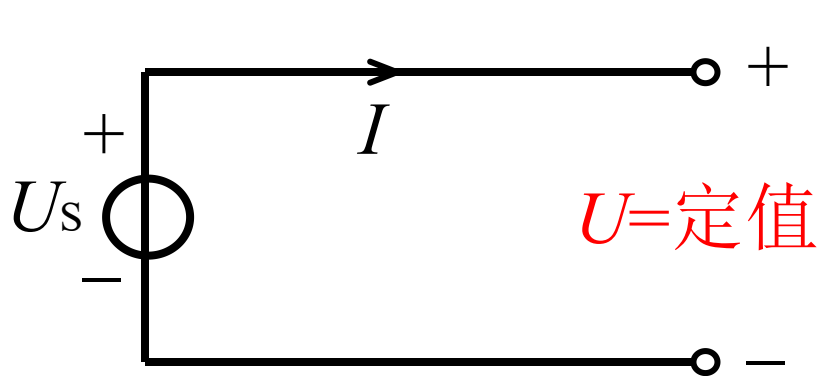
用理想电压源和电阻元件的串联组合可以构成实际电压源的模型。

电路因电源不同而分为直流电路、交流电路。

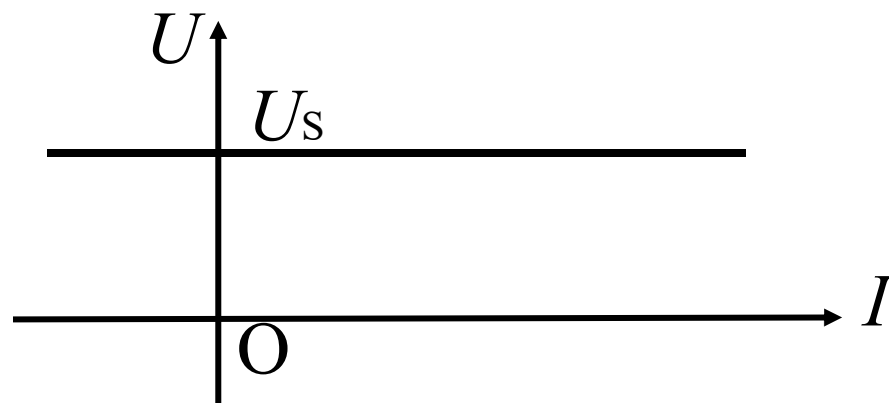
§ 1.5 电压源

理想电源元件：

当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计，即电源内阻可以忽略不计，这种电源便可以用一个理想电源元件来表示。理想电压源 (恒压源) 如图所示：



图形符号



伏安特性

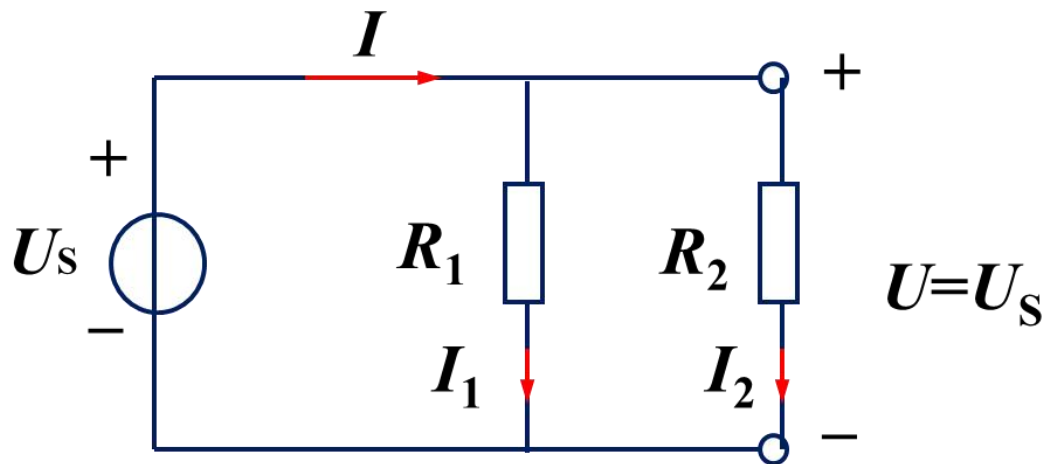
特点： $U=U_s$ 输出电流 I 不是定值，由外电路决定。

§ 1.5 电压源

关于恒压源的几点结论：

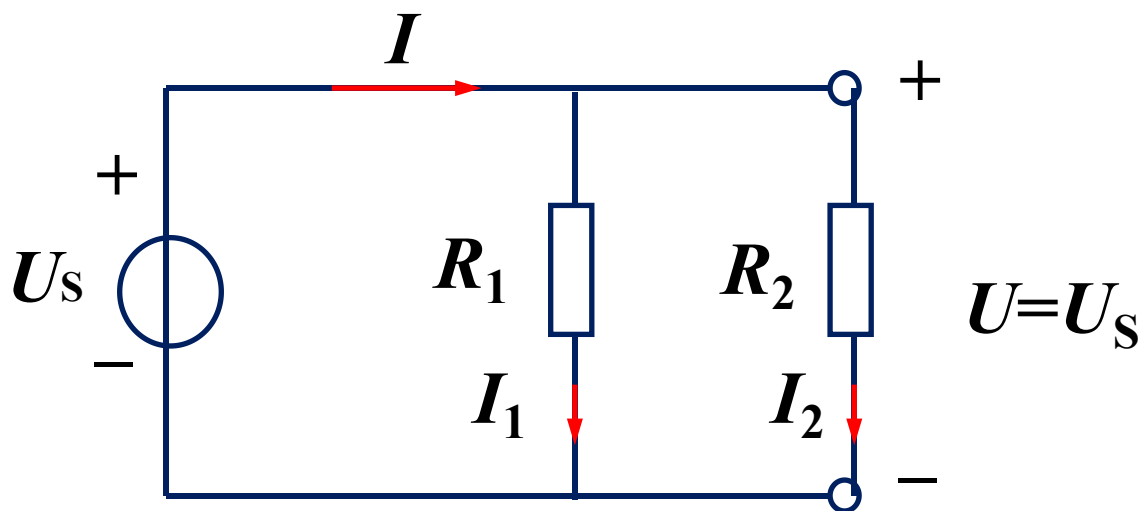
(a) 凡是与恒压源并联的元件，其两端的电压均等于恒压源的电压，即 $U=U_S$ 。

注意：不同的恒压源元件是不允许直接并联的，某个恒压源串联电阻后可以与恒压源并联。



§ 1.5 电压源

(b) 当与恒压源并联的元件的量值变化时（不应短路），不会影响电路其余部分的电压和电流，仅影响该元件自身和恒压源的电流。

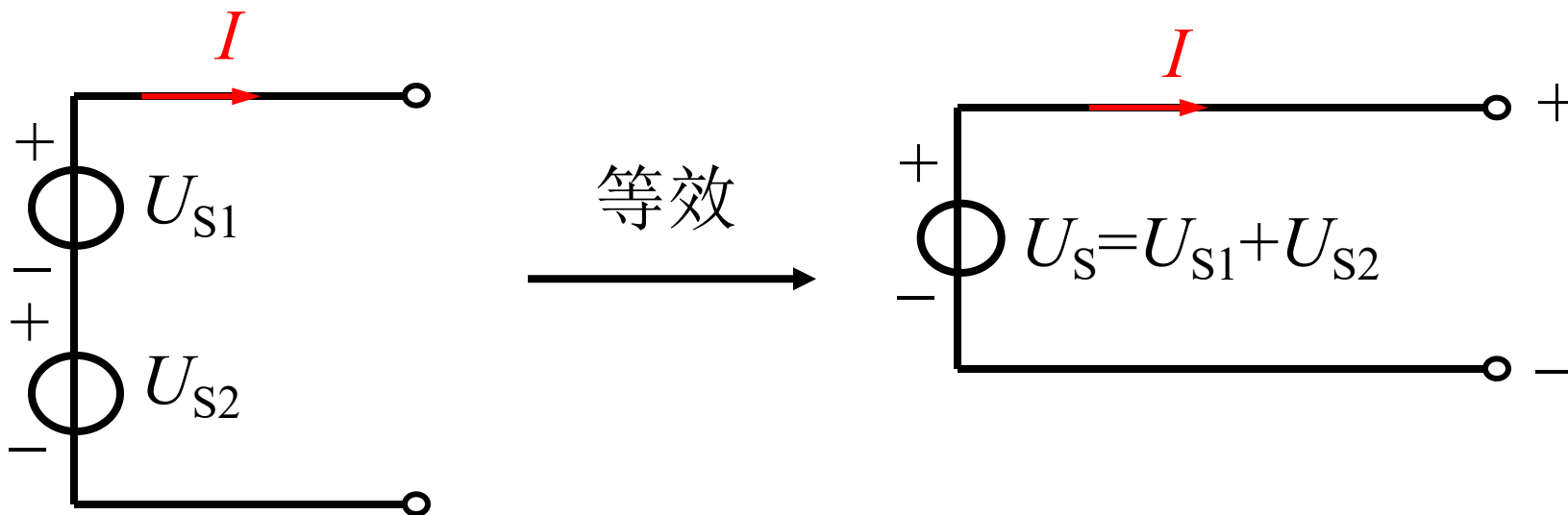




§ 1.5 电压源

(c) 多个恒压源串联时，可合并成一个等效的恒压源。

注意：多个串联恒压源合并时，应考虑每个恒压源的参考方向。



§ 1.5 电压源

例 1-7 单回路电路如图 1-30 所示, 已知 $u_{S1} = 12\text{ V}$ 、 $u_{S2} = 6\text{ V}$ 、 $R_1 = 0.2\ \Omega$ 、 $R_2 = 0.1\ \Omega$ 、 $R_3 = 1.4\ \Omega$ 、 $R_4 = 2.3\ \Omega$ 。求电流 i 及电压 u_{ab} ②。

解 基尔霍夫定律和元件的电压电流关系是解电路问题的基本依据。

设电流参考方向如图中所示, 相应地标出各电阻上电压的参考极性。从 a 点出发按顺时针方向绕行一周, 可得

$$u_{S2} + u_2 + u_4 + u_3 - u_{S1} + u_1 = 0 \text{ (KVL)}$$

又由欧姆定律得电阻元件的电压电流关系为

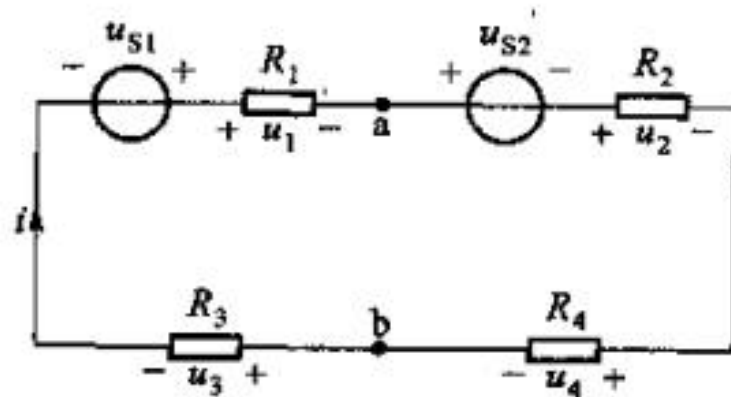


图 1-30 例 1-7

$$\begin{aligned}
 u_1 &= R_1 i \\
 u_2 &= R_2 i \\
 u_3 &= R_3 i \\
 u_4 &= R_4 i
 \end{aligned}
 \tag{VCR}$$

以 VCR 代入 KVL 方程,得

$$u_{s2} + R_2 i + R_4 i + R_3 i - u_{s1} + R_1 i = 0$$

即

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

故

$$i = \frac{u_{s1} - u_{s2}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

代入数据得

$$i = \frac{(12 - 6) \text{ V}}{(0.2 + 0.1 + 1.4 + 2.3) \Omega} = \frac{6}{4} \text{ A} = 1.5 \text{ A}$$

电流为正值说明电流的实际方向与参考方向一致。

再求 u_{ab} : 根据图中所标极性, 循着右边路径计算可得

$$\begin{aligned}
 u_{ab} &= u_{s2} + u_2 + u_4 \\
 &= u_{s2} + R_2 i + R_4 i \\
 &= [6 + 1.5(0.1 + 2.3)] \text{ V} = 9.6 \text{ V}
 \end{aligned}$$

u_{ab} 为正值, 表明由 a 点到 b 点确为电压降。

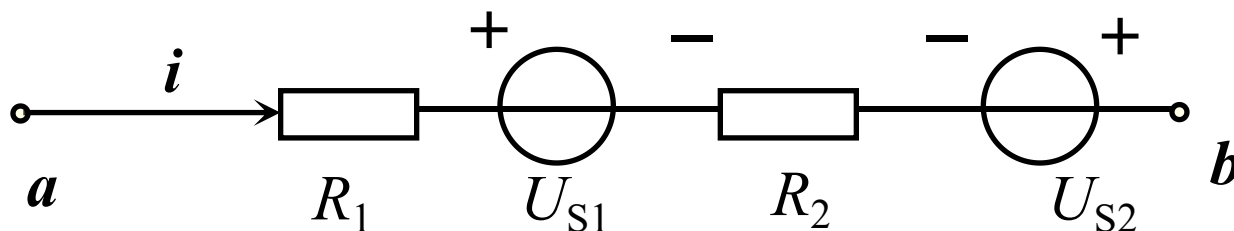
如果循着左边路径计算, 可得

$$\begin{aligned}
 u_{ab} &= -u_1 + u_{s1} - u_3 \\
 &= -R_1 i + u_{s1} - R_3 i \\
 &= [12 - 1.5(0.2 + 1.4)] \text{ V} = 9.6 \text{ V}
 \end{aligned}$$

由此可见, 沿两条路径计算的结果是一样的。

§ 1.5 电压源

例2: 下图所示的含源支路 ab , 已知 $u_{s1}=6V$,
 $u_{s2}=14V$, $u_{ab}=5V$, $R_1=2\Omega$, $R_2=3\Omega$, 求 i 。



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

$$i = (u_{ab} - u_{s1} + u_{s2}) / (R_1 + R_2) = (5 - 6 + 14) / (2 + 3) = 2.6A$$

例 1-9 求图 1-32 所示直流电阻电路中的 U_2 、 I_2 、 R_2 、 R_1 及 U_s 。

解 运用基尔霍夫定律和欧姆定律即能解决问题。对所有的电阻电路,运用这两个定律问题都能得到解决。

I_2 为流过 $2\ \Omega$ 电阻的电流,由欧姆定律可得

$$I_2 = \frac{3\ \text{V}}{2\ \Omega} = 1.5\ \text{A}$$

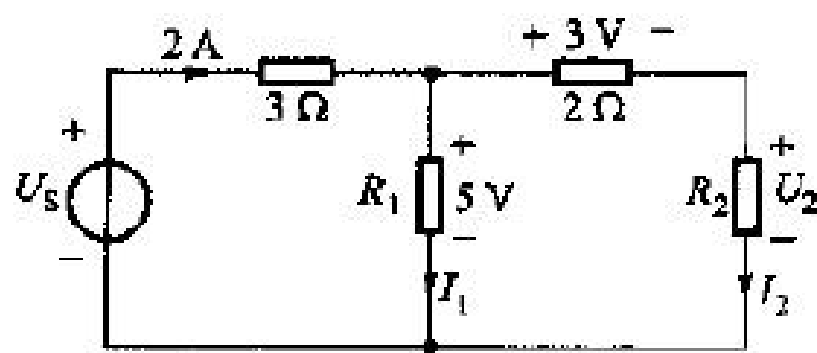


图 1-32 例 1-9

R_1 、 R_2 和 $2\ \Omega$ 电阻共同组成一个回路,由 KVL 可得

$$U_2 - 5\ \text{V} + 3\ \text{V} = 0 \quad U_2 = 2\ \text{V}$$

由欧姆定律可得 $R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2\ \text{V}}{1.5\ \text{A}} = \frac{2}{1.5}\ \Omega = 1.33\ \Omega$

由 KCL 可得 $2\ \text{A} - I_1 - I_2 = 0 \quad 2\ \text{A} - I_1 - 1.5\ \text{A} = 0 \quad I_1 = 0.5\ \text{A}$

由欧姆定律可得 $R_1 = \frac{5}{0.5}\ \Omega = 10\ \Omega$

最后,运用 KVL 于电源和 R_1 、 $3\ \Omega$ 电阻组成的回路,得 $(3 \times 2)\ \text{V} + 5\ \text{V} - U_s = 0$
 $U_s = 11\ \text{V}$



§ 1.6 电流源

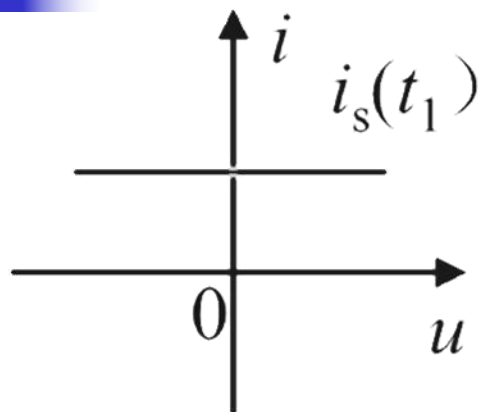
电流源提供一定值的电流或一定时间函数的电流，与端电压无关，电压值则由外电路决定。

即：能够提供一定值的电流 I_s 或一定时间函数的电流 $i_s(t)$ 的元件称为**理想电流源**，简称电流源。电流源有两个**基本性质**：

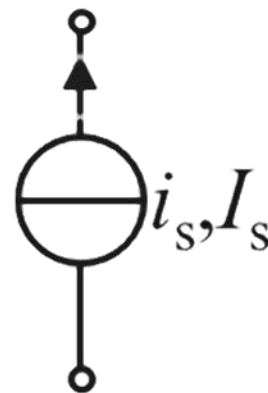
(1) 输出定值的电流 i_s 或一定时间函数的电流 $i_s(t)$ ，与端电压无关。

(2) 电流源两端电压为不定值，大小由外电路决定。

§ 1.6 电流源



电流源在时刻 t_1
的伏安特性曲线



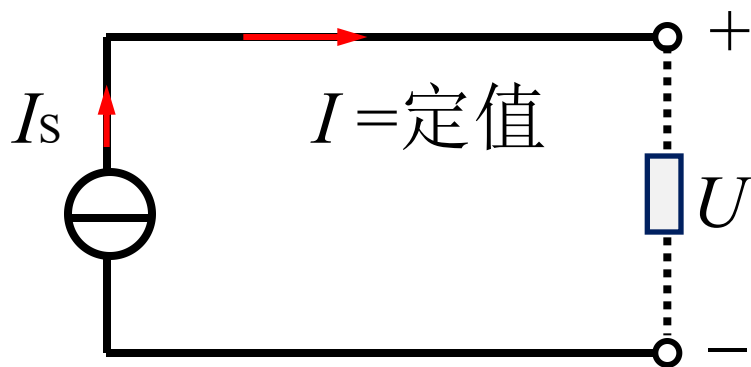
电路符号

由电流源和电阻的并联组合可以构成实际电流源的模型。

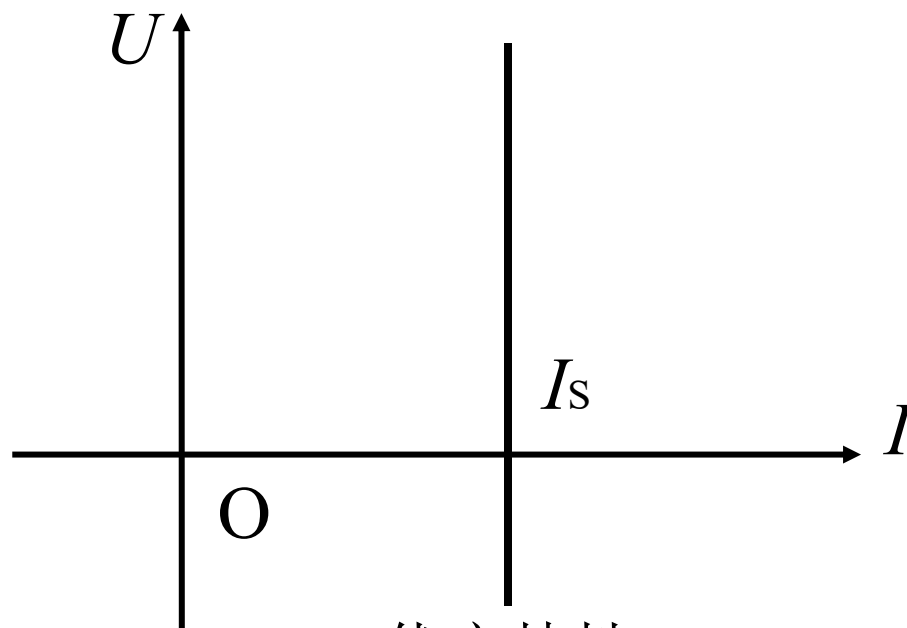
信号源可以是电压源也可以是电流源

§ 1.6 电流源

理想电流源 (恒流源)



图形符号



伏安特性

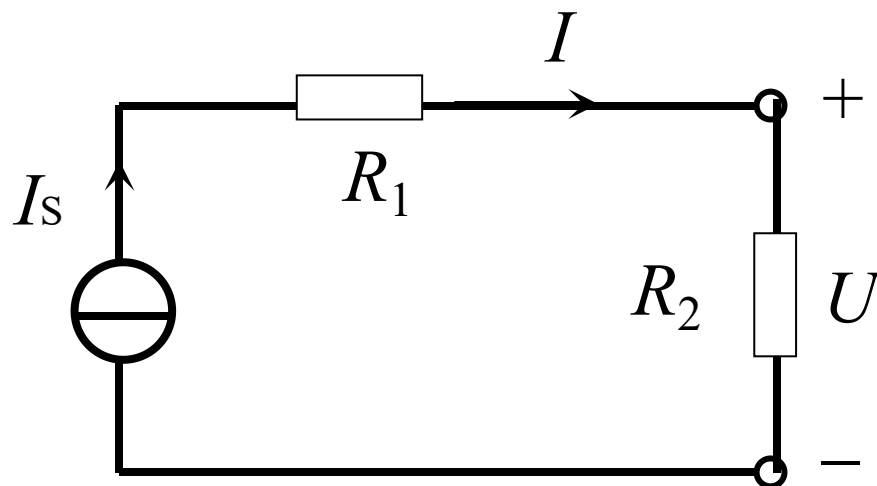
特点: 输出电流 I 为定值, 与外电路无关。 $I = I_s$
输出电压 U 不是定值, 由外电路决定。

§ 1.6 电流源

关于恒流源的几点结论：

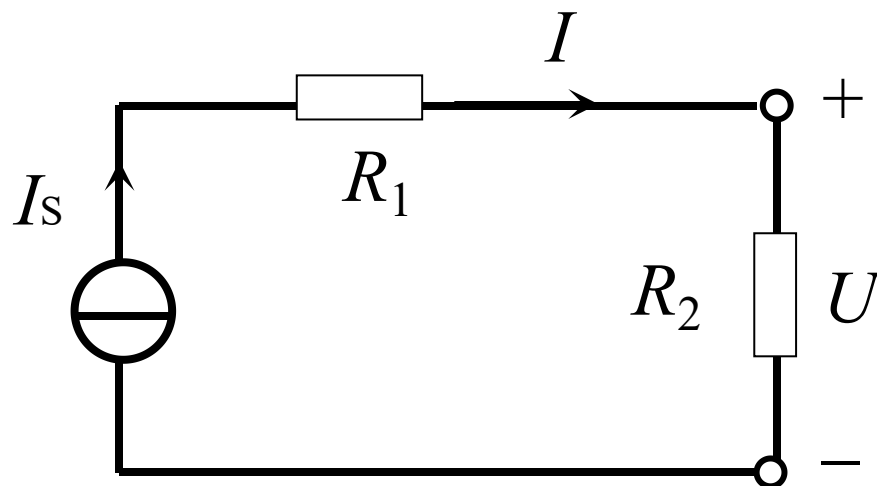
(a) 凡是与恒流源串联的元件，其电流均等于恒流源的电流，即 $I=I_S$ 。

注意：不同的恒流源元件是不允许串联的。



§ 1.6 电流源

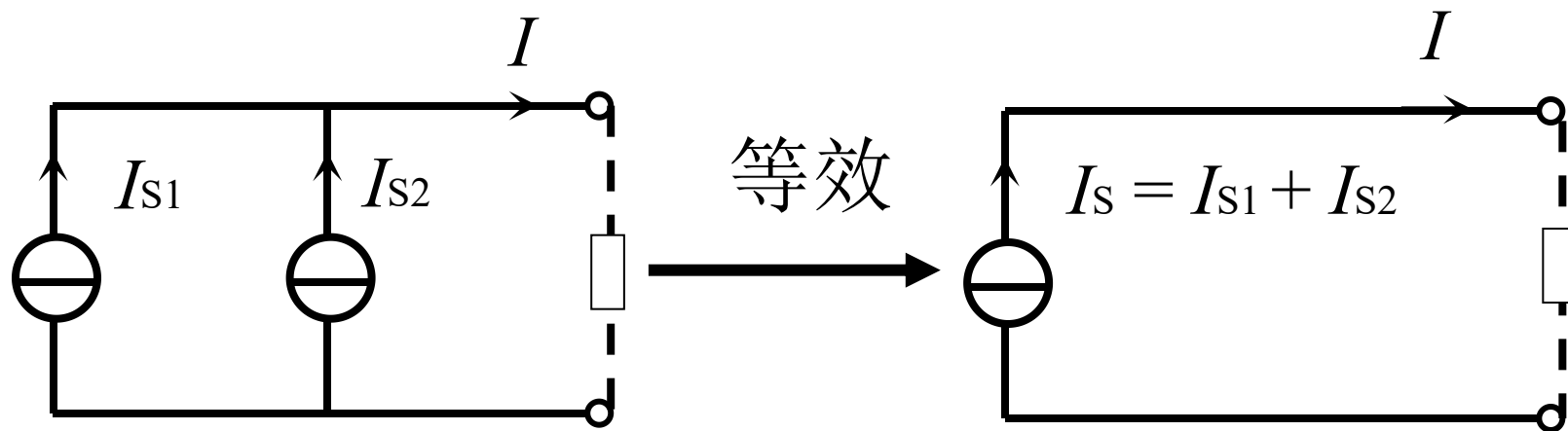
(b) 当与恒流源串联的元件的量值变化时（不应开路），不会影响电路其余部分的电压和电流，仅影响该元件自身和恒流源的电压。



§ 1.6 电流源

(c) 多个恒流源并联时，可合并成一个等效的恒流源。

注意： 多个并联恒流源合并时，应考虑每个恒流源的参考方向。

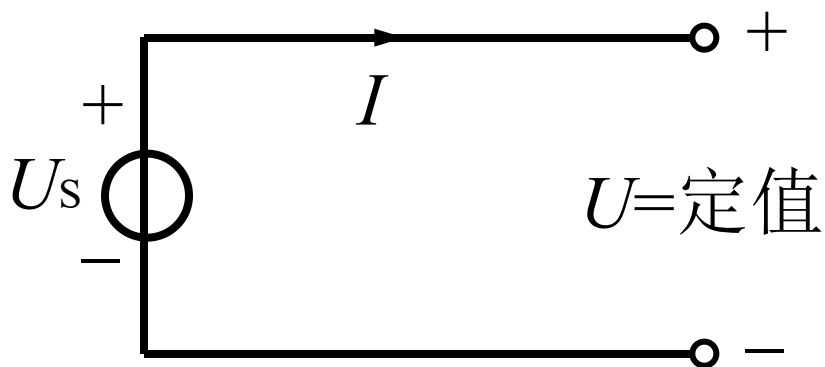


§ 1.6 电流源

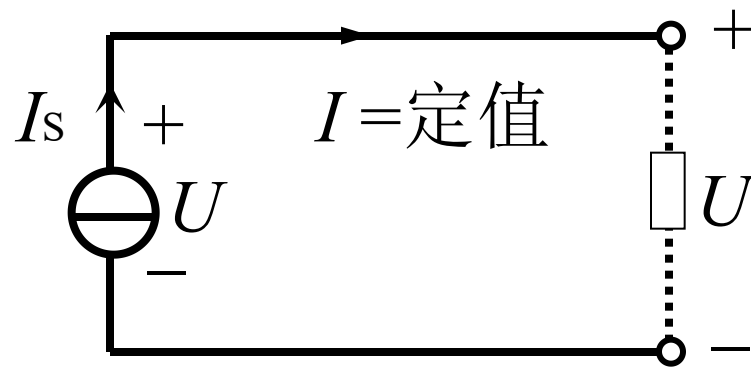
理想电源元件的两种工作状态：

(1) 起电源作用

当恒压源或恒流源的电压和电流的**实际方向**与下图中的参考方向**相同**时，它们**输出**电功率，起**电源**作用。



恒压源



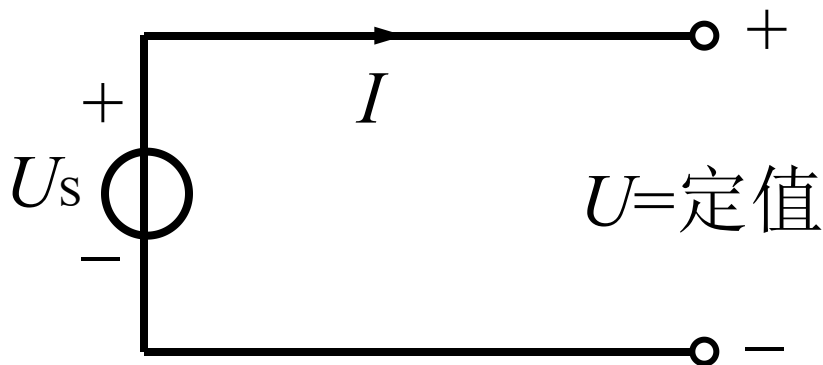
恒流源

§ 1.6 电流源

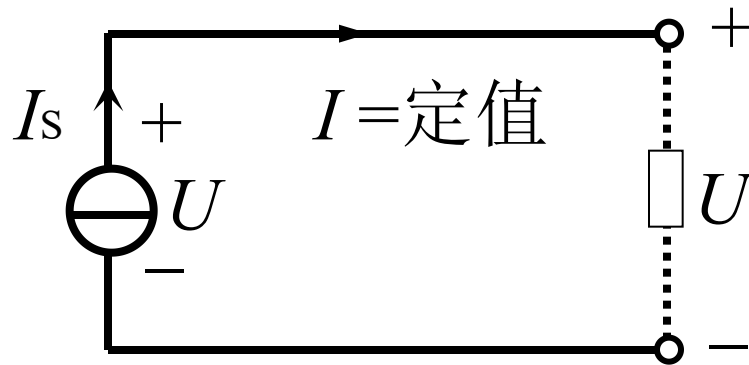
理想电源元件的两种工作状态：

(2) 起负载作用

当恒压源或恒流源的电压或电流的某一个的**实际方向**与下图中的参考方向**相反**时，它们**取用**电功率，起**负载**作用。



恒压源



恒流源

例 1-10 计算图 1-39 所示电路中 $3\ \Omega$ 电阻的电压以及电流源的端电压及功率。

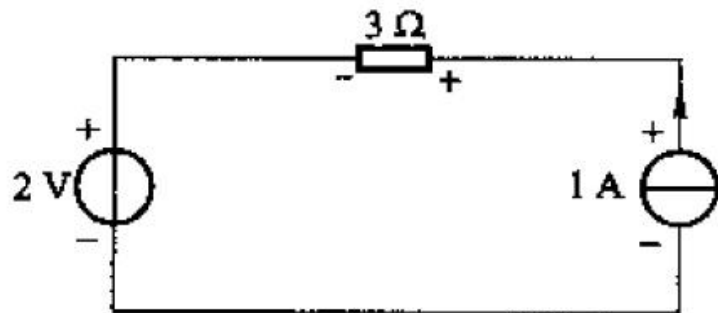
解 由电流源的基本性质可知:与电流源串联的元件,其电流即为电流源的电流。故知,流过 $3\ \Omega$ 电阻的电流为 $1\ \text{A}$,其电压为 $3\ \text{V}$,极性如图所示。

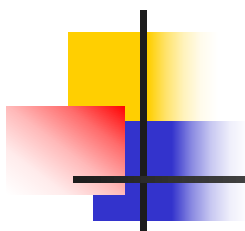
电流源的端电压由与之相连接的外电路决定。设端电压极性如图中所示,则根据 $3\ \Omega$ 电阻以及电压源的电压和极性,可得其端电压为

$$(3 \times 1 + 2)\ \text{V} = 5\ \text{V}。$$

电流源功率(非关联参考方向) $p = -5 \times 1\ \text{W} = -5\ \text{W}$ 可知,电流源提供功率 $5\ \text{W}$ 。

请注意: $2\ \text{V}$ 电压源的存在对电流的大小虽无影响,但对电流源的电压、功率均有影响。所以,不能说电压源在电路中没有作用。





例 1-11 计算图 1-40 所示电路, 当 i_s 分别为 5 A、4 A 和 3 A 时的电流 i_1 、 i_2 及电流源的端电压 u 。

解 根据电压源的性质, 在图 1-40 中不论并联的电流源电流是多少, $3\ \Omega$ 电阻的电流 i_2 均为 $i_2 = \frac{12}{3}\ \text{A} = 4\ \text{A}$

电流源电压均为 12 V。由

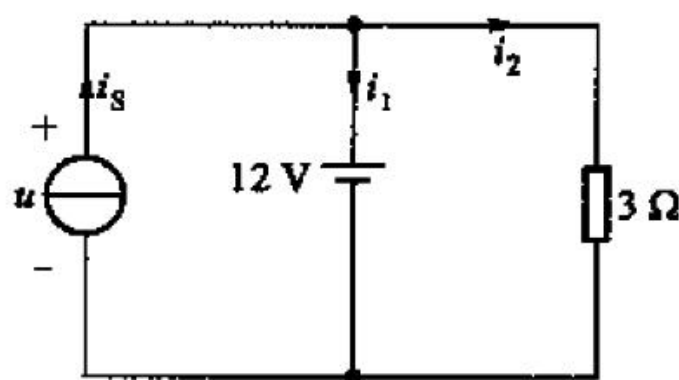
由 KCL 可计算 $i_1 = i_s - i_2$

由 i_s 为 3 A、4 A、5 A 时电压源电流 i_1 分别为

$$i_s - i_2 = (3 - 4)\ \text{A} = -1\ \text{A}$$

$$i_s - i_2 = (4 - 4)\ \text{A} = 0$$

$$i_s - i_2 = (5 - 4)\ \text{A} = 1\ \text{A}$$



例 1-12 电路如图 1-41 所示,求各电流、电压。

解 由 KCL $i_2 = (2 + 3) \text{ A} = 5 \text{ A}$

$\frac{1}{3} \Omega$ 电阻的电压,可由欧姆定律算得为

$$u_2 = \left(5 \times \frac{1}{3} \right) \text{ V} = \frac{5}{3} \text{ V}$$

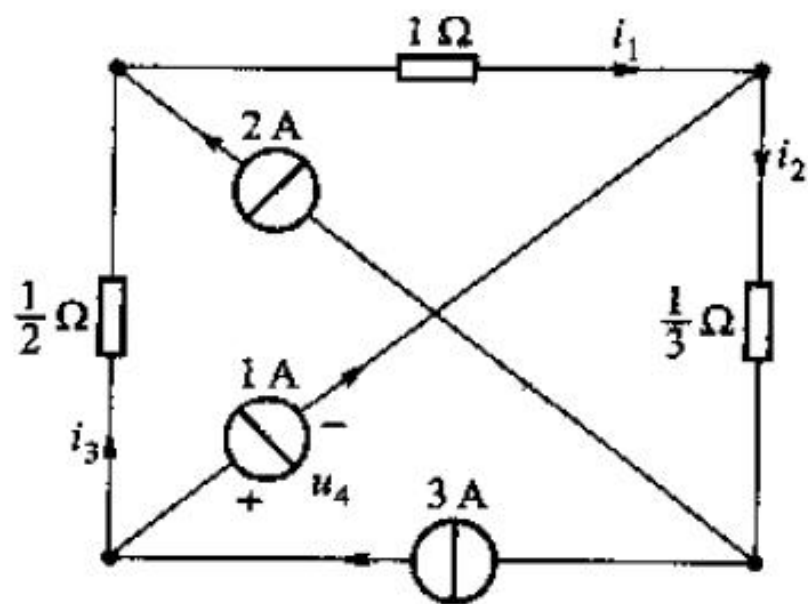
同理得

$$i_3 = (3 - 1) \text{ A} = 2 \text{ A}, \quad u_3 = 2 \times \frac{1}{2} \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$i_1 = 2 \text{ A} + i_3 = 4 \text{ A} \text{ 或 } i_1 = (5 - 1) \text{ A} = 4 \text{ A} \quad u_1 = (4 \times 1) \text{ V} = 4 \text{ V}$$

各电流源的电压必须根据外电路来确定,如 1 A 电流源的电压

$$u_4 = u_3 + u_1 = (1 + 4) \text{ V} = 5 \text{ V}$$



§ 1.6 电流源

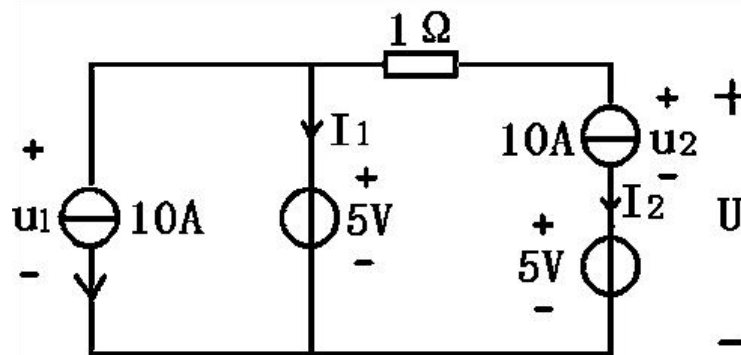
例7：求下图电路中 U 以及各个电源的功率

解：KVL:

$$U - 5 + 1 \times 10 = 0$$

$$U = 5 - 10 = -5V$$

功率：



	左10A	右10A	左5V	右5V
电 压	$u_1 = 5V$	$u_2 = U - 5 = -10V$	5V	5V
电 流	10A	10A	-20A	10A
功 率	50W	-100W	-100W	50W
	吸收	产生	产 生	吸 收



§ 1.6 电流源

结论:

(1) 电压源的电流不能由其本身确定，要由与之相连的外电路确定；电流源的电压不能由其本身确定，要由与之相连的外电路确定；

(2) 电流源可以吸收能量，如左10A电流源；也可放出能量，如右10A电流源；电压源可以吸收能量，如右5V电压源；也可放出能量，如左5V电压源；

(3) 电流源，电压源均为有源元件。

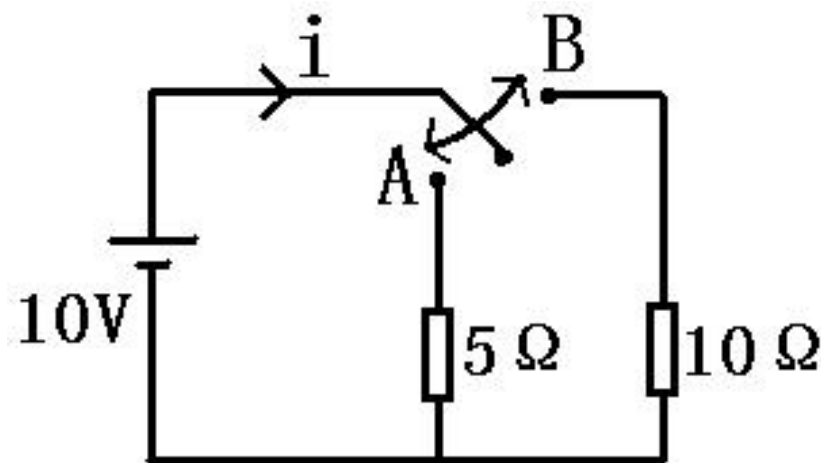
§ 1.6 电流源

例8： 求下图中开关在A或者B时电流 i =?

解：

开关在A时： $i=2\text{ A}$

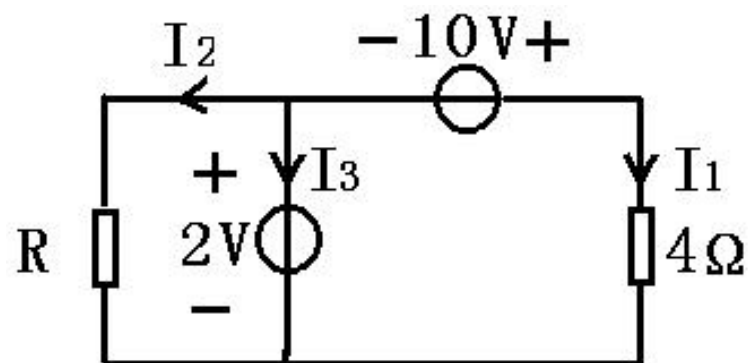
开关在B时： $i=1\text{ A}$



§ 1.6 电流源

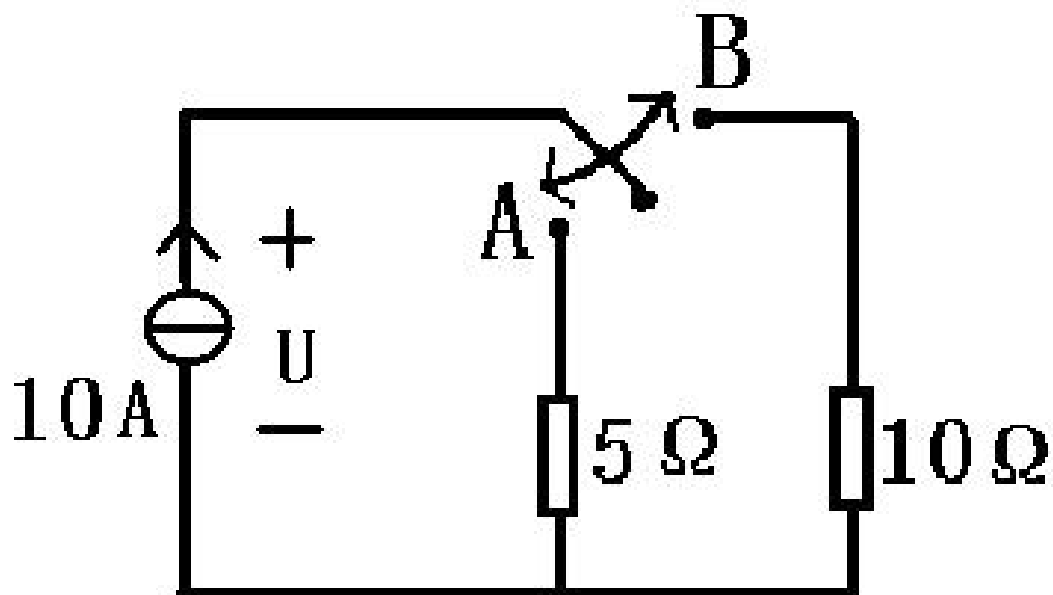
例9：下列答案那个正确？

- 解：
- (1) $R \uparrow$ 时, $I_1 \uparrow$
 - (2) $R \uparrow$ 时, $I_2 \downarrow$ ✓
 - (3) $R \uparrow$ 时, I_3 不变



§ 1.6 电流源

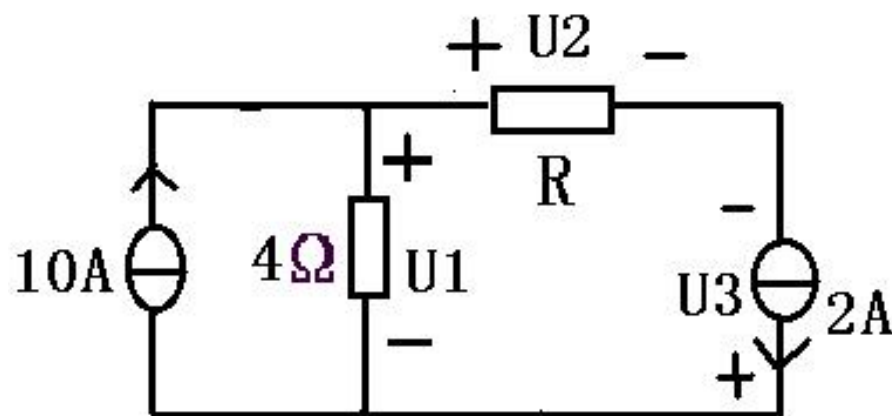
例10：求下图中开关在A和B时的电压 U 。



§ 1.6 电流源

例11：下图所示，哪个答案正确？

- (1) R 增大, U_1 增大
- (2) R 增大, U_2 增大
- (3) R 增大, U_3 不变



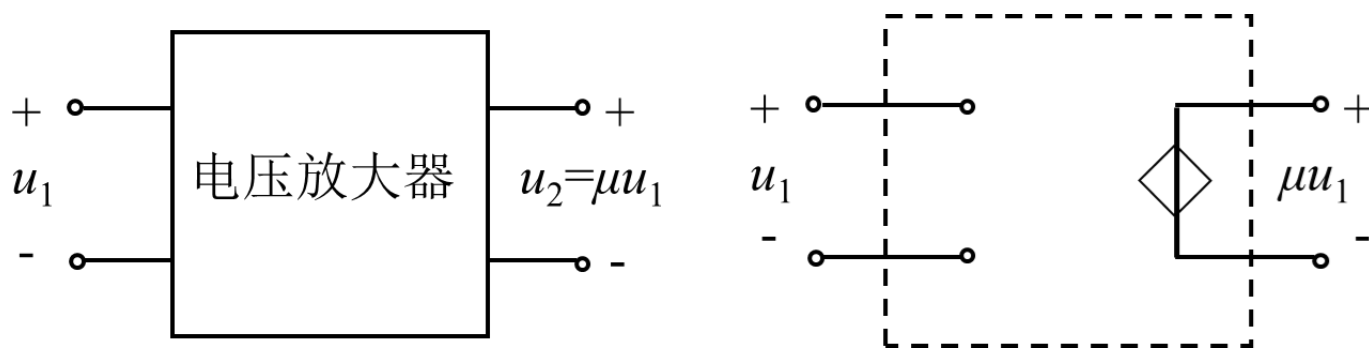
答：(2) 正确

§ 1.7 受控源

一、受控源：

受电路中其他支路电压或电流控制的电压源或电流源叫做受控源。

受控源是电子器件的抽象模型：输入端（控制支路 U 、 I ）控制输出端（受控支路 U 、 I ），表明电子器件的“互参数”和“转移”关系。根据控制支路是开路 (U)、短路 (I)，受控支路是 U 、 I 分类：





§ 1.7 受控源

二、受控源的种类：

本课程讲授讨论的是线性受控源，理想情况下：

主控量为电压时，控制支路的电压开路

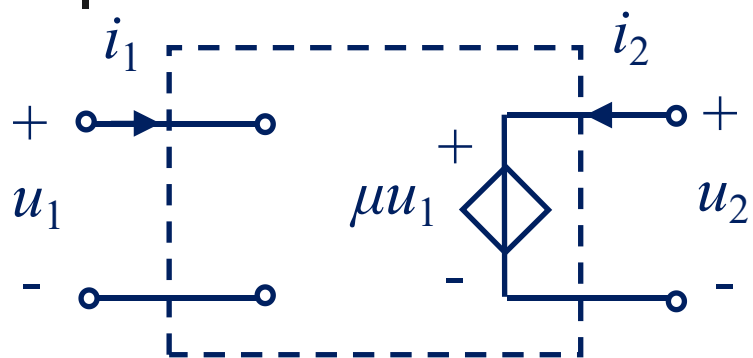
主控量为电流时，控制支路的电流短路

转移电压比—— μ ；转移电阻—— r ；

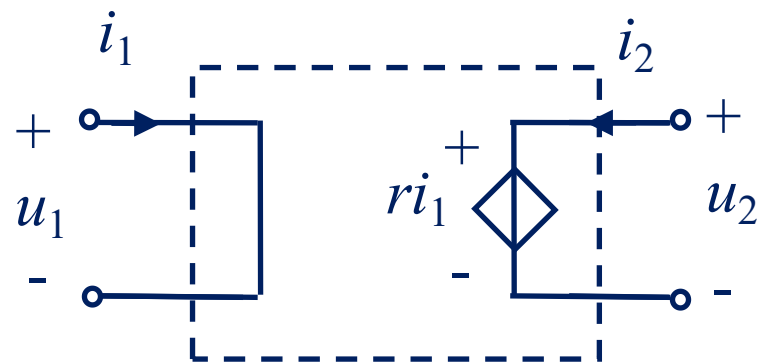
转移电导—— g ；转移电流比—— α ；

下述四种受控源为线性、时不变、双口电阻元件，属电阻电路，因此参数 μ ， r ， g ， α 都是常数，受控源是单向性的与独立源不同的是，它单独存在时无电压、电流。

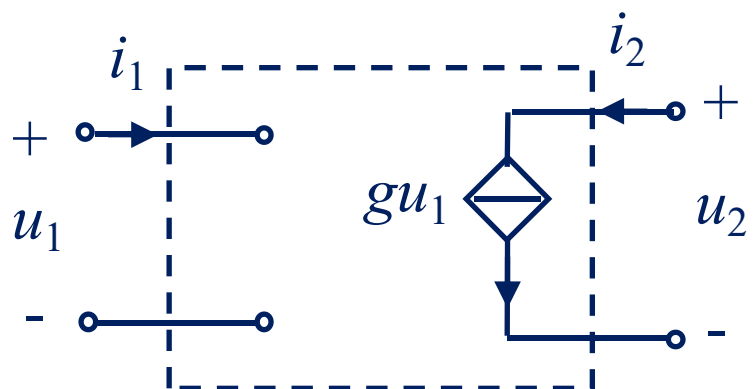
§ 1.7 受控源



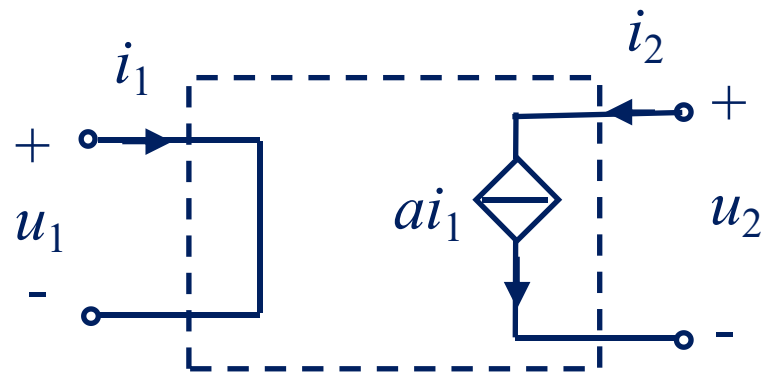
电压控制电压源 VCVS



电流控制电压源 CCVS



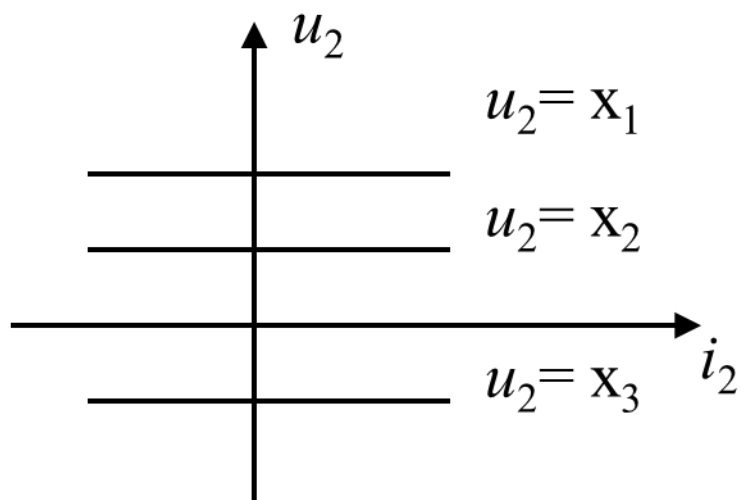
电压控制电流源 VCCS



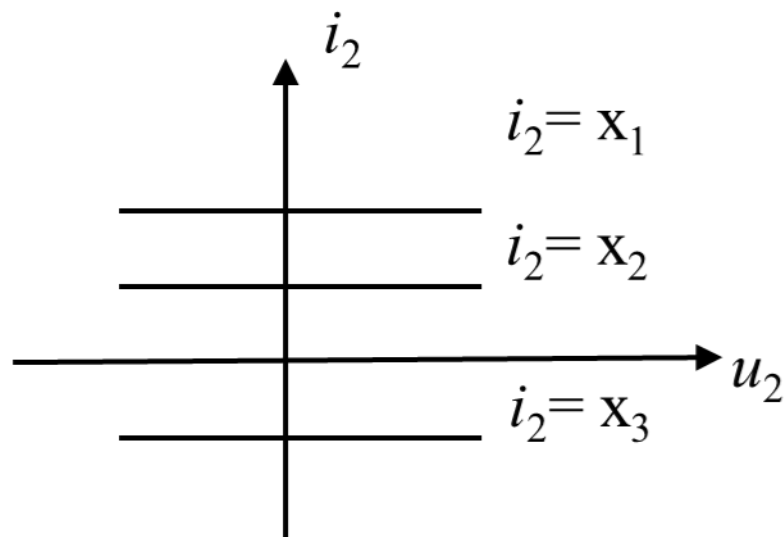
电流控制电流源 CCCS

§ 1.7 受控源

三、受控源的伏安特性：



受控电压源伏安特性曲线



受控电流源伏安特性曲线



§ 1.7 受控源

总结：

1、受控源定义

受控电压源（电流源）的电压（电流）受同一电路的其他支路的电压或电流控制。

VCVS: $i_1=0$ $u_2 = \mu u_1$ μ 为转移电压比

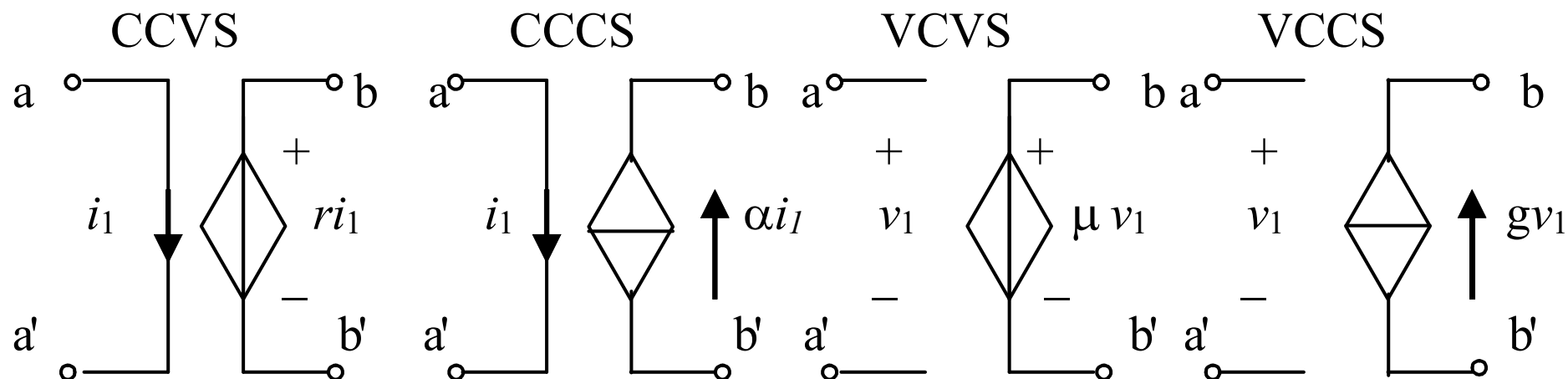
CCVS: $u_1=0$ $u_{12} = r i_1$ r 为转移电阻

VCCS: $i_1=0$ $i_2 = g u_1$ g 为转移电导

CCCS: $u_1=0$ $i_2 = \alpha i_1$ α 为转移电流比

§ 1.7 受控源

2. 元件符号与图形



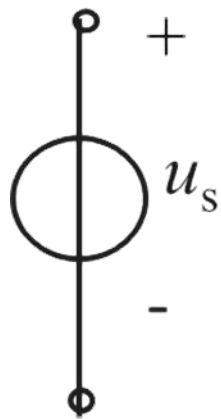
3. 说明

受控源是从晶体管、电子管电路中总结出来的一种**双端口元件模型**。受控源其他特性与电压（流）源相同

§ 1.7 受控源

四、受控源功率

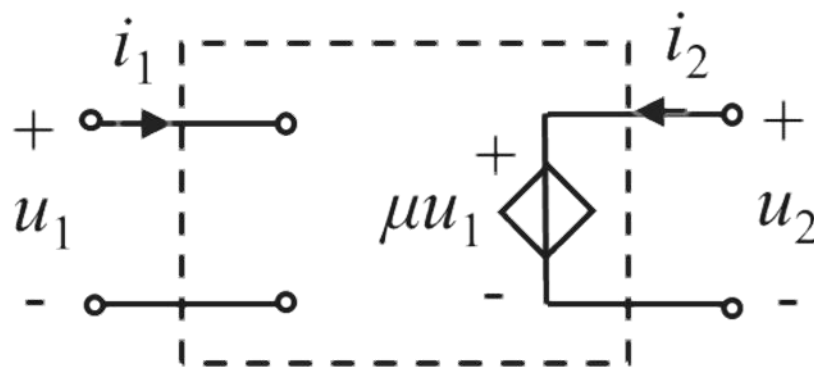
$$p(t) = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_2 i_2 \quad (\text{因 } u_1, i_1 \text{ 中总有一个为零})$$



电压源



电流源



电压控制电压源VCVS

例 1-13 VCVS 连接于信号电压源 u_s 与负载电阻 R_L 之间,如图 1-50 所示, R_s 为信号电压源的内阻。试求负载电压(输出电压) u_O 与信号电压(输入电压) u_s 的关系,并求受控源的功率。

解 求解含受控源的电路时,仍需根据两类约束列出所需方程。为方便计,在列写方程时可暂先把受控源看作独立源。由 KVL 可得

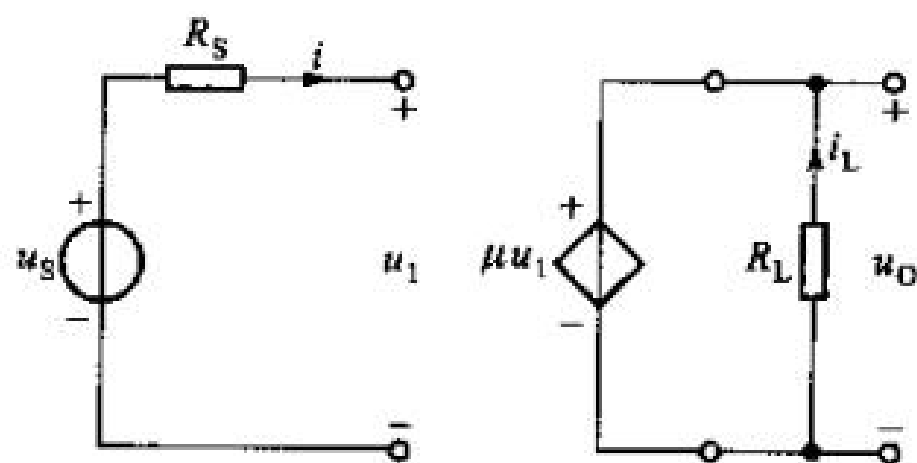


图 1-50 例 1-13

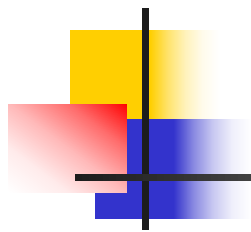
$$\mu u_1 - u_O = 0$$

由于 $i = 0$, 故得

$$u_1 = u_s$$

代入上式后,得

$$u_O = \mu u_s$$



此即为输出电压与输入电压的关系,两者成正比。若 $\mu > 1$, 则 $u_o > u_s$, 此时受控源起着线性放大器的作用。

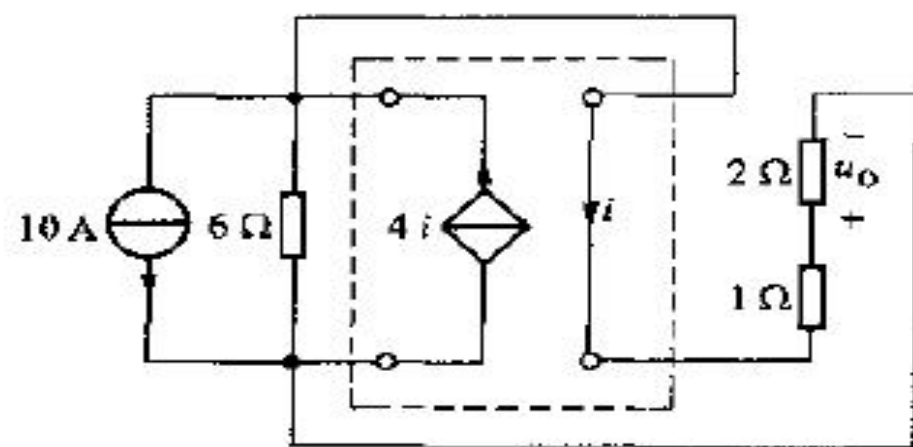
考虑到受控支路电压和电流的参考方向,由(1-36)式可求得受控源的功率

$$p = \mu u_1 i_L = \mu u_1 (-\mu u_1 / R_L) = -(\mu u_1)^2 / R_L$$

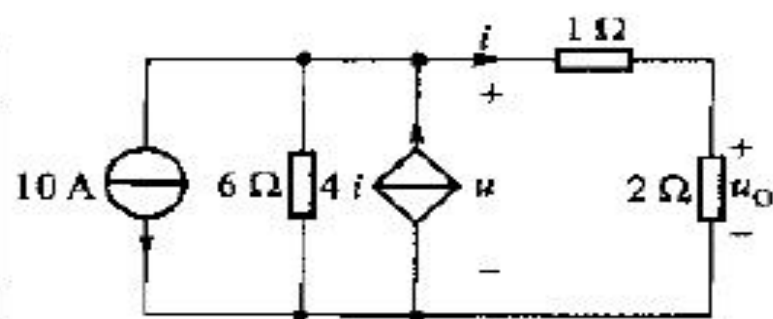
其值恒为负,亦即受控源向外提供功率。不难算出,负载 R_L 消耗的功率就是由受控源提供的。(由1-28)式可知,受控源是一种有源元件。受控源往往是某一器件在一定外加电源工作条件下的模型,一般在模型中并不表明该电源,但受控源向其外电路提供的功率来自该电源。

例 1-14 含 CCCS 电路如图 1-51(a) 所示, 试求电压 u_0 和流经受控源的电流。

解 图 1-51(a) 所示为凸显受控源的控制和受控支路的电路图, 分析时常
用图 1-51(b) 所示简化图, 注意正确标出控制量即可。今后一律采用简化图,
受控源也仅指受控支路而言。



(a)



(b)

含受控源电路仍需满足网类约束。在列写 KVL、KCL 方程时, 有两点要牢记在心: 其一, 在列写方程时要把受控源暂时看作独立源, 以便顺利列出。本题为求解 u , 需列写 KCL 方程, 列写时把受控源看作是电流为 $4i$ 的电流源, 可得①

$$\frac{u}{6} + \frac{u}{1+2} - (4i) + 10 = 0$$

其二, 列出方程后, 必须找出控制量 (本题为 i) 与求解量 (本题为 u) 的关系, 以之代入写出的方程才能求得答案。本题所需的这一关系是 $i = \frac{u}{3}$

于是 $\frac{u}{6} + \frac{u}{3} - 4\left(\frac{u}{3}\right) + 10 = 0$ 解得 $u = 12 \text{ V}$ 故得 $u_0 = (2 \Omega)i = 8 \text{ V}$



§ 1.7 受控源

五、独立源与受控源的区别：

独立源

1. 电压源电压、电流源电流是一定值，与外电路无关。
2. 独立源在电路中均作为电路的输入，称为激励，它在电路中产生的电压电流称为响应。
3. 独立源均为二端元件。

受控源

1. 受控电流源端口电流、受控电压源端口电压不是定值，而是受其它支路电压或电流的控制，即是与控制电路电压，电流相关的。
2. 受控源不能作为电路的输入，它只不过是电子器件电路模型的组成部分。
3. 受控源均为四端耦合器件。

§ 1.7 受控源

例3: 试求图示电路中受控源提供的电流 $2I$ 及每个元件的功率。

解: 按最大回路, 由KVL

$$-1 + 2I + 2 = 0$$

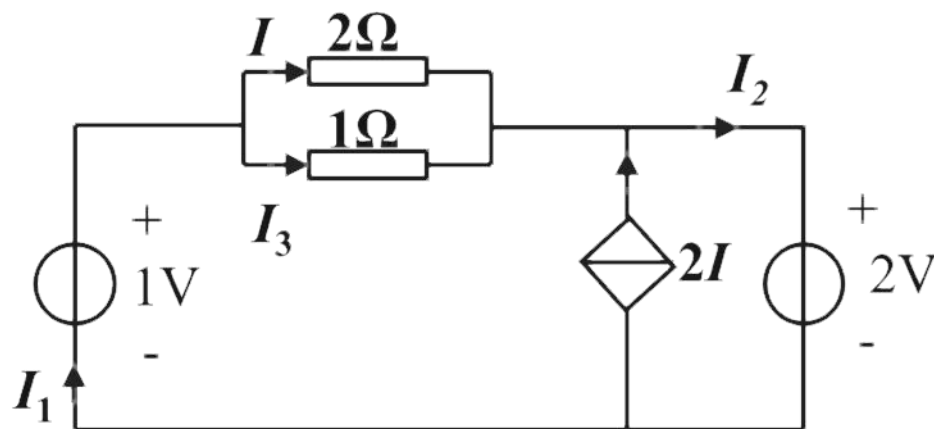
$$I = (-2 + 1)/2 = -0.5\text{A}$$

受控源提供的电流

$$2I = 2(-0.5) = -1\text{A}$$

$$\text{因 } 2\Omega \times I = 1\Omega \times I_3$$

$$\text{故 } I_3 = -1\text{A} \quad I_1 = I + I_3 = -1.5\text{A} \quad I_2 = I_1 + 2I = -1.5 - 1 = -2.5\text{A}$$



§ 1.7 受控源

例3: 试求图示电路中受控源提供的电流 $2I$ 及每个元件的功率。

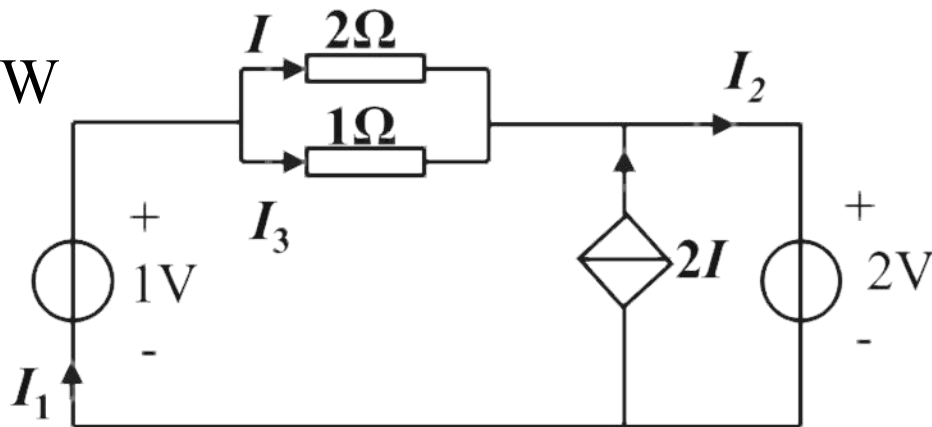
解: $P_{1V} = -1V \times I_1 = -1 \times (-1.5) = 1.5W$ (负载作用)

$$P_{2V} = 2V \times I_2 = 2 \times (-2.5) = -5W \text{ (电源作用)}$$

$$P_{\text{控}} = -2V \times 2I = -4 \times (-0.5) = 2W \text{ (负载)}$$

$$P_{2\Omega} = 2\Omega \times I^2 = 2 \times (-0.5)^2 = 0.5W$$

$$P_{1\Omega} = I_3^2 \times 1\Omega = (-1)^2 \times 1 = 1W$$

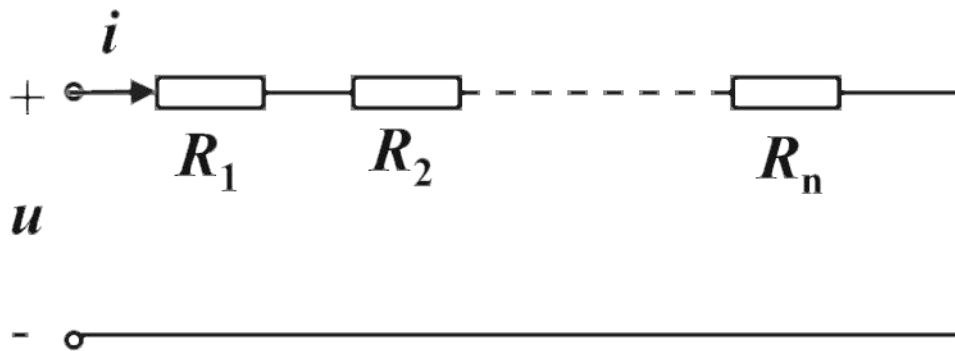


§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的串联及分压公式：

电路中两个或多个电阻一个接一个地顺序相联，并且在这些电阻中通过**同一电流**，则这样的联接方法称为**电阻的串联**。

串联电阻：若干个电阻流过同一个电流叫串联，这些电阻叫串联电阻，串联电阻的总电阻值等于各个电阻值相加。



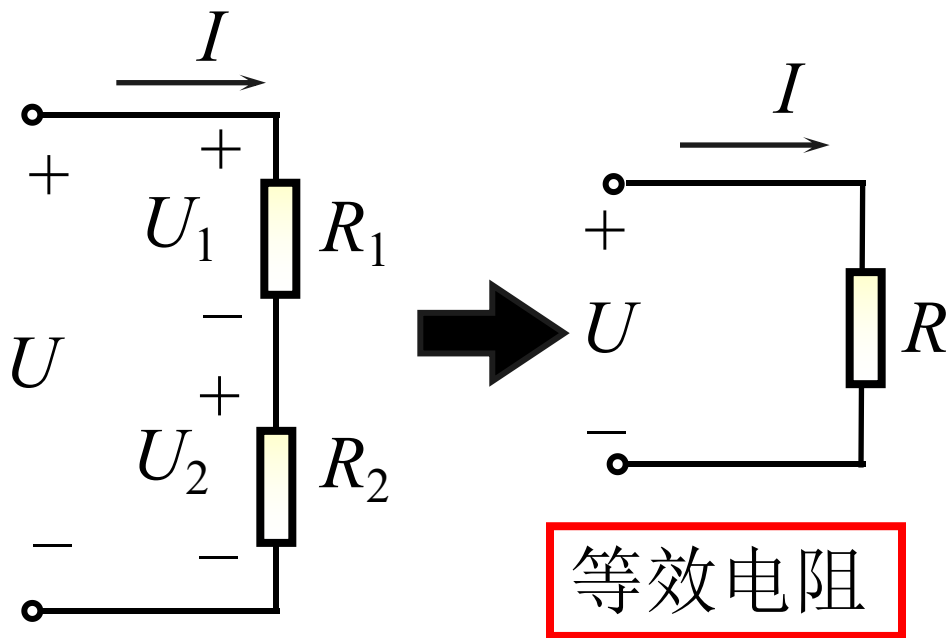
§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的串联及分压公式：

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

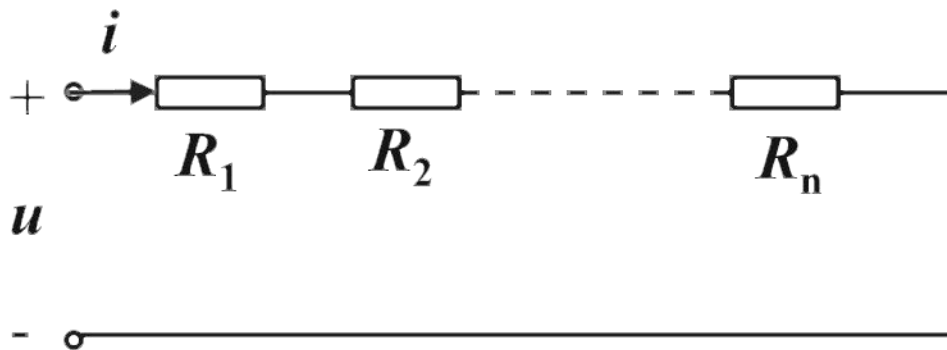
分压公式



$$R = R_1 + R_2$$

§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的串联及分压公式：



$$\begin{aligned} u &= R_1 \times i + R_2 \times i + \dots + R_n \times I = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \times I \\ &= R \times I \end{aligned}$$

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

§ 1.8 分压公式和分流公式

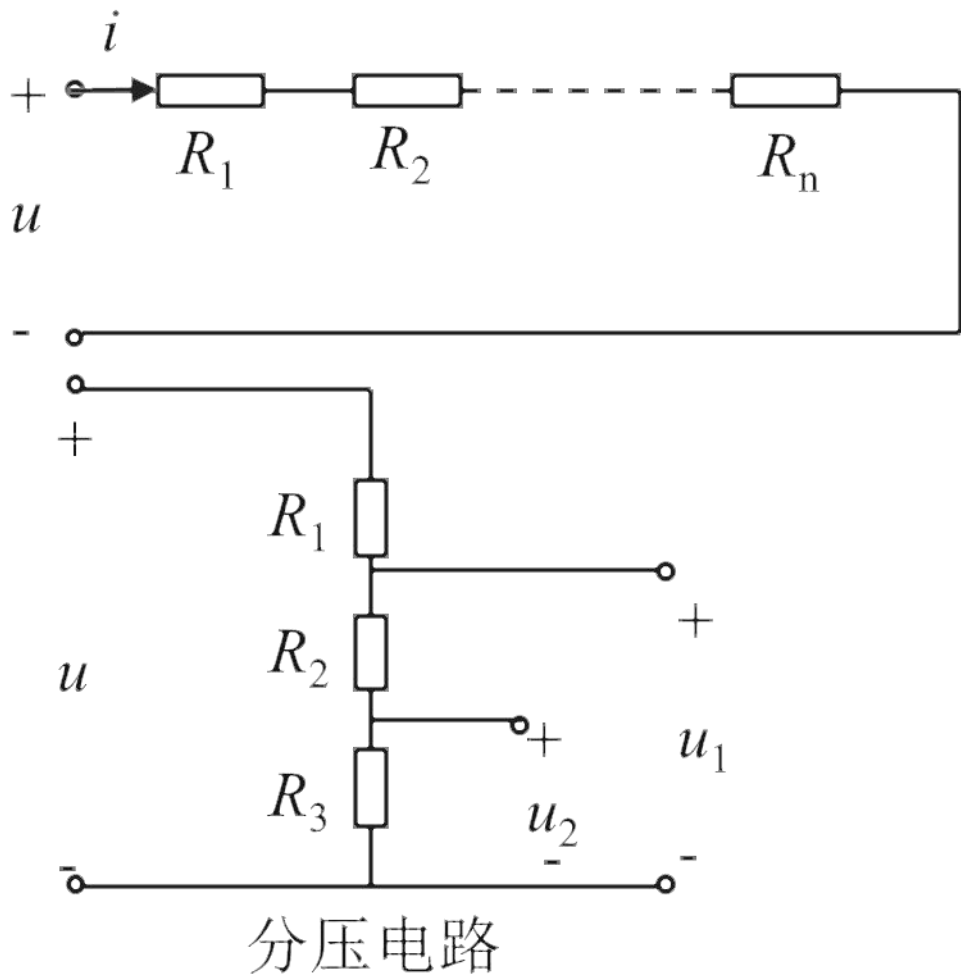
电阻的串联及分压公式：

分压公式：

$$u_k = R_k \times \frac{u}{R} = \left(\frac{R_k}{R}\right) \times u$$

$$u_1 = (R_2 + R_3) \times \frac{u}{(R_1 + R_2 + R_3)}$$

$$u_2 = R_3 \times \frac{u}{(R_1 + R_2 + R_3)}$$



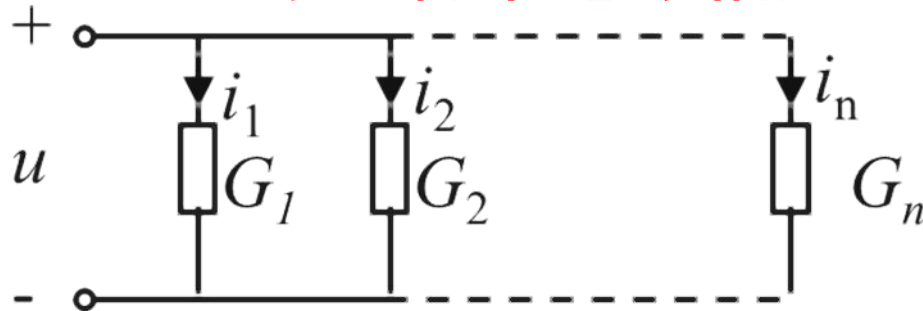
§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的并联及分流公式:

电路中两个或多个电阻联接在两个公共的结点之间, 则这样的联接法称为电阻的并联。在各个并联支路(电阻)上受到同一电压。

电阻的并联: 若干个承受同一个电压的电阻是并联电阻。

并联电阻的总电导**等于各个电导相加**。



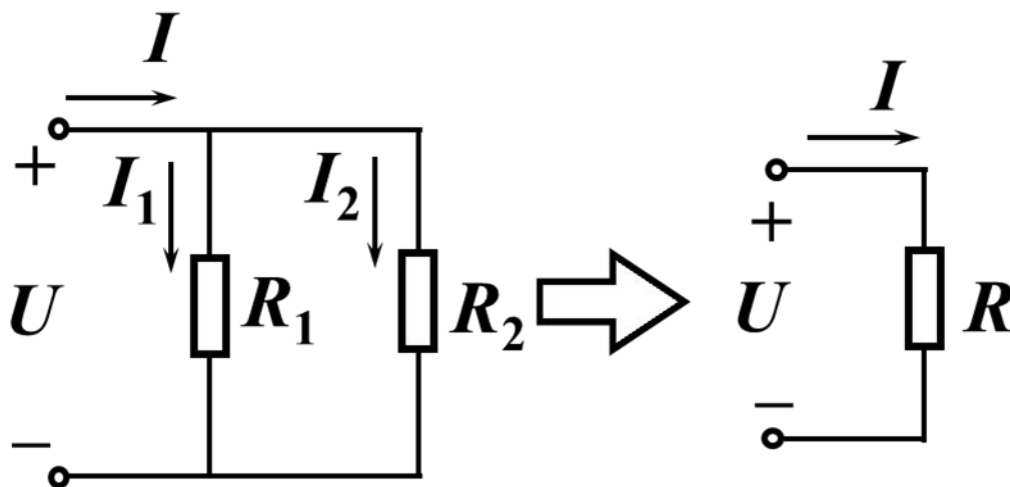
§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的并联及分流公式：

分流公式

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$



等效电阻

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的并联及分流公式：

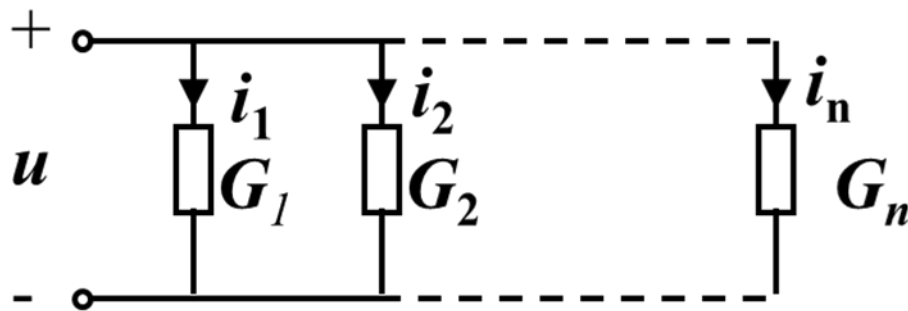
并联电阻的总电导等于各个电导相加。

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

$$= G_1 \times u + G_2 \times u + \dots + G_n \times u$$

$$= (G_1 + G_2 + \dots + G_n) \times u = G \times u$$

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

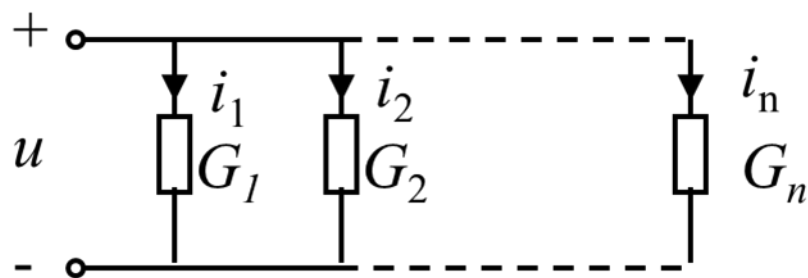


§ 1.8 分压公式和分流公式

电阻的并联及分流公式：

分流公式

并联电导可作成分流电路

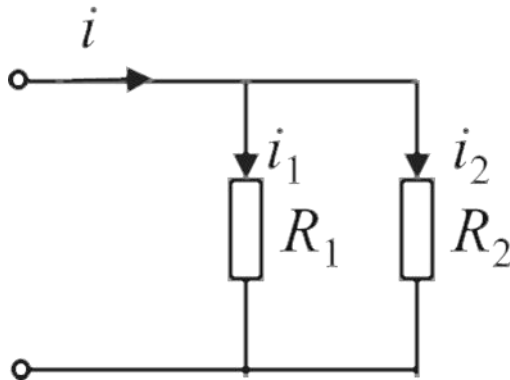


$$i_k = G_k \times u$$

$$= G_k \times i / G$$

$$= (G_k / G) \times i$$

特例：



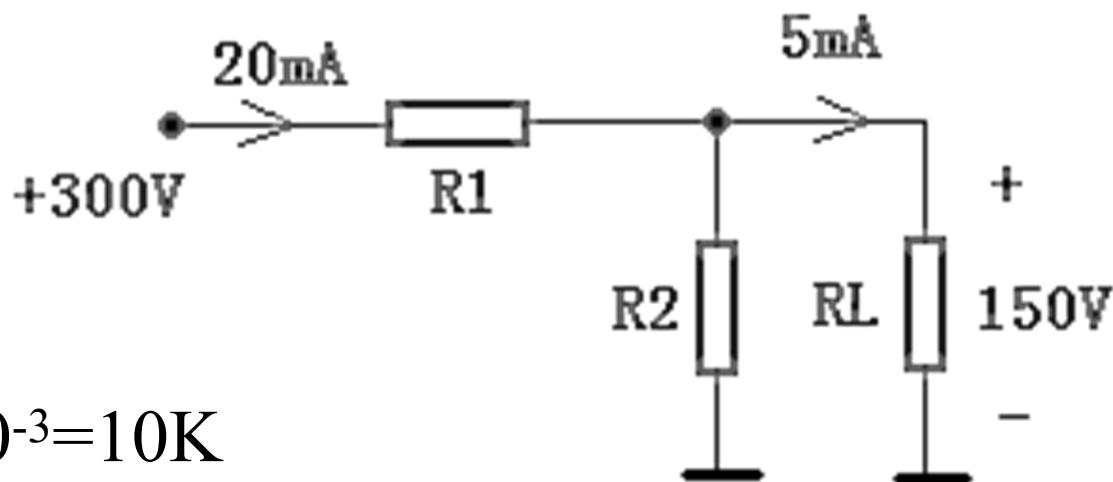
$$R = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$i_1 = i \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$i_2 = i \times R_1 / (R_1 + R_2)$$

§ 1.8 分压公式和分流公式

例题：求右下图示电路中的 $R1$ 、 $R2$ 。



解：

$$R2 = 150 / (20 - 5) \times 10^{-3} = 10\text{K}$$

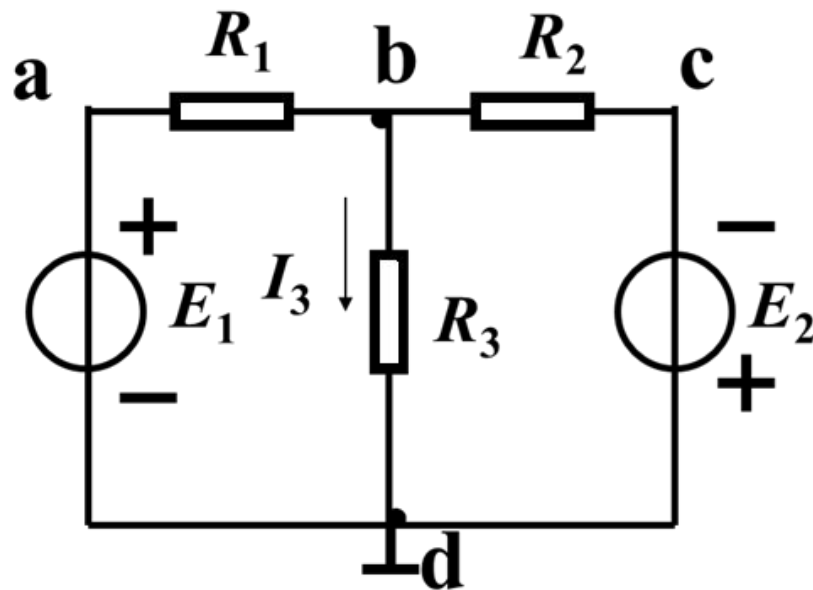
$$R1 = (300 - 150) / 20 \times 10^{-3} = 7.5\text{K}$$

§ 1.8 分压公式和分流公式

电路中电位的计算：电路中的参考点

1、参考点的电位规定为零。

电路的参考点可以任意选取，但只有一个。工程上，一般选机壳、大地或元件的公共端作参考点，也称为“地”，用“**⊥**”表示。



§ 1.8 分压公式和分流公式

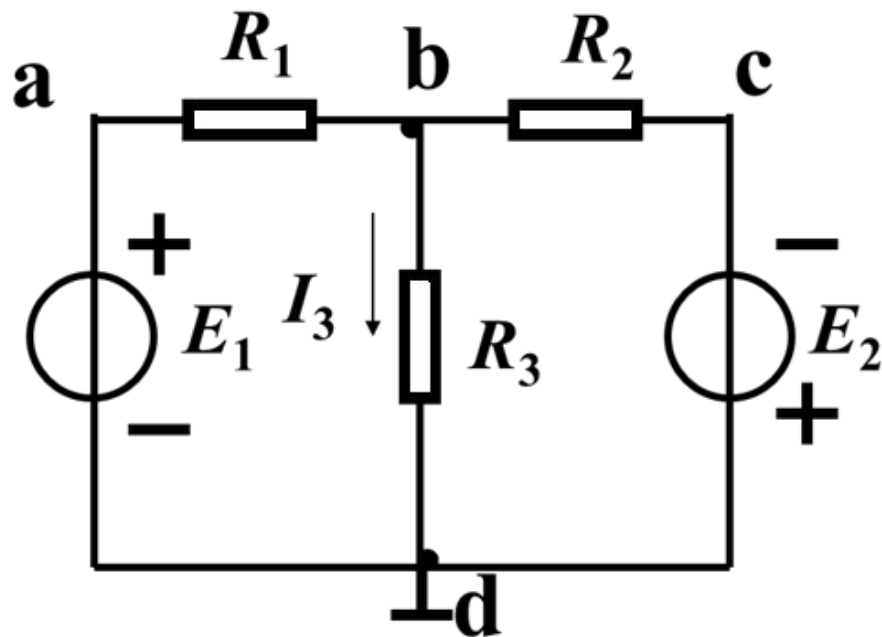
电路中电位的计算：

2、电位

电路中某一点的电位值是指由这一点到参考点的电压。

电位的大小与参考点的选择有关。

电位的单值性：参考点一经选定，电路中各点的电位就是唯一确定值。

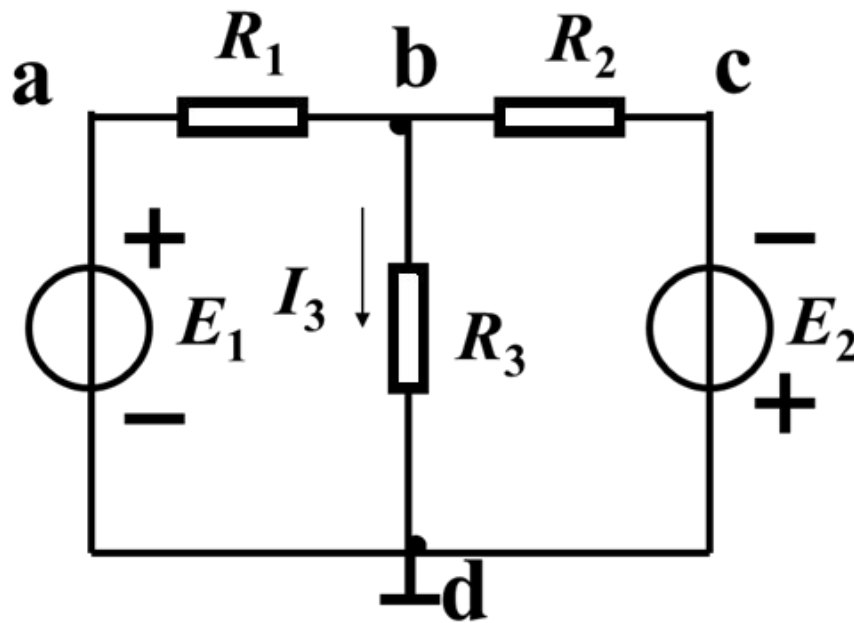


§ 1.8 分压公式和分流公式

电路中电位的计算：

2、电位

在电路中任选一点作参考点（零电位点），某点到参考点的电压降叫该点的电位。由于参考点是任意选择的，所以电位是一个相对的概念。



§ 1.8 分压公式和分流公式

电路中电位的计算：

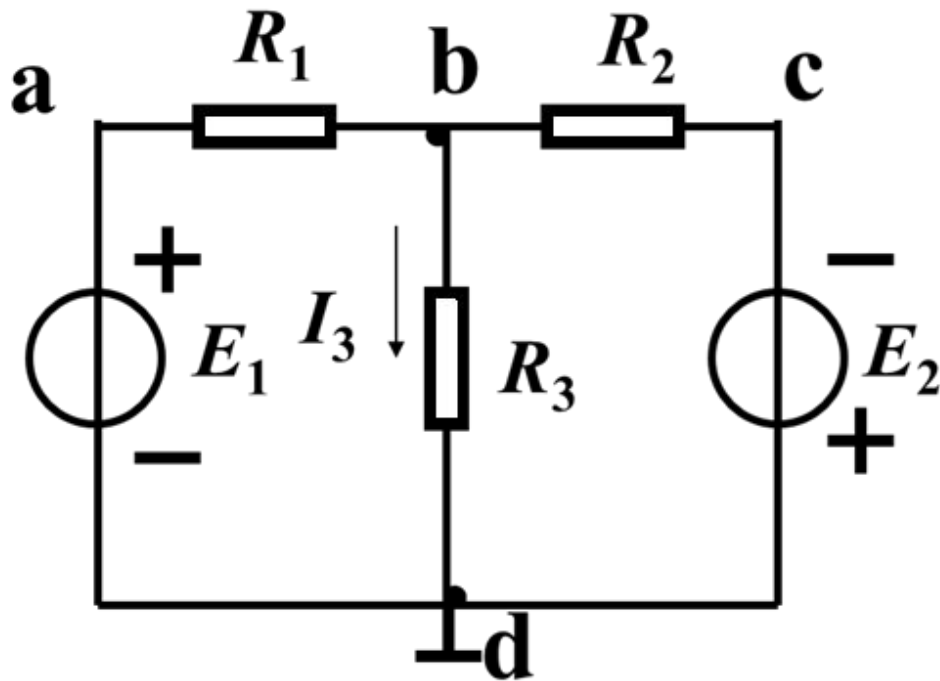
若以d为参考点，

则各点电位为：

$$V_a = E_1$$

$$V_b = I_3 R_3$$

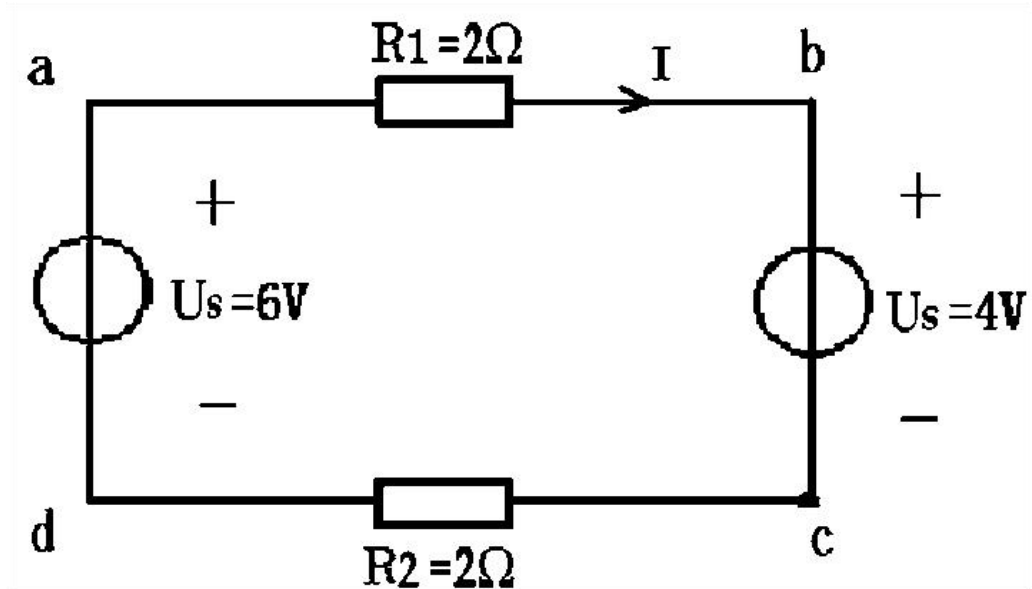
$$V_c = -E_2$$



§ 1.8 分压公式和分流公式

例：在该题中，我们采用不同的参考点，那么电位是否变化呢？

分别采用C点、D点
为参考点的两种解法



§ 1.8 分压公式和分流公式

解:

$$I = (U_{s1} - U_{s2}) / (R_1 + R_2) = (6 - 4) / 4 = 0.5 \text{ A}$$

$$U_a = U_{ac} = R_1 \times I + U_{s2} = 2 \times 0.5 + 4 = 5 \text{ V}$$

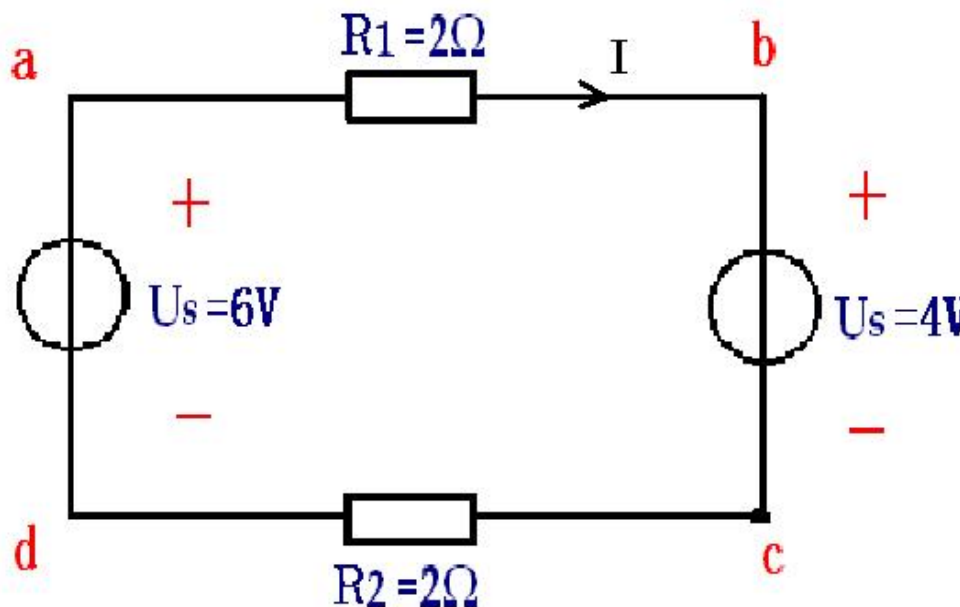
$$U_b = U_{s2} = 4 \text{ V}$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 1 \text{ V}$$

$$U_c = 0$$

$$U_d = -R_2 \times I = -2 \times 0.5 = -1 \text{ V}$$

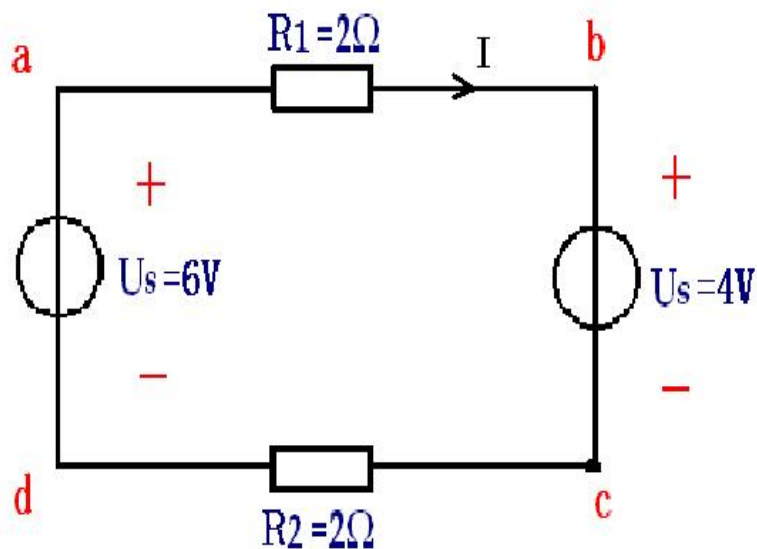
$$U_{bc} = U_b - U_c = 4 \text{ V}$$



以 C 为参考点

§ 1.8 分压公式和分流公式

以 D 为参考点



如果 d 点接地（参考点）

$$I = 0.5A \quad U_a = U_{s1} = 6V$$

$$U_b = U_{s2} + R_2 \times I = 4 + 2 \times 0.5 = 5V$$

$$U_c = R_2 \times I = 2 \times 0.5 = 1V$$

$$U_d = 0$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 6 - 5 = 1V$$

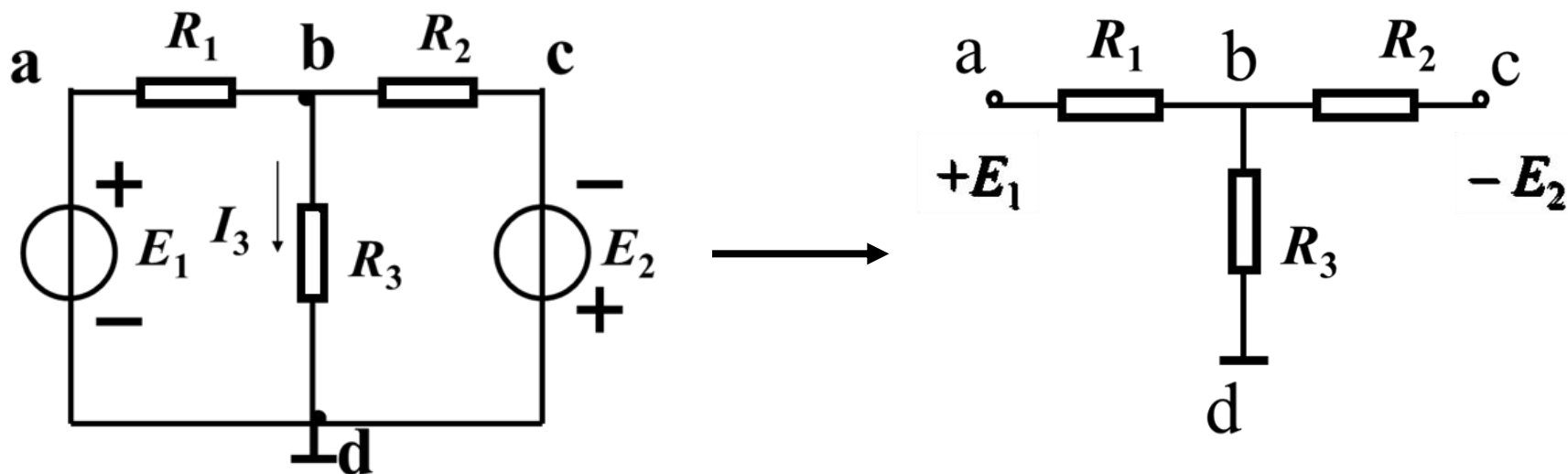
$$U_{bc} = U_b - U_c = 5 - 1 = 4V$$

可见，参考点选的不同，各点电位不同，但两点之间的电压不随参考点变化而改变！

§ 1.8 分压公式和分流公式

3、电压 电路中某两点间的电压(电位差)是一定的,与参考点的选择无关。

4、简化电路的画法



§ 1.8 分压公式和分流公式

例1： 电路如图所示,分别以A、B为参考点计算C和D点的电位及C和D两点之间的电压。

解：以A为参考点

$$I = \frac{10+5}{3+2} = 3\text{A}$$

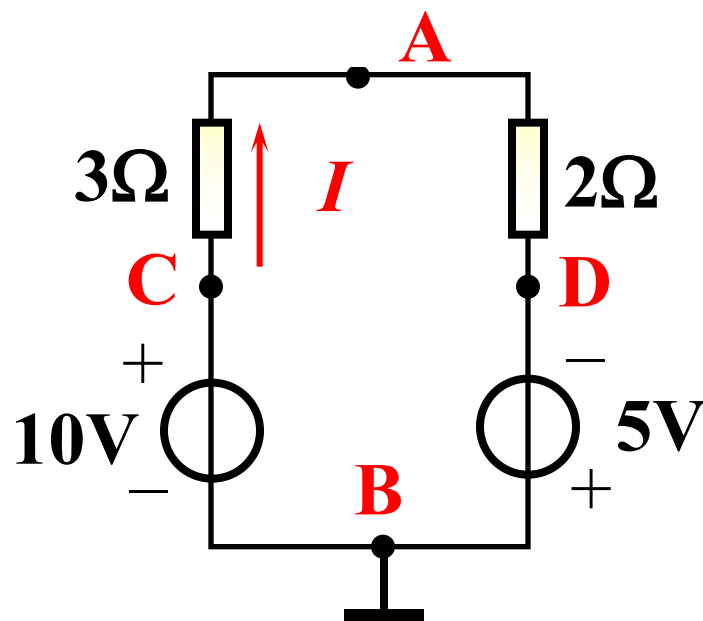
$$V_C = 3\text{A} \times 3\Omega = 9\text{V}$$

$$V_D = -3\text{A} \times 2\Omega = -6\text{V}$$

以B为参考点：

$$V_C = 10\text{V} \quad V_D = -5\text{V}$$

$$U_{CD} = V_C - V_D = 15\text{V}$$

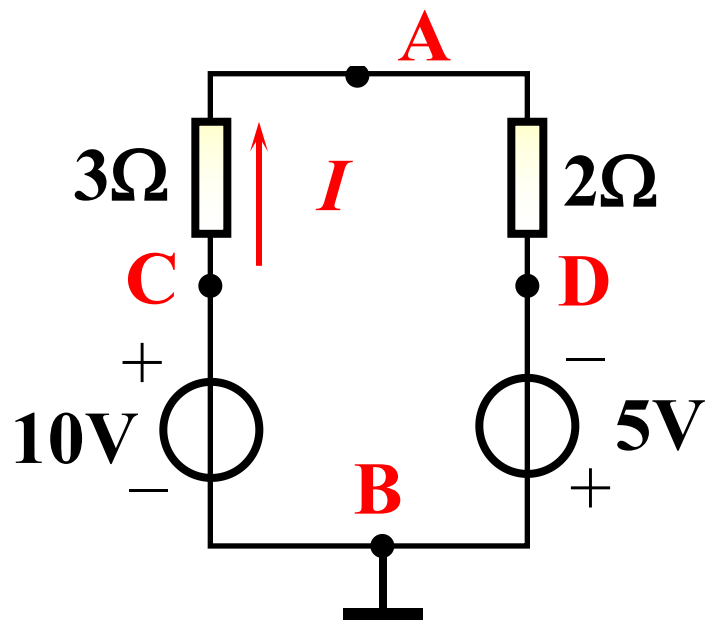


§ 1.8 分压公式和分流公式

小结：

电路中某一点的电位等于该点到参考点的电压；

电路中各点的电位随参考点选的不同而改变，但是任意两点间的电压不变。





§ 1.9

两类约束，KCL与KVL方程的独立性

一、电路结构中的两类约束：

$$\left. \begin{array}{l} KCL : \quad \sum_{i=1}^n i = 0 \quad \text{节点电流方程} \\ KVL : \quad \sum_{u=1}^n u = 0 \quad \text{回路电压方程} \end{array} \right\} \text{拓扑约束}$$

KCL可表述为： 在电路的任何一个节点上，同一瞬间电流的代数和等于零。

KVL可表述为： 在电路的任何一个回路中，沿同一方向循行，同一瞬间电压的代数和等于零。



§ 1.9

两类约束，KCL与KVL方程的独立性

一、电路结构中的两类约束：

VCR(**元件的伏安特性**)----元件约束

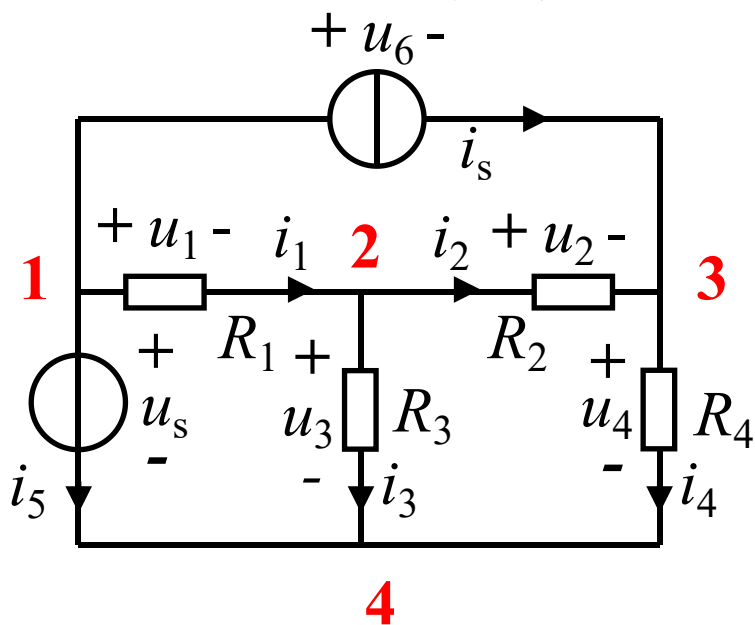
根据两类约束可列出方程求出所需的电压、电流。

2b法→ b 条支路待求量： b 个支路电流， b 个支路电压

§ 1.9

两类约束，KCL与KVL方程的独立性

2b法→设一个电路有 b 条支路， n 个节点， m 个网孔。如果以 b 个支路电流和 b 个支路电压为变量列方程组求解支路待求量，需要列 $2b$ 个方程。

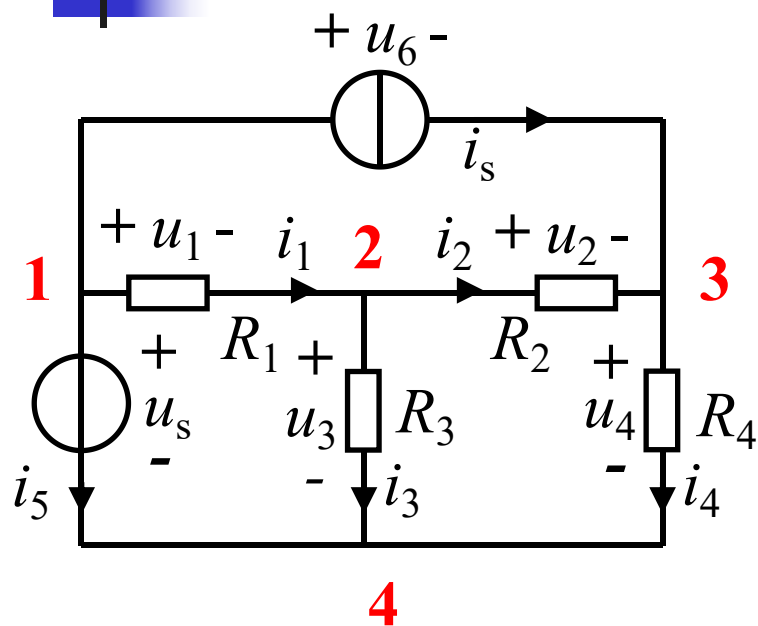


如图所示电路有6条支路，4个节点，3个网孔。

以支路电压，支路电流为变量，要列12个方程才可解。

§ 1.9

两类约束，KCL与KVL方程的独立性



由KCL列方程，设电流流出节点为正，流入为负

$$1 \quad i_1 + i_5 + i_s = 0$$

$$2 \quad -i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$3 \quad -i_2 + i_4 - i_s = 0$$

$$4 \quad -i_5 - i_3 - i_4 = 0$$

其中任一个方程都可由其他三个方程相加减得出。所以四个方程线性相关，不独立。如果去掉一个例如去掉第四个，剩下三个方程线性无关，是独立的。所以根据KCL可以列出 $n-1$ 个独立方程，此电路可列出三个独立方程。

§ 1.9

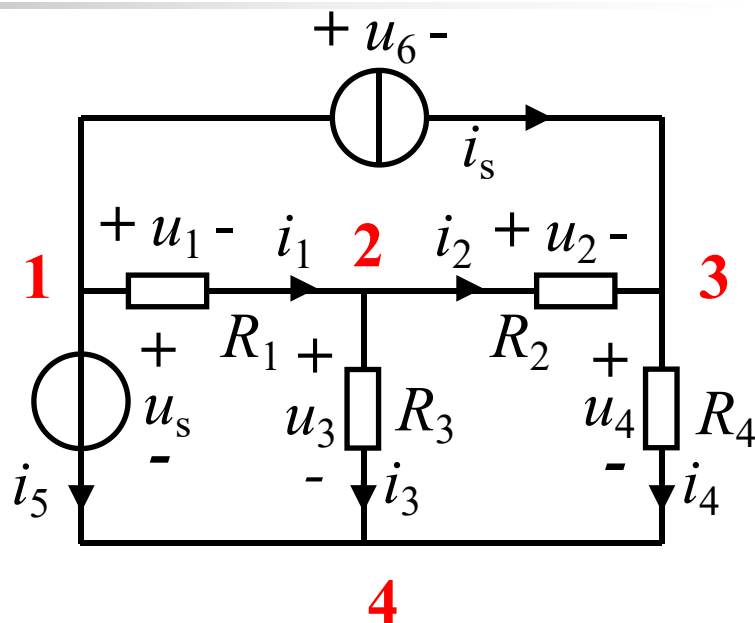
两类约束，KCL与KVL方程的独立性

按3个网孔，由KVL列方程

$$u_1 + u_3 - u_s = 0$$

$$u_1 + u_2 - u_6 = 0$$

$$u_2 + u_4 - u_3 = 0$$



还可以再选其他回路列方程，但列出的方程都可以由上面三个方程相加减得出，由KVL可列出 m 个独立的方程（ m 个网孔）。

§ 1.9

两类约束，KCL与KVL方程的独立性

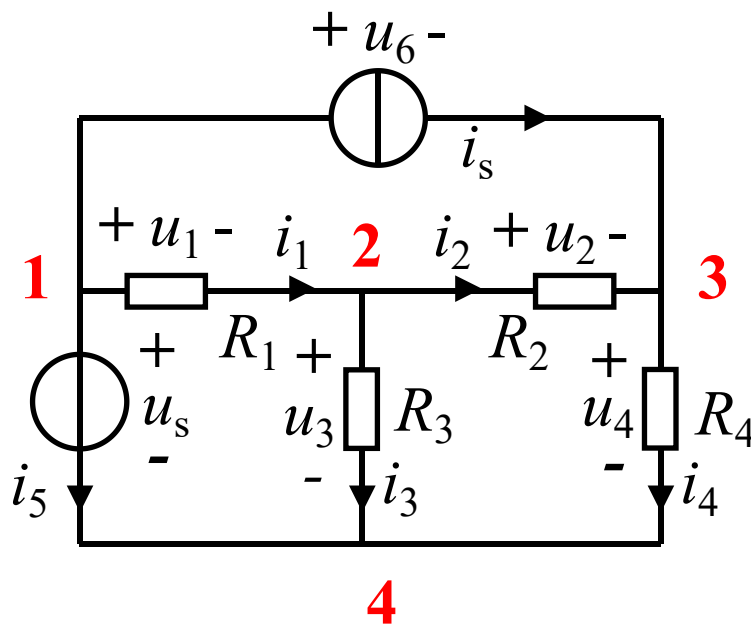
根据KCL，KVL可列6个方程，
还缺6个，另由支路VCR可列出6个方程

$$u_1 = R_1 i_1, \quad u_2 = R_2 i_2$$

$$u_3 = R_3 i_3, \quad u_4 = R_4 i_4$$

$$u_5 = u_s, \quad i_6 = i_s$$

(u_s 和 i_s 已知)



可见：3个KCL方程，3个KVL方程，6个VAR，共12个方程， $2b=12$ ；此电路共列出12个方程，这种方法称为2b法。2b法是电路分析方法的基础，但方程数太多。如果以支路电流或支路电压为变量列方程求解共列 b 个即可解。

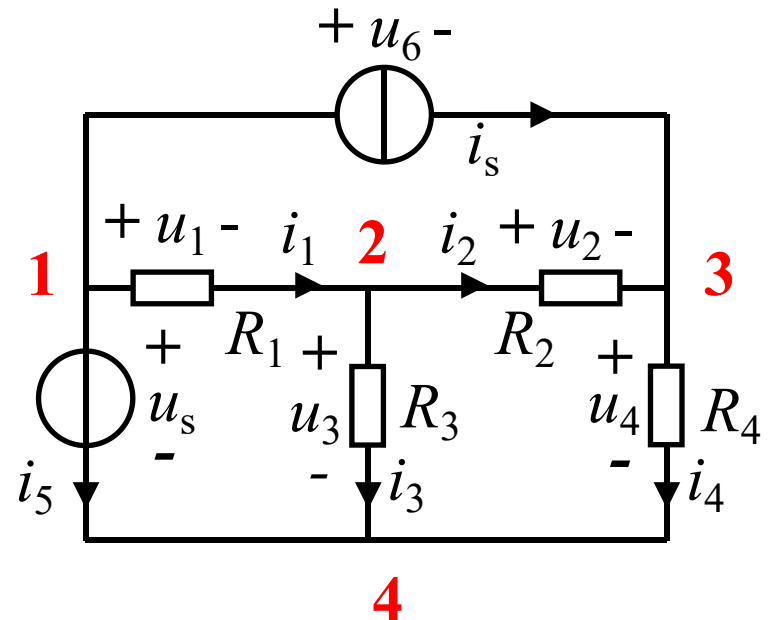
§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

2b法是电路分析方法的基础，但方程数太多。如果以支路电流或支路电压为变量列方程求解共列 b 个即可解。

1. 支路电流法：

以支路电流为求解变量列方程组求解称为支路电流法。

如图所示，由KCL列出3个独立方程，而由KVL列出的3个回路电压方程中的电压由电流表示。



§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

1. 支路电流法：

$$i_1 + i_5 + i_s = 0$$

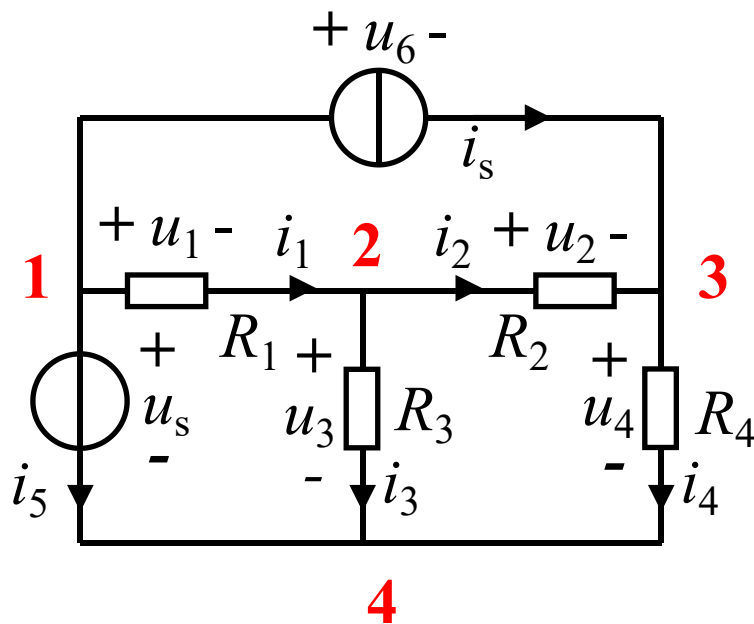
$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$-i_2 + i_4 - i_s = 0$$

$$R_1 i_1 + R_3 i_3 - u_s = 0$$

$$R_2 i_2 + R_4 i_4 - R_3 i_3 = 0$$

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 - u_6 = 0$$



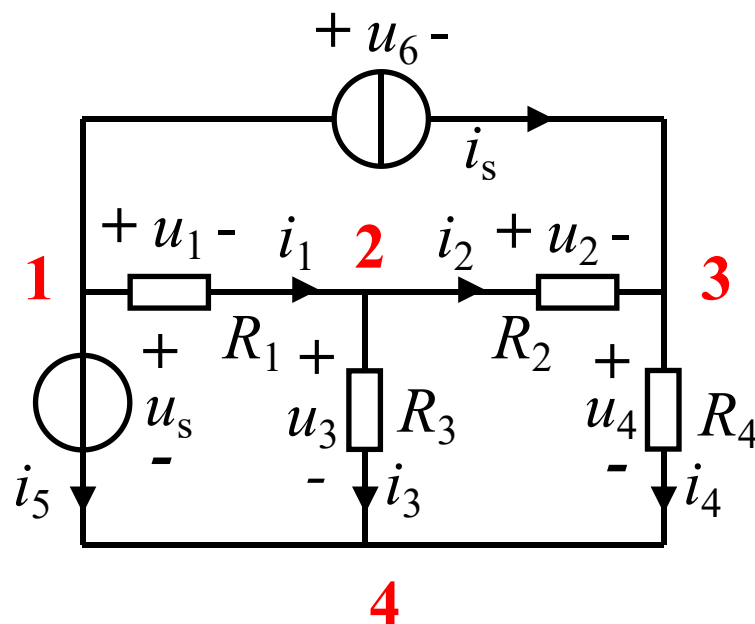
6个方程，6个未知数。由上述方程组可解出支路电流，进而求解支路电压。

§ 1. 10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

2. 支路电压法：

以支路电压为变量列方程组进行求解，支路电流由支路电压表示。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1/R_1 + i_5 + i_s = 0 \\ -u_1/R_1 + u_2/R_2 + u_3/R_3 = 0 \\ u_2/R_2 + u_4/R_4 - i_s = 0 \\ u_1 + u_3 - u_s = 0 \\ u_2 + u_4 - u_3 = 0 \\ u_1 + u_2 - u_6 = 0 \end{array} \right.$$



6个方程，6个未知数。

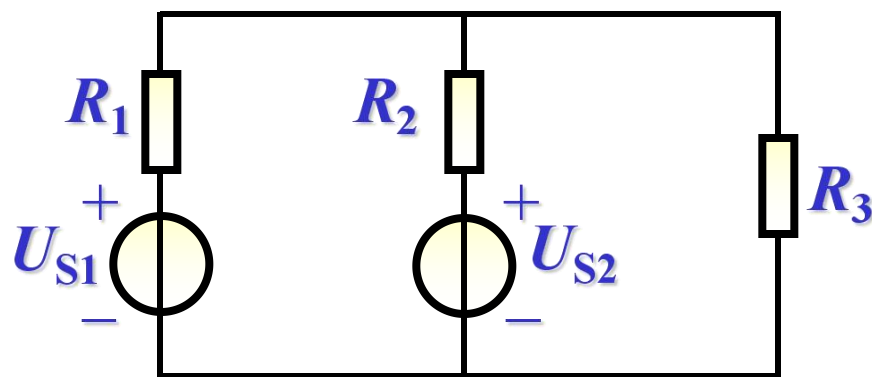
由上述方程组可解出支路电压，进而求解支路电流。

§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

凡不能用电阻串并联等效化简的电路，称为复杂电路。

支路电流法是计算复杂电路最基本的方法。

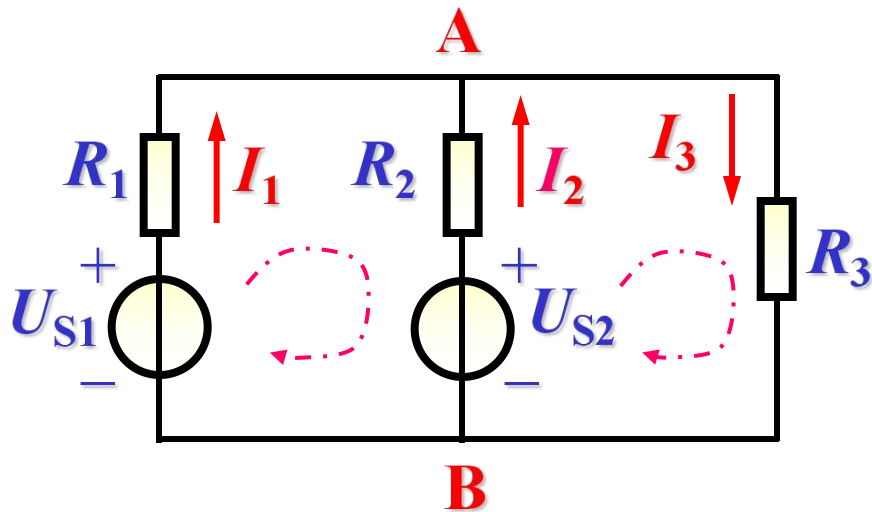
支路电流法是以支路电流为求解对象，直接应用KCL和KVL列出所需方程组，而后解出各支路电流。



首先确定支路数 b ，假定各支路电流的参考方向；为求支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 需3个独立方程。

§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

根据KCL可以列出两个
结点电流方程



$$\text{结点A : } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{结点B : } -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

其中有一个方程不独立

对于有 n 个结点的电路，只能列写 $(n-1)$ 个独立的KCL方程式。

§ 1. 10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

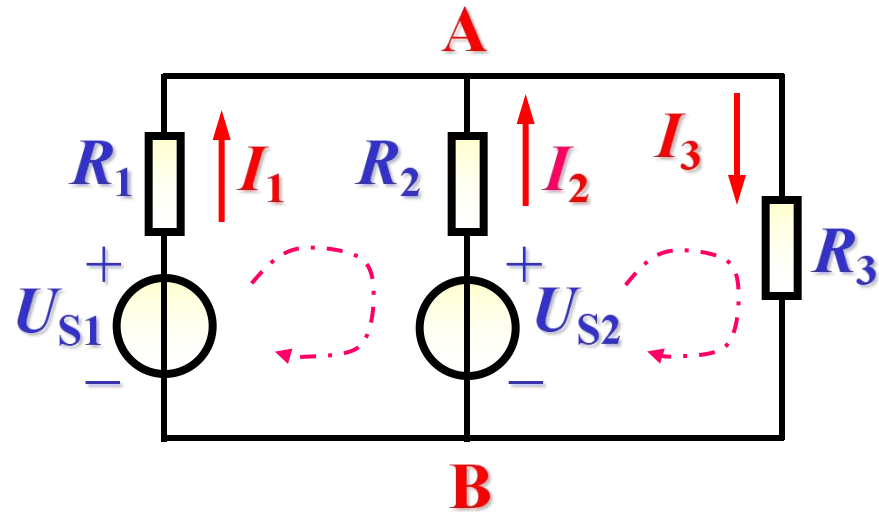
根据KVL可以列出 3 个回路电压方程

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0 \quad (1)$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 - U_{S2} = 0 \quad (2)$$

$$-U_{S1} + R_1 I_1 + R_3 I_3 = 0 \quad (3)$$

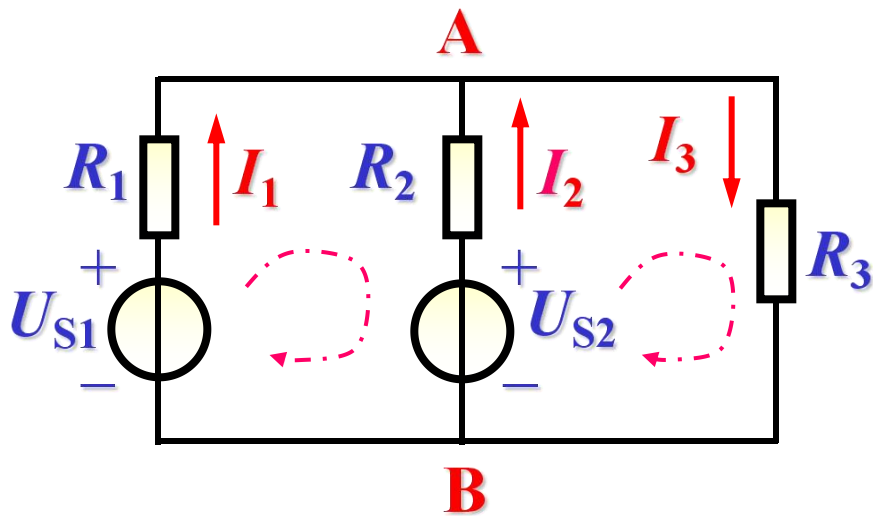
其中有一个方程也不是独立的



选取网孔或每次所选的回路中至少有一条支路是已选回路所未包含的支路，列写的KVL方程式一定独立。

§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 联立方程组为：



$$\text{结点A : } I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

$$\text{结点B : } -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$U_{S2} - U_{S1} + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0 \quad (2)$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 - U_{S2} = 0 \quad (3)$$

$$-U_{S1} + I_1 R_1 + I_3 R_3 = 0$$



§ 1. 10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

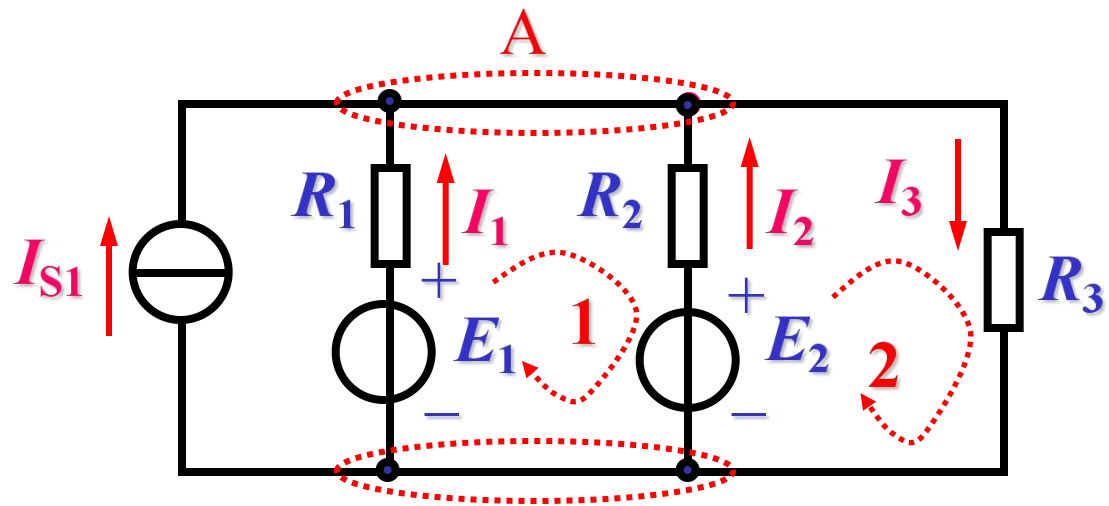
支路电流法求解电路的步骤：

- 1) 确定支路数 b ，假定各支路电流的参考方向及回路循行方向。
- 2) 应用KCL列出独立节点电流方程。对于有 n 个节点的电路，只能列出 $(n-1)$ 个独立的KCL方程。
- 3) 应用KVL列出余下的 $b - (n-1)$ 独立回路电压方程。独立回路：含有新的支路，或选网孔作为独立回路。
- 4) 解方程组，求解出各支路电流。

§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

例1：用支路电流法列出求解各支路电流所需的联立方程组。

KCL可表述为：在电路的任何一个节点上，同一瞬间电流的代数数和等于零。



KVL可表述为：在电路的任何一个回路中，沿同一方向循行,同一瞬间电压的代数数和等于零。

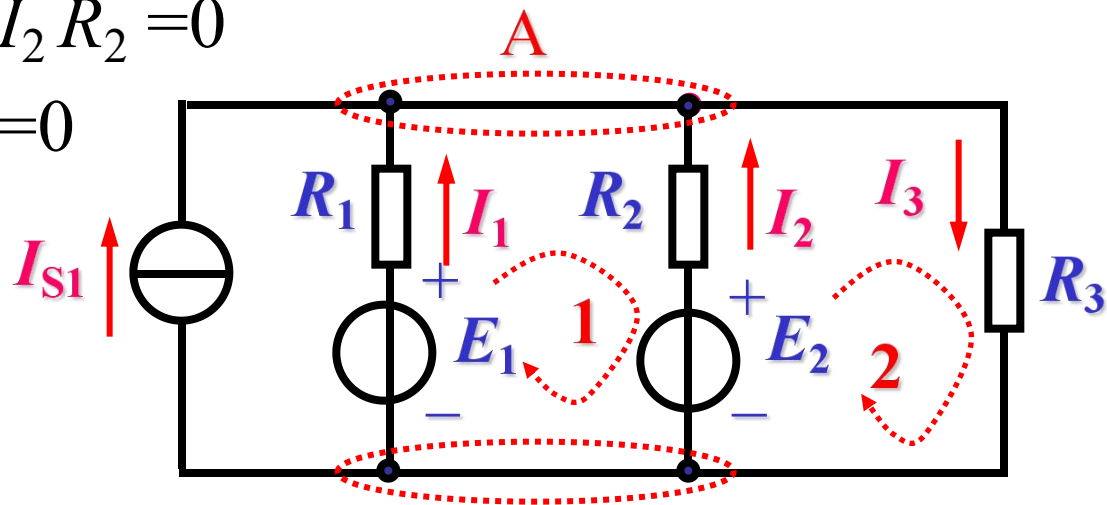
§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

解：本电路有 I_1 、 I_2 、 I_3 3 个未知量，需列写 3 个独立方程式。

结点A： $I_1 + I_2 + I_{S1} - I_3 = 0$

回路1： $E_2 - E_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0$

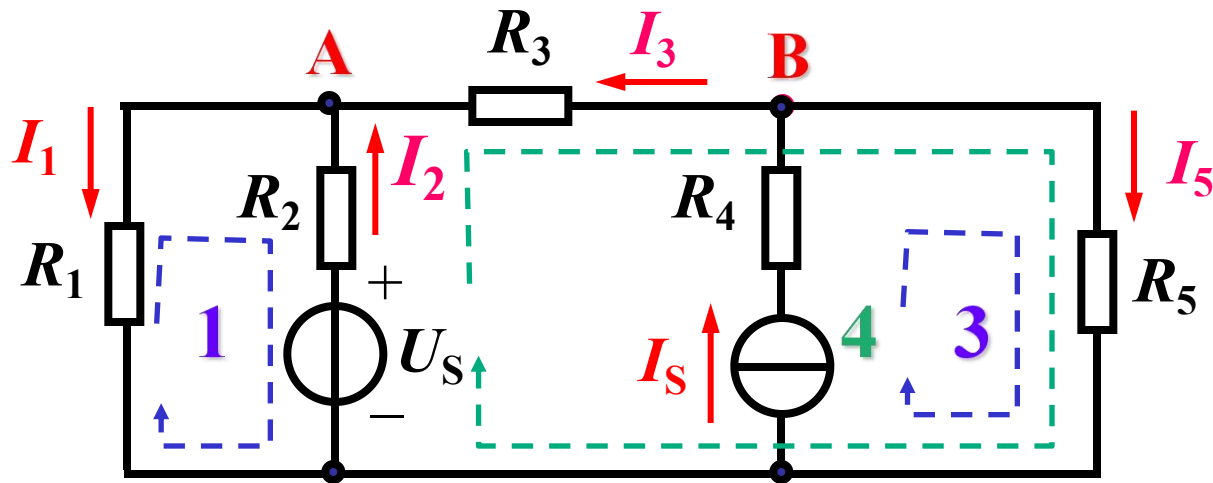
回路2： $I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0$



注意：列写回路电压方程时，不要选择含有恒流源的回路

§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

例2：用支路电流法列出求解各支路电流所需的独立方程。



§ 1.10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

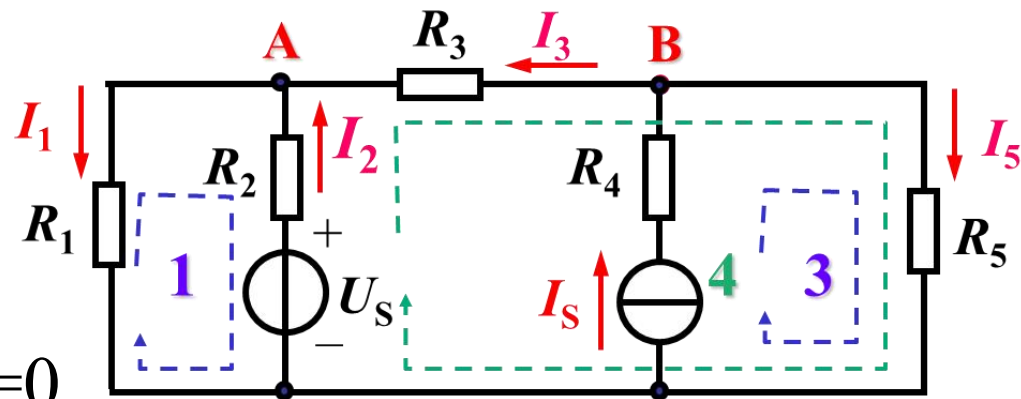
解：因有 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_5 , 4个未知量，故需4个独立方程

结点A： $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$

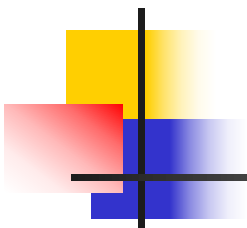
结点B： $I_S - I_3 - I_5 = 0$

回路1： $-I_1 R_1 - I_2 R_2 + U_S = 0$

回路4： $-U_S + I_2 R_2 - I_3 R_3 + I_5 R_5 = 0$



注意：列写回路电压方程时，不要选择含有恒流源的回路



例3-1:

用支路电流法求解

$$-i_0 + i_1 = 0$$

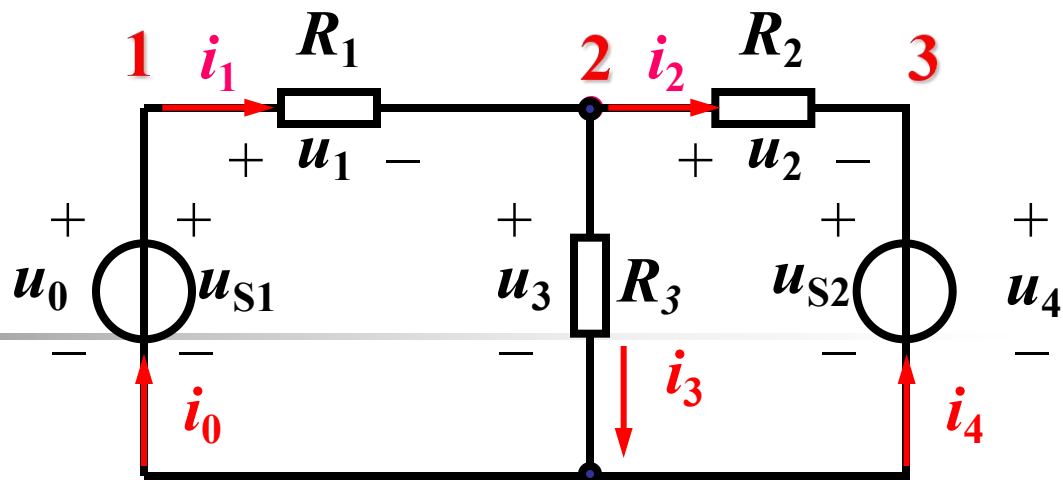
$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$-i_2 - i_4 = 0$$

$$-u_{s1} + i_1 R_1 + i_3 R_3 = 0$$

$$R_2 i_2 + u_{s2} - i_3 R_3 = 0$$

5个方程，5个未知数。



KCL为: $-i_0 + i_1 = 0$

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

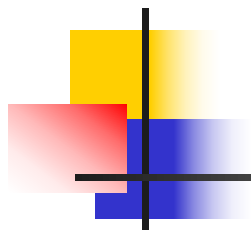
$$-i_2 - i_4 = 0$$

KVL为: $-u_0 + u_1 + u_3 = 0$

$$u_2 + u_4 - u_3 = 0$$

VAR为: $u_0 = u_{s1} \quad u_1 = i_1 R_1 \quad u_2 = R_2 i_2$

$$u_3 = i_3 R_3 \quad u_4 = u_{s2}$$



例3-1：
用支路电压法求解

$$-i_0 + u_1/R_1 = 0$$

$$u_1/R_1 - u_2/R_2 - u_3/R_3 = 0$$

$$u_2/R_2 + i_4 = 0$$

$$u_1 + u_3 = u_{s1}$$

$$u_2 - u_3 = -u_{s2}$$

KCL为: $-i_0 + i_1 = 0$

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

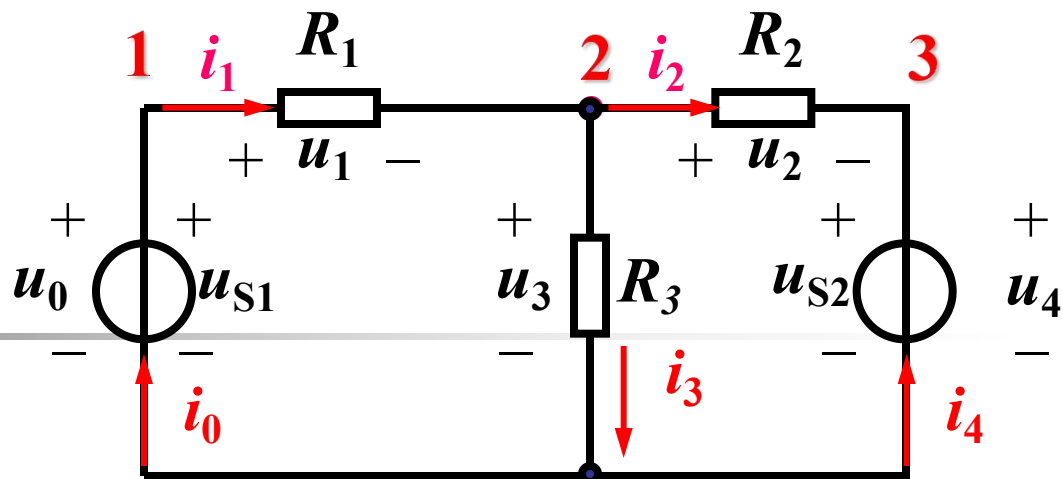
$$-i_2 - i_4 = 0$$

KVL为: $-u_0 + u_1 + u_3 = 0$

$$u_2 + u_4 - u_3 = 0$$

VAR为: $u_0 = u_{s1} \quad u_1 = i_1 R_1 \quad u_2 = i_2 R_2$

$$u_3 = i_3 R_3 \quad u_4 = u_{s2}$$





§ 1. 10 支路分析： 支路电压法和支路电流法

1) 支路电流法

先求各支路电流，再由VCR求各支路电压

2) 支路电压法

先求各支路电压，再由VCR求各支路电流