

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章内容及重点

第一节 电路的作用与组成

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

第三节 理想电路元件

第四节 电压源与电流源

第五节 基尔霍夫电流定律和电压定律

第六节 电位的概念与计算

本章重点

- 电路模型的建立
- 电压、电流的实际方向与参考方向
- 基本电路元件的VCR，功率与能量
- 基尔霍夫定律：KCL ， KVL



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

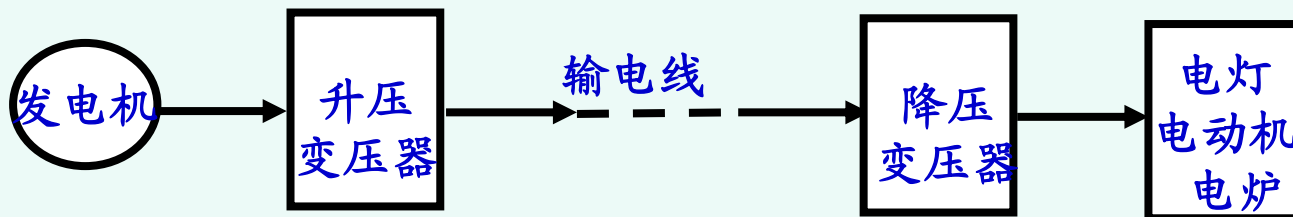
第一节 电路的作用与组成

一、什么是电路？

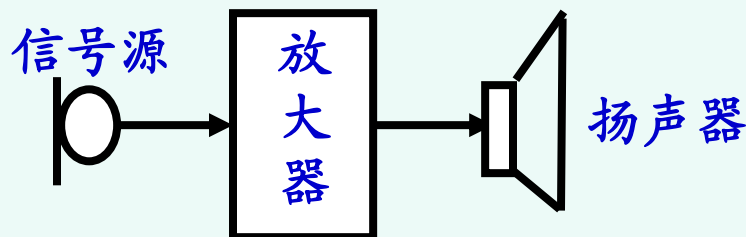
电路：电流流经的通路。它是为了满足某种实际需要，由电路元件按一定方式组成的。

二、电路的作用

1. 实现电能的转换、传输和分配



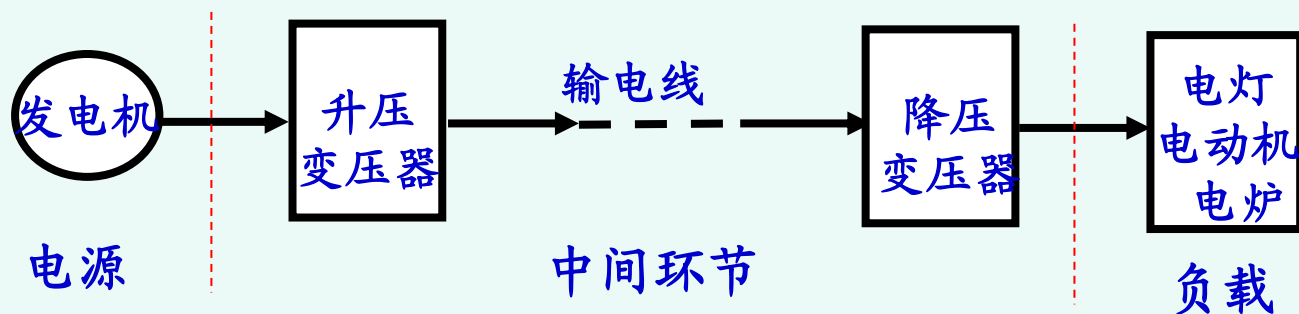
2. 传递和处理信号



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第一节 电路的作用与组成

三、电路的组成



电源：产生电能的装置，非电能→电能

例如：发电机、化学电池、太阳能电池等

中间环节：连接电源和负载的部分，起传输和分配电能的作用

例如：变压器、输电线路等

负载：消耗（使用）电能的装置，电能→非电能

例如：电动机、电炉、灯等

返回



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

一、电路模型

实际电路：是由一些不同作用的实际电路元件所组成。如：电动机、变压器、电阻、电容、电感等。

为了便于**分析与计算**，在一定条件下，突出其主要电磁性能，忽略其次要因素，将实际电路元件**理想化**。

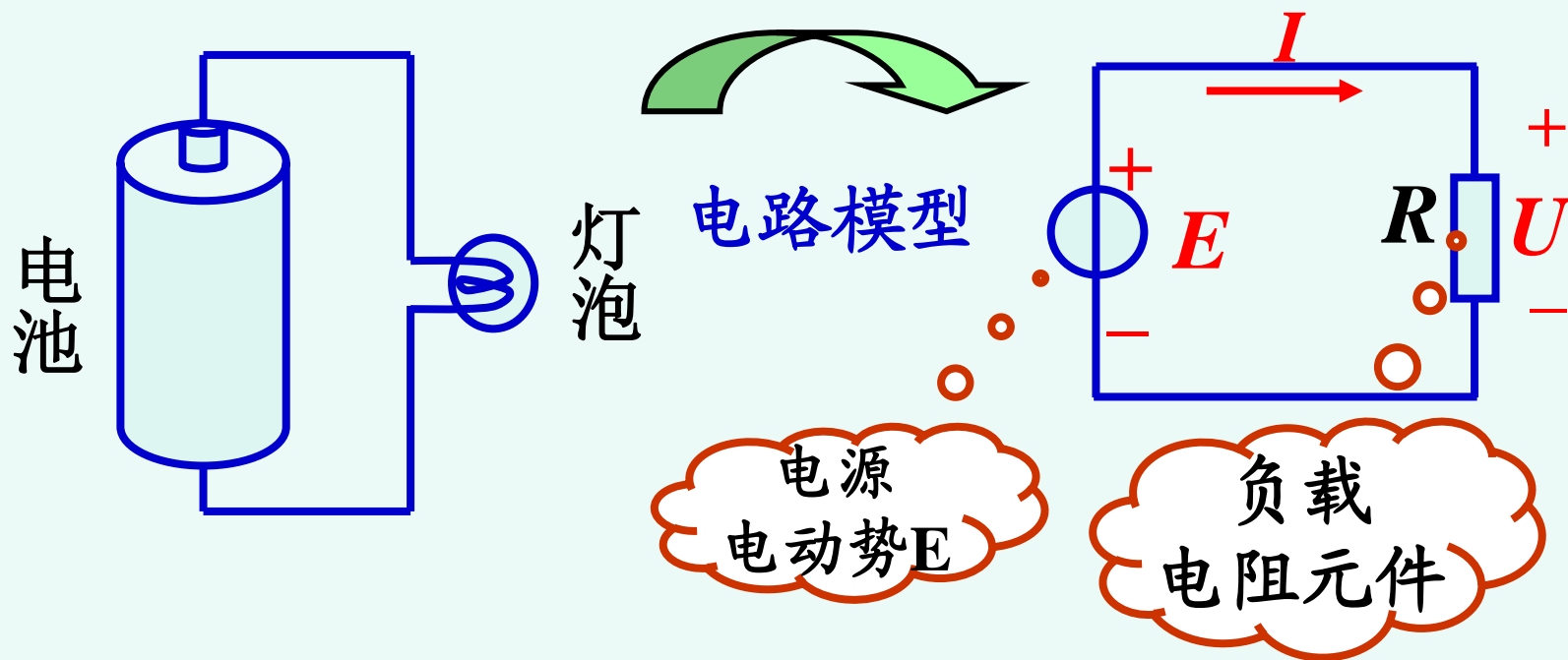
实际电路元件 \longrightarrow 理想电路元件（具有某种电磁性质）

理想电路元件主要有电阻、电感、电容。

电路模型：由理想电路元件所组成的电路，就是实际电路的电路模型。

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

简单的手电筒电路模型



第二节 电路模型与电压电流的参考方向

二、电压和电流的参考方向

物理量的方向: { 实际方向
参考方向

实际方向: 物理中对电量规定的方向

物理量	实际方向
电流 I	正电荷移动的方向
电动势 E	电源内部, 低电位→高电位
电压 U	高电位→低电位

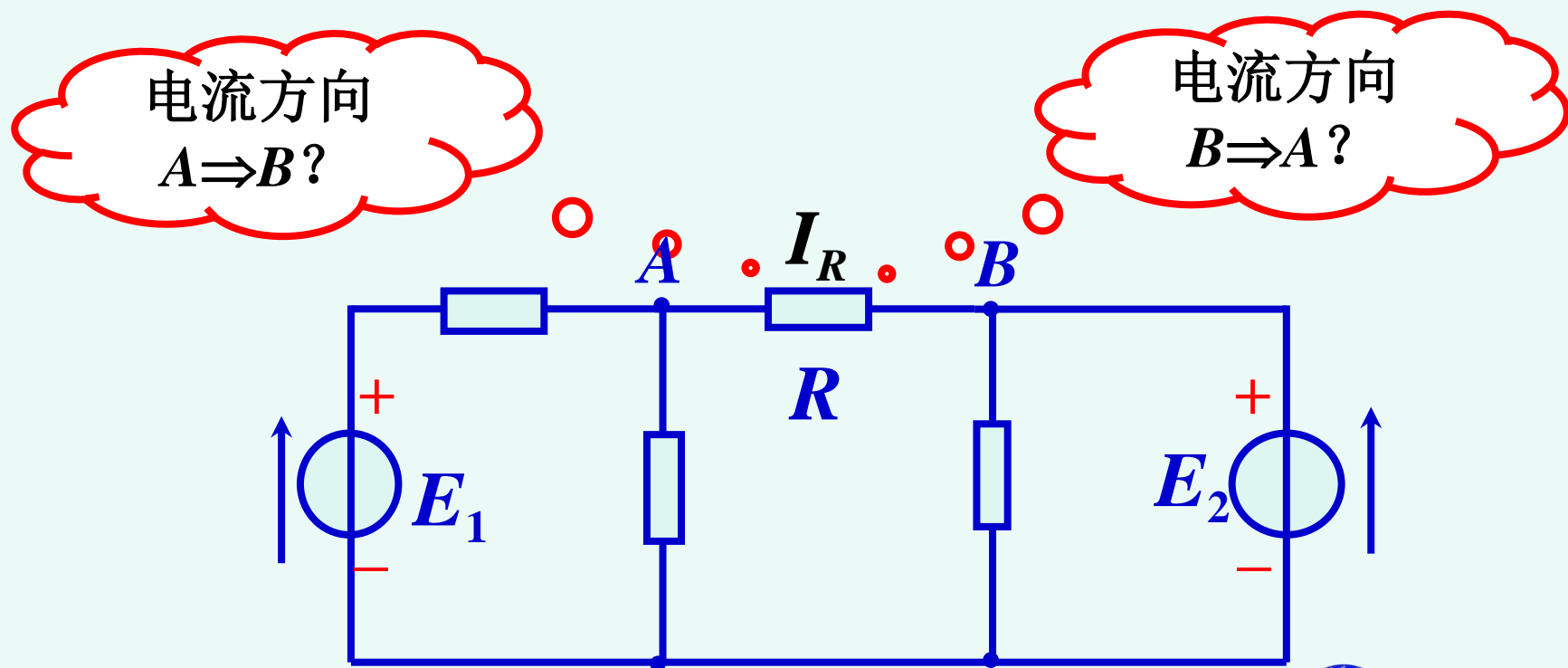
参考方向: 在分析计算时, 对电量人为规定的方向



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

问题的提出：在复杂电路中难于判断元件中物理量的实际方向，
电路如何求解？



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

解决方法:

(1) 在分析时先设定一个电流和电压的方向，作为参考方向

电流的参考方向：假设电路中正电荷流动的方向

电压的参考方向：假设电路中高电位指向低电位的方向

(2) 根据电路的定律、定理，列出物理量间相互关系的数学表达式；

(3) 根据计算结果确定实际方向

若计算结果为正，则实际方向与假设方向一致；

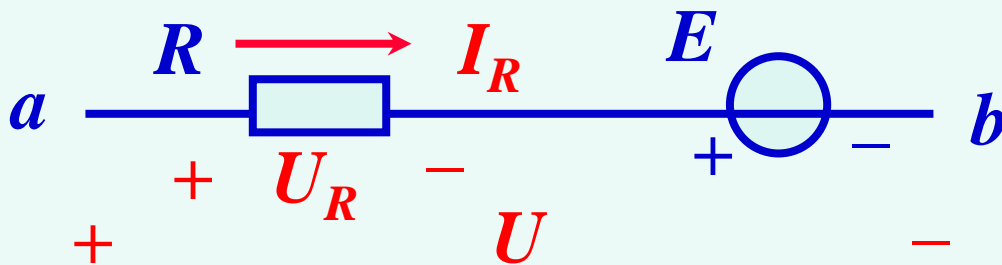
若计算结果为负，则实际方向与假设方向相反。



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

例



已知: $E=2\text{V}$, $R=1\Omega$

问: 当 U 分别为 3V 和 1V 时, $I_R=?$

解: (1) 假定电路中物理量的参考方向如图所示;

(2) 列电路方程:

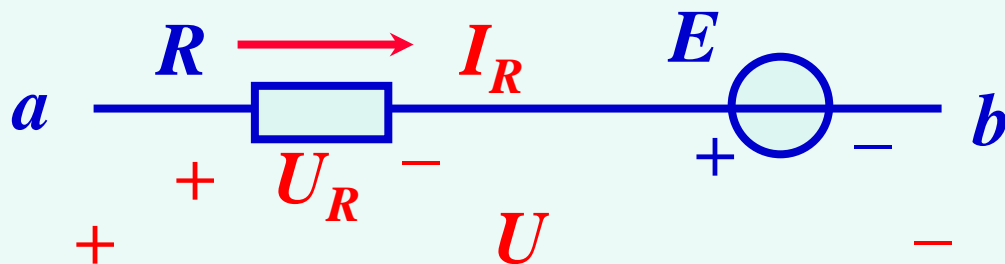
$$U = U_R + E \quad U_R = U - E$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U - E}{R}$$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向



$$I_R = \frac{U - E}{R}$$

(3) 数值计算

$$U = 3\text{V} \quad I_R = \frac{3 - 2}{1} = 1\text{A}$$

(实际方向与参考方向一致)

$$U = 1\text{V} \quad I_R = \frac{1 - 2}{1} = -1\text{A}$$

(实际方向与参考方向相反)



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第二节 电路模型与电压电流的参考方向

参考方向总结：

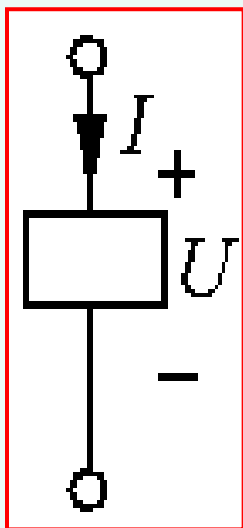
- (1) “实际方向”是物理中规定的，而“参考方向”则是人们在进行电路分析计算时，任意假设的。
- (2) 在分析复杂电路时，先假定物理量的参考方向，然后再列方程计算。
- (3) 当物理量的实际方向已知时，尽量采用实际方向作为参考方向。



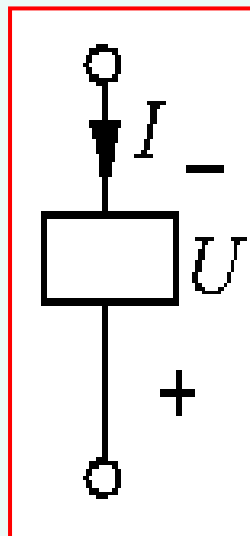
第二节 电路模型与电压电流的参考方向

(4) 对于任意的二端元件， I 与 U 的参考方向相一致时，称为电压与电流参考方向**相关联**，否则称为**非相关联**。

电压与
电流参
考方向
相关联

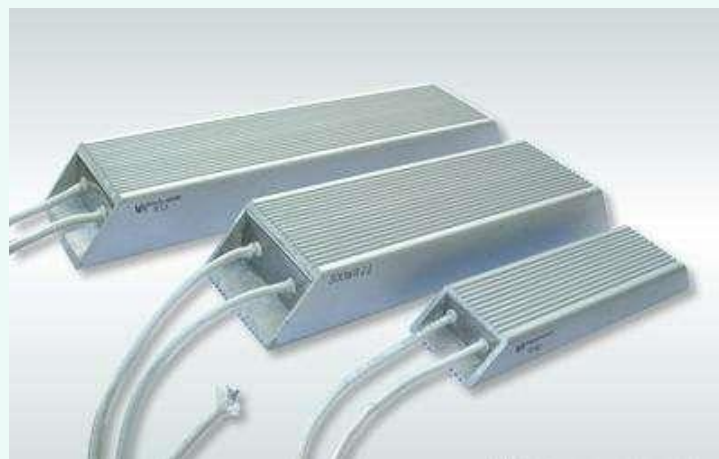
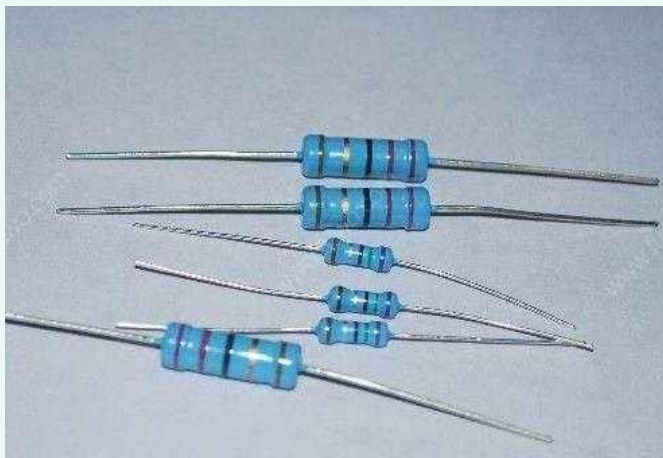


电压与
电流参
考方向
非相关联



第三节 理想电路元件

一.电阻元件

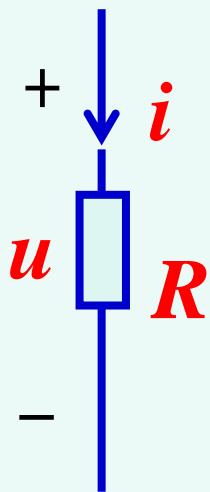


一.电阻元件

1. 定义：将电能转化为热能（光能）的电器元件。

如：白炽灯、电炉等。

电路模型



电阻 $R = \frac{u}{i}$ 具有对电流起阻碍作用性质。

如果电压单位是V，电流单位是A，则电阻单位 Ω （欧姆）。
 $1\text{k}\Omega = 10^3 \Omega$, $1\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$

电导 $G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R}$ 单位S（西门子）



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

一.电阻元件

2.伏安特性曲线：电路元件 U 与 I 之间的关系（VCR）

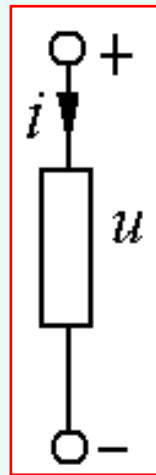
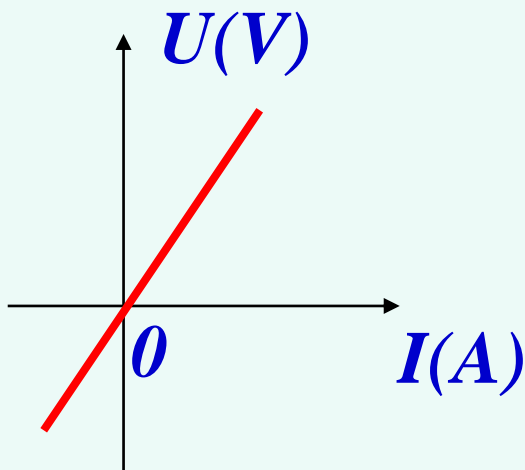


图 (a)

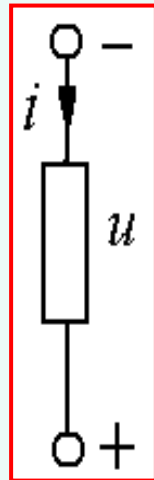


图 (b)

相关联 如图 (a)

$$u = Ri$$

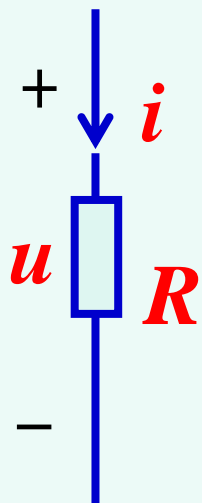
非相关联 如图 (b)

$$u = -R i$$

一.电阻元件

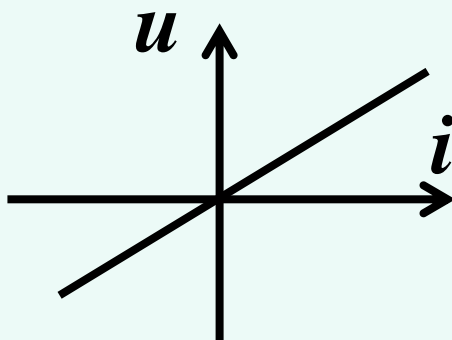
电压电流关系 (VCR)

伏 - 安 特性



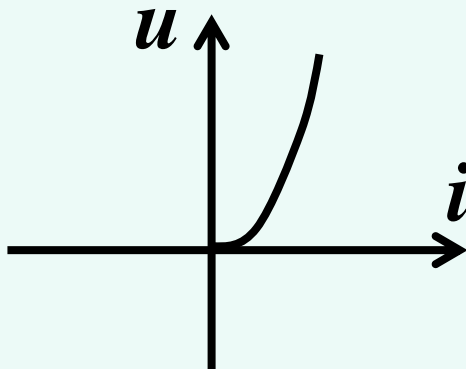
参考方向
相关联

线性
电阻



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

非线性
电阻



$$R = \frac{u}{i} \neq \text{const}$$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

一.电阻元件

3.电阻消耗的能量与功率

在关联参考方向下，电阻元件上消耗的功率为

$$p = u i = R i^2 = \frac{u^2}{R}$$

电阻元件在一时间段内消耗的能量为

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

在非关联参考方向下，电阻上消耗的功率为

$$p = u i = -R i^2 = -\frac{u^2}{R}$$

一.电阻元件

【例】已知： $u=-2V$ ， $R=2\Omega$ 试分别求出图1-5中和图1-6中电流*i*和功率*p*，并指出电压和电流的实际方向。

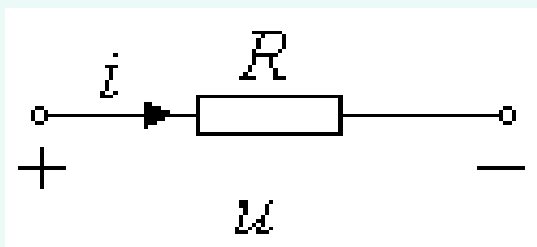


图1-5

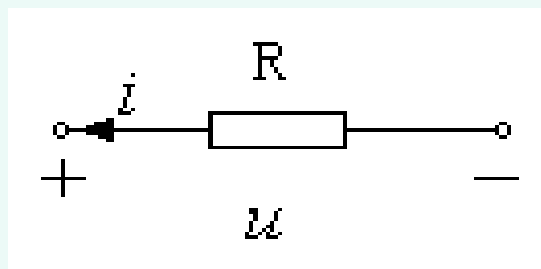


图1-6

(1) 在图1-5中，电压与电流为 **关联参考** 方向，由欧姆定律

$$i = \frac{u}{R} = \frac{-2}{2} = -1A$$

由于 $u<0$ ， $i<0$ ，故电压与电流的实际方向与图中的参考方向相反。

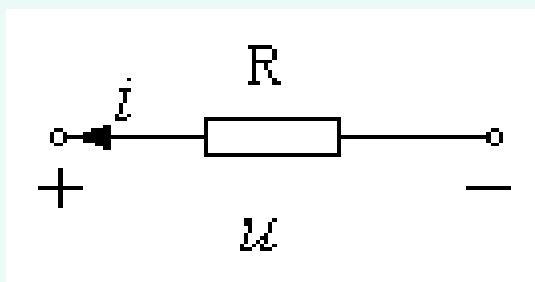
$$p = ui = (-2)(-1) = 2W$$

在**关联参考**方向下，功率 **$p>0 \rightarrow$ 电阻消耗能量**



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

一.电阻元件



(2) 在图1-6中，电压与电流为**非关联参考**方向，由欧姆定律

$$i = -\frac{u}{R} = -\frac{-2}{2} = 1A$$

由于 $u < 0, i > 0$ ，所以电压的实际方向与图中标出的参考方向相反，电流的实际方向与图中标出的参考方向相同。

$$p = ui = (-2) \times 1 = -2W$$

在非关联参考方向下，功率 $p < 0 \rightarrow$ **电阻消耗能量**

一.电阻元件

★ 由此可以导出一个具有普遍意义的结论：由线性元件组成的任意二端网络，

当其端口电压电流参考方向相关联时，电路功率 $p=ui$

当 $p>0$ 时，表明该时刻二端网络实际吸收（消耗）能量；

当 $p<0$ 时，表明该时刻二端网络实际发出（产生）能量；

其电压电流采用非关联参考方向时，则与此结论相反。



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第四节 电压源和电流源

电源:电路中提供能量的器件或装置。

常用的**直流电源**有干电池、蓄电池、直流发电机、直流稳压电源和直流稳流电源等。

常用的**交流电源**有电力系统提供的正弦交流电源、交流稳压电源和产生多种波形的各种信号发生器等。

第四节 电压源和电流源

实验室使用的直流稳压电源

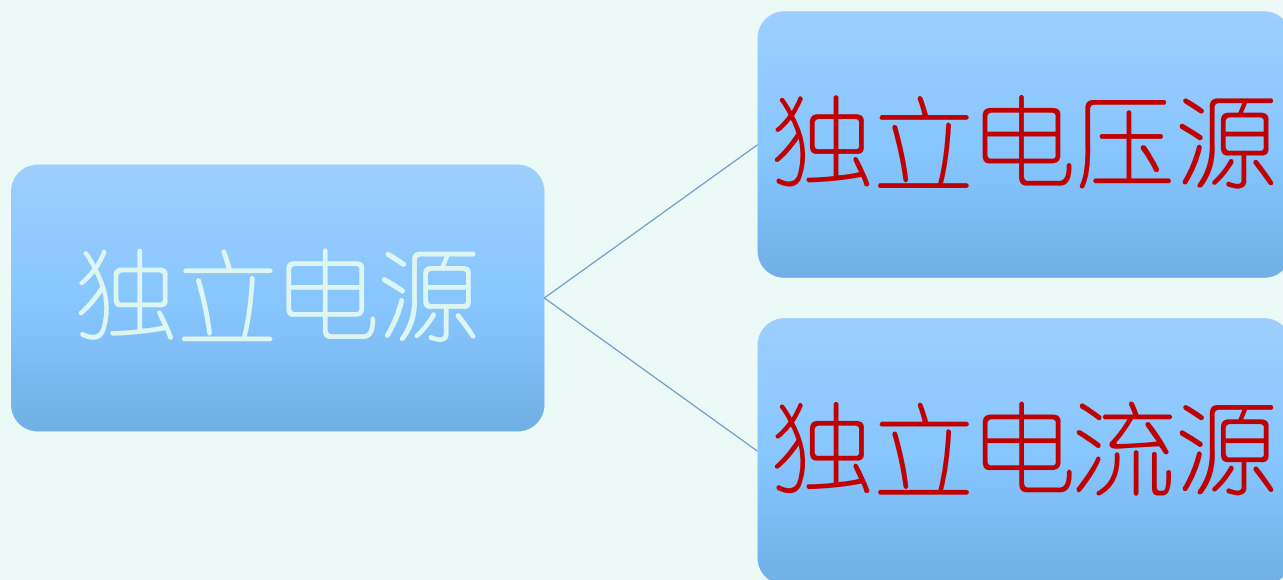


示波器

稳压电源

用示波器观测直流稳压电源的电压随时间变化的波形。

第四节 电压源和电流源



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

一、独立电压源

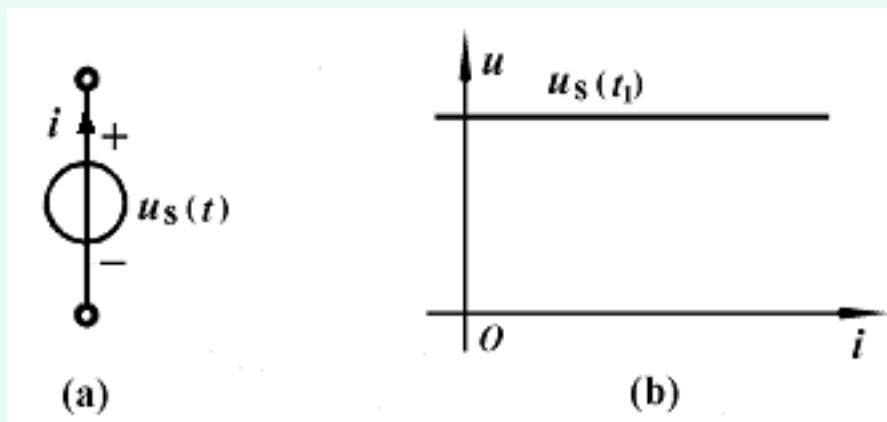
独立电压源有两种电路模型，理想电压源和实际电压源模型。

1. 理想电压源

理想电压源的电路模型如图（a）所示。其端电压 $u(t)$ 是一个给定的时间函数，**不随流过电压源的电流的大小而变化**，

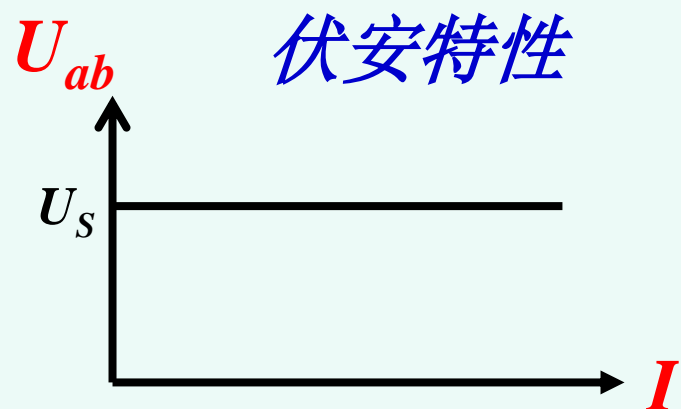
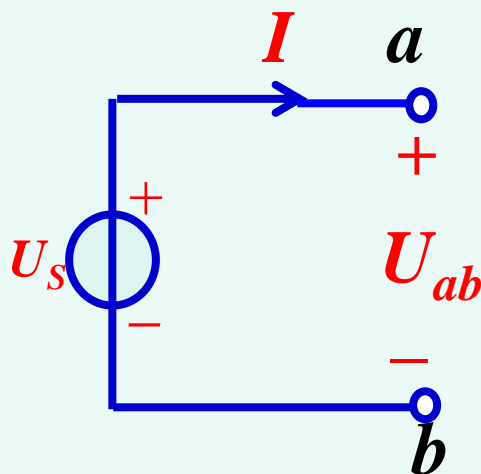
即
$$u(t) = u_s(t)$$

当 $u(t) = u_s(t) = U_s$ ， U_s 为恒定值时，称为恒压源或直流电压源。恒压源的电压特性如图（b）所示。



一、独立电压源

理想电压源的特点（恒压源）



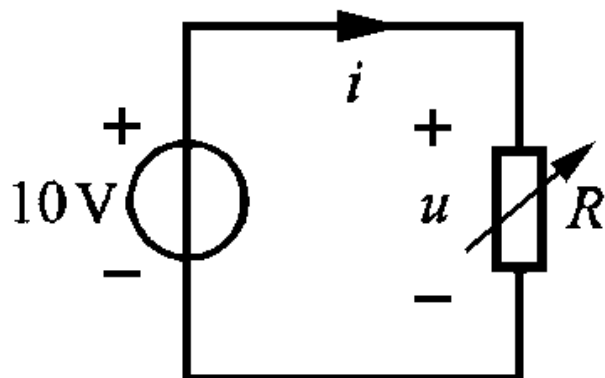
特点：(1) 输出电压不变，其值恒等于电压源。

$$\text{即 } U_{ab} \equiv U_s;$$

(2) 电源中的电流由外电路决定。

一、独立电压源

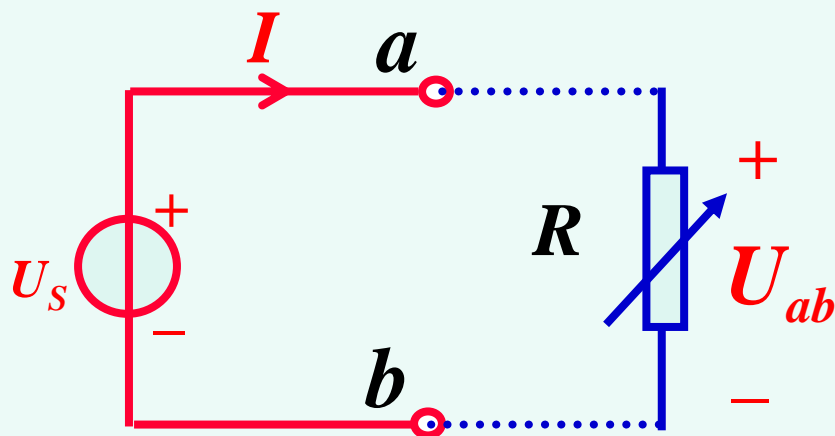
例如图示电路中电阻值变化时，电压源的电压不变，电路中的电流 i 和发出功率 p 会发生变化。



R / Ω	1	2	10	20	100	∞
i / A						
P / W						



恒压源特性小结



$$I = \frac{U_s}{R}$$

恒压源特性中不变的是: U_s

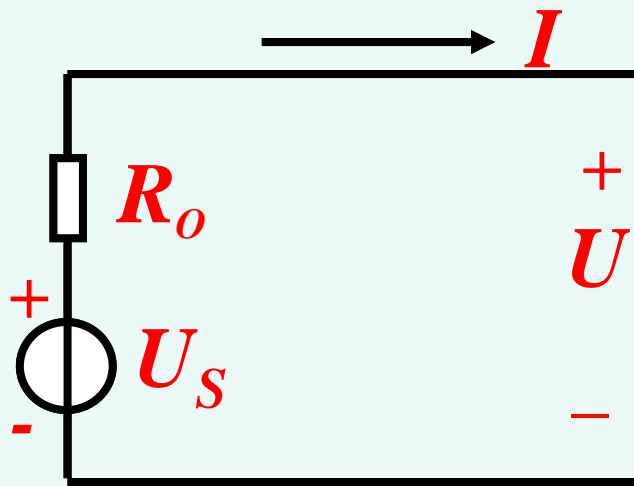
恒压源特性中变化的是: I

外电路的改变 会引起 I 的变化。

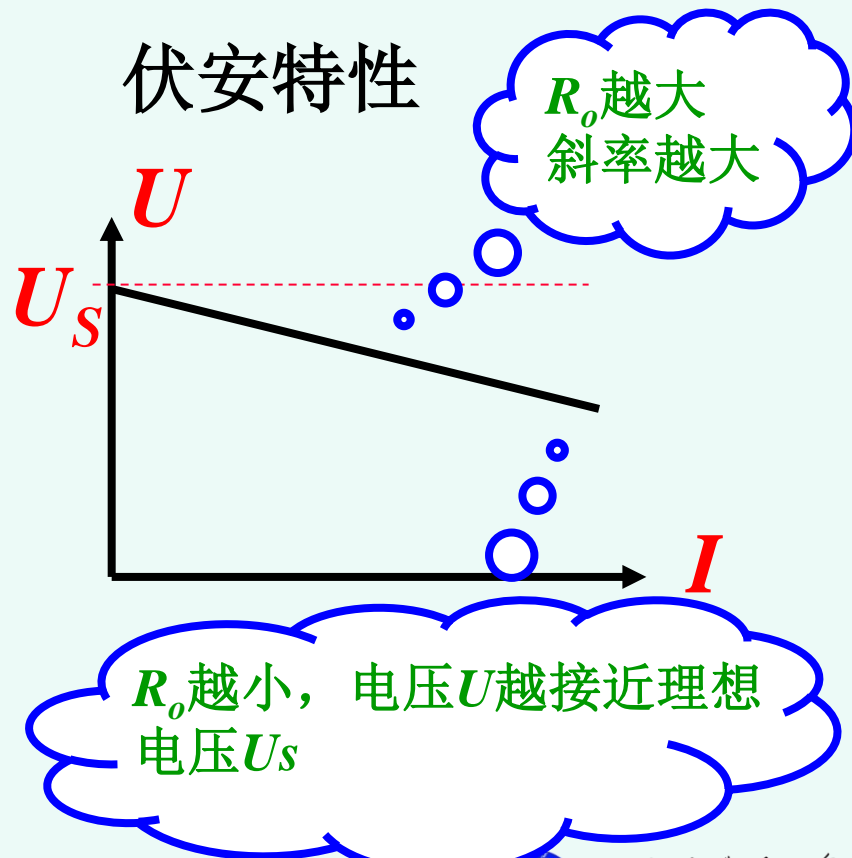
一、独立电压源

2. 实际电压源电路模型

实际电压源的电路模型是由理想电压源和其内阻串联组成的。



$$U = U_S - IR_o$$

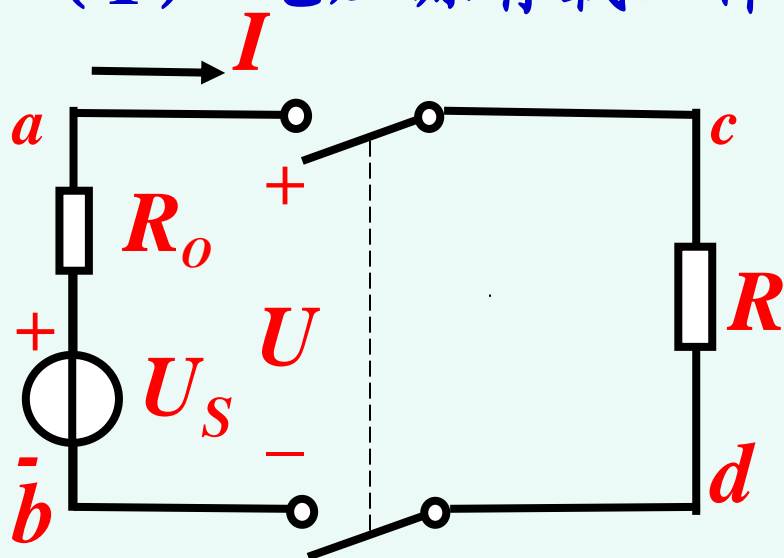


一、独立电压源

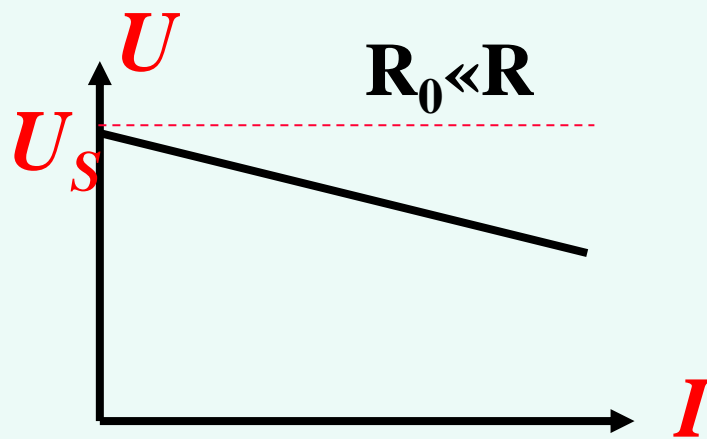
3、电压源的工作状态

电压源有载、开路和短路三种状态。

(1) 电压源有载工作（开关合上）



a. 电压与电流关系



伏安特性

$$U = U_s - IR_0$$

$$R_0 \ll R \text{ 时, } U \approx U_s$$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

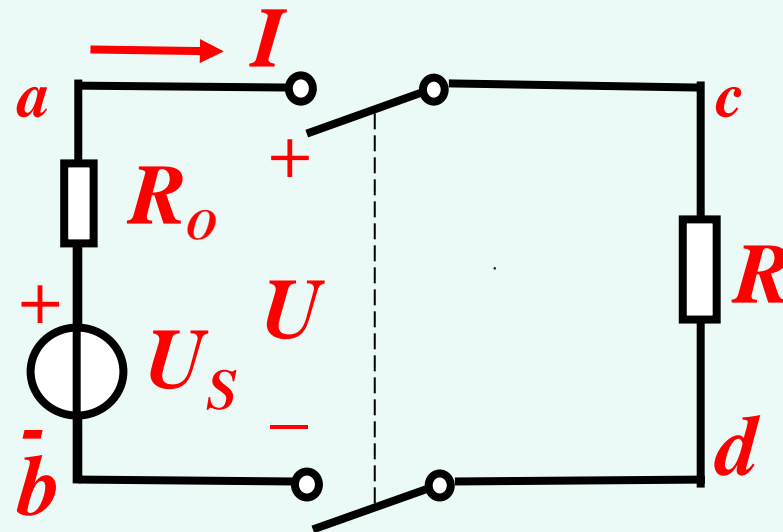
一、独立电压源

b. 功率与功率平衡 ★

$$U = U_s - IR_0$$

$$UI = U_s I - I^2 R_0$$

$$P = P_s - P_0$$

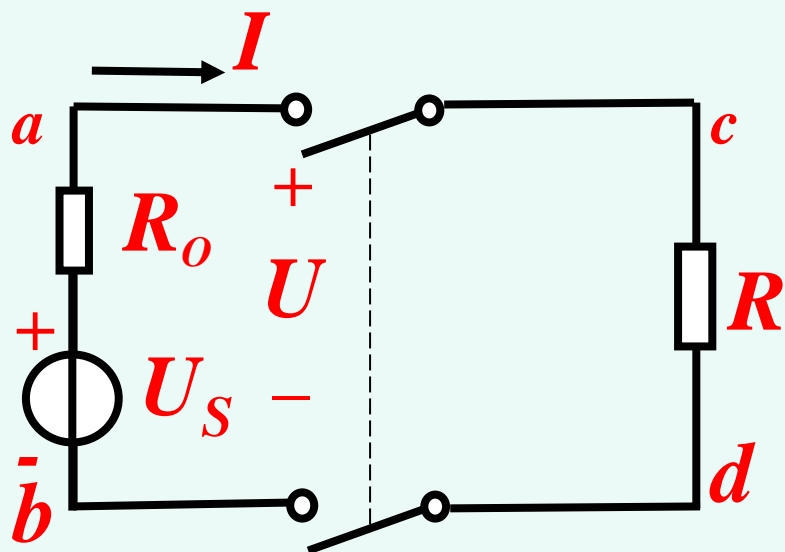


式中：
 $P_s = U_s I$ 电压源产生的功率
 $P_0 = R_0 I^2$ 电源内阻上所损耗的功率
 $P = UI$ 电源输出的功率

I 越大，电压源带载越重； I 越小，电压源带载越轻。

一、独立电压源

(2) 电压源开路（开关断开）



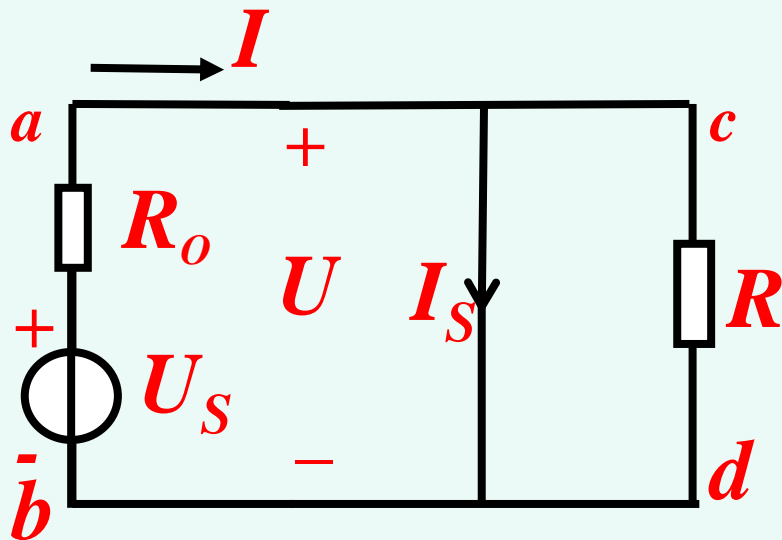
注意：空载状态

$$\left\{ \begin{array}{l} I=0 \\ U=U_s \\ P=0, P_s=0, P_o=0 \end{array} \right.$$

U_s 称为开路电压

一、独立电压源

(3) 电压源短路



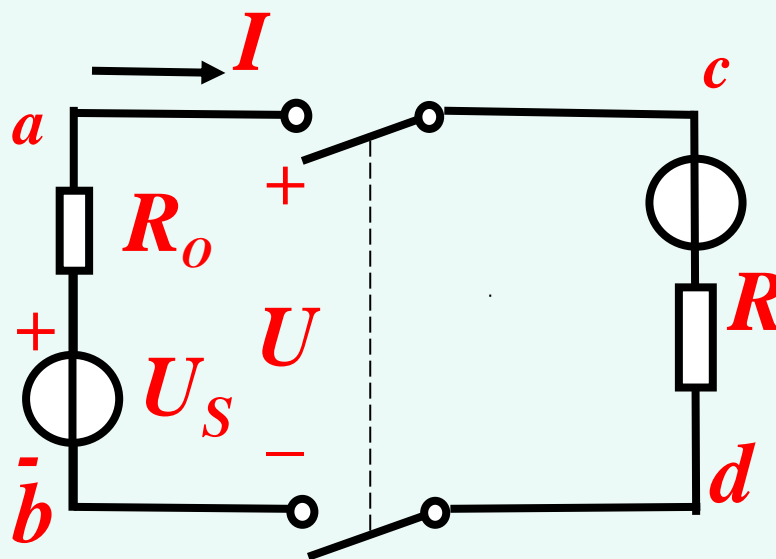
注意：电压源短路
是一种事故状态

$$\begin{cases} U=0 \\ I=I_s=U_s/R_o \\ P=0, P_s=P_o=I^2R_o \end{cases}$$

I_s 称为短路电流

一、独立电压源

电源与负载的判别



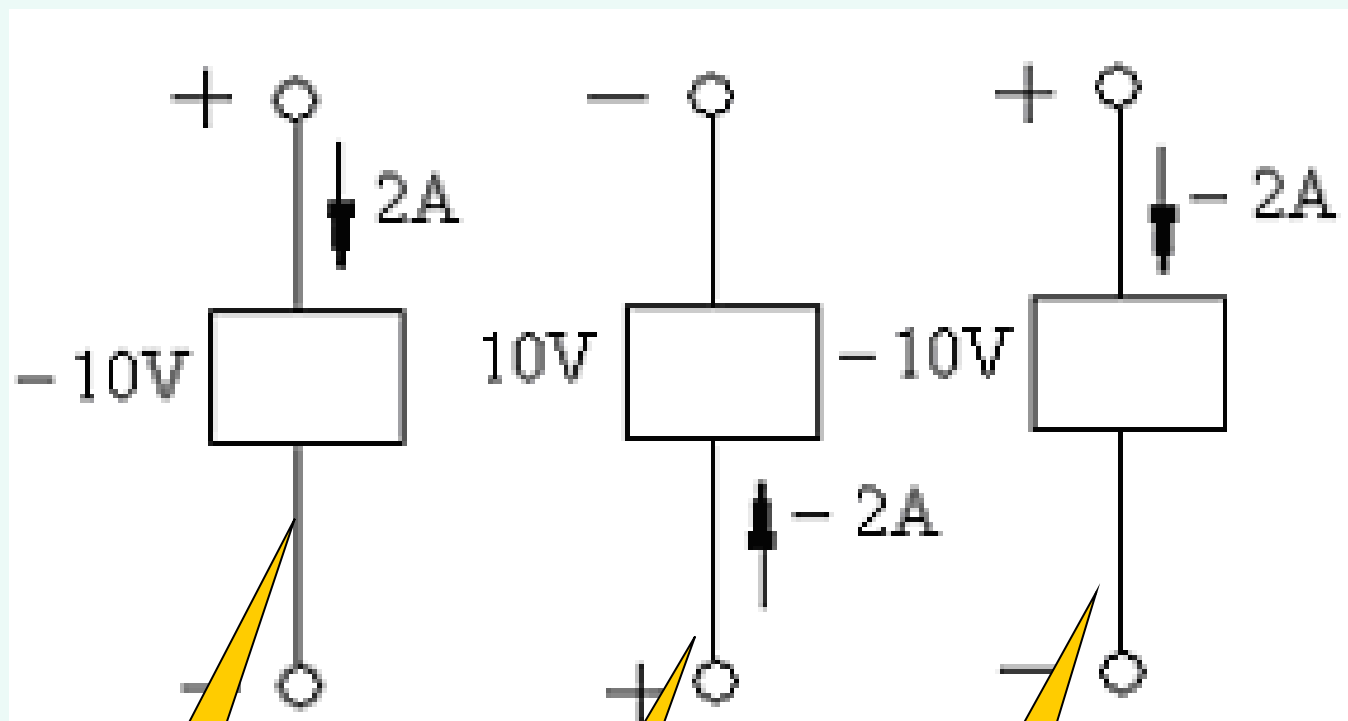
由电压电流的实际方向判别

电源：电流从电源“+”端流出，发出功率

负载：电流从电源“+”端流入，吸收功率

一、独立电压源

举例：判断下图所示电路哪一个电源？哪一个负载？



电源

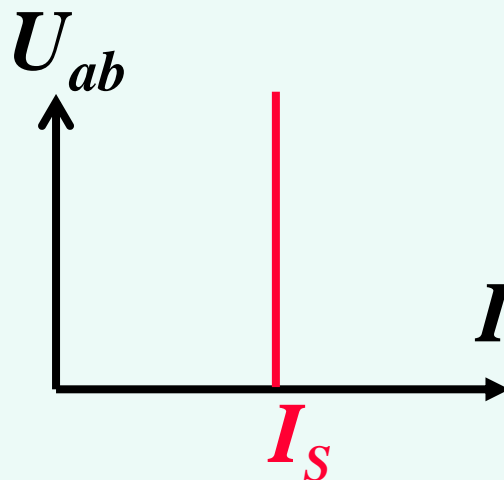
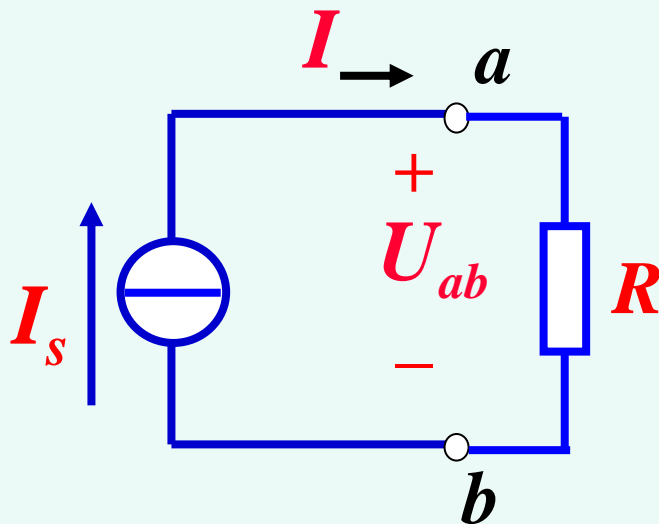
电源

负载

二、独立电流源

独立电流源也分为理想电流源和实际电流源两种。

1. 理想电流源（恒流源）

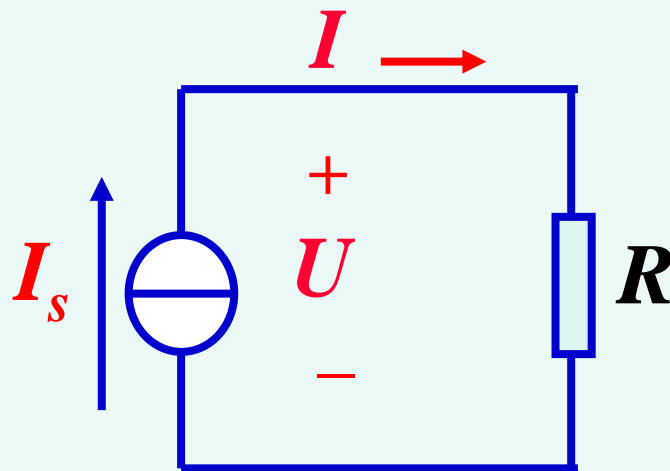


伏
安
特
性

特点：（1）输出电流不变，其值恒等于电流源电流 I_s ；
（2）输出电压由外电路决定。

二、独立电流源

恒流源两端电压由外电路决定



例

设: $I_s = 1 \text{ A}$

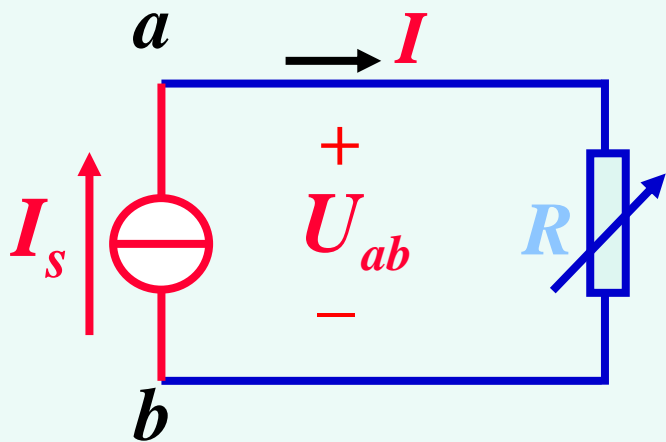
则: $R = 1 \Omega$ 时, $U = 1 \text{ V}$

$R = 10 \Omega$ 时, $U = 10 \text{ V}$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

恒流源特性小结



$$U_{ab} = I_s \cdot R$$

恒流源特性中不变的是： I_s

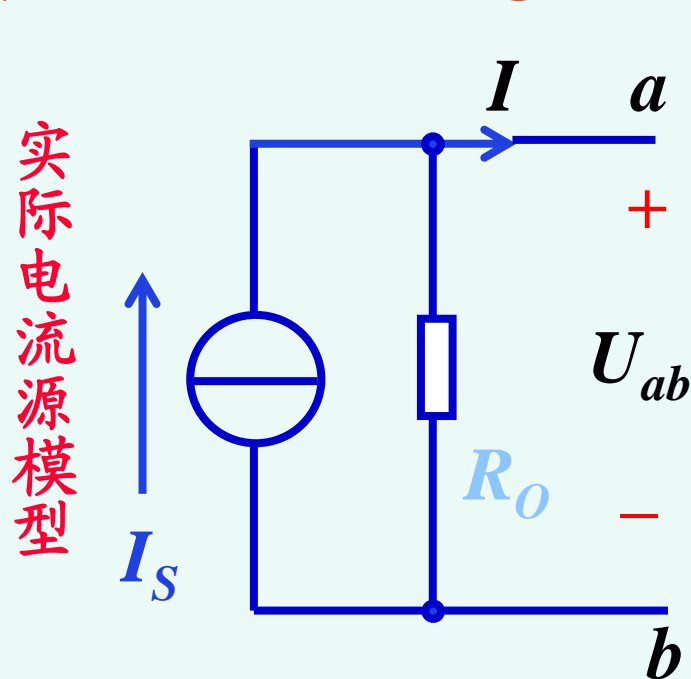
恒流源特性中变化的是： U_{ab}

外电路的改变 会引起 U_{ab} 的变化。

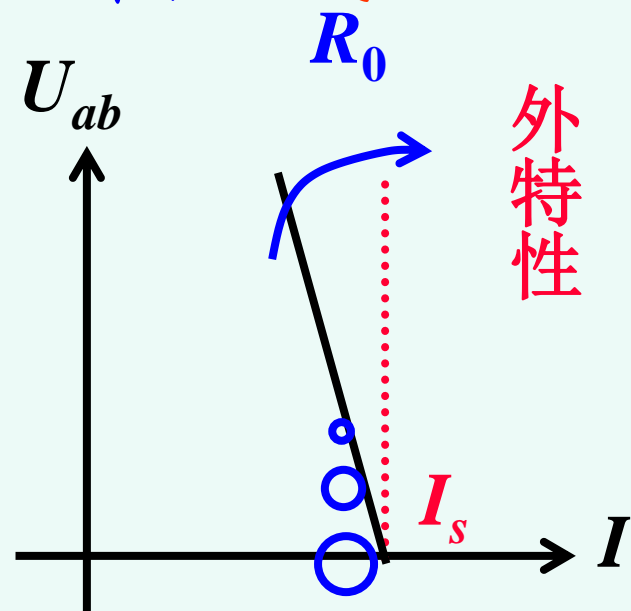
二、独立电流源

2. 实际电流源模型

实际电流源由理想电流源与其内阻并联而成。



$$I = I_s - \frac{U_{ab}}{R_0}$$



外特性

R_0 越大
特性曲线越陡，越接近理想电流源。

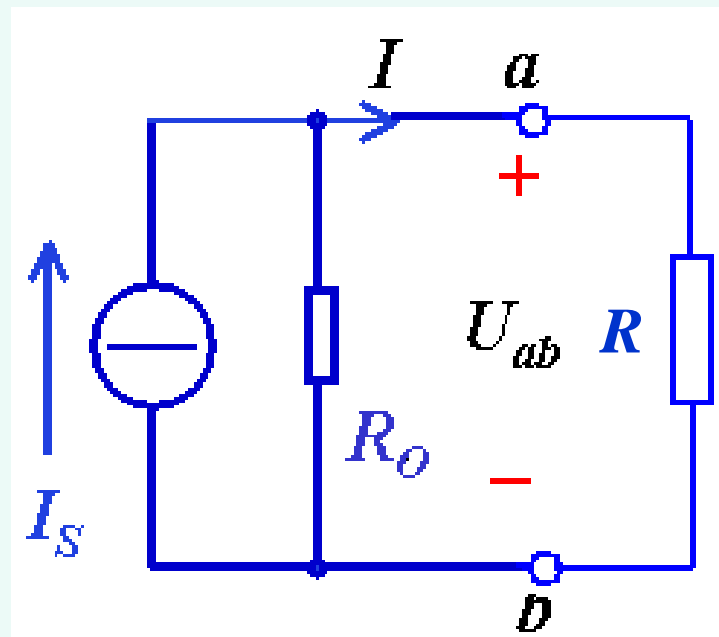
二、独立电流源

(1) 实际电流源的有载工作状态

电流源的有载工作状态如图所示，电流源的输出电压、输出电流、输出功率如下：

$$U_{ab} = \frac{R_0 R}{R_0 + R} I_S$$

$$I = \frac{I_S R_0}{R_0 + R}$$

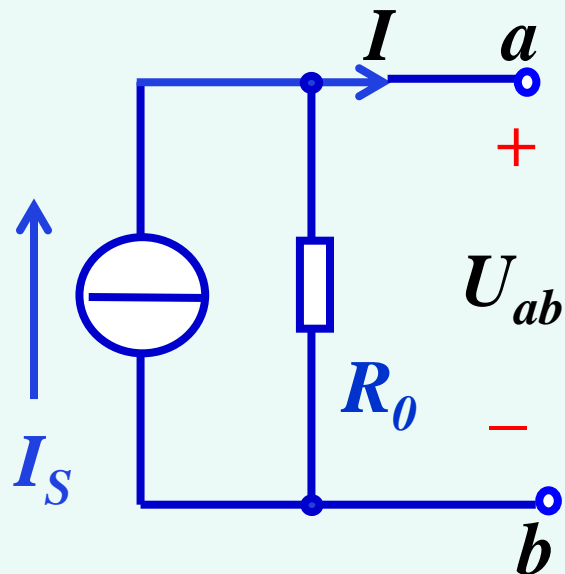


$$P = U_{ab} I = R I^2$$

二、独立电流源

(2) 实际电流源的开路状态

实际电流源处于开路状态时，
电流源的电流全部流过电流源
内阻 R_0 ，电流源产生的功率全
部消耗在此内阻上。



$$I = 0$$

$$U_{ab} = I_s R_0$$

$$P = U_{ab} I = 0$$

$$P_s = P_0 = U_{ab} I_s = I_s^2 R_0$$

二、独立电流源

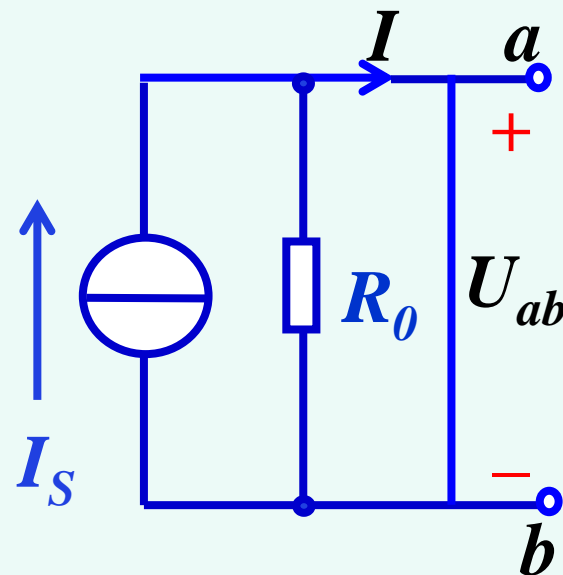
(3) 实际电流源的短路状态

短路状态时，电流源的端电压、短路电流、产生的功率及输出功率为

$$I = I_S$$

$$U_{ab} = 0$$

$$P_S = P = P_0 = 0$$



电流源不工作时应短路。

二、独立电流源

【例1-5】在图1—22中， $U_S=4V$ ， $I_S=2A$ ，试求当 $R=1\Omega$ 、 $R=2\Omega$ 、 $R=4\Omega$ 时，输出电流 $I=?$ 分析理想电压源和理想电流源的工作状态，验证功率平衡。

【解】（1）当 $R=1\Omega$ 时

$$I = \frac{U_S}{R} = 4A$$

电阻吸收的功率 $P = UI = 16W$

理想电流源发出的功率为 $P = U_S I_S = 8W$

由 $I = I_1 + I_S$

理想电压源的电流为： $I_1 = 2A$

理想电压源发出的功率为： $P = U_S I_1 = 8W$

电压源和电流源发出的功率之和等于电阻吸收的功率，电路中的功率平衡。

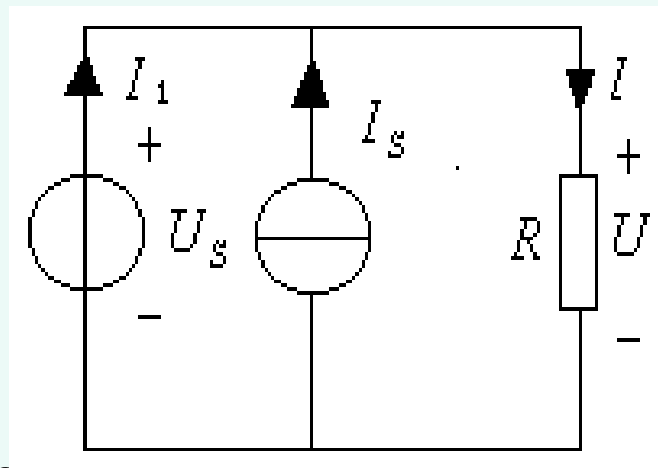


图1-22

二、独立电流源

(2) 当 $R=2\Omega$ 时,
$$I = \frac{U_s}{R} = 2A$$

电阻吸收的功率为: $P = U_s I = 8W$

电流源发出的功率: $P = U_s I_s = 8W$

由于电压源的电流为: $I_1 = 0$

所以电压源不发出功率, 电流源发出的功率等于电阻吸收的功率。

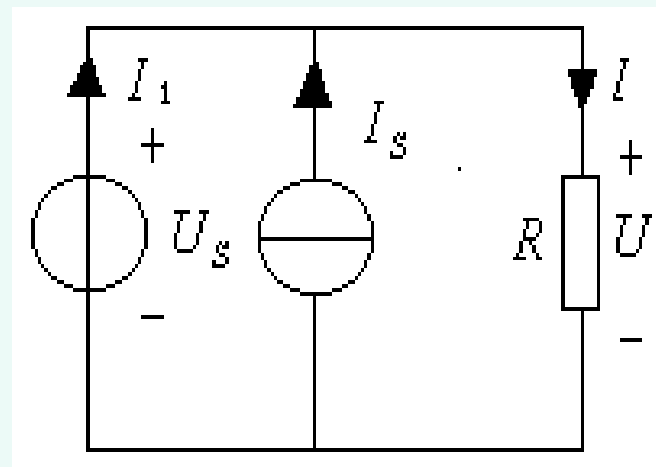


图1-22

(3) 当 $R=4\Omega$ 时
$$I = \frac{U_s}{R} = 1A$$

电阻吸收的功率为: $P = U_s I = 4W$

电流源的电流 $I_s = 2A$

所以电流源发出的功率为: $P = U_s I_s = 8W$

电压源的电流: $I_1 = I - I_s = -1A$

所以电压源发出功率: $P = U_s I_1 = -4W$

电压源实际吸收功率, 作负载。电流源发出的功率等于电压源和电阻吸收的功率之和。



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

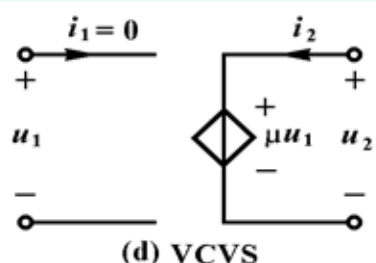
四、受控电源

受控源是一种特殊的有源元件，其输出电压或输出电流受到其他元件上的电压或电流控制，且只随控制量的大小而变化。

四、受控电源

受控源电路模型、表示方法。

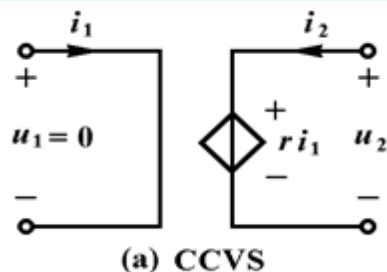
电压控制电压源
VCVS



$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ u_2 = \mu u_1 \end{cases}$$

μ 亦无量纲，称为转移电压比。

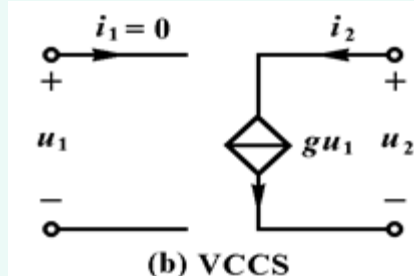
电流控制电压源
CCVS



$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = r i_1 \end{cases}$$

r 具有电阻量纲，称为转移电阻。

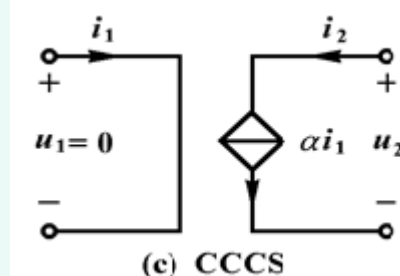
电压控制电流源
VCCS



$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = g u_1 \end{cases}$$

g 具有电导量纲，称为转移电导。

电流控制电流源
CCCS



$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ i_2 = \alpha i_1 \end{cases}$$

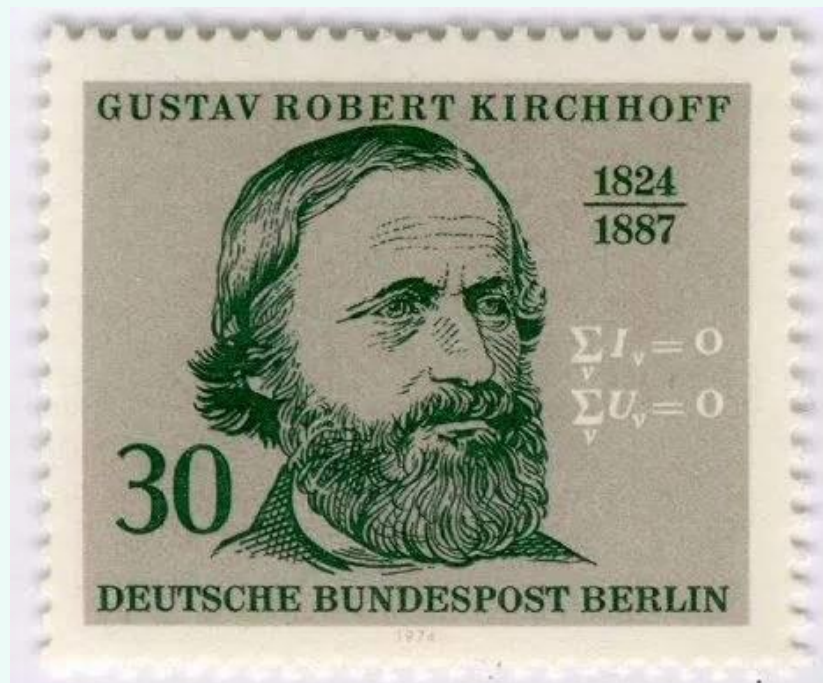
α 无量纲，称为转移电流比。

第五节 基尔霍夫电压、电流定律

古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887) 德国物理学家。

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's current law, KCL)

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's voltage law, KVL)



一、电路名词

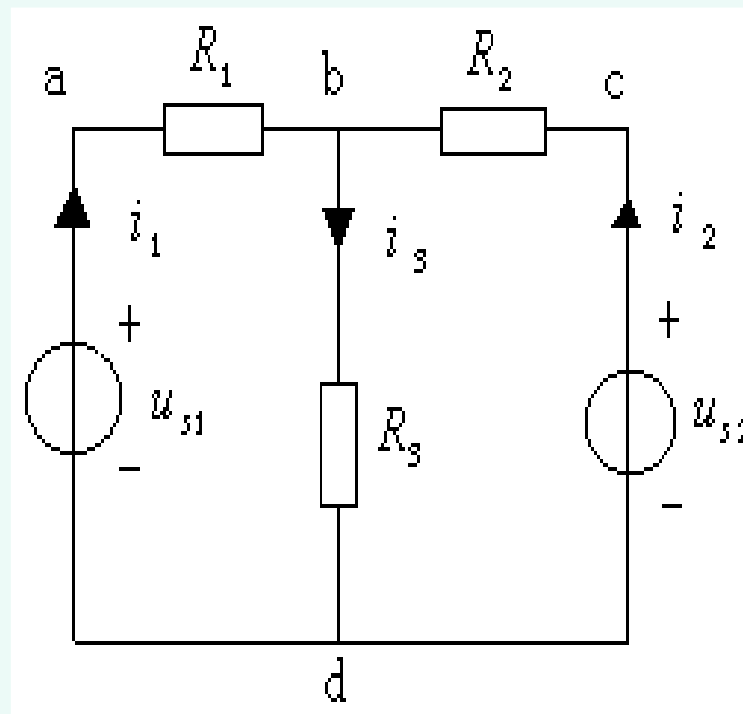
1. **支路**：电路中流过**电流**的电路分支。流过支路的电流称为支路电流，支路两端的电压称为支路电压。如图中bad、bd、bcd。

2. **结点**：会聚**三条或三条**以上支路的连接点。如图中的b、d两点。

3. **回路**：由支路组成的任一**闭合路径**称为回路。如图中abda、bcd b、abcda三个回路

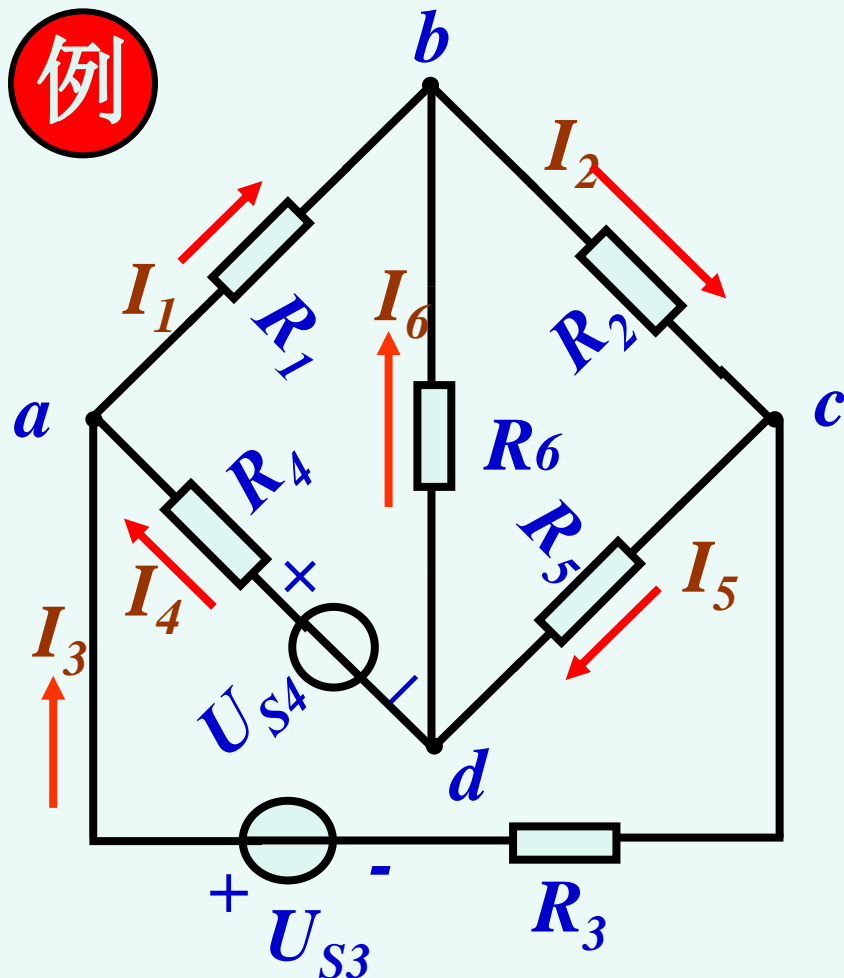
独立回路：回路中不再包含其他回路的。如回路abda、回路bcd b。

平面电路中的独立回路也被称为**网孔**。



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

一、电路名词



支路: ab 、 ad 、 bd 、
 bc 、 cd 、 ac
(支路数 $b=6$)

节点: a 、 b 、 c 、 d
(节点数 $n=4$)

回路: (共7个)
独立回路: $abda$ 、
 $bcdb$ 、 $adca$ 共3个

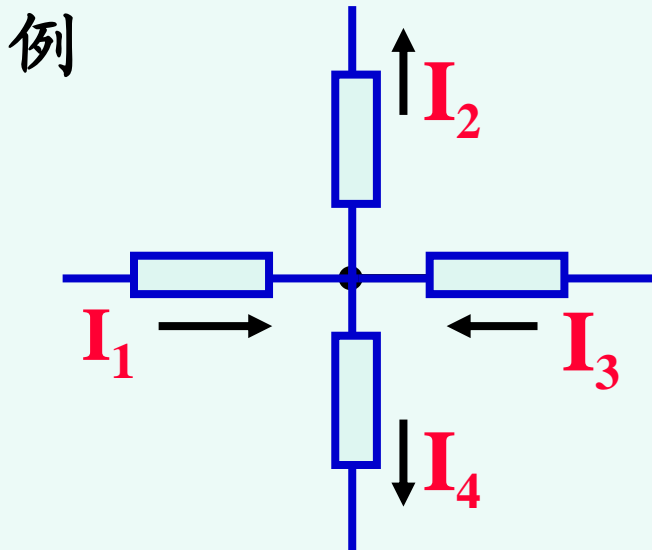
二、基尔霍夫电流定律（KCL方程）

1.基尔霍夫电流定律：对于任何结点，在任一瞬间，流入结点的电流之和等于从该结点流出的电流之和。或者说，在任一瞬间，任一个结点上电流的代数和恒为 0。

即： $\sum I_{in} = \sum I_{out}$

$$\sum I_{in} - \sum I_{out} = 0$$

$$\sum I = 0$$



$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

$$\text{或：} I_1 + I_3 - I_2 - I_4 = 0$$

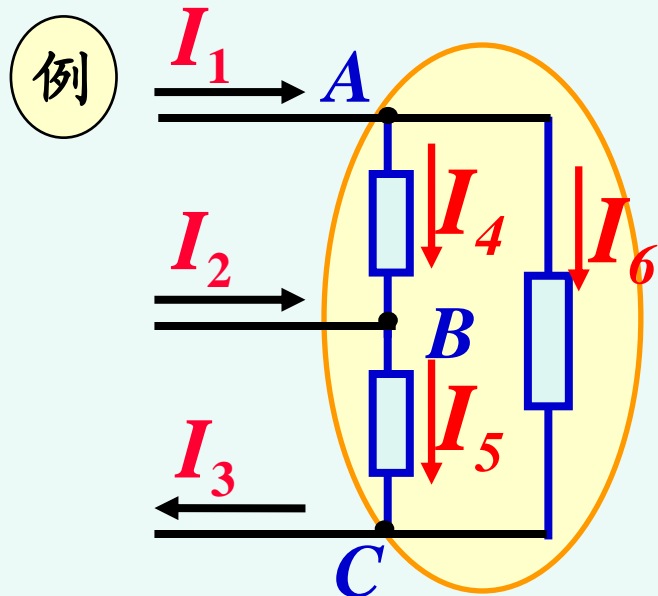
基尔霍夫电流定律的物理依据：电荷守恒



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

2.基尔霍夫电流定律的扩展（广义结点）

广义节点：电路的任意封闭面。

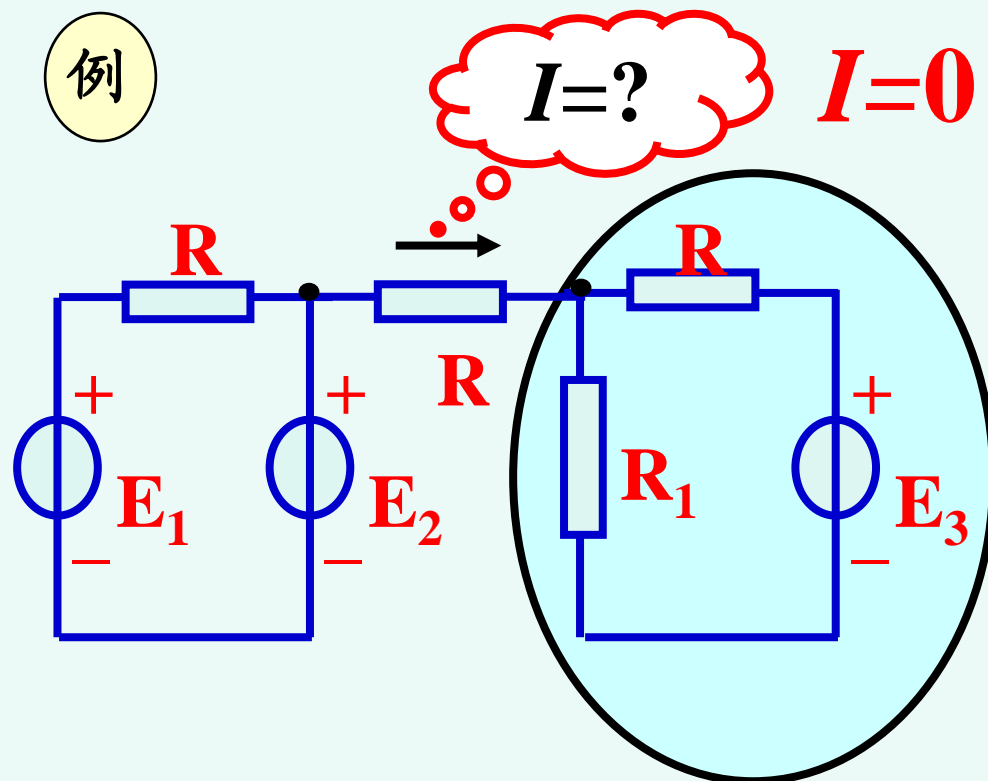


$$A: I_1 = I_4 + I_6$$

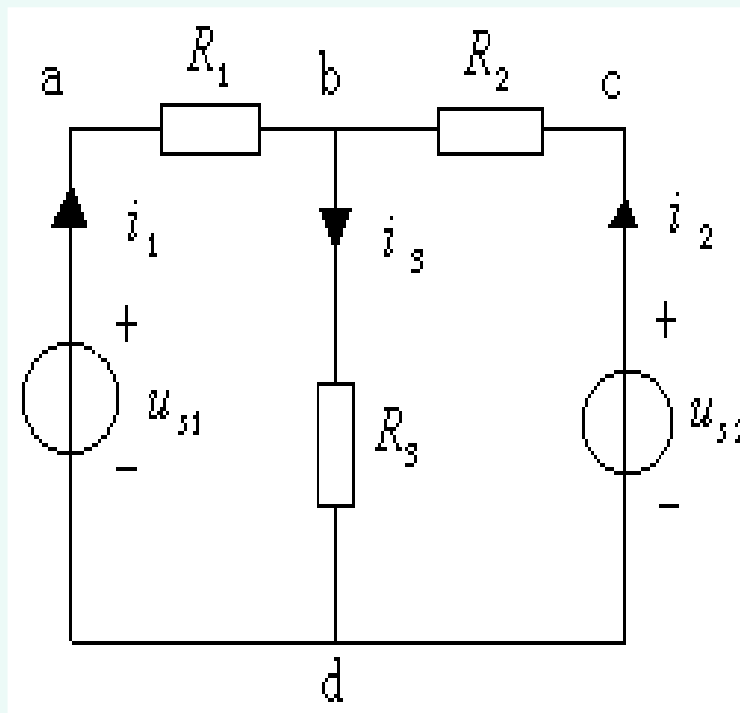
$$B: I_2 + I_4 = I_5$$

$$C: I_5 + I_6 = I_3$$

$$\text{闭合面: } I_1 + I_2 = I_3$$



二、基尔霍夫电流定律（KCL方程）



$$b: i_1 + i_2 = i_3$$

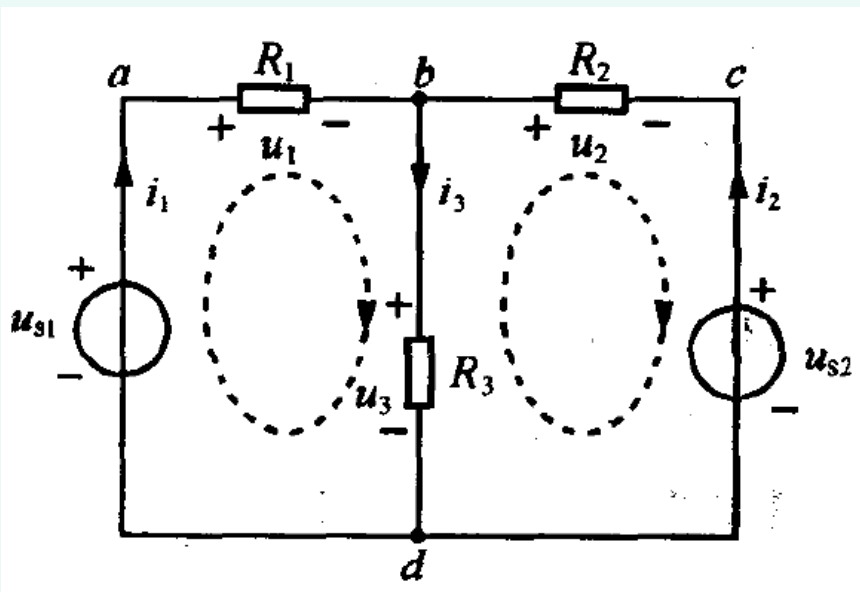
$$d: i_3 = i_1 + i_2$$

由于支路电流必须是从一个结点流出后流入另一个结点，因此，对于 n 个结点的电路，只有 **$(n-1)$** 个KCL独立方程

三、基尔霍夫电压定律（KVL方程）

1.基尔霍夫电压定律：在任一时刻，对于电路中的任一回路，沿该回路的各支路电压的代数和为0。

$$\sum U = 0$$



回路 a-b-d-a $-u_{s1} + u_1 + u_3 = 0$

回路 b-c-d-b $u_2 + u_{s2} - u_3 = 0$

回路 a-b-c-d-a

$$-u_{s1} + u_1 + u_2 + u_{s2} = 0$$

沿独立回路（网孔）列出的KVL方程都是独立的



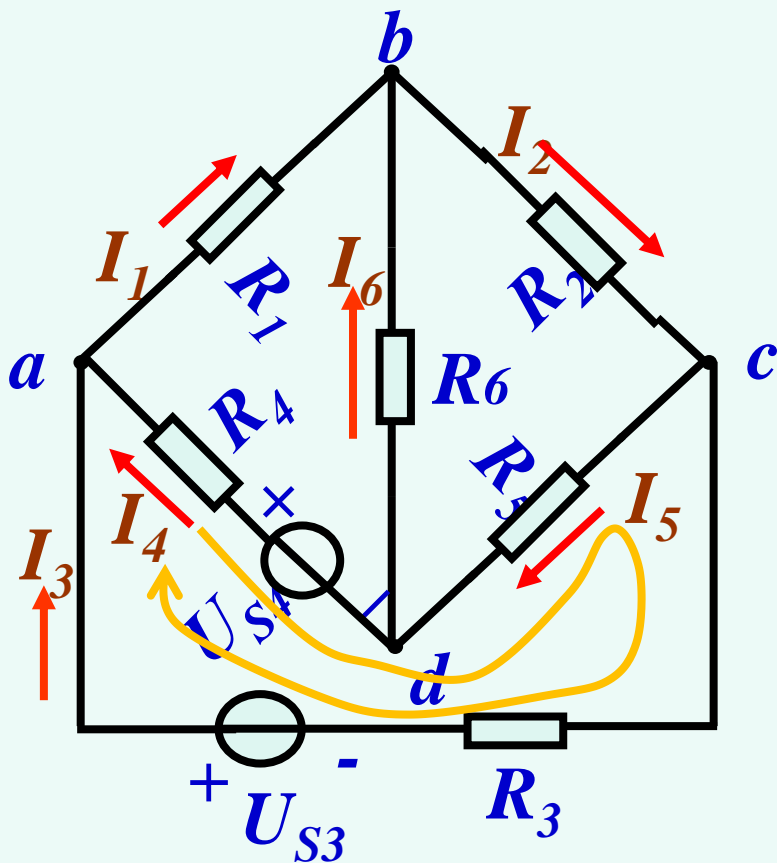
石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

三、基尔霍夫电压定律（KVL方程）

1.基尔霍夫电压定律：在任一时刻，对于电路中的任一回路，沿该回路的各支路电压的代数和为0。

即：

$$\sum U = 0$$



例如：回路 a-d-c-a

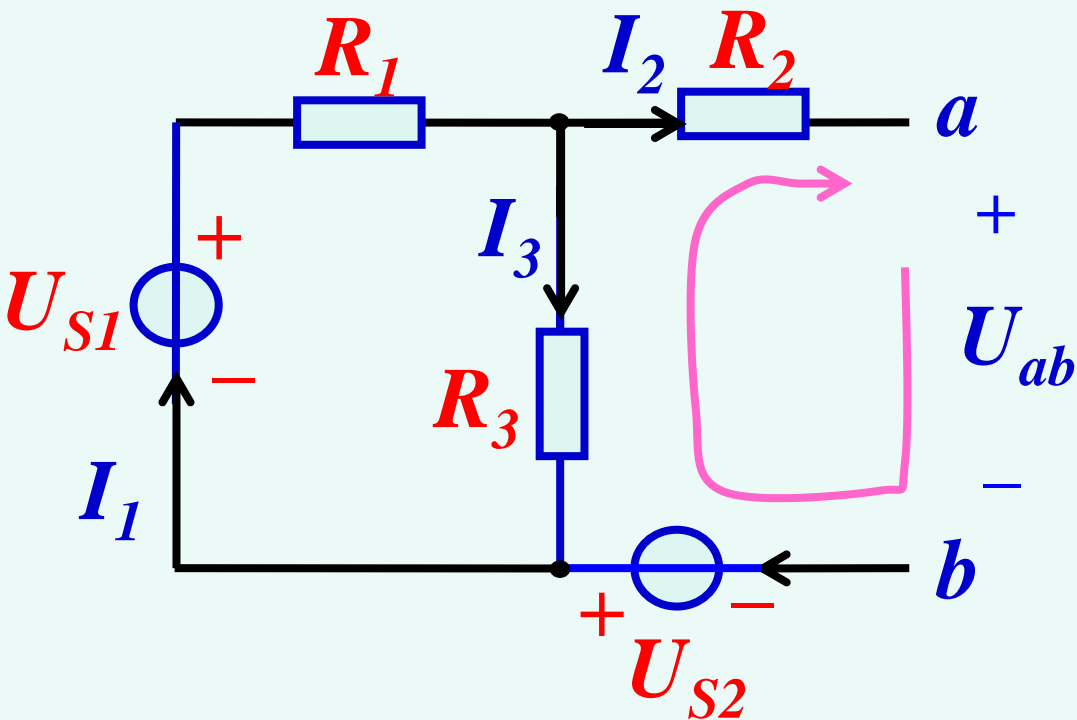
假设回路方向为顺时针方向

$$-I_4 R_4 + U_{S4} - I_5 R_5 + I_3 R_3 - U_{S3} = 0$$

三、基尔霍夫电压定律（KVL方程）

2.基尔霍夫电压定律也适合开口电路。

例



$$U_{ab} - U_{S2} - I_3 R_3 + I_2 R_2 = 0$$

注意:

1.应用基尔霍夫定律列方程时，首先规定电压、电流的参考方向。

2.基尔霍夫定律具有**普遍性**。

(1) 任一瞬间

(2) 任一电路中

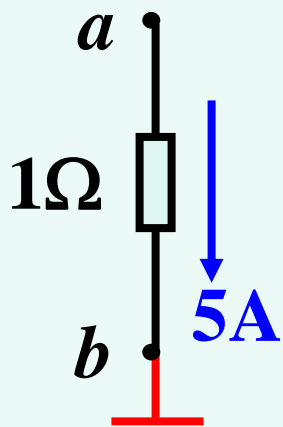
第六节 电路中电位的概念及计算

电压:

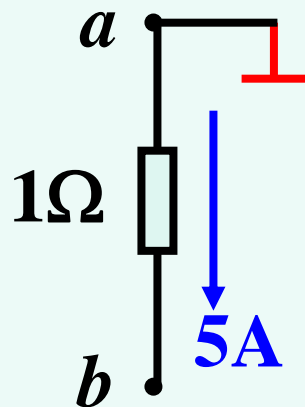
两点间的电压就是两点间的电位差，例如 U_{ab} ，（双字母下标，有方向性）

结点电位的概念:

在电路中任选一结点，设其电位为零（用 \perp 标记），此点称为参考点。其它各结点对参考点的电压，便是该结点的电位。记为：“ V_X ”（注意：电位为单下标）。



a 点电位: $V_a = 5V$



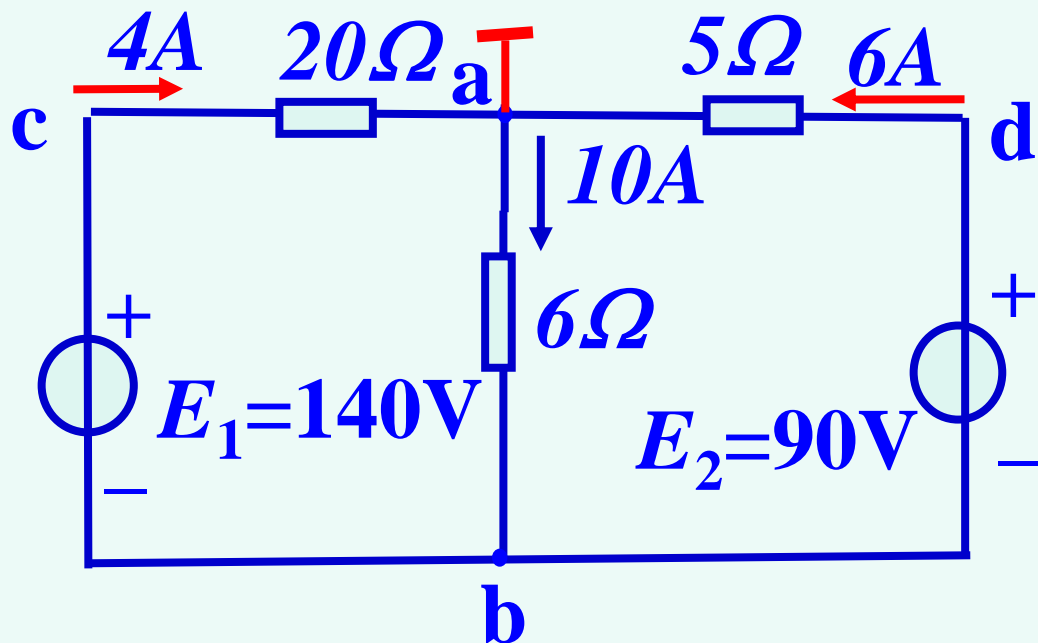
b 点电位: $V_b = -5V$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第六节 电路中电位的概念及计算

例



$$U_{ab} = 6 \times 10 = 60\text{V}$$

$$U_{ca} = 20 \times 4 = 80\text{V}$$

$$U_{da} = 5 \times 6 = 30\text{V}$$

$$U_{cb} = 140\text{V}$$

$$U_{db} = 90\text{V}$$

以a点为参考点

$$V_b - V_a = U_{ba}$$

$$V_c - V_a = U_{ca}$$

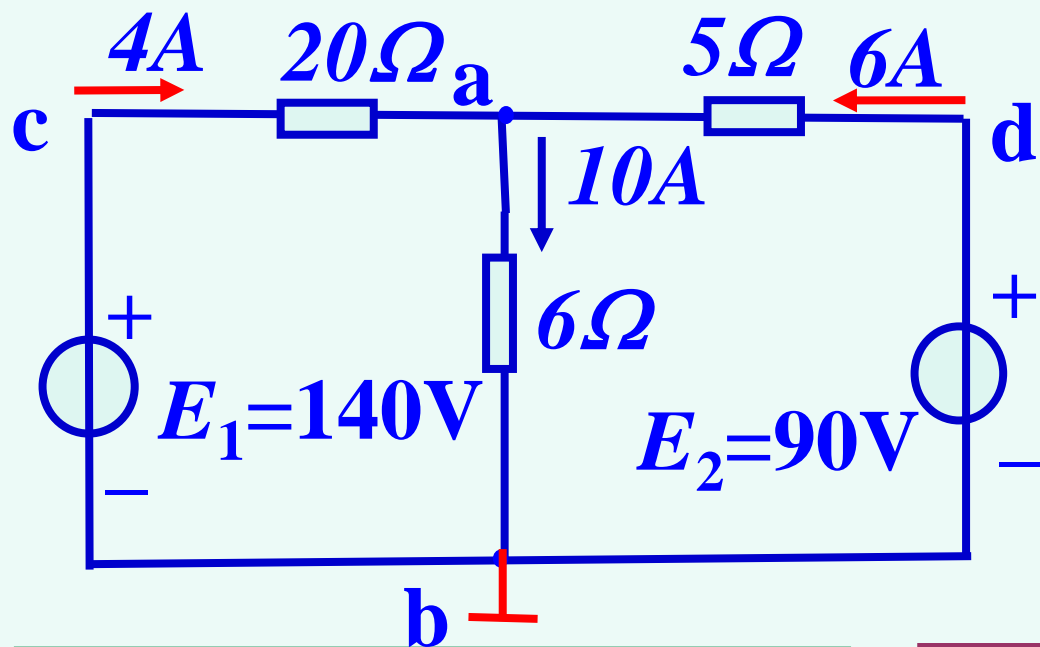
$$V_d - V_a = U_{da}$$

$$V_b = U_{ba} = -60\text{V}$$

$$V_c = U_{ca} = +80\text{V}$$

$$V_d = U_{da} = +30\text{V}$$

第六节 电路中电位的概念及计算



$$U_{ab} = 6 \times 10 = 60\text{V}$$

$$U_{ca} = 20 \times 4 = 80\text{V}$$

$$U_{da} = 5 \times 6 = 30\text{V}$$

$$U_{cb} = 140\text{V}$$

$$U_{db} = 90\text{V}$$

以b点为参考点

$$V_a = U_{ab} = + 60\text{V}$$

$$V_c = U_{cb} = + 140\text{V}$$

$$V_d = U_{db} = + 90\text{V}$$

以a点为参考点

$$V_b = U_{ba} = - 60\text{V}$$

$$V_c = U_{ca} = + 80\text{V}$$

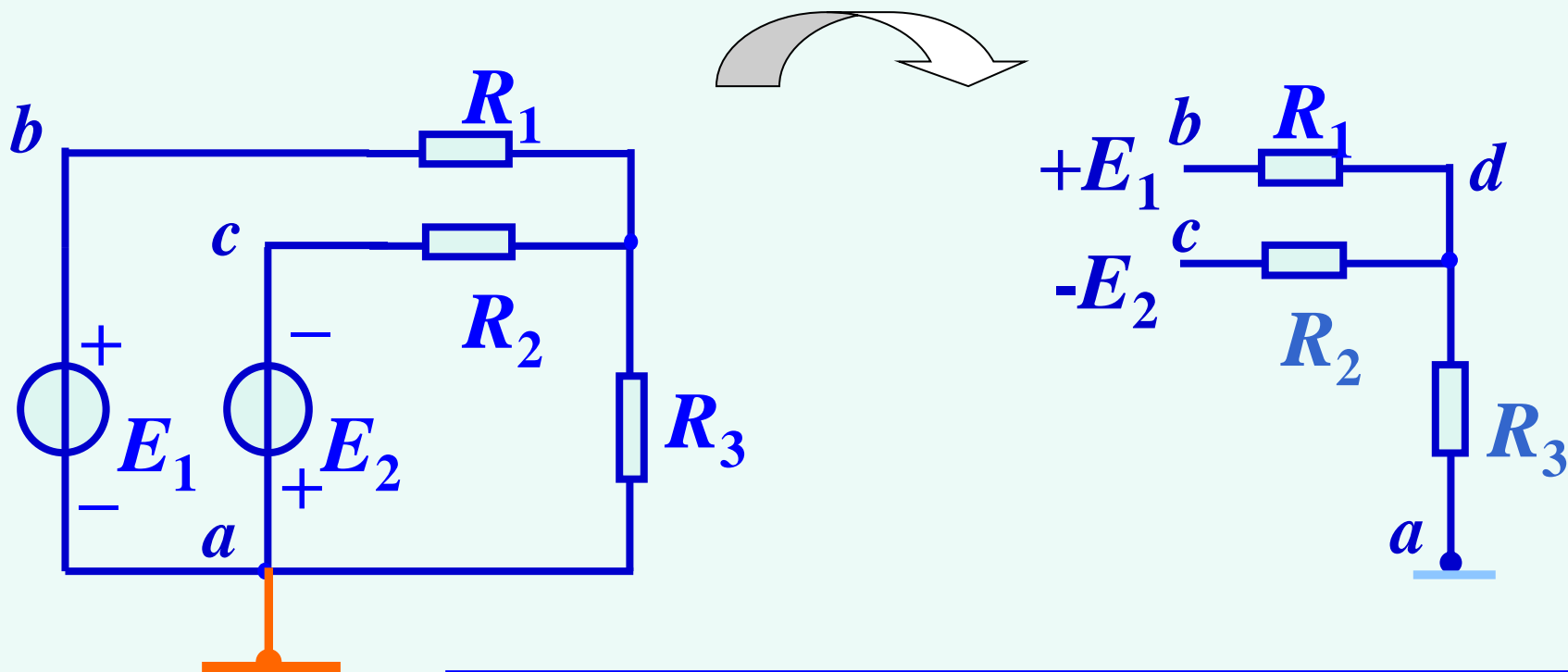
$$V_d = U_{da} = + 30\text{V}$$



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第六节 电路中电位的概念及计算

电位在电路中的表示法



注意：用电位表示的电路并不是开路。



石家庄铁道大学
Shijiazhuang Tiedao University

第六节 电路中电位的概念及计算

电位小结

(1) 电路中某一点的电位等于该点与参考点（电位为零）之间的电压；

(2) 参考点选的不同，电路中各点的电位值随着改变，但是任意两点间的电压值是不变的。所以各点电位的高低是相对的，而两点间的电压是绝对的。

第一章

结束