

《电路分析基础》

南京航空航天大学

电学的发展历史

从工程技术的观点看，电(*electricity*)是一种优越的能量形式和信息的载体。它具有易于变换、传输和控制的特点。

电学发展的重要事件：

1. 东汉王充《论衡》中提到了司南；宋代沈括《梦溪笔谈》记载了指南针、磁偏角。
2. 库仑 1785 年发现了电荷，确定了电荷力的存在。
3. 安培(*Ampere*)于 1820 年发现电磁效应和法拉第(*Faraday*)于 1831 年揭示了电磁感应原理；到 19 世纪 60 年代，麦克斯韦(*Maxwell*)建立了统一的电磁波理论，从理论上推测到电磁波的存在，为无线电技术的发展奠定了理论基础。
4. 电动机于 19 世纪 30 年代后期(俄国)出现；发电站与输电线于 19 世纪 80 年代初开始建造；电报发明于 1837 年，电话发明于 1876 年，无线电通讯则开始于 1895 年。
5. 洛伦兹(*Lorentz*)于 19 世纪末建立了古典电子学理论，随之而来的是电子学的迅速发展。20 世纪前半叶，电子管、半导体技术迅速发展。这方面的历史里程碑，从器件上说是 1906 年出现电子二极管，1948 年发明晶体三极管；从系统应用上看，第一家无线电广播电台于 1920 年在匹茨堡开播，第一家电视台于 1935 年由英国广播公司(BBC)建成，第一台电子计算机 1946 年诞生于美国宾夕法尼亚大学。
6. 20 世纪后半叶，集成电路(1958 年)、数字控制(1952 年数字控制机床)的出现，推动了一场新的技术革命。
7. 大功率半导体器件的完善，使半导体技术进入强电领域。电力电子技术(中频电源、变频调速、直流输电、不间断电源)的发展。
8. 信息技术的蓬勃发展。

一、本课程的学习内容、特点

内容：研究电路的基本概念、基本定律及其初步分析方法。主要有以下三个部分：

1. 线性电阻电路分析
2. 动态电路的瞬态分析
3. 正弦稳态分析

特点：是一门电技术基础课。理论性强，解题方法灵活，内容承前启后，实验丰富。

二、学习目的与方法

目的：为后续课及今后工作打下必要的基础。

方法：

1. 掌握基本概念、基本理论和分析方法；
2. 通过习题来巩固和加深所学理论，培养分析能力和运算能力；
3. 在实验中体会电学现象。

三、考核方法

作业15；实验15；期末70

四、其它

课代表、实验指导书、实验地点(3号楼3211室)。

答疑时间：每周周四晚；地点：看2号楼布告。

作业：双周周三交，请课代表按学号排序。

第一章

电路分析的基本概念 和电路基本定律

对电路的分析可从以下三个方面讨论

- 1) 基本概念(电路、电路模型及参考方向等)
- 2) 基本规律(元件的VAR: 元件约束)
- 3) 基本定律(KCL、KVL: 电路拓扑约束)

§ 1 —1 电路、电路模型及集总假设

一、实际电路作用及其组成

1. 电路的概念 (网络、电网络)

由一些电气器件为某种需要按一定方式连接而成的电流通路。

2. 实际电路的作用

- 1) 实现电能的传输与转换(强电, 电力电子)。
- 2) 信号的传递与处理(往往针对弱电)。如收音机、选频电路、检波电路、放大电路、扬声器驱动电路等。

3. 实际电路的主要组成部分

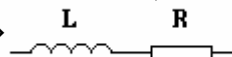
{ 电源(信号源、激励)
 负载
 传输结点

电源 提供电能或电信号的设备。
负载 用电或输出信号的设备。
传输结点 用于传输电能和电信号的中间环节。

二、电路的理想化

本课程并不是研究一个个具体的实际电路, 而是研究经过理想化的电路模型。大家学过电磁学, 不难理解有电压就会存在电场, 有电流就有磁场, 即电路周围伴有电场、磁场能量, 或存在电磁波, 它使电路伴有三种效应:

载流导体因发热而耗能 $\Rightarrow R$
 电场储能 $\Rightarrow C$
 磁场能量 $\Rightarrow L$

这三种效应一般是交织在一起的(如 R 含 L , L 含 R , C ……), 但有主次, 在某些条件下可以被理想化。如电感线圈 \Rightarrow 

1. 电路理想化的两层含义：

- 1) R 、 L 、 C 三种效应分开，使实际器件 \Rightarrow 理想元件及其组合；
实际电路 \Rightarrow 电路模型；
- 2) 电磁过程集中在元件内部进行，没有能量的辐射。

三、电路模型

实际电路的理想化，突出电路中器件的主要特性，忽略其次要性质，由若干个理想电路元件或理想元件组合体构成的电路(简称电路)。

四、集总假设

电路理论中的一个重要假设 集总(中)假设

$l \ll \lambda$ ： $l \rightarrow$ 电路元件的尺寸

$\lambda \rightarrow$ 电路周围电磁波的波长

满足上述条件的器件和部件称为集总参数器件和部件。

用来模拟集总参数器件和部件的理想元件 \rightarrow 集总参数元件

集总参数电路：由集总参数元件互连而成的电路

凡是电路的尺寸不满足上述集总化假设条件的，就称为分布参数电路。

例如：对于工频信号的电路： $f = 50\text{Hz}$ ，其波长 λ 为：

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \text{m} = 6000\text{km}$$

式中： v 为光速 $= 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，室内用电设备 \ll 工频信号的波长。

故： 室内用电设备 \Rightarrow 可用集总电路分析

对于电视信号： $f = 50\text{MHz}$ ，则波长 λ 为：

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50 \times 10^6} = 6\text{m}； \text{微波 } 1\text{mm} < \lambda < 10\text{mm}。 \text{故通常情况下的微波}$$

电路 \Rightarrow 非集总电路。

☆ 本课程只讨论集总参数电路，集总参数电路是电路基本定律(基尔霍夫电流定律和电压定律)的应用前提。

§ 1—2 电路分析的基本变量及参考方向

电路的三个基本物理量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{电流} \\ \text{电压} \\ \text{电功率} \end{array} \right.$

一、电流（强度）

1. 定义

带电粒子(电子、正离子)的有序运动形成电流。电流既是一种物理现象，同时也是一个表征带电粒子有秩序运动强弱的物理量。电流在量值上等于单位时间穿过某一截面的电荷量，它实际是电流强度的简称，用符号 i 表示：

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{单位时间通过的电荷量})$$

量纲： $[A] = \frac{[C]}{[Sec]}$ ；辅助单位： mA , μA , kA 。

P. 6 表 1—1：部分国际单位的词头。

i 的实际方向：正电荷定向移动的方向。

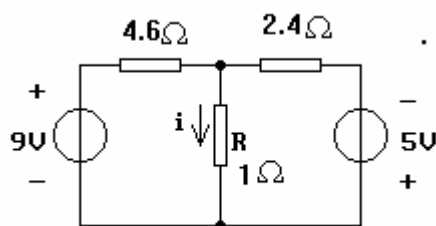
特例：1) DC: $I = q/t = \text{常数}$ ，大小、方向不随时间变化，用 $I(t)$ 或 I 表示；

2) AC: 电流的大小和方向都随时间变化，用 $i(t)$ 或 i 表示。

2. 电流的参考方向

当电路非常简单时，电流的实际方向容易直接判断出【如P. 3图1—1)】。然而，通常的电路模型并非很简单，其 i 的实际方向往往难以在电路中事先标注出来。

例：如下图电路



电阻 R 中电流的实际方向难以事先标注出来，因此引入电流的参

考方向这一概念。

电流的参考方向有两层含义：

1) 电流*i*的参考方向可以任意指定；

即：分析电路前任意假设*i*的参考方向，并以此去建立电路模型的数学关系式，去分析、计算电路。

2) 从*i*最终结果的正、负来确定*i*的实际方向。

若数值*i* > 0，则*i*的实际方向与参考方向一致

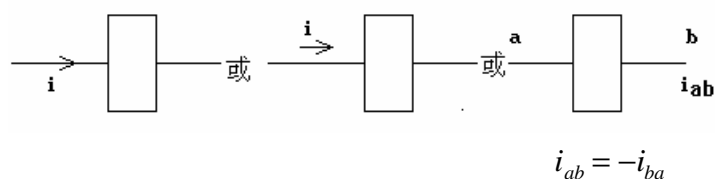
若数值*i* < 0，则*i*的实际方向与参考方向相反

▲ 参考方向未标注，则算式及结果的正、负均无意义！

再看上例，由*i*的参考方向求得： $I = -0.0776 \text{ A}$ ，这说明通过电流的实际方向向上。

注意：算式列出或结果算好后，*i*的方向均不可改标！！

★ 电流参考方向的标注方法：箭头表示法和双下标表示法。



二、电压

1. 定义：电路中任意两点间(*a, b*)的电压*U*等于这两点的电位之差，等于电场力将单位正电荷*q*由*a*点移至*b*点所作的功。用符号*U*或*u*表示。电压也称为电位降，规定方向为高电位指向低电位，即单位正电荷获得或失去的能量，用数学式表示为： $U_{ab} = \frac{dW}{dq}$

直流(恒定)电压常用“*U*”表示：大小、方向不变；

交变(交流)电压常用*u(t)*或*u*表示；

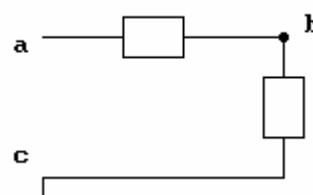
电压的单位是*V*，辅助单位：*mV*，*kV*，***mV***；

电位(用“*U*”表示) 与“参考点”(零电位点)之间的电压，

a、*b*两点间的电压*U_{ab}* *a*、*b*两点电位差*U_a - U_b*。

对于某一固定的电路，若选择不同的参考点，则该点的电位会相应不同，但任意两点间的电压值与参考点的选择总是无关。

例如：已知*U_{ab}* = 5*V*，*U_{bc}* = 3*V*。若选择*c*点为参考点，



则： $U_c = 0V, U_b = U_c + U_{bc} = 3V, U_a = U_b + U_{ab} = 8V$ ；

若选择 a 点为参考点，则：

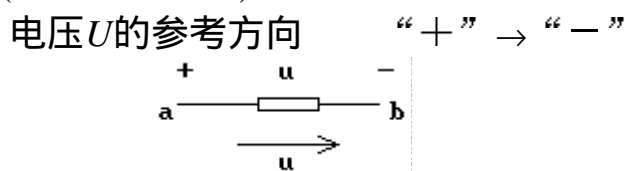
$$U_a = 0V, U_b = U_a - U_{ab} = -5V, U_c = U_b - U_{bc} = -8V$$

▲ U 的实际方向 高电位(+极)指向低电位(-极)，即电压降的方向。

2. 电压的参考方向

与电流类似，分析电路时，也必须事先任意假定电压的参考方向，其标注方法有三种：

1) 极性表示法(又称参考极性)：



2) 箭头表示法：此时，电压参考方向 “电位降”

3) 双下标表示法： U_{ab} 表示电压参考方向由 a 指向 b

3. 关联参考方向

同一元件的 u, i 的参考方向取为一致，称为关联参考方向，如下图亦可只标一个，另一个隐含为关联方向，如图中 U 隐含。



例：已知图中 $U_a = -4V, U_b = 0$ ，求 $U_1 = ?, U_2 = ?$



解： $U_1 = U_a - U_b = -4 - 0 = -4V$ ， $U_2 = U_b - U_a = 0 - (-4) = 4V$

三、功率

电流与电压的乘积，即每单位时间内电场所作的功，称为电功率，用符号 p 或 P 表示。

前面提到 $u = \frac{dw}{dq}$ 或 $dw = u dq$ ，从而 $\frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = p$ ，又 $i = \frac{dq}{dt}$

$$\therefore p = ui \quad (\text{DC时 } P = UI)$$

单位：瓦(特) W ；量纲： $[W] = [V][A]$

注意：此式是 u 、 i 取关联方向时导出的瞬时功率，它是电场力提供的功率，因而 $p = ui$ 就是这段电路“吸收”的瞬时功率。电路具体是吸收还是产生功率，如何判断？我们可根据 u 、 i 的参考方向关联与非关联的情况下，由 P 的实际值来决定。

即：1) 关联方向时， $p_{\text{吸}} = ui$

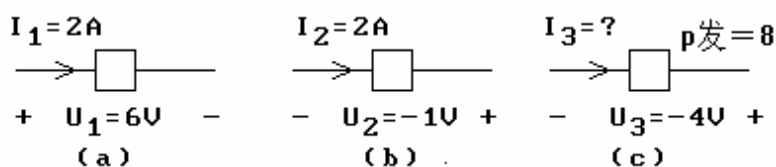
$$\begin{cases} \text{若 } p_{\text{吸}} > 0, \text{ 这段电路实际吸收功率} \\ \text{若 } p_{\text{吸}} < 0, \text{ 这段电路实际发出功率} \end{cases}$$

2) 非关联方向时， $p_{\text{吸}} = -ui$

$$\begin{cases} p_{\text{吸}} = -ui > 0 \text{ 实吸 或 } p_{\text{发}} = ui > 0 \text{ 实发} \\ p_{\text{吸}} = -ui < 0 \text{ 实发 或 } p_{\text{发}} = ui < 0 \text{ 实吸} \end{cases}$$

总之，计算 p 要与参考方向相结合。

例：



a) $P_1 = U_1 I_1 = 6 \times 2 = 12W$ 实际吸收12W

b) $P_2 = -U_2 I_2 = -(-1) \times 2 = 2W$ 实际吸收2W

c) $p_{\text{发}} = U_3 \times I_3 \Rightarrow I_3 = \frac{p}{U_3} = \frac{8}{-4} = -2A$ ，负号表明 I_3 的实际方向与图示相反。

图示相反。

可见，元件吸收功率的计算涉及三个方面的情况：

- 1) u 、 i 前面的正负号(u 、 i 关联否)
- 2) u 、 i 各自数值的正、负
- 3) $p_{\text{吸}}$ 的正、负

练习：P. 19 1-1; 1-2

作业：P. 19 1-1; 1-2

§1-3 电路的基本结构与基尔霍夫定律

电路的计算受下面两个主要因素的影响

1. 元件的伏安关系 VAR
2. 电路连接后给 u 、 i 带来的约束(电路的拓扑约束)

一、电路的几个名词术语

1. 支路 电路中的每一个分支，一条支路流过一个电流。如下图有 3 条支路($b=3$)。

2. 结点 两条以上支路的连接点。 $n=2$ ，即 a' 、 d 、 c 不算结点。

3. 回路 由一条或多条支路构成的闭合路径，且沿回路绕行一周时，回路中的结点只能经过一次。

$l=3$ $abca'a$ 、 $adba$ 和 $adbca'a$

4. 网孔 在回路内部不另含支路的回路。

$m=2$ $abca'a$ 和 $adba$

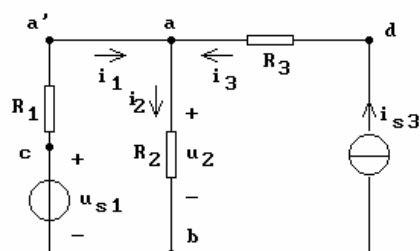


图 1-3-1

二、基尔霍夫电流定律(KCL)

表述 1: 在任一时刻，对于集总参数电路中的任一结点，“流出”结点的电流之和应等于“流入”该结点的电流之和。

$$\sum \text{流入节点的电流} = \sum \text{流出节点的电流}$$

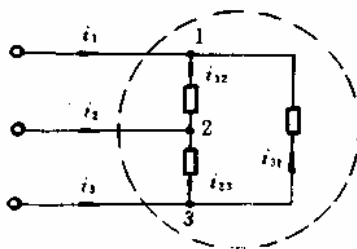
对上图结点 a: $i_2 = i_1 + i_3$

表述 2: 在任何时刻，对于集总参数电路中的任一结点，通过该结点所有支路电流的代数和恒等于 0，即：对某结点， $\sum i = 0$

对上图结点 a: $-i_1 + i_2 - i_3 = 0$ (令“出”为“+”)

流入、流出以参考方向为准，而与 i 自身的“+”“−”无关

KCL 原是由于结点的，有时亦可适用于包围几个结点的封闭面(即所谓的广义结点)。



例如：如上图所示封闭面所包围的电路，闭合面内有三个结点 1、2、3，有三条支路与电路的其余部分连接，其电流为 i_1 、 i_2 、 i_3 (电流的参考方向如图)

对此三个结点即可列出 KCL 方程为

$$i_1 = i_{12} - i_{31}$$

$$i_2 = i_{23} - i_{12}$$

$$i_3 = i_{31} - i_{23}$$

将以上三式相加得： $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

可见：流出一个封闭面的电流等于流入封闭面的电流。

基尔霍夫电流定律(KCL)是电流连续性或电荷守恒的体现，电荷不能创造、消灭。解释：P.7 划线部分。

例：P. 7 例 1-4

三、基尔霍夫电压定律(KVL)

表述：在集总参数电路中，任何时刻，环绕着任一回路中所有支路(或元件)电压降的代数和为零。

即： $\sum_{k=1}^n u_k = 0$ ， u_k 为回路中第 k 条支路电压，与绕行方向一致者

取“+”，回路的绕行方向可以任意选取

$$\sum U_{降} = \sum U_{升}$$

物理意义：电路中任一结点的电位具有单值性，遵循能量守恒定律，单位正电荷绕行一周，所获得的能量=失去的能量。因此，在任一时刻，从任一结点出发经过若干支路绕行一个回路再回到原结点，电位的总降低量等于电位的总升高量，如图 1-3-1：

沿回路 $a'abca'$ ，有： $u_2 - u_{s1} + u_1 = 0$

或 $u_1 + u_2 = u_{s1}$

从中可反映出：1) KVL 反映了回路中各支路电压间的关系；

2) 电路中两结点间的电压是单值的，不论沿哪条路径两结点电压值是相同的。

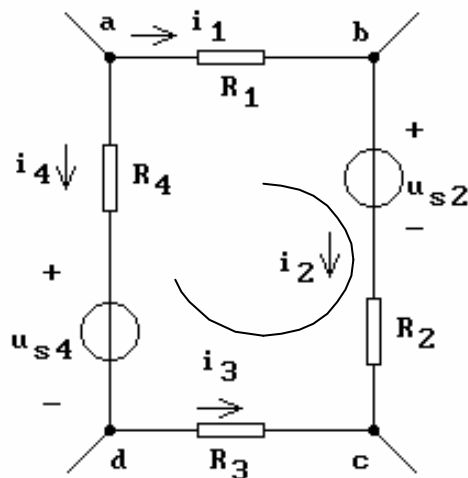
☆总结： KCL 规定了电路中任一结点处电流必须服从的约束关系，而 KVL 规定了电路中任一回路的电压必须服从的约束关系，KVL 不仅适用于闭合回路，对不闭合的回路也适用。这两个定律仅与元件的相互连接有关，而与元件的性质无关，所以称这种约束关系为“拓扑”约束。

不论元件是线性的还是非线性的，电流、电压是直流的还是交流的，只要是集总参数电路，KCL 和 KVL 总是成立的。

例： P. 8 例 1-5, 1-6 (图 1-11)

四、只含电阻、电压源电路 KVL 的另一种形式

如右下图：



按图示顺时针绕行，有： $R_1 I_1 + U_{s2} + R_2 I_2 - R_3 I_3 - U_{s4} - R_4 I_4 = 0$

即

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 = -U_{s2} + U_{s4}$$

或

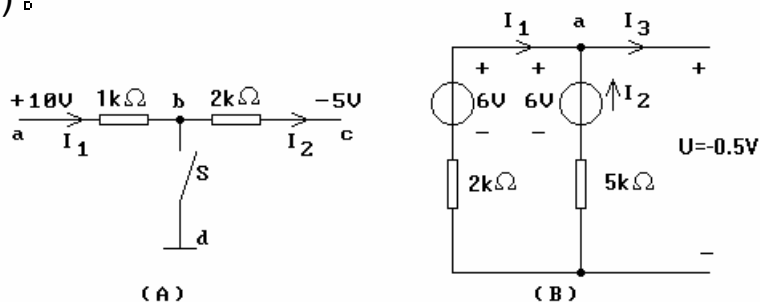
$$\sum R_k I_k = \sum U_s$$

(*)

即：沿回路绕行方向上的电阻电压降代数和等于该方向上电压源电位升的代数和。当电流参考方向与回路的绕行方向一致时 R_i 项前取“+”，反之取“-”；当绕行过电压源 u_s ，如是从“-”极性

走向“+” (电位升), 则 U_s 取“+”, 反之“-”。

例：分别求出下图 A 中 S 闭合和断开时的 U_b (A 图的说明见 P. 13 例 1-9)。



解： S 闭合时， $U_b = 0$

S 断开时， $I_1 = I_2$ ， 按回路 abcda， 有

$$(1+2)I_1 = 10 + 5 \qquad I_1 = \frac{15}{3} = 5mA$$

$$\therefore U_b = -I_1 + 10 = 5V = 2I_2 + (-5) = 5V$$

例： 求 B 图所示电路的 I_1 、 I_2 和 I_3

解： 对右侧的回路， 按式(*)有

$$5I_2 + (-0.5) = 6 \qquad \therefore I_2 = 1.3mA$$

然后对左侧回路列出： $2I_1 - 5I_2 = 6 - 6$

则： $I_1 = 3.25mA$

对结点 a， 由 KCL 有： $-I_1 - I_2 + I_3 = 0$

则： $I_3 = 4.55mA$

练习： P. 19 1-3

作业： P. 19 1-3； 1-4

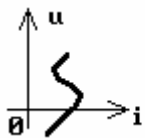
§1-4 电阻元件

从本节开始将陆续介绍讨论线性无源二端元件(如:电阻元件、电容元件和电感元件)与有源二端元件(如:电压源和电流源)以及多端元件(如:各种受控源和运算放大器)。各种元件都有精确的定义,在电路中,各元件的特性表示为它们的电压电流关系,简称伏安关系,记:VAR或VCR。

一、电阻元件的一般定义和分类

前面提及,载流导体或半导体因发热而耗能,这可抽象为电阻元件。电路是由元件连接而成的,研究电路时首先要了解各电路元件的特性,表示元件特性的数学关系称为元件约束。

一个二端元件,在任一时刻的 $u(t)$ 和 $i(t)$ 之间的关系称为元件的伏安关系,简记为VCR(Voltage-Current-Relationship)。可由 $u-i$ 平面上的曲线来表征 $u=f(i)$ 或 $i=g(u)$,该曲线称为它的伏安特性曲线。



根据其VAR的不同,电阻元件可分为:(见P. 11图1-14)

线性电阻 伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,如图(a)和图(c);

非线性电阻,如图(b)和图(d);

非时变(定常)电阻 伏安特性曲线不随时间变动,如图(a)和图(b);

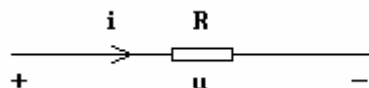
时变电阻 伏安特性曲线随时间变动,如图(c)和图(d)。

本课程主要元件**线性非时变电阻**,非线性电阻将在第十一章学习。

二、线性电阻元件与欧姆定律

1. 电阻的伏安关系(VAR)

线性非时变电阻元件是电路的一种理想元件,简称电阻,它在电路图中的图形符号为:

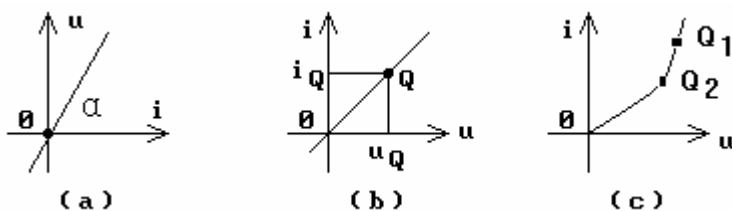


线性电阻元件的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,如图(a),即元件二端的电压与电流成正比,这个关系称为**欧姆定律**。

$u = Ri$ 。式中： R 为元件的电阻，其阻值为一常数，表示元件阻止电流通能力的参数。 R 的单位为欧(姆) Ω ，辅助单位有 $k\Omega$ 、 $M\Omega$ 等

应当注意：

- 1) 欧姆定律只适用于线性电阻；
- 2) 如果电阻 R 上的电流电压参考方向不关联,则欧姆定律公式中应冠以负号。



若已知VAR曲线如图(b)，则点 Q 的电阻 $R_Q = \frac{u_Q}{i_Q}$

又如二极管：如图(c)，不同 Q 点的阻值不同， $r \neq$ 常数

线性电阻元件也可用另一套参数 电导来表征。从物理概念看，电导是反映电阻元件导电能力强弱的参数。电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一电阻元件特性的两个电路参数。电导符号为 G ，其定义为 $G = 1/R$ ，电导的主单位为西[门子]， S

则相应得欧姆定律为 $i = Gu$

注意：当 u 、 i 取非关联方向时，上述VAR表达式应变为：

$$u = -Ru \quad i = -Gu$$

2. 电阻特例

$R = 0$ 有 i 而无 u ，即电流为有限值时， $u = 0$ ，“短路”

$R = \infty$ 有 u 而无 i ，即电压是有限值时， $i = 0$ ，“开路”

3. 线性电阻元件吸收(消耗)的功率

R 为耗能元件，无源元件(始终吸收，发热散失)，不对外提供能量。这是由于 $p_{R吸} = ui = i^2R = u(Gu) = Gu^2 \geq 0$ 。

因发热，它在 (t_0, t) 时间内产生的热量为：

$$Q = W_R = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t Gu^2 dt$$

在直流情况下： $Q = W_R = P(t - t_0) = PT = RI^2T = Gu^2T$ (*)

上两式称为焦耳定律，能量的国际单位为焦(耳)，用字母 J 表示，
1 $J = 0.24$ 卡(热量实用单位)， $1kwh(度) = 3.6 \times 10^6 J$

实际电阻的 u 、 i 及 P 都有额定值，若使用时超过额定值，轻者会使阻值变化或使其工作到非线性区，重者烧焦、烧断。

例：某碳膜电阻的额定参数：100 Ω、1W，用于DC电路，求 U_N, I_N 。

解：

$$I_N = \sqrt{\frac{P_N}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = 0.1A = 100 \text{ mA}$$
$$U_N = RI_N = \sqrt{P_N R} = 10V$$

例：有一个500 Ω电阻，流过它的直流电流为50mA，问电阻两端电压是多少？所消耗的功率是多少？每分钟产生多少热量？

解：电阻两端电压为： $U = RI = 500 \times 50 \times 10^{-3} V = 25V$

消耗的功率为： $P = UI = 25 \times 50 \times 10^{-3} W = 1.25W$

每分钟(60 s)产生的热量按式(*)为： $Q = PT = 1.25 \times 60 J = 75 J$

4. 无源元件与即时元件

无源元件 在电路中不能对外电路提供电能的元件；

即时元件 任一时刻瞬时电压 u 只决定于同一瞬时的电流 i ，而与瞬时之前的电压、电流情况无关，这样的元件不具有记忆的性质，称为即时元件或无记忆元件。

电阻有线性、非线性、时变与非时变，本书除特殊说明，均指**线性非时变电阻**。

作业：P.20 1-5；1-10

§1-5 电压源与电流源

电源：向电路提供电能，如 DC 电源，AC 电源；向电路输入电信号，故亦称为**信号源**；电源激励电路工作 \Rightarrow **激励(源)**，由此产生的电压、电流(响应)。

两种理想电源元件：电压源和电流源，均为有源元件。

一、理想电压源

1. 定义及符号

理想电压源是一个理想二端元件，在任一时刻 t ，元件的电压 $u_s(t)$ 与通过它的电流无关，保持为定值或者为某一给定的时间函数。

电压源两个特点：

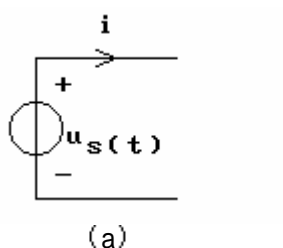
1) 它的端电压是定值 U_s ，或者是一定的时间函数 $u_s(t)$ ，不会随它外接电路的不同而改变；

2) 元件中电流的大小与外接电路有关。

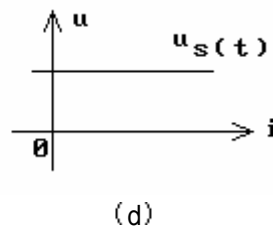
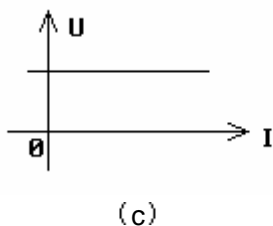
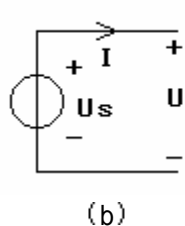
电压源在电路中的图形符号如图(a)所示，其中 u_s 为电压源电压，“+”、“-”为参考极性。直流电压源 $u_s(t) = U_s$ 为定值，可用图(b)的符号来表示，这也是电池的符号。

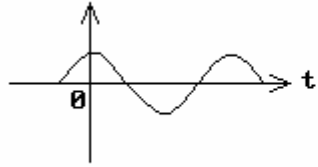
对于已知电压源，常使其电压参考极性与已知极性一致，而电压、电流的参考方向常取非关联的。

图(c)、(d)是直流电压源在整个电流变化范围内的波形曲线，即电压源的 VAR 曲线(电源外特性)。

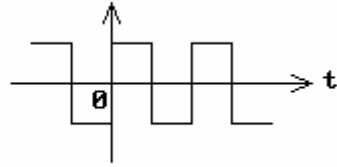


直流电压源：





正弦电压源



方波信号源

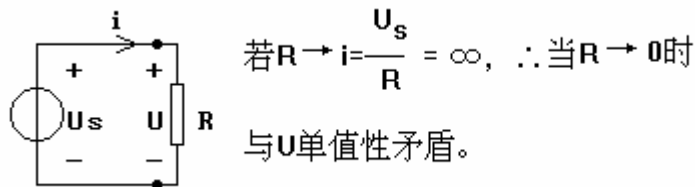
2. 性质

- 1) 元件的电压 $u(t) = u_s(t)$ 不会随外接的电路不同而改变;
- 2) 元件中的电流大小、方向取决于所接外电路;

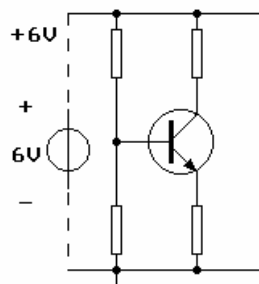
例如:

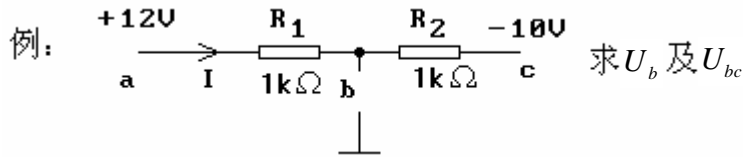


- 3) 电压源外电路不得短路;



- 4) 电子电路中常用电位表示法表示电压源, 如:





解:

$$U_{ac} = U_a - U_c = 12 - (-10) = 22V$$

$$\therefore I = \frac{U_{ac}}{R_1 + R_2} = \frac{22}{1 + 1} = 11mA$$

$$U_b = 12 - 1 \times 11 = 1V$$

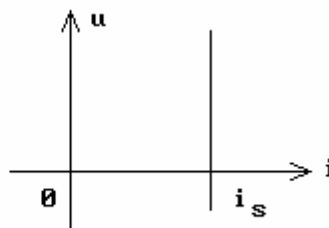
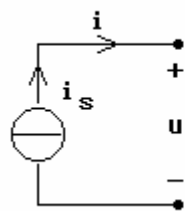
$$\therefore U_{bc} = U_b - U_c = 1 - (-10) = 11V = (R_2 I)$$

练习: P. 20 1-5

二、理想电流源

1. 定义及符号

该理想二端元件的电流 I 为与其端电压无关的定值或时间函数。电流源在电路中的符号如下图, i_s 为电流值, 箭头为参考方向。如果 $i_s = \text{常数}$, 则称为直流电流源, 它的伏安特性在 $u-i$ 平面上是一条与电压轴平行的直线。

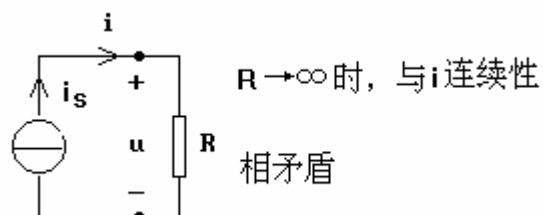


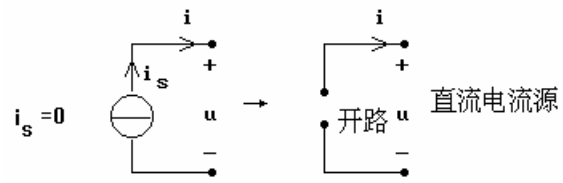
2. 性质

1) 电流 $i_s(t)$ 与外接电路无关;

2) 电压 $u(t)$ 与外接电路有关。它可以作为电源发出功率, 作为负载吸收功率, 也可以不发出或不吸收功率。电流源的端电压一般不为零。

3) $i_s(t)$ 外电路不得开路;





例： P. 14 例 1-11; 1-12
 作业： P. 20 1-6; 1-9

§1—6 受控源及运算放大器

前面讨论了几种典型的二端元件，电压源和电流源的输出量都具有确定值而与外电路无关，也称为独立源。在电路理论中，除了独立源还引进了“受控源”。

一、受控源 四端元件

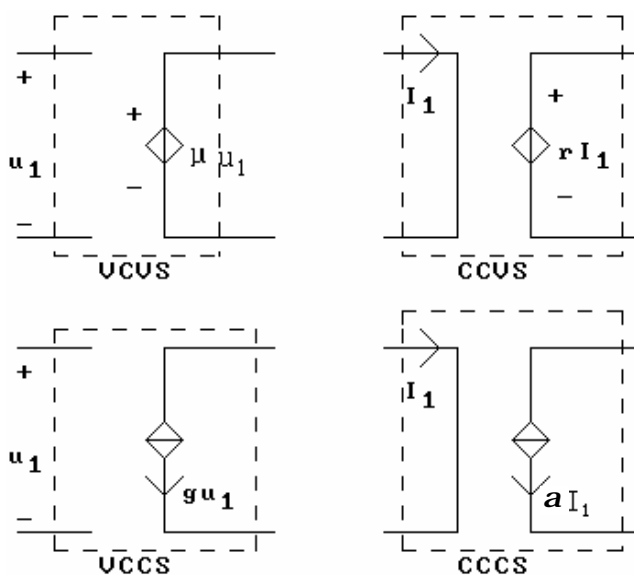
受控源是一种多端元件，受控电压源的电压和受控电流源的电流并不是定值的时间函数，而是受电路中某部分的电流或电压控制的，所以受控源又称非独立源。

受控量：电压源、电流源。

控制量：电压、电流。

通过组合可构成四种受控源：

{	电压控制电压源 (VCVS)	$u_2 = m u_1$	m	转移电压比
	电流控制电压源 (CCVS)	$u_2 = r I_1$	r	转移电阻
	电压控制电流源 (VCCS)	$I_2 = g u_1$	g	转移电导
	电流控制电流源 (CCCS)	$I_2 = a I_1$	a	转移电流比



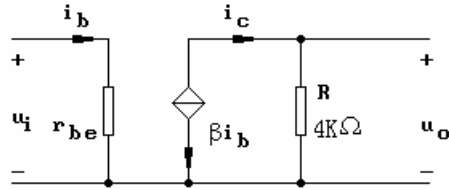
※注意事项：

- 1) 画受控源时，有时不需明显地表示出控制端口，但控制量、受控量必须明确标出；
- 2) 与独立源不同，受控源采用菱形符号表示；
- 3) 当控制系数为常数时，称为线性受控源。本书只考虑线性；
- 4) 受控源与独立源有所不同，独立源在电路中起着“激励”的作用，因为有了它才能在电路中产生电流和电压(响应)，而是受控

源则不同，它的电压或电流是受电路中其它电压和电流所控制，则控制量为 $0 \Rightarrow$ 受控源也为 0 ，受控电压源相当与短路，受控电流源相当与开路，受控源本身不起“激励”作用；

5) 受控源可吸收功率，也可发出功率。

例：图示电路表示一个晶体管放大器的简单电路模型，该晶体管的输入电阻为 $1\text{K}\Omega$ ，电流放大系数 $\beta = 50$ ，试求输出电压与输入电压的比值（称为电压的增益）



解：根据欧姆定律： $u_o = Ri_c = R(-\beta i_b)$ ，而： $u_i = r_{be}i_b$

$$\therefore \frac{u_o}{u_i} = \frac{-R\beta}{r_{be}} = \frac{-4 \times 10^3 \times 50}{10^3} = -200$$

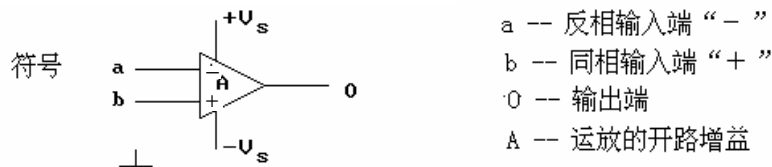
例：P. 16 例 1-13; 1-15

练习：P. 21 1-14

二、运算放大器

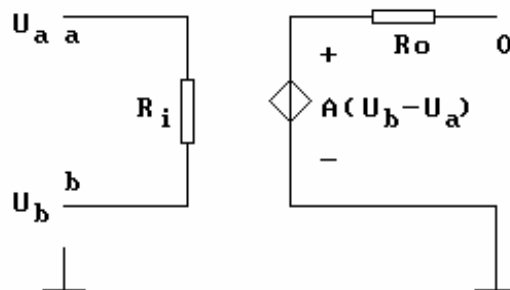
运算放大器(简称运放)是目前应用非常广泛的一种三端元件，是一种增益很高的直接耦合多级放大器，可以用来构成积分、微分、加法等运算电路。

1. 实际运放的简介



公共“接地端”， $+U_s$ 、 $-U_s$ 为电源端。

若令运放的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ，则其模型(VCVS)可为：



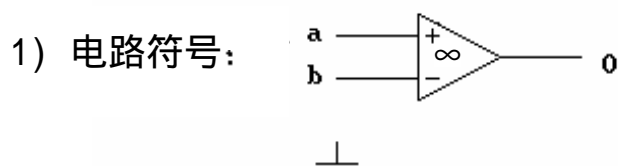
有：

$$U_o = A(U_b - U_a) = AU_{ba}$$

实际运放的 R_i 较高 ($\geq 1M\Omega$)， A 较大 ($10^4 \sim 10^7$)， R_o 较小 (100Ω 左右)。

2. 理想运算放大器 (电路分析中)

即 $\begin{cases} R_i \rightarrow \infty \\ R_o \rightarrow 0 \\ A \rightarrow \infty \end{cases}$ 的电压放大器



2) 性质:

a) “虚断(路)” 性质

$\because R_i \rightarrow \infty \quad \therefore$ 输入端两引线均无电流，相当于断路，但内部又不是真正断路。

b) “虚短(路)” 性质

$\because A \rightarrow \infty \quad U_o$ 为有限值(受电源限制)，而 $U_o = A(U_b - U_a)$

$$\therefore U_b - U_a = 0 \quad \rightarrow \quad U_a = U_b$$

即强制 a、b 两点等电位，但又无电流 \rightarrow 虚短路。

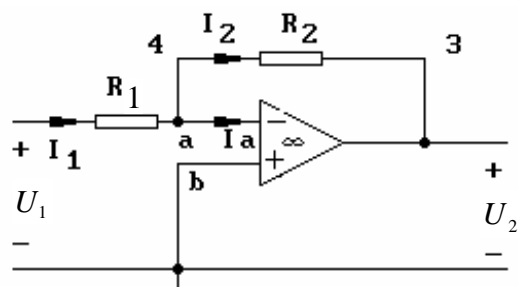
c) $R_o = 0 \quad \therefore U_o$ 不受所接负载的影响。

3. 含理想运放电路的分析

1) 基本方法: 利用“虚断”、“虚短”及 KCL、KVL 分析

2) 常用方法 含运放的结点法

例: 图示含理想运放电路中， $U_1 = 12V$ ， $I_1 = 3mA$ ， $R_2 = 3K\Omega$ ，求: R_1 、 U_{43} 及 U_2



解: 理想运放, 虚短 $U_a = U_b = 0$

$\therefore R_1$ 两端电压为 U_1

$$\therefore R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{12}{3 \times 10^{-3}} = 4 \text{K}\Omega$$

理想运放: $I_a = 0$ 由 KCL 得: $I_2 = I_1 = 3 \text{mA}$

$$\therefore U_{43} = R_2 I_2 = 3 \times 10^3 \times 3 \times 10^{-3} = 9 \text{V}$$

由 KVL, 得

$$U_2 = U_{34} = -U_{43} = -9 \text{V}$$

例: 图中所示电路为减法运算电路, 试证明

$$u_0 = \frac{R_2}{R_1} (u_{s2} - u_{s1})$$

证明: 设运算放大器的同相输入端电位为 u_+ , 设反相输入端的电位为 u_- 。根据理想运放的两个特点, 即

$$u_+ = u_- = u$$

$$i_+ = i_- = 0$$

由 KCL, 得

$$\frac{u_{s1} - u}{R_1} = \frac{u - u_0}{R_2}$$

$$\frac{u_{s2} - u}{R_1} = \frac{u}{R_2}$$

联立求解, 消去 u , 得 $u_0 = \frac{R_2}{R_1} (u_{s2} - u_{s1})$, 证毕。

练习: P. 18 例 1-17 (电压跟随器)

作业: P. 21 1-11; 1-13; 1-15; 1-16

