

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

计算机应用专业系列教材

计算机电路基础(1)

主编 刘宝芹 副主编 沈雅芬

中央广播电视大学出版社

11331
L71

计算机应用专业系列教材

计算机电路基础(1)

主 编 刘宝琴

副主编 沈雅芬



A0932381

中央广播电视大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机电路基础.1/刘宝琴主编.—北京:中央广播电视大学出版社,2000.8
计算机应用专业系列教材

ISBN 7-304-01877-1

I.计... II.刘... III.电子计算机-电路-电视大学-教材 IV.TP331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 69205 号

版权所有,翻印必究。

计算机应用专业系列教材

计算机电路基础(1)

主 编 刘宝琴

副主编 沈雅芬

出版·发行/中央广播电视大学出版社

经销/新华书店北京发行所

印刷/北京市德美印刷厂

开本/787×1092 1/16 印张/18.5 字数/419 千字

版本/2000年7月第1版 2000年8月第1次印刷

印数/0001—38000

社址/北京市复兴门内大街160号 邮编/100031

电话/66419791 68519502

(本书如有缺页或倒装,本社负责退换)

书号: ISBN 7-304-01877-1/TP·121

定价: 25.00 元

第一章 电路分析的基础知识

〔学习目标〕

通过本章学习，你应达到：

1. 掌握电流的参考方向、电压的参考极性；关联参考方向等概念。
2. 掌握电阻、电容、电感的伏安关系式。
3. 掌握电压源、电流源的伏安关系式。
4. 掌握列写 KCL、KVL 的方法。
5. 掌握用等效变换，串、并联和分压、分流公式计算简单直流电路的方法。
6. 熟悉戴维南定理及叠加定理。
7. 熟悉简单 RC 电路的过渡过程。
8. 了解受控源的四种形式。

〔内容提要〕

本章介绍电路分析的基础知识，即电路的组成及电路分析的概念、电路中常用的基本物理量、电路的基本元件、基尔霍夫定律、等效电路的概念等，着重讨论对简单直流电路的分析方法；并介绍了戴维南定理、叠加定理及简单 RC 电路的过渡过程。

1.1 电路的组成及电路分析的概念

电路是由若干电路元件按一定的方式相互连接而成的联结体，其主要作用是产生或处理信号及功率。电路中一般所涉及的元件有：电压源、电流源、受控源、电阻、电感和电容等。

电路分析与设计是电路理论的两个组成部分。**电路分析**是在已知电路结构及参数的条件下，求解电路中待求电量的过程。例如，求解部分或全部电路元件上的电流、电压及所消耗的功率等。**电路设计**是在设定输入信号或功率（能量）的条件下，欲在输出端口产生给定的信号或功率（能量），而求解电路应有的结构及参数的过程。对于一个实际的电路，电路分析的结果具有惟一性，而电路设计的答案一般具有多样性。

❓ 电路分析与电路设计各有什么特点?

下面对电路的组成及电路分析的概念做初步介绍,使初学者有一个感性认识。

图 1.1.1 是一个完整的直流电路,构成该电路的元件有:

直流电压源 U_s , 注意它有大小和极性。在图中, U_s 为 26 伏特 (V), 并表示出其 +、- 极性。

直流电流源 I_s , 具有大小和方向。在图中, I_s 的大小为 2 安培 (A), 其流动方向如箭头所示。

图 1.1.1 中还含有六个电阻元件。

将电路元件按图中所给出的连接方式相互连接后,用电路分析的方法可以求出电路中待求的电量。例如,可以求出由 E 点流入 D 点的电流 I 的数值为 0.73 安培 (A); 电阻 12 欧姆 (Ω) 上消耗的功率为 $P = 12 \times (0.73)^2 = 6.4$ 瓦特 (W) 等。可以看出,电路分析的目的是在已知电路结构 (电路连接关系) 和电路参数 (电路元件的性质及数值等) 的条件下求解电路中的待求电量。

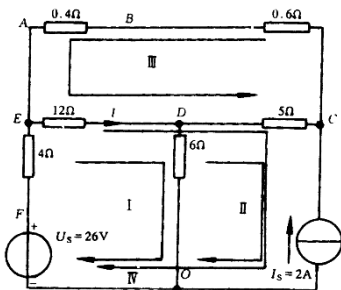


图 1.1.1 电路的组成

为了对电路结构做进一步描述,下面介绍支路、节点和回路等有关概念。

支路: 每一个二端元件构成一条支路。有时也将流过同一个电流的几个“串联”元件的组合称为一条支路。例如在图 1.1.1 中,将 0.4Ω 、 0.6Ω 的“串联组合”称为支路 EC 或支路 CE。注意:支路 ED 与 DC 的组合并不构成支路 EC,原因是 D 点与另一个 6Ω 电阻相连接,破坏了 12Ω 与 5Ω 两支路的串联。

节点: 电路中元件支路的连接点。有时也把三个或三个以上支路的连接点称为节点,例如图 1.1.1 电路中的 E 点、D 点、C 点和 O 点。注意,在电路图中, A 和 E 实际上是相同的节点。

回路: 电路中由若干条支路组成的闭合路径。在图 1.1.1 中有许多回路,例如回路 I:

EDOFE 由 12Ω 、 6Ω 、 I_1 及 4Ω 等元件构成；回路 II：DCOD，由 5Ω 、 I_2 及 6Ω 等元件构成；回路 III：EDCBAE，由 12Ω 、 5Ω 、 0.6Ω 及 0.4Ω 等元件构成和回路 IV：EDCOFE，由 12Ω 、 5Ω 、 I_3 、 U_3 及 4Ω 等元件构成。为了分析方便，对每个回路常设定一个方向：沿顺时针或沿逆时针绕行。

在电路中，当几条支路相互连接在一起时，习惯上对连接的节点打“·”表示，例如 E、D、C 和 O 等节点。在电路图中，节点 O 被指定为电路中惟一的一个参考节点（见下节）

1.2 电路中的主要物理量及参考方向

1.2.1 电流及其参考方向

电流是电路中一个具有大小和方向的基本物理量，其定义为在单位时间内通过导体截面的电通量或电荷量。电流的大小即电流的强度，简称电流，其单位为安培（A）。如果电流不随时间而变化，例如对恒定的电流（直流），用大写字母 I 表示。如果电流随时间变化，或仅为了表达一般的情况，则用小写字母 i 表示，称为电流的瞬时值。有时为了表达的需要，也用符号 $i(t)$ 表示电流，其意义一般与 i 相同。

电流是流动的，所以具有流动的方向。电流的流动方向用一个箭头来表示。在物理学中，规定电流的方向是正电荷运动的方向，即电流的**真实方向**。在图 1.2.1 中，（图中方框表示电路中的任何一种元件，这使得被讨论的对象更具有—般性），由于真实电流方向是从 a 点流向 b 点，还是由 b 点流向 a 点暂时还不能被确定，这时 i 被任意设定了一个方向，即从 a 点流向 b 点，如图 1.2.1 所示；当然也可以反过来，假设 i 由 b 点流向 a 点，将箭头指向也画为由 b 点指向 a 点。



图 1.2.1 电流参考方向

对任意假定的电流方向称为电流的**参考方向**。

设定电流的参考方向是为了便于分析电路，对于图 1.2.1 电路而言，若求出（或已知） $i = 2A$ ，则说明电流的真实方向与参考方向相同， $2A$ 电流由 a 点流向 b 点。若 $i = -2A$ ，则说明电流的真实方向与其参考方向相反， $2A$ 电流由 b 点流向 a 点，同时表示电流真实方向的箭头也应该由 b 点指向 a 点。在一般情况下，电路图中所标出的电流方向的箭头是该电流的参考方向，在同时考虑该电流的正、负值后，才能确定该电流的真实方向。

在进行电路分析时，电流 i 的参考方向被任意地假设是不会影响计算结果的正确性的。



如何判别一个电流的参考方向？与真实方向是否相同？

图 1.2.2 给出电路中经常遇到的几种形式的电流波形图。

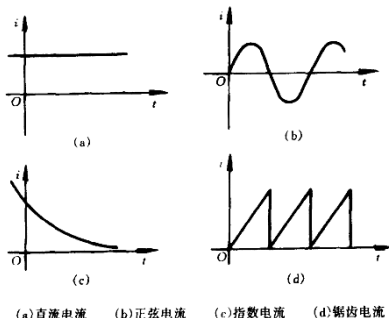


图 1.2.2 常见的电流波形图

1.2.2 电压及参考极性

电压是电路中一个具有大小和方向（极性）的重要物理量。电压又叫做电压差或电压降，与电路中两点（例如 A 、 B ）有关。与电流的表示方式相似，用大写字母 U 表示恒定的电压（直流电压），用小写字母 u 表示电压的瞬时值。

在图 1.2.3 (a) 中电路元件上的电压表示为 u （ u 也常被表达为 $u(t)$ 、 u_{AB} 或 $u_{AB}(t)$ 等）。



图 1.2.3 电压的极性

电压 u_{AB} 的大小，定义为：在电路中，单位正电荷经任意路径由 A 点运动到 B 点电场力所做的功。电压的单位为伏特 (V)，做功的单位为焦耳 (J)。电压的方向称为电压极性，其定义为：如果该电场力做功的数值为正，则 A 、 B 两点之间的电压为正，即 $u_{AB} > 0$ 。可以看出，电压与电路中的两个点有关。如果把电路中的某点，例如 B 点选作为参考点，则 A 点对于 B 点电压，又叫做 A 点的电位，用 u_A 表示。这样 B 点电位被指定为零电压，即 $u_B = 0$ 。于是有 $u_{AB} = u_A - u_B = u_A$ 。如果将 A 点指定为参考点，则有 $u_A = 0$ ， $u_{AB} = u_A - u_B = -u_B$ 。

电路中 A 、 B 两点的电压极性常用一对 “+” “-” 号来标注，如图 1.2.3 (a) 所示，

也可以用一个箭头来表示,如图 1.2.3 (b)。但应注意,标识电压极性的箭头与标识电流方向的箭头的含义是不同的,应加以区别。将 A 点标为“+”、 B 点标为“-”,或反过来标,都是允许的。电路中对 A 、 B 两点任意标定的电压极性称为电压的参考极性。

电压的参考极性用于分析电路。当对电路分析之后,如果得到 $u_{AB} > 0$,例如 $u_{AB} = 2\text{V}$,则说明电压的真实极性与参考极性相一致。即 A 点极性为“+”而 B 点极性为“-”,或电位 $u_A > u_B$;如果有电压 $u_{AB} < 0$,则说明参考极性与真实极性相反,即真实极性为 A 点标“-”、 B 点标“+”,且 $u_A < u_B$ 。

应注意电压符号的下标的含义:当 $u_{AB} = 2\text{V}$ 时,则有 $u_{BA} = -2\text{V}$ 。由于电压为电场力所做的功的值,且与电路中的路径无关,故对于电路中 A 、 B 、 C 三点之间的电压而言,关系式 $u_{AB} + u_{BC} = u_{AC}$ 成立。



如何判别一个电压的参考极性,与真实极性是否相同?

例 1.2.1 在图 1.2.4 中,方框泛指电路中的一般元件,试分别指出图中各电压的真实极性。

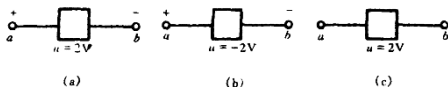


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

解 各电压真实极性为:

- (a) a 点为电压的高端,即 $u_a > u_b$; 所标参考极性与真实极性一致。
- (b) a 点为电压的低端,即 $u_a < u_b$; 所标参考极性与真实极性相反。
- (c) 不能确定,因为图中没有给出参考极性。

在电路分析中,也常遇到各种形式的电压波形,这一点与电流类似,请参考图 1.2.2 (将电流 $i(t)$ 换成电压 $u(t)$)。

应该注意:电流 i 与电压 u 是两个相互独立的物理量。电路中的某个元件,其上被施加电压,却不一定有电流流过,例如不接负载的电压源(理想的开路)等;但是,如果元件中有电流流过,其上一般会产电压(理想导线除外)。

将电流与电压联系起来进行考虑,可以看出它们之间的共同点:电流及电压都是同时具有大小和方向的基本物理量。在考虑方向时都应注意参考方向及真实方向。这两个方向是否一致,是由 i 、 u 的正负值所决定的。

当电路中某元件上的电压的参考极性与电流的参考方向相一致时,称为关联参考方向,反之称为非关联参考方向。例如,在图 1.2.5 电路中,取关联参考方向的情形有图 (a)、(c);而取非关联参考方向的情形有图 (b)、(d)。

当电路中某个元件两端有电压存在,且元件中有电流通过时,该元件就会吸收或产生功

率，这正是下面要讨论的内容。

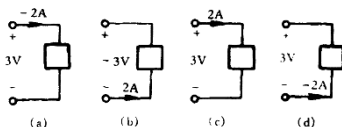


图 1.2.5 关联与非关联参考方向

1.2.3 功率

功率定义为单位时间内，电路元件上能量的变化量，是具有大小及正负值的物理量。功率的单位是瓦特（W）。

在电路分析中，通常用电流 i 及电压 u 的乘积来描述功率。

在图 1.2.6 电路中对于 (a)、(b) 两种情形而言，由于 u 、 i 取关联参考方向，元件上吸收的功率被定义为：

$$p = u \cdot i \quad (1.2.1)$$

例如，对于 $u = 3V$ ， $i = 5A$ ，则该元件上吸收（消耗）的功率为 $p = 3 \times 5 = 15W$ 。由于本例是直流情况，故也可以写成 $P = U \cdot I = 3 \times 5 = 15W$ 。注意：电流、电压值本身有正、负，例如，若 $u = -3V$ ， $i = 5A$ ，则有 $p = u \cdot i = (-3) \times 5 = -15W$ 。这表明计算结果与“吸收”（消耗）功率的原假设相反，即该元件是处于“产生”（放出）功率状态。

对于图 1.2.6 (c)、(d) 电路情况而言，由于 u 、 i 取非关联参考方向，所以该元件上吸收的功率被定义为：

$$p = -u \cdot i \quad (1.2.2)$$

例如，对于 $u = -2V$ ， $i = -3A$ ，则有

$$p = -u \cdot i = -(-2) \times (-3) = -6W \text{ (产生)}$$

若 $u = 5V$ ， $i = -3A$ ，则有

$$p = -u \cdot i = -(5) \times (-3) = 15W \text{ (吸收)}$$

当电路中某元件吸收功率时，其所消耗的功率由电路中其他部分元件所提供。消耗功率的元件可能会发热、发光等。当某元件产生功率时，该元件向电路中其他部分元件提供能量。

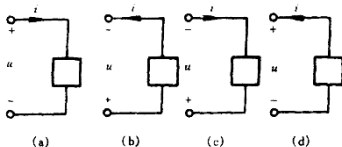


图 1.2.6 功率的计算

❓ 计算功率时应考虑电压、电流的什么方向?

例 1.2.2 在图 1.2.7 电路中, 左边的电路元件是一个电池, 右边的电路元件 R 是一个电阻。求元件 R 和电池上分别消耗的功率。

解 由稍后介绍的基尔霍夫电压定理知, 电压 $U = U = 3V$ 。

对于电池元件, 由于 U 、 I 取非关联参考方向, 故按公式 (1.2.2), 计算其吸收的功率为

$$P = -U \cdot I = -(3) \times (1) = -3W \text{ (产生)}$$

对于电阻元件而言, 由于 U 、 I 取关联参考方向, 故按公式 (1.2.1) 计算其吸收的功率为

$$P = U \cdot I = 3 \times 1 = 3W \text{ (吸收)}$$

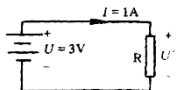


图 1.2.7 例 1.2.2 电路

在一个电路中, 一些元件上产生的功率一定消耗在该电路的其他一些元件上, 这就是电路中的**功率平衡原理**。

在本章电路分析内容中, 强调计算功率的目的在于搞清电流、电压的各种方向以及如何正确计算电流、电压值。

能量也是电路中常使用的一个物理量。是功率与时间的乘积。能量用英文小写或大写字母 w 或 W 表示。能量的单位为焦耳 (J)。有时也用千瓦·小时 (度) 表示。例如, 某电炉的功率为 $800W$, 那么 3 小时内消耗的电能为 $(800/1000) \times 3 = 2.4$ 度。

以上所涉及的电压、电流、功率及能量的单位都是**国际单位制**的单位, 分别为伏特 (V)、安培 (A)、瓦特 (W) 及焦耳 (J)。在实际应用中, 还有辅助单位。辅助单位的部分常用词头如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 部分常用的国际制词头

词 头 名 称		符 号	因 数
英 文	中 文		
pico	皮	p	10^{-12}
micro	微	μ	10^{-6}
milli	毫	m	10^{-3}
kilo	千	k	10^3
mega	兆	M	10^6

举例: 1 千伏 (kV) $= 1 \times 10^3$ 伏 (V); 2 毫安 (mA) $= 2 \times 10^{-3}$ 安 (A);

3 兆瓦 (MW) $= 3 \times 10^6$ 瓦 (W)

1.3 电路的基本元件

本节介绍电路中常见的六种元件,即电阻(器) R 、电容(器) C 、电感(器) L 、电压源 U_s 、电流源 I_s 及受控源。在学习中,应特别注意这些常用电路元件的伏安关系(VAR),即流过这些元件的电流与其上电压在关联参考方向下的相互关系。在电路分析中,将使用元件的VAR表达式进行分析和计算。

1.3.1 电阻元件

电阻是电阻元件(电阻器)的简称,是电路中最常见的元件之一。常见的电阻类型有炭膜电阻、金属膜电阻和线绕电阻等。

电阻在电路中的符号是 R (有时也被写成小写的 r),电阻值的单位是欧姆(Ω)

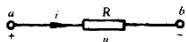


图 1.3.1 电阻元件

图 1.3.1 电路中的电阻元件,其伏安关系为:

$$u = R \cdot i \quad (1.3.1)$$

若 u, i 取非关联参考方向,则有

$$u = -R \cdot i \quad (1.3.2)$$

在电路分析中,有时也常用电阻的倒数,即电导 G 来表示电阻元件:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.3)$$

电导的单位是西门子(S)。由于 $G = \frac{1}{R}$,所以有 $i = G \cdot u$ 。

例 1.3.1 在图 1.3.1 电路中,若已知 $u = 3V$, $i = 1.5A$,求 R 和 G 值。

解

$$R = \frac{u}{i} = \frac{3}{1.5} = 2 \Omega, \quad G = \frac{1}{R} = 0.5 S$$

在对电路进行分析时,有时从 u, i 的伏安关系式计算出的 R 数值等于零(当 $u_R = 0$ 而 $i_R \neq 0$)。此时该电阻元件实际上是一根理想的导线。

电阻 R 上消耗的功率为

$$p = u \cdot i = (R \cdot i) \cdot i = R \cdot i^2 = i^2 / G \quad (1.3.4)$$

或

$$p = u \cdot i = u \cdot (u / R) = u^2 / R = u^2 \cdot G \quad (1.3.5)$$

注意,只要 $R \geq 0$,则有 $p \geq 0$ 。即在一般情况下,电阻总是消耗(吸收)功率,而与其上电流的方向或电压的极性无关。

例 1.3.2 在图 1.3.1 所示电路中,已知电阻 R 吸收功率为 $3W$, $i = -3A$ 。求电压 u 及 R 值。

解 由于 u, i 取关联参考方向 (否则应使用公式 $p = -u \cdot i$) , 有

$$p = u \cdot i = u \cdot (-3) = 3\text{W},$$

$u = -1\text{V}$ (u 的真实极性与参考极性相反)。

又因 $p = R \cdot i^2$, 故 $R = p/i^2 = 3/9 = 0.33\Omega$

注意, 在上例计算中, 由于电流、电压都是恒定的直流源, 也可以用大写字母 I, U 及 P 进行表达和计算。

对于接在电路某 a, b 两端的电阻元件 R 而言, 当 $R = 0$ 时, 称 a, b 两点短路; 当 $R \rightarrow \infty$ 时, 称 a, b 两点开路。

1.3.2 电容元件

电容是电容元件 (电容器) 的简称, 以储存电荷为其特征, 因此具有储存电场能量的功能。常见的电容类型有电解电容、陶瓷电容、铝电容等。电容器主要用于交流电路及脉冲电路中, 在直流电路中电容器一般起隔断直流电流的作用。

电容的符号是大写字母 C , 其电容量与电容器存储的电荷 q 以及电容器两端的电压 u 有关, 即 $C = \frac{q}{u}$ 。电容量的单位为法拉 (F), 通常实际使用的单位有微法 μF ($1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$)、纳法 nF ($1\text{nF} = 10^{-9}\text{F}$) 和皮法 pF ($1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$) 等。

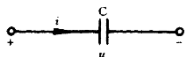


图 1.3.2 电容元件

图 1.3.2 所示的电容元件 C , u, i 取关联参考方向, 其伏安关系为

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (1.3.6)$$

$$\text{或} \quad u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1.3.7)$$

其中, $u(t_0)$ 表示在计时起点 $t = t_0$ 时刻电容 C 上的初始电压值。如果初始电容上没有被充电, 则 $u(t_0) = 0\text{V}$ 。

对于电容, 应注意以下几个问题:

(1) 从公式 $i = C \frac{du}{dt}$ (有时也常被写成 $i_c = C \frac{du_c}{dt}$) 看出, 只有当电容上的电压发生变化时, 即 $\frac{du}{dt} \neq 0$, 电容上才有电流流动 (即 $i \neq 0$); 剧烈变化的电压 (即 $\frac{du}{dt}$ 值很大), 可能会引起很大的电流。对于直流电路而言, 由于 $\frac{du}{dt} = \frac{dU}{dt} = 0$ (U 为恒定常数), 所以 $i = I = 0$, 即电容在直流电路中其两端有电压, 但无电流通过, 起隔断直流电流的作用, 简称隔直作用。进一步还可以看出, 电容上吸收的直流功率为

$$P = U \cdot I = U \cdot 0 = 0 \text{ W} \quad (1.3.8)$$

即在电容上不消耗直流电源的功率。

❓ 为何在电容上不消耗功率？

(2) 从公式 (1.3.7) 看出, 若取 $t = t_0 + \Delta t$, 则有

$$\begin{aligned} u(t_0 + \Delta t) &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} i(\tau) d\tau \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} I [(t_0 + \Delta t) - t_0] \end{aligned}$$

上式假设在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 短时间内电流 i 用其近似值 I 取代, 并假定 I 是有限值 ($I \neq \infty$)。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 上式等号右边第二项为零。其意义是: 电容 C 上的电压波形 $u(t)$ 一般不会出现不连续的跳跃点, 即电容上的电压一般不会出现跳变。

例 1.3.3 图 1.3.3 电路 (a) 所示的 $2\mu\text{F}$ 电容, 其上的电压波形如图 1.3.3 (b) 所示。试求出其电流表达式及给出电流的波形图。

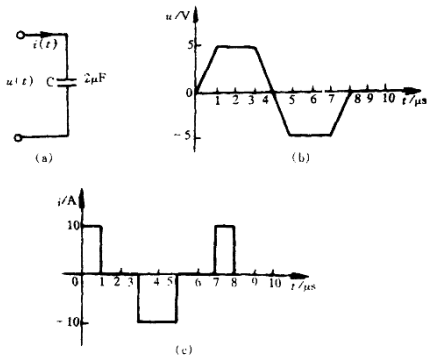


图 1.3.3 例 1.3.3 的电路

解 从图 1.3.3 (b) 波形, 得到 $u(t)$ 的表达式如下:

$$\begin{aligned} u(t) &= 5 \times 10^6 t & 0 \leq t \leq 10^{-6} \text{ s} \\ u(t) &= 5 & 10^{-6} \leq t \leq 3 \times 10^{-6} \text{ s} \\ u(t) &= 20 - 5 \times 10^6 t & 3 \times 10^{-6} \leq t \leq 5 \times 10^{-6} \text{ s} \\ u(t) &= -5 & 5 \times 10^{-6} \leq t \leq 7 \times 10^{-6} \text{ s} \\ u(t) &= -40 + 5 \times 10^6 t & 7 \times 10^{-6} \leq t \leq 8 \times 10^{-6} \text{ s} \end{aligned}$$

对 $u(t)$ 的表达式应用公式 $i(t) = C \frac{du}{dt}$, 得到

$$\begin{array}{ll} i(t) = 10 & 0 \leq t \leq 10^{-6} \text{ s} \\ i(t) = 0 & 10^{-6} \leq t \leq 3 \times 10^{-6} \text{ s} \\ i(t) = -10 & 3 \times 10^{-6} \leq t \leq 5 \times 10^{-6} \text{ s} \\ i(t) = 0 & 5 \times 10^{-6} \leq t \leq 7 \times 10^{-6} \text{ s} \\ i(t) = 10 & 7 \times 10^{-6} \leq t \leq 8 \times 10^{-6} \text{ s} \end{array}$$

$i(t)$ 的波形图如图 1.3.3 (c) 所示。

(3) 实际应用中, 在选择电容器时应注意标称电压一定要高于其实际工作电压, 并应留有余量。对于有标出正、负极性的电容 (例如电解电容), 其正极应接电路中的高电位点, 负极接低电位点。

1.3.3 电感元件

电感元件是实际电感器的理想化模型, 它具有储存磁场能量的功能。实际中常遇到的电感器是由导线绕制成的线圈, 常用于交流电路中。电感的符号是以大写字母 L 表示, 其电感量与线圈中通过的电流及产生的感应电动势有关。电感量的单位为亨利 (H), 常用的单位有毫亨 mH ($1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$) 和微亨 μH ($1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$) 等。

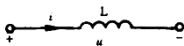


图 1.3.4 电感元件

图 1.3.4 所示的电感元件, 其 u 、 i 取关联参考方向, L 两端的伏安关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.9)$$

$$\text{或} \quad i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (1.3.10)$$

其中, $i(t_0)$ 表示在计时起始时刻电感上的初始电流值。

对于电感, 应注意以下几个问题:

(1) 从公式 $u = L \frac{di}{dt}$ (有时常被写成 $u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$) 可以看出, 只有电感上的电流发生变化时, 即 $\frac{di}{dt} \neq 0$, 电感上才能产生电压, 使 $u \neq 0$; 剧烈变化的电流 (即 $\frac{di}{dt}$ 值很大), 可能会引起很大的电压。对于直流电路而言, 由于 $\frac{di}{dt} = \frac{dI}{dt} = 0$ (I 为恒定常数), 所以 $u = 0$, 即电感在直流电路中相当于一根导线。进而还可以看出, 电感上吸收的直流功率为

$$P = U \cdot I = 0 \times I = 0 \text{ W} \quad (1.3.11)$$

即在电感上不消耗直流电源的功率。

❓ 为何在电感上不消耗功率?

(2) 从公式 (1.3.10) 可以看出, 若取 $t = t_0 + \Delta t$, 则有

$$\begin{aligned} i(t + t_0) &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u(\tau) d\tau \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \cdot U [(t_0 + \Delta t) - t_0] \end{aligned}$$

上式假设在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 短时间内电压 u 用其近似值 U 取代, 并假设 U 是有限值, 即 $U \neq \infty$ 。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 上式等号右边的第二项为零。其意义是: 电感 L 上的电流波形 $i(t)$ 一般不会出现不连续的跳跃点, 即电感上的电流一般不会跳变。

*** 例 1.3.4** 对于例 1.3.3 中的电路, 若将其中电容 C 换成电感 L , 将 $2\mu F$ 电容换成 $2\mu H$ 电感, 则图 1.3.3 (b)、(c) 所示电容 $u(t)$, $i(t)$ 的波形将分别表示为电感 L 上 $i(t)$ 和 $u(t)$ 的波形。

1.3.4 电 压 源

电压源是实际电源的一种抽象。本节内容仅涉及直流电压源 (恒压源), 用符号 U_s 表示。电压源模型如图 1.3.5 所示。

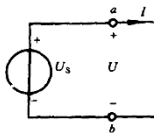


图 1.3.5 电压源模型

对于图 1.3.5 所示的电压源模型, 其伏安关系为:

$U_s =$ 某恒定值

I 由 U_s 及外电路共同决定

其中“外电路”是指图 1.3.5 中 a, b 两端点右边的其它电路部分。

由定义式知, 电压源两端的电压 U 是恒定的, 即 $U = U_s$, 而与流出电压源的电流 I 无关。例如, 设 $U_s = 5V$, 将 $R = 5\Omega$ 电阻连接于 a, b 两端, 则有 $I = 1A$; 若将 R 改为 10Ω , 则有 $I = U/R = 0.5A$ 。

对于电压源, 应注意以下两点:

(1) 流过电压源电流的真实方向不一定如图 1.3.5 所示, 也可以流入电压源, 即 I 为负值, 真实电流由高电位点 a 经 U_s 流入低电位 b 点。电压源消耗的功率为 $P = -U_s \cdot I$ (公式前的负号是由于 U_s, I 取非关联参考方向), 若计算得 $P > 0$, 则表明 U_s 不是处于产生功率

状态而是处于吸收功率状态。例如 U_s 是一个正在被充电的电池。

(2) 当 $U_s = 0$ 时, 图 1.3.5 中的 a, b 两点间相当于短路, 这一点可以由电压源圆圈中的一段短的“短路线”形象地加以说明。

1.3.5 电 流 源

电流源也是实际电源的一种抽象。本节仅涉及直流电流源(恒流源), 用符号 I_s 表示, 其模型如图 1.3.6 所示。

对于图 1.3.6 所示的电流源模型, 其伏安关系为:

$I_s = \text{某恒定值}$

U 由 I_s 及外电路共同决定

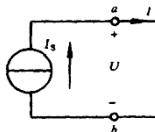


图 1.3.6 电流源模型

由定义可知, 电流源流出的电流 I 是恒定的, 即 $I = I_s$, 而与其两端的电压 U 无关。例如设 $I_s = 2\text{A}$, 若将 3Ω 电阻连接于 a, b 两端, 则有 $U = R \cdot I = 6\text{V}$; 若将 R 改为 8Ω , 则有 $U = 8 \times 2 = 16\text{V}$ 。

对于电流源, 也应注意两点:

(1) 图 1.3.6 中的电流源所吸收的功率为 $P = -U \cdot I_s$, 若 $U = 16\text{V}$, $I_s = 2\text{A}$, 则有 $P = -32\text{W}$, 表明 I_s 提供 32 瓦功率给外电路的其他元件。若 $U = -16\text{V}$, $I_s = 2\text{A}$, 则有 $P = -U I_s = -(-16) \times (2) = +32\text{W}$, 表明电流源 I_s 处于吸收功率状态, 其所吸收的 32 瓦功率由外电路来提供。

(2) 当 $I_s = 0$ 时, 图 1.3.6 中 a, b 两点间相当于开路, 这一点可以由电流源圆圈中一个短横的“阻断电流流过的闸”给予形象地说明。

以上讨论的电压源或电流源, 实际上是指独立电源以及理想电源。非独立的电源, 例如受控源和含内阻的非理想电源, 在稍后加以介绍。此外, 对以上所讨论的电路元件 R, L, C 的元件模型, 都做了如下的假设:

(1) 假设这些元件是“理想模型”。理想模型是对实际模型的一种抽象简化, 实际模型远较理想模型复杂得多。例如, 对于电阻器而言, 低阻值的金属膜电阻在频率超过 100 千赫兹 (kHz) 以后, 其等效模型通常为 R 与一个等效电感 L_s 相“串联”的组合, 如图 1.3.7 (a) 所示; 而对于高阻值金属膜电阻而言, 例如 $R \approx 100\text{k}\Omega$, 在频率高于几十兆赫兹时, 其等效模型通常是 R 与一个等效电容 C_p 相“并联”的组合, 如图 1.3.7 (b) 所示。(“串联”、“并联”等概念在稍后加以介绍)。

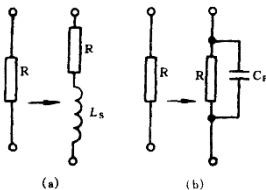


图 1.3.7 实际的电阻模型

一个实际的电压源是由理想电压源 U_s 与一个内阻 R_s 串联构成的, 如图 1.3.8 (a) 所示, 当有电流 I 流向外电路时, 实际电压源端口的电压就会有所下降, 即 $U = U_s - IR_s < U_s$ 。

一个实际的电流源是由理想电流源 I_s 与一个内阻 R_s 并联构成的, 如图 1.3.8 (b) 所示, 当有电流 I 流向外电路时, 实际电流源提供的电流将有所减少, 即 $I = I_s - U/R_s < I_s$ 。

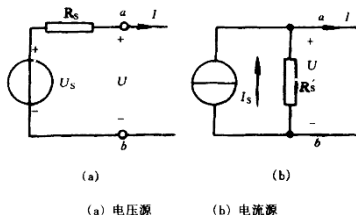


图 1.3.8 实际电源模型

(2) 以上所讨论的电阻 R 、电容 C 和电感 L 都被假设成是“线性和非时变”的。这在一般情况下可以被满足。对“线性”概念可以这样大致地理解: 当元件上的电压 (或电流) 数值上增加多少倍时, 其伏安关系中相应的电流 (或电压) 也增加同样的倍数。例如, 对电容 C 而言, 若其两端电压 $u(t) = 3\sin 15t$ V, 则由 $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$, 得 $i(t) = 3 \times 15C \cos 15t$ A; 若 $u(t)$ 变成 $u'(t) = 6\sin 15t$ V, 则相应应有 $i'(t) = 6 \times 15C \cos 15t$ A。

非线性元件也是电路中的一种常见元件。例如二极管的伏安关系式是一个非线性电阻 (详见第二章“PN 结的伏安特性”)。

元件的时变性反映了元件参数随时间变化的一种特性。例如一个线性时变电容定义为

$$C(t) = C_0 + C_1 \sin 3t$$

其中 C_0 、 C_1 均为常数。电路元件的非线性或时变性引起电路分析方法的复杂化。

1.3.6 受控源

受控源是一种四端元件, 由控制支路和受控支路两部分组成。受控源反映电路中两部分