



全国各类成人高等学校招生统一考试
大专起点升本科考前辅导班教材

电路原理

丛书主编 郭光耀
本书主编 闻 跃



科学普及出版社

全国各类成人高等学校招生统一考试
大专起点升本科考前辅导班教材

电 路 原 理

丛书主编 郭光耀

本书主编 闻 跃

科 学 普 及 出 版 社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

电路原理/闻跃主编. —北京:科学普及出版社, 1998. 9

(全国各类成人高等学校招生统一考试大专起点升本科考前辅导班教材/郭光耀主编)

ISBN 7-110-03267-1

I. 电… II. 闻… III. 电路原理-成人教育-高等学校-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 02507 号

科学普及出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:6.375 字数:160 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

印数:1-10000 册 定价:11.00 元

内容提要

本书介绍了电路分析的基本概念、理论和分析方法,内容主要针对线性非时变电路的分析,并简要介绍了非线性电阻电路。从电路模型和电路的基本规律入手,依次介绍直流电路、正弦稳态电路和动态电路。书中详细讲解了等效方法、规范化方程法、相量法、动态方程法、一阶电路三要素法以及叠加定理和戴维南定理并最基本、最常用的分析方法,每项内容均有例题。

本书为大专起点升本科考前辅导教材,也可作为普通本、专科学生的参考书。本书另有配套的习题集。

丛书主编 郭光耀

丛书编委 (按姓氏笔画排序)

于一	仁静	方铭	王奇	王小平
王爱萍	牛辉	包海	朱光贵	李寿山
纪浩	刘晓	刘亚玲	刘嘉	何虎生
陈洪育	沈俊燕	国炜	岳金波	周伯君
赵达夫	闻跃	郭光耀	徐刚	唐恒志
傅建国	魏发辰			

本书主编 闻跃

本书编者 闻跃 程瑞华 高岩 国炜 傅建国
周伯君

策划编辑 肖叶

责任编辑 桂民荣

责任校对 孟华英

封面设计 曲文

正文设计 曲文

前 言

电路原理为成人高等学校的招生考试科目,内容包括电路的基本原理和基本分析方法。本课程要求掌握电路模型的概念和电路的基本规律;熟悉直流电路、正弦交流电路、谐振电路和动态电路的特点;能运用常用的分析方法进行电路求解。

作为电路原理科目大专起点升本科考前辅导的教材,本书覆盖了国家教委大专升本科电路原理考试大纲所要求的内容,并力求突出大纲要求熟练掌握的概念和方法。书中内容按直流电路、正弦稳态电路、动态电路的顺序编排,对于概念和分析方法的介绍力求简炼,尽量避免繁琐的数学推导而侧重应用。对各种电路形式、求解方法均给出例题,便于考生迅速熟悉并掌握基本内容和方法。

为使考生加深对概念的理解,提高解题能力,本书另有配套的习题集,习题的内容与本书章节相对应并有解题指导,建议读者将本书与该习题集一同使用,以便达到更好地学习效果。

本书由闻跃主编,其中第四、五章由程瑞华编写;第七、八章由高岩编写;其余各章由闻跃编写。另外,国炜、傅建国和周伯君同志也在本书的编写中做了大量的工作。鉴于编者的水平和时间的限制,书中难免有不当之处,敬请读者指正。

编 者

1998年8月

目 录

第一章 电路分析的基本概念	1
第一节 电路模型和电路的基本变量.....	1
第二节 基尔霍夫定律.....	3
第三节 无源元件.....	4
第四节 有源元件.....	8
第五节 简单电路的求解	11
第二章 电路化简和等效分析	13
第一节 等效电路和等效变换	13
第二节 几种基本的等效关系	14
第三节 应用等效变换的分析	17
第三章 电路分析的规范方法	22
第一节 支路电流法	22
第二节 网孔分析法	23
第三节 节点分析法	25
第四章 线性电路定理	29
第一节 叠加定理	29
第二节 戴维南定理和诺顿定理	31
第三节 最大功率传输定理	35
第五章 简单非线性电阻电路	36
第一节 含一个非线性电阻的电路	36
第二节 含理想二极管电路	37
第六章 正弦稳态分析	39
第一节 正弦信号的基本概念	39
第二节 正弦信号的相量表示	41
第三节 阻抗与导纳	45
第四节 正弦电路的相量分析	48
第五节 正弦电路功率	51
第六节 三相电路	54
第七节 多频率信号激励下的稳态分析	61
第七章 含互感和理想变压器的电路	63
第一节 互感元件的伏安关系	63
第二节 含互感电路的分析	65
第三节 含理想变压器电路的分析	69

第八章 谐振电路	71
第一节 串联谐振电路	71
第二节 并联谐振电路	74
第九章 一阶动态电路	77
第一节 动态元件的性质与电路的状态	77
第二节 一阶电路的过渡过程	78
第三节 直流激励下的三要素法	82
第四节 阶跃函数与阶跃响应	86
第十章 二阶动态电路	89
第一节 RLC 串联电路的零输入响应	89
第二节 GCL 并联二阶电路	92

第一章 电路分析的基本概念

要点 电路分析的基本依据是电路元件的特性和电路连接的规律。本章介绍电路模型、电路基本变量和参考方向的概念,给出电路基本元件的伏安特性和描述电路连接规律的基尔霍夫定律。通过对本章的复习,要掌握这些基本概念、特性和规律,并能运用它们分析简单的电路。

第一节 电路模型和电路的基本变量

一、电路模型

实际电路是由各种实际元器件连接起来组成的。而实际的元器件种类繁多,且内部物理过程复杂,难以描述和分析。在电路理论中要研究的是由理想元件和理想导线连接成的电路模型。理想元件是保留了实际元器件的主要性质而忽略了其次要性质的元件模型。理想导线是既无电阻又无其他电磁效应的导线。对于理想元件,我们给出描述其性质的数学定义式和电路符号,在一般情况下,省去名称中的“理想”两字。

二、电路变量与参考方向

1. 电压和电流

电压:单位正电荷从电路的一点移到电路的另一点时电路吸收的能量,称为电压降,简称电压。数学表达式为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-1)$$

其中 w 是电路吸收的能量。当 w 单位为焦耳(J), q 为库仑(C)时,电压 u 的单位为伏特(V)。

电流:单位时间内通过导体横截面的电荷量。数学表达式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中 q 为通过某截面的电荷量,单位为库仑(C), t 为时间,单位为秒(s),电流 i 的单位为安培(A)。

2. 参考方向

在较复杂的电路中,某一支路中电流的真实方向在求解之前是很难判断的。因此,在进行分析之前,我们必须给该支路电流假定一个流动的方向,用标在该支路上的一个箭头来表示,称为电流的参考方向,如图 1-1 所示电流 i 。这样,电流的真实方向可由其参考方向和电流数值的正负来确定。

同样,电路中两点间是电压升还是电压降,一般在求解之前也是不知道的。在列写方程前,我们必须给出一个假定的电压降方向,用“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端,称为电压的参考极性,如图 1-1 所示电压 u 。这样两点间电压的真实极性由其参考极性和电压数

值的正负来确定。电压的参考极性还可以用双下标法来表示，如 u_{ab} 即表示假定参考方向为 a 点为高电位端， b 点是低电位端。

例 1-1 在图 1-2 所示 A 和 B 两个支路中，(1)若 A 支路 $i = -5A$ ，电流的真实方向如何？(2)若 B 支路电流真实方向是从 a 到 b ，大小为 $2A$ ，则 $i_1 = ?$ ， $i_2 = ?$ (3)若 A 电路中 $u = -2V$ ，电压的真实极性如何？(4)在 B 电路中， $u_1 = ?$ $u_{ab} = ?$ $u_{ba} = ?$

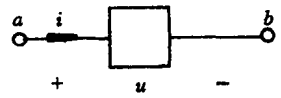


图 1-1 电压和电流的参考方向



图 1-2 例 1-1 电路

解：(1)真实方向是从 b 到 a 。

(2) $i_1 = -2A$ ， $i_2 = 2A$ 。

(3) b 到 a 的压降为 $2V$ 。

(4) $u_1 = -3V$ ， $u_{ab} = 3V$ ， $u_{ba} = -3V$ 。

3. 关联参考方向

对于一个元件的电流参考方向和电压参考极性一般可以任意假定。但在有些问题中需要同时考虑电压和电流时，常采用关联的参考方向。所谓关联的参考方向，就是假定电流参考方向从假定电压参考极性的“+”极到“-”极流过这个元件。例如图 1-1 所示的 u 和 i 。在关联参考方向下，只要标定电压或电流其中一个方向或极性，另外一个参考极性 or 方向就随之确定了。

例 1-2 见图 1-3，对元件 A 和 B ， u 和 i 是否关联？ u 和 i_1 是否关联？

解：对元件 A ， u 和 i 非关联， u 和 i_1 关联。

对元件 B ， u 和 i 关联， u 和 i_1 非关联。

4. 电位

在电路中，常选取一个点作为参考点，电路中其他点到此参考点的电压降称为该点的电位。参考点的电位规定为零，在电路中用接地符号“ $\perp$ ”来表示。如在图 1-4(a)中，选 c 为参考点，则 a ， b 两点的电位为 $U_a = 5V$ ， $U_b = 2V$ 。若选 b 为参考点，如图 1-4(b)，则 $U_a = 3V$ ， $U_c = -2V$ 。参考点不同，各点电位不同，但支路电压是唯一的。

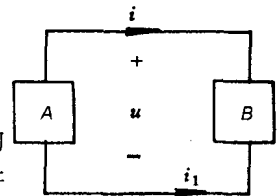


图 1-3 例 1-2 电路

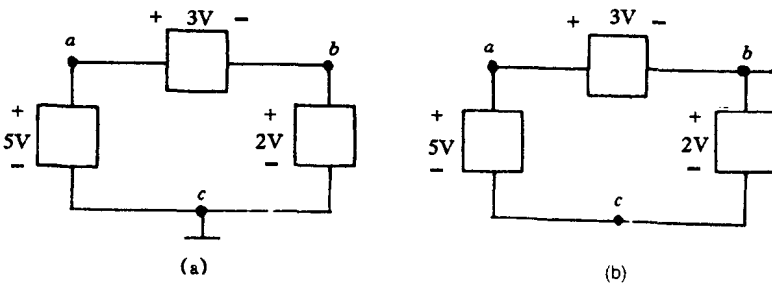


图 1-4 电位

5. 功率

某元件或电路的功率，就是该元件或电路在单位时间内吸收或放出的能量，即

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

若假定某元件或某两端电路的端电流 i 和电压 u 取关联的参考方向, 则其吸收的功率可以表示为

$$P = ui \quad (1-4)$$

当电压 u 的单位取伏特(V), 电流 i 取安培(A)时, 功率的单位为瓦特(W)。在 u, i 关联的情况下, 当 $P > 0$ 时实际为吸收, 当 $P < 0$ 时实际为放出。注意, 通常在不特别指明时, 功率均按吸收功率来计算。

例 1-3 求图 1-5 所示各元件上所标的未知量

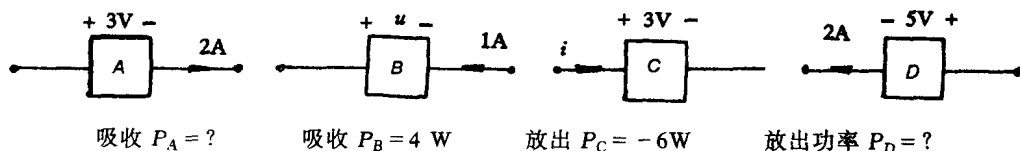


图 1-5 例 1-3 电路

解: A: 元件 A 吸收的功率 $P_A = 3 \times 2 = 6$ (W)

B: 元件 B 吸收的功率 $P_B = -u \times 1$, 因此 $u = -P_B = -4$ (V)

C: 元件 C 放出的功率 $P_C = -3 \times i$, 因此 $i = -\frac{1}{3}P_C = -\frac{1}{3} \times (-6) = 2$ (A)

D: 元件 D 放出的功率 $P_D = -5 \times 2 = -10$ (W) 实际为吸收 10W

例 1-4 试用变量 u, i 和 i_1 表示图 1-3 中元件 A 和元件 B 吸收的功率

解: 元件 A 吸收功率 $P = -ui = ui_1$

元件 B 吸收功率 $P = ui = -ui_1$

第二节 基尔霍夫定律

一、电路连接的基本概念

1. 支路 电路中每个元件(或电路中流过同一个电流的部分)称为一个支路。
2. 节点 元件的端点(或三个及三个以上支路的交点)称为节点。
3. 回路 由支路组成的闭合路径称为回路。
4. 网孔 内部不含有任何支路的回路称为网孔。

二、基尔霍夫电流定律(KCL)

KCL: 任一时刻, 流入或流出电路中任一节点的电流代数和为零, 即

$$\sum i_k = 0 \quad (1-5)$$

在列写 KCL 方程时, 首先标定各电流的参考方向, 然后对一节点统一计算流入或流出的电流和。若计算流入电流和, 则参考方向为流入该节点的电流在方程左端取正号, 流出的取负号; 若计算流出电流和, 则情况与上相反。例如, 图 1-6 中, 节点 n 的 KCL 方程为

$$i_1 - i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

例 1-5 在图 1-7 中, 以线段代表支路, 已知 $i_1 = 3A$, $i_2 = 1A$, 求电流 $i_3 = ?$

解: 设流出电流为正, 对图中 a, b, c 三个节点列出 KCL 方程

$$a: -i_1 + i_4 + i_5 = 0$$

$$b: i_2 - i_4 - i_6 = 0$$

$$c: i_3 - i_5 + i_6 = 0$$

三个方程相加得 $-i_1 + i_2 + i_3 = 0$,

所以 $i_3 = i_1 - i_2 = 2A$ 。

基尔霍夫电流定律本质上是电荷守恒定律,它不仅适用于节点,也适用于任意封闭面,即对电路中的任一封闭面,流入或流出该封闭面的电流之和为零。因此,若上例中的虚线代表一封闭面,计算所有流出封闭面的电流代数,可得

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

因此,在计算中可将一部分电路整体看作一个广义节点来列写 KCL 方程。

三、基尔霍夫电压定律(KVL)

KVL:在任一时刻,沿电路中任一闭合路径所有电压降的代数和为零,即

$$\sum u_k = 0 \quad (1-6)$$

在运用式(1-6)列方程时,首先要标出各电压的参考极性,确定沿闭合路径计算压降的绕行方向。若某项电压极性与绕行方向一致,在方程的左端取正号,否则取负号。如在图 1-8 中,若顺时针绕行,则 KVL 方程为

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

由基尔霍夫电压定律可以推知,电路中任意两点间的电压与计算电压所取的路径无关,等于从电压参考正极性节点到负极性节点间任一路径上所有电压之和。例如,图 1-8 中 u_{ab} 可写作

$$u_{ab} = -u_3 + u_2 - u_1$$

$$u_{ab} = u_4 - u_5$$

例 1-6 图1-8 中, $u_{ab} = 4V$, $u_1 = -2V$, $u_2 = 3V$, $u_4 = -1V$, 求 u_3 和 u_5 。

解: 由 $u_1 - u_2 + u_3 + u_{ab} = 0$ $u_3 = -u_1 + u_2 - u_{ab} = 2 + 3 - 4 = 1V$

由 $u_{ab} + u_5 - u_4 = 0$ $u_5 = u_4 - u_{ab} = -1 - 4 = -5V$

基尔霍夫定律与电路元件的性质无关,它描述了电路连接方式的规律,对电压和电流加上一种线性约束关系。下节介绍的元件伏安关系,是对电压和电流变量的另外一类约束关系。

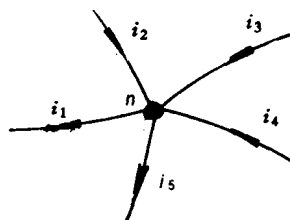


图 1-6 KCL

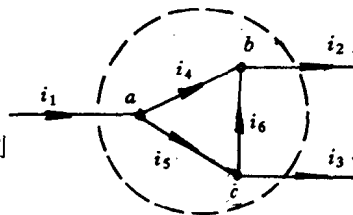


图 1-7 广义结点

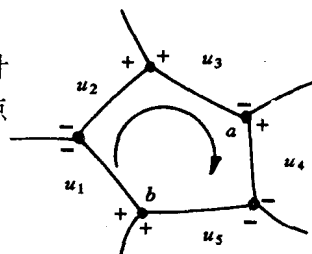


图 1-8 KVL

第三节 无源元件

电路元件的特性用其端钮上的电压、电流关系,即伏安关系来描述。

一、电阻元件

通常所说电阻是指线性电阻元件,其端电流和电压的关系是 $u-i$ 平面上的一条过原点的直线,见图1-9(b)。电阻元件的符号如图1-9(a)所示。在其端电压和电流为关联参考方向

时,其伏安关系为

$$u = Ri \quad (1-7)$$

若其端电压和电流为非关联参考方向,则伏安关系应表示为

$$u = -Ri$$

以上伏安关系就是欧姆定律, R 是电阻值,单位为欧姆(Ω)。

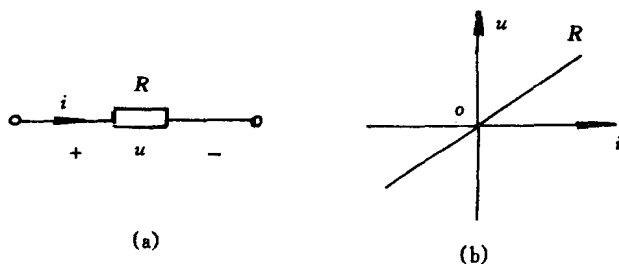


图 1-9 电阻元件

电阻的性质也可用电导 $G = 1/R$ 来表示,其单位为西门子(S)。因此,在关联的参考方向下,电阻的伏安特性(欧姆定律)也可表示为

$$i = Gu \quad (1-8)$$

电阻元件吸收的功率为

$$P = ui = Ri^2 = Gu^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知,电阻吸收的功率总是正的,其吸收的能量以热的形式消耗掉,所以电阻元件是耗能元件。

二、电感元件

1. 若某元件端口上的特性可以用磁链与电流的关系描述,则该元件为电感元件,简称为电感。线性电感元件的电路符号如图 1-10(a)所示,其磁链 Ψ 与电流 i 成正比,如图 1-10(b)所示,表示成为

$$\Psi = Li \quad (1-10)$$

式中 L 称为该电感元件的自感系数,简称电感。当 Ψ 单位取韦伯(Wb), i 单位取安培(A),则 L 单位为亨利(H)。实际电感线圈当忽略其线圈电阻时,可用理想电感元件作为其模型。

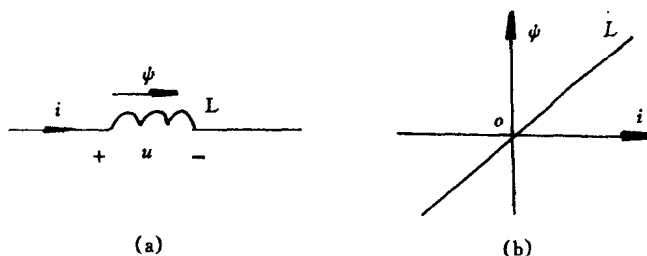


图 1-10 电感元件

2. 电感元件的伏安关系,在 u 和 i 为关联参考方向时表示为

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \quad (1-12)$$

由电感元件的伏安关系看出：

(1) 电感电压正比于电感电流的变化率。某时刻电感电压的有无、大小和方向，取决于该时刻电感电流变化与否、变化快慢和变化方向，而与该时刻的电流值无关。当电感电流恒定时，电感电压为零，所以在直流电路中电感相当于短路线。

(2) 某时刻电感电流不仅与该时刻电压有关，还与该时刻以前电感电压的情况有关，所以电感是记忆元件。

(3) 由式(1-11)看出，若电流 i 突变，则 u 为无穷大。所以当 u 为有限值时，电感电流 i 不能突变。

(4) 电感元件的功率 $P = ui = Li \frac{di}{dt}$ 随时间变化，可正可负，在某时刻电感的储能

$$W_L(t) = \int_{-\infty}^t P(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t Li di = \frac{1}{2} Li^2 - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-13)$$

式中假定 $i(-\infty) = 0$

例 1-7 图 1-11(a) 所示电感的电流 i 如图 1-11(b) 所示，试求电感电压 u 及其功率 P 和能量 W 的波形。

解： 由 $u = L \frac{di}{dt}$ ，先分段求出 u

$$0 < t < 1: \quad u = L \frac{di}{dt} = 2 \times 5 = 10 \text{ (V)}$$

$$1 < t < 3: \quad u = L \frac{di}{dt} = 2 \times (-5) = -10 \text{ (V)}$$

$$3 < t < 4: \quad u = L \frac{di}{dt} = 2 \times (5) = 10 \text{ (V)}$$

电压 u 的波形如图 1-11(c) 所示，根据 $P = ui$ 和 $W = \int_{-\infty}^t P dt$ 或 $W = \frac{1}{2} Li^2$ 给出 P 和 W 的波形如图 1-11(d) 和图 1-11(e) 所示。

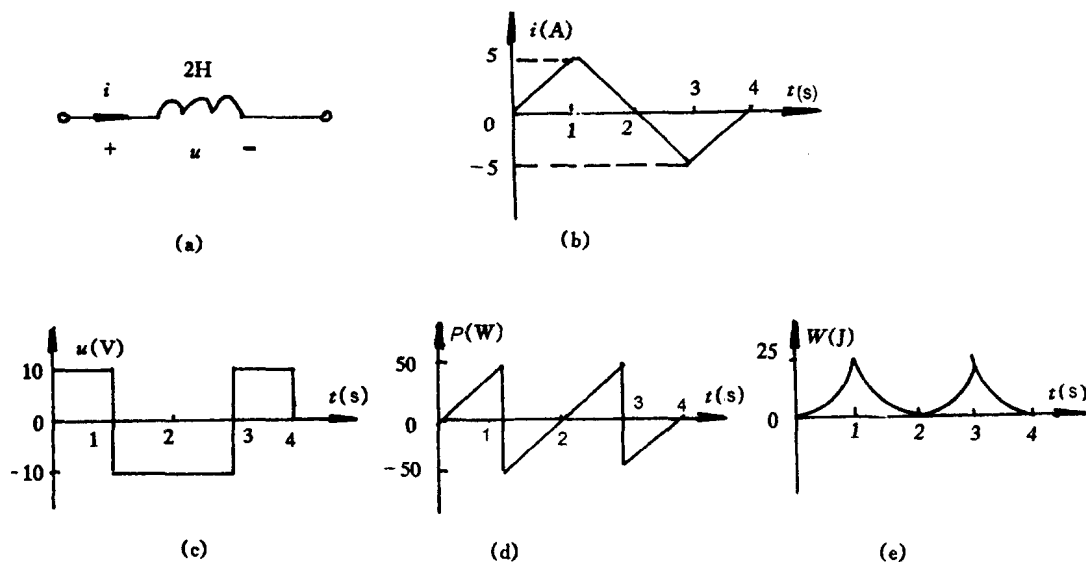


图 1-11 例 1-7 图

二、电容元件

1. 若某元件端口的特性可以用电荷与电压的关系描述, 该元件称为电容元件, 简称电容。线性电容元件的电路符号如图 1-12(a) 所示, 其储存电荷 q 与端电压 u 成正比, 如图 1-12(b) 所示, 写成

$$q = Cu \quad (1-14)$$

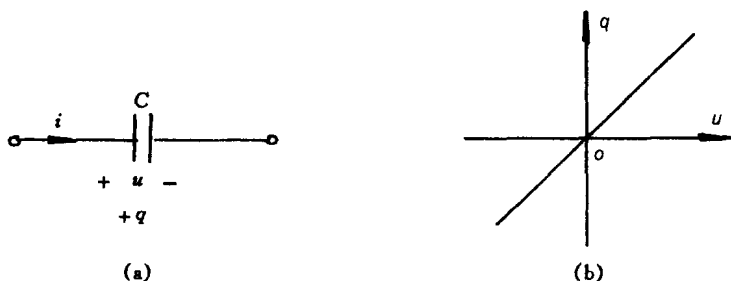


图 1-12 电容元件

式中 C 为该电容元件的电容值, 其中电荷单位为库仑(C), 电压单位取伏特(V), C 的单位为法拉(F)。

实际电容器当忽略其介绍损耗时, 可用理想电容元件作为模型。

2. 在 u 和 i 为关联参考方向时, 电容元件端口的伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-15)$$

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1-16)$$

由电容元件的伏安关系可看出:

(1) 电容电流正比于电容电压的变化率, 在某时刻电容上是否有电流, 以及电流的大小和方向, 取决于电容电压是否变化、变化快慢和变化方向, 但与该时刻的电压取值无关。当电压恒定时, 电流为零, 所以在直流电路中电容相当于开路。

(2) 某时刻电容电压不仅与该时刻 t 的电流有关, 还与 t 以前所有的电流值有关, u 记忆了 i 在过去的全部变化结果, 所以称电容是记忆元件。

(3) 由式(1-15)可看出, 若 u 有突变, 则 i 无限大, 因此, 当电流为有限值时, 电容电压不可能突然变化。

3. 电容元件的功率为 $P = ui = Cu \frac{du}{dt}$, 功率的取值随时间变化, 可正可负, 这一点区别于电阻, 在某一时刻电容储存的能量

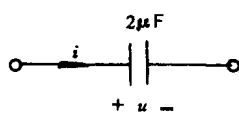
$$w_c(t) = \int_{-\infty}^t P(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t Cu du = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-17)$$

其中假定 $u(-\infty) = 0$ 。

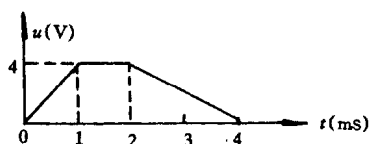
例 1-8 如图 1-13(a) 所示电容, 已知其端电压波形如图 1-13(b) 所示, 试求出其电流 i , 功率 P 及能量 w 的波形。

解: 图中 u 与 i 为关联参考方向 $i = C \frac{du}{dt}$

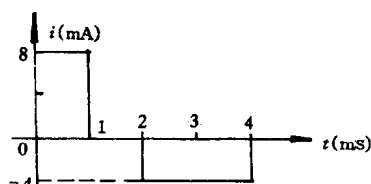
$$0 < t < 1\text{ms}; \quad \frac{du}{dt} = 4 \times 10^3 (\text{V/s})$$



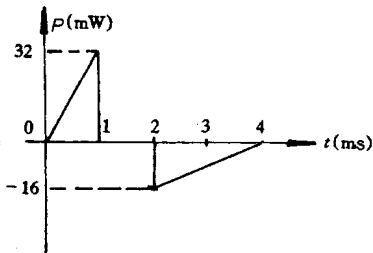
(a)



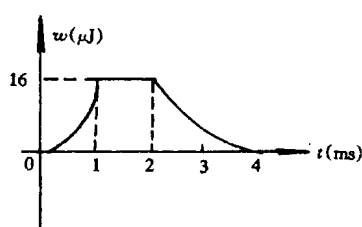
(b)



(c)



(d)



(e)

图 1-13 例 1-8 图

$$i = C \frac{du}{dt} = 2 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^3 = 8 \times 10^{-3} (\text{A})$$

$$1\text{ms} < t < 2\text{ms}: \quad \frac{du}{dt} = 0 \quad i = 0$$

$$2\text{ms} < t < 4\text{ms}: \quad \frac{du}{dt} = -2 \times 10^3 (\text{V/s})$$

$$i = 2 \times 10^{-6} \times (-2 \times 10^3) = -4 \times 10^{-3} (\text{A})$$

分段画出 i 的波形如图 1-13(c)。

由 $P = ui$ 和 $W = \int_{-\infty}^t P dt$ 可画出功率 P 和能量 w 的波形如图 1-13(d) 和图 1-13(e) 所示。

第四节 有源元件

一、独立源

1. 电压源

理想电压源的端口, 其伏安关系为

$$\begin{cases} u = u_s(t) \\ i \text{ 为任意值} \end{cases} \quad (1-18)$$

即在任一时刻, 其伏安特性是 $u-i$ 平面上的一条平行于 i 轴的直线。如图 1-14(c) 所示。其电路符号如图 1-14(a) 所示。对于直流电压源, $u_s = U_s$, 又可用图 1-14(b) 的电池符号。

理想电压源是从实际电池、发电机和稳压器等抽象而来的理想模型, 其端电压为一确定的值, 与流过元件的电流无关; 其电流可为任意值, 在电路中取决于外电路的情况。

2. 电流源

理想电流源的伏安关系是

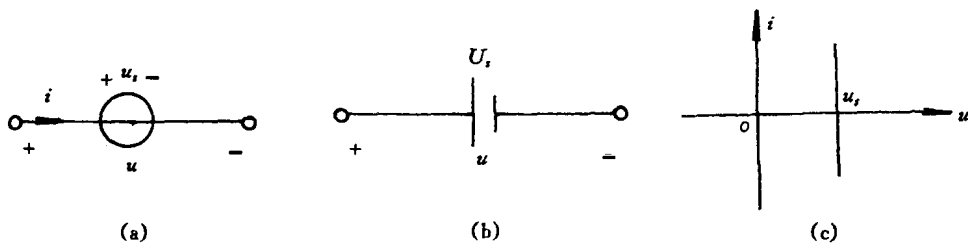


图 1-14 电压源

$$\begin{cases} i = i_s(t) \\ u \text{ 为任意值} \end{cases} \quad (1-19)$$

其伏安关系可以用 $u-i$ 平面上一条与 u 轴平行的直线来表示,如图 1-15(b)所示,其电路符号如图 1-15(a)所示。在直流情况下, $i = I_s$ 为一常数。电流源是对光电池、电子稳流器等实际电源的抽象,其特性为,端电流为一确定值,与端电压无关;端电压可为任意值,取值决定于外电路。

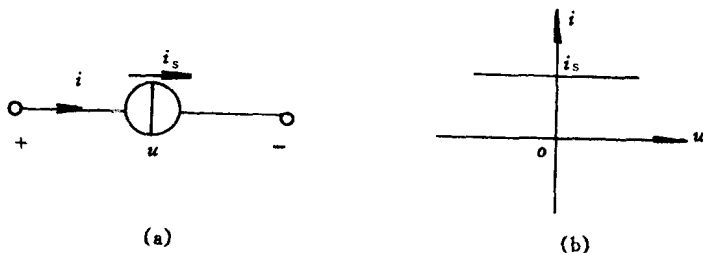


图 1-15 电流源

例 1-9 求图 1-16 所示三个电路中 u , i 和各元件的功率。

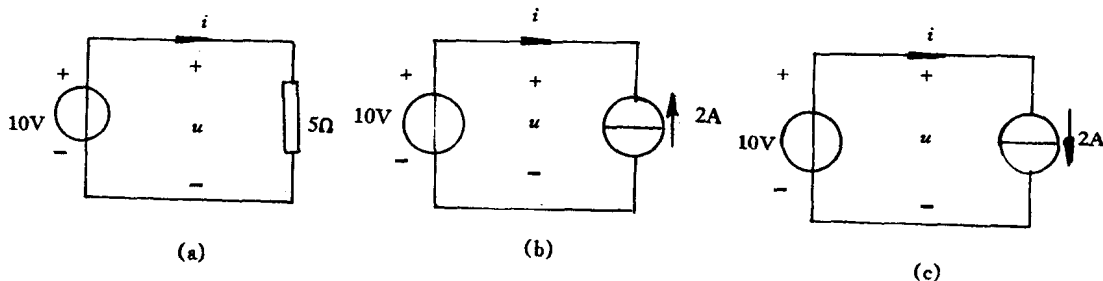


图 1-16 例 1-9 电路

解: 图 1-16(a) 电路中 $u = 10(\text{V})$ $i = 10/5 = 2(\text{A})$

10(V) 电压源功率 $P_u = -ui = -20(\text{W})$ (放出)

5Ω 电阻功率 $P_R = ui = 20(\text{W})$ (吸收)

图 1-16(b) 电路中 $u = 10(\text{V})$ $i = -2(\text{A})$

电压源功率 $P_u = -ui = 20(\text{W})$ (吸收)

电流源功率 $P_R = ui = -20(\text{W})$ (放出)

图 1-16(c) 电路中 $u = 10(\text{V})$, $i = 2(\text{A})$

电压源功率 $P_u = -ui = -20(\text{W})$ (放出)

电流源功率 $P_R = ui = 20(\text{W})$ (吸收)