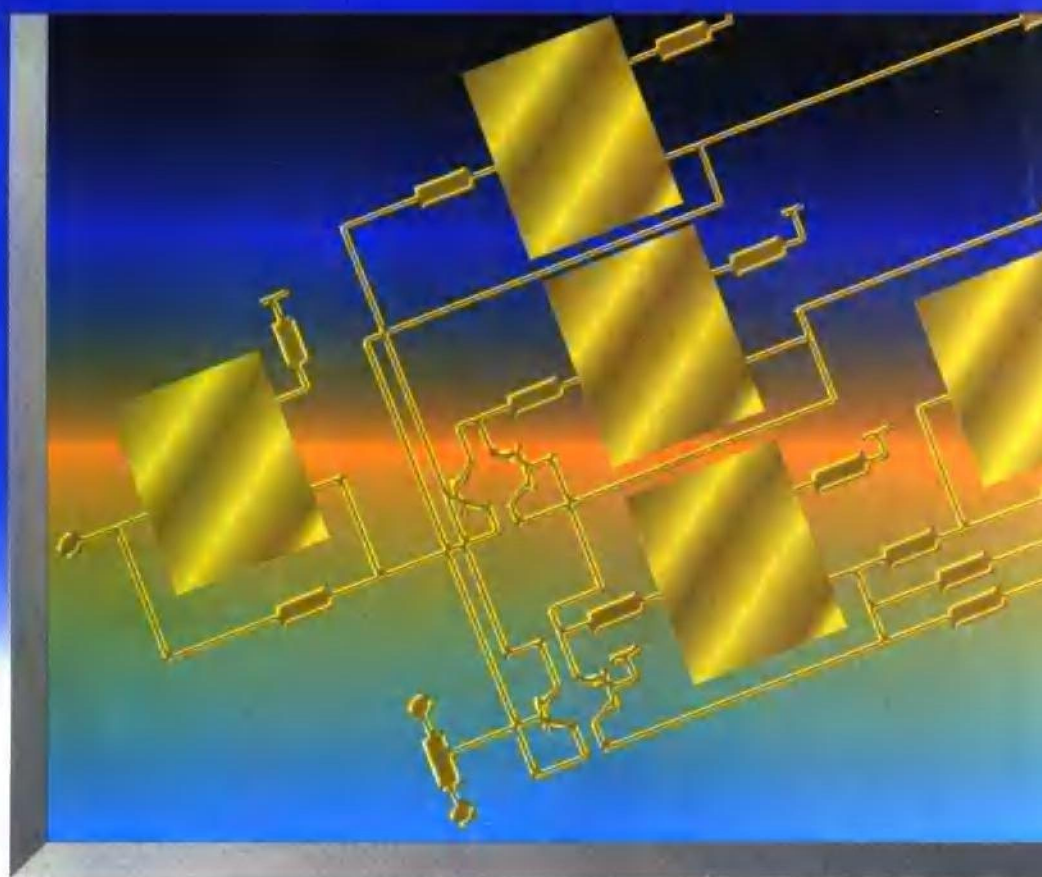


电路与电子学基础教程

DIANLU YU DIANZIXUE
JICHU JIAOCHENG

张畴先 段哲民 白中英 编著



G F G Y G B S



7
2

电路与电子学基础教程

张畴先 段哲民 白中英 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子学基础教程/张畴光等编著. —北京:国防工业出版社,1997(1998.9重印)

ISBN 7-118-01683-7

I. 电… II. 张… III. ①电子电路-电路理论-教材 ②电子学-教材 IV. TN701

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 07936 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16½ 378 千字

1997 年 6 月第 1 版 1998 年 9 月北京第 2 次印刷

印数:3001—6000 册 定价:22.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

《中国教育改革和发展纲要》指出：“世界范围的经济竞争，综合国力竞争，实质上是科学技术的竞争和民族素质的竞争。从这个意义上讲，谁掌握了面向 21 世纪的教育，谁就能在 21 世纪的国际竞争中处于战略主动地位。”处于跨世纪过程中的中国高等教育，必须花大力气对专业结构、课程体系和教学内容进行系统的、整体的改革。可以说，《计算机学科教学计划 1993》在这方面进行了卓有成效的努力，并做出了贡献。

长期以来，大部分院校的计算机类学科、电子类学科、自动控制类学科分设“电路分析”、“电子技术”、“信号与系统”等多门技术基础类课程，学时很多（每门课程均在 60~80 学时），内容庞大陈旧，且与专业结构、课程体系很不配套，因而使总的教学计划学时难以压缩和优化。而《计算机学科教学计划 1993》对此进行了重大改革，它将上述相关课程合并，设置一门技术基础课“基本电路与电子学”（80 学时）。这种改革不是单纯的课程合并，也不是单纯的学时压缩，而是从时代发展、技术进步、专业结构、课程体系上的总体考虑。

《电路与电子学基础教程》一书就是作者根据《计算机学科教学计划 1993》中“基本电路与电子学”课程教学大纲编写的教材。

本书的目标是：内容精练，基本概念清楚；系统性强，使学生建立完整有序的概念；有合理的知识结构，为进一步学习有关后续课程和实际应用打下良好基础；理论教学与实践教学结合，注重学生的智力开发和能力的培养；力图反映新技术、新动向，以适应电子技术发展和变化的需要。

尽管作者在写作过程中努力尝试进行教学内容上的改革以实现上述目标，但许多方面仍然不尽满意。为此在今后使用教材的过程中尽力完善这些目标，期望在第二版时使教材质量进一步提高。

本书第一章至第四章由段哲民执笔，第五章至第九章由张畴先执笔，全书由白中英主编和统稿。

限于作者水平，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作者 1997 年 3 月

内 容 简 介

本书是根据中国计算机学会教育委员会、全国高等学校计算机教育研究会联合推荐的《计算机学科教学计划 1993》中“基本电路与电子学”课程的教学大纲编写的革新教材。内容分如下九章：1. 电路基本概念；2. 电路基本定理与分析方法；3. 正弦稳态电路；4. 动态电路时域分析；5. 放大器导论；6. 放大器基本电路；7. 模拟集成电路；8. 集成运算放大器的应用；9. 直流稳压电源。

本书内容新颖，概念清楚，实用性强，文字流畅，题例典型，便于自学，适用面广泛，既可作为大专院校计算机类、电子工程类、自动控制类等学科的教材，也可作为相关专业的成人教育教材和工程技术人员的参考书。

目 录

第一章 电路基本概念	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路常用基本物理量	2
1.3 电路基本元件	4
1.4 基尔霍夫定律	12
习题	15
第二章 电路基本定理与分析方法	18
2.1 叠加与齐次定理	18
2.2 替代定理	19
2.3 等效电源定理	19
2.4 最大功率传输定理	23
2.5 互易定理	25
2.6 线性电路的基本分析方法	26
2.7 非线性电阻电路的分析方法	35
习题	39
第三章 正弦稳态电路	44
3.1 正弦量及其描述	44
3.2 KCL、KVL 及元件伏安关系的相量形式	48
3.3 复阻抗与复导纳	53
3.4 正弦稳态电路分析	57
3.5 正弦稳态电路的功率	62
3.6 三相电路	67
3.7 谐振电路	70
习题	75
第四章 动态电路时域分析	79
4.1 动态电路与换路定律	79
4.2 电路初始值的计算	80
4.3 一阶电路的时域分析	82
4.4 一阶电路的三要素法	88
4.5 一阶电路的阶跃与冲激响应	91
4.6 一阶电路的正弦响应	97
4.7 电路的卷积分析法	99
习题	102
第五章 放大器导论	105
5.1 放大器及其特性	105

5.2	放大器的电路模型	109
5.3	放大器的频率响应	113
5.4	放大器的反馈	117
	习题	122
第六章	放大器基本电路	125
6.1	基本半导体器件	125
6.2	双极型晶体管放大电路	138
6.3	场效应管放大电路	150
6.4	输出级和功率放大器	157
	习题	164
第七章	模拟集成电路	170
7.1	集成运算放大器的一般结构	170
7.2	F007 集成运算放大器	176
7.3	CMOS 运算放大器	179
7.4	集成功率放大器	183
7.5	数字—模拟转换器(DAC)	187
7.6	模拟—数字转换器(ADC)	190
	习题	194
第八章	集成运算放大器的应用	198
8.1	模拟运算中的应用	198
8.2	信号变换中的应用	205
8.3	信号滤波中的应用	212
8.4	信号产生电路中的应用	221
	习题	228
第九章	直流稳压电源	234
9.1	整流与滤波电路	234
9.2	串联型直流稳压器	237
9.3	开关型稳压器(SMR)	243
9.4	高精度基准稳压电源	250
	习题	253

第一章 电路基本概念

1.1 电路与电路模型

一、电路

为了实现电能或电信号的产生、传输、加工及利用,人们将所需的电器元件或设备,按一定方式联接起来而构成的集合统称为**电路**,或称为电网络,简称**网络**。

现实存在的电路,形式繁多,功能各异,但主要可分为以下几种类型:

集中参数电路和**分布参数电路**。集中参数电路是指电路的几何尺寸远远小于电路最高工作频率所对应的工作波长。否则视其为分布参数电路。

线性电路和**非线性电路**。线性电路是指电路的激励(输入)与响应(响应)之间满足线性关系,即满足叠加性和齐次性。否则视其为非线性电路。

时变电路和**定常电路**。时变电路是指电路的结构参数随时间变化的电路。而定常电路中的元件参数不随时间变化,故也称为时不变电路。

电力电路和**电子电路**。电力电路主要是用以传输、分配强电电能(大电流或高电压或大功率)的电路;电子电路主要是指用以产生、传递、处理或变换电信号的电路。所谓电信号一般指反映某些信息特征的电流或电压,也可以是电荷、磁通、功率等电量。

此外,电路还可分为**直流电路**和**交流电路**; **有源电路**和**无源电路**; **稳态电路**与**暂态电路**等。本书重点研究集中参数的定常电路。

二、电路模型

实际的电器元件和设备的种类很多,如各种电源、电阻器、电感器、电容器、变压器、晶体管、固体组件等等,它们中发生的物理过程是很复杂的。因此,为了便于对实际电路进行分析和数学描述,进一步研究电路的特性和功能,就必须进行科学的抽象,用一些模型来代替实际电器元件和设备的外部功能。这种模型称为**电路模型**。构成电路模型的元件称为**模型元件**,也称**理想电路元件**。理想电路元件只是实际电器元件和设备在一定条件下的理想化,它能反映实际元件和设备在一定条件下的主要电磁性能,并用规定的模型元件符号来表示。

理想电路元件分为两类:一类是有实际的元件与它对应,如电阻器、电感器、电容器、电压源等;另一类是没有直接与其对应的实际电路元件,但它们却能反映出实际电器元件和设备的主要特性和功能,如受控源等。

在研究电路时,常用数学表达式来描述电路元件以及元件之间电流和电压关系,由此可构成电路对应的方程组,即电路的数学模型。一旦得到数学模型,则可将电路的研究转化为数学问题,应用数学方法进行分析,以解决工程电路问题。这就是电路分析的基本思

想。

以理想电路元件及其组合作为电路理论的研究对象,即形成了电路模型理论。今后我们研究的电路均指模型电路。

图 1-1(a)所示为一个实际的简单电路。其中电池作为激励电源,它将化学能转化为电能,产生电信号,可用一个电压源 u_s 和电阻 R_s 的串联组合表示其模型元件;灯泡是从电源吸收功率或接收电信号,称为**负载**,可用电阻 R 表示;联接导线传输电能或电信号,可用电阻 R_l 表示其总电阻。因此,若用理想元件来描述该电路,其电路模型如图 1-1(b)所示。这种将电路模型画在平面上所形成的图形称为**电路图**。电路图只反映各理想电路元件在电路中的作用及其相互联接方式,并不反映实际设备的内部结构、几何形状及相互位置等。

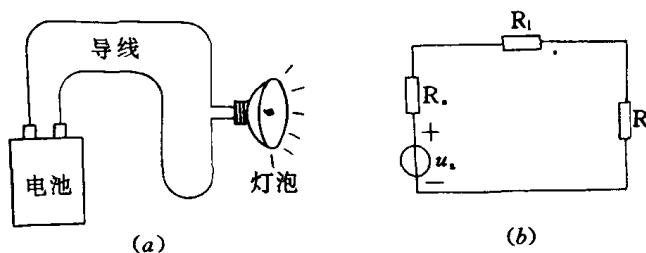


图 1-1 简单电路及其电路模型

(a)简单电路;(b)电路模型。

1.2 电路常用基本物理量

一、电流

在电场作用下,电荷的定向移动形成电流。电流是一个代数数量,它定义为在单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

式中 Q ——电荷(C);

t ——时间(s);

I ——电流(A)。

如果通过导体横截面的电荷随时间变化,则有

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

式中 $q(t)$ ——电荷为时间的函数;

$i(t)$ ——电流为时间的函数。

习惯上规定正电荷移动的方向为电流的正方向或实际方向。但在电路分析中,某段电路的实际方向往往不能确定,特别是电流随时间变化时,电流的实际方向便无法确定。因此常采用参考正方向,简称**参考方向**,在电路图中用箭头表示。参考方向为任意假定的方向。若计算结果中电流为正值,则说明参考方向与实际方向一致;反之,若电流为负值,则二者方向相反。

二、电压

电压是指电场力把单位正电荷从电路的一点移到另一点所作的功,即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

式中 Q ——电荷量(C);

W ——电场力移动电荷 Q 所作的功(J);

u ——电压(V)。

如果电压随时间变化,则

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

电压的实际方向或正方向规定为由高电位指向低电位,即电压降的方向,一般用实际极性表示,高电位标以“+”号,低电位标以“-”号。在电路分析中,同样存在难以(或无法)确定某段电路电压的实际方向,因此也采用参考方向或参考极性,即任意假定的极性。在指定参考极性后,计算结果显示电压的正负值就有明确的物理意义,即正值说明参考极性与实际极性一致,负值说明二者方向相反。

在电路分析中,经常用到电位这一个物理量。电位是相对于在电路中所选定的零电位参考点而言的。所谓某点的电位是指该点到零电位参考点的电压。任意两点电位差即为此两点的电压。电位的单位也为伏特(V)。电位与电压的区别在于电位是相对量,它与参考点选择有关,而电压是绝对量,与参考点选取无关。

关联参考方向。电流与电压的参考方向是任意假定的,二者彼此独立,相互无关。但为了分析电路的方便,总是把某段电路电压参考方向和电流参考方向取成一致,即电流参考方向是从电压参考正极流入,负极流出,并称之为关联参考方向。采用关联参考方向时,可以在电路图上只标一个电量的参考方向。图 1-2(a)所示某段电路,其电流与电压参考方向是采用关联参考方向;而图 1-2(b)则为非关联参考方向。

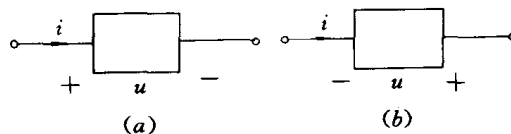


图 1-2 电流与电压的关联参考方向

(a) 电流与电压为关联参考方向; (b) 电流与电压为非关联参考方向。

三、功率

功率是电场力 单位时间内所作的功,即

$$P(t) = \frac{dW}{dt} \quad (1-5)$$

式中 W ——功或能量(J);

t ——时间(s);

$P(t)$ ——瞬时功率(W)。

若某段电路的电压为 u , 流过的电流为 i , 则功率为

$$P = ui \quad (1-6)$$

如果电压 u 和电流 i 采用关联参考方向,则电式(1-6)可计算该段电路的吸收功率;如果 u 和 i 采用非关联参考方向,则由式(1-6)计算出该段电路的发出功率。

1.3 电路基本元件

电路元件按能量特性分为**无源元件**和**有源元件**。若元件端电压 u 和通过的电流 i 采用关联参考方向,并在任一时刻 t ,其能量满足

$$W = \int_{-\infty}^t u i d\tau > 0 \quad (1-7)$$

则该元件对外不提供能量,称之为无源元件。否则称其为有源元件。

电路元件按其端钮还可分为**二端元件**和**多端元件**。二端元件具有两个端钮,如电阻、电容、电感和电源等。多端元件具有三个或三个以上端钮,如三极管、变压器和运算放大器等。

本节主要介绍电路常用的基本模型元件。

一、无源元件

1. 电阻元件

电阻元件是一种无源二端元件。

若二端元件的电压、电流关系是由 $u-i$ 平面上通过坐标原点的曲线来描述,则这种二端元件称为理想电阻元件,简称电阻元件。这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。电阻元件伏安关系或元件约束关系也常用函数关系式表示,即

$$i = f(u)$$

或

$$u = g(i)$$

电阻元件可分为**线性电阻**和**非线性电阻**。线性电阻的伏安特性是 $u-i$ 平面上通过坐标原点的直线,而非线性电阻的伏安特性为 $u-i$ 平面上通过坐标原点的曲线。

电阻元件又可分为**时变电阻**和**定常电阻**。若电阻伏安特性曲线不随时间变化,则为定常电阻或时不变电阻。否则称其为时变电阻。线性时不变电阻的伏安特性为 $u-i$ 平面一条过坐标原点的直线,而线性时变电阻伏安特性则为 $u-i$ 平面过坐标原点的一族直线。

线性时不变电阻元件的符号如图 1-3(a)所示,其伏安特性如图 1-3(b)所示。其中 R 为伏安直线的斜率。线性时不变电阻有如下特点:

- (1) 伏安特性为 $u-i$ 平面过坐标原点的直线。
- (2) 端电压 u 与通过的电流 i 成正比,即满足欧姆定律

$$u = Ri \quad (1-8)$$

式中, u 与 i 采用关联参考方向。

(3) 双向性。因伏安特性曲线以原点对称,说明对不同方向电流和电压,其伏安特性完全相同,故两个端钮没有区别,可任意联接。

(4) 无源性。对线性时不变电阻,其吸收功率 $P = ui = Ri^2 = u^2/R > 0$,可见它满足无

源性。

(5)无记忆性。由式(1-8)可看出,电压只取决于同时刻的电流值,与该时刻以前的电流值无关,故称为无记忆元件。

线性时不变电阻还可用电导 G 来表示,即

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u} \quad (1-9)$$

式中 i 、 u 分别表示电阻的电流、电压,若单位分别为安[培](A)、伏[特](V)、则电导 G 单位为西[门子](S)。

2. 电感元件

电感元件是无源二端元件,它能储存磁场能量。当图 1-4 所示线圈中的电流 i 变化时,则由此在线圈中产生的磁通 Φ 变化,相应的磁链 Ψ 也变化,随之产生的感应电压 u 也变化。

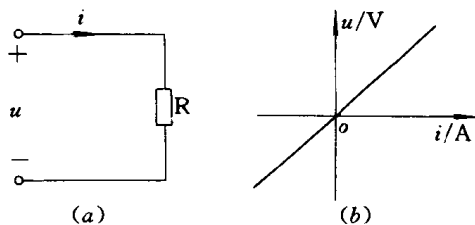


图 1-3 线性时不变电阻

(a)线性时不变电阻元件;(b)伏安特性。

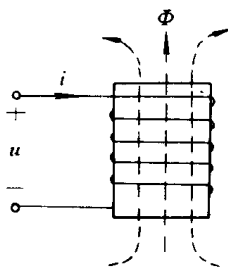


图 1-4 电感电流与磁通

设线圈匝数为 N ,则有

$$\Phi = KNi \quad (1-10)$$

式中 K 是与线圈几何尺寸、形状、线圈芯子材料等有关的因子。对应的磁链为

$$\Psi = N\Phi = KN^2i \quad (1-11)$$

磁通 Φ 和磁链 Ψ 的单位为韦[伯](Wb),方向由右手螺旋定则确定。因此磁链与电流的关系可由 $\Psi-i$ 平面过坐标原点的曲线来确定。

如果二端元件电流和磁链之间的关系可由 $\Psi-i$ 平面过坐标原点的曲线来描述,则这种二端元件称为理想电感元件,简称电感元件。这条曲线称为电感元件的韦安特性曲线。

电感元件也分为**线性电感**和**非线性电感**;**时变电感**和**时不变电感元件**。本书主要讨论线性时不变电感。线性时不变电感元件一般是芯子为空气或非磁性材料的线圈。它的主要特点如下:

(1)韦安特性为 $\Psi-i$ 平面一条过坐标原点的直线,其斜率为 L ,如图 1-5(a)所示。

(2)磁链与电流成正比,即

$$\Psi = Li \quad (1-12)$$

式中 Ψ ——磁链(Wb);

i ——电流(A);

L ——**电感量**,也为韦安直线的斜率(H)。

电感元件的电路符号如图 1-5(b)所示。

(3)双向性。由韦安特性可知,电感元件也是一种与端钮接法无关的元件。

(4)动态性。当电感中电流随时间变化时,由电磁感应定律可知,其感应电压为

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-13)$$

也随时间变化。因此电感元件伏安特性为微分关系,这说明电感元件具有动态性,也反映其记忆性。需注意,式(1-13)中 u 和 i 采用关联参考方向。

(5)无源性。电感元件具有储存磁场能量的性质,其储存能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-14)$$

此能量在任意时刻均大于零,说明电感元件的无源性和储能性。

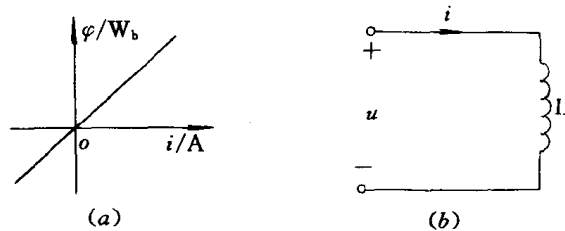


图 1-5 线性时不变电感

(a) 韦安特性; (b) 电感元件的电路符号。

3. 电容元件

电容元件是无源二端元件,它具有储存电场能量的特性。电容器一般由用电介质隔开的两个金属板构成。当电容器两个金属板上加电压时,每个金属板上将储存电荷 q ,并有

$$q = Ku \quad (1-15)$$

式中 q ——电荷(C);

u ——所加电压(V);

K ——一个与电介质、电容器几何形状、极板面积、距离等因素有关的因子。

因此电容器可用 $q-u$ 平面过原点的曲线来描述,此曲线称为库伏特性曲线。

若二端元件的电荷与电压关系可用 $q-u$ 平面上过坐标原点的直线描述,则这种二端元件为线性电容元件。否则称其为非线性电容元件。

电容元件也可分为时变和时不变电容。本书主要研究线性时不变电容,其主要特点如下:

(1)库伏特性为 $q-u$ 平面上一条过坐标原点的直线,直线斜率为 C 。如图 1-6(a)所示。

(2)储存的电荷 q 与施加的电压 u 成线性正比关系,即

$$q = Cu \quad (1-16)$$

式中 C 是一个常量,也是库伏特性的斜率,称为**电容量**,单位为法拉(F)。其电路符号如图 1-6(b)所示。

(3)双向性。线性时不变电容元件的库伏特性曲线对原点的对称性说明其特性与端钮接法无关。

(4)动态性。当电荷随时间变化时,在电容中便产生变化的电流,即有

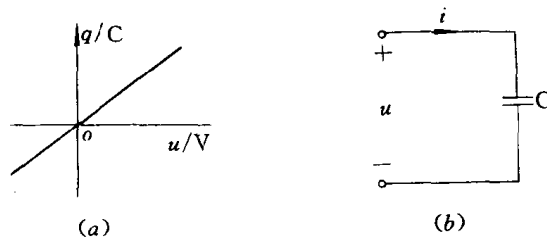


图 1-6 线性时不变电容
(a)库伏特性;(b)电容元件电路符号。

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

可见电容元件的伏安特性也为微分关系。它反映了电容元件的动态性,即电压随时间变化,就有电流通过;若电压恒定,电流则为零,相当于开路。同时也反映了其具有记忆的特性。

(5)无源性。电容元件具有储存电场能量的性质,其储存的能量为

$$W_c = \frac{1}{2}Cu^2 \quad (1-18)$$

可以看出,此能量在任意时刻均大于零。因此电容元件不仅能储存能量,而且其本身仍是一个无源元件。

二、理想电源元件

理想电源包括理想电压源和理想电流源,它们都是具有两个引出端的理想二端有源元件,是实际电源在一定条件下的理想化模型。

1. 理想电压源

一个二端元件,若其端电压在任何情况下都能保持为某给定的时间函数 $u_s(t)$,而与通过它的电流无关,则此二端元件称为理想电压源。其电路符号如图 1-7(a)所示,图中 u 代表理想电压源的端电压,它恒等于 $u_s(t)$; i 代表流过电压源的电流,它取决于联接电压源 $u_s(t)$ 的电路。

若 $u_s(t) = U_s$ 为一常量,则称为直流电压源或恒定电压源,其伏安特性可由 $u-i$ 平面的直线表示,如图 1-7(b)所示。若 $u_s(t)$ 是时间 t 的函数,则称为时变电压源,其伏安特性是 $u-i$ 平面平行于 i 轴的一族直线。

可见理想电压源的端电压 u 恒等于 $u_s(t)$,而与其中电流 i 的大小和方向均无关。电流 i 的大小和实际方向在 $u_s(t)$ 给定时,则完全由电源以外的电路(称为外电路)的工作情况决定,即具有恒压不恒流的特性。用数学方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= u_s(t) \\ i &= \text{不定值(由外电路确定)} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

理想电压源也称为恒压源。

2. 理想电流源

一个二端电路元件,若其中通过的电流在任何情况下都能保持为某给定的时间函数 $i_s(t)$,而与它的端电压无关,则此二端元件称为理想电流源,其电路符号如图 1-8(a)所示。

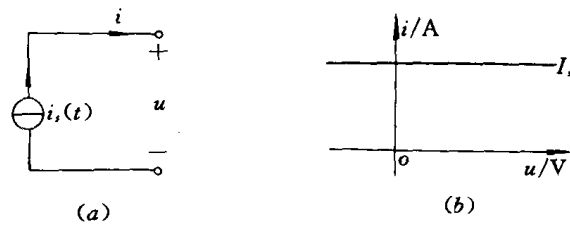


图 1-7 理想电压源及其伏安特性

(a) 电路符号; (b) 伏安特性。

图中 $i_s(t)$ 表示电流源所产生的电流数值, 箭头表示 i_s 的参考方向; u 代表电流源的端电压; i 表示电流源的端电流, 所有方向均为参考方向。

若理想电流源的端电流 $i = i_s(t) = I_s$ 为一常量, 则称为直流电流源或恒定电流源, 其伏安特性可由 $u-i$ 平面上平行于 u 轴的一条直线描述, 如图 1-8(b) 所示。若 $i_s(t)$ 随时间 t 而变化, 则称为时变电流源, 其伏安特性是 $u-i$ 平面上平行于 u 轴的一族直线。

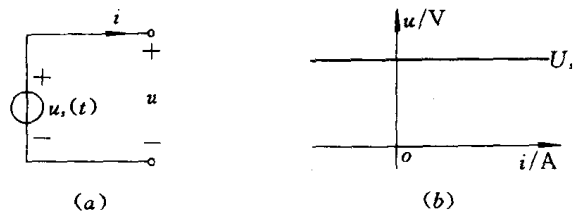


图 1-8 理想电流源及其伏安特性

(a) 电路符号; (b) 伏安特性。

可见理想电流源的端电流 i 只取决于 $i_s(t)$, 即恒等于 $i_s(t)$, 与其端电压 u 的大小和方向均无关。而其端电压 u 的大小和实际正负极性, 在 $i_s(t)$ 给定时, 则完全由电流源以外的电路(外电路)工作情况决定。因此理想电流源具有恒流不恒压的特性, 用数学方程表示为

$$\left. \begin{aligned} i &= i_s(t) \\ u &= \text{不定值(由外电路确定)} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

所以也称为恒流源。

电压源和电流源统称为**电源**, 它们都可以独立向外电路提供能量, 在电路理论中也称为**激励**或独立电源。电源在电路中作用产生的电压和电流称为**响应**。

三、实际电源模型

1. 实际电压源及其电路模型

实际电压源的伏安特性并不是如图 1-7 所示的与电流 i 轴平行的直线, 而是电源的端电压随电流增大而降低, 如图 1-9(a) 所示。为了模拟这一实际现象, 可以用一个理想电压源 u_s 与一个电阻 R_s 的串联组合作为实际电压源的电路模型, 如图 1-9(b) 所示。其中 u_s 为电压源的电压, R_s 称为实际电压源的内阻, u 和 i 分别表示实际电压源端电压和端电流。由此可得

$$u = u_s - iR_s \quad (1-21)$$

式(1-21)表明,实际电压源输出电压 u 与其内阻 R_s 和外电路负载电流有关。内阻 R_s 越小,实际电压源越接近于理想电压源。

当输出电流 $i=0$ 时,称为输出端口开路,此时的输出电压称为**开路电压**,用 u_{oc} 表示。由式(1-21)可见

$$u_{oc} = u_s$$

当输出端电压 $u=0$ 时称为输出端口短路,此时端口电流称为**短路电流**,用 i_{sc} 表示。由式(1-21)可见

$$i_{sc} = u_s/R_s = u_{oc}/R_s$$

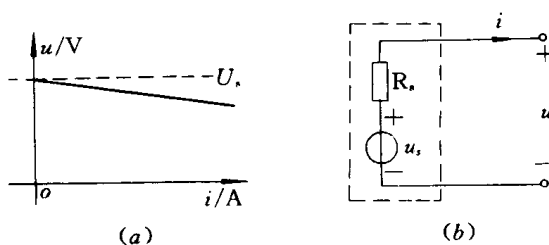


图 1-9 实际电压源伏安特性及其电路模型
(a)伏安特性;(b)电路模型。

2. 实际电流源及其电路模型

实际电流源的输出电流也并不像图 1-8 所示的那样为平行于 u 轴的直线,而是随其端电压的变化而改变。当外接负载增大时输出电流减小,如图 1-10(a)所示。因此可以用一个理想电流源 i_s 与一个电阻 R_s 的并联组合作为实际电流源的电路模型,如图 1-10(b)所示。其中 i_s 为电流源的电流, R_s 为其内阻, u 和 i 分别为其端电压和端电流。实际电流源模型的伏安特性为

$$i = i_s - u/R_s \quad (1-22)$$

其开路电压 $u_{oc}=R_s i_s$,短路电流 $i_{sc}=i_s$ 。

电流源一般是电子器件和光电器件在一定条件下的理想模型。在工程电路分析中,电流源具有重要意义,并给电路计算带来方便。

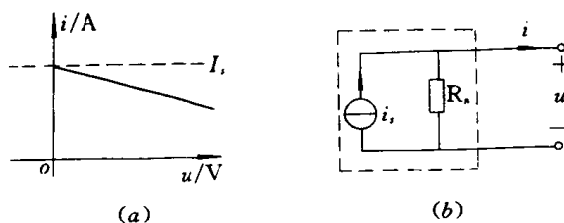


图 1-10 实际电流源伏安特性(a)及其电路模型(b)

3. 实际电源的等效变换

在电路分析中,为了分析研究的方便,往往需要将实际电压源与实际电流源进行等效变换。所谓**等效变换**,就是保持电路一部分电流、电压不变,对某些部分进行适当的结构变化,用新电路结构代替原电路中被变换的部分电路。譬如多个电阻串联结构的电路,若求其通过的电流或总电压,则可用一个总电阻代替。这一过程实际上包含着等效变换。下面

按等效变换的概念,来讨论两种实际电源模型之间参数的关系。

一个实际电压源可以等效变换为实际电流源。由实际电压源的电路模型(图 1-9(b))或式(1-21)可知

$$i = \frac{u_s}{R_s} - \frac{u}{R_s} = i_{sc} - \frac{u}{R_s} \quad (1-23)$$

其中 $i_{sc} = u_s/R_s$ 为电压源模型的端口短路电流。比较式(1-23)与式(1-22)可知,若保持两式电压 u 和电流 i ,即电源模型端口电压、电流相同,使式(1-22)中 $i_s = i_{sc}$,则二式完全相同。可见一个实际的电压源模型可以等效变换为一个实际的电流源模型。等效电流源模型的电流 $i_s = u_s/R_s$,为电压源模型的端口短路电流 i_{sc} ,方向与电压源 u_s 电压升的方向一致。等效电流源模型的内阻与实际电压源内阻在数值上相同。

同理,一个实际电流源模型也可等效变换为一个实际电压源模型。由式(1-22)有

$$u = R_s i_s - R_s i = u_{oc} - R_s i \quad (1-24)$$

其中 $u_{oc} = R_s i_s$ 为实际电流源端口的开路电压。在保持端口电压 u 和电流不变的条件下,式(1-24)与式(1-21),在 $u_s = u_{oc}$ 时,完全相同。即将一个实际电流源等效变换为一个等效电压源模型,其中 $u_s = R_s i_s$,为实际电流源端口的开路电压 u_{oc} ,其电压升的方向与电流源 i_s 方向一致。等效电压源模型的内阻与实际电流源的内阻在数值上相等。

实际电源之间的等效变换如图 1-11 所示。

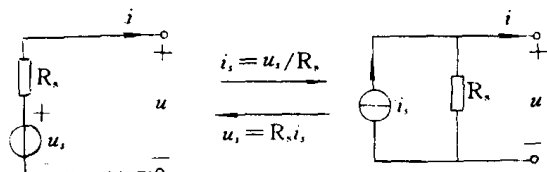


图 1-11 实际电源的等效变换

必须强调指出,电源模型之间的等效变换只是对外电路等效(体现在端口伏安特性上),而对电源内部是不等效的。例如在端口开路情况下,电压源模型中的内阻 R_s 不吸收功率,而对应的等效电流源模型中,内阻 R_s 仍吸收功率。由于理想电压源的内阻为零,而理想电流源的内阻为无穷大,因此理想电源之间不能进行相互等效变换,即理想电压源不存在与之对应的等效电流源,理想电流源也不存在与之对应的等效电压源。

在工程电路分析中,若实际电源内阻远大于外电路负载阻值,则认为此实际电源为电流源。反之,则认为此实际电源为电压源。电源的内阻大小,实际上反映了其带负载能力的大小。例如电压源内阻愈小,则当负载增大时,电源的端电压下降就愈小,带负载的能力就愈大。

【例 1】 图 1-12(a)所示电路,求 i_1 、 i_2 、 i_3 。

解: 利用电源模型的等效变换,可依次将图 1-12(a)等效变换为图 1-12(b)、图 1-12(c)所示电路。于是,根据图 1-12(c)可求得

$$i_3 = \frac{6}{1+5} = 1(\text{A})$$

$$u = 5i_3 = 5(\text{V})$$

再根据图 1-12(a)得