

面向 21 世纪高职高专系列教材

电 路 基 础

田淑华 主编

董维佳 审



机 械 工 业 出 版 社

本书是高职高专电子专业的基础理论教材。本书以应用知识为主，注重理论联系实际。全书共有七章，内容包括电路的基本概念与基本元件、电路的基本定律与分析方法、直流激励下的一阶动态电路、正弦交流电路、谐振电路、互感耦合电路及非正弦周期交流电路，并在附录里介绍复数及四则运算和电容的串联、并联及混联。每章后有小结与习题，书后还附有习题参考答案。本书可作为高等职业院校和高级技工学校电子专业及相关专业的培训教材，也可供社会职业教育培训之用，还可作为大中专院校及技工学校有关专业师生实践参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电路基础/田淑华主编. —北京：机械工业出版社，2001. 6.

面向 21 世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08301-6

I. 电... II. 田... III. 电路理论—高等学校：技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 011007 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策 划：胡毓坚

责任编辑：王 虹

责任印制：

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·5.75 印张·25B 千字

0001—5000 册

定价：17.00 元

凡购本图书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话：（010）68993821、68326677—2527

前 言

本教材是按照高职高专,电子技术专业教材编写委员会的统一安排和要求而编写的系列教材之一,供电子技术专业及其相关专业使用。全书教学时数为80学时左右。

在编写本书时,我们认真贯彻了编委会提出的“基础理论教材以应用知识为主、以为后续课程服务为目的”的宗旨,本着“必须、够用”的原则,编写时降低了理论深度,精选了教材内容,省略了公式中复杂的数学推导过程,增加了例题的数量和类型,注重强调理论联系实际。此外,每章后面有小结与习题,习题配有参考答案。在理论叙述上,尽可能简明扼要,通俗易懂,并注重从具体的例子引出结论。

全书共分7章。根据多年来的教学实践经验,将各部分内容做如下安排:第1章 电路的基本概念与基本元件;第2章 电路的基本定律与分析方法;第3章 直流激励下的一阶动态电路;第4章 正弦交流电路;第5章 谐振电路;第6章 互感耦合电路;第7章 非正弦周期交流电路;附录A、附录B、附录C及习题参考答案。

本书第1、3章由上海的陈良编写,第2章由北京的田淑华和新疆的张遥编写,第4章及附录A由南昌的钟卫编写,第5、6章由北京的曹德跃编写,第7章及附录B、C由田淑华编写。全书由田淑华统稿,董维佳审稿。在审稿过程中,董维佳严谨、认真,提出了许多具体的修改意见,对保证本书的质量起到了重要的作用。

本书的编写和统稿工作,得到了主编和审稿的老师所在单位领导的大力支持和帮助,得到了各参加编写的老师的积极配合。在全体编写成员共同努力下,按时完成了本书的编写任务,谨致以由衷的感谢!

尽管我们为本书尽心尽力,力求完善,但终因时间仓促,且水平所限,仍会有疏漏乃至错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 电路的基本概念与基本

元件 1

1.1 电路与电路模型 1

1.1.1 电路 1

1.1.2 电路模型 2

1.2 电路的基本物理量 2

1.2.1 电流 2

1.2.2 电压 3

1.2.3 电位 4

1.2.4 电流与电压的参考
方向 5

1.2.5 电能与电功率 6

1.3 电阻元件及其伏安
特性 8

1.3.1 电阻与电阻元件 8

1.3.2 电阻元件的伏安
特性 8

1.4 电容元件及其伏安
特性 9

1.4.1 电容器 9

1.4.2 电容元件 9

1.4.3 电容元件的伏安
特性 10

1.5 电感元件及其伏安
特性 11

1.5.1 电感元件 11

1.5.2 电感元件的伏安
特性 11

1.6 理想电源 12

1.6.1 理想电压源 12

1.6.2 理想电流源 13

1.7 小结 13

1.8 习题 14

第 2 章 电路的基本定律与分析

方法 16

2.1 基尔霍夫定律 16

2.1.1 电路的几个名词 16

2.1.2 基尔霍夫电流定律 16

2.1.3 基尔霍夫电压定律 17

2.2 电阻的串联、并联及混联 ... 19

2.2.1 等效网络的概念 19

2.2.2 电阻的串联及其
分压 19

2.2.3 电阻的并联及其
分流 20

2.2.4 电阻混联 22

2.3 电阻的星形、三角形联结
及其等效变换 23

2.4 电位的计算 25

2.4.1 电位的计算方法 25

2.4.2 电子电路图中的电压
源表示方法 26

2.4.3 等电位点的概念 26

2.5 两种电源模型的等效
变换 27

2.5.1 实际电源的两种模型及
其等效变换 27

2.5.2 几种含源支路的等效
变换 29

2.6 网孔电流法 32

2.6.1 网孔电流及其与支路电流
的关系 32

2.6.2 网孔电流方程 32

2.7 节点电位及弥尔曼定理 34

2.7.1 节点电位 34

2.7.2 节点电位法 34

2.7.3 弥尔曼定理	36	3.6.1 微分电路	70
2.8 叠加定理	37	3.6.2 积分电路	71
2.9 戴维南定理	39	3.7 小结	72
2.9.1 戴维南定理的内容	39	3.8 习题	72
2.9.2 戴维南定理的应用	39	第4章 正弦交流电路	76
2.9.3 戴维南等效电路参数的测定	40	4.1 正弦交流电的基本知识	76
2.9.4 诺顿定理	41	4.1.1 正弦交流电的三要素	77
2.10 负载获得最大功率的条件	41	4.1.2 交流电的有效值和平均值	80
2.11 受控源	43	4.2 正弦量的相量表示及运算	82
2.11.1 受控源的概念	43	4.2.1 利用相量表示正弦量	82
2.11.2 受控源的分类	44	4.2.2 相量形式的基尔霍夫定律	84
2.11.3 含受控源电路的分析	44	4.2.3 参考正弦量与参考相量	85
2.12 小结	46	4.3 电阻元件上电压与电流的相量关系	85
2.13 习题	48	4.3.1 电阻元件上相量形式的伏安特性	85
第3章 直流激励下的一阶动态电路	54	4.3.2 电阻元件的功率	86
3.1 换路定律与初始值的计算	54	4.4 电感元件上电压与电流的相量关系	88
3.1.1 产生过渡过程的原因	54	4.4.1 电感元件上相量形式的伏安特性	88
3.1.2 换路定律	55	4.4.2 电感元件的功率	89
3.1.3 初始值的计算	55	4.4.3 电感元件中储存的磁场能量	91
3.2 一阶电路的零输入响应	56	4.5 电容元件上电压与电流的相量关系	91
3.2.1 零输入响应的概念	56	4.5.1 电容元件上相量形式的伏安特性	91
3.2.2 RC 串联电路的零输入响应	57	4.5.2 电容元件上的功率	92
3.2.3 RL 串联电路的零输入响应	60	4.5.3 电容元件上储存的电场能量	93
3.3 一阶电路的零状态响应	62	4.6 RLC 串联电路与多阻抗	
3.3.1 零状态响应的概念	62		
3.3.2 RC 串联电路的零状态响应	62		
3.3.3 RL 串联电路的零状态响应	64		
3.4 一阶电路的全响应	66		
3.5 一阶电路的三要素法	68		
3.6 微分电路和积分电路	70		

的串联	94	5.4 小结	129
4.6.1 电压与电流的关系	94	5.5 习题	131
4.6.2 RLC 串联电路的功率	96	第 6 章 互感耦合电路	132
4.6.3 多阻抗的串联	99	6.1 互感和互感电压	132
4.7 并联电路	100	6.1.1 互感现象	132
4.7.1 多阻抗的并联	100	6.1.2 互感电压	132
4.7.2 导纳法分析并联电路	101	6.1.3 同名端	133
4.8 正弦交流电路中负载获得最大功率的条件	102	6.2 互感线圈的联结	135
4.9 三相电路	103	6.2.1 互感线圈的串联	135
4.9.1 三相交流电源	104	6.2.2 互感线圈的并联	136
4.9.2 三相负载的联结	107	6.2.3 互感线圈的一端相联	137
4.9.3 三相电路的功率	110	6.3 理想变压器	140
4.10 小结	111	6.3.1 理想变压器的定义	140
4.11 习题	113	6.3.2 理想变压器的作用	140
第 5 章 谐振电路	116	6.4 小结	142
5.1 串联谐振	116	6.5 习题	143
5.1.1 串联谐振的条件	116	第 7 章 非正弦周期交流电路	146
5.1.2 串联谐振的特征	117	7.1 非正弦周期信号	146
5.1.3 串联谐振电路的谐振曲线	119	7.1.1 常见的非正弦周期信号	146
5.1.4 串联谐振电路的通频带	121	7.1.2 非正弦周期信号的表示方法	147
5.2 并联谐振	123	7.1.3 波形的对称性与所含谐波成分的关系	148
5.2.1 并联谐振的条件	123	7.1.4 波形的光滑程度与所含谐波成分的关系	149
5.2.2 并联谐振的特征	124	7.2 非正弦周期信号的频谱	149
5.2.3 并联谐振电路的谐振曲线和通频带	125	7.3 非正弦周期量的有效值和平均值	150
5.3 谐振的应用	127	7.3.1 非正弦周期量的有效值	150
5.3.1 常用的复杂并联谐振电路	127	7.3.2 非正弦周期量的平均值	150
5.3.2 并联谐振电路的谐振条件	128	7.3.3 非正弦波的失真	150
5.3.3 并联谐振电路的谐振频率	128	7.4 线性非正弦周期电流电路的计算	152
5.3.4 并联谐振电路的应用	128	7.5 小结	155
		7.6 习题	156

附录		附录 C	162
附录 A	158	习题参考答案	167
附录 B	160	参考文献	172

第 1 章 电路的基本概念与基本元件

本章首先介绍电路分析的基本思想和概念,在引入理想元件的基础上建立了电路模型的概念,从而明确了本课程研究的对象。同时还介绍了电流、电压、电功率等电路的基本物理量以及电阻、电容、电感、电压源和电流源等常见理想电路元件对电流、电压的约束关系——元件的伏安特性。本章所讨论的内容是电路分析的重要基础知识,将始终贯穿于全书各个部分。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路

在科技发达的今天,无论是人们的日常生活还是各种生产实践都广泛地使用着种类繁多的电路。例如,为了采光而使用照明电路;异地间交流信息而使用通信电路;将微弱电信号进行放大而借助于放大电路;为实现现代化生产而使用各种自动控制电路,等等。

电路是为了实现某种预期的目的而将电器设备和元件按一定方式联接起来的总体。电路有时也称网络,两个名词常可通用,只是网络一般指较为复杂的电路。图 1-1 和图 1-2 就是两个实际电路的例子。

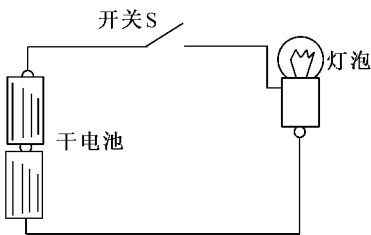


图 1-1 手电筒电路

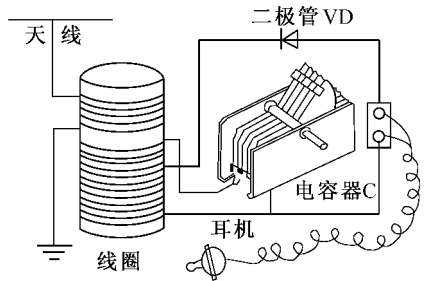


图 1-2 收音机电路

图 1-1 是一个照明电路。开关 S 合上后,随着电流的通过,灯泡将电能转换成光能和热能。图 1-2 是最简单的收音机的电路,天线将收到的电波(即电信号)由线圈感应出一个电压,再通过电路将该电压变换或“加工”成耳机所需要的电信号并转变成声音。一般说来,电路的主要功能是进行能量的传输和转换(如图 1-1)或者信号的传递和处理(如图 1-2)。不管是简单还是复杂的电路,都可以将它分为三个部分:一是提供电能(或信号)的部分称为电源(或信号源);二是消耗或转换电能的部分,称为负载;三是联接及控制电源和负载的部分如导线、开关等称为中间环节。最简单的中间环节可以仅仅是两根联接导

线,而复杂的中间环节则可以是一个庞大的控制系统。

1.1.2 电路模型

组成实际电路的元件种类繁多,即使是很简单的实际元件,在工作时所发生的物理现象也可能是很复杂的。例如,一个实际的线绕电阻器有电流通过时,除了对电流呈现阻碍之外,还在导线周围产生磁场,因而兼有电感器的性质。同时还会在各匝线圈间存在电场,因而又兼有电容器的性质。一个实际的直流电压源总有一定的内阻,因此在使用时不能严格地保持其端电压恒定,所以直接对由实际元件和设备构成的电路进行分析和研究,往往很困难,有时甚至是不可能的,为此,我们对各种实际电路元件按照它们在电路中表现出来的电磁性质进行分类,并加以理想化,在一定的条件下忽略其次要的性质,突出其主要特征,用一个足以表征其主要电磁性质的“模型”——理想元件来表示。

理想元件具有以下两个特点:第一,它所反映的电磁性质可以用数学表达式精确地描述,这样才能使人们可以运用数学的方法对电路进行定量的分析和计算。第二,实际电器设备或元件中所发生的电磁现象都可以用理想元件或者它们的适当组合来表示,例如,在电源频率不是很高的电路中,我们可以用“电阻元件”这一理想元件来表示各种电阻器、电灯、电炉等实际电路元器件,同样,在一定条件下可以用“电容元件”来表示各种实际的电容器,用“电感元件”来表示各种实际的线圈,用“理想电压源”和一个“电阻元件”的串联组合来表示各种干电池、蓄电池等实际直流电源,等等。

引入了理想元件的概念以后,实际的电路元件都可以用能够反映其主要电磁性质的理想元件来替代,因此,无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过若干种理想电路元件所构成的抽象电路来表示,我们把这种抽象电路称为“电路模型”。显然,电路模型只反映各种理想元件在电路中的作用及相互连接方式,并不表示电器设备和元件的真实几何形状和实际位置,我们所进行的电路的分析、计算就是对这种电路模型而言。另外,在电路模型中,连接各元件的导线认为是理想导体,其电阻忽略不计。

实际的电路元件总有两个或两个以上的端钮和电路的其他部分联接,因而与其对应的理想元件也有两个和多个联接端钮,分别称为两端元件和多端元件,本书主要讨论由两端元件构成的电路。

有时候为了叙述方便起见,常把电路分为外电路和内电路,从电源一端经过负载再回到电源另一端的这部分电路称外电路,电源内部的通路称内电路。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

电荷作有规则的定向运动形成电流。在金属导线中,电流是由带负电的电子的定向运动所形成,而在电解液和气态导体中,电流则是由正、负离子以及电子的定向运动所形成。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。实践表明,正电荷沿某一方向运动和等量的负电荷朝相反方向运动所产生的电效应是一样的,因此,如果电流是由电子

的定向运动而形成,那么,该电流的实际方向可以认为是电子运动的反方向,见图 1-3。

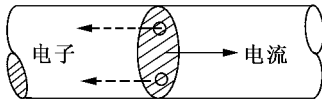


图 1-3 电荷的定向运动

在以后讨论电流时,一般情况下只需要知道电流的方向而没有必要去了解该电流是由何种电荷运动所形成的。

如果在同一段时间内流过导体横截面的电荷量不一样,则导体中电流的大小是不相同的,因此,我们引入了电流这一物理量来表征电流的大小。设在一段时间 Δt 内,通过导体截面的电荷量为 Δq ,则电流 i 定义为

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中, q 是电荷量,单位是库仑(C); t 的单位是秒(s); i 是电流,单位是安培(A)。在实际使用中,电流强度还会用到较小一些的单位:毫安(mA)和微安(μA),它们之间的换算关系如下:

$$1A = 1000 \text{ mA}$$

$$1\text{mA} = 1000\mu A$$

“电流”一词有两个含义,它既可以指一种物理现象,又可以指一种物理量,读者应注意区别。

大小和方向均不随时间改变的电流称为恒定电流,简称直流,常用字母 DC 来表示。显然,对于恒定电流,在任意相同时间间隔 Δt 内通过导体横截面的电荷量 Δq 都是相同的,式(1-1)可以简化成

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \text{恒量} \quad (1-2)$$

注意:用大写字母 I 代表恒定电流,小写字母 i 一般代表变化电流。

大小和方向随时间变化的电流叫变动电流。在变动电流中有一种呈周期性变化且一个周期内平均值为零的电流称为交变电流,简称交流,常用字母 AC 来表示。正弦交流是一种常见的、典型的交变电流。本书第 4 章将详细讨论正弦交流电路。

1.2.2 电压

从物理学课程中已经知道,电荷在电场力的作用下移动,电场力要作功。在电路中,把电场力将单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功称为 A、B 两点间的电压。设有正电荷 dq 在电场力的作用下,从 A 点移到 B 点,电场力做的功为 $d\omega$,则 A、B 两点间的电压为

$$u_{AB} = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

式中, ω 的单位是焦耳(J); q 的单位是库仑(C); u_{AB} 的单位是伏特(V)。在实际使用中,电压还会用到较大的单位:千伏(kV)和较小的单位:毫伏(mV)、微伏(μV),它们之间的换算关系如下:

$$1\text{kV} = 1000\text{V}$$

$$1\text{V} = 1000\text{mV}$$

$$1\text{mV} = 1000\mu\text{V}$$

电压的实际方向规定为正电荷在电场中受电场力作用而移动的方向。

如果电压的大小和方向均不随时间改变,则称为直流电压。显然,对于直流电压,在任何时刻电场力将电荷 q 从 A 点移到 B 点所做的功 w 都是相同的,式(1-3)可以简化成

$$U_{AB} = \frac{w}{q} = \text{恒量} \quad (1-4)$$

与前面讨论电流时一样,用大写字母 U 代表直流电压,为了区别,小写字母 u 代表变化的电压。

电压总是对电路中两点而言,所以通常用带双下标的字母来表示,且双下标字母的顺序与计算该电压时两点之间的顺序相对应。设正电荷 q 从 A 点运动到 B 点电场力做正功 $d\omega$,那么,该电荷从 B 点回到 A 点时将克服电场力而做功 $d\omega$,或者说电场力将做负功 $d\omega$ 。根据物理学的知识可知, $d\omega = -d\omega$,于是有

$$u_{BA} = \frac{d\omega}{q} = \frac{-d\omega}{q} = -u_{AB} \quad (1-5)$$

由此可知,改变电压的起点与终点的顺序,电压的数值不变,但要相差一个负号。

1.2.3 电位

在电子线路中,经常会遇到需要测量或分析电路中各点与某个固定点之间电压的情况,此时往往把该固定点称为参考点,而把电路中各点与参考点之间的电压称为各点的电位。电位通常用字母 V 表示,如 A 点的电位记作 V_A 。电位与电压的单位相同。

参考点在电路图中常用符号“—”表示。当参考点选定以后,电路中各点的电位便有一固定的数值。下面我们来研究电路中任意两点 A 和 B 的电位(V_A 和 V_B)与这两点的电压(u_{AB})之间的关系。设在图 1-4 所示的一段电路中取 O 点为参考点,于是有

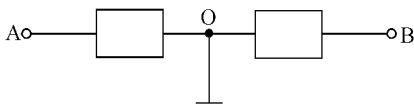


图 1-4

$$V_A = u_{AO}, V_B = u_{BO}$$

A、B 两点的电位差为

$$V_A - V_B = u_{AO} - u_{BO} = u_{AO} + u_{OB}$$

这里 $u_{AO} + u_{OB}$ 就是电场力将单位正电荷从 A 点经过 O 点再移到 B 点所做的功,也就是 A、B 两点之间的电压 u_{AB} , 即有

$$u_{AB} = V_A - V_B \quad (1-6)$$

这就是说,电路中两点之间的电压等于该两点之间的电位差。在电场力的作用下,正电荷总是从高电位点移向低电位点,因此在引入了电位概念之后,也可以说,电压的实际方向是由高电位点指向低电位点。这种对电压方向的规定更加实用。

电路中各点的电位值与参考点的选择有关,当所选的参考点变动时,各点的电位值将随之变动,因此,在电路中不指定参考点而谈论各点的电位是没有意义的。另外,参考点本身的电位为零,即 $V_O=0$,所以参考点也叫零电位点。

1.2.4 电流与电压的参考方向

电流和电压是电路分析中通常要求解的物理量,常称为电路变量。前面对这些电路变量的方向作了明确的规定。在简单的电路里,电流和电压的实际方向往往可以明显地预见到,但对比较复杂的电路,却很难直观地判断出它们的实际方向,有时电流、电压的方向还在不断地改变,我们更是无法在电路中用一个固定的箭头来表示它们的真实方向。在这种情况下,可以先任意选取一个方向作为电流(或电压)的方向并标注在电路上,根据这个方向再结合有关的电路定律进行分析、计算。这个任意选取的方向称为参考方向。若据此而求得的电流(或电压)为正值,则其实际方向与设定的参考方向相同;若求得的电流(或电压)为负值,则其实际方向与设定的参考方向相反。

参考方向在电路中一般用实线箭头表示,也可以用双下标表示,如 i_{AB} 、 u_{AB} 等,其参考方向表示由 A 指向 B。除此之外,电压参考方向还可以用“参考极性”的标注方法来表示,即在电路或元件两端标以“+”“-”符号,“+”号表示假设为高电位端,“-”号表示假设为低电位端,由高电位端指向低电位端的方向就是假设的电压的参考方向,这是较常用的一种电压参考极性的表示方法,如图 1-5 所示。

电流参考方向和电压参考方向可以任意选定,为了方便起见,往往将一段电路或一个元件上的电流和电压的参考方向选成一致,电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向,简称关联方向,电压和电流的关联参考方向如图 1-6 所示。本书中若未特别说明,均采用关联参考方向。

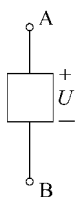


图 1-5 电压参考极性的表示方式
(方框代表一个元件或一段电路)

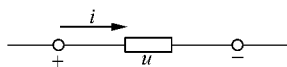


图 1-6 电压和电流的关联参考方向

参考方向是进行电路分析、计算的一个重要概念。在选取一定参考方向的前提下,电流、电压都是代数量,其实际方向由参考方向与该代数量的正、负来决定。不规定参考方向而去谈论一个电流或电压值是没有意义的。读者应注意养成习惯,每提及一个电流或电压,应同时指明其参考方向;每求解一个电流或电压,应预先设定其参考方向。

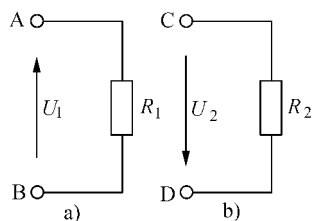


图 1-7 例 1-1 附图

【例 1-1】 在图 1-7 所示的电路中,已知 $U_1 = -100\text{V}$, $U_2 = 200\text{V}$,求 U_{AB} 和 U_{CD} 各为几伏?

解 U_1 和 U_2 是以图中箭头的方向为其参考方向,现 U_{AB} 表示的参考方向与 U_1 的箭头方向相反(见图 1-7a), U_{CD} 表示的参考方向与箭头方向一致(见图 1-7b),故有

$$U_{AB} = -U_1 = -(-100\text{V}) = 100\text{V}$$

$$U_{CD} = U_2 = 200\text{V}$$

1.2.5 电能与电功率

1. 电能

电流通过电路元件时,电场力要做功。当有电流从元件的高电位端流入,低电位端流出,即有正电荷从元件的“+”端移到“-”端时,电场力做正功,电能转化为其他形式的能量。例如,电流流过电阻元件时电能转化为热能,或者电流流过被充电的电池时电能转换为化学能,此时元件消耗电能,见图 1-8a,相反,当电流从元件的低电位端流入、高电位端流出,即有正电荷从元件的“-”端移到“+”端时,电场力做负功,元件将其他形式的能量转换为电能,例如正在供电的电源,此时元件向外提供电能,见图 1-8b。

设在 dt 时间内,有正电荷 dq 从元件的“+”端移到“-”端,若元件两端的电压为 u ,则电场力移动电荷做的功为

$$d\omega = u dq = ui dt \quad (1-7)$$

即在 dt 时间内,元件消耗了电能 $d\omega$,如果正电荷 dq 是从元件的“-”端移到“+”端,则电场力做负功, $d\omega$ 表示元件的电能。

在直流的情形下,电压 U 和电流 I 都是常量,根据式(1-7),电场力做的功为

$$W = \int_0^t d\omega = \int_0^t ui dt = UI t \quad (1-8)$$

至于元件是消耗电能还是提供电能,则要视电压与电流的实际方向而定,在电压和电流取关联参考方向时,若算得 $W > 0$,说明 U 、 I 的实际方向一致,即有电流从元件的高电位端流入、低电位端流出,说明元件消耗电能;若算得 $W < 0$,则说明 U 、 I 的实际方向相反,即有电流从元件的低电位端流入、高电位端流出,说明元件向外提供电能。

电功的单位是焦耳(J),工程上也常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$,俗称“度”)做单位,它们的换算关系为

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

2. 电功率

为了表示元件消耗或提供电能的快慢,我们引入了电功率这一物理量,电能对时间的变化率叫电功率。电功率简称为功率,用字母 p 表示,即

$$p = \frac{d\omega}{dt} = u i \quad (1-9)$$

同样地,当 $p > 0$ 时,说明元件消耗电能,为吸收功率;当 $p < 0$ 时,则说明元件向外提

供电能,为输出功率,见图 1-9。

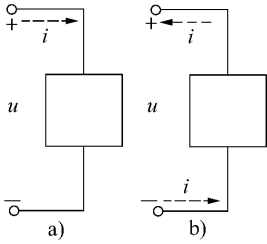


图 1-8 元件性质的确定

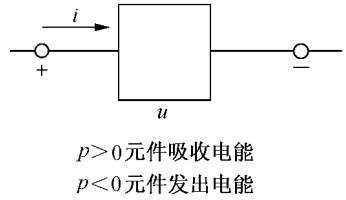


图 1-9 吸收功率与输出功率

如果电流和电压为非关联参考方向时,可将式(1-9)改写成

$$p = -ui \quad (1-10)$$

这样, $p > 0$ 仍然表示元件消耗电能,为吸收功率; $p < 0$ 表示元件向外提供电能,为输出功率。

电功率的单位是瓦(W),在实际使用中还会用到千瓦(kW)和毫瓦(mW),它们之间的换算关系如下:

$$1\text{kW} = 1000\text{W}$$

$$1\text{W} = 1000\text{mW}$$

在直流的情况下,式(1-9)可写成

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-11)$$

即功率在数值上等于单位时间内电路(或元件)所提供或消耗的电能。

【例 1-2】 试求图 1-10 中元件的功率。

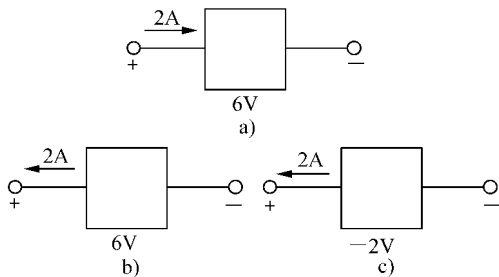


图 1-10 例 1-2 图

解 图 1-10 a 为关联参考方向, $P = UI = 6\text{V} \times 2\text{A} = 12\text{W}$ ($P > 0$, 元件消耗电能);

图 1-10 b 为非关联参考方向, $P = -UI = -6\text{V} \times 2\text{A} = -12\text{W}$ ($P < 0$, 元件提供电能);

图 1-10 c 为非关联参考方向, $P = -UI = -(-2\text{V}) \times 2\text{A} = 4\text{W}$ ($P > 0$, 元件消耗电能)。

能)。

1.3 电阻元件及其伏安特性

1.3.1 电阻与电阻元件

电流通过导体时会受到一种阻碍作用,这种阻碍作用最明显的特征是导体要消耗电能而发热。我们把物体对电流的阻碍作用称为电阻。

物体的电阻与其本身的材料性质、几何尺寸以及所处的环境(如温度甚至光照等)有关。电阻用字母 R 表示,其常用的单位是欧姆(Ω),在实际使用中,有时还会用到千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$)等较大的单位。它们之间的换算关系如下:

$$1 \text{ M}\Omega = 1000 \text{ k}\Omega$$

$$1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega$$

电阻是物体(或者说材料)本身的一种性质,利用材料的这种性质可以制成“电阻器”这种实际电路元件来集中表示导体对电流的阻碍作用。当然实际的电阻器在工作中还可能会表现出其他一些微弱的电磁现象,如会产生磁场等。如果我们突出这一实际元件对电流的阻碍作用、在其内部进行着把电能转换成热能等不可逆过程的主要特征,忽略其一些次要的性质,便可抽象出一种理想的电路元件——电阻元件,其电路图形符号如图 1-11 所示。白炽灯、电炉、电烙铁等以消耗电能而发热或发光为主要特征的一些电路器件在电路模型中都可以用电阻元件来表示。电阻元件通常简称为电阻,因此“电阻”一词既可以指一种元件,又可以指元件的一种性质。

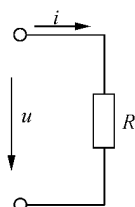


图 1-11
电阻元件
电路图形
符号

1.3.2 电阻元件的伏安特性

从电路分析的角度来看,我们对一个元件感兴趣的并非是其内部结构而是其外部特性,即该元件两端的电压 u 与通过该元件的电流 i 之间的关系,简称为元件的伏安特性。元件的伏安特性一般是通过对其所替代的实际元件进行试验取得数据并整理、分析而得到的。

实验表明:通过电阻元件的电流 i 与元件两端的电压 u 成正比。在电压与电流取关联参考方向时(见图 1-11),该关系可写成

$$u = Ri \tag{1-12}$$

这就是电阻元件的伏安特性,式中 R 是元件的电阻。这一规律在 19 世纪为德国科学家欧姆所发现,故称之为欧姆定律。该定律表明,当电流流过电阻元件时,会沿着电流的方向出现一个电位降(即电压)。

在直角平面坐标系中,以电流为横坐标,电压为纵坐标,可画出上述电阻元件的 $u-i$ 的关系(伏安特性)曲线,见图 1-12。该曲线是一条过原点的直线,电阻 R 的几何意义是该直线的斜率($R = \frac{u}{i} = \text{tg}\alpha$), R 值越大,斜率越大,直线就越陡,见图 1-12,由图 1-12 可知 $R_1 > R > R_2$ 。

当电阻 R 为常数时,其 $u-i$ 关系是一条直线,该元件称为线性电阻元件。有一些电阻元件其伏安特性曲线不是一条直线,如图 1-13 给出的晶体二极管的伏安特性曲线,它是呈非线性的。这种元件电压与电流的比值是变化的,我们把这种元件称为非线性电阻元件。非线性电阻元件的伏安特性不服从欧姆定律。

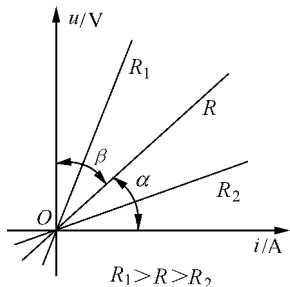


图 1-12 电阻元件的伏安特性曲线

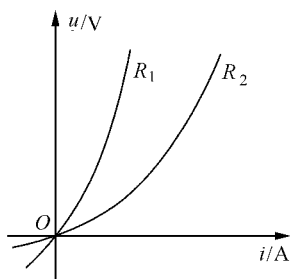


图 1-13 二极管的伏安特性曲线

1.4 电容元件及其伏安特性

1.4.1 电容器

在电气设备中,广泛用到一种叫电容器的元件。电容器由一对相互靠近中间隔以绝缘介质(如空气、纸、云母、陶瓷等)的导体构成。这一对导体又称为电容器的极板。如果将电容器的两极板与一直流电压源接通,由于介质是不导电的,最后电容器的两个极板将分别聚集起等量的异种电荷,这些电荷相互吸引,被约束在极板上,在极板之间(即介质中)建立起电场,与此同时,两极板间的电压等于外加直流电压源的电压,此时称电容器被充电。将充了电的电容器从电源上拆下,电荷仍然将保持在极板上,极板之间的电场能量也将继续存在,所以电容器是一种能够储存电荷(或电场能量)的实际电路元件。

1.4.2 电容元件

电容器工作时其介质在交变电场的作用下会发热而消耗电能,这一现象称为介质损耗;其次,电容器中的介质不可能做到完全绝缘,在实际使用时总会有少量电荷通过介质而形成所谓的漏电流。高品质电容器的损耗和漏电流都是很小的,作为一种理想的情况,假定电容器的损耗和漏电流小到可以忽略不计,只考虑其具有储存电场能量的特性,就可抽象出一种理想的电路元件——电容元件,电容元件的电路图形符号如图 1-14 所示。



图 1-14 电容元件的电路图形符号

显然,对一个电容元件来说,其极板间的电压 u 越大,极板上携带的电荷量 q 也越多,我们把 q 与 u 比值称为电容元件的电容量(简称为电容),用符号 C 表示,即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-13)$$

电容 C 是元件本身的一个固有参数,其大小取决于极板间的相对面积、距离以及中间的介质材料。如果元件的 C 是一个常数,即 q 与 u 成正比,则称其为线性电容元件,否则称为非线性电容元件。由式(1-13)可知,在两极板间的电压 u 一定时, C 越大,极板上所携带的电荷量 q 也越多,因此,电容 C 是一个表示电容元件储存电荷能力大小的物理量。

本书所讨论的电容元件均为线性电容元件。

电容的国际单位为法拉(F),实用上多用更小的单位微法(μF)和皮法(pF),它们之间的换算关系为

$$\begin{aligned} 1\text{F} &= 10^6 \mu\text{F} \\ 1\mu\text{F} &= 10^6 \text{pF} \end{aligned}$$

对一个电容元件来说,其两极板上的电压 u 与储存在极板之间的电场能量 W_C 之间有一定的对应关系(推导从略),即

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-14)$$

也就是说,每当两极板之间有电压 u ,就必定有 $\frac{1}{2} C u^2$ 的电场能量存在其中。

应该指出,“电容元件”和“电容”是两个不同的概念,但是在不致引起混淆的情况下,电容元件可简称为电容。这样,“电容”一词既可以指一种元件,也可以指一种元件的参数,读者应注意区别。

1.4.3 电容元件的伏安特性

当电容两端的电压 u 发生变化时,聚集在极板上的电荷 q 也将相应地发生变化,由于两极板之间的介质是不导电的,所以这些变化一定是由电荷通过联接导线在极板与电源之间做定向移动而产生的,也就是说,只要电容两端的电压 u 发生变化,电容所在的电路会形成电流 i 。选定 u 与 i 为关联参考方向(见图 1-15),设在极短的时间间隔 dt 内,电容 C 的极板上的电压变化了 du ,相应的电量变化了 dq ,根据式(1-13)可知

$$dq = C du$$

此时电容所在电路的电流则为

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

式(1-15)就是电容元件的伏安特性。由此可见,在某一时刻通过电容元件的电流与该时刻元件两端电压的变化率 $\frac{du}{dt}$ 成正比,而与该时刻电压值的大小无关。电压的变化率大,电流就大;电压的变化率小,电流就小;电压的变化率为零(即电压无变化,相当于直流的情况),电路中就无电流,这时元件相当于开路,所以电容元件有“隔直通交”的作用。这与电阻元件不同,电阻元件只要其两端有电压就一定有电流通过而不论该电压是否在变化。

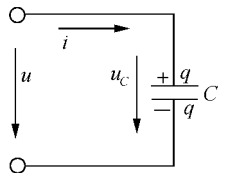


图 1-15 电容元件上的电压与电流