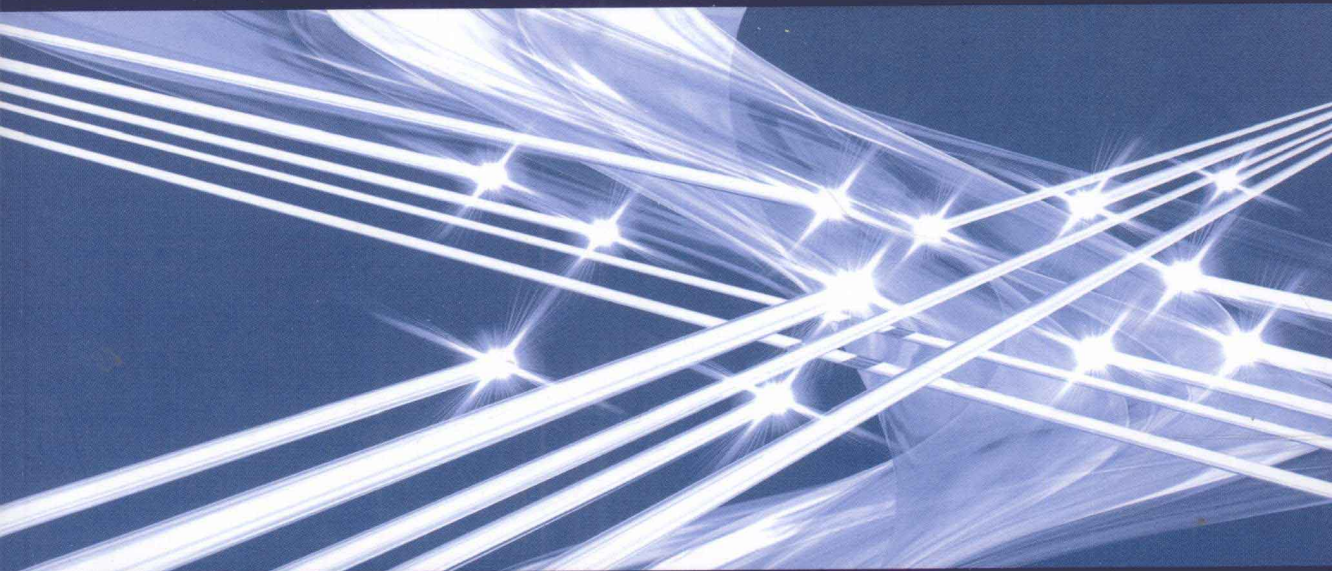




普通高等教育“十二五”规划教材



电路原理

王 玫 主 编

宋卫菊 徐国峰 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电路原理

主 编 王 玫
副主编 宋卫菊 徐国峰
编 写 陆欣云 陈兴荣
主 审 孟正大



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,根据教育部颁布的高等学校工科本科电路课程教学基本要求编写。

全书共有十三章,内容包括:电路元件和电路定理、电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、线性电路的基本定理、正弦稳态电路的分析、含耦合电感和理想变压器电路的分析、三相电路、动态电路的时域分析、非正弦周期信号激励下稳态电路的分析、动态电路的复频域分析、二端口网络、非线性电阻电路简介、磁路。每章配有大量的例题、思考题和习题,并附参考答案。

书中系统地阐述了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。内容全面、难易适中、叙述清晰透彻,便于组织教学和学生自学。

本书可作为应用型本科电气工程、自动化、通信工程、计算机等专业教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/王玫主编. —北京:中国电力出版社,2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1862-5

I. ①电… II. ①王… III. ①电路理论—高等学校—教材

IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第125872号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19印张 460千字

定价 32.50元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书以教育部新颁布的本科“电路分析基础”和“电路理论基础”两门课程的教学基本要求为指导,结合现代电工电子技术的发展对电气信息类专业人才的要求,在初版《电路分析基础》(王玫主编)一书的基础上重新编写。本书既保持了原书重视基本概念、基本理论和基本分析方法的特点,同时又对原书内容进行增删和更新,使教材内容体系更加合理。在编写中较好地处理了教材内容深度和广度、理论性和适用性的关系,方便后续课程的开展。

编者多年来一直从事电类本科专业基础课、专业课的教学和科研工作,积累了丰富的教学经验。在教材的编写工作中,着重考虑应用型本科院校的特点,以学以致用、够用为度为原则,力求做到以下几方面:

(1) 注重基本知识、基本理论和基本分析方法的阐述,以培养学生分析问题和解决问题的能力。

(2) 教材不仅具有合理的科学体系,而且紧密结合专业,可供电类各专业选用。

(3) 书中叙述简明扼要、清楚透彻,语言流畅,便于自学。

另外,还编写有与本书配套的《电路原理学习指导与习题详解》。

全书由南京工程学院老师承担编写。其中第一、二、三、四、六章由王玫编写;第五章第十一、十二节,第七、八、十、十三章由宋卫菊编写;第五章第一节~第十节、第十一章由徐国峰编写;第九章由陆欣云编写;第十二章由陈兴荣编写。全书由王玫担任主编并负责统稿,东南大学孟正大教授担任主审。孟教授对本书的初稿提出了十分宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。此外,书中还参考了众多文献资料,得到许多启发和收获,在此谨表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者和专家指正。

编者

2011年5月于南京

目 录

前言

第一章 电路元件和电路定理	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路中的基本物理量	2
第三节 电阻元件	5
第四节 电容元件	7
第五节 电感元件	10
第六节 独立电源	12
第七节 受控电源	15
第八节 基尔霍夫定律	16
第九节 电位及其计算	20
第十节 电路中的对偶关系	21
本章小结	22
思考题	23
习题一	24
第二章 电路的等效变换	29
第一节 二端网络等效变换的概念	29
第二节 电阻的串联、并联和混联	29
第三节 电阻星形连接和三角形连接及其等效变换	33
第四节 独立电源的连接和等效变换	36
第五节 含受控源电路的等效变换	40
本章小结	41
思考题	42
习题二	43
第三章 电阻电路的一般分析方法	47
第一节 支路电流法	47
第二节 网孔分析法	50
第三节 回路分析法	54
第四节 节点分析法	57
本章小结	61
思考题	63
习题三	63
第四章 线性电路的基本定理	67
第一节 叠加定理	67

第二节	替代定理	71
第三节	戴维南定理和诺顿定理	72
第四节	最大功率传输定理	79
本章小结		82
思考题		83
习题四		83
第五章	正弦稳态电路的分析	88
第一节	正弦量的基本概念	88
第二节	正弦交流电的相量表示	91
第三节	基尔霍夫定律的相量形式	95
第四节	电阻、电感和电容元件伏安特性的相量形式	97
第五节	阻抗和导纳	100
第六节	正弦稳态电路分析	105
第七节	电阻、电容和电感元件的功率	108
第八节	二端网络的功率	111
第九节	功率因数的提高和有功功率的测量	114
第十节	正弦稳态电路中的最大功率传输	117
第十一节	正弦交流电路中的串联谐振	120
第十二节	正弦交流电路中的并联谐振	123
本章小结		125
思考题		125
习题五		126
第六章	含耦合电感和理想变压器电路的分析	131
第一节	耦合电感	131
第二节	耦合电感的连接及其去耦等效电路	134
第三节	空芯变压器	141
第四节	理想变压器	146
本章小结		151
思考题		152
习题六		153
第七章	三相电路	156
第一节	三相电源	156
第二节	三相电源的连接和三相负载的连接	157
第三节	对称三相电路的计算	160
第四节	不对称三相电路的计算	163
第五节	三相电路的功率及其测量	165
本章小结		168
思考题		168
习题七		169

第八章 动态电路的时域分析	171
第一节 换路定律和电路初始值的计算	171
第二节 一阶电路的零输入响应	174
第三节 一阶电路的零状态响应	178
第四节 一阶电路的全响应·三要素法	181
第五节 一阶电路的阶跃响应	186
第六节 一阶电路的冲激响应	191
第七节 二阶电路的响应	195
本章小结	201
思考题	201
习题八	202
第九章 非正弦周期信号激励下稳态电路的分析	207
第一节 非正弦周期信号及其傅里叶级数的分解	207
第二节 非正弦周期信号激励下电路的有效值和平均功率	211
第三节 非正弦周期信号激励下电路稳态响应的计算	213
第四节 滤波电路	215
本章小结	219
思考题	220
习题九	221
第十章 动态电路的复频域分析	223
第一节 拉普拉斯变换	223
第二节 拉普拉斯反变换	226
第三节 电路元件和电路定律的复频域形式	228
第四节 线性动态电路的复频域分析法	231
第五节 网络函数	233
本章小结	238
思考题	240
习题十	240
第十一章 二端口网络	243
第一节 二端口网络的概念	243
第二节 二端口网络的参数和方程	244
第三节 二端口网络的等效电路	251
第四节 二端口网络的连接	254
本章小结	256
思考题	257
习题十一	257
第十二章 非线性电阻电路简介	259
第一节 非线性电阻元件	259
第二节 非线性电路的分析方法	260

本章小结.....	267
思考题.....	267
习题十二.....	267
第十三章 磁路	269
第一节 磁场的基本物理量及全电流定律.....	269
第二节 铁磁物质的磁化曲线.....	271
第三节 磁路及磁路定律.....	275
第四节 恒定磁通磁路的计算.....	277
第五节 交变磁通磁路.....	279
第六节 电磁铁.....	280
本章小结.....	282
思考题.....	283
习题十三.....	284
参考答案	286
参考文献	294

第一章 电路元件和电路定理

内 容 提 要

本章主要介绍电路、电路模型、参考方向等基本概念,讨论电路中电压、电流、功率等基本物理量和电路电阻、电感、电容、独立电源和受控电源五种元件及其特性,阐述电路中电压和电流应服从的两类约束,即元件的伏安关系和基尔霍夫定律以及简单电路的分析和计算方法。这些内容是全书的基础。

第一节 电路和电路模型

电路是由若干个电气设备或电路元器件(如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、电源、半导体器件、集成电路、发电机、电动机等)按一定方式连接而成的电流通路。在现代科技领域中电路的结构形式、完成的任务各有不同,但就其功能而言,大体可分为两类:一类是进行能量的转换、传输和分配的电路,如电力系统中:发电机组将热能、水能、风能等其他形式的能量转换为电能,经过输电线、变压器、开关等电气设备传输、分配给各种用电设备,这些用电设备吸收电能再转换为光能、热能、机械能等其他形式的能量而得以利用。另一类是对电信号进行传递、存储、加工和处理的电路,如通信系统中,收音机和电视机通过天线接收来自空间的音频和视频等信号,经过调谐、变频、放大、检波等处理,分别送到扬声器和显像管还原成原有的声音和图像。

图1-1(a)所示是一个手电筒的实际电路。它由电池、导线、开关和灯泡连接而成,当开关闭合时,灯泡的两端建立起电压,电路中形成电流,电流通过灯泡使其发光。图1-1(a)中电池是提供电能的器件,称为电源;灯泡是耗能的器件,称为负载;连接电源和负载的是导线。由于电路中的电流和电压是在电源的作用下产生的,因此,电源称为电路的“激励”,而电流和电压则称为电路的“响应”。

实际电路中的电路元器件在工作时的电磁性质是比较复杂的,往往同时具有多种电磁效应,这给电路的分析和计算带来困难。为了简化问题,以便于探讨电路的普遍规律,在分析实际电路时,人们往往将实际的元器件理想化,抓住其主要特性,忽略其他次要因素,用一个足以表征其主要性能的理想化电路元件近似代替实际电路器件。在手电筒电路中,当有电流流过灯泡时,灯丝对电流产生阻碍作用,呈现电阻特性,但同时还会产生磁场,因而兼有电感性质。实际的电池总有内阻,因而工作时其端电压会有所下降。连接导体多少有一点电阻,甚至还有电感。但灯泡的电感是很小的,可用一个理想电阻代替。一个新电池的内阻比灯泡的电阻小得多,可以忽略不计,

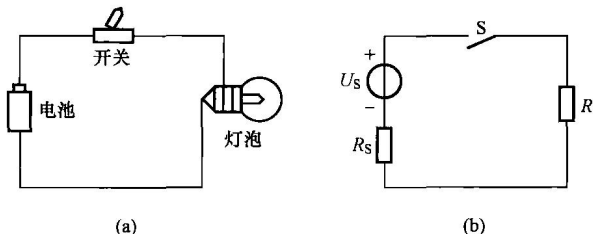


图1-1 手电筒实际电路及其电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

故可以用一个电压恒定的理想电压源代替。在连接导体不长且截面积足够大时，其电阻可忽略不计，作为理想导体。这样处理后的各电路元件只具有单一电磁特性，可以用简单的电路符号及数学表达式来精确描述。

由各种理想电路元件组成的电路称为电路模型，图 1-1 (b) 就是图 1-1 (a) 的电路模型。电路理论分析的对象是电路模型，而不是实际电路，本书所指电路均为电路模型。

实际电路可分为集中参数电路和分部参数电路两大类。当实际电路的几何尺寸远小于电路工作频率所对应的信号波长时，即可作为集中参数电路。我国电网供电频率为 50Hz，对应的波长为 6000km，这一波长远大于电子电路的尺寸，因此可以采用集中参数的概念。而对于远距离的输电和通信线路来说，就必须考虑到电场和磁场沿线路的分布情况，不能用集中参数来分析。集中参数电路理论是电路的最基本理论，本书讨论的电路都是集中参数电路。

电路分析的主要任务是在已知电路结构和元器件参数的情况下，分析和求解电路任意处的电压、电流和功率。

第二节 电路中的基本物理量

电路分析中所涉及的基本物理量主要有：电流、电压和功率。此外还有：电位、能量、电量、磁链等。本节主要介绍电流、电压、功率和能量的概念以及电压、电流的参考方向和功率正、负的含义。

一、电流及其参考方向

在电场力的作用下电荷产生定向移动便形成电流。为了衡量电流的大小，引入电流强度这一物理量。电流强度简称电流，用 i 表示。其定义为：单位时间内通过导体横截面的电荷量，即

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

在国际单位制 (SI) 中，电荷 q 的单位为 C (库仑)，时间 t 的单位为 s (秒)，电流 i 的单位为 A (安培)。常用的电流单位还有 mA (毫安) 和 μA (微安)， $1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$ 。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向。如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称之为直流电流，简称直流，记作 DC，用 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间作周期性变化，则称之为交变电流，简称交流，记作 AC，用 i [或 $i(t)$] 表示。其他形式的电流总可以用直流叠加交流的方式来表示。

上述规定的电流方向是电流在电路中的真实方向。对简单电路而言，电流的真实方向是可以直观地确定的，但在一个复杂电路中，往往很难判断出电路中电流的真实方向，而对于大小和方向都随时间变化的交变电流来说，判断其真实方向就更加困难了。为此，引入参考方向的概念。

电流的参考方向可以任意假设，在图中用箭头表示，它并不一定代表电流的真实流向。

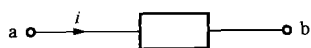


图 1-2 电流参考方向

通常规定：如果电流的真实方向与参考方向相同，则电流为正值；如果电流的真实方向与参考方向相反，则电流为负值。例如：在图 1-2 所示的电路中，方框泛指某电路的一部分，假设

电流 i 的参考方向为 $a \rightarrow b$ ，如箭头所示，若计算或测量得出 i 为正值，说明电流的真实方向与参考方向一致，即 i 由 a 端流向 b 端；若计算或测量得出 i 为负值，说明电流的真实方向与参考方向相反，即 i 由 b 端流向 a 端。这就是说，可以用电流的正、负值，再结合电流的参考方向来确定电流的真实方向。因此，不标出电流的参考方向，电流值的正负是没有意义的。

二、电压及其参考方向

在电路中电荷能够产生定向移动，一定受到电场力的作用，也就是电场力对电荷做了功。为了衡量电场力做功的大小，引入电压这一物理量，电压用 u 表示。电路中 a 、 b 两点间的电压等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。设 $d\omega$ 为电场力将电路中单位正电荷 dq 从 a 点移到 b 点所做的功，则电路中 a 、 b 两点间的电压 u 定义为

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

在国际单位制 (SI) 中，电荷 q 的单位为 C (库仑)，功 ω 的单位为 J (焦耳)，电压 u 的单位为 V (伏特)。常用的电压单位还有 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏)， $1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$ 。

电压总与电路中的两个点有关，通常给电压 u 加上脚标，如将 u 写成 u_{ab} ，以明确电路中 a 、 b 两点间的电压。如果正电荷从 a 点移到 b 点是失去能量，则 a 点是高电位，为正端，标以“+”号， b 点是低电位，为负端，标以“-”号，即 u_{ab} 是电压降，其值为正。反之，如果正电荷从 a 点移到 b 点是获得能量，则 a 点是低电位，为负端，标以“-”号， b 点是高电位，为正端，标以“+”号，即 u_{ab} 是电压升，其值为负。

习惯上称电压降为电压，将电压降的方向规定为电压的正方向。如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称之为直流电压，用 U 表示。如果电压的大小和方向都随时间作周期性变化，则称之为交流电压，用 u [或 $u(t)$] 表示。其他形式的电压总可以用直流电压叠加交流电压的方式来表示。

对于一个复杂电路而言，电路中电压的真实极性也称真实方向，往往也是很难判断的。为此，也需引入电压参考方向的概念。

电压的参考方向可以任意假设，在元件或电路的两端用“+”、“-”符号表示，它并不一定代表电压的真实方向。通常规定：如果电压的真实方向与参考方向相同，则电压为正值；如果电压的真实方向与参考方向相反，则电压为负值。例

如：在图 1-3 所示的电路中，假设电压 u 的参考方向为 a 端 “+”， b 端 “-”，若计算或测量得 u 为正值，则说明电压的真实方向与参考方向相同， a 端电位高于 b 端电位；若计算或测量得 u 为负值，则说明电压的真实方向与参考方向相反， b 端电位高于 a 端电位。这就是说，可以用电压的正、负值，再结合电压的参考方向来表示电压的真实方向。因此，不标出电压的参考方向，电压值的正负是没有意义的。

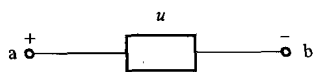


图 1-3 电压参考方向

量得 u 为负值，则说明电压的真实方向与参考方向相反， b 端电位高于 a 端电位。这就是说，可以用电压的正、负值，再结合电压的参考方向来表示电压的真实方向。因此，不标出电压的参考方向，电压值的正负是没有意义的。

电路中同一个元件上的电压、电流的参考方向是相互独立的，均可任意假设。如果选择电流的参考方向是从标以电压正极的一端流向标以电压负极的一端，即两者的参考方向一致时，则称为关联参考方向，如图 1-4 (a) 所示；如果选择电流的参考方向是从标以电压负极的一端流向标以电压正极的一端时，则称为非关联参考方向，如图 1-4 (b) 所示。当采

用关联参考方向后,就只需标出一套参考方向,即电流参考方向或电压参考方向,分别如图 1-4 (c) 和图 1-4 (d) 所示。

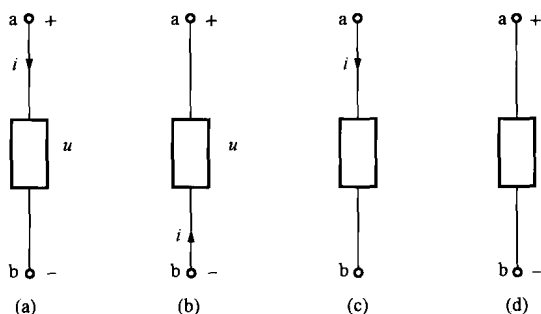


图 1-4 关联参考方向和非关联参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向;

(c) 电流参考方向; (d) 电压参考方向

三、功率和能量

电路工作时总是存在电能与其他形式能量之间的相互转换,为了衡量电路中能量转换的速度,引入功率这一物理量,功率用 p [或 $p(t)$] 表示。设在 dt 时间内电路转换的电能为 $d\omega$,则功率定义为

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

在国际单位制 (SI) 中,能量 ω 的单位为 J (焦耳),时间 t 的单位为 s (秒),功率 p 的单位为 W (瓦特)。

电路中,人们更感兴趣的是功率与电压、电流之间的关系。对式 (1-3) 进一步推导可得

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明电路的功率等于该电路的电压与电流的乘积。直流情况下,可表示为

$$P = UI \quad (1-5)$$

在国际单位制 (SI) 中,电流 i 的单位为 A (安培),电压 u 的单位为 V (伏特),功率 p 的单位为 W (瓦特)。常用的功率单位还有 kW (千瓦)、mW (毫瓦) 等, $1\text{kW} = 10^3\text{W} = 10^6\text{mW}$ 。

因为 u 和 i 的值都是代数量,所以功率 p 可为正值亦可为负值,而功率正、负也有其特定的物理含义。在 u 和 i 为关联参考方向下,计算功率为 $p=ui$,若 $p>0$,则表明电压和电流的实际方向相同,正电荷从高电位端移到低电位端,电场力对正电荷做功,电路吸收功率;若 $p<0$,则表明电压和电流的实际方向相反,正电荷从低电位端移到高电位端,外力克服电场力做功,电路将其他形式能量转换成电能释放出功率,此时电路发出(或提供)功率。在 u 和 i 为非关联参考方向下,若计算功率仍为 $p=ui$,情况则正好相反。

因此,在电压 u 和电流 i 参考方向选定后,可根据功率 p 值的正负确定电路是发出功率,还是吸收功率。当 u 和 i 为关联参考方向时, $p=ui$ 表示电路吸收功率,若 $p>0$,则表明电路确实是吸收功率;若 $p<0$,则表明电路是发出功率。当 u 和 i 为非关联参考方向时, $p=ui$ 表示电路发出功率,若 $p>0$,则表明电路确实是发出功率;若 $p<0$,则表明电路是吸收功率。

在关联参考方向下, $t_0 \sim t$ 时间内电路所吸收的能量为

$$\omega(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

在国际单位制 (SI) 中,能量 ω 的单位为 J (焦耳)。

【例 1-1】 计算图 1-5 所示各电路的功率,并指出它们是吸收功率,还是发出功率。

解 图 1-5 (a) 电路中,电压、电流为关联参考方向,则

$$P = UI = 3 \times 2 = 6(\text{W}) > 0 (\text{吸收功率})$$

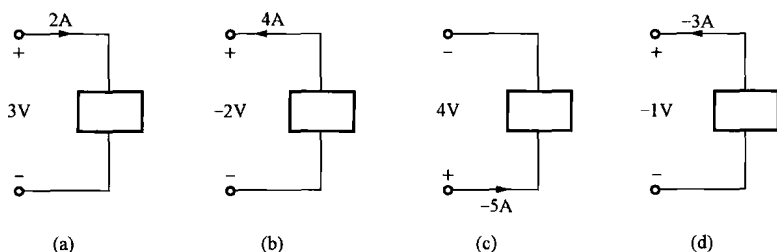


图 1-5 例 1-1 图

图 1-5 (b) 电路中, 电压、电流为非关联参考方向, 则

$$P = UI = (-2) \times 4 = -8(\text{W}) < 0 (\text{吸收功率})$$

图 1-5 (c) 电路中, 电压、电流为关联参考方向, 则

$$P = UI = 4 \times (-5) = -20(\text{W}) < 0 (\text{发出功率})$$

图 1-5 (d) 电路中, 电压、电流为非关联参考方向, 则

$$P = UI = (-1) \times (-3) = 3(\text{W}) > 0 (\text{发出功率})$$

【例 1-2】 图 1-6 所示电路中, 方框表示一段电路, 功率箭头指向方框表示吸收功率; 箭头向外表示发出功率。求各段电压并说明它们的真实极性。

解 (1) 对 A 段电路, 电流 I 与电压 U_{ab} 为关联参考方向, 吸收功率 $P_A = U_{ab}I > 0$, 则

$$U_{ab} = \frac{P_A}{I} = \frac{4}{0.5} = 8(\text{V})$$

说明 a、b 两点间电压的真实极性是 a 点 “+”, b 点 “-”。

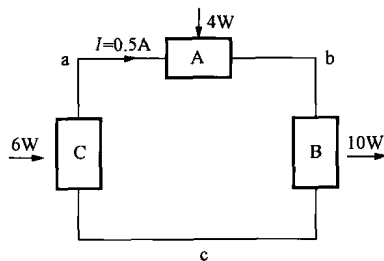


图 1-6 例 1-2 图

(2) 对 B 段电路, 电流 I 与电压 U_{bc} 为关联参考方向, 发出功率 $P_B = U_{bc}I < 0$, 则

$$U_{bc} = \frac{P_B}{I} = \frac{-10}{0.5} = -20(\text{V})$$

说明 b、c 两点间电压的真实极性是 b 点 “-”, c 点 “+”。

(3) 对 C 段电路, 电流 I 与电压 U_{ca} 为关联参考方向, 吸收功率 $P_C = U_{ca}I > 0$, 则

$$U_{ca} = \frac{P_C}{I} = \frac{6}{0.5} = 12(\text{V})$$

说明 c、a 两点间电压的真实极性是 c 点 “+”, a 点 “-”。

第三节 电 阻 元 件

一、电路元件

电路是由各种电路元件组成的, 要知晓电路中电压和电流的求解方法, 首先要掌握电路元件的特性。本书涉及八种常用电路元件, 即电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源、受控电源、耦合电感、理想变压器。前五种元件只有两个端钮, 故称为二端元件; 后三种有多个端钮, 故称为多端元件。每种电路元件端钮上的电压和电流之间都存在确切的关

系, 称伏安关系或伏安特性, 简称 VAR 或 VAC。VAR 可以用数学式描述, 也可以在 $u-i$ 平面中用曲线描述, 称伏安特性曲线。

二、电阻元件的伏安关系

电阻元件是对电流呈现阻力的元件, 它反映电路器件消耗电能的性能, 许多实际的电路器件如: 电阻器、电灯泡、电热器、扬声器等都可以用电阻元件来表征。电阻元件可以是线性的或非线性的, 非时变的或时变的。如果电阻元件上的电压与电流关系是线性关系, 则是线性电阻元件, 否则是非线性电阻元件; 如果电阻元件上电压与电流的关系是不随时间变化的, 则是时不变电阻元件, 否则是时变电阻元件。本书只涉及线性和非线性的时不变电阻元件。本节重点介绍线性电阻元件, 有关非线性电阻及其电路将在第十二章中介绍。

线性电阻元件的电路符号如图 1-7 (a) 所示。在关联参考方向下, 线性电阻元件的伏安关系服从欧姆定律, 即

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

式中: R 是电阻元件的电阻, 为常数; u 是电阻元件两端的电压; i 是流过电阻元件的电流。当 u 的单位为 V (伏特), i 单位为 A (安培) 时, R 单位为 Ω (欧姆)。此外常用的电阻单位还有 $k\Omega$ (千欧)、 $M\Omega$ (兆欧), 其中 $1M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$ 。

欧姆定律表明了线性电阻的特性: 当电流通过线性电阻时, 要消耗电能, 在沿电流方向上电阻的两端将会产生电压降, 此电压降与流过的电流大小成正比, 比例系数为常数 R , 就是电阻元件的电阻值, 简称电阻。在 $u-i$ 平面中线性电阻元件的伏安特性曲线是一条在第 1、3 象限内通过坐标原点, 斜率为 R 的直线, 如图 1-7 (b) 所示。

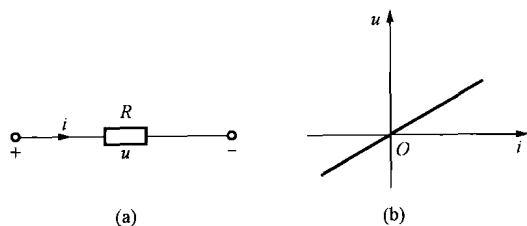


图 1-7 线性电阻元件符号及伏安特性曲线
(a) 符号; (b) 伏安特性曲线

在非关联参考方向下, 欧姆定律的表达形式应为

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

在 $u-i$ 平面中电阻元件的伏安特性曲线是一条在第 2、4 象限内通过坐标原点, 斜率为 $-R$ 的直线。

电阻既有阻止电流通过的一面, 又有允许电流通过的一面, 这就是它的电导特性。电导用 G 表示, 它是电阻的倒数, 即

$$G = \frac{1}{R}$$

在国际制单位 (SI) 中, 电导的单位是 S (西门子)。当用电导表示欧姆定律时, 在关联参考方向下, 欧姆定律可表示为

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

线性电阻有两种特殊状态: 开路和短路。如果一个线性电阻元件不论其两端电压为多大而电流恒等于零, 则该电阻元件处于开路状态, 相当于 $R = \infty$, $G = 0$ 。如果一个线性电阻元件不论流过它的电流为多大而其两端电压恒等于零, 则该电阻元件处于短路状态, 相当于 $R = 0$, $G = \infty$ 。

在电子电路中也常用到各种非线性电阻元件, 它们的共同特点是, 伏安关系是非线性方

程, 伏安特性曲线是非线性曲线。半导体二极管是典型的非线性电阻元件, 当它工作于正向导通区和反向截止区时, 其伏安关系可用方程 $i = I_s(e^{u/V_T} - 1)$ 近似描述, 伏安特性曲线如图 1-8 所示。

三、电阻元件的功率和能量

线性电阻元件在任一时刻吸收的功率可按式 (1-4), 再结合欧姆定律得到计算公式, 即

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可见, 不论电流、电压为正值或负值, 均有 $p \geq 0$, 表明电阻元件总是消耗功率的。对于一个实际的电阻器, 使用时不能超过其所标明功率, 否则将可能被烧毁。因此, 各种电气设备如灯泡、电炉和电阻器都规定有额定功率、额定电流 (或额定电压)。

在 $t_0 \sim t$ 时间范围内电阻元件吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = R \int_{t_0}^t i^2(\xi) d\xi = \frac{1}{R} \int_{t_0}^t u^2(\xi) d\xi \quad (1-11)$$

能量通常用焦耳作单位, 但在电力系统中, 则常用 “kW · h” (千瓦 · 小时) 作电能的计量单位, 即 1kW 功率在 1h 里所消耗的电能。1kW · h 又称为 1 “度” 电。

【例 1-3】 有一个 100Ω 、 $\frac{1}{4}\text{W}$ 的电阻元件, 使用时电流不得超过多大数值? 它能承受的最大电压是多少?

解 由 $P = I^2 R$ 得

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{4 \times 100}} = \frac{1}{20} (\text{A}) = 50 (\text{mA})$$

$$U = IR = \frac{1}{20} \times 100 = 5 (\text{V})$$

计算结果表明: 使用时该电阻通过的电流不得超过 50mA, 所能承受最大电压是 5V。

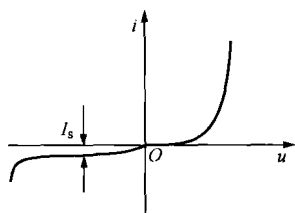


图 1-8 半导体二极管伏安特性曲线

第四节 电 容 元 件

一、电容

电容元件是具有储存电场能量性质的元件, 是实际电容器的理想化模型。实际电容器一般由两块相互绝缘的金属平行板所构成, 并从两极板分别引出外接端。当外接端加有电压 u 时, 两极板上分别存储有等量的异性电荷 $+q$ 和 $-q$, 如图 1-9 所示。当两极板之间的电压 u 变化时, 所储存的电荷量 q 亦随之变化, 将电荷量 q 与电压 u 的比值定义为电容器的电容量, 简称电容, 用 C 表示。即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-12)$$

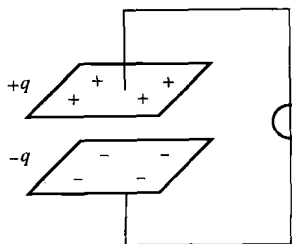


图 1-9 平行板电容器

若电荷量 q 与电压 u 变化关系成正比, 则电容 C 为常数, 此时 q 与 u 的变化关系在 $q-u$ 平面上是一条通过坐标

原点的直线，直线的斜率是 C ，如图 1-10 所示，具有这种性质的电容称为线性电容。线性电容元件的符号如图 1-11 所示。电容 C 是表示电容元件电容量的参数，因此电容元件通常简称为电容。

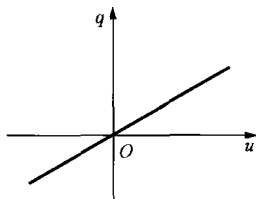


图 1-10 线性电容元件的 $q-u$ 特性曲线

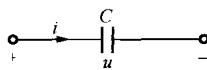


图 1-11 线性电容元件的符号

在国际制单位 (SI) 中，电量 q 的单位是 C (库仑)，电压 u 的单位是 V (伏特)，电容 C 的单位是 F (法拉)。常用的电容单位还有 μF (微法)、 pF (皮法)，其中 $1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$ ， $1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$ 。

实用中的大多数电容器都属于线性电容，而填充了特殊的介质使得 C 不是常数的电容器属于非线性电容。此外，还有时不变电容和时变电容，本书只讨论线性时不变电容。

实际电容器标定电容量和额定工作电压两个参数，在工作电压超过额定工作电压时，电容器中间的绝缘介质就有可能被击穿或因漏电剧增而导致损坏，使用中应特别注意。

二、电容元件的伏安关系

在图 1-11 所示电路中， u 和 i 采用关联参考方向，根据电流的定义

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-13)，即得出线性电容的伏安关系式为

$$i = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明，电容元件具有以下几方面特性。

(1) 任一时刻流过电容的电流取决于该时刻电容两端电压的变化率。如果加在电容两端的电压为不随时间变化的直流电压，即电压的变化率为零，则电容中的电流亦为零，此时电容元件相当于开路。当电容两端的电压随时间变化时，电容中就会有电流流过，而且电容上的电压变化越快，流过的电流就越大。所以说，电容元件具有隔直流、通交流的作用。值得注意的是，电容电流是位移电流，而并非有电子流真正流过电容内部的绝缘介质。

(2) 如果在任何时刻电容电流皆为有限值，则电容两端的电压就不会发生跃变。因为，若电容电压发生跃变，那么 du/dt 将趋于无穷大，就有电容电流 $i \rightarrow \infty$ ，这在实际工程中显然是不可能的。因此，在绝大多数应用场合，总是可以认为电容两端的电压 u_C 是处处连续的，即对任一时刻 t 而言有

$$u_C(t_-) = u_C(t_+) \quad (1-15)$$

式 (1-15) 称为换路定理，它是分析动态电路的重要依据。

由于流过电容的电流取决于电容两端电压的变化率，故电容元件是一种动态元件。电容元件 VAR 的另一种形式为

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

式(1-16)表明:某一时刻 t ,电容两端的电压,取决于电容电流从 $-\infty$ 到 t 的积分,即与电流过去的全部历史有关。电容元件具有记忆电流的功能,故它又是一种记忆元件。

在任意选定 t_0 作为初始时刻后,式(1-16)还可表示为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-17)$$

式(1-17)中: $u(t_0)$ 是初始时刻 t_0 电容两端的电压,称为初始电压。

三、电容元件的功率和储能

在关联参考方向下,电容元件吸收的瞬时功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu(t) \frac{du(t)}{dt} \quad (1-18)$$

当 $p(t) > 0$ 时,表示电容元件从电路中吸收能量并以电场能量的形式储存在电容中。反之,当 $p(t) < 0$ 时,表示电容元件释放所储存的电场能量,而电容元件自身并不消耗能量。

电容元件的储能 w_C 是瞬时功率对时间的积分,即

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \quad (1-19)$$

由于在 $t = -\infty$ 时电容未被充电,故 $u(-\infty) = 0$,则式(1-19)可写为

$$w_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-20)$$

式(1-20)表明:电容在某一时刻的储能,只取决于该时刻电容两端的电压,而与流过电容的电流无关。只要电容上有电压,它就有储能。并且,尽管电容的瞬时功率有正有负,但储能总为正值。

综上所述,电容元件是一种动态的、有记忆的储能元件。

【例 1-4】 电容元件如图 1-12 (a) 所示,其两端电压 u 如图 1-12 (b) 所示,求电容电流 i ,并绘出 i 的波形。

解 写出电容电压分段表达式为

$$u = \begin{cases} 2t & (\text{V}) \quad (0 \leq t \leq 1\text{s}) \\ -2t + 4 & (\text{V}) \quad (1 \leq t \leq 3\text{s}) \\ 2t - 8 & (\text{V}) \quad (3 \leq t \leq 4\text{s}) \\ 0 & (\text{V}) \quad (t \geq 4\text{s}) \end{cases}$$

根据式(1-14)分段计算得

$$i = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} 4 & (\text{A}) \quad (0 < t < 1\text{s}) \\ -4 & (\text{A}) \quad (1 < t < 3\text{s}) \\ 4 & (\text{A}) \quad (3 < t < 4\text{s}) \\ 0 & (\text{A}) \quad (t > 4\text{s}) \end{cases}$$

由 i 表达式可绘出电容电流 i 的波形,如图 1-12 (c) 所示。

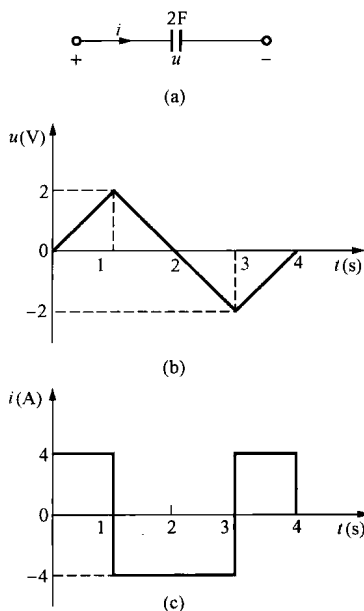


图 1-12 例 1-4 图
(a) 电容元件; (b) u 波形图;
(c) i 波形图