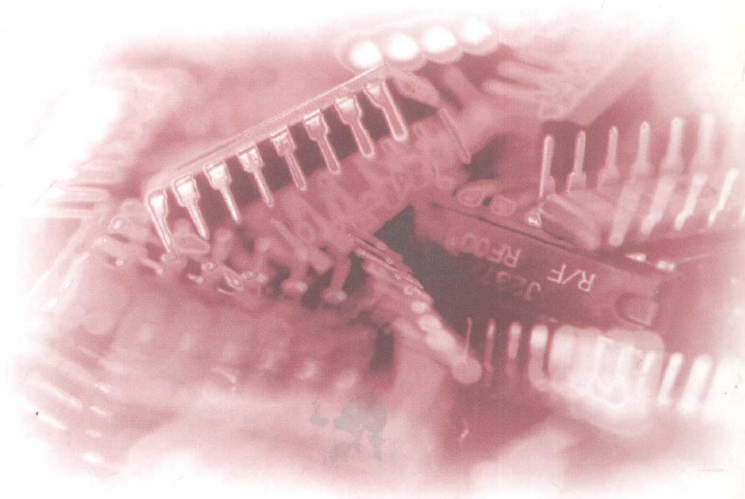


高职高专电子技术系列教材

电路

DIANLU

主 编 蒋 军
主 审 王 生 春



重庆大学出版社

内容简介

本书以“必需、够用”为基本原则，根据高职高专人才培养目标和《电路》课程教学大纲的要求，在充分调研的基础上，参考国内外优秀教材和有关文献，结合编者多年的教学经验和科研成果编写而成。本书可作为高职高专院校电气类、电子信息类、计算机类等专业的教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

电 路

本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。全书共分10章，主要内容包括：电路的基本概念和基本定律、电路的分析和计算、正弦交流电路、动态电路分析、非线性电路分析、三相电路、变压器和电动机、异步电动机、继电接触器控制线路、电子线路等。

附录(UP)目录附录A

本书根据高职高专教育的特点和《电路》课程教学大纲的要求，在充分调研的基础上，参考国内外优秀教材和有关文献，结合编者多年的教学经验和科研成果编写而成。本书可作为高职高专院校电气类、电子信息类、计算机类等专业的教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

主 编 蒋 军

主 审 王生春

本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。全书共分10章，主要内容包括：电路的基本概念和基本定律、电路的分析和计算、正弦交流电路、动态电路分析、非线性电路分析、三相电路、变压器和电动机、异步电动机、继电接触器控制线路、电子线路等。

编者

2004年6月

重庆大学出版社

本书根据《电路》课程教学大纲的要求，在充分调研的基础上，参考国内外优秀教材和有关文献，结合编者多年的教学经验和科研成果编写而成。本书可作为高职高专院校电气类、电子信息类、计算机类等专业的教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

内 容 简 介

本书依据教育部教学指导委员会颁布的“高等学校工程专科电路课程教学基本要求”而编写,以工程实践中正在使用的技术需要的基础理论为主,系统地讲述了电路理论中的基本概念、基本定理和基本分析方法。力求基本概念清楚,条理清晰,理论联系实际。全书共分12章,主要包括:电路和电路基本定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路定理、含有运算放大器的电阻电路分析、动态电路分析、正弦稳态交流电路(含三相电路简介)、含有耦合电感的电路、非正弦周期电流电路和信号频谱、拉普拉斯变换和网络函数和二端口网络。本书每章后有基本要求,各章均配有典型例题和习题,书末附有部分习题参考答案。

本书可作为无线电、电子、通信自动化、计算机等专业的高职高专教材,也可供有关科技人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路/蒋军主编. —重庆:重庆大学出版社,2005.1

(高职高专电子技术系列教材)

ISBN 7-5624-2844-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116058 号

电 路

主 编 蒋 军

主 审 王生春

责任编辑:彭 宁 穆安民 版式设计:彭 宁

责任校对:任卓惠 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆现代彩色书报印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:430千

2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5624-2844-1 定价:24.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究。

前言

目前,国内外普遍认为电路课程的基本内容和范围已经趋于稳定。本课程的主要任务是为后续相关课程的需要奠定必要的基础知识。

根据高职教育的特点和《电路课程教学基本要求》,本书重视电路原理的基本内容和基本概念,但不过分强调该学科本身的系统性和严密性;注重电路基本概念、基本方法和基本定律、定理的应用,注重辩证思维和创新意识的培养。

本书在编写中注重对基本内容和传统内容的协调,删减了一些较繁琐和过分强调技巧的内容,保留和继承了传统电路教材的特点,力求清楚、准确的阐述问题、论证定理,适当增加了例题的数量,并在每章后有本章的小结和基本要求,有利于学生学习时抓住重点,培养学生的自学能力。

本书每章附有习题,书末附有部分习题的参考答案,可供读者参考。全书统一采用国际单位制(SI)、统一的图形和文字符号标准。

本书可作为无线电技术、电子技术、通信和计算机等专业的高职教材,也可以供有关科技人员和工程技术人员参考。

参加本书编写的有:蒋军(第1章、第2章、第9章)、冯国良(第7章)、王智忠(第3章、第4章、第5章)、李梅(第8章)、王桃玲(第10章、第11章)和程岷莎(第6章、第12章)。蒋军任主编。全书由王生春教授主审。另外在编写过程中参考了相关的文献资料,在此一并表示感谢。限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者提出宝贵意见,以便修订。

编者

2004年6月

目录

第1章 电路模型和电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流和电压的参考方向	2
1.3 电阻元件	5
1.4 电容元件	7
1.5 电感元件	9
1.6 电压源和电流源	11
1.7 受控源	12
1.8 基尔霍夫定律	13
习 题	17
第2章 电阻电路的等效变换	20
2.1 引言	20
2.2 电阻的串联和并联	21
2.3 电阻 Y 连接与 Δ 连接的等效变换	23
2.4 电压源和电流源的串联和并联	26
2.5 实际电源的两种模型及其等效变换	28
2.6 输入电阻	30
习 题	31
第3章 线性电阻电路的一般分析方法	35
3.1 KCL 和 KVL 的独立方程数	35
3.2 支路电流法	38
3.3 回路电流法	41
3.4 结点电压法	47
习 题	51
第4章 电路定理	56
4.1 叠加定理	56
4.2 替代定理	60

4.3	戴维南定理和诺顿定理	62
4.4	对偶原理	71
	习 题	74
第5章	含有运算放大器的电阻电路	79
5.1	运算放大器电路模型及理想运算放大器的条件 ...	79
5.2	含有理想运算放大器的电路分析	81
	习 题	84
第6章	非线性电路简介	87
6.1	非线性元件	87
6.2	非线性电阻电路	89
6.3	非线性电路的方程	91
6.4	小信号分析法	92
6.5	分段线性化方法	93
	习 题	95
第7章	动态电路的分析	96
7.1	动态电路的方程及其初始条件	96
7.2	一阶电路的零输入响应	98
7.3	一阶电路的零状态响应	103
7.4	一阶电路的全响应	108
7.5	一阶电路的阶跃响应	111
*7.6	一阶电路的冲激响应	114
*7.7	二阶电路分析简介	118
	习 题	124
第8章	正弦交流电路	127
8.1	正弦交流电的基本概念	127
8.2	正弦量的相量表示法	131
8.3	单一参数正弦交流电路的分析	134
8.4	基尔霍夫定律的相量形式	142
8.5	RLC 串联电路的分析	145
8.6	阻抗的串联与并联	148
8.7	用相量法分析正弦交流电路	151
8.8	功率因数的提高	153
8.9	串并联谐振	155
8.10	三相正弦电路	162
	习 题	175
第9章	耦合电感和理想变压器	183
9.1	互感及耦合系数	183
9.2	含有耦合电感电路的计算	186

9.3 空心变压器	190
9.4 理想变压器	192
习 题	195
第 10 章 非正弦周期电流电路和信号频率	199
10.1 非正弦周期信号	199
10.2 周期函数分解为傅里叶级数	200
10.3 有效值、平均值和平均功率	204
10.4 非正弦周期电流电路的计算	207
习 题	212
第 11 章 拉普拉斯变换	215
11.1 拉普拉斯变换的定义	215
11.2 拉普拉斯变换的性质	217
11.3 拉普拉斯反变换的部分分式展开	221
11.4 运算模型及运算电路	225
11.5 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	229
11.6 网络函数	234
习 题	240
第 12 章 二端口网络	244
12.1 二端口网络的方程及参数	244
12.2 二端口网络的等效电路	251
12.3 二端口网络的转移函数	253
12.4 二端口网络的连接	253
12.5 回转器和负阻抗变换器	254
习 题	256
部分习题参考答案	258
参考文献	265

第1章

电路模型和电路定律

内容提要

本章首先从电路及其模型的基本概念出发,介绍电流、电压及其参考方向,功率的定义及计算,电阻、电容、电感、独立源和受控源等电路元件。最后介绍电路分析的两个最基本的定律:欧姆定律和基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

电路是指由电路元件以一定的方式连接起来的整体。在现今社会中,具有各种各样功能的实际电路已经遍及国民经济、国防建设、科学技术及人们日常生活的各个领域。电路的发展不仅促进了电力工业、电子工业的发展,也促进了农业、交通、航天、原子能、机械、兵器、石化、轻工、纺织乃至医药卫生等各种事业的发展,为社会的发展和人类的文明进步发挥着巨大的作用。如果没有电路,当今的社会将是不可想像的。

实际电路都是由各种实际电路器件(电阻器、晶体管、电源等)以一定的方式连接而成,具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。电路的类型多种多样,有大到可以跨地区、跨洲的复杂电力传输系统,有体积虽小却包含有成千上万个晶体管的集成电路。不同电路的作用也各不相同。日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路。它是由干电池、灯泡、手电筒壳(连接导体)组成的,如图1.1(a)所示。干电池是一种电源,对电路提供电能,灯泡是用电的器件,连接导体可使电流构成通路。像这些能看得见、摸得着的电路器件统称为实际电路器件,由实际电路器件连接而成的电路称为实际电路。实际电路中,把能提供电能或电信号的电路器件,如:发电机,电池,信号发生器等称为电源,而把灯泡,电炉,电动机等用电设备称为负载。由于电源在电路中产生电压和电流,因此也称为激励或输入,而电压和电流则称为响应或输出。

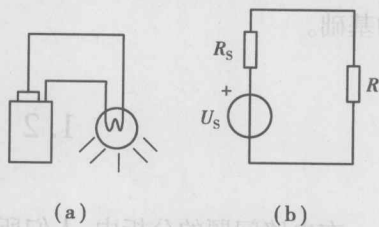


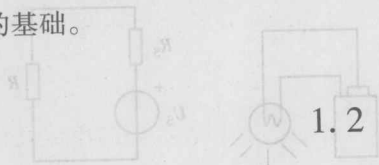
图 1.1 实际电路及其电路模型

电路理论就是研究电路中发生的电磁现象,并用电流、电荷、电压、磁通等基本物理量描述其中的过程。然而,实际电路中的电磁现象都是很复杂的,在分析电路时,如果把各个电路器件中的电磁变化关系全部加以考虑,势必会给分析带来极大的困难,而且在工程上也没有这样精确的要求。因此,必须在一定条件下对实际电路器件加以理想化处理,用一个足以表征其主要性能的理想元件作为实际电路器件的模型。电路理论正是建立在元件模型基础上的,分析的对象也是电路模型而不是实际的电路。电路分析中常用的有三种最基本的模型元件:只表征将电能转换成热能的电阻元件;只表征电场现象的电容元件;只表征磁场现象的电感元件,每一种理想化元件都具有某种特定的电磁性质,是一种理想化模型,而且具有精确的数学定义。用抽象的理想化元件及其组合近似地替代实际电路,从而构成了与实际电路相应的电路模型,本书今后所讲的电路一般都是有理想电路元件(简称电路元件)构成的电路模型(简称电路),如图 1.1(b)所示电路是手电筒电路的电路模型。

可以认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的,即在任何时刻,从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流,恒等于该时刻从另一端钮流出的电流,并且元件两端钮间的电压值也是完全确定的。凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件(lumped parameter element),简称为集总元件,由集总元件构成的电路称为集总电路,或具有集总参数的电路。

用集总电路来近似实际电路是有条件的,这个条件就是实际电路元件的尺寸要远小于电路工作频率所对应的波长。例如,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km,对此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而用集总概念是完全可以的。但对远距离输电而言,就必须考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用分布(distributed)参数表征。集总假说是本书最主要的假说。以后所述的电路基本定律均是在这一假说前提下才能使用。

电路理论的任务在于通过对电路中电磁效应的研究,预测电路的性状,其目的在于改进电路设计、改善电路性能和降低成本。它的内容包括电路分析和电路综合(或设计)两个方面,分析是综合的基础。本书作为电路分析的入门,主要介绍电路的基本概念、基本定律和基本计算方法。这些基本知识无论对学习后续课程或是分析和解决实际工程技术问题来说都是重要的基础。



1.2 电流和电压的参考方向

在电路问题的分析中,人们所关心的物理量是电流、电压、功率和能量。在具体展开分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

电流是电荷的定向运动形成的。电荷有正有负,正电荷运动的方向为电流的正方向。电流的大小用电流强度表示。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度通常简称电流,用符号 i 表示。即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在国际单位制(SI)中,时间(t)的单位是秒(s),电荷(q)的单位是库仑(C),则电流(i)的

单位是安培(A), 电流的辅助单位有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等, 它们之间的关系为:

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, 1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA}, 1 \text{ mA} = 10^3 \mu\text{A}$$

电流是一个既有大小又有方向的量。但由于电流只有两个流向, 因此可以用一个代数量来表示, 代数值的绝对值表示电流的大小; 其正、负号反映电流的方向。为此引入了电流“参考方向”的概念。

在一个二端元件上, 可以任意选定一个方向作为电流的参考方向, 用实线箭头方向表示, 当然所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向(用虚线箭头方向表示), 这样就可以把电流看成代数量, 若电流的参考方向与实际方向一致, 则电流为正值; 若电流的参考方向与实际方向相反, 则电流为负值。于是就可以利用电流的正、负值结合图上指定的电流参考

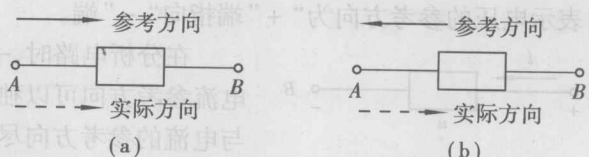


图 1.2 电流的参考方向与实际方向

(a) $i > 0$ (b) $i < 0$

方向反映电流的实际方向。例如在图 1.2(a) 中, $i > 0$ 时, 电流实际方向与参考方向一致; 图 1.2(b) 中, $i < 0$ 时, 电流实际方向与参考方向相反。参考方向一般用箭头(标在连接线上或连接线旁)表示, 也可以用双下标表示, 如 i_{AB} 表示参考方向从 A 指向 B, 显然, $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

电路中的电流在没有确定以前, 它的方向与大小同样是未知的, 其方向不能简单地加以判断, 有时电流的方向是变化的(如正弦交变电流)。因此在分析电路以前先要设定元件中电流的参考方向, 电流的参考方向是可以任意设定的。电流值的正与负在设定参考方向的前提下才有意义。

在物理电学中我们知道, 将单位正电荷自某一点 A 移到参考点(物理学中习惯选无穷远处作为参考点)电场力所做功的大小称为 A 点的电位。在电路中, 电位的物理意义同物理静电场中所讲电位是一样的, 只不过电路中某点的电位, 是将单位正电荷沿电路所约束的路径移至参考点(习惯选电路中某点而不选无穷远)时电场力所做功的大小。

电荷在电场力作用下做有规则的运动, 电场力对电荷做了功, 电压就是衡量电场力做功能力的一个物理量, 电压也叫电位差、电位降落, 用 u 表示。

A、B 两点间的电压 u_{AB} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功, 即:

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

在国际单位制(SI)中, 功 w 的单位是焦耳(J), 电荷 q 的单位是库仑(C), 电压的单位是伏特(V), 它的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等, 它们之间的关系为:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, 1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV}, 1 \text{ mV} = 10^3 \mu\text{V}$$

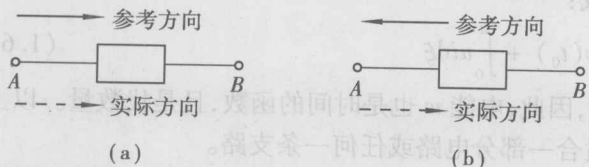


图 1.3 电压的参考方向与实际方向

(a) $u > 0$ (b) $u < 0$

同理, 对电路中某两点的电压也引入参考方向或参考极性的概念。如图 1.3 所示。图中方框代表一个元件或一段电路, 实线箭头表示电压参考方向, 虚线箭头表示电压真实方向。在设定的参考极性或方向下, 电压为正值时, 参考极性 or 方向与真实极性 or 方向一致; 反之

电压为负值时,参考极性方向与真实极性方向相反。因此,在参考极性方向下,电压值的正或负可以反映电压的真实极性方向。同电流一样,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的条件下才是有意义的。

电压的参考极性方向可用图示的箭头方向来表示;也可用双下标表示,如用 u_{AB} 表示参考方向为由 A 指向 B ,显然, $u_{AB} = -u_{BA}$;也可用极性符号“+”和“-”标注在电路或元件的两端,表示电压的参考方向为“+”端指向“-”端。

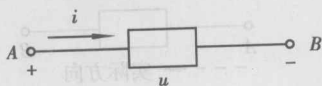


图 1.4 关联参考方向

在分析电路时,一段电路或一个元件上的电压参考极性与电流参考方向可以独立地任意设定。但是为了运算方便,电压与电流的参考方向尽量选取一致,即设定的电流参考方向是从电压参考极性的“+”端流向“-”端,如图 1.4 所示,则把这样的

电压与电流的参考方向称为关联参考方向,否则,称为非关联参考方向。

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下,总伴随有电能与其他形式能量的相互交换;另一方面,电气设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,或是不能正常工作。

电功率是电路中能量转换的速率,用符号 p 表示。即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

把式(1.1)和式(1.2)代入上式,则电路或电路元件吸收的电功率为

$$p = ui \quad (1.4)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),电流的单位是安培(A),功率的单位是瓦特(W),能量的单位是焦耳(J)。

在指定电压和电流的参考方向后,应用式(1.4)求功率时应当注意:当电压和电流的参考方向为关联参考方向时,乘积“ ui ”表示元件吸收的功率;当 p 为正值时,表示该元件确实吸收(或消耗)功率。如果电压和电流的参考方向为非关联参考方向时,乘积“ ui ”表示元件发出的功率,此时,当 p 为正值时,该元件确实发出(或产生)功率。一个元件若吸收功率 100 W,也可以说它发出功率 -100 W,同理,一个元件若发出 100 W 功率,也可以说它吸收 -100 W 功率。

可见,电路中任一元件的功率,等于该元件电压、电流的乘积,元件实际上是吸收功率或是产生功率,可由电压、电流参考方向的关联性和功率值的正、负来确定。

如果对式(1.4)从 $t = -\infty$ 到 t 积分,元件吸收的电能量为

$$w = \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t ui d\xi = \int_{-\infty}^0 ui d\xi + \int_0^t ui d\xi = w(t_0) - w(-\infty) + \int_0^t ui d\xi \quad (1.5)$$

假定 $w(-\infty) = 0$,则式(1.5)又可以改写成:

$$w = w(t_0) + \int_0^t ui d\xi \quad (1.6)$$

式中 u 和 i 都是时间的函数,并且是代数量,因此,电能 w 也是时间的函数,且是代数量。以上关于一个元件功率和能量的讨论,同样也适合一部分电路或任何一条支路。

例 1.1 图 1.5 所示电路,已知 $i = 1 \text{ A}$, $u_1 = 3 \text{ V}$, $u_2 = 10 \text{ V}$, $u_3 = 7 \text{ V}$,求三部分电路上各吸收的功率 p_1 、 p_2 、 p_3 。

解 由于电压 u_1 、 u_3 与电流 i 为非关联参考方向,所以吸收的功率为(实际为消耗的功

率)

$$p_1 = -u_1 i = -3 \times 1 \text{ W} = -3 \text{ W}$$

$$p_3 = -u_3 i = -7 \times 1 \text{ W} = -7 \text{ W}$$

而电压 u_2 与电流 i 为关联参考方向,所以这段电路吸收功率为

$$p_2 = u_2 i = 10 \times 1 \text{ W} = 10 \text{ W}$$

由此可见, $p_1 + p_2 + p_3 = 0$,即对一完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,称为功率平衡。这一点通过能量守恒原理是很容易理解的。

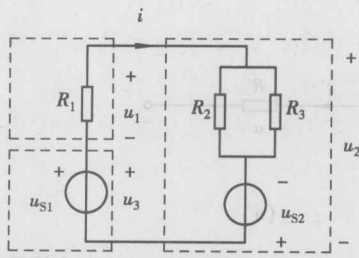


图 1.5 例 1.1 图

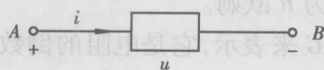


图 1.6 例 1.2 图

例 1.2 图 1.6 所示元件中, $i = 5\sin\omega t \text{ A}$, $u = -10\sin\omega t \text{ V}$, 试求元件功率,并分析是吸收还是发出功率。

解 由于图中的电压和电流的参考方向关联,则有

$$p = ui = -10\sin\omega t \cdot 5\sin\omega t \text{ W} = -50\sin^2\omega t (\text{W})$$

计算结果表明,该元件的功率是随时间变化的,但始终是负值,表示该元件是发出功率的,它是一个电源。

在国际单位制(SI)中,上面介绍了电压、电流和功率的基本单位和几种辅助单位。在本课程及有关后续课程中还会遇到其他一些量的单位。表 1.1 给出了部分国际单位制中规定的词头,供换算单位时查用。

表 1.1 SI 倍数与分数次头

倍率	词头名称词		词头符号	倍率	词头名称词		词头符号
10^{24}	尧[它]	yotta	Y	10^{-1}	分	deci	d
10^{21}	泽[它]	zetta	Z	10^{-2}	厘	centi	c
10^{18}	艾[可萨]	exa	E	10^{-3}	毫	milli	m
10^{16}	拍[它]	peta	P	10^{-6}	微	micro	μ
10^{12}	太[拉]	tera	T	10^{-9}	纳[诺]	nano	n
10^9	吉[咖]	giga	G	10^{-12}	皮[可]	pico	p
10^6	兆	mega	M	10^{-16}	飞[母托]	femto	f
10^{13}	千	kilo	k	10^{-18}	阿[托]	atto	a
10^2	百	hecto	h	10^{-21}	仄[普托]	zepto	z
10	十	deca	da	10^{-24}	幺[科托]	yocto	y

1.3 电阻元件

电阻元件是一个理想的二端元件,它是实际电阻器和各种耗能器件(电灯、电炉等)的模型。线性电阻元件用图 1.7(a)所示符号表示。

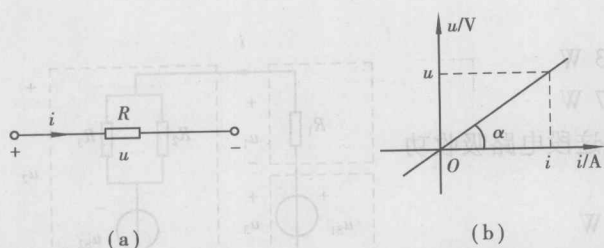


图 1.7 线性电阻元件电路符号及其伏安特性曲线

在任何时刻,线性电阻元件两端的电压与流过该元件中的电流之间的关系满足欧姆定律。即在关联电压、电流参考方向下,电阻元件上的电压、电流关系(称为伏安关系,简称为 VCR)为

$$u = R \cdot i \quad (1.7)$$

式中 u 、 i 是电路变量, R 是表征电阻元件上电压电流关系的参数,称为电阻。

在国际单位制中,电压单位为伏,电流单位为安时,电阻的单位为欧姆,简称欧(Ω)。因此,字母符号 R 既表示该元件为电阻元件,又表示了该电阻元件的参数为 R 欧姆。

电阻元件还可使用另外一个参数——电导来表征,电导用符号 G 来表示,它是电阻的倒数,即

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

国际单位制中,电导的单位为西门子,简称西(S)。用电导表征电阻元件,则(1.7)又可以写为:

$$i = G \cdot u \quad (1.8)$$

如果电阻元件的电压、电流取非关联参考方向,则欧姆定律应表示为

$$u = -R \cdot i \quad \text{或} \quad i = -G \cdot u \quad (1.9)$$

注意:应用欧姆定律时必须注意电压、电流参考方向的关联性。

若把电阻元件的电流取为横坐标(或纵坐标),标尺为 m_i (单位长度所代表的电流值);电压取为纵坐标(或横坐标),标尺为 m_u (单位长度所代表的电压值),在 $i-u$ 平面(或 $u-i$ 平面)上画出电压、电流的关系曲线,称为电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1.7(b)所示,它是一条通过坐标原点的直线,其斜率与元件的电阻 R (或电导 G)有关,即:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha \quad \text{或} \quad G = \frac{i}{u} = \frac{m_i}{m_u} \cot \alpha$$

另外,电阻元件上的电压、电流在任何时刻总是同时出现的,与该时刻以前的电压、电流是无关的,也就是说,电阻元件属于“无记忆”元件。

在电压、电流的关联参考方向下,任意时刻线性电阻元件吸收的电功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1.10)$$

电阻 R 和电导 G 是正实常数,故 $p \geq 0$,任何时刻的功率恒为非负值。这表明任何时刻电阻元件都不可能向外供出电能,它总是吸收电能并全部消耗掉。所以,线性电阻元件不仅是无源元件,还是耗能元件。电阻元件 R 在 t_0 至 t 的时间内,吸收的能量为

$$w = \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2 d\xi \quad (1.11)$$

在电路中对于任意一个两端元件,有两种特殊情况值得注意。一种是不论它两端的电压为何值,通过它的电流恒为零值,相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$,在 $i-u$ 平面上的特性就是电压轴,如图 1.8(a)所示,电路的这种工作状态称为“开路”。另一种情况是,不论流过它的电流为何

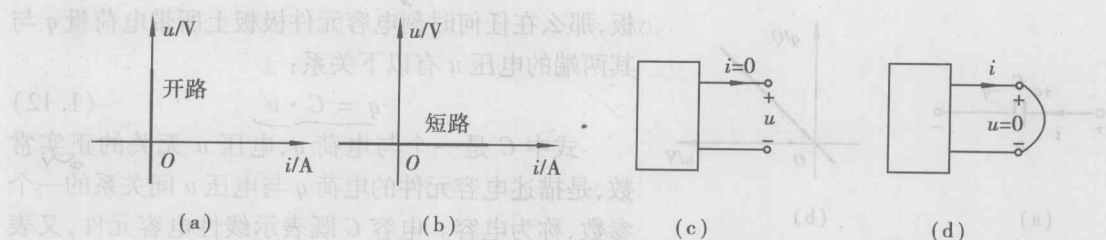


图 1.8 开路、短路及其伏安特性曲线

值,它的端电压恒为零,它相当于 $R=0$ 或 $G=\infty$,它的伏安特性就是电流轴,如图 1.8(b) 所示,电路的这种工作状态称为“短路”。上述定义及特性均可推广到电路中的任何一对端子之间,如图 1.8(c)、(d) 所示。

实际上,严格地说所有电阻器件的伏安特性都呈现为非线性。不过,在一定条件下,许多器件的伏安特性可近似为线性,可用线性电阻元件作为其模型。另外,有些器件它的伏安特性呈现明显的非线性,属于非线性器件,要用非线性电阻元件作为器件的模型。当电阻器件的电阻值随时间而变化时,称为时变电阻。本教材不加说明时,所有电阻均为线形时不变电阻。

例 1.3 一只 220 V、40 W 的灯泡,试求:在正常工作时通过灯丝的电流和此时灯丝的电阻?

解 由式 $P=UI$ 可知,通过灯丝的电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} \text{ A} = 0.182 \text{ A}$$

又由公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 可知,灯丝的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1\,210 \Omega$$

或者由欧姆定律可得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.182} \Omega = 1\,210 \Omega$$

1.4 电容元件

电容元件是实际电容器的理想化模型。电容器的品种规格很多,但就其结构来说,都是由两块金属极板间填以不同的介质组成的。在电容器两端接上电源后电容器的两块金属极板上将分别聚集起等量异性的电荷,在介质中建立起电场,并储存电场能量。如电容器断掉电源,极板上的电荷仍可聚集着,电场能量也继续存在,所以电容器是一种能够储存电荷和电场能量的器件。实际电容器由于介质损耗及漏电流而会引起电场能量的减少,但对于一个质量优良的电容器来说,介质损耗与漏电流都可忽略不计。因此在一定条件下,可以用电容元件作为实际电容器的理想化模型。

电容元件用图 1.9(a) 所示图形符号表示,其中 $+q$ 和 $-q$ (q 是代数量) 分别是电容元件两极板上的电荷,若电容元件上电压参考极性设定为从带正电荷的正极板指向带负电荷的负极

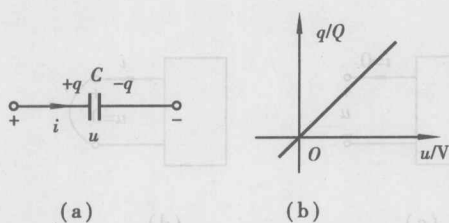


图 1.9 电容元件及其库伏特性

板,那么在任时刻电容元件极板上所带电荷量 q 与其两端的电压 u 有以下关系:

$$q = C \cdot u \quad (1.12)$$

式中 C 是一个与电荷 q 、电压 u 无关的正实常数,是描述电容元件的电荷 q 与电压 u 间关系的一个参数,称为电容。电容 C 既表示线性电容元件,又表示了该元件的电容量为 C 。

在国际单位制(SI)中,电容的单位是法拉,简称法,用符号 F 表示。当电容极板上带有 1 库仑的电荷量,它两端电压是 1 伏时,则该电容元件的电容就是 1 法拉(1F)。实际电容器的电容往往比 1F 小得多,因此常用微法(μF)、皮法(pF)作为电容的单位,它们之间的关系为:

$$1F = 10^6 \mu F = 10^{12} pF$$

若取 u 为横坐标, q 为纵坐标,则线性电容的伏-库特性曲线如图 1.9(b)所示,也是一条通过坐标原点的直线。

当电容两极板间电压变化时,极板上的电荷量也随着变化,于是电容中就出现了电流。如果设定电流的参考方向为流入正极板(见图 1.9(a)),即与电容两端电压是关联参考方向),则

$$i = \frac{dq}{dt}$$

把式(1.12)代入,则可得到电容的电流与电压的关系为:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.13)$$

式(1.13)表示,任何时刻,通过电容的电流与该时刻电容两端电压的变化率成正比。

当 $\frac{du}{dt} > 0$ 时,则 $i > 0$,电流实际方向与参考方向一致,电流流入正极板,使电荷增加,这时电容处于充电状态。

当 $\frac{du}{dt} < 0$ 时,则 $i < 0$,电流实际方向与参考方向相反,电流流出正极板,使电荷减少,这时电容处于放电状态。

当 $\frac{du}{dt} = 0$ 时,则 $i = 0$,说明接入电容元件的电压恒定不变时,电容电流为零,这时电容相当于开路状态,故电容元件有隔直作用。

由于电容元件的伏安关系与电压的变动状态有关,故电容元件属于动态元件。

电容的伏安关系还可以用另一种形式表示,将式(1.13)两边积分,得

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1.14)$$

式中 $u(0)$ 是电容初始时刻的电压,称为初始电压。可见,某时刻电容的电压与初始值及从 0 到 t 时的所有电流值有关。所以说,电容元件是一种“记忆性”元件。

若电容原来没有充过电, $u(0) = 0$, 则:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\zeta) d\zeta$$

在电压与电流关联参考方向下,线性电容元件吸收的功率为

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = C \cdot u(t) \frac{du(t)}{dt} \quad (1.15)$$

从 t_0 到 t 的时间内,电容元件吸收的磁场能量为

$$\begin{aligned} w_c(t_0, t) &= \int_{t_0}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta = C \int_{t_0}^t u(\zeta) \frac{du(\zeta)}{d\zeta} d\zeta \\ &= C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\zeta) d\zeta = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0) = w(t) - w(t_0) \end{aligned} \quad (1.16)$$

式中, $w(t_0) = \frac{1}{2} Cu^2(t_0)$ 为 t_0 时刻电容的电场能量; $w(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t)$ 为 t 时刻电容的电场能量。可见,从 t_0 到 t 的时间内,电容所吸收的能量等于 t, t_0 时刻电场能量之差。

如果 $u(t) > u(t_0)$, 则 $w_c = w(t) - w(t_0) > 0$, 电容吸收能量,此时期内电容处于充电状态;如果 $u(t) < u(t_0)$, 则 $w_c = w(t) - w(t_0) < 0$, 电容释放能量,此时期内电容处于放电状态。若电容元件原先没有充电,那么它在充电时吸收的能量一定会在放电完毕时全部释放出来,它既不产生能量也不消耗能量。所以,电容元件是一种储能元件、无源元件。

1.5 电感元件

用导线制成的空心或具有铁心的电感线圈是一个实际的二端器件,在工程上广泛应用。在图 1.10(a) 中,若线圈中通一电流 i 后,必将产生磁通 ϕ , ϕ 的方向规定为与线圈电流符合右手螺旋关系。若磁通 ϕ 与 N 匝的线圈相交链,则称 $\psi = N\phi$ 为磁通链(简称磁链)。其单位为韦伯(Wb)。电感元件是一个理想二端元件,它是实际电感线圈的模型。电感元件的图形符号如图 1.10(b) 所示。

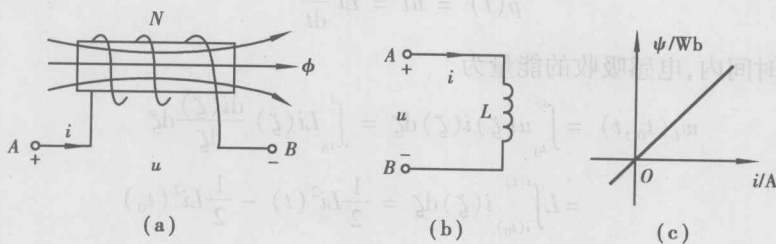


图 1.10 电感元件及其韦安特性

对于线性电感元件,磁链与电流的关系为

$$\psi = Li \quad (1.17)$$

式中 L 是一个正实常数,它是描述电感元件中磁链与电流间关系的一个参数,称为元件的电感系数或自感系数(简称电感)。

在国际单位制中,电感 L 的单位是亨利,简称亨,用符号 H 表示。当电感线圈中通过 1 A 电流时,产生的磁链是 1 Wb(韦伯),这个电感元件的电感 L 就是 1 H(亨利)。有时还用毫亨

(mH)或微亨(μH)作电感的单位。

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}, 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

若取 i 为横坐标, ψ 为纵坐标, 则线性电感的韦安特性曲线如图 1.10(c) 所示, 也是一条通过坐标原点的直线。

当电感元件中通以交变电流时, 磁链也将随之变化, 在线圈两端将产生感应电压, 在电流与电压参考方向关联时, 且感应电压与 ψ 符合右螺旋关系, 根据电磁感应定律, 这时电感线圈两端的感应电压为

$$u = \frac{d\psi(t)}{dt}$$

将式(1.17)代入, 得电感的伏安关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.18)$$

式(1.18)表示, 任何时刻, 线性电感元件上的电压与该时刻电流的变化率成正比。电流变化越快, 感应电压越大; 电流变化越慢, 感应电压越小。若电流不变时(稳定的直流电流), 则感应电压为零, 电感元件相当于短路。可见只有当流过电感中的电流变化时($\frac{di}{dt} \neq 0$), 电感两端才会有感应电压, 所以电感也是一个动态元件。

电感的伏安关系还可由另一种形式表示, 将式(1.18)两边取积分, 得

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\zeta) d\zeta = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\zeta) d\zeta + \frac{1}{L} \int_0^t u(\zeta) d\zeta \\ &= i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\zeta) d\zeta \end{aligned} \quad (1.19)$$

式中 $i(0)$ 是电感中的初始电流, 由上式可见任何时刻电感的电流 $i(t)$ 与初始值 $i(0)$ 及从 0 到 t 的所有电压值有关, 所以电感也是一个有“记忆”的元件。

在电压与电流的关联参考方向时, 线性电感元件吸收的功率为

$$p(t) = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.20)$$

从 t_0 到 t 的时间内, 电感吸收的能量为

$$\begin{aligned} w_L(t_0, t) &= \int_{t_0}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t Li(\zeta) \frac{di(\zeta)}{d\zeta} d\zeta \\ &= L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\zeta) d\zeta = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \\ &= w(t) - w(t_0) \end{aligned} \quad (1.21)$$

式中 $w(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$ 、 $w(t_0) = \frac{1}{2} Li^2(t_0)$ 分别为 t 、 t_0 时刻电感元件的储能。从 t_0 到 t 时间内, 电感所吸收的能量等于 t 与 t_0 时刻的磁场能量之差。

当电感中的电流增加时, $W(t) > W(t_0)$, 电感吸收能量, 并全部转换成磁场能量储存在磁场中; 当电流减小时, $W(t) < W(t_0)$, 电感将磁场能量释放出来。可见电感元件在电流增加时吸收的能量并没有消耗掉, 而是以磁场能量的形式储存起来, 它不消耗能量, 所以电感元件也是一个储能元件、无源元件。