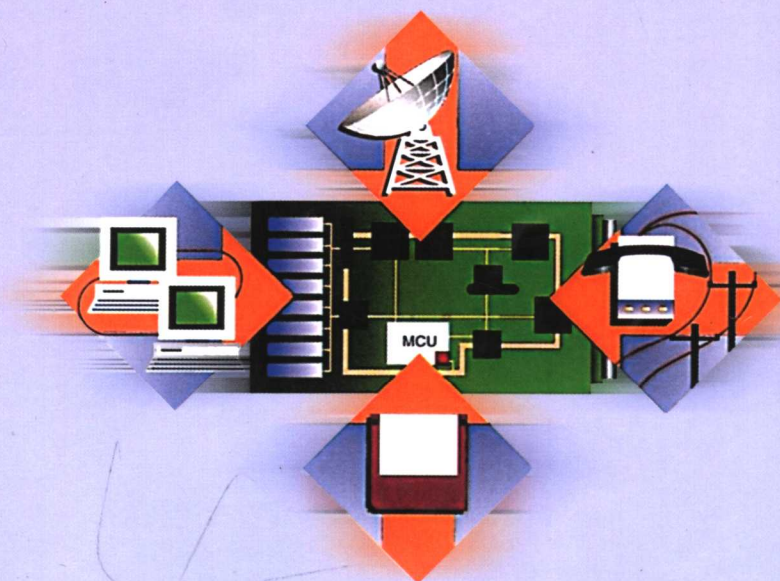


新世纪高等学校
计算机专业教材系列

电路与电子学基础

第二版

方维 高荔 主编



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

“电路与电子学”是计算机、电子、信息和自动控制等专业的一门理论性和实践性都较强的技术基础课程。本书涉及线性电路的基本分析方法和模拟电子技术的基础知识,主要包括:线性电路的一般分析方法和基本定理、一阶电路的时域分析法、正弦稳态电路的分析、半导体器件的工作特性及其应用、基本放大电路、模拟集成电路基础、集成运算放大器的应用电路、模拟电子线路的计算机辅助分析等。本书的特点是:内容简明,体系新颖,保证基础,立足实用。

本书适合用作计算机、电子、自动控制等专业的教材,也可以作为成人教育的教材和相关专业科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子学基础/方维,高荔主编. —2版. —北京:科学出版社,2005
(新世纪高等学校计算机专业教材系列)
ISBN 7-03-014575-5

I. 电… II. ①方… ②高… III. ①电路理论-高等学校-教材 ②电子学-高等学校-教材 IV. ①TM13 ②TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第116796号

责任编辑:巴建芬 贾瑞娜 潘继敏 / 责任校对:刘小梅
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年2月第一次印刷 印张:19.3/4

印数:1 3 000 字数:452 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

本书是参照《中国计算机学科教学计划 2002》精神，结合新的课程体系和教学内容改革的需要，将传统的“电路基础”、“模拟电子技术基础”两门课程合并而编写的少学时教材。

在编写本书的过程中，我们遵循了以下几点：

1. 保证基础，注重应用

在电路基础部分，我们根据计算机学科各专业的需要，汲取多年来的教学实践，选出最基本的内容重点阐述，以保证学生对最基础知识的掌握，主要包括：线性电路的一般分析方法和基本定理、一阶电路的时域分析法、正弦稳态电路的分析。在模拟电子技术部分，减少了对半导体器件导电原理的介绍，删除了许多陈旧的分立元件电路，将重点放在介绍半导体器件的外部特性、基本放大电路的分析方法，以及集成运算放大器的应用上，并突出了电子线路在实际中的应用。

2. 讲清概念，力求精炼

全书的内容和体系是按照 60 个学时安排的。本课程所涉及的内容很多，为了满足短学时教学需要，本书在编写过程中强调对基本概念、基本原理、基本分析方法的理解和应用，减少了复杂的数学推导，尽量简化定量分析，突出定性分析，力求简明扼要、系统性强。

3. 反映新概念、新技术，具有时代性

本书介绍了可编程模拟器件及其应用、PSpice 软件的应用，在每一章的最后利用 PSpice 软件对本章的主要电路进行仿真模拟，使学生掌握现代电子线路分析和设计的方法，并加深对电路的认识。

全书共 10 章，其中第一、二、四、五、九、十章由方维编写，第三、六、七、八章由高荔编写。本书的出版得到了北京邮电大学白中英教授、邝坚教授，北京理工大学周树南教授和上海 Lattice 半导体有限公司陈恒先生很大的帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中内容难免有缺点和错误，恳请使用本书的教师和学生提出意见和建议，以便今后不断改进。

编 者

2004 年 6 月

目 录

前言

第一章 直流电路	1
1.1 电路与电路模型	1
1.1.1 电路	1
1.1.2 电路模型	1
1.2 电路变量	2
1.2.1 电流和电流的参考方向	2
1.2.2 电压和电压的参考方向	3
1.2.3 电功率	4
1.3 电路基本元件	5
1.3.1 无源元件	5
1.3.2 理想有源元件	9
1.3.3 实际电源的模型	13
1.3.4 受控源	15
1.4 基尔霍夫定律.....	16
1.4.1 基尔霍夫电流定律	17
1.4.2 基尔霍夫电压定律	18
1.5 电路的系统分析法——节点电压法.....	19
1.6 叠加定理.....	23
1.7 等效电源定理.....	24
1.7.1 一端口网络.....	24
1.7.2 戴维南定理	26
1.7.3 诺顿定理.....	27
1.7.4 最大功率传输	29
1.8 用 PSpice 软件包分析直流电路	31
1.8.1 PSpice 软件简介	31
1.8.2 PSpice 8.0 的基本操作.....	31
1.8.3 PSpice 软件分析直流电路.....	34
习题	37
第二章 一阶电路的过渡过程	43
2.1 动态电路及初始条件.....	43
2.1.1 动态电路的过渡过程	43
2.1.2 动态电路的初始条件	43
2.2 一阶电路的时域分析.....	45
2.2.1 零输入响应	45
2.2.2 零状态响应	48

2.2.3 全响应	51
2.3 一阶电路的三要素法	52
2.4 积分电路和微分电路	55
2.4.1 积分电路	55
2.4.2 微分电路	56
2.5 用 PSpice 软件做暂态（过渡过程）分析	58
2.5.1 画开关分析法	58
2.5.2 无开关分析法	59
习题	60
第三章 正弦交流电路	65
3.1 正弦交流电路的基本概念	65
3.1.1 正弦交流电的瞬时值、幅值和有效值	65
3.1.2 正弦交流电的频率与周期	67
3.1.3 正弦交流电的初相和相位差	67
3.2 正弦量的相量表示法	69
3.2.1 正弦量的矢量表示	69
3.2.2 正弦量的相量表示法	69
3.2.3 相量图	71
3.2.4 基尔霍夫定律的相量形式	72
3.3 电阻、电感和电容单一元件的正弦交流电路	73
3.3.1 电阻电路	73
3.3.2 电感元件	75
3.3.3 电容元件	77
3.4 <i>RLC</i> 串联与并联交流电路	79
3.4.1 <i>RLC</i> 串联交流电路	79
3.4.2 <i>RLC</i> 并联交流电路	82
3.5 复杂交流电路的分析与计算	84
3.6 正弦交流电路的功率	85
3.6.1 瞬时功率	85
3.6.2 有功功率和无功功率	86
3.6.3 视在功率和功率三角形	87
3.7 谐振电路	88
3.7.1 串联谐振	88
3.7.2 并联谐振	90
3.8 三相正弦交流电路	92
3.8.1 三相正弦交流电源	92
3.8.2 三相电源的连接方式	93
3.8.3 三相负载的连接方式	95
3.9 应用 PSpice 软件进行交流电路分析	97

习题	98
第四章 半导体器件	102
4.1 半导体二极管	102
4.1.1 半导体的物理特性	102
4.1.2 二极管的结构和分类	102
4.1.3 半导体二极管的伏安特性	103
4.1.4 二极管的主要参数	105
4.1.5 二极管的电路模型及应用	106
4.1.6 稳压二极管	110
4.1.7 变容二极管	112
4.2 双极型晶体管	114
4.2.1 晶体管的结构及电路组态	114
4.2.2 晶体管的特性曲线和工作状态	115
4.2.3 晶体管的主要参数	117
4.3 绝缘栅型场效应晶体管	120
4.3.1 MOS管的类型	120
4.3.2 MOS管的伏安特性曲线和工作状态	121
4.3.3 场效应管的主要参数	123
4.3.4 场效应管的工作特点	124
4.4 半导体元件的开关作用	125
4.4.1 三极管的开关特性	125
4.4.2 场效应管的开关特性	126
4.5 半导体元件构成的逻辑门电路	128
4.5.1 二极管逻辑门电路	128
4.5.2 晶体管非门	129
4.6 集成门电路	131
4.6.1 TTL集成门电路	131
4.6.2 MOS集成门电路	133
4.7 应用 PSpice 分析二极管电路	134
4.7.1 二极管限幅特性的分析	134
4.7.2 稳压管限幅特性的分析	136
习题	138
第五章 基本放大电路	142
5.1 放大电路的组成和工作原理	142
5.1.1 放大电路概述	142
5.1.2 共射极放大电路的组成	142
5.1.3 共射极放大电路的工作原理	143
5.2 放大电路的基本分析方法	146
5.2.1 估算法分析静态工作点	146

5.2.2	微变等效电路法分析交流通路	148
5.2.3	放大电路的非线性失真和动态范围	153
5.2.4	稳定静态工作点的放大电路	158
5.3	放大电路的三种接法	161
5.3.1	共集电极放大电路	161
5.3.2	共基极放大电路	165
5.3.3	三种基本放大电路的性能比较	167
5.4	多级放大电路	168
5.4.1	多级放大电路的耦合方式	168
5.4.2	多级放大电路的分析	171
5.5	场效应管放大电路	174
5.5.1	场效应管的直流偏置电路和静态分析	174
5.5.2	场效应管共源极放大电路	176
5.5.3	场效应管源极输出器	179
5.6	放大电路的频率特性	180
5.6.1	频率特性和频率失真	180
5.6.2	简单 RC 网络的频率特性	182
5.6.3	单级阻容耦合共射极放大电路的频率特性	184
5.6.4	多级放大电路的频率特性	188
5.7	输出级和功率放大器	190
5.7.1	功率放大电路的基本特点	190
5.7.2	互补对称功率放大电路	192
5.7.3	其他类型的互补功率放大电路	195
5.8	用 PSpice 分析放大电路	198
5.8.1	PSpice 分析共射极放大电路	198
5.8.2	PSpice 分析功率放大电路	203
	习题	205
第六章	集成运算放大器	212
6.1	概述	212
6.2	零点漂移	213
6.3	差动放大电路	213
6.3.1	基本差动放大电路	213
6.3.2	长尾式差动放大电路	216
6.3.3	恒流源差动放大电路	220
6.3.4	共模抑制比	221
6.3.5	调零	221
6.3.6	差动放大电路四种接法	222
6.4	电流源电路	227
6.5	集成运算放大器	229

6.5.1 典型集成运算放大器介绍	229
6.5.2 集成运放的性能指标	231
6.5.3 集成运放的低频等效电路	234
6.6 PSpice 分析差动放大电路	235
习题	236
第七章 负反馈放大器	240
7.1 反馈的基本概念	240
7.1.1 什么是反馈	240
7.1.2 反馈放大器的基本类型与判断	241
7.2 负反馈放大器的表示方法	244
7.3 负反馈对放大器性能的影响	245
7.3.1 提高放大倍数的稳定性	245
7.3.2 展宽通频带	246
7.3.3 减小非线性失真	247
7.3.4 对输入、输出电阻的影响	247
习题	249
第八章 集成运算放大器的应用	251
8.1 运算电路	251
8.1.1 比例运算电路	252
8.1.2 加减运算电路	253
8.1.3 积分电路和微分电路	255
8.1.4 对数和反对数电路	257
8.1.5 乘法和除法电路	258
8.2 电压比较器	259
8.2.1 简单电压比较器	260
8.2.2 滞回比较器	261
8.3 波形发生器	263
8.3.1 正弦波信号发生器	263
8.3.2 矩形波发生器	265
8.3.3 三角波发生器	267
8.3.4 锯齿波发生器	268
8.4 PSpice 分析运放电路	269
习题	271
第九章 直流稳压电源	275
9.1 概述	275
9.2 桥式整流电容滤波电路	275
9.3 串联反馈型稳压电路	278
9.3.1 串联反馈型稳压电路	278
9.3.2 集成三端稳压器	280

9.4 串联开关型稳压电路	283
9.4.1 基本工作原理	284
9.4.2 串联开关型稳压电路	284
习题	286
第十章 在系统可编程模拟器件原理及其应用	290
10.1 概述	290
10.2 在系统可编程模拟器件的结构和原理	291
10.2.1 ispPAC10 的结构和工作原理	291
10.2.2 ispPAC20 的结构和工作原理	293
10.3 在系统可编程模拟器件的应用	294
10.3.1 放大电路设计	294
10.3.2 有源滤波电路设计	298
10.4 PAC-Designer 软件开发实例	300
10.4.1 设计步骤	300
10.4.2 PAC-Designer 软件的几个重要功能	303
习题	304
参考文献	305

第一章 直流电路

本章结合直流电路介绍了一般电路的基本物理量，讨论了电路的基本定律、基本定理和电路的基本分析方法。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路

电路 (circuit) 是由电器元件、设备按一定方式连接起来的电流通路。电路有两个主要的作用：一是实现电能的产生、传输和分配，如电力系统；二是对信号进行处理，如计算机对输入数据进行指定的计算等。

实际电路是由各种器件组成的，电路器件按其电特性可分为三类：第一类是向电路提供电能或电信号的器件，称为电源 (electric source)；第二类是在电路中吸收电能或接受电信号的器件，称为负载 (load)；第三类是电路中的连接导线和开关，称为传输控制器件。由于在电源的作用下，电路中的各部分将产生电压 (voltage)、电流 (current)，故通常又将电源称为激励 (excitation)，电路中各部分的电压、电流称为响应 (response)。

1.1.2 电路模型

1. 电路元件

实际中的电器元件和设备的种类很多，且电路结构复杂。为了便于分析、设计，就必须对实际电路进行科学的抽象，即用电路模型来代替实际的电路。构成电路模型的最小单元称为理想电路元件 (element，简称元件)，它是根据实际电器元件的电磁特征所设想的具有某种单一电磁性质的元件，有严格的文字描述和数学定义。基本的电路元件包括：

- 耗能元件：电阻 (resistance)；
- 储能元件：储存电场能的电容 (capacitance)、储存磁场能的电感 (inductance)；
- 电源元件：电压源 (voltage source)、电流源 (current source)；
- 受控源 (controlled source)。

2. 电路模型

将理想电路元件组合起来就构成了电路模型，它反映了实际电器元件和设备在一定条件下的主要电磁特征。将实际电路抽象为电路模型的过程称为建模，建模时必须考虑器件的工作条件和建模精度，同一个实际器件，在不同的工作条件和精度要求下，可能要用不同的电路模型来表示。例如，一个电感线圈工作在直流时，只需考虑其能量的损耗，因此电路模型仅用一个电阻表示，如图 1-1 (a) 所示；当工作在较低的频率下时，考虑到电感效应，电路模型要用电阻和电感的串联组合表示，如图 1-1 (b) 所示；当工作在较高的频率下时，除了反映线圈中的能量损耗及储存磁场能外，还应考虑到导体

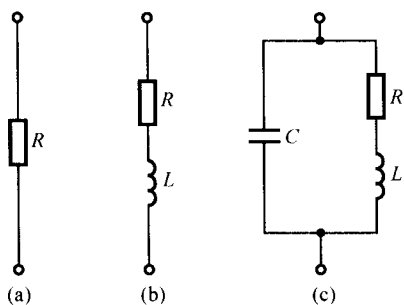


图 1-1 电感线圈不同的电路模型

表面的电荷作用，即线圈的绕线之间的电容效应，因此，较精确的电路模型还应当包含电容元件，如图 1-1 (c) 所示。

本课程所研究的对象都属于集总参数电路，其特点是实际电路的尺寸远远小于电路工作频率下的电磁波波长。例如电力网的工作频率为 50Hz，对应的波长为 6000km，这对于实验室中的设备来说，其尺寸与这一波长相比可以忽略不计，因而可用集总的概念进行分析。但对于远距离的电力传输线来说，由于线路长度可与波长比拟，所以必须考虑电流、电压的空间分布，也就是说，传输线不能用集总概念来分析，而必须用“分布参数”的概念。

本书只讨论集总电路，后述电路的基本定律都是在集总假设前提下才能使用。

1.2 电路变量

描述电路中电磁现象的基本物理量是电压、电流、电荷 (electric charge) 和磁通链 (flux linkage)。在线性电路中所讨论的电路变量是电压、电流。此外，电路在实际使用中还经常用到由基本变量派生出的电功率 (power) 等物理量。

1.2.1 电流和电流的参考方向

在电场的作用下，电荷的定向移动形成电流。电流强度 (简称电流) 是衡量电流大小的物理量，它定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量，即

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

式中，电流 i 的单位是安培 (A)；电荷 q 的单位是库仑 (C)；时间 t 的单位是秒 (s)。

习惯上规定正电荷的移动方向为电流的正方向或实际方向。但在电路分析时，电流往往是一个需要求解的未知量，其实际方向无法预知，特别是在有些情况下，电流的实际方向会随时间变化。因此，在分析计算电路时，首先必须人为设定电流方向，在此假定的方向下再对电路进行分析，这个假定的方向称为参考方向 (reference direction)。在电路图中电流的参考方向用箭头表示，如图 1-2 所示。参考方向可以任意假设，若电流的最终计算结果是正值 ($i > 0$)，则说明实际方向与假定的参考方向相同；反之，若电流为负值 ($i < 0$)，则表示实际方向与参考方向相反。也就是说，电流 i 的值有正负之分，是一个代数量，其数值表示电流大小，正负表示电流的实际方向。



图 1-2 电流的参考方向

在电路中，将大小和方向都不随时间变化的电流称为直流电流（direct current），用大写 I 表示。

1.2.2 电压和电压的参考方向

1. 电压和电压的参考方向

电压是衡量电场对电荷做功的物理量，它定义为电场力将单位正电荷从一点移到另一点所做的功，即

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

式中，功 ω 的单位是焦耳（J）；电荷 q 的单位是库仑（C）。

电压的实际方向是从高电位指向低电位的方向，即电压降的方向。同电流的参考方向类似，在电路分析中，应事先假定电压的参考方向，用箭头或正负极性表示，如图 1-3 所示。这样，电压 u 的值也有正负，是一个代数量，其数值表示电压大小，正负表示电压的实际方向。如 $u > 0$ ，则表示电压的实际方向与参考方向相同； $u < 0$ ，则两者方向相反。大小和方向都不随时间变化的电压称为直流电压，用大写 U 表示。

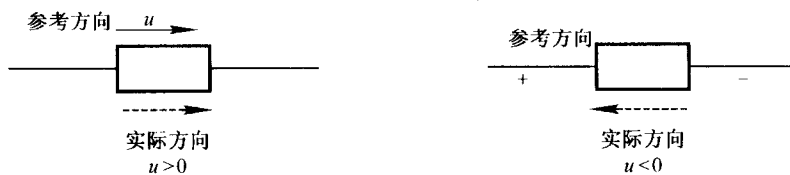


图 1-3 电压的参考方向

电流与电压的参考方向可以任意假定，二者彼此独立，相互无关。但在求解电路时，对一个元件而言，既要标注电流的参考方向，又要标注电压的参考方向，就显得较为繁琐。为了方便起见，常采用关联参考方向的标注方法。所谓关联参考方向是指元件上电压与电流的参考方向一致，即电流的参考方向自电压的正极流入，负极流出，也就是从电压的正极性指向负极性，如图 1-4 (a) 所示；反之，电流自电压的正极流出，负极流入，即电流参考方向从电压的负极性指向正极性，则称为非关联参考方向，如图 1-4 (b) 所示。这样，在电路分析中只要标注两者之一的参考方向就可以了，如电路图中只有一个参考方向，则按关联方向对待。

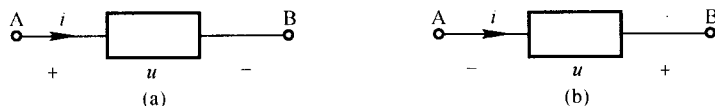


图 1-4 关联参考方向与非关联参考方向

缺少参考方向的物理量是没有意义的，这是电路分析中极为重要的概念。在分析电路的过程中，注意一定要先设定参考方向，然后再列方程计算。参考方向不同，其表达式符号也不同。虽然参考方向是任意假定的，但是一经选定，则在整个电路计算过程中

就不能随意变动。

2. 电位

在分析电子电路时，经常要用电位这一物理量，电位是相对于所选的零电位参考点而言的，电路中某点的电位是指该点到零电位参考点的电压。因此，任意两点间的电位差就等于这两点的电压，电压的实际方向也就是电位降的方向。电位与电压的区别在于电位是相对量，它与零电位参考点的选择有关，而电压是绝对量，与参考点的选择无关。

实际电气设备中的零电位参考点，一般选在有一个连接机壳的电路公共端，工程上常以这个公共点为参考，即使它并不真正接地，习惯上也称该点为“接地点”。在电子技术中，为了使电子电路图看起来较为简洁，经常采用电位电路的习惯性画法。当电压源负极性接机壳时，其正极性可标出“+”；当电压源正极性接机壳时，其负极性可标出“-”。如图 1-5 所示，图 1-5 (a) 为联成回路的画法，图 1-5 (b) 为标出电位的习惯性画法，符号“⊥”标为参考接地点， $+U_{s1}$ 、 $-U_{s2}$ 表示电位。

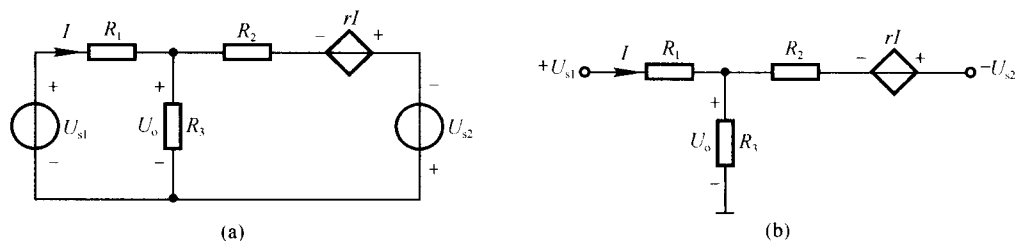


图 1-5 电路的两种画法

1.2.3 电功率

电路在工作状态下，总伴随有电能与其他形式能的相互转换，并且电路器件在使用时也有其自身的功率限制。因此，在电路的分析中，电功率的计算是非常重要的。

电功率（简称功率，power）是指单位时间内元件所吸收或发出的电能，也就是各个部分进行能量转换的速率，定义为

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt}$$

式中，电功率 p 的单位是瓦特 (W)；电能 ω 的单位是焦耳 (J)；时间 t 的单位是秒 (s)。

图 1-6 中的方框表示一段电路，其电流 i 和电压 u 的参考方向如图所示。若电量为 dq 的正电荷从电压的“+”极性移动到“-”极性，则根据电压的定义可知，在此过程中电场力对正电荷 dq 做正功，消耗电能，也可以说这段电路吸收电能，其吸收的电能可表示为

$$d\omega = u \cdot dq$$

则吸收的电功率为

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (1-3)$$

图 1-6 电功率

由于 u 、 i 有正负之分，因此功率 p 也有正负之分。当 u 与 i 取关

联方向时, 功率 $p(=ui)$ 表示这段电路所吸收的功率。因此, 若计算出 $p>0$, 则说明这段电路确实为吸收功率(消耗电能), 它相当于一个负载; 若计算出 $p<0$, 则说明这段电路实际上是发出功率(释放电能), 相当于一个电源。

反之, 当 u 与 i 取非关联方向时, 则用公式 $p=ui$ 计算的是这段电路所发出的功率, 若计算出 $p>0$, 说明这段电路实际发出功率; 若 $p<0$ 时, 实际上是吸收功率。

例 1-1 电路如图 1-7 所示, 图中的方框表示电路元件, 电流与电压的参考方向如图所示。已知 $I=2\text{A}$, $U_1=28\text{V}$, $U_2=16\text{V}$, $U_3=-12\text{V}$, 试计算各元件的功率。

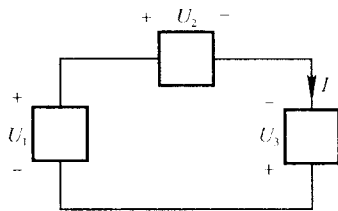


图 1-7 例 1-1 电路

解 电流 I 与电压 U_1 为非关联参考方向, 因此元件 1 发出的功率为

$$P_1 = U_1 I = 28 \times 2 = 56(\text{W})$$

元件 2 上的电流 I 与电压 U_2 为关联参考方向, 故它吸收的功率为

$$P_2 = U_2 I = 16 \times 2 = 32(\text{W})$$

电流 I 与电压 U_3 为非关联方向, 因此元件 3 发出的功率为

$$P_3 = U_3 I = -12 \times 2 = -24(\text{W})$$

由于元件 3 发出的功率是负值, 因此它实际上是吸收功率。显然, 整个电路中总的吸收功率等于发出的功率, 满足功率守恒。

1.3 电路基本元件

电路元件是电路模型的基本单元, 每个元件反映电路中的一种物理现象。电路元件分为以下几种类型:

(1) 线性元件和非线性元件: 元件参数与元件中的电流或电压无关, 则称为线性元件, 否则为非线性元件。

(2) 无源元件和有源元件: 能够对外提供能量的元件称为有源元件, 如电压源、电流源, 而电阻、电感、电容则是无源元件。

(3) 二端元件和多端元件: 电路元件通过其端钮与外电路相联, 有二个端钮的元件称为二端元件, 其余都称为多端元件。

1.3.1 无源元件

1. 电阻元件

电阻是消耗电能的无源二端元件。如果电阻的伏安特性是通过坐标原点的直线, 即端电压与其电流成正比, 如图 1-8 (a) 所示, 则称为线性电阻, 否则称为非线性电阻, 其伏安特性如图 1-8 (b) 所示。电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下都可以用电阻元件作为其电路模型。

线性电阻有以下特点:

(1) 端电压 u 与通过的电流 i 成正比, 满足欧姆定律。当 u 与 i 取关联方向时, 有

$$u = R \cdot i \quad (1-4)$$

式 (1-4) 不仅给出了电压与电流在数值上的约束关系, 而且包含了方向上的约束关系。



图 1-8 电阻符号及伏安特性

若 u 与 i 为非关联方向，则欧姆定律表示为

$$u = -R \cdot i$$

线性电阻还可用电导来表示，它与电阻互为倒数，即

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

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)，电导的单位是西门子 (S)。

(2) 双向性。线性电阻的伏安特性曲线以原点对称，因此对于不同方向的电流、电压，其伏安特性完全相同，即元件的两个端钮没有区别，可任意连接。

(3) 耗能性。在关联参考方向下，线性电阻吸收的功率为

$$P = ui = Ri^2 = u^2G$$

上式表明，无论 u 、 i 的正负，功率 P 始终大于 0，即线性电阻在任何时刻都吸收功率。这说明电阻不仅是无源元件，而且是耗能元件。电阻所消耗的电能是不可逆的，一个电阻器在使用时的功率如果超过所标明的额定功率，就有烧坏的可能。

(4) 无记忆性。由式 (1-4) 可以看出，电阻元件上的伏安关系是代数关系，任意时刻的电压（或电流）只取决于同一时刻的电流（或电压）值，而与该时刻以前的电流（或电压）值无关，因此电阻是无记忆元件。

2. 电容元件

电容元件是储存电场能量的无源二端元件。任何两个相互绝缘而又彼此靠近的导体（极板）就可构成一个电容器。在电容元件的两端加电压 u ，两个极板上就将存储等量而符号相反的电荷 q ，从而形成电场。电荷 q 与所加电压 u 之比即为电容

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-5)$$

式中，电容 C 的单位是法拉 (F)，但实际电容器的电容量多在 $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{F}$ ，故常用微法 (μF) 或皮法 (pF) 作单位， $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$ ， $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。电荷 q 的单位是库仑 (C)。

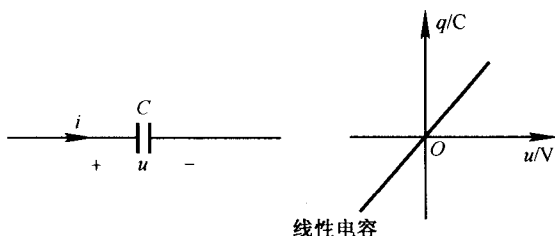


图 1-9 电容符号及库伏特性

电容特性可用电荷与电压之间的关系曲线（库伏特性曲线）描述。若电容的库伏特性曲线是通过坐标原点的直线，如图 1-9 所示，则称为线性电容。

线性电容有以下特点：

(1) 动态性。当电荷随时间变化时，电容中便产生变化的电流，在 u 、

i 取关联参考方向时, 电容上的伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-6)$$

若 u 与 i 为非关联方向, 则式 (1-6) 要加 “-” 号, 即 $i = -C \frac{du}{dt}$ 。式 (1-6) 表明, 电容电流与该时刻电压的变化率成正比, 因此称电容为动态元件。在直流电路中, 电压恒定不变, 故电容电流为零, 相当于开路, 也就是说电容具有隔直作用。

(2) 惯性。由式 (1-6) 可以看出, 若任意时刻电容电流为有限值, 则电容电压只能在原有值的基础上连续变化, 而不能发生跃变。

(3) 储能性。电容元件具有储存电场能的性质, 其储存的能量为

$$W_C = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t C \frac{du(\xi)}{d\xi} u(\xi) d\xi = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(t_0) \quad (1-7)$$

若 $|u(t)| > |u(t_0)|$, 则 $W_C(t) > W_C(t_0)$, 说明在 $t_0 \sim t$ 这段时间内电容充电, 吸收能量。若 $|u(t)| < |u(t_0)|$, 则 $W_C(t) < W_C(t_0)$, 说明在 $t_0 \sim t$ 这段时间内电容放电, 释放能量。电容是一个储能元件, 它本身不消耗能量, 同时, 它也不会释放出多于它吸收的能量, 因此电容是无源元件。

若初始电压 $u(t_0) = 0$, 则电容在 t 时刻所储存的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{C} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表明, 电场能只取决于该时刻的电容电压, 而与电容电流无关, 甚至在电容电流为零时, 电场能也可存在。

实际电容器标定有电容量和额定电压两个参数, 当工作电压超过额定电压时, 电容器的介质有可能损坏或击穿, 丧失电容器的作用。

电容器是为了获得一定大小的电容而特制的, 但电容效应在许多场合都存在。如晶体三极管的三个电极之间存在着电容; 一对架空输电线之间也有电容效应, 这是因为一对输电线可看作是二个极板, 输电线之间的空气可视为电容极板间的介质; 一个线圈的各线匝之间也有电容效应。当电流和电压的变化频率不高时, 这些电容效应可忽略, 但是在高频情况下, 就必须考虑电容效应。

例 1-2 电路如图 1-10 (a) 所示, 电容电压 u 的波形如图 1-10 (b) 所示, 试作出电流 i 的波形。

解 根据图 1-10 (b), 写出电容电压的分段表达式为

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

按式 (1-6) 可分段计算出电容电流 i

$$i = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} -0.4 \text{ A} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ 0.4 \text{ A} & (1 \leq t \leq 3 \text{ s}) \\ -0.4 \text{ A} & (3 \leq t \leq 4 \text{ s}) \end{cases}$$

由上式画出 i 的波形如图 1-10 (c) 所示。显然, 电容电压不能跃变, 而电容电流可以跃变。

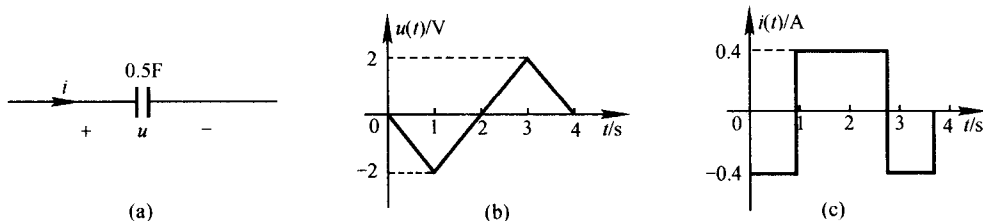


图 1-10 例 1-2 的图

3. 电感元件

电感元件是储存磁场能量的无源二端元件。当电感线圈中的电流 i 变化时，导致线圈中产生的磁通 ϕ 变化，相应的磁通链 ψ 变化，随之产生的感应电压 u 也变化。电感的大小反映了线圈通电后产生磁通链能力的强弱。

电感元件上的磁通链与电流之间的关系曲线称为电感元件的韦安特性曲线。线性电感是指电感的韦安特性是通过坐标原点的直线，如图 1-11 所示。当磁通链与电流满足

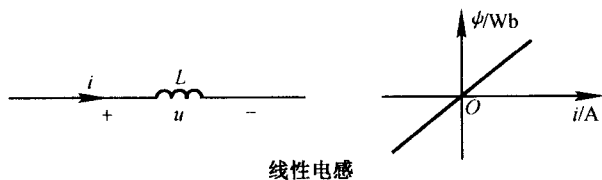


图 1-11 电感符号及韦安特性

右手螺旋法则时，磁通链与电流的比值就是电感 L ，即

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-9)$$

式中，磁通链 ψ 的单位是韦伯 (Wb)；电感 L 的单位是亨利 (H)。

线性电感具有以下特点：

(1) 动态性。根据电磁感应定律，当电感中的电流 i 随时间变化时，磁通链 ψ 也随时间变化，从而在电感两端产生感应电压 u 。电感元件的伏安关系式为

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

式中， u 与 i 取关联参考方向。上式表明，电感电压与该时刻电流的变化率成正比，而与该时刻的电流无关，因此电感是动态元件。在直流电路中，电流的变化率为零，因此电感电压 u 为零，相当于短路线。

(2) 惯性。从式 (1-10) 可以看出，若任意时刻电感电压为有限值，则电感电流只能在原电流值的基础上连续变化，而不能发生跃变。

(3) 储能性。电感元件具有储存磁场能的性质，在 $t_0 \sim t$ 时间内，其储存的能量为

$$W_L = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t L \frac{di(\xi)}{d\xi} i(\xi) d\xi = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \quad (1-11)$$

若 $|i(t)| > |i(t_0)|$ ，则电感在此时间内吸收能量；若 $|i(t)| < |i(t_0)|$ ，则电感在此时间内释放能量。但电感元件不把吸收的能量消耗掉，而是以磁场能量的形式储存于磁场中，因此电感是一种储能元件。同时，它也不会释放出多于它吸收或储存的能量，因而，它又是无源元件。若初始电流 $i(t_0) = 0$ ，则电感在 t 时刻所储存的磁场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) = \frac{1}{2} \times \frac{\psi^2}{L} \quad (1-12)$$