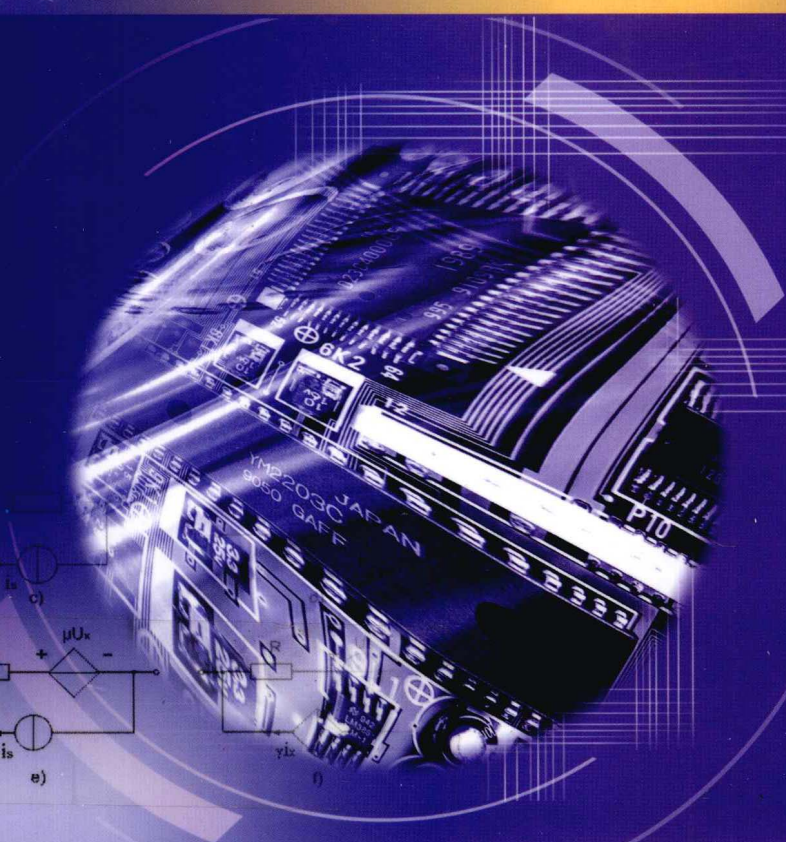




普通高等教育“十二五”电子电气基础课程规划教材

电路基础实用教程

黄亚平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子电气基础课程规划教材

电路基础实用教程

主 编	黄亚平	曹 蕾		
副主 编	徐存东	梁 芳	曾 贵	王 晓
参 编	龙诺春	杨金凡	何 娥	燕 媛
主 审	杨新盛			
	杨廷栋			



机械工业出版社

本书系统地介绍了电路理论的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共 11 章, 内容包括电路模型和基本定律、电阻电路分析、电路定理、动态电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和变压器电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的拉普拉斯变换、二端口网络、非线性电阻电路。各章均配有与基本内容密切相关的例题和习题。书末还附有电路基础实验、Multisim 软件在电路分析中的应用, 以及部分习题答案与解题方法。

本书可作为电子、电气、通信和计算机等专业应用型本科学生的教材, 也可作为高职高专相应专业学生的教材或供有关科技人员学习参考。

本书配有免费电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路基础实用教程/黄亚平主编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-111-30774-7

I. ①电… II. ①黄… III. ①电路理论—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 171743 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 责任编辑: 徐 凡

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 18.75 印张 · 462 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-30774-7

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

“电路基础”是高等工科院校电子信息与电气信息类各专业本科学生的重要专业基础课程，其内容主要是介绍电路的基础知识、基本概念、基本理论和基本分析方法。通过本书的学习能使學生掌握电路的基本概念和基本原理，并使學生获得一定的电路分析与计算的能力，为后续电类课程的学习打下基础。

本书是根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员制定的教学基本要求编写的，是高等学校应用型本科电子信息与电气信息类专业的教材。本书主要包括：电路模型和基本定律、电阻电路分析、电路定理、动态电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和变压器电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的拉普拉斯变换、二端口网络、非线性电阻电路。本书各章均配有与基本内容密切相关的例题和习题。加有*号的章节为选讲内容，教师可根据不同专业和不同层次学生的情况合理选择教学内容。本书教学参考学时为80学时。

本书注重应用型本科教学的特点，根据工程教育的理念着重基本概念、基本分析方法和基本计算方法的介绍，重点培养学生分析问题、解决问题的能力以及理论联系实际的能力。在书末，附有电路基础实验、Multisim 软件在电路分析中的应用，以及部分习题参考答案与解题方法，供教学时选用。另外为方便教学，本书赠送电子课件。

本书由广东白云学院黄亚平任主编，徐存东、曹蕾任副主编，龙诺春、梁芳芳、曾贵娥、王晓燕、杨金凡、杨新盛、何流、顾媛媛等参加编写。其中，黄亚平老师编写第1章和第2章的2.1、2.2、2.3节，杨金凡老师编写第2章的2.4节，曹蕾老师编写第3、4章以及附录A，曾贵娥老师编写第5章，龙诺春老师编写第6、7章，梁芳芳老师编写第8章，徐存东老师编写第10章，王晓燕老师编写第9、11章，杨新盛老师编写附录B，顾媛媛老师编写了部分实验内容，何流老师对部分文稿和图稿进行了修改并整理编写了部分习题参考答案与解题方法。

本书由杨廷栋教授主审。在编写过程中，林春景教授提出了宝贵的指导意见，刘烽和赵东方两位高级工程师提供了有益的建议，在此对他们的指导和建议表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

编 者

目 录

前言

第1章 电路模型和基本定律..... 1

1.1 电路及电路模型 1

1.1.1 电路及其功能 1

1.1.2 电路的组成 2

1.1.3 电路模型 2

1.2 电路的基本物理量 3

1.2.1 电流 3

1.2.2 电压 4

1.2.3 电功率 5

1.3 电阻元件 6

1.3.1 线性电阻元件 7

1.3.2 非线性电阻元件 8

1.4 电源元件 8

1.4.1 电压源 8

1.4.2 电流源 9

1.4.3 受控电源 11

1.5 基尔霍夫定律 12

1.5.1 基尔霍夫电流定律 12

1.5.2 基尔霍夫电压定律 14

本章小结 14

习题1 15

第2章 电阻电路分析..... 18

2.1 电阻电路的等效变换 18

2.1.1 电阻的串联 18

2.1.2 电阻的并联 19

2.1.3 电阻的混联 20

2.1.4 电阻的星形(丫)联结和三角形 (Δ)联结的等效变换 21

2.2 电压源与电流源的等效变换 23

2.2.1 电压源、电流源的串联与并联 23

2.2.2 实际电源模型的等效变换 24

2.3 电阻电路的一般分析法 28

2.3.1 支路电流法 29

2.3.2 网孔电流法 31

2.3.3 节点电压法 34

2.4 含受控源电阻电路的分析 39

2.4.1 含受控源电阻电路的等效变换 39

2.4.2 含受控源电阻电路 40

2.4.3 运算放大器电路 42

本章小结 46

习题2 47

第3章 电路定理 51

3.1 叠加定理 51

*3.2 替代定理 54

3.3 戴维南定理和诺顿定理 55

*3.4 特勒根定理 61

*3.5 互易定理 61

*3.6 对偶原理 62

本章小结 63

习题3 65

第4章 动态电路分析 67

4.1 动态元件 67

4.1.1 电容元件 67

4.1.2 电感元件 70

4.1.3 电容元件和电感元件的串联 与并联 72

4.2 一阶电路 74

4.2.1 换路定理及动态电路的两个 边界条件 74

4.2.2 一阶电路的零输入响应 77

4.2.3 一阶电路的零状态响应 82

4.2.4 一阶电路的全响应 85

4.2.5 一阶电路的三要素法 86

*4.2.6 一阶电路的阶跃响应 88

*4.3 二阶电路 90

*4.3.1 二阶电路的零输入响应 90

*4.3.2 二阶电路的零状态响应和全 响应 93

本章小结 94

习题4 97

第5章 正弦稳态电路分析 100

5.1 正弦量 100

5.1.1 正弦量的三要素 100

5.1.2 正弦量的有效值	101	6.5.1 交流铁心线圈的特性	158
5.1.3 相位差	102	6.5.2 交流铁心线圈的电路模型	161
5.2 相量法	103	6.5.3 铁心变压器的电路模型	162
5.2.1 复数的表示和运算规律	103	本章小结	163
5.2.2 正弦量的相量表示	104	习题 6	166
5.2.3 基尔霍夫定律的相量形式	105	第 7 章 三相电路	169
5.2.4 电路元件的相量形式	106	7.1 三相电源和负载	169
5.3 阻抗和导纳	110	7.1.1 三相电源	169
5.3.1 阻抗	110	7.1.2 三相负载	170
5.3.2 导纳	112	7.2 对称三相电路	171
5.3.3 阻抗与导纳的关系	114	7.2.1 $Y-Y$ 和 $Y-\Delta$ 对称三相 电路	173
5.4 正弦稳态电路分析	115	7.2.2 $\Delta-Y$ 和 $\Delta-\Delta$ 对称三相 电路	175
5.4.1 电阻电路与正弦电流电路的 分析比较	115	7.3 不对称三相电路	177
5.4.2 相量法分析电路的一般步骤	115	7.4 三相电路的功率	179
5.5 正弦稳态电路的功率	118	7.4.1 三相电路的平均功率	179
5.5.1 功率和能量	118	7.4.2 三相电路的无功功率	179
5.5.2 功率因数	121	7.4.3 三相电路的视在功率	179
5.5.3 最大功率传输	123	7.4.4 三相电路的瞬时功率	179
5.6 正弦稳态电路的谐振	124	7.5 三相功率的测量	181
5.6.1 RLC 串联谐振	124	本章小结	182
5.6.2 RLC 并联谐振	129	习题 7	184
本章小结	131	第 8 章 非正弦周期电流电路	185
习题 5	131	8.1 非正弦周期信号	185
第 6 章 耦合电感和变压器电路	133	8.2 非正弦周期信号的谐波分析	186
6.1 磁场与磁路	133	8.2.1 非正弦周期信号的分解	186
6.1.1 磁场的基本物理量	133	8.2.2 波形对称性与傅里叶级数的 简化	187
6.1.2 磁场的基本定律	134	8.2.3 非正弦周期信号的频谱	188
6.1.3 铁磁物质的磁性能	135	8.3 非正弦周期信号的有效值、平均 值和平均功率	189
6.1.4 磁路及其基本定律	137	8.3.1 非正弦周期信号的有效值	189
6.1.5 恒定磁通磁路的计算	139	*8.3.2 非正弦周期信号的平均值	190
6.2 互感	142	8.3.3 非正弦周期信号的平均功率	191
6.2.1 互感的基础知识	142	*8.4 非正弦周期电流电路的分析计算	192
6.2.2 耦合电感	145	本章小结	195
6.2.3 含有耦合电感电路的计算	146	习题 8	196
6.3 空心变压器	151	*第 9 章 电路的拉普拉斯变换	197
6.3.1 空心变压器的结构与特点	151	9.1 拉普拉斯变换的定义	197
6.3.2 空心变压器的电路模型	151	9.2 拉普拉斯变换的基本性质	198
6.4 理想变压器	153	9.3 拉普拉斯反变换	201
6.4.1 理想变压器的条件	153		
6.4.2 理想变压器的伏安特性	154		
6.4.3 理想变压器的阻抗变换	156		
6.5 铁心变压器	158		

9.4 复频域电路	205	10.5.1 二端口网络的级联	229
9.4.1 基尔霍夫定律的复频域形式	205	10.5.2 二端口网络的串联	230
9.4.2 电阻的复频域形式	206	10.5.3 二端口网络的并联	230
9.4.3 电感的复频域形式	206	本章小结	231
9.4.4 电容的复频域形式	206	习题 10	232
9.5 电路的拉普拉斯变换	207	* 第 11 章 非线性电阻电路	234
本章小结	211	11.1 非线性电路元件	234
习题 9	212	11.1.1 非线性电阻元件	234
第 10 章 二端口网络	214	11.1.2 非线性电容元件	235
10.1 二端口网络的概念	214	11.1.3 非线性电感元件	236
10.2 二端口网络的网络参数	215	11.2 非线性电阻电路的图解法	237
10.2.1 开路阻抗参数 Z 参数方程	215	11.3 小信号分析法	238
10.2.2 短路导纳参数 Y 参数方程	217	11.4 分段线性化法	240
10.2.3 混合参数 H 参数方程	221	本章小结	245
10.3 二端口网络的传输函数	223	习题 11	245
10.4 二端口网络的等效电路	226	附录	247
10.4.1 T 形等效电路	226	附录 A 电路基础实验	247
10.4.2 Π 形等效电路	227	附录 B Multisim 软件在电路分析	
10.4.3 含受控源二端口网络的等效		中的应用	271
电路	228	部分习题参考答案与解题方法	285
10.5 二端口网络的连接	229	参考文献	292

第 1 章 电路模型和基本定律

本章主要介绍电路（Circuit /Electric Circuit）及电路模型，电路的基本物理量，电路的基本元件，电路的基本定律。

1.1 电路及电路模型

电路是电荷定向流通的路径。电路模型是描述、分析、计算和归纳电路特性的模型。

1.1.1 电路及其功能

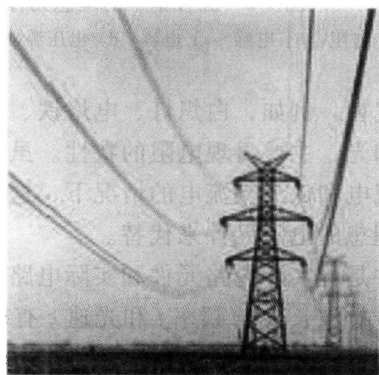
电路是电荷（带电粒子）定向流通的路径。电荷来源于构成物质的基本微粒。物质是由原子组成的，原子由电子和原子核构成，原子核又由质子和中子构成，电子带负电荷，质子带正电荷。电荷（带电粒子）的定向流动形成电流，电流的运动路径就是电路。人类社会已进入电气化、信息化的时代，电路在人的社会生活中起着重要作用。实际电路按其功能可分成两大类：一类是输送、分配和使用电能的电路；另一类是产生、传输和处理电信息的电路。

输送、分配和使用电能的电路可称为电力电路，常见的有发电机、电力变压器、输电线和用电器具构成的电力网路。电力电路中的用电器具，常见的有电动机、电炉、电焊机、照明灯具等。

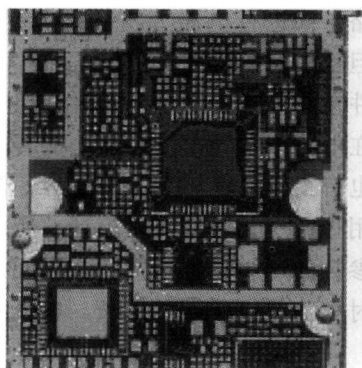
产生、传输和处理电信息的电路可称为电子电路，常见的有收音机、电视机、移动电话和电脑的内部电路。收音机、电视机、移动电话和计算机等电子设备往往要由电力网路提供电能，这时它们也是电力电路中的用电器具。

电路往往具有网络形的结构，所以电路也称为网络或网路。

实际电路举例如图 1-1 所示。



a)



b)

图 1-1 实际电路举例

a) 高压输电线路 b) 移动电话的电子电路

1.1.2 电路的组成

实际电路种类很多,但是不管是复杂电路还是简单电路,电路一般都是由电源、导线、控制部件和负载等部分组成。

电源是给电路提供电能或电信号的元件,常见的实际电源有电池、发电机、电力网等,广播电台、电视台、计算机网络是提供电信号的电源(信号源)。导线是电路传输电能或电信号的连接线。控制部件是开关等控制电路通断的元件。负载是在电路中吸收电能的元件,如电灯、电动机、电风扇、电冰箱、电视机、计算机等用电器具都是负载。

在电源和信号源的作用下,电路中产生电压和电流,所以电源和信号源又称为激励,由电源和信号源激励在电路中产生的电流和电压称为响应。

1.1.3 电路模型

实际电路的元件种类繁多,实际电路的结构是复杂的。为了能够方便地对电路的性质进行描述、分析、计算和归纳,可用一些理想元件组成模型来代替实际电路,这就是电路模型。电路模型中的理想元件是根据实际元件的主要特性理想化获得的。电路中的理想元件分为无源元件和有源元件。能向电路提供能量的元件称为有源元件;从电路吸收电源能量,并将这些能量转化为其他形式或将它储存在电场或磁场中的元件称为无源元件。

电路模型中有五种基本的理想元件,分别是电阻元件、电感元件、电容元件、电压源元件、电流源元件,它们都只有两个端子,称为二端元件,如图 1-2 所示。此外,还有受控源元件、耦合电感元件和理想变压器元件等四端理想元件。

理想元件是从实际元件抽象出来的模型,没有具体的体积和大小,其特性集中表现在一个点上,也称为集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路,简称集总电路,也就是理想电路模型。用理想元件构成的电路模型代替实际元件组成的复杂实际电路,来进行电路分析和计算是方便实用的,但也是有条件的。

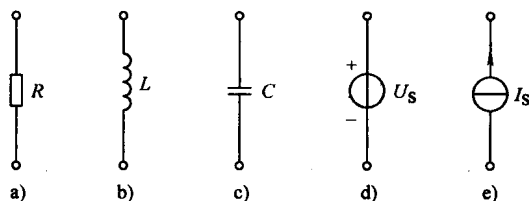


图 1-2 五种基本的理想元件

a) 电阻 b) 电感 c) 电容 d) 电压源 e) 电流源

实际元件在一定条件下可用一种理想元件来代替,例如,白炽灯、电烙铁、电炉等实际元件,它们在电路中消耗电能,把电能转换成热和光,主要显现电阻的特性。虽然它们的灯丝和电阻丝也有很小的电感和分布电容,但在直流电和低频交流电的情况下,这些电感和分布电容的作用很微小,可以忽略不计,所以可用理想的电阻元件来代替。

用集总参数的理想元件来代替实际元件的条件是:实际电路元件和实际电路的长度远小于电路工作时电流或电信号的波长。电流或电信号的波长 λ 与频率 f 和光速 c 有以下关系:

$$\lambda = c/f$$

式中,光速 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

在直流电的情况下,电流频率 f 为零,波长 λ 为无穷大,上述条件是满足的;在常用市电情况下,交流电流频率 f 为 50 Hz ,波长 λ 为 $6 \times 10^6 \text{ m}$,上述条件也是满足的;在无线电短波的频率 f 为 30 MHz ($3 \times 10^7 \text{ Hz}$) 时, λ 为 10 m ,上述条件通常也是满足的。所以,用理想

元件构成的电路模型，在大多数情况都是适用的。但是，在更高的频率情况下，比如在微波通信时，电信号波长小到厘米和毫米级，此时电路元件的大小和电信号波长处于同一数量级，就不能用集总参数元件来代替实际元件进行分析了，理想的电路模型也就失效了。这时，要用分布参数或电磁场理论来分析。

本书只讨论由理想元件构成的电路模型。本书后面提到的电路，除特别说明外均为电路模型，所涉及的元件都是理想元件。实际电路与电路模型如图 1-3 所示。

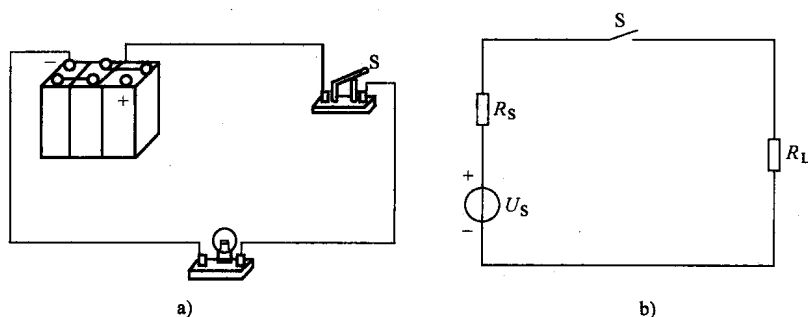


图 1-3 实际电路与电路模型

a) 小灯泡通电的实际电路 b) 电路模型

1.2 电路的基本物理量

描述电路的基本物理量有电流、电压和电功率。

1.2.1 电流

1. 电流的定义

电荷（带电粒子）在电场力的作用下作定向运动形成电流（Current/electric Current）。把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流，用符号 i 表示。其表达式为

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

式中， dq 为 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

如果电流的大小和方向随时间变化，称为时变电流或交变电流，用 $i(t)$ 表示。

如果电流的大小和方向不随时间变化，称为恒定电流或直流，用大写的 I 表示。此时通过导体横截面的电荷量 Q 与时间 t 成正比，其表达式为

$$I = \frac{Q}{t}$$

在国际单位制中，电流的单位是安培（简称安，符号为 A），电荷量的单位是库仑（简称库，符号为 C），时间的单位是秒（符号为 s）。1 安 = 1 库/秒。实际上，电流还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）等派生单位。这些单位与安培的关系如下：

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

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

2. 电流的方向

通常,规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。对于简单电路来说,电流的实际方向是容易确定的,如图1-4所示,电路中电流的方向是从电源的正极通过电阻流向电源的负极。

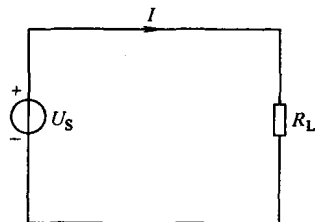


图1-4 简单电路中电流的方向

在分析复杂直流电路时,电路中某些支路电流的实际方向不易确定;对于交流电来说,它的方向是交替变化的,在电路图上无法确定它的实际方向。所以,在电路分析时,通常先任意选定一个方向作为电流的参考方向。选定的电流参考方向不一定与电流的实际方向相一致,如果电流的实际方向与选定的

参考方向相同时,电流为正值;如果电流的实际方向与选定的参考方向不相同时,电流为负值。例如,在图1-5所示的复杂电路中,流过电阻 R_2 的电流不好判断,为此先要假定电流的参考方向,如图1-5所示的 I_{R2} 的方向。根据假定的参考方向计算电流 I_{R2} 的数值,如果计算结果为正值,表明电流 I_{R2} 的实际方向与参考方向一致;如果计算结果为负值,说明电流 I_{R2} 的实际方向与参考方向相反。

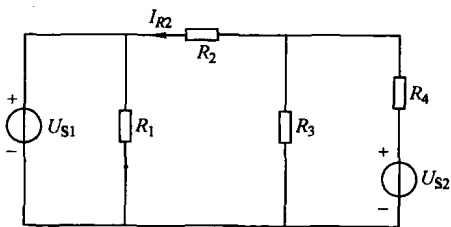


图1-5 复杂电路中假定电流的参考方向

在电路计算时,必须先选定电流的参考方向。参考方向可以任意选定,但是选定后就不能随意变动。在电路图中用箭头表示电流的参考方向,而不标注电流的真实方向。

1.2.2 电压

1. 电压的定义

电荷(带电粒子)在电场力的作用下运动,将电能转换成其他形式的能,电场力做功。电压是表示电场力做功的物理量。将单位正电荷从一点移到另一点所做的功定义为两点间的电压(Voltage),用小写字母 u 表示。其数学表达式为

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

式中, dw 为将正电荷 dq 从一点移到另一点所做的功。

如果电压的大小和方向随时间变化,称为时变电压或交变电压,用 $u(t)$ 表示。

如果电压的大小和方向不随时间变化,称为恒定电压或直流电压,用大写字母 U 表示。此时电场力做的功 W 与电荷量 Q 成正比,其表达式为

$$U = \frac{W}{Q}$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(简称伏,符号为V),功的单位是焦耳(简称焦,符号为J)。1伏=1焦/库。实际上,电压还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等派生单位。这些单位与伏特的关系如下:

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 10^3\text{V} \\ 1\text{V} &= 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V} \end{aligned}$$

2. 电压的方向

电压也称为两点间的电位差（电位是电场力把单位正电荷从某一点移到参考点所做的功）。一般把电位降落的方向（高电位到低电位）规定为电压的方向，把高电位端标记为“+”，低电位端标记为“-”。

在较复杂的电路中，往往难以确定电压的方向。所以像为电流选定参考方向一样，也要为电压选定参考方向。电压的参考方向可用“+”、“-”极性表示，也可用箭头表示，如图1-6a、b所示。

电压的参考方向是任意选定的。经过计算后如果所得电压值为正值，表明参考方向与实际方向一致；如果计算后所得电压值为负，表明参考方向与实际方向相反。

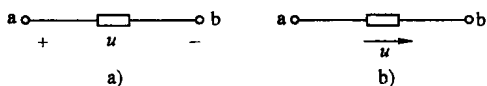


图1-6 电压的参考方向

电压的参考方向也可以用 u 的双下标来表示，如用 u_{ab} 即可表示图1-6所示的电压的参考方向。

在电路计算时，也必须先选定电压的参考方向。参考方向可以任意选定，但是选定后就不能随意变动。

电路中电流和电压都有参考方向，而且都可以任意选定，这就使电路分析时不确定性增加。为使问题简化，对于同一电路或同一元件，通常采用关联参考方向即电流的参考方向和电压的参考方向相同，关联一致。

当电流和电压确定为关联参考方向后，电路中只需要标注电流参考方向或电压参考方向其中一种就可以了。电路的关联参考方向如图1-7所示。

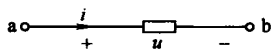


图1-7 电路的关联参考方向

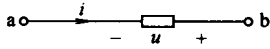


图1-8 电路的非关联参考方向

1.2.3 电功率

电路的基本作用是实现电能的传输和变换。能量对时间的变化率称为功率。电功率 (Electric Power) 用 p 表示

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

电功率与电流、电压密切相关，如果电流和电压是图1-7所示的关联参考方向，则由式(1-1)~式(1-3)可得

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

如果电流和电压是图1-8所示的非关联参考方向，则由于电流和电压参考方向相反，应取一个负号，那么

$$p = \frac{dw}{dt} = -ui \quad (1-5)$$

不管电流和电压是关联参考方向还是非关联参考方向，电功率都等于电压和电流的乘积。如果电路计算求出功率为正值，表明该电路吸收功率，或称消耗功率；如果电路计算出

功率为负值,表明该电路发出功率,或称提供功率。

如果是直流电路,电路吸收或发出功率不随时间变化。那么式(1-4)和式(1-5)可写为以下形式:

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

$$P = -UI \quad (1-7)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦特(简称瓦,符号为W)。1瓦=1焦/秒=1伏安。

在集总参数电路中,任一时刻电路中所有元件吸收和发出电功率的代数和等于零。这就是电路的功率守恒。可以用数学式表达如下:

$$\sum_{k=1}^n p_k = 0 \quad (1-8)$$

式中, n 是电路的元件总数; p_k 是第 k 个元件的功率。

在图1-9电路中,各元件的电流和电压的参考方向如图所示,根据功率守恒原理,可得如下表达式:

$$p_s + p_1 + p_2 + p_3 = 0 \quad (1-9)$$

式中, p_s 是电源 U_s 的功率; p_1 、 p_2 和 p_3 分别是元件 R_1 、 R_2 和 R_3 的功率。

例1-1 如图1-9所示电路,已知 $i=2\text{A}$, $u_1=1\text{V}$, $u_2=2\text{V}$, $u_3=3\text{V}$,试求元件 R_1 、 R_2 和 R_3 的功率 p_1 、 p_2 和 p_3 ,以及电源 U_s 的功率 p_s 。

解:在元件 R_1 、 R_2 和 R_3 上电流和电压参考方向相同,是关联参考方向。由式(1-4)可得

$$p_1 = u_1 i = 1\text{V} \times 2\text{A} = 2\text{W}$$

$$p_2 = u_2 i = 2\text{V} \times 2\text{A} = 4\text{W}$$

$$p_3 = u_3 i = 3\text{V} \times 2\text{A} = 6\text{W}$$

计算结果 p_1 、 p_2 和 p_3 均为正值,表明元件 R_1 、 R_2 和 R_3 吸收功率。

对于电源 U_s 来说,电流和电压参考方向不相同,是非关联参考方向。由式(1-9)可得

$$p_s = -(p_1 + p_2 + p_3) = -(2\text{W} + 4\text{W} + 6\text{W}) = -12\text{W}$$

通过计算,电源 U_s 的功率是负值,表明电源发出功率。

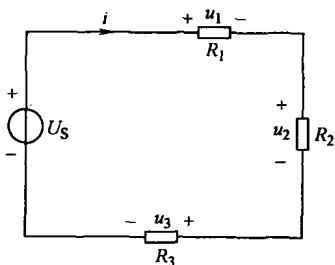


图1-9 电路的功率守恒

1.3 电阻元件

实际电路中使用多种电阻器,如碳膜电阻器、金属膜电阻器和线绕电阻器,简称为电阻(Resistor,通常用“R”表示)。

电阻元件是无源二端元件,是实际电阻器理想化的电路模型。电阻元件是一个耗能元件,它的主要物理特征是把电能转变为热能。电阻元件对电流有阻碍作用,在电路中通常用来分压和分流。

在电路中,电路元件的特性由它的电压和电流关系来表示,称为伏安特性,英文缩写为VCR(Voltage Current Relation)。元件的伏安特性可用数学关系式表示,也可用电压和电流的关系曲线,即伏安特性曲线来表示。

电阻元件的伏安特性曲线如果是通过原点的直线,称为线性电阻元件,如果是通过原点

的非直线,称为非线性电阻元件。如果电阻元件的伏安特性曲线随时间变化,称为时变电阻元件,如果不随时间变化,称为非时变电阻元件。本书只讨论非时变电阻元件。

1.3.1 线性电阻元件

电路中所用的电阻元件,通常是指非时变线性电阻元件,简称电阻(如无特别说明,本书后面提到的电阻元件均指非时变线性电阻元件)。电阻元件的图形符号和伏安特性曲线如图1-10所示。图1-10a所示是电阻元件的图形符号,图1-10b所示是伏安特性曲线。

电阻元件伏安特性的数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-10)$$

式(1-10)就是欧姆定律。式中, R 的数值为该直线的斜率, R 是与电压、电流大小无关的常量,称为电阻元件的电阻值,简称电阻。式(1-10)表明,在电压确定后电阻增大将使电流减少,说明电阻是阻碍电流的参量。电阻的单位是欧姆(简称欧,符号为 Ω),1欧

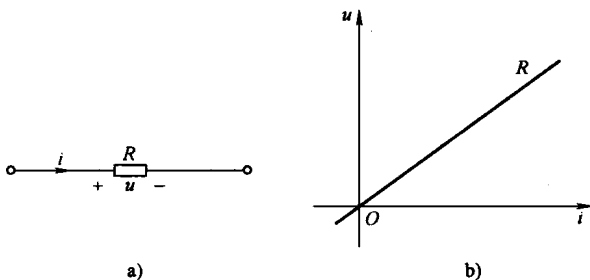


图1-10 电阻元件的图形符号和伏安特性曲线

$=1$ 伏/安。实际电路中也常用千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$)等单位。它们的数量关系如下:

$$1k\Omega = 10^3\Omega$$

$$1M\Omega = 1 \times 10^6\Omega$$

电阻的倒数是电导,用 G 表示, $G = 1/R$ 。也可用电导来表示电阻元件的伏安特性,其表达式为

$$i = Gu \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,电压确定后电导增大电流也变大,说明电导是导出电流的参量。电导的单位是西门子(简称西,符号为 S),1西 $=1$ 安/伏。

式(1-10)和式(1-11)是在电阻元件上的电压和电流为关联参考方向(见图1-10a)的情况下获得的。

如果电阻元件上的电压和电流为非关联参考方向(见图1-8),那么电阻元件伏安特性曲线的数学表达式为

$$u = - Ri \quad (1-12)$$

或

$$i = - Gu \quad (1-13)$$

当电阻元件上的电压和电流为关联参考方向时,由式(1-4)和式(1-10)可得,电阻元件吸收的电功率为

$$P = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-14)$$

式(1-14)表明,电流流过电阻元件时要消耗能量,电阻元件是一种耗能元件。

当电阻元件 $R \rightarrow \infty$ 时,由式(1-10)可知 $i = 0$,其伏安特性曲线与 u 轴重合,相当于电路断开,称为“开路”;当电阻元件 $R = 0$ 时,由式(1-10)可知 $u = 0$,其伏安特性曲线与 i 轴重合,相当于电路短接,称为“短路”。

理想的电阻元件上的电压、电流可以不受限制，但是实际电阻元件或相当于电阻元件的白炽灯、电炉等电器设备，对电压、电流或功率都有一定限制。过高的电压、过大的电流会使元件或设备过热损坏。所以在实际电路中，必须考虑实际电阻元件或电器设备的额定电流、额定电压和额定功率，不能超过额定值。实际电路更不允许出现“短路”，因为“短路”时电路的电流趋向于无穷大，将会损坏电路和设备。

1.3.2 非线性电阻元件

非时变非线性电阻元件，简称非线性电阻。当电阻元件两端的电压与流过电阻元件的电流不成比例关系，伏安特性是曲线（非直线），元件的电阻值不再是一个常数，而是随电压、电流变动时，称之为非线性电阻元件。也可以说，伏安特性不是直线的电阻元件就是非线性电阻元件。

晶体二极管的图形符号和伏安特性曲线如图 1-11 所示。图 1-11a 所示是晶体二极管的图形符号，图 1-11b 所示是伏安特性曲线。晶体二极管的伏安特性曲线不是一条直线，所以晶体二极管可认为是一种非线性电阻元件。

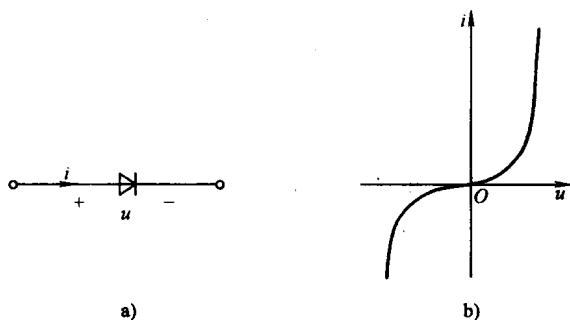


图 1-11 晶体二极管的图形符号和伏安特性曲线

1.4 电源元件

实际电路中有多种电源元件，如干电池、蓄电池和发电机等。实际电源向电路提供电能使电路工作或运行。

理想电源元件是从实际电源元件中抽象出来的。当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计，而只起产生电能的作用时，这种电源便可以用一个理想电源元件来表示。

理想电源元件是二端有源元件，分为独立电源和受控电源。独立电源又分为电压源和电流源。

1.4.1 电压源

如果一个二端元件，无论流过它的电流是多少，其两端电压保持为一个确定的时间函数或定值，则此二端元件为理想电压源，简称电压源。两端电压保持确定的时间函数 $u_s(t)$ 的称为时变电压源；两端电压保持定值 U_s 的称为直流电压源。

理想电压源是实际电压源忽略内阻影响后的模型元件，电压源有以下特性：

- 1) 电压源的两端电压由元件本身性质确定，与流过电压源的电流无关。
- 2) 流过电压源的电流的大小和方向由电压源和外电路共同确定。
- 3) 电压源的两端电压与流过的电流为非关联参考方向时，电压源向电路提供能量（是电源）；电压源的两端电压与流过的电流为参考关联方向时，电压源从电路吸收能量（是负载）。

电压源的图形符号和伏安特性曲线如图 1-12 所示。

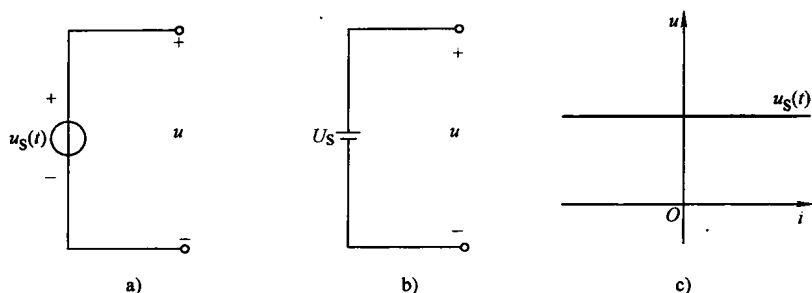


图 1-12 电压源的图形符号和伏安特性曲线

图 1-12a 所示是电压源的图形符号，图中 $u_s(t)$ 为电压源的电压，“+”、“-”号表示电压源的参考方向；图 1-12b 所示是直流电压源的图形符号，直流电压源两端电压保持定值 U_s ；图 1-12c 所示是电压源的伏安特性曲线，它表明电压源的电压为 $u_s(t)$ ，电流可为任意值。

电压源的伏安特性方程为

$$u = u_s(t) \quad (1-15)$$

电压源的伏安特性方程对应的曲线，就是图 1-12c 上与横轴平行的直线。

1.4.2 电流源

如果一个二端元件，无论其两端电压是多少，流过的电流始终保持为一个确定的时间函数或定值，则此二端元件为理想电流源，简称电流源。流过的电流保持确定的时间函数 $i_s(t)$ 的称为时变电流源；流过的电流保持定值 I_s 的称为直流电流源。

理想电流源是实际电流源忽略内部影响后的模型元件，电流源有以下特性：

- 1) 电流源的电流由元件本身性质确定，与两端电压无关。
- 2) 电流源两端电压由电流源和外电路共同确定。
- 3) 电流源的电流与两端电压为非关联参考方向时，电流源向电路提供能量（是电源）；电流源的电流与两端电压为关联参考方向时，电流源从电路吸收能量（是负载）。

电流源的图形符号和伏安特性曲线如图 1-13 所示。

图 1-13a 所示是电流源的图形符号，图中 $i_s(t)$ 为电流源的电流，箭头表示电流源的参考方向， i 为电流源的流出电流；图 1-13b 所示是电流源的伏安特性曲线，它表明电流源的电流为 $i_s(t)$ ，电压可为任意值。

电流源的伏安特性方程为

$$i = i_s(t) \quad (1-16)$$

电流源的伏安特性方程对应的曲线，就是图 1-13b 上与纵轴平行的直线。

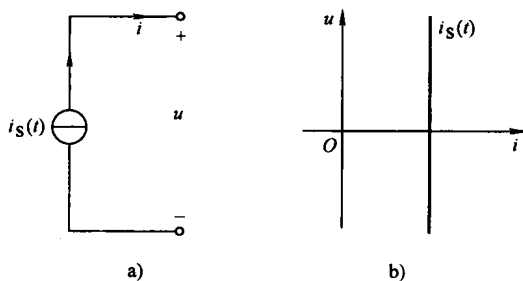


图 1-13 电流源的图形符号和伏安特性曲线

例 1-2 如图 1-14 所示电路，已知 $I_s = 2\text{A}$ ， $U_s = 10\text{V}$ ，试求元件 R 的阻值分别为 1Ω 、 5Ω 和 20Ω 时：(1) 图 a 中电压 U 和电流源 I_s 的功率；(2) 图 b 中电流 I 和电压源 U_s 的功率。

解：(1) 图 1-14a 中，由式 (1-10) 可得

$$R = 1\Omega \text{ 时}$$

$$U = I_s R = 2\text{A} \times 1\Omega = 2\text{V}$$

电流源 I_s 的功率

$P = -UI = -2\text{V} \times 2\text{A} = -4\text{W}$ (电流源的电流与两端电压为非关联参考方向，电流源向电路提供能量，以下与此情况相同)

$$R = 5\Omega \text{ 时}$$

$$U = I_s R = 2\text{A} \times 5\Omega = 10\text{V}$$

电流源 I_s 功率

$$P = -UI = -10\text{V} \times 2\text{A} = -20\text{W}$$

$$R = 20\Omega \text{ 时}$$

$$U = I_s R = 2\text{A} \times 20\Omega = 40\text{V}$$

电流源 I_s 功率

$$P = -UI = -40\text{V} \times 2\text{A} = -80\text{W}$$

此例计算说明，电流源的电流由元件本身性质确定，与两端电压无关；电流源两端电压由电流源和外电路共同确定；电流源的电流与两端电压为非关联参考方向时，电流源向电路提供能量（是电源）。

(2) 图 1-14b 中，由式 (1-10) 可得

$$R = 1\Omega \text{ 时}$$

$$I = \frac{U_s}{R} = \frac{10\text{V}}{1\Omega} = 10\text{A}$$

电压源 U_s 的功率

$P = -UI = -10\text{V} \times 10\text{A} = -100\text{W}$ (电压源的两端电压与流过的电流为非关联参考方向时，电压源向电路提供能量，以下情况与此相同)

$$R = 5\Omega \text{ 时}$$

$$I = \frac{U_s}{R} = \frac{10\text{V}}{5\Omega} = 2\text{A}$$

电压源 U_s 的功率

$$P = -UI = -10\text{V} \times 2\text{A} = -20\text{W}$$

$$R = 20\Omega \text{ 时}$$

$$I = \frac{U_s}{R} = \frac{10\text{V}}{20\Omega} = 0.5\text{A}$$

电压源 U_s 的功率

$$P = -UI = -10\text{V} \times 0.5\text{A} = -5\text{W}$$

此例计算说明，电压源的两端电压由元件本身性质确定，与流过电压源的电流无关；流过电压源的电流的大小和方向由电压源和外电路共同确定；电压源的两端电压与流过的电流为非关联参考方向时，电压源向电路提供能量（是电源）。

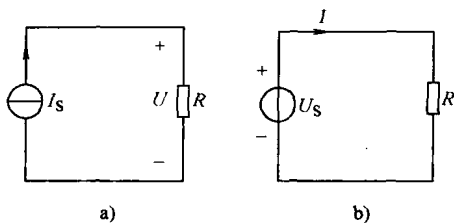


图 1-14 例 1-2 图