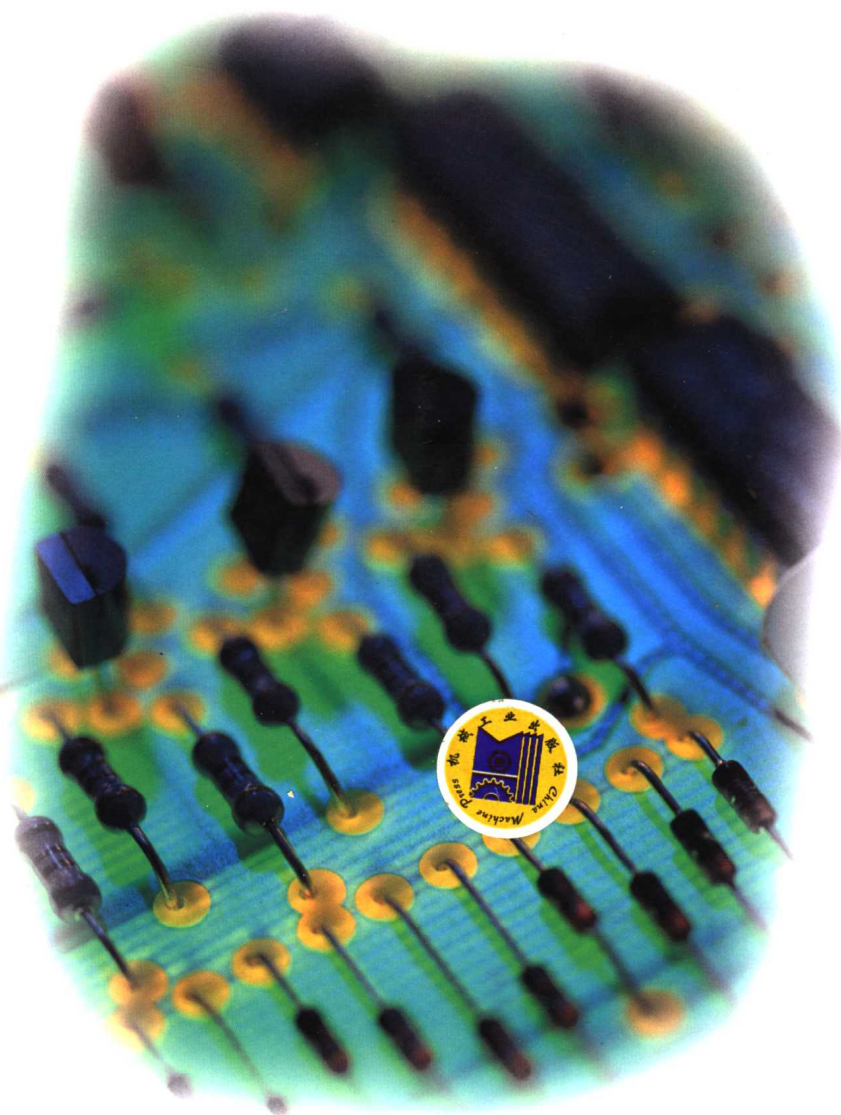


高等学校教材

电 路

黄锦安 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等学校教材

电 路

主 编 黄锦安
副主编 钱建平
参 编 康明才 孙建红 沙 涛
主 审 孙宪君

机械工业出版社

本书是根据国家工科电工课程教学指导委员会制订的高等工业学校电路课程教学的基本要求编写的。全书执行了国家关于量和单位的最新标准。

全书共 14 章。内容有电路模型和电路定律、简单电阻电路分析、电阻电路的一般分析、电路定理、一阶电路和二阶电路、正弦电流电路基础、正弦稳态电路的分析、含耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路方程的矩阵形式、二端口网络和多端元件、非线性电阻电路、运算法和网络函数，另外附有 MATLAB 在电路分析中的应用实例。各章配有习题并附部分参考答案，有助于读者掌握教材内容。

本书可作为普通高校电类专业电路、电路分析基础等课程的教材，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路/黄锦安主编. —北京: 机械工业出版社,
2003.8

高等学校教材

ISBN 7-111-12583-5

I. 电… II. 黄… III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 057118 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 韩雪清 王玉鑫 版式设计: 冉晓华 责任校对: 魏俊云

封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 9 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·26.25 印张·651 千字

定价: 35.00 元

凡购本书, 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、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据国家工科电工课程教学指导委员会制订的高等工业学校电路课程教学的基本要求编写的，供电类各专业教学用书。

本书是南京理工大学重点建设课程“电路”的一个重要组成部分，也是进行“电路”、“信号与系统”、“控制工程基础”等电类学科基础课教学内容整合、优化的一个必要措施。教材的编写是在总结多年教学实践的基础上，参考已出版的同类优秀教材，根据电类各专业的具体需要以及学时数普遍减少的情况，在选材上突出基本内容和传统内容，强调基本概念和基本原理，力求少而精。编写时尽量做到教材内容的系统性、完整性、科学性和教学适用性的有机结合。

本书可作为普通高校电类专业电路、电路分析基础等课程的教材，任课教师可根据各专业的特点、需要和学时数，取舍其有关内容。本书也可供有关科技人员参考。

参加本书编写的有南京理工大学 1009 教研室黄锦安（第 6、7、8 章）、钱建平（第 5、11 章）、康明才（第 1、2、3、4 章）、孙建红（第 9、10、13 章）、沙涛（第 12、14 章和附录）。孙宪君教授仔细审阅了本书，并提出了很多宝贵意见，在此表示深切的谢意。

限于编者的水平，对书中的不足与错误之处，希望使用本书的读者和教师给予批评指正。意见请寄南京理工大学 1009 教研室（邮编：210094）。

编者

2003 年 3 月

目 录

前言

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 功率和能量 4
- 1.4 电阻元件 6
- 1.5 电压源和电流源 8
- 1.6 受控源 10
- 1.7 基尔霍夫定律 12
- 习题1 16

第2章 简单电阻电路分析 21

- 2.1 等效变换的概念 21
- 2.2 电阻的串联、并联
和混联 21
- 2.3 电阻的 $Y-\Delta$ 等效变换 27
- 2.4 电压源、电流源的串联
和并联 30
- 2.5 实际电源的等效变换 32
- 2.6 运用等效变换分析含受控源
的电阻电路 34
- 习题2 36

第3章 电阻电路的一般分析 42

- 3.1 支路电流法 42
- 3.2 网孔电流法和回路
电流法 46
- 3.3 节点电压法 53
- 习题3 59

第4章 电路定理 64

- 4.1 叠加定理 64

- 4.2 替代定理 71

- 4.3 戴维南定理和诺顿定理 73

- 4.4 特勒根定理 79

- 4.5 互易定理 82

- 4.6 对偶原理 86

- 习题4 87

第5章 一阶电路和二阶电路 95

- 5.1 电容元件 95

- 5.2 电感元件 98

- 5.3 一阶电路 101

- 5.4 电路的初始条件 101

- 5.5 一阶电路的零输入
响应 103

- 5.6 一阶电路的零状态
响应 108

- 5.7 一阶电路的全响应 113

- 5.8 一阶电路的三要素法 115

- 5.9 一阶电路的阶跃响应 119

- 5.10 一阶电路的冲激响应 123

- 5.11 卷积积分 129

- 5.12 二阶电路的零输入响应 132

- 5.13 二阶电路的零状态响应和
阶跃响应 140

- 习题5 142

第6章 正弦电流电路基础 148

- 6.1 正弦量 148

- 6.2 正弦量的有效值 151

- 6.3 相量法的基本概念 152

- 6.4 基尔霍夫定律的相量
形式 158

- 6.5 正弦交流电路中的三种基本

电路元件	159	的计算	265
习题 6	165	10.5 对称三相电路中的高次 谐波	269
第 7 章 正弦稳态电路的分析	168	习题 10	272
7.1 阻抗和导纳	168	第 11 章 电路方程的矩阵形式	275
7.2 简单正弦稳态电路的分析及 相量图	175	11.1 电路的图	275
7.3 正弦稳态电路的功率	180	11.2 回路、树、割集	276
7.4 正弦稳态电路的一般 分析方法	186	11.3 关联矩阵、回路矩阵、 割集矩阵	281
7.5 最大平均功率的传输	192	11.4 矩阵 A 、 B_i 、 Q_i 之间 的关系	286
7.6 正弦稳态电路的谐振	195	11.5 节点电压方程的矩阵 形式	287
习题 7	205	11.6 回路电流方程的矩阵 形式	295
第 8 章 含耦合电感的电路	214	11.7 割集电压方程的矩阵 形式	299
8.1 互感	214	11.8 状态方程	301
8.2 含耦合电感的电路计算	218	习题 11	305
8.3 空心变压器	226	第 12 章 二端口网络和多端 元件	309
8.4 理想变压器	229	12.1 二端口网络	309
习题 8	232	12.2 二端口网络的方程和 参数	310
第 9 章 三相电路	237	12.3 二端口网络的等效电路	317
9.1 三相电源	237	12.4 二端口网络的网络函数	319
9.2 负载星形联结的三相 电路	240	12.5 二端口网络的特性阻抗与 实验参数	321
9.3 负载三角形联结的三相 电路	246	12.6 二端口网络的连接	322
9.4 三相电路的功率	249	12.7 运算放大器	325
9.5 三相功率的测量	251	12.8 回转器	330
习题 9	253	习题 12	333
第 10 章 非正弦周期电流 电路	257	第 13 章 非线性电阻电路	339
10.1 非正弦周期信号	257	13.1 非线性电阻	339
10.2 非正弦周期函数分解为傅 里叶级数	258	13.2 非线性电阻的串并联	341
10.3 非正弦周期电流电路的有效值、 平均值和平均功率	262	13.3 分段线性化法	345
10.4 非正弦周期电流电路			

13.4 小信号分析法	348	——运算法	365
习题 13	351	14.6 网络函数、极点和零点	369
第 14 章 运算法和网络函数	354	习题 14	375
14.1 拉普拉斯变换	354	部分习题参考答案	382
14.2 拉氏变换的主要性质	355	附录 MATLAB 在电路分析中	
14.3 拉氏反变换	359	的应用	399
14.4 电路定律的运算形式	362	参考文献	413
14.5 线性电路的复频域分析			

第 1 章 电路模型和电路定律

本章的内容源于物理，但又不同于物理，主要从电路理论方面提出问题。首先介绍电路模型的概念，在回顾电压和电流概念的基础上，引入电压和电流的参考方向；重点介绍电压源和电流源、基尔霍夫定律。它们在以后各章中都要用到，因此必须充分重视。

1.1 电路和电路模型

现代社会中电路几乎处处可见。从技术领域来看，电的应用可分为能量和信息两大领域，它们都利用了电能可以几乎瞬时地传送到远处的这一性质。实际电路是由电路元器件（例如电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器、电动机等）相互连接构成。在电路中随着电流的通过，可以完成能量的转换、传输、分配和信号的处理。例如，图 1-1a 所示的一个简单的实际电路，其中电池供给电能，两根连接导线把电能传输到小灯泡，小灯泡把电能转换成热能和光能。又例如，在收音机中，天线接收的微弱的高频信号通过调谐电路、检波电路与放大电路的信号处理，最后变成了可供输出的音频信号。电路的信号处理作用广泛地应用于通信和无线电技术中。通常把供给电能或电信号的电路器件称为电源；把利用电能或电信号的电路器件称为负载；把电源至负载的中间部分称为中间环节。由于电路中的电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励。由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。有时，根据激励和响应的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。

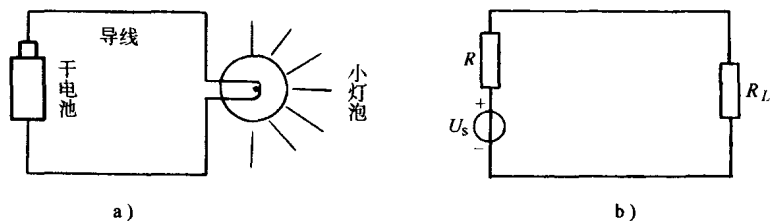


图 1-1 一个实际电路与电路模型

实际的电路元器件多种多样，其工作过程都与电路中的电磁现象有关。任何一个实际元器件，在电压和电流作用下都包含有消耗电能、储存电场能量、储存磁场能量三个基本效应，这些基本效应交织在一起，使问题变得比较复杂，分析和研究也比较困难。因此，实际电路分析需要建立电路模型。这种电路模型并非实际电路，而是在一定条件下对实际电路的科学抽象与近似描述，但是，能够足够准确地反映实际电路的电磁现象和性质。

电路模型由各种理想电路元件组成，每一种理想电路元件都有一种数学模型，而且只具有单一电磁性质，都有各自的精确定义，并且用规定的图形符号表示。常用的理想电路元件有理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件和理想电压源元件、理想电流源元件等。例如，理想电阻元件表示消耗电能的特征，白炽灯、电阻器和电炉等实际电路器件，在一定条

件下都可以用理想电阻元件作为电路模型；理想电压源元件表示提供固定电压的特征，干电池、蓄电池和发电机等电路器件在一定条件下都可以用理想电压源元件或者用理想电压源元件串联理想电阻元件作为电路模型。从而，可得图 1-1a 所示的简单实际电路的电路模型如图 1-1b 所示。

应该说明，理想电路元件不完全等同于电路器件，就是同一个电路器件在不同的条件下其电路模型也可能不同。例如，当工作频率比较低时，一个电感线圈可以用一个理想电阻元件与一个理想电感元件的串联组合作为它的电路模型。但是，当工作频率比较高时，电感线圈绕线之间的电容效应便不可忽略，因此，其比较精确的电路模型中还应当包含理想电容元件。大量实践证明，只要电路模型建立得恰当，对电路模型的分析结果就会与实际电路的测试结果保持基本一致。本书不讨论如何建立实际电路的电路模型问题，讨论的电路一般均指由理想电路元件组成的电路模型，而非实际电路。今后凡是提到的电路元件均指理想电路元件，而非电路器件。

将消耗电能、储存电场能量、储存磁场能量的特征分别集中在理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件的假设称为集中参数假设（简称集中假设）。对于集中参数元件（简称集中元件），在任何时刻，流入元件任意一端钮的电流和元件任意的端钮之间的电压都是单值的物理量。由集中元件组成的电路称为具有集中参数的电路，简称集中电路。

应该指出，在一定条件下建立的集中电路是符合实际情况而且是可行的，条件是要求实际电路的整体尺寸要远远小于电路正常工作频率对应的信号波长。例如，在音频范围内，频率约为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ，对应的信号波长约为 $15000 \sim 15\text{km}$ 。对于实验室常用电路尺寸而言，与此信号波长相比较完全可以忽略，因此，应用集中电路模型是适用的。但是，对于数百千米甚至上千千米的电力系统输电线路而言，如果采用集中电路模型进行分析，误差就会相当大。也就是说，此时集中电路模型不适宜了，要用分布参数电路模型进行分析。所谓分布参数电路是指电路中电压、电流不仅与时间有关，而且还与空间坐标有关，也就是说它们将是时空函数。描述这种器件或电路的约束方程将是偏微分方程。常用空间分布的无限多个电路元件的连接来模拟这种电路或器件。又例如，电视机从接收天线得到的电视信号可达 100MHz ，对应的信号波长约 3m ，因此，电视机与天线之间的连接导线并非一般普通导线，而要用同轴线或馈线，也就是说用集中电路模型分析就不适宜了。至于工作频率更高的电子计算机、微波电路，对应的信号波长更短，显然用集中电路模型进行分析不适宜。本书只讨论满足集中假设条件的集中电路。

电路理论是研究电路分析、电路综合或电路设计的一门基础工程学科。电路分析是指在已知电路结构和参数的条件下分析由输入（或激励）产生的输出（或响应）或者网络函数。电路综合或电路设计是指在已知输入和输出的条件下综合或设计满足条件的电路的结构和参数。电路理论的内容十分丰富，应用相当广泛，本书主要介绍电路分析的基本理论和方法。

1.2 电流和电压的参考方向

电路中的物理量主要有电流、电压、电荷和磁通，功率和能量也很重要。在电路分析中，通常把任意时刻 t （瞬时）的物理量用小写字母表示，例如电流用 $i(t)$ 、电压用 $u(t)$ 、电荷用 $q(t)$ 、磁通用 $\phi(t)$ 、功率用 $p(t)$ 表示，且分别可简写为 i 、 u 、 q 、 ϕ 、 p ，而用对应大写字

母 I 、 U 、 Q 、 Φ 、 P 表示其对应的物理量是恒定量。运用电路中的物理量可以定量地描述电路元件的特性和电路的性能。在电路分析中，一般选用电流和电压做为基本物理量，通过这两个基本物理量可以比较方便地表示电路中其他物理量。

电荷的定向运动形成电流。在导线中或在电路元件中，电流流动的实际方向只有两种可能，如图 1-2 所示。当有正电荷的净流量从元件的 A 端流入并从其 B 端流出时，习惯上认为电流的实际方向是从元件的 A 端流向 B 端；反之，则认为电流实际方向是从元件的 B 端流向 A 端。

在电路分析中，有时对于比较复杂的电路中某一段电路的电流实际流动方向很难直观预测，况且电流的实际方向有时又在不断地改变，因此，直接标明电路中电流的实际方向是比较困难的。为此，引入电流的参考方向概念。

为了分析需要，把电流视为代数量。首先把电路元件中电流的某一个可能的方向指定为电流的方向，称此方向为电流的参考方向。所指定的电流的参考方向具有任意性，并不一定就是电流的实际方向。在指定电流参考方向下，如果电流为正值 ($i > 0$)，则表示该电流的实际方向与指定的电流参考方向相同；反之，如果电流为负值 ($i < 0$)，则表示该电流的实际方向与指定的电流参考方向相反，如图 1-3 所示，图中实线箭头表示电流的参考方向，虚线箭头表示电流的实际方向。

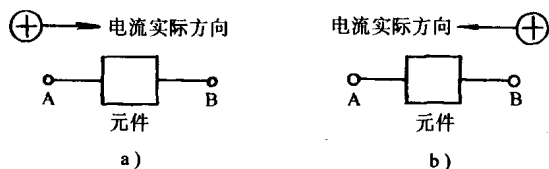


图 1-2 电流方向

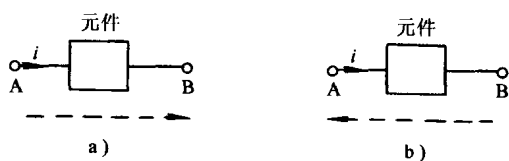


图 1-3 电流的参考方向

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

在指定电流参考方向下，根据电流数值的正与负便可以确定电流的实际方向；反过来讲，电流数值的正与负只有在指定电流参考方向下才具有明确的物理意义。

电流参考方向是任意指定的，一般用实线箭头标明在电路中。今后，除了特别说明外，凡是本书提及的电流方向均指电流参考方向。

类似地，电路中任意两点之间的电压的实际方向（或极性）也只有两种可能，习惯上把高电位点指向低电位点的方向规定为电压的实际方向（或极性），可以选定其中任意一个方向为电压的参考方向。为了分析方便，把电压视为代数量，在指定电压参考方向下，如果电压为正值 ($u > 0$)，则表示该电压的实际方向与指定的电压参考方向相同；反之，如果电压为负值 ($u < 0$)，则表示该电压的实际方向与指定的电压参考方向相反，如图 1-4 所示，图中实线箭头（或 +、- 号）表示电压的参考方向（或极性），而虚线箭头（或 +、- 号）表示电压的实际方向（或极性）。

一般在电路中，电压参考方向的表示用实线箭头表示或者用正（+）、负（-）极性表示，正（+）极指向负（-）极的方向是电压参考方向。另外还可以采用双下标表示，例如电压 u_{AB} 表示电路中 A 点和 B 点之间的电压，其参考方向是由 A 点指向 B 点（或 A 点为正

(+) 极, B 点为负 (-) 极)。今后, 除了特别说明外, 凡是本书提及的电压方向均指电压参考方向。

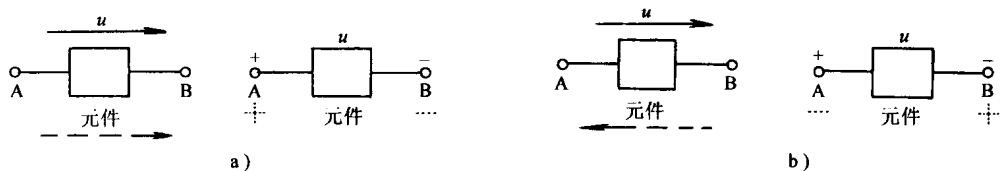


图 1-4 电压的参考方向 (或极性)

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

在指定电压参考方向下, 根据电压数值的正与负, 便可以确定该电压的实际方向。反过来讲, 电压数值的正与负, 也只有在指定的电压参考方向下才具有明确的物理意义。电路中任意两点之间的电压等于该两点的电位之差, 因此, 电压又称为电位差。

需要说明的是, 电流和电压参考方向的选择完全是任意的, 但它并不影响电流和电压的实际方向。同时也必须指出, 当一个问题开始的时候, 虽然参考方向的选择是任意的, 但一经选定, 那么以后的分析乃至对分析结果的解释, 都必须以此选取为准。

对于一个电路元件或一段电路, 电流和电压的参考方向可以彼此独立地任意指定。为了分析方便, 常常指定电流参考方向和电压参考方向一致, 如图 1-5a 所示, 即指定电流从标明电压 “+” 极性的一端流入, 并从标明电压 “-” 极性的一端流出, 称此参考方向为关联参考方向。这样, 在电路图中只需标出电流和电压中一个参考方向。当电流参考方向和电压参考方向不一致时, 称此参考方向为非关联参考方向, 如图 1-5b 所示。注意关联参考方向或非关联参考方向都是针对某一二端元件或某一段电路而言的。例如, 在图 1-6 中, 对二端电路 N_1 来说, 电流和电压的参考方向是非关联参考方向; 而对二端电路 N_2 来说, 电流和电压的参考方向是关联参考方向。



图 1-5 电流和电压的关联参考方向和非关联参考方向

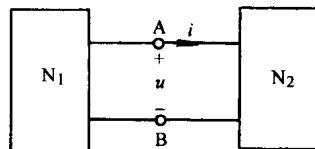


图 1-6 电路中关联参考方向和非关联参考方向

1.3 功率和能量

在图 1-7a 所示电路中, 电路元件的电流和电压取关联参考方向。根据电流和电压的物理含义, 可以知道在 t 时刻电路元件吸收的瞬时功率为

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

如果电流和电压取非关联参考方向, 如图 1-7b 所示, 则在 t 时刻电路元件吸收的瞬时功率为

$$p = -ui \quad (1-2)$$

由于电压 u 和电流 i 均为代数量, 所以功率 p 也为代数量。根据式 (1-1) 或式 (1-2) 计算得到 t 时刻电路元件吸收瞬时功率数值的正或负, 便可以确定该时刻元件是吸收功率还是发出功率。当 $p > 0$ 时表示该时刻元件吸收功率 p 瓦; 当 $p < 0$ 时表示该时刻元件实际上向外发出功率 $|p|$ 瓦。如果式 (1-1) 和式 (1-2) 中电压 u 单位为伏特 (V), 电流 i 单位为安培 (A), 则功率 p 单位为瓦 (W)。

上述有关功率的讨论不局限于一个电路元件, 可适用于任何一段电路。

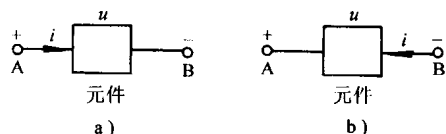


图 1-7 电路元件吸收功率的计算

a) $p = ui$ b) $p = -ui$

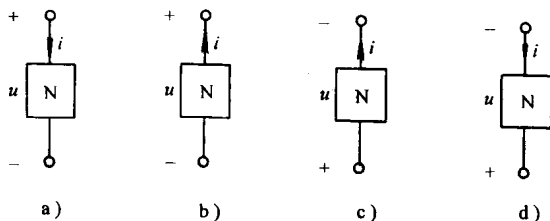


图 1-8 例 1-1 的电路

例 1-1 图 1-8 所示为一段电路 N。

(1) 图 1-8a 中, 若 $u = 5V$, $i = 2A$, 计算该段电路的功率。

(2) 图 1-8b 中, 若 $u = 10V$, $i = 3A$, 计算该段电路的功率。

(3) 图 1-8c 中, 若 N 吸收功率为 $100W$, $i = 4A$, 求电压 u 并说明其真实方向。

(4) 图 1-8d 中, 若 N 发出功率为 $500W$, $u = -100V$, 求电流 i 并说明其真实方向。

解 (1) 图 1-8a 中电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 因此, 可以应用式 (1-1) 得

$$p = ui = 5V \times 2A = 10W$$

说明该电路吸收功率为 $10W$ 。

(2) 图 1-8b 中电压 u 和电流 i 为非关联参考方向, 因此, 可以应用式 (1-2) 得

$$p = -ui = -10V \times 3A = -30W$$

说明该电路吸收功率为 $-30W$, 实际上该电路向外发出功率为 $30W$ 。

(3) 图 1-8c 中, N 吸收功率为 $100W$, $i = 4A$, 于是

$$u = p/i = 100W/4A = 25V$$

电压 u 为正值, 说明电压的真实方向与参考方向相同。

(4) 图 1-8d 中, N 发出功率为 $500W$, $u = -100V$, 于是

$$i = p/(-u) = -500W/100V = -5A$$

电流 i 为负值, 说明电流的真实方向与参考方向相反。

在电流和电压取关联参考方向时, 对式 (1-1) 等号两边从时刻 $t_0 \sim t$ 进行积分, 便得到电路从时刻 $t_0 \sim t$ 吸收的能量

$$w = \int_{t_0}^t p d\tau = \int_{t_0}^t u i d\tau \quad (1-3)$$

如果电流和电压取非关联参考方向, 则电路从时刻 $t_0 \sim t$ 吸收的能量

$$w = \int_{t_0}^t p d\tau = - \int_{t_0}^t u i d\tau \quad (1-4)$$

根据应用式 (1-3) 或式 (1-4) 计算得到的能量为正值或负值, 便可以确定从时刻

$t_0 \sim t$ 电路是吸收能量还是发出能量。当 $w > 0$ 时, 说明电路从时刻 $t_0 \sim t$ 吸收能量; 当 $w < 0$ 时, 说明电路从时刻 $t_0 \sim t$ 向外发出能量 $|w|$ 。当电流和电压的单位分别为安培 (A) 和伏特 (V), 时间单位为秒 (s) 时, 则能量单位为焦 (J)。

如果对任意时刻 t , 二端元件吸收的能量恒有

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \geq 0 \quad (1-5)$$

则此类元件被称为无源元件。

1.4 电阻元件

本书讨论的电路是由理想电路元件组成的电路模型, 本节和后续有关章节将陆续介绍一些理想电路元件。其中无源二端元件包括线性二端电阻元件、线性二端电容元件、线性二端电感元件等; 有源二端电路元件包括理想电压源和理想电流源, 统称为独立源, 还有四端电路元件——受控源, 受控源也称为非独立源。由此可知, 电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端元件、四端元件、多端元件等。电路元件还可分为无源元件和有源元件、线性元件和非线性元件、时不变元件和时变元件等。

本节讨论线性二端电阻元件, 为了简化, 下面将略去“二端”和“元件”四字。线性电阻的电路图形符号如图 1-9 所示。

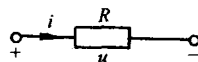


图 1-9 线性电阻的图形符号

线性电阻是一个二端理想电路元件, 在任何时刻, 其两端电压与其电流的关系都遵循欧姆定律, 即在电流和电压关联参考方向下, 线性电阻的电压 u 和电流 i 的关系为

$$u = Ri \quad (1-6)$$

式 (1-6) 也称为线性电阻的伏安关系, 式中 R 称为线性电阻的参数——电阻。它是联系线性电阻的电压和电流的一个正实常数。式 (1-6) 说明线性电阻的电流与其电压成正比。当式 (1-6) 中电压和电流的单位分别为伏特 (V) 和安培 (A) 时, 电阻的单位为欧姆 (Ω)。习惯上, 既用电阻表示电阻元件的电阻值, 又把电阻元件简称为电阻。

如果把电阻电压取为横坐标 (或纵坐标), 把电阻电流取为纵坐标 (或横坐标), 则可以在 $u-i$ 平面 (或 $i-u$ 平面) 上画出电阻电压和电流的关系曲线, 该曲线被称为电阻的伏安特性曲线。线性电阻的伏安特性曲线是一条通过 $u-i$ 平面 (或 $i-u$ 平面) 上坐标原点的直线, 如图 1-10 所示。通常, 特性曲线都是在关联参考方向下测得或绘制的。

根据图 1-10 所示的 $u-i$ 平面的伏安特性曲线, 可以由下式确定线性电阻的电阻值

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} \text{ctg} \alpha \quad (1-7)$$

式中 m_u 或 m_i ——电阻电压和电流在 $u-i$ 平面的坐标比例尺;

α ——伏安特性曲线与电压坐标轴之间的夹角。

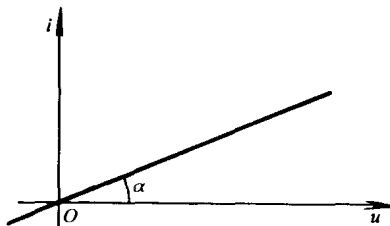


图 1-10 线性电阻的伏安特性

如果令 $G=1/R$ ，则式 (1-6) 变为

$$i = Gu \quad (1-8)$$

式中， G 称为线性电阻的电导，它也是一个正实常数，其单位为西门子，简称西 (S)。

线性电阻的伏安特性曲线有两种特殊情况，一是伏安特性曲线与 u 轴重合，此时 $R = \infty$ ， $G=0$ ，称为开路。开路状态下，只要电压为有限值，通过电阻元件的电流恒等于零。二是伏安特性曲线与 i 轴重合，此时 $R=0$ ， $G=\infty$ ，称为短路。短路状态下，只要电流为有限值，施加于电阻元件的电压恒等于零。

应当注意，在线性电阻的电流和电压取关联参考方向时才能应用式 (1-6) 和式 (1-8)。当线性电阻的电流和电压取非关联参考方向时，其伏安关系应该为

$$u = - Ri \quad (1-9)$$

$$i = - Gu \quad (1-10)$$

也就是说，线性电阻的伏安关系式必须与其电流、电压的参考方向配合使用。

在电流和电压取关联参考方向下，任意时刻，线性电阻吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-11)$$

由式 (1-11) 可知，由于线性电阻的电阻 R 和电导 G 均为正实常数，故其吸收的功率恒为非负值，这说明线性电阻在任何时刻都不可能向外发出功率，它吸收的功率（电能）将全部转变成其他非电能量消耗掉或者作为其他用途。因此，线性电阻 ($R>0$) 不仅是无源元件，而且是耗能元件。

线性电阻是遵循欧姆定律的无源、耗能的二端理想电路元件。对于某些实际电阻器，如金属膜电阻器、碳膜电阻器、线绕电阻器等，在一定的工作范围内，它们的电阻值基本不变，用线性电阻作为电路模型可以得到满意的结果。但是应当注意，实际电阻器的电压和电流都有一定的限额，超过这些限额将会由于过电压或过电流而损坏电阻器。通常把上述限额称为额定值，即额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定功率 P_N 等。在使用时不仅要选择正确的电阻值，而且不应该超过电阻的额定值，以保证实际电阻器正常安全地工作。

例 1-2 图 1-11 所示线性电阻 $R=4\Omega$ ，某时刻其电压 $u=10V$ ，求该时刻流过该电阻的电流和它吸收的功率。

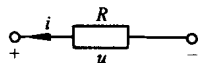


图 1-11 例 1-2 的电路

解 图 1-11 所示线性电阻 R 的电流和电压取非关联参考方向，因此由式 (1-9) 得

$$i = -u/R = -10V/4\Omega = -2.5A$$

说明电流实际方向与图示参考方向相反，其电流值为 2.5A。

该电阻吸收的功率，由式 (1-11) 得

$$p = u^2/R = (10V)^2/4\Omega = 25W$$

或

$$p = Ri^2 = 4\Omega \times (-2.5A)^2 = 25W$$

也可应用式 (1-2) 得到

$$p = -ui = -10V \times (-2.5A) = 25W$$

1.5 电压源和电流源

本节介绍另外两个理想电路元件——电压源和电流源，它们都是理想二端有源元件。

电压源具有两个特点：①电压源输出电压 u 是恒定值或者是一定的时间函数，不会因为它联接不同的外电路而改变，即电压 $u = u_s$ ，其中电压 u_s 是电压源电压。②电压源的电流的大小和方向将随着与其联接的外电路不同而改变。

电压源的电路图形符号如图 1-12a 所示，图中 u_s 是电压源电压，“+”、“-”号是其参考极性。如果电压源电压为常数，即 $u_s = U_s$ ，则称其为直流电压源。直流电压源的电路图形符号也可以用图 1-12b 表示，其中长线段表示电压源的高电位端（正极），短线段表示电压源的底电位端（负极）。如果电压源电压为正弦函数时，则称其为正弦电压源，这就是通常所说的交流电压源。直流电压源的伏安特性曲线如图 1-13 所示，在 $I-U$ 平面上，任何时刻其电压都是一条与电流轴平行的直线。

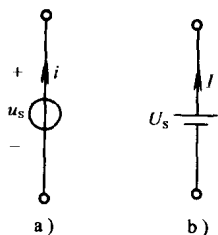


图 1-12 电压源符号

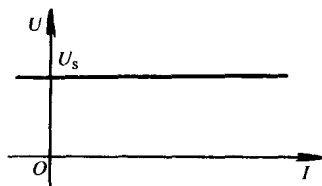


图 1-13 直流电压源伏安特性

若电压源的端电压与流过的电流取非关联参考方向如图 1-12b 所示，则在对应的 $I-U$ 平面上，第 I 象限和第 III 象限为供能区，表示电压源向外电路发出功率，起到电源作用；第 II 象限和第 IV 象限为耗能区，表示电压源从外电路吸收功率，此时的电压源不起电源作用，而是外电路的负载。

某些实际电源，例如化学电池、直流发电机等，在一定的工作电流范围内可以提供恒定的电压，因此，可以用直流电压源作为它们的电路模型。一般地讲，实际直流电压源输出电压都会随其电流的增大而降低，因此，可以用一个电压源 U_s 和一个电阻 R 的串联组合作为其电路模型，如图 1-14a 所示。在图 1-14a 所示电压 U 与电流 I 的参考方向下，实际直流电压源的伏安特性方程为

$$U = U_s - RI \quad (1-12)$$

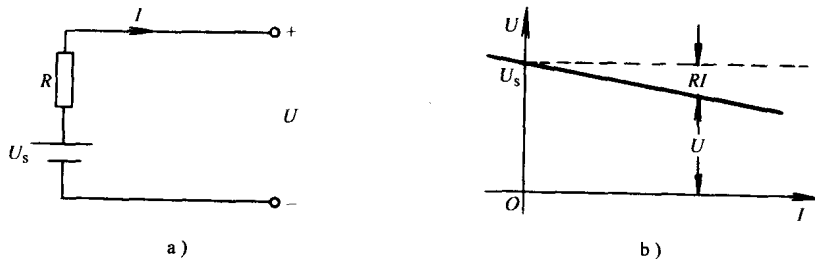


图 1-14 实际直流电压源的电路模型及其伏安特性

其伏安特性曲线如图 1-14b 所示。

当输出电流 $I=0$ 时, 实际电压源处于开路状态, 此时输出电压称为开路电压, 用 U_{∞} 表示, 可知 $U_{\infty}=U_s$ 。当输出电压 $U=0$ 时, 实际电压源处于短路状态, 此时输出电流称为短路电流, 用 I_{∞} 表示, 可知 $I_{\infty}=U_s/R$ 。对于化学电池而言, 其内电阻 R 非常小, 而电压源电压 U_s 一定, 故短路电流 I_{∞} 非常大, 在短时间内即可毁坏此电源。因此, 实际电压源器件不允许短路。

电流源也具有两个特点: ①电流源输出的电流 i 是恒定值或者是一定的时间函数, 不会因为它联接不同的外电路而改变, 即 $i=i_s$, 其中 i_s 是电流源电流。②电流源的电压的大小和方向将随着与其联接的外电路不同而改变。

电流源的电路图形符号如图 1-15 所示, 图中 i_s 是电流源电流, 箭头所指方向是其参考方向。如果电流源电流为常数, 即 $i_s=I_s$, 则称其为直流电流源。直流电流源的伏安特性曲线如图 1-16 所示, 在 $u-i$ 平面上任何时刻它都是一条与电压轴平行的直线。如果电流源电流为正弦函数时, 则称其为正弦电流源。

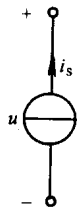


图 1-15 电流源

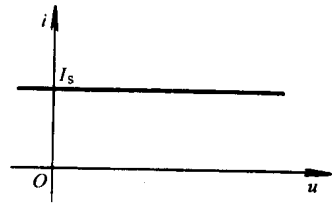


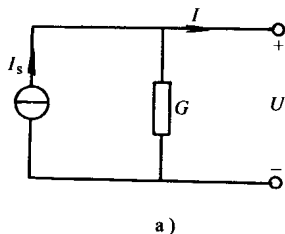
图 1-16 直流电流源的伏安特性

若电流源的电流与端电压取非关联参考方向, 如图 1-15 所示, 则在对应的 $u-i$ 平面上, 第 I 象限和第 III 象限为供能区, 表示电流源向外电路发出功率, 起到电源作用; 第 II 象限和第 IV 象限为耗能区, 表示电流源从外电路吸收功率, 此时的电流源不起电源作用, 而是外电路的负载。

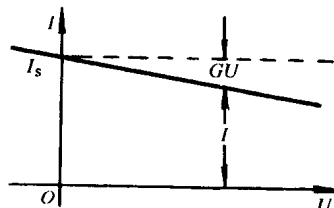
某些实际电源, 如光电池等, 在一定的工作电压范围内可以提供恒定的电流, 因此, 可以用直流电流源作为其电路模型。一般地讲, 实际电流源输出电流都会随其电压的升高而减少, 因此, 可以用一个电流源 I_s 和一个电导 G 的并联组合作为其电路模型, 如图 1-17a 所示。在图 1-17a 所示电压 U 与电流 I 的参考方向下, 实际直流电流源的伏安特性方程为

$$I = I_s - GU \quad (1-13)$$

其伏安特性曲线如图 1-17b 所示。



a)



b)

图 1-17 实际直流电流源的电路模型与其伏安特性

当输出电流 $I=0$ 时, 实际电流源处于开路状态, 此时开路电压 $U_{oc} = I_s/G = I_s R$ 。当输出电压 $U=0$ 时, 实际电流源处于短路状态, 此时短路电流 $I_{sc} = I_s$ 。对于光电池而言, 其并联电导 G 非常小, 即并联电阻 R 非常大, 而电流源电流 I_s 一定, 故开路电压 U_{oc} 非常大, 在短时间内即可毁坏此电源。因此, 实际电流源不允许开路。

电压源电压和电流源电流都不受其联接的外电路的影响, 在电路中起“激励”作用, 这类电源称为独立电源, 简称独立源。

如果一个电压源的电压 $u_s=0$, 则其伏安特性曲线为 $i-u$ 平面上的电流轴, 也就是说, 电压为零的电压源相当于短路, 可以用“短路”替代。如果一个电流源的电流 $i_s=0$, 则其伏安特性曲线为 $u-i$ 平面上的电压轴, 也就是说, 电流为零的电流源相当于开路, 可以用“开路”替代, 这些都是值得注意的独立源性质。另外, 电压源允许开路, 但是不允许短路; 电流源允许短路, 但是不允许开路, 在电路分析中要给予注意。

例 1-3 计算图 1-18 所示电路中电源发出的功率。

解 电阻中的电流由电流源决定, 其值为 $I=3A$ 。

设电流源两端电压为 U , 参考方向如图所示, 其值取决于外电路, 即

$$U = RI + 6V = 2\Omega \times 3A + 6V = 12V$$

对于电流源, 电压与电流为非关联参考方向, 则电流源吸收功率为

$$P_I = -3U = -3 \times 12W = -36W$$

可知电流源发出功率 36W。

对于电压源, 电压与电流为关联参考方向, 则电压源吸收功率为

$$P_U = 6I = 6 \times 3W = 18W$$

可知电压源发出功率 -18W。

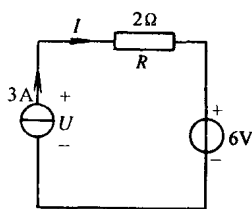


图 1-18 例 1-3 图

1.6 受控源

在电路分析中, 除了会遇到上节介绍的独立源外, 还会遇到受控源。受控源不同于独立源, 受控电压源的电压与受控电流源的电流都不能保持恒定值或某一给定的时间函数, 而要受到电路中某部分电流或电压的控制, 因此, 受控源又称为非独立源。例如, 电子管输出的交变电压要受其输入交变电压的控制; 晶体管集电极电流要受其基极电流的控制。这些实际电路器件可以用受控源作为它们的电路模型来描述其工作性能, 因此, 在分析含电子管、晶体管等电路时, 受控源概念是很重要的, 而且经常应用。

根据控制量是电压还是电流, 受控电源是电压源还是电流源, 把受控源分为下述四种:

- 1) 电压控制电压源 (VCVS——Voltage Controlled Voltage Source)。
- 2) 电压控制电流源 (VCCS——Voltage Controlled Current Source)。
- 3) 电流控制电压源 (CCVS——Current Controlled Voltage Source)。
- 4) 电流控制电流源 (CCCS——Current Controlled Current Source)。

受控源的电路图形符号如图 1-19 所示。