



iCourse · 教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材

电 路

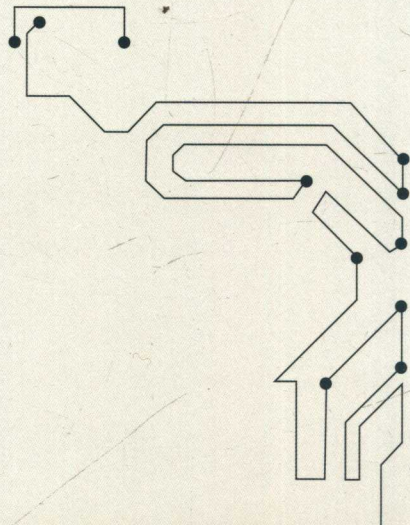
主编 黄锦安

参编 李 竹 徐行健 康明才

孙建红 沙 涛 蔡小玲

主审 孙宪君

高等教育出版社



TM 83
8702



iCourse · 教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2018-2-029）

电 路

主编 黄锦安

参编 李 竹 徐行健 康明才

孙建红 沙 涛 蔡小玲

主审 孙宪君



高等教育出版社·北京

内容提要

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会制定的“电路理论基础”和“电路分析基础”课程教学基本要求编写的。

全书共 15 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、运算放大器、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、非正弦周期电路、电路方程的矩阵形式、二端口网络、非线性电阻电路分析、运算法和网络函数,对应章节介绍了相关的工程应用实例等,另外附有 MATLAB 在电路分析中的应用实例。书中添加了二维码,链接重、难点知识点教学视频和综合例题教学视频,读者可体验新的获取知识的方法。各章配有习题并附部分参考答案。

本书可作为普通高校电子信息类、电气类、自动化类专业“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; 李竹等参编. -- 北京: 高等教育出版社, 2019. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 051440 - 7

I. ①电… II. ①黄… ②李… III. ①电路 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 035850 号

责任编辑 韩 颖
责任校对 刘娟娟

封面设计 张 志
责任印制 刘思涵

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 山东百润本色印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 29.5
字 数 720 千字
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2019 年 6 月第 1 版
印 次 2019 年 6 月第 1 次印刷
定 价 56.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 51440 - 00

前 言

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会制定的“电路理论基础”和“电路分析基础”课程教学基本要求编写的,可供电子信息类、电气类、自动化类等本科专业用作“电路”课程的教材,也可以作为电路课程的教学参考书。

本书为江苏省“十三五”高等学校重点建设教材(编号:2018-2-029),且作为“电路”国家精品课程、国家精品资源共享课及国家精品在线开放课程建设的重要组成部分,在原有的普通高等教育“十一五”国家级规划教材的基础上进行编写,全书共15章。在内容选材上突出了基本内容和传统内容,强调基本概念和基本原理,辅以每小节的思考与练习,以便为读者打下扎实的电路理论基础。在内容体系上保持了电路理论的系统性和完整性,可根据专业或课程学分数不同取舍内容,以满足不同层次学生的学习需求。在内容的编排上注重了科学性和教学实用性的有机结合,例题和习题的类型全面多样,可供读者灵活选择。在内容选择上加强了应用性,对应章节通过工程应用实例,将电路理论与工程实际应用相结合,可帮助读者学以致用。为适应互联网+的教学需求,帮助读者能够综合地应用基本概念分析具体问题,全书配有70个综合例题视频,读者可扫描二维码观看,以帮助读者提高分析问题、解决问题的能力。

本书传承了南京理工大学“电路”课程教学团队优良的教学传统,文字教材全面系统,教学视频严谨规范,教学课件细致美观。参加本书编写的有南京理工大学电子工程与光电技术学院李竹(第1、6、12章)、徐行健(第7、8、9章)、康明才(第2、3、4章)、孙建红(第10、11、14章)、沙涛(第5、13、15章和附录)。全书经黄锦安审定、修改和定稿,并拍摄了全书的所有教学视频,蔡小玲制作了全部基本知识点的教学课件。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。同时,也深深地感谢本书所引参考文献的全体作者!

限于编者的水平,书中的不足与错误之处在所难免,希望使用本书的读者和教师给予批评指正。作者 email:circuitnjust@126.com

编者

2018年9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 功率和能量	5
1.4 电阻元件	7
1.5 电压源和电流源	9
1.6 受控源	12
1.7 基尔霍夫定律	13
1.8 应用实例	18
本章小结	19
习题1	19
第2章 简单电阻电路分析	24
2.1 等效变换的概念	24
2.2 电阻的串联、并联和混联	25
2.3 电阻的Y- Δ 等效变换	31
2.4 电压源、电流源的串联和并联	35
2.5 实际电源两种模型的等效变换	38
2.6 运用等效变换分析含受控源的电阻电路	40
2.7 应用实例	43
本章小结	45
习题2	47
第3章 电阻电路的一般分析	54
3.1 支路电流法	54
3.2 网孔电流法和回路电流法	58
3.3 节点电压法	66
3.4 应用实例	71
本章小结	74
习题3	76
第4章 电路定理	82
4.1 叠加定理	82
4.2 替代定理	89
4.3 戴维南定理和诺顿定理	93

4.4	特勒根定理	101
4.5	互易定理	104
4.6	对偶原理	108
4.7	应用实例	111
	本章小结	113
	习题 4	115
第 5 章	运算放大器及应用电路	123
5.1	运算放大器	123
5.2	运算放大器构成的比例器	126
5.3	运算放大器典型电路分析	127
5.4	应用实例	131
	本章小结	134
	习题 5	134
第 6 章	一阶电路和二阶电路	138
6.1	电容元件	138
6.2	电感元件	141
6.3	一阶电路	144
6.4	电路的初始条件	144
6.5	一阶电路的零输入响应	147
6.6	一阶电路的零状态响应	151
6.7	一阶电路的全响应	156
6.8	一阶电路的三要素法	157
6.9	一阶电路的阶跃响应	162
6.10	一阶电路的冲激响应	166
6.11	卷积积分	172
6.12	二阶电路的零输入响应	174
6.13	二阶电路的零状态响应和阶跃响应	182
6.14	应用实例	184
	本章小结	186
	习题 6	188
第 7 章	正弦电流电路基础	195
7.1	正弦量	195
7.2	正弦量的有效值	198
7.3	相量法的基本概念	200
7.4	基尔霍夫定律的相量形式	208
7.5	正弦电流电路中的三种基本电路元件	210
	本章小结	216
	习题 7	217

第 8 章 正弦稳态电路的分析	220
8.1 阻抗和导纳	220
8.2 简单正弦稳态电路的分析及相量图	227
8.3 正弦稳态电路的功率	233
8.4 正弦稳态电路的一般分析方法	239
8.5 最大平均功率的传输	244
8.6 正弦稳态电路的谐振	247
8.7 应用实例	258
本章小结	261
习题 8	263
第 9 章 含耦合电感的电路	272
9.1 互感	272
9.2 含耦合电感的电路计算	276
9.3 空心变压器	283
9.4 理想变压器	287
9.5 应用实例	290
本章小结	291
习题 9	292
第 10 章 三相电路	298
10.1 三相电源	298
10.2 负载星形联结的三相电路	301
10.3 负载三角形联结的三相电路	307
10.4 复杂三相电路的计算	310
10.5 三相电路的功率	313
10.6 三相功率的测量	315
10.7 应用实例	318
本章小结	319
习题 10	319
第 11 章 非正弦周期电流电路	322
11.1 非正弦周期信号	322
11.2 非正弦周期信号分解为傅里叶级数	323
11.3 非正弦周期信号的有效值和电路的平均功率	327
11.4 非正弦周期电流电路的计算	330
11.5 对称三相电路中的高次谐波	335
11.6 应用实例	338
本章小结	340
习题 11	341

第 12 章 电路方程的矩阵形式	344
12.1 电路的图	344
12.2 回路、树、割集	345
12.3 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	350
12.4 矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系	355
12.5 节点电压方程的矩阵形式	356
12.6 回路电流方程的矩阵形式	364
12.7 割集电压方程的矩阵形式	367
12.8 状态方程	369
本章小结	374
习题 12	375
第 13 章 二端口网络	380
13.1 二端口网络概述	380
13.2 二端口网络的方程和参数	381
13.3 二端口网络的等效电路	389
13.4 二端口网络的网络函数	391
13.5 二端口网络的特性阻抗与实验参数	393
13.6 二端口网络的连接	395
13.7 回转器	398
13.8 应用实例	401
本章小结	403
习题 13	404
第 14 章 非线性电阻电路	409
14.1 非线性电阻	409
14.2 非线性电阻的串联和并联	412
14.3 分段线性化法	415
14.4 小信号分析法	418
14.5 应用实例	421
本章小结	421
习题 14	422
第 15 章 运算法和网络函数	425
15.1 拉普拉斯变换	425
15.2 拉普拉斯变换的主要性质	427
15.3 拉普拉斯反变换	430
15.4 电路定律的运算形式	433
15.5 线性电路的复频域分析——运算法	436
15.6 网络函数、极点和零点	441
15.7 应用实例	443

本章小结.....	446
习题 15	447
附录 MATLAB 在电路分析中的应用	454
部分习题参考答案.....	455
中英文对照.....	456
参考文献.....	460

第 1 章 电路模型和电路定律

现代人类社会的各种活动离不开电,信息的处理和传输要靠电,计算机、通信网和无线电等无不以电作为信息的载体。从探索物质粒子的加速器,到探索宇宙天体的飞船和卫星,从研究可在人体血管内爬行的电机,到研究可作为未来能源技术的受控核聚变装置,都需要电的支撑。电路可用于发电、输电和电能的消耗,信息的编码、解码、存储、检索、传输和处理也离不开电路。

本章首先介绍电路元件和电路模型的概念,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;元件、电路吸收或发出功率的表达式和计算;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

实际电路由电路元器件(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,可以完成能量的传输与转换,信号的传递与处理以及信息的存储。例如,图1-1-1(a)所示的一个简单的实际电路,其中电池供给电能,两根连接导线将电能传输到小灯泡,小灯泡将电能转换成热能和光能。

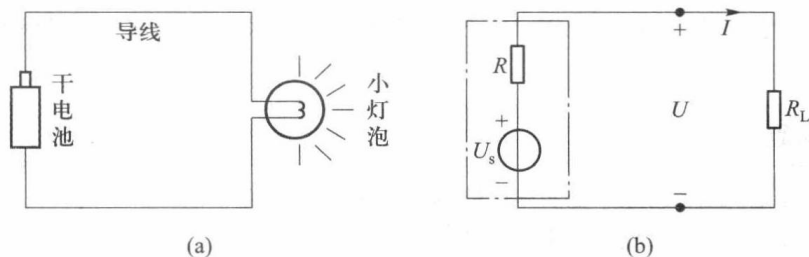


图 1-1-1 一个实际电路与电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

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。通常将提供电能或电信号的电路器件称为电源;将利用电能或电信号的电路器件称为负载;将电源至负载的中间部分称为中间环节。

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。对实际电路的分析需要建立电路模型,图1-1-1(b)为图1-1-1(a)的电路模型。电路模型是在一定条件下对实际电路的科学抽象与近似描述,它能足够准确地反映实际电路的电磁现象和性质。一个简单的实际电路的电路模型由各种理想电路元件用理想导线连接而成。不同特性的理想电路元件按照不同的方式连接就构成不同特性的电路。

理想电路元件也是从实际电路元件简化抽象得到,需要说明的是,在不同的条件下,同一个

电路器件,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,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。

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。

除非特别说明,本书中所讨论的电路均指由理想电路元件组成的电路模型。

根据电路本身的线性尺寸(l)与工作信号波长(λ)的关系,电路可分为两类:集总参数电路和分布参数电路。当实际电路的尺寸远远小于电路的工作频率对应的信号波长时,便可视是集总参数电路。例如,当工作信号频率约为 $20\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$ 时(音频范围),对应的信号波长约为 $1.5 \sim 15\text{ km}$ 。实验室常用电路尺寸与信号波长相比,完全可以忽略,应用集总电路模型是适用的。而在集成电路的设计中,每个电路元件的尺寸小到几十到几百微米,当工作信号频率很高,波长短至可以与电路元件的尺寸相比拟时,需要考虑电路的分布参数特性。另外,电力系统中的电力传输线是比较典型的分布参数电路。这种电路的电压、电流的频率很低($f = 50\text{ Hz}$),波长很长($\lambda = c/f = 6\,000\text{ km}$),传输线的长度达数百公里甚至几千公里,已可与波长相比拟。本书只讨论满足集总假设条件的集总电路。

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,它与近代系统理论有密切的关系。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,为学习电气工程技术、电子和信息工程技术等建立必要的理论基础。

思考与练习(判断题)

1-1-1

电路理论研究的对象不是实际电路,而是理想化的电路模型。()

1-1-2

电路理论是研究电路的基本规律及其计算方法的工程科学。()

1-1-3

理想元件是对实际电路元件理想化处理的结果。()

1-1-4

在不同条件下,同一实际器件,可能建立不同的电路模型。()

1-1-5

由集总参数元件相互连接而成的电路称为集总电路。()

1.2 电流和电压的参考方向

描述电路特性的物理量主要有电流、电压、电荷和磁链,功率和能量也很重要。在电路分析中,通常将任意时刻 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 $q(t)$ 、磁链用 $\psi(t)$ 、功率用 $p(t)$ 表示,且分别可简写为 i 、 u 、 q 、 ψ 、 p ,而用对应大写字母 I 、 U 、 Q 、 Ψ 、 P 表示其对应的物理量是恒定量。在电路分析中,一般选用电流和电压作为基本物理量,通过这

两个基本物理量可以比较方便地表示电路中的其他物理量。

1.2.1 电流和电流的参考方向

电荷的定向运动形成电流。单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流,其数学定义式为

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

其中 q 表示电荷量,国际单位制中,其单位为 C(库仑),电流的单位为 A(安培)。常用的电流单位还有 kA(千安)、mA(毫安)和 μA (微安)等。

习惯上将正电荷的流动方向规定为电流的实际流动方向。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 1-2-1-1 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,电流的实际方向是从元件的 A 端流向 B 端;反之,则认为电流的实际方向是从元件的 B 端流向 A 端。

在电路分析中,对于比较复杂的电路中的某一段电路,其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。

为了电路分析和计算的需要,可任意标示电路中电流的方向并指定为电流的参考方向。所指定的电流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。电流的参考方向在电路中通常用箭头所示,如图 1-2-1-2 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。

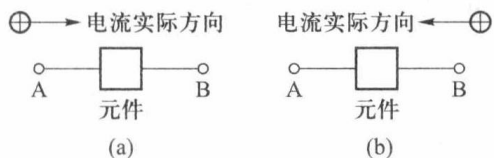


图 1-2-1-1 电流方向

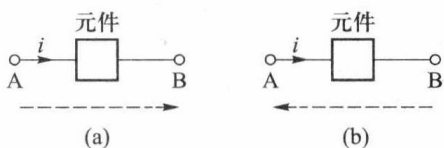


图 1-2-1-2 电流的参考方向

(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。

思考与练习(判断题)

- | | | |
|---------|----------------------------------|-----|
| 1-2-1-1 | 单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度。 | () |
| 1-2-1-2 | 通常将正电荷的运动方向规定为电流的参考方向。 | () |
| 1-2-1-3 | 当 $i < 0$ 时,实际方向与参考方向一致。 | () |
| 1-2-1-4 | 选定参考方向后,当 $i > 0$ 时,实际方向与参考方向一致。 | () |

1.2.2 电压和电压的参考方向

单位正电荷在电场中从 a 点移动到 b 点的电场力做功定义为 ab 两点间的电压,其表达式为

$$u = \frac{dW}{dq}$$

国际单位制中,电压的单位为 V(伏特)。常用的电压单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)和 μV (微伏)等。 W 表示能量(或电能),单位为 J(焦耳)。

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,习惯上将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)。类似地,直接标明电路中电压的实际方向是比较困难的,可以选定任意一个方向为电压的参考方向。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 1-2-2-1 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)。指定电压的参考方向后,电压就是一个代数量。

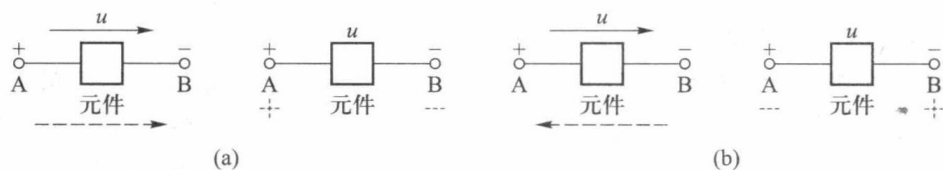


图 1-2-2-1 电压的参考方向

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

另外电压的参考方向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)。

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 1-2-2-2(a)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或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 1-2-2-2(b)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 1-2-2-3 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。

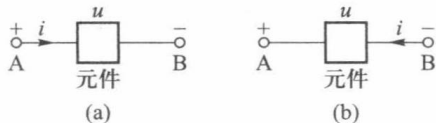


图 1-2-2-2 电压和电流的关联与非关联参考方向
(a) 关联; (b) 非关联

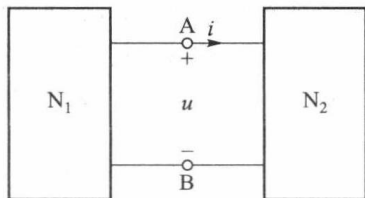


图 1-2-2-3 电路中的关联与非关联参考方向

思考与练习(判断题)

- 1-2-2-1 电路中电压和电流的参考方向是不能任意选择的。 ()
- 1-2-2-2 两点之间的电压与选择路径无关。 ()
- 1-2-2-3 电压与电流的关联参考方向只能针对一段电路讨论。 ()
- 1-2-2-4 在一段电路中,电压与电流参考方向关联时是指电流的参考方向由电压的“+”极性端指向“-”极性端。 ()

1.3 功率和能量

在图 1-3-1(a) 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

$$p = ui \quad (1-3-1)$$

如果电流和电压取非关联参考方向,如图 1-3-1(b) 所示,则在 t 时刻电路元件吸收的瞬时功率为

$$p = -ui \quad (1-3-2)$$

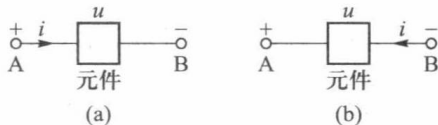


图 1-3-1 电路元件吸收功率的计算
(a) $p = ui$; (b) $p = -ui$

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(1-3-1)或式(1-3-2)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 ; 当 $p < 0$ 时表示该时刻元件实际上向外发出功率 $|p|$ 。如果式(1-3-1)和式(1-3-2)中,电压 u 单位为伏特(V),电流 i 单位为安培(A),则功率 p 单位为瓦特(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。

例 1-1 图 1-3-2 所示为一段电路 N。

(1) 图 1-3-2(a) 中,若 $u = 5 \text{ V}$, $i = 2 \text{ A}$, 计算该段电路的功率。

- (2) 图 1-3-2(b) 中,若 $u = 10\text{ V}$, $i = 3\text{ A}$, 计算该段电路的功率。
 (3) 图 1-3-2(c) 中,若 N 吸收功率为 100 W , $i = 4\text{ A}$, 求电压 u 并说明其实际方向。
 (4) 图 1-3-2(d) 中,若 N 发出功率为 500 W , $u = -100\text{ V}$, 求电流 i 并说明其实际方向。

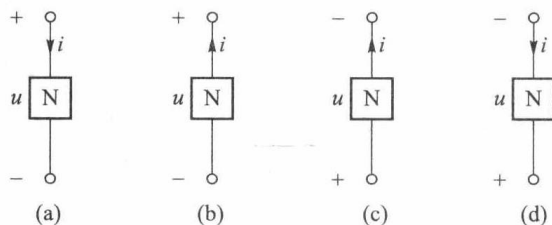


图 1-3-2 例 1-1 的电路

解 (1) 图 1-3-2(a) 中电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 因此, 可以应用式(1-3-1)得

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

说明该电路吸收功率为 10 W 。

(2) 图 1-3-2(b) 中电压 u 和电流 i 为非关联参考方向, 因此, 可以应用式(1-3-2)得

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

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

(3) 图 1-3-2(c) 中, N 吸收功率为 100 W , u 与 i 参考方向关联, $i = 4\text{ A}$, 于是

$$u = p/i = 100\text{ W}/4\text{ A} = 25\text{ V}$$

电压 u 为正值, 说明电压的实际方向与参考方向相同。

(4) 图 1-3-2(d) 中, N 发出功率为 500 W , u 和 i 为非关联参考方向, $u = -100\text{ V}$, 于是

$$i = p/(-u) = -500\text{ W}/100\text{ V} = -5\text{ A}$$

电流 i 为负值, 说明电流的实际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(1-3-1)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

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

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

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p d\tau = - \int_{t_0}^t uid\tau \quad (1-3-4)$$

根据式(1-3-3)或式(1-3-4)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, 则能量单位为焦耳(J)。

如果对任意时刻 t , 二端元件吸收的能量恒有

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \geq 0 \quad (1-3-5)$$

则称此类元件为无源元件。

思考与练习(判断题)

1-3-1 任意一段电路吸收的功率均可由公式 $p = ui$ 进行计算。 ()

1-3-2 关联参考方向下,一段电路的功率可由 $p = ui$ 进行计算,且 $p > 0$ 时,才说明该段电路吸收功率。 ()

1-3-3 电路中所有的电源都是提供功率的。 ()

1.4 电阻元件

电阻是描述材料对电荷移动阻碍特性的物理量,用符号 R 表示。电阻元件的阻值同样用 R 表示,与其所用材料的电阻率、长度成正比,与其横截面积成反比。还有一个影响阻值大小的因素是温度系数,其定义为温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电阻值发生变化的百分数。电阻分为线性和非线性两类,本节主要讨论线性电阻元件,非线性电阻电路在第 14 章讨论。

线性电阻是一个二端理想电路元件,其电路图形符号如图 1-4-1 所示,电阻是最简单的无源元件。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

$$u = Ri \quad (1-4-1)$$

式(1-4-1)也称为线性电阻的伏安关系。式(1-4-1)说明线性电阻的电压与其电流成正比。式(1-4-1)中电压和电流的单位分别为伏特(V)和安培(A),电阻的单位为欧姆(Ω)。

电路元件的两个端子的电路物理量之间的代数函数关系称为元件的端子特性(亦称元件特性)。如果将电阻电压取为横坐标(或纵坐标),将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 1-4-2 所示。通常,特性曲线都是在关联参考方向下测得或绘制的。如果一个电阻元件的伏安特性曲线位于第二、四象限,则此元件的电阻为负值,即 $R < 0$ 。负电阻元件实际上是一个发出电能的元件,一般需要专门设计。

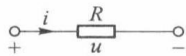


图 1-4-1 线性电阻的图形符号

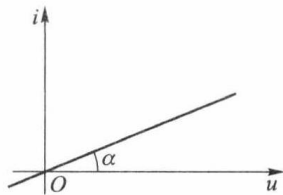


图 1-4-2 线性电阻的伏安特性

根据图 1-4-2 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

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-4-2)$$

如果令 $G = 1/R$,则式(1-4-1)变为

$$i = Gu \quad (1-4-3)$$

式中, G 称为线性电阻的电导, 其单位为西门子, 简称西(S)。

线性电阻的伏安特性曲线有几种特殊情况, 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。三是伏安特性曲线为坐标原点, 此时 $u = 0, i = 0, R$ 为任意值。

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(1-4-1)和式(1-4-3)。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

$$u = - Ri \tag{1-4-4}$$

$$i = - Gu \tag{1-4-5}$$

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

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \tag{1-4-6}$$

由式(1-4-6)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, 这说明线性电阻是耗能元件, 只能吸收电能而不能产生电能。它将吸收的电能(功率)全部转变成其他非电能量消耗掉或者作为其他用途。

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。通常将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 1-4-3 所示线性电阻 $R = 5 \, \Omega$, 某时刻其电压 $u = 10 \, \text{V}$, 求该时刻流过该电阻的电流和它吸收的功率。

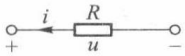


图 1-4-3 例 1-2 的电路

解 图 1-4-3 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(1-4-4)得

$$i = - u/R = - 10 \, \text{V}/5 \, \Omega = - 2 \, \text{A}$$

说明电流实际方向与图示参考方向相反, 其电流值为 $2 \, \text{A}$ 。

该电阻吸收的功率, 由式(1-4-6)得

$$p = u^2/R = (10 \, \text{V})^2/5 \, \Omega = 20 \, \text{W}$$

或
$$p = Ri^2 = 5 \, \Omega \times (- 2 \, \text{A})^2 = 20 \, \text{W}$$

也可应用式(1-3-2)得到

$$p = - ui = - 10 \, \text{V} \times (- 2 \, \text{A}) = 20 \, \text{W}$$