



高等学校“十二五”重点规划教材  
信息与自动化系列

# 电路分析基础

主 编 赵肖宇

 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

TM133/117

1946888

# 电路分析基础

主 编 赵肖宇

副主编 蔡立晶 康朝海 李文顺 任爽

耿晓琪 王发智

主 审 祁广云

江苏师大图书馆

哈尔滨工程大学图书馆

徐州师范大学图书馆



23956634

## 内 容 简 介

本书系统论述了电路分析中的基本概念、基本定理、基本分析方法和辅助分析工具,重点论述了解题技巧。每章首先介绍了相关的定义、原理以及典型例题,章后还配有习题,习题涵盖了各种难易程度的重点问题,可以帮助学生更好地掌握电路基本原理与分析方法。

本书可作为电气工程、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术等专业电路分析的教材或补充教材,也可作为全日制、自学考试、函授的大专生参考教材,同时也可供相关领域的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/赵肖宇主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.8

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0210 - 2

I. ①电… II. ①赵… III. ①电路分析 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168265 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 16.5  
字 数 395 千字  
版 次 2011 年 8 月第 1 版  
印 次 2011 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 32.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

电路分析是普通高等院校电类及相关专业开设的一门重要的专业技术基础课程。虽然其基本理论已非常成熟,但随着近代电路理论的不断发展和其辅助的计算和仿真工具不断更新,相关专业的知识结构和相应学时产生了变化。因此,有必要调整传统教材内容,以适应新的教学大纲和教学要求。

21世纪是机遇与挑战并存的时代,这个世纪是经济全球化、科技创新全球化的时代,新经济占主导地位、科学技术突飞猛进。这个世纪对高等教育办学理念、体制、模式和人才培养等各个方面都提出了全新的要求,培养的人才必须具备新思想、新观念,可以不断创新,善于经营、开拓市场,富有团队精神等素质。

21世纪同样对高等教育提出了严峻挑战。随着科学技术的迅猛发展,特别是微电子技术和信息技术的迅猛发展,电路分析这门科学也要与时俱进,优化结构。本着全面推进素质教育和改革人才培养模式为重点,以构建新的教学内容和课程体系,深化方法和手段为核心,努力培养素质高、应用能力与实践能力强、富有创新精神的应用复合型人才。

本教材是基于上述时代背景和要求编写的。力求具有以下特点:

- (1)目标定位 本教材适用于应用型本科人才培养;
- (2)内容定位 强调实践与实用;
- (3)主体定位 本教材施用对象是学生,力争成为使学生看得懂的书;
- (4)特色定位 传统理论融合新技术介绍。

本书内容尽力兼顾强、弱电专业,力图紧密联系信息技术,并体现信息学科的特色。本书由电阻电路分析开始,提供直流作用下电阻电路的一些分析方法,如 $2b$ 法、节点电压法、回路电流法、叠加原理、戴维南定理等,使读者理解和掌握电路理论中的分析方法,便于后续章节应用。本书继而深入介绍了一阶电路的瞬态响应过程和借助向量法分析正弦稳态电路,以及介绍了拉普拉斯变化分析方法、运算放大器电阻电路分析计算方法、耦合电感电路以及三相电路分析方法。另外,本书最后一章介绍了三款电路计算机辅助分析软件PSPICE、EWB和Multisim界面、功能和使用方法,以Multisim为例,详细介绍了电路的各种分析方法和基本定律的应用。

本书经过集体讨论,分工执笔,由黑龙江八一农垦大学赵肖宇担任主编,黑龙江八一农垦大学蔡立晶、李文顺、耿晓琪,东北石油大学康朝海、任爽,齐齐哈尔大学王发智担任副主编,黑龙江八一农垦大学祁广云教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见。其中赵肖宇编写了第1,3章及其习题,蔡立晶编写了第4,13章及其习题,康朝海编写了第5,10章及其习题,李文顺编写了第2,6章及其习题,任爽编写了第8,9,12章及其习题,耿晓琪编写了第7,11章及其习题,王发智参编了第4章部分习题。

限于编者水平,书中必定还会有不少缺点和不当之处,诚望读者和专家指正。

编者

2011年4月

# 目 录

<b>第 1 章 电路模型和电路定律</b> .....	1
1.1 电路分析概述 .....	1
1.2 电流和电压 .....	4
1.3 参考方向 .....	6
1.4 电功率和能量 .....	7
1.5 理想电路元件 .....	9
1.6 电阻 .....	9
1.7 独立电源 .....	11
1.8 受控电源.....	13
1.9 基尔霍夫定律.....	14
习题 1 .....	18
<b>第 2 章 电阻电路的等效变换</b> .....	25
2.1 电路的等效变换.....	25
2.2 电阻的串联和并联.....	26
2.3 电阻的 $\Delta$ 形联结与 Y 形联结的等效变换 .....	28
2.4 电压源、电流源的串联和并联 .....	31
2.5 实际电源的两种模型以及等效变换.....	32
2.6 输入电阻.....	34
习题 2 .....	36
<b>第 3 章 电阻电路的一般分析方法</b> .....	45
3.1 电路的图.....	45
3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数 .....	46
3.3 $2b$ 法 .....	48
3.4 支路电流法和支路电压法.....	50
3.5 网孔电流法.....	51
3.6 回路电流法.....	54
3.7 结点电压法.....	57
习题 3 .....	62
<b>第 4 章 电路定理</b> .....	69
4.1 叠加定理.....	69
4.2 替代定理.....	71
4.3 戴维南定理.....	73
4.4 最大功率传输定理.....	76
习题 4 .....	78
<b>第 5 章 一阶电路的时域分析</b> .....	84

5.1	电容和电感	84
5.2	一阶电路的动态过程	86
5.3	$RC$ 电路的零输入响应	88
5.4	$RL$ 电路的零输入响应	90
5.5	$RC$ 电路的零状态响应	92
5.6	$RL$ 电路的零状态响应	93
5.7	一阶动态电路的全响应	94
5.8	一阶电路的阶跃响应	97
5.9	一阶电路的冲激响应	100
	习题 5	106
<b>第 6 章</b>	<b>正弦稳态电路的分析</b>	<b>112</b>
6.1	基本概念	112
6.2	相量法	117
6.3	阻抗和导纳	121
6.4	KCL 和 VCR 的相量形式	123
6.5	正弦稳态电路的分析	126
6.6	正弦稳态电路的功率	129
	习题 6	132
<b>第 7 章</b>	<b>三相电路</b>	<b>138</b>
7.1	三相电路	138
7.2	线电压(电流)与相电压(电流)的关系	139
7.3	对称三相电路的计算	141
7.4	不对称三相电路的概念	143
7.5	三相电路的功率	144
	习题 7	145
<b>第 8 章</b>	<b>拉普拉斯变换方法</b>	<b>148</b>
8.1	拉普拉斯变换定义	148
8.2	拉普拉斯变换性质	150
8.3	拉普拉斯反变换定义	153
8.4	基本定律的复频域形式	156
8.5	二阶电路的 $s$ 域模型	158
	习题 8	161
<b>第 9 章</b>	<b>二端口网络</b>	<b>166</b>
9.1	二端口网络	166
9.2	二端口的方程和参数	167
9.3	二端口的等效电路	174
9.4	二端口的转移函数	175
9.5	二端口的连接	178
9.6	回转器和负阻抗变换器	180
	习题 9	182

<b>第 10 章 含有耦合电感的电路</b> .....	186
10.1 互感 .....	186
10.2 耦合电感的串联与并联 .....	189
10.3 含有耦合电感电路的计算 .....	191
10.4 耦合电感的功率 .....	196
10.5 变压器原理 .....	197
习题 10 .....	199
<b>第 11 章 电路的频率响应</b> .....	203
11.1 网络函数 .....	203
11.2 <i>RLC</i> 串联电路的谐振 .....	205
11.3 <i>RLC</i> 并联谐振电路 .....	208
习题 11 .....	210
<b>第 12 章 含有运算放大器的电阻电路</b> .....	213
12.1 运算放大器的电路模型 .....	213
12.2 含有理想运算放大器的电路分析 .....	214
习题 12 .....	217
<b>第 13 章 电路分析计算机辅助分析软件</b> .....	220
13.1 PSPICE 简介 .....	220
13.2 EWB 简介 .....	225
13.3 Multisim 简介 .....	238
13.4 Multisim 在电路分析中的应用 .....	241
<b>参考文献</b> .....	253

# 第 1 章 电路模型和电路定律

在这一章里,我们将接触到经典电路分析中一些重要的概念,包括电系统及其构成、电路分析的基本思想、电流和电压、参考方向、电功率和能量、理想电路元件、电阻元件、独立电流源、独立电压源和受控电流源、受控电压源的概念,这些内容构成全书的基础。

## 1.1 电路分析概述

### 1.1.1 电路理论

电在日常生活、生产实践和科学研究中都得到了广泛的应用。在收音机、电视机、录像机、音响设备、计算机、通信系统和电力网络中都可以看到各种各样的电系统。电系统是由各式各样的实际电路构成的,实际电路都是由各种元件相互连接组成的,元件的类型主要包括以下几类:

- (1)有源器件 主要是各种交直流有源器件;
- (2)基本器件 包括电阻、电容、电感、电位器、可变电容和变压器等;
- (3)二极管类器件 主要是普通二极管、稳压二极管、发光二极管、全桥和可控硅;
- (4)三极管类器件 包括三极管、达林顿管和场效应管等;
- (5)模拟类 IC 主要是各类运算放大器;TTL 集成电路;CMOS 集成电路;
- (6)复合数字类 IC 包括存储器等复合集成电路;
- (7)混合类 IC 主要是数模转换、模数转换和 555 集成电路等;
- (8)指示器件 包括电流表、电压表、数码显示器、指示灯和蜂鸣器等;
- (9)多功能器件 主要是保险丝、电子管和晶振等;
- (10)控制器件 包括乘法器、除法器、积分器、微分器和限幅器等;
- (11)射频器件 包括射频电感、电容和晶体管等;
- (12)电子机械器件 包括感应和记忆开关等。

互联网、计算机、卫星、电视、用于诊断的医学设备、机器人以及各式各样的电气设备都是由各种元件互联而成的,它们已成为现代化社会的重要标志。

电路是由若干个电气设备或器件按照一定方式组合起来,构成的电流的通路。作为电路组成部分的设备或器件,例如供电设备(电源)、用电设备(负载)、电阻器、电感器、电容器、晶体管、电子管等,统称为电路的部分。电路理论中研究的电路和电路元件(简称元件),不是指上述实际的电路和实际电路的部件,而是一些理想化了的电路或电路元件,即在一定条件下能足够准确地反映实际电路及其部件的主要电磁性能的抽象模型。有些实际部件在某种条件下的模型可由一种元件构成,有些实际部件的模型则应由几种元件构成。把实际电路及其部件模型化,是为了便于用数学的方法分析和设计电路。

从 19 世纪开始,电磁学(Electromagnetism)和电子学(Electronics)得到了飞速的发展。



19世纪60年代麦克斯韦建立了统一的电磁理论,19世纪末洛伦兹建立了古典电子理论。与此相呼应,工程技术专家敏锐地意识到电力技术对人类生活的意义,纷纷投身于电力开发、传输和利用方面的研究,以电报机、电话机、电灯、电动机、发电机为代表的一系列电气设备被发明、制造出来。复杂电气设备的出现,使得对电路的分析和设计成为了需要。

尽管广义的电磁学和电子学理论似乎是研究电现象的出发点,但其应用不仅复杂,而且需要使用高深的数学知识。如果在研究电现象时,电系统满足以下三个假设:

- (1)电效应在瞬间贯穿整个系统;
- (2)系统里所有元件的净电荷总是零;
- (3)系统里的元件之间没有磁耦合。

研究该电系统就可以应用电路理论而不是电磁学和电子学理论。

上面提到的假设“电效应在瞬间贯穿整个系统”是指电信号同时影响系统中所有的点。从定量的角度,如果电信号的波长远大于电系统的物理尺寸,则称该系统为集总参数系统,集总参数系统满足电效应在瞬间贯穿整个系统这一假设。一般认为,如果电系统的物理尺寸比电信号波长的十分之一小,则称该系统为集总参数系统;如不满足这一条件,称电系统为分布参数系统。例如,对无线电调频接收机来说,若接收的信号频率为100 MHz,则对应的波长 $\lambda = c/f = 3 \text{ m}$ (传播速度以光速计,即 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),连接接收天线与接收机之间的传输线即便只有1 m长,也不能作为集总参数系统来处理。又如,我国电力用电的频率为50 Hz,对应的波长为6 000 km,对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸远小于这一波长,可以按集总参数系统处理,而对远距离输电线来说,就必须考虑到电场、磁场沿线分布的情况,不能按集总参数系统来处理。如果电系统是集总参数系统,可以应用电路理论来研究;如果电系统是分布参数系统,就必须应用电磁学和电子学理论来研究。

### 1.1.2 电路分析

电路多种多样,功能各不相同,但它们是受共同的基本规律支配的。在研究电路共同规律的过程中,形成了“电路理论”这一学科。1845年,德国科学家基尔霍夫提出的基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)是电路理论的基石。“电路分析”属“电路理论”学科,本书学习的是电路理论的电路分析部分。

为了能够运用数学工具分析实际电路,需要忽略实际电路的次要性质,在一定条件下建立足以表征实际电路主要物理性能的电路模型。这是因为即便是最简单的电阻器,其参数也会随外部条件变化,当电流通过电阻器时会产生磁场,因而还兼有电感的性质,其他电路元件也有类似的或更复杂的情况,运用数学工具分析实际电路显然是困难的。因此需要对实际电路进行科学的抽象与概括,用一些具有确定电磁性质的、具有精确数学定义的理想电路元件来表征实际电路元件的主要电磁性能。用理想电路元件和理想导线的组合模拟实际电路就是“数学建模”的过程,理想电路元件和理想导线的组合就是实际电路的电路模型。电路分析研究的对象是电路模型,而不是实际电路。

建模时必须考虑工作条件,并按不同精度的要求把实际电路的电磁性能表征出来。例如,在直流条件下,一个线圈的模型可以是一个理想电阻元件;在低频条件下,一个线圈的模型可以是理想电阻元件和理想电感元件的串联组合;在高频条件下,还要考虑到导体表面的电荷作用,即电容效应,这时线圈的电路模型中还要包含理想电容元件。可见在不同的条件下,对同一个实际电路元件应该采用不同的模型。模型建立得准确,对电路模型的分析 and 计

算结果就与实际电路的情况接近;反之,模型建立得不准确,分析结果就会与实际情况有很大的误差,甚至得到错误的结果。数学建模问题需要专门研究,本书不作介绍。

电路分析是电气工程设计的的重要组成部分,下面通过图 1.1 说明其在电气工程中的地位 and 作用。工程设计的目标在于满足提出的要求,这个要求可以是改善现有设计,也可以是崭新的设计。在设计时首先需要对提出的要求进行仔细分析,以便将要求抽象成设计要求。设计要求要具有可测量性,一旦开始进行设计,设计要求就成为评估设计能否满足要求的标准。对设计要求的完全理解产生概念。概念来源于设计者的洞察力,洞察力与设计者的受教育程度和经验有关。概念可以体现为一张草图、一段文字描述或其他形式。

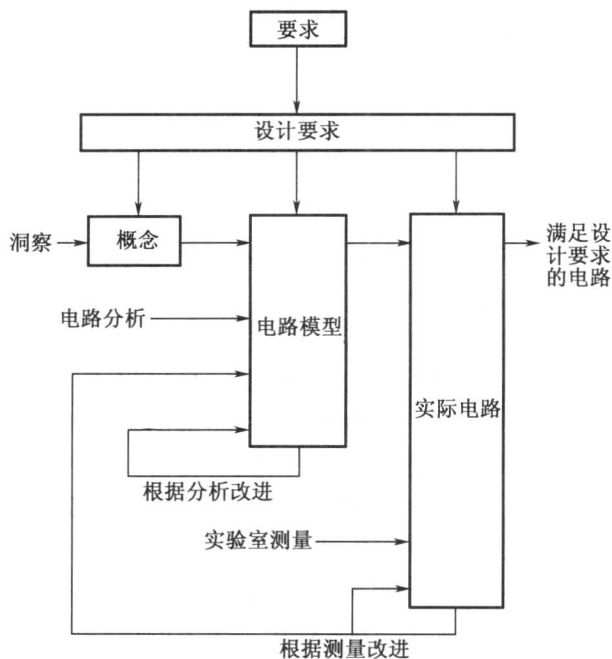


图 1.1 电气工程设计的概念模型

接下来是将概念转化为数学模型,电系统的数学模型就是电路模型。一般设计者会首先选用成熟的电路模型,使最开始选用的电路模型就尽可能地接近设计要求。设计者对选用的电路模型进行电路分析(电路分析以数学为基础,用来预测电路模型的电路行为。对电路模型的电路分析方法,是本书的学习重点),然后比较电路分析得到的预测电路行为和设计要求中的期望电路行为的异同,进而进行电路模型的改进。重复进行以上过程,一旦预测电路行为和期望电路行为一致,则电路模型的设计就完成了。

电路模型的设计完成后,要根据电路模型构造出实际电路。实际电路是真实的物理模型,由实际电路元件构成,实际电路的电路行为可以通过仪表进行测量。将仪表测量的实际电路行为与电路分析得到的预测电路行为以及设计要求中的期望电路行为相比较,比较后再进行实际电路、电路模型的改进。重复进行以上处理,不断改进电路元件和系统结构,最终设计出一个满足设计要求的电系统。从以上描述可以清楚看出,设计过程中电路分析起了非常重要的作用,只有具备了电路分析的能力才能使设计者具有用电路模型模拟实际电路的能力。

电路分析的时候对电路对象作出理想化假设。在一定的条件下,电路中的电磁现象可以分别研究,即可以用集总元件来构成模型,每一种集总元件均只表现一种基本现象,且可以用数学方法精确定义,如电阻元件为只消耗电能的元件,电容为只存储电场能量的元件,电感为只存储磁场能量的元件,等等。也就是说,能量损耗、电场储能、磁场储能三种物理过程可以在 $R, C, L$ 三个理想元件中分别进行。

采用“集总”概念的条件为:只有在辐射能量忽略不计的情况下才能采用“集总”的概念,即要求器件的尺寸远远小于正常工作频率所对应的波长。比如本来在中低频情况下可以用 $R, L, C$ 等理想模型描述的器件,在高频情况下就不再满足集总假设,或者在中低频情况下可以基本忽略电路状态影响的平行导线,在高频情况下必须重新考虑其高频模型;还有类似输电线这样的特殊情况也是不能满足集总假设的例子。

## 1.2 电流和电压

电流的发现纯属偶然。1752年一位名叫祖尔策的意大利学者,将一片铅片和一片银片放在舌尖上,当这两个金属片的另一头连在一起时,他发现舌尖的感觉很奇怪。由于找不到解释,他就没有再把这件事放在心上。实际上,他的舌尖上流通了两种金属相接触而产生的接触电,味觉因而发生了变化。三十年后,意大利波仑亚大学的医学教授伽伐尼重新遭遇了这种现象。1780年9月20日,他的一名助手无意中将解剖刀碰到了一只蛙腿的神经上,顿时四只蛙腿猛烈地抽动。伽伐尼反复做了各种实验后提出,动物体内存在着“动物电”,认为这种电与摩擦电完全一样。今天我们知道,伽伐尼的看法是错误的,但他的工作极大地促进了对该问题的深入研究。伽伐尼的发现,引起了意大利物理学家伏特的注意。起初伏特同意伽伐尼的观点,但几个月后,他开始怀疑蛙腿主要是一种验电器,而电源则在动物之外。伏特对这个问题进行了更深入的研究,结果得出了著名的伏特序列:锌、锡、铅、铜、银、金……他发现,只要将这个序列里前面的金属与后面的金属相接触,前者就带正电,后者带负电。1800年3月20日他宣布发明了伏特电堆,他在一封写给皇家学会会长班克斯的信件中介绍了他的发明,用的标题是《论不同导电物质接触产生的电》。伏特电堆的出现,使人们第一次有可能获得稳定而持续的电流,为研究电现象打下基础。1820到1827年,法国物理学家安培对电磁现象进行了研究,在研究的过程中提出了“电流”的概念,并规定了电流的方向。1827年,德国物理学家欧姆出版了《关于电路的数学研究》,给出了欧姆定律的理论推导,之后他又定义了“电流、电压和电阻”的精确概念。至此,电流和电压才被人们所认识。电流和电压是反映电系统电磁现象的重要参数。

### 1.2.1 电流

电流的原始定义基于本杰明·富兰克林的理念,即电的本性是某种呈正电性的电液体的流动。今天我们知道,电实际上是由带负电荷的电子造成的,富兰克林正好弄反了。安培受富兰克林的影响,把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。安培没有把电子运动的方向规定为电流的实际方向,但只要彻底一贯地坚持这个规定,也不会带来什么麻烦,因此物理学界沿袭了安培的这个规定。

电流磁效应的发现也使测量电流的大小成为可能。规定单位时间内通过导体横截面的

电量为电流强度,用以衡量电流的大小,即

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

电流用符号  $i$  表示。在国际单位制(SI)中,电量的单位为库仑(其符号为 C),时间的单位为秒(其符号为 s),电流的单位为安培(其符号为 A),安培是国际单位制的基本单位之一,有

$$1 \text{ 安培(A)} = \frac{1 \text{ 库仑(C)}}{1 \text{ 秒(s)}}$$

此外,电流常用的单位还有千安( $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ )、毫安( $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ )、微安( $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ )。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则该电流称为恒定电流,简称直流(Direct Current, DC),用符号  $I$  表示;否则称为时变(Time Varying)电流,用符号  $i$  表示。时变电流的大小和方向都随时间作周期性变化,则该电流称为交变电流,简称交流(Alternating Current, AC)。

### 1.2.2 电压

在英语中电位和电动势这两个概念是同一个单词 Potential。电动势在电化学中用得较多,在工业或日常生活中电动势(Potential)有时也被称作电压(Voltage)。电位、电压、电动势是三个既有联系,又有区别的物理量。理解电位是理解电压、电动势的基础。

电位是衡量电荷在电路中某点所具有能量多少的物理量。在数值上,电路中某点的电位等于把单位正电荷从无限远处(电位为零)移动到该位置所消耗的能量。电位是一个相对物理量,电路中某点电位的极性和大小与参考点(即零电位点)的选择有关。只有选定零电位点,电路中各点电位才能唯一确定,不指定零电位点,讨论电位是没有意义的。零电位点可以选电路上的任意点,习惯上规定大地为零电位点,电子线路中常取多个元器件汇聚的公共点或机壳为零电位点。电路中任一点的电位,就是该点与零电位点之间的电位差。比零电位点高的电位为正,比零电位点低的电位为负。电位降低的方向就是电场力对正电荷做功的方向。

电压又称电位差,是衡量电场力做功本领大小的物理量。在电路中,若  $a$  点电位为  $u_a$ ,  $b$  点电位为  $u_b$ , 则  $u_{ab} = u_a - u_b$  为  $a, b$  两点间电压。规定电压的方向是从高电位指向低电位; $a, b$  两点电压的大小等于电场力把单位正电荷从  $a$  点移动到  $b$  点所做的功,即

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

电位的大小是相对的,它和零电位点的选择有关;电压的大小是绝对的,它和零电位点的选择无关。

电压用符号  $u$  表示,电压的单位为伏特(其符号为 V)。此外,电压常用的单位还有千伏( $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ )、毫伏( $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$ )、微伏( $1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$ )。

电动势是衡量电源力(或非静电力)做功本领大小的物理量。规定电动势的方向是从低电位指向高电位(或从电源的负极指向正极);电源的电动势大小等于电源力把单位正电荷从低电位移到高电位(或从电源的负极移向正极)所做的功。电动势与电压的物理意义并不相同,但就其对外部的效果而言,两者是没有区别的,所以近代电路理论中逐渐省略了电动势这个量。电位、电动势和电压的单位一样,都是伏特。教材中常用电压对电路模型进

行分析。

### 1.3 参考方向

电流、电压的实际方向是客观存在的,物理学规定电流的实际方向是正电荷运动的方向,电压的实际方向是从高电位指向低电位。虽然电流、电压的实际方向物理意义明确,但采用电流、电压的实际方向进行电路分析却并不方便。这是因为电路中电流、电压的实际方向往往难以事先判定,并且电流、电压的实际方向还往往随着时间发生变化。这就产生了矛盾,一方面有时电流、电压的实际方向是未知的、可变的;另一方面,在对电路进行分析时需要明确电流、电压方向。为了解决这一矛盾,引入了电流、电压的参考方向这一概念。事实上,如没有特殊强调,本书介绍概念、定理、分析方法时涉及到的电流、电压方向均是电流、电压的参考方向,而不是电流、电压的实际方向。

对电路进行分析前须预先设定电路中相关电流、电压的参考方向。电流与电压的参考方向可以随意设定,但是一经设定,便不得更改。这样在电路分析过程中电流、电压便有了明确的方向,该方向是人为设定的电流、电压的参考方向。从数学观点来看,作为时间函数(常量可以看成时间函数的特例)的电流和电压都是代数量,其值可以为正,也可以为负。如果设定的电流、电压参考方向与电流、电压实际方向一致,其函数值为正,反之则为负。

也就是说,如果电流、电压值为正值,那么设定的参考方向与实际方向恰巧一致,反之则不一致。

在电路图中,电流的参考方向用箭头表示,如图 1.2 所示。电流的参考方向共有两种标注形式,本书采用(b)图形式。电压的参考方向可以用“+”、“-”号表示,也可以用箭头表示,如图 1.3 所示,本书采用(b)图形式。电流的参考方向就是箭头的指向,电压的参考方向是从元件(或支路)的高电位点(“+”极)指向低电位点(“-”极)。图 1.2 和图 1.3 所示参考方向都是向右的。

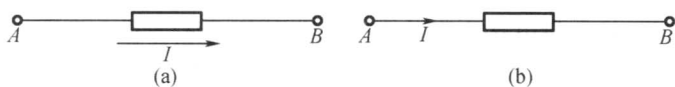


图 1.2 电流的参考方向标注

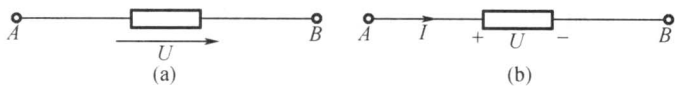


图 1.3 电压的参考方向标注

同一元件(支路)的电流和电压参考方向可以分别独立地规定,但为了分析方便,常设定其电流和电压的参考方向一致,如图 1.4 所示。这时,该元件电流和电压的参考方向是相同的,称为关联(associated)参考方向。反之,如图 1.5 所示,元件电流和电压的参考方向是不相同的,则称为非关联参考方向。

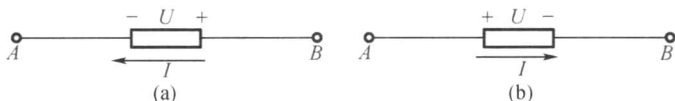


图 1.4 关联参考方向

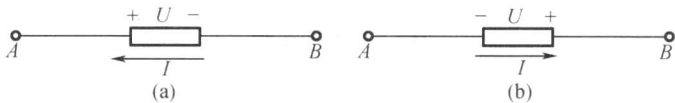


图 1.5 非关联参考方向

## 1.4 电功率和能量

在电路的分析和计算中,对能量和功率的计算十分重要。这是因为电路在工作时总伴随着电能与其他形式能量的相互转换;另外,电气设备、电路元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、元件损坏,或是不能正常工作。

电功率与电压和电流密切相关。正电荷从电路元件上电压的“+”极经元件移到电压的“-”极是电场力对电荷做功的结果,这时电路元件吸收能量;反之,正电荷从“-”极移到“+”极,则必须由外力(化学力、电磁力等)对电荷做功以克服电场力,这时电路元件发出能量。

若某元件两端的电压为  $u$ , 在  $dt$  时间内流过该元件的电荷量为  $dq$ , 那么根据电压的定义式(1-2), 电场力做的功  $dW(t) = u(t)dq(t)$ 。

在电流与电压为关联参考方向的情况下(这时,正电荷从电压的“+”极移到“-”极), 由式(1-1)可得在  $dt$  时间内电场力所做的功, 即该元件吸收的能量为

$$dW(t) = u(t)i(t)dt$$

从时间  $t_0$  到  $t$ , 元件吸收的能量为

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \quad (1-3)$$

能量对时间的变化率称为电功率。于是, 电路元件的电功率  $P(t)$  为

$$P(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t)i(t) = ui \quad (1-4)$$

电功率简称功率, 单位是 W(瓦特, 简称瓦)。如果  $P > 0$ , 表示元件吸收功率; 如果  $P < 0$ , 表示元件发出功率。

**例 1.1** 如图 1.6 所示, 计算图中电路元件功率, 说明是吸收功率还是发出功率。

**解** 图 1.6(a) 中, 电压与电流为非关联方向, 有

$$P = -ui = -3 \times 1 = -3 \text{ W (发出功率)}$$

图 1.6(b) 中, 电压与电流为关联方向, 有

$$P = -ui = -3 \times (-1) = 3 \text{ W (吸收功率)}$$

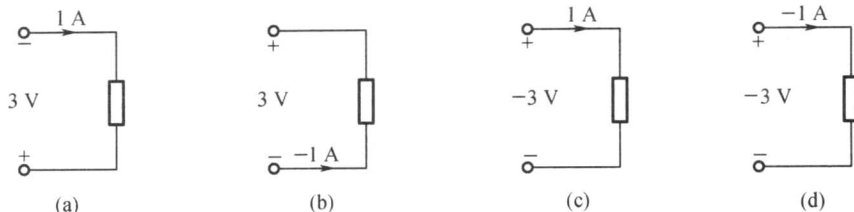


图 1.6 例 1.1 图

图 1.6(c) 中, 电压与电流为关联方向, 有

$$P = ui = (-3) \times 1 = -3 \text{ W (发出功率)}$$

图 1.6(d) 中, 电压与电流为关联方向, 有

$$P = ui = (-3) \times (-1) = 3 \text{ W (吸收功率)}$$

**例 1.2** 如图 1.7 所示, (a) 图为实际电路, (b1) 图到 (b4) 图均为 (a) 图的电路模型, 它们参考方向的设定不同。已知电源的电压为  $1.5 \text{ V}$ , 小灯泡的阻值为  $10 \Omega$ 。试分析电阻的电压、电流和功率, 并判别参考方向的设定是否影响电路分析结果。

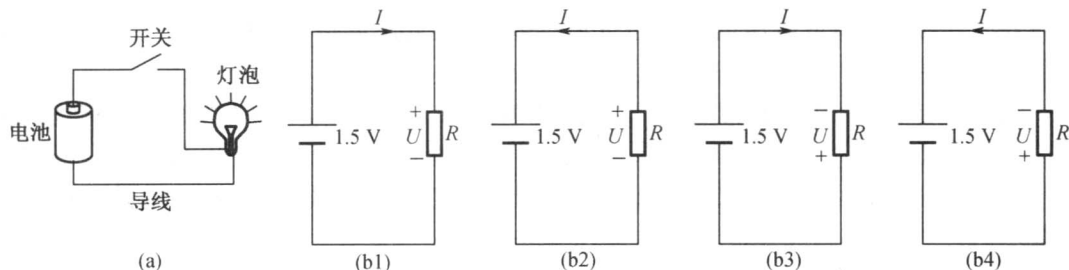


图 1.7 例 1.2 图

**解** 图 1.7(b1) 中, 电压  $U = 1.5 \text{ V}$ ; 电阻的电压、电流取关联参考方向, 则电流  $I = \frac{U}{R} = \frac{1.5}{10} = 0.15 \text{ A}$ ; 电阻的功率  $P = UI = 1.5 \times 0.15 = 0.225 \text{ W}$ 。

依据  $U > 0$ , 可知电压的实际方向与参考方向同向, 是向下的; 依据  $I > 0$ , 可知电流的实际方向与参考方向同向, 是顺时针的; 依据  $P > 0$ , 可知电阻吸收功率。

图 1.7(b2), 电压  $U = 1.5 \text{ V}$ ; 电阻的电压、电流取非关联参考方向, 则电流  $I = -\frac{U}{R} = -\frac{1.5}{10} = -0.15 \text{ A}$ ; 电阻的功率  $P = -UI = -1.5 \times (-0.15) = 0.225 \text{ W}$ 。

依据  $U > 0$ , 可知电压的实际方向与参考方向同向, 是向下的; 依据  $I < 0$ , 可知电流的实际方向与参考方向反向, 是顺时针的; 依据  $P > 0$ , 可知电阻吸收功率。

图 1.7(b3), 电压  $U = -1.5 \text{ V}$ ; 电阻的电压、电流取非关联参考方向, 则电流  $I = -\frac{U}{R} = -\frac{-1.5}{10} = 0.15 \text{ A}$ ; 电阻的功率  $P = -UI = -(-1.5) \times 0.15 = 0.225 \text{ W}$ 。

依据  $U < 0$ , 可知电压的实际方向与参考方向反向, 是向下的; 依据  $I > 0$ , 可知电流的实际

实际方向与参考方向同向,是顺时针的;依据  $P > 0$ ,可知电阻吸收功率。

图(b4),电压  $U = -1.5 \text{ V}$ ;电阻的电压、电流取关联参考方向,则电流  $I = \frac{U}{R} = \frac{-1.5}{10} = -0.15 \text{ A}$ ;电阻的功率  $P = UI = (-1.5) \times (-0.15) = 0.225 \text{ W}$ 。

依据  $U < 0$ ,可知电压的实际方向与参考方向反向,是向下的;依据  $I < 0$ ,可知电流的实际方向与参考方向反向,是顺时针的;依据  $P > 0$ ,可知电阻吸收功率。

以上的分析说明,电压、电流参考方向的设定并不影响电路的分析结果,在不同参考方向设定的环境下,电路分析结果均与实际情况相符合。

## 1.5 理想电路元件

实际电路所应用的元、器件品种繁多,而且还在不断地出现各种新的器件,如果以实际电路为分析对象,现阶段是不适当也是不可能的。前面我们提到为了能够运用数学工具分析实际电路,需要忽略实际电路的次要性质,在一定条件下建立足以表征实际电路主要物理性能的电路模型。这就需要对实际电路进行科学的抽象与概括,用一些具有确定电磁性质的、具有精确数学定义的理想电路元件来表征实际电路元件的主要电磁性能。理想电路元件的特性通过与端子有关的电路物理量描述,元件的两个端子的电路物理量之间的函数关系称为元件的端子特性(亦称元件特性)。

理想电路元件有三个特征:①只有两个端子,这些端子是连接其他电路元件的连接点;②可以用数学方式描述电压或电流;③不能被分解为其他元件。“理想”一词意味着理想电路元件并不像实际电路元件那样真实地存在,然而为了模拟实际电路和实际电路元件,理想电路元件可以被连接。我们前面提到的高频条件下的线圈模型,就是由理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件互联而成的。理想电路元件是为了建立实际电路的模型而提出的元件,常见的有电阻元件、电容元件、电感元件、独立电源和受控电源,它们都有精确的数学定义,是构建电路模型的基本单元。本书中所有的电路模型也都是由理想电路元件互联而成的。

## 1.6 电 阻

电阻器是实际元件,在电路中通常起分压、降压、分流、限流的作用。电阻元件是电路模型的基本元件之一,它是从对电流呈现阻碍作用的实际电路元器件中抽象出来的模型。电阻器和电阻元件是两个不同的概念。

电阻器的主要物理特征是变电能为热能,是一种耗能元件。电阻器按阻值特性可分为固定电阻、可调电阻、特种电阻(光敏电阻、压敏电阻、热敏电阻)等;按制造材料可分为碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等;按安装方式可分为插件电阻、贴片电阻等。应根据不同的电路特点选用适合的电阻器,如高频电路希望分布参数越小越好,应选用金属膜电阻、金属氧化膜电阻等高频电阻器;功率放大电路、偏置电路、取样电路对稳定性要求比较高,应选温度系数小的电阻器。



电阻器和其他电路元器件通电后,会显示出热效应、磁场效应和电场效应,其中的热效应常用电阻元件来表征。电阻元件是这样定义的,如果一个电路元件在任意时刻的电压  $u$  与电流  $i$  的关系由  $u-i$  平面上一条曲线确定,则此二端元件称为电阻元件,其数学表达式为

$$f(u, i) = 0 \quad (1-5)$$

这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线,它表明了电阻元件电压与电流间的约束关系 (Voltage Current Relationship, 简称为 VCR)。图 1.8 是线性时不变电阻的伏安特性曲线,通常电阻的伏安特性曲线都是在关联参考方向下绘制的。

任何时刻,电阻的电压电流关系 (VCR) 服从欧姆定律。在电压和电流取关联参考方向的情况下,其数学表达式为

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

在电压和电流取非关联参考方向的情况下,其数学表达式为

$$u = -Ri \quad (1-7)$$

其中,  $R$  称为电阻元件的电阻,是一个正实常数。电阻元件的图形符号见图 1.8(a); 当电压单位用 V, 电流单位用 A 表示时,电阻的单位是  $\Omega$  (欧姆, 简称

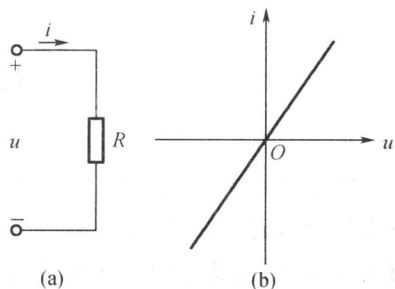


图 1.8 电阻元件及其伏安特性

欧)。有些情况,采用  $R$  的倒数来描述电阻元件更为合适,令  $G = \frac{1}{R}$ ,  $G$  称为电阻元件的电导,电导的单位是 S (西门子, 简称西)。  $R$  和  $G$  从不同的角度描述电阻元件的大小,它们都是电阻元件的参数。如采用  $G$ , 则式(1-6)可表示为

$$u = \frac{1}{G}i \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-8)$$

式(1-7)可表示为

$$u = -\frac{1}{G}i \quad \text{或} \quad i = -Gu \quad (1-9)$$

当电阻元件的电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时,电阻的功率为

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-10)$$

电阻的功率  $P$  恒为非负值,电阻只能吸收功率,电阻元件是一种无源元件。

电阻元件从  $t_0$  到  $t$  的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-11)$$

电阻元件一般把吸收的电能不能转换成热能消耗掉。

电阻元件有两种值得注意的特殊情况——开路和短路。其电压无论为何值,电流恒等于零的情况,称为开路。如图 1.9(a) 所示,开路的特性曲线与  $u$  轴重合,它相当于  $R = \infty$  或  $G = 0$  的情况。其电流无论为何值,电压恒等于零的情况,称为短路。如图 1.9(b) 所示,短路的特性曲线与  $i$  轴重合,它相当于  $R = 0$  或  $G = \infty$  的情况。如图 1.9(c) 所示,端子 1-1' 呈断开状态,这时称 1-1' 处于“开路”。如图 1.9(d) 所示,端子 1-1' 被理想导线连接起来,这时称 1-1' 处于“短路”。显然,电路中任何一根导线都是短路,与导线并联的元件电压也恒为零,称为该元件被短路。断去任何一根导线都是开路,与断开导线串联的元件亦被开路。