

普通高等教育“十二五”规划教材

电工学(上册)

DIANGONGXUE

电工技术

主编 艾永乐 副主编 王国东



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 学

上 册

电 工 技 术

主 编 艾永乐

副主编 王国东

参 编 张 伟 韩素敏 谢东垒 陈滢涛 王晓丹



机 械 工 业 出 版 社

《电工学 上册 电工技术》是普通高等教育“十二五”规划教材。本书共分10章,主要包括电路的基本概念与分析方法、正弦交流电路的稳态分析、三相电路、动态电路的暂态分析、变压器、电机与控制、继电器接触器控制等内容。

本书内容全面、深入浅出,知识体系结构合理,可作为工科非电类各专业的大、中专学生使用,也可作为相关工程技术人员的参考书。

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。

图书在版编目(CIP)数据

电工学.上册,电工技术/艾永乐主编.—北京:机械工业出版社,2011.12
普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-35838-1

I. ①电… II. ①艾… III. ①电工学—高等学校—教材②电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第184818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:于苏华 责任编辑:于苏华 王 荣 王小东

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:张 静 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·371千字

0 001—2 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-35838-1

定价:29.80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

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面防伪标均为盗版

前 言

“电工学”课程是高等工科院校非电类专业一门重要的专业基础课，它的主要任务是为学生学习专业知识和从事工程技术工作打好电工技术和电子技术的理论基础，并使他们受到必要的基本技能的训练。“电工学”课程知识覆盖面广，理论严密，逻辑性强，有广阔的工程背景，主要教学内容包括电路理论基本概念及简单分析方法，电机及控制，模拟电子技术和数字电子技术等。

《电工学》共分上、下两册。《电工技术》为上册，在编写过程中，编者力求突出工科教育特色，将知识点讲授与能力培养有机地结合起来，注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。例题和习题的选题反映了电工领域的新技术、新器件信息，并配以 Multisim 仿真例题与习题，加深学生的理解和认识。本书具有体系结构新颖、注重工程应用、启发思考、易于自学、理论紧密联系实际等特点。

本书共分 10 章，主要讲述电路理论的基础知识、变压器的基础知识、直流电动机、交流电动机、现代电机以及继电器接触器控制等内容。

参加本书编写工作的有张伟（第 1、5 章）、韩素敏（第 2 章）、谢东垒（第 3 章）、陈滢涛（第 4、6 章）、王晓丹（第 7、9 章）、艾永乐（第 8 章）和王国东（第 10 章）。艾永乐负责制定编写提纲，艾永乐、王国东负责全书的统稿工作。

本书在编写过程中，得到了国家级“三电”基础课程教学团队全体成员的大力支持，在此表示感谢。

由于编者水平所限，书中难免会有错误和不妥之处，恳切希望广大读者和同行给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念和基本定律 ... 1

1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 实际电路的组成及作用	1
1.1.2 电路模型	2
1.1.3 电流和电压的参考方向	4
1.1.4 电功率和电能	6
1.2 理想电路元件	9
1.2.1 电阻元件	9
1.2.2 电容元件	11
1.2.3 电感元件	13
1.2.4 独立源	15
1.2.5 受控源	17
1.3 基尔霍夫定律	18
1.3.1 几个概念	19
1.3.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)	19
1.3.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)	20
1.3.4 基尔霍夫定律的应用	21
本章小结	23
习题	23
Multisim 例题与习题	27

第2章 电路分析方法 29

2.1 电阻的串联与并联	29
2.1.1 电阻的串联	29
2.1.2 电阻的并联	31
2.1.3 电阻的混联	32
2.2 电阻的星形联结和三角形联结	33
2.2.1 电阻的星形联结和三角形联结 ...	33
2.2.2 惠斯顿电桥	33
2.2.3 电阻星形联结和三角形联结的 等效变换	33
2.2.4 输入电阻	35
2.3 电源的等效变换	37

2.4 支路电流法	40
2.5 节点电压法	42
2.6 叠加定理	46
2.7 等效电源定理	50
2.7.1 戴维南定理	50
2.7.2 诺顿定理	53
2.7.3 最大功率传输定理	54
本章小结	55
习题	55
Multisim 例题与习题	62

第3章 正弦交流电路的稳态分析 65

3.1 正弦量的三要素	65
3.1.1 周期与频率	65
3.1.2 幅值与有效值	66
3.1.3 相位与初相位	67
3.1.4 同频正弦量的相位差	67
3.2 相量法	68
3.2.1 同频正弦量的加减运算转化成 对应相量的加减运算	69
3.2.2 正弦量的微积分运算	70
3.3 电路定律的相量形式	70
3.3.1 相量形式的基尔霍夫定律	70
3.3.2 元件相量形式的电压电流关系 (VCR)	71
3.4 电阻、电感、电容元件串联、并联的 正弦交流电路	74
3.4.1 RLC 串联电路	74
3.4.2 RLC 并联电路	77
3.5 阻抗串并联电路分析	79
3.6 正弦交流电路的功率	83
3.6.1 瞬时功率	83
3.6.2 平均功率 (有功功率)	83
3.6.3 无功功率	84

3.6.4 视在功率·····	85	5.3.1 一阶 RL 电路的零输入响应 ···	134
3.7 功率因数的提高 ·····	86	5.3.2 一阶 RL 电路的零状态响应 ···	137
3.7.1 功率因数低存在的问题 ·····	86	5.3.3 一阶 RL 电路的全响应 ·····	138
3.7.2 功率因数低的原因 ·····	87	5.4 一阶动态电路暂态分析的三要	
3.7.3 提高功率因数的方法 ·····	87	素法 ·····	139
3.8 谐振电路 ·····	88	本章小结 ·····	142
3.8.1 串联谐振·····	88	习题 ·····	142
3.8.2 并联谐振·····	93	Multisim 例题与习题 ·····	144
本章小结 ·····	95		
习题 ·····	95	第 6 章 变压器 ·····	147
Multisim 例题与习题 ·····	99	6.1 磁路 ·····	147
第 4 章 三相电路 ·····	104	6.1.1 磁场的基本物理量·····	147
4.1 三相电路的基本概念 ·····	104	6.1.2 磁性材料的磁性能·····	148
4.2 对称三相电路的分析 ·····	106	6.1.3 磁路的分析方法 ·····	150
4.2.1 负载星形联结的三相电路 ·····	106	6.1.4 交流铁心线圈 ·····	152
4.2.2 负载三角形联结的三相		6.2 变压器的工作原理和性能指标 ·····	154
电路 ·····	111	6.2.1 变压器的工作原理·····	154
4.3 三相电路的功率 ·····	112	6.2.2 变压器的外特性 ·····	159
4.4 安全用电技术简介 ·····	114	6.2.3 变压器的损耗与效率 ·····	160
4.4.1 发电和输电概述 ·····	114	6.2.4 变压器的额定值 ·····	160
4.4.2 工业企业配电 ·····	115	6.2.5 变压器绕组的极性·····	161
4.4.3 安全用电 ·····	116	6.3 特殊变压器 ·····	162
本章小结 ·····	121	本章小结 ·····	163
习题 ·····	121	习题 ·····	164
Multisim 例题与习题 ·····	123	Multisim 例题与习题 ·····	165
第 5 章 动态电路的暂态分析 ·····	124	第 7 章 直流电动机 ·····	166
5.1 换路定律与电路的初始值·····	124	7.1 直流电机的结构和分类 ·····	166
5.1.1 动态电路产生暂态过程的		7.1.1 直流电机的结构 ·····	166
原因 ·····	124	7.1.2 直流电机的分类 ·····	167
5.1.2 换路定律 ·····	125	7.2 直流电机的工作原理 ·····	168
5.1.3 动态电路初始值的确定 ·····	125	7.2.1 直流电动机的工作原理 ·····	168
5.2 一阶 RC 电路的暂态分析 ·····	127	7.2.2 电枢电动势与电磁转矩 ·····	168
5.2.1 一阶 RC 电路的零输入		7.3 他励直流电动机 ·····	169
响应 ·····	127	7.3.1 他励直流电动机的稳态方程 ···	169
5.2.2 一阶 RC 电路的零状态		7.3.2 他励直流电动机的机械特性 ···	170
响应 ·····	130	7.3.3 他(并)励直流电动机的	
5.2.3 一阶 RC 电路的全响应 ·····	131	起动 ·····	171
5.3 一阶 RL 电路的暂态分析 ·····	134	7.3.4 他(并)励直流电动机的	
		调速 ·····	172

7.3.5 他(并)励直流电动机的 反转	175	9.1.2 直流伺服电动机	201
7.4 串励直流电动机	175	9.2 测速发电机	201
7.4.1 串励直流电动机的机械特性 ...	175	9.2.1 交流测速发电机	201
7.4.2 串励直流电动机的起动	176	9.2.2 直流测速发电机	203
7.4.3 串励直流电动机的调速和 反转	176	9.3 步进电动机	204
本章小结	177	9.3.1 步进电动机的结构	204
习题	177	9.3.2 步进电动机的工作原理	204
第8章 三相异步电动机	178	9.3.3 步进电动机的应用	207
8.1 三相异步电动机的结构	178	9.4 开关磁阻电动机	207
8.2 三相异步电动机的工作原理	179	本章小结	209
8.2.1 旋转磁场	179	习题	209
8.2.2 工作原理	182	第10章 继电接触器控制	210
8.3 三相异步电动机的电路分析	183	10.1 常用低压控制电器	210
8.3.1 定子电路分析	183	10.1.1 手动电器	210
8.3.2 转子电路分析	184	10.1.2 自动电器	212
8.4 三相异步电动机的电磁转矩与机械 特性	185	10.2 基本控制环节	216
8.4.1 电磁转矩	186	10.2.1 带有自锁的三相异步电动机的 起动控制	217
8.4.2 三相异步电动机的机械特性 ...	186	10.2.2 电动机的点动控制	217
8.5 三相异步电动机的起动、调速和 制动	188	10.2.3 电动机的两地控制	218
8.5.1 三相异步电动机的起动	188	10.2.4 电动机的顺序控制	218
8.5.2 三相异步电动机的调速	190	10.2.5 电动机的正反转控制	219
8.5.3 三相异步电动机的反转与 制动	191	10.2.6 电动机的时间控制	220
8.6 三相异步电动机的铭牌和技术 数据	193	10.2.7 自动往返行程控制	220
8.6.1 铭牌	193	10.3 电动机的保护环节	221
8.6.2 技术数据	195	10.3.1 短路保护	221
本章小结	197	10.3.2 欠电压与零压保护	222
习题	197	10.3.3 过载保护	222
第9章 现代电机	199	10.3.4 单相运行报警显示	222
9.1 伺服电动机	199	10.4 应用举例	223
9.1.1 交流伺服电动机	199	本章小结	225
		习题	225
		附录	227
		参考文献	240

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

本章是电工学课程的基础内容，着重阐述电路的基本概念和基本定律，重点讨论电路模型、电流和电压的参考方向、电功率的计算、基本的理想电路元件和基尔霍夫定律等基础知识，这些内容是进行电路分析的基础，务必深刻理解和牢固掌握，为学习后续内容奠定坚实的理论基础。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 实际电路的组成及作用

实际电路是由电气器件和电气设备用导线相互连接，为实现某种功能而构成的电流通路，如日常生活中最常见的电灯、收音机、电视机、计算机等的实际电路中就包含各种基本的电路元器件（如电阻器、电容器、电感器、二极管、晶体管、变压器和指示灯等）。

由电源、白炽灯、导线和开关组成一个简单的手电筒电路如图 1-1 所示。当开关闭合时，电流从电源的正极通过导线流过白炽灯中的灯丝，并回到电源负极。

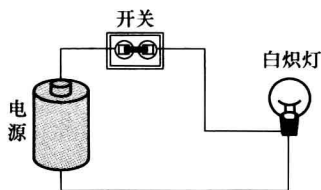


图 1-1 手电筒电路

实际电路有的很简单，例如手电筒电路；有的很复杂，例如计算机电路；有的几何尺寸很大，例如电力系统电路，其范围覆盖几十、几百平方千米；有的尺寸很小，例如集成电路，其面积只有指甲大小。但从本质上来说，它们都是由三个基本部分组成，即电源、负载和控制环节，称之为电路组成的三要素。

电源是产生并提供电能的设备，它将动能、化学能、光能等非电能量转换成电能量。常见的电源有发电厂的发电机、蓄电池和干电池等。信号源是产生电信号的发生器，它将非电信号转换成电信号。电源和信号源又称为激励或激励源，在电路中产生的电压和电流则称为响应，在电子电路中又经常将激励和响应称为电路的输入信号和输出信号。负载通常指用电设备，它将电能转换成热能、光能、动能等其他形式的能量，在电路中吸收电能或消耗电能。常见的负载有照明灯、电炉、电动机、扬声器等。中间环节是连接电源（或信号源）与负载的部分，在电路中起着传输电能、控制与保护、传送信号等作用，通常由导线、开关和熔断器等电气器件组成。

随着电子科技的飞速发展，实际电路种类繁多，功能各异，但是不论电路具有何种形

式,就其功能来说主要有两个方面:一方面功能是进行电能的传输和能量的转换。例如电力系统中的输电电路,如图 1-2a 所示,发电厂的发电机组将其他形式的能量(热能或水的势能或原子能等)转换成电能,再通过变压器、输电线等输送给各用户,将电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)和热能(如负载是电炉),为人们生产、生活所利用。上述手电筒电路也属于此类功能。另一方面功能是进行信号的传递和处理。例如图 1-2b 所示的小信号放大电路,它将信号源的微弱信号通过放大电路进行不失真地放大处理,然后传送给负载;滤波电路将输入信号中不需要的频率分量滤除,仅将所需要的频率分量传送给负载,即对输入信号进行加工处理。这一类电路的作用主要是尽可能准确地传递和处理信号,通常电路中电压较低,电流和功率也较小,习惯上常称为“弱电”电路。

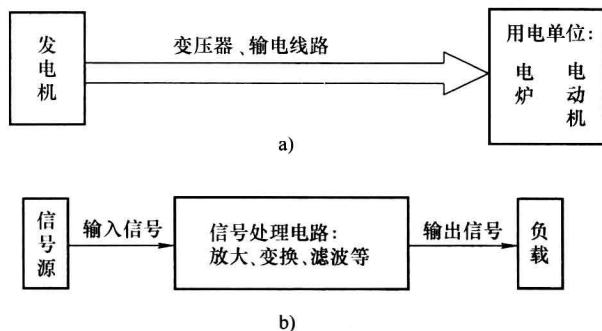


图 1-2 实际电路的作用

a) 电力系统中的能量传输和转换 b) 信号的传递与处理

1.1.2 电路模型

1. 理想电路元件

实际的电气元器件在工作时产生的电磁现象比较复杂,例如一个实际电阻器在正常工作时除了消耗电能外,还会在电流流过时产生磁场,因而兼有电感的性质;而一个实际电容器和电感线圈除了分别具有储存电场能量和磁场能量的基本性质外,也有电能的消耗,这样就给分析电气元器件组成的电路带来了困难。实际中,在对电路进行分析时,往往对实际电气元件进行理想化处理,略去其次要的电磁性质,用一个足以表征实际元件主要电磁性质的理想电路元件来表示,使问题得到合理的简化,然后再对电路进行定量分析。

理想电路元件是对实际电路元件的科学抽象和简化,实际上是一种数学模型,用国家规定的标准符号表示。实际电路各种各样,实际元件的电磁性质也较复杂,但实际元件中的电磁性质主要有 5 种,即消耗能量、储存电场能量、储存磁场能量、提供电能或电信号,以及电路中一处控制另一处的电磁现象。通过对其进行理想化处理,得到电路分析中 5 种基本理想电路元件:理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想独立源和理想受控源,本章第 2 节将介绍这 5 类基本理想电路元件的相关知识。

为了规范化,我国统一规定了理想电路元件的图形符号,5 种基本理想电路元件的电路符号如图 1-3 所示。

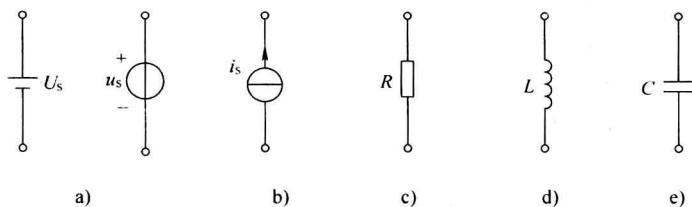


图 1-3 理想电路元件的符号

a) 电压源 b) 电流源 c) 电阻元件 d) 电感元件 e) 电容元件

实际中, 将这些基本的理想电路元件进行组合便可描述多数情况下电路的电磁现象。需要指出的是, 在不同的工作条件下, 同一个实际电气元件的模型是不相同的。例如, 电感线圈是由铜线绕制而成的, 当它通以电流时具有 3 种电磁性质, 即储存磁场能量的电感性质、消耗电能的电阻性质、匝与匝之间储存电场能量的电容性质, 在不同的工作条件下, 电感线圈的模型不尽相同: 在直流电路中突出其消耗电能的电阻性质, 用理想电阻元件作为它的模型; 在低频电路中突出其储存磁场能量和消耗电能的电磁性质, 用理想电感元件和理想电阻元件的串联组合作为它的模型; 若全面考虑其电磁性质, 可用理想电感元件与理想电阻元件相串联再与理想电容元件的并联组合作为它的模型。

2. 电路模型

对于一个实际电路, 将电路中的元件用理想电路元件替代, 得到的可用电路符号表示的电路, 称之为电路模型或电路图。

图 1-1 所示的手电筒电路中, 若用理想电阻元件 R 作为白炽灯泡的模型, 用理想电压源 U_s 和理想电阻元件 R_s 的串联组合作为干电池的模型, U_s 描述电池电源电压, R_s 描述电池的内部电阻 (常称为电源的内阻), 用理想导线作为实际导线, 可得到手电筒电路的电路模型, 如图 1-4 所示。

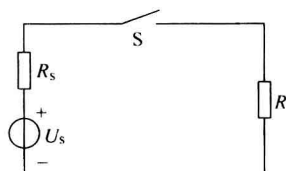


图 1-4 手电筒电路的电路模型

一个实际的电路只要电路模型选择恰当, 按照对应的电路模型 (电路图) 进行分析计算, 不但可使分析过程简化, 而且与实际测量结果基本一致; 相反, 若电路模型选择不合理 (过于复杂或过于简单), 分析计算的结果与实际差距较大, 此时的结论便没有意义。

3. 集总参数电路和集总化条件

理想电路元件又称为集总参数元件, 简称集总元件。由集总元件构成的电路模型就称为集总参数电路, 简称集总电路。

实际中, 用集总元件 (理想电路元件) 作为实际电气器件的模型是有条件的, 该条件被称为电路的集总化条件, 即实际电路的尺寸 d 应远小于其工作频率所对应的波长 λ , 数学表达式为 $d \ll \lambda$ 。

当实际电路满足集总化条件时,实际电路的尺寸可以忽略,电路的大小和形状不影响电路的特性,即电路图只反映元件相互连接的关系,并不反映元件的实际空间位置。如电路图中的导线为理想导线,在电路模型中可以根据需要将线画得长一些或短一些,因此同一个电路可以画出几种不同形状的电路图。

而实际电路都具有一定的尺寸,用集总参数电路作为实际电路的模型只是一种近似描述,是一种理想化模型。如果实际电路不满足集总化条件,就不能用集总参数电路作为它的模型,应该用分布参数电路的概念和理论对其进行分析。例如电力系统电路,工作电压和电流的频率为 50Hz,对应的波长 $\lambda = 6000\text{km}$,一般的市内照明电路以及工厂的动力电路的几何尺寸在几至几十千米,远小于波长 λ ,所以可以用集总电路描述。但如果是远距离输电线路长达 1500km 时,就不满足集总化条件,这时应将电路作为分布参数电路进行处理。本书中只讨论集总参数电路的分析计算,分布参数电路的分析如有需要请参考其他相关教材。

1.1.3 电流和电压的参考方向

电流、电压、电功率和能量是电路的基本物理量,电流和电压表征电路的工作状态,电功率和能量表征电路的性能。电路分析的基本任务就是对给定的相关电路模型进行分析计算,主要分析这 4 个物理量。由功率、能量、电压和电流的关系可知,若已知某一电路电流和电压可计算出相应的功率和能量。因此电路分析中常将电流和电压称为电路分析的两大基本变量。

1. 电流的定义与实际方向

(1) 电流的定义

电荷有规则的定向移动便形成了电流,定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,数学表达式为

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

电流的单位为安培(简称安),用字母 A 表示。在电路分析中,所有的物理量均采用国际单位制(SI 制)。对于较小的电流可用毫安(mA)、微安(μA),甚至用纳安(nA)表示,它们之间的换算关系为

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} = 10^9\text{nA}$$

一般用小写字母 i 表示随时间变化的电流;若电流是常数,则称为直流电流或恒定电流,可用大写字母 I 表示。

(2) 电流的实际方向

图 1-5 中的小方框代表一个理想电路元件,电流的实际方向只有两种可能,从 A 流向 B 或从 B 流向 A。规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。因此,图 1-5 中虚线箭头即为元件电流的实际方向。

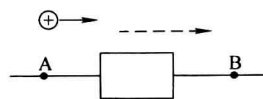


图 1-5 电流的实际方向

2. 电压的定义与实际方向

(1) 电压的定义

电压是电路中两点之间的电位差，在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功，或等于两点之间的电位之差，即

$$u_{AB} = \frac{dW}{dq} = u_A - u_B \quad (1-2)$$

电压的单位为伏特（简称伏），用字母 V 表示。电压单位在不同的场合下有不同的表示，较大的电压单位用千伏（kV），较小的电压单位用毫伏（mV）表示，更小的电压单位可用微伏（ μV ）表示，它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, 1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

一般用小写字母 u 表示随时间变化的电压；若电压是常数，则称为直流电压或恒定电压，可用大写字母 U 表示。

(2) 电压的实际方向

电压的实际方向规定为由高电位经过元件指向低电位，即电位真正降低的方向，如图 1-6 中虚线箭头所示。

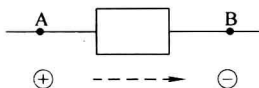


图 1-6 电压的实际方向

3. 电流和电压的参考方向

(1) 参考方向的引入

由于实际的电路大多都很复杂，在对电路进行分析计算时，事先很难判断出元件中电流和电压的实际方向，而且除直流电路外，电路中的电流和电压还随时间变化，不但大小变化，方向也变化，如交流电路中的电压和电流，这样更不容易确定电流和电压的实际方向，所以为了便于电路的分析，引入了电流和电压参考方向的概念。

参考方向是人为的、任意假定的一个方向，是电路分析中非常重要的概念，下面分别对电流和电压的参考方向进行说明和讨论。

(2) 电流的参考方向

对于一个元件，任意指定一个方向，如图 1-7a 的实线箭头所示，假设这个方向就是电流的方向，这个假设的方向称为电流的参考方向。所选的参考方向不一定是电流的实际方向，与实际方向可能相同或相反。当按照指定的参考方向进行计算时，若得到的电流 $i > 0$ （正值），则电流的实际方向与参考方向一致；若得到的电流 $i < 0$ （负值），则电流的实际方向与参考方向相反。

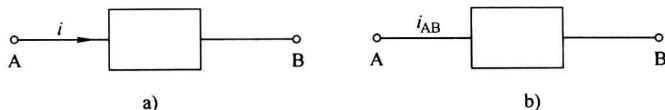


图 1-7 电流的参考方向标注

a) 箭头表示法 b) 双下标表示法

可以进一步得出下面的结论：在假定的参考方向下，根据计算电流数值的正负号就可以确定实际方向。

电流的参考方向有两种表示方法，一种是用实线箭头表示，如图 1-7a 所示；另一种用双下标表示，如图 1-7b 所示，电流 i_{AB} 表示电流的参考方向由 A 指向 B。

(3) 电压的参考方向

对于一个元件，任意指定一个方向，如图 1-8a 的实线箭头所示，这个假设的方向就称为电压的参考方向。按照指定的参考方向进行计算，若得到的电压 $u > 0$ （正值），则电压的实际方向与参考方向一致；若得到的电压 $u < 0$ （负值），则电压的实际方向与参考方向相反。这样，可以通过假设的电压参考方向和计算得到的电压便可判断实际电压的方向。

常用的电压参考方向有 3 种表示方法：采用实线箭头表示，如图 1-8a 所示；采用正负极性表示，如图 1-8b 所示，电压的参考方向从“+”极性指向“-”极性；采用双下标表示，如图 1-8c 所示，电压 u_{AB} 表示电压的参考方向由 A 指向 B。在电路图中最经常使用的是正负极性标注方法，电压的参考方向又称参考极性。

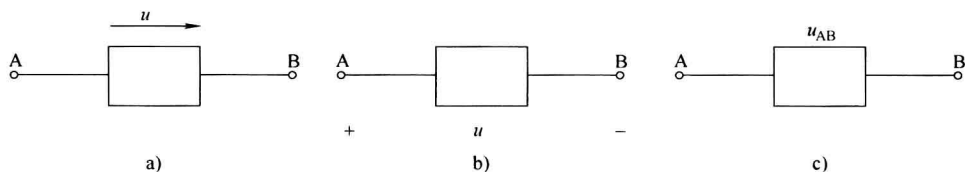


图 1-8 电压的参考方向标注

a) 箭头表示法 b) 正负极性表示法 c) 双下标表示法

引入了参考方向后，电流 i 和电压 u 变成了代数量，其值可正可负，正负号反映了实际方向与参考方向是否一致的关系。

4. 关联和非关联参考方向

对同一个研究对象（如某一个元件或某一段电路），若电压 u 与电流 i 的参考方向选得一致，称 u 与 i 取关联参考方向，如图 1-9a 所示；若电压 u 与电流 i 的参考方向选得相反，称 u 与 i 取非关联参考方向，如图 1-9b 所示。

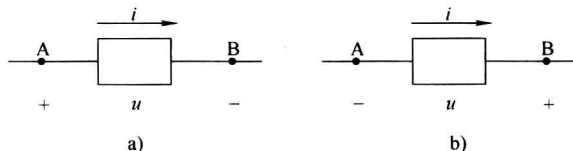


图 1-9 电压与电流的关联参考方向

a) u 与 i 取关联参考方向 b) u 与 i 取非关联参考方向

实际中，为了分析计算方便，对于负载通常选取 u 与 i 为关联参考方向。

1.1.4 电功率和电能

电路中，电流和电压两个物理量反映电路的工作状态，而电路的工作性能一般要由功

率和能量进行表征；每个器件、设备都有额定功率，工作时不允许超过额定值，否则有可能损坏器件、设备或使电路不能正常工作；同时任何一个电路在正常工作时总要伴随着能量的转换和效率问题，因此在电工和电子电路中，电功率和电能量也是两个重要参数。

1. 电功率

(1) 电功率的计算式

电功率是能量对时间的变化率，结合电流、电压定义式，可以得到功率的计算式为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

功率的单位为瓦特（简称瓦），用字母 W 表示。

当电压、电流是时间的函数 $u(t)$ 、 $i(t)$ 时， p 也是时间的函数，即 $p(t)$ ，称为瞬时功率。如果是直流电路，电压 u 和电流 i 可用大写字母 U 、 I 表示，则功率为常量，用大写 P 表示，计算公式可写为

$$P = UI \quad (1-4)$$

(2) 元件吸收（发出）功率的判断

引入参考方向后，电压 u 和电流 i 均为代数量，由式（1-3）可知功率 p 也是一个代数量，功率 p 的绝对值表示大小，正负号表示元件吸收或发出功率。

对任意元件判断吸收或发出功率的一般原则如下：当 u 与 i 取关联参考方向时，由公式 $p = ui$ 计算功率，当 $p > 0$ 时，说明元件吸收功率，当 $p < 0$ 时，说明元件发出功率；当 u 与 i 取非关联参考方向时，由公式 $p = -ui$ 计算功率，当 $p > 0$ 时，说明元件吸收功率，当 $p < 0$ 时，说明元件发出功率。

上面给出的关于功率的计算方法同样适用于电路中任何的一部分电路。图 1-10 的方框 N 代表某一部分电路，它由两个端子与外电路连接，其两端电压为 u ，流过的电流为 i ，讨论电路 N 的电功率仍可由式（1-3）计算，结论与上述对元件的结论相同。

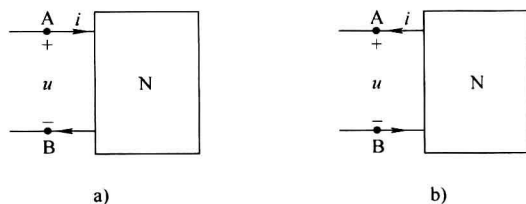


图 1-10 电路的功率

a) u 与 i 取关联参考方向 b) u 与 i 取非关联参考方向

2. 电能量

(1) 能量的计算式

由于功率和能量之间具有微积分关系，即功率是能量的变化率 $p = \frac{dW}{dt}$ ，因此，能量的表达式

$$W = \int p dt \quad (1-5)$$

电能量的单位为焦耳（简称焦），用字母 J 表示。工程上常使用千瓦·时（kW·h）

作为电能单位。在 $t_0 \sim t$ 时间内, 元件吸收或释放的电能量为

$$W(t) = \int dW = \int_{t_0}^t u i dt = \int_{t_0}^t u(t) i(t) dt \quad (1-6)$$

若元件电压 u 和电流 i 是时间的函数, 这时电能量也是时间的函数, 即 $W(t)$; 当 t_0 和 t 是确定值时, W 也是确定值。在直流电路中, 电路中的电流和电压都是恒定值, 则能量的计算式可以简化成

$$W = \int_{t_0}^t UI dt = UI(t - t_0) = UI\Delta t \quad (1-7)$$

式中, U 为元件两端的电压; I 为流过元件的电流; 电能量 W 为常量。

(2) 判断元件吸收(发出)电能量

判断元件吸收或放出能量的原则和步骤与判断元件吸收或发出功率的判断准则一致, 即:

当 u 与 i 取关联参考方向时, 由公式 $W(t) = \int_{t_0}^t u(t) i(t) dt$ 计算电能量, 当 $W > 0$ 时, 说明元件吸收电能量; 当 $W < 0$ 时, 说明元件释放电能量。

当 u 与 i 取非关联参考方向时, 由公式 $W(t) = - \int_{t_0}^t u(t) i(t) dt$ 计算电能量, 当 $W > 0$ 时, 说明元件吸收电能量; 当 $W < 0$ 时, 说明元件释放电能量。

在实际中, 较多地利用功率的计算式来进行某一元件或某一部分电路吸收或发出功率(能量)的判断。

例 1-1 电路如图 1-11 所示, 已知电压 $U = 50V$, 电流 $I_1 = -10A$, $I_2 = -6A$, $I_3 = 4A$ 。试判断各元件吸收还是发出功率? 是电源还是负载?

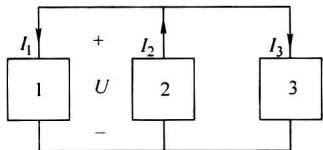


图 1-11 例 1-1 的电路图

解: 根据功率计算结果的正负值判断如下:

元件 1 的功率 $P_1 = UI_1 = 50V \times (-10A) = -500W < 0$, 元件 1 发出功率, 且元件 1 是电源;

元件 2 的功率 $P_2 = -UI_2 = -50V \times (-6A) = 300W > 0$, 元件 2 吸收功率, 且元件 2 是负载;

元件 3 的功率 $P_3 = UI_3 = 50V \times 4A = 200W > 0$, 元件 3 吸收功率, 且元件 3 是负载。

任何一个完整电路都应满足功率守恒, 即元件吸收的功率等于电源发出的功率。验证功率是否平衡是校验计算结果正误的有效方法。

3. 电气设备的额定值

电气设备的额定值是指导用户正确使用电气设备的技术数据, 是制造厂商为了使电气产品能够安全、经济运行而规定的容许值, 通常有额定电压、额定电流和额定功率 3 个参数, 分别用 U_N 、 I_N 和 P_N 表示。例如, 灯泡的电压 220V、功率 60W 就是指额定电压和额定

功率值。

额定电流是为了使电气设备工作温度不超过其最高允许温度，对电气设备长期运行时的最大容许电流设定的一个限制值。额定电压是为了限制电气设备的电流及限制绝缘材料承受的电压，设定的允许加在各电气设备上电压的一个限定值。额定功率是指电气设备正常运行时的输入功率或输出功率，在实际使用中不应超过额定值。

对于一般的电气设备，当电流超过额定值时，会引起设备的温度升高，过高的温度会使设备的绝缘材料过热而损坏；当电压超过额定值时，有可能击穿设备的绝缘材料。一般情况下，电气设备或器件按额定值要求使用时不会产生过热、绝缘击穿等问题。

根据电气设备电流、电压、功率的实际值与额定值的大小关系，电气设备有3种运行状态：当电流、电压和功率的实际值小于其额定值时，称设备为欠载运行状态，电气设备往往得不到充分利用；当电流、电压和功率的实际值大于其额定值时，称设备为过载运行状态，长时间的过载运行会缩短设备的使用寿命且易出现故障；当电流、电压和功率的实际值等于其额定值时，称设备为满载运行或称额定工作状态。电气设备只有在额定工作状态时，才能保证经济合理、安全可靠地运行。

对于电动机、变压器等设备，由于它们的负载是变化的，在使用时其电流或功率一般并不等于给定的额定值，实际电流的大小要由负载决定。因此，应尽可能合理选择此类设备，使它们能经常在接近额定值的状态下工作。

1.2 理想电路元件

理想电路元件是对实际电路元件进行合理、科学的抽象，它具有某种确定的电磁性质，并有精确的数学定义，可用规定的电路符号表示，同时也是构成电路模型的基本单元。以后若无特殊说明，本书所指的元件均为理想电路元件，简称电路元件。

电路元件按照不同的分类标准可分为不同的种类，如根据端子个数不同分为二端元件、三端元件及多端元件等；按元件的特性是用线性函数描述还是非线性函数描述，分为线性元件和非线性元件；按元件的特性是否随时间变化，分为时变元件和非时变元件等。本书主要介绍线性非时变电路元件。

电路元件通过端子与外部电路相连，因此元件的工作状态可以用其两端的电压和电流的关系来表征，称为元件特性约束 VCR (Voltage Current Relation)，它是电路分析的基本解题依据之一，在电路元件的学习中应注意重点把握。

本节将介绍5类基本的理想电路元件，包括理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想的独立源和受控源，熟练掌握这些元件的基本知识是进行后续电路分析的基础。下面对5类基本理想电路元件逐一进行讨论。

1.2.1 电阻元件

电阻元件广泛应用于电工、电子电路中，如金属丝白炽灯、电加热炉和各种电阻器等都是电阻元件的典型示例。它们的主要电磁性质是消耗电能或者把电能转换成其他形式的能量（如热能、光能和动能等）。为了方便电路的定量分析计算，只考虑其主要电磁性质，便得到了理想化模型——理想电阻元件，简称电阻元件。下面介绍线性非时变电阻元件，

一般实际中使用的诸如碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等都可近似看做是这类电阻。

1. 电阻元件的定义及符号

电阻元件的图形符号如图 1-12a 所示，它通过两个端子与外部电路连接，是一个二端元件。

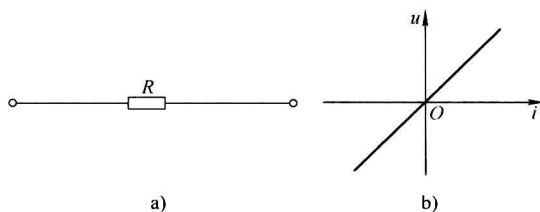


图 1-12 电阻元件和元件的伏安特性曲线

a) 符号 b) 伏安特性曲线

对于线性非时变的电阻元件，在任何时刻，元件两端的电压 u 与电流 i 的关系均满足欧姆定律，但欧姆定律的数学表达式与参考方向选择有关。

当 u 与 i 取关联参考方向时，欧姆定律为

$$u = Ri \quad (1-8)$$

式中， R 为元件的电阻参数，简称电阻，单位为欧（姆），用字母 Ω 表示。线性电阻的伏安特性曲线为经过原点的一条直线，如图 1-12b 所示，直线的斜率为它的电阻值。

若令 $\frac{1}{R} = G$ ，则有

$$i = Gu \quad (1-9)$$

式中， G 为电阻元件的电导参数，简称电导，单位为西（门子），用字母 S 表示。

当电压 u 与电流 i 取非关联参考方向时，如图 1-13b 所示，欧姆定律为

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

或

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



图 1-13 电阻元件的关联和非关联参考方向

a) u 与 i 取关联参考方向 b) u 与 i 取非关联参考方向

在使用欧姆定律时，一定要注意参考方向，它决定了电阻元件上电压和电流关系式（VCR）的正负号，习惯上取关联参考方向。

若电阻元件两端电压 u 为任意值时，流过的电流 i 恒为零，称此电阻为开路或断路，此时该元件相当于一个无穷大的电阻，相当于把电阻从电路中断开。若流过电阻元件的电流 i 为任何值时，电阻元件两端的电压恒为零，此时称为元件短路，相当于阻值为零的电阻，可用一条导线来代替该电阻进行电路的分析。

2. 功率与能量

电压 u 与电流 i 取关联参考方向时，根据功率计算式可得