



普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工原理

■ 舒朝君 主 编

■ 沈晓东 曾 琦 朱英伟 副主编

 中国工信出版集团



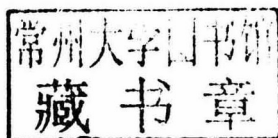
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电 工 原 理

舒朝君 主 编

沈晓东 曾 琦 朱英伟 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据长期为非电类学生和成人网络教育学生开设“电工学”课程（四川省省级精品课程）的教学实践和经验编写的。全书共 11 章。第 1 章电路基础知识，第 2 章直流电阻电路分析，第 3 章储能元件，第 4 章一阶线性电路的暂态分析，第 5 章正弦交流电路分析，第 6 章三相电路，第 7 章含有耦合电感的电路，第 8 章磁路与电磁能量转换，第 9 章电动机，第 10 章工业供电与用电安全，第 11 章电工测量。各章配有难易程度和数量恰当的思考题与习题。本书提供配套多媒体 PPT 和习题详解。

本书可作为高等学校非电类专业和成人网络教育、高等职业院校电工电子类及非电类专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工原理 / 舒朝君主编. — 北京: 电子工业出版社, 2018.3

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-32878-7

I. ①电… II. ①舒… III. ①电工—理论—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 247265 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.75 字数: 483 千字

版 次: 2018 年 3 月第 1 版

印 次: 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

电工学是高等学校本科非电类专业的一门重要的技术基础课程,是一些非电类专业唯一的电类课程,也是大专科电类和非电类专业必修的一门技术基础课程。它的主要任务是为今后学习专业知识和从事工程技术工作打好电工技术的理论基础,了解电工电子技术应用和我国电工电子事业发展的概况,了解电工电子技术领域中的新理论、新技术、新知识,获得电工电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,并受到必要的基本技能的训练。由于电工电子技术应用十分广泛,发展迅速,并且日益渗透到其他学科领域,在我国社会主义现代化建设中具有重要的作用,所以我校本科有十几个院校共几十个专业在学习这门课程,成人网络教育专科学生也在学习这门课程。

作者在多年的电工学教学中发现,国内电工学教材有很多,其中电机和控制的内容写得比较多,三相异步电动机、直流电机、控制电机、继电器接触控制、可编程控制器都有涉及,适合学生基础比较好、对电机和控制要求比较高的专业教学。但由于现在学生学习科目多,学时压缩严重,教材内容太多不利于学生掌握重点,况且有些专业的学生不需要学习那么多电机和控制的课程,所以有的学校一本书分多门课在用,大部分专业只用前面的内容,学电机的用后面的内容,学生只上一部分内容,造成很大的浪费。还有一些电工学教材又是另一种极端,仅仅写了电路分析,很少有电工应用方面的内容,仅仅编写了电磁铁。一些书安排内容顺序不合理,后面介绍的概念前面已经用这些知识讲例题了,不适合自学。一些电工学教材例题比较难,书后的思考题和练习题形式比较单一,发散思维的题很少,不适合现在的大班上课、小班讨论的形式。

四川大学电工电子实验教学中心长期为非电类学生和成人网络教育学生开设“电工技术”课程的教学和实验,电工学课程是四川省省级精品课程。为了适应 21 世纪教学内容、课程体系改革和发展的需要,培养学生理论联系实际的能力和创新能力,提高学生的动手和用电技术的能力,增强学生的实践经验,根据学生的专业需求提供不同的教学,为了实现创新人才培养计划,推动“探究式-小班化”教学改革,提升课程质量,又考虑这些年来实验室设备已进行多次更新,我们决定编写一本针对电机和控制要求不是很高的专业的学生教学用教材。

本书根据课程教学大纲,结合作者二十几年一本、二本、三本、网络成教“电工学”教学经验的积累,历时两年精心编写而成。全书共分为 11 章。第 1 章为电路基础知识,介绍电路的基本概念、基本定理;第 2 章为直流电阻电路分析,介绍电路等效变换方法、电路分析方法和电路定律;第 3 章储能元件,主要介绍电容、电感的基础知识;第 4 章介绍一阶线性电路的暂态分析;第 5 章正弦交流电路分析;第 6 章三相电路;第 7 章含有耦合电感的电路;第 8 章磁路与电磁能量转换;第 9 章电动机;第 10 章工业供电与用电安全;第 11 章电工测量。

本书尽量考虑非电类专业和大专网络教育的需求,而且针对电机和控制要求不是很高的专业的学生的教学需求。本书的特色是结构清晰、针对性强、覆盖面广。本书内容具有“通俗易懂,简明实用”“全而新”的特点。内容精要,深入浅出,便于阅读,特别在内容介绍的先后顺序上下了很大的功夫,避免了现有很多教材不完善、前后脱节、没有系统性的缺点。突出教学内容和课程体系的改革,注重归纳共性和总结规律,启发和引导学生的创新思维。电路分析尽量让人觉得简单易懂,电路部分重在基本概念、基本定律和基本方法的介绍,避免烦琐的公式推导和数学分析,加强物理概念的阐述,注重应用。比如节点法和回路法不推导整理通式,直接用 KCL、KVL 列方程解题,这样避免了学生学

了后面忘了前面如何代通式计算的问题。电路分析介绍的方法比较多,教师可以根据专业和学生层次选择几个方法讲解。暂态分析这章先引入一阶线性电路的经典法(时域分析法)和三要素法,然后用这两种方法介绍 RC 电路和 RL 电路的零输入、零状态、全响应的分析方法,学生就可以重点掌握用三要素法求解一阶线性电路的暂态过程这种方法。同时介绍了微分电路和积分电路。单相交流电路这章先介绍交流电路的基础知识,然后介绍交流电路的串联(KVL 定律、RLC 串联电路、阻抗的串联等效、串联谐振)、交流电路的并联(KCL 定律、RLC 并联、阻抗的并联等效、功率因数的提高、并联谐振)、复杂正弦稳态电路、正弦稳态电路的功率计算,这样循序渐进、归类讲解有助于学生掌握。三相交流电部分重点介绍对称三相电路的计算。本书不仅有电路的基础理论,后面还增加了对于非电专业相当有用的、难易程度恰当的电工知识,比如供电知识与安全用电、含有耦合电感的电路、变压器、电工测量基础、三相交流异步电动机。避免了现有国内电工学教材一些把电机和控制的内容写得比较多,学生感觉太难,而另一些教材仅仅写了电路分析,基本没有写应用等弊病。

每个章节知识点讲解部分概念清楚,讲解详细,通俗易懂。典型例题分析与解答部分精心挑选,具有一定的代表性,题量比较适中,尽量把可能的题型讲解到。习题可以起到复习巩固知识、加深学生对知识理解和记忆、培养学生能力的重要作用。本书依据笔者多年对不同程度学生的“电工学”这门课的授课经验,结合多本教材和题库的优势,从非电专业和高职高专学生出发,对多版本教材的习题数量、习题类型、习题素材等方面进行比较,决定每节后面应该有形式多样的练习与思考题,包括选择题、填空题、简答题等形式,每章后面附有恰当的练习题。以便读者掌握基本内容,提高分析问题、解决问题的能力。

本书可作为高等学校非电类专业和成人网络教育、高等职业院校电工电子类及非电类专业的教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

本书提供配套多媒体 PPT 和习题详解,请选用本书为教材的任课教师登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书第 1~4 章由舒朝君、冉舒婧编写,第 5 章由舒朝君、曾琦编写,第 6、10 章由沈晓东编写,第 7、8 章由曾琦编写,第 9、10 章由朱英伟编写。封面副主编根据编写章节排名,没有名次的区分。全书由舒朝君统稿和定稿。崔浩、王亚、罗春林、罗茜、吴天强研究生参与了前 5 章的编写及录入工作,在此表示感谢。

本书在编写过程中得到了四川大学精品立项建设教材项目的资助,得到了四川大学电气信息学院领导和电工电子教学实验中心领导与老师的帮助及支持,在此表示感谢。编写时参考了一些教材,已附于后面参考资料中,在此对作者表示感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间匆忙,书中错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2018 年 2 月于四川大学

目 录

第 1 章 电路基础知识	1	练习与思考	34
1.1 电路模型	1	2.3 电源等效变换	34
1.1.1 实际电路	1	2.3.1 理想电压源电路的等效	34
1.1.2 电路模型	2	2.3.2 理想电流源电路的等效	35
1.2 物理量及其参考方向	3	2.3.3 实际电源两种模型的等效变换	36
1.2.1 电流及其参考方向	3	练习与思考	37
1.2.2 电压、电位、电动势及其参考方向	4	2.4 支路电流法	38
1.2.3 电功率和电能	7	练习与思考	39
1.2.4 电气设备的额定值	8	2.5 网孔电流法	40
练习与思考	9	2.6 节点电压法	43
1.3 电阻元件与欧姆定律	9	练习与思考	46
练习与思考	11	2.7 叠加定理	46
1.4 电源元件	12	练习与思考	49
1.4.1 电压源	12	2.8 戴维南定理和诺顿定理	49
1.4.2 电流源	14	2.8.1 等效电源定理	49
1.4.3 电源与负载的判断	16	2.8.2 戴维南定理	50
1.4.4* 受控源	17	2.8.3 诺顿定理	52
练习与思考	19	练习与思考	53
1.5 基尔霍夫定律	19	2.9 最大功率传输定理	54
1.5.1 基尔霍夫电流定律	20	练习与思考	56
1.5.2 基尔霍夫电压定律	21	2.10 含受控源电路的分析	56
1.5.3 电位的计算	23	练习与思考	60
练习与思考	24	2.11 非线性电阻电路	60
习题	24	2.11.1 非线性电阻的伏安特性曲线	60
第 2 章 直流电阻电路分析	27	2.11.2 非线性电阻电路的分析与计算	61
2.1 电阻的串联和并联	27	练习与思考	64
2.1.1 电路等效变换的基本概念	27	习题	64
2.1.2 电阻的串联	28	第 3 章 储能元件	68
2.1.3 电阻的并联	29	3.1 电容元件	68
2.1.4 电阻的混联	30	3.1.1 电容器和电容量	68
练习与思考	31	3.1.2 线性电容的伏安关系	69
2.2 电阻的星形连接与三角形连接的等效变换	31	3.1.3 电容元件存储的电场能量	70
		3.1.4 电容元件的连接	73
		练习与思考	75

3.2	电感元件	75	5.3	3种基本电路元件电压电流关系	122
3.2.1	电感器和电感量	75	5.3.1	电阻元件欧姆定律的相量形式	122
3.2.2	线性电感的伏安关系	77	5.3.2	电感元件电压、电流的相量关系	123
3.2.3	电感元件存储的磁场能量	78	5.3.3	电容元件电压电流的相量关系	124
3.2.4	电感元件的连接	80	5.4	串联交流电路	126
	练习与思考	82	5.4.1	KVL 定律的瞬时值形式和相量形式	126
	习题	83	5.4.2	RLC 串联电路	127
第4章	一阶线性电路的暂态分析	85	5.4.3	复阻抗的串联等效	130
4.1	动态电路基础	85	5.4.4	正弦电路的串联谐振	131
4.2	电路初始值的计算	86		练习与思考	133
4.2.1	换路定则	86	5.5	并联交流电路	134
4.2.2	电路初始值的计算	87	5.5.1	KCL 定律的瞬时值形式和相量形式	134
	练习与思考	88	5.5.2	RLC 并联电路	134
4.3	暂态过程的分析方法	89	5.5.3	复阻抗的并联等效	138
4.3.1	经典法	89	5.5.4	正弦电路的并联谐振	139
4.3.2	三要素法	91		练习与思考	141
	练习与思考	93	5.6	正弦稳态电路的分析	141
4.4	RC 电路的响应	93		练习与思考	143
4.4.1	RC 电路的零输入响应	93	5.7	正弦稳态电路的功率	143
4.4.2	RC 电路的零状态响应	96	5.7.1	3种基本电路元件的功率	143
4.4.3	RC 电路的全响应	99	5.7.2	串联交流电路的功率	146
4.4.4*	微分和积分电路	101	5.7.3	串并联电路的功率	148
	练习与思考	104	5.7.4	提高功率因数的措施	150
4.5	RL 电路的响应	105	5.7.5*	复功率	152
4.5.1	RL 电路的零输入响应	105		练习与思考	153
4.5.2	RL 电路的零状态响应	107		习题	153
4.5.3	RL 电路的全响应	109	第6章	三相电路	156
	练习与思考	111	6.1	三相电源	156
	习题	111	6.1.1	对称三相电源	156
第5章	正弦交流电路分析	114	6.1.2	三相电源的星形连接	158
5.1	正弦交流电路的基本概念	114	6.1.3	三相电源的三角形连接	160
5.1.1	正弦交流电的参考方向	114	6.2	对称三相电路	162
5.1.2	正弦量的三要素	115	6.2.1	对称 Y-Y 电路	162
5.1.3	正弦交流电的有效值和相位差	116	6.2.2	对称 Y- Δ 电路	165
	练习与思考	118	6.3	三相电路的功率	167
5.2	正弦量的相量表示形式	119	6.3.1	三相平均功率	167
5.2.1	复数的概念	119			
5.2.2	正弦量的相量表示方法	120			
	练习与思考	122			

6.3.2	三相无功功率和三相视在功率	168	8.5	电磁能量转换	215
6.3.3	三相瞬时功率	169	8.5.1	能量守恒原理	215
6.4	不对称三相电路	170	8.5.2	电磁能量转换的枢纽——耦合磁场	216
6.4.1	不对称 Y-Y0 电路	170		练习与思考	217
6.4.2	中点位移的概念	171	8.6	变压器的应用	217
习题		174	习题		219
第 7 章	含有耦合电感的电路	177	第 9 章	电动机	220
7.1	耦合电感	177	9.1	三相异步电动机的结构	220
7.1.1	互感系数和耦合系数	177	9.1.1	定子铁芯及定子绕组	220
7.1.2	同名端	178	9.1.2	绕线式转子和鼠笼式转子	221
7.1.3	互感电压	179	9.2	三相异步电动机的转动原理	221
	练习与思考	181	9.2.1	旋转磁场的产生	222
7.2	含有耦合电感电路的计算	181	9.2.2	旋转磁场的极数与转速	224
7.2.1	耦合电感的串联电路计算	181	9.2.3	异步电动机的转动原理	225
7.2.2	耦合电感的并联电路计算	183	9.3	三相异步电动机的电路分析	226
	练习与思考	186	9.3.1	定子电路	226
7.3	耦合电感的功率	186	9.3.2	转子电路	226
	练习与思考	189	9.4	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	228
习题		189	9.4.1	电磁转矩	228
			9.4.2	机械特性	228
第 8 章	磁路与电磁能量转换	191	9.5	三相异步电动机的铭牌数据和技术数据	231
8.1	电与磁	191	9.5.1	铭牌数据	231
	练习与思考	192	9.5.2	技术数据	234
8.2	磁路及其计算	192	习题		235
8.2.1	磁路	192	第 10 章	工业供电与用电安全	236
8.2.2	铁磁材料的基本性质	192	10.1	电力系统的基本概念	236
8.2.3	磁场的基本物理量	194	10.1.1	发电厂	236
8.2.4	磁路计算	194	10.1.2	变电所和配电所	238
	练习与思考	198	10.1.3	电力线路	238
8.3	交流铁芯线圈电路	198	10.1.4	电力负荷	238
8.3.1	基本原理与电磁关系	198	10.2	电力系统的额定电压和额定频率	239
8.3.2	功率与损耗	199	10.3	电力系统的接线方式	239
	练习与思考	200	10.4	安全用电	241
8.4	变压器	200	10.4.1	安全电流与电压	241
8.4.1	变压器的结构	200	10.4.2	对触电者的救助	242
8.4.2	变压器的工作原理	202	10.4.3	人体电阻	242
8.4.3	变压器的运行性能	208			
8.4.4	其他变压器	210			
	练习与思考	215			

10.4.4 接地与接零	243
习题	244
第 11 章 电工测量	245
11.1 电工测量与仪表的基本知识	245
11.1.1 测量的误差及其分析	245
11.1.2 电工测量仪表的基础知识	247

11.2 各种常见电量的测量	248
11.2.1 直流电流和直流电压的测量	248
11.2.2 交流电流和交流电压的测量	252
11.2.3 直流功率和三相功率的测量	255
习题	258
参考文献	259

第1章 电路基础知识

电路理论分析的对象是电路模型，而不是实际电路。本章先介绍电路模型，然后介绍电路分析中一些基本物理量（电流、电压、电动势和电位）的定义、计算公式和单位，以及实际方向和参考方向的概念，养成用参考方向来分析电路的习惯。介绍电阻元件和电源元件、它们的电压电流关系，以及电功率的计算方法。用参考方向和实际方向两种方法判断电源元件在电路里起电源作用还是负载作用。介绍电路分析的两个基本定律，欧姆定律和基尔霍夫定律，并用它们求解电路。

1.1 电路模型

1.1.1 实际电路

为了实现某种功能，用导线将一些实际电气器件连接起来，构成可供电流流通的通路，称为电路。实际电气器件分为3大类。

(1) 电源或信号源：电路中电能或信号的来源。一类电源的作用是将非电能转换成电能，例如，干电池将化学能转换为电能；发电机将机械能转换为电能。热能、水能、原子能、核能、太阳能等都可以转换为电能。另一类电源又称为信号源，是将非电信号转换为电信号，将交流转换为直流，例如，话筒将声音信号转换为电信号，品种繁多的各种传感器将压力、温度等信号转换为电信号，稳压电源将交流信号转换为直流信号输出，各种信号发生器提供需要波形的信号。

(2) 负载：电路中的用电设备。一种负载的作用是将电能转换成其他形式的能（非电能），例如，灯泡吸收电能转换成光能；电炉将电能转换成热能，电动机把电能转换为机械能；另一类负载是接收和转换信号，如扬声器将电能转换成声音。

(3) 中间环节或信号处理：是指将电源与负载连接成闭合电路的导线、开关设备、保护设备等，起传递和控制电能的作用，如变压器、输电线、开关和一些储能设备（电感器、电容器），处理信号的放大器、程序控制电器（单片机、PLC、计算机）等。

根据需要的功能来设计电路或一个控制系统，由于需求繁多，所以电路的结构形式多种多样。电路主要有两种作用。一种是实现电能的传输、分配与转换，如电力系统传、输、配电；另一种是实现信号的传递和处理，如扩音机、测量系统、控制系统。现代测控系统的各种传感器将压力、温度、距离等非电信号转换为电信号，经过电路把信号传递和处理（调谐、变频、检波、放大），现在一般使用程序控制电器来处理信号，中间环节还需要通过模数转换成数字信号才能进入程序控制电器，程序控制电器输出电信号去控制负载工作，如灯泡发光、电机转动、离合器闭合或断开，有时还需要通过数模转换来控制模拟信号设备。

交流电路简单的例子是日光灯电路，如图 1.1.1(a)所示。它由交流电源、镇流器、启辉器（启动器）、灯管、电容、开关、导线组成。并联电容是为了提高电路的功率因数。

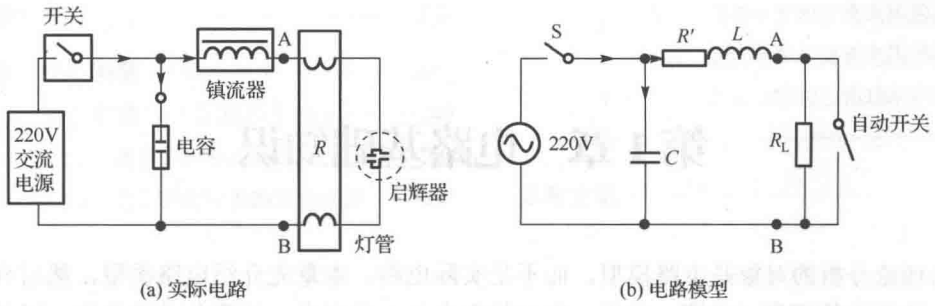


图 1.1.1 日光灯电路示意图

1.1.2 电路模型

电路理论主要研究电路中发生的各种电磁现象，包括电能的产生、消耗、存储。这些现象在电路里同时发生，直接对实际电气器件组成的电路进行分析、计算有一定困难。为了简化分析，对实际电路建立模型，由理想电路元件组成的电路称为电路模型，它是实际电路的科学抽象。

理想电路元件（简称电路元件）是针对一些基本电磁现象，将实际电路元件理想化了的电路元件，一个理想电路元件只表示一种电磁现象或物理现象，用统一的符号标记。表 1.1.1 所示为常用电路元件的电路符号。

表 1.1.1 常用电路元件的电路符号

直流电源 E		电容 C		开关 S	
固定电阻 R		电压源 U_s		熔断器 FU	
可变电阻 R_p		电流源 I_s		电压表	
电感 L		电灯 HL		电流表	

组成电路的实际电气器件是多种多样的，其电磁性能的表现往往是相互交织在一起的。先把实际器件做某种近似和理想化处理，在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，通常采用理想电路元件或其组合来代替实际器件。实际电气器件都可以用理想电路元件来模拟，以后所述的电路均为电路模型，简称电路。

日光灯电路模型如图 1.1.1(b)所示。交流电源是电源元件，为电路提供交流电。镇流器是一个带铁芯的线圈。一般线圈可以用电感元件 L 来模拟，由于绕组有电阻，考虑电阻消耗的能量就要给电感元件串联一个电阻，如果线圈通过高频交流电流，每个绕组匝间有电场，电路模型还要在电感元件串联一个电阻的基础上并联一个电容，通常频率是 50Hz，线圈的电容效应比较小。开关 S 接通、断开电路。启辉器的作用如一个自动开关，是在电路开关 S 合上瞬间接通电路，电路接通后启辉器自动断开。灯管主要的功能是消耗电能，所以用电阻元件来模拟。电容器用电容元件来模拟。

工频 50Hz 对应的波长为 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6000\text{km}$ ，其中 c 为光速，一般家用电器及控制系统的

实际尺寸远小于最高工作频率所对应的电磁波波长，满足集中假设条件，里面的元件可以认为是集中参数元件，电路是集中参数电路，可以用电路模型分析法分析电路。输电线路不满足集中假设条件，不是集中参数电路，必须采用分布参数电路模型进行分析。本书研究的电路均为集中参数电路。

1.2 物理量及其参考方向

电流 I 、电压 U 、电位 V 、电动势 E 和功率 P 是电路的基本物理量, 本节将介绍这些基本物理量的概念、实际方向和单位。在分析电路时, 不仅要知道物理量的实际方向, 还要学会用参考方向来分析电路, 有了参考方向, 这些物理量就有了正、负之分, 搞清楚实际方向与参考方向之间的关系。学会用电压、电流的参考方向来计算功率, 并判断某元件在电路中处于电源还是负载的地位。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷(带电粒子)有规则地定向运动就形成了电流, 正电荷和负电荷的流动都要形成电流。电流的大小等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷数

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

当电流的大小和方向不随时间变化时, $\frac{dq}{dt}$ 为定值, 称为恒定电流或直流电流, 简称直流 (dc 或 DC), 常用大写字母 I 来表示, 如图 1.2.1(a)所示, 并有

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2.2)$$

大小和方向随时间变化的电流, 称为时变电流。大小和方向随着时间按周期性变化且平均值为零的时变电流, 称为交流电流 (ac 或 AC), 常用英文小写字母 i 来表示, 如图 1.2.1(b)所示。

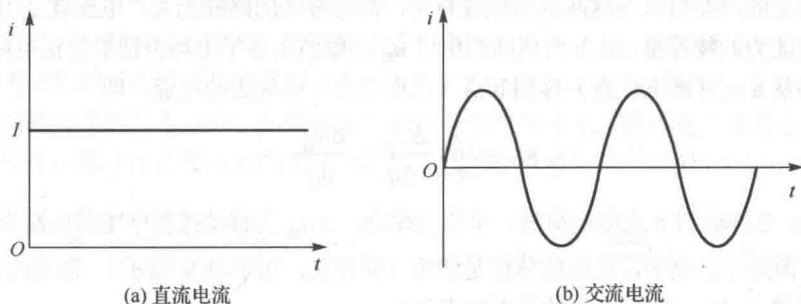


图 1.2.1 直流电流和交流电流图

在 SI (国际单位制) 中, 电流的单位为安培, 简称安, 符号为 A。常用的有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等。它们之间的换算关系是: $1\text{A} = 10^{-3}\text{kA} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

式 (1.2.1) 中, t 的单位是秒 (s), 电荷量 q 的单位为库 (C), $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$ 。

电流的方向是客观存在的。习惯上规定电流的实际方向为正电荷的运动方向, 也就是负电荷运动的相反方向。在电场力的作用下, 正离子顺电场方向运动, 负离子逆电场方向运动, 无论是在电解液中、电离了的气体中, 还是在半导体中, 正离子、负离子都形成电流, 金属导体中的电流是自由电子定向运动形成的。电流方向都是电场的方向。

在简单电路中很容易知道电流的方向, 但在复杂电路分析中, 电流的实际方向很难预先判断出来。而且在交流电路分析中, 电流的实际方向还会不断改变。

在分析与计算电路时, 任意规定某一方向作为电流的参考方向或正方向。规定了参考方向以后, 电流则有正、负之分。正的电流表示电流的实际方向与参考方向相同, 负的电流表示电流的实际方向

与参考方向相反。在选定了电流的参考方向之后,用各种计算方法和测量方法可得电流有正有负。参考方向表示方法如下。

(1) 箭标法。用实线箭头来表示电流的参考方向。如图 1.2.2(a)所示电流为正值,如图 1.2.2(b)所示电流为负值。

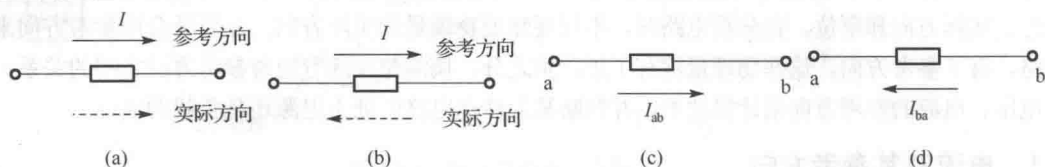


图 1.2.2 电流的参考方向

(2) 双下标法。用双下标来表示电流的参考方向。如对某一电流,用 I_{ab} 表示,其参考方向由 a 指向 b (如图 1.2.2(c)所示)。用 I_{ba} 表示其参考方向由 b 指向 a (如图 1.2.2(d)所示)。显然,两者相差一个负号,即

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

1.2.2 电压、电位、电动势及其参考方向

1. 电压及其参考方向

带电粒子的运动要发生能量的转换。如在电源外部,正电荷在电场力的作用下通过导线和负载,从电源的正极性端运动到负极性端,电场力做了功,使正电荷的电位能减少,减少的这些能量转换成其他形式的能量,如热能,电阻消耗掉了,失去的能量是由电源提供的。电荷在电场中从一点移动到另一点,它的能量的改变量只与这两点的位置有关,而与移动的路径无关。电压就是用来衡量电场力移动电荷做功的能力的物理量。 a 、 b 两点间的电压 u_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,即从 a 点(高电位点)移到 b 点(低电位点)所失去的电能,即

$$u_{ab} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w_{ab}}{\Delta q} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1.2.3)$$

式中, Δq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量,单位为库仑; Δw_{ab} 为移动过程中电荷所减少的能量,单位为焦耳(J)。在国际单位制中,电压的单位是伏特(简称伏,用字母 V 表示)。常用的有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V),它们之间的关系可表示为

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

大小和方向都不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压(DC),用字母 U 来表示,如图 1.2.3(a)所示。直流时电压公式可表示为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1.2.4)$$

大小和方向随时间变化的电压称为时变电压。大小和方向随时间按周期性变化且平均值为零的时变电压,称为交流电压(ac 或 AC),常用字母 u 来表示,如图 1.2.3(b)所示。

电压的实际方向是使正电荷电位能减小的方向,当然也是电场力对正电荷做功的方向,即由高电位端指向低电位端,也即电位降低的方向。

同样,电压的实际方向在复杂电路中也很难确定,与电流的参考方向类似,在电路分析中也要规定电压的参考方向,即正方向。在参考方向选定之后,电压则有正、负之分。

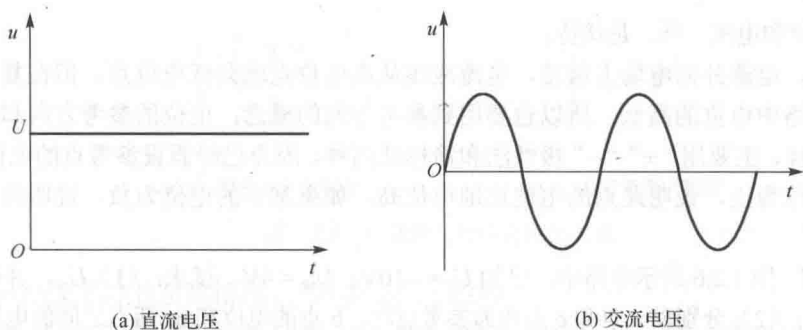


图 1.2.3 直流电压和交流电压

通常用 3 种方式来表示电压的参考方向:

- (1) “+”“-”极性价, 如图 1.2.4(a)所示。从正极性端指向负极性端的方向。
- (2) 箭标法, 如图 1.2.4(b)所示。实线箭头标定电压 U 的方向。
- (3) 双下标法, 如图 1.2.4(c)所示。如 U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 指向 b, 显然: $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

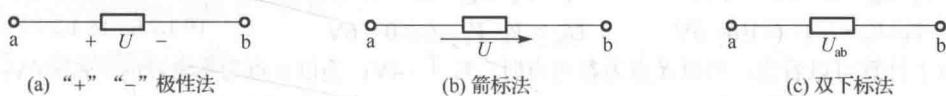


图 1.2.4 电压的参考方向

当电压 U 为正值时, 表明 a 端为高电位端, b 端为低电位端, 从 a 点到 b 点为电位降落。当 U 为负值时, 表明元件的 a 端为低电位端, b 端为高电位端, 从 a 点到 b 点为电位升高。

在电路中, 一个元件中的电流和两端电压的参考方向可以独立地任意指定, 正、负说明它们的实际方向。在计算之前, 都要先给定各元件中的电流和电压的参考方向。如果流过某元件电流的参考方向是从电压参考方向的正极性端指向负极性端, 如图 1.2.5(a)所示, 即电流和电压的参考方向一致, 则把这种参考方向称为关联参考方向; 如果流过某元件电流的参考方向是从电压参考方向的负极性端指向正极性端, 即电流和电压的参考方向不一致, 称为非关联参考方向, 如图 1.2.5(b)所示。



图 1.2.5 关联参考方向和非关联参考方向

2. 电位及其参考方向

这里多次提到高电位、低电位, 那么什么是电位呢? 只要讲电位, 就要先在电路中任选一点作为参考点, 假设 o 点为参考点, 参考点就是假设的“零电位点”或“地电位点”, 一般在电路中用 \perp 或 \downarrow 符号表示。在电路图中, 只有选定参考点以后, 谈论某点的电位才有意义。

有了参考点以后, 电路中某点的电位定义为电场力把单位正电荷从该点移到参考点所做的功, 显然电路某点的电位就是这点到参考点的电压。电位用 V 表示, a 点的电位用 V_a 表示。有

$$V_a = U_{ao} \quad (1.2.5)$$

有了电位概念以后, 电路中任意两点间的电压等于这两点的电位差。

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1.2.6)$$

电位的单位和电压一样，是伏特。

在电路中，电源外部电场力做功，电流应该从高电位点流向低电位点。但在复杂的实际电路中无法知道电路中电位的高低，所以也要用到参考方向的概念，电位的参考方向和电压的参考方向表示方法一样，主要用“+”“-”极性法和箭标法两种。因为已经假设参考点的电位为零，所以，如果某点的电位为正，说明此点的电位比地电位高，如果某点的电位为负，说明此点的电位比地电位低。

【例 1.2.1】 图 1.2.6 所示电路中，已知 $U_1 = -10\text{V}$ ， $U_{ab} = 4\text{V}$ ，试求：(1) U_{ac} ，并说明 U_1 、 U_{ab} 、 U_{ac} 的实际方向；(2) 分别以 a 点和 c 点作为参考点时，b 点的电位和 bc 两点之间的电压 U_{bc} 。

解 (1) $U_{ac} = -U_1 = -(-10) = 10\text{V}$ ， U_{ab} 、 U_{ac} 是正的，说明实际方向与参考方向一致。 U_1 是负的，说明实际方向与参考方向相反。

(2) 以 a 点作为参考点，则 $V_a = 0$ ；以 c 点作为参考点，则 $V_c = 0$ ；

因为 $U_{ab} = V_a - V_b$ ，所以：

$$V_b = V_a - U_{ab} = 0 - 4 = -4\text{V}$$

$$V_c = V_a - U_{ac} = 0 - 10 = -10\text{V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = -4 - (-10) = 6\text{V}$$

因为 $U_{ac} = V_a - V_c$ ，所以：

$$V_a = V_c + U_{ac} = 0 + 10 = 10\text{V}$$

$$V_b = V_a - U_{ab} = 10 - 4 = 6\text{V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 6 - 0 = 6\text{V}$$

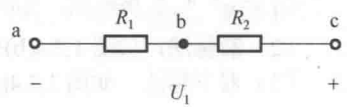


图 1.2.6 例 1.2.1 的电路

由以上计算可以看出，当以 a 点为参考点时， $V_b = -4\text{V}$ ；当以 c 点为参考点时， $V_b = 6\text{V}$ ；但 b 点和 c 点之间的电压 U_{bc} 始终是 6V 。这说明电路中各点的电位值与参考点的选择有关，而任意两点间的电压与参考点的选择无关。

3. 电动势及其参考方向

每个电源都有两个电极，电位高的一端为正极，电位低的一端为负极。在电源外部，电场力把正电荷从高电位点移到低电位点，电场力做功，为了使电路维持一定的电流，电源内部必须有一种力，能持续不断地把正电荷从电源的负极（低电位处）移送到正极（高电位处），以保证电源两极间具有一恒定的电位差。电源内部的这种非电场力，叫做电源力。电池中的电源力是由电解液和极板间的化学作用产生的，一般发动机中的电源力是由电磁作用产生的。在电源内部，电源力将单位正电荷从电源负极移动到电源正极所做的功，称为电源的电动势，用 E 表示，电动势的单位和电压一样，也是伏特 (V)。由此可知，电动势的实际方向是在电源内部由低电位指向高电位，即电位升的方向，与电压实际方向规定相反。

同样，通常电动势也用参考方向来描述。参考方向表示方法和电压一样有“+”“-”极性法、箭标法、双下标法。但要注意电动势的实际方向是电位升的方向，所以，图 1.2.7 所示电路中，如果电动势为正，说明 a 点电位高于 b 点电位。

电压电动势的参考方向本来是可以随便假设的方向，但由于电压的实际方向规定为电位降的方向，而电动势的实际方向规定为电位升的方向，所以电压电动势的参考方向选择是否一致决定了它们之间的等量关系。通常将电压电动势参考方向选择为相反方向，便于计算。

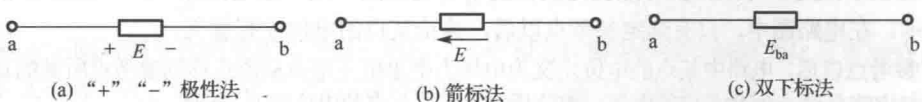


图 1.2.7 电动势的参考方向

当选择电动势的参考方向与电压的参考方向相反时，如图 1.2.8(a)所示，有 $E = U$ 。

当选择电动势的参考方向与电压的参考方向相同时，如图 1.2.8(b)所示，有 $E = -U$ 。

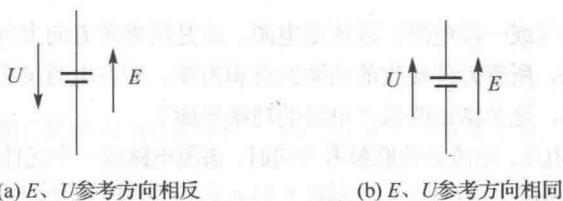


图 1.2.8 电动势与电压之间的关系

电动势与电压的单位虽然相同，但两者是有区别的。

(1) 电动势与电压的物理意义不同。电动势反映了非电场力（电源力）的做功能力，而电压反映了电场力的做功能力。

(2) 电动势与电压的实际方向相反。电动势的实际方向由低电位指向高电位，而电压的实际方向由高电位指向低电位。

(3) 虽然电动势和电压的物理意义不同，但对外效果是一样的。对电源外部支路，具有方向从电源负极到正极的几伏电动势，与方向从电源正极到负极的几伏电压，效果是一样的。所以，现在很多书中已经不讨论电动势这个物理量了。

1.2.3 电功率和电能

电源将其他形式的能转换成电能通过导线发出来，负载接收到这些能量，又把电能转换成其他形式的能，传递转换电能的速率称为电功率，简称功率，用 P （直流时）或 p （交流时）表示。

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.7)$$

功率的单位是瓦[特]，简称瓦（W）， $1W = 1J/s$ 。功率的单位还有千瓦（kW）、毫瓦（mW）、微瓦（ μW ）。 $1W = 10^{-3}kW = 10^3mW = 10^6\mu W$ 。

如果功率的单位是千瓦（kW），时间的单位是小时（h），电能的单位就是千瓦时（kW·h），1 千瓦时就是常说的 1 度电。 $1kW \cdot h = 10^3W \times 3600s = 3.6 \times 10^6 J$ 。

如图 1.2.5(a)所示，即电流、电压的参考方向为关联参考方向时，由式（1.2.3）知

$$dw = udq$$

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.8)$$

式（1.2.8）说明，在关联参考方向下，一段电路所吸收的功率为其电压和电流的乘积。功率的单位又有： $1W = 1V \cdot A$ 。

当电压和电流的参考方向为非关联参考方向时，如图 1.2.5(b)所示，此段电路吸收的功率为

$$P = -UI \quad (1.2.9)$$

因为若图 1.2.5(b)电路改变电压或电流任意一个的参考方向，如改变电压的参考方向，则 $U' = -U$ ，电压、电流就是关联参考方向了， $P = UI$ 。

式（1.2.8）和式（1.2.9）适用于一段电路，也适用于一个元件，计算的功率是以吸收功率为前提的，电压和电流是以参考方向来列方程的，电压、电流本身是有正、负号的。无论用 $P = UI$ ，还是用 $P = -UI$ 计算，若计算结果为 $P > 0$ ，则表明该元件（或一段电路）确实是从外电路吸收能量，即消耗电能，那么该元件应该是负载；若 $P < 0$ ，则表明该元件（或一段电路）实际上是向外电路提供能量，

即发出功率的,这一元件(或一段电路)应该是电源。这是用参考方向来判断元件(或一段电路)是电源还是负载的一种方法。所有元件接收的功率的总和为零,即在电路里面,任何时候电源发出的功率都等于负载得到的功率,这个结论叫做“电路的功率平衡”。

在 t_1 到 t_2 时间段内,电压、电流是关联参考方向时,该段电路或一个元件接收或发出的电能量如下。

交流时,功率、能量用小写字母 p 、 w 表示: $p = ui$, $w = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$;

直流时,功率、能量用大写字母 P 、 W 表示: $P = UI$, $W = Pt = P(t_2 - t_1)$ 。

【例 1.2.2】 图 1.2.9 所示为直流电路, $U_1 = 8V$, $U_2 = -4V$, $U_3 = 7V$, $U_4 = 5V$, $I = 2A$, $I' = -2A$ 。求: (1) 说明电流 I 和 I' 的实际方向; (2) 各元件接收或发出的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 , 并验证电路是否功率平衡。

解 (1) I 为正,说明实际方向和参考方向一致; I' 为负,说明实际方向和参考方向相反。

(2) P_1 的电压、电流参考方向相关联,故

$$P_1 = U_1 I = 8 \times 2 = 16W \quad (\text{为正,接收功率})$$

P_2 、 P_3 和 P_4 的电压参考方向与电流参考方向非关联,故

$$P_2 = -U_2 I = -(-4) \times 2 = 8W \quad (\text{为正,接收功率})$$

$$P_3 = -U_3 I = -7 \times 2 = -14W \quad (\text{为负,发出功率})$$

$$P_4 = -U_4 I = -5 \times 2 = -10W \quad (\text{为负,发出功率})$$

整个电路的功率为 P

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 16 + 8 - 14 - 10 = 0W \quad \text{功率平衡}$$

或 $P_{\text{发}} = P_{\text{收}} \quad P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad \text{功率平衡}$

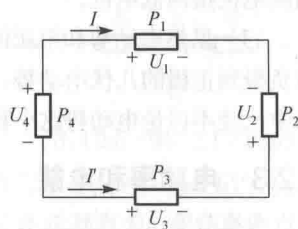


图 1.2.9 例 1.2.2 的电路

1.2.4 电气设备的额定值

电气设备长时间连续工作的温度称为稳定温度,稳定温度正好等于最高允许温度时的电流称为该电气设备的额定电流,也就是电气设备长时间连续工作的最大允许电流,用符号 I_N 表示。因此,当电路中电流达到电源或供电线的额定电流时,工作状态叫做“满载”;超过额定电流时,叫做“过载”;小于额定电流时,叫做“欠载”。在实际电路中,导线和电气设备的温度升高到稳定值要有一个过程,短时间内少量的过载是可以的,长时间的过载是不允许的,否则电气设备会因过度发热而缩短寿命或被烧毁,使用时应当注意。

能使电气设备在给定的工作条件下正常运行而规定的正常容许值称为电气设备的额定值。实际值不一定等于额定值,但一般不超过额定值,最好是接近额定值运行。电气设备的额定电压用符号 U_N 表示,额定功率用符号 P_N 表示。电气设备的额定值都在铭牌上标出,使用时必须遵守。某些只具有电阻的电气设备,它的电流与电压有正比关系,只给出其中的一项就够了,如白炽灯只规定额定电压,而变阻器只规定额定电流。

用电设备实际消耗的功率是由实际使用的条件来决定的,不一定等于额定功率。电源发出的实际功率由负载的大小来决定。通常负载都是并联运行的,负载的功率和电流的实际值取决于加在它上面的电压。如额定电压为 220V,额定功率为 100W 的白炽灯,只有接在 220V 的电源上,它的实际功率才等于额定功率。