



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路与电子技术

(电工学 I)

■ 朱伟兴 主编

■ 朱承高 主审



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路与电子技术

(电工学 I)

■ 朱伟兴 主编

■ 朱承高 主审

责任编辑 陶金凤

8111876

10 00 01

www.tjup.com

www.tjup.com

www.tjup.com

www.tjup.com

www.tjup.com

2008 年 11 月

第 1 版 第 1 次印刷

元



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。本书是“电工学”课程的基础篇,内容包括电路的基本概念与定律、电路的基本分析方法、电路的瞬态过程、交流电路分析、三相交流电路、半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、集成门电路及组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路、大规模集成电路和电工测量。本书尽量精简传统内容,加强工程基础和新技术的引入,使学生感到所学知识的实用性和系统性,真正体验到“电工电子技术”课程的可用性和有用性。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,既可作为高等学校非电类专业本、专科学生的“电工学”课程教材,又可作为各类成人教育的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术. 电工学. I / 朱伟兴主编. —北京:
高等教育出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-04-023945-4

I. 电… II. 朱… III. ①电路理论-高等学校-教材
②电子技术-高等学校-教材③电工学-高等学校-教材
IV. TM13 TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 067952 号

策划编辑	金春英	责任编辑	孙 薇	封面设计	于文燕	责任绘图	杜晓丹
版式设计	王 莹	责任校对	王 雨	责任印制	尤 静		

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
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市南方印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 22.25
字 数 540 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 25.60 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 23945-00

前 言

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。随着科学技术的发展,电工电子技术的应用日新月异,日益渗透到其他学科领域,并促进其发展。由于新器件、新方法的不断出现,“电工学”课程教学内容在不断丰富和更新。而近几年来高等学校教学改革又对培养计划的课内学时实行了多次大量压缩,使内容多与学时少的矛盾更加突出,迫切需要优化课程的体系结构和整合教学内容,编写出注重工程基础、反映新技术和新方法、便于自学的新教材。为此,我们进行了多年的教学改革,在完成“机械类专业电工电子技术课程体系和教学内容改革的研究与实践”和“改革电工电子技术系列课程的教学模式,培养机电复合型创新人才”等多项江苏省重点和一般教学改革项目的基础上,编写这套教材。本套教材在保证电气工程基础内容的前提下,压缩传统内容,增加应用性和新技术内容,强化系统概念,拓宽学生的知识面,培养学生分析问题和解决问题的能力;在每一章的开头,精选引语(格言)和提供本章导读,启发和勉励学生发奋学习,回报社会,同时为学生了解该章编写思路和学习方法提供指导;对重点和难点问题从不同角度进行分析和解释,增加典型例题,从多角度加深理解所学知识,注重培养学生的优化设计能力和技术经济意识,使课程教学更加贴近工程实际;在每一章的结尾,给出了小结,帮助学生回顾总结,巩固提高,有利于自学和多媒体教学。在全书最后,安排了两个以 PLC 为控制器的测控系统(运动控制和过程控制),强化系统集成能力和知识的综合应用能力,使学生体会到学以致用成就感。

本套教材分成两册:《电路与电子技术》(电工学 I)和《电工电子应用技术》(电工学 II)。《电路与电子技术》(电工学 I)为基础篇,主要介绍电路基础、模拟电子电路、数字电子电路和电工测量原理;《电工电子应用技术》(电工学 II)为应用篇,主要介绍直流电源、电力电子技术、磁路与变压器、电动机、继电接触器控制、可编程序控制器以及测量与控制系统设计。

本套教材经专家评审已列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材和江苏省精品教材建设项目。本书的第 1、2、3、9、10 和 12 章由朱伟兴教授编写,第 4 和 5 章由张冰教授编写,第 6、7、8 章和附录由赵曾贻副教授编写,第 11 章由叶雁群副教授编写。本书由朱伟兴教授担任主编,张冰教授担任副主编。在编写过程中得到了所在学校领导和同事的大力支持和帮助,在此表示感谢!

承蒙上海交通大学的朱承高教授在百忙中仔细审阅全书,提出了很多建设性的修改意见。在此,谨向他表示衷心的感谢和敬意。

最后,感谢使用本书的各高等学校同行教师和读者。由于编者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

编者

2008 年 2 月

第1章 电路的基本概念与定律	1
本章导读	1
1.1 实际电路与电路模型	2
1.1.1 实际电路的组成和作用	2
1.1.2 电路模型	3
1.2 电路中常用的物理量	4
1.2.1 电流及其参考方向	4
1.2.2 电压和电动势及其参考方向	4
1.2.3 电功率	5
1.3 电阻、电容和电感元件	6
1.3.1 电阻元件	6
1.3.2 电感元件	7
1.3.3 电容元件	8
1.3.4 电容、电感的串、并联	9
1.4 电源	11
1.4.1 电压源	12
1.4.2 电流源	12
1.4.3 受控电源	13
1.5 电路的工作状态	14
1.5.1 有载状态	14
1.5.2 开路状态	15
1.5.3 短路状态	15
1.6 基尔霍夫定律	15
1.6.1 基尔霍夫电流定律	16
1.6.2 基尔霍夫电压定律	17
1.7 电路中电位的计算	18
小结	20
习题	21
第2章 电路的基本分析方法	24
本章导读	24
2.1 电压源与电流源的等效变换	25
2.2 支路电流法	27
2.3 结点电压法	28

2.4 叠加定理	31
2.5 戴维宁定理	33
2.6 最大功率传输定理	36
2.7 非线性电阻电路分析	38
2.7.1 图解法	38
2.7.2 静态电阻和动态电阻	39
小结	40
习题	41
第3章 电路的瞬态过程	47
本章导读	47
3.1 概述	48
3.1.1 电路的稳态和瞬态	48
3.1.2 瞬态过程产生的原因	48
3.1.3 换路定律与电路初始值的确定	49
3.1.4 研究瞬态过程的意义及方法	51
3.2 RC 电路的瞬态过程	51
3.2.1 RC 电路的零输入响应	51
3.2.2 RC 电路的零状态响应	53
3.2.3 RC 电路的全响应	54
3.3 一阶电路的三要素法	56
3.4 RL 电路的瞬态过程	59
3.4.1 RL 串联电路的零输入响应	59
3.4.2 RL 串联电路的零状态响应	61
3.5 微分电路与积分电路	62
3.5.1 微分电路	63
3.5.2 积分电路	64
小结	65
习题	66
第4章 交流电路分析	70
本章导读	70
4.1 正弦交流电的基本概念	71
4.1.1 瞬时值、幅值和有效值	71

4.1.2 周期、频率和角频率	72	5.2.1 负载的星形联结	116
4.1.3 相位、初相位和相位差	72	5.2.2 负载的三角形联结	119
4.2 正弦量的相量表示	73	5.3 三相电路的功率	120
4.2.1 复数	74	5.3.1 三相电路的功率计算	120
4.2.2 正弦量的相量表示法	75	5.3.2 三相电路功率的测量	123
4.2.3 KCL 和 KVL 的相量表示	76	5.4 安全用电	123
4.3 单一元件参数的正弦响应	76	5.4.1 安全用电常识	124
4.3.1 电阻元件的正弦响应	77	5.4.2 保护接地和保护接零	125
4.3.2 电感元件的交流电路	78	5.4.3 静电的危害和防护	126
4.3.3 电容元件的交流电路	81	5.4.4 雷电防护	127
4.4 RLC 串联电路的正弦响应	83	5.5 工厂供电系统简介	127
4.4.1 电压和电流关系	83	5.5.1 电力系统的基本结构	127
4.4.2 功率	85	5.5.2 工业企业供电系统及其组成	129
4.5 一般正弦交流电路的分析	88	小结	129
4.5.1 阻抗的串、并联	88	习题	130
4.5.2 一般正弦交流电路的分析	88	第 6 章 半导体器件	133
4.5.3 正弦交流电路中功率的计算	91	本章导读	133
4.6 功率因数的提高	91	6.1 半导体基础知识	134
4.7 谐振电路	94	6.1.1 半导体的导电机理	134
4.7.1 串联谐振	94	6.1.2 杂质半导体	135
4.7.2 并联谐振	96	6.1.3 PN 结的形成	136
4.8 交流电路的频率特性	98	6.1.4 PN 结的特性	136
4.8.1 低通滤波电路	98	6.2 二极管	139
4.8.2 高通滤波电路	99	6.2.1 二极管的结构类型	139
4.8.3 带通滤波电路	100	6.2.2 二极管的主要参数	140
4.9 非正弦周期信号的谐波分析	100	6.2.3 半导体器件型号命名和 Datasheet	140
4.9.1 非正弦周期信号的分解	101	6.2.4 二极管的应用	141
4.9.2 非正弦周期交流电路中的有效值、平均值和平均功率	102	6.3 特殊二极管	143
4.9.3 非正弦周期交流电路的计算	103	6.3.1 稳压二极管	143
小结	104	6.3.2 光电二极管	144
习题	106	6.3.3 发光二极管	145
第 5 章 三相交流电路	113	6.4 双极晶体管	145
本章导读	113	6.4.1 双极晶体管的结构	145
5.1 三相电源	114	6.4.2 双极晶体管的电流放大作用	146
5.1.1 三相电源的星形联结	115	6.4.3 双极晶体管的特性	147
5.1.2 三相电源的三角形联结	115	6.4.4 双极晶体管的参数和型号	148
5.2 负载的星形和三角形联结	116	6.5 场效应晶体管	150

6.5.1 绝缘栅型场效晶体管(MOS)	150	8.1 集成运算放大器	187
6.5.2 功率场效晶体管(V MOSFET)	153	8.1.1 集成运算放大器的组成	187
* 6.5.3 功率模块	154	8.1.2 集成运算放大器的符号	187
小结	155	8.1.3 集成运算放大器的主要参数及 传输特性	188
习题	156	8.1.4 运算放大器的类型	189
第7章 基本放大电路	158	8.2 放大电路中的负反馈	190
本章导读	158	8.2.1 反馈的基本概念	190
7.1 放大电路的基本概念	159	8.2.2 反馈电路的类型	191
7.1.1 放大电路的作用和组成	159	8.2.3 负反馈对放大电路性能的 影响	195
7.1.2 放大电路的主要性能指标	160	8.3 集成运算放大器在信号运算 电路中的应用	198
7.2 放大电路的基本分析方法	161	8.3.1 集成运算放大器线性应用的 分析方法	198
7.2.1 静态分析	162	8.3.2 比例运算	199
7.2.2 动态分析	163	8.3.3 积分运算	200
7.2.3 放大电路工作点的稳定	164	8.3.4 微分运算	201
7.3 共集电极放大电路	167	8.3.5 加法运算	202
7.3.1 静态分析	167	8.4 集成运算放大器在信号处理 电路中的应用	203
7.3.2 动态分析	168	8.4.1 简单比较器	204
7.4 多级放大电路	169	△ 8.4.2 迟滞比较器	208
7.4.1 放大电路的级间耦合方式	169	△ 8.4.3 有源滤波器	211
7.4.2 多级放大电路性能指标的 计算	170	8.5 集成运算放大器在信号产生 电路中的应用	213
7.4.3 放大电路的频率特性	170	8.5.1 正弦信号产生电路	213
7.5 差分放大电路	172	* 8.5.2 非正弦信号产生电路	216
7.5.1 直接耦合放大电路的零点漂移 问题	172	8.6 集成运算放大器的选择和 使用	219
7.5.2 差分放大电路的工作原理	172	8.6.1 集成运算放大器的选择	219
7.5.3 差分放大电路分析	173	8.6.2 集成运算放大器使用注意 事项	220
7.6 场效晶体管放大电路	176	小结	221
7.6.1 静态分析	176	习题	222
7.6.2 动态分析	177	第9章 集成门电路及组合逻辑电路	227
7.7 功率放大电路	178	本章导读	227
7.7.1 功率放大电路的基本要求	178	9.1 数字电路概述	228
7.7.2 互补对称功率放大电路	178		
7.7.3 集成功率放大器	180		
小结	182		
习题	183		
第8章 集成运算放大器	186		
本章导读	186		

9.1.1 数字电路和模拟电路	228	10.1 双稳态触发器	266
9.1.2 数字电路的数制	229	10.1.1 基本 RS 触发器	266
9.2 逻辑门电路	230	10.1.2 时钟控制 RS 触发器	267
9.2.1 与门电路	230	10.1.3 JK 触发器	268
9.2.2 或门电路	231	10.1.4 D 触发器	270
9.2.3 非门电路	232	10.2 寄存器	272
9.2.4 复合门电路	233	10.2.1 数码寄存器	272
9.3 TTL 门电路	235	10.2.2 移位寄存器	273
9.3.1 TTL 与非门电路	235	10.3 计数器	274
9.3.2 集电极开路与非门	237	10.3.1 异步二进制加法计数器	275
9.3.3 三态门	238	10.3.2 同步二进制加法计数器	276
9.3.4 TTL 门电路的分类	241	10.3.3 十进制加法计数器	277
9.4 CMOS 集成门电路	241	10.3.4 N(任意)进制计数器	278
9.4.1 CMOS 非门电路	242	10.3.5 用中规模集成计数器构成任意 进制计数器	280
9.4.2 CMOS 或非门电路	242	10.4 555 定时器及其应用	282
9.4.3 CMOS 传输门电路	243	10.4.1 555 定时器的工作原理	282
9.4.4 CMOS 集成逻辑门电路的 特点	244	10.4.2 单稳态触发器	283
9.4.5 门电路多余输入端的处理	245	10.4.3 多谐振荡器	285
9.5 不同类型门电路的接口	245	10.4.4 施密特触发器	286
9.5.1 TTL 到 CMOS 的接口	245	10.5 模拟信号与数字信号的转换	289
9.5.2 CMOS 到 TTL 的接口	246	10.5.1 数模转换器	289
9.5.3 门电路与其他负载的接口 电路	246	10.5.2 模数转换器	293
9.6 组合逻辑电路	247	小 结	296
9.6.1 逻辑代数简介	247	习 题	297
9.6.2 组合逻辑电路的分析与设计	249	第 11 章 大规模集成电路	302
9.6.3 组合逻辑电路设计中的实际 问题	252	本章导读	302
9.7 编码器	253	11.1 存储器	303
9.8 译码器	256	11.1.1 只读存储器	303
9.8.1 二进制译码器	256	11.1.2 随机存取存储器	308
9.8.2 二-十进制译码器	257	11.2 可编程逻辑器件	311
9.8.3 显示译码器	258	11.2.1 可编程逻辑阵列(PLA)	312
小 结	261	11.2.2 可编程阵列逻辑(PAL)	313
习 题	262	11.2.3 通用可编程阵列逻辑(GAL)	313
第 10 章 触发器及时序逻辑电路	265	11.2.4 复杂可编程阵列逻辑(CPLD)	316
本章导读	265	11.2.5 现场可编程阵列逻辑门阵列 (FPGA)	316
		11.2.6 在系统可编程逻辑器件	

(ISP - PLD)	317	12.3.2 电动式测量机构和工作原理	328
11.2.7 PLD 的开发	317	12.3.3 交、直流电流表	329
小结	318	12.3.4 交、直流电压表	329
习题	319	12.4 电功率的测量	330
第 12 章 电工测量	321	12.4.1 电动式功率表	330
本章导读	321	12.4.2 有功功率的测量	331
12.1 电工测量和仪表的基本知识	322	12.5 万用表	332
12.1.1 电工仪表的分类	322	12.5.1 指针式万用表	332
12.1.2 仪表的误差和准确度	323	12.5.2 数字式万用表	334
12.2 直流电流和电压的测量	325	小结	335
12.2.1 磁电式测量机构和工作原理	325	习题	336
12.2.2 直流电流表	326	附录 1 国内外半导体器件命名方式	338
12.2.3 直流电压表	327	附录 2 部分晶体管型号参数对照表	341
12.3 交流电流、电压的测量	328	附录 3 器件知识手册 Datasheet	342
12.3.1 电磁式测量机构和工作原理	328	参考文献	344

第1章 电路的基本概念与定律



引语:

千里之行,始于足下。

——老子

本章导读

电路分析不是分析实际电路,而是分析由理想电路元件组成的电路模型。本章首先介绍电路的组成和作用,并将实际电路抽象成电路模型;然后介绍电路的基本物理量、理想电路元件、电路的状态,从工程观点出发,引出参考方向、电气设备的额定值、功率平衡、参考电位等基本概念,分析组成电路的理想电路元件的物理性质和外特性;接着,从分析复杂电路的角度出发,讨论约束电路中回路电压和结点电流的基尔霍夫定律,为下一章推导电路分析方法奠定基础。

通过本章的学习,要了解电路的组成和作用及电路模型的意义;了解电源的有载工作、开路与短路状态,理解电功率和额定值的意义;理解电流、电压参考方向的意义和理想电路元件(电压源、电流源、电阻、电容和电感)的外特性,理解基尔霍夫定律并能熟练运用;掌握电路中电位的计算方法。



图1-1-1 扬声器电路模型

电技术的应用十分广泛,但每一种应用都要通过实际电路来实现。所谓实际电路就是由实际电气元件按一定方式连接而成的一个整体,以形成电流通路,从而实现某种特定的功能。实际电路种类很多,其功能、形式和结构也各不相同,如自动控制电路、通信电路、计算机电路、电力传输电路、电气照明电路等,但这些电路的设计和分析都建立在电路理论基础之上,为此,本章先介绍电路的基本概念与基本定律,着重讨论电流和电压的参考方向以及基尔霍夫定律等,为后续章节的学习打下基础。

1.1 实际电路与电路模型

1.1.1 实际电路的组成和作用

人们在生产和生活中使用的电气设备,如电灯、电动机、电视机和计算机等都由实际电路构成。但是,不论电路的结构和功能多么复杂,形式如何变化,电路都可以抽象成三部分,也就是说,实际电路都是由电源(或信号源)、负载以及连接电源和负载的中间环节组成。其中,电源的作用是为电路提供电能或信号,例如,发电机利用机械能或核能等转化为电能,蓄电池利用化学能转化为电能,光电池利用光能转化为电能,话筒(麦克风)作为信号源将声音的振动信号转换为电信号等。负载就是用电设备,它将电能转化为其他形式的能量并加以利用,例如,电动机将电能转化为机械能,电炉将电能转化为热能等。中间环节用作电源和负载的连接体,包括导线、开关、控制电路等。对于复杂电路,中间环节是非常复杂的,如供电电路(电力系统)中,连接发电厂的发电机和用户中的用电设备(如电灯、电动机等)之间的所有部分都可以看成中间环节。通常,为了保证安全,中间环节还包含电器或电路的保护装置。图 1.1.1 是一个最简单的手电筒电路示意图。干电池作电源,灯泡作负载,导线和开关作为中间环节将灯泡和电池连接起来,实现了将电能转变为光能的功能。图 1.1.2 是一个半导体扩音器的工作原理示意图。话筒是电源(信号源),它将声音的振动信号转换为电信号,该电信号经过中间环节(放大电路)放大处理后,传递给扬声器,由扬声器将这放大处理后的电信号还原为比原来大很多的声音,起到扩大音量的作用。

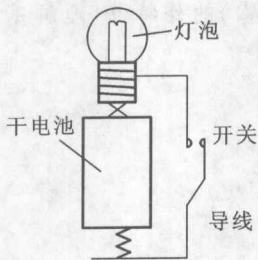


图 1.1.1 手电筒电路



图 1.1.2 半导体扩音器原理示意图

如前所说,电路的种类非常多,功能也各不相同。但概括地说,电路主要具有以下两个方面的作用:① 实现电能的传输和转换。图 1.1.1 中,干电池通过导线将电能传递给电灯,电灯将电能转化为光能和热能。② 实现信号的传递和处理。图 1.1.2 中,扩音器能将话筒传出的微弱信号经放大处理后使扬声器发出很大的声音。

1.1.2 电路模型

为了分析电路的性能,首先要将实际电路抽象为电路模型,针对电路模型分析和计算电路的性能,在这基础上设计出性能更加完善的电路。

组成电路的实际元件在工作过程中都与电磁现象有关。例如,电灯和加热电器,它们将电能转化为光能和热能而消耗掉,且对电流的流通呈现阻力,因此,具有电阻性质。当电流流过线圈时,其周围产生磁场,因而线圈具有电感性质,但是由于线圈导线多少总有点电阻,因而兼有电阻的性质。各种电容具有存储电场能量的性质,也有电阻的次要性质,甚至还有电感性质。各种电源其内部总有一定量的内阻,不可能总保持恒定不变的电压和电流。就是一根导线也总有些电阻,甚至还有些电感等。因此,实际电路元件的电磁性质很难用简单的数学表达式加以精确描述。若不分主次地把实际元件的次要性质也一起考虑,就会使问题变得相当复杂,给分析带来较大的难度。为此,在误差许可的情况下,常常把实际元件加以理想化,忽略其次要性质,用表达它们的主要性质的模型加以表示,以便于对电路进行分析和计算。因此,所谓电路模型就是由理想化的电路元件组成的电路图。理想化元件性质单纯,可以用数学表达式精确描述。在后面的电路分析中所涉及的各种元件都是理想化的电路元件,简称理想电路元件。理想电路元件包括理想电阻元件 R 、理想电感元件 L 、理想电容元件 C 、理想电压源 U_s 和理想电流源 I_s 。图 1.1.3 所示就是图 1.1.1 所示电路的电路模型。干电池属于直流电源,用 E 表示,开关用 S 表示,电灯用电阻 R 表示。

图 1.1.4 所示为汽车供电电路模型,其中, U_s 为汽车上的直流发电机的输出电压,为 14 V; R_1 为发电机的内阻; E 为蓄电池,其输出电压为 12 V; R_2 为蓄电池的内阻; R_L 是汽车上的等效负载电阻,它包括各种车用电气设备的等效电阻。对一个电路而言,电源(或信号源)的作用称为激励,由激励产生的结果(如某个元件上的电流和电压等)称之为响应,激励和响应的关系就是作用和结果的关系。电路分析就是在已知激励、电路结构和参数(电路模型)的情况下,根据电路的基本定律对由理想元件组成的电路模型进行分析,求出各元件上的电压、电流及功率等物理量,预测实际电路的特性,以便设计更优化的电路。

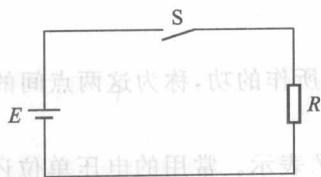


图 1.1.3 手电筒电路的电路模型

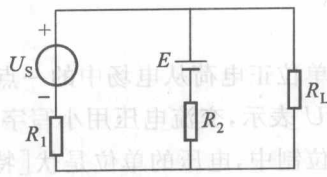


图 1.1.4 汽车供电电路模型

【练习与思考】

- (1) 电路由哪 3 个基本部分组成?
- (2) 电路的主要作用大致分为哪两个方面?
- (3) 什么是电路模型?为什么要用电路模型来表示电路?

1.2 电路中常用的物理量

在电路分析中,基本的物理量主要是电流、电压、电动势和电功率。这些物理量是分析和设计电路的基本指标。

1.2.1 电流及其参考方向

电流就是电荷的定向移动。电流是指单位时间内通过导体横截面的电荷量。交流电流用小写字母 i 表示,直流电流用大写字母 I 表示,即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2.1)$$

式(1.2.1)中, Q 为电荷量, t 为时间。在国际单位制中,电流的单位是安[培],用字母 A 表示。1 安[培]电流表示 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷量为 1 库[仑](C)。常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)。它们的关系是 $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ 和 $1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$ 。

电流的方向规定为正电荷的移动方向。但在分析较为复杂的电路时,往往难以事先判断某支路中电流的实际方向。对交流电来讲,其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭头来表示它的实际方向。为此,在分析电路时,通常引入参考方向的概念。参考方向又称假定正方向,简称正方向。参考方向可以任意选定,用“ $\rightarrow$ ”表示。规定:若选定的参考方向与电流的实际方向一致,则电流为正值,即 $I > 0$;若选定的参考方向与电流的实际方向相反,则电流为负值,即 $I < 0$,如图 1.2.1 所示。这样就可以在选定的电流参考方向下,根据电流的正、负值确定电流的实际方向。因此,在电路分析时,首先要选定参考方向。在未标明参考方向的情况下,电流值的正、负是毫无意义的。

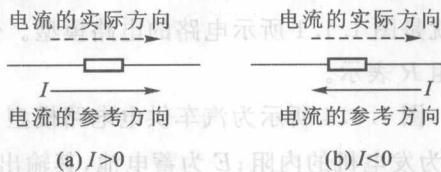


图 1.2.1 电流的参考方向和实际方向

1.2.2 电压和电动势及其参考方向

1. 电压

电场力把单位正电荷从电场中的一点移到另一点所作的功,称为这两点间的电压。直流电压用大写字母 U 表示,交流电压用小写字母 u 表示。

在国际单位制中,电压的单位是伏[特],用字母 V 表示。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V),它们的关系是 $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}$ 。

电压的实际方向规定为从高电位端指向低电位端。在分析电路时,和电流一样,首先要选定电压的参考方向。电压的参考方向可用三种方法表示:用箭头“ $\rightarrow$ ”表示,从高电位端指向低电位端;也可以用“+”、“-”极性表示,“+”表示高电位端,“-”表示低电位端;还可用双下标表示,例如,用 U_{ab} 表示 a、b 两点间的电压,它的参考方向是由 a 指向 b,也就是说 a 点的参考极性为“+”,b 点的参考极性为“-”。参考方向可以任意选取。当参考方向与实际方向相同时,电压值为正值;当参考方向与实际方向相反时,电压值为负值,如图 1.2.2 所示。与电流一样,在没有标明参考方向

时,电压值的正、负也是没有意义的。

2. 电动势

电动势描述了电源中外力做功的能力,它的大小等于外力在电源内部克服电场力把单位正电荷从负极移到正极所作的功。它的实际方向在电源内部由负极指向正极,如图 1.2.3 所示。电动势的实际方向是电位升的方向,与电压的实际方向正好相反。电动势的单位也为伏[特]。

3. 关联参考方向

一个元件或者一段电路上的电流和电压的参考方向是可以任意设定的,两者可以一致,也可以不一致。当电流和电压的参考方向(箭头方向)一致时,称为关联参考方向,如图 1.2.4(a)所示;两者的参考方向相反时,称为非关联参考方向,如图 1.2.4(b)所示。

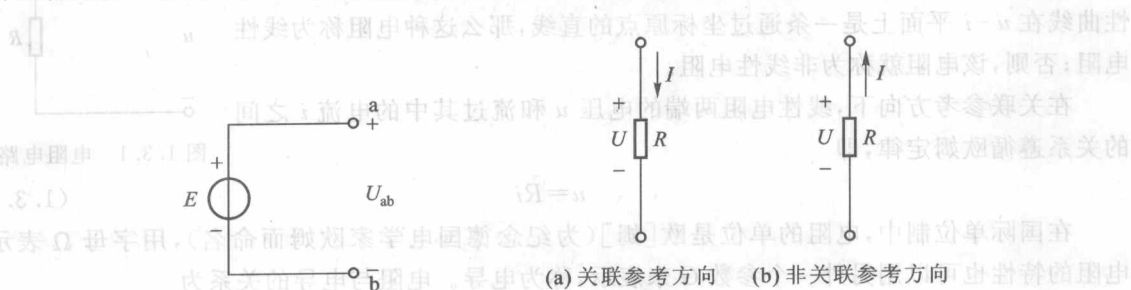


图 1.2.3 电源电动势

图 1.2.4 参考方向

值得注意的是,关联参考方向是针对某一具体元件或一段电路而言的。为了计算功率方便,一般情况下,负载上设定为关联参考方向。

1.2.3 电功率

本书中,电功率简称为功率。它是单位时间内电路元件所吸收或发出的电能,其值等于该元件上的电压与电流的乘积。直流电功率用大写字母 P 表示,交流电功率用小写字母 p 表示,即

$$P = UI \quad (1.2.2)$$

$$p = ui \quad (1.2.3)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏[特],电流的单位为安[培],功率的单位为瓦[特],用字母 W 表示。常用的单位还有千瓦(kW)和毫瓦(mW)。它们之间的关系是 $1 kW = 10^3 W$, $1 W = 10^3 mW$ 。

在电路中,有的元件从电路吸收电能,有的元件向电路发出(提供)电能。在电压和电流的关联参考方向下,计算出的功率为正值,表示该元件吸收功率;若功率为负值,表示该元件发出功率。若在非关联参考方向下,则正好相反。功率的定义可推广到任何一段(部分)电路,而不局限于一个元件。

【练习与思考】

(1) 某元件的电压和电流采用的是关联参考方向,当元件的 $P > 0$ 时,该元件是发出还是吸收功率? 该元件在电路中起电源还是负载作用?

(2) 某一元件的电压与电流的参考方向一致时,说明该元件是负载。这句话对吗?

(3) U_{ab} 是否表示 a 端的电位高于 b 端的电位?

1.3 电阻、电容和电感元件

电阻、电感和电容是三种常用的无源电路元件,它们具有不同的物理性质。当只考虑它们的主要物理性质时,电阻、电感和电容又是三种单一参数的理想化电路元件。下面分别给予介绍。

1.3.1 电阻元件

电阻元件简称为电阻,用 R 表示。它是反映消耗电能的电路参数。电阻的符号如图 1.3.1 所示。

电阻上的电压和电流之间的关系称为伏安特性。如果电阻的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上是一条通过坐标原点的直线,那么这种电阻称为线性电阻;否则,该电阻就称为非线性电阻。

在关联参考方向下,线性电阻两端的电压 u 和流过其中的电流 i 之间的关系遵循欧姆定律,即

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆](为纪念德国电学家欧姆而命名),用字母 Ω 表示。电阻的特性也可以用另外一个参数 G 来表示,称为电导。电阻与电导的关系为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.2)$$

电导的单位是西[门子],用字母 S 表示。

电阻上的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.3.3)$$

从式(1.3.3)可知,电阻上的瞬时功率 p 总是大于或等于 0。所以,电阻在一段时间($0 \sim t$)内吸收的电能也总是大于或等于 0。即

$$W(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau = \int_0^t Ri(\tau)^2 d\tau \geq 0 \quad (1.3.4)$$

式(1.3.4)中 $p(\tau)$ 为 τ 时刻的瞬间功率。由此可见,电阻(如电炉、白炽灯)吸收的能量全部转化为热能或其他形式的能量消耗掉,这是一个不可逆的能量转换过程。因此,电阻是一个耗能元件。当电流通过电阻时,电阻会发热,这称为电流的热效应。这些热能是由电能转化来的。电流的热效应用途很广,利用它可制成电炉、电烙铁等电热器件。电灯就是利用电流的热效应使灯丝达到高温而发光的。但是,电流热效应也有它不利的一面,通电的导线会由于电流的热效应而温度升高,温度过高会加速绝缘材料的老化变质(如橡皮硬化、绝缘纸烧焦等),从而引起漏电,严重时甚至会烧毁电气设备。因此,对各种电气设备来说,为了安全运行,都有一定的功率限额、电压限额和电流限额,它们分别称为这些设备的额定功率、额定电压和额定电流。在使用时,不能超过这些额定值,否则设备会损坏。例如,电灯、电烙铁等通常只给出其额定电压和额定功率(如 220 V, 40 W)。实际使用电阻时,除了要知道其阻值外,还应知道其额定功率(如 1 W、1/2 W、

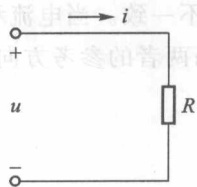


图 1.3.1 电阻电路

1/4 W、1/8 W 等)。电阻的额定功率是提醒用户注意保持元件的热平衡。当电阻上消耗的功率超过额定功率时,电阻会烧坏。工程上,将根据不同的用途采用不同类型的电阻器,有关电阻的选用,可参阅相关参考文献。

1.3.2 电感元件

实际电感元件通常是由线圈构成。电感元件简称为电感。由物理学可知,当导线中有电流通过时,在它的周围就建立起磁场。工程中,利用各种线圈建立磁场,储存磁能。图 1.3.2 为实际线圈的示意图。如果忽略导线电阻中消耗能量等次要因素,就可以用电感元件作为实际线圈的模型。如图 1.3.3(a)所示。当电流 i 通过线圈时,在每匝线圈中会产生磁通 Φ ,若线圈匝数为 N ,则与线圈交链的磁链 Ψ 等于线圈匝数与每匝线圈所产生的磁通的乘积,即 $\Psi = N\Phi$ 。将单位电流所能产生的磁链定义为电感元件的自感系数。电感元件的自感系数简称电感,用字母 L 来表示,即

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1.3.5)$$

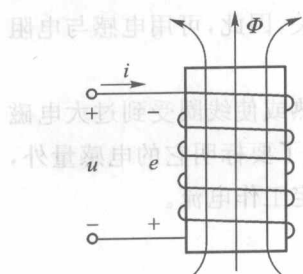


图 1.3.2 电感线圈

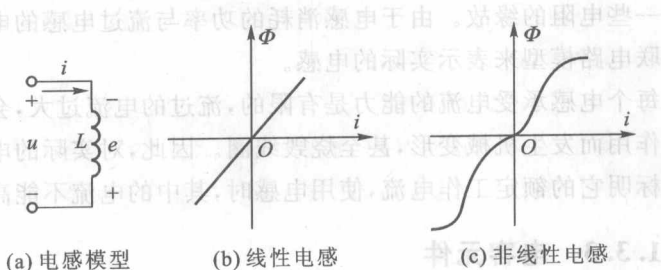


图 1.3.3 电感模型及韦安特性曲线

若磁通的单位为韦[伯](Wb),电流的单位为安[培](A),则电感的单位为亨[利],用字母 H 表示。电感较小时,常用毫亨(mH)或微亨(μH)作单位, $1\text{ H} = 10^3\text{ mH} = 10^6\text{ }\mu\text{H}$ 。如果电感元件的磁通为电流的线性函数,即 L 为常数,则此电感元件称为线性电感。它的特性如图 1.3.3(b)所示,其韦安特性曲线是一条通过原点的直线,如空心线圈(线圈中的磁路为空气)的电感就是线性电感。若电感 L 不是常数,则为非线性电感,如图 1.3.3(c)所示。如铁心线圈(为了提高导磁效率,线圈中采用铁磁物质作为磁路,将在《电工电子应用技术(电工学 II)》的第 3 章中详细介绍)的电感就是非线性电感。本书主要讨论线性电感。后面若不加说明,电感就是指线性电感。

在电路分析中,更感兴趣的是元件的伏安关系和能量关系。当通过电感元件的电流发生变化时,磁链也相应发生变化,此时,电感线圈内将产生感应电动势 e 。法拉第发现:感应电动势 e 的大小正比于磁通的变化率。楞次发现:感应电动势 e 的方向总是力图阻碍原来磁通的变化。通常规定感应电动势 e 的参考方向与磁通的参考方向符合右手螺旋定则,在此规定下,便可得到自感电动势的表达式为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1.3.6)$$

式(1.3.6)称为法拉第-楞次定律。由图 1.3.3(a)可知,电感线圈两端的电压为

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.7)$$

式(1.3.7)表明,在任一时刻,电感上的电压与该时刻电流的变化率成正比。对于恒定电流,电感两端的电压为0,所以电感元件对直流电而言相当于短路。

下面介绍电感的储能情况,在 t 时刻电感的瞬时功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Li(t) \frac{di(t)}{dt} \quad (1.3.8)$$

式(1.3.8)表明, $p(t)$ 不总是 ≥ 0 。当 $i(t)$ 为正值、且有增大的趋势时, $p(t) > 0$,表明电感吸收能量,电能以磁场能储存在电感中;当 $i(t)$ 为正值、且有减小的趋势时, $p(t) < 0$,表明电感将储存在其中的磁场能提供给电路。由此可见,电感是一种储能元件。

当流过电感元件的电流为 i 时,它所储存的磁场能(量)为

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.3.9)$$

实际的电感除了有储能作用外,还会消耗一部分电能,这主要是由于构成电感的线圈导线总存在一些电阻的缘故。由于电感消耗的功率与流过电感的电流直接相关,因此,可用电感与电阻的串联电路模型来表示实际的电感。

每个电感承受电流的能力是有限的,流过的电流过大,会使线圈过热或使线圈受到过大电磁力的作用而发生机械变形,甚至烧毁线圈。因此,对实际的电感来说,除了要标明它的电感量外,还要标明它的额定工作电流,使用电感时,其中的电流不能高于它的额定工作电流。

1.3.3 电容元件

在工程实际中,存在着各种各样的电容。它们的应用极为广泛,如收音机中的调谐电路、计算机中的动态存储器等。电容虽然品种、规格各异,但就其构成原理来说,都是由两块金属极板间隔以不同的介质(如云母、瓷介质、绝缘纸、聚酯膜、电解质等)组成的。当在极板上加上电压后,两块极板上将分别聚集等量的正、负电荷,并在介质中建立起电场,从而具有电场能量。将电源移去后,电荷可继续聚集在极板上,电场继续存在。所以说电容元件是一种能够储存电荷或以电场形式储存能量的器件。

如果忽略电容在实际工作时的漏电和磁场影响等次要因素,就可以用储存电场能量的理想电容元件作为实际电容的模型。电容的符号如图1.3.4所示。

电容的容量定义为单位电压所能存储的电荷量。即

$$C = \frac{Q}{u} \quad (1.3.10)$$

式中, Q 的单位为库[仑], u 的单位为伏[特], C 的单位为法[拉],用字母F表示。由于法[拉]的单位太大,通常采用微法(μF)或皮法(pF)表示。 $1\text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$ 。

如果电容元件所储存的电荷与其端电压之间的关系为线性函数,即 C 为常数,则此电容称为线性电容,它的特性如图1.3.5(a)所示,其库伏特性曲线是一条通过原点的直线。若电容 C 不是常数,则为非线性电容,如图1.3.5(b)所示。本书主要讨论线性电容。后面若不加说明,电容就是指线性电容。