



普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电路与模拟电子 技术基础 (第3版)

■ 查丽斌 主编 ■ 王宛苹 李自勤 刘建岚 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子基础课程规划教材

电路与模拟电子技术基础

(第3版)

查丽斌 主编

王宛苹 李自勤 刘建岚 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍电路与模拟电子技术基础课程的内容。全书共 10 章, 主要内容包括: 直流电路、一阶动态电路的暂态分析、正弦稳态电路的分析、模拟集成运算放大电路、半导体二极管及直流稳压电源、晶体三极管及其放大电路、场效应管放大电路以及放大电路的频率响应、低频功率放大电路、负反馈放大电路、信号产生与处理电路等。本书配备大量例题和习题, 并提供配套多媒体电子课件、习题详解和 MOOC 网络课程。

本书可作为高等学校计算机、通信、自动化、电子电气等各专业和部分非电专业的本科生教材, 也可作为自学考试和成人教育的自学教材, 还可供电子工程技术人员学习参考。

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

电路与模拟电子技术基础 / 查丽斌主编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2015.2

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-25047-7

I. ①电… II. ①查… III. ①电路理论—高等学校—教材 ②模拟电路—电子技术—高等学校—教材

IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 283970 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 曹剑锋

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 500 千字

版 次: 2008 年 2 月第 1 版

2011 年 8 月第 2 版

2015 年 2 月第 3 版

印 次: 2015 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 39.90 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。

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

服务热线: (010) 88258888。

第3版前言

本书自2008年出版以来,迄今已经数十次印刷,受到广大师生和读者的关注,对此我们深表感谢!

第3版是在第2版的基础上,根据广大读者对本书提出的一些意见和建议,以及我们在使用中的体会修订的。这次修订,我们保留了原书的编写思路:保证基础、注重应用、讲清概念、力求精练。在保证基本教学内容的前提下,为了适应电子技术不断发展的新形势和教学上的灵活性,以及因材施教的需要,本版适当增减了一些内容,具体考虑如下:

1. 强调“设计仿真”,鼓励学生自主探索学习。增加设计仿真的内容,每一章都有设计仿真的题目,要求完成设计,采用仿真软件进行仿真,附录A介绍Multisim软件,在不增加总学时的情况下,建议在教学中利用2~4学时进行软件的介绍,主要让学生自学,完成题目的设计和仿真,将结果以邮件的形式发给老师,在计算机和网络技术如此普及的今天应该是完全可以做到的。

2. 电路部分主要是删减了计算复杂的一部分题目,将题目的计算难度尽量降低,第3章里将需要列矢量方程求解的题目减少,复杂的电路分析都可以借助于仿真软件进行,这样有助于学生对电路基本理论和基本分析方法等重点知识的掌握;增加了电阻器、电容器和电感器等实际元件的容量、容差和标称系列等内容,以使学生了解在设计中如何选用实际器件的知识。

3. 将滤波器和通频带等概念提前到第3章讲解以配合各章的设计仿真题目。

4. 强调“外部应用”,淡化“内部结构”。第4~7章均从器件的外部特性出发,分别介绍集成运算放大器、半导体二极管、双极性晶体管和场效应管的基本电路,删除了内部结构的内容,只讲外部特性,增强电路分析的内容,强调学生掌握器件应用技能的学习。

5. 将第2版第10章中“电压比较器”的内容提前到第4章模拟集成运算放大电路及其应用中,第10章改为信号与处理电路,将第2版第8章中“有源滤波器”的内容移入。

6. 第6章中将“功率放大电路”的内容移出,放在第8章中,增加有关功率集成芯片的内容。

7. 第7章改为场效应管放大电路与放大电路的频率响应,将第2版中第8章“放大电路频率响应”的内容移入,增加了“场效应管放大电路的频率响应”的内容。由于微电子学与制造工艺的进步,与双极性器件的性能相比,MOS器件具有明显的优势,所以本书强调MOS管的内容,弱化结型场效应管的内容,将有关习题与例题大部分删除,只保留符号和外特性的内容。

8. 第9章在内容安排上有所改变,使得学生在反馈类型的判断上更加清晰明了。

本书配套有《电路与模拟电子技术基础习题及实验指导(第3版)》。该指导书既可以作为学生的实验指导书,也可以作为学生的作业本和习题指导手册来使用。指导书共11章,第1~10章与本书对应,每章给出该章内容的知识要点总结、重点与难点、重点分析方法和步骤、填空题和选择题、习题等5部分。习题部分供学生做作业时使用,可以省去抄题目和

画图的时间,提高课后学习的效率,也可以减轻教师批改作业的负担。第11章提供了11个典型的实验,每个实验均给出实验内容和实验电路的设计方法,不针对具体的实验板设计,通用性较强。

本书向使用本书作为教材的教师提供多媒体电子课件、习题详解和MOOC网络课程,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书由杭州电子科技大学信息工程学院查丽斌策划、组织和统稿,其中第1~3章由王宛苹编写,第4、5、7、9和10章由查丽斌编写,第6、8章和附录A由李自勤编写,刘建岚参与了第4章和第10章部分内容的编写。

本书从第1版到第3版经历了近8年的时间,王勇佳、吕幼华、汪洁、孔庆鹏、辛青、胡体玲和李付鹏等老师都参与了本套教材的编写工作,以及习题的解答与设计题目的模拟仿真工作,在结构和内容方面提出了很多重要的意见,张凤霞和钱文阳参与了本书的部分校对工作,钱梦楠与钱梦菲参与了本书部分书稿和图的录入工作。本书在编写的过程中,得到了杭州电子科技大学信息工程学院的大力支持,并参考了本校一些老师和兄弟院校老师的意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限及编写时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,诚恳地希望读者提出宝贵意见和建议,以便今后不断改进。

作者

2015年1月

第2版前言

本教材自2008年出版以来,迄今已经多次印刷,受到诸多师生和读者的关注,对此我们深表感谢!

第2版是在第1版的基础上,根据广大读者对本书提出的一些意见和建议,以及我们在使用中的体会进行修订而成的。这次的修订,我们保留了原书的编写思路:保证基础、注重应用、讲清概念、力求精练。在保证基本教学内容的前提下,为了适应电子技术不断发展的新形势和教学上的灵活性,以及因材施教的需要,本版适当增减了一些内容,具体考虑如下:

1. 电路部分主要对第1章进行了调整,将受控源这个难点知识分离出来单独在最后一节中介绍。这样在讲电路基本理论和分析方法时,可以突出重点,有助于学生对电路基本理论和基本分析方法的掌握。

2. 模拟部分在体系上做了调整,主要是突出集成电路,立足应用。

① 将“模拟集成运算放大电路”一章的位置提前至第4章。把集成运放作为基本电子器件,简述其外特性,并在本章中介绍由集成运放组成的基本运算电路和集成运放的主要参数、使用注意事项等。这样,在后续章节中均以模拟集成电路为对象进行讨论,形成了以模拟集成电路为主干的体系。

② 第5章半导体二极管及其直流稳压电源,将直流稳压电源的内容作为二极管的应用来讲,删除了第1版的第10章。

③ 第6章晶体三极管及其放大电路中将原来的放大电路频率一节的内容移出,增加了功率放大电路和电流源电路的内容,因为功放只是三极管放大电路对大信号的放大,而电流源电路也是三极管放大电路的应用。

④ 删除了第1版中的第7章。其中差分式放大电路一节的内容完全删除,主要是为了减少分立元件电路的讨论,注重集成电路的应用。

⑤ “场效应管及其基本放大电路”一章的内容基本不变,增加第8章滤波电路及放大电路的频率响应和第10章波形产生电路,主要是扩充了有源滤波电路和LC振荡、石英晶体振荡电路。

3. 全书各章的习题数量都有所增加,补充了有关基本概念和实际应用相结合的习题。为了加深对基本概念的理解,适当地增加了部分例题。

4. 本书提供多媒体电子课件,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书共10章,其中第1~3章由王宛苹编写,第4章和第10章由刘建岚编写,第5章、第8~9章由查丽斌编写,第6~7章由李自勤编写,查丽斌对全书进行了统稿。本书在编写的过程中,参考了本校一些教师和兄弟院校老师的意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限及编写时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,诚恳地希望读者提出宝贵意见和建议,以便今后不断改进。

作者

2011年7月

前 言

为了适应电子信息科学技术迅猛发展的需要,以及新的课程体系和教学内容改革的需要,我们根据教学基本要求,总结了多年从事电路、电子学教学工作的丰富的教学经验,针对电路与电子学课程的基本要求和学习特点,为满足课程学时压缩的实际需要,将传统的“电路基础”、“模拟电子技术基础”两门课程合并,编写了本教材。

鉴于近几年来就业形势的严峻,各个学校都对专业基础课学时进行压缩,并且把教学时间安排提前到第二、三学期,使得学生在学习数学等基础课的同时学习专业基础课,内容衔接上的不连贯使得学生对本门课程的掌握普遍感觉困难,所以本书的编写思路是保证基础、注重应用、讲清概念、力求精练。本书以基础知识为重点,在编写过程中特别注重使得知识易懂、易学,做到语言简练,容易自学。

在电路基础部分,我们根据计算机各专业的需要,结合多年来电路课的教学经验,选出最基本的教学内容重点阐述,以保证学生掌握电路的基本原理及其基本分析方法,为模拟电子技术基础的学习打下扎实的基础。

在模拟电子基础部分,将难点分散,循序渐进。在第4~6章中,均各以一类半导体器件及其基本应用电路划分为一章,便于读者学习和掌握。在第5章中,强调对基本概念、基本原理、基本分析方法的理解和应用,减少复杂的数学推导。由于微电子学与制造工艺的进步,与双极性器件的性能相比,MOS器件具有明显的优势,所以在第6章加强了MOS管的内容。在第4~6章的学习中,读者应具备了足够的基础知识。第7、8章分别介绍了集成运算放大电路和放大电路中的反馈。这两章尽量简化定量分析,突出定性分析,力求简明扼要、系统性强。第9章是在前面几章学习的基础上,讲解集成运算放大器的应用,包括信号的运算与产生电路。第10章介绍直流电源。

该课程总学时约为80学时,其中课堂讲授约为66学时,电路基础部分约为20学时,模拟电子技术部分约为46学时。由于涉及的内容较多,有些内容可以在教师指点下让学生通过自学掌握,不必全在课堂上讲授,并建议配套使用现代教学手段,以提高教学质量和效率。

本书配备了大量的例题,每章后面附有习题,这些例题和习题与教材内容紧密配合,深度适当。书末附有部分习题的参考答案,以供读者参考。本书提供多媒体电子课件,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书共10章,其中第1~3章由王宛苹编写,第4~8章由查丽斌编写,第9~10章由刘建岚编写,张海鹏编写了第4章的部分内容。全书由查丽斌主编。

本书在编写的过程中,参考了一些已经出版的教材和文献,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限及编写时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,诚恳地希望读者提出宝贵意见和建议,以便今后不断改进。

作 者

2007年9月

目 录

第 1 章 直流电路	1	2.1.1 电容元件及其性质	36
1.1 电路及电路模型	1	2.1.2 电感元件及其性质	38
1.2 电路变量	1	2.2 换路定则及其初始条件	39
1.2.1 电流和电压的参考方向	1	2.2.1 换路定则	39
1.2.2 电压和电压的参考方向	2	2.2.2 初始条件确定	40
1.2.3 功率和能量	3	2.3 一阶电路零输入响应	41
1.3 电阻元件	4	2.4 一阶电路零状态响应	45
1.4 电压源与电流源	6	2.5 一阶电路完全响应	49
1.4.1 理想电压源	6	2.6 三要素法求一阶电路响应	50
1.4.2 理想电流源	6	习题 2	54
1.4.3 实际电源的两个电路模型	6	第 3 章 正弦稳态电路的分析	57
1.5 基尔霍夫定律	9	3.1 正弦交流电的基本概念	57
1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	9	3.1.1 周期和频率	57
1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	10	3.1.2 幅值和有效值	58
1.6 单口网络及等效	11	3.1.3 相位和相位差	58
1.6.1 电阻的串并联及等效	11	3.2 正弦量的相量表示	60
1.6.2 理想电源的等效变换	13	3.3 基尔霍夫定律的相量表示	62
1.6.3 实际电压源和实际电流源的等效	15	3.4 3 种基本元件伏安关系的相量形式	63
1.7 电位的概念与计算	16	3.4.1 电阻元件 R	63
1.8 支路电流分析法	17	3.4.2 电感元件 L	63
1.9 节点分析法	19	3.4.3 电容元件 C	64
1.10 叠加定理	21	3.5 简单正弦交流电路	65
1.11 等效电源定理	23	3.5.1 RLC 串联交流电路	65
1.11.1 戴维南定理	23	3.5.2 阻抗的串并联	67
1.11.2 诺顿定理	24	3.6 正弦稳态电路分析	69
1.12 含受控源的电阻电路	26	3.7 正弦稳态电路的功率	70
1.12.1 受控电源	26	3.7.1 瞬时功率	70
1.12.2 含受控源电阻电路的分析	27	3.7.2 有功功率及功率因数	71
习题 1	30	3.7.3 无功功率和视在功率	72
第 2 章 一阶动态电路的暂态分析	36	3.8 交流电路的频率特性	74
2.1 电容元件与电感元件	36	3.8.1 滤波电路	75

3.8.2 串联谐振·····	78	5.1.1 二极管的基本结构·····	119
3.8.3 并联谐振·····	80	5.1.2 二极管的伏安特性·····	120
3.9 三相电路·····	81	5.1.3 二极管的主要参数·····	122
3.9.1 三相电源·····	81	5.2 晶体二极管电路的分析方法·····	123
3.9.2 负载星形连接的三相电路 分析·····	83	5.2.1 晶体二极管的模型·····	123
3.9.3 负载三角形连接的三相电路 分析·····	85	5.2.2 晶体二极管电路的分析 方法·····	125
习题 3·····	86	5.3 晶体二极管的应用及直流稳压 电源·····	127
第 4 章 模拟集成运算放大器及其应用 ·····	92	5.3.1 直流稳压电源的组成·····	127
4.1 放大电路概述及其主要性能 指标·····	92	5.3.2 小功率整流滤波电路·····	128
4.1.1 放大电路概述·····	92	5.3.3 稳压管稳压电路·····	131
4.1.2 放大电路的方框图及其主要 性能指标·····	92	5.3.4 三端集成稳压器·····	133
4.2 模拟集成电路运算放大器·····	95	5.4 半导体器件型号命名及方法 (根据国家标准 GB249-74)·····	136
4.2.1 集成电路运算放大器的内部 组成单元·····	95	习题 5·····	137
4.2.2 差分放大电路的概念·····	95	第 6 章 晶体三极管及其放大电路 ·····	142
4.2.3 集成运放的符号、模型及其 电压传输特性·····	97	6.1 晶体三极管的外部特性·····	142
4.3 理想集成运算放大器·····	98	6.1.1 晶体管的类型及符号·····	142
4.3.1 理想集成运算放大器的主要 参数·····	98	6.1.2 晶体管的电流分配与放大 作用·····	143
4.3.2 理想运算放大器工作在线性 区的特点·····	99	6.1.3 晶体管的共射特性曲线·····	144
4.3.3 理想运算放大器工作在线性 区的特点·····	100	6.1.4 晶体管的主要参数·····	147
4.4 基本运算电路·····	100	6.2 放大电路的组成和工作原理·····	148
4.4.1 比例运算电路·····	100	6.2.1 基本共射极放大电路的组成·····	148
4.4.2 加减运算电路·····	103	6.2.2 基本共射极放大电路的工作 原理·····	150
4.4.3 积分和微分运算电路·····	107	6.3 放大电路的分析·····	150
4.5 电压比较器·····	109	6.3.1 直流通路与交流通路·····	151
4.5.1 简单电压比较器·····	109	6.3.2 静态分析·····	153
4.5.2 迟滞电压比较器·····	111	6.3.3 动态分析·····	154
习题 4·····	113	6.3.4 图解法分析放大电路的非线 性失真和动态范围·····	160
第 5 章 半导体二极管及直流稳压电源 ·····	119	6.4 晶体管放大电路的三种接法·····	164
5.1 半导体二极管的外部特性·····	119	6.4.1 静态工作点稳定的共射极 放大电路·····	164
		6.4.2 共集电极放大电路·····	168
		6.4.3 共基极放大电路·····	171

6.4.4	三种基本放大电路的性能比较	172	计算	222
6.5	电流源电路	174	8.2.4	双电源互补对称电路中功放管的选择
6.5.1	镜像电流源电路	174	8.2.5	单电源互补对称功率放大电路
6.5.2	比例式电流源电路	176	8.2.6	平衡桥式功率放大电路
6.5.3	微电流源电路	176	8.3	复合管在功率放大电路中的应用
6.5.4	电流源作有源负载	177	8.3.1	复合管的接法及其 β
习题 6		177	8.3.2	复合管组成的互补对称功放电路
第 7 章	场效应管放大电路与放大电路的频率响应	185	8.4	集成功率放大电路
7.1	场效应管的外部特性	185	8.4.1	通用功放芯片 LM386
7.1.1	增强型 MOS 管的外部特性	185	8.4.2	专用音频集成功放芯片 TDA2030
7.1.2	耗尽型 MOS 管的外部特性	188	习题 8	230
7.1.3	JFET 的外部特性	189	第 9 章	负反馈放大电路
7.1.4	各种场效应管的特性比较	189	9.1	反馈的基本概念与分类
7.2	场效应管放大电路	191	9.1.1	反馈的基本概念
7.2.1	场效应管放大电路的直流偏置及静态分析	191	9.1.2	反馈的类型
7.2.2	场效应管的微变等效电路	194	9.1.3	交流负反馈的 4 种基本组态
7.2.3	共源极放大电路的动态分析	196	9.2	负反馈放大电路的方框图及一般表达式
7.2.4	共漏极放大电路的动态分析	197	9.2.1	负反馈放大电路的一般表达式
7.3	放大电路的频率响应	200	9.2.2	4 种组态负反馈放大电路的增益和反馈系数的表达式
7.3.1	晶体三极管的高频等效模型	201	9.3	负反馈对放大电路性能的影响
7.3.2	单管共射极放大电路的频率特性分析	204	9.3.1	提高放大倍数的稳定性
7.3.3	场效应管的频率响应	210	9.3.2	减小非线性失真
7.3.4	多级放大电路的频率特性	212	9.3.3	展宽通频带
习题 7		214	9.3.4	负反馈对输入、输出电阻的影响
第 8 章	低频功率放大电路	219	9.4	深度负反馈放大电路的分析
8.1	功率放大电路概述	219	计算	248
8.1.1	功率放大电路的特点	219	9.4.1	深度负反馈条件
8.1.2	功率放大电路类型	220	9.4.2	虚短和虚断概念的运用
8.2	互补对称功率放大电路	221	习题 9	251
8.2.1	双电源互补对称电路的组成及工作原理	221		
8.2.2	甲乙类双电源互补对称功率放大电路	221		
8.2.3	双电源互补对称电路的分析			

第 10 章 信号产生与处理电路	255	10.3 有源滤波电路	270
10.1 正弦波振荡电路	255	10.3.1 有源低通滤波器	270
10.1.1 正弦波振荡电路的振荡 条件	255	10.3.2 有源高通滤波器	272
10.1.2 RC 文氏桥正弦波振荡 电路	256	10.3.3 有源带通滤波器	273
10.1.3 LC 正弦波振荡器	258	10.3.4 有源带阻滤波器	274
10.1.4 石英晶体振荡器	263	习题 10	275
10.2 非正弦波产生电路	266	附录 A Multisim 软件简介	279
10.2.1 方波发生器	266	附录 B 本书常用文字符号说明	290
10.2.2 三角波发生器	267	附录 C 部分习题答案	294
10.2.3 锯齿波发生器	269	参考文献	302

第1章 直流电路

本章介绍电路模型的概念，电路的基本物理量——电压、电流及功率；结合直流电路介绍电阻元件、独立电源、受控电源及它们的伏安关系 VAR，重点讨论电路的基本定律、基本定理和基本分析方法。为后续的专业课程学习奠定基础。

1.1 电路及电路模型

现实生活中遇到的各种实际电路都是由一些电子元器件按一定方式相互连接而组成的。例如，常用的日光灯照明电路是由灯管、镇流器、启辉器、开关和交流电源相互连接而组成的。收音机是由一定数量的晶体管（或集成电路器件）、电容器、电感器、扬声器及直流电源等元器件组成的。不同电路可以实现不同的应用任务，其电路的具体形式多种多样，所使用的元器件也是多种多样的，往往一个实际元器件呈现多种物理性质。比如一个用导线绕成的线圈，当通有电流时不仅会产生磁通，形成磁场，而且还有能量的消耗。此外，线圈的匝与匝之间还存在分布电容，因此该元器件不仅具有电感性质，还有电阻性质及电容性质。

由此可见，若以实际电路为研究对象，必然使所有实际元器件的电磁性能交织在一起，处理起来较为复杂。为了便于对电路进行分析计算，在一定条件下，需要对实际元器件加以近似、理想化，即用一个表征其主要物理特性的理想元件来代替它，这种理想化的元件称为理想电路元件，简称为电路元件。它是实际元器件的模型，任何实际电路元器件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表征。如小灯泡，只用一个电阻元件 R_L 作为它的模型，而干电池则要由电压源和电阻元件串联构成。由于理想元件没有体积，特性集中在空间的一点上，故又称为集总参数元件，由集总参数元件组成的电路称集总电路，它是实际电路的模型。电路理论分析的是电路模型，而不是实际电路。

电路的一个作用是实现电能的传输与转换，如照明电路，它将电源提供的电能传输至照明灯，并转化为光能；另一个作用是传递和处理信号，如收音机、电视机，它们通过接收天线接收载有声音、图像信息的电磁波信号后，经过选频、放大和处理，最后由扬声器或显像管复原出原信号。

不论是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，都是通过电流、电压和电动势来实现的，所以在分析电路之前，首先讨论电路的几个物理量。

1.2 电路变量

1.2.1 电流和电流的参考方向

电流是由电荷有规则地定向运动而形成的。其大小用电流强度表示：把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，用符号 $i(t)$ 表示，其数学表达式为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

电流方向规定为正电荷运动的方向。如果电流大小及方向都不随时间变化,则称恒定电流,简称直流(简称为DC),用大写的斜体字母*I*表示。如果*i(t)*是时间*t*的函数,称为时变电流,简称为*i*,时变电流的大小和方向都随时间做周期性变化,故称为交流电流(简称为AC)。

在国际单位制(SI)中,电荷的单位是库仑(C),时间的单位是秒(s),电流的单位是安培(A),则有 $1(\text{A}) = \frac{1(\text{C})}{1(\text{s})}$,常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)。

安培(A)是电流的基本单位,换算关系为: $1\text{kA} = 10^3\text{A}$, $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

在对电路进行分析时,如果电路较为复杂,一般预先无法知道电流的实际方向,因此先设定一个方向,称为参考方向,电流的参考方向任意选择,在电路中用实线箭头来表示。例如图1.2.1所示的一段电路,其中长方框表示一个两端元件。

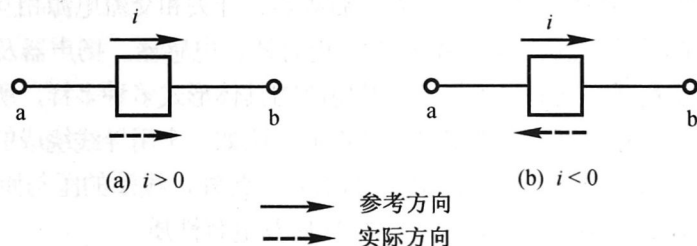


图 1.2.1 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

图1.2.1(a)中,电流的参考方向与实际方向一致, $i > 0$ 电流为正值;图1.2.1(b)中,电流的参考方向与实际方向相反, $i < 0$ 电流为负值。所以只有在选定了参考方向后,电流才有正负之分。注意,电路图中标明的电流方向均为参考方向,一般不标实际方向,电流的实际方向是用电流的参考方向 and 该电流数值的正、负号一起加以判断的。

1.2.2 电压和电压的参考方向

电路中 a、b 两点间的电压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。其数学表达式为

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.2)$$

电压反映了单位正电荷由 a 点运动到 b 点所获取或失去的能量。例如,正电荷由 a 点运动到 b 点时失去能量,即 a 点能量高, b 点能量低,则 a 为正极, b 为负极。

规定电路中两点之间由高电位指向低电位,即电位降方向为电压的实际方向。电压的方向用+、-极性表示,也可用箭头来表示,还可以用双下标来表示,如图1.2.2所示。 u_{ab} 表示 a 为正极性, b 为负极性,而 u_{ba} 正好相反,并且有 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。同电流一样,对一个较复杂的电路,电压实际方向也是预先无法知道的,因此也要假设一个参考方向。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压值为正,反之为负。

如果电压大小和极性都不随时间而变化,则称恒定电压或直流电压,用大写的斜体字母*U*表示。如果电压是时间*t*的函数,称为时变电压,用小写的斜体字母*u*表示。

在国际单位制 (SI) 中能量的单位是焦耳 (J), 电荷的单位是库仑 (C), 电压的单位是伏特 (V), 则有 $1(\text{V}) = \frac{1(\text{J})}{1(\text{C})}$, 此外, 电压的常用单位还有千伏 (kV) 和毫伏 (mV), 且有 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ 。

一般情况下, 电路在工作时, 其电路元件上既存在电流又存在电压, 而电压和电流都有各自的参考方向, 这样就有关联参考方向 (简称关联方向) 和非关联参考方向 (简称非关联方向) 两种。图 1.2.3(a) 中, 电流从电压的正端流入, 即电流的参考方向与电压的参考极性一致, 称关联参考方向, 图 1.2.3(b) 正好相反, 称非关联参考方向。在对电路进行分析时应尽可能选用关联参考方向。

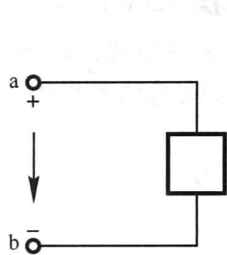
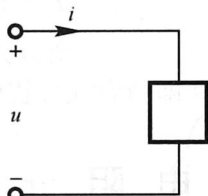
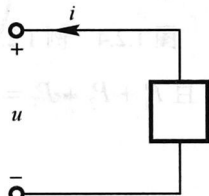


图 1.2.2 电压的方向



(a) 关联参考方向



(b) 非关联参考方向

图 1.2.3 关联和非关联参考方向

引入关联参考方向后, 只需在电路图中标出电流参考方向或电压参考极性中的任何一种就可以了。

1.2.3 功率和能量

除了电压和电流外, 功率和能量的计算在电路分析中也是很重要的。

电功率 (简称功率) 可以用来反映电能转换的快慢, 定义为: 单位时间内吸收 (或产生) 的电能量, 即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.3)$$

由于 $i(t) = \frac{dq}{dt}$, $u(t) = \frac{dw}{dq}$, 所以

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.2.4)$$

在直流电路中

$$P = UI \quad (1.2.5)$$

把能量传输的方向定为功率方向, 当电压、电流为关联参考方向时, 计算功率时采用式 (1.2.4), 若为非关联参考方向时, 则 $p(t) = -u(t)i(t)$ 。计算结果中, 若 $p(t)$ 为正值, 表明该元件吸收电功率; 若 $p(t)$ 为负值, 表明该元件提供功率或产生功率。元件在电路中提供电功率, 起到电源作用的称为电源; 吸收电功率, 起到负载作用的称为负载。一般来说:

吸收功率 = -产生功率

在国际单位制 (SI) 中, 能量的单位是焦耳 (J), 时间的单位是秒 (s), 功率的单位是瓦特 (W), 则有 $1(\text{W}) = \frac{1(\text{J})}{1(\text{s})}$, 功率的常用单位还有毫瓦 (mW)、千瓦 (kW) 和兆瓦 (MW), 且有 $1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$, $1\text{kW} = 10^3\text{W}$, $1\text{MW} = 10^6\text{W}$ 。

根据式 (1.2.3) 可求得能量

$$w(t) = \int_{-\infty}^t P(\lambda) d\lambda \quad (1.2.6)$$

在 $t_1 \sim t_2$ 的时间内元件的能量变化为 $\int_{t_1}^{t_2} P(\lambda) d\lambda$ 。

【例 1.2.1】图 1.2.4 所示电路由 6 个元件组成, 已知 $U_1 = 2\text{V}$, $U_2 = 3\text{V}$, $U_3 = 5\text{V}$, $U_4 = -3\text{V}$, $U_5 = U_6 = 2\text{V}$, $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = 1\text{A}$, $I_3 = -3\text{A}$, $I_4 = -2\text{A}$, $I_5 = -1\text{A}$; 求每个元件的功率并指出哪些是电源哪些是负载。

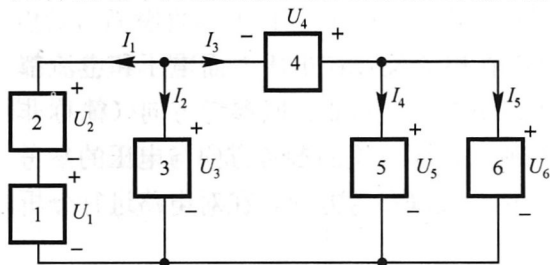


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

解: $P_1 = U_1 I_1 = 2 \times 2 = 4(\text{W})$ (吸收)

$P_2 = U_2 I_1 = 3 \times 2 = 6(\text{W})$ (吸收)

$P_3 = U_3 I_2 = 5 \times 1 = 5(\text{W})$ (吸收)

$P_4 = -U_4 I_3 = -(-3) \times (-3) = -9(\text{W})$ (产生)

$P_5 = U_5 I_4 = 2 \times (-2) = -4(\text{W})$ (产生)

$P_6 = U_6 I_5 = 2 \times (-1) = -2(\text{W})$ (产生)

所以元件 1、2 和 3 是负载, 4、5 和 6 是电源, 而且 $P_1 + P_2 + P_3 = -(P_4 + P_5 + P_6)$, 即所有元件提供的功率与吸收的功率相等。

1.3 电阻元件

电路中表示材料电阻特性的元件称为电阻器, 电阻元件是从实际电阻器中抽象出来的模型。线性电阻元件在电压与电流参考方向关联时, 如图 1.3.1(a)所示, 其两端的电压和电流的关系服从欧姆定律, 即有

$$u = R i \quad (1.3.1)$$

式中, R 是常数, 称为电阻, 单位为欧姆 (Ω)。常用的电阻单位还有千欧 ($\text{k}\Omega$) 和兆欧 ($\text{M}\Omega$)。换算关系为 $1\text{k}\Omega = 10^3 \Omega$, $1\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$ 。

欧姆定律体现了电阻器对电流呈现阻力的本质。若 u 与 i 为非关联参考方向, 则欧姆定律应改为 $u = -R i$ 。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标, 电流取为横坐标, 可绘出 $i-u$ 平面上的曲线, 称为电阻元件的伏安特性曲线。显然, 线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线, 电阻值可由直线的斜率来确定, 如图 1.3.1(b)所示。

电阻元件还可由另一个参数电导表示, 电导 $G = 1/R$, 单位为西门子, 符号为 S 。用电导表征线性电阻元件时, 欧姆定律为

$$i = G u \quad (1.3.2)$$

从线性电阻元件特性曲线可以看出, 任一时刻电阻的电压 (或电流) 由同一时刻的电流 (或电压) 所决定。也就是说, 线性电阻的电压不能“记忆”电流在“历史”上起过的作用。所以称为无记忆元件。对于任意一个二端元件, 只要电压和电流之间存在代数关系, 就是无记忆元件。

线性电阻有两个特殊情况——开路和短路。当电阻元件开路时, 无论电压为何值, 其上的电流恒等于零, 如图 1.3.1(c)所示。当电阻元件短路时, 无论电流为何值, 其上电压恒等于零, 如图 1.3.1(d)所示。

如果电阻不是常数, 其值随电压或电流的大小或方向而改变, 则称为非线性电阻, 二极管是典型的非线性电阻, 图 1.3.2(a)所示为二极管的电路符号。它的特性曲线由整条伏安特性曲线表示, 如图 1.3.2(b)所示。所以不能笼统地说它是多少欧姆的电阻。

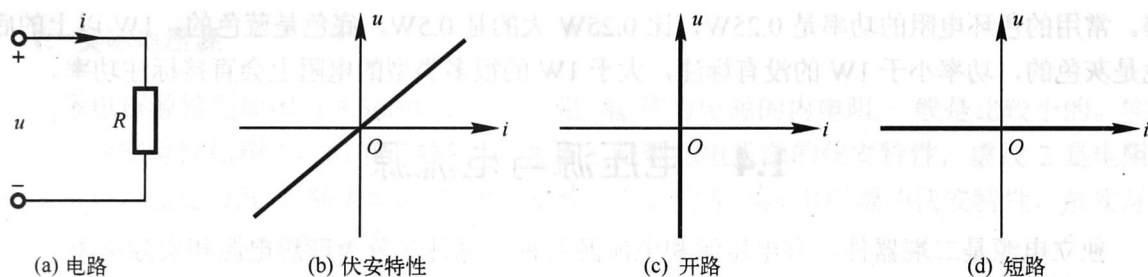


图 1.3.1 电阻元件及其伏安特性

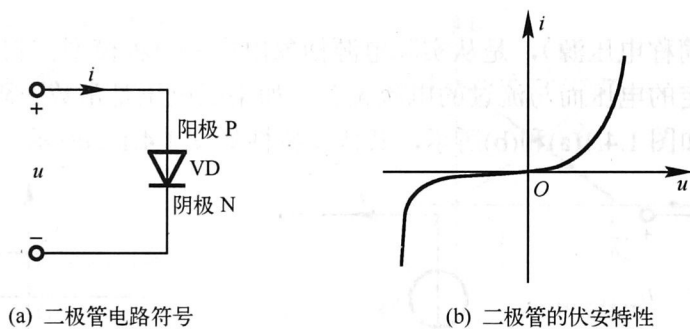


图 1.3.2 二极管

电阻元件除了线性和非线性外，还有时变和非时变（或时不变）之分，特性曲线不随时间变化的称为非时变的，否则称为时变的。

线性电阻元件在电压和电流的关联参考方向下

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

若 R 和 G 是正实常数，则功率 p 为正值，说明电阻元件消耗能量、吸收功率。

电阻器在电路中常用作电压调整、电流调整和作为负载电阻，电阻器的主要参数包括：电阻值、允许偏差、额定功率等。

(1) 标称阻值和容许误差

标称阻值是指电阻器上标出的名义阻值。而实际上，阻值往往与标称阻值有一定的偏差，这个偏差与标称阻值的百分比称为容许误差，简称容差，容差越小，电阻器精度越高，国家标准规定普通电阻器的容差有 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 三个等级。商用电阻元件的标称值是按下列标准给出的容差为 $\pm 20\%$ 的廉价电阻在 $0 \sim 10\Omega$ 之间分为 6 挡，每挡大约相差 1.5 倍，即前一挡阻值乘以 1.5 取两位有效数字就是后一挡阻值，一共有 6 种阻值：1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8，阻值在 $10 \sim 100\Omega$ 之间也为 6 挡，其值在上述阻值上乘以 10，依次类推，每升一级，加一个 0，就得到 $\pm 20\%$ 容差的整个系列的标称值。

容差为 $\pm 10\%$ 的电阻每挡大约相差 1.222 倍，共有 12 种阻值：1.0、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2。

容差为 $\pm 5\%$ 的电阻每挡大约相差 1.105 倍，有 24 种阻值：1.0、1.1、1.2、1.3、1.5、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.7、3.0、3.3、3.6、3.9、4.3、4.7、5.1、5.6、6.2、6.8、7.6、8.2、9.1。

(2) 额定功率

额定功率是指一个电阻可以耗散的最大功率。小型电阻器的外形尺寸及体积反映了其额定功率大小，通常额定功率有 $1/20W$ 、 $1/16W$ 、 $1/8W$ 、 $1/4W$ 、 $1/2W$ 、 $1W$ 、 $2W$ 、 $5W$ 、 $10W$

等。常用的色环电阻的功率是 0.25W ，比 0.25W 大的是 0.5W ，底色是蓝色的。 1W 以上的底色是灰色的，功率小于 1W 的没有标注，大于 1W 的很多类型的电阻上会直接标注功率。

1.4 电压源与电流源

独立电源是二端器件，有电压源和电流源两种，每种又分为理想电源和实际电源。

1.4.1 理想电压源

理想电压源（简称电压源），是从实际电源抽象出来的一种模型。它是一个二端元件，其两端总能保持一定的电压而与流过的电流无关。如果端电压是常数（固定不变），称为直流电压源，其符号如图 1.4.1(a)和(b)所示，其伏安特性如图 1.4.1(c)所示。

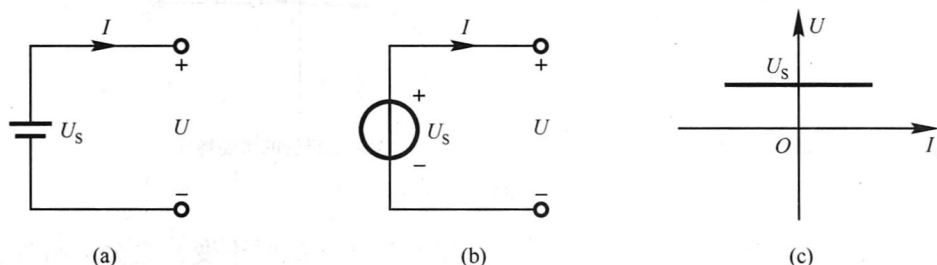


图 1.4.1 直流电压源符号及伏安特性

理想电压源的电压是定值，由它本身确定，而流过它的电流则是任意值，由与之连接的外电路决定。

1.4.2 理想电流源

理想电流源（简称电流源），也是从实际电源抽象出来的一种模型。它是一个二端元件，从其端钮上总能提供一定的电流而与端电压无关。如果电流为常数，称为直流电流源，其符号如图 1.4.2(a)所示，伏安特性如图 1.4.2(b)所示。

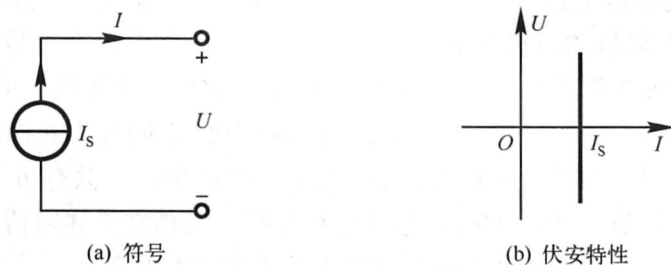


图 1.4.2 直流电流源

理想电流源的电流是定值，由它本身确定，而它两端的电压则是任意值，由与之连接的外电路决定。

1.4.3 实际电源的两个电路模型

实际电源有干电池、蓄电池、光电池、发电机等，实际电源的电路模型由产生电能的电源元件和消耗电能的电阻元件组合而成。