



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

电路与模拟电子技术基础 (第2版)

查丽斌 主 编
王宛莘 刘建岚 李自勤 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
电子电气基础课程规划教材

电路与模拟电子技术基础

(第2版)

查丽斌 主编

王宛苹 刘建岚 李自勤 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、场效应管及其基本放大电路、滤波电路及放大电路的频率响应、负反馈放大电路、波形产生电路等。本书配备大量例题和习题，并提供配套多媒体电子课件和习题答案。

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. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2011.8

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-13819-5

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 (2011) 第 110615 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳

特约编辑: 曹剑锋

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 19.75 字数: 512 千字

印 次: 2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 36.00 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。

质量投诉请发邮件至 zltts@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 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	38
1.1 电路及电路模型	1	2.1.2 电感元件及其性质	40
1.2 电路变量	1	2.2 换路定则及其初始条件	41
1.2.1 电流和电流的参考方向	1	2.2.1 换路定则	41
1.2.2 电压和电压的参考方向	2	2.2.2 初始条件确定	42
1.2.3 电位	3	2.3 一阶电路零输入响应	43
1.2.4 功率和能量	4	2.4 一阶电路零状态响应	48
1.3 电阻元件	5	2.5 一阶电路完全响应	52
1.4 电压源与电流源	6	2.6 三要素法求一阶电路响应	53
1.4.1 理想电压源	6	习题 2	57
1.4.2 理想电流源	7	第 3 章 正弦稳态电路的分析	61
1.4.3 实际电源的两个电路模型	7	3.1 正弦交流电的基本概念	61
1.5 基尔霍夫定律	9	3.1.1 周期和频率	62
1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	10	3.1.2 幅值和有效值	62
1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	11	3.1.3 相位和相位差	62
1.6 单口网络及等效	11	3.2 正弦量的相量表示	64
1.6.1 电阻的串并联及等效	12	3.3 基尔霍夫定律的相量表示	66
1.6.2 理想电源的等效变换	14	3.4 3 种基本元件伏安关系的 相量形式	67
1.6.3 实际电压源和实际电流源的 等效	15	3.4.1 电阻元件 R	67
1.7 支路电流分析法	17	3.4.2 电感元件 L	68
1.8 节点分析法	19	3.4.3 电容元件 C	69
1.9 叠加定理	21	3.5 简单正弦交流电路	70
1.10 等效电源定理	23	3.5.1 RLC 串联交流电路	70
1.10.1 戴维南定理	23	3.5.2 阻抗的串并联	72
1.10.2 诺顿定理	25	3.6 正弦稳态电路分析	73
1.11 含受控源的电阻电路	26	3.7 正弦稳态电路的功率	76
1.11.1 受控电源	26	3.7.1 瞬时功率	76
1.11.2 含受控源电阻电路的分析	27	3.7.2 有功功率及功率因数	76
习题 1	31	3.7.3 无功功率和视在功率	77
第 2 章 一阶动态电路的暂态 分析	38	3.8 正弦稳态电路中的谐振	80
2.1 电容元件与电感元件	38	3.8.1 串联谐振	80
		3.8.2 并联谐振	82

3.9 三相电路	83	5.1.1 本征半导体	118
3.9.1 三相电源	84	5.1.2 杂质半导体	119
3.9.2 负载星形连接的三相电路 分析	86	5.1.3 PN 结的形成及特性	120
3.9.3 负载三角形连接的三相 电路分析	87	5.2 半导体二极管	124
习题 3	89	5.2.1 二极管的基本结构	124
第 4 章 模拟集成运算放大电路	95	5.2.2 二极管的伏安特性	125
4.1 放大电路概述及其主要 性能指标	95	5.2.3 二极管的主要参数	126
4.1.1 放大电路概述	95	5.3 晶体二极管电路的分析 方法	127
4.1.2 放大电路的方框图及其主要 性能指标	95	5.3.1 晶体二极管的模型	127
4.2 模拟集成电路运算放大器	98	5.3.2 晶体二极管电路的分析方法	129
4.2.1 集成电路运算放大器的内部 组成单元	98	5.4 晶体二极管的应用及直流 稳压电源	131
4.2.2 差分放大电路的概念	98	5.4.1 直流稳压电源的组成	132
4.2.3 集成运放的符号、模型及其 电压传输特性	100	5.4.2 小功率整流滤波电路	132
4.3 理想集成运算放大器	101	5.4.3 稳压管稳压电路	135
4.3.1 理想集成运算放大器的 主要参数	101	5.4.4 三端集成稳压器	137
4.3.2 理想运算放大器工作在 线性区的特点	102	5.5 半导体器件型号命名及方法 (根据国家标准 GB249-74)	141
4.3.3 理想运算放大器工作在 非线性区的特点	102	习题 5	141
4.4 基本运算电路	103	第 6 章 晶体三极管及其放大 电路	146
4.4.1 比例运算电路	103	6.1 晶体三极管	146
4.4.2 加减运算电路	105	6.1.1 晶体管的结构及其类型	146
4.4.3 积分和微分运算电路	108	6.1.2 晶体管的电流分配与放大 作用	148
4.5 集成运放的主要参数	110	6.1.3 晶体管的共射特性曲线	149
4.5.1 集成运放的主要参数	110	6.1.4 晶体管的主要参数	152
4.5.2 通用型集成运放的引脚说明	112	6.2 放大电路的组成和工作 原理	153
4.5.3 集成运算放大器使用 注意事项	112	6.2.1 基本共射极放大电路的组成	153
习题 4	114	6.2.2 基本共射极放大电路的 工作原理	154
第 5 章 半导体二极管及直流 稳压电源	118	6.3 放大电路的分析	155
5.1 半导体的基础知识	118	6.3.1 直流通路与交流通路	156
		6.3.2 静态分析	157
		6.3.3 动态分析	158
		6.3.4 图解法分析放大电路的非线性 失真和动态范围	164

6.4	晶体管放大电路的三种接法	167	第 8 章	滤波电路及放大电路的频率响应	228
6.4.1	静态工作点稳定的共射极放大电路	168	8.1	有源滤波电路	228
6.4.2	共集电极放大电路	172	8.1.1	滤波电路的基本概念与分类	228
6.4.3	共基极放大电路	175	8.1.2	低通滤波器	232
6.4.4	三种基本放大电路的性能比较	177	8.1.3	高通滤波器	234
6.5	电流源电路	179	8.1.4	带通滤波器	235
6.5.1	镜像电流源电路	179	8.1.5	带阻滤波器	235
6.5.2	比例式电流源电路	180	8.2	放大电路的频率响应	236
6.5.3	微电流源电路	180	8.2.1	晶体管的高频等效模型	236
6.5.4	电流源作有源负载	181	8.2.2	放大电路的频率响应分析	240
6.6	功率放大电路	181	8.2.3	多级放大电路的频率特性	244
6.6.1	功率放大电路概述	182	习题 8		245
6.6.2	互补对称功率放大电路	183	第 9 章	负反馈放大电路	248
6.6.3	采用复合管的互补对称功率放大电路	187	9.1	反馈的基本概念与分类	248
6.6.4	集成功率放大电路	189	9.1.1	反馈的基本概念	248
习题 6		190	9.1.2	四种类型的反馈组态	249
第 7 章	场效应管及其基本放大电路	204	9.2	负反馈放大电路的方框图及一般表达式	255
7.1	金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应管	204	9.2.1	负反馈放大电路的一般表达式	255
7.1.1	增强型 MOS 管	204	9.2.2	四种组态负反馈放大电路的增益和反馈系数的表达式	256
7.1.2	耗尽型 MOS 管	207	9.3	负反馈对放大器性能的改善	258
7.2	结型场效应管 (JFET)	209	9.3.1	提高放大倍数的稳定性	258
7.2.1	JFET 的结构和工作原理	209	9.3.2	减小非线性失真	259
7.2.2	JFET 的特性曲线	211	9.3.3	展宽通频带	260
7.3	场效应管的主要参数及其各种 FET 的特性比较	211	9.3.4	负反馈对输入、输出电阻的影响	261
7.3.1	场效应管的主要参数	211	9.4	深度负反馈放大电路的分析计算	262
7.3.2	各种场效应管的特性比较	212	9.4.1	深度负反馈条件	262
7.4	场效应管放大电路	214	9.4.2	虚短和虚断概念的运用	262
7.4.1	场效应管的直流偏置及静态分析	214	习题 9		266
7.4.2	共源极放大电路的动态分析	217	第 10 章	波形产生电路	270
7.4.3	共漏极放大电路的动态分析	219	10.1	正弦波振荡电路	270
习题 7		221	10.1.1	正弦波振荡电路的振荡条件	270

10.1.2	RC 文氏桥正弦波振荡电路	271	10.2.3	三角波发生器	287
10.1.3	LC 正弦波振荡器	274	10.2.4	锯齿波发生器	289
10.1.4	石英晶体振荡器	279	习题 10		290
10.2	非正弦波产生电路	282	附录 A	本书常用文字符号说明	295
10.2.1	电压比较器	282	附录 B	部分习题答案	299
10.2.2	方波发生器	286	参考文献		308

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，而干电池则要用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： $1\text{kA} = 10^3\text{A}$ ， $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ， $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

电流的方向常用箭头表示，也可用双下标表示，如图 1.2.1 所示。

若用双下标表示，则 i_{ab} 表示电流的方向由 a 流向 b，显然有 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

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，参见图 1.2.2。

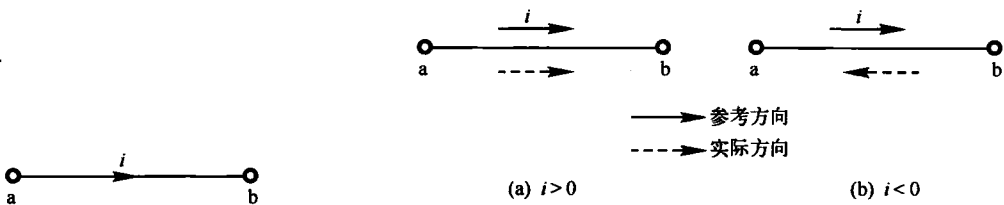


图 1.2.1 电流的表示

图 1.2.2 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

图 1.2.2(a)中，电流的参考方向与实际方向一致， $i > 0$ ，电流为正值；图 1.2.2(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。

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 1.2.3 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 1.2.4(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 1.2.4(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。

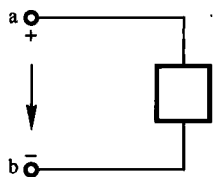


图 1.2.3 电压的方向

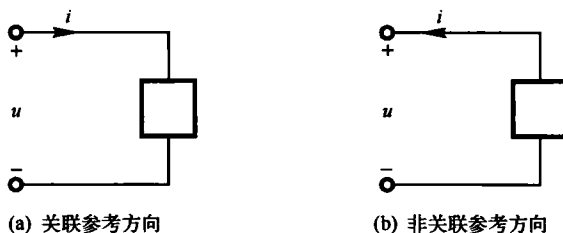


图 1.2.4 关联和非关联参考方向

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 电位

电压又称电位差。在电路分析特别是在电子电路中,常选取电路的某一点作为参考点,并将参考点电位规定为零,用符号“ \perp ”来表示,则其他点与参考点之间的电压就称为该点的电位。电位用 V 表示,如 a 点电位表示为 V_a 。 $U_{ab} = V_a - V_b$,即 a 、 b 间的电压为 a 点电位减去 b 点电位。

【例 1.2.1】 在图 1.2.5 所示的电路中,选 d 为参考点,已知 $V_a = 2\text{V}$, $V_b = 3\text{V}$, $V_c = 1\text{V}$,若选 a 为参考点,求 V_b 、 V_c 和 V_d 。

解: 当选 d 为参考点时,有

$$V_a = U_{ad} = 2(\text{V}), \quad V_b = U_{bd} = 3(\text{V}), \quad V_c = U_{cd} = 1(\text{V})$$

当选 a 为参考点时,有

$$V_b = U_{ba} = U_{bd} + U_{da} = U_{bd} - U_{ad} = 3 - 2 = 1(\text{V})$$

$$V_c = U_{ca} = U_{cd} + U_{da} = U_{cd} - U_{ad} = 1 - 2 = -1(\text{V})$$

$$V_d = U_{da} = -U_{ad} = -2(\text{V})$$

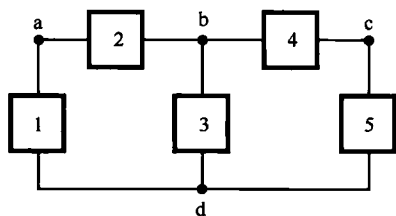


图 1.2.5 例 1.2.1 电路

可见，选择不同的参考点，电位会发生变化。因为电位与参考点选择有关，而任意两点间的电压不会改变，它与参考点选择无关。

1.2.4 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 $1(W) = \frac{1(J)}{1(s)}$ ，功率的常用单位还有毫瓦（mW）、千瓦（kW）和兆瓦（MW），且有 $1mW = 10^{-3}W$ ， $1kW = 10^3W$ ， $1MW = 10^6W$ 。

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 1.2.2】 图 1.2.6 所示电路由 6 个元件组成，已知 $U_1 = 2V$ ， $U_2 = 3V$ ， $U_5 = 2V$ ， $I_1 = 2A$ ， $I_2 = 1A$ ， $I_3 = -3A$ ， $I_4 = -2A$ ， $I_5 = -1A$ 。求：（1） U_3 、 U_4 和 U_6 ；（2）每个元件的功率并指出哪些是电源哪些是负载。

解：（1） $U_3 = U_1 + U_2 = 5(V)$ ， $U_4 = U_5 - U_3 = -3(V)$ ， $U_6 = U_5 = 2(V)$

（2）每个元件的功率为

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

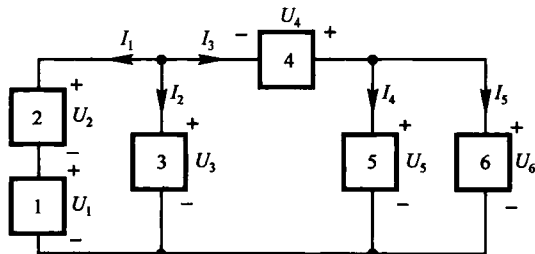


图 1.2.6 例 1.2.2 电路

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

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

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

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

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

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。

电阻元件还可用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。

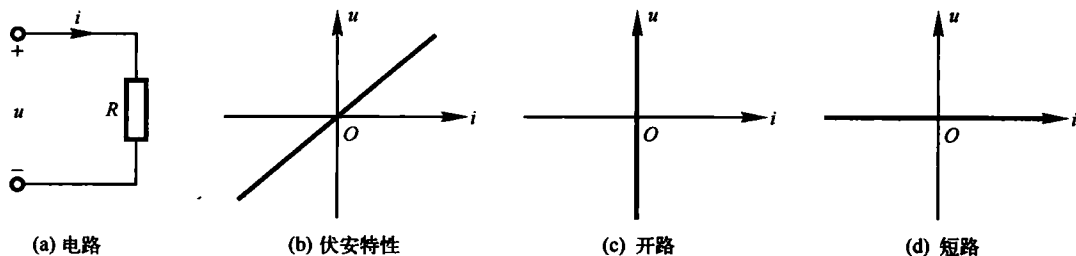


图 1.3.1 电阻元件及其伏安特性

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。

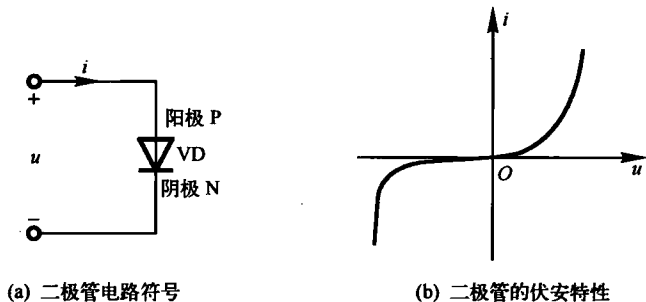


图 1.3.2 二极管

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。

最后讨论电阻元件的功率问题。在电压和电流的关联参考方向下，有

$$p = ui = R i^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \tag{1.3.3}$$

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。

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。

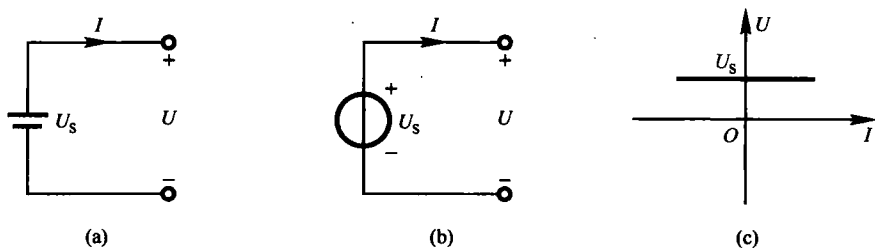


图 1.4.1 直流电压源符号及伏安特性

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。

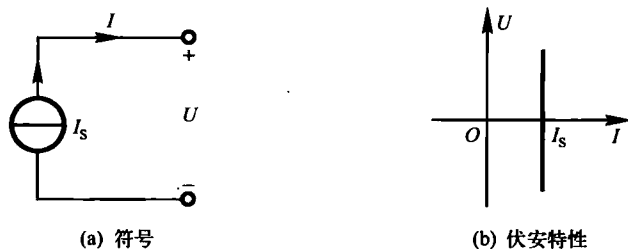


图 1.4.2 直流电流源

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。

1. 实际电压源

实际电压源模型如图 1.4.3(a)所示，其电阻 R_S 称为电源的内电阻，一般是比较小的。实际电压源伏安特性如图 1.4.3(b)所示。图中虚线 1 是理想电压源的伏安特性，虚线 2 是电阻的伏安特性，显然虚线 1 减去虚线 2 等于实线部分，它是实际电压源的伏安特性，故实际电压源的伏安关系（VAR）为

$$U = U_S - R_S I \quad (1.4.1)$$

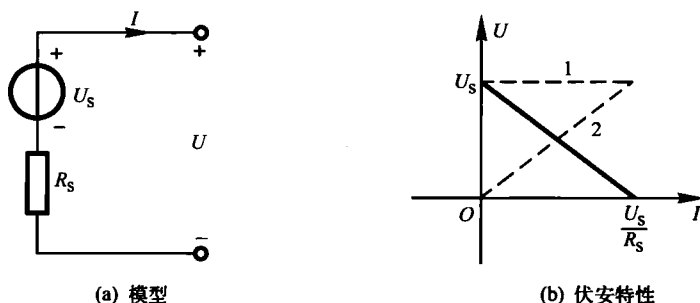


图 1.4.3 实际电压源

从图 1.4.3 可见，实际电压源的外特性是工作电压 U 随着电流的增加而下降，也就是说，实际电压源在向外提供电功率时，本身（在 R_S 上）也要消耗电功率，一个实际电压源

的内阻越小,越接近理想电压源的特性。

当实际电压源接负载时,如图 1.4.4 所示

根据负载情况的不同,可能会出现 3 种状态。

(1) 有载状态:此时 $U = IR_L$, $I = \frac{U_s}{R_s + R_L}$,若电路中电压、电流及功率的实际值等于

额定值(所谓的额定值是制造厂商为保证电路正常工作,在电器的铭牌上或产品说明书上所规定的电压、电流或功率的值),电路工作在额定状态,即满载状态时,设备的容量可得到充分的利用,当然实际电路不一定就工作在额定状态。

(2) 开路状态:此时 $R_L = \infty$, $I = 0$,即空载状态,开路时的电压用 U_{OC} 表示,开路电压最高, $U_{OC} = U_s$ 。

(3) 短路状态:此时 $R_L = 0$,短路时的电流用 I_{SC} 表示, $I_{SC} = \frac{U_s}{R_s}$,短路时电流最大。

【例 1.4.1】在图 1.4.5 所示直流电路中,已知额定功率 $P = 60W$ 、额定电压 $U = 30V$,内阻 $R_s = 0.5\Omega$,负载 R_L 可调,试求:(1)在额定工作状态下的电流 I 及负载电阻 R_L ;(2)开路电压;(3)短路电流。

解:(1) $I = \frac{P}{U} = \frac{60}{30} = 2(A)$, $R_L = \frac{U}{I} = \frac{30}{2} = 15(\Omega)$

(2) $U_{OC} = U_s = U + IR_s = 30 + 2 \times 0.5 = 31(V)$

(3) $I_{SC} = \frac{U_s}{R_s} = \frac{31}{0.5} = 62(A)$

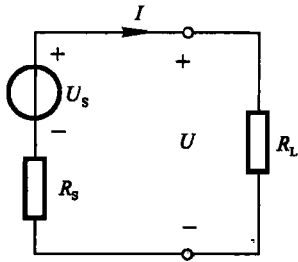


图 1.4.4 有载电压源电路

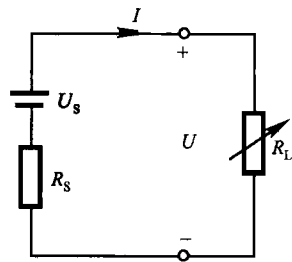


图 1.4.5 例 1.4.1 电路

由此可见,本题中短路电流是额定电流的 31 倍。由于一般电压源内阻 R_s 较小,故不可以将电压源短路,否则会因为短路电流太大而烧毁电源。因此,电压源在实际使用时必须加短路保护。

2. 实际电流源

图 1.4.6(a)所示为实际电流源的符号,其中, R_s 称为电流源的内阻,一般比较大。

图 1.4.6(b)中虚线 1 是理想电流源的伏安特性,虚线 2 是电阻的伏安特性,显然虚线 1 减去虚线 2 等于实线部分,它是实际电流源的伏安特性。其伏安关系为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} \quad (1.4.2)$$