



21st CENTURY
实用规划教材

全国高职高专
电子信息系列实用规划教材

模拟电子技术

原理与应用

主 编 张 虹 华
主 审 姜 华



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国高职高专电子信息系列实用规划教材

模拟电子技术原理与应用

主 编 张 虹
主 审 姜 华



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

为适应电子信息时代的新形式和高职院校培养应用型人才的迫切需要,经过教学改革与实践,我们编写了这本《模拟电子技术原理与应用》教材。

本教材知识全面,深入浅出,通俗易懂。在保证理论知识够用的同时,注重理论联系实际,培养学生各方面的实际能力。

全书共分9章:绪论,常用半导体器件,放大电路基础,集成运算放大器,放大电路中的反馈,集成运算放大器的应用,波形发生电路,功率放大电路,直流稳压电源。此外,为了配合理论教学,在附录部分编写了模拟电子技术的实验实训内容,包括常用电子仪器的使用,模拟电子技术基础实验,模拟电子技术设计性与综合性实验以及模拟电子技术实训。

各章均配有经典例题和习题,书后附有习题答案。

本书适于作为高职高专院校计算机、电子、通信、机电、控制等专业的教科书,也可作为自学考试和从事电子技术工程人员自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术原理与应用/张虹主编. —北京:北京大学出版社,2009.1

(全国高职高专电子信息系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-14655-2

I. 模… II. 张… III. 模拟电子—电子技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第185907号

书 名: 模拟电子技术原理与应用

著作责任者: 张 虹 主编

策 划 编 辑: 乐和琴

责 任 编 辑: 孙 琳

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-14655-2/TP·0990

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16开本 15.75印张 400千字

2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

定 价: 26.00元

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

举报电话:010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分，其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型人才。近年来，高等职业教育发展迅猛，其宏观规模发生了历史性变化。为适应我国社会进步和经济发展的需要，高等职业教育的教学模式、教学方法需要不断改革，高职教材也必须与之相适应，进行重新调整与定位，创建自己的特色，将理论与能力培养有机地结合。本书即是在这种思想的指导下组织编写的。

《模拟电子技术原理与应用》是电类各专业必修的技术基础课程，随着电子技术在各个领域越来越广泛的应用，它也越来越多地成为非电类专业的重要课程。然而由于学时数的限制以及高校培养目标的改革等诸多原因，以往的相关教材显得篇幅过于庞大，内容分散，容易造成学生学习吃力，负担过重，又由于各个专业对该门课程的不同教学要求，也迫切需要有一本比较简明、实用的教材。本书适于作为高职院校计算机、电子、通信、机电等专业的教科书，也可作为自学考试和从事电子技术工程人员自学用书。本教材总学时为 54 ~ 72(不含实验)。

本教材编者是双师型教师，有着丰富的工程实践经验，能够从实用角度出发对问题进行论证、阐述和选取例题、习题。总之，本教材注重了以下几方面的问题：

- (1) 保证基础，加强概念，培养思路。
- (2) 精选内容，主次分明，详略得当。
- (3) 面向更新，联系实际，理论与实践并重，知识与技能并重。
- (4) 问题分析深入浅出，文字叙述通俗易懂，图文并茂，例题精选，便于自学。
- (5) 理论知识以够用为目的，重点加强实际应用。例如，考虑到集成电路的发展及应用，本书大幅度压缩分立元件电路的设计和其他次要的内容，加强以集成运算放大器为主的模拟集成电路的功能和应用。

(6) 为了配合理论教学，在附录部分编写了模拟电子技术的实验实训内容，包括常用电子仪器的使用，模拟电子技术基础实验，模拟电子技术设计性与综合性实验以及模拟电子技术实训。

本书由张虹主编并执笔，姜华担任主审。此外，在大纲改证及教材编写过程中，高寒、李耀明、于钦庆、栾学德、王立梅、刘晓亮、刘均波、陈光军、刘贞德、李厚荣、张元国、解立明、齐丽丽、杜德老师给予了很大帮助，在此一并表示感谢。

《模拟电子技术原理与应用》较适宜的授课学时为“理论 54 + 实验 12”学时左右，各章的参考教学学时数如下表：

章 次 名	建议学时	章 次 名	建议学时
第 1 章 绪论	2	第 6 章 集成运算放大器的应用	6
第 2 章 常用半导体器件	6	第 7 章 波形发生电路	8
第 3 章 放大电路基础	8	第 8 章 功率放大电路	4
第 4 章 集成运算放大器	6	第 9 章 直流稳压电源	6
第 5 章 放大电路中的反馈	8		

此外，为了保证内容的系统性和连续性，我们还编写了系列教材《数字电子技术》和《实用电路基础》，连同本教材《模拟电子技术原理与应用》一起，将成为高等职业院校计算机、电子、通信、机电等专业非常实用的教学与学习用书。

编写过程中，由于时间仓促，加之水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请各方面的读者予以批评指正，以便今后不断改进。

编 者
2008年1月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.3 晶闸管的伏安特性	29
1.1 信号与电子系统	1	2.5.4 晶闸管的主要参数	29
1.1.1 模拟信号和数字信号	1	本章小结	30
1.1.2 电子系统	2	习题二	30
1.2 模拟电子技术课程的特点及学习方法	3	第 3 章 放大电路基础	34
1.2.1 模拟电子技术课程的特点	3	3.1 基本放大电路的组成	34
1.2.2 模拟电子技术课程的学习方法	3	3.1.1 基本放大电路的性能指标	34
1.3 电子电路的计算机辅助分析和设计	4	3.1.2 基本放大电路的组成	36
软件介绍	4	3.2 基本放大电路的工作原理及分析方法	37
1.3.1 PSpice	4	3.2.1 基本放大电路的工作原理	37
1.3.2 Multisim	5	3.2.2 基本放大电路的分析方法	39
第 2 章 常用半导体器件	6	3.3 放大电路静态工作点的稳定	45
2.1 半导体特性和 PN 结	6	3.3.1 温度对静态工作点的影响	45
2.1.1 半导体特性	6	3.3.2 静态工作点稳定电路	46
2.1.2 PN 结	7	3.4 共集电极放大电路	48
2.2 半导体二极管	9	3.4.1 电路的基本分析	48
2.2.1 二极管的结构和型号	9	3.4.2 共集电极电路的特点和应用	50
2.2.2 二极管的伏安特性	10	3.4.3 基本放大电路三种组态的性能比较	50
2.2.3 二极管的主要参数	11	3.5 场效应管放大电路	51
2.2.4 二极管的应用电路	11	3.5.1 静态分析	51
2.2.5 特殊二极管	13	3.5.2 动态分析	53
2.3 半导体三极管	16	3.6 多级放大电路	55
2.3.1 三极管的结构、外形及型号	16	3.6.1 多级放大电路的耦合方式	55
2.3.2 三极管的电流放大原理	18	3.6.2 多级放大电路的动态分析	57
2.3.3 三极管的共射特性曲线	20	本章小结	59
2.3.4 三极管的主要参数	21	习题三	59
2.4 场效应管	23	第 4 章 集成运算放大器	64
2.4.1 结型场效应管	23	4.1 集成电路概述	64
2.4.2 绝缘栅型场效应管	25	4.1.1 集成电路及其发展	64
2.4.3 场效应管和晶体管比较	27	4.1.2 集成电路的特点	64
2.5 晶闸管	27	4.1.3 集成电路的分类	65
2.5.1 晶闸管的结构和等效模型	27	4.1.4 集成电路制造工艺简介	66
2.5.2 晶闸管的工作原理	28	4.2 集成运算放大器的基本组成及功能	68

4.2.1 偏置电路·····	68	本章小结·····	102
4.2.2 输入级——差动放大电路·····	70	习题五·····	103
4.3 集成运算放大器的主要参数及选择·····	76	第6章 集成运算放大器的应用 ·····	107
4.3.1 集成运算放大器的主要参数·····	76	6.1 运算电路·····	107
4.3.2 集成运算放大器的选择·····	77	6.1.1 比例运算电路·····	107
4.4 集成运算放大器的使用·····	78	6.1.2 加减运算电路·····	112
4.4.1 集成运算放大器使用中注意的问题·····	78	6.1.3 积分和微分运算电路·····	115
4.4.2 集成运算放大器的保护·····	78	6.1.4 模拟乘法器及其应用·····	117
4.5 理想运算放大器·····	79	6.2 有源滤波器·····	119
4.5.1 理想运算放大器的技术指标·····	79	6.2.1 滤波电路概述·····	119
4.5.2 理想运算放大器的两种工作状态·····	80	6.2.2 无源滤波器·····	119
本章小结·····	82	6.2.3 有源滤波器·····	120
习题四·····	82	6.3 电压比较器·····	123
第5章 放大电路中的反馈 ·····	86	6.3.1 电压比较器概述·····	123
5.1 反馈的基本概念、分类及判别方法·····	86	6.3.2 单限比较器·····	124
5.1.1 反馈的基本概念·····	86	6.3.3 滞回电压比较器·····	124
5.1.2 反馈的分类及判断·····	87	6.3.4 双限电压比较器·····	126
5.2 负反馈的四种组态·····	90	本章小结·····	127
5.2.1 电压串联负反馈·····	90	习题六·····	127
5.2.2 电压并联负反馈·····	91	第7章 波形发生电路 ·····	132
5.2.3 电流串联负反馈·····	92	7.1 正弦波振荡电路·····	132
5.2.4 电流并联负反馈·····	93	7.1.1 正弦波振荡电路的基础知识·····	132
5.3 反馈的一般表达式和近似估算·····	94	7.1.2 RC正弦波振荡电路·····	134
5.3.1 反馈的一般表达式·····	94	7.1.3 LC正弦波振荡电路·····	136
5.3.2 深度负反馈放大电路电压放大倍数的估算·····	95	7.1.4 石英晶体正弦波振荡电路·····	140
5.4 负反馈对放大电路性能的影响·····	97	7.2 非正弦波振荡电路·····	141
5.4.1 稳定放大倍数·····	97	7.2.1 矩形波发生电路·····	141
5.4.2 改变输入电阻和输出电阻·····	98	7.2.2 三角波发生电路·····	142
5.4.3 展宽频带·····	99	7.2.3 锯齿波发生电路·····	143
5.4.4 减小非线性失真·····	99	7.3 波形变换电路·····	143
5.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法·····	100	7.3.1 三角波变锯齿波电路·····	143
5.5.1 产生自激振荡的原因及条件·····	100	7.3.2 三角波变正弦波电路·····	144
5.5.2 自激振荡的判断方法·····	101	7.3.3 压控振荡电路·····	145
5.5.3 消除自激振荡的方法·····	102	7.4 集成函数发生器8038简介·····	146
		本章小结·····	147
		习题七·····	148
		第8章 功率放大电路 ·····	151
		8.1 功率放大电路的特点和分类·····	151
		8.1.1 功率放大电路的特点·····	151

8.1.2 功率放大电路的分类	152	9.6 集成稳压电路	179
8.2 乙类双电源互补对称功率放大电路 (OCL 电路)	153	9.6.1 集成稳压电路概述	179
8.2.1 电路组成及工作原理	153	9.6.2 三端集成稳压器简介	180
8.2.2 功率和效率的估算	154	9.7 开关型稳压电路	183
8.3 OCL 甲乙类互补对称功率放大 电路	156	9.7.1 开关型稳压电源的特点和 分类	183
8.3.1 交越失真及其消除	156	9.7.2 串联开关型稳压电源	184
8.3.2 由复合管组成的 OCL 互补对 称功率放大电路	156	9.7.3 隔离式开关型稳压电源	187
8.4 单电源互补对称功率放大电路 (OTL 电路)	158	本章小结	187
8.4.1 电路组成及工作原理	158	习题九	188
8.4.2 功率和效率的估算	158	附录 实验实践环节	191
8.5 实用功率放大电路举例	159	F.1 常用电子仪器	191
8.5.1 OCL 高保真功率放大电路	159	F.1.1 DF4321 双踪示波器	191
8.5.2 OTL 音频功率放大电路	160	F.1.2 EM1642 函数信号发生器	195
8.6 集成功率放大器介绍	161	F.1.3 SX2172 型交流毫伏表	196
8.6.1 TDA2030A 音频集成功率放 大器简介	161	F.1.4 仪器“接地”与“共地” 问题	198
8.6.2 TDA2030A 集成功率放大器的 典型应用	162	F.2 模拟电子技术基础实验	199
本章小结	163	F.2.1 常用电子元件的识别 方法	199
习题八	163	F.2.2 单管放大电路	202
第 9 章 直流稳压电源	166	F.2.3 负反馈放大电路	205
9.1 直流稳压电源的组成	166	F.2.4 模拟信号运算电路	207
9.2 整流电路	167	F.2.5 正弦波发生电路	209
9.2.1 单相半波整流电路	167	F.2.6 OTL 功率放大电路的 测试	210
9.2.2 单相全波整流电路	168	F.2.7 集成运算放大器参数 测试	213
9.2.3 单相桥式全波整流电路	169	F.2.8 直流稳压电源	216
9.2.4 整流电路的主要参数	169	F.3 模拟电子技术设计性与综合性 实验	218
9.3 滤波电路	172	F.3.1 函数信号发生器的组装与 调试	218
9.3.1 电容滤波电路	172	F.3.2 用运算放大器组成万用表的 设计与调试	221
9.3.2 Π 型 RC 滤波电路	173	F.4 模拟电子技术实训	224
9.3.3 电感滤波电路和 LC 滤波 电路	174	F.4.1 无触点自动充电器	224
9.4 稳压管稳压电路	175	F.4.2 温度控制电路	225
9.4.1 电路组成及稳压原理	175	F.4.3 电冰箱保护器	226
9.4.2 主要稳压指标	176	F.4.4 数字逻辑信号测试器	229
9.4.3 限流电阻的选择	177	习题参考答案	233
9.5 串联型直流稳压电路	178	参考文献	241
9.5.1 电路组成及工作原理	178		
9.5.2 输出电压的调节范围	179		

第 1 章 绪 论



教学目标和要求

本章主要讲述了电信号的分类及特点、电子系统的组成及功能、模拟电子技术的课程特点及学习方法。

- 了解：模拟信号和数字信号、模拟电路和数字电路的区别。
- 了解：模拟电子技术的特点及学习方法。

1.1 信号与电子系统

1.1.1 模拟信号和数字信号

在自然界中有形形色色的物理量，尽管它们的性质各异，但就其变化规律的特点而言，不外乎有两大类：模拟信号和数字信号。

1. 模拟信号

模拟信号是指时间和数值上连续变化的信号，它具有无穷多的数值，其数学表达式也较复杂，如正弦函数、指数函数等，如图 1-1(a)所示为典型的模拟信号。

人们从自然界感知的许多物理量均是模拟性质的，如速度、压力、声音、温度等。在工程技术上，为了便于分析，常用传感器将模拟量转换为电流、电压或电阻等电量，以便用电路进行分析和处理。传输、处理模拟信号的电路称为模拟电子线路，简称**模拟电路**。在模拟电路中主要关心输入、输出信号间的大小、相位、失真等方面的问题。

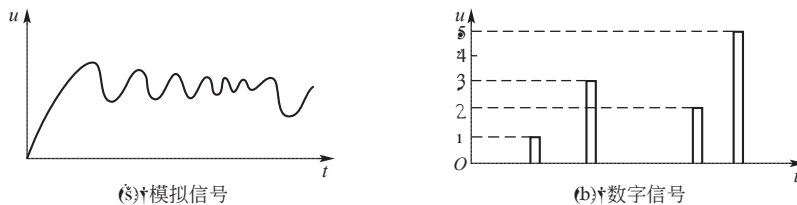


图 1-1 模拟信号与数字信号

2. 数字信号

电子系统中一般均含有模拟和数字两种构件。模拟电路是系统中必需的组成部分。但是，为了便于存储、分析或传输信号，数字电路更具优越性。

数字信号是指时间和数值上不连续变化的信号，即数字信号具有离散性，如图 1-1(b)所示。交通信号灯控制电路、智力竞赛抢答电路，以及计算机键盘输入电路中的信号，都是数字信号。对数字信号进行传输、处理的电子线路称为数字电子线路，简称**数字电路**。在数

字电路中主要关心输入、输出之间的逻辑关系。

数字电路又称为开关电路或逻辑电路，它是利用半导体器件的开关特性使电路输出高、低两种电平，从而控制事物相反的两种状态，如灯的亮和灭、开关的开和关、电机的转动和停转等。数字电路中的信号只有高、低两种电平，分别用二进制数字 1 和 0 表示，即数字信号都是由 0、1 组成的一串二进制代码。

1.1.2 电子系统

1. 电子系统的组成

用不同种类、不同功能的电路构成具有特定功能的仪器、设备，称为**电子系统**。

如图 1-2 所示为典型的电子系统组成示意图。系统首先采集信号，即进行信号的提取。通常，这些信号来源于测试各种物理量的传感器、接收器，或者来源于用于测试的信号发生器。对于实际系统，传感器或接收器所提供的信号的幅值往往很小，噪声很大，且易受干扰，有时甚至分不清哪些是有用信号，哪些是干扰或噪声。在加工信号之前，需将其进行预处理。进行预处理时，要根据实际情况利用隔离、滤波、阻抗变换等各种手段将信号提取出来并进行放大。当信号足够大时，再进行信号的运算、转换、比较等不同的加工。最后，经过功率放大以驱动执行机构(负载)。若要进行数字化处理，则首先通过 A/D 转换电路将预处理后的模拟信号转换为数字信号，输入至计算机或其他数字系统，经处理后，再经 D/A 转换电路将数字信号转换为模拟信号，以便驱动负载。

如图 1-2 所示电子系统是模拟与数字混合系统，信号的提取、预处理、加工、驱动与执行由模拟电路完成，计算机或其他数字系统由数字电路组成，A/D、D/A 转换为模拟电路和数字电路的接口电路。

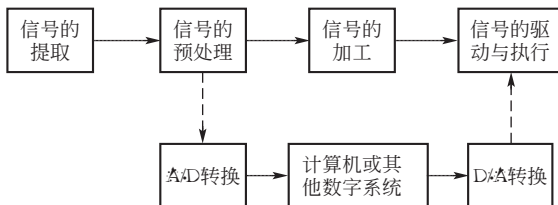


图 1-2 电子系统的组成示意图

2. 电子系统中的模拟电路

从对信号的分析可知，对模拟信号最基本的处理是放大，放大电路是构成各种功能模拟电路的基本电路。在电子系统中，常用的模拟电路及其功能如下。

- (1) 放大电路：用于信号的电压、电流或功率放大。
- (2) 滤波电路：用于信号的提取、变换或抗干扰。
- (3) 运算电路：完成信号的比例、加、减、乘、除、积分、微分、对数、指数等运算。
- (4) 信号转换电路：用于将电流信号转换成电压信号或将电压信号转换成电流信号、将直流信号转换成交流信号或将交流信号转换成直流信号、将直流电压转换成与之成比例的频率等。

(5) 信号发生电路：用于产生正弦波、矩形波、三角波、锯齿波。

(6) 直流电源：将 220V、50Hz 交流电转换成不同输出电压和电流的直流电，作为各种电子电路的供电电源。

以上各电路也是本书要重点介绍的内容。

1.2 模拟电子技术课程的特点及学习方法

1.2.1 模拟电子技术课程的特点

模拟电子技术课是入门性质的技术基础课，目的是使学生初步掌握模拟电子电路的基本理论、基本知识和基本技能。本课程与数学、物理、电路分析等课程有着明显的区别，主要表现在它的工程性和实践性上。

1. 工程性

在模拟电子技术课程中，需学会从工程的角度思考和处理问题。

(1) 实际工程需要证明其可行性。本课程特别重视电子电路的定性分析，定性分析是对电路是否能够满足功能、性能要求的可行性分析。

(2) 实际工程在满足基本性能指标的前提下总是容许存在一定的误差范围，这种计算称为“近似估算”。若确实需要精确求解，可借助于各种 EDA 软件。

(3) 近似分析要“合理”。在估算时必须考虑“研究的是什么问题、在什么条件下、哪些参数可忽略不计及忽略的原因”。也就是说，近似应有道理。

(4) 估算不同的参数需采用不同的模型。不同的条件、解决不同的问题，应构造不同的等效模型。

2. 实践性

实用的模拟电子电路几乎都要通过调试才能达到预期的指标，掌握常用电子仪器的使用方法、模拟电子电路的测试方法、故障的判断和排除方法、仿真方法是教学的基本要求。了解各元、器件参数对电路性能的影响是正确调适的前提，了解所测试电路的原理是正确判断和排除故障的基础，掌握一种仿真软件是提高分析问题、解决问题能力的必要手段。

1.2.2 模拟电子技术课程的学习方法

模拟电子技术具有很强的工程性和实践性，而且课程本身概念多，理论性强，原理抽象，在学习时需要根据课程特点，采取有效的学习方法。

1. 抓基本概念

学习模拟电子技术，理解是关键，这就要从基本概念抓起。基本概念的定义是不变的，要先知其意，后灵活应用。基本概念是进行分析和计算的前提，要学会定性分析，务必防止用所谓的严密数学推导掩盖问题的物理本质。在掌握基本概念、基本电路的基础上还应掌握基本分析方法。不同类型的电路具有不同的功能，需用不同的参数和不同的方法描述，而不同的参数有不同的求解方法。基本分析方法包括电路的识别方法、性能指标的估算方法和描述方法、电路形式及参数的选择方法等。

2. 抓规律，抓相互联系

电子线路内容繁多，总结规律十分重要。要抓住问题是如何提出的，有什么矛盾，如何解决，然后进一步改进。具体而言，基本电路的组成原则是不变的，电路却是千变万化的，要注意记住电路的组成原则而不是记住每一个电路。在每一章都有其基本电路，掌握这些电

路是学好该课程的关键。某种基本电路通常不是指某一个电路，而是指具有同样功能和结构特征的所有电路。掌握它们至少应了解其产生背景、结构特点、性能特点及改进之处。

3. 抓理论联系实际

电子线路是实践性很强的学科，一方面要注意理论联系实际，另一方面要多接触实际。在可能的条件下，多做些实验，这样不仅便于掌握理论知识，而且能够提高解决问题的能力。

4. 抓自我检查

在认真阅读教材的基础上，对照每章思考题与习题，检验学习效果，若是抱着完成任务的观点，为做习题而做习题是达不到预期效果的。

1.3 电子电路的计算机辅助分析和设计软件介绍

随着电子计算机技术的发展，计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)已经逐渐进入电子设计的领域。模拟电路中的电路分析、数字电路中的逻辑模拟，甚至是印制电路板、集成电路版图等都开始采用计算机辅助工具来加快设计效率，提高设计成功率。而大规模集成电路的发展，使得原始的设计方法无论是从效率上还是从设计精度上已经无法适应当前电子工业的要求，采用计算机辅助设计来完成电路的设计已经势在必行。同时，微机以及适合于微机系统的电子设计自动化软件的迅速发展，使得计算机辅助设计技术逐渐成为提高电子线路设计的速度和质量的不可缺少的重要工具。

电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)技术自 20 世纪 70 年代开始发展，其标志是美国加利福尼亚大学柏克莱分校开发的 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)于 1972 年研制成功，并于 1975 年推出实用化版本。当时仅适用于模拟电路的分析，而且只能用程序的方式输入。此后，在扩充电路分析功能、改进和完善算法、增加元器件模型库、改进用户界面等方面做了很多实用性的工作，使之成为享有盛誉的电子电路辅助设计工具，1988 年被定为美国国家工业标准。与此同时，各种以 SPICE 为核心的商用仿真软件应运而生，常用的有 PSpice 和 Electronics Workbench EDA(简称 EWB)。

1.3.1 PSpice

PSpice 是较早出现的 EDA 软件之一，1985 年就由 MICROSIM 公司推出，在电路仿真方面，它的功能可以说是最为强大，在国内被普遍使用，现在使用较多的是 PSpice 6.2，工作于 Windows 环境，整个软件由原理图编辑、电路仿真、激励编辑、元器件库编辑、波形图等几个部分组成，使用时是一个整体，但各个部分各有各的窗口。

PSpice 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能，以图形方式输入，自动进行电路检查，生成网表，模拟和计算电路。它的用途非常广泛，不仅可以用于电路分析和优化设计，还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学。PSpice 软件与印制板设计软件配合使用，还可实现电子设计自动化，被公认是通用电路模拟程序中最优秀的软件，具有广阔的应用前景。这些特点使得 PSpice 受到广大电子设计工作者、科研人员和高校师生的热烈欢迎，国内许多高校已将其列入电子类本科生和硕士生的辅修课程。

1.3.2 Multisim

EWB 是基于 PC 平台的电子设计软件，它提供了一个功能全面的 SPICE A/D 系统，支持模拟和数字混合电路的分析和设计，创造了集成的一体化设计环境，把电路原理图的输入、仿真和分析紧密结合起来。系统将 SPICE 仿真器完全集成在原理图输入和测试器等工具之中。与其他 Windows 环境下的系统软件相类似，它具有图形化界面，提供按钮式的工具栏，在各个菜单中各个选项的物理意义一目了然。在输入原理图时，自动地将其编辑成网络表送到仿真器，加快建立和管理的时间；在仿真过程中，若改变设计，则立刻获得该变化所带来的影响，实现了交互式的设计和仿真。

MultisimV7 是 EWB 的新产品，Multisim 是加拿大图像交互技术公司 (Interactive Image Technoligics, 简称 IIT 公司) 推出的以 Windows 为基础的仿真工具，适用于模拟/数字电路板的设计工作。它包含了电路原理图的图形输入、电路硬件描述语言输入方式，具有丰富的仿真分析能力。

使用 Multisim 可以交互式地搭建电路原理图，并对电路进行仿真。Multisim 提炼了 SPICE 仿真的复杂内容，这样工程师无须懂得深入的 SPICE 技术就可以很快地进行捕获、仿真和分析新的设计，这也使其更适合电子学教育。通过 Multisim 和虚拟仪器技术，PCB 设计工程师和电子学教育工作者可以完成从理论到原理图捕获与仿真再到原型设计和测试这样一个完整的综合设计流程。

初步掌握一种电子电路计算机辅助分析和设计软件对学习电子技术课很有必要。

第 2 章 常用半导体器件



教学目标和要求

本章主要讲述了半导体的基础知识、半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管的结构、工作原理、外特性、主要参数以及基本应用。

- **了解：**本征半导体的特性、PN 结的形成及导电特性。
- **掌握：**半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管的结构、工作原理、外特性、主要参数以及基本应用。

2.1 半导体特性和 PN 结

2.1.1 半导体特性

1. 本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。半导体是构成电子元器件的重要材料，最常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)两种元素。纯净的晶体结构的半导体称为**本征半导体**。

本征半导体是通过一定的工艺过程形成的单晶体，其中每个硅或锗原子最外层的 4 个价电子，均与它们相邻的 4 个原子的价电子共用，从而形成共价键。本征半导体中原子间的共价键具有较强的束缚力，每个原子都趋于稳定。在常温下，由于热运动价电子被激活，有些获得足够能量的价电子会挣脱共价键成为自由电子，与此同时共价键中就留下一个空位，称为空穴。这种现象称为**本征激发**。由于电子带负电荷，所以空穴表示缺少一个负电荷，即空穴具有正电荷粒子的特性。

在电子、空穴对产生的同时，运动中的自由电子也有可能去填补空穴，使电子和空穴成对消失，这种现象称为**复合**。在外电场作用下，一方面带负电荷的自由电子做定向移动，形成电子电流；另一方面价电子会按电场方向依次填补空穴，产生空穴的定向移动，形成空穴电流。能够运动的、可以参与导电的带点粒子称为**载流子**，显然自由电子和空穴是半导体中的两种载流子。由于它们所带电荷极性相反，所以电子电流和空穴电流的方向相反。

在一定温度下，电子、空穴对的产生和复合都在不停地进行，最终处于一种动态平衡状态，使半导体中载流子的浓度一定。当温度升高时，本征半导体中载流子浓度将增大。由于导电能力决定于载流子数目，因此半导体的导电能力将随温度升高而增强。温度是影响半导体器件性能的一个重要的外部因素，半导体材料的这种特性称为**热敏性**。此外，还有**光敏性**、**压敏性**、**磁敏性**和**掺杂性**等。利用这些特性，可以用半导体材料制成各种敏感元器件，如热敏电阻、光敏电阻、压敏电阻和磁敏电阻等，广泛应用于电子技术的各个领域。如图 2-1 所示为各种敏感元件的电路符号和外形。

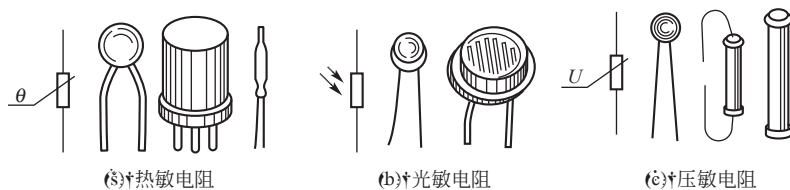


图 2-1 电工设备中常用的敏感元件的符号与外形

2. 杂质半导体

在常温下，本征半导体中载流子浓度很低，导电能力很弱。为了改善导电性能并使其具有可控性，需在本征半导体中掺入微量的其他元素(称为杂质)。这种掺入杂质的半导体称为杂质半导体。因掺入杂质的性质不同，可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

若在半导体硅、锗中掺入 5 价的锑、磷、砷等元素，将会产生大量的自由电子，使半导体主要靠电子导电，故称为电子型半导体，因为电子带负电(Negative Electricity)，所以又称 **N 型半导体**。N 型半导体中，自由电子是多数载流子(简称**多子**)，空穴是少数载流子(简称**少子**)。杂质离子带正电。

若在半导体硅、锗中掺入 3 价的镉、铝、硼等元素，将会产生大量的空穴，使半导体主要靠空穴导电，故称为空穴型半导体，因为空穴带正电(Positive Electricity)，所以又称 **P 型半导体**。P 型半导体中，空穴是多数载流子(多子)，自由电子是少数载流子(少子)。杂质离子带负电。

需要指出的是，不论是 N 型还是 P 型半导体，虽然都有一种载流子占多数，但它们都是电中性的，对外不显电性。这主要是由于半导体和掺入的杂质都是电中性的，而且掺杂过程中既不丧失电荷也不从外界得到电荷，只是在半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴，因此并没有破坏整个半导体内正、负电荷的平衡状态。

综上所述，掺入杂质后，由于载流子的浓度提高，因而杂质半导体的导电性能将增强，而且掺入的杂质越多，多子浓度越高，导电性能也就越强，从而实现了导电性能的可控性。例如，在 4 价的硅中掺入 1% 的 3 价杂质硼后，在室温时的电阻率与本征半导体相比，将下降到 1/500000，可见导电能力大大提高了。当然，仅仅提高导电能力不是最终目的。杂质半导体的奇妙之处在于，只要掺入不同性质、不同浓度的杂质，并使 P 型半导体和 N 型半导体采用不同的方式组合，就可以制造出形形色色、品种繁多、用途各异的半导体器件。

2.1.2 PN 结

如果将一块半导体的一侧掺杂成为 P 型半导体，而另一侧掺杂成为 N 型半导体，则在二者的交界处将形成一个 **PN 结**。

1. PN 结的形成

以下介绍 PN 结形成的过程。

(1) 多子的扩散运动。将 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起，在两种半导体的界面就出现了电子和空穴的浓度差。物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方扩散，自由电子和空穴也不例外。P 区中的多子(即空穴)将向 N 区扩散，而 N 区中的多子(即自由电子)将

向 P 区扩散，如图 2-2(a) 所示。扩散运动的结果使两种半导体界面附近出现了不能移动的带电离子区，P 区出现负离子区，N 区出现正离子区，如图 2-2(b) 所示。这些带电离子形成了一个很薄的空间电荷区，产生了内电场。

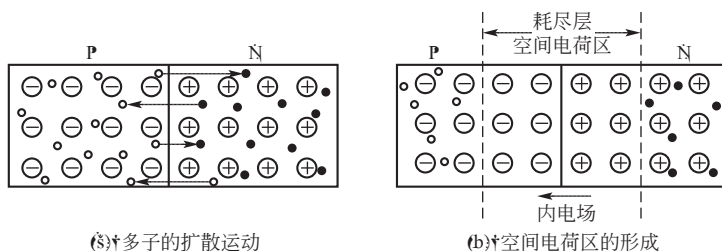


图 2-2 PN 结的形成

(2) 少子的漂移运动。一方面，随着扩散运动的进行，空间电荷区加宽使内电场增强；另一方面，内电场又将阻止多子的扩散运动，促进少子的运动，而少子的运动方向正好与多子扩散的方向相反。这种在电场作用下少子的运动称为漂移运动。电场力越大，漂移运动越强。最后，漂移运动与扩散运动达到动态平衡，在 P 区和 N 区的交界面上形成一个宽度稳定的空间电荷区——PN 结。在 PN 结内，大都是不能移动的正、负离子，电阻率极高，又称为耗尽层。

2. PN 结的单向导电性

实际工作中，PN 结上总是有外加电压，称为偏置。

若将 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为正向偏置，简称正偏，如图 2-3(a) 所示。这时外电场与内电场方向相反，削弱了内电场，空间电荷区变薄，多数载流子的扩散运动加强，形成较大的正向电流 I ，电流方向从 P 区到 N 区。PN 结在正偏时呈现较小电阻，PN 结变为导通状态。正向偏置电压稍有增加，PN 结的正向电流 I 急剧增加，为了防止大的正向电流把 PN 结烧毁，实际电路都要串接限流电阻 R 。

若将 P 区接电源负极，N 区接电源正极，称为反向偏置，简称反偏，如图 2-3(b) 所示。这时外电场与内电场方向相同，空间电荷区变宽，内电场增强，有利于少子的漂移而不利于多子的扩散。此时，多子扩散形成的正向电流几乎为零，只有少子漂移形成的反向电流 I_s ，方向由 N 区到 P 区。由于少子的浓度非常低，使得反向电流很小，一般为微安 (μA) 数量级，所以可以认为 PN 结反偏时呈高阻状态，基本不导电。

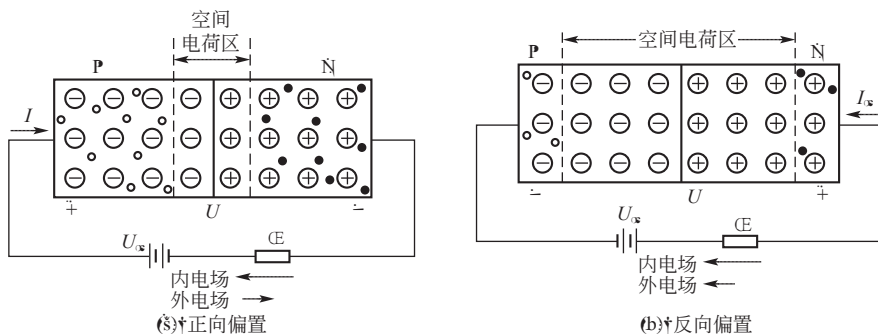


图 2-3 PN 的单向导电性

综上所述,PN结正偏时导通,表现出的正向电阻很小,正向电流 I 较大;反偏时截止,表现出的反向电阻很大,正向电流几乎为零,只有很小的反向饱和电流 I_s ,这就是PN结最重要的特性——**单向导电性**。二极管、三极管及其他各种半导体器件的工作特性,都是以PN结的单向导电性为基础的。

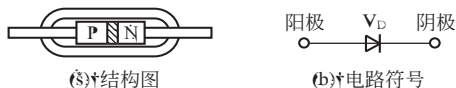
此外,PN结在一定条件下还具有电容效应,根据产生原因不同分为**势垒电容**和**扩散电容**。当PN结外加电压变化时,空间电荷区的宽度将随之变化,即耗尽层的电荷量随外加电压而增大或减小,这种现象与电容器的充、放电过程相同,耗尽层宽窄变化所等效的电容称为势垒电容 C_b 。PN结的扩散区内,电荷的积累和释放过程与电容器充、放电过程相同,这种电容效应称为扩散电容 C_d 。

2.2 半导体二极管

2.2.1 二极管的结构和型号

1. 二极管的结构

在PN结的两端引出两个电极并将其封装在金属或塑料管壳内,就构成**二极管(Diode)**。二极管通常由管芯、管壳和电极三部分组成,管壳起保护管芯的作用,如图2-4(a)所示。从P区引出的电极称为**正极或阳极**,从N区引出的电极称为**负极或阴极**。如图2-4(b)所示为二极管的电路符号,二极管一般用字母 V_D 表示。



2-4 二极管的结构示意图和电路符号

二极管的种类很多,分类方法也不同。按制造所用材料分类,主要有硅二极管和锗二极管;按用途分类,主要有普通二极管、整流二极管、开关二极管和稳压二极管;按其结构分类,有点接触型和面接触型二极管。

点接触型二极管的结面积小,极间电容小,不能承受高的反向电压和大的正向电流,适于做高频(几百兆赫兹)检波、脉冲数字电路里的开关元件和小电流整流。

面接触型二极管的结面积大,可承受较大的电流,但极间电容也大,只适合于低频整流。目前常用的是硅合金整流管,工作温度可高达 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 。

小电流的二极管常用玻璃壳或塑料壳封装,大电流二极管尺寸较大,为便于散热,一般用金属外壳。导电电流在1A以上的二极管,工作时PN结温度较高,要加装散热器帮助冷却,往往把正极制成螺栓,以便与散热器组装成一体。近年来,大功率管逐渐采用平板压接式,寿命比螺栓式更长。如图2-5所示是从小功率到大功率的各种二极管封装形式。

2. 二极管的型号

按照国家标准 GB 249—74 的规定,国产二极管的型号由5部分组成,见表2-1。