



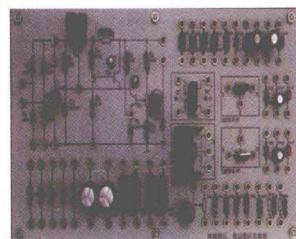
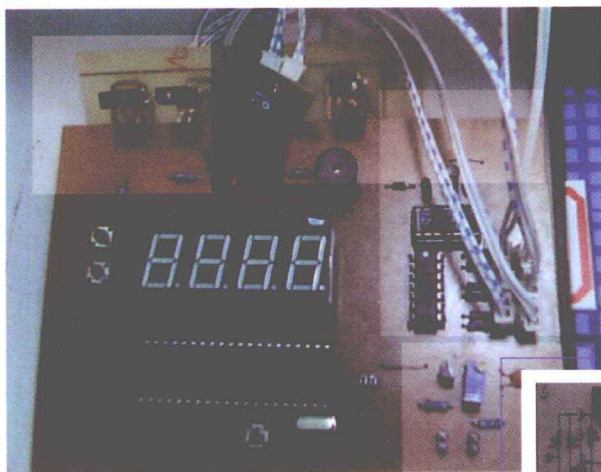
高等学校应用型特色规划教材



模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

谢志远 主编
尚秋峰 副主编



免费赠送电子课件

传统教学内容进行了精选与整合，适当地增加了现代模拟电子技术知识的比重。电子技术、计算机仿真技术引入模拟电子技术教学中，利于教师授课和学生学习。引导学生进行探究式学习，培养学生的自主学习能力、创新思维能力。



清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

模拟电子技术基础

谢志远 主 编

尚秋峰 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书紧紧围绕模拟信号的产生、放大、运算、处理与变换等内容进行讲解。其内容包括：半导体二极管及其基本应用电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、集成电路运算放大器及单元电路、放大电路中的反馈、功率放大电路、模拟信号的运算和处理电路、模拟信号产生电路和直流电源。本书在编写过程中，淡化了内部电路的分析计算，突出了实际电路的应用。

本书可作为高等学校电气信息、电子信息类专业模拟电子技术基础课程的教材，也可作为工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/谢志远主编；尚秋峰副主编. —北京：清华大学出版社，2011.8
(高等学校应用型特色规划教材)
ISBN 978-7-302-25858-2

I. ①模… II. ①谢… ②尚… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 110157 号

责任编辑：李春明 郑期彤

装帧设计：杨玉兰

责任校对：李玉萍

责任印制：王秀菊

出版发行：清华大学出版社 地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者：北京富博印刷有限公司

装 订 者：北京市密云县京文制本装订厂

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：26.5 字 数：638 千字

版 次：2011 年 8 月第 1 版 印 次：2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数：1~4000

定 价：48.00 元

产品编号：038934-01

前 言

电子技术基础课程是一门工程性、实践性和应用性很强的课程，对于培养学生的工程实践能力和创新意识具有重要的意义。随着电子技术的不断发展，新技术、新器件、新电路不断涌现。华北电力大学电子学教研室根据电子技术的发展趋势，在总结“电子技术基础系列课程”省级精品课程建设成果和经验的基础上，组织编写了本教材，将启发式教学、研究性教学和优秀生培养思路及成果融入到教材编写之中。教材更加突出实际电路的应用。

本书紧紧围绕信号的产生、放大、运算、处理与变换等内容进行讲解。其内容包括：半导体二极管及其基本应用电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、集成电路运算放大器及单元电路、放大电路中的反馈、功率放大电路、模拟信号的运算和处理电路、模拟信号产生电路和直流电源。本书可作为高等学校电气信息、电子信息类各专业模拟电子技术基础课程的教材，也可作为工程技术人员的参考书。

本书的特点如下。

(1) 本书在借鉴国内外模拟电子技术基础教材优点的基础上，对传统教学内容进行了精选与整合，精简和优化了经典的模拟电子技术基础知识，适当增加了现代模拟电子技术知识的比重。在保证基础的前提下，更新课程内容，介绍当代先进的电子技术知识；进一步淡化内部电路的分析和计算，重点介绍典型电路的外特性和应用；突出模拟集成电路的应用。

(2) 将教学与科研紧密结合，充分发挥科研优势对本科教学的促进作用，适度将科研实践中的一些实用电路引入教材中。

(3) 书中安排了适量的思考题、例题、自我检测和习题，以便帮助学生更好地理解模拟电子技术基础的基本概念、基本电路和基本方法。

(4) 将电子技术、计算机仿真技术引入模拟电子技术教学中，教材每章章末安排 2~3 个 Multisim 仿真实例，以利于教师授课和学生学习。通过将理论课、仿真实验和实际实验有机结合，帮助学生更好地理解教材内容，提高学生的学习兴趣，提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书由华北电力大学电子学教研室组织编写，谢志远任主编，尚秋峰任副主编。参加编写的老师有何玉钧、刘童娜、马海杰、刘立、黄怡然、张宁、王健健、胡智奇等。

编写一部优秀教材是一项十分艰巨的工作，需要长期的教学实践和学术积累。因作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论.....	1	2.5 其他类型的二极管.....	32
1.1 信号及分类.....	1	2.5.1 发光二极管.....	32
1.1.1 信号.....	1	2.5.2 光电二极管.....	33
1.1.2 模拟信号与数字信号.....	1	2.5.3 变容二极管.....	34
1.2 模拟电路与数字电路.....	2	2.5.4 肖特基二极管.....	35
1.2.1 模拟电路.....	3	2.6 二极管应用电路的仿真实例.....	35
1.2.2 数字电路.....	3	本章小结.....	38
1.3 如何学习模拟电子技术基础.....	3	习题.....	38
1.3.1 课程特点.....	3	第 3 章 双极型 BJT 及其放大电路.....	42
1.3.2 如何学好该课程.....	4	3.1 双极型 BJT.....	42
第 2 章 半导体二极管及其基本应用		3.1.1 BJT 的工作原理与电流分配	
电路.....	7	关系.....	43
2.1 半导体的基础知识.....	7	3.1.2 BJT 的特性曲线.....	47
2.1.1 半导体材料及其导电特性.....	7	3.1.3 BJT 的参数.....	50
2.1.2 本征半导体.....	8	3.1.4 温度对 BJT 参数及特性的	
2.1.3 杂质半导体.....	9	影响.....	54
2.2 PN 结的形成及其单向导电性.....	11	3.2 放大电路的基本知识.....	55
2.2.1 PN 结的形成.....	11	3.2.1 放大电路的组成及放大的	
2.2.2 PN 结的单向导电性.....	12	本质.....	55
2.2.3 PN 结的伏安特性.....	14	3.2.2 放大电路的主要性能指标.....	56
2.2.4 PN 结的电容效应.....	15	3.3 基本共射放大电路及放大电路的	
2.3 半导体二极管.....	16	分析方法.....	61
2.3.1 二极管的结构.....	17	3.3.1 基本共射放大电路的组成	
2.3.2 二极管的伏安特性.....	17	和工作原理.....	61
2.3.3 二极管的主要参数.....	20	3.3.2 直流通路与交流通路.....	63
2.3.4 二极管的等效电路.....	20	3.3.3 放大电路的图解分析法.....	63
2.3.5 二极管基本应用电路及分析		3.3.4 放大电路的微变等效电路	
方法.....	24	分析法.....	69
2.4 稳压二极管.....	27	3.4 放大电路的静态工作点稳定问题.....	76
2.4.1 稳压二极管的伏安特性.....	27	3.4.1 静态工作点稳定的必要性.....	76
2.4.2 稳压二极管的主要参数.....	28	3.4.2 典型的静态工作点稳定	
2.4.3 稳压二极管基本应用电路.....	29	电路.....	76
		3.5 BJT 单级放大电路的三种组态.....	81
		3.5.1 共集电极放大电路.....	82

3.5.2 共基极放大电路.....	85
3.5.3 BJT 放大电路三种组态的 比较	88
3.6 放大电路的频率响应.....	89
3.6.1 频率响应的基本概念.....	89
3.6.2 一阶 RC 电路的频率响应	91
3.6.3 BJT 的高频等效模型	95
3.6.4 BJT 电流放大系数的频率 响应	99
3.6.5 单管共射极放大电路的频率 响应	102
3.6.6 单管共基极和共集电极放大 电路的频率响应.....	110
3.7 单管放大电路的仿真实例.....	113
本章小结	118
习题	119
第 4 章 场效应管及其基本放大电路.....	129
4.1 场效应管	129
4.1.1 场效应管的分类.....	129
4.1.2 绝缘栅型场效应管.....	130
4.1.3 结型场效应管.....	137
4.1.4 场效应管的主要参数.....	143
4.2 场效应管放大电路.....	145
4.2.1 场效应管的直流偏置电路与 静态分析	145
4.2.2 场效应管的动态分析.....	149
4.2.3 场效应管和晶体管放大电路 的比较	154
4.3 场效应管放大电路的频率响应.....	156
4.3.1 场效应管的高频小信号 模型	156
4.3.2 场效应管放大电路的频率 响应	156
4.4 仿真实例	158
本章小结	161
习题	161

第 5 章 集成电路运算放大器及单元 电路	166
5.1 多级放大电路.....	166
5.1.1 多级放大电路的级间耦合 方式.....	166
5.1.2 多级放大电路的分析方法	170
5.1.3 多级放大电路的频率响应	173
5.2 电流源电路.....	174
5.2.1 电流源.....	174
5.2.2 电流源电路的作用	179
5.3 差分式放大电路.....	180
5.3.1 直接耦合放大电路中的零点 漂移.....	180
5.3.2 差分式放大电路组成及工作 原理.....	181
5.3.3 差分式放大电路的静态 分析.....	185
5.3.4 差分式放大电路的动态 分析.....	186
5.3.5 改进型差分式放大电路	193
5.4 集成电路运算放大器.....	195
5.4.1 集成电路运算放大器概述	195
5.4.2 通用型集成电路运算放大器 简介.....	197
5.4.3 集成运放的主要性能指标 参数及低频等效模型	201
5.5 差分式放大电路仿真实例	204
本章小结	208
习题	209
第 6 章 放大电路中的反馈	217
6.1 反馈概述.....	217
6.1.1 反馈的概念.....	217
6.1.2 反馈结构.....	218
6.1.3 正反馈和负反馈及其判断 方法.....	220
6.1.4 直流反馈和交流反馈及其 判断方法.....	220

6.1.5	电压反馈和电流反馈及其判断方法	222
6.1.6	串联反馈和并联反馈及其判断方法	223
6.1.7	反馈的判断步骤	224
6.2	负反馈放大电路的四种组态	224
6.2.1	负反馈四种组态的方框图	224
6.2.2	电压串联负反馈放大电路	225
6.2.3	电流串联负反馈放大电路	226
6.2.4	电压并联负反馈放大电路	226
6.2.5	电流并联负反馈放大电路	227
6.3	负反馈放大电路的通用描述	228
6.3.1	负反馈放大电路增益的一般表达式	228
6.3.2	深度负反馈的实质	230
6.4	深度负反馈条件下增益的估算	231
6.4.1	电压串联深度负反馈电路	231
6.4.2	电流串联深度负反馈电路	232
6.4.3	电压并联深度负反馈电路	232
6.4.4	电流并联深度负反馈电路	233
6.5	负反馈对放大电路性能的影响	234
6.5.1	稳定闭环增益	234
6.5.2	影响输入电阻和输出电阻	235
6.5.3	展宽频带	237
6.5.4	减小非线性失真	239
6.6	负反馈放大电路的稳定性	240
6.6.1	负反馈放大电路自激振荡产生的原因和条件	240
6.6.2	负反馈放大电路稳定工作的条件	241
*6.6.3	消除负反馈放大电路自激的方法	243
6.7	Multisim 仿真实例——负反馈对放大性能的影响	245
	本章小结	248
	习题	249
第 7 章	功率放大电路	253
7.1	概述	253

7.1.1	功率放大电路的特点	253
7.1.2	功率放大电路提高效率的主要途径	254
7.2	甲类放大电路	256
7.2.1	甲类共射极放大电路	256
7.2.2	射极输出器的输出功率与效率	257
7.3	互补对称功率放大电路	258
7.3.1	乙类双电源互补对称功率放大电路	258
7.3.2	甲乙类双电源互补对称功率放大电路	263
7.3.3	甲乙类单电源互补对称功率放大电路	264
7.4	集成功率放大器	265
7.4.1	TDA2030A 音频集成功率放大器的组成及功能	265
7.4.2	TDA2030A 的典型应用	267
7.5	功率放大电路的安全运行	267
7.5.1	功放管的散热	267
7.5.2	功放管的二次击穿	268
7.6	Multisim 仿真实例——乙类双电源互补对称功率放大电路的输出功率和效率的研究	269
	本章小结	271
	习题	271

第 8 章 模拟信号的运算和处理电路

8.1	集成运算放大器应用电路的基本知识	277
8.1.1	集成运放线性电路的分析方法	278
8.1.2	集成运放线性电路的组成结构	278
8.2	典型运算电路	278
8.2.1	比例运算电路	278
8.2.2	加法和减法运算电路	281
8.2.3	对数和指数运算电路	284



8.2.4 模拟乘法器及其典型应用 电路	286	9.3 压控振荡电路	350
8.2.5 积分运算和微分运算电路	289	9.4 集成信号发生器	354
8.2.6 综合应用电路	292	9.5 Multisim 仿真实例	356
8.2.7 集成运放性能指标对运算误差 的影响	293	9.5.1 RC 桥式正弦波振荡电路	356
8.3 有源滤波电路	294	9.5.2 占空比可调的矩形波产生 电路	359
8.3.1 概述	294	本章小结	360
8.3.2 典型的有源滤波电路	298	习题	361
8.3.3 有源滤波器的级联设计	305	第 10 章 直流电源	369
8.3.4 有源集成滤波器	307	10.1 整流电路	369
8.3.5 开关电容滤波器	310	10.1.1 工作原理	370
8.4 信号变换电路	312	10.1.2 主要参数	371
8.4.1 电压-电流变换电路	312	10.1.3 二极管选择	371
8.4.2 电流-电压变换电路	312	10.2 滤波电路	372
8.4.3 精密全波整流电路	313	10.2.1 电容滤波电路	372
8.5 Multisim 仿真实例	314	10.2.2 其他形式的滤波电路	376
8.5.1 比例积分放大电路的特性	314	10.2.3 倍压整流电路	377
8.5.2 滤波特性比较	316	10.3 稳压电路	378
本章小结	319	10.3.1 直流稳压电路的技术指标	378
习题	320	10.3.2 串联反馈式稳压电路	380
第 9 章 模拟信号产生电路	327	10.3.3 三端集成稳压器及其应用	384
9.1 正弦波信号产生电路	327	10.4 开关型直流稳压电路	391
9.1.1 正弦波振荡产生的条件	327	10.4.1 开关稳压电源概述	391
9.1.2 RC 桥式正弦波振荡电路	328	10.4.2 DC-DC 变换器基本电路及 其工作原理	392
9.1.3 LC 正弦波振荡电路	332	10.4.3 常用降压式 DC-DC 变换器 控制芯片	397
9.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	337	10.5 直流稳压电源的仿真实例	402
9.2 非正弦波信号产生电路	339	本章小结	406
9.2.1 电压比较器	339	习题	407
9.2.2 矩形波产生电路	344	参考文献	414
9.2.3 三角波产生电路	347		
9.2.4 锯齿波产生电路	349		

第 1 章 绪 论

电子技术是以研究电子器件、电子电路及其应用为目的的科学。随着物理学、半导体技术的不断发展，电子技术在 20 世纪取得了惊人的进步。特别是近几十年来，微电子技术的发展带动了计算机、通信、自动控制等高新技术的迅速发展。目前电子技术已经渗透到国民经济的各个领域。

电子技术基础课程是高等工科院校电气、电子、信息类专业的一门技术基础课程，该课程主要包括模拟电子技术基础和数字电子技术基础。课程主要研究电子器件与电子电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及其应用。电子技术的应用涉及信号的产生、信号的传输、信号的运算以及信号的处理等多个方面，可以说信号是电子技术处理的对象。

作为绪论，本章首先简要介绍信号与电子电路的基本概念，然后介绍模拟电子技术基础课程的特点以及如何学习该课程。

1.1 信号及分类

1.1.1 信号

信号是信息的载体。通常信息需要通过某些物理量的变化来表示和传递。在人类赖以生存的自然界中，有各种各样的信号存在，如压力、温度、流量、声音、图像等。这些信号可以是电信号也可以是非电信号。其中，电信号是指随时间而变化的电压 u 或电流 i 。信号包括确定性信号和非确定性信号。在数学上，对于确定性信号，可将它表示为时间的函数，即 $u = f(t)$ 或 $i = g(t)$ ，例如正弦波信号即为典型的确定性信号，它可以用正弦函数来表示；对于非确定性信号，即随机信号，可以用随机过程来描述，例如语音信号即为随机信号，它只能用随机过程来描述。由于电信号容易传送、交换、存储、提取和控制，因此，在电子系统中所传输和处理的信号通常都是以电信号的形式表现出来的。对于要处理的非电信号，通常可以通过传感器将它转变成电信号，例如可以通过麦克风将语音信号转变成电信号，可以通过温度传感器将温度信号转变成电信号等。

1.1.2 模拟信号与数字信号

信号的形式是多种多样的，可以从不同角度进行分类。根据信号的确知性可将信号划分为确定信号和随机信号；根据信号是否具有周期性可将信号划分为周期信号和非周期信号；根据信号对时间的取值是否具有连续性，可将信号划分为连续时间信号和离散时间信号等。在电子电路中将信号划分为模拟信号和数字信号。

模拟信号在时间和数值上均具有连续性，即对应于任意时间 t ，均有确定的电压值 u 或电流值 i 与之对应，并且 u 或 i 的取值是连续的，例如从温度传感器输出的大气温度的变化



信号即为一个模拟信号,正弦波信号也是一个典型的模拟信号。如图 1.1 所示是一个典型模拟信号的波形。

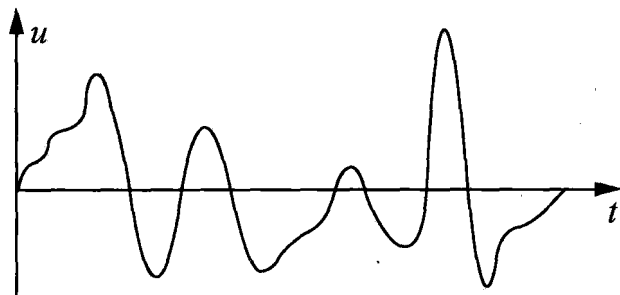
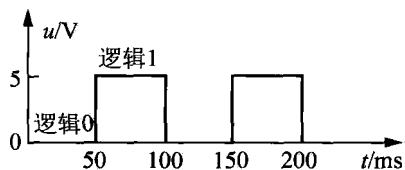
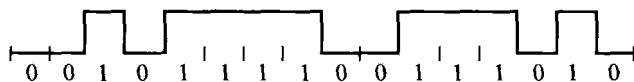


图 1.1 模拟信号的波形

与模拟信号不同,数字信号是指在时间上和幅值上均离散的信号。数字信号具有如下特点,首先 u 或 i 的变化在时间上是不连续的,也就是 u 或 i 的出现总是在一些离散的时刻;其次 u 或 i 的大小总是某一最小值的整数倍,并以此倍数作为数字信号的数值。如图 1.2 所示为典型数字信号的波形,其中图 1.2(a)所示为用逻辑电平表示的数字信号,图 1.2(b)所示为一个 16 位数据的波形。



(a) 用逻辑电平表示的数字信号



(b) 16位数据的波形

图 1.2 数字信号的波形

自然界中存在的信号多数为模拟信号。可以通过模数转换电路即 A/D(Analog to Digital)转换器将模拟信号转换为数字信号,同样也可以通过数模转换电路即 D/A(Digital to Analog)转换器将数字信号转换为模拟信号。A/D 转换器和 D/A 转换器是计算机控制和数字信号处理的重要器件,将在数字电子技术课程中学习。

1.2 模拟电路与数字电路

电子电路主要完成信号产生、信号变换、信号处理以及信号传输等功能。电信号分为模拟信号和数字信号,电子电路也相应分为模拟电路和数字电路。处理模拟信号电子电路称为模拟电路,处理数字信号电子电路称为数字电路或逻辑电路。

1.2.1 模拟电路

从对信号的分析可知,模拟信号的来源多为各种传感器,通常为微弱小信号,因此对模拟信号最基本的处理是放大,包括对信号电压的放大和对信号电流的放大(或功率放大),放大电路也是构成各种功能模拟电路的基础。此外,常见的模拟电路还包括以下几类。

- (1) 滤波电路,可以完成对有用模拟信号的提取或变换,用来抑制噪声和干扰信号。
- (2) 运算电路,可以完成对模拟信号的加、减、乘、除、积分、微分等运算。
- (3) 信号变换电路,可以完成对信号波形的变换、电压信号与电流信号的转换(V/I、I/V)、交流信号与直流信号的转换(AC/DC、DC/AC)、电压信号与频率信号的转换(V/F、F/V)等。
- (4) 信号产生电路,用于产生正弦波、方波(或矩形波)、三角波、锯齿波等信号。
- (5) 直流电源电路,用于将工频 220V 或 380V 市电转换成所需要的直流电压,直流电源是各种电子电路或电子系统工作所必需的。

1.2.2 数字电路

数字电路也称为逻辑电路,主要完成对数字信号的逻辑运算、逻辑变换、信号存储等功能。常见的数字电路包括门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、可编程逻辑器件、模数与数模转换电路等。组成数字电路的晶体管工作在开关状态,也就是工作在饱和状态或截止状态,而模拟电路中的晶体管工作在放大状态。与模拟电路相比,数字电路具有如下优点:首先,数字电路体积小,便于大规模集成;其次,由于数字信号具有可再生的特点,因此数字电路的抗干扰能力强。随着数字集成电路和计算机技术的迅速发展,数字电路的应用已经渗透到了国民经济和人们日常生活的各个领域,人们已经进入了一个数字时代。数字电路将在数字电子技术基础课程中学习。

1.3 如何学习模拟电子技术基础

1.3.1 课程特点

模拟电子技术基础课程是高等工科院校电子与电气信息类专业的重要技术基础课,教学目的是让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,为以后学习专业课打好基础。该课程与数学、物理以及电路理论有着明显的区别,它是一门应用技术,其最突出的特点是工程性和实践性强,对于培养学生的工程实践能力和创新意识具有重要的作用。

1. 工程性

由于组成电子电路的各种器件具有非线性,并且各类半导体材料、半导体器件的参数与性能通常具有很强的分散性,即使同一个型号的器件,其参数也是不完全一样的。因此在分析模拟电子电路时要更加注重以下几个方面。



1) 分析计算采用“工程估算”方法

通常对电子电路的精确计算是很困难的,也是没有必要的,因此在电子电路的分析计算过程中通常采用“工程估算”的方法。即在工程允许的范围内,忽略一些次要因素,将非线性器件用其线性化模型代替,将非线性电路转化成线性电路来分析计算,在工程上,允许有5%~10%的误差。在模拟电子电路的分析过程中,经常用到等效电路分析方法和图解分析方法。

2) 更加强调整定性分析

因为只有对模拟电子电路进行反复调试,才能使模拟电子电路满足性能指标的要求。因此,对电子电路的分析更强调定性分析,即分析电路的工作原理,分析电路是否在功能上和性能上满足要求。特别是要善于把握电路的变化,即当电路的参数、工作条件发生变化时,能正确分析电路的性能发生了哪些变化。

2. 实践性

各类电子电路千差万别,应用场合不同,但实用的电子电路几乎都要通过调试才能达到预期的指标,调试电路的过程就是实践的过程。掌握常用电子仪器仪表的使用方法、模拟电子电路的测试方法、故障的诊断与排除方法、仿真方法是教学的基本要求。理论教学是进行实践的基础,只有正确理解了模拟电子电路中各元器件参数对电路性能的影响,才能进行正确的电路调试和故障排除。同样,通过实践可以加深对理论的理解。随着计算机技术的不断发展,电子电路的计算机仿真技术得到了迅速发展,掌握一种电子电路仿真软件是提高电子电路分析能力和设计能力非常必要的手段。

1.3.2 如何学好该课程

模拟电子技术基础课程具有工程性强和实践性强的特点,在学习该课程时,我们一定要抓住模拟电子技术基础课程的这一特点。

1. 重点掌握“基本概念、基本电路和基本分析方法”

掌握模拟电路中的基本概念、基本电路和基本分析方法是学好模拟电子技术基础课程的关键。

(1) 对于基本概念,不仅要理解概念引入的必要性,更要理解基本概念的物理意义以及适应的条件,并能灵活运用。

(2) 在模拟电路中,有成千上万种电路,但是每一个复杂电路其实都是由若干单元电路有机组合在一起构成的。我们在学习模拟电子技术基础课程时,一定要熟练掌握常见基本模拟单元电路,不仅要掌握单元电路的原理和分析计算,更要理解各单元电路的参数、性能、特点以及应用。在模拟电子技术课程中,贯穿整个课程的是各类放大电路,它们不仅能完成对信号电压或电流的放大作用,而且还是构成其他模拟电路的基础。因此学习模拟电子技术时,一定要抓住放大电路这条线索。

(3) 不同类型的模拟电路完成不同的功能,在对电路进行分析时,可能用到不同的参数和方法。在学习模拟电子技术基础课程时,不仅要掌握各种参数的求解方法、电路的识

别方法、性能指标的估算方法和描述方法,而且还要清楚各种参数、分析方法所适用的条件和范围。

2. 灵活运用电路理论的基本定理、定律

模拟电路是一种非线性电路,它由非线性器件(如晶体管)和线性器件(如电阻、电容、电感等)组成。电子电路中的非线性器件除了满足其自身的伏安特性外,在模拟电路中它和线性器件组成的电路还满足电路理论的基本定理和定理,如基尔霍夫定理、戴维南定理、诺顿定理等。在小信号工作情况下,晶体管等非线性器件可以用其线性电路模型表示,此时可将非线性电路转变为线性电路进行分析。

3. 学会用全面、辩证的观点分析模拟电子电路

模拟电路千差万别,应用条件、应用场合各不相同。如果从实际应用出发讨论各种电路,应该说没有最好的电路,只有最合适的电路,或者说在某一特定条件下最好的电路。因为在改变电路的某些参数,以改善电路某些性能指标的同时,还可能使其他某些电路指标变差。也就是说电路的各方面性能指标往往是相互影响的,通常“有一利必将有一弊”,要注意不能顾此失彼。因此在学习模拟电路技术基础课程的过程中,在学习某一新电路时,我们不仅要首先弄清楚现有电路存在的问题以及新电路是如何解决这一问题的,而且还要清楚新电路带来了哪些不利。在模拟电路设计中,经常会对技术指标进行“折中”考虑。只有辩证、全面地学习模拟电子电路,才能学精、学透模拟电子技术。

4. 勤于实践并善于实践

电子技术基础是一门工程性和实践性很强的课程,因此在学习该课程时,一定要十分重视实践环节,要通过实验课或课程设计,掌握常用仪器仪表的使用方法、常见电子电路的设计与调试方法。不仅如此,还要善于实践,以日常生活中的电路为素材,进行电子设计和制作。此外,还要善于学习有关电子电路方面的书刊、杂志,拓宽知识面学会用 Protel 绘图软件画原理图、PCB 图等。

5. 至少学会一种电子电路仿真与设计软件

随着半导体技术、集成电路技术和计算机技术的迅速发展,电子电路和电子系统的分析方法和设计方法发生了很大的变革。特别是以计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)为基础的电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)技术已经成为电子技术领域的重要学科。EDA 技术摒弃了靠硬件调试来达到设计目标的繁琐过程,实现了硬件设计的软件化。

目前,电子技术基础课程常用的 EDA 仿真软件主要有 PSpice 和 Multisim 等。PSpice 是基于 Spice 的 PC 版软件。Spice(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)软件是由美国加州大学柏克莱分校开发的。PSpice 软件是 20 世纪 80 年代世界上应用最广的电路设计软件,它是强大的模拟和数字电路仿真分析软件,可以实现对大规模集成电路(Middle Scale Integrated, MSI)甚至大规模集成电路(Large Scale Integrated, LSI)的仿真分析,是较成熟的仿真分析软件。



Multisim 的最初版本叫 EWB, 它是 IIT(Interactive Image Technology)公司在 20 世纪 90 年代初开发的电路仿真软件, 主要用于模拟电路和数字电路的仿真。相对于 PSpice 软件来说, 它提供了包括万用表、信号发生器以及示波器等在内的各种虚拟仪器, 使得软件的界面较为直观、易学易用。针对不同的用户, Multisim 开发了多个版本, 分为增强专业版(Power Professional)、专业版(Professional)、个人版(Personal)、教育版(Education)、学生版(Student)以及演示版(Demo)等。各版本的功能和价格有着明显的差异, 目前我国高校主要使用教育版。为了方便学生学习, 本书每章最后都给出了基于 Multisim 软件的仿真实例。通过应用 Multisim 仿真软件, 可以帮助学生加深对电子电路的分析和理解。

总之在学习模拟电子技术基础课程时, 一定要理论联系实际。

第 2 章 半导体二极管及其基本应用电路

本章要点

- 半导体的结构及其导电特性。
- PN 结的形成及其导电特性。
- 普通半导体二极管和稳压二极管的结构、特点、参数及典型应用电路的分析方法。
- 几种特殊类型二极管的结构及工作原理。

本章难点

普通二极管和稳压二极管的特性、参数及基本应用电路的分析计算。

半导体器件是各种电子系统和设备的基本组成部分，掌握 PN 结的结构和导电特性是学习各种半导体器件的重要基础。为此，本章首先介绍了半导体的基础知识、PN 结的形成及其导电特性；然后着重介绍了半导体二极管和稳压二极管的结构、伏安特性曲线、主要参数及典型应用电路的分析方法；最后介绍了几种特殊类型二极管的结构和工作原理。通过学习，应掌握普通二极管和稳压二极管的特性、参数及基本应用电路的分析方法，熟悉各种特殊二极管的结构及工作原理。

2.1 半导体的基础知识

2.1.1 半导体材料及其导电特性

根据导电能力的不同，物质可分为导体、半导体和绝缘体。导体就是容易导电的物质，其原子最外层的价电子很容易摆脱原子核的束缚而成为自由电子，在外加电场力的作用下，这些自由电子就会定向运动形成电流。绝缘体就是在正常情况下不会导电的物质。大部分绝缘体都属于化合物，其价电子被原子紧紧地束缚在一起，自由电子非常少，导电能力很差。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。常见的半导体材料有：元素半导体，如硅(Si)、锗(Ge)等；化合物半导体，如砷化镓(GaAs)等。

半导体材料具有与导体和绝缘体不同的导电特性，具体如下。

(1) 热敏特性：当环境温度升高时，半导体的导电能力显著增强。利用这种特性可以制成温度敏感元件，如热敏电阻。

(2) 光敏特性：当受到光照时，半导体的导电能力显著增强。利用这种特性可以制成各种光敏元件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等。

(3) 掺杂特性：在纯净的半导体中掺入微量杂质，半导体的导电能力可以增加几十万乃至几百万倍。利用这种特性可以制成各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管和晶闸管等。



为什么半导体的导电能力有如此大的差别呢？这就需要研究半导体材料的内部结构和导电机理。

2.1.2 本征半导体

本征半导体是完全纯净的、晶格结构完整的半导体。常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)的原子序数分别为 14 和 32，它们的共同特点是原子最外层轨道上有 4 个电子，称为价电子。硅和锗原子呈电中性，通常用带有 4 个正电荷的正离子以及它周围的 4 个价电子来表示，其原子结构模型如图 2.1 所示。

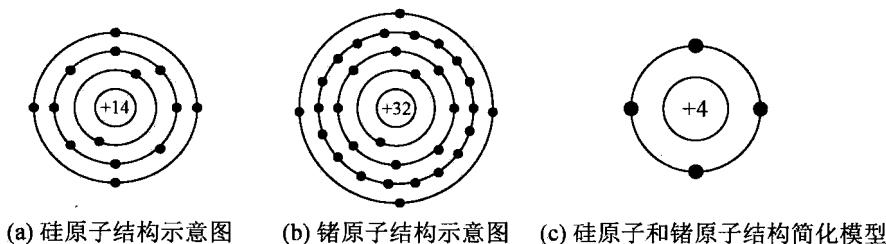


图 2.1 硅原子和锗原子的结构模型

1. 本征半导体中的共价键结构

本征半导体具有晶体结构，原子在空间形成排列整齐的晶格，单个硅原子的空间结构如图 2.2(a)所示。由于相邻原子间的距离很小，因此原子最外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚，还要受到相邻原子核的吸引，形成共价键结构，如图 2.2(b)所示。

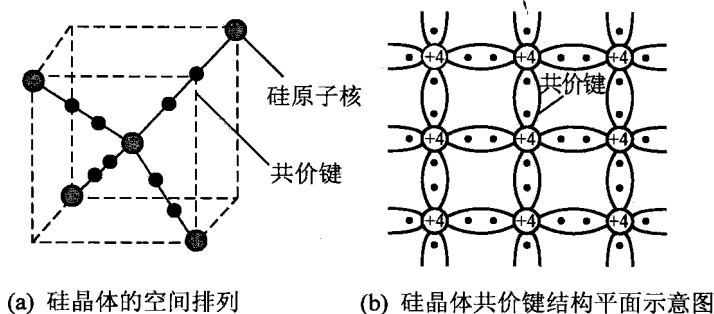


图 2.2 本征半导体的共价键结构

2. 本征半导体中的两种载流子

晶体中的共价键具有很强的结合力，因此，当半导体处于热力学温度 $T=0\text{K}$ 时，半导体中所有的价电子紧紧束缚在共价键中，没有自由电子，不能导电。当温度升高或受到光照时，有些价电子就会获得足够的能量，挣脱共价键的束缚，参与导电，成为自由电子。自由电子产生的同时，会在原来共价键中留下一个空位，称为空穴。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，称为电子-空穴对，如图 2.3 所示。半导体在外部能量激励下(主要是热激发)，产生自由电子-空穴对的现象称为本征激发。外加能量越高(例如温度越

高), 产生的电子-空穴对就会越多。常温 300K 时, 硅晶体中电子-空穴对的浓度大约为 $1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$; 锗晶体中电子-空穴对的浓度大约为 $2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 。

原子失掉一个价电子后而带正电, 也就是说, 我们可以把空穴看成是带正电的粒子, 它所带的电量与自由电子相等, 但符号相反。在外加电场力的作用下, 邻近共价键中的价电子很容易填补这个空穴, 从而在这个价电子原来的位置上留下一个新的空位, 就好像空穴在移动。因此, 在电场力的作用下, 一方面本征半导体中的自由电子可以定向移动, 形成电子电流; 另一方面空穴也会产生定向移动, 形成空穴电流, 只不过空穴的移动是靠相邻共价键中的价电子按一定方向依次填充来实现的。

运载电荷的粒子称为载流子。导体中只有一种载流子——自由电子参与导电; 而本征半导体中有两种载流子——带负电的自由电子和带正电的空穴, 它们均参与导电。这是半导体导电区别与导体导电的一个重要特点。自由电子和空穴所带电荷极性不同, 它们的运动方向相反, 因此本征半导体中的电流是电子电流和空穴电流之和, 如图 2.4 所示。

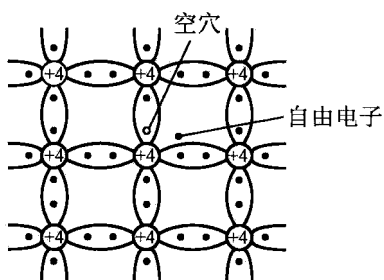


图 2.3 本征半导体中的电子-空穴对

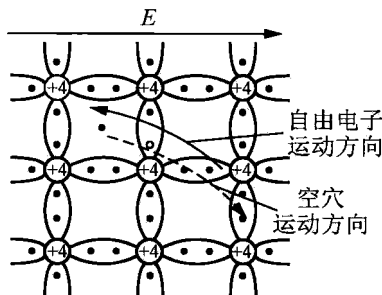


图 2.4 载流子在电场力作用下的运动

另外, 当自由电子在运动过程中与空穴相遇时就会填补空穴, 这种现象称为复合。在一定温度下, 本征半导体中所产生的自由电子-空穴对, 与复合的自由电子-空穴对数目相等, 达到动态平衡。即当环境温度相同时, 本征半导体中自由电子和空穴两种载流子的浓度不变且相等。本征激发产生的载流子浓度和温度有关: 当环境温度升高时, 热运动加剧, 挣脱共价键束缚的自由电子增多, 空穴也随之增多, 载流子的浓度升高, 晶体的导电能力增强; 反之, 当环境温度降低时, 载流子的浓度降低, 晶体的导电能力就会变差。

总的来说, 常温下本征激发所产生的载流子的浓度很低, 且与环境温度密切相关, 因此本征半导体的导电能力和热稳定性较差, 一般不能直接用来制造半导体器件。

2.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质, 可使半导体的导电性发生显著变化。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同, 杂质半导体可分为电子(N)型半导体和空穴(P)型半导体两大类。通过控制掺入杂质元素的浓度, 可以控制杂质半导体的导电性能。

制备杂质半导体时, 一般按百万分之一数量级的比例在本征半导体中掺入三价或五价元素。