



普通高等教育“十三五”规划教材
寇戈·模拟电路与数字电路(第3版)·配套用书

电子信息类精品教材

模拟电路与数字电路 学习指导与考研辅导

• 寇戈 主编
• 黄琳 吴少琴 谭雪琴 姜萍 花汉兵 编著

中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材

电子信息类精品教材

寇戈·模拟电路与数字电路（第3版）·配套用书

模拟电路与数字电路 学习指导与考研辅导

寇戈 主编

黄琳 吴少琴 谭雪琴 姜萍 花汉兵 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

《模拟电路与数字电路》(第3版)为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材,教育部2009年普通高等教育国家精品教材,也是2013年江苏省“十二五”高等学校重点教材。本书为该教材的配套辅导教材。

本书分为4个部分,第一部分是绪论,对全书的内容做简单介绍;第二部分是学习指导,共包含12章,与《模拟电路与数字电路》(第3版)的第2~13章一一对应,从教学要求、学习重点及难点解析和解题指导三个方面对每一章内容进行归纳和总结;第三部分是《模拟电路与数字电路》(第3版)教材课后习题的详细题解;第四部分提供了课程的两套考试样卷、两份考研样卷及答案。

本书紧扣教材各章的知识点,注重基本概念、基本原理与基本计算的介绍。同时力求叙述简明扼要,通俗易懂,引导读者举一反三,灵活运用并真正掌握相关知识。

本书可以和《模拟电路与数字电路》(第3版)配套使用,作为学生的自学辅导教材和教师的教学参考书,也可以单独用作电子技术基础、模拟电子技术、数字电子技术和电子电路等课程的课外参考书,以及相关课程的考研辅导教材,还可以作为工程技术人员的参考用书。

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

模拟电路与数字电路学习指导与考研辅导 / 寇戈主编. —北京: 电子工业出版社, 2017.9

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-31576-3

I. ①模… II. ①寇… III. ①模拟电路—研究生—入学考试—自学参考资料②数字电路—研究生—入学考试—自学参考资料 IV. ①TN710②TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第118967号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾 李宪强 宋 薇

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

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: 14 字数: 500千字

版 次: 2017年9月第1版

印 次: 2017年9月第1次印刷

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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: 88254113。

前 言

本书是《模拟电路与数字电路》(第3版)(电子工业出版社,书号 978-7-121-25056)的辅助教材,可以和主教材配套使用,也可以单独使用,作为电子技术基础、模拟电子技术、数字电子技术和电子电路等课程的课外参考书及相关课程的考研辅导教材。

本书分为4个部分,第一部分是绪论,对本书的内容和使用方法做简单介绍;第二部分是学习指导,共包含12章,与主教材的第2~13章一一对应,从教学要求、学习重点及难点解析和解题指导三个方面进行归纳和总结,以期对读者有一些启发和指导;第三部分是《模拟电路与数字电路》教材课后习题的详细题解;第四部分提供了课程的两套考试样卷及答案,以及两份考研样卷及评分标准,供读者参考。

本书得益于很多热心的教师和学生的催促及鼓励!《模拟电路与数字电路》教材的编写始于2002年,距今已经15个年头了!教材第1版2004年经由电子工业出版社正式出版后,经过2008年第2版及2015年第3版的两次修订,很多使用教材的师生都曾经联系编者索要学习指导书,而且也提出了很多很好的意见和建议。本书是在此种情况下编写而成的。

本书的编写者均是南京理工大学多年从事模拟电路与数字电路课程教学的资深一线教师,学习指导部分都是各位老师结合自身教学体会而写,很多内容都是老师们的原创,是从学生学习的角度出发为读者奉上的经验之谈。该部分内容不是教材的简单重复或提炼总结,很多内容都进行了深度归纳与剖析。例如,第2章对于二极管限幅电路的各种类型及输出情况进行了完整总结,读者通过比较对此类型的电路会有全面系统的认识;再如,第8章进行逻辑表达式左右两边相等判断时,真值表是常用方法,本书还提供了用卡诺图和公式法对同一问题进行求解。又如,第9章对于数据选择器和译码器实现逻辑函数的情形进行了归纳和对比分析,这些都是从展拓读者思维角度出发,使相关知识的掌握更具灵活性。教材的习题详解部分除了给出答案,还对很多问题进行了详细分析,帮助学生更好地理解相关知识。几位老师都提到:本书的许多内容都是经常在课堂上跟学生讲课时说的话以及自己的备课笔记!相信这些真诚的文字会对读者的教与学产生积极的作用,会对模拟电路和数字电路的学习有一些帮助。

本书由寇戈主编并统稿,第1、2、7、8章由寇戈编写,第3、4章由黄琳编写,第5、6章由吴少琴编写,第9、12章由谭雪琴编写,第10、11章由姜萍编写,第13章由花汉兵编写。

由于时间较仓促及编写者的水平局限,书中难免存在各种问题,敬请广大读者指正。编者的电子邮件地址为 mdandsd@2008.sina.com,有任何建议及意见,欢迎联系我们。

编 者

于南京理工大学

本书结构	}	第一部分 —— 第1章 绪论		
		第二部分 —— 学习指导	}	第2章 半导体器件基础
				第3章 放大电路基础
				第4章 放大电路中的反馈
				第5章 集成运算放大器
				第6章 正弦波振荡电路
				第7章 直流稳压电源
				第8章 数字逻辑基础
				第9章 组合逻辑电路
				第10章 时序逻辑电路引论
				第11章 时序逻辑电路的分析与设计
				第12章 存储器和可编程逻辑器件
		第13章 脉冲信号的产生与整形		
第三部分 —— 教材习题详解				
第四部分 —— 考试样卷及答案				

目 录

第一部分

第 1 章 绪论	(1)
----------	-----

第二部分 学习指导

第 2 章 半导体器件基础	(2)
---------------	-----

2.1 本章教学要求	(2)
2.2 本章学习重点及难点解析	(2)
2.2.1 掌握半导体基础知识	(2)
2.2.2 正确理解 PN 结(二极管)的单向导电性	(3)
2.2.3 掌握二极管的电路模型	(4)
2.2.4 掌握二极管的应用	(4)
2.2.5 掌握特殊二极管——稳压管的反向击穿特性	(6)
2.2.6 掌握三极管的三种工作方式及相应的偏置特点	(6)
2.2.7 掌握场效应管分类	(7)
2.2.8 掌握场效应管栅源电压控制漏极电流输出的特性	(8)
2.2.9 正确理解场效应管沟道宽度不均匀的特点	(9)
2.3 解题指导	(9)

第 3 章 放大电路基础	(13)
--------------	------

3.1 本章教学要求	(13)
3.2 本章学习重点及难点解析	(13)
3.2.1 正确理解放大电路的构成、工作原理及特点	(13)
3.2.2 熟练掌握放大电路的分析方法	(15)
3.2.3 熟练掌握小信号模型分析法分析放大电路的动态性能指标	(18)
3.2.4 熟练掌握由晶体三极管构成的三种组态放大电路及特点	(20)
3.2.5 熟练掌握场效应管放大电路的工作原理及分析	(22)
3.2.6 熟练掌握多级放大电路耦合方式及其分析	(26)
3.3 解题指导	(28)

第 4 章 放大电路中的反馈	(35)
----------------	------

4.1 本章教学要求	(35)
4.2 本章学习重点及难点解析	(35)
4.2.1 正确理解反馈的概念	(35)
4.2.2 熟练掌握反馈的类型及判断	(36)
4.2.3 反馈的四种组态	(38)
4.2.4 熟练掌握反馈对放大电路性能的影响	(39)

4.2.5	掌握负反馈的正确引入	(39)
4.3	解题指导	(40)
第5章	集成运算放大器	(43)
5.1	本章教学要求	(43)
5.2	学习重点及难点解析	(43)
5.2.1	掌握运算放大器的组成以及各部分的特点	(43)
5.2.2	掌握差分放大器的基本概念	(43)
5.2.3	掌握差分放大电路的分析计算	(44)
5.2.4	掌握运算放大器的结构特点	(46)
5.2.5	熟悉运算放大器线性应用的分析方法	(46)
5.2.6	熟悉集成运算放大器非线性应用的分析方法	(48)
5.3	解题指导	(50)
第6章	正弦波振荡电路	(58)
6.1	本章教学要求	(58)
6.2	本章学习重点及难点解析	(58)
6.3	解题指导	(61)
第7章	直流稳压电源	(65)
7.1	本章教学要求	(65)
7.2	本章学习重点及难点解析	(65)
7.2.1	掌握各种类型整流电路的工作原理及技术指标	(65)
7.2.2	掌握电容滤波电路的特性	(66)
7.2.3	掌握稳压电路的性能及相关计算	(67)
7.3	解题指导	(68)
第8章	数字逻辑基础	(72)
8.1	本章教学要求	(72)
8.2	本章学习重点及难点解析	(72)
8.2.1	正确理解数制和码制的概念	(72)
8.2.2	掌握逻辑代数基本运算公式、基本定律与基本规则	(74)
8.2.3	熟练掌握逻辑问题的描述方法及相互转换	(75)
8.2.4	掌握逻辑函数表达式的一般形式与标准形式(最小项表达式和最大项表达式)	(76)
8.2.5	熟练掌握逻辑函数的简化方法	(77)
8.3	解题指导	(78)
第9章	组合逻辑电路	(83)
9.1	本章教学要求	(83)
9.2	本章学习重点及难点解析	(83)
9.2.1	掌握由基本门构成的组合逻辑电路的分析	(83)
9.2.2	掌握由基本门构成的组合逻辑电路的设计	(84)
9.2.3	正确理解编码器的设计	(84)
9.2.4	熟练掌握译码器实现组合逻辑函数的应用	(84)

9.2.5	熟练掌握数据选择器实现组合逻辑函数的应用	(86)
9.2.6	掌握加法器的应用	(87)
9.2.7	掌握数值比较器的功能及容量扩展	(89)
9.3	解题指导	(89)
第 10 章	时序逻辑电路引论	(97)
10.1	本章教学要求	(97)
10.2	本章学习重点及难点解析	(97)
10.3	解题指导	(100)
第 11 章	时序逻辑电路的分析与设计	(106)
11.1	本章教学要求	(106)
11.2	本章学习重点及难点解析	(106)
11.3	解题指导	(109)
第 12 章	存储器和可编程逻辑器件	(121)
12.1	本章教学要求	(121)
12.2	本章学习重点及难点解析	(121)
12.2.1	掌握 ROM 的结构及容量	(121)
12.2.2	了解 ROM 的分类	(122)
12.2.3	掌握 PROM 实现组合逻辑函数的应用	(122)
12.2.4	掌握 RAM 的结构	(122)
12.2.5	掌握 RAM 容量的扩展	(123)
12.2.6	掌握 PLD 器件的基本结构	(124)
12.2.7	了解 PAL 器件的输出结构	(125)
12.2.8	了解 PAL 实现组合逻辑函数的应用	(127)
12.2.9	了解 PLD 的开发过程	(127)
12.3	解题指导	(129)
第 13 章	脉冲信号的产生与整形	(132)
13.1	本章教学要求	(132)
13.2	本章学习重点及难点解析	(132)
13.2.1	熟练掌握 555 定时器的工作原理	(132)
13.2.2	掌握由 555 定时器构成的三种脉冲单元电路	(133)
13.2.3	掌握多谐振荡器改进电路	(135)
13.2.4	掌握由集成施密特触发器构成的两种脉冲单元电路	(136)
13.3	解题指导	(137)

第三部分 《模拟电路与数字电路（第 3 版）》教材习题解答

第 2 章	(143)
第 3 章	(146)
第 4 章	(153)
第 5 章	(155)

第 6 章	(161)
第 7 章	(164)
第 8 章	(166)
第 9 章	(170)
第 10 章	(178)
第 11 章	(183)
第 12 章	(192)
第 13 章	(194)

第四部分 考试样卷及答案

模拟电路与数字电路样卷一	(199)
模拟电路部分	(199)
数字电路部分	(200)
样卷一参考答案	(201)
模拟电路与数字电路样卷二	(203)
模拟电路部分	(203)
数字电路部分	(204)
样卷二参考答案	(205)
硕士学位研究生入学考试试题一	(207)
硕士学位研究生入学考试试题一参考答案	(208)
硕士学位研究生入学考试试题二	(210)
硕士学位研究生入学考试试题二参考答案	(212)
参考文献	(214)

第一部分

第1章 绪论

1. “模拟电路与数字电路”课程简介

“模拟电路与数字电路”是一门重要的技术基础课，其实践性很强。通过该课程相关内容的学习，可以获得模拟电子技术和数字电子技术的基本理论、基本知识和基本技能，培养学生分析问题、解决问题及理论联系实际的能力，并增强思维能力和动手能力，为学习后续课程及从事工程技术和科学研究奠定基础。

通过“模拟电路与数字电路”课程的学习，学生应掌握常用电子器件的结构、工作原理、主要参数及应用；掌握基于 BJT 和 FET 的基本电路的结构、工作原理和功能，并能进行基本分析和计算；掌握逻辑代数的基本定理和运算方法；掌握组合电路和时序电路的分析及设计方法；掌握一定的模拟电路与数字电路的测试和实验技能；并具备初步的电子电路的设计能力。

该课程的先修课程是大学物理和电工学。课程的参考学时数为 80~120。各章的参考学时分配见表 1.1（以 80 学时为例）。

2. 本书使用说明

本书是《模拟电路与数字电路》（第 3 版）的配套辅导教材，亦可单独使用，作为《模拟电路与数字电路》学习的参考书和考研辅导书。

本书按照《模拟电路与数字电路》（第 3 版）的章节顺序编写，方便读者对照阅读使用。全书分为四个部分：绪论部分（第一部分）简介本书使用方法。第二部分是本书的核心部分，分为本章教学要求、学习重点及难点解析和解题指导三部分内容，均是“模拟电路与数字电路”课程多年的授课教师结合自身教学经验和体会编写的，解题指导部分除了有详细的解题过程，每题亦提供了解题思路对读者进行指点和提示。第三部分包括《模拟电路与数字电路》（第 3 版）课后全部习题的解答，为教师备课、学生学习复习及一些自学者使用提供方便。第四部分是“模拟电路与数字电路”课程考试的两份样卷及答案，以及该课程研究生考试的两份样卷及答案，供学生课程结业考试或考研复习参考。

表 1.1 参考学时分配

章节	教 学 内 容	学时
1	绪论	2
2	半导体器件基础	6
3	放大电路基础	12
4	放大电路中的反馈	4
5	集成运算放大器	8
6	正弦波振荡器	4
7	直流稳压电源	4
8	数字逻辑基础	6
9	组合逻辑电路	8
10	时序逻辑电路引论	6
11	时序逻辑电路的分析与设计	10
12	存储器和可编程逻辑器件	4
13	脉冲信号的产生与整形	6
总 学 时		80

第二部分 学习指导

第2章 半导体器件基础

2.1 本章教学要求

1. 掌握半导体的基础知识, 熟练掌握本征半导体和杂质半导体、PN 结的形成和 PN 结的特性, 正确理解 PN 结的偏置及单向导电性;
2. 掌握半导体二极管的结构, 熟练掌握其工作原理、电路模型及应用, 了解二极管的主要参数, 掌握稳压管的工作原理及应用;
3. 掌握半导体三极管的结构, 熟练掌握三极管电流分配、放大原理、输入特性和输出特性曲线, 理解三极管的主要参数;
4. 掌握场效应管的结构, 熟练掌握增强型、耗尽型 MOS 管的工作原理和 MOS 管的伏安关系曲线, 了解场效应管的主要参数。

2.2 本章学习重点及难点解析

本章内容是学习后续各章节的前提和基础。首先介绍半导体材料的特点和半导体器件的核心环节——PN 结, 然后重点讲解三种重要的半导体器件(二极管、三极管和场效应管)。这部分内容如果不能深入透彻地掌握, 后续的放大电路内容将很难理解。具体教学内容包括:

2.2.1 掌握半导体基础知识

半导体的相关知识是学习 PN 结的基础, 而 PN 结的理解程度直接决定着对二极管、三极管和场效应管的掌握程度。这里有两个问题要搞清楚:

(1) 半导体的导电特性

半导体的名称很好地诠释了其导电特性, 即半导体的导电特性介于导体和绝缘体之间。

将纯净的半导体称作本征半导体, 本征半导体中多子和少子的浓度是相等的。在半导体器件中我们并不直接使用本征半导体, 这是由于在室温下本征半导体的导电性能几乎和绝缘体相当。

但是, 经过掺杂后的杂质半导体其导电性能却大大加强, 因此 PN 结是采用杂质半导体制作的。在本征半导体中掺入一定量的杂质元素, 就成为杂质半导体。杂质半导体有两类: P 型半导体和 N 型半导体。两种杂质半导体的比较如表 2.1 所示。

表 2.1 两种杂质半导体的比较

杂质半导体	所掺杂质	多数载流子	少数载流子
P 型半导体	三价元素	空穴	电子
N 型半导体	五价元素	电子	空穴

杂质半导体中的多子浓度取决于掺入杂质的多少, 一般少量掺杂即可大大增强半导体的导电性能。少子浓度由本征激发决定, 而本征激发取决于温度, 所以少子的浓度与温度关系很大。

(2) PN 结的形成过程

在同一块半导体基片上通过掺杂工艺得到 P 型半导体和 N 型半导体，这两种杂质半导体可以在交界面上实现原子级的结合。

P 型半导体和 N 型半导体交界面发生着两种相反的运动——多子的扩散和少子的漂移，如图 2.1 所示。当两种运动达到动态平衡时，空间电荷不再变化，形成宽度稳定的空间电荷区——PN 结。

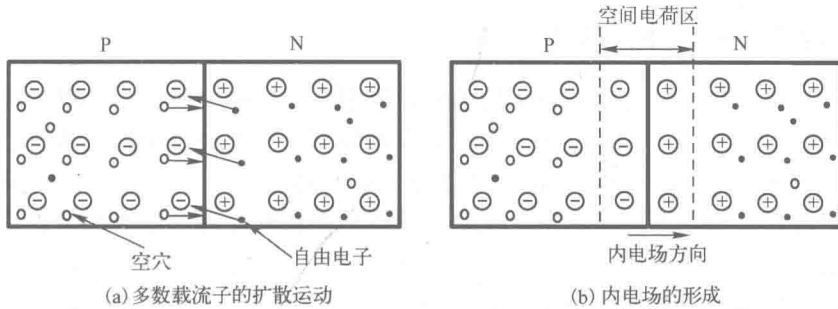


图 2.1 PN 结的形成

PN 结的形成过程如图 2.2 所示。

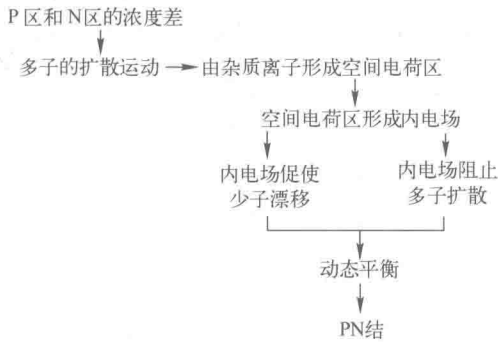


图 2.2 PN 结的形成过程示意图

2.2.2 正确理解 PN 结（二极管）的单向导电性

PN 结加外部封装引出阳极和阴极两根引线即成为二极管。二极管的物理特性与 PN 结完全一样。

二极管（PN 结）的单向导电性是经常用到的一个电路特性。但由如图 2.3 所示的二极管的伏安关系可知：实际上二极管是双向导电的。注意：为了方便地描述二极管的电压与电流之间的关系，将正向特性和反向特性绘制在一张图上，因此图 2.3 中正向电压与反向电压的数值数量级是不一样的，正向电压一般是零点几伏，而反向电压数值为几十到几百伏。严格地说应该是在一定范围内，二极管是单向导电的。根据半导体物理理论，由肖克利方程可知加于二极管两端的电压和流经的电流之间的关系为：

$$I = I_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (2.1)$$

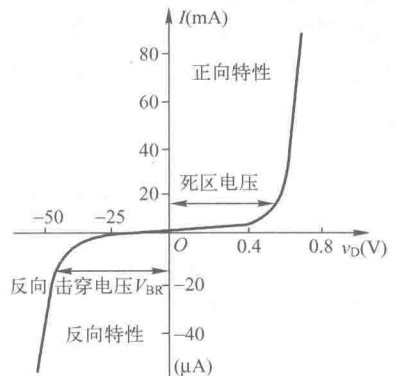


图 2.3 二极管的伏安关系曲线

在式 (2.1) 中， V_T 是在第 3 章放大电路相关计算中经常需要用到的一个参量，一般情况下，室温时 (27°C，即 300K)

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{300 \times 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \approx 26 \text{ mV} \quad (2.2)$$

在第 3 章及以后各章节中, V_T 作为已知常数使用, 直接采用 26mV 的计算结果。

在对上述伏安特性进行描述时, 经常提到的一个术语是“偏置”, 其含义即为在二极管或 PN 结两端加外加电场, 根据所加电场的方向, 有正向偏置及反向偏置两种情况。

2.2.3 掌握二极管的电路模型

基于二极管的单向导电性, 二极管常用的电路模型有理想模型和恒压降模型, 如图 2.4 所示。在包含二极管的电路中, 可以根据要求采用两种模型之一来分析电路, 进行相关计算。但是不管采用哪种模型, 必须先判断二极管是导通的还是截止的, 才能进行接下来的分析和计算。二极管导通或截止的判断方法如下: 先将二极管的阳极和阴极与电路断开, 求解阳极和阴极之间的电压数值。如果该数值高于死区电压(硅管约为 0.5V, 锗管约为 0.1V), 或者阳极电位高于阴极电位, 说明二极管是正向偏置的, 则二极管接通后处于导通状态, 反之则处于截止状态。

例如, 图 2.5 所示的二极管电路, 假定电路于 A、B 两点处断开, 得到两点的对地电位 $V_A = -3\text{V}$, $V_B = -6\text{V}$ 。由于 $V_A > V_B$, 故二极管导通。按照理想模型和恒压降模型处理, 可以得到不同的相关电路参数。

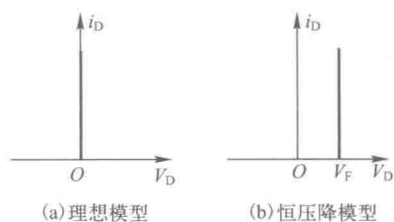


图 2.4 二极管两种不同模型的伏安特性

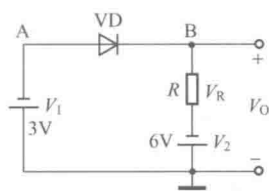


图 2.5 二极管电路模型的应用举例

若采用二极管的理想模型, 则流经二极管的电流 $I_D = V_R/R = (-V_1 + V_2)/R$, $V_O = V_A = -3\text{V}$; 若采用二极管的恒压降模型, 设二极管的正向压降 $V_F = 0.7\text{V}$, 则 $I_D = V_R/R = (-V_1 + V_2 - V_F)/R$, $V_O = -V_F + V_A = -3.7\text{V}$ 。

有的时候电路中会包含多个二极管(如教材中的 2.8 题)。在这种情况下, 承受正向电压较高者优先导通, 然后可根据导通的二极管的电路特点, 将导通的二极管两端电压视为正向导通电压(恒压降模型对于硅管来说就是 0.7V), 然后再用上述方法判断分析其他二极管的导通情况。

2.2.4 掌握二极管的应用

二极管的应用非常广泛, 表 2.2 对二极管的普通应用及特殊应用进行了归纳, 便于读者了解。

教材第 2 章重点介绍了二极管在限幅电路和钳位电路中的应用。教材第 7 章将介绍检波二极管、整流二极管和稳压二极管的应用。表 2.3 以输入电压 $v_i = 10\sin\omega t$ (V) 为例将限幅电路的常见类型及对应的输出电压波形进行了总结(二极管按照理想模型处理, 图中均画了一个周期)。

表 2.2 二极管的应用

普通应用	特殊应用
检波二极管、整流二极管、开关二极管、稳压二极管、限幅二极管、钳位二极管等	发光二极管、光电二极管、变容二极管等

表 2.3 各种限幅电路及其输出波形

串联限幅	 	 	 	
并联限幅	 	 	 	
双向限幅	 	 		

读者可以通过对表 2.3 中的各种限幅电路进行分析比较,从而了解各种限幅电路,掌握规律,进而熟悉二极管在电路中的应用。

2.2.5 掌握特殊二极管——稳压管的反向击穿特性

稳压管是一种特殊类型的二极管,制作稳压管时半导体必须高度掺杂,增大 PN 结的面积。稳压管的特性曲线与二极管类似,其伏安特性曲线如图 2.6 所示。包含稳压管的电路分析与二极管类似。用稳压管构成稳压电路时,要使稳压管的工作电流介于最小工作电流和最大工作电流之间,即 $I_{ZMIN} < I_Z < I_{ZMAX}$ 。

正常情况下稳压管工作在反向击穿区,使用时须加限流电阻以避免稳压管损毁。如果稳压管工作在正向导通区,其电路特性分析与二极管完全一致。

例如图 2.7 中稳定电压值分别为 V_{Z1} 和 V_{Z2} 的两只稳压管(以硅管为例),图(a)中稳压值为 $V_{Z1} + V_{Z2}$,而图(b)中稳压值为 $V_{Z1} + 0.7(V)$ 。

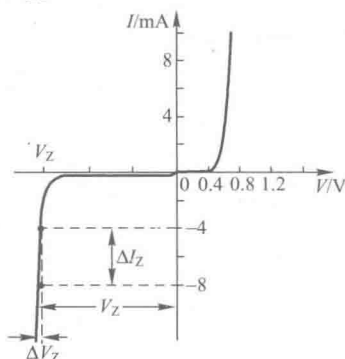


图 2.6 稳压管的伏安特性曲线

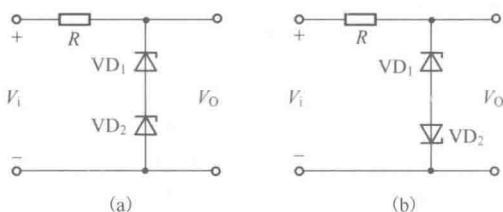


图 2.7 稳压管电路

2.2.6 掌握三极管的三种工作方式及相应的偏置特点

三极管是电流控制型器件,具有电流放大作用,这一点是初学者感觉较难理解但必须掌握的内容。基于 PN 结的概念,首先认识清楚三极管中是包含发射结和集电结两个 PN 结的半导体器件。两个 PN 结的不同偏置情况决定了三极管不同的工作模式及应用,如表 2.4 所示。

三极管的输出特性曲线是需要下些功夫才能真正理解的,因为很多相关概念和计算都与此曲线有关,三极管放大电路的分析也是基于此输出特性曲线的。首先,要建立“曲线族”的概念,特性曲线只是画出了有限的几根,实际上对应于不同的基极电流 I_B 有无穷多根输出曲线;其次,正确理解曲线之间的间隔与电流放大系数 β 的关系。由于一般来说反向电流 I_{CEO} 很小可以忽略,在我们研究的线性工作区,输出特性曲线为平行等距的曲线族,此时交流电流放大倍数 β 和直流电流放大倍数 $\bar{\beta}$ 可以不再区分,即 $\beta = \bar{\beta}$;再次,要熟练掌握在三极管的输出特性曲线上,放大区、饱和区和截止区的分布与偏置电压的关系;最后,需要重申的是只有在放大区才有 $I_C = \beta I_B$ 和 $I_E = I_C + I_B$ 这两个关系式成立。

另外,初学者疑问较多的一点是,进行相关计算时公式是用 $I_C = \beta I_B$ 还是 $I_C \approx \beta I_B$,是用 $I_E = (1 + \beta) I_B$ 还是 $I_E \approx I_C = \beta I_B$? 由于教材中所分析的三极管及其放大电路,均认为其满足工程近似条件,因此有的表达式直接采用等号代替了近似相等,这也是很多教材习惯的做法,可

表 2.4 三极管的三种工作模式、偏置特点及应用

工作模式	发射结	集电结	应用
放大	正向偏置	反向偏置	模拟电路: 放大器
饱和	正向偏置	正向偏置	数字电路: 开关
截止	反向偏置	反向偏置	

以不用加以区分。

2.2.7 掌握场效应管分类

场效应管分为结型和绝缘栅型，两种类型又都有 P 沟道和 N 沟道之分。在理解场效应管工作原理的基础上，比较容易通过转移特性或输出特性判断场效应管的类型。各种类型场效应管的符号、转移特性、输出特性及参数特性总结归纳于表 2.5。

表 2.5 各种类型场效应管的符号、转移特性、输出特性及参数特性

类型	符号	转移特性	输出特性	栅源电压 V_{GS}	漏源电压 V_{DS}	V_T 或 V_P		
JFET	N 沟道				$V_{GS} < 0$	$V_{DS} > 0$	夹断电压 $V_P < 0$	
	P 沟道				$V_{GS} > 0$	$V_{DS} < 0$	夹断电压 $V_P > 0$	
MOSFET	增强型	N 沟道				$V_{GS} > 0$	$V_{DS} > 0$	开启电压 $V_T > 0$
		P 沟道				$V_{GS} < 0$	$V_{DS} < 0$	开启电压 $V_T < 0$
	耗尽型	N 沟道				$V_{GS} > 0$ 或 $V_{GS} = 0$ 或 $V_{GS} < 0$	$V_{DS} > 0$	夹断电压 $V_P < 0$
		P 沟道				$V_{GS} > 0$ 或 $V_{GS} = 0$ 或 $V_{GS} < 0$	$V_{DS} < 0$	夹断电压 $V_P > 0$

通过观察表 2.5 转移特性和输出特性可以发现，结型场效应管中，栅源电压 V_{GS} 和漏源电压 V_{DS} 的极性是相反的，而增强型绝缘栅场效应管的 V_{GS} 和 V_{DS} 的极性是相同的。对于耗尽型绝缘栅场效应管而言， V_{GS} 可正可负可零， V_{DS} 的极性可能会出现不同的两种情况——相同或者相反，视沟道变宽或变窄而定。

表 2.5 中 V_{GS} 和 V_{DS} 的极性是为了保证场效应管工作在放大区（恒流区，也称饱和区）。实际上， V_{DS} 极性是由导电沟道确定的。由于 N 沟道的导电载流子为自由电子，为了使自由电子向漏极漂移，必须使 $V_{DS} > 0$ ；相反地，由于 P 沟道的导电载流子为空穴，为了使空穴向漏极漂移，必须使 $V_{DS} < 0$ 。

V_{GS} 的极性稍稍复杂一些，分两种情况考虑：

(1) 针对结型场效应管, 因为栅源之间要加反向偏置电压, N 沟道的 JFET 栅极为 P 型半导体, 所以 $V_{GS} \leq 0$; 类似地, P 沟道的 JFET 栅极为 N 型半导体, 所以 $V_{GS} \geq 0$ 。

(2) 针对绝缘栅场效应管, 如果是增强型 N 沟道, 为了吸引电子那么栅源之间必须加正向偏置, 即 $V_{GS} > 0$; 而增强型 P 沟道, 为了吸引空穴, 那么栅源之间必须加反向偏置, 即 $V_{GS} < 0$; 如果是耗尽型 N 沟道, 为了吸引更多自由电子到衬底表面, 栅源之间必须加正向偏置, 即 $V_{GS} > 0$, 此时沟道加宽, 而栅源之间如果加反向偏置, 即 $V_{GS} < 0$, 此偏置会使沟道变窄。耗尽型 P 沟道情况正好相反。

所以, V_{GS} 的极性是由场效应管的类型 (结型或者绝缘栅型) 和沟道的类型 (N 沟道或 P 沟道) 共同决定的。

而对于场效应管的参数, 夹断电压 V_p (结型或者耗尽型绝缘栅) 或者开启电压 V_T (增强型绝缘栅) 则是由沟道决定的。

N 沟道 JFET 或耗尽型 MOSFET, $V_p < 0$; P 沟道 JFET 或耗尽型 MOSFET, $V_p > 0$ 。

N 沟道增强型 MOSFET, $V_T > 0$; P 沟道增强型 MOSFET, $V_T < 0$ 。

2.2.8 掌握场效应管栅源电压控制漏极电流输出的特性

场效应管和三极管均是常见的半导体器件, 二者的根本区别是场效应管属于电压控制型, 即通过栅源电压 V_{GS} 控制漏极电流 I_D 。在有些场合使用 FET 较 BJT 更有优势, 比如说需要较高输入电阻, 或者需要一个电流源 (概念见教材 5.1.3 节), 或者需要受电压控制的电阻时 (当漏源电压 V_{DS} 数值较小时, 漏极电流 I_D 随 V_{GS} 变化, 漏源之间此时等同于一只受 V_{GS} 控制的低阻值可变电阻)。由于 FET 工作时输入回路等同于绝缘体 (绝缘栅型 FET) 或反向偏置的 PN 结 (结型 FET), 因此场效应管输入回路 (控制端) 的电流为 0, 仅存在外加的控制电压 V_{GS} , 这一点需要格外引起注意。

无论是结型还是绝缘栅型, 场效应管的工作原理都可以概括为: 由于电场效应 (名称来由), 在外加 V_{GS} 及 V_{DS} 作用下, 场效应管的导电沟道产生预夹断, 这样 V_{DS} 的变化对 I_D 几乎不产生影响 (见图 2.8, NMOS 输出特性曲线中几乎与横轴平行的部分)。而当 V_{GS} 改变时 (图 2.8 中不同的曲线对应不同的 V_{GS}), 因为预夹断区的长度随之改变, 从而改变了导电沟道的电阻, 因此 I_D 也发生相应的改变, 最终实现了 V_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制。

MOSFET 中的增强型和耗尽型参数有所区别, 增强型 FET 的一个重要参数是开启电压 V_T , 而耗尽型 FET 的一个重要参数是夹断电压 V_p 。这两个参数实际上反映了 MOSFET 两种不同的工作模式——增强型需要“开启” (大于某一电压值) 才能进入工作状态, 而耗尽型一直处于工作状态需要“关断” (小于某一电压值) 才能停止, 如图 2.9 所示 (以 NMOS 为例)。这样分析后可能有助于对 MOSFET 工作原理的理解。

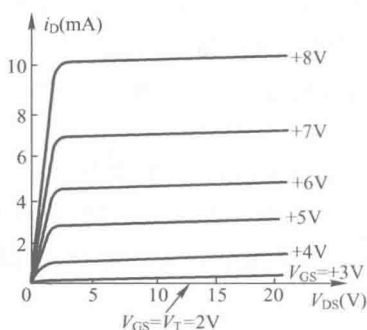


图 2.8 NMOS 输出特性曲线

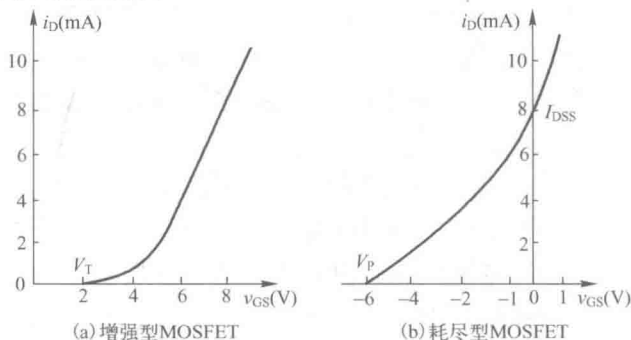


图 2.9 增强型 MOSFET 和耗尽型 MOSFET 工作模式对比