



普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

模拟电子技术基础

学习指南与习题详解

周淑阁 主编

周淑阁 硕力更 付文红 吴少琴 编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

模拟电子技术基础 学习指南与习题详解

周淑阁 主编

周淑阁 硕力更 付文红 吴少琴 编

高等教育出版社

内容简介

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材《模拟电子技术基础》(周淑阁主编,高等教育出版社出版)的配套学习指导书。

全书共分三篇。第一篇是电子器件及基本应用,主要包括晶体二极管、晶体三极管、场效应管的特性及基本应用和分析方法;第二篇是基本功能电路,主要包括负反馈电路、振荡电路、电流源电路、差分放大电路、功率放大电路等功能电路的特性、技术指标、实际应用;第三篇是模拟集成电路,主要包括集成运算放大器、集成稳压电源等的原理和应用。

每章都含有如下内容:“内容说明与重点、难点”、“重点内容例题解析”、“自测题”、“自测题答案”、“配套教材习题详解”,PSpice 仿真题的解答在书后所附光盘中。

本书是高等学校电子信息类学生“模拟电子线路”、“电子技术基础”、“低频电子线路”等课程的学习指导书,也可以供从事电子技术工作的工程技术人员以及非电子信息类相关课程的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础学习指南与习题详解/周淑阁主编.

北京:高等教育出版社,2006.1

ISBN 7-04-018473-7

I. 模... II. 周... III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 155502 号

策划编辑 韩颖 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青
责任绘图 朱静 版式设计 史新薇 责任校对 殷然
责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总机 010-58581000
经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京晨光印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>
版次 2006 年 1 月第 1 版
印次 2006 年 1 月第 1 次印刷
定价 38.70 元(含光盘)

开本 787×960 1/16
印张 25
字数 450 000

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18473-00

前 言

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材《模拟电子技术基础》(周淑阁主编,高等教育出版社出版)的配套学习指导书。

本书的编写按照教育部印发的《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》精神,以“把提高教材质量作为教材建设的核心”为宗旨,按照国家教育部电气信息类课程指导委员会分委会制定的教学大纲编写的。

本书是编者多年来教学实践经验的总结。本书对主教材的各章重点内容都做了系统的总结,重点内容例题解析之后还带有注释内容,可以加强对重点内容的学习、理解和记忆。学生可以通过自测题测试自己的学习状况。PSpice 的例题和习题全部经过了 ORCAD 仿真,并且提供了 ORCAD 仿真光盘。因此,本书对“模拟电子线路”、“电子技术基础”、“低频电子线路”等课程的学习具有普遍的指导意义。

本书的编写成员有:周淑阁、硕力更、付文红、吴少琴,由周淑阁教授担任主编。第一章到第十章的“内容说明与重点、难点”和“重点内容例题解析”由周淑阁编写,第一章到第三章的“自测题”和“习题详解”由付文红编写,第四章到第七章的“自测题”和“习题详解”由硕力更编写,第八章到第十章的“自测题”和“习题详解”由吴少琴编写。PSpice 仿真题解答光盘主要由硕力更和吴少琴完成。

再一次感谢上海银利电子有限公司为主教材《模拟电子技术基础》提供的 ORCAD 练习光盘,它有利于学生对 PSpice 的学习与实际练习。

在本书的编写过程中宗志园、张军、张卫清、彭中、柳祥乐、颜玮、陈敏等做了绘图、录入和校对工作,在这里一并表示感谢。

由于水平有限,再加上时间仓促,书中肯定有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

目 录

第一篇 电子器件及基本应用	1
第一章 晶体二极管工作原理及应用	3
1.1 内容说明与重点、难点	3
1.1.1 内容说明	3
1.1.2 重点、难点	3
1. 半导体物理知识	3
2. N型半导体和P型半导体	4
3. 载流子的运动	4
4. PN结的形成原理	4
5. 二极管的伏安特性	4
6. 二极管的电路模型	5
7. 二极管的应用	8
8. 二极管电路的分析方法	11
1.2 重点内容例题解析	12
1.3 自测题	19
1.4 自测题答案	20
1.5 配套教材习题详解	20
第二章 晶体三极管及基本放大器	32
2.1 内容说明与重点、难点	32
2.1.1 内容说明	32
2.1.2 重点、难点	32
1. 三极管的组成和工作原理	32
2. 三极管的三种连接方式	33
3. 三极管的伏安特性和参数	33
4. 放大器的技术指标	35
5. 放大器的偏置电路	37
6. 放大器的分析方法	38
7. 几种放大器性能的比较	40
8. 多级放大器	46
9. 放大器的频率响应	48

2.2	重点内容例题解析	53
2.3	自测题	89
2.4	自测题答案	90
2.5	配套教材习题详解	90
第三章	场效应管及其应用	121
3.1	内容说明与重点、难点	121
3.1.1	内容说明	121
3.1.2	重点、难点	121
1.	结型场效应管构造、工作原理、伏安特性和参数	121
2.	绝缘栅型场效应管构造、工作原理、伏安特性和参数	122
3.	各种场效应管比较	126
4.	场效应管放大电路的偏置电路	126
5.	场效应管放大器的图解法	128
6.	场效应管小信号等效电路	129
7.	场效应管放大器的解析法	129
8.	三种组态的场效应管放大器	129
9.	场效应管的其它应用	130
3.2	重点内容例题解析	132
3.3	自测题	144
3.4	自测题答案	144
3.5	配套教材习题详解	145
第二篇	基本功能电路	163
第四章	负反馈放大器	165
4.1	内容说明与重点、难点	165
4.1.1	内容说明	165
4.1.2	重点、难点	165
1.	反馈放大器的基本概念	165
2.	反馈类型的判断方法	166
3.	反馈放大器的增益	166
4.	负反馈放大器对放大器性能的影响	168
5.	求解反馈放大器的方法	169
6.	负反馈放大器稳定性问题	169
7.	相位补偿技术	170
4.2	重点内容例题解析	172
4.3	自测题	188

4.4 自测题答案	190
4.5 配套教材习题详解	190
第五章 振荡电路	205
5.1 内容说明与重点、难点	205
5.1.1 内容说明	205
5.1.2 重点、难点	205
1. 振荡器的工作原理	205
2. 产生振荡的条件(起振条件)	206
3. RC 正弦波振荡器	206
4. LC 正弦波振荡器	207
5. 石英晶体谐振器	209
5.2 重点内容例题解析	210
5.3 自测题	218
5.4 自测题答案	220
5.5 配套教材习题详解	220
第六章 电流源电路	225
6.1 内容说明与重点、难点	225
6.1.1 内容说明	225
6.1.2 重点、难点	225
1. 恒流源电路的原理	225
2. 三极管基本镜像电流源电路	225
3. 三极管改进型电流源电路	226
4. 三极管微电流源电路	226
5. 三极管比例电流源电路	227
6. 三极管多个输出电流的电流源电路	227
7. 场效应管基本镜像电流源	227
8. 场效应管比例电流源	228
9. 多个场效应管镜像电流源电路	228
6.2 重点内容例题解析	228
6.3 自测题	233
6.4 自测题答案	235
6.5 配套教材习题详解	235
第七章 差分放大电路	240
7.1 内容说明与重点、难点	240
7.1.1 内容说明	240

7.1.2 重点、难点	240
1. 差分放大器的基本概念	240
2. 差分放大器的工作原理、求解方法	240
3. 差分放大器的性能指标比较	242
4. 差分放大器的传输特性	243
5. 差分放大器的失调	244
6. 差分放大器的调零	244
7.2 重点内容例题解析	244
7.3 自测题	255
7.4 自测题答案	258
7.5 配套教材习题详解	259
第八章 功率放大器	273
8.1 内容说明与重点、难点	273
8.1.1 内容说明	273
8.1.2 重点、难点	273
1. 功率放大器的基本概念	273
2. 甲类功率放大器	274
3. 乙类功率放大器	276
4. 甲乙类功率放大器	277
5. 复合管	277
6. 单电源甲乙类功率放大器	278
7. 桥式功率放大器	279
8.2 重点内容例题解析	279
8.3 自测题	286
8.4 自测题答案	290
8.5 配套教材习题详解	291
第三篇 模拟集成电路	301
第九章 运算放大器	303
9.1 内容说明与重点、难点	303
9.1.1 内容说明	303
9.1.2 重点、难点	303
1. 运算放大器的内部结构	303
2. 运算放大器的主要参数	304
3. 运算放大器组成的各种运算电路	304
4. 运算放大器组成的有源滤波电路	306

5. 运算放大器组成的比较器	308
6. 运算放大器在波形产生电路中的应用	309
9.2 重点内容例题解析	310
9.3 自测题	319
9.4 自测题答案	326
9.5 配套教材习题详解	329
第十章 集成稳压电源	357
10.1 内容说明与重点、难点	357
10.1.1 内容说明	357
10.1.2 重点、难点	357
1. 串联反馈式稳压电路的原理	357
2. 集成稳压电路	358
3. 三端固定式集成稳压器的应用	359
4. 三端可调式集成稳压器	359
5. 开关稳压电路	360
10.2 重点内容例题解析	362
10.3 自测题	373
10.4 自测题答案	378
10.5 配套教材习题详解	379
主要参考书目	389

第

一

篇

电子器件及基本应用

第一篇主要介绍电子器件(晶体二极管、晶体三极管、场效应管等)的工作原理、特性参数、特性曲线、基本应用和基本分析方法。第一篇是学习电子线路的基础。

由于晶体二极管、晶体三极管和场效应管是非线性器件,因此使用了描述这些器件特性的伏安特性曲线来对其进行分析。另外,在电路的分析中也经常使用近似分析的方法,并且给非线性器件建立了近似的数学模型和近似的等效电路。这些概念和方法贯穿了整个电路的学习过程。

第一章 晶体二极管工作原理及应用

第一章主要讨论晶体二极管(简称二极管)的工作原理、特性参数、二极管的模型及二极管的各种应用。

二极管是最简单的半导体器件,但是二极管的工作原理是学习其它半导体器件的基础,因此本章也介绍了一些必要的半导体物理方面的知识。

通过本章的学习,要了解二极管的工作原理,掌握二极管的伏安特性、二极管的各种模型和使用这些模型的条件、二极管电路的分析方法,掌握稳压二极管的工作原理和电路的分析与设计方法。

通过本章的学习对非线性器件有一定的认识。

1.1 内容说明与重点、难点

1.1.1 内容说明

- ① 半导体物理知识,本征半导体和本征激发。
- ② N型半导体、P型半导体。
- ③ 载流子的运动。
- ④ PN结的形成原理。
- ⑤ 二极管的伏安特性。
- ⑥ 二极管的电路模型。
- ⑦ 二极管的应用。
- ⑧ 二极管电路的分析方法。

1.1.2 重点、难点

1. 半导体物理知识

- ① 本征半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。
- ② 硅和锗的每个原子都以共价键形式和它周围的原子结合和相互作用。
- ③ 本征激发时,电子和空穴成对出现,即本征激发时,电子和空穴的浓度相等。

$$n_i = p_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{g0}}{2kT}}$$

- ④ 电子在导带中运动,空穴在价带中运动。

⑤ 温度升高本征激发加剧,产生的电子-空穴对就越多,因此本征半导体可以制成热敏器件。

2. N型半导体和P型半导体

① 杂质半导体有两种:N型半导体和P型半导体。

② 杂质半导体中掺入杂质元素的浓度要远大于本征载流子的浓度,又要远小于材料的原子密度。

③ N型半导体是由本征半导体掺入五价的施主杂质(donor impurity)制成的,多子——电子($n_{n0} \approx N_d$),少子——空穴($p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_d}$)。

④ P型半导体是由本征半导体掺入三价的受主杂质(acceptor impurity)制成的,多子——空穴($p_{p0} \approx N_a$),少子——电子($n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_a}$)。

⑤ 杂质半导体的导电能力和掺杂浓度有关,N型半导体的电阻率为:

$$\rho_n = \frac{1}{qN_d\mu_n}$$

P型半导体的电阻率为:

$$\rho_p = \frac{1}{qN_a\mu_p}$$

3. 载流子的运动

① 载流子的运动有两种形式:一种称为漂移运动,一种称为扩散运动。

② 载流子在外加电场的作用下而产生的定向运动称为漂移(drift)运动;由于浓度差而引起的载流子的运动,称为载流子的扩散运动。

4. PN结的形成原理

① PN结的制造利用了杂质补偿技术。

② 在热平衡状态下的PN结中,载流子的扩散运动和漂移运动达到动态平衡。

③ 内建电压的表达式为:

$$V_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

④ PN结的内建电压随温度升高而减小。

5. 二极管的伏安特性

① 对PN结加正向电压(即P型区接电源的正极,N型区接电源的负极)时,空间电荷区变薄,多子的扩散运动大于少子的漂移运动,从而产生正向电流。当正向电压 V 远大于 V_T 时(一般 $V > 0.1\text{ V}$),PN结中的电流 I 和所加电压 V 成指数关系,即:

$$I \approx I_S e^{\frac{V}{V_T}}$$

② 当 PN 结加反向电压(即 P 型区接电源的负极, N 型区接电源的正极)时, 空间电荷区变厚, 多子的扩散运动很困难, 少子的漂移运动加剧, 形成了反向电流。只要 $|V|$ 远大于 V_T ($|V| > 0.1 \text{ V}$), 反向电流的表达式就可以写成:

$$I_R \approx -I_S$$

③ 如果反向电压加得太大, PN 结的反向电流会突然猛增, 这种现象称为“击穿”(breakdown)。二极管的击穿电压用 V_{BR} 表示。

④ 二极管的伏安特性和温度有关。

当温度升高时, PN 结的正向偏置电压就要减小。一般温度每升高 1°C , 正向偏置电压就减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ (即 $-2 \sim -2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$);

当温度升高时, 反向饱和电流 I_S 增加, 一般温度每升高 10°C , 反向饱和电流 I_S 就增加一倍。用下式表示:

$$I_S(T_2) = I_S(T_1) 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}}$$

式中 $I_S(T_1)$ 和 $I_S(T_2)$ 是对应温度分别为 T_1 和 T_2 时的反向饱和电流;

当温度升高时, 击穿电压可能具有正温度系数(即击穿电压随温度升高而增加), 也可能具有负温度系数(即击穿电压随温度升高而减小)。击穿电压的温度系数和 PN 结的制造工艺有关。

⑤ PN 结具有电容效应。PN 结电容等于势垒电容和扩散电容之和, 即:

$$C_j = C_B + C_D$$

当对 PN 结加正向电压时, 以扩散电容 C_D 为主, 即 $C_j \approx C_D$; 当对 PN 结加反向电压时, $C_j \approx C_B$ 。一般二极管的 PN 结电容在几 pF 到几百 pF 之间, 因此当二极管的工作频率低时, 电容效应可以忽略。

6. 二极管的电路模型

(1) 二极管是非线性器件

二极管的伏安特性如图 1-1-1 所示。

非线性器件的特点是: 不同的工作点, 器件的直流电阻和交流电阻都不相同。图 1-1-1 中 Q_1 和 Q_2 两点的直流电阻等于从原点分别到 Q_1 和 Q_2 连线的直线斜率的倒数, 很显然这两点的直流电阻不同, 即:

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

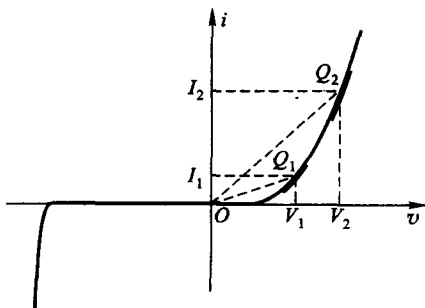


图 1-1-1 二极管伏安特性

$$R_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

Q_1 、 Q_2 两点的交流电阻为：

$$r_1 = \left. \frac{dv}{di} \right|_{Q_1}$$

$$r_2 = \left. \frac{dv}{di} \right|_{Q_2}$$

它们分别等于 Q_1 和 Q_2 处切线斜率的倒数。

因此，使用非线性器件时，要特别注意它们的工作点。

(2) 二极管的开关模型

实际应用中，经常将二极管当作开关使用，即当二极管有电流流过时，认为其压降为零；当对二极管加反向电压时，其电流为零。二极管的开关模型如图 1-1-2 所示。

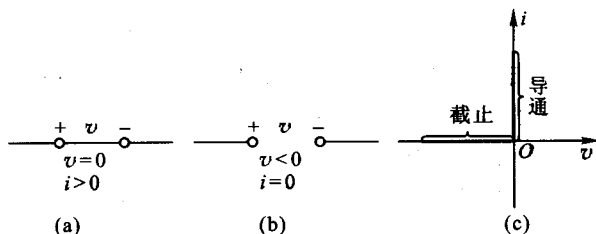


图 1-1-2 二极管的开关模型

(a) 二极管导通时的等效电路 (b) 二极管反偏时的等效电路

(c) 二极管简化伏安特性

在工作电压的幅值较大的情况下，经常使用二极管的开关模型。

二极管开关模型可以简述为：只要对二极管加正向电压，二极管就导通，而且二极管的压降为零，二极管中电流的大小取决于电路的其它部分；只要对二极管加反向电压，二极管就截止，相当于开关断开。

(3) 二极管的恒压模型

二极管恒压模型的实质是将二极管的伏安特性简化为折线，如图 1-1-3 所示。

二极管恒压模型可以简述为：只要对二极管所加正向电压大于 V_{on} ，二极管就导通，而且二极管的压降为 V_{on} ，二极管中电流的大小取决于电路的其它部分；只要对二极管所加的电压小于 V_{on} ，二极管就截止，相当于开关断开。

在工作电压的幅值较小的情况下(工作电压幅值与 V_{on} 相差不多)，经常使用二极管的恒压模型。

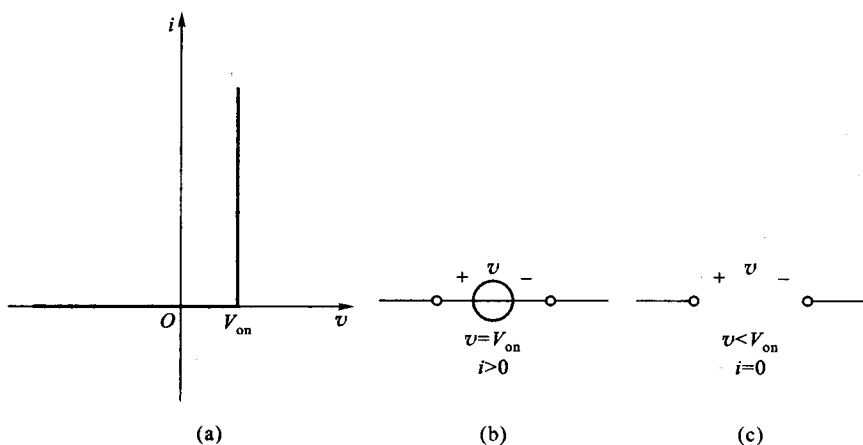


图 1-1-3 二极管恒压模型

(a) 二极管的恒压简化伏安特性 (b) 二极管导通时的等效电路
(c) $v < V_{on}$ 时的等效电路

(4) 二极管的小信号模型

若二极管在小信号状态下工作，则可以将二极管的伏安特性在工作点附近近似地看成直线，因此二极管这一非线性器件就可以用线性器件来代替了，这就是二极管的小信号模型，如图 1-1-4 所示。

C_j 为二极管的结电容，二极管在较低频率下工作时，容抗较大，可以将其视为开路。 r_s 为二极管中性区体电阻及导线与中性区的接触电阻，它的阻值很小，一般可以忽略。因此二极管的低频小信号模型可以简化为一个电阻 r_j ，如图 1-1-5 所示。

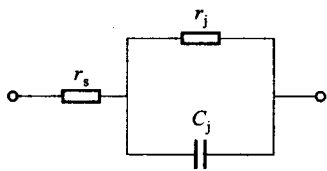


图 1-1-4 二极管小信号模型

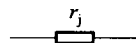


图 1-1-5 二极管低频
小信号简化模型

r_j 为二极管在工作点处的交流电阻，它的大小和工作点有关，即：

$$r_j = \frac{V_T}{I_Q}$$

这里要强调的是：二极管的工作条件不同、分析要求不同时，使用的二极管模型就不同。一般当二极管工作在大信号条件下时，可以将二极管看成是理想的单向导电器件，因此可以使用开关模型；当二极管工作的信号电压为几伏时，二极管正向导通时的正向压降不能忽略，因此可以使用二极管的恒压模型；当二极管工作在小信号条件下时，就要使用二极管的小信号模型。

7. 二极管的应用

二极管通常可以做整流、限幅、稳压等方面的应用。

(1) 整流

二极管在整流电路中，一般工作在大信号条件下，这时可以将二极管看成是理想的单向导电器件，因此可以使用开关模型。全波整流电路如图 1-1-6 所示。

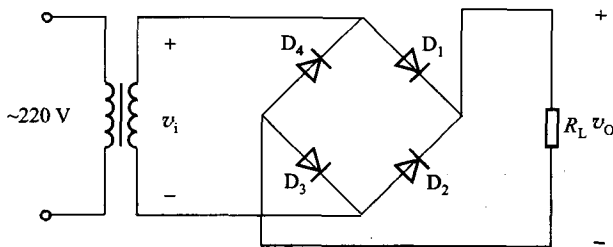


图 1-1-6 全波整流电路

全波整流电路在仪器仪表等设备中用的很多，变压器将 220 V 的市电转变为具体设备所需要的交流电压 v_i ，再经过整流之后变成如图 1-1-7 所示的电压 v_o 。

(2) 限幅、整形

对如图 1-1-8 所示的双向限幅电路，必须使用二极管的恒压模型。

设二极管的正向导通电压为 0.7 V，输入信号电压的峰值较大，因此输出电压的波形如图 1-1-9 所示。

(3) 稳压

利用稳压二极管可以进行稳压，实际上，稳压二极管在进行稳压时使用的是 PN 结的反向伏安特性，如图 1-1-10 所示。

由 PN 结的伏安特性曲线可以知道，PN 结在反向击穿区，电流变化很大时，PN 结上的电压变化不大。因此，只要有适当的限流电阻，使稳压二极管的电流受到限制，就不会损坏稳压二极管。

综上所述，在稳压二极管电路中，稳压二极管一定要反向连接，并且电路