

高等学校教学参考书

《电子线路(第四版)》 教学指导书

汪胜宁 程东红 编
谢嘉奎 审

高等教育出版社

内容简介

本书是为东南大学谢嘉奎教授主编的《电子线路 线性部分(第四版)》和《电子线路 非线性部分(第四版)》编写的配套教学指导书。

编者在长期使用该教材进行教学的基础上,对该教材各章内容进行了概括和总结,对教材各章习题从思路到方法逐一作了较详尽解答,并结合各章的重点和难点以例题分析和问题讨论的方式作了阐述,在各章习题后还附有 PSPICE 分析练习题的选解。旨在帮助读者更好地理解 and 掌握教材内容,并熟悉计算机辅助教学在电子线路方面的运用。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、自动控制等相近专业“电子线路”课程的教学参考书,也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路(第四版)教学指导书 / 汪胜宁,程东红编.
北京:高等教育出版社,2003.5
ISBN 7-04-011987-0

I. 电... II. ①汪...②程... III. 电子电路—高等学校—教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000413 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16	版 次	年 月 第 版
印 张	27.25	印 次	年 月 第 次印刷
字 数	500 000	定 价	33.80 元

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

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》。行为人将承担相应的民事责任和行政责任 构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

现公布举报电话及通讯地址:

电 话 (010)84043279 13801081108

传 真 (010)64033424

E-mail :dd@hep.com.cn

地 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮 编 :100009

策 划	张培东
编 辑	曲文利
封面设计	张 楠
责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍
责任校对	朱惠芳
责任印制	

前 言

本书是为谢嘉奎教授主编的《电子线路 线性部分(第四版)》与《电子线路 非线性部分(第四版)》编写的教学指导书。该书是在高等教育出版社与谢嘉奎教授亲自关怀指导下编写完成的。

《电子线路(第四版)》是面向 21 世纪课程教材,被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材,2002 年荣获全国优秀教材一等奖。由于本课程内容多、概念强,对问题分析又常采用近似方法,这给初学者带来很大困难。为帮助读者明确教学基本要求和教学重点,掌握电子线路的基本概念和基本分析方法,提高分析问题、解决问题的能力,我们编写了这本教学指导书。

为便于读者学习,本书在章节编排顺序上与教材完全相同。全书分为两大部分:第一部分——电子线路 线性部分教学指导;第二部分——电子线路 非线性部分教学指导。

本书各章内容主要包含以下五部分:

1. 教学要求。指出各章中哪些内容需要重点掌握、哪些内容只需要一般了解、哪些内容可根据教学需要作为扩展内容。帮助读者有的放矢地进行学习。
2. 基本内容。根据编者多年教学实践工作中的经验和体会,对教材各章内容进行总结、提炼和归纳。通过基本内容的学习,帮助读者理清思路、抓住重点,更好地掌握电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法。
3. 例题分析。选择典型例题,从解题思路、分析方法、结果讨论等多方面进行详细阐述,巩固基本概念。通过这部分学习,掌握解题要领,做到举一反三,增强分析问题、解决问题的能力。
4. 习题解答。为方便学生自学,教材各章后面的习题均有简要分析解答。
5. PSPICE 练习题选解。选择教材中部分典型练习题,给出源程序及运行结果,便于学生掌握 PSPICE 电路分析方法。

此外,对于某些章节中容易混淆、不易掌握的概念,通过问题讨论或例题分析的方式作深入探讨,加深对内容的理解,拓宽知识面。

本书由汪胜宁、程东红编写。程东红编写第一部分——电子线路线性部分教学指导。汪胜宁编写第二部分——电子线路非线性部分教学指导。李彧完成了 PSPICE 练习题的解答。东南大学宣月清副教授对本书的例题及习题部分提出了许多宝贵意见。

本书由东南大学谢嘉奎教授主审。本书的编写工作自始至终在谢嘉奎教授

指导下进行,谢教授对本书的整体构思提出了许多宝贵意见,对提高本书质量起到了重要作用。

高等教育出版社一直关心本书的出版工作,张培东主任及各位编辑给编者提供了许多具体指导,为本书出版创造了良好条件。

在此,我们对以上所有同志表示衷心感谢。同时,对书中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2002年10月于南京

目 录

电子线路 线性部分教学指导

第 1 章 晶体二极管	3
1.1 教学要求	3
1.2 基本内容	3
1.2.1 半导体的导电机理	3
1.2.2 PN 结的基本特性	4
1.2.3 晶体二极管模型	6
1.2.4 晶体二极管电路分析方法	8
1.3 问题讨论	9
1.4 例题分析	10
1.5 习题解答	13
1.6 PSPICE 练习题选解	19
第 2 章 晶体三极管	21
2.1 教学要求	21
2.2 基本内容	21
2.2.1 放大模式下电流分配基本关系式	22
2.2.2 三极管的通用模型——伏安特性曲线	22
2.2.3 三极管的简化模型	25
2.2.4 三极管电路分析方法	26
2.2.5 放大器的构成	28
2.3 问题讨论	28
2.4 例题分析	31
2.5 习题解答	34
2.6 PSPICE 练习题选解	43
第 3 章 场效应管	45
3.1 教学要求	45
3.2 基本内容	45
3.2.1 场效应管分类	45
3.2.2 场效应管工作原理	46
3.2.3 场效应管模型	47

3.2.4	场效应管电路分析方法	50
3.3	问题讨论	51
3.4	例题分析	53
3.5	习题解答	56
3.6	PSPICE 练习题选解	62
第4章	放大器基础	65
4.1	教学要求	65
4.2	基本内容	65
4.2.1	放大器的组成原理	65
4.2.2	放大器的性能指标	68
4.2.3	基本组态放大器	69
4.2.4	差分放大器	73
4.2.5	电流源电路及其应用	77
4.2.6	集成运算放大器	81
4.2.7	放大器的频率响应	83
4.3	问题讨论	87
4.4	例题分析	90
4.5	习题解答	112
4.6	PSPICE 练习题选解	145
第5章	放大器中的负反馈	154
5.1	教学要求	154
5.2	基本内容	154
5.2.1	反馈的类型	155
5.2.2	反馈极性与类型的判别	155
5.2.3	负反馈对放大器性能的影响	156
5.2.4	基本放大器引入负反馈的原则	157
5.2.5	负反馈放大器的分析方法	158
5.2.6	负反馈放大器稳定性的判别	160
5.2.7	集成运放的相位补偿技术	160
5.3	问题讨论	161
5.4	例题分析	162
5.5	习题解答	175
5.6	PSPICE 练习题选解	183
第6章	集成运算放大器及其应用电路	188
6.1	教学要求	188
6.2	基本内容	188

6.2.1	集成运放应用电路的组成	188
6.2.2	集成运放理想化条件下的两条重要法则	189
6.2.3	反相放大器和同相放大器	189
6.2.4	集成运放线性应用电路	190
6.2.5	非理想参数对应用电路性能的影响	195
6.2.6	集成运放非线性应用电路	197
6.3	问题讨论	199
6.4	例题分析	201
6.5	习题解答	216
6.6	PSPICE 练习题选解	224

电子线路 非线性部分教学指导

第 1 章	功率电子线路	231
1.1	教学要求	231
1.2	基本内容	231
1.2.1	非谐振功率放大器的基本组成原理及工作特点	231
1.2.2	效率是功率放大器的重要性能指标	233
1.2.3	保证功率管安全工作是必须考虑的问题	234
1.2.4	非线性失真是功率放大器的另一个重要性能指标	234
1.2.5	组成乙类互补推挽功放实用电路时需考虑的问题	234
1.2.6	功率合成	235
1.2.7	稳压电路	237
1.3	例题分析	237
1.4	习题解答	243
1.5	PSPICE 练习题选解	260
第 2 章	谐振功率放大器	266
2.1	教学要求	266
2.2	基本内容	266
2.2.1	谐振功放工作原理——从非谐振功放过渡到谐振功放	266
2.2.2	准静态分析方法	267
2.2.3	负载特性	268
2.2.4	调制特性和放大特性	270
2.2.5	谐振功率放大电路的组成原理	272
2.3	例题分析	274
2.4	习题解答	278
2.5	PSPICE 练习题选解	287
第 3 章	正弦波振荡器	291

3.1	教学要求	291
3.2	基本内容	291
3.2.1	正弦波振荡器的工作原理——振荡三条件	291
3.2.2	反馈式振荡电路的组成及判定法则	294
3.2.3	振荡器频率稳定度及频率稳定的 LC 振荡器	295
3.3	例题分析	296
3.4	习题解答	301
3.5	PSPICE 练习题选解	319
第 4 章	振幅调制、解调与混频电路	324
4.1	教学要求	324
4.2	基本内容	324
4.2.1	振幅调制、解调与混频电路的实现模型	324
4.2.2	线性时变状态	327
4.2.3	器件的线性时变模型	328
4.2.4	典型调制器与混频器的电路组成和性能特点	330
4.2.5	混频失真和干扰	334
4.3	例题分析	336
4.4	习题解答	341
4.5	PSPICE 练习题选解	368
第 5 章	角度调制与解调电路	373
5.1	教学要求	373
5.2	基本内容	373
5.2.1	调频波与调相波	373
5.2.2	变容管直接调频电路	375
5.2.3	间接调频电路	377
5.2.4	调频波通过线性网络的分析	379
5.2.5	斜率鉴频器和相位鉴频器	381
5.3	例题分析	383
5.4	习题解答	388
5.5	PSPICE 练习题选解	404
第 6 章	反馈控制电路	408
6.1	教学要求	408
6.2	基本内容	408
6.2.1	自动电平控制电路的工作原理	408
6.2.2	自动频率控制电路的工作原理	409
6.2.3	锁相环路锁定、跟踪和捕捉的概念	410

6.2.4 锁相环路的应用.....	411
6.3 例题分析	413
6.4 习题解答	416

电子线路 线性部分 教学指导

第 1 章 晶体二极管

无论何种用途的电子系统,均由各种功能的电子线路组成。电子线路是指包含有电子器件、并能对电信号实现某种功能处理的电路,它由电子器件加外围电路构成。常用的电子器件有:晶体(半导体)二极管、三极管、场效应管、集成电路等。外围电路主要由直流电源、电阻、电容以及集成电路中常用的电流源电路等组合而成。不同半导体器件具有不同的特性。而同一种半导体器件,当外围电路提供不同条件时,电路又会呈现不同的功能。

因此,要掌握各种功能电路的工作原理、性能特点,首先要了解各种半导体器件的外特性,掌握器件在不同条件下的等效模型及分析方法,然后再根据外部电路提供的条件,分析电路的功能和所能达到的性能。

本章在简要了解半导体基本知识的基础上,重点掌握器件的外特性。熟悉二极管的各种模型,并会利用模型分析功能电路。

1.1 教学要求

1. 了解 PN 结的基本特性。
2. 熟悉晶体二极管的数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合。
3. 熟悉二极管电路的三种分析方法:图解法、简化分析法、小信号分析法。能熟练利用简化分析法分析各种功能电路。
4. 本章 1.4 节与 1.5 节根据教学需要,可作为扩展内容。

1.2 基本内容

1.2.1 半导体的导电机理

本节将以共价键模型为基础,了解半导体的导电机理。归纳起来,就是了解两种载流子(自由电子和空穴)、两种杂质半导体(N型和P型),以及两种导电方式(漂移和扩散)的基本概念。

1. 自由电子和空穴

半导体中有两种可以导电的载流子:自由电子和空穴。注意:空穴的出现是

半导体区别于导体的重要特征。

实际上,原子中的价电子激发为自由电子时,原子中留下空位,同时原子因失去价电子而带正电。当邻近原子中的价电子不断填补这些空位(称为空穴)时形成一种运动,而这种运动可等效地看作是空穴的运动,故称空穴载流子运动。由于空穴运动方向与价电子填补方向相反,因此,空穴载流子带正电,自由电子载流子带负电。

本征半导体中,在本征激发产生自由电子-空穴对的同时,还存在着自由电子和空穴相遇而复合的过程。温度一定时,激发与复合在某一热平衡值上达到动态平衡,此时,自由电子浓度与空穴浓度相等,即 $n_i = p_i$ 。它们的热平衡浓度值随温度增加而迅速增大。

2. N型和P型半导体

N型半导体:在本征半导体中掺入少量的五价元素而形成的杂质半导体。这种半导体中,多子是自由电子,少子是空穴。杂质离子因失去价电子而带正电。

P型半导体:在本征半导体中掺入少量的三价元素而形成的杂质半导体。这种半导体中,多子是空穴,少子是自由电子。杂质离子因空位被填补而带负电。

无论何种杂质半导体,多子均由掺杂形成,而多子浓度主要取决于掺杂浓度,与温度几乎无关(少子浓度远低于本征浓度值);少子由本征激发形成,其浓度主要取决于温度。注意:整个杂质半导体呈电中性。

3. 漂移电流与扩散电流

漂移电流:载流子在电场作用下作定向运动而形成的电流称为漂移电流。它与电场强度成正比,比例系数即为载流子的迁移率 μ 。

扩散电流:载流子在浓度差作用下作定向运动而形成的电流称为扩散电流。它与浓度梯度成正比,比例系数即为载流子的扩散系数 D 。

1.2.2 PN结的基本特性

利用掺杂工艺,把P型半导体和N型半导体在原子级上紧密结合,P区与N区的交界面就形成了PN结。由于PN结是各种半导体器件的基本组成部分,因此掌握PN结的特性,是了解各种半导体器件工作原理的基础。

PN结的阻挡层(耗尽层、空间电荷区、势垒区)和其间建立起来的内建电场是多子扩散与少子漂移达到动态平衡时的结果。当扩散大于漂移时,阻挡层宽度和内建电场必将增大,它阻止扩散、增强漂移,最终使两者之间达到动态平衡;反之,当漂移大于扩散时,阻挡层宽度和内建电场必将减小,它增强扩散、减小漂移,最终也将使两者之间达到动态平衡。

PN 结处于动态平衡时,扩散电流与漂移电流相抵消,通过 PN 结的电流为零。此时,PN 结内建电位差 V_B 与阻挡层宽度 l_0 分别为

$$V_B \approx V_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$
$$l_0 = \left(\frac{2\epsilon V_B}{q} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

可以看出,掺杂浓度(N_a 、 N_d)越大,内建电位差 V_B 就越大,而阻挡层宽度 l_0 却越小。

1. PN 结的单向导电特性

PN 结动态平衡状态是相对的,一旦外加电压,阻挡层宽度和内建电场将发生变化,扩散与漂移的动态平衡状态也将遭到破坏。

(1) PN 结正偏(外电源正极接 P 区,负极接 N 区):

外加电场部分抵消内建电场→阻挡层变薄、内建电场减弱→多子扩散阻力减小→多子扩散 \gg 少子漂移,即多子扩散占优势→多子扩散形成较大的正向电流→PN 结导通。结果使正向电流随外加电压增加而迅速增大。

(2) PN 结反偏(外电源正极接 N 区,负极接 P 区):

外加电场增强内建电场→阻挡层变宽、内建电场增强→多子扩散阻力增大→少子漂移 \gg 多子扩散,即少子漂移占优势→少子漂移形成极其微小的反向电流→PN 结截止。反向电流主要受温度影响,而与外加电压近似无关。因此,反向电流又称为反向饱和电流。

总之,PN 结正偏时,阻挡层变窄,交界面两侧的正负离子电荷量减少,正向电流增大,且其值随正向电压的增加按指数规律迅速增大。PN 结反偏时,阻挡层变宽,交界面两侧的正负离子电荷量增多,反向电流很小,并且其值与反向电压近似无关。

2. PN 结的击穿特性

当 PN 结反向电压增大到一定值时,反向电流将急剧增大,PN 结反向击穿。根据击穿形成的机理,反向击穿分雪崩击穿与齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿

发生条件:PN 结掺杂浓度较低(即阻挡层较宽)。

外加反向电压较大(一般大于 6 V)。

形成原因:碰撞电离。较高的反向电压,使载流子获得的动能足以把阻挡层中共价键的价电子撞出,由于阻挡层较宽,碰撞电离的机会增多,连锁反应,使载流子数目剧增、电流增大,造成雪崩击穿。雪崩击穿电压具有正的温度系数。

(2) 齐纳击穿

发生条件:PN 结掺杂浓度较高(即阻挡层较窄)。

外加反向电压较小(一般小于 6 V)。

形成原因:场致激发。由于阻挡层较窄,即使不大的反向电压也会建立起很强的电场,该强电场可直接将共价键中的价电子拉出,使载流子数目剧增、电流增大,造成齐纳击穿。齐纳击穿电压具有负的温度系数。

3. PN 结的电容特性

PN 结除了具有伏安特性表现出的非线性电阻特性外,还具有非线性电容的特性。这种特性由势垒电容与扩散电容两部分组成。

势垒电容 C_T :指势垒区内空间电荷量随外加电压变化而产生的电容效应。

扩散电容 C_D :指阻挡层外中性区(P区和N区)贮存的非平衡电荷量随外加电压变化而产生的电容效应。

PN 结总电容 C_j : $C_j = C_T + C_D$ 。

PN 结正偏时, $C_D \gg C_T$, $C_j \approx C_D$ 。因此,正偏时以扩散电容 C_D 为主。

PN 结反偏时, $C_T \gg C_D$, $C_j \approx C_T$ 。因此,反偏时以势垒电容 C_T 为主。利用势垒电容可制成变容二极管。

注意:PN 结的结电容是增量电容,它表示叠加在直流电压上的增量电压与增量电流之间的关系,其值随外加直流电压的变化而变化,与普通线性电容不同。

1.2.3 晶体二极管模型

晶体二极管的内部结构就是一个 PN 结。就其伏安特性而言,它有不同的表示方法,或者表示为不同形式的模型。

1. 数学模型

晶体二极管的伏安特性,可用下列理想的指数函数来描述

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

其中 $V_T = \frac{kT}{q}$ 称热电压,室温下约 26 mV。 I_S 为反向饱和电流,其值受温度影响很大。室温附近,温度每升高 10 °C, I_S 约增加一倍。

PN 结正偏、且 $V > 3V_T$ 时, $I \approx I_S e^{\frac{V}{V_T}}$,电流随外加电压的增加按指数规律增加。

PN 结反偏时, $I \approx -I_S$,反向电流与外加反向电压无关,近似为常数。

2. 曲线模型

曲线模型即实测的二极管伏安特性曲线,如图 1-1 所示。

(1) 正向特性

当外加电压 $V > V_{I(on)}$ 时,随着 V 的增加,正向电流迅速增大,正向电阻很

小,PN 结处于导通状态。

关于 $V_{I(on)}$ 的含义,见本章 1.3 节的问题讨论。

(2) 反向特性

当外加电压 $V < V_{I(on)}$ 时,在一定范围内反向电流很小,近似为常数,反向电阻很大,PN 结处于截止状态。

(3) 击穿特性

当反向电压增大到 $V_{(BR)}$ 时,反向电流急剧增加,PN 结反向击穿。

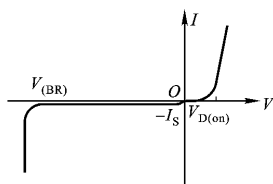


图 1-1 PN 结曲线模型

3. 简化电路模型

在主要利用二极管单向导电性的功能电路中,实际二极管的伏安特性可以用两段折线近似表示,如图 1-2(a)所示。

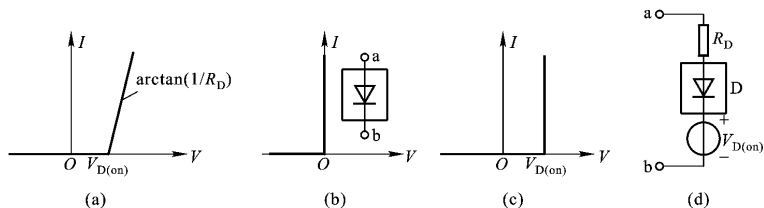


图 1-2 二极管电路模型及不同状态时的伏安特性

(a) 折线等效 (b) 理想状态 (c) 开关状态 (d) 简化电路模型

当信号幅度远大于 $V_{I(on)}$,导通电阻 R_D 与外电路相比可以忽略不计时,认为二极管是理想的开关器件,其伏安特性和电路符号如图 1-2(b)所示。即当外加电压 $V > 0$ 时,二极管导通, a-b 两端相当于短路;当 $V < 0$ 时,二极管截止, a-b 两端相当于开路。

与外电路相比,当 R_D 可以忽略、而 $V_{I(on)}$ 不能忽略时,二极管伏安特性可表示为如图 1-2(c)所示的开关状态。即当外加电压 $V > V_{I(on)}$ 时,二极管导通, a-b 两端呈现 $V_{I(on)}$ 电压; $V < V_{I(on)}$ 时,管子截止, a-b 两端相当于开路。

当 $V_{I(on)}$ 与 R_D 都不能忽略时,二极管可直接用其简化电路模型表示,如图 1-2(d)所示。

PN 结的数学模型、曲线模型及简化电路模型统称为一般模型,主要用来分析、计算二极管上加特定范围内电压或电流值时的响应。

4. 小信号电路模型

电路进行动态分析时,需采用二极管小信号电路模型,如图 1-3 所示。该

模型只能用来计算叠加在 Q 点上的微小增量电压与增量电流的响应。

$$r_j = \frac{V_T}{I_Q} \quad (1-2)$$

r_j 为二极管增量结电阻,其值与 Q 点有关。 r_s 为 PN 结串联电阻,数值很小。 C_j 为 PN 结结电容,它由势垒电容和扩散电容两部分构成。

在低频电路中,结电容 C_j 的影响常可忽略不计;而在高频电路中,由于 C_j 呈现的容抗很小,PN 结的单向导电性会因 C_j 的交流旁路作用而变差,因此在高频电路中, C_j 的影响不能忽视。

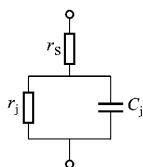


图 1-3 小信号
电路模型

1.2.4 晶体二极管电路分析方法

分析晶体二极管电路主要采用图解法、简化分析法和小信号等效电路法。本章着重掌握简化分析法。

1. 图解法

图解法是利用二极管曲线模型与管外电路所确定的负载线,用作图的方法进行求解。这种方法比较直观,既可分析 Q 点,也可分析交流工作状态。

要求:已知二极管伏安特性曲线和外围电路元件值。

分析步骤:

(1) 写出管外电路的直流负载线方程。即管外电路在二极管两端的电压与电流之间的线性方程式。

(2) 作直流负载线。将直流负载线画在伏安特性曲线上。

(3) 分析直流工作点。找出直流负载线与特性曲线的交点,即 Q 点。

2. 简化分析法

简化分析法是将电路中的二极管用简化电路模型代替,利用得到的简化电路直接分析、求解。一般在利用二极管单向导电性的电路中,常用这种方法分析直流电压、电流,也常根据输入信号波形画出输出波形。

(1) 估算法

(a) 判断二极管是导通还是截止?

假设电路中二极管全部开路,分析二极管两端的电位。

理想二极管:若某管阳极电位大于阴极电位,则接上二极管后,该管导通;反之,二极管截止。

实际二极管:若某管阳极电位与阴极电位之差大于导通电压,则该管导通;反之,二极管截止。

当电路中存在多个二极管时,存在优先导通权,正偏电压最大的管子优先导