

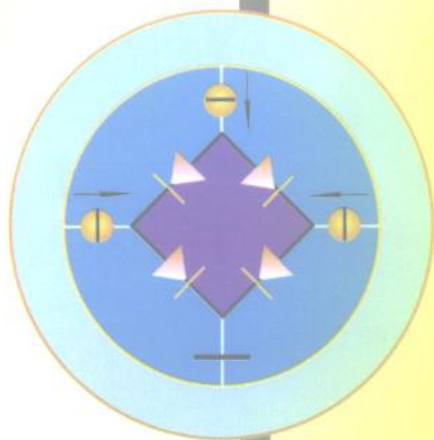
模拟电子技术

常见题型解析及模拟题

张畴先 主编

通向研究生之路
系列丛书

- 考研者
愿望成真的阶梯
- 大学生
知识汲取的源泉
- 自学者
闯关过隘的桥梁



理论提要 · 例题解析 · 模拟题

西北工业大学出版社

通向研究生之路系列丛书

模拟电子技术

常见题型解析及模拟题

张畴先 主编

张畴先 王光明 于海勋 编

西北工业大学出版社

1998年2月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书是根据国家教委颁布的高等工业学校《电子线路课程教学基本要求》和《电子技术基础课程教学基本要求》,针对模拟电子线路中器件的工作状态复杂、电路品种繁多、分析方法灵活,且比电路课程具有更强的工程性等特点而编写的一本辅导教材。本书主要讨论模拟电子线路的低频部分,全书共 9 章,每章包括该章的重点与难点、例题精选和习题三部分。书中还收集了部分兄弟院校的电子线路考研试题和模拟题,并附有各章习题参考答案。

本书可供报考有关专业研究生的本科生和在职人员作为系统复习用的参考书,也可作为高等工业学校电子类本科生学习电子线路或模拟电子技术基础课程的辅导教材。

通向研究生之路系列丛书
模拟电子技术
常见题型解析及模拟题

张畴先 主编
责任编辑 王璐
责任校对 钱伟峰

*

©1998 西北工业大学出版社出版发行
(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-1010-8/TN·59

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15 字数:348 千字
1998年2月第1版 1998年2月第1次印刷
印数:1—6 000册 定价:19.50元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

本书是根据国家教委颁布的高等工业学校《电子技术基础课程教学基本要求》和《电子线路课程教学基本要求》编写的一本模拟电子线路的辅导教材。本书是通向研究生之路系列丛书之一,可供有志攻读硕士研究生的考生复习之用,也可供大学本科学生在学习模拟电子线路课程时作参考。

在编写中,我们采取了以课程的教学基本要求为基点,某些方面又略高于基本要求的原则,内容重点突出了以模拟集成电路为主,双极型和单极型电路并重的原则,目的是为适应电子线路和电子技术飞速发展的需要。

全书共分9章:基本半导体器件;双极型晶体管放大电路;场效应管放大电路;放大器的频率响应;放大电路中的反馈;低频功率放大器;集成运算放大器及其线性应用;波形的产生与变换电路;直流稳压电源等。每章内容由重点与难点分析、例题精选和习题三部分组成。重点和难点将指明各章复习的方向和目标,为读者掌握每章的基本内容提供指导;例题精选通过典型例题的分析计算与讨论,帮助读者提高对模拟电子线路的解题能力,并在深化知识方面作具体应用的指导。各章挑选的习题则是读者用来了解自身综合应用各章知识能力的一个检验,通过做这些习题,读者可以深化对各章内容的理解。

在书末的附录中,提供了国内几所重点高等院校1996年硕士研究生入学考试试题和一套模拟题。由于各校考试科目组成的差异,在收集的考题中,我们只选取了低频模拟电子线路的内容及所占的比重,以提供读者复习时参考。

本书由张畴先任主编,负责全书编写的组织与定稿,王光明编写了第4、6、8三章,于海勋参加了第1章的编写工作,本书的其余部分均由张畴先负责编写。

在编写过程中,曾得到西北工业大学604教研室全体同志的帮助和支持,也得到了6041班部分同学的支持,编者谨此一并致以谢忱。

编 者

1997年7月

通向研究生之路系列丛书编委会

- 顾问** 戴冠中（西北工业大学校长，博士生导师，教授）
- 主任委员** 徐德民（西北工业大学副校长，博士生导师，教授）
- 副主任委员** 孙朝（陕西省学位委员会办公室主任）
- 王润孝（西北工业大学教务处副处长，教授）
- 冯博琴（西安交通大学教务处副处长，教授）
- 韦全生（西安电子科技大学教务处副处长，副教授）
- 郑永安（西北工业大学出版社副总编，副编审）
- 委员** 史忠科 张畴先 王公望 葛文杰
- 刘达 支希哲 范世贵
- 策划** 王璐 张近乐



面向 21 世纪, 社会对德才兼备的高素质科技人才的需求更加迫切。通过行之有效的途径和方法培养符合时代要求的优秀人才, 是摆在全社会尤其是高等学校、科研院(所)面前一项艰巨而现实的问题。

为了强化素质教育, 使大学生学有所长, 增强才智, 高等教育部门各有关单位对高等学校公共基础课、技术基础课到专业课的整个教学过程做了大量细致的工作。与之相配合, 不少出版社也相继出版了指导学生理解、领会教学内容, 增强分析、解决问题能力的辅导读物, 其中多数是关于外语、数学、政治等公共基础课的, 极大地满足了大学生基础课学习阶段相应的要求。但当学习技术基础课时, 学生们同样需要合适的参考书来帮助他们掌握课程重点和难点, 提高课程学习水平, 以及指导解题的思路和技巧, 乃至适应研究生入学考试的需求。不过, 这类读物目前比较少见。基于此, 西北工业大学出版社的同志们深入作者、读者之中, 进行调查研究, 在广泛听取意见的基础上, 组织数十位在重点大学执教多年, 具有较高学术造诣的一线教

• 邱关源——西安交通大学教授, 博士生导师。曾任第一、二届中国电工技术学会理论电工专业委员会副主任委员, 高等教育委员会工科电工课程教学指导委员会委员。

师,经历两年,精心编撰了这套旨在有效指导大学生学习技术基础课,为课程学习、应试考研及以后工作提供帮助的参考书。

该丛书首批推出9种,所有书稿几经修改,并经同行专家审定。内容选材符合课程基本要求,并且重在对基本概念的启发、理解和提高读者分析问题的能力。我热情地向大家推荐这套丛书,希望它能对广大读者的学习有所帮助,更期望它能在强化素质教育、推动教学改革方面起到积极作用。

邱关源

1997年10月

出版 说明

近年来，随着经济建设的快速发展和科教兴国战略的实施，社会对高素质专业人才的需求更加迫切。崇尚知识，攻读学位，不仅是一种知识价值的体现，更是社会进步的标志。“考研热”已成为当今中国社会的一道引人注目的风景线，成为莘莘学子乃至社会关注的焦点和热点。

研究生入学考试是通向研究生之路的基石，考试成绩的高低是能否跨入研究生之门的主要依据。为了配合考生进行有效的复习，不少出版社围绕国家教委颁布的考试大纲，相继推出了众多的考研复习辅导书，其中尤以公共基础课（外语、数学、政治）的应考书最多。

事实上，研究生入学考试不仅包括外语、数学等公共基础课，技术基础课（专业基础课）和专业课也是必考科目。片面强调公共基础课，导致技术基础课及专业课考试失分，是众多报考者最终未能如愿的主要原因，此中技术基础课对考生影响尤甚。作为制约人才培养和成长的课程因素，加强技术基础课的学习，拓宽基础知识，已成为广大大学生及教师共同的心声。

为了推动教学改革，弥补技术基础课学时短、内容多，学生难以在课堂内准确理解、全面接受教学内容之不足；更为了满足当今社会对基础扎实、专业面宽、动手能力强的人才的需求，促进大学生学有所长，早日成才，西北工业大学出版社策划和组织编写了通向研究生之路系列丛书。本丛书首批推出9种，所对应的9门课程是：自动控制原理、机械原理、材料力学、理论力学、模拟电子技术、数字电子技术、电工技术、电子技术、微型计算机原理。其余课程的指导书将陆续推出，届时将基本涵盖全国工科院校所开设的技术基础课和拟选定的考研要求科目。

本丛书具有如下特点：

1. 选题新颖，独树一帜

技术基础课历来不像外语、数学、政治等公共基础课一样受到出版者的重视，因而这方面的指导书凤毛麟角，学生很难找到一套系统的、全面的、富有针对性的参考书。该丛书站在新的视角，有计划地推出整套工科技术基础课学习用书，令人耳目一新，为之一振。

2. 紧扣大纲，严把尺度

该丛书紧紧围绕国家教委制定的教学大纲及研究生入学考试大纲，按照提高基础知识与解题技巧的主线，展开论述。丛书既巩固和加深学生对技术基础课重点、难点的理解，又重在为备考研究生提供有力的指导，即既要保证课程学习时开卷有益，又要对复习应考行之有效。

3. 重视能力，提高技巧

该丛书时刻牢记不管是学习还是考试其最终目的都是为了提高学生分析问题、解决问题的能力这一主旨，重在通过阐明基本要点及设定典型例题解析来引导学生识题、解题。丛书中所选例题均是历届课程结业考试及考研中出现过的试题，经精选、精编后，既避免了让学生陷入“茫茫题海”的窘境，又使学生在有限的时间内掌握大纲所规定的基本内容，提高自己的解题潜能，从而在课程考试及研究生考试中立于不败之地。

4. 选材得当，重点突出

参加本套丛书编写的均为从事教学工作多年的资深教师，他们既能把握住课程要求的脉搏，又最了解学生的学习的状况和需求心态，因而在丛书内容的取舍，材料的选编及文字表达方面能更胜一筹。正因为如此，该丛书内容得当，材料全而不滥，精而易懂，注释简明，解析扼要，使学生乐于阅读，易于接受。

本丛书的出版得到了多方面的支持和关心，陕西省学位委员会办公室、西安交通大学、西安电子科技大学、西北工业大学等单位的有关人士为本丛书的出版出谋划策，提出了许多建设性的意见。西安交通大学邱关源教授献身教育事业 50 余年，德高望重，学识渊博，他在百忙中为本丛书写了序，充分肯定了本丛书的价值。在此，我们一并表示衷心的感谢。

“通向研究生之路系列丛书”的出版不论是对大学生的课程学习还是对有关考研人员以及广大自学者来说无疑都是一个福音，我们衷心希望本丛书能帮助广大读者闯关过隘，获得课程考试或研究生入学考试的好成绩，我们也祝愿天下莘莘学子早日如愿以偿，大展鸿图！

丛书编委会

1997 年 9 月

常用符号表

一、电压、电流

小写 $u(i)$ 、小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示输出交流电压瞬时值)

大写 $U(I)$ 、大写下标表示直流电压(电流)(例如, U_o 表示输出直流电压)

小写 $u(i)$ 、大写下标表示包含有直流的电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示包含有直流的输出电压瞬时值)

大写 $U(I)$ 、小写下标表示正弦电压(电流)有效值(例如, U_o 表示输出正弦电压有效值)

$U_Q(I_Q)$	静态工作点电压(电流)
$u_i(i_i)$	输入交流电压(电流)瞬时值
$u_o(i_o)$	输出交流电压(电流)瞬时值
$u_s(i_s)$	交流信号源电压(电流)瞬时值
$U_m(I_m)$	正弦电压(电流)幅值
$U_p(I_p)$	正弦电压(电流)峰值
$U(s) [I(s)]$	电压(电流)的拉普拉斯变换
V_{CC}, V_{BB}, V_{EE}	集电极、基极、发射极的电源电压
V_{DD}, V_{GG}, V_{SS}	漏极、栅极、源极的电源电压
U_f	反馈电压有效值
V_R	基准电压
$U_{IO}(I_{IO})$	输入失调电压(电流)
$U_{id}(U_{ic})$	差模输入(共模输入)电压
$U_{D(on)}$	二极管导通电压
U_Z	稳压管的稳定电压
V_T	晶体管热电压, 室温下取 $V_T = 26 \text{ mV}$
U_{CES}	集电极饱和电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 $C-E$ 之间的反向击穿电压
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电结的反向击穿电压
$U_{BE(on)}$	发射结导通电压
V_A	厄尔利电压
$U_{GS(off)}$	夹断电压
$U_{GS(th)}$	开启电压
I_{CEO}	基极开路时 $C-E$ 之间的穿透电流
I_{DSS}	漏极饱和电流

二、阻抗、导纳

R_S	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
g_e	回路有载谐振电导或回路的等效谐振电导
g_{e0}	回路空载谐振电导或回路固有谐振电导
g_m	跨导(器件参数)
Z_{eq}	等效阻抗
$Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi_2(\omega)}$	阻抗复数值
$Z(\omega), \varphi_2(\omega)$	阻抗的模值与相角

三、增益

$A(s)$	增益的拉普拉斯变换
$A(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi_A(\omega)}$	增益复数值
$A(\omega), \varphi_A(\omega)$	增益的幅值与相角
A_u, A_{us}	电压增益与源电压增益
A_i, A_{is}	电流增益与源电流增益
A_g, A_{gs}	互导增益与源互导增益
A_r, A_{rs}	互阻增益与源互阻增益
A_{usf}	闭环源电压增益
A_{uc}, A_{ud}	共模电压增益与差模电压增益

四、功率

P_o	输出信号功率
P_C	集电极耗散功率
P_D	直流电源供给功率
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率

五、频率

f_L	3 dB 下限频率
f_H	3 dB 上限频率
f_{HF}	反馈放大器的 3 dB 上限频率
BW	通频带
BW_G	单位增益带宽
f_o	回路固有的谐振频率
f_T	特征频率

f_β	β 的截止频率
f_α	α 的截止频率
$\omega_p(\omega_z)$	极点(零点)角频率

六、其他符号

k_f	反馈系数
$\mu(\mu_n, \mu_p)$	载流子的迁移率(自由电子,空穴)
C_{ox}	单位面积的栅极电容
F	反馈放大器的反馈深度
GBW	增益带宽积
S_R	上升速率(压摆率)

目 录

1 基本半导体器件	1
1.1 重点与难点	1
1.1.1 半导体基础知识	1
1.1.2 PN 结与半导体二极管	1
1.1.3 双极型晶体管(BJT)	3
1.1.4 场效应晶体管	5
1.2 例题精选	6
1.3 习题	12
2 双极型晶体管基本放大电路	15
2.1 重点与难点	15
2.1.1 放大器电路组成原理	15
2.1.2 放大器的直流偏置电路及其分析	15
2.1.3 三种基本组态放大电路的性能分析	17
2.1.4 组合放大电路	19
2.1.5 差动放大器	19
2.1.6 有源负载放大电路	20
2.2 例题精选	20
2.3 习题	40
3 场效应管基本放大电路	44
3.1 重点与难点	44
3.1.1 直流偏置电路及其分析	44
3.1.2 场效应管组成的三种基本组态放大电路	44
3.1.3 模拟集成电路中的 MOS 单级放大器	45
3.1.4 MOS 差分放大器	47
3.1.5 BiCMOS 放大器	47
3.2 例题精选	48
3.3 习题	57

4 放大器的频率响应	62
4.1 重点与难点.....	62
4.1.1 放大器频率响应的基本概念.....	62
4.1.2 频率响应的分析方法.....	62
4.1.3 三种基本放大器的频率响应分析.....	64
4.1.4 组合电路频响的定性分析.....	67
4.2 例题精选.....	67
4.3 习题.....	79
5 负反馈放大器	82
5.1 重点与难点.....	82
5.1.1 反馈放大器的基本概念.....	82
5.1.2 负反馈对放大器性能的影响.....	83
5.1.3 负反馈放大器的性能分析.....	86
5.1.4 负反馈放大器的稳定性与相位补偿技术.....	87
5.2 例题精选.....	89
5.3 习题.....	101
6 低频功率放大器	107
6.1 重点与难点.....	107
6.1.1 功率放大电路的特点.....	107
6.1.2 乙类互补推挽功率放大电路.....	107
6.1.3 其他形式推挽功率放大电路.....	109
6.1.4 功率管的损坏与保护.....	110
6.2 例题精选.....	110
6.3 习题.....	115
7 集成运算放大器及其线性应用	119
7.1 重点与难点.....	119
7.1.1 集成运放内部电路的分析.....	119
7.1.2 理想化集成运放的特性及应用.....	120
7.1.3 集成运放的非理想特性.....	122
7.1.4 集成运放在有源滤波器中的应用.....	124
7.2 例题精选.....	129
7.3 习题.....	144
8 波形发生与变换电路	156
8.1 重点与难点.....	156

8.1.1	正弦波振荡器	156
8.1.2	电压比较器	158
8.1.3	非正弦信号产生电路	159
8.1.4	波形变换电路	160
8.2	例题精选	161
8.3	习题	169
9	直流电源	175
9.1	重点与难点	175
9.1.1	直流电源的基本组成与各部分的功能	175
9.1.2	小功率单相整流与滤波电路	175
9.1.3	稳压电路	176
9.2	例题精选	180
9.3	习题	187
附录	189
1.	1996年北京航空航天大学硕士研究生模拟电路入学考试题	189
2.	1996年电子科技大学硕士研究生模拟电路入学考试题	195
3.	1996年西北工业大学硕士研究生电子线路(模拟部分)入学考试题	201
4.	1996年北京邮电大学硕士研究生电子电路(模拟部分)入学考试题	204
5.	1996年上海交通大学硕士研究生电子技术基础(模拟部分)入学考试题	206
6.	1996年西北工业大学硕士研究生电子技术基础(模拟部分)入学考试题	208
7.	模拟电子线路硕士研究生入学考试模拟题	210
各章习题答案	218
参考文献	223

基本半导体器件

1.1 重点与难点

1.1.1 半导体基础知识

了解半导体中两种载流子的产生和载流子的两种基本运动形式:扩散运动与漂移运动;半导体导电性能的两个重要特性:掺杂特性与温度特性。掺杂浓度越大,温度越高,半导体的导电能力就越强。

1.1.2 PN结与半导体二极管

PN结几乎是所有半导体器件的结构单元,因此掌握PN结的基本特性是研究各种半导体器件的重要基础。

1. PN结的基本特性

(1) 开路PN结的特性。了解空间电荷区(或耗尽区、阻挡层、位垒)的概念;空间电荷区的宽度及内建电场产生的接触电位差与两侧半导体区掺杂浓度、工作环境温度之间的定性关系。当温度一定时,两侧半导体区掺杂浓度越大,空间电荷区宽度越窄,接触电位差越大;当掺杂一定时,空间电荷区宽度随温度升高而变窄,接触电位差变小。

(2) PN结的单向导电特性。当PN结正偏时,空间电荷区变窄,多数载流子(简称多子)的扩散运动大于少数载流子(简称少子)的漂移运动,形成以多子为主体的正向扩散电流;当PN结反偏时,空间电荷区变宽,少子的漂移运动大于多子的扩散运动,形成以少子为主体的反向漂移电流。PN结两端的电压 U 与流过PN结的电流 I 用数学方程描述如下:

$$I = I_s(e^{\frac{U}{V_T}} - 1) \quad (1.1)$$

式中, I_s 称为PN结由少子漂移运动形成的反向饱和电流,它基本上与外加电压 U 无关; $V_T = \frac{k_T}{q}$ 称为热电压,当室温为 25°C 时, $V_T = 26\text{ mV}$ 。

由式(1.1)可见,PN结作为一个二端器件与电阻等线性元件不同,它呈现非线性特性。当 $U > 0$ 时, I 随电压 U 按指数规律增加,不服从欧姆定律;当 $U < 0$ 时,其反向电流 $I_R \approx -I_s$,数值很小,基本上与外电压 U 无关。这就是PN结的单向导电特性。

(3) PN结的反向击穿特性。当反向电压增大到一定数值时,其反向电流 I_R 急剧增加,这就是PN结的反向击穿现象。通常有齐纳击穿与雪崩击穿两种形式。它们特点如下:

雪崩击穿发生在低掺杂的PN结中,反向击穿电压较高,随掺杂浓度降低、温度的升高,其反向击穿电压增大。

齐纳击穿发生在高掺杂的PN结中,反向击穿电压较低,随掺杂浓度增加,温度升高,其反向击穿电压降低。

(4) PN结的电容特性。PN结除呈现非线性电阻特性外,还具有非线性电容特性。有势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 之分。当PN结正偏时,主要是扩散电容 C_D ,其大小与扩散电流成正比。当PN结反偏时,主要是势垒电容 C_T ,它随外加反偏电压的变化而变化,其关系特性的定性描述如图1.1所示。

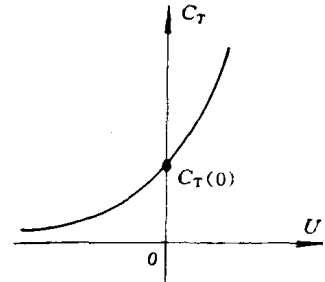


图 1.1 C_T 与 U 的关系特性

PN结的电容特性是限制由PN结制造的半导体器件上限工作频率的基本因素。

(5) PN结的温度特性。它主要表现在两个方面:随温度升高时,PN结的端电压降要以 $-(2.0 \sim 2.5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 的规律减小;反向饱和电流要以温度每升高 10°C 加倍的规律增加。故为保证PN结制造的半导体器件正常工作,都须有一个最高工作温度的限制,硅材料为 $150 \sim 200^\circ\text{C}$,锗材料为 $75 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

2. 二极管

半导体二极管是由PN结加电极引线及外壳封装构成的基本半导体器件。它的特性基本就是PN结的特性,但与理想PN结不同。它存在一个正向导通电压或阈值电压 $U_{D(on)}$,且实际二极管的正向电流在相同的外加正向偏置时略小于理想PN结的电流,反向电流则略大于理想PN结的反向电流。

(1) 二极管的模型。图1.2(a)所示是二极管的大信号模型,它是根据图1.2(b)所示的折线近似特性来建立的。图1.2(c)所示是二极管的小信号模型,它是依据图1.2(d)所示的小信号运用时的特性来建立的。如果忽略电极引线接触电阻与半导体的体电阻,则低频小信号电阻

$$r_j = r_d = \frac{V_T}{I_{DQ}} \quad (1.2)$$

式中, I_{DQ} 为静态工作点电流; C_j 为结电容。

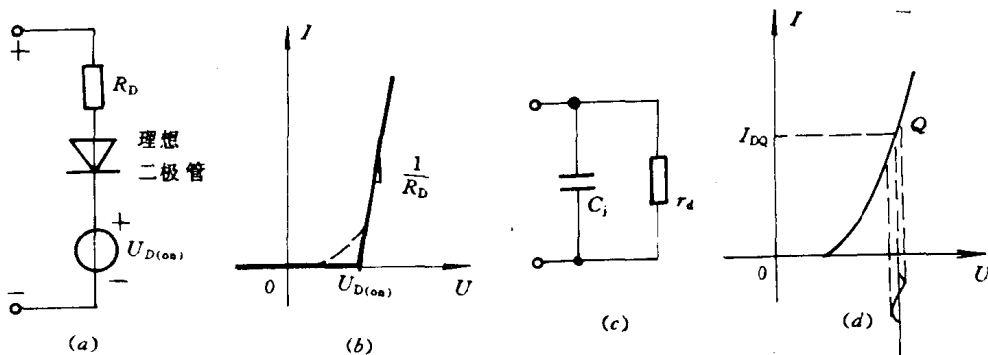


图 1.2 二极管的大信号与小信号等效电路