



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等学校通信类规划教材

电子电路基础

(第2版)

Fundamentals of Electronic Circuits
(Second Edition)

谢沅清 邓 钢 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪高等学校通信类规划教材

电子电路基础

(第 2 版)

Fundamentals of Electronic Circuits
(Second Edition)

谢沅清 邓 钢 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,内容包括:半导体元器件、放大电路基础、放大电路中的反馈、放大电路的频率特性、场效应管放大电路、功率输出电路、集成电路基础、集成放大电路及其应用、电压比较器和模拟相乘器。

全书着重物理概念的论述,力求避免烦琐的数学推导;明确了工程简化处理的实质,体现了工程性课程的特点;强调重要基础性概念的适用条件和本质,为初学者打下牢固的基础。本书配有电子课件和习题解答,可以帮助教师提高教学效率。

本书可作为高等学校通信、电子信息类专业本科生教材,也可供相关专业领域的科技人员参考。

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

电子电路基础/谢沅清,邓钢编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2006.9

(21世纪高等学校通信类规划教材)

ISBN 7-121-02942-1

I. 电... II. ①谢... ②邓... III. 电子电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 083841 号

责任编辑:韩同平 张 濮

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

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:17.75 字数:454 千字

印 次:2006 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:24.50 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,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

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。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

教材建设是高等学校教学和学科建设的主要内容之一。近几年来,我国各高等学校实施了一系列面向21世纪教学改革计划,在教学内容和课程体系改革上取得了丰硕的成果,因此需要适时推出适应教改成果的教材。同时,通信技术发展十分迅速,原有教材或者内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,需要修订或重新编写;或者需要开设新课程,编写新教材以填补空白。

电子工业出版社作为以信息技术领域出版为特色的中央级科技与教育出版社,始终关注着电子信息技术的发展方向,始终把出版适应我国高等学校发展要求的高质量精品教材放在重要位置上,出版了一系列特色鲜明的教材,希望能把它们放在学生的书包里、课桌上,为培养高素质人才打下良好的基础。

基于上述考虑,经过一年多的调研,并征求多方的意见,根据国内高等学校通信专业的发展现状,以及教育部《关于十五期间普通高等教育教材建设与改革意见》的指示精神,电子工业出版社规划出版了这套“21世纪高等学校通信类规划教材”。

目前,我国多数高等学校都设有通信专业,但办学水平、特色及人才培养层次差异很大。这套教材定位于重点高校,即以研究型、研究教学型人才培养为主的高等学校通信类专业,包括其他相关专业的通信类课程教材。教材的作者全部来自于重点高校,多数是“信息与通信工程”一级学科设有全国重点学科的高校。

与以往出版的同类教材相比,这套教材具有以下特点:

(1) 专业特色鲜明:以重点院校本科通信类专业的专业课程教材为主线,兼顾其他相关专业的通信类课程。

(2) 突出系统性:本套规划教材覆盖了本科通信类专业的专业基础课、专业方向课及专业选修课,形成一个完整的教材系列,规模之大是以往教材中所不多见的。同时注意教材之间内容的合理划分与衔接,层次分明,重点突出,各高校可以根据需要组合选用,我们的目的是为通信类课程打造一套全方位解决方案。

(3) 体系、内容新颖:整个知识点建立在“高”、“新”平台上。基本理论阐述精练,深入浅出,便于自学;注意吸收新理论、新技术成果;加强实践性与应用性,结合实例进行讲解。

(4) 配套教学支持:多数教材配有教学课件(电子教案),部分重要课程配套出版教学辅导书或实验教材。

(5) 质量保证:多数教材为已出版教材的修订版,原教材在高校的影响大;重新规划的教材将在组织专家/教授对写作大纲和知识点进行充分讨论的基础上,选择优秀作者编写。

本套教材可作为高等学校通信专业及相关专业的本科生或研究生教材,也可供通信领域的有关专业人员学习参考。

为做好本套教材的出版工作,我们聘请了多位国内通信教育领域的著名教授作为教材顾问,并聘请了清华大学、东南大学、上海交通大学、北京交通大学、北京邮电大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校电子信息学院(系)的院长(系主任)成立教材编委会,从根本上保证了教材的高质量。在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切联系和合作,广泛听取一线教师对教材的反馈意见 and 建议,以便使我们的教材出版工作做得更好。

《21世纪高等学校通信类规划教材》顾问委员

(按姓名音序排列)

迟惠生 (北京大学)
冯重熙 (清华大学)
吴伟陵 (北京邮电大学)
谢希仁 (解放军理工大学)

程时昕 (东南大学)
李承恕 (北京交通大学)
吴诗其 (电子科技大学)
袁保宗 (北京交通大学)

《21世纪高等学校通信类规划教材》编审委员

(按姓名音序排列)

主任委员: 樊昌信 (西安电子科技大学)

副主任委员:

顾婉仪 (北京邮电大学)
彭启琮 (电子科技大学)
王希勤 (清华大学)
吴镇扬 (东南大学)

李建东 (西安电子科技大学)
王金龙 (解放军理工大学)
文宏武 (电子工业出版社)
张思东 (北京交通大学)

委员:

安建平 (北京理工大学)
陈咏思 (同济大学)
段哲民 (西北工业大学)
范平志 (西南交通大学)
酆广增 (南京邮电大学)
顾学迈 (哈尔滨工业大学)
李建东 (西安电子科技大学)
刘 琚 (山东大学)
仇佩亮 (浙江大学)
唐向宏 (杭州电子科技大学)
王金龙 (解放军理工大学)
王祖林 (北京航空航天大学)
韦 岗 (华南理工大学)
徐昌庆 (上海交通大学)
张思东 (北京交通大学)
朱光喜 (华中科技大学)

鲍长春 (北京工业大学)
邓建国 (西安交通大学)
樊昌信 (西安电子科技大学)
方 勇 (上海大学)
顾婉仪 (北京邮电大学)
康 健 (吉林大学)
李晓峰 (电子科技大学)
彭启琮 (电子科技大学)
唐朝京 (国防科技大学)
田宝玉 (北京邮电大学)
王希勤 (清华大学)
文宏武 (电子工业出版社)
吴镇扬 (东南大学)
张德民 (重庆邮电学院)
郑建生 (武汉大学)
朱秀昌 (南京邮电大学)

编辑出版组: 韩同平 王羽佳 姚晓竞

联系电话: (010)88254525 **E-mail:** hantp@phei.com.cn

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,与电子工业出版社 2005 年底出版的《通信电子电路》互为配套教材。

第 2 版是在第 1 版的基础上,根据近几年电子技术的发展和教育教学改革的情况,全面修订而成的。第 2 版在教材内容的划分上遵循目前多数院校传统的做法,即《电子电路基础》和《通信电子电路》教材,分别与《低频电子线路》和《高频电子线路》教材内容相近。

与第 1 版比较,第 2 版具体的变动如下:

(1) 对电子电路基础的基本内容做了进一步的提炼

在编写本书第 1 版时,作者的取材原则是:作为基础课,力求所选内容能反映不同的原理、不同的分析方法,以便充分利用有限的学时。对那些可以由已介绍过的原理、电路演绎或组合得出的电路,则不再收录。例如,在不少教材中编入的 RC 有源滤波器,由于其可以由放大器加 RC 反馈网络组成,并可以运用反馈和频率特性的分析方法得出有关结果,故本书第 1 版没有列入这一内容。

根据上述原则,本书第 2 版删去的主要内容有:变压器耦合放大功率输出电路中的互补电路加变压器构成的电路,集成电路基础中的基准电压源,特种运算放大器中的高输入阻抗运算放大器、高精度运算放大器、高压运算放大器,模拟相乘器中的电跨导运放构成的相乘器,电压比较器中的双限比较器等。上述这些电路都能够由介绍过的相关电路为基础,运用电子电路某一方面的知识,引申、演绎出来。

(2) 删去了数字电路基础部分的内容

第 1 版把模拟电路与数字电路的共同基础集中在电子电路基础课程中讲授,这样做需要在课时上进行调整,而课时的调整涉及面较广,实际操作时有一定难度,这就限制了一些分部门组织教学的院校的选用。

(3) 对第 1 版中提出的某些新观点,以及与一般教材不同的讲述方法,随着作者在认识上的深入,在第 2 版中做了进一步的阐述,继续奉献给有此需要的师生。

鉴于本书第 1 版前言没有更多新的内容,故第 2 版将第 1 版前言略去,以节省读者的时间。

下面介绍本书的主要特色和作者在编写时的一些考虑。

1. 体现工程性课程的特点

电子电路基础是学生首次遇到的工程性课程,初学者往往对工程简化处理方法很不适应。工程简化处理的重要原则是,根据相对误差的大小来简化问题。长期以来,在电子电路教材和课堂讲授中,很少提相对误差。但实际上,教材的编写者和授课教师是按相对误差大小来简化问题的,虽然头脑中有经验上或理论上的众多数据作比较,却不写在教材上或不说出来。这样,学生在教材上看到的和在课堂上听到的是最终结果,只是某个物理量抽象的“大”或“小”,无法真正理解老师进行简化的实质。本书作者在教学中提出按相对误差大小简化问题,实践证明这可以极大地减小学生在这个问题上的学习困难。因此,本书提出了若干按相对大小

来理解的问题。例如,所谓高阻抗、低阻抗,主要不是按阻抗的绝对值来理解;在信号源和负载相连时,按信号源内阻和负载阻抗的比值来谈论“高”或“低”。相信这种提法可以进一步减小学生的学习困难。

2. 作为基础性的课程,概念宜力求准确

作者在多年的电子电路教学实践中发现,本课程在理论上存在一些不妥之处。造成这种状况的主要原因,一方面是电子电路不像数学、物理,以及先修的电路分析课程的内容那么成熟。许多新型电子电路不断涌现,人们对问题的认识,要到达正确的彼岸,需要一个过程。另一方面,也有从事教学工作本身的问题,具体内容请见参考文献[11]和[12]。在目前课程内容中,存在的主要问题大致可归为以下3类。

(1) 线性电子电路中的非线性问题。在分析放大电路这一线性单元时,往往忽略了其具有的非线性。例如,当线性电路中负载和信号源内阻共轭匹配时,负载可以获得最大功率的原理,不适用于放大电路的功率输出级;定量分析负反馈改善放大电路的非线性失真,不能运用叠加定理。当用负反馈来改善放大电路的某些特性指标时,要求器件的动态运用范围有余量,否则会达不到预期的效果。

(2) 电子电路某些结论是有条件的,但许多教材没有强调或根本不提,从而导致学生误将有条件成立的结论当成普遍适用的原理应用。例如,引入负反馈后,频带可展宽 $(1 + AB)$ 倍,但实际上,只有当 A 为一阶函数、 B 为常数时才是如此。

(3) 术语不科学,定义含混,不少论述难以自圆其说。例如,将双极型晶体管和场效应管分别称为电流控制型器件和电压控制型器件,而实际上对于双极型晶体管,通过电压控制电流的指数特性是一个非常重要的特性;近期的电流模电路是一个没有严格定义的名词,但人们却牵强地对其作精确定义;电流反馈运算放大器与经典的电流反馈定义不相关,会给读者在概念上造成混乱;给传统的电路贴上一个“电压模电路”标签,给传统的运算放大器贴上一个“电压反馈运算放大器”标签,掩盖了电路的本质特征,令初学者如坠雾中。

本书在讨论上述问题时,采取正、反两个方面进行对比的方式。希望这有助于提高读者辨别正、误的能力,有利于培养学生的创新精神,避免误以为教科书的内容就一定正确。

3. 几个关系的处理

(1) 基本概念和数学推导。基本概念是主要的,数学推导在弄清概念的基础上进行,以避免烦琐的推导掩盖物理实质。

(2) 分析、计算与设计。以分析为主,立足于局部电路设计而非整体电路设计。手工分析和计算机辅助分析互为补充,手工分析用于弄清基本概念的估算,计算机辅助分析用于处理电路复杂、难以用手工进行简化的情况。

(3) 集成块内部电路的主干电路与辅助电路。用简化电路描述集成块内部电路,将着眼点放在实现集成块功能的主干电路上。因为作为辅助电路的电流源、电压源很多,往往比主干电路所占用的器件还多。同时,子电路用其相应符号表示,可避免子电路喧宾夺主,收到画面简洁的效果。另外,适当讲明连接引脚的内部电路,以满足使用者配置外围元件和查找电路故障的需要。

(4) 结构逻辑和人的认识规律方面的考虑。基于人们从个别到一般的认识规律,本书从分散讲述个别问题入手,将难点分散开来。例如,讲述器件时将双极型晶体管和场效应管分开,讲述器件参数时将低频参数和低频参数分开、大功率参数和小信号参数分开,并在章末的小结中综合讲述分析方法。

全书分9章。第1章讲述半导体元器件,包括双极型晶体管及必要的、最基本的半导体知识,重点介绍器件外特性。讨论了三极管的电流形成原理,即利用结电压控制势垒高度,影响基区少数载流子的分布,最后实现对3个电极电流大小的改变。本章提出了一个新观点,即将三极管放大状态与饱和状态的界限分为理论值和实际值。在一般教材中,只讲放大状态和饱和状态的分界是集电结电压为0,一旦集电结电压为正向电压,便进入饱和状态,再也不能起放大作用。但实际应用中并非如此,例如,单电源供电运算放大器和以跨导线性电路为子电路的许多电路,其中不少器件在零集电结偏压下工作。故本章提出,当集电结处于不大的正向偏压下,三极管仍能起放大作用;放大状态与饱和状态的分界是集电结为某一小于PN结导通电压的正向偏压值。这个原理基于PN结伏安特性的指数规律,正好像三极管要进入实际的放大状态,不是发射结加上正向偏压就可以,而是必须大于导通电压 U_D 。

第2章讲述放大电路基础,介绍图解法、等效电路法和计算机仿真法,以及与这些方法相应的双极型三极管模型,并提出按相对误差大小简化工程问题的处理方法。本章着重分析器件工作点位置和负载电阻值对非线性失真的影响,与一般教材不同的是,本章还讨论了信号源内阻大小对非线性失真的影响。

第3章讲述放大电路中的反馈,介绍正、负反馈的区分和反馈电路的识别。与一般教材不同的是,本章说明反馈电路元件除引入反馈作用外,还对输入、输出信号有分流(或分压)和直通等副作用。反馈电路的分类只根据输入和输出的两种连接方式来讨论,因为二者组合成4种电路后不出现新的特性。本章还提到,输入端连接方式为串联反馈时,输入量取电压为变量,为并联反馈时,输入量取电流为变量;输出端连接方式为电压反馈时,输出量取电压为变量,为电流反馈时,输出量取电流为变量,这样做有其方便之处,但不是非此不可。避免误导初学者认为,输入、输出各有两种不同连接方式来组成4种电路,从而只能或必须是考察电压比、电流比、互阻、互导4种不同的增益。在介绍反馈对放大电路特性的影响时,同时强调性能得到改善所必需的条件。本章还着重阐明了线性电子电路中的非线性问题,提出大信号工作时,必须以牺牲器件动态运用范围为代价的观点。

第4章讲述放大电路的频率特性,包括频率失真的定义、不产生频率失真的条件、PN结电容和双极型管的高频模型,以及高频模型中各参数的物理意义。频率特性的分析方法分为手工估算和计算机仿真两种方法。在手工估算法中,强调工程简化分析,介绍如何应用等效电源定理及允许的相对误差对电路进行简化变换。本章重点放在高频特性的分析上,介绍了提高截止频率的3种方法。

第5章讲述场效应管放大电路,介绍结型场效应管和MOS型管两类器件。在讲述器件原理时,将器件看做一个非线性可变电阻。在讲述电极作用和放大电路时,将其和双极型管类比,这样可最大限度地利用已有的双极型管电路知识,节约篇幅,并获得事半功倍的效果。

第6章讲述功率输出电路,重点介绍器件工作于大信号下的特点。本章点明输出功率、效率和非线性失真之间的矛盾,指出从选择负载和器件工作状态等方面缓和矛盾,还讨论了最佳负载的概念和甲类、甲乙类、乙类等工作情况。本章的主要电路是互补放大电路和若干变形电路,以及变压器耦合双端推挽电路等。

第7章讲述集成电路基础,介绍集成电路中的主要子电路,包括恒流电路(主要是电流镜)、恒压电路、差动电路和跨导线性电路。本章根据电路结构决定电路功能,根据分析是否方便决定采用何种变量,避免了部分教材中根据分析电路时选用电流或电压为变量来决定电路功能的模糊论点。

第8章讲述集成放大电路,主要介绍运算放大器。本章提出按运放电路的结构分为对称输入式和非对称输入式两大类,它们分别对应于文献中的电压反馈式和电流反馈式。本章还介绍了运算放大器的应用。在深负反馈情况下,本章采用利用放大器输入端具有虚短路、虚开路的特性进行简化分析的方法,并指出传统的将运放特性理想化进行简化分析的不足。

第9章讲述电压比较器和模拟相乘器。电压比较器主要围绕灵敏度和响应速度两个指标来介绍。模拟相乘器重点介绍由跨导线性电路构成的电路,分电流相乘和由电流相乘转换为电压相乘两步讲述,还介绍相乘器和运放组成的有关运算电路。

本书第1,5,6章由邓钢编写,第2,3,4,7,8,9章由谢沅清编写,电子课件由邓钢制作,全书由谢沅清统稿。电子课件和习题解答可登录华信教育资源网(www.huaxin.edu.cn)免费下载。

本书参考学时为60学时,目录中及书中标题注有*号的部分是建议作为选学的内容。

感谢本书第1版的合作者解月珍教授,她的辛勤工作为本书打下了良好的基础。华中科技大学康华光教授审阅了本书,衷心感谢他为本书提出的宝贵意见。

限于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者不吝指正。

作 者

2006年于北京邮电大学

常用符号说明

一、基本的量和单位表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
电流	I, i	安[培]	A	电感	L	亨[利]	H
电压	U, u	伏[特]	V	电容	C	法[拉]	F
功率	P, p	瓦[特]	W	放大倍数	A	分贝	dB
电阻	R, r	欧[姆]	Ω	时间、摄氏温度	t	秒、摄氏度	s, $^{\circ}\text{C}$
电导	G, g	西[门子]	S	热力学温度	T	开[尔文]	K
电抗	X, x	欧[姆]	Ω	频率	f, F	赫[兹]	Hz
电纳	B, b	西[门子]	S	角频率	ω, Ω	弧度每秒	rad/s
阻抗	Z, z	欧[姆]	Ω	带宽	BW	赫[兹]	Hz

注:无方括号的量的名称与单位名称均为全称。方括号中的字,在不引起混淆、误解的情况下,可以省略。去掉方括号中的字即为其名称的简称。

二、电压、电流的符号表示

小写 $u(i)$ 和小写下标 小写 $u(i)$ 和大写下标	交流电压(电流)瞬时值(例如 u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压瞬时值) 含有直流电压(电流)的瞬时值(例如 u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值)
大写 $U(I)$ 和小写下标 大与 $U(I)$ 和大写下标 大写 V 和大写双字重复下标	交流电压(电流)有效值(例如 I_b 表示基极电流的有效值) 直流电压(电流)值(例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间直流电压值) 直流供电电压(例如 V_{CC} 表示集电极直流供电电压)

三、正弦信号作用下,复数、模、相角的符号

$U(j\omega) = U(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ $U(\omega), \varphi(\omega)$ $U(S)$	正弦电压复数值 电压的模和相角 电压的拉氏变换
--	-------------------------------

四、角标含义

i	输入量(例如 u_i 为输入电压)
o	输出量(例如 u_o 为输出电压)
i	电流量(例如 A_i 为电流放大倍数)
u	电压量(例如 A_u 为电压放大倍数)
L	负载上的量(例如 u_L 为负载上的电压)
f	反馈量(例如 u_f 为反馈电压, A_f 为加有反馈时的放大倍数)
s	信号源量(例如 u_s 为信号源电压, A_s 为从信号源计算的放大倍数)
d	直流分量(例如 U_d 为电压直流分量)
R	基准量(例如 U_R 为基准电压)

五、功率

P_C P_o	集电极损耗功率 载频功率	P_{SB} P_{av}	边频功率 平均功率
----------------	-----------------	----------------------	--------------

六、频率

f_h	3 dB 上限(截止)频率	BW	3 dB 带宽
f_l	3 dB 下限(截止)频率	f_0	回路固有谐振频率

七、器件符号及参数

1. 二极管

VD	普通二极管	I_S	反向饱和电流
VD _w	稳压二极管	U_Z	稳压管的击穿电压
U_D	导通电压	$U_T \left(= \frac{kT}{q} \right)$	热电压

2. 三极管

VT	三极管	P_{CM}	集电极最大容许功耗
I_{CBO}	发射极开路时的集电结反向饱和电流	g_m	跨导
I_{CEO}	基极开路时集电极与发射极间的电流(穿透电流)	α	共基极短路电流放大系数
I_{CM}	集电极最大容许电流	β	共发射极短路电流放大系数
U_{CES}	集电极与发射极间的饱和压降	f_a	共基极短路电流放大系数的截止频率
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时的集电结击穿电压	f_β	共发射极短路电流放大系数的截止频率
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极与发射极间的击穿电压	f_T	特征频率(β 降至等于1的频率)
U_A	欧拉电压	$r_b(r_{bb'})$	基区体电阻

3. 场效应管

$U_{GS(off)}$	夹断电压	I_{DSS}	$U_{GS}=0$ 时的恒流区漏极电流
$U_{GS(th)}$	开启电压	f_c	特征频率(输出负载电阻趋于无限大、电压放大倍数等于1时的频率)
$U_{(BR)DS}$	漏源间击穿电压		

八、差动放大电路及运算放大器

U_{IO}	输入失调电压	A_d	差模增益
I_{IO}	输入失调电流	A_c	共模增益
U_{id}	差模输入电压	CMRR	共模抑制比
U_{ic}	共模输入电压	SR	摆动速率(压摆率)

九、其他符号

γ	非线性失真系数	A	放大倍数
η	效率	B	反馈系数
τ	时间常数	$T=AB$	环反馈系数
n	变压器变比	$F=1+AB$	反馈深度
Q	静态工作点	K_M	相乘器的相乘增益

目 录

第 1 章 半导体元器件	(1)
1.1 半导体基础知识	(1)
1.1.1 半导体的特性	(1)
1.1.2 本征半导体	(1)
1.1.3 杂质半导体	(2)
1.1.4 半导体内的电流	(3)
1.2 PN 结	(4)
1.2.1 PN 结的基本原理	(4)
1.2.2 外加直流(缓变)电压时 PN 结的电流	(6)
1.2.3 PN 结的伏安特性	(7)
1.2.4 PN 结的温度特性	(7)
1.3 二极管	(8)
1.3.1 二极管的符号和结构	(8)
1.3.2 二极管的特性	(8)
1.3.3 几种常用的特种二极管	(11)
1.4 三极管	(13)
1.4.1 三极管的结构和符号	(13)
1.4.2 三极管的工作原理	(14)
1.4.3 三极管的放大作用	(18)
1.4.4 三极管的特性曲线	(19)
1.4.5 三极管的主要参数	(20)
* 1.5 集成化元器件及其特点	(25)
1.5.1 集成电路工艺简介	(25)
1.5.2 集成电路中的器件	(27)
1.5.3 集成化元器件的特点	(28)
1.6 小结	(29)
习题与思考题	(30)
第 2 章 放大电路基础	(32)
2.1 放大电路的主要性能指标	(32)
2.1.1 增益	(32)
2.1.2 输入电阻和输出电阻	(33)
2.1.3 失真	(34)
2.2 单管放大电路的构成	(34)
2.3 放大电路的分析方法	(36)
2.3.1 图解分析法	(36)

2.3.2 等效电路分析法	(45)
2.4 用小信号模型分析共基极和共集电极放大电路	(51)
2.4.1 共基极放大电路的分析	(51)
2.4.2 共集电极放大电路的分析	(52)
2.5 有源负载放大电路	(55)
2.5.1 问题的提出	(55)
2.5.2 电路特点	(55)
2.5.3 特性分析	(56)
2.6 双极型三极管放大电路的计算机辅助分析	(57)
2.6.1 双极型三极管的 SPICE 模型参数	(57)
2.6.2 放大电路的计算机辅助分析	(58)
2.7 小结	(60)
习题与思考题	(61)
第3章 放大电路中的反馈	(66)
3.1 反馈电路的识别和正、负反馈的区分	(66)
3.1.1 单级反馈电路	(66)
3.1.2 两级反馈电路	(67)
3.2 反馈元件的作用	(68)
3.3 反馈电路的连接方式	(70)
3.3.1 反馈电路在放大电路输入端的连接方式及其对输入阻抗的影响	(70)
3.3.2 反馈电路在放大电路输出端的连接方式及其对输出阻抗的影响	(72)
3.3.3 反馈电路在放大电路输入端、输出端不同连接方式的组合	(75)
3.4 深负反馈电路增益的工程计算	(76)
3.4.1 深负反馈条件	(76)
3.4.2 虚短路和虚开路	(77)
3.5 负反馈对放大电路工作点和增益的稳定作用	(78)
3.5.1 静态工作点的稳定性	(78)
3.5.2 增益的稳定性	(81)
3.6 负反馈对放大电路噪声和非线性失真的影响	(82)
3.6.1 负反馈对噪声的影响	(82)
3.6.2 负反馈对非线性失真的影响	(83)
3.7 小结	(86)
习题与思考题	(87)
第4章 放大电路的频率特性	(92)
4.1 频率特性的分析方法	(92)
4.1.1 放大电路不产生频率失真的条件	(92)
4.1.2 频率特性的工程简化分析法	(94)
4.2 双极型管的高频参数及模型	(97)
4.2.1 PN 结电容	(97)
4.2.2 共发射极高频混合 π 型模型	(99)

4.2.3 共基极高频 T 型模型	(101)
4.3 单级放大电路的高频特性	(101)
4.3.1 等效电路的单向化与密勒效应	(102)
4.3.2 低通一阶电路的特性	(104)
4.4 扩展放大电路通频带的方法	(108)
4.4.1 负反馈法	(109)
4.4.2 不同组态电路混合连接法	(113)
4.4.3 外接电感补偿元件法	(117)
4.5 电容耦合放大电路的低频特性	(118)
4.5.1 输出端的频率特性	(118)
4.5.2 输入端的频率特性	(119)
4.6 放大电路的时域特性	(121)
4.7 小结	(122)
习题与思考题	(123)
第 5 章 场效应管放大电路	(125)
5.1 结型场效应管	(125)
5.1.1 结构与电路符号	(125)
5.1.2 工作原理	(125)
5.1.3 主要参数	(128)
5.2 绝缘栅场效应管	(129)
5.2.1 增强型管的结构和电路符号	(129)
5.2.2 N 沟道增强型管的工作原理	(130)
5.2.3 N 沟道耗尽型管	(131)
5.3 场效应管的偏置电路	(134)
5.3.1 偏置变量的选择	(134)
5.3.2 电路形式	(134)
5.4 场效应管放大电路	(135)
5.4.1 场效应管共源放大电路	(135)
5.4.2 共漏放大电路——源极跟随器	(137)
5.4.3 有源负载放大电路	(138)
5.5 小结	(140)
习题与思考题	(141)
第 6 章 功率输出电路	(142)
6.1 功率输出电路的主要问题	(142)
6.1.1 非线性失真	(142)
6.1.2 器件的安全运用	(143)
6.1.3 集电极功率转换效率	(145)
6.2 互补放大电路	(146)
6.2.1 电路工作原理	(146)
6.2.2 输出功率与负载电阻的关系	(148)

6.2.3	能量关系	(150)
6.2.4	效率与工作状态的关系	(151)
6.2.5	乙类互补放大电路的分析	(153)
6.3	其他功率输出电路	(157)
6.3.1	准互补放大电路	(157)
6.3.2	单电源供电互补放大电路	(159)
6.3.3	桥式电路	(159)
*6.3.4	保护电路	(160)
*6.3.5	提高输出电压幅度的自举电路	(160)
*6.3.6	变压器耦合放大电路	(161)
*6.3.7	场效应管功率输出电路	(164)
6.4	小结	(170)
	习题与思考题	(171)
第7章	集成电路基础	(173)
7.1	恒流电路	(173)
7.1.1	基本电流镜	(173)
7.1.2	改进型电流镜	(174)
7.1.3	压控电流源	(176)
7.2	恒压电路	(177)
7.3	差动放大电路	(178)
7.3.1	基本差动放大电路	(178)
7.3.2	具有电流镜偏置电路和电流镜负载的差动放大电路	(183)
7.4	电平移动电路	(188)
7.5	跨导线性电路	(189)
7.5.1	跨导线性的基本概念	(189)
7.5.2	跨导线性回路原理	(189)
7.5.3	由三极管跨导线性环构成的电流放大电路	(191)
7.6	小结	(196)
	习题与思考题	(200)
第8章	集成放大电路及其应用	(204)
8.1	运算放大器概述	(204)
8.2	通用运算放大器的工作原理	(205)
8.2.1	对称输入式双极型管运算放大器电路	(205)
8.2.2	非对称输入式双极型管运算放大器电路	(206)
8.2.3	MOS型运算放大器电路	(207)
8.3	运算放大器的主要参数	(208)
8.3.1	直流参数	(208)
8.3.2	交流参数	(209)
8.4	运算放大器输入信号的连接方式	(212)
8.4.1	反相输入式放大电路	(212)

8.4.2 同相输入式放大电路	(215)
8.4.3 以运放为基本放大器的电路的分析方法	(216)
8.5 非对称输入式运算放大器的特性	(218)
8.5.1 开环特性	(218)
8.5.2 分析闭环特性的简化等效电路	(219)
8.5.3 反相输入式放大电路	(220)
8.5.4 同相输入式放大电路	(222)
8.5.5 摆动速率	(225)
8.6 其他集成放大器	(227)
8.6.1 单电源供电运算放大电路	(227)
8.6.2 跨导运算放大器	(228)
8.6.3 电压跟随器	(229)
8.6.4 集成功率放大器	(229)
8.7 运算放大器构成的运算电路	(231)
8.7.1 线性运算电路	(231)
8.7.2 非线性运算电路	(237)
* 8.8 利用元器件伏安特性构成互逆运算的电路结构	(242)
8.9 小结	(243)
习题与思考题	(244)
第9章 电压比较器和模拟相乘器	(250)
9.1 基本电压比较器	(250)
9.1.1 工作原理	(250)
9.1.2 主要技术指标	(250)
9.2 迟滞比较器	(252)
9.3 模拟相乘器	(253)
9.3.1 工作原理	(253)
9.3.2 电流相乘电路	(253)
9.3.3 电压相乘电路	(255)
9.3.4 模拟相乘器芯片典型电路	(256)
9.4 模拟相乘器构成的运算电路	(258)
9.4.1 相乘与乘方运算电路	(259)
9.4.2 相除运算电路	(259)
9.4.3 开方和均方根运算电路	(260)
9.5 小结	(262)
习题与思考题	(263)
名词索引	(265)
参考文献	(267)

第 1 章 半导体元器件

半导体元器件的类型很多,本书只介绍电子电路中常用的元器件。元件只限于电阻,器件只限于常用的二极管(整流、稳压、光电和发光二极管)、双极型晶体管和场效应管。本章先介绍前面几种器件,场效应管在第 5 章介绍。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体的特性

物质的导电性能决定于原子结构的最外层电子。导体一般为低价元素,它们的最外层电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子,并在外电场的作用下产生定向移动,形成电流。高价元素(如惰性气体)或高分子物质(如橡胶),它们的最外层电子所受的原子核束缚力很强,很难成为自由电子,所以这些物质的导电性能很差,是绝缘体。常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)均为四价元素,它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱原子核的束缚,也不像绝缘体那样被原子核束缚得很紧,因而其导电性能介于导体和绝缘体之间。

半导体之所以能被用来制造电子元器件,不在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间,而在于它的导电能力在外界某种因素作用下会发生显著的变化。例如:

(1) 半导体的电导率可以因加入杂质而发生显著的变化。当室温为 30℃ 时,在纯锗中掺入一亿分之一的杂质(称为“掺杂”),其电导率会增加几百倍。各种不同器件的制作,正是利用了掺杂来改变和控制半导体的电导率。

(2) 温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化。利用这种热敏效应,人们制作出热敏元件;但另一方面,热敏效应也会使半导体元器件的热稳定性下降。在本书中,将会讨论克服因半导体元器件热敏特性造成电路不稳定的有关措施。

(3) 光照不仅可以改变半导体的电导率,而且可以产生电动势,上述现象统称半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光电晶体管、光电耦合器和光电池等。

物质的导电特性取决于原子的外层结构,即最外层电子的分布状态,所以下面以制造半导体元器件常用的锗、硅晶体的外层电子分布为例,讨论半导体的导电性能。

1.1.2 本征半导体

没有杂质且晶体结构完整的半导体,称为本征半导体。

1. 硅和锗晶体的共价键结构

在晶体中,原子间的距离很近,每一个原子的外层电子不仅受到本原子的作用,还要受到相邻原子的作用。由原子理论可知,当外层有 8 个电子时原子才处于稳定状态。硅和锗的原子只有 4 个最外层电子,它们称为价电子,因此在组成单晶时,每个原子都要从四周相邻的原子取得 4 个价电子,以形成稳定状态。这样,每两个原子都公用一对价电子,形成共价电子对,