

高等院校精品课程系列教材·省级

模拟电路分析与设计基础

精品课主持人 刘祖刚◎编著



Analog Circuit

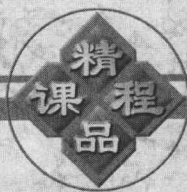


机械工业出版社
China Machine Press

高等院校精品课程系列教材·省级

模拟电路分析与设计基础

精品课主持人 刘祖刚◎编著



TN710
L31

Analog Circuit



机械工业出版社
China Machine Press

本书是高等院校精品课程系列教材。本书内容力求理论紧密联系实际,在阐明概念的基础上,着重讲清讲透电路的工作原理、分析方法;各章对一些基本电路的设计作了必要的讨论。学生通过本书的学习,不仅能掌握基本电路的工作原理和分析方法,而且还能初步学会设计一些实用的基本电路,以此进一步培养学生的创新思维 and 创新能力。

本书主要内容包括:常用半导体器件、常用基本放大电路、集成运算放大电路、功率放大电路、放大电路中的反馈、信号运算与处理、波形发生电路、直流电源等。

本书可作为高等院校电子信息与电气学科本科各专业的教材和非电子电气信息类本科相关专业的选用教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路分析与设计基础/刘祖刚编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 10
(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-22405-1

I. 模… II. 刘… III. ①模拟电路—电路分析—高等学校—教材 ②模拟电路—电路设计—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 147847 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王颖

三河市明辉印装有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24 印张

定价:36.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

出版者的话

机械工业出版社华章公司秉承“全球采集内容，服务中国教育”的理念，经过十余年的不懈努力，引进、翻译、出版了大量在计算机科学界、电子科学界享有盛名的专家名著与名校教材，其中包括 Donald E. Knuth、Alfred V. Aho、Jim Gray、Jeffrey D. Ullman、R. Jacob Baker 等大师名家的一批经典作品，这些作品对国内计算机教育事业的发展起到了一定的推动作用。今天，全国高等学校精品课程建设工作的蓬勃开展为我们更好地服务于计算机教育、电子信息科学教育提供了良好的契机，我们将以严谨的治学态度及全面服务的专业出版精神，在国内广大院校老师们的支持与帮助下，陆续推出具有国内一流教学水平的“高等院校精品课程系列教材”。

精品课程是具有一流教师队伍、一流教学内容、一流教学方法、一流教材、一流教学管理等特点的示范性课程，是教育部实施的“高等学校教学质量与教学改革工程”的重要组成部分，是教育部深化教学改革，以教育信息化带动教育现代化的一项重要举措。自 2003 年精品课程建设项目持续推进以来，国内高校中的优秀教师纷纷在总结本校富有历史传统而又特色突出的课程教学方法与经验成绩的基础上，充分运用现代网络传播技术将优质的教学资源上网共享，使国内其他高校在实施同类课程教学的过程中能够借鉴、使用这些优质的教学资源，在更大范围内提高高等学校的教学和人才培养质量，提升我国高等教育的综合实力和国际竞争能力。经过几年的共同努力，已经建立起了较为齐全的各门类及各专业的校、省、国家三级精品课程体系，期间先后有总计 750 门课程通过了专家评审，获得了“国家精品课程”称号。

这些各个层次的“精品课程”建设过程都比较充分地体现了教育部所要求的七个重点，即：具有科学的建设规划，配备高水平的教学队伍，不断进行教学内容和课程体系的改革，使用先进的教学方法和手段，注重建设系列化的优秀教材，高度重视理论与实践两个环节，切实激励各方人员共同参与。也正因为这样的多方面积极参与，使得我国的高等教育在近年来由精英教育转向大众教育的跨越式发展中取得了教学质量上的突破与飞跃。精品课教材作为精品课程的要件之一，比以往教材更加具有实践检验性，教学辅助资源经过不断地更新与补充更加丰富，是精品课教学团队智慧的共同体现。

“师者，所以传道授业解惑也”。教材是体现教学内容和教学要求的知识载体，是教师进行教学活动的基本工具，是提高教学质量的重要保证。精品课程教学团队中优秀的老师们集多年治学经验撰写出版相关教材，也是精品课程建设的一个重要方面。华章作为专业的出版团队，长久以来以“传承专业知识精华，服务中国教育事业”为使命，遵循“分享、专业、创新”的价值观，实践着“国际视野、专业出版、教育为本、科学管理”的出版方针，愿与高等院校的老师共同携手，为中国的高等教育事业走向国际化而努力。

为更好地服务于精品课程配套教材的出版，华章不仅密切关注高校的优秀课程建设，而且还将利用自身的优势帮助教师完善课程设置、提供教辅资料、准备晋级申报、推广教学经验。具体详情可访问专门网站 <http://www.hzbook.com/jpkc.aspx>，并可在线填写出版申请，欢迎您对我们的工作给予帮助和指导。

投稿专线：010-88379604

投稿 Email: hzsj@hzbook.com



华章科技图书出版中心

前言

“模拟电路”(或称“模拟电子技术基础”、“低频电子线路”)是电子信息及电气类各专业一门重要的专业基础课,其理论是建立在实践之上并可直接指导实践。“模拟电路”教学的根本原则是注重理论与实际的紧密结合,特别强调用理论去直接指导和解决工程实际问题;其教学的根本目的就是使学生掌握电路的工作原理、分析方法,能正确地应用各种电路(包括电路调试、参数测试、故障分析与排除等),初步学会根据工程实际要求设计出一些实用的基本电路。因此,模拟电路教材体系不应只限制在电路理论分析的“框架”之中,而应结合实际,将理论分析落实到基本电路的工程设计之上,这才是“模拟电路”教学更高层次的理论联系实际。

电子电气信息类专业的“模拟电路”教学应加强学生基本电路设计能力的培养,这不仅是模拟电路教学所要达到的基本目标,更是加强学生工程实践能力、创造性思维和创新能力的培养的重要教学环节;学生只有掌握了基本电路的设计原理和设计方法,才能在理论与实践相结合的基础上更深刻地理解电路原理和特性,更正确合理、乃至创造性地将这些基本电路运用于工程实践中。

本书正是作者基于上述基本思想和30多年的教学经验编写而成的。本书内容力求从工程实际要求出发,理论紧密联系实际,在讲清讲透电路工作原理和分析方法的基础上,各章对一些基本电路的工程设计作了必要的讨论,使学生初步学会和掌握一些基本电路的工程设计原理和方法,以此加强学生创新思维和创新能力的培养。

从有利于教学的需要出发,本书在基本内容取舍和知识结构体系上作了如下几个方面的调整:

(1)在对每一个具体电路讨论之前,减少了不必要的“铺垫”,避免了某些“繁琐”。

(2)为了使不同章节有关内容更好地前后“衔接”和避免不同章节有关内容前后不必要的重复,在知识结构体系上作了如下几个方面的整合。

- 将现有某些教材中分布在三章的内容(基本放大电路、多级放大电路、放大电路的频率响应)整合在第2章“常用基本放大电路”之中。
- 考虑介绍集成运放输入级和中间级时会用到差分放大电路,因

此，将差分放大电路调整到第3章“集成运算放大电路”中讨论。

- 考虑目前绝大多数情形下，已很少用到变压器耦合的功率放大器，故这部分内容在第4章“功率放大电路”中被删去，重点讨论了OCL、OTL和集成功率放大电路。

(3) 考虑实用的负反馈电路一般满足深度负反馈条件，故负反馈电路这部分内容重点讨论了深度负反馈条件下的近似分析法，删去了工程实际已很少应用的繁琐的方框图分析法。

天津大学孙雨耕教授、清华大学华成英教授对本书编写大纲提出了宝贵意见，学院领导及教研室许多老师对本书的编写给予了很大的支持，曾梅香老师在绘图和书稿校对方面作了大量的工作，机械工业出版社的王颖主任在书稿编辑方面给予了不少帮助，在此一并表示衷心感谢！

本书可作为高等学校电子信息与电气学科本科各专业“模拟电路”课程教材和非电子电气信息类本科相关专业“模拟电路”课程选用教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

由于时间仓促和作者水平所限，书中若有疏漏和错误之处，敬请各位教师和读者不吝指正。

作者

2007年5月

教学建议

| 教学内容 | 学习要点及教学要求 | 课时安排(学时) | |
|------|--|--------------|--------------|
| | | 电子信息及电气类本科专业 | 非电子信息电气类本科专业 |
| 第1章 | <ul style="list-style-type: none"> 了解本征半导体、N型半导体、P型半导体的共价键结构及空穴和自由电子两种载流子产生的过程 弄清PN结的形成及其单向导电性 弄清半导体二极管的单向导电性及简单二极管电路工作原理 弄清双极型晶体管基本结构,晶体管内部载流子的运动规律、外部电流分配关系及其截止、放大、饱和和三种工作状态的特性 了解结型场效应管和绝缘栅型场效应管的基本结构,以及内部载流子的运动规律 理解二极管、晶体管、场效应管的一些主要参数的意义 正确识别二极管、晶体管、场效应管的各电极 | 8~10 | 选讲8 |
| 第2章 | <ul style="list-style-type: none"> 理解放大的基本概念、放大电路的主要性能指标的意义 弄清晶体管共射、共基、共集三种基本组态放大电路的结构组成、工作原理,重点掌握电路交直流工作状态及相关性能指标的分析、计算方法和实际应用 弄清场效应管共源、共漏两种常用的基本组态放大电路的结构组成、工作原理,重点掌握电路交直流工作状态及相关性能指标的分析、计算方法和实际应用 弄清放大电路频率特性(频率响应)分析的实际背景和意义,掌握频率特性分析方法 初步掌握放大电路的一般设计原理和工程设计方法 初步学会放大电路的一般故障现象的分析 | 10~12 | 选讲6~10 |
| 第3章 | <ul style="list-style-type: none"> 弄清集成运算放大电路的特点、组成结构、各组成部分的作用 了解集成运算放大电路中电流源的作用,各类电流源的特点、工作原理 理解四种不同输入、输出方式差分放大电路的特点、工作原理,掌握其分析方法 初步学会差分放大电路设计方法 理解集成运算放大电路的主要性能指标的意义 一般性了解集成运算放大电路内部电路的组成及其工作原理 了解集成运算放大电路应用中需要注意的问题,学会正确使用集成运放 | 4~6 | 选讲4 |

(续)

| 教 学 内 容 | 学习要点及教学要求 | 课时安排(学时) | |
|---------|--|----------------------|----------------------|
| | | 电子信息 及电气类 本科专业 | 非电子信 息电气类 本科专业 |
| 第4章 | <ul style="list-style-type: none"> 了解功率放大电路的作用 了解互补对称功率放大电路的主要特点和对功率放大电路的主要要求 弄清互补对称功率放大电路工作在甲乙类状态目的及电路工作原理 弄清 OCL 与 OTL 功率放大电路的异同之处 掌握功率放大电路输出功率、效率, 以及管耗等参数的计算方法和实际应用 初步掌握 OTL 功率放大电路的设计原理与设计方法 了解集成功放电路原理及其应用 | 6 | 选讲4 |
| 第5章 | <ul style="list-style-type: none"> 理解放大电路中反馈的概念, 交、直流负反馈的作用, 掌握正、负反馈的判别方法——瞬时极性法 弄清电流串联、电压串联、电流并联、电压并联四种类型负反馈放大电路的特点, 着重掌握其判别方法 理解四种类型负反馈放大电路放大倍数一般表达式中反馈系数和放大倍数的不同含义, 掌握其计算方法, 弄清其实际应用场合 着重掌握深度负反馈条件下四种类型负反馈放大电路电压放大倍数的近似计算方法 初步学会负反馈放大电路的设计 弄清负反馈对放大电路性能的改善 了解少数情形下放大电路中引入正反馈的作用 初步学会电路常见故障现象的分析 | 8~10 | 选讲6~8 |
| 第6章 | <ul style="list-style-type: none"> 弄清理想运放模型性能参数的意义和理想运放工作在线性区、非线性区的电路特征 弄清运算电路深度负反馈的电路特征; 着重掌握建立在“虚短”、“虚断”概念基础上的节点电流分析法和多输入信号作用时的叠加原理分析法 掌握基本运算电路(比例、加法、减法、乘法、除法、对数、反对数、微分、积分等电路)工作原理、运算关系的具体分析方法及其实际应用 了解模拟乘法器电路分析方法及用乘法器组成除法、乘方、开方等运算电路的方法 初步掌握运算电路的设计原理及方法 了解有源滤波电路(低通、高通、带通、带阻等电路)的特点, 一般性掌握其分析方法 | 8~10 | 选讲4~8 |

(续)

| 教 学 内 容 | 学习要点及教学要求 | 课时安排(学时) | |
|---------|--|----------------------|----------------------|
| | | 电子信息 及电气类 本科专业 | 非电子信 息电气类 本科专业 |
| 第 7 章 | <ul style="list-style-type: none"> 弄清正弦振荡的概念及产生自激振荡的条件(相位条件和振幅条件) 了解正弦波发生(振荡)电路的组成结构及各组成部分的作用 弄清 RC 串并联选频网络的频率特性,掌握 RC 桥式振荡电路的工作原理、电路的分析方法和实际应用 理解 LC 正弦波振荡电路的工作原理,着重掌握判断正反馈相位条件的方法 初步了解 LC 正弦波振荡电路的设计原理 弄清石英晶体电抗特性和并联型石英晶体振荡电路、串联型石英晶体振荡电路的组成结构及工作原理 弄清集成运放电压比较器开环或正反馈工作状态的电路特征 弄清单限、滞回、窗口比较器电压传输特性 理解矩形波、三角波、锯齿波发生电路工作原理,掌握振荡频率和输出电压幅值的计算方法 学会正弦波发生电路和非正弦波发生电路的正确应用和常见故障现象分析 | 8~10 | 选讲 6~8 |
| 第 8 章 | <ul style="list-style-type: none"> 理解半波、全波、桥式整流电路工作原理,弄清三种整流电路输出平均电压与输入电压有效值之间的关系 理解储能元件电容和电感实现滤波的原理,弄清两种滤波电路输出电压与整流电路输入电压有效值间的近似关系 理解二极管稳压电路稳压原理,掌握限流电阻选择的计算方法 理解晶体管串联型线性稳压电路的工作原理,弄清电路各元件的作用,掌握输出电压调节范围的计算方法 了解限流型和截流型过流保护电路的工作原理 学会正确应用晶体管串联型线性稳压电路及初步掌握电路的设计方法 弄清三端集成稳压器的基本应用及输出电压和输出电流的扩展方法 简要了解开关稳压电路工作原理 初步学会晶体管串联型线性稳压电路的常见故障分析 | 6~8 | 选讲 4~6 |
| | 教学总学时建议 | · 56~72 | 42~56 |

说明:

- ① 本教材为电子信息及电气类本科专业“模拟电路”或“模拟电子技术基础”课程教材,理论授课学时数为 56~72 学时(相关配套实验另行单独安排),不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数酌情对教材内容进行适当取舍。如电子信息工程、通信工程、自动控制等专业,教材内容原则上可全讲;其他专业,可酌情对教材内容进行适当删减。
- ② 非电子信息电气类本科专业使用本教材可适当降低教学要求。
- ③ 本教材理论授课学时数 56~72 学时包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。
- ④ 若某些电子信息及电气类本科专业和非电子信息电气类本科专业计划教学学时数少于 56 学时,建议可部分或全部舍去各章节中的相关电路设计内容。

本书常用符号说明

1. 电流和电压符号表(以基极电流为例)

| 字母符号 | 字母符号代表的意义 |
|---------------|----------------------------|
| $I_B(I_{BQ})$ | 大写字母、大写下标, 表示直流量(或静态电流) |
| i_b | 小写字母、小写下标, 表示交流量 |
| i_B | 小写字母、大写下标, 表示包含直流量和交流量的瞬时量 |
| I_b | 大写字母、小写下标, 表示交流量有效值 |
| \dot{i}_b | 表示交流量复量 |
| ΔI_B | 表示直流变化量 |
| Δi_B | 表示瞬时量的变化量 |

2. 基本量、单位、符号表

| 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 | 电容 | C | 法[拉] | F |
| 电压 | U, u | 伏[特] | V | 放大倍数 | A | 无或分贝 | 无或 dB |
| 功率 | P, p | 瓦[特] | W | 时间 | t | 秒 | s |
| 电阻 | R, r | 欧[姆] | Ω | 摄氏温度 | t | 摄氏度 | $^{\circ}\text{C}$ |
| 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 | 频带宽度 | f_{BW} | 赫[兹] | Hz |
| 电感 | L | 亨[利] | H | | | | |

注: 单位名称中去掉方括号中的字即为其名称的简称。

3. 正弦信号复数值、模、相角符号

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

4. 下角标的含义

| | |
|--------|--|
| i, I | 输入量(例如 u_i 为输入电压) |
| o, 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) |
| f | 反馈量(例如 u_f 为反馈电压, A_f 为反馈放大倍数) |
| s | 信号源量(例如 u_s 为信号源电压, A_{us} 为源电压放大倍数) |

5. 功率符号

| | | | |
|-------|-----------|------------|---------|
| P_V | 电源供给的平均功率 | P_T, P_C | 晶体管损耗功率 |
| P_o | 输出信号功率 | P_i | 输入信号功率 |

6. 频率

| | | | |
|-------|------------|-------|------------|
| f_H | 放大电路上限截止频率 | f_o | 选频回路固有谐振频率 |
| f_L | 放大电路下限截止频率 | f_p | 滤波器通带截止频率 |

7. 元器件符号及参数

(1) 二极管

| | | | |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|
| VD | 普通二极管 | U_Z | 稳压二极管反向击穿电压 |
| VD _Z | 稳压二极管 | I_S | 反向饱和电流 |
| U_D | 二极管正向导通电压 | $U_T = KT/q$ | 温度的电压当量 |

(2) 三极管

| | | | |
|-----------|------------------------|---------------|---------------------------|
| VT | 晶体管(三极管) | P_{CM} | 集电极最大允许功耗 |
| I_{CBO} | 发射极开路时集电极反向饱和电流 | I_{CM} | 集电极最大允许电流 |
| I_{CEO} | 基极开路时集电极与发射极间的电流(穿透电流) | g_m | 跨导 |
| U_{CES} | 集电极与发射极间的饱和压降 | β | 共发射极电流放大倍数(系数) |
| U_{CEO} | 基极开路时集电极与发射极间的反向击穿电压 | α | 共基极电流放大倍数(系数) |
| U_{CBO} | 发射极开路时集电极与基极间的反向击穿电压 | f_β | 共发射极截止频率 |
| U_{EBO} | 集电极开路时发射极与基极间的反向击穿电压 | f_α | 共基极截止频率 |
| | | f_T | 特征频率(β 下降至1时对应的频率) |
| | | r_{be}, r_b | 基区体电阻 |

(3) 场效应管

| | | | |
|---------------|--------|--------------|----------|
| $U_{GS(off)}$ | 夹断电压 | I_{DM} | 最大漏极电流 |
| $U_{GS(th)}$ | 开启电压 | P_{DM} | 最大允许功耗 |
| I_{DSS} | 饱和漏极电流 | $U_{(BR)GS}$ | 栅源极间击穿电压 |
| g_m | 低频跨导 | $U_{(BR)DS}$ | 漏源极间击穿电压 |

8. 差分放大电路及集成运算放大电路

| | | | |
|----------|--------|-------------|------------|
| U_{IO} | 输入失调电压 | A_{ud} | 差模电压放大倍数 |
| I_{IO} | 输入失调电流 | A_{uc} | 共模电压放大倍数 |
| u_{id} | 差模输入电压 | K_{CMR} | 共模抑制比 |
| u_{Od} | 差模输出电压 | A_{od} | 开环差模电压放大倍数 |
| u_{ic} | 共模输入电压 | U_{idmax} | 最大差模输入电压 |
| u_{Oc} | 共模输出电压 | U_{icmax} | 最大共模输入电压 |

9. 其他符号

| | | | |
|----------|---------|----------|-----------|
| η | 效率 | F | 反馈系数 |
| γ | 非线性失真系数 | AF | 反馈环路放大倍数 |
| τ | 时间常数 | $1 + AF$ | 反馈深度 |
| A | 放大倍数 | K | 模拟乘法器相乘系数 |

目 录

| | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------|
| 出版者的话 | 1.5.3 场效应管与晶体管的类比 | 39 |
| 前言 | 本章总结 | 40 |
| 教学建议 | 自我检测题 | 40 |
| 本书常用符号说明 | 习题 | 42 |
| 第1章 常用半导体器件 | 第2章 常用基本放大电路 | 46 |
| 1.1 半导体基础知识 | 2.1 放大电路的组成及基本性能指标 | 46 |
| 1.1.1 导体、绝缘体和半导体 | 2.1.1 放大概念 | 46 |
| 1.1.2 本征半导体共价键结构 | 2.1.2 阻容耦合共发射极放大电路的组成 | 47 |
| 1.1.3 本征半导体热激发 | 2.1.3 放大器的主要性能指标 | 50 |
| 1.1.4 杂质半导体 | 2.2 三种基本组态放大电路及其派生电路 | 53 |
| 1.1.5 P型和N型半导体导电结构模型的表示方法 | 2.2.1 基本共射放大电路 | 53 |
| 1.1.6 半导体中的电流 | 2.2.2 共集电极放大电路 | 71 |
| 1.2 PN结 | 2.2.3 共基极放大电路 | 75 |
| 1.2.1 PN结的形成 | 2.2.4 三种基本放大电路性能比较 | 76 |
| 1.2.2 PN结的单向导电性 | 2.3 多级放大电路 | 77 |
| 1.3 半导体二极管 | 2.3.1 放大电路的级间耦合方式 | 77 |
| 1.3.1 半导体二极管常见的几种结构 | 2.3.2 多级放大电路的分析 | 79 |
| 1.3.2 二极管伏安特性 | 2.3.3 晶体管组合电路 | 83 |
| 1.3.3 二极管的主要参数 | 2.4 场效应管基本放大电路 | 85 |
| 1.3.4 半导体二极管的等效模型 | 2.4.1 共源极放大电路 | 85 |
| 1.3.5 稳压二极管 | 2.4.2 共漏极放大电路 | 91 |
| 1.3.6 其他二极管简介 | 2.5 放大电路的频率特性 | 93 |
| 1.4 晶体管 | 2.5.1 频率特性的一般概念 | 93 |
| 1.4.1 晶体管的结构及分类 | 2.5.2 RC高通电路与RC低通电路 | 94 |
| 1.4.2 晶体管内部载流子的传输过程 | 2.5.3 晶体管高频等效电路 | 98 |
| 1.4.3 晶体管电压放大作用简述 | 2.5.4 场效应管高频等效电路 | 102 |
| 1.4.4 晶体管共射特性曲线 | 2.5.5 放大电路的频率特性 | 102 |
| 1.4.5 晶体管的主要参数 | *2.5.6 多级放大电路的频率特性 | 115 |
| 1.5 场效应管 | 2.6 基本放大电路的设计 | 118 |
| 1.5.1 结型场效应管 | 2.6.1 基本放大电路设计的一般原则 | 118 |
| 1.5.2 绝缘栅场效应管 | | |

| | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| 2.6.2 晶体管基本放大电路设计 | 120 | 放大电路 | 178 |
| 本章总结 | 124 | 4.2.4 单电源准互补功率放大电路(OTL电路) | 179 |
| 自我检测题 | 125 | 4.2.5 单电源准互补功率放大电路设计 | 180 |
| 习题 | 127 | 4.3 集成功率放大电路 | 182 |
| 第3章 集成运算放大电路 | 136 | 4.3.1 DG4100 内部电路组成简介 | 182 |
| 3.1 集成运算放大电路的特点及电流源电路 | 136 | 4.3.2 DG4100 集成功放的应用 | 183 |
| 3.1.1 集成运算放大电路的特点及组成 | 136 | 本章总结 | 184 |
| 3.1.2 集成运放的电压传输特性 | 137 | 自我检测题 | 184 |
| 3.1.3 集成运放中的电流源电路 | 138 | 习题 | 185 |
| 3.2 差分放大电路 | 143 | 第5章 放大电路中的反馈 | 188 |
| 3.2.1 差分放大电路概述 | 143 | 5.1 反馈的概念及反馈类型的判别方法 | 188 |
| 3.2.2 基本差分放大电路的工作原理及性能分析 | 144 | 5.2 负反馈放大电路四种基本类型及放大倍数一般表达式 | 190 |
| 3.2.3 具有恒流源的差分放大电路 | 150 | 5.2.1 负反馈放大电路四种基本类型 | 190 |
| 3.2.4 具有恒流源的差分放大电路的设计 | 156 | 5.2.2 负反馈放大电路放大倍数一般表达式 | 194 |
| 3.3 集成运算放大电路的输出级 | 158 | 5.3 负反馈对放大电路性能的改善 | 197 |
| 3.3.1 互补型共集电路 | 158 | 5.3.1 提高放大倍数的稳定性 | 197 |
| 3.3.2 设置静态偏置的互补型共集输出级电路 | 159 | 5.3.2 展宽通频带 | 198 |
| *3.4 集成运放电路简介 | 160 | 5.3.3 减小非线性失真 | 199 |
| 3.4.1 集成运算放大电路 F007 原理简介 | 160 | 5.3.4 改变输入电阻 | 200 |
| 3.4.2 集成运算放大电路的主要性能指标 | 162 | 5.3.5 改变输出电阻 | 201 |
| 3.5 集成运放的选择和使用 | 163 | 5.4 深度负反馈放大电路 | 204 |
| 本章总结 | 165 | 5.4.1 深度负反馈的实质 | 205 |
| 自我检测题 | 166 | 5.4.2 负反馈系数的确定 | 205 |
| 习题 | 167 | 5.4.3 深度负反馈放大电路电压放大倍数分析 | 206 |
| 第4章 功率放大电路 | 170 | *5.4.4 负反馈放大电路的自激振荡简介 | 210 |
| 4.1 功率放大电路概述 | 170 | *5.4.5 负反馈放大电路的设计 | 211 |
| 4.2 互补功率放大电路 | 172 | *5.5 放大电路中的正反馈 | 214 |
| 4.2.1 双电源乙类互补功率放大电路(OCL电路) | 172 | 本章总结 | 217 |
| 4.2.2 采用复合管组成的准互补功率放大电路 | 176 | 自我检测题 | 218 |
| 4.2.3 双电源甲乙类互补功率放大电路 | 178 | 习题 | 220 |
| | | 第6章 信号的运算和处理 | 224 |
| | | 6.1 集成运放电路应用基础 | 224 |

| | | | | |
|--------------------|-----------------------|-----|----------------------------|-----|
| 6.1.1 | 理想集成运放模型 | 224 | 本章总结 | 306 |
| 6.1.2 | 理想运放工作在线性区的条件及其特点 | 224 | 自我检测题 | 308 |
| 6.1.3 | 理想集成运放工作在线性区的条件及其特点 | 225 | 习题 | 310 |
| 6.2 | 常用基本运算电路 | 226 | 第8章 直流稳压电源 | 317 |
| 6.2.1 | 比例运算电路 | 227 | 8.1 直流稳压电源的组成及各部分的作用 | 317 |
| 6.2.2 | 加、减法运算电路 | 231 | 8.2 小功率整流滤波电路 | 317 |
| 6.2.3 | 积分运算电路和微分运算电路 | 234 | 8.2.1 半波整流电路 | 318 |
| 6.2.4 | 对数和指数运算电路 | 237 | 8.2.2 全波整流电路 | 320 |
| 6.2.5 | 由对数和指数运算电路组成乘法或除法运算电路 | 240 | 8.2.3 桥式整流电路 | 321 |
| 6.3 | 模拟乘法器及其应用 | 242 | 8.2.4 电源滤波电路 | 323 |
| 6.3.1 | 变跨导型模拟乘法器 | 242 | *8.2.5 倍压整流电路 | 328 |
| 6.3.2 | 模拟乘法器在运算电路中的应用 | 245 | 8.2.6 其他形式的滤波电路 | 329 |
| 6.4 | 运算电路设计 | 248 | 8.3 二极管稳压电路 | 331 |
| 6.4.1 | 运算电路的设计原则 | 248 | 8.3.1 二极管稳压电路的组成及稳压原理 | 331 |
| 6.4.2 | 运算电路的设计 | 249 | 8.3.2 稳压电路主要性能参数 | 332 |
| 6.5 | 有源滤波电路 | 250 | 8.3.3 二极管稳压电路设计时电路参数的选择 | 333 |
| 6.5.1 | 滤波电路基础知识 | 250 | 8.4 串联型反馈式稳压电路 | 336 |
| 6.5.2 | 有源低通滤波电路 | 254 | 8.4.1 串联型反馈式稳压电路的工作原理及电路分析 | 336 |
| 6.5.3 | 其他有源滤波电路 | 259 | 8.4.2 串联型反馈式稳压电路设计 | 343 |
| *6.5.4 | 开关电容滤波电路 | 263 | 8.5 集成稳压电路 | 346 |
| 本章总结 | | 265 | 8.5.1 三端集成稳压器分类 | 347 |
| 自我检测题 | | 266 | 8.5.2 三端集成稳压器的组成框图及其功能概述 | 347 |
| 习题 | | 267 | 8.5.3 三端集成稳压器的应用 | 348 |
| 第7章 波形发生电路 | | 274 | *8.6 开关稳压电路 | 350 |
| 7.1 正弦波发生电路 | | 274 | 8.6.1 开关稳压电路分类 | 350 |
| 7.1.1 产生正弦波的条件 | | 274 | 8.6.2 串联型开关稳压电路 | 350 |
| 7.1.2 RC 正弦波振荡电路 | | 277 | 8.6.3 并联型开关稳压电路 | 354 |
| 7.1.3 LC 正弦波振荡电路 | | 280 | 本章总结 | 355 |
| 7.1.4 LC 正弦波振荡电路设计 | | 287 | 自我检测题 | 356 |
| 7.1.5 石英晶体正弦波振荡电路 | | 288 | 习题 | 357 |
| 7.2 非正弦波发生电路 | | 292 | 部分自我检测题和习题答案 | 363 |
| 7.2.1 电压比较器 | | 293 | 参考文献 | 369 |
| 7.2.2 矩形波发生电路 | | 299 | | |
| 7.2.3 三角波发生电路 | | 303 | | |
| 7.2.4 锯齿波发生电路 | | 304 | | |

图 1-1 原子结构示意图



图 1-1 原子结构示意图

第 1 章

常用半导体器件

1.1 半导体基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

自然界中的物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。

物质的导电特性取决于原子结构。导体一般为低价元素，如铜、铁、铝等金属，其原子最外层电子受原子核的束缚力很小，极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。因此，在外电场作用下，这些自由电子产生定向运动（称为漂移运动）形成电流，呈现出较好的导电特性。高价元素（如惰性气体）和高分子物质（如橡胶，塑料等）原子最外层电子受原子核的束缚力很强，不易摆脱原子核的束缚成为自由电子，所以其导电性极差，可作为绝缘材料。半导体材料原子最外层电子既不像导体那样极易摆脱原子核的束缚，成为自由电子，也不像绝缘体那样被原子核紧紧束缚，因此，半导体的导电特性介于两者之间。

半导体是制造电子器件的主要材料，半导体获得广泛应用的主要原因不在于它的导电特性介于导体和绝缘体之间，而在于它具有如下性质。

- 1) 热敏性：导电性能受温度影响很大，利用这一特性可将半导体制成热敏电子元件；
- 2) 光敏性：导电性能受光照射强度的影响很大，利用这一特性可将半导体制成光敏电子元件；
- 3) 掺杂性：通过掺入其他微量元素物质，可以非常显著地提高其导电性能，例如，在纯净的半导体中掺入百万分之一的其他微量的物质（五价的磷或三价的硼），可使其导电性能增强一百万倍；不仅如此，更为重要的是，在纯净的半导体中，通过掺入不同价元素的微量物质（如五价的磷或三价的硼），可改变其导电的类型，正是这一特性，才使得现代电子器件的制造成为可能。

1.1.2 本征半导体共价键结构

纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。电子技术中，常用的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge），它们都是四价元素，原子最外层轨道上有 4 个电子，称为价电子。硅和锗的导电性能只与价电子有关（内层电子被原子核束缚很紧，不参与导电），图 1-1 所示为两种

材料的原子结构简化模型。由于原子整体呈电中性，故图 1-1 中带 +4 的圆圈部分表示带 4 个电子电荷量的正离子(也有文献中将这一正离子称为惯性核或原子实)。

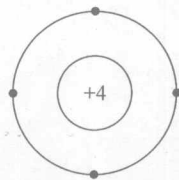


图 1-1 硅和锗原子结构简化模型

由原子理论可知，原子外层为 8 个价电子时最稳定，因此，当把硅或锗材料制成单晶体(本征半导体)时，硅或锗晶体中每个原子都要从相邻四周的四个原子获得另外的四个价电子，以达到稳定状态，这样就使得相邻两个原子有一对价电子成为共有电子，这些共有电子一方面围绕自身的原子核运动，另一方面又出现在相邻原子所属的轨道上。即价电子不仅受到自身原子核的作用，同时还受到相邻原子核的吸引。于是，两个相邻的原子共有一对价电子，组成共价键结构。因此，本征半导体中，每个原子都和相邻的 4 个原子以共价键的形式互相结合起来，其共价键结构平面示意图如图 1-2 所示。

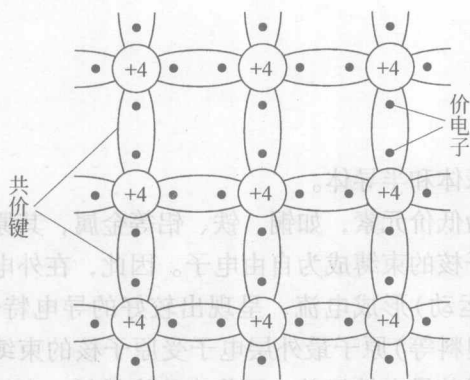


图 1-2 本征半导体共价键结构平面示意图

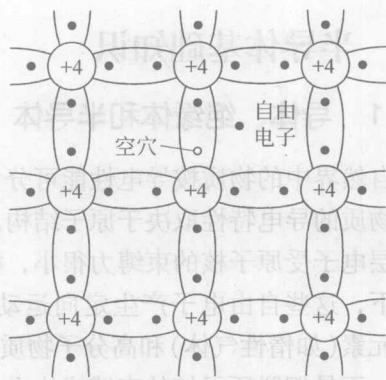


图 1-3 本征半导体中的空穴和自由电子

1.1.3 本征半导体热激发

本征半导体中共价键具有很强的结合力，共价键中的电子称为束缚电子。在热力学温度 $T=0\text{K}$ 和无外界其他因素作用时，价电子全部牢牢地束缚在共价键中，此时，本征半导体相当于绝缘体。

在室温下，只有极少数价电子从热运动中获得足够大的能量才能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。在没有外电场作用时，自由电子在半导体中作无规则的运动，半导体中不会出现“电子”电流。

某原子的一个价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，该原子因失去一个价电子而带正的电子电荷量，并在原来的共价键中留下了一个空位，这种带正电的空位称为“空穴”(为了分析方便，通常将正的电子电荷量看做是空穴所具有的)，本征半导体中这种由于热运动使自由电子与空穴成对“产生”的物理现象称为“热激发”(也称本征激发)，如图 1-3 所示。空穴的出现是半导体导电机构与导体导电机构显著不同的一个重要特征。

由原子能带理论可知，某一共价键中的束缚电子“跳到”另一带有“空穴”的相邻共价键中(成为另一共价键中的束缚电子)填补其空穴所需能量，要比该共价键中的束缚电子“跳出”共价键束缚而成为自由电子所需能量小得多，因此，在室温下，某一共价键中的束缚电