



普通高等教育“十一·五”国家级规划教材



知识点讲解

# 模拟电子电路及技术基础

(第三版)

主 编 孙肖子  
副主编 赵建勋  
参 编 王新怀 朱天桥 顾伟舟



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 模拟电子电路及技术基础

(第三版)

主 编 孙肖子

副主编 赵建勋

参 编 王新怀

顾伟舟



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共十三章, 主要介绍集成运放特性及基本应用、RC 有源滤波器、常用半导体器件原理及特性、晶体管和场效应管放大器、集成运放内部电路、放大器的频率响应、反馈、特殊用途集成运放及其应用、低频功率放大电路、稳压电源等。

本书将纸质教材与在线开放课程相结合, 尝试着向新形态数字化课程的目标努力。本书的一个新特点是在许多章中增加了大作业和综合设计实验题目, 旨在增强解决复杂工程问题的能力。本书更注重系统和应用, 更贴近工程实际。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、电气与自动化工程、测控技术与仪器、生物医学工程、微电子、电子科学与技术等有关专业的本科生或专科生“电子线路基础”、“电子技术基础”等课程的教材或教学参考书, 也可作为广大工程技术人员参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路及技术基础/孙肖子主编. —3 版.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2017. 4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4445 - 5

I. ① 模… II. ① 孙… III. ① 模拟电路—高等学校—教材

IV. ① TN710

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 068800 号

策 划 云立实

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017 年 4 月第 3 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 26

字 数 614 千字

印 数 92001~95000 册

定 价 46.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4445 - 5/TN

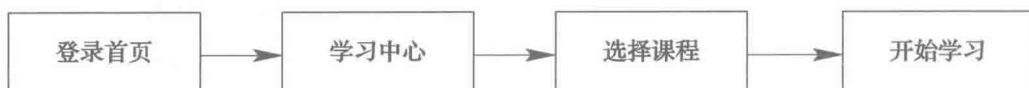
**XDUP 4737003 - 19**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

## 本教材配套的在线课程资源使用说明

本教材配有孙肖子、赵建勋、王新怀等老师主讲的模拟电子技术基础课程知识点讲座视频，发布在西安电子科技大学出版社学习中心网站，请登录后开始课程学习。具体网站登录方法如下：



The screenshot shows the website interface for the course "模拟电子电路及技术基础" (Fundamentals of Analog Electronic Circuits and Technology). The page includes a navigation bar with "分类导航" (Category Navigation), a search bar, and links for "首页" (Home), "网上书城" (Online Bookstore), "互动论坛" (Interactive Forum), "注册" (Register), and "登录" (Login). The main content area features a course introduction, a QR code, and a list of related resources.

**模拟电子电路及技术基础**  
(第三版)

主编 孙肖子  
副主编 赵建勋  
参编 王新怀 张天桥 顾伟丹

课程介绍

模拟电子技术基础是电子类、电气类、控制类、仪表类专业的重要专业基础课。通过学习晶体管、场效应管和集成运放等半导体器件工作原理、特性及应用电路，掌握模拟电子线路的基本知识、基本分析方法和工程计算及应...

查看更多

孙肖子 教授

开始学习 已收藏

课程视频

模拟电子技术基础课程知识点讲座(47)

- 1.模拟电子技术基础——MAP
- 2.放大器指标
- 3.同相比例放大器与反相比例放大器
- 4.运放构成相加器的电路原理、设计及应用

课程教材

模拟电子电路及技术基础(第三版)(孙肖子)

作者:孙肖子  
价格:46元

购买 阅读

出版社网站首页地址 <http://www.xduph.com>

本教材在线课程地址 <http://www.xduph.com:8081/CInfo/1045>

# 前 言

“模拟电子电路及技术基础”课程是电子、电气、信息工程类专业的主干课程，是最重要的学科技术基础课之一。该课程的教学宗旨是“打好基础，学以致用”。一方面该课程要为后续课程的学习打好基础；另一方面该课程的概念性、实践性、工程性特别强，很多内容与工程实际密切相关，“直面应用”是本课程的特点之一。本书以模拟电子技术的重要知识点和知识链为载体，注重加强学科理论基础，培养创新意识、科学思维方法，提高分析问题和解决问题的能力。

“兴趣是最好的老师”、“想象力比知识更重要”，本书在绪论中首先简单介绍了“电子管的发明”、“晶体管的发明”以及“集成电路的发明”等电子技术发展的里程碑，显示人类智慧是无限的，科学技术的发展、发现、创新是永无止境的。

编者结合多年的教学与科研实践，编写本书时力图做到“基础更扎实，内容更实用，视野更开阔，编排更合理”。本书有以下特点：

1. 本书遵循“以产出为标准，以全体学生为中心，以质量持续改进为根本目的，提高学生解决复杂工程问题的能力”的宗旨，充分利用现代“互联网+”技术，将纸质教材与在线开放课程相结合，向新形态数字化课程的目标努力。

2. 本书在加强理论基础的同时，突出实践和应用，内容丰富，学以致用，在许多章中增加了大作业和综合设计实验题，在最后一章中增加了综合设计实验案例，旨在增强解决复杂工程问题的能力。

3. 在第四章清晰地描述了常用半导体器件的特性，加强了器件参数的介绍，特别加强了有关场效应管参数的讨论，增加了 CMOS 的简介以及晶体管和场效应管作为电子开关的应用。

4. 在第一章提前介绍“反馈”的概念与框图，并将“反馈”的概念贯穿全书。在第五章双极型晶体三极管和场效应管放大器基础及第六章集成运算放大器内部电路中，均不回避“负反馈”在稳定工作点、提高输入电阻、提高放大倍数稳定度及提高共模抑制比等方面所发挥的作用。在第二章及第三章运算放大器基本应用和滤波器中，归纳电路结构可以发现其实质是“运放加反馈”。第八章全面回顾和总结负反馈的特性、分类及深反馈条件下增益的估算方法，讨论反馈稳定性及相位补偿的基本概念与原理。在第十一章低频功率放大电路及第十二章电源及电源管理中，仍然大量应用“负反馈”来改善电路性能。可见，“反馈”的概念和应用在模拟电子技术中是非常重要的。

5. 为更好掌握应用，本书仍然将重点前移，将运放基本运用与有源滤波器安排在第二章和第三章，但为了降低教与学的难度，将第二版的第三章电压比较器和弛张振荡器后移，拼入第十章——集成运算放大器的非线性应用中。相应地第二版中的第四章中许多与运放有关的非线性电路也移至第十章，使本书的条理性和系统性更好。

6. 滤波器是最重要的一类模拟电路，本书将有源 RC 滤波器从运放基本应用中独立成章，旨在加强这方面的相关内容。书中对滤波器概念、形式、分类及其特点的介绍更为清

晰,对滤波器的工程设计方法的介绍更加准确,对实际应用更具指导意义。

7. 第五章借助“电路分析基础”的二端口网络模型来介绍放大器模型及放大器主要指标,一开始就提出了三种基本组态电路,并用简化交流小信号模型来计算放大器的主要指标。对直流工作点的分析也以解析法估算为主,适当淡化了图解分析法,只将其作为讨论非线性失真和动态范围较为形象的方法。本章还提出了一种“快速估算法”,看到电路图,就能写出各项指标的结果,而无需画出等效电路。本书在重要分析后都进行讨论、归纳,提炼规律性的结论,对实际应用具有较好的指导意义。

8. 电源是所有电子设备中必备的部件,本书也做了重点介绍。

9. 各学校、各专业可根据教学要求,对书中的章节内容进行取舍。例如,对开设高频电子线路课的专业,书中第十章有关正弦波振荡器的内容就不必讲;又如对非通信电子专业,第九章特殊运放也可舍去,关于滤波器传递函数、频率响应、反馈稳定性等内容只需介绍基本概念即可,而不需要详细展开讲解。

10. 关于大作业也可灵活掌握。大作业的跨度大,可能涉及多章内容,实践证明对提高学生的综合设计能力非常有用,一般一学期只需挑上1~2题让学生做即可。第十三章的设计案例也可不讲,可作为学生完成大作业时的参考。

本书由西安电子科技大学“丝绸之路云课堂”教学团队修编,其中赵建勋教授修编了第四章和第十章,王新怀副教授新编了第九章、第十三章以及各章的大作业和综合设计仿真实验题,朱天桥老师修编了第八章,顾伟舟副教授修编了第十一章,其他各章由孙肖子教授修编。最终由孙肖子教授和赵建勋教授负责整理定稿。

许多老师为本课程和本书的建设付出了很多努力,这里编者要特别感谢两位老师:一位是电子工程学院的张企民老师,张老师长期从事模拟电子技术课程和教材建设,目前虽已退休不参加新教材的编写了,但他留给我们的许多宝贵经验对新教材的编写是非常有帮助的;另一位是空间科学与技术学院的谢楷老师,谢老师是我校年轻的教授和博导之一,他为本课程的改革和新教材的编写提供了许多新的思想与建议,对编者很有启发。

江晓安教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。西安电子科技大学出版社的相关工作人员为本书的出版付出了辛勤劳动。在此,谨对为本书编写和出版提供过帮助的所有人员表示最衷心的感谢!

由于时间和水平所限,书中可能还存在一些不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2016年10月于西安

# 目 录

第一章 绪论	1	2.3.2 反相相加器	24
1.1 “模拟电子电路及技术基础”是怎样一门课	1	2.4 相减器	27
1.2 电子器件与电子电路的发展概况	2	2.4.1 基本相减器电路	27
1.2.1 电子管的发明	2	2.4.2 精密相减器电路——仪用放大器	30
1.2.2 晶体管的发明	3	2.5 引入电容负反馈的基本应用——积分器和微分器	31
1.2.3 集成电路的发明	4	2.5.1 积分器	31
1.3 模拟电路的基本命题及主要内容	4	2.5.2 微分器	34
1.4 放大器模型及主要性能指标	6	2.5.3 积分器和微分器的应用与虚拟实验	34
1.4.1 四种放大器及四种放大倍数的定义	7	2.6 电压—电流(V/I)变换器和电流—电压(I/V)变换器	35
1.4.2 放大器模型及放大器主要指标	7	2.6.1 V/I变换器	35
1.5 模拟电路难点及主要解决方案——负反馈概念的引入	10	2.6.2 I/V变换器	36
1.5.1 模拟电路难点及主要解决方案	10	习题	39
1.5.2 “负反馈”的基本概念及基本框图	10	大作业及综合设计实验——数显温度计设计	44
1.5.3 负反馈的启示	11	第三章 基于集成运放和RC反馈网络的有源滤波器	47
1.6 集成运算放大器的应用	12	3.1 滤波器的概念	47
1.7 模拟电路学习方法建议	12	3.1.1 滤波器的特性	47
第二章 集成运算放大器的基本应用电路	13	3.1.2 理想滤波器的逼近方法	48
2.1 集成运算放大器应用基础	13	3.1.3 二阶滤波器的传递函数	51
2.1.1 集成运算放大器的符号、模型及理想运算放大器条件	13	3.2 一阶有源RC滤波器的电路实现	54
2.1.2 集成运算放大器的电压传输特性	14	3.3 二阶有源RC滤波器的电路实现	56
2.2 引入电阻负反馈的基本应用——同相比例放大器与反相比例放大器	16	3.3.1 二阶压控电压源型(Sallen-key)滤波器的电路实现及工程设计	56
2.2.1 同相比例放大器——同相输入+电阻负反馈	16	3.3.2 二阶无限增益多路反馈(MFB)滤波器的电路实现及工程设计	61
2.2.2 反相比例放大器——反相输入+电阻负反馈	17	3.3.3 二阶带阻滤波器的电路实现及工程设计	63
2.2.3 同相比例放大器与反相比例放大器的比较	19	3.4 多功能有源RC滤波器(状态变量滤波器)	65
2.3 相加器	23	3.4.1 多功能有源RC滤波器(状态变量滤波器)的工作原理	65
2.3.1 同相相加器	23		

3.4.2 集成多功能有源 RC 滤波器 UAF42 .....	66	4.4.4 温度对晶体三极管参数的影响 .....	111
3.5 一阶全通滤波器(移相器)的原理与工程 设计方法 .....	68	4.5 场效应管 .....	112
3.6 开关电容滤波器的基本原理 .....	69	4.5.1 结型场效应管的工作原理、特性及 参数 .....	112
3.6.1 基本开关电容单元及等效电路 .....	70	4.5.2 绝缘栅场效应管的工作原理、特性及 参数 .....	115
3.6.2 开关电容积分器 .....	70	4.5.3 场效应管的主要参数 .....	121
习题 .....	71	4.5.4 CMOS 场效应管 .....	123
大作业及综合设计实验 1——音频有源滤波器 实验 .....	75	4.5.5 双极型晶体三极管与场效应管的 对比 .....	124
大作业及综合设计实验 2——方波的频谱分解 与合成 .....	76	4.6 双极型晶体三极管与场效应管的低频小 信号简化模型——受控源模型 .....	124
大作业及综合设计实验 3——李沙育图形 发生器 .....	78	4.6.1 双极型晶体三极管的低频小信号简化 模型 .....	125
<b>第四章 常用半导体器件原理及特性</b> .....	80	4.6.2 场效应管的低频小信号简化模型 .....	127
4.1 半导体物理基础 .....	80	4.7 双极型晶体三极管与场效应管的开关特性 及其应用 .....	128
4.1.1 半导体与导体、绝缘体的区别 .....	80	4.7.1 双极型晶体三极管开关电路 .....	128
4.1.2 半导体的材料 .....	81	4.7.2 MOS 管开关电路 .....	129
4.1.3 本征半导体 .....	82	4.7.3 取样/保持电路 .....	130
4.1.4 杂质半导体——N 型半导体与 P 型 半导体 .....	84	4.7.4 相敏检波电路 .....	130
4.1.5 半导体中的电流——漂移电流与扩散 电流 .....	86	习题 .....	131
4.2 PN 结 .....	86	大作业及综合设计实验 1——测量 $\beta$ 的方法 及电路 .....	135
4.2.1 PN 结的形成 .....	86	大作业及综合设计实验 2——用于工业远距离 传输的电流变送器设计 .....	136
4.2.2 PN 结的单向导电特性 .....	87	<b>第五章 双极型晶体三极管和场效应管放大器 基础</b> .....	138
4.2.3 PN 结的击穿特性 .....	89	5.1 基本放大器组成原理、三种组态放大器及 偏置电路 .....	138
4.2.4 PN 结的电容特性 .....	89	5.1.1 基本放大器组成原理及三种组态 放大器 .....	138
4.3 晶体二极管 .....	91	5.1.2 放大器的偏置电路 .....	139
4.3.1 晶体二极管的伏安特性及参数 .....	91	5.2 共发射极放大器分析 .....	143
4.3.2 温度对晶体二极管伏安特性和参数的 影响 .....	93	5.2.1 阻容耦合共发射极放大器电路 结构 .....	143
4.3.3 二极管的极限参数 .....	93	5.2.2 直流工作状态分析与计算 .....	144
4.3.4 晶体二极管简化模型 .....	94	5.2.3 共射放大器的交流分析及主要指标 估算 .....	144
4.3.5 晶体二极管的基本应用 .....	95	5.3 共集电极放大器 .....	151
4.3.6 稳压二极管特性及应用 .....	99	5.3.1 直流工作状态分析 .....	151
4.3.7 其他晶体二极管 .....	101	5.3.2 交流指标计算 .....	151
4.4 双极型晶体三极管 .....	105		
4.4.1 双极型晶体三极管的工作原理 .....	105		
4.4.2 双极型晶体三极管的伏安特性及 参数 .....	108		
4.4.3 双极型晶体三极管的极限参数 .....	110		



5.4 共基极放大器 .....	153	6.8.1 正确选用集成运算放大器 .....	214
5.4.1 直流工作状态分析 .....	153	6.8.2 集成运放应用中的注意事项 .....	215
5.4.2 交流指标计算 .....	153	习题 .....	217
5.5 三种组态放大器比较 .....	154	<b>第七章 放大器的频率响应</b> .....	222
5.6 图解分析法及关于非线性失真的 讨论 .....	155	7.1 频率特性与频率失真的概念 .....	222
5.6.1 直流负载线与直流工作点 (Q 点) .....	156	7.1.1 频率特性及参数 .....	222
5.6.2 交流负载线与动态图解分析法 .....	157	7.1.2 频率失真现象 .....	223
5.6.3 非线性失真与输出电压动态 范围 .....	159	7.1.3 不产生线性失真(即频率失真)的 条件 .....	223
5.7 场效应管放大器 .....	160	7.1.4 线性失真与非线性失真 .....	224
5.7.1 偏置电路 .....	160	7.2 晶体管的高频小信号模型及高频 参数 .....	224
5.7.2 共源放大器 .....	161	7.2.1 晶体管的高频小信号混合 $\pi$ 型等效 电路 .....	224
5.7.3 共漏放大器和共栅放大器 .....	163	7.2.2 晶体管的高频参数 .....	225
5.7.4 场效应管放大器与双极型晶体管放大 器的比较 .....	164	7.3 共射放大器的高频响应 .....	226
5.8 放大器的级联 .....	165	7.3.1 共射放大器的高频小信号等效 电路 .....	226
5.8.1 级间耦合方式及组合原则 .....	166	7.3.2 密勒定理以及高频等效电路的单向化 模型 .....	226
5.8.2 多级放大器的性能指标计算 .....	167	7.3.3 管子内部电容引入的频率响应和上限 频率 $f_{H1}$ .....	228
习题 .....	171	7.3.4 负载电容 $C_L$ 引入的上限频率 $\omega_{H2}(f_{H2})$ .....	228
<b>第六章 集成运算放大器内部电路</b> .....	178	7.4 共集放大器及共基放大器的高频 响应 .....	230
6.1 集成运算放大器电路概述 .....	178	7.4.1 共集放大器的高频响应 .....	230
6.2 集成运放电路中的电流源 .....	179	7.4.2 共基放大器的高频响应 .....	231
6.2.1 双极型晶体管组成的电流源 .....	179	7.4.3 三种电路高频响应对比及组合电路在 展宽频带中的应用 .....	232
6.2.2 场效应管组成的电流源 .....	184	7.5 场效应管放大器的高频响应 .....	234
6.3 差分放大电路 .....	185	7.5.1 场效应管的高频小信号等效 电路 .....	234
6.3.1 差分放大器的特征 .....	185	7.5.2 场效应管放大器的高频响应 .....	235
6.3.2 长尾式差分放大电路分析 .....	187	7.6 低频区频率响应 .....	236
6.3.3 带恒流源的差分放大电路 .....	194	7.7 多级放大器的频率响应 .....	238
6.3.4 差分放大电路的传输特性及 应用 .....	196	7.8 建立时间 $t_r$ 与上限频率 $f_H$ 的关系 .....	241
6.3.5 场效应管差分放大器 .....	200	习题 .....	241
6.4 有源负载放大器 .....	202	大作业及综合设计实验——三极管音频电压放 大器电路设计与仿真 .....	244
6.4.1 单管有源负载放大器 .....	202	<b>第八章 反馈</b> .....	245
6.4.2 有源负载差分放大器 .....	204	8.1 反馈的基本概念及基本方程 .....	245
6.5 集成运算放大器的输出电路 .....	206	8.2 反馈放大器的分类 .....	247
6.6 集成运算放大器内部电路举例 .....	208		
6.6.1 BJT 通用运算放大器 F007 .....	228		
6.6.2 C14573 集成运算放大电路 .....	210		
6.7 集成运算放大器的主要技术参数 .....	210		
6.8 实际集成运算放大器选型指南及应用注意 事项 .....	214		

8.2.1	有、无反馈的判断	247	9.3.2	可变增益放大器 AD8367	286
8.2.2	正反馈与负反馈的判断	247	习题		288
8.2.3	电压反馈与电流反馈	248	大作业及综合设计实验 1——简易心电图仪设计		288
8.2.4	串联反馈与并联反馈	248	大作业及综合设计实验 2——宽带可控增益放大器		290
8.2.5	直流反馈与交流反馈	250	<b>第十章 集成运算放大器的非线性应用</b>		291
8.3	负反馈对放大器性能的影响	251	10.1	对数、反对数运算和乘除法运算	291
8.3.1	负反馈使放大倍数稳定度提高	251	10.2	精密二极管电路	293
8.3.2	负反馈使放大器通频带展宽及线性失真减小	252	10.2.1	精密二极管整流电路	293
8.3.3	负反馈使非线性失真减小及输入动态范围展宽	254	10.2.2	峰值检波电路	294
8.3.4	负反馈可以减小放大器内部产生的噪声与干扰的影响	255	10.3	电压比较器	295
8.3.5	电压反馈和电流反馈对输出电阻的影响	256	10.3.1	简单电压比较器	295
8.3.6	串联负反馈和并联负反馈对放大器输入电阻的影响	257	10.3.2	引入正反馈的迟滞比较器	298
8.4	反馈放大器的分析和近似计算	258	10.4	方波、三角波产生器——弛张振荡器	302
8.4.1	并联电压负反馈放大器	258	10.4.1	单运放弛张振荡器	302
8.4.2	串联电压负反馈放大器	259	10.4.2	双运放弛张振荡器	304
8.4.3	串联电流负反馈放大器	261	10.5	正弦波振荡器	306
8.4.4	并联电流负反馈放大器	262	10.5.1	产生正弦波振荡的条件	306
8.4.5	复反馈放大器	263	10.5.2	文氏桥正弦波振荡器	306
8.5	反馈放大器稳定性讨论	265	10.5.3	LC 正弦波振荡器	308
8.5.1	负反馈放大器稳定工作的条件	265	习题		315
8.5.2	利用开环增益的波特图来判别放大器的稳定性	266	大作业及综合设计实验 1——函数发生器电路设计		323
8.5.3	常用的消振方法——相位补偿法	268	大作业及综合设计实验 2——雾霾检测器设计		324
习题		271	<b>第十一章 低频功率放大电路</b>		327
<b>第九章 特殊用途的集成运算放大器及其应用</b>		278	11.1	功率放大电路的一般问题	327
9.1	高速集成运算放大器	278	11.1.1	特点和要求	327
9.1.1	高速电流反馈型集成运算放大器	278	11.1.2	功率放大电路的工作状态	328
9.1.2	高速电压反馈型集成运算放大器	281	11.1.3	提高功率放大电路效率的方法	330
9.1.3	宽带、高速集成运算放大器举例	281	11.2	互补对称功率放大电路	330
9.2	集成仪表放大器	283	11.2.1	B类互补对称功率放大电路	330
9.3	增益可控集成运算放大器	285	11.2.2	AB类互补对称功率放大电路	334
9.3.1	电压控制增益放大器 VCA820/VCA822/VCA824	285	11.2.3	AB类单电源互补对称功率放大电路	335
			11.2.4	复合管及准互补 B类功率放大电路 (OCL 电路)	337
			11.3	D类功率放大电路	339
			11.4	集成功率放大电路	341
			11.4.1	通用型集成功率放大器 LM386	341

11.4.2 桥式功率放大器 .....	342	12.5.2 开关变换器的基本拓扑结构 .....	363
11.5 功率器件 .....	343	12.6 基准电压源 .....	366
11.5.1 双极型大功率晶体管(BJT) .....	343	习题 .....	367
11.5.2 功率 MOS 器件 .....	345	大作业及综合设计实验——开关稳压	
11.5.3 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) .....	346	电源 .....	370
11.5.4 功率管的保护 .....	347	<b>第十三章 模拟电路系统设计及实验案例</b> ...	371
习题 .....	347	13.1 “波形产生、分解和合成”的综合设计、	
大作业及综合设计实验——MP3 功率放大器		仿真及实验 .....	371
制作 .....	350	13.1.1 命题内容 .....	371
<b>第十二章 电源及电源管理</b> .....	352	13.1.2 命题论证 .....	372
12.1 整流及滤波电路 .....	352	13.1.3 理论设计与仿真 .....	373
12.1.1 整流电路 .....	352	13.1.4 总电路图 .....	382
12.1.2 滤波电路 .....	353	13.1.5 硬件装配与调试 .....	383
12.2 线性稳压电源 .....	354	13.2 自动增益控制电路设计 .....	384
12.2.1 稳压电源的主要指标 .....	354	13.2.1 题目要求 .....	384
12.2.2 串联型线性稳压电源 .....	355	13.2.2 设计与实现 .....	384
12.3 低压差线性稳压电路(LDO) .....	357	<b>附录一 部分习题答案</b> .....	393
12.4 集成线性稳压器 .....	357	<b>附录二 专用名词汉英对照</b> .....	398
12.5 开关型稳压电源 .....	360	<b>参考文献</b> .....	403
12.5.1 开关电源的原理和基本组成 .....	361		

# 第一章

## 绪 论

本章主要介绍模拟电子电路的特点及其主要应用领域、电子器件的发展概要及模拟电子电路的核心部件——放大器的主要指标参数。本章还引入了一个贯穿全书的重要概念即“负反馈”的基本概念，并提出了关于模拟电子电路学习方法的若干建议。通过对本章内容的学习，可了解本书内容的基本脉络。

### 1.1 “模拟电子电路及技术基础”是怎样一门课

“模拟电子电路及技术基础”是电气、电子信息类专业的主干专业基础课之一，是所有涉及硬件设计课程的基础。不仅如此，它还是一门直面实际工程应用、与工业界有着密切联系的重要课程。

“信号”是“信息”的载体。“信号”有非电物理量信号与电信号之分，如光、温度、压力、流量、位移、速度、加速度等属非电物理量信号，而电信号一般指的是随时间变化的电流或电压，也包括电容器的电荷、线圈的磁通以及空间的电磁波等。非电物理量信号可借助“传感器”转换为电信号，以便于进一步加工、处理和传输。

电信号可分为模拟信号和数字信号。所谓模拟信号，是指在时间和数值(幅度)上都是连续变化的信号，如图 1.1.1 所示。

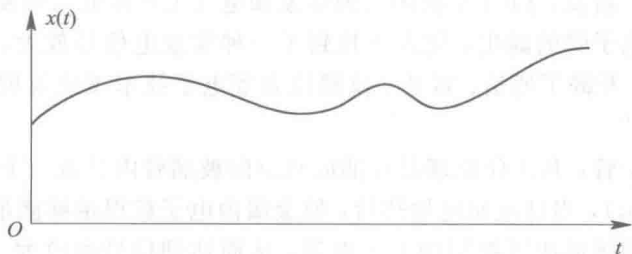


图 1.1.1 模拟信号

如图 1.1.2 所示，大部分电子设备都是从物理世界获取信息，进行处理，再将信息返回物理世界。真实的物理世界的本质是模拟的，模拟电路是电子设备与真实物理世界交互的重要桥梁。

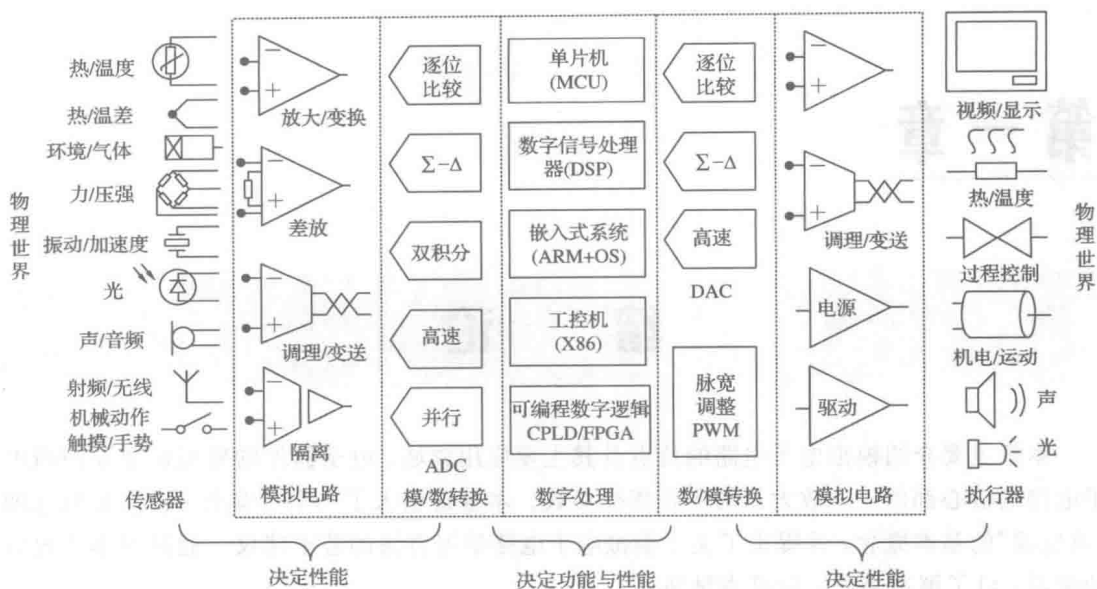


图 1.1.2 一般电子系统信号处理的组成框图

“模拟电子电路与技术基础”就是一门研究模拟信号处理，以及模拟电子电路性能、设计和应用的课程。其内容包括两部分，即电子器件及由电子器件组成的电子电路。

## 1.2 电子器件与电子电路的发展概况

在“电路分析基础”课程中，曾经介绍过耗能元件电阻( $R$ )和储能元件电容( $C$ )、电感( $L$ )，以及受控源模型等，人们一直在寻找具有能量转换和功率放大功能的新器件新元件，即真实的、可用于工程实际的受控源。新器件的出现，大大地推动了电子技术的发展。

### 1.2.1 电子管的发明

受“爱迪生效应”启发，1904年英国物理学家和电气工程师弗莱明发明了电子管，并获得了发明专利权。电子管的诞生，使人类找到了一种实现电信号放大、产生、变换、控制与处理的核心器件，开辟了通信、雷达、仪器仪表等电子技术飞速发展的道路，标志着人类迈进了“电子时代”。

电子管又名真空管，其工作原理是在抽成真空的玻璃管内放置一个灯丝和若干个金属电极(如图 1.2.1 所示)，当灯丝通电加热后，使金属内电子获得足够能量而发射出来，并在金属电极电压的作用下形成可控制的电子电流，从而达到信号的放大、产生、控制、处理和加工的目的。在一定的历史阶段，电子管的应用大大推动了人类科学技术的发展。然而，电子管存在许多难以克服的缺点：体积大、功耗大、发热严重、寿命短、电源利用率低、结构脆弱、可靠性差、需要高电压电源等。世界上第一台由电子管构成的计算机用了 1.8 万只电子管，占地 170 平方米，重 30 吨，耗电 150 kW。

由于电子管存在上述问题，促使人们继续探索和寻找新理论、新材料与新器件。



图 1.2.1 电子管结构示意图和实物照片

### 1.2.2 晶体管的发明

20 世纪中期，人们对电子器件研究的兴趣由真空环境转向物体内部。当时的美国贝尔实验室总裁默文凯利从 30 年代起就致力于寻找新材料、新原理工作的电子放大器件，二战后他果断地决定加强半导体的基础研究，以开拓电子技术的新领域。由贝尔实验室理论物理学家威廉·肖克利(1910—1989 年)、约翰·巴丁(1908—1991 年)和实验物理学家沃尔特·布拉顿(1902—1987 年)三人组成的研究小组于 1947 年 12 月发明了具有放大作用的点触式晶体三极管，1950 年又宣布成功研制了基于 PN 结的结型晶体管。晶体管是 20 世纪中期最伟大的发明，它标志着“固体电子技术时代”的到来。基于此项发明，肖克利、巴丁、布拉顿三人获得了 1956 年的诺贝尔物理学奖。图 1.2.2 是晶体管的发明者与点触式晶体管实验装置的照片。



图 1.2.2 晶体管发明者与点触式晶体管实验装置

一些现代晶体管器件如图 1.2.3 所示。晶体管的寿命比电子管长几百倍乃至几千倍，具有体积小、耗能小、工作电压低、可用电池供电、不需预热、抗震、可靠性高等优点。晶体管的出现和广泛应用改变了世界，此后除某些显像管、示波管和高频大功率无线发射设备仍部分沿用电子管外，电子管已基本被淘汰出局，从而逐渐退出了历史舞台。

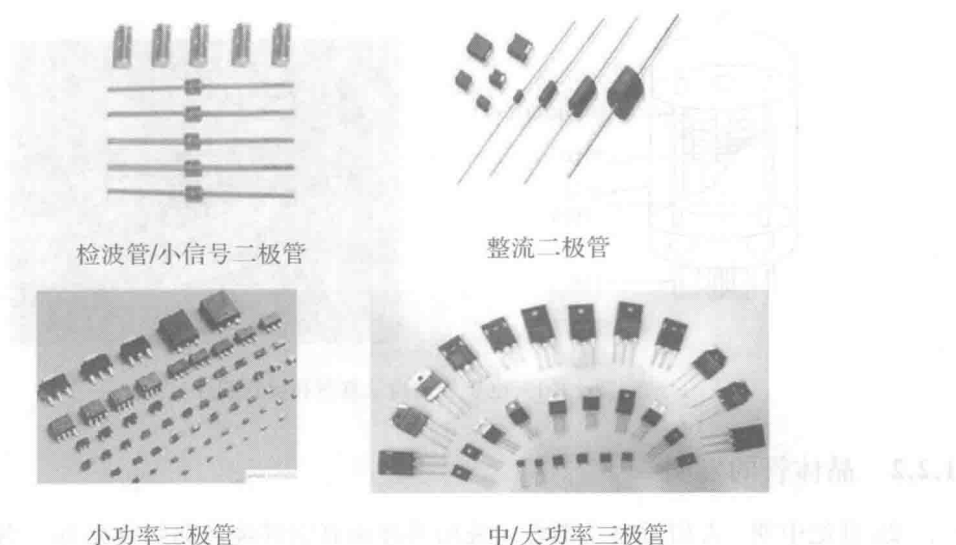


图 1.2.3 部分半导体晶体二极管及晶体三极管外形图

### 1.2.3 集成电路的发明

晶体管的诞生大大推动了电子技术的发展,但是对于复杂的电子设备,仍需大量的导线和焊接点将众多晶体管、电阻、电容连接起来,设备还是过于庞大和沉重,于是人们继续探讨电子设备微型化之路。1952年英国皇家雷达研究所提出“集成电路”的概念,1958年9月12日美国德州仪器公司年轻的工程师杰克·基尔比(Jack S. Kilby)发明了世界上第一块集成电路——相移振荡器,成功地实现了把电子器件(电阻、电容、晶体管)集成在一块半导体材料上的构想,并获得了集成电路发明专利权。集成电路的发明,不仅大大地推动了现代科学技术和工业的发展,而且改变了人们生活的世界,从此人类迈进了“现代微电子时代”。基尔比因发明集成电路而获得了2000年的诺贝尔物理学奖。

电子管发明到晶体管发明相距43年,而晶体管发明到集成电路发明仅相隔10年。这些伟大的发明改变了世界,也改变了人们的生活。如今集成电路正在朝着超微精细加工、超高速、超高集成度、片上系统 SoC(System on Chip)方向迅速发展, MEMS(硅片上的机电一体化)技术和生物信息技术将成为下一代半导体主流技术新的增长点,而人类探求新的科学技术的脚步将永不停息。

## 1.3 模拟电路的基本命题及主要内容

凡是能够处理、加工模拟信号的电路统称为模拟电路。模拟电路的内容十分丰富,主要包括器件、放大器、滤波器、振荡器、电源及电源管理、调制解调等,如图 1.3.1 所示。在本课程中,将介绍调制解调以前的所有内容。由于放大器是所有模拟电子电路的基础,所以本书将重点介绍放大器的工作原理、分析方法和设计要点。另外,电源是所有电子设备不可或缺的组成部分,故本书也将有所强调。

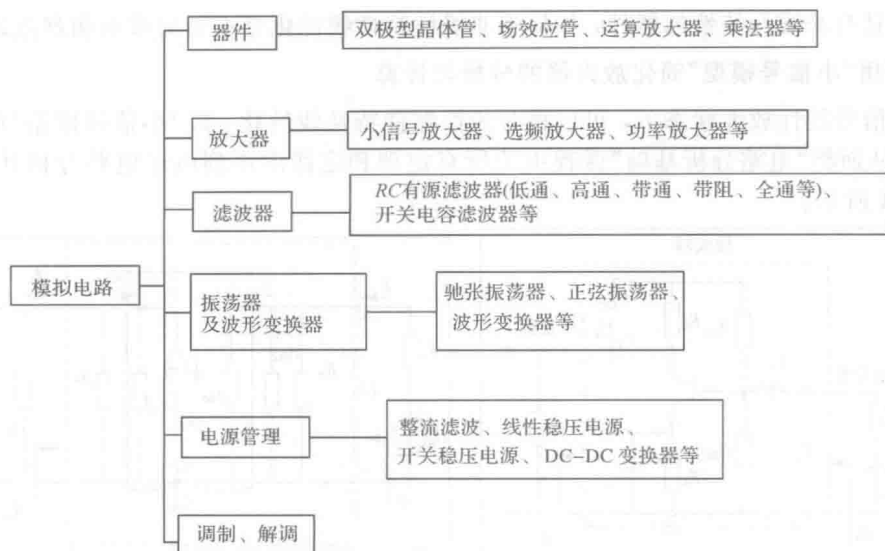


图 1.3.1 模拟电路的基本命题及主要内容

## 1. 为什么需要放大器

本书的重点是放大器，为什么需要放大器？因为众多的模拟信号都十分微弱，例如生物电信号（心电、脑电、肌电等仅为微伏至毫伏量级），许多传感器（压力传感器、温度传感器等）转换得到的电信号也为毫伏量级，天线接收到的无线电信号一般为  $-90$  dBm 左右，这样小的信号转换为在  $50\ \Omega$  电阻上产生的电压也仅为几微伏，而通常数字化或进一步加工处理的信号强度为几百毫伏甚至是伏量级，所以要将信号放大几十、几百、几千或几万倍。放大器就是将信号按比例不失真地放大的电子电路。图 1.3.2 和图 1.3.3 分别表示放大器框图及线性放大特性，图中  $X_i$  为放大器的输入信号， $X_o$  为放大器的输出信号， $A$  为输出信号与输入信号的比例系数，称为放大器的“放大倍数”或放大器的“增益”，即

$$X_o = AX_i \quad (1.3.1)$$

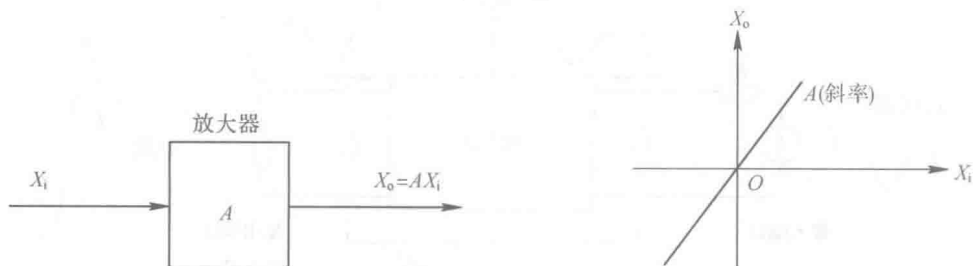


图 1.3.2 放大器示意框图

图 1.3.3 线性放大器特性示意图

## 2. 寻找受控源——放大器件

要实现信号放大，首先要寻找有“放大”功能的元器件，目前最常用的这类元件是由半导体材料制成的晶体管和场效应管。我们知道，能量不可能凭空被“放大”，而只能被“转换”，晶体管和场效应管实质上是一种“受控源”，它通过微弱的电压变化来控制器件电流的变化，将直流电源的能量转化为信号能量，从而达到信号放大的目的。晶体管的控制电压和器件电流关系服从指数特性，场效应管的控制电压和器件电流关系服从平方率特性，



它们都是具有非线性特性的器件，如何将非线性特性线性化是本书的重点和难点之一。

### 3. 利用“小信号模型”简化放大器的分析与计算

在小信号线性放大状态下，可以将非线性器件特性线性化，以“小信号模型”取代非线性器件，从而将“电路分析基础”课程中的所有定理和定律应用到电子电路分析计算之中，如图 1.3.4 所示。

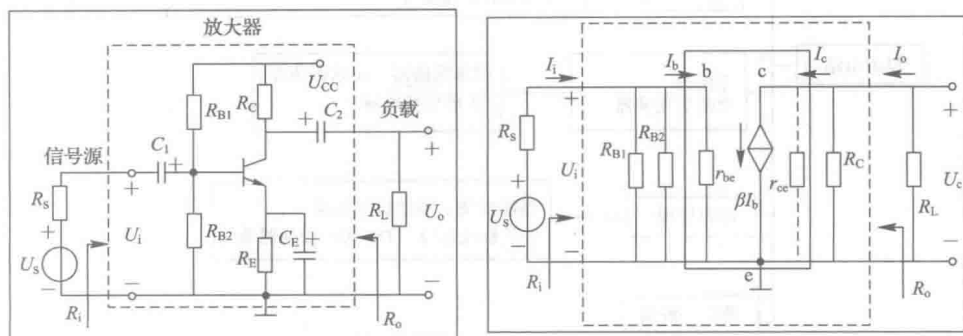


图 1.3.4 用小信号模型来代替晶体管，然后用电路分析方法来求解

## 1.4 放大器模型及主要性能指标

放大器可以等效为一个有源二端口网络，如图 1.4.1 所示。放大器的输入端口连接待放大的“信号源”，其中  $\dot{U}_s$  为信号源电压(复相量)， $R_s$  为信号源内阻， $\dot{U}_i$  和  $\dot{I}_i$  分别为放大器的输入电压和输入电流。放大器的输出端口接相应的负载电阻  $R_L$  ( $Z_L$ )， $\dot{U}_o$  和  $\dot{I}_o$  分别为放大器的输出电压和输出电流。通常输入端口和输出端口有一个公共的电位参考点，称之为“地”。输入端口的  $\dot{U}_i$  或  $\dot{I}_i$  作为网络的“激励”信号，那么输出端口的  $\dot{U}_o$  或  $\dot{I}_o$  则为“响应”信号，信号传输方向通常是从输入到输出。

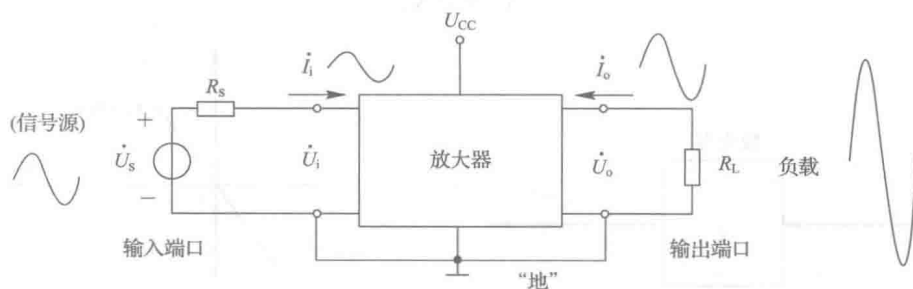


图 1.4.1 放大器等效为有源二端口网络

放大器的基本任务是不失真地放大信号，其基本特征是具有功率放大功能，即功率放大倍数大于 1：

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} > 1 \quad (1.4.1)$$

根据这一点，变压器不是放大器，因为变压器的功率增益小于或等于 1，根据变压比不同，若次级电压增大  $n$  倍，则电流必减小  $n$  倍，加之变压器本身的损耗，次级功率是小于初级的。