



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术基础

王 丽 高燕梅 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“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术基础

王 丽 高燕梅 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍模拟电子电路的基本概念、结构和特点,各种电子电路的分析方法,以及电子电路的计算机辅助分析。全书共 11 章,主要内容包括电子技术课程导论、半导体材料和器件(二极管、三极管、场效应管)及其基本电路、功率放大电路、集成运算放大器及其应用电路、负反馈放大电路、直流稳压电源、模拟电子电路 PSpice 计算机仿真程序分析及应用实例。本书配套电子课件和习题参考答案。

本书可作为高等学校电子信息、通信、计算机等专业相关课程的教材,也可供相关领域的工程技术人员学习和参考。

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

模拟电子技术基础 / 王丽, 高燕梅编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.8

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-17186-4

I. ①模… II. ①王… ②高… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108077 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 王 崧

印 刷: 涿州市京南印刷厂
装 订:

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: 18.5 字数: 530 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 38.00 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, 联系及邮购电话: (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。

前 言

“模拟电子技术”是高等学校电类专业的一门重要专业基础课，是研究各种电子器件性能、电路及其应用的学科。本课程要求学生掌握电子技术的基本概念和基本分析方法，能对电子电路有较深的理解和认识，为电路设计打下坚实的基础。

本书系统地介绍模拟电路的基本概念、结构和特点，以及各种电子电路的分析方法，主要内容包括半导体材料、器件（二极管、三极管、场效应管）及其基本电路、功率放大电路、集成运算放大电路及其应用电路、负反馈放大电路、直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析与设计。

本书重点突出，结构严谨，深入浅出，全书分为3部分，共11章。

第1部分为半导体器件和基本电路（第1~3章）：半导体器件包括二极管、双极型三极管（BJT）、场效应管（FET）。半导体器件是构成各种功能电路的核心部件，一般情况下初学者通常感觉这部分内容比较枯燥且难以理解。因此，在学习半导体器件时，可以与简单电路的学习穿插，消除初学者的厌烦心理。基本电路包括二极管应用电路、基本放大电路。这部分的电路以分立元件电路为主，是构成各种功能电路和集成电路的基础，需要重点掌握和多做练习。

第2部分为放大电路深层次的内容（第4~8章）：这部分的电路增加了复杂性，包含了许多技术性应用，重点是运算放大电路。第4章介绍多级放大电路；第5章介绍改善电路性能的负反馈放大电路；第6章分析集成运算放大电路及其应用电路，其中差分放大电路和恒流源电路是集成电路的基本单元电路；第7章讨论放大电路的输出级即功率放大电路；第8章介绍电子设备都要使用的直流稳压电源。

第3部分为计算机辅助分析与设计（第9~10章）。计算机仿真程序是帮助用户分析和设计电子电路的重要工具，占有很高的地位。计算机分析需要在掌握了电路的基本特性之后进行，可以作为对工程近似计算结果的检验。

本书在编写过程中体现如下特点：

1. 大量例题贯穿全书，强化基本概念、基本原理和基本分析方法。习题形式多样化，全方位培养学生的独立思考能力和创新能力。
2. 加强与相关课程间交叉渗透的内容，注重与“电路分析基础”等先修课程的相互衔接，适当地用相关课程的原理、方法解决本课程的问题。
3. 突出工程性，强调工程近似分析方法。

本书提供配套电子课件和习题参考答案，请登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）免费注册下载。

本书根据作者多年来一线教学的实践经验编写。吉林大学的王丽老师编写了第0~8章，高燕梅老师编写了第9~10章，全书由王丽老师统稿。玄玉波、陈玫玫、高博、王刚、赵彦平等也参与了本书的编写工作。在本书编写过程中我们参考了许多专家的著作和论文，并得到了有关方面和同事的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者的能力和水平有限，对于本书中存在的缺点、疏漏和错误，恳请广大读者批评和指正，以便今后不断改进。

编 者

目 录

第0章 电子技术课程导论	1	1.4.2 稳压电路	30
0.1 电子技术的产生和发展	1	1.4.3 限幅电路	31
0.2 电子技术课程的研究对象	3	本章小结	33
0.2.1 模拟信号和数字信号	3	习题1	34
0.2.2 放大电路	4	第2章 三极管及三极管放大电路	37
0.2.3 放大电路的模型和性能指标	4	2.1 双极型三极管	37
0.3 电子技术课程学习方法	8	2.1.1 三极管的结构	37
0.3.1 课程特点	8	2.1.2 三极管放大模式下的工作原理	38
0.3.2 学习方法	9	2.1.3 三极管伏安特性曲线	42
0.4 计算机辅助分析和设计	9	2.1.4 三极管小信号模型	46
本章小结	10	2.2 放大电路的组成及其工作原理	49
习题0	10	2.2.1 放大电路的组成	49
第1章 二极管及二极管电路	12	2.2.2 放大电路的工作原理	50
1.1 半导体材料及特性	12	2.3 放大电路图解分析法	50
1.1.1 半导体材料	12	2.3.1 图解法确定静态工作点	51
1.1.2 本征半导体	13	2.3.2 图解法分析放大状态	51
1.1.3 杂质半导体	14	2.3.3 图解法分析电路性能	54
1.1.4 漂移电流和扩散电流	16	2.4 放大电路的基本分析方法	55
1.2 PN结的形成及特性	16	2.4.1 放大电路工程近似分析法	55
1.2.1 PN结的形成	16	2.4.2 放大电路小信号等效电路分析法	56
1.2.2 PN结正向特性	18	2.5 放大电路静态工作点的稳定	58
1.2.3 PN结反向特性	18	2.5.1 静态工作点稳定性分析	59
1.2.4 PN结的伏安特性	19	2.5.2 分压式电流负反馈偏置电路	59
1.2.5 PN结的击穿特性	19	2.6 三种基本放大电路	62
1.2.6 PN结的电容效应	21	2.6.1 含射极电阻的共射放大电路	62
1.3 二极管及其基本电路	22	2.6.2 共集电极放大电路(射极跟随器)	63
1.3.1 二极管的结构及特性	22	2.6.3 共基放大电路	65
1.3.2 二极管的主要参数	23		
1.3.3 二极管等效模型	25		
1.3.4 二极管电路分析方法	27		
1.4 二极管应用电路	29		
1.4.1 整流电路	29		

2.6.4 三种基本放大电路总结 与比较	67	频率的计算	112
2.7 放大电路的频率响应	68	4.4 宽频带放大电路	113
2.7.1 频率响应与频率失真 的概念	68	4.4.1 共射-共基组合电路	113
2.7.2 频率响应图示分析法 ——波特图 (Bode)	70	4.4.2 共集-共射组合电路	114
2.7.3 三极管高频等效模型	72	4.4.3 集成宽带放大电路 CA3040	114
2.7.4 共射放大电路高频响应	75	本章小结	115
本章小结	79	习题 4	115
习题 2	80	第 5 章 负反馈放大电路	118
第 3 章 场效应管及其放大电路	85	本章学习要点	118
3.1 MOS 场效应管	85	5.1 反馈的基本概念	118
3.1.1 N 沟道增强型 MOS 场效应管的 结构和工作原理	85	5.1.1 反馈放大电路的 基本关系式	118
3.1.2 N 沟道耗尽型 MOSFET	89	5.1.2 反馈放大电路的分类	120
3.2 结型场效应管	91	5.1.3 反馈放大电路类型 判别举例	123
3.2.1 结型场效应管 (JFET) 的结构 和工作原理	91	5.2 负反馈对放大电路性能 的改善	126
3.2.2 伏安特性曲线	93	5.2.1 负反馈提高增益的稳定性	126
3.3 场效应管放大电路	94	5.2.2 负反馈展宽通频带	127
3.3.1 FET 的直流偏置电路及直流 分析	95	5.2.3 减小放大电路的 非线性失真	128
3.3.2 FET 放大电路的小信号 模型分析法	96	5.2.4 负反馈对输入电阻和输出 电阻的调节	129
本章小结	101	5.3 深度负反馈条件下的 近似计算	130
习题 3	101	5.3.1 深度负反馈条件和近似 计算方法	131
第 4 章 多级放大电路	104	5.3.2 计算举例	132
4.1 多级放大电路的组成和 耦合方式	104	5.3.3 虚短、虚断概念的运用	135
4.1.1 多级放大电路的组成	104	本章小结	136
4.1.2 多级放大电路的 耦合方式	104	习题 5	136
4.2 多级放大电路的分析	106	第 6 章 集成运算放大电路及其 应用电路	140
4.2.1 多级放大电路的动态特性	106	本章学习要点	140
4.2.2 组合放大电路	109	6.1 集成电路的特点及 发展概况	140
4.3 多级放大电路的频率响应	111	6.2 集成电路中的电流源电路	141
4.3.1 多级放大电路的通频带	111	6.2.1 镜像电流源	142
4.3.2 上限频率和下限			

6.2.2 比例电流源	144	6.8.2 单限电压比较器	170
6.2.3 微电流源电路	144	6.8.3 迟滞比较器	172
6.2.4 MOS 管镜像电流源电路	145	6.8.4 窗口比较器	174
6.2.5 电流源用做放大电路的 有源负载	146	本章小结	174
6.3 差分式放大电路	147	习题 6	175
6.3.1 电路基本结构	147	第 7 章 功率放大电路	180
6.3.2 差模信号和共模信号	148	7.1 功率放大电路概述	180
6.3.3 差模交流电路及差模 性能特点	149	7.1.1 功率放大电路的特点	180
6.3.4 共模交流电路及共模 性能特点	151	7.1.2 功率放大电路的类型	181
6.3.5 共模抑制比	152	7.2 乙类推挽互补对称功率 放大电路	183
6.3.6 抑制零点漂移的原理	153	7.2.1 双电源互补对称功率 放大电路	183
6.3.7 差模传输特性	155	7.2.2 性能分析计算	184
6.3.8 改进型差分放大电路	155	7.2.3 单电源互补对称电路	187
6.4 集成运算放大电路简介	158	7.3 实用互补对称功率 放大电路	187
6.4.1 集成运算放大电路的组成	158	7.3.1 交越失真	188
6.4.2 F007 集成运放电路分析	159	7.3.2 甲乙类互补对称功率 放大电路	188
6.5 集成运算放大电路的 应用原理	161	7.3.3 准互补对称功率 放大电路	190
6.5.1 集成运放理想化条件	161	7.3.4 带自举电路的功率 放大电路	191
6.5.2 集成运放传输特性	161	7.3.5 功率管保护电路	192
6.5.3 集成运放两类应用	162	7.4 集成功率放大电路	193
6.6 集成运放的基本 应用电路	163	本章小结	194
6.6.1 反相放大电路	163	习题 7	194
6.6.2 同相放大电路	164	第 8 章 直流稳压电源	197
6.6.3 电压跟随器	164	本章学习要点	197
6.7 信号运算电路	164	8.1 直流稳压电源的组成	197
6.7.1 加减运算电路	164	8.2 整流与滤波电路	198
6.7.2 积分运算电路和微分 运算电路	166	8.2.1 半波整流滤波电路	198
6.7.3 对数运算电路和指数 运算电路	167	8.2.2 全波整流滤波电路	199
6.7.4 乘法运算电路和除法 运算电路	168	8.2.3 桥式整流滤波电路	201
6.8 电压比较器	169	8.3 倍压整流电路	202
6.8.1 电压比较器传输特性	169	8.3.1 二倍压整流电路	203
		8.3.2 多倍压整流电路	203
		8.4 滤波电路	203

8.4.1 电感滤波电路	204	9.4.4 PSpice 的收敛问题	255
8.4.2 复式滤波电路	204	9.5 OrCAD 版的 PSpice	256
8.5 稳压电路	205	9.5.1 Capture 环境的电路 基本分析	257
8.5.1 稳压管稳压电路	205	9.5.2 参数分析和测量 性能分析	261
8.5.2 串联型稳压电路	206	本章小结	264
本章小结	210	习题 9	264
习题 8	211	第 10 章 PSpice 在模拟电路中 的应用	266
第 9 章 电子电路 CAD 技术	214	10.1 半导体放大电路的分析	266
本章学习要点	214	10.1.1 二极管电路的分析	266
9.1 电子电路 CAD 概述	214	10.1.2 晶体管放大电路的分析	267
9.1.1 Spice 简介	214	10.1.3 场效应管放大电路 的分析	269
9.1.2 PSpice 的输入方式	215	10.1.4 多级放大电路的分析	271
9.1.3 电源模型	223	10.2 负反馈放大电路和功率 放大电路的分析	272
9.1.4 点命令	227	10.2.1 负反馈放大电路的分析	272
9.2 元器件模型	229	10.2.2 功率放大电路的分析	274
9.2.1 晶体管模型	229	10.3 运算放大电路的分析	276
9.2.2 场效应管模型	232	10.3.1 差分放大电路的分析	276
9.2.3 无源元件模型	234	10.3.2 集成运算放大电路 的分析	277
9.2.4 子电路	236	10.3.3 信号运算电路的分析	278
9.3 模拟电路分析	237	10.3.4 信号产生电路的分析	278
9.3.1 直流分析	237	10.4 直流稳压电源电路的分析	279
9.3.2 交流分析	240	10.4.1 整流滤波电路的分析	279
9.3.3 瞬态分析	242	10.4.2 稳压电路的分析	281
9.3.4 参数分析	244	习题 10	281
9.3.5 蒙特卡罗分析 (Monte-Carlo)	246	附录 A 部分习题答案	285
9.3.6 最坏情况分析 (Worst Case)	248	参考文献	288
9.4 模拟电路分析技巧	249		
9.4.1 电路宏模型的建立方法	249		
9.4.2 电路的优化设计	251		
9.4.3 PSpice 运行中的问题	253		

第 0 章 电子技术课程导论

本章学习要点

- 电子学、电子技术及其发展历程
- 电信号、模拟信号和数字信号的特征
- 放大电路的功能和实质
- 放大电路的模型、分类和主要性能指标
- “模拟电子技术基础”课程的特点及学习方法

本章的目的在于了解电子技术的发展历程，简要介绍电子电路的一些基本概念、术语和课程特点及学习方法。在这一章，将学习信号的概念和最重要的信号处理电路——放大电路的基本知识，我们将看到线性放大电路的模型，这些模型将在以后的章节中用于分析和设计实际放大电路。

希望这一章能够成为先修课程“电路分析基础”和本门课程的桥梁，能够激发读者对电子电路的学习热情。

0.1 电子技术的产生和发展

1. 电子技术

在当今的电子信息时代，以计算机技术、控制技术、通信技术为代表的现代技术正在渗透到我们社会的各个领域，而电子技术正是这些现代技术的基石之一，半导体器件和集成电路是现代技术的支柱。在日常生活中，我们可以通过电话、电视、计算机的不断更新，感受到电子技术的飞速发展。

电子学是研究电子和电子器件特性的物理学科，电子技术是根据电子学的原理，运用电子器件设计和制造某种特定功能的电路以解决实际问题的科学。电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支，信息电子技术包括模拟电子技术和数字电子技术。本书仅介绍模拟电子技术。

2. 电子技术的产生

20 世纪初叶是电子科学发展的黄金时代。1897 年，英国著名物理学家汤姆逊发现了电子的存在。同年，英国伦敦大学电工学教授弗莱明开始认真研究，掌握了电子在真空中的运动规律，并且于 1904 年研制出第一只真空二极管，从而宣告人类第一个电子二极管的诞生，电子二极管的出现被称为电子技术的开端；1906 年，美国发明家德福雷斯特在二极管的两个电极之间增加了一个电极，用来控制电流的大小，从而制造出电子三极管，利用三

极管可以用较小的控制电压获得很大的输出电流或电压，具有放大信号的作用。电子管的出现推动了无线电电子学的蓬勃发展，1925 年，电视机问世；1940 年，雷达在第二次世界大战中诞生；1946 年 2 月 14 日，世界上第一台计算机在美国宾夕法尼亚大学诞生。

3. 电子技术的革命

随着航空工业的发展，特别是雷达、火箭的发明，对电子管又提出了更新、更高的要求，这将促使更新类型电子器件的出现。1945 年，美国著名电子学研究中心贝尔实验室的物理学家开始致力于半导体性质的研究，他们的主攻方向是发现控制半导体中电子流动的方法，以硅、锗这类半导体作为研究对象。1947 年，他们终于制成了世界上第一个晶体三极管。晶体管的发现在电子学发展史上具有划时代的意义，给电子技术带来了革命性变化，它开创了电子学的新纪元，并促进了许多新兴科学的发展。晶体管的出现使电子设备体积缩小，耗电减少，可靠性提高。由于晶体管可大规模工业化生产，售价便宜，使得电子设备成本也大幅度降低。

晶体管的发明是 20 世纪物理学发展史上的重要事件。半个多世纪以来，以晶体管的发明为契机，开创了微电子时代，并导致信息革命的出现，极大地改变了人们的生产、生活方式，给社会生产力带来了巨大而深刻的变化。

4. 集成电路的诞生

电子器件的这些变革，仍然满足不了电子工业迅速发展的需求，对导弹、火箭、人造卫星和宇宙飞船来说，迫切需要轻便、小巧、可靠的电子设备，晶体管已达不到这个要求。1952 年，美国雷达研究所的科学家达默在一次电子元件会议上提出了集成电路的构想：把电子电路所需要的整流、放大、绝缘、导电等功能元件，全部制作在一块半导体晶片上，一小块晶片就变成一个完整的电路，组成电路的各种元件——晶体管、电阻、电容及引线集成为一个不可分割的密集整体，从外观上已不能分辨哪个是晶体管，哪个是电容器，哪个是电阻。传统电路中功能各异的分立元件界限消除了，这样一来，电子电路的体积就大大缩小，可靠性明显提高。

1956 年，美国材料专家富勒和赖斯发明了半导体生产的扩散工艺，为研制集成电路提供了具体的工艺技术。1958 年，美国德州仪器公司的工程师基尔比，提出了用一块半导体硅晶片制作一个完整功能电路的新方案，他在研制微型组件的晶体管中频放大器时，用一块硅晶制成了包括电阻、电容在内的实验电路，且实验结果非常令人满意。到 1958 年年底，他们已经解决了半导体阻容元件和电路制作中的许多具体工艺问题，确定了集成电路的标准封装尺寸，为大规模工业化生产做好了各项准备。1959 年，美国仙童公司的诺伊斯研究出一种二氧化硅的扩散技术和 PN 结的隔离技术，从而完成了集成电路制作的全部工艺。

5. 集成电路的发展

在单块晶片上能集成 1000 个以上门电路的集成电路称为大规模集成电路，而把能在单块芯片上集成 10000 个门电路的集成电路称为超大规模集成电路。随着制作工艺的进步和新技术的应用，人们把一个电子系统所包含的所有晶体管和其他电子元件全部制作在一块晶片上，从而大大缩小了体积并提高了可靠性。1969 年，出现了第一块大规模集成电路，之后随着大直径硅单晶材料性能的提高和新隔离技术的应用，特别是光刻工艺精度的不断

提高,使制作在晶片上的电子元件的几何尺寸越来越小,于是在20世纪70年代中期,超大规模集成电路问世了,进入20世纪90年代,集成电路的集成度已在每片 10^9 以上。

集成电路的出现,开拓了电子器件微型化的道路;而大规模集成电路、超大规模集成电路的出现,打破了电子元件和电子线路之间存在着的传统界限,使电子技术领域实现了真正的变革。表0.1列出了集成电路发展的各个阶段。

表0.1 集成电路发展阶段

年 代	集成电路集成度	每片元件数量
20世纪50年代	分立元件电路	1
20世纪60年代	小规模集成(SSI)电路	10^2
20世纪60年代	中规模集成(MSI)电路	$10^2 \sim 10^3$
20世纪60年代	大规模集成(LSI)电路	$10^3 \sim 10^4$
20世纪70年代	超大规模集成(VLSI)电路	$10^4 \sim 10^9$
20世纪90年代	极大规模集成(ULSI)电路	10^9 以上

0.2 电子技术课程的研究对象

0.2.1 模拟信号和数字信号

1. 电信号

信号是反映自然界各种事物和行为信息的物理量,例如关于天气的信号——温度、气压、风速等,又如自然界的声信号、光线信号,人类的语言、文字、图像、表格等信号。因而信号是信息的表现形式,是记录或传输信息的工具。

为了将各种信号在电子系统中进行处理(放大、传输或控制等),先要将非电信号转换成电信号,即转换成电压 v 或电流 i 。例如,通过温度传感器可将温度信号转换为电信号,用话筒将声音信号转换为电信号,然后再输入到电子系统中进行处理。

传感器转换成的电信号可以用两种形式表示,一种是电压源,另一种是电流源,如图0.1所示。理论上,两种信号源是可以相互转换的,但在实际电子系统中,经常将内阻小的称为电压源,将内阻大的称为电流源。

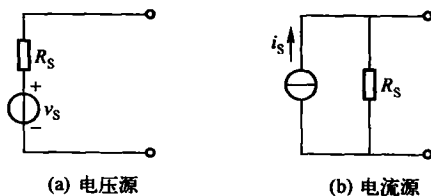


图0.1 两种信号源

2. 模拟信号和数字信号

信号的形式是多种多样的,在电子电路中可以将信号分为模拟信号和数字信号。

(1) 模拟信号

图0.2所示的信号被称为模拟信号,它的属性为信号的变化在时间和数值上均具有连续性,即对任意时间值 t 均有确定的函数值与之对应。我们周围世界的大量信号都是模拟信号,即大多数物理量所转换成的电信号均为模拟信号。处理模拟信号的电子电路称为模拟电路,这本书就是用来学习模拟电路的。

(2) 数字信号

与模拟信号不同, 数字信号的变化在时间和数值上均具有离散性, 也就是说, 它们的变化在时间上是不连续的, 总是发生在一系列离散的瞬间, 同时, 它们的数值大小是一个最小量值的整倍数, 如图 0.3 所示。处理数字信号的电子电路称为数字电路。

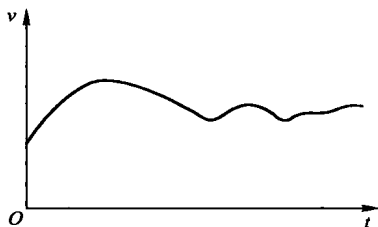


图 0.2 模拟信号

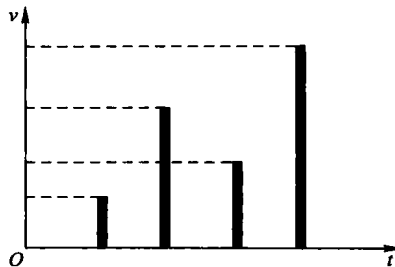


图 0.3 数字信号

0.2.2 放大电路

由于传感器输出的信号是微弱的, 非电信号转换成电信号后, 首先都要进行信号的放大, 然后再做进一步的处理。可见, 信号放大是最基本的模拟信号处理功能, 它是通过放大电路实现的。顺便指出, 放大电路也是构成各种其他功能模拟电路的基本单元电路, 所以放大电路尤为重要。

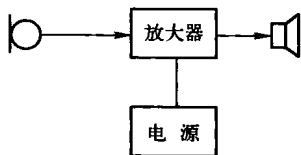


图 0.4 扩音机系统框图

下面以扩音机系统为例说明放大电路的作用。

图 0.4 是扩音机系统框图。来自信号源的时变信号通常是很微弱的, 必须放大后才能使用。

当人们对着话筒讲话时, 话筒将声音信号变为微弱的电信号, 这种微弱的电信号输入到放大器中, 经放大器放大成为较大的电信号输出给扬声器, 扬声器把这个较大的电信号转换成声音, 结果扬声器发出的声音就比人的讲话声大得多。由此可以看出, 声音的增大完全是由于放大器将微弱的电信号转换成较大的电信号的结果, 这就是放大器的放大作用。还须指出, 我们希望放大后的声音最大可能地真实反映讲话人的声调, 这就要求输出信号与输入信号呈线性关系, 即希望放大器的传输特性是线性的, 也就是说, 为保证信号的不失真放大, 要求放大器必须是线性放大器。

对于放大器而言, 话筒(传感器)转换成的电信号作为放大器输入信号, 扬声器接受放大器输出的电信号, 是放大器的负载。

任何情况下, 能量都是守恒的。放大器将微小的电信号转换成较大的电信号, 增加的能量是由图 0.4 中的直流电源提供的。因此, 放大器放大的实质是能量控制和能量转换, 即在输入信号控制下, 将直流电源的能量转换成输出交流信号的能量。

0.2.3 放大电路的模型和性能指标

1. 放大电路的模型

一般情况下, 放大电路可统一表示为有源四端网络, 如图 0.5 所示。图中 v_s 为信号源电压, R_s 为信号源内阻; v_i 是在 v_s 作用下, 放大电路输入端获得的电压, 称为输入电压;

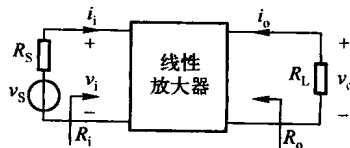


图 0.5 放大电路的表示方法

i_i 为信号源流进放大电路的电流, 称为输入电流; R_L 为放大电路的负载电阻, 是放大电路的驱动对象; v_o 是负载上的电压, 称为输出电压; i_o 是从输出端流出的电流, 称为输出电流。

放大电路的输出和输入的关系为

$$v_o = A v_i \quad (0.1)$$

式中, A 表示放大电路的放大能力, 称为增益 (或放大倍数)。

看图 0.5 左侧的输入回路, 对输入信号源而言, 放大电路的输入端口可视为信号源的负载, 用等效电阻 R_i 表示; 再看图 0.5 右侧的输出回路, 放大电路为负载 R_L 提供信号, 对负载 R_L 而言, 放大电路的输出端口可视为 R_L 的信号源, 用受控电压源表示或受控电流源表示。用上述思想画出的四种不同的放大电路模型, 如图 0.6 所示。

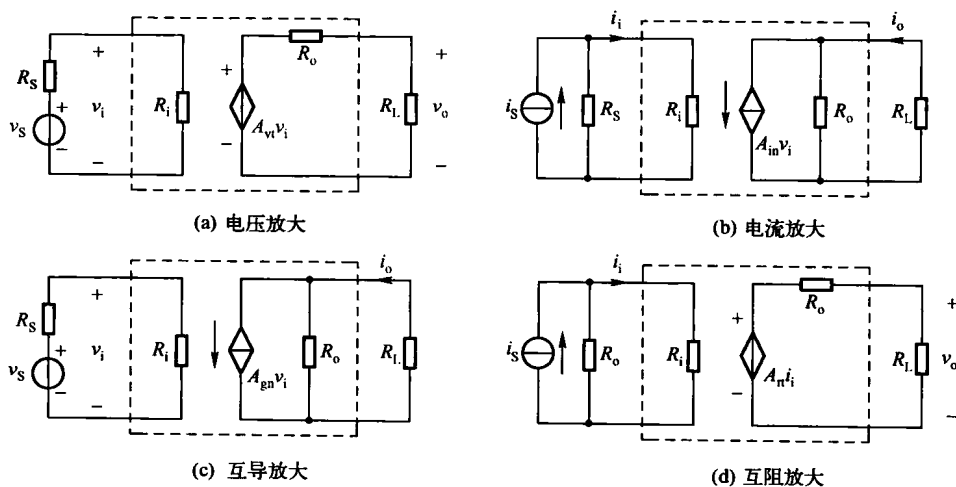


图 0.6 四种类型的放大电路模型

图 0.6 中虚线方框内的电路是放大电路的模型, 放大电路的输入端口用 R_i 等效, R_i 称为放大电路的输入电阻, 放大电路输出端口用受控电压源等效, 或用受控电流源等效, R_o 是受控电压源或受控电流源的内阻, 称为放大电路的输出电阻。根据放大电路输入和输出电量的不同, 放大电路有四种类型。图 0.6(a) 输入用电压源 v_s , 输入电压量, 放大电路输出端用受控电压源等效, 输出电压量, 则此放大电路为电压放大; 图 0.6(b) 输入用电流源 i_s , 输入电流量, 放大电路输出端用受控电流源等效, 输出电流量, 则此放大电路为电流放大; 图 0.6(c) 输入用电压源 v_s , 输入电压量, 放大电路输出端用受控电流源等效, 输出电流量, 则此放大电路为互导放大, 此放大电路在放大的同时, 完成了电压到电流的转换; 图 0.6(d) 输入用电流源 i_s , 输入电流量, 放大电路输出端用受控电压源等效, 输出电压量, 则此放大电路为互阻放大, 同样, 此放大电路在放大的同时, 完成了电流到电压的转换。

2. 放大电路的主要性能指标

放大电路的性能指标是衡量它的品质和决定其应用范围的标准, 主要有增益、输入电阻、输出电阻、频率响应和失真等几项。

(1) 增益

增益（放大倍数）是直接衡量放大电路放大能力的重要指标，其值为输出量（ v_o 或 i_o ）与输入量（ v_i 或 i_i ）之比。由图 0.6 可知，放大电路的增益有四种形式。

① 图 0.6(a)所示的电压放大能力用电压增益 A_v 表示，定义为输出电压 v_o 与输入电压 v_i 之比，即

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (\text{无量纲}) \quad (0.2)$$

② 图 0.6(b)所示的电流放大能力用电流增益 A_i 表示，定义为输出电流 i_o 与输入电流 i_i 之比，即

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad (\text{无量纲}) \quad (0.3)$$

③ 图 0.6(c)所示的互导放大能力用互导增益 A_g 表示，定义为输出电流 i_o 与输入电压 v_i 之比，即

$$A_g = \frac{i_o}{v_i} \quad \text{西门子 (S)} \quad (0.4)$$

④ 图 0.6(d)所示的互阻放大能力用互阻增益 A_r 表示，定义为输出电压 v_o 与输入电流 i_i 之比，即

$$A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad \text{欧姆 } (\Omega) \quad (0.5)$$

由图 0.6 可知，四种增益可以互相转换，例如，

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_o R_L}{i_i R_i} = -A_i \frac{R_L}{R_i} \quad (0.6)$$

其他几种增益的转换请读者自行推导。

(2) 输入电阻

由图 0.6 可知，放大电路输入电阻 R_i 的大小决定放大电路从信号源吸取信号的大小。对于图 0.6(a)和(c)而言， R_i 越大，则放大电路输入端获得的输入电压 v_i 越大，但是放大电路输入端向信号源吸取的电流 i_i 越小；反之，对于图 0.6(b)和(d)而言， R_i 越小，则放大电路输入端向信号源吸取的输入电流 i_i 越大，但是放大电路输入端获得的电压 v_i 越小。

输入电阻的定量计算，可以根据定义进行，即

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (0.7)$$

(3) 输出电阻

由图 0.6 可知，放大电路输出电阻 R_o 的大小决定了放大电路带负载的能力。所谓放大电路带负载的能力，是指负载变化对增益的影响，负载变化对增益的影响大即带负载能力弱，负载变化对增益的影响小即带负载能力强。

由图 0.6(a)和(d)可知，放大电路输出电压量时，放大电路输出电阻 R_o 越小，带负载能力越强；由图 0.6(b)和(c)可知，放大电路输出电流量时，放大电路输出电阻越大，带负载能力越强。

用戴维南定理或诺顿定理将放大电路的输出端等效为电压源或电流源, 定量计算放大器输出电阻时, 用戴维南定理求等效内阻通常有三种方法, 工程上经常采用外加电源法。图 0.7 是采用外加电源法求放大电路输出电阻的电路, 将放大电路输入端的信号去掉 (电压源短路或电流源开路), 在放大电路的输出端, 将负载开路, 加一个测试电压源 v_t , 相应地产生一测试电流 i_t , 则输出电阻为

$$R_o = \left. \frac{v_t}{i_t} \right|_{v_s=0} \quad (0.8)$$

(4) 频率响应及通频带

放大电路增益与频率的关系称为放大电路的频率响应, 它用于衡量放大电路对不同频率信号的放大能力。放大电路中总含有电抗元件 (放大电路中的电容、电感及半导体器件结电容等), 因而增益与频率有关:

$$A(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi_A(\omega)} \quad (0.9)$$

式中, $A(\omega)$ 和 $\varphi_A(\omega)$ 分别是增益的幅值和相角, 分别称为幅频特性和相频特性。幅频特性和相频特性又统称为放大电路的频率特性。

图 0.8 所示为某放大电路增益 (放大倍数) 与信号频率的关系曲线, 称为频率特性曲线。

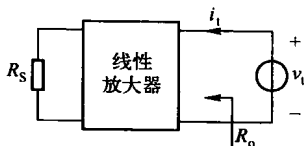


图 0.7 求放大电路输出电阻的电路

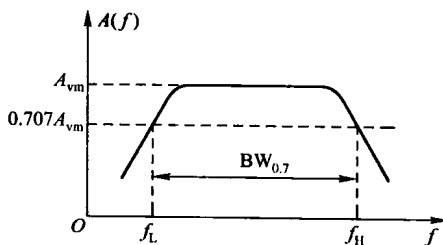


图 0.8 放大器的幅频特性曲线

由图 0.8 可知, 在输入信号频率较低或较高时, 增益 (放大倍数) 的数值会下降, 频率特性曲线可分为三段, 从左到右为低频段、中频段和高频段。

中频段是一段平坦的水平线, 增益与频率无关, 是常数。通常, 作为放大电路性能指标的增益 (放大倍数) 就是指中频增益 (放大倍数)。设 A_{vm} 是放大电路中频段时增益的幅值。

在低频段, 放大电路的增益 (放大倍数) 随信号频率升高而增加, 当增益的数值约等于 0.707 倍 A_{vm} 时, 对应的频率称为下限截止频率 f_L ; 在高频段, 放大电路的增益 (放大倍数) 随信号频率升高而减小, 当增益的数值约等于 0.707 倍 A_{vm} 时, 对应的频率称为上限截止频率 f_H , f 小于 f_L 的部分称为放大电路的低频段, f 大于 f_H 的部分称为高频段, 而 f_L 与 f_H 之间的部分称为中频段, 也称为放大电路的通频带 $BW_{0.7}$

$$BW_{0.7} = f_H - f_L \quad (0.10)$$

$$A(f_H) = A(f_L) = \frac{A_{vm}}{\sqrt{2}} = 0.707 A_{vm} \quad (0.11)$$

(5) 失真

输出信号不能重现输入信号波形的现象称为失真。由产生失真的原因不同,失真可分为线性失真和非线性失真。

线性失真是由线性电抗元件引起的,没有产生新的频率分量。

若输入信号为非正弦波,即输入信号中含有多个频率分量,由于放大电路对各频率分量放大倍数有可能不同,输出信号中各频率分量大小关系和相位关系就会发生变化,输出波形的形状就会发生变化,这种失真称为频率失真,频率失真属于线性失真。

信号的另一种失真是由电子器件的非线性引起的,称为非线性失真。若输入信号为正弦波,由于电子器件的非线性,输出信号将是非正弦波,含有多个频率分量。可见,非线性失真产生了新的频率分量。这是非线性失真和线性失真的本质区别。有关失真的详细内容将在以后的有关章节中再做介绍。

0.3 电子技术课程学习方法

“模拟电子技术”课程是电子技术的基础,是进行“电子电路”的分析和设计的课程。所谓“电子电路”,就是以电子器件为核心元件,具有一定功能的电路。可见,我们在先修课程“电路分析基础”中学习的电路里未包含电子器件,所以它们不是“电子电路”。

在“模拟电子技术”课程中,我们将学习电子器件(二极管、三极管和场效应管)的结构、特性、模型及应用,基本放大电路和集成电路的分析、改进和设计,以及电子电路的应用技术和各种应用电路。

0.3.1 课程特点

本课程是入门性质的重要技术基础课,与传统的理论基础课有较大差别,如与先修课程“数学”、“物理”、“电路分析基础”等就有明显的差别,主要表现在以下几个方面。

(1) 新概念多,知识点多

电子器件(二极管、三极管和场效应管)是有源器件,它们的结构、特性比较复杂,不同于先前大家熟悉的电阻、电容和电感等无源元件。另外,三端器件比大家熟悉的两端器件繁杂许多。

(2) 工程性强

电子器件是复杂的非线性器件,具有复杂的物理特性。必须求解非线性方程,才能对电路做严格的分析,这势必会陷入数学求解的困境,失去了电路性能分析的实际意义。在工程上,一定要抓住主要矛盾,忽略次要因素,将问题简单化,这就是工程近似分析法,即力求用最简单的分析方法,获得具有实用意义的结果。

(3) 实践性和经验性

电子电路是在科学和生产实践中发展起来的,许多理论概念可以通过实践得到深入的理解和认识。在实践中获得的经验也能开阔思路,更好地掌握理论知识,因此,应坚持理论联系实际,重视实验环节。

(4) 入门难

由于本课程的上述三个特点,决定在学习本课程时,就要建立新的思维方式,不能沿

用传统基础课的思维惯性,而要从工程的角度思考和处理问题。所以,学习本课程,对大多数初学者来说,有一个入门的过程。

0.3.2 学习方法

首先明确学习本课程的目标:认识、理解电子电路的工作原理、特性及其局限性,达到设计电路的目的。

1. 明确基本概念、掌握基本电路和基本分析方法

分析一个问题,基本概念是关键,它是我们分析问题思维的起点,因此要明确每一个概念的物理意义。

掌握基本电路的结构特点和性能特点,是认识和理解电子电路的关键。对电子电路要重视它的定性分析,学会对电路的评价,掌握电路的应用场合,提出电路改进的基本途径。

掌握工程上的近似分析方法,工程近似分析要“合理”,应明确研究的是什么问题,电路在什么工作条件下,应考虑哪些参数而忽略哪些参数。

2. 注重与其他课程的联系

电子电路同样也符合电路的基本定律,如欧姆定律、基尔霍夫定律、戴维南定理等。因此,在学习本课程时,要与其他课程建立起联系,如“电路分析基础”、“信号与系统”等课程。

3. 注重知识的总结与梳理

通过知识的总结和梳理,在繁杂的知识点间建立起联系,形成逻辑。找出各电路之间的内在联系,洞悉电路的基本规律。

本书介绍的“低频电子技术”,即电路的工作频率在 300 kHz 以下,主要以放大电路的分析、改进为主线,具体的工程设计步骤做了适当的压缩,有关这一部分的详细内容,请读者查阅相关的资料。

0.4 计算机辅助分析和设计

随着计算机的发展,传统的电子线路设计工作已被计算机辅助分析和设计(Computer Aided Analysis and Design, CAD)所取代,使得繁重的实验室设计工作及印制电路板(PCB)的设计可以在 CAD 软件平台上完成。设计人员可以轻松快捷地完成电路的设计、调试、优化和制作版图等工作。因此,计算机辅助分析和设计是本科学生必须掌握的技能和工具。

本书重点介绍了 PSpice 的电路输入方式、元器件模型、各种分析指令和常用的分析技巧,并给出了 PSpice 在分析各类模拟电路中的应用实例。简要介绍了 Cadence OrCAD 16.0 的操作方法,以利于学生走向企业后迅速地成长为优秀的工程研发人员。

(1) 电路输入方式

PSpice 的电路输入方式有电路原理图输入方式和编程语言描述的电路文本输入方式。两种输入方式都要熟练掌握,并能交互使用。在输入电路原理图并仿真后,可以提取电路的网表文件,生成或编辑电路的文本输入文件。

(2) 元器件模型