



国家电工电子教学基地系列教材

模拟电子技术

◎ 朱定华 吴建新 饶志强 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



内 容 简 介

本书内容包括:半导体器件、放大器分析基础、频率响应、低频功率放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、集成运算放大器的应用、直流电源等。

本书的取材具有先进性、系统性和实用性等特点,力求精选内容,着重基本概念的介绍,深入浅出,图文并茂,便于阅读。另外,每章均有一定量的例题和练习题,书末附有大部分习题参考答案。

本书可作为电子类、通信类、自动化类及其他相近专业本科和专科的模拟电子技术教材,也可作为普通高校本科和专科有关专业的教学参考书,并可供从事电子技术的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/朱定华,吴建新,饶志强编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2005.2

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7-81082-480-5

I. 模… II. ①朱… ②吴… ③饶… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 002449 号

责任编辑:韩 乐 特邀编辑:宋望溪

出 版 者:清 华 大 学 出 版 社 邮 编:100084 电 话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮 编:100044 电 话:010-51686414

印 刷 者:北京东光印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印 张:17.25 字 数:386 千字

版 次:2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-81082-480-5/TN·26

印 数:1~5 000 册 定 价:23.00 元

国家电工电子教学基地系列教材

编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵乐沅 孙雨耕

委 员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 张晓冬 陈后金 邹家驊 郑光信

屈 波 侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞

廖桂生 薛 质 戴瑜兴

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

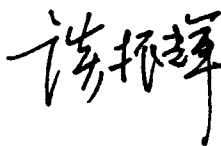
- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《电路分析学习指导及习题精解》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《信号与系统学习指导及习题精解》、《模拟电子技术》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信息处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持，在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助，在此表示衷心的感谢。

北京交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, reading '陈保华' (Chen Baohua), the name of the chief reviewer.

2005 年 1 月

前 言

自 20 世纪 70 年代末以来,电子技术的发展极大地推动了信息化时代的发展。大量的电子系统被应用于测量、控制、通信和计算,电子系统的工作基础是电信号的产生、传送、处理和接收。表征信息的电信号在时间上和幅度上可以是连续的或离散的,从而划分出“模拟电子技术”和“数字电子技术”。由于应用范围的广泛,模拟电子技术涉及的内容也浩如烟海。我们谈到的模拟电子技术的任务是:使学生获得电子技术方面的基本理论、基本知识和掌握基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的创造能力,为以后深入学习电子技术某些相关领域中的内容,以及为电子技术专业中的应用打好基础。

在多年的教学实践中,不少教师的共同感受是:在电子技术基础这门课程上,内容与学时数的矛盾一直很尖锐。现有的某些教材编写水平很高,但篇幅过大,使教与学都感到不便。因此,编写一本内容精练、篇幅不大,而又能较好满足教学基本要求的教材,成为大家的共同心愿。但是,要实现这一愿望又谈何容易。这里既有客观上的实际困难,又有主观上的学术水平和教学经验不足的问题。为此,我们产生了如下的编写指导思想。

(1) 力求少而精,在“精练”上取胜。要精选内容,优选讲法,以符合教学基本要求为准。

(2) 本课程是电子技术方面入门性的技术基础课,要确保基础,决不贪多,坚持“伤其十指,不如断其一指”的原则。根据教学实践的经验,模拟电子技术有一个“入门难”的问题。为此要分散难点,同时在教学方法上调动一切手段来解决这个问题。

(3) 因为是技术基础课,就要理论联系实际,学以致用,使学生建立工程观点,排除实际难点。在教材中要有意识地逐步培养学生的读图能力和分析问题、解决问题的能力,把完成习题看成是一种重要的实践环节。

(4) 既要博采众长,善于学习,又要认真总结自己的教学经验,在教学方法上下功夫,写出特色而不是材料的堆砌。

(5) 本课程的特点是内容广泛,线路众多,但不能就事论事,不能就线路讲线路,否则,将是编写这类教材之大忌。重点在于突出事物的规律,而不单纯追求所讲线路之多少,这样学生有可能达到“举一反三”的效果。

全书内容包括:半导体器件、放大器分析基础、频率响应、低频功率放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、集成运算放大器的应用、直流电源等。本书在编写中坚持突出基本概念,基本电路的工作原理和基本分析方法的思想,考虑到集成电路的工作原理与集成运放内部电路相关内容融为一体,将信号的产生、处理、转换、应用等内容合并为一章,还有考虑到频率响应是一个非常重要的基本概念,将它单独作为一章是为了强调其

重要性。本书利用零极点的方法对模拟电子电路的频率响应进行分析，并与后续相关课程的分析方法保持一致，为深入学习高等电子电路或相关专业课程打下扎实的基础。

最后指出，电子器件的非线性和电子产品性能的分散性，加上一般的电子电路都包含反馈，即使是比较简单的电子电路的分析与设计也是比较复杂和困难的。早年采用“定性分析、定量估算、实验验证”的传统方法很难满足分析与设计的需要，目前国内有不少高等院校采用设计自动化的 EDA (Electronic Design Automation) 技术可以弥补传统方法的不足。在条件许可时，应该另外设置有关的课程。

本书由朱定华、吴建新和饶志强编写。参加本书编写工作的人员还有翟晟、吕建才、程萍、林威、林卫、朱悦、戴颖颖、李志文、梁宗善等。

电子技术的飞速发展对教学内容及方法的改革要求越来越高，而我们的能力和水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，衷心欢迎读者随时反映意见和建议，来信请寄：rao_hua1@163.com, zhu4361@163.com, 诚盼使用本教材的教师、学生及其他读者给予批评指正。

编 者
于武昌南湖
2005 年 1 月

本书符号说明

1. 电压、电流的表示

$\dot{U}$ 、 U 、 u	电压通用符号
$\dot{I}$ 、 I 、 i	电流通用符号
U_m 、 I_m	电压、电流的幅值
U_Q 、 I_Q	电压、电流的静态值
U_{CC} 、 U_{EE}	集电极、发射极直流电源电压
U_{BB}	基极直流电源电压
U_{DD} 、 U_{SS}	漏极和源极直流电源电压
$\dot{U}_s(U_s, u_s)$	信号源电压通用符号
$\dot{I}_s(I_s, i_s)$	信号源电流通用符号
$\dot{U}_i(U_i, u_i, u_{i1})$	输入电压通用符号
$\dot{U}_o(U_o, u_o, u_{o1})$	输出电压通用符号
U_R	基准电压、参考电压、二极管最大反向工作电压
I_R	参考电流、二极管反向电流
U_{id}	差模输入电压信号
U_{ic}	共模输入电压信号
U_{CEQ}	集电极、发射极间静态压降
$\dot{I}_i(I_i, i_i, i_{i1})$	输入电流通用符号
$\dot{I}_o(I_o, i_o, i_{o1})$	输出电流通用符号
I_{BQ}	基极静态电流
I_{CQ}	集电极静态电流
ΔU_{CE}	直流变化量
Δi_c	电流瞬时值变化量

$\dot{I}_f(I_f)$ 、 $\dot{U}_f(U_f)$	反馈电流、电压
I_{REF} 、 U_{REF}	参考电流、电压
i_P 、 u_P	集成运放同相输入电流、电压
i_N 、 u_N	集成运放反相输入电流、电压
U_{OH}	电压比较器的输出高电平
U_{OL}	电压比较器的输出低电平

2. 电阻的表示

R_s	信号源内阻
$r_i(R_i)$	输入电阻
$r_o(R_o)$	输出电阻
R_{if} 、 r_{if}	负反馈放大电路的输入电阻
r_{of}	具有反馈时的输出电阻
r_{id}	差模输入电阻
R_w	电位器(可变电阻器)
R_c	集电极偏置电阻
R_b	基极偏置电阻
R_L	负载电阻

3. 放大倍数、增益的表示

A_u	电压放大倍数 $A_u = U_o/U_i$
A_{us}	考虑信号源内阻时电压放大倍数 $A_{us} = U_o/U_s$, 即源电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uh}	高频电压放大倍数
A_{ul}	低频电压放大倍数
A_{um}	中频电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{od}	开环差模电压放大倍数
A_f	闭环放大倍数
A_{uf}	具有负反馈的电压放大倍数, 即闭环电压放大倍数
A_i	开环电流放大倍数
A_{if}	闭环电流放大倍数

A_r	开环互阻放大倍数
A_{rf}	闭环互阻放大倍数
A_g	开环互导放大倍数
A_{gf}	闭环互导放大倍数
F	反馈系数

4. 功率的表示

P	平均功率(有功功率)
P_O	输出信号功率
$P_{om}、(P_o)_M$	最大输出功率
P_{VT}	管耗功率
$P_{UCC}、P_V$	直流电源供给功率

5. 频率的表示

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
$f_H(f_h)$	放大电路的上限截止频率
$f_L(f_l)$	放大电路的下限截止频率
f_{BW}	通频带(带宽) $f_{BW} = f_H - f_L$
f_α	共基极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_β	共射极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_T	三极管的特征频率
ω_0	谐振角频率、振荡角频率
f_p	滤波电路的截止频率
f_0	振荡频率、中心频率

6. 器件参数的表示

VD	二极管
U_T	温度电压当量 $U_T = kT/q$ 、场效应管的开启电压、电压比较器的阈值电压
I_D	二极管电流,漏极电流
I_S	反向饱和电流,源极电流
I_F	最大整流电流

U_{on}	二极管开启电压
U_B	PN 结击穿电压,基极直流电压
VDZ	稳压二极管
U_Z	稳压管稳定电压值
I_Z	稳压管工作电流
$I_{z,max}$	最大稳定电流
r_z	稳压管的微变电阻
r	器件内部的等效电阻
b	基极
c	集电极
e	发射极
I_{CBO}	发射极开路、集 - 基极间的反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路、集 - 射极间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
r_{be}	共射接法下,基 - 射极间的微变电阻
r_{ce}	共射接法下,集 - 射极间的微变电阻
α	共基接法下,集电极电流的变化量与发射极电流变化量之比
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分数,或 $\bar{\alpha} = I_C/I_E$
β	共射接法下,集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比
$\bar{\beta}$	共射接法下,不考虑穿透电流时 I_C 与 I_B 的比值
g_m	跨导
U_{IO}, I_{IO}	集成运放输入失调电压、失调电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
VT	三极管
S_R	集成运放的转换速率
D	场效应管漏极
G	场效应管栅极
S	场效应管源极、整流电路的脉动系数
U_P	场效应管夹断电压

r_{DS}	场效应管漏源间的等效电阻
I_{DSS}	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的 I_D 值
K_{CMR}	共模抑制比
Q	静态工作点, LC 回路的品质因数
τ	时间常数
η	效率
$\varphi(\theta)$	相角
φ_F	反馈网络的相移
C_μ	混合 π 等效电路中集电结的等效电容
C_π	混合 π 等效电路中发射结的等效电容

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体器件的基础知识	1
1.1.1 半导体材料	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.1.4 PN 结	4
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	8
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	9
1.2.3 半导体二极管的主要电参数	10
1.2.4 半导体二极管的应用	11
1.2.5 特殊二极管	12
1.3 半导体三极管	15
1.3.1 概述	15
1.3.2 半导体三极管的工作原理	16
1.3.3 半导体三极管的基本组态与特性曲线	19
1.3.4 半导体三极管的主要电参数	22
1.4 场效应管	23
1.4.1 结型场效应管	23
1.4.2 绝缘栅场效应管	27
1.4.3 场效应管的主要参数	29
1.4.4 场效应管与晶体管的比较	30
习题	31
第 2 章 放大器分析基础	35
2.1 基本放大器概述	35
2.1.1 放大器的基本概念	35
2.1.2 共射极基本放大电路	37
2.2 放大器的静态分析	39
2.2.1 静态分析中的解析法	39
2.2.2 静态分析中的图解法	39
2.3 放大器的动态分析	41

2.3.1 动态分析中的图解法	42
2.3.2 微变等效电路法	44
2.4 其他基本放大电路	49
2.4.1 射极偏置放大电路	49
2.4.2 共集电极放大电路	51
2.4.3 共基极放大电路	55
2.4.4 三种 BJT 基本放大电路的比较	57
2.5 场效应管放大电路	57
2.5.1 静态工作情况分析	57
2.5.2 动态工作情况分析	59
2.6 多级放大电路	62
2.6.1 多级放大电路的一般问题	62
2.6.2 多级放大电路的分析	64
习题	68
第 3 章 频率响应	76
3.1 频率响应概述	76
3.1.1 研究放大电路频率响应的必要性	76
3.1.2 电容的等效电路	77
3.1.3 复频域分析方法	78
3.1.4 频率响应的基本概念	79
3.1.5 波特图	81
3.2 晶体管的频率参数	83
3.2.1 共发射极电流放大系数 β 的截止频率 f_β	83
3.2.2 特征频率 f_T	83
3.2.3 共基极电流放大系数 α 的截止频率 f_α	84
3.2.4 拓展晶体管混合参数 π 型等效电路	84
3.3 共 e 极放大电路的频率特性	87
3.3.1 中频电压放大倍数 $A_{u_{sm}}$	87
3.3.2 低频电压放大倍数 $A_{u_{sl}}$ 及波特图	88
3.3.3 高频电压放大倍数 $A_{u_{sh}}$ 及波特图	90
3.3.4 完整的频率特性曲线及波特图	92
3.3.5 其他电容对频率特性的影响	93
3.4 多级放大电路的频率特性	94
3.4.1 多级放大电路的通频带 f_{BW}	94
3.4.2 上、下限频率的计算	95
习题	97

第 4 章 低频功率放大电路	101
4.1 低频功率放大电路概述	101
4.1.1 功放电路的分类	101
4.1.2 低频功率放大电路的特点	102
4.1.3 提高功率和效率的途径	102
4.2 甲类功率放大电路	104
4.3 乙类互补对称功率放大电路	105
4.3.1 电路组成和工作原理	105
4.3.2 分析计算	106
4.3.3 交越失真	108
4.4 甲乙类互补对称功率放大电路	109
4.4.1 甲乙类双电源互补对称功放电路	109
4.4.2 甲乙类单电源互补对称功放电路	110
4.5 集成功率放大电路	111
4.5.1 电路组成及工作原理	111
4.5.2 集成功放的应用	112
习题	113
第 5 章 负反馈放大电路	116
5.1 反馈的基本概念及判断方法	116
5.1.1 反馈的基本概念	116
5.1.2 反馈组态及其判定	119
5.1.3 理想反馈的拓扑结构	122
5.2 负反馈对放大电路性能的影响	125
5.2.1 使放大器的放大倍数下降和稳定性提高	125
5.2.2 稳定被取样的输出信号	126
5.2.3 对输入电阻的影响	127
5.2.4 对输出电阻的影响	128
5.2.5 减小非线性失真和抑制干扰、噪声	129
5.2.6 可以展宽通频带	130
5.3 负反馈放大器的指标计算	132
5.4 负反馈放大电路的自激振荡	135
5.4.1 产生自激振荡的原因及条件	135
5.4.2 自激振荡的判断方法	136
5.4.3 常用的消除自激的方法	137
习题	137

第 6 章 集成运算放大器	144
6.1 概述	144
6.2 集成运算放大器的基本单元电路	145
6.2.1 电流源	146
6.2.2 差动放大电路	149
6.3 集成运算放大器的典型电路分析	158
6.3.1 简单的集成运算放大器	158
6.3.2 通用型集成运算放大器	159
6.4 集成运算放大器的性能指标	160
习题	162
第 7 章 集成运算放大器的应用	166
7.1 集成运放的基础	166
7.1.1 理想运放的性能指标	166
7.1.2 理想运放在线性工作区	166
7.1.3 理想运放的非线性工作区	167
7.2 运算电路	168
7.2.1 比例运算电路	168
7.2.2 加减运算电路	172
7.2.3 积分电路和微分电路	176
7.3 处理电路	180
7.3.1 有源滤波电路	180
7.3.2 电压比较器	188
7.4 产生电路	195
7.4.1 非正弦波产生电路	195
7.4.2 正弦波产生电路	203
习题	212
第 8 章 直流电源	221
8.1 直流电源的组成	221
8.2 整流电路	222
8.2.1 单相半波整流电路	222
8.2.2 单相全波整流电路	224
8.2.3 单相桥式整流电路	226
8.3 滤波电路	228
8.3.1 电容滤波电路	228
8.3.2 有源滤波电路	231

8.4 稳压电路	232
8.4.1 稳压电路的主要指标	232
8.4.2 串联型稳压电路	232
8.4.3 集成稳压电路	236
习题	240
部分习题答案	243
参考文献	254