

国家级精品课程教材

Foundamentals of Analog Electronics

模拟电子技术 基本教程

- 简明扼要
- 易于入门
- 重点突出
- 便于自学
- 体例新颖
- 利于创新
- 内容丰富
- 适于少学时

华成英 主编



清华大学出版社

模拟电子技术基本教程

华成英 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是根据近年来电子技术的发展和丰富的教学实践,针对模拟电子技术课程教学基本要求和学习的特点,编写而成的。

主要包括:模拟电子系统简介、集成运算放大电路及其基本应用、半导体二极管及其基本应用电路、晶体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的反馈、模拟信号的运算和滤波、信号的产生和变换、直流电源。本书配有光盘,主要包括 Multisim V7 使用手册和本书大部分例题的仿真。

本书适用于作为高等院校电气信息类各个专业和部分非电类专业的教科书,而且特别适合于学时较少的情况,也可作为工程技术人员的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,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

模拟电子技术基本教程/华成英主编. —北京:清华大学出版社,2006.2

ISBN 7-302-12091-9

I. 模… II. 华… 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 130844 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编: 100084
社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 王一玲

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 22.75 字数: 481 千字

版 次: 2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-12091-9/TN·289

印 数: 1~4000

定 价: 35.00 元(含光盘)



作者简介

华成英 1970年毕业于清华大学电机系，其后留校任教至今，现为自动化系教授，首届国家级精品课程“电子技术基础”课程负责人。三十五年来，主要从事电子技术方面的教学和科学研究工作，此外，还参加了中央广播电视大学和成人高等教育有关电子技术课程的建设工作。近年来主要著作有：

1. 《模拟电子技术基础（第三版）》（普通高等教育“九五”国家教委重点教材，面向21世纪课程教材）高等教育出版社，2001。该教材于2004年获得北京市高等教育优秀教学成果一等奖。

2. 《模拟电子技术基础》、《数字电子技术基础》（教育部高教司组编全国成人高等教育规划教材）高等教育出版社，2001、2002。

3. 《模拟电子技术基础题库》高等教育出版社，2002。是四所院校完成的国家“九五”重点攻关项目成果。

4. 《模拟电子技术基础（第三版）教师手册》高等教育出版社，2002。

5. 《帮你学模拟电子技术基础》高等教育出版社，2004。

6. 《模拟电子技术基础电子教案》高等教育出版社，2005。

责任编辑：王一玲

封面设计：跃海一阳书装工作室

前言



P R E F A C E

为了适应电子科学技术的发展和 21 世纪高等教育人才的培养,我们根据教学基本要求,总结了多年的教学实践,针对模拟电子技术课程学习的特点,为满足学时较少情况下的需求,编写了这本教材。力图在内容体系、编写体例、叙述风格等方面有别于其它教材,做到语言简练,容易自学,具有系统性、科学性、启发性、先进性和适用性。

为达到上述目的,具体做法是:

一、第 1 章阐明模拟信号的特点、模拟电子系统的组成及各种模拟电路在系统中的作用。力图使读者从电子系统的角度了解全书所讲述的模拟电路的功能,从而在面对实际应用时能够正确选择合适的电路。

二、针对模拟电子技术课程入门较难的特点,在第 2 章中,将集成运放作为基本电子器件,简述其外特性,并在讲述其基本应用的同时阐明对模拟信号的放大、运算、比较等基本处理电路,使读者较快深入到实质性问题中去。

三、分散难点,循序渐进。在第 3~5 章中,均各以一类半导体器件及其基本应用电路划分为一章,便于学习和掌握。在有足够的基本知识的铺垫下,第 6、7 章分别讲述集成运算放大电路和放大电路中的反馈。遵循“先基础、后应用”的原则,第 8、9 两章讲述模拟信号的处理、转换和产生等电路,第 10 章讲述直流电源。

四、为了突出教学基本要求,各章的开头均给出了本章的基本概念、基本电路与基本方法,使读者学习目的明确,有利于自我检查。

五、本书配备了足够数量的例题和习题,力图使其在难度上有层次,在题型上多样化,在提问题的角度上具有启发性,有利于读者自学并提高分析问题和解决问题的能力。

六、本书配有光盘,内容为 Multisim V7 的使用说明和本书大多数例题的仿真,

以利于读者更深入地理解电子电路的基本原理,并学习和掌握电子电路先进的分析和设计方法。

本书由华成英主编。全书正文由华成英编写,习题由叶朝辉编写;叶朝辉还完成了光盘的制作。

由于我们的能力和水平所限,书中定有疏漏、欠妥和错误之处。恳请各届读者多加指正。

编 者

2005 年 9 月于清华园

作者电子信箱:

华成英: hchya@tsinghua. edu. cn

叶朝辉: yezhaohui@tsinghua. edu. cn

一、几点原则

1. 电流和电压(以基极电流为例)

$I_{B(AV)}$	表示平均值
$I_B(I_{BQ})$	大写字母、大写下标,表示直流量(或静态电流)
i_B	小写字母、大写下标,表示包含直流量的瞬时总量
I_b	大写字母、小写下标,表示交流有效值
i_b	小写字母、小写下标,表示交流瞬时值
$\dot{A}_{up}$	表示交流复数值
Δi_B	表示瞬时值的变化量

2. 电阻

R	电路中的电阻或等效电阻
r	器件内部的等效电阻

二、基本符号

1. 电流和电压

I, i	电流的通用符号
U, u	电压的通用符号
I_f, U_f	反馈电流、电压
$\dot{I}_i, \dot{U}_i$	正弦交流输入电流、电压
$\dot{I}_o, \dot{U}_o$	正弦交流输出电流、电压
I_Q, U_Q	电流、电压静态值

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_{1c}	共模输入电压
u_{1d}	差模输入电压
$\dot{U}_s$	交流信号源电压
U_T	电压比较器的阈值电压、PN 结电流方程中温度的电压当量
U_{OH}, U_{OL}	电压比较器的输出高电平和输出低电平
V_{BB}, V_{CC}, V_{EE}	晶体管基极回路电源、集电极回路电源和发射极回路电源
V_{GG}, V_{DD}	场效应管栅极回路电源和漏极回路电源

2. 电阻、电导、电容、电感

R	电阻通用符号
G	电导通用符号
C	电容通用符号
L	电感通用符号
R_b, R_c, R_e	晶体管基极、集电极、发射极外接电阻
R_g, R_d, R_s	场效应管栅极、漏极、源极外接电阻
R_i	放大电路的输入电阻
R_o	放大电路的输出电阻
R_{if}, R_{of}	负反馈放大电路的输入电阻和输出电阻
R_L	负载电阻
R_N	集成运放反相输入端外接的等效电阻
R_P	集成运放同相输入端外接的等效电阻
R_s	信号源内阻

3. 放大倍数、增益

A	放大倍数或增益的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
$\dot{A}_u$	电压放大倍数的通用符号, $\dot{A}_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i$
$\dot{A}_{ul}, \dot{A}_{um}, \dot{A}_{uh}$	低频、中频、高频电压放大倍数

$\dot{A}_{up}$	有源滤波电路的通带放大倍数
$\dot{A}_{us}$	考虑信号源内阻时的电压放大倍数的通用符号, $\dot{A}_{us} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$
$\dot{A}_{uu}$	第一个下标为输出量,第二个下标为输入量,电压放大倍数符号, A_{ui} 、 A_{ii} 、 A_{iu} 依此类推
$\dot{F}$	反馈系数通用符号
F_{uu}	第一个下标为输出量,第二个下标为输入量,电压串联负反馈放大电路反馈系数符号, $\dot{F}_{us} = \dot{U}_f / \dot{U}_o$; $\dot{F}_{ui}$ 、 $\dot{F}_{ii}$ 、 $\dot{F}_{iu}$ 依此类推

4. 功率和效率

P	功率通用符号
p	瞬时功率
P_o	输出交流功率
P_{om}	最大输出交流功率
P_T	晶体管耗散功率
P_V	电源消耗的功率

5. 频率

f	频率通用符号
f_{BW}	通频带
f_c	使放大电路增益为 0dB 时的信号频率
f_H	放大电路的上限截止频率
f_L	放大电路的下限截止频率
f_p	滤波电路的截止频率
f_o	电路的振荡频率、中心频率
ω	角频率通用符号

三、器件参数符号

1. 二极管

D	二极管
---	-----

I_F	二极管的最大整流平均电流
I_R	二极管的反向电流
I_S	二极管的反向饱和电流
r_d	二极管导通时的动态电阻
U_{on}	二极管的开启电压
$U_{(BR)}$	二极管的击穿电压

2. 稳压二极管

D_Z	稳压二极管
I_Z, I_{ZM}	稳定电流、最大稳定电流
r_z	稳压管工作在稳压状态下的动态电阻
U_Z	稳定电压

3. 双极型管

T	晶体管
b, c, e	基极、集电极、发射极
$\bar{\beta}, \beta$	晶体管共射直流电流放大系数和共射交流电流放大系数
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
f_β	晶体管共射接法电流放大系数的上限截止频率
f_T	晶体管的特征频率, 即共射接法下使电流放大系数为 1 的频率
g_m	跨导
$h_{11e}, h_{11e}, h_{11e}, h_{11e}$	晶体管 h 参数等效电路的四个参数
I_{CBO}, I_{CEO}	发射极开路时 b-c 间的反向电流、基极开路时 c-e 间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
$r_{bb'}, r_{b'e}, r_{be}$	基区体电阻、发射结动态等效电阻、b-e 间动态电阻
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 c-e 间的击穿电压
U_{CES}	晶体管饱和管压降
U_{on}	晶体管 b-e 间的开启电压

4. 单极型管

T	场效应管
d, g, s	漏极、栅极、源极
C_{ds}, C_{gs}, C_{gd}	D-S 间等效电容、G-S 间等效电容、G-D 间等效电容
g_m	跨导
I_{DO}	增强型 MOS 管 $U_{GS}=2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流
I_{DSS}	耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
r_{ds}	D-S 间的微变等效电阻, 近似计算时可认为其无穷大
$U_{GS(off)}$ 或 U_P	耗尽型场效应管的夹断电压
$U_{GS(th)}$ 或 U_T	增强型场效应管的开启电压

5. 集成运放

A_{od}	开环差模增益
r_{id}	差模输入电阻
f_h	-3dB 带宽
I_{IB}	输入级偏置电流
$I_{IO}, dI_{IO}/dT$	输入失调电流及其温漂
$U_{IO}, dU_{IO}/dT$	输入失调电压及其温漂
K_{CMR}	共模抑制比
SR	转换速率

四、其它符号

K	热力学温度
Q	静态工作点
T	周期、温度
η	效率, 等于输出功率与电源提供的功率之比
τ	时间常数
θ	二极管导通角
ϕ, φ	相位角

目录

CONTENTS

第 1 章 导言	1
1.1 电信号	1
1.1.1 什么是电信号	1
1.1.2 模拟信号和数字信号	2
1.2 电子信息系统	2
1.2.1 模拟电子系统的组成	2
1.2.2 电子信息系统的组成原则	3
1.2.3 电子信息系统中的模拟电路	4
1.3 电子电路的计算机辅助分析和设计软件介绍	4
1.3.1 概述	4
1.3.2 Pspice	5
1.3.3 Multisim V7	5
习题	6
第 2 章 集成运放及其基本应用	7
2.1 放大的概念和放大电路的性能指标	7
2.1.1 放大的概念	7
2.1.2 放大电路的方框图及其性能指标	8
2.2 集成运算放大电路	12
2.2.1 差分放大电路的概念	12
2.2.2 集成运放的符号及其电压传输特性	13
2.2.3 理想集成运放	14
2.2.4 理想运放两个工作区域的特点	15
2.3 理想运放组成的基本运算电路	17

2.3.1	比例运算电路	17
2.3.2	加减运算电路	19
2.3.3	积分运算电路和微分运算电路	24
2.4	理想运放组成的电压比较器	27
2.4.1	电压比较器概述	27
2.4.2	单限比较器	29
2.4.3	滞回比较器	32
习题		37
 第3章 半导体二极管及其基本应用电路		42
3.1	半导体基础知识	42
3.1.1	本征半导体	42
3.1.2	杂质半导体	44
3.1.3	PN结	45
3.2	半导体二极管及其基本应用电路	48
3.2.1	半导体二极管的几种常见结构	48
3.2.2	二极管的伏安特性	49
3.2.3	二极管的主要参数	50
3.2.4	二极管的等效电路	51
3.2.5	基本应用电路	53
3.3	稳压二极管及其基本应用电路	55
3.3.1	稳压二极管	55
3.3.2	稳压管的基本应用电路	57
3.4	发光二极管及其基本应用举例	59
习题		60
 第4章 晶体三极管及其基本放大电路		64
4.1	晶体三极管	64
4.1.1	晶体管的结构及类型	65
4.1.2	晶体管的电流放大作用	65
4.1.3	晶体管的共射特性曲线	67
4.1.4	晶体管的主要参数	69

4.1.5	温度对晶体管特性及参数的影响	71
4.2	放大电路的组成原则	73
4.2.1	基本共射放大电路的工作原理	73
4.2.2	如何组成放大电路	75
4.3	放大电路的基本分析方法	77
4.3.1	放大电路的直流通路和交流通路	77
4.3.2	图解法	80
4.3.3	等效电路法	87
4.4	晶体管放大电路的三种接法	95
4.4.1	静态工作点稳定的共射放大电路	96
4.4.2	基本共集放大电路	99
4.4.3	基本共基放大电路	102
4.4.4	基本放大电路三种接法的性能比较	105
4.5	放大电路的频率响应	106
4.5.1	频率响应概述	106
4.5.2	晶体管的高频等效模型	108
4.5.3	单管共射放大电路的频率响应	112
习题		120
第 5 章	场效应管及其基本放大电路	127
5.1	场效应管	127
5.1.1	结型场效应管	127
5.1.2	绝缘栅型场效应管	131
5.1.3	场效应管的主要参数	137
5.1.4	场效应管与晶体管的比较	139
5.2	场效应管基本放大电路	140
5.2.1	场效应管放大电路静态工作点的设置	140
5.2.2	场效应管的交流等效模型	144
5.2.3	共源放大电路的动态分析	145
5.2.4	共漏放大电路的动态分析	147
5.2.5	单极型晶体管基本放大电路的频率响应	148
习题		150

第 6 章 集成运算放大电路	154
6.1 多级放大电路	154
6.1.1 多级放大电路的耦合方式	154
6.1.2 多级放大电路的动态分析	158
6.1.3 多级放大电路的构成	160
6.1.4 多级放大电路的频率响应	160
6.2 集成运算放大电路简介	164
6.2.1 集成运放的电路特点	164
6.2.2 集成运放的方框图	165
6.3 差分放大电路	166
6.3.1 直接耦合放大电路的零点漂移现象	166
6.3.2 基本差分放大电路	167
6.3.3 具有恒流源的差分放大电路	170
6.3.4 差分放大电路的四种接法	172
6.4 功率放大电路	176
6.4.1 功率放大电路概述	176
6.4.2 OCL 电路	178
6.4.3 其它类型的功率放大电路	184
6.5 集成运放中的电流源	186
6.5.1 基本电流源电路	187
6.5.2 多路电流源	189
6.5.3 改进型电流源	190
6.5.4 以电流源作为有源负载的放大电路	190
6.6 集成运放原理电路	192
6.6.1 分析方法	192
6.6.2 原理电路分析	192
6.7 集成运放的主要技术指标和集成运放的种类	195
6.7.1 集成运放的主要技术指标	195
6.7.2 集成运放的种类	197
6.8 集成运放的使用注意事项	199
6.8.1 集成运放的选用	199
6.8.2 集成运放的静态调试	199

6.8.3 集成运放的保护电路	199
习题	201
第7章 放大电路中的反馈	208
7.1 反馈的基本概念及判断方法	208
7.1.1 反馈的基本概念	208
7.1.2 反馈的判断方法	210
7.1.3 交流负反馈的四种组态	213
7.2 负反馈放大电路的方框图及一般表达式	216
7.2.1 负反馈放大电路的方框图	216
7.2.2 负反馈放大电路的一般表达式	217
7.2.3 四种组态负反馈放大电路放大倍数和反馈系数的量纲	218
7.3 深度负反馈放大电路放大倍数的分析	219
7.3.1 深度负反馈的实质	219
7.3.2 深度负反馈条件下电压放大倍数的分析	220
7.3.3 理想运放组成的负反馈放大电路的分析	225
7.4 负反馈对放大电路性能的影响	226
7.4.1 提高放大倍数的稳定性	227
7.4.2 改变输入电阻和输出电阻	227
7.4.3 展宽频带	229
7.4.4 减小非线性失真	230
7.4.5 引入负反馈的一般原则	231
7.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	232
7.5.1 产生自激振荡的原因及条件	232
7.5.2 负反馈放大电路稳定性的判定	234
7.5.3 消除自激振荡的方法	235
7.6 放大电路中的正反馈	238
7.6.1 自举电路	238
7.6.2 在电压-电流转换电路中的应用	240
习题	241