



普通高等教育“十五”国家级规划教材

模拟电子技术基础

西安交通大学电子学教研组 编

杨拴科 主编

高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

模拟电子技术基础

西安交通大学电子学教研组
杨拴科 马积勋 赵进全 徐正红 编
杨拴科 主编

高等教育出版社

内容简介

本书是根据西安交通大学电子学教研组多年教学实践,参照原国家教委 1995 年颁发的“高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求”(第一部分),结合新的课程体系和教学内容改革的需要而编写的。本书内容包括:绪言、半导体二极管及其应用、晶体管及放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运算放大器、反馈和负反馈放大电路、集成运放组成的运算电路、信号检测与处理电路、信号发生器、功率放大电路、直流稳压电源、在系统可编程模拟器件原理及其应用等。各章末有小结,并配有难易程度和数量都比较适当的思考题和习题。

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,可作为高等学校电气信息、仪器仪表、计算机、电子信息科学类及其它相近专业本、专科生“电子技术基础”教材和教学参考书,也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/杨拴科主编. —北京:高等教育出版社,2003
ISBN 7-04-011426-7

I. 模... II. 杨... 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(2002)第 076556 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	中国青年出版社印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2003 年 1 月第 1 版
印 张	22.5	印 次	2003 年 1 月第 1 次印刷
字 数	410 000	定 价	25.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据西安交通大学电子学教研组多年形成的教学实践和经验,参照原国家教委 1995 年颁发的“高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求”(第一部分),结合新的课程体系和教学内容改革的需要编写而成的。本书与我校张克农主编的《数字电子技术基础》形成电子技术基础课程教材的姊妹篇,但内容相对独立,既可采用“先模拟后数字”,又可采用“先数字后模拟”的教学体系。

编写本书的指导思想是:

1. 本课程是入门性质的技术基础课程,教学内容的变革要符合“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的十六字方针,体现我校电子技术基础教学“保基础、重实践、少而精”的传统,以满足较少学时教学的需要。

2. 教材内容以集成电路为主,适当保留了作为电子电路基础的部分分立元件电路的重要内容。重点放在讨论各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、模拟集成电路及其应用等方面。

3. 重视电子器件的外特性以及各种集成电路的输入、输出电路和特性;压缩电子器件以及各种集成电路内部的工作原理分析;通过经典的分立元件电路,介绍电子电路的基本分析方法;注重电子电路的组成及结构设计、分析,减少复杂数学推导,突出定性分析;适当引入系统概念。

4. 适当引入新概念、新器件、新技术,如电流模电路基础及电流模运放、低压差线性集成稳压器、精密基准电压源、可编程模拟器件及其应用、EWB EDA 软件等等,便于学生了解电子技术的新发展。

书中打*号部分为选学内容,教师可根据具体要求、总学时数及学生水平情况灵活处理。删去这些内容不影响理论体系的完整性。

本书的编写工作是在何金茂先生的指导下进行的,具体分工如下:马积勋编写第 1、2、3 章,赵进全编写第 7 章,徐正红编写第 6、9 章,杨拴科编写绪言、第 4、5、8、10、11 章和附录(EWB EDA 软件简介),并负责制订编写提纲和全书的统稿工作。编写过程中,西安交通大学电子与信息工程学院邓建国老师,电子学教研组杨建国、张克农、段军政、高歌、宁改娣等老师经常参加修改讨论,并提出了宝贵的意见。硕士研究生何卫锋同学为本书的编写做了不少工作。

西安电子科技大学国家电工电子教学基地主任孙肖子教授作为本书主审,审阅了本书的全稿,并提出了不少建设性的修改意见。对此,谨致以衷心的感谢。

感谢。

现代电子技术发展日新月异,本书内容若有疏漏和错误,欢迎专家、学者、使用本书的教师、学生和工程技术人员提出意见和建议,以便今后不断改进。

编者

2002年6月

本书常用符号表

1. 不同书写体的电压、电流、电阻之含意

(1) 电压和电流(以晶体管 b、e 之间的电压为例)

u_{BE}	小写字母, 大写下标, 表示含有直流量的瞬时总值
U_{BE}	大写字母, 大写下标, 表示直流量(或静态值)
u_{be}	小写字母, 小写下标, 表示交流瞬时值
U_{be}	大写字母, 小写下标, 表示交流分量有效值
\dot{U}_{be}	交流量的复数表示形式
ΔU_{BE}	表示直流变化量
Δu_{BE}	表示瞬时值的变化量

(2) 电阻

R	电路的电阻或等效电阻	r	器件内部的等效电阻
-----	------------	-----	-----------

2. 基本符号

(1) 电压和电流

I, i	电流通用符号	u_{id}	差模输入电压
U, u	电压通用符号	u_s	信号源电压
i_f, u_f	反馈电流、电压	V_{CC}	集电极直流供电电源电压
i_i, u_i	交流输入电流、电压	V_{EE}	发射极直流供电电源电压
i_o, u_o	交流输出电流、电压	V_{DD}	漏极直流供电电源电压
I_Q, U_Q	电流、电压的静态值	U_{OH}	比较器输出高电平
u_{ic}	共模输入电压	U_{OL}	比较器输出低电平

(2) 功率

P	功率通用符号	P_{om}	电路最大输出功率
p	瞬时功率	P_T	晶体管的耗散功率
P_o	电路输出功率	P_V	电源消耗的功率

(3) 频率

f	频率通用符号	f_{bw}	通频带
ω	角频率通用符号	f_H	放大电路的上限截止频率
f_c	滤波器的截止频率	f_L	放大电路的下限截止频率
f_0	振荡频率	f_{BWG}	单位增益带宽
f_o	中心频率	$s = \sigma + j\omega$	复频

(4) 电阻、电导、电容、电感

R	电阻的通用符号	R_S	信号源内阻
R_i	电路的输入电阻	R_L	负载电阻
R_o	电路的输出电阻	G	电导的通用符号
R_{id}	差模输入电阻	X	电抗的通用符号
R_{ic}	共模输入电阻	Z	阻抗的通用符号
R_{if}	有反馈时电路的输入电阻	L	电感的通用符号
R_{of}	有反馈时电路的输出电阻	C	电容的通用符号
(5) 增益或放大倍数			
A	增益或放大倍数的通用符号	\dot{A}_{uH}	高频电压放大倍数的复数量
A_u	电压放大倍数的通用符号	\dot{A}_{uL}	低频电压放大倍数的复数量
A_i	电流放大倍数的通用符号	A_{um}	中频电压放大倍数
A_r	互阻增益的通用符号	A_f	闭环增益的通用符号
A_k	互导增益的通用符号	A_{uf}	闭环电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数	A_{ud}	差模电压放大倍数
		A_{uc}	共模电压放大倍数

3. 器件符号及参数

(1) 二极管

D	二极管	C_B	势垒电容
D_Z	稳压管	C_D	扩散电容
I_S	反向饱和电流	C_j	结电容
I_F	最大整流电流	U_Z	稳压管的稳定电压
I_R	反向电流	U_T	热电压
I_Z	稳压管工作电流	$U_{(BR)}$	反向击穿电压
R_D	二极管直流等效电阻	U_R	最高反向工作电压
r_d	二极管动态电阻	f_M	最高工作频率
r_z	稳压管动态电阻		

(2) 晶体管

T	晶体管	$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时的集电极击穿电压
e、E	发射极	$U_{(BR)CEO}$	基极开路时,集电极与发射极之间的击穿电压
b、B	基极	$U_{(BR)CES}$	基极发射极短路时,集电极与发射极之间的击穿电压
c、C	集电极	$U_{(BR)CER}$	基极发射极之间加电阻时,集电极与发射极之间的击穿电压
I_{CBO}	发射极开路时的集电结反向电流		
I_{CEO}	基极开路时,集电极与发射极之间的穿透电流		
I_{CM}	集电极最大允许电流		
U_{CES}	集电极发射极之间的饱和电压	U_A	欧拉电压
		P_{CM}	集电极允许的最大耗散功率

g_m	跨导	f_β	共射极电流放大系数的上限截止频率
β	共射极接法(交流)电流放大系数	f_α	共基极电流放大系数的上限截止频率
α	共基极接法(交流)电流放大系数	f_T	特征频率(双极型)
$\bar{\beta}$	共射极接法直流电流放大系数	$r_{bb'}$	基区体电阻
$\bar{\alpha}$	共基极接法直流电流放大系数	r_{be}	输入电阻

(3) 场效应管

T	场效应管	I_{DSS}	耗尽型管子 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流
s、S	源极	I_{DSM}	最大漏极电流
g、G	栅极	P_{DSM}	漏极最大允许耗散功率
d、D	漏极	$U_{GS(off)}$	夹断电压
C_{gs}	栅极与源极之间的电容	$U_{GS(th)}$	开启电压
C_{gd}	栅极与漏极之间的电容	$U_{(BR)DS}$	漏极与源极之间的击穿电压
C_{ds}	漏极与源极之间的电容	$U_{(BR)GS}$	栅极与源极之间的击穿电压

(4) 运算放大器

A	集成运放	S_R	转换速率(压摆率)
A_{ou}	开环电压放大倍数	U_{ICM}	最大共模输入电压
I_{IO}	输入失调电流	U_{IDM}	最大差模输入电压
U_{IO}	输入失调电压	r_{id}	差模输入电阻
K_{CMR}	共模抑制比	r_{ic}	共模输入电阻

4. 其它符号

η	效率	φ	相位角
τ	时间常数	T	温度、周期
Q	静态工作点, 电路的品质因数	M	互感
F	反馈系数	γ	纹波系数
$D=1+AF$	反馈深度	S_r	稳压系数
$\dot{U}(j\omega)=U(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$	正弦电压复数值	S_u	电压调整率
$U(s)$	电压的拉氏变换	S_I	电流调整率
$A(s)$	传递函数	S_T	输出电压的温度系数

目 录

0	绪言	1
0.1	什么是电子技术	1
0.2	本课程的性质、任务和重点内容	3
0.3	本课程的特点和学习方法	4
1	半导体二极管及其应用	7
1.1	PN 结	7
1.1.1	PN 结的形成	7
1.1.2	PN 结的单向导电性	10
1.1.3	PN 结的电压与电流关系	11
1.2	半导体二极管	12
1.2.1	半导体二极管的结构和类型	12
1.2.2	半导体二极管的伏安特性	13
1.2.3	温度对半导体二极管特性的影响	15
1.2.4	半导体二极管的主要电参数	15
1.3	半导体二极管的应用	16
1.3.1	在整流电路中的应用	17
1.3.2	在检波电路中的应用	17
1.3.3	限幅电路	18
1.4	特种二极管	19
1.4.1	硅稳压二极管	19
1.4.2	变容二极管	23
	本章小结	25
	思考题及习题	26
2	晶体管及放大电路基础	31
2.1	晶体管	31
2.1.1	晶体管的结构	31
2.1.2	晶体管的工作原理	31
2.1.3	晶体管共射极接法的伏安特性曲线	36
2.1.4	晶体管的主要电参数	38
2.1.5	温度对管子参数的影响	40

2.2	共射极放大电路的组成和工作原理	41
2.2.1	放大电路概述	41
2.2.2	共射极放大电路的组成及其工作原理	45
2.3	放大电路的静态分析	46
2.3.1	图解法在放大电路静态分析中的应用	47
2.3.2	估算法在放大电路静态分析中的应用	48
2.4	放大电路的动态分析	49
2.4.1	图解法在放大电路动态分析中的应用	49
2.4.2	微变等效电路法在放大电路动态分析中的应用	52
2.5	静态工作点的选择和稳定	56
2.5.1	静态工作点的选择	56
2.5.2	静态工作点的稳定	57
2.5.3	负反馈在静态工作点稳定中的应用	58
2.6	共集电极和共基极放大电路	61
2.6.1	共集电极放大电路	61
2.6.2	共基极放大电路	65
2.7	多级放大电路	67
2.7.1	多级放大电路的组成	67
2.7.2	多级放大电路中的耦合方式	67
2.7.3	多级放大电路的计算	70
2.8	放大电路的频率特性	71
2.8.1	频率响应和频率失真	71
2.8.2	放大电路的频率响应和瞬态响应	72
2.8.3	晶体管的高频特性	73
2.8.4	单管共射极放大电路的频率响应	77
2.8.5	放大电路的增益带宽积	81
2.8.6	多级放大电路的频率响应	82
	本章小结	83
	思考题及习题	84
	附录 2.1 密勒定理	90
3	场效应晶体管及其放大电路	92
3.1	结型场效应管	92
3.1.1	结型场效应管的结构和类型	92
3.1.2	结型场效应管的工作原理	93
3.1.3	结型场效应管的伏安特性	95
3.1.4	结型场效应管的主要电参数	97
3.2	绝缘栅型场效应管	98

3.2.1	增强型 MOS 管	98
3.2.2	耗尽型 MOS 管	100
3.3	场效应管放大电路	103
3.3.1	场效应管的偏置及其电路的静态分析	103
3.3.2	场效应管的微变等效电路	105
3.3.3	场效应管组成的三种基本放大电路	106
	本章小结	109
	思考题及习题	110
4	集成运算放大器	114
4.1	集成运放概述	114
4.1.1	集成电路中元器件的特点	115
4.1.2	集成运放的典型结构	115
4.2	集成运放中的基本单元电路	116
4.2.1	典型差分放大电路	116
4.2.2	带恒流源的差分放大电路	123
4.2.3	电流源电路	124
4.2.4	复合管电路	127
4.2.5	互补推挽放大电路	127
4.3	通用集成运放	128
4.3.1	双极型通用运放简化电路	129
4.3.2	CMOS 运放	130
4.4	运放的主要参数及简化低频等效电路	131
4.4.1	交流参数	131
4.4.2	直流参数	133
4.4.3	简化低频等效电路	134
4.5	其它集成运放	136
4.5.1	几种特殊用途的运放简介	136
4.5.2	跨导运放	138
4.5.3	电流模运放	139
	本章小结	144
	思考题及习题	144
5	反馈和负反馈放大电路	149
5.1	反馈的基本概念及类型	149
5.1.1	反馈的基本概念	150
5.1.2	负反馈放大电路的四种基本类型	152
5.1.3	负反馈放大电路举例	155
5.1.4	负反馈放大电路的一般表达式	159

5.2	负反馈对放大电路性能的影响	161
5.2.1	提高放大倍数的稳定性	161
5.2.2	扩展通频带	162
5.2.3	减小非线性失真	164
5.2.4	抑制反馈环内的干扰和噪声	164
5.2.5	对输入电阻和输出电阻的影响	165
5.2.6	正确引入反馈	169
5.3	负反馈放大电路的分析及近似计算	169
5.3.1	深度负反馈放大电路近似计算的一般方法	169
5.3.2	电压模运放组成的反馈电路	170
5.3.3	分立元件组成的反馈电路	173
* 5.3.4	电流模运放的闭环特性	175
5.4	负反馈放大电路的自激振荡及消除	177
5.4.1	负反馈放大电路的自激振荡条件	177
5.4.2	负反馈放大电路的稳定性	178
5.4.3	消除自激振荡的方法	180
	本章小结	182
	思考题及习题	183
6	集成运放组成的运算电路	186
6.1	基本运算电路	186
6.1.1	加法运算	186
6.1.2	减法运算	188
6.1.3	积分运算	190
6.1.4	微分运算	191
6.2	对数和反对数运算电路	192
6.2.1	对数运算	192
6.2.2	反对数运算	192
6.3	模拟乘法器及其应用	193
6.3.1	乘法器的工作原理	193
6.3.2	乘法器应用电路	195
6.4	集成运放使用中的几个问题	197
6.4.1	选型	197
6.4.2	调零	197
6.4.3	消振	198
6.4.4	保护	199
* 6.4.5	运算电路的误差分析	199
	本章小结	203

思考题及习题	203
7 信号检测与处理电路	208
7.1 电子系统概述	208
7.2 信号检测系统中的放大电路	209
7.2.1 测量放大器	210
7.2.2 隔离放大器	211
7.3 有源滤波器	215
7.3.1 滤波器的基础知识	215
7.3.2 低通有源滤波器	216
7.3.3 高通有源滤波器	220
7.3.4 带通和带阻有源滤波器	222
7.4 电压比较器	224
7.4.1 单门限电压比较器	225
7.4.2 多门限电压比较器	227
7.4.3 集成电压比较器	230
本章小结	232
思考题及习题	233
8 信号发生器	237
8.1 正弦波信号发生器	237
8.1.1 正弦波自激振荡的基本原理	238
8.1.2 RC型正弦波信号发生器	240
8.1.3 LC型正弦波信号发生器	243
8.1.4 晶体振荡器	249
8.2 非正弦信号发生器	252
8.2.1 方波发生器	252
8.2.2 三角波和锯齿波发生器	254
8.2.3 压控振荡器	256
本章小结	258
思考题及习题	259
9 功率放大电路	264
9.1 功率放大电路的特点及分类	264
9.2 互补推挽功率放大电路	266
9.2.1 乙类互补推挽功率放大电路	266
9.2.2 甲乙类互补推挽功率放大电路	269
9.2.3 单电源功率放大电路	271
9.2.4 前置级为运放的功率放大电路	271

* 9.3 功率器件与散热	272
9.3.1 双极型功率晶体管 (BJT)	272
9.3.2 功率 MOSFET	273
9.3.3 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	274
9.3.4 功率器件的散热	275
本章小结	276
思考题及习题	277
10 直流稳压电源	280
10.1 概述	280
10.2 单相整流及电容滤波电路	281
10.2.1 单相桥式整流电路的主要性能指标	281
10.2.2 电容滤波电路	283
10.3 串联反馈型线性稳压电路	288
10.3.1 稳压电路的功能和性能指标	288
10.3.2 串联反馈型线性稳压电路的工作原理	289
10.3.3 高精度基准电压源	292
10.3.4 集成三端稳压器	293
10.3.5 高效率低压差线性集成稳压器	294
* 10.4 开关型稳压电路	296
本章小结	298
思考题及习题	299
* 11 在系统可编程模拟器件原理及其应用	303
11.1 概述	303
11.2 在系统可编程模拟器件的结构及原理	304
11.2.1 ispPAC10 的结构和原理	304
11.2.2 ispPAC20 的结构和原理	309
11.3 在系统可编程模拟器件的应用电路	312
11.3.1 放大电路设计	312
11.3.2 滤波电路设计	316
11.3.3 数据采集系统中的信号调理电路设计	318
11.4 PAC-Designer 软件开发实例	320
11.4.1 设计步骤	320
11.4.2 PAC-Designer 软件的几个重要的功能	323
本章小结	324
思考题及习题	325
附录 A Electronics Workbench EDA 简介	326

A.1 EWB 的特色与资源	326
A.1.1 EWB 的特色	326
A.1.2 EWB 元器件库	327
A.1.3 EWB 虚拟测量仪器	330
A.1.4 EWB 的分析工具	331
A.2 EWB 使用方法简介	332
A.2.1 EWB 窗口功能简介	332
A.2.2 EWB 的基本操作	334
A.2.3 虚拟实验举例	334
附录 B 主要参考文献	340



绪 言

内容提要

近几十年来,电子技术发展非常迅速,应用也越来越广泛,目前已经成为现代科学技术的一个重要组成部分。那么,究竟什么是电子技术?电子技术基础课程的性质、任务以及教学内容的重点又是什么?它与以前学过的课程相比有哪些特点?怎样学习本课程?这是绪言中要讨论的几个问题。

0.1 什么是电子技术

简单地说,电子技术就是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。为了使读者对电子技术有一个概貌性的了解,下面对电子器件、电子电路及其应用作一简要介绍。

1. 电子器件

最早的电子器件是电子管(electron tube),也称为真空管(vacuum tube)。电子管有密封的管壳,内部抽到高真空。例如,在热阴极电子管中,有一个阴极,它可由灯丝加热,使温度升高,发射出电子。这些电子受外加电场和磁场的影响,在真空中运动就形成了电子管中的电流。离子管(ion tube)是与电子管类似的一种电子器件。它们也要抽成高真空,然后再充以适当的气体,所以也称为充气管(gas-filled tube)。这类管子中的电流,除了电子外,正离子也起着作用,因此叫离子管。电子管和离子管都属于电真空器件,是电子器件的第一代。

第二代电子器件是晶体管(transistor),它们是用半导体材料制成的,也称为半导体器件(semiconductor device)或者固体器件(solidstate device)。这类管子具有体积小、重量轻、寿命长、功耗小等优点,在许多电子设备中已经取代了电子管。然而,半导体器件也有它的弱点,例如过载能力较差,受温度变化的影响

较大,外加电压不能太高等。因此,半导体器件不可能完全代替电子管。电子管在某些场合仍然发挥着它的优势,例如电视机中的显像管、电子示波器中的示波管,目前还是采用电子管。

2. 电子电路

电子器件与常用的电阻器、电感器、电容器、变压器、开关等元件适当地连接起来所组成的电路,就称为电子电路。它具有控制方便、工作灵敏、响应速度快等特点。电子电路与普通电路的区别,在于电子电路包含有电子器件,而这些器件的特性往往是非线性的,所以必须采用非线性电路的分析方法来分析电子电路。

由各种单个的电子器件和元件构成的电路称为分立电路(discrete circuit)。分立电路通常是把许多元件和器件焊接在印刷电路板上组成的。复杂的电路有成千上万个焊点,这些焊点的接触不良,往往是电子设备发生故障的主要原因之一,影响了设备的正常运行。

随着半导体技术的发展,出现了能把许多晶体管与电阻等元件制作在同一块硅晶片上的电路,这种电路被称为集成电路(IC——integrated circuit)。集成电路内部不仅包含器件,还有元件和连线,是“管”与“路”的结合,因此也称为集成组件(module)。集成电路使电子电路系统进一步缩小了体积,减轻了重量,降低了功耗,减少了焊接点,提高了工作的可靠性。自从1959年世界上第一块集成电路在美国的德州仪器公司和西屋电气公司诞生以来,它的发展经历了小规模、中规模、大规模和超大规模(SSI、MSI、LSI和VLSI)等不同阶段。第一块集成电路上只有四只晶体管,而目前的集成电路已经可以在一片硅片上集成几千万只,甚至上亿只晶体管。同时,集成电路的性能(高速度和低功耗等)也迅速提高。集成电路的出现,使电子技术产生了一个新的飞跃,进入了微电子(microelectronics)技术时代。

采用集成电路芯片,配合一些分立的元、器件,就可以组成具有特定功能的电子系统。利用这种方法设计电子系统,不仅可以使系统的电路结构、设计和制作得到简化,并且能使系统的可靠性和性能价格比有很大提高。

目前,集成电路仍在高速发展。系统级芯片(SOC——system on chip)已经能将整个系统集成在单个芯片上,完成系统的功能。系统级芯片的出现,使集成电路逐步向集成系统(integrated system)的方向发展。

3. 电子技术应用

电子技术最初应用于通信系统。它与无线电技术相结合,使通信科学技术在上世纪就获得了惊人的发展。除了无线电外,有线载波通信、激光通信、光纤通信等,也都应用了电子技术的成就。

控制是电子技术的另一个广泛的应用领域。在自动化技术中,电子控制是