



北京市高等教育精品教材立项项目



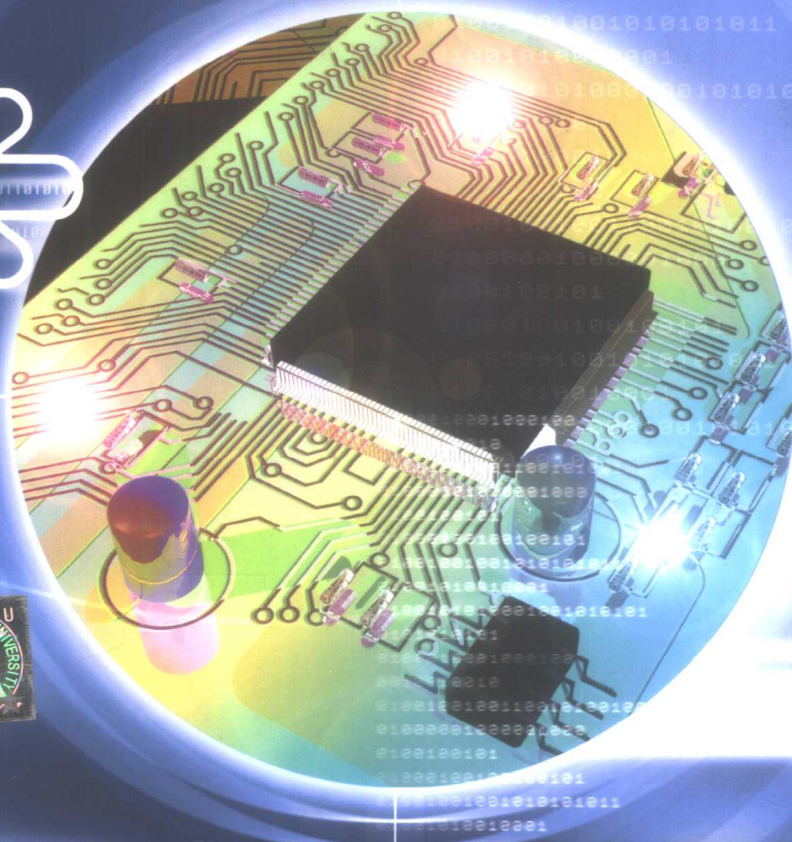
国家电工电子教学基地系列教材

模拟集成电路基础

The Foundation of Analog Integrated Circuits

◎ 李金平 主编

◎ 董在望 主审



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



北方交通大学出版社
<http://press.njtu.edu.cn>



北京市高等教育精品教材立项项目

国家电工电子教学基地系列教材

模拟集成电路基础

李金平 主编

李金平 路勇 延凤平 编著

董在望 主审

清华大学出版社
北方交通大学出版社

·北京·

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:

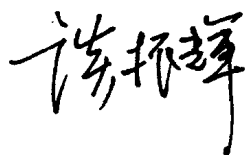
- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《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》、《数字信号处理综合设计实验》、《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、北方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。

北方交通大学
“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 '陈振辉' (Chen Zhenhui), written in a cursive style.

2003 年 2 月

前 言

20 世纪 90 年代以来,电子技术呈现出系统集成化、设计自动化、用户专用化、测试智能化的发展态势,从而对 21 世纪的人才培养提出了更高更新的要求。为了适应电子技术的发展和 21 世纪人才培养的要求,电子电路课程体系和内容的改革势在必行。基于面向 21 世纪电工电子系列课程体系与内容的改革成果,基于多年的教学实践,我们认为:强调技术理论与工程实践相融合、技术理论与计算机方法相融合及基础技术理论与现代电子技术相融合,应作为编写本教材的出发点。

编写本教材的基本思想是:

——明确本课程的定位,教材内容必须注重基础,即着重基本概念、基本原理和基本分析方法,这些基础内容是模拟电路和电子技术在今后较长时期起作用的重要理论和基本技术。在注重基础内容的同时,也必须反映电子信息技术的最新发展(如半导体激光放大器、电流模技术、EDA 技术等)及趋势。

——内容安排上力求符合认知规律,突出电子电路的基本原理、分析及应用。

——为了建立基本的模拟电子电路基础知识平台,使模拟电子线路形成较完整的体系,把原属于数字电路内容的脉冲波形的产生与处理电路纳入本教材。

——考虑到电子电路的发展依赖于器件的发展及集成电路芯片设计的需要,也考虑到不同专业方向的知识需求,加大了半导体器件的篇幅,以便给教学双方提供一定的知识内容选择空间。

——建立集成化的课程体系,通过介绍通用和专用集成器件,使读者了解模拟集成电路的结构及基本单元电路在集成电路与系统中的应用,为以后设计与应用模拟集成电路芯片奠定基础。

——考虑各学校教学计划和课程内容安排上的差异,所增加的新内容都具有相对的独立性,教学双方可根据实际需要加以取舍,从而使教材具有通用性。

——增加电子电路(单元电路、模拟集成电路)的应用实例,提高初学者的

学习兴趣。

——配合各章的主要内容,配备较多层次不同、类型不同的习题。从第3章开始还增设了计算机辅助分析和设计题,以使读者提高综合应用已学知识分析问题的能力。

本书由李金平主编。全书共分为9章,其中第1~5章、第7章和第8章由李金平编写,第6章、第9章由路勇编写,第2章中2.2节有关光特性部分和2.7节、第3章中3.11节由延凤平编写。最后,李金平对各章进行了文字润饰和定稿。

教育部前电工课程教学指导委员会副主任兼电子技术与线路课程教学指导小组组长、清华大学董在望教授主审了全书,并提出了许多宝贵的意见,这些意见对提高本书质量十分重要。

本书在编写过程中始终得到北方交通大学电子信息工程学院张思东院长、贾怀义书记、张有根副院长等领导的热情支持。

在此,对上述所有帮助过我们的同志表示深切的谢意。

由于作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2003年1月

常用符号说明

1. 电流和电压符号的一般规定 (以基极电流为例)

I_B	大写符号、大写下标,表示基极直流电流
I_b	大写符号、小写下标,表示基极电流交流分量的有效值
i_B	小写符号、大写下标,表示基极电流含有直流的总瞬时值
i_b	小写符号、小写下标,表示基极电流交流瞬时值
$I_{b,max}$	基极电流交流分量的最大值
ΔI_B	基极电流直流变化量
ΔI_b	基极电流交流分量变化量
Δi_B	基极总瞬时电流变化量

2. 常用的基本符号

1) 电阻

R, r	电阻通用符号
G, g	电导通用符号
R_i	不包括偏置电阻的输入电阻
R'_i	包括偏置电阻时的输入电阻
R_o	不包括集电极负载电阻时的输出电阻
R'_o	包括集电极负载电阻时的输出电阻
R_{if}	不包括偏置电阻时负反馈放大器的输入电阻
R'_{if}	包括偏置电阻时负反馈放大器的输入电阻

R_{of}	不包括集电极负载电阻时负反馈放大器的输出电阻
R'_{of}	包括集电极负载电阻时负反馈放大器的输出电阻
R_s	信号源内阻
R_L	外加负载电阻
R'_L	放大器的负载电阻

2) 电容、电感及阻抗

C	电容通用符号
C_i	输入电容
C_L	负载电容
C_M	密勒等效电容
L	电感通用符号
Z	阻抗通用符号

3) 电压

U, u	电压通用符号
U_s, u_s	信号源电压
U_i	输入信号电压
U_o	输出信号电压
U_{CC}, U_{DD}	正电源电压
U_{EE}, U_{SS}	负电源电压
U_B, U_G	基极、栅极偏置电压
U_{ref}	基准电压(参考电压)
U_{ID}, U_{id}	差模输入电压
U_{IC}, U_{ic}	共模输入电压
U_{OD}, U_{od}	差模输出电压
U_{OC}, U_{oc}	共模输出电压
$U_{o,max}$	最大输出电压

U_f	反馈电压
V	电位、电平通用符号
V_H	逻辑高电平
V_L	逻辑低电平
V_{oH}, V_{oL}	输出逻辑高、低电平
V_{iH}, V_{iL}	输入逻辑高、低电平
V_{on}, V_{off}	开门、关门电平

4) 电流

I, i	电流通用符号
I_s, i_s	信号源电流
I_i	输入电流
I_o	输出电流
I_L	负载电流
I_f	反馈电流
I_{ref}	基准电流(参考电流)
I_O	恒流源电流
I_{OH}	OC 门开路时的漏电流

5) 增益

A	增益通用符号
A_U, A_I	电压、电流增益
A_R, A_G	互阻、互导增益
A_s	源增益
$A(s)$	增益函数
$A(jf), A(j\omega)$	正弦增益函数
A_f	反馈放大电路的增益
A_{Ud}	差模电压增益
A_{Uc}	共模电压增益
B	反馈系数用符号
B_U, B_I	电压、电流反馈系数
B_R, B_G	互阻、互导反馈系数

6) 功率

P_{DC}	直流电源供给功率
P_o	输出功率

$P_{o, max}$	最大输出功率
P_C	耗散功率
NEP	噪声等效功率

7) 频率

f, ω	频率、角频率通用符号
f_H, f_L	放大电路上限频率(高频截频)、下限频率(低频截频)
f_{Hf}, f_{Lf}	反馈放大电路上限频率(高频截频)、下限频率(低频截频)
BW	通频带
f_p, ω_p	极点对应的频率、角频率
f_z, ω_z	零点对应的频率、角频率

3. 器件参数符号

U_D	二极管正向压降
U_z	稳压二极管稳定电压
U_ϕ	PN 结势垒电压
U_T	晶体管温度电压当量
$U_{GS, th}$	增强型场效应管的阈值电压(开启电压)
$U_{GS, off}$	耗尽型场效应管的阈值电压(夹断电压)
U_A	厄尔利电压
λ	晶体管基区调宽系数, 场效应管沟道长度调制系数
U_{CES}	晶体管 C, E 间饱和压降
$U_{CBO, B}$	射极开路时 C, B 间反向击穿电压
$U_{CEO, B}$	基极开路时 C, E 间反向击穿电压
$U_{EBO, B}$	集电极开路时 E, B 间反向击穿电压
$U_{DS, B}$	源、漏间反向击穿电压

I_S	二极管反向饱和电流	$C_{b'e}$	混合 π 模型中发射结等效电容
I_{ES}	发射结反向饱和电流	C_{gs}	场效应管栅、源间等效电容
I_{CBO}	发射极开路时 C,B 间反向饱和电流	C_{gd}	场效应管栅、漏间等效电容
I_{CEO}	基极开路时 C,E 间反向饱和电流	C_{ds}	场效应管漏、源间等效电容
I_{CM}	集电极最大允许电流	C_D	扩散电容
I_{DSS}	耗尽型场效应管的饱和漏极电流	C_T	势垒电容
f_a	晶体管共基电流放大系数的截止频率	$\alpha, \bar{\alpha}$	晶体管共基交、直流电流放大系数
f_β	晶体管共射电流放大系数的截止频率	$\beta, \bar{\beta}$	晶体管共射交、直流电流放大系数
f_T	特征频率	n_i	本征半导体电子浓度
P_{CM}	晶体管集电极最大允许耗散功率	n	电子浓度
P_{on}	TTL 门的空载导通功耗	p_i	本征半导体空穴浓度
P_{off}	TTL 门的空载截止功耗	p	空穴浓度
r_D	二极管正向电阻	N	电子型半导体
$r_{bb'}$	基区体电阻	P	空穴型半导体
r_e	发射结微变电阻	W	沟道宽度
$r_{b'e}$	混合 π 模型中发射结微变电阻	L	沟道长度
h_{ie}	共射 h 模型中输入电阻	η	跨导比
h_{fe}	共射 h 模型中电流放大系数	K	MOS 管的导电因子
h_{oe}	共射 h 模型中输出电导	E_{G0}	半导体材料的禁带宽度
h_{ib}	共基 h 模型中输入电阻	N_A	受主杂质浓度
h_{fb}	共基 h 模型中电流放大系数	N_D	施主杂质浓度
h_{ob}	共基 h 模型中输出电导	μ_n	电子迁移率
r_{ds}	场效应管共源接法时输出电阻	μ_p	空穴迁移率
g_m, g_{mb}	跨导、背栅跨导	D_n	电子扩散系数
$C_{b'c}$	混合 π 模型中集电结等效电容	D_p	空穴扩散系数
		U_+	运放的同相输入端
		U_-	运放的反相输入端

4. 其他符号

VD, VD_z 二极管、稳压二极管

VT	晶体管、场效应管	t_d	延迟时间,分辨时间
S	开关	t_{on}	开通时间
F	反馈深度	t_{off}	关断时间
K_{CMR}	共模抑制比	Q	静态工作点,品质因数
η	效率	φ	相位
T	周期	G_m	增益裕量
t	时间	φ_m	相位裕量
t_r	上升时间	τ	时间常数
t_f	下降时间	θ	导通角
t_{re}, t_R	恢复时间	D	占空比
t_w	脉冲宽度	N_i	扇入系数
t_{pd}	平均延迟时间	N_o	扇出系数
t_s	存储时间	SNR	信噪比

注:本书第9章中,计算机软件 PSpice 和 Electronics Workbench 所采用的仿真电路元件符号、元件单位和比例因子符号,有些与国标符号和本书其余章节的符号约定不相同。为了便于软件讲解,软件界面图形、仿真电路图和软件仿真结果的屏幕拷贝一律保持原样。在正文有关软件参数设置说明中,必要时也采用软件的约定。仿真电路图中元件符号、参数单位与国标的主要差别列于下表,其余不同点将在有关章节中加以说明。

名 称	国标符号	软件符号
电阻		
电阻值单位(欧姆)	Ω	ohm 或省略
电导值单位(西门子)	S	mho 或省略
比例因子符号(10^{-6})	μ	u 或 U

目 录

常用符号说明	1
第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 放大器的基本概念	2
1.3 模拟电子系统举例	4
习题	5
第2章 半导体器件基础	7
2.1 半导体基础知识	7
2.1.1 半导体的特性	7
2.1.2 半导体的能带	8
2.1.3 本征半导体	9
2.1.4 杂质半导体	10
2.1.5 半导体内光与电子的相互作用	12
2.1.6 载流子的扩散运动和漂移运动	14
2.2 PN 结	16
2.2.1 PN 结的形成	16
2.2.2 PN 结的接触电位差	17
2.2.3 PN 结的能带结构	18
2.2.4 PN 结的光电效应与电致发光	19
2.2.5 PN 结的伏安特性	20
2.2.6 PN 结的反向击穿特性	22
2.2.7 PN 结电容	23
2.3 半导体二极管	26
2.3.1 二极管的结构	26
2.3.2 二极管的伏安特性	27
2.3.3 二极管的等效电阻	29
2.3.4 二极管的主要参数	30

2.3.5 半导体二极管的模型	31
2.3.6 稳压二极管	32
2.3.7 二极管应用举例	33
2.4 双极型晶体管	36
2.4.1 晶体管的结构	36
2.4.2 晶体管的工作原理	37
2.4.3 晶体管的模型	40
2.4.4 晶体管的特性曲线	43
2.4.5 晶体管的参数	48
2.4.6 温度对晶体管参数的影响	50
2.5 场效应晶体管	50
2.5.1 绝缘栅型场效应管	51
2.5.2 结型场效应管	58
2.5.3 场效应管的主要参数及特点	61
2.6 集成化元器件	64
2.6.1 集成双极型晶体管	64
2.6.2 集成二极管	65
2.6.3 集成 MOS 管	65
2.6.4 集成电阻	66
2.6.5 集成电容	66
2.6.6 集成化元器件的特点	67
2.7 半导体管光电器件	67
2.7.1 半导体发光器件	67
2.7.2 半导体光电探测器	77
习题	83
第 3 章 双极型模拟集成电路的基本单元电路	87
3.1 单管共射放大电路的构成	87
3.2 放大电路的分析方法	89
3.2.1 静态分析	89
3.2.2 动态分析	90
3.3 频率响应的基本概念及单管共射放大电路的频率响应	102
3.3.1 频率响应的基本概念	102
3.3.2 频率响应的分析方法	103
3.3.3 单管共射放大电路的高频响应	108
3.3.4 单管共射放大电路的低频响应	112
3.4 共集放大电路	115

3.4.1 共集放大电路的中频特性	115
3.4.2 共集放大电路的高频响应	116
3.5 共基放大电路	117
3.5.1 共基放大电路的中频特性	117
3.5.2 共基放大电路的高频响应	119
3.6 共射、共集及共基放大电路性能比较	120
3.7 电流源电路及基本应用	121
3.7.1 常用的电流源电路	121
3.7.2 电流源的主要应用	124
3.8 差分放大电路	125
3.8.1 典型差分放大电路的工作原理及性能分析	125
3.8.2 改进型差分放大电路	135
3.8.3 差分放大电路的失调与温漂	138
3.9 多级放大电路	140
3.9.1 直接耦合放大电路的特殊问题	141
3.9.2 多级放大电路的中频特性	142
3.9.3 多级放大电路的频响	143
3.10 低频功率放大电路	145
3.10.1 乙类互补推挽功率放大电路	146
3.10.2 甲乙类互补推挽功率输出级	149
3.10.3 准互补推挽功率输出级	151
3.10.4 单电源互补推挽功率输出级	152
3.11 光放大器	153
3.11.1 光放大器的工作机理	153
3.11.2 半导体光放大器	156
3.11.3 掺铒光纤放大器	158
3.11.4 光纤拉曼放大器	161
3.11.5 光放大器的应用	163
习题	165
机辅分析题	172
 第4章 MOS模拟集成电路的基本单元电路	 174
4.1 MOS场效应管的特点	174
4.2 MOS场效应管的模型	175
4.2.1 MOS场效应管的直流模型	175
4.2.2 MOS场效应管的交流小信号模型	175
4.3 MOS管三种基本放大电路	176

4.4 MOS 管恒流源负载	177
4.4.1 单管增强型有源负载	177
4.4.2 单管耗尽型有源负载	178
4.4.3 威尔逊电流源有源负载	178
4.5 MOS 管电流源	179
4.5.1 MOS 管基本电流源	179
4.5.2 威尔逊电流源	180
4.5.3 几何比例电流源	181
4.6 MOS 单级放大电路	182
4.6.1 E/E 型 NMOS 单级放大电路	182
4.6.2 E/D 型 NMOS 单级放大电路	183
4.6.3 CMOS 有源负载放大电路	184
4.6.4 CMOS 互补放大电路	186
4.6.5 源极跟随器	188
4.7 MOS 管差分放大电路	189
4.8 CMOS 功率放大电路	190
4.9 MOS 模拟开关	191
4.9.1 单管 MOS 传输门模拟开关	191
4.9.2 CMOS 传输门和 CMOS 模拟开关	193
4.9.3 MOS 模拟开关的应用举例	194
习题	197
机辅分析题	203
第 5 章 负反馈放大电路	205
5.1 反馈的基本概念	205
5.1.1 反馈放大电路的构成	205
5.1.2 基本反馈方程式	207
5.2 反馈放大器的分类及其判别方法	208
5.2.1 负反馈放大器的分类	208
5.2.2 反馈组态的判别方法	210
5.3 负反馈对放大器性能的影响	211
5.3.1 负反馈提高了增益的稳定性	211
5.3.2 负反馈可展宽放大器的频带宽度	212
5.3.3 负反馈可改善放大器的非线性失真	213
5.3.4 负反馈对放大器输入阻抗的影响	214
5.3.5 负反馈对放大器输出电阻的影响	215
5.3.6 信号源内阻对负反馈放大器性能的影响	218

5.4 负反馈放大器的分析方法	219
5.4.1 等效电路法	219
5.4.2 方框图分析法	220
5.4.3 深负反馈条件下的近似计算	222
5.5 负反馈放大器的稳定性及其相位补偿	224
5.5.1 反馈放大电路自激振荡的条件	224
5.5.2 负反馈放大电路稳定性的判别方法	225
5.5.3 防止负反馈放大电路自激的方法	228
5.6 负反馈放大器实例	232
习题	234
机辅分析题	239
 第6章 集成运算放大器的分析与应用	 241
6.1 集成运算放大器的组成及基本特性	241
6.1.1 概述	241
6.1.2 集成电路的基本结构	241
6.1.3 模拟集成运放的典型电路	244
6.2 集成运算放大器的主要参数	253
6.3 线性应用及理想运放模型	255
6.3.1 线性应用和非线性应用	255
6.3.2 理想运放模型	256
6.4 基本运算电路	256
6.4.1 比例运算电路	257
6.4.2 加减运算电路	257
6.4.3 积分运算和微分运算电路	261
6.4.4 对数运算和指数运算电路	263
6.5 电压比较器	265
6.5.1 单门限电压比较器	265
6.5.2 迟滞比较器	266
6.6 波形发生电路	268
6.6.1 矩形波发生电路	268
6.6.2 三角波发生电路	271
6.6.3 锯齿波发生电路	273
6.7 集成运算放大器的其他应用	274
6.7.1 电流-电压变换电路	274
6.7.2 RC有源滤波器	275
6.7.3 测量放大器	276

6.7.4 双极性增益可调放大器	279
6.7.5 交流耦合放大器	279
6.7.6 线性稳压电路	281
习题	282
机辅分析题	286
第7章 现代模拟集成电路技术	289
7.1 电流模电路	289
7.1.1 电流模电路的基本概念	289
7.1.2 跨导线性电路	290
7.2 电流反馈型集成运算放大器	295
7.2.1 电流反馈集成运算放大器的基本特性	296
7.2.2 电流反馈集成运算放大器的典型电路	296
7.2.3 电流反馈集成运算放大器的闭环特性	298
7.3 跨导运算放大器	300
7.3.1 跨导运算放大器的典型电路	300
7.3.2 跨导运算放大器的应用举例	302
7.4 在系统可编程模拟集成电路	305
7.4.1 在系统可编程模拟电路的结构及工作原理	306
7.4.2 在系统可编程模拟器件的设计应用	310
习题	314
机辅分析题	316
第8章 脉冲波形的产生与处理电路	317
8.1 脉冲信号与参数	317
8.2 半导体器件的开关特性	318
8.2.1 二极管的开关特性	318
8.2.2 晶体三极管的开关特性	319
8.3 逻辑门电路	320
8.3.1 基本的逻辑运算与逻辑门电路	320
8.3.2 TTL集成逻辑门	322
8.3.3 CMOS集成逻辑门	328
8.4 555集成定时器	333
8.4.1 CMOS集成定时器的结构	333
8.4.2 CMOS集成定时器的工作原理	334
8.5 单稳触发器	335
8.5.1 用555定时器构成的单稳触发器	335

8.5.2 单稳触发器应用举例	337
8.6 多谐振荡器	338
8.6.1 由门电路构成的多谐振荡器	338
8.6.2 由 555 定时器构成的多谐振荡器	339
8.7 施密特触发器	341
8.7.1 由 555 定时器构成的施密特触发器	342
8.7.2 集成施密特触发器	343
8.7.3 施密特触发器应用举例	344
8.8 锯齿波发生器	345
习题	346
机辅分析题	348
第 9 章 电子电路计算机辅助设计	350
9.1 PSpice 仿真模型的应用	350
9.1.1 PSpice 模型	350
9.1.2 模型举例	351
9.1.3 硬件描述语言中的模型与参数	356
9.1.4 仿真分析模型	356
9.2 电子工作台简介	366
9.2.1 电子工作台概述	366
9.2.2 电子工作台的特点	367
9.2.3 系统要求	368
9.2.4 软件安装	368
9.2.5 Electronics Workbench 软件的使用	369
9.2.6 Electronics Workbench 软件的电路分析方法	376
9.3 PAC-Designer 软件及开发实例	390
9.3.1 ispPAC 简介	390
9.3.2 PAC-Designer 对系统的要求	390
9.3.3 PAC-Designer 软件的主要功能	390
9.3.4 PAC-Designer 软件的安装	390
9.3.5 PAC-Designer 软件的使用方法	391
9.3.6 ispPAC80 器件的软件设计方法	395
习题参考答案	398
参考文献	404