



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

集成电子技术 基础教程

浙江大学电工电子基础教学中心电子学组 编
郑家龙 王小海 章安元 主编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪 课程教材
Textbook Series for 21st Century

集成电子技术 基础教程

浙江大学电工电子基础教学中心电子学组 编
郑家龙 王小海 章安元 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

集成电子技术基础教程/郑家龙,王小海,章安元主编.

—北京:高等教育出版社,2002.7

本科电子信息类

ISBN 7-04-010642-6

I.集... II.①郑...②王... III.集成电路—高等学校—教材 IV.TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001648 号

责任编辑 章浩平 封面设计 张楠 责任绘图 黄建英
版式设计 马静如 责任校对 朱惠芳 责任印制 宋克学

集成电子技术基础教程

浙江大学电工电子基础教学中心电子学组 编

郑家龙 王小海 章安元 主编

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
印 刷 中国科学院印刷厂

开 本	787×960 1/16	版 次	2002 年 7 月第 1 版
印 张	42	印 次	2002 年 7 月第 1 次印刷
字 数	780 000	定 价	47.30 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

内 容 简 介

本书是教育部“面向 21 世纪电工电子系列课程教学内容和课程体系改革”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材,是普通高等教育“十五”国家规划教材。

本书是在原教材《模拟集成电子技术教程》(高等教育出版社,1994 年出版)和《集成电子技术教程》(浙江大学出版社,1999 年出版)的基础上,根据面向 21 世纪的教材结构和教学内容改革要求,重新编写而成的。全书共四篇 18 章,内容涵盖了高等学校工科本科电气信息类原“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”两门课程的基本教学要求,并适当予以拓宽。

本书采用了模块式的结构、“模拟”与“数字”相结合的体系。第一篇是电子器件与电子电路基础;第二篇为数字电路和系统;第三篇是模拟电路和系统;第四篇中,通过“信号发生电路”、“信号处理电路”、“信号转换电路”、“信号传输电路”以及“电子系统设计示例”等 5 章,将模拟电子技术与数字电子技术紧密结合,着力培养学生对两部分知识的综合运用能力,并且结合各篇内容,注重将一些新的集成电子器件和 EDA 的基本知识介绍给读者。

由于采用了模块式结构,使用本教材时,在教学顺序和学时分配方面都具有较大的灵活性。例如,按先“数字”后“模拟”的顺序进行教学时,可将一、二两篇安排在第一个学期,三、四两篇安排在第二个学期;若按先“模拟”后“数字”的顺序安排教学,则可将一、三两篇安排在第一个学期,二、四两篇安排在第二个学期;少学时专业使用时,可方便地将某些章、节删去。

本书由华中科技大学康华光教授担任主审。

本书可作为高等学校电气信息类(原电气类、自控类、电子类)专业教材,也可供成人和职业教育相关专业选用。

前 言

进入 20 世纪 90 年代以来,微电子技术取得了突飞猛进的发展。如今,它已成为国民经济的强大推动力,成为带动 21 世纪科技进步的强力支柱。因此,从事各行各业的科技人员,都要求或多或少地掌握电子技术最基本的理论和技能,以便为推动本专业的发展发挥更大的作用。

本书是在原教材《模拟集成电子技术教程》(邓汉馨、郑家龙主编,高等教育出版社出版)和《集成电子技术教程》(王小海主编,浙江大学出版社出版)的基础上,根据面向 21 世纪的教材结构和教学内容改革要求,重新编写而成的。全书共四篇 18 章,内容涵盖了高等学校工科本科电气类、自控类和电子类,原“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”两门课程的相关教学要求。

本书力图在教材体系、内容更新和能力培养等几方面有所突破,并且希望用较少的篇幅,讲清本课程最重要和最基本的内容。

一、将模拟电子技术和数字电子技术内容紧密相结合

模拟电子技术和数字电子技术本是电子技术课程中的两个分支。长期以来,由于它们分别组成了独立的课程,已形成了各自的教材体系。而实际上,在一个电子系统中,往往将二者紧密结合起来,而且目前的集成器件中,有的已将二者集成在同一块芯片中。如果将这两部分内容统一安排,将有利于学生对二者共性的理解和综合运用能力的提高。

本书第一篇是电子器件与电子电路基础,主要介绍半导体二极管、三极管、场效应管和集成电路中电子器件的外特性以及由它们组成的基本电子电路及其静态分析方法,是模拟与数字电路的共同基础。第二篇为数字电路和系统,内容包括数字逻辑基础、集成门电路、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路以及大规模集成电路。对于近年来迅速发展起来的可编程逻辑器件及其应用,从介绍集成门电路开始便融入以上各部分内容之中,并作为基本逻辑部件介绍它的设计方法。第三篇为模拟电路和系统,内容包括放大电路的动态分析与频率响应,集成运算放大器,反馈放大电路及应用和功率变换电路。第四篇为电子系统组成与应用,通过介绍信号发生电路、信号处理电路、信号转换电路和信号传输电路,将模拟与数字电路的应用紧密结合在以上四个方面。最后,通过电子系统设计实例,进一步引入电子系统设计的概念。本篇的目的是希望读者体会到,为了达到同一个目标,既可采用模拟电路,也可采用数字电路而且在一个电子系统

中,往往必须综合运用模拟和数字技术,才能更好地达到预定的目标。

二、本书在注重电子电路基础的前提下,加强了电子电路应用能力的培养

作为电子技术方面的入门性课程,本书首先应将重点放在电子电路基本原理和基本分析方法的讨论上。但如果仅限于这些基础,读者将往往会在“从原理到应用”的过程中遇到困难,特别对于那些在本门课程后较少设置电子技术应用方面课程的专业学生尤其如此。为此,本书在第二篇和第四篇的最后,都适当地安排了电子电路设计方面的示例。通过示例,希望读者能够初步了解电子系统的设计方法,并且可以将所学知识融会贯通,从而进一步加深对基础知识的理解。

三、注重教学内容的更新

电子技术的发展日新月异,新器件、新电路层出不穷。但学校中,本课程的学时数是有限的,并且还有减少的趋势。因此本书在编写中作了以下几方面的努力。

1. 适当减少对分立器件内部机理的介绍,如将PN结的机理安排在附录中,使读者将注意力更多地集中在器件的外特性及其性能参数上。

2. 从主要是学会正确使用集成器件的目标出发,本书把重点放在与集成器件性能指标相关的、最基本的单元电路(特别是输入、输出级电路)的原理和分析方法上,而不介绍复杂的集成器件内部电路,以减少学习中的难点。

3. 对于新的集成电子器件,如电流模放大器、集成开关电容滤波器、程控放大器、可编程逻辑器件和在系统可编程模拟电路等,本书都作了一定的介绍,并且与它们的应用领域紧密结合。

4. 电子电路设计自动化(EDA)是21世纪电子工程师必须掌握的工具,但它涉及的面很广。本书结合第二篇中各章内容,初步介绍了数字逻辑电路设计中的基本工具——ABEL-HDL(硬件描述语言)的使用;结合第三篇中多级放大电路和精密运算电路的计算,介绍了应用PSPICE软件的分析过程,并在附录B中简要介绍这两种软件的使用方法。此外,可在本课程的实验课中让学生进一步掌握这两种软件的使用。

本书作为电子技术基础课程教材,要求在校学生两个学期中学完。由于本书采用了模块化的结构,对教材的使用比较灵活。例如,第一、二两篇安排在第一个学期,参考学时为50~60;第三、四两篇安排在第二个学期,参考学时为60~70。即通常称为先“数字”后“模拟”的教学安排。但也可按一、三两篇和二、四两篇的顺序安排教学,即先“模拟”后“数字”的安排。对于少学时的学校,可将某些章节(目录中打“*”号)的内容(特别是第四篇的某些章节)删去,让学有潜力的学生自学。

参加本书编写工作的教师分工如下:第一篇,章安元;第二篇,王小海、祁才

君;第三篇,蔡忠法、沈红;第四篇,章安元、阮秉涛;附录,郑家龙、蔡忠法、祁才君。郑家龙、王小海、章安元负责编写大纲的定稿和全书的统稿、协调。在本书的编写过程中,浙江大学电工电子基础教学中心电子学组的全体老师给予了大力的支持,雷剑虹等老师还为本书试做了部分习题,并绘制了部分图稿。

本书在编写过程中得到了学校教务部和电气工程学院有关领导的大力支持。

本书由华中科技大学康华光教授主审参加审阅的有彭容修教授、杨华、张林副教授。他们在百忙中细致、认真、逐字逐句地审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的意见,在此我们表示诚挚的谢意,并希望继续给予关心和支持。

尽管编写组的同志对全书的体系和内容作了不少努力,但限于时间和水平,肯定还会有很多缺点或错误,恳请使用本教材的老师 and 同学、各位读者给以指正,不胜感激。

编者

2002年3月于浙江大学

符号说明

为方便阅读,对读者容易混淆的基本符号和与电子器件性能参数相关的符号作如下说明。

一、电压(V)和电流(I)

电子电路中的电压和电流往往不是单一的直流或交流,而是二者兼有;有时需要强调其中的直流分量,有时则需强调交流分量或动态变化量。为此需要用大、小写符号加上大、小写下标来表示,甚至再加上辅助符号才能说明清楚。否则可能造成概念上的混淆。现以电路的输入电压(电流)为例加以说明。

1. 大写字母、大写下标,如 $V_I(I_I)$ 表示直流输入电压(电流)或输入电压(电流)中的直流分量;而直流电源电压常用大写双下标表示,如 V_{CC} 、 V_{BB} 、 V_{EE} 等,其中 C、B、E 为所施加的电极符号。

2. 大写字母、小写下标,如 $V_i(I_i)$ 表示交流输入电压(电流)有效值;而 $\dot{V}_i(\dot{I}_i)$ 为交流相量值(复数);交流输入电压(或电流)的幅值常用 $V_{im}(I_{im})$ 表示。

3. 小写字母、小写下标,如 $v_i(i_i)$ 表示交流输入电压(电流)的瞬时值。

4. 小写字母、大写下标,如 $v_I(I_I)$ 一般用来表示非正弦输入电压(电流)的瞬时总量。其中如含有直流分量和交流分量,则它们又可表示为 $v_I = V_I + v_i$ (或 $i_I = I_I + i_i$)。

5. Δ 、小写字母、大写下标,如 $\Delta v_I(\Delta i_I)$ 一般用来表示非正弦输入电压(电流)的瞬时变化量。如输入电压(电流)中仅含交流量,则 Δv_I 与 v_i (或 Δi_I 与 i_i) 是等价的。

6. Δ 、大写字母、大写下标,如 $\Delta V_I(\Delta I_I)$ 表示直流输入电压(电流)的变化量。

二、功率(P)和效率(η)

P_o	交流输出功率
P_{om}	最大交流输出功率
P_T	晶体管平均功耗
P_E	电源消耗的平均功率
η_{max}	最大效率

三、频率(f)

f_{bw} (或 BW)	放大电路通频带宽度
f_H, f_L	放大电路上、下限频率(或 -3dB 频率)
f_c	与放大器增益为 0dB 相对应的信号频率
f_p	滤波器截止频率
f_0	振荡频率或重复频率

四、时间(t)

t_f	下降时间
t_r	上升时间
t_w	脉冲宽度
t_{pd}	门电路平均延迟时间
T	周期
τ	时间常数

五、增益(A)

$A_v(\dot{A}_v)$	电压增益(复数电压增益 $\dot{A}_v = \dot{V}_o / \dot{V}_i$)
A_{vo}	开路电压增益($R_L = \infty$ 时的电压增益)
A_{vs}	源电压增益(输出电压与信号源电压之比)
A_{vd}	差模电压增益(对差模输入信号的电压增益)
A_{vc}	共模电压增益(对共模输入信号的电压增益)
A_{vp}	滤波器的通带增益
A_{vf}	反馈放大电路的闭环电压增益

六、与电子器件相关的符号

1. 二极管(D)和稳压管(D_z)

V_T	温度的电压当量(室温下, $V_T \approx 26\text{ mV}$)
V_{on}	二极管伏安特性曲线中的开启电压
C_j	结电容
C_B	势垒电容
C_D	扩散电容
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
r_d	二极管导通时的动态电阻
r_z	稳压管在稳压区的动态电阻
I_F	二极管允许的最大整流电流
$V_{(BR)}$	二极管反向击穿电压

V_{RM}	二极管允许的最高反向工作电压(通常取 $V_{RM} = V_{(BR)}/2$)
V_Z	稳压管稳定电压
dV_Z/dT	稳定电压的温度系数
$I_{Z(max)}$	稳压管允许的最大稳定电流
P_{ZM}	稳压管允许的最大耗散功率($P_{ZM} = V_Z \cdot I_{Z(max)}$)

2. 双极型三极管(BJT)

$\alpha(\bar{\alpha})$	共基接法时交流(直流)电流放大系数
$\beta(\bar{\beta})$	共射接法时交流(直流)电流放大系数
$r_{be}(=r_{bb'} + r_{b'e})$	b-e 间的动态电阻(它由 $r_{bb'}$ 和 $r_{b'e}$ 组成)
r_{ce}	c-e 之间的动态电阻
g_m	跨导($g_m = \Delta i_C / \Delta v_{BE} = \beta / r_{be}$)
I_{CBO}	发射极开路时, b-c 之间的反向电流
I_{CEO}	基极开路时, c-e 之间的穿透电流 [$I_{CEO} = (1 + \beta) \cdot I_{CBO}$]
I_{CM}	集电极最大允许电流(此时 β 明显下降)
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
$V_{(BR)CEO}$	基极开路时, c-e 之间的击穿电压
$V_{(BR)CER}$	b, e 间接电阻 R 时, c-e 之间的击穿电压
$V_{(BR)CBO}$	发射极开路时, c-b 之间的击穿电压
$V_{(BR)EBO}$	集电极开路时, e-b 之间的击穿电压
I_{CS}	集电极饱和电流
I_{BS}	基极临界饱和电流($I_{BS} = I_{CS} / \beta$)
V_{CES}	c-e 之间的饱和压降
f_T	三极管特征频率(此时 β 下降为 1)
$C_{ob}(C_{b'c})$	共基接法时, 三极管输出电容(集电结等效电容)
$C_{b'e}$	发射结等效电容

3. 场效应晶体管(FET)

V_T	增强型场效应管的开启电压
I_{DO}	增强型场效应管 $v_{GS} = 2V_T$ 时的 i_D
V_P	耗尽型场效应管的夹断电压
I_{DSS}	耗尽型场效应管 $v_{GS} = 0$ 时的 i_D (也称饱和漏极电流)

g_m	跨导 ($g_m = \Delta i_D / \Delta v_{GS}$)
r_{ds}	d-s 之间的动态电阻
P_{DM}	场效应管漏极最大允许耗散功率
$V_{(BR)DS}$	d-s 之间的击穿电压
$V_{(BR)GS}$	g-s 之间的击穿电压
$C_{gs}、C_{gd}、C_{ds}$	FET 各电极间的分布电容
4. 集成运放(A)	
A_{od}	差模电压增益
A_{oc}	共模电压增益
R_{id}	差模输入电阻
R_{ic}	共模输入电阻
R_o	输出电阻
$V_{om}^+、V_{om}^-$	正向和负向最大输出电压幅度
V_{IO}	输入失调电压
dV_{IO}/dT	输入失调电压温漂
I_{IO}	输入失调电流
dI_{IO}/dT	输入失调电流温漂
I_{IB}	输入偏置电流
K_{CMR}	共模抑制比 ($K_{CMR} = \dot{A}_{od} / \dot{A}_{oc} $)
$V_{IC(max)}$	最大共模输入电压
f_H	-3dB 带宽
f_c	单位增益带宽 ($f_c \approx A_{od} \cdot f_H$)
SR	转换速率 ($SR = dv_O/dt _{max}$)
5. 集成门电路	
$V_{OL(max)}$	门电路输出低电平上限值(对应于 $I_{OL(max)}$)
$V_{OH(min)}$	门电路输出高电平下限值(对应于 $I_{OH(max)}$)
$V_{IL(max)} (V_{off})$	门电路输入低电平上限值(关门电平)
$V_{IH(min)} (V_{on})$	门电路输入高电平下限值(开门电平)
$I_{OL(max)}$	低电平输出时的灌电流允许值
$I_{OH(max)}$	高电平输出时的拉电流允许值
$I_{IL(max)}$	低电平输入时的最大输入电流
$I_{IH(max)}$	高电平输入时的最大输入电流
$V_{NL(max)}$	低电平输入时的噪声容限 ($\leq V_{IL(max)} - V_{OL(max)}$)

$V_{\text{NH(max)}}$	高电平输入时的噪声容限($\leq V_{\text{OH(min)}} - V_{\text{OH(min)}}$)
N_{OL}	低电平扇出门数($N_{\text{OL}} = I_{\text{OL(max)}} / I_{\text{IL(max)}}$)
N_{OH}	高电平扇出门数($N_{\text{OH}} = I_{\text{OH(max)}} / I_{\text{IH(max)}}$)
t_{PHL}	输出电平从高转换为低所需的时间
t_{PLH}	输出电平从低转换为高所需的时间
t_{pd}	平均延迟时间 [$t_{\text{pd}} = (t_{\text{PHL}} + t_{\text{PLH}}) / 2$]

目 录

第一篇 电子器件与电子电路基础

第一章 半导体二极管及其电路分析	3
1.1.1 半导体二极管的结构、特性与参数	3
1.1.2 二极管基本应用电路分析举例	7
1.1.3 特种二极管	13
第二章 半导体三极管及其电路分析	19
1.2.1 半导体三极管的结构、特性与参数	19
1.2.2 三极管放大电路的组成原理	30
1.2.3 电压传输特性和静态工作点	33
1.2.4 三极管放大与开关应用举例	41
第三章 场效应晶体管及其电路分析	45
1.3.1 场效应晶体管的结构、特性与参数	45
1.3.2 场效应管放大电路	52
第四章 集成电路中的电子器件	63
1.4.1 复合管	63
1.4.2 多发射极管和多集电极管	65
1.4.3 肖特基三极管	66
本篇习题	67

第二篇 数字电路和系统

第一章 数字逻辑基础	87
2.1.1 数制、码制及相互间的转换	87
2.1.2 逻辑代数	93
2.1.3 逻辑函数化简	102
2.1.4 逻辑功能的硬件语言描述	107
第二章 集成逻辑门电路	111
2.2.1 集成 TTL 门电路的主要特性和参数	111
2.2.2 集成 CMOS 门电路的主要特性和参数	120

2.2.3	各类门电路应用时的注意事项	124
2.2.4	可编程逻辑阵列(PLD)	126
第三章	组合逻辑电路	130
2.3.1	编码器	130
2.3.2	译码器	134
2.3.3	数值比较器	143
2.3.4	二进制加法器	145
2.3.5	数据分配器和数据选择器	150
2.3.6	奇偶校验器	155
2.3.7	用可编程逻辑器件设计组合逻辑电路	156
第四章	集成触发器和时序逻辑电路	163
2.4.1	基本触发器	164
2.4.2	时钟控制电平触发触发器	165
2.4.3	边沿触发器	170
2.4.4	二进制计数器	176
2.4.5	非二进制计数器	180
2.4.6	典型中规模集成计数器	184
2.4.7	寄存器和移位寄存器	191
2.4.8	用可编程逻辑器件设计时序逻辑电路	199
第五章	大规模数字集成电路	207
2.5.1	随机存取存储器(RAM)	207
2.5.2	只读存储器(ROM)	213
2.5.3	高密度可编程逻辑器件简介	221
2.5.4	在系统可编程逻辑器件	224
2.5.5	现场可编程门阵列 FPGA	232
2.5.6	高密度 PLD 器件的简单应用示例	242
* 2.5.7	应用 PLD 器件实现数字系统	244
本篇习题		261

第三篇 模拟电路和系统

第一章	放大电路的动态和频响分析	283
3.1.1	放大电路的主要性能指标	283
3.1.2	半导体三极管和场效应晶体管的低频小信号模型	286
3.1.3	放大电路的动态分析	290
3.1.4	放大电路的频响分析	309

3.1.5 放大电路的计算机辅助分析举例	320
第二章 集成运算放大器	325
3.2.1 集成运算放大器的典型结构及特点	325
3.2.2 集成运放的组成	327
3.2.3 集成运放的特性和主要性能指标	342
3.2.4 集成运放应用时应考虑的几个问题	347
第三章 反馈放大电路及应用	351
3.3.1 反馈的基本概念与分类	351
3.3.2 负反馈放大电路的方框图表示及增益函数	357
3.3.3 负反馈对放大器性能的影响	359
3.3.4 负反馈放大电路的计算	363
3.3.5 负反馈放大电路的自激问题	372
* 3.3.6 电流模电路简介	378
第四章 功率变换电路	382
3.4.1 功率放大电路的特点和基本类型	382
3.4.2 功率放大电路的分析计算	385
3.4.3 集成运放的扩流和扩压	387
3.4.4 集成功率放大器	389
3.4.5 整流、滤波、稳压电路	390
3.4.6 开关型直流稳压电路	399
本篇习题	402

第四篇 电子系统组成与应用

第一章 信号发生电路	435
4.1.1 RC 正弦波振荡器	435
4.1.2 LC 正弦波振荡器	438
4.1.3 其它正弦波振荡器	443
4.1.4 电压比较器	445
4.1.5 非正弦波发生器	452
* 4.1.6 单片集成多功能函数发生器	465
第二章 信号处理电路	469
4.2.1 信号处理电路概述	469
* 4.2.2 干扰与噪声	471
4.2.3 仪用放大器	476
4.2.4 有源滤波器	482

* 4.2.5 在系统可编程模拟电路(ispPAC)	496
第三章 信号转换电路	503
4.3.1 数/模转换电路	503
4.3.2 模/数转换电路	513
* 4.3.3 电压/频率转换电路	526
* 4.3.4 频率/电压转换电路	528
* 第四章 信号传输电路	530
4.4.1 模拟与数据通信系统概述	530
4.4.2 模拟调制与解调电路	539
4.4.3 集成锁相环及其应用	549
* 第五章 电子系统设计示例	556
4.5.1 电子系统设计概论	557
4.5.2 数控直流稳压电源设计方案论证	561
4.5.3 数控信号源设计示例	567
本篇习题	579
附录 A 半导体器件的基础知识	597
A.1 PN 结的机理和特性	597
A.2 半导体器件的制造工艺	608
附录 B 两种常用的电子电路分析、设计软件	614
B.1 计算机辅助分析软件 PSPICE 简介	614
B.2 ABEL-HDL 硬件描述语言简介	620
参考文献	629
名词术语汉英对照	632
部分习题答案	641

第一篇

电子器件与电子 电路基础