

高等学校教材

电子线路基础

(第二版)

高文焕 李冬梅 编



高等教育出版社

高等学校教材

电子线路基础

(第二版)

高文焕 李冬梅 编

高等教育出版社

内容简介

根据近年来电子技术的发展情况和教学改革与实践经验,本书对第一版进行了全面的修订。修订时,注意保持多年来形成的比较成熟的课程体系,精练了基础内容,加强了 MOS 器件和 MOS 集成电路方面的介绍,适当拓宽了知识面,尽量反映近年来模拟集成电路在理论 and 应用等方面的新成果,力图为正确使用和设计模拟集成电路芯片打好基础。改编与新增了较多例题与习题,并注意与教学内容匹配,新增了习题参考答案,以便于教学。

全书主要内容包括:半导体二极管与双极型晶体管、场效应晶体管、双极型模拟集成电路的基本单元电路、MOS 模拟集成电路的基本单元电路、反馈放大电路、集成运算放大器及其基本应用电路、电流模电路基础、脉冲波形的产生与处理电路以及模数转换器和数模转换器等。

本书可作为高等学校电子信息、通信类及其它相近专业本科生的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路基础/高文焕,李冬梅编.—2版.—北京:
高等教育出版社,2005.1
ISBN 7-04-016030-7

I. 电... II. ①高...②李... III. 电子电路—高等
学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 126211 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 李葛平 封面设计 李卫青 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 朱惠芳 责任印制 孔源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所	版 次	1997 年 7 月第 1 版
印 刷	北京东光印刷厂		2005 年 1 月第 2 版
开 本	787×960 1/16	印 次	2005 年 1 月第 1 次印刷
印 张	34.25	定 价	38.80 元
字 数	640 000		

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

物料号:16030-00

前 言

本书自1997年问世以来,受到各兄弟院校师生和读者的关注。为了适应电子技术的飞速发展和培养高质量人才的需要,我们在第一版的基础上,总结多年的教学改革与实践经验,对第一版进行了全面的修订。修订时,注意保持多年来形成的比较成熟的集成化课程体系,体现本课程的基本要求,同时对电子线路的基本内容作了进一步的提炼,集中精力讨论模拟集成电路中常用的基本电路、基本概念、基本原理和基本分析方法。适当增加新器件、新技术的内容,加强了MOS器件和MOS集成电路方面的介绍,尽量反映近年来模拟集成电路在理论和应用等方面的新成果。力图使新版教材具有系统性、先进性和启发性,有利于学生掌握基本理论、基本知识,培养分析问题、解决问题的能力 and 创新精神,为以后从事电子技术方面的工作打下良好的基础。

与第一版相比,新版主要作了如下修订:

1. 半导体器件部分分为第1、2两章。适当地精简器件物理基础的内容,进一步突出器件的模型、电流方程和外部特性曲线,增加了器件应用原理的讨论,以期对常用器件的应用得到初步的认识。

2. 考虑到分析放大电路频率响应特性时要引入较多的新概念和新方法,是教学中的一个难点,为了分散学习难点,打好电路基础,新版将双极型放大电路频率响应的内容单独列为一节,且放在第3章较后的位置(第8节)进行讨论。

3. 近些年来,MOS集成电路的性能取得了重大突破,在当代大规模和超大规模集成电路中已占据了主导地位。为了适应这种发展趋势,同时考虑国内的实际情况,新版适当加强了对MOS器件和MOS集成电路内容的介绍,包括MOS管的特征频率、MOS集成单元电路的高频响应特性、折叠式共源极-共栅极放大电路及折叠式CMOS运放等。

4. 现代电子系统对集成运放的精度、速度和频带的要求越来越高,因此,新版在第6、7章中加强了对超高速、超宽频带、超高精度集成运放的介绍,并讨论了提高集成运放工作速度、频带与精度的基本方法,介绍折叠式结构、用电流模电路设计电压集成运放等内容。

5. 新版的第9章为模数转换器和数模转换器。在这一章中,除了介绍基本转换原理、主要技术指标和传统电路结构外,增加了电阻分压式D/A转换器以及插值A/D转换器、折叠A/D转换器、流水线A/D转换器、交织A/D转换器

和过采样 $\Sigma\Delta$ A/D转换器等新型电路结构,它们是现代大规模和超大规模集成电路中常用的高速、高精度电路形式,以开阔视野,扩展知识面,可帮助读者了解模数转换器和数模转换器的发展趋势。

6. 为了帮助复习,巩固所学内容,新版重编了习题。一是增加习题的数量(习题总量增加到304道,与原版相比增加29.4%);二是重新设计习题结构,增加了基础性习题和有一定难度、实际应用的题目。这种多层次的结构可以加深对基本概念、基本电路和基本分析方法的理解,力图更具有启发性,引导学生深入钻研,适应不同读者的需要;三是增加部分习题参考答案,便于教学。

7. 在电路的分析上,采用定性分析与定量工程估算相结合的分析方法。定性分析注重突出电路的基本原理和基本功能;定量工程估算主要目的在于了解电路性能与哪些参数有关及其影响,至于精确计算结果需要采用计算机辅助分析工具获得。

8. 目前,以电子计算机辅助设计为基础的电子设计自动化技术已渗透到电子系统和专用集成电路设计的各个环节。使用计算机辅助分析和设计工具来分析与设计电路,加深对电路原理、信号流通过程、元器件参数对电路性能影响的了解等,已经成为电类本科生必须掌握的知识和必备的基本能力。本书受篇幅限制,并考虑知识的系统性和完整性,便于安排教学,有关计算机辅助分析和设计工具及其应用的内容另有配套教材(高文焕、汪蕙编著:《模拟电路的计算机分析与设计——PSpice程序应用》,清华大学出版社)。本书的任务是为采用计算机辅助工具来分析与设计电路打下必要的基础。

本书的内容比较丰富,各章节的内容保持相对的独立性,在教学中可以根据需要灵活选取。其中带有“*”的各节可作为选学内容或阅读资料。

本书由高文焕主编,高文焕、李冬梅共同完成修订工作。北京交通大学李哲英教授审阅了全书,提出许多颇有价值的修改意见,他的辛勤劳动对提高本书质量起了重要的作用。在此向李哲英教授以及所有关心本书的读者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中难免存在不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编者
2004年8月
于清华大学

第一版前言

近年来,模拟集成电路理论与设计、集成工艺技术、模拟电子应用技术都有巨大的发展和突破,各种超高速、超宽频带、超高精度、超低噪声的高性能模拟集成电路不断地大量涌现,使电子系统的性能与指标得到迅速的提高。为了适应这种发展趋势,模拟电子线路课程的体系和内容必须不断地改革。

1. 模拟电子线路课程的主要任务应是为学生打好两方面的基础:一是正确使用模拟集成电路的基础,二是模拟集成电路芯片设计的基础。

模拟集成电路的设计与制造是一个复杂的过程,大体上包括电路方案的设计、电路的仿真与优化、版图设计、芯片加工、芯片测试等阶段。它要求设计者不仅要掌握电路与系统的知识,还要了解集成工艺的基础知识以及具备使用集成电路计算机辅助设计工具的能力。

为了打好以上两个基础,本书第1~4章讨论了集成电路的基本元件和器件、基本单元电路,阐述模拟集成电路的基本概念、基本原理和基本分析方法。这些内容是模拟电路和电子技术在今后较长时间内都会起作用的重要理论和基本技术。

为了适应计算机辅助分析和集成电路芯片设计的需要,本书加强了半导体器件物理特性和模型的内容,因为它们是准确地仿真电路性能的关键因素之一。

2. 从课程体系上讲,“模拟电路”与“数字电路”两门课应有一个合理的分工。就课程性质而言,“数字电路”应是一门数字逻辑系统设计及应用的课程,不一定涉及电路级的内容,有关电路级的内容应属于模拟电路的范畴。因此,本书第7、8章介绍了脉冲波形、半导体器件的开关特性、集成逻辑门电路、脉冲波形的产生与处理电路、模数与数模转换电路等,力图形成模拟电子线路较完整的体系,以适应模拟电路的发展趋势。

3. 建立集成化的课程体系是编写本书的一个重要思想。这种集成化课程体系主要表现在集中精力讨论集成电路的基本电路及相应的器件,着重介绍它们的电路结构、工作原理、性能特点及应用原理。通过介绍一些通用和专用集成器件(如集成运放、集成电压比较器、集成宽带放大器、集成互导放大器、集成电流放大器及电流反馈运算放大器、集成逻辑门、集成定时器及集成DAC与ADC等),了解模拟集成电路的结构、电路特性以及基本单元电路在集成电路与系统中的应用,为正确选择、使用和设计模拟集成电路芯片奠定基础。

考虑到通用和专用模拟集成电路中的负反馈,绝大部分是以单级或者以二、

三级放大单元为基本放大电路引入的,其电路结构、负载条件、性能要求和以单片集成运放作基本放大电路引入负反馈有所不同。因此,本书采用前一种方法来讨论负反馈放大电路的组成及性能特点,更符合模拟集成电路的实际情况。

4. MOS集成工艺的突出优点和发展使各种MOS模拟集成电路的性能日趋完善,其应用日益广泛。因此,本书第3、5、7章中专门介绍MOS模拟集成电路的基本单元电路(如放大电路、电流源、MOS模拟开关等)、各种MOS集成运放、MOS电压比较器、MOS器件的开关特性和MOS门电路等。

5. 电流模电路理论与技术及其高性能集成电路是伴随高速集成工艺发展起来的新兴电路技术的分支,用电流模技术设计的高性能模拟集成电路容量大、速度快、精度高、频带宽、线性好、效率高,可以说是模拟集成电路设计的重大突破。电流模电路理论与技术对当代及今后各种高速、宽频带、高精度线性与非线性模拟集成电路的发展至关重要。因此,本书第6章专门介绍了电流模电路的基本概念、跨导线性回路原理、电流放大电路、各种电流传输器及其应用、电流反馈运算放大器等。这些内容是电流模电路的基本内容,也是深入研究电流模电路的基础。

6. 编写本书时,考虑了各学校教学计划和课程内容安排的不同,为使本书具有通用性,所增加的新内容均保持有相对的独立性,删去这部分内容或者改变讲授次序不会对教学产生多大影响。例如第7章脉冲波形的产生和处理电路,第8章模数转换器和数模转换器是独立的,可以移至数字电路中介绍。

书中各章之后均附有较多习题,帮助读者加深理解各章的主要内容,扩展知识面,综合应用已学过的知识去独立分析问题。

本书的第1章由刘润生编写,第2~8章由高文焕编写。刘蕙芬参加了部分习题的选编工作。在本书的编写过程中,清华大学电子工程系主任、国家教育委员会高等学校工科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董在望教授给予了大力的帮助和指导,提出了许多宝贵意见。清华大学电子工程系线路与系统教研组的许多同志也给予了热情的支持。

北京航空航天大学教授、国家教育委员会高等学校工科电工课程教学指导委员会委员张凤言主审了全稿。在审稿过程中,张凤言教授对全书的结构、内容的选取等提出了许多颇有价值的修改意见,他的辛勤劳动对提高本书质量十分重要。

在此,对以上所有给予我们支持、帮助和指导的同志致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

1996年5月

于北京清华园

常用的文字符号说明

一、两条原则

1. 电压和电流符号的规定

以基极电流为例:

I_B	大写字母、大写下标,表示基极直流电流
I_b	大写字母、小写下标,表示基极电流交流分量的有效值
i_B	小写字母、大写下标,表示基极电流含有直流的总瞬时值
I_{bm}	基极电流交流分量的最大值
$\dot{I}_b$	正弦基极电流的复数量
ΔI_B	基极直流电流的变化量
Δi_B	基极总瞬时电流的变化量

2. 电阻

R	大写字母表示电路的电阻或等效电阻
r	小写字母表示器件的等效电阻

二、常用的基本符号

1. 电压

V, v	电压通用符号
v_s	信号源电压
v_i, v_i	输入信号电压
v_o, v_o	输出信号电压
V_{CC}, V_{DD}	正电源电压
V_{EE}, V_{SS}	负电源电压
V_{BB}, V_{GG}	基极、栅极偏置电压
V_{REF}	基准电压(参考电压)
v_{ID}, v_{id}	差模输入电压
v_{IC}, v_{ic}	共模输入电压
v_{OD}, v_{od}	差模输出电压
v_{OC}, v_{oc}	共模输出电压
V_{IDM}, V_{ICM}	最大差模、共模输入电压

V_{ommax}	输出电压最大幅度
V_F 、 V_i	反馈电压
v_P 、 v_N	集成运放同相、反相端的输入电压
V_{OH} 、 V_{OL}	输出高、低电平
V_{IH} 、 V_{IL}	输入高、低电平
V_{on} 、 V_{off}	开门、关门电平
V_{NH} 、 V_{NL}	高、低电平噪声容限电压

2. 电流

I 、 i	电流通用符号
i_s	信号源电流
i_I 、 i_i	输入电流
i_O 、 i_o	输出电流
I_R	基准电流(参考电流)
I_{CC} 、 I_{DD}	正电源静态电流
I_{EE} 、 I_{SS}	负电源静态电流
I_L 、 i_L	负载电流
i_F 、 i_f	反馈电流
I_{ommax}	输出电流最大幅度

3. 功率

P 、 p	功率通用符号
P_i 、 P_o	输入、输出信号功率
P_D	静态功率,空载功率
P_{DC}	电源供给功率
P_{ommax}	最大输出功率

4. 电阻、电容、电感及阻抗

R 、 r	电阻通用符号
g	电导通用符号
R_i 、 R_o	输入、输出电阻
R_{if} 、 R_{of}	反馈放大电路的输入、输出电阻
R_s	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_F	反馈电阻
R_P 、 R_N	集成运放同相、反相输入端外接的等效直流电阻
C	电容通用符号
C_i 、 C_o	输入、输出电容
C_L	负载电容
C_M	密勒电容

L	电感通用符号
Z	阻抗通用符号
5. 增益(放大倍数)	
A	增益通用符号,其下标不同意义也不同
A_v 、 A_i	电压、电流增益
A_r 、 A_g	互阻、互导增益
A_s	源增益
A_f	反馈放大电路的增益
A_{vd} 、 A_{vc}	差模、共模电压增益
A_M 、 A_0	中频、低频增益
F	反馈系数通用符号
F_v 、 F_i	电压、电流反馈系数
F_r 、 F_g	互阻、互导反馈系数

6. 频率

f 、 ω	频率、角频率通用符号
f_H 、 f_L	放大电路的上限、下限截止频率
f_{HF} 、 f_{LF}	反馈放大电路的上限、下限截止频率
BW	通频带
BW_G 、 BW_P	单位增益带宽、全功率带宽
f_p 、 f_z	极点、零点的频率
f_s	采样频率
f_0	振荡频率、中心频率
f_{CMR}	共模抑制比的上限截止频率

三、器件参数符号

D 、 D_Z	二极管、稳压二极管
T	晶体管;场效应管
V_D 、 V_Z	二极管正向压降、稳压二极管稳定电压
V_T	温度的电压当量
V_{th}	二极管、晶体管、门电路、电压比较器等的阈值电压
$V_{GS(th)}$ 、 $V_{GS(off)}$	场效应管的阈值电压(开启电压)、截止电压(夹断电压)
V_A	厄尔利电压
λ	基区宽度调制系数;沟道长度调制系数
$V_{CE(sat)}$	晶体管 C、E 间的饱和压降
$V_{(BR)CBO}$	发射极开路时 C、B 间的击穿电压
$V_{(BR)CEO}$	基极开路时 C、E 间的击穿电压
$V_{(BR)EBO}$	集电极开路时 E、B 间的击穿电压

$V_{(BR)DS}、V_{(BR)GS}$	漏源间的击穿电压、栅源间的击穿电压
V_{IO}	输入失调电压
I_S	二极管反向饱和电流;晶体管的饱和电流
I_{ES}	晶体管发射结反向饱和电流
$I_{CBO}、I_{CEO}$	发射极开路时 C、B 间的反向电流,基极开路时 C、E 间的反向电流
I_{EBO}	集电极开路时 E、B 间的反向电流
$I_{CM}、I_{DM}$	集电极、漏极最大允许电流
I_{DSS}	耗尽型场效应管的饱和漏极电流
$I_{IB}、I_{IO}$	集成运放的输入偏置电流、输入失调电流
f_β	晶体管共发射极电流放大系数 β 的截止频率
f_α	晶体管共基极电流放大系数 α 的截止频率
f_T	晶体管、场效应管的特征频率
$P_{CM}、P_{DM}$	晶体管集电极、场效应管漏极最大允许耗散功率
r_d	二极管的动态电阻
$r_{bb'}$	晶体管基区体电阻
r_e	发射结的微变电阻, $r_e = V_T / I_{EQ}$
$r_{b'e}、r_{b'c}$	混合 π 形模型中发射结、集电结的微变等效电阻
$r_{be}、r_{eb}$	晶体管共发射极、共基极接法的输入电阻
r_{ce}	晶体管共发射极接法时的输出电阻
r_{ds}	场效应管共源极接法时的输出电阻
$g_m、g_{mb}$	跨导、背栅跨导
$C_{b'e}、C_{b'c}$	混合 π 形等效电路中集电结、发射结的等效电容
$C_{gs}、C_{gd}、C_{ds}$	场效应管栅源、栅漏、漏源间的等效电容
$C_{gb}、C_{bs}$	场效应管栅极与衬底、源极与衬底间的等效电容
$C_T、C_D$	势垒电容、扩散电容
C_j	PN 结的结电容
$\alpha、\bar{\alpha}$	晶体管共基极电流放大系数
$\beta、\bar{\beta}$	晶体管共发射极电流放大系数
N	电子型半导体;运放的反相输入端
$n、p$	电子浓度、空穴浓度
P	空穴型半导体;运放的同相输入端
$W、L$	沟道宽度、长度
η	跨导比;效率
k_p	MOS 管的导电因子
$E_{g0}、V_{G0}$	半导体材料的禁带宽度、带隙电压
S_R	转换速率(摆率)
$N_A、N_D$	受主、施主杂质浓度

μ_n, μ_p	电子、空穴的迁移率
D_n, D_p	电子、空穴的扩散系数

四、其它符号

D	反馈深度,非线性失真系数,占空比
D/A,DAC	数模转换器
A/D,ADC	模数转换器
K, k	常数;锯齿波扫描速度
K_{CMR}	共模抑制比
K_{SVR}	电源电压抑制比
T	温度;周期
T_{CP}	时钟周期
T_B	回扫期
T_S	采样周期
t	时间
t_r, t_f	上升、下降时间
t_{re}	恢复时间
t_w	脉冲宽度
t_{pd}	平均传输延迟时间
t_s	存储时间
t_d	延迟时间;分辨时间
t_{on}, t_{off}	开通时间、关断时间
t_{PHL}, t_{PLH}	导通、关闭延迟时间
G_m, φ_m	幅度裕度、相位裕度
φ	相位角
Q	静态工作点;电荷
τ	时间常数
S	面积
θ	导通角
CP	时钟脉冲
δ	相对误差
Δ	量化单位
MSB	最高有效位
LSB	最低有效位

目 录

第 1 章 半导体二极管与双极型晶体管	1
1.1 半导体中的载流子及其运动	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 半导体中载流子的运动	7
1.2 PN 结	9
1.2.1 动态平衡情况下的 PN 结	10
1.2.2 PN 结的伏安特性	12
1.2.3 PN 结的温度特性	16
1.2.4 PN 结的反向击穿特性	16
1.2.5 PN 结的电容效应	18
1.3 半导体二极管	20
1.3.1 二极管的结构	21
1.3.2 二极管的伏安特性	22
1.3.3 二极管的主要参数	23
1.3.4 二极管的等效电阻	23
1.3.5 二极管的模型	24
1.3.6 二极管电路的分析方法	27
1.3.7 二极管应用电路举例	30
1.4 双极型晶体管	33
1.4.1 晶体管的结构	33
1.4.2 放大状态下晶体管的工作原理	34
1.4.3 晶体管的 Ebers - Moll 模型	39
1.4.4 晶体管的特性曲线	45
1.4.5 温度对晶体管特性的影响	50
1.4.6 晶体管的主要参数	51
1.4.7 晶体管的应用原理	53
1.5 模拟集成电路中的元件	58
1.5.1 集成 NPN 型晶体管	58
1.5.2 集成 PNP 型晶体管	59
1.5.3 集成电路中的二极管	60
1.5.4 集成电路中的电阻和电容	60

1.5.5 集成电路中元器件的特点	61
习题	62
第 2 章 场效应晶体管	69
2.1 MOS 场效应管	69
2.1.1 N 沟道增强型 MOS 场效应管	70
2.1.2 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	80
2.1.3 P 沟道 MOS 场效应管	82
2.1.4 MOS 场效应管的模型	84
2.2 结型场效应管	87
2.2.1 结型场效应管的结构	87
2.2.2 N 沟道结型场效应管的工作原理	88
2.2.3 N 沟道结型场效应管的特性曲线与电流方程	90
2.2.4 结型场效应管的模型	91
2.3 场效应管的主要参数	92
2.4 场效应管的应用原理	93
2.4.1 场效应管放大电路	93
2.4.2 场效应管开关电路	95
2.4.3 场效应管电流源	96
习题	99
第 3 章 双极型模拟集成电路的基本单元电路	104
3.1 基本共发射极放大电路的组成及工作原理	104
3.1.1 基本共发射极放大电路的组成	104
3.1.2 基本共发射极放大电路的工作原理	104
3.2 放大电路的主要性能指标	108
3.2.1 输入阻抗和输出阻抗	108
3.2.2 增益	110
3.2.3 频率响应	112
3.2.4 非线性失真	113
3.2.5 最大输出幅度	113
3.2.6 最大输出功率与效率	113
3.3 放大电路的分析方法	114
3.3.1 图解法	114
3.3.2 等效电路法	120
3.4 共集电极放大电路与共基极放大电路	129
3.4.1 共集电极放大电路	129
3.4.2 共基极放大电路	133

3.5 电流源及其应用	134
3.5.1 常用的电流源电路	135
3.5.2 电流源的主要应用	140
3.6 差分放大电路	142
3.6.1 差分放大电路的组成及基本特性	142
3.6.2 差放的小信号分析	147
3.6.3 采用有源负载的差分放大电路	156
3.6.4 差分放大电路的失调及温漂	157
3.7 互补输出级	161
3.7.1 互补输出的基本原理	161
3.7.2 甲乙类互补输出级	164
3.7.3 准互补输出级	166
3.8 放大电路的频率响应特性	169
3.8.1 频率响应的基本概念	169
3.8.2 频率响应的分析方法	171
3.8.3 单管共发射极放大电路的高频响应	175
3.8.4 共集电极放大电路的高频响应	180
3.8.5 共基极放大电路的高频响应特性	182
3.8.6 放大电路的低频响应特性	184
3.9 多级放大电路及组合放大单元电路	187
3.9.1 直接耦合放大电路的特殊问题	188
3.9.2 多级放大电路的增益	189
3.9.3 多级放大电路的频率响应	192
3.9.4 组合放大单元电路	193
习题	196

第4章 MOS模拟集成电路的基本单元电路	214
4.1 MOS场效应管的基本特点	214
4.2 MOS场效应管的小信号模型和三种组态基本放大电路	215
4.2.1 MOS场效应管的小信号模型	215
4.2.2 基本共源极放大电路	221
4.2.3 基本共漏极放大电路	222
4.2.4 基本共栅极放大电路	223
4.3 MOS管有源电阻和电流源	225
4.3.1 MOS管有源电阻	225
4.3.2 MOS管电流源	227
4.4 集成MOS管单级放大电路	231
4.4.1 共源极放大电路	231

4.4.2 共漏极放大电路·····	238
4.4.3 共栅极放大电路·····	240
4.4.4 共源极-共栅极放大电路·····	243
4.5 MOS管差分放大电路·····	246
4.5.1 MOS管基本差分放大电路·····	246
4.5.2 有源负载的MOS管差分放大电路·····	250
4.6 CMOS输出级·····	253
4.7 MOS模拟开关·····	254
4.7.1 简单的MOS模拟开关·····	255
4.7.2 CMOS传输门与CMOS模拟开关·····	256
习题·····	259

第5章 反馈放大电路····· 268

5.1 反馈的基本概念·····	268
5.1.1 什么是反馈·····	268
5.1.2 反馈放大电路的组成·····	269
5.1.3 反馈极性——负反馈与正反馈·····	272
5.1.4 反馈电路的基本方程式·····	274
5.1.5 负反馈放大电路的四种类型·····	276
5.2 负反馈对放大电路性能的影响·····	279
5.2.1 负反馈提高增益的稳定性·····	279
5.2.2 负反馈对输入电阻的影响·····	281
5.2.3 负反馈对输出电阻的影响·····	282
5.2.4 负反馈展宽频带·····	284
5.2.5 负反馈可以减小非线性失真·····	286
5.3 负反馈放大电路的分析方法·····	287
5.3.1 等效电路法·····	287
5.3.2 方框图法·····	288
5.3.3 深度负反馈条件下的近似计算·····	288
5.4 负反馈放大电路的稳定性和相位补偿·····	291
5.4.1 负反馈放大电路的自激条件及稳定性判别·····	291
5.4.2 负反馈放大电路稳定性的分析方法·····	294
5.4.3 负反馈放大电路的相位补偿·····	296
5.5 负反馈放大电路实例·····	300
5.5.1 集成音频功率放大电路LM380·····	300
5.5.2 集成宽带放大电路MC1553·····	301
习题·····	303

第 6 章 集成运算放大器及其基本应用电路	312
6.1 集成运放的组成及其基本特性	312
6.1.1 集成运放的组成	312
6.1.2 集成运放的基本特性	313
6.2 集成运放的主要参数	314
6.2.1 输入失调参数	314
6.2.2 差模特性参数	315
6.2.3 共模特性参数	316
6.2.4 大信号动态特性	317
6.2.5 电源特性参数	320
6.3 双极型单片集成运算放大器	321
6.3.1 通用型单片集成运放 F007	321
6.3.2 超高精度单片集成运放 OP177	323
6.3.3 高速宽带集成运放 LT1226	327
6.4 CMOS 集成运算放大器	329
6.4.1 CMOS 集成运放的特点	329
6.4.2 CMOS 集成运放	333
6.5 集成运放的应用分类及三种输入方式	338
6.5.1 集成运放的应用分类	338
6.5.2 集成运放的三种输入方式	339
6.6 集成运放的模拟运算电路	341
6.6.1 加法运算电路	342
6.6.2 减法运算电路	343
6.6.3 积分运算电路	343
6.6.4 微分运算电路	345
6.6.5 对数与反对数运算电路	346
6.7 集成运放性能参数对运算误差的影响	348
6.7.1 A_{od} 、 R_{id} 为有限值引起闭环增益的误差	349
6.7.2 共模抑制比 K_{CMR} 为有限值引起闭环增益的误差	350
6.7.3 输入失调参数 I_{IB} 、 V_{IO} 及 I_{IO} 引起输出电压的误差	351
6.7.4 运放的开环带宽对闭环增益的影响	352
6.7.5 积分电路的运算误差	353
6.8 电压比较器	356
6.8.1 电压比较器的基本特性	356
6.8.2 电压比较器的应用电路	359
6.8.3 单片集成电压比较器	363
习题	367