

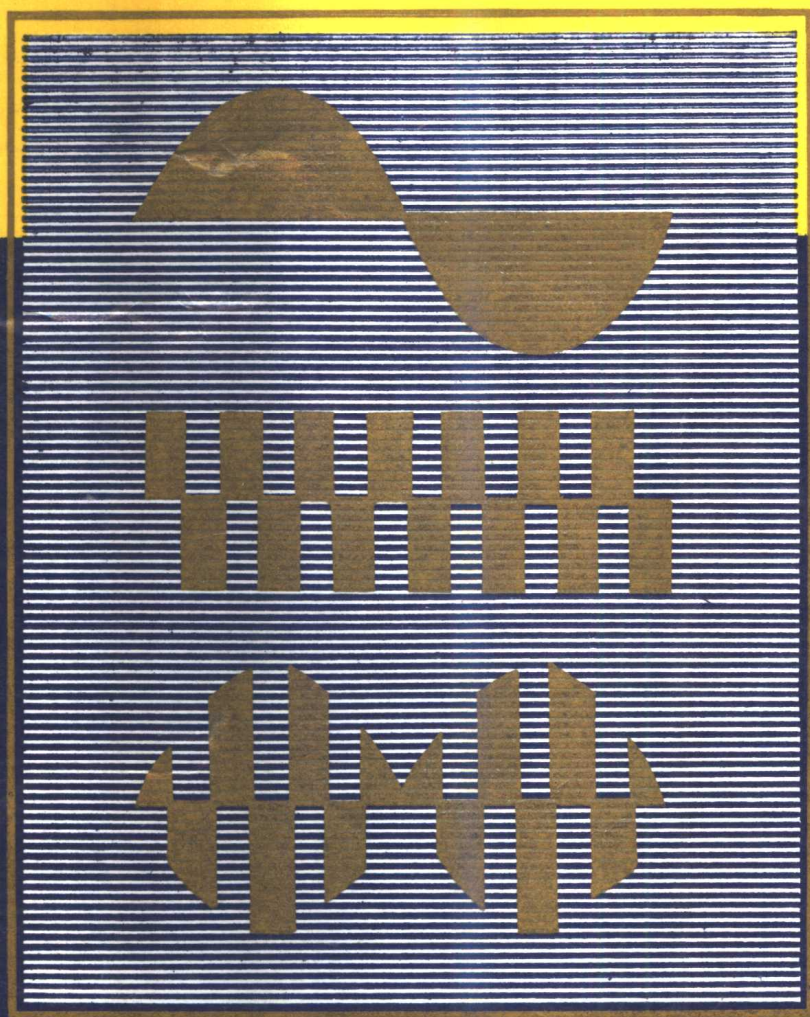
983650

# 电子电路基础

(第二版)

——高性能模拟电路和电流模技术

张凤言 编著



高等教育出版社

982680

# 电子电路基础

(第 二 版)

张凤言 编著

高等教育出版社

## (京)112号

本书经高等学校工科电工课程教学指导委员会电子线路课程教学指导小组委托清华大学董在望教授审阅。同意作为高等学校教材出版。

本书是在保留并加强第一版理论基础、发扬第一版特色的基础上,大量引入90年代初模拟集成电子学的新成果而全面修订的。全书共有10章:集成电路元、器件基础;模拟集成基本单元电路基础;放大电路的频率特性;集成运算放大器;放大电路反馈原理与稳定化基础;MOS模拟集成电路基础;集成运放的高性能组合放大应用技术;模拟集成乘法器及其应用;应用电流模技术的部分模拟电路;稳压电源及其高精度和高效率技术。本书含3个重要组成部分:模拟集成电路基础、电流模技术、高性能模拟集成电路及其应用。较全面、系统介绍电流模技术,并把该技术与实现集成电路高性能相结合,是本书重要特色之一。

本书采用国际单位制(SI)和国际(GB)。

本书可作为高等学校理工科电子、通信、自动控制、计算机等类专业本科生教材或教学参考书,可供研究生和教师参考,对电子技术工程师也很有用。

责任编辑 姚玉洁

### 图书在版编目(CIP)数据

电子电路基础:高性能模拟电路和电流模技术/张凤言编著, —2版. —北京:高等教育出版社, 1995

ISBN 7-04-005204-0

I. 电… II. 张… III. 电子电路-模拟集成电路 IV. ①TN710②TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01365 号

\*

高等教育出版社出版  
新华书店总店北京发行所发行  
国防工业出版社印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 41 字数 1 020 000

1986年1月第1版

1995年5月第2版 1995年5月第1次印刷

印数 0001—6 534

定价 21.20 元

## 第二版前言

本书第一版 1991 年在国家教育委员会举办的第二届全国高等学校优秀教材评选中获国家教委优秀教材一等奖。第一版书稿写于 1982 年。1982 年以来,模拟集成电路理论和设计、集成电路工艺、模拟电子应用技术都有了巨大发展和突破。本书第二版是在第一版基础上,根据国家教育委员会批准的《电子电路(Ⅰ)、(Ⅱ)课程教学基本要求》,以及国家教育委员会高等学校工科电子线路课程教学指导小组建议,考虑到模拟电子技术的发展而全面修订的。

1. 第二版与第一版相比,内容变化很大。第一版内容被收留在第二版内的,篇幅上约占 40%;第二版内增补内容(含新工艺、新器件、新电路和新技术等)约占 60%,并被分别编排在 4、6~10 章中。

第二版的第 1、2、3、5 章分别取自第一版的第一、二、三、四和七章。但第二版又补充了一些重要基础内容,如各种晶体管工作原理、MOSFET 亚阈值导电特性和体效应以及背栅控制特性、埋层齐纳稳压管、垂直沟道阵列式大功率 MOSFET、绝缘栅双极型大功率晶体管(IGBJT)、电流模电路基础、高速宽带集成缓冲器、宽带集成放大器等。

第二版的第 1、2、3、5 章讨论模拟集成电路的基本器件和基本电路的基本概念、工作原理、基本特性和分析方法。这些是模拟电子技术的重要理论和技术基础;是本书第二版的重点内容之一。它保留了第一版的主要特色。

2. 本书第二版的重点内容之二是介绍一些高性能的模拟集成电路及应用。MOS 集成工艺的突出优点和发展使各种 MOS 模拟集成电路和功率器件向高性能日趋完善,其应用日益广泛;发展迅速的高、新模拟电子应用技术必然要使用各种高性能的模拟集成电路;而目前国内系统介绍双极型和 MOS 高性能模拟集成电路的书籍却不多。因此,第二版以高性能模拟集成电路的关键技术指标为线索,用目前已比较成熟并用于实际的新工艺、新器件、新电路及新技术,来综合说明达到高性能指标的思路和方法,以建立为提高模拟集成电路技术指标而必须综合考虑工艺、器件与电路技术的完整概念。这对于高性能模拟集成电路的分析、设计和应用都是很重要的。

3. 电流模电路与技术是第二版重点内容之三。第 2 章专节讨论电流模电路基础,在第 4、6、8~10 章的有关章节中比较全面、系统地讨论电流模技术,并把该技术与实现模拟集成电路的高性能有机结合起来,充分展示电流模技术的实用性、先进性和巨大潜力,这是本书的重要特色之一。

目前乃至 21 世纪初,硅集成工艺仍是大规模和超大规模集成电路的主导工艺。使用于高速、高精度、宽频带模拟集成电路的工艺现在主要是硅互补双极(CB)工艺和线性兼容 CMOS(LC<sup>2</sup>MOS)工艺。当今 CB 工艺可以做到 NPN 管的  $f_T \approx 10\text{GHz}$ , PNP 管的  $f_T \approx 4\text{GHz}$ 。电流模电路理论与技术及其高性能集成电路正是与上述高速集成工艺相伴发展的新兴电路技术分支。它对当代及今后各种高速、宽频带、高精度线性和非线性模拟集成电路的发展至关重要。

第二版讨论的电压模和电流模高性能模拟集成电路有:超低噪声、超高精度、超低偏流集成运放;超高速、超宽频带电流模集成运放;电流反馈高精度高速度数据放大器;高精度高速度和

超高速电压比较器;高精度、高速超高精度和带宽 DC~1GHz 的电流模乘法器;高精度多功能平衡调制/解调器;CMOS 低功耗和超低漂移集成运放、CMOS 电压比较器、CMOS 电流模乘法器、高精度 CMOS 模拟开关和宽带低噪声开关电容滤波器;电流传输器、高精度和宽带电流模对数比变换器及 RMS-DC 变换器;电流模脉冲宽度调制器;高精度基准稳压器、高效率低压差线性集成稳压器等以及它们的典型应用电路。

第 10 章还重点讨论了应用电流模脉冲宽度调制器的高效率开关稳压电源技术。

虽然第二版引进了大量新内容,但可读性较强;注重由浅入深、阐述详细、讲清难点、强调重点。因此,第二版的第 1、2、3、5 章和 4、6、10 章的部分内容,完全可以作为高等学校理工科电子、通信、自动控制类等各专业本科生模拟集成电路或模拟电子技术课程的教材;4、6、10 章的部分内容和 7、8、9 章可作为上述各专业本科生高年级选修课和硕士研究生的教材或课程设计、毕业设计的参考书;第 4、6~10 章的新集成电路、新技术及大量工程应用电路也很适用于电气与电子工程新技术继续教育用书。在内容深度层次的延伸上,第二版具有较大的弹性。

本书第二版的修订与出版得到了北京航空航天大学校、系各级领导的热情关怀和大力支持,也同时得到了国家教委高等学校工科电工课程教学指导委员会副主任谢嘉奎教授和高等教育出版社领导的关心和帮助。我的研究生于立新、孟卫辉和邵晓坚同学也为第二版出了力,其中 10.3 节是孟卫辉与我合写的。

清华大学信息科学技术学院副院长兼电子工程系系主任、国家教委高等学校工科电工课程教学指导委员会委员董在望教授主审了第二版全稿,提出了许多重要宝贵的意见。高等教育出版社姚玉洁编审不仅对第二版书稿编辑加工、采用国际单位制(SI)和国标(GB)花了很大精力,而且实际上已成为第二审阅者,提出了大量改进和修正意见。董、姚二位教授的不辞辛劳对提高第二版质量十分重要。

在此,对以上所有同志谨致最衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1994 年 9 月

于北京航空航天大学

## 第一版前言

几年来,作者为北京航空学院电子工程系讲授电子线路课,编写了相应讲义《电子器件与线路》。还编写了《集成运算放大器及其应用》,作为选修课教材,经过院内外几次教学实践。1982年暑假,为北京电视大学等学校模拟电子技术课程的教师开设面授课,并为此编写了《模拟电子技术教师学习材料》。本书是以上述三套讲义为基础编写的。编写中,认真总结了上述课程教学实践与教材编写积累的点滴体会,学习了国内外有代表性的几本著作,研究了学科的发展趋势,吸取了近几年国内有关教学大纲及教学法讨论会的宝贵经验。

“电子线路”是非原理性、非设备性、理论密切联系实际的技术基础课。电子技术在迅速发展,学科内容在急剧膨胀,以电子器件为标志,已从电子管、晶体管、小规模集成电路进入大规模集成电路的时代。大规模集成电路的涌现,使器件、电路与系统的界限再难以截然分开。以音频信号为主、分立元件电路为主、小信号特性分析为主的传统教材体系,很难适应时代的需要。有鉴于此,在编写本书中力图做出以下尝试:

第一,加强理论基础,引用网络理论成果。电子器件的更新换代,导致了电子技术的飞速变革。但实践证明,从网络化的观点和系统的概念出发,对各种线性放大系统采用网络分析和复频域分析,是对电子管电路、晶体管电路、集成电路均适用的重要理论基础。因此,第二章阐述了密勒定理及其近似条件;第三章综合论述了网络函数极零点数目及数值,引证了短路和开路时间常数分析法;第四章采用实际电路与A网络、B网络统一表示的方块图相结合的方法讲述;第七章利用网络函数分析负反馈对电路频域和时域响应特性的影响,进而讨论负反馈系统的稳定化概念与技术。

第二,以集成电路分析与应用为重点。模拟集成电路[如集成运算放大器(以下简称集成运放)AD508L及HA2900]国内外均已步入大规模集成化的水平。集成运放的广泛线性与非线性应用,已推动了电子技术的重大变革。模拟乘法器是模拟集成电路的重要分支,它将以十分广泛而有效的非线性应用,推动电子技术的进一步变革。因此第二章就从分立元件基本放大电路的工作原理入手,逐步转移到以集成电路为重点,并在以后各章突出集成电路的分析与应用。第六章在讲述集成运放的应用时,除论述理想等效模型分析法外,还根据集成运放应用电路的重要特性,把集成运放应用电路归纳为反相输入、同相输入、差动输入和开环比较四种基本组态。

第三,引用大信号特性分析法。第一章首先以统一的观点,将晶体管的大信号模型和小信号模型有机地联系起来,并在第二、五、六、八等章中,应用大信号模型来分析各种基本电路和模拟乘法器的传输特性。大信号特性分析是图解法和等效电路法相结合、非线性和线性分析相结合的方法。放大电路的小信号特性是其大信号传输特性在静态点Q处的微变特性。应用大信号特性分析法能开阔视野,提高分析能力,有利于开拓新电路。

本书是作为教学参考书编写的。因此,在学科内容的深度与广度上都做了一些伸展。为使本书有利教学,便于自学,除大量删节陈旧内容外,编写中做了由浅入深、阐述详尽、辅以例证、系统归类、讲清难点、强调重点等努力。除每节后编选了结合基本教学内容的练习题外,大多数章

后还编集了难度稍大的综合练习题,以满足不同读者的需要。

因前几年北京航空学院教学计划中把电子器件独立设课,故本书没有纳入半导体物理、电子器件工作机理等内容。但实际上,只要对第一章就所缺内容,做几个学时的补充,就可完整地使用本书。

魏南源副教授 1982 年 12 月受北京航空学院聘请,对本书初稿第一到第四章进行了审阅;1983 年 10 月又受高等工科学校电子线路教材编审小组及高等教育出版社委托,对本书稿全面审阅,提出了许多批评与修改意见,书中许多问题都揉合着他的学术见解,例如,关于差放的共模抑制特性,就采用了他的论证。武汉大学张肃文教授评阅过本书的第一、二、三、四章。成都电讯工程学院黄香馥教授审阅了第三章。南开大学秦世才副教授审阅了第六章。北京航空学院潘维瀚副教授指导了本书的侧重与删节。在编写本书的过程中,还得到了北方交通大学贺允东副教授的帮助。他们都提出了很多宝贵的修改意见。在此一并谨致衷心感谢。

限于作者水平,书中仍会有谬误及不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

1984 年 8 月

于北京航空学院

# 本书常用符号

## 一、电流和电压符号的规定(以集电极电流和电压为例)

|                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| $I_C, V_C$               | 大写字母、大写下标,表示集电极直流电流和电压平均值;    |
| $I_c, V_c$               | 大写字母、小写下标,表示集电极电流和电压交流分量有效值;  |
| $i_C, v_C$               | 小写字母、大写下标,表示集电极含直流的电流和电压总瞬时值; |
| $i_c, v_c$               | 小写字母、小写下标,表示集电极电流和电压的交流分量;    |
| $I_{cm}, V_{cm}$         | 大写字母、小写下标,表示集电极电流和电压交流分量最大值;  |
| $I_c, V_c$               | 集电极电流和电压交流分量的复数表示;            |
| $\Delta I_C, \Delta V_C$ | 表示直流电流和电压的变化量;                |
| $\Delta i_C, \Delta v_C$ | 表示总瞬时值电流和电压的变化量。              |

## 二、基本符号

1.  $A$  增益或放大倍数的通用符号。 $A$  的不同符号的下标代表不同物理意义的增益,例如:

$A_i, A_v, A_r, A_g$  分别指电流、电压、互阻、互导增益;  
 $A_{is}, A_{vs}, A_{rs}, A_{gs}$  分别指计及源内阻  $R_s$  的上述增益;  
 $A_{iso}, A_{vso}, A_{rso}, A_{gso}$  分别指负载开路 and 短路时的上述增益;  
 $A_{if}, A_{vf}, A_{rf}, A_{gf}$  分别指反馈放大器的电流、电压、互阻、互导增益;  
 $A_{ifs}, A_{vfs}, A_{rfs}, A_{gfs}$  分别指负反馈放大器计及源内阻  $R_s$  的上述增益;  
 $A_l$  低频增益;  $A_h$  高频增益;  $A_{vo}$  运放开环增益;  
 $A_{vd}$  差模电压增益;  $A_{vc}$  共模电压增益;

$A$  复数增益的通用符号;  $A(s)$  增益函数的拉普拉斯变换;

$A$  表示反馈放大电路中的基本放大电路。

2.  $B$  反馈系数的通用符号

$B_i, B_v, B_r, B_g$  分别指电流、电压、互阻、互导反馈系数;  
 $B$  基极、反馈网络;  
 $BW$  带宽(-3dB);  $BW_G$  单位增益带宽;  $BW_P$  全功率带宽。

3.  $C$  电容

$C_i, C_o, C_L$  分别指输入、输出和负载电容;  
 $C_T, C_D, C_J$  分别指势垒电容、扩散电容和结电容;  
 $C_b, C_e$  分别指基极和射极旁路电容;  
 $C_\pi, C_\mu, C_{CS}$  分别指 BJT 的分布电容;  
 $C_{dg}, C_{gs}, C_{ds}$  分别指 FET 的分布电容;

$C_m, C_\varphi$  分别指密勒电容和相位补偿电容;

$C$  集电极。

4.  $D$  二极管, 场效应管漏极;

$D$  非线性失真系数, 扩散系数;

$D_Z$  稳压管。

5.  $E$  发射极;

$E$  能量, 电场强度, 误差。

6.  $F$  反馈深度, 调制频率。

7.  $f, \omega = 2\pi f$  频率、角频率;

$f_L$  低频截止 ( $-3\text{dB}$ ) 频率,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ;

$f_H$  高频截止 ( $-3\text{dB}$ ) 频率,  $\omega_H = 2\pi f_H$ ;

$f_G$  单位增益频率;

$f_a, f_\beta$  分别指共基 BJT 和共射 BJT 的截止频率;

$f_T$  特征频率;

$f_c$  时钟信号频率;

$f_0$  滤波器中心或转折频率。

8.  $G$  网络参数, 增益;

$G$  FET 栅极, 门电路;

$g$  动态(微变)电导, 例如:

$g_\pi, g_{ce}, g_\mu$  表示 BJT 的微变等效跨导;

$g_m$  低频跨导;

$g_{mf}$  具有反馈时的等效跨导。

9.  $I, i$  电流

$I_E, I_B, I_C, I_D, I_S$  分别指射、基、集、漏、源极直流(静态)电流;

$i_C, i_B, i_E, i_D$  分别指集、基、射、漏极总瞬时值电流;

$i_c, i_b, i_e, i_d$  分别指上述电极交流电流分量;

$I_c, I_b, I_e, I_d$  分别指上述电极交流电流的有效值;

$i_s$  信号源电流;

$I_{IO}$  输入失调电流;

$I_{IB}, I_B$  输入偏置电流;

$I_m$  电流幅度;

$I_c, I_b, I_e, I_d, I_g$  分别指上述电极交流电流的复数表示;

$I(s)$  电流的拉普拉斯变换;

$I_S$  PN 结反向饱和电流;

$I_{DSS}$  耗尽型 FET 在  $V_{GS}=0$  时  $I_D$  值;

- $I_D$  二极管电流, FET 漏极电流;  
 $I_F$  正向电流;  
 $I_R$  反向电流;  
 $I_{CBO}$  发射结开路时的集电结反向饱和电流;  
 $I_{CEO}$  基极开路时的穿透电流;  
 $I_{CM}$  集电极最大允许电流。
10.  $J$  电流密度;
11.  $K$  热力学温度单位(开尔文);  
 $K$  常数, 增益系数;  
 $K_{SVR}$  电源电压抑制比;  
 $K_{CMR}$  共模抑制比;  
 $\bar{K}$  共模抑制比;  
 $k$  玻耳兹曼常数。
12.  $N$  电子型半导体;  
 $n$  电子浓度;  
 $NF$  噪声系数。
13.  $P$  功率, 例如:  
 $P_i(P_1), P_o(P_O), P_C$  分别指输入、输出信号功率和集电极耗散功率;  
 $P_E$  直流电源供给功率;  
 $P_{CM}$  集电极最大允许功耗;  
 $P$  空穴型半导体;  
 $p$  空穴浓度。
14.  $R$  电阻, 例如:  
 $R_b, R_e, R_c, R_G, R_S, R_D$  分别指基、射、集、栅、源、漏极直流偏置电阻;  
 $R_i, R_o$  分别指电路的输入和输出电阻;  
 $R_{if}, R_{of}$  分别指有反馈电路的输入和输出电阻;  
 $R_s$  信号源内阻;  
 $R_F$  反馈电阻;  
 $R_L$  负载电阻;  
 $R_L$  等效负载电阻;  
 $R_{cm}$  共模负反馈电阻;  
 $r$  动态(微变)电阻, 等效电阻, 例如:  
 $r_{bb'}, r_{\pi}, r_{\mu}, r_{ce}, r_{ee}, r_{cc}$  表示 BJT 的体电阻和结电阻;  
 $r_{gs}, r_{ds}$  表示 FET 的动态电阻;  
 $r_1, r_2$  表示电路中节点 1 和 2 的等效电阻。
15.  $S$  FET 源极, 开关;

$S$  面积;

$S_R$  运算放大器的转换速率;

$s$  复频率;

$S/N$  信号功率与噪声功率的比值,简称信噪比。

16.  $T$  晶体三极管,磁感应强度单位(特斯拉);

$T$  温度,周期,环路增益;

$Tr$  变压器;

$t$  时间。

17.  $V, v$  电位、电压,例如:

$V_B, V_C, V_E, V_G, V_D, V_S$  分别指相应电极直流电位;

$V_{BE}, V_{CE}, V_{DS}, V_{GS}$  分别指相应电极间直流电压;

$v_{BE}, v_{CE}, v_{DS}, v_{GS}$  分别指相应电极间总瞬时值电压;

$v_i, v_o, v_{be}, v_{ce}, v_{ds}, v_{gs}$  分别指输入、输出和相应电极间交流电压分量;

$V_i, V_o, V_{be}, V_{ce}, V_{ds}, V_{gs}$  分别指上述交流分量的有效值;

$v_s, V_s$  信号源电压及其有效值;

$V_s, V_i, V_o, V_{be}, V_{ce}, V_{ds}, V_{gs}$  分别指上述交流分量的复数值;

$V(s)$  电压的拉普拉斯变换;

$V_{CC}, V_{DD}, +V_S$  正电源电压;

$V_{EE}, V_{SS}, -V_S$  负电源电压;

$V_{id}$  差模输入电压;

$V_{ic}$  共模输入电压;

$V_m$  交流电压的幅值;

$V_T$  热力学电压;

$V_{GS(th)}$  增强型 MOSFET 开启(阈值)电压;

$V_{GS(off)}$  耗尽型 MOSFET 阈值(或夹断)电压;

$V_{IO}$  输入失调电压;

$V_{OO}$  输出失调电压;

$V_{REF}$  参考(基准)电压;

$V_{(BR)}$  晶体管的击穿电压;

$V_{(on)}$  晶极管的导通电压;

$V_A$  厄尔利电压。

### 三、其他符号

1.  $\alpha, \bar{\alpha}$  共基 BJT 的电流增益(放大倍数)。

2.  $\beta, \bar{\beta}$  共射 BJT 的电流增益(放大倍数)。

3.  $\eta$  效率。

4.  $\tau$  时间常数,非平衡少子寿命,脉冲宽度。

- 
5.  $\varphi$  相位差。
  6.  $\delta$  倾斜率, 误差。
  7.  $\varphi_m$  相位裕度。
  8.  $G_m$  增益裕度。
  9.  $\zeta$  阻尼系数。
  10.  $X, x$  电抗。
  11.  $Z, z$  阻抗。
  12.  $Y, y$  导纳。
  13.  $\omega, \Omega$  角频率;  
 $\Omega$  电阻的单位(欧姆)。
  14. S 西门子;  
s 秒。
  15.  $\sigma$  复频率  $s = \sigma + j\omega$  的实部。
  16. rad 弧度。
  17.  $Q$  静态工作点, 品质因数。

# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 集成电路元、器件基础</b>              | 1  |
| 引言                                   | 1  |
| 1.1 半导体基础知识                          | 1  |
| 1.1.1 本征半导体                          | 1  |
| 1.1.2 杂质半导体                          | 3  |
| 1.1.3 载流子在半导体内的运动                    | 6  |
| 1.2 PN 结与晶体二极管                       | 7  |
| 1.2.1 PN 结的动态平衡过程和接触电位差              | 8  |
| 1.2.2 PN 结和晶体二极管的伏安特性与小信号等效模型        | 8  |
| 1.2.3 PN 结的反向击穿特性与高稳定性埋层齐纳稳压管        | 12 |
| 1.2.4 PN 结的结电容特性与变容二极管               | 14 |
| 1.2.5 PN 结的温度特性                      | 15 |
| 1.2.6 二极管的主要参数                       | 16 |
| 1.3 双极型晶体管(BJT)                      | 16 |
| 1.3.1 BJT 的工作原理                      | 17 |
| 1.3.2 共射 BJT 的伏安特性曲线                 | 20 |
| 1.3.3 共射 BJT 工作在正向作用区的大信号特性方程        | 22 |
| 1.3.4 BJT 的主要特性参数                    | 26 |
| 1.3.5 共射 BJT 的小信号等效模型及等效参数           | 27 |
| 1.3.6 共射 BJT 的频率参数 $f_\beta$ 和 $f_T$ | 31 |
| 1.4 场效应晶体管(FET)                      | 34 |
| 1.4.1 JFET 的结构、工作原理和特性               | 34 |
| 1.4.2 JFET 的特性曲线和大信号特性方程             | 36 |
| 1.4.3 增强型 N 沟道 MOSFET 的结构、工作原理和特性曲线  | 38 |
| 1.4.4 耗尽型 NMOS 管和增强型 PMOS 管工作原理      | 42 |
| 1.4.5 MOSFET 的大信号特性方程                | 43 |
| 1.4.6 MOSFET 亚阈区的传输特性                | 45 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1.4.7 MOSFET 的体效应和背栅控制特性        | 46 |
| 1.4.8 FET 的小信号等效模型              | 47 |
| 1.4.9 垂直沟道功率 MOSFET             | 51 |
| 1.4.10 绝缘栅双极型功率管(IGBT)          | 53 |
| 小结                              | 56 |
| 思考题和练习题                         | 57 |
| <b>第 2 章 模拟集成基本单元电路基础</b>       | 59 |
| 引言                              | 59 |
| 2.1 放大电路的工作原理和图解分析              | 59 |
| 2.1.1 共射放大电路的组成及其交、直流通路         | 59 |
| 2.1.2 图解法与动态工作分析                | 61 |
| 2.2 集成电路(IC)中的电流源和稳定偏置电路        | 64 |
| 2.2.1 BJT 参数的温度特性               | 64 |
| 2.2.2 主要镜像电流源                   | 65 |
| 2.2.3 对电源电压变化不敏感的偏置电流源          | 69 |
| 2.3 三种基本组态放大电路的特性与分析            | 71 |
| 2.3.1 电阻负载共射放大电路的大信号特性与微变等效分析   | 71 |
| 2.3.2 有源负载共射放大电路的大信号特性与微变等效分析   | 76 |
| 2.3.3 有源负载共射电路带载下的非线性失真、输出功率和效率 | 79 |
| 2.3.4 有源负载射随器的传输特性、波形失真、输出功率和效率 | 81 |
| 2.3.5 射随器的微变等效分析                | 82 |
| 2.3.6 共基放大电路                    | 85 |
| 2.3.7 串接放大电路与达林顿组态              | 87 |
| 2.3.8 JFET 放大电路                 | 90 |

|                                                                            |     |                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------|-----|
| 2.4 差动放大电路的特性与分析 .....                                                     | 91  | 3.2.3 网络函数的零点、极点和零极点图 .....                            | 142 |
| 2.4.1 差放的偏置、输入和输出信号及连接方式 .....                                             | 91  | 3.2.4 系统波特图的近似绘法 .....                                 | 142 |
| 2.4.2 基本共射差放理想对称时的大信号特性与非线性失真 .....                                        | 93  | 3.2.5 主极点的概念 .....                                     | 148 |
| 2.4.3 基本共射差放理想对称时的微变等效分析 .....                                             | 96  | 3.2.6 开路时间常数分析法 .....                                  | 149 |
| 2.4.4 JFET 共源差放的大信号特性及差模电压增益 .....                                         | 99  | 3.3 单级放大电路的频率特性 .....                                  | 152 |
| 2.4.5 有源负载共射差放的大信号特性及微变等效分析 .....                                          | 100 | 3.3.1 共射差放的高频特性 .....                                  | 152 |
| 2.4.6 实际差放的共模抑制比 .....                                                     | 103 | 3.3.2 用密勒定理及其近似条件分析 BW .....                           | 153 |
| 2.4.7 实际共射差放的输入失调特性 .....                                                  | 106 | 3.3.3 共基放大电路的频率特性 .....                                | 156 |
| 2.4.8 超低噪声和超级匹配的单片集成双极型对管 .....                                            | 108 | 3.3.4 共集放大电路的频率特性 .....                                | 157 |
| 2.5 乙类推挽输出级电路与功率放大器 .....                                                  | 110 | 3.4 多级和集成宽带放大器频率特性分析 .....                             | 159 |
| 2.5.1 乙类推挽输出级的工作原理 .....                                                   | 110 | 3.4.1 两级差动放大器的频率特性分析 .....                             | 159 |
| 2.5.2 输出功率、管耗和效率的分析计算 .....                                                | 112 | 3.4.2 组合式单片集成宽带放大器的频率特性分析 .....                        | 160 |
| 2.5.3 实际电路及转换速率 $S_R = 1\,000 \sim 15\,000\text{V}/\mu\text{s}$ 的缓冲器 ..... | 115 | 3.4.3 120MHz 差动式单片集成宽带放大器频率特性分析 .....                  | 164 |
| 2.6 电流模电路基础 .....                                                          | 119 | 小结 .....                                               | 168 |
| 2.6.1 电流模电路的一般概念 .....                                                     | 119 | 思考题和练习题 .....                                          | 168 |
| 2.6.2 跨导线性(TL)的基本概念 .....                                                  | 120 | <b>第4章 集成运算放大器</b> .....                               | 172 |
| 2.6.3 跨导线性(TL)回路原理 .....                                                   | 121 | 引言 .....                                               | 172 |
| 2.6.4 由 TL 回路构成的基本电流模电路 .....                                              | 124 | 4.1 集成运放的主要技术参数 .....                                  | 172 |
| 2.6.5 电流模电路的特点 .....                                                       | 129 | 4.1.1 集成运放的主要直流和低频参数 .....                             | 173 |
| 小结 .....                                                                   | 130 | 4.1.2 集成运放的主要交流参数 .....                                | 175 |
| 思考题和练习题 .....                                                              | 131 | 4.2 模拟集成工艺和集成运放的发展 .....                               | 176 |
| <b>第3章 放大电路的频率特性</b> .....                                                 | 137 | 4.2.1 模拟标准双极工艺及其典型运放电路 .....                           | 176 |
| 引言 .....                                                                   | 137 | 4.2.2 改进和兼容 BiMOS 模拟双极工艺及其典型运放电路 .....                 | 181 |
| 3.1 放大电路频率特性的基本概念 .....                                                    | 137 | 4.2.3 CMOS 工艺及其模拟集成电路 .....                            | 186 |
| 3.1.1 频率特性和通频带 .....                                                       | 137 | 4.2.4 线性兼容 CMOS(LC <sup>2</sup> MOS)工艺 .....           | 188 |
| 3.1.2 频率失真和相位失真 .....                                                      | 138 | 4.2.5 $f_T \geq 5\text{GHz}$ 的互补双极(CB)工艺及其典型运放电路 ..... | 188 |
| 3.1.3 增益带宽积 .....                                                          | 139 | 4.2.6 $f_T \geq 3\text{GHz}$ 的 flash(“闪光”)双极工艺 .....   | 190 |
| 3.2 复频域分析法 .....                                                           | 139 | 4.2.7 高稳定性的集成电阻 .....                                  | 190 |
| 3.2.1 复频域中的网络函数 .....                                                      | 139 | 4.3 超低噪声集成运放 .....                                     | 191 |
| 3.2.2 复频率 $s = \sigma + j\omega$ 的物理意义 .....                               | 140 |                                                        |     |

|                                                                       |     |                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 4.3.1 放大器的等效输入噪声和最小可分辨信号 .....                                        | 191 | 小结 .....                              | 247 |
| 4.3.2 超低噪声精密集成运放的设计与制造技术 .....                                        | 195 | 思考题和练习题 .....                         | 248 |
| 4.3.3 超低噪声超低失真精密宽带集成运放典型电路 .....                                      | 196 |                                       |     |
| 4.4 超高精度集成运放 .....                                                    | 199 | <b>第5章 放大电路反馈原理与稳定化</b>               |     |
| 4.4.1 共射-共基串接差放的共模自举和共模抑制特性 .....                                     | 199 | 基础 .....                              | 256 |
| 4.4.2 超低失调漂移的版图布局与内部在片动态调零技术 .....                                    | 201 | 引言 .....                              | 256 |
| 4.4.3 外部超低漂移调零网络工作原理 .....                                            | 203 | 5.1 反馈放大器的基本概念 .....                  | 256 |
| 4.4.4 偏流抵消电路 .....                                                    | 205 | 5.1.1 反馈极性与反馈形式 .....                 | 256 |
| 4.4.5 超高精度集成运放的电路设计与工艺技术小结 .....                                      | 205 | 5.1.2 理想反馈方块图和基本反馈方程式 .....           | 258 |
| 4.4.6 超高精度单片集成运放典型电路 .....                                            | 206 | 5.1.3 环路增益和反馈深度 .....                 | 259 |
| 4.4.7 超高精度混合集成运放典型电路 .....                                            | 207 | 5.1.4 负反馈放大器的分类 .....                 | 260 |
| 4.5 高速和超高速超高频集成运放 .....                                               | 210 | 5.2 负反馈对放大器性能的影响 .....                | 263 |
| 4.5.1 集成运放时域与频域特性的关系 .....                                            | 211 | 5.2.1 闭环增益的稳定性 .....                  | 263 |
| 4.5.2 CB工艺电压反馈高速( $S_R \leq 600V/\mu s$ )集成运放 .....                   | 212 | 5.2.2 输入电阻 .....                      | 263 |
| 4.5.3 电流反馈超高速集成运放的基本概念 .....                                          | 214 | 5.2.3 输出电阻 .....                      | 266 |
| 4.5.4 CB工艺电流反馈超高速( $S_R = 1\ 000 \sim 3\ 500V/\mu s$ )集成运放电路与特性 ..... | 218 | 5.2.4 信号源内阻对负反馈放大器性能的影响 .....         | 269 |
| 4.6 集成运放的等效模型及运算特性 .....                                              | 222 | 5.2.5 关于负反馈改善非线性失真的证明及条件 .....        | 269 |
| 4.6.1 理想集成运放及其等效模型 .....                                              | 222 | 5.2.6 负反馈放大电路的噪声特性 .....              | 271 |
| 4.6.2 实际集成运放的等效模型及运算特性 .....                                          | 224 | 5.3 负反馈放大器的分析与计算 .....                | 273 |
| 附录 A4 高速和超高速双极型集成电压比较器 .....                                          | 228 | 5.3.1 四种类型负反馈放大器的电压增益 $A_{vfb}$ ..... | 273 |
| A 4.1 具有锁定功能的精密高速电压比较器 .....                                          | 229 | 5.3.2 深度负反馈时 $A_{vfb}$ 的计算 .....      | 273 |
| A 4.2 超高速集成电压比较器 .....                                                | 235 | 5.3.3 负反馈放大器的方块图分析法 .....             | 275 |
| A 4.3 集成电压比较器应用电路 .....                                               | 240 | 5.4 负反馈对放大器频域和时域特性的影响 .....           | 283 |
|                                                                       |     | 5.4.1 负反馈对放大器传输函数极零点的影响 .....         | 283 |
|                                                                       |     | 5.4.2 单极点闭环系统的响应特性 .....              | 283 |
|                                                                       |     | 5.4.3 具有双极点开环增益函数的负反馈系统 .....         | 285 |
|                                                                       |     | 5.4.4 具有三极点开环增益函数的负反馈系统 .....         | 290 |
|                                                                       |     | 5.5 负反馈放大器的稳定性 .....                  | 291 |
|                                                                       |     | 5.5.1 负反馈放大器的自激振荡与稳定条件 .....          | 291 |
|                                                                       |     | 5.5.2 稳定裕度 .....                      | 293 |
|                                                                       |     | 5.6 相位补偿原理与技术 .....                   | 294 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 5.6.1 主极点补偿 .....                          | 294 |
| 5.6.2 极点分离的密勒电容补偿 .....                    | 295 |
| 5.6.3 用 $R_p C_p$ 串联网络的极点分离<br>补偿 .....    | 298 |
| 5.6.4 反馈网络零点的宽频带补偿 .....                   | 300 |
| 小结 .....                                   | 303 |
| 思考题和练习题 .....                              | 304 |
| <b>第6章 MOS模拟集成电路基础</b> .....               | 311 |
| 引言 .....                                   | 311 |
| 6.1 MOS模拟集成基本单元电路 .....                    | 311 |
| 6.1.1 MOS电流源 .....                         | 311 |
| 6.1.2 MOS单级放大器 .....                       | 313 |
| 6.1.3 MOS源耦对与差动放大器 .....                   | 315 |
| 6.1.4 CMOS互补输出级 .....                      | 317 |
| 6.2 CMOS集成运算放大器 .....                      | 318 |
| 6.2.1 简单的CMOS集成运放 .....                    | 318 |
| 6.2.2 单片集成低功耗CMOS运放 .....                  | 321 |
| 6.2.3 斩波稳零超低漂移单片集成CMOS<br>运放 .....         | 325 |
| 6.3 CMOS集成电压比较器 .....                      | 330 |
| 6.3.1 差动输入单片集成CMOS电压比<br>较器 .....          | 330 |
| 6.3.2 高精度自稳零CMOS集成电压比<br>较器 .....          | 330 |
| 6.4 MOS模拟开关 .....                          | 332 |
| 6.4.1 MOSFET开关特性与开关等效<br>电路 .....          | 333 |
| 6.4.2 CMOS开关电路 .....                       | 334 |
| 6.4.3 CMOS四通道模拟开关(Analog<br>Switche) ..... | 335 |
| 6.4.4 CMOS多路模拟转换开关<br>(Multiplexers) ..... | 338 |
| 6.4.5 高性能模拟开关介绍 .....                      | 339 |
| 6.5 开关电容电路(SC) .....                       | 340 |
| 6.5.1 开关电容电路的基本概念 .....                    | 340 |
| 6.5.2 基本开关电容电路 .....                       | 350 |
| 6.5.3 开关电容滤波器(SCF) .....                   | 359 |
| 6.5.4 单片集成开关电容滤波器介绍 .....                  | 363 |
| 小结 .....                                   | 365 |
| 思考题和练习题 .....                              | 366 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第7章 集成运放的高性能组合放大应<br/>用技术</b> .....                                                         | 370 |
| 引言 .....                                                                                       | 370 |
| 7.1 高压和大电流组合运放 .....                                                                           | 370 |
| 7.1.1 高精度或高速度大电流输出的<br>运放 .....                                                                | 370 |
| 7.1.2 高精度或高速高压大电流运放 .....                                                                      | 371 |
| 7.1.3 高压大电流运放的应用 .....                                                                         | 373 |
| 7.2 数控增益放大器 .....                                                                              | 375 |
| 7.2.1 用运放和模拟开关组成的数控增<br>益放大器 .....                                                             | 375 |
| 7.2.2 用运放和数/模转换器构成的数控<br>增益放大器 .....                                                           | 377 |
| 7.3 超低噪声超低漂移组合运放 .....                                                                         | 379 |
| 7.3.1 并联式超低噪声超低漂移组合运<br>放 .....                                                                | 379 |
| 7.3.2 斩波稳零双极型集成运放的超低噪<br>声组合运放 .....                                                           | 385 |
| 7.3.3 斩波稳零BiFET运放的超低噪声组<br>合运放 .....                                                           | 389 |
| 7.4 高速高精度组合运放 .....                                                                            | 390 |
| 7.4.1 具有直流高精度的高速和超高速<br>组合运放 .....                                                             | 390 |
| 7.4.2 采用前馈技术的高速高精度组合<br>运放 .....                                                               | 393 |
| 7.4.3 直流稳定 $BW \geq 100\text{MHz}$ 、 $S_R \geq$<br>$2000\text{V}/\mu\text{s}$ 的FET输入放大器 .....  | 399 |
| 7.4.4 直流稳定 $S_R \geq 3000\text{V}/\mu\text{s}$ 、 $BW$<br>$\geq 110\text{MHz}$ 的电流反馈组合放大器 ..... | 400 |
| 7.5 集成运放的最小相位误差组合<br>应用技术 .....                                                                | 403 |
| 7.5.1 减小相位误差的传统电路设计<br>方法 .....                                                                | 403 |
| 7.5.2 用匹配双运放组成有源反馈补偿的<br>最小相移应用技术 .....                                                        | 405 |
| 7.5.3 用匹配三运放组成有源反馈补偿的<br>最小相移应用技术 .....                                                        | 407 |
| 小结 .....                                                                                       | 410 |
| 思考题和练习题 .....                                                                                  | 410 |

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 8 章 模拟集成乘法器及其应用</b> .....                            | 415 |
| 引言 .....                                                  | 415 |
| 8.1 模拟乘法器的基本概念 .....                                      | 415 |
| 8.1.1 基本特性与主要参数 .....                                     | 415 |
| 8.1.2 模拟乘法器的直流误差 .....                                    | 418 |
| 8.2 跨导线性四象限乘法器原理 .....                                    | 419 |
| 8.2.1 电路组成 .....                                          | 419 |
| 8.2.2 跨导线性(TL)乘法器单元工作原理及分析 .....                          | 420 |
| 8.2.3 差模电压-电流变换器原理及分析 .....                               | 422 |
| 8.2.4 差模输出电流-单端输出电压变换器 .....                              | 424 |
| 8.2.5 典型通用跨导线性集成四象限乘法器电路 .....                            | 424 |
| 8.3 高精度跨导线性集成四象限乘法器 .....                                 | 426 |
| 8.3.1 跨导线性乘法器的误差分析与计算 .....                               | 426 |
| 8.3.2 利用有源负反馈的高精度跨导线性四象限乘法器 .....                         | 430 |
| 8.3.3 补偿非线性误差的交叉馈送技术 .....                                | 434 |
| 8.4 高速( $S_R = 450V/\mu s$ )超高精度单片集成四象限乘法器 .....          | 435 |
| 8.4.1 高速超高精度跨导线性乘法器的技术参数 .....                            | 435 |
| 8.4.2 高速超高精度跨导线性乘法器设计与制造技术 .....                          | 436 |
| 8.4.3 集成电路原理及传输特性分析 .....                                 | 436 |
| 8.4.4 高稳定度偏置与分母电压 $U$ 的内、外部设置电路 .....                     | 438 |
| 8.5 DC~(0.5~1)GHz 的跨导线性集成四象限乘法器 .....                     | 441 |
| 8.5.1 DC~(0.5~1)GHz 的电流模放大器/乘法器原理 .....                   | 441 |
| 8.5.2 DC~(0.5~1)GHz 跨导线性集成乘法器的设计考虑 .....                  | 444 |
| 8.5.3 DC~(0.5~1)GHz 单片集成四象限乘法器主要特性及基本应用 .....             | 445 |
| 8.6 MOS 模拟集成乘法器 .....                                     | 447 |
| 8.6.1 NMOS 乘法器原理与特性分析 .....                               | 447 |
| 8.6.2 CMOS 线性化电流模乘法器原理 .....                              | 449 |
| 8.6.3 CMOS 集成四象限乘法器电路分析 .....                             | 450 |
| 8.7 模拟集成乘法器的部分应用电路 .....                                  | 451 |
| 8.7.1 带宽 50~100MHz 的直接耦合乘法器和三变量乘除器 .....                  | 452 |
| 8.7.2 精密测量电路 .....                                        | 456 |
| 8.7.3 精密和宽带模拟信号变换器 .....                                  | 459 |
| 8.7.4 20~80MHz 的压控放大器(VCA) .....                          | 462 |
| 8.7.5 精密和宽带 AGC 环路 .....                                  | 465 |
| 8.7.6 线性压控频带通用有源滤波器 .....                                 | 467 |
| 8.7.7 压控正交振荡器和精密宽带 VFC .....                              | 469 |
| 8.7.8 频率变换应用电路 .....                                      | 471 |
| 8.8 平衡调制器/解调器及其应用 .....                                   | 472 |
| 8.8.1 压控吉尔伯特乘法器原理 .....                                   | 472 |
| 8.8.2 MC1596 在频率变换中的应用举例 .....                            | 473 |
| 8.8.3 多功能高精度平衡调制器/解调器电路原理及特性 .....                        | 477 |
| 8.8.4 精密增益为 $\pm 1$ 、 $\pm 2$ 和 $\pm 10$ 的对称增益放大器 .....   | 480 |
| 8.8.5 精密增益为 $+1$ 、 $+2$ 、 $+3$ 和 $+4$ 的多路模拟转换开关 .....     | 482 |
| 8.8.6 精密增益为 $\pm 1$ 、 $\pm 2$ 和 $\pm 10$ 的平衡调制器/解调器 ..... | 483 |
| 8.8.7 精密 AC-DC 变换器 .....                                  | 484 |
| 8.8.8 精密 LVDT 和 AC 桥路信号调零器 .....                          | 484 |
| 8.8.9 动态范围 100dB 的锁定放大器 .....                             | 486 |
| 小结 .....                                                  | 487 |
| 思考题和练习题 .....                                             | 487 |
| <b>第 9 章 应用电流模技术的部分模拟电路</b> .....                         | 494 |
| 引言 .....                                                  | 494 |
| 9.1 电流反馈数据放大器 .....                                       | 494 |