

模 拟 电 路 导 论

王筱颖 编

高 等 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书以集成电路为主, 兼顾分立电路的基本原理, 注重加强集成运算放大器、模拟乘法器以及 MOS 模拟集成电路分析与应用, 初步介绍了开关电容电路原理。全书共十三章, 每章内有例题并附习题。

本书可作为高等理工院校无线电技术类各专业相应课程的教材或教学参考书, 也可供研究人员、技术人员参考。

模拟电路导论

王筱颖 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 23.875 字数 590,000

1986 年 4 月第 1 版 1986 年 4 月第 1 次印刷

印数 00,001—18,400

书号 15010-0718 定价 4.80 元

前 言

当前, 模拟电路正在向集成化方向发展。本书以集成电路为主, 兼顾分立电路的基本原理, 从分立到集成、由浅入深地组成统一的体系, 注重加强集成运算放大器、模拟相乘器以及 MOS 模拟集成电路的分析与应用, 并初步介绍开关电容电路的基本原理。

全书共有十三章。第一章(绪论)给出放大器模型和模拟系统的基本概念, 以期使学生对本课程概貌与重点有初步了解。第二、三章讨论半导体器件的基本原理, 着重分析器件外特性和等效电路模型, 力图精简压缩涉及半导体器件物理方面的内容。关于工艺和版图知识则贯穿在有关章节, 结合电路原理作适当介绍。第四章至第七章是组成模拟系统的基本单元电路分析, 包括偏置、单端与差动小信号放大器以及大信号功率放大器原理。这是学习模拟集成电路与系统的基础。当然, 其中许多概念和方法也适用于分立电路。第八章至第十三章着重讨论模拟系统分析的基本概念和方法, 包括运放及其应用、反馈、频率特性和噪声。考虑到近年来 MOS 模拟集成电路的迅速发展, 本书适当增加了这方面的内容, 在最后一章研究 MOS 模拟集成电路的原理和应用, 包括中、小规模以及大规模 MOS 模拟集成电路的实例。

由于电子线路的实际应用涉及多方面的具体问题, 这些内容不可能在本书正文中作出过多的反映, 通过各章的例题与所附习题, 在巩固基本概念和分析方法的同时, 注意引导学生认识和研究一些实际电路。在实验课程中则安排更多时间, 并努力创造条件进行这方面的训练, 对某些实践性较强的教学内容, 例如整流与稳

压电源、运算放大器参数测试等移到实验课中解决。

本书可作为工科或理科无线电、自动化等专业二、三年级学生模拟电路原理(低频电子线路或线性电子线路)课程的教材,授课学时一般不超过70小时。也可作教学参考书或提供研究人员与技术人员参考。

在使用本书作教材时,可以根据专业要求、后续课程设置的有关情况选取适当的章节。例如,可以将第十二章或第十三章的内容移至其它课程讲授。此外,还可适当压缩或删除第八、九、十、十一等章中的某些内容。

郑君里同志提供了MOS模拟LSI电路的授课讲稿以及研究工作中的技术资料,以此为基础,我们共同完成了最后一章的编写工作。

白应奎同志参加了附录A的编写工作,对许多章节提出了修改意见,并负责各章习题的编写、整理以及绘图等工作。张尊桥、杨明杰、孙也里、胡兰芝等同志协助完成了许多工作。

在本书编写过程中,无线电电子学系以及微电子学研究所的许多同志给予各方面的支持和帮助。

本书初稿承高等学校理工科基础课程教材编审委员会电子线路编审小组委托合肥电子工程学院魏志源副教授、南京工学院谢洪黥同志审阅,并由南京工学院谢嘉奎副教授复审,提出了许多宝贵意见,作者在此表示衷心感谢。

限于水平,书中难免有错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

一九八五年五月

于清华大学无线电电子学系

符 号 说 明

(一) 基本符号

(1) 电压和电流

I, i 电流通用符号

V, v 电压通用符号

E 直流电源电压

V_i, v_i 输入电压有效值、瞬时值

V_o, v_o 输出电压有效值、瞬时值

V_s, v_s 信号源电压有效值、瞬时值

V_m, I_m 正弦电压、正弦电流幅值

V_Q, I_Q 静态工作点 Q 的电压、电流值

$\dot{V} = V(j\omega)$ 正弦电压复数值

$\dot{I} = I(j\omega)$ 正弦电流复数值

V_{os}, I_{os} 失调电压、失调电流

小写 v, i , 小写下标, 表示交流瞬时值

(例如 v_{ce} 表示 C-E 间交流电压瞬时值)

小写 v, i , 大写下标, 表示包含有直流的瞬时值

(例如 i_E 表示包含有直流的发射极电流瞬时值)

大写 V, I , 大写下标, 表示直流电压、电流值

(例如 V_{BE} 表示 B-E 间直流电压值)

大写 V, I , 小写下标, 表示正弦有效值

(例如 I_b 表示基极正弦电流有效值)

(2) 增益

A 增益通用符号

$\dot{A} = A(j\omega) = |A(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$ 增益的复数量

$A(\omega)$ 、 $\varphi(\omega)$ 增益的幅值和相角

A_i 、 A_{is} 电流增益、源电流增益

A_v 、 A_{vs} 电压增益、源电压增益

A_{vf} 反馈放大器电压增益

A_g 、 A_r 互导增益、互阻增益

A_{vd} 、 A_{vc} 差动放大器差模电压增益、共模电压增益

A_p 功率增益

A_0 中频增益

$A_l(j\omega)$ 低频增益

$A_h(j\omega)$ 高频增益

(3) 频率

f_l 、 ω_l 放大器低频边界(下降 3 dB)频率、角频率

f_h 、 ω_h 放大器高频边界(下降 3 dB)频率、角频率

BW 、 $\Delta\omega$ 通频带

f_{cp} 时钟频率

$s = \sigma + j\omega$ 复频率

(4) 阻抗

R 、 r 电阻通用符号

C 电容

L 电感

$Z = R + jX$ 阻抗

$Y = G + jB$ 导纳

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

$R_{\square}$ 扩散层薄层电阻(方块电阻)

(5) 功率

P 功率

p 瞬时功率

P_E 电源消耗的功率

P_o 输出功率

P_i 输入功率

P_c 集电极消耗功率

(二) 器件参数符号

(1) 二极管

V_D PN 结内建电位差

V_B PN 结击穿电压

V_r 二极管阈值电压

$V_T = \frac{kT}{q}$ 等效热电压

I_S 反向饱和电流

P_{ZM} 稳压管最大允许功耗

r_j 等效结电阻

C_j 结电容

C_T 势垒电容

C_D 扩散电容

(2) BJT

BJT 双极型晶体管

$r_{bb'}$ 基区体电阻

r_e 发射结动态电阻

r_c 集电结动态电阻

g_m 跨导

$\alpha, \bar{\alpha}$ 共基极交流、直流电流传输系数

α_F 共基极正向电流传输系数

α_R 共基极反向电流传输系数

$\beta, \bar{\beta}$ 共发射极交流、直流电流放大系数

β_F 共发射极正向电流放大系数

β_R 共发射极反向电流放大系数

V_A 厄尔利电压

I_{CBO} 发射极开路时 C-B 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

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

f_α 共基极交流电流传输系数的截止频率

f_β 共发射极交流电流放大系数的截止频率

f_T 特征频率

(3) 场效应晶体管

FET 场效应晶体管

MOSFET 金属-氧化物-半导体场效应管

JFET 结型场效应管

g_m 栅跨导

g_{mb} 背栅跨导

$\eta = g_{mb}/g_m$ 跨导比

V_T 开启电压、阈值电压

V_P 夹断电压

V_{TE} 增强型 MOSFET 阈值电压

V_{TD} 耗尽型 MOSFET 阈值电压

W/L 导电沟道宽、长比

μ_n 导电沟道中电子表面迁移率

C_{ox} 栅氧化层单位面积电容

$k = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} = \frac{k'}{2} \frac{W}{L}$ 导电系数

λ 沟道调制因子

$V_A = 1/\lambda$ 厄尔利电压

I_{DSS} $V_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流

R_{on} 动态导通电阻

$g_{ds} = 1/r_{ds}$ 漏极输出电导

P_{DM} 漏极最大允许耗散功率

BV_{GS} 栅击穿电压

BV_{DS} 漏-源击穿电压

C_{gs}, C_{gd} 栅-源电容、栅-漏电容

C_{gb} 栅极与衬底间的总电容

C_{sb}, C_{db} 源区与衬底、漏区与衬底间的 PN 结电容

(三) 其它符号

CMRR 共模抑制比

F 反馈系数

$D = 1 + AF$ 反馈深度

D 密勒效应 D 因子

T 热力学温度

$T(j\omega) = A(j\omega)F(j\omega)$ 环路传输函数

τ 时间常数

GBP 增益带宽积

N_F 噪声系数

$S_i/N_i, S_o/N_o$ 输入端、输出端信噪比

T_m 增益裕量

φ_m 相位裕量

D_h 谐波失真系数

η 效率

TR 变压器

SR 摆率(上升速率)

S 不稳定系数

ρ 电阻率

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 理想放大器模型.....	3
1.3 理想电压放大器.....	7
1.4 放大器的简单应用.....	10
1.5 实际放大器性能.....	12
1.6 模拟系统举例.....	21
习题.....	24
第二章 PN 结与半导体二极管	27
2.1 PN 结的形成.....	27
2.2 PN 结的伏安特性.....	31
2.3 PN 结的击穿特性.....	36
2.4 PN 结电容.....	38
2.5 温度对 PN 结特性的影响.....	40
2.6 半导体二极管.....	42
2.7 二极管的等效电阻.....	44
2.8 二极管电路的图解分析.....	45
2.9 稳压管.....	48
习题.....	52
第三章 双极型晶体管与场效应晶体管	55
3.1 双极型晶体管工作原理.....	55
3.2 双极型晶体管的 Ebers-Moll 模型.....	63
3.3 双极型晶体管的特性曲线.....	67
3.4 双极型晶体管的参数.....	79
*3.5 双极型晶体管模型的进一步讨论.....	82
3.6 增强型 MOS 场效应管的工作原理.....	85
3.7 增强型 MOSFET 特性曲线.....	91

3.8	耗尽型 MOSFET 的工作原理	96
*3.9	结型场效应管	99
3.10	场效应管的主要参数、模型和电路符号	104
3.11	温度对双极型晶体管、场效应晶体管特性的影响	112
3.12	MOSFET、JFET 和 BJT 的比较	114
	习题	116
第四章	偏置电路	119
4.1	放大电路的静态工作点	119
4.2	静态工作点的图解分析和近似计算	123
4.3	工作点稳定的偏置电路	126
4.4	直接耦合放大电路	130
*4.5	场效应晶体管放大器的静态工作点	139
4.6	恒流源电路	145
	习题	152
第五章	小信号线性放大原理	160
5.1	放大器的图解分析法	160
5.2	放大器的能量关系	168
*5.3	放大器的最大不失真输出电压	172
5.4	双极型晶体管交流小信号模型	174
5.5	放大器的等效电路分析法	191
5.6	发射极输出器	200
5.7	共基放大电路分析	203
5.8	组合放大电路	208
5.9	场效应晶体管小信号放大电路分析	212
	习题	220
第六章	差动放大器	230
6.1	差动放大器的工作原理、性能分析	230
6.2	有恒流源的差动放大器	241
6.3	多级差动放大电路	248
6.4	差动放大器的传输特性	250
6.5	差动放大器的失调和温漂	262

6.6 模拟乘法器	267
习题	271
第七章 低频功率放大器	276
7.1 低频功率放大器概述	276
7.2 单管功率放大器	278
7.3 推挽功率放大器	285
7.4 功率管的损坏与保护	298
*7.5 场效应管功率放大器	304
习题	307
第八章 双极型晶体管模拟集成电路	315
8.1 概述	315
8.2 集成电路的制造工艺	317
8.3 模拟集成电路的特点	333
8.4 电流源	336
8.5 双端输出变单端输出电路	345
8.6 输入级电路	349
8.7 典型运放电路	355
8.8 电流差动型集成运放电路	365
*8.9 其它模拟集成电路举例	370
习题	377
第九章 放大电路中的反馈	386
9.1 反馈的基本概念	386
9.2 反馈放大器的分类及其判断方法	392
9.3 负反馈对放大器性能的影响	400
9.4 负反馈放大器的分析方法	410
*9.5 四种组态负反馈放大器分析	427
习题	438
第十章 运算放大器的应用	445
10.1 运算放大器的宏模型	445
10.2 负反馈运算放大器的三种输入形式	449
*10.3 非理想运算放大器闭环特性分析	455

10.4	线性运算电路	462
10.5	非线性运算电路	471
10.6	高输入阻抗放大电路	479
*10.7	电压比较器	483
*10.8	采样-保持电路	488
10.9	非线性波形变换电路	490
10.10	直流稳压电源	495
10.11	使用单片集成运放的几个问题	499
	习题	504
第十一章 放大器的频率响应		513
11.1	频率响应的表示方法	513
11.2	放大器的低频响应	525
11.3	放大器的高频响应	537
11.4	多级放大器频响分析	552
11.5	负反馈对放大器频响的影响	557
11.6	放大器展宽频带的方法	560
11.7	负反馈放大器的稳定性分析	564
11.8	反馈放大器的频率补偿技术	580
*11.9	有源滤波器	593
	习题	598
第十二章 噪声		604
12.1	概述	604
12.2	噪声源	605
12.3	噪声模型	609
12.4	双极型晶体管放大器输出端噪声电平计算	613
*12.5	场效应晶体管放大器输出端噪声电平计算	616
12.6	噪声系数	618
*12.7	多级放大器的噪声系数	623
	习题	624
第十三章 MOS 模拟集成电路		626
13.1	概述	626

13.2	MOS 模拟集成电路制作工艺	623
13.3	MOS 管有源负载与电流源	638
13.4	MOS 集成运放中的基本单元电路	644
13.5	双端-单端输出转换与电平移动电路	660
*13.6	NMOS 集成运放	667
13.7	CMOS 集成运放	671
13.8	斩波稳零集成运放工作原理	682
*13.9	5G 7650 型斩波式集成运放	686
13.10	MOS 管作为模拟开关、开关电容电路	694
	习题	700
附录 A		706
附录 B		717
附录 C		721
附录 D		732
参考书目		747

标有 * 号各节为选读内容

第一章 绪 论

1.1 引言

由电子器件组成并完成一定功能的电路称为电子线路。组成电子线路的目的,常常是为了对信号进行传输、处理或用来产生某些信号。

从本世纪初发明无线电报开始,到三十年代中期,电子线路主要用于无线电通信、广播中。以后,随着科学技术的发展,电子线路的应用由无线电通信扩大到计算机科学、自动控制以及其它各个科学技术领域。

电子线路的发展是与电子器件的发展紧密结合的。随着电子器件的不断更新,电子线路的发展史经历了以下几个阶段。

1906年发明了真空三极管(电子管)。它能够产生从低频到微波范围的振荡,可以放大各种微弱信号。这一重大发明有力地促进了无线电工程的发展,使电子线路技术进入了实际应用阶段。

1948年至1952年,相继出现了点接触型晶体三极管与面结合型硅三极管。由于晶体管具有体积小、重量轻、寿命长、耗电低、不需要灯丝电源以及直流电源电压较低等一系列优点,因而,在许多领域中逐步取代了电子管。电子线路技术也转入以晶体管电路为主的历史阶段。

五十年代末至六十年代初,人们研制成功集成电路。它是在一小块硅片上,制成多个晶体管、电阻和电容等元、器件,并将它们连接成能够完成一定功能的电子线路。起初,硅片上的元、器件数目较少,以后逐年递增,集成规模逐步扩大。六十年代末制成单片

含千支晶体管的所谓大规模集成电路,到七十年代中期,每块芯片内晶体管数提高到上万支,称为超大规模集成电路,目前,单片集成度已达数十万个元件。

大规模与超大规模集成电路的出现,使电子线路的技术装置面貌发生了根本变化。电子设备在功能、速率、耗电、体积、成本和可靠性诸方面都取得了惊人的成就。这是一次意义深远的技术革命,电子科学技术的发展进入了“微电子学”时代。

相对于集成电路而言,由晶体管和其它元、器件组装构成的电子线路称为“分立元件电路”。目前,集成电路的发展还不能完全取代分立元件电路,此外,集成电路与分立元件电路的构成原理有许多相似之处。考虑到这些因素,本书从分立元件电路开始讨论,着重研究小规模和中规模集成电路原理及其应用,最后,初步介绍一些大规模集成电路的概念。

按照电子线路的不同功能和构成原理,可将它们划分为模拟电子线路(简称模拟电路)与数字电子线路(简称数字电路)两大类型。

模拟电路是对模拟信号进行传输或处理的电路。所谓模拟信号是指信号的幅值随时间是连续变化的。这时信号可以取一定范围内的任意值。

数字电路是对数字信号进行传输或处理的电路。所谓数字信号是指信号在时间上和取值上都是离散的、不连续的。例如在规定的時間间隔上只按高、低两个电平取值的数字信号。

当然,有许多电子系统,往往兼作模拟与数字信号处理工作,这样,便出现模拟与数字混合的电路与系统。

此外,还可将电子线路划分为线性电路与非线性电路两种类型。

如果根据电路的工作情况,电路中的元、器件都可以等效为线