

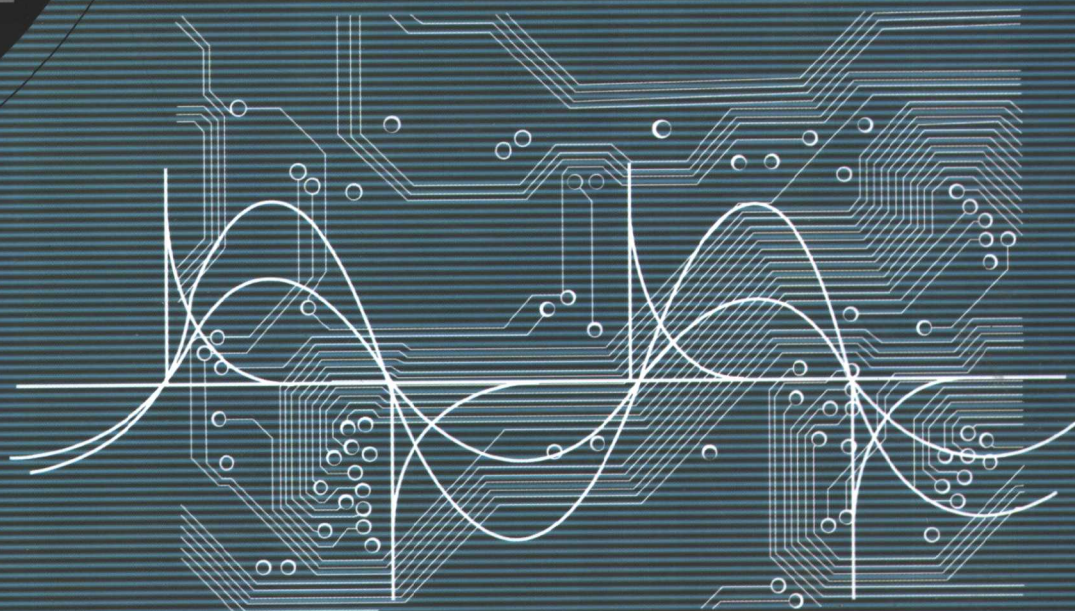
电子科学与技术



国防科工委「十五」规划教材

现代电子技术基础 (模拟部分)

●王成华 王友仁 胡志忠 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·电子科学与技术

现代电子技术基础

(模拟部分)

王成华 王友仁 胡志忠 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是国防科工委重点教材建设计划“十五”规划教材。

为适应现代电子技术的飞速发展,本书对传统教学内容进行了较大幅度的更新,引入了电流模式电路、模拟可编程器件、电子设计自动化等内容。全书共分10章,内容包括:半导体器件基础、放大器基础、集成运算放大器与模拟乘法器、信号运算与处理电路、放大器的频率响应、反馈放大电路及其稳定性、波形产生与变换电路、功率放大电路与直流稳压电源、电流模式电路及系统模拟可编程器件与电子设计自动化软件及应用等。

本书可作为高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类各专业的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子技术基础. 模拟部分/王成华等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.2

ISBN 7-81077-568-5

I. 现… II. 王… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 143186 号

现代电子技术基础(模拟部分)

王成华 王友仁 胡志忠 编著

责任编辑 蔡 喆

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:30.5 字数:683千字

2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷

印数:5000册

ISBN 7-81077-568-5 定价:40.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,



锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现



志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

电子技术是 20 世纪发展最为迅速的领域之一,这主要得益于集成电路和计算机的发明。这两项技术既是电子技术发展的产物,又是电子技术持续发展的推动力。集成电路和计算机技术的飞速发展,正把人类社会带入信息时代。在这样的时代背景下,掌握模拟和数字电子技术是对所有电类专业学生的基本要求。

正因为模拟和数字电子技术是电类专业极其重要的专业基础课和技术基础课,2002 年国防科工委在发布重点建设教材的指南时,将《现代电子技术基础(模拟部分/数字部分)》列入选题。

在编写《现代电子技术基础(模拟部分/数字部分)》时,与南京航空航天大学“国家工科基础课程电工电子教学基地”的建设相结合,力求站在教学内容和课程体系改革与整体优化的高度来组织内容,并力求教材具有科学性、可读性和前瞻性。

本书的编写原则是:保证基础,精选内容,强调集成,注重特色。在具体内容上,具有如下特点:

① 在讲述半导体器件工作原理、特性曲线和性能参数的基础上,引出半导体器件的模型,为电路分析和电路 CAD 打下基础;

② 在分析由三极管、场效应管构成的放大电路时,强调基本概念、基本工作原理和基本分析方法,为集成电路的学习打下坚实的理论基础;

③ 在讲清集成运放基本单元电路和主要性能参数的基础上,强调集成运放的线性与非线性应用;

④ 在分析负反馈放大器时,强调反馈的基本概念与深度负反馈放大器性能指标的估算,而对于非深度负反馈放大器的计算,则利用电路仿真软件完成;

⑤ 正确处理与数字电路部分内容的衔接,将门内部电路、555 芯片、波形变换电路等电路级内容归入模拟电路部分,对数字电路部分,从布尔代数、逻辑关系开始讨论;

⑥ 引入了电流模式电路,在系统可编程模拟器件(ispPAC)、电路分析与设计自动化软件等模拟电路新技术。

本书主要讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本电路和基本分析方法。全书共分10章。第1章讨论二极管、三极管、场效应管等半导体器件的工作原理、特性曲线、特性参数和等效电路。第2章讨论由三极管和场效应管构成的单级或多级放大器的工作原理和分析方法。第3章讨论集成运算放大器的内部典型电路和模拟乘法器及其应用。第4章讨论集成运算放大器在运算、滤波及比较等方面的应用。第5章讨论放大器的频率响应。第6章讨论负反馈放大器的判断、负反馈对放大器性能的影响以及深度负反馈放大器的计算。第7章介绍正弦波振荡电路、非正弦波振荡电路、集成多功能信号发生器以及波形变换电路。第8章介绍功率放大电路、整流滤波与稳压电路以及开关型稳压电源。第9章介绍电流模式电路。第10章介绍在系统可编程模拟器件的原理与应用、电子设计自动化软件(Multisim)及其应用。

本书由王成华主编。第1,2,9章及10.2节由王成华执笔,第3,4,6章及10.1节由王友仁执笔,第5,7,8章由胡志忠执笔。

本书承蒙东南大学冯军教授、南京理工大学周淑阁教授审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限,对于书中的错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2004年5月于南京

常用符号表

1. 电压和电流符号的规定

U_C, I_C	大写字母, 大写下标, 表示直流量
u_c, i_c	小写字母, 小写下标, 表示交流量瞬时值
u_C, i_C	小写字母, 大写下标, 表示总瞬时值
U_c, I_c	大写字母, 小写下标, 表示交流量有效值
\dot{U}_c, \dot{I}_c	大写字母上面加点, 小写下标, 表示正弦相量
$\Delta U_C, \Delta I_C$	直流电压和电流的变化量
$\Delta u_C, \Delta i_C$	总瞬时值电压和电流的变化量

2. 基本符号

A_i, A_u	电流、电压放大倍数
A_{us}	源电压放大倍数
\dot{A}_{usi}	低频电压放大倍数复数量
\dot{A}_{usm}	中频电压放大倍数复数量
\dot{A}_{ush}	高频电压放大倍数复数量
A_r, A_g	互阻、互导增益
$A_{if}, A_{uf}, A_{rf}, A_{gf}$	分别表示反馈放大器的电流、电压、互阻、互导增益
A_{ud}	差模电压增益
A_{uc}	共模电压增益
$BW_{0.7}$	3 dB 带宽
C_B, C_D, C_J	分别指势垒电容、扩散电容和结电容
C_π, C_μ	分别指 BJT 的发射结和集电结电容
C_{dg}, C_{gs}, C_{ds}	分别指 FET 的分布电容
C_φ	相位补偿电容
D	非线性失真系数
E, ϵ	能量, 电场强度
E_{g^0}	半导体的禁带宽度
F	反馈系数
f	频率
f_0	振荡频率、谐振频率

f_L	下限(-3 dB)频率, $\omega_L = 2\pi f_L$
f_H	上限(-3 dB)频率, $\omega_H = 2\pi f_H$
f_α, f_β	分别指共基 BJT 和共射 BJT 的截止频率
f_T	特征频率
g_m	低频跨导
I, i	电流通用符号
$I_{EQ}, I_{BQ}, I_{CQ}, I_{DQ}$	分别指射、基、集、漏极直流工作点电流
i_C, i_B, i_E, i_D	分别指集、基、射、漏极总瞬时值电流
i_s	信号源电流
I_{IO}	输入失调电流
I_{IB}	输入偏置电流
I_S	PN 结反向饱和电流
I_{DSS}	结型、耗尽型 FET 在 $u_{GS} = 0$ 时的 I_D 值
I_D	二极管电流, FET 的漏极电流
I_F, I_R	分别表示正向电流、反向电流
I_{ES}	晶体管发射结反向饱和电流
I_{CBO}	发射极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
I_{SE}	门电路输入短路电流
I_{RE}	门电路反向漏电流
k	玻耳兹曼常数
K_{CMR}	共模抑制比
n_i	本征半导体中电子热平衡浓度
n	杂质半导体中电子浓度
P_C	集电极耗散功率
P_V	直流电源供给功率
P_T	BJT 的管耗
P_{CM}	集电极最大允许功耗
p_i	本征半导体中空穴热平衡浓度
p	杂质半导体中空穴浓度
Q	品质因数
R_B	基极直流偏置电阻
R_E	发射极直流偏置电阻

R_C	集电极直流偏置电阻
R_G	栅极直流偏置电阻
R_D	漏极直流偏置电阻
R_s	信号源内阻
$R_F (R_f)$	反馈电阻
R_L	负载电阻
R_{ID}, R_{IC}	差、共模输入电阻
R_{OD}, R_{OC}	差、共模输出电阻
R_{off}	关门电阻
R_{on}	开门电阻
R_i, R_o	放大器的交流输入和输出电阻
R_{if}, R_{of}	反馈放大器的交流输入和输出电阻
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
$r_{b'c}$	集电结电阻
r_{ce}	集电结输出电阻
r_e	发射结电阻
r_{gs}, r_{ds}	FET 的动态电阻
r_z	稳压管的动态电阻
S_R	运算放大器的转换速率
S_r	稳压系数
S_u	电压调整率
S_i	电流调整率
S_{rin}	纹波抑制比
S_T	输出电压的温度系数
T	温度、周期
t	时间
t_{pd}	门电路平均延迟时间
$U_{BQ}, U_{CQ}, U_{EQ}, U_{GQ}, U_{DQ}, U_{SQ}$	分别指相应电极的直流工作点电位
$U_{BEQ}, U_{CEQ}, U_{DSQ}, U_{GSQ}$	分别指相应电极间的直流工作点电压
$u_{be}, u_{ce}, u_{ds}, u_{gs}$	分别指相应电极间的总瞬时值电压
$u_i, u_o, u_{be}, u_{ce}, u_{ds}, u_{gs}$	分别指输入、输出和相应电极间的交流电压分量
u_s, U_s	信号源电压及其有效值
$\dot{U}_s, \dot{U}_i, \dot{U}_o, \dot{U}_{be}, \dot{U}_{ce}, \dot{U}_{ds}, \dot{U}_{gs}$	分别指对应交流分量的复数值

u_{id}	差模输入电压
u_{ic}	共模输入电压
U_T	温度电压当量(热力学电压)
U_T	门电路的阈值电压
$U_{GS(th)}$	增强型 MOSFET 开启(阈值)电压
$U_{GS(off)}$	结型 FET 的夹断电压、耗尽型 MOSFET 的阈值(或夹断)电压
U_L	低电平
U_H	高电平
U_{on}	开门电平
U_{off}	关门电平
U_{NL}	低电平噪声容限
U_{NH}	高电平噪声容限
U_{IO}	输入失调电压
U_{OO}	输出失调电压
U_{REF}	参考(基准)电压
$U_{(BR)}$	晶体管的击穿电压
$U_{CE(sat)}$	BJT 的饱和电压
U_{ϕ}	接触电位差
$V_{CC}, V_{DD}, +V_S$	正电源电压
$V_{EE}, V_{SS}, -V_S$	负电源电压
X, x	电抗
Y, y	导纳
Z, z	阻抗

3. 元器件及引脚名称

E, e	双极型三极管的发射极
B, b	双极型三极管的基极
C, c	双极型三极管的集电极
S, s	场效应管的源极
G, g	场效应管的栅极
D, d	场效应管的漏极
D	二极管
T	双极型三极管, 场效应管

D_z	稳压管
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
T_r	变压器

4. 其他符号

$\alpha, \bar{\alpha}$	共基极交、直流电流传输系数(增益)
$\beta, \bar{\beta}$	共射极交、直流电流放大系数(增益)
W/L	MOS管的宽长比
C_{ox}	MOS管单位面积的栅极电容
μ_n	电子运动的迁移率
η	效率
φ	相位角
φ_m	相位裕量
G_m	增益裕量
ω, Ω	角频率
Q	静态工作点

目 录

第 1 章 半导体器件基础

1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN 结与半导体二极管	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.2.3 PN 结的电容特性	9
1.2.4 半导体二极管及其参数	10
1.2.5 二极管的电路模型	13
1.3 特殊二极管	15
1.3.1 稳压二极管	15
1.3.2 变容二极管	17
1.3.3 发光二极管	17
1.3.4 光电二极管	18
1.4 半导体三极管	18
1.4.1 三极管的结构	18
1.4.2 三极管的工作原理	19
1.4.3 三极管的特性曲线	21
1.4.4 三极管的主要参数	24
1.4.5 三极管的小信号模型	26
1.4.6 三极管其他工作模式的等效电路	29
1.5 场效应晶体管	30
1.5.1 结型场效应管	30
1.5.2 绝缘栅场效应管	33
1.5.3 场效应管的小信号模型	39
1.5.4 场效应管的主要参数	39
1.5.5 场效应管与晶体三极管的比较	40
本章小结	41
思考题	42
习 题	42



第2章 放大器基础

2.1 放大器的基本概念与技术指标	48
2.1.1 放大器的基本概念	48
2.1.2 放大器的主要技术指标	49
2.2 共射放大器的工作原理与分析方法	52
2.2.1 共射放大器的工作原理	52
2.2.2 共射放大器的分析方法	52
2.2.3 温度对工作点的影响与分压式偏置电路	57
2.3 三种组态三极管放大器的分析与比较	59
2.3.1 共基放大器	59
2.3.2 共集放大器	60
2.3.3 三种组态三极管放大器的比较	62
2.4 场效应管放大器	63
2.4.1 场效应管放大器偏置电路与直流分析	63
2.4.2 场效应管共源放大器交流分析	64
2.4.3 三种组态场效应管放大器的比较	65
2.4.4 场效应管放大器的设计	68
2.5 多级放大器	69
2.5.1 级间耦合方式	69
2.5.2 多级放大器的分析	72
本章小结	74
思考题	75
习题	76

第3章 集成运算放大器与模拟乘法器

3.1 恒流源电路	85
3.2 差动放大电路	92
3.2.1 双极型三极管差动放大电路	92
3.2.2 场效应管差动放大电路	100
3.2.3 差动放大电路的传输特性	103
3.3 双极型集成运算放大器	106
3.3.1 集成运算放大器的基本组成	106
3.3.2 典型集成运算放大器电路分析	108
3.4 场效应管集成运算放大器	111
3.4.1 JFET 集成运算放大器	111
3.4.2 CMOS 集成运算放大器	112
3.5 集成运算放大器的主要技术参数	113
3.6 理想集成运算放大器	116



3.7 模拟乘法器	119
3.7.1 模拟乘法器的原理	119
3.7.2 模拟乘法器的应用	121
本章小结	126
思考题	127
习 题	128
第 4 章 信号运算与处理电路	
4.1 基本运算电路	137
4.1.1 比例运算电路	137
4.1.2 求和运算电路	141
4.1.3 积分和微分运算电路	144
4.1.4 对数和反对数运算电路	147
4.1.5 非理想集成运放运算电路的误差分析	149
4.2 有源滤波器	154
4.2.1 滤波电路的作用与分类	154
4.2.2 一阶有源滤波器	155
4.2.3 二阶有源滤波器	156
4.2.4 状态变量滤波器	164
4.2.5 开关电容滤波器	166
4.3 电压比较器	169
4.3.1 单门限比较器	169
4.3.2 迟滞比较器	171
4.3.3 窗口比较器	174
4.3.4 集成电压比较器	175
本章小结	177
思考题	178
习 题	179
第 5 章 放大器的频率响应	
5.1 频率响应概述	189
5.1.1 研究放大器频率响应的必要性	189
5.1.2 波特图及简单 RC 电路的频率响应	190
5.2 单级共射放大器的频率响应	193
5.2.1 共射基本放大器全频段微变等效电路	193
5.2.2 三极管的频率参数	194
5.2.3 共射基本放大器频率响应分析	196
5.3 共集和共基放大器的频率响应及组合宽带放大器	205
5.3.1 共集放大器的高频响应	205