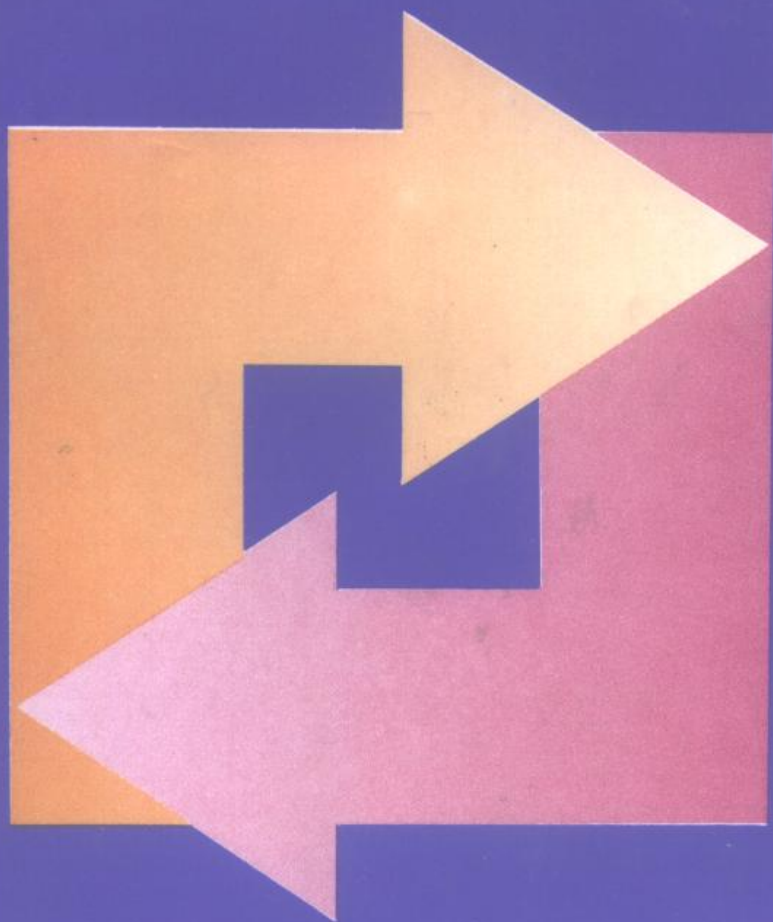


高等学校教材

电子线路基础

高文焕 刘润生 编



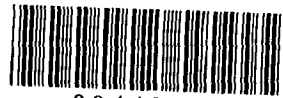
高等教育出版社

TN7
G25

443448

电子线路基础

高文焕 刘润生 编



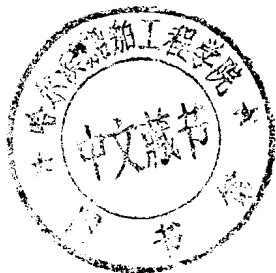
00443448

高等教育出版社



443448

(京)112号



图书在版编目 (CIP) 数据

电子线路基础/高文焕, 刘润生编. -北京: 高等教育出版社, 1997.7 (1999 重印)

ISBN 7-04-005996-7

I. 电… II. ①高… ②刘… III. 电子电路-基础理论
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 21223 号。

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009

电 话 010-64054588 传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京金顺印刷厂

开 本 850×1168 1/32 版 次 1997 年 7 月第 1 版

印 张 19.625 印 次 1999 年 6 月第 2 次印刷

字 数 500 000 定 价 18.50 元

凡购买高等教育出版社图书, 如有缺页、倒页、脱页等
质量问题, 请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

DVSG 1/14

内容简介

本书按照国家教育委员会颁发的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》，根据多年的教学实践经验，本着教学改革的精神编写而成。

全书共分八章，内容是：半导体器件基础，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，模数转换器和数模转换器。

本书通过对各种半导体器件及电路的分析，阐述了电子线路中的基本概念、基本原理和基本分析方法。书中适当地增加了器件模型、MOS电路、电流模电路、脉冲电路、集成门电路、模数转换器及数模转换器等内容，力图形成电子线路较完整的体系，使课程内容适应电子技术迅速发展的趋势。希望为学生正确使用和设计模拟集成电路打好基础。

为了加深对基本内容的理解，书中介绍了一些电路实例，并附有一定数量的例题和习题。

本书可作为高等学校电子、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。

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都必须不断地改革。

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上,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,他的辛苦劳动对提高本书质量十分重要。

在此,对以上所有给予支持、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

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_b 小写字母、小写下标,表示基极电流的交流瞬时值

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

u_s 信号源电压

u_i, u_i 输入信号电压

u_o, u_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)

u_{ID}, u_{id} 差模输入电压

u_{IC}, u_{ic} 共模输入电压

u_{OD}, u_{od} 差模输出电压

U_{OC}, U_{oc}	共模输出电压
V_{IDM}, V_{ICM}	最大差模、共模输入电压
$(V_{om})_{max}$	最大输出电压幅值
V_F, U_f	反馈电压
U_P, U_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_1, i_i	输入电流
i_o, i_o	输出电流
I_R	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

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

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}	有反馈时的电路输入、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	输入电容
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
$A_{v0}、A_{vH}$	低频、高频电压增益
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

$f、\omega$	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、零点对应的频率

f_s	取样频率
f_o	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
$V_{(BR)CBO}$	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
$V_{(BR)DS}$	漏源间的击穿电压
V_{IO}	输入失调电压
I_S	二极管反向饱和电流
I_{ES}	晶体管发射结反向饱和电流
I_{CBO}	发射极开路时C、B间的反向电流
I_{CEO}	基极开路时C、E间的穿透电流
I_{CM}, I_{DSM}	集电极、漏-源极最大允许电流
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	晶体管共射电流放大系数 β 的截止频率
f_α	晶体管共基电流放大系数 α 的截止频率

f_T	特征频率
P_{CM}, P_{DSM}	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
$r_{bb'}$	基区体电阻
r_e	发射结的微变电阻, $r_e = V_T / I_{EQ}$
$r_{b'e}$	混合 π 形模型中发射结的微变等效电阻
r_{be}, r_{eb}	晶体管共射、共基接法的输入电阻
r_{ce}	晶体管共射接法时的输出电阻
r_{ds}	场效应管共源接法时的输出电阻
g_m, g_{mb}	跨导、背栅跨导
$C_{b'e}, C_{b'e}$	混合 π 形等效电路中集电结、发射结等效电容
C_{gs}, C_{gd}, C_{ds}	场效应管栅源、栅漏、漏源间的等效电容
C_T, C_D	势垒电容、扩散电容
C_j	PN结结电容
$\alpha, \bar{\alpha}$	晶体管共基电流放大系数
$\beta, \bar{\beta}$	晶体管共射电流放大系数
N	电子型半导体;运放的反相输入端
n	电子浓度
P	空穴型半导体;运放同相输入端
p	空穴浓度
W, L	沟道宽度、长度
η	跨导比
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_{C}	取样期
T_{S}	取样周期
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
η	效率; 跨导比
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	最高位
LSB	最低位

目 录

第1章 半导体器件基础	(1)
1.1 半导体中的载流子及其运动	(1)
1.1.1 本征半导体中的载流子	(1)
1.1.2 杂质半导体中的载流子	(4)
1.1.3 载流子在半导体中的运动	(8)
1.2 PN结	(12)
1.2.1 动态平衡情况下的PN结	(12)
1.2.2 外加偏置电压时的PN结, PN结的伏安特性	(16)
1.2.3 PN结的反向击穿特性	(24)
1.2.4 PN结电容	(26)
1.3 半导体二极管	(30)
1.3.1 二极管的结构	(30)
1.3.2 二极管的伏安特性	(32)
1.3.3 二极管的静态电阻和动态电阻	(34)
1.3.4 二极管的温度特性	(36)
1.3.5 半导体二极管模型	(37)
1.3.6 二极管特性举例	(42)
1.3.7 稳压二极管及其应用	(43)
1.4 双极型晶体管	(45)
1.4.1 晶体管的结构	(45)
1.4.2 晶体管中载流子的运动	(47)
1.4.3 晶体管的电流传输关系	(51)
1.4.4 晶体管的Ebers - Moll模型	(53)
1.4.5 晶体管的特性曲线	(61)
1.4.6 温度对晶体管特性的影响	(72)
1.4.7 晶体管的主要参数	(73)
1.5 场效应晶体管	(77)
1.5.1 绝缘栅场效应管	(77)

1.5.2	结型场效应管(JFET)·····	(97)
1.5.3	场效应管的主要参数及温度特性·····	(102)
1.6	模拟集成电路中的元件·····	(105)
1.6.1	集成双极型晶体管·····	(105)
1.6.2	集成MOS管·····	(107)
1.6.3	集成电路中的二极管·····	(108)
1.6.4	集成电路中的电阻·····	(109)
1.6.5	集成电路中的电容·····	(109)
1.6.6	集成电路中元 器件的特点·····	(110)
	习题·····	(111)
第2章	模拟集成电路的基本单元电路 ·····	(118)
2.1	单管共射放大电路的组成及工作原理·····	(118)
2.1.1	单管共射放大电路的直流传输特性·····	(118)
2.1.2	单管共射放大电路的组成·····	(120)
2.1.3	单管共射放大电路的工作原理·····	(122)
2.1.4	放大电路的主要性能指标·····	(125)
2.2	放大电路的分析方法·····	(130)
2.2.1	图解法·····	(130)
2.2.2	等效电路法·····	(135)
2.3	频率响应的基本概念及单管共射放大电路的频率 响应特性·····	(146)
2.3.1	频率响应的基本概念·····	(146)
2.3.2	频率响应的分析方法·····	(148)
2.3.3	单管共射放大电路的高频响应·····	(155)
2.3.4	单管共射放大电路的低频响应·····	(163)
2.4	共集放大电路·····	(166)
2.4.1	共集放大电路的中频特性·····	(166)
2.4.2	共集放大电路的高频响应·····	(168)
2.4.3	共集放大电路的主要应用·····	(171)
2.5	共基放大电路·····	(175)
2.5.1	共基放大电路的中频特性·····	(176)
2.5.2	共基放大电路的高频响应特性·····	(177)
2.6	电流源及其应用·····	(182)
2.6.1	常用的电流源电路·····	(183)

2.6.2	电流源的主要应用	(189)
2.7	差分放大电路	(192)
2.7.1	差分放大电路的组成及基本特性	(192)
2.7.2	差放的小信号分析	(198)
2.7.3	具有有源负载的差分放大电路	(208)
2.7.4	差分放大电路的失调及温漂	(210)
2.8	多级放大电路及组合放大单元电路	(216)
2.8.1	直接耦合放大电路的特殊问题	(216)
2.8.2	多级放大电路的增益	(218)
2.8.3	多级放大电路的频率响应	(221)
2.8.4	组合放大单元电路	(222)
2.9	互补输出级	(227)
2.9.1	互补输出级的基本原理	(227)
2.9.2	甲乙类互补输出级	(232)
2.9.3	准互补输出级	(234)
2.9.4	单电源供电的互补输出级	(236)
	习题	(237)
第3章	MOS模拟集成电路的基本单元电路	(255)
3.1	MOS场效应管的基本特点	(255)
3.2	MOS集成电路的单级放大电路	(257)
3.2.1	MOS场效应管的模型	(257)
3.2.2	MOS管三种组态基本放大电路	(259)
3.2.3	MOS单级放大电路	(261)
3.2.4	共源-共栅放大电路	(267)
3.3	MOS管电流源	(268)
3.3.1	MOS单管电流源	(268)
3.3.2	MOS管基本电流源	(269)
3.3.3	其它形式的MOS管电流源	(270)
3.4	场效应管差分放大电路	(273)
3.5	CMOS输出级	(280)
3.6	模拟开关	(281)
3.6.1	单通道MOS开关	(281)
3.6.2	CMOS传输门和CMOS模拟开关	(283)
3.6.3	MOS模拟开关的应用举例	(286)