

湖北省高等教育自学考试教材



线性电子电路

(附 线性电子电路自学考试大纲)

组编 湖北省教育考试院
吴鸿修 谢世辉 张林



华中科技大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

E-mail: hustpp@wuhan.cnbg.com

湖北省高等教育自学考试教材

线性电子电路

(附 线性电子电路自学考试大纲)

组编 湖北省教育考试院

吴鸿修 谢世辉 张 林

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

线性电子电路/吴鸿修 谢世辉 张林
武汉:华中科技大学出版社,2001年7月
ISBN 7-5609-2311-9

I. 线…

II. ①吴… ②谢… ③张…

III. 线性电路-高等学校-自学考试-教材

IV. TN710

线性电子电路

吴鸿修 谢世辉 张林

责任编辑:钱文霖

封面设计:潘 群

责任校对:蔡晓瑚

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北省新华印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:18.75

字数:324 000

版次:2001年7月第1版

印次:2006年3月第3次印刷

定价:22.50元

ISBN 7-5609-2311-9/TP·406

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是湖北省教育考试院组织编写的湖北省自学考试规划教材。

本书根据高等教育自学考试电子技术专业(专科)考试计划选材。全书共七章,内容包括半导体器件的工作原理、基本单元电路的工作原理及分析方法、集成运放的特性、电子电路的频率特性及反馈放大电路、常用电子电路的工作原理与分析方法等。

本书编写时充分注意了“自学”的特点,注意物理概念和基本原理的阐述,避免了复杂的数学推导。本着够用、适用的原则,做到精选内容、突出重点、便于自学。

本书可作为高等教育自学考试电子技术专业(专科)的教材,同时也可供有关工程技术人员和相应专业的本科学生参考。

湖北省高等教育自学考试
教材编写委员会

主 任	李怀中		
副主任	张 毅	胡德坤	邹寿彬
委 员	邓宗琦	陈继勇	洪光祥
	张中华	张端品	胡胜方
	黄恩育		

前 言

线性电子电路是高等教育自学考试电子技术专业（大专）的一门专业技术基础课程。它也是一门实用性较强的课程。

电子线路是电子技术的重要组成部分，通常可分为模拟电路和数字电路两大部分。模拟电路又可分为线性电路与非线性电路。线性电子电路是电子技术专业最重要的技术基础。本书是根据湖北省自考的要求而编写的，它可作为高等教育中的大专班的教材使用。由于该书内容在高等教育本科专业教学内容中精选出来的，因此，对于电子、电工工程类的本科专业，它也将是一本比较有参考价值的教科书。

电子技术的发展极大地推动了信息时代的发展。为了培养电子技术人才，培养学生的创造能力，本书在编写中坚持突出基本概念、基本电路的工作原理和基本分析方法的思想。因此，该书尽管是针对电子类大专读者的，但对电子电路的基本概念、基本方法不但没有削弱，反而有所加强，这将有助于读者今后的学习和工作，同时，考虑到集成电子技术的发展及广泛应用，本书将基本单元电路的工作原理与集成运放内部电路相关内容融为一体，以便于组织教学和有助于读者对集成运放工作原理的理解。针对上述想法，我们在编写该书时，具体作了如下考虑。

（1）全书分为两大部分。第一部分为基础部分（1~5章），分别对半导体器件的工作原理、基本单元电路的工作原理及分析方法、集成运放的特性、电子电路的频率特性及反馈放大电路进行了较详细的介绍，这几章内容是线性电子电路最基本和最重要的基础。第二部分为基本应用部分（6~7章），它以集成运放为对象，介绍常用电子电路的工作原理与分析方法。

（2）利用半导体器件的小信号等效模型对电子电路进行分析，不仅能帮助学生加深对电子线路的工作原理的理解，而且它也是计算机辅助分

析的基础,因此,本书用了较多的篇幅对二极管、BJT、FET 的等效模型进行了讨论。

(3) 电子电路的频率特性是一个重要的基本概念,将它单独作为一章是为了强调其重要性。本书利用零极方法对电子电路的频率特性进行分析,以与后续相关课程的分析方法保持一致,为深入学习高等电子电路打下基础。

(4) 应用部分内容写得比较简单,为的是给学生留出充分思考的空间,以培养学生独立思考的能力。

参加本书编写工作的有吴鸿修(1、5、6、7 章)、谢世辉(2、3 章)、张林(4 章)等同志。全书由吴鸿修统稿。

电子技术的飞速发展对教学内容及方法的改革要求越来越高,而我们的能力和水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,诚盼使用本教材的教师、学生及其他读者给予批评指正。

最后要感谢我们所在的教研室对我们工作的支持,感谢出版社责任编辑的认真审读。

编 者
2001 年 5 月于武汉

本书常用符号表

A	增益, 放大倍数	E	能量
a	整流元件的阳极 (正极)	e	电子的电荷量
A_F	反馈放大电路增益	e	BJT 发射极
A_i	放大电路的电流增益	ε	电场强度
A_v	放大电路的电压增益	F	反馈系数
A_{vC}	共模电压增益	F_v	电压反馈系数
A_{vD}	差模电压增益	f	频率
A_{vF}	反馈放大电路的闭环电压增益	f_L	放大电路的下限频率
A_{vM}	放大电路的中频电压增益	f_H	放大电路的上限频率
A_{vO}	反馈放大电路的开环电压增益	f_T	特征频率
A_{vS}	放大电路的源电压增益	f_α	BJT 共基极截止频率
B	势垒	G	电导
b	BJT 基极	g	微变电导
BW	频谱宽度, 带宽	g_m	双口有源器件的互导 (跨导)
C	电容	H	双口网络的混合参数
C_b	隔直电容 (耦合电容)	$h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$	共发射极的 H 参数
C_c	发射极旁路电容	I, i	电流
$C_{b'c}$	基极-集电极电容	I_i	输入电流
$C_{b'e}$	基极-发射极电容	I_o	输出电流
C_B	势垒电容	I_s	信号源电流
C_D	扩散电容	I_{CC}	空载正电源电流
C_j	结电容	I_{DD}	空载漏电流
C_F	反馈电容	I_{EE}	空载负电源电流
C_i	输入电容	I_L	负载电流
C_o	输出电容	I_{IB}	输入偏置电流
C_L	负载电容	I_{IO}	输入失调电流
c	BJT 集电极	I_{OM}	最大输出电流
D	扩散系数	I_{OO}	输出失调电流
D	半导体二极管	I_{OS}	输出短路电流
d	场效应 BJT 的漏极	I_{TEF}	参考电流 (基准电流)

J	电流密度	S_R	转换速率
K	热力学温度单位 (开尔文)	T	温度 (热力学温度以 K 为单位, 摄氏温度用 $^{\circ}\text{C}$ 表示)
k	玻耳曼常数	T	双口有源器件 (指 BJT、FET 等)
k	整流元件的阴极 (负极)	Tr	变压器
K_{CMR}	共模抑制比	t	时间
L	自感系数, 电感	V, v	电压
L	负载	V_s	信号源电压
l	长度	V_i	输入电压
M	互感系数	V_{th}	二极管、BJT 的门坎电压
N	绕组匝数	V_T	场效应管的开启电压
N_F	噪声系数	V_T	温度的电压当量
P	功率	V_P	场效应管的夹断电压
P	空穴型半导体	V_{CC}, V_+	正电源电压
Q, q	电荷, 品质因数	V_{DD}	正电源电压
Q	静态工作点	V_{EE}, V_-	负电源电压
R	电阻 (直流电阻或静态电阻)	V_{OO}	输出失调电压
R_b, R_c, R_e	BJT 的基极、集电极、发射极电阻	V_{REF}	参考电压 (基准电压)
R_d, R_g	场效应管的漏极、栅极电阻	$V_{(\text{BR}) \text{CBO}}$	发射极开路, 集电极-基极反向击穿电压
R_s	信号源内阻	$V_{(\text{BR}) \text{EBO}}$	集电极开路, 发射极-基极反向击穿电压
R_L	负载电阻	$V_{(\text{BR}) \text{CEO}}$	基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压
R_p	可变电阻 (电位器)	$V_{(\text{BR}) \text{DS}}, V_{(\text{BR}) \text{GD}}, V_{(\text{BR}) \text{GS}}$	分别为漏源击穿电压、栅漏击穿电压、栅源击穿电压
r	电阻 (交流电阻或动态电阻)	X, x	电抗, 反馈电路中的信号量
r_{be}	BJT 共射输入电阻	Y, y	电导
r_{ce}	BJT 共射输出电阻	Z, z	阻抗
R_i	直流输入电阻	α	BJT 共基极接法的电流放大系数
R_i	放大电路的交流输入电阻	β	BJT 共射极接法的电流放大系数
R_o	放大电路的交流输出电阻	γ	稳压系数
R_F	反馈电阻	η	效率
S	面积		
S	开关		
s	复频率变量		
s	场效应管源极		
S/N	信噪比		

θ 整流元件导通角
 μ BJT 内部电压反馈系数
 ρ 电阻率
 σ 电导率
 φ 相角

ϕ 时钟脉冲
 τ 时间常数
 Ω 电阻单位
 Ω, ω 角频率

目 录

第 1 章 集成电路元器件基础	(1)
§1.1 半导体的导电特性	(1)
一、本征半导体	(1)
二、杂质半导体	(2)
三、半导体载流子的运动	(3)
§1.2 PN 结	(4)
一、PN 结的形成	(4)
二、PN 结的单向导电性	(5)
三、PN 结的电容效应	(6)
§1.3 半导体二极管	(7)
一、半导体二极管的结构	(7)
二、半导体二极管的伏安特性	(7)
三、温度对二极管特性的影响	(9)
四、二极管的动态特性	(10)
五、二极管的参数	(10)
六、二极管的等效电阻	(11)
七、二极管模型	(12)
八、特殊二极管	(17)
§1.4 双极型晶体管	(19)
一、BJT 结构及放大作用	(19)
二、BJT 的特性曲线	(23)
三、BJT 的主要参数	(26)
四、共射 BJT 的等效模型与参数	(27)
§1.5 场效应晶体管	(31)
一、结型场效应管(JFET)	(31)
二、金属-氧化物-半导体场效应管	(37)
三、场效应管的小信号模型	(42)
§1.6 半导体光电器件	(43)
一、光电二极管及光电晶体管	(44)
二、发光二极管	(45)

三、光电耦合器件	(45)
本章小结	(46)
思考题与习题	(48)
第2章 线性集成电路的基本单元电路	(54)
§2.1 放大电路的性能指标	(54)
§2.2 放大电路的基本分析方法	(57)
一、单管共射放大电路	(57)
二、图解法	(60)
三、等效电路法	(63)
§2.3 稳定工作点的偏置电路和电流源电路	(67)
一、温度对静态工作点的影响	(67)
二、射极偏置电路	(68)
三、补偿式工作点稳定偏置电路	(73)
四、电流源、电流镜电路	(74)
五、有源负载共射放大电路	(77)
§2.4 共集电极电路与共基极电路	(77)
一、共集放大电路(射极跟随器)	(77)
二、共基放大电路	(83)
§2.5 差分放大电路	(85)
一、差分放大电路的组成及基本概念	(86)
二、差分放大电路的低频小信号特性	(89)
三、差分放大电路大信号的直流传输特性	(96)
§2.6 多级放大电路	(99)
一、计算原则	(99)
二、共射-共基组合放大电路	(100)
三、共集-共基组合放大电路	(101)
§2.7 输出级电路	(105)
一、概述	(105)
二、乙类互补对称输出电路	(106)
三、甲乙类互补对称输出级电路	(110)
四、单电源互补对称输出级电路	(111)
§2.8 场效应管放大电路	(113)
一、共源极放大电路	(113)
二、共漏极放大电路	(115)

三、FET 差分放大电路	(117)
本章小结	(118)
思考题与习题	(119)
第 3 章 集成运算放大器	(132)
§3.1 集成运放电路简介	(132)
一、双极型通用单片集成运算放大器 CF741	(132)
二、CMOS 运算放大器	(137)
§3.2 集成运放的基本特性和参数	(138)
一、集成运放的电路符号与电压传输特性	(138)
二、集成运放的主要参数	(140)
§3.3 集成运放的选用原则和使用要点	(144)
一、集成运放的选用原则	(144)
二、集成运放的正确使用	(144)
三、集成运放使用中的几个问题	(145)
§3.4 集成运放的等效模型	(145)
一、理想集成运算放大器的等效模型	(145)
二、理想集成运算放大器的运算特性	(146)
三、实际集成运算放大器的运算特性	(147)
本章小结	(148)
思考题与习题	(148)
第 4 章 放大电路的频率特性	(149)
§4.1 放大电路频率特性的基本概念	(149)
一、频率特性和通频带	(149)
二、波特图	(151)
三、幅度失真和相位失真	(152)
四、增益带宽积	(153)
§4.2 频率特性的分析方法	(153)
一、网络函数	(153)
二、网络函数的波特图	(154)
§4.3 放大电路的频率特性	(159)
一、BJT 电流放大系数的频率特性	(159)
二、单极差分放大电路的高频特性	(161)
三、共基极放大电路的高频特性	(165)
四、集成运算放大器的频率特性	(167)

五、共射极放大电路的低频特性	(168)
六、多级放大电路的频率特性	(170)
本章小结	(171)
思考题与习题	(172)
第 5 章 反馈放大电路	(175)
§5.1 反馈的基本概念及增益一般表达式	(175)
一、反馈的基本概念	(175)
二、负反馈放大电路的方框图	(176)
三、负反馈放大电路的一般表达式	(176)
§5.2 反馈放大电路的分类及基本特点	(177)
一、电压并联负反馈	(178)
二、电流串联负反馈	(180)
三、电压串联负反馈	(181)
四、电流并联负反馈	(182)
§5.3 深度负反馈放大电路增益的近似计算	(183)
一、深度负反馈放大电路增益的近似表达式	(183)
二、深度负反馈放大电路增益的近似计算	(184)
§5.4 负反馈对放大电路性能的改善	(186)
一、提高增益的稳定性	(186)
二、扩展通频带	(187)
三、减小非线性失真	(188)
四、抑制放大电路内部的噪声	(189)
五、对输入和输出电阻的影响	(191)
§5.5 负反馈放大电路工作稳定性	(192)
一、自激振荡产生的原因及条件	(193)
二、稳定工作条件	(193)
三、负反馈放大电路稳定性分析	(195)
四、频率补偿技术	(197)
本章小结	(198)
思考题与习题	(199)
第 6 章 集成运算放大器应用电路	(205)
§6.1 线性运算电路	(205)
一、比例运算电路	(205)
二、加减法运算电路	(206)

三、积分运算电路	(208)
四、微分运算电路	(209)
五、对数、反对数及乘法运算电路	(212)
§6.2 集成运放的高性能组合放大电路	(215)
一、精密整流电路	(215)
二、仪用放大器	(216)
三、数控增益放大电路	(217)
§6.3 LC 小信号调谐放大电路	(218)
一、LC 并联谐振回路的选频作用	(218)
二、LC 调谐放大电路	(220)
三、BJT 的 Y 参数等效模型及应用	(221)
§6.4 有源滤波电路	(225)
一、基本概念	(225)
二、一阶有源滤波电路	(226)
三、二阶有源滤波电路	(228)
§6.5 非正弦波发生电路	(232)
一、比较器	(232)
二、方波发生电路	(235)
三、锯齿波产生电路	(238)
本章小结	(239)
思考题与习题	(240)
第 7 章 小功率直流稳压电源	(249)
§7.1 单相桥式整流滤波电路	(249)
一、单相桥式整流电路	(249)
二、电容器滤波电路	(251)
§7.2 串联反馈式稳压电路	(254)
一、串联反馈式稳压电路	(254)
二、稳压电路的质量指标	(255)
三、三端集成稳压电路	(255)
四、三端集成稳压器的应用	(257)
*§7.3 串联开关式稳压电路	(259)
本章小结	(261)
思考题与习题	(262)

线性电子电路自学考试大纲.....	(267)
一 本课程考试性质、目的与对象	(268)
二 本课程考试的基本要求	(268)
三 本课程的考试内容	(269)
四、线性电子电路试题范例	(274)

第 1 章 集成电路元器件基础

半导体器件是集成电路，特别是大规模集成电路和超大规模集成电路的基础，也是现代电子技术的重要组成部分。它因具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入输出转换率高等优点而得到越来越广泛的应用。特别是随着微电子技术的发展，极大地提高了半导体集成电路的集成度，有力地推动了信息科学的发展。

本章将介绍半导体器件的基本知识，特别是二极管、双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）、场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)和光电器件的结构、工作原理、特性曲线、小信号线性等效模型及主要参数等内容。这些内容是学习本课程的基础。

§ 1.1 半导体的导电特性

一、本征半导体

自然界中的物质按其导电性能不同，可分为导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。目前，用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)。硅和锗都是四价元素，其核外层有四个价电子。

本征半导体就是完全纯净的、结构完整的半导体晶体。在温度为 $T=0\text{ K}$ 和没有外界激发时，由于半导体内共价键中的价电子被束缚着，这时它相当于绝缘体。当半导体受热或光照激发时，某些电子从外界获得足够的能量而挣脱共价键的束缚，离开原子成为自由电子，同时在共价键中留下相同数量的空穴，如图 1.1.1 所示。这种现象称为本征激发。

当共价键中出现空穴时，在外加电场或其他能源作用下，邻近的价电子就可填补到这个空穴上，同时产生一个新的空穴，而其他的价电子又可转移到新的空穴上。这样继续下去相当于空穴在半导体内运动，形成电荷迁移。由于带负电荷的价电子依次填补空穴的效果与带正电荷的粒子反向运动的效果相同，因此，可把空穴看作带正电荷的载流子。可见，半导体中存在着自由电子和空穴两种载流子。空穴的出现是半导体区别于导体的重要特征。

在本征半导体中自由电子和空穴总是成对产生，其自由电子-空穴对随温度的增高而显著增加，这是半导体的一个重要特性。通常在常温范围内，温度每升高 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，硅半导体中自由电子-空穴对增加一倍；温度每升高 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锗半导体中的自由电子-