



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

电子线路

线性部分 (第四版)

谢嘉奎 主编

谢嘉奎 宣月清 冯 军 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

TN7-43

X321=4

:1

电子线路

线性部分 (第四版)

谢嘉奎 主 编

谢嘉奎 宣月清 冯 军 编

Y902/2



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112 号

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材,并被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材。全书由晶体二极管、晶体三极管、场效应管、放大器基础、放大器中的负反馈、集成运算放大器及其应用电路共六章组成。与第三版比较,本修订版具有如下特点:基础知识更系统全面;基本概念更严密、确切,且具有前瞻性;删繁就简,引入电流反馈、数据取样、电流模等新的电路概念;例题丰富、习题匹配,并引入 PSPICE 分析;思路清晰、易教易学。

本书是高等学校电子信息、通信类专业“线性电子线路”、“低频电子线路”课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书由清华大学董在望和西安电子科技大学孙肖子两位教授主审。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路:线性部分/谢嘉奎主编;宣月清,冯军编.
4 版.—北京:高等教育出版社,1999.6
ISBN 7-04-007246-7

I. 电… II. ①谢… ②宣… ③冯… III. ①电子电路-高等学校-教材②线性电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07857 号

电子线路(线性部分)第四版

谢嘉奎 主编 谢嘉奎 宣月清 冯军 编

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 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1987 年 1 月第 1 版

1999 年 6 月第 4 版

印 张 26

印 次 1999 年 6 月第 1 次印刷

字 数 480 000

定 价 27.10 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

前 言

本书是面向 21 世纪课程教材,并被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材。本书第三版于 1988 年 5 月底出版,曾获原国家教委优秀教材一等奖。根据近十年来电子技术的发展和教学实践中暴露的问题,新版对本书第三版进行了全面的修订。在修订过程中,对电子线路的基本内容作了进一步的提炼,并力求做到浅一点、宽一点,概念更严密些。浅一点、宽一点是指涉及内容的面宽,而内容的深度浅;概念更严密些是指从电路基本原理上理解概念,且具有前瞻性。在确保基本内容的前提下,适度介绍正在发展且已广泛应用的电流模等新电路技术,并从中提炼出基本概念,融合到基本内容中。在电路分析上,力求将它简化为采用简单器件模型进行工程估算,并在每章末设置有关 PSPICE 电路分析的附录,介绍 PSPICE 器件模型和参数,提供分析实例和一定数量的习题。在内容编排上,尽量做到思路清晰、叙述详尽、便于自学。并对原有习题进行了整理、补充和更新,做到有层次性,以期有助于理解和掌握所学内容。

与第三版比较,新版作了如下变动:

1. 频率特性是放大器主要特性之一。为了更好地揭示展宽频带和实现稳定的原理,避免过于繁琐的电路分析,新版取消了第三版中的第七章放大器的频率响应,将其主要内容分散在第 4、5、6 章中。

2. 第 1、2、3 章为器件部分。新版处理这部分内容时,适当压缩第三版中的器件物理,进一步突出器件模型及其数学、曲线和电路等各种表示形式,系统地介绍了利用器件模型进行电路分析的方法,并简要地介绍利用三极管的非线性和可控性实现有源电阻、电流源、放大、开关和跨导线性等电路的组成原理,以便对今后的学习有一完整的了解。

3. 放大器基础是本书的重点。新版重写了这一章内容,主要变动有:

提出放大器的电路模型,重点讨论了电压、电流、互阻和互导四种类型放大器的理想化条件,以便全面了解各种类型放大器对输入、输出阻抗的不同要求;电流源电路突出了精度和恒流特性的要求,并简要地介绍了电流源电路在信号处理中的应用原理;在分析单级放大器频率特性时,重点讨论了极点频率与 RC 时间常数的关系,上限频率与节点阻抗的关系以及组合电路和电流放大器展宽频带的概念;以 F007 集成运放内部组成电路为例讨论了设计多级放大器时必须

须考虑的问题,包括增益分配、电平配置、级间隔离等。

4. 放大器中的负反馈一章(第5章)中取消了第三版中的附录,将其内容简要地融合在负反馈放大器分析一节中。鉴于实际应用中深度负反馈的重要性,本章增设深度负反馈放大器分析方法一节。在这一节中,除了介绍深度负反馈条件外,还重点讨论了深度负反馈条件所具有虚短路和虚开路的性质。在讨论稳定性和相位补偿时,通过对环路增益的进一步认识,提出在集成运放的各种应用电路中,利用环路增益或集成运放差模电压增益的幅频特性渐近波特图判别稳定性的简化方法。

5. 新版的最后一章(第6章)是集成运放及其应用,这一章与第三版的差别较大。首先,通过采用理想化条件进行简化分析,揭示集成运放实现各种功能电路的组成原理。而后讨论集成运放性能参数及其对应用电路性能的影响,并指出提高集成运放精度和速度的途径,重点介绍了电流反馈型集成运放的内部电路组成和性能特点。最后讨论了电压比较器及其应用。

本书取材内容较为丰富,在教学中,根据需要,可将部分加“*”的节段作为选学内容,也可稍做处理自行安排教学体系。例如,将集成运放作为与二、三极管类似的通用器件,提前讲授“集成运放应用电路的组成原理”这一节内容,又如,分散在第4、5章的有关频率响应的内容集中讲解等。

本书由谢嘉奎主编,谢嘉奎、宣月清和冯军共同完成了本版的修订工作,宣月清和冯军还分别编写了习题和 PSpice 电路分析附录。徐莹隽、梁俊两位青年教师为完成本版修订做了大量工作。

本版由清华大学董在望和西安电子科技大学孙肖子两位教授审阅,他们提出了许多十分宝贵的意见,对提高本版质量起了重要的作用。

十年来,许多兄弟院校教师对本书提出的批评和建议,对我们启发和帮助很大。

在此,我们对以上所有同志表示由衷的感谢。恳请对本书继续提出批评和指教。

编者

1998年7月于东南大学

第一版前言

一九七零年我们编写了《电子线路》讲义,作为我院无线电技术类专业的试用教材。在此基础上,根据一九七七年全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上“电子线路”小组讨论修订的编写大纲作了较大的修改和补充,编写成本书。

根据编写大纲的要求,本书加强了以下两个方面的内容:第一,半导体器件的工作原理;第二,同一类型电路的共同物理本质及其分析方法。电子线路所涉及的分析方法主要有非线性电路的各种近似分析方法和反馈电路的分析方法。

由上述考虑,本书不按工作频率的高低来分类,而按分析方法相同的电路归类,例如小信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路等,以便联系对比,讲清电路的物理本质和分析方法。同时还注意介绍各种新的电路技术,使学生开阔思路。

我们期望,通过本书的学习,学生能掌握电子线路的分析方法,较深刻地认识各种电路的物理本质,这样,他们才能适应电子技术迅速发展的需要。

本书的编写组由谢嘉奎、陈永彬、陈笃信担任主编,成员有:吴林如、林福华、祝宗泰、李潜生、陈子敏、谢洪隰、彭沛、邹家骥。其中陈笃信、谢洪隰、林福华、陈子敏还做了大量的具体工作。

北京工业学院俞宝传教授担任本书的主审,进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵的意见。

北京工业学院、华中工学院、成都电讯工程学院、西安交通大学、华南工学院、重庆大学、浙江大学、北方交通大学、北京航空学院、国防科学技术大学、合肥工业大学、大连工学院、大连海运学院、上海科技大学、南京邮电学院、南京航空学院、清华大学、中国科学技术大学等有关同志参加了本书的审稿会议,他们也都提出了宝贵的意见。

在编写本书时,我院吴伯修教授进行了指导。在教材中还引用了我院田良、沈永朝、詹宏英、周文兴、周寿根等同志编写的讲义。

成都电讯工程学院魏志源同志为本书编写了“负反馈放大器的另一种分析方法”的附录。

我们对上述单位和个人表示深切谢意。

限于编者的水平,本书对分析方法的介绍还不够系统;各种具体电路的工作

过程及工程设计方法的介绍还嫌太多。此外,还有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组

1979年1月

第二版前言

电子线路是指含有晶体管、场效应管等电子器件,并且能实现某种特定电功能的电路。它广泛应用于各种电子设备中。

电子线路的种类繁多。但是,在无线电技术类专业的教学计划中,作为主要技术基础课程的电子线路仅限于讨论集中参数的放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路以及相应的半导体器件。至于脉冲电路、数字电路、分布参数电路则分别划归“脉冲与数字电路”和“微波技术”等课程介绍。此外,在学习电子线路课程时,应有电路、信号和线性系统分析的基础。

“电子线路”课原先是作为一门大课开设的,这对于统一安排教学内容是有利的。南京工学院无线电工程系电子线路编写组于一九七九年编写出版的《电子线路》就是根据这种安排编写的。但是,这样一门大课的学时过多,在安排教学计划时十分不便。因此,在一九八零年春修订的无线电技术类专业参考性教学计划中,将这门大课分成两门课程。同年又在高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组的会议上,审订了《电子线路(Ⅰ)(Ⅱ)教学大纲》(草案),并提出了两门课程可按工作频率高低分成“低频电子线路”和“高频电子线路”;也可按电子器件工作特点及其分析方法上的不同分成“线性电子线路”和“非线性电子线路”。本书就是根据这个大纲,对原来的《电子线路》第一册、第二册和第五册部分内容进行改编而成的。与第一版比较,这第二版的变动较大,各章节几乎都重新改写过。全书篇幅压缩约三分之一。

在修订过程中,广泛听取了本院及兄弟院校教师和学生的意见,并根据教学实践的经验和教训,对第一版中某些要求过高、讨论过细或内容重复的部分作了压缩或删减,还对第一版中的内容安排作了合理的调整。各章都新增了习题。希望这样的变动能够加强基本概念和基本分析方法,便于教学。

在教材体系的处理上,本书是按照半导体器件、基本放大电路、频率响应及稳定性三个相对独立的单元顺序安排的。半导体器件单元包括晶体二极管、晶体三极管和场效应管三章,着重讨论三种半导体器件的内部物理过程,并在此基础上介绍它们的外特性及相应的直流参数。基本放大电路单元包括放大器基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其线性应用三章,着重讨论各种基本放大电路(包括三种基本组态电路、组合电路、集成运算放大器电路等)的组成原理、分析方法、性能特点以及反馈在放大器中的应用等问题。在讨论这些问题

时,没有涉及放大器的频率响应及稳定性,而将这部分内容集中放在第三单元中讨论。第三单元包括放大电路的频率响应、负反馈放大器的频率响应和小信号谐振放大器三章,着重介绍频率响应的复频域分析方法,基本放大电路的频率响应特性以及反馈对频率响应的影响,并且在此基础上讨论稳定性及相位补偿技术。建立这样的教材体系,便于逐步引出放大器的基本概念和基本分析方法,比较符合循序渐进、由浅入深的教学规律,也便于抓住共性问题,精选内容,减少重复。

在教材内容的处理上,与第一版比较,作了如下的重大修改。

半导体物理基础知识是了解各种半导体器件工作原理及其外特性的前提。这部分内容历来有两种不同的讲法。第一版中采用能级能带模型的讲法,这种讲法比较严密,可以解释各种物理现象,但是,需要涉及更多的近代物理知识。由于本课程的学时有限,采用这种讲法的教学实践效果总是不很理想。考虑到本课程讲解半导体器件的目的仅限于更好地了解晶体二极管、晶体三极管和场效应管的工作原理及其外特性,因此,一九八零年审订的教学大纲中建议采用共价键模型的讲法。本书采用共价键模型,用经典的电学知识讲清半导体器件中的基本物理过程。

晶体管的小信号等效电路可以有各种模型。其中,有的是从晶体管固有的物理特性引出来的;有的是从网络观点引出来的。但是它们本质上都是非线性器件在增量基础上进行线性化处理的结果。因此,本书从这个本质出发,将第一版中分散在各章节的等效电路集中在第四章中讨论,着重介绍了混合 Π 型和 H 参数两种常用的等效电路,并以混合 Π 型等效电路作为分析各种小信号放大器的基本模型。

噪声是放大器的固有特性。但是,考虑到噪声的深入讨论已超出了本课程的范围。因此,本书仅在第四章中介绍了噪声系数的概念,删去了第一版中噪声系数及其测量一章。

放大器中的负反馈历来是教学中的一个难点。本书针对第一版中对这个问题讨论过细、过繁、重点不突出的缺点,从讲清反馈的基本概念和基本分析方法出发,对这部分内容重新作了改写。其中,反馈网络的负载效应改由网络的观点进行处理,以突出其内涵的规律性。

本书将第一版中分散在各章讨论的频率响应及稳定性集中在一个单元中讨论,并统一将放大器看作为一个线性系统,采用复频域的分析方法。由于严格分析放大器的频率响应是十分繁琐的,一般都必须借助计算机进行近似数值分析。因此,本书在处理这部分内容时,尽量避免繁琐的数学演算,力求采用近似的工程分析方法,并从中引出具有实际意义的概念和结论。

为了照顾部分院校的需要,将第一版第五册中的电子管及其电路一章进行

压缩和删减,作为本书的附录。

本书是按约 100 课内总学时数而编写的。根据我们的教学实践,建议学时分配如下:半导体器件单元为 22~24 学时;基本放大电路单元为 42~44 学时;频率响应及其稳定性单元为 30~32 学时。在使用这些学时数时,我们主张课堂讲授的学时数最好少一些,留一部分内容让学生自学,或采用习题课和课堂讨论的形式指导学生学习,培养他们独立学习的能力。

“线性电子线路”是一门实践性较强的技术基础课。许多理论概念必须通过实践才能获得更清晰的了解,在实践中积累丰富经验就能更主动地学好理论。因此,在学习本课程时必须高度重视实验环节,坚持理论联系实际的原则。

我们主张教材只能起到主要参考书的作用。在满足教学大纲所规定基本内容的前提下,教师可以有自己的教学体系和阐明问题的方法,不要受一本教材的束缚,还应指导学生多看些书,这样才能促进教学质量的提高。

本书由谢嘉奎主编。在谢嘉奎主持下,共同拟定了改编的指导思想及各章的改编大纲。由谢洪膺编写第一、二、三、四、六和附录各章,金宝琴编写第五、七、八、九各章。在整个编写过程中,谢洪膺还协助对全书进行修改和文字加工,最后由谢嘉奎定稿。

本书的部分习题是从南京工学院无线电工程系电子线路习题集编写组所编《电子线路习题集》中选取的。

本书由北方交通大学蒋焕文副教授主审,北京工业学院俞宝传教授复审,他们都提出了许多宝贵的修改意见。这些意见对本书的编写帮助很大,在此谨向他们致以衷心的感谢。

我们还要向广大读者、兄弟院校和本院的教师致以衷心的感谢,他们对第一版提出的批评和建议,以及对第二版提出的希望和要求,都对这次改编有很大帮助。

限于水平,本书仍可能有不少不妥和错误之处,恳请读者提出批评。

编 者

1983 年 9 月

第三版前言

《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》由工科电工课程教学指导委员会审订通过,经国家教委批准,已于一九八七年初正式公布。这个文件规定了电子、通信等类专业本科学生必须达到的合格要求,它是制订教学计划和教学大纲的依据,也是修改本教材的依据。

对照《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》对第二版中要求过高、讨论过细的内容作了进一步的压缩和删减。同时,为了适应集成电路的发展,在保证基本内容的前提下,进一步删除了已由相应集成电路取代的分立元件电路,适当增加了MOS集成电路的内容,并对部分章节的体系进行了必要的调整。

与第二版比较,全书篇幅压缩四分之一强。除了第四和第七两章以外,其余各章的体系基本不变,但内容上均有不同程度的增删。其中,压缩和精简的内容有:半导体物理基础知识,晶体二极管、三极管内部载流子运动的定量分析以及负反馈放大器的分析方法等。适当增加的内容有:集成电路中的版图知识,MOS集成运算放大器以及集成比较器等。

第四章为放大器基础。在这一章中,删除了T型等效电路,并按物理模拟的方法建立混合II型等效电路。同时,以集成电路中的基本组成电路为主要线索,建立了新的体系,压缩和精简了有关阻容耦合放大器及其偏置电路、放大电路中的噪声以及多级放大器等内容,适当增加有源负载单管放大器等内容。

第七章为放大电路中的频率响应,它是由第二版的第七、第八和第九三章的内容组合而成的,着重介绍频率响应的分析方法、低通和带通放大器及其稳定性以及相位补偿等基本内容。在这一章中,较大幅度精简和压缩的内容有:频率响应的极零点分析方法,分立元件的小信号谐振放大器等。同时,较系统地介绍了集成宽带放大器。

此外,在本修订版中,还删除了电子管及其基本放大电路的附录。

本书由谢嘉奎主编,在谢嘉奎主持下,通过广泛的调查研究,共同确定了本版的修改大纲。其中,第一到第五各章由谢嘉奎修订,第六、第七两章及各章习题由金宝琴修订,在习题的增删和题解方面冯军做了大量的工作。最后谢嘉奎对各章进行了文字润饰和定稿。

本版由北京航空学院张凤言副教授审阅,他提出了许多宝贵的意见。南京工学院无线电工程系电子线路教研组全体同志,根据他们的教学实践对本版的

修订提出了具体的意见。广大读者和兄弟院校教师对本版的修订提出了宝贵的建议。

我们对上述同志表示深切的谢意。恳请对本书继续提出批评和指正。

编 者

1987年10月

责任编辑	张培东
封面设计	张楠
责任绘图	李维平
版式设计	马静如
责任校对	朱惠芳
责任印制	宋克学

目 录

第 1 章 晶体二极管	1
1.1 半导体物理基础知识	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 两种导电机理——漂移和扩散	7
1.1.4 小结	10
1.2 PN 结	11
1.2.1 动态平衡下的 PN 结	11
1.2.2 PN 结的伏安特性	13
1.2.3 PN 结的击穿特性	18
1.2.4 PN 结的电容特性	20
1.2.5 小结	22
1.3 晶体二极管电路的分析方法	22
1.3.1 晶体二极管模型	22
1.3.2 晶体二极管电路分析方法	25
1.4 晶体二极管的应用	29
1.4.1 整流与稳压电路	29
1.4.2 限幅电路	32
*1.5 其它二极管	34
1.5.1 肖特基表面势垒二极管	35
1.5.2 光电二极管	36
习题	39
附录 PSPICE 电路分析	43
第 2 章 晶体三极管	47
2.1 放大模式下晶体三极管的工作原理	48
2.1.1 内部载流子传输过程	48
2.1.2 电流传输方程	50
2.1.3 一般模型	52
2.2 晶体三极管的其它工作模式	54
2.2.1 饱和模式	54

2.2.2 截止模式	55
2.3 埃伯尔斯-莫尔模型	56
2.4 晶体三极管的伏安特性曲线	57
2.5 晶体三极管的小信号电路模型	63
2.6 晶体三极管电路分析方法	68
2.6.1 图解分析法	68
2.6.2 工程近似分析法	70
2.6.3 小信号等效电路分析法	75
2.7 晶体三极管应用原理	76
2.7.1 电流源	76
2.7.2 放大器	77
2.7.3 跨导线性电路	79
2.8 集成工艺	81
2.8.1 集成工艺的标准流程	82
2.8.2 集成元器件	86
2.8.3 集成元器件的特点	90
习题	91
附录 PSPICE 电路分析	96
第3章 场效应管	101
3.1 MOS 场效应管	101
3.1.1 增强型 MOS(EMOS)场效应管	101
3.1.2 耗尽型 MOS(DMOS)场效应管	110
3.1.3 四种 MOS 场效应管比较	112
3.1.4 小信号电路模型	112
3.1.5 分析方法	115
3.2 结型场效应管	117
3.2.1 工作原理	117
3.2.2 伏安特性曲线	120
3.3 场效应管应用原理	122
3.3.1 有源电阻	122
3.3.2 开关	124
习题	128
附录 PSPICE 电路分析	133
第4章 放大器基础	138
4.1 偏置电路和耦合方式	138
4.1.1 偏置电路	138

4.1.2 耦合方式	142
4.2 放大器的性能指标	145
4.2.1 输入电阻、输出电阻和增益	146
4.2.2 失真	151
4.3 基本组态放大器	154
4.3.1 三种组态放大器的实际电路	154
4.3.2 共发、共基和共集放大器的性能	156
4.3.3 改进型放大器	162
4.3.4 共源、共栅和共漏放大器的性能	167
4.3.5 集成 MOS 放大器	171
4.4 差分放大器	176
4.4.1 电路结构	176
4.4.2 性能特点	177
4.4.3 电路两边不对称对性能的影响	184
4.4.4 差模传输特性	188
4.5 电流源电路及其应用	193
4.5.1 镜像电流源电路	194
4.5.2 其它改进型电流源电路	201
4.5.3 有源负载差分放大器	203
4.6 集成运算放大器	205
4.6.1 集成运放概述	205
4.6.2 F007 集成运放的内部组成电路	206
4.7 放大器的频率响应	212
4.7.1 复频域分析方法	212
4.7.2 共发放大器的频率特性	219
4.7.3 共集和共基放大器的频率响应	226
4.7.4 宽带放大器	230
* 4.8 放大器的噪声	234
4.8.1 起伏噪声的来源	234
4.8.2 放大器噪声分析	236
习题	240
附录 PSPICE 电路分析	261
第 5 章 放大器中的负反馈	271
5.1 反馈放大器的基本概念	271
5.1.1 反馈放大器的组成	271
5.1.2 四种类型负反馈放大器	273

5.1.3 反馈性质和反馈类型的判别	275
5.2 负反馈对放大器性能的影响	280
5.2.1 增益灵敏度	280
5.2.2 输入和输出电阻	281
5.2.3 失真和噪声	284
* 5.3 负反馈放大器的性能分析	286
5.4 深度负反馈	293
5.4.1 深度负反馈条件	293
5.4.2 虚短路和虚开路	294
5.5 负反馈放大器的稳定性	295
5.5.1 判别稳定性的准则	295
5.5.2 集成运放的相位补偿技术	299
习题	310
附录 PSPICE 电路分析	332
第6章 集成运算放大器及其应用电路	321
6.1 集成运放应用电路的组成原理	321
6.1.1 集成运放的理想化条件	321
6.1.2 运算电路	323
6.1.3 精密整流电路	329
6.1.4 仪器放大器	332
6.1.5 电流传输器	335
6.2 集成运放的性能参数及其对应用电路的影响	337
6.2.1 集成运放性能参数	338
6.2.2 直流和低频参数对性能的影响	341
6.2.3 高频参数对性能的影响	345
* 6.3 高精度和高速宽带集成运放	349
6.3.1 高精度集成运放	350
6.3.2 高速宽带集成运放	354
6.4 集成电压比较器	364
6.4.1 电压比较器的作用	364
6.4.2 具有不同比较特性的电压比较器电路	365
* 6.4.3 集成电压比较器	369
习题	371
附录 PSPICE 电路分析	383
主要参考书目	388
名词索引	390