



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

电子线路

非线性部分 (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

电子线路

非线性部分 (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

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。全书由绪论、功率电子线路、谐振功率放大电路、正弦波振荡电路、振幅调制、解调与混频电路、角度调制与解调电路和反馈控制电路组成。与第三版比较,本书对电子线路的基本内容作了进一步的提炼,力求作到浅一点、宽一点、概念更严密些。在内容编排上,尽量做到思路清晰、叙述详尽,便于自学。对原有习题进行了整理和补充,并增加了 PSPICE 分析练习题。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程等专业的教材,也可供相应专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路: 非线性部分 / 谢嘉奎主编: 谢嘉奎、宣月清, 冯军编. — 4版. — 北京: 高等教育出版社, (2001 重印)
ISBN 7-04-007987-9

I. 电... II. ①谢... ②谢... ③宣... ④冯...
III. 非线性电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 14279 号

电子线路 非线性部分(第四版)	责任编辑	张培东	版式设计	史新薇
谢嘉奎 主编	封面设计	张楠	责任校对	王巍
	责任绘图	李维平	责任印刷	宋克学

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

开 本 787×960 1/16

印 张 24.75

字 数 450 000

版 次 1979 年 11 月第 1 版

2000 年 5 月第 4 版

印 次 2001 年 1 月第 2 次印刷

定 价 20.90 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

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。全书由绪论、功率电子线路、谐振功率放大电路、正弦波振荡电路、振幅调制、解调与混频电路、角度调制与解调电路和反馈控制电路组成。与第三版比较,本书对电子线路的基本内容作了进一步的提炼,力求作到浅一点、宽一点、概念更严密些。在内容编排上,尽量做到思路清晰、叙述详尽,便于自学。对原有习题进行了整理和补充,并增加了 PSPICE 分析练习题。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程等专业的教材,也可供相应专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路:非线性部分 / 谢嘉奎主编: 谢嘉奎、宣月清, 冯军编. — 4版. — 北京: 高等教育出版社, (2001 重印)
ISBN 7-04-007987-9

I. 电... II. ①谢... ②谢... ③宣... ④冯...
III. 非线性电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14279 号

电子线路 非线性部分(第四版)	责任编辑	张培东	版式设计	史新薇
谢嘉奎 主编	封面设计	张楠	责任校对	王巍
	责任绘图	李维平	责任印刷	宋克学

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

电 话 010-64054588

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 24.75

字 数 450 000

版 次 1979 年 11 月第 1 版

2000 年 5 月第 4 版

印 次 2001 年 1 月第 2 次印刷

定 价 20.90 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 年出版,曾获国家教委优秀教材一等奖。根据近十年来电子技术的进展和教学实践中暴露的问题,编者对本书第三版进行了全面的修订。在修订过程中,对非线性电子线路的基本内容作了进一步的提炼,力求做到浅一点、宽一点、概念更严密些。同时,对于目前应用较少的内容进行了删减,适度补充了新的和实用性的内容。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,增加了 PSPICE 分析练习题。

第一章功率电子线路由第三版中第一章(非谐振功率放大器)和附录(整流与稳压电路)的内容组成。本章以功率和效率为主线对原有内容进行了整理,首先讨论了功率电子线路中有关性能特点、功率器件及其运用特性和极限特性等共性内容,而后以功率放大器为重点,按功率放大器、功率合成电路、整流与稳压电路顺序进行讨论。其中,为了更好地理解开关稳压电路,增加了斩波器的内容。

第二章谐振功率放大器,对第三版的内容进行了删减,为了增加实用性,增设了高频功率放大器一节。

第三章正弦波振荡器中突出了三点式电路起振条件的工程估算方法。另外,增加了间歇振荡和频率占据的内容。

第四章振幅调制、解调与混频电路由第三版中第四章(频谱搬移电路的工作原理)和第五章(频谱搬移电路)的内容组成。本章以相乘器电路为核心,对原有内容进行了重新整理,首先提出频谱搬移电路的实现模型,而后集中介绍几种通用的相乘器电路,最后顺序介绍混频、振幅调制与解调电路的性能要求和应用特性。

第五章角度调制与解调电路中对耦合回路相位鉴频器内容进行了删减,增加了数字调制的内容。

第六章反馈控制电路中增加了吞脉冲锁相频率合成器内容。

本版还增设了选频网络的附录,作为教学辅助材料。

本书由谢嘉奎主编,谢嘉奎、宣月清和冯军共同完成本版的修订工作,宣月清和冯军还分别编写了习题和 PSPICE 分析练习题。

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衷心的感谢。恳请对本书继续提出批评和指教。

编 者

1999年8月于东南大学

第三版前言

一九八五年下半年开始,高等学校工科电工课程教学指导委员会电子线路课程教学指导小组按照国家教委的部署和要求,着手制订电子线路(I)(II)课程的教学基本要求。通过广泛讨论、反复修改、数易其稿,并由高等学校工科电工课程教学指导委员会审订通过,经国家教委批准,《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》于一九八七年初正式公布。《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》是一个教学指导性文件,它是电子、通信等类专业本科学生必须达到的合格要求,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、讨论过细的内容做了进一步的压缩和删减,力求讲清功率放大、振荡和频率变换的电路组成、工作原理、性能特点、基本工程分析方法。同时,本着贯彻以集成电路为主的原则,删减目前已逐步由相应集成电路取代的分立元件电路,适当增加集成电路方面的内容。

与第二版比较,全书篇幅压缩了四分之一以上,以便适应《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》规定的120~140的参考学时(其中非线性部分约为60~70学时)。内容增删如下:

在功率放大部分中,压缩变压器耦合功率放大电路,删除谐振功率放大器的折线分析法和电子管谐振功率放大器的附录。

在振荡部分中,精简LC正弦振荡电路的分析,删除间歇振荡,增加各种集成振荡电路。

在频率变换部分中,将“振幅调制与解调电路”和“混频电路”两章的体系作了调整,按频谱搬移电路的工作原理和电路组成与分析方法分设第四和第五两章。在第五章频谱搬移电路中,着重介绍双差分对集成乘法器和二极管双平衡混频组件两种广泛采用的频谱搬移电路,删除和压缩高电平调制电路、三极管混频电路和二极管检波电路等。在第六章角度调制与解调电路中,较大幅度增加集成鉴频电路。在第七章反馈控制电路中,压缩了自动频率控制电路和锁相环路的数学分析,增加了集成锁相环路及其应用。

在整流与稳压电路的附录中,以集成稳压电路为线索对原书中的这部分内容进行了较大幅度的修改,并增加了开关稳压电路的工作原理。

本书由谢嘉奎主编,在谢嘉奎主持下,通过广泛的调查研究,确定了本版的

修改大纲。书中,第四、第五、第六、第七各章由谢嘉奎修订,第一、第二、第三章、附录及各章习题由宣月清修订,在习题的增删和题解方面冯军做了大量的工作。最后谢嘉奎对全书进行了文字润饰和定稿。

本版由清华大学董在望副教授主审,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8月

第二版前言

电子线路是指含有晶体二极管、晶体三极管、场效应管等电子器件、并且能实现特定电功能的电路,它被广泛应用于各种电子设备中。

电子线路的种类繁多,在无线电技术专业教学计划中,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。

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》是“电子线路”原先作为一门大课开设时的教材。在一九八〇年春教育部组织修订无线电技术专业教学计划时,从便于安排考虑,将这门大课分成两门课程,并将其中的实验部分单独设置课程。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”;也可按电子器件的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《电子线路》第三册、第四册和第五册进行改编而成的。与第一版比较,它的变动较大,各章都重新改写过,全书篇幅压缩三分之一以上。

在改编过程中,我们对第一版中要求过高、讨论过细以及枝节性的内容做了较大幅度的压缩和删减,并力求由浅入深地讲清实现每一种功能电路的基本原理、基本组成和基本工程分析方法,不是着眼于全面介绍各种实用电路,而是选择其中具有典型性的电路来进一步说明上述基本内容。我们期望这样的变动将有利于开阔思路,举一反三,并引导学生从本质上了解各种不同功能的具体电路,同时也有利于教师精选内容,讲清规律。

本书大体上保留了第一版的体系。全书由功率放大电路、正弦波振荡电路和频率变换电路三部分组成。功率放大电路部分包括非谐振功率放大器和谐振功率放大器两章,着重讨论这两种功率放大器的工作原理、功率管的充分利用、工作状态的近似工程分析方法以及匹配网络的计算,还介绍了传输线变压器及功率合成技术,并设有电子管谐振功率放大器的附录。正弦波振荡电路部分只包括正弦波振荡器一章,它是由第一版中振荡原理和正弦波振荡器两章合并而成的,着重讲清反馈振荡器的起振条件、平衡条件和稳定条件,并介绍了LC正弦振荡电路和晶体振荡电路以及它们的分析方法,还讨论了频率稳定度问题。

频率变换电路部分包括振幅调制与解调电路、混频电路、角度调制与解调电路和反馈控制电路四章,删去了第一版中的参量电路一章,将该章部分内容并入混频电路。这部分着重讨论频谱搬移电路(包括振幅调制与解调电路、混频电路)和频谱非线性变换电路(包括频率调制与解调电路)的特点、电路模型、实现方法及实用电路,还讨论了各种反馈控制电路的作用、工作过程及应用。

书末设有整流与稳压电路的附录,简要介绍各种整流电路的特点以及串联式稳压电路的工作原理和提高稳压性能的主要措施。

本书是按课内总学时数约 100 而编写的,根据我们的教学实践,建议学时数分配如下:功率放大电路部分为 26,正弦波振荡电路部分为 16,频率变换电路部分为 58。为了培养学生独立学习的能力,在使用这些学时数时,课堂讲授的学时数最好控制在 80% 以内,多余的学时数用于习题课、课堂讨论或其它行之有效的形式指导学生学习。

我们认为,教材只能起到主要教学参考书的作用,在满足教学大纲要求的前提下,教师完全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。同时,“非线性电子线路”是一门有待发展的课程,在集成化技术和计算机辅助设计的推动下,可以预期这门课程无论在内容上或体系上将会有较大的变动,因此,我们热切期待大家在更新内容、引入计算机辅助分析和设计以及建立更完善和合理的课程体系等方面取得有益的经验。这样,才能促进这门课程教学质量的提高。

本书的大部分习题是从南京工学院无线电工程系《电子线路习题集》编写组于一九八〇年编写出版的《电子线路习题集》中选取的。

本书由北方交通大学贺允东副教授主审,北京工业学院俞宝传教授复审,他们都提出了许多十分宝贵的意见。

本书第一版的主编之一陈笃信副教授对改编的原则和具体内容都提出了有益的意见。

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第一版及第二版的内容都提出了具体的意见,为本书积累了不少习题,并为本书编写做了许多具体工作。

广大读者和兄弟院校教师对第一版提出了宝贵的批评和建议,并对第二版提出了希望和要求。

我们对上述同志表示深切的谢意。

限于水平,本书在内容取舍、叙述方法和文字润饰等方面都会存在着不妥之处,甚至还会有错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

1984.2.

第一版前言

一九七〇年我们编写了《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、谢洪隳、彭沛、邹家驊。其中陈笃信、谢洪隳、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。

我们对上述的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

目 录

绪论	1
0.1 非线性电子线路的作用	1
0.2 非线性器件的基本特点	6
0.3 本课程的特点	9
第 1 章 功率电子线路	11
1.1 功率电子线路概述	11
1.1.1 功率放大器	11
1.1.2 电源变换电路	13
1.1.3 功率器件	14
1.2 功率放大器的电路组成和工作特性	19
1.2.1 从一个例子讲起	20
1.2.2 甲类、乙类功率放大器的电路组成及其功率性能	22
1.3 乙类推挽功率放大电路	29
1.3.1 乙类互补推挽功率放大电路	29
1.3.2 集成功率放大器	35
1.4 功率合成技术	40
1.4.1 功率合成电路的作用	40
1.4.2 传输线变压器	41
1.4.3 用传输线变压器构成的魔 T 混合网络	45
1.5 整流与稳压电路	51
1.5.1 整流电路	51
1.5.2 串联型稳压器	58
1.5.3 开关型稳压器	64
习题	70
PSPICE 分析练习题	78
第 2 章 谐振功率放大器	81
2.1 谐振功率放大器的工作原理	81
2.1.1 丙类谐振功率放大器	81
2.1.2 丁类和戊类谐振功率放大器	83
2.1.3 倍频器	85

2.2 谐振功率放大器的性能特点	85
2.2.1 近似分析方法	85
2.2.2 欠压、临界和过压状态	87
2.2.3 四个电压量对性能影响的定性讨论	89
2.3 谐振功率放大器电路	94
2.3.1 直流馈电电路	94
2.3.2 滤波匹配网络	96
2.3.3 谐振功率放大器电路	102
2.4 高频功率放大器	103
2.4.1 高频功率管及其大信号输入和输出阻抗	104
2.4.2 高频功率放大器设计举例	106
习题	110
PSPICE 分析练习题	114
第3章 正弦波振荡器	116
3.1 反馈振荡器的工作原理	116
3.1.1 平衡和起振条件	117
3.1.2 稳定条件	119
3.1.3 基本组成及其分析方法	122
3.2 LC 正弦波振荡器	123
3.2.1 三点式振荡电路	123
3.2.2 差分对管振荡电路	131
3.2.3 举例	135
3.3 LC 振荡器的频率稳定度	137
3.3.1 提高频率稳定度的基本措施	138
3.3.2 克拉泼振荡电路	141
3.4 晶体振荡器	142
3.4.1 石英谐振器的电特性	142
3.4.2 晶体振荡电路	145
3.5 RC 正弦波振荡器	148
3.6 负阻正弦波振荡器	151
3.6.1 负阻器件	151
3.6.2 负阻振荡原理及其电路	152
3.6.3 用负阻观点讨论 LC 反馈振荡器	155
3.7 寄生振荡、间歇振荡和频率占据	156
3.7.1 寄生振荡	156
3.7.2 间歇振荡	157
3.7.3 频率占据	158

习题	160
PSPICE 分析练习题	168
第 4 章 振幅调制、解调与混频电路	170
4.1 频谱搬移电路的组成模型	170
4.1.1 振幅调制电路的组成模型	170
4.1.2 振幅解调和混频电路的组成模型	177
4.1.3 小结	180
4.2 相乘器电路	182
4.2.1 非线性器件的相乘作用及其特性	182
4.2.2 双差分对平衡调制器和模拟相乘器	188
4.2.3 大动态范围平衡调制器 AD630	196
4.2.4 二极管双平衡混频器	198
4.3 混频电路	202
4.3.1 通信接收机中的混频电路	203
4.3.2 三极管混频电路	206
4.3.3 混频失真	209
4.4 振幅调制与解调电路	216
4.4.1 振幅调制电路	216
4.4.2 二极管包络检波电路	219
4.4.3 同步检波电路	229
* 4.5 参量混频电路	231
4.5.1 非线性电容器件的能量转换原理	231
4.5.2 参量混频电路	236
习题	238
PSPICE 分析练习题	248
第 5 章 角度调制与解调电路	251
5.1 角度调制信号的基本特性	251
5.1.1 调频信号和调相信号	251
5.1.2 调角信号的频谱	255
5.1.3 调角信号的频谱宽度	257
5.1.4 小结	258
5.2 调频电路	259
5.2.1 调频电路概述	259
5.2.2 在正弦振荡器中实现直接调频	261
5.2.3 张弛振荡电路实现直接调频	270
5.2.4 间接调频电路——调相电路	274
5.2.5 扩展最大频偏的方法	282

5.3 调频波解调电路	283
5.3.1 限幅鉴频实现方法概述	284
5.3.2 斜率鉴频电路	292
5.3.3 相位鉴频电路	294
5.4 数字调制与解调电路	306
5.4.1 数字信号的再生	306
5.4.2 数字调相与解调电路	308
5.4.3 数字调频与解调电路	314
习题	316
PSPICE 分析练习题	324
第 6 章 反馈控制电路	325
6.1 反馈控制电路概述	325
6.1.1 自动电平控制电路	326
6.1.2 自动频率控制电路	330
6.1.3 自动相位控制电路(锁相环路)	335
6.2 锁相环路性能分析	337
6.2.1 基本环路方程	337
6.2.2 捕捉过程的定性讨论	341
6.2.3 跟踪特性	344
6.3 集成锁相环及其应用	349
6.3.1 集成锁相环路	349
6.3.2 锁相环在解调和锁相接收中的应用	352
6.3.3 锁相环在频率合成器中的应用	356
习题	361
附录 选频网络	367
一、串联谐振回路	368
二、并联谐振回路	370
三、阻抗变换网络	372
四、集中选频滤波器	375
参考书目	379

绪 论

0.1 非线性电子线路的作用

各种电子器件都是非线性器件,因此,所有包含电子器件的电子线路都是非线性电路。但是使用条件不同,电子器件表现出来的非线性程度也不同。在线性电子线路中,对信号进行处理时,尽量使用电子器件特性的线性部分。在这种情况下,对信号而言,电路基本上是线性的,但多少存在着不希望有的失真。从另一方面来看,可以利用电子器件的非线性来完成振荡、频率变换等功能。完成这些功能的电路统称为非线性电子线路。

各种放大器,就其功能来说,都要求不失真地放大信号,应归属于线性电子线路。但是各种放大器的工作情况又有不同。本书线性部分讨论的各种小信号放大器,由于它们的输入信号足够小,可以用线性等效电路表示电子器件的特性,因此,可以采用线性电路的分析方法。而在本书非线性部分中将要讨论的功率放大器,由于它们的输入信号大,同时,考虑到提高放大器效率等要求,必然涉及到器件的非线性部分,这样,就不能用线性等效电路表示电子器件的特性,而必须用非线性电路的分析方法。因此,从分析方法的观点出发,也将功率放大器归在非线性电子线路的范畴。

非线性电子线路广泛用于通信系统和各种电子设备中。为了具体了解非线性电子线路的作用,现对它们在通信系统中的应用作一概要的介绍。

从广泛的涵义上说,一切将信息从发送者传送到接收者的过程都可看作为通信(Communication),实现这种信息传送过程的系统称为通信系统。其中,利用导线传送信息的系统称为有线通信系统;利用电磁波传送信息的系统称为无线通信系统;利用光导纤维传送信息的系统称为光纤通信系统。以无线通信系统为例,它由发射装置、接收装置和传输媒质所组成,如图 0-1-1 所示。

发射装置包括换能器、发射机(Transmitter)和发射天线(Antenna)三部分。其中,换能器将发送者提供的信息变换为电信号,如果发送者提供的信息表现为