



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

电子线路 非线性部分

第五版

冯 军 谢嘉奎 主编
冯 军 王 欢 王 蓉 宣月清 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 ◀

Dianzi Xianlu

Feixianxing Bufen

第五版

冯 军 谢嘉奎 主编
冯 军 王 欢 王 蓉 宣月清 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。其第三版曾获国家教委优秀教材一等奖;第四版被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材以及面向 21 世纪课程教材,获 2002 年全国普通高等学校优秀教材一等奖。全书由绪论,功率电子线路,谐振功率放大器,振荡器,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及附录(选频网络)组成。新版在保持原教材的既有特色、基本内容的前提下,增加了场效应管电路的分析与应用,以及低压差线性稳压电路、Class D 音频功放、三极管整流和可控整流、非正弦波振荡和电荷泵锁相环的内容;对内容的编排做了适当调整,力求做到思路清晰,易教易学。

本书可作为高等学校电子信息、通信类专业的教材,也可供相关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/冯军,谢嘉奎主编.—5
版.—北京:高等教育出版社,2010.8
ISBN 978-7-04-030142-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 126555 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 魏芳 封面设计 于涛 责任绘图 尹莉
版式设计 王艳红 责任校对 俞声佳 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 29
字 数 540 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1979 年 11 月第 1 版
2010 年 8 月第 5 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷
定 价 39.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30142-00

第五版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。其第三版曾获国家教委优秀教材一等奖;第四版被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材以及面向 21 世纪课程教材,于 2000 年出版,获 2002 年全国普通高等学校优秀教材一等奖。这套教材从 1979 年出版第一版至今,历时三十余年,凝聚了许多老前辈的心血,倾注了谢嘉奎教授的毕生精力,为我国电子科学的基础教育作出了很大的贡献。时至今日第四版发行已有十年,随着近十年来科学技术的发展和教学改革的需要,有必要对第四版进行修订。新版在保持原教材的既有特色、基本内容的前提下,增加场效应管电路以及集成电路的分析与应用,以适应电子技术的发展和教学改革的需求;增加顺应科学技术发展的新的和具有实用性的内容,以适应社会发展的需求。在教材的选材和叙述中重视物理概念,在电路的工作过程分析中重视物理解释而不局限于数学推导,在内容的编排上,尽量做到思路清晰、叙述详尽、便于自学、利于理解。

与第四版比较,新版的具体修订如下。

1. 在功率电子线路的两个组成部分中,调整了功率放大部分的内容安排,加强了电源部分的内容。具体为:将集成功率放大器单独作为一节,增加 MOS 管集成功放和目前应用广泛的 Class D 音频功放内容。在电源部分,将整流电路和稳压电路分为两节分别介绍。整流电路部分增加了三极管整流和可控整流;稳压电路部分增加了低压差线性稳压电路(LDO),并给出了 LDO 与开关稳压电路的比较。

2. 第 3 章原为正弦波振荡器,由于引入了张弛振荡和由数字门电路构成的振荡器概念,在内容介绍上不只局限于对正弦波振荡器的介绍,所以此章标题改为振荡器。在工作原理介绍上,将数字电路中奇数个反相器构成的振荡器与模拟电路中的反馈振荡器这两种原先出现在两套教材中的内容统一用一个反馈振荡器的概念来解释,给出了反馈振荡器在组成方式上的集总和分散两种不同的组合方式。增加了环形振荡器概念和压控振荡器(VCO)概念,并介绍了一些基本电路。增加了交叉耦合这一用正反馈电路实现负阻的振荡电路的原理和分析。调整了内容和叙述结构,增加了电路分析的实例,同时介绍了振荡电路分析、研究的方法。

3. 相乘器是频谱搬移电路的核心,为对相乘器有一个完整的介绍,本次修

订重新整理与编排了相乘器的内容,以器件本身特性、二极管平衡、双平衡电路、三极管 Gilbert 电路和集成模拟相乘器为主线在各个层次上介绍相乘器的实现原理。

4. 振幅调制与解调的其他内容和角度调制与解调部分只是针对本次修订中因其他章节内容修订而有改动的内容做了适当的调整。

5. 反馈控制部分增加了有关电荷泵锁相环基本概念的介绍,调整了集成锁相环及其应用的部分内容。

本书第五版由冯军主编,冯军、王欢和王蓉共同完成本版的修订工作,除第 2 章未作修订外,由冯军完成第 3、4、5 章的修订,王蓉、冯军共同完成第 1 章的修订,王欢、冯军共同完成第 6 章的修订。

本书由清华大学董在望教授审阅、把关,董在望教授提出了十分宝贵的意见,对提高本版质量起到了重要的作用。

十年来,广大读者和兄弟院校教师对本书提出的批评和建议,对我们有很大的启发和帮助。在此,我们表示由衷的感谢。恳请广大读者和同行对本书继续提出批评和指教。

编 者

2010 年 4 月于东南大学

第四版前言

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 年 2 月

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、谢洪隰、彭沛、邹家驊。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	19
1.2.2 甲类、乙类功率放大器的电路组成及其功率性能	21
1.2.3 乙类互补推挽放大器实际电路	28
1.3 集成功率放大器	34
1.3.1 LM380 集成功率放大器	35
1.3.2 功率运算放大器	37
1.3.3 MOS 管集成功率放大器	37
1.3.4 桥式功率放大器	38
1.3.5 集成 Class D 音频功率放大器	40
1.4 功率合成技术	43
1.4.1 功率合成电路的作用	43
1.4.2 传输线变压器	44
1.4.3 用传输线变压器构成的魔 T 混合网络	48
1.5 整流电路	53
1.5.1 二极管整流电路	54
1.5.2 三极管整流电路	61
1.5.3 可控整流电路	63
1.6 稳压电路	67
1.6.1 串联稳压电路	68
1.6.2 低压差线性稳压电路	74
1.6.3 开关稳压电路	80
1.6.4 LDO 与开关稳压电路的比较	86

习题	86
PSPICE 分析练习题	98
第 2 章 谐振功率放大器	101
2.1 谐振功率放大器的工作原理	101
2.1.1 丙类谐振功率放大器	101
2.1.2 丁类和戊类谐振功率放大器	103
2.1.3 倍频器	105
2.2 谐振功率放大器的性能特点	106
2.2.1 近似分析方法	106
2.2.2 欠压、临界和过压状态	107
2.2.3 四个电压量对性能影响的定性讨论	109
2.3 谐振功率放大器电路	115
2.3.1 直流馈电电路	115
2.3.2 滤波匹配网络	117
2.3.3 谐振功率放大器电路	122
2.4 高频功率放大器	124
2.4.1 高频功率管及其大信号输入和输出阻抗	124
2.4.2 高频功率放大器设计举例	127
习题	131
PSPICE 分析练习题	135
第 3 章 振荡器	137
3.1 反馈振荡器的工作原理	138
3.1.1 起振条件和平衡条件	140
3.1.2 稳定条件	142
3.1.3 基本组成和基本分析方法	145
3.2 LC 正弦波振荡器	147
3.2.1 三点式振荡电路	147
3.2.2 差分对管振荡电路	159
3.3 LC 振荡器的频率稳定度	163
3.3.1 影响频率稳定性的因素	163
3.3.2 提高频率稳定性的措施	166
3.3.3 克拉泼振荡电路	167
3.4 石英晶体振荡器	169
3.4.1 石英晶体的物理性能	169
3.4.2 石英谐振器的电特性	169
3.4.3 晶体振荡电路	173
3.5 RC 正弦波振荡器	178
3.6 环形振荡器	182

3.6.1 门电路反相器构成环形振荡器	183
3.6.2 反相放大器构成环形振荡器	184
3.7 负阻正弦波振荡器	185
3.7.1 负阻器件	186
3.7.2 负阻振荡原理及其电路	188
3.7.3 用负阻观点讨论 LC 反馈振荡器	190
3.7.4 用正反馈电路实现负阻振荡	192
3.8 压控振荡器	193
3.8.1 压控特性	194
3.8.2 压控振荡器的实现方法	194
3.8.3 压控振荡器实现方法举例	195
3.9 寄生振荡、间歇振荡和频率占据	197
3.9.1 寄生振荡	197
3.9.2 间歇振荡	198
3.9.3 频率占据	199
习题	202
PSPICE 分析练习题	214
第 4 章 振幅调制、解调与混频电路	217
4.1 频谱搬移电路的组成模型	217
4.1.1 振幅调制电路的组成模型	217
4.1.2 振幅解调和混频电路的组成模型	225
4.1.3 小结	229
4.2 相乘器电路	229
4.2.1 非线性器件的相乘作用及其特性	230
4.2.2 二极管平衡、双平衡电路	237
4.2.3 三极管 Gilbert 电路	240
4.2.4 集成模拟相乘器	246
4.2.5 小结	253
4.3 混频电路	253
4.3.1 通信接收机中的混频电路	253
4.3.2 三极管混频电路	258
4.3.3 混频失真	262
4.4 振幅调制与解调电路	268
4.4.1 振幅调制电路	268
4.4.2 二极管包络检波电路	271
4.4.3 同步检波电路	281
*4.5 参量混频电路	283
4.5.1 非线性电容器件的能量转换原理	284

4.5.2 参量混频电路	289
习题	291
PSPICE 分析练习题	301
第5章 角度调制与解调电路	304
5.1 角度调制信号的基本特性	304
5.1.1 调频信号和调相信号	304
5.1.2 调角信号的频谱	308
5.1.3 调角信号的频谱宽度	310
5.1.4 小结	311
5.2 调频电路	312
5.2.1 调频电路概述	312
5.2.2 直接调频电路	314
5.2.3 间接调频电路——调相电路	327
5.2.4 扩展最大频偏的方法	335
5.3 调频波解调电路	336
5.3.1 限幅鉴频实现方法概述	337
5.3.2 斜率鉴频电路	345
5.3.3 相位鉴频电路	348
5.4 数字调制与解调电路	359
5.4.1 数字信号的再生	360
5.4.2 数字调相与解调电路	361
5.4.3 数字调频与解调电路	368
习题	370
PSPICE 分析练习题	378
第6章 反馈控制电路	380
6.1 反馈控制电路概述	380
6.1.1 自动电平控制电路	381
6.1.2 自动频率控制电路	384
6.1.3 自动相位控制电路(锁相环路)	390
6.2 锁相环路性能分析	392
6.2.1 基本环路方程	392
6.2.2 捕捉过程的定性讨论	396
6.2.3 跟踪特性	399
6.3 电荷泵锁相环	404
6.3.1 工作原理	404
6.3.2 环路方程	407
6.3.3 电荷泵电路	408
6.4 集成锁相环及其应用	410