

湖北省高等教育自学考试教材

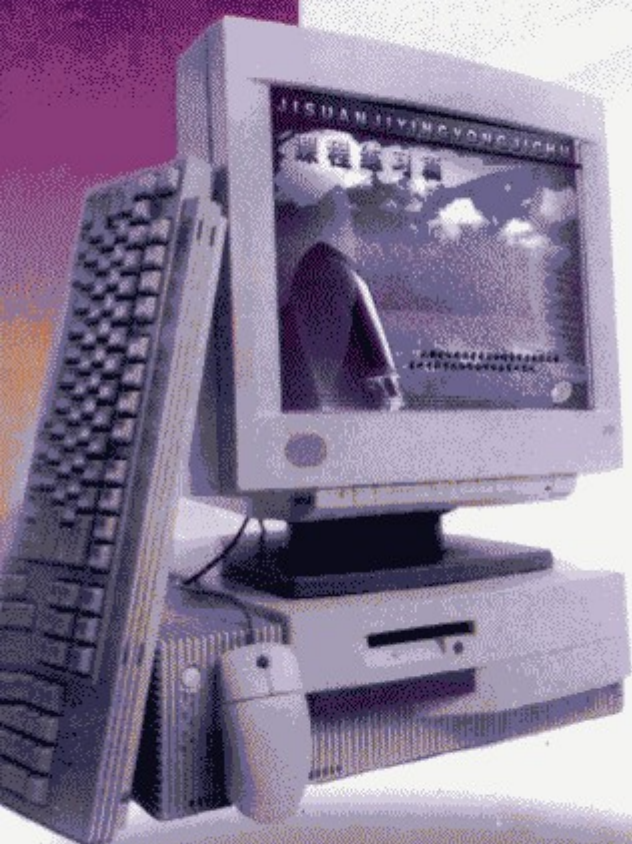


非线性电子电路

(附 非线性电子电路自学考试大纲)

组编 湖北省教育考试院

严国萍 龙占超



华中科技大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

E-mail: hustpp@wuhan.cngh.com

ISBN 7-5609-2330-5



9 787560 923307 >

定价: 19.80 元

湖北省高等教育自学考试教材

非线性电子电路

(附 非线性电子电路自学考试大纲)

组编 湖北省教育考试院

严国萍 龙占超

华中科技大学出版社

(华中理工大学出版社)

图书在版编目(CIP)数据

非线性电子电路/严国萍 龙占超
武汉:华中科技大学出版社, 2001年1月
ISBN 7-5609-2330-5

I. 非…

I. ①严… ②龙…

Ⅱ. 非线性电路-高等教育-自学考试-教材

Ⅳ. TN711.4

非线性电子电路

严国萍 龙占超

责任编辑:傅岚亭

封面设计:潘 群

责任校对:王崇军

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)87545012

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:15.25

字数:265 000

版次:2001年1月第1版

印次:2003年3月第3次印刷

印数:5 101—7 100

ISBN 7-5609-2330-5/TN·61

定价:19.80元

(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，内容包括非线性电路分析基础、谐振功率放大器、正弦波振荡器、频谱搬移电路（调幅、检波与混频）、频谱非线性变换电路（角度调制与解调）、反馈控制电路、频率合成技术等。

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。为使自学者易于掌握要点，每章末都有小结。

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

本教材是湖北省自学考试规划教材,根据高等教育自学考试电子技术专业(专科)考试计划中对非线性电子电路课程内容的要求编写。

“非线性电子电路”是“线性电子电路”的后续课,也是电子技术专业的一门专业基础课。本课程主要介绍非线性电子电路的基本原理、分析方法和典型应用。教材在讲清非线性电子电路的特性、作用及其与线性电路的区别、几种常用分析方法的基础上,分别介绍了谐振功率放大器、正弦波振荡器及通信系统收发设备中的各种频率变换电路。书中将具有频谱搬移共性的调幅、检波与混频归为一章。首先讲清频谱搬移电路的共同特点,再分别介绍调幅、检波与混频电路,使学生易于掌握它们之间的异同点及其分析方法。为使学生掌握角度调制的频谱非线性变换特性,将调频、调相归在一章中统一介绍,着重讲清它们之间的区别和联系,以常用的变容二极管调频电路为重点介绍了调频方法。在反馈控制电路中,首先使学生建立反馈控制系统的整体概念,再分别介绍 AGC、AFC 和 PLL 电路。由于无线通信技术的迅速发展,对振荡信号源的要求不断提高,因此本书还另辟一章介绍了既能满足较高频率稳定度,又能方便地转换频率的频率合成器。着重讲述了频率合成器的特点、指标和各种频率合成器的电路分析。由于相乘器是目前通信系统中实现频率变换的常用基本组件,因此本书着重介绍了基本原理、结构和实际应用电路。

本教材充分考虑了自学考试学生的特点,语言力求通俗易懂,并着重物理概念和基本原理的阐述。尽量避免繁琐的数学推导。本着对自学考生够用、适用的原则,教材内容紧扣自学考试大纲,并注意控制篇幅,突出重点,每章都有适当的例题和实际应用电路。为了便于学生自学并掌握本章要点,书中每章末均有小结,将本章重点和难点进行归纳总结。

本书绪论,第 1、2、3、4、5 章由严国萍编写,第 6、7 章由龙占超

编写，全书由严国萍统稿。华中理工大学电信系高频教研组的同志审阅了全稿，并提出了宝贵的意见，孙中葛、黄耀军、蒋仲雄为本书编写做了大量工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有一些不妥和错误之处，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

2000年5月于华工园

目 录

绪 论	(1)
一、概述	(1)
二、通信系统简介	(1)
三、频谱与非线性电路组成	(3)
四、本课程的特点	(5)
第 1 章 非线性电路分析基础	(7)
§1.1 非线性电路的基本概念与非线性元件	(7)
一、非线性电路的基本概念	(7)
二、非线性元器件的特性	(8)
§1.2 非线性电路的分析方法	(10)
一、幂级数分析法	(11)
二、折线分析法	(12)
三、线性时变参量电路分析法	(13)
§1.3 非线性电路的应用	(15)
§1.4 模拟相乘器及其频率变换作用	(16)
一、相乘器的基本特性及实现方法	(16)
二、四象限双差分对模拟相乘器原理	(18)
§1.5 二极管平衡相乘器	(23)
本章小结	(25)
思考题与习题	(25)
第 2 章 谐振功率放大器	(28)
§2.1 概 述	(28)
§2.2 谐振功率放大器的工作原理	(29)
一、谐振功率放大器的原理及电压、电流波形	(29)
二、谐振功率放大器的功率关系和效率	(30)
§2.3 晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法	(32)
一、折线法	(32)
二、晶体特性曲线的理想化及其解析式	(33)
三、集电极余弦电流脉冲的分解	(34)
四、谐振功率放大器的动态特性与负载特性	(36)

五、放大器工作状态及半导通角的调整	(40)
六、谐振功率放大器的计算	(42)
§2.4 谐振功率放大器电路	(44)
一、直流馈电电路	(44)
二、输出回路和级间耦合回路	(46)
§2.5 谐振功率放大器实例	(49)
一、160MHz, 13W 谐振功率放大电路	(49)
二、50MHz, 25W 调谐功率放大电路	(49)
§2.6 晶体管倍频器	(50)
一、概述	(50)
二、晶体管丙类倍频电路与工作原理	(51)
三、负载回路的滤波作用	(52)
本章小结	(52)
思考题与习题	(53)
第 3 章 正弦波振荡器	(55)
§3.1 概 述	(55)
§3.2 反馈型振荡器的基本工作原理	(55)
一、自激振荡建立的物理过程和电路基本构件	(55)
二、振荡器的起振条件	(56)
三、振荡器的平衡条件	(58)
四、振荡器平衡状态的稳定条件	(58)
§3.3 反馈型 LC 振荡器线路	(60)
一、互感耦合振荡器	(61)
二、三端式 LC 振荡器	(62)
§3.4 振荡器的频率稳定问题	(69)
一、频率稳定度定义	(69)
二、影响频率稳定度的因素	(70)
三、振荡器稳定频率的方法	(71)
§3.5 石英晶体振荡器	(72)
一、石英晶体及其特性	(72)
二、晶体振荡器电路	(74)
§3.6 其他形式的振荡器	(78)
一、压控振荡器	(78)
二、集成电路振荡器	(79)

(241)	§3.7 RC 正弦波振荡器	(81)
(241)	一、RC 选频网络	(82)
(241)	二、文氏电桥振荡器	(82)
(241)	三、RC 相移振荡器	(84)
(021)	本章小结	(85)
(521)	思考题与习题	(86)
	第4章 调幅、检波与混频——频谱搬移电路	(91)
(221)	§4.1 频谱搬移电路的特性	(91)
(821)	§4.2 振幅调制原理	(92)
(1021)	一、概述	(92)
(1021)	二、调幅波的性质	(92)
(1021)	三、抑制载波的双边带调幅波与单边带调幅波	(96)
(001)	§4.3 振幅调制方法与电路	(98)
(001)	一、概述	(98)
(001)	二、低电平调幅电路	(99)
(051)	三、高电平调幅电路	(106)
(051)	§4.4 振幅解调(检波)原理与电路	(108)
(051)	一、概述	(108)
(551)	二、二极管(大信号)峰值包络检波器	(108)
(551)	三、同步检波器	(114)
(251)	§4.5 混频器原理及电路	(119)
(551)	一、概述	(119)
(851)	二、晶体三极管混频器	(122)
(181)	三、晶体二极管混频器	(126)
(951)	四、模拟相乘器混频电路	(127)
(081)	五、混频器的干扰	(128)
(181)	本章小结	(133)
(181)	思考题与习题	(134)
	第5章 角度调制与解调——频谱非线性变换电路	(138)
(181)	§5.1 概 述	(138)
(281)	§5.2 调角波的性质	(138)
(181)	一、调频波和调相波的波形和数学表达式	(138)
(181)	二、调角信号的频谱与有效频带宽度	(142)

三、调频波与调相波的联系与区别	(145)
§5.3 调频方法及电路	(146)
一、实现调频的方法和基本原理	(146)
二、变容二极管直接调频电路	(147)
三、晶体振荡器直接调频	(150)
四、间接调频方法 (由 PM→FM)	(152)
§5.4 调角信号解调	(155)
一、鉴频方法概述和鉴频器的主要技术指标	(155)
二、相位鉴频	(158)
三、比例鉴频器	(162)
§5.5 调频制的抗干扰(噪声)性能	(163)
本章小结	(165)
思考题与习题	(166)
第 6 章 反馈控制电路	(169)
§6.1 概 述	(169)
§6.2 自动电平控制电路	(170)
一、基本工作原理	(170)
二、应用	(170)
§6.3 自动频率控制电路	(172)
一、基本工作原理	(172)
二、应用	(175)
§6.4 锁相环路的基本工作原理	(177)
§6.5 锁相环路的性能分析	(178)
一、鉴相器(PD)及其电路模型	(178)
二、压控振荡器(VCO)	(179)
三、环路低通滤波器	(180)
四、锁相环路的数学模型	(181)
§6.6 集成锁相环	(183)
一、L562 集成锁相环	(183)
二、CC4046 单片锁相环	(184)
§6.7 锁相环路的应用	(185)
一、锁相环路的调频与鉴频	(185)
二、调幅信号的解调	(188)
三、锁相接收机	(188)

本章小结	(189)
思考题与习题	(190)
第 7 章 频率合成技术	(193)
§7.1 频率合成器的主要技术指标	(193)
一、频率合成方法	(193)
二、频率合成器的主要性能指标	(194)
§7.2 频率直接合成法	(195)
一、非相干式直接合成器	(195)
二、相干式直接合成器	(195)
三、频率漂移抵消法(外差补偿法)	(197)
§7.3 频率间接合成法(锁相环路法)	(198)
一、脉冲控制锁相法	(199)
二、模拟锁相环路法(间接合成制减法降频)	(199)
三、数字锁相环路法(间接合成制除法降频)	(202)
§7.4 集成频率合成器	(207)
本章小结	(208)
思考题与习题	(209)
参考文献	(211)
非线性电子电路自学考试大纲	(213)
一 课程的性质及设置目的	(214)
二 课程内容与考核目标	(214)
三 有关说明与实施要求	(225)
四 题型举例	(226)

绪 论

一、概述

在通信系统和各种电子设备中，常用的电路元件根据其工作状态不同可分为线性、非线性以及参变量元件三类。含有非线性元件的电子电路称为非线性电子电路。

非线性电子电路相对线性电子电路而言，其分析要复杂得多。但从工程应用来说，往往根据实际情况进行某些合理的近似，常采用幂级数近似分析法、折线近似分析法及线性时变参量分析法分析。这几种分析方法在第1章将分别进行讨论。

为了具体了解非线性电子电路的作用、原理和分析方法，本书着重研究广播、通信系统中的非线性电子电路。因此，有必要对通信系统作一简要介绍。

二、通信系统简介

从广义上说，传输信息的系统统称为通信系统。例如，广播电台是传输声音的系统，电视是传输图像信息与声音信息的系统，计算机通信是传送数据的系统，它们都是通信系统。一个完整的通信系统应包括：信号源、发送设备、传输信道、接收设备和受信装置五部分，如图0-1所示。

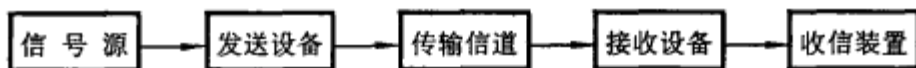


图 0-1 通信系统原理框图

① 信号源 信号源是将要传送的信息变成电信号的装置，如话筒、摄像机、各种传感装置。

② 发送设备 发送设备将基带信号变换成适于信道传输特性的信号。不同的信道具有不同的传输特性，由于要传送的消息种类很多，它们相应基带信号的特性各异，往往不适于直接在信道中传输。因此，需要利用发送设备对基带信号进行变换，以得到适于信道传输的信号。

③ 传输信道 传输信道是传送信息的通道，又称传输媒介，如电缆、光缆或无线电波。不同的信道有不同的传输特性。

④ 接收设备 接收设备是将信道传送过来的信号进行处理，以恢复出与发送端基带信号相一致的信号。当然，由于在信道传输中和恢复过程中会产生一定的干扰

和失真，因此，接收设备恢复的信号也会有一定的失真，应尽量减少这种失真。

⑤ 收信装置 收信装置是将接收设备输出的电信号变换成原来形式的消息的装置，如还原声音的喇叭，恢复图像的显像管等。

通信系统收发设备中的谐振功率放大器、倍频器、振荡器以及调制解调器、变频器的电路均属于非线性电子电路范畴，这是本书研究的重点。下面，我们以无线电发送设备和接收设备为例介绍它们的功能。图 0-2 为无线电发射机和接收机的方框图，其各部分的作用功能如下。

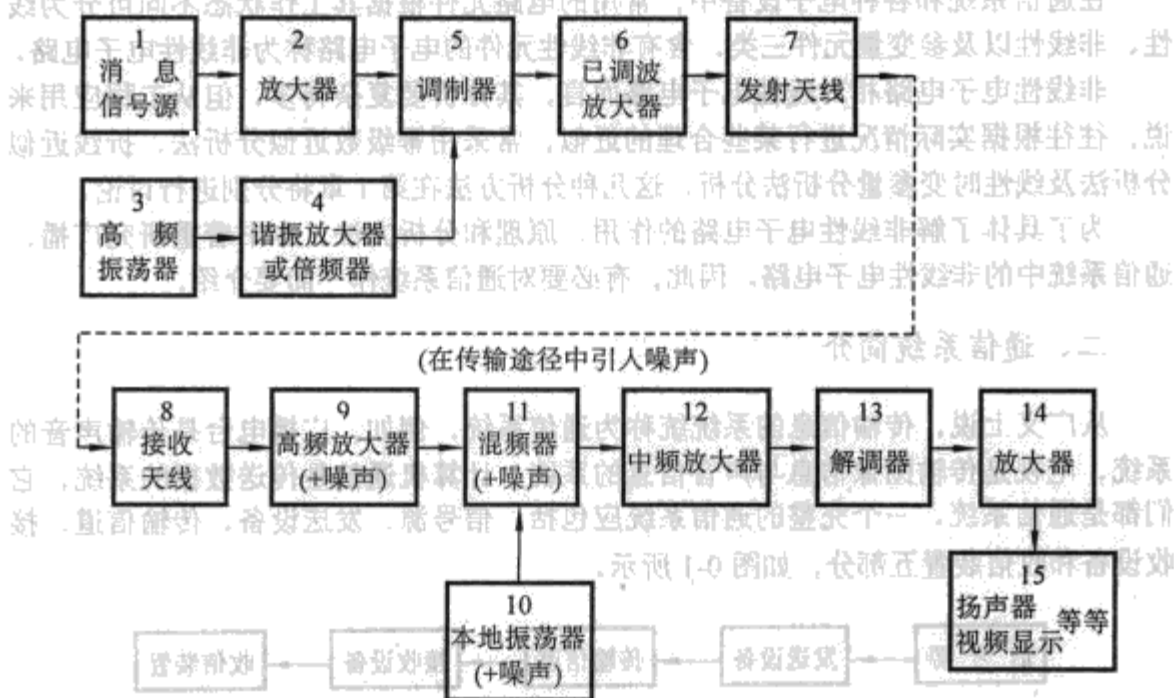


图 0-2 无线电发射机和接收机的方框图

① 消息信号源 它可以是话筒、电视摄像机或者其他能把所需信息转换成电信号的器件。

② 放大器 它把信号加以放大，并经常通过低通滤波器来限制信号的带宽。

③ 高频振荡器 用它来建立载波频率或载波的某个分谐波。因为需要有良好的稳定度以便保持发射机工作在指定的频率上，因此振荡器常常采用石英晶体作振荡元件。

④ 谐振放大器或倍频器 它们把来自振荡器的信号功率提高到调制器输入端所需要的电平。为了获得高的效率，只要可能，总是采用丙类工作状态。各级输出电路都调谐到输入频率的某个谐波上，构成“倍频”，从而使最终的载波频率可能是振荡器频率的数倍。

⑤ 调制器 调制过程是将基带信号装载到高频振荡信号上去的过程,即用基带信号去改变载波的振幅、频率或相位,因此,根据调制方式不同,在模拟通信中有调幅、调频和调相等三种调制器。

⑥ 已调波放大 信号经调制以后可能需要加以放大,以便把信号功率提高到天线输入端所需要的值。

⑦ 发射天线 它把高频能量转换成极化符合要求的电磁波。假使信号只传给单一固定接收机,则发射天线要设计得使尽可能多的辐射能量指向接收天线。天线长度必须和要传输的载波的波长可以比拟,才能有效地把电振荡波辐射出去。这也是为什么要调制的原因之一。

⑧ 接收天线 它可以是普通用途的全向天线,或者是点对点通信用的高方向性天线。从发射机传播过来的电磁波,在接收天线上感应出一个小的电压,其幅度范围可以从几十毫伏到小于 $1\mu\text{V}$,这取决于各种各样的接收条件。

⑨ 高频放大级 它把天线接收到的信号功率增大到适合混频器输入的电平,同时它有助于隔离本地振荡器和天线。

⑩ 接收机本地振荡器 它产生一个振荡频率 f_0 ,与进入接收机的信号频率 f_s 差一个中频 f_i 。这就是说, f_0 可以等于 $f_s + f_i$ 或 $f_s - f_i$ 。

⑪ 混频器 它是一个非线性器件,把被接收的高频已调信号的载波频率 f_s 变换到固定中频 f_i ,而保持其调制规律不变。

⑫ 中频放大器 它把中频信号增强到适合于检波的程度,并提供主要的频率选择能力。

⑬ 解调器 解调过程是调制的逆过程,即是从中频已调制信号中恢复出原始消息的过程。根据调制信号的不同,解调器可分为振幅解调、频率解调和相位解调等三种解调器。

⑭ 音频或视频放大器 它把检波器输出功率电平提高到适合于推动扬声器、显像管或其他输出器件的值。

⑮ 收信装置 它把音频或视频电信号恢复到它原来的形式(声音、图像等)。在这些方框中,本课程主要研究高频振荡器、谐振功率放大器、倍频器、调制器、混频器和解调器。

三、频谱与非线性电路组成



在实际应用中的信号千变万化,多种多样。为了便于分析,常采用数学表达式、波形及频谱的方式来描述信号。

对于波形,数学表达式一般适于表达较简单的信号,而对于大量实际信号由于规律复杂或无规律,写表达式和画波形都很麻烦,因此,在表示信号频率变换的过

程中,为了突出主要矛盾常采用信号频谱表示法。任何复杂的信号,都可分解为许多不同频率的正弦信号之和,因此,所谓“频谱”即是指组成信号的各正弦信号按频率分布的情况。为了更直观地了解信号的频率组成和特点,通常采用作图的方法来表示频谱,用频率 f 作横坐标,用信号的各正弦分量的幅度作纵坐标作出的关系曲线,称之为频谱图。例如声音信号变化规律比较复杂,不容易写出数学表达式。但是用频谱图的方法来分析它,就不难抓住其特点,清楚地表述它。图 0-3 所示为一般话音信号的频谱图,它的频率范围大约在一二百赫兹到几千赫兹之间(通常定为 300~3 400Hz),其能量主要集中在 1 000Hz 附近。由于语音信号包含的频率成分连续变化,因此谱线画成一片。

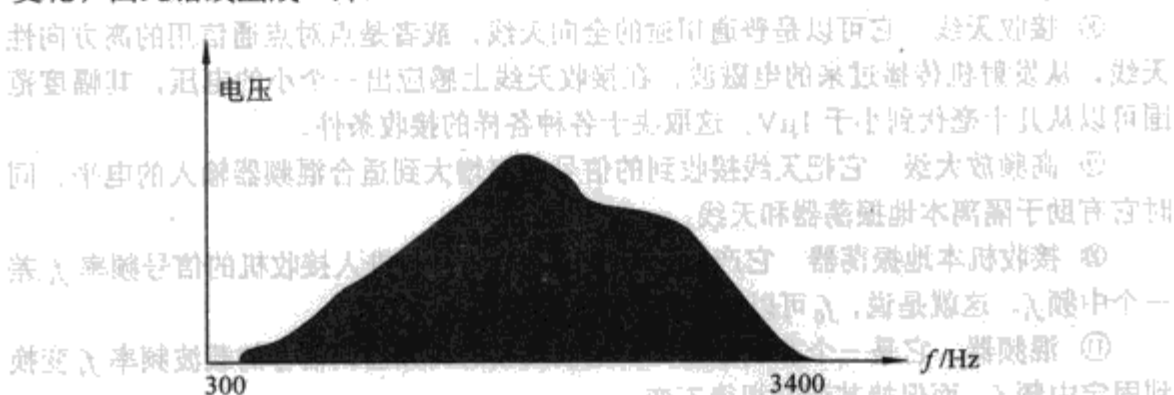


图 0-3 话音信号频谱示意

信号的频谱在分析非线性电子电路中十分重要,它可以清楚地表达通过非线性电路后信号频率的变化。

信号通过非线性系统与通过线性系统的基本区别在于:当信号通过非线性系统后,不仅输出信号中与输入信号同频率的各分量的幅度、相位有变化,而且出现了输入信号中没有的新的频率成分。这些频率成分是各输入信号频率的各次倍频和它们之间的组合频率。在有些情况下,也可能在输出信号中不再出现某些输入信号频率成分。

信号通过非线性系统将出现新的频率分量,产生非线性失真。所以,在要求无失真传输信号的场合,要尽量避免电路工作在非线性状态。如对线性放大器,要限制其输入信号的幅度,避免超过其线性工作范围。而在本书中要研究的混频、倍频及各种调制、解调却正是利用了非线性电路产生频率变换这一特点。其基本框图如图 0-4 所示,它包含有非线性器件和滤波器两部分,非线性器件完成



图 0-4 产生频率变换的非线性电路组成框图