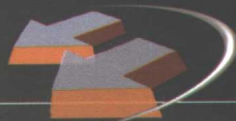
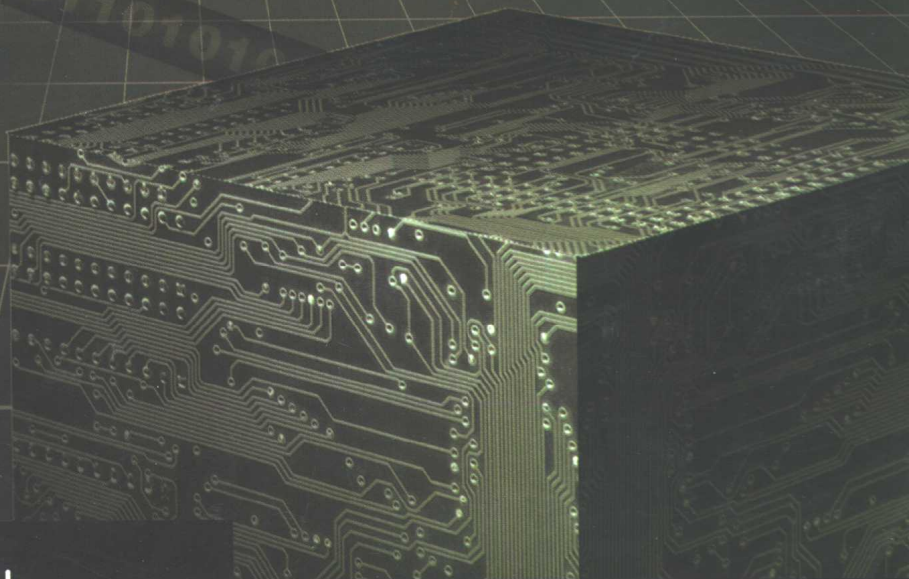
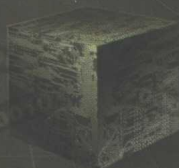
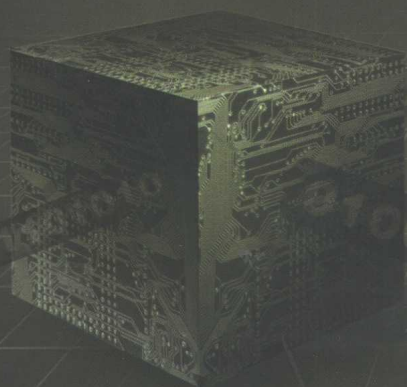


高等学校电子信息与电气学科基础教材



射频模拟电路

张玉兴 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息与电气学科基础教材

射频模拟电路

张玉兴 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

作者分析了国内外一些相关文献,结合自己的教学体会和科研实践,编写了本书。本书主要特色:
1. 面向学生,始终强调基本概念、基本原理、基本电路和基本测试方法。2. 本书力求精练,易于阅读,重要结论和基本概念一目了然。3. 删除了陈旧的内容,增加了新的内容。例如,增加了“线性功率放大器”、“射频电子系统”和“射频电路集成芯片”。4. 附录 A 收录了对于高频宽带匹配、网络实现具有现实的指导意义及工程应用价值的“传输线变压器的原理及应用”的内容。

本书可以作为电子工程、通信工程、自动控制等电类专业相关课程的本科生(或专科生)教材,也可供相关技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

射频模拟电路/张玉兴编著. —北京:电子工业出版社,2002.9

高等学校电子信息与电气学科基础教材

ISBN 7-5053-7997-6

I. 射… II. 张… III. 射频电路:模拟电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 068822 号

责任编辑:章海涛 特约编辑:徐 堃

印 刷:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:25 字数:633.6 千字 插页:1

版 次:2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:34.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

前 言

高频电子线路是电子工程、通信工程、自动控制等电子类专业的重要基础课。面对 21 世纪,原有教材已跟不上时代的要求,有必要编一本新的教材。

作者从事射频模拟电路教学与科研近 30 年,对该领域的学科内容有深入的体会。“高频电子线路”名称中,“高频”这个概念是含糊的,究竟高频范围的上限、下限是什么?高频与微波的频率界限在什么地方?一般认为,不管频率高低,只要可用“路”(集总参数)的概念来分析问题,都归结为模拟电子线路的内容。“微波”电路则是用“场”(分布参数)的概念来分析电路。事实上,电路尺寸只要小于八分之一导波波长,就可用路的概念来分析电路。据有关报道,惠普公司用集总参数制造的压控振荡器的频率已达 18GHz,因此高频与微波已无频率界限可言。鉴于上述分析,“高频电子线路”课程名称改为“射频模拟电路”更为贴切。

随着信息时代的来临,通信工程飞速发展,为节省频谱资源,提高数字通信系统的信道容量及传递信息的准确可靠性,数字调制技术发展迅速。第三代 GSM 系统、高清晰数字电视等都对通信信道的指标要求更加苛刻,特别是对射频电子电路提出了更高要求,如系统的动态范围、线性度,本振源的频谱纯度等。

为了满足移动通信手机小型化的要求,集成射频电路不断推陈出新。集成度更高、功耗更小、性能更佳、体积更小、成本更低、可靠性更高,这是集成射频电路的追求。例如,美信(MAXIM)公司推出了双频手机系统芯片 MAX2338, MAX2310 及 MAX2366。MAX2338 用于低噪声放大及混频, MAX2310 用于调制及解调, MAX2366 用于发送器及功率放大,配以适当的双工器、外围元件及基带信号处理芯片即可构成超小型化手机。高频集成芯片发展迅速,但是基本概念、基本原理是不会变化的。而且由于工作频率甚高,电路的结构参数,即分布电容、杂散电容、引线电感、分布电感、电磁辐射、互耦等对电路性能影响严重。集成高频芯片的外围元件设计与装配调试还要遵循射频模拟电路的一般规则,否则集成芯片不能正常工作。

射频模拟电路包含的内容愈来愈多,但受限于新的教学大纲,该门课的授课学时越来越少。在此前提下,要编写一本具有新的特色,面向 21 世纪学生的教材困难是很大的。作者分析了国外的一些特色教材,结合自己的教学体会及该领域的科研实践,力求在教材中体现以下特色:

1. 面向学生。不管信息技术如何发展,基本概念、基本原理是不会变化的。教材始终强调基本概念、基本原理、基本电路、基本测试方法;即使加入新内容,如第 2 章的线性

功率放大器,也是以打基础为宗旨。

2. 删除了陈旧的内容,增加了新的内容。例如,增加了第2章“线性功率放大器”、第6章“射频电子系统”、第7章“射频电路集成芯片”;第3章“波形发生与变换电路”中增加了有关信号源频谱纯度的基本概念和基本定义的内容。可以这样说,整个教材中有三分之一的内容是以往的老教材中没有反映或者说是全新的。作者认为,这些全新的内容中有些是必须讲的,有些是可以帮助学生自学的。例如,第2章及第3章增加的内容应全讲,第6章可讲可不讲,第7章则可以不讲。

3. 教材内容作了大量的调整。把这门课称为“非线性电路”或“射频电子线路”都有其局限性。本教材不以线性、非线性区分电路,而是以电路的内容来区分。因此,第1章“选频放大器”中,既包含小信号电路——射频小信号放大器,也包含非线性电路——谐振高频功率放大器。第1章中的“耦合谐振回路”属选讲内容,可讲可不讲。本教材删除了宽带高频功率放大器的内容。第3章的“非正弦波产生电路”可不讲。第4章“频谱搬移电路”应突出模拟乘法器的作用。第5章“角度调制与解调”完全删除了比例鉴频器的内容。

4. 第6章“射频电子系统”除“放大器中的噪声”内容外,其他都是根据作者多年的设计经验总结出来的,不足之处希望同行专家指导、批评。这部分内容主要是系统的概念。如何正确地设计射频电子系统不是一件很容易的事情,它需要多方面的综合知识。

5. 对于第7章“射频电路集成芯片”,由于射频集成芯片发展太迅速,教材中仅列出极少一部分。这部分内容完全可不讲。国外有一本教材叫做“集成射频电路”,它以砷化镓场效应管电路为主讲述了各类射频电路,包含集成电路,如小信号放大器、混频器、振荡器、功率放大器等,有兴趣的读者可参阅该教材。

6. “射频模拟电路”是一门工程性质的课程,是“模拟电路基础”的后续课程,还涉及非线性电路的内容。学生普遍反映难学难懂,原因如下:(1)这门课所学单元电路都是从工程实践电路中抽象出来的,有些就是实际电路。绝大部分学生并没有真正接触到实际电路,学起来很空洞。(2)这门课大部分内容属非线性电路,涉及到的分析方法有泰勒级数法、折线法、开关函数法、线性时变分析法。同一电路不同的工作状态可以要采用不同的分析方法。(3)射频电路中,电感、电容的作用各异。大电感为什么可作为射频扼流圈?大电容为什么可作为隔直电容、旁路电容?究竟在什么频率范围,电感、电容大到什么程度才可作为射频扼流圈与隔直电容?射频电路中为什么要加入“去耦”电路?这些问题对电路工作者而言是非常简单的,对学生则不然。如何在教材中解决学生的这些困惑不是一件很容易的事,只有采用多次重复、反复强调,电路中尽可能不要省略“去耦”电路等方法来解决。(4)“射频模拟电路”各章节之间的内容缺乏关联性,实际电路的关联性是靠射频电子系统来完成的(这也是要增加第6章的理由之一),学生很难理解。

7. 电路图是电子工程师的“语言”,如何读图、设计电路图是这门课需培养的能力。

本教材力图在“培养”上下功夫,希望学生完成这门课程后,应初步具备这方面的能力。

8. 射频模拟电路的 CAD 软件已推出了很多,但每种软件价格昂贵,特别是包含电磁兼容特性仿真的软件价格更为昂贵。每种软件总存在局限性,这是由于软件是由人编写的,每个人对知识的理解与掌握有局限性。射频模拟电路中,由于器件的多样性,电路种类、形式的多样性,电路结构、印刷电路板结构、电磁兼容特性的多样性等等,要推出一种万能的包罗万象的 CAD 软件是极其困难的。本教材没有反映这方面的内容,不能不说是一种遗憾。

9. 非线性电路的分析方法有新的发展,如谐波平衡法。这部分内容本教材没有反映。

10. 由于编写时间紧迫,习题编写没有给予足够的重视,仅编写了要求学生完成的习题。这些习题大部分不同于老教材的习题,这完全是精选的结果。

11. 本教材力求精练,易于阅读,重要结论和基本概念一目了然。

12. 根据工程实际应用的需要,本教材增加了附录“传输线变压器的原理及应用”。这是朱维乐教授在 20 世纪 70 年代作了大量研究工作后写成的。笔者认为这部分内容对高频宽带匹配、网络实现具有现实的指导意义及工程应用价值,故收录于教材附录之中。

限于作者水平,书中不妥之处,敬请批评指正。

编 者

2002 年 5 月于电子科技大学

目 录

绪论	(1)
0.1 射频模拟电路在通信系统中的地位	(2)
0.2 非线性电路的基本特点	(4)
0.3 课程特点	(6)
0.4 本书各章内容简介	(7)
第 1 章 选频放大器	(9)
1.1 谐振电路的基本特性	(9)
1.1.1 简单串并联谐振电路的基本特性	(9)
1.1.2 串并联阻抗互换和回路抽头时阻抗变比折合关系	(23)
1.1.3 双调谐耦合谐振回路	(27)
1.2 高频小信号调谐放大器	(36)
1.2.1 高频小信号放大器的基本要求	(36)
1.2.2 高频晶体管小信号等效电路模型与参数	(37)
1.2.3 晶体管的高频参数	(41)
1.2.4 晶体管高频小信号单调谐回路谐振放大器	(43)
1.2.5 高频小信号单调谐回路谐振放大器级联	(50)
1.2.6 高频小信号双调谐回路谐振放大器	(51)
1.2.7 高频小信号调谐放大器的稳定性	(52)
1.3 使用放大功能块的选频放大器	(60)
1.3.1 集成放大功能块	(60)
1.3.2 选频网络	(63)
1.4 高频谐振功率放大器	(67)
1.4.1 高频谐振功率放大器的基本工作原理	(70)
1.4.2 高频谐振功率放大器折线近似分析法	(74)
1.4.3 高频谐振功率放大器的动态特性	(77)
1.4.4 高频谐振功率放大器的馈电线路	(84)
1.4.5 高频谐振功率放大器的输出匹配网络与级间匹配网络	(88)
1.4.6 高频谐振功率放大器的实际电路	(93)
习题一	(98)
第 2 章 线性功率放大器	(102)

2.1	线性功率放大器在通信系统与图像传输系统中的作用	(102)
2.2	信号的失真特性	(103)
2.2.1	无记忆系统中的振幅非线性	(103)
2.2.2	无记忆系统中的交叉调制	(107)
2.3	双音包络分析	(108)
2.3.1	双音包络分析工作原理	(108)
2.3.2	用可变峰/平均功率之比进行包络分析	(112)
2.4	调幅—调相(AM-PM)转换效应	(114)
2.5	RF功率放大器中的偏置调制效应	(117)
2.6	数字调制系统对RF功率放大器的指标要求	(118)
2.7	多载波系统对功率放大器的指标要求	(120)
2.8	功率放大器的线性化技术	(121)
2.8.1	直接反馈技术	(122)
2.8.2	间接反馈技术	(124)
2.8.3	极性环	(124)
2.8.4	笛卡儿环	(125)
2.8.5	预失真	(126)
2.8.6	前馈技术	(128)
2.9	GaAs FET线性功率放大器	(134)
2.9.1	非线性模型	(134)
2.9.2	GaAs FET线性功率放大器的设计	(138)
	习题二	(140)
第3章	波形发生与变换电路	(141)
3.1	LC反馈正弦波振荡器工作原理	(141)
3.1.1	自激振荡的建立过程及起振条件	(142)
3.1.2	振荡器的平衡条件	(144)
3.1.3	振荡器振幅平衡的稳定条件	(145)
3.1.4	振荡器相位平衡的稳定条件	(147)
3.2	反馈型晶体管LC振荡器电路	(148)
3.2.1	变压器耦合LC反馈振荡器	(148)
3.2.2	电感三端式振荡电路	(149)
3.2.3	电容三端式振荡电路(Copitts振荡电路)	(151)
3.2.4	其他形式的LC振荡器电路	(152)
3.2.5	LC三端式振荡器相位平衡条件的判别准则	(152)
3.3	振荡器频率稳定度的物理定义及改进型电容三端式振荡电路	(153)
3.3.1	频率稳定度的定义	(153)
3.3.2	改进型电容三端式振荡电路	(158)

3.4 场效应振荡电路	(160)
3.5 石英晶体振荡器	(163)
3.5.1 引起频率不稳定的因素分析	(163)
3.5.2 石英谐振器的特性	(163)
3.5.3 石英晶体振荡器电路	(166)
3.6 LC反馈正弦波振荡器的噪声特性及低相噪石英晶体振荡器	(171)
3.6.1 LC反馈振荡器的相位噪声特性	(171)
3.7 RC正弦波振荡器	(177)
3.8 非正弦波发生电路	(179)
3.8.1 矩形波发生电路	(179)
3.8.2 三角波发生电路	(181)
3.8.3 锯齿波发生电路	(182)
习题三	(183)
第4章 频谱搬移电路	(186)
4.1 频谱线性变换的一般概念	(186)
4.1.1 单间断点折线特性源	(186)
4.1.2 平方律特性源	(187)
4.1.3 指数特性源	(189)
4.1.4 受控差分特性源	(190)
4.2 振幅调制与解调	(190)
4.2.1 普通振幅调制波的基本特性及其数学表达式	(191)
4.2.2 双边带调制(DSB)和单边带调制(SSB)	(195)
4.2.3 振幅调制电路	(196)
4.2.4 振幅调制波的解调模型及电路	(202)
4.3 混频	(214)
4.3.1 晶体管混频器	(218)
4.3.2 场效应管混频器	(221)
4.3.3 二极管混频	(223)
4.3.4 混频器中的组合频率干扰与非线性失真	(228)
习题四	(232)
第5章 频谱的非线性变换——角度调制与解调	(234)
5.1 角度调制波的基本特性	(234)
5.1.1 瞬时频率与瞬时相位	(234)
5.1.2 调频波与调相波的数学表达式、频移与相移、最大频移与最大相移	(235)
5.1.3 调相波的频谱及频带宽度	(237)
5.2 直接调频回路	(242)
5.2.1 LC正弦波振荡器直接调频电路	(242)

5.2.2	电抗管直接调频电路	(247)
5.2.3	晶体振荡器直接高频电路	(248)
5.2.4	其他直接调频电路	(250)
5.3	间接调频电路	(252)
5.3.1	可变移相法调相电路	(253)
5.3.2	可变延时法调相电路	(254)
5.4	调频波的解调	(255)
5.4.1	限幅电路	(257)
5.4.2	斜率鉴频器	(258)
5.4.3	相位鉴频器	(262)
	习题五	(269)
第6章	射频电子系统	(271)
6.1	电子系统中的噪声	(271)
6.1.1	噪声的来源与性质	(271)
6.1.2	晶体管与场效应管中的噪声	(275)
6.1.3	噪声系数与噪声温度	(278)
6.1.4	放大器中的噪声	(281)
6.1.5	噪声系数的测量	(285)
6.2	接收机系统分析与设计	(287)
6.2.1	接收机的灵敏度	(288)
6.2.2	通频带及各级通频带	(289)
6.2.3	中频频率的选择	(291)
6.2.4	总增益的确定及其各级增益分配	(292)
6.2.5	接收机整机参数的测量	(292)
6.3	无线发射系统分析与设计	(294)
6.3.1	无线发射系统框图设计及电平分配	(294)
6.3.2	发射机的功率、频率与本振信号频谱纯度	(295)
6.3.3	天线及馈线系统	(296)
6.3.4	发射机参量测量	(299)
6.4	增益控制电路	(299)
6.4.1	增益控制的方法	(300)
6.4.2	AGC的实现	(301)
6.5	自动频率控制电路	(302)
6.5.1	自动频率控制原理	(303)
6.5.2	误差信号产生器(鉴频器)	(303)
6.5.3	跟踪式 AFC 系统	(303)
	习题六	(304)

第 7 章 射频电路集成芯片	(306)
7.1 通用单片集成芯片	(306)
7.1.1 通用单片小信号放大集成芯片	(307)
7.1.2 单片功率放大器芯片	(310)
7.1.3 单片集成混频器芯片及其他类型芯片	(312)
7.2 通用集成接收芯片	(314)
7.2.1 MC3356 芯片	(314)
7.2.2 MC3367 芯片	(316)
7.3 集成发射机芯片	(317)
7.3.1 MC2831A 低功耗 FM 发射器	(318)
7.3.2 MC2833 低功耗 FM 发射器	(321)
7.3.3 MC13175 和 MC13176UHF 波段 FM/AM 发射器	(324)
附录 A 传输线变压器的原理及应用	(329)
A.1 简单的物理概述	(330)
A.2 作为四端网络的传输特性及阻抗变换作用	(331)
A.3 当 4:1 传输线变压器接有任意负载时的输入阻抗	(334)
A.4 4:1 传输线变压器的低频限及功率容量	(334)
A.5 双平行耦合线理论及用双绞线绕组绕制的传输线变压器的等效电路	(336)
A.6 三平行耦合线理论及用三绞线绕制的传输线变压器的等效电路	(341)
A.7 单环高变比传输线变压器	(346)
A.7.1 传输线变压器单环绕法的电压—电流图	(346)
A.7.2 单环 $n^2:1$ 绕法的两种系列	(347)
A.7.3 几种互耦绕法	(349)
A.7.4 无上限带宽绕法	(349)
A.8 单端—平衡变换器	(350)
A.8.1 几种平衡变换器	(350)
A.8.2 平衡度及插入损耗的意义及测量	(355)
A.9 平衡—平衡变压器	(357)
A.9.1 几种不同变比的平衡—平衡变压器	(357)
A.9.2 单端—平衡变换器及平衡—平衡变压器组合为平衡端有中心头的平衡变换器	(361)
A.10 功率分配器	(361)
A.10.1 3dB 功率分配器的一般要求	(362)
A.10.2 等阻抗 3dB 功分器	(363)
A.10.3 平衡型 3dB 功分器及传输线魔 T 接法	(364)
A.11 无磁芯传输线变压器及其微波应用	(366)
A.12 传输线的测量与变压器的实际绕制	(368)

A.13 一小段传输线的四端网络矩阵	(369)
A.14 有分布电容的完全耦合线圈的高频等效电路	(369)
A.15 有分布电容的不完全耦合线圈的高频等效电路	(372)
A.16 单环高变比绕法的传输特性	(376)
A.16.1 高阻系列	(376)
A.16.2 低阻系列	(377)
附录 B 余弦脉冲分解系数表	(379)
参考文献	(385)

绪 论

“射频模拟电路”是“模拟电路基础”的后续课程,但与“模拟电路基础”有很大不同,表现在:(1)除少部分内容外,大部分属非线性电子电路。非线性电路在无线电通信中主要用来完成频谱变换的功能,如混频、倍频、调制与解调制等。(2)由于工作在高频端,“高频”是在一个系统中相对的概念。例如在广播接收机中,465kHz 相对于音频而言是高频;在电视接收机中,38MHz 相对于视频而言是高频。因而,高频范围覆盖非常广。究竟高频的上限在什么频率范围? 这个问题是一个值得研究的问题。严格来讲,只要在此频率范围,仍旧可用“路”的概念来分析问题,那么这个频率范围属射频模拟电路领域。事实上,场与路是分析电磁能量产生、传输、变换等性能的手段。场建立在严格的数学分析基础上,因此更具有“权威”性。但是,由于边界条件的复杂性,很多问题在数学上是无法求得解析解的。但是在静电场或在似稳场情况下,单位电荷克服电场力移动到无穷远所作的功与移动的路径无关。因此,在这种情况下,每一个点都具有确定的属性,这就是“电位”。任何两点之间的电位差就是电压。显然,在有旋场情况下,这种属性是不存在的,因为单位点电荷移动到无穷远克服电场力所作的功是与走的路径有关的。在似稳场下,可以定义电位差——“电压”这个概念,这是电路分析的基础。但是在电路分析中,除了“电压”这个概念外,还有所谓的“电感”、“电容”的概念。事实上,电子电路中的电阻、电容、电感及有源器件(双极晶体管、场效应管等)几乎是电子电路的“全部”,是它们的组合,形成了五花八门的电路。电感、电容、电阻称为集中参数元件。这就得出另外一个概念:集中参数与分布参数。即使满足似稳场的条件,如果电路尺寸可以与工作波长相比拟,这种电路就是一种分布参数电路,这时不能用“路”的概念来分析。从另外一个角度看,即使在极高频率,如果电路尺寸做得很小,或者说远小于工作波长,这种电路仍旧可以用“路”的概念来分析。这就是为什么说高频电路的频率上限没有确切的量值。例如,频率高达 3GHz 的压控振荡器(VCO)仍可用集中参数电路来实现,但此时电路尺寸做得很小,整个电路布在直径不到 10mm 的圆形基片上($\lambda=100\text{mm}$)。第三个为杂散参数,如引线电感、分布电容对电路影响严重,甚至会引起电路的不稳定。有源器件要看成双向器件,单向化模型在这里只能作近似分析。因此在高频电路里,后级对前级的牵引是十分明显的,频率在几百兆赫以上时更明显。考虑到高频线路的特殊性,电路分析方法与低频模拟电路分析方法不同,特别是非线性电路”的分析方法。高频电路馈电及偏置电路的基本原理与方法与低频模拟电路相同,但必须更仔细地考虑高频电路的馈电电路的去耦及接地。为了防止分布电容形成寄生耦合及电感的电磁辐射产生的寄生耦合,高频电路还必须考虑良好、合理的屏蔽。

既然“射频电路”是“低频模拟电路”的后续课程，它们当然有共性，即电路的基本形式、基本工作原理、偏置方法、反馈、电路的稳定性、信号源的属性、放大电路的基本特性等都是相同的。在学习的过程中，应该有意识地找出它们的共性与差异。

这门课程原名“高频电子线路”，但由于“高频”的不明确性，改为“射频模拟电路”更贴切。

0.1 射频模拟电路在通信系统中的地位

射频模拟电路在一些学校中又称为无线通信电路，这句话概括了射频模拟电路的作用。射频模拟电路几乎包括了无线通信信道中的所有单元电路。图 0-1 为无线电发射机与

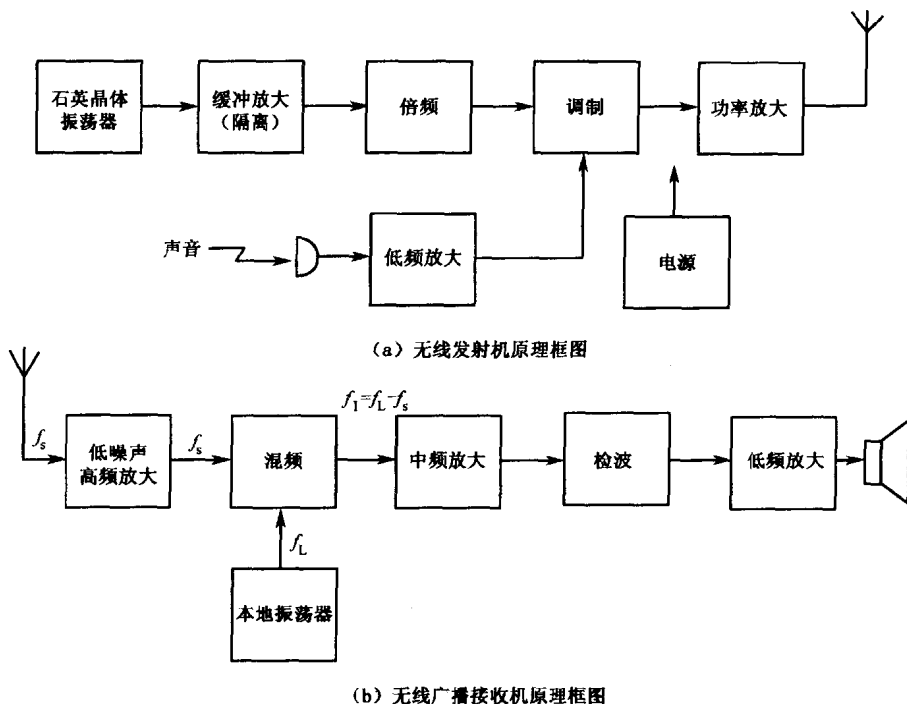


图 0-1 无线电收发原理框图

无线电接收机的原理框图。从图中可见，射频电路几乎是无线电发射机和接收机的全部。石英晶体振荡器、缓冲放大、倍频、调制、功率放大、低噪声高频放大、混频、振荡、中频放大、检波等都是射频电路要讲述的内容。

通信，就是要准确而迅速地传递信息。信息传输对人类生活的重要性是不言而喻的。可以这样说，信息传输是人类社会赖以生存及发展的根本。没有信息传输，人类社会活动

将走向死亡。什么是信息？这里不准确地定义它、度量它。大致地说，语言、文字、图像、音乐、数据等都是信息。而会话、图书、报纸都是传输信息最基本的手段。为了远距离传递信息，中国古代发明了烽火台，传递边疆发生战争的信息，这可以说是最古老的光通信。后来出现了海上常用的旗语及船只之间的闪光通信，这就是“编码”通信。进入 19 世纪，人们发现电能以光速沿导线传输。1837 年，F·B·莫尔斯发明了以点、划、空组合代表字母和数字的电报。1876 年，贝尔发明了电话。1895 年，意大利的 G·马可尼与俄国的 A·C·波波夫发明了无线电通信。

要完成无线电通信，首先必须产生频率稳定的射频载波，这个任务由石英晶体振荡器，或其他频率合成器、介质振荡器等高稳定的信号产生电路完成。射频载波经缓冲放大、倍频（如果载频不够高）送入下一级调制电路单元。调制是“装载”信息的过程，也就是让载波的某个特征量（振幅、频率和相位）按信息的变化规律而变化。最后，已调波经功率放大单元放大到一定的功率后由天线发射出去。

调制是现代通信重点研究的课题之一，本书仅介绍最基本的模拟调制——调幅、调频、调相，对调制技术的深入讨论请参阅有关文献。为什么要进行调制？不经调制信息的电信号能否经天线发射到空间？语言是经常需传输的信息，语言音频范围集中在 300Hz~3kHz 之间。设语言中心频率为 1kHz，则波长 $\lambda_0=300\text{km}$ 。为了有效发射电磁波，天线长度设为 $0.25\lambda_0$ ，则天线长度为几十千米，这样的天线实现起来是很困难的。而且，即使能发射这样的信号，但如多个广播电台同时发射这种信号，接收机如何区分这些电台呢？可见，调制是必须的。例如，把语音信号调制到 1000kHz 的载波上，此时天线长度仅 75m，要实现这种天线是不困难的。

无线电信号接收的任务实质上是准确地恢复信息。图 0-1(a)是无线发射机基本的原理框图，图 0-1(b)是一台调幅广播接收机的原理框图。图中 f_s 为信号频率， f_L 为本地振荡器的频率， f_i 为中频频率。经天线接收的信号首先由低噪声高频放大，然后与本地振荡器产生信号混频。差频称为中频，中频是恒定的。当输入的信号频率变化时，本地振荡器的振荡信号的频率也跟着变化，保持 $f_i=f_L-f_s$ 是一个恒定值。这样，中频放大器是一个中心频率不变且带宽给定的放大器，可以设计成增益高且稳定的放大器。接收到的微弱信号经过中频放大后达 1V 左右，然后经检波—解调，把信息从载波中还原出来后送到低频放大，最后由喇叭放出声音。发射的过程由图 0-1(a)描述。

上面介绍了无线电发射与接收的整个过程，射频电路的内容覆盖了无线电收发系统的单元电路、系统设计。随着通信技术的发展，数字通信已成为通信系统的主体，有人说：“既然是数字通信，模拟射频电路已过时了。”显然，这种说法是站不住脚的。目前，蓬勃发展的数字移动通信(GSM)系统，不管是老一代还是新一代的，信道(发射与接收前端)仍旧属模拟电路的范畴。在数字有线通信系统中，分为基带传输与载波传输。即使是基带传输系统，随着传输速率的增加，基带所占的频带已扩展到射频电路的范围；对于载波传输，

射频电路的内容更是必不可少的。为了增加信道容量,通信频段不断向高端发展。新一代 GSM 频段已从 900MHz 频段移到 1700MHz~1800MHz 频段。可以断言,随着高速信息时代的到来,射频(微波)电路受到越来越多的重视。人们在认识客观世界的规律时会走弯路。20 世纪 70 年代,随着集成电路技术的发展,出现了中规模、大规模、超大规模集成电路,有人说:“在电子技术中,单元电路过时了,模拟电路没有用了,将来的电子工程师只要有系统概念就行了。”在此概念的误导下,大家都不学单元电路,计算机及有关课程几乎成了电子工程专业的全部。但事实上,模拟电子电路在电子工程领域占有很大的比重,其基本工作原理及基本概念在电子系统中无所不在,这都证明了模拟电子电路的重要性。

0.2 非线性电路的基本特点

严格来讲,任何器件,如晶体二极管、双结晶体管、场效应管,都是非线性的。这种非线性是指器件特性的非线性,不考虑时间的非线性。这种器件被称为时不变非线性器件(时间的非线性本书不考虑)。本书讨论的非线性器件均属时不变非线性器件。晶体二极管、三极管、场效应管均属阻性非线性,即电压与电流之间的非线性(不同于电容及电感的非线性)。这里要说明的是,器件的非线性特性是绝对的,但在一定的条件下可忽略其非线性,将其看做线性器件。例如,当输入信号非常小时,器件可看做线性器件,这就是低频模拟电子电路的晶体管的网络参数等效模型的前题。下面以阻性非线性来说明它的特点。

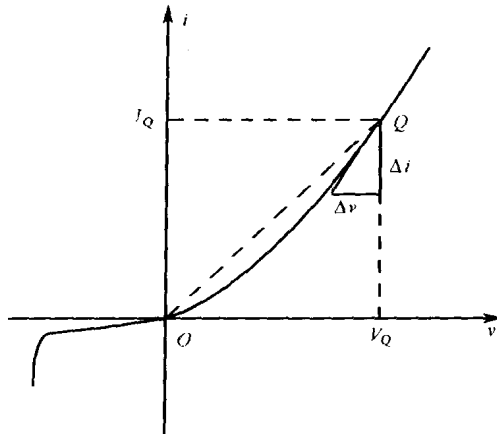


图 0-2 阻性非线性

某一器件的非线性特性如图 0-2 所示。显然, $i=f(v)$ 是非线性的, 当 $v=V_Q$ 时 $i=I_Q$ 。
定义

$$g_0 = I_Q / V_Q \quad (0-1)$$

为 Q 点的直流电导。将 Q 点切线的斜率定义为 Q 点的交流电导,或称之为微分电导:

$$g = \left. \frac{\partial i}{\partial v} \right|_{i=I_Q} \quad (0-2)$$

非线性器件的 g_0 与 g 是不相等的 (g_0 与 g 不相等的不一定是非线性器件)。当在 V_Q 上叠加一个交变电压时,即

$$v = V_Q + V_m \cos \omega t \quad (0-3)$$

时,电流波形与电压波形之间发生了严重的畸变,这就是非线性的结果。但电流波形仍是周期性的,可以分解为无穷多个余弦之和,即

$$i = I_0 + I_{1m} \cos \omega t + I_{2m} \cos 2\omega t + \dots \quad (0-4)$$

正弦单频电压加到非线性器件上后,产生的电流波形包含丰富的谐波分量。事实上,从图 0-3 可见,电流波形发生了畸变。当这种非线性器件加上不同频率的信号时,就会产生频率的交叉调制,即频谱变换。频谱变换是通信电路的一大种类,用于混频、调制、解调制、倍频等电路。非线性电路不满足叠加原理,假设某器件的非线性特性曲线连续,各阶导数均存在,则该非线性函数可分解成台劳级数。近似情况下,可用前几项近似(如图 0-4 所示)。

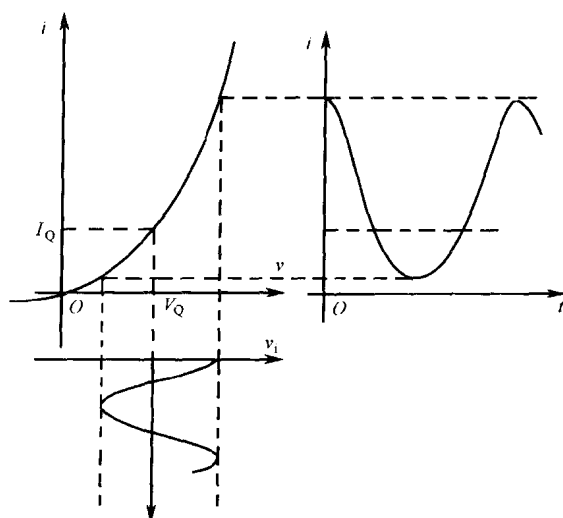


图 0-3 非线性器件加上交变电压后的电流波形

当 $v_1(t) = V_{1m} \cos \omega_1 t$, $v_2(t) = V_{2m} \cos \omega_2 t$, $v'(t) = V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t$ 时, $v_0(t) = a_0 + a_1(V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t) + a_2(V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t)^2 + a_3(V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t)^3$ 。上式展开,可知 v_0 中包含直流分量、 ω_1 、 ω_2 分量、 $\omega_1 \pm \omega_2$ 分量及 $2\omega_1 \pm \omega_2$, $2\omega_2 \pm \omega_1$ 等分量。用滤波器滤出 $\omega_1 + \omega_2$ 或 $\omega_1 - \omega_2$ 分量,可完成通信电路中的上混频或下混频。用不同的信号及不