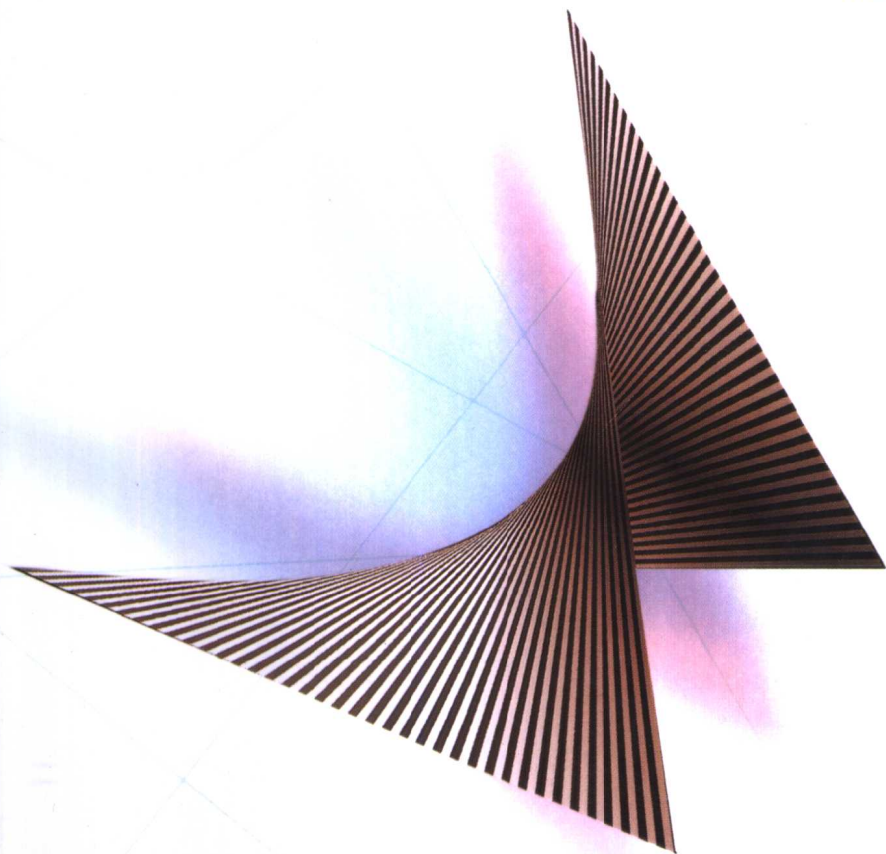


21世纪通信教材

通信电子线路

TONGXIN DIANZI XIANLU

钱 聪 陈英梅 编
裴昌兴 审



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路/钱聪,陈英梅编. —北京:人民邮电出版社,2004.1

21世纪通信教材

ISBN 7-115-11344-0

I. 通… II. ①钱…②陈… III. 通信系统—电子电路—高等学校—教材 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 084311 号

内 容 提 要

本书主要讨论通信和电子系统中的高频电路和非线性电路,全书共分为 10 章,主要内容包括通信电子线路基础、小信号放大器、正弦波振荡器、谐振功率放大器、非线性电路的分析方法、振幅调制解调及混频、角度调制与解调、参量电路、反馈控制电路。

本书可作为高等学校通信工程、信息处理和电子工程等专业本科“通信电子线路”、“高频电子线路”以及“非线性电路”课程的教材和参考书,也可以供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

21 世纪通信教材

通信电子线路

◆ 编 钱 聪 陈英梅
审 裴昌兴
策划编辑 滑 玉
责任编辑 郭 玲

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
读者热线:010-67194042
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京朝阳展望印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16
印张:16.25
字数:387千字 2004年1月第1版
印数:1—5000册 2004年1月北京第1次印刷

ISBN 7-115-11344-0/TN·2096

定价:22.00 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010)67129223

编者的话

为了适应“电子线路”系列课程的教学改革,本书是根据教育部工科电工课程教学指导委员会审定的“电子线路”课程基本要求编写的。

“通信电子线路”是“模拟电子线路”和“数字电路基础”的后续课程,无论是对于通信工程、信息处理、电子技术应用专业还是其他电类专业,都是一门重要的专业基础课。本课程主要讨论通信系统和现代电子设备中各种高频电路的组成、基本工作原理以及分析和设计方法。作为以电路为主体的教材,本书在编写中主要考虑以下几个方面。

1. 全书以通信系统为主线贯穿各个功能电路,注意体现通用性和实用性;力求适应“打牢基础,拓宽知识面,培养创新能力”的教学要求;尽量保持“通信电子线路”这门课程的完整性和系统性。

2. 注意突出基本概念、基本理论和基本分析方法,注重概念的物理阐述,尽量避免繁琐的数学运算。本书贯穿工程分析和工程计算的观点,重点分析典型单元电路。

3. 为了适应集成电路的发展,在各种实用电路中,采取“集成为主,兼顾分离”的原则,重点介绍集成功能块及外围元件的设计。

4. 为了适应电子线路实验手段的改革,本书每章都安排了一节计算机仿真实验的内容,帮助学生利用仿真实验加深对教学内容的理解,进一步拓宽知识面,同时也保证了计算机不断线的要求。

本书由钱聪担任主编,其中第1,2,3,6,7,8,9和10章由钱聪编写,第4,5章由陈英梅编写,程荣贵编写了本书的仿真实验,钱聪负责全书的统稿工作。蒋卓勤、刘永祥参加了部分书稿和习题的整理工作,西安通信学院教保科对本书的出版给予了很大的帮助和支持。

本书由西安电子科技大学的裴昌兴教授主审,裴教授仔细地审阅了本书的全部书稿,对本书的结构体系以及诸多具体的内容设置提出了很多宝贵的修改意见。

谨此,对以上支持本书出版的同事和同仁表示深切的谢意!

本书可作为高等学校通信工程、信息处理及电子工程等专业本科“通信电子线路”、“高频电子线路”以及“非线性电路”课程的教材和参考书,也可以供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

由于水平和学识有限,加之时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者给予批评指教!

编者

2003年12月于西安王曲

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信和通信系统	1
1.2 通信系统中信号的变换过程	2
1.3 无线电广播的发射与接收	2
1.3.1 无线电广播信号的发射	2
1.3.2 无线电广播信号的接收	3
1.4 无线电波的传播方式和频段划分	3
1.4.1 无线电波的传播方式	3
1.4.2 无线电波的频段划分	4
1.5 本课程的主要内容及特点	5
习题	6
第 2 章 通信电子线路基础	7
2.1 高频电路中的有源器件	7
2.1.1 双极型三极管的高频小信号模型	7
2.1.2 二极管和场效应管的高频小信号模型	9
2.2 无源谐振电路分析.....	10
2.2.1 无源谐振网络.....	10
2.2.2 无源固体组件.....	17
2.3 干扰和噪声.....	21
2.3.1 外部干扰.....	21
2.3.2 内部噪声.....	23
2.4 谐振回路仿真实验.....	27
小结	27
习题	28
第 3 章 小信号放大电路	32
3.1 小信号谐振放大器.....	32
3.1.1 概述.....	32
3.1.2 单调谐回路谐振放大器.....	32
3.1.3 单调谐放大器的级连.....	36
3.1.4 双调谐回路谐振放大器.....	37
3.1.5 集成电路谐振放大器.....	38
3.2 小信号谐振放大器的稳定性.....	40
3.2.1 谐振放大器的输入导纳 Y_i 及稳定性分析	40
3.2.2 提高放大器稳定的措施.....	41

3.3	集成宽带放大器	43
3.4	小信号放大电路的仿真实验	45
	小结	46
	习题	46
第4章	高频谐振功率放大器	50
4.1	概述	50
4.2	高频谐振功率放大器的工作原理	50
4.2.1	基本电路构成	50
4.2.2	工作原理及性能指标	51
4.2.3	丙类谐振功率放大器工作状态分析	54
4.2.4	谐振功率放大器的外部特性	57
4.3	高频功率放大器的实际电路	61
4.3.1	直流馈电电路	61
4.3.2	输出匹配网络	62
4.3.3	高频功率放大器的实际电路	65
4.4	丁类高频功率放大器简介	65
4.5	宽频带功率放大器	66
4.5.1	传输线变压器	67
4.5.2	宽带功率合成技术	69
4.6	高频功率放大器的仿真实验	72
	小结	73
	习题	74
第5章	正弦波振荡器	76
5.1	概述	76
5.2	反馈振荡器的工作原理	76
5.2.1	反馈振荡器的基本组成	76
5.2.2	振荡的建立和振荡条件	77
5.3	LC正弦振荡器	79
5.3.1	互感耦合振荡器	79
5.3.2	三端式振荡器	80
5.3.3	改进型电容三端式振荡器	82
5.3.4	其他LC振荡器简介	83
5.4	LC振荡器的频率稳定度	85
5.4.1	频率稳定度的概念	85
5.4.2	LC振荡器的频率稳定度分析	85
5.4.3	提高频率稳定度的措施	87
5.5	晶体振荡器	87
5.5.1	石英晶体的谐振特性	88
5.5.2	晶体振荡器	88

5.6	振荡器中的几种现象	91
5.6.1	寄生振荡	91
5.6.2	间歇振荡	92
5.6.3	频率占据	93
5.6.4	频率拖曳	93
5.7	正弦波振荡器的仿真实验	94
	小结	95
	习题	95
第6章	非线性电路的分析方法	99
6.1	概述	99
6.1.1	非线性元件的基本特性	99
6.1.2	非线性电路的特点	100
6.2	非线性电路的分析方法	100
6.2.1	幂级数近似分析法	100
6.2.2	折线近似分析法	103
6.2.3	线性时变电路分析法	103
6.3	模拟乘法器	105
6.3.1	模拟乘法器的基本概念	105
6.3.2	差分对模拟乘法电路	106
6.4	非线性电路的仿真实验	113
	小结	114
	习题	115
第7章	振幅调制、解调及混频	118
7.1	概述	118
7.1.1	调制的基本概念	118
7.1.2	振幅调制信号分析	119
7.2	振幅调制电路	125
7.2.1	AM调制电路	125
7.2.2	DSB调制电路	127
7.3	调幅信号的解调	132
7.3.1	二极管峰值包络检波	133
7.3.2	包络检波器的其他形式	139
7.3.3	同步检波	141
7.4	混频	145
7.4.1	概述	145
7.4.2	混频电路	147
7.4.3	混频器的干扰	153
7.5	振幅调制、解调及混频电路仿真实验	157
	小结	160

习题	161
第8章 角度调制与解调	167
8.1 角度调制信号分析	167
8.1.1 调频波的数学表达式	167
8.1.2 调频波的频谱、带宽和功率	168
8.1.3 相位调制	171
8.2 频率调制电路	173
8.2.1 概述	173
8.2.2 变容二极管直接调频电路	174
8.2.3 电抗管直接调频电路	179
8.2.4 晶体振荡器直接调频电路	180
8.2.5 非正弦波产生器直接调频电路	181
8.2.6 间接调频电路	183
8.2.7 扩展最大频偏的方法	186
8.3 调频波解调电路	187
8.3.1 概述	187
8.3.2 斜率鉴频器	189
8.3.3 相位鉴频器	191
8.3.4 比例鉴频器	198
8.4 角度调制和解调电路的仿真实验	200
小结	202
习题	202
第9章 参量电路	207
9.1 概述	207
9.2 非线性电容的换能原理	207
9.2.1 非线性电容换能的基本物理过程	207
9.2.2 参量电路的能量分配关系(门雷——罗威关系)	208
9.3 参量倍频和参量混频电路	210
9.3.1 参量倍频	210
9.3.2 参量混频电路	210
9.3.3 参量放大电路	214
小结	214
习题	215
第10章 反馈控制电路	216
10.1 自动增益控制 AGC	216
10.1.1 AGC 的工作原理	216
10.1.2 AGC 电路在通信系统中的应用	217
10.1.3 增益控制电路	218
10.2 自动频率控制 AFC	220

10.2.1 AFC 电路的工作原理	220
10.2.2 AFC 特性分析	221
10.2.3 AFC 在通信系统中的应用	222
10.3 自动相位控制电路——锁相环路	222
10.3.1 锁相环路的基本工作原理	222
10.3.2 锁相环的性能分析	223
10.3.3 单片集成锁相环路	229
10.3.4 锁相环的应用	231
10.4 频率合成技术	233
10.4.1 概述	233
10.4.2 锁相频率合成器	234
10.4.3 直接数字式频率合成器	236
10.5 反馈控制系统的仿真实验	239
小结	240
习题	241
附录 1 余弦脉冲分解系数表	244
附录 2 第一类贝塞尔函数 $J_n(m_r)$ 表	247
参考资料	248

第1章 绪论

1.1 通信和通信系统

通信（Communication）泛指把信息从发出信息者传送到接收信息者的过程，完成信息传输的系统称为通信系统。

现代意义上的通信主要指“电通信”，即发信者将原始的信息如语言、文字和图像等转换成电压、电流或电磁波来表示的电信号，再将电信号传送至接收者，接收者收到电信号后，还原成原始的信息。因此，一个通信系统必须具备三个基本的部分：发送设备、传送信号的通路（称为信道）和接收设备。通信系统的基本模型如图 1-1 所示。

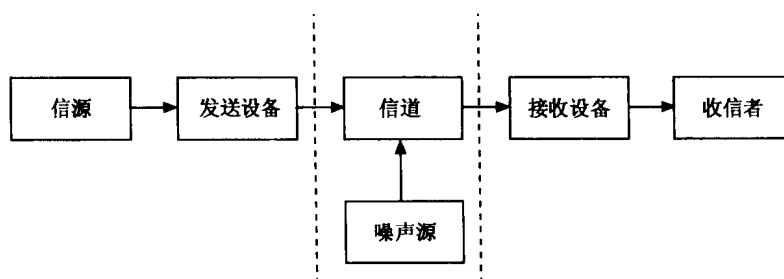


图 1-1 通信系统的基本模型

图 1-1 中所示的发送设备将信息发送者送来的非电量原始信息如语言、文字和图像等转换成电信号，再把电信号处理成适合于信道传输的信号形式送至信道。信号经过信道传输时通常会有干扰和噪声窜入。接收设备将收到的信号还原成原来的信息送给收信者。

信道是信号传输的载体，即信号传输的通道。通信系统根据所采用的传输媒介不同，分为两大类。一类是有线通信系统，即是依赖金属导线、电缆和光导纤维等有着明确物理形状的载体来传送信号的通信系统；另一类是无线通信系统，即是利用电磁波在空间传播来传送信号的通信系统，广义的无线通信还包括无线电导航、无线电遥控和遥测等。

无论是有线通信系统还是无线通信系统，根据通信系统中处理、传输的信号的不同，又分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信系统其信源的信号是时间的连续信号，例如语音和图像信号就是随时间连续变化的信号。数字通信系统其信源的信号可以是时间上离散的数字信号，如计算机的数据流；也可以是模拟信号，如果是模拟信号，则要将模拟信号转换成数字信号来处理 and 传输。

1.2 通信系统中信号的变换过程

信源提供的信号在通信系统中称为基带信号。基带信号是频谱在零频附近的宽带信号，例如声音基带信号的频率范围是 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ ，电视图像基带信号的频率范围是 $0\sim 6\text{MHz}$ 。这样的基带信号不能在无线信道上传输。即使在某些可以传输直流的有线信道上，为了提高信道的通信容量，基带信号的传输方式也很少采用。

一般是用基带信号去改变某个高频正弦电压（通信设备中称为载波）的参数，使载波的振幅、频率或相位随基带信号而变化，这一过程称为调制。在通信系统中，调制有三个主要的作用：（1）调制的过程就是一个频谱搬移的过程，将原来不适宜传输的基带信号频谱搬移到适宜传输的某一个频段上，然后送至信道传输。（2）调制的另一个重要作用是实现信道复用，即把多个信号分别安排在不同的频段上同时进行传输，以提高信道的容量。（3）调制可以提高通信系统抗干扰的能力，例如将信号频率搬移，从而离开某一特定干扰频率；在 FM 调制中进行限幅，将叠加在信号上的干扰和噪声剔除等。

接收端收到经过调制以后的高频信号后，从中取出随基带信号变化的参数，再还原成原来的基带信号，这一过程称为解调。解调的过程就是频谱的反搬移过程。

下面通过具有典型意义的无线电广播发射和接收，来进一步了解通信系统中信号的处理和传输过程。

1.3 无线电广播的发射与接收

1.3.1 无线电广播信号的发射

图 1-2 是调幅中波广播发射机的组成方框图。图中振荡器产生高频正弦电压，称为载波。高频载波经放大后送往振幅调制器的一个输入端。拾音器将话音转变成低频电信号，这个低频电信号称作调制信号，调制信号经放大后送往振幅调制器的另一端。经过调制器处理，输出一个频率与高频载波相同，幅度随着调制信号变化的波形，这个波形称为已调信号。已调信号是高频载波驮载上低频信号以后的信号。已调信号由高频功率放大器放大后送往天线，天线将其转变成电磁波辐射到空中。

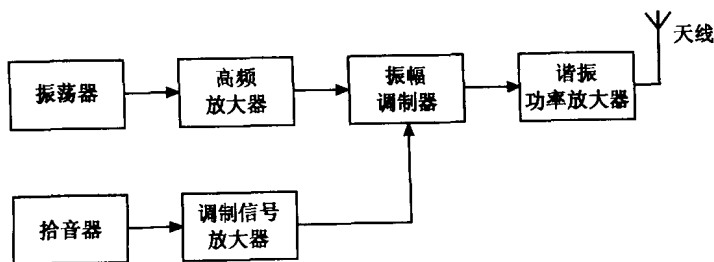


图 1-2 调幅中波广播发射机组组成方框图

1.3.2 无线电广播信号的接收

图 1-3 是调幅中波广播接收机的组成方框图。这个方框图的结构称为超外差接收方式，是现代无线电接收机的典型形式。

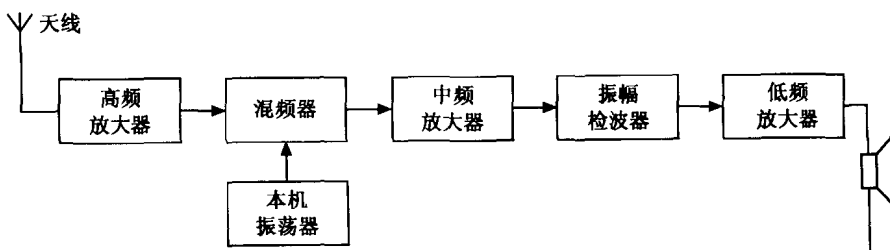


图 1-3 调幅中波广播接收机的组成方框图

无线电波经过长距离的空间传播，到达接收设备时已十分微弱。接收天线感生出毫伏甚至微伏数量级的微弱高频已调信号，经过高频放大（有些简易接收设备可以省掉高频放大），然后进入混频器。混频器的另一路输入是接收机自己产生的一个高频正弦电压，称为本地振荡信号 f_L 。混频器的作用是将载波频率为 f_c 的高频已调信号转变成载波频率为 f_1 的中频已调信号，在这里混频器只改变已调信号的载波频率，不改变已调信号振幅的变化规律，因此中频已调信号仍携带着基带信号的信息。在我国，广播接收机（收音机）的中频频率固定为 465kHz。中频已调信号经过若干级放大器放大后送往振幅检波器，振幅检波器实现解调功能，将中频已调信号还原成低频调制信号。

综上所述，通信设备应包含各种放大电路、正弦波产生电路、调制与解调电路等，这些功能电路的有机组合就构成了通信设备。这些功能模块的电路组成、工作原理、分析与计算均属于“通信电子线路”课程讨论的范围。

1.4 无线电波的传播方式和频段划分

1.4.1 无线电波的传播方式

无线电波（电磁波）主要以绕射、折射反射和直射三种方式在自由空间中传播，如图 1-4 所示。无线电通信系统根据发射信号所处的频段位置，选择这三种方式中的一种。频率在 1500kHz 以下的通信系统，选择绕射方式，即地面波。由于地球是一个巨大的导体，电磁波沿着地面传播时，因集肤效应引起能量被大地吸收。频率低的电磁波吸收小，造成的损耗也小，而且地球表面的电性能在短时间内是很稳定的，所以中、低频率的电磁波以地面波的方式可以稳定地传播比较远。频率在 1500kHz~30MHz 的短波通信系统，选择反射方式，即天波。天波主要依靠电离层反射传播。因为太阳的辐射引起大气电离，在地球表面约 100~600km 的高空形成一层电离层，电磁波到达电离层后，一部分被吸收，其余的被反射和折射回地面。可见天波的传播距离最远。但是电离层的状态随时在变化，故短波通信不够稳定。由于频率在 30MHz 以上的电磁波会穿过电离层，不再返回地面，因此频率在 30MHz 以上的超短波通信系统只能选择直射传播方式。由于地球表面曲率，直射传播的距离有限，

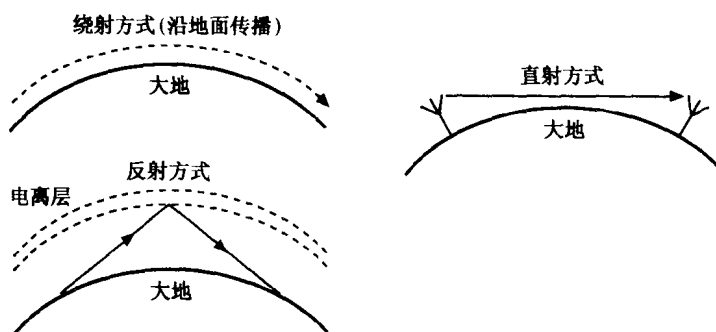


图 1-4 无线电波传播方式示意图

通常只能为可视距离，也称为视距传播。视距传播可以通过高架天线（如电视台的天线基本上是每个城市最高的建筑物）、卫星中继等方式来扩大传输距离。

1.4.2 无线电波的频段划分

表 1-1 和 1-2 概括地说明了信号的频段的划分、每个频段的传播特性和应用场合。

表 1-1 频段的划分

序号	频段名称	频率范围	波长范围	传播特性	应用场合
1	极低频 (ELF)	3~30Hz	$10^7 \sim 10^8$ m	传播损耗小，通信距离远，信号稳定，能渗入海水	远洋通信、远程导航、潜艇通信、标准时间发送
2	超低频 (SLF)	30~300Hz	$10^6 \sim 10^7$ m		
3	特低频 (ULF)	300~3kHz	$10^5 \sim 10^6$ m		
4	甚低频 (VLF)	3~30kHz	$10^4 \sim 10^5$ m		
5	低频 (LF)	30~300kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	夜晚传播与上面相同，白天稍差，随季节变化	除上述用途外，还用于地下通信
6	中频 (IF)	0.3~3MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	夜间比白天损耗小，冬比夏损耗小，可靠性比低频差	广播、船舶通信和飞行通信
7	高频 (HF)	3~30MHz	$10 \sim 10^2$ m	远距离损耗小，每时、每日、每季都有变化	中、远距离通信和广播
8	甚高频 (VHF)	30~300MHz	1~10m	特性与光波类似，直线传播	移动通信、电视、调频电台、雷达与导航
9	超高频 (UHF)	300~3000MHz	$10^{-1} \sim 10$ m	微波波段，特性与上相同	除上面的应用外，还用于卫星通信等
10	特高频 (SHF)	3~30GHz	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ m		
11	极高频 (EHF)	30~300GHz	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ m		
12	至高频	300~3000GHz	$10^{-4} \sim 10^{-3}$ m		

表 1-2 SHF 和 EHF 频段的具体划分

频段	频率 (GHz)	波长 (cm)
L	1~2	30~15

续表

频段	频率 (GHz)	波长 (cm)
S	2~4	15~7.5
C	4~8	7.5~3.75
X	8~12.5	3.75~2.4
Ku	12.5~18	2.4~1.67
K	18~26.5	1.67~1.132
R	26.5~40	1.132~0.75
F	40~60	0.75~0.5
E	60~90	0.5~0.33
V	90~140	0.33~0.214

1.5 本课程的主要内容及特点

“通信电子线路”是“模拟电子线路”、“数字电路”的后续课程，是电子信息类各专业的一门重要的技术基础课。本课程主要讨论通信系统中发送设备和接收设备中高频部分的专用电路。这些专用电路如果从工作特点和分析方法的角度划分，大致可以分为三个模块：信号的放大模块、正弦波的产生模块和频谱的搬移模块。

信号放大模块讨论高频小信号谐振放大器、中频放大器、小信号宽带放大器、参量放大器、谐振功率放大器、功率的合成与分配等。

正弦波产生模块讨论各种正弦波振荡器。

频谱搬移模块讨论非线性器件的频谱搬移原理、振幅调制与解调、混频、倍频、频率调制与解调等。

除了上述三个模块以外，通信设备中所用到的一些特殊电路，如自动增益控制电路、自动频率控制电路、自动相位控制电路以及频率合成器等也属于本课程的讨论范围。

综上所述，在前面图 1-1、图 1-2 和图 1-3 中画出的通信设备中的各个功能方框图，将由本课程各个章节中的单元电路实现。通过本课程的学习，读者就可以从电路的层次上来认识通信设备和系统了。

本课程的特点是：高频、非线性。

对“高频”来讲，由于有些效应物理机理非常复杂，很多问题涉及到了分布参数，很难作定量分析，所以本课程仅涉及集中参数电路的分析。

非线性电路的分析是本课程的重点，也是本课程与“模拟电子线路”的重要区别之一。非线性电子线路能够实现的功能以及电路的形式远比线性电子线路多，例如频率变换就不能用线性电子线路来实现，必须借助于非线性电路。但是非线性电路的严格分析则要涉及非线性代数方程或非线性微分方程的求解，而这些方程的求解是相当困难的，在工程上往往根据实际情况进行合理的近似，以求得具有简明物理意义的实用性结果，尽量避免陷入繁琐的数学推导之中。

本课程是理论与实际紧密联系的课程，一切理论分析都是围绕解决工程实际问题来进行

的，在各种电路的分析中并不追求严密的理论分析结果，更多地是采用工程近似分析。因此，在本课程的学习中需要注意：

(1) 本课程各章节内容原则上是按照学习通信系统来安排的，即从功能原理的讨论到电路实现再到工程估算。因此，各个单元电路及其工作原理是首先要把握的重点，其次是掌握基本分析方法和计算思路，最后要根据分析结果了解电路的设计原则及改进电路性能的措施。

(2) 实践是学好本课程的重要环节。本书的大部分章节均编写了计算机仿真实验的内容。在学习的过程中，将实际实验、计算机仿真实验和理论分析密切结合，才能使本课程各单元电路的学习融会贯通。

(3) 具体通信设备中的电路很多，仅放大器就千差万别，本课程不可能讨论所有的实用电路，只能介绍典型电路及其构成原则。因此，掌握基本原则及基本分析方法才能在实际应用中举一反三。

习 题

- 1-1 画出调幅发送和接收机的原理框图，并说明各部分的作用。
- 1-2 频率为 3~30MHz 称为什么频段？它对应的波长是多少？
- 1-3 简述无线电通信中调制的目的。
- 1-4 C 波段与 Ku 波段对应的频率范围是多少？

第2章 通信电子线路基础

本章将讨论常用有源器件在高频条件下的模型、通信电子线路中常用的选频电路和固体器件、有关电子线路中的噪声和电磁兼容性问题，为后续章节的学习打下一定的基础。

2.1 高频电路中的有源器件

在通信（高频）电子线路中，由于电路处理的信号频率较高，以往低频电路中忽略的诸多因数都会明显地表现出来，因此高频电路中的半导体器件——二极管、双极型三极管和场效应管的电路模型与低频环境中的电路模型相比有较大的不同。本节将通过分析，建立上述有源器件的高频小信号模型。

2.1.1 双极型三极管的高频小信号模型

一、双极型三极管混合 π 等效电路

三极管的物理结构模型如图 2-1 (a) 所示。图中 b' 为理想基极， $r_{bb'}$ 是基区体电阻，它表示基极电流流过极窄的基区所受到的阻力，一般高频三极管约为十几欧姆。 $r_{b'e}$ 是 r_e 折算到基极回路的电阻。 $C_{b'e}$ 是发射结扩散电容。 $C_{b'c}$ 是集电结电容，由于集电结反偏， $C_{b'c}$ 主要是集电结势垒电容。因为 $C_{b'c}$ 跨在三极管输入回路和输出回路之间，构成了管子内部反馈，故 $C_{b'c}$ 又称为内部反馈电容（或称为密勒电容）。 $g_m U_{b'e}$ 是受控源，表示三极管输入对输出的控制作用。由于在高频工作时， $C_{b'c}$ 对 I_b 的分流作用使得 I_c 与 I_b 不再成正比关系，因此用直接加在发射结上的电压 $U_{b'e}$ 控制集电极电流。 g_m 表示 $U_{b'e}$ 单位电压引起 I_c 变化的大小，称作三极管的跨导。 r_{ce} 是电流源的内阻。

由图 2-1 (a) 所示结构模型，得到三极管混合 π 等效电路（也称为物理模型等效电路），如图 (b) 所示。这个等效电路的拓扑结构具有“ π ”的形状，电路中元件参数又具有不同的量纲，故称为混合参数 π 型等效电路，简称混合 π 等效电路。这个等效电路中的主要参数是跨导 g_m ，可以由下式确定：

$$g_m \approx \frac{1}{r_e} = \frac{I_{EQ}}{26\text{mV}} \quad (\text{室温 } T = 300\text{K}) \quad (2-1)$$

式中 r_e 为正向导通发射结的交流电阻。

三极管混合 π 等效电路是从管子物理模型中提取出来的，当静态工作点确定时，混合 π 等效电路中各元件的值基本上是固定的，在很宽的频率范围内基本不变，这是混合 π 等效电路的优点。但是这个等效电路的节点较多，给电路的分析计算会带来一定的困难，这是它的缺点。

二、三极管的 Y 参数等效电路

三极管处在小信号线性放大状态时，可以近似为线性器件。因此，我们避开三极管的内

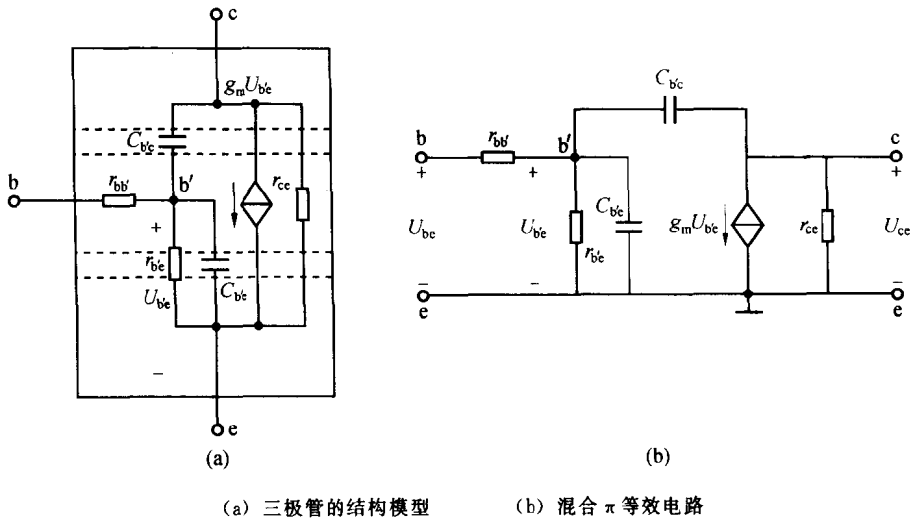


图 2-1 三极管的结构模型和混合 π 等效电路

部结构，将其看成一个线性二端口网络，如图 2-2 (a) 所示，从而可以用网络参数等效电路来等效三极管。在模拟电子线路中大量使用的 H 参数等效电路就是一种网络参数等效电路。但是高频电路中常用的选频放大器，其输入或输出通常接有 LC 并联谐振回路。如果电路中各条支路均用导纳来表示，则在计算时就能直接相加，使运算简便。因此，三极管 Y 参数（导纳参数）等效电路在高频电路中得到广泛的应用。

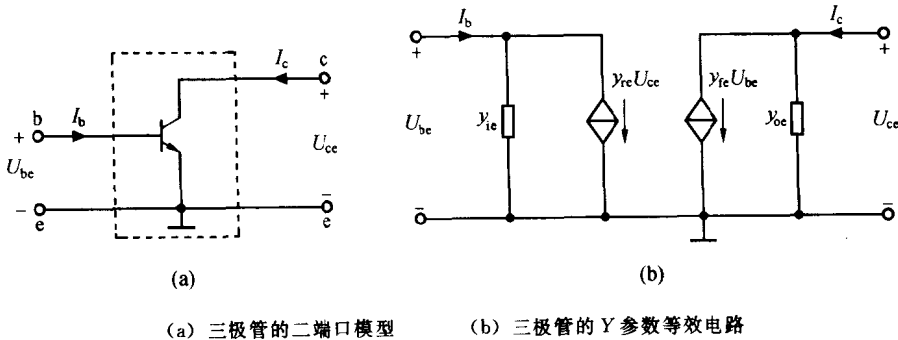


图 2-2 三极管的 Y 参数等效电路

已知线性二端口网络的 Y 参数方程为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= y_{11}U_1 + y_{12}U_2 \\ I_2 &= y_{21}U_1 + y_{22}U_2 \end{aligned} \right\}$$

将其移植到图 2-2 (a) 所示的三极管等效二端口网络模型中，并将 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 和 y_{22} 用 y_{ie} 、 y_{re} 、 y_{fe} 和 y_{oe} 替换，得到三极管共发射极接法的 Y 参数电流方程：

$$\left. \begin{aligned} I_b &= y_{ie}U_{be} + y_{re}U_{ce} \\ I_c &= y_{fe}U_{be} + y_{oe}U_{ce} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式中，

$$y_{ie} = \left. \frac{I_b}{U_{be}} \right|_{U_{ce}=0}$$

是输出交流短路时的输入导纳；

$y_{re} = \left. \frac{I_b}{U_{ce}} \right|_{U_{be}=0}$ 是输入交流短路时的反向传输导纳, 是造成三极管输入回路与输出回路耦合的主要因数, 也称为反馈导纳;

$y_{fe} = \left. \frac{I_c}{U_{be}} \right|_{U_{ce}=0}$ 是输出端交流短路时的正向传输导纳, 是体现三极管电流控制作用的参数, 其作用相当于 H 参数等效电路中的 $h_{fe} (\beta)$;

$y_{oe} = \left. \frac{I_c}{U_{ce}} \right|_{U_{be}=0}$ 是输入端交流短路时的输出导纳, 即受控电流源 $y_{fe} U_{be}$ 的内导纳。

根据方程 (2-2) 就可以直接画出三极管的交流小信号 Y 参数等效电路, 如图 2-2 (b) 所示。

混合 π 等效电路和 Y 参数等效电路所反映的是同一只三极管, 所以这两种等效电路的参数之间存在着确定的关系。根据 Y 参数的定义, 从混合 π 等效电路可以推导出:

$$\begin{aligned} y_{ie} &= \frac{g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]}, \quad g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}}; \\ y_{re} &= \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]}; \\ y_{fe} &= \frac{g_m - j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]}; \\ y_{oe} &= \frac{j\omega C_{b'c}[1 + r_{bb'}(g_m + g_{b'e} + j\omega C_{b'c})]}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]} \end{aligned}$$

由这组公式可以得出以下三点结论:

(1) Y 参数与静态工作点有关, 在这点上与 H 参数一样。

(2) Y 参数与三极管的工作频率有关。在下一章将要讨论的小信号谐振放大器中, 由于电路的通频带很窄, 三极管的工作频率被局限在一个较小的范围内, Y 参数在此可以近似看成常数。

(3) 如果工作频率对三极管来讲不是特别高, 即满足 $|j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})| \ll g_{b'e}$, $|j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})| \ll 1$ 时, Y 参数均为容性参数。为了今后分析电路方便, 我们将 Y 参数记为

$$\left. \begin{aligned} y_{ie} &= g_{ie} + j\omega C_{ie} \\ y_{re} &= g_{re} + j\omega C_{re} \\ y_{fe} &\approx g_m \\ y_{oe} &= g_{oe} + j\omega C_{oe} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

2.1.2 二极管和场效应管的高频小信号模型

一、二极管的高频小信号等效电路

二极管在高频小信号状态工作时, 其 PN 结电容的影响就不能忽略了, 因此二极管的高频小信号等效电路如图 2-3 所示。图中 r_D 为二极管的交流电阻, 在室温条件下 $r_D = \frac{26\text{mV}}{I_D}$; C_J 为 PN 结电容, 它包括势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 。

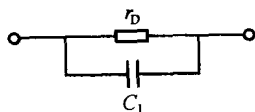


图 2-3 二极管的高频小信号等效电路