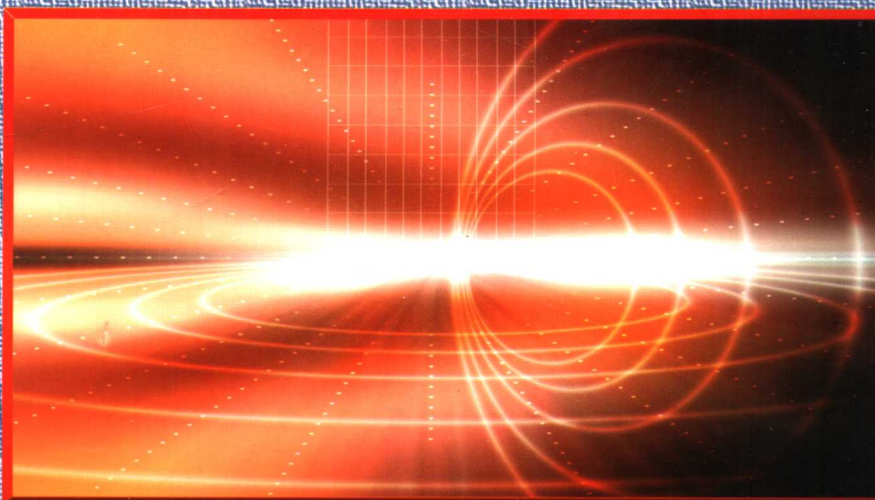


高等学校“十一五”规划教材

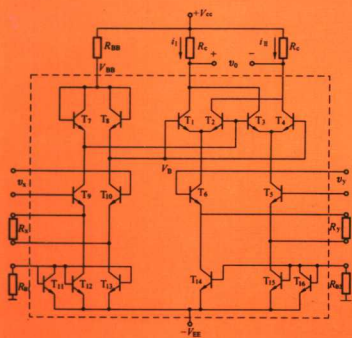
GAOPIN
DIANZI
XIANLU



高频电子线路

(第三版)

张义芳 编著



哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材

高频电子线路

(第三版)

张义芳 编著

哈尔滨工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/张义芳编著.—3版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-5603-0824-1

I.高… II.张… III.高频-电子电路
IV.TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 147213 号

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.5 字数 381 千字

版 次 2007 年 3 月第 3 版 2007 年 3 月第 8 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-0824-1

印 数 34 001~38 000 册

定 价 21.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

再版说明

本版是在前版的基础上修订的。本版的主导思想是根据教育部近年来对该门课程教学大纲的基本要求,遵循“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”原则编写的。编者强调指出,本书是电子信息与通信技术类专业基础课教材,它以现代模拟通信系统组成框图为纲,介绍的电信号为媒介传输与处理信息的物理过程,从而理解各框图的基本功能,以及掌握为实现这些功能的硬件电路构成原则。随着电子技术日新月异地快速发展,具体实用电路形式和器件种类繁多,但是它们所实现的基本功能是永恒的。只要深刻理解和掌握这些功能电路的组成原则、基本工作原理、性能特点和工程分析方法,就能有效地运用、设计、调试这些电路或设备。对层出不穷的新电路、新器件也会具有举一反三和创造思维之能力。

因此,本次修订工作在保持基本架构的前提下,对各章进行了不同程度的压缩、删减和补充、重新改写了第4、5、8章。加强了基础性和应用性,叙述简洁,更符合认识规律。对全书的图形符号,根据国家标准和习惯用法进行了统一修订,为查找方便,书中符号表改为按字母顺序排列,置于附录1;对习题进行了增减调整,并重新复核了答案。

本书原编者之一冯健华老师因长期定居国外,表示不再参与此项工作。本版修订工作由张义芳独立完成。冯老师的前期辛勤劳动,为本次修订工作提供了有益的支持;还得到吕志武教授,温海洋、刘显忠老师的大力帮助,他们在“应如何修订”讨论中提出许多宝贵的意见和建议;赵建新、郭宏老师对本课程的实验和习题做了大量工作,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,难免有不妥或错误之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者
2007 年元月

目 录

第1章 基础知识	1
1.1 高频电子线路的功用	1
1.1.1 通信系统的组成	1
1.1.2 发射机和接收机的组成	4
1.1.3 本书的研究对象和任务	5
1.2 选频电路	6
1.2.1 对选频电路的要求	6
1.2.2 选频电路的分类	7
1.2.3 谐振式选频电路	7
1.3 晶体管高频等效电路	20
1.3.1 物理参数模型	20
1.3.2 网络参数模型	23
1.4 非线性电路的基本特点和分析方法	26
1.4.1 非线性元件与非线性电路	26
1.4.2 非线性电路的分析方法	28
1.4.3 非线性电路的频率变换作用	37
习 题	42
第2章 高频小信号频带放大电路	46
2.1 概 述	46
2.2 晶体管谐振放大电路	47
2.2.1 单调谐回路谐振放大电路	48
2.2.2 双调谐回路谐振放大电路	52
2.2.3 参差调谐放大电路	54
2.2.4 集中选择性放大电路	55
2.3 放大器的稳定性	62
2.3.1 晶体管内部反馈	62
2.3.2 晶体管外部干扰	62
习 题	63
第3章 放大器的内部噪声	65
3.1 噪声的来源与性质	65
3.1.1 热噪声	65

3.1.2	散粒噪声	67
3.1.3	$1/f$ 噪声	67
3.1.4	噪声带宽	68
3.2	元件的噪声及其噪声模型	69
3.2.1	晶体二极管的噪声	69
3.2.2	晶体三极管的噪声	69
3.2.3	场效应管的噪声	72
3.2.4	放大器的噪声模型	72
3.3	噪声系数	74
3.3.1	噪声系数的定义	74
3.3.2	噪声系数的计算公式	75
3.3.3	放大器的噪声系数	76
3.3.4	等效噪声温度	77
3.3.5	多级放大器的噪声系数	78
3.3.6	接收机灵敏度与噪声系数关系	79
习 题		80
第 4 章	高频功率放大电路	82
4.1	概 述	82
4.2	高频谐振功率放大电路	83
4.2.1	电路组成与工作原理	83
4.2.2	丙类谐振功率放大电路分析	84
4.3	丙类谐振功率放大器电路形式与匹配网络参数估算	89
4.3.1	电路形成	89
4.3.2	阻抗匹配网络	89
4.3.3	高频谐振功率放大器实用电路举例	94
4.4	功率放大管的高频特性	95
4.4.1	基区少数载流子渡越时间的影响	95
4.4.2	晶体管在高频区工作时引线电感的影响	96
4.4.3	晶体管在高频区工作时对饱和压降的影响	96
4.5	宽带非谐振功率放大电路	97
4.5.1	传输线变压器	97
4.5.2	功率合成与功率分配	100
4.5.3	功率合成电路应用举例	102
4.6	丙类倍频器	104
习 题		104
第 5 章	正弦波振荡电路	106
5.1	概 述	106

5.2 反馈式正弦波振荡器基本原理	106
5.2.1 起振条件	106
5.2.2 平衡条件	107
5.2.3 稳定条件	107
5.3 反馈式正弦波振荡器常用电路	108
5.3.1 互感耦合振荡电路	108
5.3.2 三点式振荡电路	110
5.3.3 集成振荡电路	114
5.4 振荡器频率稳定度	115
5.4.1 频率稳定度的概念	115
5.4.2 引起频率不稳定因素分析*	116
5.4.3 稳频措施	117
5.5 石英晶体振荡器	119
5.5.1 并联谐振型晶体振荡器	120
5.5.2 串联谐振型晶体振荡器	120
5.5.3 泛音晶体振荡器	121
习 题	121
第 6 章 调制与解调电路	124
6.1 概 述	124
6.2 幅度调制	125
6.2.1 调幅信号性质	125
6.2.2 调幅方式的演变及其实现模型	129
6.2.3 常用调幅电路	134
6.3 幅度解调	152
6.3.1 综述	152
6.3.2 包络检波电路	154
6.3.3 同步检波电路	162
6.3.4 晶体二极管检波与模型相乘器检波性能比较	164
6.4 角度调制	165
6.4.1 调角波性质	165
6.4.2 调频方法及其实现模型	168
6.4.3 常用调频电路	169
6.4.4 扩展频偏方法	178
6.5 角度解调	179
6.5.1 鉴频方法及其实现模型	180
6.5.2 常用鉴频电路	181
6.6 限幅电路	193
习 题	194

第7章 变频电路	202
7.1 概 述	202
7.2 常用混频电路	204
7.2.1 晶体三极管混频电路	204
7.2.2 场效应管混频电路	210
7.2.3 晶体二极管混频电路	211
7.2.4 集成模拟相乘器混频电路	215
7.3 变频干扰	216
7.3.1 哨叫干扰	216
7.3.2 寄生通道干扰	217
7.3.3 交叉调制(交调)干扰	217
7.3.4 互相调制(互调)干扰	218
7.3.5 本振噪声干扰与倒易混频干扰	219
习 题	219
第8章 反馈控制电路	223
8.1 概 述	223
8.2 锁相环路组成及其工作原理	223
8.2.1 锁相环路的基本工作原理	224
8.2.2 锁相环路的数学模型	224
8.3 锁相环路分析*	227
8.3.1 一阶锁相环路分析	227
8.3.2 二阶锁相环路分析	230
8.4 锁相环路的主要特性及其应用	233
8.4.1 锁相环路的主要特性	233
8.4.2 锁相环路的应用	233
8.4.3 集成锁相环简介	236
8.5 自动频率控制电路	239
8.6 自动增益(电平)控制电路	241
习 题	243
附录	244
习题答案	251
参考文献	255

第 1 章 基本知识

1.1 高频电子线路的功用

高频电子线路是若干无源电子元件或有源电子元件(晶体管、场效应管、集成电路等)的有序联结、并在高频频段范围内实现特定电功能的电路,它被广泛应用于通信系统和各种电子设备中。为了具体了解高频电子线路的种类和功用,现以通信系统为例,对它们作一概要的介绍。

1.1.1 通信系统的组成

通信既是人类社会的重要组成部分,又是社会发展和进步的重要因素。广义地说,凡是在发信者和收信者之间,以任何方式进行消息的传递,都可称为通信。实现消息传递所需设备的总和,称为通信系统。19 世纪末迅速发展起来的以电信号为消息载体的通信方式,称为现代通信系统。其组成框图如图 1.1-1 所示。各部分的主要作用简介如下:

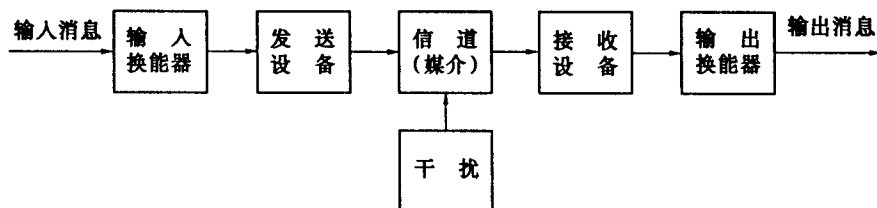


图 1.1-1 通信系统的组成

1. 输入换能器

输入换能器主要任务是将发信者提供的非电量消息(如声音、景物等)变换为电信号,它应能反映待发的全部消息,通常具有“低通型”频谱结构,故称为基带信号。当输入消息本身就是电信号时(如计算机输出的二进制信号)输入换能器可省略而直接进入发送设备。

2. 发送设备

发送设备主要有两大任务:一是调制,二是放大。所谓调制,就是将基带信号变换成适合信道传输特性传输的频带信号。它是使基带信号去控制消息载体信号的某一参数,让该参数随基带信号的大小而线性变化的处理过程。例如,在连续波调制中,简谐振荡有三个参数(振幅、频率和初相位)可以改变,利用基带信号去控制这三个参数中的某一个,

对应三种调制方式:调幅、调频和调相。通常又将基带信号称为调制信号,将高频振荡信号称为载波信号,将经过调制后的高频振荡信号称为已调信号或已调波。

所谓放大,是指对调制信号和已调信号的电压和功率放大、滤波等处理过程,以保证送入信道足够大的已调信号功率。

3. 信道

信道是连接发、收两端的信号通道,又称传输媒介。通信系统中应用信道可分为两大类:有线信道(如架空明线、电缆、波导、光纤等)和无线信道(如海水、地球表面、自由空间等)。不同信道有不同的传输特性,相同媒介对不同频率的信号传输特性也是不同的。例如,在自由空间媒介里,电磁能量是以电磁波的形式传播的。然而,不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。1.5 MHz 以下的电磁波主要沿地表传播,称为地波,如图 1.1-2 所示。由于大地不是理想的导体,当电磁波沿其传播时,有一部分能量被损耗掉,频率越高,趋表效应越严重,损耗越大,因此频率较高的电磁波不宜沿地表传播。1.5 ~ 30 MHz 的电磁波,主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波,如图 1.1-3 所示。电离层是由于太阳和星际空间的辐射引起大气上层电离形成的。电磁波到达电离层后,一部分能量被吸收,一部分能量被反射和折射到地面。频率越高,被吸收的能量越小,电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后,电磁波就会穿透电离层而不再返回地面。因此频率更高的电磁波不宜用天波传播。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波,如图 1.1-4 所示。由于地球表面的弯曲,空间波传播距离受限于视距范围。架高发射天线可以增大其传输距离。



图 1.1-2 电磁波沿地表绕射

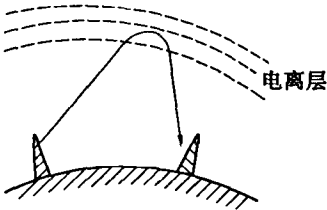


图 1.1-3 电磁波的折射与反射

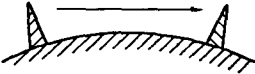


图 1.1-4 电磁波的直射

为了讨论问题的方便,将不同频率的电磁波人为地划分若干频段或波段,其相应名称和主要应用举例,列于表 1.1-1 中。应该指出,各种波段的划分是相对的,因为各波段之间并没有显著的分界线,但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。

4. 接收设备

接收设备的任务是将信道传送过来的已调信号进行处理,以恢复出与发送端相一致的基带信号,这种从已调波中恢复基带信号的处理过程,称为解调。显然解调是调制的反过程。又由于信道的衰减特性,经远距离传输到达接收端的信号电平通常是很微弱的了(微伏数量级),需要放大后才好解调。同时,在信道中还会存在许多干扰信号,因而接收设备还必须具有从众多干扰信号中选择有用信号、抑制干扰的能力。

表 1.1-1 不同频率电磁的名称和应用

频 率	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz	3 THz	30 THz	300 THz
频段名称	极低频 (ELF)	声 频 (VF)	甚低频 (VLF)	低 频 (LF)	中 频 (MF)	高 频 (HF)	甚高频 (VHF)	特高频 (UHF)	超高频 (SHF)	极高频 (EHF)	超极高频			
应用举例	音频 电话 数据传输 长距离航海 时间标准			航海设备 无线电信标	调幅广播 民间保护 业余无线电	短波广播 移动通信 军用通信 业余无线电	VHF 电视 调频广播 空中交通管制 业余无线电	UHF 电视 遥测 雷达 业余无线电	雷达 卫星和空间 通信 军用通信 业余无线电	无线电天 文学 雷达着陆 设备 业余无线电	卫星广播 与通信	光学通信 数据传输		
波段名称			超长波 (V LW)	长 波 (LW)	中 波 (MW)	短 波 (SW)	米 波 超短波	分米波	厘米波	毫米波	亚毫米波		光 波	
波 长	10 Mm	1 Mm	100 km	10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm	1 mm	100 μm	10 μm	1 μm
传 输 介 质	架空明线			视频电缆			射频频电缆			同轴电缆			波 导	
有 线														
无 线	海水			地球表面			自由空间						光导纤维	

* 常对微波波段做更细的划分,并用不同的拉丁字母表示如下:

波段代号	P	L	S	C	X	Ku	K	Ka	Q-W
简称		22 cm 波段	10 cm 波段	5 cm 波段	3 cm 波段	2 cm 波段	1.25 cm 波段	0.8 cm 波段	0.4 cm 波段
波长范围/cm	130~75	75~15	15~7.5	7.5~3.65	3.65~2.42	2.42~1.66	1.66~1.13	1.13~0.75	0.75~0.375
频率范围/MHz	225~400	400~2 000	2 000~4 000	4 000~8 200	8 200~12 400	12 400~18 000	18 000~26 500	26 500~40 000	40 000~80 000

5. 输出换能器

输出换能器的作用是将接收设备输出的基带信号变换成原来形式的消息,如声音、景物等,供受信者使用。

1.1.2 发射机和接收机的组成

发射机和接收机是现代通信系统的核心部件。它们是为了使基带信号在信道中有效地和可靠地传输而设置的。现以无线广播调幅发射机为例,说明它的组成,如图 1.1-5 所示。

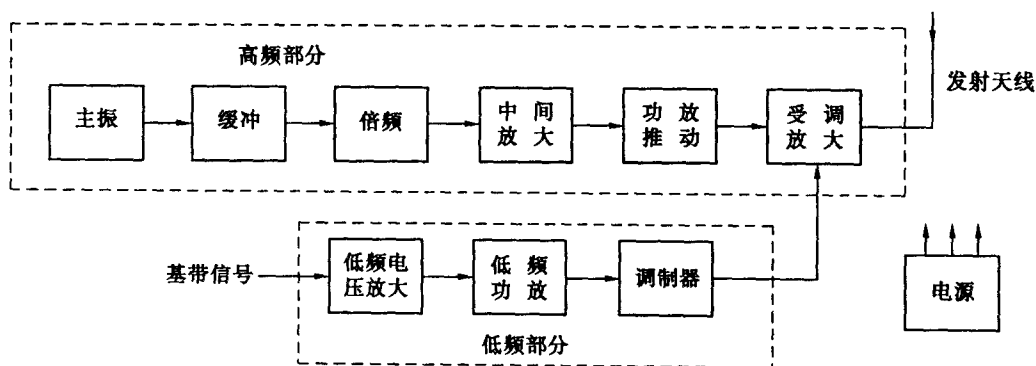


图 1.1-5 调幅发射机组成方框图

它包括三个组成部分:高频部分、低频部分和电源部分。

高频部分通常由主振、缓冲、倍频、中间放大、功率推动与末级功放(受调放大)组成。主振级的作用间产生频率稳定的载频信号。缓冲级是为减弱后级对主振级的影响而设置的。有时为了提高主振级的频率到所需的数值,缓冲级后要加一级或若干级倍频器。倍频级后加若干级放大器,以逐步提高输出功率,最后经功放推动级,使末级功放输出功率达到所需的发射功率电平,经发射天线辐射出去。

低频部分包括低频电压放大级、低频功放和末级低频功放。基带信号通过逐级放大,在末级功放处获得对高频末级功率放大器进行调制所需的功率电平,因此,末级低频功率放大级又称为调制器,末级高频功率放大级则称为受调放大器。

无线电信号的接收过程正好和发射过程相反。在接收端,接收天线将收到的电磁波转变为已调波电流,然后从这些已调波电流中选择出所需的信号进行放大和解调。这种直接放大式接收机的方框图,如图 1.1-6 所示。

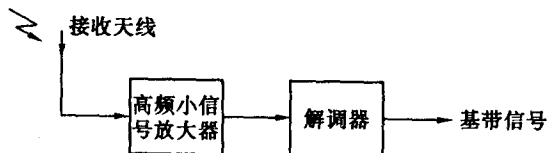


图 1.1-6 直接放大式接收机组成框图

图中高频小信号放大器通常以 LC 谐振回路为负载完成选频作用。由于直放式接收机的灵敏度和选择性都与工作频率有关(即波段性差),并受高频小信号调谐放大器级数限制,不能过高。因此,目前已不多用。图 1.1-7 所示的超外差式接收机克服了上述缺点,得到广泛应用。

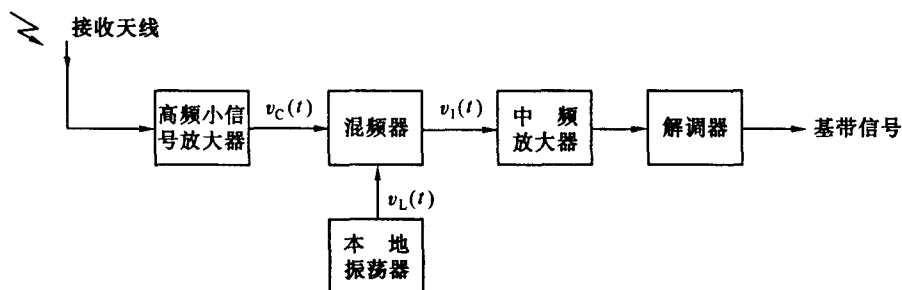


图 1.1-7 超外差式接收机组组成框图

超外差式接收机与直接放大式接收比较,增加了混频器、本地振荡器和中频放大器三种功能电路。混频器的作用是将接收到的不同频率的载波信号变换为固定频率的中频信号。其原理是:用本地振荡器产生的正弦振荡信号 $v_L(t)$ (其频率为 f_L) 与接收到的有用信号 $v_c(t)$ (其频率为 f_c) 在混频器中混频,得到中频信号 $v_1(t)$ (其频率为 f_1),通常选取 $f_1 = f_L - f_c$ 。这种作用就是所谓外差作用,也是超外差式接收机名称的由来。当输入信号频率变化时,使本地振荡器的频率也相应地改变,保持中频固定不变,因此中频放大器的增益和选择性都与接收信号的载频无关了。这就克服了直接放大式的缺点。在第 7 章中将证明,经混频后所得的中频信号仍是已调信号,且调制规律不变,即中频信号保留了输入信号中全部有用信息。当然,超外差式接收机电路比较复杂,还存在一些特殊的干扰现象(详见 7.3)这是超外差式接收机的缺点。

1.1.3 本书的研究对象和任务

通过本节的学习,我们已对无线电通信有了一个极粗浅的了解。本书将要讨论的“高频电子线路”究竟包括哪些电路呢?它们都有什么功用?

这可借助图 1.1-5 和图 1.1-7 来说明。在发送机中的主振、倍频、高频功率放大、受调放大(调制)电路和接收机中的高频小信号放大、混频、本地振荡、中频放大、解调电路等,都属高频电子线路的研究对象。它们除了在现代通信系统中占据着“举足轻重”的作用外,还广泛地应用于其他电子设备中。

本书的主要任务是讨论以集总参数为限的上述各高频电子线路的基本组成、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、低噪声电路方面的内容。

在上述电路中,除高频小信号放大和中频放大电路属线性电路外,其余者均属非线性电路,作为学习本书的基础知识,有必要首先对选频电路、晶体管高频等效电路和非线性电路的特点进行讨论。

1.2 选频电路

在无线电通信系统中,无论是从自由空间电磁波中接收已调波,还是利用非线性电路实现频率变换,都需要从众多不同频率信号中选出有用信号,抑制无用信号(干扰和噪声),以提高系统信号的质量和抗干扰能力。这一任务是由选频电路来完成的。

1.2.1 对选频电路的要求

在通信电路中,多数情况下,信号本身不是单一频率的信号,而是占有一定频带宽度的频谱信号。这就要求选频电路的通频带宽度应与它所传输信号有效频谱宽度相适应。为不引入信号的幅度失真,理想的选频电路通频带内的幅频特性 $H(f)$ 应满足

$$\frac{dH(f)}{df} = 0 \quad (1.2-1)$$

为抑制通频带外的干扰,选频电路通频带外的幅频特性 $H(f)$ 应满足

$$H(f) = 0 \quad (1.2-2)$$

显然,理想的幅频特性应是矩形,如图 1.2-1 中虚线所示。其纵坐标是 $\alpha(f) = H(f)/H(f_0)$,称为归一化谐振函数。

实际幅频特性只能是接近矩形,如图 1.2-1 中实线所示。接近的程度与选频电路本身结构形式有关。通常用矩形系数 $K_{r0.1}$ 表示,其定义为

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (1.2-3)$$

式中, $2\Delta f_{0.7}$ 为 $\alpha(f)$ 由 1 下降到 $1/\sqrt{2}$ 时,两边界频率 f_1 与 f_2 之间的频带宽度,称为通频带,即

$$2\Delta f_{0.7} = f_1 - f_2 = 2(f_1 - f_0) \quad (1.2-4)$$

$2\Delta f_{0.1}$ 为 $\alpha(f)$ 下降到 0.1 处的频带宽度。显然,理想矩形系数 $K_{r0.1} = 1$,实际矩形系数均大于 1。

信号通过选频电路,为不引入信号的相位失真,要求在通频带范围内选频电路的相频特性应满足

$$\frac{d\varphi(f)}{df} = \tau$$

即信号有效频带宽度之内的各频率分量通过选频电路之后,都延迟一个相同时间 τ ,这样才能保证输出信号中各频率分量之间的相对关系与输入信号完全相同,否则,将引起相位失真,使波形变形。

实际上,完全满足上述要求并非易事,往往只能进行合理的近似。

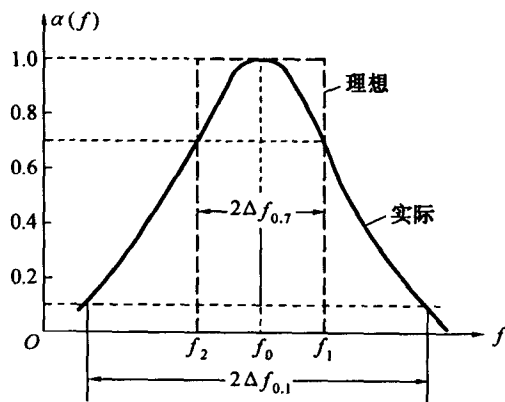


图 1.2-1 理想与实际幅频特性

1.2.2 选频电路的分类

在通信电路中,选频电路与非线性频率变换电路是两大主要组成部分。根据它们实现的功能不同,两者之间的组合形式也是各不相同的。对选频电路本身而言,按其功能可分为低通滤波电路、带通滤波电路、高通滤波电路、带阻滤波电路等。按其工作原理可分为谐振式选频电路、集中选频电路、陶瓷滤波器、声表面波滤波器、晶体滤波器等。

下面将介绍谐振式选频电路的一些特点和结论,其他形式选频电路在第2章中介绍。

1.2.3 谐振式选频电路

利用 LC 振荡回路所呈现的谐振特性来实现选频功能的电路,称为谐振式选频电路,简称为谐振回路。

1. LC 串联谐振回路及其选频特性

图 1.2-2 为电感 L 、电阻 r 、电容 C 和外加电动势 $\dot{V}_s$ 组成的串联谐振回路。图中 r 通常是电感线圈的损耗电阻,电容的损耗很小,可以忽略。

(1) 串联回路阻抗

由图 1.2-2 可知串联回路阻抗为

$$Z = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = r + jX = |Z| e^{j\varphi_Z} \quad (1.2-5)$$

式中

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$|Z| = \sqrt{r^2 + X^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

$$\varphi_Z = \arctan \frac{X}{r} = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}$$

分别为回路电抗 X 、回路阻抗模值 $|Z|$ 和回路阻抗角 φ_Z 。它们与角频率 ω 的关系曲线分别示于图 1.2-3 中(a)、(b) 和(c)。

使回路阻抗 Z 呈现纯阻性的角频率,称为谐振角频率,以 ω_0 表示,显然

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad \text{或} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.2-6)$$

只决定于回路本身参数,与激励源无关,称为回路固有谐振角频率。

令

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (1.2-7)$$

称 ρ 为回路的谐振特性阻抗。

由图 1.2-3 可见,当 $\omega = \omega_0$ 时, $X = 0$, $|Z| = r$, Z 呈电阻性, $\varphi_Z = 0$; 当 $\omega > \omega_0$ 时, $X > 0$, $|Z| > r$, Z 呈电感性, $\varphi_Z > 0$; 当 $\omega < \omega_0$ 时, $X < 0$, $|Z| > r$, Z 呈电容性, $\varphi_Z < 0$ 。

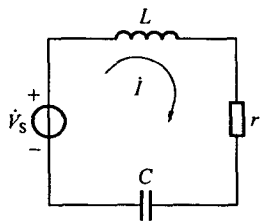


图 1.2-2 串联谐振回路

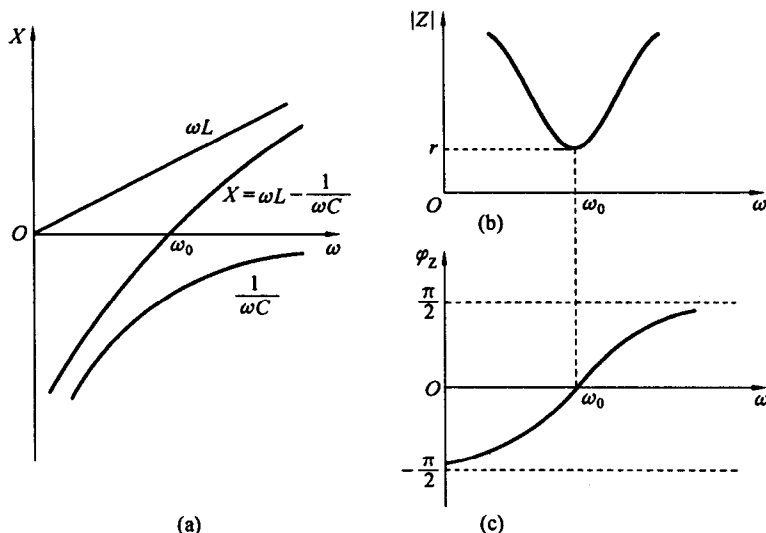


图 1.2-3 串联谐振回路阻抗特性

当激励源的角频率恰好等于回路固有谐振角频率时, $|Z|$ 呈现最小值, 回路电流值达到最大。若偏离谐振角频率, 则回路中电流值均要减小。正是利用这一现象实现选频功能的。

(2) 串联谐振回路幅频特性曲线

串联谐振回路中电流 I 的幅值随外加激励源 $\dot{V}_S$ 角频率变化的关系曲线表示式, 由图 1.2-2 可得

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_S}{Z} = \frac{\dot{V}_S}{r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\dot{V}_S}{|Z|} e^{-j\varphi_2} = I_m e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = I_m e^{j\varphi_1} \quad (1.2-8)$$

取其模值

$$I_m = \frac{|\dot{V}_S|}{|Z|} = \frac{V_{Sm}}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

I_m 与 ω 的关系曲线, 称为幅频特性, 如图 1.2-4 所示。

当 $\omega = \omega_0$ 时, $I_{m0} = \frac{V_{Sm}}{r}$ 最大。显然, I_{m0} 值因 r 不同而不同。为比较不同谐振回路的选频性能, 常采取归一化谐振曲线, 其定义为

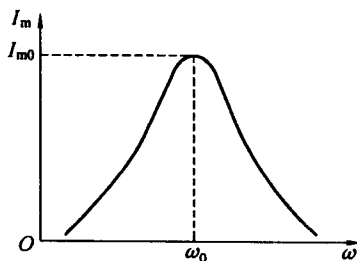


图 1.2-4 I_m 与 ω 关系曲线

$$\begin{aligned} \alpha = \frac{I_m}{I_{m0}} &= \frac{V_{Sm}}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \bigg/ \frac{V_{Sm}}{r} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{r^2}(\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 L^2}{r^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \end{aligned} \quad (1.2-9)$$

式中, $Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{\rho}{r}$ 为回路的固有品质因数; $\gamma = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$ 为回路的相对失谐; $\xi = Q_0 \gamma$ 为回路的广义失谐。

在 ω_0 附近(即 $\omega \approx \omega_0$), 相对失谐 γ 表示式可以简化

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega} \approx \frac{(\omega + \omega_0)(\omega - \omega_0)}{\omega_0^2} \approx \frac{2\omega_0 \Delta\omega}{\omega_0^2} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \\ \xi &= Q_0 \gamma \approx Q_0 \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.2-10)$$

其中 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 为绝对失谐量, 将式(1.2-10)代入式(1.2-9)中

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (1.2-11)$$

根据式(1.2-11), 可取不同的自变量画出其归一化的谐振曲线, 如图 1.2-5(a)、(b) 所示。

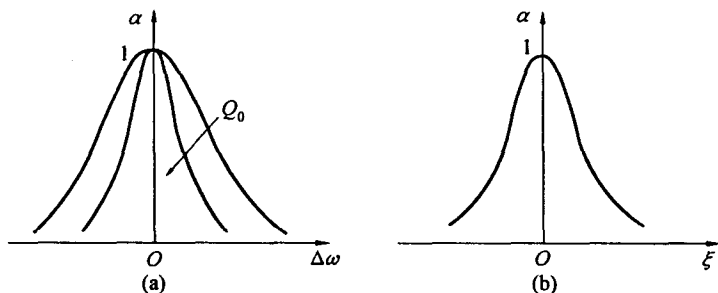


图 1.2-5 取不同自变量的归一化幅 - 频特性曲线

由图(a)可见, 回路品质因数 Q_0 的大小对谐振曲线形状影响很大。 Q_0 值越高, 曲线越尖锐, 选择性越好, 但其通频带也越窄, 反之亦然。因而选择性和通频带之间是矛盾的。图(b)为通用谐振曲线, 对任何不同参数的串联回路都是适用的。

从式(1.2-11)可求出串联谐振回路的通频带表达式, 令

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

解得

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_0} \quad (1.2-12)$$

当回路谐振频率 f_0 一定时, 通频带 $2\Delta f_{0.7}$ 与回路品质因数 Q_0 成反比。

(3) 串联谐振回路相频特性曲线

串联谐振回路中电流 i 的相位随外加激励源 $\dot{V}_s$ 角频率变化关系曲线, 称为相频特性曲线, 如设 $\varphi_s = 0$, 由式(1.2-8)可知, 回路中电流相角 φ_i 与回路阻抗相角 φ_z 的关系为

$$\varphi_i = -\varphi_z = -\arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = -\arctan Q_0 \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = -\arctan \xi \quad (1.2-13)$$