

——从无线广播说起

1.1 无线广播概述

广播,是通过无线电波或导线传送声音的新闻传播工具。通过导线传送节目的称为有线广播,通过无线电波传送节目的称为无线广播。广播又是靠声音来传播的,人耳能听到的声音频率范围是 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 。声音的魅力在于,它不仅传播了信息,还融入了传播方的特征,从而对人们理解、接受信息提供帮助。主持人主持节目的风格、对节目的把握,能大大增强节目的吸引力,他们对稿件的再创造、再提高,能对听众认识、理解、接受信息产生很大的影响。以声音为传播特色,其魅力还在于不受年龄和文化程度的限制,所以广播受众面特别广。广播还有可移动性和便携性,人们可以随时、随地、很方便地从广播中了解最新的信息。

在当今互联网时代,人们可以利用智能手机及网络获取大量信息,广播似乎是个过时的老古董,虽然少数老人还会延续收听广播节目的习惯,但对大多数人来说,偶尔才会收听广播,而年轻的学生们大概只有在进行英语听力考试时才会使用调频收音机收听试题广播。尽管如此,相比于其他任何媒体,只有广播技术能让人以最快的速度听到世界各地的消息。速度是网络的一大优势,对于一般的信息处理来说,互联网要快于广播。但是,对于重大事件、重要新闻,广播的传播速度要快于互联网。

20 世纪 20 年代,美国最早迎来广播大爆炸式发展,1920 年初,全美家庭听众只有 5000 名,18 个月后,300 万个家庭拥有了收音机,4 年后,这个数字变成了 5000 万。广播成为“即时大众传媒”的第一种形态。全国各地的人都可以获得即时、共享的体验,听广播剧、体育和音乐是当时的人们每天的一大乐事。广告商很快开始利用广播节目植入广告,电视的发展在很大程度上也要归功于广播的黄金时代,NBC(美国全国广播公司)、ABC(美国广播公司)、CBS(哥伦比亚广播公司)、BBC(英国广播公司)等主要广播公司至今仍是媒体行业的领头羊。很多音乐流派,如爵士乐和摇滚乐等,都是通过广播得以传播,广播对流行音乐、广告乃至整个文化都产生了巨大影响。

有趣的是,“广播”一词最初是个农业术语,指的是广播种,如此说来,这个词的逻辑就说得通了。无线广播技术随着电子器件的发展而突飞猛进,从电子管到晶体管,再到集成电路芯片,使得无线广播收发系统体积更小且性能更好。通信电子电路所涉及的内容就是围绕着无线广播收发系统的组成及功能电路展开的,相关的射频电路技术已广泛应用于当今无

线通信及各类无线监测中。因此,本章涉及的通信电子电路基础性案例内容,就从无线广播说起,介绍无线广播相关技术及功能电路。

1.1.1 我国早期的无线广播电台

1923年,美国人奥斯邦在上海创办的广播电台是中国境内最早的广播电台,该电台设在上海广东路大来洋行楼上,挂着“中国无线电公司”的招牌,发射功率为50W。

1926年,在奉系军阀的支持下,我国早期著名的无线电工程专家刘瀚主持创建的哈尔滨广播无线电台是中国人建立的官办广播电台。1928年8月,南京开办“中国国民党中央执行委员会广播无线电台”,简称“中央广播电台”,发射功率为500W。1940年12月30日创建的“延安新华广播电台”是中国共产党最早的广播电台,1947年3月改称陕北新华广播电台。1949年3月25日,陕北新华广播电台迁到北平,同年12月5日,定名为“中央人民广播电台”。

延安新华广播电台的建立,在中国广播事业史上具有特殊的历史意义。1930年8月红军攻打长沙时,由于没有无线电台,部队之间没有联系,损失惨重。随后,毛泽东给中央写报告指出“红军必须有自己的无线电台”。四个月后的一个战斗中,红军缴获了一部无线电台,但由于发报电子管损坏而成为不能发报、只能收报的半部电台,俘虏收编的10个报务员成为红军最早的无线报务人才,他们将半部电台修复,红色电波从此开始发射并影响世界。

“延安声音”向世界传播的发展过程中,得到英国友人林迈可的鼎力帮助,毕业于牛津大学的林迈可受聘在燕京大学做经济学导师,他利用自己的特殊身份,积极帮助八路军购买医药品和无线电台零件,太平洋战争爆发后,他来到晋察冀抗日根据地担任通讯部门顾问,一直从事电台设备的整修改进和教学工作,他利用自学的无线电知识,借助缴获的日军器材,制作了上百部形式各异的电台,帮助中共重建无线电站,加强了电话与电报的收发能力。在烽火连天的岁月里,情报工作至关重要。为保障部队通信联络畅通,晋察冀军区举办了无线电训练班。林迈可在无线电训练班的基础上设立无线电研究班,为我党、我军培养了大批通信事业骨干。1944年5月,林迈可到达延安,毛泽东主席、朱德总司令和叶剑英参谋长非常关心他的工作,任命他为18集团军通讯部的无线电通讯顾问,除继续做好通信工作外,他还帮助新华社创建英文广播,用英文撰稿和向国外发稿,介绍解放区的真实情况,并设计建造了600W的大型发报机和定向天线,实现了首次对外广播,将“延安声音”传向世界。

中华人民共和国成立后,无线广播电台遍布各省市自治区直辖市,有些乡镇及村也建立了小型的无线或有线广播站。但在相当长的时期里,播出内容以新闻为主,收音机也并不普及。改革开放以后才迎来广播事业的大发展,人们围在收音机旁听广播剧“夜幕下的哈尔滨”、评书“岳飞传”等节目成为一道风景,广播的普及也带动了电视、电话及通信技术的巨大需求。在当今,我国信息技术领域紧跟世界科技潮流,迎来互联网时代5G应用新机遇,成为5G技术领先的国家。

1.1.2 无线广播信号发射系统——广播电台

所谓无线广播信号发射系统,就是播送语言及音乐节目的无线电台,包括播控中心、发

射台以及相应的附属设施。

广播电台播出节目时首先把声音通过话筒转换成音频电信号,经放大后对高频信号(载波)调制,这时高频载波信号的某一参量随着音频信号作相应的变化,如高频载波信号的幅度随音频信号变化成为调幅(Amplitude Modulation, AM)信号,高频载波信号的频率随音频信号变化成为调频(Frequency Modulation, FM)信号,使要传送的音频信号包含在高频载波信号之内,产生调幅广播或调频广播信号,已调频或已调幅的高频信号再经功率放大,其高频电流流过天线时,形成无线电波向外发射,无线电波传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,在无线电台发射功率覆盖范围内的接收机,就可以收听到电台播出的节目。无线广播电台组成如图 1-1 所示。

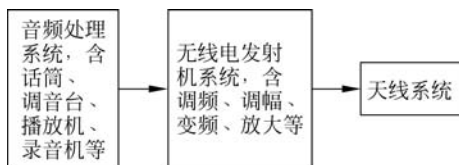


图 1-1 无线广播电台组成

图 1-1 中,音频处理系统是电台播控中心的主要设备,再经无线广播发射机和天线将节目内容发射到空间。其中,话筒、播放机和录音机播出的音源,变成音频电信号后由调音台进行放大处理。调音台又称调音控制台,它将多路输入信号进行放大、混合、分配、音质修饰和音响效果加工,之后再通过母线输出。调音台是现代电台广播、舞台扩音、音响节目制作等系统中进行播送和录制节目的重要设备。无线广播发射机系统中包含高频载波信号产生、调幅及调频、高频功率放大等电路,高频信号的产生包括晶体振荡器、频率合成、锁相环等方式;调频及调幅电路将音频节目信号装载到高频载波上,使得高频载波携带着节目内容;高频功率放大包含激励、选频、阻抗匹配等电路,使高频信号传输到天线发射出去。

任何一个广播电台,无论其规模大小(国家电台、省级电台、市级电台、县级电台、乡级电台、村级电台、校园电台、企事业单位电台、部队营房电台等),都由音频播控设备、无线发射机及发射天馈线组成。覆盖范围大的电台,需要发射功率大的无线发射机、高增益的发射天线且架设在离地面高的地方;而覆盖范围小的电台,则需要发射功率小的无线发射机、增益合适的天线且架设在合适的高度上。

调幅(AM)及调频(FM)指的是无线电学上的两种不同调制方式。一般中波广播多采用调幅(AM)的方式,因此人们常常将中波和 AM 之间画上等号,实际上中波只是诸多利用 AM 调制方式的一种广播,在高频($3 \sim 30 \text{ MHz}$)中的国际短波广播所使用的调制方式也是 AM,甚至比调频广播更高频率的航空导航通信($116 \sim 136 \text{ MHz}$)也采用 AM 的方式,只是我们日常所说的 AM 波段指的就是中波广播。

通常,我们用 FM 来指一般的调频广播($76 \sim 108 \text{ MHz}$,我国为 $87.5 \sim 108 \text{ MHz}$ 、日本为 $76 \sim 90 \text{ MHz}$)。FM 是另一种调制方式,即使在 $27 \sim 30 \text{ MHz}$ 的短波范围,作为业余电台、太空、人造卫星通信应用的波段,有的也采用 FM 方式。

按调频发射机的使用场合可分为专业级调频发射机和业余级调频发射机,专业级主要用于专业广播电台和对音质、可靠性要求较高的场合,而业余级主要用于非专业电台和对音质和可靠性要求一般的场合;按广播方式可分为立体声广播和单声道广播;按调频发射机

的电路原理可分为模拟调频发射机和数字调频发射机。

各电台发射的高频载波信号的中心频率遵循无线电委员会规定的广播频段,广播频段是一种通信术语,是为防止无线电台间的相互干扰,经国际协议统一划分的用于无线电广播的频率范围。在我国,中波广播的频率(高频载波频率)范围为 525~1605kHz,短波的频率范围为 3500~18000kHz,短波广播频段则为 1.5~30MHz,调频广播的国际标准频段为 88~108MHz 的甚高频波段。甚高频电视频段为 48.5~72.5MHz,76~92MHz 及 167~223MHz,超高频电视频段为 470~700MHz。

无线电爱好者 DIY 搭建无线发射系统时,可利用相应的调制模块工作在开放的业余频段内,并限定在低功率下进行调试实验,以减少对其他设备的影响。无线发射系统的基本组成如图 1-2 所示。

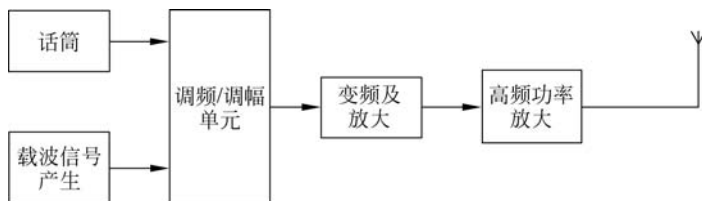


图 1-2 无线发射系统的基本组成

经天线发射的无线电波是由一点向空间中沿直线传播的(就像水波纹),若收、发信机之间有阻挡物或者距离太远被地球阻挡(地球是有曲率的),则利用地球大气层中的电离层反射实现通信。电离层罩住了整个地球,就像天然的发信机“反光镜”,如果在 A、B 两点收发通信,当 A、B 两点不能直线连接时,可以通过 A 到电离层再到 B 的方式进行通信(反之亦然),我们收听的短波无线电广播就是利用这个原理。所以只要发送端的发射功率足够大,接收端的接收器足够灵敏,发送端和接收端的距离就可以足够远。不过现在有通信卫星了,卫星也可以起到“反光镜”的作用,而且卫星还可以进行信息处理。

1.1.3 无线广播接收系统——收音机

要接收无线广播电台发射的节目信号,往往采用收音机等终端设备来收听广播,但一般只能收听到有限的几个频道。通常,大家所见到的收音机或收录音机上都有 AM 及 FM 波段,这两个波段是用来收听国内广播的,若收音机上还有 SW 波段,则除了国内短波电台之外,还可以收听到世界各国的广播电台节目。SW 是对短波的一种简单称呼,正确的说法应该是高频(High Frequency, HF)。以波长而言,中波(Medium Wave, MW)的波长为 200~600m,而 HF 的波长为 10~100m,与 MW 的波长相比较,HF 的波长的确短了些,因此就把 HF 称为短波(Short Wave, SW)。同样地,比 MW 频率更低的 150~284kHz 这一段频谱也是作为广播用的,波长为 1000~2000m,与 MW 的 200~600m 相比较显然“长”多了,因此就把这段频谱的广播称为长波(Long Wave, LW)。实际上,不论 LW、MW 或 SW,都采用 AM 调制方式。对一般收(录)音机而言,FM、MW、LW 波段是收听国内广播用的,但我国目前没有设立 LW 电台,而 SW 波段则主要用于收听国内/国际远距离广播。

电台发射的无线电波被收音机天线接收,然后经过放大、解调,还原为音频电信号,送入

喇叭音圈中,就可以还原为声音,人们就可以收听到广播节目内容了。广播电台节目有 FM 制和 AM 制方式发送的,收音机则需要针对不同的调制方式信号进行解调,对调频信号解调需要鉴频电路,对调幅信号解调需要检波电路。此外,由于调幅信号和调频信号的工作频段不同,两种制式收音机的具体电路也有所不同,但收音机的各功能模块是类似的,目前的收音机大多集调幅和调频一体化,可分别收听调频和调幅电台,接收解调后的音频电路是共用的。调幅收音机的组成框图如图 1-3 所示。

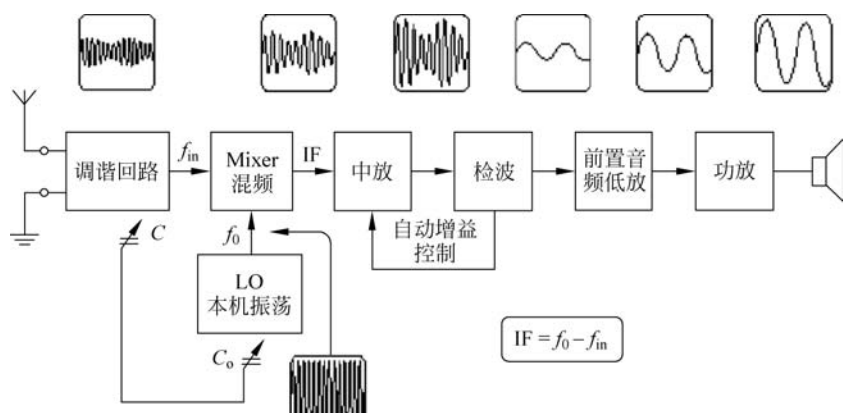


图 1-3 调幅收音机组成框图

图 1-3 是单次变频超外差式收音机的原理方框图。所谓超外差,就是本机振荡频率始终高出接收频率一个中频,且中频固定。混频器只改变已调信号的载波频率,而不改变已调信号振幅的变化规律,因此中频已调信号仍然携带着基带信号的信息。中频已调信号再经过若干级中频放大器放大后送入检波器,检波器实现解调功能,得到低频调制信号。最后再经低频及功率放大后送入扬声器(或耳机)转变为音频信号。

超外差式接收机的核心是混频器。混频器的作用是将接收到的不同载波频率转变为固定的中频,应当指出,无论如何去调谐接收机,中频是永远不变的。为保证本振频率始终高出接收频率一个固定的中频,必须使天线预选回路和本机振荡回路实现统调,统调的最简单办法就是让预选回路电容和本振回路电容采用一个同轴的双联可调电容。

采用超外差式接收机方案后,将接收机的总增益分散到了高频、中频和基带三个频段上。而且,载频降为中频后,在较低的固定中频上做窄带的高增益放大器要比在载波频段上做高增益的放大器容易和稳定得多。

图 1-3 中,接收天线将空间的高频调幅波感应接收送入调谐回路模块,由调谐回路从众多的信号中选出想要收听的电台信号 f_{in} (某电台载波频率),然后送入混频模块,另一个送入混频模块的信号是由本机振荡电路产生的等幅振荡信号,其频率 f_0 比接收到的电台信号频率高 465kHz,使得混频输出信号的载波频率是本机振荡信号频率和电台接收信号频率的差频 465kHz,这个差频称为中频 IF,即中频=本振频率(f_0)-电台频率(f_{in}),这是一个固定中频,不论接收哪个电台信号,本振频率始终超出电台频率一个中频,所以调整选择电台频率时也要同步调整本机振荡频率,图中的电容 C_0 和 C 分别作为本振回路和输入回路的调谐电容同步调谐,混频后的中频都是 465kHz,这样,处理接收信号频率的接收机也称为超外差式接收机。需要注意的是,混频电路模块只是完成输入电台载波频率的变换,混

频输出信号仍为调幅波,其包络与天线接收到的电台信号包络一致,从图中波形示意图可知,原来的音频包络线并没有改变。由于混频输出的信号幅度很小,因此混频后往往设有多级中频放大电路,由于这里只需要对固定频率的中频进行放大,放大器的放大增益和选频滤波技术指标都比较理想,且实现技术简单,可以大大提高整机灵敏度,同时也为后续大信号检波电路提供幅度足够的信号;自动增益控制电路在检波输出和中放电路之间构成了一个反馈环,来控制中放电路的增益,以防止接收较强电台信号时产生失真。检波电路是调幅波的解调器,它把中频调幅波中的音频包络解调出来,检波电路输出的音频信号经前置音频低放电路和功率放大电路放大后,送入扬声器还原成声音,从而完成整个电台节目内容的接收过程。

调频收音机的组成框图如图 1-4 所示。调频收音机组成框图和调幅收音机大同小异,除了解调电路由鉴频器代替检波器外,其他功能模块的作用是相同的,但天线感应接收的频率和调幅收音机不同,混频后的中频频率也不同,调频收音机中混频后的中频是 10.7MHz。

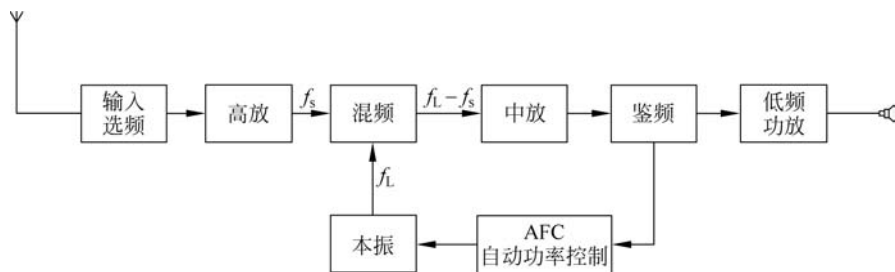


图 1-4 调频收音机的组成框图

综上所述,无线广播电台发射机和相应接收机系统是无线收发系统的最基本组成,现代无线通信过程中的信号处理离不开高频载波信号产生(振荡器、锁相环及频率合成)、幅度调制与检波、频率调制与鉴频、高频功率放大、调谐滤波、混频、中频放大、音频放大及处理等电路,而这些信号处理技术也广泛应用于移动通信、无线对讲、遥控遥测、物联网无线监测及智能电子产品中。

1.1.4 拓展阅读

广播这个词汇在当今互联网通信技术中,有了更多的含义。

1. 网络广播

如今很多电台都提供了互联网收听服务,很多网站都收集了这些电台的收听地址,用户可以通过互联网在线收听广播节目,这就是网络广播。

网络广播应该说是一种网络流媒体,它通过在 Internet 站点上建立广播服务器,运行特定软件再把节目传播出去,我们通过在自己的计算机上安装和运行广播接收软件连接这些站点,就可方便地收听广播节目,还可阅读广播信息。

在宽带网络技术日新月异的今天,网络广播的实现相对容易,且设备投资相对较少,因而具有先天的优势,世界各国媒体竞相发展网络广播。网络广播有直播和点播两种主要播放形式。

直播(Live)主要应用于重大活动的即时报道。它就是电台或电视台实际播出节目的网上传输形式,其优点是时效性强,生动实际,而且用户可在第一时间获取信息。

点播(On-demand Audio/Video)是将节目根据内容做成一个个片段,人们可根据标题或分类选择所喜爱的片段来收听收看。这种播放形式具有节约资源的优点,而且选择性和针对性也更强。

信息时代三大技术——数字技术、网络技术和卫星技术——在传媒中的运用,使广播媒体成为最大的受益者,也使广播实现真正意义上的“广为传播”。

数字音频广播音质纯净如同激光唱盘,使广播的娱乐功能更加完美;而且数字音频广播抗干扰性很强,在移动中收听也没有杂音,符合人们在移动中收听的新需求。在广播的采访、编辑、制作和播出等方面,数字化的工具和设备不断出现。2000年3月,世广卫星“亚洲之星”发射成功,亚洲之星一个波束的覆盖面积是1400万平方千米,可以覆盖中国全部的国土。在世广卫星服务范围内的人,只用一个小小的接收器,就能够从卫星上直接收听广播。广播的“广为传播”不再是一件困难的事。

走上互联网的广播扩大了传播范围,网络广播融会了互联网与音频广播的优点,使广播节目能保存、有文字、可点播、随意检索与下载,并大大增加了信息量。

2. 计算机网络数据包传输中的广播

在计算机网络中,广播(broadcast)是指数据包在计算机网络中传输时,目的地址为网络中所有设备的一种传输方式。实际上,这里所说的“所有设备”也是限定在一个范围之内,称为“广播域”。

并非所有的计算机网络都支持广播,例如X.25网络和帧中继都不支持广播,而且也没有在“整个互联网范围中”的广播。IPv6亦不支持广播,广播相应的功能由多播代替。

通常,广播都是限制在局域网中的,比如以太网或令牌环网,因为广播在局域网中造成的影响远比在广域网中小得多。

广播分为二层广播和三层广播。

二层广播也称硬件广播,用于在局域网内向所有的节点发送数据,通常不会穿过局域网的边界(路由器),除非它变成一个单播。广播的目的地址是一个二进制的全1或者十六进制全F的IP地址(255.255.255.255)。

三层广播用于在某个网络内向所有的节点发送数据,三层广播也支持平面的老式广播。广播信息是指以某个广播域所有主机为目的地的信息,这些称为网络广播,它们所有的主机位均为ON。

一个数据帧或包被传输到本地网段(由广播域定义)上的每个节点就是广播;由于网络拓扑的设计和连接问题,或其他原因导致广播在网段内大量复制、传播数据帧,导致网络性能下降,甚至网络瘫痪,这就是广播风暴。

其实广播风暴多是出现在以Hub连接的容易产生环形连接的局域网中,如果用路由器和交换机的树形连接设计,可以有效防止广播风暴的产生。

在主干网上,路由器的主要作用是路由选择。主干网上的路由器,必须知道到达所有下层网络的路径,这需要维护庞大的路由表,并对连接状态的变化做出尽可能迅速的反应。路由器的故障将会导致严重的信息传输问题。在局域网内部,路由器的主要作用是分隔子网。随着网络规模的不断扩大,局域网演变成以高速主干和路由器连接的多个子网所组成的网络。各个子网在逻辑上独立,而路由器就是唯一能够分隔它们的设备,它负责子网间的报文转发和广播隔离,在边界上的路由器则负责与上层网络的连接。

1.2 滤波器

滤波器是一种用来减少或消除干扰的电气部件,其功能是将输入信号进行过滤处理得到所需的信号。在电信发展的早期,滤波器在电路中就扮演着重要的角色,并随着通信技术的发展而不断发展。1915年,德国科学家Wagner开创了Wagner滤波器的设计方法,与此同时,美国的Campbell发明了一种以镜像参数法而知名的设计方法。1917年,美国和德国科学家分别发明了LC滤波器,这直接导致了美国第一个多路复用系统的出现。1933年,Mason展示了一种石英晶体滤波器,这种滤波器具有优异的温度稳定性和低损耗特性,很快就成为通信器材中不可或缺的重要元件。陶瓷滤波器的某些性能虽然不如石英晶体滤波器优异,但由于其低成本而得到实际应用。1947年,美国的Roberts在 BaTiO_3 陶瓷上施加高压获得了压电陶瓷的电压特性。1955年,美国的B. Jaffe等发现了比 BaTiO_3 压电性更优越的PZT压电陶瓷,促使压电器件的应用研究又大大地向前推进了一步,特别是用作压电陶瓷滤波器和谐振器。压电陶瓷除具有压电性外,还具有介电性、弹性等,已被广泛应用于医学成像、声传感器、声换能器、超声马达等。压电陶瓷是利用材料在机械应力作用下,引起内部正负电荷中心相对位移而发生极化,导致材料两端表面出现符号相反的束缚电荷即压电效应而制作的。压电陶瓷具有敏感的特性,主要用于制造超声波换能器、水声换能器、电声换能器、陶瓷滤波器、陶瓷变压器、陶瓷鉴频器、高压发生器、红外探测器、声表面波器件、电光器件、引燃引爆装置和压电陀螺等。声表面波(SAW)技术是20世纪60年代末期才发展起来的一门新兴科学技术领域,它是声学 and 电子学相结合的一门边缘学科。声表面波技术的发展相当迅猛,其应用领域从最开始的军用雷达发展到现在几乎遍及整个无线电通信,特别是移动通信技术的高速发展,更进一步地推动了声表面波技术的发展。声表面波滤波器(SAWF)是利用压电陶瓷、铌酸锂、石英等压电石英晶体振荡器材料的压电效应和声表面波传播的物理特性制成的一种换能式无源带通滤波器。SAWF广泛应用于彩色电视机、手机、GPS定位、卫星通信和有线电视等电气设备。

自20世纪60年代起,由于计算机技术、集成工艺和材料工艺的发展,滤波器的发展上了一个新台阶,并且朝着低功耗、高精度、小体积、多功能、稳定可靠和价格低廉的方向发展。20世纪70年代后期,RC有源滤波器、开关电容滤波器、电荷转移器和数字滤波器等几种滤波器的单片集成芯片已经被研制出来并得到应用。21世纪初,左手媒质滤波器出现,这种材料的滤波器具有体积更小、群延迟更小的特性。

滤波器最常见的用法是对特定频率的频点或该频点以外的频率信号进行有效滤除,从而实现消除干扰、获取某特定频率信号的功能。一种更广泛的定义是将有能力进行信号处理的装置都称为滤波器。滤波器的应用非常广泛,其性能优劣在很大程度上决定了产品的优劣。

滤波器的分类方法有很多种,从处理信号形式来区分,可以分为模拟滤波器和数字滤波器。模拟滤波器由电阻、电感、电容、运算放大器等分离元件组成,可以对模拟信号进行处理。数字滤波器则通过软件或数字信号处理器对离散化的数字信号进行滤波处理。随着数字信号处理器件性能的不提高,数字滤波器技术应用越来越广泛。综合起来,与模拟滤波器相比,数字滤波器主要有以下特点:

(1) 数字滤波器是一个离散时间系统。应用数字滤波器处理模拟信号时,首先必须对

输入的模拟信号进行频带限制、抽样和模/数转换。数字滤波器输入信号的抽样频率应大于被处理信号带宽的 2 倍。为得到模拟信号,数字滤波器处理的输出数字信号必须经数/模转换和平滑处理。

(2) 数字滤波器具有比模拟滤波器更高的精度。例如,数字滤波器能够做到一个 1kHz 的低通滤波器允许 999Hz 信号通过,并且完全阻止 1001Hz 的信号。而模拟滤波器无法区分这么接近的信号。

(3) 数字滤波器具有比模拟滤波器更高的信噪比。因为数字滤波器是用数字器件执行运算的,从而避免了模拟电路中噪声的影响。

(4) 数字滤波器的可靠性高。组成模拟滤波器的电子元件的特性会随着时间、温度、电压等因素的变化而发生漂移,而数字电路就没有这种问题。只要在数字电路的工作环境下,数字滤波器就能够稳定可靠的工作。

(5) 数字滤波器的处理能力受到系统采样频率的限制。根据奈奎斯特采样定理,数字滤波器的处理能力受到系统采样频率的限制。如果输入信号的频率分量包含超过滤波器采样率 1/2 倍的频率分量时,数字滤波器将因为频率的混叠而无法正常工作。

按照处理信号的成分进行分类,可以分为频域滤波和时域滤波。频域滤波就是频率选择性网络传输函数特性 $H(\omega)$ 对信号频率特性的限制。滤波器的作用是让信号在通频带内的频率分量通过,让在截止频带内的频率分量不能通过,或使其受到尽可能大的衰减。时域滤波形式上是对时间波形的直接处理。

根据所用器件进行区分可以分为有源滤波器 and 无源滤波器,单纯由电阻、电容、电感等无源器件构成的滤波器称为无源滤波器。在电力系统中,无源滤波器技术就是利用滤波器的谐振电路,使谐波在源头就被旁路掉,从而保证系统的稳定运行。有源滤波电路由电阻、电容和集成运算放大器组成,又称为有源滤波器。有源滤波器能够在滤波的同时还能对信号起放大作用,这是无源滤波器无法做到的。有源滤波器目前已实现了集成化。

通信电子电路中的滤波器,担负着选择频率或频段的重任,如同信号处理各阶段的频率门,这扇门允许符合要求的频率通过并阻挡不符合要求的频率成分,如低通滤波器是保留比截止频率低的信号频率成分,同时阻挡并衰减比截止频率高的所有信号频率成分,如图 1-5(a)

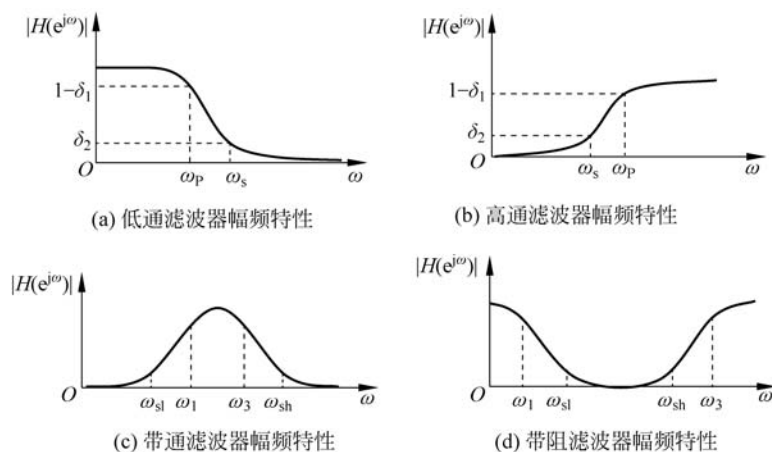


图 1-5 几种常用滤波器的幅频特性

所示；而高通滤波器的作用正好与低通滤波器相反，如图 1-5(b) 所示；应用最为广泛的带通滤波器，也称选频滤波器或选频电(回)路，只允许指定的频率成分通过，这些频率成分根据信号的不同处理要求可以是宽范围的也可以是窄范围的，所以带通滤波器可以是宽带选频滤波器或窄带选频滤波器，如图 1-5(c) 所示；陷波器，也称为带阻滤波器，其作用与带通滤波器正好相反，如图 1-5(d) 所示。

1.2.1 低通滤波器

低通滤波器有很多种(见图 1-6)，其中最通用的就是巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器。

1. 巴特沃斯滤波器

巴特沃斯滤波器是滤波器的一种设计分类，它采用巴特沃斯传递函数分为高通、低通、带通、带阻等多种滤波器类型。巴特沃斯滤波器在通频带内外都有平稳的幅频特性，但有较长的过渡带，也称为最平响应滤波器。它在过渡带上很容易造成失真。这种滤波器最先由英国工程师巴特沃斯(Stephen Butterworth)在 1930 年发表于英国《无线电工程》期刊的一篇文章中提出。

巴特沃斯滤波器的传递函数为：

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}} \quad (1-1)$$

式中， n 为滤波器的阶数； ω_c 为截止频率，等于振幅下降 3dB 时的频率； ω_p 为通频带边缘频率； $|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1+\epsilon^2}$ 是在通频带边缘的数值。

巴特沃斯低通滤波器的幅频特性如图 1-7 所示。

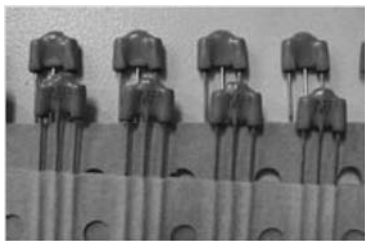


图 1-6 低通滤波器实物图

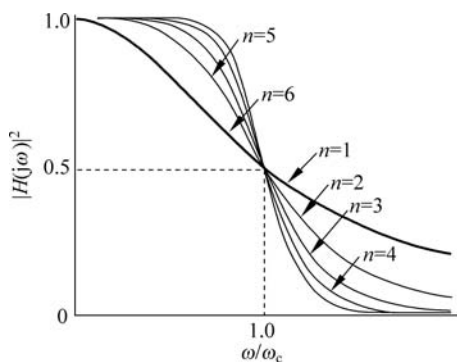


图 1-7 巴特沃斯低通滤波器的幅频特性

图 1-7 展示了不同阶数字滤波器的幅频特性。可见阶数 n 越高，滤波器的幅频特性越好，低频检测信号保真度越高。

一阶巴特沃斯滤波器的衰减率为每倍频 6dB，每十倍频 20dB。二阶巴特沃斯滤波器的衰减率为每倍频 12dB，三阶巴特沃斯滤波器的衰减率为每倍频 18dB，依此类推。巴特沃斯

滤波器的振幅对角频率单调下降,并且也是唯一的无论多少阶数,振幅对角频率曲线都保持同样形状的滤波器。只不过滤波器阶数越高,在阻频带振幅衰减速度越快。其他滤波器高阶的振幅对角频率图和低阶的振幅对角频率图有不同的形状。

典型的 RC 无源低通滤波器如图 1-8 所示。

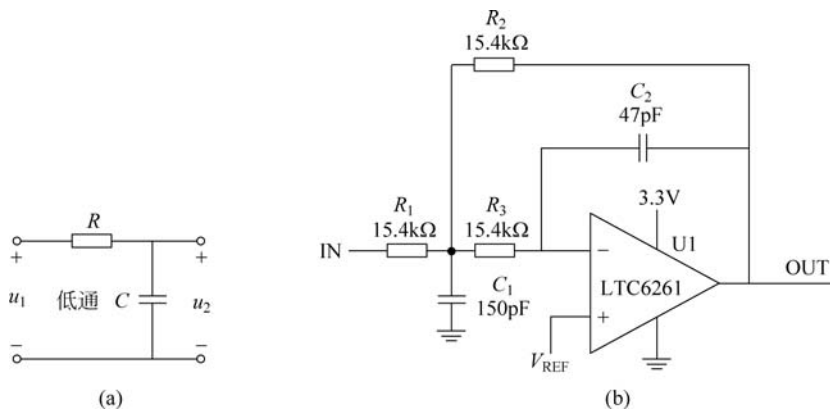


图 1-8 RC 无源低通滤波器

图中的截止频率 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$; s 传输函数表示为 $H(s) = \frac{1/RC}{s + 1/RC}$ 。

图 1-9 是一个四阶巴特沃斯有源低通滤波器。

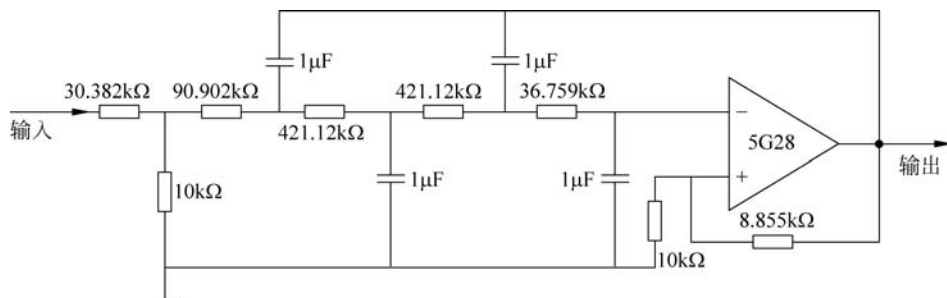


图 1-9 四阶巴特沃斯有源低通滤波器

这个四阶巴特沃斯有源低通滤波器适用于滤除直流电平信号上的甚低频随机脉冲噪声干扰电压,其截止频率(-3dB)约为 8Hz ,在 18Hz 处,增益下降 20dB 。通带内固有衰减为 0.467 。输入电阻约为 $40\text{k}\Omega$ 。滤波器网络电阻均采用数个金属膜精密电阻串联而成。如果其中的 $1\mu\text{F}$ 电容能达到相当精度,则截止频率 f_c 接近理论值。

2. 切比雪夫滤波器

切比雪夫滤波器也是滤波器的一种设计分类,它采用切比雪夫传递函数,有高通、低通、带通、高阻、带阻等多种滤波器类型。与巴特沃斯滤波器相比,切比雪夫滤波器的过渡带很窄,但内部的幅频特性却很不稳定,也称为等波纹型滤波器。电路如图 1-10 所示。

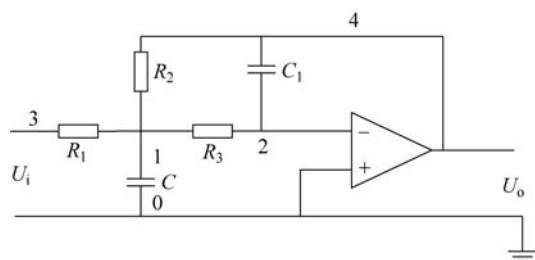


图 1-10 切比雪夫滤波器电路图

1.2.2 应用举例

各级音频信号的解调电路的末级都需要用到低通滤波器,例如解调 AM 信号所需要的包络检波电路,如图 1-11 所示。

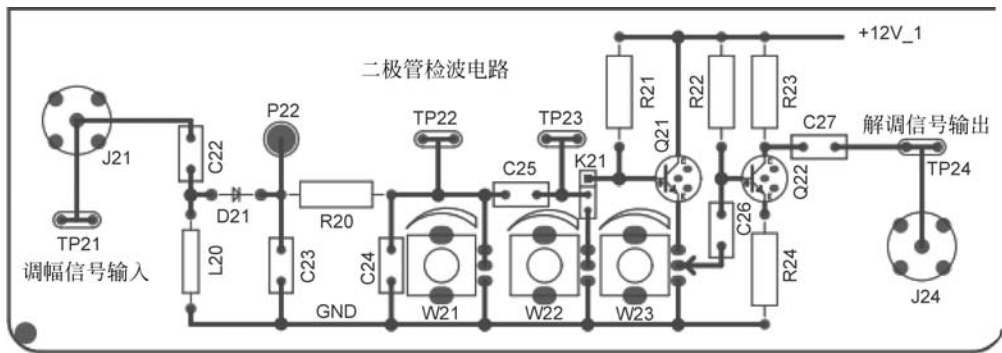


图 1-11 包络检波电路



图 1-12 正弦滤波器实物图

图 1-11 中,D21 为检波二极管,C23、R20、C24 构成低通滤波器,可以滤除高频信号,输出低频信号。

变频器与逆变电源由于采用的是交直流方式工作,它们的输出端含有大量高次谐波,造成电压波形畸变,严重影响用电设备正常工作甚至使用寿命。正弦滤波器采用谐振电路的方式滤波,能够有效改善电压波形,使输出波形达到近似正弦波的状态,从而提高电能质量以及用电设备的寿命,其实物图如图 1-12 所示。

1.2.3 带通滤波器

带通滤波器(band-pass filter)是一个允许特定频段的信号通过,同时屏蔽其他频段信号的设备。与带阻滤波器的概念相对,一个理想的带通滤波器应该有一个完全平坦的通带,在通带内没有放大或者衰减,并且在通带之外所有频率都被完全衰减掉,另外,通带外的转换在极小的频率范围完成。实际上,并不存在理想的带通滤波器。带通滤波器并不能将期

望频率范围外的所有频率完全衰减掉,尤其是在所要的通带外还有一个被衰减但是没有被隔离的范围,这通常称为滤波器的滚降现象,用每十倍频的衰减幅度的 dB 数来表示。通常,滤波器的设计应尽量保证滚降范围越窄越好,这样滤波器的性能就与设计更加接近。然而,随着滚降范围越来越小,通带就变得不再平坦,开始出现“波纹”。这种现象在通带的边缘处尤其明显,这种效应称为吉布斯现象。

有些带通滤波器有外部信源,使用晶体管、集成电路等有源元件,即通常所说的有源带通滤波器。另一些带通滤波器没有外部信源,只由电容、电感一类的无源元件构成,称为无源带通滤波器。

除了电子学和信号处理领域之外,带通滤波器还应用在大气科学领域,很常见的例子是使用带通滤波器过滤最近 3~10 天的天气数据,这样在数据域中就只保留了作为扰动的气旋数据。另外,许多音响装置的频谱分析器均使用带通滤波器,以选出各个不同频段的信号。

1. 单调谐滤波器

LC 单调谐回路是通信电路中应用最广的无源网络,也是构成选频放大器、振荡器及各种滤波器的基本电路,可在电路中完成阻抗变换、信号选择与滤波、幅频和相频转换及移相等功能,并可直接作为负载使用。最简单的 LC 单调谐回路是由电感 L 和电容 C 并联或串联形成的回路,具有谐振特性和频率选择作用,见图 1-13。需要注意的是,串联谐振电路和并联谐振电路的相频特性正好相反,以谐振频率点为界,串联谐振电路的相频特性是低频段为容性,高频段为感性;并联谐振电路的相频特性是低频段为感性,高频段为容性。

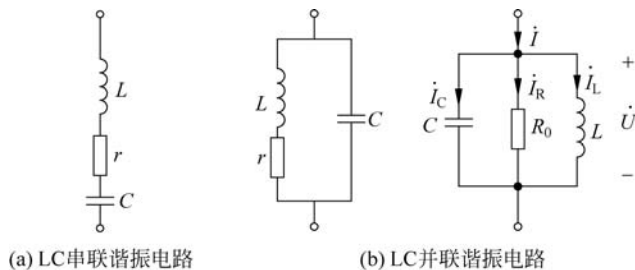


图 1-13 LC 单调谐谐振电路

LC 并联谐振回路的端阻抗与工作频率之间的关系曲线称为阻抗频率特性。LC 并联谐振回路如图 1-13(b)所示,图 1-13(a)中的 r 表示电感 L 的损耗,这也是回路的损耗。图 1-13(b)是 LC 并联谐振回路常用的等效电路示意图, R_0 表示谐振回路的损耗。理想无耗的谐振回路中的 r 为 0,或 R_0 为 ∞ 。谐振回路中有品质因数 Q 、谐振频率、3dB 带宽、矩形系数等几个重要的参数,下面分别进行介绍。

1) 品质因数

并联谐振时的品质因数:

$$Q = \omega_0 R_0 C = R_0 / (\omega_0 L) \quad (1-2)$$

式中, ω_0 是谐振角频率; R_0 是电路谐振时的阻抗值,是一个阻值很大的纯电阻。

串联谐振时的品质因数：

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r}$$

式中, ω_0 是谐振频率; r 是电路谐振时的阻抗值, 是一个阻值很小的纯电阻。

并联回路中, 电感和电容均为储能元件, 谐振时电感中的最大储能 $= (1/2)LI^2 = (1/2)CU^2$ = 电容中最大储能。磁能与电能相互交换, 理想时 ($r=0$ 或 $R_0=\infty$ 时) 不损耗能量。用品质因数 Q 表示谐振回路中储能与耗能的关系:

$$Q = 2\pi \times \text{回路的最大储能} / \text{每周期的耗能} = \omega_0 R_0 C = R_0 / (\omega_0 L) \quad (1-3)$$

由此可见, 当 R_0 增加时, 表示谐振回路的损耗降低, 品质因数 Q 提高。反之, 当 R_0 降低时, 表示谐振回路的损耗增加, 品质因数 Q 降低。

2) 滤波器的谐振频率

设并联谐振回路两端的并联阻抗为 Z_p , 由图 1-13(b) 可知:

$$Z_p = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (1-4)$$

令式(1-4)中的虚部为零, 则可求得其谐振频率为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1-5)$$

此时, 谐振阻抗最大, 且为纯阻性。换句话说, 可以把谐振时的 LC 并联回路视为一个纯电阻 R_0 , 此时回路两端的电压 U 最大。

3) 滤波器的通频带(3dB 带宽)

将式(1-4)进行变化, 可得

$$Z_p = \frac{R_0}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}} = \frac{R_0}{1 + j\xi} \quad (1-6)$$

对应的阻抗模值为:

$$|Z_p| = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad (1-7)$$

式中, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 表示信号频率偏离谐振频率的程度, 称为失谐或失调。由于 LC 并联回路在实际应用中通常工作于窄带系统, $\Delta\omega$ 相差不大, 即 ω 与 ω_0 很接近, $\omega + \omega_0 \approx 2\omega_0$ 。 $\xi = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$ 为一般失谐, 其归一化幅频特性如图 1-14(a) 所示。

在谐振点 ω_0 处, 一般失谐为 0, $Z_p = R_0$, 回路呈纯阻性; 回路失谐时, 回路的工作偏离回路的谐振频率, Z_p (意味着电压幅度) 下降。

定义通频带(3dB 带宽)是回路失谐使阻抗下降 3dB (即幅度最大值的 $1/\sqrt{2}$) 时所对应的上下限频率之差, 即令 $|Z_p|/R_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ (一般失谐为 1 时的 $2\Delta\omega$ 值), 此时, 根据式(1-7)可

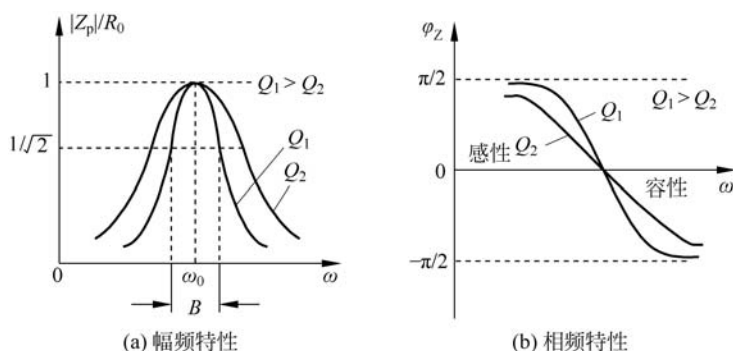


图 1-14 并联谐振回路的幅频特性和相频特性

以写成 $Q(2\Delta\omega)/\omega_0=1$, 则带宽 B 用通频带 $BW_{0.7}$ 表示为:

$$B = 2\Delta\omega = BW_{0.7} = \omega_0/Q \text{ (rad/s)}, \quad \text{或} \quad BW_{0.7} = f_0/Q \text{ (Hz)} \quad (1-8)$$

LC 并联谐振回路的阻抗(或幅度)的相位与工作频率之间的关系曲线称为并联谐振回路的相频特性。

将式(1-7)改写成 $Z_p = |Z_p| \angle \varphi_z$, 其中:

$$\varphi_z = -\arctan\left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) = -\arctan\xi \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知:

谐振时: $f=f_0, \varphi_z=0, Z_p=R_0, Z_p$ 呈纯阻性。

失谐时: $f>f_0, \varphi_z<0$, 电压相位滞后电流, Z_p 呈电容性;

$f<f_0, \varphi_z>0$, 电压相位超前电流, Z_p 呈电感性。

显然, Q 值越大, 相频特性曲线在谐振频率处斜率越大, 曲线越陡峭, 相位随频率变化越灵敏, 并联谐振回路的相频特性如图 1-14(b) 所示。

必须注意的是, 以上并联谐振回路的 Q 值是未接负载时的空载品质因数, 是回路本身的损耗; 当外接负载为 R_L 时, 总电阻 $R=R_0//R_L$, 此时, 根据式(1-2)可得有载品质因数为 $Q_L=R/(\omega_0 L)=\omega_0 CR$ 。

4) 矩形系数

并联谐振回路谐振时, 回路呈现纯电阻性, 且谐振阻抗最大。谐振回路的阻抗频率特性也代表了其幅度频率特性, 谐振时, 回路电压 U_0 最大。回路电压 U 与外加信号源频率之间的幅频特性曲线称为谐振曲线。任意频率下的回路电压 U 与谐振时回路电压 U_0 之比称为单位谐振函数, 用 $N(f)$ 表示。 $N(f)$ 曲线称为单位谐振曲线, 由式(1-7)可得:

$$N(f) = \frac{U}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} \quad (1-10)$$

Q 越大, 谐振曲线越尖锐, 通频带越窄, 选择性越好。也就是说, 通频带与回路选择性是互相矛盾的两个性能指标。选择性是指谐振回路对不需要的信号的抑制能力, 即要求在通频带之外, 谐振曲线 $N(f)$ 应陡峭下降。

一个理想的谐振回路, 其幅频特性曲线应该是通频带内完全平坦, 信号可以无衰减通过, 而在通频带以外的信号可被完全抑制, 如图 1-15 所示宽度为 $BW_{0.7}$ 、高度为 1 的矩形为

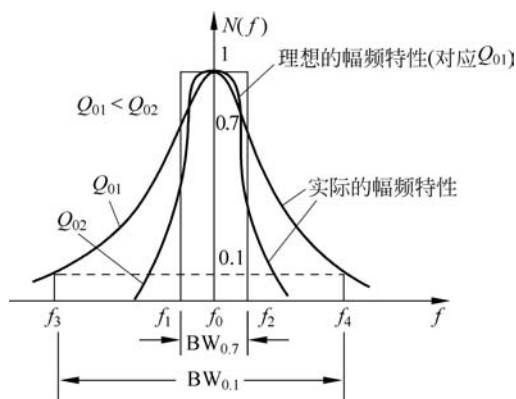


图 1-15 并联谐振回路单位谐振曲线

通频带。

采用“矩形系数”这个性能指标可以衡量实际幅频特性曲线接近理想幅频特性曲线的程度。

矩形系数 $K_{0.1}$ 定义为单位谐振曲线 $N(f)$ 值下降到 0.1 时的频带范围 $BW_{0.1}$ 与通频带 $BW_{0.7}$ 之比,即

$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} \quad (1-11)$$

单调谐时的矩形系数是一个常数,约等于 9.95。

单调谐谐振放大器实验电路如图 1-16 所示。

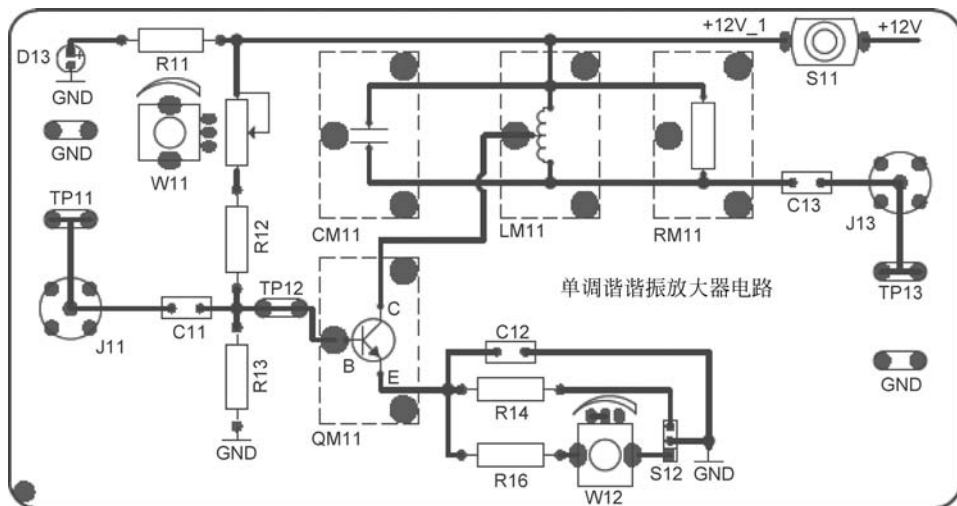


图 1-16 单调谐谐振放大器电路

图 1-16 所示的单调谐谐振放大器实验电路中,使用信号发生器产生 10.7MHz,100mV 的正弦波信号,用同轴电缆线将该信号连接至实验板“J11”上,即信号从 J11 有线输入,从 J13 输出,TP11、TP12、TP13 为实验测试点,GND 为电路接地点。直流供电由开关 S11 接入,开关接通时,本模块电路的电源指示灯将点亮。LM11 是谐振电感,可变电容 CM11 用

来调谐使电路工作在选定的中心频率上, RM11 用以改变集电极电阻, 以观察集电极负载变化对谐振回路(包括电压增益、带宽、Q 值)的影响。用万用表测量三极管基极电压, 调整 W11 使 QM11 的基极直流电压为 2.5V 左右, 使放大器工作于放大状态。W11 用来改变基极偏置电压, 以观察放大器静态工作点变化对谐振回路(包括电压增益、带宽、Q 值)的影响, 短路块 S12 的连接方式可确定是否接入 W12 以调整发射极偏置电压。电路中的 C11 和 C13 都是耦合电容, C12 为发射极高频旁路电容。

思考:

- (1) 调整 CM11 双联电容, 观察谐振点将会如何变化?
- (2) 把 S12 开关掷于最小端, 调整 W12, 改变发射极电阻, 观察曲线的变化。
- (3) 单调谐滤波器和双调谐滤波器的幅频特性都有什么特点, 它们的带宽怎么获得?

2. 双调谐滤波器

由于单谐振回路的选频特性不够理想, 存在带内不平坦、带外衰减变化缓慢、频带较窄、选择性较差、矩形系数大等缺点, 有时不能满足实际需要。因此, 在通信电路中也常常采用两个互相耦合的谐振回路, 即由两个或两个以上的单谐振回路通过不同耦合方式组成的选频回路, 称为双调谐回路。把接有激励信号源的回路称为初级回路, 把与负载相接的回路称为次级回路或负载回路, 如图 1-17 所示, 其中图 1-17(a) 是互感耦合电路, 初、次级回路之间由互感 M 耦合, 改变 M 就可改变初、次级回路的耦合程度。图 1-17(b) 是电容耦合回路, 初、次级回路之间由电容 C_C 耦合, 改变耦合电容就可改变初、次级回路的耦合程度。

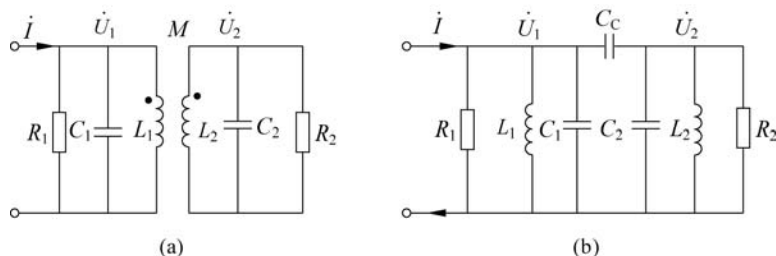


图 1-17 LC 双调谐回路

定义次级回路端电压 U_2 与初级回路电流 I 的比值为双调谐回路的转移阻抗, 用 Z_{21} 表示, 即:

$$Z_{21} = \frac{\dot{U}_2}{I}$$

为简化分析, 假设图 1-17 中初、次级回路元件参数对应相等, 即 $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$, $R_1 = R_2 = R$, $Q_1 = Q_2 = Q$, 则初、次级回路的谐振频率相同为 ω_0 , 一般失谐也相同为 ξ , 根据回路方程, 可得图 1-17(a) 互感耦合回路的转移阻抗为:

$$Z_{21} = -j \frac{Q}{\omega_0 C} \frac{A}{1 - \xi^2 + A^2 + 2j\xi} \quad (1-12)$$

式中, $A = kQ$ 为耦合因数, $A < 1$ 时称为弱耦合, $A > 1$ 时称为强耦合, $A = 1$ 时称为临界耦合。

同样可得图 1-17(b) 电容耦合回路的转移阻抗为:

$$Z_{21} = -jQ\omega_0 L \frac{A}{1 - \xi^2 + A^2 + 2j\xi} \quad (1-13)$$

显然,两种双调谐耦合回路的转移阻抗可统一写成:

$$Z_{21} = \frac{-jRA}{1 - \xi^2 + A^2 + 2j\xi} \quad (1-14)$$

其中,

$$R = \frac{Q}{\omega_0 C} = Q\omega_0 L$$

当 $A=1, \xi=0$ 时, Z_{21} 取最大值,于是可得两种双调谐耦合回路的归一化转移阻抗特性同为:

$$\frac{|Z_{21}|}{|Z_{21}|_{\max}} = \frac{2A}{\sqrt{(1 - \xi^2 + A^2)^2 + 4\xi^2}} \quad (1-15)$$

由耦合回路知识可知,初、次级回路之间的耦合程度通常用耦合系数来表征,耦合系数的定义为:耦合元件电抗的绝对值,与初、次级回路中同性质元件电抗值的几何中项之比,通常以 k 表示。

互感耦合回路的耦合系数为:

$$k = \frac{\omega M}{\sqrt{\omega^2 L_1 L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

电容耦合回路的耦合系数为:

$$k = \frac{C_C}{\sqrt{(C_1 + C_C)(C_2 + C_C)}}$$

k 是无量纲常数。一般地, $k < 0.01$ 为很弱耦合; $k = 0.01 \sim 0.05$ 为弱耦合; $k = 0.05 \sim 0.9$ 为强耦合; $k > 0.9$ 为很强耦合; $k = 1$ 称为全耦合。 k 值的大小能极大地影响耦合回路频率特性曲线的形状。 $A = kQ = k/k_0$, 双调谐回路阻抗频率特性曲线如图 1-18 所示。

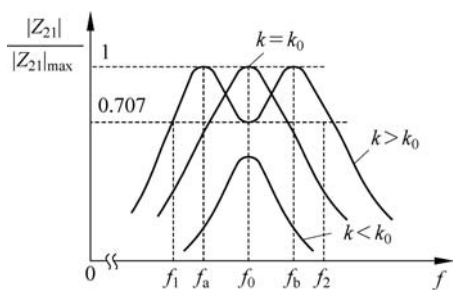


图 1-18 双调谐回路阻抗频率特性

关键结论:

(1) 通频带 $BW_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q}$ 。

(2) 矩形系数 $K_{0.1} = 3.15$ 。

从图 1-18 可以观察到:

① 弱耦合时, $A < 1 (k < k_0)$, 曲线呈单峰形状, 在谐振频率 f_0 处有峰值, 且 A 值越小, 峰值越小;

② 强耦合时, $A > 1 (k > k_0)$, 曲线呈双峰形状, 在谐振频率 f_0 处出现谷值, 在 f_a 和 f_b 处有峰值并达到最大, 且 A 值越大, 谷值越小, 峰值相距越远 (f_a 和 f_b 的差值越大), 但峰值保持不变;

③ 临界耦合时, $A = 1 (k = k_0)$, 曲线仍呈单峰形状, 在谐振频率 f_0 处有峰值, 且峰值最大。

双调谐谐振放大器实验电路如图 1-19 所示。

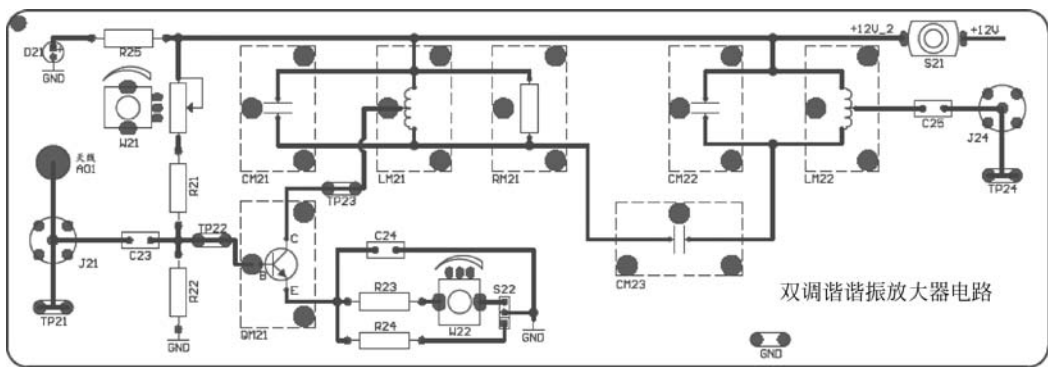


图 1-19 双调谐谐振放大器实验电路

双调谐是指有两个调谐回路：一个靠近“信源”端(如晶体管输出端),称为初级；另一个靠近“负载”端(如下级输入端),称为次级。两者之间可采用互感耦合或电容耦合。与单调谐回路相比,双调谐回路的矩形系数较小,即双调谐回路的谐振特性曲线更接近于矩形。本实验模块电路是电容耦合双调谐谐振放大器电路。

使用信号发生器产生 10.7MHz,100mV 的正弦波信号,从实验电路板的 J21 有线输入,从 J24 输出,TP21、TP22、TP23 和 TP24 为实验测试点,GND 为电路接地点。直流供电由开关 S21 接入,开关接通时,本模块电路的电源指示灯将点亮。该电路有两个谐振回路：LM21、CM21 组成了初级回路,LM22、CM22 组成了次级回路。两者之间并无互感耦合(必要时,可分别对 LM21、LM22 加以屏蔽),而是由电容 CM23 进行耦合,故称为电容耦合。谐振回路中的电容 CM21、CM22 可调谐,使电路工作在选定的中心频率上,可调电容 CM23 可改变初、次级回路的耦合程度,RM21 可用来改变集电极负载电阻以改变回路损耗,继而改变幅频特性曲线形状。连动调整双联电容 CM21、CM22,使输出波形最大,示波器上得到的波形,两峰对称,并使谐振频率在中间凹点附近,从而得到幅频特性曲线,并进一步计算带宽。当然,如果在 LM21、CM21、LM22、CM22 位置上插入不同参数的元器件,可以得到不同的谐振频率。

1.2.4 带通滤波器的应用

1. 单调谐滤波器

单调谐滤波器广泛应用于电力系统的无功补偿与无功补偿容量分配,以满足系统谐波电压要求,使得随着负荷的增减,系统的电压和无功交换基本保持稳定。在变电站内常用的无功补偿电容器组就是单调谐滤波器的电路形式,补偿电容器和电抗器内部有内电阻。补偿电容器组设置串联电抗器的目的是限制电容器投用时的涌流,同时限制电容器短路故障时的短路电流,常安装在高压侧,如图 1-20 所示的方形滤波器就是其中的一种。

这种滤波器的常规电感量为 10mH、20mH、30mH、40mH、50mH 及以上,滤波器的体积小重量轻,具有稳定的电感量,漏感低,可靠性高,可有效防止电路干扰,广泛应用于整流器、开关电源等电子产品。



图 1-20 SQ1515 方形滤波器

2. 双调谐滤波器

双调谐滤波器在电力系统广泛应用于高压输电工程、矿井电网的谐波治理,以及无线通信、广播、整流等领域,如图 1-21 所示为葛洲坝-南桥直流输电工程直流侧的主电路。

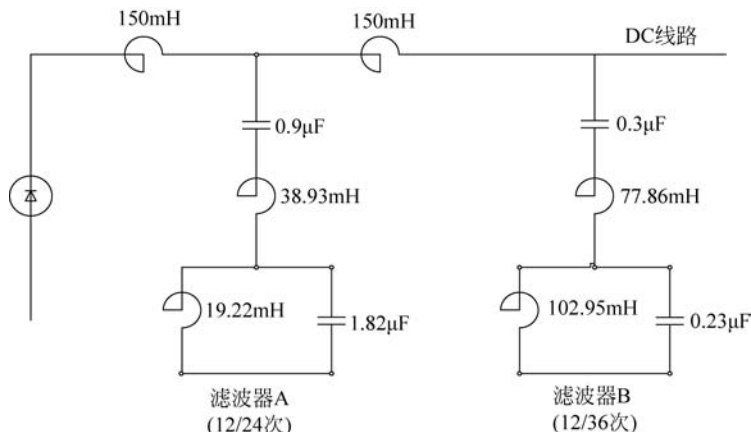


图 1-21 葛洲坝-南桥直流输电工程直流侧的主电路

葛洲坝-南桥直流输电工程是我国第一条长距离高压直流输电系统。其直流侧(电压 $U_{DC} = \pm 500\text{kV}$)按照图 1-21 设计安装有两组双调谐滤波器,分别为 A 型滤波器(12/24 次)和 B 型滤波器(12/36 次),用来滤除谐波,从而降低等效干扰电流。

3. 通信应用

带通滤波器在通信系统中广泛应用,通信系统中使用的滤波器大多都是带通型的,在系统的不同位置需要使用不同的滤波器进行处理。例如超外差式晶体管收音机中的中周(也称中频变压器)就是一个工作中频 465kHz 频段的带通滤波器,起选频和耦合的作用。滤波器的质量如何在很大程度上决定了收音机的灵敏度、选择性和通频带等性能指标。滤波器的谐振回路可在一定范围内微调,以使接入电路后能达到稳定的谐振频率(465kHz)。

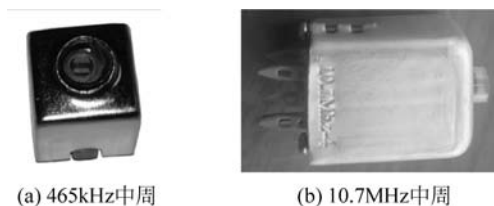


图 1-22 AM 和 FM 收音机中使用的中周

调谐借助于磁心相对位置的变化来完成。收音机中的中周大多是单调谐式,结构较简单,占用空间较小。由于晶体管的输入、输出阻抗低,为了使中频变压器能与晶体管的输入、输出阻抗匹配,初级有抽头,且具有圈数很少的次级耦合线圈。双调谐式中周的优点是选择性较好且通频带较宽,多用在高性能收音机中,如图 1-22 所示。

1.3 高频放大器

1.3.1 基本概念

放大器是通信电子电路中的重要组成部分。按照频率划分,可以分为低频放大器和高频放大器。低频放大器主要用于对基带信号放大,而高频放大器主要用于放大射频信号。