

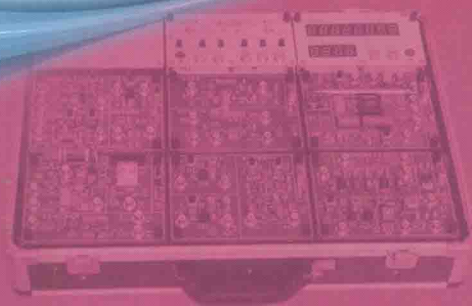


全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

GAOPIN DIANZI XIANLU

高频电子线路

李明 杨光 主编



黄河水利出版社

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

高频电子线路

主 编 李 明 杨 光
副主编 付宗见 田相军 马磊娟

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书为全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材。全书共分七章,在强调基本概念的基础上,以常用基本电路为对象进行基础理论分析和实际应用介绍。同时结合当前电子技术的发展,重点介绍了集成电路在具体电路中的应用。

本书可供高职高专院校电子、通信类专业使用,也可供相应工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/李明,杨光主编. —郑州:黄河水利出版社,2011.12

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0021 - 9

I. ①高… II. ①李… ②杨… III. ①高频 - 电子
电路 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 248889 号

组稿编辑:王文科 电话:0371 - 66028027 E-mail:wwk5257@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11

字数:268千字

印数:1—4 000

版次:2011年12月第1版

印次:2011年12月第1次印刷

定价:25.00元

前 言

随着电子、电信技术的飞速发展,高频电子线路的应用越来越广泛,高频电子线路理论得到不断的充实和发展。为了更好地适应新形势下我国高职高专教育发展的需要,我们编写了《高频电子线路》教材。该教材可供电子、通信类专业使用,也可供相应工程技术人员参考。

高频电子线路是一门理论性、实践性都很强的课程,其先修课程为电路基础、模拟电子线路等。结合高职高专教学的特点,在本教材编写过程中,我们力求简单明了,尽量减少复杂烦琐的理论推导,在强调基本概念的基础上,以常用基本电路为对象进行基础理论分析和实际应用介绍,做到理论与实际相结合。同时结合当前电子技术的发展,重点介绍了集成电路在具体电路中的应用。章后安排了实训项目,以便更好地帮助读者掌握对高频电子线路的性能分析,加深对高频电子线路的工作原理和电路调试方法的理解。

全书共分七章。第一章为绪论,简要介绍通信系统的组成和非线性电子线路的基本概念;第二章为高频小信号放大器,主要介绍小信号谐振放大器的工作原理及集中选频放大器的组成;第三章为高频功率放大器,主要讨论丙类谐振功率放大器的工作原理、电路和传输线变压器的工作原理;第四章为正弦波振荡器,主要介绍 LC 振荡器和晶体振荡器;第五章为幅度调制、解调与混频电路,主要介绍频谱线性搬移电路的基本原理及实现电路模型,常用调幅、检波和混频电路;第六章为角度调制与解调电路,主要介绍频率调制、解调原理及实用调频和鉴频电路;第七章为锁相环电路与频率合成技术,主要介绍锁相环电路工作原理、应用和频率合成技术,简单介绍自动增益控制电路和自动频率控制电路。

另外,本书在编写过程中还注意将理论讲授、课堂讨论、自学、作业等教学环节有机结合,以充分调动学生的学习积极性和主动性。每章编有小结和习题,习题内容力求突出本课程的重点和基本要求,并注意与工程应用相结合。

本书由李明、杨光担任主编,由付宗见、马磊娟、田相军担任副主编。第一章由河南机电高等专科学校史兆强编写,第二章、第五章由河南机电高等专科学校李明编写,第三章由焦作大学机电工程学院杨光编写,第四章由濮阳职业技术学院田相军编写,第六章由商丘工学院杨娜编写,第七章由河南工业职业技术学院马磊娟编写,全书各章仿真实训及附录部分由郑州铁路职业技术学院付宗见编写。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2011年8月

目 录

前 言	
第一章 绪 论	(1)
第一节 无线电通信系统概述	(1)
第二节 无线电通信原理	(3)
第三节 波段的划分和传播方式	(5)
习 题	(6)
第二章 高频小信号放大器	(7)
第一节 概 述	(7)
第二节 高频小信号放大器的分类与主要性能指标	(7)
第三节 分析小信号放大器的有关知识	(9)
第四节 小信号谐振放大器	(16)
第五节 谐振放大器的稳定性	(22)
第六节 高频小信号放大器实例	(23)
本章小结	(25)
实训:高频小信号谐振放大器仿真	(25)
习 题	(27)
第三章 高频功率放大器	(29)
第一节 概 述	(29)
第二节 谐振功率放大器	(29)
第三节 宽频带功率放大器与功率合成电路	(47)
第四节 倍频器	(55)
本章小结	(58)
实训:高频谐振功率放大器的仿真	(59)
习 题	(61)
第四章 正弦波振荡器	(64)
第一节 概 述	(64)
第二节 反馈式振荡器的工作原理	(64)
第三节 RC 正弦波振荡器	(68)
第四节 LC 正弦波振荡器	(72)
第五节 石英晶体振荡器	(79)
第六节 振荡器在常用家电中的应用	(82)
本章小结	(84)
实训:正弦波振荡器的仿真	(84)
习 题	(86)

第五章 幅度调制、解调与混频电路	(89)
第一节 概 述	(89)
第二节 幅度调制电路	(89)
第三节 幅度解调电路	(97)
第四节 混频电路	(101)
本章小结	(107)
实训:幅度调制与解调电路仿真	(108)
习 题	(110)
第六章 角度调制与解调电路	(113)
第一节 概 述	(113)
第二节 角度调制	(113)
第三节 调频电路	(119)
第四节 调角波的解调	(124)
第五节 自动频率控制	(133)
本章小结	(135)
实训:三极管调频发射机的制作	(136)
习 题	(137)
第七章 锁相环电路与频率合成技术	(139)
第一节 概 述	(139)
第二节 锁相环电路	(140)
第三节 集成锁相环电路	(147)
第四节 频率合成技术	(149)
第五节 锁相环应用举例	(154)
本章小结	(157)
实训:频率合成器的制作	(158)
习 题	(160)
附 录	(161)
附录一 49.67 MHz 窄带调频发射器制作举例	(161)
附录二 49.67 MHz 窄带调频接收器制作举例	(162)
附录三 常用射频发射模块与接收模块	(165)
参考文献	(168)

第一章 绪 论

人们在生活和生产等活动中将语言、文字、图像及数据等含有信息的信息,从一个地方传送到另一个地方,称为通信。利用电信号实现信息传送过程的系统称为通信系统。高频电子线路是在高频段范围内实现特定功能的电路。高频电路是通信系统,特别是无线电通信系统的基础,是无线电通信设备的重要组成部分。本书主要结合无线电通信这一方式讨论高频电子线路的线路组成、工作原理。

第一节 无线电通信系统概述

一、无线电通信发展简史

信息传输是人类社会生活的重要内容。从古代的烽火到近代的旗语,都是人们寻求快速远距离通信的手段。直到19世纪电磁学的理论与实践有了坚实的基础之后,人们才开始用电磁能量来传送信息。

1837年摩尔斯发明电报,创造了摩尔斯电码,开始了通信的新纪元。

1864年麦克斯韦总结了前人的科学成果,提出电磁波学说。

1876年贝尔发明了电话,能够直接将语言信号变为电能沿导线传送。

1887年德国科学家赫兹(Hertz)用一个振荡偶子产生了电磁波,在历史上第一次直接验证了电磁波的存在。

1895年意大利科学家马可尼(Marconi)在赫兹实验的基础上,实现了远距离无线电信号的传送,这个距离在当时不过一百码(约为91.4 m),但一年后他就实现了船只与海岸的通信。

1901年马可尼首次完成横渡大西洋的无线通信。

1904年英国科学家弗莱明(Fleming)获得了一项专利,在专利说明书中描述了一个高频交变电流整流用的两极真空管,这标志着电子技术进入无线电电子学时代。

1907年美国科学家弗雷斯特(Forest)发明了真空三极管,用它能够组成具有放大、振荡、变频、调制、检波和波形变换等重要功能的电子线路。真空三极管为现代千变万化的电子线路提供了“心脏”器件,是电子技术发展史上第一个重要里程碑。

1912年英国科学家埃克斯(Eccles)提出了无线电波通过电离层传播的理论,这一理论使得一群业余爱好者在1921年实现了短波试验性广播;同年,美国的费森登(Fessenden)和阿姆斯特朗(Armstrong)改进了接收机的工作方式,发明了外差式接收系统,这种形式仍是目前许多无线电接收机的主要工作方式。

1938年美国科学家香农(Shannon)指出,利用布尔(Boole)代数能对复杂的开关电路进行分析,电子科学中一个崭新的分支就逐渐形成并发展起来。这就是电子计算机最初的理论。

1942年美国“莫尔小组”开始研制ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer)。一般来说,它是第一台真正的电子计算机。这台计算机直到1946年才完成,它主要是

为美国陆军阿贝尔丁检验基地计算弹道而设计的,共用了 18 000 个真空管。

1948 年第一只晶体管在贝尔实验室(Bell Telephone Laboratories)诞生,它促成了电子技术小型化的发展,推动了对固体物理和电子学的研究。晶体管出现后,无线电技术及电子学本身发生了巨大变化,得到了长足的发展。这是电子技术发展史上第二个重要里程碑。

20 世纪 60 年代,中、大规模乃至超大规模集成电路不断涌现,成为电子技术发展史上第三个重要里程碑。

1959 年美国科学家基尔比(Kilby)研制出了世界上第一块集成电路。

1966 年美国贝尔实验室制造成第一块公认的大规模集成电路。

1978 年超大规模集成(VLSI)电路面世,从此电子技术进入了微电子技术时代。

无线电技术诞生后对人类的生活和生产活动产生了非常深刻的影响。20 世纪初首先解决了无线电报通信问题;接着又解决了用无线电波传送语言和音乐的问题,从而开展了无线电话通信和无线电广播;随后传输图像的问题也解决了,出现了无线电传真和电视。20 世纪 30 年代中期到第二次世界大战期间,为了防空的需要,无线电定位技术的迅速发展和雷达的出现,带动了其他学科的兴起,如无线电天文学、无线电气象学等。20 世纪 50 年代以来,宇航技术的发展又促进了无线电技术向更高的阶段发展。

无线电技术的发展是从利用电磁波传输信息的无线电通信扩展到计算机科学、宇航技术、自动控制以及其他各学科领域的。

二、通信系统的组成

根据电信号传输媒质的不同,通信系统可以分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信是指通过电线、电缆线、光缆线等有线媒质来传递信息。无线通信是指电信号利用电磁波的传播来完成信息的传输,如无线广播、移动通信、卫星通信均属无线通信。

任何通信系统都可以用图 1-1 来表示。

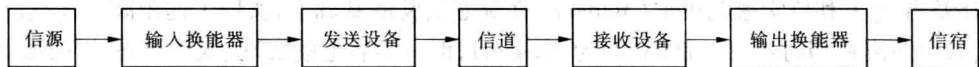


图 1-1 通信系统组成方框图

输入换能器——将传输的非电量信息(如声音、图像等)变换为电信号。

发送设备——将电信号变换为适应于信道传输特性的信号。

信道——传输信息的通道,又称传输媒介。

接收设备——与发送设备相反,将接收到的信号恢复成与发送设备输入信号一致的信号。

输出换能器——将电信号转变成原来传送的信号。

无线通信系统的组成框图如图 1-2 所示。

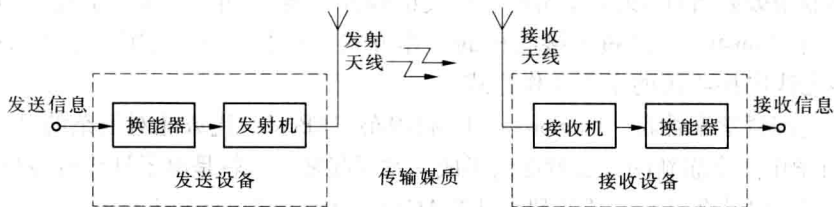


图 1-2 无线通信系统方框图

三、无线通信系统分类

按照无线通信系统中关键部分的不同特性,有以下一些类型:

(1)按照工作频段或传输手段分类,有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。

(2)按照通信方式分类,主要有(全)双工、半双工和单工方式。

(3)按照调制方式的不同,分为调幅、调频、调相以及混合调制等。

各种不同类型的通信系统,其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同。但是,组成设备的基本电路及其原理都是相同的,遵从同样的规律。

第二节 无线电通信原理

以无线电通信调幅广播发射机、接收机为例来说明无线电工作原理与工作过程。

一、发送设备的基本工作原理

调幅式无线电广播发射机组成框图如图 1-3 所示。它由高频、低频和电源三大部分组成。

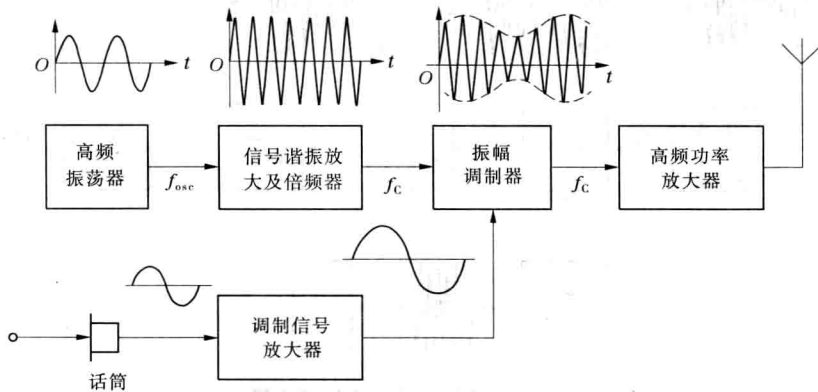


图 1-3 调幅无线电发射机原理图

低频部分有:

话筒——将声音变换为电信号,即音频信号,这种信号具有低通型频谱结构,故称为基带信号。

调制信号放大器——也称为音频放大器或低频放大器。调制信号即基带信号,从话筒得到的电信号通常强度很小,只有几毫伏到零点几伏,不能满足调制器对调制信号的要求,需要经过调制信号放大器放大,以达到所需电平。

高频部分有:

高频振荡器——产生高频的振荡信号,即载波信号。

信号谐振放大及倍频器——振荡器产生的振荡信号往往还不能直接用做载波。要使振荡器的频率稳定度高,振荡器的频率就不能太高,所以需要使用倍频器把载波频率提高到所需的数值上,然后对载波信号放大,以得到频率较高、振幅较大的高频载波信号。

振幅调制器——用调制信号对载波进行振幅调制。

高频功率放大器——对经过调幅后的已调信号进行功率放大,保证输出信号有足够大的功率馈送到天线,由天线进行发射。输出信号的功率大小决定了信号传输距离的远近。

声音经过话筒转换为电信号,即产生基带信号,基带信号为低频信号,大多不适宜直接在信道中传输,必须先经过调制,然后通过天线向空间以电磁波的形式将信息辐射出去。

所谓调制,就是在发送端将基带信号变换成适合信道传输的频带信号。它利用基带信号去控制载波的幅度(或频率或相位),使载波的幅度(或频率或相位)随基带信号而变化,这里基带信号称为调制信号,调制后形成的信号称为已调信号。调制使幅度变换的称为调幅,使频率变换的称为调频,使相位变换的称为调相。在通信系统中,载波相当于运载工具,起装载和运输信号的作用,而调制信号才是真正需要传送的对象。

二、接收设备的基本工作原理

接收设备的工作过程是发射设备工作过程的逆过程,它的基本任务是将接收天线上感应的已调信号接收下来,并还原成原来的信号。

现代接收设备多采用超外差式接收机的形式,如图 1-4 所示。

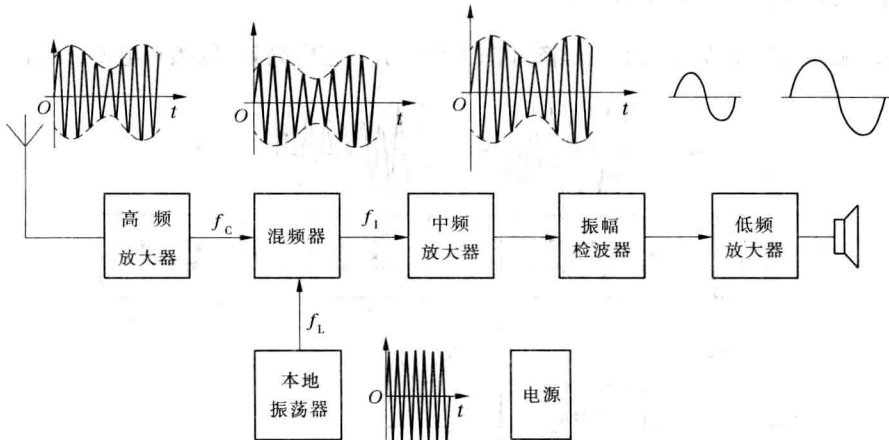


图 1-4 超外差式接收机原理图

超外差式接收机由高频放大器、本地振荡器、混频器、中频放大器、振幅检波器、低频放大器及扬声器等组成。

接收天线从空间接收信号,由高频放大器将谐振频率对准某一载频,从而在接收到的众多信号中选择其中一个电台信号,并适当放大;此时得到的信号为已调信号,还需要经过解调才能得到音频信号,输出到终端设备扬声器上;本地振荡器为混频器提供高频等幅的正弦波信号,即本振信号;混频器将高频的调幅波与高频本振信号的等幅波进行混频,使之变成中频的调幅信号输出;中频放大器将中频信号进行放大,为检波器提供峰-峰值为1 V的调幅波信号;检波器再将中频信号变换成音频信号,从调幅波中还原出原来的信号就是解调,它与发射设备中的调幅电路功能刚好相反;低频放大器,又称为音频放大器,将检波器输出的音频信号进行放大,使之有足够大的功率推动扬声器发声。

以上我们简要地介绍了无线电发射设备和接收设备的组成,分析了发射和接收的工作原理及过程。虽然是基于模拟信号中的语音信号进行分析的,但它具有代表意义。

第三节 波段的划分和传播方式

一、电磁波的划分

电磁波可分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、宇宙射线。图 1-5 为电磁波波谱,从图中可以看出无线电波的频段在整个电磁波中的位置。

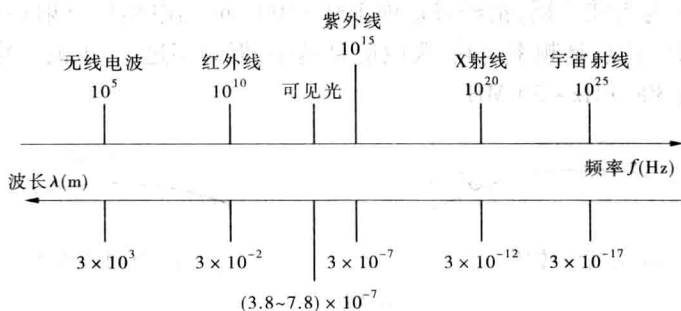


图 1-5 电磁波波谱

表 1-1 为无线电波的频段划分。按波长不同,可将无线电波划分为长波(LW)、中波(MW)、短波(SW)、超短波(VSW)和微波等。按频率的不同,可划分为低频(LF)、中频(MF)、高频(HF)、甚高频(VHF)等。高频电子线路课程涉及的频段为中频(MF)、高频(HF)、甚高频(VHF)。

表 1-1 无线电波的频段划分及其用途

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途	
长波(LW)	$10^3 \sim 10^4$ m	30 ~ 300 kHz	低频(LF)	地波;远距离通信	
中波(MW)	$10^2 \sim 10^3$ m	300 kHz ~ 3 MHz	中频(MF)	地波、天波;广播、通信、导航	
短波(SW)	10 ~ 100 m	3 ~ 30 MHz	高频(HF)	天波、地波;广播、通信	
超短波(VSW)	1 ~ 10 m	30 ~ 300 MHz	甚高频(VHF)	直线传播、对流层散射;通信、电视广播、调频广播、雷达	
微波	分米波(USW)	10 ~ 100 cm	300 MHz ~ 3 GHz	特高频(UHF)	直线传播、散射传播;通信、中继与卫星通信、雷达、电视广播
	厘米波(SSW)	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz	超高频(SHF)	直线传播;中继和卫星通信、雷达
	毫米波(ESW)	1 ~ 10 mm	30 ~ 300 GHz	极高频(EHF)	直线传播;微波通信、雷达

二、无线电波的基本传播方式

无线电波在无线信道中的传播方式可分为三种:地面波传播、空间波传播和天波传播。

图 1-6(a)所示为地面波(300 kHz 以下的电磁波)传播,它是指电磁波沿地球表面的传

播,也称为绕射或表面波传播。由于地球表面并非传播电磁波的理想导体,因而有能量的损耗,并且波长愈长,传播损耗愈小。地面波传播主要用于长距离通信、导航和广播。

图 1-6(b)所示为空间波(30 MHz 以上的电磁波)传播,它是指电磁波由发射天线直接辐射至接收天线,也称为直射波。直线传播的电磁波只能在视距范围内。发射天线和接收天线架设得越高,其传播距离就越远(在发射机发射工具足够大、接收机灵敏度足够高的条件下)。电磁波在空间传播时会被大气吸收,因而有部分能量损耗,损耗与电磁波的波长等因素有关。

图 1-6(c)所示为天波传播,指经过地面 100 ~ 500 km 的电离层反射传送到接收点的电磁波。电离层反射的特点是频率越高,吸收能量越小,但频率过高,电波会穿透电离层,故频率只限于中短波段 300 kHz ~ 30 MHz。

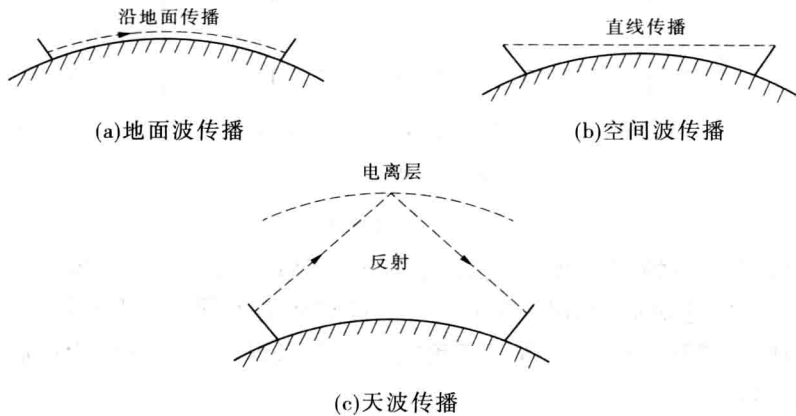


图 1-6 无线电波的三种传播方式

为了有效地传输信号,不同波段的信号采用不同的传播方式。

习 题

- 1-1 画出无线通信收发信机的原理框图,并说出各部分的功用。
- 1-2 无线通信为什么要进行调制?如何进行调制?
- 1-3 无线电波的频段或波段是如何划分的?各个频段的传播特性和应用情况如何?
- 1-4 无线电传播的三种方式及其特点是什么?

第二章 高频小信号放大器

第一节 概述

高频小信号放大器的功用,就是从众多微弱的电信号中,选出有用信号并加以放大,而对其他无用信号、干扰与噪声进行抑制,以提高信号的质量和抗干扰能力。这里所指的小信号主要是强调这种信号的放大器工作在它的线性范围。高频小信号放大器既可以用于通信系统的接收机中,也可以用于发射机等设备中。它是中心频率在几百千赫到几百兆赫,频谱宽度在几千赫到几十兆赫,振幅在微伏至毫伏量级范围内的放大器。高频小信号放大器主要技术要求是:增益要高,频率选择性要好,工作稳定可靠,此外,还要求放大器内部噪声要小。

第二节 高频小信号放大器的分类与主要性能指标

一、高频小信号放大器的分类

高频小信号放大器的类型很多:按使用的元器件,可分为晶体管放大器、场效应管放大器和集成电路放大器;按通频带,可分为窄带放大器和宽带放大器;按电路形式,可分为单级放大器和多级放大器;按负载性质,可分为谐振放大器和非谐振放大器,其中以谐振回路为负载的谐振放大器又可分为调谐放大器(通称高频放大器)和频带放大器(通称中频放大器),前者的谐振回路需对外来不同的信号频率进行调谐,后者的谐振回路谐振频率固定不变。本章主要介绍单极单调谐窄带放大器。

为了突出选频效果,有时采取集中选频放大器,集中选频放大器是把放大和选频两种功能分开处理,放大作用由多级非谐振宽频带放大器承担,目前一般都采用集中宽频带放大器,其线路简单,性能可靠,调整方便。

小信号条件下工作的高频放大器,由于信号电压、电流幅度都很小,放大器件用在甲类工作状态,放大电路可看做有源线性电路,因而可采用小信号等效电路来进行分析。由于高频小信号放大器的负载具有谐振特性,故采用导纳 Y 参数电路进行分析比较方便。

二、高频小信号放大器的主要性能指标

高频小信号放大器的主要性能指标有谐振增益、通频带和选择性等。

(一) 谐振电压增益与功率增益

谐振电压增益是指放大器在谐振频率上的电压增益 A_{v0} (或功率增益),其值为放大器的输出电压与输入电压之比,即: $A_{v0} = \frac{u_o}{u_i}$,可用分贝(dB)数表示。

而功率增益等于放大器输出给负载的功率与输入功率之比,即: $A_p = \frac{P_o}{P_i}$, 它用来说明放大器对有用信号的放大能力,一般每级的增益越大越好。

(二) 通频带

通频带指放大器的增益比谐振增益下降 3 dB(即 A_v 下降到 A_{v0} 的 $1/\sqrt{2}$) 时,所对应的频率范围,用 $BW_{0.7}$ 表示,如图 2-1 所示。为了不失真地放大有用信号, $BW_{0.7}$ 应大于有用信号的频谱宽度。

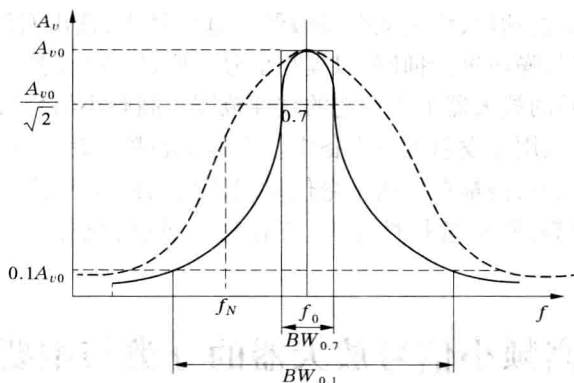


图 2-1 高频小信号放大器的典型幅频特性曲线

(三) 选择性

选择性指放大器从含有各种不同频率信号总和中,选出有用信号并排除干扰信号的能力。它定义为通频带以外某一特定频率上的增益 $A_v(f_N)$ 与谐振增益 $A_{v0}(f_0)$ 的比值,用 N 表示,即

$$N = \frac{A_v(f_N)}{A_{v0}(f_0)} \quad (2-1)$$

显然, N 越小选择性就越好。

实际上,通频带与选择性是相互制约的。一般情况下,通频带越宽,对特定频率干扰的选择性就越差,图 2-1 中虚线所示幅频特性曲线的通频带比实线所示通频带宽,但 $f=f_N$ 时, N 比较大。

(四) 工作稳定性

放大器的工作稳定性是指放大器的直流偏置、晶体管参数、电路元件参数等由于各种原因发生变化时,放大器主要性能的稳定程度。一般要求晶体管放大器的工作要稳定。

(五) 噪声系数

噪声系数是用来表征放大器的噪声性能好坏的一个物理量。

由于 LC 谐振回路为高频小信号放大器的组成部分,其特性将直接影响放大器性能的好坏,同时 LC 谐振回路在以后各章所述的电路,如谐振功率放大器、调制、变频等电路中,也都起着重要的作用。因此,下一节将对谐振回路的基本特性进行分析。

第三节 分析小信号放大器的有关知识

一、串并联谐振回路的特性

谐振回路也称振荡回路,是最常用的选频网络,它由电感线圈和电容器组成。简单的谐振回路有串联、并联谐振回路,以及把两个或更多个串联、并联谐振回路相互耦合连接起来的耦合谐振回路。

(一) 串联谐振回路

串联谐振回路如图 2-2 所示。图中 r 表示 L 和 C 的总损耗电阻,实际上,由于电容损耗比电感线圈的损耗小很多,所以 r 近似等于线圈的损耗电阻。

由于电路中电阻、电感、电容的阻抗分别为 r 、 $j\omega L$ 、 $\frac{1}{j\omega C}$,则回路总阻抗为

$$Z = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2-2)$$

在某一频率 ω_0 (f_0) 时,回路的感抗与容抗相等,回路的总阻抗 $Z = r$ 最小。此时,电流与电压同相,回路发生串联谐振,由此可得串联谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 或 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3)$$

谐振时容抗与感抗数值相等,通常称它们为回路的特性阻抗,用 ρ 表示,即

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-4)$$

回路的特性阻抗与回路固有损耗电阻的比值,称为回路的固有品质因数,用 Q_0 表示,即

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r} \quad (2-5)$$

Q_0 越大,说明回路电抗元件储能越大而损耗的能量越小,回路的选择性也越好。

谐振时,回路呈现纯阻性,且谐振阻抗最小。回路电流 I 与外加信号源频率之间的幅频特性曲线称为谐振曲线。谐振时,回路电流 I_{∞} 最大。任意频率下的回路电流 I 与谐振时回路的电流 I_{∞} 之比称为单位谐振函数,用 $N(f)$ 表示如下

$$N(f) = \frac{I}{I_{\infty}} = \frac{\frac{U_s}{Z}}{\frac{U_s}{r}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}{r^2}}} \quad (2-6)$$

该式总是小于或等于 1。

由式(2-5)和式(2-6)可得

$$\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = \frac{\omega_0 \omega L}{\omega_0 r} - \frac{\omega_0}{\omega_0 r \omega C} = Q_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$$

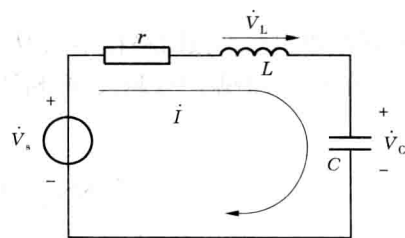


图 2-2 串联谐振回路

定义相对失谐 $\varepsilon = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$, 当失谐不大时,

$$\varepsilon = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f+f_0)(f-f_0)}{ff_0} \approx \frac{2(f-f_0)}{f_0} = \frac{2\Delta f}{f_0}$$

因此,式(2-6)还可表示为

$$N(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} \quad (2-7)$$

式中, $\Delta f = f - f_0$, 称为回路的绝对失调量, 即信号源频率偏离回路谐振频率的绝对值。回路的相频特性也可近似为

$$\varphi \approx -\arctan\left(Q_0 \frac{2\Delta f}{f_0}\right) \quad (2-8)$$

于是可绘出串联谐振回路在不同 Q_0 值上的谐振曲线和相移曲线, 如图 2-3 所示。由图可见, Q_0 值越大, 谐振曲线越尖锐, 相移特性越陡峭; Q_0 值越小, 曲线就越平坦。

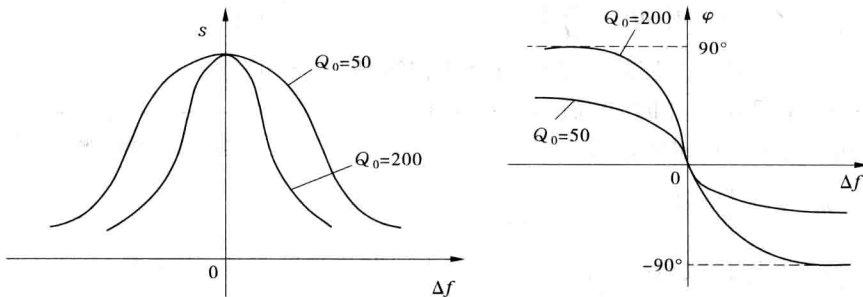


图 2-3 谐振曲线和相移曲线

当占有一定频带的信号在串联回路中传输时, 由于谐振曲线的不均匀性, 输出的电流或电压便不可避免地产生频率失真。为了限制谐振回路频率失真的大小, 而规定了谐振回路的通频带。定义单位谐振曲线上 $N(f) \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ 所包含的频率范围为回路的通频带, 用 $BW_{0.7}$ 表示, 如图 2-4 所示。

在图上 $BW_{0.7} = f_2 - f_1$, 取

$$N(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

可得

$$Q_0 \frac{2\Delta f}{f_0} = \pm 1$$

即

$$Q_0 \frac{2(f_2 - f_0)}{f_0} = 1 \quad (2-9)$$

$$Q_0 \frac{2(f_1 - f_0)}{f_0} = -1 \quad (2-10)$$

用式(2-9)减去式(2-10), 可得

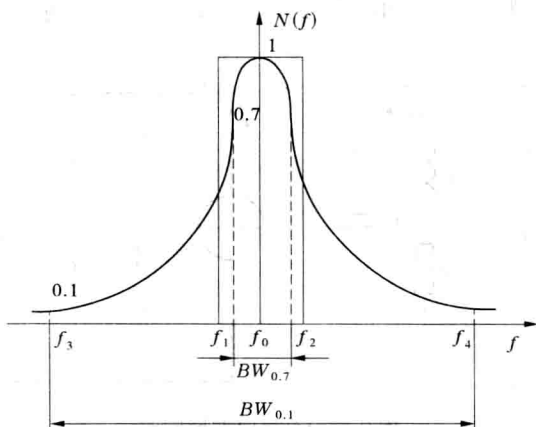


图 2-4 单位谐振曲线

$$Q_0 \frac{2(f_2 - f_1)}{f_0} = 2$$

所以

$$BW_{0.7} = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q_0} \quad (2-11)$$

式(2-11)说明,谐振时回路 Q_0 值越大,谐振曲线越尖锐,通频带越窄,选择性越好;反之,谐振曲线越平坦,通频带越宽,选择性越差。

由于通频带与选择性相互制约,为了解决这个矛盾,应尽量使放大器的幅频特性曲线接近理想矩形,并使矩形的宽度等于通频带,如图 2-4 所示,这样通频带与选择性才能同时达到理想的要求。因此,为了统一表示通频带和选择性的要求,说明实际幅频特性曲线接近矩形的程度,常引用矩形系数这一参数。它定义为放大器的电压增益下降到谐振增益的 0.1 时,相应的频带宽度 $BW_{0.1}$ 与放大器通频带 $BW_{0.7}$ 之比,即

$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} \quad (2-12)$$

【例 2-1】 求串联谐振回路的矩形系数。

解:

$$N(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{10}}$$

用类似于求通频带 $BW_{0.7}$ 的方法可求得

$$BW_{0.1} = f_4 - f_3 = \sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q_0}$$

又因为 $BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_0}$, 所以其矩形系数应为

$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} = \sqrt{10^2 - 1} \approx 9.95$$

这说明串联谐振回路的谐振曲线和矩形相差较远,所以选择性比较差。

(二) 并联谐振回路

LC 并联谐振回路如图 2-5 所示。图中 r 代表线圈 L 的等效损耗电阻,由于电容器的损