

新世纪
高等职业教育规划教材

高频电子技术

黄亚平 主 编
林冬梅 副主编



机械工业出版社
China Machine Press



新世纪高等职业教育规划教材

高频电子技术

主 编 黄亚平

副主编 林冬梅

参 编 张凤炳 胡满红 顾 倩 孙飞龙

主 审 殷瑞祥



机械工业出版社

高频电子技术的研究对象是高频信号产生、发射、接收和处理的有关电路,主要解决无线电广播、电视和通信中发射与接收的有关技术问题。

高频电子技术是电子信息类专业的主要技术基础课程,是“模拟(低频)电子技术”课程的后续内容。本书主要内容有:选频与滤波电路、高频小信号放大电路、高频功率放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路、调制与解调电路、反馈控制与频率合成电路。本书末附有高频电子技术有关内容的相应实验,以及 EWB 软件在高频电路分析中的应用实例。

本书可作为高等职业技术、高等专科学校应用电子技术、通信及相近专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子技术/黄亚平主编. —北京:机械工业出版社, 2002.6

新世纪高等职业教育规划教材

ISBN 7-111-10359-9

I. 高… II. 黄… III. 高频—电子电路—高等学校:技术学校—教材
IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 039560 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王保家 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:姚毅 责任印制:付方敏

煤炭工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·12.5 印张·307 千字

0 001—4 000 册

定价:18.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677—2527

封面无防伪标均为盗版

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

主任委员	李维东	广东白云职业技术学院	常务副院长
副主任委员	陈周钦	广东交通职业技术学院	院长
	石令明	广西柳州职业技术学院	院长
	蔡昌荣	广州民航职业技术学院	副院长
	覃洪斌	广西职业技术学院	副院长
	姚和芳	湖南铁道职业技术学院	副院长
	韩雪清	机械工业出版社教材编辑室	副主任
委 员	沈耀泉	深圳职业技术学院	副院长
	郑伟光	广东机电职业技术学院	副院长
	张尔利	广西交通职业技术学院	院长
	谈向群	无锡职业技术学院	副院长
	刘国生	番禺职业技术学院	副院长
	陈大路	温州职业技术学院理工学区	主任
	邹 宁	广西机电职业技术学院	副院长
	成王中	济源职业技术学院	副院长
	管 平	浙江机电职业技术学院	副院长
	韦荣敏	广西柳州市交通学校	校长
	田玉柯	遵义航天工业学校	校长
	黄秀猛	厦门市工业学校	校长
	张毓琴	广东白云职业技术学院	兼委员会秘书

编写说明

20 世纪 90 年代以来,我国高等职业教育为社会主义现代化建设事业培养了大批急需的各类专门人才,提高了劳动者的素质,对建设社会主义精神文明,促进社会进步和经济发展起到了重要作用。中共中央、国务院《关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定》指出:“要大力发展高等职业教育”。教育部在《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》中明确指出:“高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,培养拥护党的基本路线,适应生产、建设、服务第一线需要的,德、智、体、美等方面全面发展的高等技术应用性专门人才;学生应在具有必备的基础理论知识和专门知识的基础上,重点掌握从事本专业领域实际工作的基本能力和基本技能。”加入 WTO 以后,我国将面临人才资源的全球竞争,其中包括研究开发型人才的竞争,也包括专业技能型优秀人才的竞争。高等职业教育要适应我国现代化建设的需要,适应世界市场和国际竞争的需要,尽快为国家培养出大批符合市场需求的、有熟练技能的高等技术应用性人才。

教材建设工作是整个高等职业教育工作中的重要内容,在贯彻国家教改精神保证培养人才质量等方面起着重要作用。根据目前高等职业教育发展的趋势,机械工业出版社组织全国多所在高等职业教育办学有特色、在社会上有影响的高职院校成立了“新世纪高等职业教育规划教材编审委员会”,诚请教学经验丰富、实践能力强的专业骨干教师,组织、规划、编写了这套“新世纪高等职业教育规划教材”,首批教材含三个专业系列共 21 本书(书目附后)。系列教材凝聚了全体编审人员、编委会委员的大量心血,同时得到了各委员院校的大力支持,在此表示衷心感谢。

参加本套教材编写的作者均来自教学一线,他们对高职教育的专业设置、教学大纲、教改形势都有深刻的认识和体会。这为编写出具有创新性、适用性的高职教材奠定了良好基础。

本套教材的编写以保证基础、加强应用、体现先进、突出以能力为本位的职教特色为指导思想,在内容上遵循“宽、新、浅、用”的原则。所谓“宽”,即知识面宽,适用面广;所谓“新”,就是要体现新知识、新技术、新工艺、新方法;所谓“浅”,是指够用为度、通俗易懂;所谓“用”,就是要注重应用、面向实践。

本套教材的出版,将促进高等职业教育的教材建设,对我国高等职业教育的发展产生积极的影响。同时,我们也希望在今后的使用中不断改进、完善此套教材,更好地为高等职业教育服务,为经济建设服务。

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

前 言

人类社会的发展已从工业化社会进步到信息化社会,各种类型的信息必须转化成电子信息才便于处理和传递。广播、电视、通信以及计算机行业都可看成从事电子信息的产生、处理、储存和传递的行业。而高频电子技术是电子信息发送、处理和传递的理论基础,因此对于电子信息和通信等专业来说,高频电子技术是重要的基础课程。

本书是高等职业技术教育电子信息类专业教材。本书书名确定为《高频电子技术》,一方面是考虑到本课程是“模拟(低频)电子技术”的后续课程,另一方面是考虑职业技术教育的特点。因此本书在内容上,既注意基本理论的完整性,又尽量避免复杂的数学推导。注重基本概念、基本分析方法和基本计算方法的介绍。重点培养学生分析问题和解决问题的能力,理论联系实际的能力和实际操作能力。本书主要内容包括:高频电子技术概论,选频和滤波电路,高频小信号放大器,正弦波振荡器,变频电路,高频功率放大器,振幅调制与解调,角度调制与解调,反馈控制电路和频率合成电路。为了提高学生的实际动手能力,书末附录A给出了“高频电子技术”的有关实验,可根据教学需要选用。为提高学生在计算机上处理有关电路的能力,附录B给出了“EWB软件在高频电路中的应用实例”,有条件的学校也可选用。本书在简明介绍基础知识和基本电路的情况下,较多介绍新型元器件和集成电路的有关知识和应用实例,有利提高学生的实际技能。本书授课学时数建议为60。

本书第一、二、三、十章由黄亚平编写,第四、五章由张凤炳编写,第六章由胡满红编写,第七、八章和附录B由林冬梅编写,第九章由顾倩编写,附录A由孙飞龙编写。全书由广州白云职业技术学院黄亚平副教授统稿、主编,林冬梅为副主编,由华南理工大学殷瑞祥教授主审。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言		习题	77
第一章 高频电子技术概论	1	第六章 高频功率放大电路	78
第一节 高频电子技术的研究范围	1	第一节 概述	78
第二节 无线电信号的产生与发射	3	第二节 丙类谐振功率放大电路	78
第三节 无线电信号的接收	4	第三节 丁类高频功率放大电路	92
习题	5	第四节 宽带高频功率放大电路	94
第二章 选频和滤波电路	7	第五节 功率合成技术	98
第一节 概述	7	第六节 晶体管倍频器	101
第二节 串联谐振回路	7	第七节 高频功率放大电路应用举例	102
第三节 并联谐振回路	10	本章小结	104
第四节 回路的阻抗变换	12	习题	104
第五节 耦合回路	16	第七章 振幅调制与解调	106
第六节 滤波器电路	18	第一节 概述	106
本章小结	23	第二节 振幅调制原理	106
习题	24	第三节 调幅电路	112
第三章 高频小信号放大器	25	第四节 调幅信号解调原理	114
第一节 概述	25	本章小结	119
第二节 晶体管高频小信号等效电路	26	习题	119
第三节 高频小信号谐振放大器	29	第八章 角度调制与解调	121
第四节 集成电路高频小信号放大器	37	第一节 概述	121
第五节 噪声与干扰	40	第二节 角度调制与解调原理	122
本章小结	43	第三节 调频电路	127
习题	44	第四节 鉴频电路	132
第四章 正弦波振荡器	46	第五节 调频、鉴频的应用	135
第一节 概述	46	本章小结	140
第二节 反馈型振荡器原理	46	习题	140
第三节 LC 振荡器	49	第九章 反馈控制电路	142
第四节 石英晶体振荡器	54	第一节 概述	142
第五节 RC 振荡器	56	第二节 自动增益控制电路	142
第六节 集成电路振荡器简介	59	第三节 自动频率微调	146
本章小结	61	第四节 锁相环路	147
习题	62	第五节 集成锁相环及其应用	152
第五章 频率变换与混频电路	64	本章小结	157
第一节 概述	64	习题	157
第二节 非线性器件的特性及分析方法	64	第十章 频率合成技术	158
第三节 混频电路	70	第一节 概述	158
本章小结	76	第二节 频率直接合成	159

第三节 锁相环频率合成（频率间接合成）	161	电路	172
第四节 集成锁相环频率合成器	165	实验四 变容管调频电路	173
本章小结	168	实验五 调幅与检波	175
习题	169	实验六 混频电路	176
附录	170	实验七 锁相环路	177
附录 A 高频电子技术实验	170	实验八 高频谐振功率放大电路	178
实验一 高频谐振电路与滤波电路特性	170	实验九 比例鉴频器的调试与测量	180
实验二 高频小信号谐振放大器	172	附录 B EWB 软件在高频电子线路中的应用	181
实验三 电容三点式振荡及晶体振荡		参考文献	192

第一章 高频电子技术概论

第一节 高频电子技术的研究范围

21 世纪人类已进入信息时代，人们可用各种方式方便快捷地传递与接收信息。人类社会的信息主要以声音、图像、文字和符号等形式出现。各种类型的信息对人类社会生活产生极大的影响，如军事信息影响战争的胜负，甚至决定国家民族的存亡；经济信息影响交易的成败和公司的兴衰；文娱体育信息给人以愉快和享受。19 世纪前，远距离传递信息很困难，在古代，人们曾用烽火报告敌情，以快马传递书信，这些都是远距离直接传送信息的例子。直到 19 世纪人类掌握电磁学理论后，信息的传输才有了新的进展。有线电话和电报将声音和文字变成电信号传送，能够迅速、准确地远距离传送信息，是通信技术的重大突破。但有线电报和电话需要依靠导线传送信号，使用受到限制。能否不要导线，在空间传送信号，随后发明的无线电通信就解决了这个问题。

由电磁学的基础理论可知，交变的电流可感应出交变的磁场，交变的磁场又可引起交变的电场，由此产生电磁波。频率高的电磁波易向空间传播，远距离传输无需导线，称为无线电波。

由于无线电波能方便快捷地向空间传播，所受限制较少，因此广泛地用于信息的传输。现代社会将无线电技术用于广播、电视、通信、雷达和导航等领域。由于它们都涉及信息的传输，所以可称为广义的无线电通信系统。

无线电通信系统由发射装置、传输媒质和接收装置构成，如图 1-1 所示。

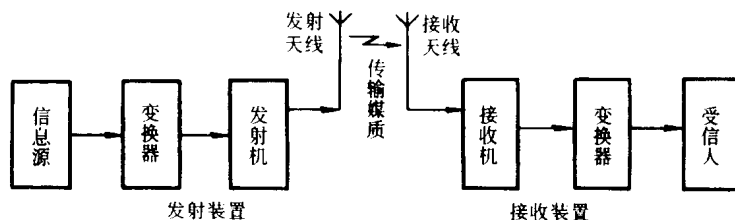


图 1-1 无线电通信系统组成框图

信息源发出需要传送的信息，如声音、图像、文字等，由变换器把这些原始信息转换成相应的电信号，然后由发送设备把这些电信号转换成高频振荡信号，发射天线再将高频振荡信号转换成无线电波，向空间发射。无线电波的传输媒质是自由空间。接收天线将接收到的无线电波转换成高频振荡信号，接收设备把高频振荡信号转换成低频电信号，再由变换器还原成原来传递的信息（声音、图像、文字等），最后信息接收人就收到传递的信息。

高频电子技术的研究对象主要是无线电发送与接收设备的有关电路的原理、组成与功能。首先了解一下无线电波在传输媒质中的传播特性和有关规律也是有必要的。

无线电波的传播速度极快，与光速相同，约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。无线电波的波长、频率和传

播速度的关系如下式：

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中， λ 是波长 (m)； c 是传播速度 (m/s)； f 是频率 (Hz)。

由上式可知，因传播速度固定不变，频率越高，波长越短；频率越低，波长越长。

无线电波的频率相差很大，因而波长变化很大。不同波长的无线电波传播规律不同，应用范围也不同，因此通常把无线电波划分成不同波段。表 1-1 列出常见波段名称、波长范围、频段名称、频率范围和主要用途。

表 1-1 无线电波的波段

波段名称	波长范围	频段名称	频率范围	主要用途
长波 (LW)	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$	低频 (LF)	300 ~ 30kHz	海上船舶通信
中波 (MW)	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$	中频 (MF)	3 ~ 0.3MHz	无线电广播通信
短波 (SW)	$10 \sim 10^2 \text{m}$	高频 (HF)	30 ~ 3MHz	短波广播、军事通信
米波	1 ~ 10m	甚高频 (VHF)	300 ~ 30MHz	电视、调频广播、无线电通信
分米波	1 ~ 10dm	特高频 (UHF)	3 ~ 0.3GHz	电视、雷达、移动通信
厘米波	1 ~ 10cm	超高频 (SHF)	30 ~ 3GHz	雷达、卫星通信
毫米波	1 ~ 10mm	极高频 (EHF)	300 ~ 30GHz	射电天文学、雷达
亚毫米波	0.1 ~ 1mm	超极高频	3 ~ 0.3THz	卫星广播通信
光波 (红外至紫外)	100 μm 以下		3THz 以上	光通信

无线电波在空间的传播途径有三种：一是沿地面传播，叫地波，如图 1-2a 所示；二是依靠电离层的反射传播，叫天波，如图 1-2b 所示；三是在空间直线传播，叫直线波，如图 1-2c 所示。

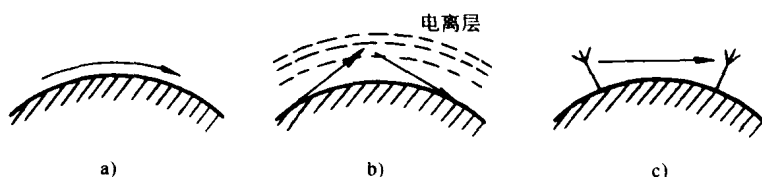


图 1-2 无线电波的传播方式

a) 地波 b) 天波 c) 直线波

波长不同的无线电波在空间的传播特性不同，长波和中波的波长较长，遇障碍物绕射能力强，且地面的吸收损耗较少，可沿地面远距离传播，所以长波和中波的通信和广播主要以地波方式传播。

短波的波长较短，地面绕射能力弱，且地面吸收损耗较大，不宜地面传播，但短波能被电离层反射到远处，因此短波的广播和通信主要以天波方式传播。

波长比短波更短的无线电波称为超短波（如米波、分米波）。超短波的波长很短，往往小于地面障碍物（如山峰、建筑物等），不能绕过，且地面吸收损耗很大，所以不能以地波

方式传播。另超短波能穿透电离层，即电离层很难反射它，所以也不能以天波方式传播。超短波只能在空间以直线波方式传播，而地球的表面是球面的，因此它的传播距离有限，并与发射和接收天线高度有关。电视、调频广播和移动通信均属超短波通信，只能以直线波方式传播。

第二节 无线电信号的产生与发射

在无线电通信的发射部分，原始信息（声音、图像、文字等）由变换器转换成相应的电信号，这些电信号的频率对应于原始信息的频率，称为基带信号。基带信号的特点是：频率较低，相对频带较宽。以声音的转换为例：声音的频率范围为 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ ，由声电变换器转换成的音频电信号频率也是 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ ，属于低频范围。低频振荡电流能量较低，辐射力弱，不宜发射；而且因频率低，波长很长，由天线理论可知，发射和接收天线的尺寸和波长为同一数量级，这就要求天线尺寸巨大，实际上无法实现；另外如果能直接发射音频信号，多家电台的发射频率将是相同的，接收机将无法区分，会造成相互的干扰，由此可知不能也不可直接发射音频信号。变换器转换得到的图像和文字的基带信号频率也较低，同样也不能直接发送。

由此可见，要实现无线电通信，首先必须产生高频振荡信号，再把基带低频信号加到高频振荡信号上控制它的参数，这称为调制，然后把已受基带低频信号调制的高频振荡信号经发射天线发射出去，这样的高频已调无线电波就将基带低频信号一起发射。未经调制的高频振荡信号好比“载运工具”，称为载波信号；基带低频信号称为调制信号；经调制携带有基带低频信号的高频振荡信号称为已调波信号。当传输的基带信号是模拟信号时，称为模拟通信系统，当传输的基带信号是数字信号时，称为数字通信系统，虽然基带信号不同，但通信系统的原理和组成是相同的。

高频载波通常是一个正弦波振荡信号，有振幅、频率和相位三个参数可以改变。用基带信号对载波进行调制就有调幅、调频和调相三种方式。

(1) 调幅 (AM) 载波的频率和相位不变，载波的振幅按基带信号的变化规律变化。调幅获得的已调波称为调幅波。中短波广播和电视的高频图像信号都是调幅波。

(2) 调频 (FM) 载波的振幅不变，载波的瞬时频率按基带信号的变化规律变化。调频获得的已调波称为调频波。调频广播和电视的高频伴音信号都是调频波。

(3) 调相 (PM) 载波振幅不变，载波的瞬时相位按基带信号的变化规律变化。调相获得的已调波称为调相波。调频和调相又统称为调角。

由于调幅应用较早而且使用广泛，现以图 1-3 所示调幅广播发射机为例来说明发射设备的主要组成。

发射机通常由高频、低频、电源和天线四部分组成。

高频部分包括主振荡器、缓冲放大器、倍频器、中间放大器、功率推动和末级功放（受调放大）。主振荡器的作用是产生频率稳定的高频振荡，现多采用石英晶体振荡器。缓冲放大用来减轻后级对主振荡器的影响。因石英晶体产生的振荡频率不能太高，用倍频器来提高频率。倍频后还需多级放大，以达到推动末级功放的电平。末级高频功放则将输出功率提高到所需的发射功率，并受低频功率电平的调制。

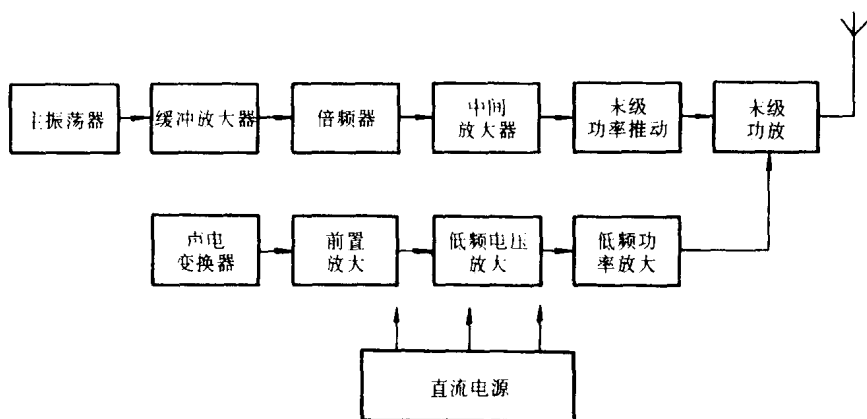


图 1-3 调幅广播发射机框图

低频部分包括声电变换器（话筒）、低频电压放大与低频功率放大。用于实现声电变换，并将音频信号逐级放大到调制所需功率，对末级高频功放进行调制。

电源部分给各部分电路提供直流电能。

天线部分把调制器送来的高频已调波信号通过天线以电磁波形式辐射出去。

第三节 无线电信号的接收

无线电信号的接收是发送的逆过程，其作用是对载有信息的高频已调波信号接收处理，从中获得需要的信息。

现以调幅广播的接收为例介绍无线电信号的接收过程。

要接收无线电信号，首先要有接收天线。由于空间无线电信号有很多个，要获得需要的信号，还须有选频电路，以选取需要的信号，并把不需要的信号滤除。接收的无线电信号是高频已调波，须经过解调才能获得原来的调制信号，即音频信号。音频信号作用到电声变换器（耳机）转换成声音后被接收人听到，因此最简单的接收机是由接收天线、选频电路、解调器（检波器）和输出变换器（耳机）四部分组成。如图 1-4 所示。

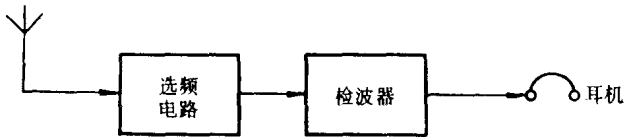


图 1-4 最简单的接收机框图

最简单的接收机电路很简单但性能很差，由于天线接收到的无线电信号很

微弱，通常只有几十微伏到几毫伏，直接送检波器检波，检波效率很低，检波后获得的音频信号更弱，只有用耳机进行电声变换才能听到微弱的声音。为了提高接收性能，检波前的高频信号和检波后的音频信号都需要放大，这就形成了直接放大式接收机，其组成如图 1-5 所示。

直接放大式接收机在选频电路后有高频放大器，对选频后的高频信号放大，这样送到检波器的高频信号幅度增大，检波效率提高。检波器输出的音频信号幅度可达几百毫伏，再经低频电压放大和低频功率放大后，推动扬声器发声，其收听效果要比最简单接收机好得多。

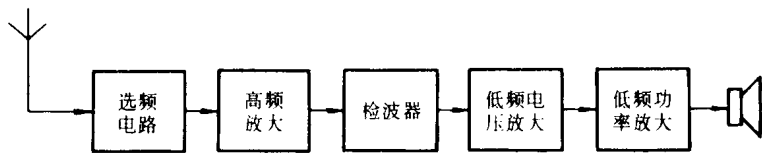


图 1-5 直接放大式接收机框图

其灵敏度有所提高，但还不够好，因为通常只有一级高频放大。其选择性也还不够好，因为只有一级选频电路。而且在频段的高端，高频放大器的放大倍数比低端要低，对高端电台的接收效果就会差一些，而频段低端电台的接收效果要好一些，频段内电台的接收效果不均衡。为克服这些缺点，现在的接收机都采用超外差式电路。图 1-6 是超外差式接收机组成框图。

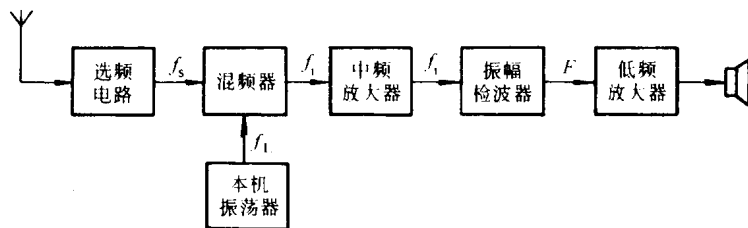


图 1-6 超外差式接收机框图

与直接放大式接收机相比，超外差式接收机增加了混频和本机振荡电路。混频电路是用晶体管的频率变换作用，把选频电路的外来高频已调波信号，与本机振荡电路所产生的本机高频振荡信号两个频率相混合，混频器的输出就会产生新的差频，这个差频的频率是本机振荡频率与外来高频信号频率之差。混频器的输出选频电路选出这个差频，这个差频通常称为中频。我国中、短波调幅接收机的中频是 465kHz。这就要求本振频率比外来信号频率超出一个差频，这就是超外差式接收机名称的来由。由于超外差式接收机的中频是固定不变的，不随外来高频信号频率的改变而变化，不管是频段的高端还是低端，经混频后获得的中频都是一样的。这样接收高、低端电台的中频放大倍数都是相同的，整个频段的接收效果是均衡的。中频放大器的工作频率较低，且固定不变，其性能可做得很好。而且可设有几级中频放大，每级都有选频回路，这样放大倍数很高，整机灵敏度就高，选择性也好。由于超外差式接收机具有这些优点现在得到广泛的采用。

本章介绍了无线电广播发射与接收的基本原理和工作过程，传输的信息是声音。对于传输其他形式的信息，无线电波的发送与接收的基本原理和工作过程也是相同的。本书后面各章将分别介绍设备中的选频电路、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、混频器、振幅调制电路和检波器、角度调制电路和鉴频器与鉴相器以及反馈控制电路和频率合成器等内容。

习 题

- 1-1 无线电通信系统由几部分组成，各部分起什么作用？
- 1-2 基带信号有何特点？为什么需要载波才能发射？

1-3 无线电通信中为什么要调制与解调？它们的作用是什么？

1-4 什么是调幅？什么是调频？你接收过调幅和调频广播信号吗？

1-5 超外差式接收机有何特点？为什么要混频？如接收的广播信号频率为 1500kHz，中频为 465kHz，接收机的本机振荡频率是多少？

1-6 高频电子技术主要研究解决什么问题？

第二章 选频和滤波电路

第一节 概 述

高频已调波信号的特点是频率高, 相对频带宽度较窄。以调幅广播中波为例, 其频率范围规定为 $526.6 \sim 1606.5\text{kHz}$, 频道间隔规定为 9kHz , 信号的相对频带宽度为 $1/58 \sim 1/178$ (此处以频道间隔代替频带宽度计算, 通常频带宽度还应小于频道间隔)。按以上频率范围和频道间隔的规定, 在调幅广播中波波段可以设置 110 多个广播电台 (某地区实际可接收电台数少于此数)。要从多个高频信号中选取需要接收的信号, 选频和滤频电路不可缺少。

LC 谐振回路是最常用的选频网络, 它有串联回路和并联回路两种类型。

用 LC 谐振回路的选频特性, 可以从输入信号中选出有用信号而抑制无用的信号, 如用在接收机的输入回路和选频放大器中。LC 回路还可进行频幅和频相转换, 如用在鉴频器电路中, 此外 LC 回路还可组成阻抗变换电路用于级间耦合和阻抗匹配, 所以 LC 谐振回路是高频电路中不可缺少的组成部分。

传统接收机的输入回路, 常由电感线圈和可变电容器组成 LC 谐振回路, 靠手转动可变电容器改变电容量来选择不同信号频率。为实现自动调谐选台, 现已使用变容二极管代替可变电容器来调谐选台, 这在电视机的电调谐高频头中已广泛使用。

在整机生产中为了减少人工调谐, 已使用固体滤波技术, 陶瓷滤波器、石英晶体滤波器和声表面波滤波器已广泛使用, 它们常用作集中滤波器, 在集成电路选频放大和信号选取分离上起着重要作用。

第二节 串联谐振回路

一、串联谐振回路的参数和特性

在 LC 谐振回路中, 当信号源与电容和电感以及负载串接, 就组成串联谐振回路。如图 2-1 所示, 其中 R_L 是负载电阻, r 是电感 L 的损耗电阻。

由电路原理知识, 可得出串联谐振回路的主要参数表达式。

1. 回路总阻抗

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

2. 回路谐振频率

在某一特定频率 ω_0 时, 回路电抗为 0, 回路总阻抗为最小值, 回路电流达到最大值, 回路发生谐振。由回路电抗

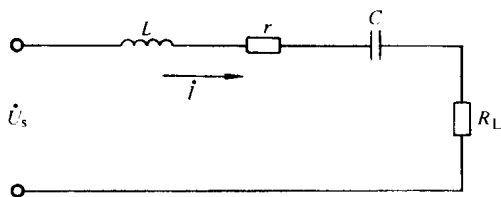


图 2-1 LC 串联谐振回路

$$X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

得谐振角频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-2)$$

谐振频率

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

3. 回路空载品质因数

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-4)$$

回路有载品质因数

$$Q_e = \frac{\omega_0 L}{R_L + r} \quad (2-5)$$

4. 空载回路电流

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2-6)$$

谐振时空载回路电流

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_s}{r} \quad (2-7)$$

5. 单位（归一化）谐振曲线

回路电流幅值与信号电压频率之间的关系曲线称为谐振曲线。串联谐振时，回路阻抗最小，回路电流达到最大值。在空载时，任意频率下的回路电流 $\dot{I}$ 与谐振时回路电流 $\dot{I}_0$ 之比称为单位（归一化）谐振函数，用 $N(f)$ 表示。 $N(f)$ 曲线称为单位谐振曲线。

$$\begin{aligned} N(f) &= \frac{\dot{I}}{\dot{I}_0} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}{r^2}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}} \end{aligned} \quad (2-8)$$

定义相对失谐 $\epsilon = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$ ，当失谐很小，即 f 与 f_0 相差很小时

$$\epsilon = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f + f_0)(f - f_0)}{f_0 f} \approx \frac{2(f - f_0)}{f_0} = \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (2-9)$$

所以

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

根据式 (2-10) 可作出单位谐振曲线，如图 2-2 所示。

6. 回路选择性

由图 2-2 可看出回路对偏离谐振频率信号的抑制作用，偏离越大， $N(f)$ 越小。而且

回路 Q 值大, $N(f)$ 曲线就尖锐, 回路选频性能就好; 回路 Q 值小, $N(f)$ 曲线就平缓, 回路选择性就差。

7. 回路通频带

接收的高频已调波信号不是一个单一的频率, 而是包含调制信号在内的一个频带。为了衡量回路对不同频率信号的通过能力, 定义单位谐振曲线 $N(f) \geq 1/\sqrt{2}$ 所对应的频率范围为回路的通频带, 用 $BW_{0.7}$ 表示。如图 2-2 所示, $BW_{0.7} = f_2 - f_1$ 。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 $Q_0 \frac{2\Delta f_{0.7}}{f_0} = \pm 1$ (负值舍去)

因为 $2\Delta f_{0.7} = f_2 - f_1 = BW_{0.7}$

所以 $BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_0}$ (有载时 $BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_e}$) (2-11)

由上式可知通频带 $BW_{0.7}$ 与回路 Q 值成反比, 回路的 Q 值又代表回路的选择性, 即回路的通频带和选择性是互相矛盾的两个性能指标。

实际谐振回路 Q 值越高, 谐振曲线就越尖锐, 选择性就越好, 而通频带就越窄; 如果要增宽频带, 就要使 Q 值下降, 而这样选择性就差了。

8. 矩形系数

理想谐振回路, 其幅频特性曲线应是通频带内平坦, 对信号无衰减, 其值为 1; 而在通频带外, 任何频率都不能通过, 其值为 0。如图 2-2 所示, 是高度为 1, 宽度为 $BW_{0.7}$ 的矩形。显然, 实际谐振回路距理想有差距, 为比较实际幅频特性曲线偏离 (或接近) 理想幅频特性曲线的程度, 可用矩形系数这一参数来衡量。

矩形系数 $K_{r0.1}$ 定义为单位谐振曲线 $N(f)$ 值下降到 0.1 时的频带范围与通频带之比

$$K_{r0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} \quad (2-12)$$

理想谐振回路 $K_{r0.1} = 1$, 实际回路中 $K_{r0.1}$ 总是大于 1 的。其数值越大, 表示偏离理想值越大; 其值越小, 表示偏离越小, 显然其值越小越好。

9. 实际单振荡谐振回路的矩形系数

由定义取

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

根据图 2-2, 求得

$$BW_{0.1} = f_4 - f_3 = \sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q_0} \quad (2-13)$$

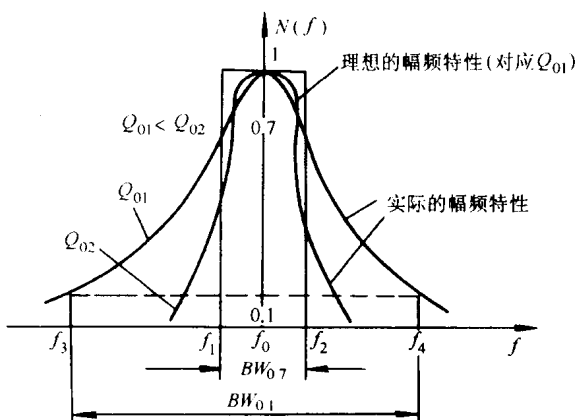


图 2-2 谐振回路的单位谐振曲线