



教育部高职高专规划教材

高频电子线路

● 莫怀忠 主编
韩春光 主审



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

高频电子线路

莫怀忠 主 编

韩春光 主 审

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高频电子线路/莫怀忠主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.6
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3857-7

I. 高… II. 莫… III. 高频-电子线路-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 039663 号

教育部高职高专规划教材

高频电子线路

莫怀忠 主 编

韩春光 主 审

责任编辑: 张建茹

责任校对: 李 林

封面设计: 郑小红

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13¼ 字数 328 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3857-7/G·1017

定 价: 21.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

为贯彻《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》(教高[2000]2号)有关精神,积极支持教育部面向21世纪高职高专教材建设,在教育部领导直接关怀下,全国高等职业教育院校协作会专门课开发指导委员会确定了编写电子类专业的10门主干课程(《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电子技术实训》、《高频电子线路》、《电子测量与仪器》、《电视接收技术》、《电子设计自动化(EDA)技术》、《单片机应用技术》和《C语言》)供电子技术应用、应用电子技术、电子工程、通信、电子设备制造与维修等相关专业使用。

本套教材紧密结合高职高专教育特点,主动适应社会实际需要,突出应用性、针对性,加强实践能力的培养。内容叙述力求深入浅出,将知识点与能力点有机结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力;内容编排力求简洁明快、形式新颖、目标明确,利于促进学生的求知欲和学习主动性。

高频电子线路是通信与信息系统专业的一门重要的专业基础课,是一门工程性和实践性都很强的课程。根据高职教育的特点,本着“适应性、实用性、通俗性”的原则,本教材在编写中,省略了繁锁的理论推导,注重强调理论联系实际。在内容的叙述上,力求简明扼要,通俗易懂,突出重点,并注重实用。本书以模拟通信系统的组成原理为引导,逐步深入地介绍高频电子线路中各功能单元电路的组成、工作原理及其主要性能参数的计算方法。为了适应现代电子技术的发展趋势,在内容上尽量以集成电路构成的电路为主进行介绍。各章节的内容既有各自的独力性,又有相互的联系性。在各章节均增加了相应电路的应用实例,让学生感到学有所用,同时增强学生的读图能力。

为了增强学生对各高频单元电路的工作原理和电路性能的理解,在附录中,利用易学、易用的EWB电路仿真分析软件,指导学生对主要的高频电子线路进行性能分析和结论验证,体现了实践教学手段的先进性及其发展方向。

本书由莫怀忠主编,其中的绪论和二、四、五章由莫怀忠编写,第一章和附录的实验与实训由何军编写,第三章由张光鑫编写,第六章由颜琴峰编写,第七章由张凯编写。韩春光对书稿进行了认真的审阅,并提出了宝贵的意见和修改建议。在审稿会上,主编、主审以及各位参编又对书稿进行了认真细致的审阅、修改和订正,进一步提高了本教材的质量。在此,对各位老师的辛勤参与以及各有关院校和化学工业出版社的大力支持,一并致以诚挚的感谢。

限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者指正。

作者

2002年3月

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

目

录

绪论	1
第一章 高频小信号放大器	8
第一节 晶体管高频等效电路	8
第二节 宽带放大器的特点和分析方法	15
第三节 扩展放大器通频带的方法	16
第四节 小信号谐振放大器的分类和主要性能指标	21
第五节 单调谐放大器	23
第六节 影响放大器的稳定性及其解决方法	35
第七节 集成中频放大器	38
本章小结	41
习题一	42
第二章 高频功率放大器	44
第一节 概述	44
第二节 丙类谐振功率放大器的工作原理	45
第三节 丙类谐振功率放大器的性能分析	47
第四节 丙类谐振功率放大器电路	52
第五节 宽带高频功率放大器	58
第六节 丙类谐振倍频器	65
本章小结	66
习题二	67
第三章 正弦波振荡器	68
第一节 概述	68
第二节 反馈式正弦波振荡器的工作原理	69
第三节 LC 正弦波振荡器	71
第四节 石英晶体振荡器	81
第五节 RC 振荡器	87
本章小结	92
习题三	93

第四章 频率变换与集成模拟乘法器	97
第一节 利用非线性器件进行频率变换	98
第二节 模拟乘法器	99
本章小结	105
习题四	106
第五章 调幅、检波与混频电路	107
第一节 调制概述	107
第二节 调幅波的性质	107
第三节 调幅电路	112
第四节 检波器	116
第五节 变频电路	123
本章小结	133
习题五	133
第六章 调角与解调	135
第一节 概述	135
第二节 调频电路	143
第三节 鉴频器	152
本章小结	162
习题六	163
第七章 反馈控制电路	164
第一节 概述	164
第二节 自动增益控制 (AGC) 电路	165
第三节 自动频率控制 (AFC) 电路	169
第四节 锁相环路 (PLL)	170
本章小结	185
习题七	186
附录 实验与实训	188
第一部分 实验	188
第二部分 实训	199
参考文献	204

绪 论

高频电子线路是高职高专院校通信、电子类专业的一门主要专业基础课,通常由以下内容组成:小信号谐振放大器、谐振功率放大器,正弦波振荡器、调制器(包括调幅电路、调频电路或调相电路)、混频与倍频、解调器(检波器、鉴频器或鉴相器)及反馈控制电路(包括自动增益控制电路、自动频率控制电路及锁相环路)等,上述各类电路是无线通信系统及其他电子系统的基本组成部分。为了具体了解各电路的功能,下面扼要地介绍无线通信系统的基本组成及工作原理。

无线电通信系统是无线电技术的最早应用。所谓通信系统,可以简单称之为传输信息的系统。当然,目前的所谓通信系统其含义与 40 多年前已大不相同,过去指的只是无线电报和电话,而今天,除电报、电话之外,还包括传真、电视和各式各样的数据信息传输系统。这些信息,有的来自雷达定位系统,有的来自电子计算机和数据处理设备,而有的则来自自动控制系统或传感器,有的甚至来自宇宙空间。即便是将来,随着人类生活各方面需要的日益增长,更有效、更大量和更可靠地传输信息仍然是无线电技术应用的一个重要方面。

随着电子科学的不断发展与进步,到目前为止,实现信息传输的通信系统已有利用电缆线传输信息的有线通信系统、利用电磁波在空间传输信息的无线通信系统以及利用光导纤维传输信息的光纤通信系统。下面仅以无线通信系统为例,简单介绍通信系统的基本工作原理以及各高频单元电路的应用,以增加大家对高频电子线路的认识。

无线通信系统的简略方框图如图 0-1 所示。

由方框图可见,无线通信系统通常是由三部分组成,即发射装置(或称之为发射设备)、接收装置(或称之为接收设备)及自由空间。而自由空间是电磁波在发射装置与接收装置之间进行信息传输的媒介(对于有线通信系统来说,发射装置与接收装置之间传输信息的媒介是电缆线;而对于光纤通信

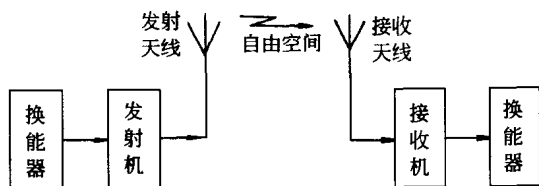


图 0-1 无线通信系统组成方框图

系统而言,发射装置与接收装置之间传输信息的媒介是光导纤维)。无线电广播系统是无线通信系统典型应用之一,下面以无线电调幅广播为例分别对发射装置和接收装置的电路组成原理及电磁波在空间传播的基本特性做简略介绍。

一、无线电发射设备的基本工作原理

调幅式无线电广播发射机方框图如图 0-2 所示。

由图可见,无线电调幅广播发射机主要由载波信号产生电路、调制信号产生电路、振幅调制电路及发射天线等部分组成。

载波产生电路主要包含图中的正弦波振荡器、高频放大器及倍频器,它的基本功能是产生高频大功率的正弦波信号。调制信号产生电路则包括图中的微音器和调制信号放大器,它的

功能是将声音转换成音频信号并加以放大。这里的音频信号通常又称为调制信号,它代表传输信息的全部内容。而振幅调制电路(又称振幅调制器)的功能是使载波信号的振幅受调制信号的调制作用而输出调幅波,由振幅调制器输出的调幅波经天线转换成电磁波的形式向空间辐射。

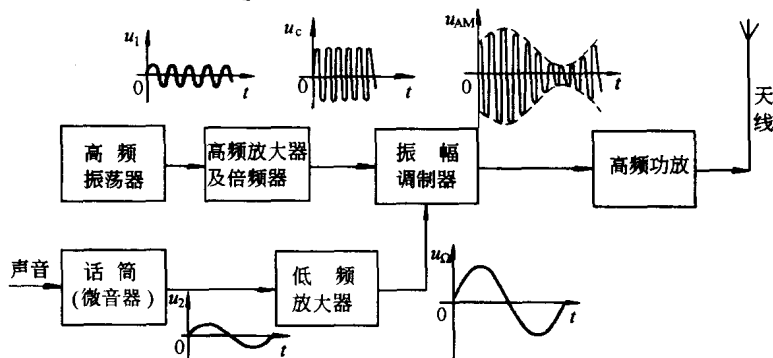


图 0-2 调幅式无线电广播发射机方框图

1. 载波产生电路

高频振荡器,通常又称为主振器。它的主要功能是产生波形好、频率稳定的正弦波信号。为了提高正弦波的频率稳定性,主振器一般均采用石英晶体振荡器。

由于高稳定度的石英晶体(谐振器)振荡频率并不高,因而石英晶体振荡器所产生的正弦波频率往往达不到高载频的要求。为此,对主振器产生的正弦波要进行倍频及放大,使正弦波信号的频率成倍增加,以得到频率较高的高频正弦波(载波)。

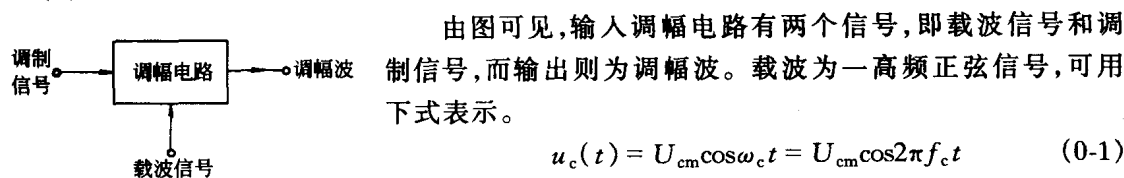
2. 调制信号产生电路

调制信号产生电路由微音器和音频放大器组成。微音器的功能是将声音转换成音频信号。由于微音器输出的音频信号非常微弱(通常为 mV 级),远不能满足大功率振幅调制电路对调制信号的要求,为此,应进行放大,使音频信号达到所需的电平。

3. 振幅调制电路

振幅调制电路的基本功能是将调制信号对载波进行振幅调制,输出大功率的调幅波信号。

(1) 振幅调制基本原理 振幅调制又可简称为调幅,其原理方框图如图 0-3 所示。



由图可见,输入调幅电路有两个信号,即载波信号和调制信号,而输出则为调幅波。载波为一高频正弦信号,可用下式表示。

$$u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t = U_{cm} \cos 2\pi f_c t \quad (0-1)$$

式中, U_{cm} 为载波振幅; ω_c 为载波角频率; f_c 为载波频率。例如,我国无线电广播中波段, $f_c = 535 \sim 1605 \text{ kHz}$ 。

但对某一电台而言,其载频 f_c 只是其中的一个点频,如 $f_c = 840 \text{ kHz}$ 等。

在无线电广播系统中,调制信号为音频信号。通常,音频信号是一个复杂的信号,但为了分析方便,一般是先以一单音频信号为例进行讨论。对于单音频信号,可用下式表示。

$$u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t = U_{\Omega m} \cos 2\pi F t \quad (0-2)$$

式中, $U_{\Omega m}$ 为单音频信号振幅; Ω 为单音角频率; F 为单音频率。例如, 语音频率为数百赫兹至数千赫兹之间。可见, 调制信号频率 F 要比载频 f_c 低得多。

将 $u_{\Omega}(t)$ 对 $u_c(t)$ 进行振幅调制后, 输出单音频调幅波的一般表达式如下。

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= U_{cm}(1 + M_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= U_{cm}(1 + M_a \cos 2\pi F t) \cos 2\pi f_c t \end{aligned} \quad (0-3)$$

式中, $U_{cm}(1 + M_a \cos 2\pi F t)$ 为调幅波的瞬时振幅; M_a 为调幅系数, 通常 $M_a \leq 1$, 可见 $u_{AM}(t)$ 的瞬时振幅随 $u_{\Omega}(t)$ 的大小而变化。

(2) 为什么要采用调制发射方式 目前, 几乎所有的无线电发射机均采用调制发射方式, 即以代表传输信息特点的信号作为“调制信号”, 先将它“调制”在一高频信号上, 然后由天线辐射出去。那么, 究竟为什么要采用这种调制发射方式呢?

采用调制发射方式的原因是多方面的, 但至少在以下两方面是最基本的, 其一是与无线电波有效辐射的条件有关; 其次是为了满足“多路复用”的需要。

所谓无线电波有效辐射的条件, 是指无线电信号通过天线有效地辐射出去所必须具备的条件, 即天线的几何尺寸应与欲发射的无线电信号波长相比拟。

信号波长 λ 与频率 f 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (0-4)$$

式中, c 为无线电波在空间的传播速度, 其值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。若信号频率 f 的单位为 Hz (即 1/s), 则波长 λ 的单位为 m。

由于音频信号的频率范围为数百赫兹至数千赫兹, 若按式 (0-4) 估算, 就算音频信号的频率高端 (即高音信号频率) 要辐射出去, 其天线尺寸也得几十公里, 显然这在天线制作与架设方面是根本不符合实际的。换句话说, 音频信号要直接通过天线辐射出去是完全不可能的, 除非架设几十公里长的发射天线。

若将音频信号调制在高频载波上情况就大不相同了。例如, 载波频率 $f_c = 1000 \text{ kHz}$, 按式 (0-4) 估算其波长为 300m, 根据半波振子天线原理制作 150m 左右的天线便能将调幅信号有效地辐射出去。

采用调制发射方式还与实现“多路复用”的无线电通信体制有关。例如, 有一组音乐信号和一组语言信号要同时播出, 若将这两组信号同时“直接” (未经调制) 向空间辐射 (暂且不考虑有效辐射条件), 那么, 这两组信号的频谱就会发生混叠现象。当接收机接收到这类信号时, 就无法将这两组信号彼此分开, 结果将在扬声器中同时发出音乐声与讲话声, 显然, 这是不符合实际使用要求的。如果是采用调制方式, 且将上述两组信号分别调制在载频 f_{c1} 和 f_{c2} 上, 那么, 当这样的信号进入接收机时, 利用接收机调谐回路的选择特性便可将两组信号分离。当接收机调谐于 f_{c1} 时, 只有第一组信号 (载频为 f_{c1}) 能进入接收机, 而第二组信号 (载频为 f_{c2}) 则被抑制; 而当接收机调谐于 f_{c2} 时, 只有第二组信号能进入接收机, 而第一组信号则被抑制。因此, 当不同载频的多个电台同时播出节目时, 接收机只要调谐于其中某台载频, 此时接收机只能接收该台的节目, 而将其余电台的信号抑制掉。

综上所述, 正是基于上述两点使得目前所有的无线通信、无线广播及电视广播均毫无例外地采用“调制发射”方式。

4. 高频功率放大器

为了增大发射设备的覆盖面, 即增加发射设备的作用距离, 则要求振幅调制电路输出大

功率的调幅波。由于调幅电路输出的功率不大，往往要对其输出的调幅信号进行功率放大。

二、无线电接收设备的基本工作原理

目前，无论是无线电广播接收机（收音机），还是电视接收机（简称电视机）、通信接收机、雷达接收机等都毫无例外地采用“超外差”接收机的形式。以上各类接收机的组成与工作原理大同小异，所以，下面以超外差收音机为例，对其工作原理作简略分析。超外差收音机的方框图如图 0-4 所示。

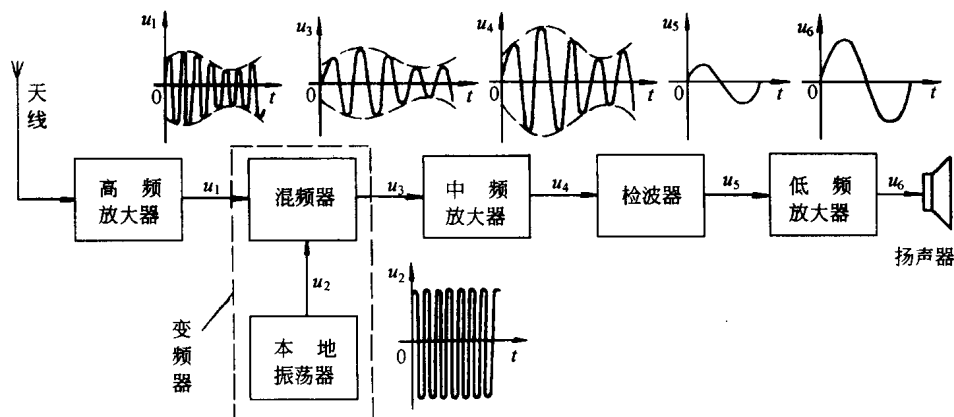


图 0-4 超外差收音机方框图

由图可见，超外差收音机由高频放大器、本振电路（本机振荡器）、混频器、中频放大器、检波器、低频放大器及扬声器等部分组成。

超外差收音机的基本工作原理如下。接收天线接收从空间传来的电磁波并感生出微小的高频信号，高频放大器从中选择出所需的信号并进行放大，得到高频调幅波信号 $u_1(t)$ ，高频放大器常由一级或多级具有选频特性的小信号谐振放大器组成。本地振荡器（又称本机振荡器）产生高频等幅振荡信号 $u_2(t)$ ，它比 $u_1(t)$ 的载频高一个中频频率，简称中频。调幅波信号 $u_1(t)$ 和本振信号 $u_2(t)$ 同时送至混频器进行混合，输出中频电压 $u_3(t)$ 。 $u_3(t)$ 与 $u_1(t)$ 相比，其包络线的形状不变[后文将看到，这表明 $u_3(t)$ 仍携有原来调制信号的信息]，但载波频率则转换为 $u_2(t)$ 的频率与 $u_1(t)$ 的载频之差，即转换为中频，因此 $u_3(t)$ 为中频调幅波信号。 $u_3(t)$ 经中频放大器放大为 $u_4(t)$ ，再送到检波器。检波器从中频调幅信号 $u_4(t)$ 中取出反映传送信息的调制信号 $u_5(t)$ ，再经低频放大器放大为 $u_6(t)$ ，送到扬声器中转变为声音信号。

1. 高频放大器

高频放大器的主要功能是将放大器的谐振频率对准某一电台的载频（或称放大器调谐于某一电台信号频率），以便从多台信号中选出其中一个电台的信号，同时加以适当放大。概括而言，高频放大器具有“选频”与“放大”功能。

由于高频放大器应具备良好的选频功能，因而，这类放大器的负载一般为 LC 调谐回路。所以，通常称这类放大器为高频小信号谐振放大器。

天线接收的信号非常微弱，一般为 mV 级，甚至可能是 μV 级。为了提高混频器的混频效果，可在混频器前设置高频放大器，尤其是远程接收机更是如此。为了提高接收机灵敏

度，应尽量选用低噪声高频管作为高频放大器的放大管。

2. 本机振荡器

本机振荡器又称本振电路，它的功能是为混频器提供高频正弦波信号。本振电路通常采用互感耦合振荡器或三点式振荡器。

3. 混频器

混频器是超外差接收机的重要组成部分。混频器的基本功能是将高频的调幅波与高频本振信号的等幅波进行非线性变换，使之变成中频的调幅信号输出。

若输入混频器的高频调幅波的载频记为 f_c ，本振信号频率记为 f_1 ，而输出中频调幅波的中频记为 f_i ，那么， f_c 、 f_1 及 f_i ，三者则遵循如下关系：

$$f_i = f_1 - f_c \quad (0-5)$$

高频信号的载频 f_c 是随不同广播电台而异的。例如，广播电台 1 的载频为 1000kHz，而广播电台 2 的载频为 840kHz。但是，收音机无论是收听 1 台节目还是收听 2 台节目，混频器输出的中频信号（调幅波）的载频是不变的，即均为 465kHz，这是超外差收音机的显著特点，也是所有超外差接收机的特点。

既然超外差收音机中频频率 $f_i = 465\text{kHz}$ 不会因所收不同电台而改变，那么本振信号频率 $f_1 = f_c + f_i$ 就应随不同电台而改变。若收听电台 1 时，本振信号频率应为 1465kHz，而收听电台 2 时，本振信号频率就应改为 1305kHz。可见，高频放大器的谐振频率应与本振信号频率保持同步变化，以维持中频不变。

4. 中频放大器

中频放大器的基本功能是将混频器输出的中频信号进行放大，为检波器提供峰-峰值约为 1V 的调幅波信号。由于混频器输出的中频信号通常为 mV（毫伏）级或甚至更小，所以，收音机中频放大器的电压增益（电压放大倍数）往往需要数百乃至数千倍，因此，中频放大器一般由多级（2~4 级）调谐放大器级联而成。

中频放大器是超外差接收机的重要组成部分，接收机的主要技术指标，如灵敏度、选择性、通频带等，在很大程度上取决于中频放大器的性能。

5. 检波器

检波器的主要功能是将中频放大器输出的中频信号（调幅波）变换成音频信号。可见，接收设备中的检波器与发射设备中的调幅电路其功能刚好相反，即互为逆变换。

6. 低频放大器

低频放大器的功能是将检波器输出的音频信号进行放大，使之具有足够大的功率以推动扬声器发声。在超外差收音机中低频放大器又可称为音频放大器。对于雷达、电视接收机而言，检波器输出的是脉冲信号或视频信号，因而要采用宽频带放大器（又称脉冲放大器、或视频放大器），而不能采用音频放大器。

三、电磁波的空间传播特点

1. 电磁波的基本传播方式

与光波相同，无线电波也是一种电磁波，它具有直射、绕射、反射及折射等现象。因而，电磁波由发射天线至接收天线之间有如下几种传播方式：图 0-5（a）所示的绕射传播方式；图 0-5（b）所示的直射传播方式；图 0-5（c）所示的反射及折射传播方式等。

由图 0-5（a）可见，所谓绕射传播即绕地球弯曲表面传播。由于地球表面并非传播电磁

波的理想导体,因而,电磁波在绕射传播过程中会有能量损耗,能量损耗的大小与电磁波的频率等因素有关。绕射传播的主要特点是传播比较稳定。

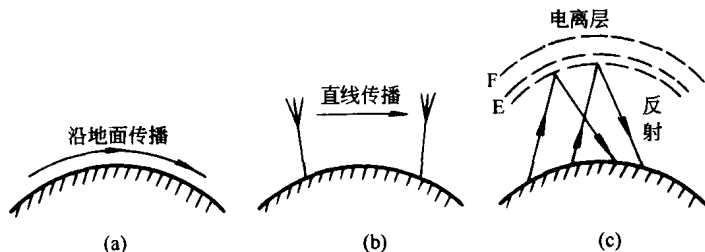


图 0-5 电磁波的几种传播方式

图 0-5 (b) 所示为直射传播方式,由于地球表面为一弯曲面,因而,直射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愈高,其传播距离就愈远(在发射机发射功率足够大、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 0-5 (c) 所示为电磁波的反射及折射传播方式,它是利用空间电离层的反射与折射现象而实现的。对电磁波的传播有显著影响作用的电离层有两层,离地球表面约 $100 \sim 300\text{km}$ 的 E 层;另一层是离地球表面约 $900 \sim 400\text{km}$ 的 F 层。电离层的高度以及电离层中的电子和离子密度与太阳光密切相关。在一昼夜或一年四季中,电离层都在不断地变化。当电磁波辐射到电离层时会发生反射及折射现象,其间有一部分电磁能量被电离层吸收。电磁波的反射、折射及吸收强度与电离程度及电磁波波长等因素有关。

2. 电磁波的传播特点

根据电磁波的波长长短不同,通常可将其分为长波、中波、短波、超短波及微波等。

(1) 长波 凡波长超过 3000m ,即频率低于 100kHz 的电磁波统称为长波。

地面对长波的吸收较弱,因而靠地球表面绕射传播的距离较远。

长波主要用于导航和播送标准时间信号,也可用于长距离的无线电报。

由于长波电台所需天线很大,且可利用的频带又比较窄,因而它的应用受到一定的限制。

(2) 中波 凡波长为 $200 \sim 3000\text{m}$,即频率为 $100 \sim 1500\text{kHz}$ 之间的电磁波,统称为中波。

电离层对中波的吸收较强,尤其是在白天吸收更为严重,因而,中波在白天基本上不能依靠电离层的反射,而只是依靠绕射方式进行传播。但是,地面对中波的吸收比长波厉害,因此,中波在白天传播距离约 100km 左右。

晚上,电离层对中波的吸收减弱,这时中波可借助反射和折射现象传播到较远的地方。例如,某些远距离的广播电台在白天收不到而在夜间却能收到正是这个道理。

中波主要用于中近距离的无线电广播。

(3) 短波 凡波长为 $10 \sim 100\text{m}$,即频率为 $3 \sim 30\text{MHz}$ 的电磁波,统称为短波。

地面对短波的吸收更为严重,因此,短波沿地球表面绕射的传播距离不超过几十公里。

虽然电离层对短波的吸收也很厉害,但远距离的短波通信主要靠电离层的反射来实现。尤其是利用电离层与地球表面之间的多次反射现象,可实现超远距离的无线电通信,因而是国际无线电广播的主要手段。

对于中近距离, 移动式小型报话通信机也可采用短波波段。

(4) 超短波及微波 凡波长为 $1\sim 10\text{m}$, 频率为 $30\sim 300\text{MHz}$ 的电磁波统称为超短波。

凡波长在 1m 以下的电磁波统称为微波。其中波长为 $0.1\sim 1\text{m}$ 、频率为 $300\sim 3000\text{MHz}$ 的电磁波统称为分米波; 波长为 $0.01\sim 0.1\text{m}$ 、频率为 $3000\sim 30000\text{MHz}$ 的电磁波统称为厘米波; 凡波长短于 0.01m 、频率高于 30000MHz 的电磁波统称为毫米波。

电离层对超短波和微波的反射及折射甚微, 超短波和微波的绕射能力也不强, 所以, 通常只是靠直线传播。超短波和微波主要用于中继通信、调频广播、电视广播、雷达、导航等方面。

四、本课程的特点

本课程是无线电技术、通信、广播、电视等专业的一门专业基础课, 一般在电工基础、电路与信号系统及低频电子线路等课程学完之后开设。上述各课程的学习为本门课的教学奠定了基础, 而它又为后续专业课的教学铺平了道路。

考虑到教材对各专业的通用性, 本书以无线通信系统为主线, 将各有关的高频单元电路贯穿于各章节之中。按照高职高专教学大纲的要求, 重点放在弄懂有关物理概念, 基本电路工作原理的分析和讨论, 了解电路元件的功能、元件的数值范围及各电路的具体应用, 而不是过多地去讨论有关公式的推导和电路的设计。在各章中尽量多列举一些典型的应用实例, 以加强教材的实用性及与专业课的联系。

第一章 高频小信号放大器



目的与要求 通过对本章的学习, 要求掌握单谐振放大器的基本电路组成、工作原理及其主要性能参数的计算; 熟悉晶体管的高频参数、扩展放大器通频带的方法、集成中频放大器的组成与特点; 了解影响放大器稳定性的主要因素及其解决的方法; 看懂各应用电路。

在无线通讯中, 发射与接收的信号应当适合于空间传输。所以, 被通信设备处理和传输的信号是经过调制处理过的高频信号, 这种信号具有窄带特性。而且, 通过长距离的通信传输, 信号受到衰减和干扰, 到达接收设备的信号是非常弱的高频窄带信号, 在做进一步处理之前, 应当经过放大和限制干扰的处理, 这就需要通过高频小信号放大器完成。这种小信号放大器是一种谐振放大器。混频器输出端也接有这种小信号放大器, 作为中频放大器对已调信号进行放大。

高频小信号放大器广泛用于广播、电视、通信、测量仪器等设备中。高频小信号放大器可分为两类, 一类是以谐振回路为负载的谐振放大器; 另一类是以滤波器为负载的集中选频放大器。它们的主要功能都是从接收的众多电信号中, 选出有用信号并加以放大, 同时对无用信号、干扰信号、噪声信号进行抑制, 以提高接收信号的质量和抗干扰能力。

第一节 晶体管高频等效电路

一、晶体管共射混合 Π 型等效电路

(一) PN 结二极管的等效电路

晶体三极管包含两个 PN 结, 所以首先从 PN 结的等效电路讲起。

PN 结二极管对交流小信号而言, 其等效电路如图 1-1 所示。等效电路中的每一个元件都对应一种物理过程, 因此这样的等效电路就是物理参数模型。其中 r_j 为模拟 PN 结对交流信号呈现的电阻, 相当于工作点 Q 处的特性曲线的斜率倒数, C_T 为模拟 PN 结的势垒电容, C_D 为模拟 PN 结的扩散电容, 在等效电路中三者是并联的; r_s 为模拟二极管的串联电阻, 它包括 P 区、N 区的体电阻以及电极引线的接触电阻。

当直流工作点确定后, 等效电路中各元件的数值都是确定值。若二极管正向偏置, 则结电阻

$$r_j = \frac{KT}{qI_Q} \quad (1-1)$$

式中 K ——波尔兹曼常数, 其值为 $1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T ——热力学温度;

q ——电子的电荷量, 其值为 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$;

I_Q ——在 Q 点的静态电流。

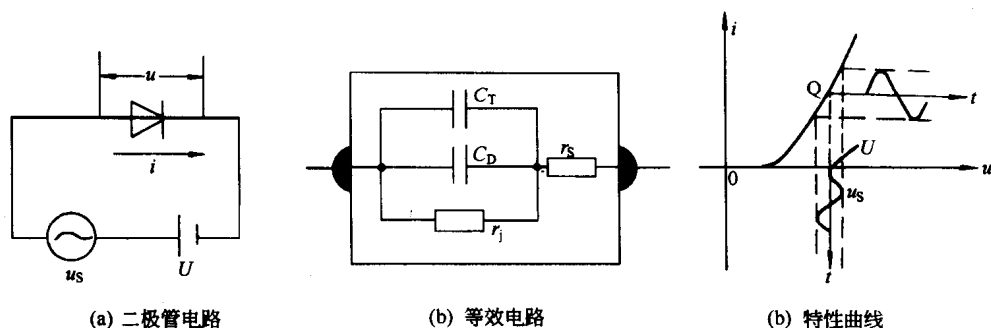


图 1-1 PN 结二极管及其等效电路

若 $T = 300\text{K}$ (即室温) 时, $KT/q \approx 26\text{mV}$, 则

$$r_j \approx \frac{26\text{mV}}{I_{Q\text{mA}}} \quad (1-2)$$

由公式可见, r_j 的大小取决于工作点的电流。若二极管反向偏置, 则结电阻可视为无穷大 (即开路)。在 PN 结正偏时, 扩散电容 C_D 比较大, 起主要作用; 反偏时, C_D 比较小, 因而势垒电容 C_T 起主要作用。

(二) 晶体管共射混合 Π 型等效电路

晶体三极管由两个 PN 结构成, 具有放大作用, 因此它并不是两个 PN 结的简单相连。那么, 怎样来模拟三极管中所发生的主要物理过程呢? 下面讨论共射极的晶体管物理参数模型。三极管的两个 PN 结可以各用一个 PN 结三极管的等效电路表示, 即图 1-2 中的 $r_{cc}-C_{b'c}-r_{b'c}$ 和 $r_{ee}-C_{b'e}-r_{b'e}$ 。

基极引线接触电阻及基区体电阻用 $r_{bb'}$ 来模拟。b' 称为有效基极。受控电流源 $g_m U_{b'e}$ 模拟晶体管的放大作用。 r_{cc} 模拟输出电阻, C_{cc} 模拟输出电容。把图 1-2 所示的共射晶体管的物理模型画成如图 1-3 所示的电路称为混合 Π 型等效电路。电路中如果去掉 $r_{bb'}$ 就是一个 Π 型网络。这个等效电路考虑了结电容效应, 因此它适用的频率范围可以到高频段。一般来说, 它适用的最高频率约为 $f_T/5$, 其中 f_T 称为晶体管的特征频率。

下面对混合 Π 型等效电路参数进行分析。

1. 基区电阻 $r_{bb'}$

$r_{bb'}$ 是指从基区引线到有效基区的电阻。一般手册中给出了某些高频管的 $r_{bb'}$, 其值在几十欧到 100Ω , 甚至更大。在高频时, 由于电容效应的存在, 对电容 $C_{b'e}$ 和 $C_{b'c}$ 充电的电流必须通过 $r_{bb'}$, 因此它的影响就不容忽视了。

在图 1-2 中还画有发射区串联电阻 r_{ee} 和集电区串联电阻 r_{cc} , 在改画成图 1-3 的等效电路时, 忽略了这两个电阻。实际上, r_{ee} 对晶体管的放大性能是有一定影响的, 但可以包括在给定的基区电阻 $r_{bb'}$ 之内 (即

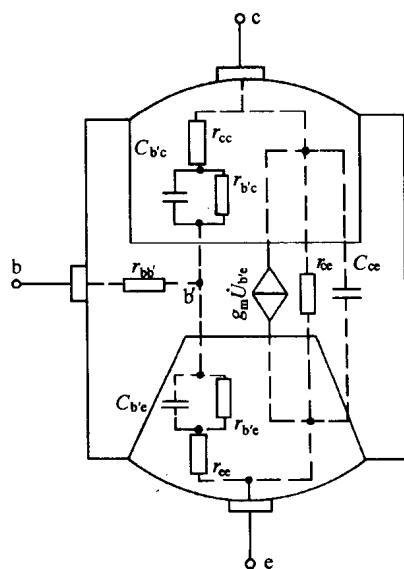


图 1-2 共发射极晶体管的物理模型

$r_{bb'}$ 的数值取大些), 这可使电路简化。至于 r_{cc} , 由于它串接在输出电路中, 影响不大, 故可以忽略。

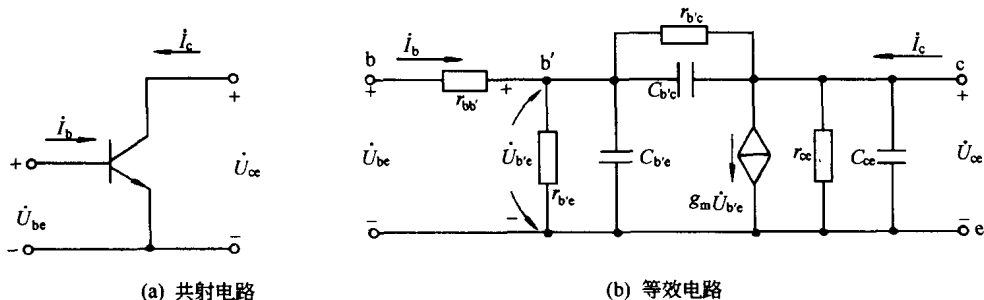


图 1-3 共射混合 Π 型等效电路

2. 有效基极到发射极间的电阻 $r_{b'e}$

$r_{b'e}$ 是指发射结电阻 r_j 折合到基极回路的等效电阻。流过 r_j 电流本是发射极电流 i_e , 但在等效电路中, 流过等效电阻 $r_{b'e}$ 的是基极电流 i_b 。因此 $r_{b'e}$ 和 r_j 间的关系如下, 即

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) r_j \approx \beta_0 r_j \quad (1-3)$$

式中 β_0 为晶体管低频电流放大系数。若把 $r_j = \frac{26}{I_{EQ}} (\Omega)$ 代入式(1-3), 则

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{26}{I_{EQ}} \approx \beta_0 \frac{26}{I_{EQ}} \quad (1-4)$$

式中 I_{EQ} 是工作点的发射极电流, 单位为 mA。由于发射结正偏, r_j 的值较小, 因此 $r_{b'e}$ 数值也不很大, 一般在几十欧到几百欧之间。有时也把 $r_{b'e}$ 改用电导形式表示, 即

$$g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}} \quad (1-5)$$

3. 发射结电容 $C_{b'e}$

包括发射结的势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 。由于发射结正偏, 所以 $C_{b'e}$ 主要指扩散电容 C_D , 它的数值一般为 $100 \sim 500 \text{ pF}$ 。

4. 集电结电容 $C_{b'c}$

包括集电结的势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 。由于集电结反偏, 因此 $C_{b'c}$ 主要指势垒电容 C_T , 它的数值一般为 $2 \sim 10 \text{ pF}$ 。

5. 集电结电阻 $r_{b'c}$

由于集电结反偏, 因此 $r_{b'c}$ 很大, 约在 $100 \text{ k}\Omega \sim 10 \text{ M}\Omega$ 之间。

6. 跨导 g_m

g_m 的定义是当 u_{CE} 为常数时, i_c 的微小变化量 Δi_c 与 $u_{b'e}$ 的微小变量 $\Delta u_{b'e}$ 之比。所以 g_m 是衡量发射结电压对集电极电流的控制能力的参数。

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{b'e}} \right|_{u_{CE} = \text{常数}} \quad (1-6)$$

式中, Δi_c 和 $\Delta u_{b'e}$ 分别为集电极电流和 $b'-e$ 间的电压两个瞬时值的微小变量。当输入信号很小时, 式 (1-6) 可以写成

$$g_m = \frac{I_c}{U_{b'e}} \Big|_{u_{CE} = \text{常数}} \quad (1-7)$$

式中, I_c 和 $U_{b'e}$ 分别为集电极电流和 $b'-e$ 间电压正弦量的有效值。在 u_{CE} 不变的条件下,

$$I_c = g_m U_{b'e} \quad (1-8)$$

表示集电极电流是受 $U_{b'e}$ 控制的。为了使增益大, 总希望跨导 g_m 大。晶体管与其他电子器件相比, 突出的特点就是跨导较大。 g_m 的单位为 mS (毫西门子), 一般为几十毫西门子。因为 $I_c = \alpha_0 I_e$, $U_{b'e} = I_e r_j$, 所以

$$g_m = \frac{\alpha_0 I_e}{I_e r_j} = \frac{\alpha_0}{r_j} \approx \frac{1}{r_j} \quad (1-9)$$

或

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}(\text{mA})}{26} \times 10^3 (\text{mS}) \quad (1-10)$$

若考虑电极静态电流 $I_C = I_{EQ}$, 并将式(1-1)代入式(1-9), 则

$$g_m = \frac{q I_{EQ}}{KT} \approx \frac{q}{KT} I_c \quad (1-11)$$

在室温下, $q/KT \approx 40$, 则

$$g_m (\text{mS}) \approx 40 I_C (\text{mA}) \quad (1-12)$$

g_m 还可以用下式求得

$$g_m = \frac{I_e}{U_{b'e}} = \frac{\beta_0 I_b}{I_b r_{b'e}} = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} = \frac{h_{fe}}{r_{b'e}} \quad (1-13)$$

7. 集-射极间电阻 r_{ce}

晶体管集电极电流 I_c 主要由基极电压 $U_{b'e}$ (或基极电流 I_b) 决定, 但 U_{ce} 对 I_c 也有影响。 U_{ce} 对 I_c 的作用由电阻 r_{ce} 来模拟。由于 U_{ce} 对 I_c 影响较小, 所以 r_{ce} 较大, 一般在几千欧以上。

8. 集-射极间电容 C_{ce}

这个电容较小, 一般在 $2 \sim 10 \text{pF}$ 之间。

【例 1-1】 高频小功率 3AG87A 在工作点电流分别为 5mA 和 8mA 时, 混合 Π 参数的 $r_{bb'}$ 、 $C_{b'c}$ 、 $r_{b'e}$ 及 g_m 各为多少?

解 查手册可知 3AG87A 的 $r_{bb'} \leq 100\Omega$, $C_{ob} \leq 4\text{pF}$, $h_{fe} \geq 10$

故, 可取 $r_{bb'} = 100\Omega$, $C_{b'c} \approx C_{ob} \approx 4\text{pF}$, $\beta_0 \approx 10$

① 当 $I_{EQ} = 5\text{mA}$ 时,

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{26}{I_Q} \approx 57\Omega$$

根据式(1-10)

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{26} \times 10^3 \approx 192\text{mS}$$

② 当 $I_{EQ} = 8\text{mA}$ 时,

$$r_{b'e} = 11 \times \frac{26}{8} \approx 36\Omega$$

$$g_m \approx \frac{8}{26} \times 10^3 \approx 308\text{mS}$$