



教育部高职高专规划教材

高频电子线路

● 莫怀忠 主编
何 军 主审

第二版



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

高频电子线路

第二版

莫怀忠 主编

何 军 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书为教育部高职高专规划教材。全书由无线电通信系统组成的基本原理,高频小信号放大器,高频功率放大器,正弦波振荡器,频率变换与集成模拟乘法器,调幅、检波与混频电路,调角与解调,反馈控制电路,实验与实训等章节组成。

本书根据高职高专学生的特点,重点放在讲清基本电路的物理本质和分析方法上,注意培养学生对电路基本工作原理的理解及分析能力。在附录部分指导学生利用 Multisim 8 电路仿真软件对各章节相应的电路进行性能分析和结论验证,并给出了两种方案的实训课题。

本书可作为高职高专院校电子信息工程、通信工程等专业的教材,也可供中专电子类相关专业的学生使用和相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高频电子线路/莫怀忠主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2010. 6
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-08435-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 077886 号

责任编辑: 张建茹

文字编辑: 吴开亮

责任校对: 周梦华

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 320 千字 2010 年 8 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

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

第二版前言

高频电子线路是无线通信等各专业的一门重要的专业基础课，是一门理论性、工程性和实践性都很强的课程。它需要低频电子线路和电路分析等课程知识作为基础，通过对本课程的学习，使学生掌握各单元高频电路的基本理论知识，为专业课打下良好的基础。

本书是在 2002 年 7 月第一版《高频电子线路》的基础上重新编写而成。

第一版《高频电子线路》经多年的使用以及广大师生反映来看，该书内容具有结构合理、通俗易懂的主要特点，但由于当时编写时间仓促，故仍存在问题，为了更好地满足教学要求，特组织部分有丰富教学经验的教师对第一版《高频电子线路》从以下几方面进行重新编写。

1. 本着对当代高职学生理论知识够用的特点，进一步删除了原书中较复杂的公式推导过程。对各章节的内容，重点介绍电路的作用、电路的组成、基本工作原理、主要参数的计算，力求简明扼要，突出重点。

2. 删除了原书中一些过时的应用电路，增加了一些新的典型的应用电路，并对各应用电路进行较为详细的分析，让学生感到学有所用，提高学生的学习兴趣。

3. 对实验部分，各实验电路采用了目前较为流行的仿真软件 Multisim 8 完成，使各实验更加丰富和逼真。通过各实验的完成，进一步巩固学生对教材中相关理论知识的理解和掌握。

本书由莫怀忠主编，秦秀常和罗森参编，何军主审。莫怀忠编写第一、五、六章以及附录部分；秦秀常编写第二、三章；罗森编写第四、七章。在编写过程中，得到了很多领导和教师的指导和支持，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

第一版前言

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》、《数学电子技术》、《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，省略了烦琐的理论推导，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立性，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，其中的绪论和第二、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

目 录

绪论	1	第四章 频率变换与集成模拟乘法器 ...	92
第一章 高频小信号放大器	7	第一节 概述	92
第一节 晶体管高频等效电路	7	第二节 利用非线性器件进行频率 变换	93
第二节 宽带放大器的特点和分析 方法	13	第三节 模拟乘法器及其应用	94
第三节 扩展放大器通频带的方法	15	本章小结	100
第四节 小信号谐振放大器的分类和主要 性能指标	19	习题四	100
第五节 单调谐放大器	21	第五章 调幅、检波与混频电路	102
第六节 影响放大器的稳定性及其解决 方法	33	第一节 调制概述	102
第七节 集成中频放大器	35	第二节 调幅波的性质	102
本章小结	39	第三节 调幅电路	107
习题一	40	第四节 检波器	113
第二章 高频功率放大器	41	第五节 混频电路	120
第一节 概述	41	本章小结	129
第二节 丙类谐振功率放大器的工作 原理	42	习题五	130
第三节 丙类谐振功率放大器的性能 分析	44	第六章 调角与解调	132
第四节 丙类谐振功率放大器 电路	50	第一节 概述	132
第五节 宽带高频功率放大器	56	第二节 调频电路	138
第六节 丙类谐振倍频器	62	第三节 鉴频器	143
本章小结	63	本章小结	153
习题二	64	习题六	154
第三章 正弦波振荡器	65	第七章 反馈控制电路	155
第一节 概述	65	第一节 概述	155
第二节 反馈式正弦波振荡器的工作 原理	65	第二节 自动增益控制 (AGC) 电路	155
第三节 LC 正弦波振荡器	68	第三节 自动频率控制 (AFC) 电路	159
第四节 石英晶体振荡器	77	第四节 锁相环路 (PLL)	161
第五节 RC 振荡器	82	本章小结	176
本章小结	87	习题七	176
习题三	88	附录 实验与实训	178
		第一部分 实验	178
		第二部分 实训	194
		参考文献	200

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, 主要介绍以下内容: 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、调相电路)、混频与倍频、解调器 (检波器、鉴频器、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。

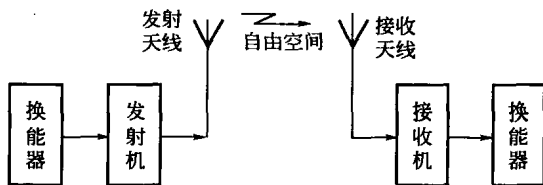


图 0-1 无线通信系统组成方框图

无线通信系统组成的简略方框图如图 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、高频功率放大电路及发射天线等部分组成。

1. 高频振荡器

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。

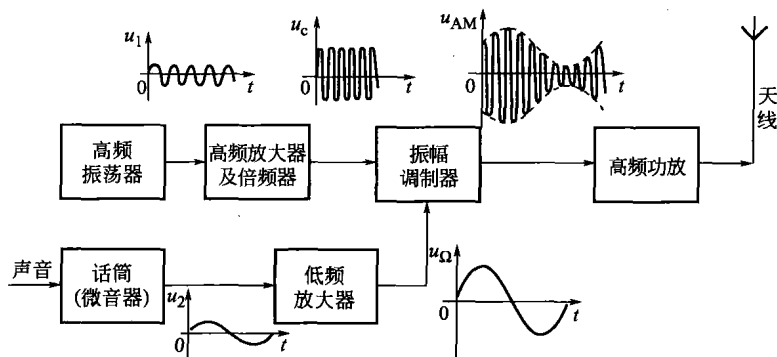


图 0-2 调幅式无线电广播发射机方框图

2. 高频放大器与倍频器

由于石英晶体振荡器所产生正弦波的频率以及振幅往往达不到要求，为此，对主振器产生的正弦波要进行倍频及放大，以得到频率较高、振幅较大的高频载波信号。

3. 话筒

话筒是一种声电变换器，其作用是将声音信息转换成音频电信号。

4. 低频放大器

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，故由低频放大器进行放大，使音频信号达到所需的电平。

5. 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。

6. 高频功率放大器

高频功率放大器的作用是调幅信号进行功率放大，输出大功率的调幅波推动发射天线，以增加发射设备的作用距离。

基本工作原理 欲传送的信息（声音）由话筒转换为电信号 u_2 再由低频放大器放大作为调制信号 u_Ω ，通过振幅调制器对高频载波信号 u_c 的振幅进行调制，使高频载波的瞬时振幅随低频调制信号 u_Ω 的大小而变化，输出包含有被传送信息的高频调幅波 u_{AM} ，通过高频功率放大器进行放大，推动天线以电磁波的形式将信息向空间辐射出去。

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。

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：其一是满足无线电波有效辐射的条件；其次是为了实现“多路复用”。

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

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (0-1)$$

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(0-1)估算，假设音频信号的频率高端（即高音信号频率）要辐射出去，其天线尺寸也要几十公里，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(0-1)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电台的载频，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。

根据被调制的参数不同，调制发射方式通常分为振幅调制、频率调制、相位调制三种。

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 0-3 所示。

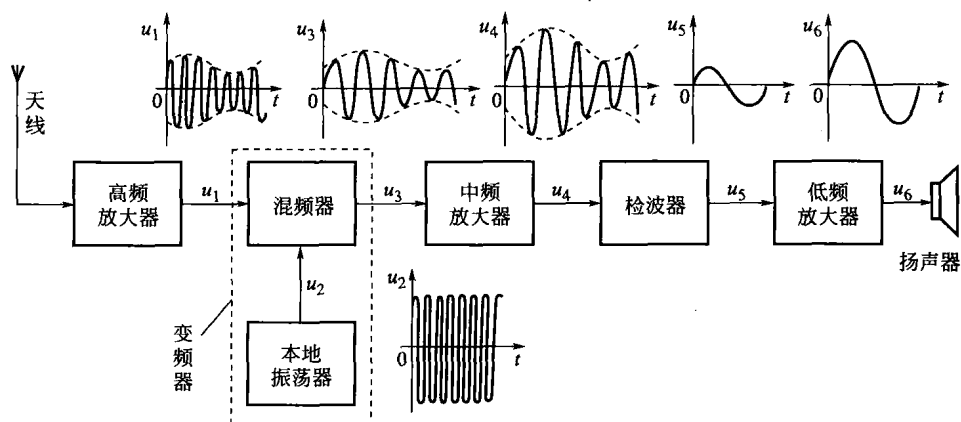


图 0-3 超外差收音机方框图

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。

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等幅的正弦波信号。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混频，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_L ，而输出中频调幅波的中频记为 f_1 ，那么， f_c 、 f_L 及 f_1 ，三者则遵循如下关系：

$$f_1 = f_L - f_c \quad (0-2)$$

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，混频器输出的中频调幅波信号的载频是不变的，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 $f_1 = 465\text{kHz}$ 不会因所收不同电台而改变，那么本振信号频率 $f_L = f_c + f_1$ 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。为了保证本振信号频率随不同电台载波频率而改变，通常在高频放大器的选频回路与本地振荡器中的选频网络采用双连可变电容器，以实现本振信号频率与被接收电台的载波频率保持同步变化。

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。

7. 扬声器

扬声器是一种电声变换器，其作用是将音频电信号转换成声音信息。

基本工作原理 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 ，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 ，它比 u_1 的载频高一个中频频率，简称中频。调幅波信号 u_1 和本振信号 u_2 同时送至混频器进行混合，输出中频电压 u_3 。 u_3 与 u_1 相比，其包络线的形状不变，这表明 u_3 仍携带有原来调制信号的信息，但载波频率则转换为 u_2 的频率与 u_1 的载频之差，即转换为中频，因此 u_3 为中频调幅波信号。 u_3 经中频放大器放大为 u_4 ，再送到检波器。检波器从中频调幅信号 u_4 中取出反映传送信息的调制信号 u_5 ，再经低频放大器放大为 u_6 ，送到扬声器中转变为声音信号。

采用外差式接收，其目的是提高接收机对不同电台信号的接收性能。若采用直接放大式接收，由于放大器的增益与带宽的关系，很难保证对不同电台的信号都进行高增益的放大，影响了接收性能。采用外差式接收，对不同电台的高频已调波信号，先通过混频器变换为相同频率的中频已调波信号，再通过高增益的中频放大器进行放大，从而提高了接收机对不同电台信号的接收性能。

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 0-4(a) 所示的绕射传播方式；图 0-4(b) 所示的直线传播方式；图 0-4(c) 所示的反射及折射传播方式等。

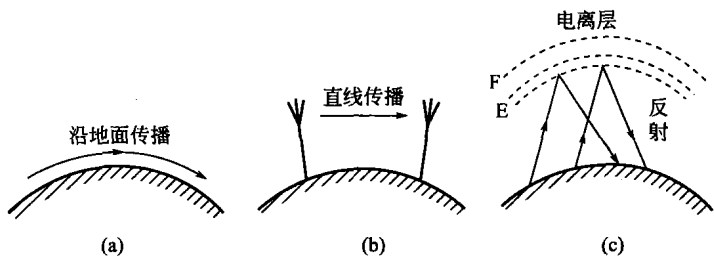


图 0-4 电磁波的几种传播方式

由图 0-4(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 0-4(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 0-4(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 100~300km 的 E 层；另一层是离地球表面约 300~400km 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 200~3000m,即频率为 100~1500kHz 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。

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 10~100m,即频率为 3~30MHz 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 1~10m,频率为 30~300MHz 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 0.1~1m、频率为 300~3000MHz 的电磁波统称为分米波;波长为 0.01~0.1m、频率为 3000~30000MHz 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、电路分析、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。

高频小信号放大器指的是对频率高于数百 kHz 且振幅小于数十 mV 的输入信号进行放大的放大器。根据输入信号占有的频带宽度不同, 高频小信号放大器分为窄带放大器和宽带放大器两类。其中窄带放大器又分为两类: 一类是小信号谐振放大器, 另一类是集中选频放大器。

由于放大电路基本上都是以晶体管作为放大元件, 在高频状态, 由于晶体管内部结电容的影响, 使晶体管的参数发生了变化。本章首先介绍晶体管的频率特性, 然后介绍宽带放大器、谐振放大器以及集中选频放大器等主要内容。

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 结的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。

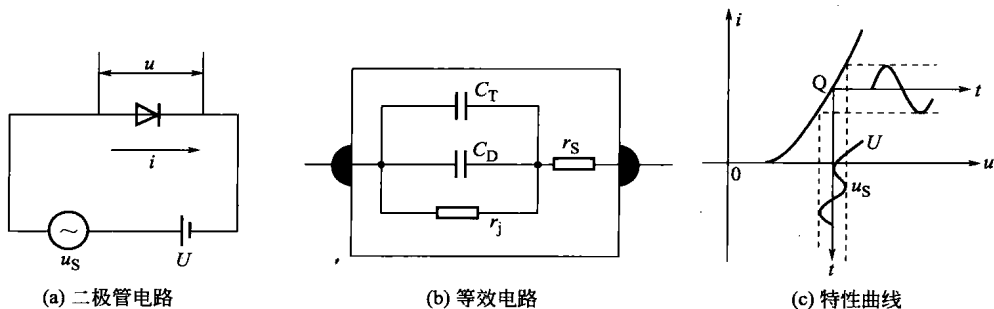


图 1-1 PN 结二极管及其等效电路

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。

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 r_j 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 结二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 $r_{bb'}$ 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。

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

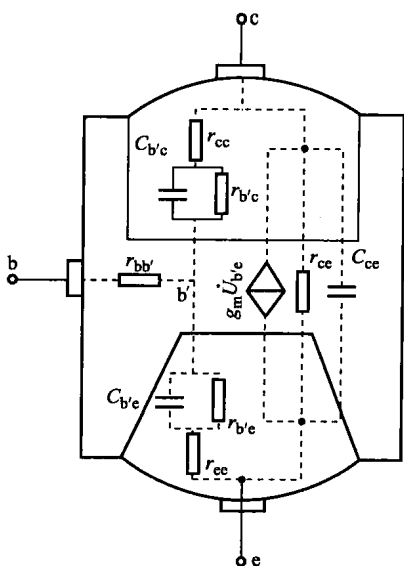


图 1-2 共发射极晶体管的物理模型

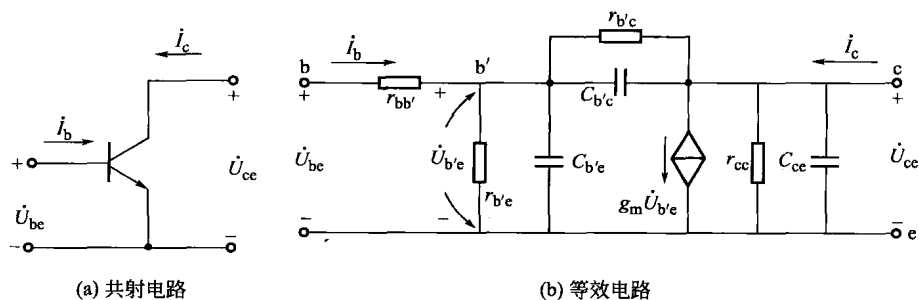


图 1-3 共射混合 II 型等效电路

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

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

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

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

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

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

$$g_m = \frac{q I_{EQ}}{K T} \approx \frac{q}{K T} I_C \quad (1-11)$$

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

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

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】 高频小功率三极管 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 $r_{bb'} \geq 100\Omega$ ， $C_{ob} \leq 4\text{pF}$ ， $h_{fe} \geq 10$

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

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{26}{I_{EQ}} = (1 + 10) \frac{26}{5} \approx 57\Omega$$

根据式(1-10)

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{26} \times 10^3 = \frac{5}{26} \times 10^3 \approx 192\text{mS}$$

② 当 $I_{EQ} = 8\text{mA}$ 时

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{26}{I_{EQ}} = (1 + 10) \frac{26}{8} \approx 36\Omega$$

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{26} \times 10^3 = \frac{8}{26} \times 10^3 \approx 192\text{mS}$$

二、晶体管频率特性参数 f_β 、 f_α 、 f_T

为了表征晶体管在高频时的特性需要定义几个频率参数，这些参数有 β 截止频率 f_β 、 α 截止频率 f_α 、特征频率 f_T 。

1. β 截止频率 f_β

β 是晶体管共射短路电流放大系数。所谓短路，是指负载被短路。当负载短路时，无论集电极电流怎样变化，集电极电压始终不变，即集电极电压只有直流部分， $u_{ce} = U_{CC} = \text{常数}$ 。有时说交流分量等于零，即输出电压 $U_o = 0$ ，或者说 $U_c = 0$ ， $u_{ce} = 0$ ，都是指负载被短