

高等院校电子信息类教材

# 通信电路原理

TONGXIN DIANLU YUANLI

刘联会 主编



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

## 内 容 简 介

本书是适用于通信电子类本科与专科设置的“通信电子电路”课程的教材。本书解决了由于电子技术发展快、内容多、课时少的矛盾,其内容新,少而精,突出物理概念,实用性强,基本电路分析具体,图文并茂直观,通俗易懂,深入浅出,利于自学。本书以基本电路分析为基础,列举了无线电广播发射与接收机的结构原理、调频立体广播发射与接收机的电路结构原理及电视机的基本结构,具有理论联系实际、应用性强、涵盖面宽、系统性强的特点。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信电路原理/刘联会主编. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-0750-7

I. 通… II. 刘… III. 通信系统—电子电路—高等学校—教材 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 062892 号

---

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)

邮 编:100876 (发行部)电话:62282185 传真:62283578

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京通州皇家印刷厂

印 数:1—3000 册

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:16.25

字 数:417 千字

版 次:2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

---

ISBN 7-5635-0750-7/TN·296

定 价:25.00 元

• 如有质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 高等院校电子信息类教材编审委员会

**顾问:**周炯荣

**委员:**(以姓氏笔画为序)

卫建华 马海武 孙伟玲 达新宇 刘联会

刘 毓 刘高辉 姜 莉 郭元术 夏清国

**秘书长:**马海武

# 序

随着通信技术的高速发展及广泛应用,全国很多高等院校都开办了通信工程和电子信息工程专业,尤其是1999年开始的扩大招生和压缩学时等举措,使得本专业原有的教材无法适应当前的发展形势。许多高校在修改教学计划的同时,修订了各门课程的教学大纲,但在具体实施的过程中却遇到了很大的困难,找不到合适的教材,只好用原有的教材,在授课时进行节选,给教与学都带来很大的麻烦。针对这种情况,2002年3月十数所高校通信工程专业的教师在西安召开了第一次新形势下的教学研讨会。与会者一致认为,编写一套与当前教学形势相适应的本专业的系列教材迫在眉睫。经过一年的准备,2003年4月在北京邮电大学出版社的大力协助和支持下,成立了由十数所高校参加的“高等院校电子信息类教材编审委员会”。在进一步深入讨论本专业培养计划的基础上,确定了系列教材的课目及各教材的编写大纲,并且组织各高校有一定教学经验的一线骨干教师参与编写工作,使得这套系列教材更贴近读者,更适应当前教学的需要。

在教材编写过程中,为了保证教材的质量,编委会对每部教材的大纲、内容及要求都作了详细的研讨。主编都是由具有多年教学经验的骨干教师担任。编者对教材的内容取舍、结构设计、章节安排和表达方式等方面进行了反复修改。为了教学实际的需要,每部教材都对内容做了结构化安排,便于教师根据实际情况部分选讲,而且都配有足够的习题或思考题和相当多的例题。本套系列教材不仅适用于课堂教学,也是课外读者非常合适的参考书。

在这里,感谢所有参加编写工作的教师们,另外特别感谢北京邮电大学出版社,他们在组织、统筹、出版和发行等方面做了大量的工作。每部教材都有他们的心血和努力。

编委会  
2003年12月

# 前 言

通信电路原理是通信、电子、信息等专业的一门重要的专业基础课和技术基础课,它主要讨论组成通信系统的基本单元电路的结构原理和分析方法,在整个专业学习中起着承前启后的作用。

随着微电子技术及其应用的发展,通信电路的内容越来越丰富,应用越来越广泛,但十几年来各校由于种种原因却对其教学学时不同程度的压缩。如何应对不断出现的变化和适应课程的发展,实施好这门课程是当前的一项重要工作。

在充分认识课程特点的基础上,作者总结了多年的实际教学经验,博采国内外众家之长,为适应专业及课程实际需要,特别是近年来我国高等教育大发展和电子通信类专业全面扩招这一实际情况的需要而编写本书。内容包括:绪论、小信号放大器与噪声、高频功率放大电路、振幅调制与解调、混频电路、角度解调与调制、通信系统中的自动控制电路等。在编写中,以分立元件为主、集成电路为辅,以基本电路原理和基本分析方法为重点,适当结合实际应用,介绍了这些基本电路组成的接收机、发射机以及移动手机电路的例子,把单元电路和通信系统相联系,既加强了对基本电路原理的理解,也了解了通信设备的整体结构,培养了理论联系实际的能力,起到了事半功倍的效果。

本书力求做到简明扼要,深入浅出,通俗易懂,以达到适于自学的目的,同时书中突出非线性电路的特性与分析方法。本课程的参考学时为 56 学时,根据使用者的实际情况,使用本书时可酌情删减。

本书由刘联会主编,参加编写的还有倪云峰、刘晓佩、刘凌志、杨辉、姜晖、张雁、刘沛、王养西、武风波、张燕燕等,另外姚亮及韩博文在绘图、打字等方面做了大量的工作。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当的地方,敬请读者不吝赐教。

作 者  
2004 年 9 月

# 目 录

绪 论	1
0.1 无线电通信的发展简史	1
0.2 无线电通信原理	1
0.2.1 无线电通信系统的组成	1
0.2.2 无线电发射机和接收机的工作原理	3
0.3 本书研究对象及任务	5
思考题与习题	5
<b>第 1 章 谐振回路和滤波电路</b>	<b>6</b>
1.1 谐振回路元件的高频特性	6
1.2 谐振电路	8
1.2.1 并联谐振回路	8
1.2.2 串联谐振回路	12
1.3 LC 回路阻抗变换作用	12
1.3.1 引言	12
1.3.2 LC 阻抗变换电路	13
1.3.3 LC 选频匹配电路	15
1.4 耦合振荡回路	19
1.5 滤波器	23
1.5.1 石英晶体滤波器	23
1.5.2 声表面波滤波器	25
1.5.3 陶瓷滤波器	26
思考题与习题	27
<b>第 2 章 高频小信号放大电路</b>	<b>29</b>
2.1 概述	29
2.2 晶体管高频小信号等效电路与高频参数	30
2.2.1 晶体管共射混合 $\pi$ 型等效电路	30
2.2.2 $y$ 参数等效电路	31
2.2.3 晶体管的高频参数	33
2.3 晶体管谐振放大电路	34
2.3.1 单管单调谐回路谐振放大器	34
2.3.2 多级单调谐回路谐振放大器	39
2.3.3 双调谐回路谐振放大器	40
2.4 谐振放大器的稳定性	43
2.4.1 晶体管内部反馈及其消除方法	43
2.4.2 晶体管外部干扰	44

2.5 集中选频放大器	45
2.6 放大电路的噪声	47
2.6.1 电阻的热噪声	47
2.6.2 电阻噪声电路的计算	49
2.6.3 天线噪声	49
2.6.4 晶体三极管的噪声	50
2.6.5 放大器噪声的表示方法及计算	51
2.6.6 无源二端口网络的噪声系数	55
2.6.7 接收机灵敏度与噪声系数的关系	55
思考题与习题	56
<b>第3章 高频谐振功率放大电路</b>	<b>59</b>
3.1 概述	59
3.2 丙类谐振功率放大器的工作原理	61
3.3 丙类功率放大器工作状态分析	64
3.3.1 丙类功率放大器的折线分析法	64
3.3.2 丙类功率放大器的负载特性	69
3.3.3 各级电压对工作状态的影响	71
3.4 丙类功率放大器电路	74
3.4.1 馈电电路	74
3.4.2 输出、输入回路与级间耦合回路	76
3.5 丁类及戊类高频功率放大器	82
3.6 传输线变压器	83
3.6.1 传输线变压器的工作原理	83
3.6.2 传输线变压器的主要参数	84
3.6.3 传输线变压器的阻抗变换作用	84
3.7 功率的分配与合成	86
3.7.1 功率分配网络	87
3.7.2 功率合成网络	90
3.7.3 功率合成电路举例	92
3.8 集成高频功率放大电路及应用简介	94
思考题与习题	96
<b>第4章 正弦波振荡器</b>	<b>98</b>
4.1 反馈振荡器的工作原理	98
4.1.1 平衡条件	98
4.1.2 起振条件	99
4.1.3 稳定条件	99
4.1.4 基本组成及其分析方法	101
4.2 LC正弦波振荡器电路	102
4.2.1 互感耦合振荡器电路	102
4.2.2 电感反馈振荡器电路	103

4.2.3 电容反馈振荡器电路 .....	105
4.2.4 LC三端式振荡器相位平衡条件的判断准则 .....	107
4.2.5 高稳定度的LC振荡器电路 .....	108
4.3 振荡器的频率稳定度 .....	111
4.3.1 振荡器的频率稳定度 .....	111
4.3.2 提高频率稳定度的措施 .....	111
4.4 石英谐振器 .....	113
4.4.1 石英晶体特性与石英谐振器的等效电路 .....	113
4.4.2 晶体振荡电路 .....	114
4.5 振荡器线路应用举例 .....	118
4.5.1 差分对管振荡电路 .....	118
4.5.2 压控振荡器 .....	119
4.5.3 运放振荡器 .....	120
4.5.4 单片集成振荡器电路 .....	120
思考题与习题 .....	121
<b>第5章 振幅调制与解调及混频</b> .....	<b>126</b>
5.1 概述 .....	126
5.1.1 调制概念 .....	126
5.1.2 调制的分类 .....	126
5.2 调幅波的性质 .....	127
5.2.1 调幅波的波形 .....	127
5.2.2 调幅波的数学表达式与频谱 .....	128
5.2.3 调幅波中的功率关系 .....	131
5.3 调幅电路 .....	132
5.3.1 平方律调幅 .....	132
5.3.2 高电平调幅 .....	134
5.4 包络检波器 .....	137
5.4.1 小信号检波(平方律检波) .....	137
5.4.2 大信号检波(峰值包络检波) .....	139
5.5 双边带信号 .....	143
5.5.1 平衡调幅器 .....	143
5.5.2 斩波器 .....	145
5.5.3 模拟乘法器 .....	148
5.5.4 双边带信号的解调 .....	150
5.6 单边带信号 .....	154
5.6.1 滤波法 .....	154
5.6.2 相移法 .....	155
5.6.3 修正的移相滤波法 .....	155
5.6.4 单边带信号的接收 .....	156
5.7 混频电路 .....	157



5.7.1 概述	157
5.7.2 混频电路	159
5.7.3 混频器的干扰	166
5.7.4 外差式调幅广播收音机	169
思考题与习题	170
<b>第6章 角度调制与解调</b>	175
6.1 角度调制	175
6.1.1 调频波与调相波的数学表达式	175
6.1.2 调角波的频谱与频带宽度	176
6.2 调频方法	179
6.2.1 调频方法	179
6.2.2 直接调频电路	180
6.2.3 调相法——间接调频电路	183
6.2.4 调频广播发射机	185
6.3 鉴频电路	186
6.3.1 斜率鉴频器	186
6.3.2 相位鉴频器	188
6.3.3 比例鉴频器	191
6.4 其他形式的鉴频器	192
6.4.1 符合门鉴频器	192
6.4.2 脉冲计数式鉴频器	194
6.5 限幅电路	194
思考题与习题	195
<b>第7章 自动控制电路</b>	198
7.1 自动增益控制	198
7.1.1 概述	198
7.1.2 自动增益控制电路的组成	198
7.1.3 放大器的自动增益控制	199
7.1.4 电控衰减器	201
7.1.5 利用 PIN 管组成的增益控制电路	202
7.1.6 线性集成电路中的 AGC 控制	202
7.1.7 AGC 控制电压的产生	204
7.1.8 AGC 系统的增益控制特性	206
7.2 自动频率微调与电子调谐	208
7.2.1 概述	208
7.2.2 自动频率微调系统工作原理、跟踪式自动频率微调	208
7.2.3 通信系统中自动频率微调系统	211
7.2.4 调频负反馈——调频反馈解调器	212
7.3 锁相环路的基本原理	213
7.3.1 概述	213

7.3.2 锁相环路的主要部件 .....	214
7.3.3 锁相环路的环路方程和模型 .....	219
7.4 锁相环路的线性分析 .....	222
7.4.1 环路的线性化 .....	222
7.4.2 环路的频率响应 .....	223
7.4.3 环路的线性跟踪性能 .....	225
7.4.4 线性分析的小结 .....	227
7.5 锁相环路的非线性分析 .....	228
7.5.1 一阶锁相环的非线性分析 .....	228
7.5.2 二阶锁相环非线性分析的主要结论 .....	232
7.6 锁相环路的应用 .....	233
7.6.1 窄带跟踪接收机 .....	233
7.6.2 锁相环路的调频与鉴频 .....	234
7.6.3 调幅信号的解调 .....	235
7.6.4 用于振荡器的稳定与频谱纯化 .....	235
7.6.5 用于调相信号和数字相位键控信号的相干解调 .....	236
7.6.6 倍频与分频 .....	238
7.6.7 频率合成器 .....	238
7.6.8 移动通信设备电路举例——900 MHz 移动电话系统 .....	240
思考题与习题 .....	241
参考文献 .....	244

# 绪 论

## 0.1 无线电通信的发展简史

信息传输是人类生活的重要内容。广义地说,凡是在发信者和收信者之间,以任何形式进行信息传递,都可称为通信。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 世纪有了电磁学理论与实践的坚实基础后,人们开始利用电磁能量传送信息。1837 年莫尔斯发明了电报,创造了莫尔斯电码,开创了通信的新纪元。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。电报、电话的发明,为迅速准确地传送信息提供了新手段,是通信技术的重大突破。电报、电话都是沿导线传送信号的,能否不用导线,在空间传送信号呢?答案是肯定的,这就是无线电通信。

1864 年英国物理学家麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)发表了《电磁场动力学理论》这一著名论文,为无线电的发明和发展奠定了理论基础。1887 年德国的物理学家赫兹(H. Hertz)以卓越的实验技巧证明了电磁波的存在。此后的科学家有英国的罗吉,法国的勃兰利,俄国的波波夫和意大利的马可尼等进行了进一步的研究。在以上人中,马可尼的贡献最大,他于 1901 年首次完成了横渡大西洋的通信,实现了无线电通信。此后,1904 年弗莱明发明了二极管,1907 年李·德·福雷斯特发明了电子三极管,肖克莱等发明了晶体三极管,以及后来出现的将“管”、“路”结合起来的集成电路,极大地推进了无线电技术和电子学的迅速发展,真正进入了无线电技术和无线电电子的时代。

从发明无线电开始,传输信息就是无线电技术的首要任务。直到今天,虽然无线电电子技术领域在迅速扩大,但信息的传输与处理仍然是它的主要内容。通信电路所涉及的单元电路都是从传输与处理信息这一基本点出发来进行研究的,因此有必要在本书的开始概述无线电通信系统的基本原理与组成。

## 0.2 无线电通信原理

### 0.2.1 无线电通信系统的组成

一般地讲,无线电通信系统的基本组成如图 0.2.1 所示,它由输入变换器、发送设备、信

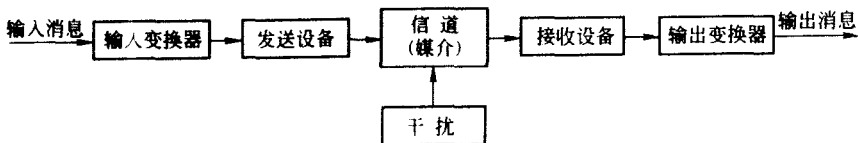


图 0.2.1 无线通信系统组成框图

道、接收设备及输出变换器五部分组成。各部分的主要作用简介如下：

### (1) 输入变换器

输入变换器的主要任务是将发信者提供的非电量消息(如语音、景物等)变换为电信号,该电信号应能反映待发的全部消息,通常具有“低通型”频谱结构,故称为基带信号。当输入消息本身就是电信号时(如计算机输出的二进制信号),输入变换器可省略而直接进入发送设备。

### (2) 发送设备

发送设备主要有两大任务:一是调制;二是放大。所谓调制,就是将基带信号变换成适合信道传输的频带信号。它是用基带信号去控制消息载体信号的某一参数,让该参数随着基带信号的大小而线性变化的处理过程。例如,在连续波调制中,简谐振荡有三个参数(振幅、频率和初相位)可以改变,利用基带信号去控制这三个参数中的某一个,就会产生对应的三种调制方式:调幅、调频和调相。通常又将基带信号称为调制信号;将高频振荡信号称为载波信号;将经过调制后的高频振荡信号称为已调信号或已调波。

所谓放大,是指对调制信号和已调信号的电压和功率放大、滤波等处理过程,以保证送入信道有足够大的已调信号功率。

### (3) 信道

信道是连接发、收两端的信号通道,又称传输媒介。通信系统中应用的信道可分为两大类:有线信道(如架空明线、电线、电缆、波导、光纤等)和无线信道(如海水、地球表面、自由空间等)。不同信道有不同的传输特性,相同媒介对不同频率的信号传输特性也是不同的。例如,

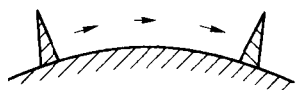


图 0.2.2 电磁波沿地表绕射

在自由空间媒介里,电磁能量是以电磁波的形式传播的。然而,不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。1.5 MHz 以下的电磁波主要沿地表传播,称为地波,如图 0.2.2 所示。由于大地不是理想的导体,当电磁波沿其传播时,有一部分能量被损耗掉,频率越高,趋表效应越严重,损耗越大,因此频率较高的电磁波不宜沿地表传播。1.5~30 MHz 的电磁波,主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波,如图 0.2.3 所示。电离层是由于太阳和星际空间的辐射引起大气上层电离形成的。电磁波到达电离层后,一部分能量被吸收,一部分能量被反射和折射返回到地面。频率越高,被吸收的能量越小,电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后,电磁波就会穿透电离层而不再返回地面,因此频率更高的电磁波不宜用天波传播。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波,如图 0.2.4 所示。由于地球表面的弯曲,空间波传播距离受限于视距范围,架高发射天线可以增大其传输距离。为了讨论问题的方便,将不同频率的电磁波人为地划分若干频段或波段,其相应名称和主要应用举例,列于表 0.2.1 中。应该指出,各种波段的划分是相对的,因为各波段之间并没有显著的分界线,但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。

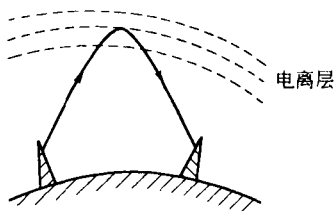


图 0.2.3 电磁波的折射与反射

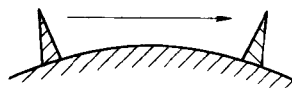


图 0.2.4 电磁波的直射

表 0.2.1 无线电频段划分

频段名称	频率范围/Hz	波长范围/m	传输特性	应用举例
极低频(ELF)	3~30	$10^7 \sim 10^8$	传输损耗小,通信距离远,信号稳定可靠,渗入地层、海水能力强	音频电话,数据传输,潜艇通信,透地通信,远洋通信,远程导航,发送标准时间等级
超低频(SLF)	30~300	$10^6 \sim 10^7$		
特低频(ULF)	300~3 000	$10^5 \sim 10^6$		
甚低频(VLF)	3~30 k	$10^4 \sim 10^5$		
低频(LF)	30~300 k	$10^3 \sim 10^4$	夜间传播与 VLF 同,但稍有不可靠,白天吸收大于 VLF,频率愈高,吸收愈大,每季均有变化	除上述外,有时还用于地下通信
中频(IF)	300~3 000 k	$10^2 \sim 10^3$	夜间比白天衰减减小,夏天比冬天衰减大,长距离通信不如长波可靠,频率愈高愈不可靠	广播,船舶通信,飞行通信,业余无线电
高频(HF)	3~30 M	$10 \sim 10^2$	远距离通信完全由电离层决定,每时、每日、每季都有变化。情况好时,远距离通信衰减减小	短波广播,移动通信,军用通信,业余无线电
甚高频(VHF)	30~300 M	1~10	特性与广播类似,直线传播,与电离层无关(能穿透电离层,不反射)	移动通信,电视,调频电台,雷达,导航
超高频(UHF)	300~3 000 M	$10^{-1} \sim 1$	均属于微波波段,传播特性与 VHF 相似	与 VHF 雷同,还适合散射通信,流星余迹通信,卫星通信等
特高频(SHF)	3~30 G	$10^{-2} \sim 10^{-1}$		
极高频(EHF)	30~300 G	$10^{-3} \sim 10^{-2}$		
至 高 频	300~3 000 G	$10^{-4} \sim 10^{-3}$		

#### (4) 接收设备

接收设备的任务是将信道传送过来的已调信号进行处理,以恢复出与发送端相一致的基带信号。这种从已调波中恢复基带信号的处理过程,称为解调。显然解调是调制的反过程。由于信道的衰减特性,经远距离传输到达接收端的信号电平通常是很微弱的(微伏数量级),需要放大后才能解调。同时,在信道中还会存在许多干扰信号,因而接收设备还必须具有从众多干扰信号中选择有用信号和抑制干扰的能力。

#### (5) 输出变换器

输出变换器的作用是将接收设备输出的基带信号变换成原来形式的消息,如语音、景物等,供收信者使用。

### 0.2.2 无线电发射机和接收机的工作原理

发射机和接收机是无线电通信系统的核心部件,它们是为了使基带信号在信道中有效和可靠地传输而设置的。现以图 0.2.5 和 0.2.6 所示调幅电话发射机和超外差式接收机为例,说明它们的组成及发射、接收原理。

发射机的工作过程简述为:振荡器产生一定频率的最初高频振荡,通常其功率很小。倍频器主要是以提高发射机的频率以及扩展发射机的波段范围,使其频率倍增到载波频率( $f_c$ )

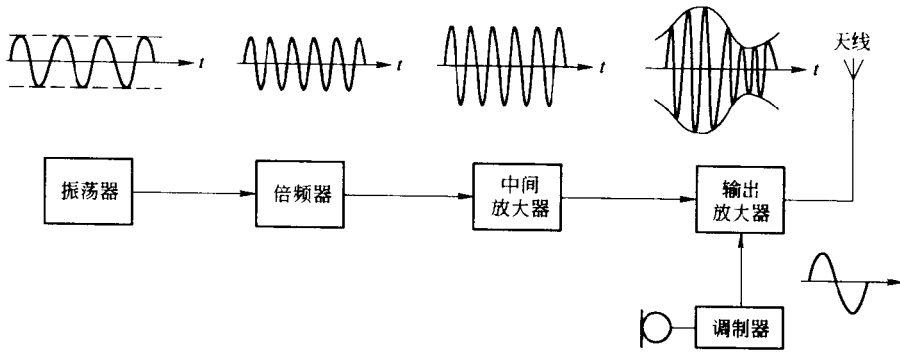


图 0.2.5 调幅电话发射机原理方框图

上。中间放大器的主要功用就是将小的等幅振荡信号功率加以放大,以供给输出功率放大器所需的激励,它通常由若干级放大器构成。输出放大器的主要作用就是在激励信号的频率上,产生足够的高频功率,送给天线或传输线路。在调幅电话发射机中,振幅调制通常在输出放大器中进行。方框图中的调制器,实际就是音频放大器,它的功用就是将语音信号放大到所需要的功率,使调制信号功率足够大,从而供给输出放大器完成调制。图 0.2.5 中各处的信号波形就反映了上述的工作过程。

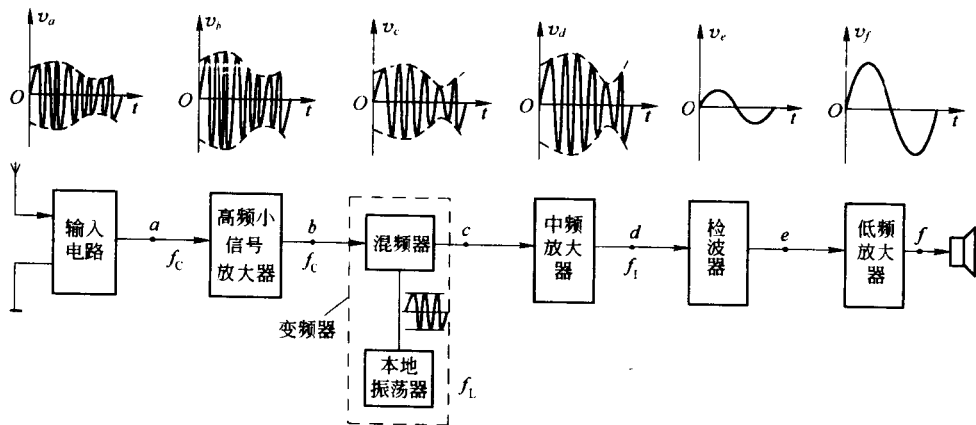


图 0.2.6 超外差式接收机的方框图

图 0.2.6 为超外差式接收机的方框图。在该图中,高频小信号放大器由一级或多级小信号谐振放大器组成,用来放大电磁波在天线上感应到的有用信号;同时利用放大器中的谐振回路抑制其他频率的干扰信号。由于谐振放大器的中心频率随接收信号频率的不同而不同,如短波频率范围为  $1.5 \sim 30$  MHz,因此高频放大器一般是可调谐的。混频器是将高频已调信号(载波频率为  $f_c$ )不失真地变换为中频已调信号(载波频率用  $f_i$  表示)的变换电路。本地振荡器用来产生频率为  $f_L = f_c + f_i$  的高频振荡信号( $f_L$  表示本地高频振荡信号频率)。由于  $f_c$  随接收信号的不同而不同,所以本振频率  $f_L$  是可调的,而且必须正确跟踪  $f_c$  以中频信号  $f_i$  为固定值(465 kHz)。中频放大器用来放大中频调幅信号,由于中频频率是固定的,因此中频放大器的选择性和增益等技术指标得到极大地提高,而检波器将中频调幅信号反变换为反映传送信息的调制信号。低频放大器由电压放大器和非谐振功率放大器组成,用来放大带有

信息的调制信号,向扬声器提供必要的推动功率。

### 0.3 本书研究对象及任务

通信电路原理是通信工程专业中一门主要的技术基础课。在信息技术不断发展的今天,人类社会已经进入社会网络化、网络互动化的时代,通信网已成为开发各种通信技术及通信手段的依托。在一个通信网络中,包括传统上所说的有线通信、无线通信,而且还包括光纤通信、卫星通信、数据通信或计算机通信等等。这就要求我们不能仅限于某一个通信手段或技术上,而应着眼于更宽的知识视野中。当然目前通信技术所覆盖的内容浩如烟海,任何一门在校的课程或专业也难以有如此多的时间及篇幅将它阐述得详尽透彻。本课程的宗旨在于介绍无线电通信系统所涉及的基本功能电路,如振荡电路、高频小信号放大电路、高频功率放大电路、调制与解调电路、倍频电路和混频电路等。另外,包括自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制在内的反馈控制电路也是通信电路原理所研究的对象,同时本书也尽可能地介绍一些最新的通信电路应用技术。

通信电路原理中,大部分是非线性电路,如振荡电路、调制和解调电路、混频电路和倍频电路等。非线性电路必须采用非线性分析方法,非线性微分方程是描述非线性电路的数学模型,但在工程上常采用一些近似分析和求解的方法。

本书所涉及的电路远比低频部分多,但它们都是在一些基本电路基础上发展起来的。因此,在学习本课程的时候不但要掌握各种单元电路的组成、工作原理和分析方法,而且要深入了解它们之间的内在联系,培养分析和解决电子技术问题的能力。

本课程的实践性很强,因此在学好理论课的同时,一定要坚持理论联系实际,重视实验课和有关课程设计环节。

随着电子设计自动化(EDA技术)的发展,越来越多地应用EDA软件来进行电子电路设计,电路仿真分析和电路图、电路板设计。所以,强调掌握先进的高频电路EDA技术也是非常重要的。在实际应用中,各种功能电路作为局部电路出现在整体设备中发挥它们的作用。本书将讨论通信电路在无线电通信中的应用及无线电通信设备的整机电路原理,并且介绍性能指标等问题;建立通信机的整机概念,增强读图能力,为后续的课程打下基础。

#### 思考题与习题

- 0.1 试述无线电通信的组成及其各部分的工作原理。
- 0.2 以调幅电话为例,说明无线电通信系统中发射部分的工作过程。

# 第 1 章 谐振回路和滤波电路

## 1.1 谐振回路元件的高频特性

常用到的无源元件认为是线性双通的、不随时间变化的、具有集总参量的电阻、电感线圈和电容。所谓线性是指元件参量与流经它的电流或加于其上的电压的数值无关；所谓双通是指元件参量与电流方向和电压极性无关；所谓集总参量是指不随空间位置而变的参量。

无源元件上的电流和电压的关系称为元件的伏安特性。在理想情况下，电阻是一个耗能元件，而电容是储存电能的元件，电感是储存磁能的元件，且线路中的磁能和电能是不能突然改变的，也就是说电感线圈中的电流和电容器中的电荷都不能骤然增加。

在电路中引用的无源元件(电阻、电感线圈和电容)都是理想元件，实际上没有这种元件。实际元件应用不同的等效电路来表示，针对不同的运用情况，应采用最确切的等效电路。

### 1. 电阻

一个实际的电阻，在低频时主要表现为电阻特性；在高频使用时除了表现为电阻特性外，还具有电抗特性的一面。一个电阻  $R$  的高频等效电路如图 1.1.1 所示，其中， $C_R$  为分布电容， $L_R$  为引线电感， $R$  为电阻。分布电容和引线电感越小，表明电阻的高频特性越好。电阻器的高频特性与制作电阻的材料、封装形式和尺寸大小有密切的关系。一般来说，金属膜电阻比碳膜电阻的高频特性要好，而碳膜电阻比绕线电阻的特性要好。频率越高，电阻的电抗成分越明显，在使用时，应尽量使之表现为纯电阻。

### 2. 电感线圈的高频特性

电感线圈除表现出电感  $L$  的特性外，还具有一定的损耗电阻和分布电容。在分析一般的长、中、短波频段时，通常可忽略分布电容的影响。因而，电感线圈的等效电路可以表示为电感  $L$  和电阻  $r$  串联，如图 1.1.2 所示。

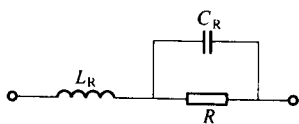


图 1.1.1 电阻的高频等效电路

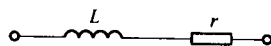


图 1.1.2 电感线圈的串联等效电路

电阻  $r$  随频率增高而增加，这主要是由于集肤效应的影响。所谓集肤效应就是指随着工作频率的增高，流过导线的交流电趋于流向导线表面的现象。当频率很高时，导线中心部位几乎完全没有电流流过，这相当于导线的有效面积较直流时大为减少，电阻  $r$  增大，工作频率越高，导线电阻就越大。

在无线电技术中通常用线圈品质因数来表示线圈的损耗性能。品质因数定义为无功功率



与有功功率之比:

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} \quad (1.1.1)$$

由上式可得电感线圈  $L$  的品质因数为:

$$Q_L = \frac{\omega L}{r} \quad (1.1.2)$$

$Q_L$  值实际上是电感感抗  $\omega L$  与损耗电阻  $r$  之比,  $Q_L$  值越高损耗越小。通常线圈  $Q_L$  常在几十到一二百左右。

**例 1.1.1** 将图 1.1.3(b)所示的电感和电阻串联形式的线圈等效电路转换为电感与电阻的并联形式。

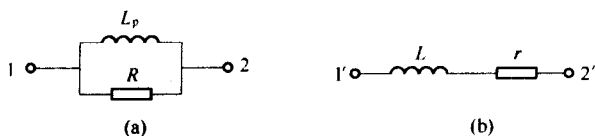


图 1.1.3 电感线圈的串、并联等效电路

**解** 如图 1.1.3(a)所示,  $L_p$ 、 $R$  表示并联形式的参数。根据等效电路的原理, 在图 1.1.3(b)中的  $1'$ 、 $2'$  两端的导纳应等于图 1.1.3(a)两端的导纳, 即

$$\frac{1}{r + j\omega L} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_p} \quad (1.1.3)$$

由式(1.1.3)可以得到

$$R = r(1 + Q_L^2) \quad (1.1.4)$$

$$L_p = L(1 + 1/Q_L^2) \quad (1.1.5)$$

一般情况下,  $Q_L \gg 1$ , 此时有

$$R \approx Q_L^2 r = \frac{\omega^2 L^2}{r} \quad (1.1.6)$$

$$L_p \approx L \quad (1.1.7)$$

上述结果表明, 一个高  $Q_L$  电感线圈, 其等效电路可以表示为串联形式, 也可以表示为并联形式。两种形式中, 电感值近似不变而并联电阻值为  $Q_L^2 r$ 。这实际上可以作为串并联等效电路转换公式, 它具有广泛的意义。即一电抗与电阻串联电路, 当等效变换为并联电路时, 并联电阻约等于串联电阻的  $Q_L^2$  倍, 而电抗值几乎不变。

### 3. 电容器的高频特性

一个实际的电容除表现出电容特性外, 由于介质损耗使其具有损耗电阻, 电容器损耗电阻的大小主要由介质材料决定, 其品质因数  $Q_C$  值可达几千到几万的数量级, 其引线具有分布电感。在分析较低频段的谐振回路时, 常常只考虑电容的损耗。电容器的等效电路也有两种形式, 如图 1.1.4 所示。

为了说明电容器损耗的大小, 引入电容器的品质因数  $Q_C$ , 它等于容抗与串联电阻之比, 即

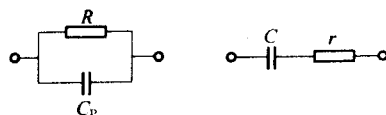


图 1.1.4 电容器串并联等效电路