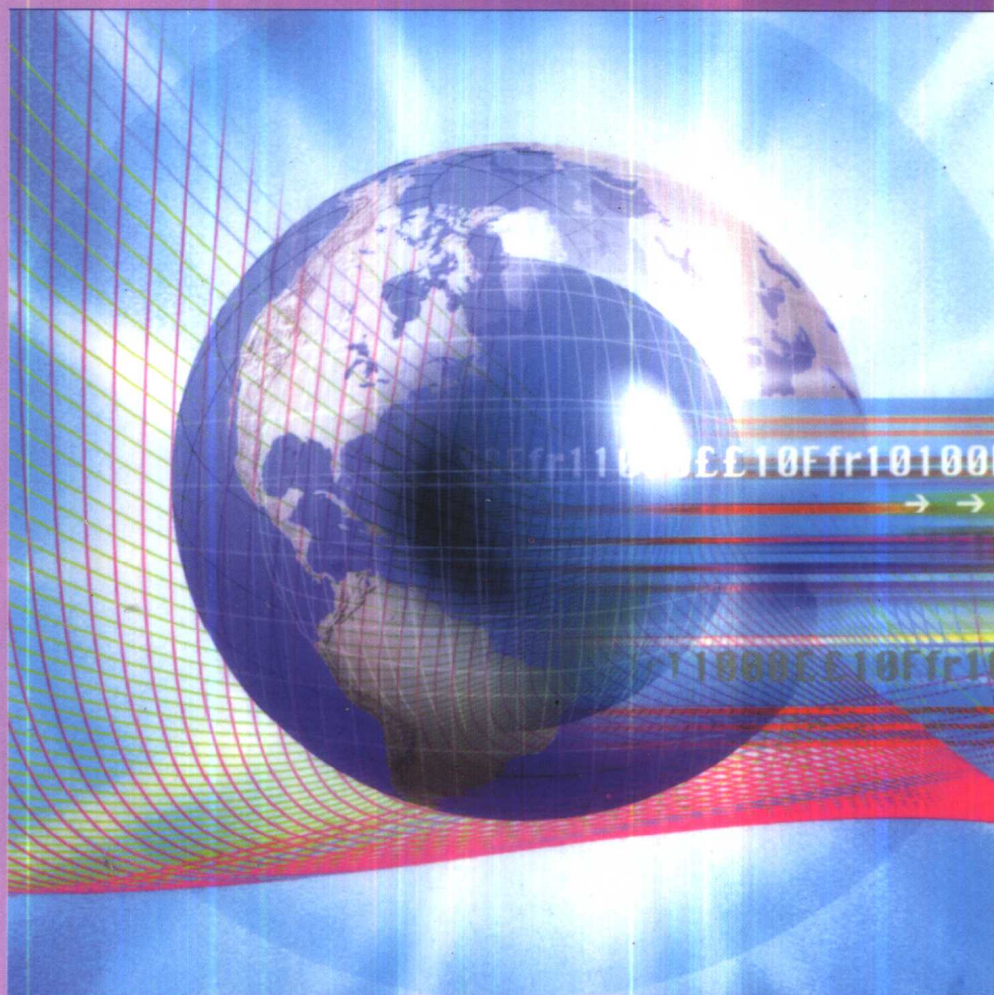


高频电子线路

阳昌汉 主编

GAOPIN DIANZI XIANLU



哈尔滨工程大学出版社



哈尔滨工程大学
国家工科基础课程教学基地
电工电子类系列教材

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/阳昌汉主编. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001. 1
ISBN 7-81007-355-9

I. 高... II. 阳... III. 高频-电子电路
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75225 号

内 容 简 介

本书是根据国家教委工科电工课程教育指导委员会制定的无线电技术类专业“电子线路(I)(II)课程教学基本要求”, 遵循“加强基础, 优选内容, 理论联系实际, 培养学生的综合素质”的原则, 考虑到科学技术的迅速发展, 新器件、新技术不断更新的实际情况, 结合我们多年的教学实践改编而成。

本书主要内容是讲述模拟通信电路的基本原理及其实现的方法。本书从功能电路的输入和输出信号的频谱关系为出发点, 分析各个功能电路的输入频谱与输出频谱变换关系的特征, 从理论上讲清楚组成各个功能电路的基本原理和实现电路的基本方法。全书共 10 章, 内容有绪论、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、调幅信号的解调电路、角度调制电路、调角信号的解调电路、变频电路和反馈控制电路。各章后附有思考题与习题。

本书可作为高等学校电子、信息、通信类等专业的“高频电子线路”课程的教材。舍去某些章节后, 也可作为夜大学、函授、自学考试等大专班的教材, 还可供从事电子设备及其电路研制与开发的工程技术人员参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
肇东粮食印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 15.5 字数 350 千字
2001 年 3 月第 2 版 2001 年 3 月第 1 次印刷
印数:1~5 000 册
定价:19.00 元

前 言

本书是根据国家教委工科电工课程教育指导委员会制定的无线电技术类专业“电子线路(I)(II)课程教学基本要求”,遵循“加强基础,优选内容,理论联系实际,培养学生的综合素质”的原则,考虑到科学技术的飞速发展,新器件、新技术不断更新的实际情况,结合我们多年的教学实践,并参考了国内外有关教科书,在原“高频电子线路”教材的基础上改编而成。

本书主要内容是讲述模拟通信功能电路的基本原理及其实现的方法。对于各个功能电路来说,虽然经历了电子管、晶体管、场效应管、集成电路及大规模集成系统等不同的实现过程,但是各个功能电路输入信号与输出信号的频谱变换关系是没有变化的,也就是基本原理不变。因而以功能电路的“功能”为基点,从功能电路的输入和输出信号的频谱关系为出发点,分析各个功能电路的输入频谱与输出频谱变换关系的特征,从理论上讲清楚组成各个功能电路的基本原理和实现电路的基本方法。使学生能够深刻认识功能电路在信息传输系统中的作用,增强对系统各部分的内在关系的认识,还能培养学生适应新器件、新技术不断更新的能力,从而开发学生的创新思维能力。本书以通信系统为主线贯穿各功能电路,加强了内容的系统性,对集成电路在各功能电路中的应用进行了分析介绍。对一些大规模集成系统电路在对应的章节后以附录形式给予介绍,以供实验应用时参考。

本书内容包括:绪论、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、调幅信号的解调电路、角度调制电路、调角信号的解调电路、变频电路和反馈控制电路共10章。可作为电子、信息、通信等类专业的“高频电子线路”、“通信电子线路”、“非线性电子线路”等课程的教材。在舍去某些章节后,本书也可作为相应专业夜大学、函授、自学考试等大专班的教材。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程,教材仅为学好课程提供必要的基础,有许多理论知识和实践技能,如实际电路的组成、大规模集成系统电路的应用、测试方法和仪器使用等,还必须在实践中学习和提高。作为高频电子线路课程教学改革的内容之一,我们将理论课与实验课的教学做了合理的分工,理论课中的有关集成电路及大规模集成系统电路的应用内容通过实验课和课程设计来完成,并增加EDA的内容,以提高学生的素质和培养创新能力。为此,本课程编写了“高频电子线路”和“高频电子线路实验与课程设计”两本教材作为配套使用的教材。

本书由阳昌汉担任主编。第一、八、九、十章由阳昌汉编写,第二、三、六章由谢红编写,第四、五、七章由杨翠娥编写。

主审张占基教授对本书进行了认真地审阅,并提出了许多宝贵的意见。

限于编者水平,不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2000年11月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 高频电子线路课程的研究对象	1
第二节 无线电发送设备的组成与原理	2
第三节 无线电接收设备的组成与原理	4
思考题与习题	6
第二章 高频小信号放大器	7
第一节 概 述	7
第二节 分析小信号放大器的有关知识	8
第三节 晶体管高频小信号等效电路	11
第四节 晶体管谐振放大器	15
第五节 小信号谐振放大器的稳定性	20
第六节 双栅场效应管高频放大器	24
第七节 线性宽带放大集成电路与集中滤波器	26
第八节 放大电路的噪声	28
思考题与习题	36
第三章 高频功率放大器	39
第一节 概 述	39
第二节 谐振式高频功率放大器的工作原理	40
第三节 谐振功率放大器的折线分析法	42
第四节 谐振功率放大电路	54
第五节 丙类倍频器	59
第六节 宽频带高频功率放大器	60
第七节 功率合成	64
本章附录 3A 余弦脉冲分解系数表	70
思考题与习题	72
第四章 正弦波振荡器	74
第一节 概 述	74
第二节 反馈型 LC 振荡原理	74
第三节 反馈型 LC 振荡器	79
第四节 振荡器的频率稳定原理	83
第五节 高稳定度的 LC 振荡器	85

第六节 晶体振荡电路	88
第七节 负阻振荡器	92
第八节 文氏电桥振荡器	95
思考题与习题	96
第五章 振幅调制电路	99
第一节 概 述	99
第二节 低电平振幅调制电路	103
第三节 高电平振幅调制电路	112
第四节 单边带信号的产生	116
思考题与习题	118
第六章 调幅信号的解调	122
第一节 概 述	122
第二节 二极管大信号包络检波器	124
第三节 二极管小信号检波器	133
第四节 同步检波器	135
思考题与习题	137
第七章 角度调制电路	140
第一节 概 述	140
第二节 调角波的基本性质	140
第三节 调频方法的概述	145
第四节 变容二极管直接调频电路	147
第五节 石英晶体振荡器直接调频	153
第六节 调相电路	154
本章附录 7A 集成调频发射机	160
思考题与习题	162
第八章 调角信号的解调电路	165
第一节 概 述	165
第二节 鉴相器	165
第三节 鉴频器	170
思考题与习题	181
第九章 变频电路	184
第一节 概 述	184
第二节 晶体三极管混频器	186
第三节 场效应管混频器	191
第四节 二极管混频电路	193
第五节 模拟乘法器混频器	196
第六节 混频器的干扰与失真	197

本章附录 9A 集成接收电路	201
思考题与习题	204
第十章 反馈控制电路	207
第一节 概述	207
第二节 自动相位控制电路(锁相环路)	209
第三节 自动频率控制电路	223
第四节 自动增益控制电路	226
本章附录 10A 集成锁相环频率合成器	229
思考题与习题	235
参考文献	238

第一章 绪 论

第一节 高频电子线路课程的研究对象

电子学与信息系统是一门科学技术密集,发展更新很快的学科。信息的传输在人类生活中是极为重要的。信息的获取、传输、变换、存贮、识别、处理、显示,都要依赖于电子学与信息系统来实现。传输信息的系统,统称为通信系统。一个完整的通信系统应由输入变换器、发送设备、传输信道、接收设备和输出变换器五个基本部分组成。图 1-1 是通信系统的组成方框图。其中,输入变换器的功能是将输入信息变换为电信号。当输入信息为非电量(例如,声音、文字、图像等)时,输入变换器是必要的。当输入信息本身就是电信号(例如,计算机输出的二进制信号、传感器输出的电流或电压信号等)时,在能满足发送设备要求的条件下,可不用输入变换器,而直接将电信号送给发送设备。输入变换器输出的电信号应反映原输入的全部信息,通常称此信号为基带信号。传输信道是信号传输的通道,它可以是平行线、同轴电缆或光缆,也可以是传输无线电波的自由空间或传送声波的水等。输出变换器的功能是将接收设备输出的电信号变换成原来的信息,如声音、文字、图像等。

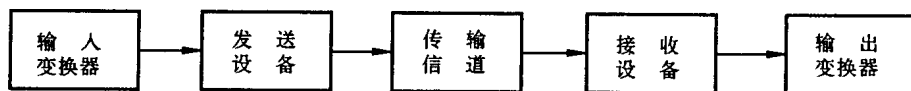


图 1-1 通信系统方框图

通信系统的种类很多,按所用信道的不同可分为有线通信系统和无线通信系统。按通信业务(即所传输的信息种类)的不同可分为电话、电报、传真和数据通信系统等。广义地说,广播、电视、雷达及导航系统等,也都属于通信系统。当通信系统中传输的基带信号是模拟信号时,称为模拟通信系统;当通信系统中传输的基带信号是数字信号时,则称为数字通信系统。尽管它们的种类不同,但就系统的基本组成部分来说是相同的。

本课程的研究对象是通信系统中的发送设备和接收设备的各种高频功能电路的功能、原理和基本组成。本课程讨论的工作频率范围是几百千赫至几百兆赫。值得注意的是,在科学技术的快速发展,新电路和新器件日新月异,通信集成电路不断更新的今天,学习本课程时应特别注意对电路功能和基本原理的理解。加上实践环节的训练,培养运用集成电路去设计与开发新的电子系统的能力。因为对高频功能电路来说,可以用不同的器件组成。虽然使用器件不同,但是每个高频功能电路的功能和基本原理是不会变的。通信集成电路通常是由多个功能电路组成,掌握了各个功能电路的功能,对运用集成电路就会很容易的。

为了对发送设备、接收设备各组成部分之间的相互关系有所了解,使读者对通信系统有

全面的认识,以介绍无线电广播原理为例,说明无线电信号的发送和接收的过程及系统的组成是很有必要的。尽管无线电广播系统较为简单,但麻雀虽小,五脏俱全。

表 1-1 粗略地给出目前使用频段的分配,供读者参考。但根据实际应用的需求和科学技术的不断发展,其用途会有发展与更新的。

表 1-1 不同频段的典型用途

频 带	波 长	名 称*	典 型 用 途
30~300 Hz	$10^4 \sim 10^3$ km	特低频	水下通信;电报
0.3~3 kHz	$10^3 \sim 10^2$ km	音频	数据终端;实线电话
3~30 kHz	$10^2 \sim 10$ km	甚低频	远距离导航;声呐;电报;电话;频率标准
30~300 kHz	$10 \sim 1$ km	低频 (长波)	导航系统;航标信号;电报通信
0.3~3 MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	中频 (中波)	商用调幅广播;业余移动通信;海军无线电通信; 测向;遇险和呼救
3~30 MHz	$10^2 \sim 10$ m	高频 (短波)	国际定点通信;军用通信;商用调幅广播;飞机和 船通信;岸与船通信
30~300 MHz	$10 \sim 1$ m	甚高频 (超短波)	电视广播;调频广播;车辆通信;航空通信; 导航设备
0.3~3 GHz	$10^2 \sim 10$ cm	超高频 (分米波)	电视广播;雷达;遥控遥测;导航;卫星通信; 无线电测高;移动通信
3~30 GHz	$10 \sim 1$ cm	极高频 (厘米波)	卫星通信;空间通信;微波接力;机载雷达;气象雷 达;陆地机动车
30~300 GHz	$10 \sim 1$ mm	特高频 (毫米波)	雷达着陆系统;射电天文;铁路设施;科学研究

* 30kHz 以下也称超长波,30MHz 到 1000MHz 也称超短波,1000MHz 以上也称微波。

第二节 无线电发送设备的组成与原理

无线电发送是以自由空间为传输信道,把需要传送的信息(声音、文字或图象)变换成无线电波传送到远方的接收点。

为什么要用无线电波发送方式把信息(例如声音)传送出去呢?信息传输通常应满足两个基本要求,一是希望传送距离远,二是要能实现多路传输,且各路信号传输时,应互不干扰。依靠声音在空气中直接进行远距离传送,显然是不行的。其原因是声波在空气中传播的速度很慢(约 340m/s),而且衰减很快,不能实现远距离传送。再则,人耳能听到的声音的频率约在 20Hz 到 20kHz 的范围内,若将声音直接传送,多路声音就会混在一起,接收时就难于分辨,不能实现选择功能。为了把声音传送到远方,常用的方法是将声音变成电信号,再通过发送设备送出去。电信号是与声音同频率的交变电磁振荡信号,可以利用天线向空

中辐射出去。电磁波在空气中的传播速度很快($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。在天线高度足够的条件下是能够实现远距离传送的。但是,无线电波通过天线辐射,天线的长度必须和电磁振荡的波长相近,才能有效地把电磁振荡波辐射出去。对于频率为 20Hz 到 20kHz 的声频来说,其波长是 $(15 \times 10^6 \sim 15 \times 10^3) \text{ m}$ 。那么,这样大尺寸的天线,制造是很困难的。即使可以做出来,由于各个电台所发出的信号频率范围相同,接收者也无法选择所需的接收信号。解决的办法是,将发射的电磁波的频率提高,使传送的音频信号“加载”到高频振荡之中。这样,天线的尺寸可以减小。不同的电台可以采用不同的高频振荡频率,接收时很容易分辨开。通常,把需传送的信息“加载”到高频振荡中的过程称为调制。能实现这样功能变换的电路称为调制器。调制可以分为三类,即调幅、调频和调相。

图 1-2 是调幅广播发射机的方框图,它由三部分组成。①低频部分:由声电变换器(话筒)和低频放大器组成,实现声电变换,并对音频电信号进行放大,使其满足调制器的要求。②高频部分:由主振器、缓冲器、高频电压放大、振幅调制器和高频功率放大器组成,实现载波的产生,放大和振幅调制。③传输线和天线部分,它完成将已调波通过天线以电磁波形式辐射出去。

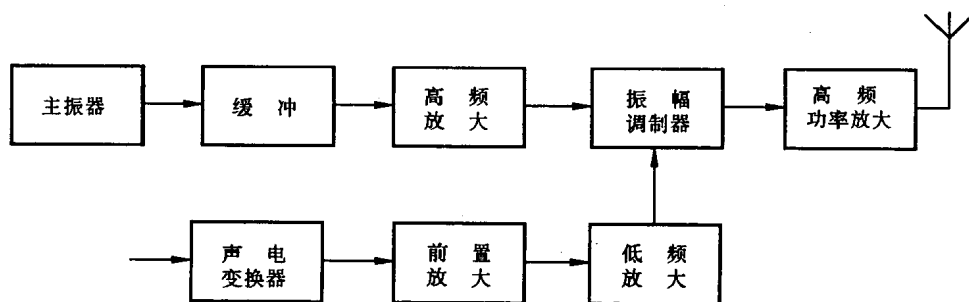


图 1-2 调幅广播发射机方框图

主振器产生的高频振荡信号经缓冲、放大后,作为高频载波电压送给振幅调制器。设其表示式为

$$u_i(t) = U_{im} \cos(\omega_c t + \varphi)$$

其中, $u_i(t)$ 是调制器输入高频载波信号的瞬时值, U_{im} 是它的振幅, ω_c 是角频率, φ 为初始相位。

送给调制器的另一信号是由声音经话筒转变成电信号,并经低频电压放大的低频电信号。设其表示式为

$$u_n(t) = U_{nm} \cos \Omega t$$

其中, $u_n(t)$ 为送给调制器的调制信号的瞬时值, U_{nm} 是振幅, Ω 是角频率。

$u_i(t)$ 和 $u_n(t)$ 送到调制器进行振幅调制,调制器输出的调幅波为

$$u(t) = U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega_c t + \varphi)$$

它通过高频功率放大、传输线经天线以电磁波形式辐射出去。

第三节 无线电接收设备的组成与原理

无线电接收过程正好和发送过程相反,它的基本任务是将通过天空传来的电磁波接收下来,并从中取出需要接收的信息信号。

图 1-3 是一个最简单的接收机的方框图。它由接收天线、选频电路、检波器和输出变换器(耳机)四部分组成。接收天线接收从空中来的电磁波。在同一时间,接收天线不仅接收到所需接收的无线电信号,而且也接收到若干个不同载频的无线电信号与一些干扰信号。为了选择出所需的无线电信号,在接收机的接收天线之后要

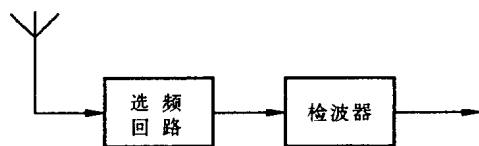


图 1-3 最简单的接收机方框图

有一个选频电路,其作用是将所要接收的无线电信号取出来,并把不需要的信号滤掉,以免产生干扰。利用一个并联 LC 回路的谐振特性就能够实现选频。通过选频电路选频,将选出所需要的高频调幅波,例如 $u(t) = U_m(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$, 送给检波器。检波器的任务是从已调波信号中取出原调制信号,即音频 Ω 成分。音频信号送给耳机将电信号转换成声音。这样就完成了全部接收过程。

这种最简单的接收机叫做直接检波式接收机。其特点是线路简单。因为从天线得到的高频无线电信号非常微弱,一般只有几十微伏至几毫伏,直接送给检波器检波,检波器的电压传输系数很小,检波后输出的音频信号更弱,只能采用耳机完成电声变换。为了提高检波器的电压传输系数,通常希望送给检波器的高频信号电压达到 1V 左右。这就需要在选频电路与检波器之间增加高频放大器,将通过选频电路的高频信号进行放大。增加高频放大器后,送给检波器的高频信号幅度增大,检波器的电压传输系数增大。但是检波器输出的音频信号通常只有几百毫伏,要推动功率大一点的扬声器是不行的。因而,在检波器之后要进行音频电压放大和功率放大,然后去推动扬声器。这种带有高频放大器的接收机叫做直接放大式接收机。其方框图如图 1-4 所示。

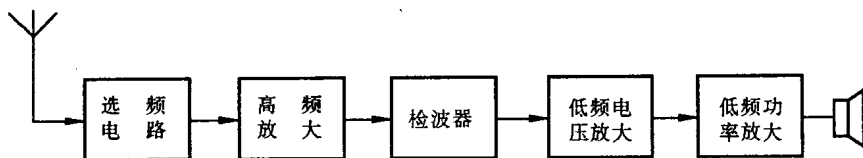


图 1-4 直接放大式接收机方框图

直接放大式接收机的特点是灵敏度较高,输出功率也较大,特别适用于固定频率的接收。但是,在用于多个电台接收时,其调谐比较复杂。再则,高频小信号放大器的整个接收频带内,频率高端的放大倍数比低端要低。因此,对不同的电台其接收效果也就不同。为了克服这样的缺点,现在的接收机几乎都采用超外差式线路。图 1-5 所示是超外差式接收机的方框图。

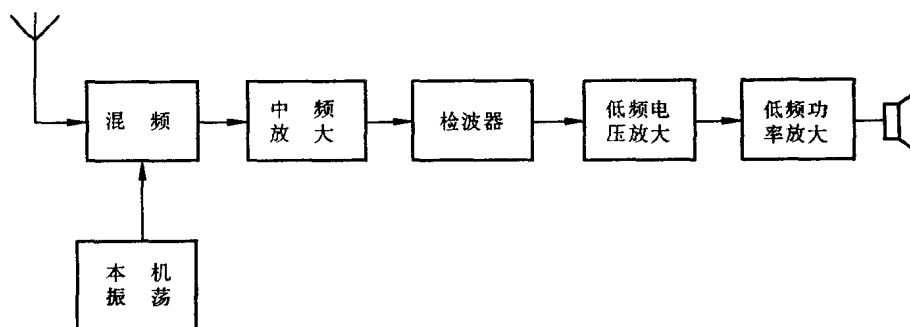


图 1-5 超外差式接收机方框图

超外差接收机的主要特点是,把被接收的已调波信号的载波角频率 ω_c 先变为频率较低的(或较高的),且是固定不变的中间频率 ω_I (称为中频),而其振幅的变化规律保持不变,即仍由 Ω 来决定。然后利用中频放大器加以放大送至检波器进行检波,解调出与调制信号 $u_\Omega(t)$ 线性关系的输出电压。随后通过低频电压放大、功率放大,由扬声器还原为原来的声音。因为中频放大器的中心频率是固定不变的,而且接收机的主要放大倍数由中频放大器承担。所以,整机增益在接收频率范围内,高端和低端的差别就会很小。对于调谐来说,仅对混频器的选频输入回路和本机振荡器进行同步调谐,这是容易实现的。

将高频信号的载波频率 ω_c 降低为中频 ω_I 的任务是由变频器来实现的。变频器是由混频器和本机振荡器组成。有关变频器的变频原理将在变频电路一章中讨论。在此仅简述变频的工作过程。当许多高频信号通过天线进入混频器的输入回路时,由于输入回路调谐于 ω_c ,并具有选频作用,则只有角频率为 ω_c 及其附近的频率成分通过输入回路进入混频器。另外,本机振荡器产生的角频率为 ω_L 的等幅振荡信号也送入混频器与输入信号的各个频率分量进行混频,并由混频器的输出选频回路选出 $\omega_I = \omega_L - \omega_c$ 的中频信号及上下边频分量。输入为调幅波时,输出信号的振幅变化规律与输入信号振幅变化规律相同。值得注意的是,本机振荡的振荡角频率 ω_L 的调节与混频器输入回路的调谐是同步进行的,必须保持二者的角频率之差为 ω_I 。

超外差接收机由于有固定频率的中频放大器,它不仅可以实现较高的放大倍数,而且选择性也很容易得到满足。可以同时兼顾高灵敏度与高选择性,这是非常重要的。

上面介绍了无线电广播发送与接收的基本原理与工作过程。虽然介绍的是传送语言的特殊例子,但对传输其它形式的信号来说,其基本工作原理是相同的。发送设备和接收设备中的高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、检波器、角度调制电路、调角信号的解调电路和变频电路等是高频电子线路课程所要讲授的内容,而这些内容又是组成发送设备和接收设备不可缺少的重要组成部分。

本课程讲授的各功能电路,大多属于非线性电子线路。非线性电子线路的分析方法与线性电子线路的分析方法是不相同的。因而,在学习本课程的各功能电路时,要根据不同电路的功能和特点,掌握各个功能电路的实现方法和基本原理。要根据输入信号的大小和器件的工作状态的不同选用不同的近似分析法,系统地了解非线性电子线路的分析方法。高频电子线路的理论与实践必须紧密联系,要学会用理论去指导实验和分析实验现象,从而得

出合理的结论。这对从事科学研究和电子系统开发会有很大帮助。

思考题与习题

1. 为什么在无线电通信中要使用“载波”发射,其作用是什么?
2. 在无线电通信中为什么要采用“调制”与“解调”,各自的作用是什么?
3. 计算机通信中应用的“调制解调”与无线电通信中的“调制解调”有什么异同点?
4. 试说明模拟信号和数字信号的特点?它们之间的相互转换应采用什么器件实现?
5. 理解“功能”电路的功能的含意,说明掌握功能电路的功能在开发电子系统中有什么好处。

第二章 高频小信号放大器

第一节 概 述

一、高频小信号放大器的功能

高频小信号放大器是通信设备中常用的功能电路。所谓高频,是指被放大信号的频率在数百千赫至数百兆赫。小信号是指放大器输入信号小,可以认为放大器的晶体管(或场效应管)是在线性范围内工作。这样就可以将晶体管(或场效应管)看成为线性元件,分析电路时可将其等效为二端口网络。高频小信号放大器的功能是实现对微弱的高频信号进行不失真地放大。从信号所含频谱来看,输入信号频谱与放大后输出信号的频谱是完全相同的。

二、高频小信号放大器的分类

高频小信号放大器按照所使用的器件可分为晶体管、场效应管和集成电路放大器;按照所放大信号的频谱宽窄可分为宽频带和窄频带放大器。按照所用负载的性质可分为谐振和非谐振放大器。

三、高频小信号放大器的主要性能指标

衡量高频小信号放大器的主要指标是

(1)电压增益与功率增益

电压增益(A_u)等于放大器输出电压与输入电压之比;而功率增益(A_p)等于放大器输出给负载的功率与输入功率之比。

(2)通频带

通频带的定义是放大器的电压增益下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时,所对应的频带宽度。常用 $2\Delta f_{0.7}$ 来表示。

(3)矩形系数

矩形系数是表征放大器选择性好坏的一个参量。而选择性是表示选取有用信号,抑制无信号的能力。理想的频带放大器应该对通频带内的频谱分量有同样的放大能力,而对通频带以外的频谱分量要完全抑制,不予放大。所以,理想的频带放大器的频率响应曲线应是矩形。但是,实际放大器的频率响应曲线与矩形有较大的差异,矩形系数用来表示实际曲线形状接近理想矩形的程度,通常用 $K_{r0.1}$ 来表示。其定义为

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

式中, $2\Delta f_{0.7}$ 为放大器的通频带; $2\Delta f_{0.1}$ 为放大器的电压增益下降至最大值的 0.1 倍时所对

应的频带宽度。

(4) 工作稳定性

工作稳定性是指放大器的直流偏置、晶体管参数、电路元件参数等发生可能变化时,放大器主要性能的稳定程度。一般的不稳定现象是增益变化、中心频率偏移、通频带变化、谐振曲线变形等。不稳定状态的极端情况是放大器自激,以致使放大器完全不能工作。对于设计放大器来说应特别注意工作稳定性。

(5) 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参量。对于放大器来说,总是希望放大器本身产生的噪声越小越好,即要求噪声系数接近于 1。

高频小信号放大器在通信设备中主要用途是做接收机的高频放大器和中频放大器。

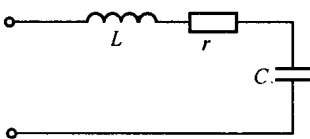
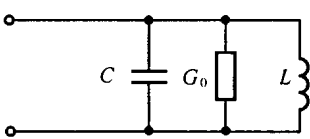
本章重点分析晶体管单级谐振放大器。对于其它器件组成的放大器,只是所用器件的等效电路有所差别,总的分析方法是相同的。由于集成电路的迅速发展,本章还介绍由集成放大电路和集中选择滤波器组成的高频小信号放大器的基本电路形式和特点。

第二节 分析小信号放大器的有关知识

一、串并联谐振回路的特性

表 2-1 列出了串、并联谐振回路的特性,供分析电路时应用。

表 2-1 串并联回路的特性

		串联回路	并联回路
电路形式		 (a)	 (b)
阻抗或导纳		$Z = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$Y = G_0 + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$
谐振频率		$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$	$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$
品质因数 Q		$\frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 Cr} = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\frac{R_0}{\omega_0 L} = \omega_0 CR_0 = \frac{1}{G_0}\sqrt{\frac{C}{L}}$
谐振电阻		$r = \frac{1}{Q}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$R_0 = Q\sqrt{\frac{L}{C}}$
阻抗	$f < f_0$	容抗	感抗
	$f > f_0$	感抗	容抗

二、串并联阻抗的等效互换

图 2-1 是一个串联电路与并联电路的等效互换图。设串联电路是由 X_1 与 r_1 组成, 等效后的并联电路是由 X_2 与 R_2 组成。所谓“等效”是指在工作频率 ω 相同的条件下, AB 两端的阻抗相等。也就是

$$r_1 + jX_1 = \frac{R_2 jX_2}{R_2 + jX_2} = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2} + j \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2-2)$$

所以

$$r_1 = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2}, \quad X_1 = \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2-3)$$

根据品质因数 Q 的定义, 串联回路 r_1 、 X_1 的品质因数 $Q_1 = X_1/r_1$ 。代入式(2-3)的值, 得

$$Q_1 = \frac{X_1}{r_1} = \frac{R_2}{X_2} = Q_2$$

式中, Q_2 为并联回路的品质因数。可见等效互换结果 Q 不变。即

$$Q_1 = Q_2 = Q。$$

由式(2-2)可得

$$r_1 = \frac{X_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{X_2^2} + 1} = \frac{1}{Q^2 + 1} R_2$$

$$X_1 = \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{X_2}{1 + \frac{X_2^2}{R_2^2}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q^2}} X_2$$

所以

$$R_2 = (Q^2 + 1)r_1 \quad (2-4)$$

$$X_2 = (1 + 1/Q^2)X_1 \quad (2-5)$$

若回路品质因数较高, 可得

$$R_2 \approx Q^2 r_1, \quad X_2 \approx X_1$$

这个结果表明, 串联电路转换为等效并联电路后, R_2 为串联电路 r_1 的 Q^2 倍, 而 X_2 与串联电路 X_1 相同, 保持不变。

三、并联谐振回路的耦合联接与接入系数

当并联谐振回路作为放大器的负载时, 其联接的方式将直接影响放大器的性能。若将晶体管的集电极和下一级的负载都直接接入谐振回路, 从交流等效电路来看, 晶体管的输出电阻、输出电容和下一级晶体管的输入电阻、输入电容都与谐振回路并联。这样的联接方式一般来说是不适用的。因为晶体管的输出阻抗低, 直接并联在回路两端会降低谐振回路的品质因数 Q , 不仅使放大器电压增益降低, 而且还使选择性变坏。同样, 下一级负载的直接接入也会使 Q 下降。另外, 从晶体管放大器输出功率最大来看, 要求晶体管的输出阻抗与

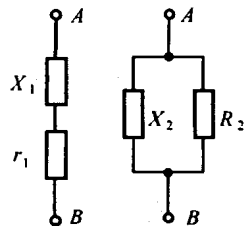


图 2-1 等效互换电路

回路负载阻抗相等,直接接入也不能满足这一要求。通常,多采用部分接入方式,以完成阻抗变换的要求。

(一)变压器耦合联接的变比关系

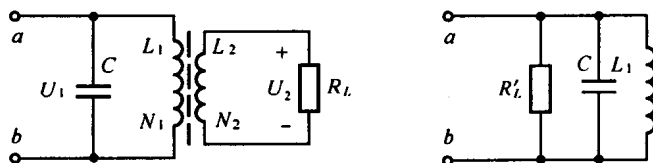


图 2-2 变压器耦合联接的变换

图 2-2 是变压器耦合联接形式,因为 L_1 与 L_2 是绕在同一磁芯上,是紧耦合,可认为是理想变压器。设次级负载电阻 R_L 得到的功率为 P_2 ,此功率来自初级,即初级提供给次级 R_L 的功率 P_1 等于 P_2 。根据功率关系, $P_2 = U_2^2/R_L$, $P_1 = U_1^2/R_L'$,故

$$R_L' = \frac{U_1^2}{U_2^2} R_L \quad (2-6)$$

根据变压器的电压变换关系, U_1 与 U_2 之比等于初级线圈的圈数 N_1 与次级线圈的圈数 N_2 之比,即 $U_1/U_2 = N_1/N_2$,故可得

$$R_L' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2-7)$$

(二)自耦变压器耦合联接的变比关系

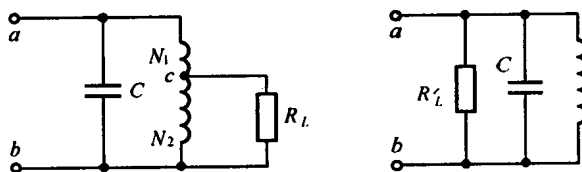


图 2-3 自耦变压器耦合联接的变换

图 2-3 是自耦变压器耦合联接形式,其变比关系的分析与变压器耦合相同。设 ac 的圈数为 N_1 , cb 圈数为 N_2 ,总圈数为 $N_1 + N_2$ 。则

$$R_L' = \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2-8)$$

自耦变压器耦合联接方式适用于与晶体管的联接,它除了能实现阻抗变换外,还能为晶体管的集电极提供直流通路。

(三)双电容分压耦合联接的变比关系

图 2-4 是双电容分压耦合联接形式,其变比关系可以应用串并联等效互换的关系求得。首先将 R_L 与 C_2 组成的并联支路等效为串联支路。其中 X 不变,即 C_2 不变,电阻 R_{LS} 为

$$R_{LS} = \frac{1}{Q_c^2} R_L = \frac{1}{(\omega_0 C_2 R_L)^2} R_L = \frac{1}{\omega_0^2 C_2^2 R_L}$$

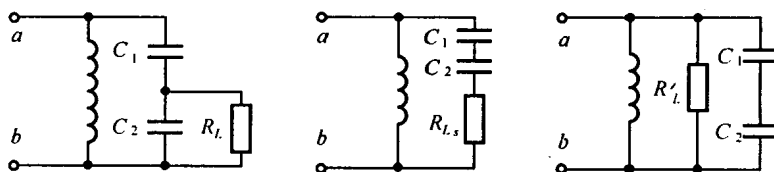


图 2-4 双电容分压耦合联接的变换

再将 R_{LS} 、 C_1 、 C_2 组成的串联支路等效为并联支路。其中, C_1 、 C_2 仍串联不变, 而电阻 R_L' 为

$$R_L' = Q^2 R_{LS} = \left(\frac{1}{\omega_0 C R_{LS}} \right)^2 R_{LS} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 R_{LS}} = \frac{C_2^2}{C^2} R_L$$

因为, $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, 所以

$$R_L' = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^2 R_L \quad (2-9)$$

上面进行推导的近似条件是 $Q_{e2} \gg 1$, $Q_c \gg 1$ 。双电容分压的联接方式可以避免绕制变压器线圈时抽头的麻烦。在实际电路中, 这种方法用得较多。

(四) 接入系数

上面以电阻 R_L 的等效变换推导了各种联接形式的变比关系。为了在分析电路时运用方便, 可将上述变化关系推广到电导、电抗、电容、电流源和电压源的等效变比关系上去。

首先定义与变化有关的接入系数 p , 即令

$$p = \frac{\text{转换前的圈数(或容抗)}}{\text{转换后的圈数(或容抗)}}$$

根据此定义和式(2-7)、(2-8)、(2-9)可得转换的通式

$$R_L' = \frac{1}{p^2} R_L \quad (2-10)$$

推广到其它量可得

$$\begin{aligned} g_L' &= p^2 g_L; & X_L' &= \frac{1}{p^2} X_L; & C_L' &= p^2 C_L; \\ I_g' &= p I_g; & U_g' &= \frac{1}{p} U_g \end{aligned} \quad (2-11)$$

利用上式可以很方便地进行各种变换。这对分析电路将是非常简便的。

第三节 晶体管高频小信号等效电路

晶体管在高频线性运用时, 晶体管的内部参数将随工作频率而变化。因而必须讨论晶体管的高频等效电路。在本课程所讨论的频率范围内, 用得最多的是 y 参数等效电路和混合 π 等效电路。