



普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

# 高频电子线路

GAOPIN DIANZI XIANLU

◎ 羊梅君 苏艳 谢永红 编

 华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

# 高频电子线路

羊梅君 苏 艳 谢永红 编

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书系统阐述了高频电子线路的基本原理与分析方法。其内容包括绪论,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,振幅调制、解调及混频,角度调制与解调和反馈控制电路。各章后均配有习题。

本书可以作为电子信息工程、通信工程等专业应用型本科生的教材,也可以作为大专、高职相关专业的教材和有关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/羊梅君,苏艳,谢永红编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.3

普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

ISBN 978-7-5680-1422-9

I. ①高… II. ①羊… ②苏… ③谢… III. ①高频-电子电路-高等学校-教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284319 号

### 高频电子线路

Gaopin Dianzi Xianlu

羊梅君 苏 艳 谢永红 编

策划编辑:范莹

责任编辑:陈元玉

封面设计:原色设计

责任校对:张琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.75

字 数:440千字

版 次:2016年3月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

随着无线通信技术的迅速发展,人们已经越来越清晰地认识到高频知识在无线电技术应用领域的重要性,高频电子线路也已成为电子信息工程、通信工程等电子信息类专业的一门主要专业基础课程。

本书是广东省精品课程“高频电子线路”的配套教材,是依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会的“电子电气基础课程教学基本要求”,为应用型本科学学生编写的教材。本书充分考虑了应用型本科教学的特点,在内容选取上突出基础性和实用性,遵循“系统功能为纲,优选基础内容”的原则,以无线通信系统各主要单元电路的功能为基点构筑各章节,精选基础内容,以分立元件的分析为基础,以集成电路的分析为重点,力求能够全面反映高频电子线路理论与技术的发展。在内容阐述上,除必要的数学分析之外,尽量避免烦琐的数学推导,强调实际电路分析,突出重点,力求做到条理清晰、通俗易懂、深入浅出、循序渐进。

全书共8章,第1章主要介绍了无线通信系统的组成、无线通信中信号的特性与调制方式、本书的特点及学习方法等;第2章主要介绍了高频电路中的元器件及两类选频电路:LC谐振回路和集中滤波电路;第3章主要介绍了高频小信号放大器的工作原理、性能指标、稳定性分析,此外还介绍了电子噪声的来源与特性、噪声系数和噪声温度的概念等;第4章主要介绍了丙类谐振功率放大器的工作原理、动态特性分析、外部特性和实际电路等;第5章主要介绍了LC正弦波振荡器、石英晶体振荡器和负阻振荡器的原理与分析方法;第6章主要介绍了振幅调制、调制信号的解调和混频的原理与实现方法;第7章介绍了频率调制与相位调制的概念,其中重点介绍了频率调制和解调的原理与实现方法;第8章主要介绍了自动增益控制、自动频率控制、自动相位控制(锁相环)和频率合成等技术的原理与实现方法。

本书由华南理工大学广州学院羊梅君、苏艳、谢永红编写,羊梅君负责全书的结构设计、修改和定稿工作。在本书的编写过程中,编者参考了一些同行的相关著作、文献,在此一并表示感谢。作者还要感谢华中科技大学出版社对本书出版给予的支持和帮助,感谢范莹编辑辛勤有效的工作及对本书出版所付出的努力。

由于编者水平有限,书中疏漏与错误之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

编 者

2016年3月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 无线通信系统的组成 .....	(1)
1.2 无线通信的信号与调制 .....	(3)
1.3 无线电信号的传播特性 .....	(4)
1.4 本书的特点及学习方法 .....	(6)
习题.....	(7)
<b>第 2 章 选频电路</b> .....	(8)
2.1 高频电路的元器件 .....	(8)
2.2 LC 谐振回路 .....	(11)
2.3 石英晶体谐振器.....	(22)
2.4 集中选频滤波器.....	(25)
习题 .....	(28)
<b>第 3 章 高频小信号放大器</b> .....	(29)
3.1 概述.....	(29)
3.2 晶体管高频等效电路与参数.....	(30)
3.3 高频小信号谐振放大器性能分析.....	(34)
3.4 高频谐振放大器的稳定性.....	(38)
3.5 多级谐振放大器 .....	(42)
3.6 集中选频放大器.....	(46)
3.7 放大器的噪声.....	(48)
习题 .....	(56)
<b>第 4 章 高频功率放大器</b> .....	(59)
4.1 概述.....	(59)
4.2 高频功率放大器的原理和特性.....	(60)
4.3 高频功率放大器的高频效应.....	(72)
4.4 高频功率放大器的电路组成.....	(75)
4.5 丁类(D 类)高频功率放大器 .....	(80)
4.6 功率合成器.....	(84)
4.7 集成高频功率放大器举例.....	(86)
习题 .....	(88)

<b>第 5 章 正弦波振荡器</b> .....	(90)
5.1 概述 .....	(90)
5.2 反馈型振荡器的工作原理 .....	(90)
5.3 LC 振荡器 .....	(95)
5.4 振荡器的频率稳定度 .....	(104)
5.5 LC 振荡器的设计方法 .....	(107)
5.6 石英晶体振荡器 .....	(108)
5.7 负阻振荡器 .....	(115)
5.8 几种特殊的振荡现象 .....	(118)
习题 .....	(124)
<b>第 6 章 振幅调制、解调及混频</b> .....	(129)
6.1 概述 .....	(129)
6.2 频谱线性搬移电路 .....	(130)
6.3 振幅调制 .....	(148)
6.4 调制信号的解调 .....	(169)
6.5 混频 .....	(183)
习题 .....	(196)
<b>第 7 章 角度调制与解调</b> .....	(201)
7.1 概述 .....	(201)
7.2 调角波的性质 .....	(202)
7.3 调频器 .....	(211)
7.4 鉴频器 .....	(223)
习题 .....	(235)
<b>第 8 章 反馈控制电路</b> .....	(240)
8.1 自动增益控制电路 .....	(241)
8.2 自动频率控制电路 .....	(244)
8.3 锁相环路 .....	(246)
8.4 频率合成器 .....	(262)
习题 .....	(275)
<b>参考文献</b> .....	(277)

# 第 1 章 绪 论

现代无线电技术已经广泛地应用于军事和日常生活的各个领域,如广播、电视、手机、无线网络、导航、雷达、卫星通信等,虽然应用领域不同,但都是利用高频载波信号来传递信息进而实现无线电通信的。虽然目前使用的各类无线通信系统在工作方式和设备结构上有一定的差异,但系统的基本组成和用于产生、处理、接收和检测高频信号的基本电路大都是相同的。本书主要结合无线通信系统来讨论高频电路的基本组成、工作原理和分析方法。

## 1.1 无线通信系统的组成

通信的目的是传输消息,我们把实现消息传输所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。在实际中使用的各类通信系统,虽然其表现形式各异,但都具有一定的共性,这些共性可以抽象概括为通信系统模型,如图 1-1 所示。

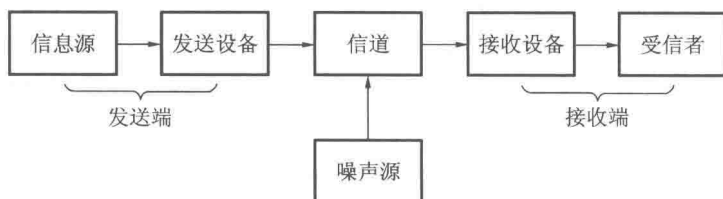


图 1-1 通信系统的一般模型

信息源的作用是将消息转换成随时间变化而变化的原始电信号,这样的原始电信号通常又称为消息信号或基带信号。常用的信息源有电话机的传声器、摄像机、传真机和计算机等。

发送设备的基本功能是将信息源和信道匹配起来,即将信息源产生的原始电信号变换为适合于在信道中传输的信号形式。发送设备一般由载波振荡器、调制器、(上变频)变频器、滤波器和放大器等单元组成。在数字通信系统中,发送设备还包含加密器和编码器等。

信道是信号传输的通道,可以是有线的,也可以是无线的。例如双绞线、同轴电缆、光缆等是有线信道,中长波、短波、微波中继及卫星中继等是无线信道。

噪声源是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集合。噪声主要来源于热噪声、外部的干扰(如雷电干扰、宇宙辐射、邻近通信系统的干扰等),以及由于信道特性不理想使得信号失真而产生的干扰。为了分析方便,通常将各种噪声抽象为一个噪声源并集中在信道上加入。

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,一般由解调器、(下变频)变频器、解码器、译码器、滤波器和放大器等单元组成。接收设备的主要任务是从接收到的带有干扰的信号中正确恢复出相应的原始电信号。

受信者又称信宿,其作用是将接收设备恢复出来的原始电信号转换成相应的消息。

按照信道中传输媒质的不同,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统等两大类。按照工作频段的不同,又可以将无线通信系统分为中波通信系统、短波通信系统、超短波通信系统、微波通信系统和卫星通信系统等。无线通信系统的类型很多,但它们的基本组成不变,典型的无线通信系统基本组成方框图如图 1-2 所示。

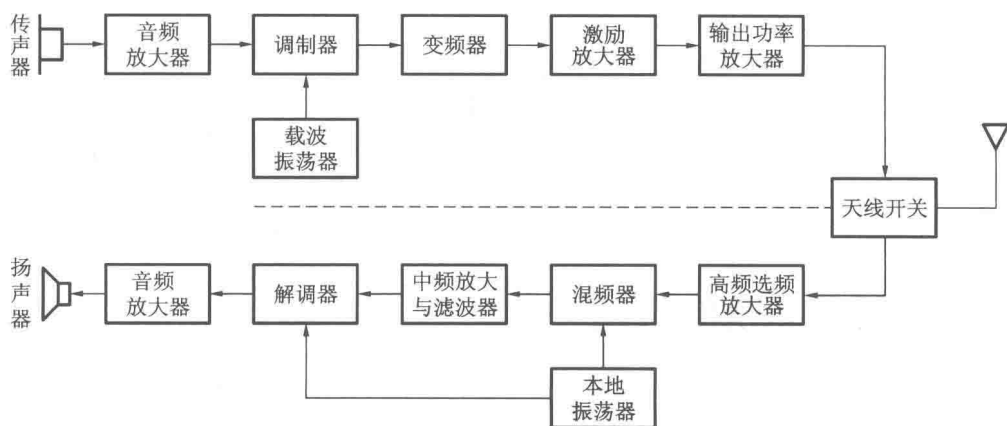


图 1-2 无线通信系统的基本组成方框图

图 1-2 中,传声器和扬声器属于通信的终端设备,分别为信息源和受信者,上下两个音频放大器分别是为放大传声器输出信号和推动扬声器工作而设置的,属低频放大电路。信道为自由空间,是无线信道。虚线以上部分为发送设备,虚线以下部分为接收设备,天线及天线开关为收发共用设备。

发送设备由调制器、变频器、激励放大器和输出功率放大器等部分组成,主要实现调制、上变频、功率放大和滤波等功能。在满足某些条件的情况下,调制和上变频可以合二为一,由调制器来实现这两项功能。在图 1-2 中,发送设备中的音频放大器将低频基带信号放大后送至调制器,该信号控制高频载波振荡器输出信号的某个(或几个)参数,从而实现调制,调制器输出的已调信号为高频带通信号。根据需要可以对已调信号进行倍频或上变(混)频,使信号频率进一步提高,然后经过多级高频放大器进行激励放大和输出功率放大,最后经天线辐射出去。在发送设备中存在着两种变换:第一种变换是,信息源将消息变换成原始电信号,该信号的频谱通常靠近零频附近,属于低频信号,称为基带信号;第二种变换是,调制器将基带信号变换成适合在信道中传输的信号,即将低频基带信号变换为高频已调带通信号。

接收设备由高频选频放大器、混频器、中频放大与滤波器和解调器等部分组成,主要实现滤波、放大、下变(混)频和解调等功能。接收设备的任务是有选择地放大接收到的微弱电磁信号(同时要尽可能保证信息的质量),并从中恢复出有用信息。接收设备的结构通常采用超外差形式,接收到的信号通过高频选频放大(初步选择放大并抑制其他无用信号)后进行下混(变)频,混频器输出的中频信号经中频放大与滤波后进行解调,再经音频放大器放大推动扬声器。在接收设备中存在着相应的两种反变换,将接收到的已调信号变换(恢复)为基带信号的过程称为解调,把实现解调的部件称为解调器。

由上面的例子可以看出,无线通信系统的发送设备和接收设备中都需要有处理高频信号的电路,也就是说,无线通信系统中必定包含高频电路。对于不同的无线通信系统而言,其发



送设备和接收设备的结构会有一些的差异,但设备中所包含的高频电路基本上可以归纳为以下几种:①高频振荡器(提供载波信号或本地振荡信号);②放大器(高频小信号选频放大及高频功率放大);③混频器或变频器(高频信号变换或处理);④调制器与解调器(高频信号变换或处理)。此外,在无线通信系统中通常还需要某些反馈控制电路,主要包括自动增益控制(automatic gain control, AGC)电路、自动频率控制(automatic frequency control, AFC)电路和锁相环(phase locked loop, PLL)电路等。

## 1.2 无线通信的信号与调制

### 1. 无线通信的信号

无线通信是靠电磁波实现信息传输的。自然界中存在的电磁波波谱如图 1-3 所示。在自由空间中,无线电波的波长与频率存在以下关系:

$$c = f\lambda \quad (1-1)$$

式中,  $c$  为光速;  $f$  和  $\lambda$  分别为频率和波长。

从图 1-3 可以看出,无线电波可以认为是一种波长相对较长,即频率相对较低的电磁波。在实际应用中,通常根据无线电波的频率或波长对其进行分段,分别称为频段或波段。表 1-1 列出了无线电波的频(波)段划分、主要传播方式和用途等。表 1-1 中关于传播方式和用途的划分是相对而言的,相邻频段间无绝对的分界线。

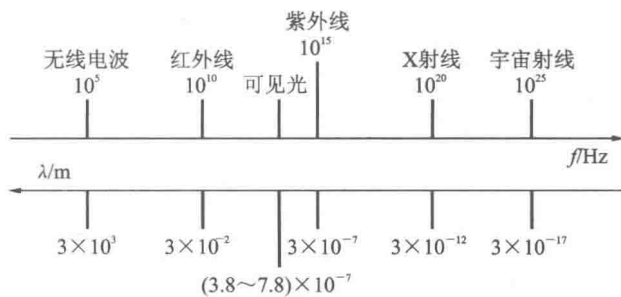


图 1-3 电磁波波谱

表 1-1 无线电波的频(波)段划分、主要传播方式和用途

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途
长波	$10^3 \sim 10^4$ m	30~300 kHz	低频	地波:远距离通信
中波	$10^2 \sim 10^3$ m	300 kHz~3 MHz	中频	地波、天波:广播、通信、导航
短波	10~100 m	3~30 MHz	高频	天波、地波:广播、通信
超短波	1~10 m	30~300 MHz	甚高频	直线传播、对流层散射:通信、电视广播、调频广播、雷达
微波	分米波	10~100 cm	特高频	直线传播、散射传播:通信、中继与卫星通信、雷达、电视广播
	厘米波	1~10 cm	超高频	直线传播:中继与卫星通信、雷达
	毫米波	1~10 mm	极高频	直线传播:微波通信、雷达

不同频段信号的传播方式和传播能力不同,因而它们的分析方法和应用范围也不同。对于米波以上(含米波, $\lambda \geq 1 \text{ m}$ )的信号,通常应用集总(中)参数的方法来分析与实现;而对于米波以下( $\lambda < 1 \text{ m}$ )的信号,一般应用分布参数的方法来分析与实现。

“高频”也是一个相对的概念,表 1-1 所示的“高频”指的是短波频段,其频率范围为 3~30 MHz,这是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频,其频率范围很宽,本书内容涉及的波段可从中波波段到微波波段。

对于电磁波的发送与接收而言,天线是必不可少的装置。理论上,任何频率的电磁波都能使用天线来传输,但是对于频率较低的电磁波,实现起来是有困难的。这是由于天线的尺寸与所传送的电磁波的波长是有关系的,通常只有当天线的尺寸与电磁波的波长相比拟时,天线的辐射效率才会较高,从而以较小的信号功率传播较远的距离,接收天线才能有效地接收信号。

在通信系统中,由各类信息(声音、图像、文字等)转换成的基带信号通常频率较低,不适合直接使用天线发射。以语音信号为例,其频率范围为 300~3400 Hz,若要有效地发射这样的信号,天线的长度应该至少达到数公里,这是很难实现的。因此,在无线通信系统中,通常需要先将其频率较低的基带信号转换成高频信号,然后再使用天线发送出去。

## 2. 无线通信中的调制

调制是将需要传输的基带信号加到高频振荡信号上,用基带信号去控制高频振荡信号的某一个或几个参数,使其按照基带信号的变化规律而变化的过程。这里,我们将基带信号称为调制信号;高频振荡信号可以视为运载基带信号的工具,称为载波信号;而调制后的信号是携带有基带信号的高频振荡信号,称为已调信号。通过调制,把低频信号转换成高频信号,这样收发天线的长度就可大大缩短。

载波信号一般为单一频率的高频正弦波振荡信号,对应的调制称为正弦调制。若载波为一脉冲信号,则称这种调制为脉冲调制。根据载波受调制参数的不同,正弦调制分为三种基本方式,分别为振幅调制(调幅)、频率调制(调频)和相位调制(调相)。本书主要讨论模拟消息(调制)信号和正弦载波的模拟调制,但这些原理以及对应的电路都可以推广到数字调制中去。

调制的逆过程称为解调或检波,其作用是从接收到的已调信号中将原调制信号恢复出来。

## 1.3 无线电信号的传播特性

无线电信号的传播特性是指其传播方式、传播距离、传播特点等。无线电信号所处的频段或波段不同,其传播特性也不同。

电磁波在传播过程中,其能量会被地面、建筑物或高空的电离层吸收或反射,或者在大气层中产生折射或散射等现象,从而使到达接收机时的信号大大减弱。根据无线电波在传播过程中所发生的现象不同,可以将其传播方式分为绕射(地波)传播、反射(天波)传播、直射(视距)传播和散射传播等四种。决定传播方式和传播特点的关键因素是无线电信号的频率。

低于 2 MHz 的电磁波通常以地波的方式进行传播,如图 1-4 所示。由于地球是一个巨大

的导体,电磁波沿地面传播(绕射)时能量会被吸收(趋肤效应引起),通常是,波长越长(或频率越低),被吸收的能量越少,损耗就越小。因此,中、低频(或中、长波)信号以地波的方式绕射传播很远,传播距离可以达到几百甚至几千公里,并且信号比较稳定,因此多用作远距离通信与导航。

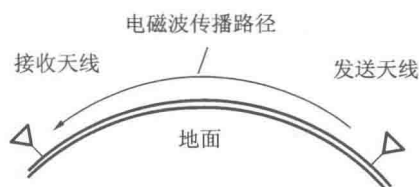


图 1-4 地波传播

频率在 2~30 MHz 范围内的电磁波沿地面传播的距离很短,远距离传播主要靠电离层,通常以天波的方式传播,如图 1-5 所示。大气层中离地面 60~600 km 的区域称为电离层,它是由太阳和星际空间的辐射引起大气电离而产生的。电离层从里往外可以分为 D、E、F1、F2 四层,D 层和 F1 层在夜晚几乎完全消失,因此经常存在的是 E 层和 F2 层。电离层对射向它的无线电波会产生反射与折射作用。入射角越大,反射越易;入射角越小,折射越易。通常情况下,对于短波信号,F2 层是反射层,D、E 层是吸收层(因为它们的电子密度小,不满足反射条件)。F2 层的高度为 250~300 km,所以,一次反射的最大跳距约为 4000 km。由于电离层的状态随着时间(年、季、月、天、小时甚至更小单位)的变化而变化,因此,利用电离层进行的短波通信并不稳定。但由于电离层离地面较高,因此,短波通信还是一种价格低廉的远距离通信方式。需要指出,电磁波的反射传播不只存在于电离层中。由于电波在不同性质的介质的交界处都会发生反射,因此,反射也发生于地球表面、建筑物表面等许多地方。

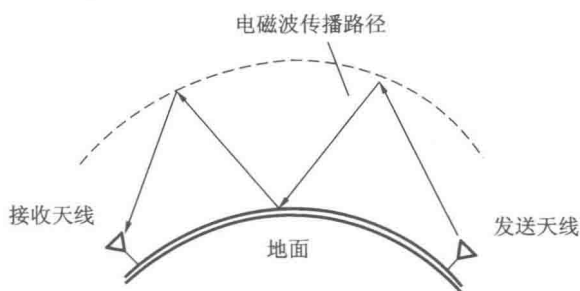


图 1-5 天波传播

频率高于 30 MHz 的电磁波的主要传播方式是直射(视距)传播,如图 1-6 所示。电离层除了会对电磁波产生反射与折射作用以外,对通过它的电磁波也有吸收作用,频率越高的信号,电离层的吸收能力越弱,或者电磁波的穿透能力越强。因此,频率高于 30 MHz 的电磁波会穿过电离层而达到外层空间,它不能再依靠电离层的反射向前传播,而只能沿着空间直线传播。直射传播的距离有限,通常只有视距的距离,所以又称为视距传播。直射传播方式可以通过架高天线、中继或卫星等方式来延长传输距离。

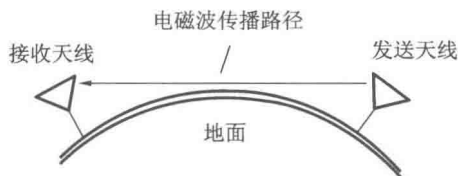


图 1-6 直射传播

电磁波还有一种传播方式称为散射传播,如图 1-7 所示。当电磁波通过的介质中存在小于波长的物体并且单位体积内阻挡体的个数非常多时,会发生散射。因此,散射发生于粗糙表面、小物体或不规则物体等条件下。在离地面大约 10~12 km 范围内的大气层称为对流层,该层的空气密度较高,所有的大气现象(如风、雨、雷、电等)都发生在这一层。散射现象也主要发生在对流层。散射具有很强的方向性和随机性。接收到的能量与入射线和散射线夹角有关。散射信号随时间的变化分为慢衰落和快衰落两种,前者由气象条件决定,后者由多径传播引起。散射传播距离约为 100~500 km,适合的频率在 400~6000 MHz 之间。

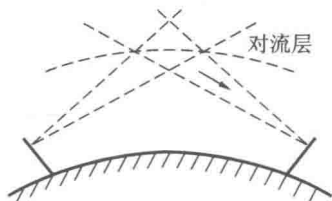


图 1-7 散射传播

由以上分析可以看出,不同波长(或频率)的电磁波对应的传播方式也不同。长波信号以地波绕射为主;中波信号和短波信号可以地波和天波两种方式传播,前者以地波传播为主,后者以天波(反射与折射)传播为主;超短波以上频段的信号大多以直射方式传播,也可以采用对流层散射的方式传播。

## 1.4 本书的特点及学习方法

高频电子线路几乎都是由线性的元件和非线性的器件组成的,都属于非线性电路。除了高频小信号放大器可以用线性电路来近似等效分析以外,本书的绝大部分电路都采用非线性电路的方法来进行分析。在分析非线性电路时,需要求解非线性方程(包括代数方程和微分方程),而在实际中要想精确求解是十分困难的。在工程中,往往根据实际情况对器件的数学模型和电路的工作条件进行合理的近似,以便简化分析方法,而不会过分追求其严格性。因此,学习本书时,不要一味追求数学上的求解过程,而应该注重探究电路的物理本质。

近年来,集成电路和数字信号处理(DSP)技术迅速发展,各种通信电路甚至系统都可以在一个芯片内,称为片上系统(SOC)。但要注意,所有这些电路都是以分立器件为基础的,因此,在学习时要遵循“分立为基础,集成为重点,分立为集成服务”的原则。在学习具体电路时,要掌握“管为路用,以路为主”方法,做到以点带面,举一反三,触类旁通。

高频电子线路是一门实践性很强的课程,由于高频电路的复杂性和分析手段的局限性,实践成为学生加深对理论知识理解的必不可少的重要环节。因此,在学习本书时必须注重理论与实践的紧密结合。

## 习 题

- 1-1 画出无线通信收发信机的原理框图,并说出各部分的功用。
- 1-2 无线电信号的频段或波段是如何划分的?各个频段的传播特性和应用情况如何?
- 1-3 什么是调制?正弦调制有哪几类?在无线通信中为什么要进行调制?
- 1-4 电磁波有哪几种传播方式?

# 第2章 选频电路

信号在传输过程中不可避免地会受到外界环境的干扰和电路内部噪声的影响,各种干扰和噪声都可能给信号增加无用的频率分量,从而导致信号失真。因此,为了选出所需的有用频率分量并滤除无用的频率分量,通信系统必须使用选频电路。在高频电路中,选频电路分为两类:第一类是由电感和电容元件组成的  $LC$  选频电路;第二类是各种滤波器,如  $LC$  集中滤波器、石英晶体滤波器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器等。选频电路在高频电路中得到了广泛的应用,它是高频小信号放大器、高频功率放大器、高频振荡器、调制器、混频器和解调器等电路的重要组成部分。

## 2.1 高频电路的元器件

高频电路的元器件主要包括电阻器、电容器、电感器、二极管和三极管等。在低频电路中,诸如电阻器、电容器、电感器等元件都可视为集总(参数)元件,其特性可以用理想元件来描述。但在高频电路中,随着工作频率的升高,必须考虑元件分布参数的影响,如电阻器的分布电容与引线电感、电感器呈现的分布寄生电容等,此时,这些元件就不能用理想元件来描述了。下面分别介绍各种常用元器件在高频电路中工作时的特性。

### 2.1.1 导线

导线包括裸铜线、镀银(金)线、漆包线、塑包线和纱包线等。在低频电路中,电流可以认为是均匀分布在其截面上的。

在高频电路中,随着频率的升高,流过导线的电流只集中在导线的表面,导致有效导电截面积减小,从而导线损耗增加,电路性能恶化,这种现象称为趋肤效应。由于导线的中心部分几乎没有电流通过,所以在高频电路中可以采用空心导线代替实心导线。

### 2.1.2 电阻器

在高频电路中,电阻器不仅具有电阻特性,而且具有电抗特性。电阻器的电抗特性反映的就是其高频特性。

电阻器的高频等效电路如图 2-1 所示。其中, $R$  为电阻, $C_R$  为分布电容, $L_R$  为引线电感。分布电容和引线电感越小,表明其电抗特性的影响越小,其电阻的高频特性越好。

电阻器的高频特性与电阻的封装形式、尺寸大小和制作电阻的材料有密切关系。一般来说,表面贴装电阻比引线电阻的高频特性好;小尺寸的电阻比大尺寸的电阻的高频特性好;线绕电阻的  $L_R$  一般可达几十微亨, $C_R$  可达几十皮法,而非线绕电阻的  $L_R$  为  $0.01 \sim 0.05 \mu\text{H}$ ,  $C_R$  为  $0.1 \sim 5 \text{ pF}$ ,因此线绕电阻的高频特性相对较差。比较而言,金属膜电阻比碳膜电阻的高频特性好,而碳膜电阻比线绕电阻的高频特性好。

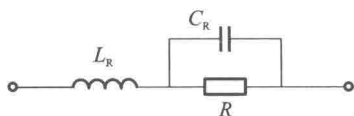


图 2-1 电阻器的高频等效电路

### 2.1.3 电容器

电容器的高频等效电路如图 2-2(a)所示,其中, $C$  为电容,电阻  $R_c$  为极间绝缘电阻,它是由于两导体间的介质的非理想(非完全绝缘)所致;电感  $L_c$  为分布电感或(和)极间电感,小容量电容器的引线电感也是其重要组成部分。

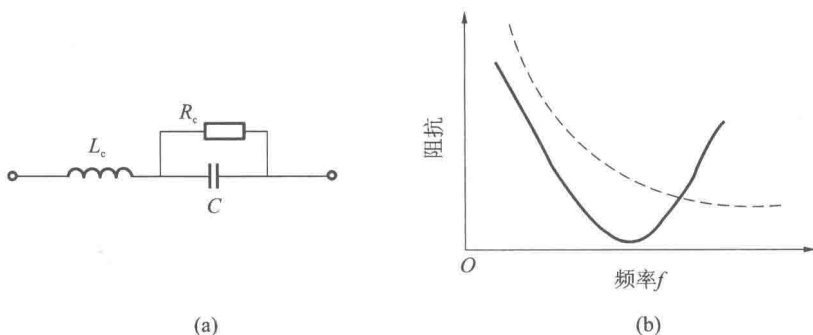


图 2-2 电容器的高频等效电路

(a) 电容器的等效电路;(b) 电容器的阻抗特性

由于引线电感的影响,电容器的阻抗呈现串联谐振的特性,其阻抗特性如图 2-2(b)所示,其中虚线表示理想电容器的阻抗特性,而电容器在高频电路中运用时的实际阻抗频率特性如图 2-2(b)中实线所示,呈 V 形特性。阻抗最小值对应的频率为电容器的自身谐振频率(self resonant frequency, SRF)。当工作频率小于自身谐振频率时,电容器呈正常的电容特性;当工作频率大于自身谐振频率时,电容器将等效为一个电感器。

### 2.1.4 电感器

电感量  $L$  是高频电感器的主要参数,由  $L$  产生的感抗为  $j\omega L$ 。高频电感器一般由导线绕制(空心或有磁芯、单层或多层)而成(也称电感线圈),由于导线都有一定的直流电阻,所以高频电感器有直流电阻  $R$ 。

随着工作频率的升高,高频电路中的趋肤效应加剧,加上涡流损失、磁芯电感在磁介质内的磁滞损失,以及由电磁辐射引起的能量损失等,会使高频电感的等效电阻(交流电阻)大大增加,通常情况下其值远大于直流电阻,因此,高频电感器的电阻主要指交流电阻。在中、短波段和米波波带,高频电感器可等效为电感器和电阻的串联或并联。实际中,衡量高频电感器损耗性能的指标是品质因数  $Q$ 。它定义为高频电感器的感抗与其串联损耗电阻之比。 $Q$  值越高,表明该电感器的储能作用越强、损耗越小。

在工作频率更高的频段上,电感器的等效电路不能简单地用电感器与电阻的并联或串联来等效,还应考虑电感器两端总的分布电容,该电容应与电感器并联。

电感器的阻抗特性如图 2-3 所示。由图 2-3 可见,高频电感器也具有自身谐振频率。在自身谐振频率上,高频电感的阻抗的幅值最大,而相角为零。

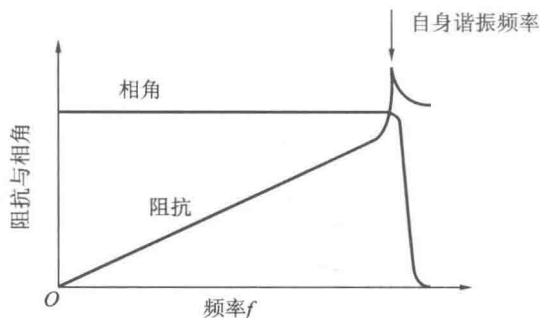


图 2-3 电感器的阻抗特性

## 2.1.5 二极管

在高频电路中,半导体二极管工作在低电平,主要用于检波、调制、解调及混频等非线性变换电路中。

### 1. 检波二极管

检波二极管广泛应用于半导体收音机、电视机和各类通信设备的接收机中,通常选用锗半导体材料制成的点接触型二极管。其特点是极间电容小、工作频率高、反向电流小等。常用的检波二极管有 2AP 系列,工作频率可达 200 MHz,具有检波效率高和频率特性好等特点。

### 2. 混频二极管

混频二极管应用于上(下)变频电路中,通常选用表面势垒二极管(又称肖特基二极管),具有工作频率高、噪声低、反向电流小、结电容小等特点,工作频率可高至微波范围。

### 3. PIN 二极管

PIN 二极管是一种由 P 型、N 型和本征(I)型三种半导体构成的二极管,当工作频率超过 100 MHz 时,该二极管失去整流功能而变为阻抗器件,且其阻抗值随偏置电压的变化而改变。可以在限幅、调制或电调移相电路中,作为开关或衰减器使用。

### 4. 变容二极管

变容二极管由硅或砷化镓单晶材料制成,通常工作在反偏状态,其 PN 结的势垒电容随外加反偏电压变化而变化。若将它作为振荡器中的电容元件,则改变变容二极管两端的反偏电压,就可以达到改变振荡器输出信号频率的目的。变容二极管具有消耗能量低、噪声小、效率高等特点。

## 2.1.6 三极管

高频电路中采用的三极管仍然是双极晶体管和各种场效应管,它们的性能比用于低频电路的管子更好,在外形结构方面也有所不同。

### 1. 高频小功率管

高频小功率管主要用于小信号放大,通常要求其有高增益和低噪声。目前双极型小信号放大管的工作频率可达几千兆赫兹,噪声系数为几分贝。小信号的场效应管也能工作在同样



高的频率中,且噪声更小。

## 2. 高频功率放大管

高频功率放大管主要用于功率放大,通常既要求其有较大增益,也要求其有较大的输出功率。在几百兆赫兹以下的频率,双极型晶体管的输出功率可达十几瓦甚至上百瓦。而金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)甚至在几千兆赫兹的频率上还能输出几瓦功率。

### 2.1.7 集成电路

用于高频的集成电路主要分为通用型和专用型等两种。

高频电路中运用最广泛的通用型集成电路是晶体管模拟乘法器,其工作频率可达 100 MHz 以上,主要用于调制器、解调器和混频器中。宽带集成放大器也是较为常见的通用型集成电路,其工作频率可达 100~200 MHz,增益可达 50~60 dB,甚至更高。

随着集成技术的发展,目前也出现了一些高频专用集成电路(ASIC),如集成锁相环、集成调频信号解调器、单片集成接收机,以及电视机中的专用集成电路等。

各种有源器件的具体应用将在后续章节中详细讨论。

## 2.2 LC 谐振回路

LC 谐振回路是由电感和电容元件串联或并联形成的回路,在电路中完成选频和阻抗变换的任务,是构成高频放大器、振荡器,以及各种滤波器的主要部件,这在高频电路中应用很广。LC 谐振回路可以分为单谐振回路和耦合谐振回路等两类。单谐振回路是指只有一个回路的振荡电路,有串联谐振回路和并联谐振回路等两种,其中并联谐振回路应用最广。单谐振回路具有谐振特性,其回路阻抗在某一特定频率上有最大值或最小值,这个特定频率称为回路的谐振频率。

### 2.2.1 串联谐振回路

由电感器和电容器组成的串联谐振回路如图 2-4(a)所示。在高频电路中,一个实际的电感器通常用一个理想无损耗的电感  $L$  和一个串联的损耗电阻  $r$  来等效, $r$  很小,在某些情况下可以忽略不计。对电容器来说,由于在高频电路所讨论的频率范围内损耗很小,所以可以用一个理想电容  $C$  来等效。

当信号角频率为  $\omega$  时,串联谐振回路的阻抗为

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

回路电抗  $X$ 、回路阻抗的模  $|Z_s|$  和辐角  $\varphi$  随  $\omega$  变化而变化的曲线分别如图 2-4(b)、(c)和 (d)所示。由图 2-4 可知,当  $\omega < \omega_0$  时,  $|Z_s|$  随着频率的增大而减小,回路呈容性,  $|Z_s| > r$ ; 当  $\omega > \omega_0$  时,  $|Z_s|$  随着频率的增大而增大,回路呈感性,  $|Z_s| > r$ ; 当  $\omega = \omega_0$  时,感抗与容抗相等,此时回路发生串联谐振,  $|Z_s| = r$ ,有最小值,回路呈现纯电阻特性。串联谐振角频率  $\omega_0$  为

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