

高等学校简明通用系列规划教材

RADIO FREQUENCY
CIRCUIT CONCISE
COURSE

高频电子线路
简明教程

曾兴雯

刘乃安

陈健

付卫红

曾兴雯

主编 ◀

黑永强

编著 ◀



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校简明通用系列规划教材

高频电子线路简明教程

主 编 曾兴雯
编 著 曾兴雯 刘乃安 陈 健
付卫红 黑永强

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书注重基础,强化应用。全书共分九章,主要内容包括绪论,高频电路基础,高频谐振放大器,正弦波振荡器,频谱的线性搬移电路,振幅调制、解调及混频,频率调制与解调,反馈控制电路和整机线路分析。每章后均配有一定数量的习题。

本书可作为普通高等院校通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、微电子等相关专业本科生的教材,也可作为大专、电大、职大相关专业的教学用书,还可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路简明教程/曾兴雯主编. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2016.4

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3961 - 1

I. ① 高… II. ① 曾… III. ① 高频—电子电路—高等学校—教材

IV. ① TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 020883 号

策 划 云立实

责任编辑 马武装 张驰

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 15.5

字 数 365千字

印 数 1~3000册

定 价 28.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3961 - 1/TN

XDUP 4253001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

随着信息技术的迅速发展,电子与通信产品日益丰富,采用高频、射频甚至微波频率的设备越来越多,人们也非常清晰地认识到高频电子线路在整个通信与电子系统中的重要地位,因此各类高等学校都把高频电子线路作为电气信息类专业的一门主要的专业基础课程。

高频电子线路课程对学生的基础知识要求较高,而在应用型本科院校,该课程存在着“课时少、概念多、分析难、重应用”的特点。传统的高频电子线路教材往往偏重于抽象理论的分析与研究,缺乏实际应用的案例,这对应用型人才培养是十分不利的。本书作者长期从事高频电子线路课程和通信系统方面的教学与科研工作,对高频通信领域的人才培养有较为深刻的认识和较为丰富的经验。本书作为普通高等本科院校相关专业的高频电子线路课程的教科书,针对相关院校学生的特点,遵照教学指导委员会制定的教学规范,在注重课程本身应该具备的课程知识点的情况下,精简内容,避免繁琐的数学推导,尽可能降低课程难度与深度,但讲透“四个基本”,即基本概念、基本原理、基本分析方法和基本电路,并结合现代工程实际应用,强化工程性和系统性,注重新科技、新器件的介绍,努力使本书成为一本实用的教学和工程参考书。

全书共分九章,建议采用48学时的课程教学,不同学校或专业可以视实际情况进行选择或者安排自学。本书的教学安排建议如下:

- 第一章 绪论,1学时;
- 第二章 高频电路基础,5学时;
- 第三章 高频谐振放大器,6学时;
- 第四章 正弦波振荡器,6学时;
- 第五章 频谱的线性搬移电路,5学时;
- 第六章 振幅调制、解调与混频,10学时;
- 第七章 频率调制与解调,7学时;
- 第八章 反馈控制电路,6学时;
- 第九章 整机线路分析,2学时。

本书内容由多个院校具有丰富教学和工程实践经验的资深教师共同讨论而定。本书作者曾编写过多种高频电子线路的教材,其中不乏“十五”、“十一五”国家级规

划教材，负责教授的高频电子线路课程为国家精品课程和国家精品资源共享课程。本书由西安电子科技大学的曾兴雯教授担任主编，刘乃安教授、陈健教授、付卫红副教授和黑永强副教授参加编写，全书由曾兴雯教授负责统稿。

在编写本书的过程中，编者参考了众多国内外同行的著作和文献，在此向这些著作和文献的作者表示感谢。

限于编者的水平，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

第一章 绪论	1	第二节 高频小信号放大器	29
第一节 无线通信系统概论	1	一、高频小信号放大器的主要性能指标	29
一、无线通信系统的组成	1	二、高频小信号谐振放大器的工作原理	31
二、无线电频率和波段的划分	2	三、高频集成放大器	33
三、电波传播方式	4	第三节 高频功率放大器原理	35
四、调制与解调	4	一、工作原理	35
第二节 本课程的特点与学习方法	5	二、高频功放的能量关系	38
一、本课程的特点	5	三、高频功放的工作状态	40
二、本课程学习中应注意的问题与方法	6	第四节 高频功放的外部特性	43
本章小结	6	一、高频功放的负载特性	43
思考题与练习题	6	二、高频功放的振幅特性	44
		三、高频功放的调制特性	45
		四、高频功放的调谐特性	46
第二章 高频电路基础	8	第五节 高频功率放大器实际线路	47
第一节 高频电路中的选频网络	8	一、直流馈电线路	47
一、串联谐振回路	8	二、输出匹配网络	49
二、并联谐振回路	11	三、高频功放的实际线路举例	51
三、抽头并联谐振回路	13	第六节 高频集成功率放大器简介	52
四、集中滤波器	15	本章小结	53
第二节 电子噪声及其特性	16	思考题与练习题	56
一、概述	16		
二、电子噪声的来源与特性	16		
三、噪声系数	19		
四、噪声系数与灵敏度	24		
本章小结	24		
思考题与练习题	25		
第三章 高频谐振放大器	27	第四章 正弦波振荡器	58
第一节 晶体三极管高频等效电路	27	第一节 反馈振荡器的原理	58
一、晶体三极管高频混合 π 型等效电路	27	一、负阻型振荡器原理	59
二、Y参数等效电路	28	二、反馈型振荡器原理	60
		三、反馈型振荡线路举例——互感耦合	64
		振荡器	64
		第二节 LC振荡器	65
		一、振荡器的组成原则	65
		二、电容反馈振荡器	67

三、电感反馈振荡器	68	二、二极管峰值包络检波器	140
四、两种改进型电容反馈振荡器	69	三、同步检波	148
五、场效应管振荡器	72	第三节 混频	152
六、单片集成振荡器举例	72	一、混频的概述	152
第三节 振荡器的频率稳定度	74	二、混频电路	157
一、频率稳定度的意义和表征	74	第四节 混频器的干扰	164
二、提高频率稳定度的措施	75	一、信号与本振的自身组合干扰	165
第四节 石英晶体振荡器	76	二、外来干扰与本振的组合干扰	166
一、石英晶体谐振器	76	三、交叉调制干扰(交调干扰)	168
二、晶体振荡器电路	79	四、互调干扰	169
三、高稳定晶体振荡器	82	本章小结	169
第五节 压控振荡器	84	思考题与练习题	170
本章小结	87	第七章 频率调制与解调	178
思考题与练习题	87	第一节 调频信号分析	178
第五章 频谱的线性搬移电路	90	一、调频信号的表达式与波形	178
第一节 非线性电路的分析方法	90	二、调频信号的频谱和功率	180
一、非线性函数的级数展开分析法	91	三、相位调制	184
二、线性时变电路分析法	93	第二节 调频方法	187
第二节 二极管电路	94	一、直接调频	187
一、单二极管电路	95	二、间接调频	187
二、二极管平衡电路	97	三、调频器的性能指标	189
三、二极管环形电路	100	第三节 变容二极管直接调频电路	190
第三节 差分对电路	104	一、变容二极管及其特性	190
一、单差分对电路	104	二、变容二极管直接调频电路	191
二、双差分对电路	107	第四节 调频信号的解调	194
第四节 其他频谱线性搬移电路	111	一、鉴频器的性能指标	194
一、晶体三极管频谱线性搬移电路	111	二、直接鉴频	195
二、场效应管频谱线性搬移电路	112	三、间接鉴频	196
本章小结	114	第五节 互感耦合相位鉴频器电路	199
思考题与练习题	114	一、频率-相位变换	199
第六章 振幅调制、解调与混频	117	二、相位-幅度变换	201
第一节 振幅调制	117	三、检波特性	202
一、振幅调制信号分析	117	第六节 调频收发机电路	204
二、振幅调制电路	126	一、调频发射机电路	204
第二节 调幅信号的解调	138	二、调频接收机电路	205
一、调幅信号解调的方法	138	本章小结	207
		思考题与练习题	208

第八章 反馈控制电路	212	一、传输子系统	228
第一节 概述	212	二、应用子系统	228
第二节 自动增益控制电路	213	三、电源子系统	228
一、基本工作原理	213	第二节 手机射频电路分析	228
二、自动增益控制电路的应用	213	一、手机天线电路	229
第三节 自动频率控制电路	216	二、手机射频接收机结构	231
一、基本工作原理	216	三、手机射频发射机结构	232
二、自动频率控制电路的应用	216	第三节 手机射频电路分析实例	233
第四节 锁相环路	217	一、摩托罗拉 V60 手机射频接收电路	233
一、基本工作原理	218	二、摩托罗拉 V60 手机射频发射电路	236
二、锁相环路的应用	221	三、频率合成器	238
本章小结	225	本章小结	239
思考题与练习题	225	练习题	239
第九章 整机线路分析	227	参考文献	240
第一节 手机整机线路分析	227		

第一章 绪论

本书主要讨论用于各种电子系统和电子设备中的高频电子线路。无线通信系统就是利用射频(无线电)信号来传递消息的电信系统,它最能体现高频电路的应用。

无线通信系统的种类和用途很多,其设备组成和复杂度也有很大差异,但设备中产生、接收和检测高频信号的基本电路大都是相同的。本书将主要结合无线通信来讨论高频电路的线路组成、工作原理和分析方法。这不仅有利于明确学习基本电路的目的,加强对有关设备和系统的了解,而且对于其他通信与电子信息系统也有典型意义。

第一节 无线通信系统概论

高频电子线路是无线通信设备硬件的主要组成部分,也对无线通信系统的性能有重要影响。

一、无线通信系统的组成

典型的点对点无线通信系统将由信源产生的信息通过无线发送设备(发射机)辐射到空中(无线信道,引入干扰和噪声),接收端由无线接收设备(接收机)恢复出发送端信源产生的信息送至信宿。

发射机和接收机是无线通信系统的核心组成部分,虽然有多种形式,但从产生至今,其最常用的形式是超外差(Super Heterodyne)结构,分别如图 1-1(a)和图 1-1(b)所示。通常将发射机和接收机合称收发信机(Transceiver)。

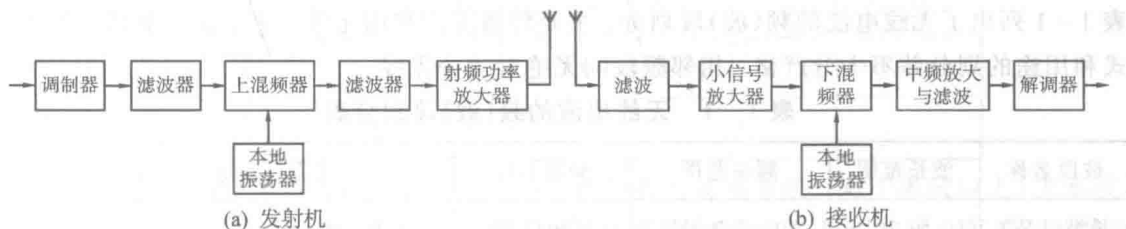


图 1-1 典型无线通信电路组成框图

发射机通过调制器和上混频器将信源产生的原始基带(Baseband)信号变换到频率较高的载波(Carrier)上,使所传送信号的时域和频域特性更好地满足信道的要求。射频功率放

大器将要发送的高频信号放大到需要的功率电平。接收机将动态范围很宽的射频已调信号 (Modulated Signal) 由高频变换到适宜处理的低频。接收机接收到的是高频、大动态范围和低信噪比的小信号。发射机和接收机中的天线用来实现射频信号的有效辐射与接收。

在发射机中, 将基带信号变换成适合在信道中传输的信号形式的过程称为调制 (Modulation), 实现调制的电路称为调制器 (Modulator)。调制后的信号称为已调信号, 通常为射频带通信号, 但也有在基带上实现数字调制的。在接收机中, 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 (Demodulation), 把实现解调的部件称为解调器 (Demodulator)。有时将收发设备中的调制器和解调器合称为调制解调器 (Modem)。

二、无线电频率和波段的划分

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的波谱很宽, 如图 1-2 所示。无线电波和光波都属于电磁波。在自由空间中, 波长与频率存在以下关系:

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

式中: c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; f 和 λ 分别为无线电波的频率和波长。因此, 无线电波也可以认为是一种频率相对较低的电磁波, 占据的频率范围很广。电磁波的频率是一种不可再生的重要资源。

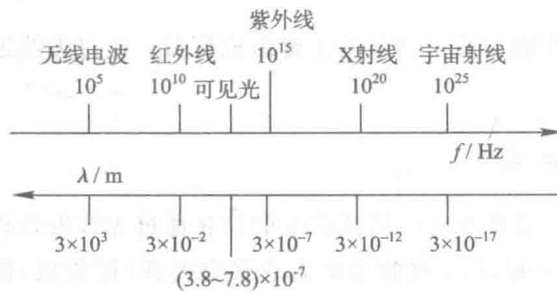


图 1-2 电磁波的波谱

对电磁波的频率或波长进行分段, 分别称为频段或波段。不同频段信号的产生、放大和接收的方法不同, 传播的能力和方式也不同, 因而它们的分析方法和应用范围也不同。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。表中关于频段、传播方式和用途的划分并不十分严格, 相邻频段间无绝对的分界线。

表 1-1 无线电波的频(波)段划分表

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(LW)	$10^3 \sim 10^4 \text{ m}$	30~300 kHz	低频(LF)	地波; 远距离通信
中波(MW)	$10^2 \sim 10^3 \text{ m}$	300 kHz~3 MHz	中频(MF)	地波、天波; 广播、通信、导航
短波(SW)	10~100 m	3~30 MHz	高频(HF)	天波、地波; 广播、通信

续表

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	
超短波 (VSW)	1~10 m	30~300 MHz	甚高频(VHF)	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 (USW)	10~100 cm	300 MHz~3 GHz	特高频(UHF)	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 (SSW)	1~10 cm	3~30 GHz	超高频(SHF)	直线传播; 中继和卫星通信、雷达
	毫米波 (ESW)	1~10 mm	30~300 GHz	极高频(EHF)	直线传播; 微波通信、雷达

应当指出,表 1-1 中的“高频”是一个相对的概念,它指的是短波频段,其频率范围为 3~30 MHz,这只是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频(RF, Radio Frequency),其频率范围非常宽。只要电路尺寸比工作波长小得多,可用集中(总)参数来分析实现,都可认为工作频率属于“高频”范围。就目前的技术水平来讲,“高频”的上限频率可达微波频段(如 3~5 GHz)。微波频段主要由 UHF、SHF 和 EHF 三个频段组成。表 1-2 为 IEEE 定义的更为详细的工业用微波频段。

表 1-2 IEEE 定义的微波频段

频带名称	频率范围/GHz	频带名称	频率范围/GHz
L	1.0~2.0	S	2.0~4.0
C	4.0~8.0	X	8.0~12.0
Ku	12.0~18.0	K	18.0~26.5
Ka	26.5~40.0	Q	33.0~50.0
U	40.0~60.0	V	50.0~75.0
E	60.0~90.0	W	75.0~110.0
F	90.0~140.0	D	110.0~170.0
G	140.0~220.0		

需要强调指出,不同频段的信号具有不同的分析与实现方法。对于米波以上(含米波, $\lambda \geq 1$ m)的信号,通常用集总(中)参数的方法和“路”的概念来分析与实现;而对于米波以下($\lambda < 1$ m)的信号,一般应用分布参数的方法和“场”的概念来分析与实现。

电磁波的频率越高,可利用的频带宽度就越宽,不仅可以容纳许多互不干扰的信道,从而实现频分复用或频分多址,而且可以传播某些宽频带的消息信号(如图像信号)。这是

无线通信采用高频的原因之一。

三、电波传播方式

不同频率的电磁波信号，其主要传播方式不同。电磁波的传播方式分为直射(视距)传播、绕射(地波)传播、折射和反射(天波)传播及散射传播等，如图 1-3 所示。

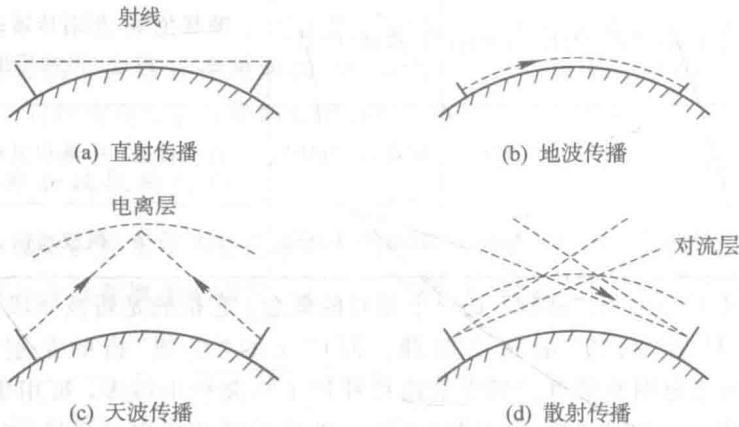


图 1-3 电磁波的传播方式

一般来讲，长波信号以地波绕射为主；中波和短波信号可以以地波和天波两种方式传播，不过，前者以地波传播为主，后者以天波(反射与折射)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。为了拓展直线传播的距离，可以通过架高天线、中继或卫星等方式来实现。

四、调制与解调

由图 1-1 可知，调制与解调在收发信机中的作用至关重要，其本质是频谱的非线性搬移。无线电传播一般都要采用高频(射频)的一个原因就是高频适于天线辐射和无线传播。只有当天线的尺寸大到可以与信号波长相比拟(例如天线尺寸至少为信号波长的 $1/10$)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，接收天线也才能有效地接收信号。若把低频的调制信号直接馈送至天线上，要想将它有效地变换成电磁波辐射，则所需天线的长度几乎无法实现。如果通过调制，把调制信号的频谱搬至高频载波频率，则收发天线的尺寸就可大大缩小。调制还有一个重要作用就是可以实现信道的复用，提高信道利用率。此外，先进的调制解调方式还具有较强的抗干扰、抗衰落能力，并可以提高传输性能，实现可靠通信。

所谓调制，就是把信号变换成适合于在信道(传输链路)中进行传输的形式的一种过程。在无线通信中，基本的调制方法是使高频载波信号的一个或几个参数(振幅、频率或相位)按照基带调制信号的规律变化。

根据载波受调参数的不同，调制分为三种基本方式，它们是振幅调制(调幅)、频率调制(调频)、相位调制(调相)，分别用 AM、FM、PM 表示。还可以有组合调制方式。当调

制信号为数字信号时,通常称为键控,三种基本的键控方式为振幅键控(ASK)、频率键控(FSK)和相位键控(PSK)。

一般情况下,高频载波为单一频率的正弦波,对应的调制为正弦调制。若载波为一脉冲信号,则称这种调制为脉冲调制。

解调是调制的逆过程。在双向通信中,实现调制和解调的复杂程度很可能是不对称的。在广播系统中,通常要求解调的复杂度要小,而不太关心调制的复杂度。

对于不同的调制信号和不同的调制解调方式,调制解调性能不同。衡量调制器和解调器性能优劣的指标主要是调制方式的频带利用率或频谱有效性、功率有效性及抗干扰和噪声的能力。

第二节 本课程的特点与学习方法

一、本课程的特点

高频电子线路的最大特点就是高频和非线性。

频率高的射频信号会产生许多低频信号所没有的效应,主要是分布参数、集肤效应和辐射效应。集总参数元件是指一个独立的局域性元件,能够在一定的频率范围内提供特定的电路性能。而随着频率提高到射频,任何元器件甚至导线都要考虑分布参数效应和由此产生的寄生参数,如导体间、导体或元件与地之间、元件之间的杂散电容,连接元件导线的电感和元件自身的寄生电感等。由于分布参数元件的电磁场分布在附近空间,其特性会受到周围环境的影响,分析和设计都相当复杂。集肤效应是指当频率升高时,电流只集中在导体的表面,导致有效导电面积减小,交流电阻可能远大于直流电阻,从而使导体损耗增加,电路性能恶化。辐射是指信号泄漏到空间中,使得信号源或要传输的信号的能量不能全部输送到负载上,从而产生能量损失和电磁干扰。辐射还会引起一些耦合效应,使得高频电路的设计、制作、调试和测量等都非常困难。此外,射频电路的输入/输出阻抗一般情况下都是相当低的,大部分射频电路与设备的典型阻抗是 $50\ \Omega$ 。因此,在分析与设计射频电路与系统时,一定要重视阻抗匹配问题,并要考虑噪声和损耗问题。

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。严格来讲,所有包含非线性器件的电子线路都是非线性电路,只是在不同的使用条件下,非线性器件所表现的非线性程度不同而已。比如对于高频小信号放大器,由于输入的信号足够小,而又要求不失真放大,因此,其中的非线性器件可以用线性等效电路表示(但存在不希望的失真),分析方法也可采用线性电路的分析方法。本课程的核心内容和绝大部分电路都属于非线性电路。非线性电路在无线通信中主要用来完成频谱变换功能,如C类功率放大器、振荡器、混频器、倍频器、调制与解调器等。

与线性器件不同,对非线性器件通常用多个参数来描述,如直流跨导、时变跨导和平均跨导等,而且它们大都与控制变量有关。器件的非线性会产生变频压缩、交调、互调等

非线性失真,它们将影响收发信机的性能。在分析非线性器件对输入信号的响应时,不能采用线性电路中行之有效的叠加原理,而必须求解非线性方程(包括代数方程和微分方程)。对非线性电路进行严格的数学分析不仅非常困难,而且没有必要。在实际中,一般都采用计算机辅助设计(CAD)的方法进行辅助分析。在工程上也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,以使用简单的分析方法(如折线近似法、线性时变电路分析法、开关函数分析法等)获得具有实际意义的结果,而不必过分追求其严格性。这也是学习本课程的困难所在。

二、本课程学习中应注意的问题与方法

第一,要深刻理解本课程的特点,懂得产生这些特点的原因,才能领会不同电路和分析方法的内在联系。

第二,要抓住各种电路之间的共性。高频电子线路中的功能电路虽然很多,但它们都是在为数不多的基本电路的基础上发展而来的。因此,在学习本课程时,要洞悉各种功能之间的内在联系,而不是仅仅局限于掌握一个个具体的电路及其工作原理。当然,熟悉典型的单元电路对读识图能力的提高和电路的系统设计都是非常有意义的。

第三,本课程所讲的电路都是无线通信系统发送设备和接收设备中的单元电路,虽然在讲解原理时经过了一定的归纳与抽象,但电路形式仍具有十分强烈的工程实践性。这就要求在学习过程中,要注意高频电路的工程性,如匹配、耦合、屏蔽与滤波等,要高度重视实验环节,坚持理论联系实际,在实践中积累丰富的经验。

第四,要有系统观。本课程的内容包括单元电路和整机电路,在对单元电路进行分析、设计时要有系统观,要从整个系统的角度来考虑要求和指标。各单元电路之间的关联性可通过系统来实现。

第五,要有发展的观念。随着需求的变化和技术的发展,电子元器件、集成电路、设计与仿真软件、制造工艺等各方面都有长足的发展,发射机和接收机的技术体制和实现方式也有很大变化,因此,在学习本课程时必须随时关注相关发展,及时应用新技术、新器件、新方法。

本章小结

本章以无线通信系统电路组成为主线,阐述了高频电子线路的功用和特点,介绍了无线电信号的波段划分和传播方式,说明了高频信号的作用和分析方法,以及调制的作用和方法,指出了学习本课程的方法和注意事项。

思考题与练习题

- 1-1 简述无线通信系统的组成原理。

- 1-2 无线通信系统为什么要进行调制？如何进行调制？
- 1-3 无线通信系统为什么要用高频信号？高频信号指的是什么？
- 1-4 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？
- 1-5 如何理解通信电子线路的最主要特点？

第二章 高频电路基础

由第一章可知,各种无线电设备都包含处理高频信号的功能电路,如高频放大器、振荡器、调制与解调器等。虽然这些电路的工作原理和实际电路都有各自的特点,但是它们之间也有一些共同之处,这就是高频电路的基础。

本章主要介绍高频电路中的选频网络和电子噪声两个内容。信号在传输过程中都会不同程度地受到外界干扰或电路内部噪声的侵袭,为了选出所需的频率分量和滤除无用的频率分量,就必须依靠选频网络(或称选频器或滤波器)。

电子噪声存在于各种电子电路和系统中,噪声系数与电子噪声密切相关,了解电子噪声的概念对理解某些高频电路和系统的性能非常有用,因此,电子噪声的来源与特性及噪声系数的计算也是高频电路的重要基础。

第一节 高频电路中的选频网络

高频电路中的选频网络主要完成信号的传输、频率选择及阻抗变换等功能,主要有高频谐振回路和滤波器等基本电路。

高频谐振回路是高频电路中应用最广的无源网络,也是构成高频放大器、振荡器以及各种滤波器的主要部件,在电路中完成阻抗变换、信号选择与滤波、相频转换和移相等功能,并可直接作为负载使用。只有一个回路的谐振电路称为简单谐振回路或单谐振回路,有串联谐振回路和并联谐振回路两类。串联谐振回路适用于电源内阻为低内阻(如恒压源)的情况或低阻抗的电路(如微波电路)。当频率不是非常高时,并联谐振回路应用最广。简单谐振回路的阻抗在某一特定频率上具有最大或最小值的特性称为谐振特性,这个特定频率称为谐振频率。简单谐振回路具有谐振特性和频率选择作用,这是它在高频电子线路中得到广泛应用的重要原因。下面对串联谐振回路、并联谐振回路、抽头并联谐振回路分别进行讨论。

一、串联谐振回路

串联谐振回路是电感、电容串联组成的振荡回路,如图 2-1(a)所示。在工作角频率为 ω 时,该回路的串联阻抗 Z_s 为

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

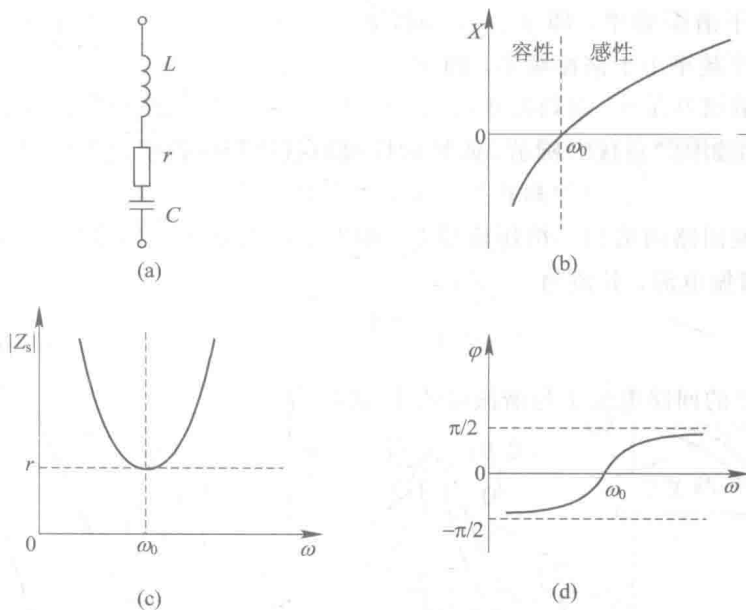


图 2-1 串联谐振回路及其特性

使感抗与容抗相等的频率为串联谐振频率 ω_0 ，令 Z_s 的虚部为零，求解方程的根就是 ω_0 ，可得

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

即当串联谐振回路工作在 ω_0 上时，该回路处于谐振状态，此时回路呈现出纯电阻特性。回路的阻抗为谐振电阻 $Z_s = r$ 。

串联谐振回路品质因数 Q 定义为高频电感的感抗与其串联损耗电阻之比：

$$Q \doteq \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} \quad (2-3)$$

Q 值越高，表明该电感的储能作用越强，损耗越小。

考虑在谐振频率附近，回路工作在高 Q 状态，窄带工作时，有

$$Z_s = r \left[1 + jQ \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega} \right) \right] \approx r \left[1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right] \quad (2-4)$$

式中， $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 为相对于回路中心频率的绝对角频率偏移，它表示频率偏离谐振的程度，称为失谐；令 $\xi = 2Q\Delta\omega/\omega_0 = 2Q\Delta f/f_0$ 为广义失谐。则

$$Z_s = r(1 + j\xi) \quad (2-5)$$

阻抗模值：

$$|Z_s| = r \sqrt{1 + \xi^2} \quad (2-6)$$

阻抗相角：

$$\varphi = \arctan \xi \quad (2-7)$$

当工作频率为谐振频率，即 $f = f_0$ 时， $\xi = 0$ ， $\varphi = 0$ ，即回路为纯电阻特性，且 $|Z_s| =$