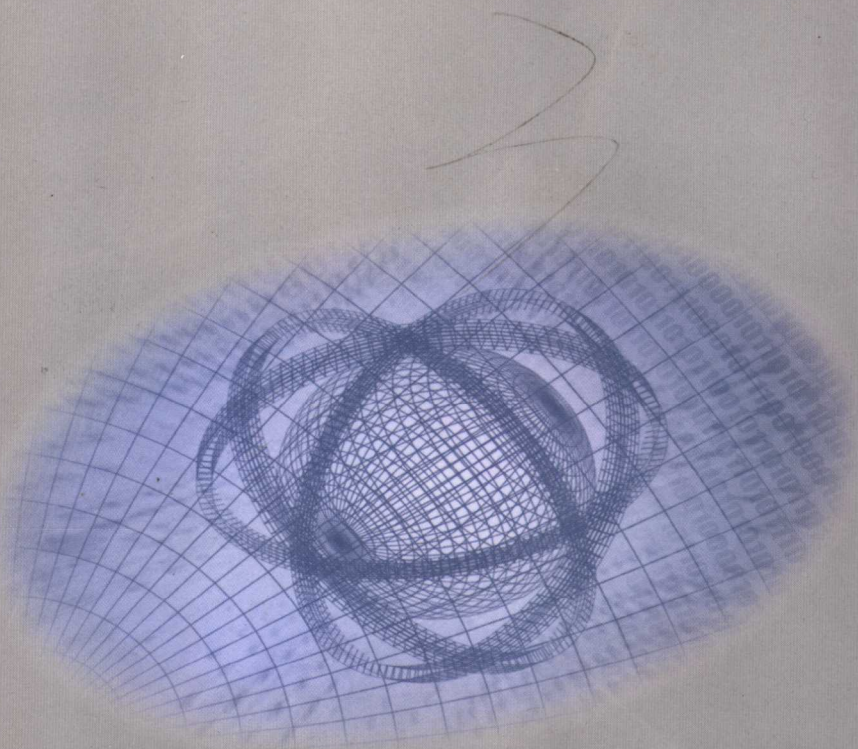


21 世纪信息通信系列教材

通信电子电路

TONGXIN DIANZI DIANLU

刘宝玲 胡春静 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

通信电子电路

刘宝玲 胡春静 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 提 要

本书主要讨论用于各种无线电技术设备和系统中的通信电子电路,内容包括绪论、高频放大电路、正弦振荡电路、调制解调与变频电路、反馈控制电路以及电子电路中的噪声和模拟乘法器。在每章后面总结了相应的要点,还编写了大量的习题。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的教材和参考书,也可供相应专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信电子电路/刘宝玲,胡春静编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-1024-9

I. 通... II. ①刘...②胡... III. 通信—电子电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 000142 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:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京源海印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:15

字 数:352 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1024-9/TN·362

定价:24.00 元

·如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系·

前 言

本书是为高等学校通信工程专业和其他相近专业编著的一本专业课基础教材。内容的安排重点包括了通信系统所涉及的各种高频电子电路的功能、工作原理、性能特点和分析方法。在本书的编写过程中,作者总结了多年的教学实践经验,汲取了国内外同类教材的特色,并考虑到 21 世纪教育改革的需要,在原编教学讲义的基础上,加以修改编著而成。

为了压缩授课学时及适应电子技术迅猛发展的形势需要,兼顾本课程是入门课的特点,并且考虑到国家教育部对有关本科专业目录调整的精神,本书精选了教学内容,拓宽了知识面,增强了教材的通用性。

本教材的主要内容包括绪论、高频放大电路、正弦振荡电路、调制解调与变频电路、反馈控制电路以及附录等。全书以绪论为主线,在介绍信息无线电传输系统原理的基础上,展开对各种功能电路的讨论。在对各种功能电路的讨论中,着重研究其工作原理、典型电路和分析方法,注意新理论、新器件的应用;对于类似的电路,则寻其特点,找出共性,用以指导对各种具体电路的分析。

与类似教材比较,本书注意突出基本概念、基本理论和基本分析方法,在以分立元件组成的电路为主的基础上,减少了对有关章节的繁琐推导或只引用结论,注重加强了内容的系统性,本教材深入浅出,既重视理论分析,又注意讲解物理概念及分析问题的基本思路,并在每章后总结了一章的要点,还编写了大量的习题,比较适合自学。在舍去某些章节后,本书也可以作为相应专业夜大、函授、自学考试等大专班的教材。

本书由刘宝玲担任主编,绪论、第一、三、四章由刘宝玲编写,第二章由胡春静编写。张春茂教授对全书进行了认真地审阅,并提出了许多宝贵的意见。在本教材的编写过程中,李立华、邓钢、姜军、王莹、陶小峰等老师提出了许多建议,在此表示感谢。

限于编者水平,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 1 月

目 录

绪 论	1
一、通信系统的构成	1
二、通信电路系统的发展趋势	3
三、本课程特点	5
第 1 章 高频放大电路	6
1.1 谐振回路的基本特性	6
1.1.1 LC 简单串、并联谐振回路的基本特性	6
1.1.2 LC 回路的阻抗变换特性	11
1.2 小信号谐振放大电路	13
1.2.1 小信号谐振放大电路的技术指标及组成方法	14
1.2.2 分散选频的小信号谐振放大电路	15
1.2.3 集中选频的小信号谐振放大电路	20
1.3 谐振功率放大电路	24
1.3.1 概述	24
1.3.2 谐振功率放大电路的工作原理及能量关系	25
1.3.3 丙类谐振放大电路的性能分析	27
1.3.4 谐振功率放大电路的直流馈电电路和匹配网络	35
1.3.5 谐振功率放大电路举例	41
1.4 倍频电路	43
1.4.1 概述	43
1.4.2 倍频电路及工作原理	44
1.5 宽带高频功率放大电路和功率合成技术	45
1.5.1 传输线变压器	46
1.5.2 宽带功率放大电路实例	49
1.5.3 功率合成技术	50
小 结	56
习 题	57
第 2 章 正弦振荡电路	60
2.1 正弦振荡电路的原理和频域分析方法	60
2.1.1 反馈型振荡电路的工作原理	60

2.1.2 LC 振荡电路的工作状态	66
2.1.3 正弦振荡电路的线性频域分析方法	69
2.2 LC 正弦振荡电路	72
2.2.1 调谐型振荡电路	72
2.2.2 三端型 LC 振荡电路	73
2.2.3 改进型三端电容振荡电路	80
2.2.4 场效应管振荡电路	81
2.2.5 集成电路振荡器	84
2.3 RC 正弦振荡电路	87
2.4 石英晶体振荡电路	93
2.4.1 正弦振荡电路的频率稳定问题	93
2.4.2 石英晶体振荡电路	96
2.5 压控振荡器	101
2.6 负阻振荡电路	106
2.6.1 负阻振荡电路的构成	106
2.6.2 负阻正弦振荡电路的工作原理	108
小 结	110
习 题	110
第 3 章 调制、解调与变频电路	116
3.1 非线性元件的频率变换作用	117
3.2 调幅波及其解调电路	118
3.2.1 调幅原理	118
3.2.2 低电平调幅电路的工作原理	124
3.2.3 调幅波的解调——检波器的工作原理	127
3.3 调角波及其解调	135
3.3.1 调角波的基本特性	136
3.3.2 调频制与调相制的比较	141
3.3.3 调频电路的工作原理	143
3.3.4 调频波的解调——鉴频器的工作原理	150
3.3.5 调相波的解调——鉴相器的工作原理	159
3.4 变频	163
3.4.1 概述	163
3.4.2 晶体管变频电路	167
3.4.3 乘积型混频器	170
3.4.4 混频器的干扰	172
3.4.5 二极管环形混频器	174
小 结	176

习题	177
第 4 章 反馈控制电路	181
4.1 自动电平控制电路	182
4.1.1 基本工作原理	182
4.1.2 自动电平控制电路的类型	183
4.1.3 自动电平控制电路的应用	184
4.2 自动频率控制电路	185
4.3 锁相环的基本原理	186
4.3.1 锁相环的构成	187
4.3.2 锁相环的动态方程	190
4.3.3 环路锁定的建立过程	192
4.3.4 差拍状态和频率牵引现象	194
4.3.5 二阶锁相环的同步与捕捉	196
4.4 锁相环的应用	198
4.4.1 锁相解调电路	199
4.4.2 频率变换电路	201
4.5 单片集成锁相环	204
4.5.1 L562 单片集成锁相环	204
4.5.2 5G4046(J691)单片锁相环	207
4.5.3 应用举例	208
小结	209
习题	209
附录 A 电子电路中的噪声	212
一、噪声的来源及其特性	212
二、运放中的噪声	214
三、噪声系数	216
附录 B 模拟乘法器	218
一、模拟乘法器的基本工作原理	218
二、理想模拟乘法器的基本特性	219
三、变跨导型模拟乘法器的基本原理	221
四、BG314 型四象限模拟乘法器简介	226
五、模拟乘法器的运算误差及其补偿方法	228
参考文献	231

绪 论

自从无线电技术诞生以来,信息处理和信息传输一直是其研究的主要内容。通信电子电路所涉及的正是用于信息传输与处理的基本电路。因此,本书主要结合无线电通信这一方式,讨论设备和系统中高频电子电路的组成、工作原理以及工程计算等。在绪论中,将对通信系统的基本组成作简要介绍,以便读者了解本书各章所介绍的单元电路在整个系统中的地位和作用。

一、通信系统的构成

一切能完成信息传输任务的系统可以统称为通信系统。按照信道中传输的基带信号是模拟信号还是数字信号,可以把通信系统分为两类,即模拟通信系统和数字通信系统。本教材将重点介绍模拟通信系统。

一个完整的通信系统构成的方框图,如图 0.1 所示。

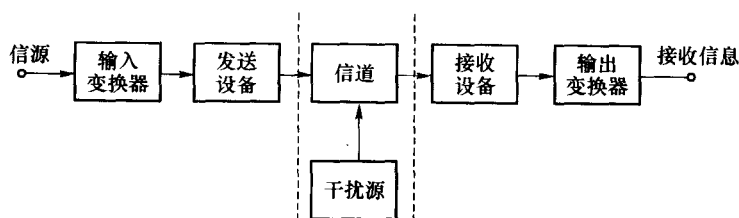


图 0.1 通信系统模型

信源是指需要传送的原始信息源,如语言、音乐、图像、文字等,一般是非电物理量。信源经输入变换器后转换成电信号,称为基带信号,其形式不一定适合在信道上传输,需将基带信号送入发送设备,将其变换成适合于信道传输特性的信号,送入信道。信号在信道的传输过程中,不可避免地要受到干扰,如工业干扰、天电干扰等。信号传送到接收端后,接收设备把有用信号从众多信号和噪声中选取出来,经输出变换器恢复出原始信息,供收信者使用。

信道是指信号传输的通道,包括有线信道和无线信道。信道不同,其传输特性也不一样。有线信道包括架空明线、同轴电缆、波导管和光缆等;无线通信系统中,信道主要指大气层或外层空间。由于无线电波在空间传播的性能和大气结构、高空电离层结构、大地的衰减以及无线电波的频率、传播路径等因素密切相关,因此,不同频段无线电波的传播路径及其受上述各种因素的影响程度也不同。

无线电波在空间的传播速度与光速相同,约为 3×10^8 m/s。无线电波的波长、频率和

传播速度的关系满足下式：

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中, λ 是波长, c 是传播速度, f 是频率。由于电波的传播速度固定不变, 所以信号频率越高, 波长越短。

不同波长的无线电波传播规律不同, 应用范围也不同, 通常把无线电波划分为不同的波段。无线电波频段的划分如表 0.1 所示。

表 0.1 频段划分与常用信道的工作频率范围

波段名称		波长范围	频段	传输媒介	
				有线信道	无线信道
甚长波		1 000~100 km	0.3~3 kHz	架空明线 对称电缆 …… 同轴电缆 …… 波导管 …… 光缆	海水 …… 地球表面 …… 电离层 …… 空间
超长波		100~10 km	3~30 kHz		
长波		10~1 km	30~300 kHz		
中波		1 000~200 m	0.3~1.5 MHz		
短波		200~10 m	1.5~30 MHz		
超短波	米波	10~1 m	30~300 MHz		
微波	分米波	100~10 cm	0.3~3 GHz		
	厘米波	10~1 cm	3~30 GHz		
	毫米波	10~1 mm	30~300 GHz		
	亚毫米波	1~0.1 mm	300~3 000 GHz		
光波	长波长	1.25~1.6 μm			
	短波长	0.8~0.9 μm			

由天线理论可知, 要将无线电信号有效地发射出去, 天线的长度必须和电信号的波长为同一数量级。由原始非电量信息转换而成的原始电信号一般是低频信号, 波长很长。例如音频信号的频率约为 20 kHz 以内, 对应波长为 15 km 以上, 制造出相应的巨大天线是不现实的。此外, 即使这样的天线制造出来, 由于各个发射台发射的均为同一频段的低频信号, 在信道中会互相重叠、干扰, 接收设备也无法选择所要接收的信号。

因此, 为了有效地进行传输, 必须采用高频振荡信号作为载体, 将携带信息的低频电信号“装载”到高频振荡信号上(这一过程称为调制), 然后经天线发射出去。到了接收端后, 再把低频电信号从高频振荡信号上“卸取”下来(这一过程称为解调)。其中, 未经调制的高频振荡信号称为载频信号, 低频电信号称为调制信号, 经过调制的高频振荡信号称为已调波信号。

采用调制方式以后, 由于传送的是高频振荡信号, 所需天线尺寸大大下降。同时, 不同的发射台可以采用不同频率的载波信号, 这样在频谱上就可以互相区分开了。

图 0.2 是通信系统中调幅式无线电发送设备与接收设备的方框图及其相应波形。

其中, 发送设备一般包括振荡、放大、调制、抽样与 A/D 变换等电路; 接收设备通常包括放大、滤波、混频、解调以及 D/A 变换等电路。这些都是通信电子电路所要研究的基本

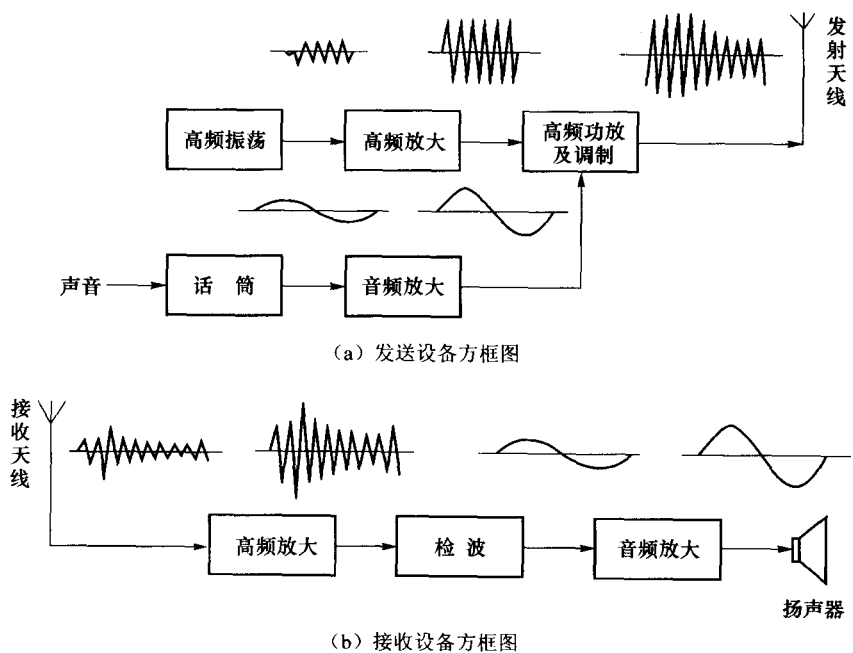


图 0.2 发送和接收设备方框图

功能电路。此外,包括自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制(锁相环)在内的反馈控制电路也是通信电子电路研究的重要对象,因为这是通信系统中必不可少的组成部分。

在发送设备和接收设备的各项功能中,除了各种放大只能用模拟电路实现外,原则上讲,对于其他的功能,都可以将信号数字化后,用编程的方法或者数字电路来实现。

图 0.3 是数字通信系统的基本组成方框图。对于数字通信系统来说,除了包含图中的各个功能模块以外,还要有同步系统,用于建立系统的收、发两端相对一致的时间对应关系,即通过在收端确立每一位码的起止时刻,确定接收码组与发送码组之间的对应关系,从而正确恢复发端的信息。

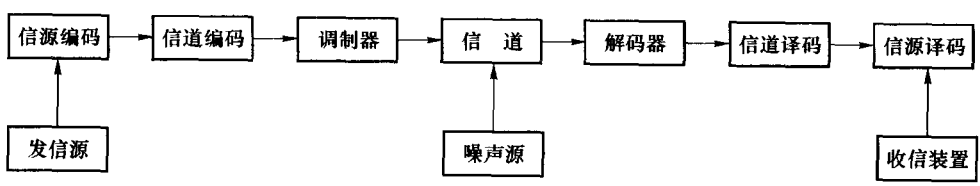


图 0.3 数字通信系统模型

二、通信电路系统的发展趋势

随着电子技术和集成电路制造技术的发展,电子系统正朝着集成化、数字化、现场可编程化、智能化的方向发展。在这些方面,数字系统发展要比模拟系统更快,这主要是由于数字集成电路的集成规模比模拟集成电路大、易于与计算机联用以及具有良好的电性能等优点。

1. 模拟电子电路系统的集成化

在 20 世纪 70 年代以前,通信系统中的一些功能电路一般都是由分立元件电路构成的。随着科学技术的发展,到 20 世纪 70 年代末,已经广泛地采用了集成的稳压电源、运算放大器、低频功率放大器以及各种高频、中频放大器等集成器件。这些通用型的单片集成器件,配合少量外接元件,本身就组成一个独立的子系统,可以实现稳压、放大、有源滤波、调制解调等功能;如果将多种芯片组合起来,就可以组成一个完整的电子系统。此外,还有根据某一系统的性能指标而设计的专用集成电路,它的规模更大、功能更全,由一片或一组集成芯片就可组成一个完整的电子系统。由于专用集成电路是针对系统要求设计的,所以比用几种通用集成电路加以组合构成的系统更为先进、合理。例如,20 世纪 70 年代初,一台彩电的信号处理系统一般由 7~10 个单片组成,每个单片中约有 100 个元件;到 20 世纪 80 年代初,已发展为仅用两个单片组成,每个单片中有 600~1 000 个元件。如今,移动通信设备所用集成芯片发展更快,几乎可以说是“日新月异”。

虽然模拟电路和系统的集成化已经取得了很大进展,但要以集成电路完全取代分立元件电路,还有许多困难,这是因为模拟电路和系统对质量指标要求较高,诸如频率特性、噪声特性、失真系数、元件精度、稳定性等等,都比数字电路和系统严格得多;而且单元电路种类繁多、功能各异,以目前的电路设计技术和集成电路工艺水平,尚难全面满足各项要求。因此在一些性能指标要求较高的模拟系统中,尚保持着一定数量的分立元件电路。特别是高频大功率的设备,主要还采用晶体管和电子管。另外,某些元器件的集成化问题至今还未得到完善的解决,例如电感元件用平面工艺不能集成,虽然可以用各种等效电路构成有源电感来代替,但因稳定性差而很少应用,所以在需用电感的电路中,一般都采用外接方式;再比如,制作大电容、大电阻需占用相当大的芯片面积,并且还很困难,因而在集成电路中所需要的大电容、大电阻、调整元件及其他特殊元件等都使用外接元件。

2. 通信电路系统的数字化

模拟电路的主要优点是,它能在高频率工作和实时地处理信号。目前,模拟电路可以在几万兆赫兹的频率下工作,而数字电路还远未达到这样的工作速度。但是,模拟电路也存在如下缺点:第一,模拟电路中的有源器件绝大多数工作在放大状态,由于器件在放大状态工作时,其参数与工作点等多种因素有关,因此使整个放大电路工作参数的稳定性较差;第二,模拟电路的时间特性主要取决于电路中的电阻、电容和电感,而利用这些元件得到准确、稳定的时间常数尚有一定困难;第三,利用模拟电路对模拟信号进行延时、存储等处理比较困难。上述缺点在数字电路中不存在。近年来,随着数字信号处理技术的飞速发展,一些原来由模拟电路实现的功能,都改用数字化实现,并且数字电路易于大规模集成。因此,通信系统的发展越来越趋向于数字化,如锁相环路、调频、调相、解调等等。此外,数字化还将给通信系统的设计带来很多好处,例如通过用高速的数字多路复用器、数控振荡器和数字滤波器来取代相应的模拟混频器、振荡器和滤波器,可以消除各种不需要的效应和考虑事项,如混频器、振荡器的非线性校准、温度漂移校准。

虽然模拟电路的数字化是大势所趋,但由于模拟通信系统和制式已经应用很广泛,如果立即完全数字化,将要投入大量资金和增加用户负担,因此从经济的观点看,通信广播等完全数字化的普及推广应用尚需时日。另外,数字电路的速度在某些领域还不能满足

需要,这也有待于集成电路技术的进一步发展。所以,在相当长的一段时间内,通信系统还将是模拟集成电路、数字集成电路并存或模拟、数字混合构成的局面。

三、本课程特点

本书的内容主要包括四个方面:

(1) 信号的产生:正弦波振荡电路。

(2) 高频信号的放大:小信号谐振放大电路、谐振功率放大电路和宽带功率放大电路。

(3) 信号的频率变换:倍频、变频、调制、解调等。

(4) 反馈控制电路:自动增益控制、自动频率控制、锁相环。

本书内容涉及面广,电路较复杂,学习时应注意以下特点:

第一,非线性电子电路中,为实现同一功能,因指标要求不同,可以采用形式各异的电路,但是它们都是基于非线性器件实现的,是在为数不多的基本电路的基础上发展而来的。此外,同一形式的电路,可因其工作状态、输入信号的性质、电平的高低、输出滤波特性的不同,而完成不同的功能。因此在学习时,应注意掌握实现各种功能电路的基本工作原理、不同电路的优缺点及其适用场合。要抓住各种电路之间的共性以及各种功能之间的内在联系,而不要局限于某个具体的电路及其工作原理。近年来,随着集成电路和数字信号处理技术的迅速发展,各种通信电路甚至系统都可以做在一个芯片内,但是所有这些电路,都是以分立器件为基础的,所以对于集成器件,还要弄清楚内部结构性能,这样才能灵活应用,充分发挥器件的功能,如果出现故障也能找到原因及时解决。

第二,非线性电子电路中,有源器件工作在特性的非线性区,一般很难对这种电路进行严格的定量分析,工程上大多采用近似方法,即根据实际情况,忽略一些次要因素,对器件的模型和电路工作条件进行合理的近似,以便用简单的分析方法求得具有实用意义的结果。因此在学习时,应注意各种电路在不同的工作条件下进行的简化,掌握各种电路在工程设计时的步骤和计算方法,也可以利用计算机通用电路分析程序,对电路进行较严格的定量分析。

第三,通信电子电路是在科学技术和生产实践中发展起来的,学习本课程时,应高度重视实验环节,将理论和实际紧密结合,运用所学理论去分析和解决实践环节中遇到的问题,并通过实践加深对理论的理解。随着计算机技术和电子设计自动化(EDA技术)的发展,越来越多的通信电子电路可以采用EDA软件进行设计、仿真分析和电路板制作等工作,因此,掌握先进的通信电路EDA技术,也是学习本课程的一个重要内容。

第 1 章 高频放大电路

在各种无线电技术设备和系统中,为了放大高频信号,广泛采用高频放大电路,本章主要讨论小信号谐振放大电路、谐振功率放大电路、倍频电路和宽带高频功率放大电路。

高频放大电路的负载,通常采用调谐回路,因此称之为谐振放大电路。这种放大电路对于频率靠近谐振频率的信号,有较大的放大倍数;对于频率远离谐振频率的信号予以抑制。所以,谐振放大电路不仅有放大作用,而且还起着选频(或滤波)的作用。这类放大电路属于窄带放大器。

和低频放大电路一样,谐振放大电路也分为小信号放大和大信号放大两大类。其中小信号谐振放大电路多用于接收机,作为高频和中频电压放大;后者作为高频谐振功率放大电路,多用于发射机,主要提供较大的输出功率和较高的效率。

宽带高频功率放大器采用频率响应很宽的传输线变压器作负载,可以工作在很宽的频率范围内。

1.1 谐振回路的基本特性

谐振回路具有选频特性,它是构成高频谐振放大电路、正弦波振荡电路及各种选频电路的基础。

一般谐振回路由电感 L 与电容 C 并联或者串联构成。采用 LC 谐振回路作选频网络,可以从输入信号中选出有用信号同时抑制无用信号;也可以将其用于移相网络、相频转换网络;此外,LC 谐振回路还可以组成阻抗变换电路用于级间耦合和阻抗匹配。因此,LC 谐振回路是高频电路中不可缺少的组成部分。

1.1.1 LC 简单串、并联谐振回路的基本特性

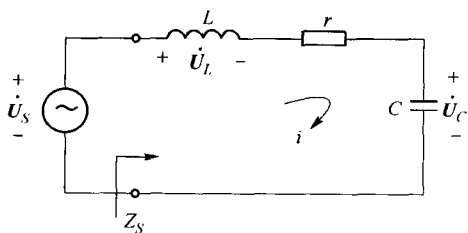


图 1.1.1 LC 串联谐振回路

1. LC 串联谐振回路的基本特性

LC 串联谐振回路的基本形式如图 1.1.1 所示。

图中 L 、 C 分别为回路电感和电容, r 是电感 L 的损耗电阻,其阻值一般很小;电容中的损耗一般也很小,可以忽略不计。

当激励电压 $\dot{U}_s$ 是正弦电压时, 由图可见, 回路的阻抗为

$$Z_S(j\omega) = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jX(\omega) = |Z(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (1.1.1)$$

其中:

$$X(\omega) = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (1.1.2)$$

$$|Z_S(j\omega)| = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (1.1.3)$$

$$\varphi_S(\omega) = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \quad (1.1.4)$$

式中, Z_S 为阻抗, X 为电抗。

当输入信号的工作频率 $\omega = \omega_0$ 时, 如果满足 $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$, 即 $X = 0$, 则谐振回路发生了谐振现象。一般把 ω_0 称为串联谐振回路的固有谐振角频率。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.1.5)$$

而谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1.6)$$

空载回路电流

$$\dot{I} = \dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_s}{r} = \frac{U_s}{r} = I_0 \quad (1.1.7)$$

式中, U_s 为输入正弦信号的振幅; $\dot{I}_0$ 为回路在串联谐振时的电流, 为实数, 即 $\dot{I}_0 = I_0$ 。显然, 谐振时 I_0 最大。

此时, 电感线圈 L 上的电压为

$$\dot{U}_L = j\omega_0 L \cdot \dot{I}_0 = j\omega_0 L \cdot \frac{\dot{U}_s}{r} = jU_s \frac{\omega_0 L}{r} \quad (1.1.8)$$

当回路发生谐振时, $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ 。把回路谐振时的感抗(或容抗)值与回路的损耗电

阻 r 之比定义为回路的品质因数, 以 Q 表示。则有: $Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$, 称为回路空载品质因数, 表示回路不含外加负载电阻与阻尼电阻时, 回路电抗与其固有损耗电阻 r 的比值, 它是谐振回路的一个重要指标, 表征回路谐振状态下电抗元件的储能与电阻元件耗能状况的比值。

实际电路中, 一般总是满足 $\omega_0 L \gg r$, 显然, $Q_0 \gg 1$ 。此时

$$\dot{U}_L = j \dot{U}_s Q_0 \quad (1.1.9)$$

同样, 电容 C 上的电压为

$$\dot{U}_C = \dot{I}_0 \frac{1}{j\omega_0 C} = -j \frac{1}{\omega_0 C r} \dot{U}_s = -j \dot{U}_s Q_0 \quad (1.1.10)$$

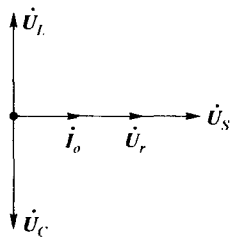


图 1.1.2 LC 串联谐振回路谐振时的相位关系

上式说明,电感和电容上的电压均为信号源电压的 Q_0 倍,但相位相反,因此串联谐振也称为电压谐振。此时,电感、电容、电阻上的相位关系如图 1.1.2 所示。

图 1.1.3 示出了 LC 串联回路的阻抗频率特性。由图可知,当输入信号频率等于回路的谐振频率时,即 $\omega = \omega_0$ 时,回路的阻抗值最小,等于纯电阻 r ; 当 $\omega \neq \omega_0$, 则阻抗的模将增大,回路将呈现容抗特性($\omega < \omega_0$)或感抗特性($\omega > \omega_0$), 相角则由零趋于 $-\frac{\pi}{2}$ 或 $+\frac{\pi}{2}$ 。

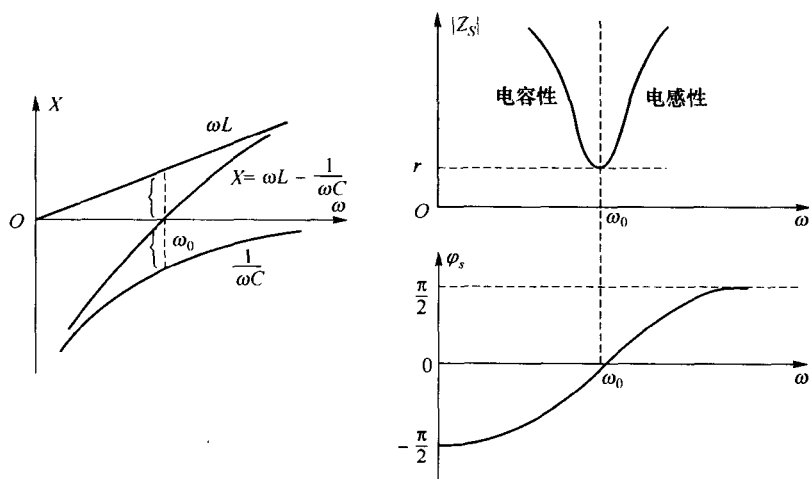


图 1.1.3 串联谐振回路的阻抗频率特性

2. LC 并联谐振回路的基本特性

LC 并联谐振回路的基本形式如图 1.1.4(a)所示, r 为电感中的损耗电阻。由图可见,回路端口阻抗为

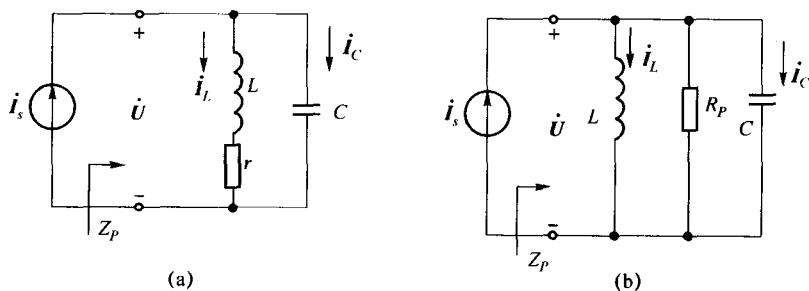


图 1.1.4 LC 并联谐振回路

$$Z_P(j\omega) = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (1.1.11)$$

工程中,一般总是满足 $\omega L \gg r$, 因此

$$Z_P(j\omega) \approx \frac{\frac{L}{C}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{1}{\frac{Cr}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (1.1.12)$$

$$Y_P(j\omega) = \frac{1}{Z_P} = \frac{Cr}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = G_P + jB \quad (1.1.13)$$

式中

$$G_P = \frac{Cr}{L} \quad (1.1.14)$$

$$B = \omega C - \frac{1}{\omega L} \quad (1.1.15)$$

而且

$$Z_P(j\omega) = \frac{1}{Y(j\omega)} = |Z(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (1.1.16)$$

$$|Z_P(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{G_P^2 + B^2}} \quad (1.1.17)$$

$$\varphi_P(\omega) = -\arctan \frac{B}{G_P} \quad (1.1.18)$$

由式(1.1.13)可见,在满足 $\omega L \gg r$ 的条件下,图 1.1.4(a)可用图 1.1.4(b)所示的电路等效。图中 L 为理想电感,其中 $R_P = \frac{1}{G_P} = \frac{L}{Cr}$, 为并联谐振回路的谐振电阻。

当回路受电流源 $\dot{I}_s$ 激励时,回路的端电压为

$$\dot{U} = \frac{\dot{I}_s}{Y_P} = \frac{\dot{I}_s}{\frac{Cr}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (1.1.19)$$

当输入信号的频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时, $B = \omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} = 0$, 此时并联谐振回路产生谐振, ω_0 称为并联谐振回路的谐振频率。回路阻抗为

$$Z_P = R_P = \frac{L}{Cr} \quad (1.1.20)$$

它为纯电阻。电感 L 中的损耗 r 愈小, R_P 愈大。

当回路谐振时,

$$\dot{U} = \dot{U}_P = \frac{\dot{I}_s}{G_P} = \dot{I}_s \cdot \frac{L}{Cr} \quad (1.1.21)$$

流过电容的电流

$$\dot{I}_C = \dot{U}_P / \frac{1}{j\omega_0 C} = j\omega_0 C \dot{U}_P = j\omega_0 C \frac{\dot{I}_S}{G_P} = j\omega_0 C \frac{L}{Cr} \dot{I}_S = j \frac{\omega_0 L}{r} \dot{I}_S = jQ_0 \dot{I}_S \quad (1.1.22)$$

式中

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} \quad (1.1.23)$$

Q_0 称为并联谐振回路的空载品质因数。从式(1.1.23)可以看出

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{G_P} = \omega_0 C R_P = \frac{\omega_0^2 C R_P}{\omega_0} = \frac{\frac{1}{LC} C R_P}{\omega_0} = \frac{R_P}{\omega_0 L} \quad (1.1.24)$$

当满足 $\omega_0 L \gg r$ 时, 流过电感线圈的电流为

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_P}{r + j\omega_0 L} \approx \frac{\dot{U}_P}{j\omega_0 L} = -j \frac{\dot{I}_S}{\omega_0 C \frac{L}{r}} = -j \frac{\dot{I}_S}{\omega_0 Cr} = -j \frac{\omega_0 L}{r} \dot{I}_S = -jQ_0 \dot{I}_S \quad (1.1.25)$$

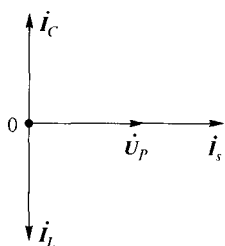


图 1.1.5 并联谐振回路谐振时的相位关系

由式(1.1.22)和式(1.1.25)可以看出, 谐振时流经电感与电容的电流是信号源电流的 Q_0 倍, 二者之间大小相等、相位相反, 因此, 并联谐振也称之为电流谐振。图 1.1.5 给出了并联谐振回路谐振时的相位关系。

图 1.1.6 表示出了并联谐振回路的阻抗频率特性。可以看出, 当 $\omega = \omega_0$ 时, 即谐振回路工作于调谐状态时, 回路等效于一个纯电阻, 其阻值为最大且等于 R_P 。随着 ω 偏离 ω_0 , 回路将呈现容抗特性 ($\omega > \omega_0$) 或感抗特性 ($\omega < \omega_0$), 相角则由零趋于 $-\frac{\pi}{2}$ 或 $+\frac{\pi}{2}$ 。

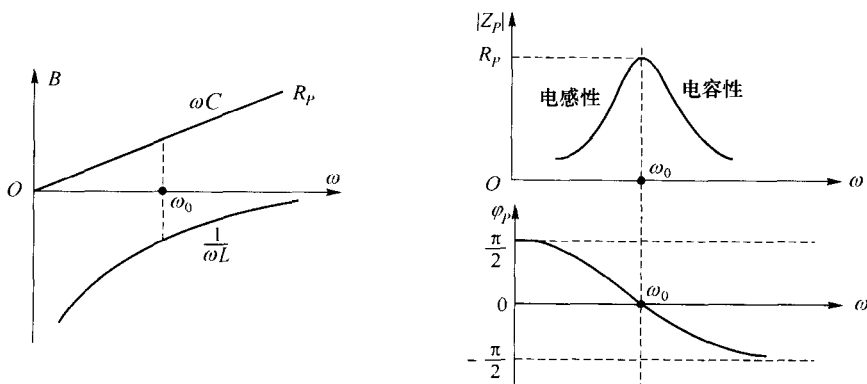


图 1.1.6 并联谐振回路的阻抗频率特性

综上所述, 我们对 LC 串、并联谐振回路的基本特性进行了讨论, 在表 1.1 中, 列出了