

高等教育“十二五”规划教材

高频电子线路

秦玉娟 祁鸿芳 主 编
周 彬 副主编



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

高等教育“十二五”规划教材

高频电子线路

秦玉娟 祁鸿芳 主 编

周 彬 副主编

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书全面讲述了高频通信的基本理论和应用, 主要内容包括绪论, 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、解调与混频电路, 角度调制与解调, 数字调制与解调, 自动控制电路及高频电子实验指导。

本书内容丰富, 概念清晰, 力求避免烦琐的数学推导, 加强基本理论和基本电路的分析, 内容由浅入深, 注重理论联系实际。每章都列举了一定数量的例题, 并附有大量的习题。

本书可作为高等学校应用型本科和部分高职高专电子信息工程、通信工程、测控技术与仪器等专业的教材或参考用书, 也可供有关技术人员参考。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 秦玉娟, 祁鸿芳主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2014.5

(高等教育“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1899-7

I. ①高… II. ①秦… ②祁… III. ①高频-电子电路-高等学校-教材 IV. ①TN.710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 081220 号

责任编辑: 吴嫦娥 特邀编辑: 李晓敏

出版发行: 北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414

印刷者: 北京艺堂印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 15.25 字数: 381 千字

版 次: 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-1899-7 / TN·90

印 数: 1~1 500 册 定价: 36.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

高频电子线路作为通信和电子类专业的一门重要的专业基础课，具有很强的理论性和实践性，在整个专业体系中处于承上启下的作用。教材紧密结合高等教育的特点，本着“针对性、应用性、适用性”的原则，在合理的理论推导下，注重理论联系实际，系统介绍无线通信系统的主要单元的组成及工作原理。

全书包括绪论、第1~第7章内容，以及高频电子实验指导。

第1章 高频小信号放大器，主要内容有LC谐振回路的基本特性和高频小信号放大器的工作原理、性能指标，以及高频集成放大器等。

第2章 高频功率放大器，主要内容有高频功率谐振放大器的工作原理、分析方法、实际线路等，同时对传输线变压器和宽带功率放大器进行了讨论。

第3章 正弦波振荡器，介绍正弦波振荡器的原理、LC、RC振荡器的原理和实际线路、晶体振荡器、负阻正弦波振荡器等。

第4章 振幅调制、解调与混频电路，介绍振幅调制、解调和混频的原理和实现方法。主要讲述频谱的线性搬移电路的原理和线路组成，包括二极管电路、差分对电路。振幅调制、解调和混频均属于频谱的线性搬移。

第5章 角度调制与解调，介绍角度调制，重点是频率调制和解调的原理、实现方法。频率调制和解调是频谱的非线性搬移，其实现方法有别于频谱的线性搬移。相位调制的原理和电路与频率调制相似。

第6章 数字调制与解调，主要介绍二进制ASK、FSK、PSK、多进制数字调制与解调电路，以及进一步提高系统的频带利用率的正交振幅调制(QAM)系统的原理。

第7章 自动控制电路，介绍反馈控制电路，包括自动增益控制电路、自动频率控制电路、锁相环和频率合成器电路的原理和实现电路。

本书由秦玉娟、祁鸿芳任主编，周彬任副主编，编写的分工为：祁鸿芳编写绪论、第1章，周彬编写第2章、第3章，秦玉娟编写第4章、第5章，刘馨编写第6章、第7章和实验部分。秦玉娟负责统稿。祁鸿芳副教授主审。

由于作者水平有限，本书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者
2014年2月

目 录

绪论	(1)
0.1 无线通信系统概述	(1)
0.2 无线电波的传播方式	(3)
本章小结	(5)
习题	(6)
第1章 高频小信号放大器	(7)
1.1 LC 谐振回路	(7)
1.2 信号源内阻和负载对并联谐振回路的影响	(13)
1.3 阻抗变换电路	(14)
1.4 小信号谐振放大器	(17)
1.5 集成选频放大器	(21)
本章小结	(23)
习题	(24)
第2章 高频功率放大器	(26)
2.1 丙类(C类)谐振功率放大器	(26)
2.2 谐振功率放大器电路	(37)
2.3 宽带高频功率放大器	(43)
本章小结	(50)
习题	(51)
第3章 正弦波振荡器	(53)
3.1 反馈式正弦波振荡器	(53)
3.2 LC 正弦波振荡器	(60)
3.3 石英晶体振荡器	(67)
3.4 RC 正弦波振荡器	(73)
3.5 负阻正弦波振荡器	(79)
本章小结	(84)
习题	(85)

第 4 章 振幅调制、解调与混频电路	(90)
4.1 调制的分类	(90)
4.2 振幅调制的基本原理	(91)
4.3 振幅调制电路	(99)
4.4 振幅解调原理与解调电路	(112)
4.5 混频电路	(121)
本章小结	(128)
习题	(128)
第 5 章 角度调制与解调	(132)
5.1 调角信号的基本性质	(132)
5.2 调频电路	(139)
5.3 鉴频电路	(149)
本章小结	(158)
习题	(159)
第 6 章 数字调制与解调	(161)
6.1 二进制 ASK 的调制与解调	(161)
6.2 二进制 FSK 的调制与解调	(164)
6.3 二进制 PSK 的调制与解调	(168)
6.4 多进制数字调制系统	(173)
6.5 正交振幅调制	(181)
本章小结	(184)
习题	(184)
第 7 章 自动控制电路	(185)
7.1 自动增益控制	(185)
7.2 自动频率控制	(189)
7.3 锁相环路	(192)
7.4 频率合成器	(202)
本章小结	(208)
习题	(209)
附录 A 高频电子实验指导	(211)
实验一 单调谐回路谐振放大器实验	(211)
实验二 高频功率放大器实验	(213)

实验三	电容三点式 LC 振荡器实验	(217)
实验四	晶体三极管混频实验	(221)
实验五	集成乘法器幅度调制实验	(223)
实验六	振幅解调器实验	(226)
实验七	变容二极管调频器实验	(229)
实验八	斜率鉴频与相位鉴频器实验	(232)
参考文献		(235)

绪 论

本书主要介绍用于各种电子系统和电子设备的高频电子线路。通信系统广泛应用于国民经济、国防建设和人们的日常生活的各个领域。本章主要介绍通信系统的组成与无线电波的划分和传播方式。

0.1 无线通信系统概述

0.1.1 无线通信系统的组成

信息传输是人类社会生活的重要内容。通信按照传统的理解就是信息的传输和交换。通信系统的作用就是将信息从信源发送到一个或多个目的地。实现通信的方式和手段很多,如手势、语言、旌旗、烽火台和击鼓传令,以及现代社会的电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、互联网和计算机通信等,这些都是消息传递的方式和信息交流的手段。19世纪末迅速发展起来的以电信号为消息载体的通信方式,称为现代通信系统。其基本组成方框图如图0-1所示。

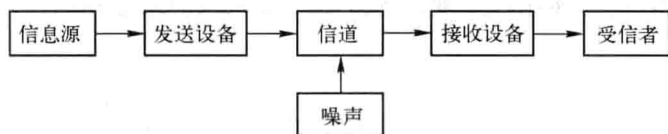


图 0-1 通信系统基本组成方框图

1. 信息源

信息源(简称信源)的作用是把各种消息转换成原始电信号。根据消息的种类不同,信源可分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出连续的模拟信号,如话筒(声音→音频信号)、摄像机(图像→视频信号);数字信源则输出离散的数字信号,如计算机等各种数字终端。模拟信源送出的信号经数字化处理后也可送出数字信号。

2. 发送设备

发送设备的作用是产生适合于在信道中传输的信号,即使发送信号的特性和信道特性相匹配,具有抗信道干扰的能力,并且具有足够的功率以满足远距离传输的需要。因此,发送设备涵盖的内容很多,可能包含变换、放大、滤波、编码、调制等过程。对于多路传输系统,发送设备还包括多路复用器。

3. 信道

信道是一种物理媒质,用来将来自发送设备的信号传送到接收端。在无线信道中,信道可以是自由空间;在有线信道中,可以是明线、电缆和光纤。有线信道和无线信道均有多种物理媒质。信道既给信号以通路,也会对信号产生各种干扰和噪声。信道的固有特性及引入的干扰和噪声直接关系到通信的质量。

图 0-1 中的噪声源是信道中的噪声及分散在通信系统及其他各处噪声的集中表示。噪声通常是随机的,形式多样,它的出现干扰了正常信号的传输。

4. 接收设备

接收设备的功能是将信号放大和反变换(如译码、解调等),其目的是从接收信号中正确恢复出原始电信号。对于多路复用信号,接收设备中还包括解除多路复用,实现正确分路的功能。此外,它还要尽可能减小在传输过程中噪声与干扰所带来的影响。

5. 受信者

受信者(简称信宿)是传送消息的目的地,其功能与信源相反,即把原始电信号还原成相应的消息,如扬声器等。

图 0-1 概括描述了一个通信系统的组成。根据我们研究的对象及所关注的问题不同,因而相应有不同形式的、更具体的通信模型。通常按照传输媒介的物理特性,把通信系统分为无线通信系统和有线通信系统。

对于无线通信系统,传输媒介是自由空间。若其传输方式、频率范围、用途不同,其组成也有较大的差异性,但基本组成不变。无线电广播系统的发送和接收系统方框图如图 0-2 所示。

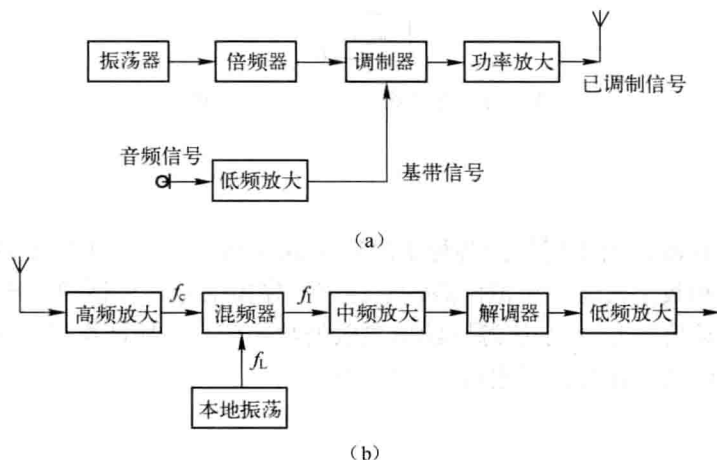


图 0-2 无线电广播系统的发送和接收系统方框图

无线电广播系统的发送方框图如图 0-2 (a) 所示,其中振荡器用来产生高频信号,倍频器产生频率足够高的载波信号。低频放大的作用是放大话筒所产生的微弱信号。调制器的作用是将输入的高频载波信号和低频调制信号变换成高频已调制信号,并有足够大的功率输入

至天线, 辐射到空间。

在无线电通信系统中, 电信号是通过天线以电磁波的形式向空间辐射传输的。理论和实践证明, 只有当电信号的频率很高, 以致它的波长与天线尺寸相近时 (例如发射天线的尺寸至少应该是发射波长的 $1/10$), 电信号才能有效地辐射传输。一般基带信号频率很低, 例如, 语音信号为 $0.1 \sim 3.4 \text{ kHz}$, 若是 1 kHz , 则其波长为 300 km , 需要 30 km 长的天线, 这显然无法实现。采用调制就可以把低频基带信号调制在高频载波上, 从而实现电信号的有效传输。

无线电广播系统的接收方框图如图 0-2 (b) 所示, 其中高频放大器用来对天线所接受的有用频率信号进行初步的选择和放大, 以便抑制其他频率的无用信号。高频放大器输出的载频为 f_c 的已调信号和本机振荡器所提供的频率为 f_L 的高频等幅信号同时输入混频器, 在其输出端就可获得载频频率较低的中频已调信号, 通常取中频频率 $f_i = f_L - f_c$ 。中频放大器为中心频率固定在 f_i 上的选频放大器, 它可以进一步滤除无用信号, 并将有用信号放大到足够值, 然后经检波器解调, 可恢复出原基带信号, 经低频放大后输出。为什么一定要进行混频? 由于设计和制作工作频率较原载频低的固定中频放大器比较容易, 且增益高, 选择性好, 所以采用混频方式可大大提高接收机的性能并使接收机的设备大大简化。

0.1.2 无线通信系统的类型

无线通信系统的类型, 可以根据不同的方法来划分。按照无线通信系统中关键部分的不同特性, 有以下一些类型。

(1) 按照工作频段或传输手段分类, 有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。所谓工作频率, 主要是指发射与接收的射频 (Radio Frequency, RF) 频率。射频实际上就是“高频”的广义语, 它是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

(2) 按照通信方式分类, 主要有 (全) 双工、半双工和单工方式。所谓单工通信, 是指只能发或只能收的方式; 半双工通信是指一种既可以发也可以收但不能同时收发的通信方式; 而双工通信是指一种可以同时收发的通信方式。

(3) 按照调制方式的不同来分类, 有调幅、调频、调相及混合调制等。

(4) 按照传送的消息的类型分类, 有模拟通信和数字通信, 也可以分为语音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

各种不同类型的通信系统, 其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同。但是组成设备的基本电路及其原理都是相同的, 遵从同样的规律。本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路, 认识其规律。这些电路和规律完全可以推广应用到其他类型的通信系统。

0.2 无线电波的传播方式

0.2.1 无线电波的划分

通信系统中, 信号经过信道传输后会有不同程度的衰减。不同的信道引起衰减的原因不

同,产生衰减的大小也不同。导线或电缆中的衰减主要由导线电阻和屏蔽损耗造成,通常衰减较小;光纤对光波的散射和吸收造成光纤衰减,其衰减程度更小。在无线信道中,电信号的衰减程度与传播路径、传播距离、大气结构、电离层结构和大地衰减及信号频率等因素密切相关。自然界中存在的电磁波的波谱很宽,如图 0-3 所示。由图可见,无线电波和光波都属于电磁波。无线通信中所用的无线电波只是一种波长比较长、频率相对较低的电磁波,占据的频率范围很广。在自由空间中,电磁波的波长 λ 、传播速度 c 与频率 f 的关系为:

$$c = \lambda f$$

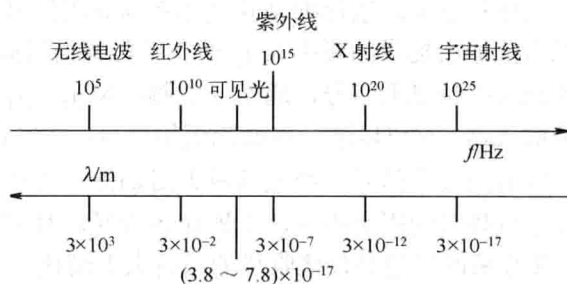


图 0-3 电磁波的波谱

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,传播的能力和方式不同,因而它们的分析方法和应用范围也不同。根据不同频率的电磁波传播规律的特点,人们把整个频率范围划分为多个通信频段,见表 0-1。应该说明,波段的划分是很粗略的,因而在各波段之间并没有明显的分界线。所以各波段之间的衔接处,无线电波的特性也无明显的差别。

表 0-1 通信频段的划分

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)		$10^3 \sim 10^4$ m	30~300 kHz	低频 (LF)	地波: 远距离通信
中波 (MW)		$10^2 \sim 10^3$ 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
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

值得注意的是,表 0-1 中的“高频”是相对的概念,3~30 MHz 的频率范围只是“高频”的狭义解释。广义的“高频”是指射频 (Radio Frequency, RF),其频率范围非常宽,只要电路尺寸比工作波长小得多,仍可用集中参数来分析实现,都可认为属于“高频”范围,根据目前的技术水平,“高频”的上限频率可达微波频段 (如 3 GHz)。在通信系统中,被传输的信号都占据一定的带宽,带宽就是信号能量主要部分 (一般为 90% 以上) 所占据的频率范围或频带宽度。不同的信号,其带宽不同。电磁波频率越高,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,以便实现频分复用或频分多址,而且也可以传播宽频带的信

号(如图像信号),这是无线通信采用高频的原因之一。

0.2.2 无线电波的传播

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。无线电波的传播是无线通信系统的一个重要环节。无线电波传播方式大体可分为 3 种:沿地面传播、沿空间直线传播、依靠电离层传播。电磁波沿地面传播的示意图如图 0-4 所示。由于地面不是理想的导体,当电磁波沿其表面传播时必将有能量的损耗,这种损耗随电波频率的升高而增加。因此,通常只有中、长波范围的信号适宜于沿地面传播,1.5 MHz 以下的电磁波称为地波。不过因为地面的导电特性比较稳定,不会在短时间有很大的变化,所以电波沿地面的传播比较稳定,传输距离也比较远,故可用于导航和播送标准的时间信号。电磁波沿空间直线传播的示意图如图 0-5 所示。频率超过 30 MHz 以上的超短波主要沿空间直线传播,称为空间波。由于地球表面是弯曲的,这种传播的距离只能限制在视线范围内,所以传播的距离是有限的。但可以通过架空天线、中继或卫星等方式来扩大传播距离。电磁波直线传播方式主要应用于中继通信、调频和电视广播及雷达、导航系统中。

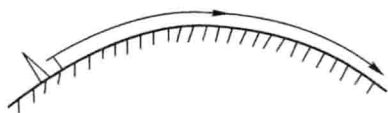


图 0-4 电波沿地面传播

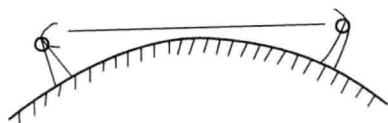


图 0-5 电波的直线传播

频率在 1.5~30 MHz 范围的短波主要依靠电离层的折射和反射进行传播,称为天波,如图 0-6 所示。众所周知,在地球的表面存在着具有一定厚度的大气层,由于受到太阳的照射,大气层上部的气体将发生电离而产生自由电子和离子,被电离了的这一部分大气层称为电离层。电磁波到达电离层后,一部分能量被吸收掉,一部分能量被反射和折射到地面,频率较低的电波容易从电离层反射到地面,频率较高的电波则容易穿过电离层,不再回到地面。利用电离层反射可以实现信号的远距离传输,所以短波通信常用于远距离无线电广播、电话通信及中距离小型移动电台等。但因电离层状态随时间而变化,所以电波的传播不稳定。

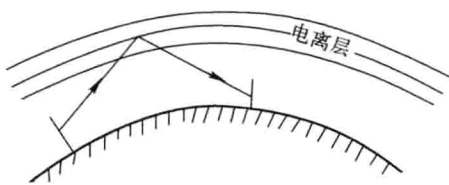


图 0-6 电波依靠电离层传播

本章小结

本章介绍了无线电广播发射与接收的基本原理和工作过程,传输的信息是声音。对于

其他形式的信息，无线电波的发射与接收的基本原理和工作过程也是相同的。

用电信号（或光信号）传输信息的系统称为通信系统，它由信源、信宿、发送、接收设备和信道等组成。通信系统的种类很多，利用空间电磁波传送信号的系统称为无线通信系统，利用线缆传送信号的系统称为有线通信系统。直接传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。

习 题

0-1 无线通信为什么要采用高频通信？“高频”信号是指什么？

0-2 无线通信为什么要进行调制？

0-3 无线电信号的频段是如何进行划分的？

第1章 高频小信号放大器

【内容提要】

高频小信号放大器是各类接收机的重要组成部分。其作用是从众多微弱信号中，选中有用频率信号加以放大并对其他无用信号予以抑制。用 LC 谐振回路作为选频网络构成的选频放大器称为小信号谐振放大器。本章中的“高频”是指被放大信号的频率在数百千赫至数百兆赫。由于频率高，放大器的晶体管的极间电容的作用不能忽略。“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。

1.1 LC 谐振回路

在通信系统中，收、发两地一般相距甚远，信号经过信道传输，受到很大衰减，到达接收端的高频信号电平多在微伏数量级。因此，必须先将微弱信号进行放大再解调。在多数情况下，信号不是单一频率的，而是占有一定频谱宽度的频带信号，将完成频带信号放大任务的电路称为高频小信号频带放大电路。另外，在同一信道中，可能同时存在许多偏离有用信号频率的各种干扰信号，因此高频小信号放大电路除有放大功能外，还必须具有选频功能，高频小信号频带放大电路又可视为有源滤波器，它集放大、选频于一体，其电路模型必然由有源放大器件和无源选频网络所组成，如图 1-1 所示。

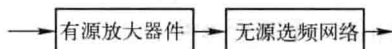


图 1-1 高频小信号频带放大电路组成

作为放大器件，可以是晶体管、场效应管或集成电路。选频网络可以是 LC 谐振回路，或者是声表面波、陶瓷、晶体滤波器。不同的组合方法，构成各种各样的电路形式。本章主要以 LC 谐振放大电路为例，讨论高频小信号放大电路的选频特性及其有关问题。

谐振放大器的性能在很大程度上取决于谐振回路，而 LC 谐振回路在以后各章，如正弦波振荡、调制、混频电路中都起着重要的作用，因此本章先介绍 LC 谐振回路的基本特性。

LC 谐振回路由电感线圈和电容器组成，它具有选择信号及阻抗变换作用。简单谐振回路的阻抗在某一特定频率上具有最小或最大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。简单的谐振回路有串联谐振回路和并联谐振回路，有时为获得更好的选择效果，

可把两个或更多个串、并联谐振回路连接起来, 构成带通滤波器。谐振放大器中, LC 并联谐振回路使用最为广泛。

1. 串联谐振回路

最简单的串联回路如图 1-2 (a) 所示。图中 r 是电感线圈 L 中的等效损耗电阻, r 通常很小, 可以忽略, C 为电容。

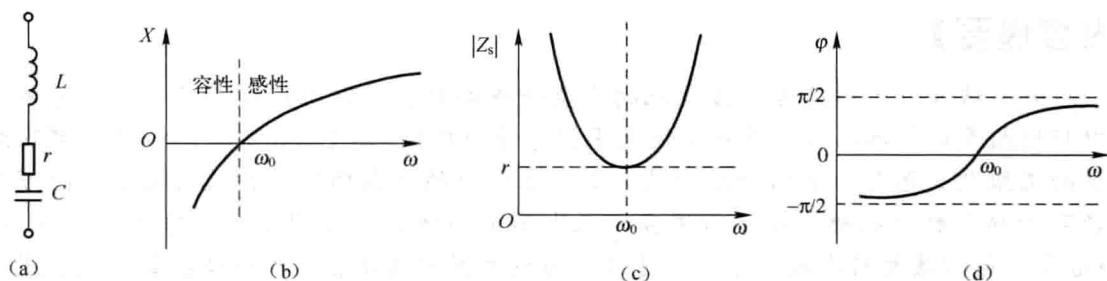


图 1-2 串联谐振回路及特性

谐振回路的谐振特性可以从它们的阻抗频率特性看出来。对于图 1-2 (a) 的串联振荡回路, 当信号角频率为 ω 时, 其串联阻抗为

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

回路电抗 $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$, 回路阻抗的模 $|Z_s|$ 和辐角 φ 随 ω 变化的曲线分别如图 1-2 (b)、(c) 和 (d) 所示。由图可知, 当 $\omega < \omega_0$ 时, 回路呈容性; 当 $\omega > \omega_0$ 时, 回路呈感性; 当 $\omega = \omega_0$ 时, 感抗与容抗相等, $|Z_s|$ 最小, 并为纯电阻 r , 我们称此时发生了串联谐振, 且串联谐振角频率 ω_0 为

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

串联谐振频率 ω_0 是串联振荡回路的一个重要参数。

若在串联振荡回路两端加一恒压信号 $\dot{U}$, 则发生串联谐振时因阻抗最小, 流过电路的电流最大, 称为谐振电流, 其值为

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{r} \quad (1-3)$$

在任意频率下的回路电流 $\dot{I}$ 与谐振电流 $\dot{I}_0$ 之比为

$$\frac{\dot{I}}{\dot{I}_0} = \frac{\dot{U}/Z_s}{\dot{U}/r} = \frac{r}{Z_s} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega_0 L}{r}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = \frac{1}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (1-4)$$

式中

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} \quad (1-5)$$

Q 被称为回路的品质因数。它是振荡回路的另一个重要参数。根据式 (1-5) 画出相应的曲线如图 1-3 所示, 称为谐振曲线。由图可知, 回路的品质因数越高, 谐振曲线越尖锐, 回路选择性越好。在高频中通常 Q 远大于 1 (一般电感线圈的 Q 值为几十到一、二百)。在串联回路中, 电阻、电感、电容上的电压值与电抗值呈正比, 因此串联谐振时电感及电容上的电压为最大, 其值为电阻上电压值的 Q 倍。发生谐振的物理意义是, 此时电容和电感中储存的最大能量相等。

在实际应用时, 外加的频率 ω 与回路谐振频率 ω_0 之差 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 表示频率 ω 偏离谐振频率 ω_0 的程度, 称为失谐。

应当指出的是, 以上所用到的品质因数都是指回路没有外加负载时的值, 称为空载 Q 值或 Q_0 。当回路有外加负载时, 品质因数要用有载 Q 值或 Q_e 来表示。

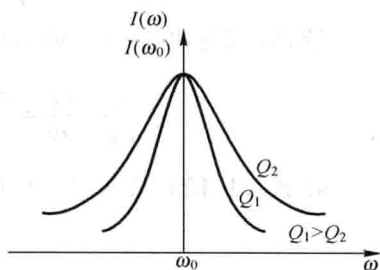


图 1-3 串联谐振曲线的谐振曲线

2. 并联谐振回路

LC 并联谐振回路如图 1-4 所示。图中 r 代表线圈 L 的等效损耗电阻。由于电容器的损耗很小, 图中略去其损耗电阻。由图 1-4 可知, 并联谐振回路的等效阻抗为

$$Z_p = \frac{(r + j\omega L)(1/j\omega C)}{r + j\omega L + 1/j\omega C} \quad (1-6)$$

在实际电路中, 通常 r 很小, 满足 $r \ll \omega L$, 因此, 式 (1-6) 可近似为

$$Z_p \approx \frac{L/C}{r + j(\omega L - 1/\omega C)} \quad (1-7)$$

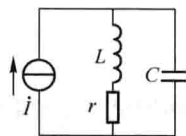


图 1-4 LC 并联谐振回路

当 $\omega L = 1/\omega C$, 回路产生谐振, 由式 (1-7) 可知并联谐振回路在谐振时其等效阻抗为纯电阻且为最大, 可用符号 R_p 表示, 即

$$Z_p = R_p = \frac{L}{Cr} \quad (1-8)$$

并联谐振回路的谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-9)$$

回路的品质因数 Q 定义为回路谐振时的感抗 (或容抗) 与回路等效损耗电阻 r 之比。即

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 Cr} \quad (1-10)$$

联立式 (1-8)、式 (1-9) 和式 (1-10), 得

$$R_p = Q\sqrt{\frac{L}{C}} \quad Q = R_p\sqrt{\frac{C}{L}} \quad Q = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

将式 (1-8)、式 (1-9) 和式 (1-10) 带入式 (1-7) 中, 得

$$Z_p = \frac{R_p}{1 + j \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}} = \frac{R_p}{1 + j \frac{\omega_0 L}{r} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} = \frac{R_p}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (1-11)$$

通常, 谐振回路主要研究谐振频率 ω_0 附近的频率特性。由于 ω 十分接近 ω_0 , 即

$$\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega} = \left(\frac{\omega + \omega_0}{\omega} \right) \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \approx \frac{2\omega}{\omega_0} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 带入式 (1-11), 得

$$Z_p = \frac{R_p}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}} \quad (1-13)$$

其幅频特性和相频特性分别为

$$|Z_p| = \frac{R_p}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (1-14)$$

$$\varphi = -\arctan \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right) \quad (1-15)$$

利用式 (1-14) 和式 (1-15) 可做出并联谐振回路阻抗幅频特性和相频特性曲线, 如图 1-5 所示。当 $\omega = \omega_0$, 即谐振时, 回路阻抗为最大且为纯电阻, 相移 $\varphi = 0$ 。当 $\omega \neq \omega_0$ 时, 并联回路阻抗下降, 相移值增大; 当 $\omega > \omega_0$ 时, 回路呈容性, 相移为负值, 最大值趋向 -90° ; 当 $\omega < \omega_0$ 时, 回路呈感性, 相移为正值, 最大值趋向 90° 。而且还可以看出 Q 值越高, 幅度和相移在谐振频率附近变化就越快, 即幅频特性曲线越尖锐, 相移曲线在谐振频率附近变化更陡峭。

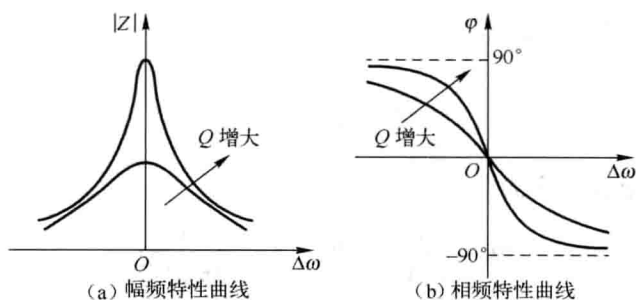


图 1-5 并联谐振回路阻抗频率特性曲线

3. 并联谐振回路的性能指标

1) 电压谐振曲线

上面已求得并联谐振回路的阻抗频率特性。设并联谐振回路输入电流为 i , 且幅值保持不变, 改变其频率, 并联回路两端电压输出电压 $\dot{U}_o$ 的变化规律与回路阻抗频率特性相似。由图 1-4 可知, 并联回路两端输出电压 $\dot{U}_o$ 为