



附：非线性电子电路自学考试考试大纲

非线性电子电路

组编 / 全国高等教育自学考试指导委员会
主编 / 傅丰林

全国高等教育自学考试指定教材 通信技术专业 (专科)

中国出版集团
中国出版

组编前言

当您开始阅读本书时，人类已经迈入了 21 世纪。

这是一个变幻难测的世纪，这是一个催人奋进的时代。科学技术飞速发展，知识更替日新月异。希望、困惑、机遇、挑战，随时随地都有可能出现在每一个社会成员的生活之中。抓住机遇、寻求发展、迎接挑战、适应变化的制胜法宝就是学习——依靠自己学习，终生学习。

作为我国高等教育组成部分的自学考试，其职责就是在高等教育这个水平上倡导自学、鼓励自学、帮助自学、推动自学，为每一个自学者铺就成才之路。组织编写供读者学习的教材就是履行这个职责的重要环节。毫无疑问，这种教材应当适合自学，应当有利于学习者掌握、了解新知识、新信息，有利于学习者增强创新意识、培养实践能力、形成自学能力，也有利于学习者学以致用、解决工作中遇到的问题。具有如此特点的书，我们虽然沿用了“教材”这个概念，但它与那种仅供教师讲、学生听，教师不讲、学生不懂，以“教”为中心的教科书相比，在内容安排、形式体例、行文风格等方面都已经大不相同了。希望读者对此有所了解，以便从一开始就树立起依靠自己学习的坚定信念，不断探索适合自己的学习方法，充分利用已有的知识基础和实际工作经验，最大限度地发挥自己的潜能，达到学习的目标。

欢迎读者提出意见和建议。

祝每一位读者自学成功。

全国高等教育自学考试指导委员会

1999 年 10 月

编者的话

本教材由电子电工与电气信息类专业委员会审定并推荐出版。

本教材参考学时数为 72 个, 自学学时数为 180 个。第一章绪论(自学学时数 6 个)介绍无线电通信的基本概念。第二章高频谐振放大器(自学学时数 24 个)介绍 LC 网络的选频特性, 高频小信号调谐放大器和高频功率放大器的工作原理、主要性能参数及稳定性问题。第三章正弦波振荡器(自学学时数 24 个)介绍互感、三端式高频反馈振荡器的工作原理、特点以及电路组成, 同时介绍了频率稳定度高的石英晶体振荡器。第四章振幅调制与解调(自学学时数 32 个)和第五章混频器(自学学时数 24 个)介绍了它们的工作原理及特点, 都属于频域的线性搬移电路。第六章频率调制与解调(自学学时数 34 个)介绍了其工作原理及实现方法, 属于频域的非线性搬移电路。第七章反馈控制电路(自学学时数 36 个)介绍了自动增益控制、自动频率控制和锁相环路和频率合成器的基本工作原理及其应用。

本书力求讲清物理概念, 阐明分析的思路, 建立起必要的数量概念。在叙述方式上尽量做到便于自学。使用本教材时应把握住教学基本要求, 着重掌握非线性电子电路的分析方法、线性和非线性频率变换的原理电路。教材可与《非线性电子电路学习指导书》配套使用。本课程是一门实践性很强的课程, 在学习理论的同时, 必须重视实践, 认真做好有关实验。

本教材由傅丰林担任主编并编写了第一、二、三章, 陈健编写了第四、五章, 曾兴雯编写了第六、七章。全书由傅丰林统稿。

本教材由西安交通大学谈文心教授主审, 陆曼如和张殿富两位老师参加了审阅工作, 他们对本书提出了许多宝贵意见, 在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限, 书中难免存在一些缺点和错误, 殷切希望广大读者批评指正。

目 录

非线性电子电路

第一章 绪 论	3
第一节 无线电信号的基本概念	3
第二节 无线电波段的划分与电波的传播	5
第三节 通信系统简介	7
思考题与习题	8
第二章 高频谐振放大器	9
第一节 LC 选频网络	9
第二节 高频小信号放大器	16
第三节 高频功率放大器的原理	20
第四节 高频功率放大器的外部特性	30
第五节 高频功率放大器的线路	34
思考题与习题	38
第三章 正弦波振荡器	39
第一节 反馈振荡器原理	39
第二节 三端式振荡器	44
第三节 频率稳定度	52
第四节 石英晶体振荡器	54
思考题与习题	58
第四章 振幅调制与解调	61
第一节 振幅调制信号分析	61
第二节 二极管调制电路	70
第三节 模拟乘法器调制电路	79
第四节 其他调制电路	86
第五节 振幅调制解调概述	90
第六节 二极管峰值包络检波器	90
第七节 同步检波器	99
思考题与习题	103
第五章 混频器	106

第一节	三极管混频器	109
第二节	模拟乘法器混频器	112
第三节	其他混频电路	114
第四节	混频器的干扰	116
第五节	频谱线性搬移电路	119
	思考题与习题	121
第六章	频率调制与解调	123
第一节	调频信号分析	124
第二节	调频方法	130
第三节	变容二极管直接调频电路	132
第四节	晶体振荡器直接调频电路	136
第五节	调频信号解调概述	138
第六节	正交鉴频器	147
	思考题与习题	151
第七章	反馈控制电路	153
第一节	自动增益控制电路	153
第二节	自动频率控制电路	156
第三节	锁相环的基本原理	158
第四节	频率合成器	169
	思考题与习题	181

附 非线性电子电路自学考试大纲

出版前言	185
I. 课程性质及设置目的与要求	186
II. 课程内容与考核目标	187
III. 有关说明与实施要求	197
附录 试题举例	199
后记	201

非线性电子电路

第一章 绪 论

晶体二极管、晶体三极管、场效应管等器件，在静态工作点合适且小信号工作时，输出与输入之间呈现线性关系，此时的器件为线性器件，组成的电路称为线性电子电路。（关于线性电子电路的分析方法，我们已在先修课程中学习过。）但在输入为大信号或静态工作点设计不合适时，输出信号将产生非线性失真。根据傅里叶级数的理论，输出波形除了包含输入信号频率这一基波分量外，还包含有各次谐波分量。也就是产生了输入信号所没有的新的频率分量。此时的器件为非线性器件，组成的电路称为非线性电子电路。在这种情况下，大家熟知的许多分析线性电子电路的方法，如线性电子电路的齐次性、叠加性等，就不能用来分析非线性电子电路，而必须另辟分析非线性电子电路的方法。另外，在各种电子设备中，特别是在通信系统中，广泛应用的倍频器、调制器、解调器、混频器等，都使用了非线性电子电路来实现频率变换的功能。本书将结合无线电通信来说明非线性电子电路的电路组成、分析方法、工作原理。因此，首先必须了解无线电通信的有关基础知识。

第一节 无线电信号的基本概念

人类社会总是需要传递消息，而古代的烽火台，现代的电话、传真、电视、互联网等等都是传递消息的工具或手段。由一地向另一地传递消息就是人们通常所说的通信。随着社会的不断进步，人们对通信的要求也越来越高。在各种通信方式中，电通信方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现快速、准确、可靠的传递，因此获得了迅猛发展，以致于日常所说的通信几乎变成了电通信的代名词。

通信系统的模型如图 1-1 所示。信息源的作用是把各种需要传递的消息转换成电信号，信息可以是数据、文字、图像、语音等。为了使信号适合在信道中传输，在发送端需要对信号作某些变换。信道是指信号的传输媒质，当信号利用明线、电缆、光缆及波导等导线作为传输媒质进行传输时，称为有线通信；当信号利用无线电波的空间传播进行传输时，称为无线通信。接收端需要与发射端作相反的变换，以便从接收信号中恢复出原始信号。如无线电通信系统中，在发射端需要对信号进行调制，而在接收端则需要对信号解调。



图 1-1 通信系统模型

无线电通信中的信号（也是本课程所说的需要处理的信号）主要有三种：消息信号、高频载波信号及已调信号。

消息信号就是表示消息的电信号。通常把各种消息信号归结为两类，一类称为离散消息，即消息的状态是可数的或离散型的，这就是我们通常所说的数字信号，如电报信号、数据信号等；另一类称为连续消息，即消息状态是连续变化的，这就是我们通常所说的模拟信号，如话音信号、图像信号等。信号的表示方法通常有三种：电压、电流的时间函数表示法、波形表示法以及频谱表示法。我们对前两种表示方法比较熟悉，比如，对于较简单的信号如正弦波、方波、三角波等，可以用前两种方法很方便地表示出来。但是，对于较复杂的信号，如话音信号、图像信号，由于其复杂性、随机性，就很难用表达式或波形来表示了；此时，可以采用频谱表示法，即一个确定的信号可以看成是由很多不同频率的单一正弦信号组成的，周期性的信号利用傅立叶级数可以分解为许多离散的频率分量，各频率分量成谐波关系；非周期性的信号利用傅立叶变换方法可以分解为连续谱，信号为连续谱的积分。通过对信号的频谱进行分析，可以知道信号的特性，如信号的频率分布、带宽等。比如话音信号，由于其随机性，我们较难用表达式或波形来表示，但通过对其频谱分析可知，话音信号（也称音频信号）的频率范围大致是 0.1kHz 到 6kHz，主要能量集中在 300Hz~3400Hz 范围内，常常只需传送此频率范围的信号就能保证通话所需的懂度及自然度（话音信号的频谱分布图如图 1-2 所示）。

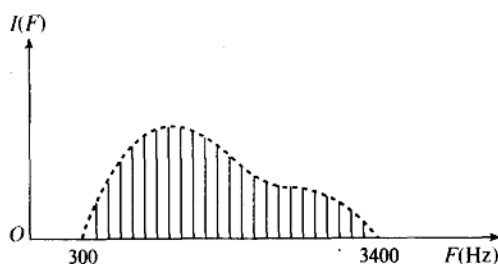


图 1-2 话音信号的频谱分布图

高频载波信号是指没有受消息信号调制的单一频率的正弦波信号。要通过载波传递消息，就必须使载波信号的某一参数（振幅、频率、相位）随消息信号的规律发生变化，这一过程称为调制，调制后的信号称为**已调信号**。从原理上看，有三种基本调制方式：振幅调制（AM）、频率调制（FM）、相位调制（PM），通过用消息信号分别控制载波信号的振幅、频率及相位来实现。当调制采用的消息信号为数字信号时，通常又称为键控，相应的三种基本调制方式分别称为振幅键控（ASK）、频率键控（FSK）、相位键控（PSK），此时已调信号的振幅、频率、相位是在有限的几个值之间进行变化。需要说明的是，除了这些基本的调制外，还可以实现某些组合调制。另外，在微波通信中还可以利用以脉冲信号为中间信号的二重调制，即消息信号对脉冲进行编码，然后用此脉冲信号对载波进行调制。图 1-3 示出了振幅调制的波形及频谱图。

在无线电通信中为什么没有将消息信号直接发射出去，而是将消息信号调制到载波信号上才能有效发射呢？我们知道，信号的波长 λ 与频率 f 的关系为

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

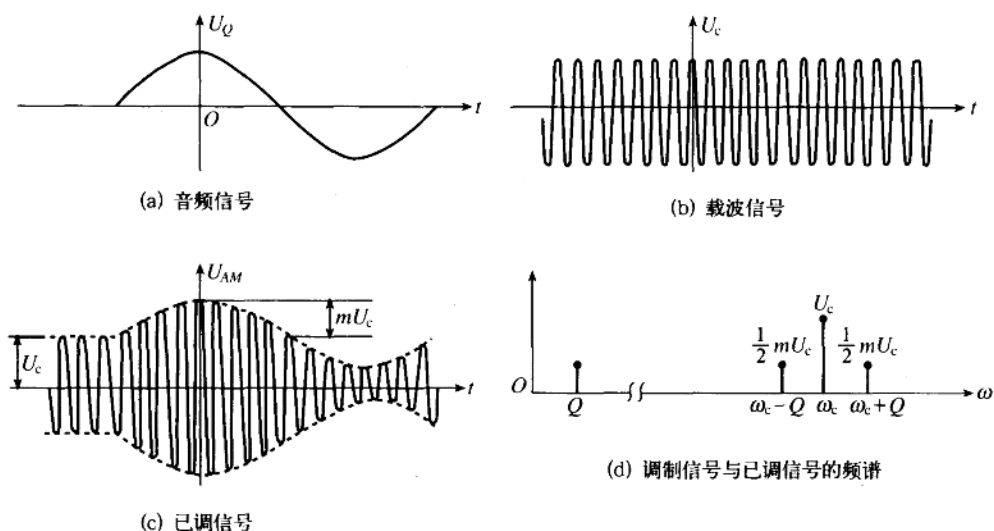


图 1-3 振幅调制的波形与频谱图

其中 c 为自由空间光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。根据天线理论, 要将无线电信号有效地发射出去, 天线的尺寸必须和要传输的电信号波长为同一数量级。由原始非电量信号经转换而成的消息信号一般为低频信号, 波长很长, 如话音信号的波长为 10km 以上。要制造出如此巨大的天线是不现实的, 而且即使能够制造出这样的天线, 由于各个发射台均发射同一频段的低频信息, 接收设备也无法选择区分出需要接收的信号。因此, 消息信号需要调制到频率较高的载波上才能有效地发射, 而且不同的发射台其载波信号频率不同, 在接收端就可以很容易地区分开。另外, 高频具有宽阔的频段, 能容纳许多互不干扰的频道, 也能传播某些宽频带的消息信号。

第二节 无线电波段的划分与电波的传播

任何载有消息的无线电波均占有一定的信号频带, 载波频率越高, 可以利用的总频带 (即波段) 就越宽, 因而在同一波段可以实现许多不同对象间消息的传输, 并且频带较宽的消息信号只能在很高的频率上才能传输。比如电视图像信号的频带宽度约为 6MHz , 它只适宜在几十兆赫兹以上的频率上传输。这说明了无线电波的不同波段, 其用途是不同的。

另外, 不同的高频波段通常有其最适宜的传播方式。无线电波的传播方式主要有: 地波传播、电离层反射 (天波) 传播、视线传播、对流层散射传播等。图 1-4 给出了这几种传播方式的示意图。

地球表面是有电阻的导体, 也就是说电磁波可以围绕地球表面传输信号, 这种电磁波的传播方式称为**地波传播**。由于地面的导电性能在短时间内不会有什么变化, 故地波传播性能稳定; 但电磁波是在有电阻的导体中行进的, 将有一部分能量被损耗, 所以地波传播距离受

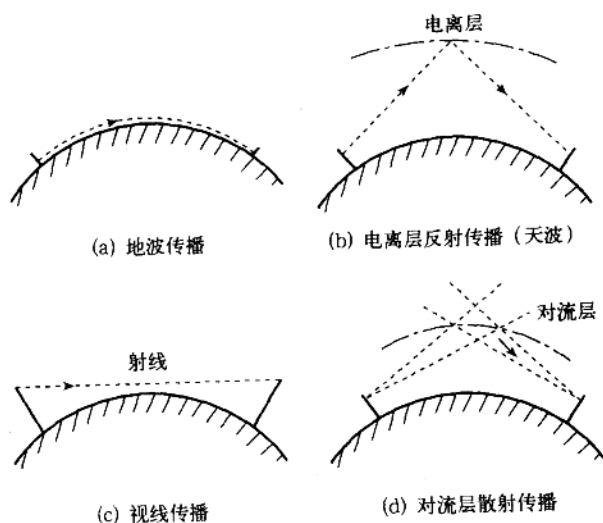


图 1-4 无线电波传播方式

到限制，而且传播的信号频率越高，损耗就越大，距离就越短。

在离地球表面 50km 左右的地方，空气比较稀薄，太阳、宇宙射线等的辐射作用较为强烈，空气产生电离，电离密度成层分布即电离层。电磁波到达电离层后，一部分能量被吸收，一部分能量则被反射回地球表面，从而可以实现电波的传播，这种传播称为**电离层反射传播**。由于惯性，传输的电磁波频率越高，电子和离子的振动幅度就越小，电离层吸收的能量就越少，所以电离层反射传播宜采用频率较高的信号；但如果传输的电磁波的频率太高，电磁波将穿透电离层，地球表面就没有反射回的电磁波。

视线传播就是在看得见的距离内传播，即直线传播，其最远距离约为 50km。在频率很高时，地面波衰减极大，天波又会穿透电离层而不能返回地面，因而只能采用视线传播。

在离地球表面 20km 左右的地方，空气密度高，所有的大气现象（如风、雨、雷等）都产生在这一区域，该区域称为对流层。利用对流层对电磁波的散射可以完成信号的传输即**对流层散射传播**。**对流层散射传播**时电磁波传输的距离大大超过视线传播，因此，对流层散射传播已成为超短波乃至微波波段远距离通信的有力手段。

表 1-1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式及用途。表中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。通常将频率大于 1GHz (1000MHz)、波长短于 3cm 的范围统称为微波。

表 1-1 无线电波的波段划分

波段范围	波长范围	频率范围	主要传播方式	用 途
超长波波段 (VLW)	10 000m~30 000m	10kHz~30kHz (甚低频 VLF)	地波传播	高功率长距离点对点通信

续前表

波段范围	波长范围	频率范围	主要传播方式	用 途
长波波段 (LW)	1 000m~10 000m	30kHz~300kHz (低频 LF)	地波传播	远距离通信
中波波段 (MW)	100m~1 000m	300kHz~3 000kHz (中频 MF)	地波传播、天波传播	广播、通信、导航
短波波段 (SW)	10m~100m	MHz3~30MHz (高频 HF)	天波传播、地波传播	广播、通信
超短波波段 (VSW)	1m~10m	30MHz~300MHz (甚高频 - VHF)	视线传播、对流层 散射传播	通信、电视、调频广播、 雷达
分米波波段 (USW)	10cm~100cm	300MHz~3 000MHz (超高频 UHF)	视线传播、对流层 散射传播	通信、中继通信、卫星通 信、雷达、电视
厘米波波段	1cm~10cm	3 000MHz~30 000MHz (极高频 SHF)	视线传播	中继通信, 卫星通信、雷 达
毫米波波段	1mm~10mm	30GHz~300GHz	视线传播	波导通信

第三节 通信系统简介

不同类型的无线电通信，其设备组成、复杂程度是很不相同的，现以一典型的发射机和超外差式接收机框图为例，说明无线电通信系统的概念，见图 1-5。

在图 1-5 (a) 所示的发射机中，振荡器的作用是产生高频载波信号；高频功率放大器（高频功放器）的主要作用是将振荡器输出的小信号放大到足够的功率电平；话筒的作用就是将话音转化为电信号；音频放大器用来放大音频信号；调制器的主要作用是用话音信号控制高频载波信号的幅度形成已调信号，以便于发射。

图 1-5 (b) 所示的为常用的超外差式接收机框图。其中，接收机输入端的高频放大器的作用是对天线上接收到的信号进行初步选择和放大。因为天线接收端的电波有很多，所以应该只对所需要频率的信号进行放大，对其他无用频率的信号进行抑制，这通常是靠放大器中频率选择性电路来完成的。混频器将对放大器输出的信号与本地振荡器输出的信号进行频率相减，得到频率相对较低的中频信号（如收音机中频一般为 465kHz），以便于后级电路进一步放大。中频放大器是一中心频率固定的频带（带通）放大器，其作用为放大信号及进一步滤除无用频率的信号。检波器的作用是从已调信号中恢复出消息信号，这一过程也称为解调；解调后的信号通过低频放大送到用户。超外差式接收机中的放大和频率选择主要是由中心频率固定的中频放大器完成的，通过改变本地振荡器的中心频率就可以接收不同的电台。

在图 1-5 所示的典型发射机和接收机框图中，我们已经学习过低频放大器电路，而高频小信号放大器、高频功率放大器、振荡器、调制器、解调器、混频器等部分电路的组成、原理就是本书的研究对象。

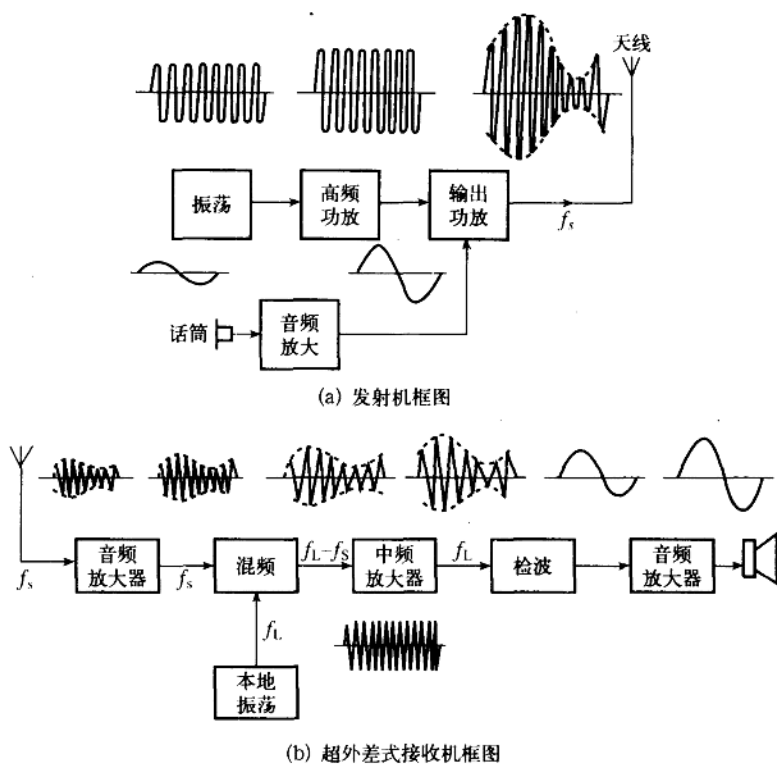


图 1-5 无线电收发信机典型框图

思考题与习题

1. 无线电通信为什么要进行调制？常用的模拟调制方式有哪些？
2. 常用的收发设备通常有哪些高频电路，它们的主要功用是什么？

第二章 高频谐振放大器

在通信系统和其他电子系统中, 高频谐振放大器是必不可少的单元电路。在发射机中, 要将信号发送出去, 通过信道传送到接收端, 必须根据传送距离和其他因素来确定发射机的发射功率; 而要达到此发射功率, 就需要用高频谐振功率放大器将信号放大到系统所需的功率。一般发射机的发射功率可以从几十毫瓦到几千瓦不等。在接收端, 从天线上感应的信号是非常微弱的, 一般在微伏级, 要将传输的信号恢复出来, 一般需要将信号放大, 这就需要用高频小信号谐振放大器来完成。本章主要介绍高频小信号谐振放大器和高频功率放大器。

第一节 LC 选频网络

在高频电路中, 除了用到有源器件外, 还要用到各种无源器件构成的电路, LC 谐振回路就是其中最常用的电路。它与晶体管、场效应管等有源器件结合, 即可构成高频放大器、振荡器等功能电路。谐振回路在其中担当负载、滤波、阻抗变换等角色, 是高频电路中不可缺少的组成部分。本节主要介绍 LC 串联谐振回路、并联谐振回路以及耦合谐振回路等。

一、串联谐振回路

图 2-1 是由 L 、 C 构成的串联谐振回路, 图中 r 为电感 L 的损耗电阻, 其激励源是角频率为 ω (频率为 f) 的正弦电压源, 设其向量为 $\dot{U}_s$, 初相为零。

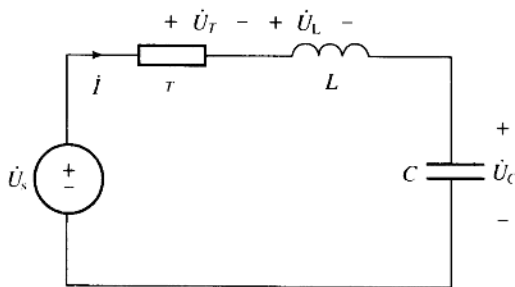


图 2-1 LC 串联谐振回路

图中的总阻抗为

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

$$= r + jX = \sqrt{r^2 + X^2} e^{j\varphi} \quad (2-1)$$

式中电抗和相角分别为

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (2-2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X}{r} = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = \tan^{-1} \xi \quad (2-3)$$

上式中

$$\xi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \quad (2-4)$$

为广义失谐量。

串联电路中的电流 I 为

$$I = \frac{U_s}{Z} = \frac{U_s}{\sqrt{r^2 + X^2}} e^{-j\varphi} \quad (2-5)$$

由以上关系可以看出，在电路参数 r 、 L 、 C 一定的条件下，当激励信号的角频率 ω 变化时，感抗 ωL 随 ω 增大而增大，容抗 $1/\omega C$ 随 ω 增大而减小，所以总电抗 $X = \omega L - 1/\omega C$ 也随频率而变化。图 2-2 画出了感抗、容抗、总电抗 X 和阻抗的模值 $|Z|$ 随角频率 ω 变化的情况。

当频率较低时， $\omega L < 1/\omega C$ ，电抗为负值，电路呈容性，因而电流 I 超前于激励源电压 U_s 。随着频率的增大， $|X|$ 减小，从而阻抗模值 $|Z|$ 也减小，电流的模值增大。当激励源角频率改变到某一值 ω_0 时，使 $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$ ，这时 $X = 0$ ，阻抗模值 $|Z|$ 达到最小值（见图 2-2）。这时电流达到最大值，且与激励源电压同相。若 ω 继续升高，则 $\omega L > 1/\omega C$ ，电抗为正值，电路呈电感性，因而电流 I 落后于电压 U_s 。

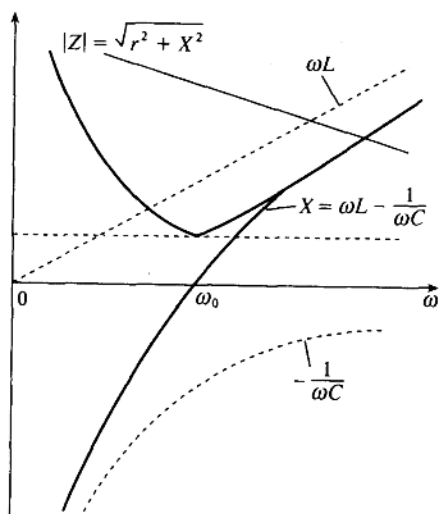


图 2-2 LC 串联电路阻抗特性曲线

当回路电抗等于零，电流 I 与激励源电压 U_s 同相时，称电路发生了串联谐振。这时的频率称为串联谐振频率，用 f_0 表示，相应的角频率用 ω_0 表示。由式 (2-2)，当电路发生串联谐振时，有

$$X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

故得谐振角频率 ω_0 及谐振频率 f_0 为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-6a)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-6b)$$

由上式可知, 电路的谐振频率仅由回路元件参数 L 和 C 决定, 与激励无关, 仅当激励源的频率等于电路的谐振频率时, 电路才发生谐振现象。在 LC 串联电路发生谐振时, 电抗 $X=0$, 故阻抗为纯阻性, 且等于 r , 阻抗模为最小。谐振时 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, 这时的感抗与容抗值相等, 其值称为谐振电路的特性阻抗, 用 ρ 表示, 即

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-7)$$

这是一个仅由电路参数决定的量。特性阻抗 ρ 与回路电阻 r 的比值称为回路的品质因数。用 Q 表示, 即

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 r C} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{r} \quad (2-8)$$

这是一个无量纲的量。

LC 串联电路谐振时, 由于 $X=0$, 电路呈纯阻且阻抗值最小, 因而此时电流达到最大值, 并与激励源电压 $\dot{U}_s$ 同相。此时, 电阻 r 上的电压即为激励源电压 $\dot{U}_s$, 而 L 和 C 上的电压模值为外加激励源电压 $\dot{U}_s$ 模值的 Q 倍, 即

$$\dot{U}_{L0} = j\omega_0 L \dot{I}_0 = j \frac{\omega_0 L}{r} \dot{U}_s = jQ \dot{U}_s \quad (2-9a)$$

$$\dot{U}_{C0} = \frac{1}{j\omega_0 C} \dot{I}_0 = -j \frac{1}{\omega_0 r C} \dot{U}_s = -jQ \dot{U}_s \quad (2-9b)$$

可见, 谐振时电感上电压 $\dot{U}_{L0}$ 与电容上电压 $\dot{U}_{C0}$ 大小相等, 均为 QU_s , 但相位相反, 故互相抵消。根据这一特点, 串联谐振也称为电压谐振。这时激励源电压 $\dot{U}_s$ 全部加到电阻 r 上。谐振时, U_{L0} 和 U_{C0} 均为 U_s 的 Q 倍, 如果电路的品质因数 Q 较高, 那么在谐振时, 电感和电容上电压值将大大超过电源电压。在通信系统中, 利用这一特点, 就可构成选频电路。

二、并联谐振回路

并联谐振回路如图 2-3 (a) 所示。考虑到电感线圈中的损耗, 并联谐振电路的等效电路如图 2-3 (b) 所示。谐振电路的并联阻抗为

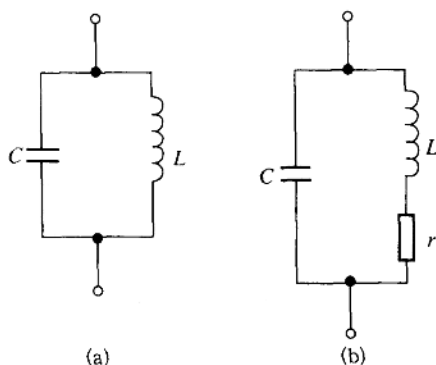


图 2-3 并联谐振电路及等效电路

$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C} (r + j\omega L)}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2-10)$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 r C} \quad (2-11)$$

对于并联谐振电路，仍然可以得到串联谐振回路中的使感抗与容抗相等时的角频率 ω_0 ($\omega_0 L = 1/\omega_0 C$, 即 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$), 以及品质因数 Q 。当回路中只有损耗电阻 r 时, 通常 $Q \gg 1$ 。由于并联谐振电路经常工作在 $\omega = \omega_0$ 附近, 再考虑到式 (2-10) 分子中的 r 远小于 ωL , 则此时并联回路阻抗可以表示为

$$Z \approx \frac{\frac{L}{rC}}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2-12)$$

其中 L/rC 就是 $\omega = \omega_0$ 时的回路电阻, 也称为并联回路谐振电阻, 用 R_0 表示, 即

$$R_0 = \frac{L}{rC} = Q \frac{1}{\omega_0 C} = Q\omega_0 L \quad (2-13)$$

在 $Q \gg 1$ 的条件下, ω_0 可以称为并联谐振电路的谐振频率。严格地说, 并联振荡电路的谐振频率 ω_p 可以由式 (2-10) 在纯电阻的条件下得到, 经化简得

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (2-14)$$

由此可见, 当 $Q \gg 1$ 时, ω_p 与 ω_0 相差很小。并联谐振回路通常用于窄频带系统, 我们主要关心的是在谐振频率 ω_0 附近的特性。式 (2-12) 可以进一步简化为

$$Z = \frac{R_0}{1 + j2Q \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}} = \frac{R_0}{1 + j2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \quad (2-15)$$

式中 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 。对应的并联阻抗的模值和相角分别为

$$|Z| = \frac{R_0}{\sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (2-16)$$

$$\varphi_z = -\tan^{-1} 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2-17)$$

图 2-4 给出了 $|Z|$ 与 φ_z 随 ω 变化的曲线。由图可以看出, 回路品质因数 Q 越大, 曲线在 ω_0 附近变化越陡。由相频特性还可以看出, 当 $\omega < \omega_0$ 时回路呈感性阻抗, 当 $\omega > \omega_0$ 时回路呈容性阻抗, 这一点正好与串联谐振回路相反。通常将 $|Z|$ 下降为 R_0/f_0 时的频率范围称为回路的通频带, 也称为回路的带宽。

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad (2-18)$$