



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化

通信电子线路

TONG XIN DIAN ZI XIAN LU

主编 杨永杰 陈鹏 刘怀强



中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

通信电子线路

主 编 杨永杰 陈 鹏 刘怀强

副主编 刁少岚 杨 懿

中国矿业大学出版社

内容提要

“高频电子线路”课程是通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的一门非常重要的专业基础课，具有很强的专业性、工程性和系统性。

本书主要讨论各种无线设备以及系统中高频电路的相关原理、线路和分析方法。随着科学技术的不断发展与改进，相关技术的教学教育方法也需要不断进行改革，与此同时“高频电子线路”课程的地位和作用也在不断变化。为此，在编写本教材时，力求达到控制教材篇幅、精选更新内容、突出重点的目的。

本书适用于通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的专业基础课教材，也可供相关专业从业人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

通信电子线路 / 杨永杰, 陈鹏, 刘怀强主编. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4053 - 8

I. ①通… II. ①杨… ②陈… ③刘… III. ①通信线路—电子线路 IV. ①TN913.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 169156 号

书 名 通信电子线路

主 编 杨永杰 陈 鹏 刘怀强

责任编辑 吴学兵

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

江苏省徐州市解放南路 邮编 221008

营销热线 (0516) 83885307 83884995

出版服务 (0516) 83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 武钢实业印刷总厂

开 本 787 × 1092 1/16 印张 16 字数 399 千字

版次印次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

前言

“高频电子线路”课程是通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的一门非常重要的专业基础课，具有很强的专业性、工程性和系统性。

全书共分为8章。第1章绪论，第2章通信电子线路的基础，第3章高频小信号放大器，第4章高频功率放大器，第5章正弦波振荡器，第6章振幅调制与解调及混频电路，第7章角度调制与解调，第8章反馈控制电路。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程，教材仅为学好课程提供必要的基础知识，有许多理论知识和实际技能，如实际电路的构成、测量仪器和使用方法、实践动手能力等，还必须在学习与实践中提升和加强。

本书第3章由刘怀强老师编写，第4、5章由陈鹏老师编写，第6章由刁少岚老师编写，第8章由杨懿老师编写，其余章节均由杨永杰老师编写。全书由杨永杰老师统稿。

在本书编写和出版过程中，得到了有关方面和同仁的大力支持，在此致以谢意。由于时间仓促，书中难免有一些错误与不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2018年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统和信号变换过程	1
1.2 调制和已调信号的频谱分析	3
1.3 无线电广播的发射与接收	4
第 2 章 通信电子线路的基础	8
2.1 无源谐振电路	8
2.2 常用无源固体器件	15
2.3 干扰	16
2.4 放大器中的噪声	18
2.5 噪声的表示和计算方法	24
本章小结	28
习题	29
第 3 章 高频小信号放大器	30
3.1 高频小信号放大器性能指标	30
3.2 高频小信号放大器	32
3.3 单调谐回路谐振放大器	40
3.4 多级单调谐回路谐振放大器	45
3.5 双调谐回路谐振放大器	47
3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施	50
本章小结	54
习题	55
第 4 章 高频功率放大器	57
4.1 丙类谐振功率放大器的工作原理	57
4.2 谐振功率放大器的工作状态分析	63
4.3 谐振功率放大器电路	68
4.4 宽带高频功率放大器与功率合成	74

4.5 倍频器	81
4.6 高频功率放大电路印刷电路板 (PCB) 设计	84
4.7 功放管的工作特性	87
本章小结	88
习题	89
第5章 正弦波振荡器	91
5.1 反馈振荡器的工作原理	91
5.2 正弦波振荡器	96
5.3 石英晶体振荡器	103
5.4 负阻正弦波振荡器	106
本章小结	111
习题	112
第6章 振幅调制与解调及混频电路	115
6.1 概述	115
6.2 振幅调制的基本原理	122
6.3 相乘器电路	133
6.4 振幅调制电路	146
6.5 检波电路	155
6.6 混频电路	166
本章小结	181
习题	182
第7章 角度调制与解调	191
7.1 调角波的性质	191
7.2 调频信号波形的变化规律	194
7.3 调频信号的频域分析	195
7.4 调频特性及对调频器的技术要求	199
7.5 调频方法概述	199
7.6 变容二极管调频电路	200
7.7 晶体振荡器直接调频	205
7.8 鉴频器与鉴频方法	207
7.9 鉴频器电路	210
本章小结	218

习题	218
第 8 章 反馈控制电路	224
8.1 概述	224
8.2 自动增益控制电路	225
8.3 自动频率控制电路	228
8.4 自动相位控制电路（锁相环路）	230
本章小结	243
习题	243
参考文献	246

绪 论

1.1 通信系统和信号变换过程

1.1.1 通信和通信系统

通信是把信息从发送信息者传送到接受信息者的过程。

通信系统是指完成信息传输的系统。信源(发端设备)、信道(传输媒介)和信宿(收端设备)被称为通信系统的三要素。

信道是传送信息的通道。无线通信的信道有自由空间、蓝牙、WiFi 等;有线通信的信道多为传输线,如导线、电缆、光纤、光缆等。通信的种类有很多,如人们生活中常见的电话、手机、电视、广播、卫星通信、计算机通信等等,这些通信中应用的电子线路种类很多。通信系统框图如图 1.1.1 所示。

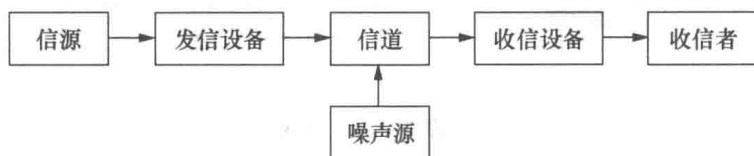


图 1.1.1 通信系统框图

1.1.2 通信系统中的信号变换过程

1. 信号的概念

通信系统中信号有三种形式:基带信号、高频载波信号和已调波信号。

基带信号:也称消息信号或调制信号,表示信息的电信号。例如,话音、图像信号(模拟信号);数据、电报信号(数字信号)等。

高频载波信号:确知的单一频率的正弦波信号,由高频振荡器或频率合成器产生。

已调波信号:已载有消息信号的高频载波信号。

2. 信号的表示方法

(1) 数学表达式

数学表达式例如, $u = 2\sin(2\pi \times 10^3 t)$ V。

(2) 波形

信号波形图如图 1.1.2 所示。

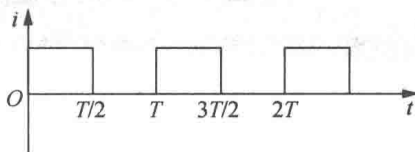


图 1.1.2 信号波形图

(3) 频谱

将信号所包含的所有频率在坐标横轴上表示出来(图 1.1.3)。

单频信号: $i(t) = 2\sin(100\pi t)$ 。

双频信号: $i(t) = 2\sin(100\pi t) + \cos(200\pi t)$ 。

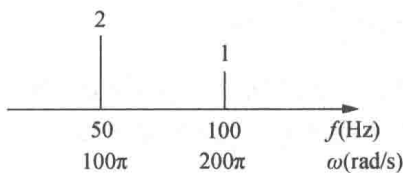


图 1.1.3 双频信号频谱图

多频信号: 占据一段频带宽度——带宽(图 1.1.4)。

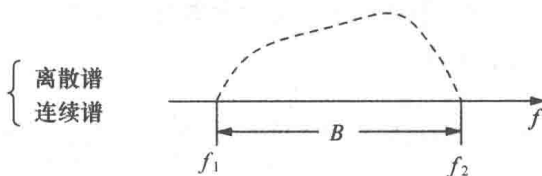


图 1.1.4 带宽

传输信道的带宽必须大于信号的带宽。

【例 1.1.1】 图 1.1.5 所示开关函数用傅立叶级数可分解为

$$K(\omega_2 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_2 t) - \frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_2 t) + \frac{2}{5\pi} \cos(5\omega_2 t) - \dots$$

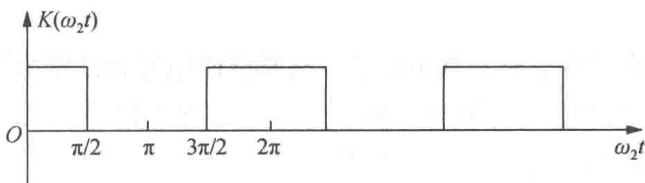


图 1.1.5

频谱图如图 1.1.6 所示。

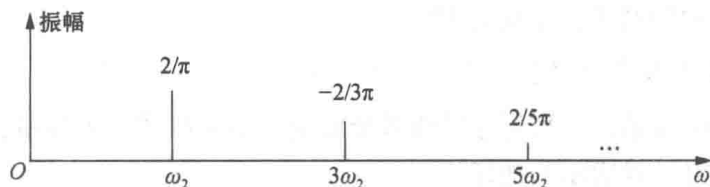


图 1.1.6

【例 1.1.2】 话音信号用傅立叶变换后的频谱分布如图 1.1.7 所示。

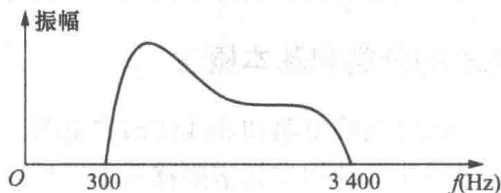


图 1.1.7

1.2 调制和已调信号的频谱分析

1.2.1 调制的基本概念

1. 调制的概念

将低频消息信号直接发射是不现实的，因此，信号的无线传播必须进行调制。

由振荡电路产生一个高频载波信号，可将其加到适当高度的天线上发射出去，作为传输信息的运载工具，如图 1.2.1 所示。不同的电台可采用不同的载波，避免了信号的相互干扰。

高频载波信号可表示为：

$$u_c = U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1.2.1)$$

式中 U_c ——振幅；

ω_c ——角频率；

φ_c ——初相。

2. 调制高频载波信号

用需要传输的消息信号(调制信号)去控制高频载波信号的某一参数——振幅、角频率或相位，使其随调制信号的变化而变化，这一过程称为调制。调制后的高频信号称为已调波。已调波本身是高频信号，可以发射，同时因为受到调制，就带着控制它的信号(即要传输的信号)一起发射出去。

3. 调制的主要作用

(1) 进行频谱搬移(将原来不适宜传输的基带信号搬移到适合传输的某一个频段上，再送入信道)。

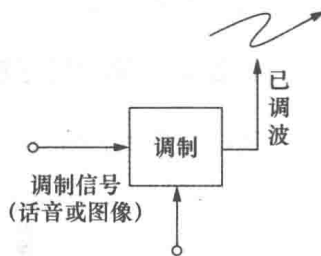


图 1.2.1 高频载波信号

(2) 实现信道复用(把多个信号分别安排在不同的频段上同时进行传输)。

(3) 可以提高通信系统抗干扰能力。

4. 调制高频载波信号的频谱

对周期性的时间函数,可用傅立叶级数分解为许多离散的频率分量;对非周期性的时间函数,可用傅立叶变换表示为连续谱。

1.2.2 解调的基本概念

解调是调制的逆过程,其作用是将已调信号中的原调制信号恢复出来。

1.2.3 频谱搬移电路的分类和基本概念

频谱的搬移电路可以分为线性搬移电路和非线性搬移电路。

线性搬移电路:输入信号的频谱结构在频谱搬移后不发生变化。

非线性搬移电路:输入信号的频谱结构在频谱搬移后发生变化。

1.3 无线电广播的发射与接收

1.3.1 通信系统的任务

通信的任务是将各种电信号由发送端传送到接收端,以达到传输消息的目的。信息包括语言、音乐、文字、图像、数据等各种信号。

1.3.2 通信系统的构成

通信系统的构成如图 1.3.1 所示。



图 1.3.1 通信系统构成图

图 1.3.2 和图 1.3.3 所示为无线广播发送与接收的框图。其中发送设备中由高频振荡器产生一个高频正弦波信号,再经过放大形成载波。语音信号通过话筒变成电信号,经过音频放大送到调制器中,在调制器中把语音信号寄载到载波上。图中所示是把语音信号寄载在载波的振幅上,这叫调幅。调制后的高频信号叫已调波,我们称这种已调波为调幅波。再经过高频功率放大,把大功率的已调波信号送到天线上。在天线上,高频电信号转变成高频电磁波,向空间辐射出去。这种电磁波经大气空间的传送,最终到达接收机的天线。由于电磁感应现象,在接收机天线上感生出无线电信号。接收设备即为接收机的框图,天线中感生的无线电信号,经过输入回路的选择,取出要接收的已调波信号,经过高

频谐振放大器放大，把信号送入到混频器中。混频器有两个输入信号，一个是外来的高频已调波信号，另一个是本地振荡器产生的高频正弦波。在混频器中，两个信号的频率进行减法运算得到差频 f_i 。差频是固定的中频值，如广播接收机中 f_i 为465 kHz。经过中频放大器，把信号放大。检波是调制的逆过程。在检波器中，把语音信号从中频已调波信号中提取出来，再经过低频放大器，推动扬声器，产生出要收听的语音信号。这种接收机是目前广泛采用的超外差式接收机。

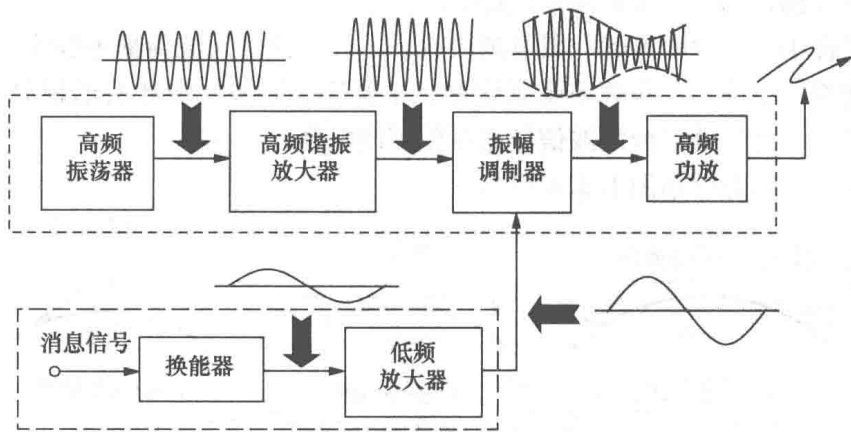


图 1.3.2 发送设备构成图

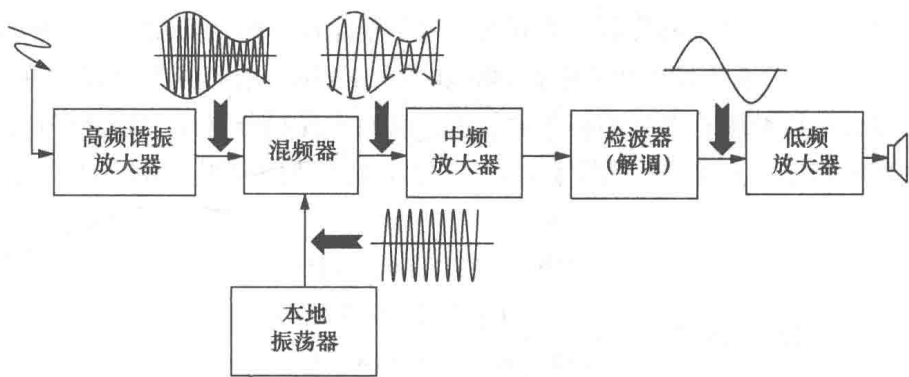


图 1.3.3 接收设备构成图

在这个语音通信系统中，振荡、功放、调制、混频、检波都是由非线性电子线路完成的，所以，这些电路都将是本书研究的主要内容。

1.3.3 无线电波的传播方式和频段划分

1. 无线电波的传播方式

电磁波从发射天线辐射出去后，不仅电波的能量会扩散，接收机只能收到其中极小的一部分，而且在传播过程中，电波的能量会被地面、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，从而造成到达接收机时的强度大大衰减。根据无线电波在传播过程中所发生的现象，电波的传播方式如下。

(1) 地波传播(绕射波)

特点是波长愈长, 传播损耗愈小。主要用于中、长波无线电通信和导航。例如, 收音机接收的广播电台中波信号。

(2) 视距传播(直射波)

特点是收、发信高架(高度比波长大多得多)。主要用于超短波、微波波段的通信和电视广播。例如, 卫星通信采用视距传播。

(3) 天波传播, 也称电离层传播(反射波)

特点是损耗小, 传播距离远; 因电离层状态不断变化使天波传播不稳定; 因要满足从电离层返回地面的条件, 工作频率受到限制。主要用于短波、中波的远距离通信和广播。例如, 收音机接收的广播电台短波信号或军用短波电台。

三种传播方式示意图如图 1.3.4 所示。

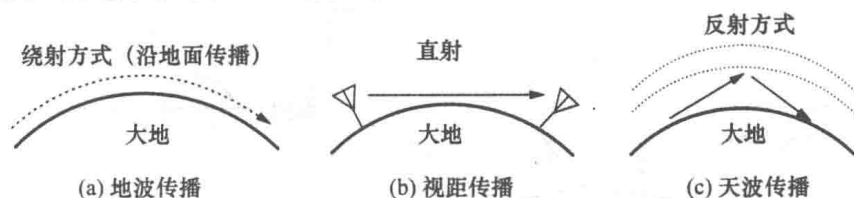


图 1.3.4 传播方式示意图

2. 无线电波频段划分

任何信号都会占据一定的带宽, 不同的信号其带宽也不同。比如, 话音的频率范围大致为 100 Hz ~ 6 kHz, 其主要能量集中在 300 Hz ~ 3.4 kHz。射频频率越高, 可利用的频带宽度越宽, 不仅可以容纳许多互不相干的信道, 从而实现频分复用或频分多址, 而且也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。

例如, 多波段收音机频段划分	LM
	MW: 535 ~ 1 605 kHz
	SW { I : 2.2 ~ 8.5 MHz
	II : 8.5 ~ 18 MHz
	III : 18 ~ 30 MHz
	FM: 88 ~ 108 MHz

任何信号都具有一定的频率或波长, 称之为频谱特性。电磁波辐射的波谱很宽, 如图 1.3.5 所示。

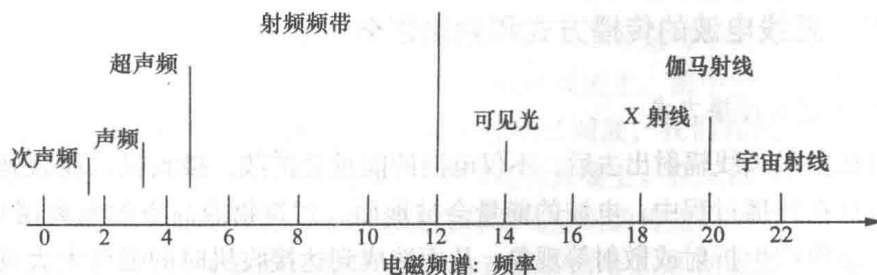


图 1.3.5 电磁波波谱

无线电波只是一种波长比较长的电磁波，占据的频率范围很广。对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。

无线电波的波段划分如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围	频率范围	应用举例
长波波段	1 000 ~ 10 000 m	30 ~ 300 kHz 低频——LF	航海设备；无线电信标
中波波段	100 ~ 1 000 m	300 ~ 3 000 kHz 中频——MF	调幅广播；业余无线电台
短波波段	10 ~ 100 m	3 ~ 30 MHz 高频——HF	短波广播；移动通信；军用通信；业余无线电台
超短波波段	1 ~ 10 m	30 ~ 300 MHz 甚高频——VHF	电视；调频广播；空中交通管制；业余无线电台
分米波波段	10 ~ 100 cm	300 ~ 3 000 MHz 特高频——UHF	电视；遥测；雷达；业余无线电台
厘米波波段	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz 超高频——SHF	雷达；卫星和空间通信；业余无线电台
毫米波波段	0.1 ~ 1 cm	30 ~ 300 GHz 极高频——EHF	雷达；着陆设备；业余无线电台

通信电子线路的基础

各种高频电路基本上是由无源元件、有源器件和高频基本组件等组成的，它们与用于低频电路的基本元器件没有本质上的差异，只是这些元器件作用于高频电路时会存在一定的特殊性，当然也有一些高频电路所特有的器件。在高频多个单元电路中常用的两个重要功能是选频滤波与阻抗变换，振荡回路、石英谐振器与集中选频滤波器等组件都具有这两个功能，高频变压器、传输线变压器及阻抗匹配器则具有较好的阻抗变换能力。

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。

2.1 无源谐振电路

2.1.1 概述

LC 谐振回路是高频电路里最常用的无源网络，包括并联回路和串联回路两种结构类型。

利用 LC 谐振回路的幅频特性和相频特性，不仅可以进行选频，即从输入信号中选择出有用频率分量而抑制掉无用频率分量或噪声（例如在选频放大器和正弦波振荡器中），而且还可以进行信号的频幅转换和频相转换（例如在斜率鉴频和相位鉴频电路里）。另外，用 L 、 C 元件还可以组成各种形式的阻抗变换电路和匹配电路。所以， LC 谐振回路虽然结构简单，但是在高频电路里却是不可缺少的重要组成部分，在本书所介绍的各种功能的高频电路单元里几乎都离不开它。

2.1.2 LC 串联谐振回路

$$z_s = r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.1.1)$$

(1) 串联谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.1.2)$$

(2) 品质因数：回路谐振时无功功率与损耗功率之比

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r\omega_0 C} \quad (2.1.3)$$

(3) 特性阻抗 ρ ：谐振时容抗或感抗的值

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1.4)$$

(4) 广义失谐 ξ ：能够清楚地反映失谐的大小

$$\begin{aligned} Z_s &= r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r\left[1 + j\frac{1}{r}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)\right] = r\left[1 + j\frac{\omega_0 L}{r}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] \\ &= r\left[1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = r(1 + j\xi) \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

其中, $\xi = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$

当 $\xi = 0$ 时, $Z = r$, 电路谐振; 当 $\xi \neq 0$ 时, $|Z| > r$, 电路失谐。

$\xi < 0$, Z 为容性阻抗; $\xi > 0$, Z 为感性阻抗。

通信电路中用到的谐振电路多为窄带电路, 即 ω 与 ω_0 很接近, 则有:

$$\xi = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = Q\left(\frac{\omega + \omega_0}{\omega}\right)\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right) \quad (2.1.6)$$

因为 $\omega + \omega_0 \approx 2\omega$, 令 $\omega - \omega_0 = \Delta\omega$, 则 $\xi = 2Q\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 2Q\frac{\Delta f}{f_0}$, 其中 $\Delta\omega$ 是失谐量。

2.1.3 LC 并联谐振回路

如图 2.1.1 所示是并联谐振回路框图, g_0 是 L 和 C 的损耗之和。

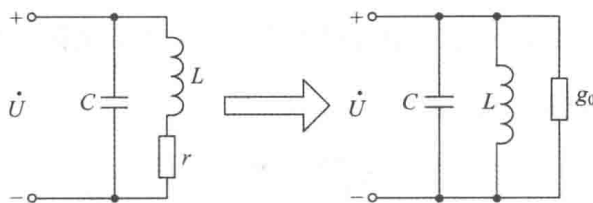


图 2.1.1 并联谐振回路框图

$$\begin{aligned} y &= g_0 + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = g_0 + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \\ &= g_0\left[1 + j\frac{1}{g_0}\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right] = g_0\left[1 + j\frac{\omega_0 C}{g_0}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] \\ &= g_0\left[1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] \\ &= g_0(1 + j\xi) \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

(1) 并联谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 或 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1.8)$$

(2) 品质因数

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{g_0} = \frac{1}{g_0 \omega_0 L} \quad (2.1.9)$$

(3) 广义失谐

$$\xi = Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \approx 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.1.10)$$

并联谐振回路的幅频特性和相频特性如图 2.1.2 所示。

曲线越窄,选频特性越好,定义当 U 下降到 U_0 的 $1/\sqrt{2}$ 时,对应的频率范围为通频带—— $BW_{0.7}$ 。

$$\begin{cases} |U| = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \left(2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \xi^2}} \\ \varphi_z = -\arctan \left(2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) = -\arctan \xi \end{cases} \quad (2.1.11)$$

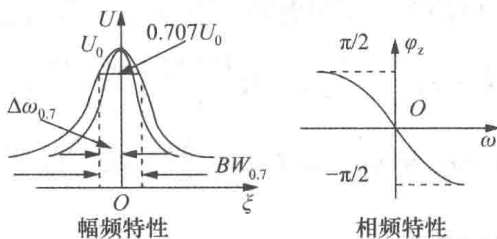


图 2.1.2 并联谐振回路的幅频特性和相频特性

(4) 通频带

为了衡量回路对于不同频率信号的通过能力,定义单位谐振曲线上 $N(f) \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ 所包含的频率范围为回路的通频带,用 $BW_{0.7}$ 表示。

$$BW_{0.7} = 2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q_0} \text{ 或 } BW_{0.7} = 2\Delta f = \frac{f_0}{Q_0} \quad (2.1.12)$$

可见,通频带与回路 Q 值成反比。也就是说,通频带与回路 Q 值(即选择性)是互相矛盾的两个性能指标。选择性是指谐振回路对不需要信号的抑制能力,即要求在通频带之外,谐振曲线 $N(f)$ 应陡峭下降。所以, Q 值越高,谐振曲线越陡峭,选择性越好,但通频带却越窄。一个理想的谐振回路,其幅频特性曲线应该是通频带内完全平坦,信号可以无衰减通过,而在通频带以外则为零,信号完全通不过。

(5) 矩形系数

为了衡量实际幅频特性曲线接近理想幅频特性曲线的程度,提出了“矩形系数”这个性能指标。