

高等院校信息与通信工程系列教材

通信电子电路教学参考书

于洪珍 编著

清华大学出版社



内 容 简 介

本书共包括9章内容,分别为绪论、小信号调谐放大器、高频调谐功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调、角度调制与解调、变频器、锁相环路及其他反馈控制电路、电噪声及其抑制。每一章由五部分组成。第一部分为重点和难点,第二部分为内容要点,第三部分为典型例题分析,第四部分为思考题与习题解答,第五部分为自测题。另外,本书还给出了综合测试题及答案。

本书为“通信电子电路”课程的教学参考书,无论对教师还是对学生都有较大的指导和帮助。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

通信电子电路教学参考书/于洪珍编著. —北京:清华大学出版社,2006.3

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 7-302-12336-5

I. 通… II. 于… 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(2006)第 000803 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:佟丽霞

文稿编辑:赵从棉

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:13 字数:304千字

版 次:2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12336-5/TN·299

印 数:1~3000

定 价:21.00元

前言

“通信电子电路”这门课程对于通信与信息工程、无线电工程专业以及其他电类专业都是非常重要的专业基础课。它涉及许多通信理论知识、通信电路中常用的基本功能部件以及实际电路,通过对典型问题的深入分析,阐明通信系统中带有普遍性的思想方法和重要结论。

《通信电子电路教学参考书》是《通信电子电路》立体化系列教材之一。《通信电子电路》立体化系列包括主教材、教学参考书、实验指导、较多动画与复杂图形的 PowerPoint 格式的电子教案、网络课件和供老师组卷用的试题库。

本书与主教材相对应,共包括 9 章内容,即绪论、小信号调谐放大器、高频调谐功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调、角度调制与解调、变频器、锁相环路及其他反馈控制电路、电噪声及其抑制。每一章由五部分组成。第一部分为重点和难点,主要列出了该章主教材内容的重要概念和难点内容。第二部分为内容要点,对“通信电子电路”课程中的基本教学内容特别是重点和难点内容进行了系统的阐述和归纳总结,使读者更进一步理解和掌握该课程的知识。第三部分为典型例题分析,将该章中的重要内容通过例题分析给出一个较好的解题思路和解题技巧,可以使读者提高分析问题和解决问题的能力。第四部分为思考题与习题解答,将教材中全部的思考题与习题都进行了较为详尽的分析和解答,该部分覆盖了教学中大部分知识点,题型主要包括问答题和计算题。第五部分为自测题,包括填空题、判断题及问答题,使读者通过自测题检查和了解掌握基本概念的情况。另外,本书还给出了综合测试题及答案以及自测题部分参考答案,可全面测试读者对“通信电子电路”知识点的理解和掌握,并帮助读者加深对基本概念的理解、掌握基本的解题方法。

本书既重视理论分析,又注意讲清物理概念,分析计算详尽,便于教与学,且易读易懂,便于自学。

本书由于洪珍主编,于洪珍教授编写了第 1,3,4,5,6,7,8 章,王艳芬副

教授编写了第 2,9 章,王刚同志参与了全书的校对。

衷心感谢为本书编写付出辛勤劳动的同志,感谢清华大学出版社的大力支持和帮助,特别感谢佟丽霞和赵从棉编辑提出的宝贵意见。

由于编者水平有限,加上时间紧张,书中肯定存在不少问题和错误,诚挚希望广大读者批评指正。

编者

2005 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本章重点	1
1.2 内容要点	1
1.2.1 通信系统的概念	1
1.2.2 无线电波的传播特性	2
1.2.3 无线电波的频段划分	2
1.2.4 调制的通信系统	3
1.2.5 本课程的主要内容	4
1.3 典型例题分析	4
1.4 思考题与习题解答	5
1.5 自测题	5
第 2 章 小信号调谐放大器	7
2.1 本章重点	7
2.2 内容要点	7
2.2.1 概述	7
2.2.2 LC 谐振回路	8
2.2.3 单调谐放大器	13
2.2.4 晶体管高频等效电路及频率参数	15
2.2.5 高频调谐放大器	18
2.2.6 调谐放大器的级联	20
2.2.7 高频调谐放大器的稳定性	23
2.2.8 集中选频小信号调谐放大器	24
2.3 典型例题分析	27
2.4 思考题与习题解答	29
2.5 自测题	41

第3章 高频调谐功率放大器	43
3.1 本章重点和难点	43
3.2 内容要点	43
3.2.1 概述	43
3.2.2 调谐功率放大器的工作原理	44
3.2.3 功率和效率	47
3.2.4 调谐功率放大器的工作状态分析	49
3.2.5 调谐功率放大器的实用电路	54
3.2.6 功率晶体管的高频效应	58
3.2.7 倍频器	59
3.2.8 集成高频功率放大电路及应用简介	60
3.3 典型例题分析	60
3.4 思考题与习题解答	63
3.5 自测题	69
第4章 正弦波振荡器	71
4.1 本章重点和难点	71
4.2 内容要点	71
4.2.1 概述	71
4.2.2 反馈型正弦波自激振荡器基本原理	71
4.2.3 三点式LC振荡器	72
4.2.4 改进型电容三点式电路	74
4.2.5 振荡器的频率稳定问题	76
4.2.6 石英晶体振荡器	77
4.3 典型例题分析	80
4.4 思考题与习题解答	82
4.5 自测题	85
第5章 振幅调制与解调	87
5.1 本章重点和难点	87
5.2 内容要点	87
5.2.1 概述	87
5.2.2 调幅信号的分析	88
5.2.3 普通调幅波的产生电路	91
5.2.4 普通调幅波的解调电路	98
5.2.5 抑制载波调幅波的产生和解调电路	100
5.3 典型例题分析	104

5.4	思考题与习题解答	107
5.5	自测题	117
第6章	角度调制与解调	118
6.1	本章重点和难点	118
6.2	内容要点	118
6.2.1	引言	118
6.2.2	调角波的性质	119
6.2.3	调频信号的产生	121
6.2.4	调频电路	122
6.2.5	调频波的解调	125
6.3	典型例题分析	131
6.4	思考题与习题解答	135
6.5	自测题	140
第7章	变频器	141
7.1	本章重点和难点	141
7.2	内容要点	141
7.2.1	概述	141
7.2.2	变频器的基本原理	142
7.2.3	晶体三极管变频电路	143
7.2.4	变频干扰	144
7.2.5	超外差接收机的统调与跟踪	146
7.2.6	用模拟乘法器构成的混频器	146
7.3	典型例题分析	147
7.4	思考题与习题解答	149
7.5	自测题	154
第8章	锁相环路及其他反馈控制电路	155
8.1	本章重点和难点	155
8.2	内容要点	155
8.2.1	锁相环路(PLL)的基本原理与数学模型	155
8.2.2	集成锁相环芯片	161
8.2.3	锁相环路的应用	162
8.3	典型例题分析	164
8.4	思考题与习题解答	165
8.5	自测题	169

第 9 章 电噪声及其抑制	170
9.1 本章重点	170
9.2 内容要点	170
9.2.1 概述.....	170
9.2.2 电阻热噪声.....	171
9.2.3 晶体管的噪声及其等效电路.....	172
9.2.4 噪声度量.....	174
9.2.5 减小电子电路内部噪声影响、提高输出信噪比的方法	177
9.3 典型例题分析	178
9.4 思考题与习题解答	179
9.5 自测题	184
附录 A 综合测试题及答案	185
附录 B 自测题部分参考答案	194
参考文献	197

第 1 章 绪 论

1.1 本章重点

- (1) 通信系统的概念;
- (2) 无线电波的传输特性;
- (3) 调制的通信系统;
- (4) 无线电广播调幅发射机和超外差接收机;
- (5) 本课程的内容简介及要求。

1.2 内容要点

1.2.1 通信系统的概念

通信的任务是传递信息,传输信息的系统称为“通信系统”。

任何一个通信系统,都是从一个称为信息源的时空点向另一个称为信宿的目的点(用户)传送信息。通信系统是指实现这一通信过程的全部技术设备和信道的总和。通信系统种类很多,它们的具体设备和业务功能可能各不相同,然而经过抽象和概括,均可用图 1-1 所示的基本组成方框图表示。所以一个完整的通信系统应包括信息源、发送设备、信道、接收设备和受信装置五部分,如图 1-1 所示。

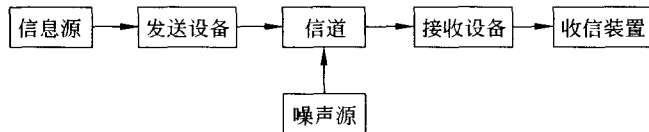


图 1-1 通信系统组成方框图

信道即传输信息的通道,或传输信号的通道。概括起来有两种,即有线信道和无线信道。有线信道包括架空明线、电缆、光缆等;无线信道可以是传输无线电波的自由空间,如地球表面的大气层、水、地下及宇宙空间等。

1.2.2 无线电波的传播特性

传播特性指的是无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。不同频段的无线电信号,其传播特性不同。同一信道对不同频率的信号传播特性是不同的。例如,在自由空间媒介里,电磁能量是以电磁波的形式传播的,而不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。

传播方式主要有直射传播、绕射(地波)传播、折射和反射(天波)传播及散射传播等。决定传播方式和传播特点的关键因素是无线电信号的频率。例如,1.5MHz 以下的电磁波可以绕着地球的弯曲表面传播,称为地波。又如,对于 1.5~30MHz 的电磁波,由于频率较高,地面吸收较强,用表面波传播时衰减很快,它主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波。再如,对于 30MHz 以上的电磁波,由于频率很高,表面波的衰减很大,电磁波穿入电离层也很深,它就会穿透电离层传播到宇宙空间而不能反射回来,因此不用表面波和天波传播方式,而主要由发射天线直接辐射至接收天线,沿空间直线传播,称为空间波。由于地球表面的弯曲,空间波传播的距离受限于视距范围。架高发射天线、利用通信卫星可以增大其传输距离。

综上所述,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(反射和折射)传播为主。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。

还需要强调说明的是,无线电传播一般都要采用高频(射频)才适于天线辐射和无线传播。理论和实践都证明:只有当天线的尺寸大到可以与信号波长相比拟时,天线才具有较高的辐射效率。这也是为什么要把低频的调制(基带)信号调制到较高的载频上的原因之一。

1.2.3 无线电波的频段划分

在各种无线电系统中,信息是依靠高频无线电波来传递的,那么应该如何选择高频载波的频率呢?我们知道,频率从几十千赫至几万兆赫的电磁波都属于无线电波,所以它的频率范围是很宽的。为了便于分析和应用,习惯上将无线电的频率范围划分为若干个区域,即对频率或波长进行分段,称为频段或波段。

无线电波在空间传播的速度是 3×10^8 m/s。电波在一个振荡周期 T 内的传播距离叫波长,用符号 λ 表示。波长 λ 、频率 f 和电磁波传播速度 c 的关系可用下式表示:

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

这是电磁波的一个基本关系式。知道了高频振荡的频率 f ,利用式(1-1)就可以算出波长 λ 。如果 c 的单位是 m/s, f 的单位是 Hz,那么波长的单位就是 m。

表 1-1 为无线电波的波(频)段划分及其用途表。其中米波和分米波有时合称为超短波。因为不同频段信号的产生、放大和接收的方法不同,传播的方式也不同,因而它们的应用范围也不同。

表 1-1 无线电波的波(频)段划分及其用途表

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要用途或场合
超长波	$10^8 \sim 10^4$ m	3Hz~30kHz	VLF(甚低频)	音频、电话、数据终端
长波	$10^4 \sim 10^3$ m	30~300kHz	LF(低频)	导航、信标、电力线通信
中波	$10^3 \sim 10^2$ m	300kHz~3MHz	MF(中频)	AM(调幅)广播、业余无线电
短波	$10^2 \sim 10$ m	3~30MHz	HF(高频)	移动电话、短波广播、业余无线电
米波(超短波)	10~1m	30~300MHz	VHF(甚高频)	FM(调频)广播、TV(电视)、导航移动通信
分米波	100~10cm	300MHz~3GHz	UHF(超高频)	TV、遥控遥测、雷达、移动通信
厘米波	10~1cm	3~30GHz	SHF(特高频)	微波通信、卫星通信、雷达
毫米波	10~1mm	30~300GHz	EHF(极高频)	微波通信、雷达、射电天文学

应该指出,各波段的划分是相对的,因为各波段之间并没有显著的分界线,但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。例如,从使用的元器件以及电路结构与工作原理等方面来说,中波、短波和米波段基本相同,但它们和微波波段则有明显的区别。前者采用的元件大都是通常的电阻器、电容器和电感线圈等,在器件方面主要采用一般的晶体二极管、三极管、场效应管和线性组件等;而后者采用的元件是同轴线、光纤和波导等,在器件方面除采用晶体管、场效应管和线性组件外,还需要特殊器件如调速管、行波管、磁控管及其他固体器件。

从表中可以看出,频段划分中有一个“高频”段,其频率范围为 3~30MHz,这是“高频”的狭义定义。本书涉及的频段是从中频(MF)到超高频(UHF)的频率范围。

1.2.4 调制的通信系统

尽管在实际工作中需要传送的信号是多种多样的,例如代表话音的信号就是由许多不同频率的低频信号组成;又如风压、风速、水位、瓦斯含量等测量数据的信号,应能反应出不同的数量,但是根据要传送的信号是否要采用调制,可将通信系统分为基带传输和调制传输两大类。

基带传输是将基带信号直接传送,由于从消息变换而来的基带信号通常具有较低的频率(有些资料称载频为高频信号,称基带信号为低频信号),大多不适宜直接在信道中传输,而必须先经过调制。

所谓调制就是在传送信号的一方(发送端),用我们所要传送的对象(例如话音信号)去控制载波的幅度(或频率或相位),使载波的幅度(或频率或相位)随要传送的对象信号而变,这里对象信号本身称为“调制信号”,调制后形成的信号称为“已调信号”。调制使幅度变化的称“调幅”,使频率变化的称“调频”,使相位变化的称“调相”。

所谓解调,就是在接收信号的一方(接收端),从收到的已调信号中把调制信号恢复出来。调幅波的解调叫“检波”,调频波的解调叫“鉴频”,解调是其统称。以上介绍的就是三

种基本的调制方式——调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)。

调制的通信系统应用广泛,典型的是无线电广播发送和接收系统。

应当指出,尽管要传输的信息多种多样,如声音、图像和数据等,但把它们转换为电信号后,可以归纳为两大类,一类是模拟信号,另一类是数字信号。模拟信号是指电信号的某一参量的取值范围是连续的,如话筒产生的话音电压信号。模拟信号通常是时间连续函数,也有时间离散函数的情况,但取值一定是连续的。数字信号是指电信号的某一参量携带着离散信息,其取值是有限个数值,如电报信号、数据信号等。

在数字通信系统中,传输的是数字信号。当用数字信号进行调制时,通常称为键控。三种基本的键控方式是振幅键控(ASK)、频率键控(FSK)和相位键控(PSK)。这些内容将在通信原理课程中进行介绍。

1.2.5 本课程的主要内容

通信电子电路课程的主要内容有:谐振回路、小信号调谐放大器、调谐功率放大器、倍频器、LC 正弦波振荡器、变频器、振幅调制及检波电路、频率调制及鉴频电路、锁相环以及通信电子电路的应用实例。着重讨论发送设备和接收设备各单元的工作原理和组成,以及构成发送、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型电路和分析方法。

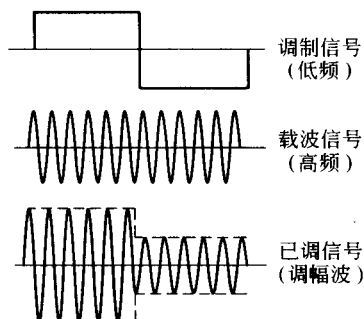
1.3 典型例题分析

例 1-1 无线通信为什么要进行调制?

答 若信号频率为 1kHz,根据 $\lambda = \frac{c}{f}$,其相应波长为 300km,若采用 1/4 波长的天线,就可以算出天线长度需要 75km,制造这样的天线是很困难的。

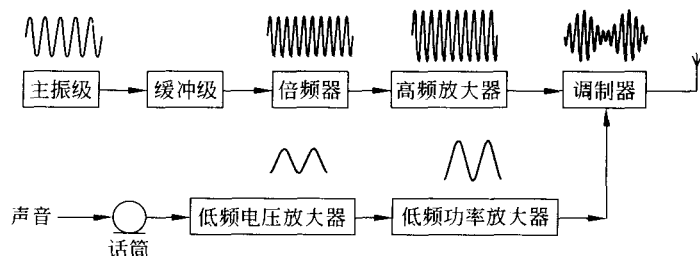
只有天线实际长度与电信号的波长相比拟时,电信号才能以电磁波形式有效地辐射,这就要求原始电信号必须有足够高的频率。

例 1-2 画出用矩形波进行调幅时已调波波形。

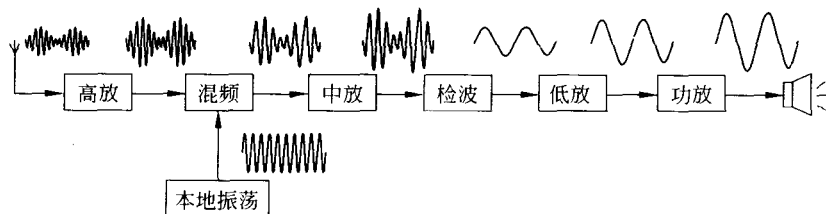


1.4 思考题与习题解答

1-1 画出无线电广播发射调幅系统的组成方框图以及各方框图对应的波形。



1-2 画出无线电接收设备的组成方框图以及各方框图对应的波形。



1-3 无线通信为什么要进行调制?

答 详见本章典型例题 1-1 分析。

1-4 FM 广播、TV 以及导航移动通信均属于哪一波段通信?

答 均属于超短波波段通信。

1-5 画出用矩形波进行调幅时已调波波形。

答 详见本章典型例题 1-2 分析。

1.5 自测题

1. 填空题

- (1) 一个完整的通信系统应包括_____，_____，_____，_____，_____。
- (2) 在接收设备中，检波器的作用是_____。
- (3) 调制是用音频信号控制载波的_____，_____，_____。
- (4) 无线电波传播速度固定不变，频率越高，波长_____，频率_____，波长越长。
- (5) 短波的波长较短，地面绕射能力_____，且地面吸收损耗_____，不宜_____传播，短波能被电离层反射到远处，主要以_____方式传播。
- (6) 波长比短波更短的无线电波称为_____，不能以_____和_____方式传

播,只能以_____方式传播。

2. 判断题

- (1) 低频信号可直接从天线有效地辐射。
- (2) 高频电子技术所研究的高频工作频率范围是 $300\text{kHz}\sim 3000\text{MHz}$ 。
- (3) 为了有效地发射电磁波,天线尺寸必须与辐射信号的波长相比拟。
- (4) 电视、调频广播和移动通信均属于短波通信。

第 2 章 小信号调谐放大器

2.1 本章重点

并联谐振回路的选频作用,谐振回路的接入方式,晶体管高频等效电路,混合 Π 等效电路,晶体管 Y 参数等效电路,晶体管的高频放大能力及频率参数,高频单调谐放大器的选频功能和谐振电压放大倍数计算,多级单调谐回路放大器。

2.2 内容要点

2.2.1 概述

小信号调谐放大器是构成无线电通信设备的主要电路,其作用是对信道中的微弱高频小信号进行不失真的放大。它在无线电接收机中主要用做高频和中频选频放大,高频调谐放大器的集电极负载为可变频率调谐,而中频调谐放大器的集电极负载为固定频率调谐,如在第 1 章绪论中介绍的超外差调幅接收机框图中,高放就是负载为可变调谐的高频调谐放大器,而中放则为固定调谐的中频调谐放大器。调幅接收机的中频为 465kHz,调频接收机的中频为 10.7MHz。

调谐放大器的集电极负载为调谐回路(如 LC 调谐回路)。它不仅具有放大作用,而且还有选频功能。这种放大器对工作在谐振频率的信号具有最强的放大作用,而对其他远离谐振频率的信号,放大作用很差。调谐放大器的频率特性如图 2-1 所示。

对小信号调谐放大器的主要要求是:①有足够高的增益;②满足选择性和通频带要求;③稳定性与噪声系数要好;④动态范围要宽。

小信号调谐放大器的主要性能与谐振回路的特性密切相关,所以专门用一节来讨论了谐振回路的重要特性。且在调谐放大器中,谐振回路往往是以并联的方式出现在电路中,因此主要讨论的是并联谐振回路,但作为内容的完整性,教材中也给出了串联谐振回路的特性。

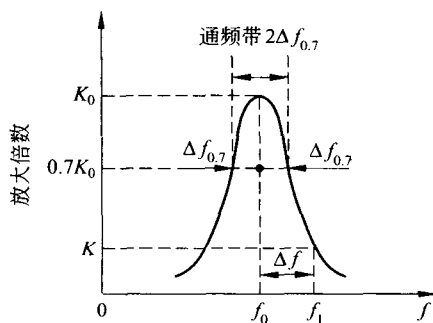


图 2-1 调谐放大器的频率特性

2.2.2 LC 谐振回路

1. 谐振回路的基本特性

谐振回路的主要特点是具有选频作用。 LC 谐振回路由电感和电容组成。按电感、电容与外接信号源连接方式的不同,可分为串联和并联谐振回路两种类型,电路图如图 2-2 所示。

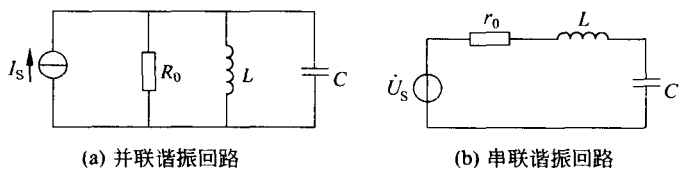


图 2-2 谐振回路

(1) 谐振回路的等效导纳、等效阻抗

并联回路:回路的等效导纳

$$Y = G_0 + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (2-1)$$

串联回路:回路的等效阻抗

$$Z = r_0 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2-2)$$

(2) 谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3)$$

(3) 谐振电阻

并联回路:回路处于谐振状态时,回路导纳最小,阻抗最大,回路呈现为纯电阻。则称回路谐振时的电阻 R_0 为并联谐振回路的谐振电阻。

串联回路:回路处于谐振状态时,回路阻抗最小,导纳最大,回路呈现为纯电阻。则称回路谐振时的电阻 r_0 为串联谐振回路的谐振电阻。

(4) 回路的品质因数

并联回路:

$$Q = \frac{R_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R_0}{\omega_0 L} = R_0 \omega_0 C \quad (2-4)$$

串联回路:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r_0} = \frac{\omega_0 L}{r_0} = \frac{1}{\omega_0 C r_0} \quad (2-5)$$

品质因数 Q 值包含了回路三个元件参数 (L, C, R_0 或 L, C, r_0), 反映了三个参数对回路特性的影响, 是描述回路特性的综合参数。

(5) 回路的阻抗特性

并联回路:

$$|Z| = \frac{1}{|Y|} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}} \quad (2-6)$$

当谐振即 $f = f_0$ 时, 回路阻抗最大且为纯电阻, 失谐时阻抗变小, $f < f_0$ 时回路呈感性, $f > f_0$ 时回路呈容性。

串联回路:

$$|Z| = r_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2} \quad (2-7)$$

当谐振即 $f = f_0$ 时, 回路阻抗最小且为纯电阻, 失谐时阻抗变大, $f < f_0$ 时回路呈容性, $f > f_0$ 时回路呈感性。

(6) 谐振曲线

主要讨论并联谐振回路。因为并联谐振回路的幅频特性曲线表达式为

$$\frac{U}{U_m} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}}$$

在谐振点附近, 因为 $\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f+f_0)(f-f_0)}{f_0 f} \approx 2 \frac{\Delta f}{f_0}$, 所以上式可简化为

$$\frac{U}{U_m} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta f}{f_0} \right)^2}} \quad (2-8)$$

式中, Δf 为信号频率偏离谐振点的数量 ($\Delta f = f - f_0$)。 $\frac{U}{U_m}$ 称为谐振曲线的相对抑制比, 它反映了回路对偏离谐振频率的抑制能力。

由式(2-8)可以看出 Q 对谐振曲线的影响, 对于同样频偏 Δf , Q 越大, $\frac{U}{U_m}$ 值越小, 谐振曲线越尖锐。