

高职高专电子信息专业教材

高频电子电路

张 澄 主编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

高频电子电路 / 张澄主编. —北京: 人民邮电出版社, 2006.4

高职高专电子信息专业教材

ISBN 7-115-14347-1

I. 高... II. 张... III. 高频—电子电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 016609 号

内 容 提 要

本书是针对高等职业教育的特点, 结合高职学生的特点和多年来高职教育的实践经验编写而成的。全书共分为 7 章, 第 1 章高频小信号放大器; 第 2 章正弦波振荡器; 第 3 章调幅、检波、混频; 第 4 章高频功率放大器; 第 5 章角度调制与解调; 第 6 章反馈控制电路; 第 7 章高频电路应用举例。在编写上力求通俗易懂、简化数学推导过程、适当增加例题和习题练习, 适当淡化理论, 强调应用。使学生通过学习本课程, 掌握高频电子电路的基本分析方法和相关应用技术, 为学好今后的专业课程打好基础。

本书的特点是系统性强, 内容编排连贯, 突出基本概念、基本原理, 减少不必要的数学推导和计算, 各章给出了相关内容的习题, 以帮助学生透彻地理解和掌握有关知识。

本书可以作为通信、电子信息、电子工程、自动化、计算机等专业高职高专、函授和成人教育的教材, 也可供有关专业技术人员参考。

高职高专电子信息专业教材

高 频 电 子 电 路

-
- ◆ 主 编 张 澄
责任编辑 王晓明
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.25
字数: 317 千字 2006 年 4 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2006 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14347-1/TN · 2670

定价: 21.00 元

读者服务热线: (010)67129258 印装质量热线: (010)67129223

丛书前言

随着我国教育事业发展的不断深入,高等职业教育应运而生,并得到迅猛地发展。为了深化职业教育的改革,完善职业教育体系,培养 21 世纪专业应用型人才,急需编写一批适应高职高专教育特色的教材。按照教育部 2004 年底颁布的《普通高等学校高职高专教育指导性专业目录》对高职高专教材编写的要求,人民邮电出版社与天津通信学会高等教育工作委员会共同策划、组织天津市有关高职高专院校的多年来从事第一线教学的骨干教师,编写了这套《高职高专电子信息专业教材》。

本套教材根据高职高专学生的培养目标,着重强调培养学生的基本技能,强化学生的实践能力和动手能力,突出理论联系实际。按照高职高专教学的要求,本套教材在编写时加强了基本概念的讲授,使学生能够运用所学的基本知识分析和解决问题。教材中还适当介绍了一些新技术、新器件和新的实验方法,目的是扩大学生的知识面,培养学生的创新意识。

本套教材根据高职高专学生的特点,在内容安排上力求做到精简内容,突出重点;尽量采用学生易于接受的方法进行编写。教材中的知识点由浅入深,循序渐进;理论性较强的内容尽可能采用图解分析或例题分析的方法。此外,在教材中还编写了较多的例题、思考题与习题,以便学生能够系统地掌握所学的基础理论知识。

本套教材在编写过程中得到天津通信学会高等教育工作委员会领导和天津市有关高职高专院校的大力支持,在此表示衷心的感谢。

目前,本套教材的编写还处于起步阶段,由于缺乏实际的编写经验,在教材的选材和编写过程中难免存在各种问题,衷心希望选用这套教材的院校师生提出批评指正,以便进一步改进这套教材内容,使之更加符合高职高专院校电子信息专业教学的实际要求。

前 言

为满足全国高职院校计算机及弱电类专业教学的要求，加快我国应用型人才培养的步伐，人民邮电出版社与天津通信学会高等教育委员会共同策划、出版了这套《高职高专电子信息专业教材》，《高频电子线路基础》就是这套教材中的一本。

本书系统地介绍了高频电子电路的基本内容，重点放在与通信电路分析有关的基本理论和基本方法上，对通信系统涉及到的知识也进行了简单介绍。

考虑到高职高专院校的特点是培养学生的实际操作技能和提高学生分析问题、解决问题的能力。因此，本书作者根据多年教学实践，在编写中作如下安排：

1. 根据高职高专院校学生的特点，在书中着重强调基本概念、基本单元电路的分析及其应用，略去了不必要的冗长的数学推导和分析。编写了适当的例题、思考题与练习题，以便学生能系统地掌握所学的基础理论知识。

2. 精简内容、突出重点。例如书中简化了频率变换及模拟乘法器部分，不再像其他教材一样将该部分内容作为一章进行详尽地分析与推导。而是在分析电路时简单介绍进行频率变换的几种常用方法。

3. 打破传统，合理编排章节内容。为了便于学生理解和接受，将线性电路放在前面，非线性电路放在后面。例如第1章为小信号谐振放大器；第2章为正弦振荡器；第3章为调幅、检波及混频；第4章为高频功率放大器；第5章为角度调制与解调，等等。

书中有些内容是根据通信技术的发展而介绍的加深（或加宽）的内容，可根据专业需要和学时数的多少选择使用。

本书第1、3、5、6章由天津理工大学姜道连老师编写，第2、4、7章由天津电子信息职业技术学院张澄编写，张澄负责全书的统稿工作并担任主编。本教材由天津电子信息职业技术学院的齐虹配电子教案，如需使用电子教案，可登录人民邮电出版社网站（www.ptpress.com.cn）。

由于编者水平有限，加之时间紧迫，书中难免存在问题或错误，敬请各位读者批评指正。

编者

2006年1月

目 录

绪论	1
第 1 章 高频小信号放大器	4
1.1 高频小信号放大器概述	4
1.2 谐振回路的特性	8
1.2.1 谐振回路的选频特性	8
1.2.2 谐振回路的阻抗变换特性	14
1.3 晶体管高频小信号等效电路	17
1.3.1 y 参数等效电路	17
1.3.2 混合 π 等效电路	18
1.3.3 晶体管的高频参数	18
1.4 晶体管谐振放大器	20
1.4.1 单调谐谐振回路放大器	20
1.4.2 多级单调谐回路谐振放大器	24
1.4.3 双调谐回路放大器	25
1.4.4 小信号谐振放大器的稳定性	28
1.4.5 双栅场效应管高频放大器	29
1.5 集中选频放大器	30
1.5.1 集中选频滤波器	30
1.5.2 集中选频放大器	35
习题	36
第 2 章 正弦波振荡器	39
2.1 概述	39
2.2 反馈振荡原理	39
2.2.1 反馈振荡原理及反馈型振荡器的组成	39
2.2.2 起振条件和平衡条件	40
2.2.3 振荡器的稳定条件	41
2.3 LC 振荡器	42
2.3.1 互感耦合振荡电路	43
2.3.2 LC 三点式振荡电路	43
2.3.3 改进型电容三点式振荡电路	45
2.4 振荡器的频率稳定度	47

2.4.1	频率稳定度的定义	47
2.4.2	频率变化的原因及稳频措施	48
2.5	晶体振荡器	49
2.5.1	石英晶体的电特性	49
2.5.2	石英晶体振荡电路	49
2.6	RC 振荡器	51
2.6.1	RC 串并联网络的选频特性	51
2.6.2	文氏桥振荡器	53
	习题	54
第 3 章	调幅、检波及混频	59
3.1	概述	59
3.2	实现频率变换的方法	59
3.2.1	利用非线性器件进行频率变换	59
3.2.2	利用模拟乘法器进行频率变换	60
3.3	振幅调制	62
3.3.1	调幅波的基本概念及数学表达式	62
3.3.2	几种调幅波的特点及实现调幅的方法	66
3.4	调幅电路	70
3.4.1	低电平调幅电路	70
3.4.2	高电平调幅	72
3.4.3	其他几种调幅波电路	73
3.5	检波电路	76
3.5.1	包络检波电路	77
3.5.2	同步检波器	80
3.6	混频	81
3.6.1	混频的基本原理	81
3.6.2	混频干扰及其克服干扰的措施	82
3.6.3	混频电路	84
3.7	数字振幅调制与解调	89
3.7.1	振幅键控 (ASK)	89
3.7.2	ASK 信号的解调	91
	习题	91
第 4 章	高频功率放大器	95
4.1	概述	95
4.2	谐振高频功率放大器	96
4.2.1	谐振高频功率放大器的基本电路及特点	96
4.2.2	谐振高频功率放大器的工作原理	97

4.2.3	谐振高频功率放大器的分析方法	98
4.2.4	谐振高频功率放大器的特性	103
4.2.5	谐振高频功率放大器的电路组成	111
4.3	丙类倍频放大器	117
4.3.1	丙类倍频器的基本原理	118
4.3.2	晶体管倍频器电路	119
4.4	宽频带高频功率放大器	122
4.4.1	高频传输线变压器	122
4.4.2	功率合成	126
	习题	131
第5章	角度调制与解调	133
5.1	概述	133
5.2	调角波的基本特性	134
5.2.1	调角波的基本概念	134
5.2.2	调角波的数学表达式	136
5.2.3	调角波的频谱与带宽	137
5.3	角度调制电路	140
5.3.1	直接调频电路	141
5.3.2	间接调频——由调相实现调频	149
5.4	调角信号的解调	154
5.4.1	鉴相器	154
5.4.2	鉴频器	159
	习题	170
第6章	反馈控制电路	172
6.1	概述	172
6.2	自动增益控制电路	173
6.2.1	AGC 电路的组成、工作原理和性能分析	174
6.2.2	放大器的增益控制	176
6.2.3	电路类型	179
6.3	自动频率控制电路	180
6.3.1	工作原理	180
6.3.2	自动频率微调电路	184
6.4	锁相环路及频率合成	185
6.4.1	锁相环路的基本原理	185
6.4.2	频率合成的基本原理	186
6.4.3	锁相环的应用	189
	习题	191

第 7 章 高频电路应用举例	193
7.1 概述	193
7.2 高频电路在 GSM 手机中的应用	193
7.2.1 GSM 手机的组成	193
7.2.2 低噪声高频放大电路	194
7.2.3 RX VCO (压控振荡器) 电路	195
7.2.4 混频与中频放大电路	196
7.2.5 激励放大电路	197
7.2.6 预放电路	197
7.2.7 功放电路	198
7.3 电视机高频调谐器	199
7.3.1 VTS-7ZH7 电路组成	199
7.3.2 VHF 电路	201
7.3.3 UHF 电路	201

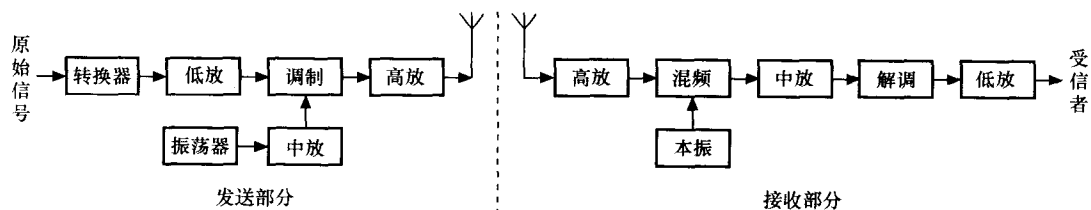
绪 论

高频电子线路是低频电子线路的后续课程，是无线电技术、无线电通信以及相关专业的入门十分重要的专业基础课之一。

所谓“高频”是相对的，究竟高、低频的界定频率值是多少，并无严格定义。比如 AM 广播接收机中，接收的载频范围为 535~1605kHz，相对于音频而言就是高频。一般我们认为，只要频率高到 PN 结电容及分布参数的影响不能忽略，但仍可用“电路”的概念来分析的频率范围为“高频”的范畴。本书所讨论的“高频”范畴大约为几十千赫至几十兆赫。

同低频电子电路一样，有源器件仍是电路的核心。但是当信号的频率有较大的变化时，电路的性能会有很大的差异。在低频时，晶体管可以用纯阻性网络模拟，电路大多是线性应用。而在高频段，由于结电容及分布参数不能再忽略，晶体管不可以再用纯阻性网络模拟，因而分析方法会有很大的区别。在分析低频电路时，我们通常采用时域分析，而在分析高频电路时，由于电路的非线性，仅采用时域分析是不够的，还要进行频域分析。

高频电子线路之所以是无线电技术、通信以及相关专业的入门十分重要的专业基础课之一，是因为它几乎涵盖了信号的传送和接收所有的单元电路。以无线电通信系统为例，其组成框图如下图所示。



无线电通信系统组成框图

(1) 发送部分：原始信号可以是声音或图像以及其他物理量，经转换器将它们转换为电信号，这类信号的频率较低，相对于载频而言属于低频。它们具有一定的频带宽度，我们称它们为基带信号。该信号通常很微弱，须进行低频放大。

无线电通信，是以自由空间作为信道、信号是以电磁波的形式传送的。由天线理论可知，只有当天线的长度与要发送的电信号的波长可以比拟时，天线才能将电信号转换为电磁波有效地辐射。例如，语音信号的频率为 300~3400Hz，其对应的波长为 1000~88km，试想，如此巨大的天线我们能否建造？答案当然是否定的。此外，要传送的原始信息若是多个相同的物理量，例如语音信号，经转换调制后，它们会在信道中彼此重叠、干扰，使接收机无法选择要接收的信号。可见，要进行无线电通信，必须采用高频振荡信号作为运载工具，使其波长与天线的长度相近，将携带信息的低频信号“装载”到高频振荡信号上，这一过程称为调制。不同的发射台采用不同频率的高频振荡信号（称为载波）。这样，既解决了天线的尺寸问

题又解决了信号的选择问题。调制后的信号经高频功率放大后送至天线，以电磁波的形式发射出去。有些发射系统将调制与高频功率放大合二为一。

(2) 接收部分：接收天线将收到的微弱高频信号送入高放进行放大，对高放要求是电路要有从众多的信号中选出所需信号的能力。

前面我们提到，当信号的频率较高时，放大器件的性能会发生很大的变化，为了使接收机的性能在整个接收频段内不受输入信号频率变化的影响，将信号进行混频，把不同的载波变换为低于载波的固定频率（称为中频），再送入中频放大器进行放大。这样，当接收不同频率的信号时经过混频器后就变为固定的中频。由于中频放大器所放大的信号频率为一个固定中频，所以，可以很容易地得到令人满意的效果，从而提高整个接收机的性能。当然，所携带的信息不变。

进行中频放大后，必须从已调波中取出携带信息的低频信号，即调制的逆过程，这一过程被称之为解调。带有变频级（混频器与本振的组合）的接收机被称之为超外差或超内差接收机，这取决于中频与本振频率和接收载频之间的关系。目前的接收机均采用超外差或超内差。解调后的信号幅度较低，需要进行低频电压放大、功率放大以推动负载工作。

以上介绍了无线电通信系统的基本构成，实际中，无线电通信系统的类别很多，涉及卫星通信、导航、GPS（全球定位系统）、无线电话、电视广播等。不同种类的通信系统有不同的要求。但不同类别的通信系统的基本组成和基本原理是一致的。不同的通信系统涉及信号的频段不同，为了使大家更清楚、更系统地了解频段的划分和利用，下表给出了频段划分命名及用途。

频段划分命名及用途

频段	频率范围	波段	波长范围	主要用途
低频 (L.F)	30~300kHz	长波	$10^4 \sim 10^3 \text{m}$	大气层内中距离通信；地下岩层通信；海上导航
中频 (M.F)	300kHz~3MHz	中波	$10^3 \sim 10^2 \text{m}$	广播；海上导航
高频 (H.F)	3~30MHz	短波	$10^2 \sim 10 \text{m}$	远距离短波通信；短波广播
甚高频 (V.H.F)	30~300MHz	超短波	10~1m	调频广播；电视广播；雷达；导航；移动通信；外空间飞行体（飞机、导弹、卫星）的通信
特高频 (U.H.F)	300MHz~3GHz	分米波	$1 \sim 10^{-1} \text{m}$	电视广播；移动通信；雷达；中、小容量微波接力通信
超高频 (S.H.F)	3~30GHz	厘米波	$10^{-1} \sim 10^{-2} \text{m}$	数字通信；卫星通信；微波通信
极高频 (E.H.F)	30~300GHz	毫米波	$10^{-2} \sim 10^{-3} \text{m}$	微波通信

本教材将讨论高频放大器、振荡器、高频功率放大器、混频电路、模拟调制及其解调、AGC、AFC 电路、锁相环及其频率合成电路。可见，高频电子电路在无线电通信系统中所占的地位是十分重要的。

目前，无线电广播、电视广播常用的无线电波的波段是：国内一般中波调幅广播的频率范围是 550~1605kHz；短波广播的频率范围是 2~24MHz；调频广播的频率范围是 88~108MHz。电视广播使用的频段为“甚高频”和“特高频”两个频段区间。甚高频段有 12 个频道，频率范围是：48.5~223MHz；特高频有 56 个频道，频率范围为：670~958MHz。国际规定的卫星广播电视有 6 个频段。

本教材的特点是：(1) 大部分电路是非线性的；(2) 大部分电路输入输出信号的频率不一

致，即频率变换。(3) 各单元电路之间有关联性。比如，本振与混频电路；调制与解调电路；高频振荡与调制电路等等。(4) 分析方法多样，也较为复杂。既有时域分析又有频域分析；有时要借助于复杂的数学分析。比如，在分析调频波的频谱时，要用到贝塞尔函数。(5) 电路的实用性较强，但由于频率较高，元器件及电路的分布参数对电路的干扰较严重，因而电路的制作与调试较为困难。(6) 本课程与无线电技术、无线电通信联系非常紧密，随着电子技术的飞速发展，新器件、新技术不断涌现，高频电子技术也随之不断更新、变化。学习本课程，应有一定的知识储备，如电路基础、低频电子电路、高等数学等知识。

第 1 章 高频小信号放大器

1.1 高频小信号放大器概述

在高频电路中，调谐放大器是一种最基本、最常见的电路形式。它是由调谐回路与晶体管相结合而成的，其突出的优点是增益高，有明显的选频性能，广泛地应用于各类接收设备中。它的增益、通频带和选择性，决定了接收机的主要质量指标。

接收机天线所感应的电台的高频信号是很微弱的，一般只有几十微伏到几毫伏，而接收设备内检波器的输入电压，最好能达到 1V 左右。这就是说，要求接收机对高频信号的放大能力要达到 1000 倍至 10 万倍左右，相当于 60~100dB。显然，这就需要先对高频信号进行放大，必要时要用多级高频放大电路。

调谐放大器是高频放大器的一种。它是指负载采用谐振回路的放大电路。接收天线所感应的信号，除了要收听的电台信号以外，还有许多不需要的无线电信号（我们把不需要的信号都称为干扰）。显然如果我们采用没有选择性的放大器进行放大，势必使所要收听的电台声音被淹没在其他电台的干扰声中。为了解决这个问题。通常在晶体管的集电极接上 LC 谐振回路作为选频之用。这样构成的调谐放大器不仅有放大作用，而且具有选频能力。

调谐放大器按它工作时信号幅值的大小可分为大信号调谐放大器和小信号调谐放大器，前者主要用作高频功率放大，常在发送设备中使用。小信号调谐放大电路通常用在各种接收机中，作为高频放大器和中频放大器。这里所以按“信号大小”来分类，是因为对不同大小的信号，应采取不同的分析方法，对大信号必须考虑晶体管的非线性，而对于小信号却可将晶体管当作线性元件处理。

根据小信号调谐放大器所采用的调谐回路是单谐振回路（一个 LC 谐振回路）还是双谐振回路（两个互相耦合的 LC 谐振回路），又可分为小信号单调谐放大器和小信号双调谐放大器。

当然，按照晶体管三个极与输入、输出信号的接法不同，调谐放大器也可有三种组态，即共发射极、共基极和共集电极组态，在广播、电视接收机中常用的是共射极组态。这里只讨论共发射极组态的小信号单调谐放大电路，小信号调谐放大器的主要指标如下：

(1) 电压增益 (A_u) 和功率增益 (G_p)

放大器的增益是调谐放大器的放大能力。高的增益是提高接收机灵敏度所需要的，达到一定的增益是调谐放大器的首要任务。放大器输出电压（或功率）与输入电压（或功率）之比，称为放大器的增益或放大倍数，用 A_u （或 G_p ）表示，有时以 dB 数计算。我们希望每级放大器在中心频率（谐振频率）及通频带处的增益尽量大，使满足总增益的级数尽量少。放大器增益的大小，取决于所用的晶体管、要求的通频带宽度、是否能良好的匹配和稳定的工作等方面。

$A_u = \frac{u_o}{u_i}$, $G_P = \frac{P_o}{P_i}$, 位于中心频率 (谐振频率) 处的相应值用 A_{u0} , G_{P0} 表示。

(2) 通频带 $B=BW=2\Delta f_{0.7}$

由于所放大的信号不只是一个载波频率, 而且还包括载波两旁的边频, 要使无线电信号不失真地传输, 调谐放大器的通频带一定要稍宽于信号所占有的频谱宽度。所以放大器的通频带也是一个重要的指标。

当放大器的负载是谐振回路 (或耦合回路) 时, 放大器的谐振特性和谐振回路的谐振特性是一致的。和共振回路相同, 放大器的电压增益下降到最大值的 0.7 (即 $1/\sqrt{2}$) 时所对应的频率范围, 称为放大器的通频带, 用 $2\Delta f_{0.7}$ 表示, 如图 1-1 所示。

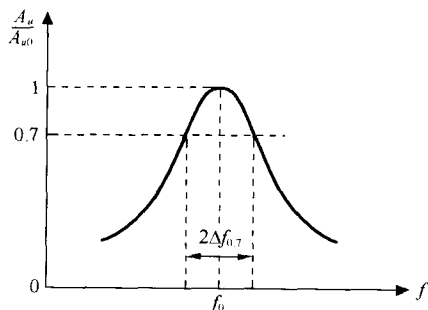


图 1-1 放大器的通频带

(3) 选择性

放大器从各种不同频率的信号 (有用的和有害的) 中选出有用信号, 排除干扰 (有害) 信号的能力, 称为放大器的选择性。选择性指标是针对抑制干扰而言的, 但干扰的情况常常很复杂, 有位于有用信号频率附近电台的干扰 (称邻台干扰), 有某一特定频率的干扰, 又有由于设备本身电子器件非线性产生的交调干扰, 等等。对于不同的干扰有不同的选择性指标要求。选择性的两个基本指标是抑制比和矩形系数。

① 矩形系数 (通常说明邻近波道选择性的好坏)

放大器应该对通频带内的各种信号频谱成分具有同样的放大能力, 而对通频带以外的邻近波道的干扰频率分量, 则应完全抑制不予放大。所以理想的频带放大器频率响应曲线应呈矩形, 但实际的曲线形状则与矩形有较大的差异, 如图 1-2 所示。

为了评定实际曲线的形状接近理想矩形的程度通常引入“矩形系数”这个参数, 用 K_r 表示。

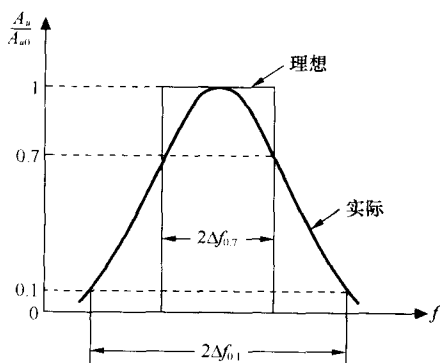


图 1-2 理想的与实际的频率特性

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} \text{ 或 } K_{r0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}}$$

显然矩形系数 K_r 愈接近 1, 则实际曲线愈接近理想矩形, 邻近波道选择性愈好, 滤除邻近波道干扰信号的能力愈强。通常谐振放大器的矩形系数 K_r 约在 2~5 的范围内。

② 抑制比 (或称抗拒比, 通常说明对某些特定组合频率如中频、镜像频率等选择性的好坏)

如图 1-3 所示的谐振曲线, 对信号频率调谐。谐振点 f_0 的放大倍数为 A_{u0} 。若有一干扰

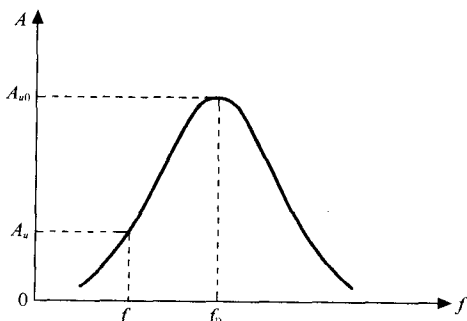


图 1-3 说明抑制比的谐振曲线

其频率为 f_n ，则电路对此干扰的放大倍数为 A_u ，用 $d = \frac{A_{u0}}{A_u}$ 表示放大器对干扰的抑制能力。 d 通常称为对干扰的抑制比（或抗拒比），用 dB 表示，则 $d(\text{dB}) = 20 \lg d$ 。例如， $A_{u0} = 100$ ， $A_u = 1$ 则 $d = 100$ ，或 $d = 40 \text{dB}$ 。

(4) 稳定性

谐振放大器的稳定性是指当放大器的工作状态或条件发生变化时，其主要性能的稳定程度。例如，当温度变化时，会引起直流偏置状态以及晶体管和电路元件的参数改变，导致放大器性能的不稳定。它常表现为放大器的增益改变，中心频率偏移，谐振曲线畸变，甚至放大器自激而完全不能工作。因此要求放大器工作稳定是十分重要的问题。

以上这些要求相互之间既有联系又有矛盾。例如增益和稳定性，通频带和选择性等。因此应根据要求决定主次进行合理的设计和调整。

高频小信号放大电路分为窄频带放大电路和宽频带放大电路两大类。前者对中心频率在几百千赫到几百兆赫，频谱宽度在几千赫到几十兆赫内的微弱信号进行不失真的放大，故不但需要有一定的电压增益，而且需要有选频能力。后者对几兆赫至几百兆赫较宽频带内的微弱信号进行不失真的放大，故要求放大电路的下限截止频率很低（有些要求到零频即直流），上限截止频率很高。

窄频带放大电路由双极型晶体管（以下简称晶体管）、场效应管或集成电路等有源器件提供电压增益，LC 谐振回路、陶瓷滤波器、石英晶体滤波器或声表面波滤波器等器件实现选频功能。它有两种主要类型：以分立元件为主的谐振放大器和以集成电路为主的集中选频放大器。

宽频带放大电路也是由晶体管、场效应管或集成电路提供电压增益。为了展宽工作频带，不但要求有源器件的高频性能好，而且在电路结构上采取了一些改进措施。

从信号所含频谱来看，输入信号频谱与放大后输出信号的频谱是完全相同的。

无线电元件的选择，主要考虑它们在电路中的作用，以及电路对它们的特性提出的要求。这些要求包括参数的大小以及应当达到怎样的精确度和稳定度等，此外，也要考虑体积、重量以及成本等因素。

下面先扼要介绍电子电路的基本元件——电感和电容的参数及其高频特性，作为学习高频技术课程的预备知识。

电感线圈除了有电感特性外，还同时具有电阻及电容特性。尤其当元件工作在高频时，线圈的有效电阻将会明显变大，且随工作频率升高而增加；线圈的电容量虽然不大，但在高频时，其影响可能相当大。

先讨论线圈的电阻，线圈的直流电阻也就是指绕制线圈的导线的直流电阻，它是当导线只通过直流或频率很低的交流时所呈现的电阻，此时导线横截面上电流密度（单位面积上的电流强度）可认为是均匀的。随着频率的逐渐增高，导线横截面上电流分布的不均匀现象会逐渐显著起来。

越接近导体表面，电流密度越大；反之，越往导体内部，电流密度越小。在频率相当高时电流的绝大部分集中在导体表皮的某一薄层内，而导体内部的电流密度却接近于零，也就是说，随着工作频率的增高，流过导体的交流电流向导体表面（“皮肤”）集中，这一现象叫作集肤效应，又称趋肤效应，如图 1-4 所示。

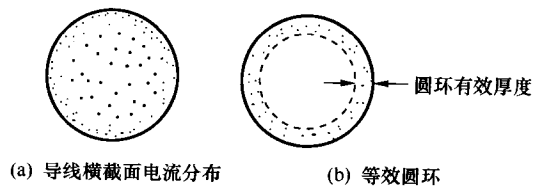


图 1-4 集肤效应示意图

产生集肤效应的原因在电路基础课程中已介绍过，这里不再赘述。从趋肤效应的结果来看，相当于减小了导体的有效面积，从而增加了电阻值，电阻越大，损耗功率越大，线圈在电路中感抗作用就越不明显，这是我们所不希望的。为了减小线圈的电阻值，可采用下述方法：用几根在端点相连的绝缘导线拧成多股线，增加总表面积（收音机输入电路中磁棒上的线圈大多采用这种多股线），或者在铜导线表面镀上银，以减小电阻值。在高频大功率无线电设备中，还可将导体做成空心管状，以节省金属材料，等等。

在实际电感线圈中，除了以上讨论的导体电阻造成的损失外，还有其他原因造成的能量损失。例如，由线圈磁场附近金属物内感应所产生的涡流损失，磁路线圈在磁介质内的磁滞损失，以及由于电磁辐射所引起的能量损失等等。所有这些能量损失都可以用线圈电流通过一个等效电阻 r 所引起的损失等效地表示。所以线圈中的任何损失，均可表现为等效电阻 r 的增加。考虑上述因素的元件电阻值，是在交流运用下的有效电阻，简称为交流电阻，它比直流电阻要大得多。影响线圈交流电阻增加的各因素中，最主要的是趋肤效应。

电感线圈在高频频段除表现出电感 L 的特性外，还具有一定的损耗电阻 r 和分布电容。在分析一般长、中、短波频段电路时，通常忽略分布电容的影响。因而，电感线圈的等效电路可以表示为电感 L 和电阻 r 串联，如图 1-5 (a) 所示。

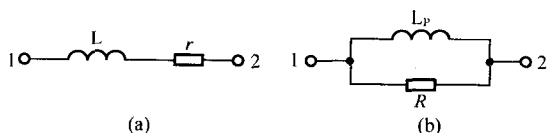


图 1-5 电感线圈的串联等效电路和并联等效电路

在无线电技术中通常不是直接用等效电阻 r ，而是引入线圈的品质因数这一参数来表示线圈及回路的损耗性能，品质因数定义为无功功率与有功功率之比。

设流过电感线圈的电流为 I ，则电感 L 上的无功功率为 $I^2\omega L$ ，电阻 r 上消耗的功率为 I^2r ，得到电感的品质因数

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{I^2\omega L}{I^2r} = \frac{\omega L}{r} \quad (1-1)$$

Q 值是一个比值，它是感抗 ωL 与损耗电阻 r 之比， Q 值越高损耗越小， Q 值通常在几十到一二百左右（一般远大于 1）。

也可以用并联模型，如图 1-5 (b) 所示，此时

$$\begin{aligned} \frac{1}{r + j\omega L} &= \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_p} \\ R &= (1 + Q^2)r \approx Q^2r \\ L_p &= \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)L \approx L \end{aligned} \quad (1-2)$$

所以

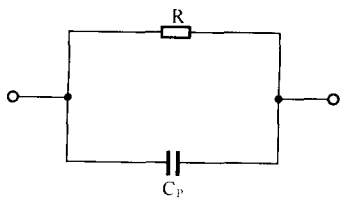


图 1-6 电容器的并联等效电路

类似地，一个实际的电容器除表现电容特性外，也具有损耗电阻和分布电感。在一般分析米波以下频段的谐振回路时，常常只考虑电容和损耗电阻。损耗电阻通常理解为电容的漏电阻，因而，电容器的等效电路可以表示为电容 C_p 和电阻 R 并联，如图 1-6 所示。

为了说明电容器损耗的大小，引入电容器的品质因数 Q ，设回路两端电压为 U ，得到电容的品质因数

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{\frac{U^2}{1/(\omega C_p)}}{\frac{U^2}{R}} = \omega C_p R \quad (1-3)$$

电容器损耗电阻的大小主要由介质材料决定。 Q 值可达几千到几万的数量级，与电感线圈相比，电容器的损耗常常忽略不计。

一个实际的电容器，其等效电路既可以表示为串联形式，也可以表示为并联形式。两种形式可以用阻抗变换的方法证明对外特性是相同的，详见后文。

1.2 谐振回路的特性

LC 谐振回路是高频电路里最常用基本的选频网络。所谓选频是指从各种输入频率分量中选择出有用信号而抑制掉无用信号和噪声，这对于提高整个电路输出信号的质量和抗干扰能力是极其重要的。另外，用 L、C 元件还可以组成各种形式的阻抗变换电路。

LC 谐振回路分为并联回路和串联谐振回路两种形式，其中并联回路在实际电路中用途更广，且二者之间具有一定的对偶关系，所以只要理解并联回路，则串联谐振回路的特性用对偶方法就可以得到。

1.2.1 谐振回路的选频特性

1. 并联谐振回路

LC 并联谐振回路如图 1-7 所示。

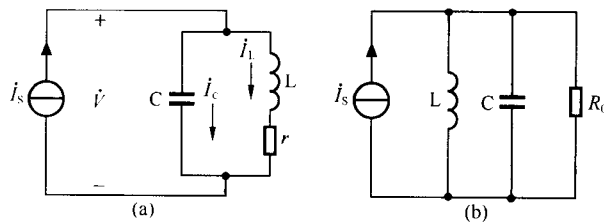


图 1-7 LC 并联谐振回路及其等效电路

图中， r 代表线圈 L 的等效损耗电阻（串联模型）， R_0 为折合到回路两端的等效电阻（并联模型）。由于电容器的损耗很小，图中略去其损耗电阻。

并联谐振回路的并联阻抗为

$$Z_p = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (1-4)$$

等效为

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \quad (1-5)$$

谐振回路的品质因数 Q 来表示回路的损耗, 则:

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}}$$

而在并联谐振回路中, L 、 C 同为储能元件, 并且两者相位相差 180° (参见振荡器部分相关内容), 因此只要计算相同电抗性质 (或同为容性, 或同为感性) 上的无功功率, 所以

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{\frac{U^2}{\omega L}}{\frac{U^2}{R_0}} = \frac{R_0}{\omega L} = \frac{\frac{U^2}{1/(\omega C)}}{\frac{U^2}{R_0}} = \omega C R_0 \quad (1-6)$$

即
$$Q = \frac{R_0}{\omega L} = \omega C R_0 \quad (1-7)$$

同时定义使感抗与容抗相等的频率为并联谐振频率 ω_0 , 令 Z_p 的虚部为零, 求解方程根得

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (1-8)$$

由于一般情况下 $Q \gg 1$, 则式 (1-8) 近似得谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1-9)$$

在 ω_0 处 $Z_p = R_0$ 。

由式 (1-2) 可知 $R_0 = Q^2 r$, 将式 (1-7) 和式 (1-9) 代入, 得 $R_0 = \frac{L}{Cr} = Q \omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C}$, 将上述结果代入式 (1-5) 并考虑实际高 Q 情况得

$$Z_p = \frac{\frac{L}{Cr}}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (1-10)$$

在窄带系统中 $\omega \approx \omega_0$, 即微失谐情况下

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

其中 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, 代入式 (1-10) 得

$$Z_p = \frac{R_0}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}} = \frac{R_0}{1 + j\xi}$$

其中令 $\xi = 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$ 为广义失谐。

可见并联谐振回路两端的阻抗只有在谐振 (即 $\xi=0$) 时才是纯电阻并达到最大值。失谐时并联振荡回路的等效阻抗 Z 包括电阻 R_e 和电抗 X_e 。当 $\omega > \omega_0$ 时, 回路等效阻抗中的电抗是