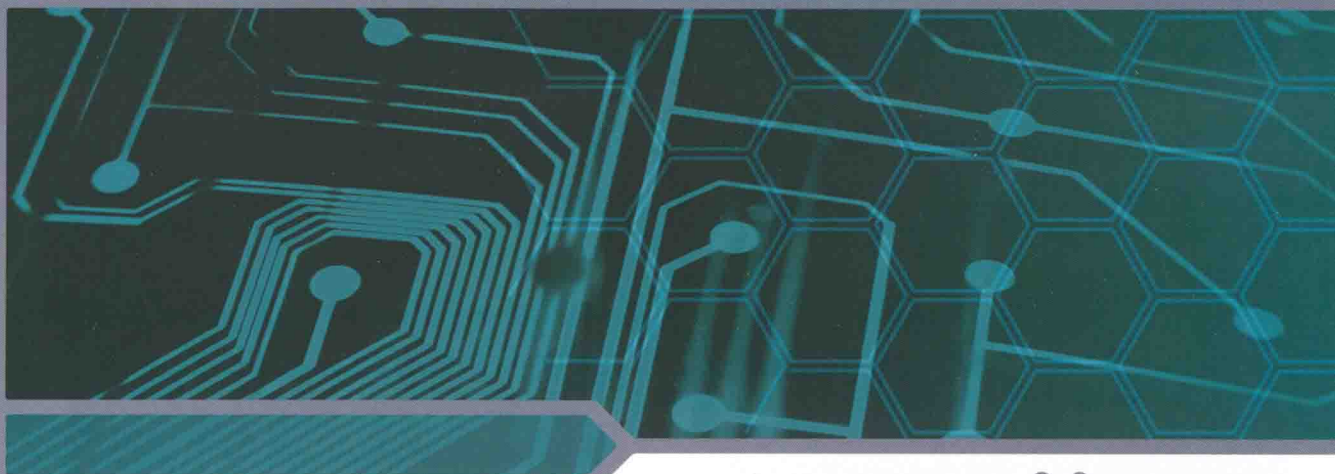




高等职业教育电子信息类专业规划教材

GAO DENG ZHI YE JIAO YU DIAN ZI XIN XI LEI ZHUAN YE GUI HUA JIAO CAI




# 高频电子电路

## (第2版)

张澄 主编

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



高等职业教育电子信息类专业规划教材

GAO DENG

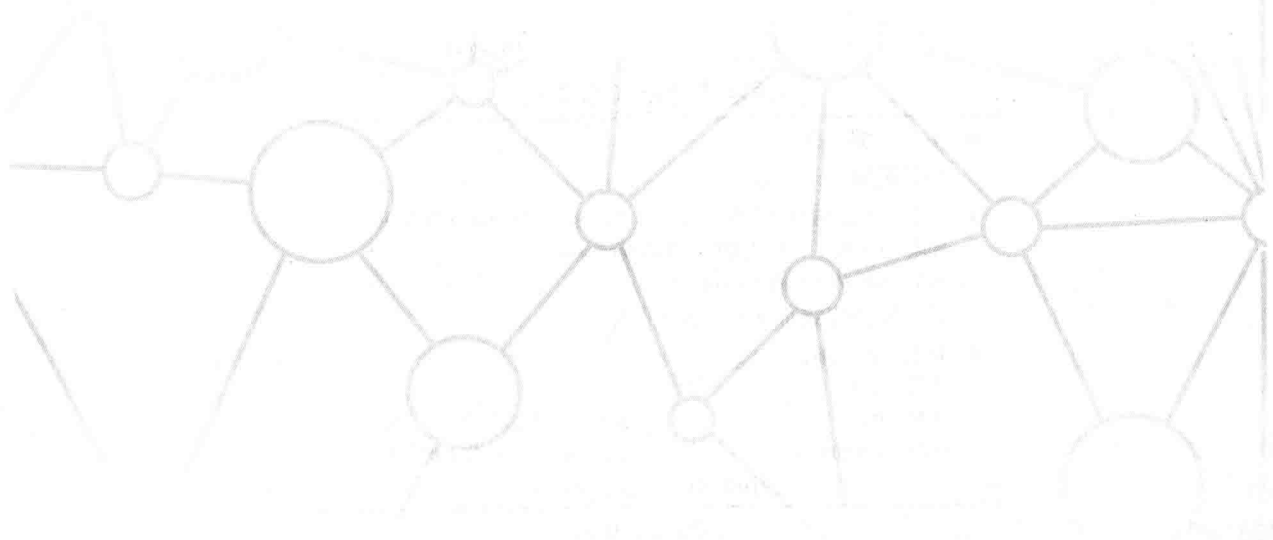
LEI ZHUAN YE GUI HUA JIAO CAI



# 高频电子电路

(第2版)

■ 张澄 主编



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

高频电子电路 / 张澄主编. — 2版. — 北京: 人民邮电出版社, 2011.9

(高等职业教育电子信息类专业规划教材)

ISBN 978-7-115-26018-5

I. ①高… II. ①张… III. ①高频—电子电路—高等职业教育—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第137926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章高频小信号调谐放大器; 第2章正弦波振荡器; 第3章调幅、检波及混频; 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章实训。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。

高等职业教育电子信息类专业规划教材

### 高频电子电路 (第2版)

- 
- ◆ 主 编 张 澄  
责任编辑 李 强
  - ◆ 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 电子邮件 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
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 12.5  
字数: 301千字 2011年9月第2版  
印数: 1-3000册 2011年9月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-26018-5

定价: 28.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

# 前 言

为满足高职高专电子各类专业教学的需要，加快我国职业技术人才培养的步伐，根据教育部关于高职高专的培养目标，推出本教材。本书适用于高职高专院校通信技术、电子信息技术、应用电子技术、电子测量技术和仪器及计算机类相关专业，也可供从事高频电子产品开发、生产和管理的工程技术人员参考。

本书系统地介绍了高频电子电路的基本内容、基本电路和应用。

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和解决问题的职业能力，因此作者根据多年教学实践经验编写本书。本书具备如下特点。

1. 根据高职高专院校对学生的培养目标和学生的特点，本书着重强调基本概念、基本单元电路的分析及应用。从基本概念出发，对各单元电路定性地进行分析解读，略去了不必要的冗长的数学推导和分析，使内容更通俗易懂。教材内容几乎涵盖了高频电子电路的全部内容。

2. 层次清晰、重点突出，利于培养学生的职业能力。为了便于学生及读者自学，内容由浅入深、由点到面进行延伸，层次分明，突出重点，易于理解和接受。本书对各章电路的用途进行了一一举例，并在书中加入了计算机仿真。最后一章专门介绍了高频电子电路在电子产品中的应用与制作。在项目的确定上，本着培养学生能力的出发点，选择了最基本的、最典型的高频电子产品电路。

3. 合理编排章节内容，配有学习指导手册。为了便于学生的理解和接受，本书在各章节的顺序及逻辑关系的衔接上做了认真的研究。本书第1章为高频小信号调谐放大器；第2章为正弦波振荡器；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；第6章为反馈控制电路；第7章为实训，共7章。

本书由天津电子信息职业技术学院张澄老师主编，天津理工大学姜道连老师参编，天津电子信息职业技术学院杨景山老师审阅并提出了宝贵意见。

# 目 录

绪论	1
<b>第 1 章 高频小信号调谐放大器</b>	<b>4</b>
1.1 调谐放大器的组成及主要技术指标	4
1.1.1 电路组成	4
1.1.2 主要技术指标	5
1.2 调谐放大器的等效电路	7
1.2.1 晶体管 $y$ 参数等效电路	7
1.2.2 LC 并联谐振回路及其等效关系	8
1.2.3 放大器的等效电路	11
1.3 主要技术指标的估算	12
1.3.1 单级单调谐放大器	12
1.3.2 多级单调谐放大器	14
1.4 双调谐放大器	15
1.4.1 电路组成	15
1.4.2 主要技术指标	16
1.5 高频小信号谐振放大器的稳定性	17
1.6 集中选频放大器	17
1.6.1 集中选频滤波器	18
1.6.2 集中选频放大器应用举例	22
1.7 单调谐放大电路仿真实验	23
习题	24
<b>第 2 章 正弦波振荡器</b>	<b>27</b>
2.1 反馈振荡原理	27
2.1.1 反馈振荡原理及反馈型振荡器的组成	27
2.1.2 起振条件和平衡条件	28
2.1.3 振荡器的稳定条件	29
2.2 LC 振荡器	31
2.2.1 互感耦合振荡电路	31
2.2.2 LC 三点式振荡电路	31
2.2.3 改进型电容三点式振荡电路	34
2.3 振荡器的频率稳定度	36

2.3.1	频率稳定度的定义	36
2.3.2	频率变化的原因及稳频措施	36
2.4	晶体振荡器	37
2.4.1	石英晶体的电特性	37
2.4.2	石英晶体振荡电路	38
2.5	RC 振荡器	40
2.5.1	RC 串并联网络的选频特性	40
2.5.2	文氏桥振荡器	41
2.6	正弦波振荡器仿真实验	42
	习题	43
<b>第 3 章</b>	<b>调幅、检波及混频</b>	<b>48</b>
3.1	振幅调制	48
3.1.1	调幅波的性质	48
3.1.2	几种调幅波的特点及实现调幅的方法	53
3.2	调幅电路	56
3.2.1	低电平调幅电路	56
3.2.2	高电平调幅电路	59
3.2.3	其他几种调幅波电路	60
3.3	检波电路	63
3.3.1	包络检波电路	64
3.3.2	同步检波电路	67
3.4	混频	68
3.4.1	混频的基本原理	68
3.4.2	混频干扰及其克服干扰的措施	70
3.4.3	混频电路	72
3.5	调幅、检波及混频仿真实验	76
3.5.1	调幅仿真	76
3.5.2	同步检波器仿真实验	78
3.5.3	混频器仿真实验	78
	习题	79
<b>第 4 章</b>	<b>高频功率放大器</b>	<b>83</b>
4.1	高频功率放大器的特点及用途	83
4.1.1	高频功率放大器的用途	83
4.1.2	晶体管工作状态对放大器效率的影响	83
4.1.3	丙类谐振功率放大器与低频功率放大器及小信号谐振放大器的区别	84
4.1.4	高频功率放大器的主要技术指标	84
4.2	谐振高频功率放大器	85

4.2.1	谐振高频功率放大器的基本电路	85
4.2.2	谐振高频功率放大器的工作原理	85
4.2.3	谐振高频功率放大器的分析方法	87
4.2.4	谐振高频功率放大器的特性	91
4.2.5	谐振高频功率放大器的直流馈电电路及匹配网络	99
4.3	丙类倍频器	103
4.3.1	倍频器的用途	103
4.3.2	丙类倍频器的基本原理	103
4.4	宽频带高频功率放大器	105
4.4.1	高频传输线变压器	105
4.4.2	功率合成	109
	习题	115
<b>第 5 章</b>	<b>角度调制与解调</b>	<b>116</b>
5.1	调角波的基本性质	116
5.1.1	调角波的基本概念	116
5.1.2	调角波的数学表达式	117
5.2	角度调制电路	124
5.2.1	直接调频电路	124
5.2.2	间接调频——由调相实现调频	132
5.3	调角信号的解调	137
5.3.1	鉴相器	138
5.3.2	鉴频器	143
5.4	单失谐回路斜率鉴频器仿真	153
	习题	154
<b>第 6 章</b>	<b>反馈控制电路</b>	<b>156</b>
6.1	反馈控制系统的概念	156
6.2	自动增益控制电路	157
6.2.1	放大器的增益控制	157
6.2.2	电路类型	161
6.3	自动频率控制电路	162
6.3.1	自动频率控制基本原理	162
6.3.2	自动频率微调 (AFC) 电路	164
6.4	锁相环路及频率合成	165
6.4.1	锁相环路的基本原理	165
6.4.2	频率合成的基本原理	166
6.4.3	锁相环的应用	169
	习题	171

第7章 实训 .....	174
7.1 高频电路制作中应该注意的问题 .....	174
7.2 实训 .....	176
7.2.1 调频麦克风 .....	176
7.2.2 丙类高频功率放大器 .....	179
7.2.3 收音机 .....	186



# 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、无线电通信及相关专业的一门十分重要的专业基础课。

## 1. 高频电路的特点

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。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。一般认为，只要频率高到晶体管 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”范畴。本书所讨论的“高频”范畴为几百千赫兹至几十兆赫兹。

各类电子设备和系统都是由电子电路组成，有源器件是电路的核心。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。如晶体管在低频时，可以用纯阻性网络模拟，电路多为线性应用；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，通常采用时域分析；而在分析高频电路时，由于电路的非线性运用，仅采用时域分析是不够的，还要进行频域分析。

## 2. 高频电路在无线电发送、接收设备中的应用

高频电子线路之所以是无线电技术、通信及相关专业的一门十分重要的专业基础课，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，其组成框图如图 0-1 所示。

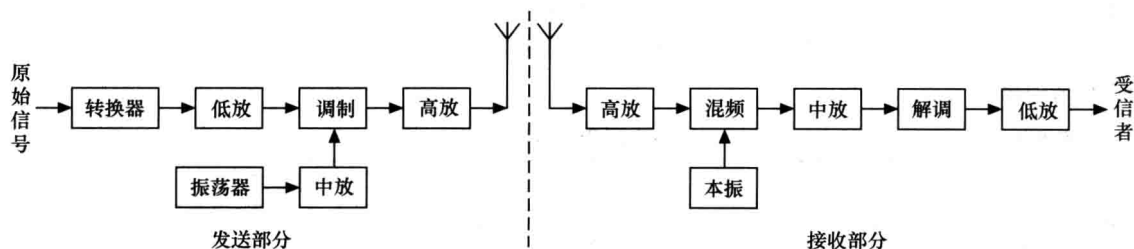


图 0-1 无线电通信系统组成框图

### (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，称它们为基带信号。该信号通常很微弱，需进行低频放大。

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，其相应的波长为 1000~88km，试想，如此巨大的天线人们能否建造？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，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，称为解调。带有变频级（混频器与本振的组合）的接收机，称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。

### （3）无线电波段划分

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，表 0-1 给出了频段划分命名及用途。

**表 0-1 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，外空间飞行器（飞机、导弹、卫星）的通信
特高频 (U.H.F)	300MHz~3GHz	分米波	1~ $10^{-1}\text{m}$	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

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。

### 3. 本课程的内容和特点

#### (1) 内容

本课程将讨论高频小信号谐振放大器、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。

#### (2) 特点

①本课程大部分电路是非线性的, 输入输出信号的频率不一致, 即频率变换。

②各单元电路之间有关联性。例如, 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。

③分析方法多样, 也较为复杂。即有时域分析又有频域分析, 有时要借助于复杂的数学分析。例如, 在分析调频波的频谱时, 要用到贝塞尔函数。

④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。

本课程的实践性很强, 在学习中应重视实验和其他实践性环节, 培养分析和解决电子技术问题的能力。

# 第 1 章 高频小信号调谐放大器

**本章要点：** 小信号调谐放大器的电路组成  
小信号调谐放大器的主要技术指标及估算  
提高放大器稳定性的措施  
多级单调谐放大器，双调谐放大器与单级单调谐放大器性能比较

在高频电路中，调谐（谐振）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性能指标。

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要求能达到 1V 左右。这就要求接收机对高频信号的放大能力要达到  $10^3 \sim 10^5$  倍，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，除了有要收听的电台信号以外，还有许多不需要的无线电信号（把不需要的都称为干扰信号）。显然如果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。

调谐放大器按其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。前者主要用于高频功率放大，常在发送设备中使用。后者通常用在各种接收机中，作为高频电压放大器和中频电压放大器。之所以按信号大小来分类，是因为放大器工作在大信号和小信号时，工作状态不同，分析方法也不同。对于大信号，必须考虑晶体管的非线性，而对于小信号却可把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 3 个极与输入、输出信号的接法不同，调谐放大器也可有 3 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发射极组态。

## 1.1 调谐放大器的组成及主要技术指标

### 1.1.1 电路组成

单调谐放大器如图 1-1 所示。单调谐放大器由共发射极组态的晶体管放大器和并联谐振

回路组成。

电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_c$  组成静点稳定的偏置电路， $C_b$ 、 $C_e$  为高频旁路电容。集电极负载由 LC 组成的并联谐振回路（简称回路）构成。回路的作用是选择要放大的信号频率。晶体管的集电极接在电感的某个位置上，而不是接在电感的下端。交流时，晶体管的输出端（c、e 之间）只接回路电压的一部分，而不是全部，称为部分接入。采用部分接入的原因是为了减少晶体管、负载中不稳定的因素对回路造成的不良影响，该不良影响会引起中心频率不稳定以及输出电压不稳定。

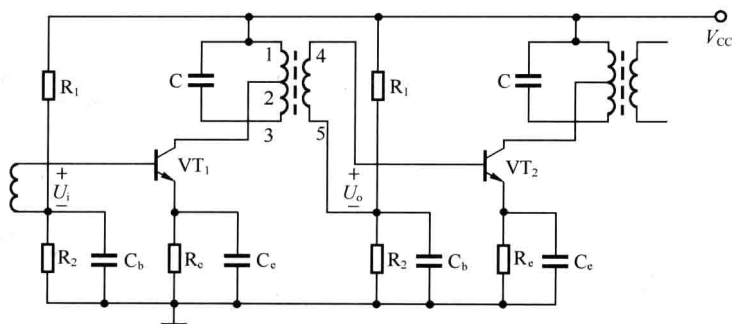


图 1-1 小信号单调谐放大器

### 1.1.2 主要技术指标

#### 1. 电压增益 ( $A_u$ ) 和功率增益 ( $G_p$ )

电压增益和功率增益指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。人们希望每级放大器在中心频率（谐振频率）及通频带内的增益尽量大，使满足总增益的级数尽量少。

$A_u = \frac{u_o}{u_i}$ ,  $G_p = \frac{P_o}{P_i}$ ，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 $B=2\Delta f_{0.7}$

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。因此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。和谐振回路相同，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 1-2 所示。

#### 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矩形系数和抑制比。

(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。因而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 1-3 所示。

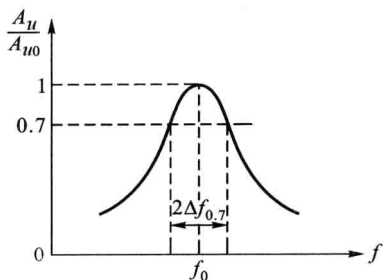


图 1-2 小信号单调谐放大器的谐振曲线

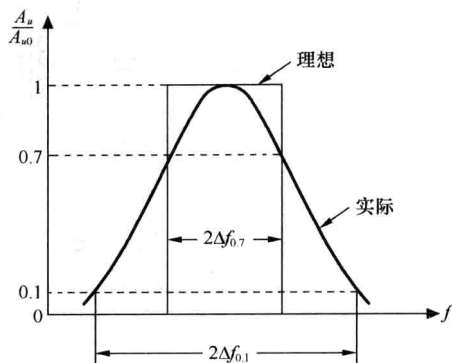


图 1-3 理想的与实际的频率特性

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。

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

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  $K_r$  为 2~5。

(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、像频等选择性的好坏）

如图 1-4 所示的谐振曲线，谐振点  $f_0$  的放大倍数为  $A_{u0}$ 。若有一干扰，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  $d(\text{dB}) = 20 \lg d$

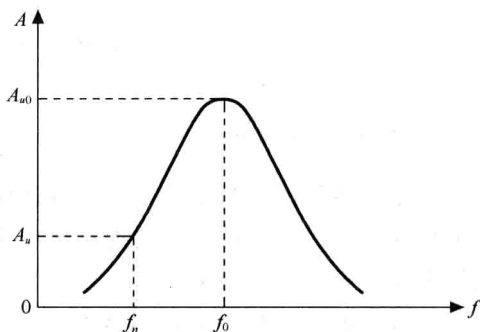


图 1-4 说明抑制比的谐振曲线

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。

## 1.2 调谐放大器的等效电路

### 1.2.1 晶体管 $y$ 参数等效电路

研究晶体管等效电路的目的是便于对放大电路进行定量分析。等效电路的形式有好几种， $y$  参数等效电路是比较适宜分析该放大器的。

等效时，把晶体管看作四端（两端口）网络，4 个参量  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$  中两个电压作为自变量，两个电流作为因变量，其数学表达式为

$$\dot{I}_1 = y_i \dot{U}_1 + y_r \dot{U}_2 \quad (1-1)$$

$$\dot{I}_2 = y_f \dot{U}_1 + y_o \dot{U}_2 \quad (1-2)$$

根据表达式得到等效电路如图 1-5 所示。

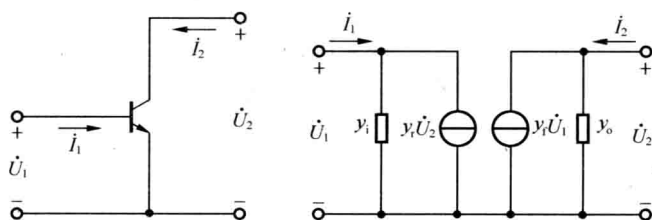


图 1-5 晶体管  $y$  参数等效电路

其中：

$$y_i = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{称为输出短路时的输入导纳，它反映了输入电压对输入电流的作用；}$$

$$y_r = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{称为输入短路时的反向传输导纳，它反映了输出电压对输入电流的影响；}$$

$$y_f = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{称为输出短路时的正向传输导纳，它反映了输入电压对输出电流的控制能力；}$$

$$y_o = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{称为输入短路时的输出导纳，它反映了输出电压对输出电流的作用。}$$

因为电路不是纯阻性的，所以 4 个  $y$  参数都是复数。 $y = g + j\omega C$ ，基本单位为西门子 (S)。

## 1.2.2 LC 并联谐振回路及其等效关系

本书许多电路都会含有 LC 并联谐振回路，这里将 LC 并联谐振回路的主要特性进行概括。LC 并联谐振回路如图 1-6 (a) 所示。图 1-6 (b) 所示为等效电路。电阻  $r$  为电感的损耗。

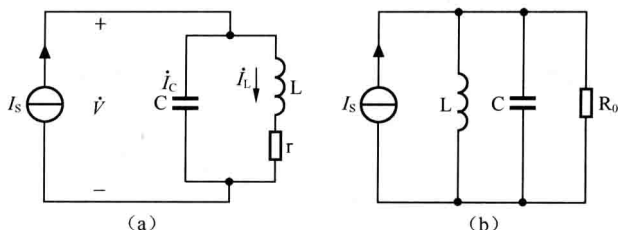


图 1-6 LC 并联谐振回路及其等效电路

### 1. 谐振频率

所谓谐振是指整个回路呈现纯阻性，即感抗与容抗相互抵消的状态。当信号频率变化时，感抗与容抗在变化，使感抗与容抗相等的频率为谐振频率。

回路的总阻抗为

$$Z_p = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (1-3)$$

等效为

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \quad (1-4)$$

$$R_0 = \frac{L}{Cr} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C} \quad (1-5)$$

式中， $Q$  为回路的品质因数，用来表示回路的损耗。其定义和回路元件参数的关系为

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

令  $Z_p$  的虚部为零，求解方程根得

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (1-7)$$

由于一般情况下  $Q \gg 1$ ，即  $r$  的值非常小的时候，则式 (1-7) 近似的谐振频率为

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

在  $\omega_0$  处  $Z_p = R_0$ ，电路的性质为纯阻性。



## 2. 回路的电抗性质

并联回路两端的等效阻抗  $Z$  及电阻  $R_e$ 、电抗  $X_e$  随频率变化的曲线如图 1-7 所示。

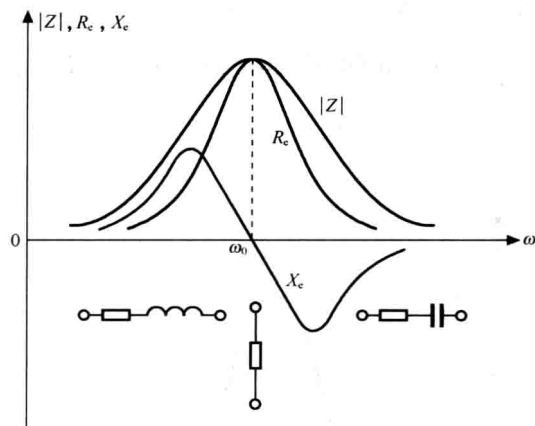


图 1-7 LC 并联谐振回路等效电抗与频率的关系

可见并联谐振回路两端的阻抗只有在谐振时，才是纯电阻并达到最大值。失谐时，并联谐振回路的等效阻抗  $Z$  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容性的；当  $\omega < \omega_0$  时，回路等效阻抗中的电抗是感性的。这是由于并联回路的合成总阻抗的性质总是由两个支路中阻抗较小的那个支路的阻抗性质决定的。

## 3. 谐振回路的通频带

回路两端输出电压  $V$  与谐振时回路两端电压之比为

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (1-9)$$

得到并联谐振回路的谐振曲线，如图 1-8 所示。

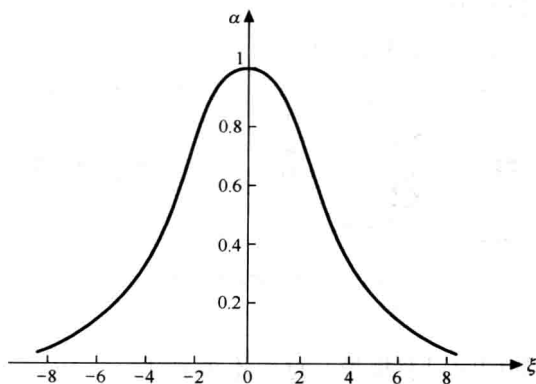


图 1-8 LC 谐振回路的谐振曲线

$$\alpha = \left| \frac{V}{V_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$