

# 高频电子线路

## 学习指导

曾兴雯 陈健 刘乃安 编著

西安电子科技大学出版社  
[Http://www.xduph.com](http://www.xduph.com)

# 高频电子线路学习指导

曾兴雯 陈健 刘乃安 编著

西安电子科技大学出版社

2004

**【内容简介】**本书是高等院校“通信与信息系统”学科专业课“高频电子线路”的学习指导书。全书包括高频电子线路的基础知识、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦振荡器、振幅调制与解调、混频、频率调制与解调等各章节的重点、难点和考点以及典型例题分析和自测题。

本书不仅可作为本科生学习该门课程的参考书和指导书，同时也可作为研究生入学考试的辅导书。

## 高频电子线路学习指导

曾兴雯 陈健 刘乃安 编著

责任编辑 李惠薄 李纪澄

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88227828 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印 刷 西安市秦群印刷厂

版 次 2004年1月第1版 2004年6月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 10.75

字 数 207千字

印 数 1~4 000册

定 价 14.00元

ISBN 7-5606-0897-3/TN·0153

**XDUP 1168B01-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

# 前 言

“高频电子线路”是通信与信息系统专业的一门重要的专业基础课程，是一门工程性和实践性都很强的课程，该课程也被许多院校作为硕士研究生入学考试的专业课之一。

“高频电子线路”主要包括高频电路的基础知识、高频小信号谐振放大器和高频谐振功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制和解调、混频、频率调制与解调等内容，这些都是通信与信息系统中重要的组成部分和理论基础。“高频电子线路”有别于通信与信息系统专业的其他专业基础课程，其显著的特点是概念多、电路多、要求的基础知识多以及非线性分析方法等，这对理解和掌握“高频电子线路”的原理和电路带来了很大的困难。鉴于这种情况，我们根据自己多年来的教学经验和科研实践，针对教学中的重点和难点以及学习中同学们普遍存在的问题，并依据本课程的硕士研究生考试大纲，编写了这本考研辅导书。这本考研辅导书对“高频电子线路”这门课程中的各章节的重点、难点和考点进行了总结；通过典型例题分析，给出一个较好的解题思路和解题技巧；通过自测题，可以使读者通过自测检查，更进一步理解和掌握本门课程中应掌握的知识。

本书是为高等院校相关专业学生学习“高频电子线路”课程而编写的学习指导书，同时，也可作为该课程的考研辅导书，期望对考生能有很好的帮助，以实现他们的理想和追求。另外，此书若能够对所有学习“高频电子线路”课程的学生有很好的指导和帮助，将是我们最大的心愿。

本书由曾兴雯主编，刘乃安、陈健参加了编写工作。第1章、第2章和第7章由刘乃安编写，第3章、第4章由陈健编写，第5章、第6章由曾兴雯编写。曾兴雯对全书进行统稿。

限于作者水平，本书中不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2003年10月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 重点、难点、考点.....	1
1.1.1 无线通信系统的组成 .....	1
1.1.2 无线电信号的特性 .....	2
1.2 自测题 .....	4
<b>第 2 章 高频电路基础</b> .....	5
2.1 重点、难点、考点.....	5
2.1.1 高频电路中的有源器件和无源网络 .....	5
2.1.2 高频小信号放大器 .....	11
2.1.3 电子噪声 .....	15
2.2 典型例题分析 .....	20
2.3 自测题 .....	30
<b>第 3 章 高频功率放大器的原理</b> .....	33
3.1 重点、难点、考点 .....	33
3.1.1 高频功率放大器的工作原理 .....	33
3.1.2 高频谐振功率放大器的性能分析 .....	37
3.1.3 高频功放的外部特性 .....	40
3.1.4 高频功率放大器的实际线路 .....	43
3.2 典型例题分析 .....	46
3.3 自测题 .....	52
<b>第 4 章 正弦波振荡器</b> .....	54
4.1 重点、难点、考点 .....	54
4.1.1 反馈振荡器原理 .....	54
4.1.2 互感耦合反馈振荡器 .....	56
4.1.3 三端式振荡器 .....	56
4.1.4 频率稳定度 .....	61
4.1.5 石英晶体振荡器 .....	61
4.2 典型例题分析 .....	63
4.3 自测题 .....	70

<b>第 5 章 振幅调制与解调</b> .....	73
5.1 重点、难点、考点 .....	73
5.1.1 振幅调制信号分析 .....	73
5.1.2 调制方法 .....	76
5.1.3 二极管调制电路 .....	77
5.1.4 差分对调制器 .....	79
5.1.5 调幅信号的解调方法 .....	82
5.1.6 二极管峰值包络检波器 .....	82
5.1.7 同步检波 .....	84
5.2 典型例题分析 .....	85
5.3 自测题 .....	99
<b>第 6 章 混频</b> .....	103
6.1 重点、难点、考点 .....	103
6.1.1 混频的概念 .....	103
6.1.2 晶体三极管混频器 .....	104
6.1.3 场效应管混频器 .....	105
6.1.4 二极管混频器 .....	106
6.1.5 频谱的线性搬移小结 .....	106
6.1.6 混频器的干扰 .....	107
6.2 典型例题分析 .....	109
6.3 自测题 .....	122
<b>第 7 章 频率调制与解调</b> .....	127
7.1 重点、难点、考点 .....	127
7.1.1 频率调制与角度调制 .....	127
7.1.2 调频信号分析 .....	127
7.1.3 调频信号的产生 .....	130
7.1.4 鉴频概述 .....	134
7.1.5 鉴频电路 .....	135
7.2 典型例题分析 .....	139
7.3 自测题 .....	150
<b>附录</b> .....	153
1999 年西安电子科技大学攻读硕士研究生“高频电子线路”入学考试试题 .....	153
2000 年西安电子科技大学攻读硕士研究生“高频电子线路”入学考试试题 .....	157
<b>主要参考文献</b> .....	161

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 重点、难点、考点

高频电路是通信系统，特别是无线通信系统的基础，因此，高频电路的内容必然涉及无线通信设备。

#### 1.1.1 无线通信系统的组成

通信的目的与任务是传递消息。消息的类型很多，传输消息的方法也很多，现代通信大多以电(或光)信号的形式出现，因此，通常称作电信。传输电信号的媒质(或介质)可以是有线的，也可以是无线的，而以无线的形式最能体现高频电路的应用。

无线通信(或称无线电通信)的类型也很多，可以根据传输方法、频率范围、用途等来分类。不同的无线通信系统，其设备组成和复杂度虽然有较大差异，但它们的基本组成是不变的。图 1-1 是无线通信系统基本组成的方框图。

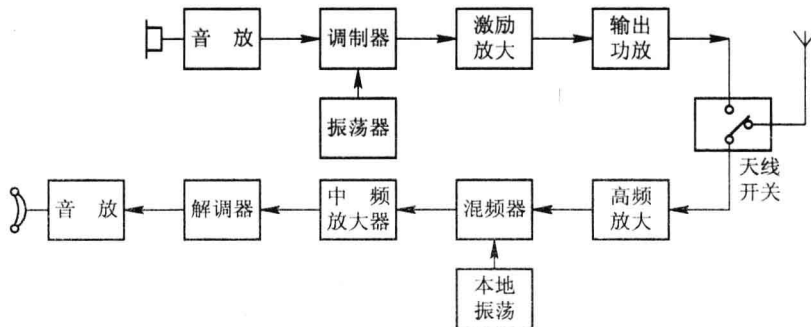


图 1-1 无线通信系统的基本组成

按图示的无线通信系统基本组成可以看出，高频电路的基本内容应该包括：

- 高频振荡器(信号源、载波或本振)；
  - 高频放大器(高频小信号放大器及高频功率放大器)；
  - 混频或变频
  - 调制与解调
- } 高频信号处理。

此外，还要考虑高频电路所用的元件、器件和组件，以及信道或接收机中的干扰与噪声问题。

### 1.1.2 无线电信号的特性

无线电信号主要分三种：消息信号(基带)、高频载波信号和已调信号。前者通常为低频信号，后两者通常属于高频信号。

无线电信号有多方面的特性，主要表现在时间(域)特性、频率特性、频谱特性、调制特性、传播特性等方面。

#### (1) 时间特性

时间特性指信号随时间变化快慢的特性，通常用时域波形或数学表达式(电压或电流)来表示。要求传输信号电路的时间特性(如时间常数)必须与该信号的时间特性相适应。

#### (2) 频谱特性

任何形式的信号都可以分解为许多不同频率、不同幅度的正弦信号之和。谐波次数越高，幅度越小，影响越小。频谱特性有幅频特性和相频特性两部分，它们分别反映信号中各个频率分量的振幅和相位的分布情况。任何信号都会占据一定的带宽。从频谱特性上看，带宽就是信号能量主要部分(一般为90%以上)所占据的频带。不同的信号，其带宽不同。射频(“高频”的广义语，指适合无线电发射传播的频率)频率越高，可利用的频带宽度就越宽，从而可以容纳更多的信号。这是无线通信采用高频的原因之一。

#### (3) 频率特性

频率特性指的是无线电信号的频率或波长。波长 $\lambda$ 与频率 $f$ 的关系为

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

式中： $c$ 为光速， $f$ 和 $\lambda$ 分别为无线电波的频率和波长。

对频率或波长进行分段，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，传播的方式也不同，因而它们的应用范围也不同。表1-1为无线电波的频(波)段划分表。

从表中可以看出，频段划分中有一个“高频”段，其频率范围为3~30 MHz。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。



表 1-1 无线电波的频(波)段划分

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途
长波波段	1 000~10 000 m	30~300 kHz	低频(LF)	地波。远距离通信
中波波段	100~1 000 m	300~3 000 kHz	中频(MF)	地波、天波。广播、通信、导航
短波波段	10~100 m	3~30 MHz	高频(HF)	天波、地波。广播、通信
超短波波段	1~10 m	30~300 MHz	甚高频(VHF)	直线传播、对流层散射 通信、电视广播、调频广播、 雷达
分米波波段	10~100 cm	300~3 000 MHz	超高频(UHF)	直线传播、散射传播 通信、中继通信、卫星通信、 雷达、电视广播
厘米波波段	1~10 cm	3~30 GHz	极高频(SHF)	直线传播 中继通信、卫星通信、雷达

#### (4) 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。

传播方式主要有直射(视距)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。

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(反射与折射)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。

#### (5) 调制特性

要通过载波传送消息，就必须使载波信号的某一个或(几个)参数(振幅、频率或相位)随消息信号改变，这一过程就称为调制。

三种基本调制方式是振幅调制(调幅)、频率调制(调频)和相位调制(调相)，分别用AM、FM和PM表示；还可以有组合调制方式。当用数字消息信号进行调制时，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)。

一般情况下，高频载波为单一频率的正弦波，对应的调制为正弦调制。若载波为一脉冲信号，则称这种调制为脉冲调制。“高频电子线路”课程主要讨论模拟消息(调制)信号和正弦载波的模拟调制。但这些原理甚至电路完全可以推广到数字调制中去，这就是举一反三。

调制还有一个重要作用就是可以实现信道的复用，提高信道利用率。

不同的调制信号和不同的调制方式，其调制特性不同。

## 1.2 自 测 题

- 1-1 画出无线通信收发信机的原理框图，并说出各部分的功用。
- 1-2 无线通信为什么要采用高频信号？
- 1-3 无线通信为什么要进行调制？如何进行调制？
- 1-4 无线电信号的频段或波段是如何划分的？各个频段的传播特性和应用情况如何？

## 第 2 章

# 高频电路基础

## 2.1 重点、难点、考点

### 2.1.1 高频电路中的有源器件和无源网络

高频电路中使用的元器件与在低频电路中使用的元器件基本相同，但要注意它们的高频特性。高频电路中的有源器件主要是二极管、晶体管和集成电路，用以完成信号的放大、非线性变换等功能。

#### 1. 高频电路中的有源器件

##### (1) 二极管

##### ① 类型

- 非线性变换二极管。主要用于调制、检波(解调)及混频等电路中，一般工作于低电平。它们的极间(结)电容小，工作频率高。常用点接触式(如 2AP 系列)和表面势垒式(肖特基)两种形式。

- 变容二极管。变容二极管除了它的基本特性仍表现为二极管特性外，它的主要特点是其结电容随所加的反偏电压而变化。表现为：结电容较大、结电容变化范围较宽、工作于反偏状态。变容二极管多用于调谐、振荡、混频与倍频等电路中。

- PIN 二极管。PIN 二极管是在 PN 结中间增加了一层本征(I)半导体，因此具有较强的正向电荷储存能力。其主要特性是高频等效电阻受正向直流电流的控制。一般用于开关、限幅、衰减和移相电路中。

##### ② 特性与参数。一般情况下，二极管的特性与参数如图 2-1 所示。

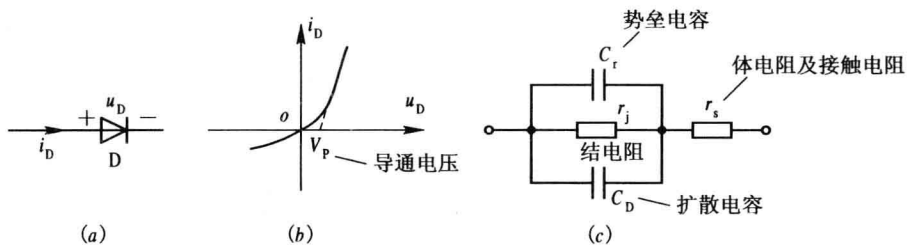
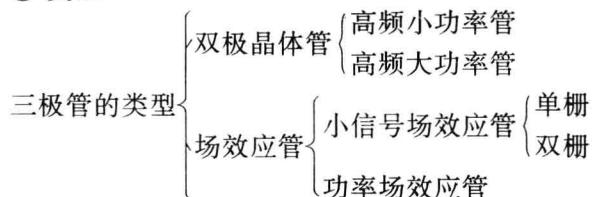


图 2-1 二极管特性与参数

(a) 二极管; (b) 伏安( $V-I$ )特性; (c) 等效电路

## (2) 三极管

### ① 类型



高频小信号(功率)晶体管或场效应管(FET)主要用于小信号的放大、振荡、调制/解调和混频电路中。对它的主要要求是高增益和低噪声。功率管主要用于功放电路,除了要求增益外,还要求有大的输出功率。

### ② 等效电路

• 混  $\pi$  等效电路与参数。混  $\pi$  等效电路如图 2-2 所示。混  $\pi$  参数在一定频率范围内与频率无关,只与工作点有关,因此可用于宽带分析。

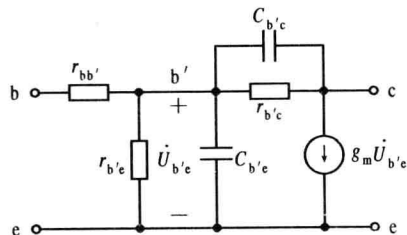


图 2-2 混  $\pi$  等效电路

•  $Y$  参数等效电路。在小信号运用时，晶体管可近似为线性网络，因此可用线性方法求解。

$Y$  参数等效电路如图 2-3 所示。图中， $Y_{ie}$ 、 $Y_{oe}$ 、 $Y_{fe}$ 、 $Y_{re}$  分别为晶体管的输入导纳、输出导纳、正向传输导纳、反向传输导纳，其  $Y$  参数方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= Y_{ie}\dot{U}_b + Y_{re}\dot{U}_c \\ \dot{I}_c &= Y_{fe}\dot{U}_b + Y_{oe}\dot{U}_c \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

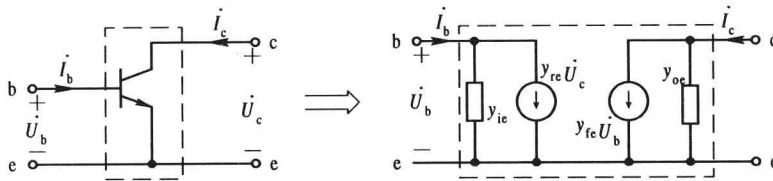


图 2-3  $Y$  参数等效电路

$Y$  参数不仅与工作点有关，而且与频率有关，因此只适用于窄带分析。此外， $Y$  参数是在输入或输出交流短路时所得到的，它只代表晶体本身的特征，而与外电路无关。在低频电路中晶体管用  $h$  参数等效。

### (3) 集成电路(IC)

用于高频电路的集成电路分为通用型 IC 和专用 IC(ASIC)。通用型 IC 主要是宽带集成放大器和模拟乘法器。ASIC 主要是集成的锁相环(PLL)、FM 信号解调器、单片接收机等。另外还有一些功放的组件或模块。

## 2. 高频电路中的无源组件

高频电路中的无源组件主要有高频振荡回路、高频变压器、谐振器与滤波器等。它们完成信号的传输、频率选择和阻抗变换等功能。

### (1) 谐振(振荡)回路

振荡回路是高频电路中应用最广的无源网络，也是构成高频放大器和振荡器的主要部件，在电路中完成阻抗变换、信号选择等任务，并可作为负载。

串联谐振回路和并联谐振回路的电路和特性如图 2-4 所示。表 2-1 列出了这两种谐振回路的特性。

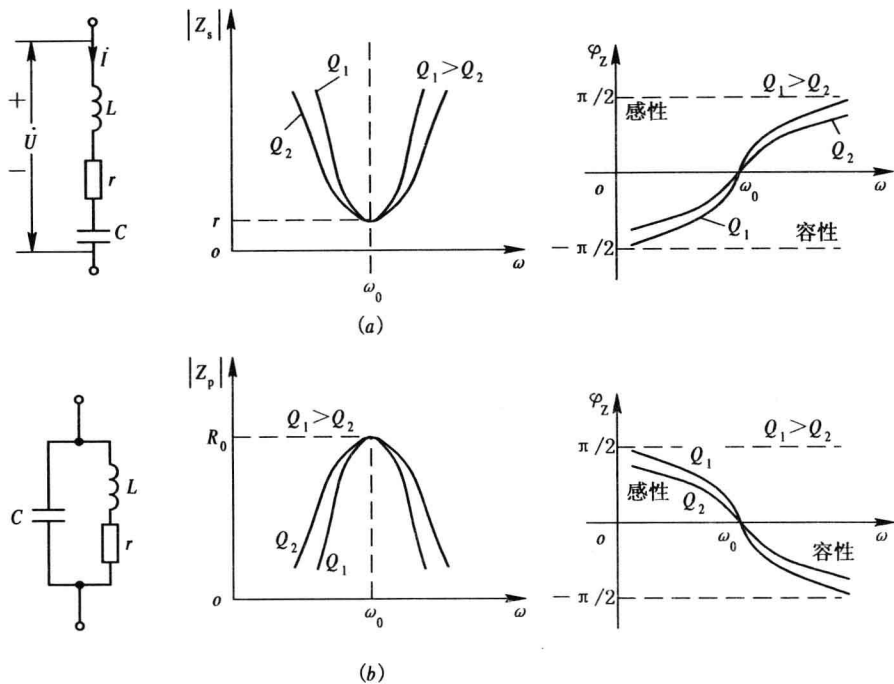


图 2-4 谐振回路及其特性

(a) 串联谐振回路及其特性；(b) 并联谐振回路及其特性

表 2-1 谐振回路特性

回路 特性	串联谐振回路	并联谐振回路
阻抗	$r(1+j\xi)$	$\frac{R_0}{1+j\xi}$
幅频特性	$r\sqrt{1+\xi^2}$	$\frac{R_0}{\sqrt{1+\xi^2}}$
相频特性	$\arctan\xi$	$-\arctan\xi$
谐振电阻	$r$	$R_0 = \frac{L}{Cr}$
谐振频率	$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$\frac{\sqrt{1-(1/Q^2)}}{2\pi\sqrt{LC}}$

续表

回路		串联谐振回路	并联谐振回路
特性			
Q 值		$\frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r}$	$\frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{R_0}{\omega_0 L} = R_0 \omega_0 C$
特性阻抗		$\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$
阻抗特性	$f > f_0$	感性	容性
	$f = f_0$	纯阻 ( $r$ )	纯阻 ( $R_0$ )
	$f < f_0$	容性	感性
通频带		$f_0/Q$	$f_0/Q$

注：式中  $\xi = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) / r$  为广义失谐。

### (3) 抽头并联振荡回路

采用抽头回路，可以通过改变抽头位置或电容分压比来实现回路与信号源的阻抗匹配或进行阻抗变换。在抽头振荡回路中，有一个重要参数——接入系数  $p$ ，它是回路与外电路之间的调节因子。 $p$  定义为与外电路相连的那部分电抗与同一回路内参与分压的同性质总电抗之比，举例如图 2-5 所示。

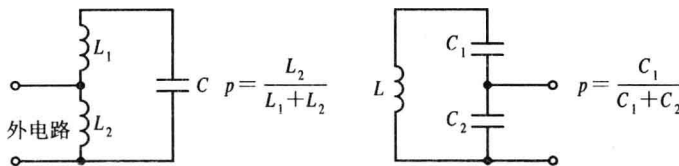


图 2-5 接入系数举例

**注意：**上述定义是有条件的，即只在窄带高 Q 值的情况下有效。通常情况下都满足此条件。

### (4) 耦合振荡回路

耦合振荡回路主要指双调谐回路，通常有互感耦合和电容耦合两种。这里着重讨论互感耦合电路。

如图 2-6 所示的耦合回路中，有如下几个参数：

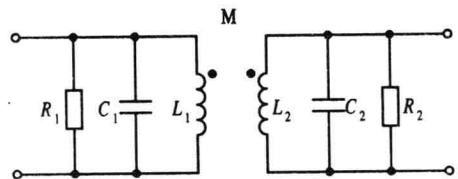


图 2-6 互感耦合电路

- 耦合系数  $k$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

- 耦合阻抗  $Z_M$

$$Z_M = j\omega M$$

- 次级对初级的反映(射)阻抗  $Z_f$

$$Z_f = \frac{(\omega M)^2}{Z_2}$$

式中,  $Z_2$  为次级串联阻抗, 即  $Z_2 = r_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$ 。

- 耦合因子

$$A = kQ$$

式中,  $Q$  为初次级回路相同时的  $Q$ 。  $A=1$  为临界耦合;  $A<1$  为欠耦合;  $A>1$  为过耦合。

- 初次级回路相同且为临界耦合时回路带宽  $B_{0.707}$  与矩形系数  $K_{r0.1}$

$$B_{0.707} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q}$$

矩形系数

$$K_{r0.1} = 3.15$$

**注意:** 以上分析也只限于高  $Q$  的窄带耦合回路。

### (5) 石英晶体谐振器

石英晶体是  $\text{SiO}_2$  的结晶体, 它的物理特性非常稳定, 它具有压电效应和反压电效应。晶体谐振器有一个固有的机械谐振频率, 当外加电信号的频率与此自然谐振频率一致或相近时, 就会产生谐振(共振和电谐振)。晶体可以在基频上谐振, 也可以在高次谐波(通常是奇次谐波, 又称泛音)上谐振。把利用基频共振的谐振器称为基频(音)谐振器, 谐振器频率通常以 kHz 标志。把利用泛音共振的谐振器称为泛音谐振器, 谐振器的频率通常用 MHz 标志。目前, 基音谐振频率最高只能达到 25 MHz 左右, 泛音谐振频率可高达 250 MHz 以上。石英晶体谐振器的等效电路如图 2-7 所示, 图中,  $L_q$ 、 $C_q$  和  $r_q$  分别为等效电感、等效电容和等效电阻,  $C_0$  为静态的封装电容。石英晶体谐振器的电抗特性如图 2-8 所示, 它是忽略  $r_q$  求出的。由此可知:

- 晶体谐振器有两个谐振频率, 即串联谐振频率  $f_q$  和并联谐振频率  $f_0$ :

$$f_q = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q}} \quad (2-2)$$



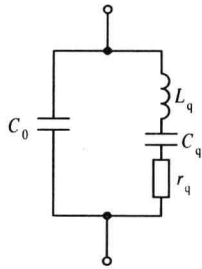


图 2-7 石英晶体谐振器的等效电路

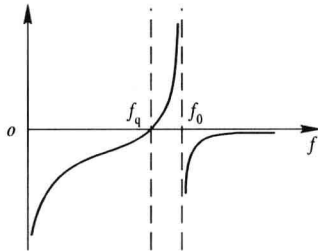


图 2-8 石英晶体谐振器的电抗特性

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}} = f_q \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}} \quad (2-3)$$

• 一般情况下,  $L_q$  在几 H 到几百 H,  $C_q$  很小, 在  $10^{-3}$  pF 左右,  $r_q$  约为几  $\Omega$ ~几百  $\Omega$ ,  $C_0$  通常为几 pF, 因此,  $C_q \ll C_0$ ,  $f_q$  与  $f_0$  相差很小。

• 在  $f_q$  和  $f_0$  之间谐振器呈感性; 在  $f_q$  和  $f_0$  之外谐振器呈容性。

晶体谐振器与一般振荡回路相比, 有以下几个特点:

- ① Q 值非常高, 可达数万;
- ② 接入系数非常小, 一般在  $10^{-3}$  数量级;
- ③ 回路等效参数由晶体的尺寸决定, 受外界因素的影响小;
- ④ 在工作频率附近阻抗变化率大, 并有很高的并联谐振阻抗。

这些特点决定了晶体谐振器的频率稳定度高。

晶体谐振器主要用于晶体振荡器中, 但也可以用于滤波器中, 只不过工作频带较窄。此外, 它还可以用于其它场合, 如鉴频器中等。

## 2.1.2 高频小信号放大器

### 1. 概述

高频小信号放大器的功用为: 不失真地放大高频小信号和选频滤波。为了尽量减小失真, 通常为线性放大(A 类或甲类)。这里所说的“小信号”是相对于放大器的线性范围来讲的。选频滤波主要由谐振回路来实现。

高频小信号放大器的分类情况如表 2-2 所示。