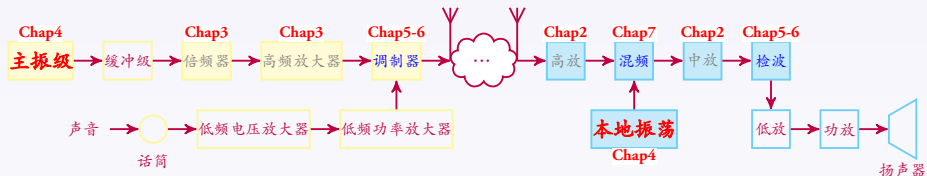


# 课程主要内容



- ① Chap2 谐振回路 高频电路基础
- ② Chap2 小信号调谐放大器 放大选频
- ③ Chap3 调谐功率放大器 功率效率谐波抑制制度
- ④ Chap3 倍频器
- ⑤ Chap4 正弦波振荡器
- ⑥ Chap5 振幅调制与解调
- ⑦ Chap6 角度调制与解调
- ⑧ Chap7 变频器
- ⑨ Chap8 锁相环

- ① 电阻、电容、电感等无源线性元件
- ② 二极管、三极管等有源非线性器件
- ③ LC 谐振回路、基本放大电路、振荡器电路等

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。

## 基本概念、基本原理、基本电路、基本分析方法

# 正弦波振荡器

郑海永

选课号：0202004      课程号：071502101211

上课时间地点：周 1/34 节/7108 周 4/12 节/7108

中国海洋大学 电子工程系

2012 年 11 月



# 本章主要内容

- ① 基本概念
- ② 反馈型正弦波自激振荡器基本原理
- ③ 三点式 LC 振荡器
- ④ 改进型电容三点式振荡器
- ⑤ 振荡器的频率稳定问题
- ⑥ 石英晶体谐振器
- ⑦ 石英晶体振荡器电路

# 目录

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 石英晶体振荡器

频率稳定度 要求  $10^{-8}$  以上

- LC 振荡器：只能达到  $10^{-5}$ ； $Q$  值不能做的很高（约 200 以下）。
- 石英晶体振荡器：可达  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  数量级；高  $Q$  值的谐振元件。

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 石英晶体的压电效应

## 石英晶体

- 从石英晶体柱中切割下来的一种弹性体，有一固有振动频率，其值与石英片的形状、尺寸、切型有关。
- 当外加交流电压的频率等于晶体固有频率时，晶体片的机械振动最大，晶体表面电荷量最多，外电路中的交流电流最强，于是产生了谐振。

## 机械系统类比电系统

- 晶片的质量类比于电感
- 晶片的弹性类比于电容
- 机械摩擦损耗类比于电阻

## 主要特点

- 物理性能和化学性能十分稳定。
- 振动具有多谐性，基谐振动、泛音振动等。
- 具有正、反压电效应（机和电的相互转换效应）。



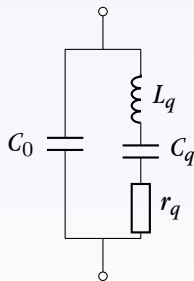
# 石英晶体的等效电路

$$Q = \frac{1}{r_q} \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}$$

- $C_q \approx 0.005 \sim 0.1 \text{pF}$
- $C_0 \approx 2 \sim 5 \text{pF}$
- $r_q \approx 1$  欧姆到几十欧姆
- $Q \approx 10^5$
- $L_q \approx$

100H(频率约 100kHz), 1H(频率约 1MHz), 10mH(频率约 10MHz)

$L_q$  的数值取决于晶片的厚度, 低频晶体较厚, 质量较大, 动态电感  $L_q$  较大; 而高频晶体较薄, 质量较小, 所以  $L_q$  较小。



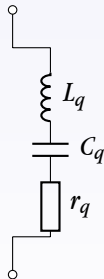
# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 串联谐振频率

串联谐振频率

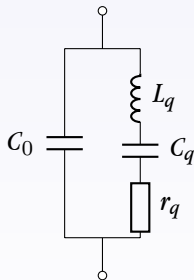
$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q}}$$

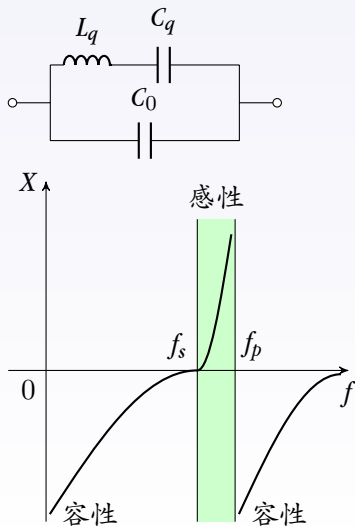


# 并联谐振频率

## 并联谐振频率

$$\begin{aligned}
 f_p &= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}} \\
 &= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q}} \sqrt{\frac{C_0 + C_q}{C_0}} \\
 &= f_s \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}} \\
 &\approx f_s \left(1 + \frac{C_q}{2C_0}\right)
 \end{aligned}$$



电抗-频率曲线 ( $r_q = 0$ )

不计动态电阻  $r_q$  时的等效阻抗

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{j(\omega L_q - 1/\omega C_q)(-j/\omega C_0)}{j(\omega L_q - 1/\omega C_q - 1/\omega C_0)} \\
 &= -j \frac{1}{\omega C_0} \frac{\omega L_q (1 - 1/\omega^2 L_q C_q)}{\omega L_q (1 - 1/\omega^2 L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0})} \\
 &= -j \frac{1}{\omega C_0} \left(1 - \frac{\omega_s^2}{\omega^2}\right) / \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)
 \end{aligned}$$

- 当  $\omega = \omega_s$  时,  $L_q C_q$  支路串联谐振,  $Z = 0$ 。
- 当  $\omega = \omega_p$  时, 产生并联谐振,  $Z \rightarrow \infty$ 。
- 当  $\omega < \omega_s$  或  $\omega > \omega_p$  时,  $Z = -jx$ , 电抗呈容性。
- 当  $\omega_s < \omega < \omega_p$  时,  $Z = jx$ , 电抗呈感性。

## 考虑 $r_q$ 的晶体等效阻抗特性

- $Q$  值越高,  $\frac{d\beta}{d\omega}$  越大, 稳定性越好。
- 在并联谐振频率  $\omega_p$  附近, 变化率  $\frac{d\beta}{d\omega} < 0$ , 石英谐振器作为并联回路工作。
- 在串联谐振频率  $\omega_s$  附近, 变化率  $\frac{d\beta}{d\omega} > 0$ , 石英谐振器则相当于一个串联谐振回路。

# 内容提要

## 1 石英晶体谐振器

- 石英晶体的压电效应及等效电路
- 石英晶体的阻抗特性
- 石英谐振器的频率-温度特性
- 石英谐振器频率稳定度高的原因

## 2 石英晶体振荡器电路

- 并联型晶振电路
- 串联型晶振电路
- 泛音晶振电路
- 思考

## 3 调制与解调

- 频谱变换

# 石英谐振器的频率-温度特性

- 在一定的温度范围内，石英晶体的各电参量具有较小的温度系数。
- 具体情况与晶片切割类型有关。



# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

## 石英谐振器频率稳定度高的原因

- 频率温度系数小，采用恒温设备后，更可保证频率稳定。
- 石英谐振器的  $Q$  值非常高，在谐振频率  $f_s$  或  $f_p$  附近，相位特性变化率很高（相频特性的斜率很大），这有利于稳频。
- 石英谐振器  $C_q \ll C_0$ ，使振荡频率基本上由  $L_q$  和  $C_q$  决定，外电路对振荡频率的影响很小。
  - 外界电容对振荡频率  $f_0$  几乎没有影响，石英谐振器仍具有很高的频率稳定度。
  - 外界电阻对电感  $L_q$  的分路作用很小，石英谐振器仍可保证有高的品质因数  $Q$ 。

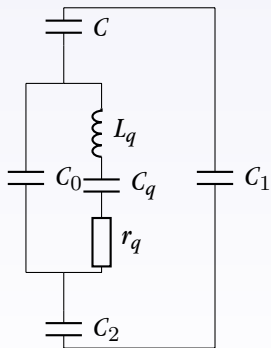
# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 并联型晶振电路（皮尔斯电路）



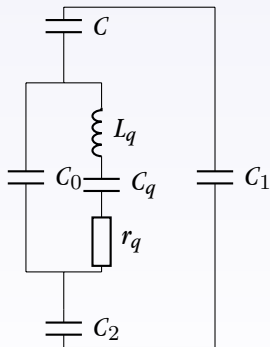
振荡频率  $f_0$

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0 + \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}}$$

选择  $C \ll C_1, C \ll C_2$ , 则  
 $\frac{1}{C_{\Sigma}} \approx \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0 + C} = \frac{C_q + C_0 + C}{C_q(C_0 + C)}$ , 所以

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_q(C_0 + C)}{C_q + C_0 + C}}}$$

# 并联型晶振电路（皮尔斯电路）

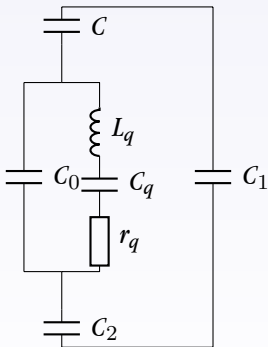


$f_0$  总是处在  $f_s$  和  $f_p$  之间

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_q(C_0+C)}{C_q+C_0+C}}}$$

- $C \rightarrow \infty$ , 则  $f_{0 \min} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q}} = f_s$
- $C \approx 0$ , 则  $f_{0 \max} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q+C_0}}} = f_p$

## 并联型晶振电路（皮尔斯电路）



### 微调频率问题

调节  $C$  可以改变振荡器的频率，为什么要调节振荡频率呢？

- 由晶体组成的并联谐振回路的振荡频率一般不能正好等于石英谐振器产品指标给出的标称频率，有一个很小的差别，需要用负载电容进行校正。
- 晶体的物理、化学性能虽然稳定，但是温度的变化仍会改变它的参数，振荡频率不免会有较慢的变化。

# 内容提要

## 1 石英晶体谐振器

- 石英晶体的压电效应及等效电路
- 石英晶体的阻抗特性
- 石英谐振器的频率-温度特性
- 石英谐振器频率稳定度高的原因

## 2 石英晶体振荡器电路

- 并联型晶振电路
- 串联型晶振电路
- 泛音晶振电路
- 思考

## 3 调制与解调

- 频谱变换



## 串联型晶振电路

- 晶体工作在串联谐振频率  $f_s$  附近，阻抗呈短路，构成正反馈产生振荡。
- 当振荡频率等于石英谐振器的串联谐振频率  $f_s$  时，晶体呈现纯电阻，阻抗最小，正反馈最强，相移为零，满足相位条件。

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 泛音晶振电路

## 泛音

石英片振动的机械谐波。

- 电气谐波与基频是整数倍的关系，且谐波和基波同时并存。
- 泛音是在基频奇数倍附近，且两者不能同时并存。
- 用泛音晶振也可以组成串联型泛音晶体振荡器，LC回路应调谐在需要的 $n$ 次泛音上，其频率稳定度仍由晶体控制，可以做得很高。

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 思考

## 从普通放大到调谐放大再到调谐振荡

- 低频电压/功率放大器（三极管）
- 小信号调谐放大器（三极管+LC回路）
- 高频调谐功率放大器（三极管+LC回路）
- 三点式LC振荡器（三极管+LC回路）

## 振荡器

- RC振荡器
- LC振荡器
- 石英晶体振荡器

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

# 内容提要

- 1 石英晶体谐振器
  - 石英晶体的压电效应及等效电路
  - 石英晶体的阻抗特性
  - 石英谐振器的频率-温度特性
  - 石英谐振器频率稳定度高的原因
- 2 石英晶体振荡器电路
  - 并联型晶振电路
  - 串联型晶振电路
  - 泛音晶振电路
  - 思考
- 3 调制与解调
  - 频谱变换

## 频谱变换电路

将输入信号进行频谱变换，获得所需频率输出信号。

**频谱搬移电路** 将输入信号频谱沿频率轴进行不失真的搬移（振幅调制与解调，混频电路，等）。

**频谱非线性变换电路** 将输入信号频谱进行特定的非线性变换（频率调制与解调电路，等）。

器件工作在非线性状态，产生新的频率分量，实现频谱变换。



