

# 通信电子电路

## 第二章 小信号调谐放大器



概述

谐振回路

LC 谐振回路

调谐放大器的级联

晶体管高频等效电路

高频调谐放大器

调谐放大器的级联

高频调谐放大器的稳定性

集中选频小信号调谐放大器



# 第2章 小信号调谐放大器



[返回总目录](#)

## 2.1 概述

## 2.2 LC谐振回路

## 2.3 单调谐放大器

## 2.4 晶体管高频等效电路及频率参数

## 2.5 高频调谐放大器

## 2.6 调谐放大器的级联

## 2.7 高频调谐放大器的稳定性

## 2.8 集中选频小信号调谐放大器

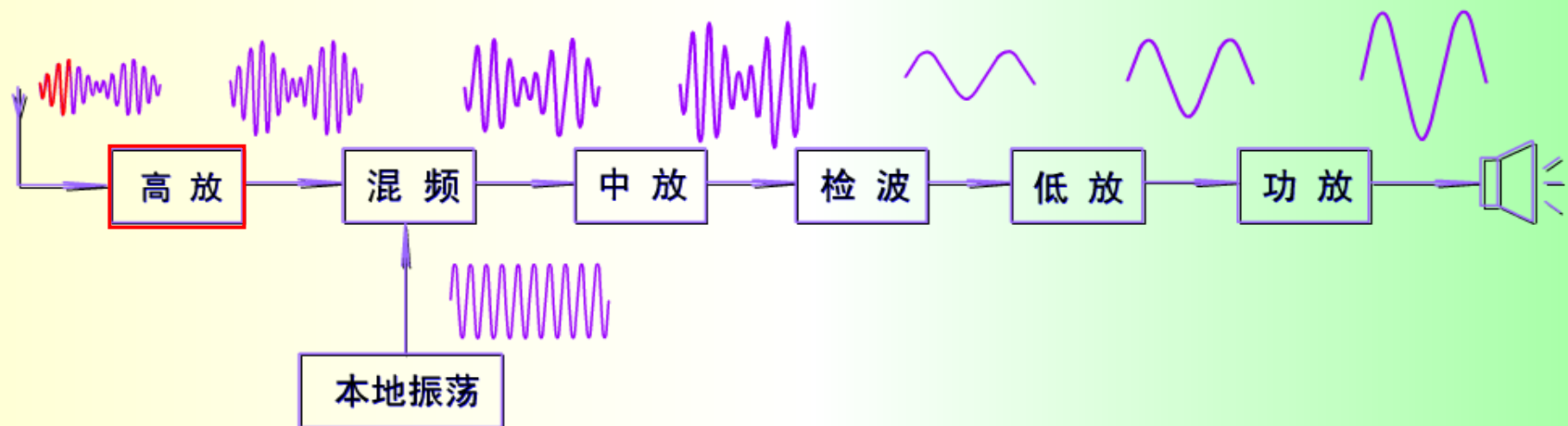
# 本章重点与难点

## (一) 本章重点

1. 并联谐振回路的选频作用；  
品质因数 ( $Q$ ) ---- quality factor
2. 谐振回路的接入方式；
3. 晶体管高频等效电路，混合  $\pi$  等效电路，
4. 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；
5. 高频单调谐放大器的选频功能和谐振电压放大倍数计算；
6. 多级单调谐回路放大器。

## (二) 本章难点

1. 晶体管  $I$  参数等效电路，晶体管的高频放大能力
2. 高频单管单调谐放大器的选频功能和谐振电压放大倍数计算.



超外差接收机组成方框图

# 2.1 概述

## 一、调谐放大器分类

- 小信号调谐放大器

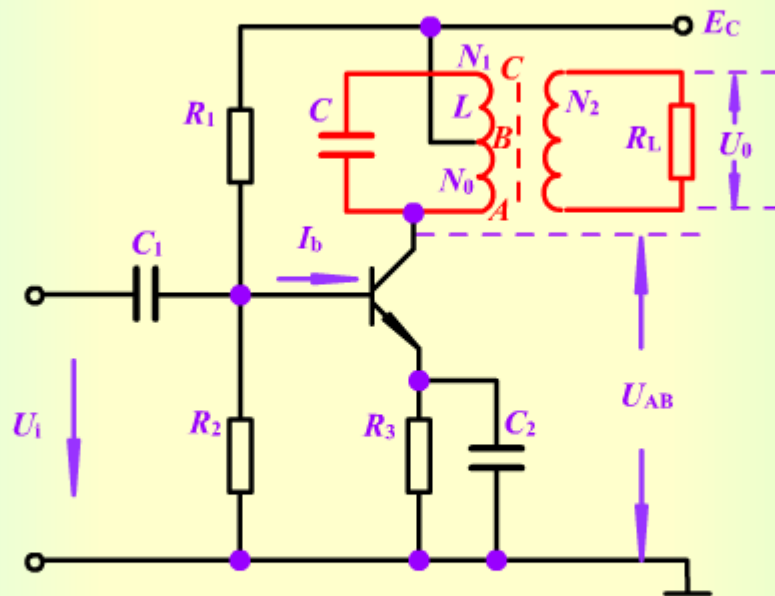
小信号：输入信号  $\mu\text{V} \sim \text{mV}$

要 求：增益足够大，通频带足够宽，选择性好，工作在甲类，多用于接收机。

- 调谐功率放大器

大信号：输入信号  $\text{mV}$  以上

要 求：大的功率和效率，工作在丙类，多用于发射机。



单调谐放大器

YHZ/XJK

图2-20 单调谐放大器

## 二、电路特点

采用谐振回路作为放大器的集电极负载。

## 三、组成与作用

主要由放大器和谐振回路组成，  
作用：放大、选频。



## 四、技术指标

### 1. 放大能力

用谐振时的放大倍数  $K_0$  表示

### 2. 选频性能

#### (1) 通过有用信号的能力

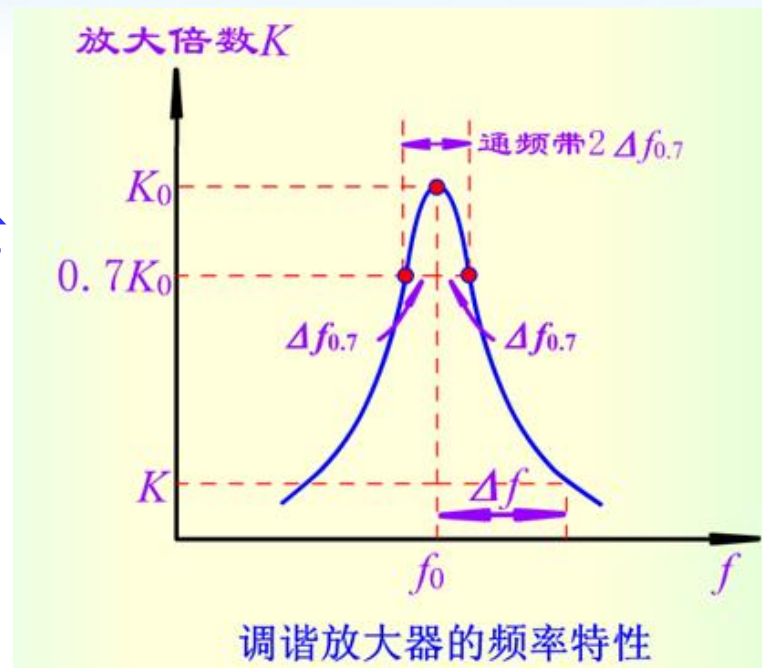
即具有一定的通频带：

放大器能有效放大的频率范围。

#### (2) 抑制无用信号的能力

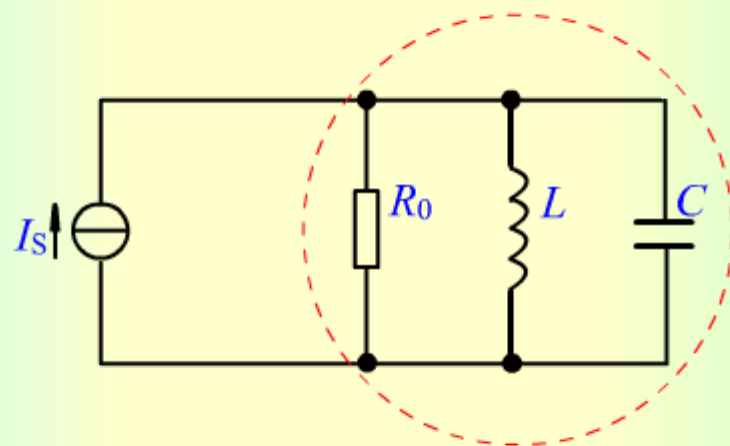
即有足够的选择性：

放大器对其他频率信号抑制能力的衡量。



## 2.2 $LC$ 谐振回路

### 主要讨论并联谐振回路



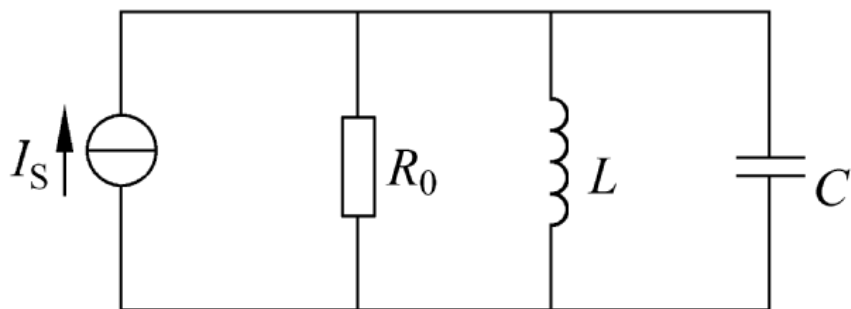
并联谐振回路

YHZ/XJK

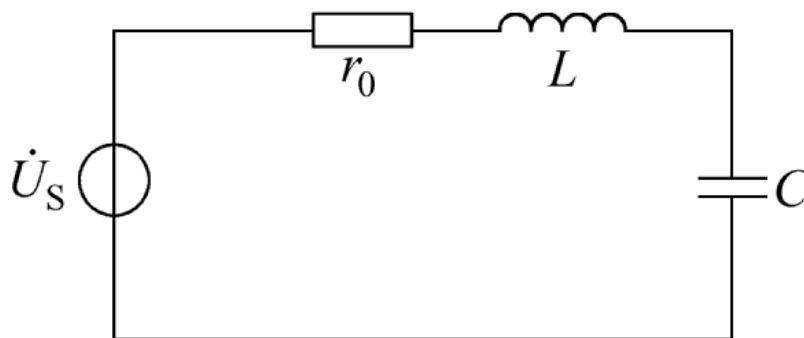
图2-2 并联谐振回路

# 一、并联谐振与串联谐振回路比较

## 1. 电路



并联谐振回路



串联谐振回路

$R_0$ : 并谐电路的空载谐振阻抗

对信号源而言,  
 $L, C$  三者是并联关系

$r_0$ : 串谐电路的空载谐振阻抗。

对信号源而言,  
 $L, C$  三者是串联关系

## 2. 谐振条件

当  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  时,

得谐振频率  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

串联、并联谐振回路的谐振频率相等

谐振意义：谐振时， $\dot{U}$ ， $\dot{I}$  同相。

### 3. 导纳或阻抗

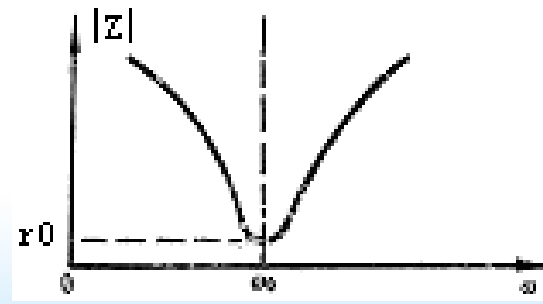
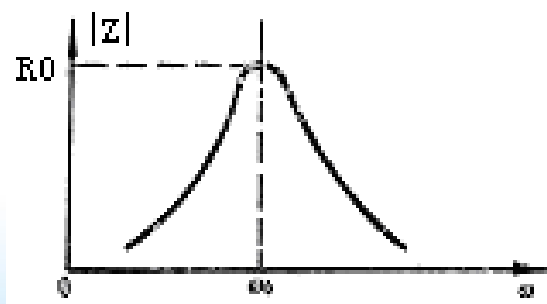
并联谐振

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

串联谐振

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

### 4. 阻抗特性曲线



## 5. 品质因数-----quality factor

$$Q = \frac{\text{谐振时}L\text{（或}C\text{）的无功功率}}{\text{谐振时}r_0\text{或}R_0\text{的有功功率}}$$

并联谐振

$$Q = \frac{\text{谐振电阻}R_0}{\text{谐振时的电抗}\omega_0 L(1/\omega_0 C)}$$

$$Q = \frac{R_0}{\omega_0 L} = R_0 \omega_0 C$$

串联谐振

$$Q = \frac{\text{谐振时的电抗}\omega_0 L(1/\omega_0 C)}{\text{谐振电阻}r_0}$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r_0} = \frac{1}{\omega_0 C \cdot r_0}$$

$Q$ 用途：可以衡量谐振现象的尖锐程度

## 二、并联谐振回路

### 1. 并联谐振回路的阻抗特性

等效阻抗  $|Z| = \frac{1}{|Y|}$   $Y$ 为等效导纳

$Y = G_0 + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$  其中, 电导  $G_0 = \frac{1}{R_0}$

写成指数形式为:  $Y = |Y|e^{j\phi}$

$$|Y| = \sqrt{G_0^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} \quad \phi = \arctan \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{G_0}$$

(单位为西门子**S**) 导纳角为: (单位为弧度**rad**)

在实际中，有时用阻抗形式比较方便，故

$$|Z| = \frac{1}{|Y|} = \frac{1}{\sqrt{G_0^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}}$$

当回路谐振时，

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$\sqrt{\frac{L}{C}}$  称为谐振回路的特性阻抗。

$$Q = \frac{R_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R_0}{\omega_0 L} = R_0 \omega_0 C$$

引入品质因数后，

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

(自行推导)



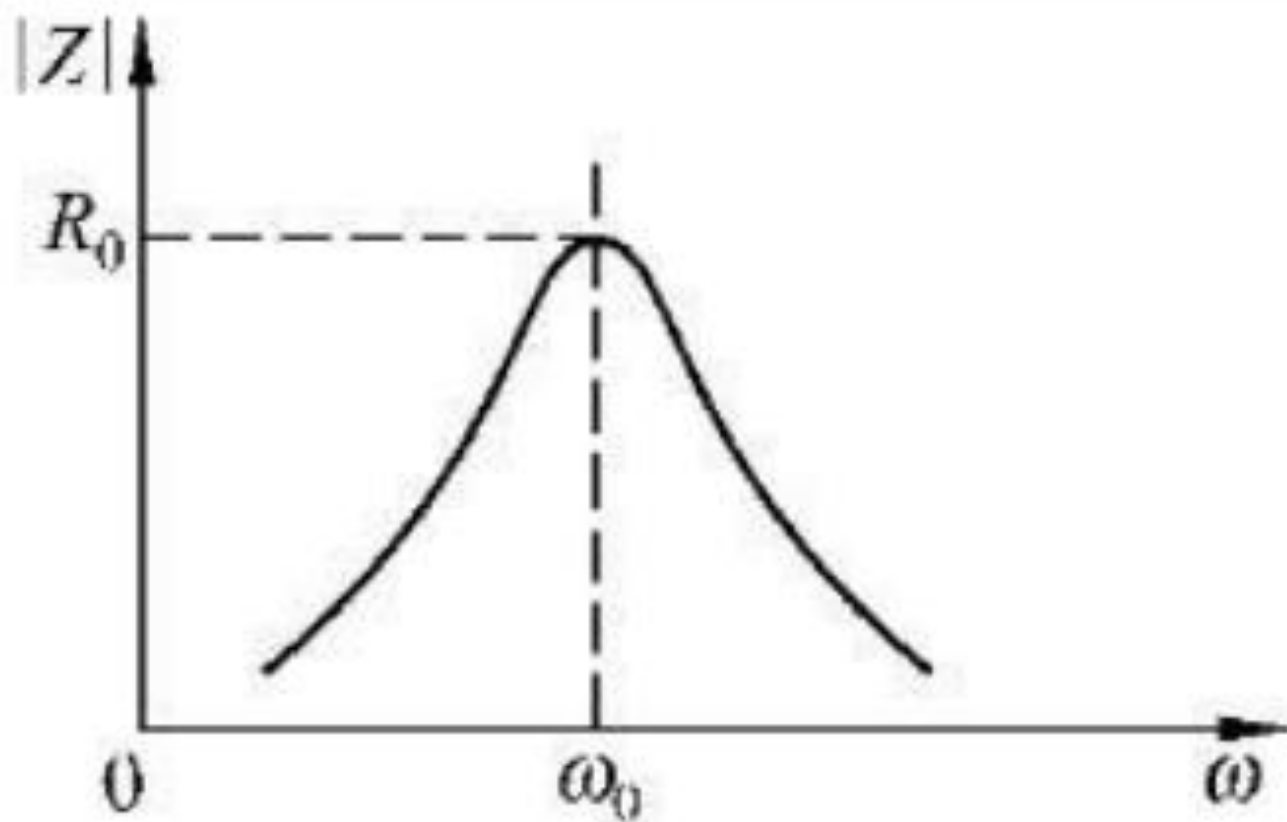


图2-3 并联谐振回路的阻抗特性

## 2. 并联谐振回路的选频特性

回路电压特性曲线

——并联电路谐振曲线

设信号源为恒流源，响应为回路电压

$$\dot{U} = \dot{I} Z$$

模为

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

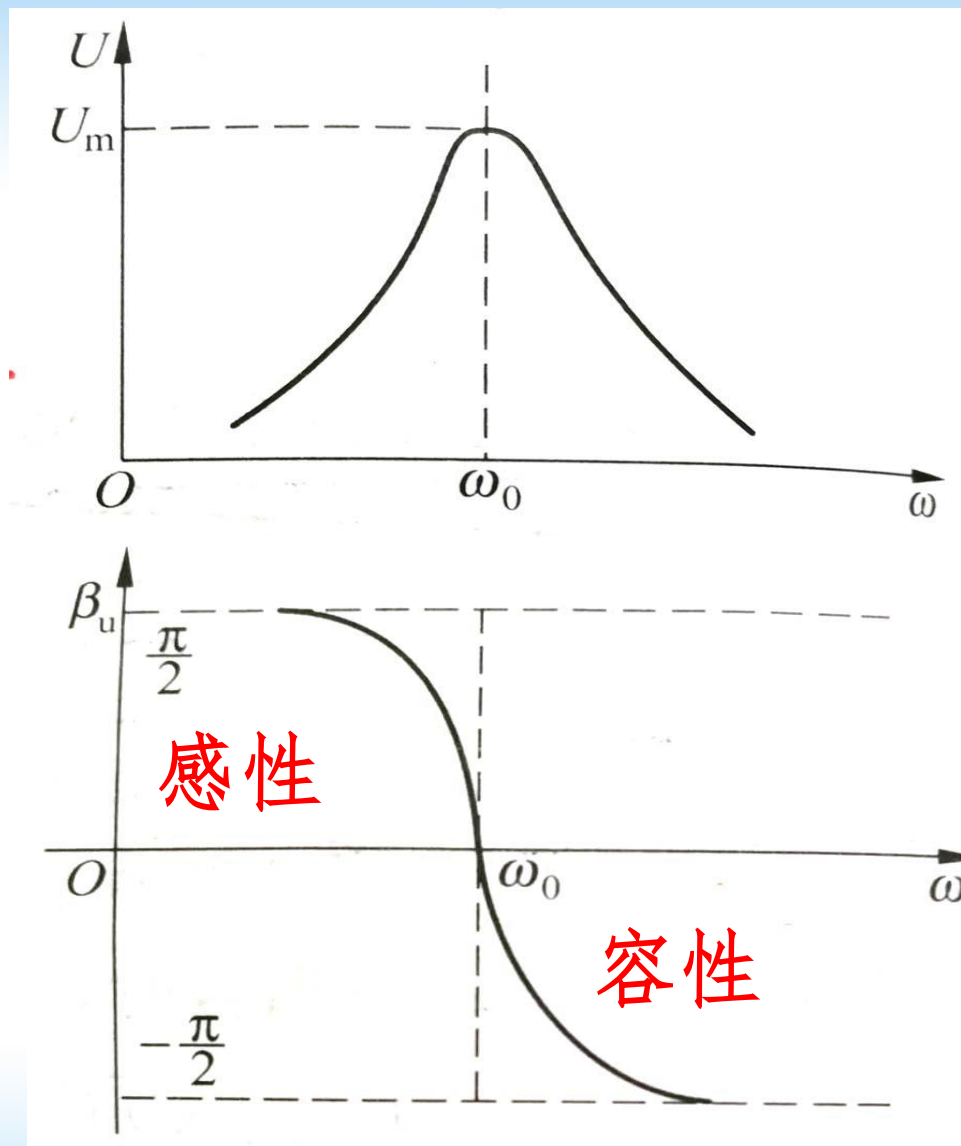
$$U = I |Z| = \frac{U_m}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}}$$

谐振时的电压幅值

$$U_m = I_S R_0$$

相位角

$$\beta_u = -\arctan Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$$



回路电压特性曲线

### 3. 谐振曲线分析

#### (1) 通频带

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

在谐振点附近可简化为

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

谐振曲线的相对抑制比

$\Delta f$ ：信号频率偏离谐振点  $f_0$  的数量。

$$\Delta f = f - f_0$$

**定义：** 把 $U/U_m$ 从1下降到 $1/\sqrt{2}$ 处的两个频率 $f_1$ 和 $f_2$ 的范围称为**通频带**

$$B = f_2 - f_1$$

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

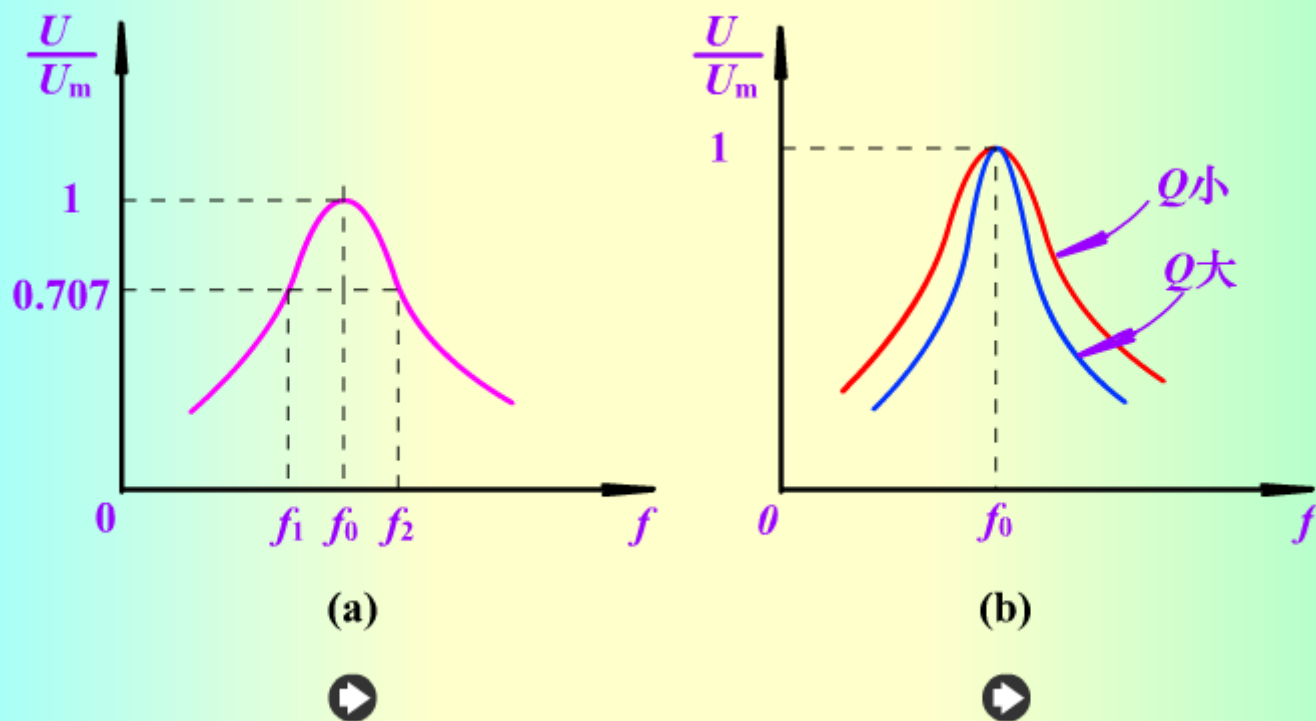
$$Q \frac{2\Delta f}{f_0} = \pm 1$$

$$\begin{cases} Q \frac{2(f_2 - f_0)}{f_0} = 1 \\ Q \frac{2(f_1 - f_0)}{f_0} = -1 \end{cases}$$

$$Q \frac{2(f_2 - f_1)}{f_0} = 2$$

$$B = \frac{f_0}{Q}$$

谐振回路通频带及  $Q$  对谐振曲线的影响



YHZ/XJK

图2-5  $Q$  对谐振曲线的影响及谐振回路通频带

## (2) 选择性

对某一频率偏差  $\Delta f$  下的  $\frac{U}{U_m}$  值叫做回路对这一指定频偏下的选择性。记为： $\alpha$

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

$\alpha$  值愈小选择性愈高。

$$\alpha \text{ (dB)} = 20\lg\alpha$$

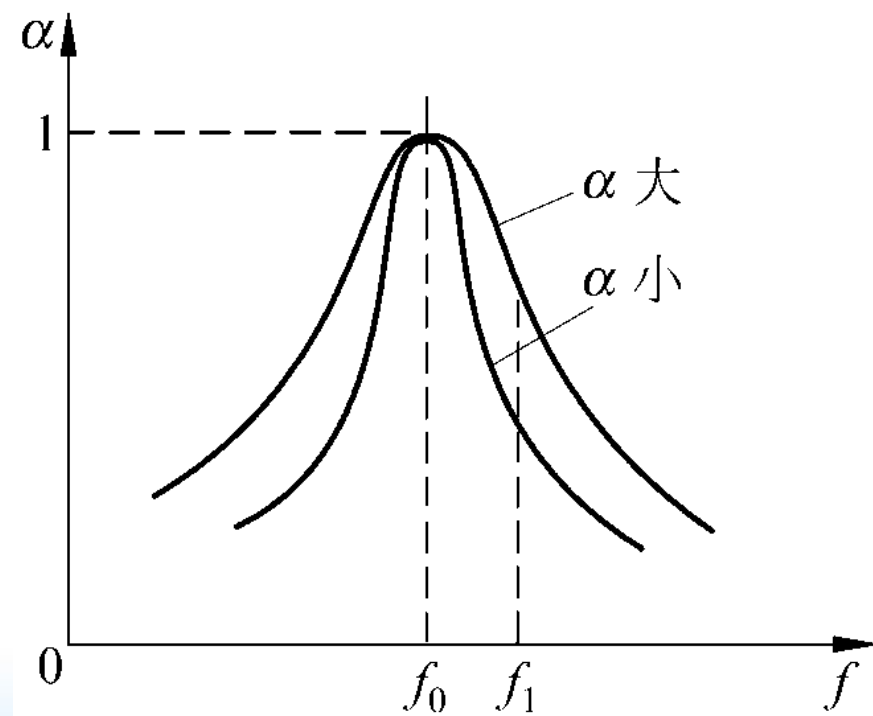


图2-6  $\alpha$  值对谐振曲线的影响

### (3) 矩形系数

$$K_{0.1} = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}}$$

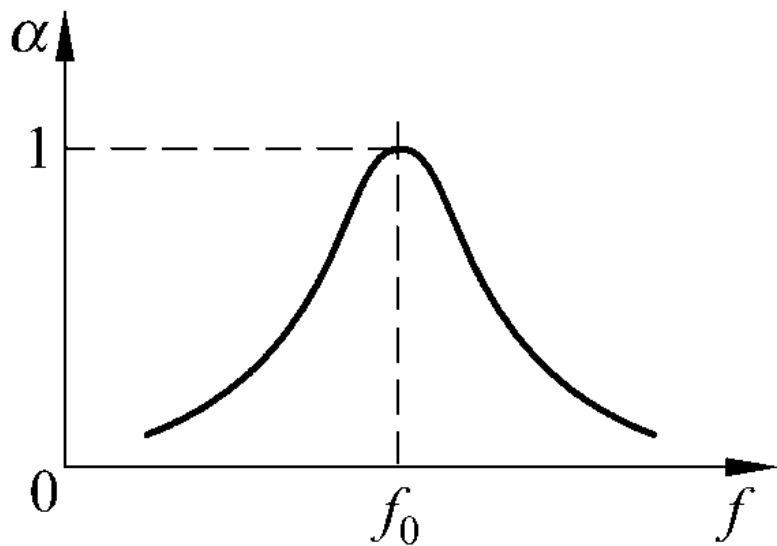
$$\alpha = 0.1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (Q \frac{2\Delta f}{f_0})^2}}$$

$$Q \frac{2\Delta f}{f_0} = 10$$

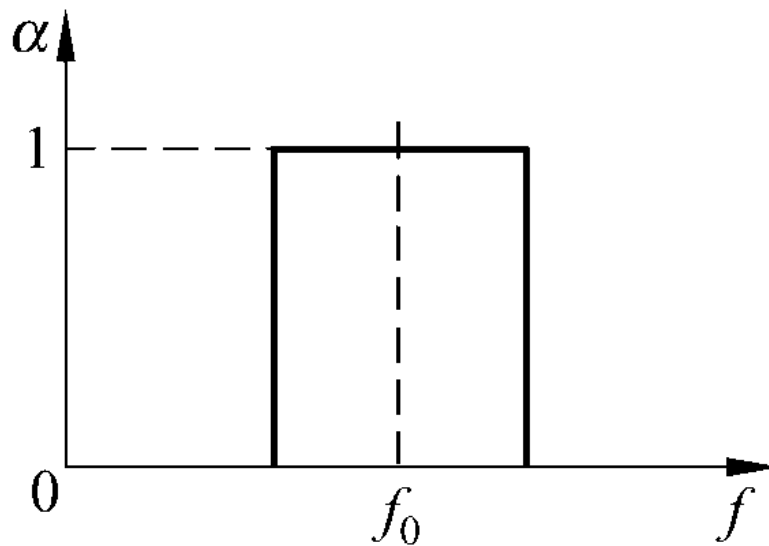
$$B_{0.1} = 2\Delta f = 10 \frac{f_0}{Q}$$

$$K_{0.1} = 10$$





(a) 实际回路



(b) 理想回路

图2-7 幅频特性比较

## 2.2.2 负载和信号源内阻对谐振回路的影响

### 1. 负载和信号源内阻为纯电阻

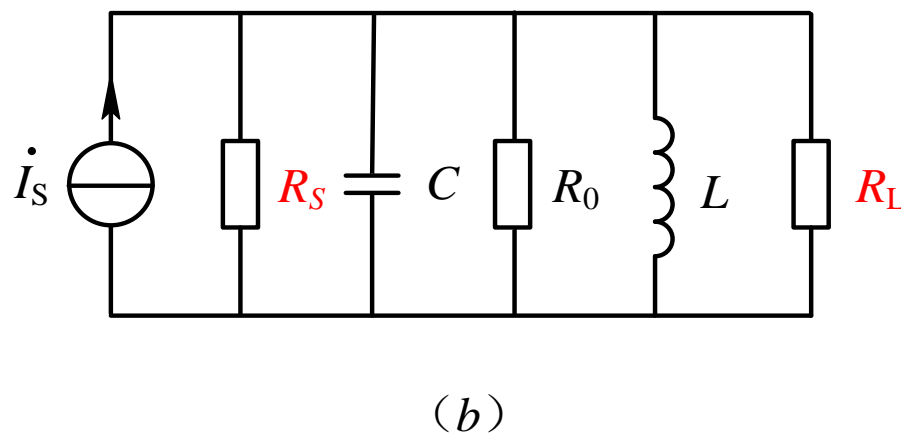
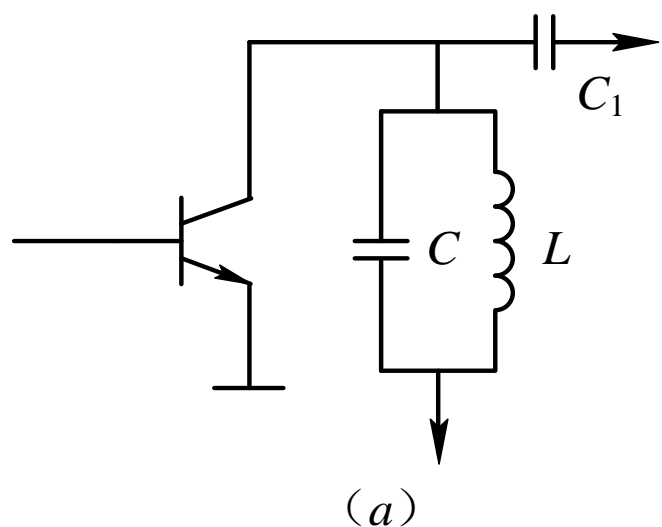


图2-8 带信号源内阻和负载的并联谐振回路

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

不变

$$Q_L = \frac{R_\Sigma}{\omega_0 L} = \frac{1}{\omega_0 L (G_0 + G_s + G_L)}$$

下降

$$Q_0 = \frac{1}{\omega_0 L G_0}$$

说明： $Q_0$ 是在没接入负载、信号源时的品质因数，  
称为无载（或空载）品质因数。

$Q_L$ 为有载品质因数。 $Q_L < Q_0$

所以，有载时，电路通频带 $\uparrow$ ，选择性 $\downarrow$ 。

$$\frac{Q_L}{Q_0} = \frac{G_0}{G_0 + G_S + G_L} = \dots = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_S} + \frac{R_0}{R_L}}$$

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \frac{R_0}{R_S} + \frac{R_0}{R_L}}$$

已知  $Q_0$  求  $Q_L$

## 2. 负载和信号源内阻含有电抗成分（一般是容性）

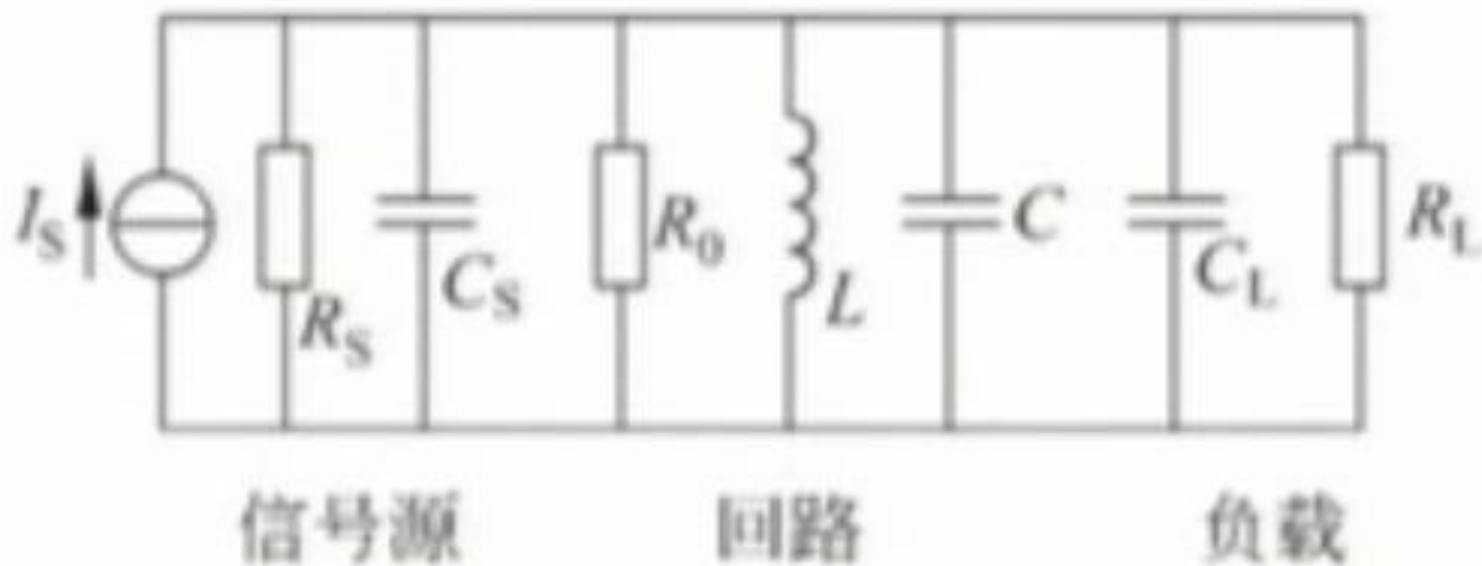


图2-9 考虑信号源输出电容和负载输出电容的并联谐振回路 29

回路总电容为：  $C_{\Sigma} = C_S + C + C_L$

**注意：**考虑了负载电容和信号源输出电容后，在谐振回路的谐振频率、品质因数等的计算中，式中的电容都要以  $C_{\Sigma}$  代入。**如：谐振频率**

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma}}}$$

## 四、谐振回路的接入方式

上述谐振回路中，信号源和负载都是直接并在 $L$ 、 $C$ 元件上。

因此存在以下三个问题：

第一，**谐振回路 $Q$ 值大大下降**，一般不能满足实际要求；

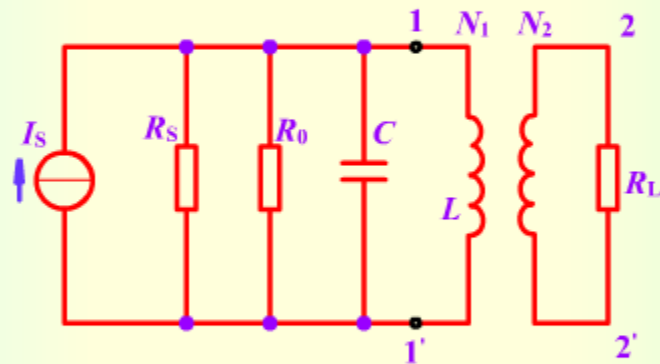
第二，信号源和负载电阻常常是不相等的，即阻抗不匹配。当相差较多时，负载上得到的功率可能很小；

第三，信号源输出电容和负载电容影响回路的谐振频率，在实际问题中， $R_S$ 、 $R_L$ 、 $C_L$ 、 $C_S$ 给定后，不能任意改动。

解决这些问题的途径是采用“阻抗变换”的方法，使信号源或负载不直接并入回路的两端，而是经过一些简单的变换电路，把它们折算到回路两端。



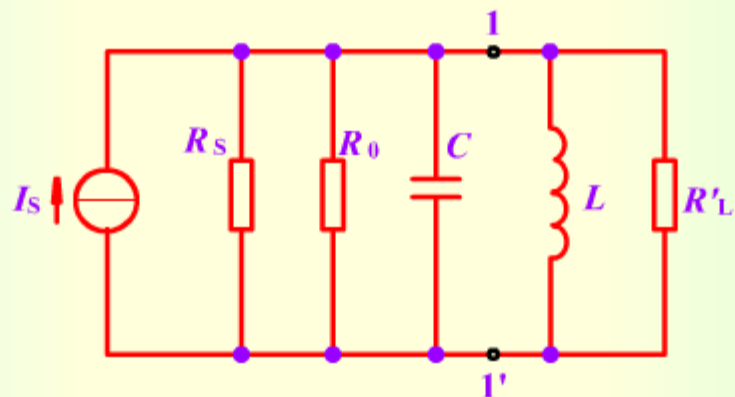
# 1. 互感变压器接入方式



互感变压器接入电路

YHZ/XJK

图2-1 0 互感变压器接入电路示意图



互感变压器接入电路的等效电路

YHZ/XJK

图2-1 1 互感变压器接入电路的等效电路

$$R_L' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$$

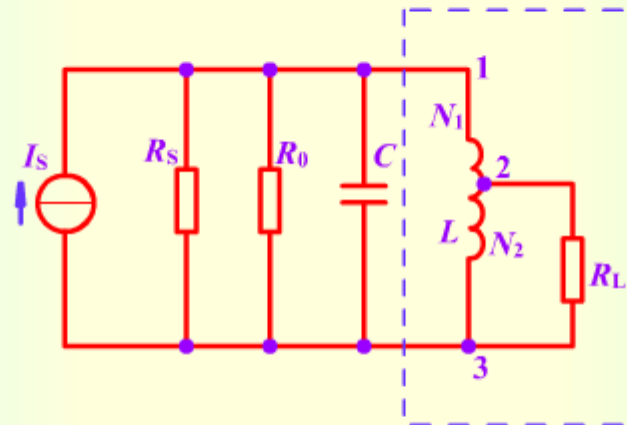
若  $\frac{N_1}{N_2} > 1$  则  $R_L' > R_L$

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

$$(2) \quad Q_L = \frac{R_\Sigma}{\omega_0 L} \uparrow$$

$$R_\Sigma = R_S // R_0 // R_L'$$

## 2. 自耦变压器接入（电感抽头接入）



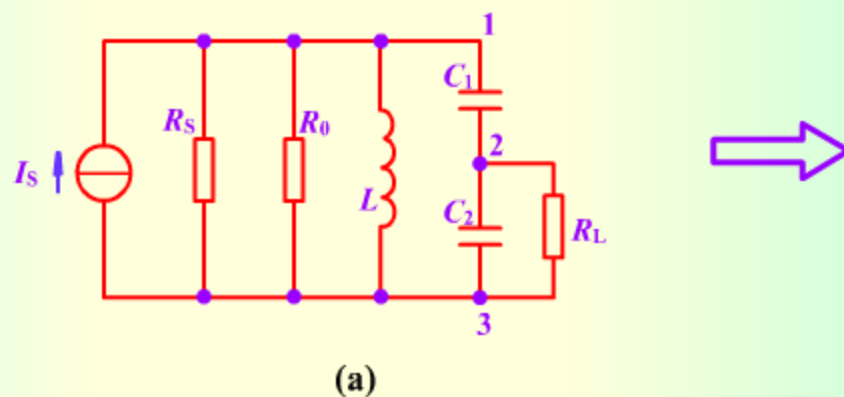
自耦变压器接入

YHZ/XJK

$$R_L' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$$

$$R_L' > R_L$$

### 3. 电容抽头接入



电容抽头接入

YHZ/XJK

图2-1 4 电容抽头接入电路

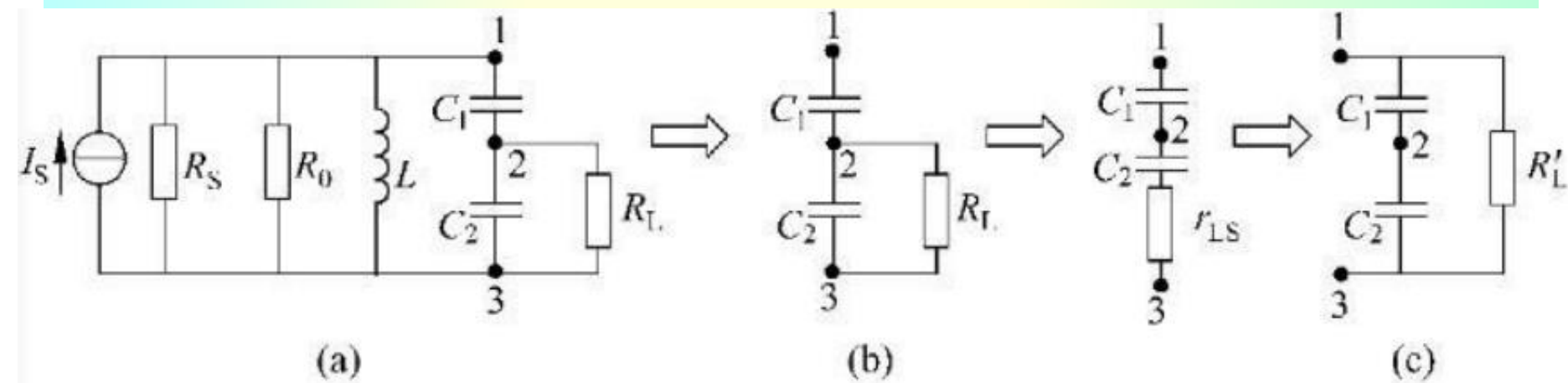
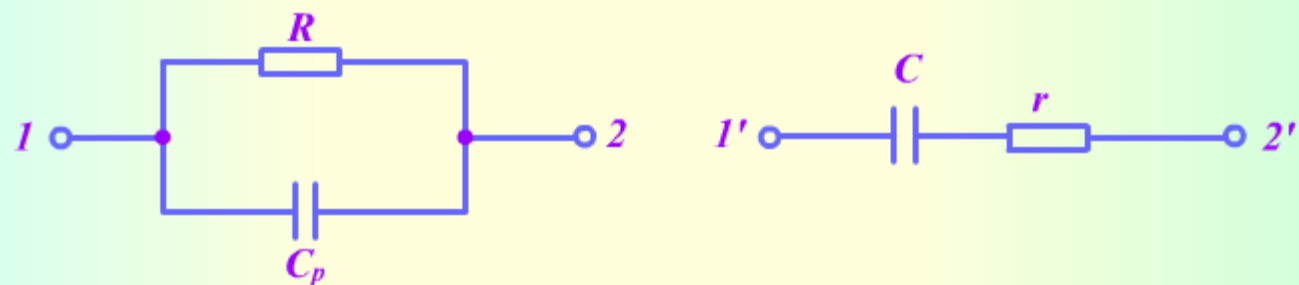


图 2-14 电容抽头接入电路

## 电容的串、并联等效变换：

$$\left\{ \begin{array}{l} R = r(1 + Q_c^2) \\ C_p = \frac{C}{1 + \frac{1}{Q_c^2}} \end{array} \right. \xrightarrow{Q_c \gg 1} \left\{ \begin{array}{l} R \approx rQ_c^2 \\ C_p \approx C \end{array} \right.$$

等效变换关系

其中：

串联  $Q_c = \frac{1}{\frac{\omega C}{r}} = \frac{1}{r\omega C}$

并联  $Q_c = \frac{R}{\frac{1}{\omega C_p}} = \omega C_p R$

$$R_L' = Q_C' r_{LS} = \left( \frac{C_2}{C} \right)^2 R_L = \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^2 R_L$$

$$\therefore \frac{C_1 + C_2}{C_1} > 1$$

$$\therefore R_L' > R_L$$

变换后的并联等效  
电路如图2-16所示

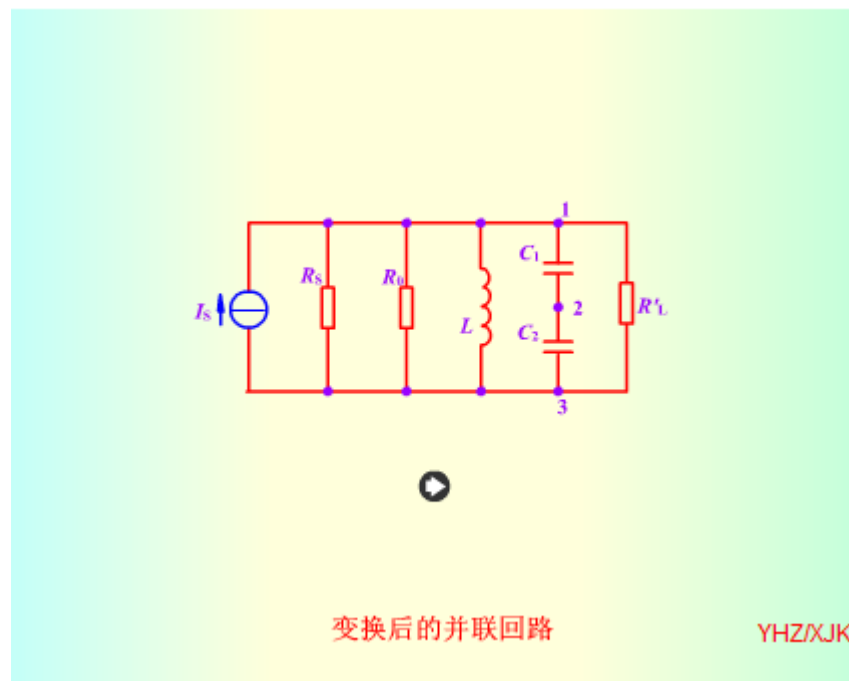


图2-16变换后的并联等效电路



## 4. 接入系数 $n$

1与2重合时,  $R_L$ 全部接到电路两端, 对回路影响最明显;

2从上向下滑动时,  $R_L$ 与回路的连接↓, 对回路的影响↓;

2与3重合时,  $R_L$ 与回路脱离联系, 对回路没任何影响。

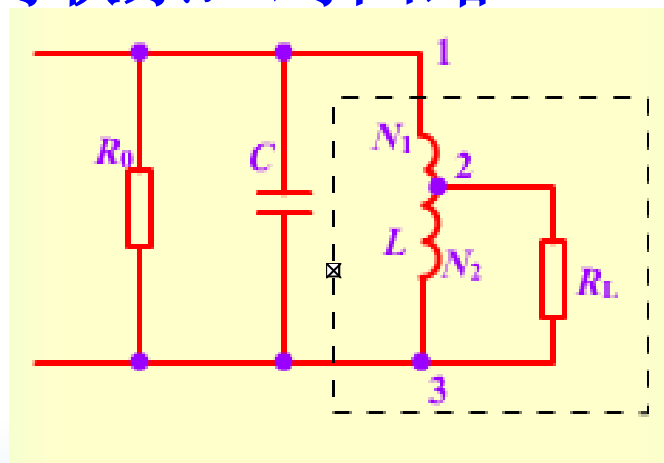
该变化过程, 反映在下式中:

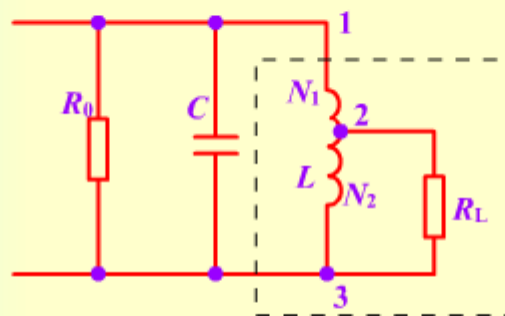
$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$$

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

$$R'_L = \frac{1}{n^2} R_L$$

“部分接入”的概念



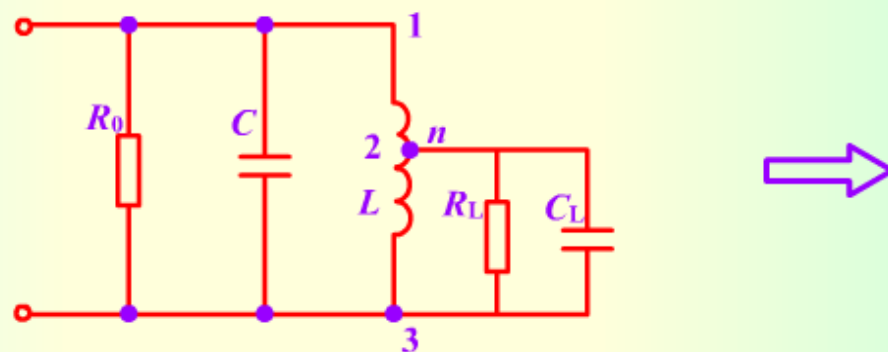


“部分接入”的概念

☒

YHZ/XJK

图 2 — 1 7 “部分接入”的概念



负载电容等效折算

YHZ/XJK

图 2 — 1 8      负载电容等效折算

## 说明:

(1)  $0 < n < 1$  , 调节  $n$  可改变折算电阻数值。

$n$  越小,  $RL$  与回路接入部分越少, 对回路影响越小,  $R_L'$  越大。

(2) 对于电容抽头接入, 接入系数为

$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

(3) 当外接负载不是纯电阻, 包含有电抗成分时, 上述等效变换关系仍适用。

$$R_L' = \frac{1}{n^2} R_L \qquad C_L' = n^2 C_L$$

(4) 谐振回路信号源的部分接入的折算方法与上述负载的接入方式相同。

$$R_S' = \frac{1}{n^2} R_S \quad I_S' = n I_S$$

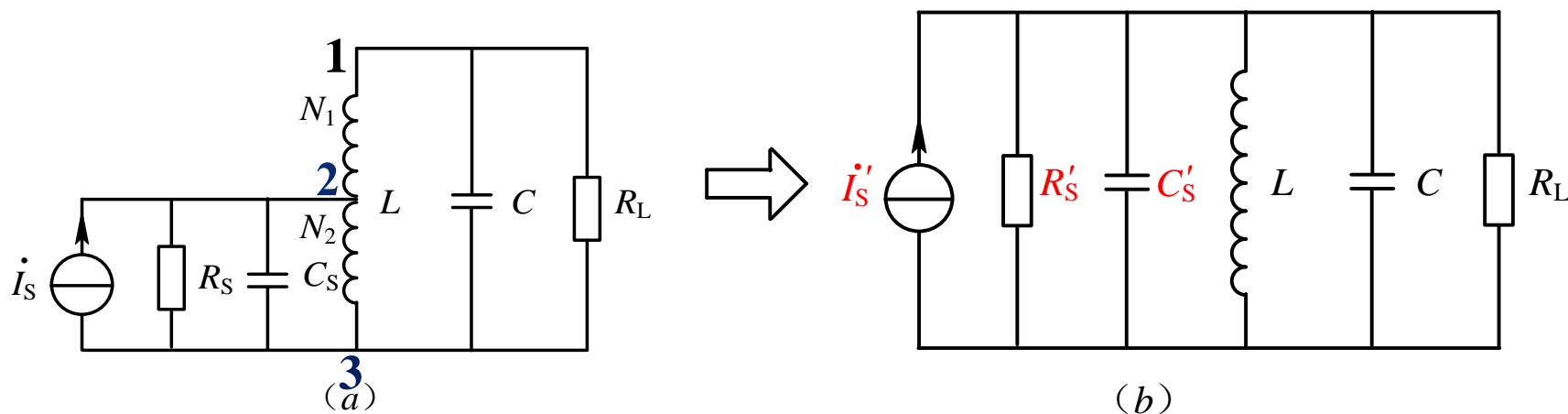
(5) 为区别信号源和负载与回路的接入系数，在下面信号源和负载均采用部分接入的电路中，规定：

$n_1$  为信号源与回路的接入系数，

$n_2$  为负载与回路的接入系数。

# 谐振回路的信号源采用部分接入的方法

对谐振回路的信号源同样可采用部分接入的方法，折算方法相同。例如如图2-19所示电路中，信号源内阻从2-3端折算到1-3端，电流源也要折算到1-3端，计算式为



$$R'_S = \frac{1}{n^2} R_S \quad C'_S = n^2 C_S \quad I'_S = n I_S$$

- 通过以上讨论得知：

采用任何接入方式，**都可使回路的有载 $Q_L$ 值提高，而谐振频率不变**。同时，**只要负载和信号源采用合适的接入系数，即可达到阻抗匹配，输出较大的功率。**

