



成都信息工程大学
Chengdu University of Information Technology

高频电子线路

第二章 谐振与小信号 选频放大电路



本章学习目标

- 理解谐振选频电路的功能、作用及其基本构成方式；掌握关于选频电路的分析过程和方法，以及相应的参数指标。
- 理解阻抗变换的作用和意义；掌握阻抗变换电路的几种形式和分析方法。
- 理解小信号选频放大电路的作用、构成和工作原理；掌握小信号选频放大电路的简单分析过程、方法和相应指标

频带宽度表示法

绝对带宽：以频率作为单位表示的带宽是指绝对带宽。

$$BW(Hz) = f_H - f_L$$

频带宽度表示法

相对带宽(无量纲)

1. 百分比带宽：定义为绝对带宽占中心频率的百分数

$$RBW = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\% = \frac{BW}{f_0} \times 100\% \quad f_0 = \frac{f_H + f_L}{2}$$

2. 倍数带宽：定义为高端截止频率 f_H 与低端截止频率 f_L 的比值

$$K = \frac{f_H}{f_L}$$

分贝表示法

分贝是一个无量纲的比值，用来表示物理量相对值

$$G_P (\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right)$$

$$G_V (\text{dB}) = G_P (\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{V_{OUT}^2 / Z_0}{V_{IN}^2 / Z_0} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right)$$

分贝表示法

绝对功率的分贝表示

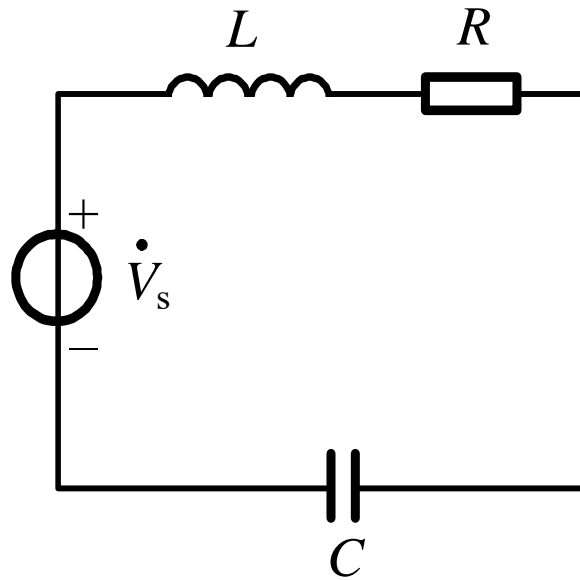
$$P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1\text{mW}} \right)$$

使用 dBm 表示的一些典型功率值

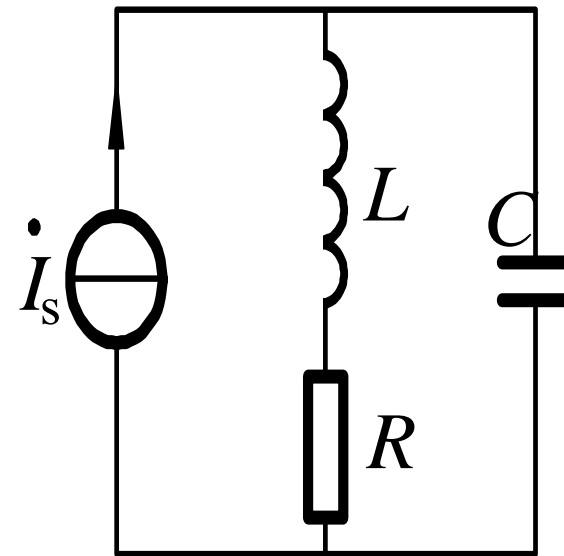
P	0.01mW	0.1mW	1mW	10mW	100mW	1W
P(dBm)	-20dBm	-10dBm	0dBm	10dBm	20dBm	30dBm

频率选择电路-谐振回路

由电感线圈和电容器组成的振荡电路，称为谐振回路



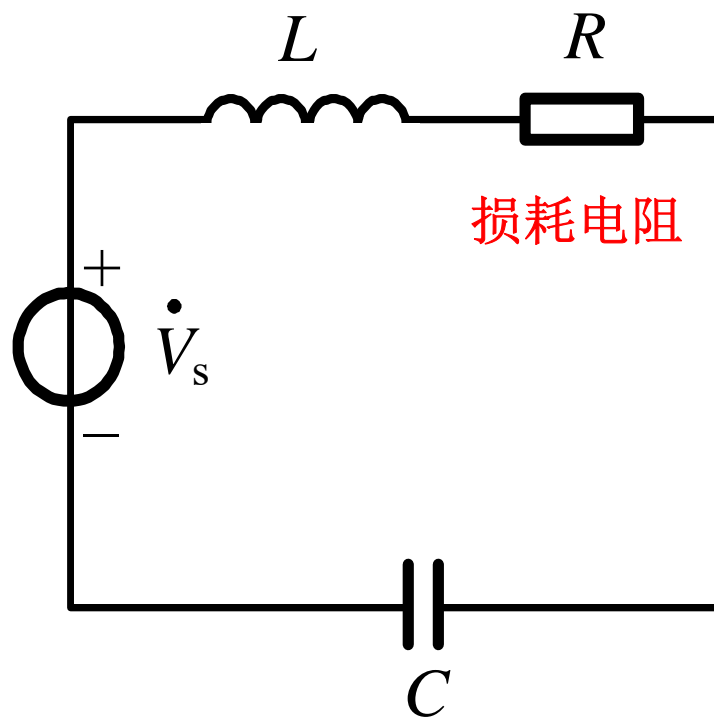
串联谐振回路



并联谐振回路

串联谐振回路

信号源与电容C和电感L串接，就构成串联振荡回路



串联谐振回路

串联谐振回路阻抗的谐振特性 $Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$

谐振频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 或 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

回路的品质因数 $Q = 2\pi \frac{I^2 L}{T I^2 R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

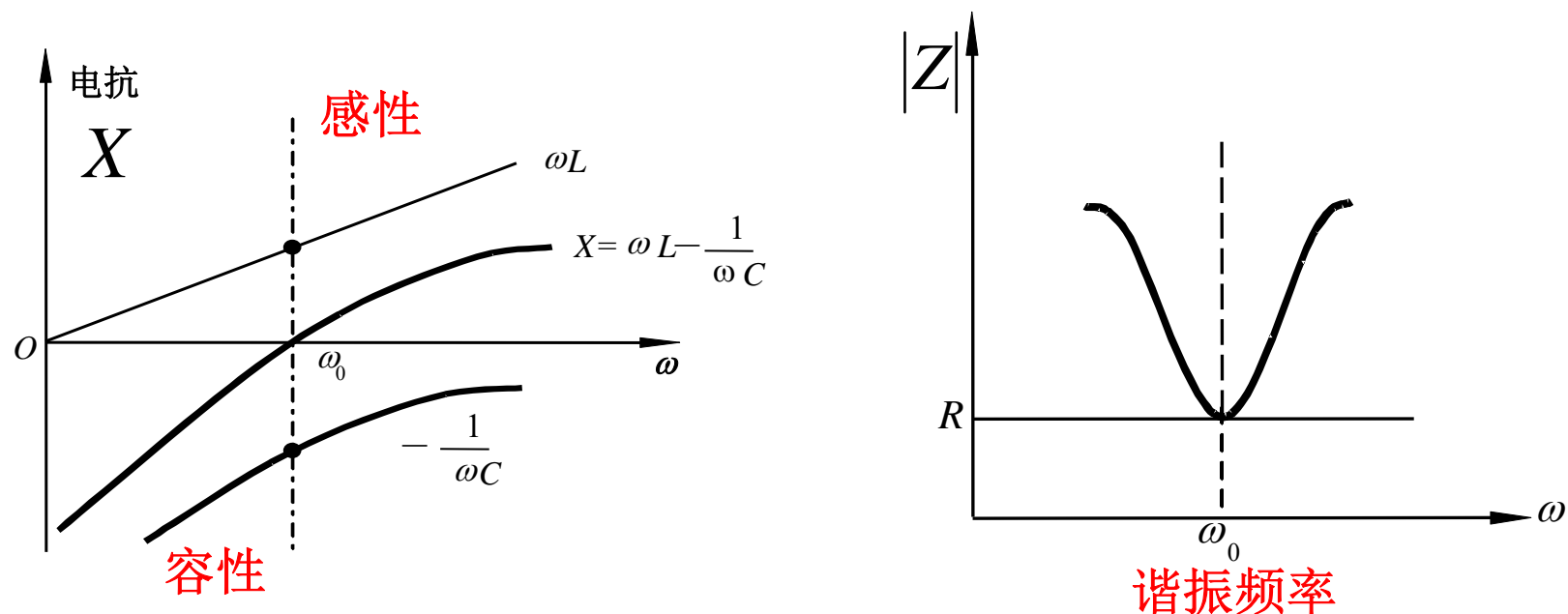
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{Z_s} = \frac{\dot{U}_s}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\dot{U}_s / R}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

谐振时 $Z_s|_{\min} = R$ $\dot{I}_{\max} = \frac{\dot{U}_s}{R}$

$$\dot{U}_C = \dot{I}_{\max} \frac{1}{j\omega_0 C} = \frac{\dot{U}_s}{j\omega_0 C R} = -jQ\dot{U}_s \quad \dot{U}_L = \dot{I}_{\max} j\omega_0 L = j\frac{\omega_0 L \dot{U}_s}{R} = jQ\dot{U}_s$$



串联谐振回路

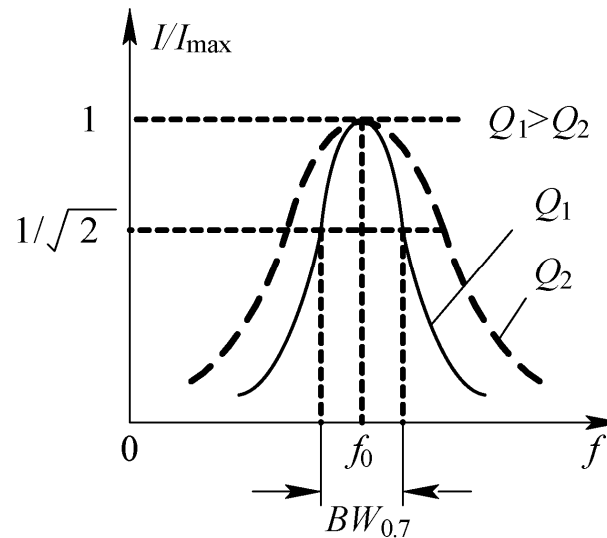


串联振荡回路的谐振特性：其阻抗在某一特定频率上具有最小值（谐振状态），而偏离此频率时将迅速增大

高频电子线路

串联谐振回路的谐振曲线与通频带

$$\dot{N}(\omega) = \frac{\dot{I}}{\dot{I}_{\max}} = \frac{1}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = N(\omega)e^{j\Psi(\omega)}$$



$$N(\omega) = \frac{I(\omega)}{I(\omega_0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

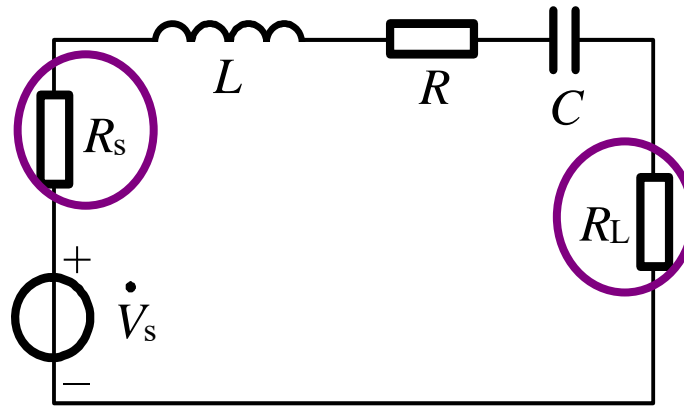


信号源内阻和负载对品质因数的影响

有载品质因数 Q_L

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{R + R_S + R_L}$$
$$= \frac{Q_0}{1 + \frac{R_S}{R} + \frac{R_L}{R}}$$

考虑信号源内阻 R_S 和负载电阻 R_L

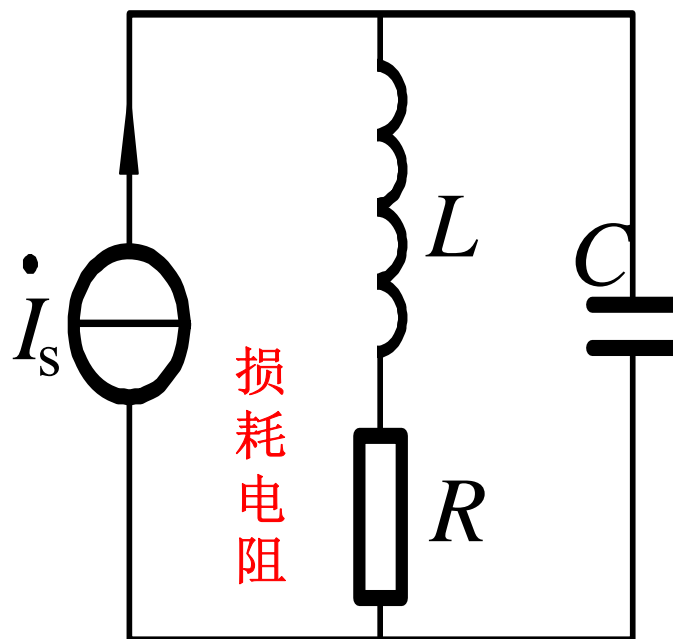


回路总的损耗增大，回路 Q 值将下降

没有考虑信号源内阻和负载电阻时回路本身的 Q 值叫做无载 Q 值(或空载 Q 值)，用 Q_0 表示；而把考虑信号源内阻和负载电阻时的 Q 值叫做有载 Q 值，用 Q_L 表示。

并联谐振回路

信号源与电容C和电感L并接，就构成并联振荡回路

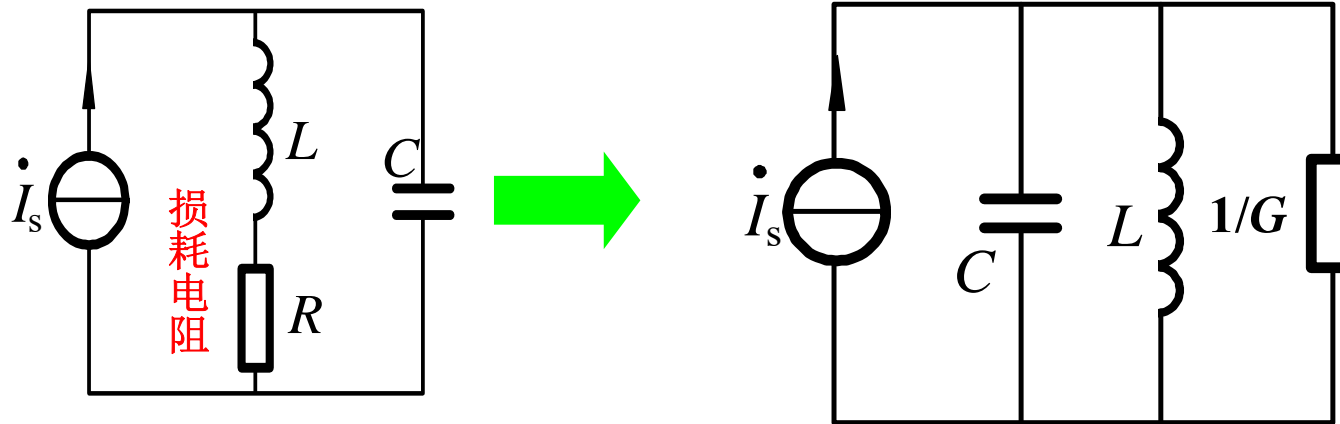


并联谐振回路

并联谐振回路阻抗的谐振特性

$$\omega L \square R$$

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \approx \frac{\frac{L}{C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{1}{\frac{CR}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$$



$$Y = G + jB = \frac{CR}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

$$R_p = \frac{1}{G} = \frac{L}{CR}$$

$$B = \omega C - \frac{1}{\omega L}$$

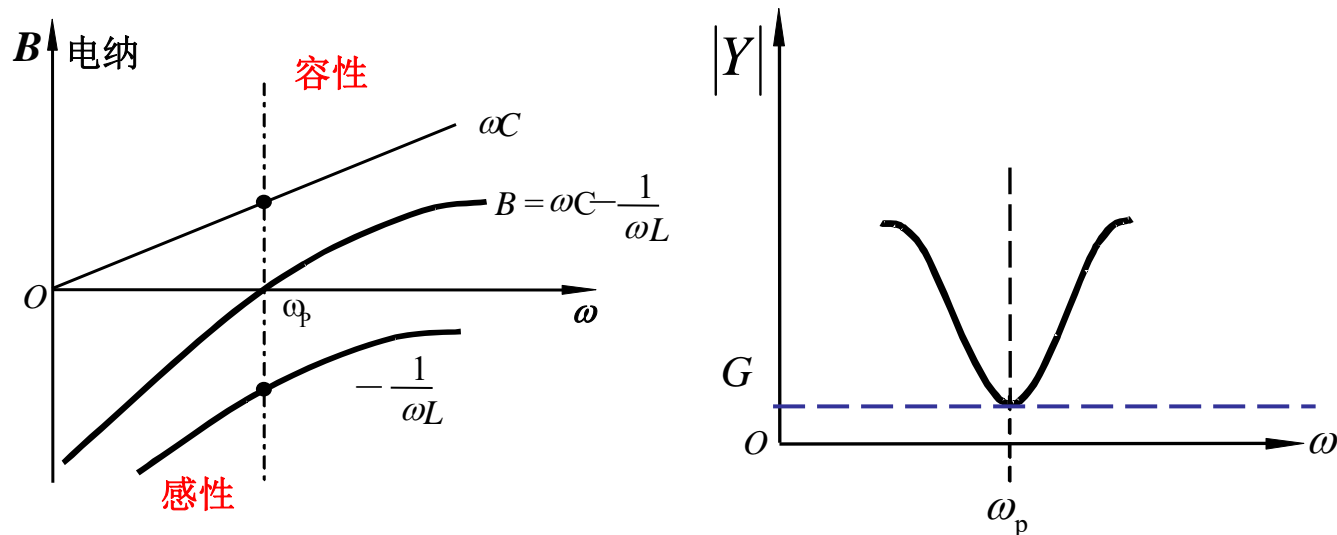
并联谐振回路

并联谐振回路阻抗的谐振特性

$$\begin{aligned} \text{谐振频率} \quad B = \omega_p C - \frac{1}{\omega_p L} = 0 \quad \omega_p &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ \text{回路的品质因数} \quad Q &= \frac{R_p}{\omega_0 L} = \omega_0 C R_p \end{aligned}$$



并联谐振回路

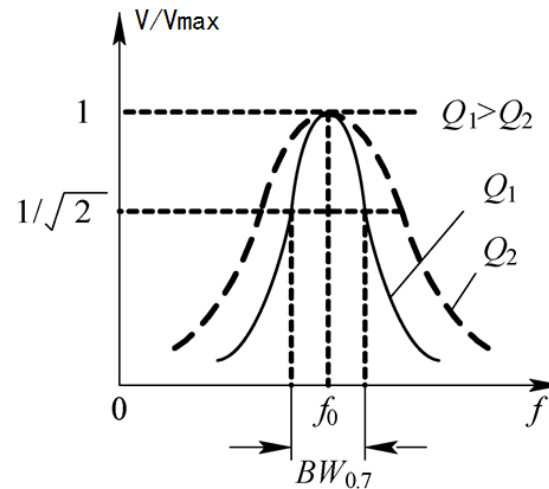


谐振特性：其导纳在某一特定频率上具有最小值（谐振状态），而偏离此频率时将迅速增大。

高频电子线路

并联谐振回路的谐振曲线与通频带

$$\dot{N}(\omega) = \frac{\dot{V}(\omega)}{\dot{V}(\omega_0)} = \frac{\frac{\dot{I}_s}{G_p + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}}{\frac{\dot{I}_s}{G_p}} = \frac{G_p}{G_p + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} = \frac{1}{1 + jQ_p(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega})} = N(\omega)e^{j\psi(\omega)}$$

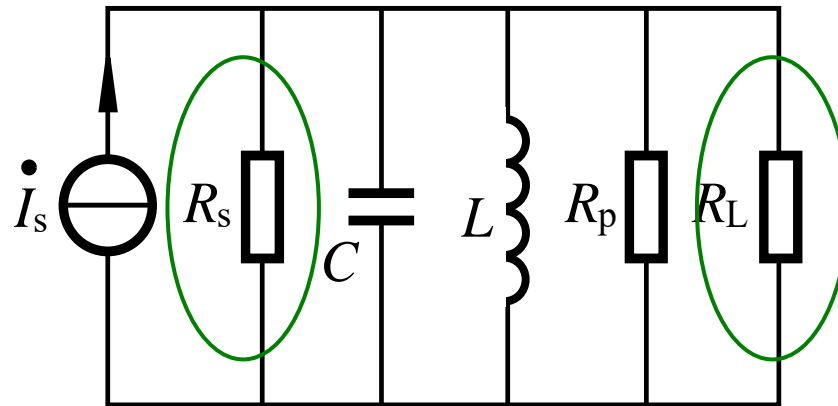


$$N(\omega) = \frac{I(\omega)}{I(\omega_0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}}$$



信号源内阻和负载对品质因数的影响

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{1}{\omega_p L (G_p + G_s + G_L)} \\ &= \frac{1}{\frac{\omega_p L}{R_p} \left(1 + \frac{R_p}{R_s} + \frac{R_p}{R_L} \right)} \\ &= \frac{Q_p}{\left(1 + \frac{R_p}{R_s} + \frac{R_p}{R_L} \right)} \end{aligned}$$



由于有载品质因数数值低于空载品质因数，因此考虑信号源内阻及负载电阻后，并联谐振回路的选择性变坏，通频带加宽。

串并联谐振回路总结

	并联回路	串联回路
电路结构	LC 并 联	LC 串 联
谐振频率	$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
谐振阻抗	$R_p = \frac{L}{rC} = Q\omega_o L$	r
品质因数	$Q = \frac{R_p}{\omega_o L}$	$Q = \frac{\omega_o L}{r}$
通频带	$BW_{0.7} = \frac{f_o}{Q}$	$BW_{0.7} = \frac{f_o}{Q}$
激励信号	电 流 源	电 压 源
附加相移	$\omega > \omega_o$ 回路呈容性相移滞后	$\omega > \omega_o$ 回路呈感性相移超前
	$\omega < \omega_o$ 回路呈感性相移超前	$\omega < \omega_o$ 回路呈容性相移滞后

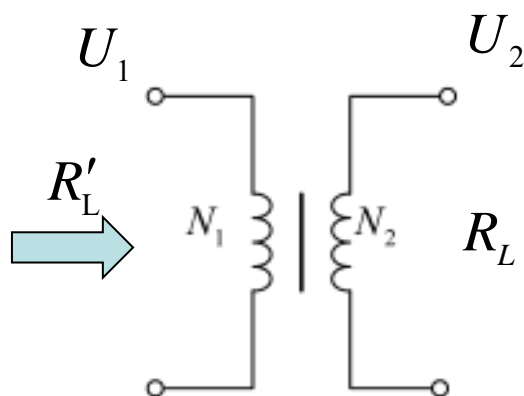
阻抗变换电路

信号源内阻或负载电阻直接并联在回路两端，将对回路的 Q 值、谐振频率影响较大，为减少信号源及负载对谐振回路的影响，可用部分接入的阻抗变换电路，将它们折算到回路两端，以改善对回路的影响。



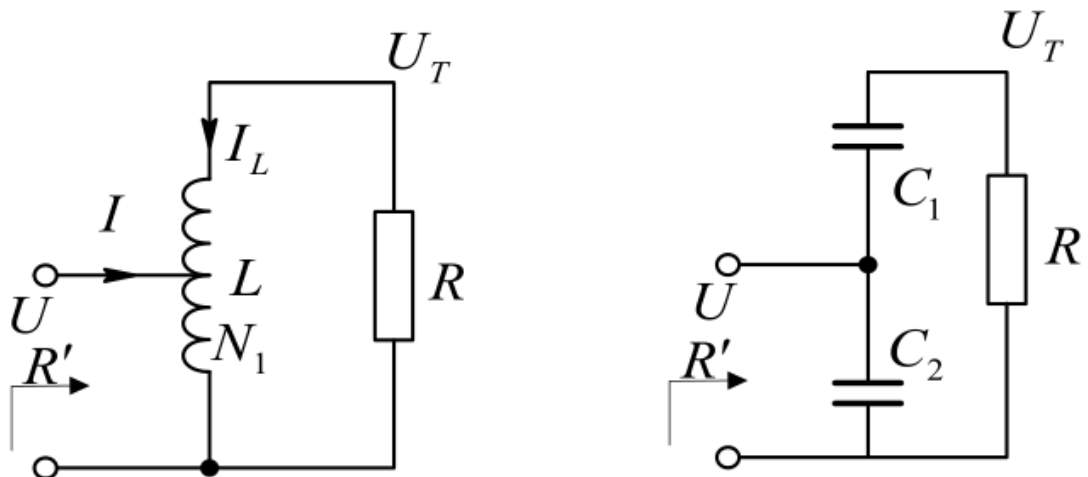
阻抗变换电路

变压器



$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \quad R'_L = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{n \dot{U}_2}{\dot{I}_2 / n} = n^2 R_L$$

部分接入阻抗变换电路

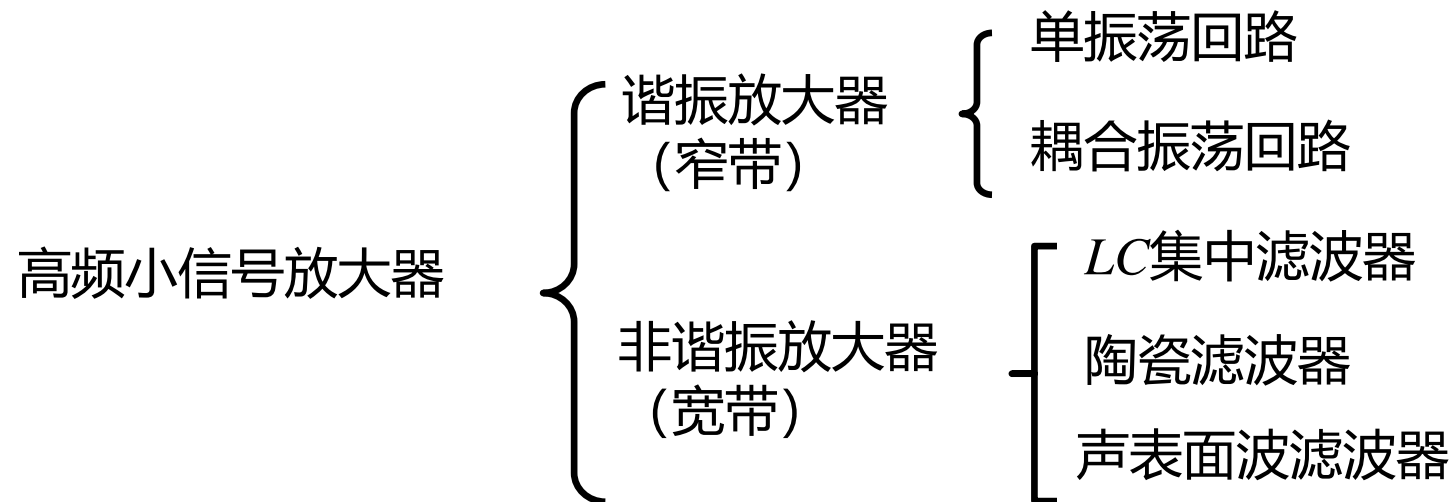


$$\frac{U_T^2}{R} = \frac{U^2}{R'} \quad R' = \left(\frac{U}{U_T} \right)^2 R = p^2 R \quad p\text{-接入系数}$$

$$p = \frac{N_1}{N}$$

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

高频小信号放大器



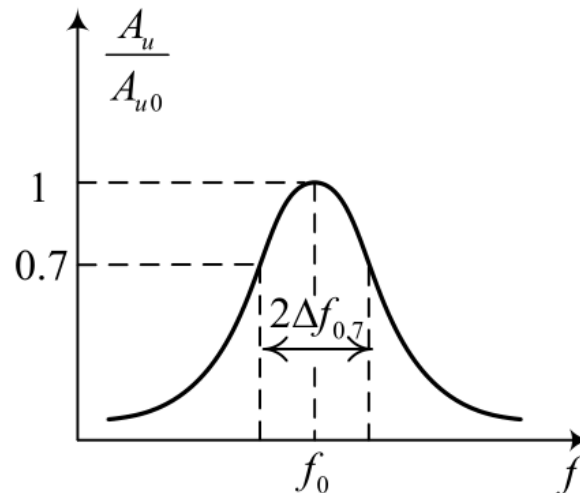
高频小信号放大器的主要质量指标

1) 增益：（放大系数）

电压增益： $A_v = \frac{V_o}{V_i}$ 功率增益： $A_p = \frac{P_o}{P_i}$

分贝表示： $A_v = 20 \log \frac{V_o}{V_i}$ $A_p = 10 \log \frac{P_o}{P_i}$

2) 通频带：

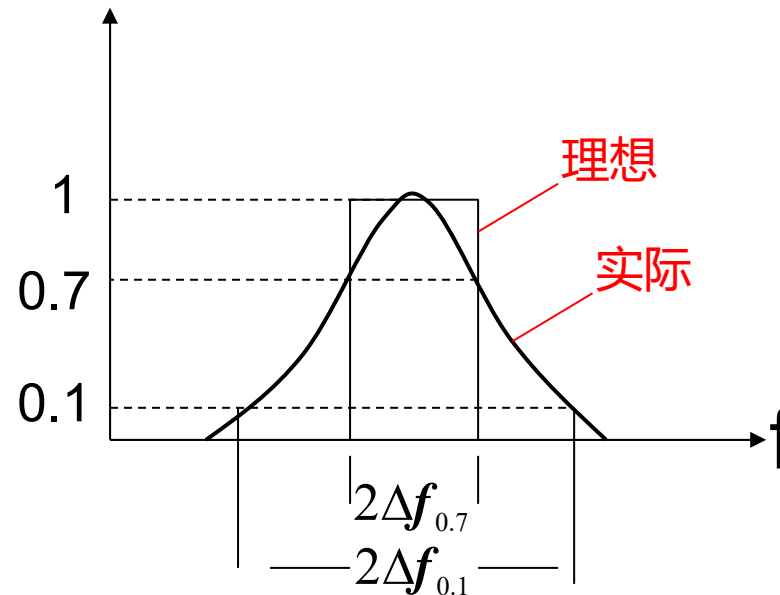


高频小信号放大器的主要质量指标

- 3) 选择性：从各种不同频率信号的总和（有用的和有害的）中选出有用信号，抑制干扰信号的能力称为放大器的选择性。选择性常采用矩形系数和抑制比来表示。

① 矩形系数：表示与理想滤波特性的接近程度。

$$K_{r0.1} = \frac{2 \Delta f_{0.1}}{2 \Delta f_{0.7}}$$



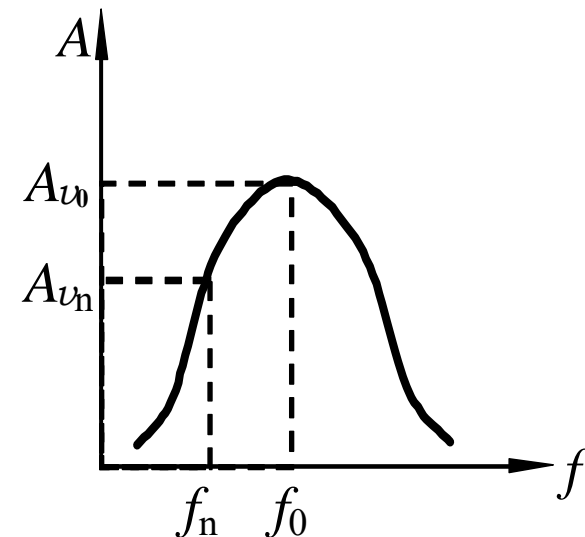
高频小信号放大器的主要质量指标

3) 选择性：从各种不同频率信号的总和（有用的和有害的）中选出有用信号，抑制干扰信号的能力称为放大器的选择性。选择性常采用**矩形系数**和**抑制比**来表示。

② 抑制比：表示对某个干扰信号 f_n 的抑制能力，用 α_n 表示。

$$\alpha_n = \frac{A_p(f_0)(\text{中心频率点放大倍数})}{A_p(f_n)(\text{干扰频率点放大倍数})}$$

$$\alpha(dB) = 10 \log \frac{A(f_0)}{A(f_n)}$$



高频小信号放大器的主要质量指标

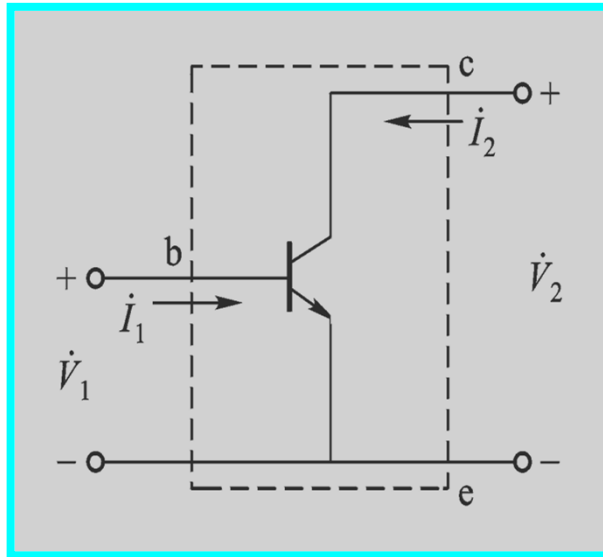
4) 噪声系数：输出信噪比/输入信噪比

$$N_F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}$$

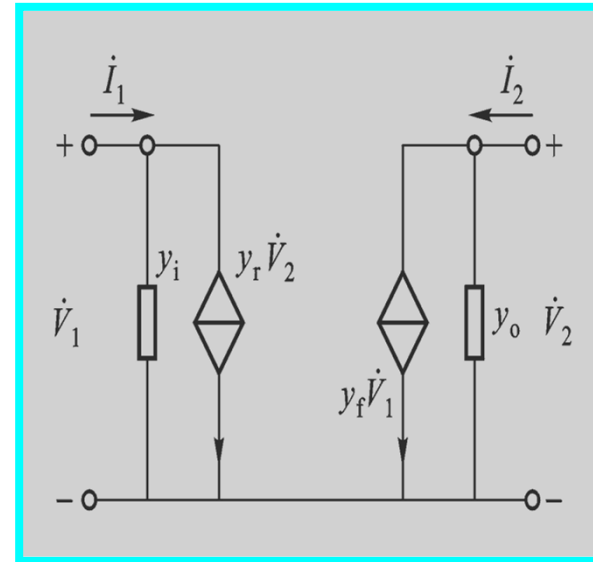
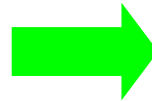
放大电路不仅把输入端的噪声放大，而且放大电路本身也存在噪声。所以，其输出端的信噪比必小于输入端信噪比。在放大器中，内部噪声与外部噪声愈小愈好。放大电路本身噪声越大，它的输出端信噪比越小于输入端信噪比，噪声系数就越大



高频小信号放大器等效电路与参数



等效
电路

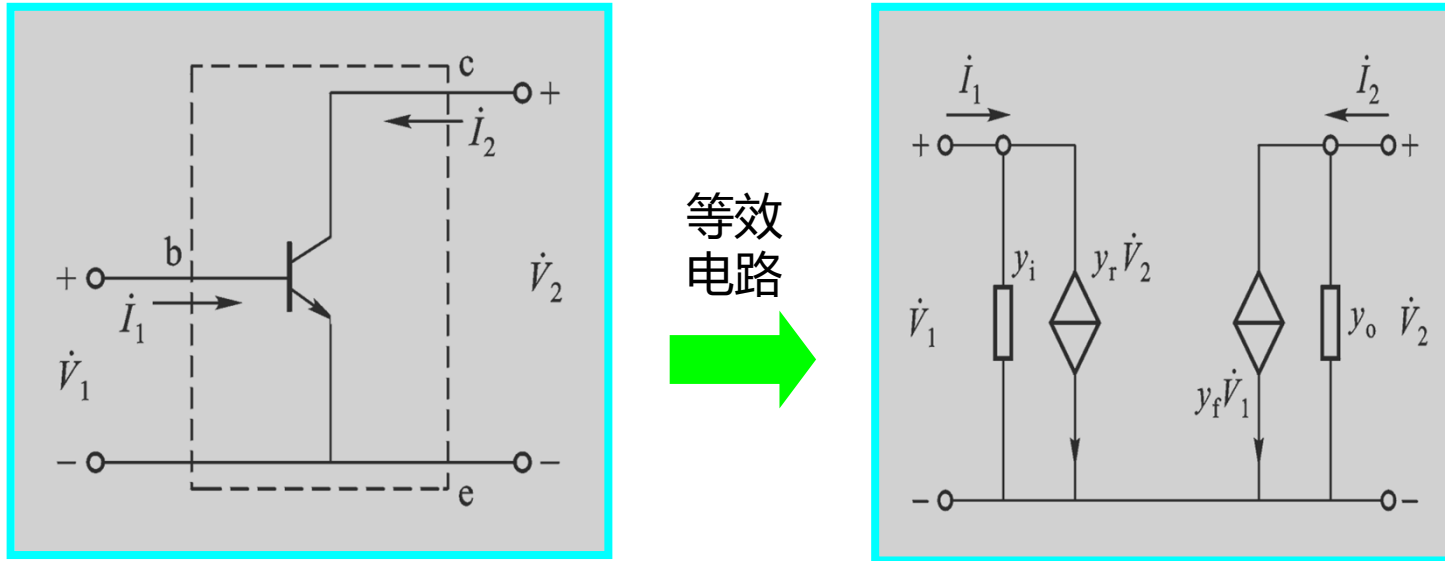


$$\dot{I}_1 = y_i \dot{V}_1 + y_r \dot{V}_2$$

$$\dot{I}_2 = y_f \dot{V}_1 + y_o \dot{V}_2$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

高频小信号放大器等效电路与参数



$$y_i = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2 = 0} \text{ 称为输出短路时的输入导纳;}$$

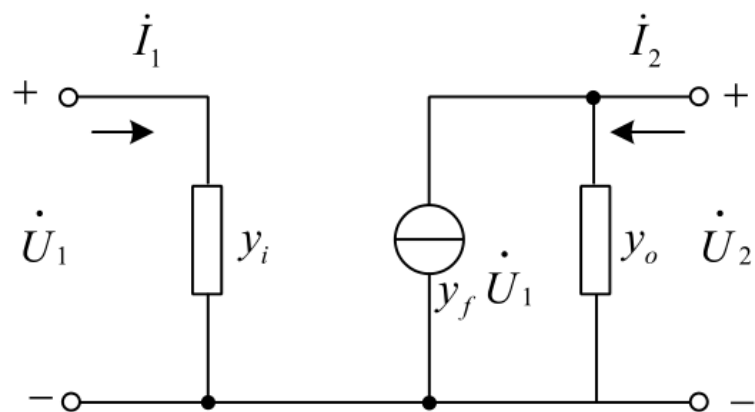
$$y_r = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1 = 0} \text{ 称为输入短路时的反向传输导纳;}$$

$$y_f = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2 = 0} \text{ 称为输出短路时的正向传输导纳;}$$

$$y_o = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1 = 0} \text{ 称为输入短路时的输出导纳。}$$

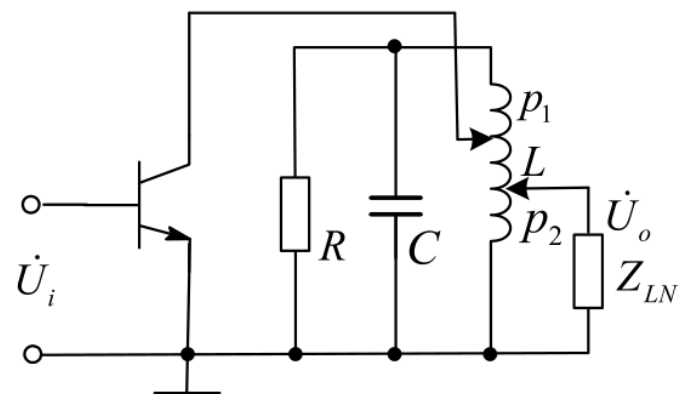
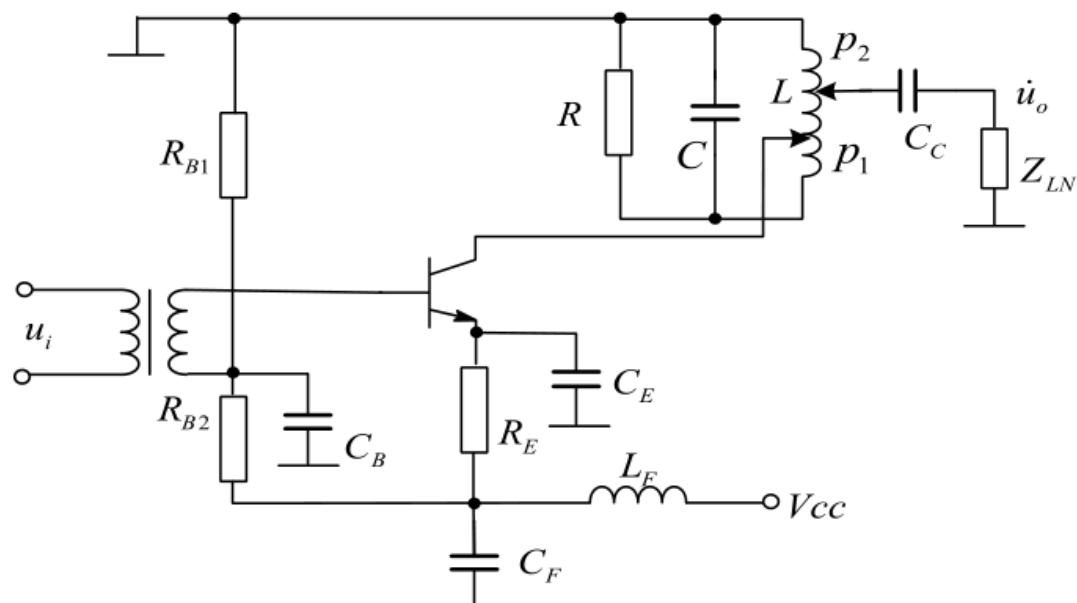
高频小信号放大器等效电路与参数

实际情况中 y_r 近似为0

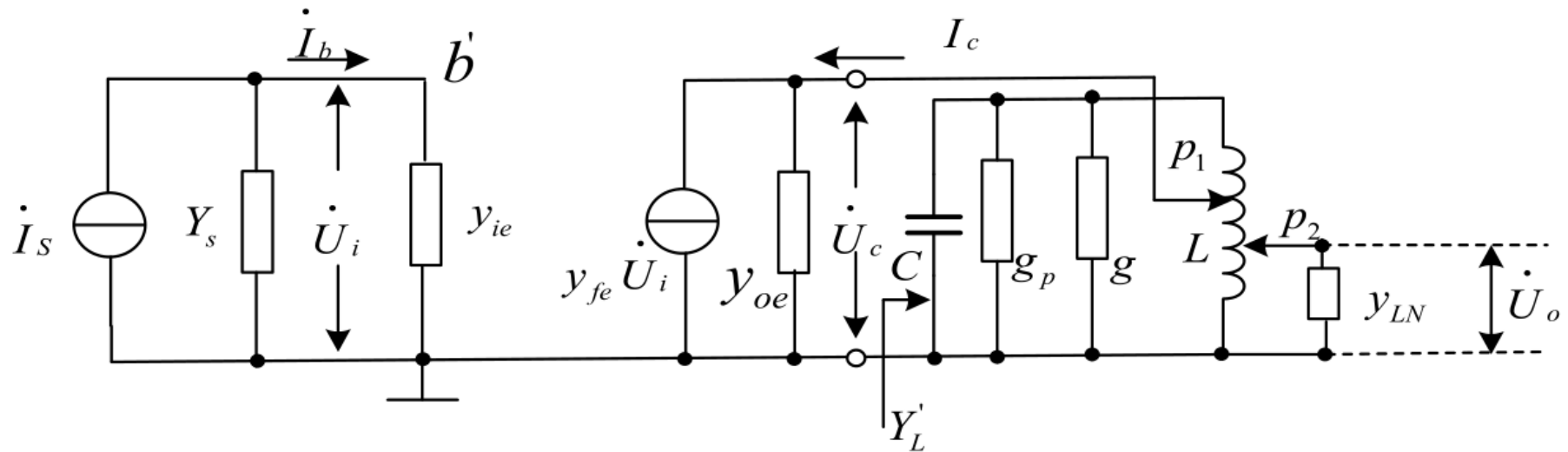


简化等效电路

单调谐回路谐振放大器



单调谐回路谐振放大器

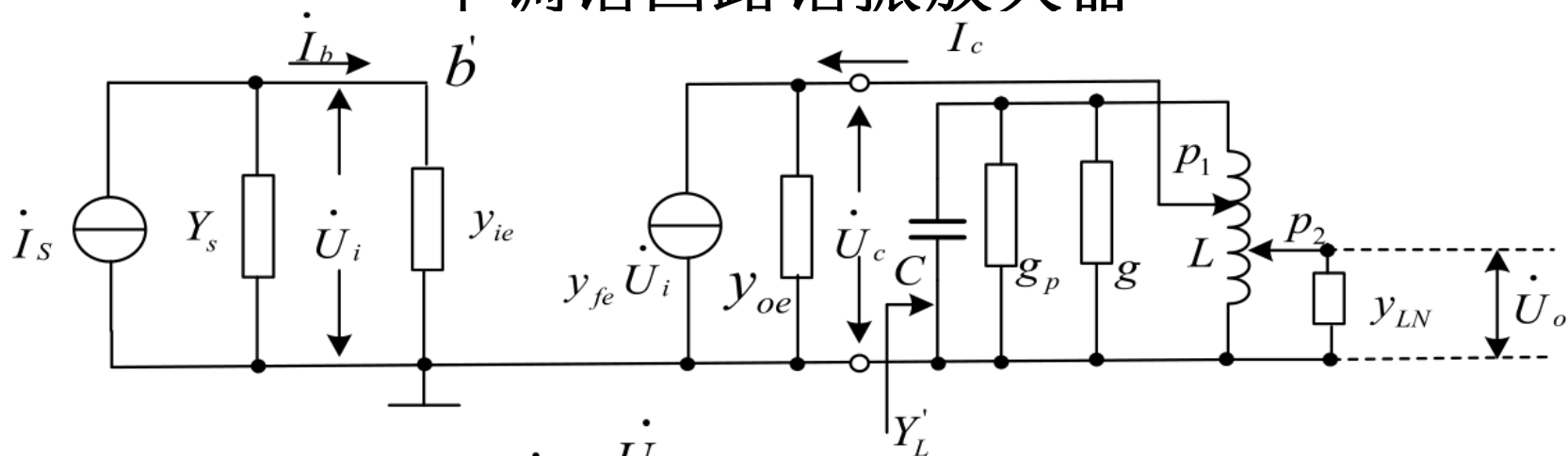


$$\begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie} \dot{U}_i \\ \dot{I}_c = y_{fe} \dot{U}_i + y_{oe} \dot{U}_c \\ \dot{I}_c = -Y'_L \dot{U}_c \end{cases}$$

$$\dot{U}_c = \frac{-y_{fe}}{y_{oe} + Y'_L} \dot{U}_i$$

$$Y'_L = \frac{1}{p_1^2} \left(g + g_p + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + P_2^2 y_{LN} \right)$$

单调谐回路谐振放大器



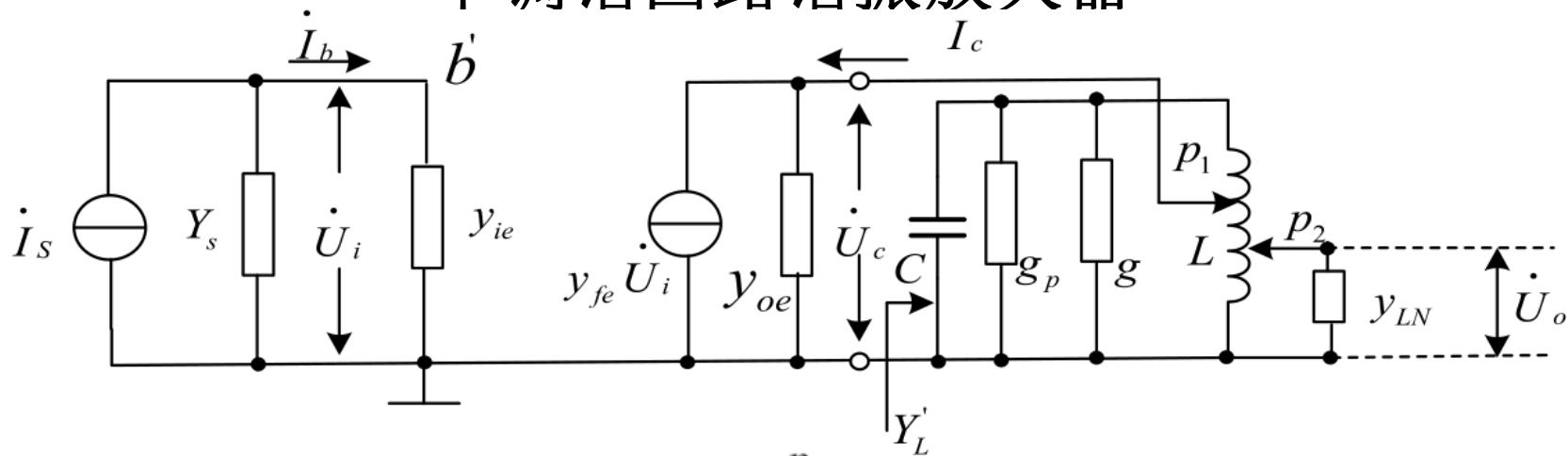
放大器的电压增益: $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$\frac{\dot{U}_c}{\dot{U}_o} = \frac{p_1}{p_2} \quad \dot{U}_c = \frac{-y_{fe}}{y_{oe} + Y'_L} \dot{U}_i \quad Y'_L = \frac{Y_L}{p_1^2} \quad y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe} \quad y_{LN} = g_{LN} + j\omega C_{LN}$$

$$\dot{A}_u = -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{(p_1^2 g_{oe} + p_2^2 g_{LN} + g + g_p) + j\omega(C + p_1^2 C_{oe} + p_2^2 C_{LN}) + \frac{1}{j\omega L}} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}} \approx \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma (1 + j2Q_L \Delta f / f_0)}$$

谐振时: $\dot{A}_{u_0} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma}$

单调谐回路谐振放大器



谐振时放大器的功率增益： $A_{po} = \frac{p_o}{p_i}$

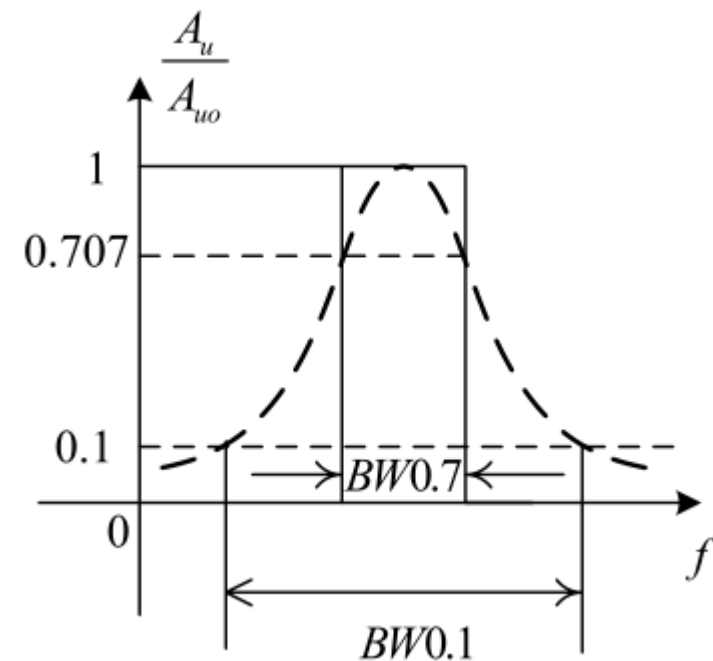
$$p_i = u_i^2 g_{ie} \quad p_o = \left(\frac{p_1 |y_{fe}| u_i}{g_{\Sigma}} \right)^2 p_2^2 g_{LN}$$

$$A_{po} = \frac{p_o}{p_i} = \frac{p_1^2 p_2^2 g_{LN} |y_{fe}|^2}{g_{ie} g_{\Sigma}^2} = (A_{vo})^2 \frac{g_{LN}}{g_{ie}}$$

单调谐回路谐振放大器

放大器的谐振曲线：某一频率的增益与谐振频率的增益之比

$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{-p_2 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma \left[1 + \frac{1}{g_\Sigma} \left(j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L} \right) \right]} = \frac{\dot{A}_{u0}}{1 + j \frac{1}{\omega_0 L g_\Sigma} \left(\omega C_\Sigma L - \frac{\omega_0 L}{\omega L} \right)} \\ &= \frac{\dot{A}_{u0}}{1 + jQ_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \\ \frac{A_u}{A_{u0}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + (2Q_L \Delta f / f_0)^2}}\end{aligned}$$



放大器的通频带： $BW_{0.7} = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L}$

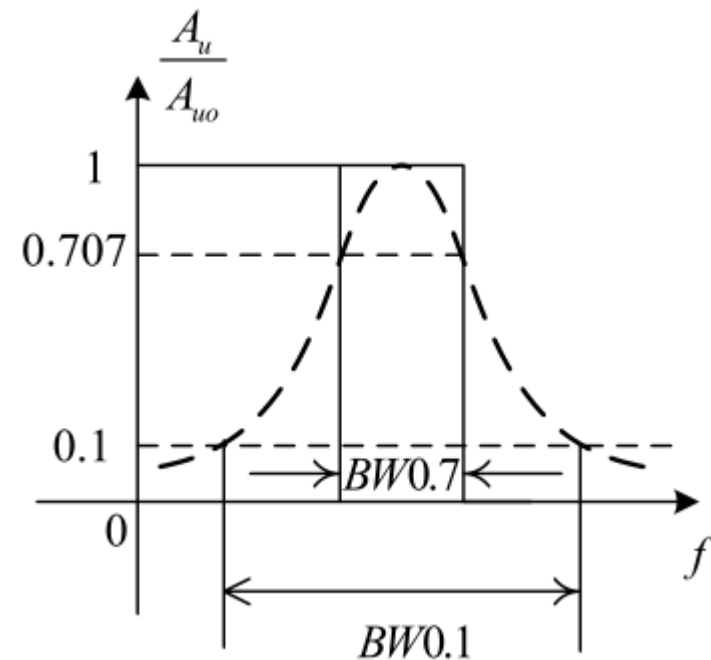
单调谐回路谐振放大器

放大器的矩形系数：放大器电压增益下降至谐振时增益的**0.1**倍时，相应的通频带放大器通频带之比

$$K_{r0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}}$$

$$\text{令 } \frac{A_u}{A_{u0}} = 0.1, \text{ 代入 } \frac{A_u}{A_{u0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2Q_L \Delta f_{0.1} / f_0)^2}}$$

$$BW_{0.1} = \sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q_L} \quad K_{r0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} = \sqrt{10^2 - 1} \approx 9.96$$



多级单调谐回路谐振放大器

1. 电压增益 $\dot{A}_n = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$

每一级放大器的参数结构均相同 $A_n = (A_{u1})^n = \frac{(p_1 p_2)^n |Y_{fe}|^n}{\left[G_\Sigma \sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta f Q_\Sigma}{f_0} \right)^2} \right]^n}$

谐振时总的电压增益 $A_{n0} = \left(\frac{p_1 p_2}{G_\Sigma} \right)^n |Y_{fe}|^n$

2. 通频带 $BW_n = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_\Sigma} = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \cdot BW_1$

频带缩减因子 $\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$



多级单调谐回路谐振放大器

3. 矩形系数

$$BW_{n0.1} = \sqrt{100^{1/n} - 1} f_0 / Q_{\Sigma}$$

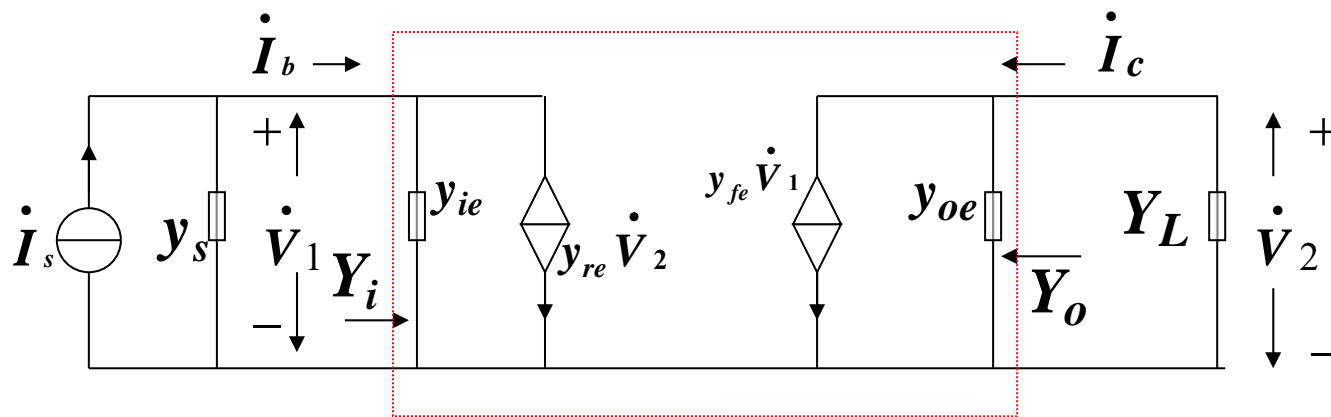
$$K_{n0.1} = \frac{BW_{n0.1}}{BW_n} = \frac{\sqrt{100^{1/n} - 1}}{\sqrt{2^{1/n} - 1}}$$

级数n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	∞
B_n/B_1	1.0	0.64	0.51	0.43	0.39	0.35	0.32	0.30	0.28	...	
$K_{0.1}$	9.95	4.66	3.74	3.42	3.15	3.07	3.01	2.94	2.92	...	2.57

级数越多，矩形系数越小，选择性越好；但总的通频带变窄



谐振放大器的稳定性



当反向传输导纳 $Y_{re} \neq 0$ 时，反馈等效导纳 $Y'_i \neq 0$ ，放大器的输入导纳不等于晶体管的输入导纳。输出电压影响输入电流，放大器输出电路中的晶体管参数 Y_{fe} 、 Y_{oe} 和集电极负载导纳 Y'_L 均对放大器输入导纳有影响。在条件合适时，放大器的输出电压通过 Y_{re} 将一部分信号反馈回输入端，形成自激振荡。

$$Y_i = y_{ie} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{oe} + Y'_L} = y_{ie} + Y_F$$

Y_F 称为反馈导纳

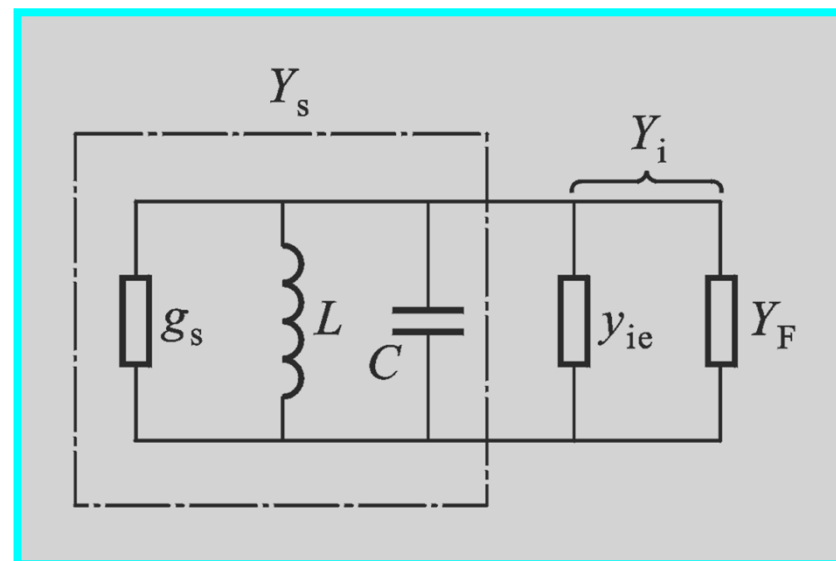
谐振放大器的稳定性

实际电路中：

$$y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie}$$

$$Y_F = g_F + jb_F$$

此时，如果 $g_{\Sigma} = g_s + g_{ie} + g_F = 0$ ，即整个回路的能量消耗为零，回路中储存的能量恒定，在电感与电容之间相互转换，回路中的等幅振荡得以维持，而不需外加激励。如果反馈电导为负值，那么 g_{Σ} 可能存在，即发生自激振荡现象。



所谓“谐振”，就能量关系而言，是指：回路中储存的能量是不变的，只是在电感与电容之间相互转换；外加电动势只提供回路电阻所消耗的能量，以维持回路的等幅振荡。