

第1章 基础知识

1.1 LC谐振回路的选频特性和阻抗变换特性

1.2 集中选频滤波器

1.3 电噪声

1.4 反馈控制电路原理及其分析方法

章末小结



1.1 LC谐振回路的选频特性和阻抗变换特性

1.1.1 概述

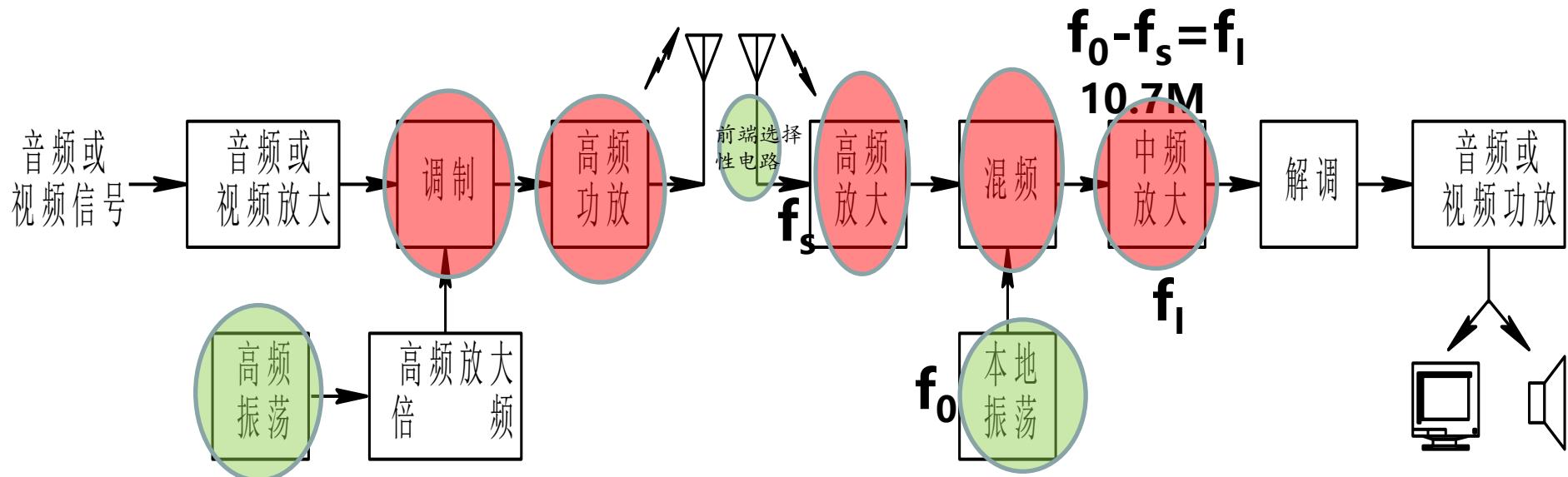
1.1.2 LC谐振回路

1.1.3 阻抗变换电路



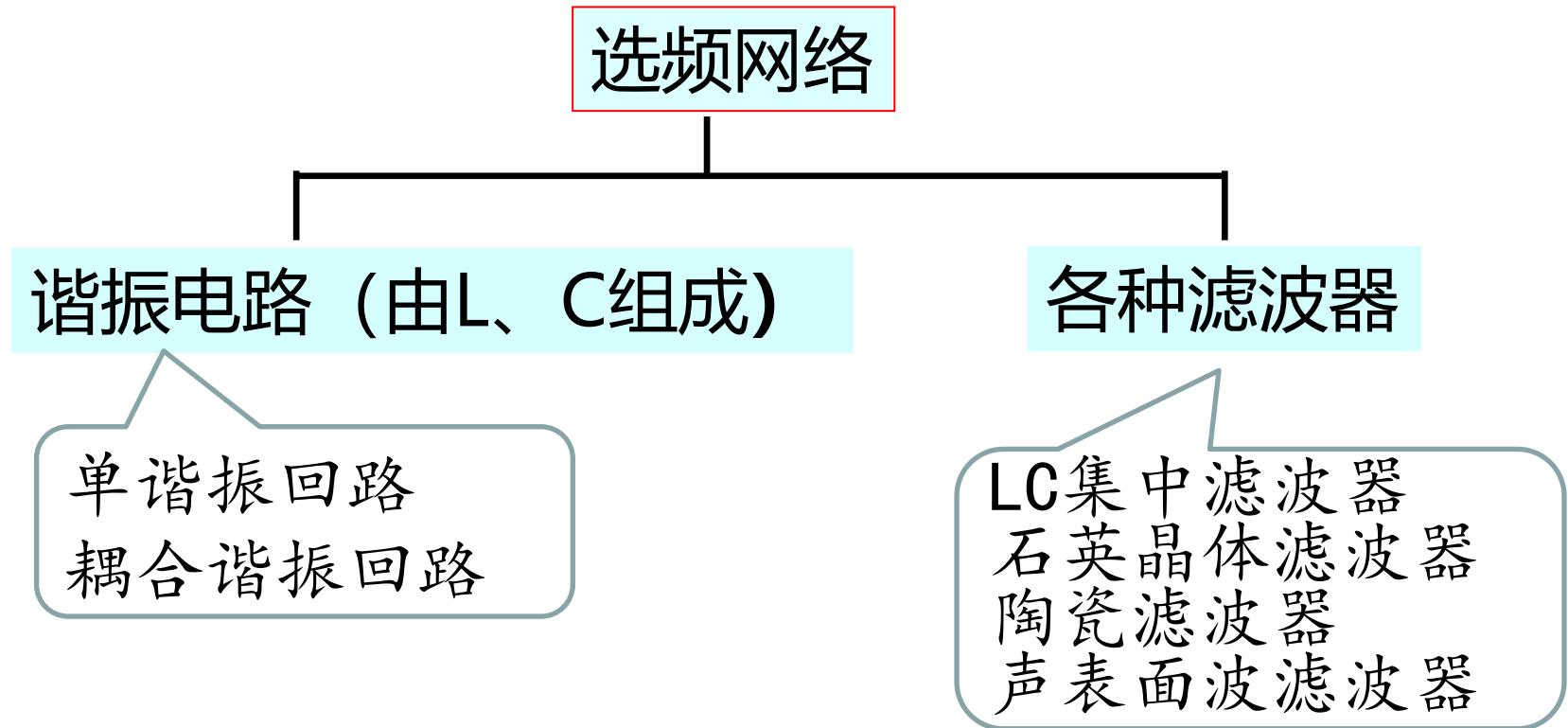
一、LC谐振回路在无线通信系统中的应用场合

- 谐振回路的作用：选频（滤波）就是选出需要的频率分量和滤除不需要的频率分量。

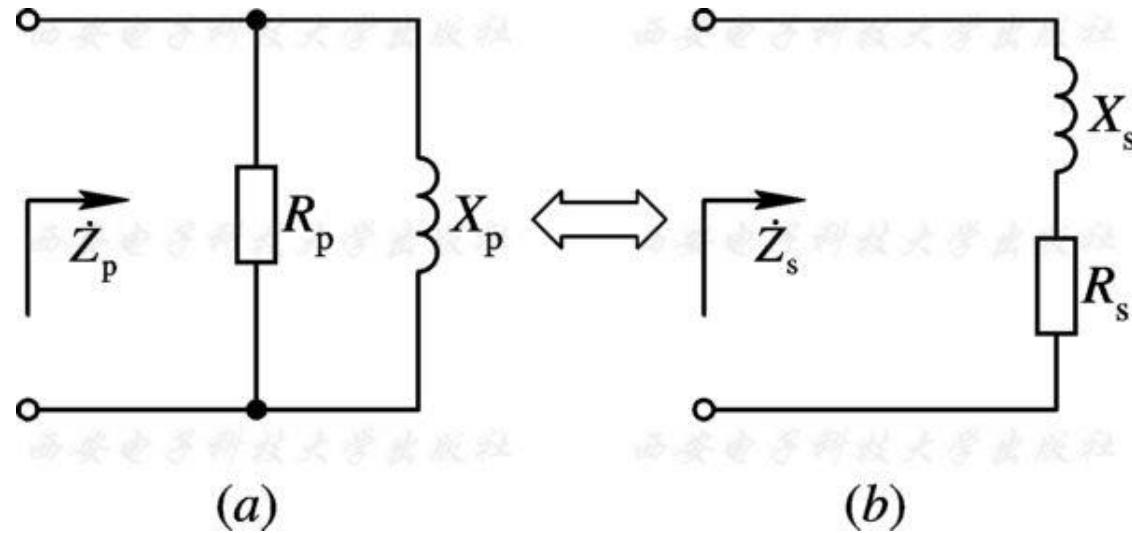


二、选频器件及电路

- 分类：

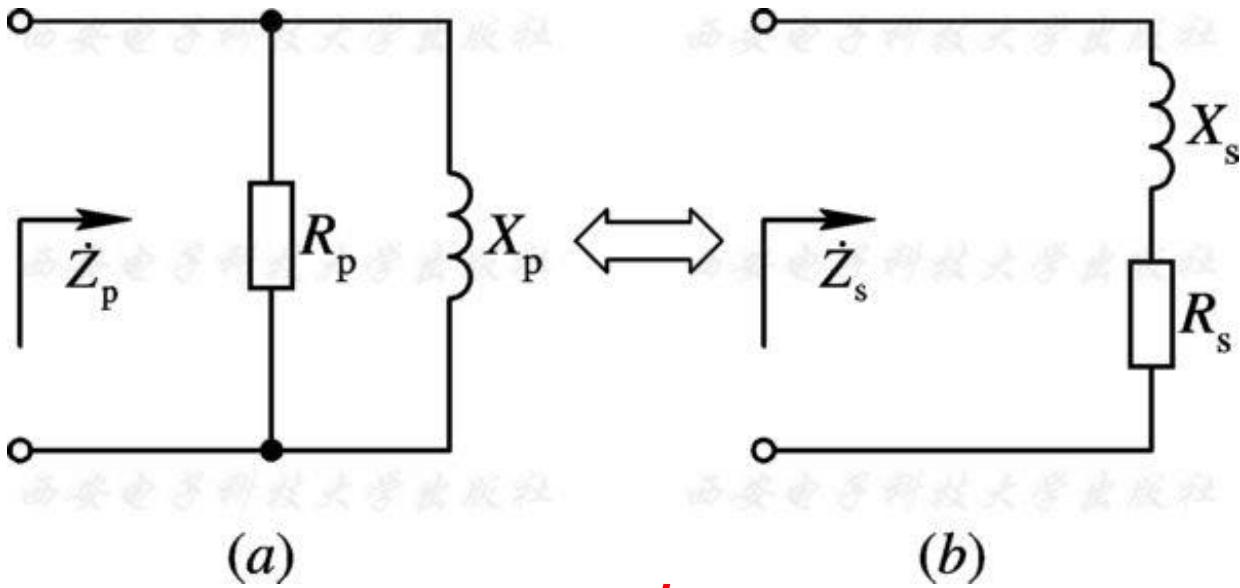


三、阻抗电路的串、并联等效变换



1. 阻抗不变(相对于外电路而言);
2. Q_e (品质因素) 不变



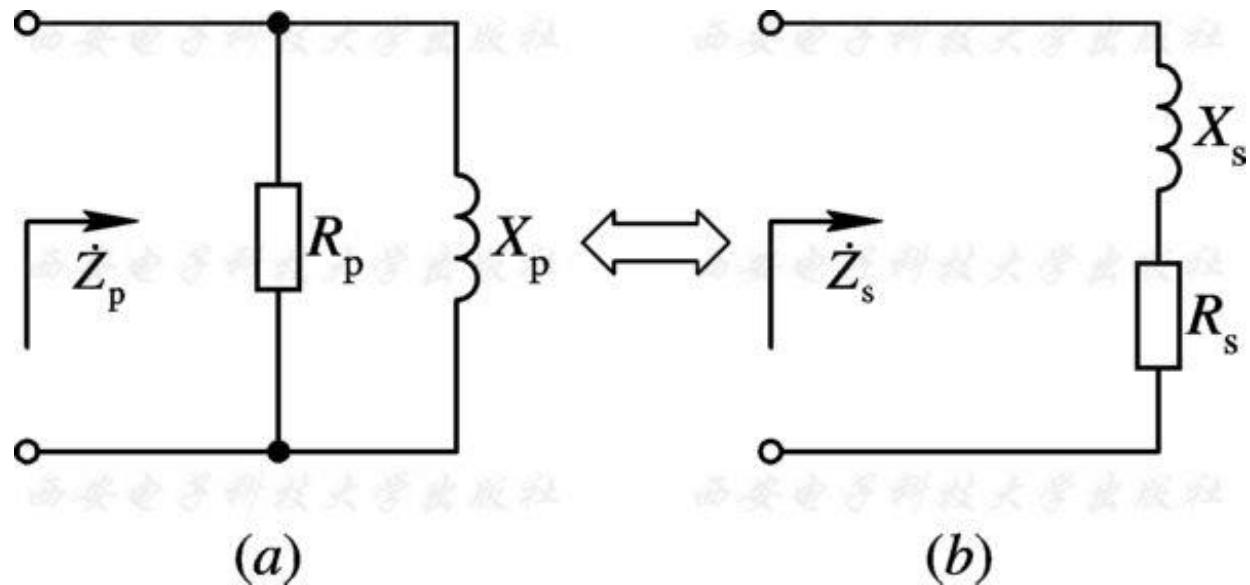


$$Z_s = R_s + jX_s$$

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p} \Rightarrow Z_p = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} + j \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2}$$

由 $Z_s = Z_p$ 有 :

$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$	$X_s = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2}$
---	---



$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \quad X_s = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2}$$

$$\boxed{\text{由 } Q_e = \frac{X_s}{R_s} = \frac{R_p}{X_p} \text{ 有:}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_p = (1 + Q_e^2) R_s \\ X_p = X_s \left(1 + \frac{1}{Q_e^2} \right) \end{array} \right. \quad Q_e \geq 10 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} R_p = R_s Q_e^2 \\ X_p \approx X_s \end{array} \right.$$

结论：

1) 小的串联电阻 R_s 化为大的并联电阻 R_p 且：

$$R_p = \left(1 + Q_e^2\right) R_s \quad \text{在高 } Q_e \text{ 值下 } R_p = R_s Q_e^2$$

2) 串联电抗 X_s 化为同性质的并联电抗 X_p 且：

$$X_p = X_s \left(1 + \frac{1}{Q_e^2}\right) \quad \text{在高 } Q_e \text{ 值下 } X_p \approx X_s$$

3) 串并联电路的有效品质因数为

$$Q_e = \frac{X_s}{R_s} = \frac{R_p}{X_p}$$



1. 1 LC谐振回路的选频特性和阻抗变换特性

1. 1. 1 概述

1. 1. 2 LC谐振回路

1. 1. 3 阻抗变换电路

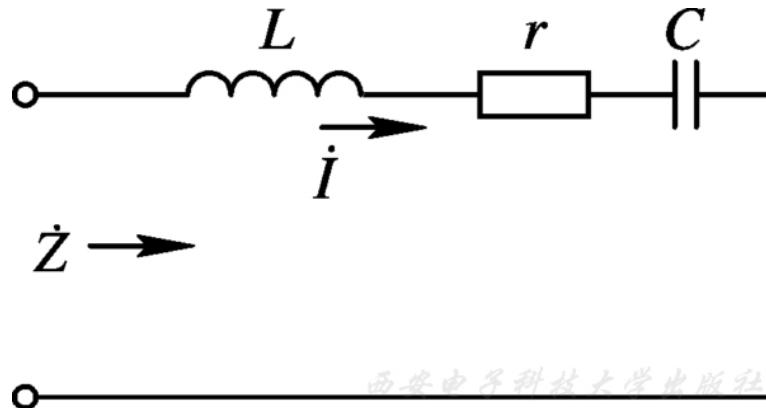


1.1.2 LC谐振回路

- 单谐振回路 由信号源、电感线圈和电容器组成的单个振荡回路。

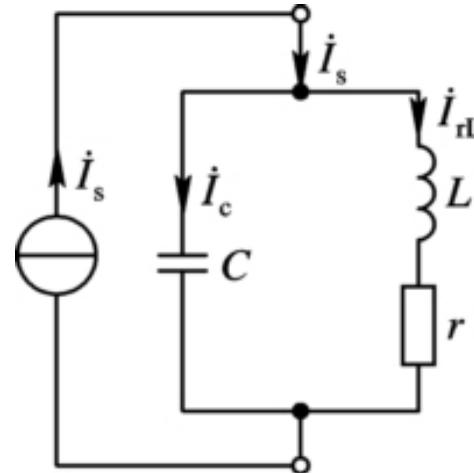
串联谐振回路

(信号源与电容和电感串联)



并联谐振回路

(信号源与电容和电感串联)



- 谐振：振荡回路的阻抗在某一特定频率上具有最大（或最小）值，在其它频率上减小（或增大）。



1. 1. 2 LC谐振回路

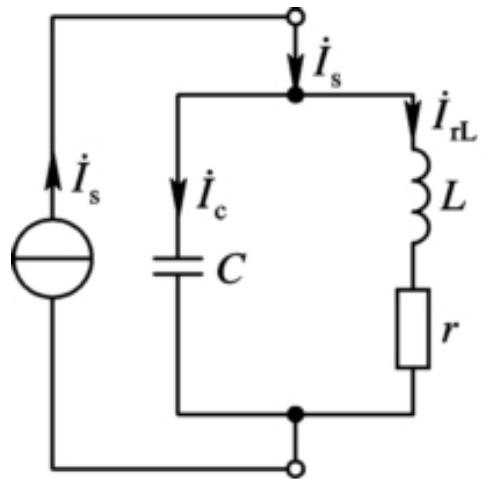
一、并联谐振回路

二、串联谐振回路

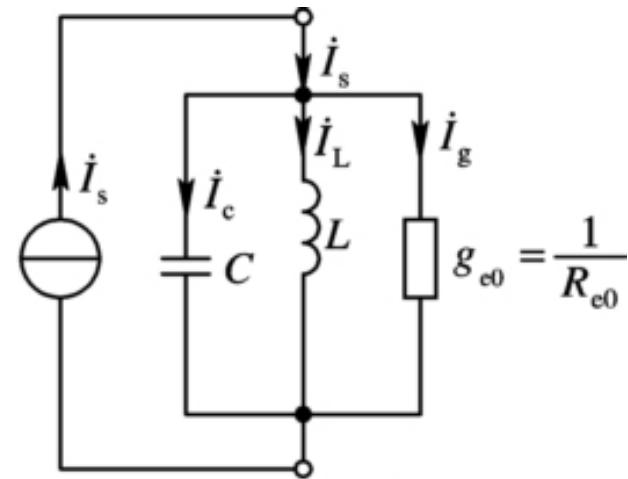
三、LC串并联谐振回路的比较



一、并联谐振回路



(a)



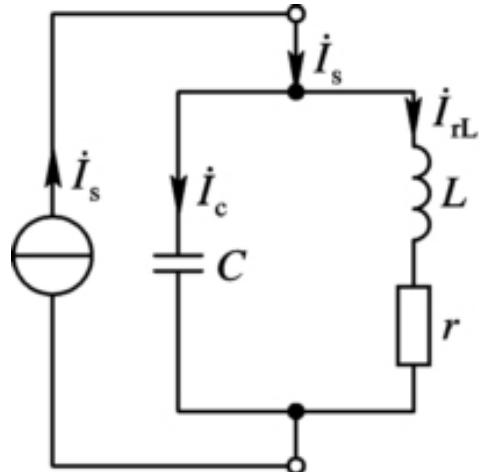
西安电子科技大学出版社 (b)



四川大学
SICHUAN UNIVERSITY



1. 阻抗与导纳



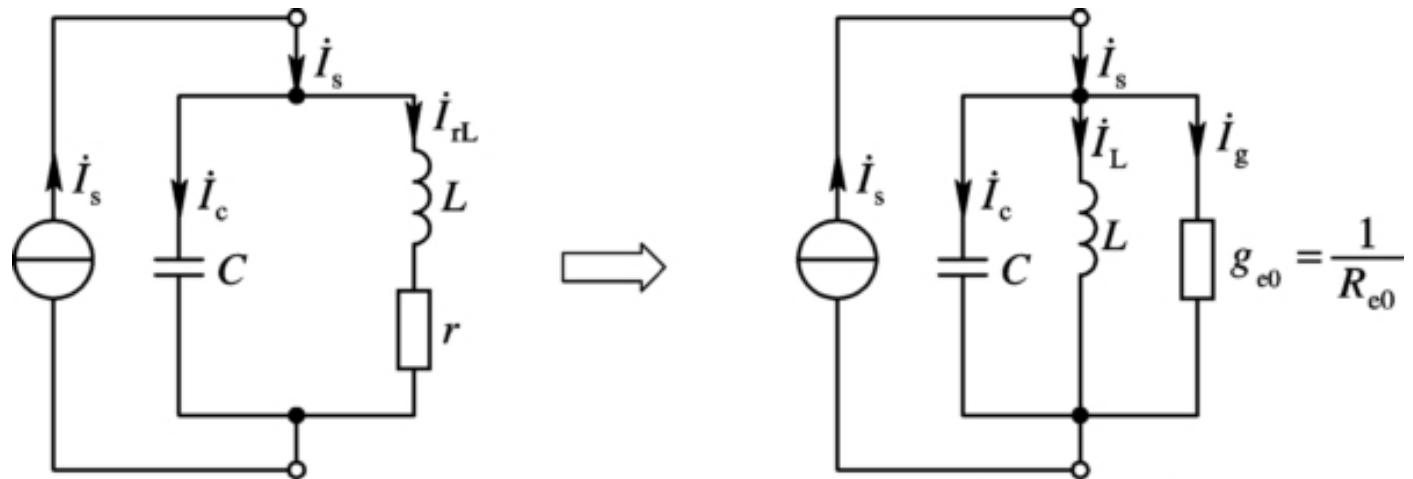
(a)

总阻抗:

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

$\omega L \gg r$

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



(a)

(b)

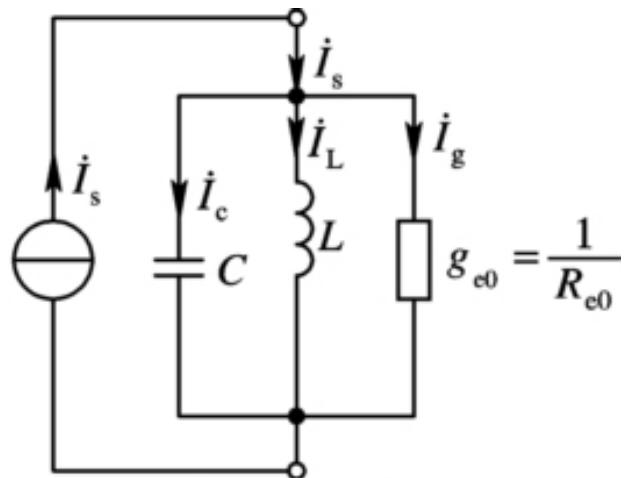
总阻抗

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

总导纳

$$\begin{aligned} Y &= \frac{Cr}{L} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \\ &= g_{e0} + jB \end{aligned}$$

2. 谐振频率 (谐振时: X=0, Z最大)



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

$$Z = \frac{1}{g_{e0}} = Z_{\max} = R_{e0} = \frac{L}{rC} = \frac{(\omega_0 L)^2}{r}$$

谐振时，端电压 $\dot{U}_{00} = I_s / g_{e0}$ 相应达到最大值且与 I_s 同相。



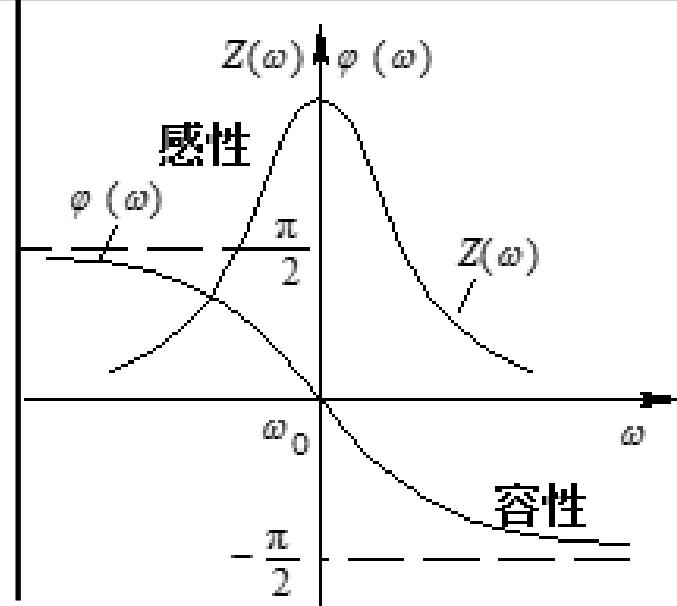
阻抗特性曲线

幅频特性

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{g_{e0}^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}}$$

相频特性

$$\varphi = -\arctan \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{g_{e0}}$$



- $\omega = \omega_0$, $|z| = R_{eo}$ 呈纯电阻且最大，并联谐振。
- 当 $\omega \neq \omega_0$ 时有 $|z| < R_{eo}$
- $\omega > \omega_0$, $\varphi < 0$, 呈容性, 电压滞后电流。
- $\omega < \omega_0$, $\varphi > 0$, 呈感性, 电压超前电流。

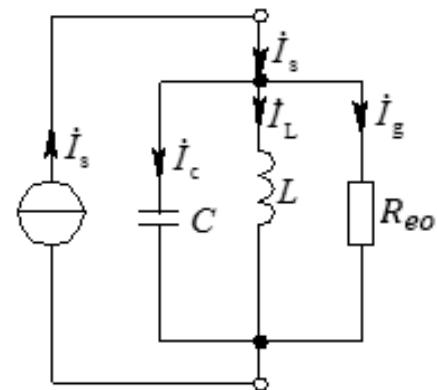


四川大学

SICHUAN UNIVERSITY



3. 回路空载Q值



$$Q_o = \frac{R_{eo}}{\omega_o L} = \frac{1}{G_{eo} \omega_o L} = R_{eo} \omega_o C = \frac{\omega_o C}{G_{eo}} = R_{eo} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

谐振时：

$$\dot{I}_{CO} = \dot{V}_{00} / \left(j \omega_o C \right) = j \omega_o C \dot{V}_{00} = j \omega_o C I_s \frac{Q_o}{\omega_o C} = j Q_o I_s$$

$$\dot{I}_{LO} = \dot{V}_{00} / j \omega_o L = \frac{\dot{I}_s Q_o \omega_o L}{j \omega_o L} = -j Q_o \dot{I}_s$$

结论：并联谐振时，电感和电容上的电流幅值为外加电流源的 Q_0 倍。故并联谐振又称为电流谐振。



4. 单位谐振曲线N(f)

- 谐振曲线：回路电压V(或电流I)与外加信号源频率f之间的幅频特性曲线。
- 单位谐振曲线：失谐时的电压与谐振点电压之比。

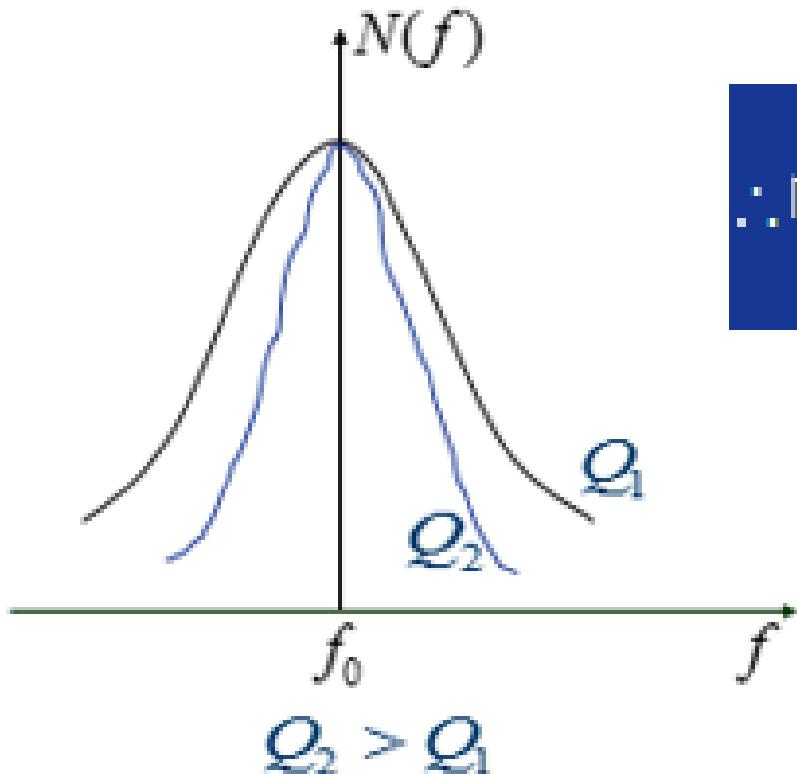
$$\begin{aligned} N(f) &= \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\infty}} = \frac{\dot{I}_s / Y}{\dot{I}_s / G_{eo}} = \frac{G_{eo}}{Y} = \frac{G_{eo}}{G_{eo} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} \\ &= \frac{1}{1 + j Q_o \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)} = \frac{1}{1 + j Q_o \left(\frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f} \right)} \end{aligned}$$



定义相对失谐 ε :

(当失谐不大 ($f \approx f_0$) 时)

$$\varepsilon = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f + f_0)(f - f_0)}{f_0 f} \approx \frac{2(f - f_0)}{f_0} = \frac{2\Delta f}{f_0}$$



$$\therefore \text{幅值 } |N(f)| = \left| \frac{V}{V_{\infty}} \right|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left[Q_o \frac{2\Delta f}{f_o} \right]^2}}$$

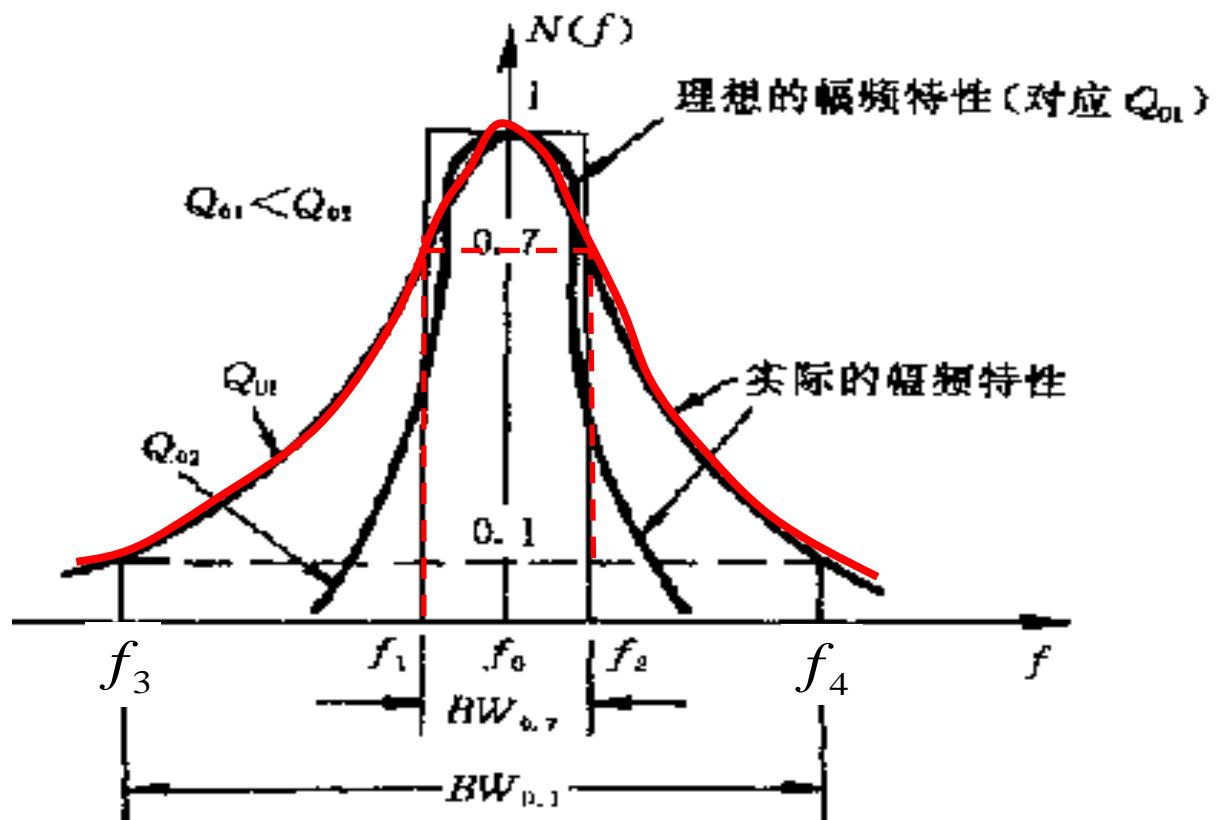


5. 通频带

(频率) 选择性

矩形系数

当回路端电压下降到最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时所对应的频率范围。



$$BW_{0.7} = f_2 - f_1$$



$$\text{由 } |N(f)| = \left| \frac{V}{V_{00}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[Q_o \frac{2\Delta f}{f_o} \right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

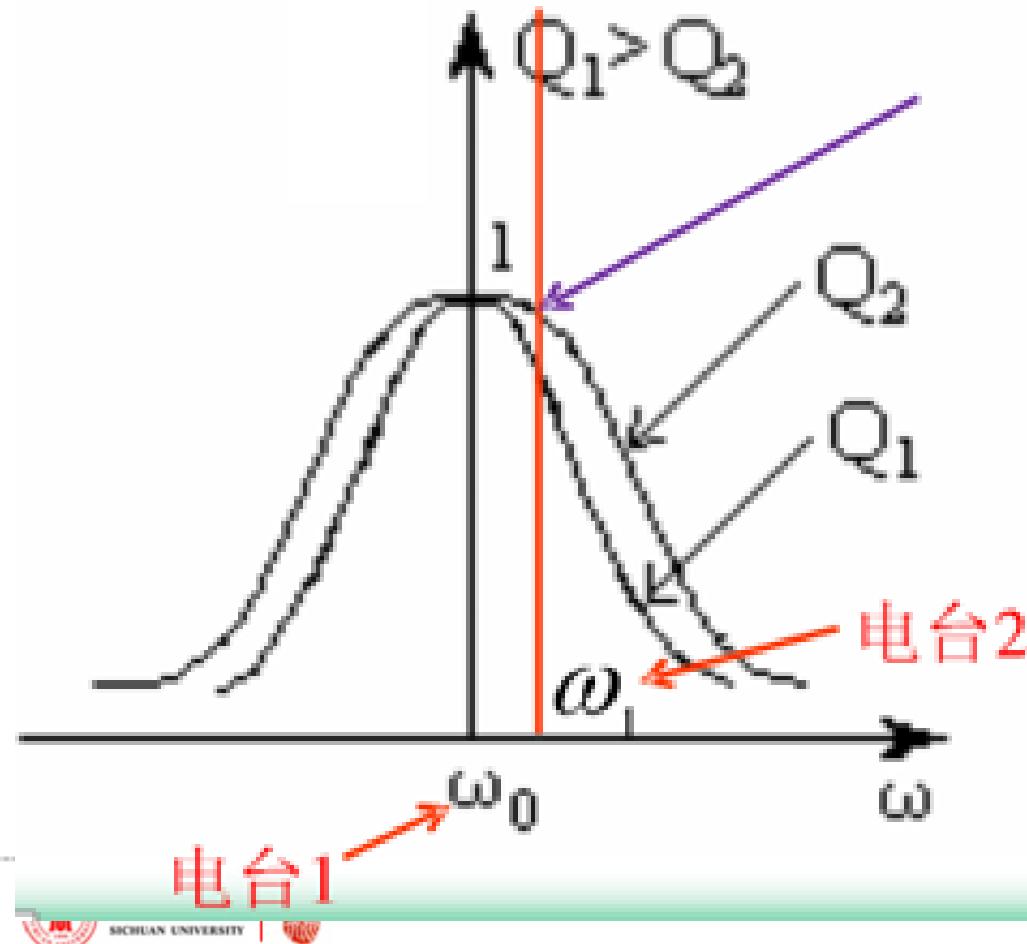
 $Q_o \cdot \frac{2(f_2 - f_0)}{f_0} = 1 \quad \text{和} \quad Q_o \cdot \frac{2(f_1 - f_0)}{f_0} = -1$

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

 $BW_{0.7} = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q_o}$

(频率) 选择性

是指谐振回路能够准确高效地把有用信号频率提取出来，而把无用信号过滤掉的能力。



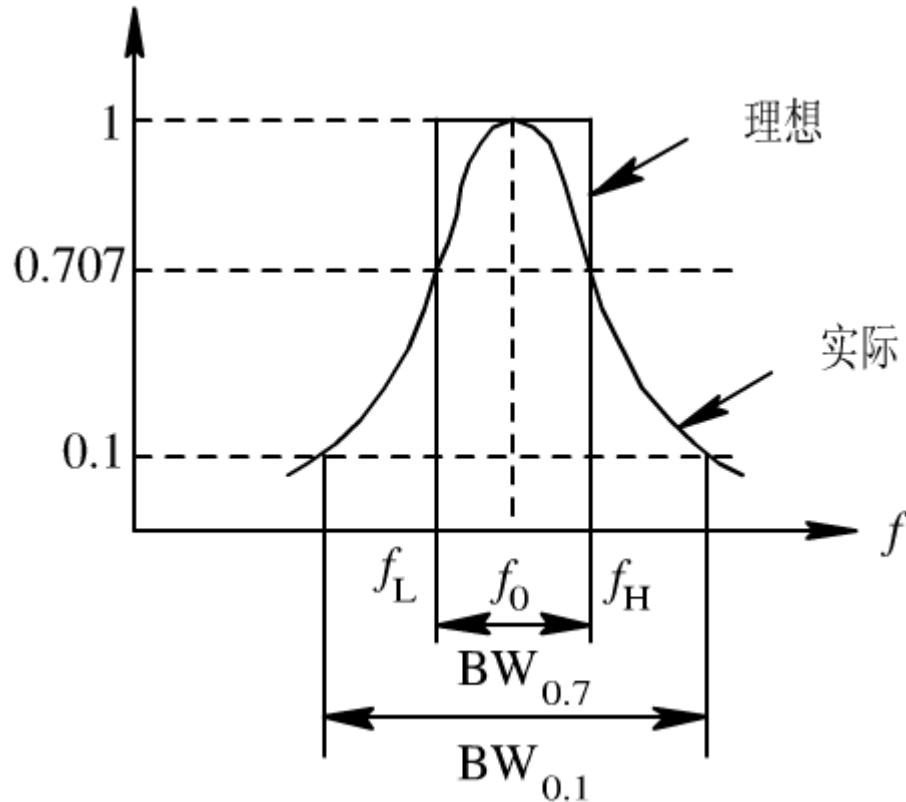
$$N(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)^2}}$$

Q越大(表示损耗越小),
曲线越陡峭,
表示选频性越好。



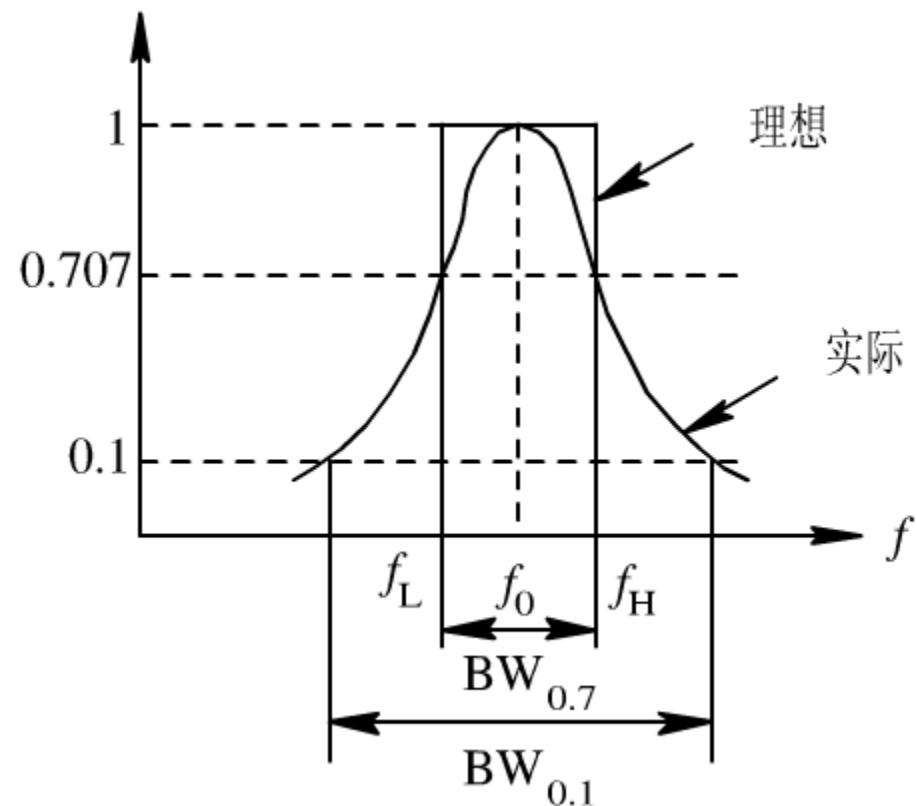
矩形系数 ($K_{0.1}$)

单位谐振曲线 $N(f)$ 值下降到 0.1 时的频带范围 $BW_{0.1}$ 与通频带 $BW_{0.7}$ 之比。



$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} \geq 1$$





$$\text{由 } N(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} = \frac{1}{10}$$

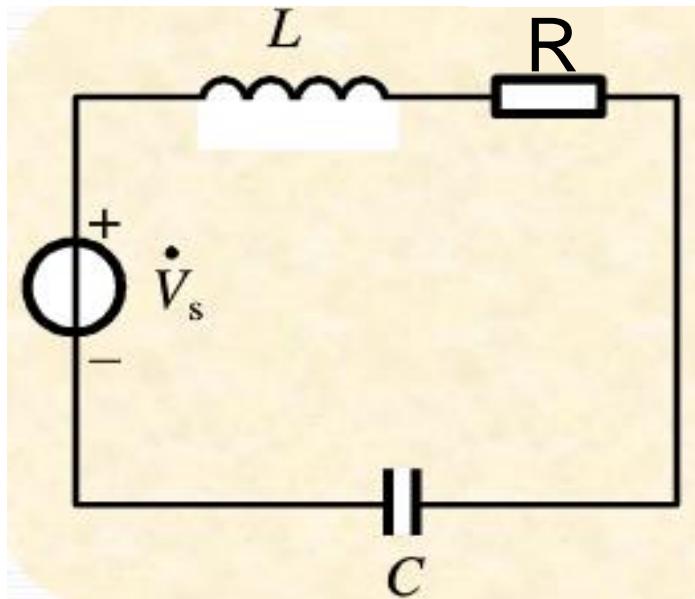
$$\text{得 } BW_{0.1} = \sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q_0}$$

$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} = \sqrt{10^2 - 1} \approx 9.95 \quad (\text{定值})$$

■ $K_{0.1}$ 数值越小 (越接近于1) , 放大器的选择性越好。



二、串联谐振回路（信号源与电容和电感串接）

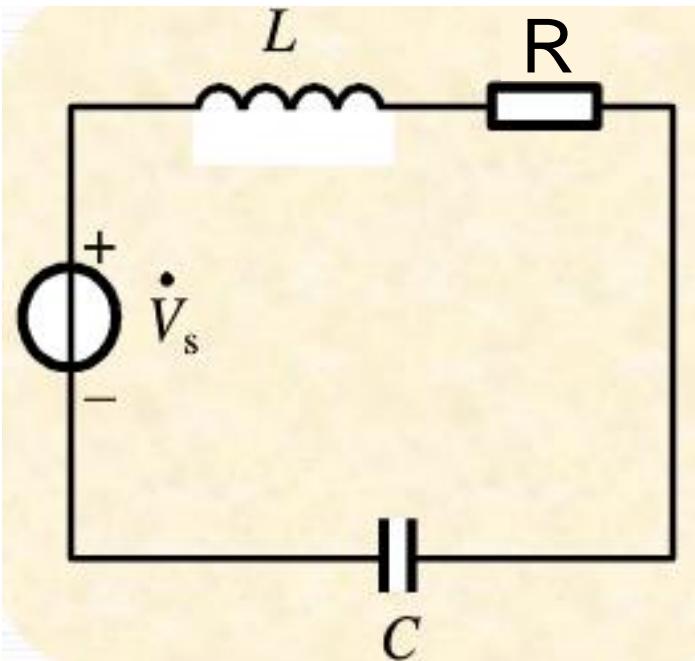


1. 等效阻抗

$$z = R + jX = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \doteq |z| e^{j\omega}$$



2. 谐振角频率



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

$$Z = R = Z_{\min}$$

电流 $I = I_0 = \frac{V_s}{R}$ 达最大，且与电源同相。



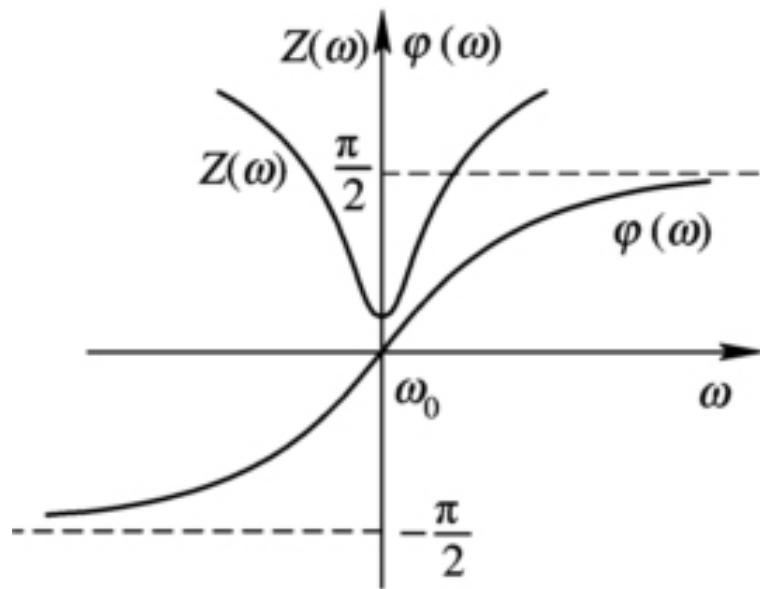
3. 阻抗特性曲线

幅频特性

$$|z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

相频特性 $\omega L - \frac{1}{\omega C}$

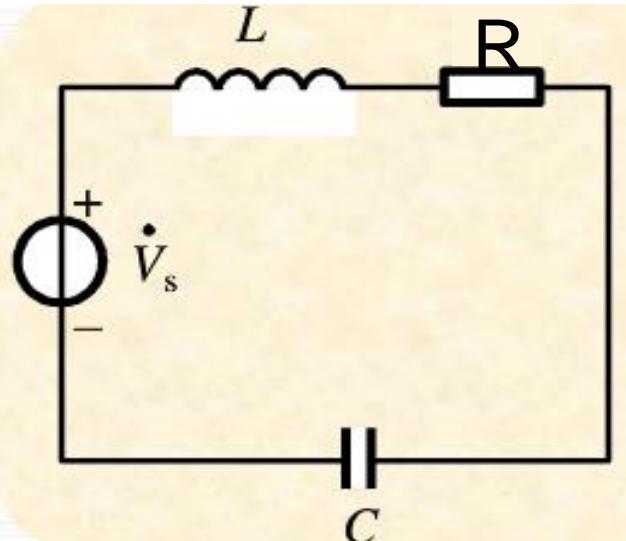
$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$



- $\omega = \omega_0$, $|z| = R$ 呈纯电阻且最小, 串联谐振。
- 当 $\omega \neq \omega_0$ 时有 $|z| > R$,
- $\omega > \omega_0$, $X > 0$, $\varphi > 0$, 呈感性, 电压超前电流。
- $\omega < \omega_0$, $X < 0$, $\varphi < 0$, 呈容性, 电压滞后电流。



4. 回路空载Q值



$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- R大则Q低（损耗功率大），
R小则Q高，Q越高越好。

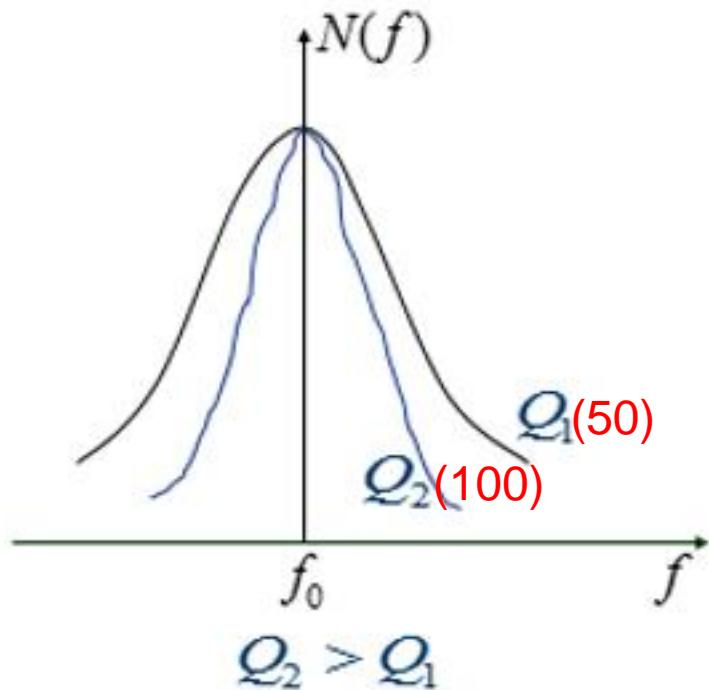
$$\dot{V}_{L0} = I_0 j \omega_0 L = \frac{\dot{V}_s}{R} j \omega_0 L = j \frac{\omega_0 L}{R} \dot{V}_s = j Q_0 \dot{V}_s$$
$$\dot{V}_{C0} = I_0 \frac{1}{j \omega_0 C} = \frac{\dot{V}_s}{R} \frac{1}{j \omega_0 C} = -j \frac{1}{\omega_0 C R} \dot{V}_s = -j Q_0 \dot{V}_s$$

结论：串联谐振时，电感L和电容C上的电压达到最大值且为输入信号电压的 Q_0 倍，故其也称电压谐振。



5. 串联谐振曲线

回路电流幅值 $|I|$ 与外加信号频率之间的关系曲线



$$\text{幅值 } |N(f)| = \left| \frac{I}{I_{00}} \right|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)^2}}$$

结论：

- (1) $f=f_0$ 时，电流最大（谐振）； $f \neq f_0$ 时，电流减小（失谐）。
- (2) Q 大，曲线越陡，选频作用越好。
- Q 小，曲线越平缓，选频作用越差。



四川大学



SICHUAN UNIVERSITY

6. 通频带 $BW_{0.7}$

$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_0}$$



四川大学

SICHUAN UNIVERSITY



1. 1. 2 LC谐振回路

一、并联谐振回路

1. 阻抗与导纳
2. 谐振频率
3. 回路空载Q值
4. 单位谐振曲线N(f)
5. 通频带 选择性 矩形系数

二、串联谐振回路

三、LC串并联谐振回路的比较



三、LC串并联谐振回路的比较

并联谐振回路

串联谐振回路

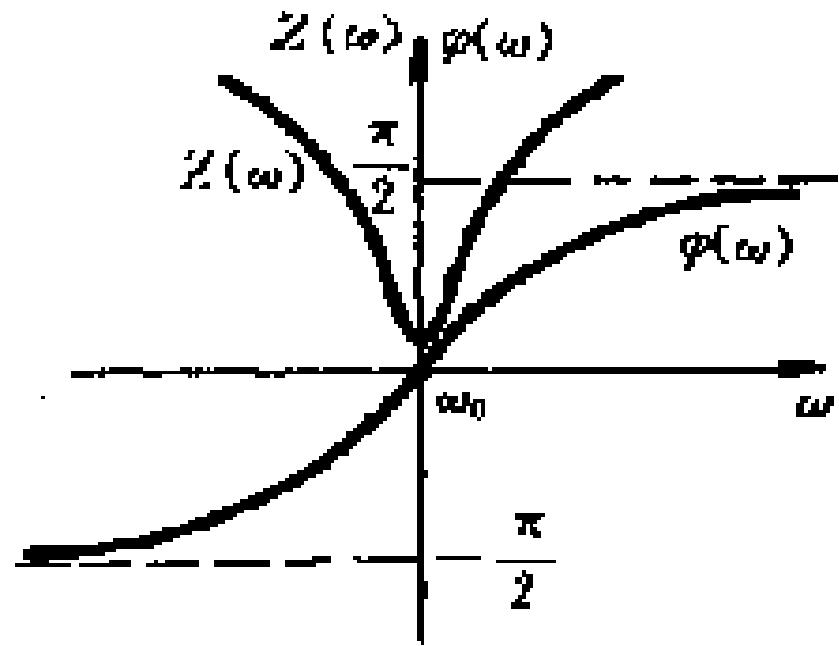
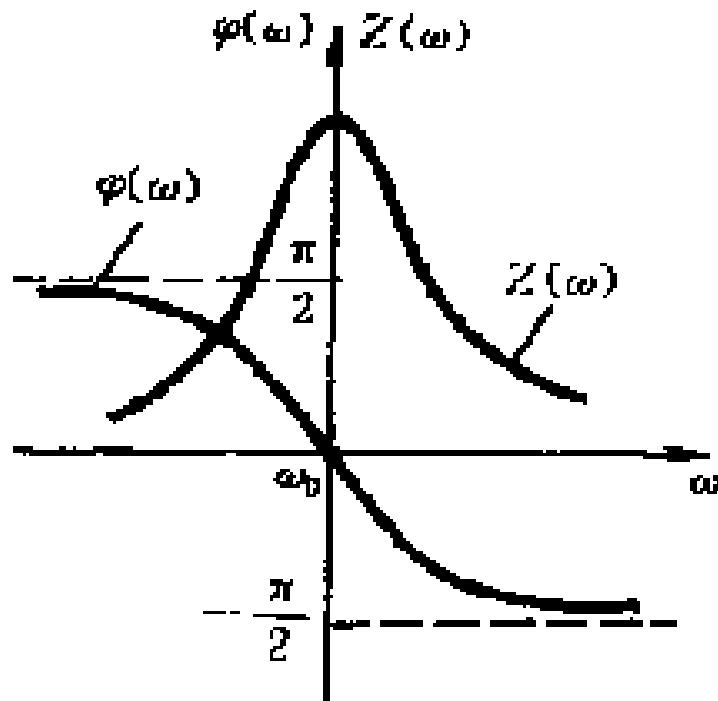
谐振阻抗	纯阻,最大	纯阻,最小
谐振频率	* $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
品质因数	$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} = \frac{R_p}{\omega_0 c r}$	$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 c r}$
支路电流元件电压	$I_L \approx I_C = QI_S$, 支路电流是总电流Q倍,为 <u>电流谐振</u>	$U_L \approx U_C = QU_{\infty}$ 为 <u>电压谐振</u>
选择性	* 品质因数越大,矩形系数越接近1,选择性越好	品质因数越大,矩形系数越接近1,选择性越好
通频带与品质因数关系	* $BW = \frac{f_0}{Q_0}$	$BW = \frac{f_0}{Q_0}$
与信号源连接	适合与电流源并联,谐振时电压最大	适合与电压源串联,谐振时电流最大



• 相频特性

并联谐振回路

串联谐振回路



并： 负斜率 $\pm 90^\circ$

串： 正斜率 $\pm 90^\circ$



1.1 LC谐振回路的选频特性和阻抗变换特性

1.1.1 概述

- 一、LC谐振回路在无线通信系统中的应用场合
- 二、选频器件及电路
- 三、阻抗电路的串、并联等效变换

1.1.2 LC谐振回路

1.1.3 阻抗变换电路

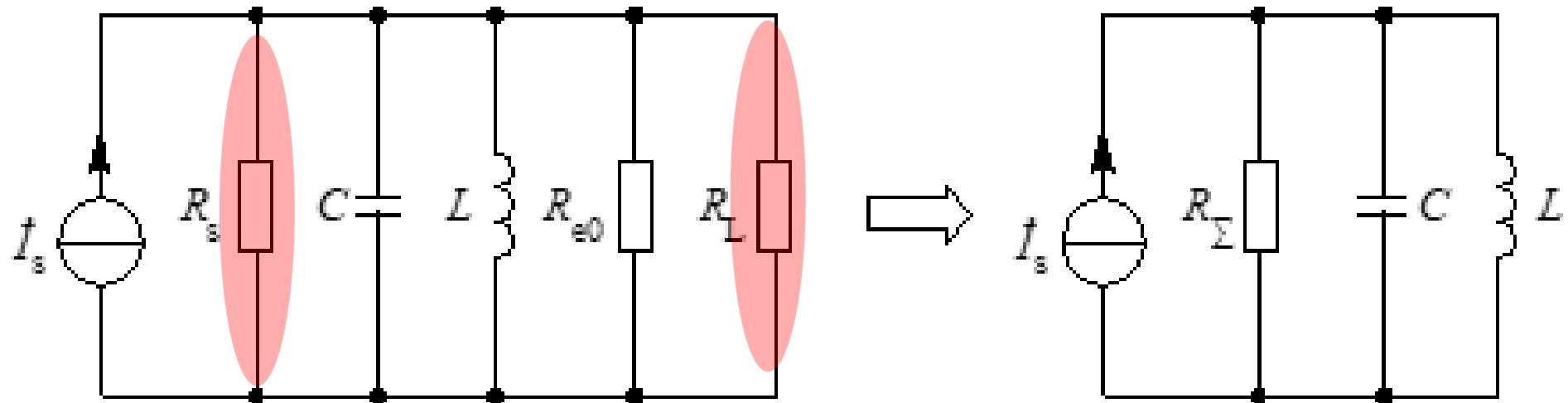


1.1.3 阻抗变换电路

- 一、信号源及负载对谐振回路的影响
- 二、阻抗变换电路



一、信号源及负载对谐振回路的影响

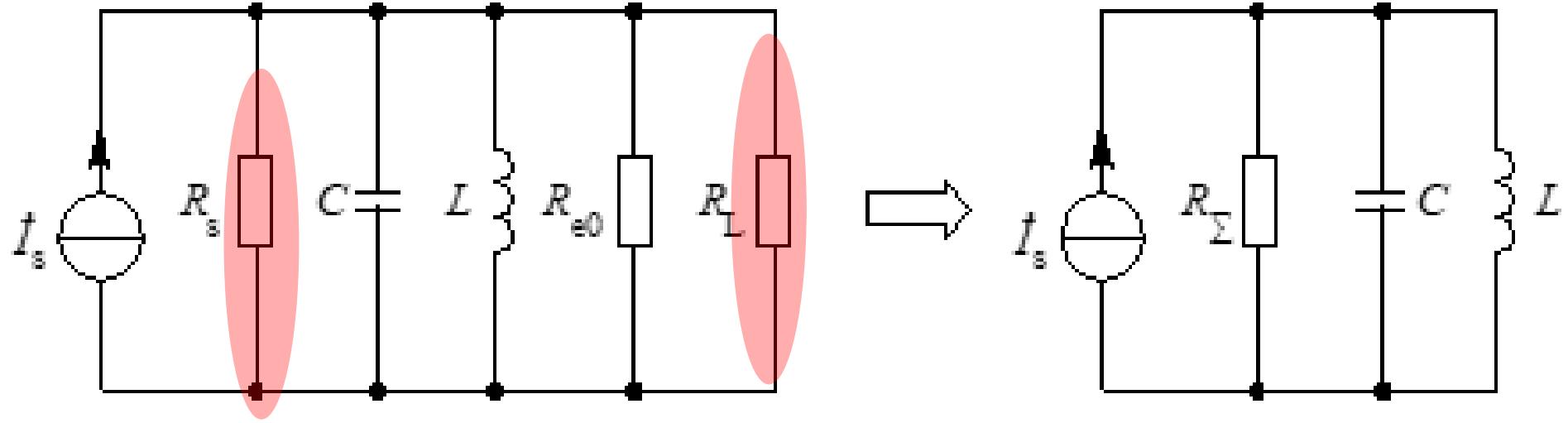


1. 有载品质因素(劣化)

$$Q_e = \frac{R_\Sigma}{\omega_0 L} = \frac{R_s // R_{e0} // R_L}{\omega_0 L}$$

$$< Q_0 = \frac{R_{e0}}{\omega_0 L}$$

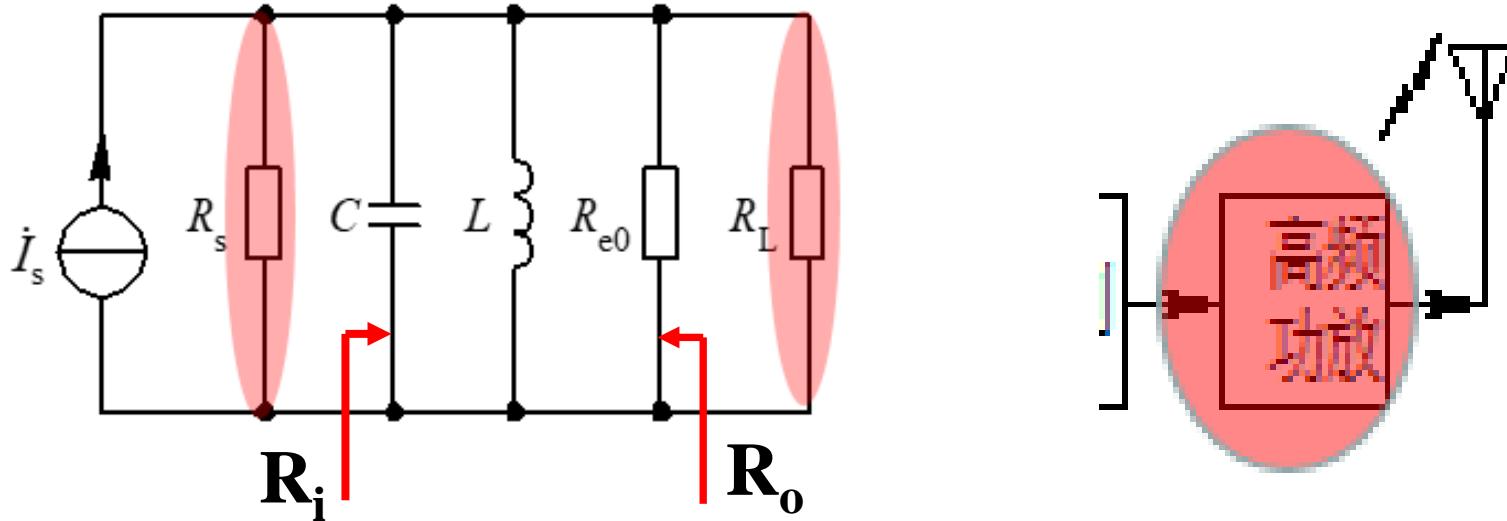
Q值变小，通频带展宽，选择性变差。



2. 若是容性负载，回路谐振频率将发生变化。

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





3. 阻抗匹配问题

功放调谐回路的目的要传送信号能量，所以只有 R_S ， R_L 与回路电阻匹配时才能获得最大功率。

$$R_s = R_i$$

$$R_L = R_o$$



二、 阻抗变换电路

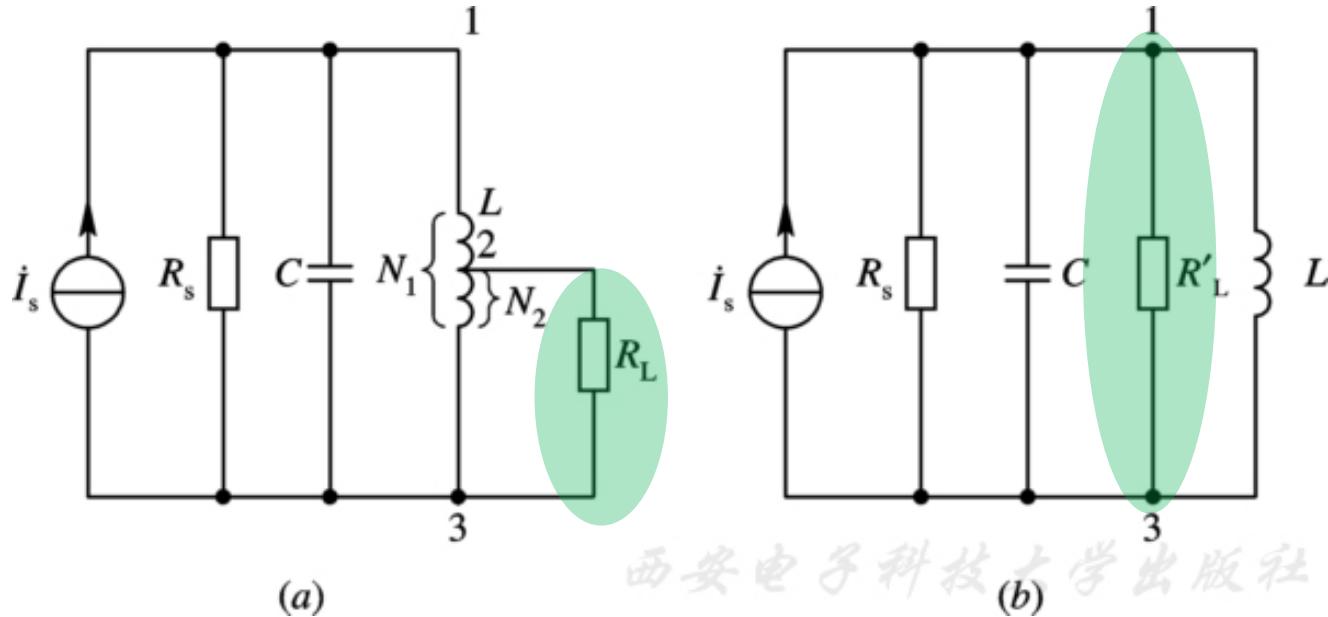
I. 纯电感或纯电容阻抗变换电路 (抽头并联振荡电路)

1. 自耦变压器电路
2. 变压器阻抗变换电路
3. 电容分压式电路
4. 电感分压式电路

II. LC选频匹配电路



1. 自耦变压器电路 (设变压器理想无损耗)



西安电子科技大学出版社

**接入系数n
(电压比) :**

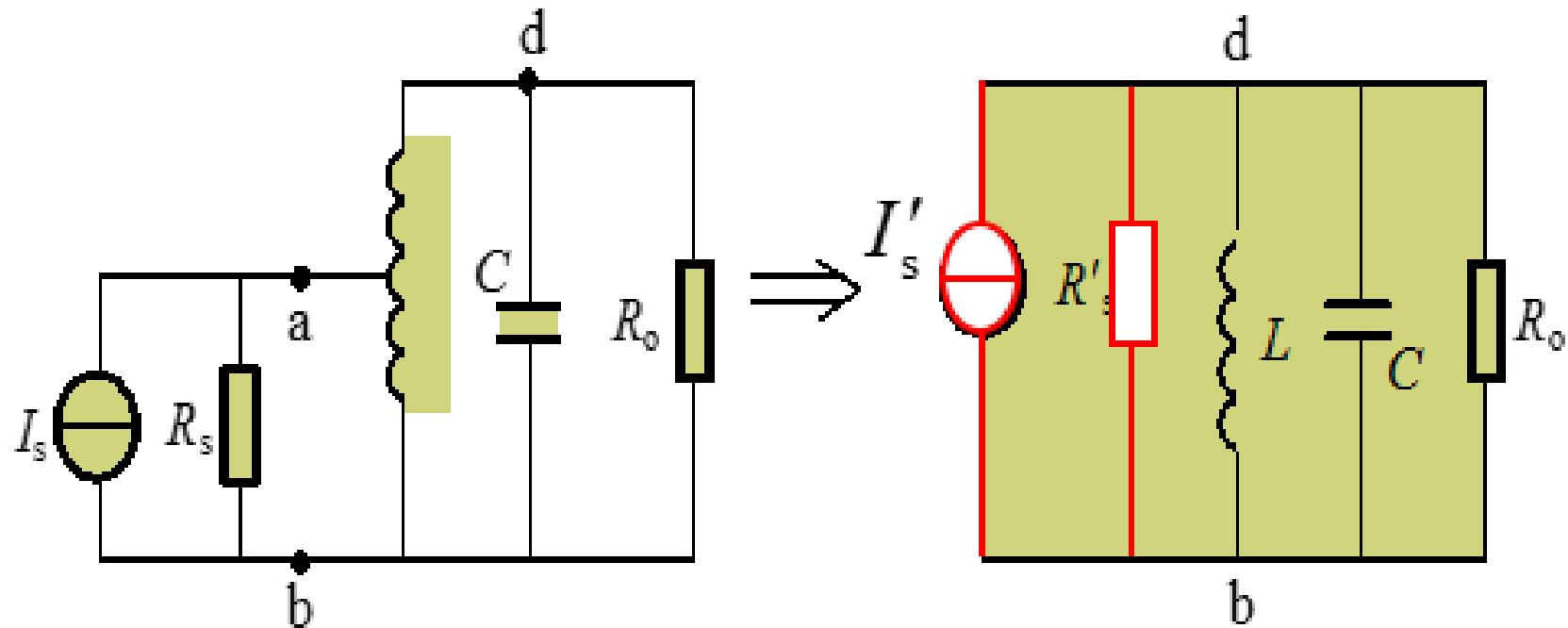
$$n = \frac{N_2}{N_1} (\leq 1)$$

$$R_L' = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 R_L = \frac{1}{n^2} R_L$$



讨论

电流源的折合



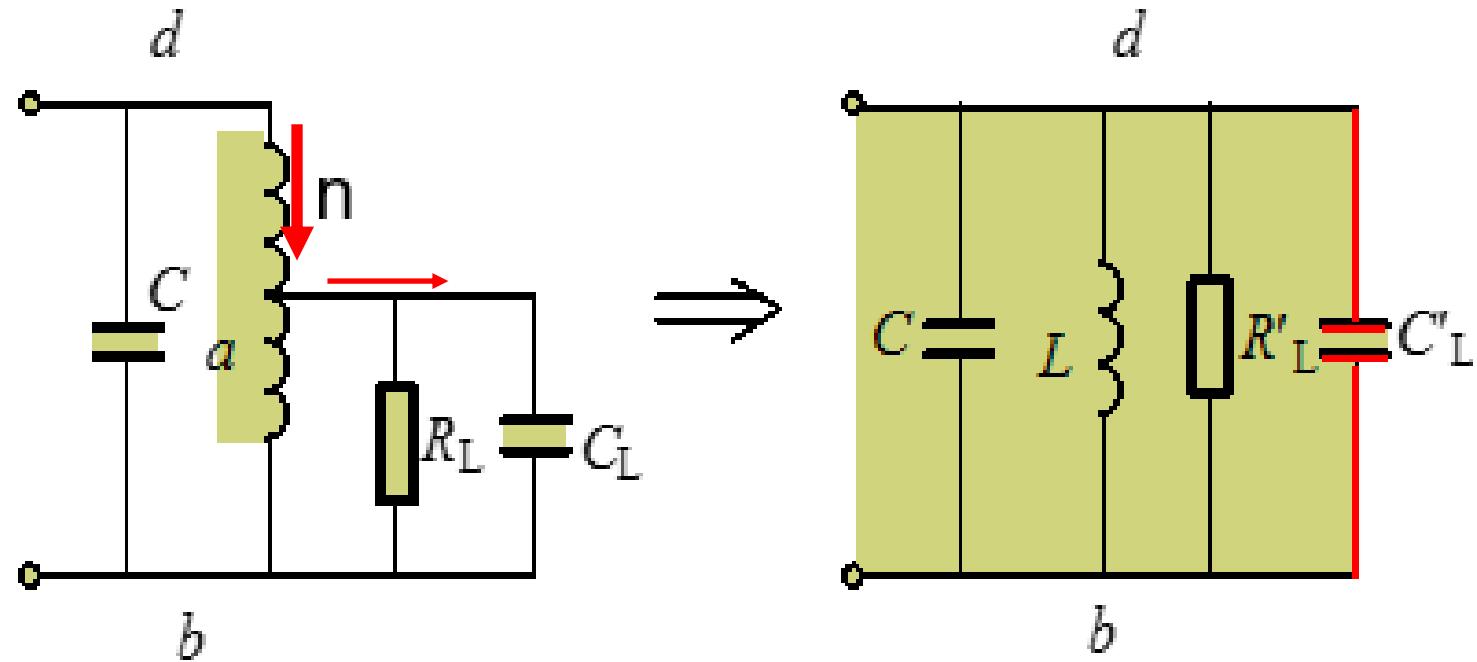
$$\text{因 } I_s \cdot V_{ab} = I'_s \cdot V_{bd} \Rightarrow I'_s = \frac{V_{ab}}{V_{bd}} \cdot I_s = n \cdot I_s$$

· 电流、电压转换时，其变比是n或1/n,而不是n²。



讨论

负载电容的折合

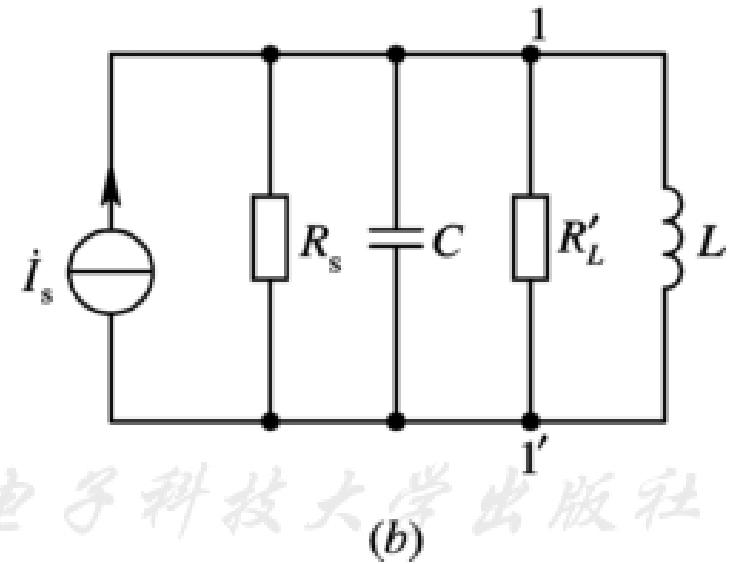
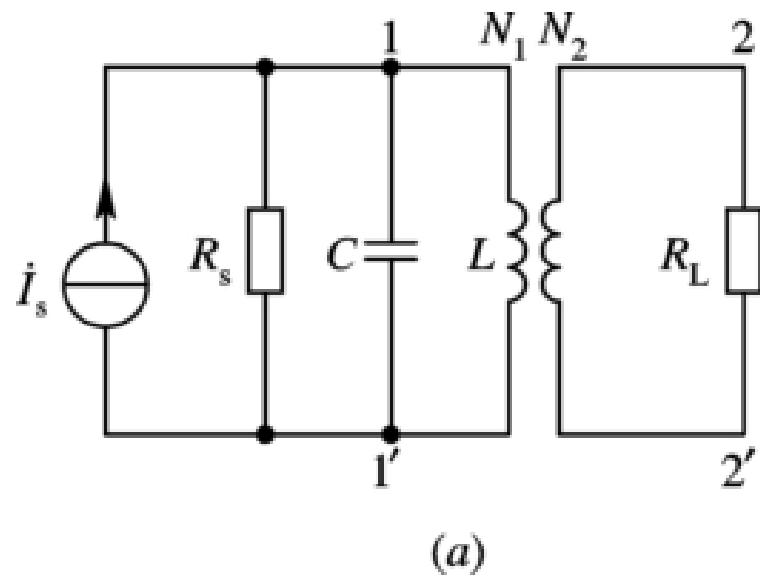


$$R'_L = \frac{1}{n^2} R_L \quad \frac{1}{\omega C'_L} = \frac{1}{n^2} \frac{1}{\omega C_L}$$

因此 $C'_L = n^2 C_L$



2. 变压器阻抗变换电路

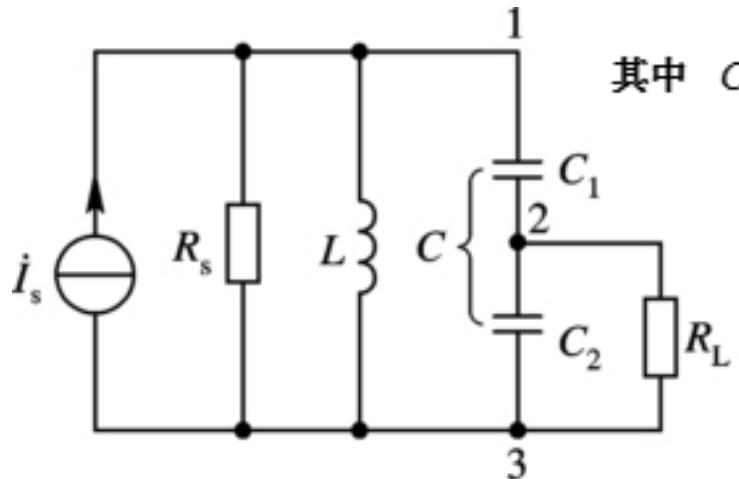


西安电子科技大学出版社

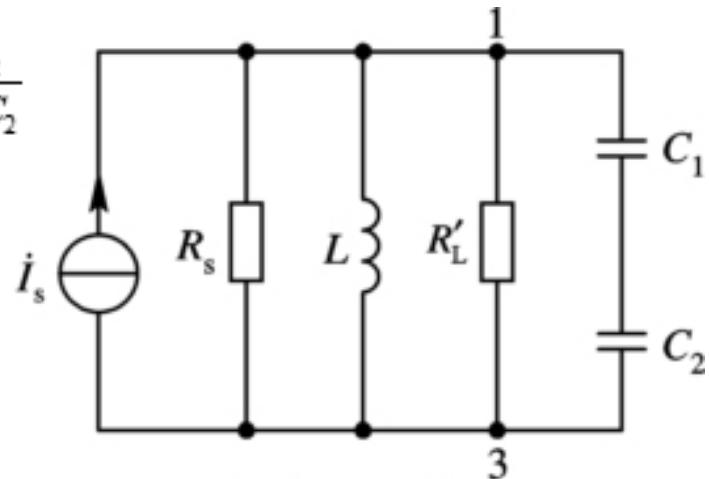
$$R_L' = \frac{1}{n^2} R_L$$



3. 电容分压式电路



(a)



(b)

西安电子科技大学出版社

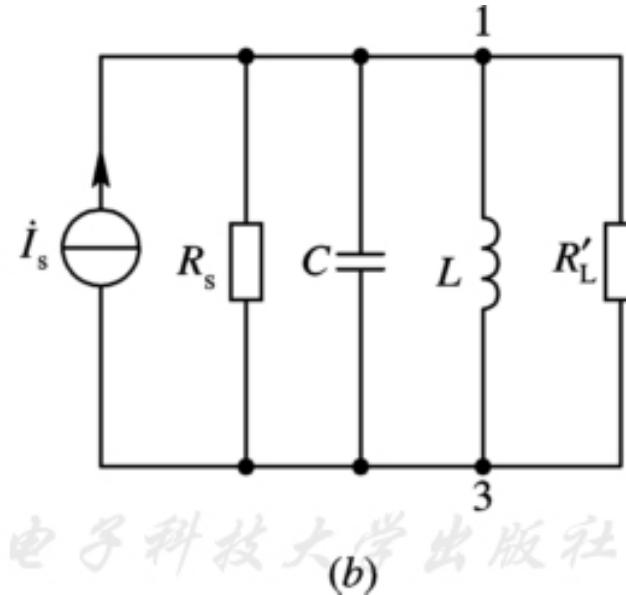
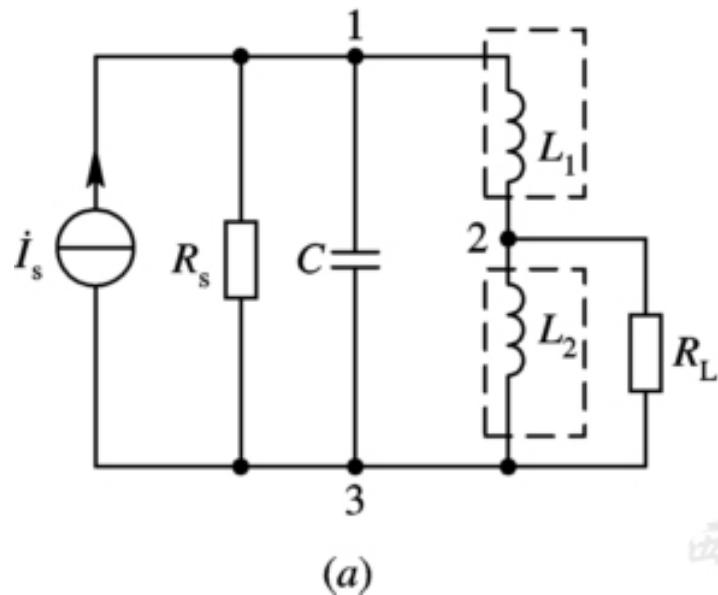
当 $R_L \gg \frac{1}{\omega C_2}$ 时， C_1, C_2 可看作是串联的，

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

$$\text{则 } R'_L = \frac{1}{\left(\frac{C_1}{C_1 + C_2}\right)^2} R_L = \frac{1}{n^2} R_L$$



4. 电感分压式电路



西安电子科技大学出版社

设 L_1, L_2 是无耗的，且 $WL_2 \gg R_L$

$$n = \frac{L_2}{L_1 + L_2}$$

$$R'_L = \frac{1}{\left(\frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)^2} = \frac{1}{n^2} R_L$$

$$\text{或 } g'_L = n^2 g_L$$



四川大学

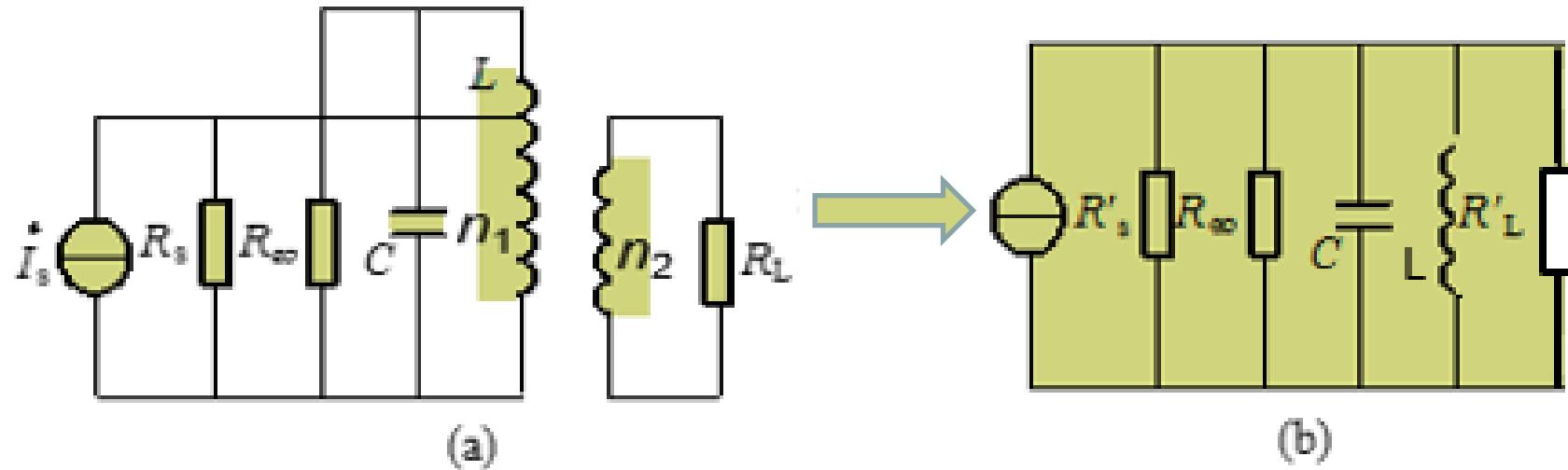


SICHUAN UNIVERSITY

讨论

下图为紧耦合的抽头电路。

给定回路谐振频率 $f_0 = 465 \text{ kHz}$, $R_s = 27\text{K}\Omega$, $R_{eo} = 172\text{K}\Omega$,
 $R_L = 1.36\text{K}\Omega$, 空载 $Q_0 = 100$, $n_1 = 0.28$, $n_2 = 0.063$, $I_s = 1\text{mA}$
 求回路通频带 $BW_{0.7} = ?$ 和等效电流源 $I'_s = ?$



$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_\infty} \quad Q_0 = \frac{R_{eo}}{\omega_0 L} \quad Q_\infty = \frac{R_\Sigma}{\omega_0 L} \quad \frac{Q_0}{Q_\infty} = \frac{R_{eo}}{R_\Sigma} \quad I'_s = n_1 I_s$$

二、阻抗变换电路

(一) 纯电感或纯电容阻抗变换电路 (抽头并联振荡电路)

1. 自耦变压器电路
2. 变压器阻抗变换电路
3. 电容分压式电路
4. 电感分压式电路

(二) LC选频匹配电路



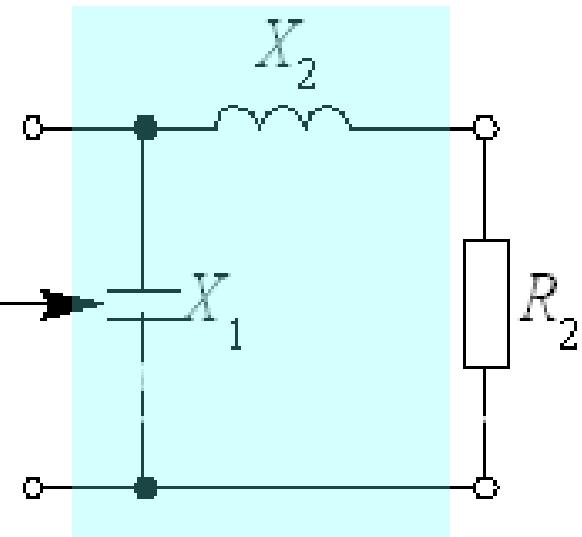
(二) LC选频匹配电路

1. 倒L型(最基本)

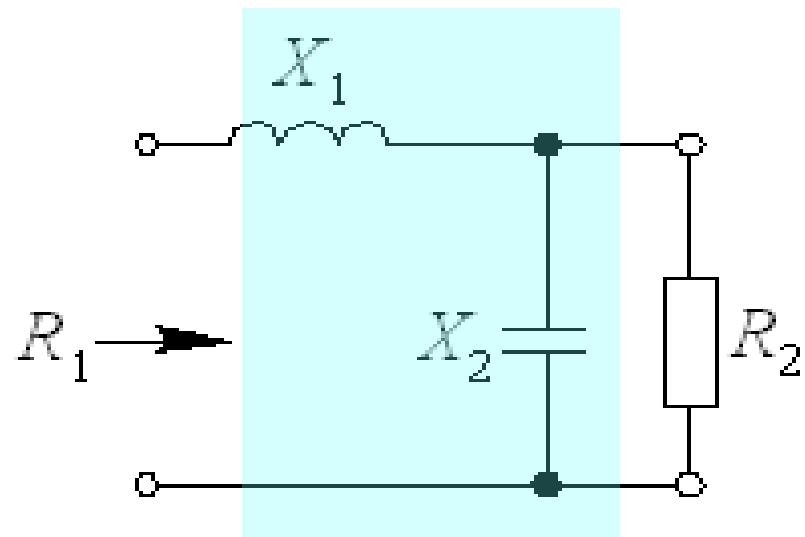
2. T型和π型网络



1. 倒L型(最基本)



(a) L_1 型



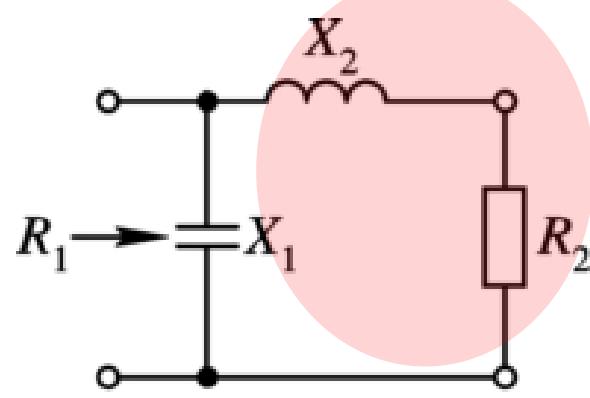
(b) L_2 型

R_2 为负载电阻，
 R_1 为二端网路在 ω_0 处的等效电阻
如何选择网络参数？

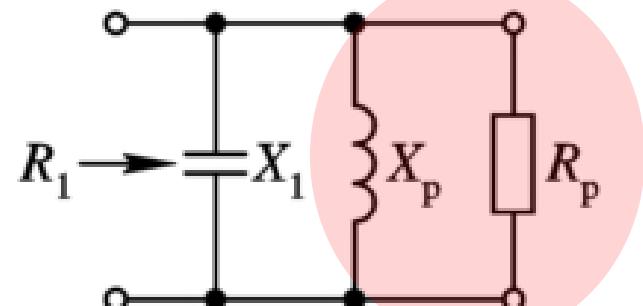


L₁型

谐振时: $X_1 + X_p = 0, R_1 = R_p$



(a)



(c)

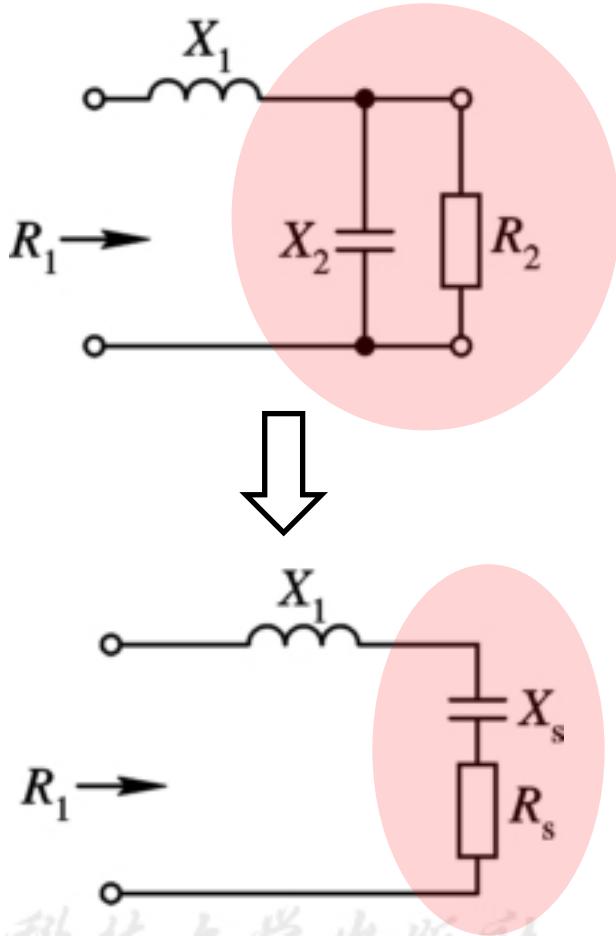
$$R_1 = (1 + Q_e^2) R_2 \Rightarrow Q_e = \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1}$$

$$|X_2| = Q_e R_2 = \sqrt{R_2 (R_1 - R_2)}, \quad |X_1| = |X_p| = \frac{R_1}{Q_e} = R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1 - R_2}}$$

注: 采用这种电路, 可以将小负载变成大负载。



L₂型



$$R_1 = R_s = \frac{1}{(1 + Q_e^2)} R_2 \quad Q_e = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}$$

$$|X_2| = \frac{R_2}{Q_e} = R_2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2 R_1}}$$

$$|X_1| = |X_s| = Q_e R_1 = \sqrt{R_1(R_2 - R_1)}$$

注：采用这种电路，可以将大负载变成小负载。



$$Q_e = \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1}$$

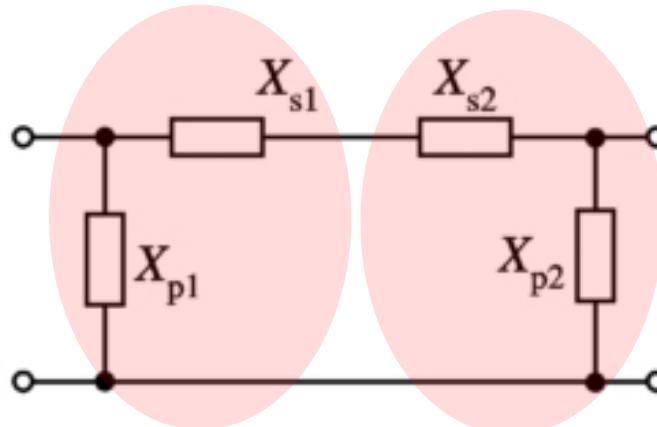
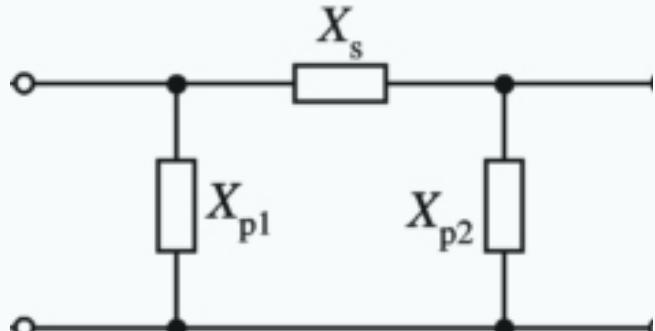
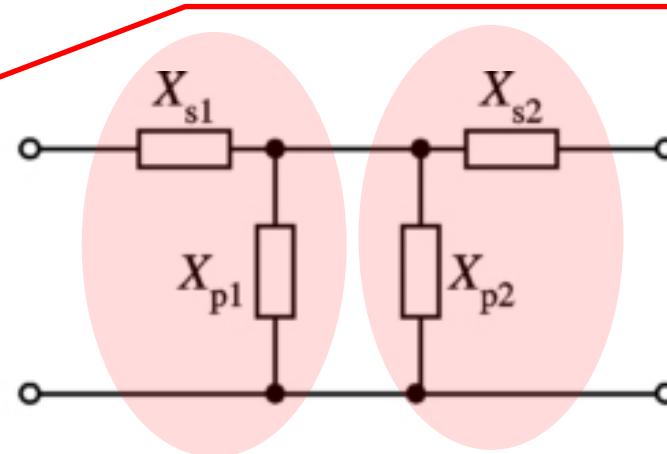
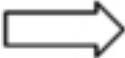
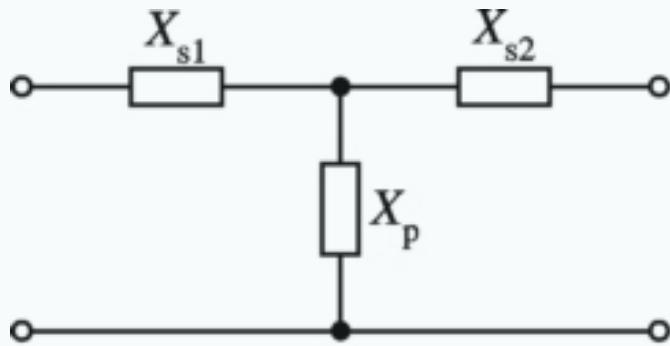
$$Q_e = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}$$

- 倒L型电路有一种不足：如果阻值前后变比不大，则要求Q值不大。Q值越低，选频性能变差。



2. T型和π型网络

各由三个电抗元件组成(两个同性质、一个异性质)



第1章 基础知识

1.1 LC谐振回路的选频特性和阻抗变换特性

1.2 集中选频滤波器

1.3 电噪声

1.4 反馈控制电路原理及其分析方法

章末小结



1.3 电噪声

■ 定义

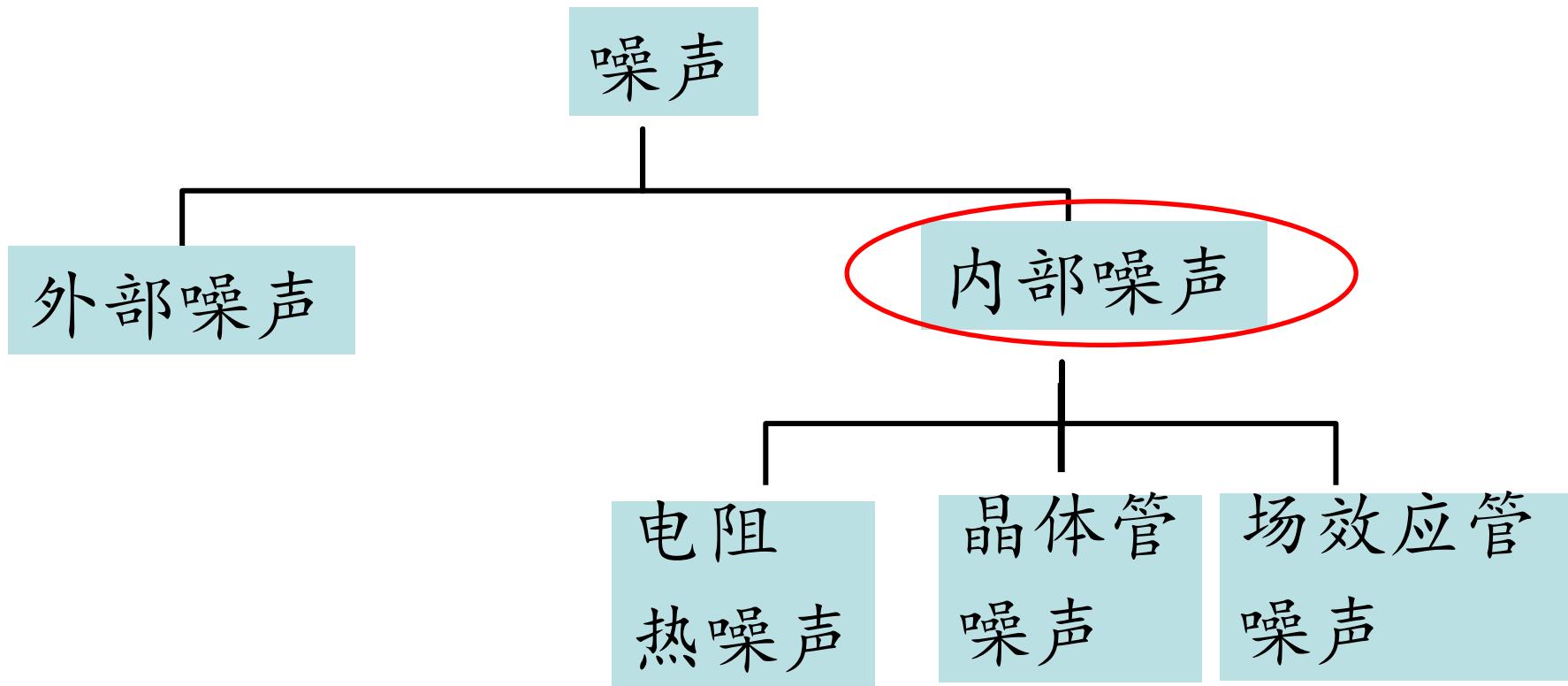
干扰（或噪声），指除有用信号以外的一切不需要的信号及各种电磁骚动的总称。

■ 研究目的

如何减小它对有用信号的影响。

■ 分类





1.3 电噪声

1.3.1 电阻热噪声

1.3.2 晶体管噪声

1.3.3 场效应管噪声

1.3.4 额定功率和额定功率增益

1.3.5 噪声系数

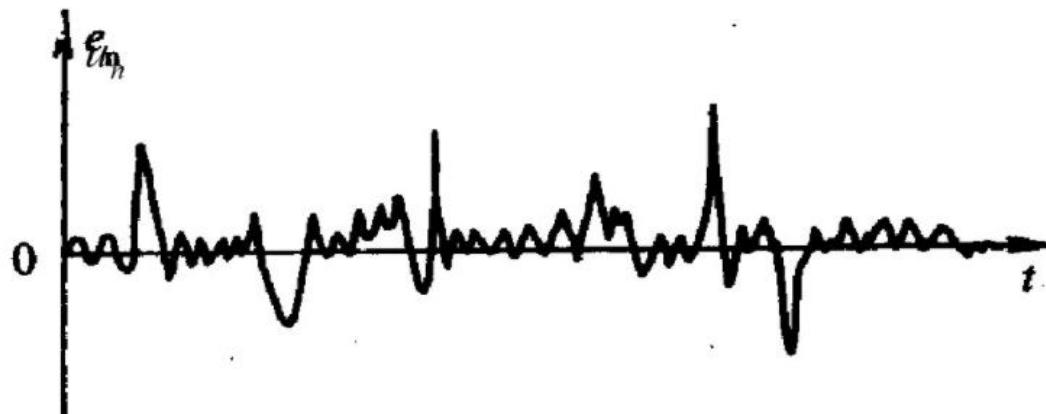
1.3.6 等效输入噪声温度

1.3.7 接收灵敏度



1.3.1 电阻热噪声

- 定义 由于电阻内部自由电子的热运动在导体内形成非常微弱的电流,这种电流呈杂乱起伏的状态。



- 热噪声功率[均方电压(或电流)]谱密度和噪声均方电压(或电流)值

$$S_U(f) = 4kTR \text{ (V}^2/\text{Hz)}$$

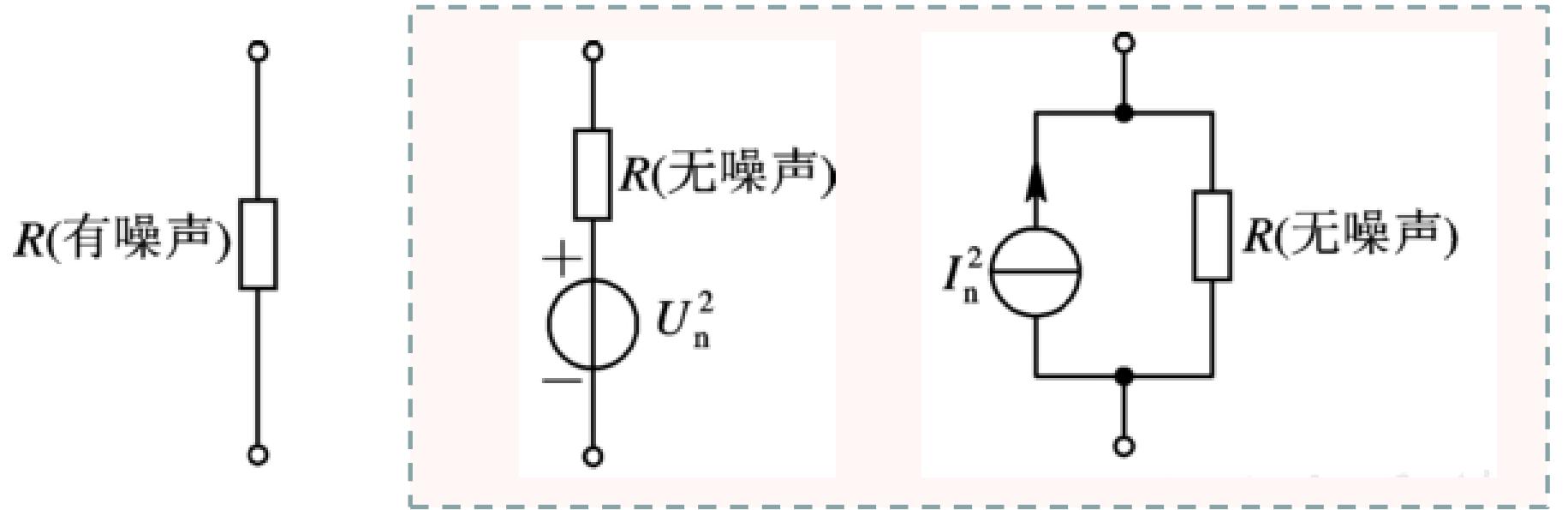
$$S_I(f) = \frac{4kT}{R}$$

$$U_n^2 = S_U(f) \cdot BW = 4kTR \cdot BW$$

$$I_n^2 = S_I(f) \cdot BW$$



■ 实际电阻的热噪声等效电路



- 对于线性网络的噪声，适用**均方叠加法则**，此时总的噪声输出功率是每个噪声源单独作用在输出端所产生的噪声功率之和。

$$\text{多个电阻热噪声: } U_n^2 = U_{n1}^2 + U_{n2}^2 = 4kTB(R_1 + R_2)$$



1.3.2 晶体管噪声

- 热噪声
- 散弹噪声 (主要噪声源)
- 分配噪声
- 闪烁噪声



■ 热噪声

以基区体电阻 $r_{bb'}$ 的影响为主。

■ 散弹噪声

- 由载流子随机起伏流动产生，属白噪声。
- 散弹噪声均方电流谱密度： $S_I(f) = 2qI_0$
- 适用均方叠加法则。



■ 分配噪声

- 因基区载流子复合的随机性造成分配比起伏变化。
- 功率谱密度随频率增而增。

■ 闪烁噪声 (1/f噪声, 低频噪声)

- 由于半导体材料及制造工艺水平造成表面清洁处理不好等引起的噪声。
- 频谱集中在约1KHz以下的低频范围, 且功率频谱密度随频率降低而增大。



1.3 电噪声

1.3.1 电阻热噪声

1.3.2 晶体管噪声

1.3.3 场效应管噪声

1.3.4 额定功率和额定功率增益

1.3.5 噪声系数

1.3.6 等效输入噪声温度

1.3.7 接收灵敏度

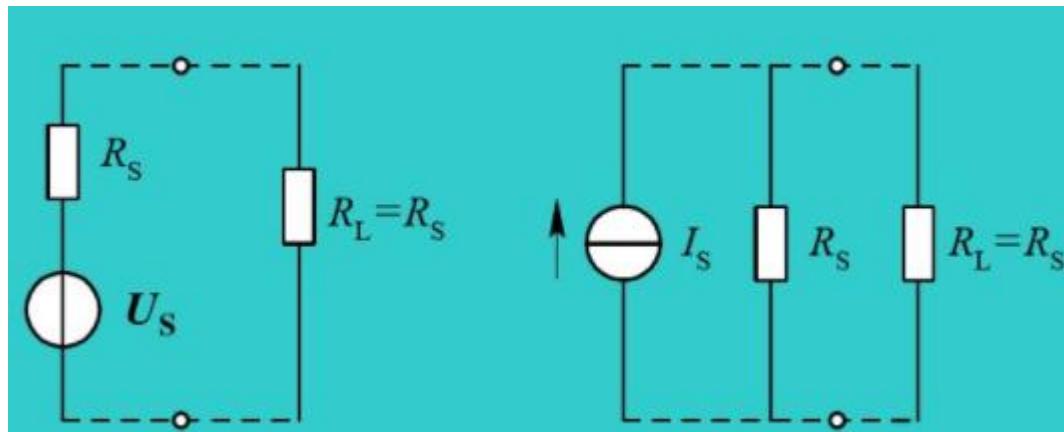


1.3.4 额定功率和额定功率增益

■ 额定功率 P_A

- 定义：指信号源所能输出的最大功率 ($R_L = R_s$)。只取决于信号源本身的参数——内阻和电动势，与输入电阻和负载无关。

$$P_A = \left(\frac{U_s}{R_s + R_L}\right)^2 R_L = \frac{U_s^2}{4R_s} = \frac{I_s^2 R_s}{4}$$



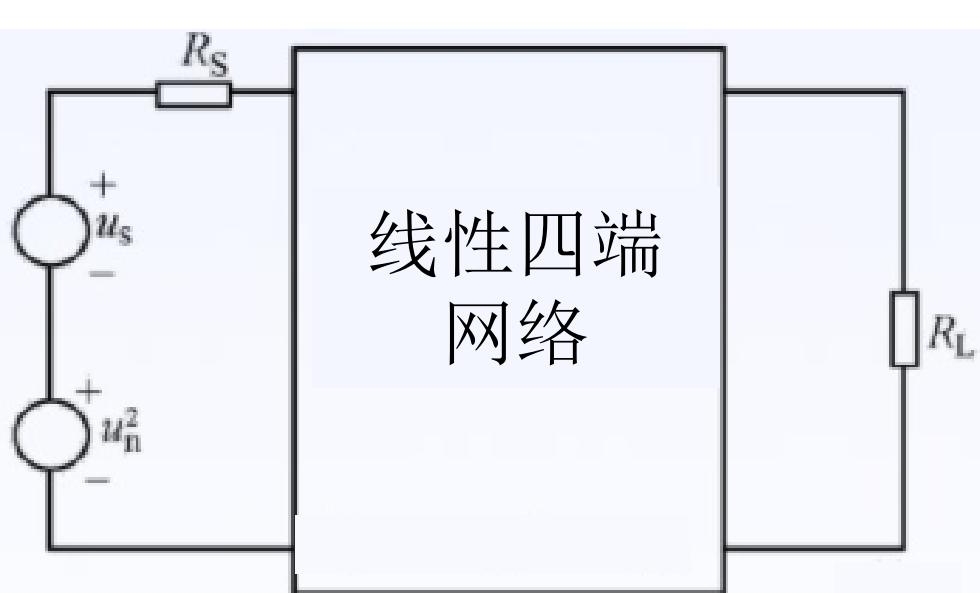
注： U_s 、 I_s 为有效值



■ 输入噪声 (电阻 R_s 热噪声) 额定功率

$$P_{nA} = \frac{U_n^2}{4R_s} = \frac{S_U(f) \cdot BW}{4R_s} = kT_0 \cdot BW$$

P_{nA} 只与 T_0 和 BW 有关，而与本身阻值和负载(电路的输入阻抗)大小无关。



$$\frac{P_A}{P_{nA}} = \frac{U_s^2}{U_n^2}$$

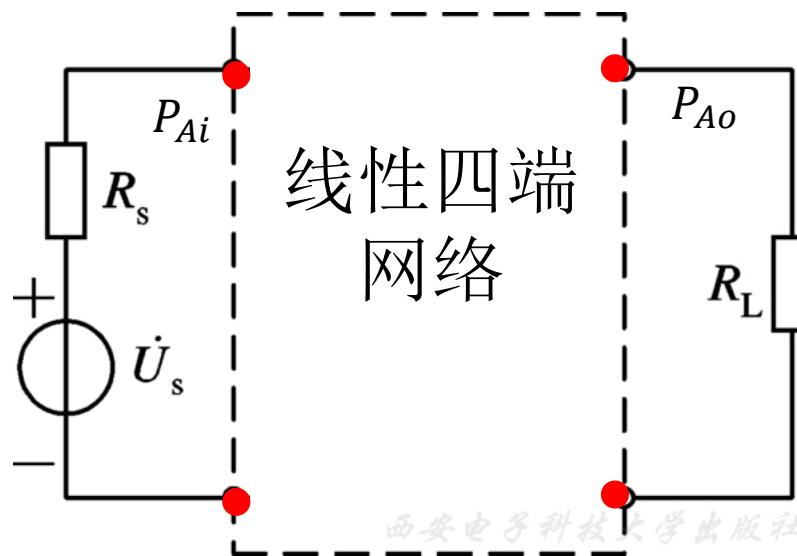
信号源与任何负载相接并不影响其输入端信噪比，即无论负载为何值，其信噪比都不变。



■ 额定功率增益 G_{PA} 是表征线性四端网络的一个参量。

- 定义:

$$G_{PA} = \frac{\text{输出额定功率 } P_{Ao}}{\text{输入额定功率 } P_{Ai}}$$



西安电子科技大学出版社

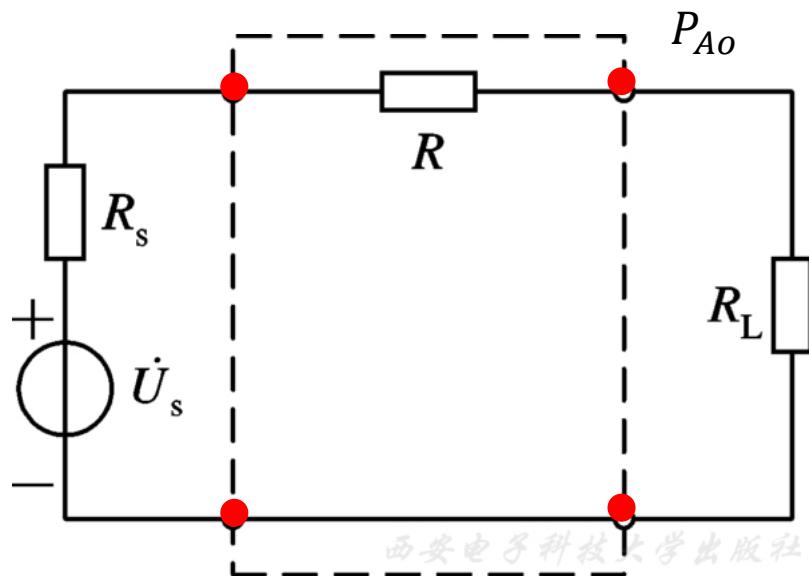


四川大学
SICHUAN UNIVERSITY



讨论

【例1.6】求图示四端网络的额定功率增益。



$$P_{Ai} = \frac{U_s^2}{4R_s}$$

$$P_{Ao} = \frac{U_o^2}{4(R_s + R)}$$

$$G_{PA} = \frac{P_{Ao}}{P_{Ai}} = \frac{R_s}{R_s + R}$$



1.3 电噪声

1.3.1 电阻热噪声

1.3.2 晶体管噪声

1.3.3 场效应管噪声

1.3.4 额定功率和额定功率增益

1.3.5 噪声系数

1.3.6 等效输入噪声温度

1.3.7 接收灵敏度



1.3.5 (线性四端网络的) 噪声系数

■ 信噪比(SNR)

1. 噪声系数定义
2. 噪声系数计算式
3. 放大器内部噪声表达式
4. 级联噪声系数
5. 无源四端网络的噪声系数



■ 信噪比(SNR)

是描述信号抗噪声质量的一个物理量。



- 定义:

$$SNR = \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率}}$$

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} (\text{dB})$$

1.3.5 (线性四端网络的) 噪声系数

■ 信噪比(SNR)

1. 噪声系数定义
2. 噪声系数计算式
3. 放大器内部噪声表达式
4. 级联噪声系数
5. 无源四端网络的噪声系数



1. 噪声系数 (NF)的定义

描述某一线性电路(如放大器)或一系统
(如接收机)的固有噪声的大小量度。



• 定义

$$NF = \frac{\text{输入端信噪比}}{\text{输出端信噪比}} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}$$

$$(NF)_{dB} = 10 \lg \left(\frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \right)$$



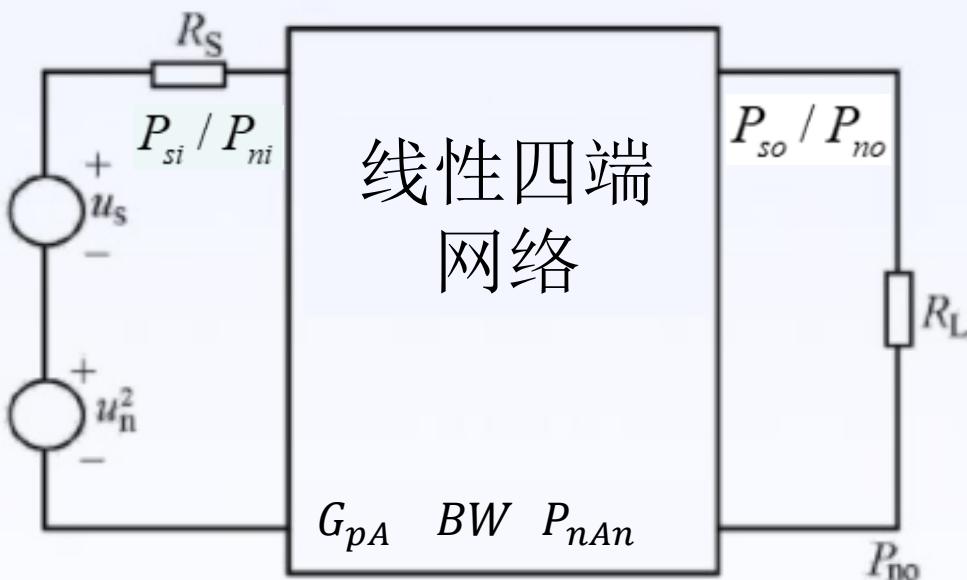
2. 噪声系数的计算式

利用额定功率法

- $NF > 1$;
- 理想情况下， $P_{nAn} = 0$, $NF = 1$

$$NF = \frac{P_{sAi} / P_{nAi}}{P_{sAo} / P_{nAo}} = \frac{1}{G_{pA} \frac{P_{nAo}}{P_{nAi}}}$$

$$P_{nAo} = G_{pA} P_{nAi} + P_{nAn}$$



$$= \frac{P_{nAi} G_{pA} + P_{nAn}}{G_{pA} P_{nAi}}$$

$$= 1 + \frac{P_{nAn}}{G_{pA} kT_0 \cdot BW}$$



3. 放大器内部噪声 P_{nAn} 的表达式

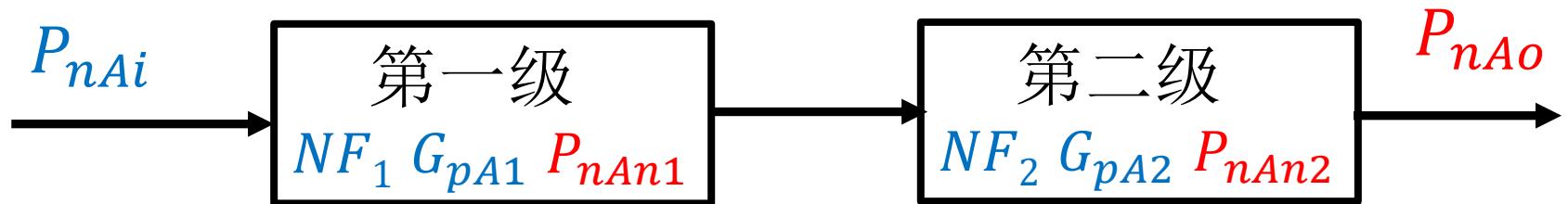
$$P_{nAn} = (NF - 1) \cdot G_{pA} \cdot kT_0 \cdot BW$$

- $NF = 1$, $P_{nAn} = 0$, NF 反映出放大系统内部噪声的大小。



4. 级联噪声系数

■ 先考虑两级放大器



$$NF_{1\sim 2} = \frac{P_{nAo}}{G_{pA}P_{nAi}}$$



- 总输出噪声额定功率 P_{nAo}

$$P_{nAo} = P_{nAi} G_{PA1} G_{PA2} + P_{nAn1} G_{PA2} + P_{nAn2}$$

- 各级的内部附加噪声额定功率

$$P_{nAn1} = (NF_1 - 1) \cdot G_{PA1} kT_0 \cdot BW$$

$$P_{nAn2} = (NF_2 - 1) \cdot G_{PA2} kT_0 \cdot BW$$

$$G_{PA} = G_{PA1} \cdot G_{PA2}$$

- 两级放大器总噪声系数为

$$NF_{1\sim 2} = \frac{P_{nAo}}{G_{pA} P_{nAi}} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{PA1}}$$



■ n 级放大器总噪声系数为

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{PA1}} + \frac{NF_3 - 1}{G_{PA1}G_{PA2}} + \cdots + \frac{NF_n - 1}{G_{PA1} \cdots G_{PA(n-1)}}$$

结论：对第一级来说，不但希望 NF_1 小，也希望 G_{PA1} 大，以便减小后级噪声的影响。



1.3.5 (线性四端网络的) 噪声系数

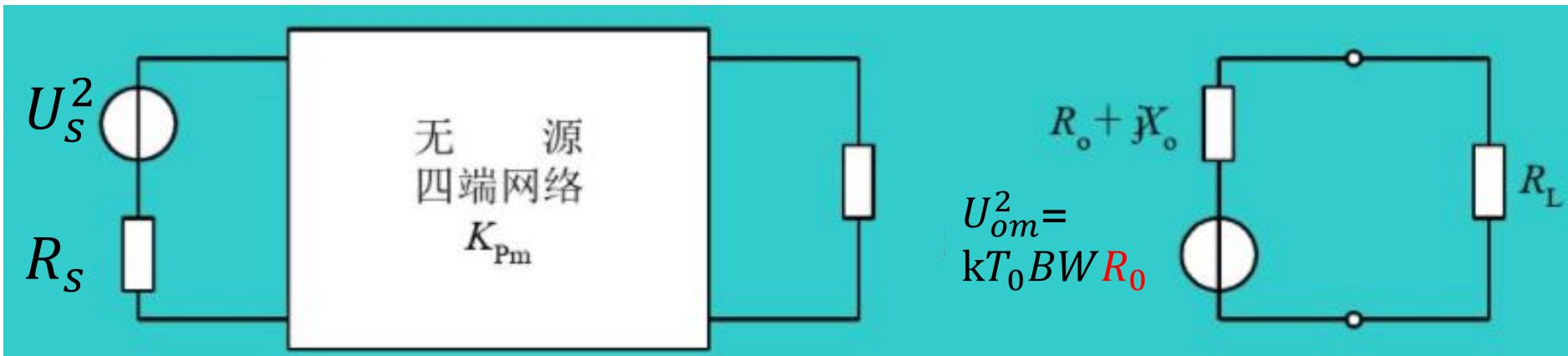
■ 信噪比(SNR)

1. 噪声系数定义
2. 噪声系数计算式
3. 放大器内部噪声表达式
4. 级联噪声系数
5. 无源四端网络的噪声系数



5. 无源四端网络的噪声系数

匹配网络、无源滤波器及具有一定长度的传输电缆



$$P_{nAi} = kT_0 \cdot BW = P_{nAo}$$

$$NF = \frac{P_{nAo}}{G_{pA} P_{nAi}} = \frac{1}{G_{pA}} = L$$

*无源四端网络的噪声系数等于其额定衰减量。



1.3 电噪声

1.3.1 电阻热噪声

1.3.2 晶体管噪声

1.3.3 场效应管噪声

1.3.4 额定功率和额定功率增益

1.3.5 噪声系数

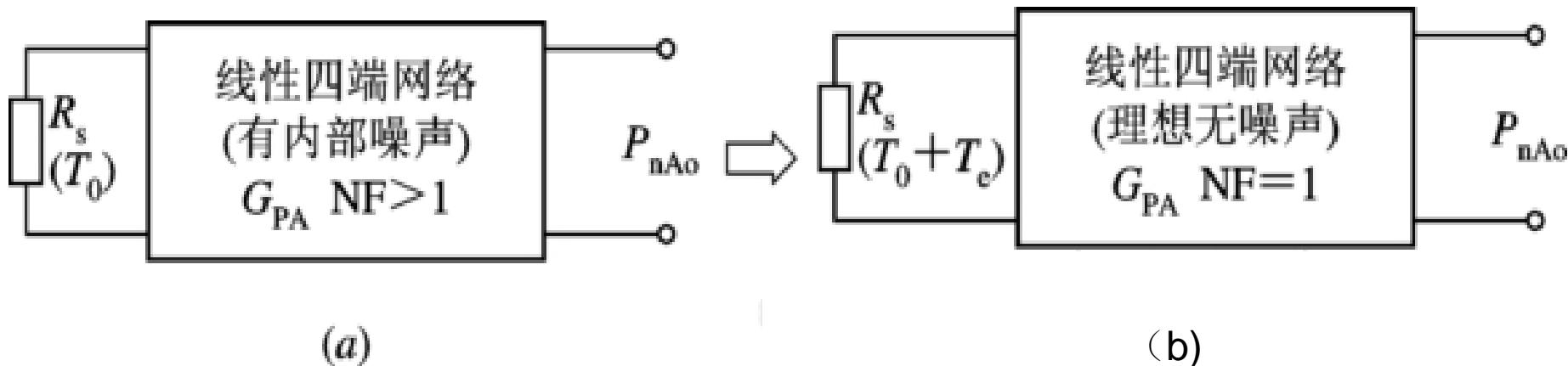
1.3.6 等效输入噪声温度

1.3.7 接收灵敏度



1.3.6 等效输入噪声温度

- 是衡量线性四端网络**噪声性能**的另一个参数。
- 噪声温度：**指线性电路的**内部附加噪声折算到输入端**，等效为信号源内阻上温度的升高。



■ 噪声温度 T_e 与噪声系数 NF 的等效关系

由a图和NF公式, $P_{nAo} = kT_0 \cdot B \cdot G_{PA} \cdot NF$

由b图: $P_{nAo} = k(T_0 + T_e) \cdot B \cdot G_{PA}$

$$\Rightarrow NF = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

*对理想的无噪电路, $NF=1$,
故其噪声温度为0。



噪声温度 T_e

- 用于低噪声器件和低噪声电路

噪声系数 NF

- 电路内部噪声较大时

例：有两个低噪放大器。

NF 分别为1.05和1.025，

T_e 分别为14.5K和7.25K

更容易，更方便

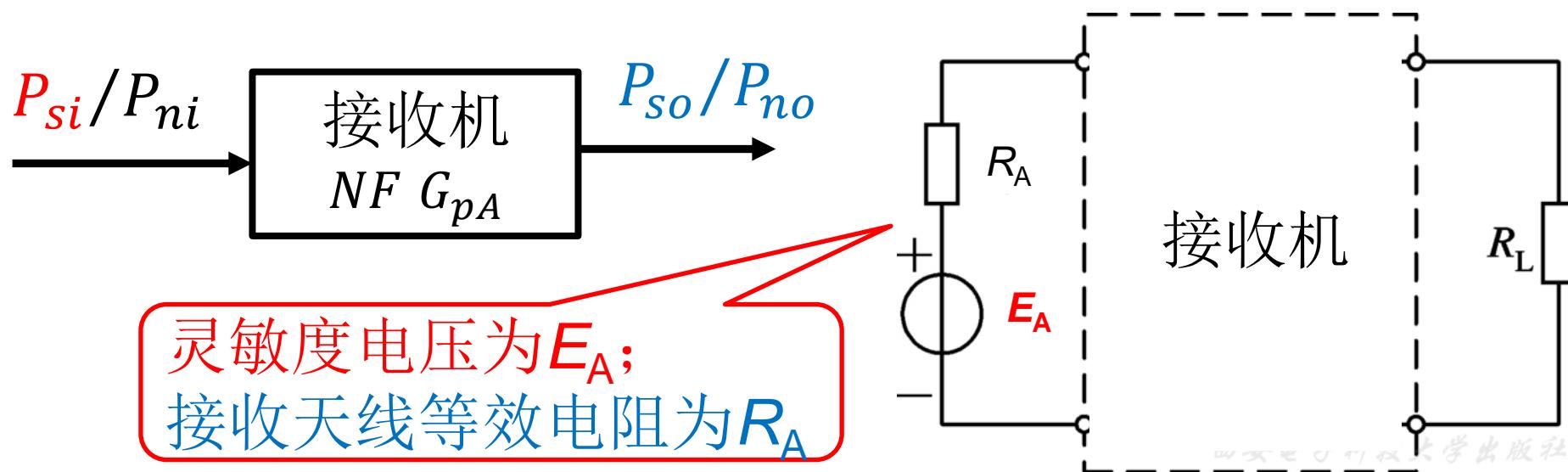


1.3.7 接收灵敏度

噪声系数: 用来衡量部件和系统噪声性能的。

灵敏度: 保持接收机输出端信噪比一定时，接收机输入的最小信号电压或功率(设接收机有足够的增益)。即决定放大或接收微弱信号的能力。

(超外差式接收机的灵敏度一般在 $0.1\sim 1\mu V$ 之间)



- 接收机输入端额定信噪比为 $\frac{P_{si}}{P_{ni}} = \frac{E_A^2 / 4R_A}{kT_0 \cdot BW}$

- 噪声系数 $NF = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{E_A^2}{4kT_0 R_A \cdot BW \cdot D}$

若正常工作时接收机输出额定信噪比 $D = P_{so} / P_{no}$

$$E_A = \sqrt{4kT_0 R_A \cdot BW \cdot D \cdot NF}$$

(一般取 $D=1$)



本章作业

- 本章例题：（自看）
- 习题(P28-29): 2~4, 6~9

