

第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器(重点)

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结



2.1 概 述

1. 高频小信号放大器的特点
2. 高频小信号放大器的分类
3. 高频小信号放大器的主要性能指标
4. 高频小信号放大器的分析方法



1. 高频小信号放大器的特点

(1) 中心频率较高 一般在几百kHz到几GHz。

调频电台中心频率88-108MHz，带宽0.1MHz；
U波段的电视信号中心频率几百MHz，带宽8MHz；
手机信号中心频率GHz频段，带宽几MHz；

(2) 小信号

信号较小，线性（电压放大，甲类）

2. 高频小信号放大器的分类

■ 按频谱宽度：窄频带放大器和宽频带放大器

相对频带（通频带与其中心频率的比值）大小

■ 按负载性质：谐振放大器和非谐振放大器
以调谐回路为负载 非调谐回路为负载

■ 按电路形式：单级放大器和多级放大器



3. 高频小信号放大器的主要性能指标

(1) 增益

电压增益:

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

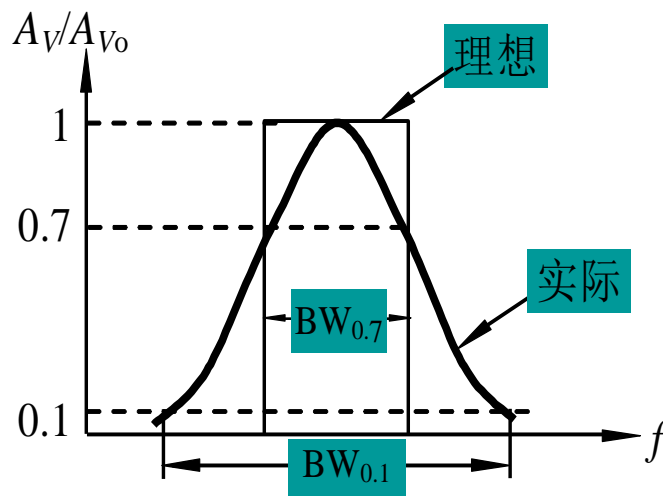
分贝表示:

$$\dot{A}_v = 20 \lg \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

(2) 通频带和选择性

$$BW_{0.7} = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_o}{Q_e}$$

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



(3) 噪声系数

$$NF = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{P_{nAo}}{G_{pA} P_{nAi}} = 1 + \frac{P_{nAn}}{G_{pA} kT_0 \cdot BW}$$

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



4. 高频小信号放大器的分析方法

I. Y参数等效模型（窄放） （网络参数/形式参数模型）

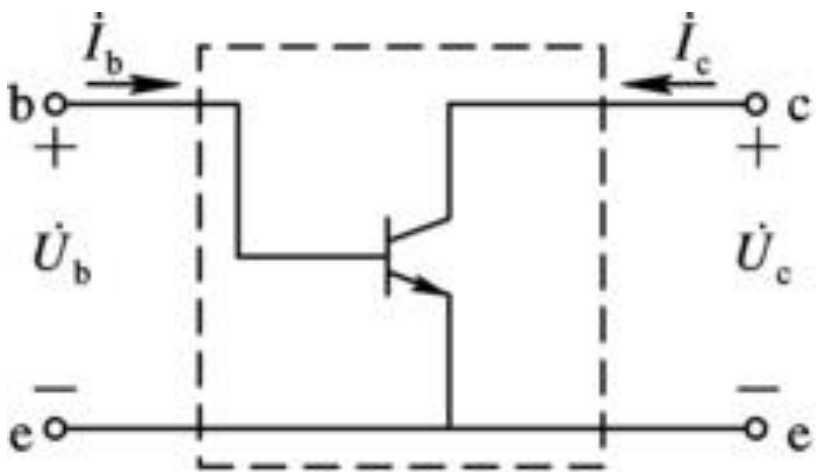
根据晶体管的外特性等效。

II. 混合 π 型等效模型（宽放）

根据晶体管内部的物理工作特性等效。



I. Y参数等效电路（形式等效电路，窄放）



线性二端口网络

网络端口电流、电压的关系：

$$\begin{cases} i_b = f_1(u_b, u_c) \\ i_c = f_1(u_b, u_c) \end{cases}$$

为研究各变化量之间关系，求全微分：

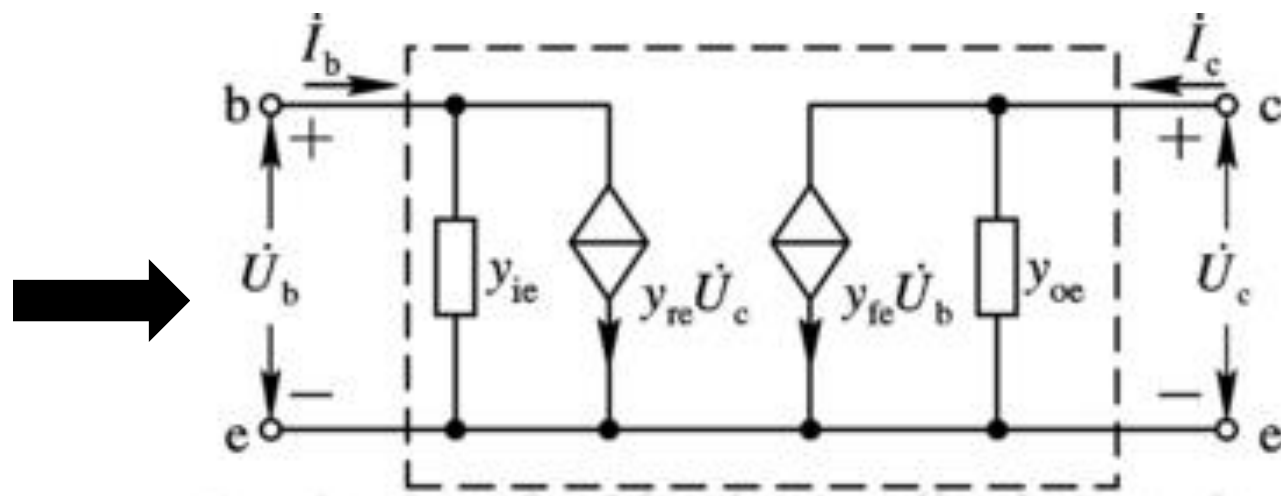
$$\begin{cases} di_b = \frac{\partial i_b}{\partial u_b} du_b + \frac{\partial i_b}{\partial u_c} du_c \\ di_c = \frac{\partial i_c}{\partial u_b} du_b + \frac{\partial i_c}{\partial u_c} du_c \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie} \dot{U}_b + y_{re} \dot{U}_c \\ \dot{I}_c = y_{fe} \dot{U}_b + y_{oe} \dot{U}_c \end{cases}$$



Y参数等效电路模型

$$\begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie} \dot{U}_b + y_{re} \dot{U}_c \\ \dot{I}_c = y_{fe} \dot{U}_b + y_{oe} \dot{U}_c \end{cases}$$



短路导纳参数——Y参数的物理意义

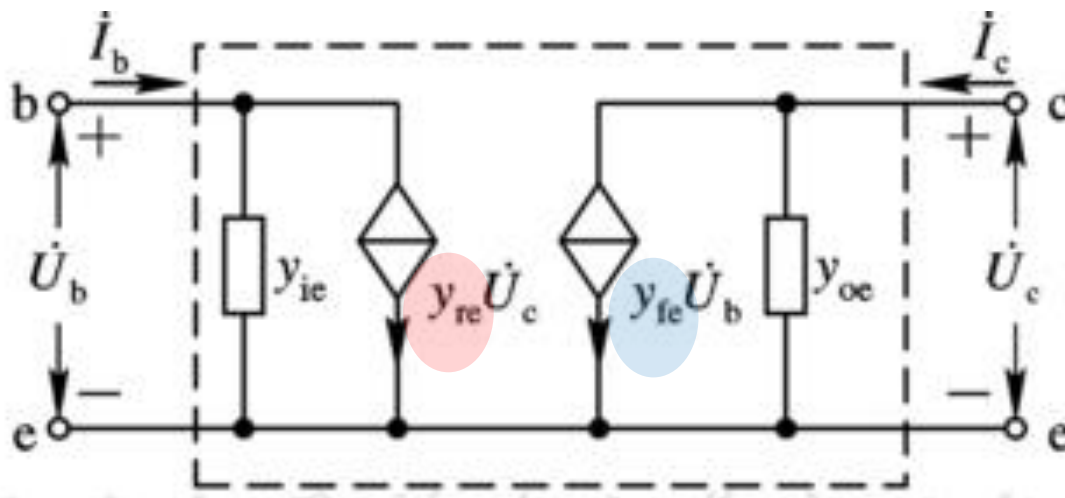
- 输入导纳 y_{ie}
- 反向传输导纳 y_{re}
- 正向传输导纳 y_{fe}
- 输出导纳 y_{oe}

$$y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_b} \right|_{\dot{U}_c=0}$$

$$y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_c} \right|_{\dot{U}_b=0}$$

$$y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_b} \right|_{\dot{U}_c=0}$$

$$y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c} \right|_{\dot{U}_b=0}$$



Y参数的特点

在高频电路中，一般Y参数都是复数，其形式如下：

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

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

$$y_{fe} = |y_{fe}| \angle \phi_{fe}$$

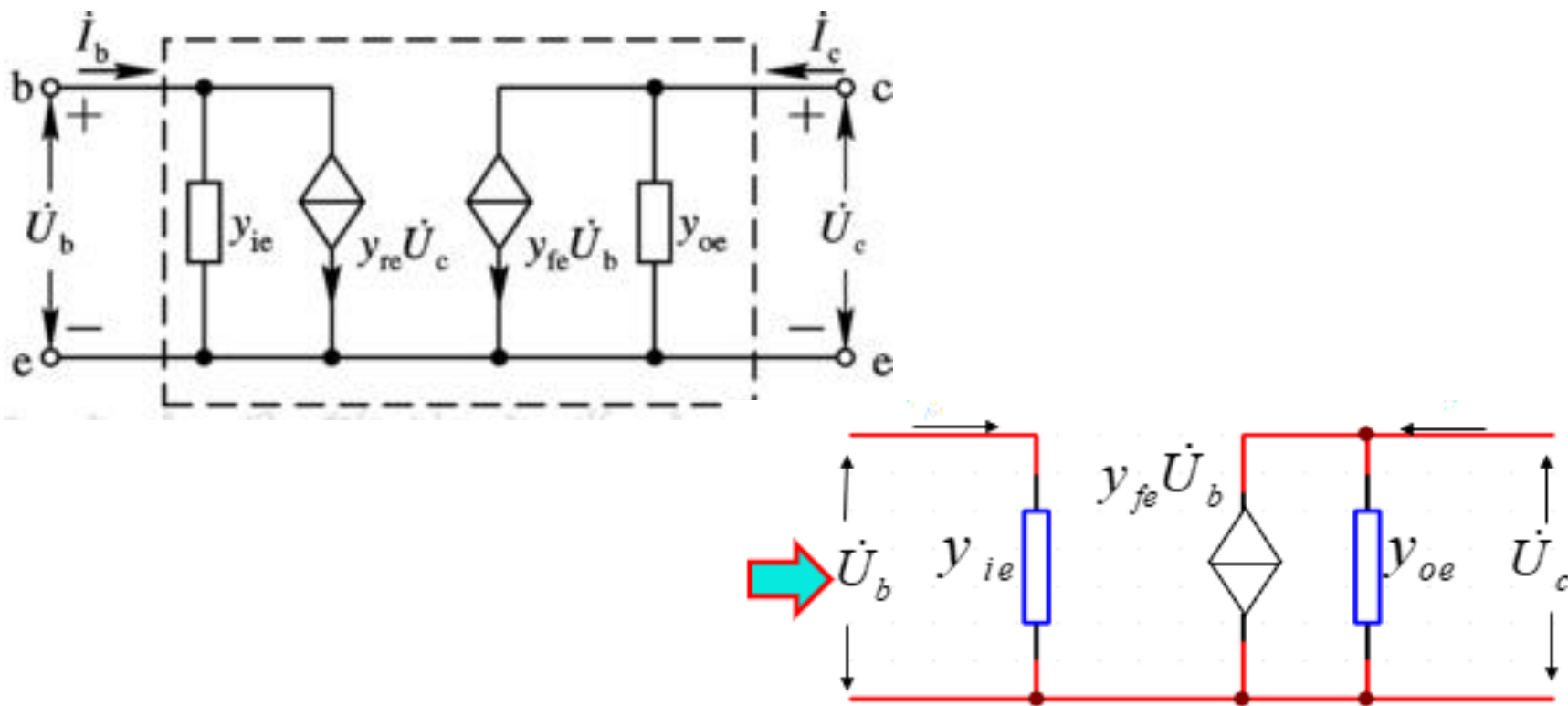
$$y_{re} = |y_{re}| \angle \phi_{re}$$

1. Y参数是频率的函数（高小放大多为窄带，一般仅需考虑 f_0 附近的特性，在BW范围内认为其为常数）。
2. Y参数只能用于小信号工作状态。



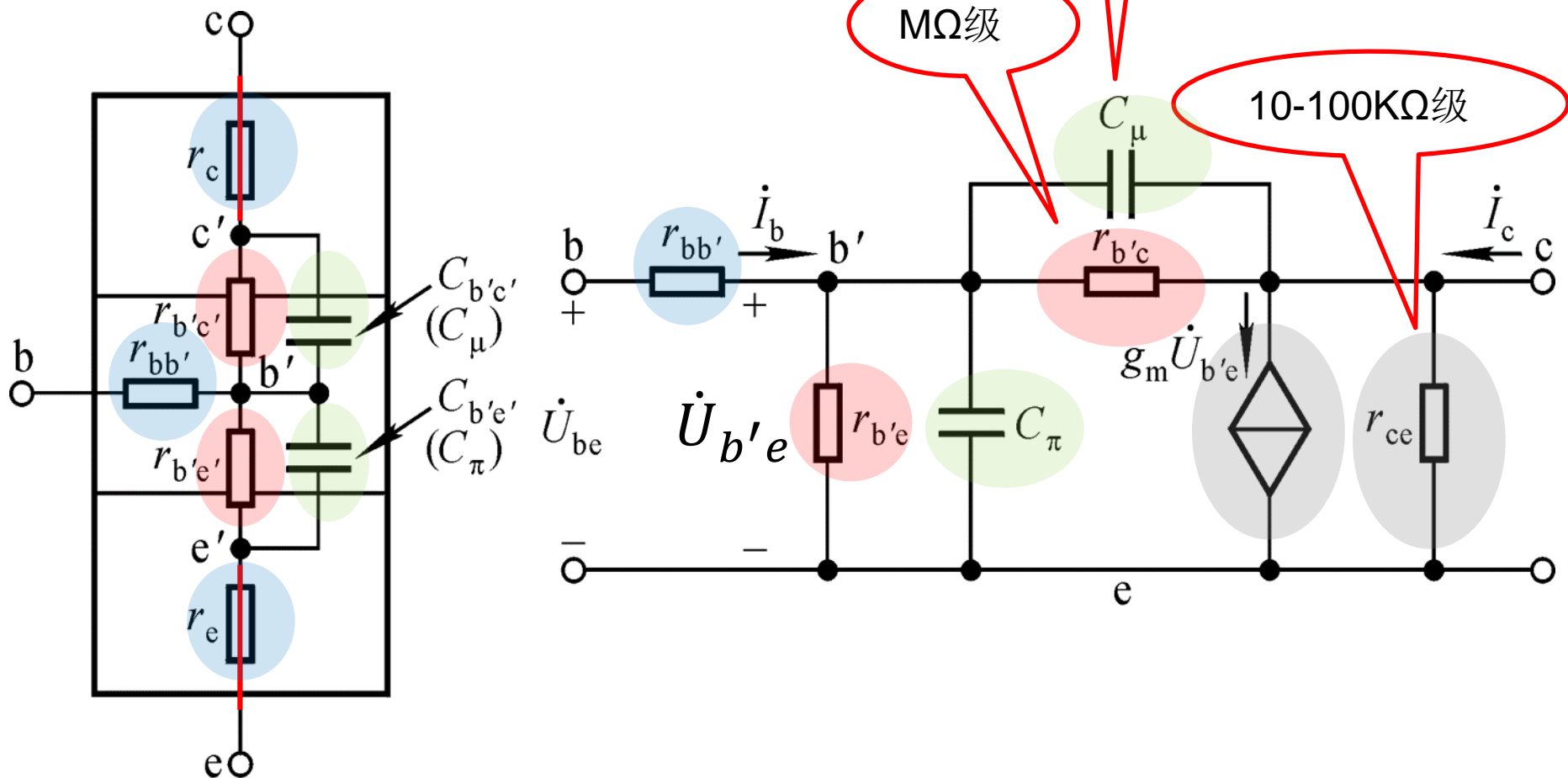
Y参数等效电路模型的简化

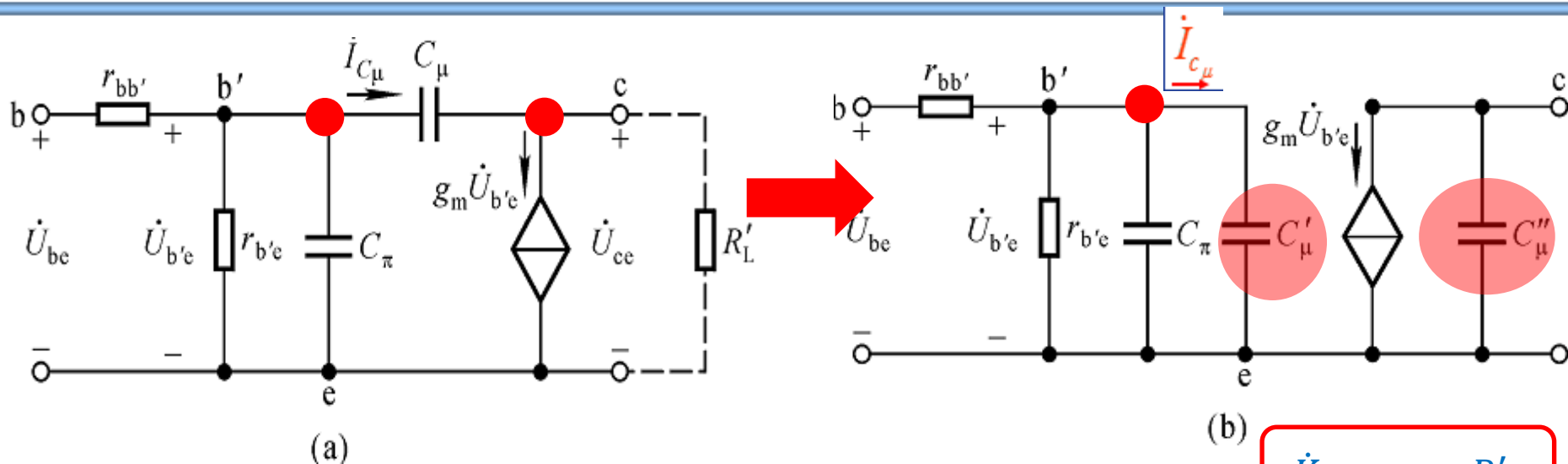
晶体管的单向化：一个放大器件，最好是单向器件，这样，放大器的输出回路就不会对输入回路产生影响，隔离性能好。因此可认为反向传输导纳 $y_{re} \approx 0$ 。



II. 混合 π 型等效模型

(1) 完整的混合 π 模型





$$\dot{K} = -g_m R'_L$$

$$\Rightarrow C'_\mu = (1 - \dot{K})C_\mu = (1 + |\dot{K}|)C_\mu$$

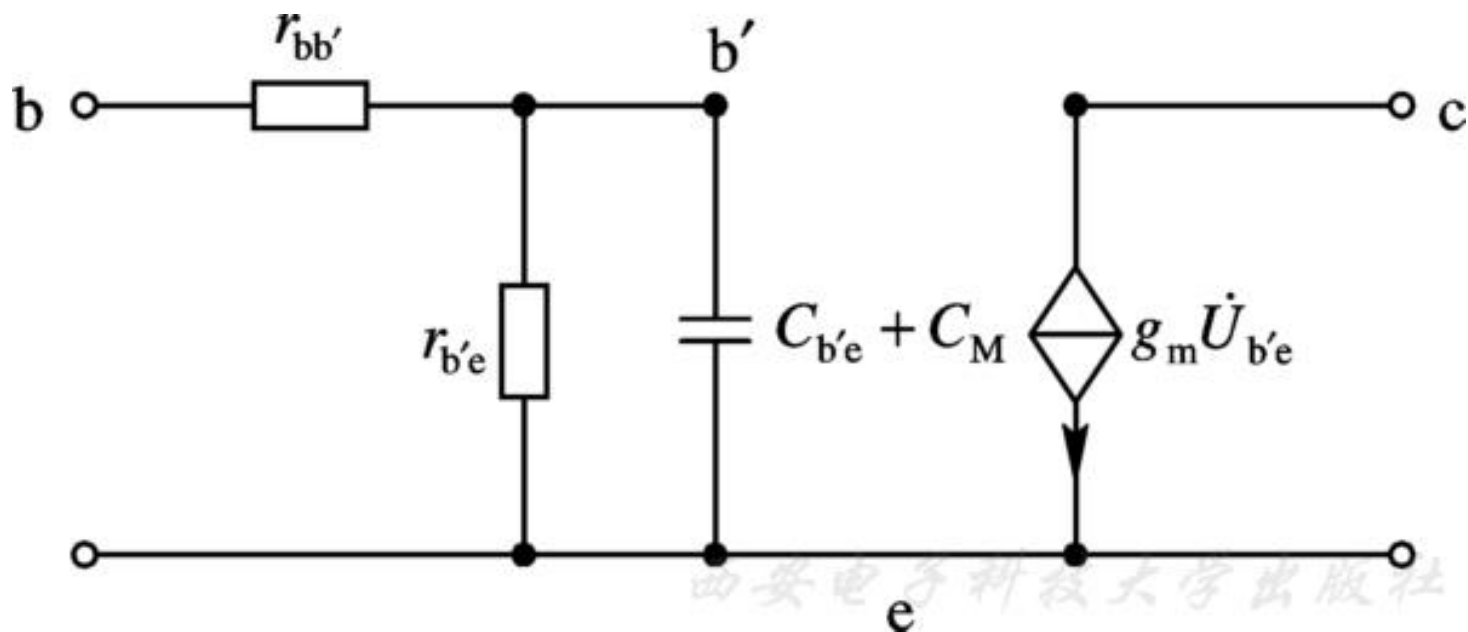
K为中频增益

$$C''_\mu = \frac{\dot{K} - 1}{\dot{K}} \cdot C_\mu \approx C_\mu$$

因 $X_{C''_\mu} \gg R_L$, 故常略去。



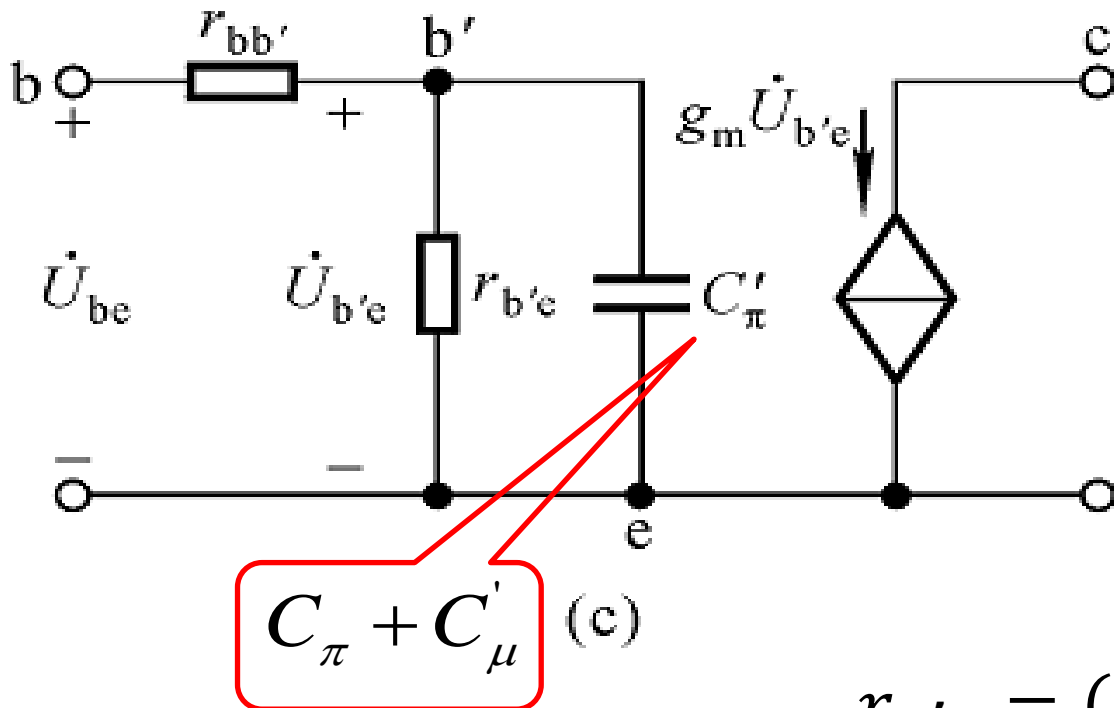
(2) 简化的高频混 π 模型



- 此模型与h参数模型在低频(中频)信号作用下具有一致性。



(3) 混 π 模型的主要参数



• 可从手册查到

$$r_{bb'}, C_{\mu} (C_{ob}) \text{ 及 } f_{\beta} (f_T)$$

$$C_{b'e} + C_{b'c} = \frac{1}{2\pi f_T r_e}$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) r_e = (1 + \beta_0) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$g_m = \frac{I_c}{U_{b'e}} = \frac{1}{r_e}$$



第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

2.2.1 单管单调谐放大器

2.2.2 多级单调谐放大器

2.2.3 谐振放大器的稳定性

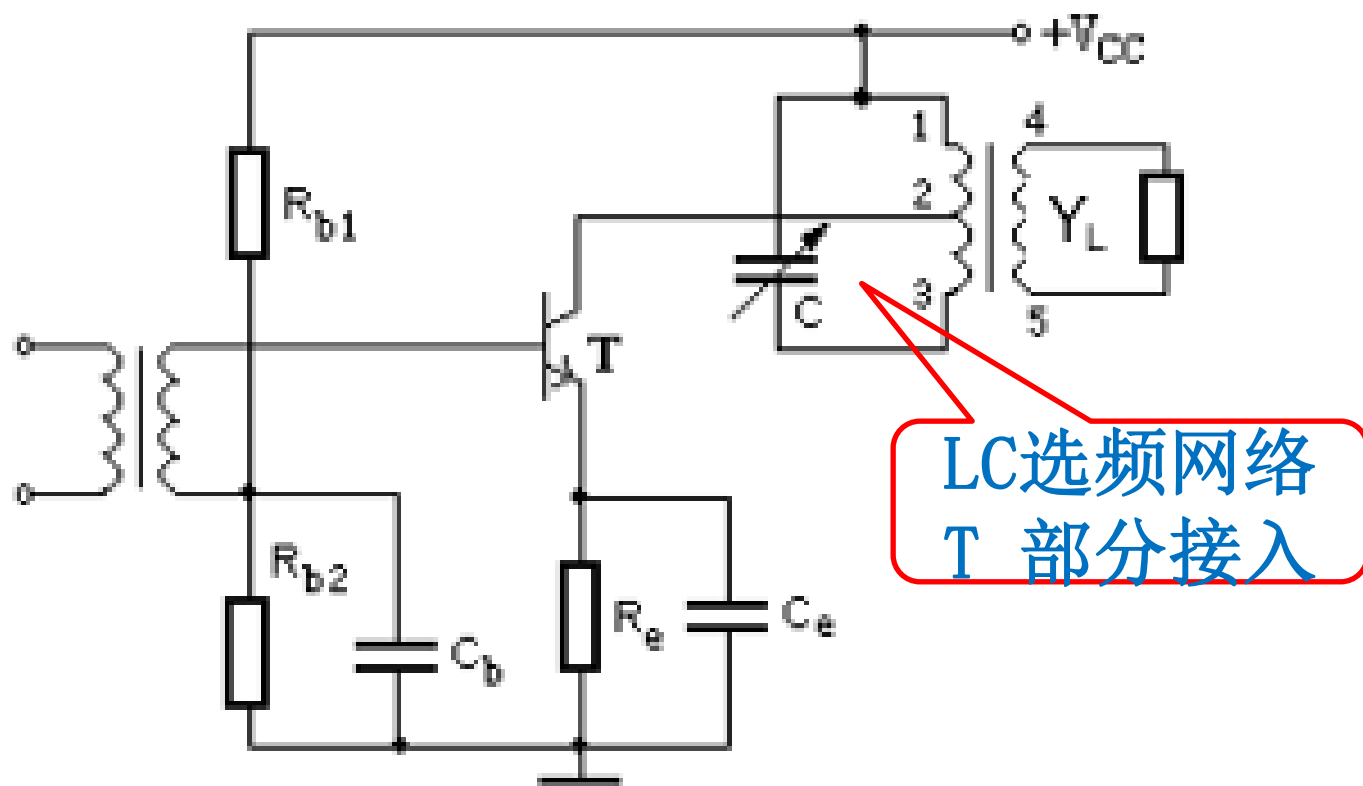


2.2.1 单管单调谐放大器

一、电路组成及特点

二、电路性能参数分析

一、电路组成及特点



■与低频小信号放大器的分析比较

表 1 分析步骤的异同点

分析步骤	低频放大器	高频小信号放大器
步骤一	画直流通路,计算静态工作点	
步骤二	画交流通路	画高频交流通路
步骤三	画微变等效电路	画微变等效电路
步骤四	计算性能指标,如输入电阻、输出电阻、电压增益等	计算性能指标,如电压增益、通频带等

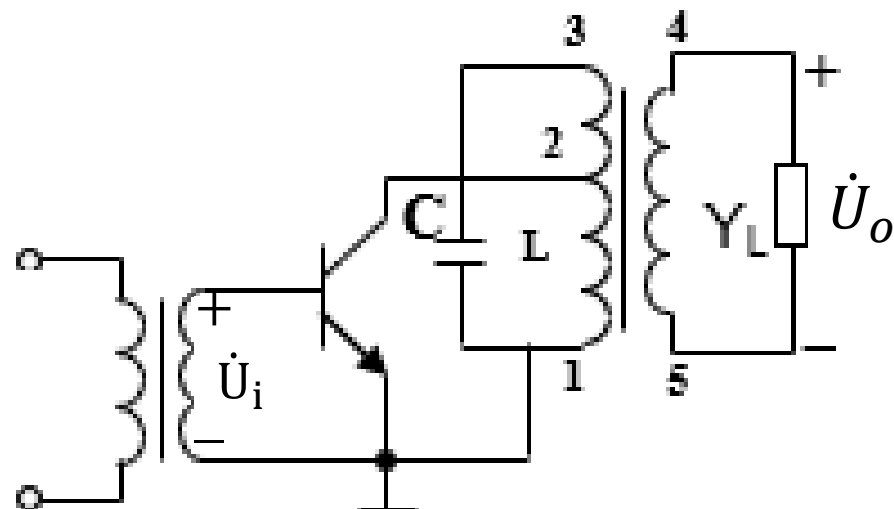
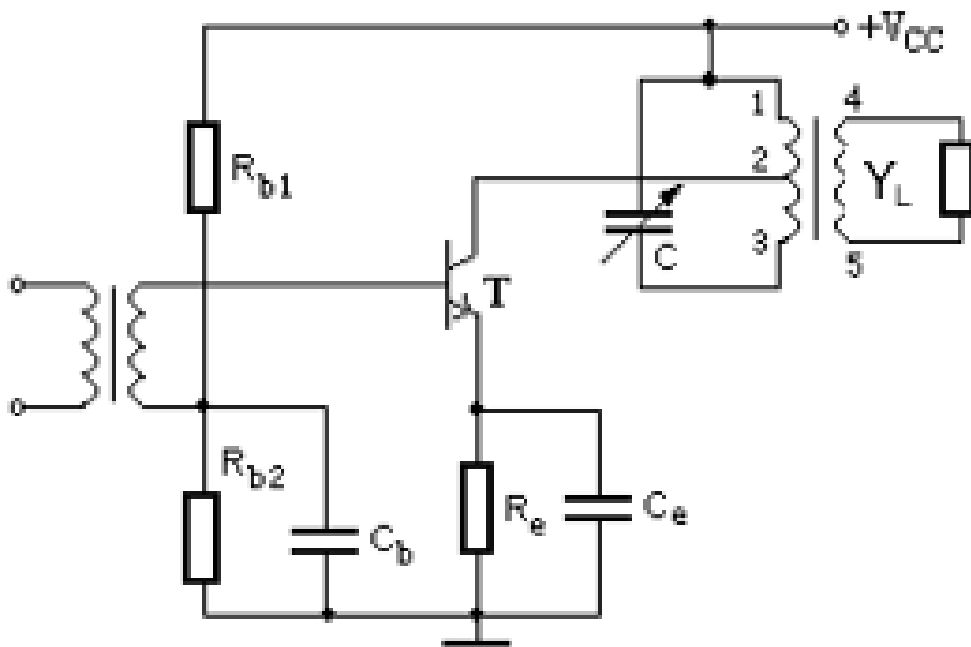
表 2 交流等效电路中电容、电感

工作 频段	电容		电感	
	大电容 (隔直、耦合、旁路电容)	小电容 (回路电容)	大电感 (扼流圈)	小电感 (回路电感)
低频	短路	开路		
高频	短路	保留	开路	保留



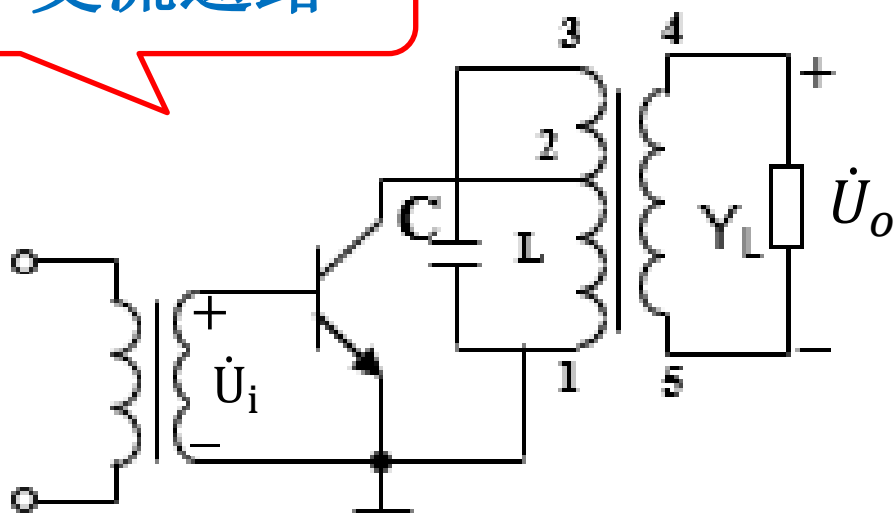
二. 电路性能参数分析

1. 画出交流通路、Y参数等效电路

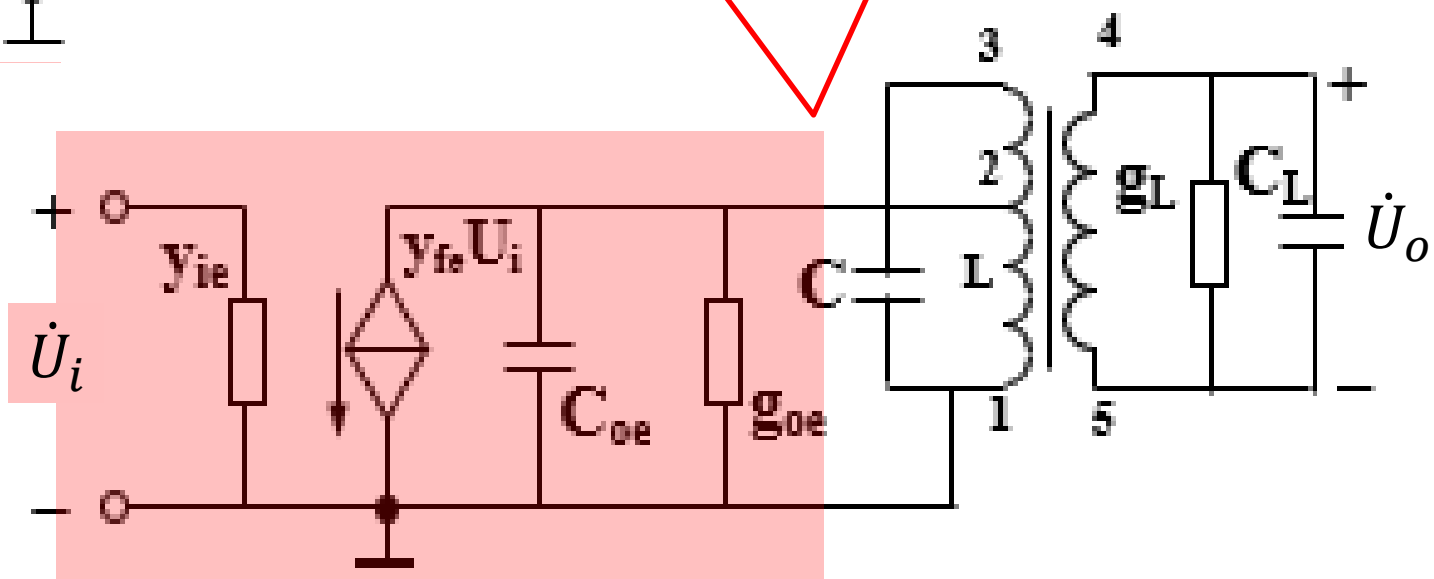


交流通路

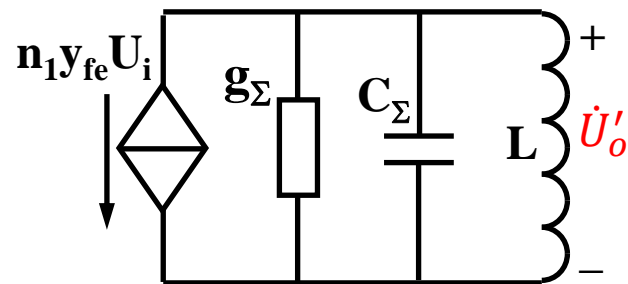
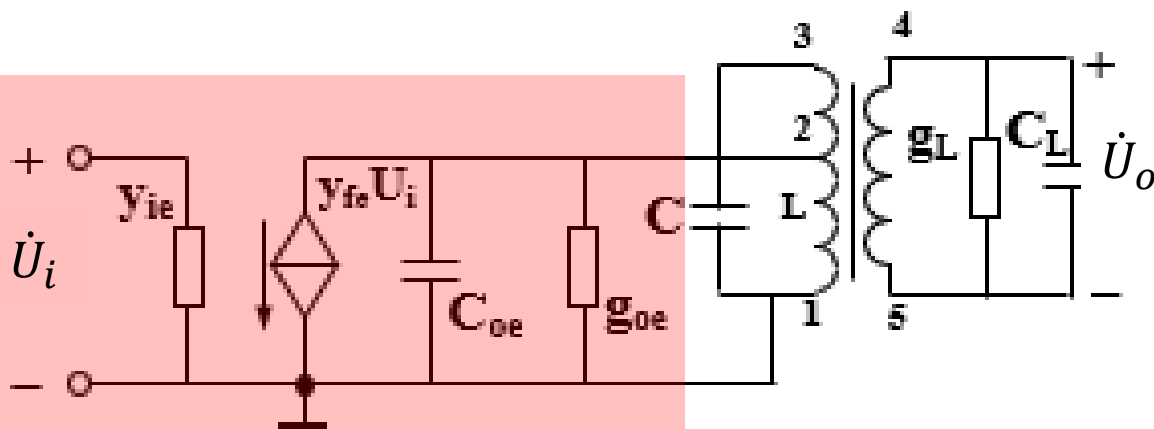
交流通路



Y参数等效电路



2、性能参数分析



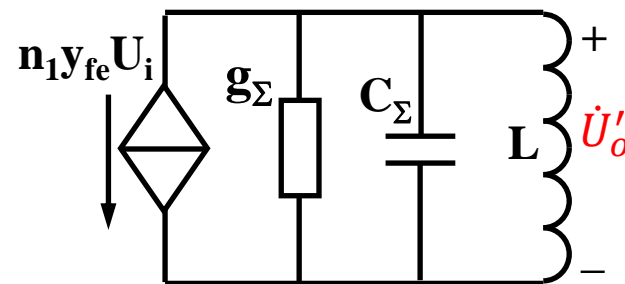
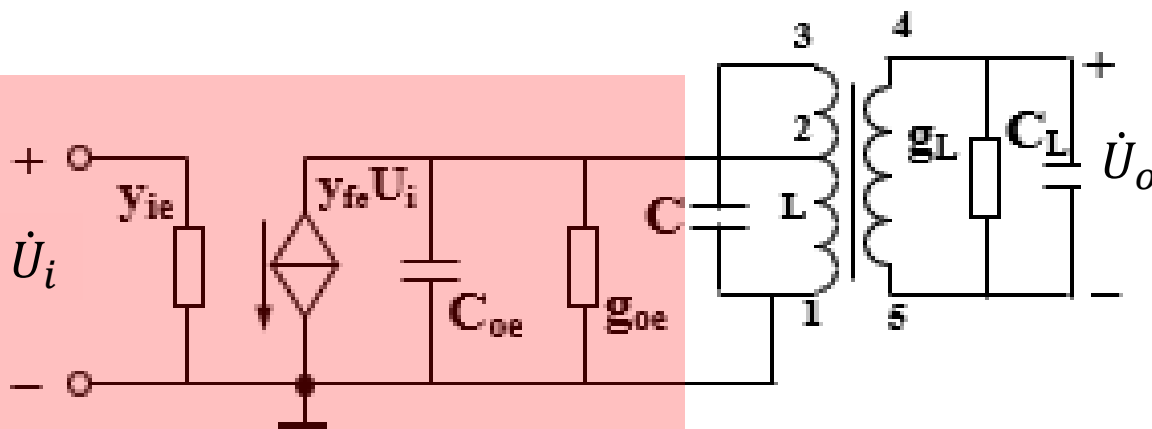
将1—2和4—5分别折算到
1—3端后的等效电路

$$n_1 = \frac{N_{12}}{N_{13}}, \quad n_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}}$$

$$\begin{cases} C_{\Sigma} = n_1^2 C_{oe} + n_2^2 C_L + C \\ g_{\Sigma} = n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_L + g_{e0} \end{cases} \quad (g_{e0} \text{ 为 } LC \text{ 回路的损耗})$$



- 电压增益（电压放大倍数）

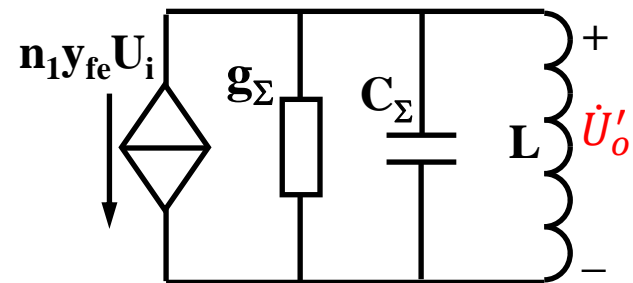
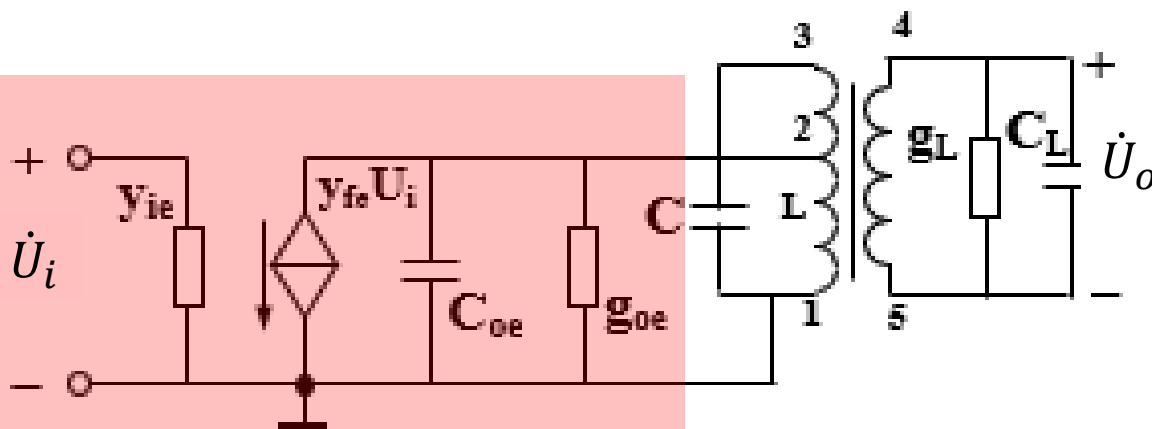


将1—2和4—5分别折算到1—3端后的等效电路

$$\dot{U}'_o = I \cdot Z = \frac{n_1 y_{fe} \dot{U}_i}{g_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega L}}$$

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega L}}$$

$$\dot{U}_o = n_2 \dot{U}'_o = \frac{n_2 n_1 y_{fe} \dot{U}_i}{g_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega L}}$$



将1—2和4—5分别折算到
1—3端后的等效电路

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega L}}$$

- 谐振时的电压增益

$$\dot{A}_{u0} = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_{\Sigma}}$$



几点说明:

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}}$$

I. \dot{A}_u 是工作频率 f 的函数。

II. 当 $\Delta f = 0$, $\dot{A}_{u0} = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma}$

输入和输出之间的相位差: $180^\circ + \phi_{fe}$

当频率较低时, $\phi_{fe} = 0$, 输入输出相位差才是 -180° .

III. A_{u0} 与 晶体管参数、负载电导、回路谐振电导 和 接入系数 有关。

- 通频带 $BW_{0.7}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} \quad Q_e = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma} = \frac{1}{\omega_0 L g_\Sigma}$$

$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_e} = f_0 \omega_0 L g_\Sigma = \frac{g_\Sigma}{2\pi C_\Sigma}$$

$$\longrightarrow A_{u0} = \frac{n_2 n_1 |y_{fe}|}{g_\Sigma} = \frac{n_2 n_1 |y_{fe}|}{2\pi C_\Sigma \cdot BW_{0.7}}$$

(增益带宽积) $A_{uo} B = \frac{|Y_{fe}|}{2\pi C_\Sigma}$



第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

2.2.1 单管单调谐放大器

2.2.2 多级单调谐放大器

2.2.3 谐振放大器的稳定性



2.2.2 多级单调谐放大器

如果多级放大器中的每一级都调谐在同一频率上

- 增益
- 通频带
- 矩形系数



■ 增益

- 总电压增益振幅 $A_n = A_{u1}A_{u2} \cdots A_{un}$

若每级放大器的参数结构均相同

$$A_n = (A_{u1})^n = \frac{(n_1 n_2)^n |y_{fe}|^n}{\left[g_\Sigma \sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta f Q_e}{f_0} \right)^2} \right]^n}$$

- 谐振频率处**电压增益振幅 $A_{n0} = \left(\frac{n_1 n_2}{g_\Sigma} \right)^n |y_{fe}|^n$

■ 通频带

单位谐振函数为:
$$N(f) = \frac{A_n}{A_{n0}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2\Delta f Q_e}{f_0}\right)^2\right]^{n/2}}$$

$$BW_n = 2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2^{1/n} - 1} \frac{f_0}{Q_e} = \sqrt{2^{1/n} - 1} BW_{0.7}$$

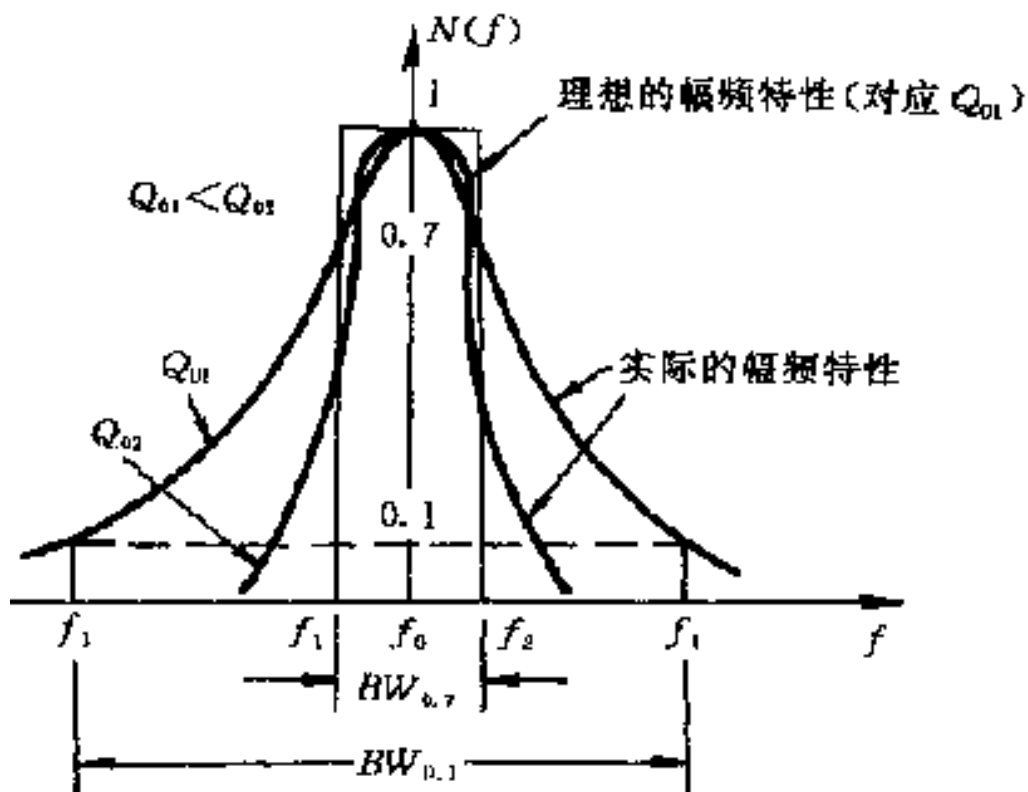
< 1

级数n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$	1.0	0.64	0.51	0.43	0.39	0.35	0.32	0.3

结论：级数n越多，带宽越窄。



■ 矩形系数



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



级数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
矩形系数 $K_{n0.1}$	9.95	4.90	3.74	3.40	3.20	3.10	3.00	2.93	2.89	2.85	2.56

表2.3.1 单调谐放大器矩形系数与级数的关系

从表上可以看出：

- 当级数 n 增加时，矩形系数有所改善，但这种改善是有限度的，级数越多， $K_{n0.1}$ 变化越缓慢。
- 当 n 趋于无穷大时，趋于2.56。和理想的矩形还是有很大距离。

双调谐放大器可改善矩形系数和频带宽度这两个性能参数！



第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

概述

2.2.1 单管单调谐放大器

2.2.2 多级单调谐放大器

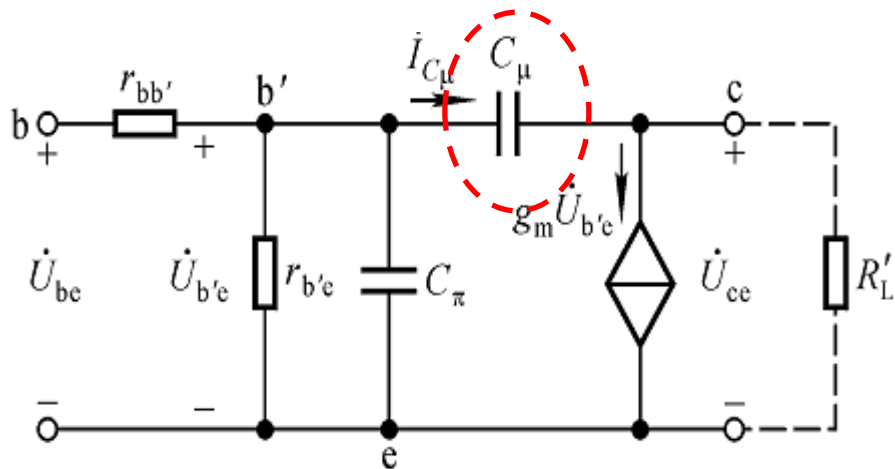
2.2.3 谐振放大器的稳定性



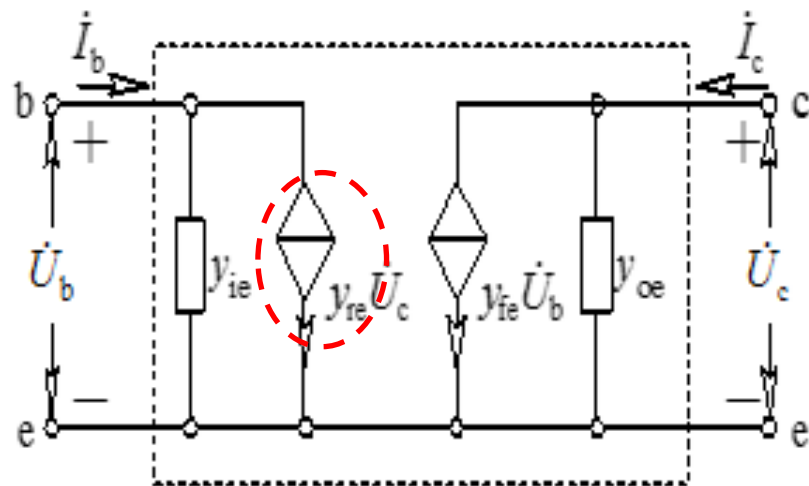
2.2.3 谐振放大器的稳定性

- 一、自激产生的原因
- 二、克服自激的方法

一、自激产生的原因



混合 π 型等效模型（宽放）



Y参数等效模型（窄放）

由于Y参数中 y_{re} ($C_{b'c}$) 的存在。

二、克服自激的方法

由于 y_{re} (C_{bc}') 的存在, 晶体管是一个双向的器件。增强放大器的稳定性可以:

(一) 选用 y_{re} (C_{bc}') 小的管子;

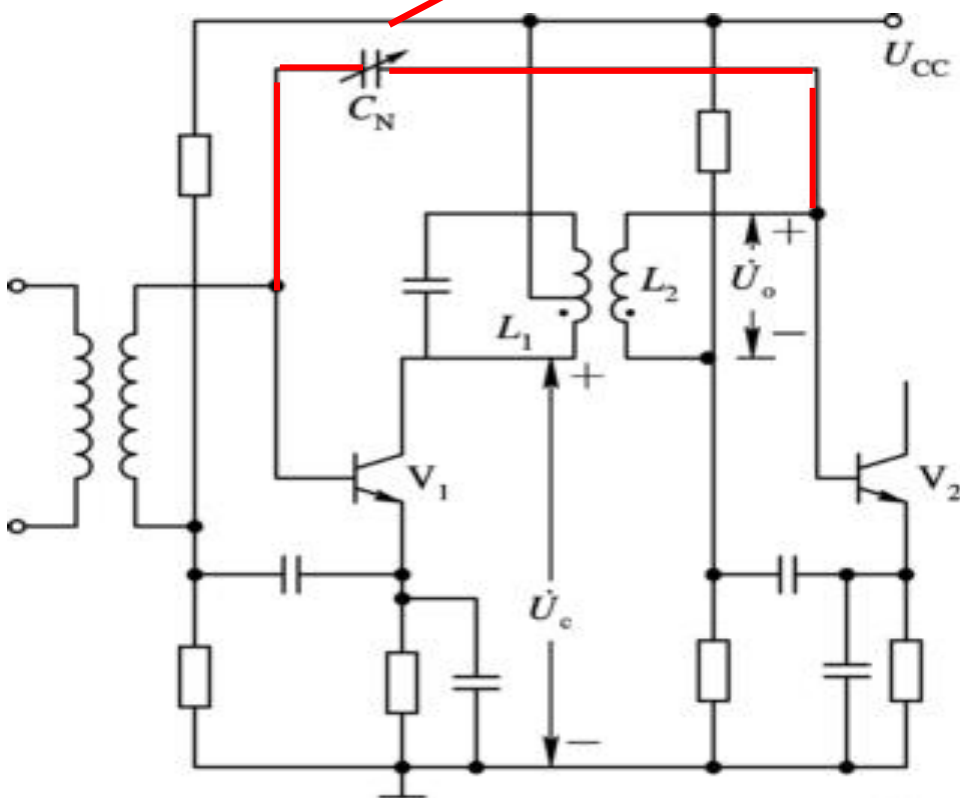
(二) 考虑实行晶体管的单向化。

其单向化方法有:

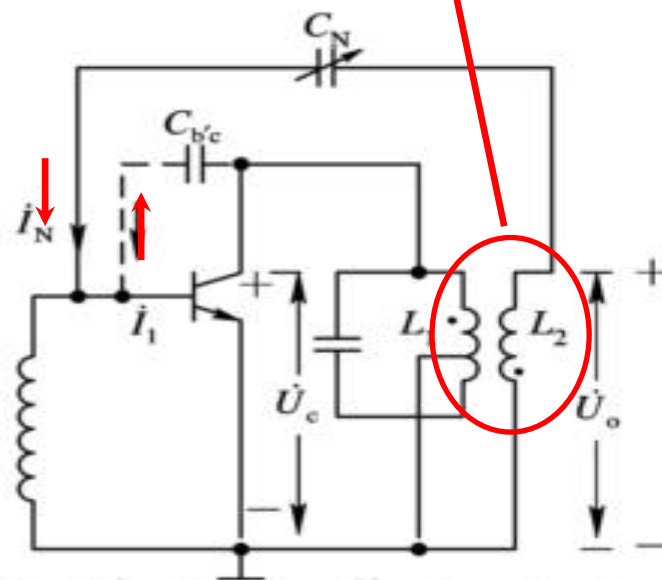
(1) 中和法

(2) 失配法

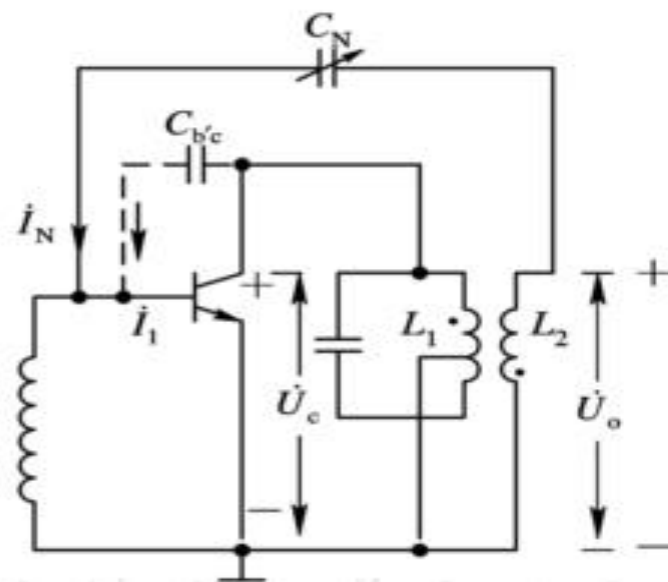
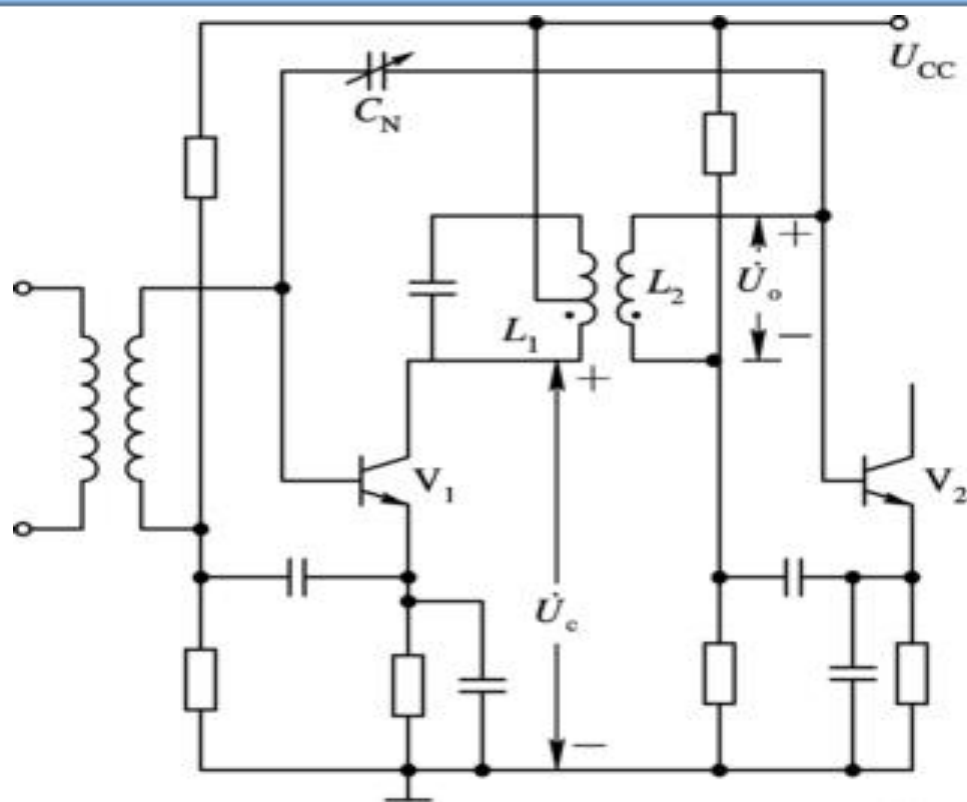
(1) 中和法 中和电容



反相耦合变压器



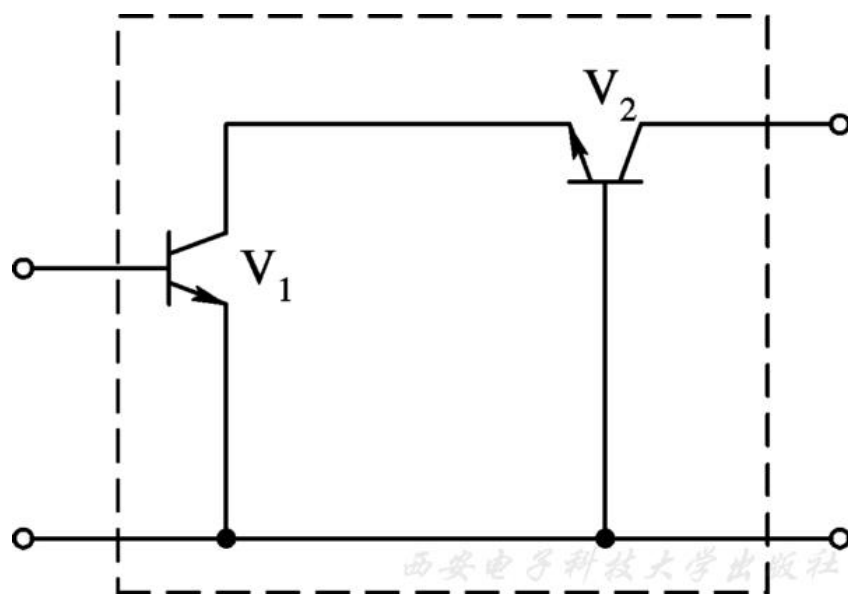
$$\left. \begin{aligned} U_c j\omega C_{b'c} &= U_o j\omega C_N \\ \frac{U_c}{U_o} &= \frac{N_1}{N_2} \end{aligned} \right\} C_N = \frac{N_1}{N_2} C_{b'c}$$



适用性： 由于 y_{re} 不是纯容性，且是频率的函数，所以只适用于固定频率的调谐放大器（如接收机的中频放大器）。

(2) 失配法——共射-共基级联放大电路

原理：由于阻抗不匹配，输出电压减小，反馈减小，使增益下降，提高稳定性。



电路优点：

- 稳定性提高
- 在很宽频率范围内可实现单向化

V_1 : 因 R_{i2} 小 $\rightarrow R'_{L1}$ 减小 $\rightarrow \dot{A}_{u1}$ 减小 $\rightarrow V_1$ 内反馈减弱

V_2 : $C_{b'c}$ 不构成内反馈



第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

- 一、应用和特点
- 二、展宽放大器频带的方法

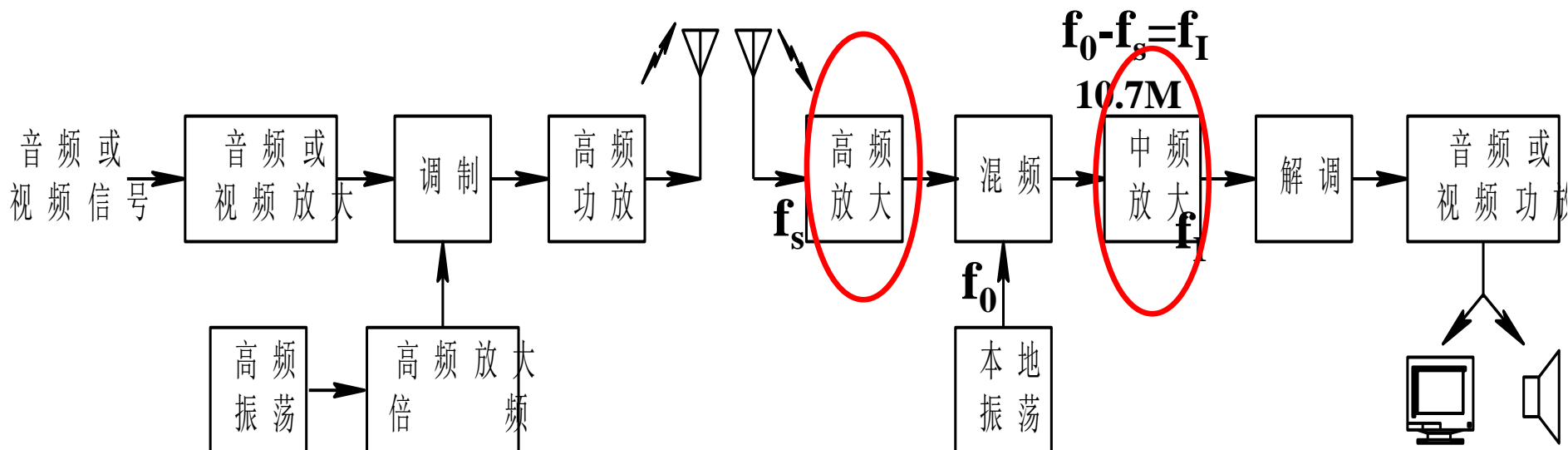


2.3 宽频带放大器

一、应用和特点

二、展宽放大器频带的方法

一、应用和特点



- 增益带宽积 $G \cdot BW$ ($=A_u f_H$) 80M、100M、300M.....
- 晶体管特性适合采用混 π 等效电路。



二、展宽放大器频带的方法

即要提高 f_H 。 主要方法：

- 1、组合电路法
- 2、反馈法
- 3、电感串并联补偿法

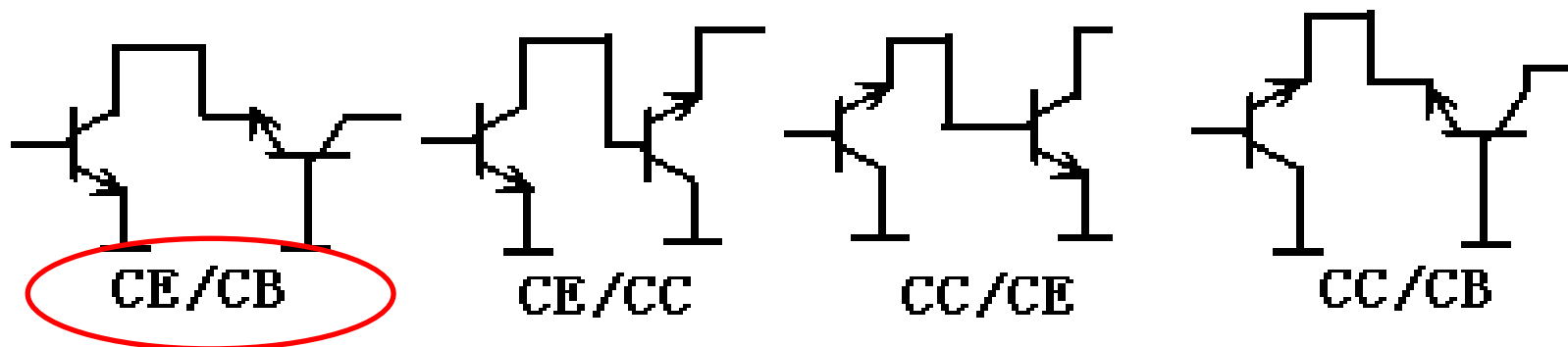
1. 组合电路法

- 放大电路三种组态的特点

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

共射: A_u 大, R_i 、 R_o 中, f_H 低(因密勒效应)。
共集: A_u 小, R_i 大, R_o 小, f_H 高
共基: A_u 大, R_i 小, R_o 大, f_H 较高

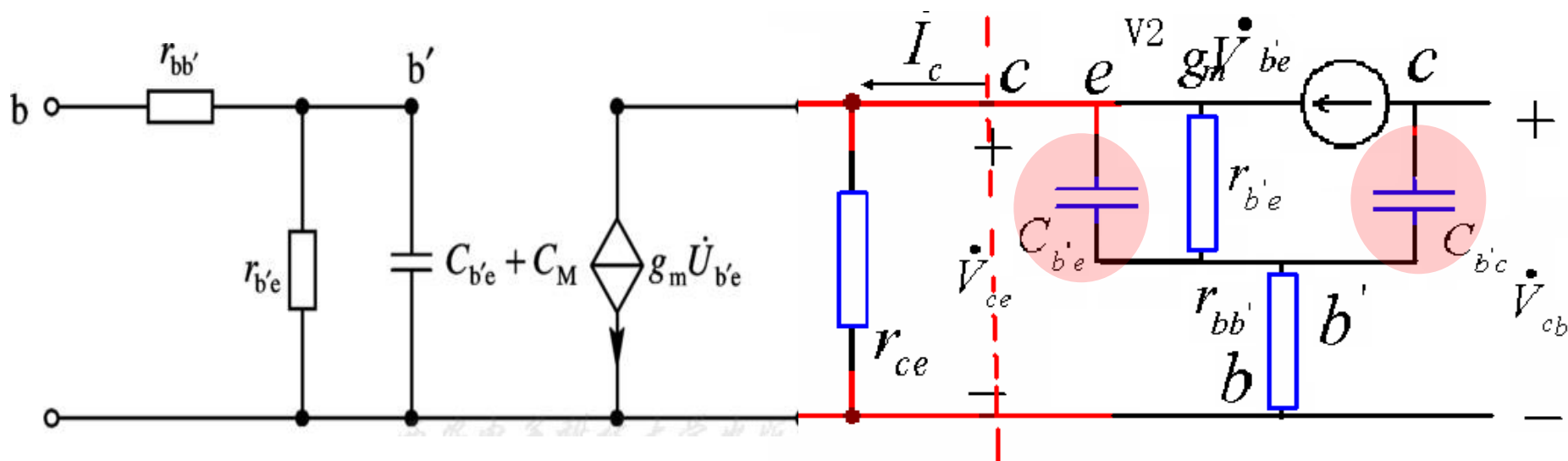
- 几种常见的组合电路



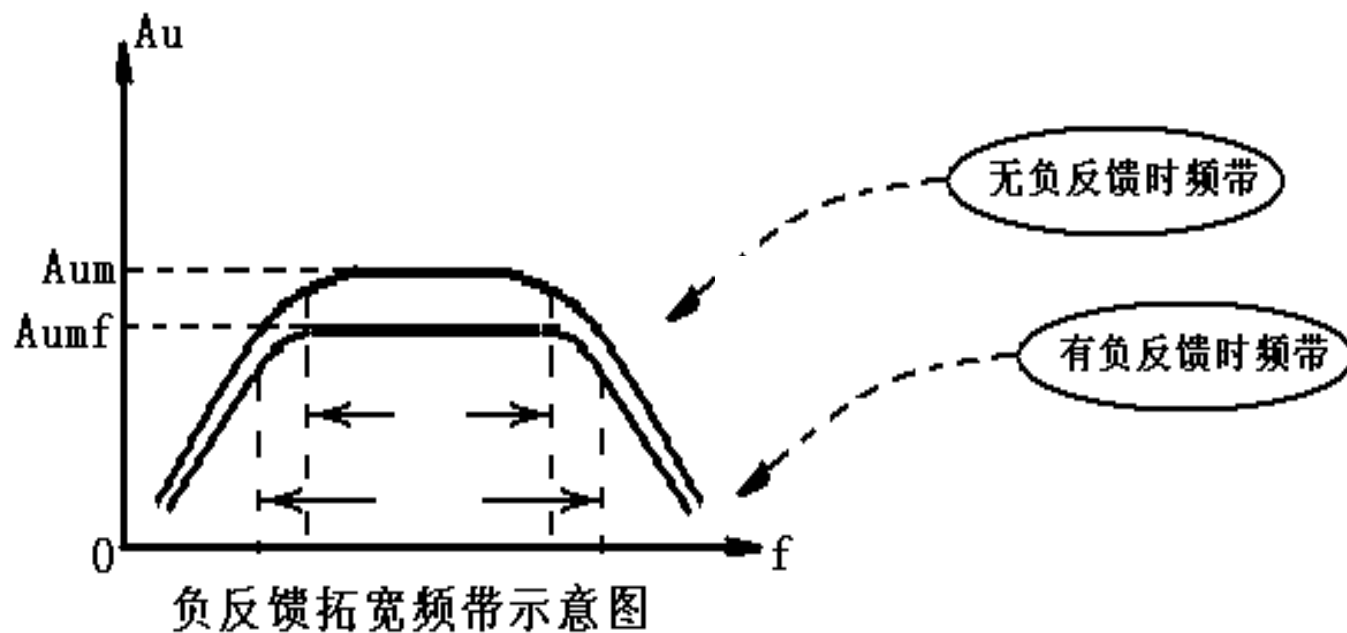
- 共射-共基组合电路 f_H 由共射电路的 f_{H1} 决定?

$$C_M = (1 + g_m R_L') C_{b'e}$$

$$\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}$$



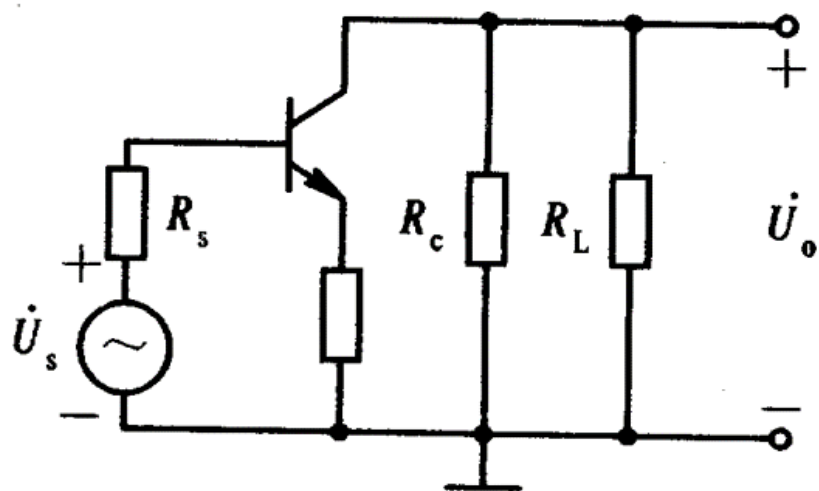
2. 负反馈法



$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

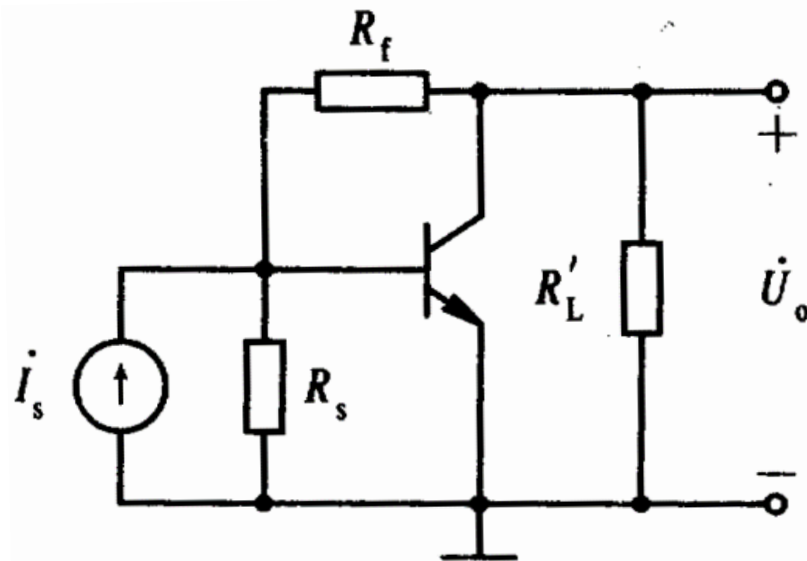


• 单级负反馈放大电路



电流串联负反馈

输入、输出阻抗高，
适合与低内阻的信号
电压源连接



电压并联负反馈

输入、输出阻抗低，
适合与高内阻的信号
电流源连接



集成宽带放大器LM733

将引出端11和4短接, 增益最高(400), f_H 最低(40MHz);
 将引出端12和3短接, 增益 100, f_H 90MHz;
 各引出端均不短接, 增益10, f_H 120MHz

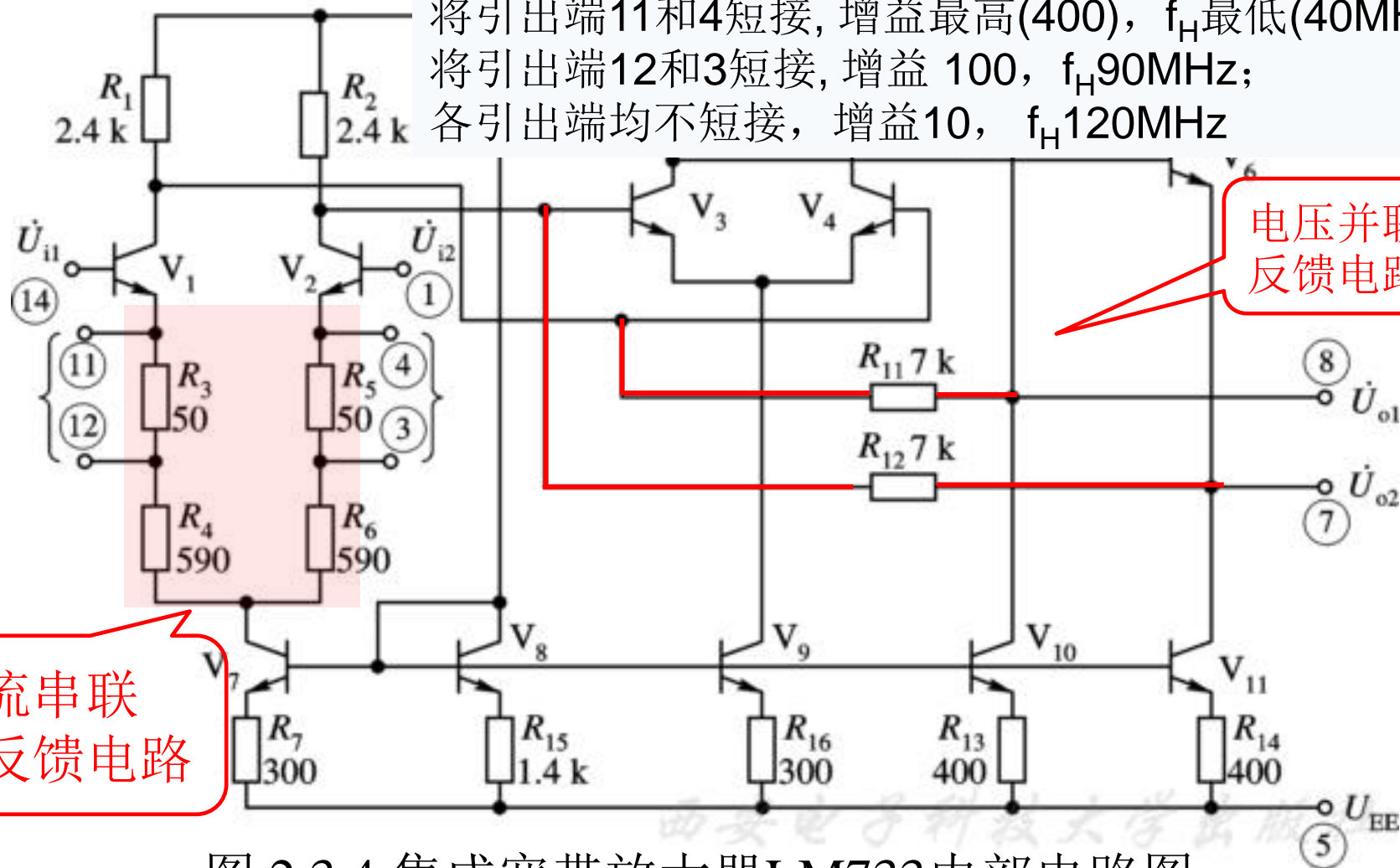


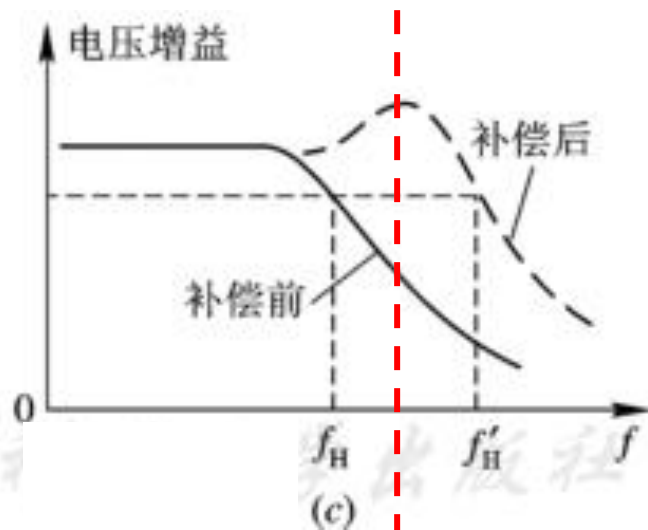
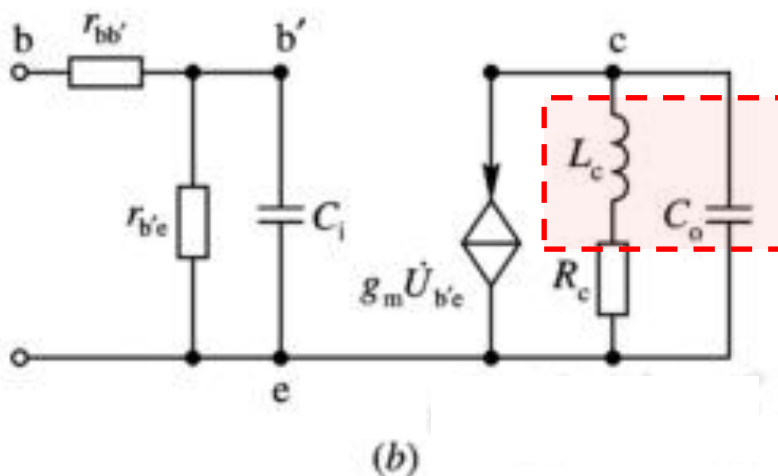
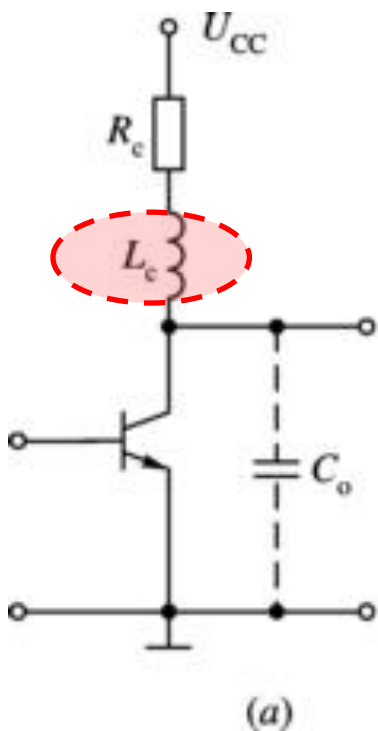
图 2.3.4 集成宽带放大器LM733内部电路图



3. 电感串并联补偿法

可采用多个电感串联或并联接入方式进行补偿，展宽频带。

- 集电极电感并联补偿电路



第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结



2.4 章末小结

一. 单管单调谐放大电路

- Y参数等效电路
- 分析性能指标 (A_{u0} 、 $BW_{0.7}$)
- 谐振放大器的稳定性

二. 多级单调谐放大器

- 增益
- 通频带
- 矩形系数

三. 宽带放大器

- 混合 π 型等效模型
- 提高带宽的三种办法

课后作业

- 章末小结（自行总结）
- 习题(P47-48)： 2~5