

# 基础电路与电子学

主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

Email: [ckz@fzu.edu.cn](mailto:ckz@fzu.edu.cn)

	基本共发射极放大电路（固定偏置）	分压偏置共发射极放大电路	共集电极放大电路（射极偏置）
电路图			
静态工作点 Q	$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_B} \quad I_C = \beta I_B$ $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad I_E = \frac{V_B - 0.7}{R_{E1} + R_{E2}} \quad I_B = \frac{I_E}{1 + \beta}$ $I_C = \beta I_B \quad U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E (R_{E1} + R_{E2})$	$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_B + (1 + \beta) R_E} \quad I_C = \beta I_B$ $I_E = (1 + \beta) I_B \quad U_{CE} = V_{CC} - I_E R_E$
微变等效电路			
电压放大倍数	$A_u = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$	$A_u = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}}$	$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)}$
输入电阻	$r_i = R_B // r_{be}$	$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}]$	$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$
输出电阻	$r_o = R_C$	$r_o = R_C // \infty = R_C$	$r_o = R_E // \frac{r_{be} + (R_B // R_S)}{1 + \beta}$

# 多级放大电路的分析

两者比较  
详见P167

一、多级放大电路的耦合方式 → 阻容耦合或直接耦合 表5-3

二、多级放大电路的分析过程 → 与单级类似，先静态后动态

静态分析：→ 只有直流电源作用的电路

步骤1：画出直流通路  $u_i$  —||— [第一级] —||— [第二级] —||—  $u_o$      $u_i$  — [第一级] — [第二级] —  $u_o$

① 若是阻容耦合，则将所有的电容断开 → 分开求每一级的Q

② 若是直接耦合，则将交流电压短路变成导线 → 联立方程组求Q

步骤2：求解各级的Q点 → 已知  $U_{BE}$  估算每一级的  $I_B, I_C, U_{CE}$

动态分析：→ 只有交流信号作用的电路 → 微变等效电路法

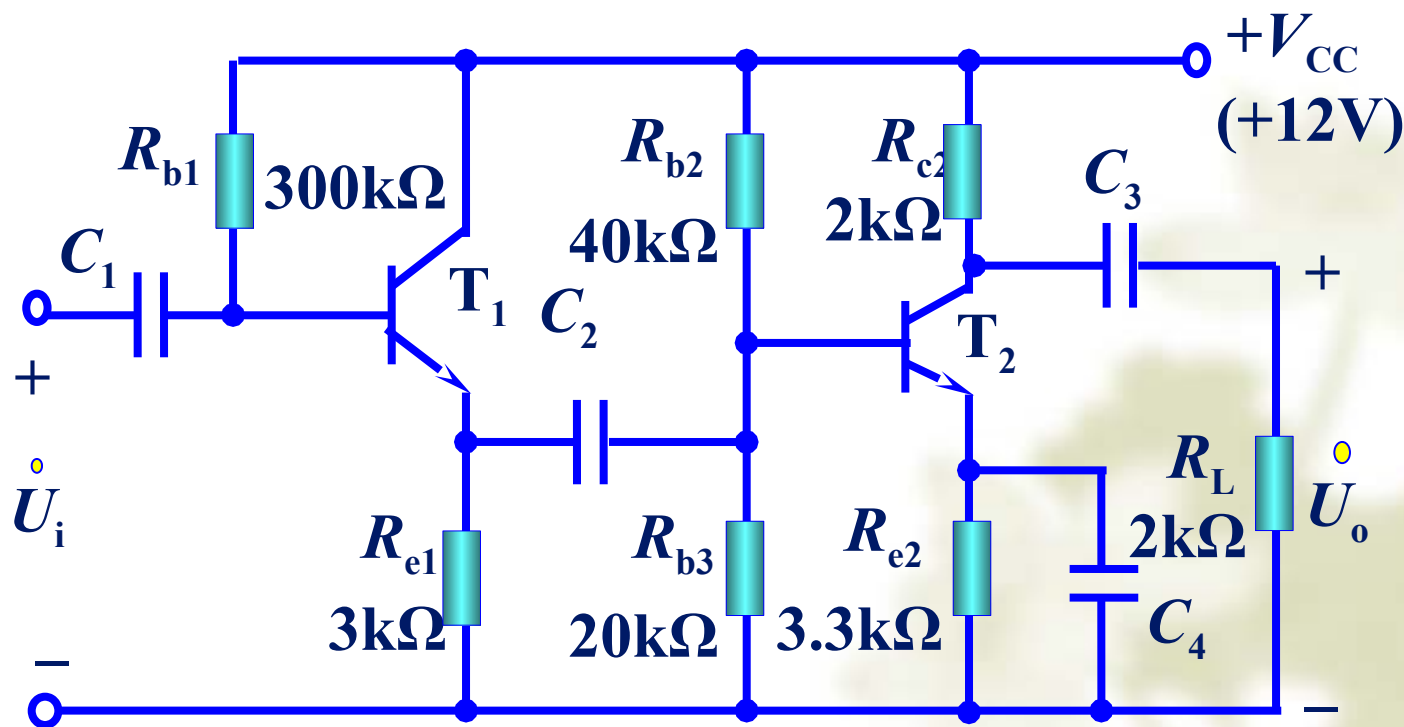
步骤1：画出微变等效电路 注意：先画第一级再画第二级

步骤2：计算动态性能指标 → 求总的  $A_u, r_i, r_o$      $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

注意：总  $r_i$  就是第一级的输入电阻；总  $r_o$  就是最后一级的输出电阻

# [例 5-6]

图 (a) 为一阻容耦合两级放大电路。晶体管  $T_1$  和  $T_2$  的  $\beta=50$ ， $U_{BE}=0.7V$ 。各电容的容量足够大。求：①计算各级的静态工作点；②计算  $A_{u1}$ ， $R_i$  和  $R_o$ 。



(a) 放大电路



例题2: 静态分析 断开所有电容

1) 画出直流通路 → 断开所有电容

2) 求静态工作点Q1和Q2

已知  $U_{BE}$  求  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_{CE}$

Q2的求解过程和Q1一样 (下标改一下)

Q1的求解过程:

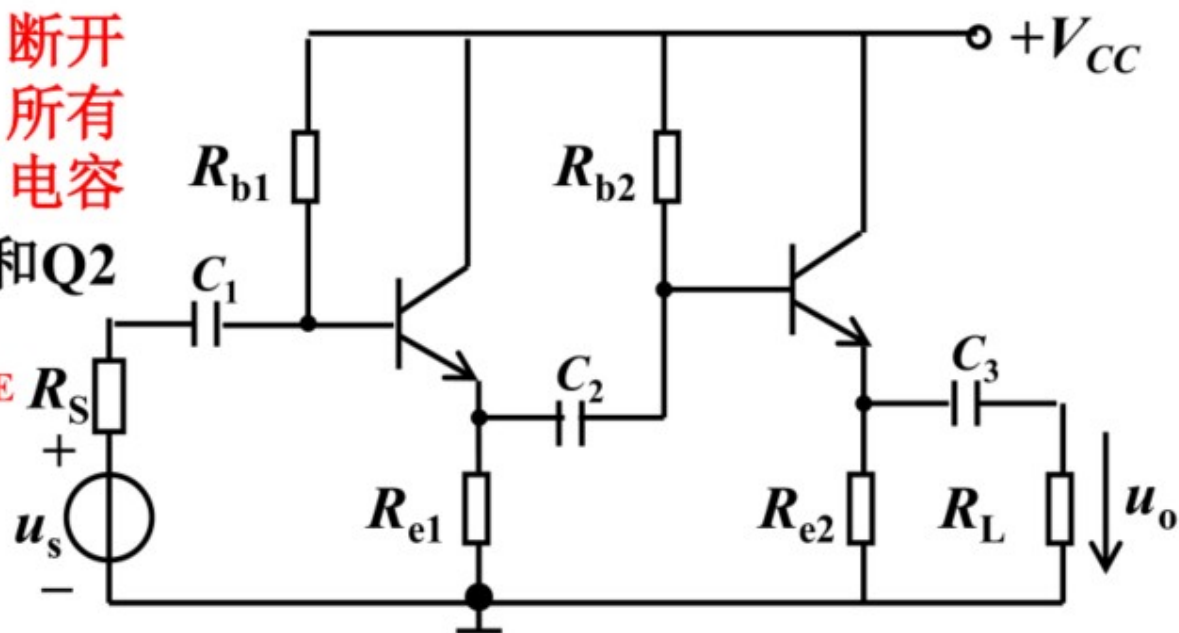
$$V_{CC} = I_{B1}R_{b1} + U_{BE1} + I_{E1}R_{e1}$$

$$= I_{B1}R_{b1} + 0.7 + (1 + \beta_1)I_{B1}R_{e1}$$

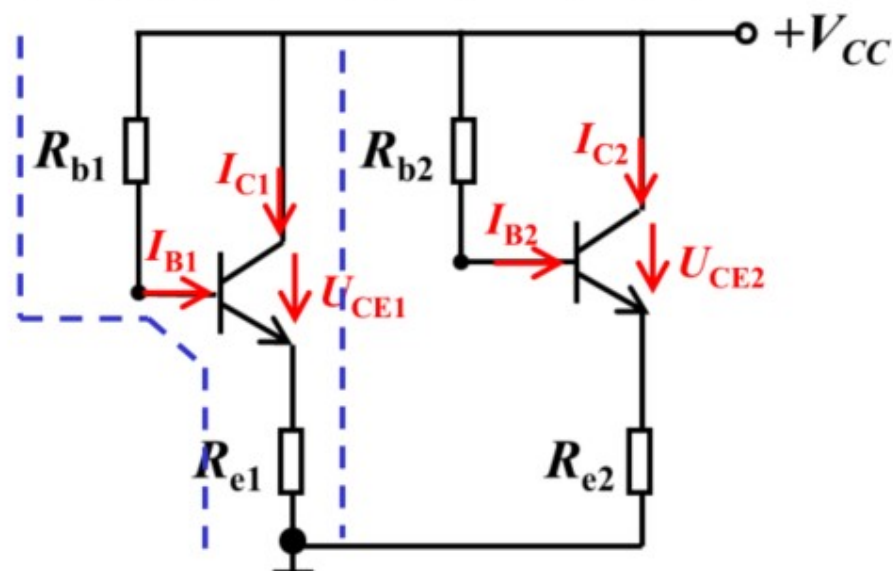
$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_{b1} + (1 + \beta_1)R_{e1}}$$

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \quad I_{E1} = (1 + \beta_1)I_{B1}$$

$$U_{CE1} = V_{CC} - I_{E1}R_{e1}$$



阻容耦合两级共集电极放大电路



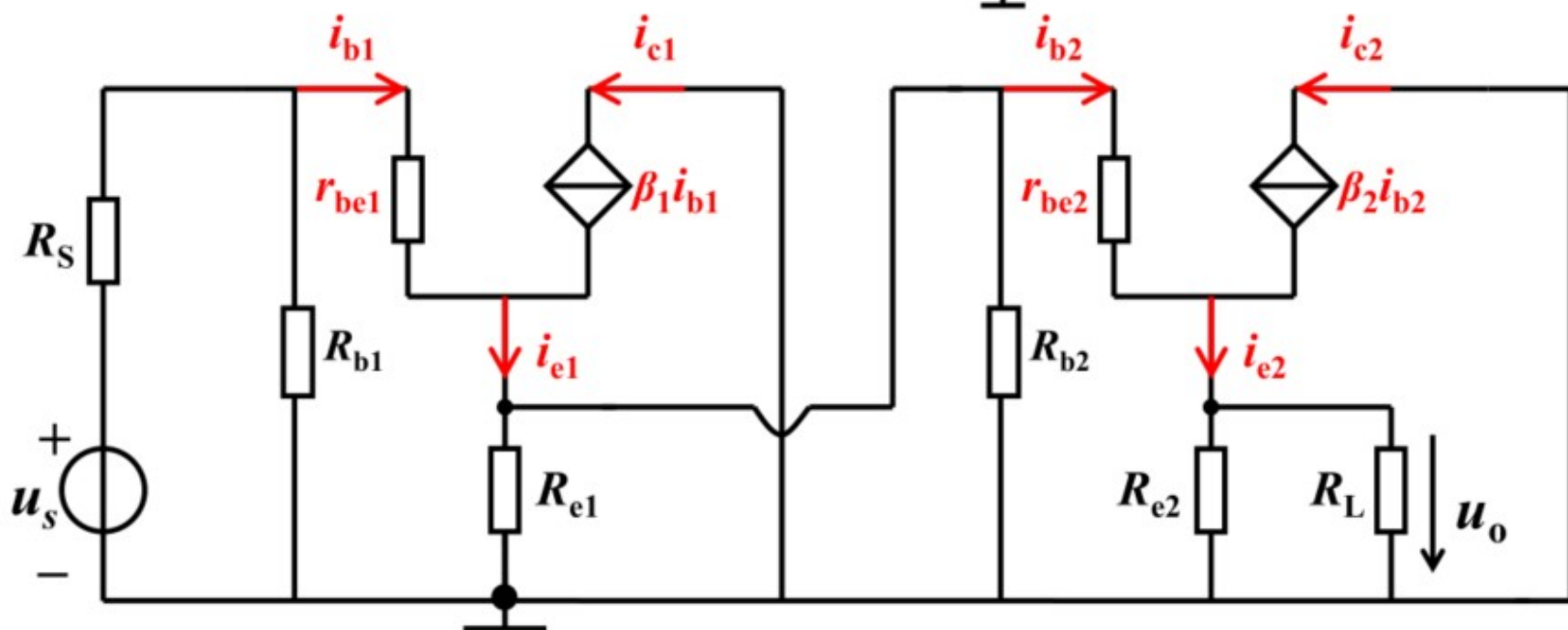
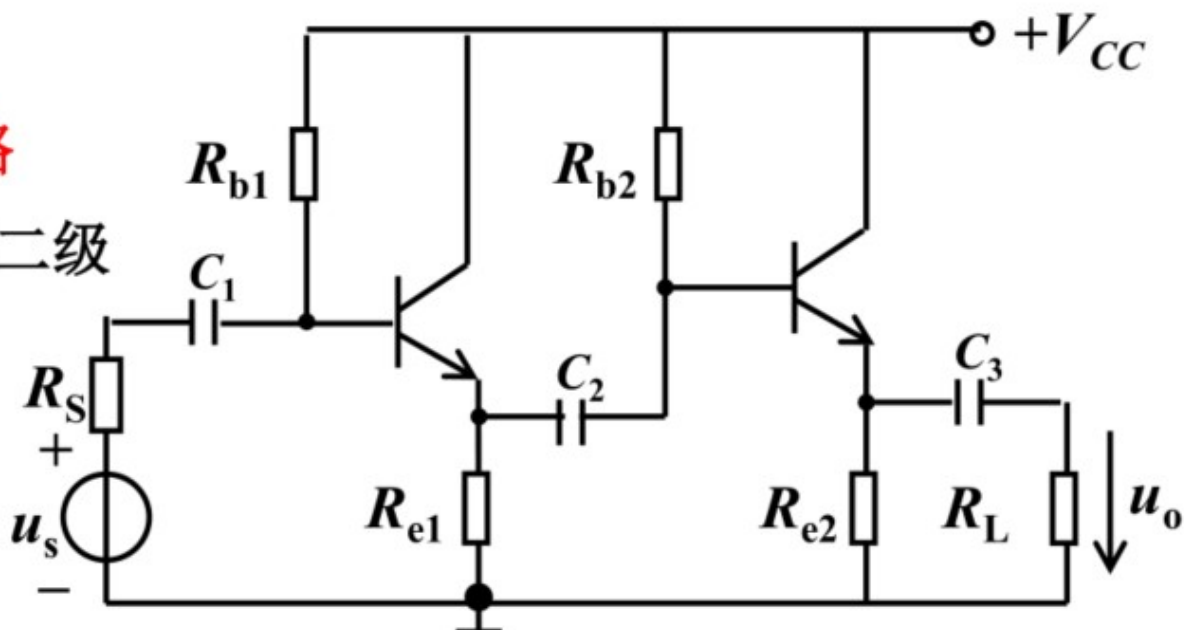
## 例题2： 动态分析

### 1) 画出微变等效电路

先画第一级再画第二级

$$r_{be1} = r_{bb}' + (1 + \beta_1) \frac{26(mV)}{I_{E1}(mA)}$$

$$r_{be2} = r_{bb}' + (1 + \beta_2) \frac{26(mV)}{I_{E2}(mA)}$$



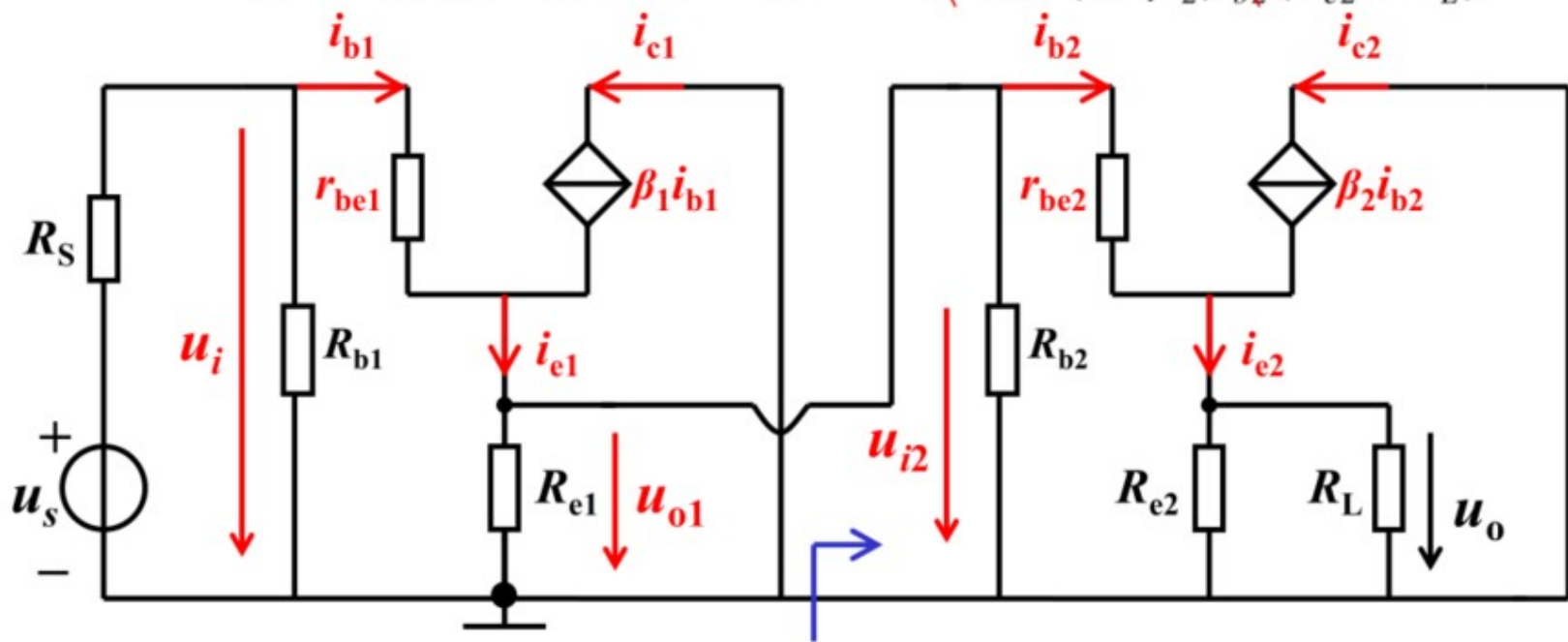
2) 求  $A_u$ ,  $A_{us}$ ,  $r_i$ ,  $r_o$  ① 电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

第一级的负载就是第二级的输入电阻  $0 < A_{u1} < 1$  且  $A_{u1} \approx 1$

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{i_{e1}(R_{e1} // r_{i2})}{i_{b1}r_{be1} + i_{e1}(R_{e1} // r_{i2})} = \frac{(1 + \beta_1)i_{b1}(R_{e1} // r_{i2})}{i_{b1}r_{be1} + (1 + \beta_1)i_{b1}(R_{e1} // r_{i2})}$$

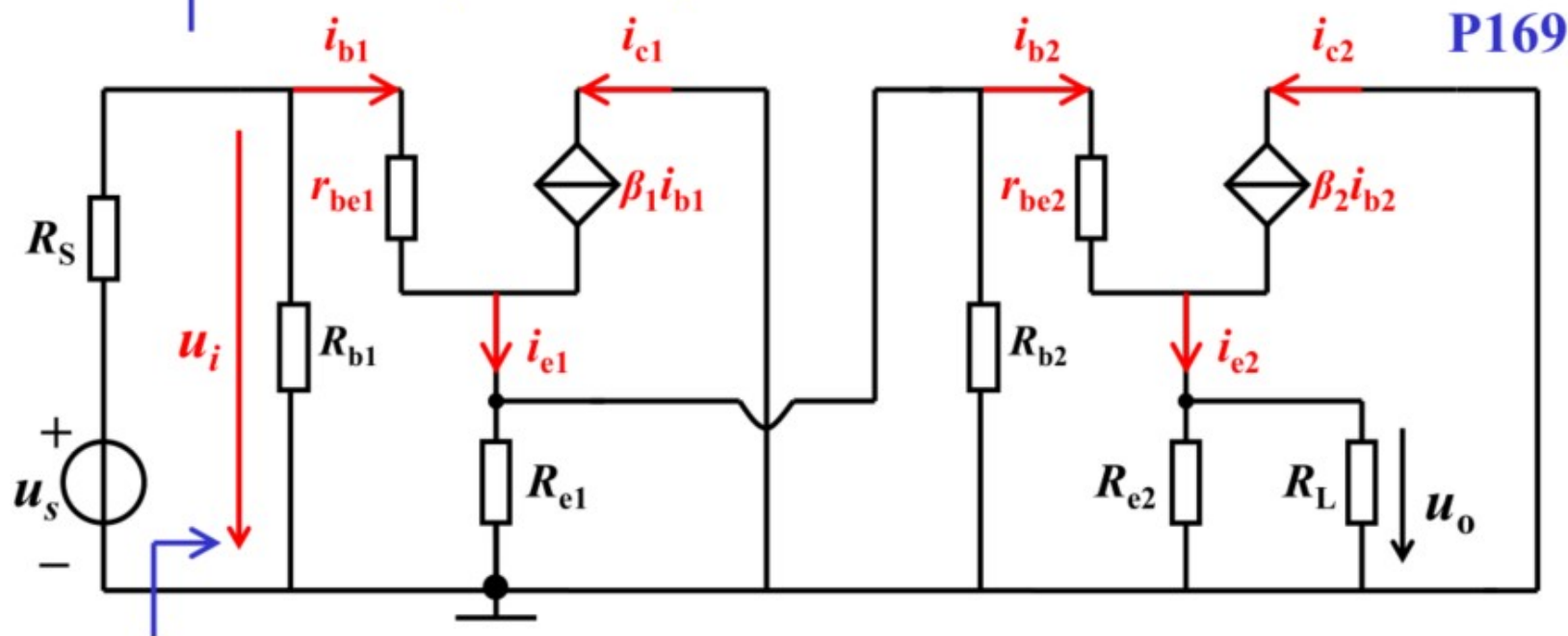
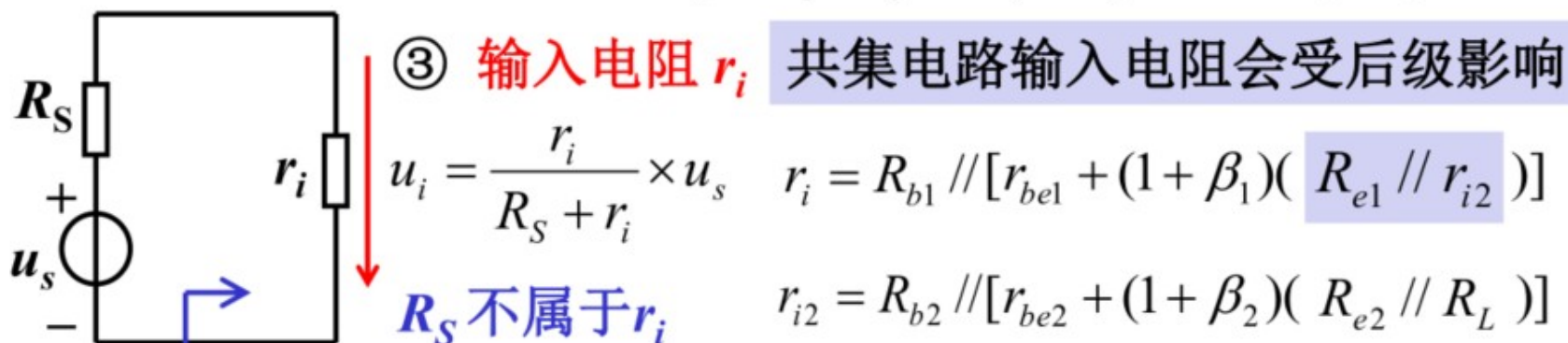
$$r_{i2} = R_{b2} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)]$$

$$A_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{i_{e2}(R_{e2} // R_L)}{i_{b2}r_{be2} + i_{e2}(R_{e2} // R_L)} = \frac{(1 + \beta_2)i_{b2}(R_{e2} // R_L)}{i_{b2}r_{be2} + (1 + \beta_2)i_{b2}(R_{e2} // R_L)}$$



2) 求  $A_u$ ,  $A_{us}$ ,  $r_i$ ,  $r_o$  ① 电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

② 电源电压放大倍数  $A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_o \times u_i}{u_s \times u_i} = \frac{u_o}{u_i} \times \frac{u_i}{u_s} = A_u \times \frac{r_i}{R_s + r_i}$  P137





2) 求  $A_u$ ,  $A_{us}$ ,  $r_i$ ,  $r_o$

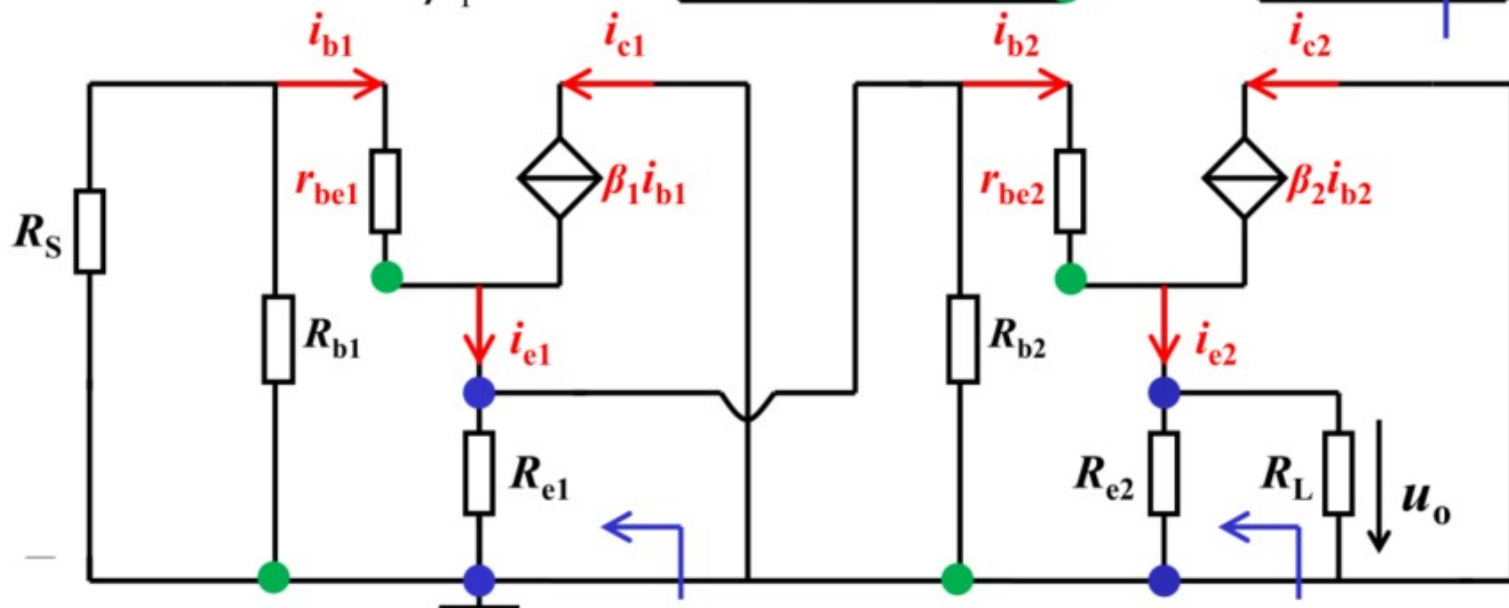
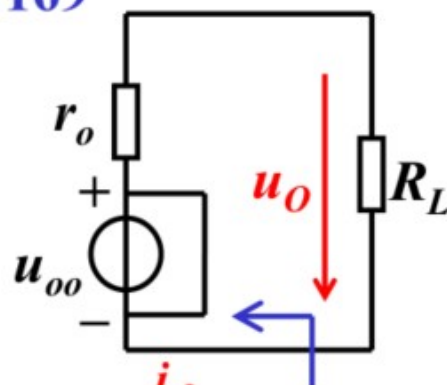
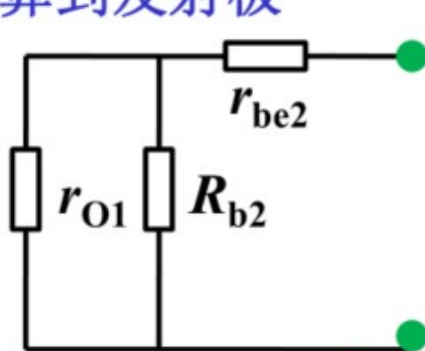
④ 输出电阻  $r_o \rightarrow R_L$  不属于  $r_o$  共集电路输出电阻会受前级影响

注意：需要把基极电阻折算到发射极

P169

$$r_o = R_{e2} // \frac{r_{be2} + (R_{b2} // r_{o1})}{1 + \beta_2}$$

$$r_{o1} = R_{e1} // \frac{r_{be1} + (R_{b1} // R_S)}{1 + \beta_1}$$



### 例题1: P165 图5-52(a)

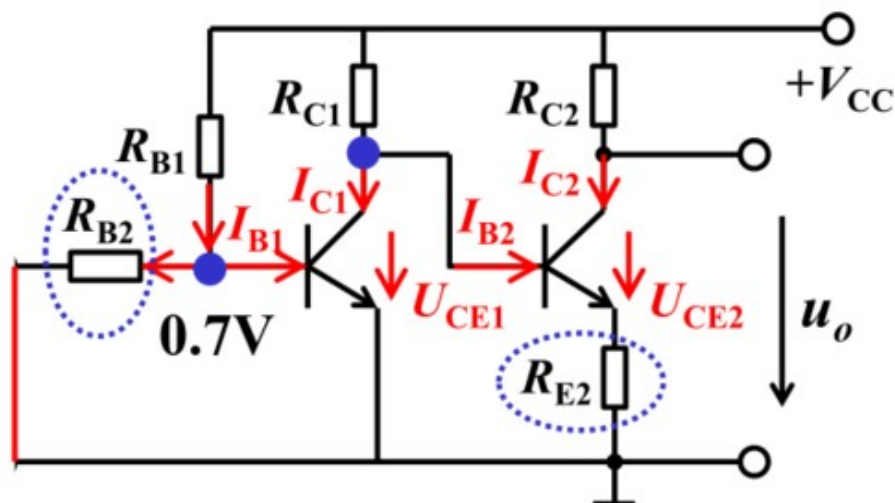
#### 直接耦合两级共射放大电路

$R_{B2}$ 保证 $T_1$ 的发射结正偏

$$V_{C1} = U_{BE2} + I_{E2}R_{E2} > 0.7V$$

$R_{E2}$ 保证 $T_1$ 的集电结反偏

静态分析:



步骤1: 画出直流通路: 将交流电源除源, 变成一根导线

步骤2: 确定各级的Q点 → 已知 $U_{BE}$ 去估算 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$

$$KCL: I_{B1} = I_{RB1} - I_{RB2} \quad I_{B1} = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}} \quad I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \quad I_{C1} \neq I_{RC1}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{CE1} &= V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2})R_{C1} \\ U_{CE1} &= 0.7 + (1 + \beta_2)I_{B2}R_{E2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{直接耦合的静态工作点Q会相互影响} \\ \text{联立方程组, 即可求出 } U_{CE1} \text{ 和 } I_{B2} \end{array}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad \text{空载} \rightarrow U_{CE2} = V_{CC} - I_{C2}R_{C2} - I_{E2}R_{E2} \quad I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2}$$

思考1:  $R_{B2}$ 和 $R_{E2}$ 的作用? → 保证 $T_1$ 正常工作

思考2: 如果有载, 会发生什么变化?

# 例题1: P165 图5-52(a)

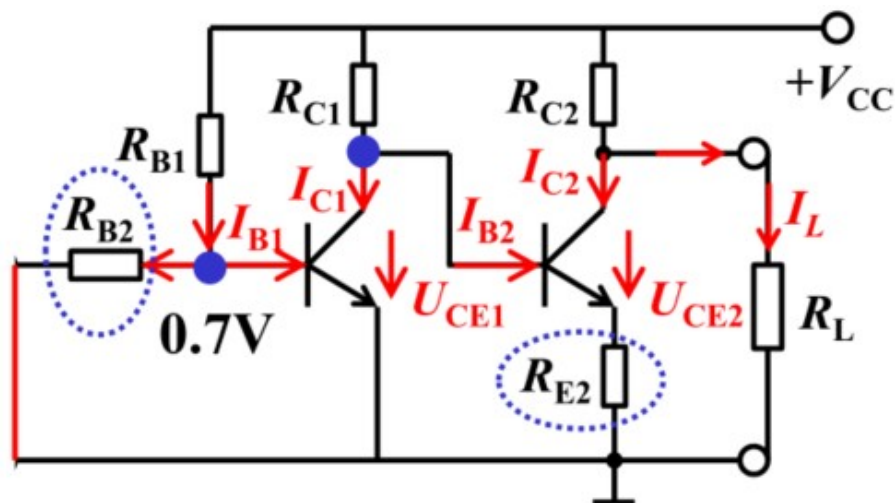
## 直接耦合两级共射放大电路

$R_{B2}$  保证  $T_1$  的发射结 **正偏**

$$V_{C1} = U_{BE2} + I_{E2} R_{E2} > 0.7V$$

$R_{E2}$  保证  $T_1$  的集电结 **反偏**

静态分析:



步骤1: 画出 **直流通路**: 将交流电源除源, 变成一根导线

步骤2: 确定 **各级的Q点** → 已知  $U_{BE}$  去估算  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$

$$KCL: I_{B1} = I_{RB1} - I_{RB2} \quad I_{B1} = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}} \quad I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \quad I_{C1} \neq I_{RC1}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{CE1} &= V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2}) R_{C1} \\ U_{CE1} &= 0.7 + (1 + \beta_2) I_{B2} R_{E2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{直接耦合的静态工作点 } Q \text{ 会相互影响} \\ \text{联立方程组, 即可求出 } U_{CE1} \text{ 和 } I_{B2} \end{array}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad \text{空载} \rightarrow U_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} R_{C2} - I_{E2} R_{E2} \quad I_{E2} = (1 + \beta_2) I_{B2}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{有载 } U_{CE2} &= V_{CC} - (I_{C2} + I_L) R_{C2} - I_{E2} R_{E2} \\ U_{CE2} + I_{E2} R_{E2} &= I_L R_L \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{联立方程组, 即可求 } U_{CE2} \text{ 和 } I_L \\ \text{写出表达式即可 (无需求解)} \end{array}$$



# 例题1: P165 图5-52(a)

动态分析:

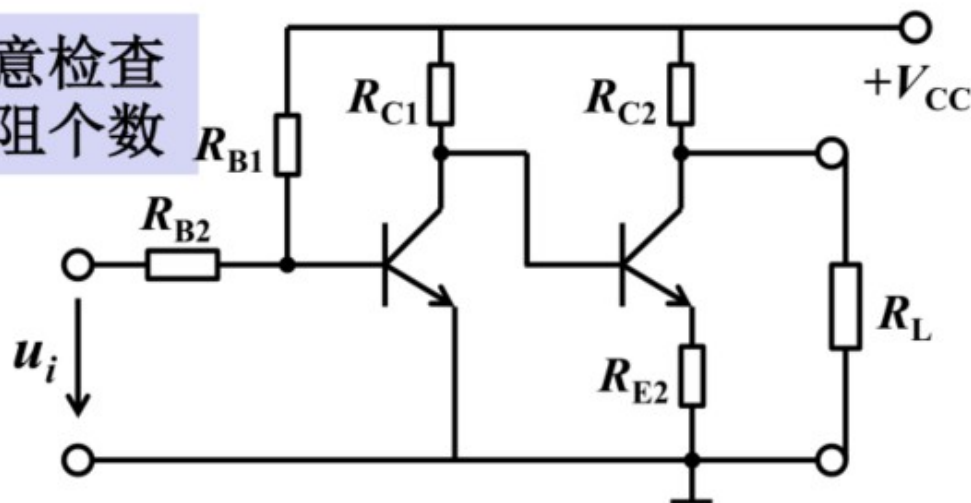
① 画出微变等效模型

先画前级再画后级

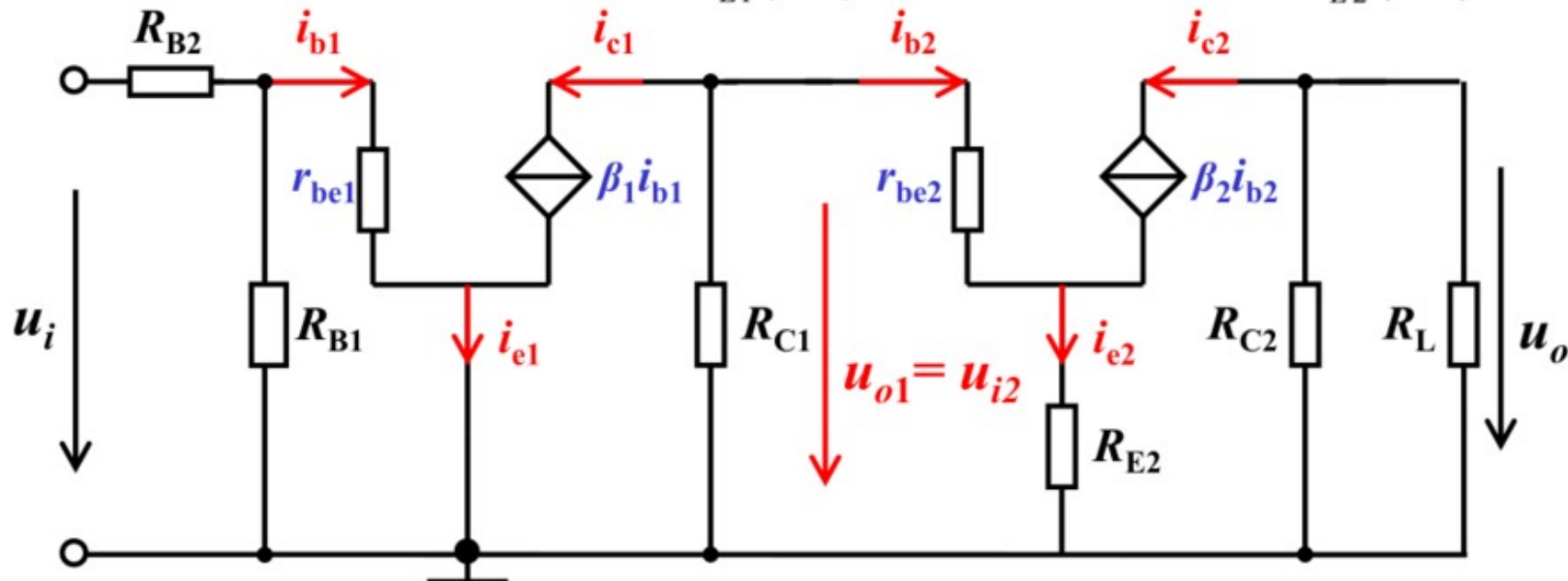
② 求解动态性能指标

→ 求  $A_u$ 、 $r_i$ 、 $r_o$

注意检查  
电阻个数



$$r_{be1} = r_{bb}' + (1 + \beta_1) \frac{26(mV)}{I_{E1}(mA)} \quad r_{be2} = r_{bb}' + (1 + \beta_2) \frac{26(mV)}{I_{E2}(mA)}$$





1、电压放大倍数  $A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = \boxed{A_{u1} \times A_{u2}}$

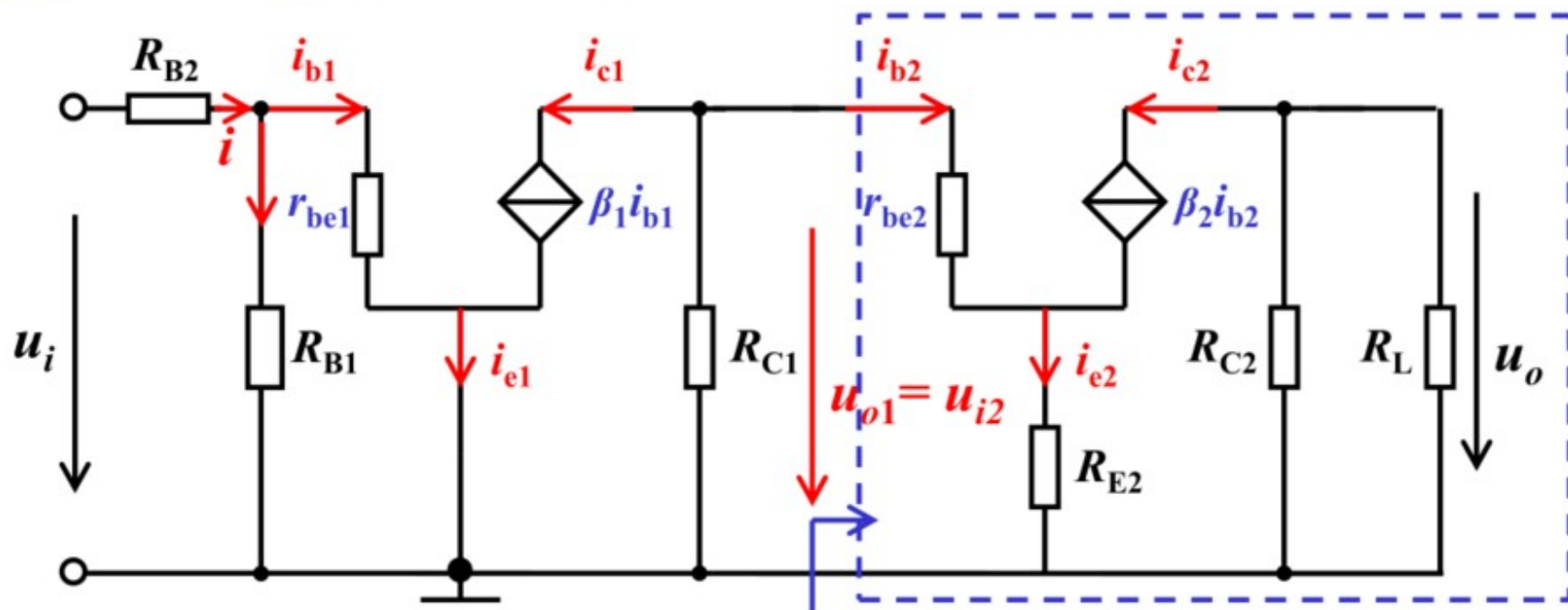
$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{i (R_{B2} + R_{B1} // r_{be1})}$$

注意：第一级的负载就是第二级的输入电阻  $r_{i2}$ 。

思考：其他方法？

分流公式

$$= \frac{-\beta \frac{R_{B1}}{R_{B1} + r_{be1}} i (R_{C1} // r_{i2})}{i (R_{B2} + R_{B1} // r_{be1})} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$



1、电压放大倍数  $A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = \boxed{A_{u1} \times A_{u2}}$

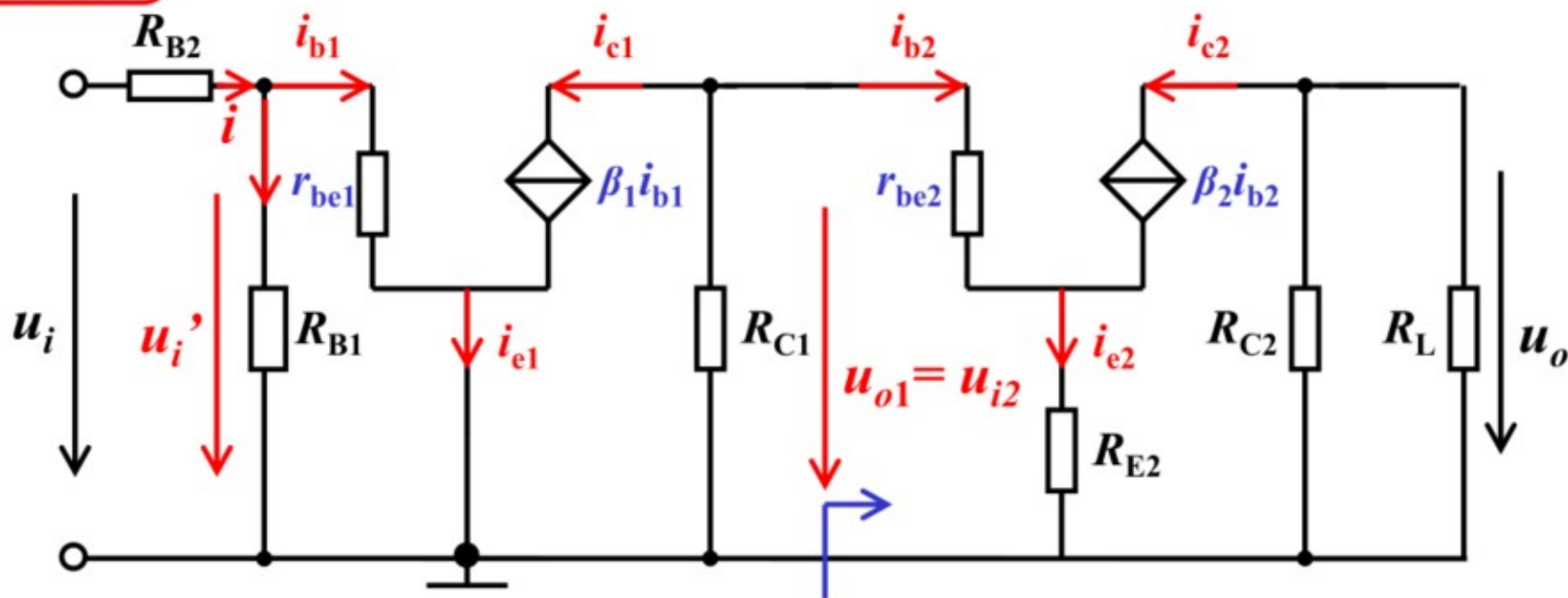
$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{\left( \frac{i_{b1} r_{be1}}{R_{B1}} + i_{b1} \right) R_{B2} + i_{b1} r_{be1}} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

方法二:

方法三:  
推荐使用

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i'} \times \frac{u_i'}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{i_{b1} r_{be1}} \times \frac{R_{B1} // r_{be1}}{R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}}$$

$r_{i2}=?$



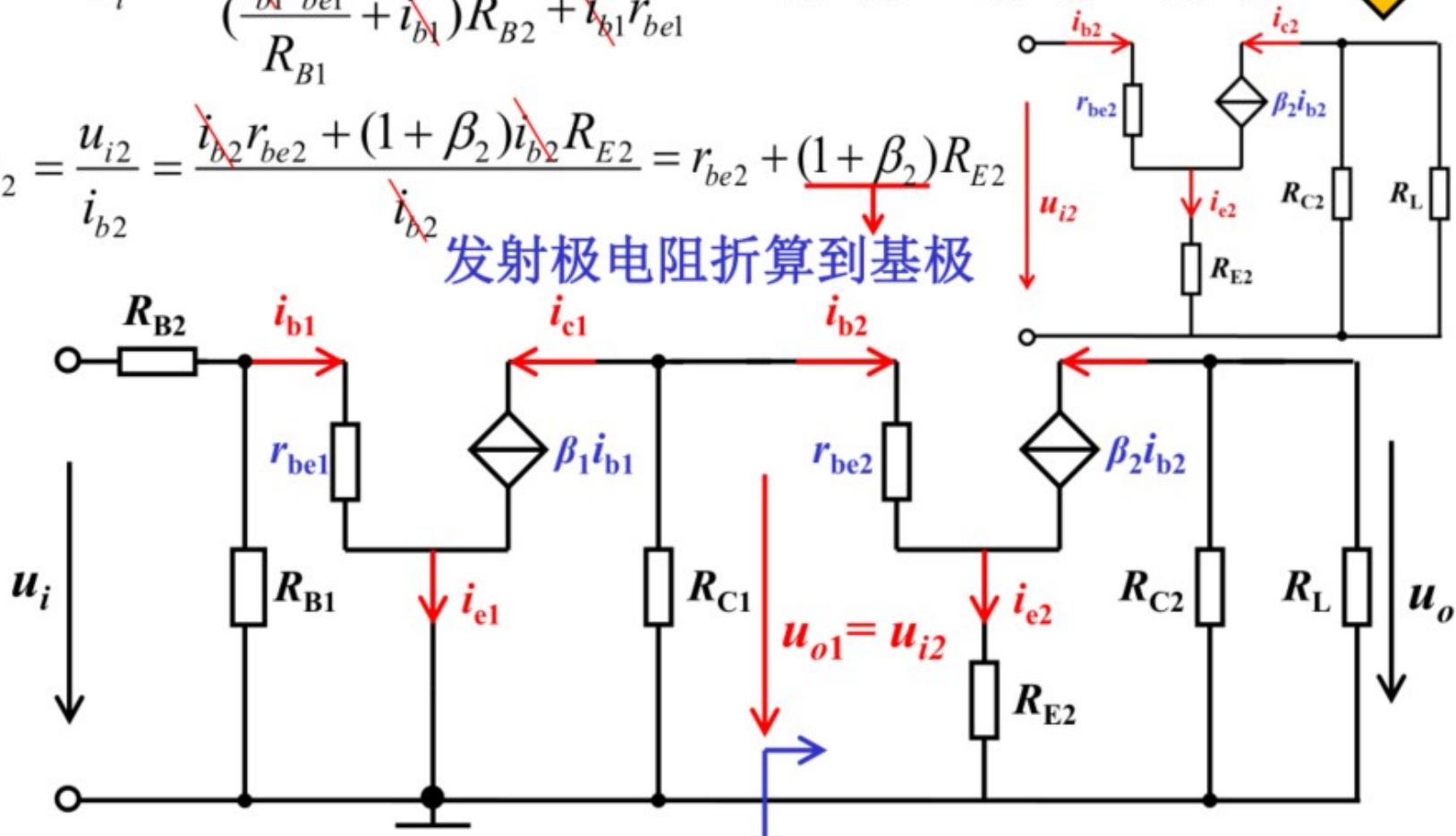
1、电压放大倍数  $A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = A_{u1} \times A_{u2}$

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{(\frac{i_{b1} r_{be1}}{R_{B1}} + i_{b1}) R_{B2} + i_{b1} r_{be1}} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

$$r_{i2} = \frac{u_{i2}}{i_{b2}} = \frac{i_{b2} r_{be2} + (1 + \beta_2) i_{b2} R_{E2}}{i_{b2}} = r_{be2} + (1 + \beta_2) R_{E2}$$

发射极电阻折算到基极

P7  
图e

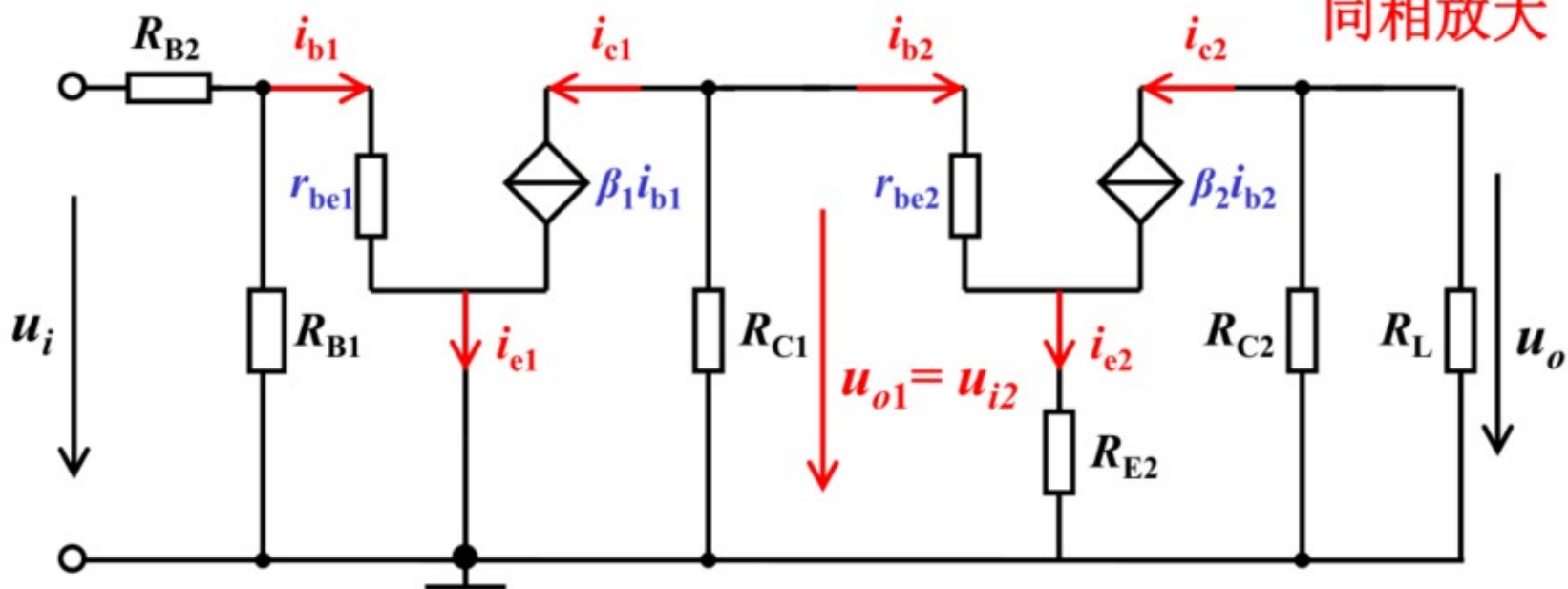


1、电压放大倍数  $A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = \boxed{A_{u1} \times A_{u2}} > 1$

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{(\frac{i_{b1} r_{be1}}{R_{B1}} + i_{b1}) R_{B2} + i_{b1} r_{be1}} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

$$A_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{-i_{c2} (R_{C2} // R_L)}{i_{b2} r_{be2} + i_{e2} R_{E2}} = \frac{-\beta_2 i_{b2} (R_{C2} // R_L)}{i_{b2} r_{be2} + (1 + \beta_2) i_{b2} R_{E2}}$$

两级共射  
接法可以  
实现信号  
同相放大





单级  
总结表

1、电压放大倍数  $A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = A_{u1} \times A_{u2}$

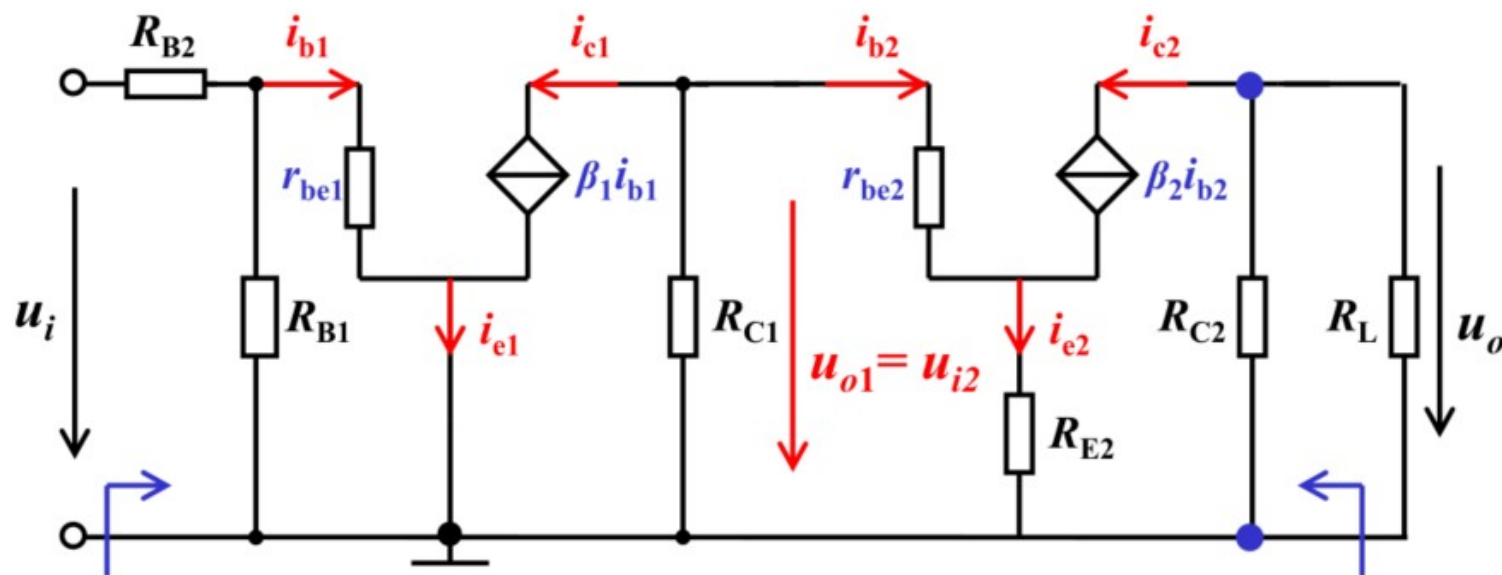
2、输入电阻  $r_i \longrightarrow$  第一级的输入电阻  $r_i = R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}$

$\because$  受控源的恒流特性  $\therefore$  读输入电阻时若遇到受控恒流源即可停止

3、输出电阻  $r_o \longrightarrow$  最后一级的输出电阻  $r_o = R_{C2}$

$\because$  受控源的  $r_{ce} \approx \infty$   $\therefore$  读输出电阻时若遇到受控恒流源即可停止

重点：电  
阻得正确  
折算



# 多级放大电路的分析

两者比较  
详见P167

一、多级放大电路的耦合方式 → 阻容耦合或直接耦合 表5-3

二、多级放大电路的分析过程 → 与单级类似，先静态后动态

静态分析：→ 只有直流电源作用的电路

步骤1：画出直流通路  $u_i$  —||— [第一级] —||— [第二级] —||—  $u_o$      $u_i$  — [第一级] — [第二级] —  $u_o$

① 若是阻容耦合，则将所有的电容断开 → 分开求每一级的Q

② 若是直接耦合，则将交流电压短路变成导线 → 联立方程组求Q

步骤2：求解各级的Q点 → 已知  $U_{BE}$  估算每一级的  $I_B, I_C, U_{CE}$

动态分析：→ 只有交流信号作用的电路 → 微变等效电路法

步骤1：画出微变等效电路 注意：先画第一级再画第二级

步骤2：计算动态性能指标 → 求总的  $A_u, r_i, r_o$      $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

注意：总  $r_i$  就是第一级的输入电阻；总  $r_o$  就是最后一级的输出电阻

## 5.8 放大器的通频带

### 1. 放大器的频率特性

一般情况下，电路中的电抗元件或具有电抗效应的器件，其电抗（主要是容抗）是输入信号频率的函数。因而，放大器的电压放大倍数也是频率的函数。其频率特性 (Frequency Response) 可用下式表示

$$\dot{A}_u(f) = A_u(f) \angle \varphi(f)$$

- $A_u(f)$  表示电压放大倍数的幅值与频率的关系，称为幅频特性 (Amplitude Frequency — Response)。

$\varphi(f)$  表示放大倍数的相位与频率的关系，称为相频特性 (Phase Frequency — Response)。



## 5.8 放大器的通频带

### 1. 放大器的频率特性

由于放大电路中耦合电容、旁路电容、PN 结结电容的存在，使放大倍数为频率的函数。

$$\dot{A}_u(f) = A_u(f) \angle \varphi(f)$$

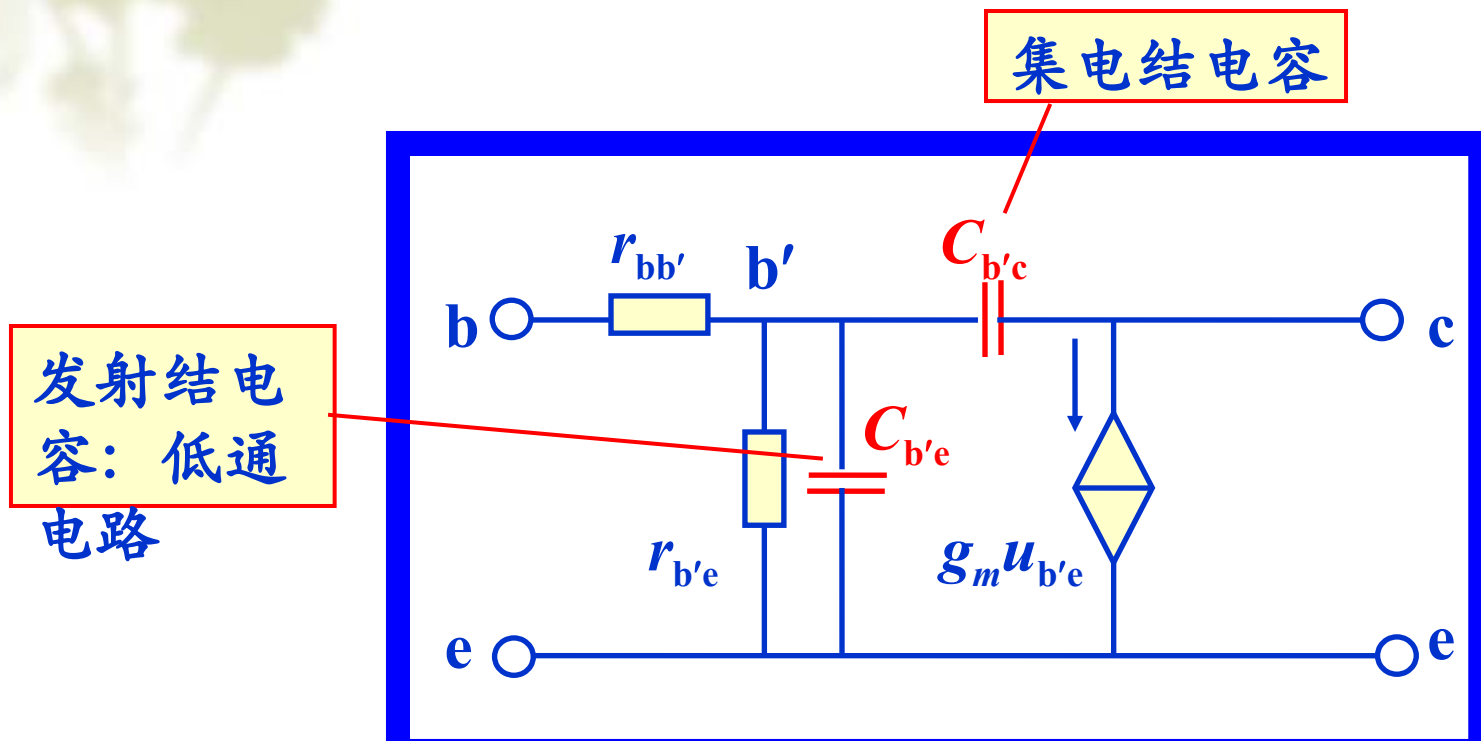
在使用一个放大电路时应了解其信号频率的适用范围，在设计放大电路时，应满足信号频率的范围要求。



## 2、单级阻容耦合放大电路的频率特

### 三极管的混合 $\pi$ 型等效电路

高频时，考虑到结间电容的影响，三极管的高频微变等效电路重画如图所示。此时，输出回路的受控源是  $\beta_0 \dot{I}_{b'}$



在高频段，随着信号频率逐渐升高，晶体管极间电容和分布电容、寄生电容等杂散电容的容抗减小，使动态信号损失，放大能力下降。

# 简单的交流信号处理电路

## 1、低通电路（并接电容）

输入信号  $u_i = \sqrt{2}\sin\omega t$ ，输出信号  $u_o$ ，电阻  $R=1$  欧姆，大电容  $10\mu\text{F}$ ，求输入信号角频率分别为， $10^2, 10^4, 10^6, 10^8$  时，输出电压的有效值。

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i}{R + \frac{1}{j\omega C}} \frac{1}{j\omega C} = \frac{1\angle 0^\circ}{j\omega CR + 1} = \frac{1\angle 0^\circ}{j\omega 10^{-5} + 1}$$

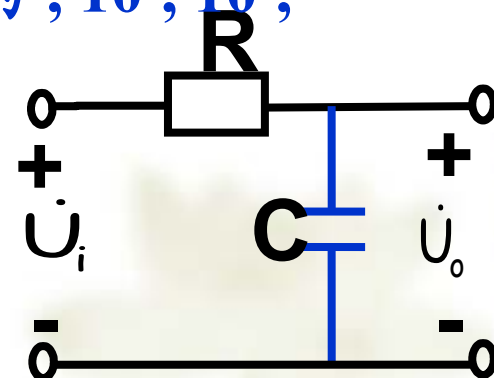
角频率分别为

$$10^2: \dot{U}_o \approx 1\angle 0^\circ$$

$$10^4: \dot{U}_o \approx 1\angle 0^\circ$$

$$10^6: \dot{U}_o \approx 0.1\angle -90^\circ \approx 0$$

$$10^8: \dot{U}_o \approx 0.001\angle -90^\circ \approx 0$$



$\dot{U}_o$  滞后  $\dot{U}_i$

当  $f \rightarrow 0$  时； $\dot{U}_o \rightarrow \dot{U}_i$ 。

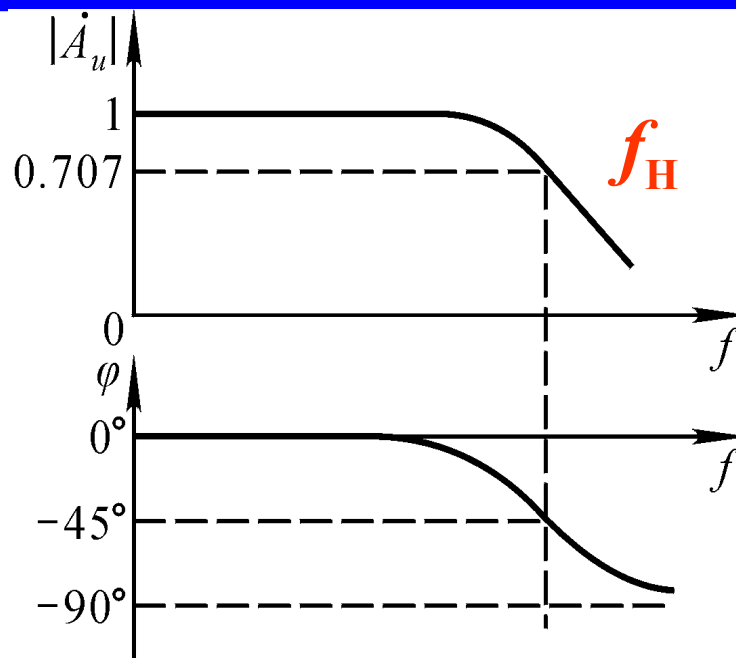
当  $f \rightarrow \infty$  时； $|\dot{U}_o| \rightarrow 0$ 。

低通电路：低频信号能基本无失真通过，高频信号衰减很厉害

害

$f \ll f_H$  时放大倍  
数约为 1

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

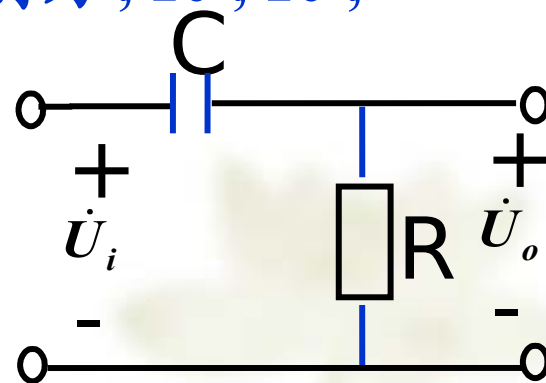


# 简单的交流信号处理电路

## 2、高通电路（串接电容）

输入信号  $u_i = \sqrt{2}\sin\omega t$ ，输出信号  $u_o$ ，电阻  $R=1$  欧姆，大电容  $1\text{mF}$ ，求输入信号角频率分别为， $10^2, 10^4, 10^6, 10^8$  时，输出电压的有效值。

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i}{R + \frac{1}{j\omega C}} R = \frac{1\angle 0^\circ}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1\angle 0^\circ}{1 + \frac{1}{j10^{-3}\omega}}$$



角频率分别为

$$10^2 : \dot{U}_o \approx 0.1\angle 90^\circ \approx 0$$

$$10^4 : \dot{U}_o \approx 1\angle 0^\circ$$

$$10^6 : \dot{U}_o \approx 1\angle 0^\circ$$

$$10^8 : \dot{U}_o \approx 1\angle 0^\circ$$

$\dot{U}_o$  超前  $\dot{U}_i$

当  $f \rightarrow 0$  时； $|\dot{U}_o| \rightarrow 0$ 。

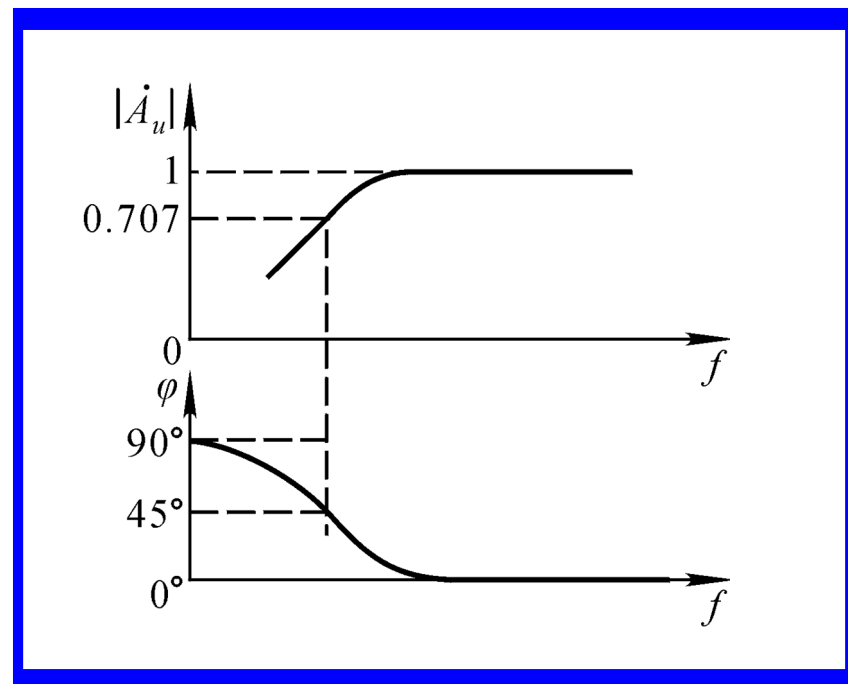
当  $f \rightarrow \infty$  时； $\dot{U}_o \rightarrow \dot{U}_i$ 。

高通电路：高频信号能基本无失真通过，低频信号衰减很厉害



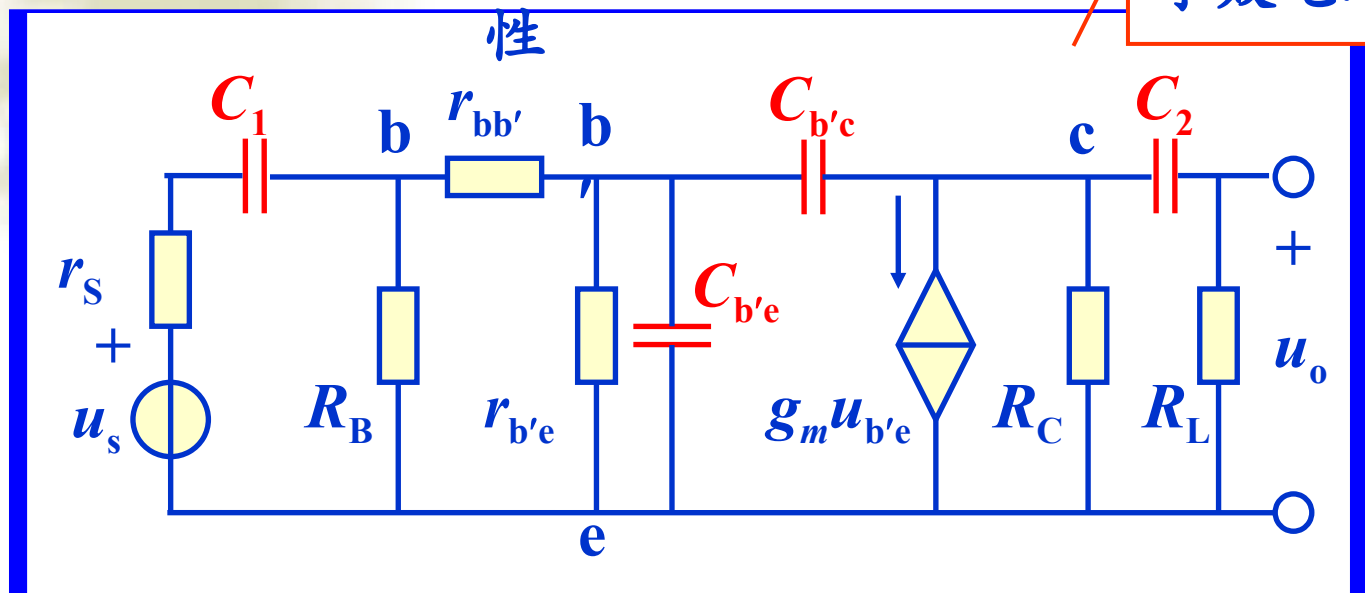
## 2、高通电路

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$



## 2、单级阻容耦合放大电路的频率特

适用于信号频率  
从  $0 \sim \infty$  的微变  
等效电路



中频段：  $C_1$ 、  $C_2$  短路，  $C_{b'e}$ 、  $C_{b'c}$  开路

低频段： 考虑  $C_1$ 、  $C_2$  影响，  $C_{b'e}$ 、  $C_{b'c}$  开路

高频段：  $C_1$ 、  $C_2$  短路， 考虑  $C_{b'e}$  影响

# 第5章 放大电路基础

5.1 放大电路的组成及工作原理 → 定性

5.2 图解分析法  
5.3 计算分析法 } 定量

5.4 放大电路的三种接法

5.5 稳定工作点的放大电路 (怎么消除温度影响)

5.6 场效应管放大电路

5.7 多级放大电路 (怎么提高放大倍数)

5.8 放大器的通频带