



模拟电路基础（下）

三极管与其放大电路

3.2 三极管放大电路分析



► 放大电路的改进

例：电路的形式及参数如图所示，设： $(r_{bb'}=300\Omega)$ ，求(1)确定Q点，(2)估算 r_{be} ，(3) 计算 A_v (4) 计算 R_i 和 R_o 。

(1) 求Q点：

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} = \frac{20 \times 12}{40 + 20} = 4V$$

$$I_C \approx I_E \approx V_B / R_e = 4V / 2k = 2mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_e = 3V$$

$$I_B = I_C / \beta = 2mA / 40 = 50\mu A$$

(2) 估算 r_{be} ：

$$r_{be} = 300 + \frac{26mV}{0.05mA} = 820\Omega$$

(3) 计算 A_v

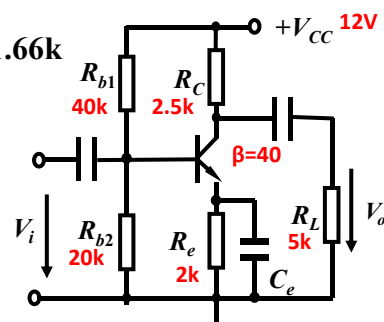
$$R_L' = R_C // R_L = 2.5 \times 5 / (2.5 + 5) = 1.66k$$

$$A_v = -\frac{\beta R_L'}{r_{be}} = -\frac{40 \times 1.66}{820\Omega} = -80$$

(4) 求 R_i 和 R_o

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \approx r_{be} = 833\Omega$$

$$R_o = R_C = 2.5k$$



3.2 三极管放大电路分析

3

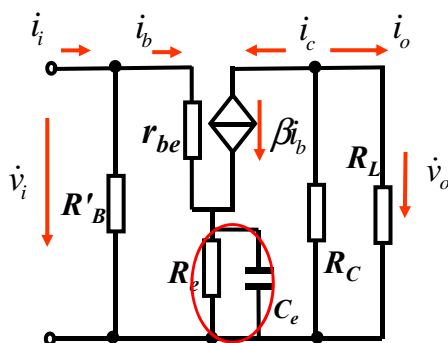


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进 若没有电容 C_e ，再求解上题。

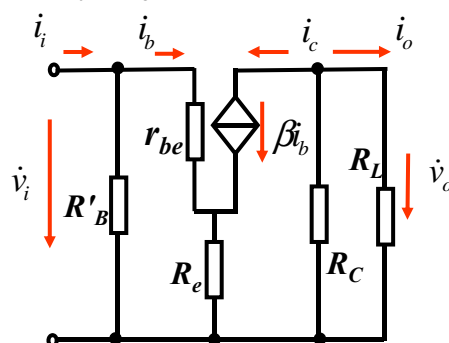
此时，Q点和 r_{be} 保持不变

$$A_v = -\frac{\beta \cdot (R_C \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \quad A_v = -\frac{40 \times 1.66}{0.82 + (1 + 40) \times 2} = -0.8$$



$$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 11.5k$$

$$R_o \approx R_C = 2.5k$$



3.2 三极管放大电路分析

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的改进

总结：

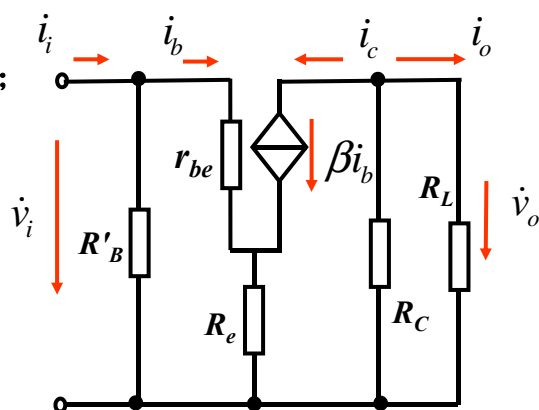
- ✓ 尽管电路形式有区别，其等效电路大致相同；
- ✓ 以此为模板，可快速求解电路参数

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta \cdot i_b (R_C \parallel R_L)}{i_b [r_{be} + (1 + \beta)R_e]} = -\frac{\beta \cdot (R_C \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

$$R_o \approx R_C$$

以上公式重点记忆！！！！



3.2 三极管放大电路分析

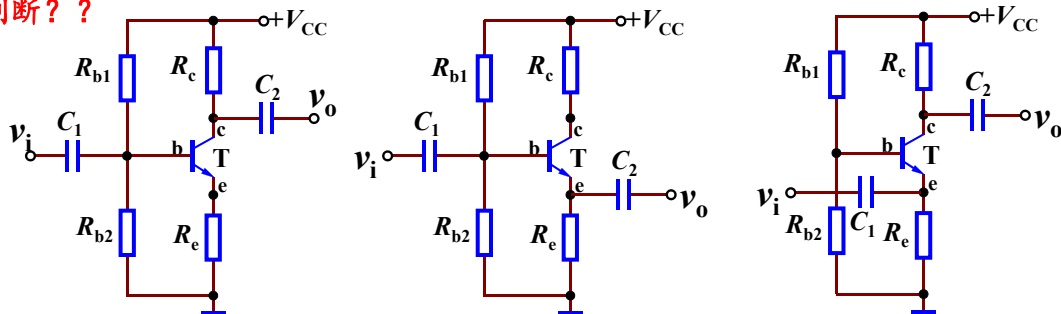
5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

如何判断??



以输入、输出信号的位置为判断依据:

信号由基极输入, 集电极输出—— 共射极放大电路

信号由基极输入, 发射极输出—— 共集电极放大电路

信号由发射极输入, 集电极输出—— 共基极电路

交流信号!

3.2 三极管放大电路分析

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

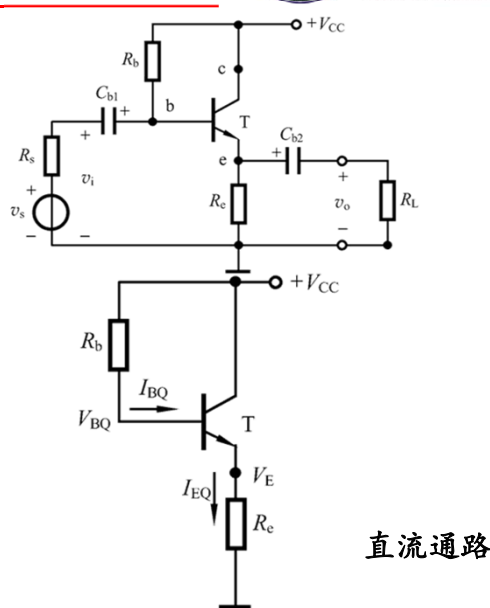
1. 共集电极放大电路

(1) 静态分析

$$\text{由} \begin{cases} V_{CC} = I_{BQ} R_b + V_{BEQ} + I_{EQ} R_e \\ I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ} \end{cases}$$

$$\text{得 } I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e} \quad I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_e \approx V_{CC} - I_{CQ} R_e$$



3.2 三极管放大电路分析

7

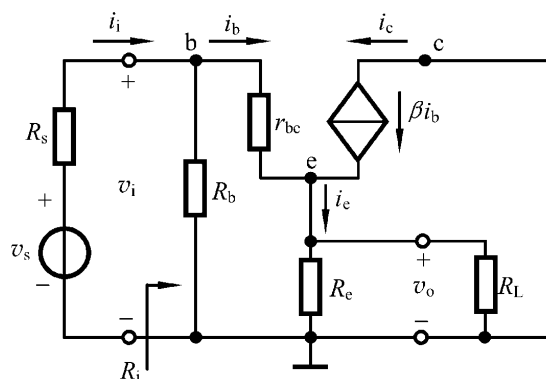
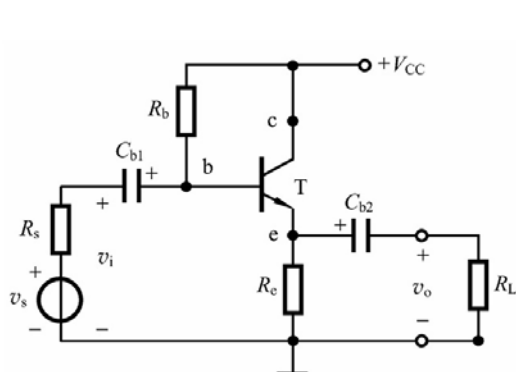


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

1. 共集极放大电路

(2) 动态分析



3.2 三极管放大电路分析

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

1. 共集极放大电路

(3) 求放大电路动态指标

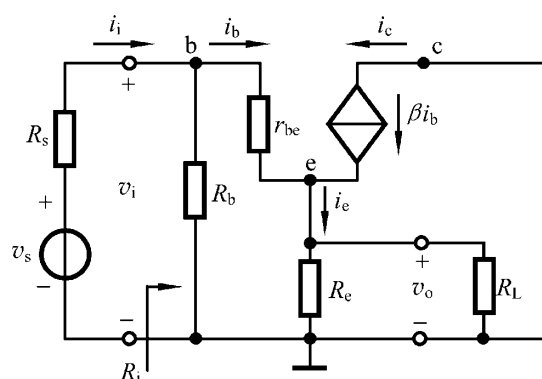
$$\begin{aligned} \text{输入回路: } v_i &= i_b r_{be} + (i_b + \beta i_b) R'_L \\ &= i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R'_L \end{aligned}$$

$$\text{其中 } R'_L = R_e \parallel R_L$$

$$\text{输出回路: } v_o = (i_b + \beta \cdot i_b) R'_L = i_b (1 + \beta) R'_L$$

$$\text{电压增益: } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_b (1 + \beta) R'_L}{i_b [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L} \approx \frac{\beta \cdot R'_L}{r_{be} + \beta \cdot R'_L} < 1$$

一般 $\beta \cdot R'_L \gg r_{be}$, 则电压增益接近于1, 即 $A_v \approx 1$ 。 v_o 与 v_i 同相 称之为电压跟随器



3.2 三极管放大电路分析

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

1. 共集极放大电路

(3) 求放大电路动态指标

根据定义 $R_i = \frac{v_i}{i_i}$

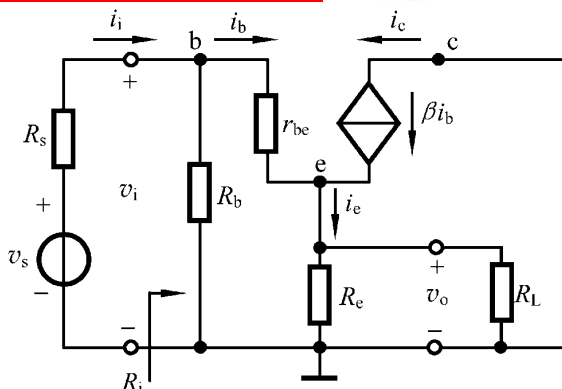
由电路列出方程

$$\begin{cases} i_i = i_{R_b} + i_b \\ v_i = i_{R_b} R_b \\ v_i = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R'_L \\ R'_L = R_c \parallel R_L \end{cases}$$

则输入电阻 $R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$

当 $\beta \gg 1$, $\beta \cdot R'_L \gg r_{be}$ 时, $R_i \approx R_b \parallel \beta \cdot R'_L$

输入电阻大, 适合用于?



3.2 三极管放大电路分析

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

1. 共集极放大电路

(3) 求放大电路动态指标 输出电阻怎么求?

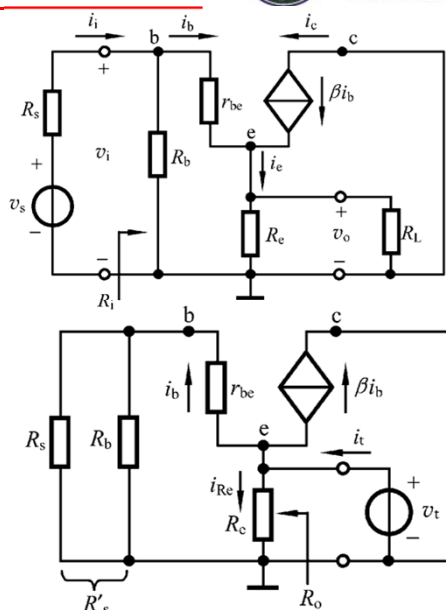
由电路列出方程

$$\begin{cases} i_t = i_b + \beta i_b + i_{R_c} \\ v_t = i_b (r_{be} + R'_s) \quad \text{其中 } R'_s = R_s \parallel R_b \\ v_t = i_{R_c} R_c \end{cases}$$

则输出电阻 $R_o = \frac{v_t}{i_t} = R_c \parallel \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$

当 $R_c \gg \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$, $\beta \gg 1$ 时, $R_o \approx \frac{R'_s + r_{be}}{\beta}$

输出电阻小, 适合用于?



3.2 三极管放大电路分析

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

1. 共集极放大电路

共集电极电路特点：

◆ 电压增益小于1但接近于1, \dot{V}_o 与 \dot{V}_i 同相

$$A_v \approx 1$$

◆ 输入电阻大, 对电压信号源衰减小

$$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$

◆ 输出电阻小, 带负载能力强

$$R_o = R_c \parallel \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$$

既然共集电极电路的电压增益小于1（接近于1），那么它对信号放大没有任何作用。这种说法是否正确？

3.2 三极管放大电路分析

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

2. 共基极放大电路

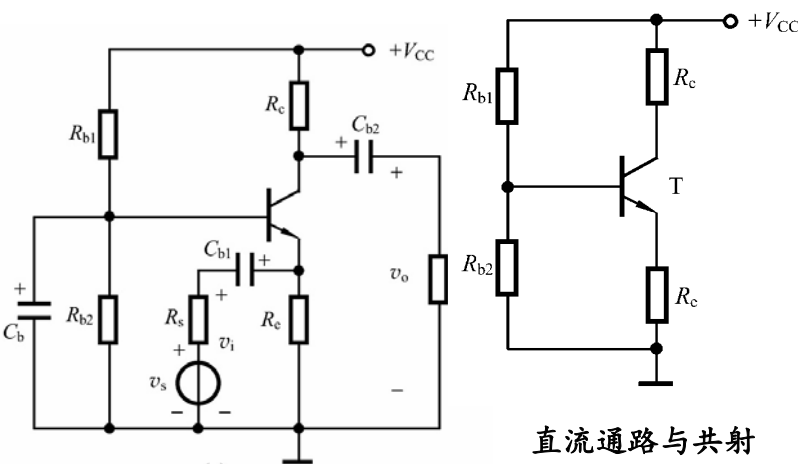
(1) 静态分析

$$V_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{R_e}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \\ \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$



直流通路与共射极偏置电路相同

3.2 三极管放大电路分析

13

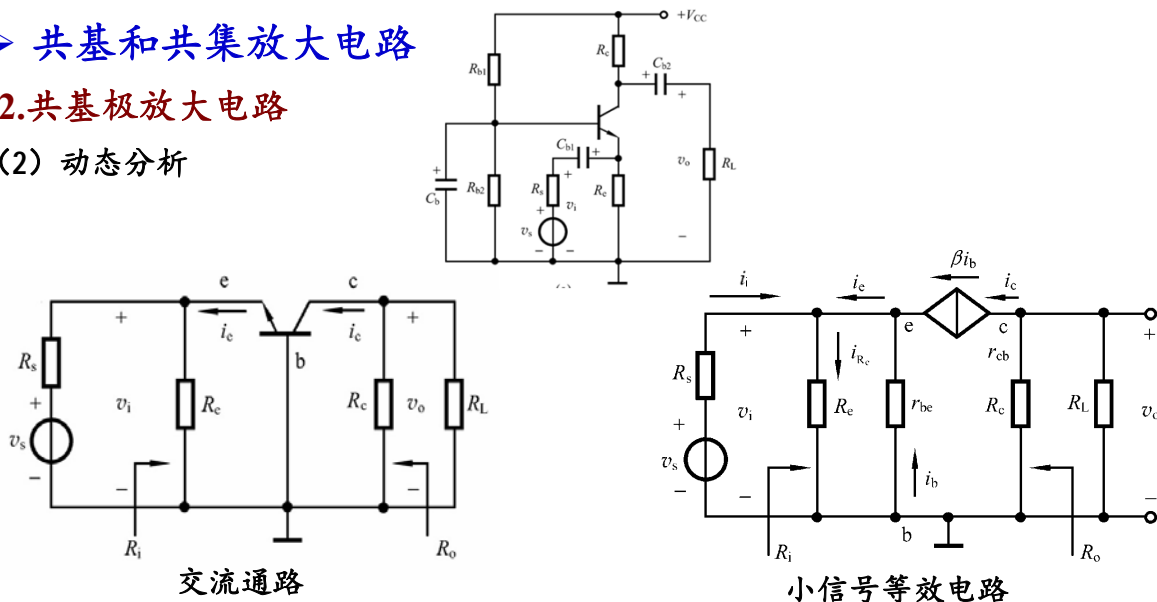


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

2. 共基极放大电路

(2) 动态分析



3.2 三极管放大电路分析

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 共基和共集放大电路

2. 共基极放大电路

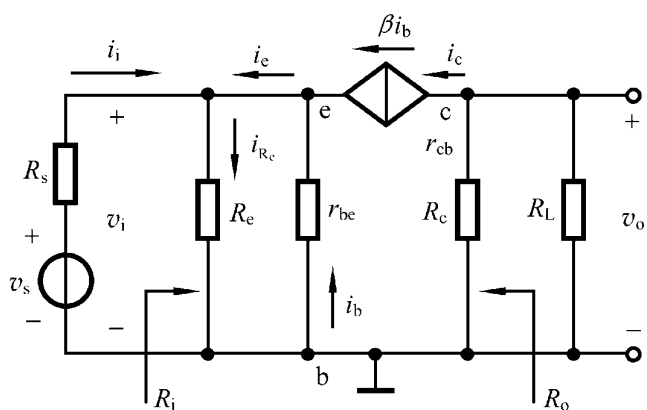
(3) 求放大电路动态指标

① 电压增益

输入回路: $v_i = -i_b r_{be}$

输出回路: $v_o = -\beta i_b R'_L$

电压增益: $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ $R'_L = R_c \parallel R_L$



3.2 三极管放大电路分析

15



➤ 共基和共集放大电路

2. 共基极放大电路

(3) 求放大电路动态指标

② 输入电阻

$$R'_i = r_{eb} = \frac{v_i}{-i_e}$$

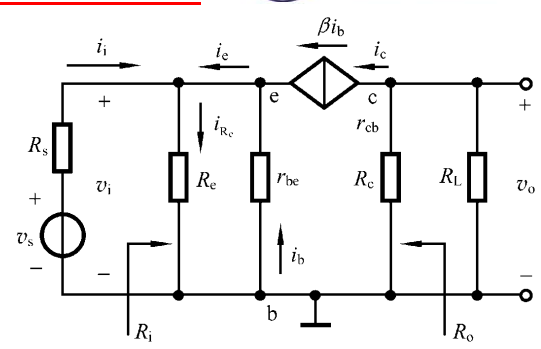
$$= \frac{-i_b r_{be}}{-(1+\beta)i_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_e \parallel r_{eb} = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1+\beta} \approx \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

③ 输出电阻

$$R_o \approx R_c$$

输入电阻小适合放大什么信号？



3.2 三极管放大电路分析

16



	共射极电路	共集电极电路	共基极电路
电路图			
电压增益 A_v	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R_e}$ ($R'_L = R_c \parallel R_L$)	$A_v = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L}$ ($R'_L = R_e \parallel R_L$)	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ ($R'_L = R_c \parallel R_L$)
v_o 与 v_i 的相位关系	反相	同相	同相
最大电流增益 A_i	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1+\beta$	$A_i \approx \alpha$
输入电阻	$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1+\beta)R_e]$	$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1+\beta)R'_L]$	$R_i = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1+\beta}$
输出电阻	$R_o \approx R_c$	$R_o = \frac{r_{be} + R'_s}{1+\beta} \parallel R_e$ ($R'_s = R_s \parallel R_{b1} \parallel R_{b2}$)	$R_o \approx R_c$
用途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频带电路

3.2 三极管放大电路分析

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

三种组态的特点及用途

共射极放大电路：

电压和电流增益都大于1，输入电阻在三种组态中居中，输出电阻与集电极电阻有很大关系。适用于低频情况下，作多级放大电路的中间级。

共集电极放大电路：

只有电流放大作用，没有电压放大，有电压跟随作用。在三种组态中，输入电阻最大，输出电阻最小，频率特性好。可用于输入级、输出级或缓冲级。

共基极放大电路：

只有电压放大作用，没有电流放大，有电流跟随作用，输入电阻小，输出电阻与集电极电阻有关。高频特性较好，常用于高频或宽频带低输入阻抗的场合，模拟集成电路中亦兼有电位移动的功能。

3.3 多级放大器（对应书本4.3节）

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的概念

为什么要采用多级放大？

因为单管放大器不能满足特定的**放大倍数**、**输入电阻**、**输出电阻**等各项性能指标的要求，所以为使输入的微弱信号进行放大后能获得足够的输出功率去推动负载运行，往往要采用多级放大电路，将信号逐级放大，直至得到能够驱动负载的输出信号。

例如：请设计满足如下条件的放大电路

- 1) 输入信号是一个内阻较大的电压源，其能输出的功率比较小
- 2) 要求电压和功率能够放大
- 3) 电路的负载阻抗会存在一定的变动（ $k\Omega$ ），要求输出电压（放大倍数）稳定

输入级、中间级、输出级需要具有什么特点？如何连接？

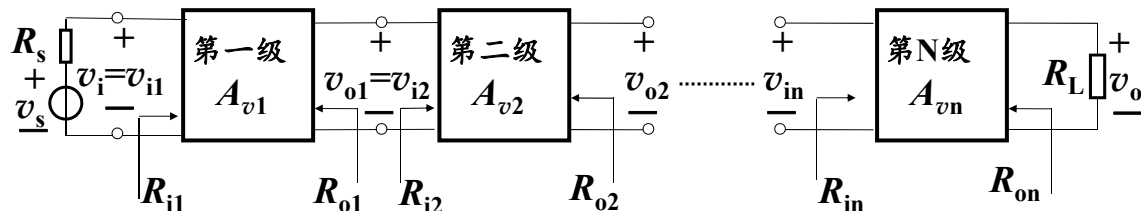
3.3 多级放大器

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的耦合



耦合方式：直接耦合；阻容耦合；变压器耦合；光电耦合。

多级放大电路对耦合电路要求：

- (1) 它的加入应尽量不影响前、后级间的静态工作点；
- (2) 把前一级的信号尽可能多地传到后一级；
- (3) 失真小。

3.3 多级放大器

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的耦合

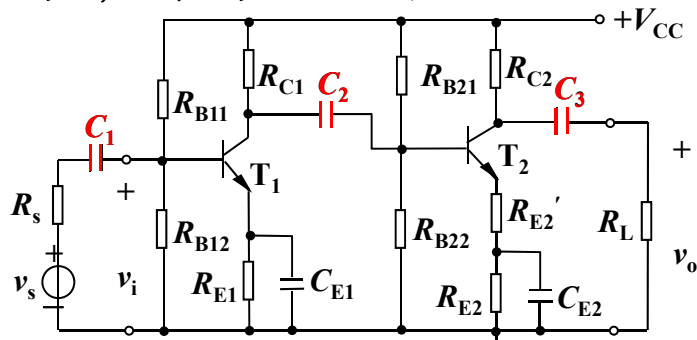
1. 阻容耦合

优点：

- ✓ 各级直流通路相互独立、互不影响；
- ✓ 只要耦合电容足够大，信号能够顺利地加到后一级。

缺点：

- ✓ 不适合传送缓慢变化的信号；
- ✓ 不适用于线性集成电路。



3.3 多级放大器

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

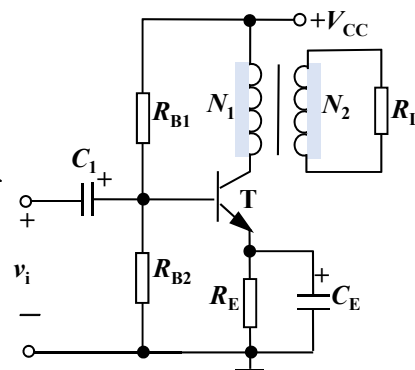
➤ 多级放大器的耦合

2. 变压器耦合

优点：它可以在传送信号的同时实现阻抗的变换，以获得较大的输出功率。另一方面，各级直流通道相互隔离。

缺点：频带窄，体积、重量大。

用途：多用于功放、中频调谐放大器以及多级放大器的输出级。



变压器耦合
共发射极放大电路

3.3 多级放大器

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的耦合

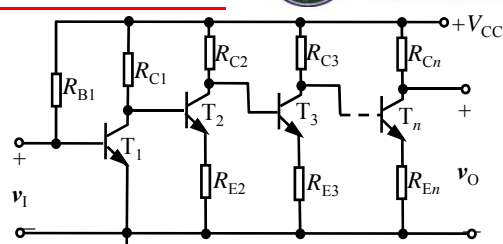
3. 直接耦合

直接耦合是将前一级的输出端直接（或经过电阻）接到下一级的输入端。

优点：简单。

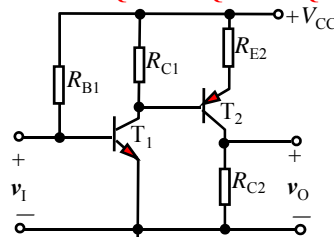
缺点：直流电位相互牵制；零点漂移。

用途：直流信号的放大、集成电路。



直接耦合放大电路

$$V_{CQn} > \dots > V_{CQ3} > V_{CQ2} > V_{CQ1}$$



NPN和PNP管混合使用

3.3 多级放大器

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的耦合

3.直接耦合

零点漂移：输入信号为零时，输出电压不为零且缓慢变化的现象。

产生零漂的主要原因：（1）温度变化引起，也称温漂

（2）电源电压波动

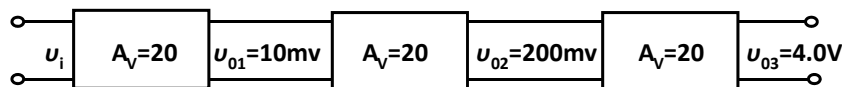
零点漂移特点

✓ 第一级的零漂影响最大。

✓ 直流放大器级数越多，放大倍数越大。输出端漂移现象越严重。

减少零漂的措施

➤ 选用高质量的硅管，并用温度补偿电路。采用差分放大电路。



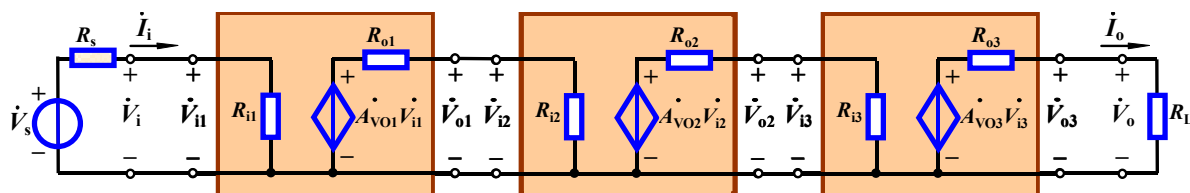
3.3 多级放大器

24



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 多级放大器的性能分析



$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_{i2}} \cdots \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{in}} = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdots \dot{A}_{vn}$$

$$R_1 = R_{i1} \parallel R_{L1} = R_{i2}$$

$$R_o = R_{on} \parallel R_{sn} = R_{o(n-1)}$$

注意：

A_{vi} 是考虑了级与级之间影响后的增益，即将后级输入电阻作为负载计算的增益。

A_{vi} 与图中 A_{voi} 概念不同！可先计算 A_{voi} ，再通过 R_{oi} 与 $R_{i(i+1)}$ 分压计算 V_i 。