

第二章 放大电路的基本原理

- 2.1 放大的概念
- 2.2 放大电路的主要技术指标
- 2.3 单管共发射极放大电路
- 2.4 放大电路的基本分析方法
- 2.5 静态工作点的稳定问题
- 2.6 放大电路的三种基本组态
- 2.8 多级放大电路

2.1 放大的概念

一、放大的概念



扩音机示意图

放大的对象：变化量。

放大的本质：能量的控制和转换。

放大电路的必备元件：有源器件（晶体管或场效应管）。

放大的前提：不失真。（晶体管工作在合适区域）

2.2 放大电路的主要技术指标

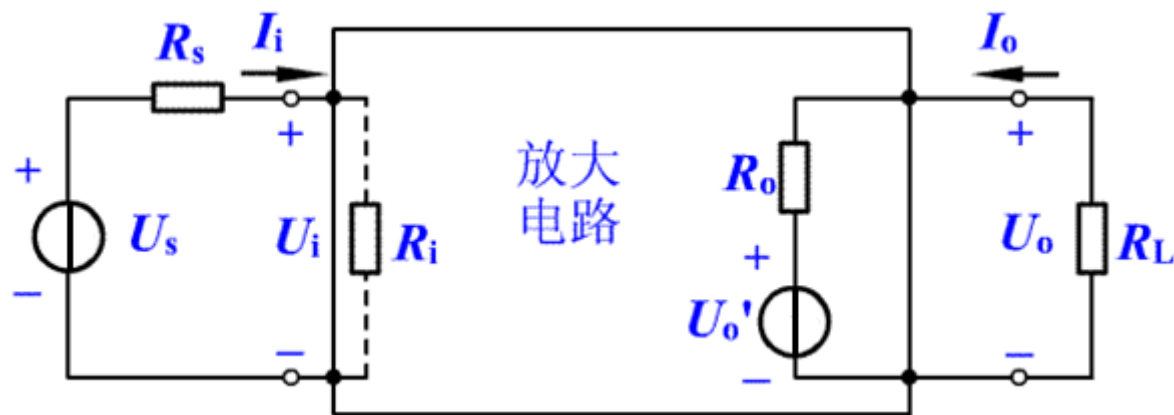
一、放大倍数

电压放大倍数 (\dot{A}_u)

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

电流放大倍数 (\dot{A}_i)

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$



放大电路技术指标测试示意图

二、最大输出幅度

在输出波形没有明显失真情况下放大电路能够提供给负载的最大输出电压(或最大输出电流)可用峰-峰值表示, 或有效值表示(U_{om} 、 I_{om})。

三、非线性失真系数 D

所有谐波总量与基波成分之比, 即

$$D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1}$$

四、输入电阻 R_i

从放大电路输入端看进去的等效电阻。

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

五、输出电阻 R_o

从放大电路输出端看进去的等效电阻。

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{U}_S=0 \\ R_L=\infty}}$$

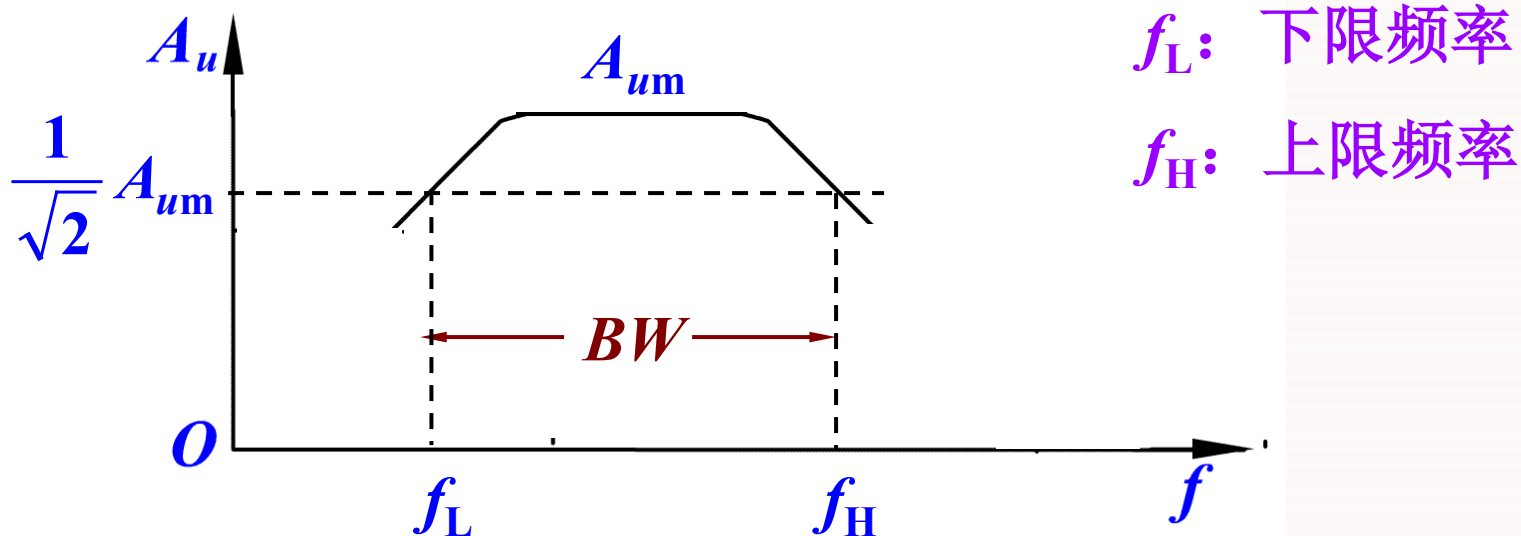
测量 R_o ：

输入端正弦电压 \dot{U}_i ，分别测量空载和输出端接负载 R_L 的输出电压 \dot{U}'_o 、 \dot{U}_o 。

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}'_o R_L}{R_o + R_L} \quad \longrightarrow \quad R_o = \left(\frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L$$

输出电阻愈小，带载能力愈强。

六、通频带



七、最大输出功率与效率

输出不产生明显失真的最大输出功率。用符号 P_{om} 表示。

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V}$$

η : 效率

P_V : 直流电源消耗的功率

2.3 单管共发射极放大电路

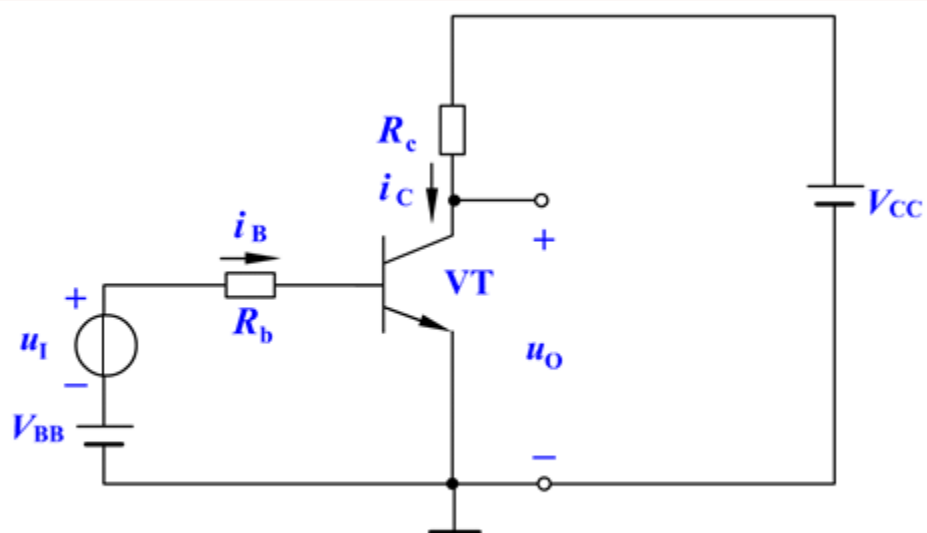
2.3.1 单管共发射极放大电路的组成

VT: NPN 型三极管，为放大元件；

V_{CC} : 为输出信号提供能量；

R_C : 当 i_C 通过 R_C ，将电流的变化转化为集电极电压的变化，传送到电路的输出端；

V_{BB} 、 R_b : 为发射结提供正向偏置电压，提供静态基极电流(静态基流)。



单管共射放大电路的原理电路

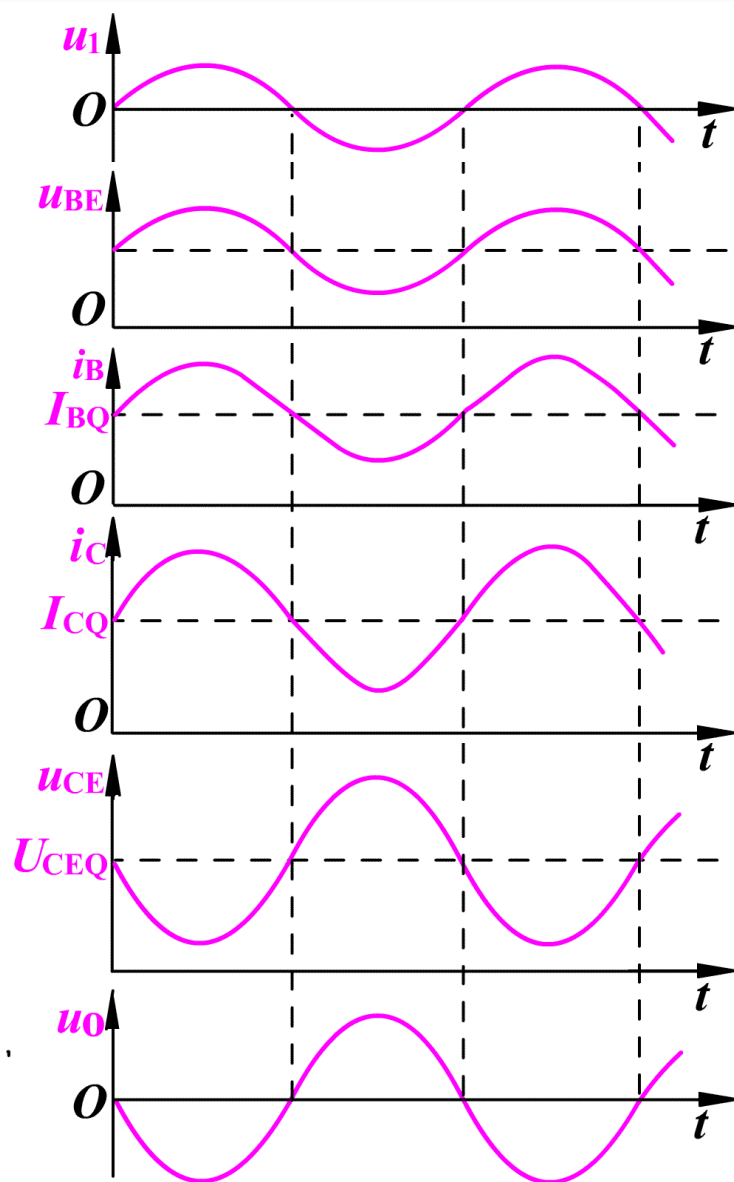
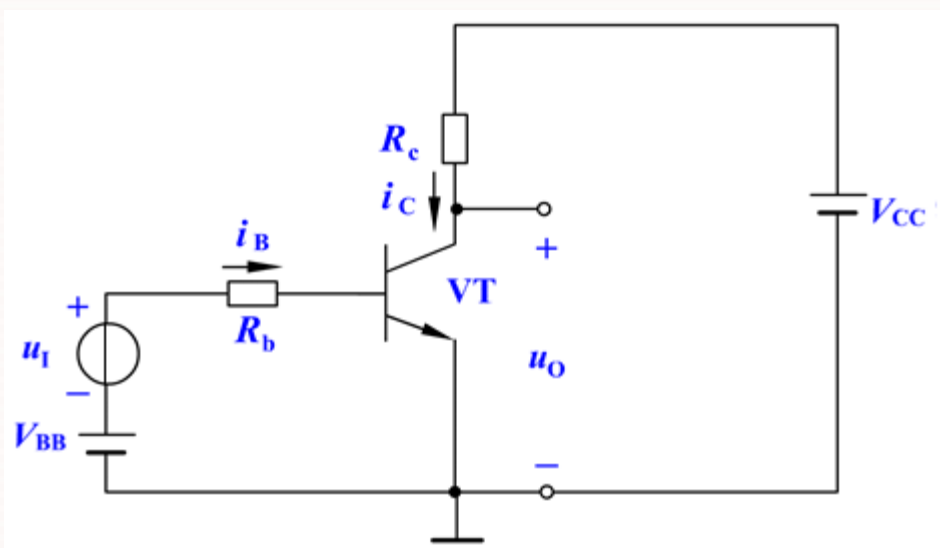
2.3.2 单管共发射极放大电路的工作原理

一、放大作用：

$$\Delta u_I \rightarrow \Delta u_{BE} \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C (= \beta \Delta i_B)$$

$$\Delta u_O \leftarrow \Delta u_{CE} (= -\Delta i_C R_C) \leftarrow \downarrow$$

$\Delta u_O > \Delta u_I$ 实现了放大作用

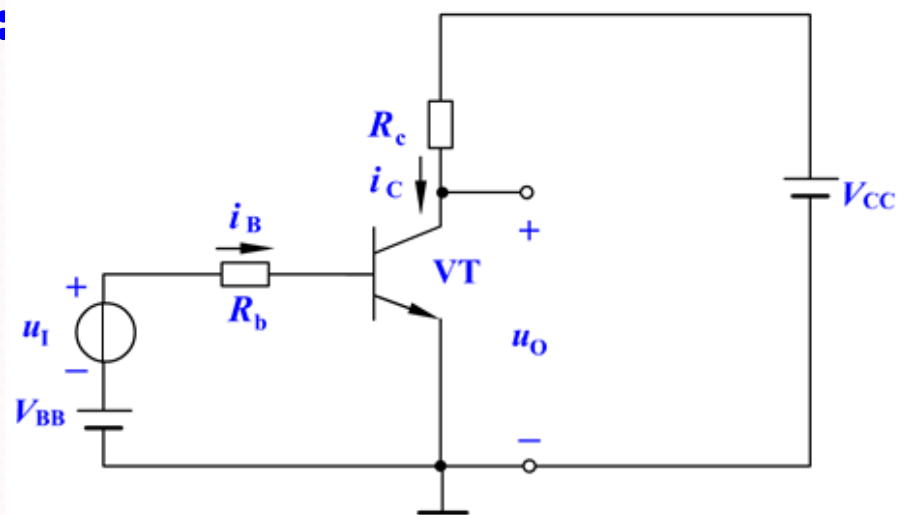


第二章 放大电路的基本原理

二、组成放大电路的原则：

1. 外加直流电源的极性必须使发射结正偏，集电结反偏。则有：

$$\Delta i_C = \beta \Delta i_B$$



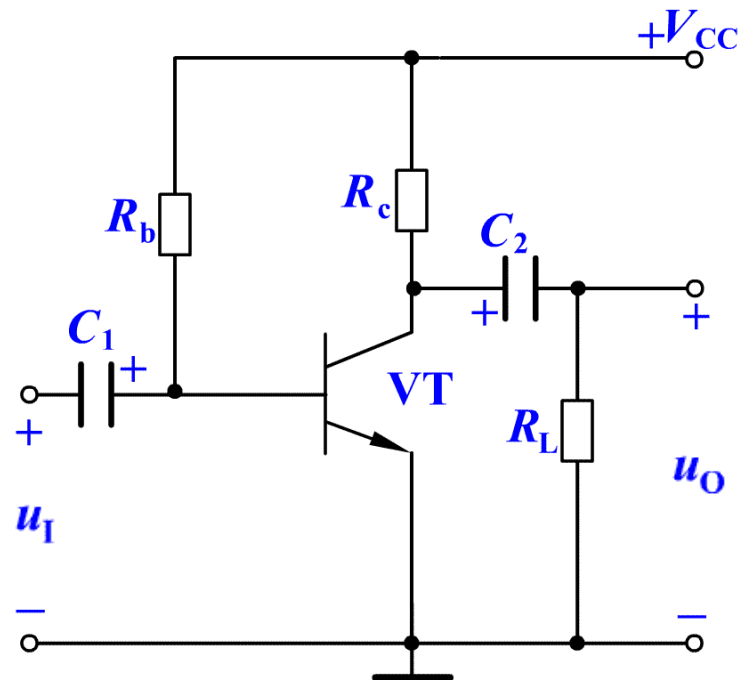
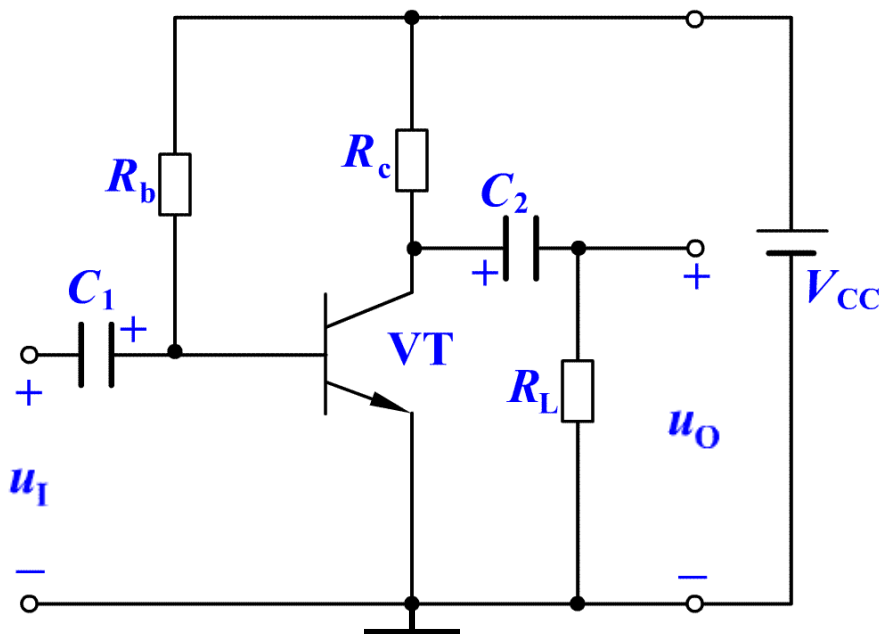
2. 输入回路的接法应使输入电压 Δu_I 能够传送到三极管的基极回路，使基极电流产生相应的变化量 Δi_B 。

3. 输出回路的接法应使变化量 Δi_C 能够转化为变化量 Δu_{CE} ，并传送到放大电路的输出端。

三、原理电路的缺点：

1. 双电源供电； 2. u_I 、 u_O 不共地。

四、单管共射放大电路



单管共射放大电路

C_1 、 C_2 ：为隔直电容或耦合电容； R_L ：为负载电阻。

该电路也称阻容耦合单管共射放大电路。

2.4 放大电路的基本分析方法

由前述分析可知放大电路中：

(1) 直流量 U_{BE} 、 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 不随信号的变化而变化；

(2) 交流量 u_{be} 、 i_b 、 i_c 、 u_{ce} 随信号的变化而变化。

在传输放大过程中，交流量驮载在直流量之上，但在输出端取出的交流量又是分离的，因此分析放大电路时，可采取交、直流状态分开讨论的办法。

放大电路的分析：先静态分析，分析放大电路的静态工作点，基于直流通路分析；后动态分析，分析放大电路的动态参数，基于交流通路分析。

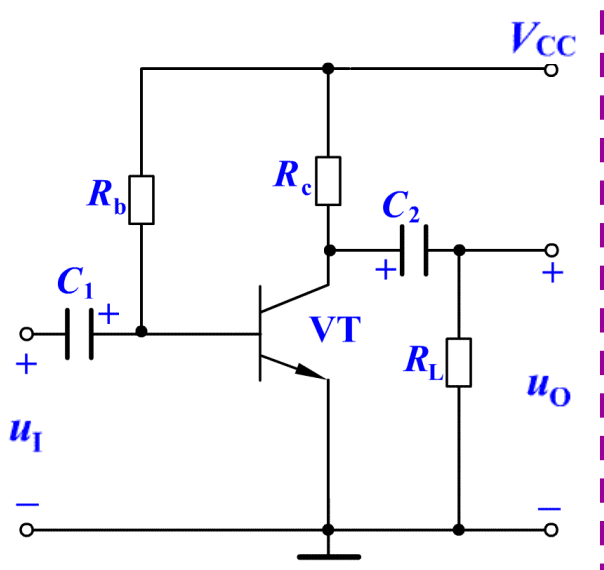
静态工作点：

$u_i=0$ 时，输入特性曲线上的点 (U_{BEQ}, I_{BQ}) 和输出特性曲线上的点 (U_{CEQ}, I_{CQ})，称之为静态工作点 Q 。

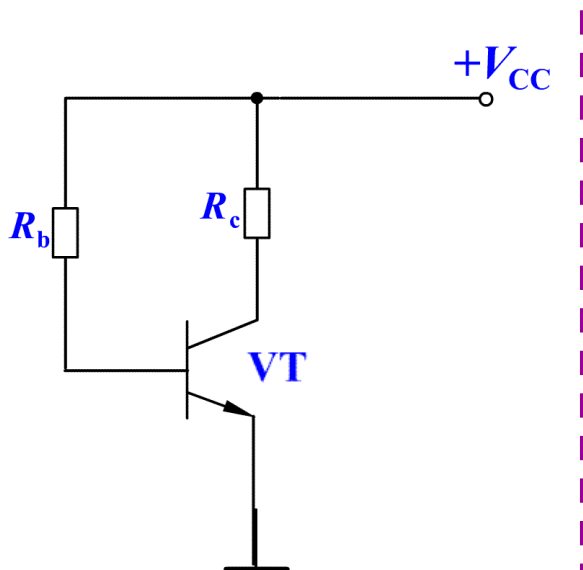
2.4.1 直流通路与交流通路

直流通路：直流电流流经的通路，用于静态分析。对于直流通路：电容视为开路；电感视为短路；信号源视为短路，但保留其内阻。

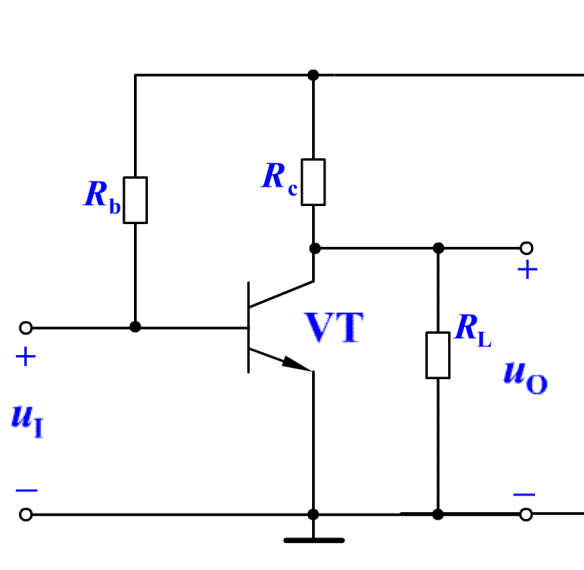
交流通路：交流电流流经的通路，用于动态分析。对于交流通路：大容量电容（耦合电容、旁路电容等）视为短路；直流电源视为短路。



例题电路



直流通路



交流通路

基本分析方法两种

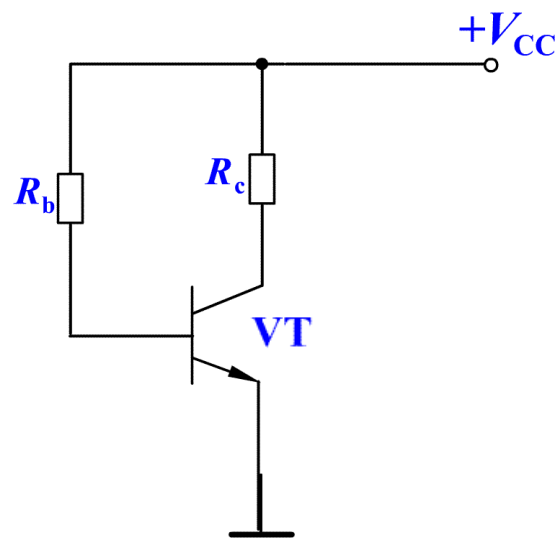
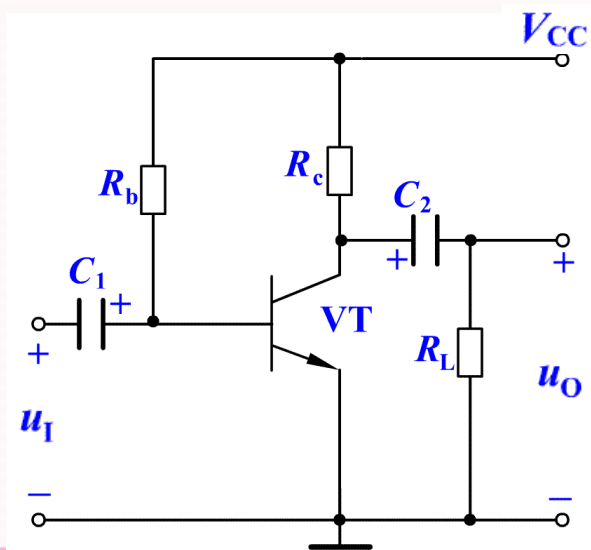
图解法
等效电路法

2.4.2 图解法

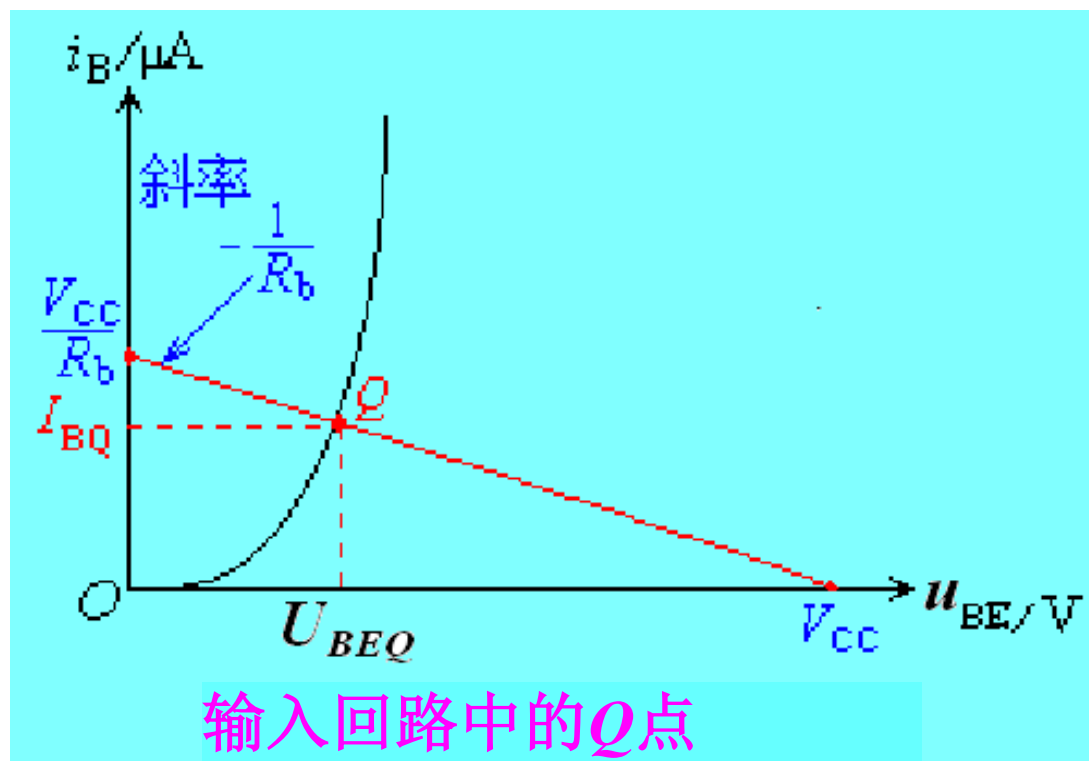
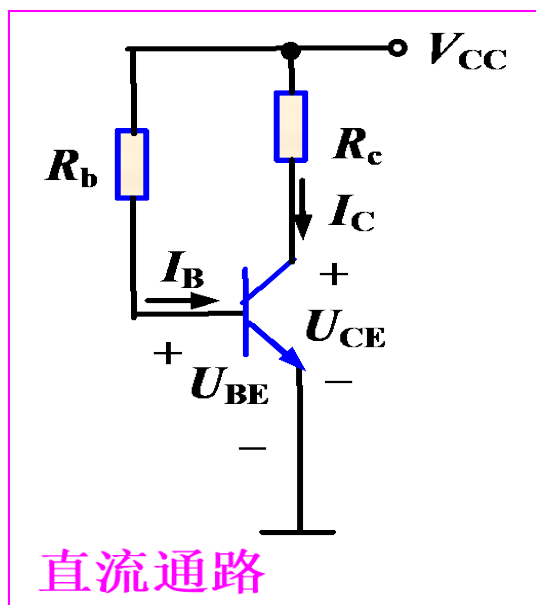
在三极管的输入、输出特性曲线上直接用作图的方法求解放大电路的工作情况。

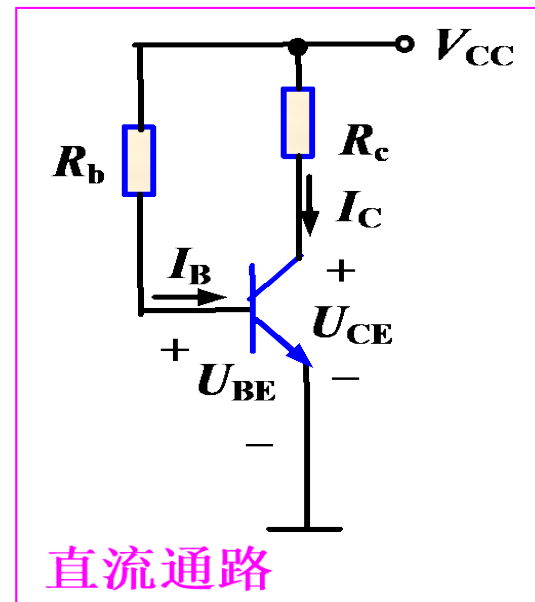
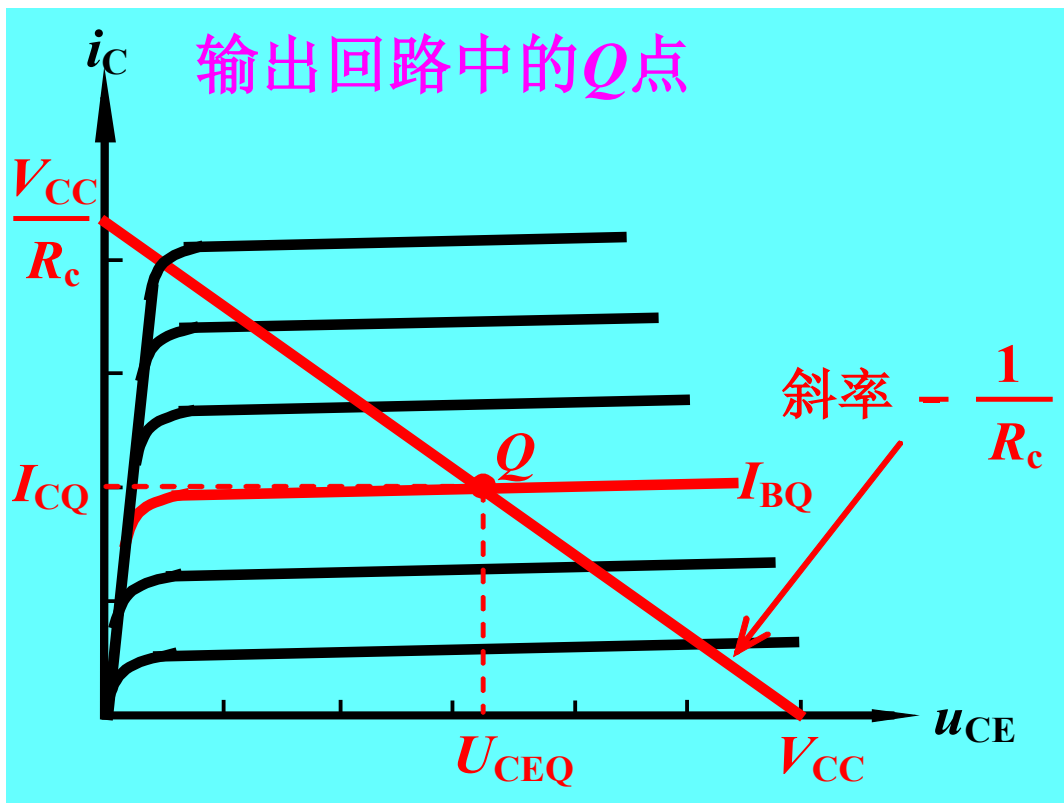
一、图解法的过程

(一) 图解分析静态工作点



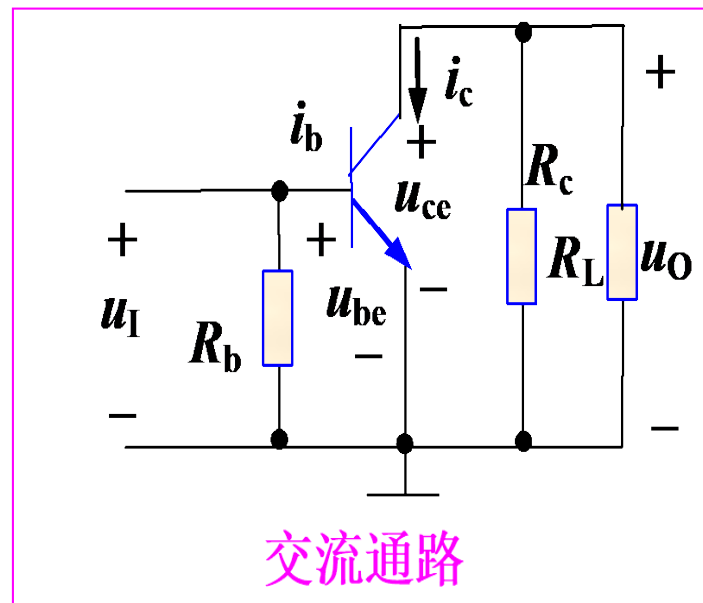
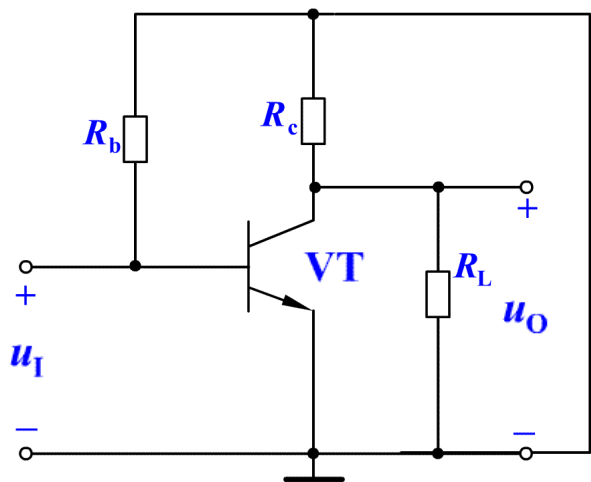
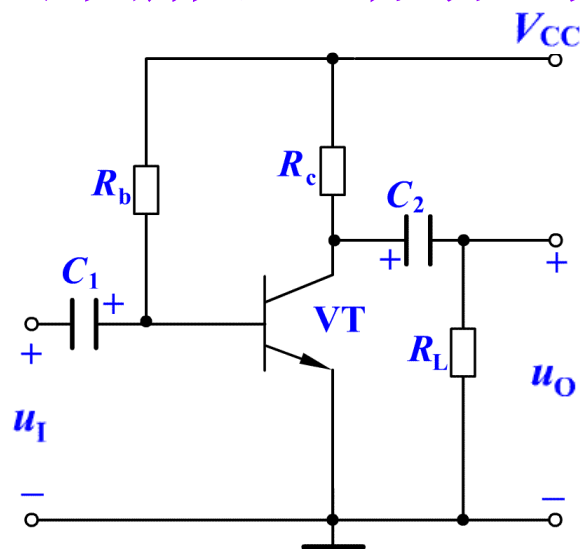
- 列输入回路方程: $U_{BE} = V_{CC} - I_B R_b$
- 在输入特性曲线上, 作直线 $U_{BE} = V_{CC} - I_B R_b$, 两线的交点即是 Q 点, 得到 I_{BQ} 。如图所示。





- 列输出回路方程: $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$
- 在输出特性曲线上, 作出直流负载线 $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$, 与 I_{BQ} 曲线的交点即为 Q 点, 从而得到 U_{CEQ} 和 I_{CQ} 。

(一) 图解法进行动态分析



- 由交流通路得纯交流负载线：

$$u_{ce} = -i_c \cdot (R_c // R_L)$$

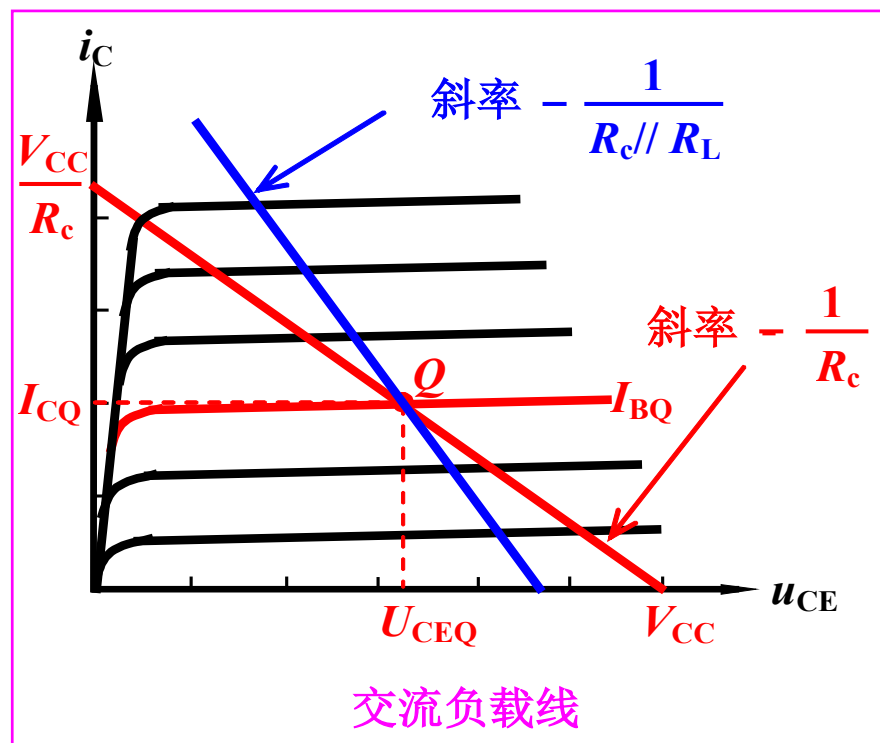
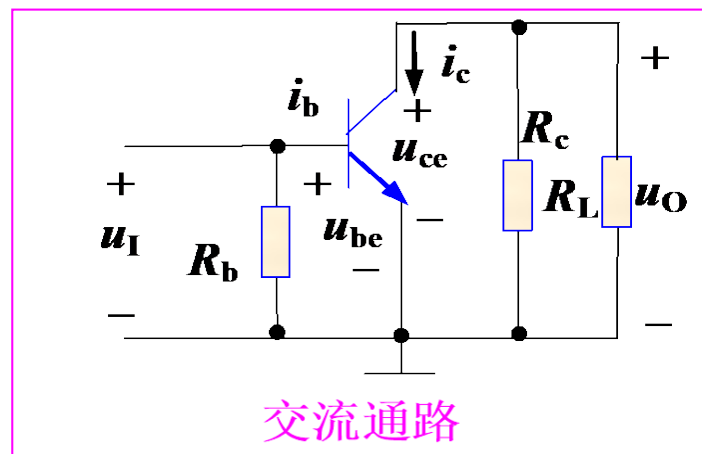
$$= -i_c \cdot R'_L$$

$R'_L = R_L // R_c$ ，是交流负载电阻。

因为交流负载线必过 Q 点，

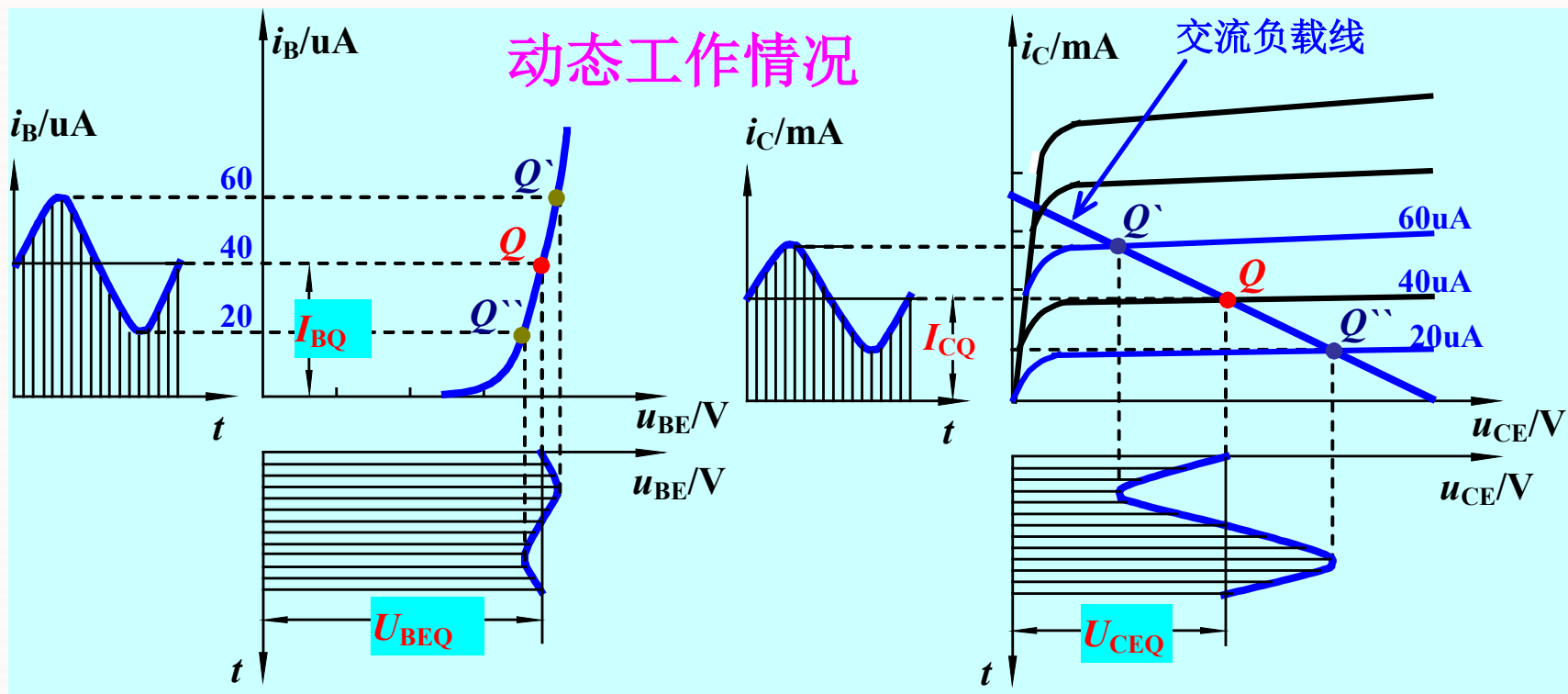
即 $U_{CEQ} = -I_{CQ} R'_L$

过输出特性曲线上的 Q 点做一条斜率为 $-1/R'_L$ 直线，该直线即为交流负载线。



第二章 放大电路的基本原理

- 动态工作情况如图所示。



思考题：（1）动态工作时， i_B 、 i_C 的实际电流方向是否改变？ u_{CE} 的实际电压极性是否改变？（2）是否可以从图中求出电压放大倍数？

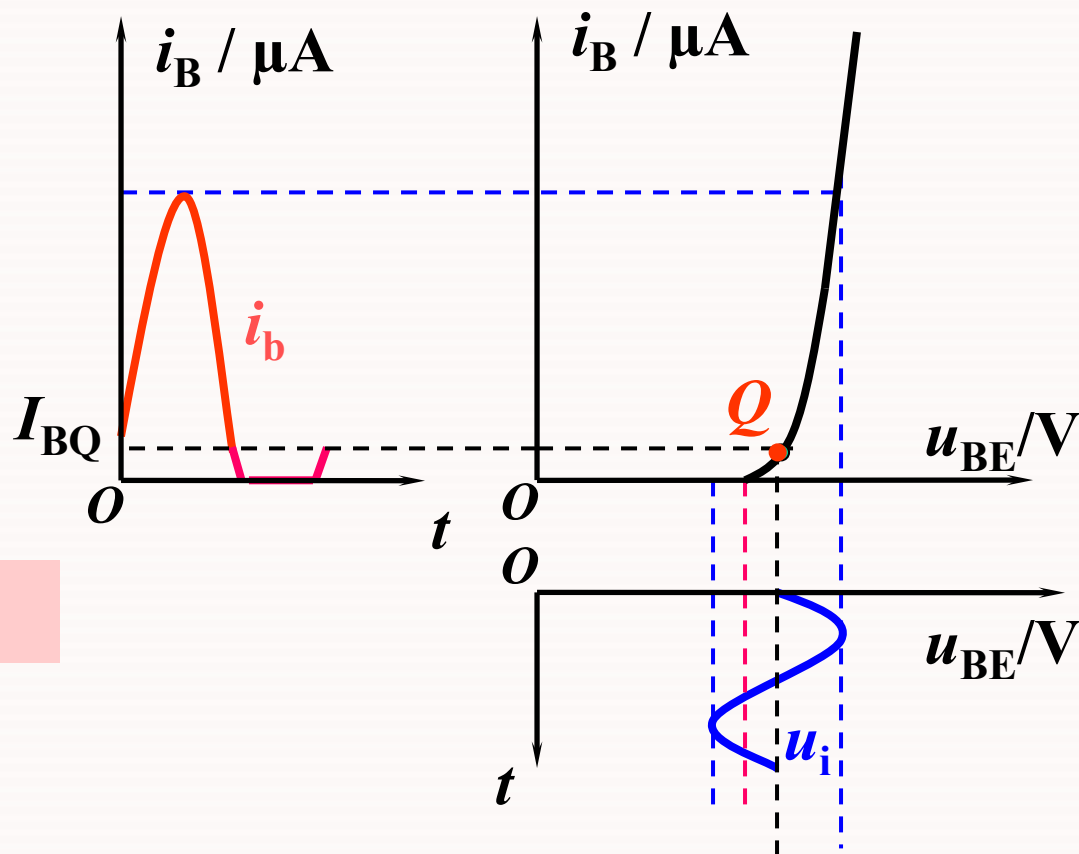
二、图解法的应用

(一) 用图解法分析非线性失真

1. 静态工作点
过低, 引起 i_B 、 i_C 、 u_{CE} 的波形失真

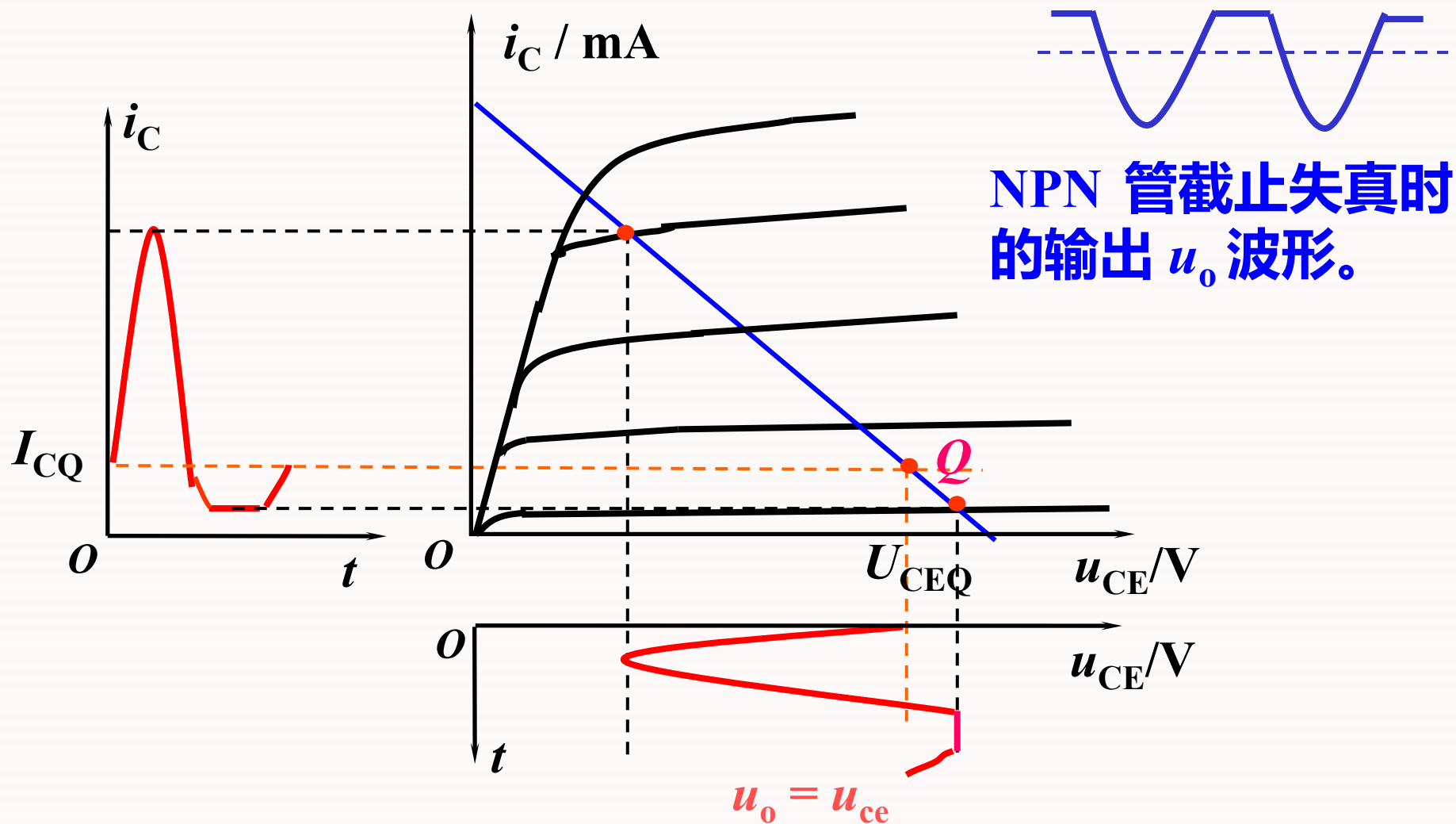
—— 截止失真

结论: i_B 波形失真



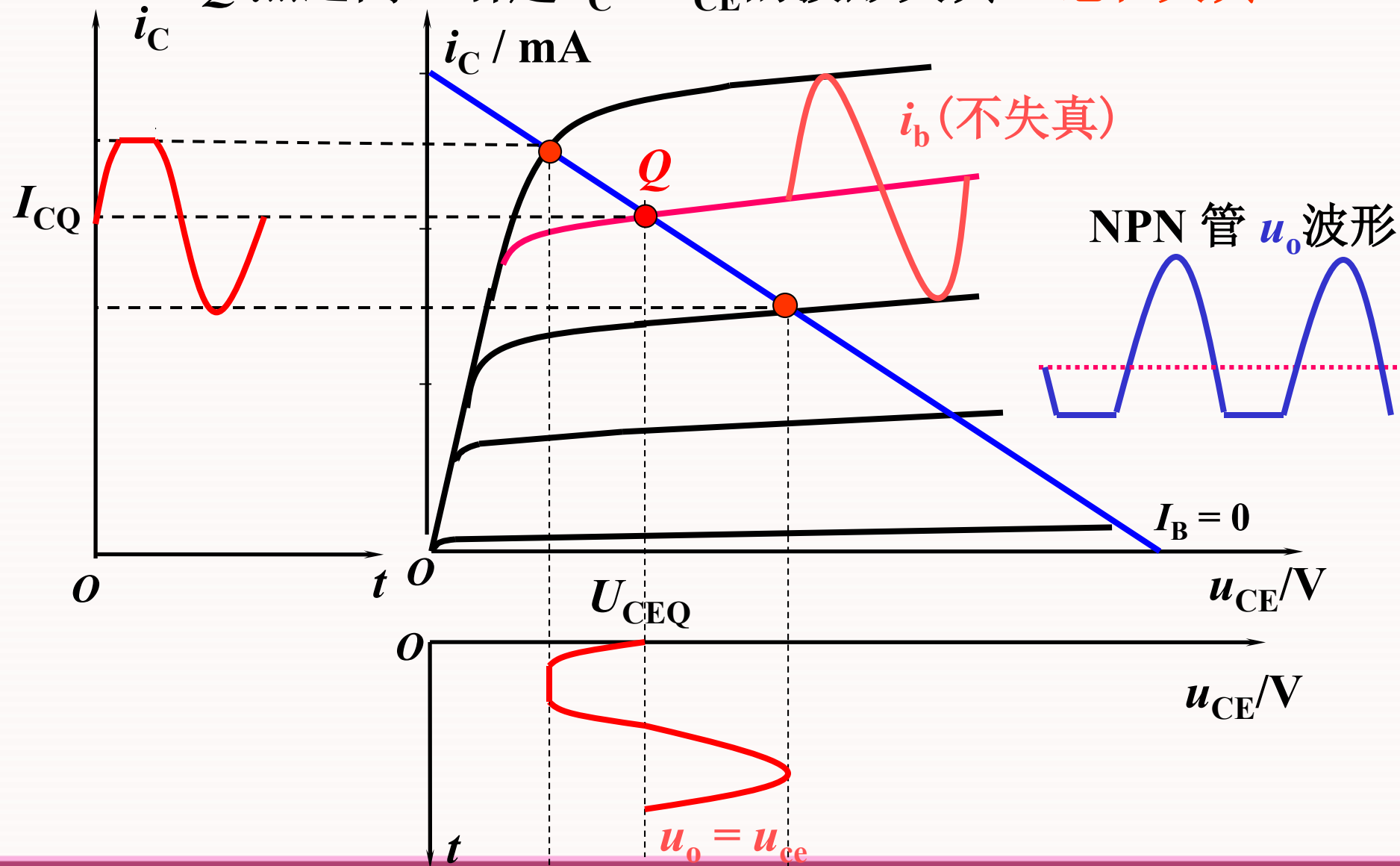
第二章 放大电路的基本原理

i_C 、 u_{CE} (u_o) 波形失真



第二章 放大电路的基本原理

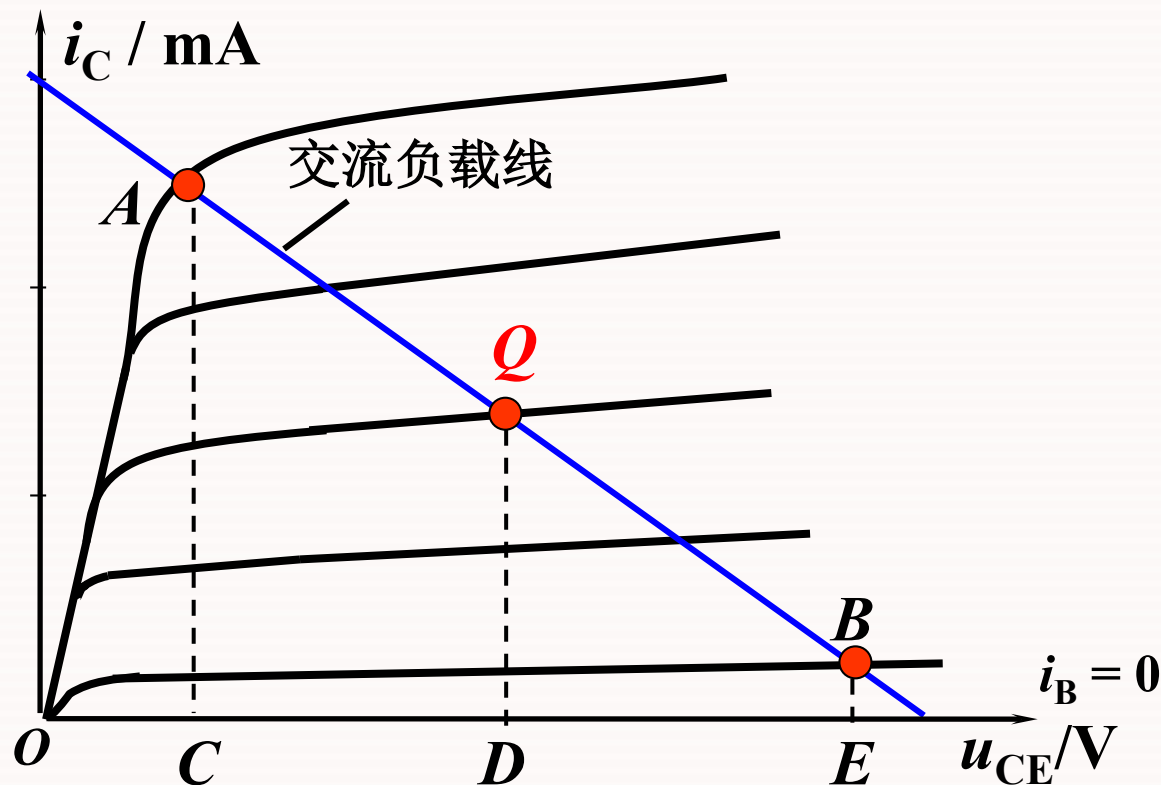
2. Q 点过高, 引起 i_C 、 u_{CE} 的波形失真—饱和失真



(二) 用图解法估算最大输出幅度

输出波形没有明显失真时能够输出最大电压。即输出特性的 A 、 B 所限定的范围。

$$U_{om} = \frac{CD}{\sqrt{2}} = \frac{DE}{\sqrt{2}}$$

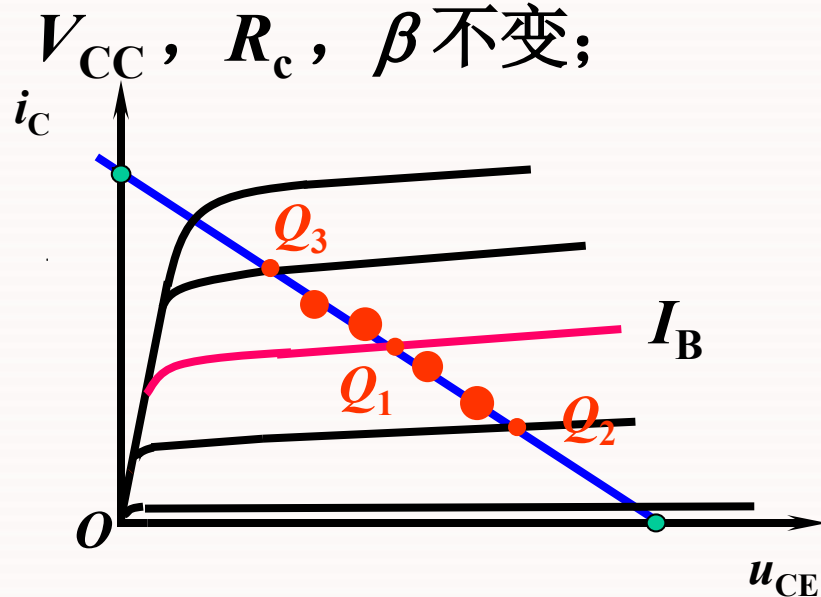


Q 尽量设在线段 AB 的中点。则 $AQ = QB$, $CD = DE$

第二章 放大电路的基本原理

(三) 用图解法分析电路参数对静态工作点的影响

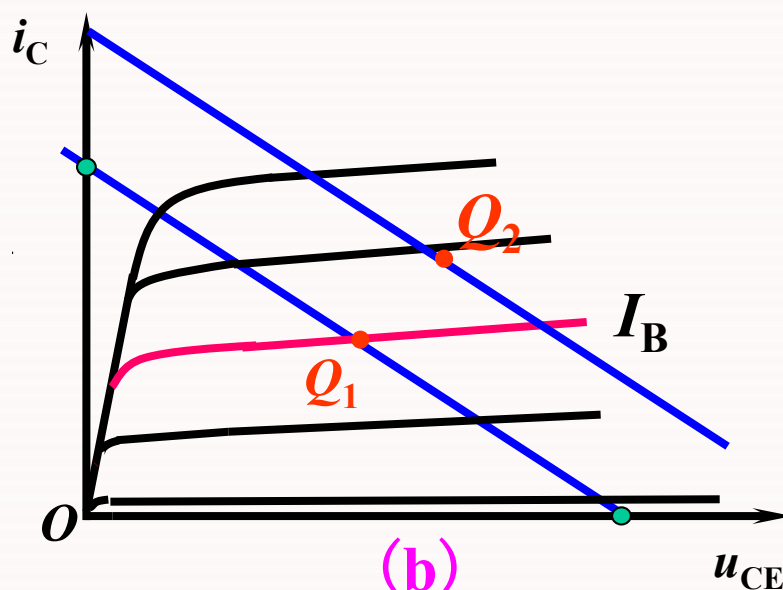
1. 改变 R_b , 保持 V_{CC} , R_c , β 不变;



(a)

R_b 增大, Q 点下移;
 R_b 减小, Q 点上移;

2. 改变 V_{CC} , 保持 R_b , R_c , β 不变;

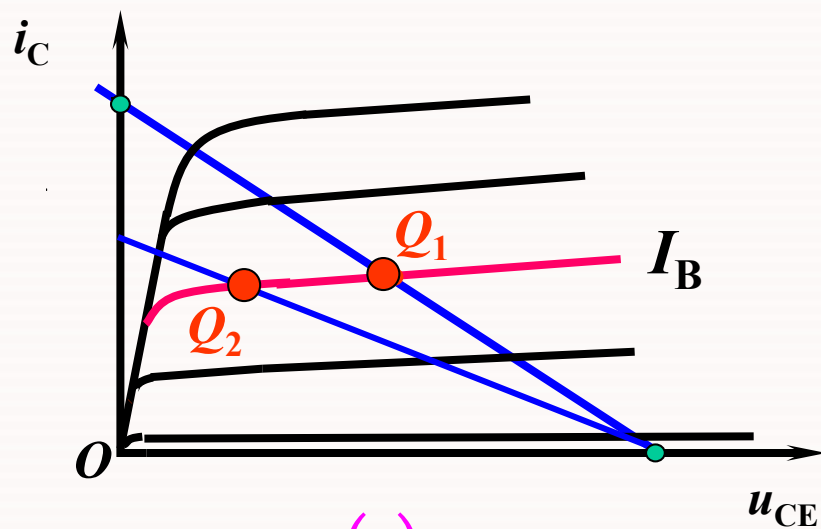


(b)

升高 V_{CC} , 直流负载线平行右移, 动态工作范围增大, 但管子的动态功耗也增大。

第二章 放大电路的基本原理

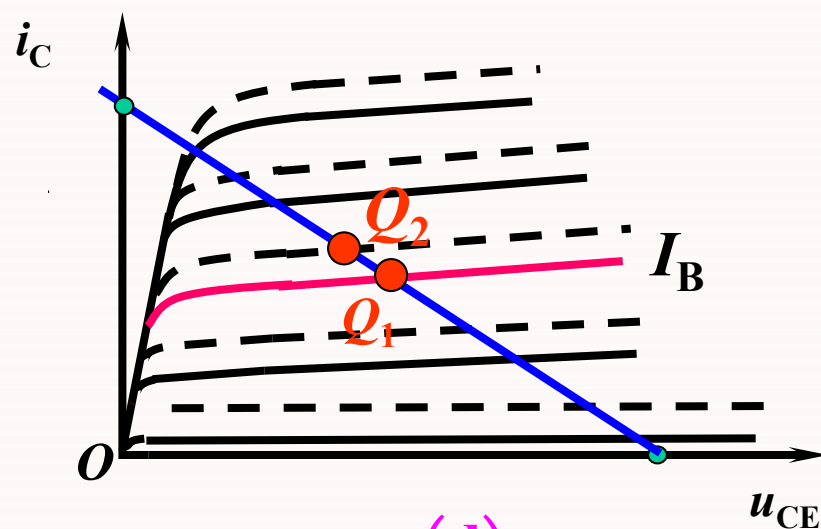
3. 改变 R_c , 保持 R_b , V_{CC} , β 不变;



(c)

增大 R_c , 直流负载线斜率改变, 则 Q 点向饱和区移近。

4. 改变 β , 保持 R_b , R_c , V_{CC} 不变;



(d)

增大 β , I_{CQ} 增大, U_{CEQ} 减小, 则 Q 点移近饱和区。

图解法小结

1. 能够形象地显示静态工作点的位置与非线性失真的关系；
2. 方便估算最大输出幅值的数值；
3. 可直观表示电路参数对静态工作点的影响；
4. 有利于对静态工作点 Q 的检测等。

2.4.3 静态工作点的近似计算

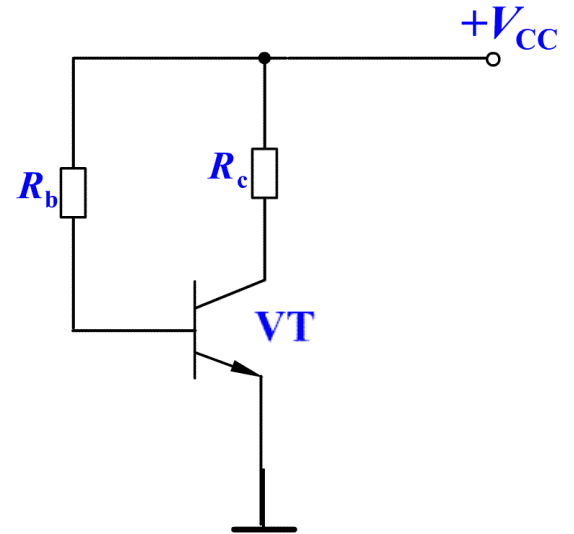
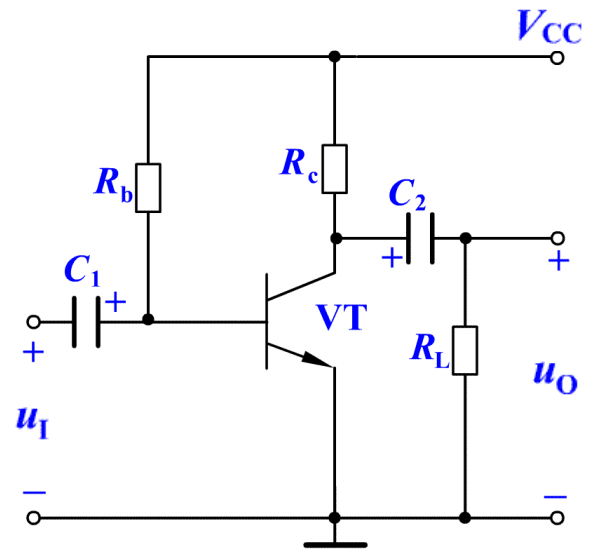
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

硅管 $U_{BEQ} = (0.6 \sim 0.8) \text{ V}$

锗管 $U_{BEQ} = (0.1 \sim 0.2) \text{ V}$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$



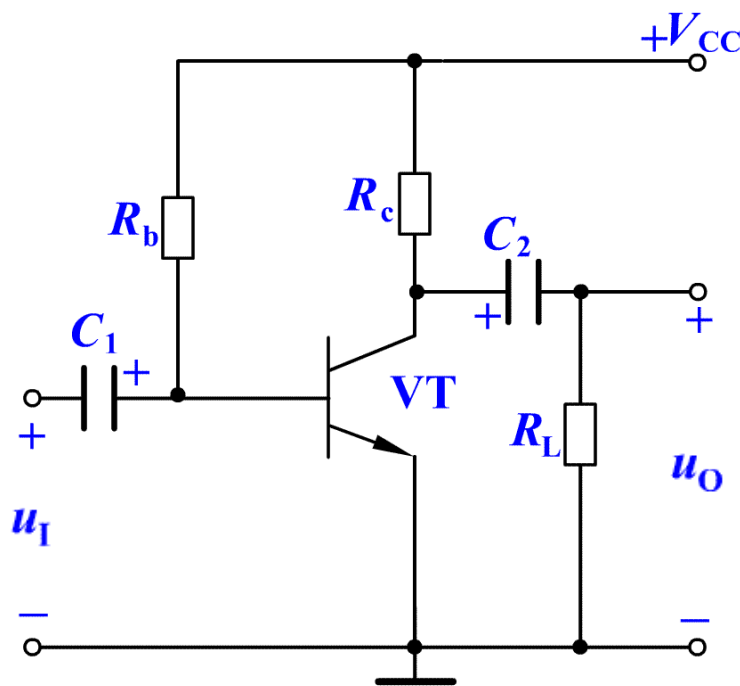
【例】 图示单管共射放大电路中， $V_{CC} = 12\text{ V}$ ， $R_c = 3\text{ k}\Omega$ ， $R_b = 280\text{ k}\Omega$ ，NPN 硅管的 $\beta = 50$ ，试估算静态工作点。

解： 设 $U_{BEQ} = 0.7\text{ V}$

$$\begin{aligned} I_{BQ} &= \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \\ &= \left(\frac{12 - 0.7}{280} \right) \text{ mA} \\ &= 40\text{ }\mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{CQ} &\approx \beta I_{BQ} \\ &= (50 \times 0.04) \text{ mA} = 2\text{ mA} \end{aligned}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = (12 - 2 \times 3) \text{ V} = 6\text{ V}$$



2.4.4 微变等效电路法

晶体管在小信号(微变量)情况下工作时,可以在静态工作点附近的小范围内用直线段近似地代替三极管的特性曲线,三极管就可以等效为一个线性元件。这样就可以将非线性元件晶体管所组成的放大电路等效为一个线性电路。

微变等效条件 { 研究的对象仅仅是变化量
信号的变化范围很小

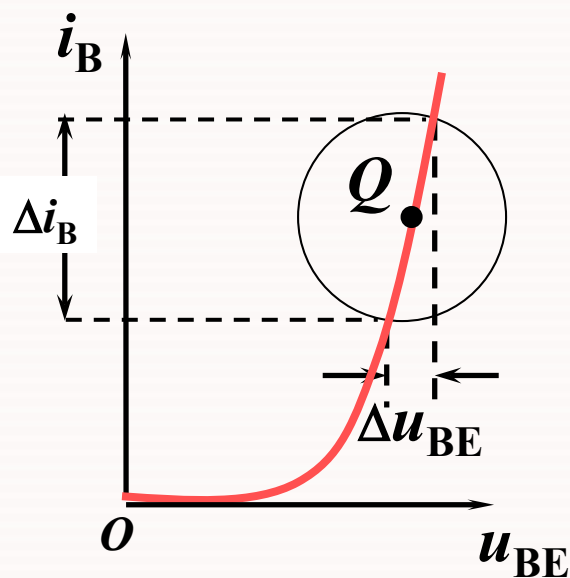
第二章 放大电路的基本原理

一、简化的 h 参数微变等效电路

(一) 三极管的微变等效电路

1. 输入电路

晶体管的输入特性曲线 \rightarrow Q 点附近的工作段
近似地看成直线 \rightarrow 可认为 Δu_{BE} 与 Δi_B 成正比



$$r_{be} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

r_{be} ：晶体管的输入电阻。

在小信号的条件下， r_{be} 是一常数。晶体管的输入电路可用 r_{be} 等效代替。

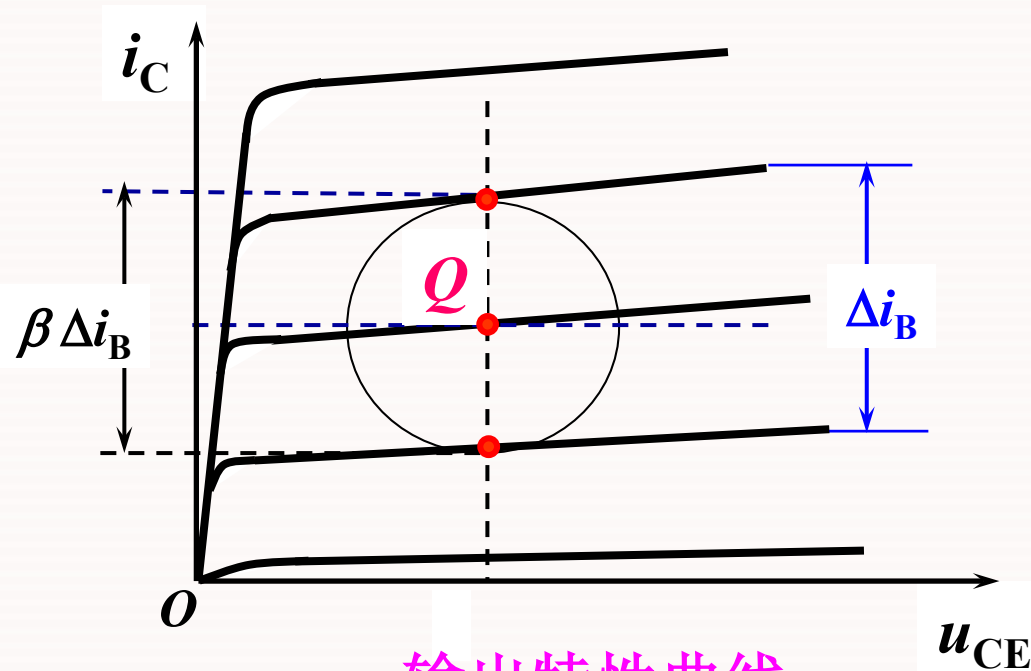
输入特性曲线的
局部线性化

2. 输出电路

假设在 Q 点附近特性曲线基本上是水平的 (Δi_C 与 Δu_{CE} 无关)，数量关系上， Δi_C 比 Δi_B 大 β 倍；

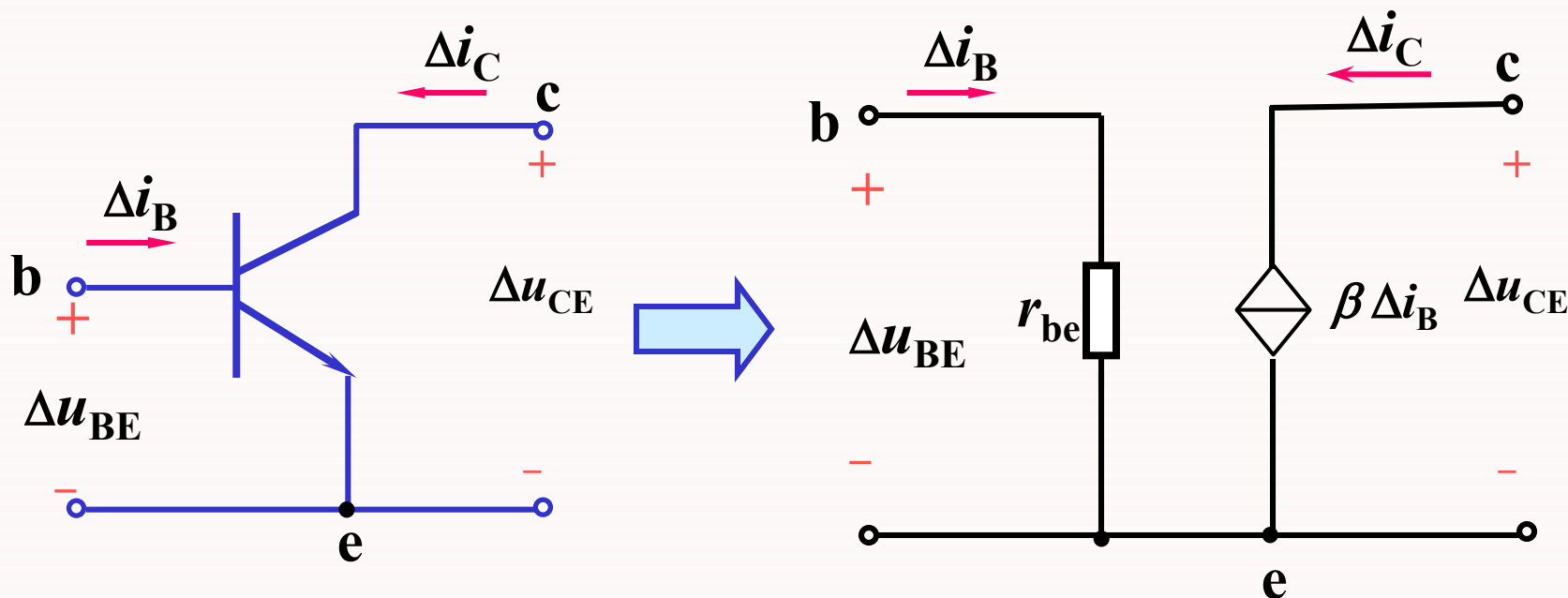
从三极管输出端看，
可以用 $\beta \Delta i_B$ 恒流源代替三极管；

该恒流源为受控源；
为 i_B 对 i_C 的控制。



输出特性曲线
的局部线性化

3. 三极管的简化参数等效电路

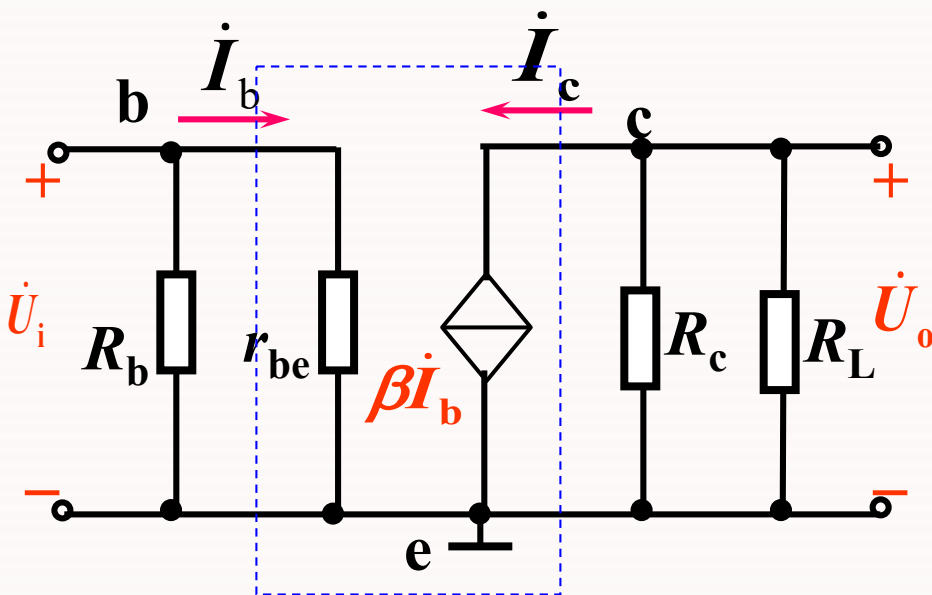
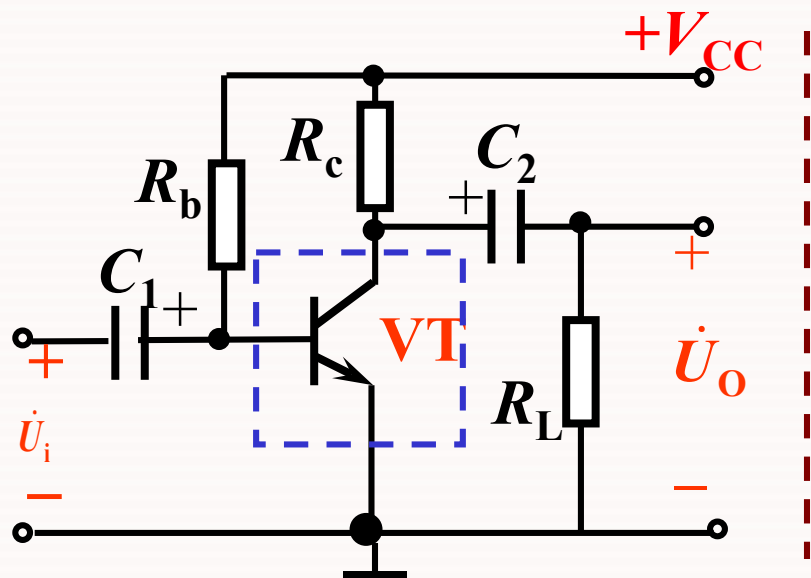


三极管的简化 h 参数等效电路

注意： 这里忽略了 u_{CE} 对 i_C 与输出特性的影响，在大多数情况下，简化的微变等效电路对于工程计算来说误差很小。

第二章 放大电路的基本原理

4. 电压放大倍数 A_u ; 输入电阻 R_i ; 输出电阻 R_o



单管共射放大电路的等效电路

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad \text{而} \quad \dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

$$\text{所以} \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

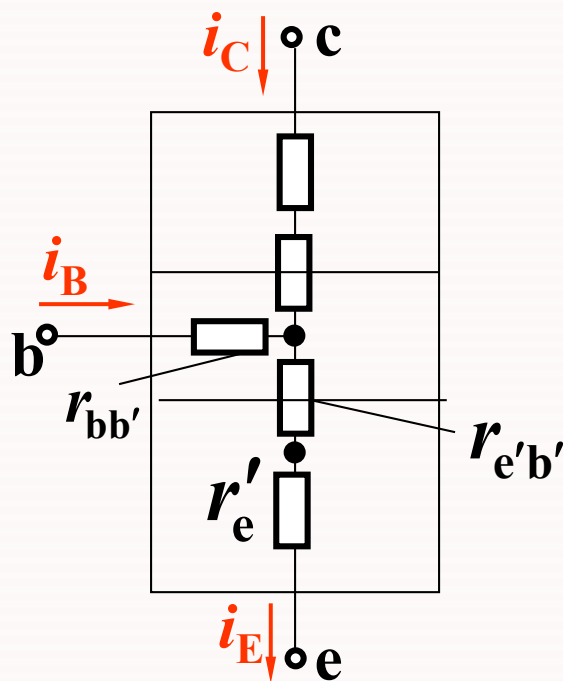
$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = \beta \dot{I}_b$$

$$(R'_L = R_c // R_L)$$

$$R_i = r_{be} // R_b,$$

$$R_o = R_c$$

(二) r_{be} 的近似估算公式



$r_{bb'}$ ：基区体电阻。

$r_{e'b'}$ ：基射之间结电阻。

r_e' ：发射区体电阻，一般只有几欧姆，可忽略。

$$r_{e'b'} = \frac{U_T}{I_{EQ}} \approx \frac{26}{I_{EQ}}$$

U_T ：温度电压当量。

$$r_{be} = \frac{du_{BE}}{di_B} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

低频、小功率管 $r_{bb'}$ 约为 300Ω 。

因：

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$r_{be} \approx 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

1. 当 I_{EQ} 一定时， β 愈大则 r_{be} 也愈大，选用 β 值较大的三极管其 A_u 并不能按比例地提高；
2. 当 β 值一定时， I_{EQ} 愈大则 r_{be} 愈小，可以得到较大的 A_u ，这种方法比较有效。

(三) 等效电路法的步骤(归纳)

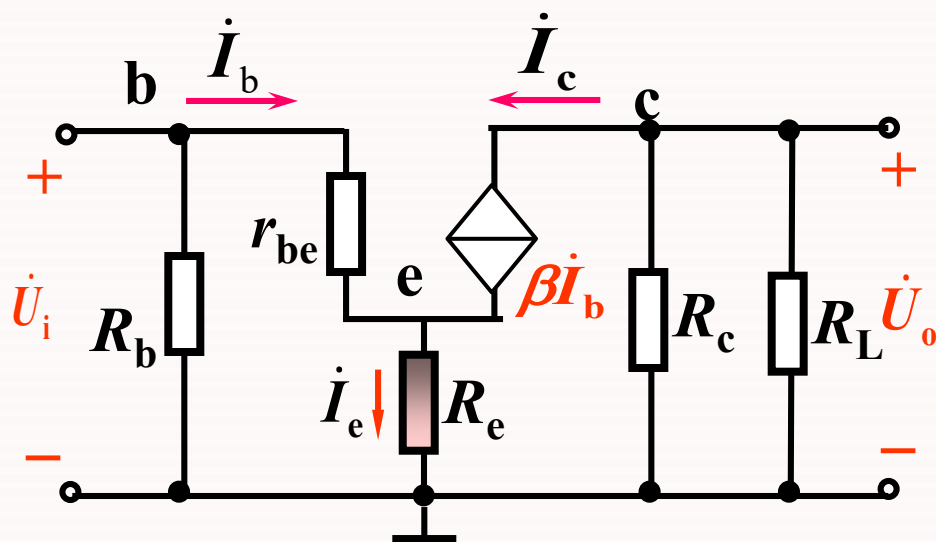
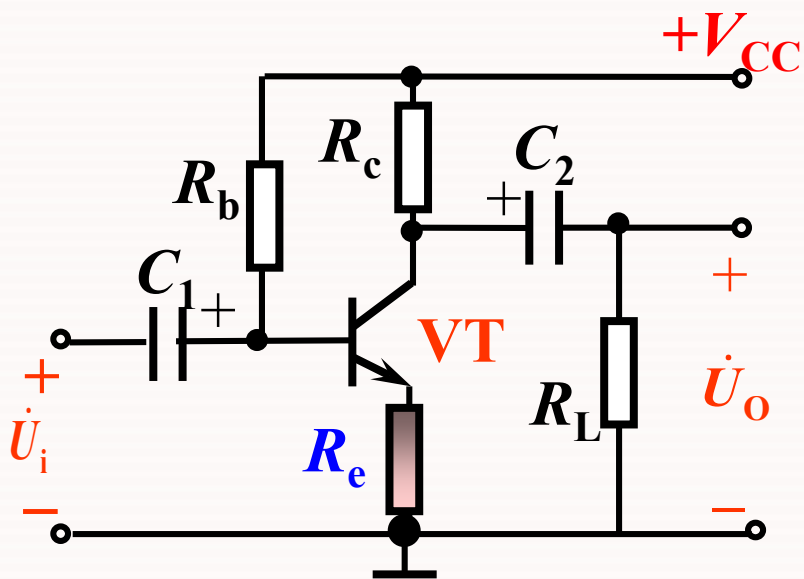
1. 首先利用图解法或近似估算法确定放大电路的静态工作点 Q 。
2. 求出静态工作点处的微变等效电路参数 β 和 r_{be} 。
3. 画出放大电路的微变等效电路。可先画出三极管的等效电路，然后画出放大电路其余部分的交流通路。
4. 列出电路方程并求解。

第二章 放大电路的基本原理

二、微变等效电路法的应用

例：接有发射极电阻的单管放大电路，计算电压放大倍数和输入、输出电阻。

1. 计算电压放大倍数 \dot{A}_u



接有发射极电阻的放大电路

第二章 放大电路的基本原理

根据微变等效电路列方程

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e \quad \text{其中} \quad \dot{I}_e = (1 + \beta) \dot{I}_b$$

$$\text{而} \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

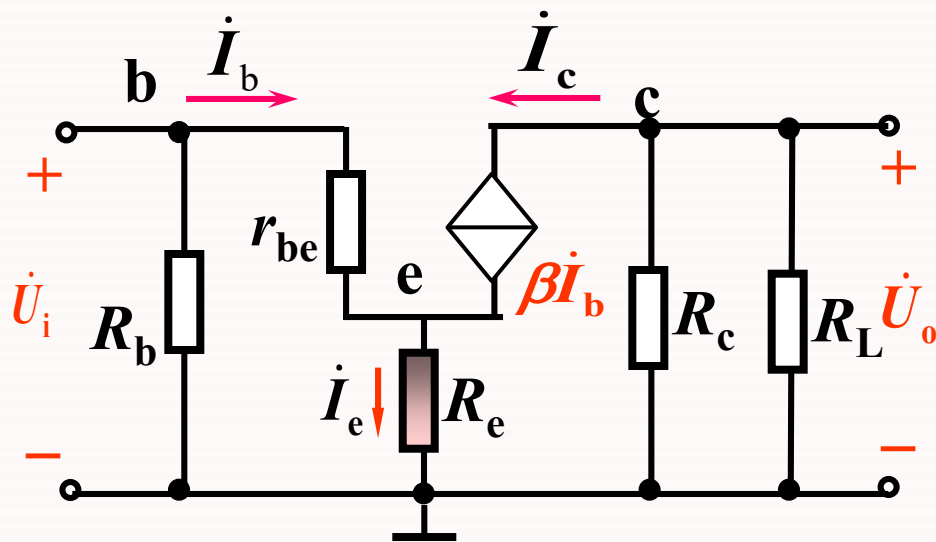
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

引入发射极电阻
后, \dot{A}_u 降低了。

若满足 $(1 + \beta) R_e \gg r_{be}$

$$\dot{A}_u \approx -\frac{R'_L}{R_e}$$

\dot{A}_u 与三极管的参数
 β 、 r_{be} 无关。



2. 放大电路的输入电阻

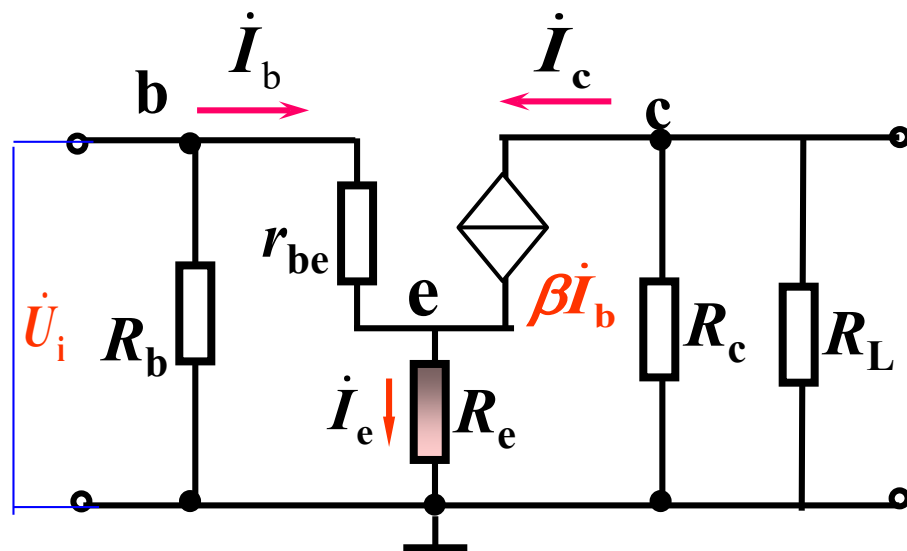
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = [r_{be} + (1 + \beta)R_e] // R_b$$

引入 R_e
后，输入电阻
增大了。

3. 放大电路的输出电阻

将放大电路的输入端短路，负载电阻 R_L 开路，忽略 c、e 之间的内电阻 r_{ce} 。

$$R_o \approx R_c$$



2.5 静态工作点的稳定问题

2.5.1 静态工作点稳定的必要性

一. 必要性

静态工作点决定放大电路是否产生失真；

静态工作点影响电压放大倍数、输入电阻等动态参数；

静态工作点的不稳定，将导致动态参数不稳定，甚至使放大电路无法正常工作。

二. 影响静态工作点稳定的因素

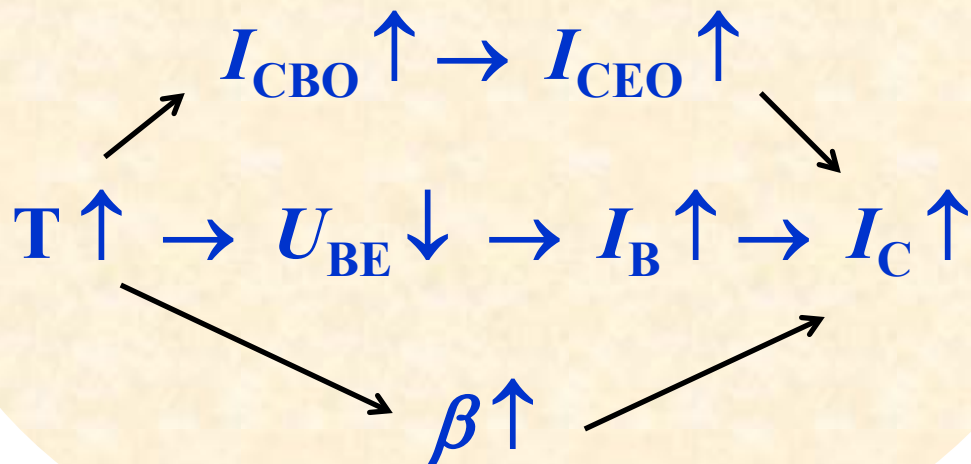
电源电压波动、元件老化、环境温度变化等，都会引起三极管和电路元件参数的变化，造成静态工作点的不稳定。其中，**温度对三极管参数的影响是最为主要的。**

2.5.2 温度对静态工作点的影响

三极管是一种对温度十分敏感的元件。温度变化对管子参数的影响主要表现为：

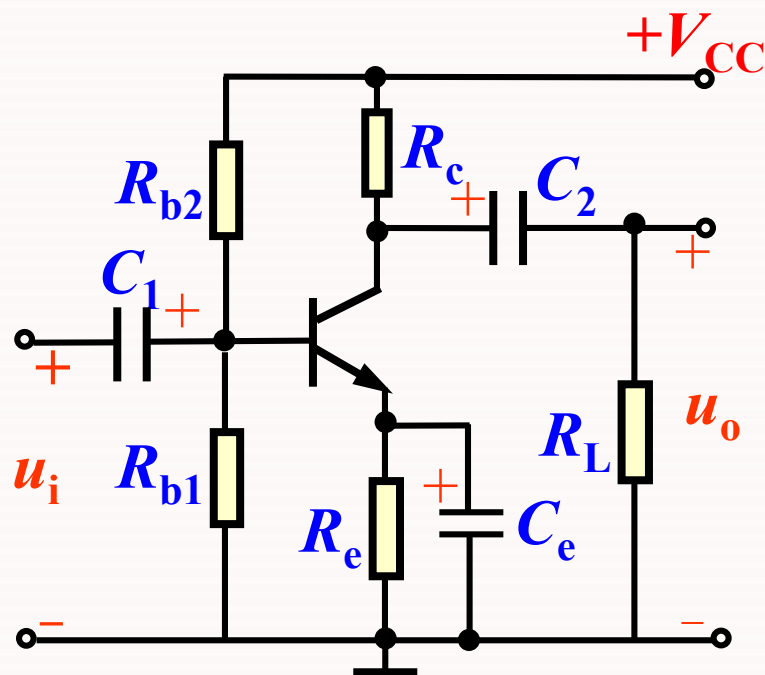
1. U_{BE} 改变。温度每升高 1°C ， U_{BE} 约下降 2 mV 。
也即同样 U_{BE} ，温度升高， I_B 会变大。
2. β 改变。温度每升高 1°C ， β 值约增加 $0.5\% \sim 1\%$ 。
3. I_{CBO} 改变。温度每升高 10°C ， I_{CBO} 大致将增加一倍。

总之：



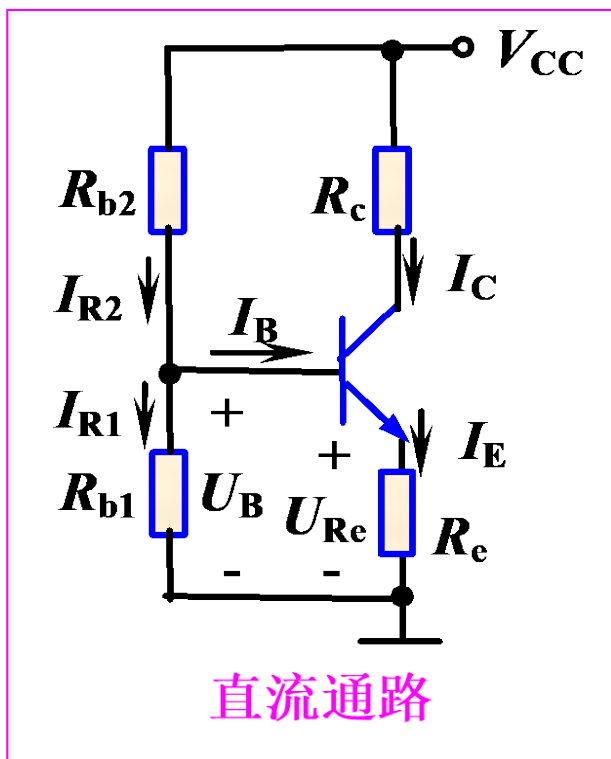
2.5.3 静态工作点稳定电路

一、电路组成



分压式电流负反馈静态工作点稳定电路

二、静态工作点稳定原理



目标：温度变化时，使 I_C 维持恒定。

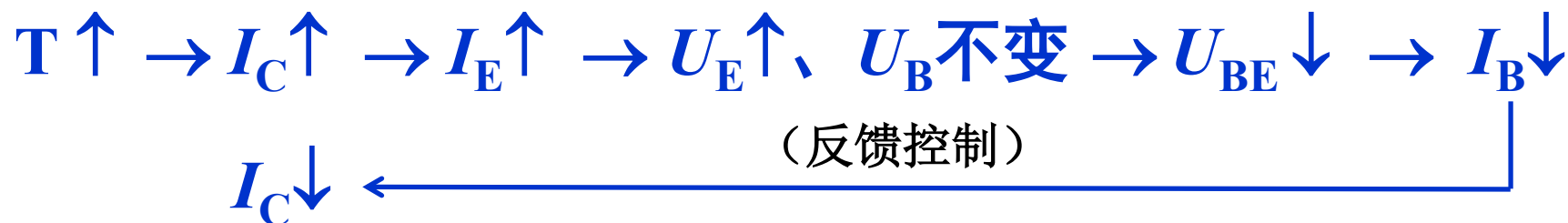
原因：

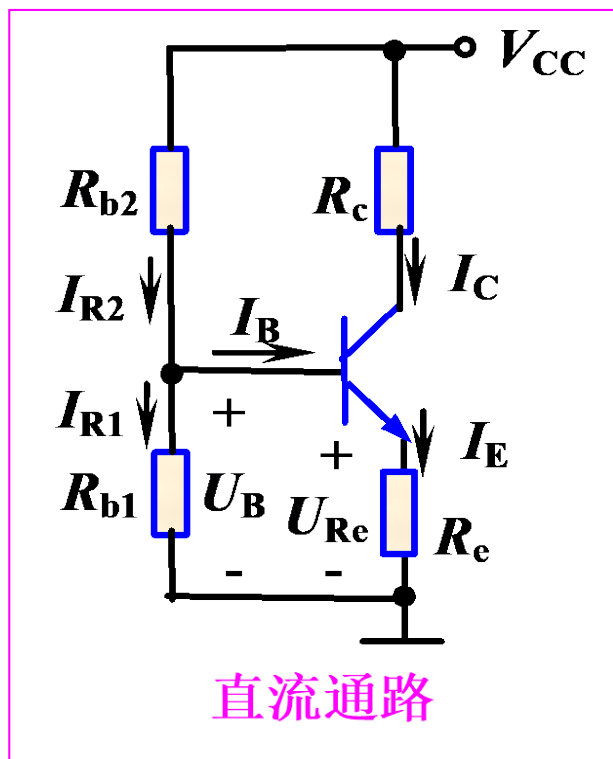
(1) 采用分压式电路，固定基极电位 U_B ；

电路参数的选取应满足 I_{R1} 、 $I_{R2} \gg I_B$ ，则

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

(2) 电阻 R_e 的直流负反馈作用。





电路将输出电流 I_C 在 R_e 上的压降返送到输入回路，产生了抑制 I_C 改变的作用，使 I_C 基本不变。

这种作用称为直流电流负反馈

分压式电流负反馈静态工作点稳定电路。

第二章 放大电路的基本原理

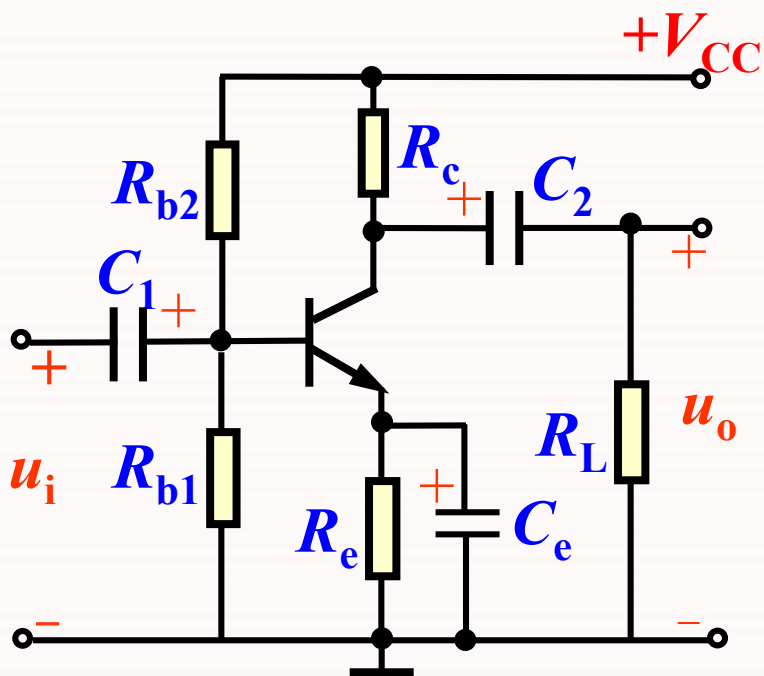
说明:

1. R_e 愈大, 同样的 ΔI_{EQ} 产生的 ΔU_{EQ} 愈大, 则温度稳定性愈好。但 R_e 增大, U_{EQ} 增大, 要保持Q点不变, 必须增大 V_{CC} 。

2. 接入 R_e , 电压放大倍数将大大降低。在 R_e 两端并联大电容 C_e , 交流电压降可以忽略, 则 A_u 基本无影响。

C_e 称旁路电容

3. 要保证 U_{BQ} 基本稳定, 流过分压电阻的电流 $I_R \gg I_B$, 则需要 R_{b1} 、 R_{b2} 小一些, 但这会使电阻消耗功率增大, 且电路的输入电阻降低。实际选用 R_{b1} 、 R_{b2} 值, 取 $I_R = (5 \sim 10)I_B$, $U_B = (5 \sim 10)U_{BE}$ 。



三、静态与动态分析

静态分析 由于 $I_R \gg I_{BQ}$, 可得

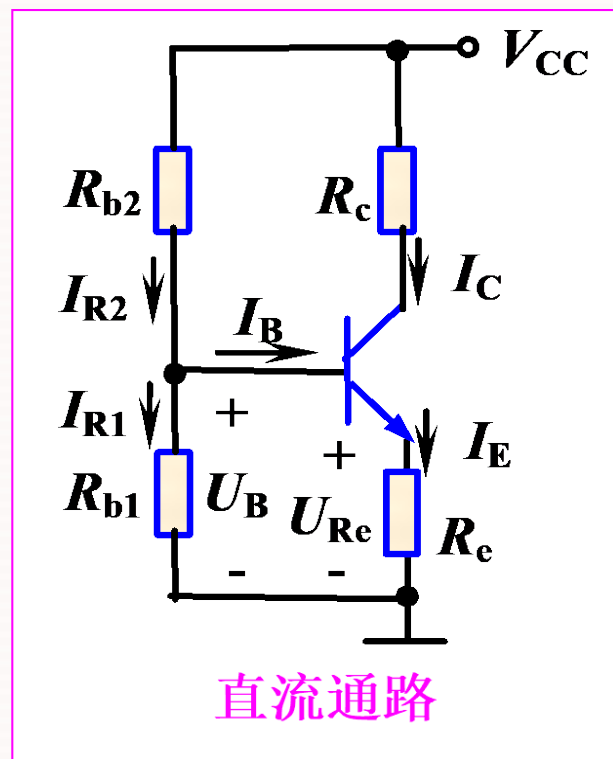
$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$\text{则 } I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \end{aligned}$$

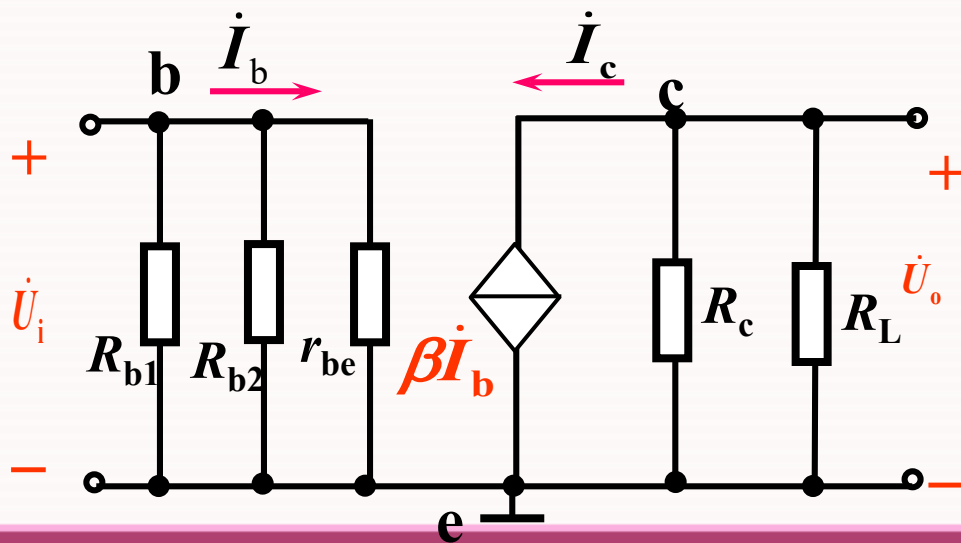
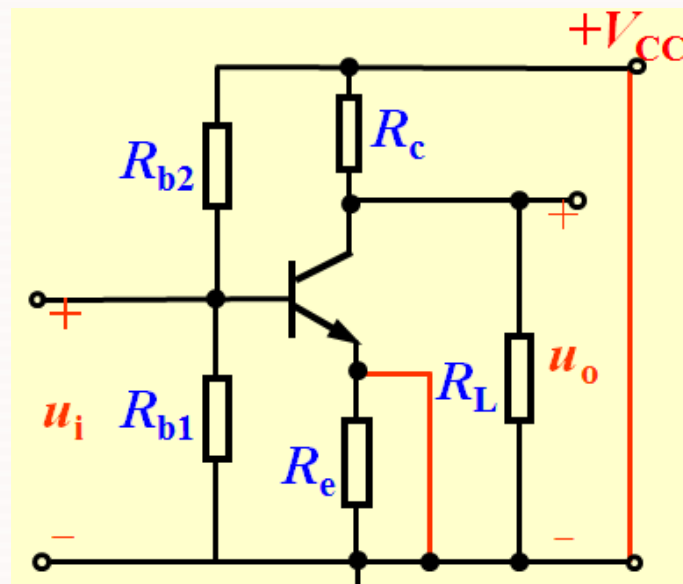
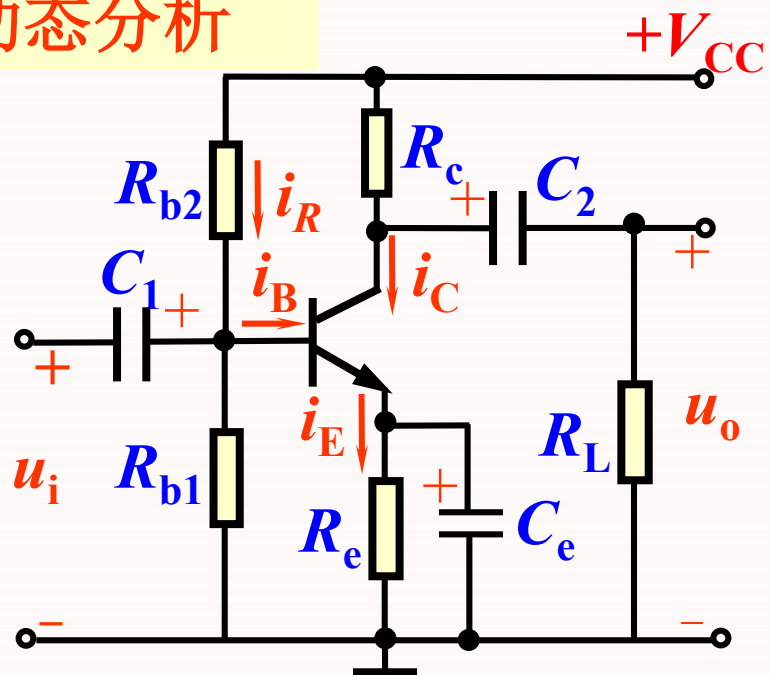
静态基极电流

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

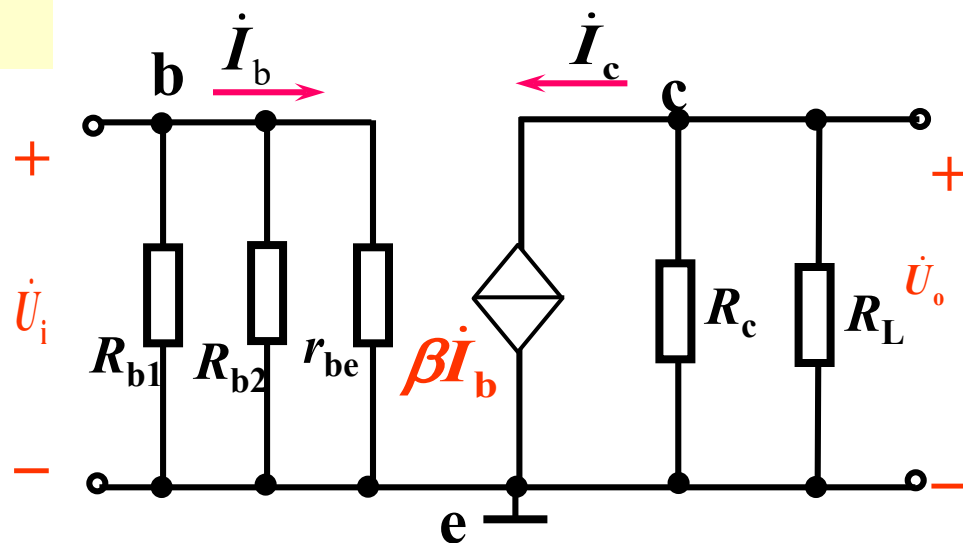


第二章 放大电路的基本原理

动态分析



动态分析



$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad R'_L = R_c // R_L$$

$$R_i = r_{be} // R_{b1} // R_{b2}$$

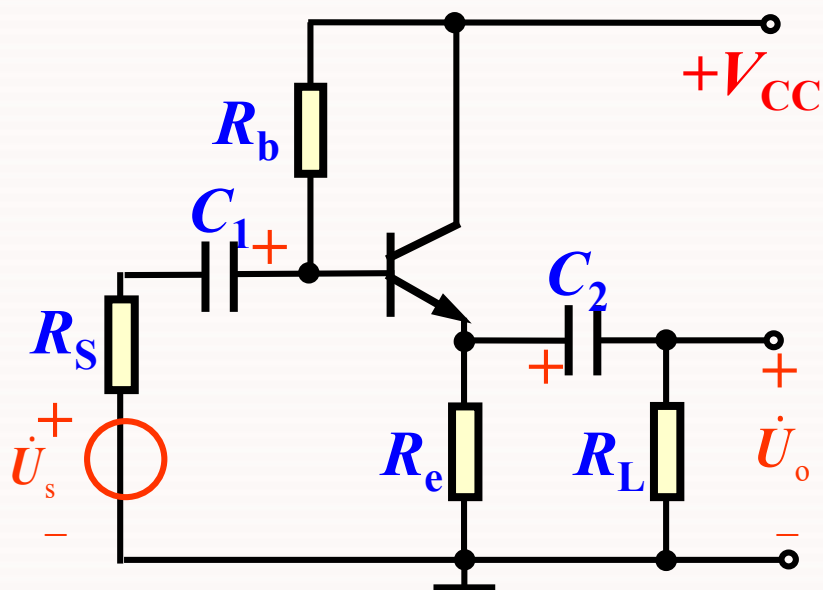
$$R_o = R_c$$

2.6 放大电路的三种基本组态

三种基本接法

- 共射组态
- 共集组态
- 共基组态

2.6.1 共集电极放大电路



共集电极放大电路

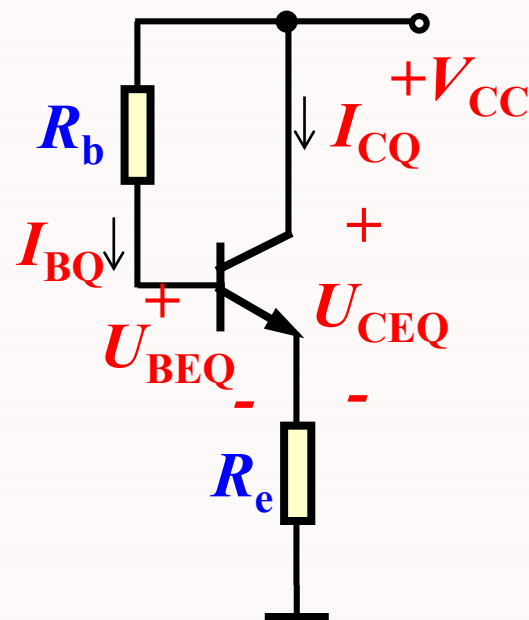
一、静态工作点

由基极回路求得静态基极电流

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

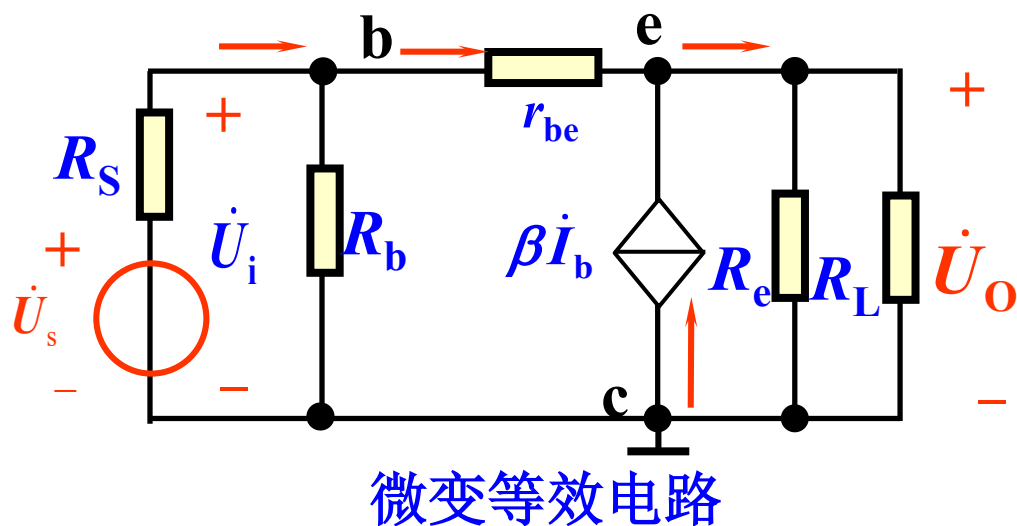
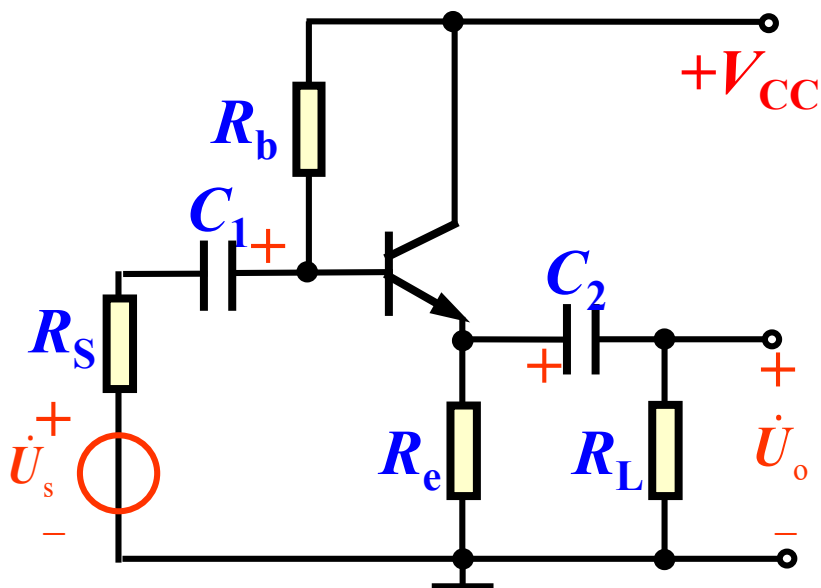
$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{EQ}R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ}R_e \end{aligned}$$



直流通路

二、动态参数

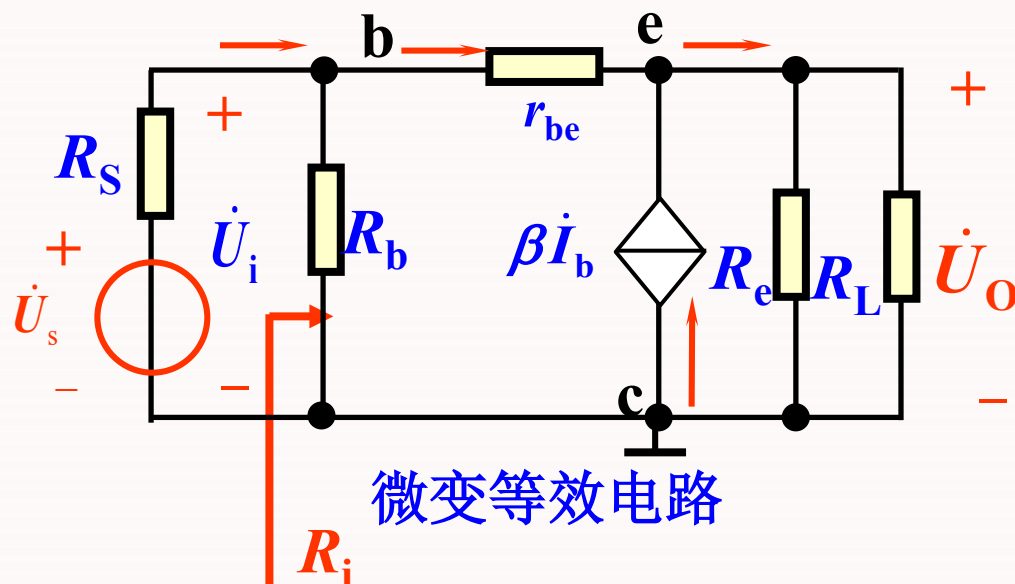


电压放大倍数
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) (R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L)}$$

电压放大倍数恒小于 1，而接近 1，且输出电压与输入电压同相，又称射极跟随器。

第二章 放大电路的基本原理

输入电阻



$$R_i = R_b // \left[r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L) \right]$$

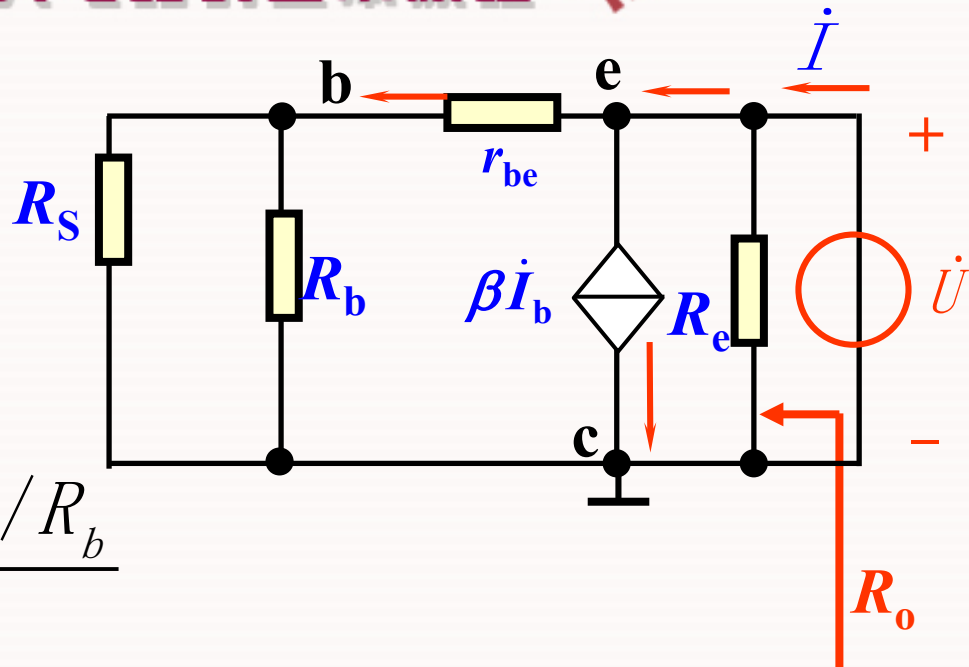
不考虑输入端的电阻 R_b

$$R_i = r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L)$$

输入电阻较大。

第二章 放大电路的基本原理

输出电阻



$$R_o = R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_b}{1 + \beta}$$

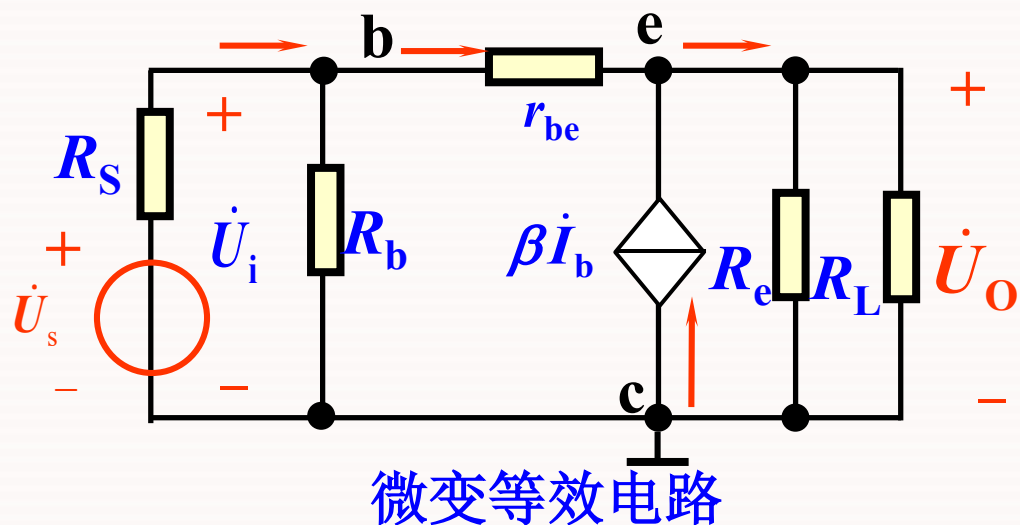
不考虑输出端的电阻 R_e

求输出电阻 R_o 的等效电路

$$R_o = \frac{r_{be} + R_s // R_b}{1 + \beta}$$

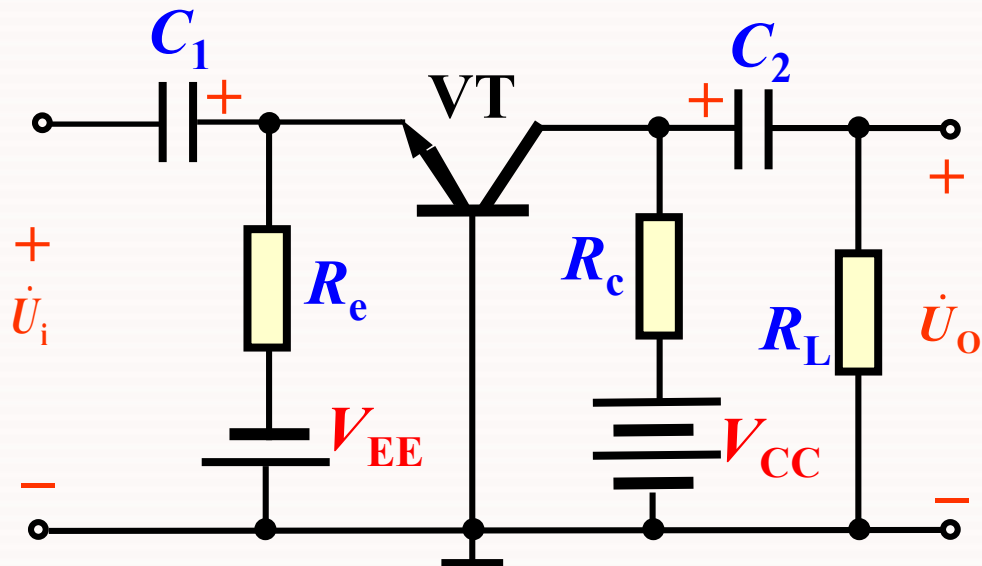
输出电阻低，故带载能力比较强。

电流放大能力

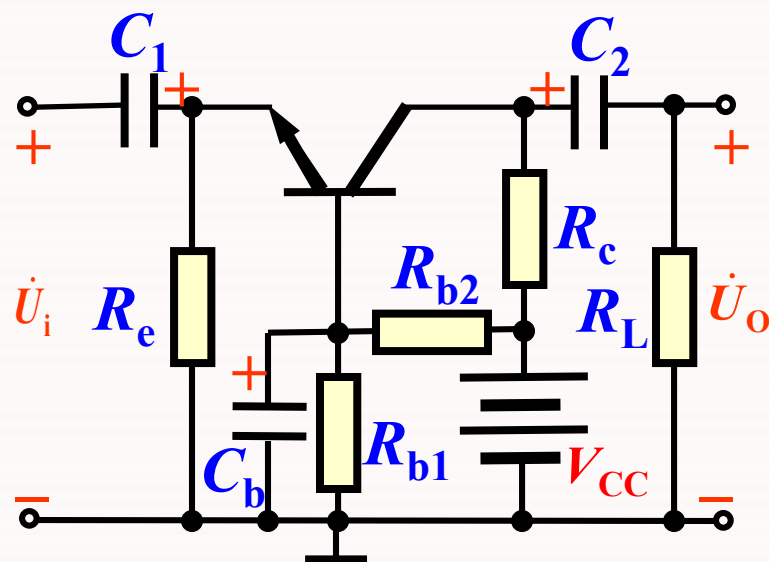


输入端电流为 \dot{I}_b ，输出端电流为 \dot{I}_e ，有电流放大能力。

2.6.2 共基极放大电路



(a) 原理电路



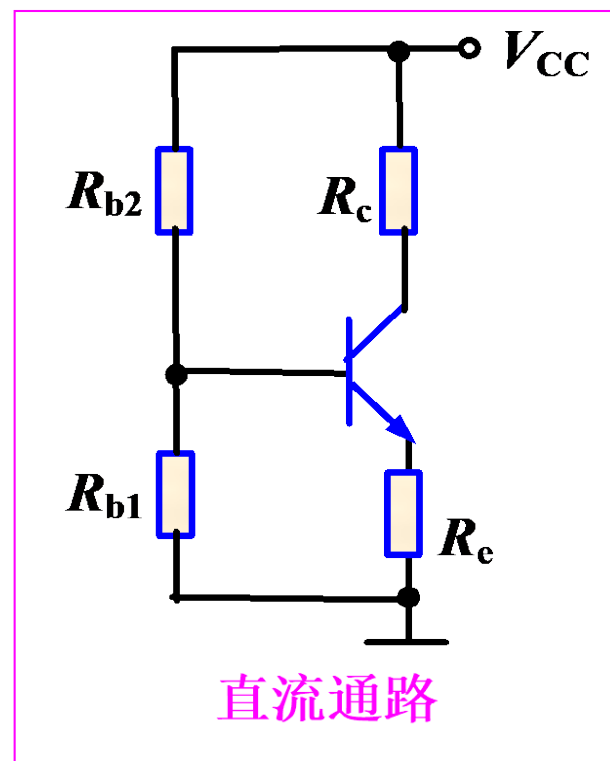
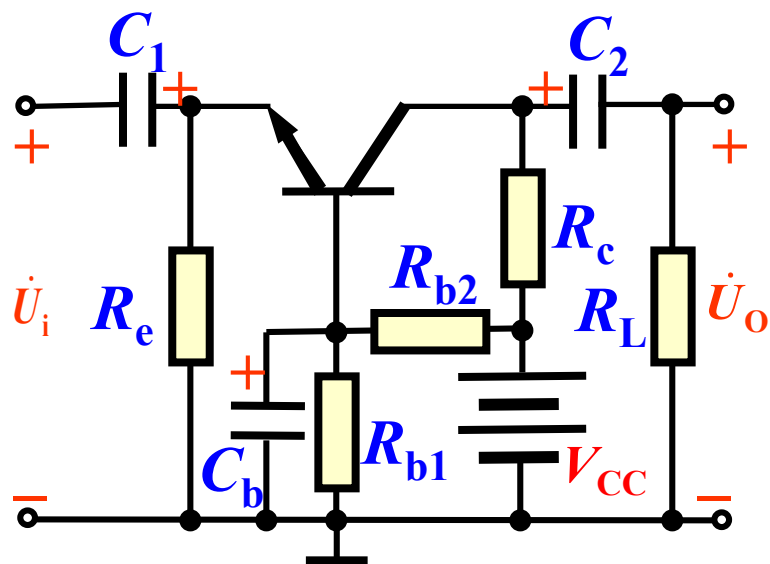
(b) 实际电路

共基极放大电路

V_{EE} 保证发射结正偏；
 V_{CC} 保证集电结反偏；三极管
 工作在放大区。

实际电路采用一个电
 源 V_{CC} ，用 R_{b1} 、 R_{b2} 分
 压提供基极正偏电压。

一、静态工作点 (I_{BQ}, I_{CQ}, U_{CEQ})

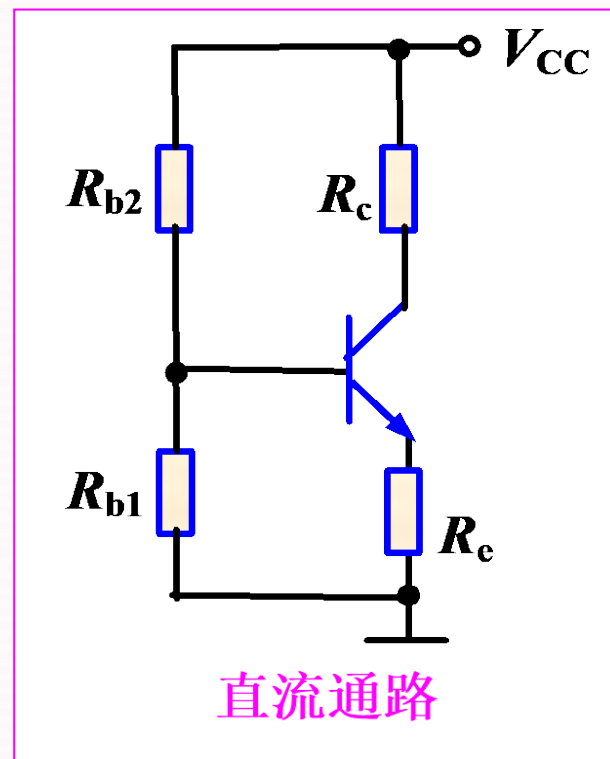


第二章 放大电路的基本原理

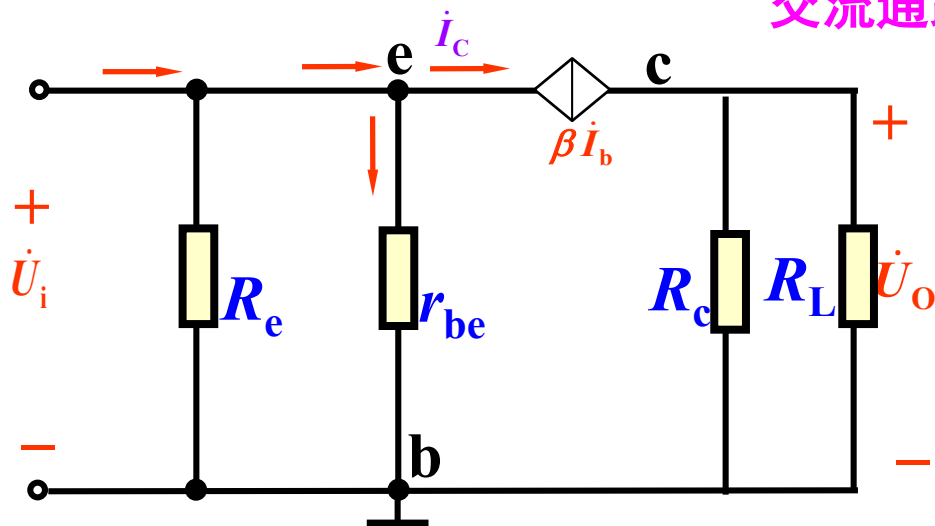
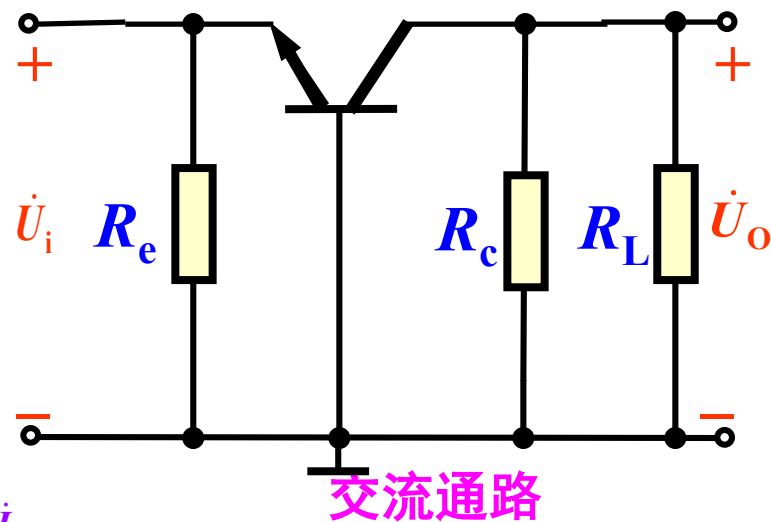
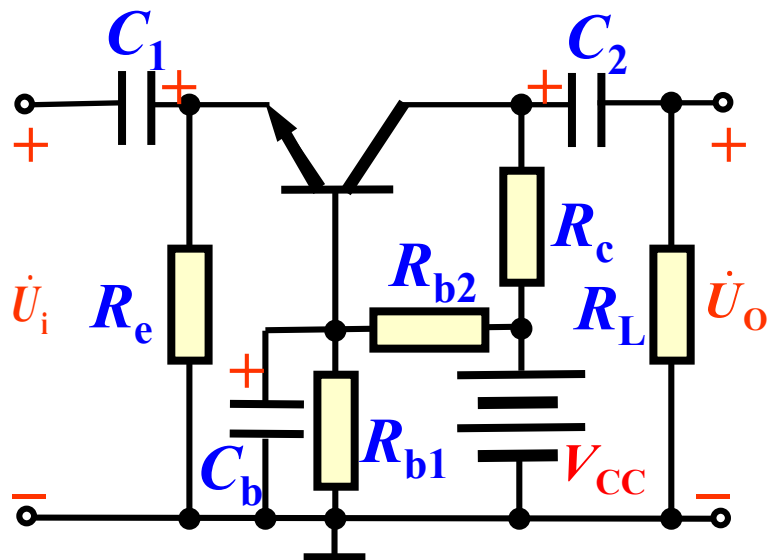
$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} = \frac{1}{R_e} \left(\frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - U_{BEQ} \right) \approx I_{CQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \end{aligned}$$

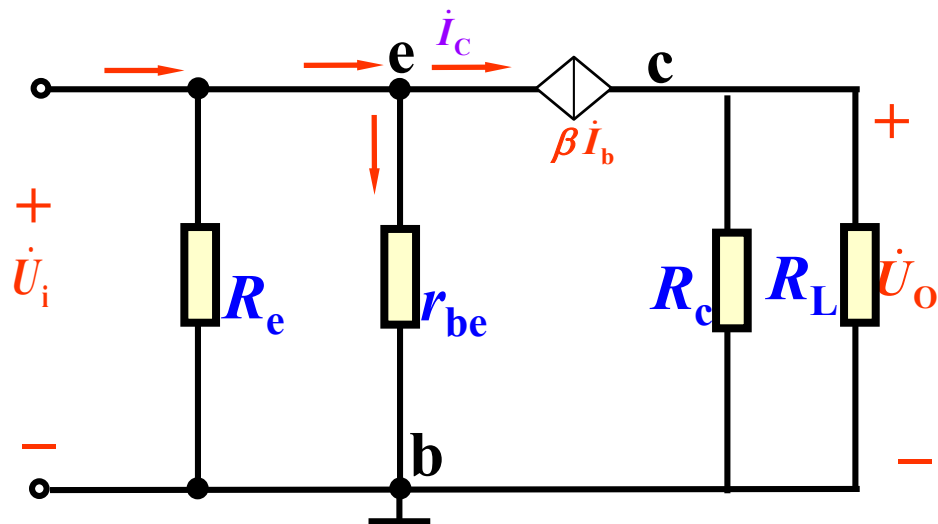


二、动态参数



电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$$



微变等效电路

共基极放大电路具有电压放大作用，电压放大能力与共射电路相当，没有负号，说明该电路输入、输出信号同相位。

第二章 放大电路的基本原理

输入电阻

$$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

不考虑输入端的电阻 R_e

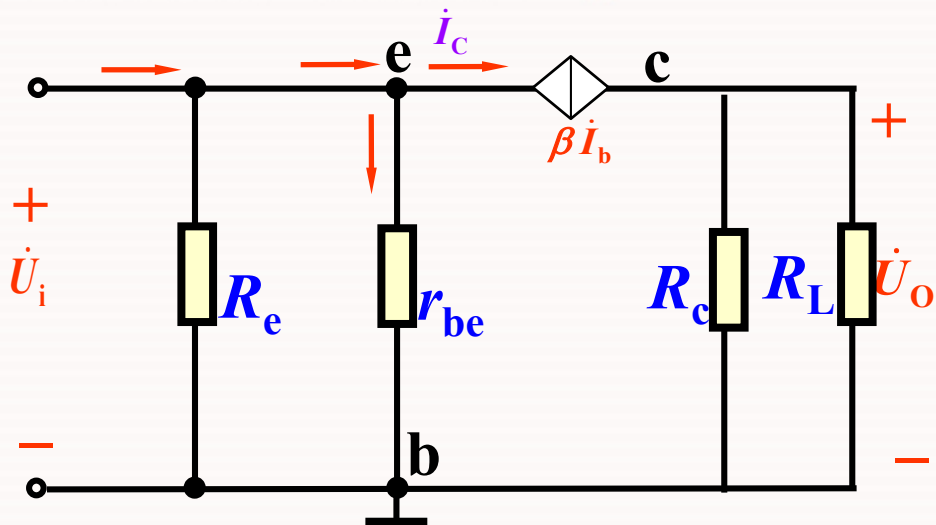
$$R_i = \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

输入电阻小

输出电阻

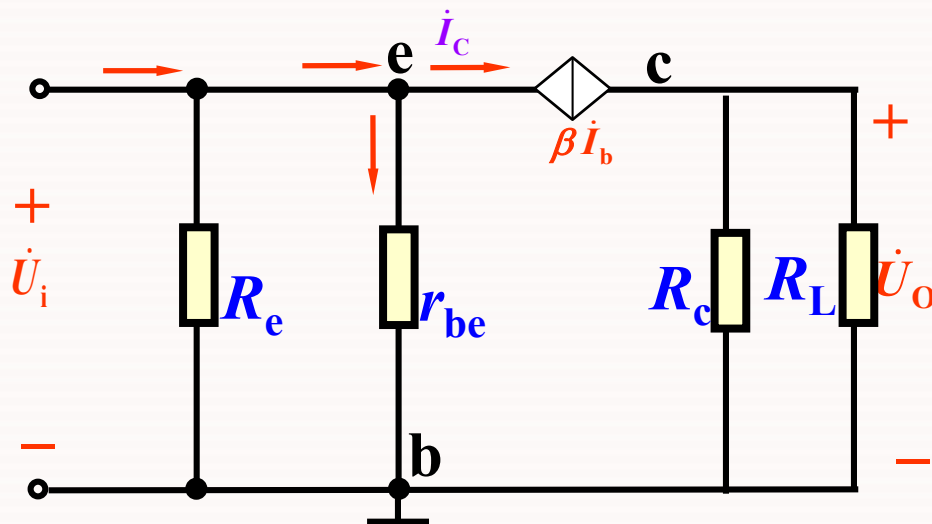
$$R_o = R_c$$

输出电阻与共射电路相当



微变等效电路

电流放大能力

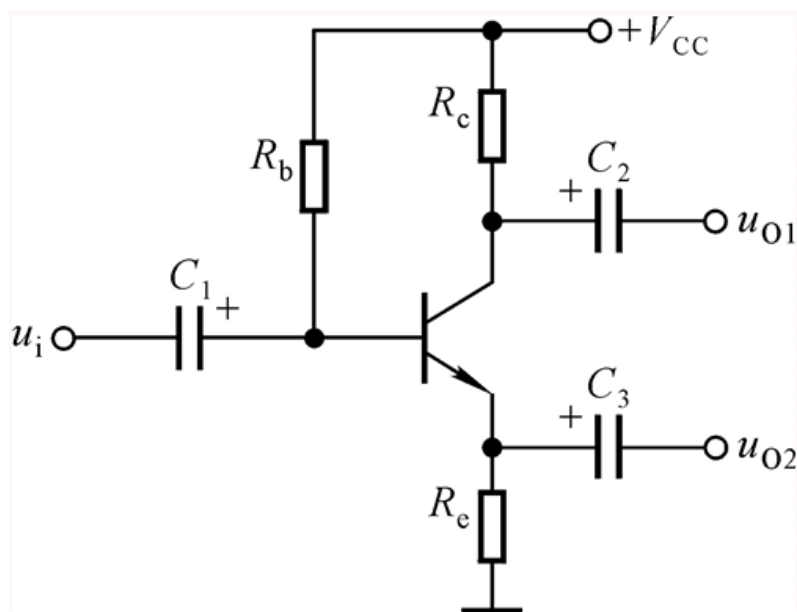


微变等效电路

输入端电流为 \dot{I}_e ，输出端电流为 \dot{I}_c ，无电流放大能力。

2.6.3 三种基本组态的比较

- 共射电路既能放大电压又能放大电流，输入电阻在三种电路中居中，输出电阻较大，频带较窄。常做为低频放大电路的单元电路。
- 共集电路只能放大电流不能放大电压，具有电压跟随的特点，是三种接法中输入电阻最大、输出电阻最小的电路。常用于多级放大电路的输入级和输出级及作为隔离缓冲用的中间级。
- 共基电路只能放大电压不能放大电流，电压放大倍数和输出电阻与共射电路相当，输入电阻小，使三极管结电容的影响不显著，因而频率响应得到很大改善，常用于宽频带放大电路。



【例】 放大电路如图所示，画出分别从 u_{O1} ， u_{O2} 输出时电路的微变等效电路，写出计算电压放大倍数 $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o1} / \dot{U}_i$ 和 $\dot{A}_{u2} = \dot{U}_{o2} / \dot{U}_i$ 的表达式，并画出当 $R_c = R_e$ 时的输出电压 u_{O1} 和 u_{O2} 的波形（与输入正弦电压 u_i 相对应）

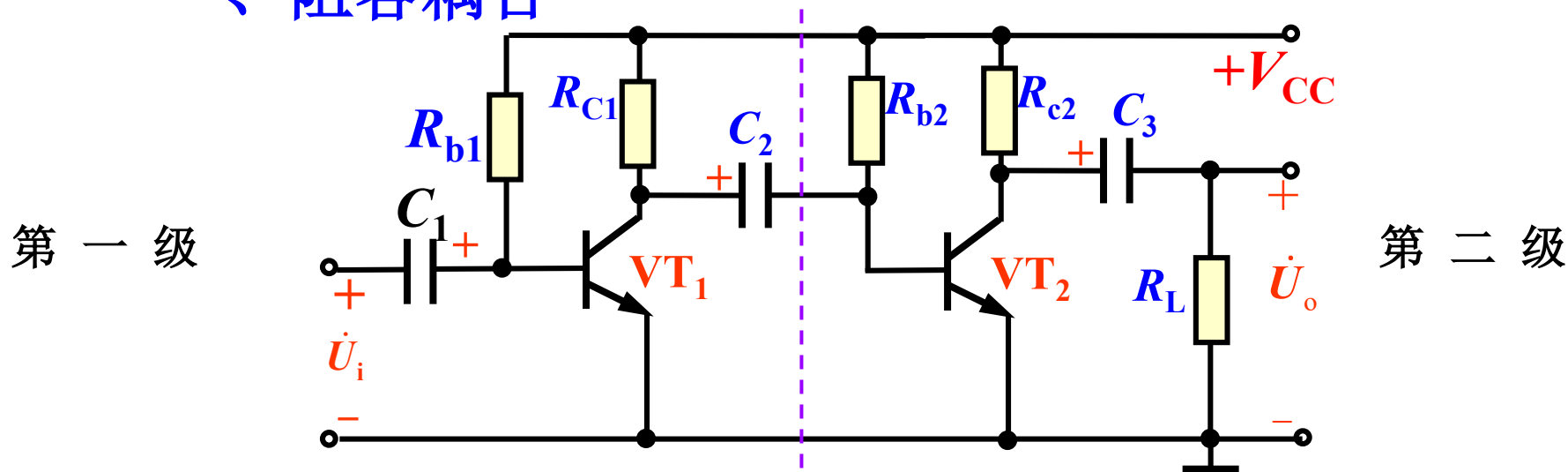
2.8 多级放大电路

2.8.1 多级放大电路的耦合方式

级间耦合：多级放大电路的每一个基本放大电路称为一级；级与级之间的连接称之为耦合。

三种常见的耦合方式 { 阻容耦合
直接耦合
变压器耦合

一、阻容耦合

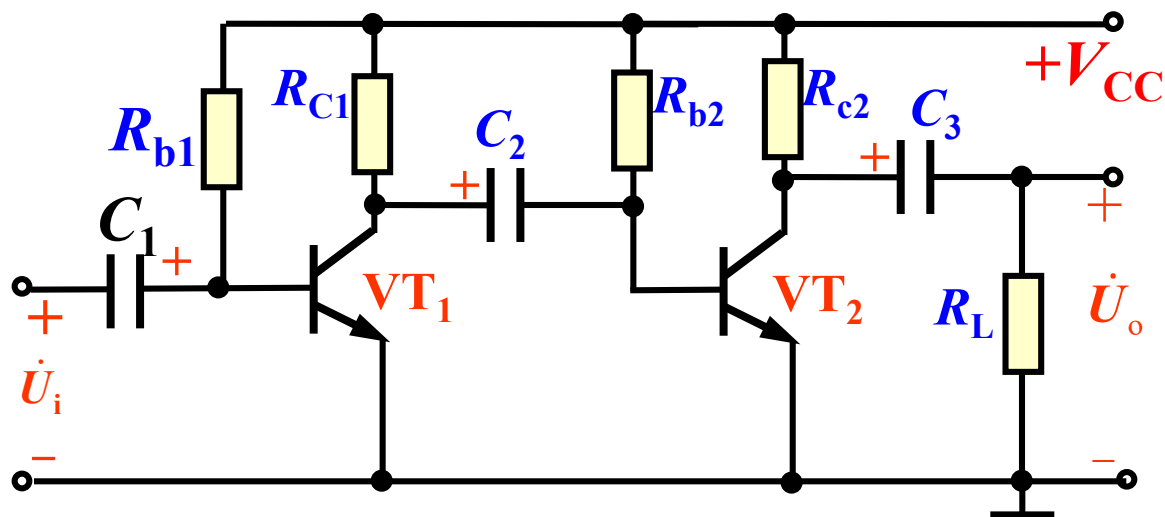


优点：

阻容耦合两级放大电路

(1) 前、后级直流电路互不相通，静态工作点相互独立，给电路的分析、设计和调试带来很大方便；

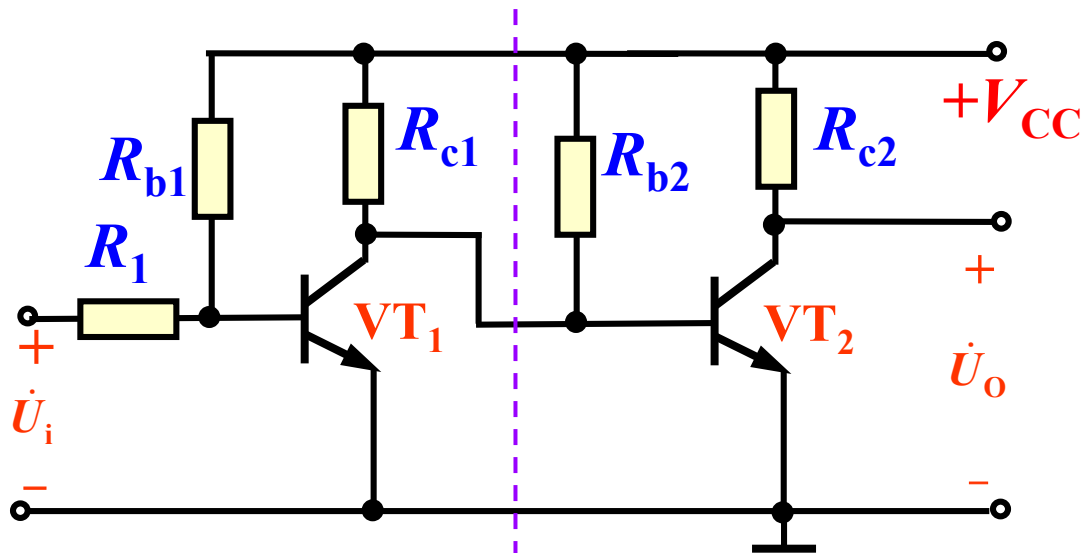
(2) 选择足够大电容，可以做到在一定频率范围内，前一级输出信号几乎不衰减地加到后一级输入端，使信号得到充分利用。



缺点：

- (1) 不能放大直流信号、缓慢变化的信号；
- (2) 由于耦合电容容量较大，所以不便于集成化。

二、直接耦合



两个单管放大电路简单的直接耦合

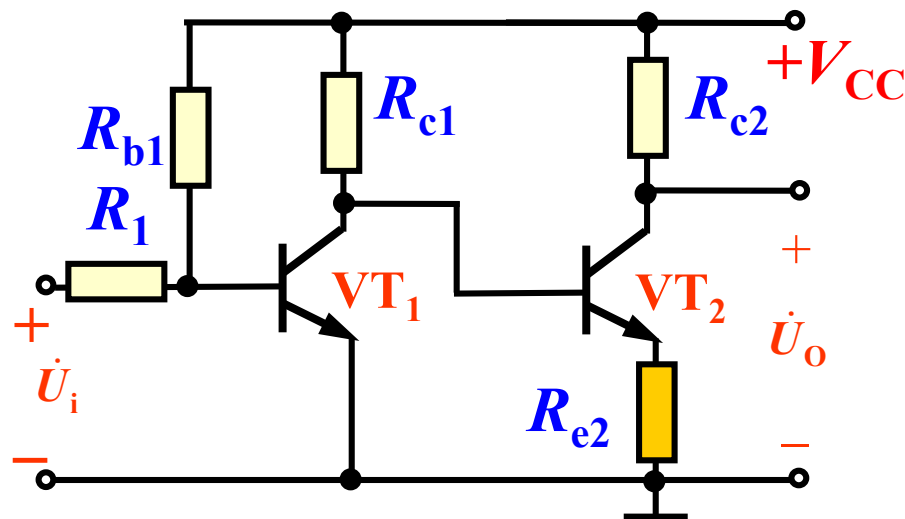
优点:

- (1) 可以放大交流和缓慢变化及直流信号;
- (2) 便于集成化。

缺点:

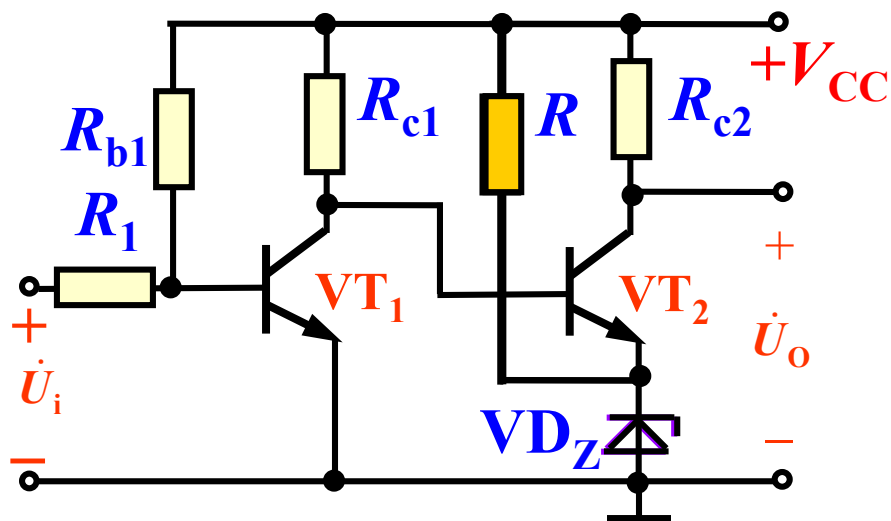
- (1) 各级静态工作点互相影响;
- (2) 存在零点漂移。

1. 解决合适静态工作点的几种改进电路



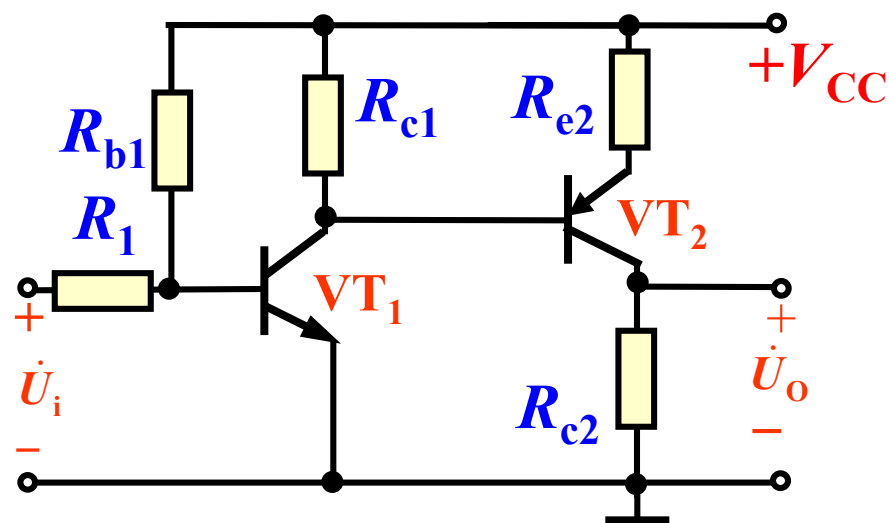
电路中接入 R_{e2} ，保证第一级集电极有较高的静态电位。

但 R_{e2} 的接入将大大降低第二级的电压放大倍数，从而影响整个放大电路的放大能力。



稳压管动态电阻很小，可以使第二级的放大倍数损失减小。

但前述两个电路，当耦合级数更多时，将逐级抬高集电极的静态电位，使之接近于电源电压，引起后级的静态工作点不合适。



采用NPN-PNP的耦合方式，可获得合适的工作点。为经常采用的方式。

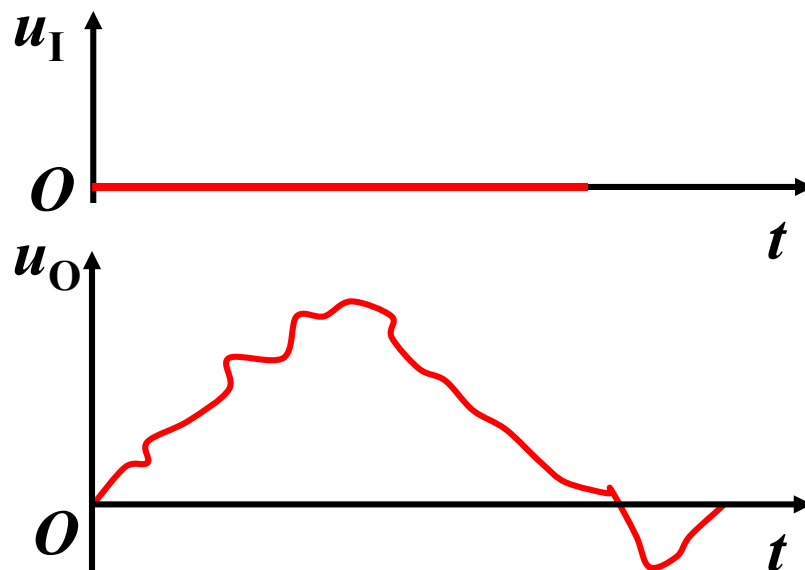
2. 零点漂移

直接耦合时，输入电压为零，但输出电压离开零点，并缓慢地发生不规则变化的现象。

主要原因：放大器件的参数受温度影响而使 Q 点不稳定。故也称**温度漂移**。

思考：为什么直接耦合放大电路有零点漂移？

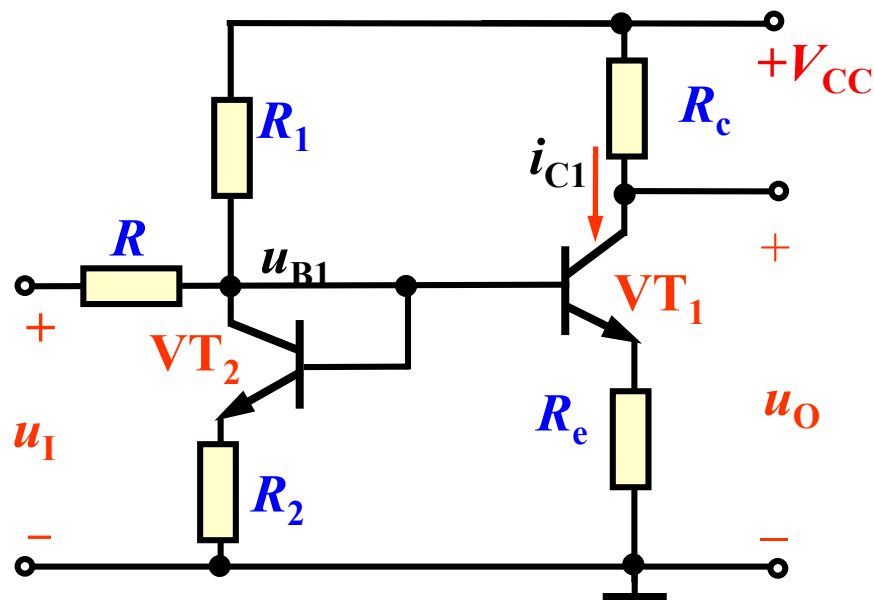
放大电路级数愈多，放大倍数愈高，零点漂移问题愈严重。



零点漂移现象

抑制零点漂移的措施：

- (1) 引入直流负反馈以稳定 Q 点；
- (2) 利用热敏元件补偿放大器的零漂；



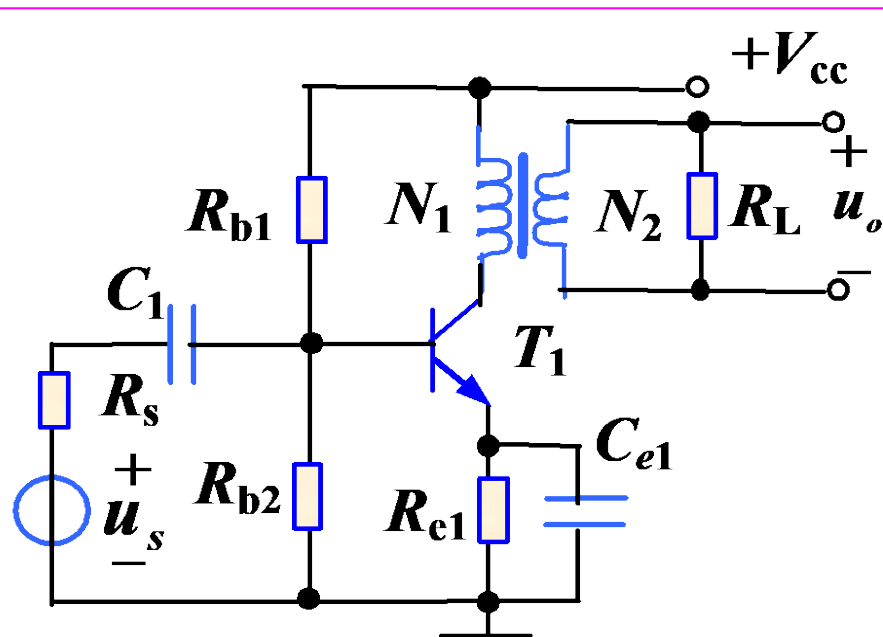
利用热敏元件补偿零漂

- (3) 采用差分放大电路。

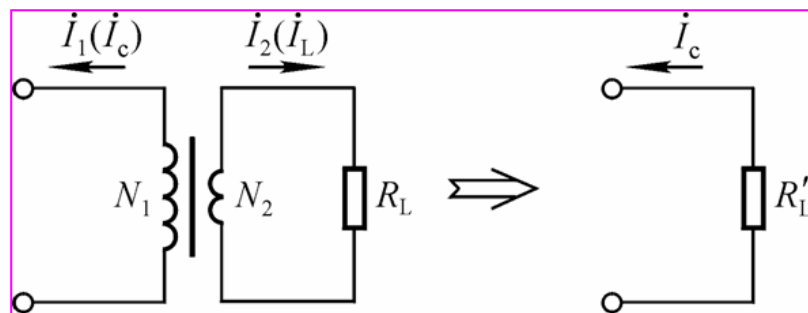
三、变压器耦合

优点:

- (1) 静态工作点互相独立;
- (2) 能实现阻抗变换。

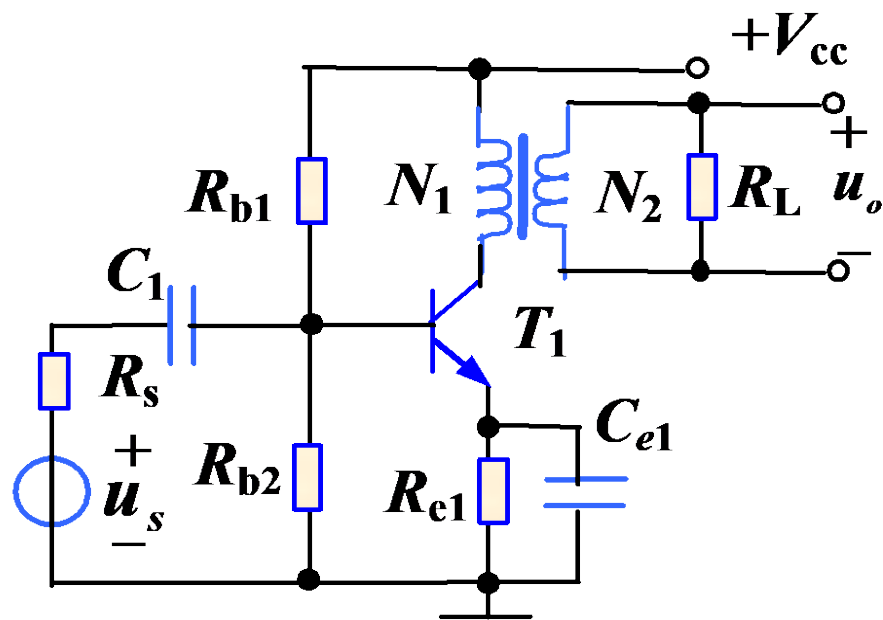


变压器耦合放大电路



$$R'_L = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 R_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L$$

三、变压器耦合



变压器耦合放大电路

缺点:

- (1) 变压器笨重;
- (2) 无法集成化;
- (3) 直流和缓慢变化信号不能通过变压器。

三种耦合方式的比较

	阻容耦合	直接耦合	变压器耦合
特点	各级静态工作点相互独立	能放大直流信号和缓慢变化的信号； 适合集成化	各级静态工作点相互独立； 可以实现阻抗变换
存在问题	不能放大直流信号与缓慢变化的信号； 不适合集成化	各级工作点互相影响； 有零点漂移现象	不能放大直流信号与缓慢变化的信号； 不适合集成化
适合场合	分立元件交流放大电路	集成放大电路，直流放大电路	低频功率放大电路，调谐放大器。

【例】 图示两级直接耦合放大电路中，已知：信号源内阻 $R_s = 810\Omega$ ， $R_{b1} = 24\text{ k}\Omega$ ， $R_{c1} = 3.9\text{ k}\Omega$ ， $R_{c2} = 500\Omega$ ，稳压管 VDz 的工作电压 $U_Z = 4\text{ V}$ ，三极管 VT_1 的 $\beta_1 = 45$ ， VT_2 的 $\beta_2 = 40$ ， $V_{CC} = 24\text{ V}$ ，设静态时 $U_{\text{BEQ}1} = U_{\text{BEQ}2} = 0.7\text{ V}$ ，试计算各级静态工作点。

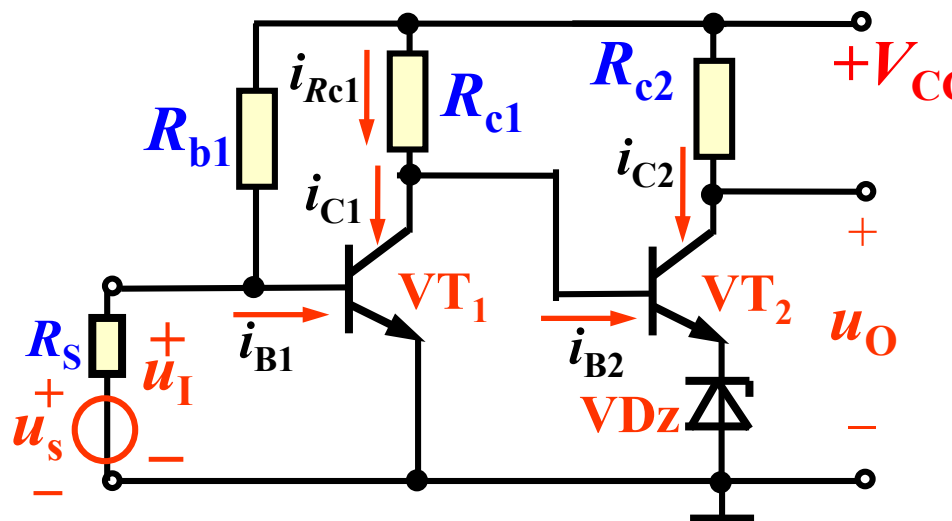
解：

$$I_{\text{BQ}1} = \frac{V_{CC} - U_{\text{BEQ}1}}{R_{b1}} - \frac{U_{\text{BEQ}1}}{R_s}$$

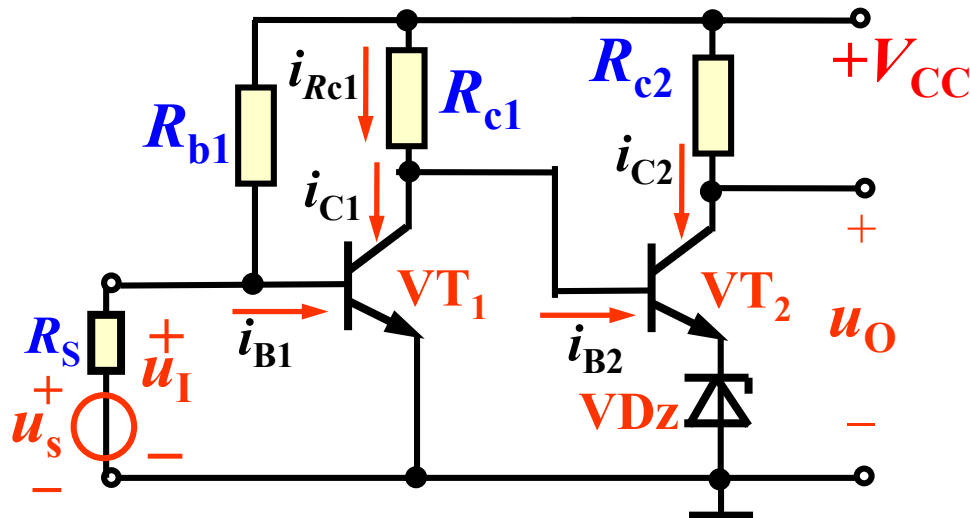
$$= \left(\frac{24 - 0.7}{24} - \frac{0.7}{0.81} \right) \text{mA} \approx 0.1 \text{mA}$$

$$I_{\text{CQ}1} = \beta_1 I_{\text{BQ}1} = 4.5\text{ mA}$$

$$U_{\text{CEQ}1} = U_{\text{BEQ}2} + U_Z = (0.7 + 4)\text{ V} = 4.7\text{ V}$$



例题的电路

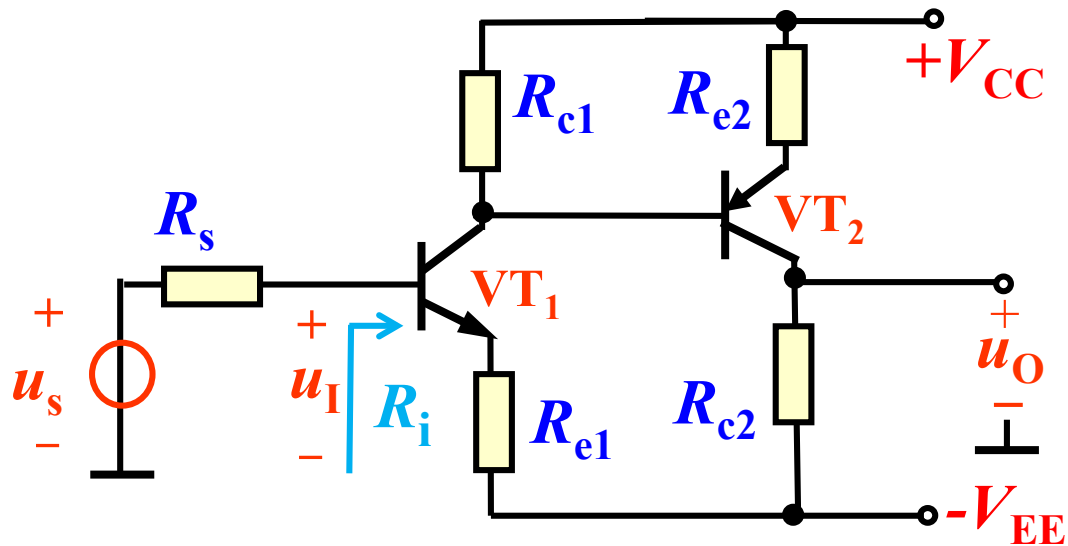


$$I_{R_{c1}} = \frac{V_{CC} - U_{CQ1}}{R_{c1}} = \left(\frac{24 - 4.7}{3.9} \right) \text{ mA} = 4.95 \text{ mA}$$

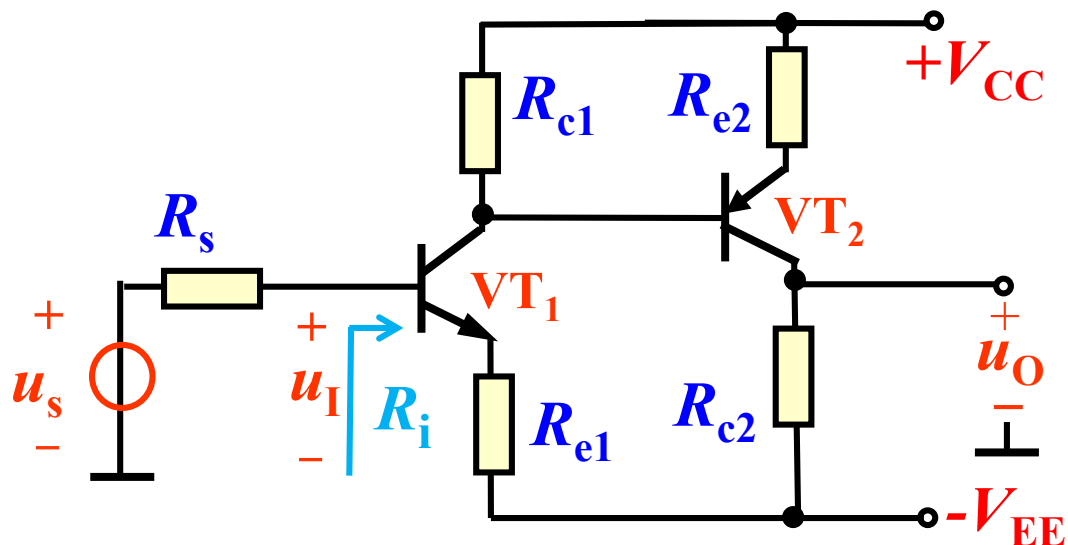
$$I_{BQ2} = I_{R_{c1}} - I_{CQ1} = (4.95 - 4.5) \text{ mA} = 0.45 \text{ mA}$$

$$I_{CQ2} = \beta_2 I_{BQ2} = (40 \times 0.45) \text{ mA} = 18 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ2} &= U_{CQ2} - U_{EQ2} = V_{CC} - I_{CQ2} R_{C2} - U_Z \\ &= (24 - 18 \times 0.5 - 4) \text{ V} = 11 \text{ V} \end{aligned}$$



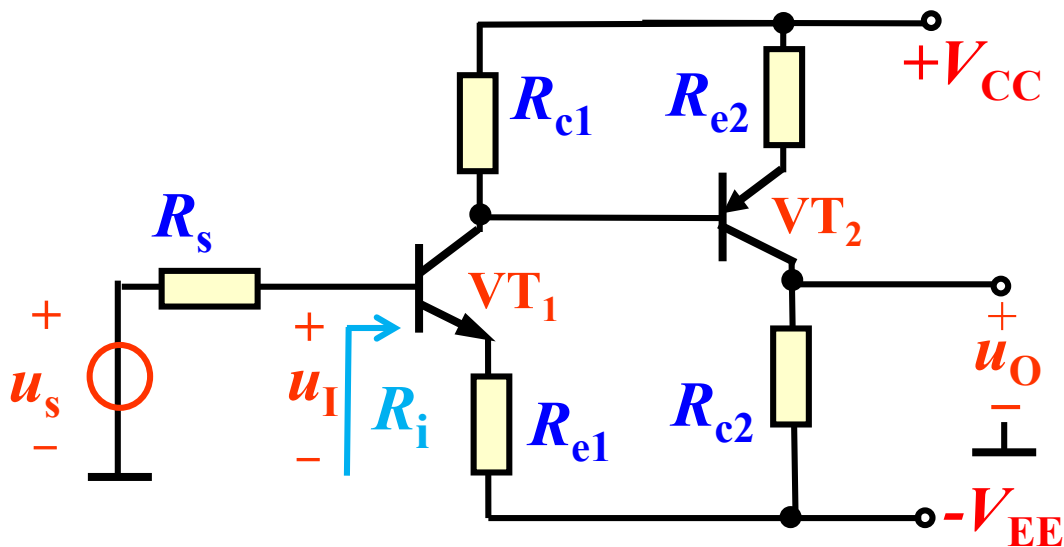
【例】 图示NPN和PNP管组成的双电源直接耦合放大电路中，已知： $V_{CC} = V_{EE} = 18\text{V}$ ， $R_{c1} = 5.6\text{ k}\Omega$ ， $R_{e1} = 200\Omega$ ， $R_{c2} = 4.7\text{ k}\Omega$ ， $R_{e2} = 1.2\text{ k}\Omega$ ，三极管的 $|U_{BEQ1}| = |U_{BEQ2}| = 0.7\text{ V}$ ， $\beta_1 = 50$ ， $\beta_2 = 30$ ，假设输入信号为零时，输出电压 $u_o = 0$ ，估算放大电路的静态工作点。



解 : $I_{CQ2} = \frac{V_{EE}}{R_{c2}} = \frac{18}{4.7} \text{ mA} = 3.83 \text{ mA}$ $I_{BQ2} = \frac{I_{CQ2}}{\beta_2} = \frac{3.83}{30} \text{ mA} \approx 0.13 \text{ mA}$

$$I_{EQ2} = I_{CQ2} + I_{BQ2} = (3.83 + 0.13) \text{ mA} = 3.96 \text{ mA}$$

$$U_{EQ2} = V_{CC} - I_{EQ2} R_{e2} = (18 - 3.96 \times 1.2) \text{ V} = 13.2 \text{ V}$$



$$U_{CQ1} = U_{BQ2} = U_{EQ1} - |U_{BEQ2}| = (13.2 - 0.7)V = 12.5V$$

$$I_{R_{C1}} = \frac{V_{CC} - U_{CQ1}}{R_{C1}} = \frac{18 - 12.5}{5.6} mA = 0.98mA$$

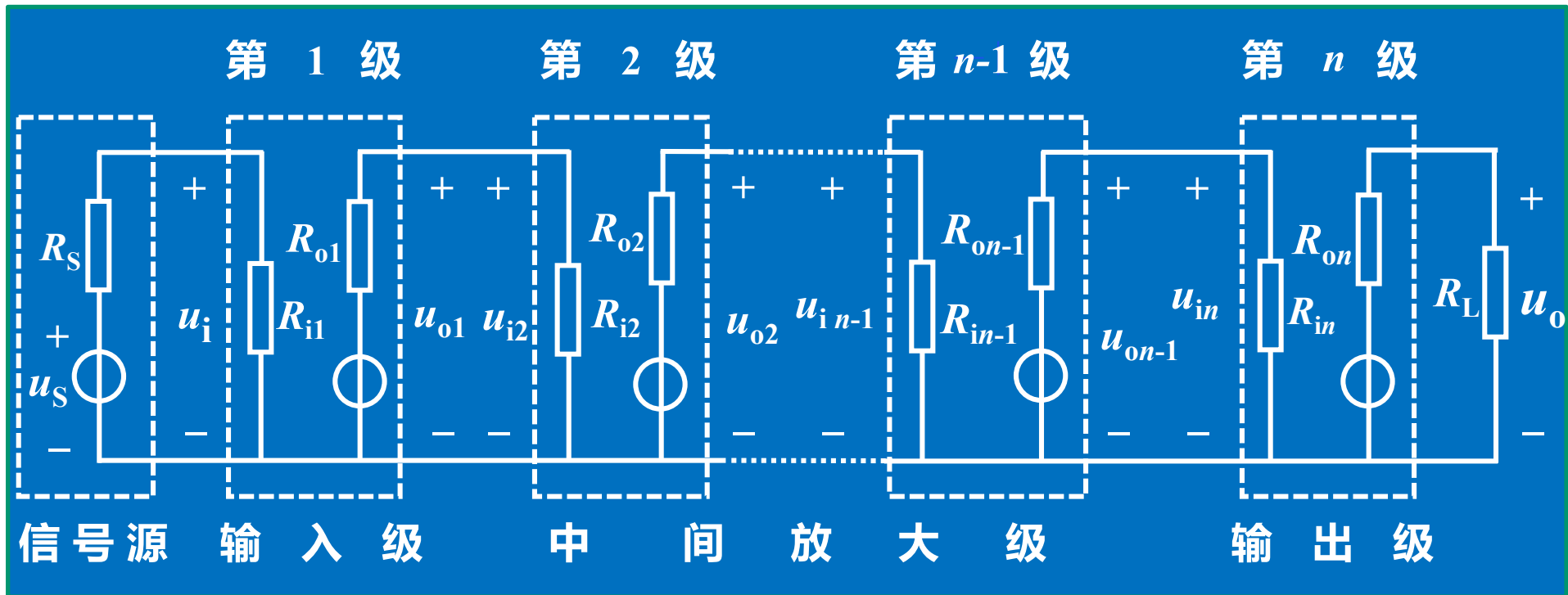
$$I_{CQ1} = I_{R_{C1}} + I_{BQ2} = (0.98 + 0.13)mA = 1.11mA \quad I_{BQ1} = \frac{I_{CQ1}}{\beta_1} = \frac{1.11}{50} mA = 0.022mA$$

$$I_{EQ1} = I_{CQ1} + I_{BQ1} = (1.11 + 0.022)mA \approx 1.13mA$$

$$U_{EQ1} = I_{EQ1}R_{e1} - V_{EE} = (1.13 \times 0.2 - 18)V = -17.8V$$

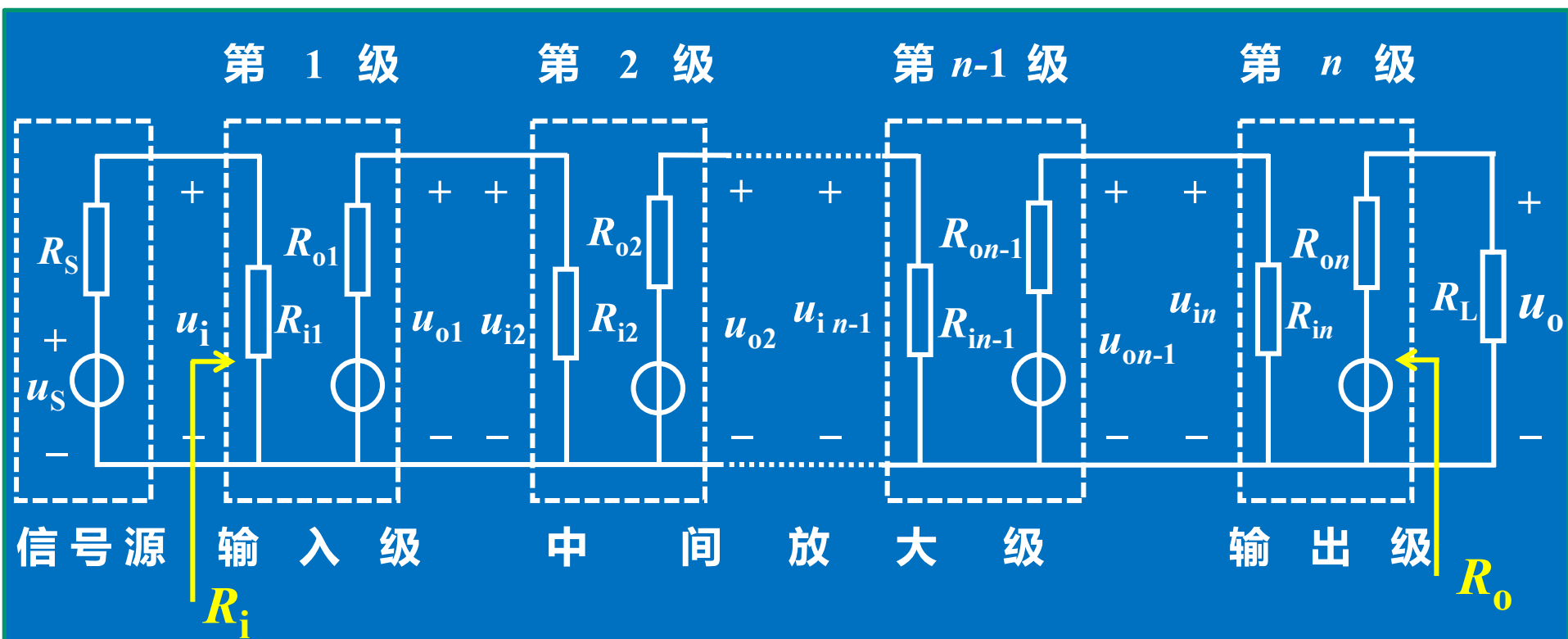
2.8.2 多级放大电路的动态参数

一、电压放大倍数



总电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积，即

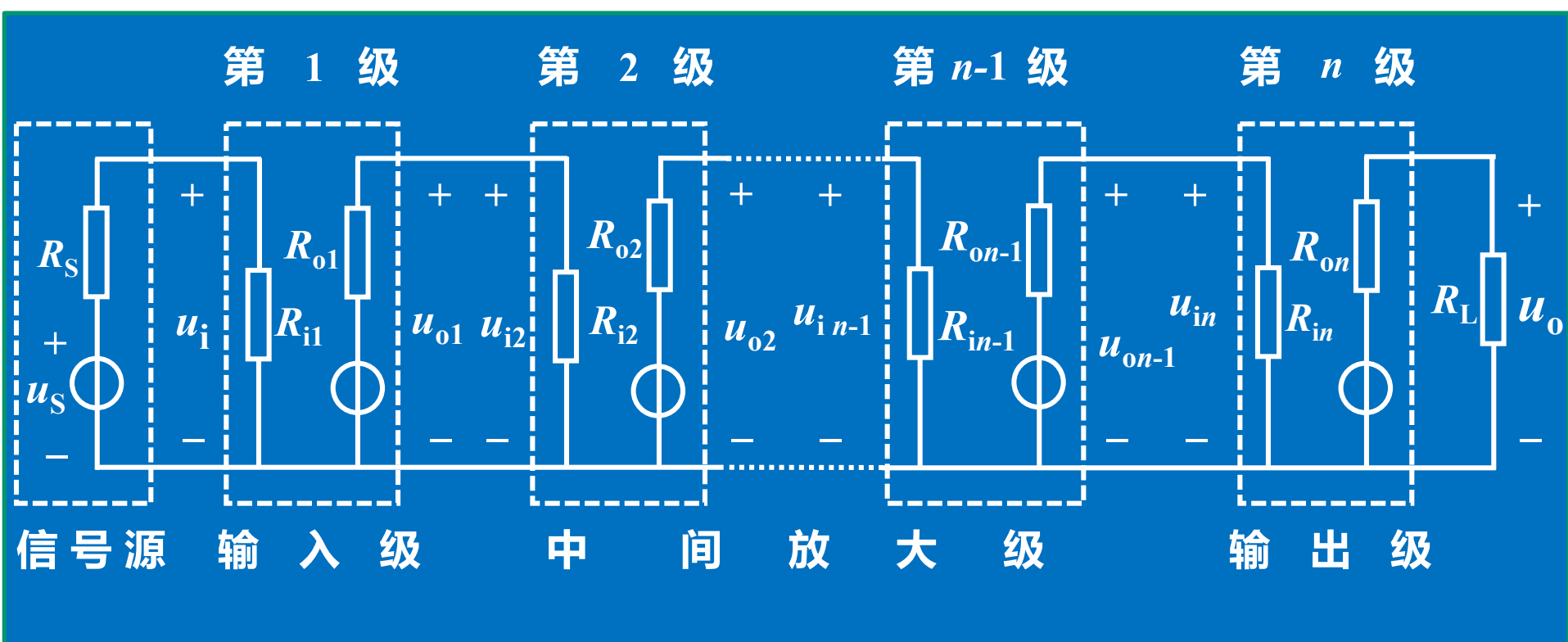
$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$$



二、输入电阻和输出电阻

输入电阻 $R_i = R_{i1}$

输出电阻 $R_o = R_{on}$



多级放大电路动态分析时应注意的两个问题

- 第 i 级放大电路的输入电阻应视为第 $i-1$ 级放大电路的负载电阻
- 第 $i-1$ 级放大电路的输出电阻应视为第 i 级放大电路的信号源内阻

【例】 图示电路中， $R_{b1} = 24 \text{ k}\Omega$ ， $R_{c1} = 3.9 \text{ k}\Omega$ ，
 $R_{c2} = 500 \text{ }\Omega$ ， $U_Z = 4 \text{ V}$ ， $\beta_1 = 45$ ， $\beta_2 = 40$ ， $V_{CC} = 24 \text{ V}$ ， 设
 稳压管的 $r_z = 50 \text{ }\Omega$ 。 试估算总的电压放大倍数 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ ，
 以及输入、输出电阻 R_i 和 R_o 。

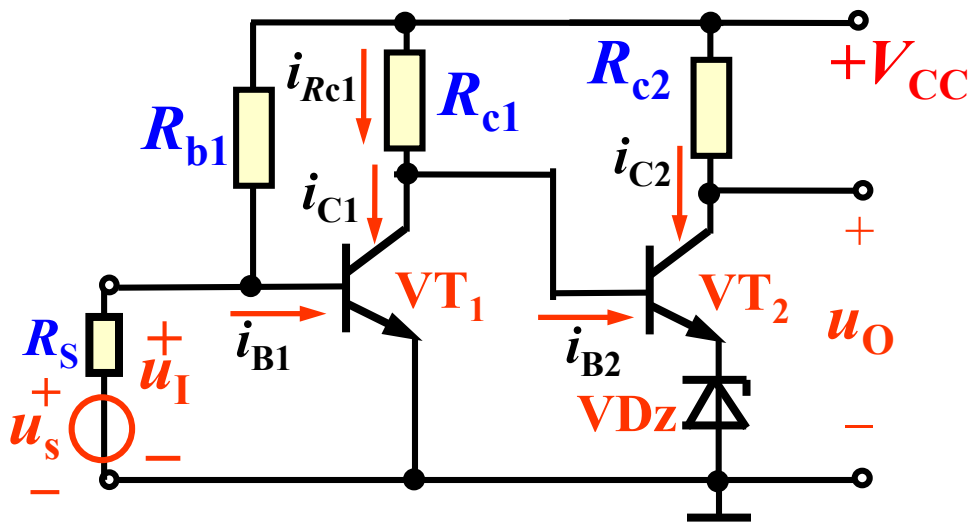
解：

$$r_{be1} = r_{bb'} + \beta_1 \frac{U_T}{I_{CQ1}}$$

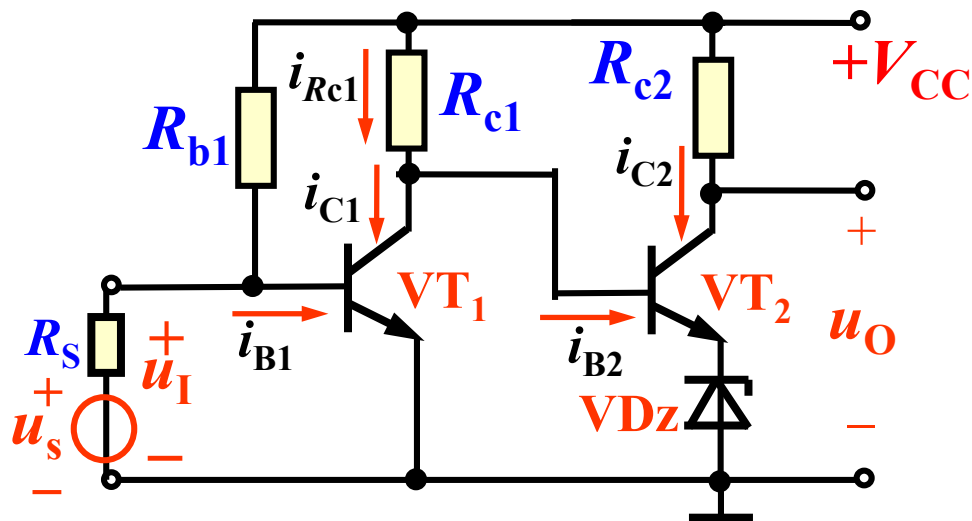
$$= \left(300 + \frac{45 \times 26}{4.5} \right) \Omega = 566 \Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + \beta_2 \frac{U_T}{I_{CQ2}}$$

$$= \left(300 + \frac{40 \times 26}{18} \right) \Omega = 358 \Omega$$



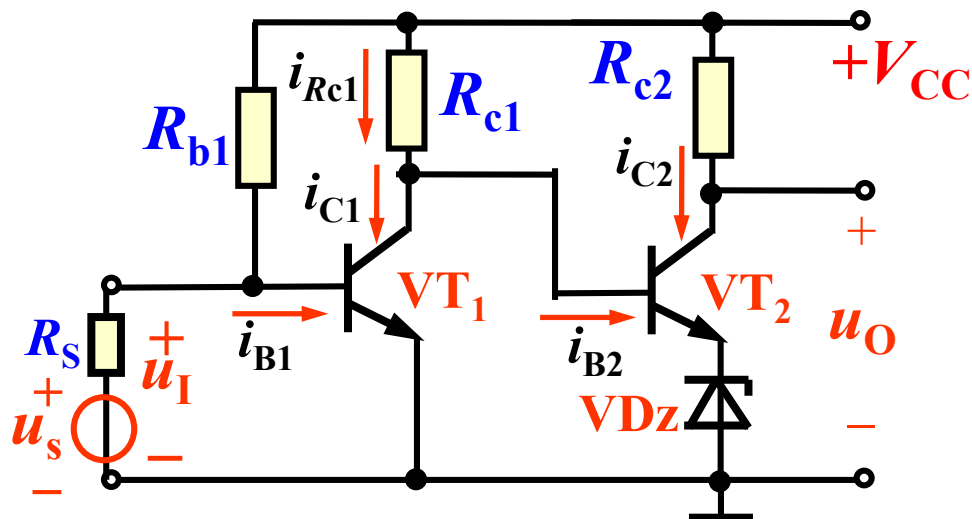
例题的电路



估算 A_{u1} 时，应将第二级 R_{i2} 作为第一级的负载电阻。

$$\begin{aligned}
 R_{i2} &= r_{be2} + (1 + \beta_2)r_z \\
 &= [358 + 41 \times 50] \, \Omega = 2408 \, \Omega \approx 2.4 \, \text{k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta_1(R_{c1} // R_{i2})}{r_{be1}} = - \frac{45 \times \frac{3.9 \times 2.4}{3.9 + 2.4}}{0.566} = -118$$

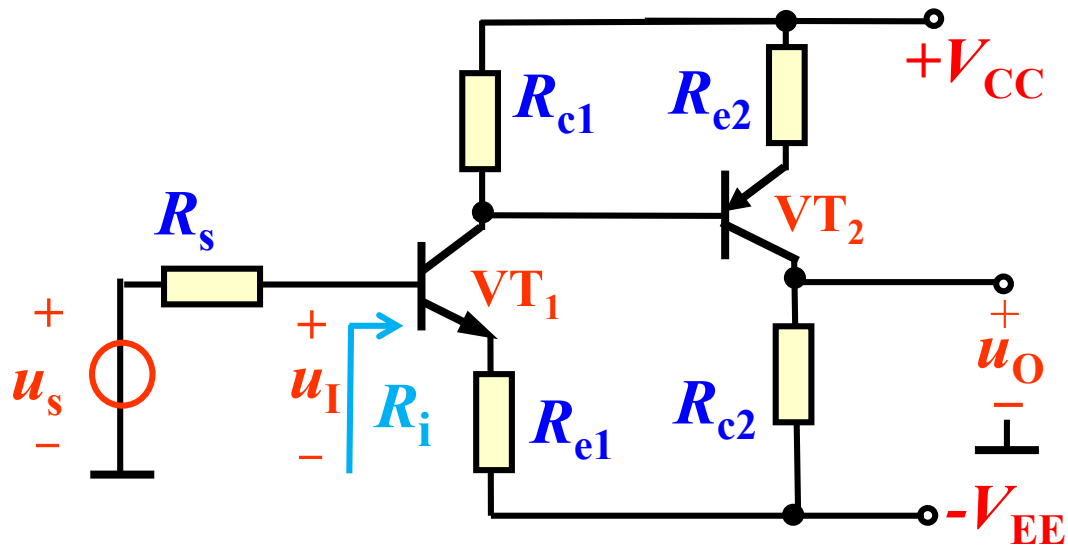


$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = - \frac{\beta_2 R_{c2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2) r_L} = - \frac{40 \times 500}{359 + 41 \times 50} = -8.3$$

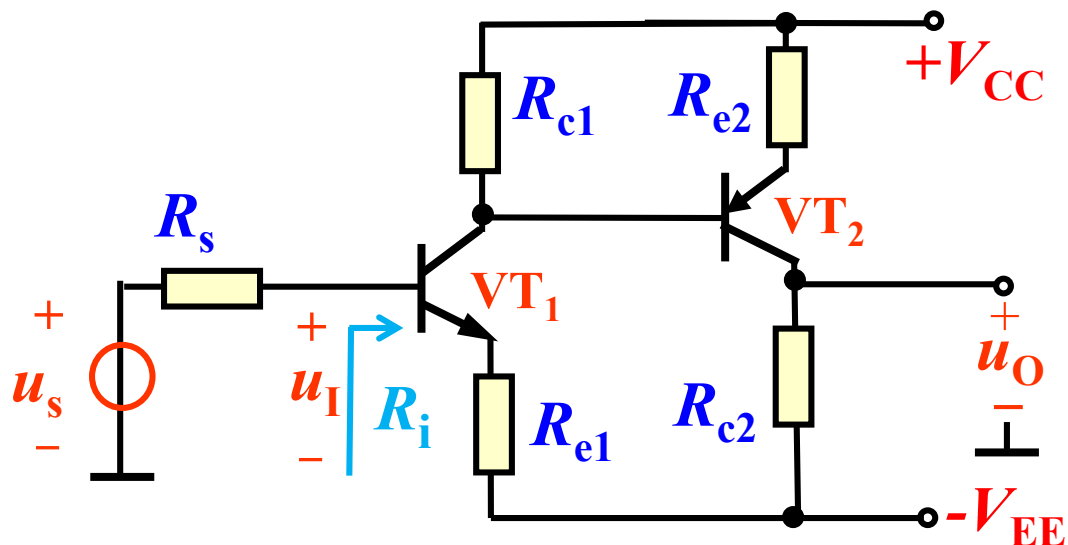
所以 $\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} = (-118) \times (-8.3) \approx 979$

$$R_i = R_{i1} = r_{be1} // R_{b1} \approx r_{be1} = 566 \Omega$$

$$R_o = R_{c2} = 500 \Omega$$



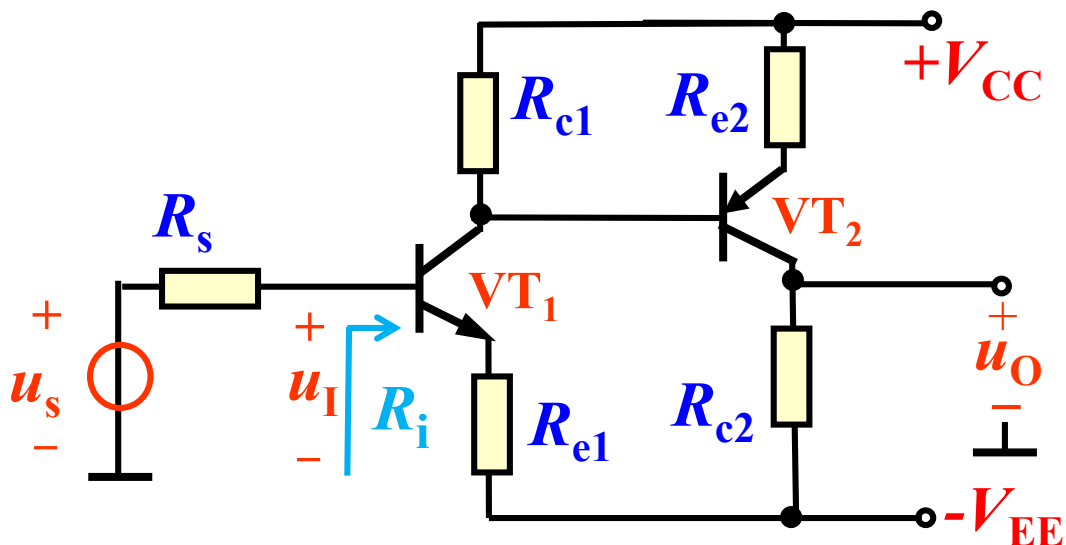
【例】 图示NPN和PNP管组成的双电源直接耦合放大电路中，已知： $V_{CC} = V_{EE} = 18\text{V}$ ， $R_{c1} = 5.6\text{ k}\Omega$ ， $R_{e1} = 200\Omega$ ， $R_{c2} = 4.7\text{ k}\Omega$ ， $R_{e2} = 1.2\text{ k}\Omega$ ，三极管的 $|U_{BEQ1}| = |U_{BEQ2}| = 0.7\text{ V}$ ， $\beta_1 = 50$ ， $\beta_2 = 30$ ，估算总的电压放大倍数 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ 以及输入、输出电阻 R_i 和 R_o 。



解:

$$r_{be1} = r_{bb'} + \beta_1 \frac{U_T}{I_{CQ1}} = \left(300 + \frac{51 \times 26}{1.13} \right) \Omega = 1473 \Omega \approx 1.47 \text{K}\Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + \beta_2 \frac{U_T}{I_{CQ2}} = \left(300 + \frac{31 \times 26}{3.96} \right) \Omega \approx 504 \Omega$$

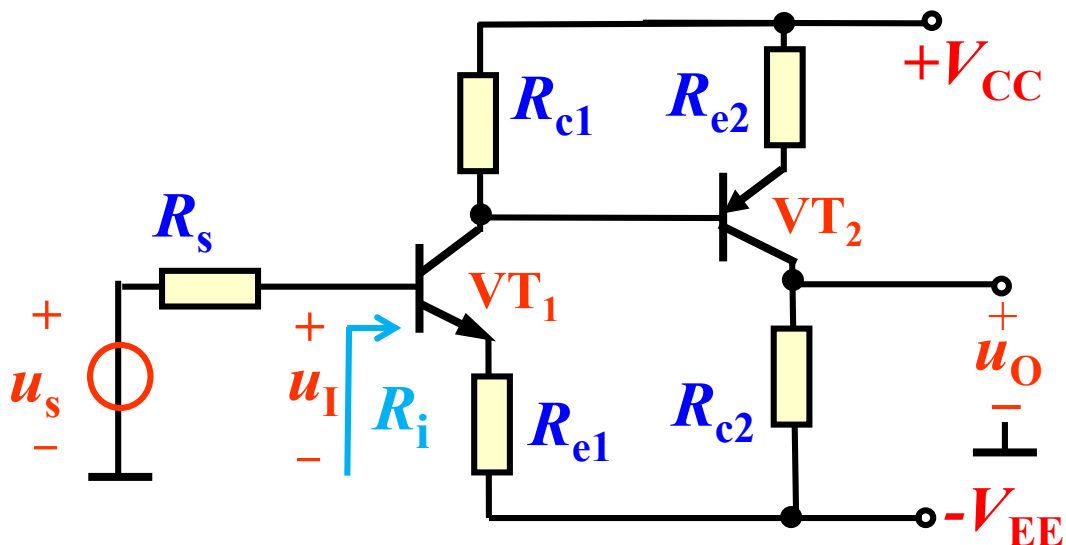


估算 A_{u1} 时，应将第二级 R_{i2} 作为第一级的负载电阻。

$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}$$

$$= (504 + 31 \times 1200) \Omega = 37704 \Omega \approx 37.7 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta_1(R_{c1} // R_{i2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R_{e1}} = - \frac{50 \times \frac{5.6 \times 37.7}{5.6 + 37.7}}{1.47 + 51 \times 0.2} = -20.9$$



$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = - \frac{\beta_2 R_{c2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2) R_{e2}} = - \frac{30 \times 4.7}{37.7} = -3.74$$

$$\text{所以 } \dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} = (-20.9) \times (-3.74) = 78.2$$

$$R_i = R_{i1} = r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{e1} = 11.7 k\Omega$$

$$R_o = R_{o2} = R_{c2} = 4.7 k\Omega$$