



第六章 基本放大电路

北京邮电大学电子工程学院

第六章 基本放大电路

本章主要内容：

- 基本共射放大电路的组成和基本原理
- 基本共射放大电路静态和动态分析
- 射极输出器
- 多级放大电路与频率特性
- 差分放大电路分析

本章重点：

- 掌握放大电路静态工作点的计算方法
- 理解放大电路的交流小信号模型
- 掌握放大电路的动态分析方法。

第六章 基本放大电路

§6-1 基本共射放大电路 ◊

§6-2 其他放大电路 ◊

§6-3 场效应管放大电路 ◊

§6-4 多级放大电路与频率特性 ◊

§6-5 差分放大电路 ◊

6-1 基本共射放大电路

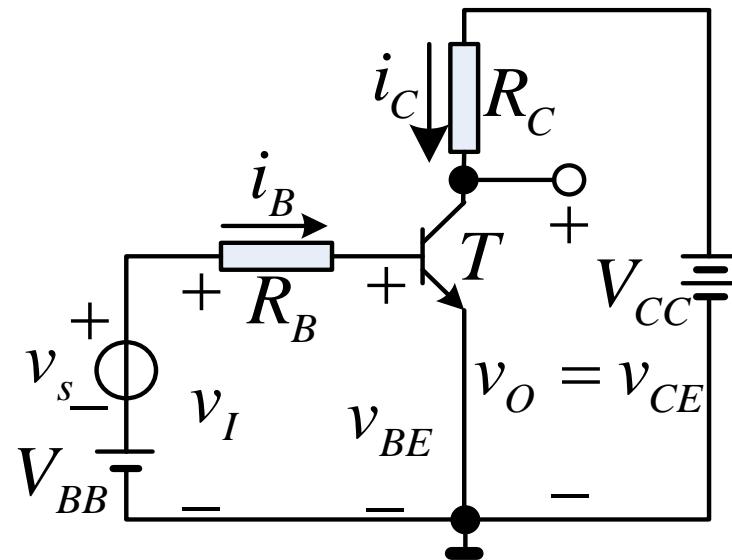
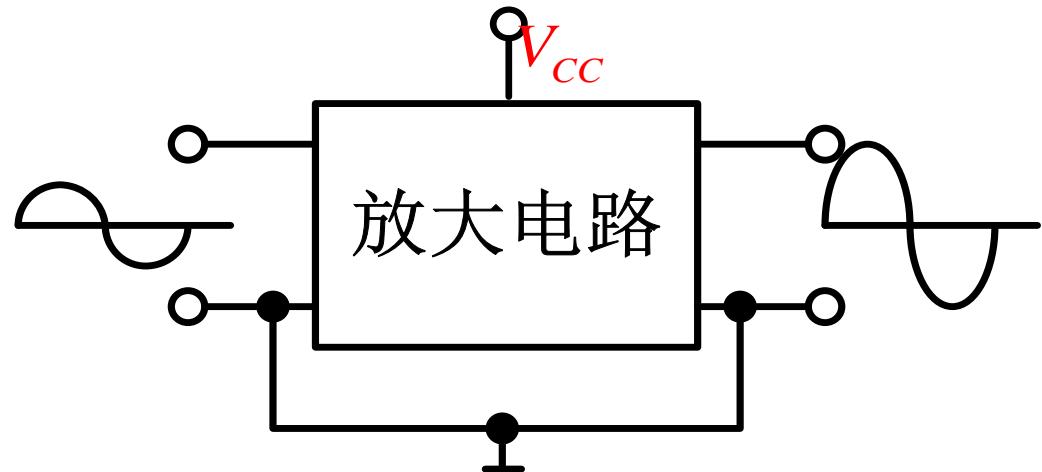
主要内容

1. 共射放大电路的组成
2. 共射放大电路的静态分析
3. 分压式偏置放大电路
4. 共射放大电路的动态分析

0.放大电路的概念

- 放大电路的概念：

- 将微弱输入信号不失真地增强，使输出电压或电流在幅度上得到放大，从而可以得到所需要的功率。
- 由于信号是连续的，称为模拟信号。处理模拟信号的电路称为模拟电路。



0.放大电路的概念

放大电路分析的基本思路

问题

- 纯交流信号无法使三极管保持在放大状态（无法进行线性放大）
- 放大的能量从哪来

首先分析直流偏置是否有效

- 三极管是否在放大状态
- 交流信号的幅度限制

再分析交流小信号的放大效果

- 如何评价小信号放大能力

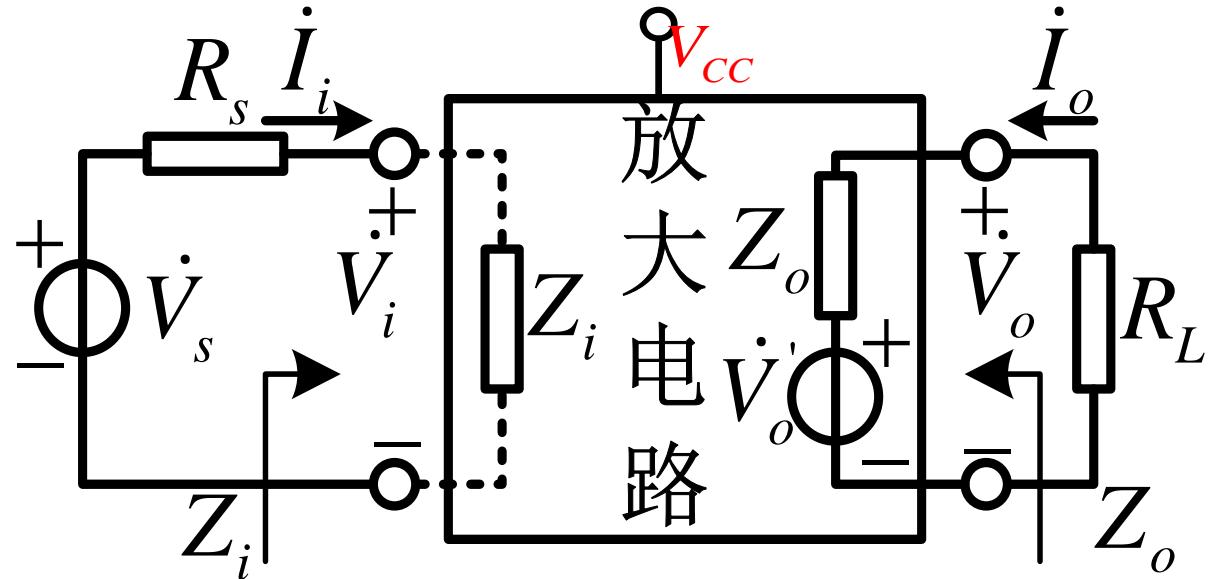
低频交流小信号模型的用途

分析放大电路的限制

- 频率限制
- 失真问题

0. 放大电路的概念

放大电路的主要性能指标



电压放大倍数 $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$

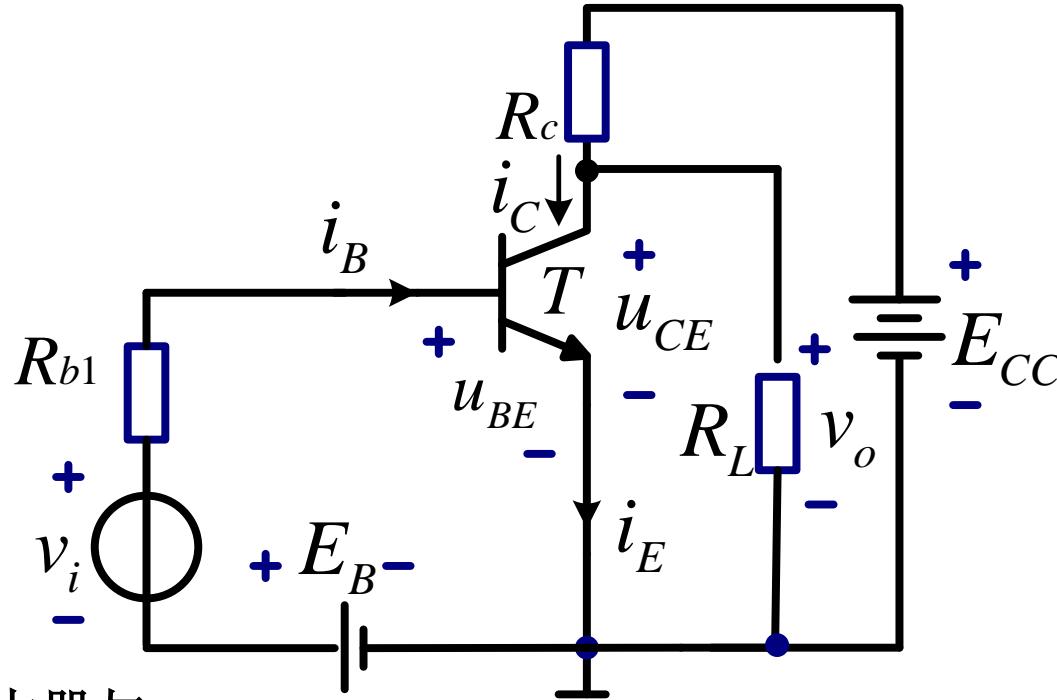
输入阻抗 $Z_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$

输出阻抗：输出端戴维南等效阻抗。

6-1-1 共射放大电路的组成和各元件作用

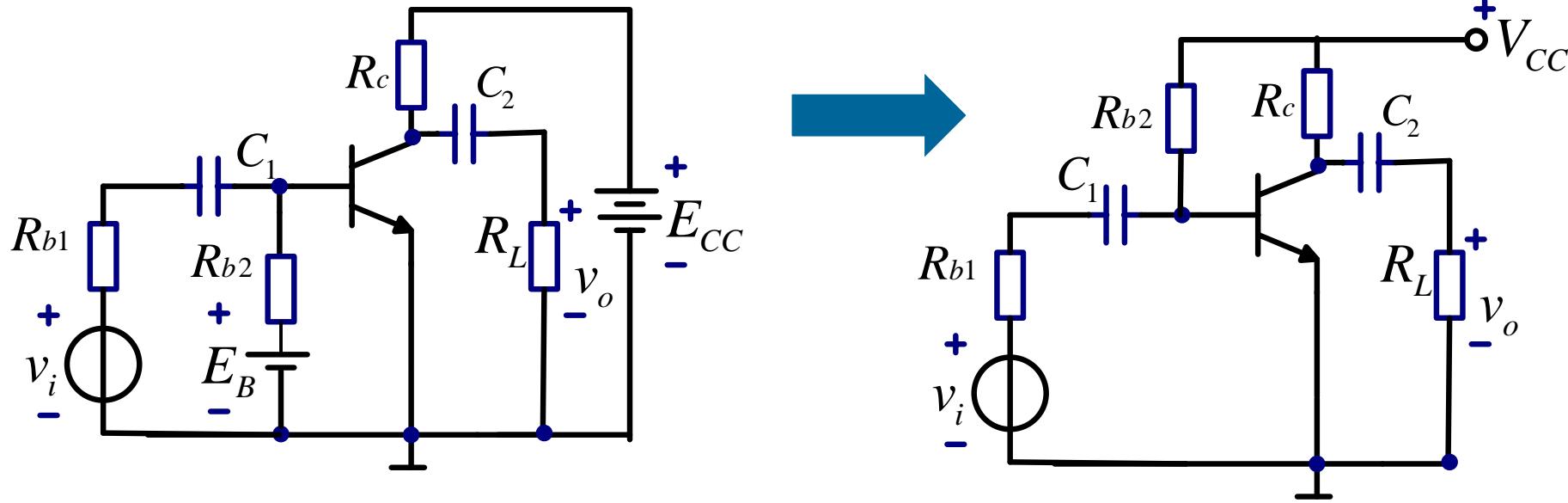
组成及作用：

- 输入信号、输出信号
- 三极管
- 集电极直流电源
- 集电极电阻
- 基极直流电源和基极电阻



直接耦合：信号源与放大器、放大器与负载通过电阻或导线连接

- 没有隔离信号源与直流信号的相互影响。
- 多级放大器级联时，会提升下一级三极管的静态工作点



阻容耦合放大电路

阻容耦合：信号源与放大器、放大器与负载通过电容连接

- 隔离直流、导通交流信号的作用。 直流通路： 直流信号通过的路径

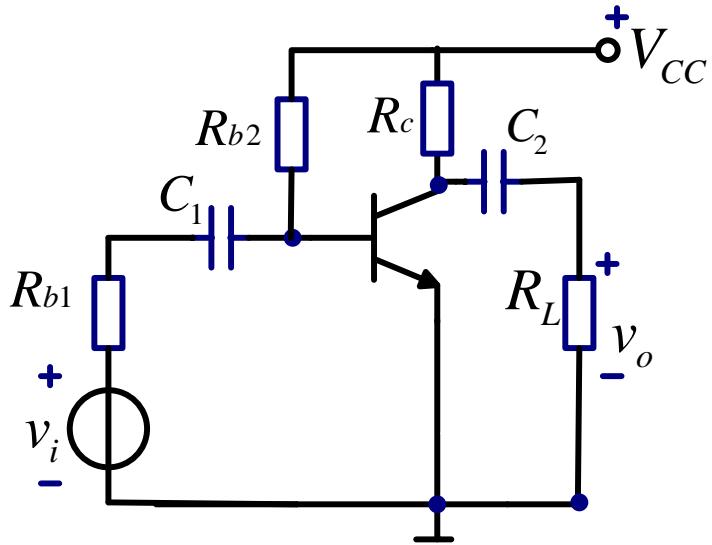
- C_1, C_2 称为耦合电容

电容视为开路

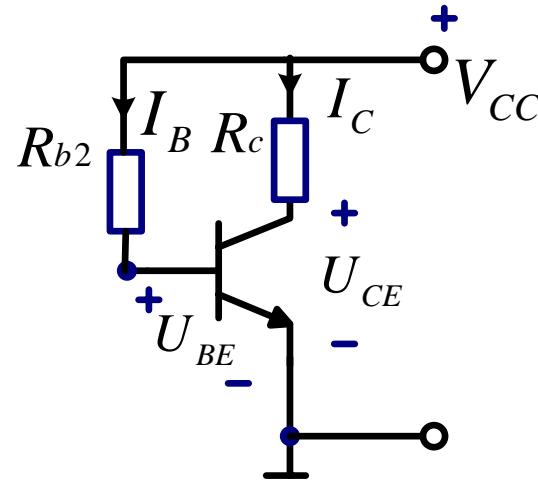
交流通路： 电容短路, 直流电源置零

适当的修改 R_{b2} 改接成由单电源供电电路

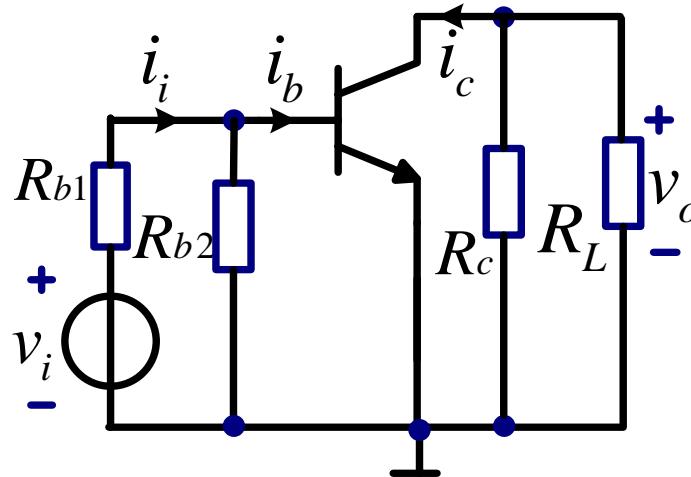
【例】 绘制基本共射放大电路的直流信号通道和交流信号通道。



共射放大电路的
交流通路

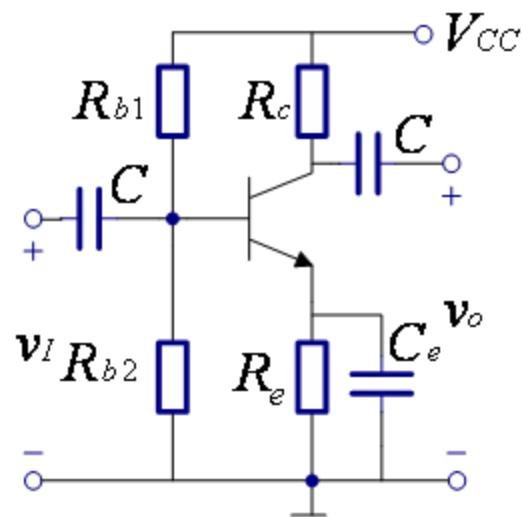


共射放大电路的直流通路

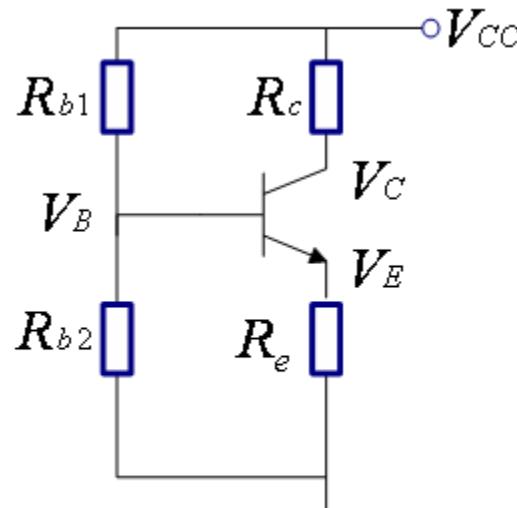


【例】绘制如图所示电路的直流信号通道和交流信号通道。

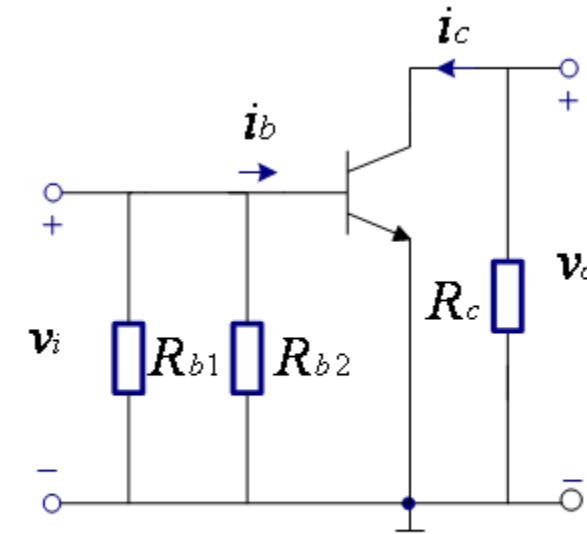
分析：对于直流信号来说，电容处于开路状态，对于交流信号来说，电容和电源处于短路状态。



(a) 基本电路



(b) 直流通道



(c) 交流通道

6-1-2 共射放大电路的静态分析

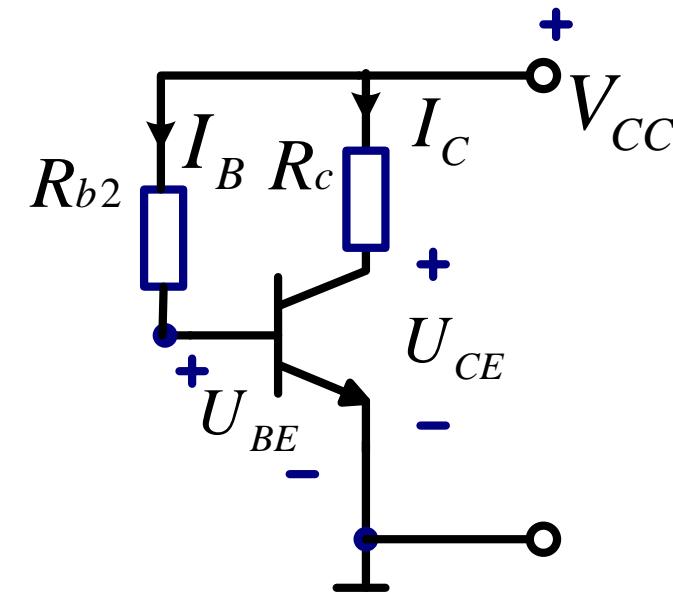
1. 电路静态工作点与直流通路

静态工作点：指没有输入信号时 $v_i = 0$

三极管各极的电压、电流值是不变的，是直流量，可用 $U_{BE}, I_B, U_{CE}, I_C, I_E$ 表示

在输入特性、输出特性曲线上表示的是一个点，称它们为静态工作点（也称Q点、直流工作点）

静态分析就是确定放大电路的直流状态，常采用估算法和图解法。

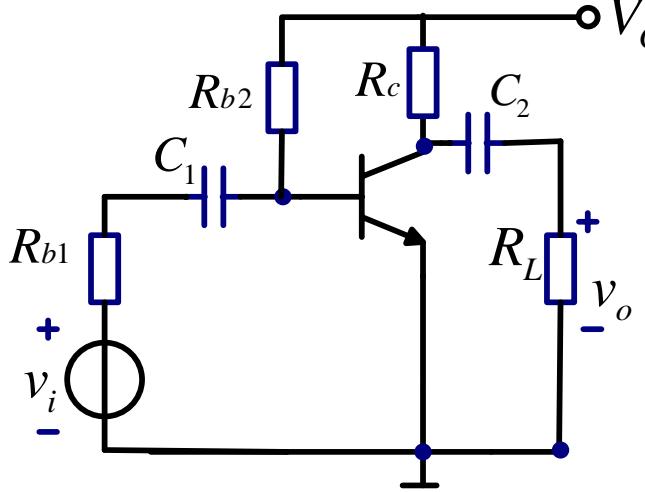


共射放大电路的直流通路

2. 估算法：根据电路的基本结构和使用的器件，利用电路分析的基本理论，确定Q点： $U_{BEQ}, I_{BQ}, I_{CQ}, U_{CEQ}$

【例】试估算如图所示放大电路的静态工作点。设

$$V_{CC} = 12V, R_{b2} = 280k\Omega, R_c = 3k\Omega, \text{ 三极管 } \beta = 50$$



解：首先估算出基极电流

U_{BEQ} 为晶体三极管的发射结电压，

硅管约为 $0.6 \sim 0.7V$

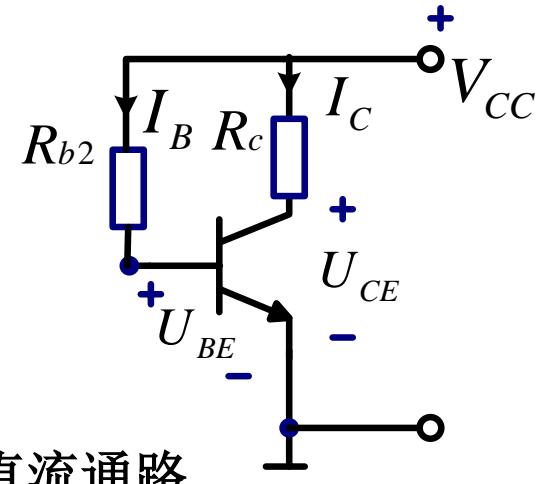
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{280} = 0.04mA$$

根据晶体三极管的放大特性可知：

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.04 = 2mA$$

最后根据KVL定律可得：

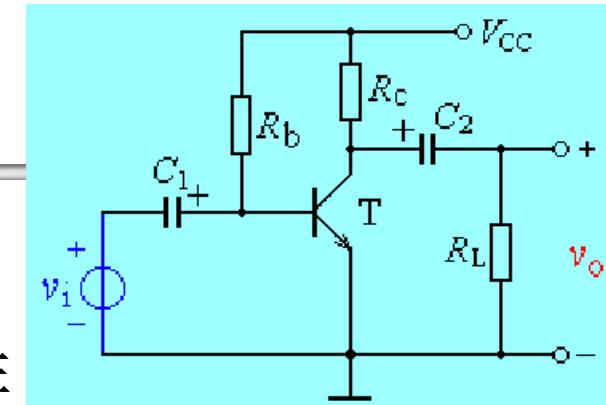
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 12 - 2 \times 3 = 6V$$



直流通路

例：放大电路如图所示，已知三极管的 $\beta=80$ ，
 $R_b=300k$, $R_c=2k$, $V_{CC}=+12V$, 求：

- (1) 放大电路的Q点。此时BJT工作在哪个区域？
- (2) 当 $R_b=100k$ 时，放大电路的Q点。此时BJT工作在哪个区域？



共射极放大电路

解：(1) $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{12V}{300k} = 40\mu A$ $I_C = \beta \cdot I_B = 80 \times 40\mu A = 3.2mA$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_c \cdot I_C = 12V - 2k \times 3.2mA = 5.6V$$

三极管工作在放大区。

(2) 当 $R_b=100k$ 时， $I_B = \frac{V_{CC}}{R_b} \approx \frac{12V}{100k} = 120\mu A$ $I_C = \beta \cdot I_B = 80 \times 120\mu A = 9.6mA$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_c \cdot I_C = 12V - 2k \times 9.6mA = -7.2V$$

V_{CE} 不可能为负值，其最小值只能为0，此时 I_C 的值最大，即：

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_c} \approx \frac{12V}{2k} = 6mA$$

由于 $\beta \cdot I_B > I_{CM}$ ，所以三极管工作在饱和区

估算法总结

画出直流通路后，基本步骤如下：

- ①考察基极的工作状态，看基极为三极管提供了什么样的静态工作电流。
- ②根据基极电流与集电极电流的比例关系，估算出集电极电流与发射极电流大小。
- ③最后根据基尔霍夫电压定律，估算出集电极与发射极间电压的大小。

3. 用图解法确定静态工作点（了解）

图解法：在半导体放大器件的输入、输出特性曲线上用作图的方法确定静态点或动态工作情况。

图解法的基本分析步骤和过程如下：

- ①获得半导体放大器件的特性曲线。
- ②根据电路结构和电路分析理论绘制直流负载线，确定静态工作点

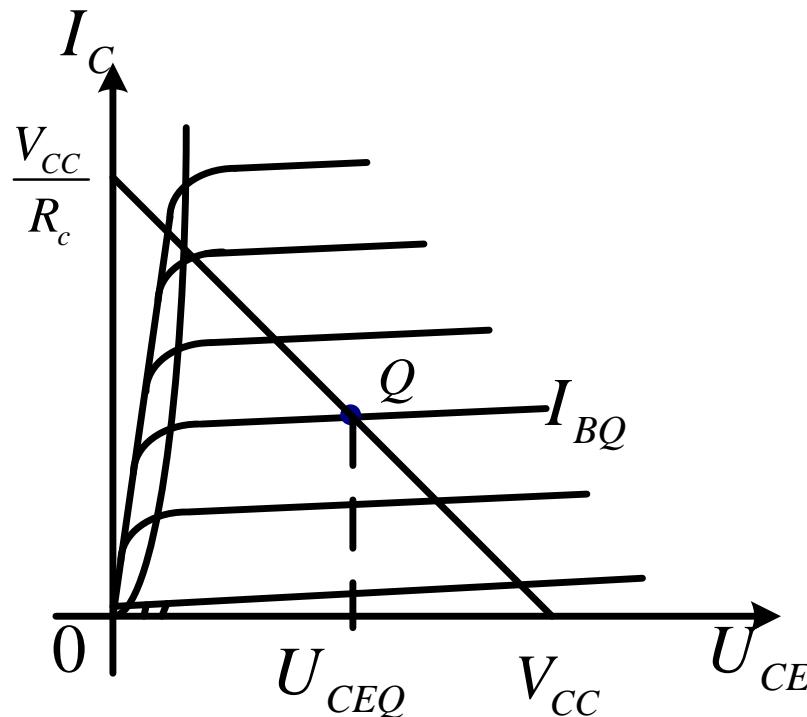
以三极管共射极放大电路为例，如图：

首先，在输出曲线上确定与基极电流 I_{BQ} 对应的曲线，

然后，画出直流负载线 $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$

两条线的交点(Q)就是静态工作点

直流静态工作点是放大器工作的基础，当有信号输入时，电路将在静态工作点附近工作（变化）



6-1-3 分压式偏置放大电路

一、温度对静态工作点的影响

1. 温度对反向饱和电流 I_{CBO} 的影响，温度每升高 $10^{\circ}C$

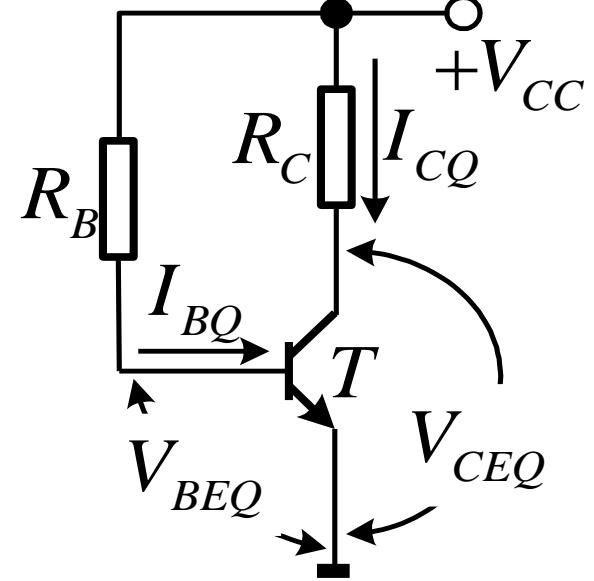
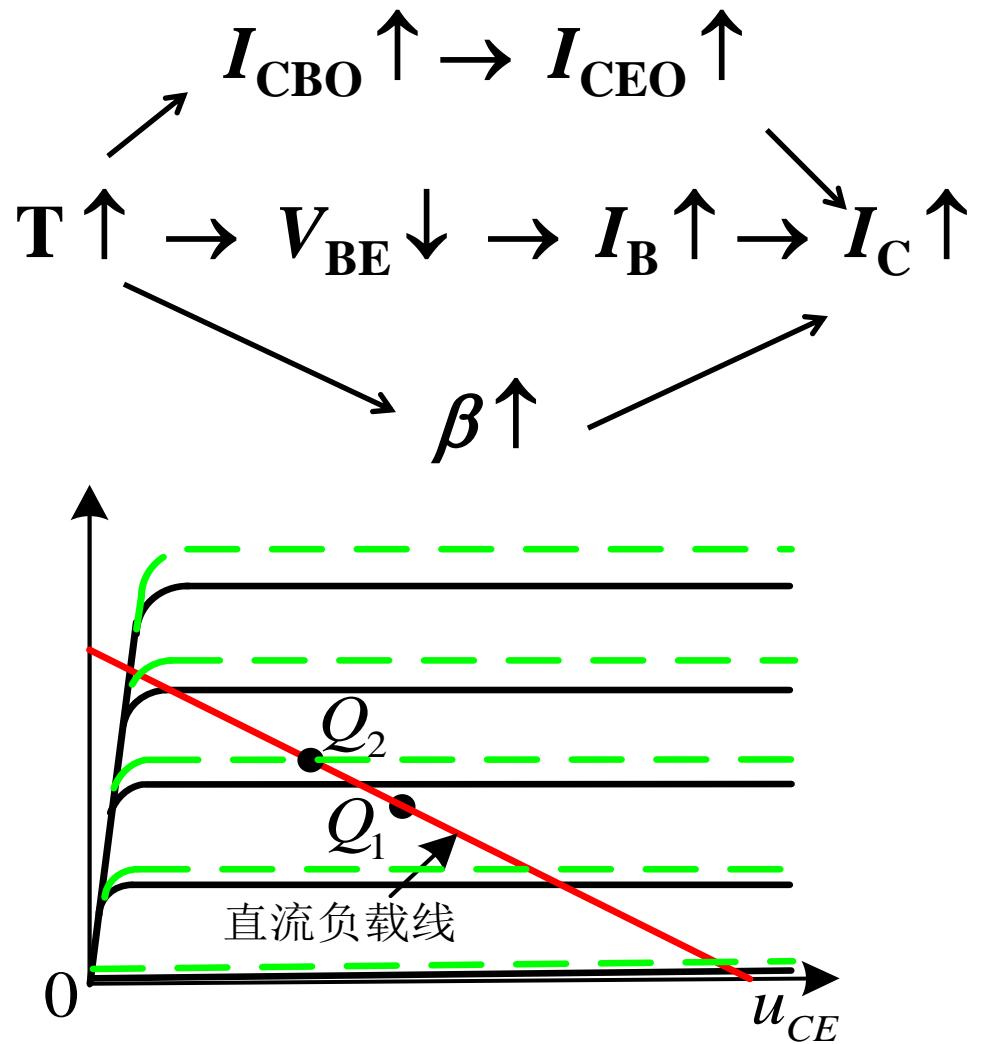
I_{CBO} 约为增加一倍，穿透电流 $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$

又 $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$ ，导致 I_C 增大

2. 温度对电流放大系数的影响 晶体管的电流放大系数会随温度的升高而增大。

3. 温度升高时，三极管的输入特性曲线整体向左平移

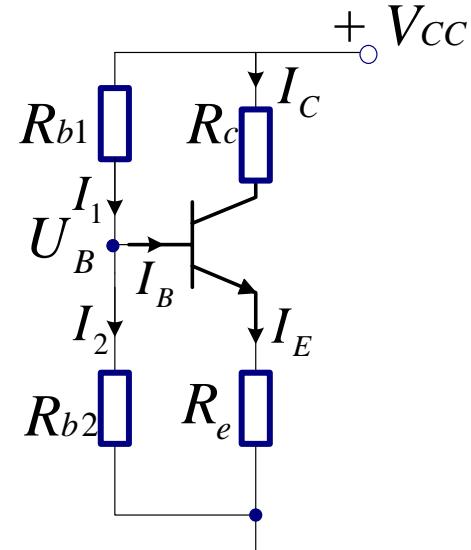
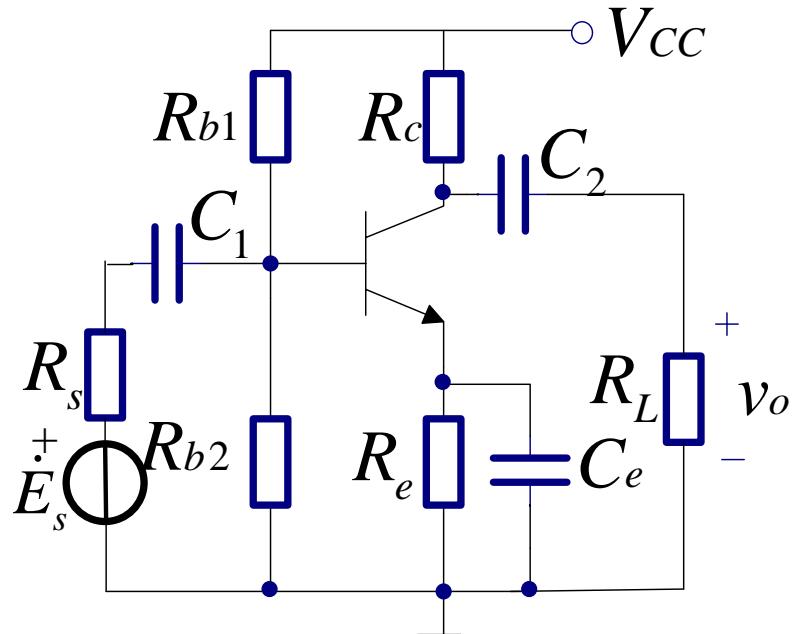
二、分压式偏置放大电路



固定偏流电路：容易受到环境温度变化等因素的影响。

二、分压式偏置放大电路

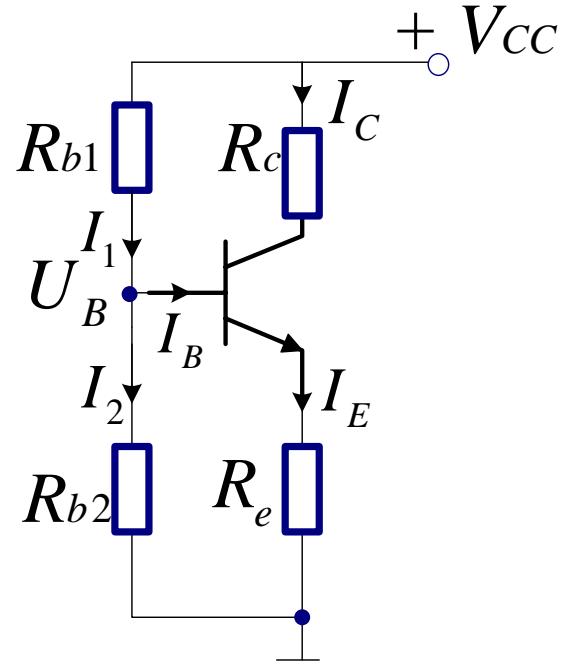
- 1.选择温度性能好的元件，或采取恒温措施
- 2.能够自动稳定静态工作点的分压式偏置放大电路



分压式偏置放大电路及其直流通路

二、分压式偏置放大电路

分压式偏置放大电路的静态分析可以采用估算法和戴维南等效法。
估算法分析流程如下：



若 满 足： $I_2 \gg I_B$ $I_1 \approx I_2 \approx \frac{V_{CC}}{R_{b1} + R_{b2}}$

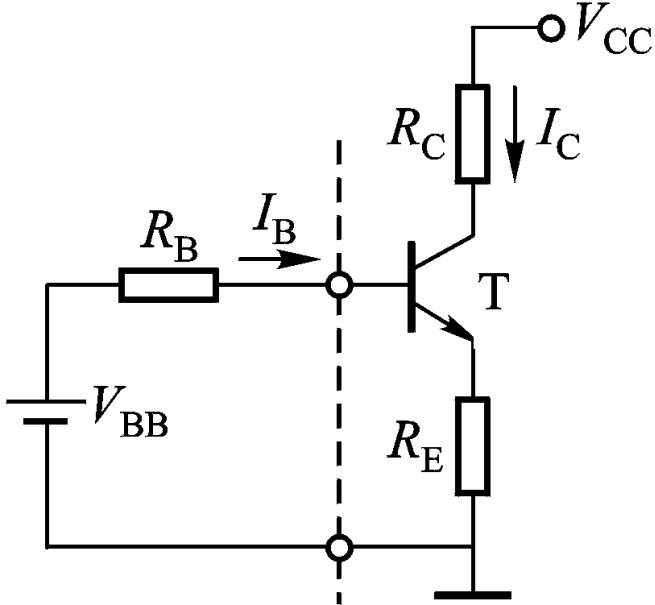
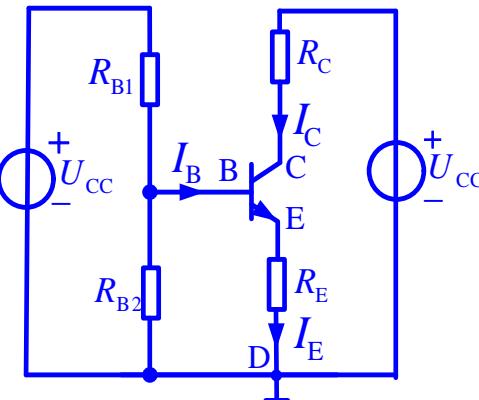
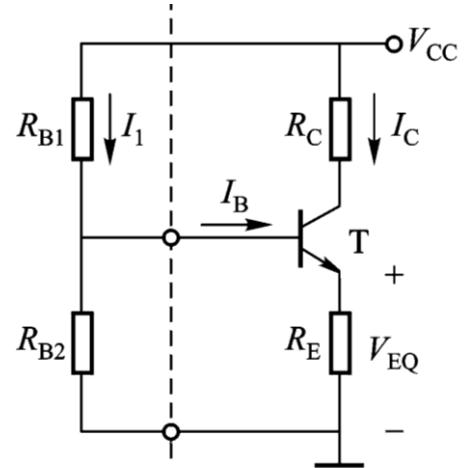
$$U_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

基极电位基本恒定，不随温度变化。

若 满 足： $U_B \gg U_{BE}$ $I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{U_B}{R_E}$

二、分压式偏置放大电路

(参考) 戴维南等效分析流程如下:



$$V_{BB} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

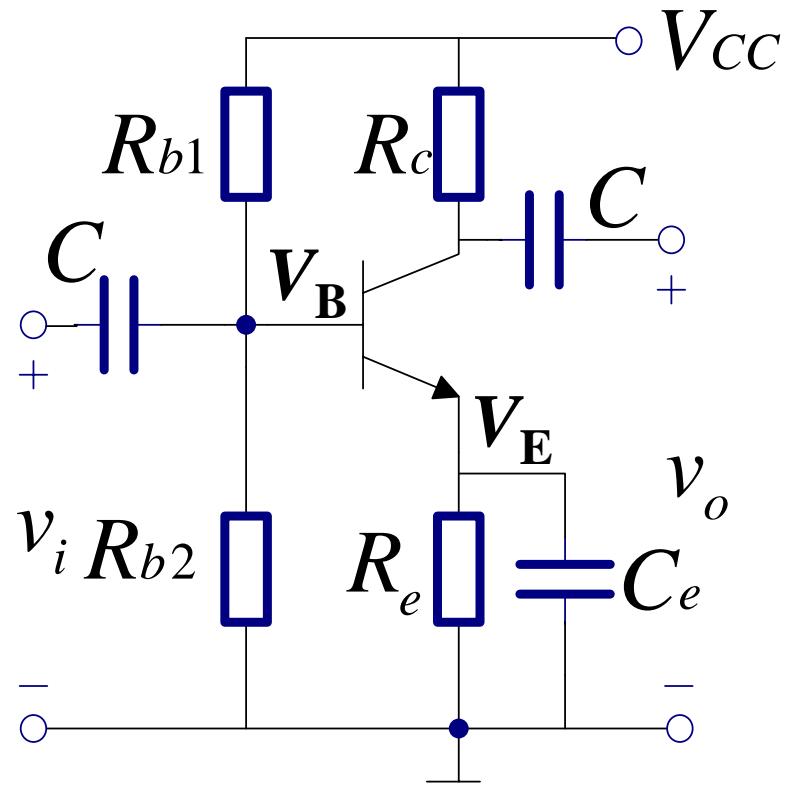
$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

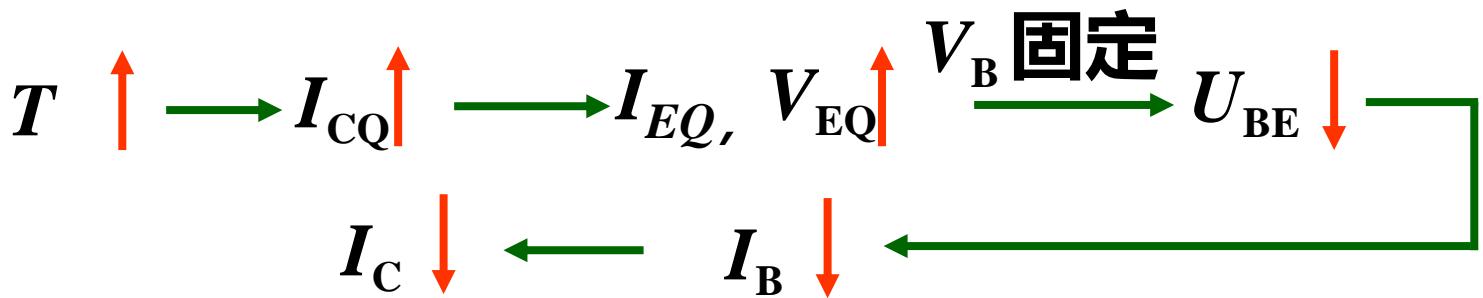
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_E R_E \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

$R_B \ll (1 + \beta)R_E$ 或 $I_1 \gg I_B$ 时，两种计算结果基本一样。实际电路的设计，多数都满足。

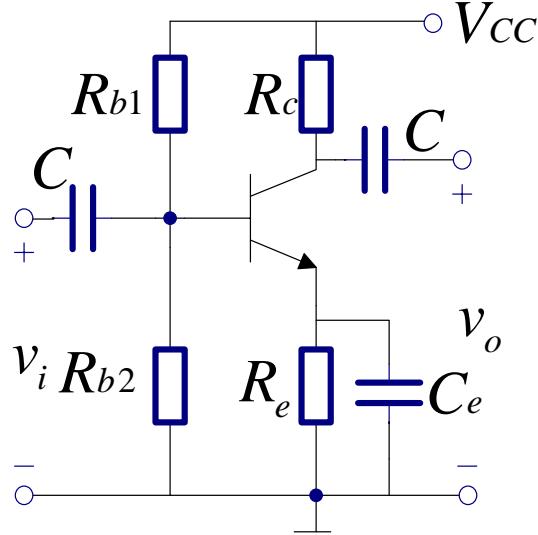
Q 点稳定的物理过程



- R_E : 温度补偿电阻
- 对直流: R_E 越大, 稳定 Q 点效果越好;
- 对交流: R_E 越大, 交流损失越大, 为避免交流损失加旁路电容 C_E 。



【例】试估算如图所示放大电路的静态工作点。设三极管的 $r_{be} = 700\Omega$, $\beta = 50$
 $V_{CC} = 12V$, $R_{b1} = 110k\Omega$, $R_{b2} = 40k\Omega$, $R_c = 1k\Omega$, $R_e = 500\Omega$, $C = C_e = 1\mu F$



解：

设 R_{b1} 、 R_{b2} 中的电流远
大于基极电流

$$U_B = 12 \times \frac{40}{110 + 40} V = 3.2V \quad U_E = (3.2 - 0.7)V = 2.5V$$

$$I_{EQ} = (\beta + 1) I_{BQ} = \frac{2.5}{500} A = 5mA$$

$$I_{CQ} = I_{EQ} \frac{\beta}{\beta + 1} = 4.9mA$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = 0.098mA = 98\mu A$$

$$U_{CQ} = (12 - 0.0049 \times 1000)V = 7.1V$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = 4.6V$$

6-1-4 共射放大电路的动态分析

动态 —— 有输入信号时电路的工作状态

动态时电路中的信号为交、直流混合信号。

电路中各处的电压和电流是直流电源和交流电源共同作用的结果，因此分析放大电路时可用叠加法分别讨论

动态分析主要采用图解法和微变等效电路法；

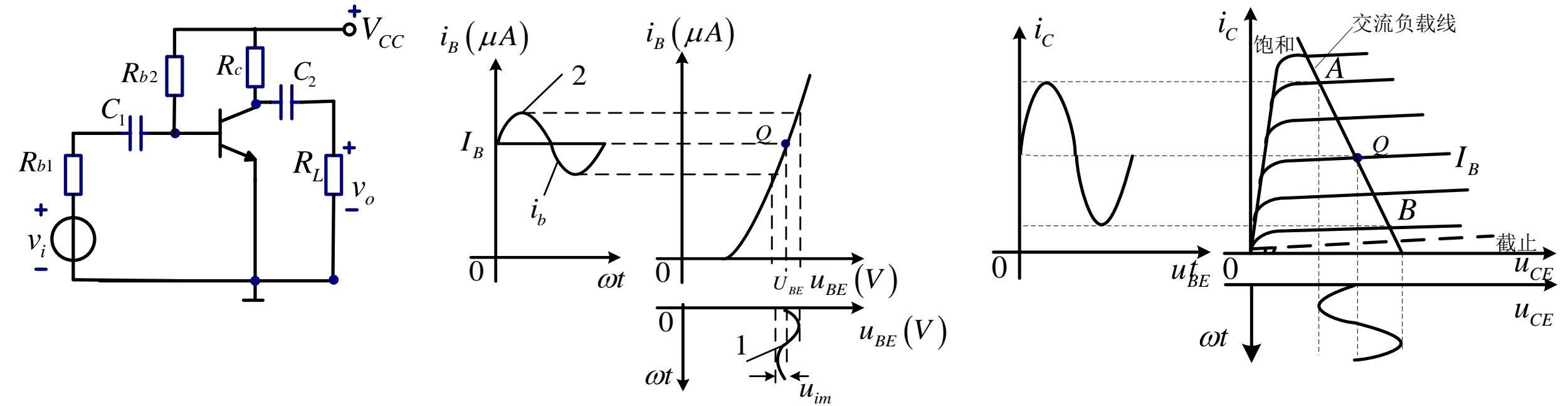
估算法只能分析静态工作点

微变等效法只能分析交流通路，用于放大电路性能指标的分析计算

图解法既可以分析静态也可以分析动态，

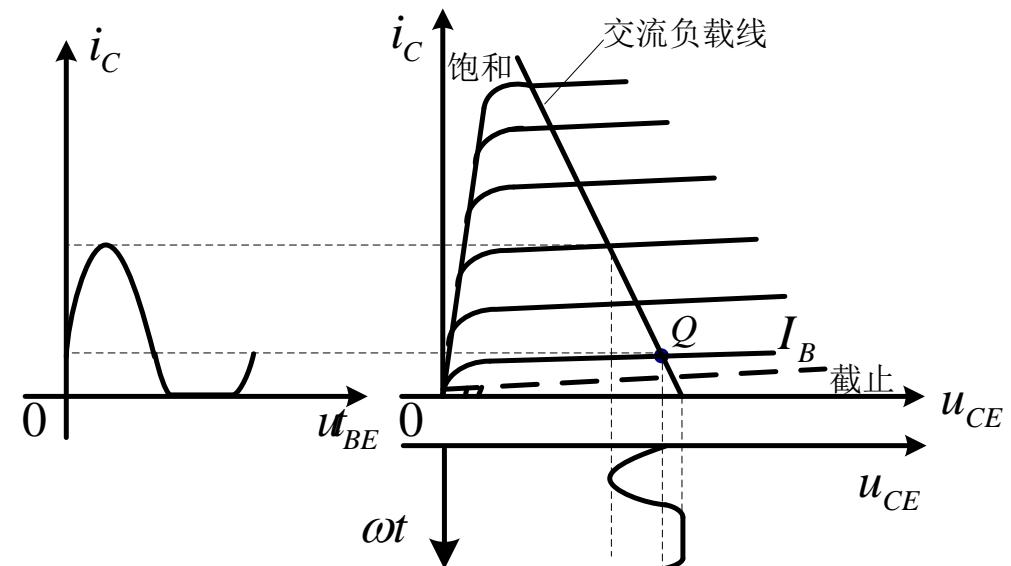
图解法的优点是：直观地发现非线性失真

交流分析中的图解法



交流分析中的图解法

- 非线性失真
 - 静态工作点设置不当或者动态工作点若移动范围过大，使得动态工作点超出了三极管的线性区域
- (1) 截止失真
- 工作点Q过低， i_B 一部分会进入截止区，底部被削平
 i_C 被“削底”，输出电压被“削顶”
- 改善截止失真的办法是提高静态工作点



交流分析中的图解法

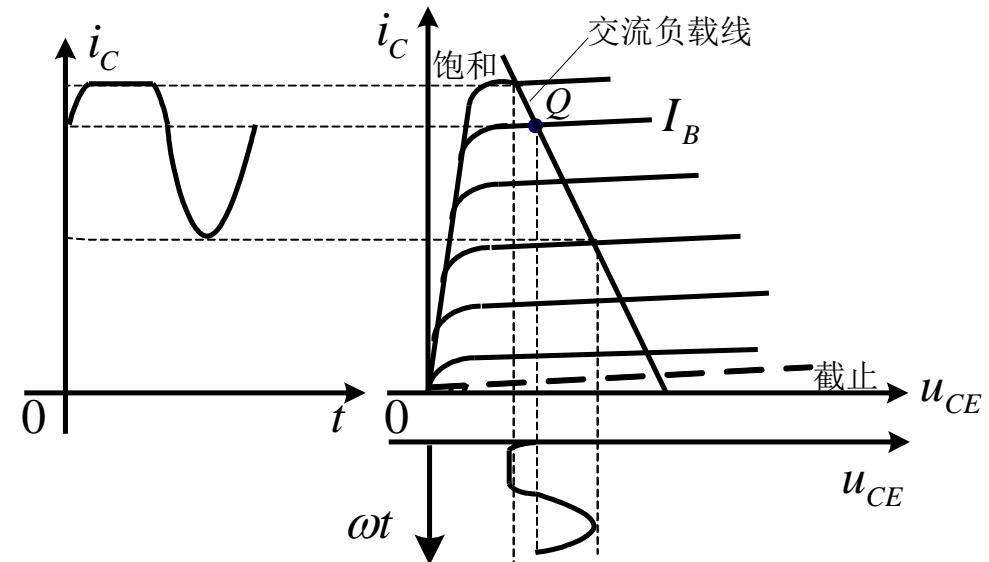
- 非线性失真
 - 静态工作点设置不当或者动态工作点若移动范围过大，使得动态工作点超出了三极管的线性区域

(2) 饱和失真

工作点Q过高， i_B 一部分会进入饱和区，顶部被削平

i_C 被“削顶”，输出电压被“削底”

改善饱和失真的办法是降低静态工作点



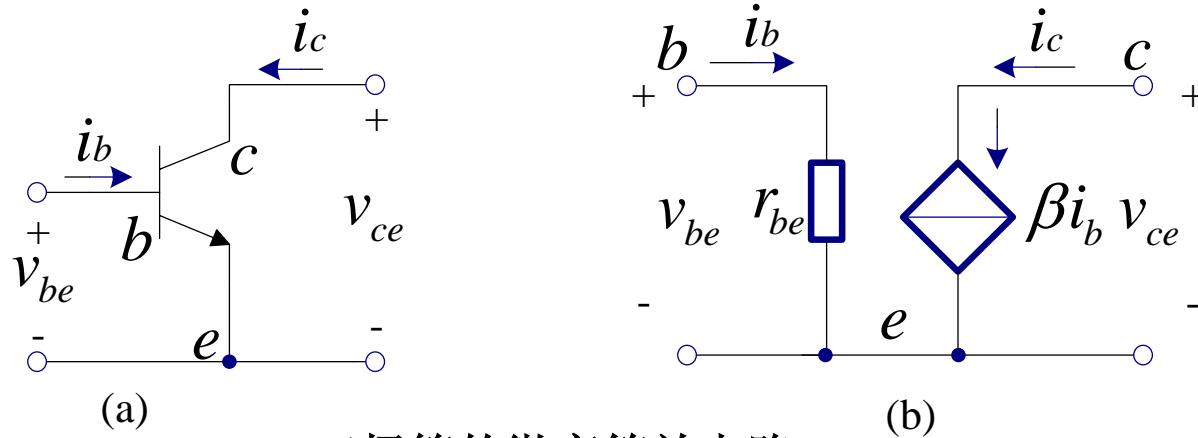
二、用微变等效法进行放大电路的动态分析

微变：输入信号很小，电路中的电压、电流都只是在静态值的基础上做微小变化，在输入输出特性曲线上近似为直线。

等效电路：用器件的微变等效电路代替器件，得到微变等效电路图

微变等效电路分析法：

- ① 据放大电路画出电路的交流通路；
- ② 用三极管微变等效电路模型代替三极管，画出微变等效电路；
- ③ 在微变等效电路中分析电路功能和工作特性



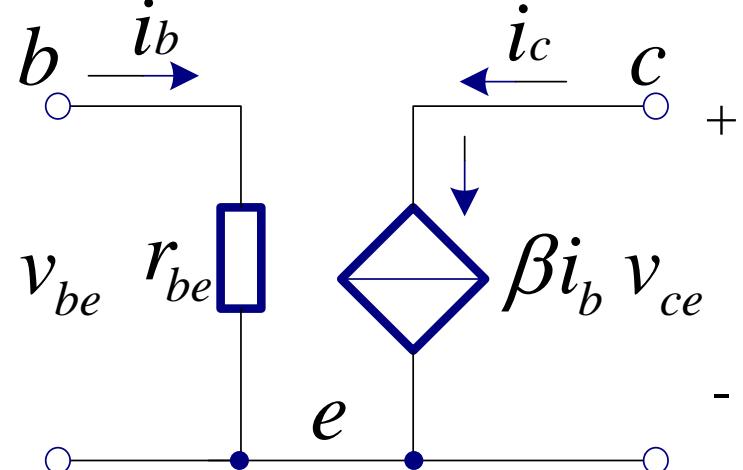
- β 一般用测试仪测出;
- r_{be} 与 Q 点有关, 可用图示仪测出
一般也用公式估算 r_{be}

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

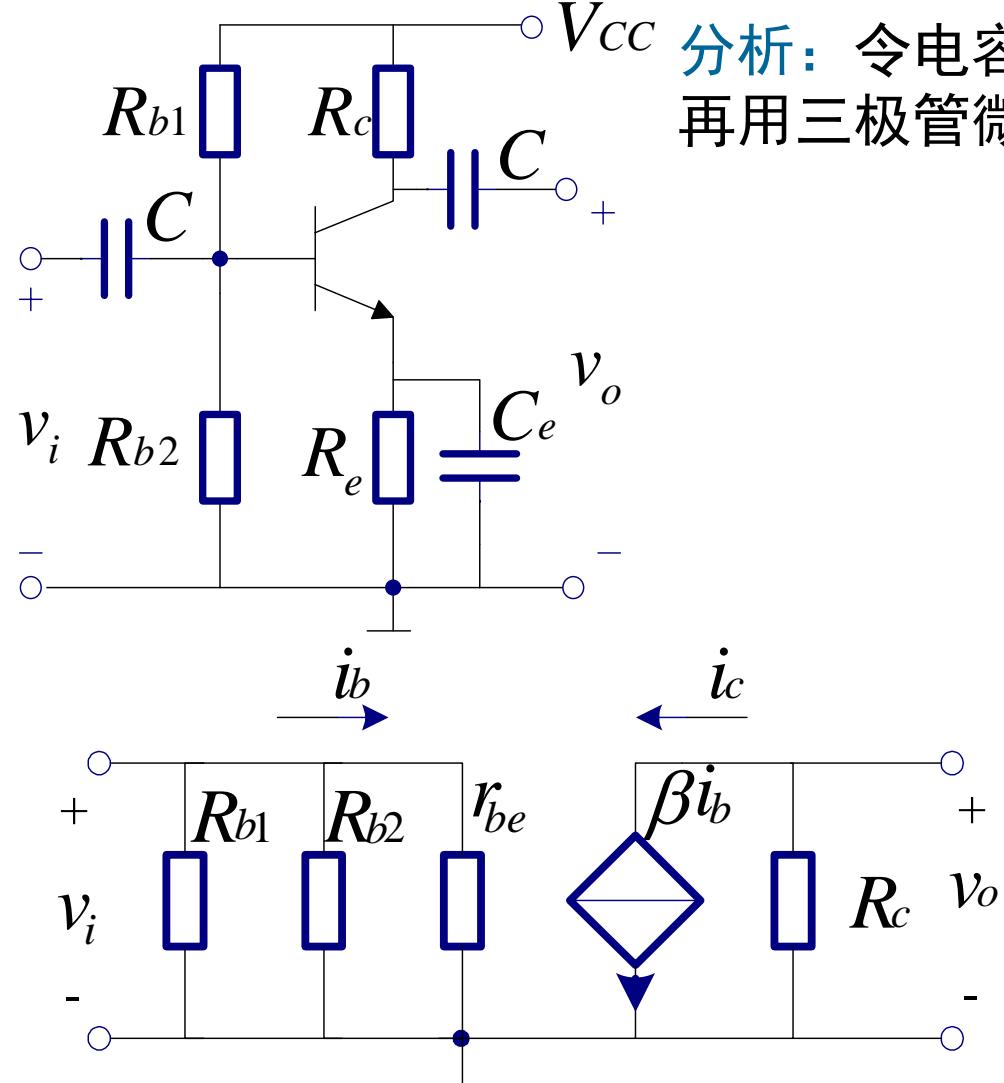
其中对于低频小功率管 $r_b \approx 300\Omega$

而 $r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$ ($T=300\text{K}$)

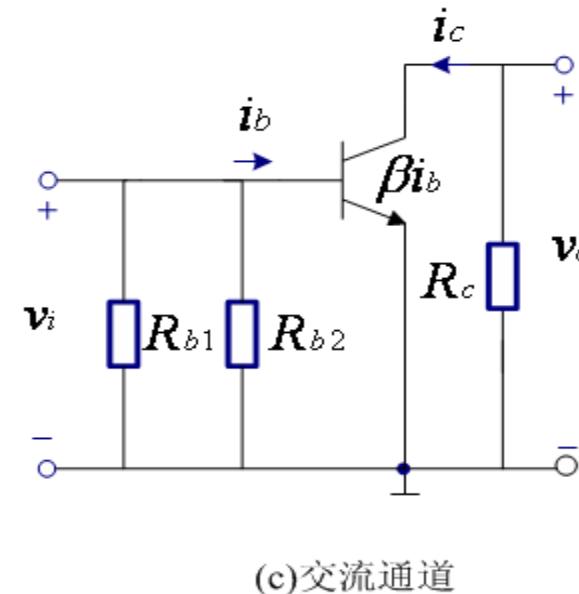
则 $r_{be} \approx 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$



【例】绘制如图所示共射极放大电路的微变等效电路



分析：令电容和直流电源短路，得出交流通路；再用三极管微变等效电路模型代替三极管；



微变等效电路

共射极放大电路的性能指标：放大倍数、输入电阻、输出电阻

• 电压放大倍数 \dot{A}_u

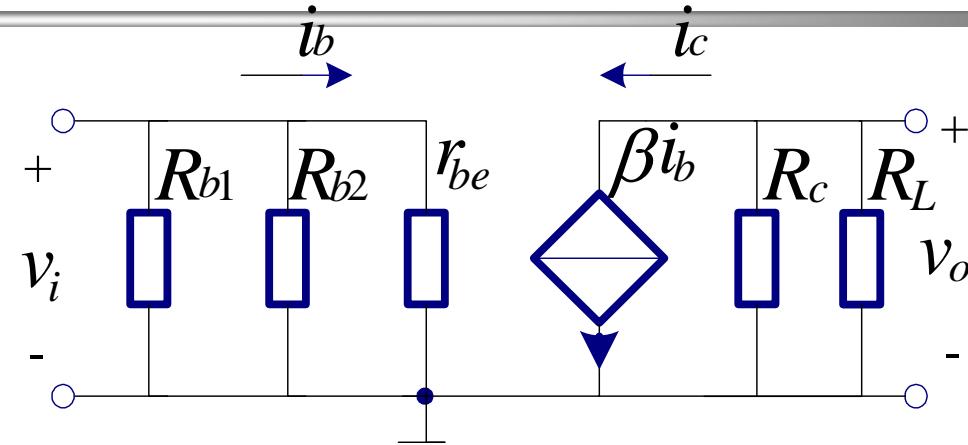
输出电压与输入电压之比
当信号为正弦信号时

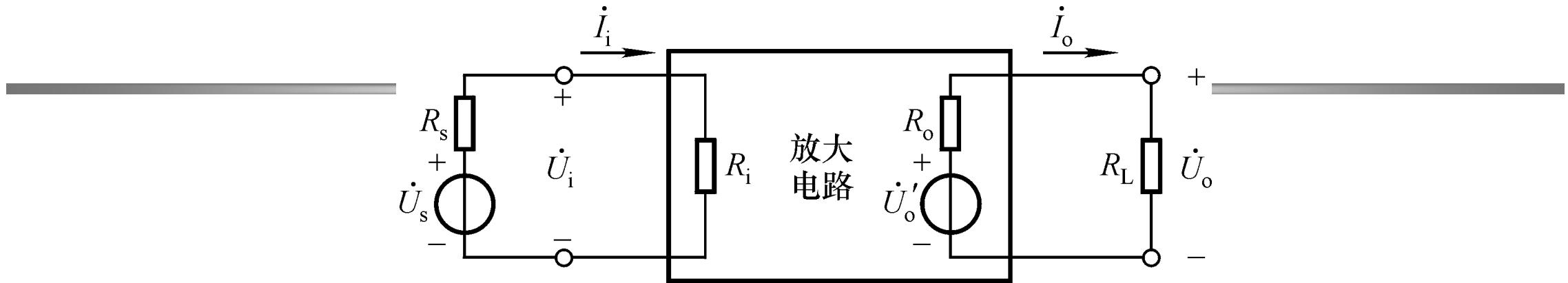
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

$$\dot{V}_i = \dot{U}_{be} = \dot{I}_b r_{be}, \quad \dot{V}_o = -\dot{I}_c (R_c // R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

其中， $R'_L = R_c // R_L$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$
 输出与输入反相





$$u_o = A_u \cdot u_i \quad \text{电压放大倍数: } A_u \quad \text{电压增益(dB): } 20 \lg A_u$$

$$i_o = A_i \cdot i_i \quad \text{电流放大倍数: } A_i \quad \text{电流增益(dB): } 20 \lg A_i$$

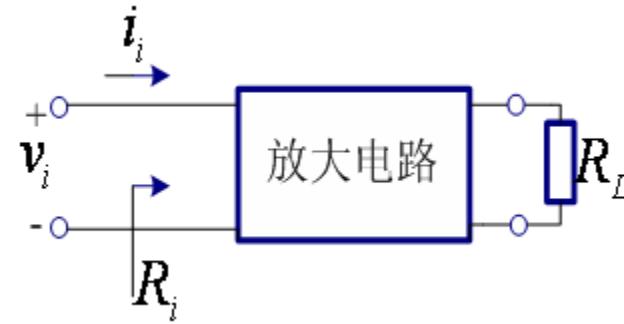
$$u_o = A_R \cdot i_i \quad \text{互阻放大倍数}(\Omega): A_R \quad \text{互阻增益(dB): } 20 \lg A_R$$

$$i_o = A_G \cdot u_i \quad \text{互导放大倍数(G): } A_G \quad \text{互导增益(dB): } 20 \lg A_G$$

输入电阻与输出电阻

电路的输入电阻: $R_i = v_i / i_i$

输入电阻越小, 进入电路的电流就越大

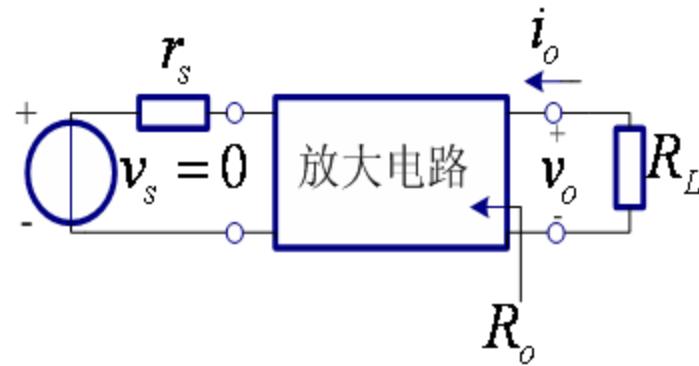


电路的输出电阻: $R_o = v_o / i_o$

输出电阻越小,

输出电压就能更多的分压在负载上;

负载变化对输出电压影响越小 (带负载能力强)

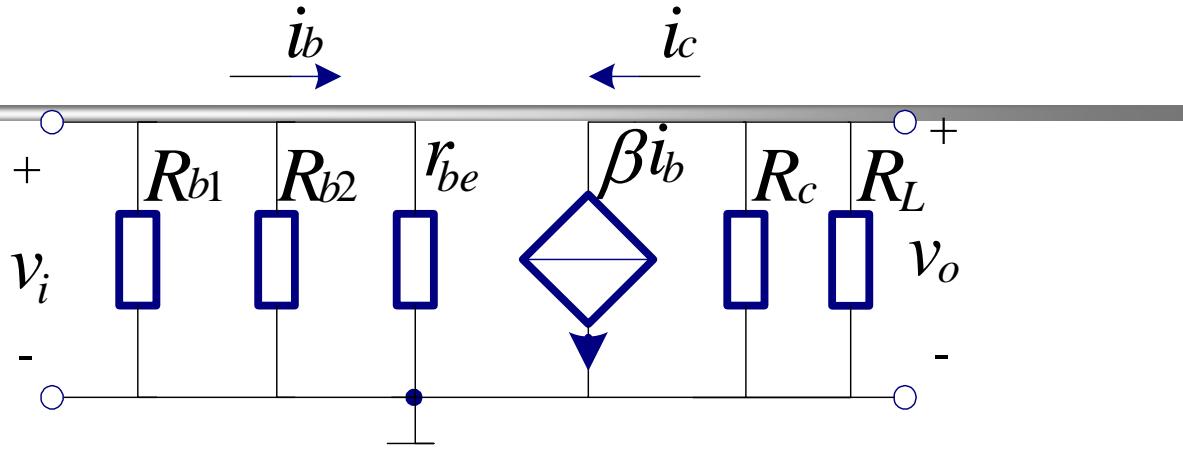


• 输入电阻

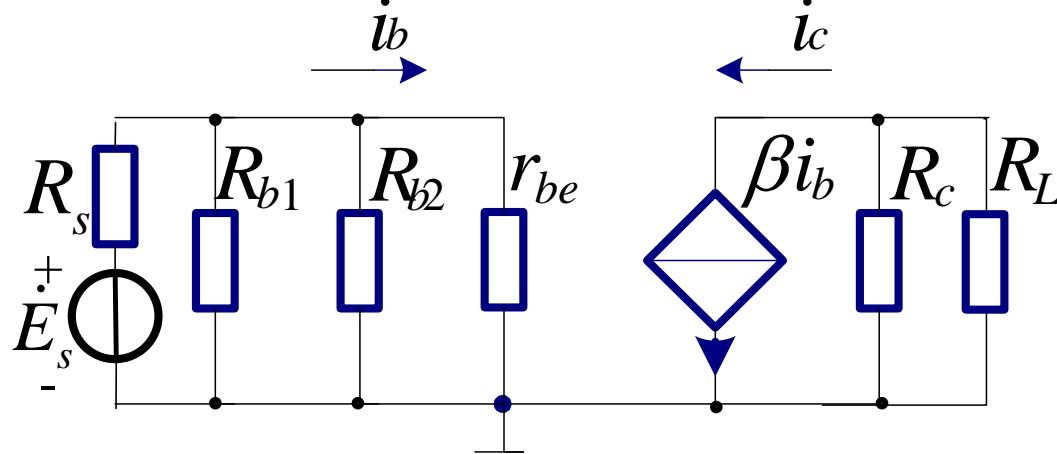
$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$$

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

$$\dot{V}_i = E_s r_i / (R_s + r_i)$$



外加信号源的微变等效电路

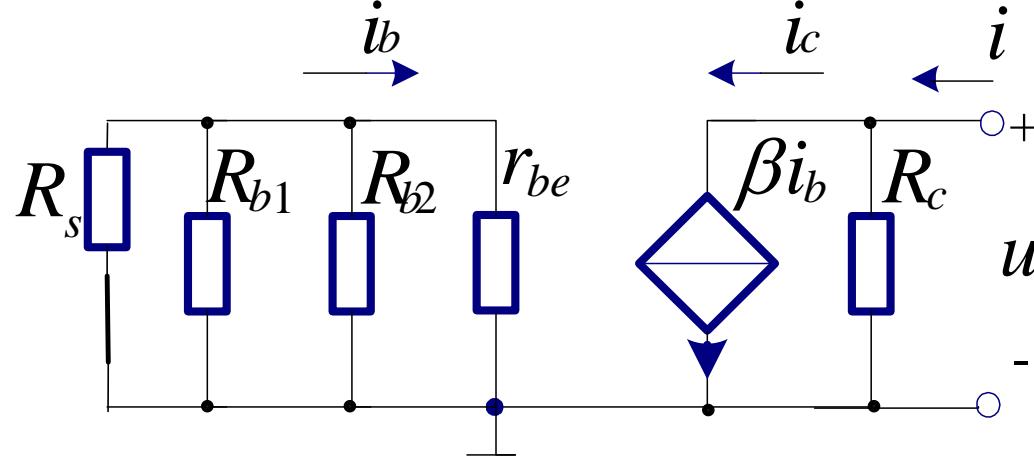


对于电压信号源，输入电阻越大越好 $u_i \rightarrow u_s$ ，衰减小；
 对于电流信号源，输入电阻越小越好 $i_i \rightarrow i_s$ ，衰减小；

输出电阻 $R_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \Big|_{\dot{E}_s=0}$

令 $\dot{V}_i = 0 \rightarrow \dot{I}_b = 0$
 $\rightarrow \beta \cdot \dot{I}_b = 0$

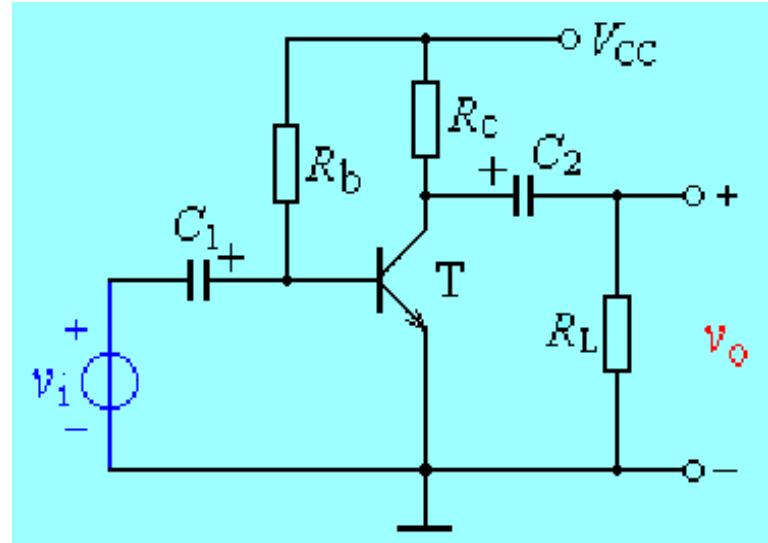
$$R_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \Big|_{\dot{E}_s=0} = R_C$$



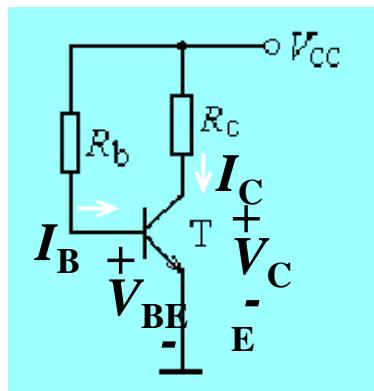
信号源置零，外加电压法

对于电压放大器，输出电阻越小越好，因 $u_o \rightarrow u_{oc}$ ，稳压，驱动负载强；
 对于电流放大器，输出电阻越大越好， $i_o \rightarrow i_{sc}$ ，恒流

•用微变等效电路法分析性能指标的步骤



共射极放大电路



直流通路

由于晶体管的电路模型与静态工作点有关
首先：画直流通路，分析静态工作点

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

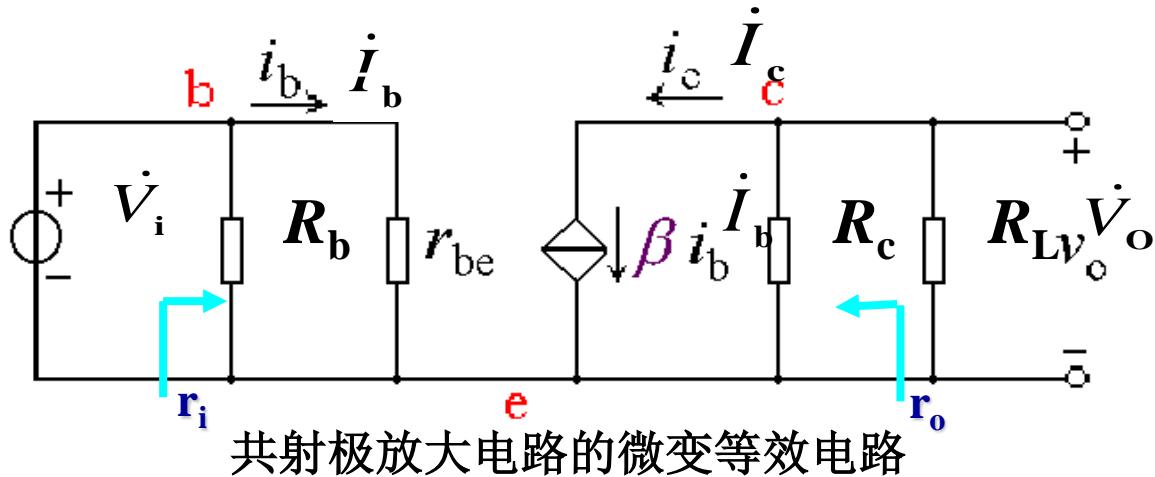
$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_c \cdot I_{CQ}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta) \cdot I_{BQ}$$

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) \cdot \frac{V_T}{I_{EQ}}$$

根据微变等效电路，分析放大电路的性能指标



$$\dot{V}_i = \dot{I}_b \cdot r_{be} \quad \dot{I}_c = \beta \cdot \dot{I}_b$$

$$\dot{V}_o = -\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)$$

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}}$$

$$= -\beta \cdot \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L) = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

负号表示输出电压相位相反

(1) 电压放大倍数 A_v

(2) 输入电阻

$$r_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be}$$

(3) 输出电阻

外加电源法

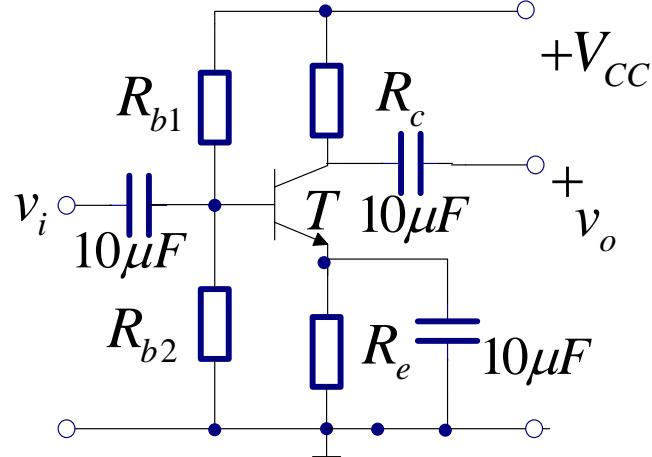
令 $\dot{V}_i = 0$ 则 $\dot{I}_b = 0$

受控源开路

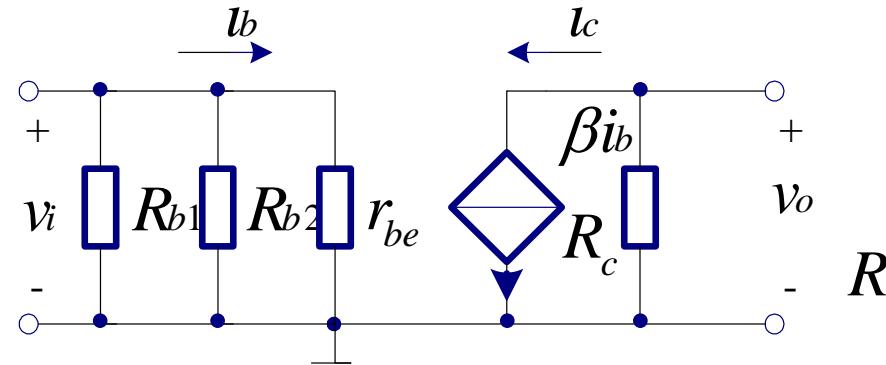
$$r_o = R_c$$

【例】用微变等效电路概念与方法，分析如图所示电路的功能、交流信号的输入—输出关系和参数特性。三极管 $\beta = 50$ 其他参数为： $r_{be} = 1k\Omega$

$$R_{b1} = 50k\Omega, R_{b2} = 10k\Omega, R_c = 1k\Omega, R_e = 80\Omega, V_{CC} = 9V, \text{电容都为 } 10\mu F$$



解：1) 用微变等效电路分析
画出微变等效电路如图所示。



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} = -50 \quad \text{电路对交流信号大约放大了50倍}$$

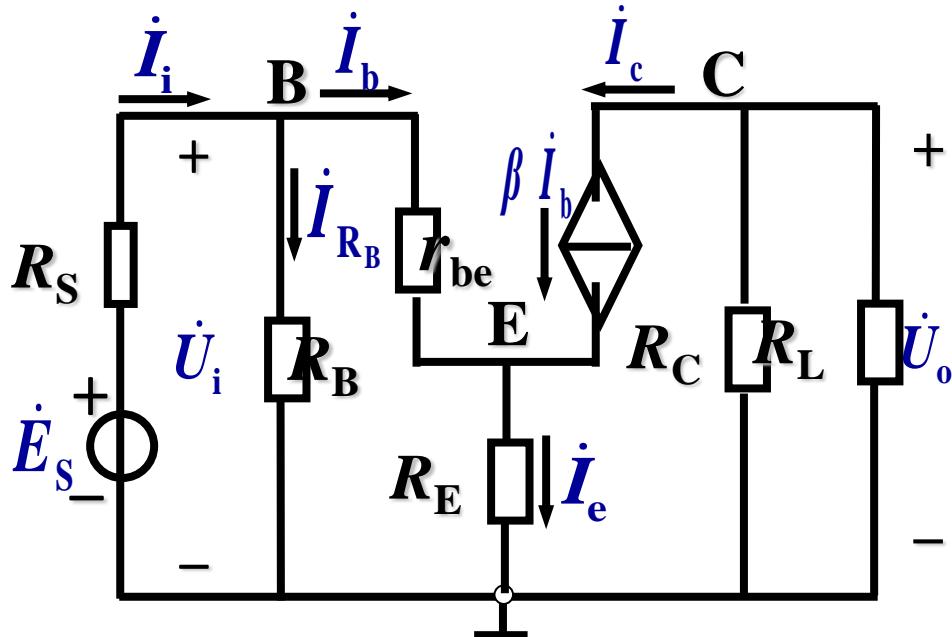
放大电路输入电阻大约为 r_{be} ，电路的输出电阻是 R_c

对交流：旁路电容 C_E 将 R_E 短路， R_E 不起作用， A_u , r_i , r_o 与固定偏置电路相同。

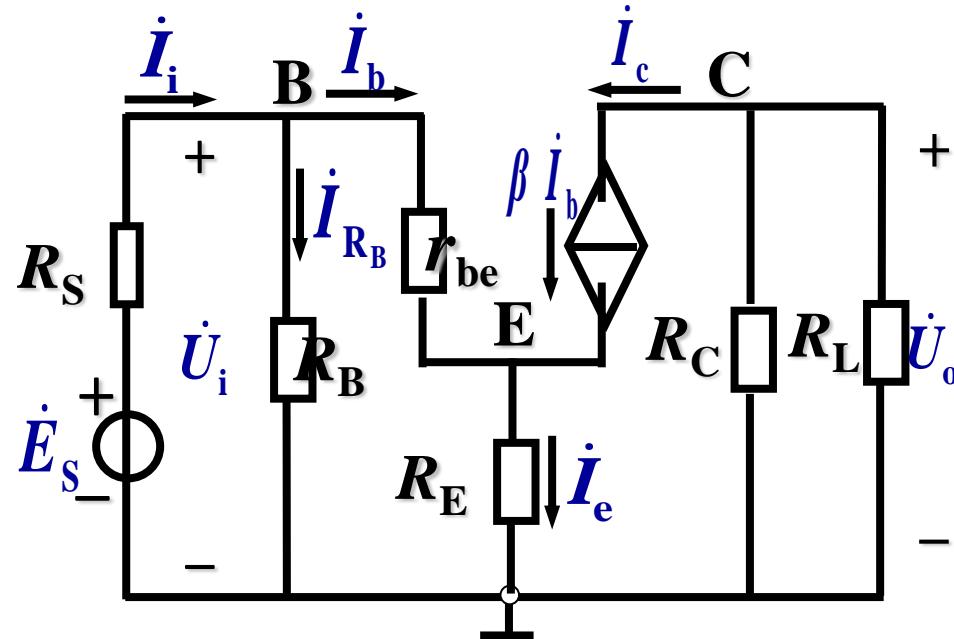


去掉 C_E 后的微变等效电路

$$\text{图中, } R_B = R_{B1} // R_{B2}$$



无旁路电容 C_E 时的性能指标



$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}$$

比较有旁路电容时, A_u 减小

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$$

比较有旁路电容时, R_i 提高

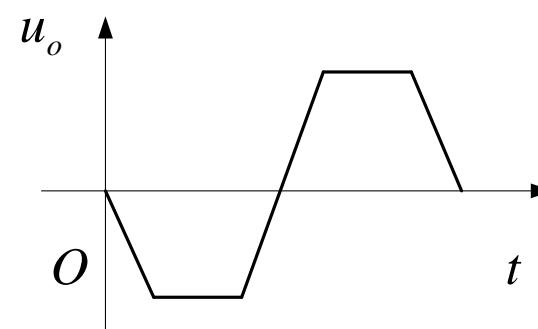
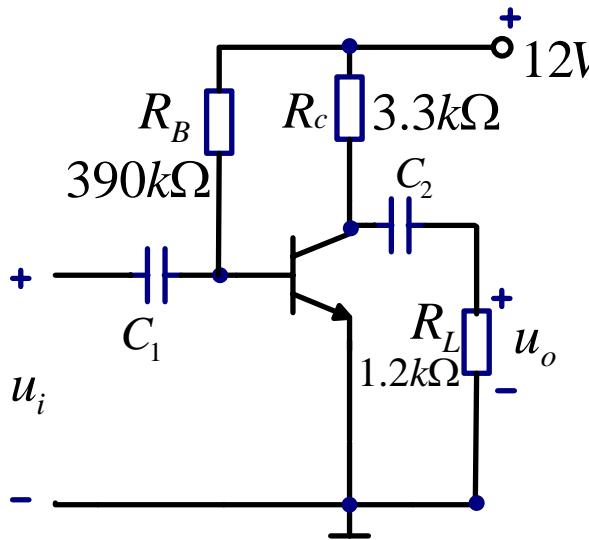
外加电源法求输出电阻

$$R_o = R_C$$

R_o 不变

放大电路如图 7(a) 所示，已知晶体管的 $r_{be} = 900\Omega$, $\beta = 80$, $U_{BE} = 0.6V$ 。

- (1) 求静态工作点
- (2) 画出微变等效电路；
- (3) 试求放大电路的电压放大倍数，输入电阻，输出电阻；
- (4) 设输出电压 u_o 的波形出现如图 7(b) 的失真情况，试问改变电阻 R_B 的大小能否消除失真？若负载电阻和输入信号均不变，怎样才能消除上述失真。



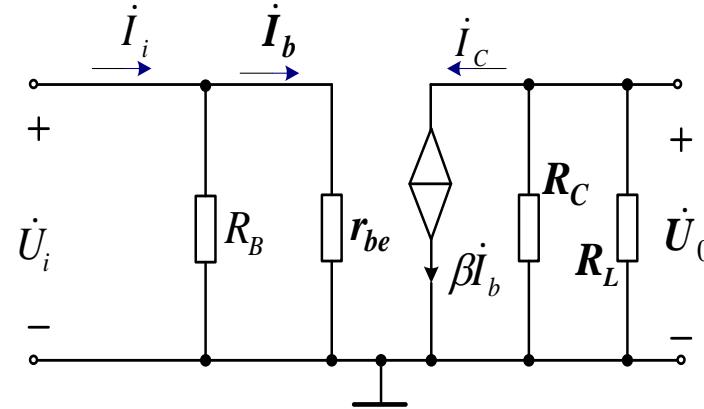
确定放大电路的静态工作点

$$I_{BQ} = \frac{12 - U_{BE}}{R_B} = 0.029mA$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.32mA$$

$$U_{CEQ} = 12 - R_C I_{CQ} = 4.344V$$

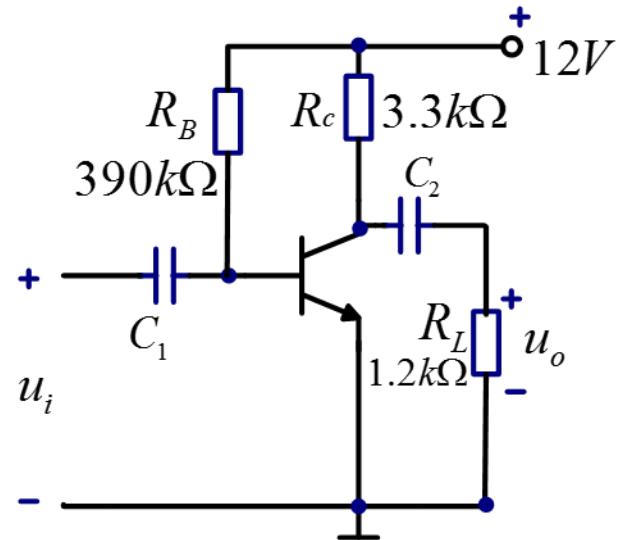
微变等效电路如图所示，(3分)



$$(3) \text{ 电压放大倍数 } A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} = -78$$

输出电阻 $r_o \approx R_C = 3.3k\Omega$

输入电阻 $r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 900\Omega$



总结

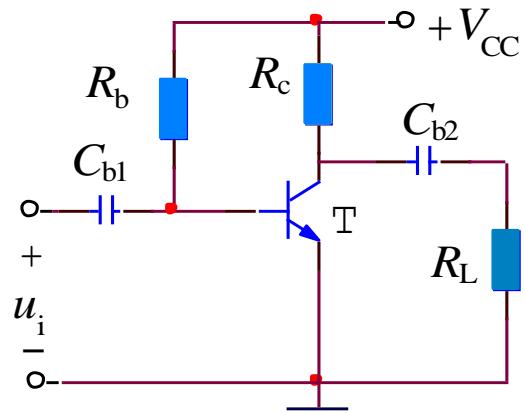
- 共射极放大电路的分析方法
 - 静态分析（Q点分析）
 - 画直流通路
 - 普通共射极放大电路方法
 - 分压式偏置电路方法
 - 结论：通过 V_{ceq} 看是否饱和
 - 结论：得到 I_{BQ} 、 I_{CQ} 等直流电路
 - 动态分析（建立模型）
 - 画交流通路
 - 改画微变等效模型
 - 根据Q点求出 r_{be}
 - 动态分析（求值）
 - 放大倍数：建立 V_o 和 I_c 的关系，再建立 V_i 和 I_b 的关系，得到 V_o/V_i 。
- 输入电阻：从输入端看进去，得到 V_i/I_i
- 输出电阻：从输出端看进去（不要 R_L ），求戴维南等效电阻（建议除源之后用外加电源法）

总结

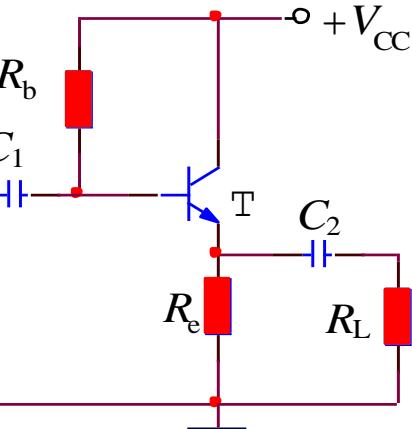
- 普通共射极放大电路方法的静态分析
 - 列方程: V_{cc} - R_b - v_{be} 端的KVL, 得到 i_{bq}
 - 根据 $I_C = \beta I_B$, 得到 I_{Cq} ,
 - 列 V_{cc} - R_c - V_{ce} 的 KVL, 求出 V_{ceq}
 - 看 V_{ceq} 是否饱和, 如果饱和, 则不能取 $I_C = \beta I_B$, 应取 $V_{ceq} = 0$ 或 $= V_{ces}$ 值, 并根据 V_{cc} - R_c - V_{ce} 的 KVL 重算 I_{CQ}
 - 如果饱和, 则不进行动态分析
 - 进而求出 I_b 、 I_c
 - 再根据 V_{cc} - R_c - V_{ce} - R_e 的 KVL, 求解 V_{ceq} , 判断是否饱和
- 分压偏置共射极放大电路方法的静态分析
 - 根据 R_{b1} 和 R_{b2} 得到 V_b
 - $V_b - 0.7 = V_e$
 - $V_e / R_e = I_e$

总结：三种放大电路的等效电路

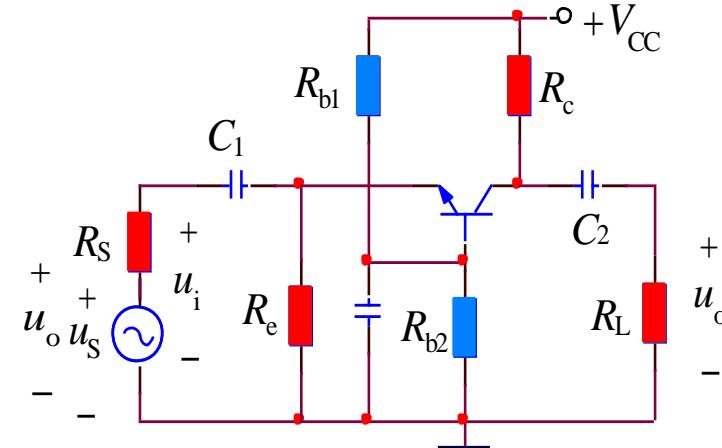
共射



共集



共基



电压增益:

$$-\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

$$\frac{(1+\beta) \cdot (R_e // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_e // R_L)}$$

$$\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

输入电阻:

$$R_b // r_{be}$$

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

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

输出电阻:

$$R_c$$

$$R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1+\beta}$$

$$R_c$$

总结：三种放大电路的等效电路

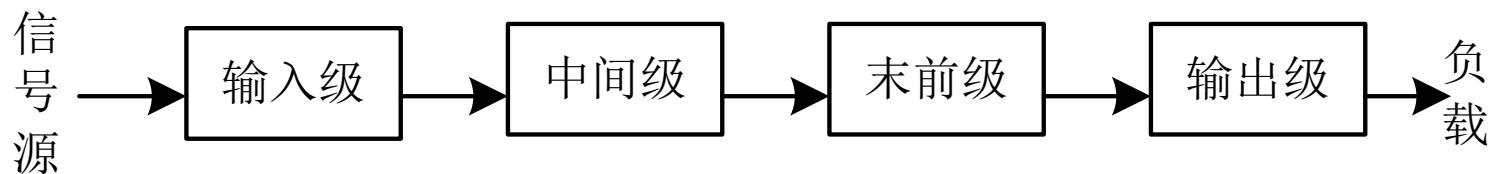
- 1. 共射极电路具有较大的电压放大倍数、电流放大倍数，输入输出电阻适中，被广泛的应用于低频多级放大电路的输入级、输出级、中间级
- 2. 共集电极电路（射极输出电路）输入电阻很高、输出电阻很小，无电压放大能力（电压放大倍数小于但接近于1）
 - 电压跟随器
 - 常被用于多级放大电路的输入级、输出级
 - 可以放大电流
- 3. 共基极放大电路频率响应好，一般用于宽频带或高频放大电路
 - 能放大电压、不能放大电流

6-4 多级放大电路与频率特性

主要内容

1. 多级放大电路的级间耦合方式
2. 多级放大电路的性能指标
3. 阻容耦合放大电路的频率特性

多级放大电路组成



- 输入级，一般要求有尽可能高的输入电阻（减小对小信号获取时的能量损失）和低的静态工作点(减小输入级的噪声和功耗，同时也尽可能的减小下一级静态工作点的提高)
- 中间级的任务是提高放大电路的放大倍数，所以中间级应选用放大倍数较大的放大电路
- 输出级应尽可能选择输出电阻较小的放大电路，以利于提高放大电路的带载能力。
- 末前级和输出级组成功率放大电路。

6-4-1 多级放大电路的级间耦合方式

耦合：在多级放大电路中，每两个单级放大电路之间的连接方式。

对级间耦合电路的基本要求：

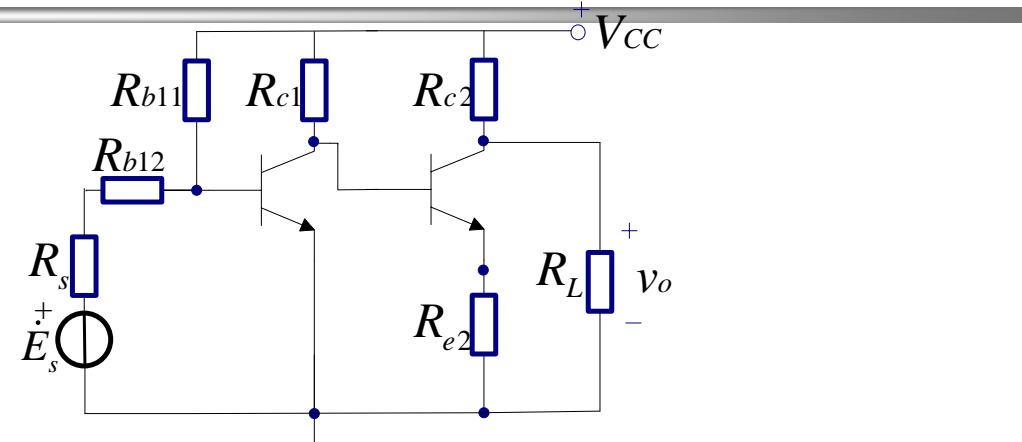
1. 对前后级静态工作点的影响尽量小。
2. 保证信号的传输。
3. 减少信号电压在耦合电路上的压降。

耦合方式：直接耦合、阻容耦合、变压器耦合。

1. 直接耦合

特点：

- 传送交流信号，同时还传输直流信号
- 第一级放大电路会提高第二级放大电路的静态工作点，有可能使第二级输出信号产生饱和失真。

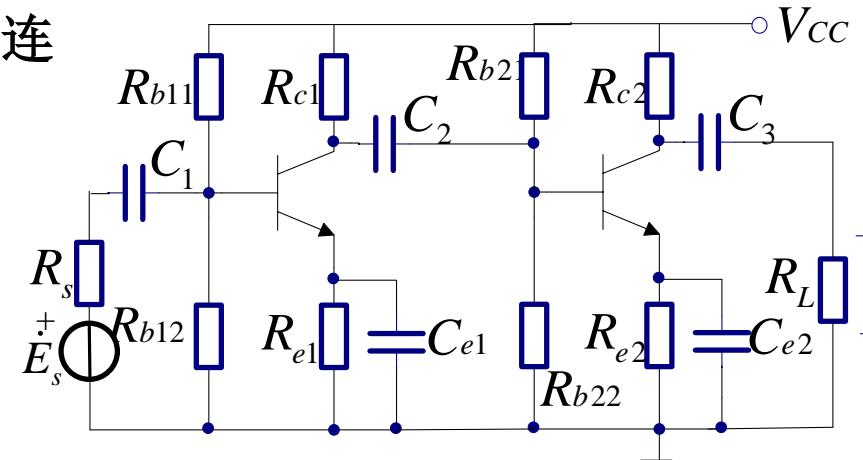


2 阻容耦合

两级之间通过耦合电容 C_2 与下一级电路连接

特点：

- 可以抑制零点漂移。
- 无法放大低频信号和直流信号。
- 在集成电路中，无法制造大电容。
- 各级电路的静态工作点相互独立，便于设计和调试。



6-4-2 多级放大电路的 \dot{A}_u , R_i , R_o

前级的输出信号 \dot{V}_{o1} 即为后级输入信号 \dot{V}_{i2}
而后级的输入电阻 R_{i2} 即为前级负载 R_{L1}

对于两级放大电路，

$$\text{第一级电压放大倍数 : } \dot{A}_{u1} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \quad \text{第二级电压放大倍数 : } \dot{A}_{u2} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}}$$

$$\text{则总的放大倍数 : } \dot{A}_u = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \times \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}} = \dot{A}_{u1} \times \dot{A}_{u2}$$

对于n级电压放大电路，其总电压放大倍数是各级电压放大倍数的乘积：

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

多级放大电路的输入电阻即为第一级放大电路的输入电阻；
输出电阻即为最后一级的输出电阻

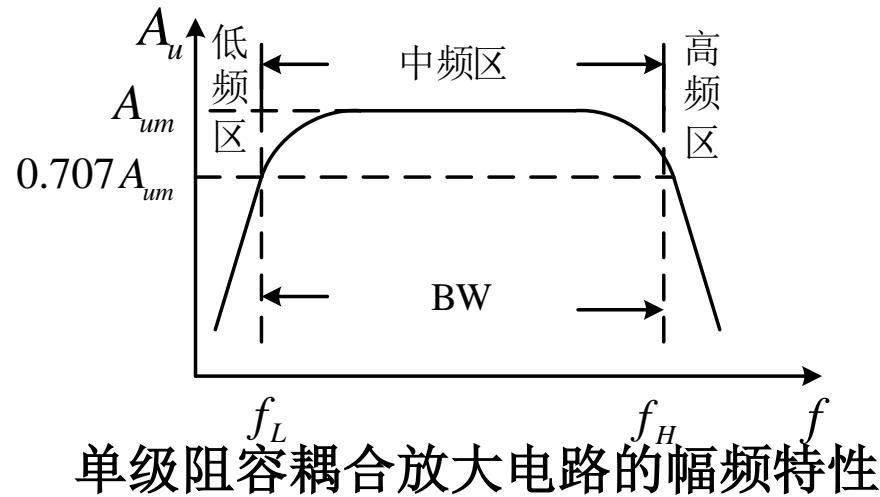
放大电路的频率特性

- 当输入信号的频率高于某一数值后，三极管的 β 值将随频率的增加而减小
- 频率失真：
 - 幅频失真：放大电路输入信号的频率在高频段或者低频段时，放大电路对不同谐波信号的放大倍数不一样，将造成输出信号的幅度失真。
 - 相频失真：同样，所带来的对不同谐波产生的附加相移不同而导致输出信号的相位失真，称为相频失真。
- 直接耦合电路不存在耦合电容和旁路电容，因此在低频区电压放大倍数和相移不随频率的变化而变化，和中频区一样。在高频区三极管的结电容和电路分布式电容的影响依然存在，其高频的频率特性和阻容耦合放大电路的高频特性一样。

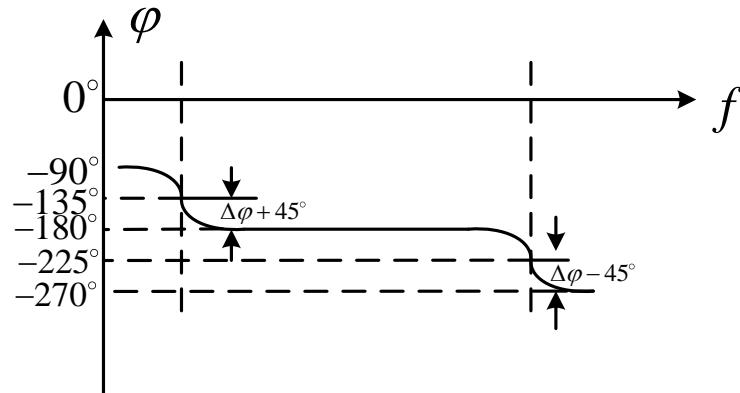
6-4-3 阻容耦合放大电路的频率特性

实际应用中输入放大电路的信号往往是由许多不同频率的信号分量（谐波分量）组合而成的复杂信号，信号的频率范围可能从几赫兹到几百兆赫兹

阻容耦合电路中除了耦合电容和旁路电容，还有晶体管本身所拥有的极间电容和电路的分布电容。极间电容和电路分布式电容都很小，约几皮法到几百皮法，它们的容抗随输入信号频率的变化而变化，从而影响放大电路的放大倍数和输出信号的相位。



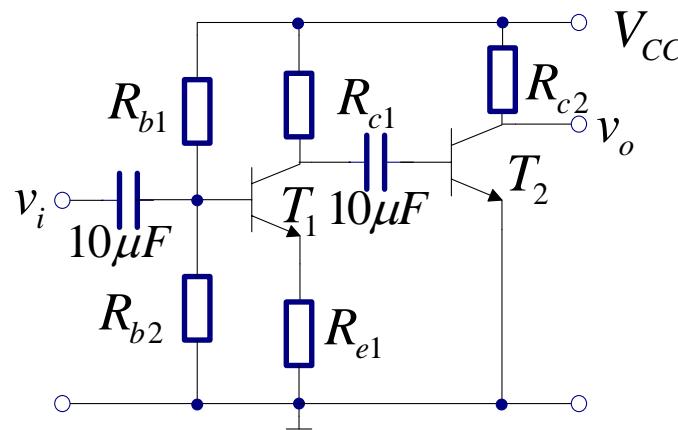
单级阻容耦合放大电路的幅频特性



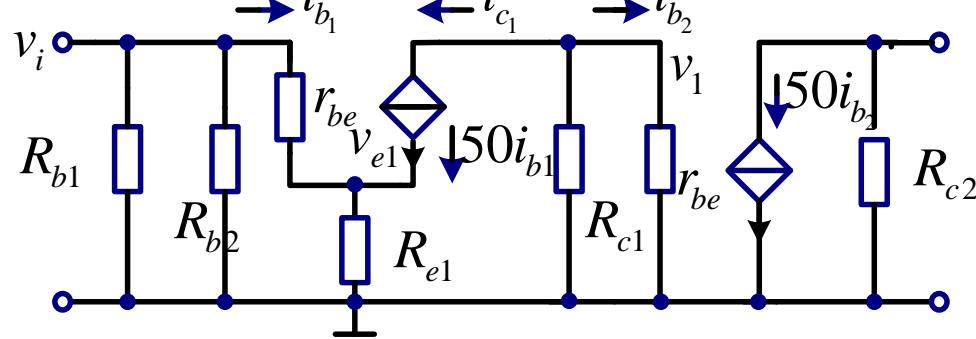
单级阻容耦合放大电路的相频特性

【例】用微变等效电路概念与方法，分析如图所示电路的功能、交流信号的输入—输出关系和参数特性，假设三极管都具有相同的参数， $\beta = 50$

$$R_{b1} = 50k\Omega, R_{b2} = 10k\Omega, R_{c1} = 1k\Omega, R_{c2} = 10k\Omega, R_{e1} = 80\Omega, V_{CC} = 9V, \text{电容都为 } 10\mu F$$



解：画出微变等效电路如图所示。

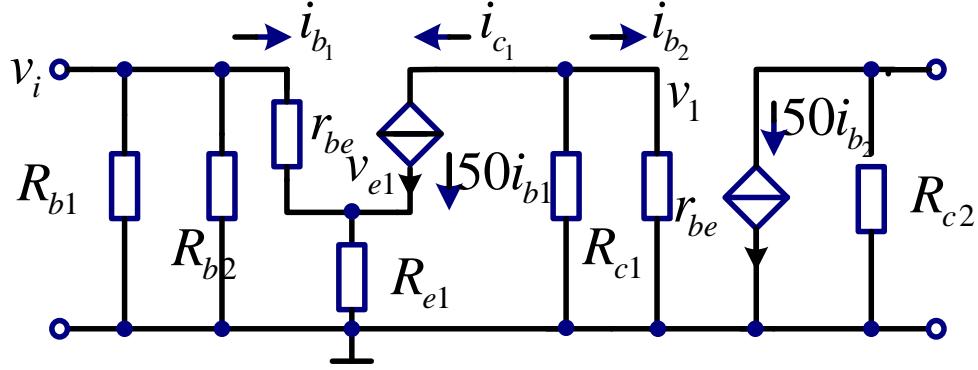


$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) \cdot \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx 1k\Omega$$

$$\dot{I}_{b1} = \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_{e1}}{r_{be}}$$

$$\dot{V}_{e1} = (\dot{i}_{c1} + \dot{i}_{b1})R_{e1}$$

$$\text{解得: } \dot{I}_{b1} = \frac{\dot{V}_i}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}}$$



$$\dot{I}_{b1} = \frac{\dot{V}_i}{r_{be} + (1+\beta)R_{e1}}$$

$$\dot{i}_{c1} = \beta \dot{I}_{b1}$$

$$\dot{V}_1 = -\dot{I}_{c1} (R_{c1} // r_{be})$$

$$\dot{V}_1 = \frac{-(R_{c1} / / r_{be}) \beta}{r_{be} + (\beta + 1)R_{e1}} \dot{V}_i \approx -5 \dot{V}_i$$

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_1} = \frac{-\beta i_{b2} \cdot R_{c2}}{i_{b2} r_{be}} = -\beta \frac{R_{c2}}{r_{be}} = -500$$

$$\dot{V}_o = 2500 \dot{V}_i$$

整个电路对信号源的输入电阻是第一级电路的输入电阻：

$$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel (r_{be} + (1+\beta)R_{e1}) \approx 3k\Omega$$

整个电路的输出电阻是第二级电路 T_2 的输出电阻： $R_o = R_{c2} = 10k\Omega$