

第六章 基本放大电路

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

放大电路示意图

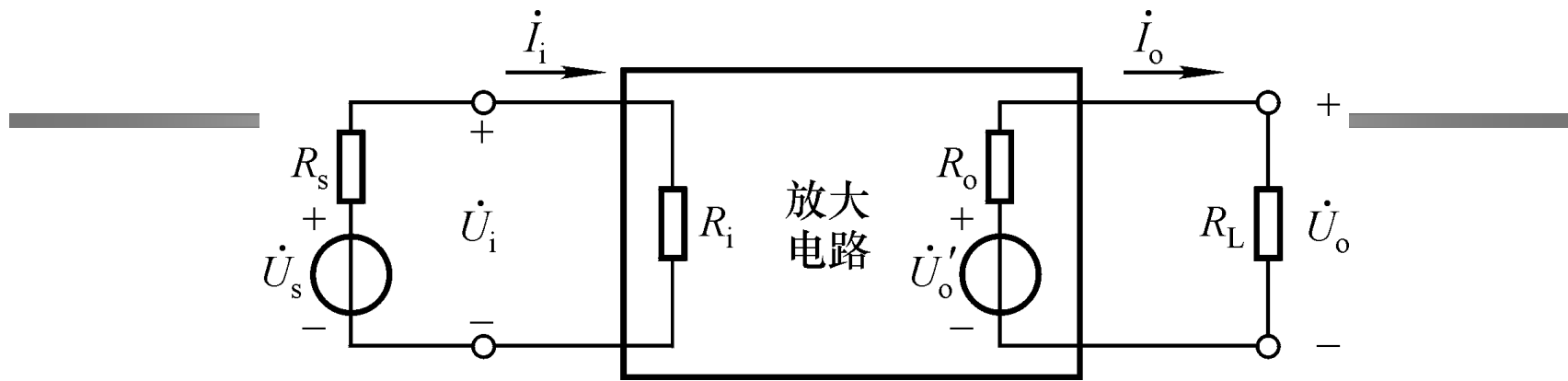
放大电路的功能： 将小信号不失真地放大到需要的数值

包括： 电流信号放大和电压信号放大

要求： 输出功率>输入功率；输出信号的失真在允许的范围



- 放大电路必须满足：
 - 有直流电源 提供能量
 - 使晶体管工作在线性放大区
 - 放大电路有信号的传输通路：输入回路和输出回路



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

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

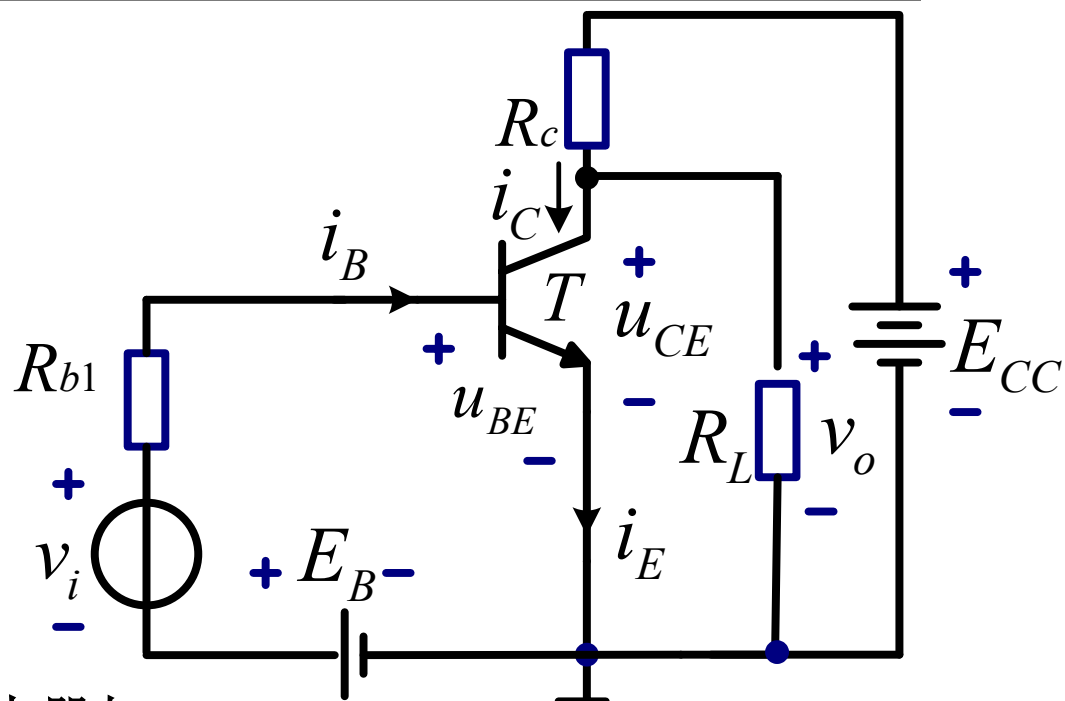
$$u_o = A_R \cdot i_i \quad \text{互阻放大倍数}(\Omega): A_R \quad \text{互阻增益(dB): } 20 \lg A_R$$

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

6-1-1 共射放大电路的组成和各元件作用

组成及作用：

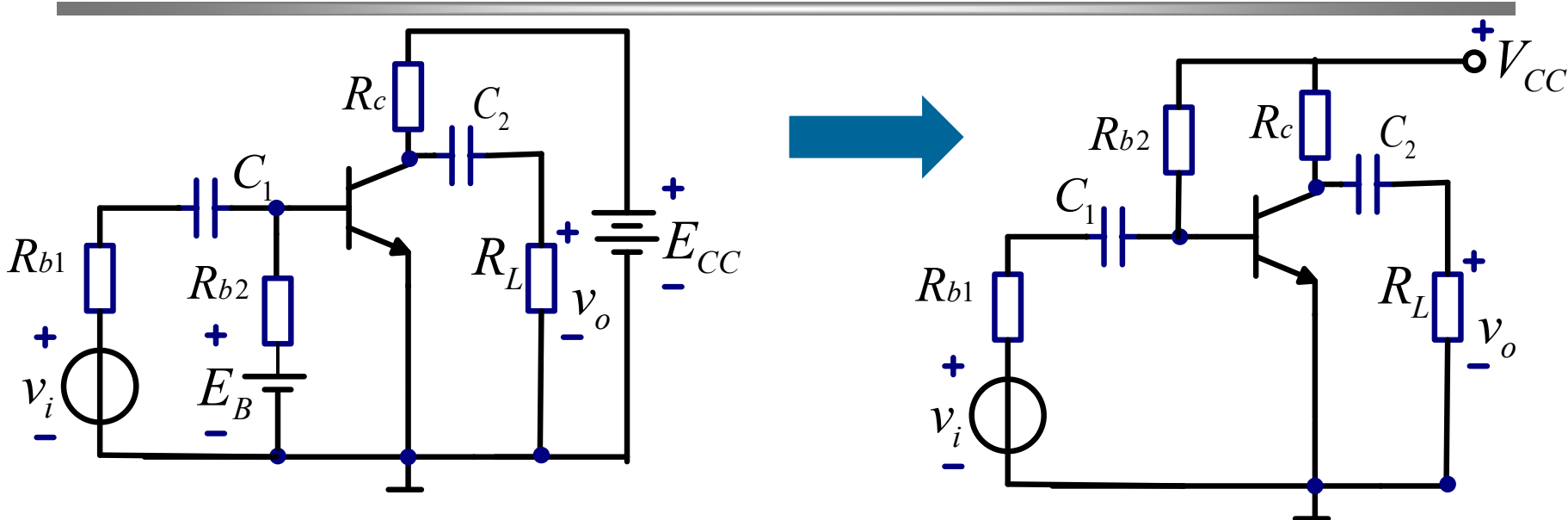
- 输入信号、输出信号
- 三极管
- 集电极直流电源
- 集电极电阻
- 基极直流电源和基极电阻



共射极放大电路（直接耦合）

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



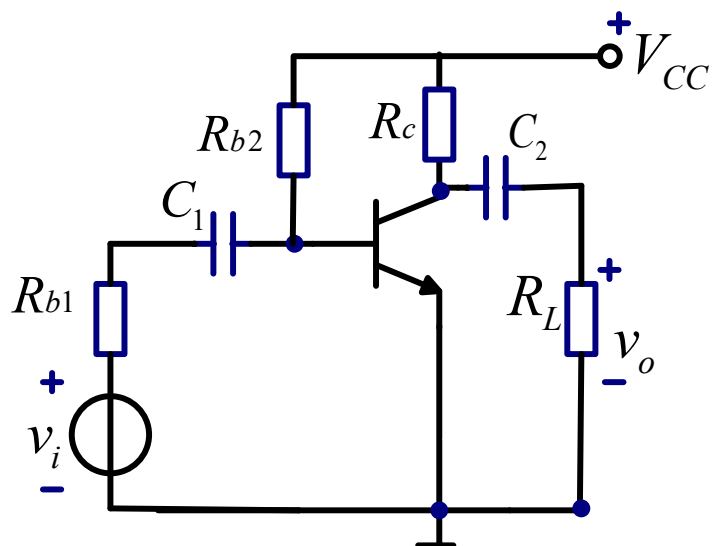
阻容耦合放大电路

阻容耦合： 信号源与放大器、放大器与负载通过电容连接

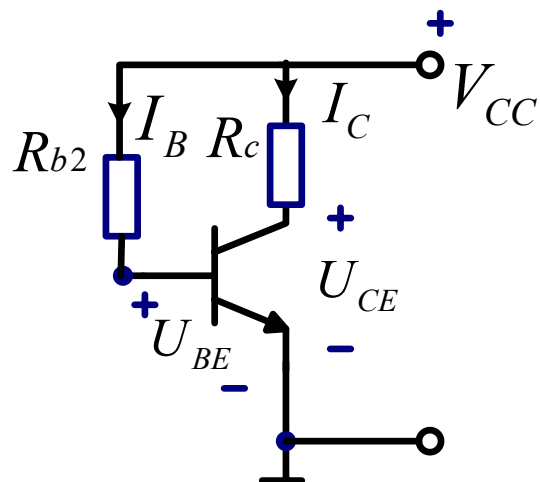
- 隔离直流、导通交流信号的作用。 **直流通路：** 直流信号通过的路径
电容视为开路
- $C_1 C_2$ 称为耦合电容 **交流通路：** 电容短路, 直流电源置零

适当的修改 R_{b2} 改接成由单电源供电电路

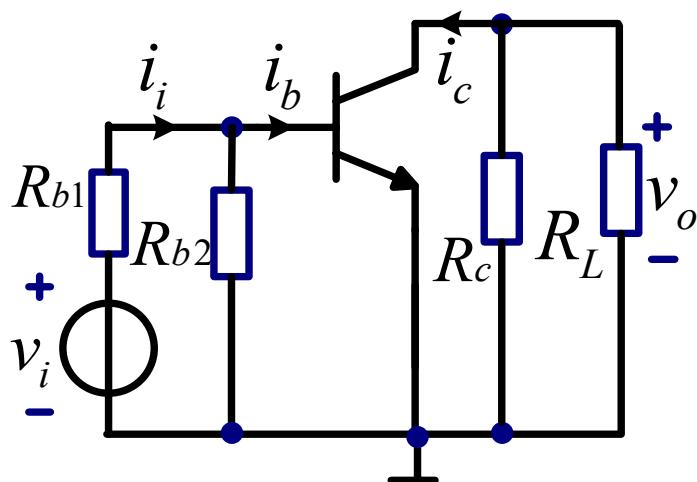
【例】 绘制基本共射放大电路的直流信号通道和交流信号通道。



共射放大电路的
交流通路

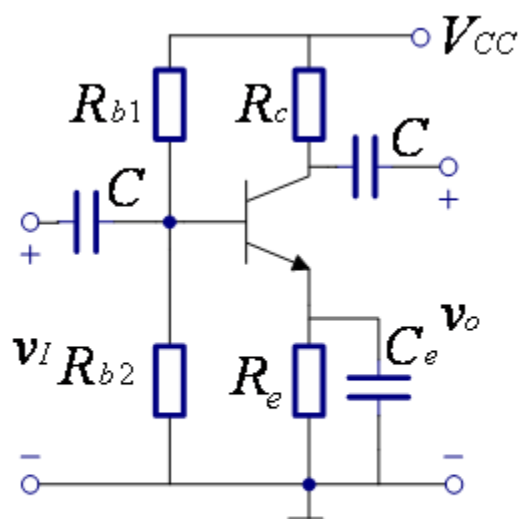


共射放大电路的直流通路

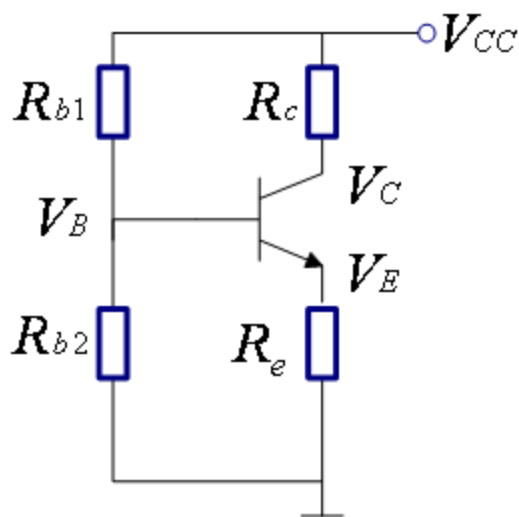


【例】 绘制如图所示电路的直流信号通道和交流信号通道。

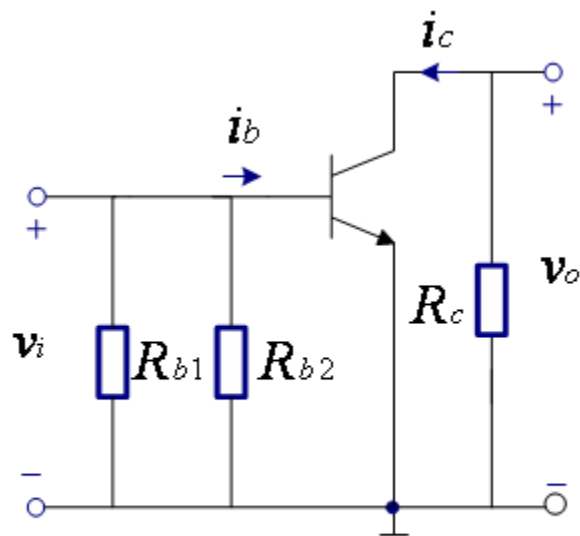
分析： 对于直流信号来说，电容处于开路状态，对于交流信号来说，电容和电源处于短路状态。



(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

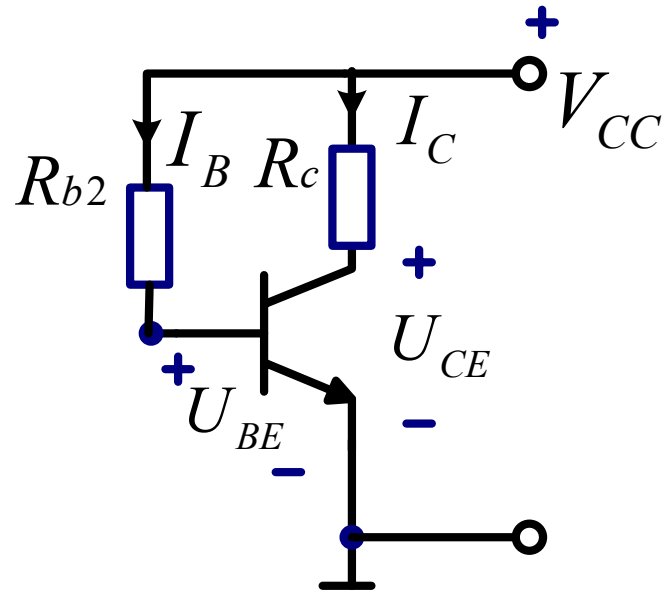
1. 电路静态工作点与直流通路

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。

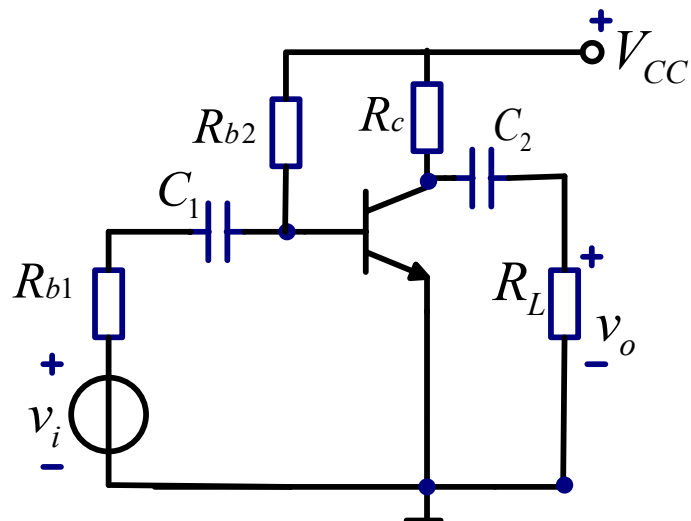


共射放大电路的直流通路

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 $0.6 \sim 0.7V$

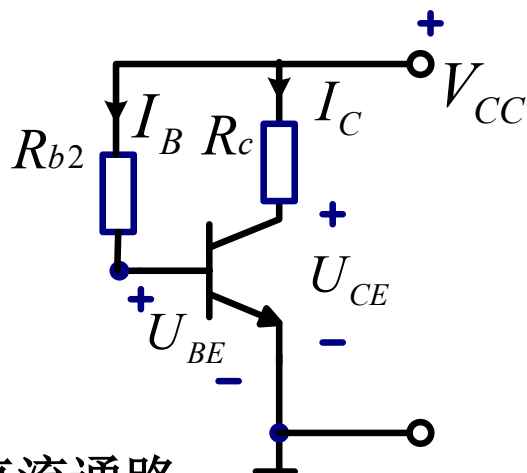
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{280} = 0.04mA$$

根据晶体三极管的放大特性可知：

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

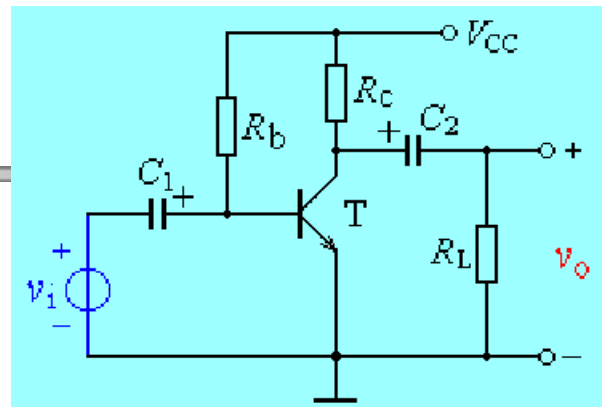
最后根据KVL定律可得：

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



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：



共射极放大电路

- (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？

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

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：

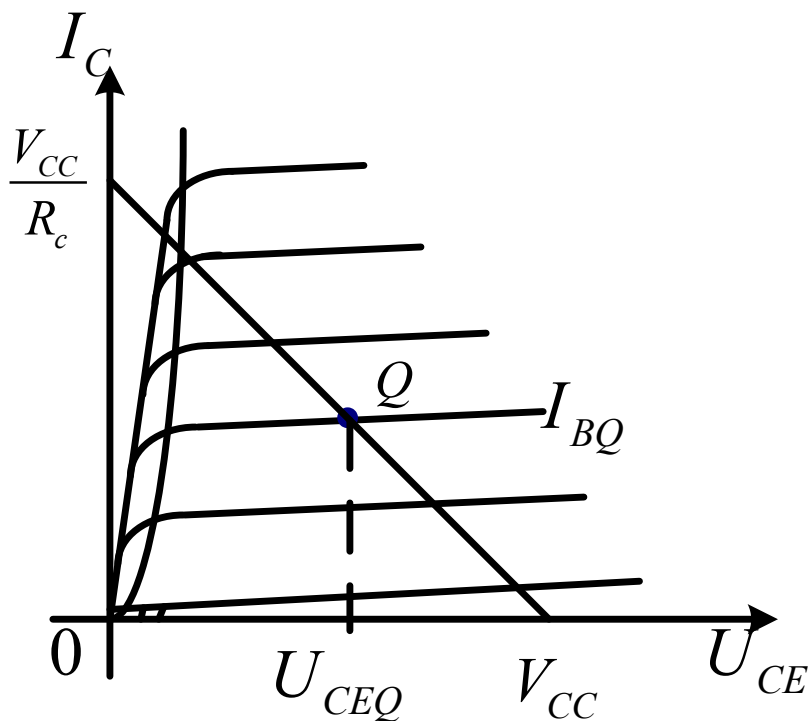
- ①获得半导体放大器件的特性曲线。
- ②根据电路结构和电路分析理论绘制直流负载线，确定静态工作点

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）



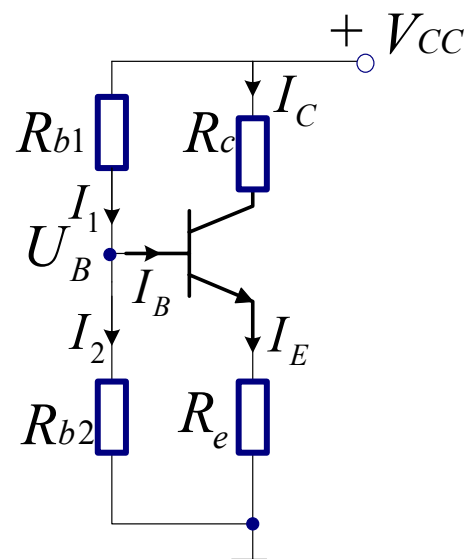
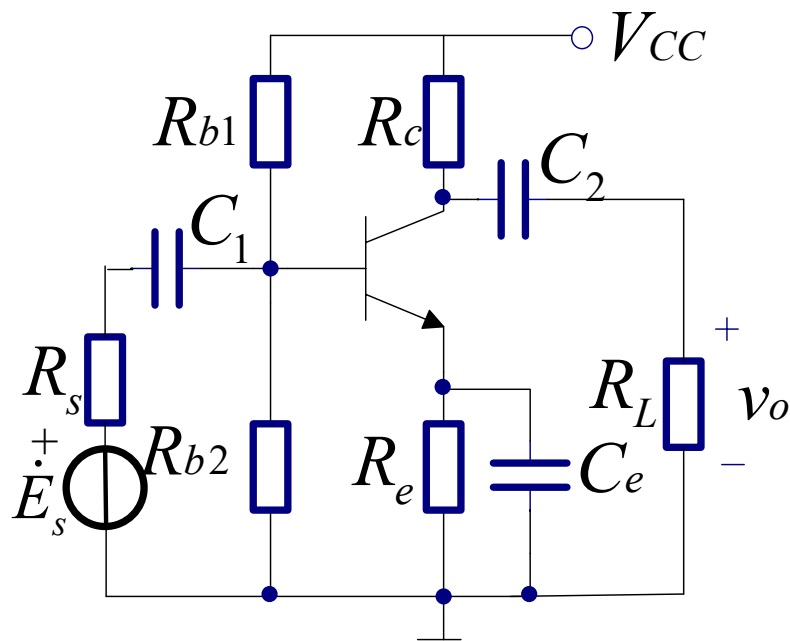
6-1-3 分压式偏置放大电路

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°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

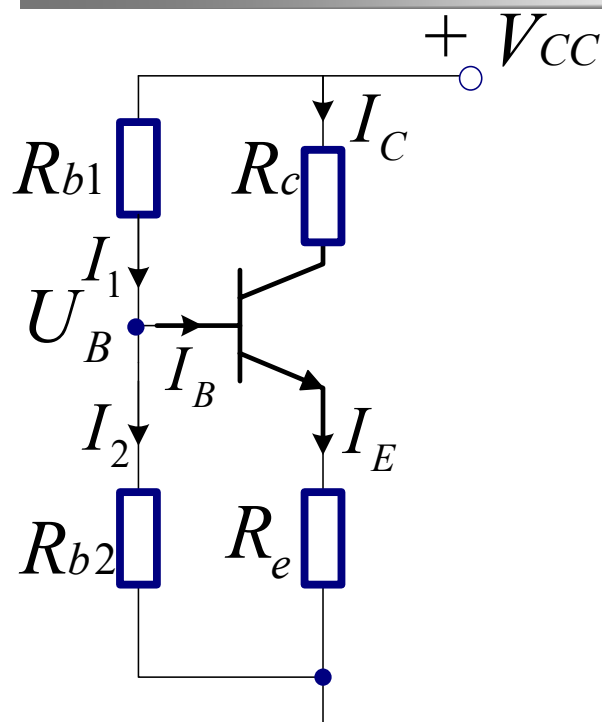
二、分压式偏置放大电路

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

静态工作点稳定原理



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。

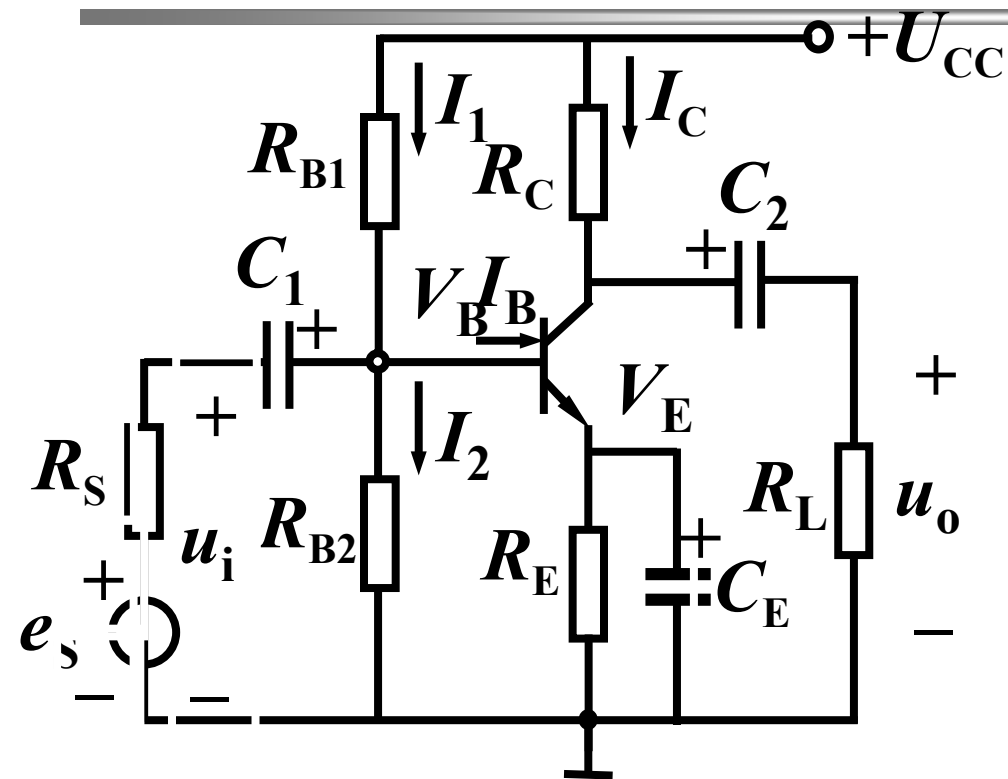
$$I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$$

若满足： $U_B \gg U_{BE}$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{U_B}{R_E}$$

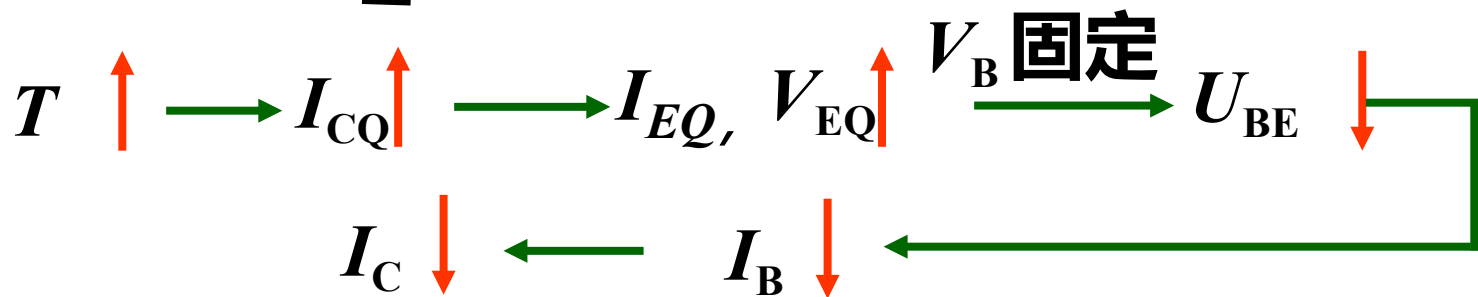
集电极电流基本恒定，不随温度变化。

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;

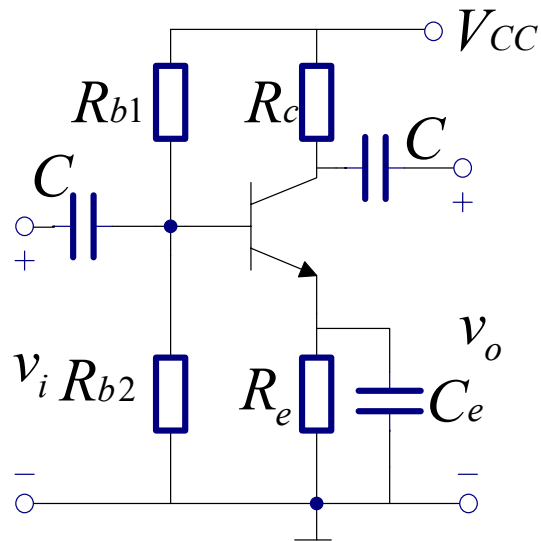
对交流: R_E 越大, 交流损失越大, 为避免交流损失加旁路电容 C_E 。



【例】试估算如图所示放大电路的静态工作点。设

$$V_{CC} = 12V, R_{b1} = 110k\Omega, R_{b2} = 40k\Omega, R_c = 1k\Omega, R_e = 500\Omega, C = C_e = 1\mu F$$

三极管的 $r_{be} = 700\Omega, \beta = 50$



解： R_{b1} 、 R_{b2} 形成基极工作点的分压电路
设计时使 R_{b1} 、 R_{b2} 中的电流远大于基极电流，则

$$U_B = 12 \times \frac{40}{110 + 40} V = 3.2V$$

$$U_E = (3.2 - 0.7)V = 2.5V$$

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

$$I_{BQ} = \frac{5 \times 10^{-3}}{51} A = 98\mu A$$

$$I_{CQ} = 50 \times 0.098mA = 4.9mA$$

$$U_{CQ} = (12 - 0.0049 \times 1000)V = 7.1V \quad U_{CEQ} = 4.6V$$

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

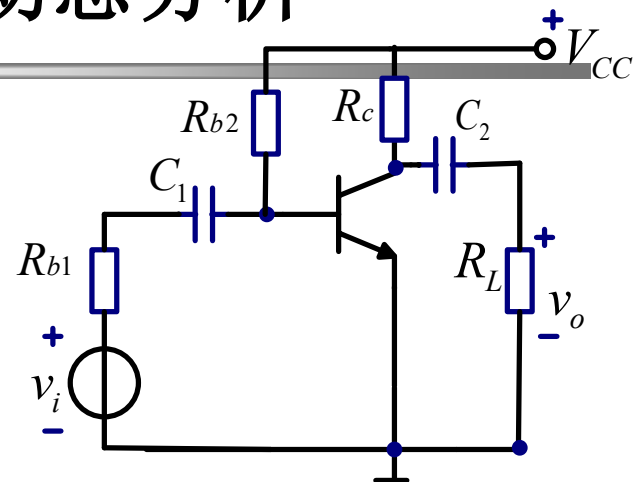
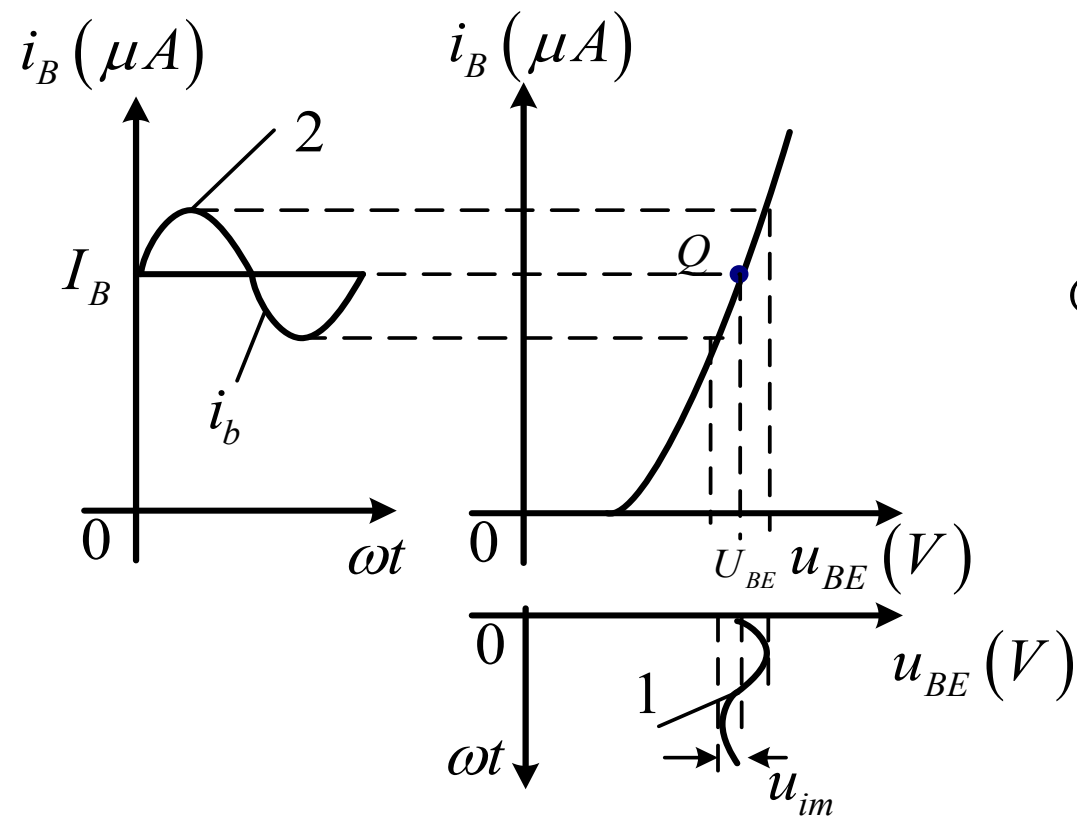
微变等效法只能分析交流通路，用于放大电路性能指标的分析计算

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

一、用图解法进行放大电路的动态分析

- 用图解法分析共射放大电路中各电压、电流瞬时值 u_{BE}, u_{CE}, i_B, i_C 的波形



(1) 在输入特性曲线上分析 u_{BE}, i_B

设输入电压 $v_i = V_{im} \sin \omega t$

在发射结产生相应的电压:

三极管发射结电压: $u_{be} = V_{bem} \sin \omega t$

$$u_{BE} = U_{BE} + V_{bem} \sin \omega t$$

则基极电流:

$$i_B = I_B + i_b = I_B + I_{bm} \sin \omega t$$

(2) 交流负载线与动态工作点

三极管集电极电流: $i_C = \beta i_B = \beta(I_B + I_{bm} \sin \omega t) = I_C + i_c$

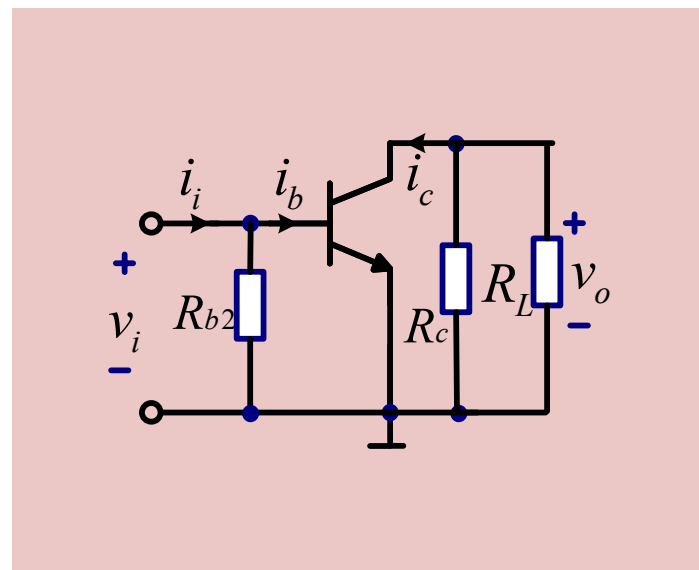
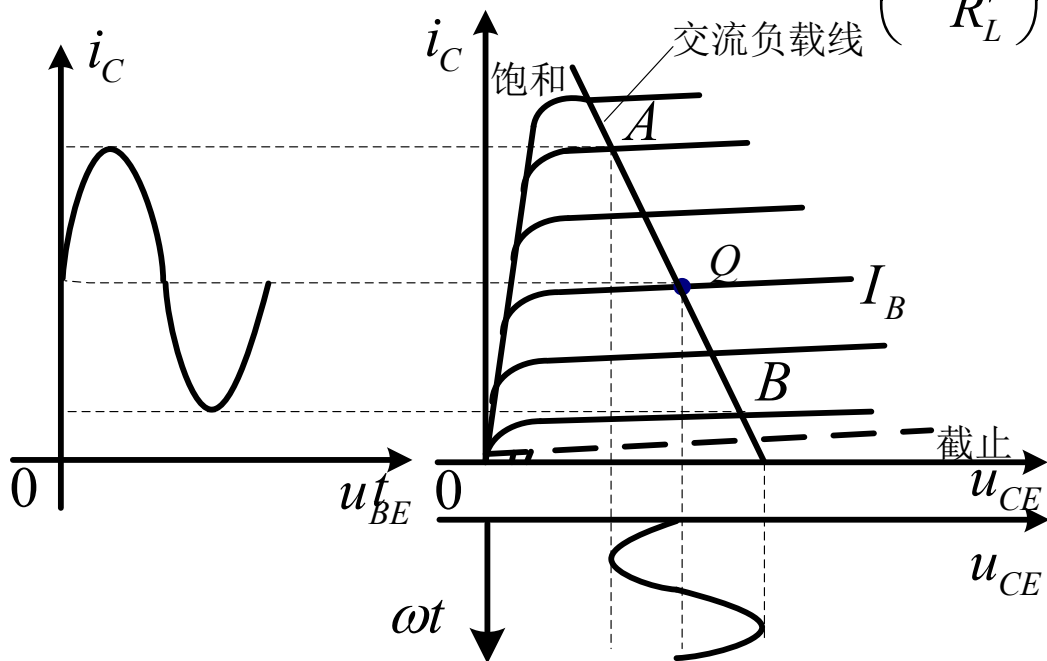
负载开路时: $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C = U_{CE} - i_c R_C$

经耦合电容输出, 直流被隔掉, 输出电压只有交流分量 $v_o = -i_c R_c$

$$u_{ce} = -i_c (R_c // R_L) = -i_c R'_L = v_o \quad R'_L \text{ 称为放大电路的交流负载}$$

$$\text{由于 } u_{CE} = U_{CE} + u_{ce} = U_{CE} + v_o = U_{CE} - i_c R'_L = U_{CE} - (i_C - I_C) R'_L$$

瞬时值 u_{CE} 与 i_C 之间的关系是一条斜率为 $\left(-\frac{1}{R'_L}\right)$ 的直线, 这条直线称为交流负载线



(3) 由交流负载线和输出特性曲线求出 u_{CE}

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce} = U_{CE} + U_{cem} \sin(\omega t - 180^\circ)$$

并且由电路中电容的隔直作用，使得

$$u_{ce} = v_o = U_{cem} \sin(\omega t - 180^\circ)$$

这种现象称为“倒相”，也称为反相输出

结论：

① 在合适的静态工作点和输入信号幅度很小的条件下，三极管各极电压、电流都是在静态值的基础上叠加一个交流分量。

② 当输入信号为正弦信号时，电路中各交流分量都是与输入信号同频率的正弦波，输入信号与输出信号反相。

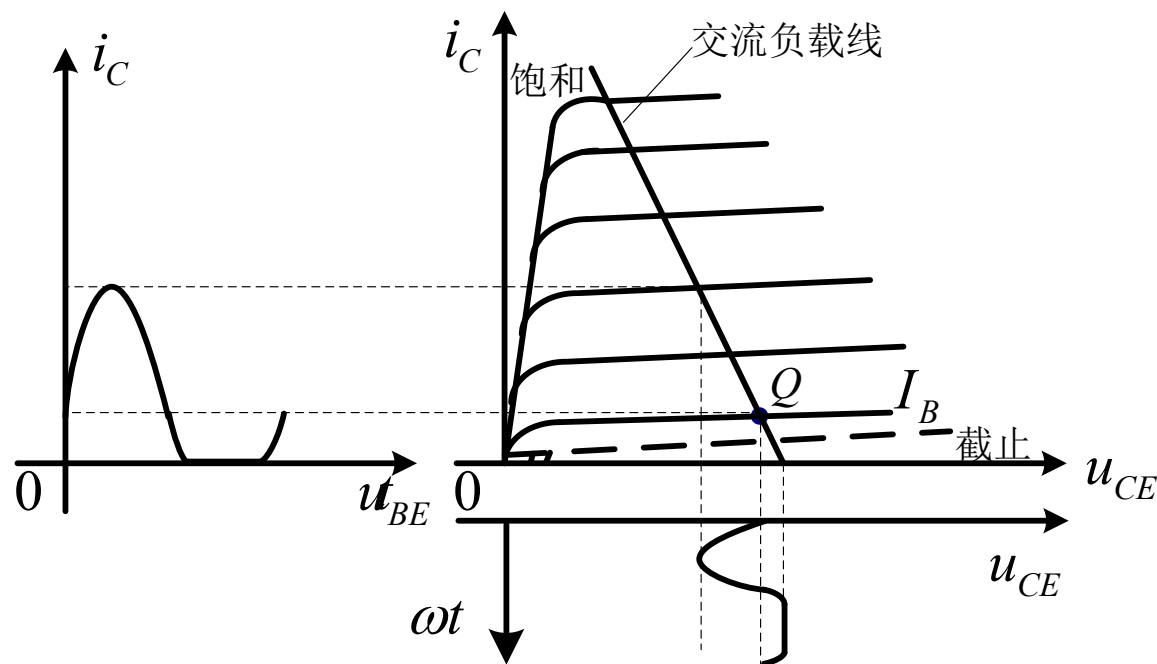
- 非线性失真

- 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 底部被削平，输出电压正半周被“削顶”

改善截止失真的办法是提高静态工作点



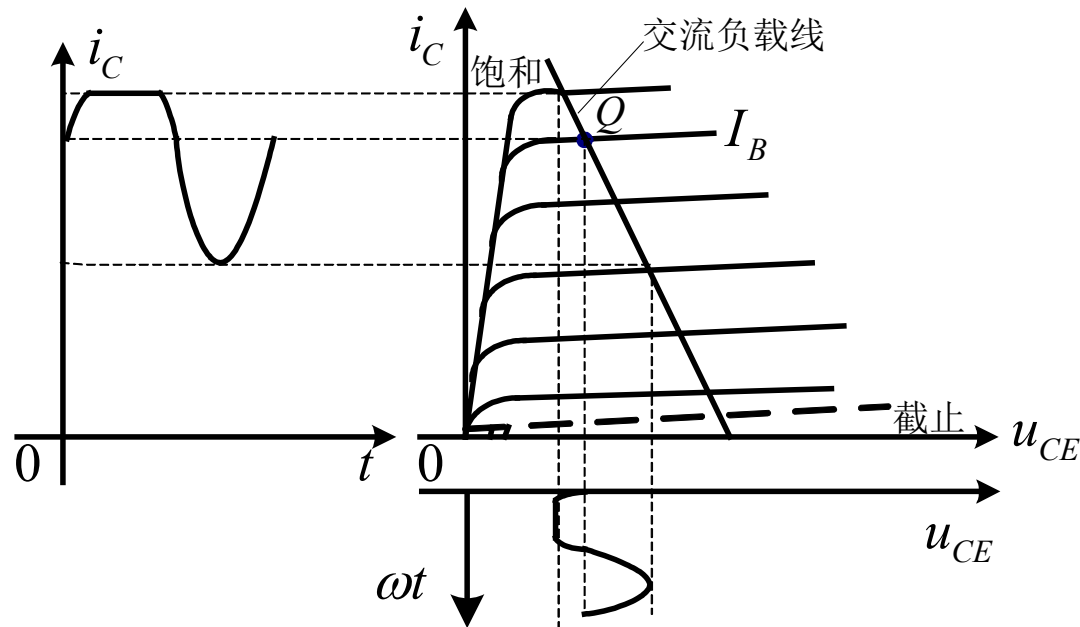
- 非线性失真

- 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 顶部被削平，输出电压负半周被“削顶”

改善饱和失真的办法是降低静态工作点



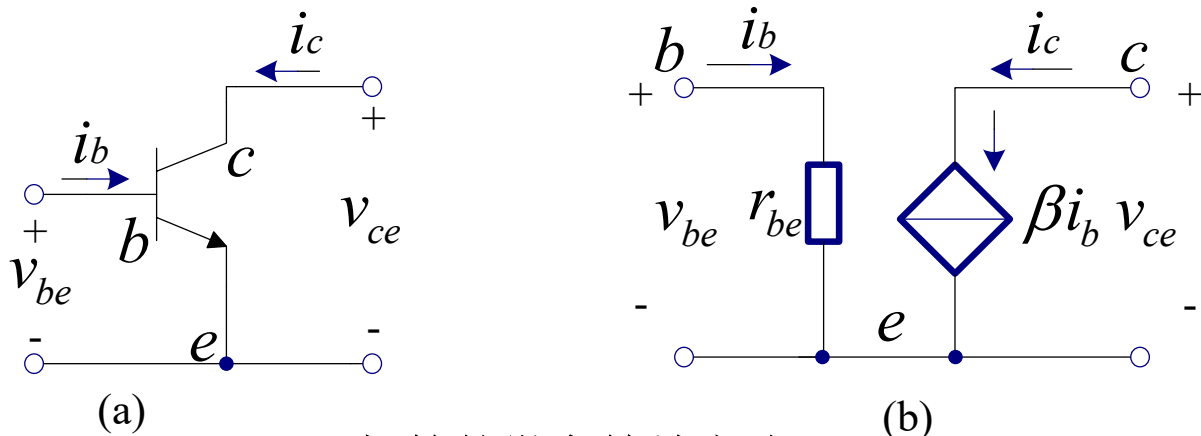
二、用微变等效法进行放大电路的动态分析

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



三极管的微变等效电路

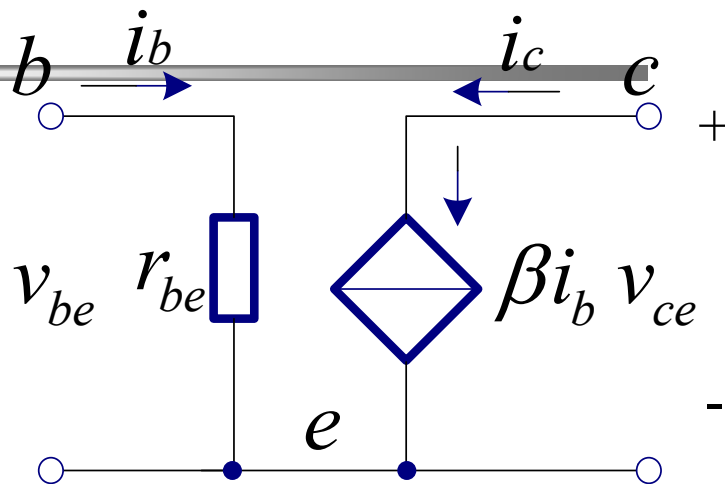
- β 一般用测试仪测出;
- r_{be} 与 Q 点有关, 可用图示仪测出
一般也用公式估算 r_{be}

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

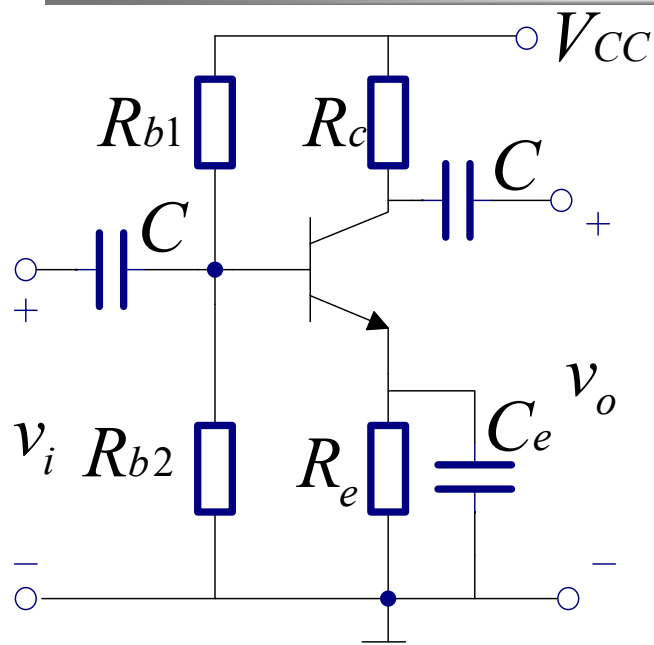
其中对于低频小功率管 $r_b \approx 300\Omega$

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

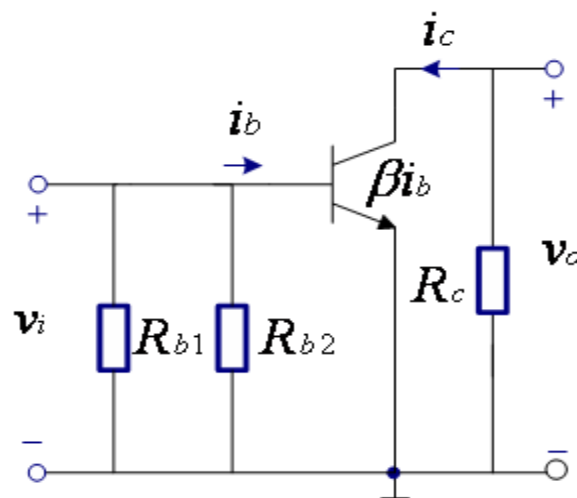
则
$$r_{be} \approx 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$



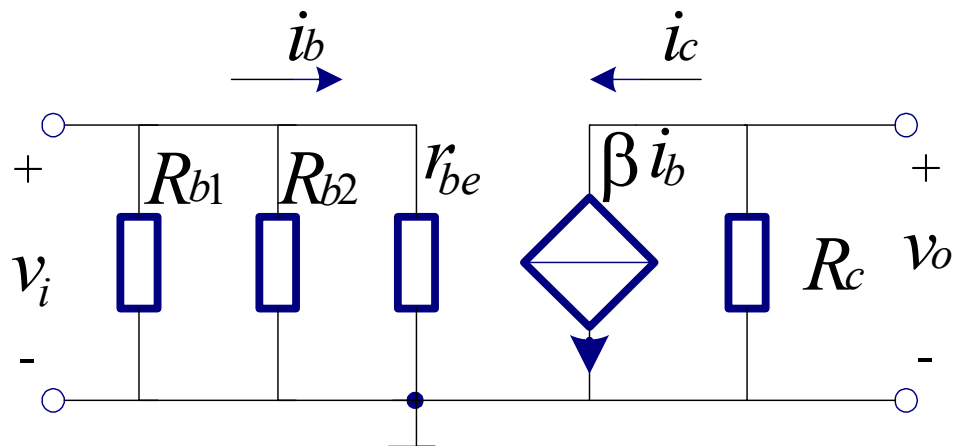
【例】绘制如图所示共射极放大电路的微变等效电路



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；



(c)交流通道

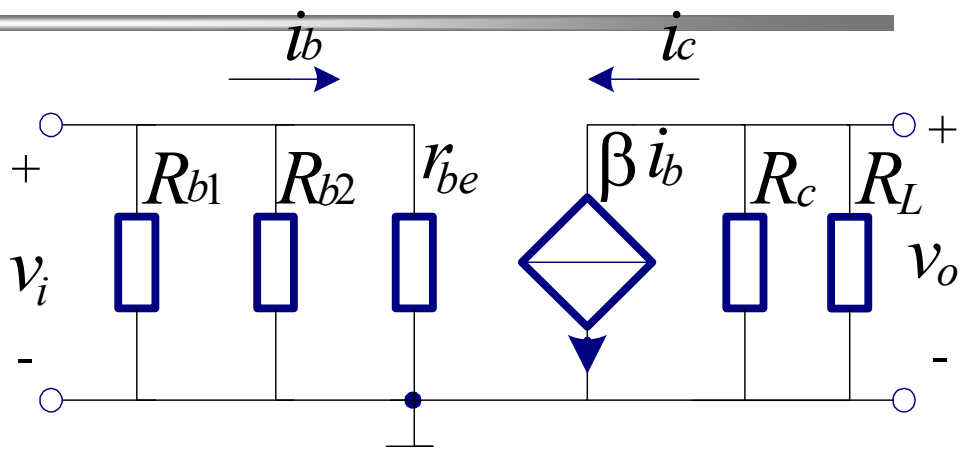


微变等效电路

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

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

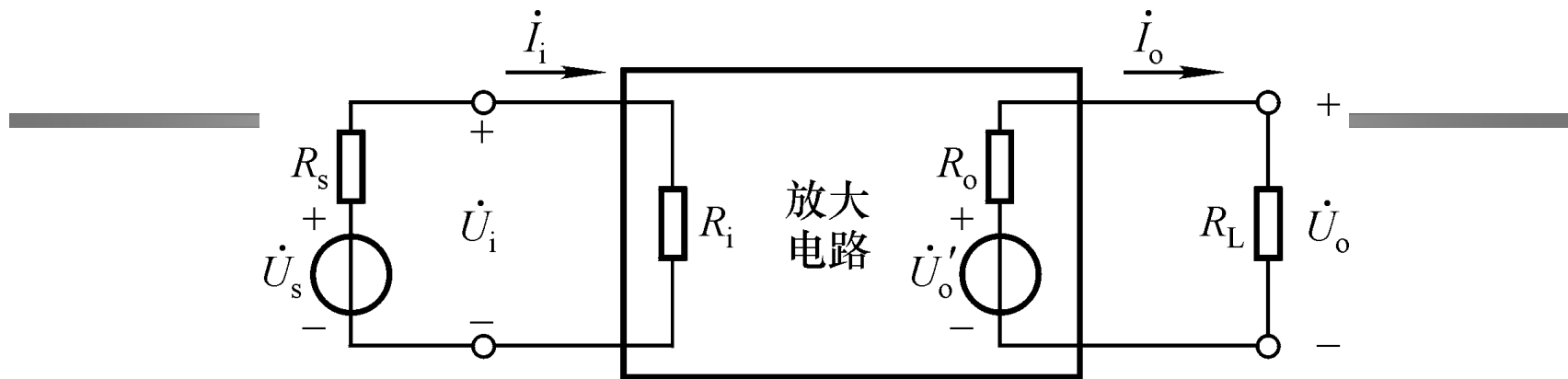


$$\dot{V}_i = \dot{U}_{be} = \dot{I}_b r_{be}, \quad \dot{V}_o = -\dot{I}_c (R_c // R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

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



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

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

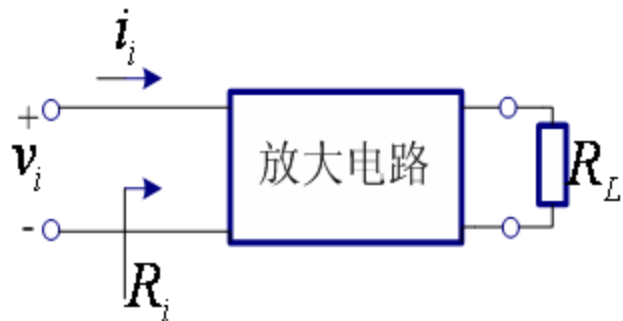
$$u_o = A_R \cdot i_i \quad \text{互阻放大倍数}(\Omega): A_R \quad \text{互阻增益(dB): } 20 \lg A_R$$

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

输入电阻与输出电阻

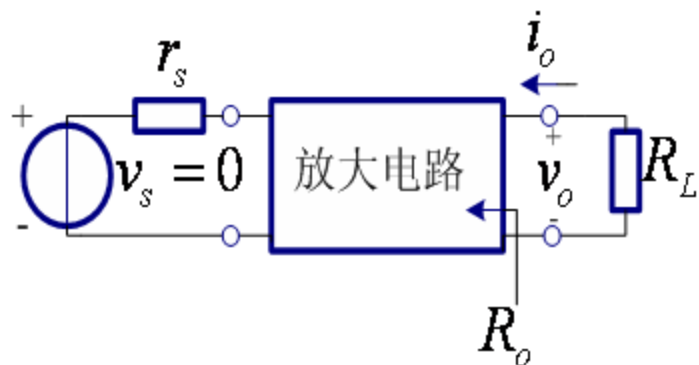
电路的输入电阻: $R_i = v_i / i_i$

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)

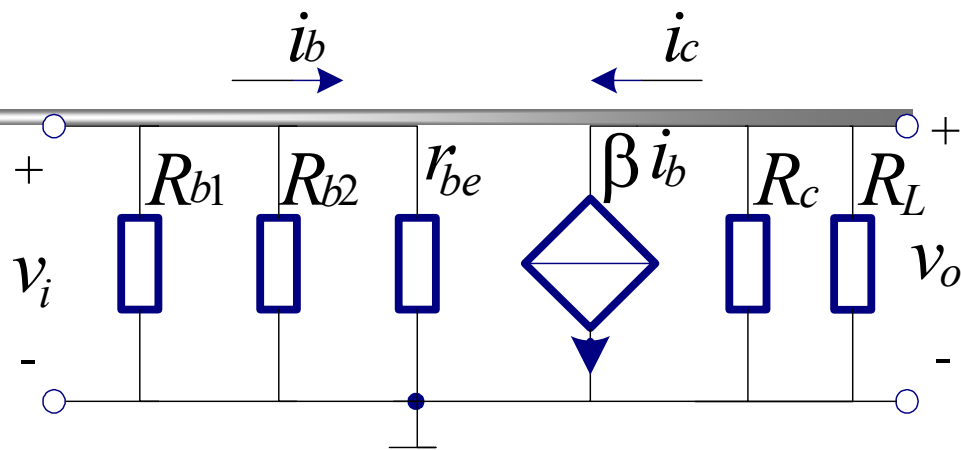


•输入电阻

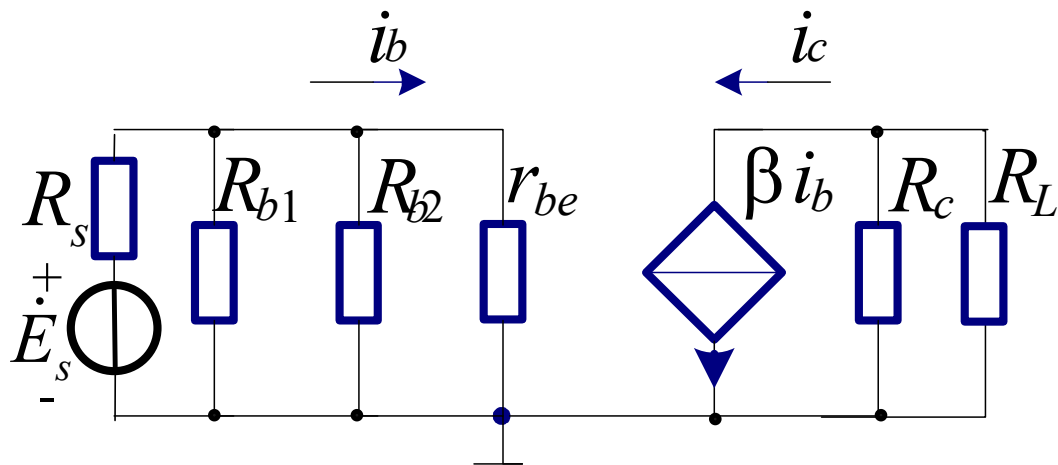
$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$$

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

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



外加信号源的微变等效电路



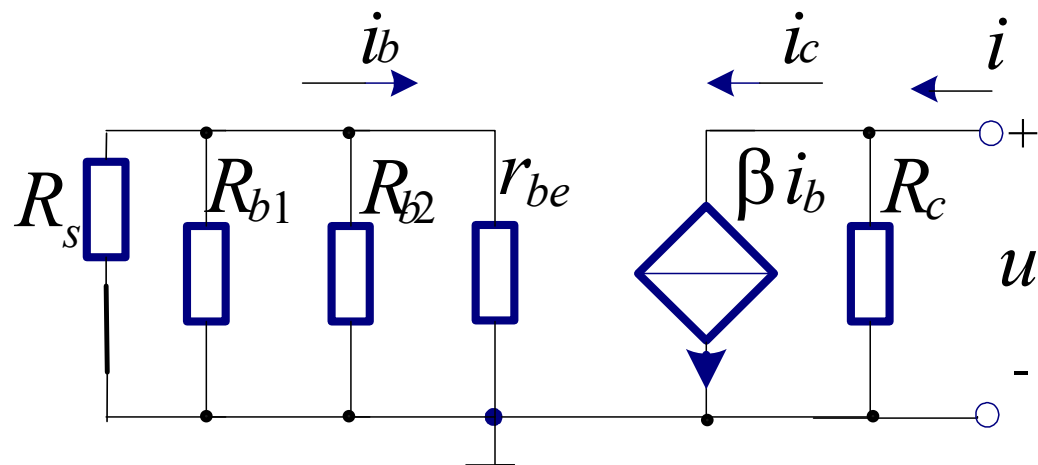
对于电压信号源，输入电阻越大越好 $u_i \rightarrow u_s$ ，衰减小；
对于电流信号源，输入电阻越小越好 $i_i \rightarrow i_s$ ，衰减小；

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

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

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

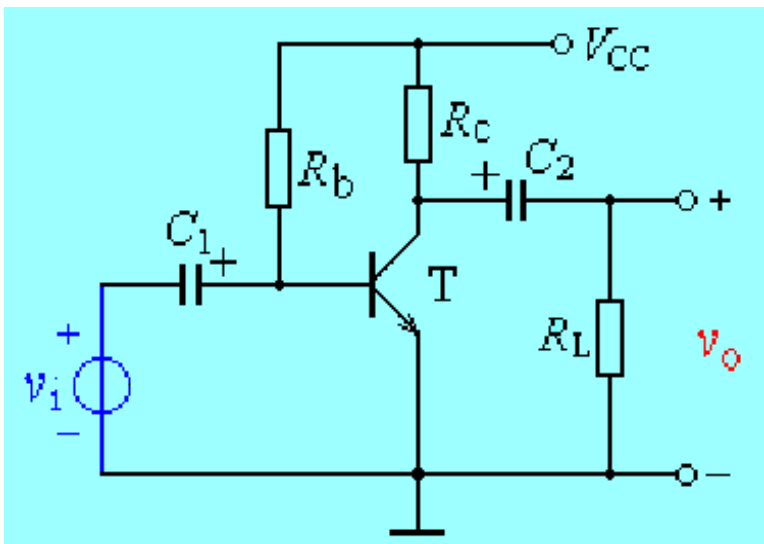
$$R_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \Big|_{\dot{E}_s=0} = R_C$$



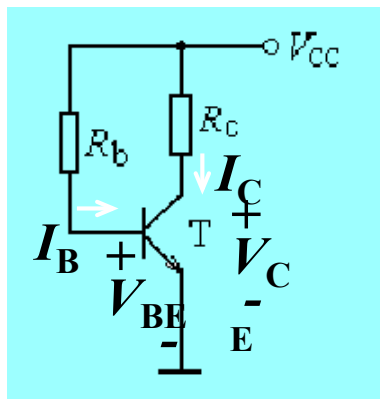
信号源置零，外加电压法

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

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

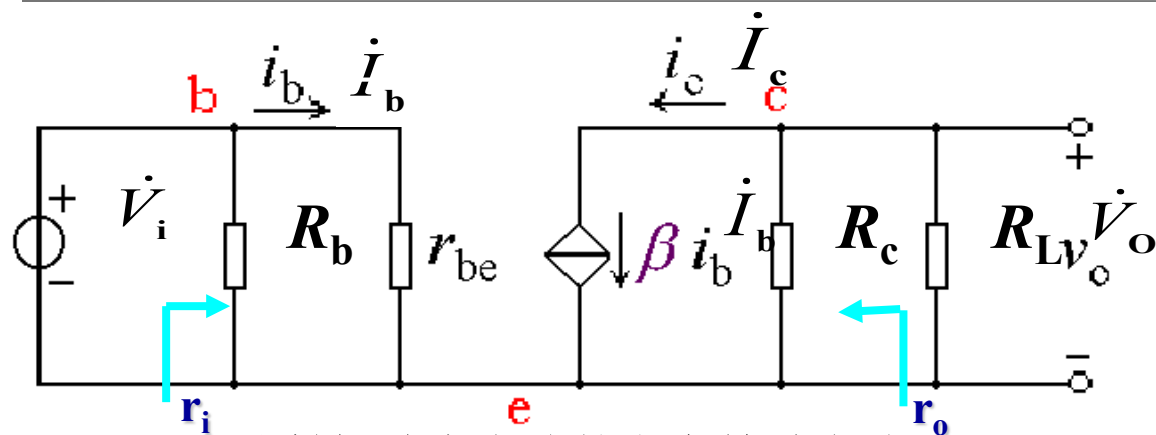
$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

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

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

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

根据微变等效电路，分析放大电路的性能指标



共射极放大电路的微变等效电路

(1) 电压放大倍数 A_v

(2) 输入电阻

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

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

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

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

负号表示输出电压相位相反

(3) 输出电阻

外加电源法

令 $\dot{V}_i = 0$ 则 $\dot{I}_b = 0$

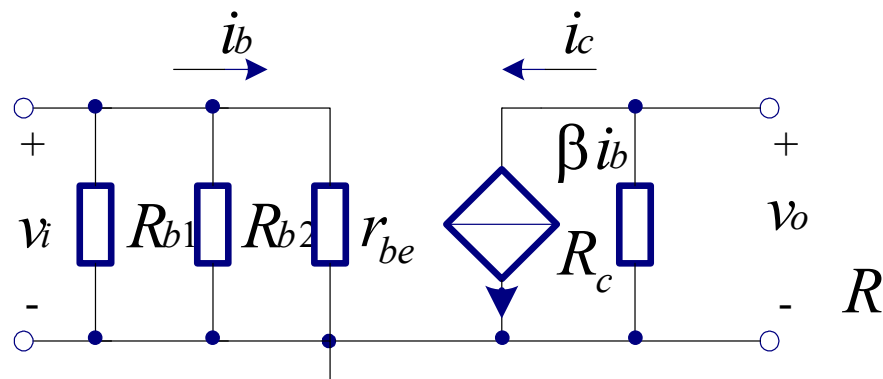
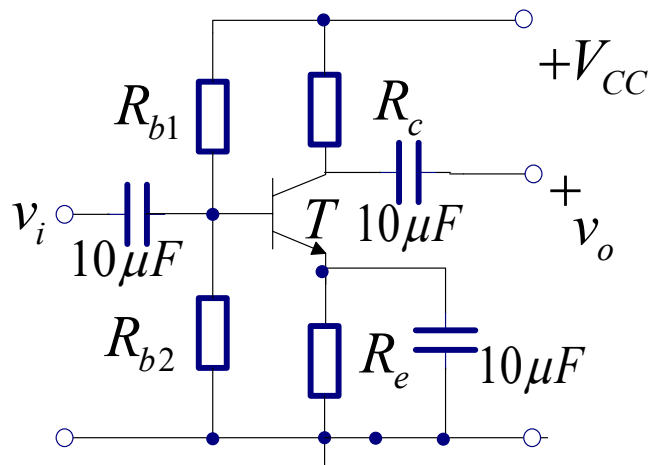
受控源开路

$$r_o = R_c$$

【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： $r_{be} = 1k\Omega$

$R_{b1} = 50k\Omega, R_{b2} = 10k\Omega, R_c = 1k\Omega, R_e = 80\Omega, V_{CC} = 9V$, 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。



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

放大电路输入电阻大约为 r_{be} ，电路的输出电阻是 R_C

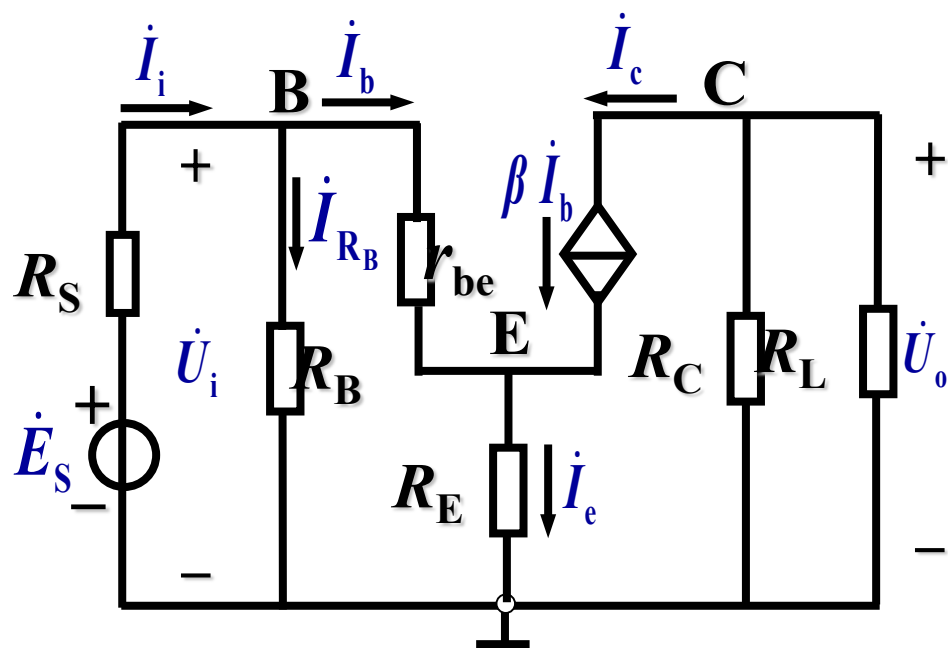
对交流：旁路电容 C_E 将 R_E 短路， R_E 不起作用， A_u ， r_i ， r_o 与固定偏置电路相同。



如果去掉 C_E ，
 A_u ， r_i ， r_o ？

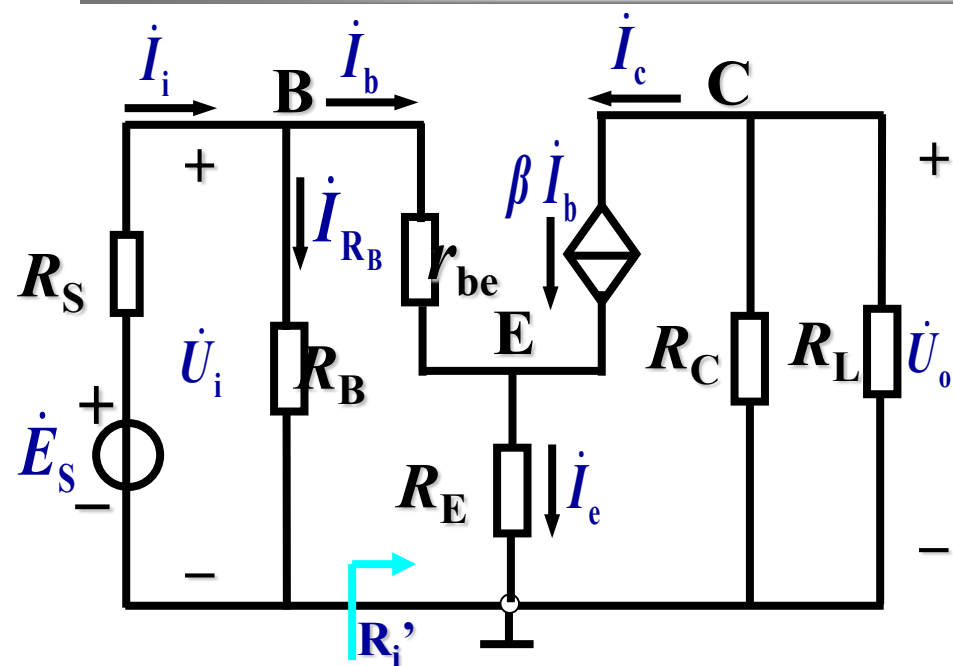
去掉 C_E 后的微变等效电路

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

先用外加电源法求 R_i'

$$u_i = r_{be} i_b + (1 + \beta) i_b R_E$$

$$\text{即 } R_i' = \frac{u_i}{i_b} = r_{be} + (1 + \beta) R_E$$

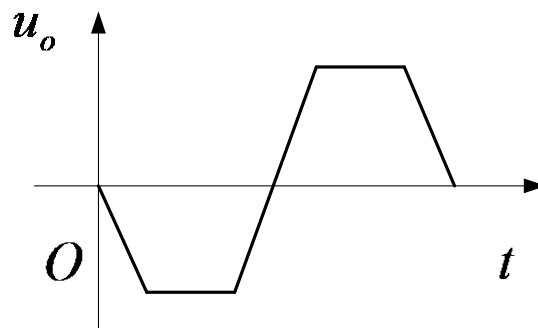
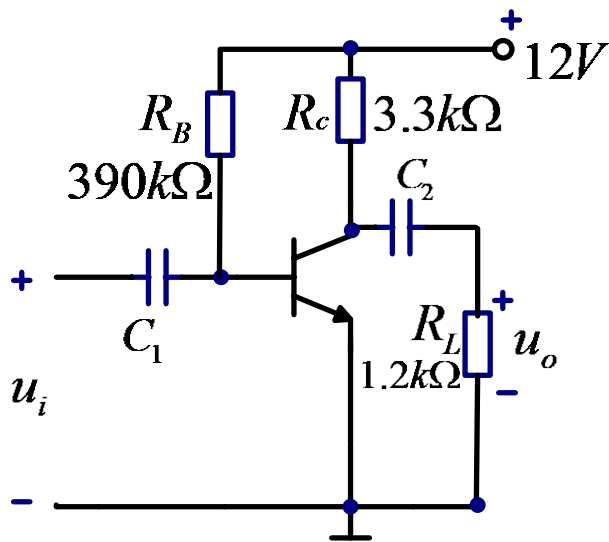
外加电源法求输出电阻

$$R_o = R_C$$

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。

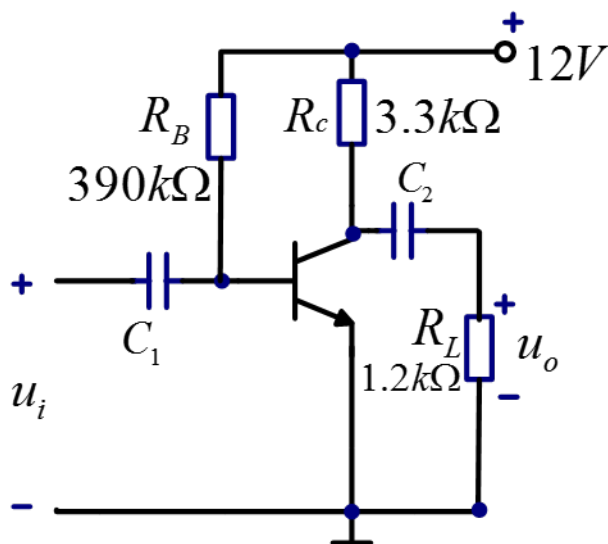


确定放大电路的静态工作点

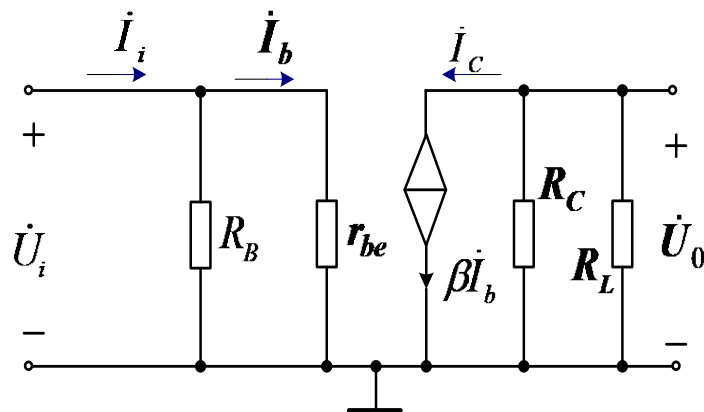
$$I_{BQ} = \frac{12 - U_{BE}}{R_B} = 0.029mA$$

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

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



微变等效电路如图所示， (3 分)



(3) 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 $r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 900\Omega$