

## 第二章 基本放大电路(1)

# 第二章 基本放大电路

---

**2.1放大的概念和电路主要指标**

**2.2基本共射放大电路的工作原理**

**2.3放大电路的分析方法**

**2.4放大电路静态工作点的稳定**

**2.5单管放大电路的三种基本接法**

**2.6晶体管基本放大电路的派生电路**

**2.7场效应管放大电路**

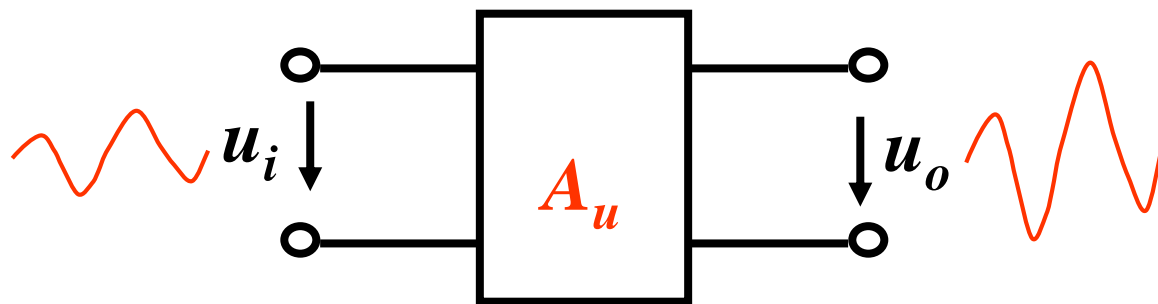
---

## 2.1 放大的概念和电路主要指标

### 2.1.1 放大的概念

电子学中放大的目的是将微弱的变化信号放大成较大的信号。  
这里所讲的主要是电压放大电路。

电压放大电路可以用有输入口和输出口的四端网络表示，如图：



放大电路放大的本质是能量的控制和转换。

放大的前提是不失真，即只有在不失真的情况下放大才有意义。

## 2.1.2 电路主要指标

### 一、放大倍数          表示放大器的放大能力

根据放大电路输入信号的条件和对输出信号的要求，放大器可分为四种类型，所以有四种放大倍数的定义。

(1) 电压放大倍数:  $\dot{A}_{uu} = \dot{U}_O / \dot{U}_I$  (重点)

(2) 电流放大倍数:  $\dot{A}_{ii} = \dot{I}_O / \dot{I}_I$

(3) 互阻放大倍数:  $\dot{A}_{ui} = \dot{U}_O / \dot{I}_I$

(4) 互导放大倍数:  $\dot{A}_{iu} = \dot{I}_O / \dot{U}_I$

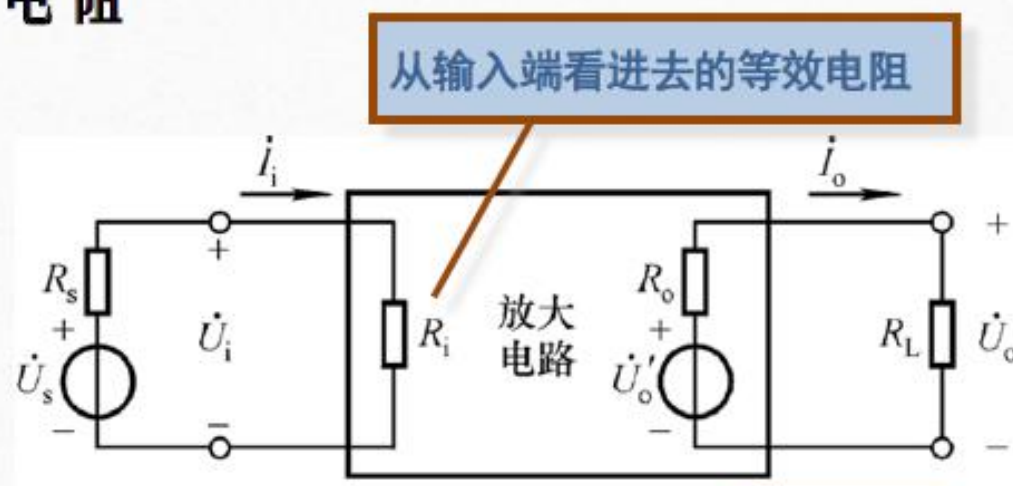
本章重点研究电压放大倍数 $\dot{A}_{uu}$

## 2.1.2 电路主要指标

### 二、输入电阻

衡量放大电路从其前级取电流大小的参数

#### ■ 输入电阻



输入电压与输入电流有效值之比：

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

输入电阻越大，从其前级取得的电流越小，对前级的影响越小。一般来说， $R_i$ 越大越好。

## 2.1.2 电路主要指标

### 三、输出电阻

#### ■ 输出电阻



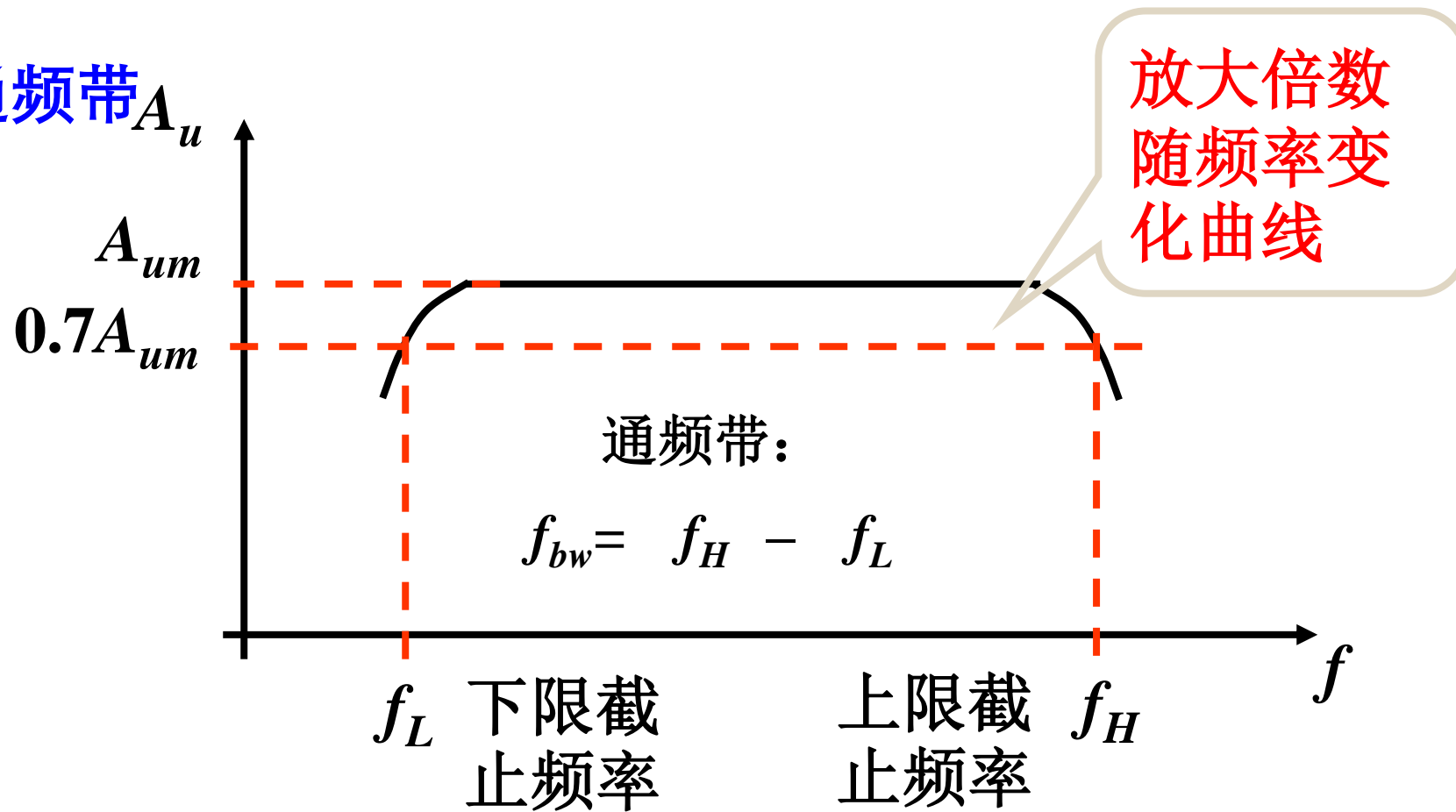
$$R_o = \frac{U_o' - U_o}{\frac{U_o}{R_L}} = \left( \frac{U_o'}{U_o} - 1 \right) R_L$$

空载时输出电压有效值

带 $R_L$ 时输出电压有效值

## 2.1.2 电路主要指标

### 四、通频带 $A_u$



通频带越宽，表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。

## 2.2 基本共射放大电路的工作原理

### 2.2.1 基本共射放大电路的组成及各元件作用

**T:** 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）。

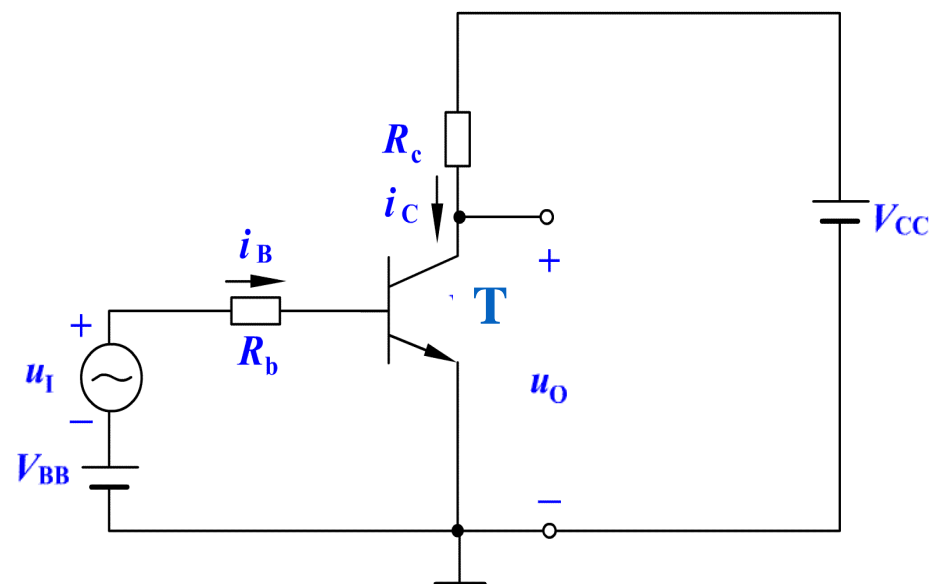


图 2.2.1 基本共射放大电路



## 2.2.2 设置静态工作点的必要性

### 一、 静态工作点 (Quiescent Point)

放大电路没有输入信号时的工作状态称为静态。

静态工作点Q（直流值）： $U_{BEQ}$ 、 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 和 $U_{CEQ}$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} \\ I_{CQ} = \beta I_{BQ} \\ U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \end{array} \right.$$

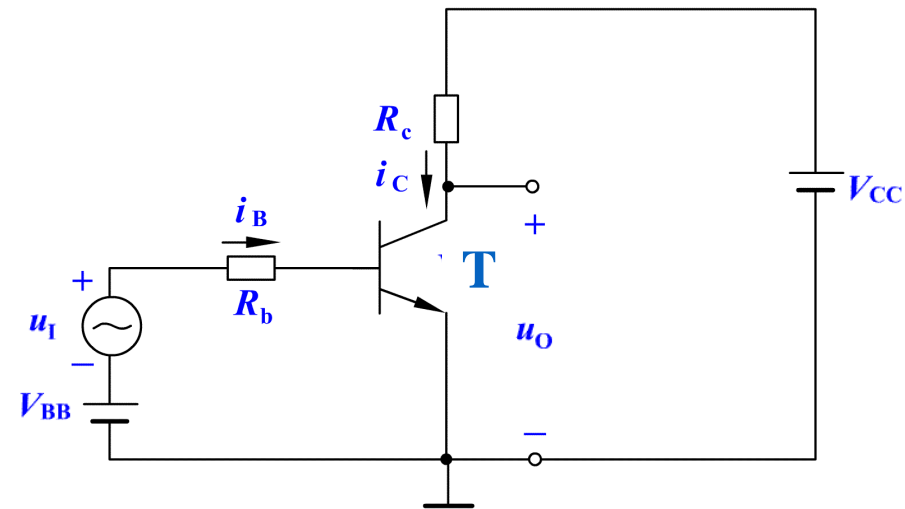


图 2.2.1 基本共射放大电路

对于NPN硅管 $U_{BEQ} = 0.7V$ ，PNP锗管 $U_{BEQ} = -0.2V$

## 2.2.2 设置静态工作点的必要性

### 二、为什么要设置静态工作点

输出电压会出现失真

对放大电路的基本要求：

1. 输出波形不能失真。
2. 输出信号能够放大。

Q点不仅影响放大电路是否会失真，  
而且影响放大电路的几乎所有的动态参数。

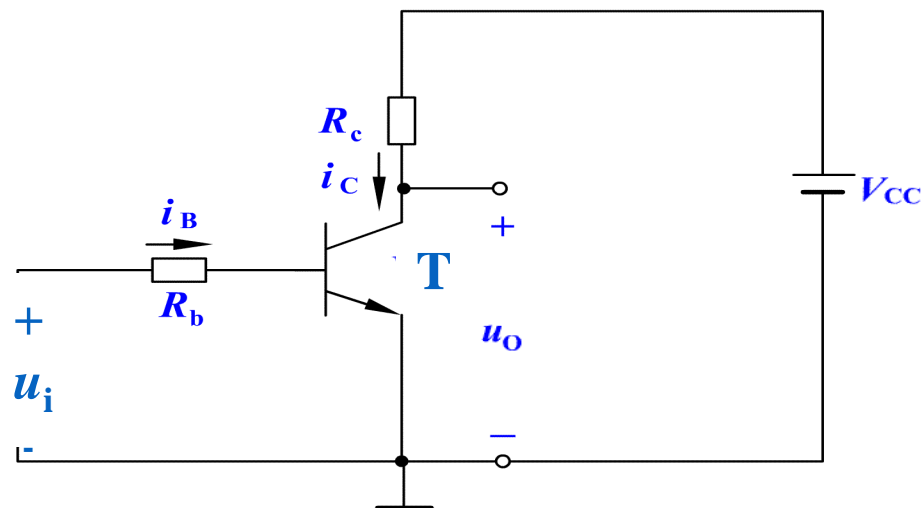


图 2.2.2 没有设置合适的静态工作点

## 2.2.3 基本共射放大电路的工作原理及波形分析

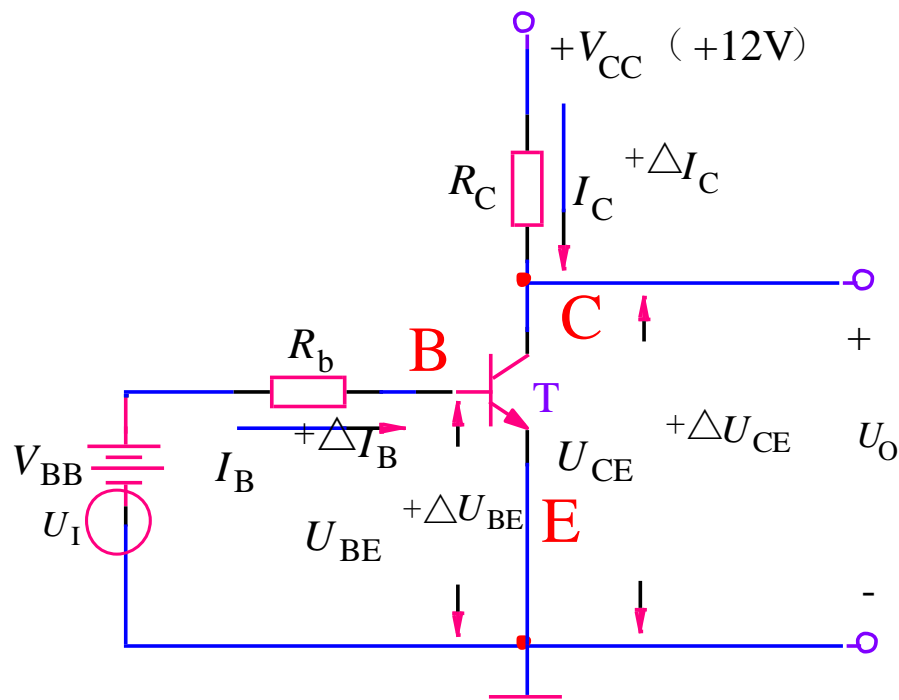
$$\dot{U}_i \rightarrow \Delta u_{BE} \rightarrow \Delta i_B$$

$$\rightarrow \Delta i_C (\beta \Delta i_B)$$

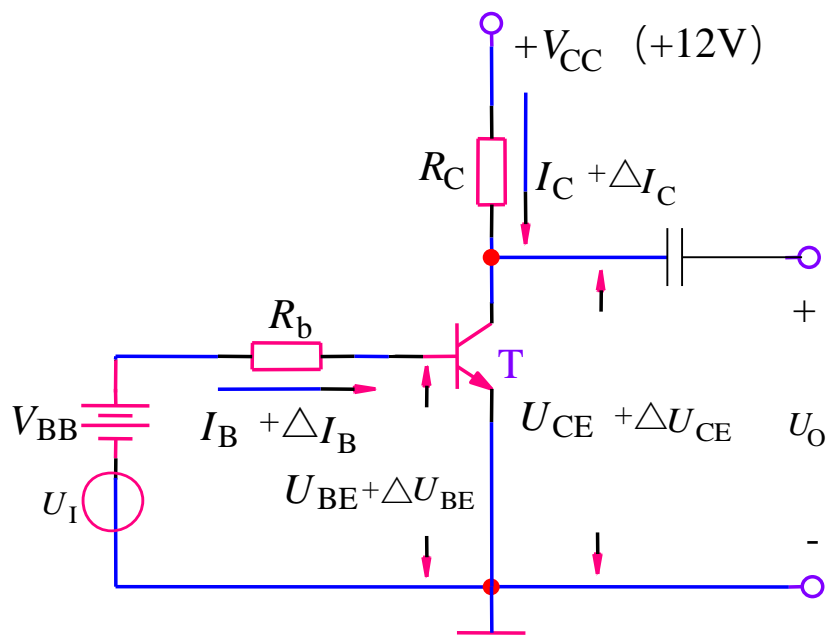
$$\rightarrow \Delta u_{CE} (-\Delta i_C \times R_C)$$

$$\rightarrow \dot{U}_o$$

电压放大倍数:  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$



## 2.2.3 基本共射放大电路的工作原理及波形分析

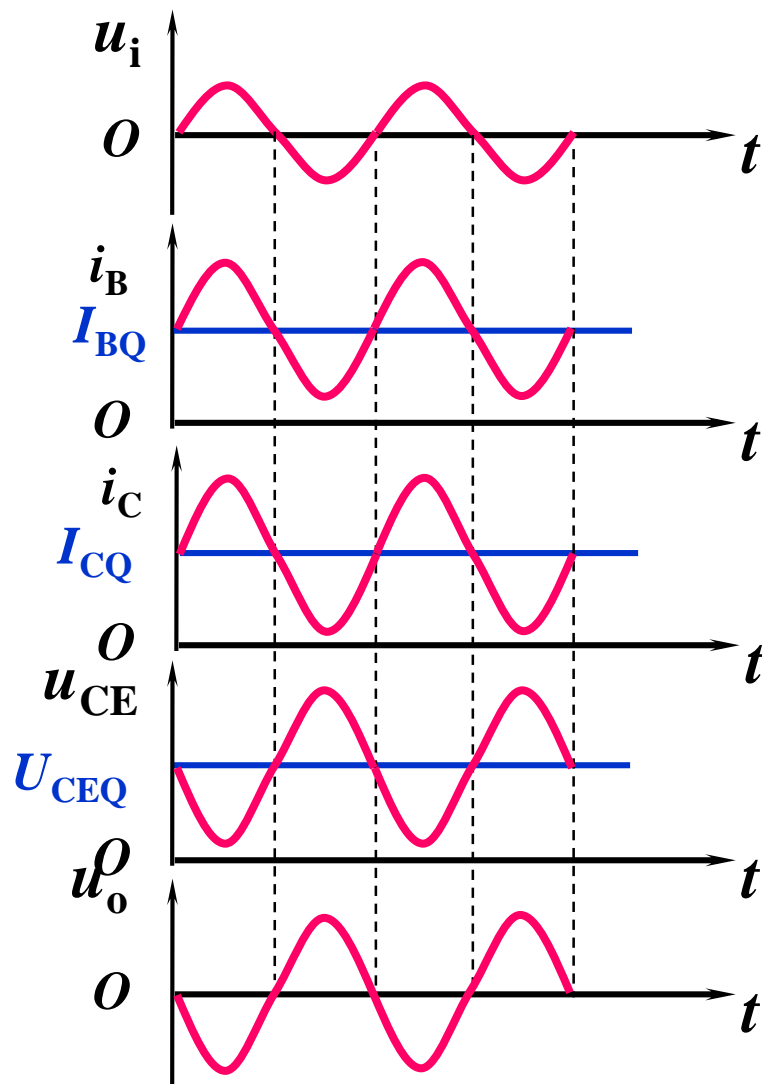


$$u_{BE} = U_{BEQ} + u_{be}$$

$$i_B = I_{BQ} + i_b$$

$$i_C = I_{CQ} + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$$



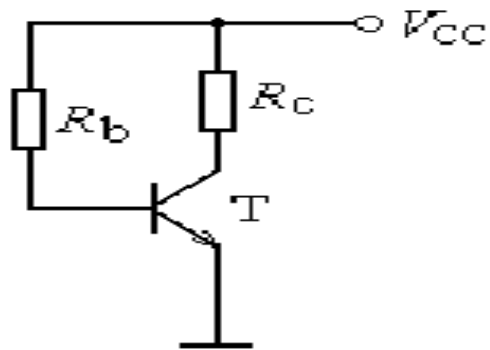
各电压、电流的波形

基本共射放大电路的电压放大作用是利用晶体管的电流放大作用，并依靠 $R_C$ 将电流的变化转化成电压的变化来实现的。

## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

### 一、直流通路

1. 电容的容抗为无穷大，视为开路
2. 电感线圈的阻值很小，相当于短路



阻容耦合放大电路的  
直流通路

例：画出下图所示电路  
的直流通路

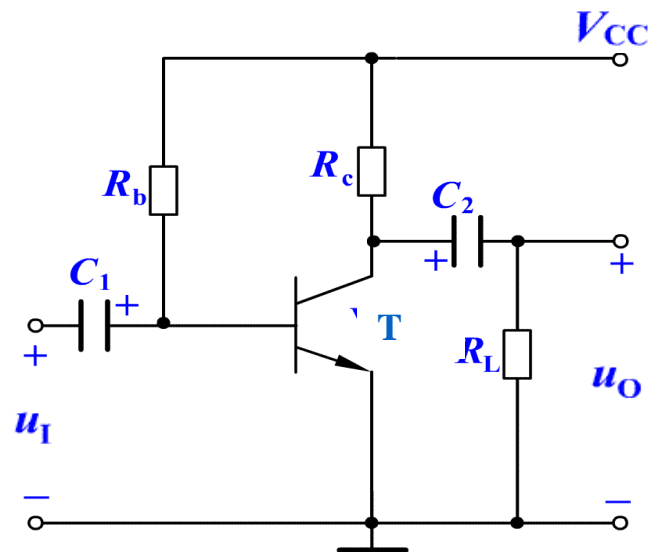


图 2.2.5 阻容耦合共  
射放大电路

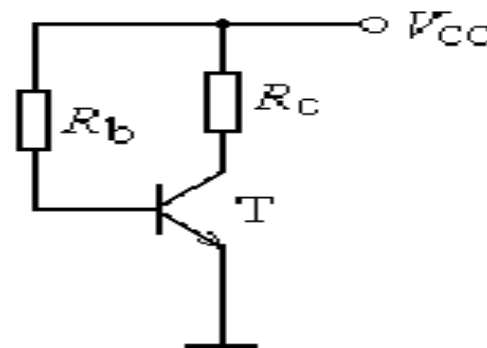
## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

### 二、静态工作点的计算

**原则：**令输入信号为零（若信号源有内阻应保留），在直流通路的基础上，利用节点电流定律和回路电压法等列方程求解。

**静态工作点（直流）**包括  $(U_{BEQ}, I_{BQ}, I_{CQ}, U_{CEQ})$

$$\begin{cases} I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \\ I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \\ U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \end{cases}$$



阻容耦合放大电路的  
直流通路

## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

例：求下图所示电路的静态工作点

对于NPN硅管 $U_{BEQ} = 0.7V$ ，PNP锗管 $U_{BEQ} = -0.2V$

$$\begin{cases} I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} \\ I_{CQ} = \beta I_{BQ} \\ U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \end{cases}$$

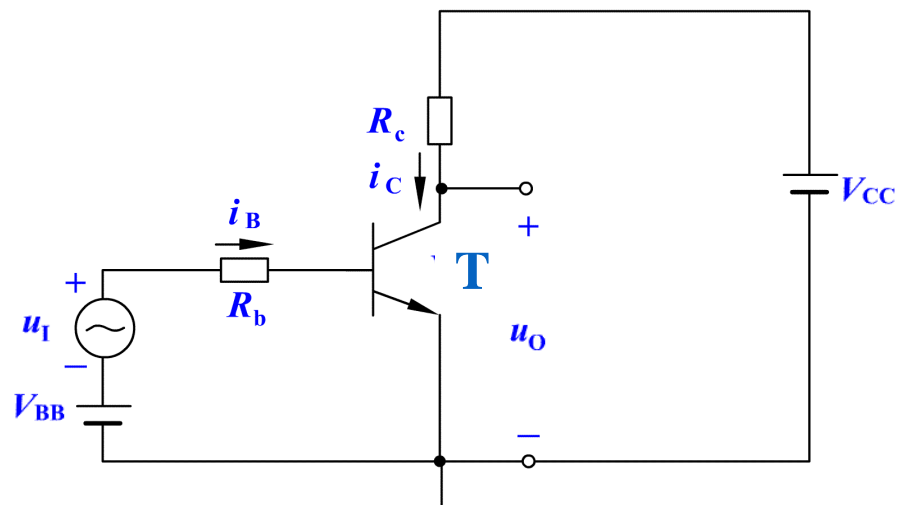


图 2.2.1 基本共射放大电路

## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

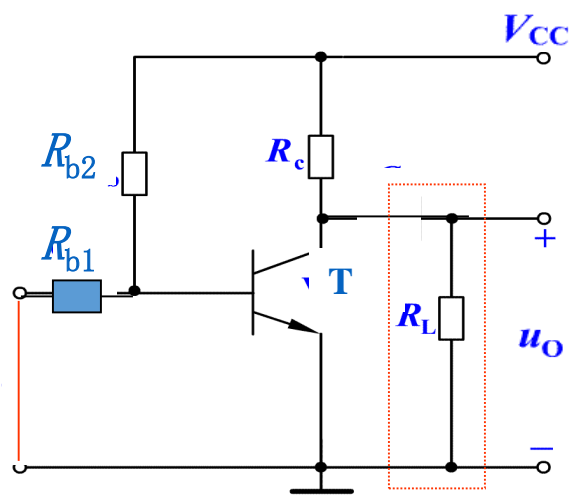


图 2.2.4 直接耦合共射放大电路

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_{b2}} - \frac{U_{BEQ}}{R_{b1}}$$

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

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

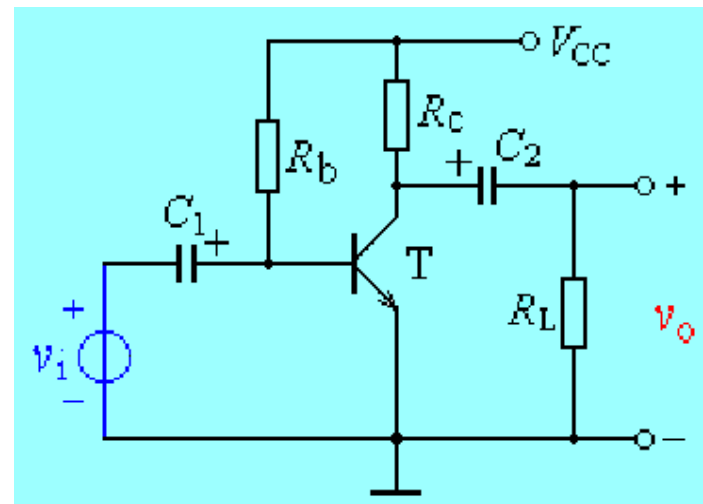
(负载电路  $R_L$  未接入)



## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

放大电路如图所示。已知BJT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? (忽略BJT的饱和压降)



共射极放大电路

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

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

静态工作点为 $Q$  (40 $\mu A$ , 3.2mA, 5.6V), BJT工作在放大区。

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - R_c \cdot I_C = 12V - 2k \times 9.6mA = -7.2V \quad U_{CEQ} \text{不可能为负值,}$$

其最小值也只能为0, 即 $I_C$ 的最大电流为: 
$$I_{CM} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_c} \approx \frac{12V}{2k} = 6mA$$

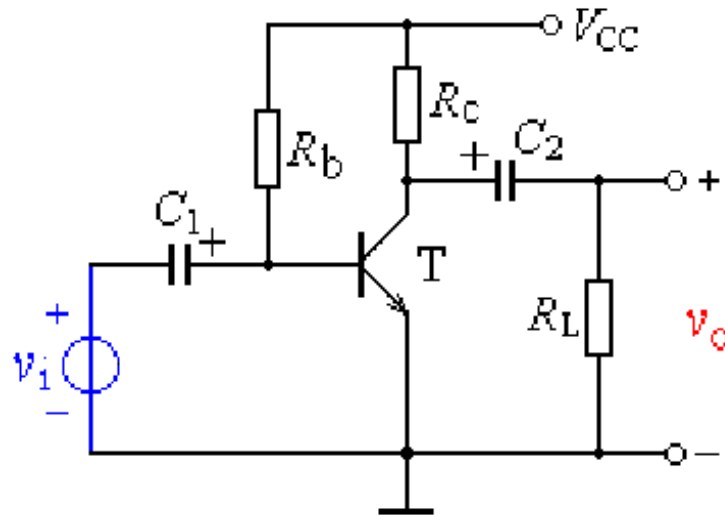
此时,  $Q$  (120 $\mu A$ , 6mA, 0V), 由于  $\beta \cdot I_B > I_{CM}$  所以BJT工作在饱和区。

## 2.2.4 放大电路的直流通路和交流通路

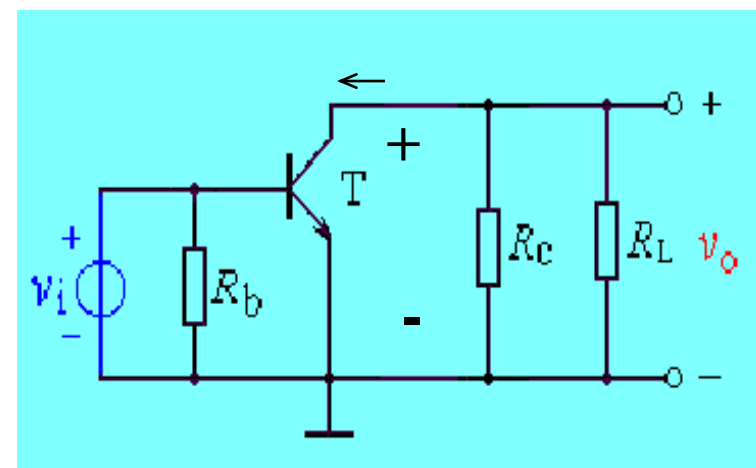
### 三、交流通路

- 直流电源：内阻为零，相当于短路
- 耦合电容（大电容）对交流相当于短路

画出下图的交流通路



共射极放大电路



阻容耦合放大电路的交流通路

## 2.3 放大电路的分析

如何判断定性判断一个放大电路能否正常放大信号？

依据两个方面

(1) 静态

放大电路是否有一个合适的静态工作点

(2) 动态

输入的交流信号是否能够正确的作用于输入端，放大后输出的信号是否能够正确的作用于负载。

## 2.3 放大电路的分析

### 2.3.1 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、静态工作点的分析

##### 1. 先确定输入回路

$I_{BQ}$ 、 $U_{BEQ}$ 。（一般采用：用估算的方法计算）

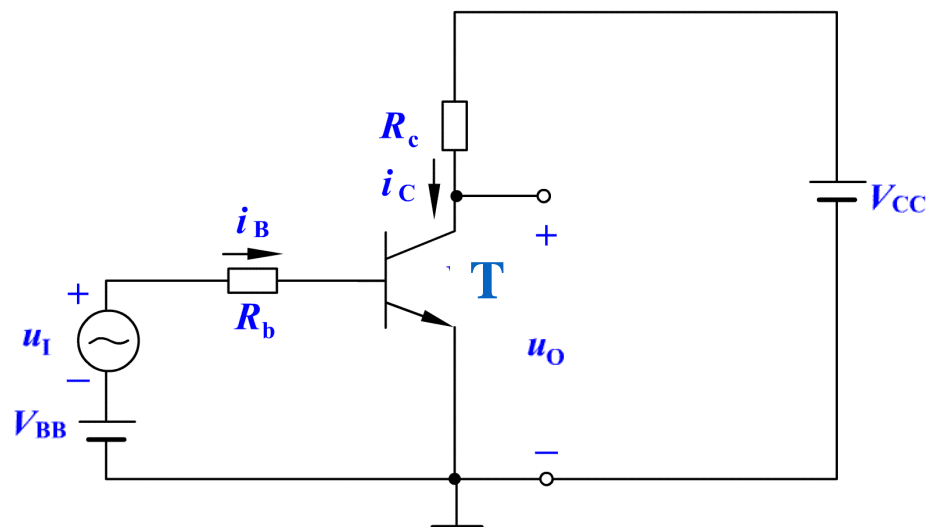


图 2.2.1 基本共射放大电路

## 2.3.2 图解法

2. 用图解法确定输出回路静态值。

方法：根据  $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$  式确定两个特殊点

当  $i_C = 0$  时,  $u_{CE} = V_{CC}$

当  $u_{CE} = 0$  时,  $i_C = \frac{V_{CC}}{R_c}$

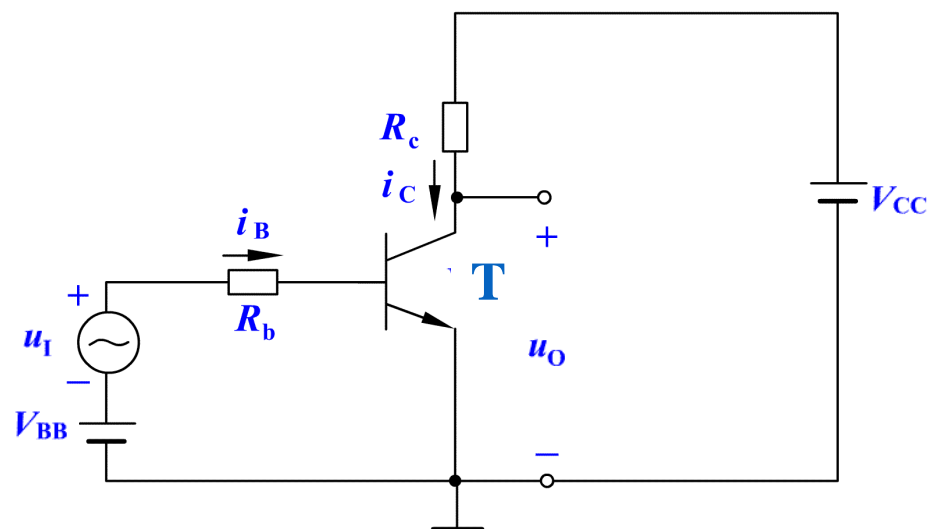
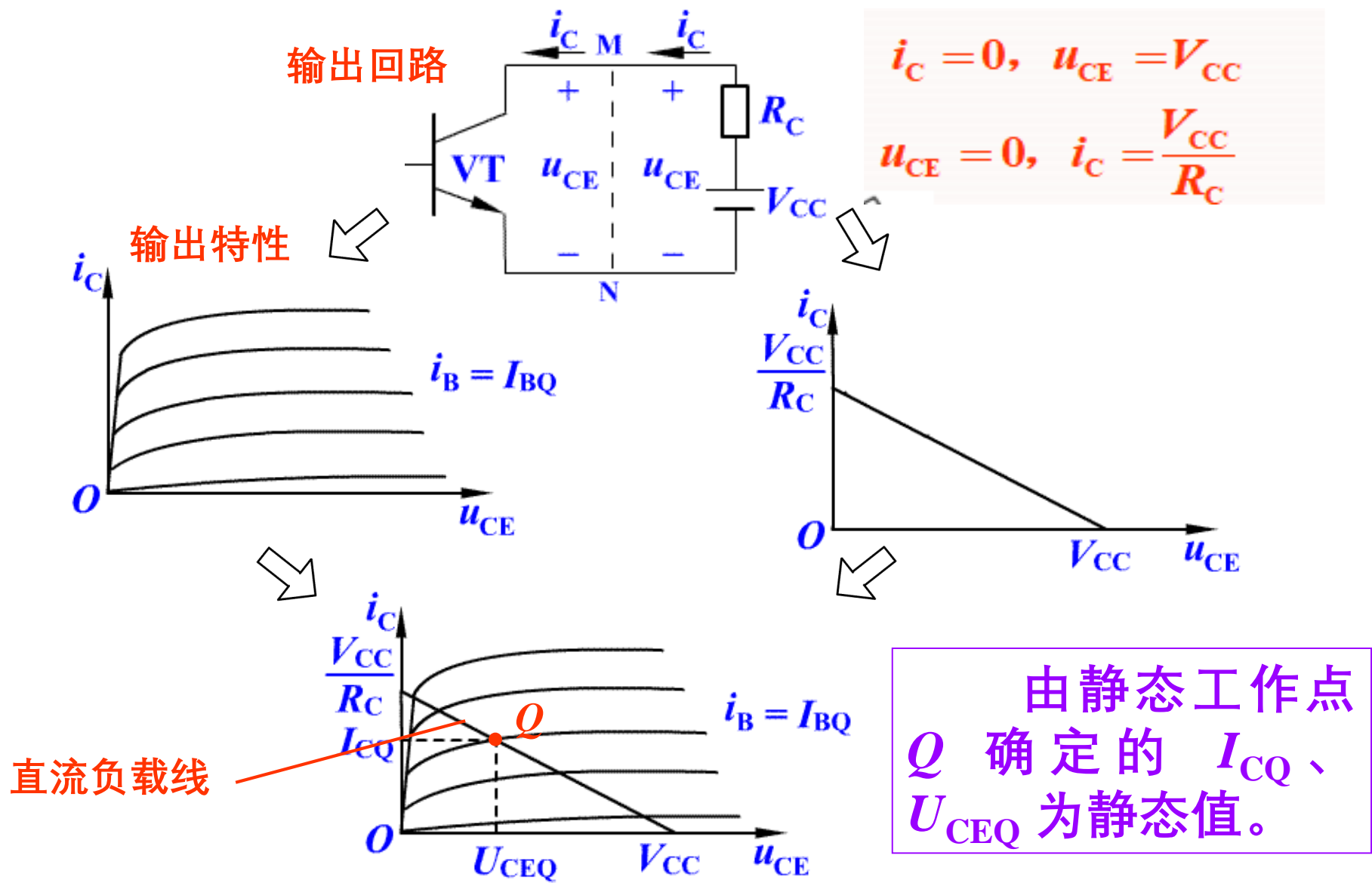


图 2.2.1 基本共射放大电路



## 2.3.2 图解法

【例】图示单管共射放大电路及特性曲线中，已知  $R_b = 280\text{ k}\Omega$ ， $R_c = 3\text{ k}\Omega$ ，集电极直流电源  $V_{CC} = 12\text{ V}$ ，试用图解法确定静态工作点。

解：首先估算  $I_{BQ}$

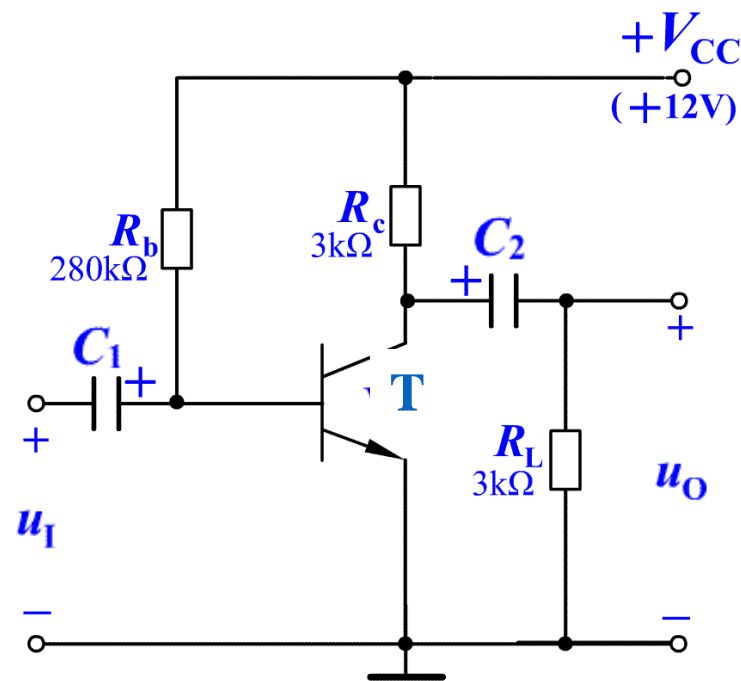
$$\begin{aligned} I_{BQ} &= \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \\ &= \left( \frac{12 - 0.7}{280} \right) \text{mA} = 40\text{ }\mu\text{A} \end{aligned}$$

做直流负载线，确定  $Q$  点

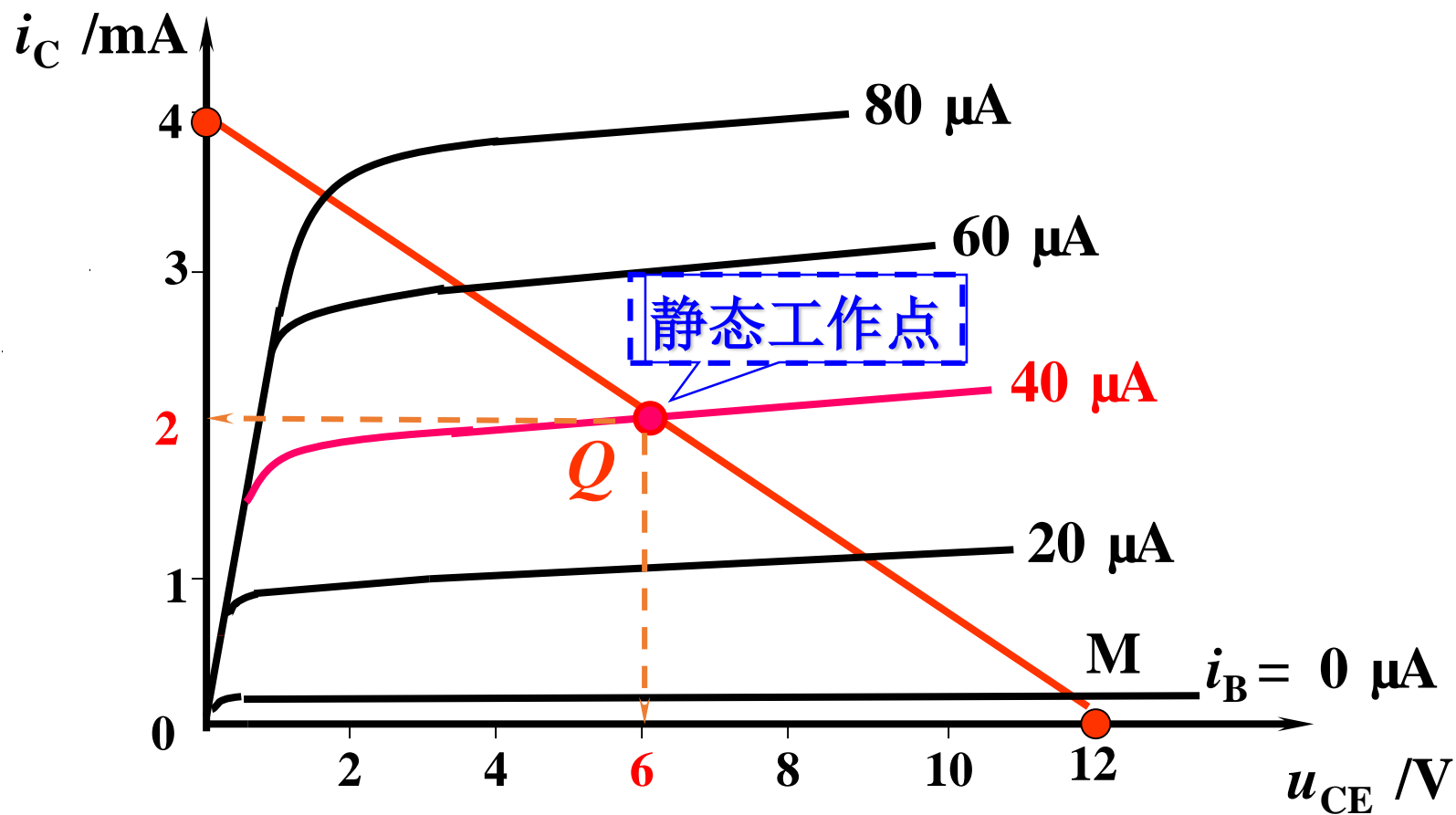
根据  $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$

$$i_C = 0, u_{CE} = 12\text{ V};$$

$$u_{CE} = 0, i_C = 4\text{ mA}.$$



## 2.3.2 图解法



由  $Q$  点确定静态值为：

$$I_{BQ} = 40 \mu A, \quad I_{CQ} = 2 \text{ mA}, \quad U_{CEQ} = 6 \text{ V}.$$

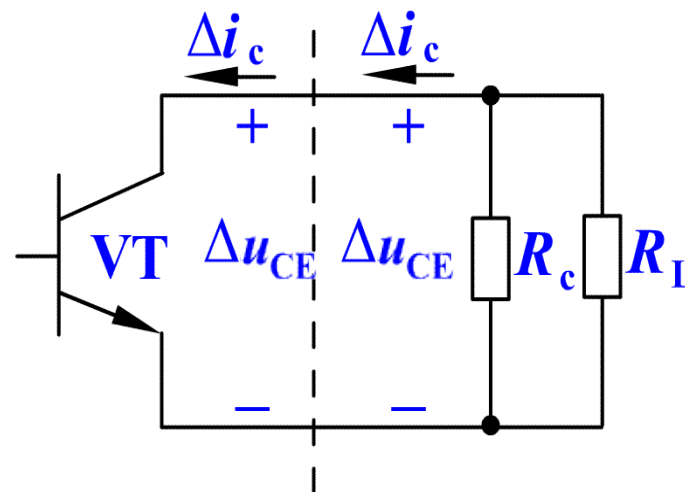


## 2.3.2 图解法

### 二、电压放大倍数的分析

#### 1. 交流通路的输出回路

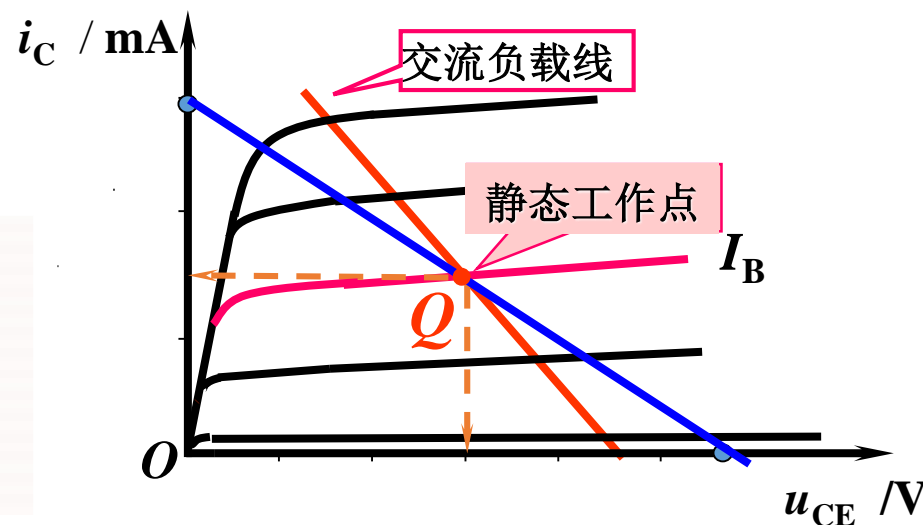
输出通路的外电路是  $R_c$  和  $R_L$  的并联。



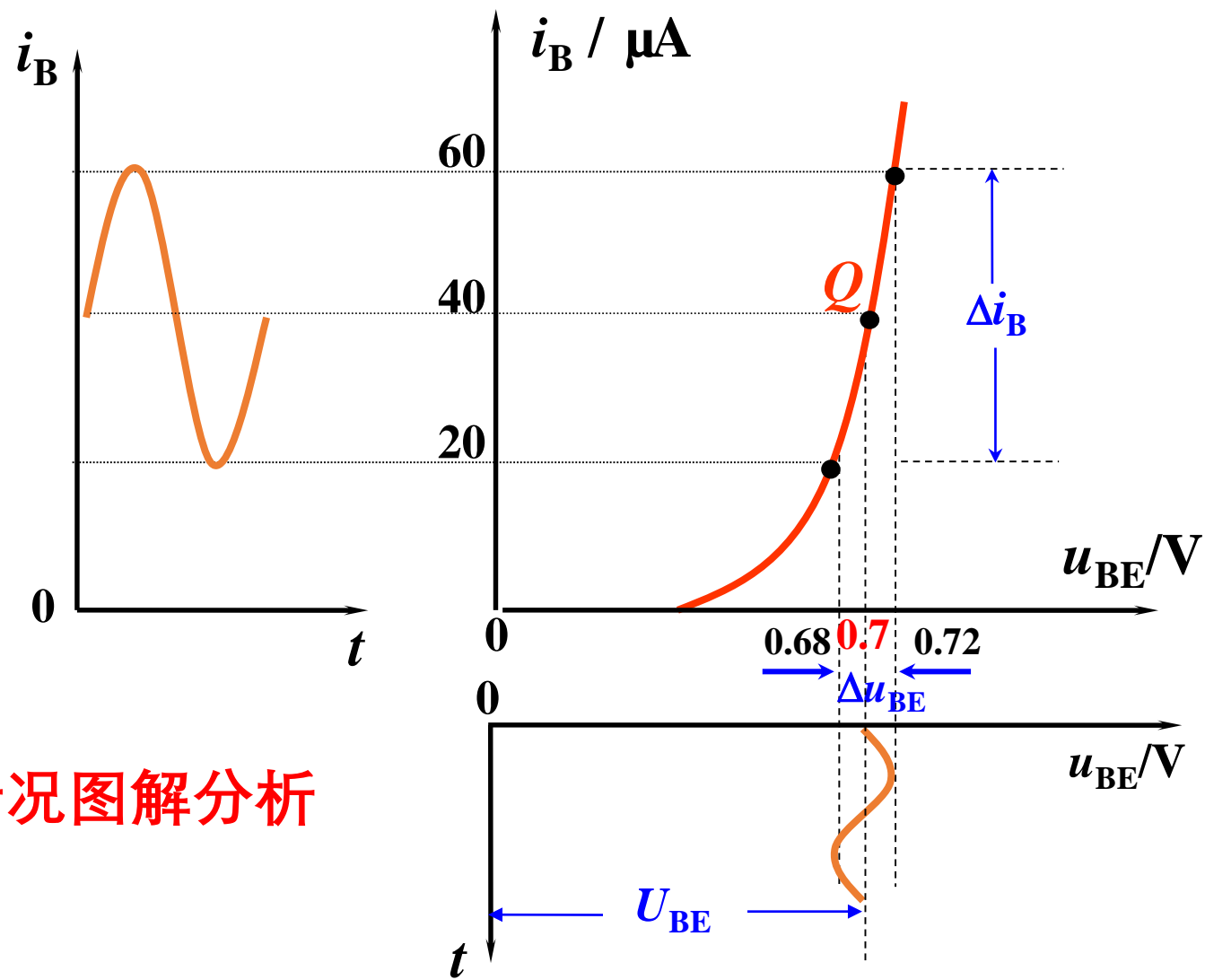
#### 2. 交流负载线

交流负载线斜率为：

$$-\frac{1}{R'_L}, \text{ 其中 } R'_L = R_c // R_L$$

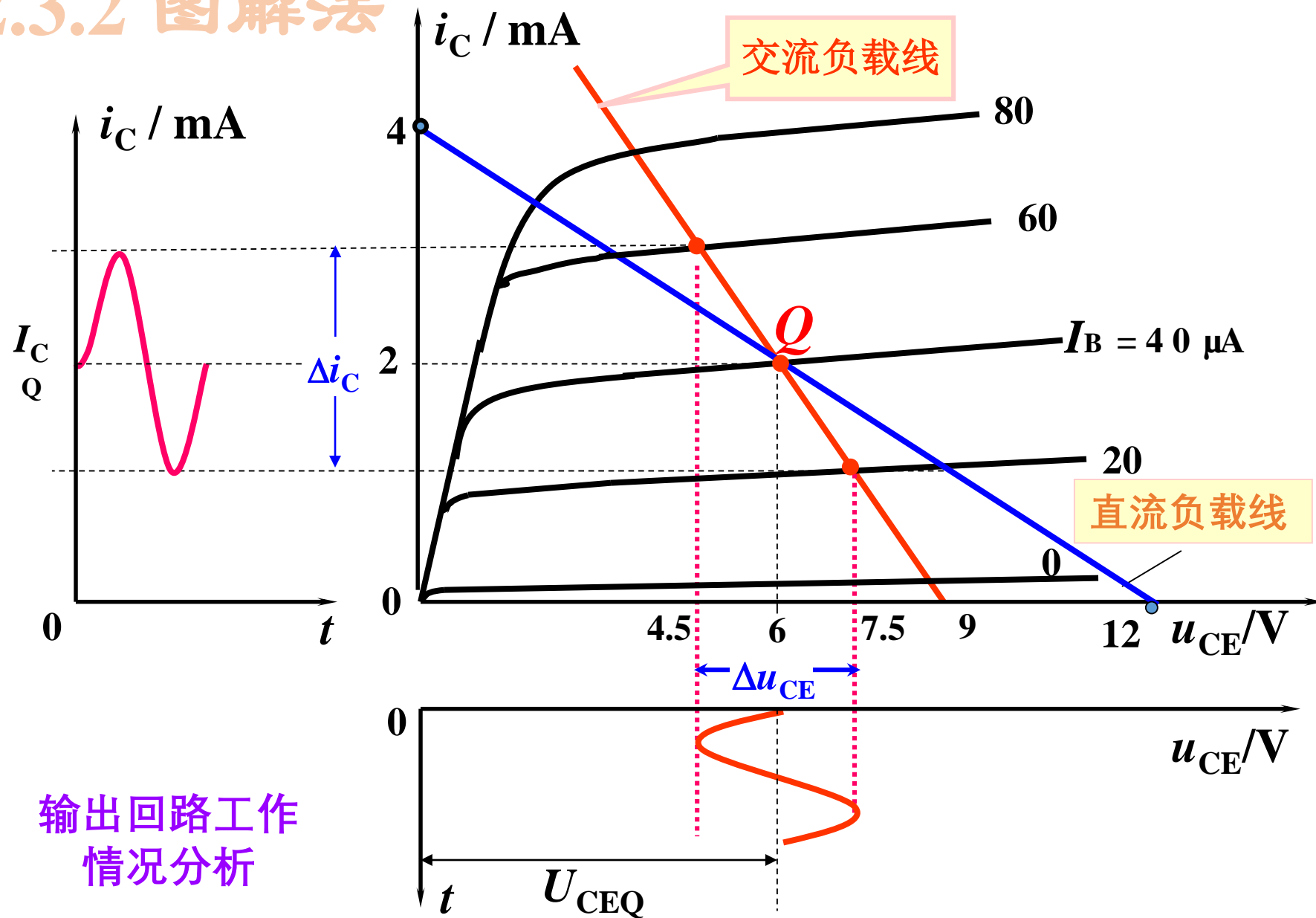


## 2.3.2 图解法



### 3. 动态工作情况图解分析

## 2.3.2 图解法



## 2.3.2 图解法

### 4. 电压放大倍数

$$A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta u_{BE}}$$

【例】用图解法求图示电路电压放大倍数。输入、输出特性曲线如右图， $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ 。

解：求  $R'_L$  确定交流负载线

$$R'_L = R_C // R_L = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$\text{取 } \Delta i_B = (60 - 20) \mu\text{A} = 40 \mu\text{A}$$

则输入、输出特性曲线上有

$$\Delta u_{BE} = (0.72 - 0.68) \text{ V} = 0.04 \text{ V}$$

$$\Delta u_{CE} = (4.5 - 7.5) \text{ V} = -3 \text{ V}$$

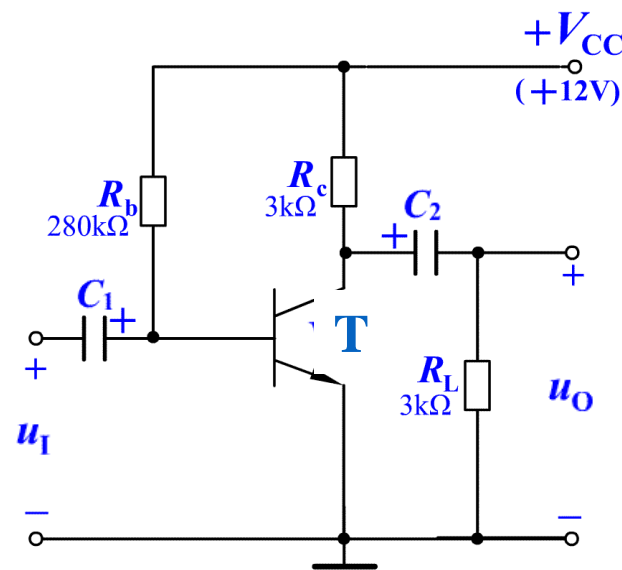


图 2.4.3 (a)

$$A_u = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta u_{BE}} = \frac{-3}{0.04} = -75$$

## 2.3.2 图解法

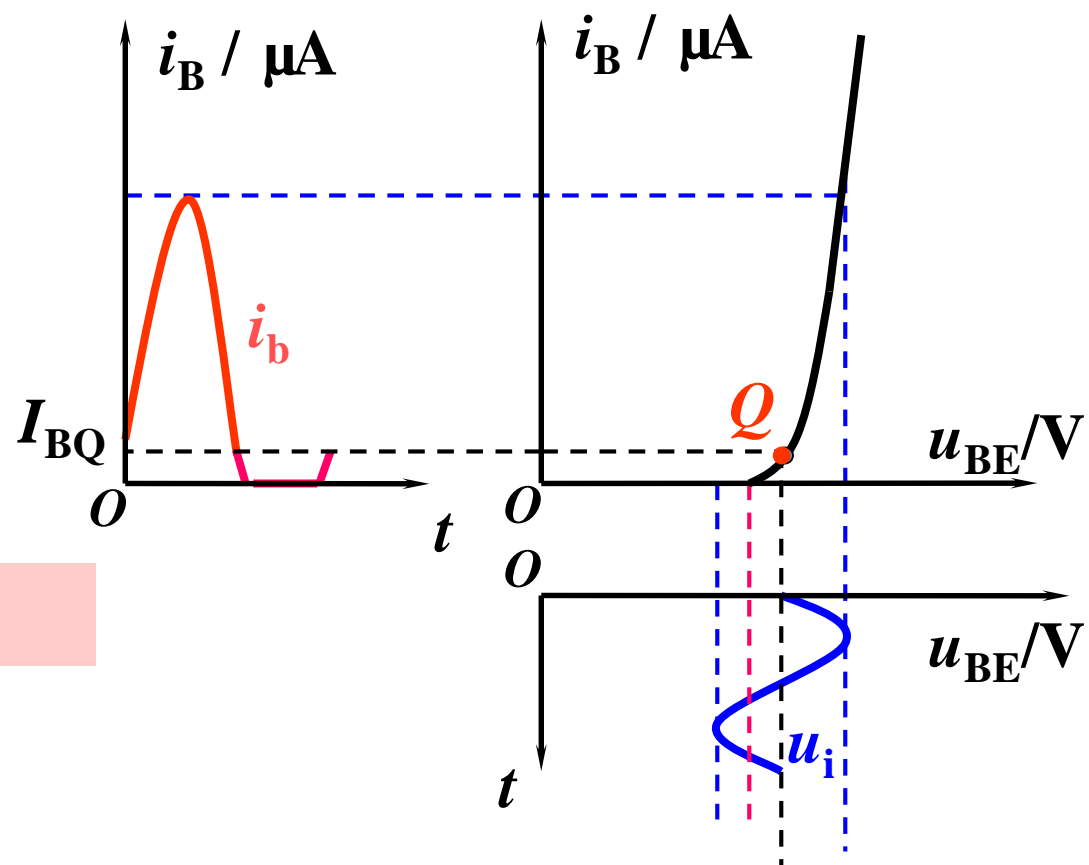
### 三、波形非线性失真的分析

#### 1. 静态工作点

过低，引起  $i_B$ 、 $i_C$ 、 $u_{CE}$  的波形失真

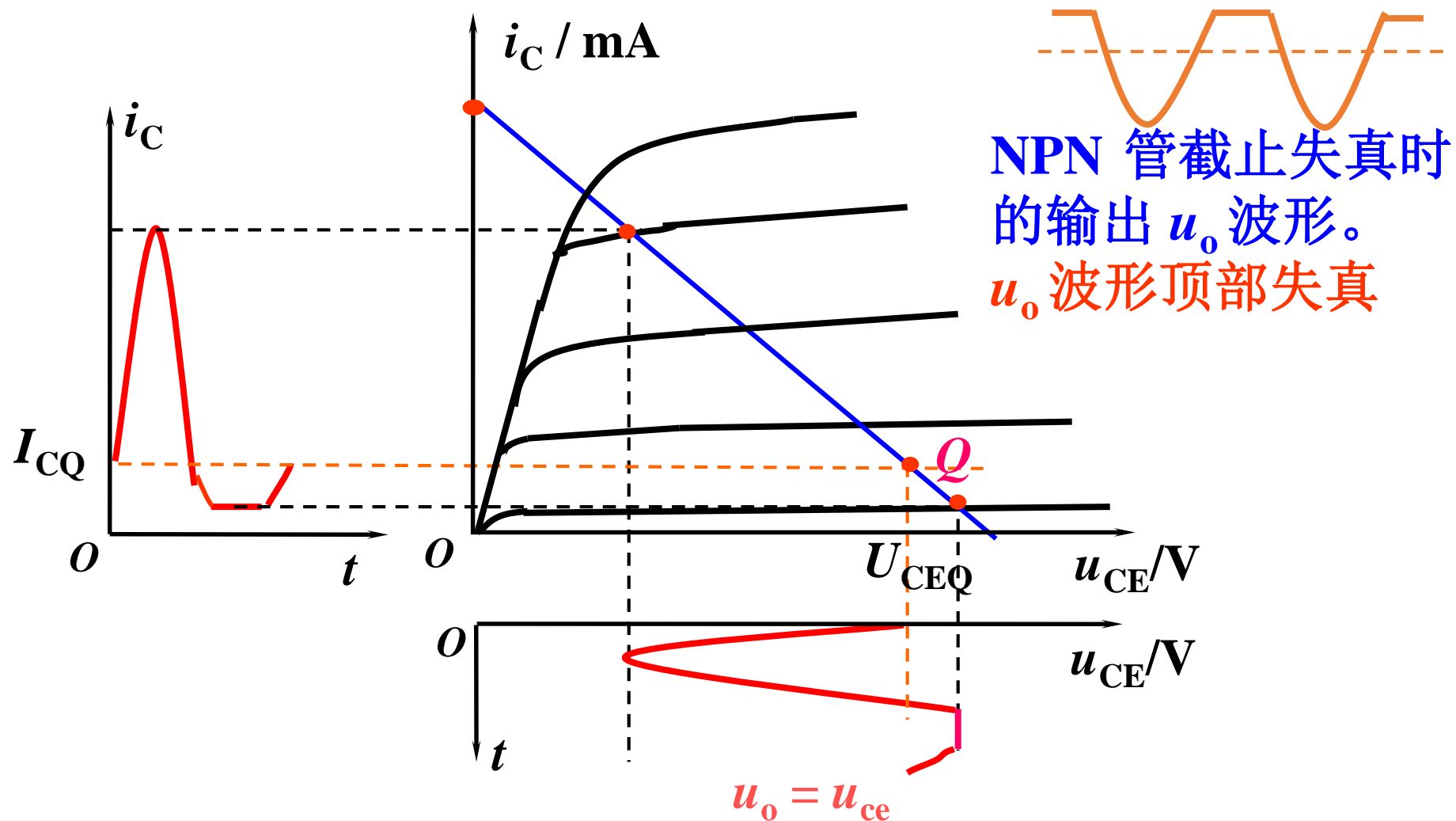
—— 截止失真

结论：  $i_B$  波形失真



## 2.3.2 图解法

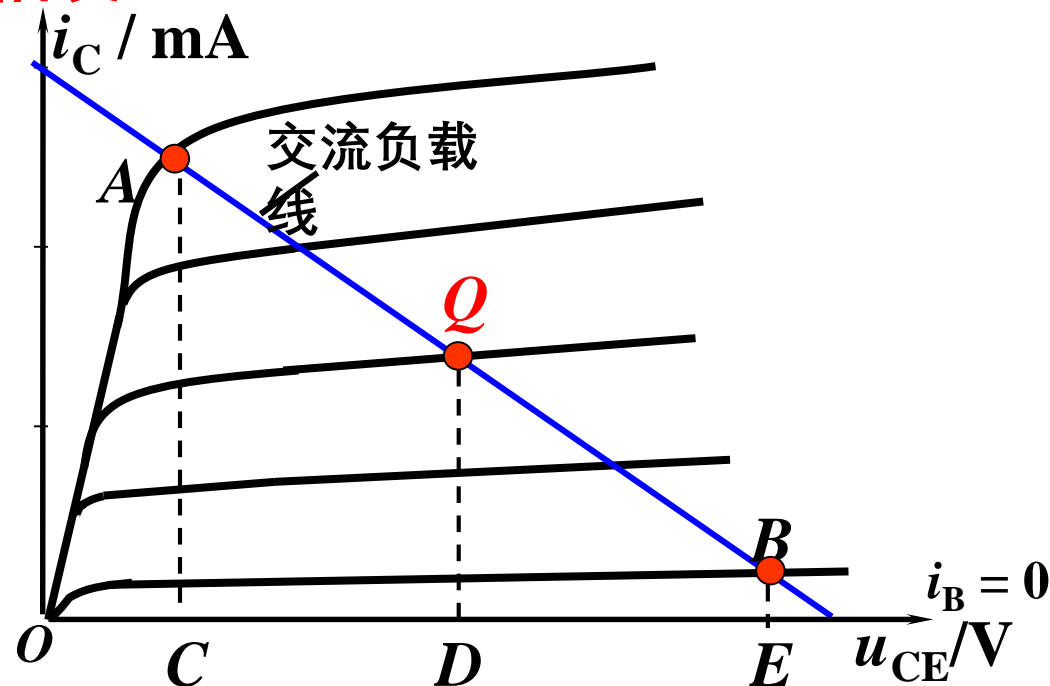
$i_C$ 、 $u_{CE}$  ( $u_o$ ) 波形失真



## 2.3.2 图解法

### 2. 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。



问题：如何求最大不失真输出电压？

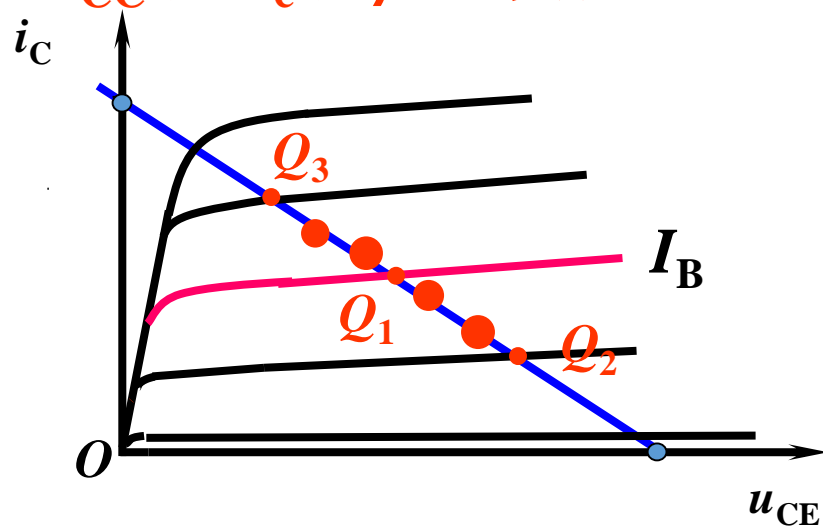
$$U_{omax} = \min[(U_{CEQ} - U_{CES}), (U_{CC}' - U_{CEQ})]$$

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

## 2.3.2 图解法

### 4. 用图解法分析电路参数对静态工作点的影响

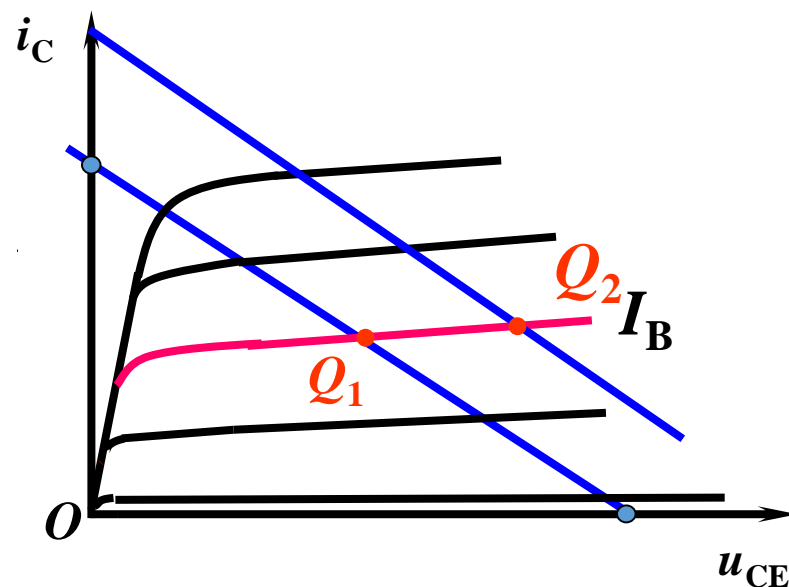
(1) 改变  $R_b$ ，保持  $V_{CC}$ ， $R_c$ ， $\beta$  不变；



$R_b$  增大， $Q$  点下移；

$R_b$  减小， $Q$  点上移；

(2) 改变  $V_{CC}$ ，保持  $R_b$ ， $R_c$ ， $\beta$  不变；



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。



## 2.3.2 图解法

(3) 改变  $R_c$ , 保持  $R_b$ ,  $V_{CC}$ ,  $\beta$  不变;

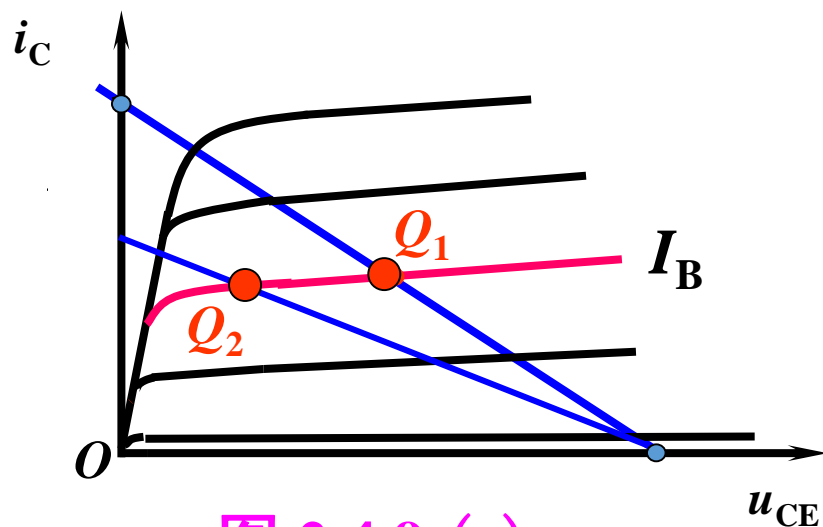


图 2.4.9 (c)

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  $\beta$ , 保持  $R_b$ ,  $R_c$ ,  $V_{CC}$  不变;

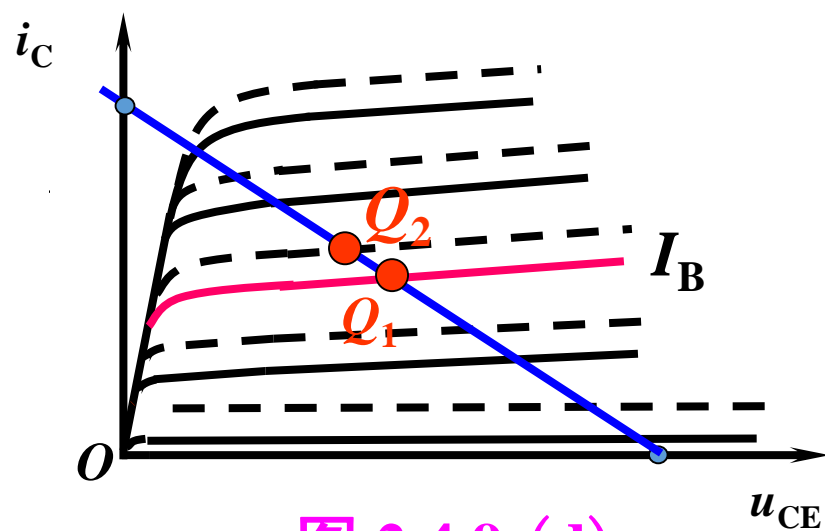


图 2.4.9 (d)

增大  $\beta$ ,  $I_{CQ}$  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。