

2 半导体三极管及放大电路基础

2.1 半导体三极管

2.2 共射极放大电路的组成和工作原理

2.3 放大电路的静态分析

2.4 放大电路的动态分析

2.5 静态工作点的选择和稳定

2.6 共集电极和共基极放大电路

2.7 多级放大电路

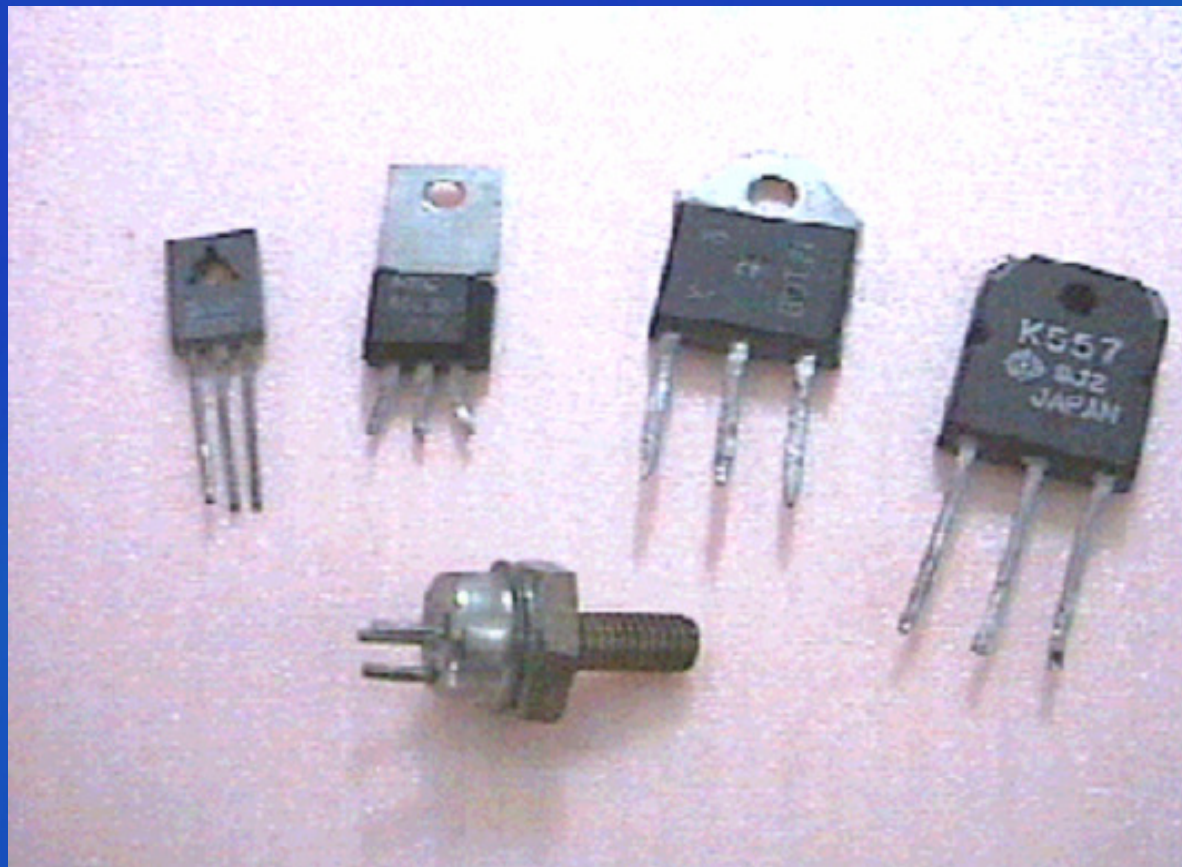
2.8 放大电路的频率特性

2 半导体三极管及放大电路基础

2.1 半导体三极管

半导体三极管又称简称晶体管。

半导体三极管的放大作用和开关作用，促进了电子技术的飞跃。

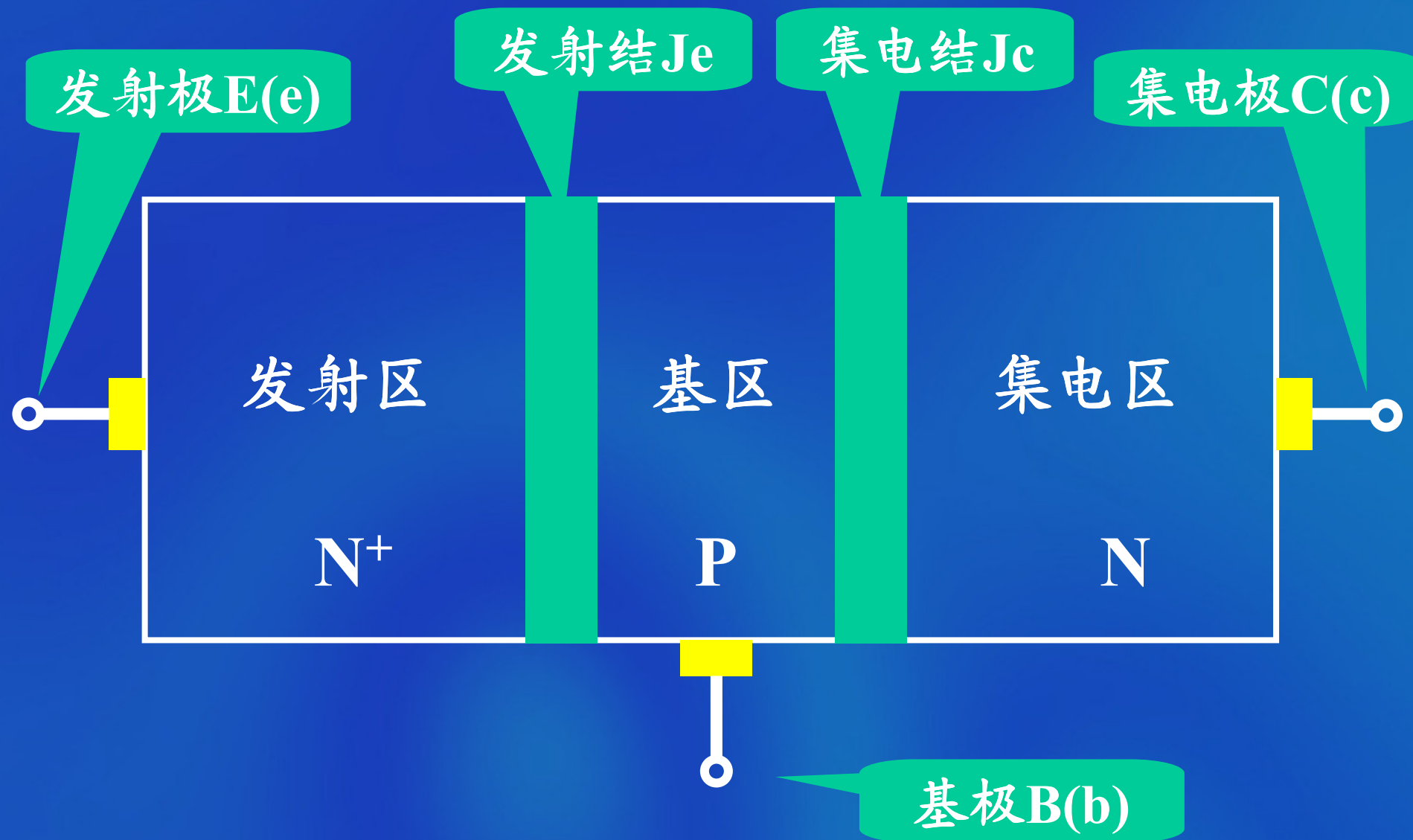


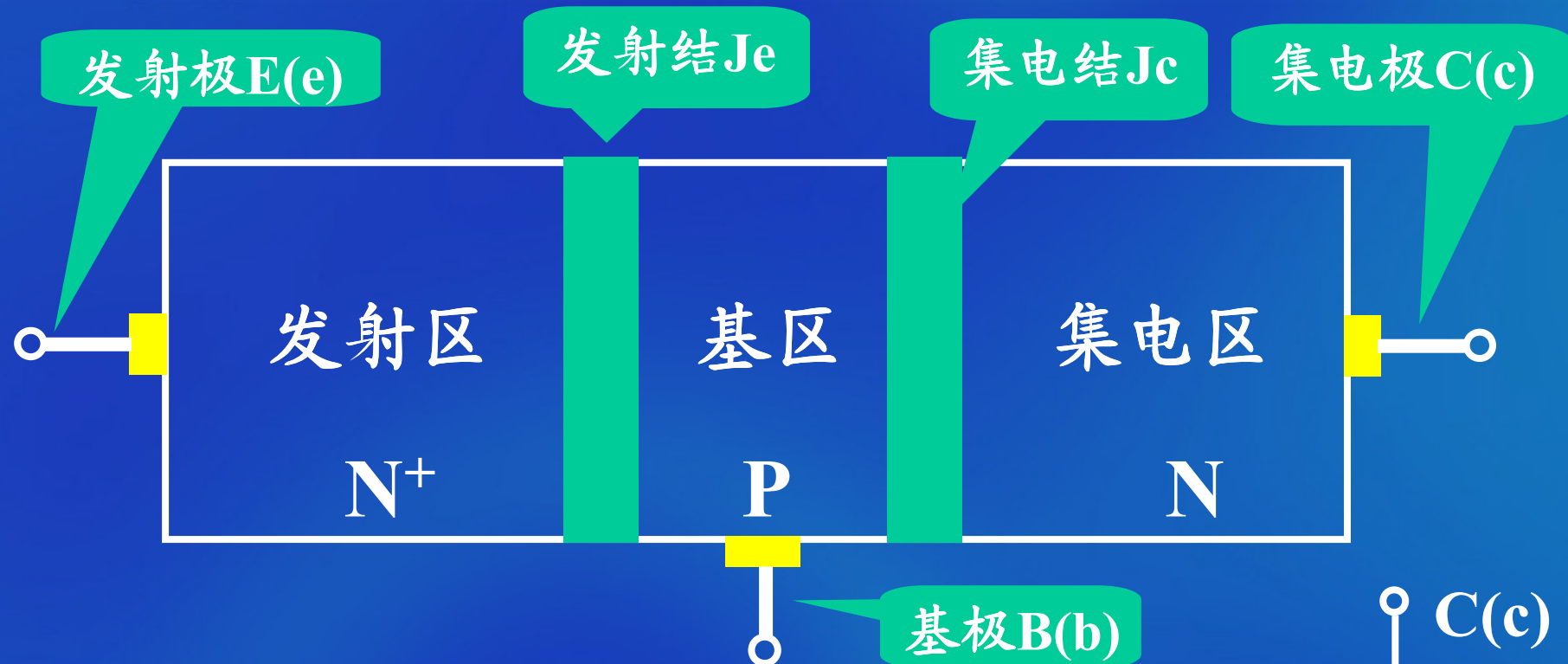
2.1.1 半导体三极管的结构

三极管的主要类型

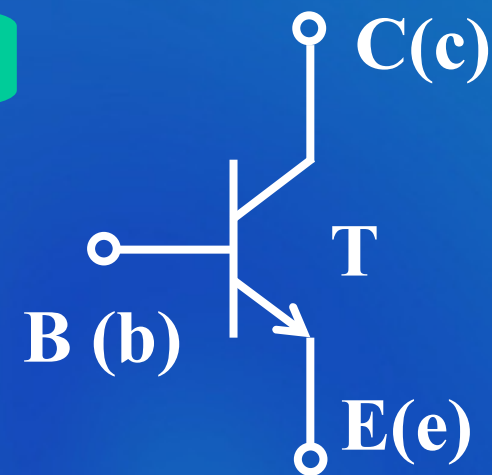
- (1) 根据结构分: NPN型和PNP型
- (2) 根据使用的半导体材料分: 硅管和锗管

1. NPN型三极管结构示意图和符号

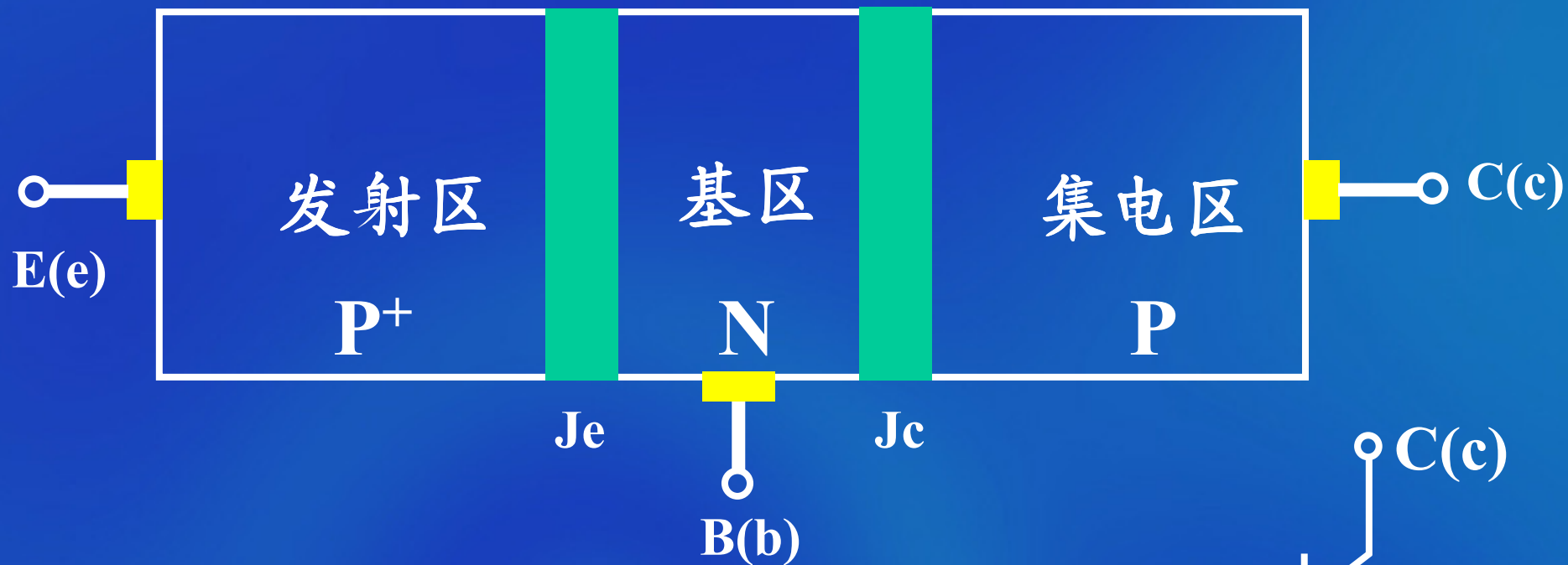




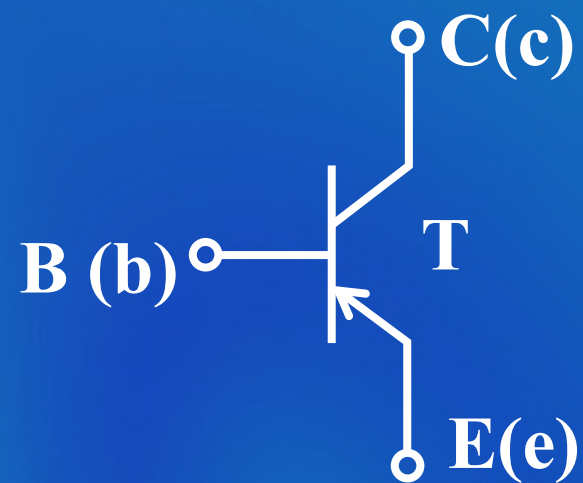
NPN型三极管符号

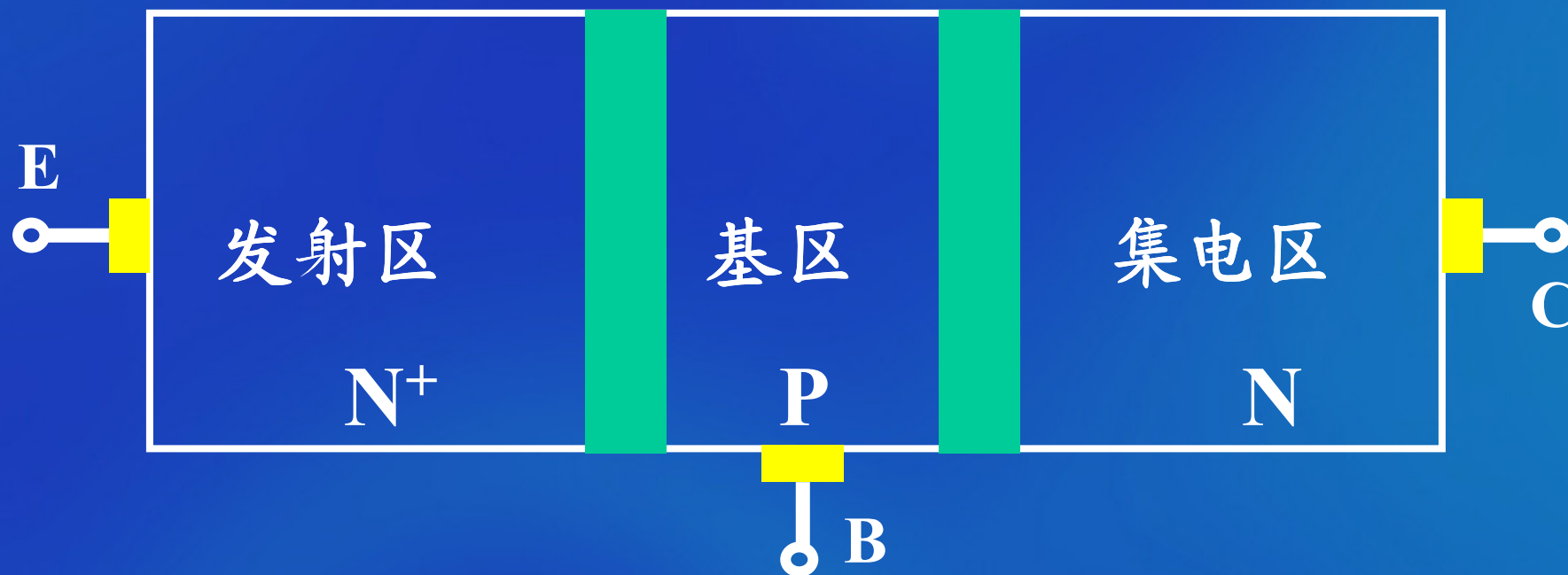


2、PNP型三极管结构示意图和符号



PNP型三极管符号





3、三极管的内部结构特点（具有放大作用的内部条件）：

- （1）发射区小，掺杂浓度大。
- （2）集电区掺杂浓度低，集电区面积大。
- （3）基区掺杂浓度很低，且很薄。

2.1.2 三极管工作原理（以NPN型管为例）

依据两个PN结的偏置情况

晶体管的工作状态

放大状态

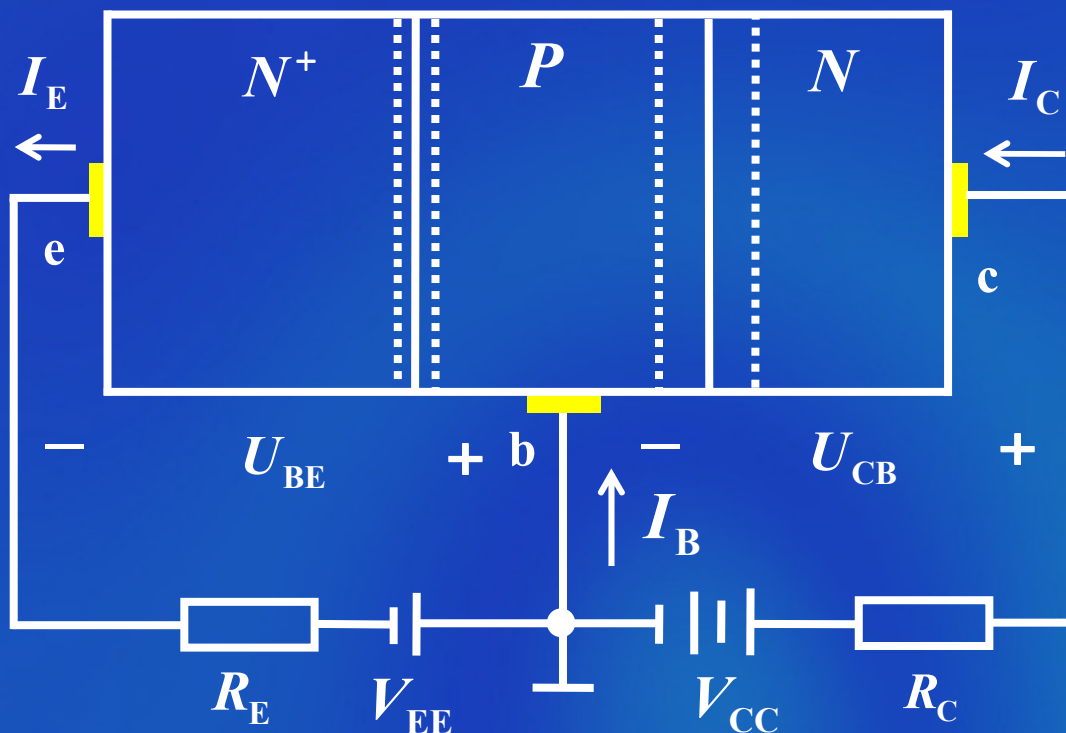
饱和状态

截止状态

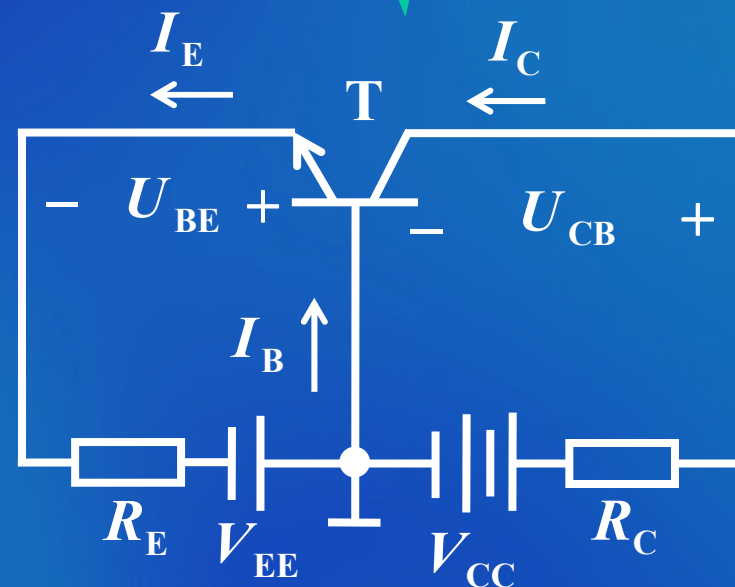
倒置状态

1. 发射结正向偏置、集电结反向偏置—放大状态

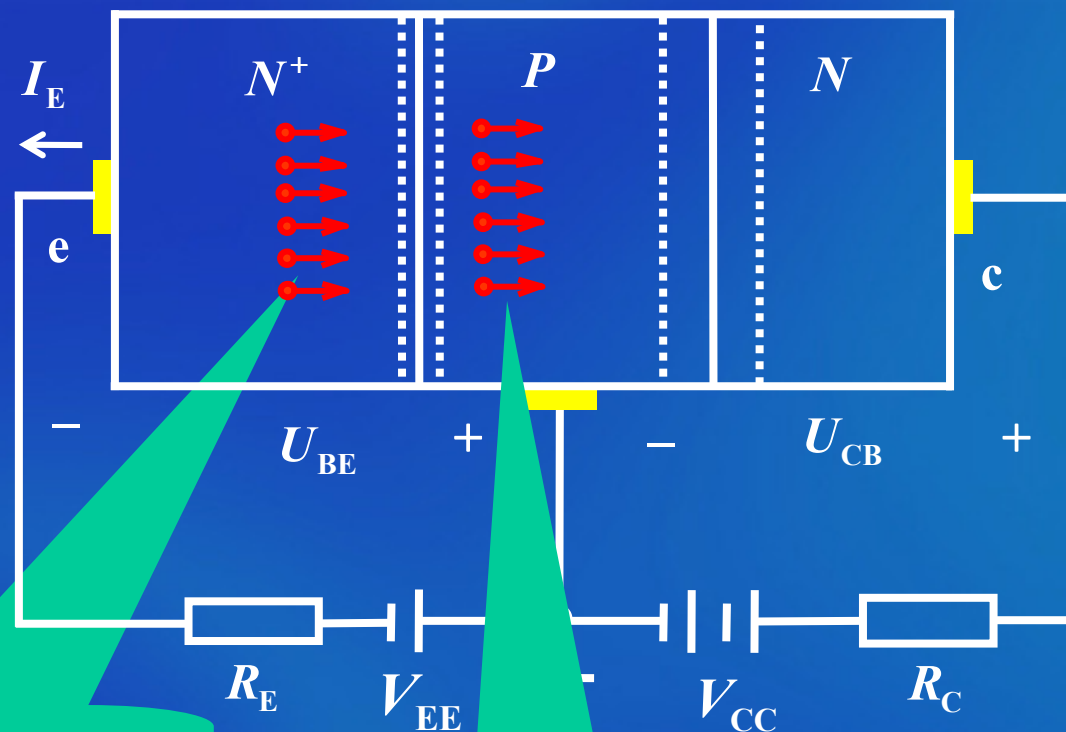
原理图



电路图



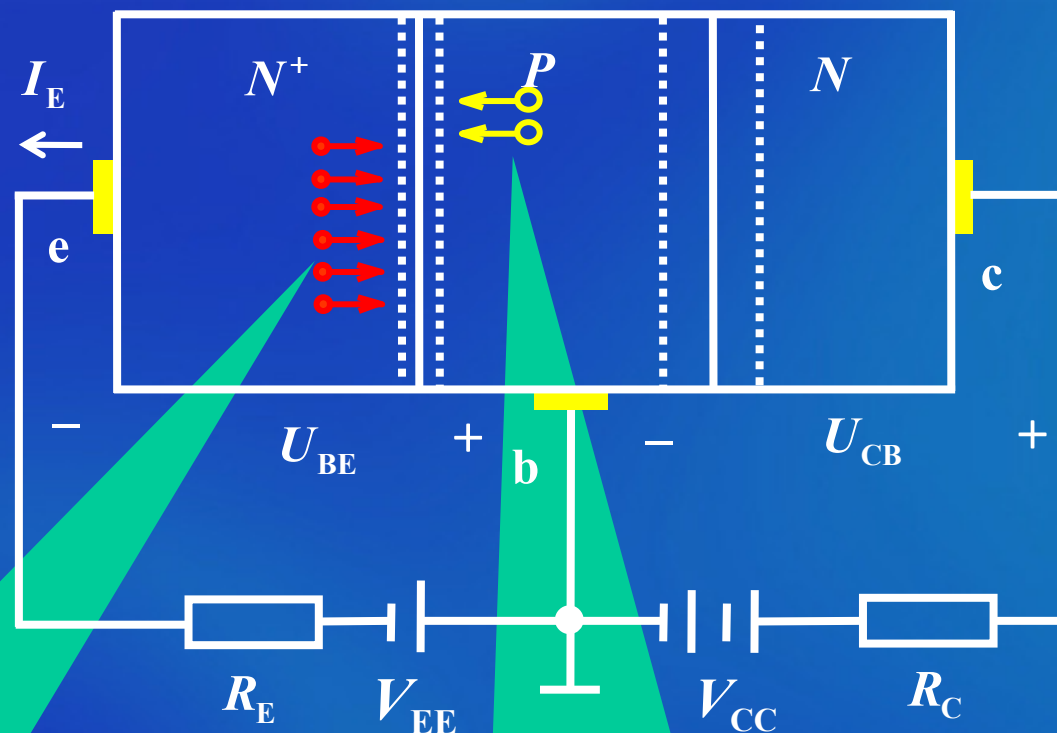
(1) 电流关系



发射区向基区扩散电子

a. 发射区向基区扩散电子
形成发射极电流 I_E 。

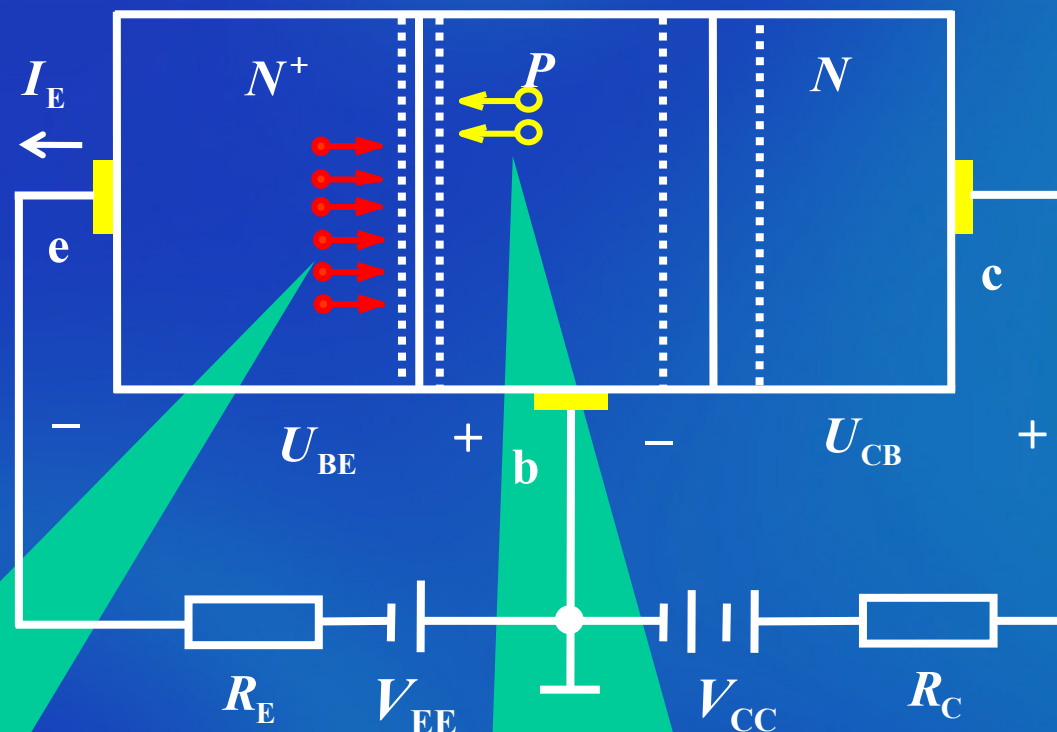
称扩散到基区的发射区多子为非平衡少子



发射区向基区扩散电子

基区向发射区扩散空穴

基区向发射区扩散空穴
形成空穴电流。

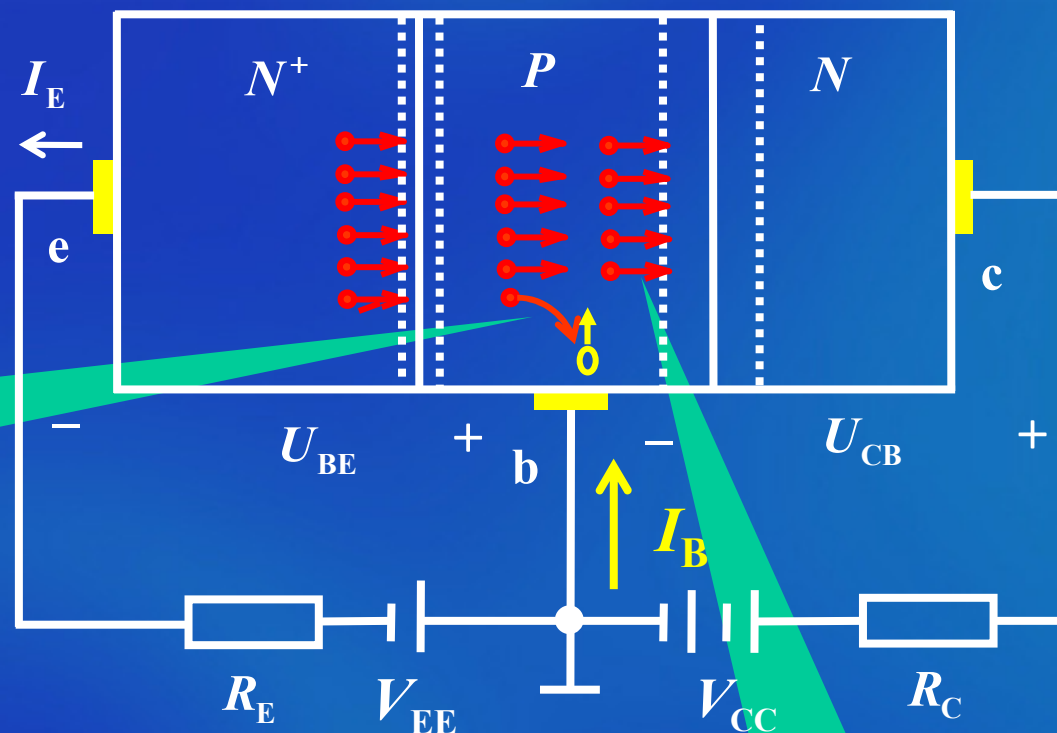


发射区向基区扩散电子

基区向发射区扩散空穴

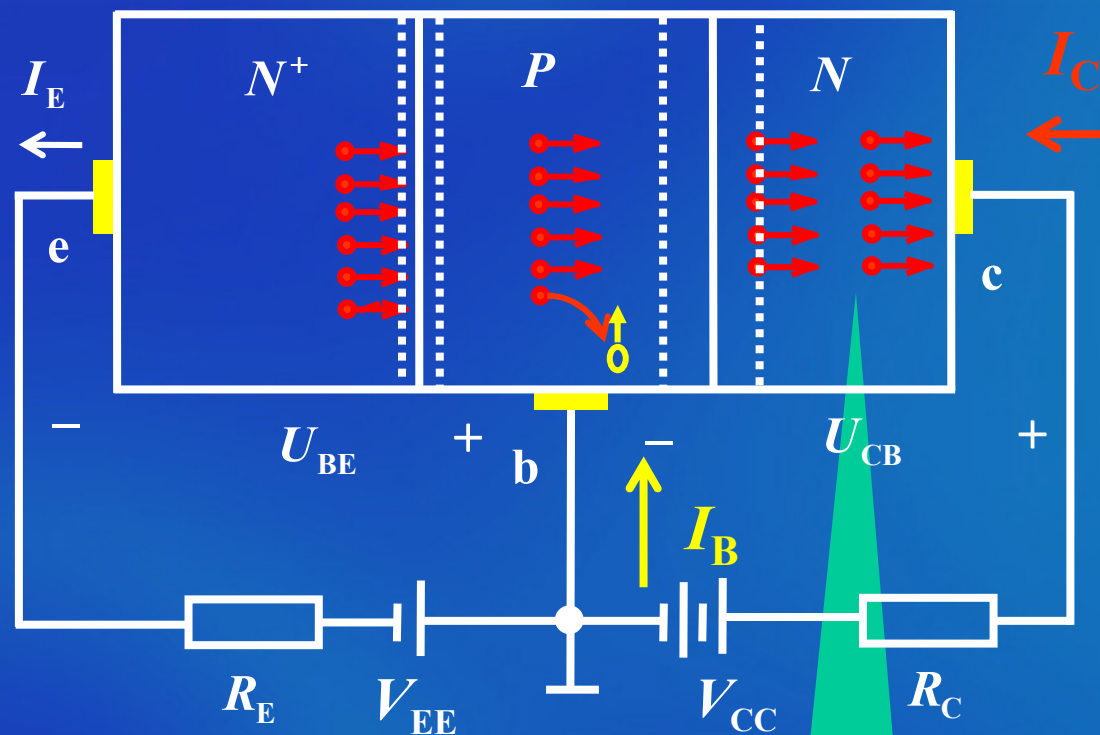
因为发射区的掺杂浓度远大于基区浓度，
空穴电流忽略不计。

非平衡少子在基区复合，形成基极电流 I_B



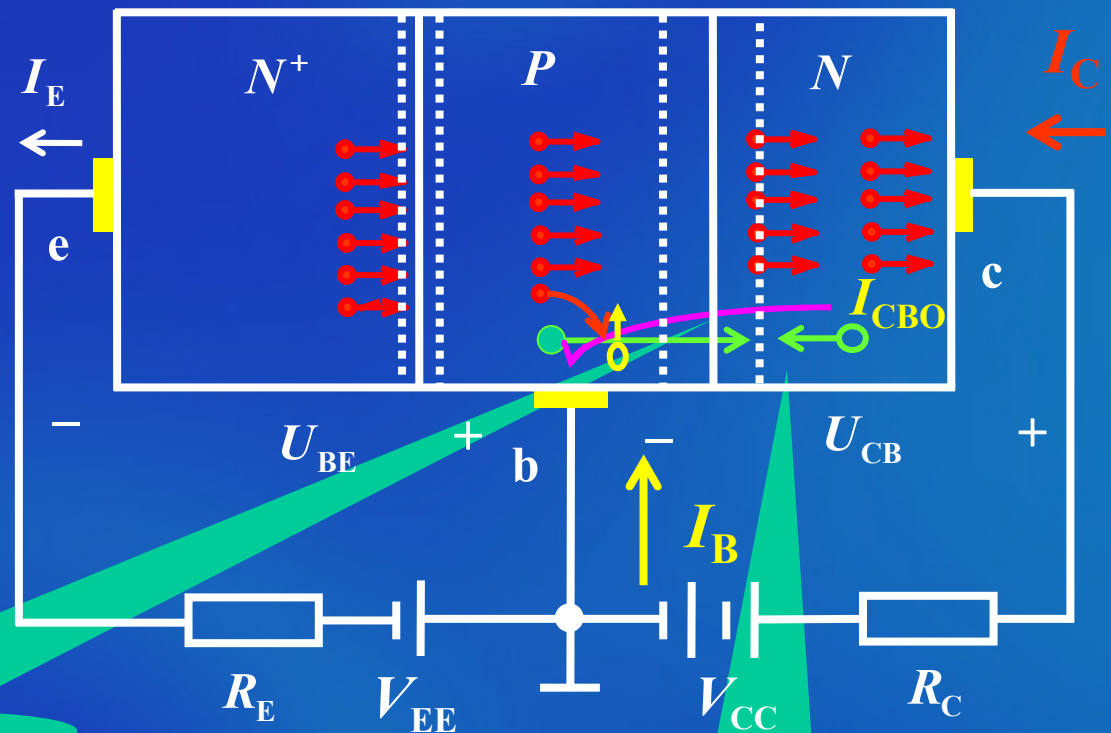
非平衡少子向集电结扩散

b. 基区电子扩散和复合



非平衡少子
到达集电区

C. 集电区收集从发射区扩散过来的电子
形成集电极电流 I_C

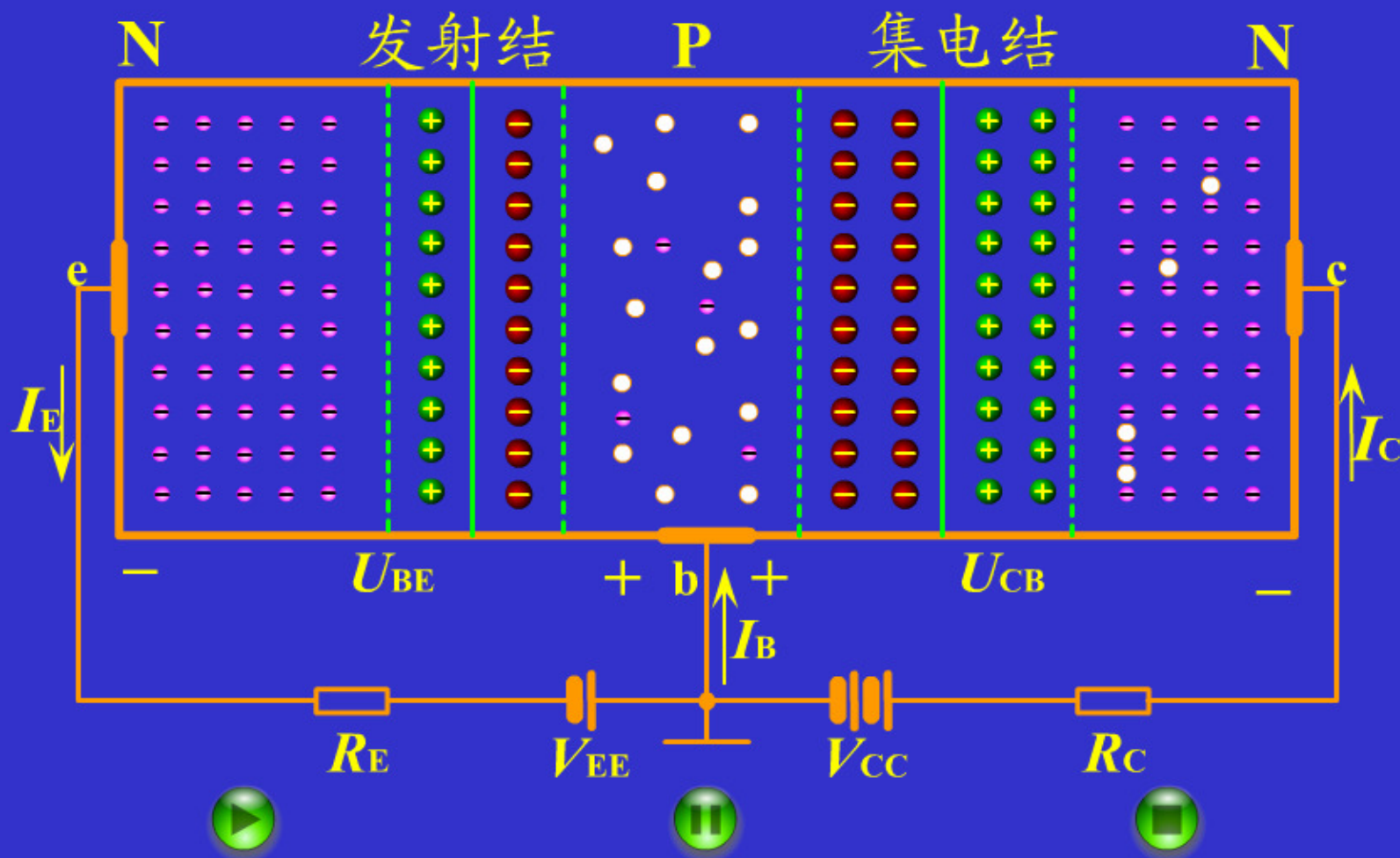


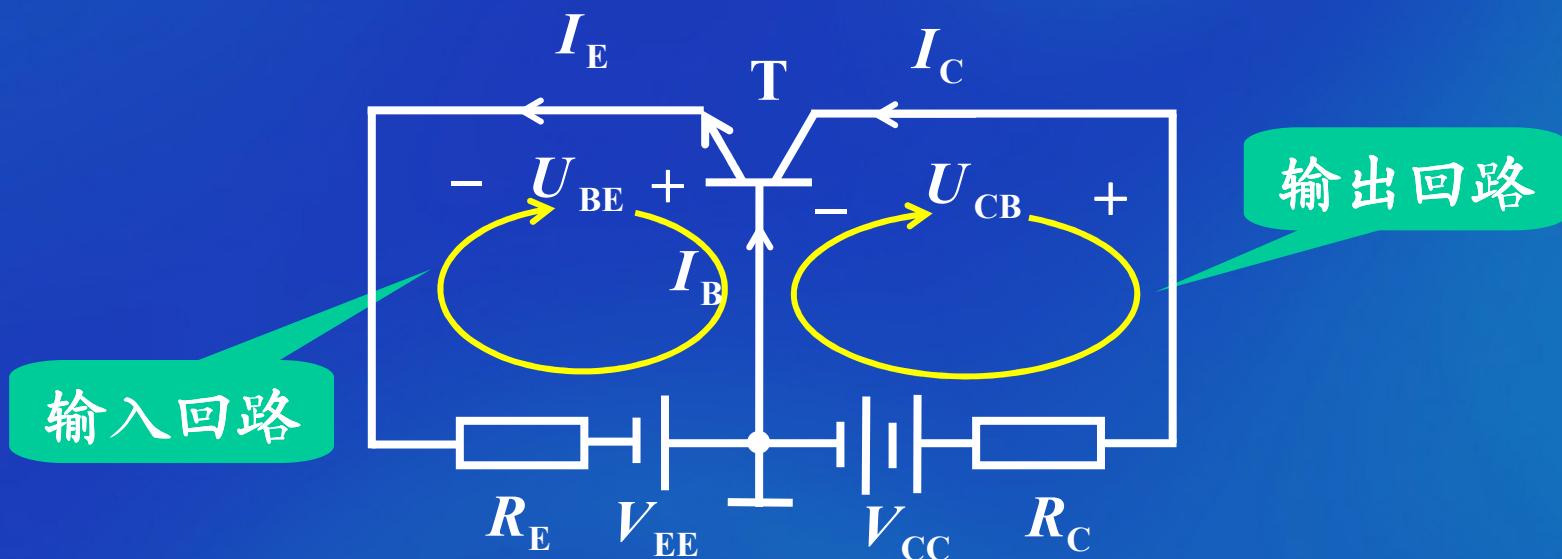
形成反向饱和电流 I_{CBO}

少子相互漂移

集电区、基区少子相互漂移

三极管的电流分配关系动画演示





发射结回路为输入回路，集电结回路为输出回路。

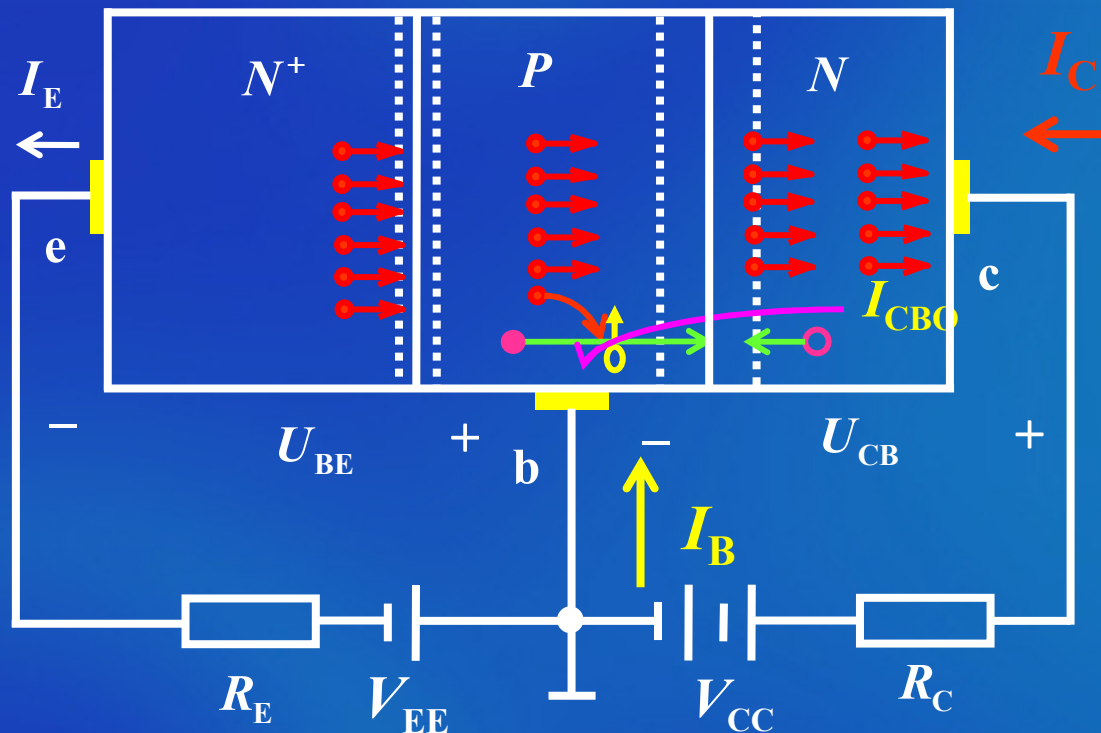
基极是两个回路的公共端，称三极管这种接法为**共基极接法**。

定义
$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \bigg|_{I_{CBO}=0}$$

$\bar{\alpha} = 0.99$ 理解为电流分配关系

则发射100个电子，扩散了99个，复合1个

$\bar{\alpha}$ 称为共基极直流电流放大系数



各电极电流之间的关系

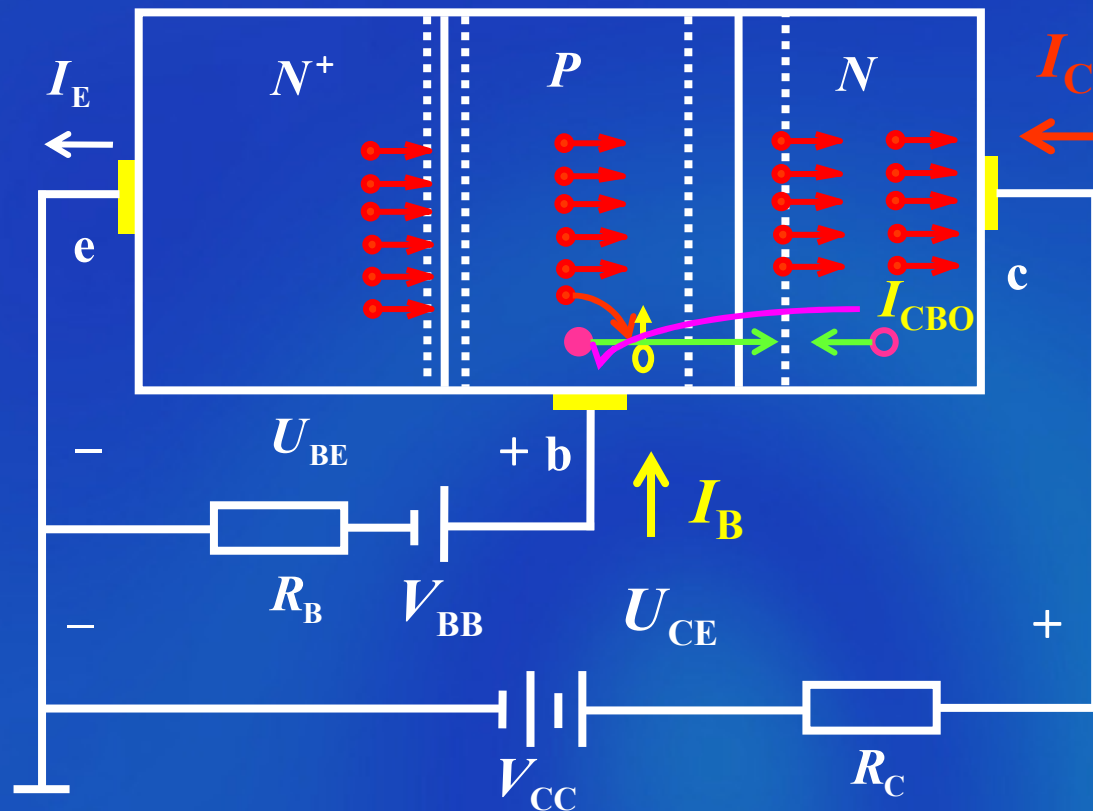
$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$$

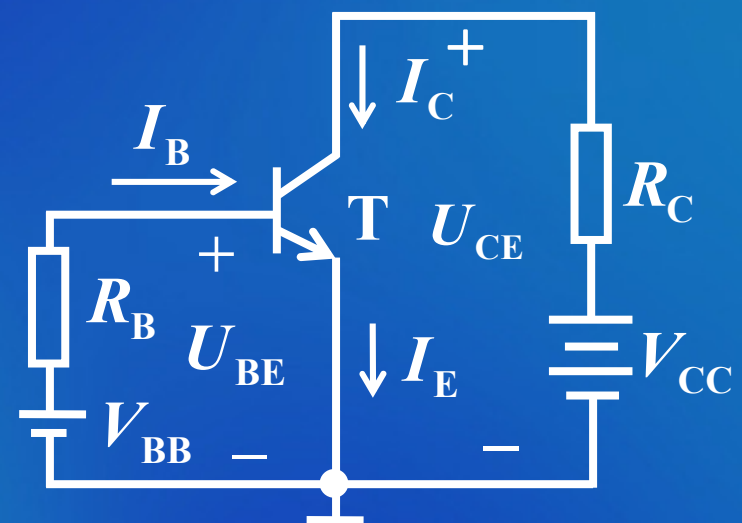
$$I_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO}$$

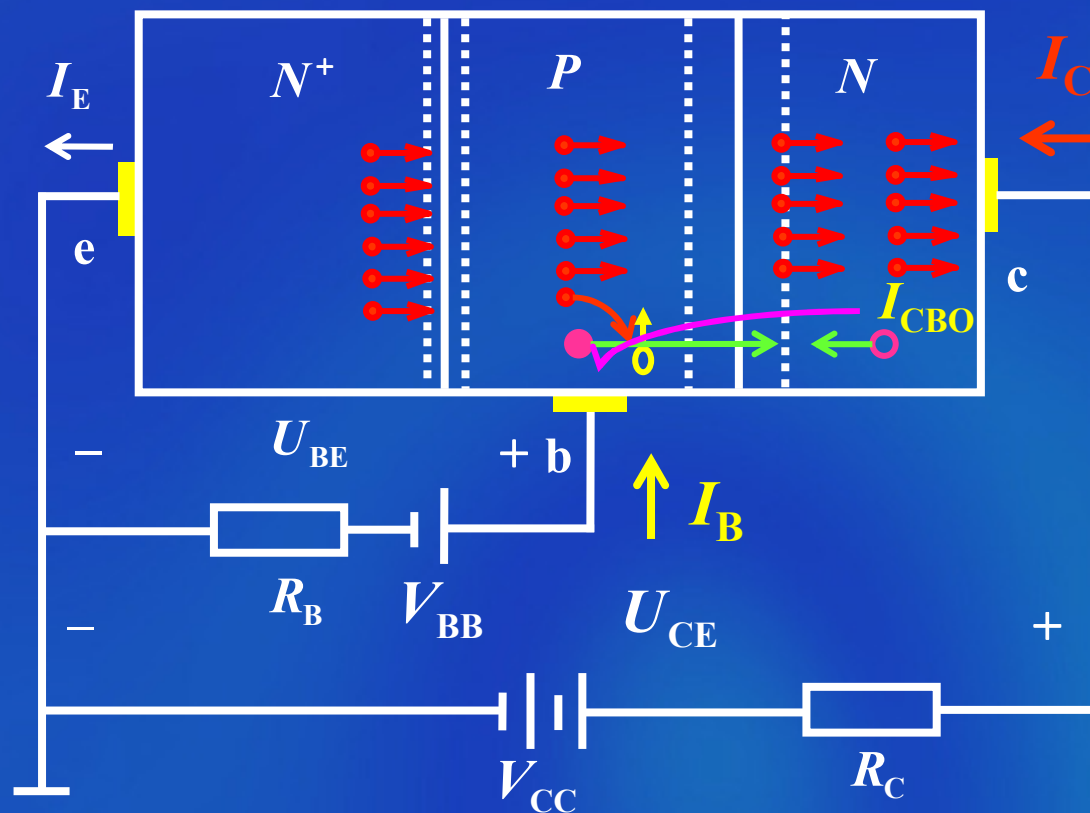
晶体管共射极接法

原理图



电路图





定义

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{I_{CBO}=0}$$

为三极管共射极直流电流放大系数

$\bar{\alpha}$ 由 $\bar{\beta}$ 的关系式

由 $I_E = I_C + I_B$

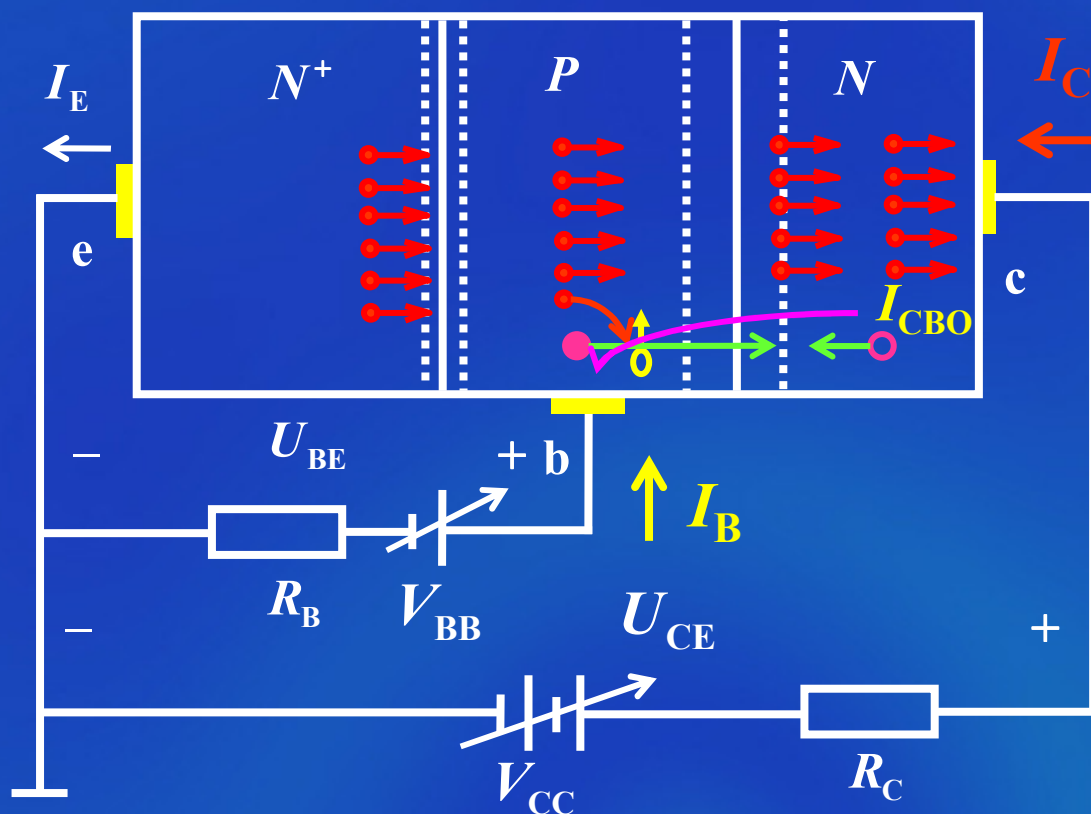
及 $\bar{\alpha}$ 与 $\bar{\beta}$ 的定义

得
$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

或
$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}}$$

$$\bar{\alpha} = 0.95 \sim 0.995$$

$$\bar{\beta} = 20 \sim 200$$



当输入回路电压

$$U'_{BE} = U_{BE} + \Delta U_{BE}$$

那么

$$I'_B = I_B + \Delta I_B$$

$$I'_C = I_C + \Delta I_C$$

$$I'_E = I_E + \Delta I_E$$

如果 $\Delta U_{BE} > 0$, 那么 $\Delta I_B > 0$, $\Delta I_C > 0$, $\Delta I_E > 0$

如果 $\Delta U_{BE} < 0$, 那么 $\Delta I_B < 0$, $\Delta I_C < 0$, $\Delta I_E < 0$

定义 $\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$ 共基极交流电流放大系数

$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 共射极交流电流放大系数

α 与 β 的关系

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

一般可以认为: $\bar{\alpha} \approx \alpha, \bar{\beta} \approx \beta$

符号的意义

• 电流：
(一个下标)

I_B

i_b

I_b

i_B

• 电压：
(二个下标)

U_{BE}

u_{be}

U_{be}

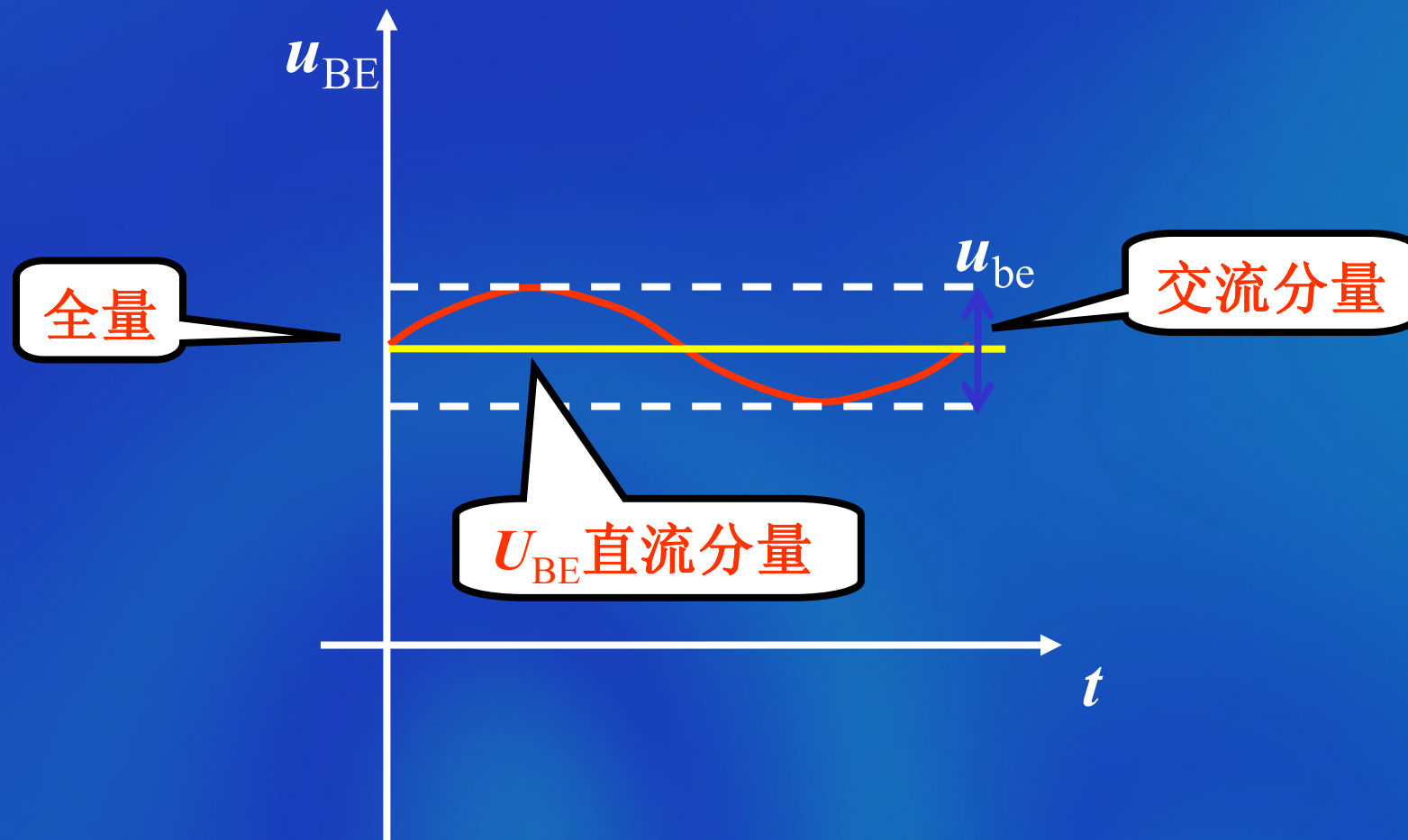
u_{BE}

↑
直流

↑
交流
瞬时值

↑
交流
有效值

↑
交流 +
直流

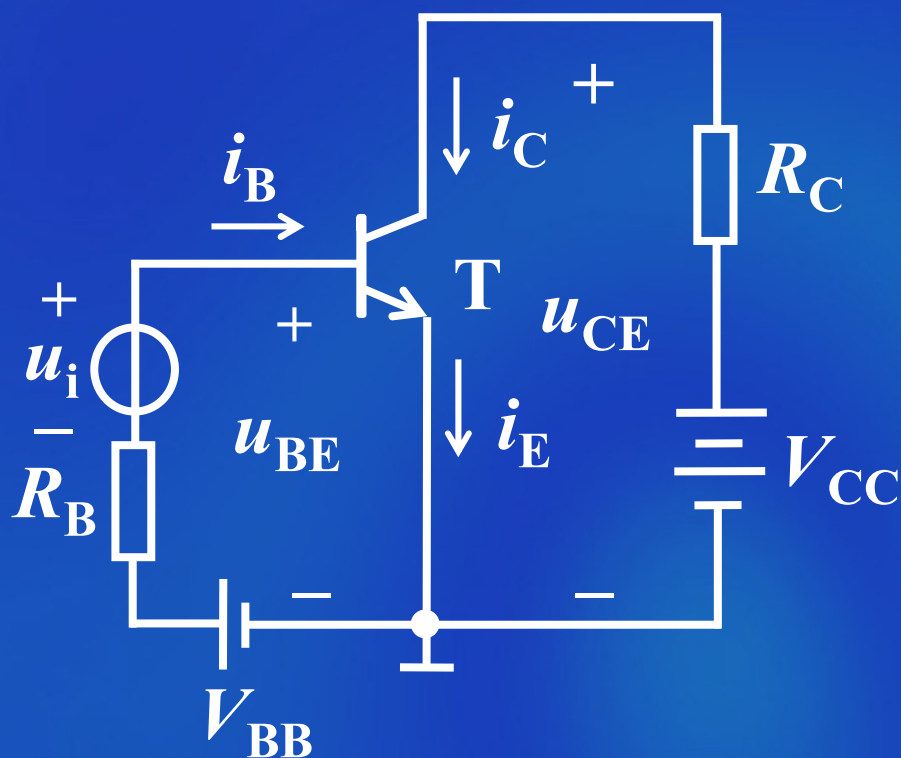


(2) 放大原理

设输入信号 $u_i = U_{im} \sin \omega t \text{ V}$

那么

放大电路



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



$$i_B = i_b + I_B$$



$$i_C = i_c + I_C$$



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

其中

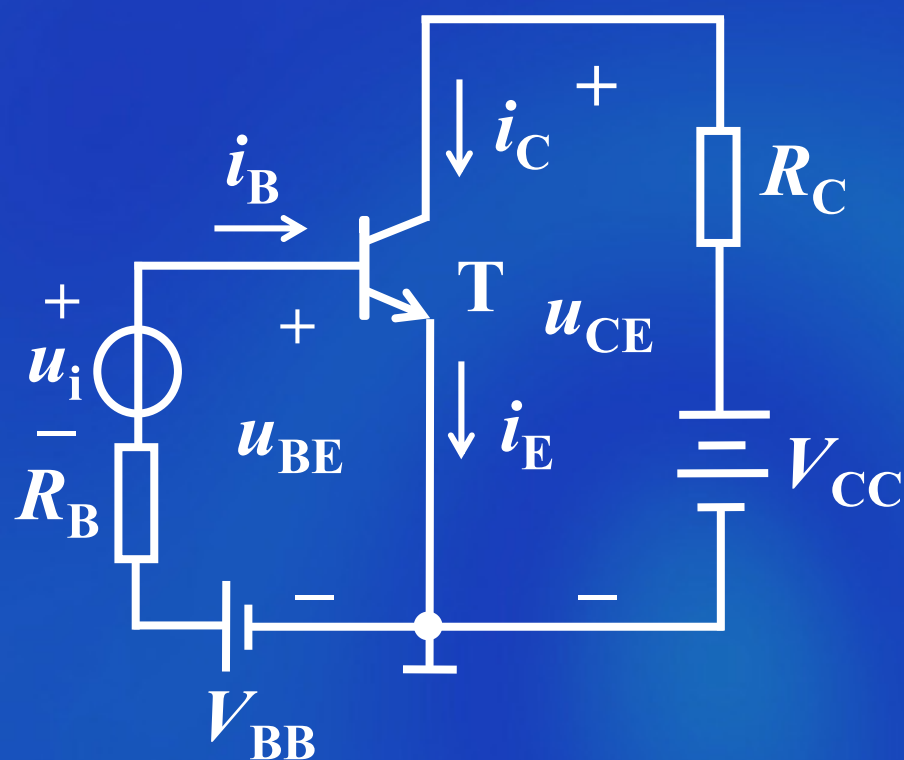
$$u_{ce} = -i_c R_C$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

上页

下页

后退



由 $u_{CE} = u_{ce} + U_{CE}$

$$u_{ce} = -i_c R_C$$

可知

a. 在 R_C 两端有一个较大的交流分量可供输出。

b. 交流信号的传递过程

$$u_i \rightarrow i_b \rightarrow i_c \rightarrow i_c R_c$$

- 晶体管放大的条件:
- 内部条件: 发射区掺杂浓度高, 面积小;
基区掺杂浓度低且很薄;
集电区掺杂浓度低, 面积大。
- 外部条件: 发射结正偏, 集电结反偏

2. 发射结正向偏置、集电结正向偏置——饱和状态

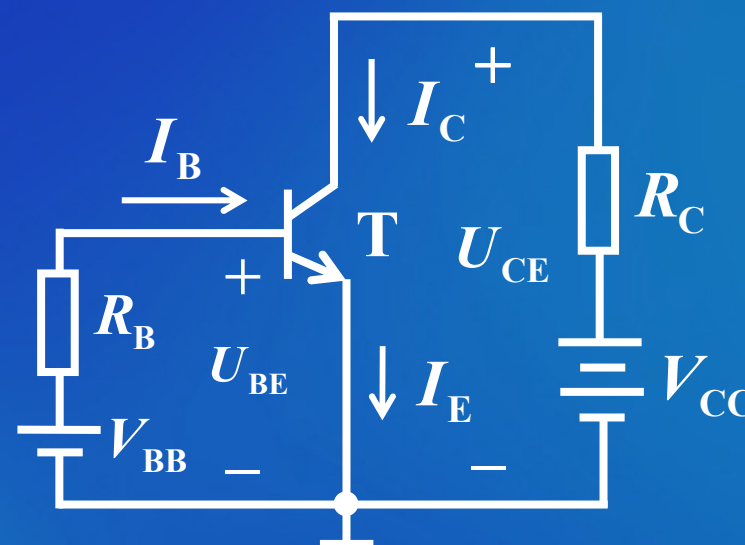
饱和状态的特点

(1) $U_{CB} (=U_{CE}-U_{BE}) \leq 0$ 。
集电结零偏或正偏

(2) $I_C \neq \beta I_B$, I_B 失去了对 I_C 的控制。

(3) 集电极饱和电压降 U_{CES} 较小

小功率硅管 $0.3 \sim 0.5V$ 。

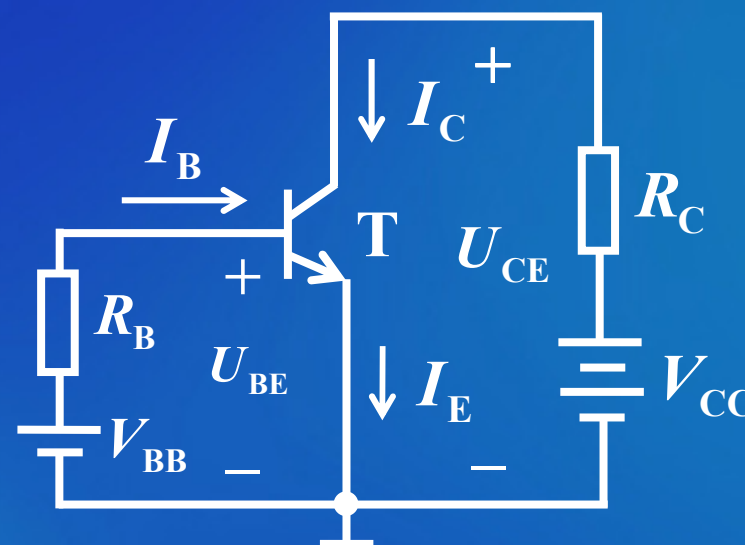


(4) 饱和时集电极电流

$$I_{CS} = (V_{CC} - U_{CES}) / R_C$$

(5) U_{CE} 对 I_C 的影响大，
当 U_{CE} 增大， I_C 将随之增加。

当 U_{CE} 增大使集电结从正偏往零偏变化过程中， U_{CE} 越大，到达集电区的非平衡少数子就越多， I_C 将随着 U_{CE} 增大而增加。

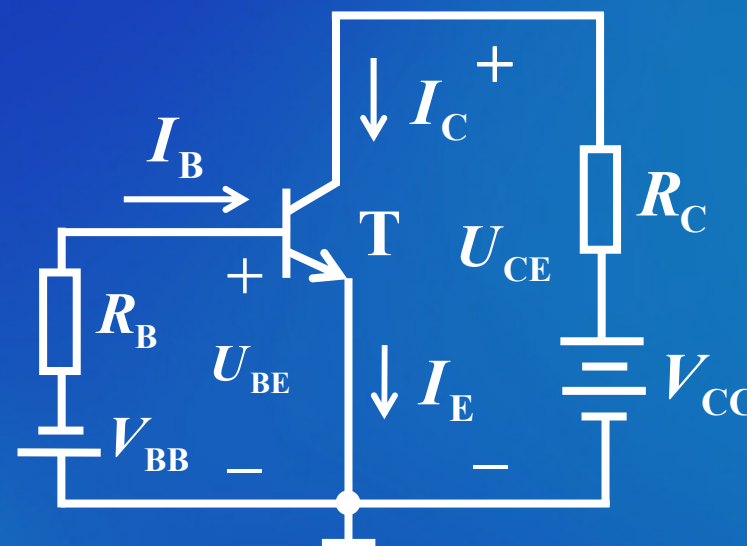


3. 发射结反向偏置、集电结反向偏置—截止状态

截止状态的特点：

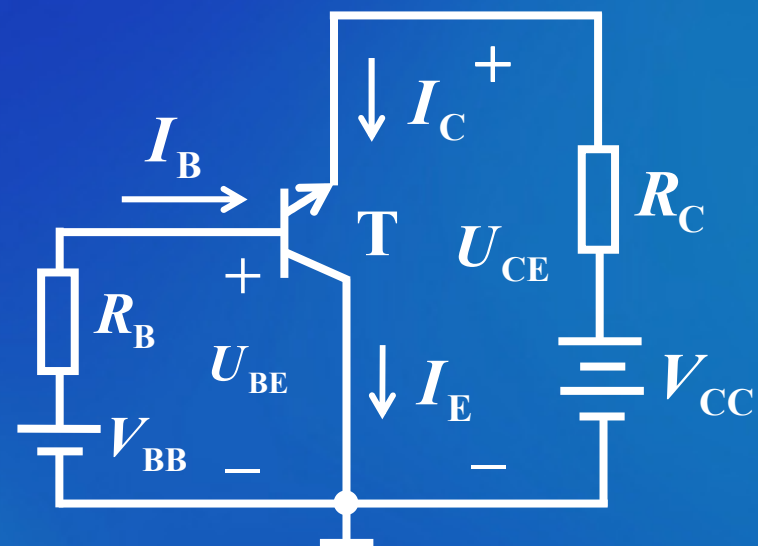
(1) U_{BE} 小于死区电压。

(2) $I_C = I_{CBO}$, $I_B = -I_{CBO}$

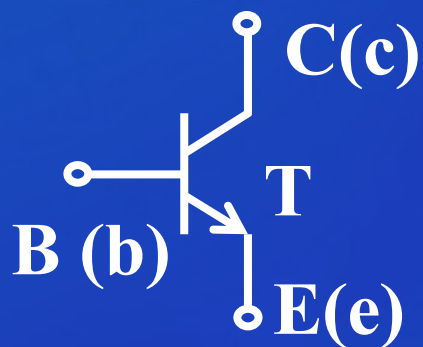


4. 发射结反向偏置、集电结正向偏置—倒置状态

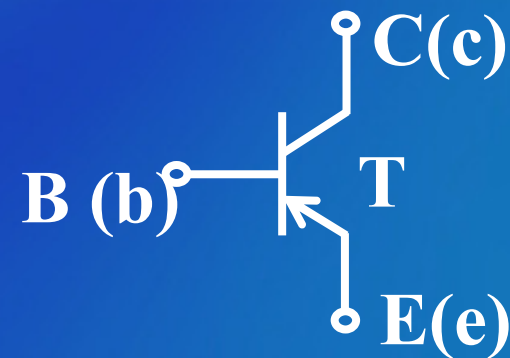
特点:



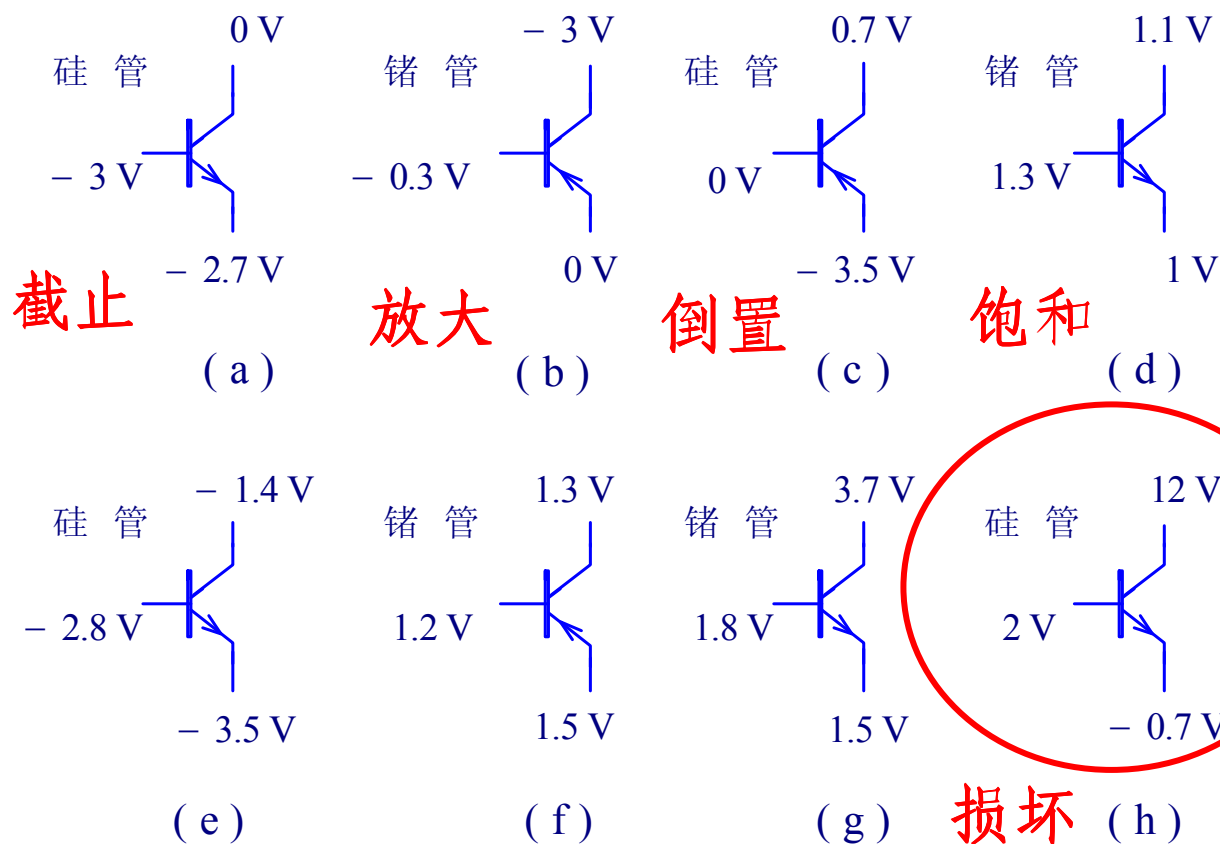
- (1) 集电区扩散到基区的多子较少。
- (2) 发射区收集基区的非平衡少数载流子的能力小。
- (3) 电流放大系数很小。



总 结



	放大	饱和	截止	倒置
发射结	正	正	反	反
集电结	反	正	反	正

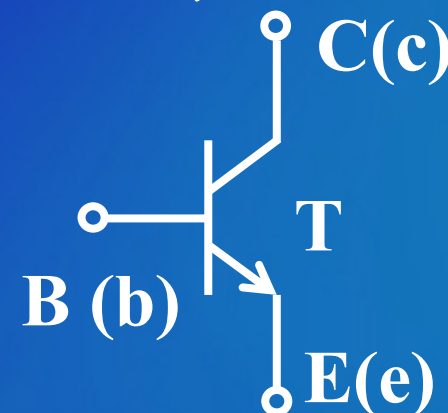


2.7 测得各半导体三极管静态时三个电极相对于“地”的电压如本题图所示。问哪个（或哪些）管子可以正常放大信号？哪个（或哪些）管子处于截止、饱和或倒置状态？

	放大	饱和	截止	倒置
• 发射结	正	正	反	反
• 集电结	反	正	反	正

放大状态下晶体管各极电位关系

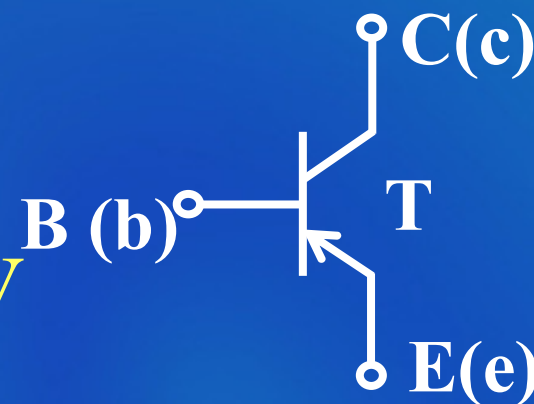
- NPN管: $U_C >> U_B > U_E$

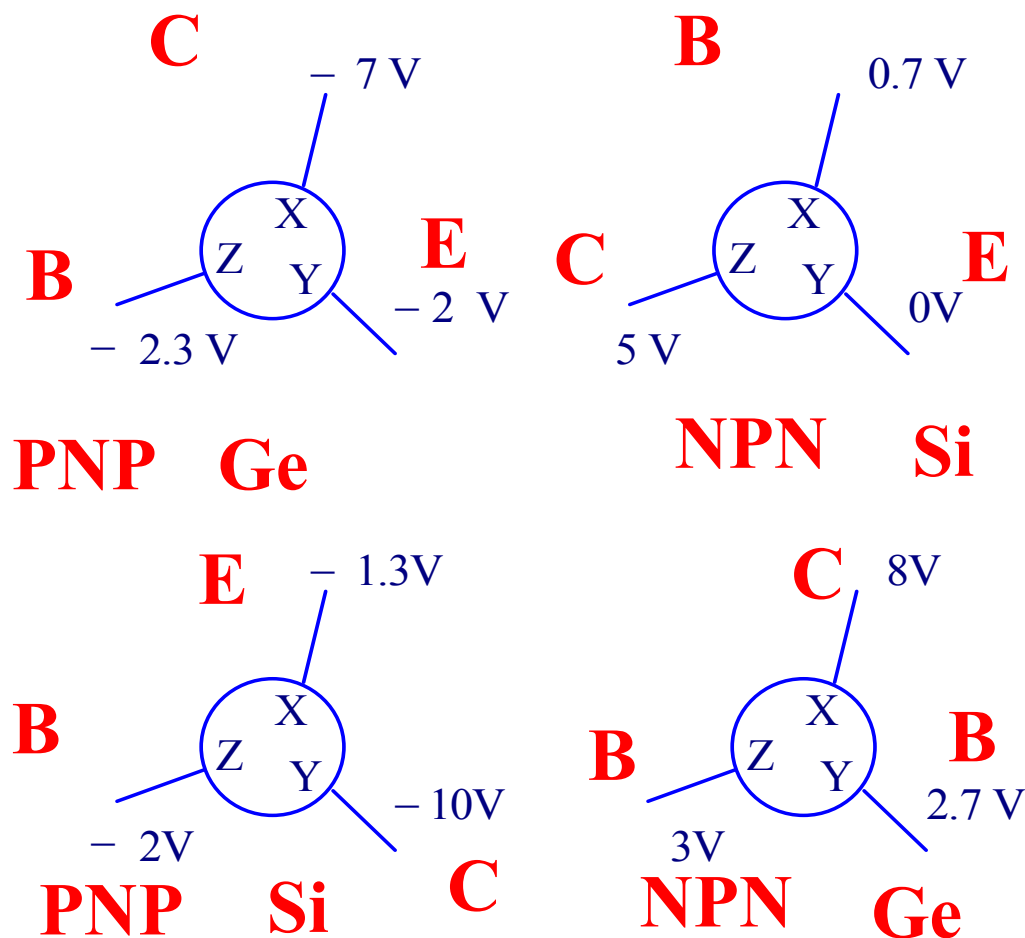


$|U_{BE}|=0.7V$ ----Si $|U_{BE}|=0.3V$ ----Ge

- PNP管: $U_C << U_B < U_E$

$-7V$ $-2.0V$ $-1.3V$





2.4 在工作正常的放大电路中，测得四只半导体三极管各电极相对于“地”的电压如本题图所示。试判断各管的三个管脚X、Y、Z各是什么电极；各三极管分别是硅管还是锗管、是NPN型还是PNP型？

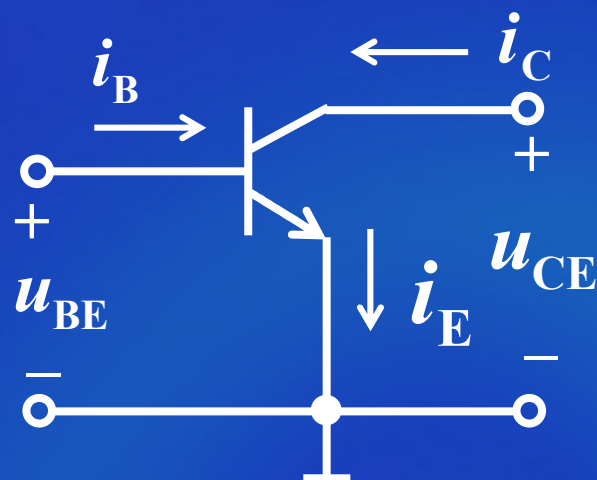
- NPN管： $U_C \gg U_B > U_E$
- PNP管： $U_C \ll U_B < U_E$

$$|U_{BE}|=0.7V\text{----Si}$$

$$|U_{BE}|=0.3V\text{----Ge}$$

2.1.3 半导体三极管共射极接法的伏安特性曲线

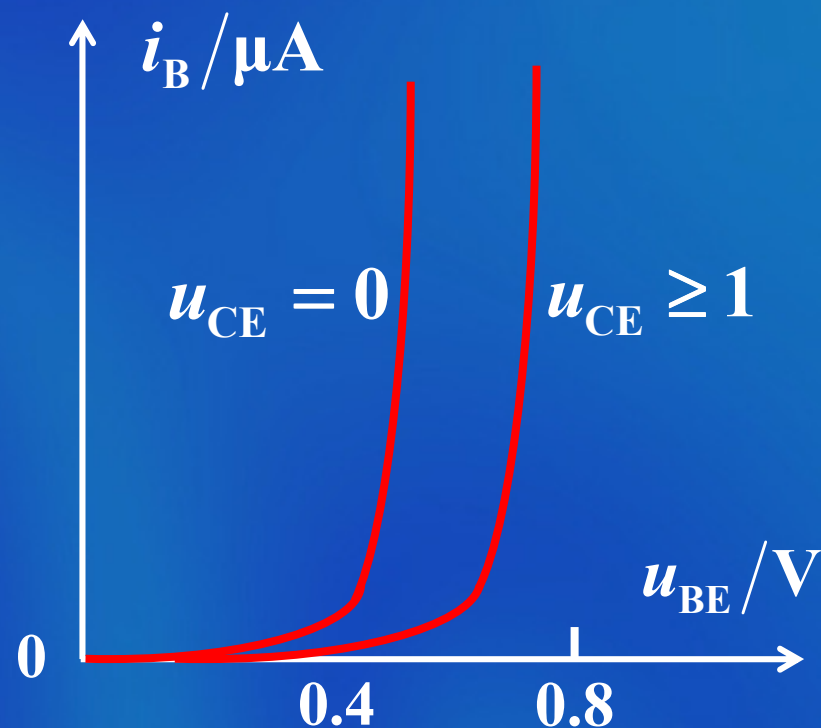
三极管共射极接法



1. 共射极输入特性

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE} \text{一定}}$$

共射极输入特性

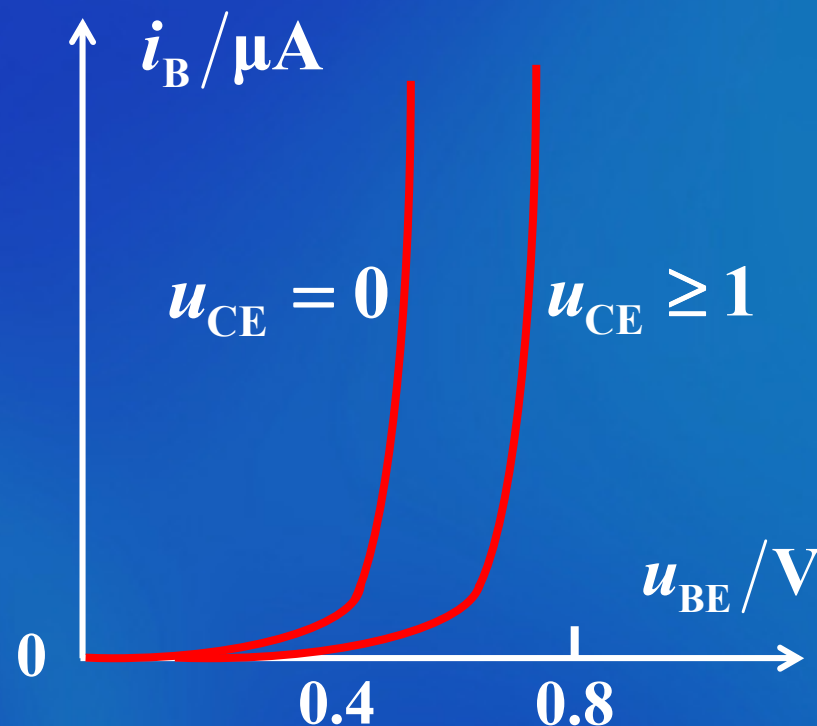


输入特性的特点:

(1) 输入特性是非线性的，有死区。

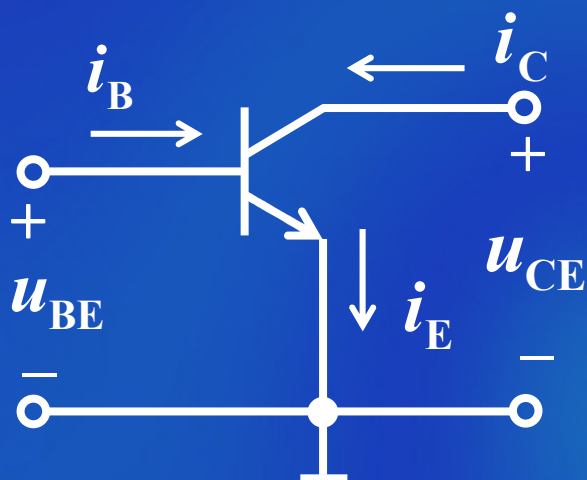
(2) 当 u_{BE} 不变， u_{CE} 从零增大， i_B 减小。

(3) 当 $u_{CE} \geq 1V$ ，输入特性曲线几乎重合在一起， u_{CE} 对输入特性几乎无影响。

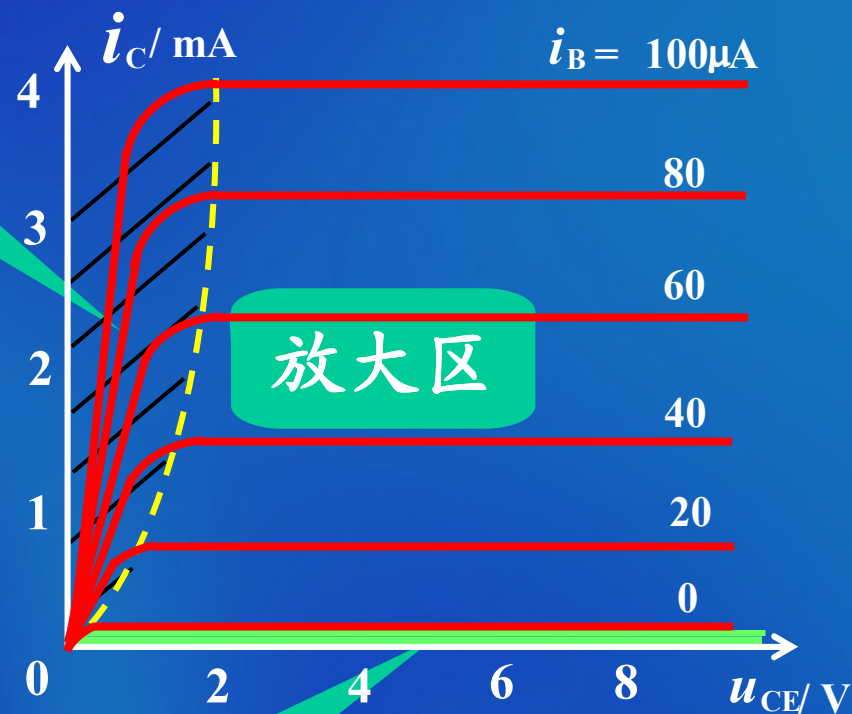


2. 共射极输出特性

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B \text{一定}}$$



输出特性曲线



饱和区

放大区

截止区

各区的特点:

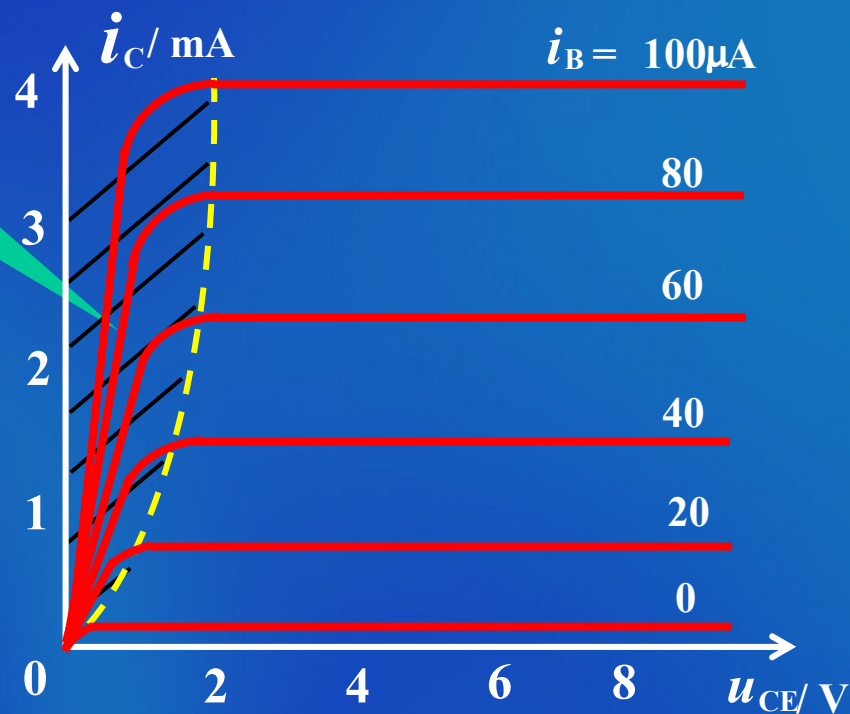
(1) 饱和区

a. $U_{CE} \leq U_{BE}$

b. $I_C < \beta I_B$

c. U_{CE} 增大, I_C 增大。

饱和区



(2) 放大区

a. $U_{CE} > U_{BE}$

b. $I_C = \beta I_B$

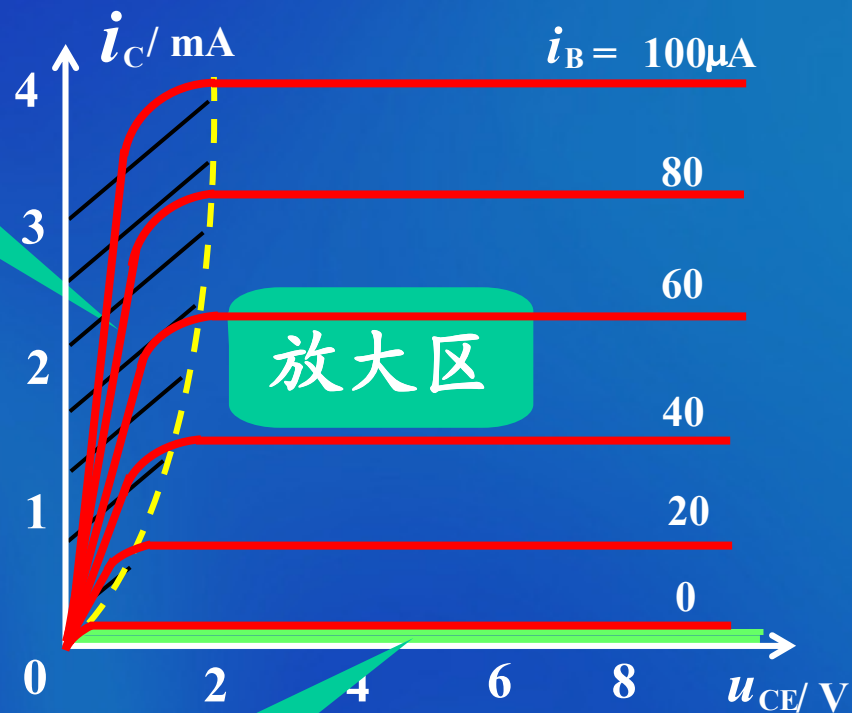
c. I_C 与 U_{CE} 无关

(3) 截止区

a. $U_{BE} < \text{死区电压}$

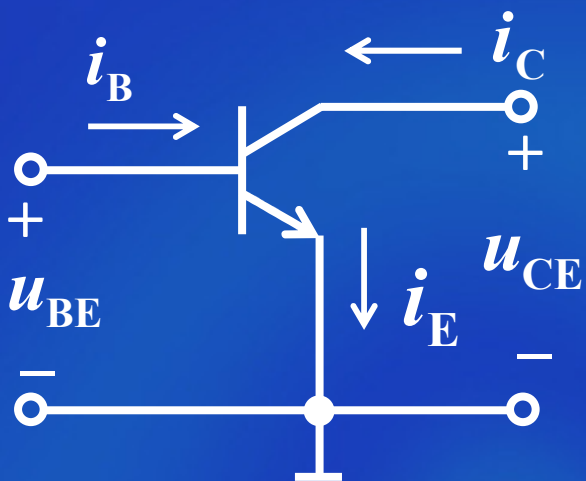
b. $I_B \approx 0$

c. $I_C \approx 0$

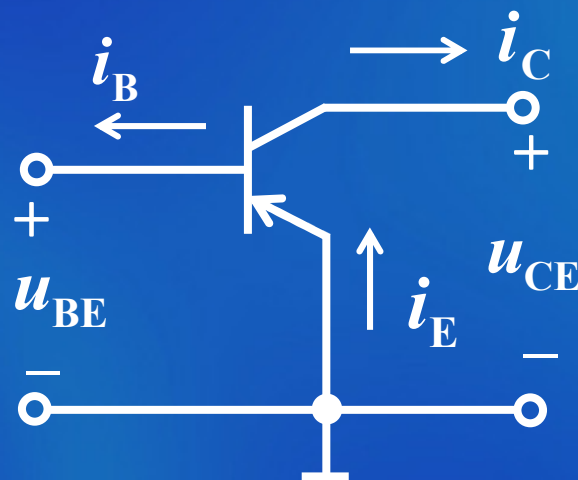


NPN管与PNP型管的区别

NPN管电路



PNP管电路



i_B 、 u_{BE} 、 i_C 、 i_E 、 u_{CE} 的极性二者相反

硅管与锗管的区别:

(1) 死区电压约为 $\left\{ \begin{array}{l} \text{硅管 } 0.5 \text{ V} \\ \text{锗管 } 0.1 \text{ V} \end{array} \right.$

(2) 导通压降 $|u_{\text{BE}}|$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{硅管 } 0.7 \text{ V} \\ \text{锗管 } 0.3 \text{ V} \end{array} \right.$

(3) 锗管的 I_{CBO} 比硅管大

2.1.4 半导体三极管的主要电参数

1. 直流参数

(1) 共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ $\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{I_{CBO}=0}$

(2) 共射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{I_{CBO}=0}$

(3) 发射极开路，集电极——基极间反向饱和电流
 I_{CBO}

(4) 基极开路，集电极——发射极间反向饱和电流
 I_{CEO}

2. 交流参数

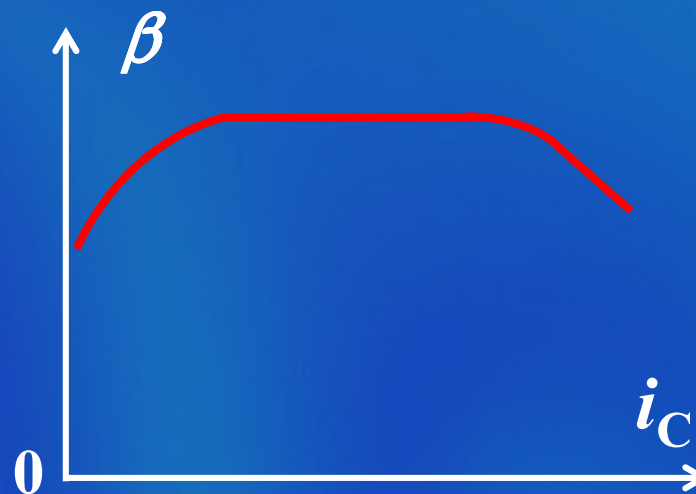
(1) 共基极交流电流放大系数 α

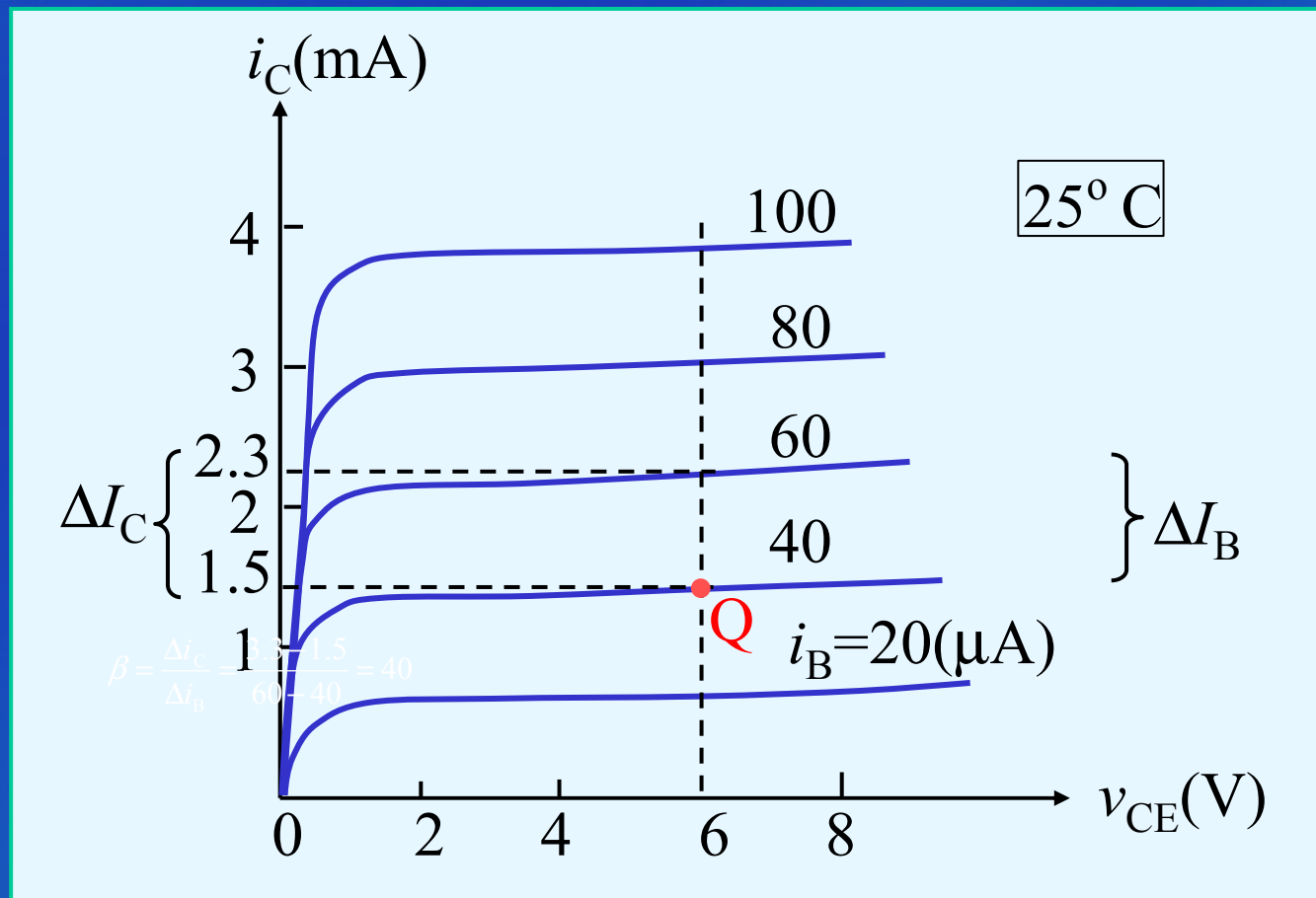
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

(2) 共射极交流电流放大系数 β

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \neq \text{常数}$$

β 值与 i_C 的关系曲线





$$\bar{\beta} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = \frac{1.5\text{mA}}{40\mu\text{A}} = 37.5$$

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{2.3 - 1.5}{60 - 40} = 40$$

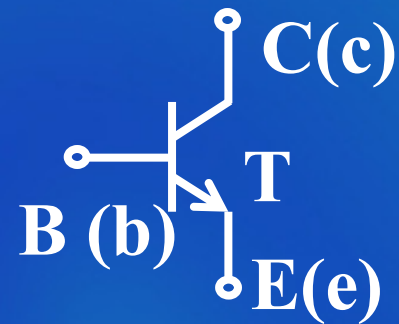
3. 极限参数

(1) 集电极开路时发射极——基极间反向击穿电压 $U_{(BR)EBO}$

(2) 发射极开路时集电极——基极间反向击穿电压 $U_{(BR)CBO}$

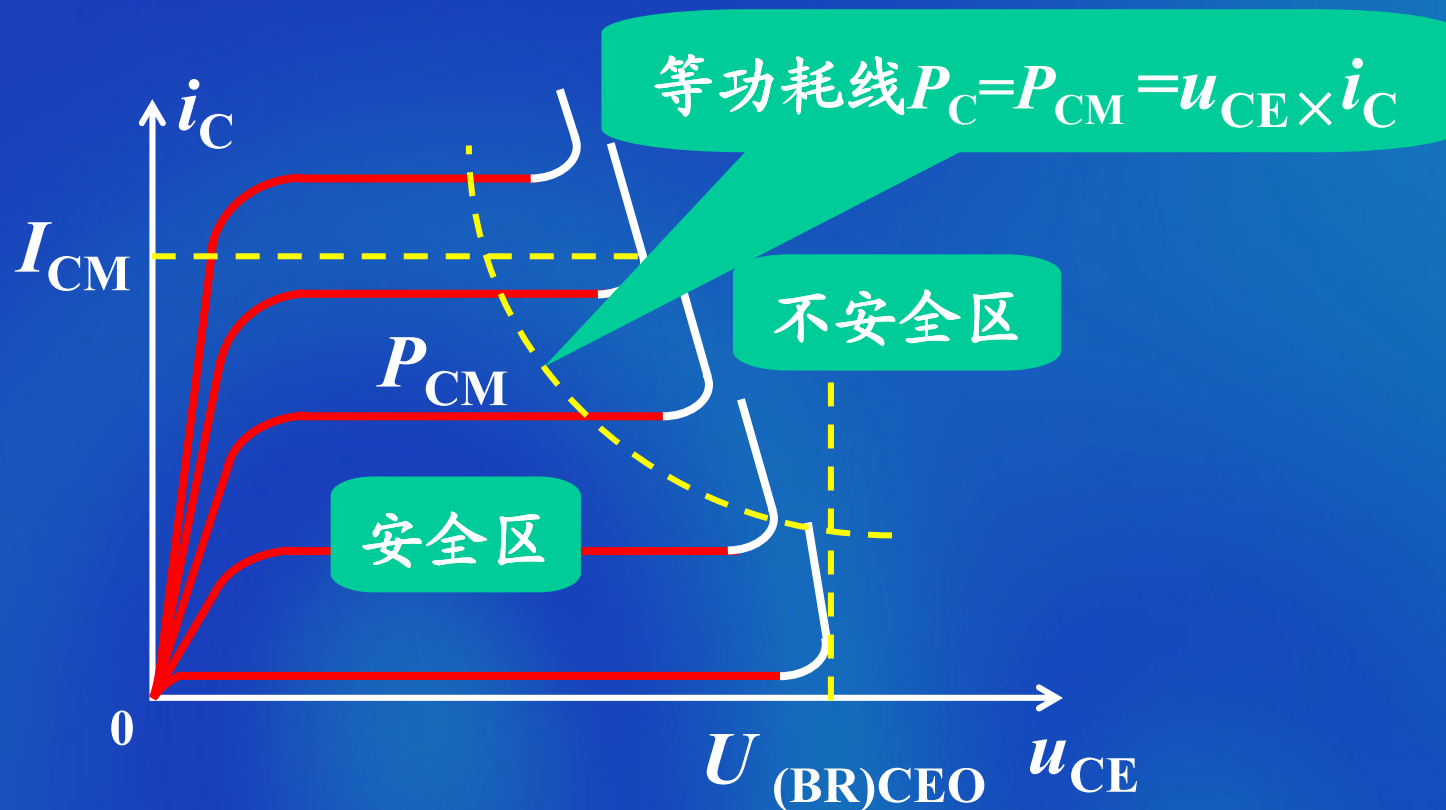
(3) 基极开路时集电极——发射极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

(4) 集电极最大允许电流 I_{CM}



(5) 集电极最大允许功率耗散 P_{CM}

晶体管的安全工作区



2.1.5 温度对管子参数的影响

1. 对 β 的影响

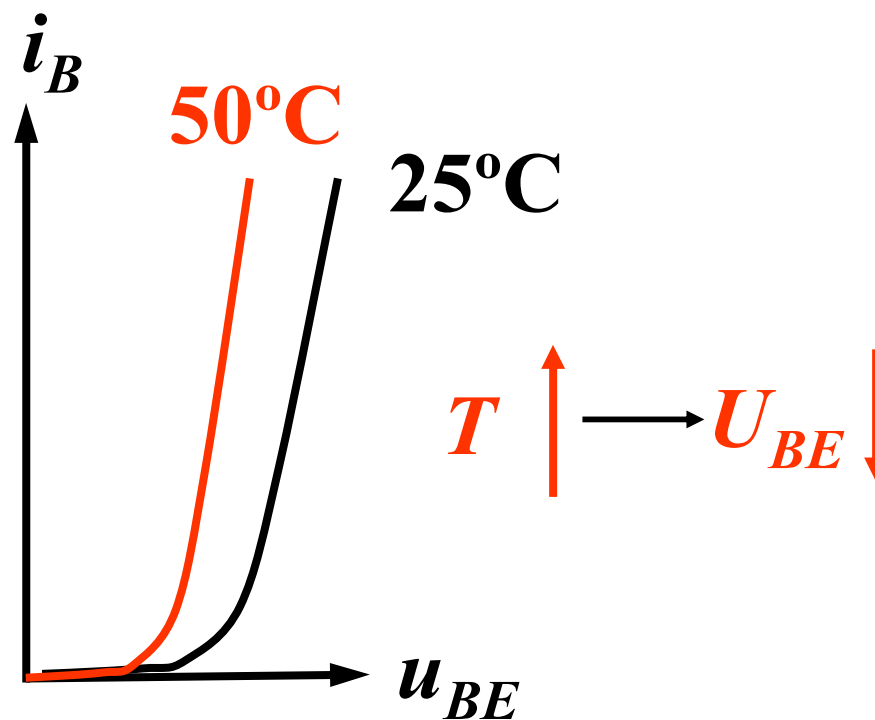
$$\frac{\Delta\beta}{\beta} / \Delta T$$

2. 对 I_{CBO} 的影响

$$I_{CBO}$$

3. 对 U_{BE} 的影响

$$\frac{\Delta U_{BE}}{|U_{BE}|} = - (2 \sim 2.5) \text{mV} / ^\circ\text{C}$$



思考题

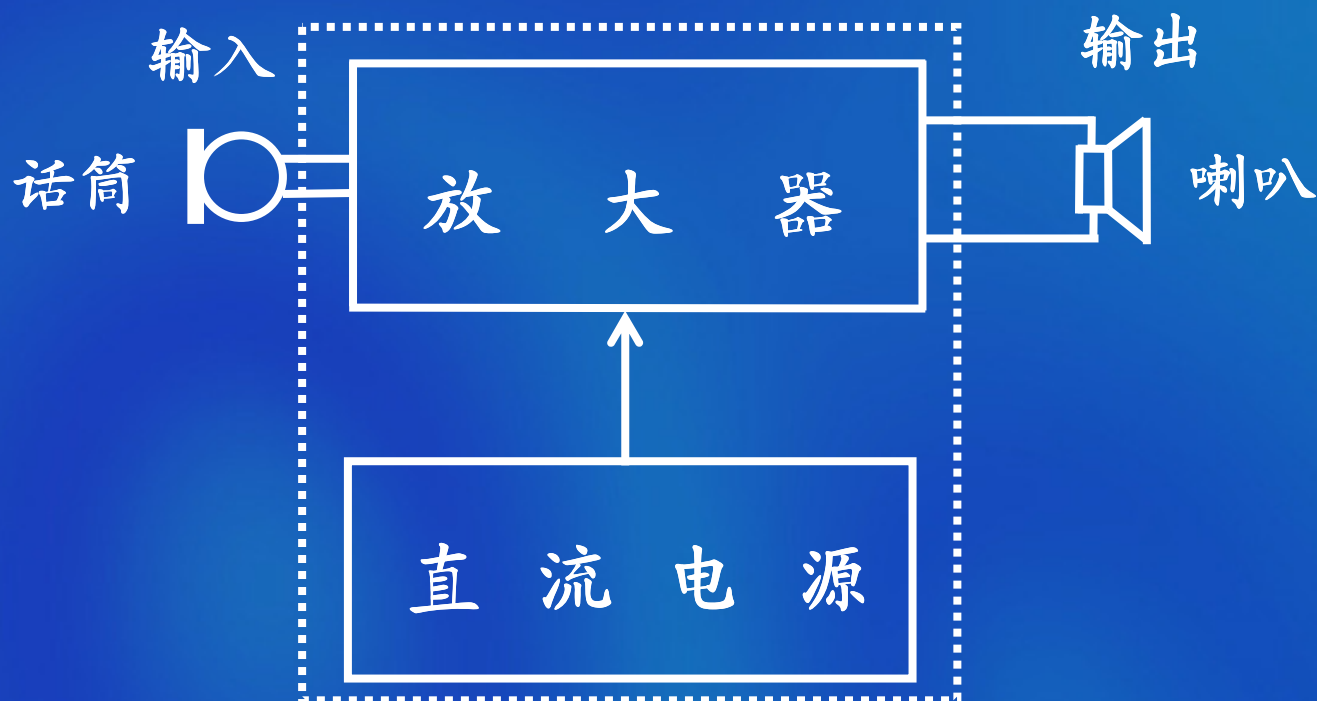
1. 晶体管为什么有电流放大作用？它是如何实现信号放大的？
2. 晶体管的发射极和集电极是否可以调换使用？
3. 为什么晶体管基区掺杂浓度小而且做的很薄？
4. 晶体管在输出特性曲线的饱和区工作时，其电流放大系数和在放大区工作时是否一样大？

2.2 共射极放大电路的组成和工作原理

2.2.1 放大电路概述

1. 放大电路的用途：把微弱的电信号不失真地放大到负载所需的数值。

应用举例



说到放大你
最关心什么？

对信号源
影响有多大？

R_i

放大多大？

A_u

象不象？

D

带负载能力
如何？

R_o

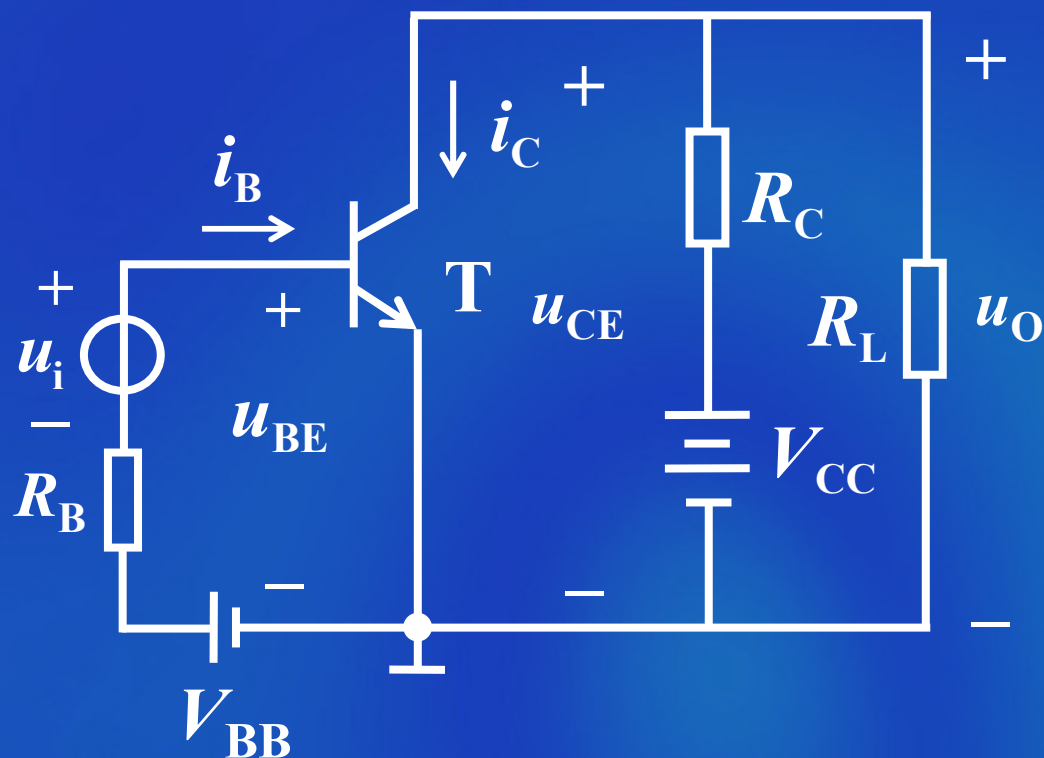
上页

下页

后退

2.2.2 共射极放大电路的组成及其工作原理

1. 共射极放大电路的组成



电路存在的问题:

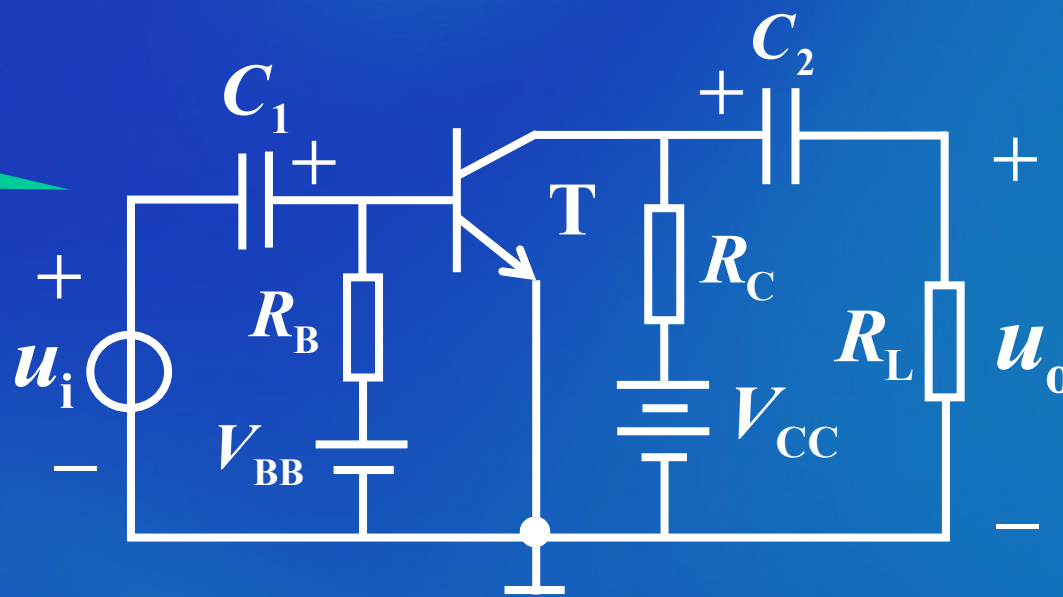
(1) 信号源与放大电路相互影响。

(2) 放大电路与负载相互影响。

改进的共射极放大电路

各元器件的作用:

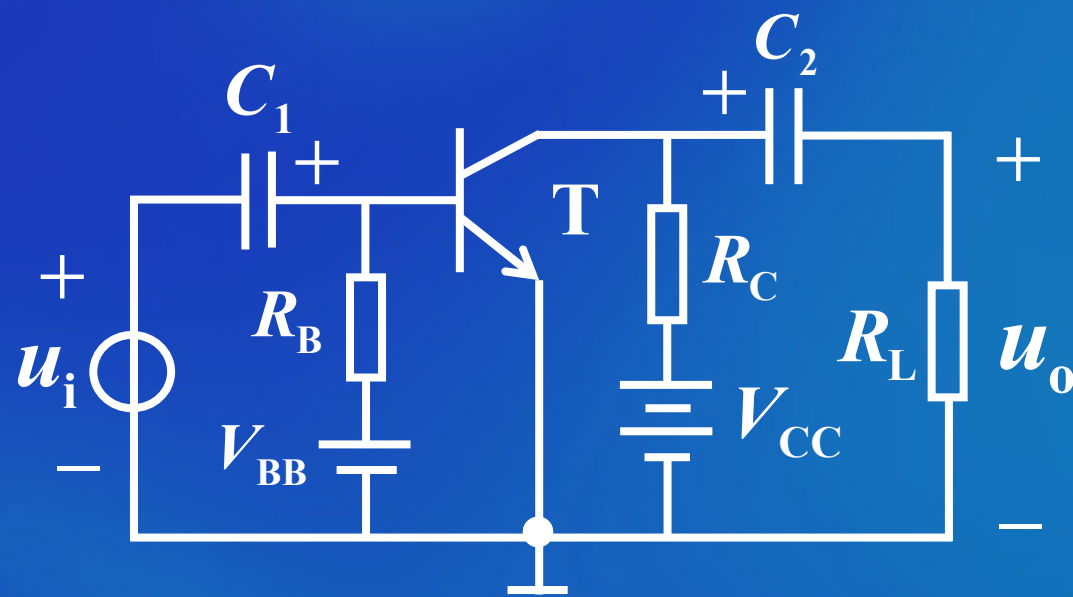
T——放大器件



耦合电容 C_1 、 C_2

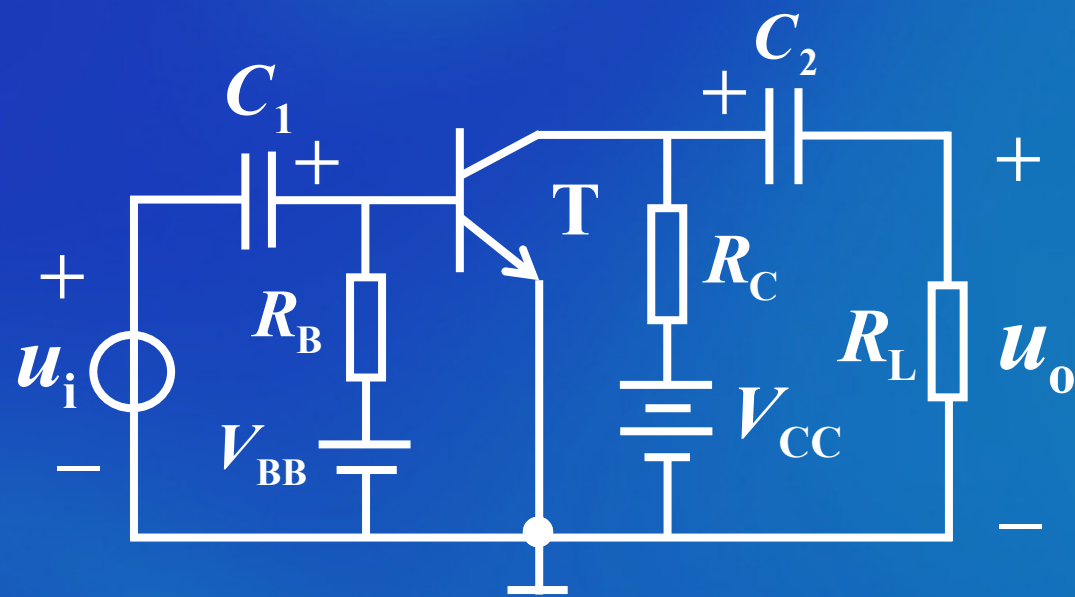
隔离放大电路对信号源和负载的直流影响。

沟通信号源、放大电路、负载之间的信号传递通道。



V_{BB} 、 R_B { 为T提供Je正偏电压 U_{BE}
 提供基极偏置电流 I_B

V_{CC} { 为T提供Jc反偏电压 U_{CE}
 为电路提供能量

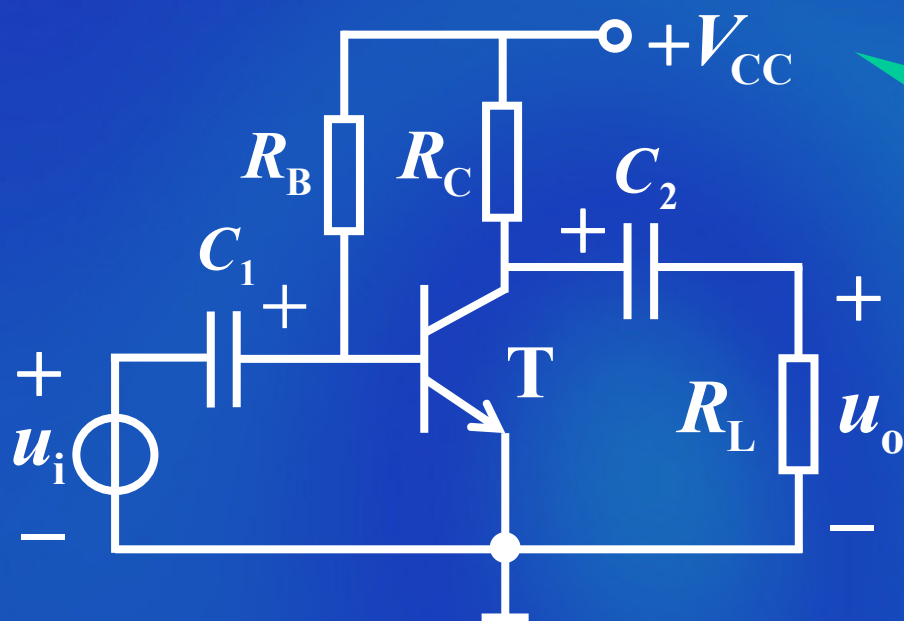
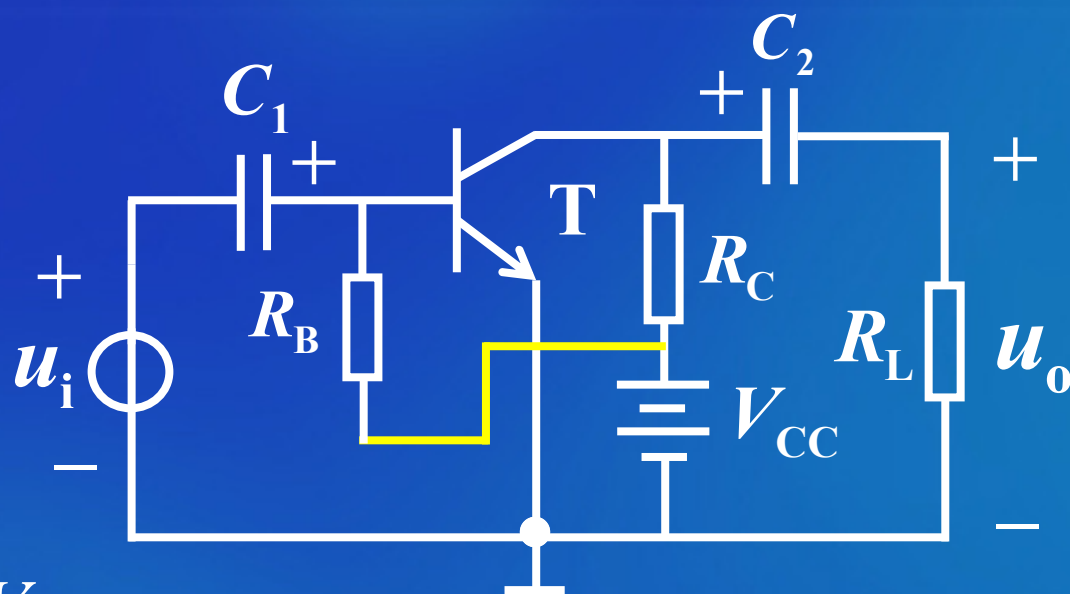


R_C { 使集电极有合适的电流 I_C
 转换集电极电流信号为电压信号，实现电压放大

(1) 电路的简化

只用一个电源，
减少电源数。

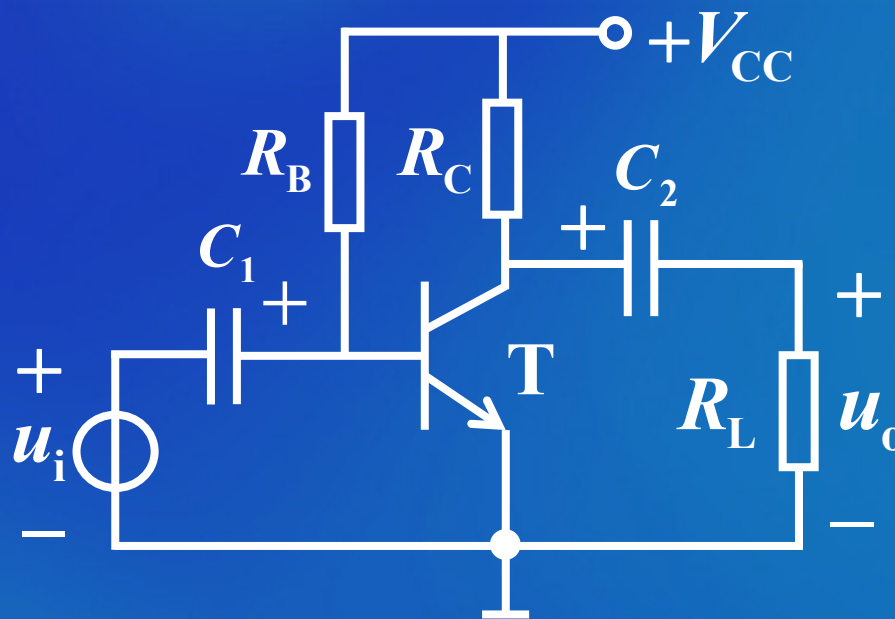
(2) 电路画法



不画电源符号，
只写出电源正极
对地的电位。



放大电路的两种 工作状态：



静态——当输入信号为零时电路的工作状态。

静态时放大电路只有直流分量。

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分量的叠加。

注：不同书写体字母的含义

U_{BE} I_B — 大写字母，大写下标，表示直流量。

u_{be} — 小写字母，小写下标，表示交流瞬时值。

u_{BE} — 小写字母，大写下标，表示交、直混合量。

U_{be} — 大写字母，小写下标，表示交流分量有效值。

信号的传递过程

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



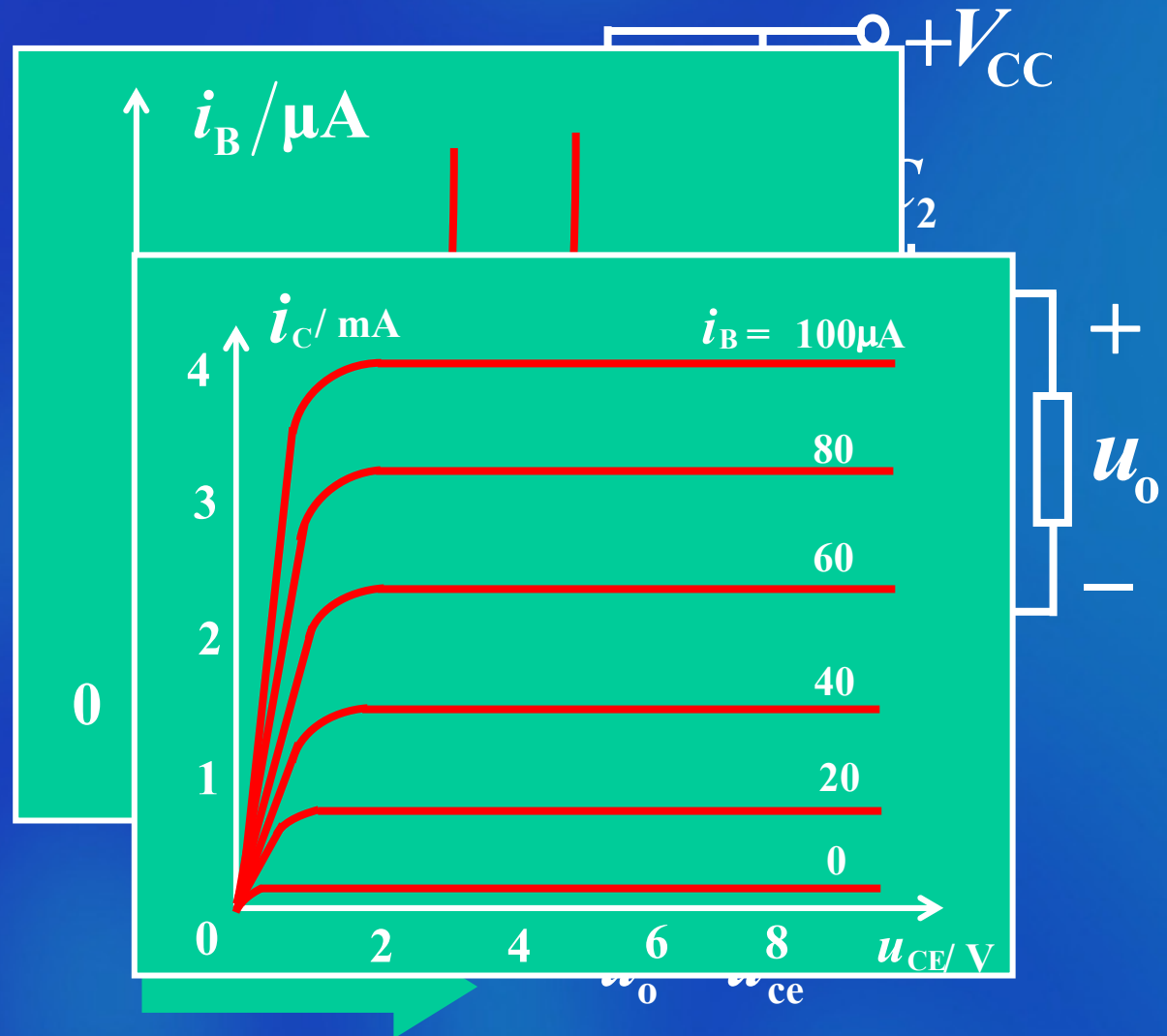
$$i_B = I_{BQ} + i_b$$



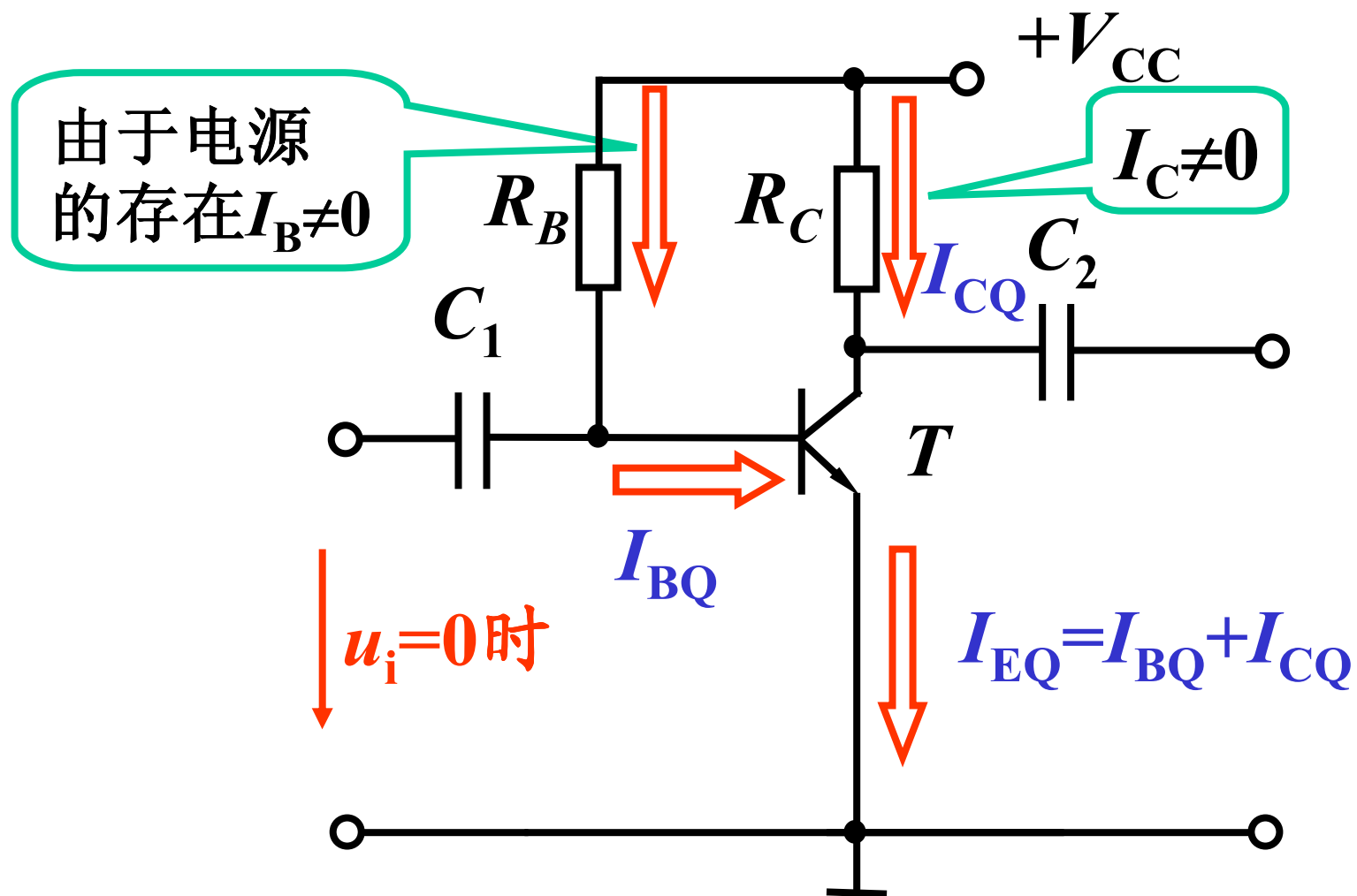
$$i_C = I_{CQ} + i_c$$



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

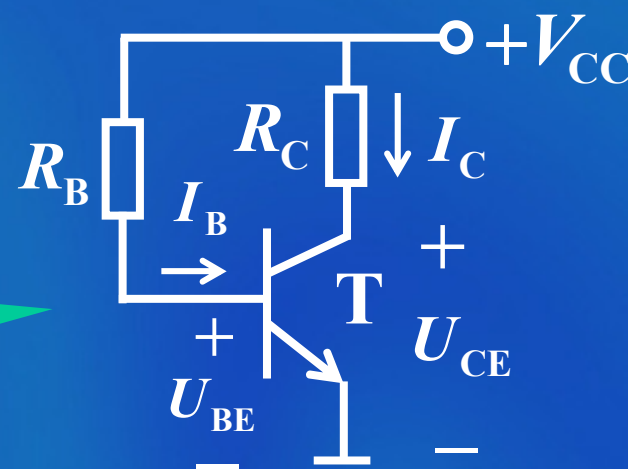
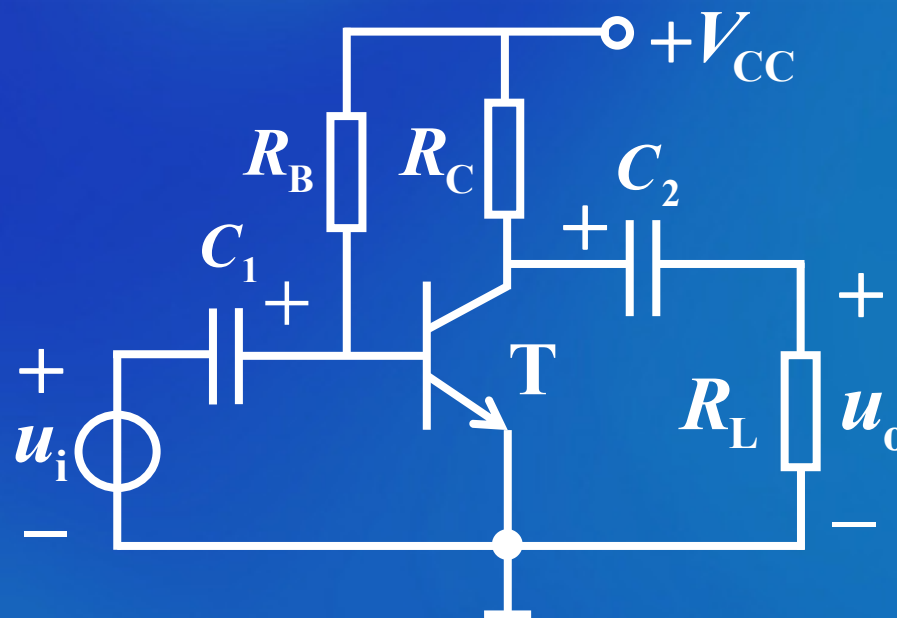


2.3 放大电路的静态分析



2.3 放大电路的静态分析

静态分析——就是通过放大电路的直流通路求解静态工作点值 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 。



直流通路

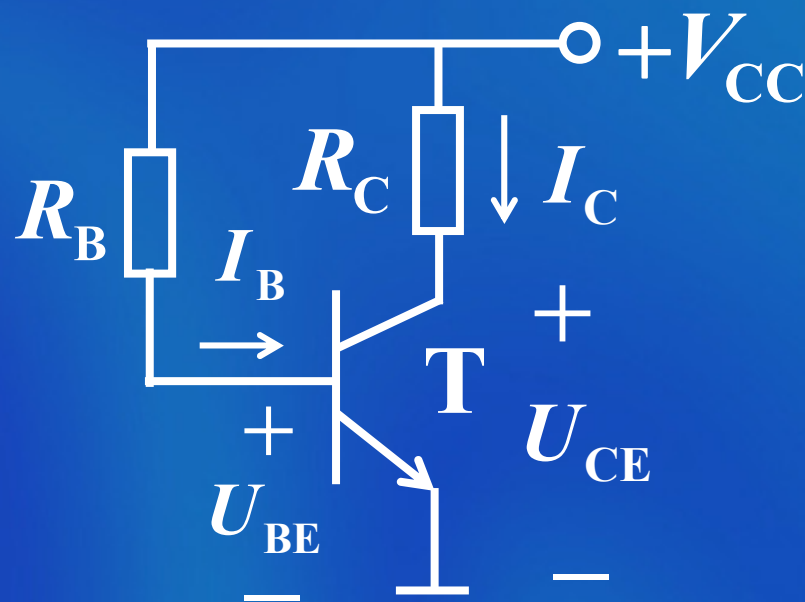
求解静态工作点的常用方法 { 图解法
估算法

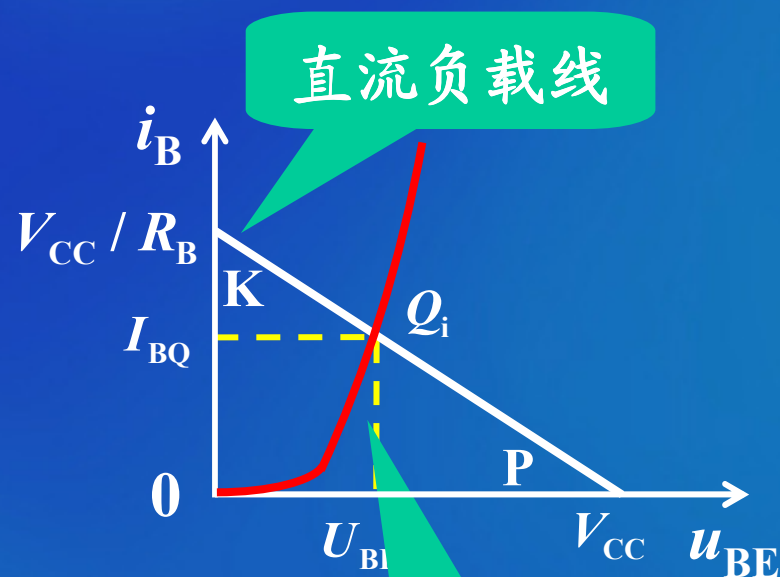
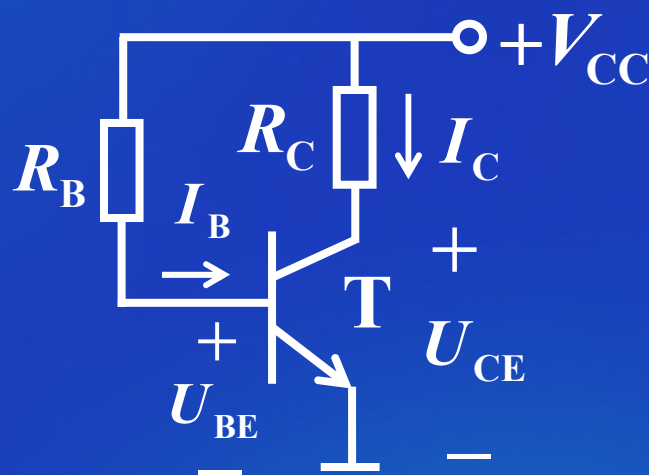
2.3.1 图解法在放大电路静态分析中的应用

1. 输入回路

列写输入回路方程

$$V_{CC} = I_B R_B + U_{BE}$$





方程 $V_{CC} = i_B R_B + u_{BE}$

在 i_B 、 u_{BE} 坐标系上是一条直线

称为输入回路的直流负载线

直流负载线与三极管输入特性曲线的交点，即为放大电路的输入静态工作点 Q_i 。

2. 输出回路

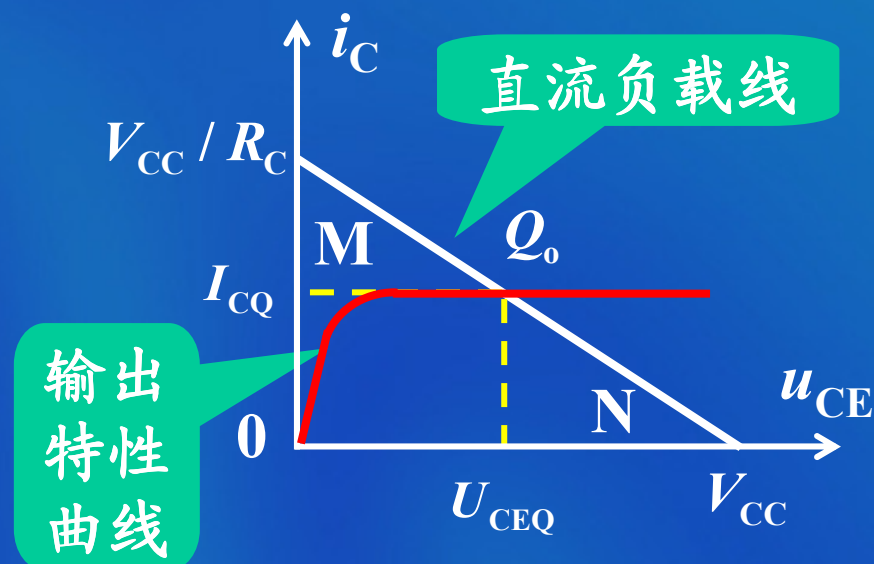
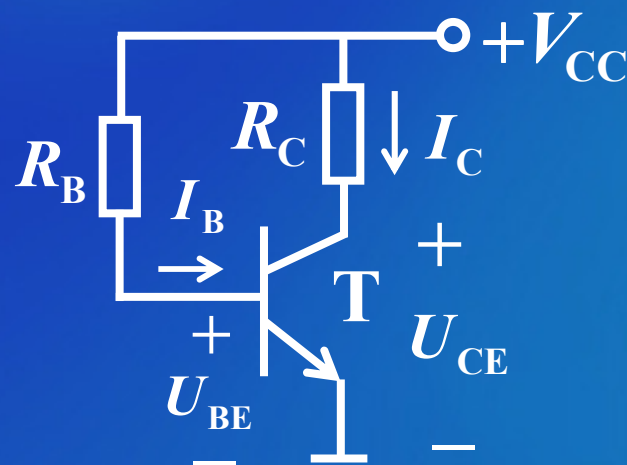
输出回路方程

$$V_{CC} = i_C R_C + u_{CE}$$

在 i_C 、 u_{CE} 坐标系上是一条直线

称为输出回路的直流负载线

直流负载线与晶体管输出特性曲线的交点，即为放大电路的输出静态工作点 Q_0 。



2.3.2 估算法在放大电路静态分析中的应用

由输入回路方程

$$V_{CC} = I_{BQ} R_B + U_{BEQ}$$

得

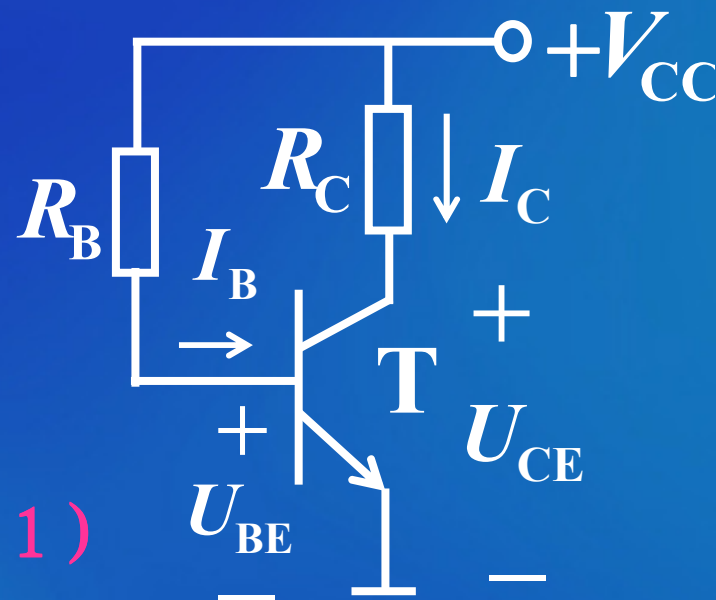
三步法！

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \quad (1)$$

式中， $|U_{BEQ}|$ 硅管可取为0.7V，锗管0.3V

$$I_{CQ} = \bar{\beta} I_{BQ} \quad (2)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (3)$$



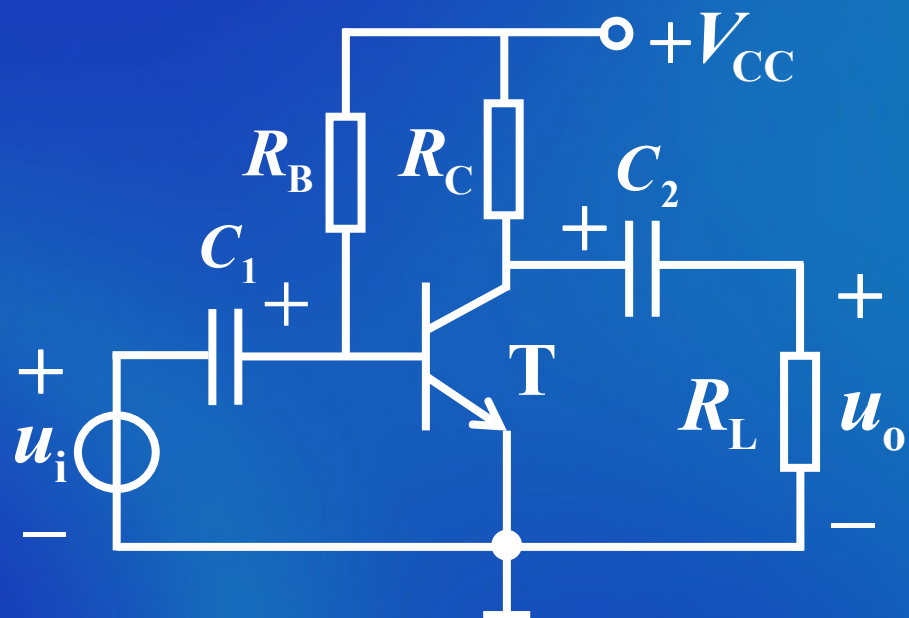
晶体管工作状态判别:

当发射极正偏:

$$\frac{R_B}{R_C} = \beta \quad \text{临界饱和}$$

$$\frac{R_B}{R_C} < \beta \quad \text{饱和}$$

$$\frac{R_B}{R_C} > \beta \quad \text{放大}$$

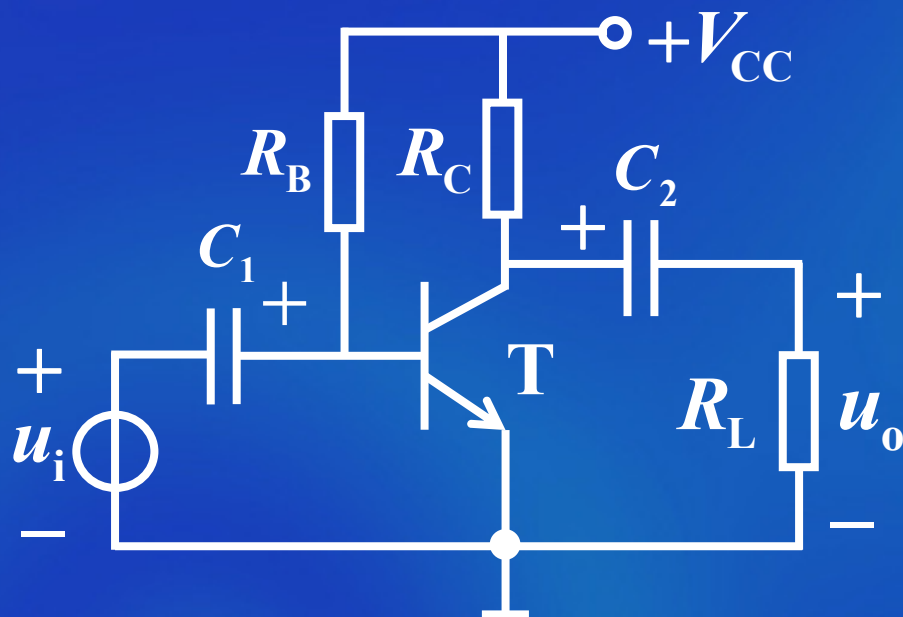


2.4 放大电路的动态分析

在静态分析基础上，分析电路中的交流分量之间关系。主要求出各种动态参数。

常用的分析方法 { 图解法
微变等效电路法

2.4.1 图解法在放大电路动态分析中的应用

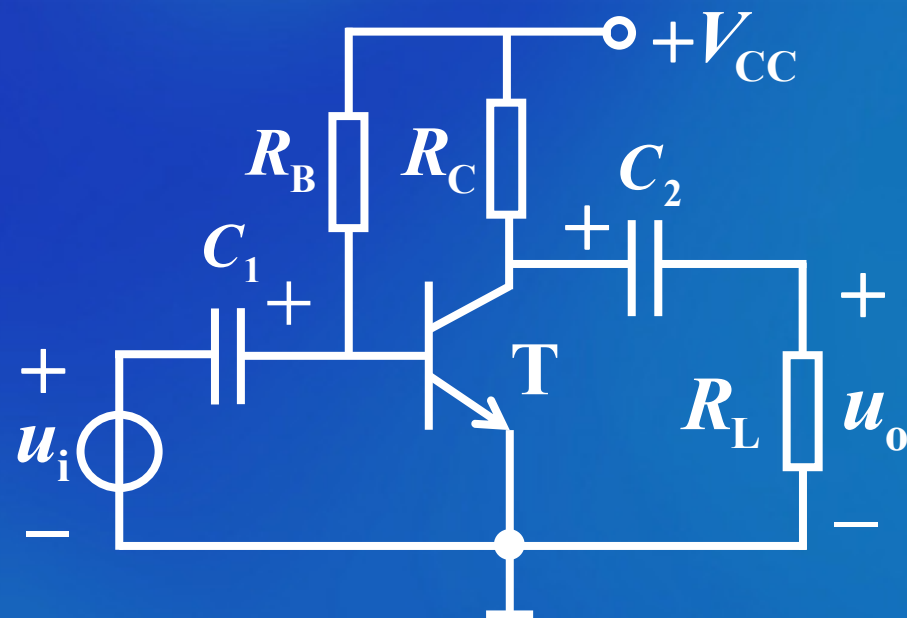


设输入信号 $u_i = U_{im} \sin \omega t$ V

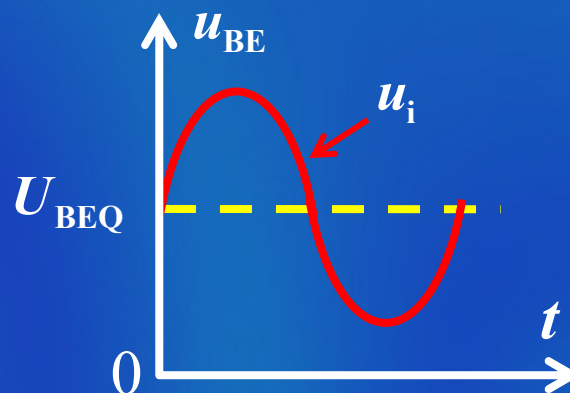
1. 当 $R_L = \infty$ 时

在输入回路

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

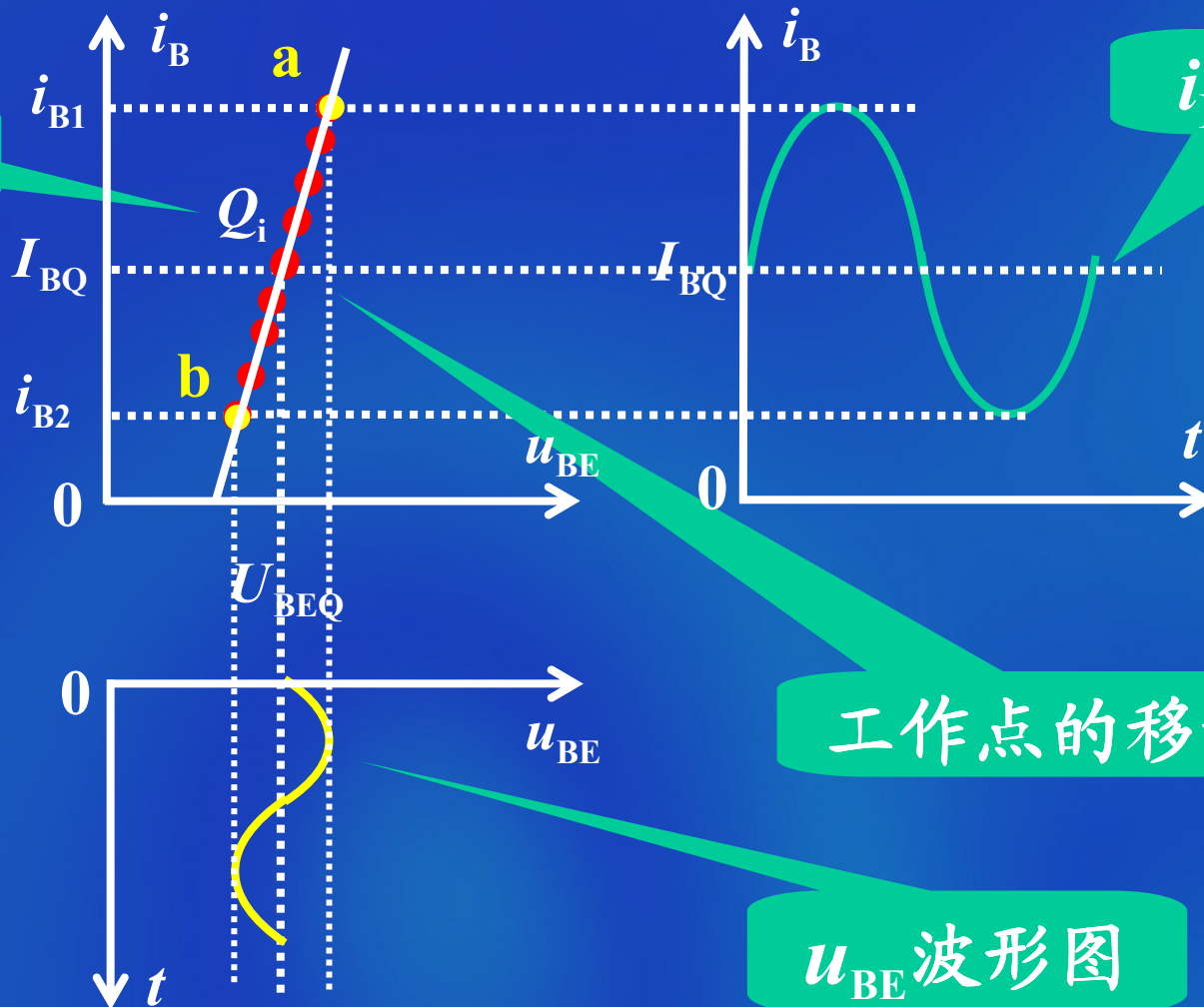


u_{BE} 波形图

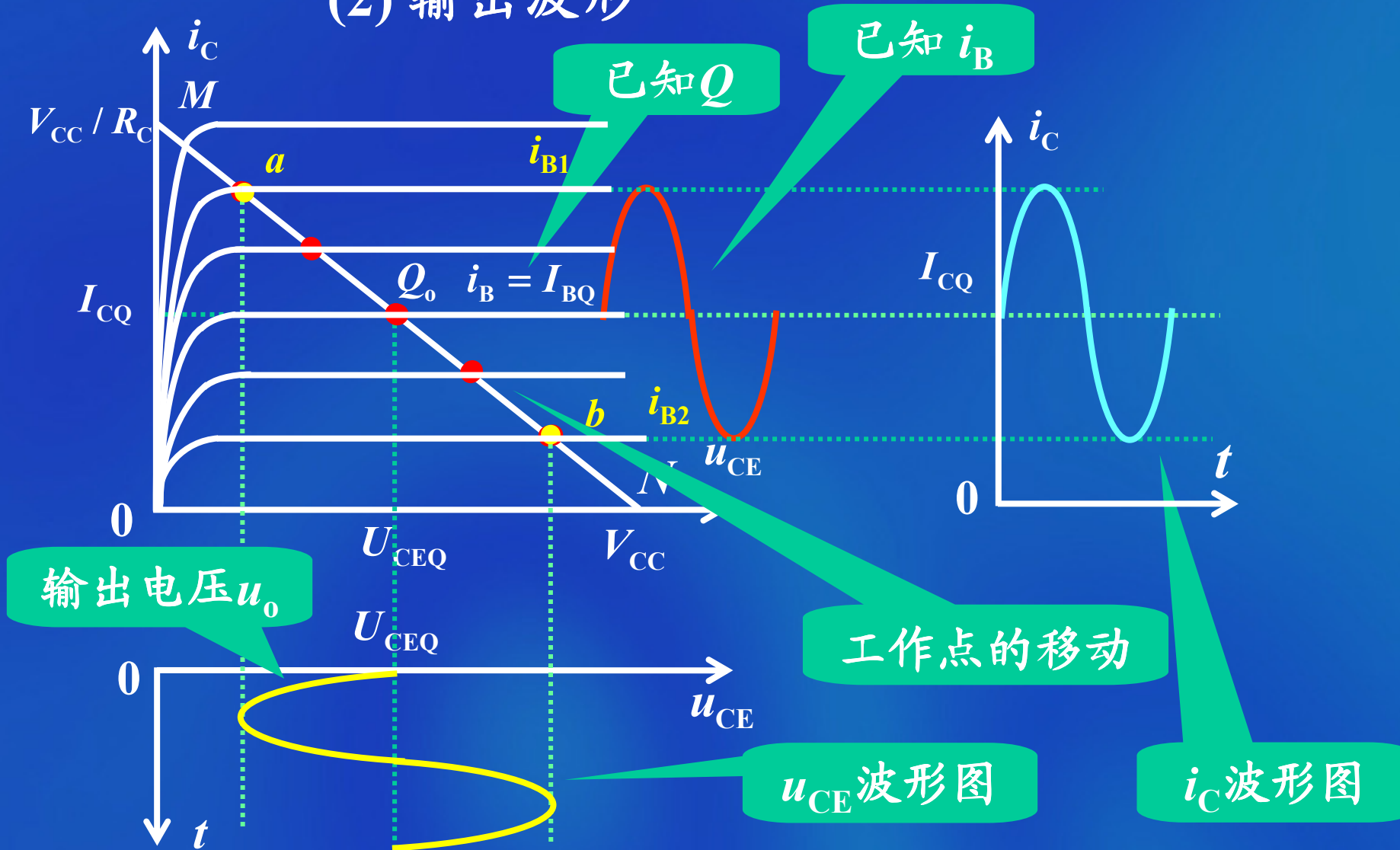


(1) i_B 的形成过程

已知 Q

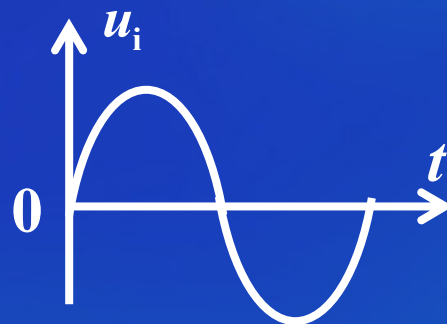


(2) 输出波形

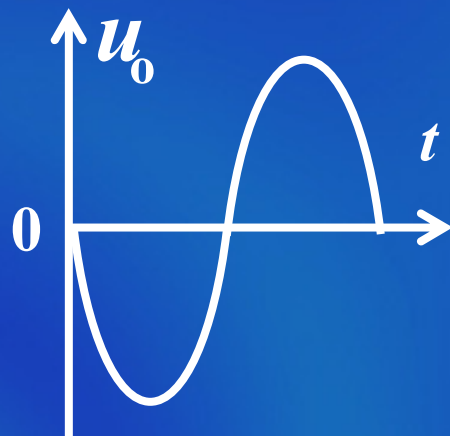


小结:

已知输入信号

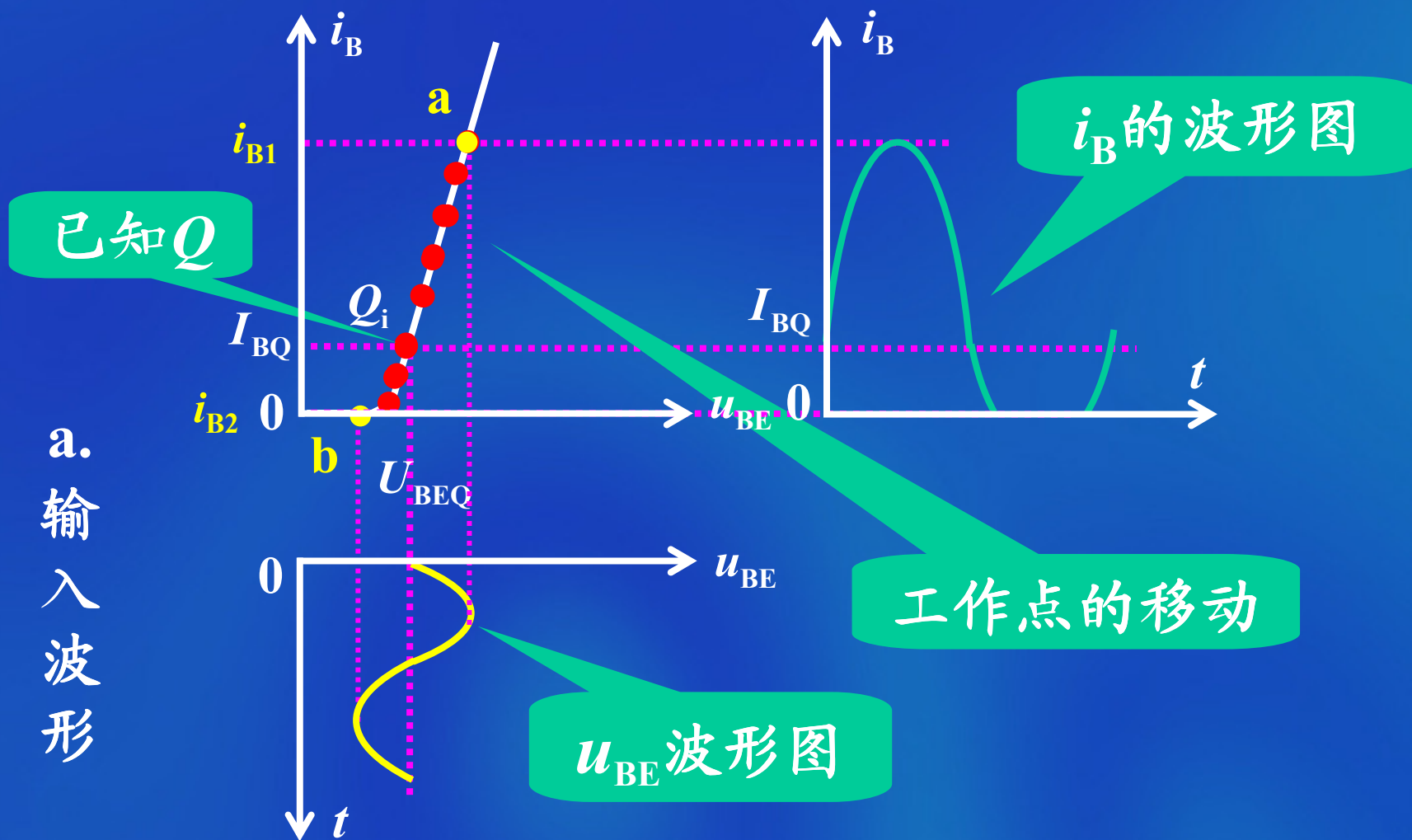


输出信号波形

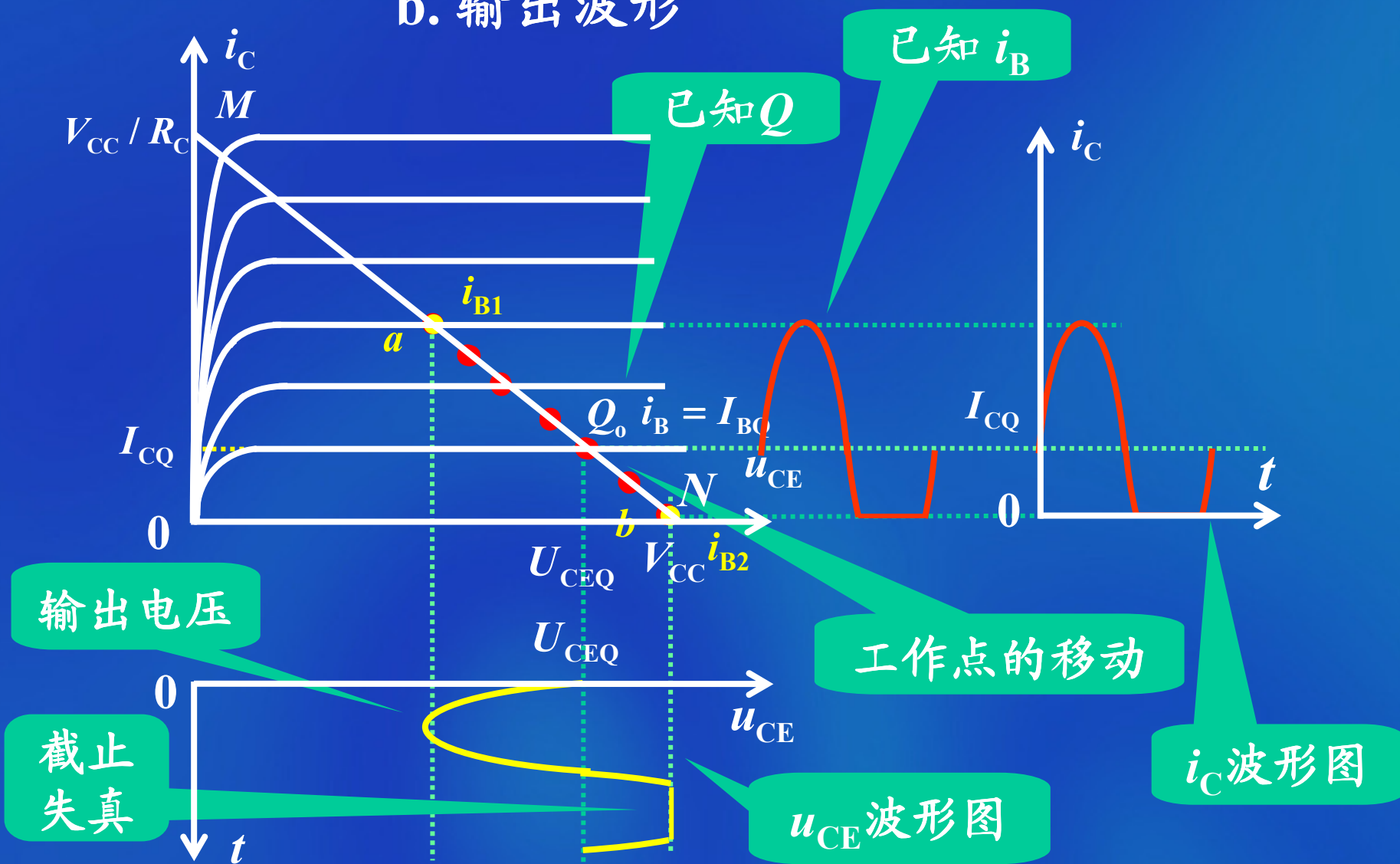


输出电压 u_o 与输入电压 u_i 相位相反

(2) 如果静态工作点 Q 太低



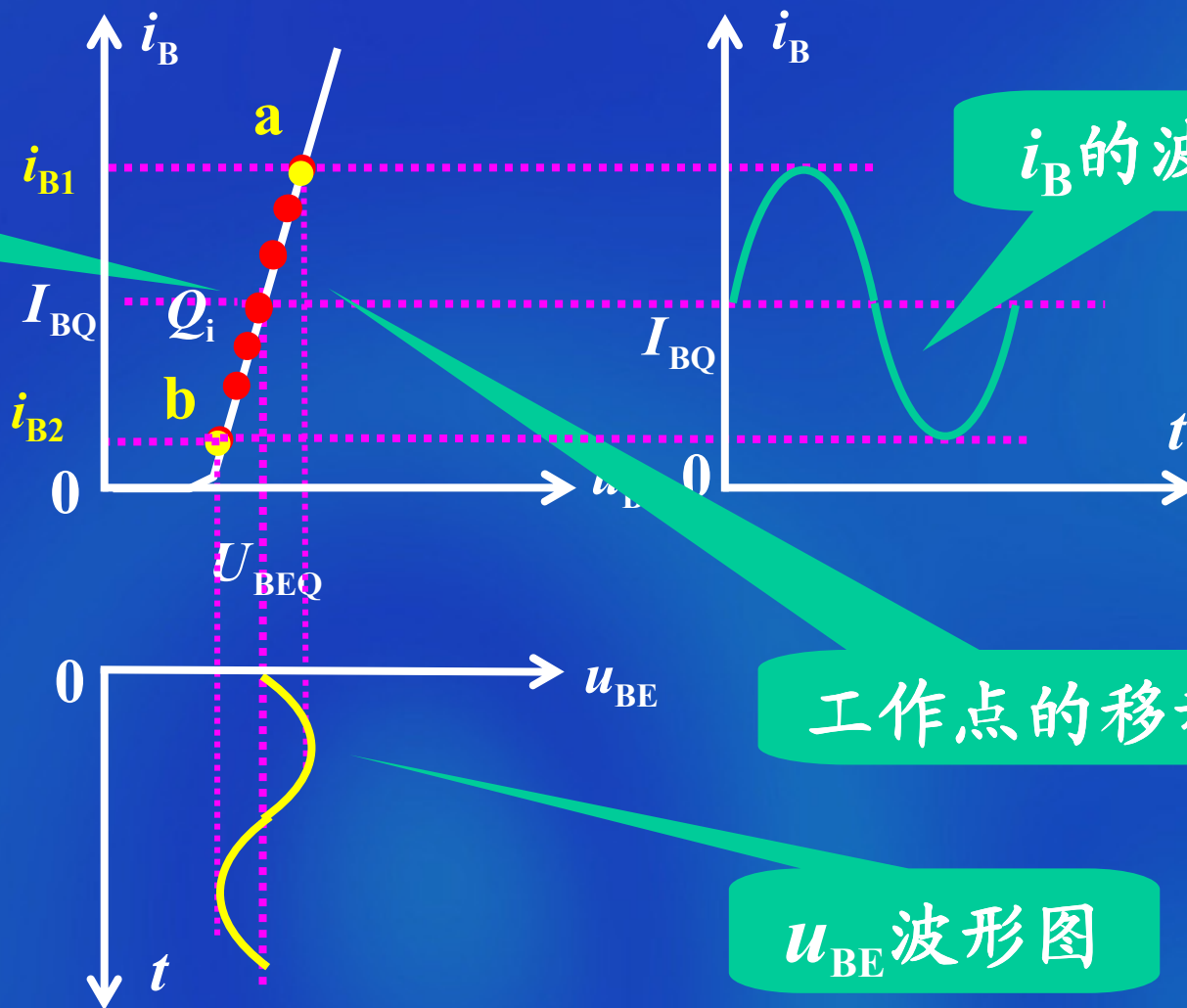
b. 输出波形



(3) 如果静态工作点 Q 太高

已知 Q

a. 输入波形

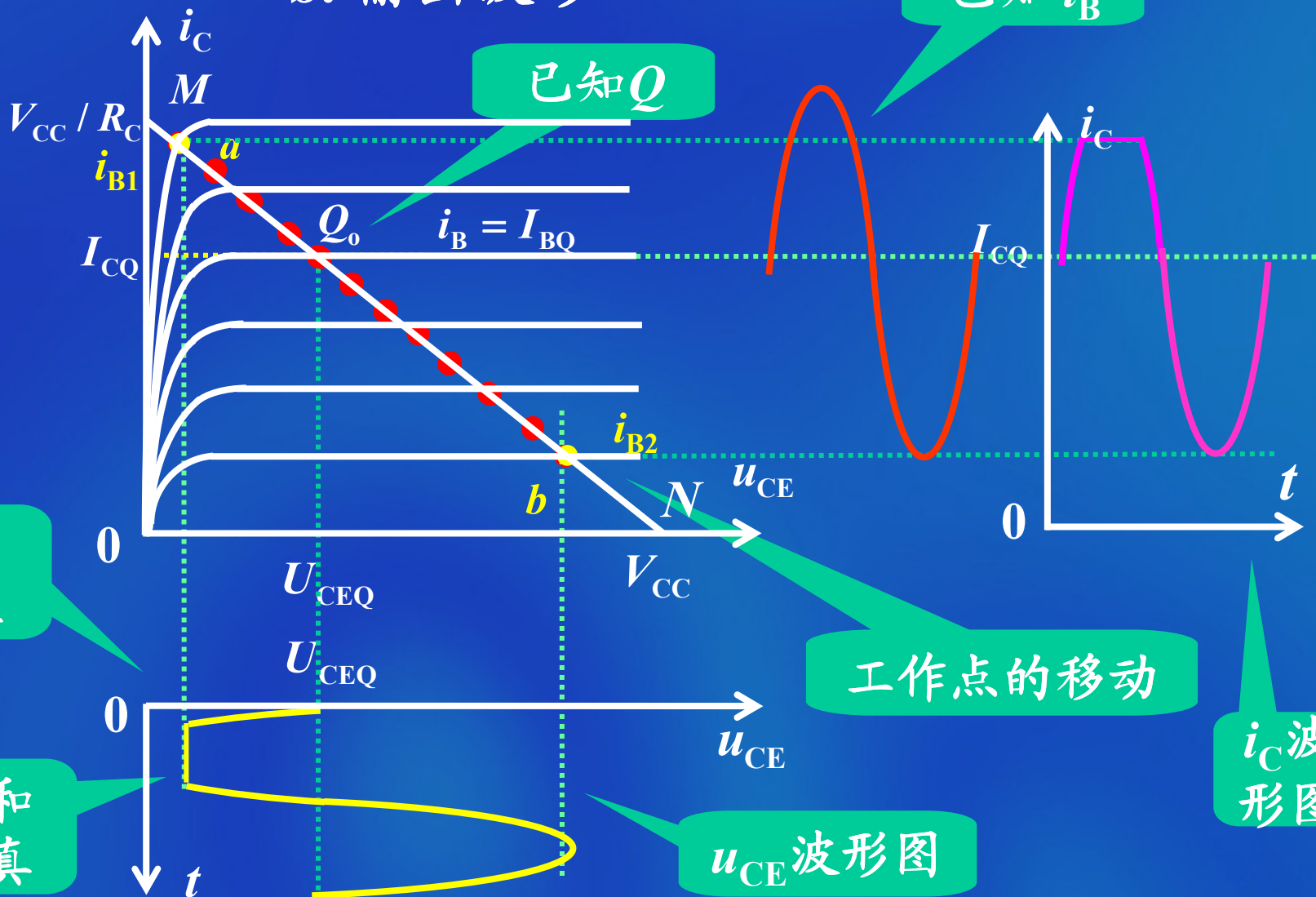


上页

下页

后退

b. 输出波形



小结:

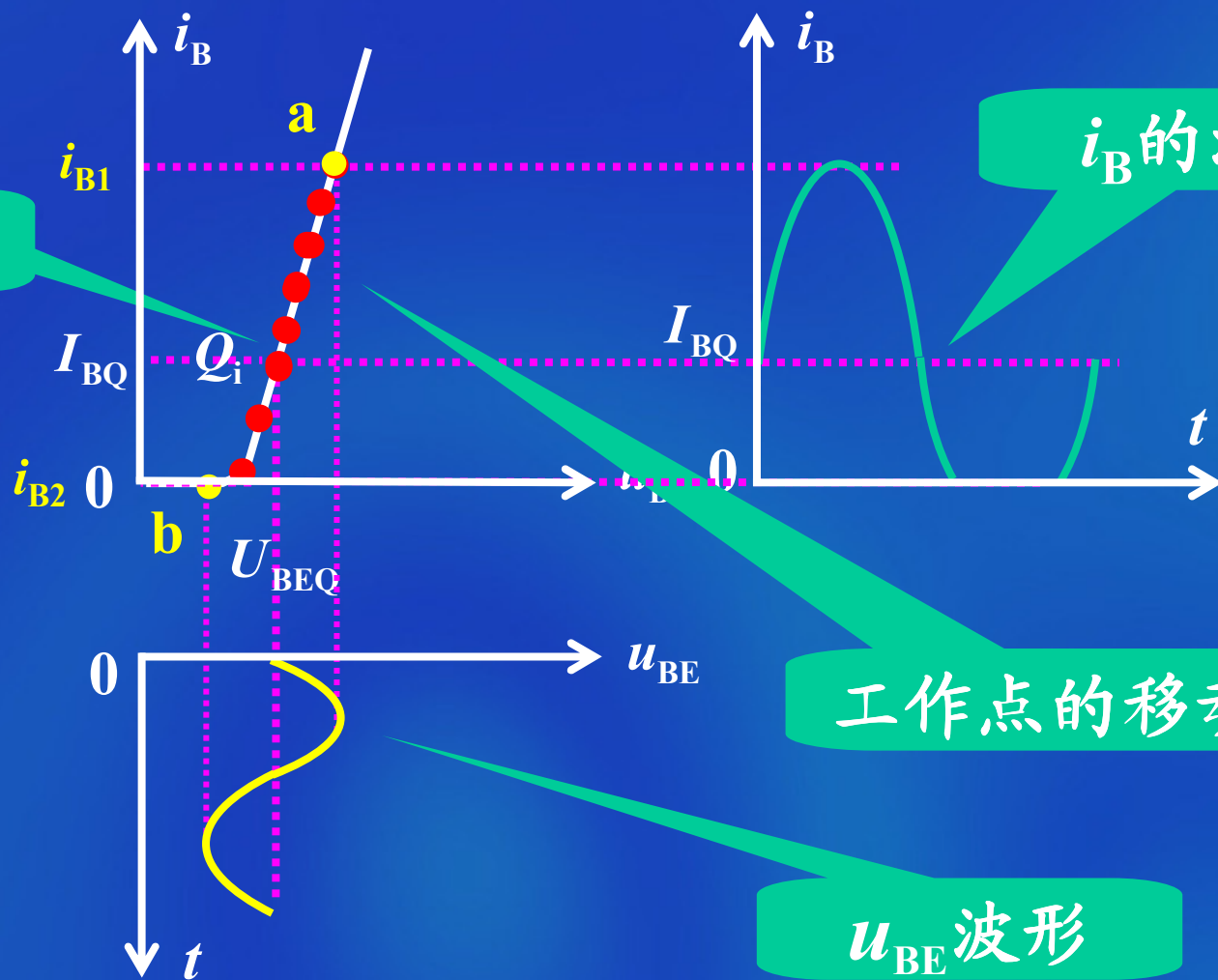
静态工作点不合适，将使工作点进入非线性区而产生非线性失真（饱和失真、截止失真）。

工作点合适就一定不会失真？

(4) 如果输入信号太大

已知Q

a. 输入波形



i_B 的波形

工作点的移动

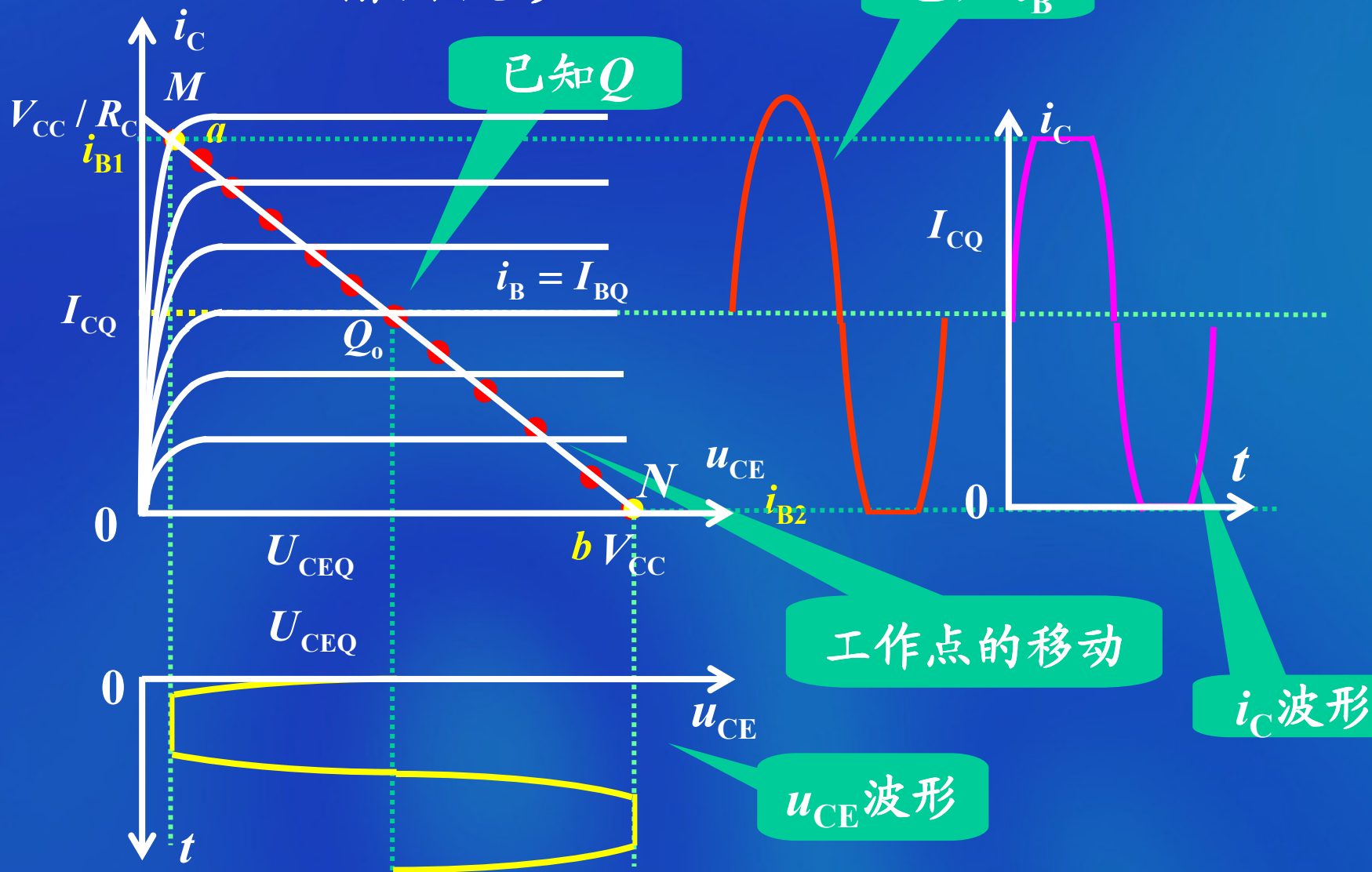
u_{BE} 波形

上页

下页

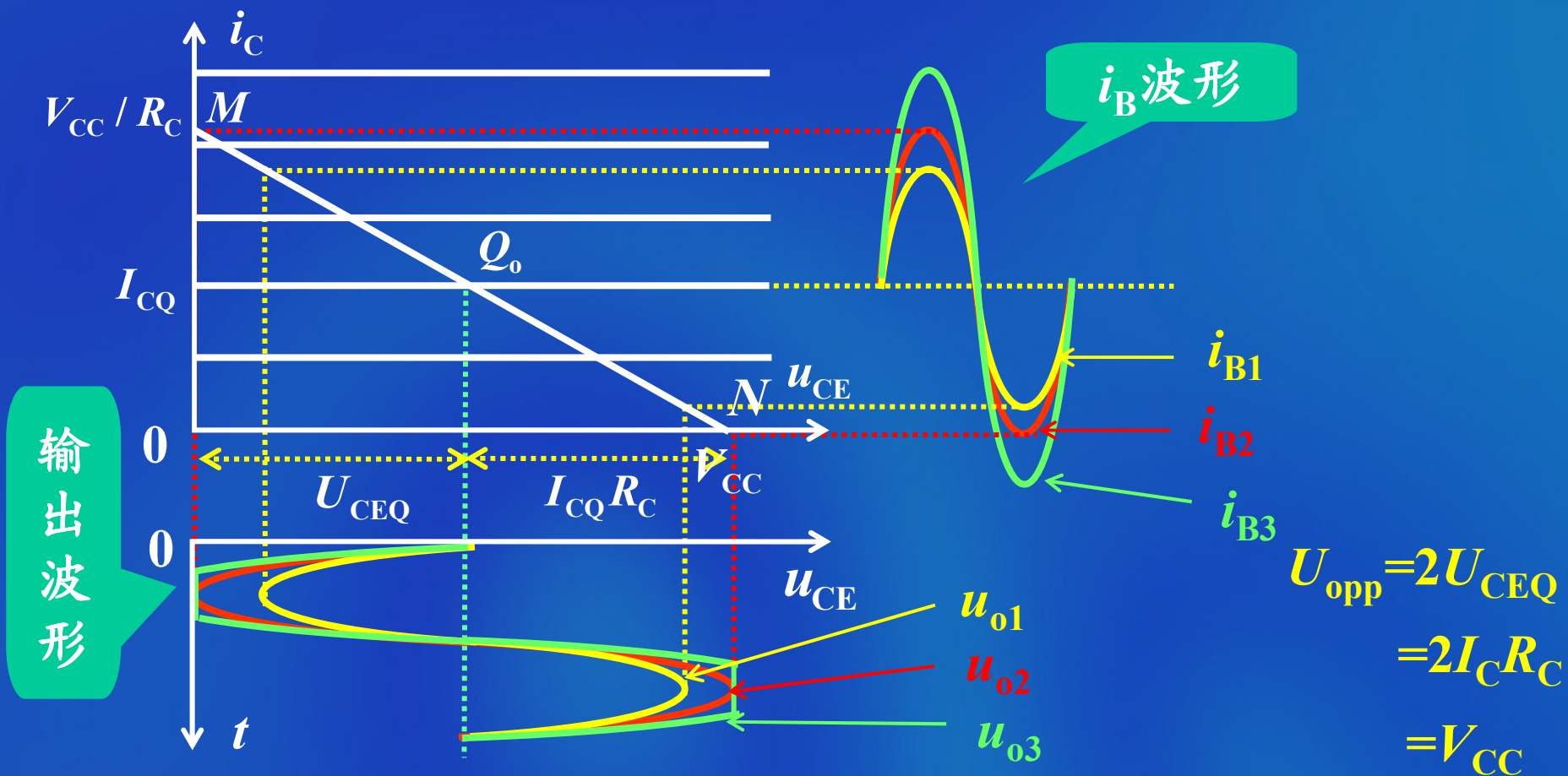
后退

b. 输出波形

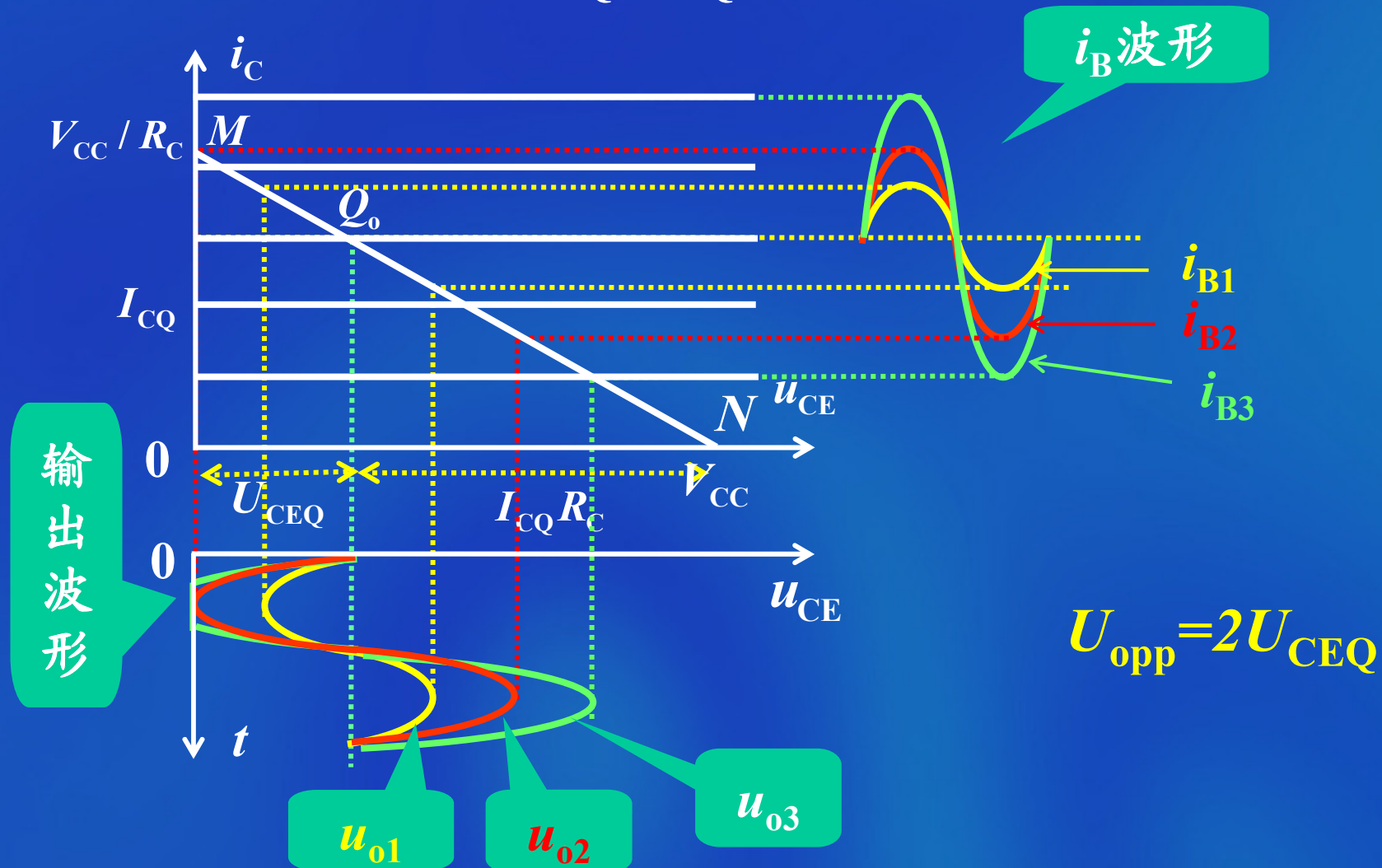


(5) 放大电路的动态范围 (忽略 U_{CES} 和 I_{CBO})

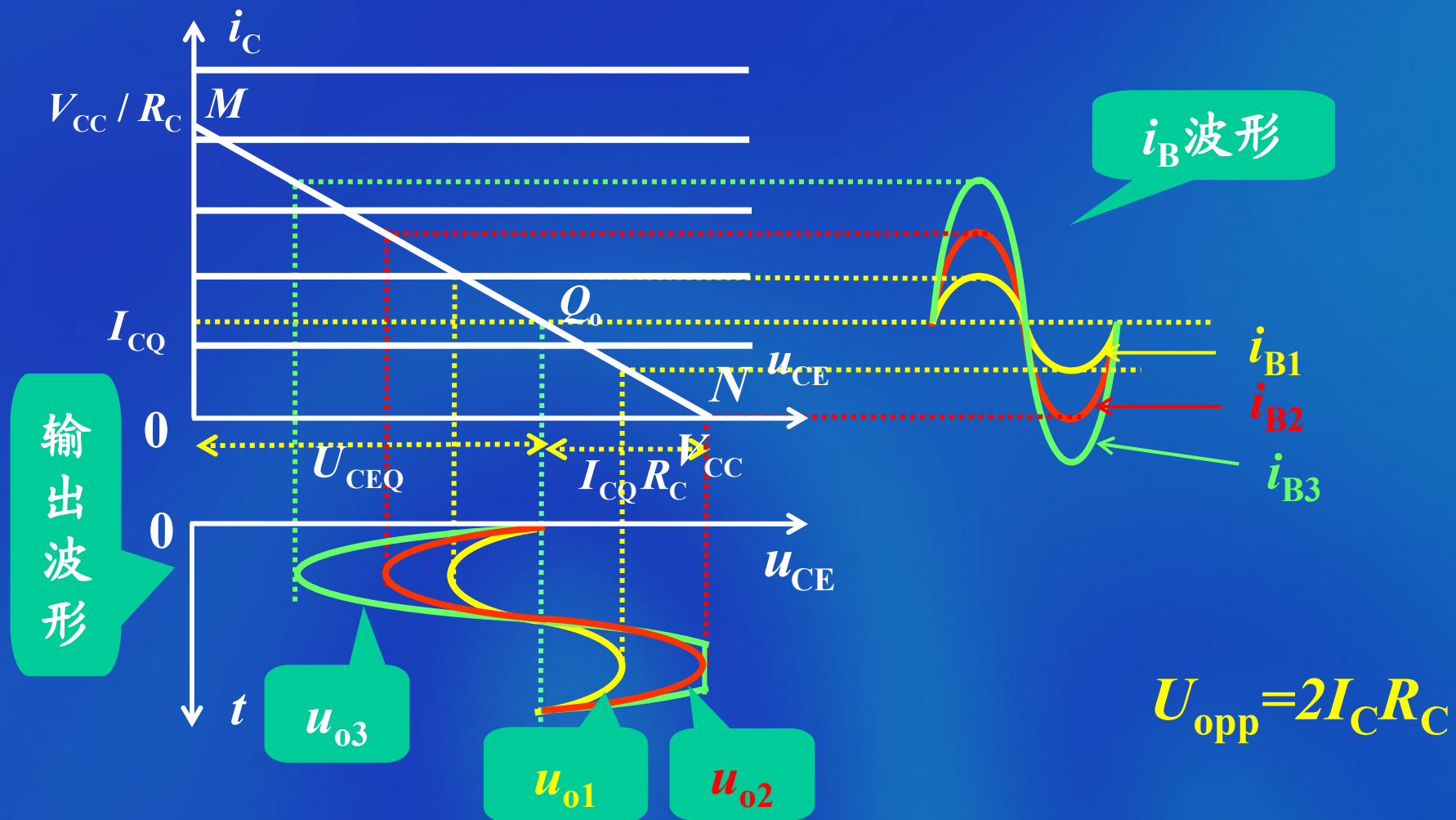
a. 如果 $U_{CEQ} = I_{CQ}R_C = V_{CC}/2$



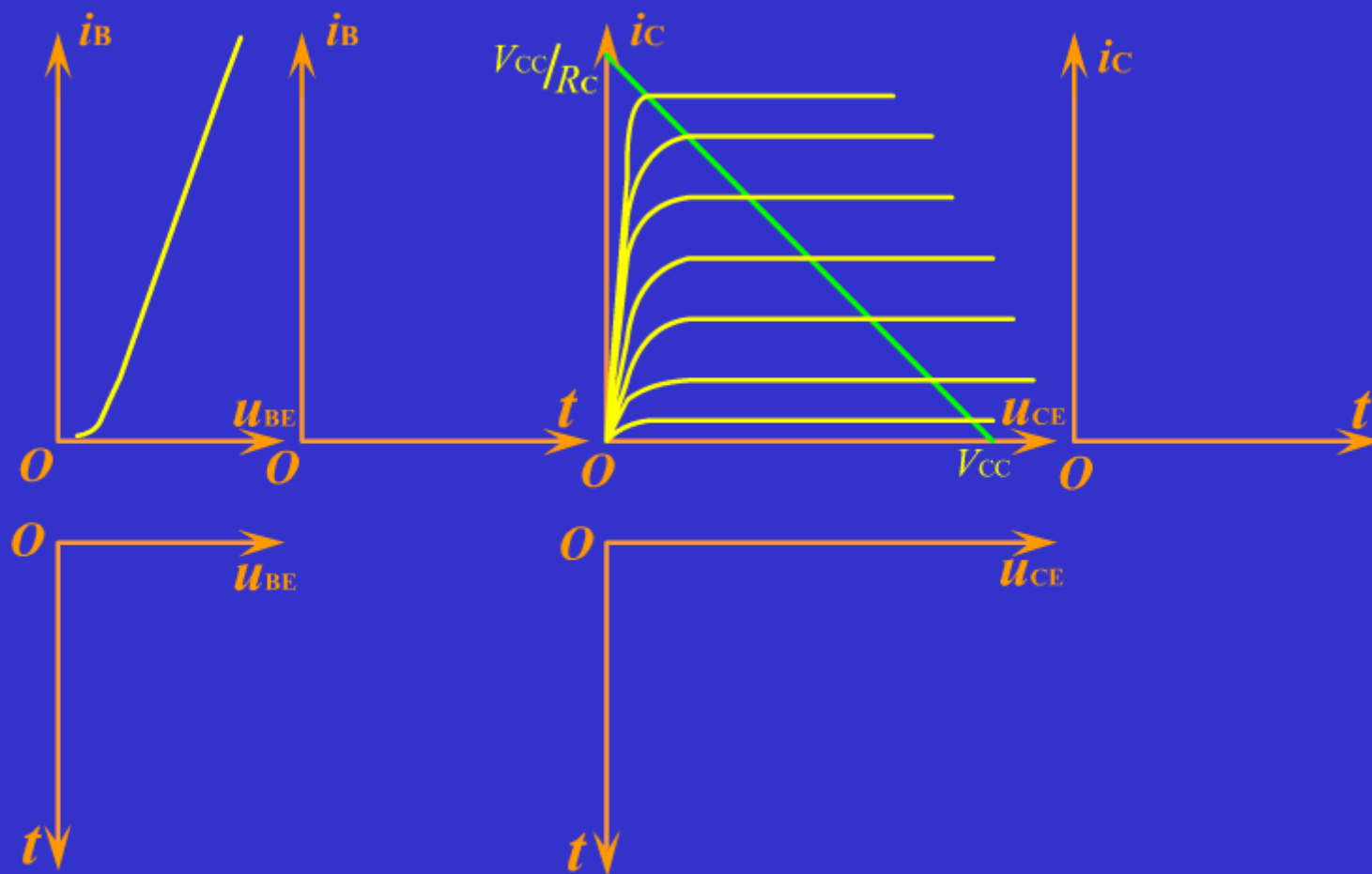
b. 如果 $U_{CEQ} < I_{CQ}R_C$



C. 如果 $U_{CEQ} > I_{CQ}R_C$



基本共射极放大电路的波形分析动画演示

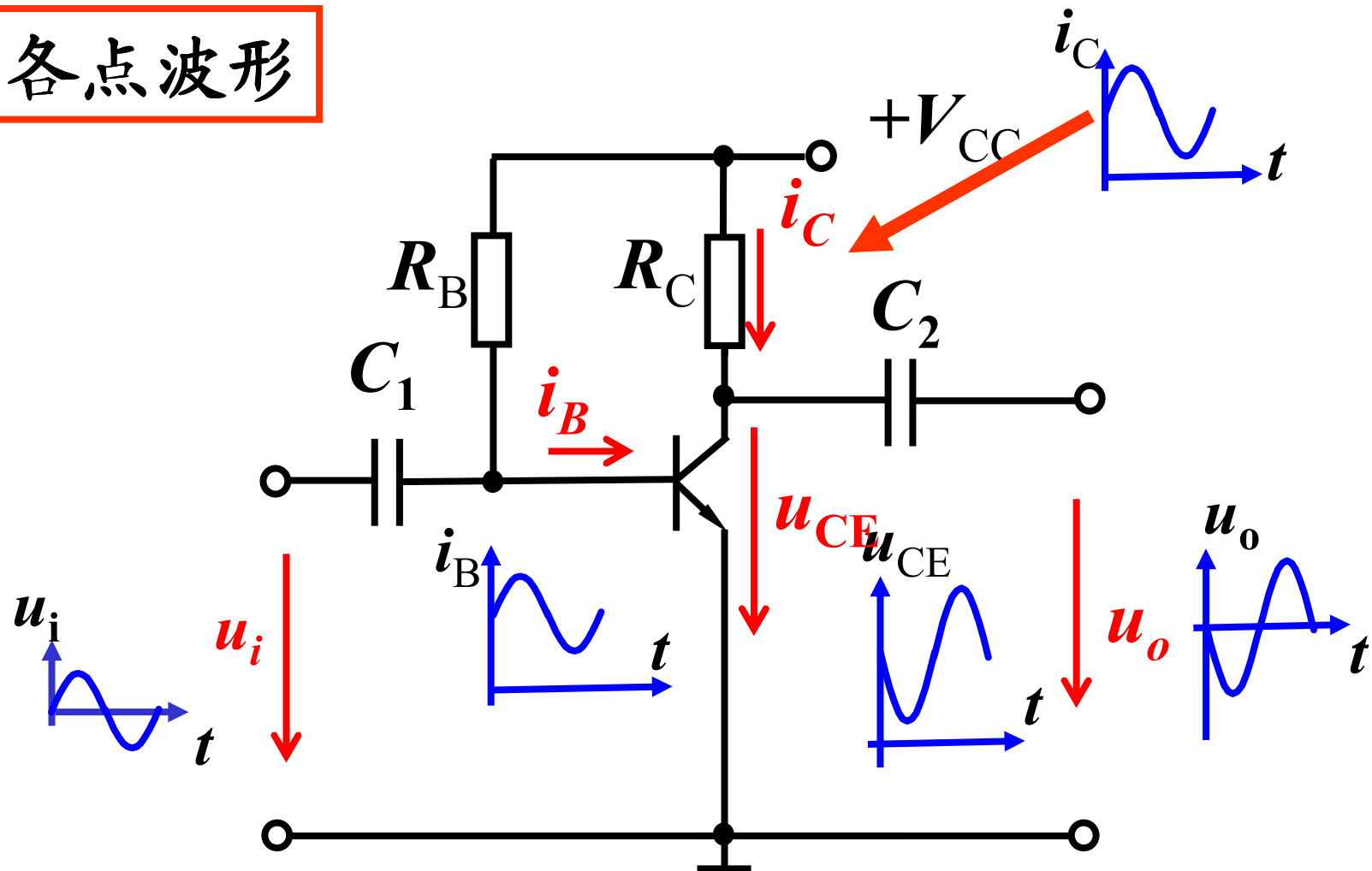


上页

下页

后退

各点波形



结论:

(1) 共射极放大电路有电压放大能力。

(2) u_o 与 u_i 的相位相反。

(3) u_i 的幅度过大或静态工作点不合适，将产生非线性失真（饱和失真、截止失真）。

(4) 放大电路信号

$$u_{BE} = U_{BE} + u_i$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

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

(5) 动态范围(忽略 I_{CEO} 和 U_{CES})

(a) Q_0 点在负载线中点

$$U_{CEQ} = I_{CQ} R_C = V_{CC} / 2$$

$$U_{OPP} = 2 \times U_{CEQ} = 2 I_{CQ} R_C = V_{CC}$$

(b) Q_0 点在负载线中点下方

$$U_{CEQ} > I_{CQ} R_C$$

$$U_{opp} = 2 I_{CQ} R_C$$

(c) Q_0 点在负载线中点上方

$$U_{CEQ} < I_{CQ} R_C \quad U_{opp} = 2 U_{CEQ}$$

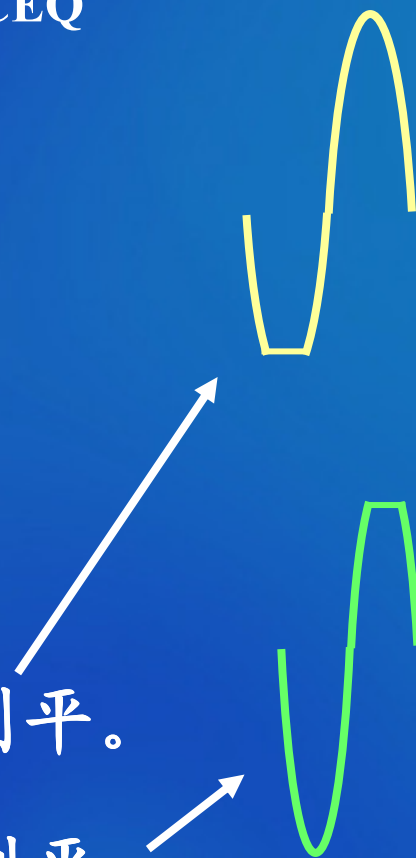
(d) U_{opp} 的一般表示式

$$U_{opp} = 2 \times \min[U_{CEQ}, I_{CQ} R_C]$$

(6) 非线性失真的特点:

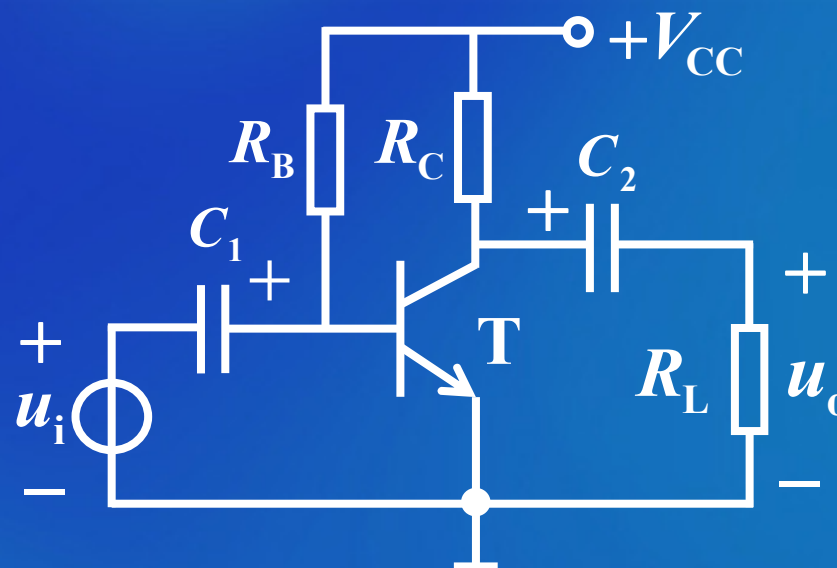
饱和失真: 输出电压波形的下半部被削平。

截止失真: 输出电压波形的上半部被削平。



2. 当 $R_L \neq \infty$ 时

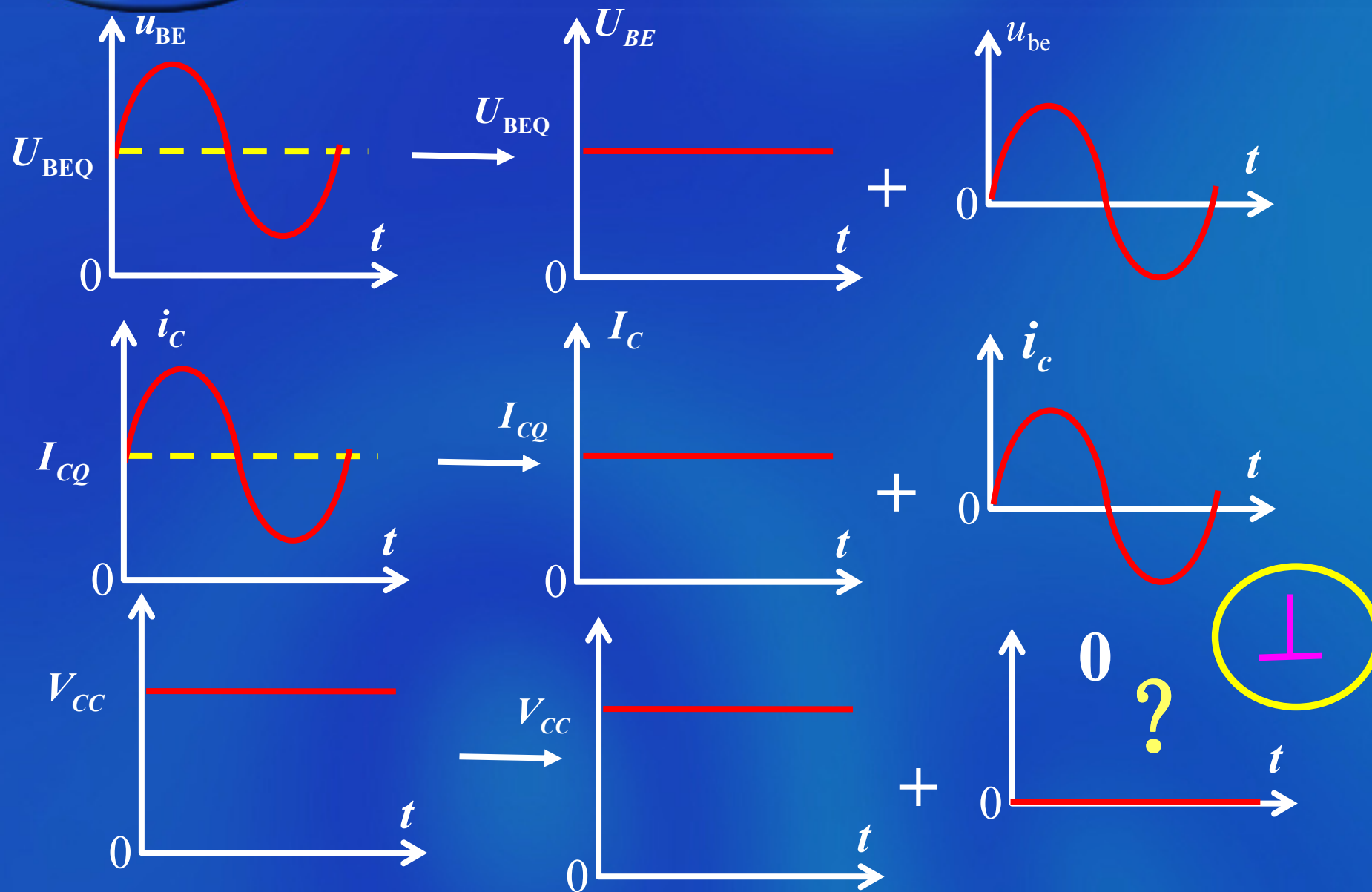
(1) 放大电路的交流通路



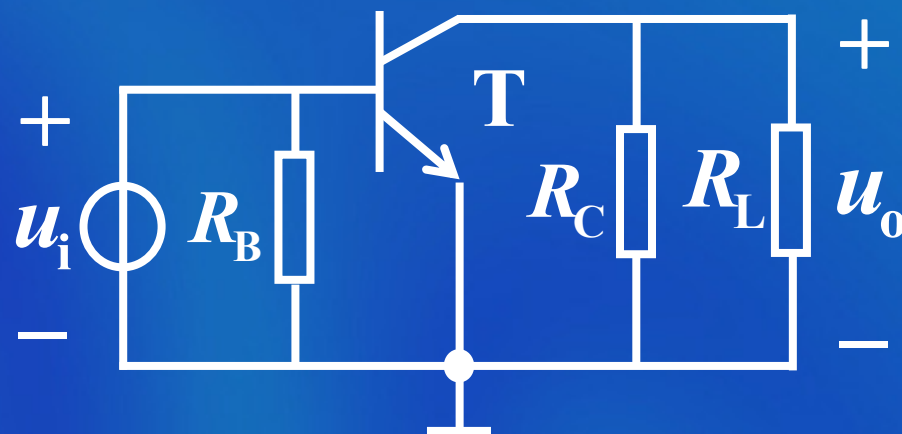
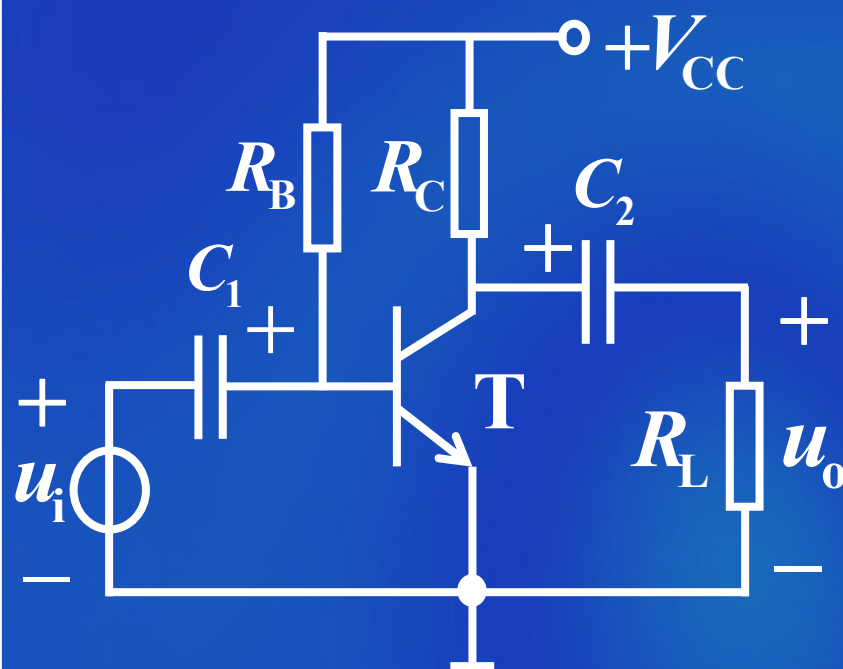
交流通路
画法:

耦合电容短路

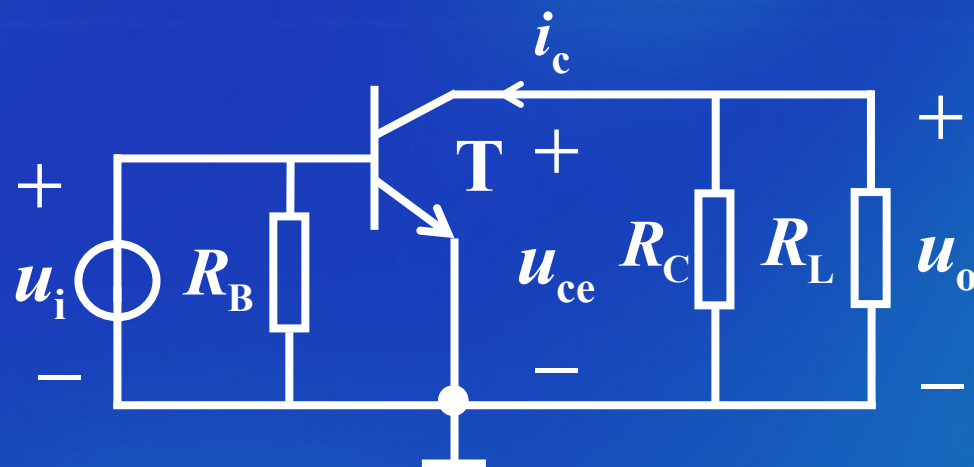
V_{CC} 如何处理?



交流通路
画法： { 耦合电容短路
直流电压源短路(接地)



交流通路



由放大电路的交流通路可知

$$\begin{aligned} u_o = u_{ce} &= -i_c R_L // R_C \\ &= -i_c R'_L \end{aligned}$$

式中

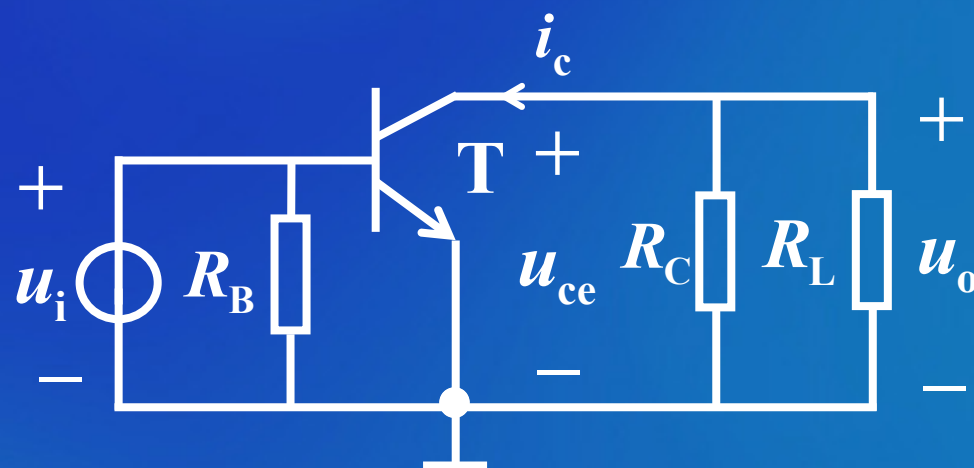
$$R'_L = R_C // R_L$$

(2) 交流负载线

由于 $u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$

故 $u_{ce} = -i_c R'_L$

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

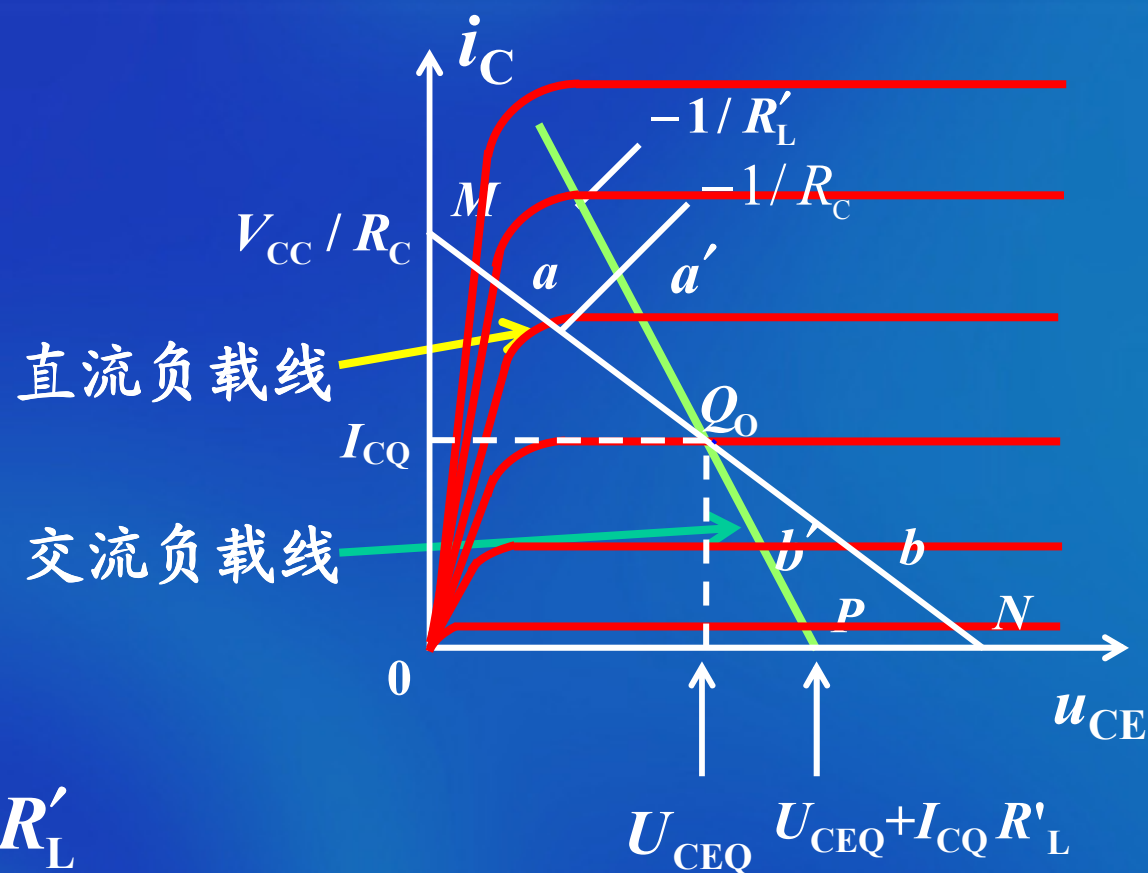


$$u_{CE} = U_{CEQ} - (i_C - I_{CQ})R'_L$$

$$= U_{CEQ} + I_{CQ}R'_L - i_C R'_L$$

$$= V'_{CC} - i_C R'_L$$

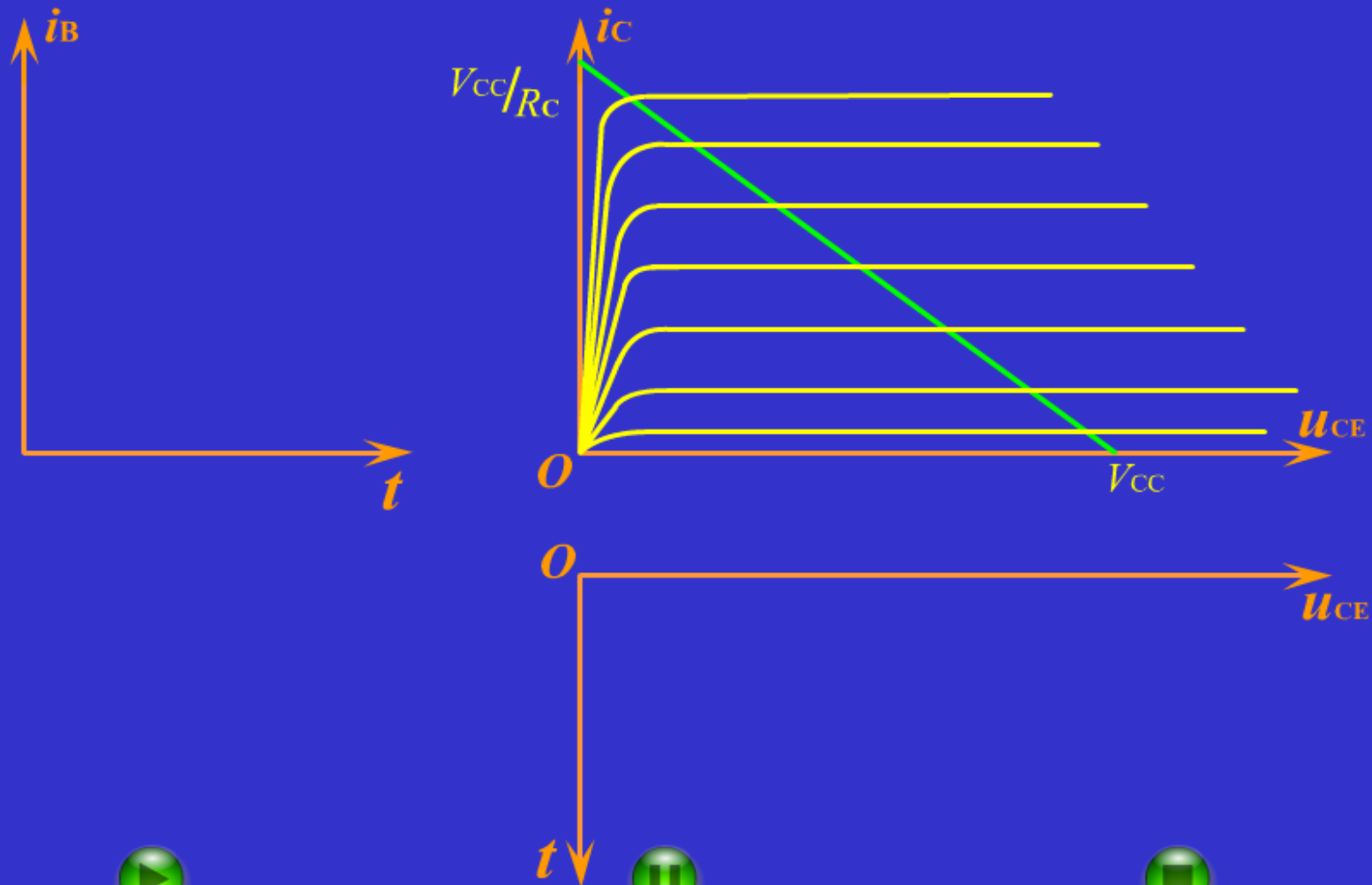
式中 $V'_{CC} = U_{CEQ} + I_{CQ}R'_L$



$$\text{式 } u_{CE} = V'_{CC} - i_C R'_L$$

在 u_{CE} 和 i_C 的坐标中，也表示一条直线
该直线称为放大电路的**交流负载线**。

交流负载线及放大电路波形分析



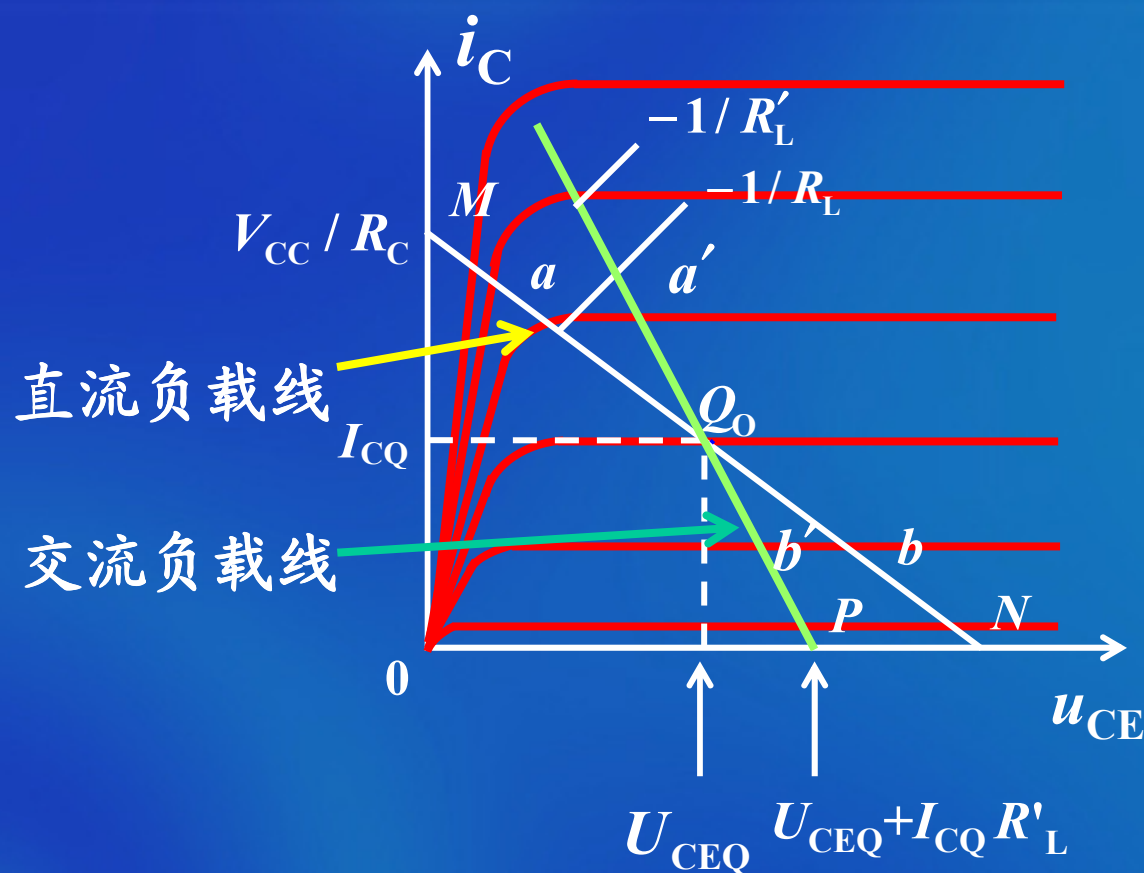
交流负载线的特点:

a. 斜率为 $-1/R'_L$

b. 经过静态工作点 Q

c. 与横轴的交点为 $U_{CEQ} + I_{CQ} R'_L$

d. 电路的工作点沿交流负载线移动。



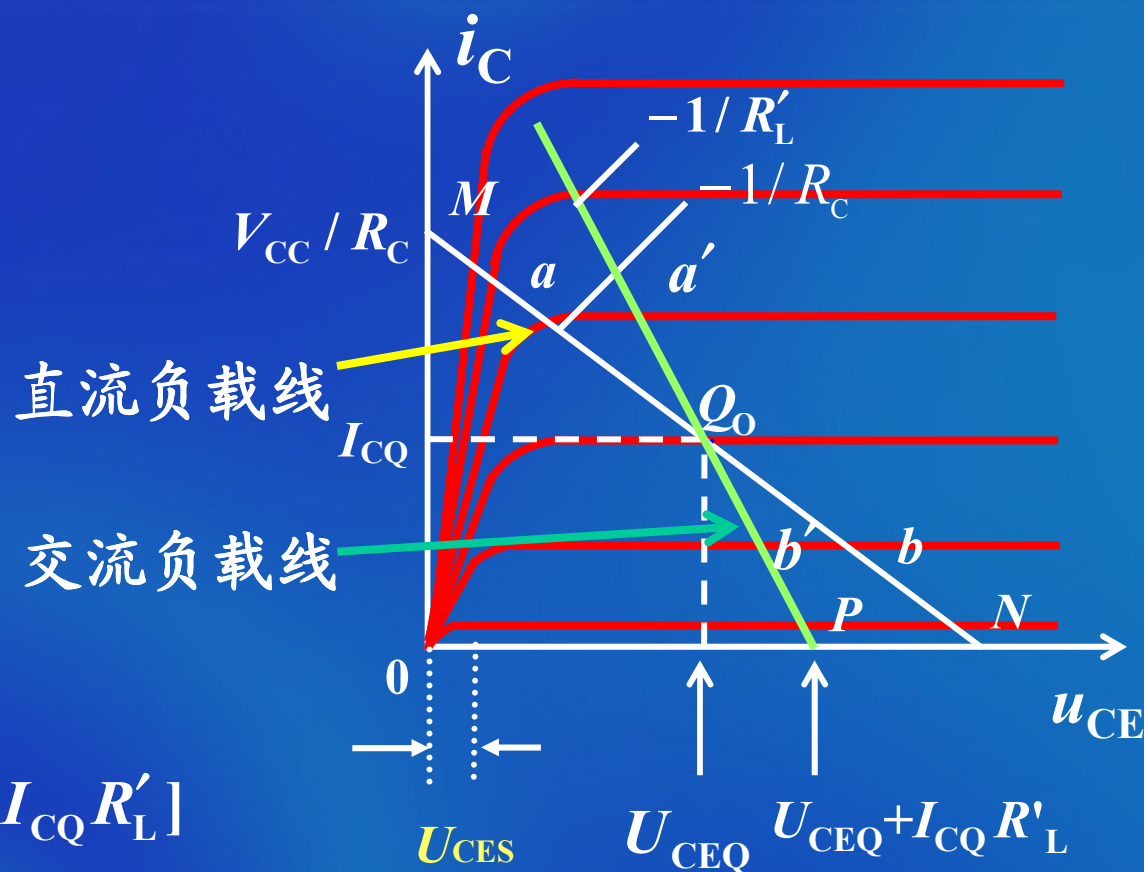
e. 动态范围

(a) 比电路空载时小。

(b) $U_{OPP} = 2 \times \min[U_{CEQ}, I_{CQ} R'_L]$

(c) 当考虑 U_{CES} 时

$$U_{OPP} = 2 \times \min(U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ} R'_L)$$



图解法的特点:

- (1) 便于观察。
- (2) 作图烦琐, U_i 很小时难以作图。
- (3) 放大电路一些性能指标无法由图解法求得。

2.4.2 微变等效电路法在放大电路动态分析中的应用

1. 晶体管的H参数微变等效电路

(1) 晶体管线性化的条件:

电路工作在小信号状态。

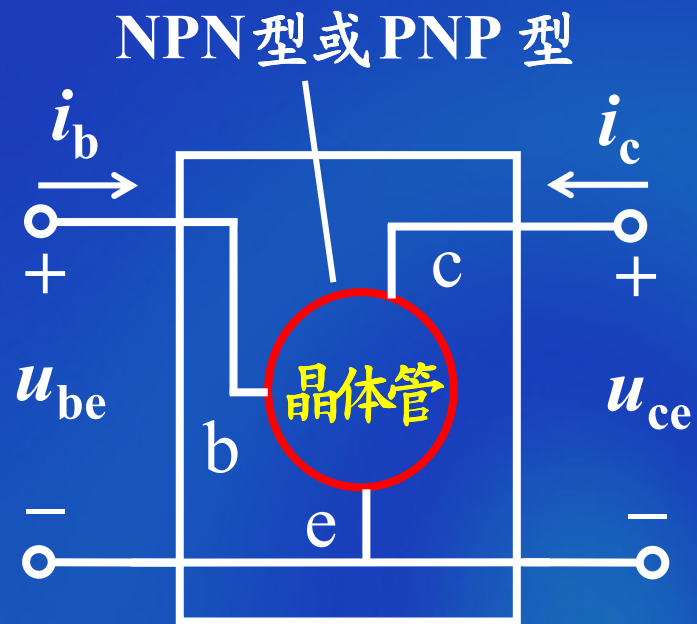
(2) 晶体管可线性化的主要依据:

a. Δi_B 与 Δu_{BE} 之间具有线性关系

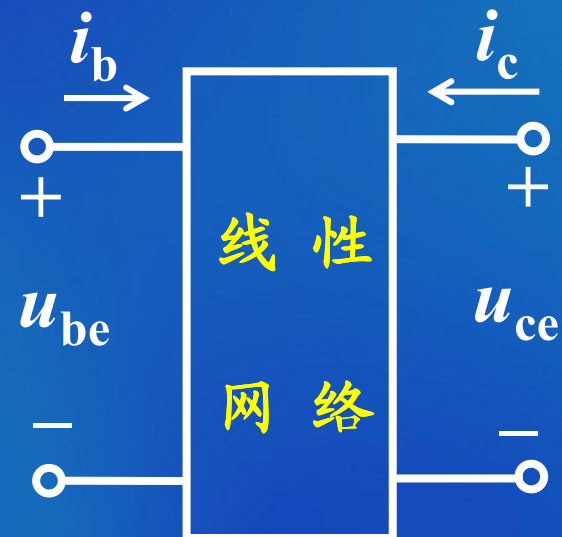
b. β 值恒定

晶体管共射极接法线性化原理

晶体管



等效图



晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$

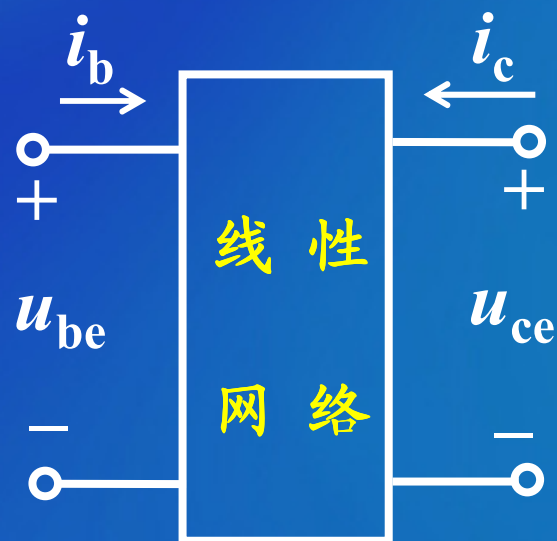
式中

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{\Delta U_{CE}=0}$$

$$h_{re} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{\Delta u_{CE}=0}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$

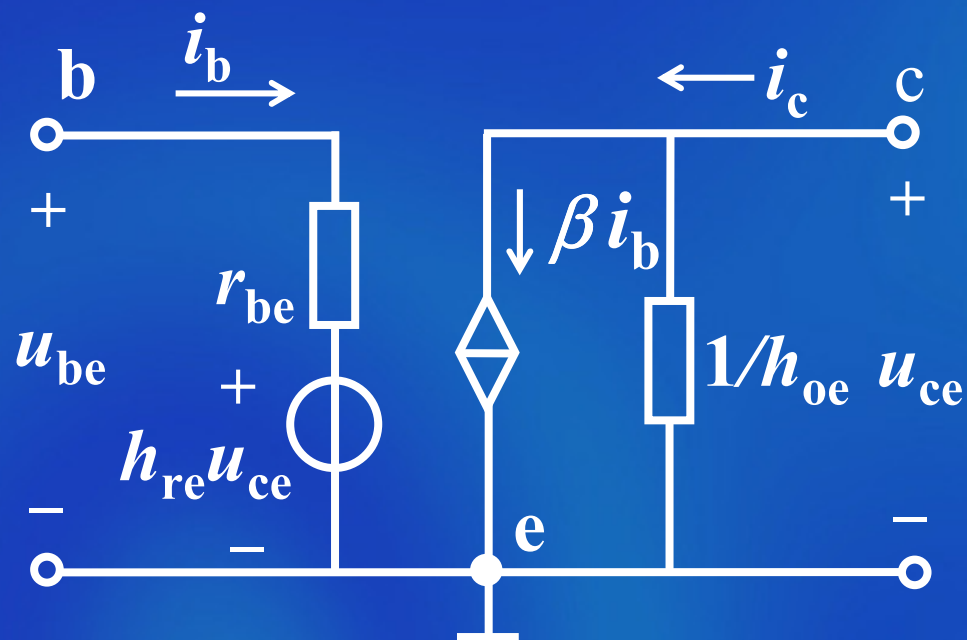


上页

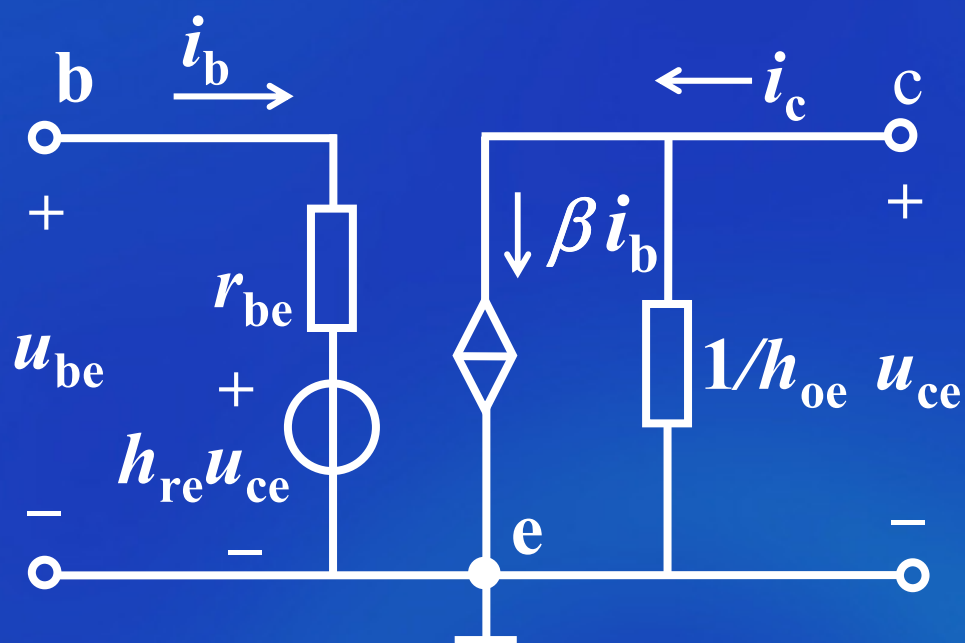
下页

后退

由 $\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$ 可画出等效电路



晶体管的微变等效电路



图中

$$r_{be} = h_{ie} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|}$$

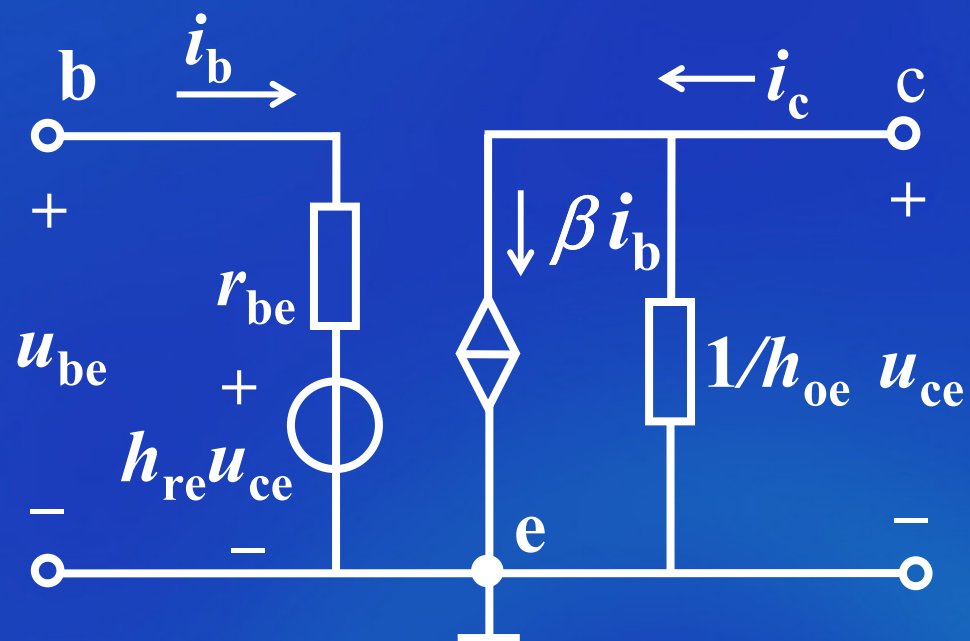
称为晶体管的输入电阻

式中 $r_{bb'} = 300\Omega$

称为晶体管的基区体电阻

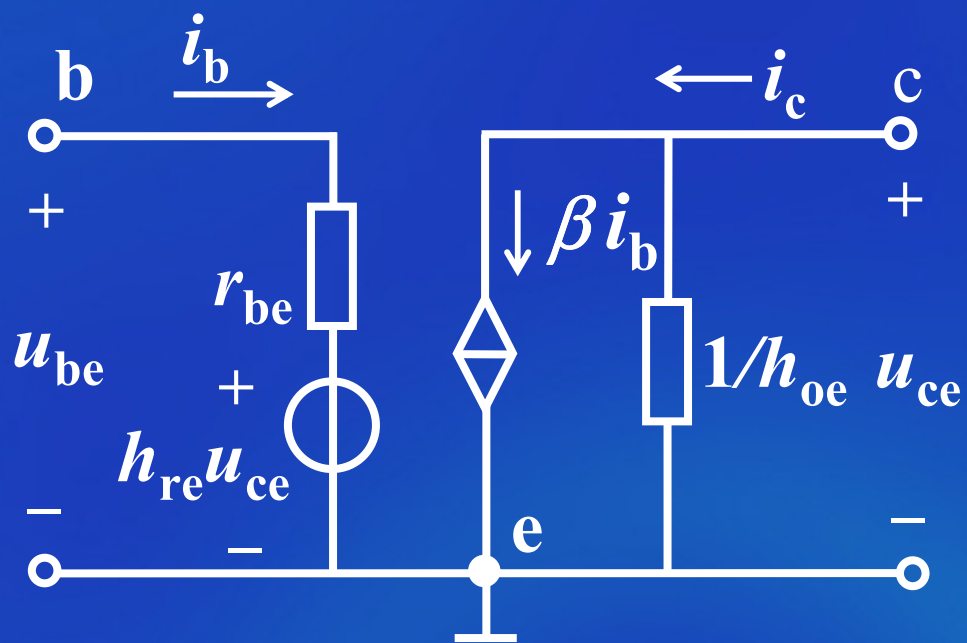
h_{re} —反向传输电压比

$\beta = h_{fe}$ 电流放大系数

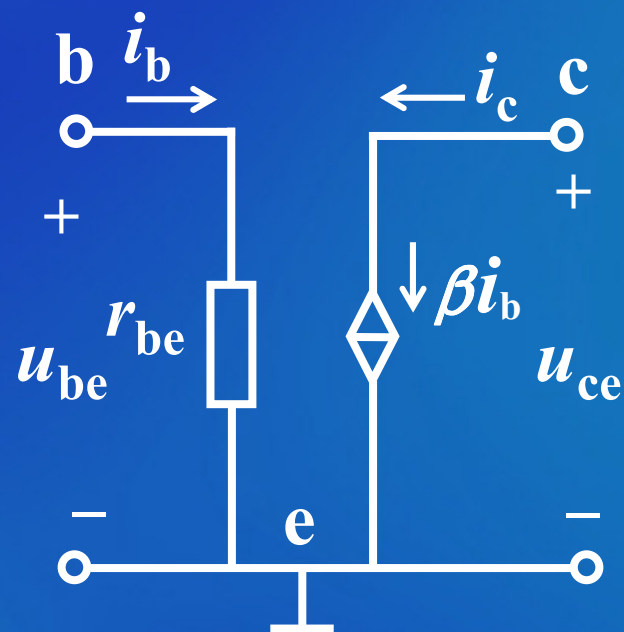


$$h_{oe} = \frac{1}{r_{ce}} = \frac{|I_{CQ}|}{U_A}$$

称为晶体管共射极输出电导

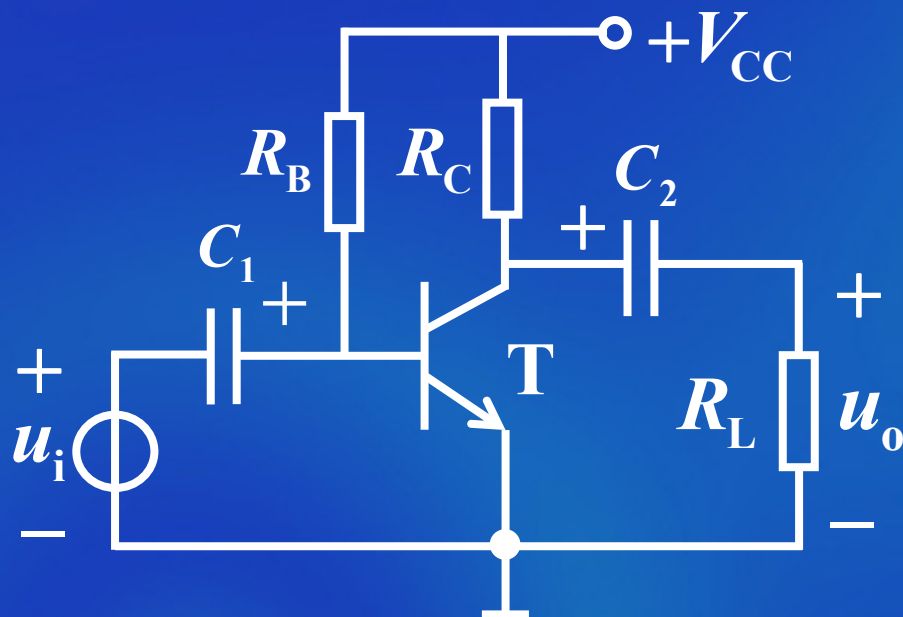


h_{re} 、 h_{oe} 一般比较小，可忽略不计

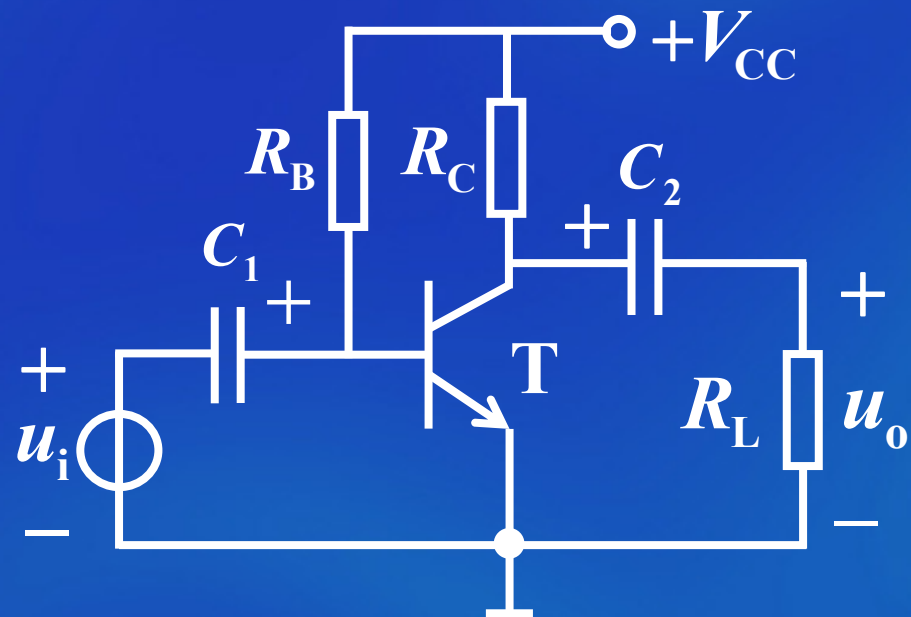


晶体管微变等效简化电路

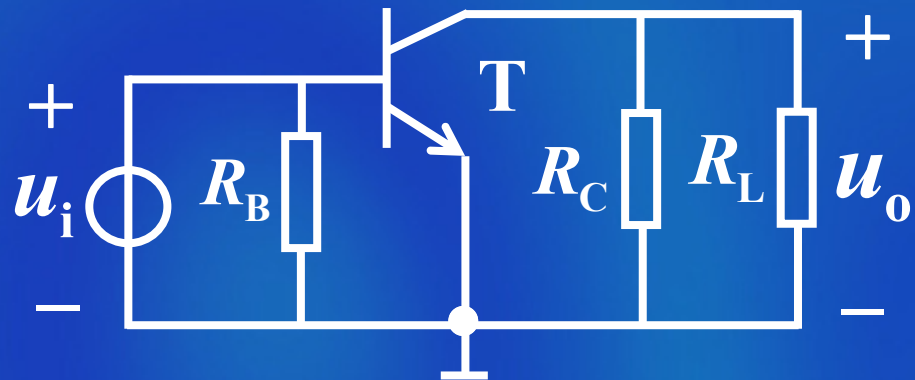
2. 微变等效电路法在放大电路动态分析中的应用

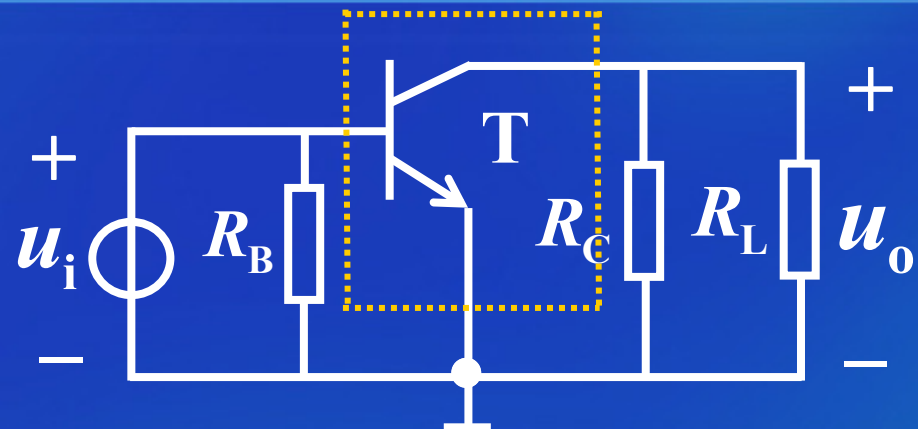


(1) 画出放大电路的交流通路



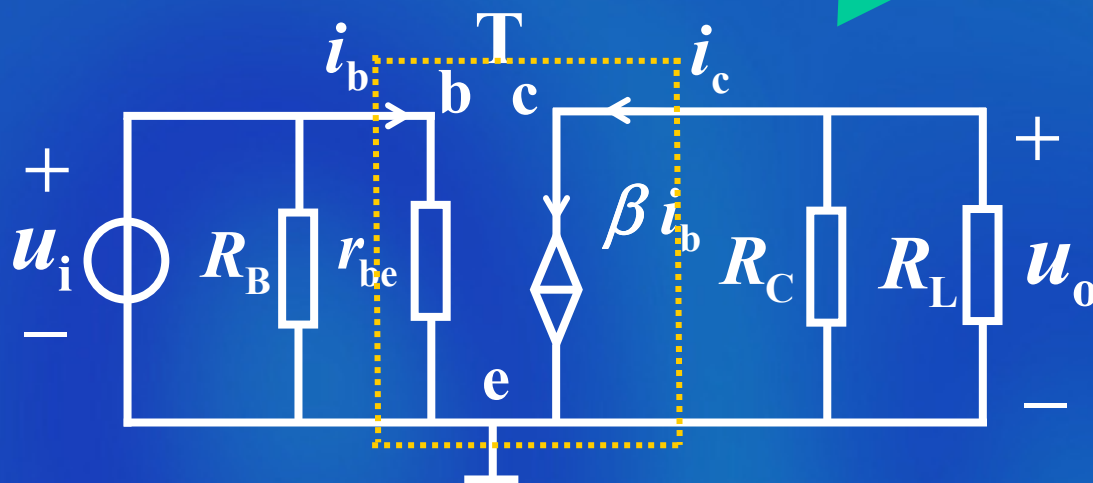
交流通路





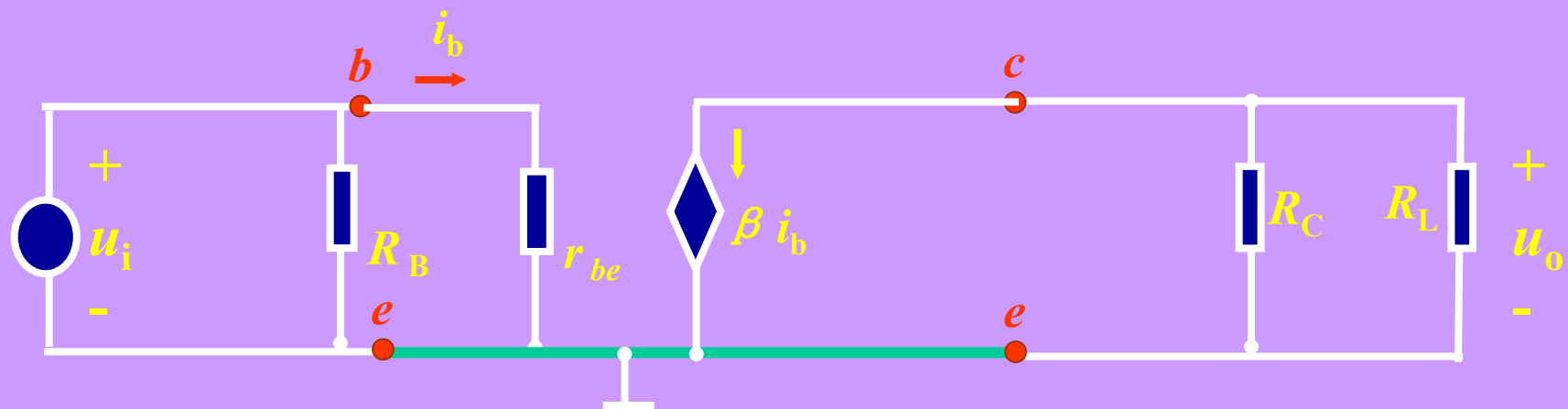
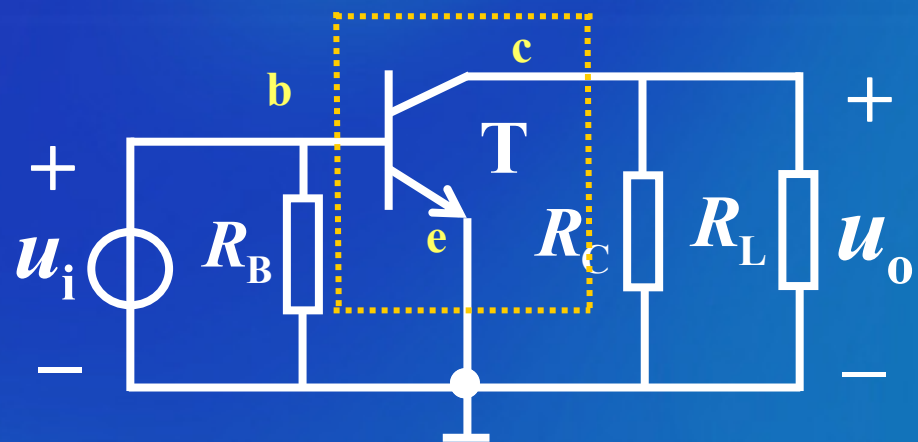
(2) 将晶体管微变等效

放大电路的微变等效电路



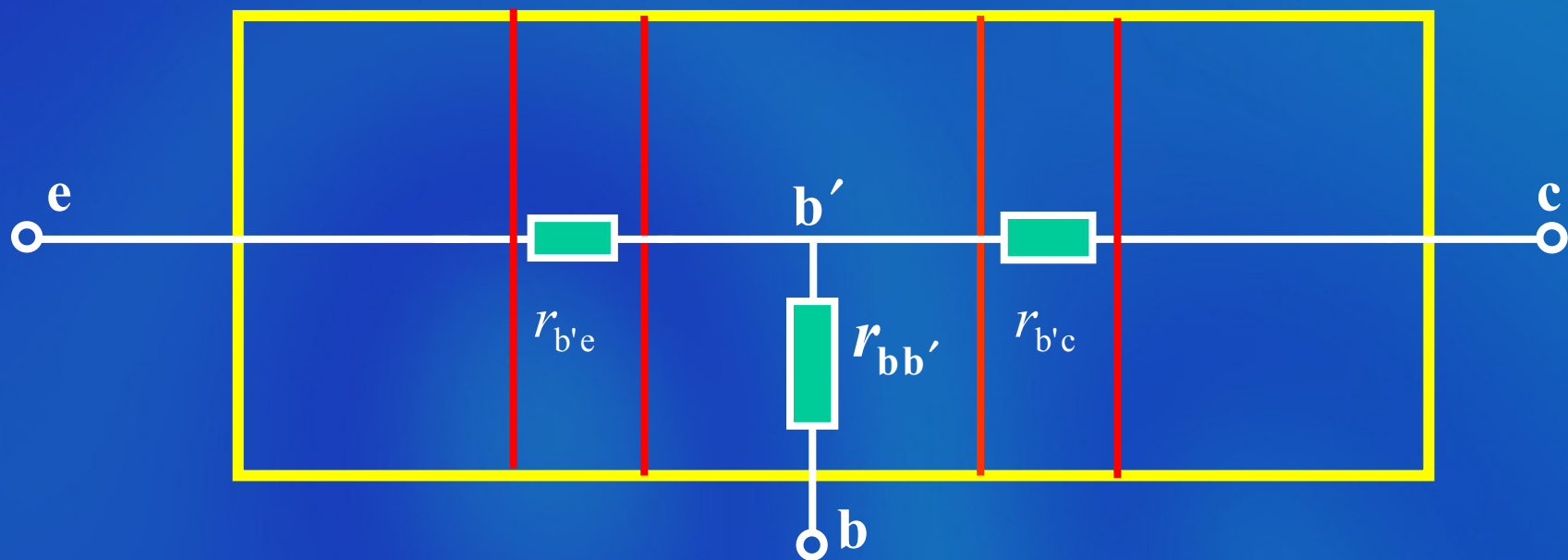
微变等效电路画法:

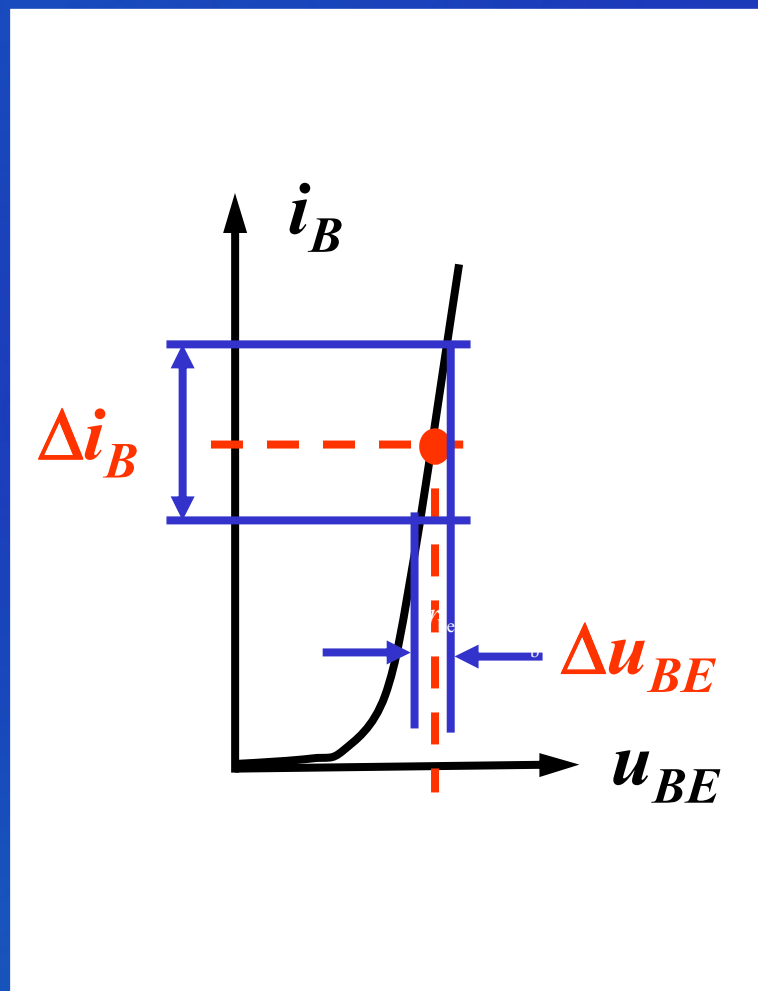
先中间, 后两边



$$u_{be} = i_b r_{bb'} + (1 + \beta) i_b r_{b'e} \qquad r_D = \frac{U_T}{I_D}$$

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_b} = r_{bb'} + (1 + \beta) r_{b'e} \qquad r_{b'e} = \frac{U_T}{I_{EQ}}$$





当信号很小时，将输入特性在小范围内近似线性。

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta i_b}$$

对输入的小交流信号而言，三极管相当于电阻 r_{be} 。

$$\begin{aligned} r_{be} &= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|} \\ &= 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{|I_{EQ}|(\text{mA})} \end{aligned}$$

r_{be} 的量级从几百欧到 $1 \sim 2\text{k}\Omega$ 。

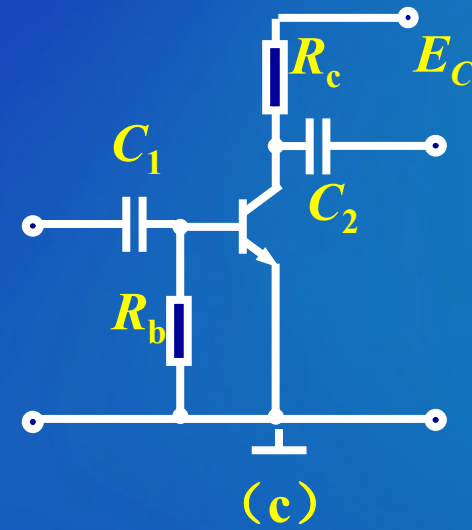
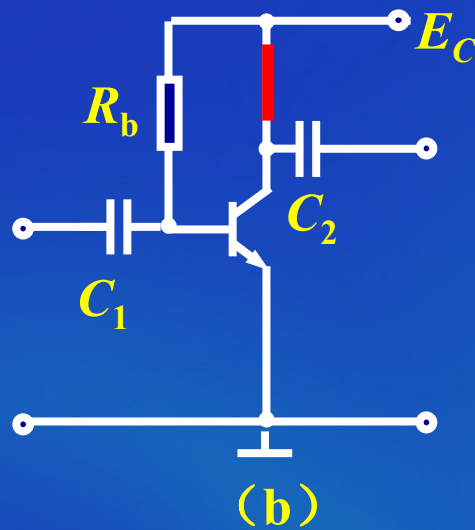
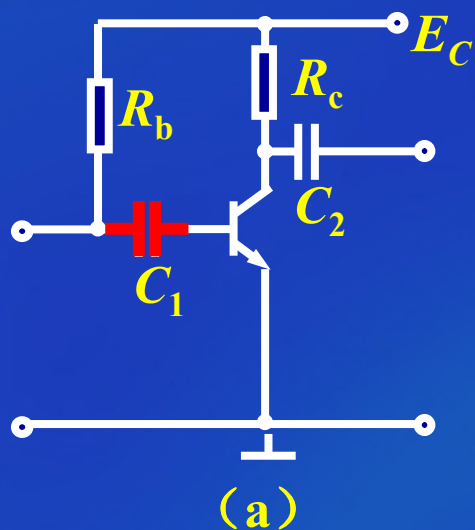


上页

下页

后退

例：判断下图所示电路是否具有电压放大作用

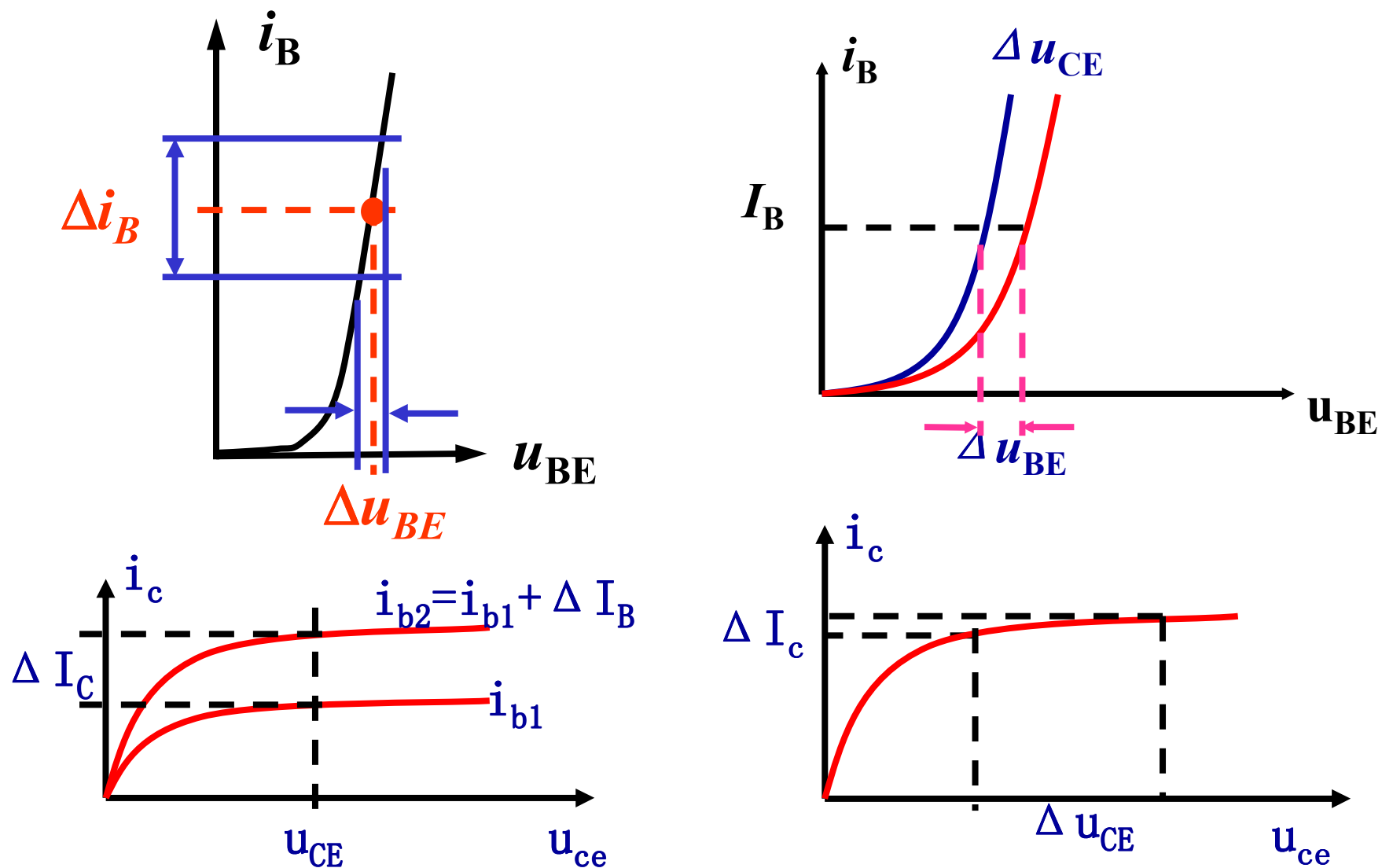


图(a)由于 C_1 隔直流的作用，无输入直流通路。

图(b)由于没有 R_c ，只有信号电流，无信号电压输出，或者说输出信号电压无法取出。

图(c)发射结没有正向偏置电压。

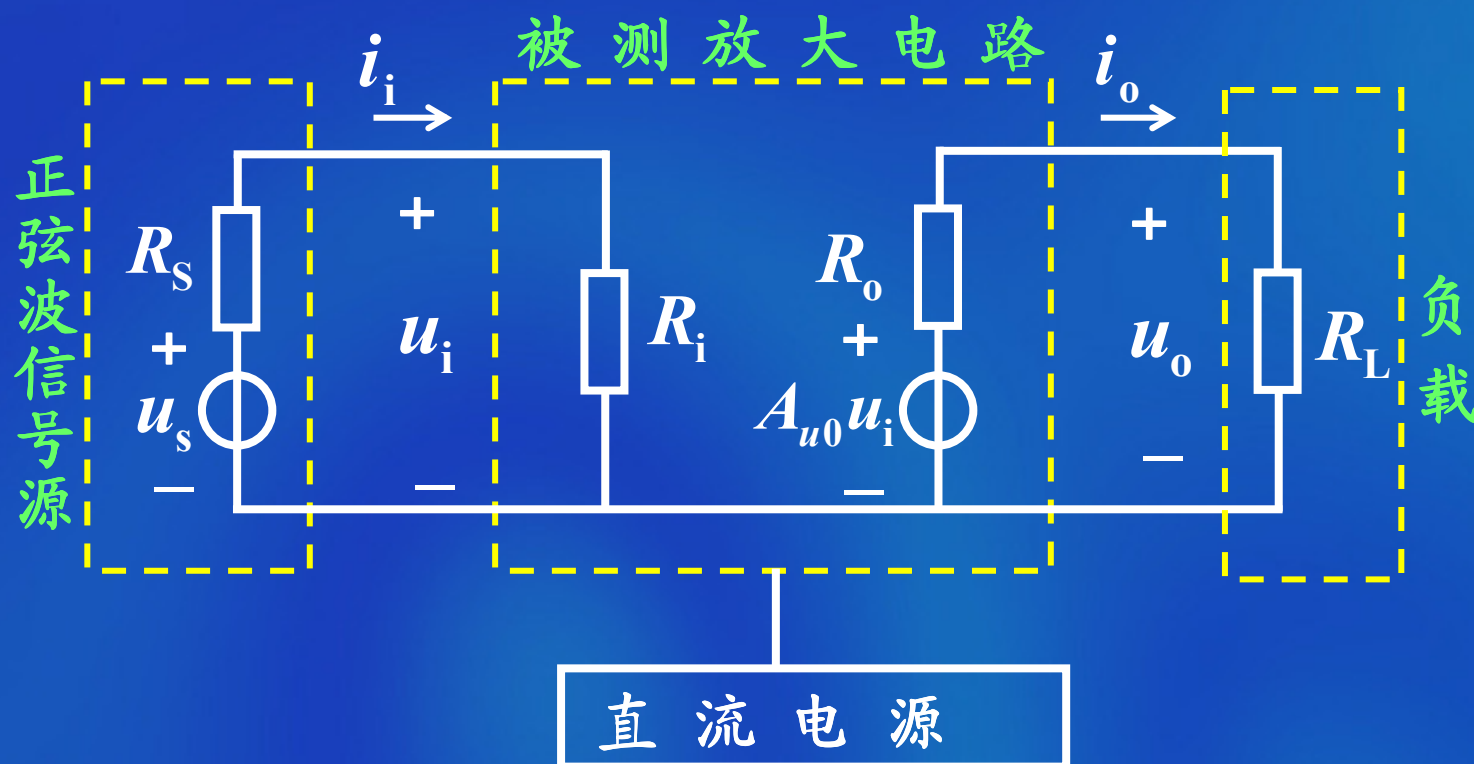




2. 放大电路的主要性能指标



放大器性能指标测量原理方框图



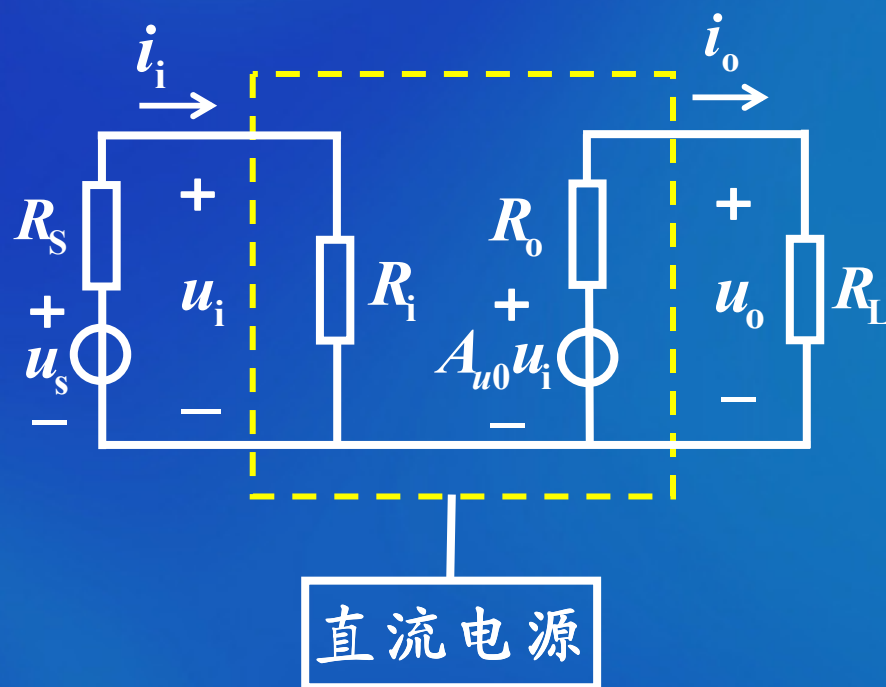
(1) 放大倍数 \dot{A}

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

互阻放大倍数 \dot{A}_r $\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$

互导放大倍数 \dot{A}_g $\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$



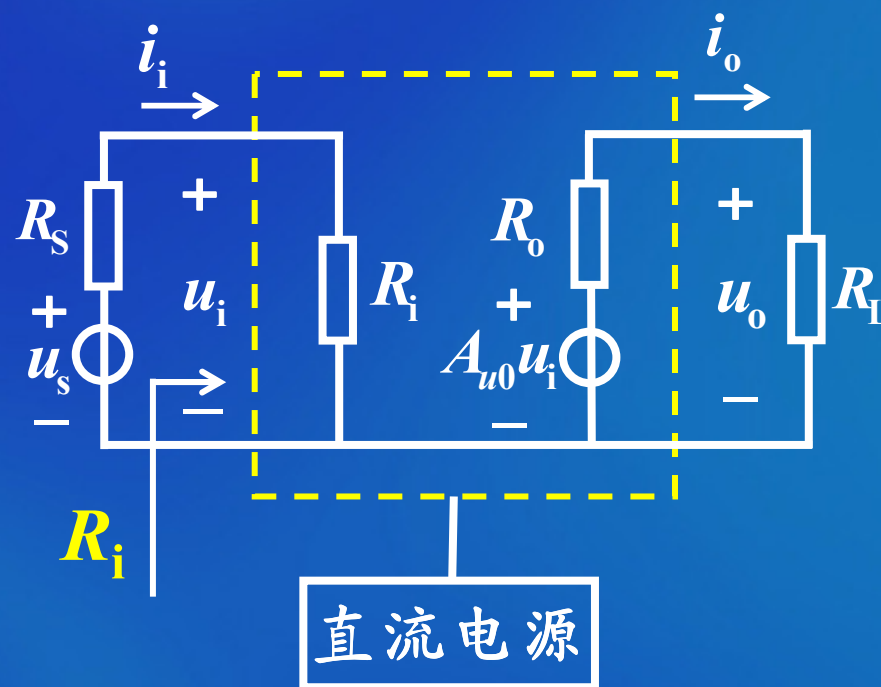
(2) 输入电阻 R_i

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

a. 由于 $U_i = \frac{R_i}{R_S + R_i} U_S$

R_i 越大, U_i 也就越大, 电路的放大能力越强。

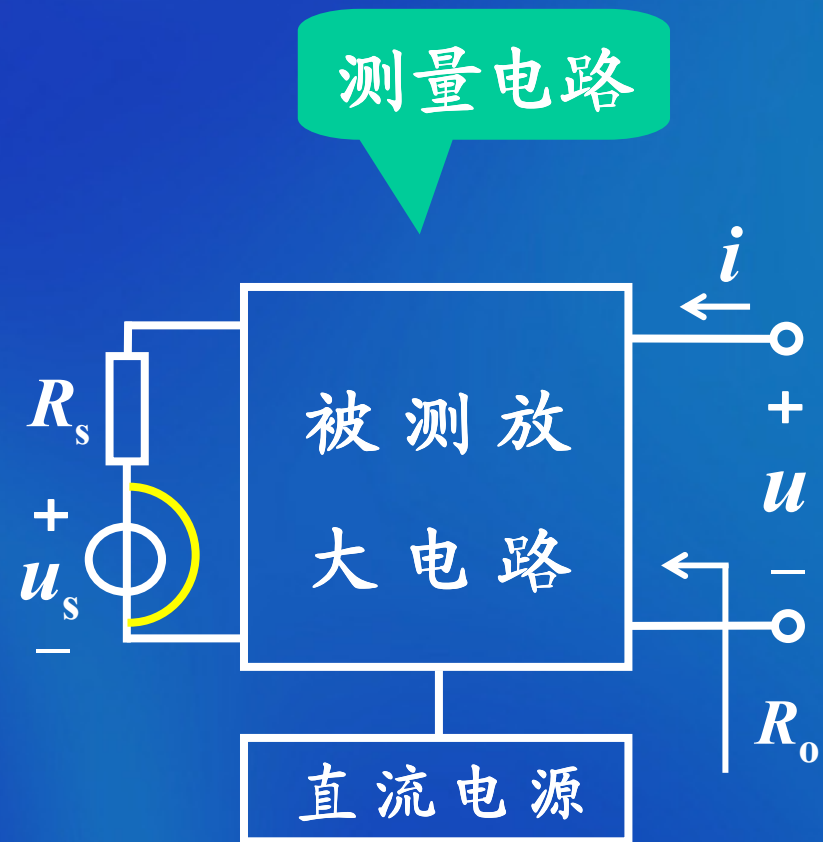
b. R_i 越大, 输入电流 i_i 越小, 信号源的负载越小。



(3) 输出电阻 R_o

定义:

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_s=0 \\ R_L=\infty}}$$

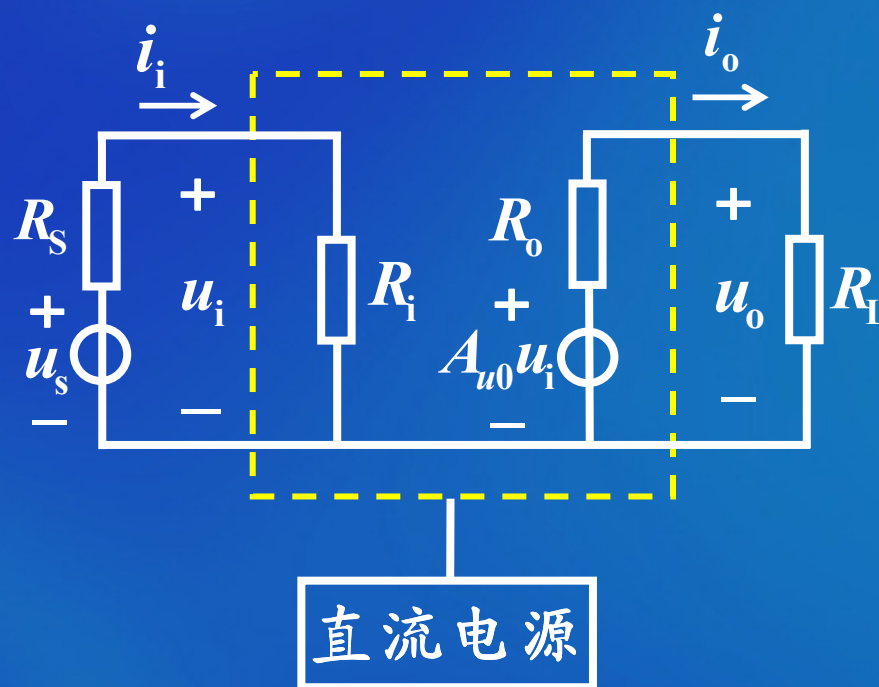


对输出电压的电路

由于

$$u_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{u0} u_i$$

$$R_o \rightarrow 0 \quad u_o \rightarrow A_{u0} u_i$$



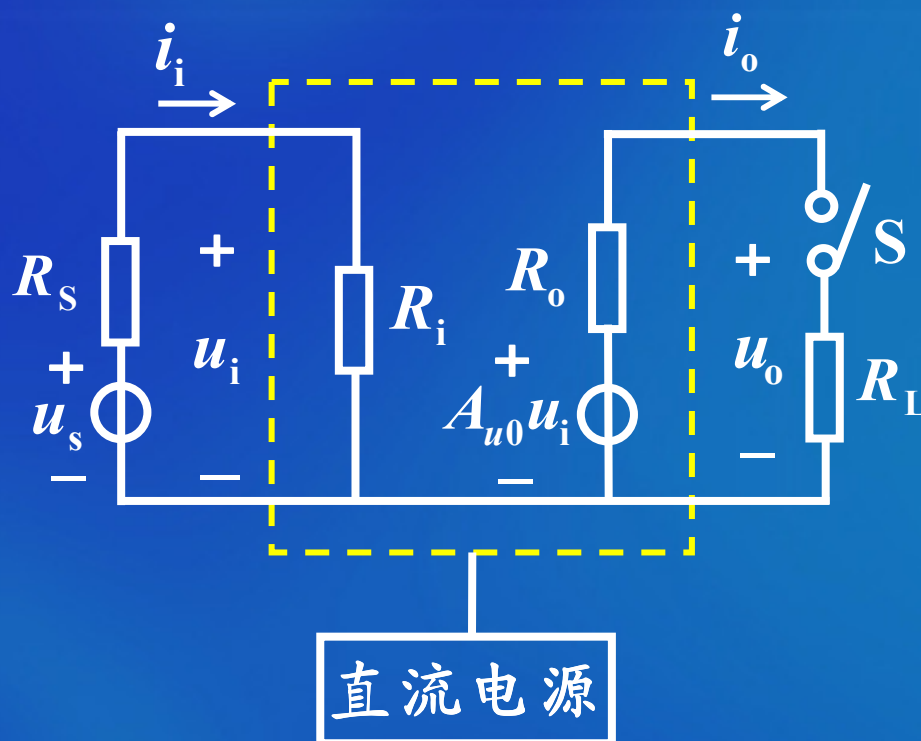
即 R_o 越小，输出电压越稳定，电路带载能力越强。

测量 R_o 的一种方法

$$R_o = \left(\frac{U_{o\infty}}{U_{oL}} - 1 \right) R_L$$

U_{oL} —— 带负载时的输出电压

$U_{o\infty}$ —— 负载开路时的输出电压



(4) 全谐波失真度 D

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

即谐波电压总有效值与基波电压有效值之比

(5) 动态范围 $U_{o\text{ p-p}}$

使输出电压 u_o 的非线性失真度达到某一规定数值时的 u_o 的峰—峰值。

也称为最大不失真输出电压。

(6) 频带宽度 f_{bw}

由 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = |\dot{A}_u| \angle \varphi$ 得

幅频特性

$$|\dot{A}_u| = |\dot{A}_u(f)|$$

相频特性

$$\varphi = \varphi(f)$$

相频特性曲线

幅频特性曲线

