

第6章 晶体三极管及其放大电路



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

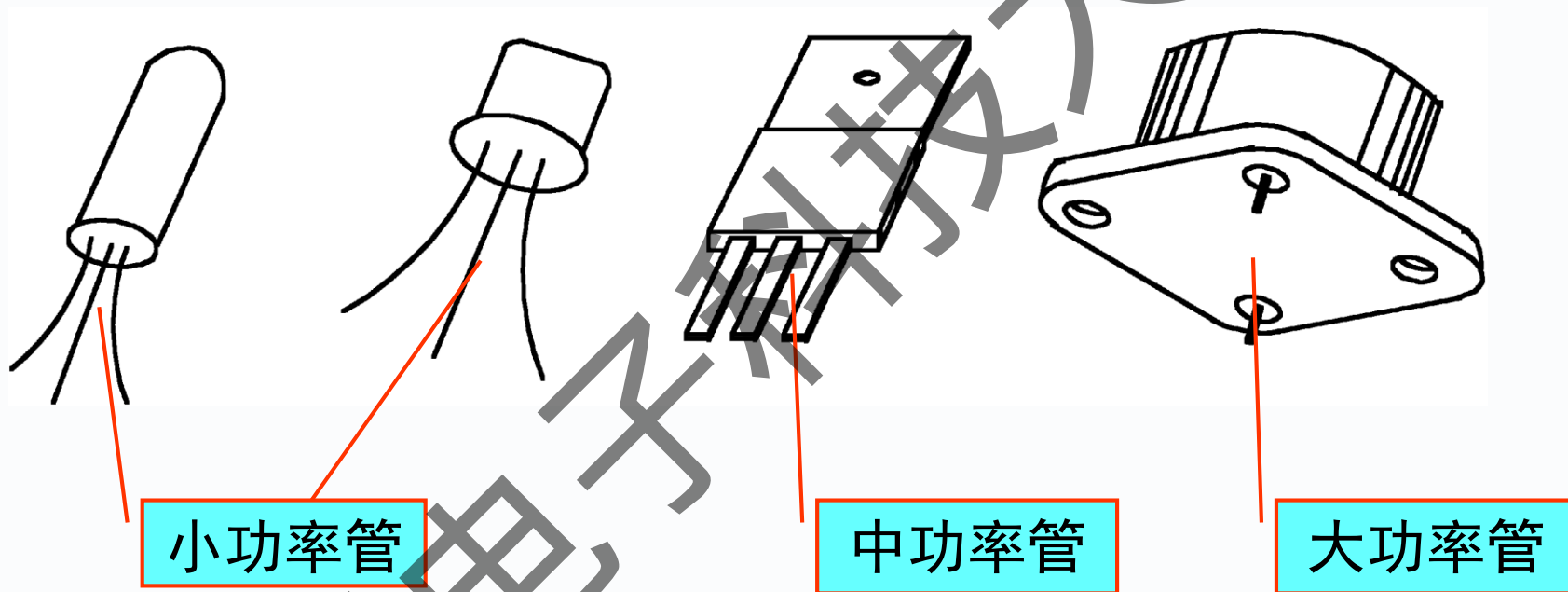
第6章 晶体三极管及其放大电路

- 6.1 晶体三极管
- 6.2 放大电路的组成和工作原理
- 6.3 放大电路的分析
- 6.4 放大电路的三种接法
- 6.5 电流源电路
- 6.6 功率放大电路



6.1 晶体三极管

1. 晶体管的结构



几种常见晶体管的外形

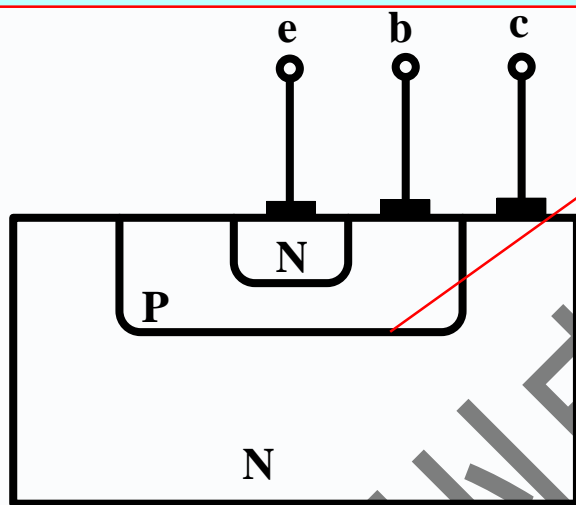
6.1 晶体三极管

晶体管有三个极、三个区、两个PN结。

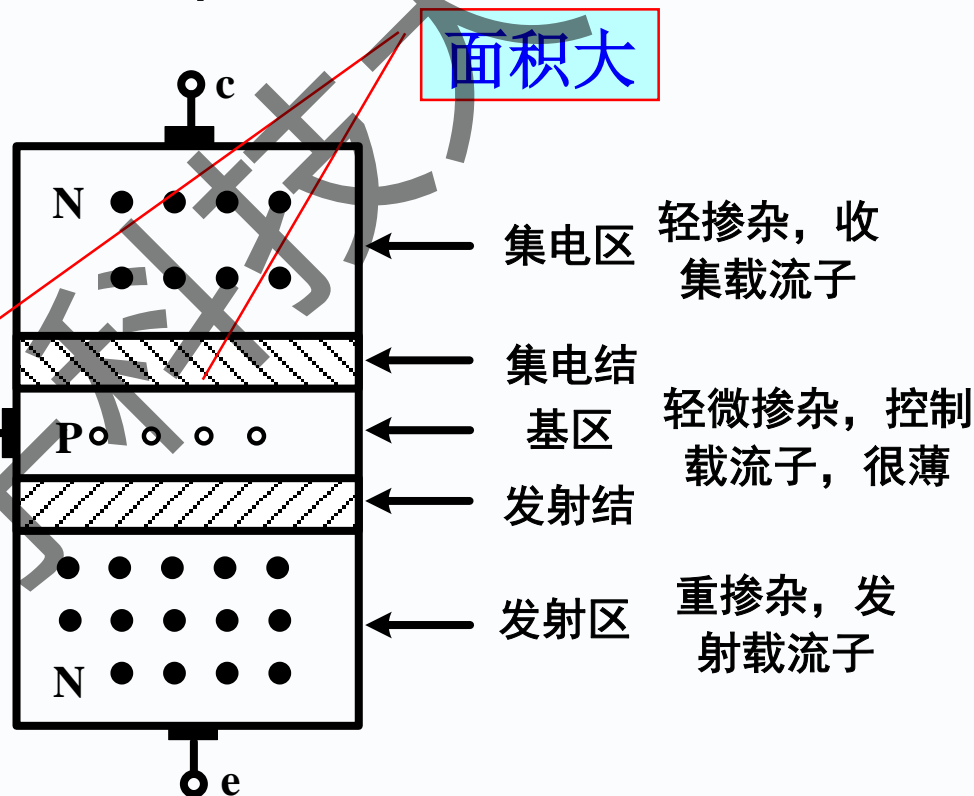
发射区：发射载流子

集电区：收集载流子

基区：传送和控制载流子

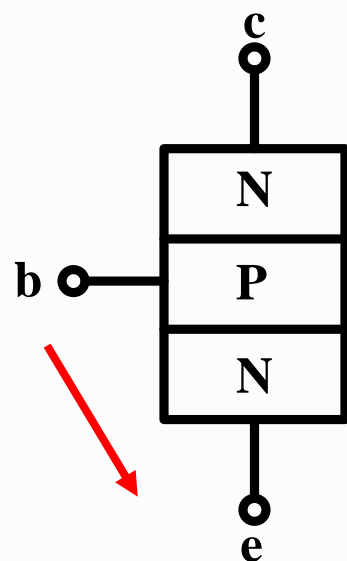


(a) NPN型晶体管的结构剖面图

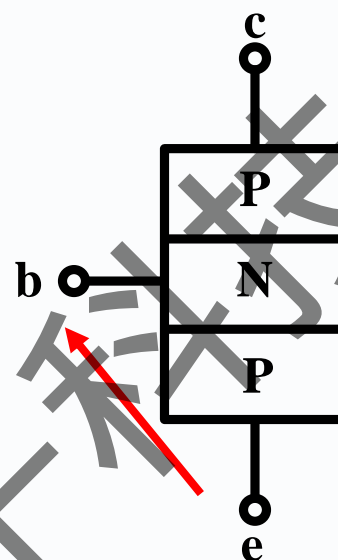
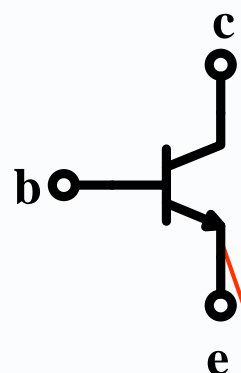


(b) NPN型晶体管的结构示意图

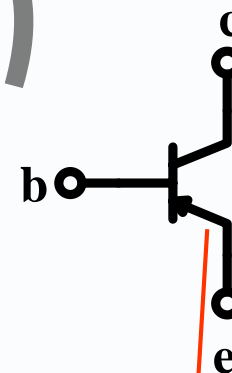
2. 晶体管的类型与符号



(a) NPN型晶体管



(b) PNP型晶体管



箭头表示发射结加正向偏压时，发射极电流的实际方向

6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

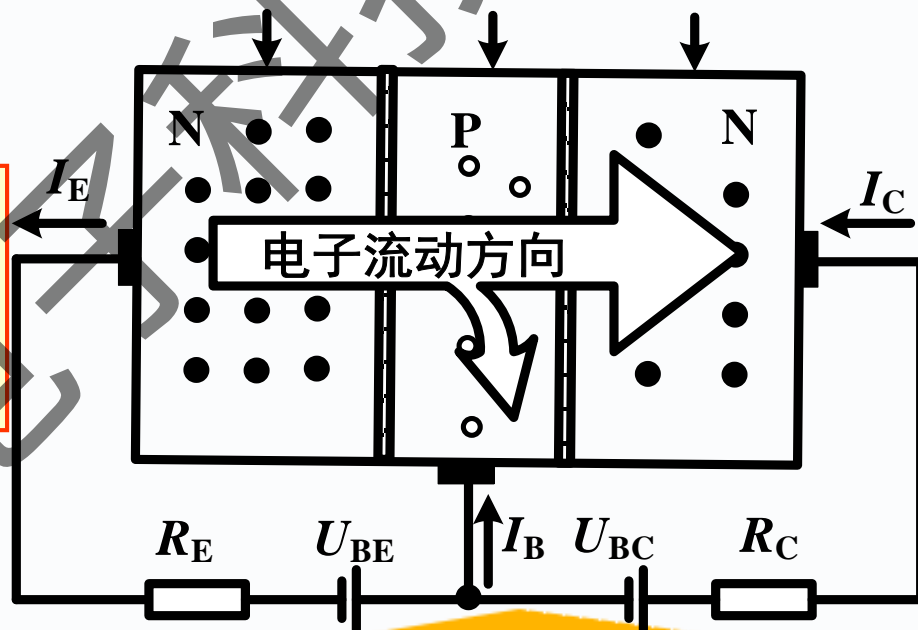
放大的条件 $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$

外部条件

内部条件

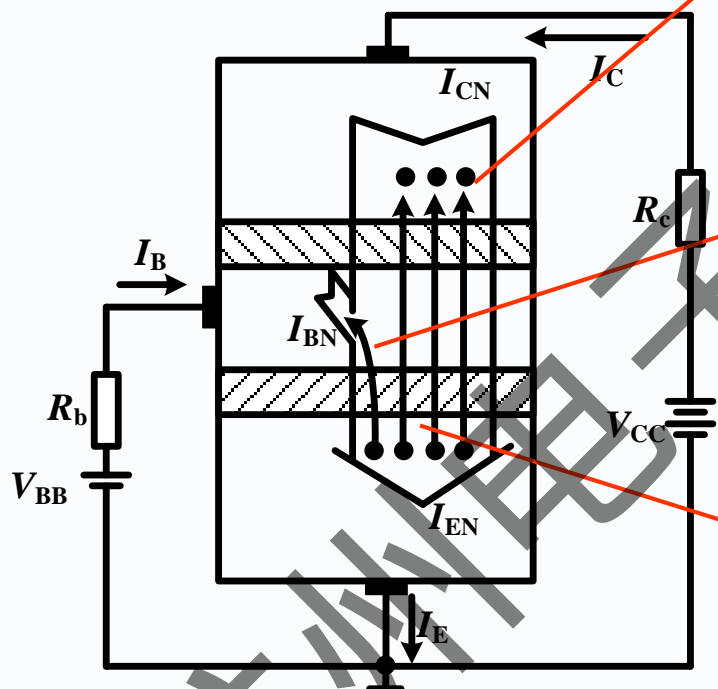
发射区比基区重掺杂；
基区很薄；
集电区面积大

发射区有大量电子 基区空穴很少 集电结反偏，吸引从发射区过来的电子



6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

放大的条件 $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$



因集电区面积大，在外电场作用下大部分扩散到基区的电子漂移到集电区

因基区薄且多子浓度低，使扩散到基区的电子（非平衡少子）中的极少数与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区扩散到基区

6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

放大的条件 $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$

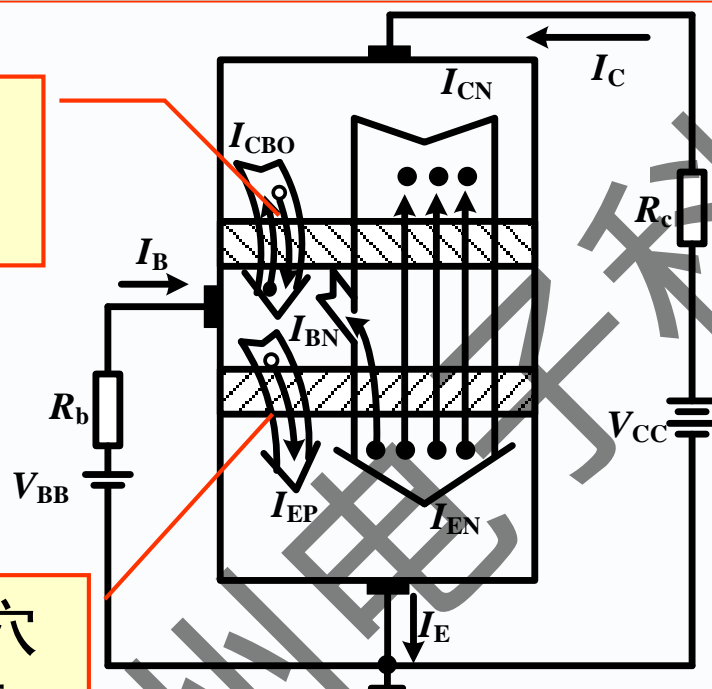
少数载流子的运动

扩散运动形成发射极电流 I_E

复合运动形成基极电流 I_B

漂移运动形成集电极电流 I_C

基区空穴的扩散



6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

电流分配: $I_E = I_B + I_C$

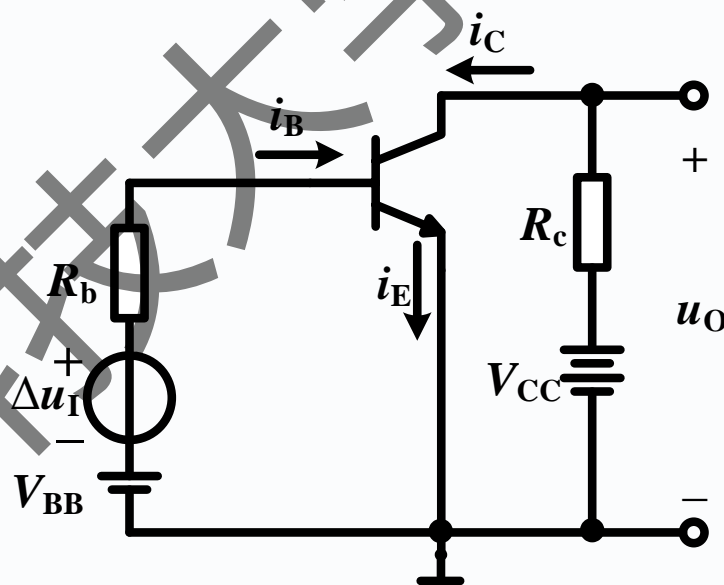
直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

$$I_C = \bar{\beta} I_B, I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B$$

3个电极的电流关系 $I_E > I_C > I_B$

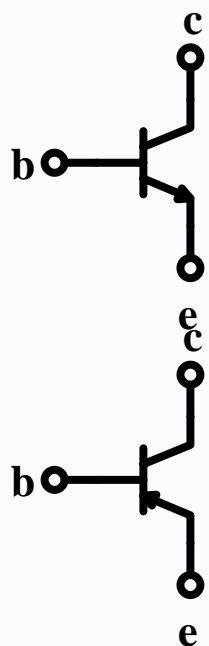
β 大表示只要基极电流很小的变化, 就可以控制产生集电极电流大的变化, 即电流放大作用好。



交流电流放大系数

6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

放大的条件：发射结正向偏置，
集电结反向偏置。



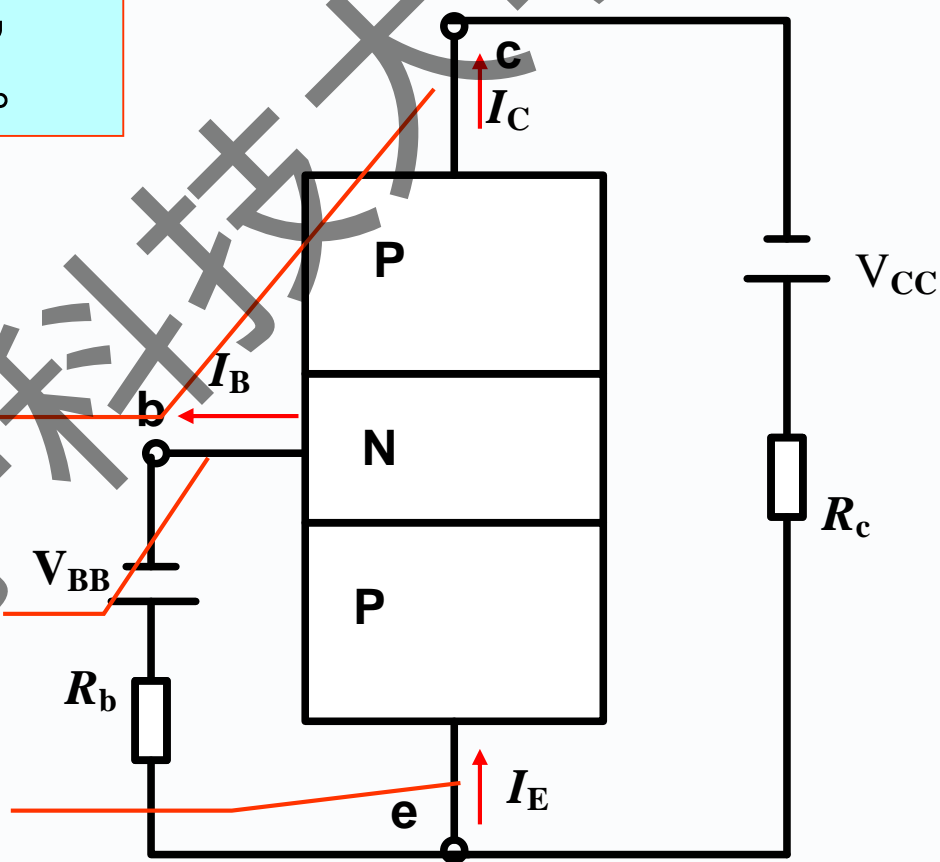
NPN型： $V_C > V_B > V_E$

PNP管
 I_C 流出

PNP管
 I_B 流出

PNP型： $V_E > V_B > V_C$

PNP管
 I_E 流进



6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

【例6.1.1】 一个晶体管的发射极电流为12.1mA，集电极电流为12.0mA，晶体管的 $\bar{\beta}$ 是多少？

解：首先求基极电流

$$I_B = I_E - I_C = 12.1 - 12.0 = 0.1(\text{mA})$$

然后求出 $\bar{\beta}$

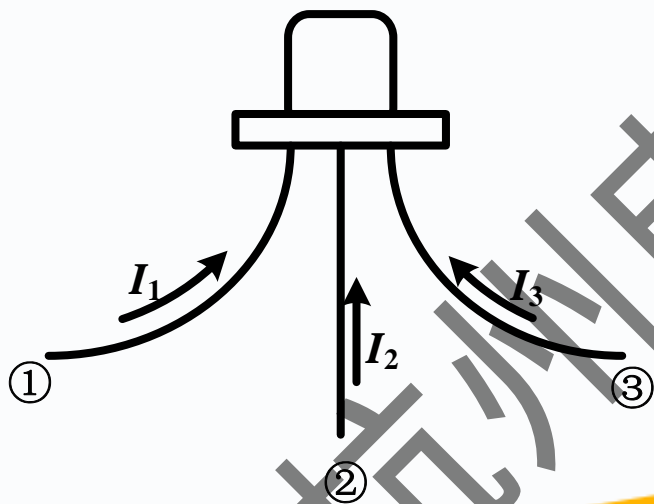
$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{12(\text{mA})}{0.1(\text{mA})} = 120$$



6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用

【例6.1.2】在某放大电路中，晶体管的3个电极的电流如图6.1.5所示，已知， $I_1 = -1.5\text{mA}$ ， $I_2 = -0.03\text{mA}$ 。

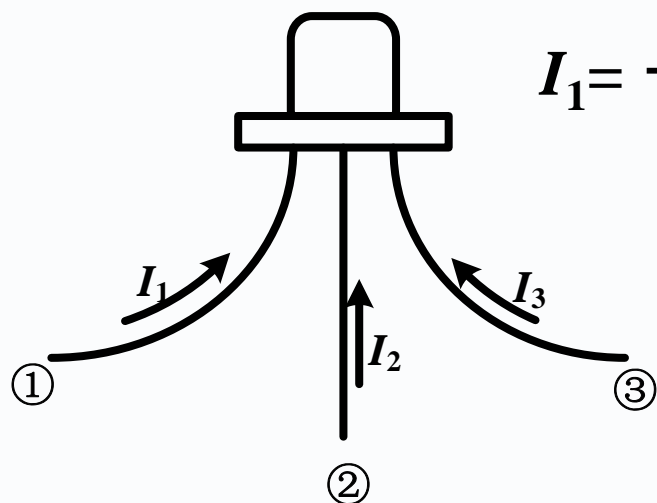
- (1) 求出另一个电极电流 I_3 的大小；
- (2) 试确定晶体管是PNP型还是NPN型，并区分出各电极；
- (3) 近似确定出该管电流放大系数



解：(1)由KCL，将三极管看成是一个节点，可以得到：

$$I_3 = -(I_1 + I_2) = -(-1.5 - 0.03) = 1.53(\text{mA})$$

6.1.2 晶体管的电流分配与放大作用



$$I_1 = -1.5\text{mA}, \quad I_2 = -0.03\text{mA}, \quad I_3 = 1.53\text{mA}$$

(2) 根据三极管3个电极的电流关系 $I_E > I_C > I_B$, 故得

① → c, ② → b, ③ → e。

由于发射极电流的实际方向为向里, 所以此晶体管为PNP型管。

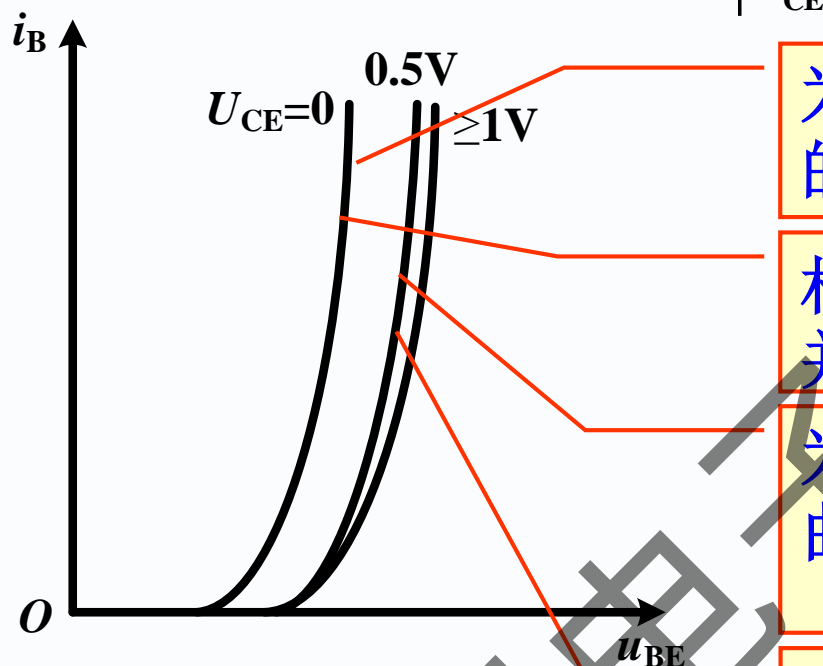
(3) 可以求得电流放大系数:

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{|I_1|}{|I_2|} = \frac{1.5}{0.03} = 50$$



6.1.3 晶体管的共射特性曲线

1. 输入特性 $i_B = f(u_{BE}) \big|_{U_{CE}}$

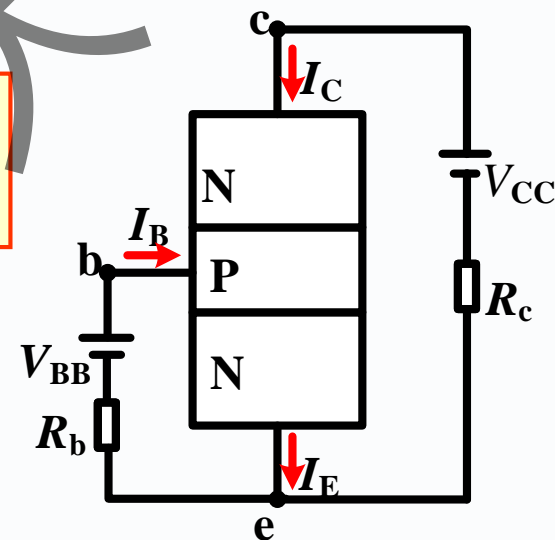


为什么像PN结的伏安特性？

相当于两个并联PN结

为什么 U_{CE} 增大曲线右移？

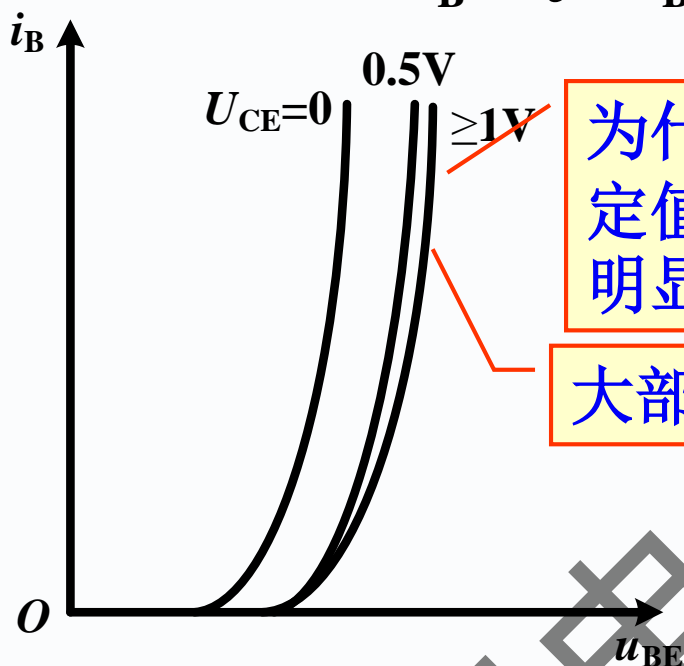
更多的电子被集电极收集，同样 u_{BE} 下， i_B 减小，曲线右移



6.1.3 晶体管的共射特性曲线

1. 输入特性

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

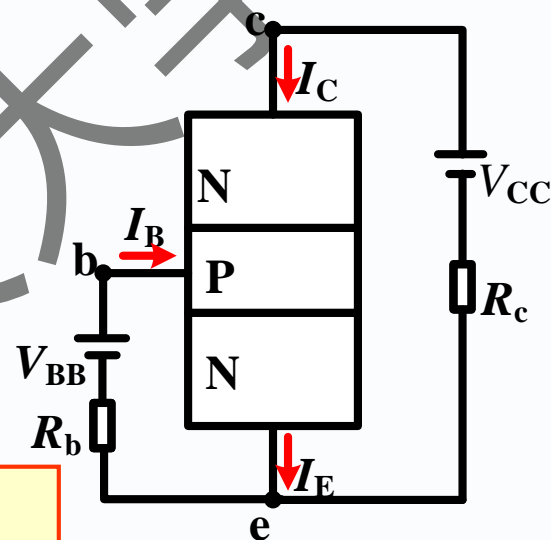


为什么 U_{CE} 增大到一定值曲线右移就不明显了？

大部分电子都被拉过去

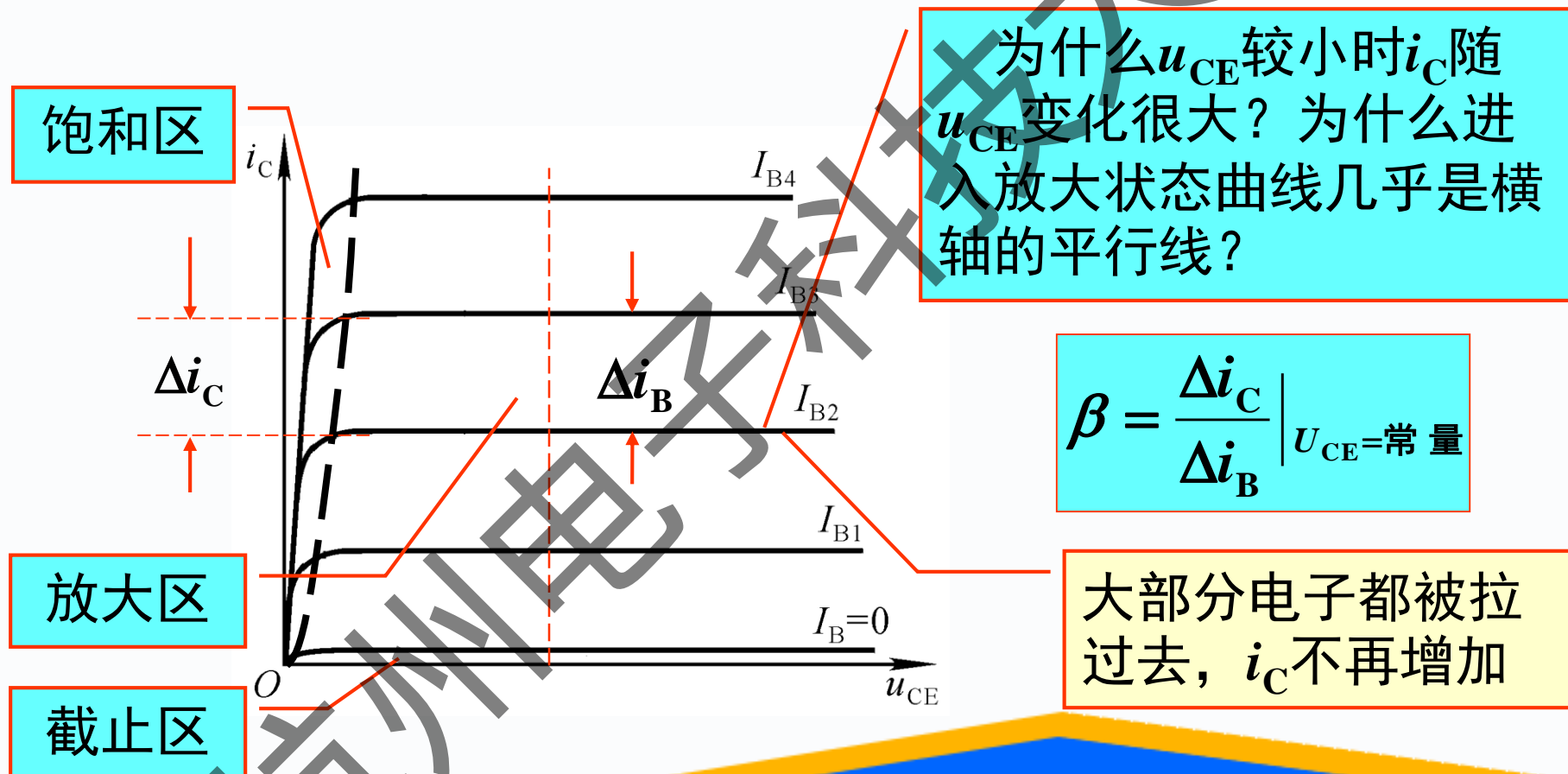
发射结电压 U_{BE} 硅管: 0.6V~0.7V,
锗管: 0.2V~0.3V

对于小功率晶体管, U_{CE} 大于1V的一条输入特性曲线可以取代 U_{CE} 大于1V的所有输入特性曲线。



2. 输出特性

$i_C = f(u_{CE})|_{I_B=\text{常数}}$ 对应于一个 I_B 就有一条 i_C 随 u_{CE} 变化的曲线。



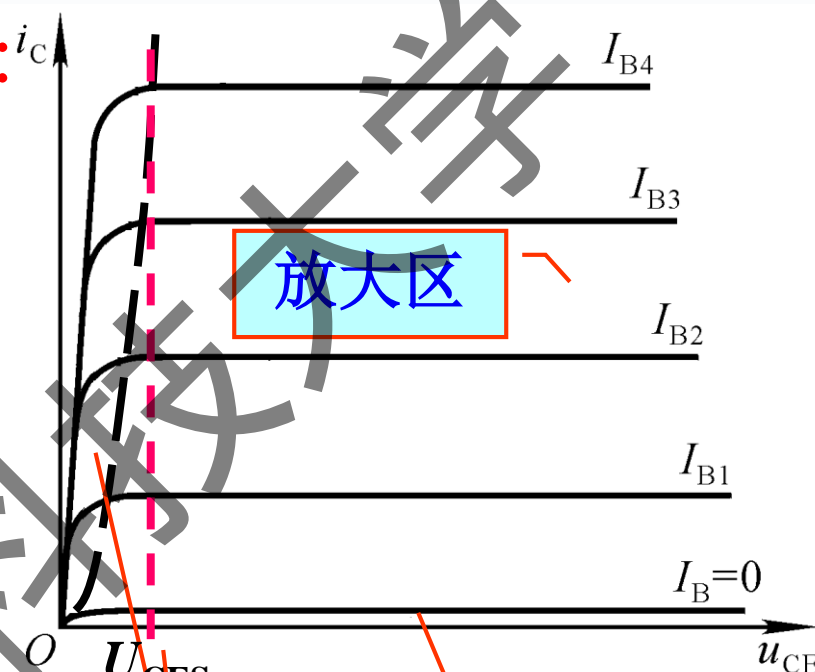
输出特性曲线的三个区域:

截止区: $i_B=0$ 的曲线下方。

$i_C=I_{CEO}$, u_{BE} 小于死区电压, 为了可靠截止, 常使得发射结和集电结均反偏。

放大区: i_C 平行于 u_{CE} 轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。

饱和区: i_C 明显受 u_{CE} 控制的区域, 该区域内, $u_{CE} < U_{CES}$ (饱和压降)。此时, 发射结正偏, 集电结正偏。



饱和区

截止区

硅管 $U_{CES} \approx 0.3V$,
锗管 $U_{CES} \approx 0.1V$

晶体管的三个工作区域

状态	u_{BE}	i_C	u_{CE}
截止	$< U_{on}$	I_{CEO}	V_{CC}
放大	$\geq U_{on}$	βi_B	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$\leq u_{BE}$

晶体管工作在放大状态时，输出回路的电流 i_C 几乎仅仅决定于输入回路的电流 i_B ，即可将输出回路等效为电流 i_B 控制的电流源 i_C 。



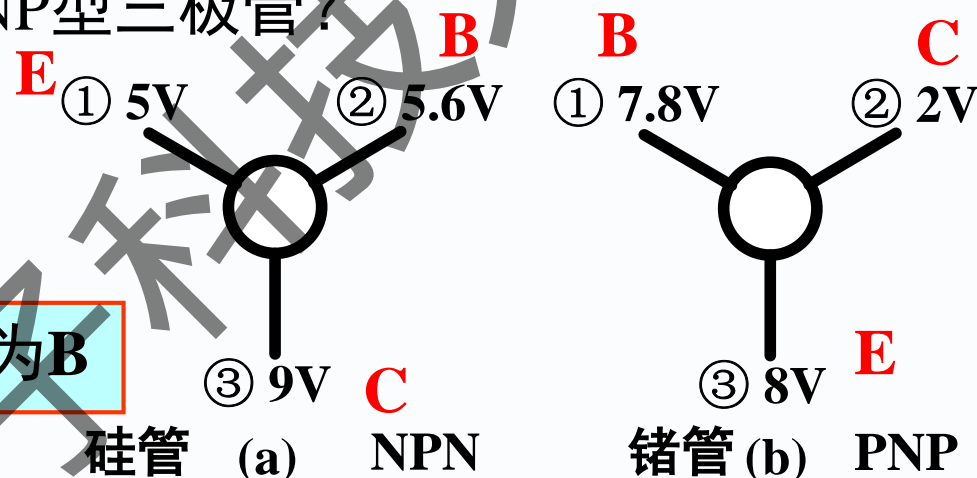
6.1.3 晶体管的共射特性曲线

【例6.1.3】已知工作在放大区，今测得它们的管脚对地电位如下图所示，试判别三极管的三个管脚，说明是硅管还是锗管？是NPN还是PNP型三极管？

NPN型 $V_C > V_B > V_E$

PNP型 $V_E > V_B > V_C$

中间电位为B



与B脚相差0.6V~0.7V为E脚，是硅管；

相差0.2V~0.3V为E脚，是锗管

剩下的为C脚



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

6.1.4 晶体管的主要参数

1. 电流放大系数

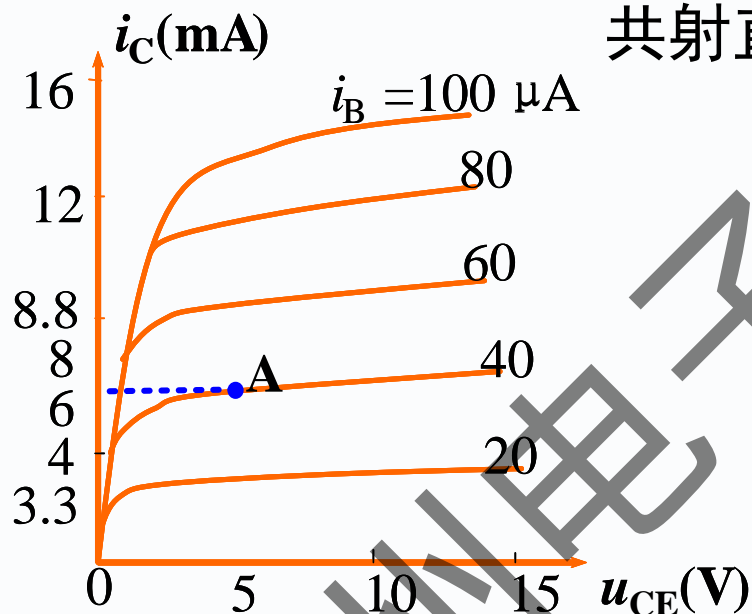
$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

A点对应的

$$i_C = 6\text{mA}, \quad i_B = 40\mu\text{A}$$

$$\bar{\beta} \approx \frac{i_C}{i_B} = \frac{6}{0.04} = 150$$



3DG6的输出特性



6.1.4 晶体管的主要参数

共射交流电流放大系数 β

β 值的求法:

在A点附近找两个 u_{CE} 相同的点C和D

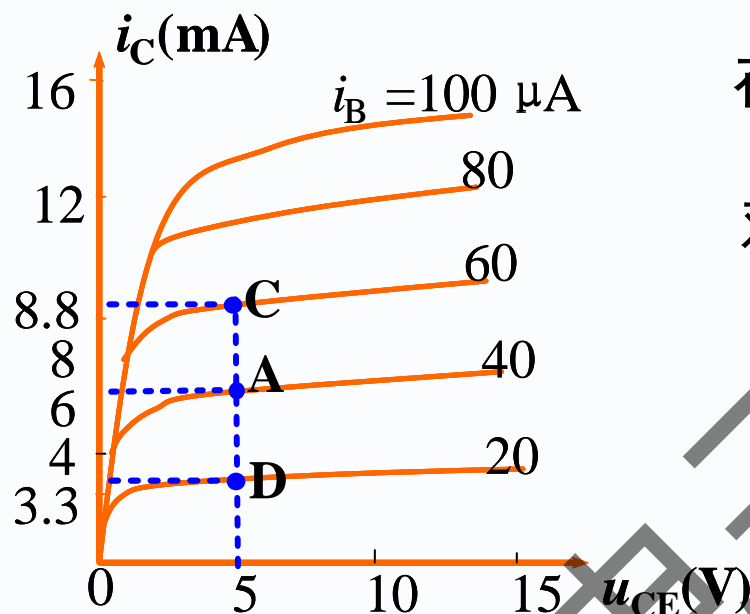
对应于C点, $i_C = 8.8\text{mA}$, $i_B = 60\mu\text{A}$;

对应于D点, $i_C = 3.3\text{mA}$, $i_B = 20\mu\text{A}$,

$$\Delta i_C = 8.8 - 3.3 = 5.5\text{mA},$$

$$\Delta i_B = 60 - 20 = 40\mu\text{A},$$

$$\text{所以 } \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{5.5}{0.04} = 138$$



3DG6的输出特性

估算时, 可认为 $\beta \approx \bar{\beta}$

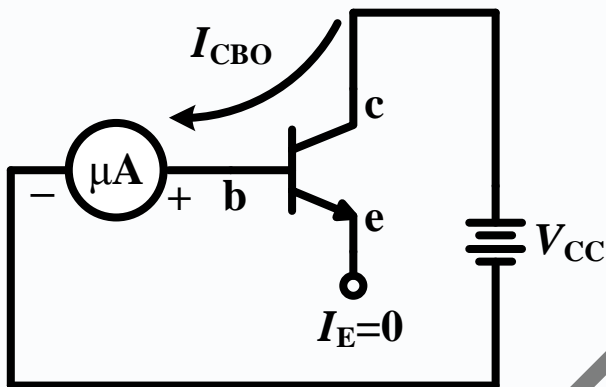
故可以混用。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

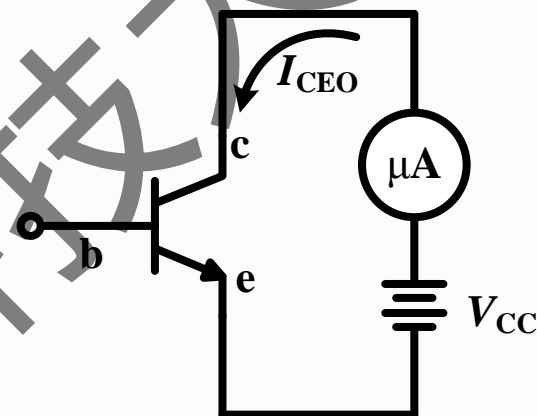
6.1.4 晶体管的主要参数

2. 极间反向电流 I_{CBO} 、 I_{CEO}



I_{CBO} 是少数载流子电流，受温度影响很大， I_{CBO} 越小越好。

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$



由图可见， I_{CEO} 不单纯是一个PN结的反向电流

所以， β 大的三极管的温度稳定性较差

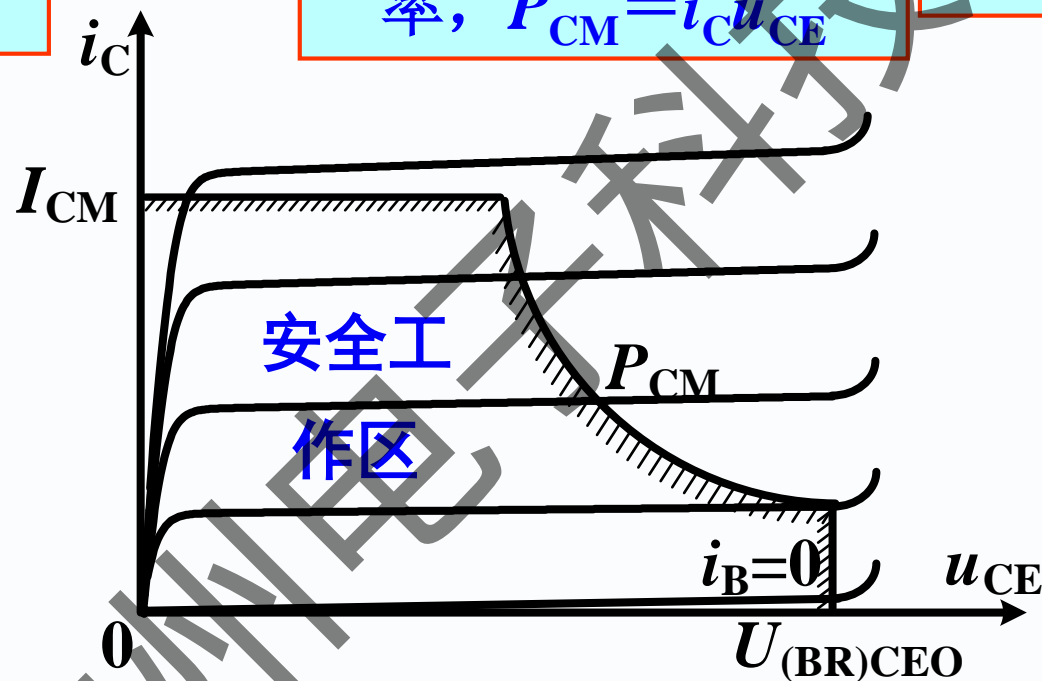
6.1.4 晶体管的主要参数

3. 极限参数: I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$

最大集电极电流

最大集电极耗散功率, $P_{CM} = i_C u_{CE}$

c-e间击穿电压



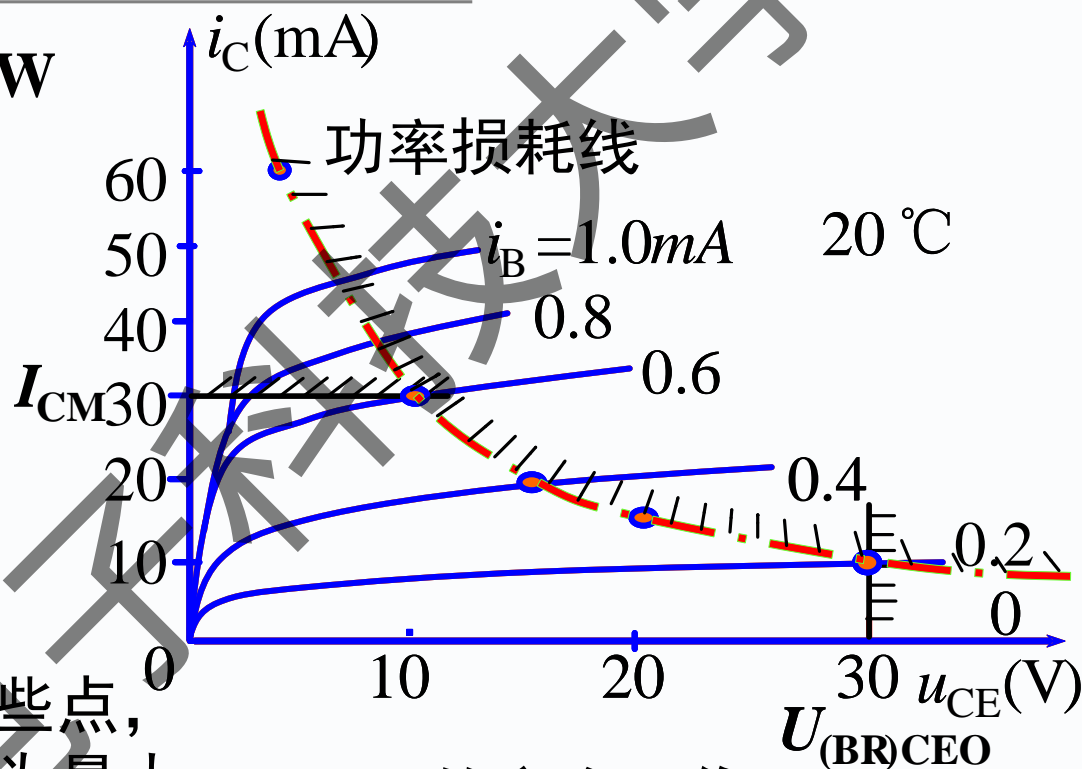
6.1.4 晶体管的主要参数

例如, 3DG4的 $P_{CM}=300\text{mW}$

根据 $i_C u_{CE}=300\text{mW}$, 可以计算出功率损耗线上的点: $u_{CE}=5\text{V}$ 时 $i_C=60\text{mA}$; $(10\text{V}, 30\text{mA})$; $(15\text{V}, 20\text{mA})$; $(20\text{V}, 15\text{mA})$; $(30\text{V}, 10\text{mA})$; $(40\text{V}, 7.5\text{mA})$ 等等。

在输出特性坐标上找出这些点, 并将它们连成一条曲线即为最大功率损耗线, 如图所示。

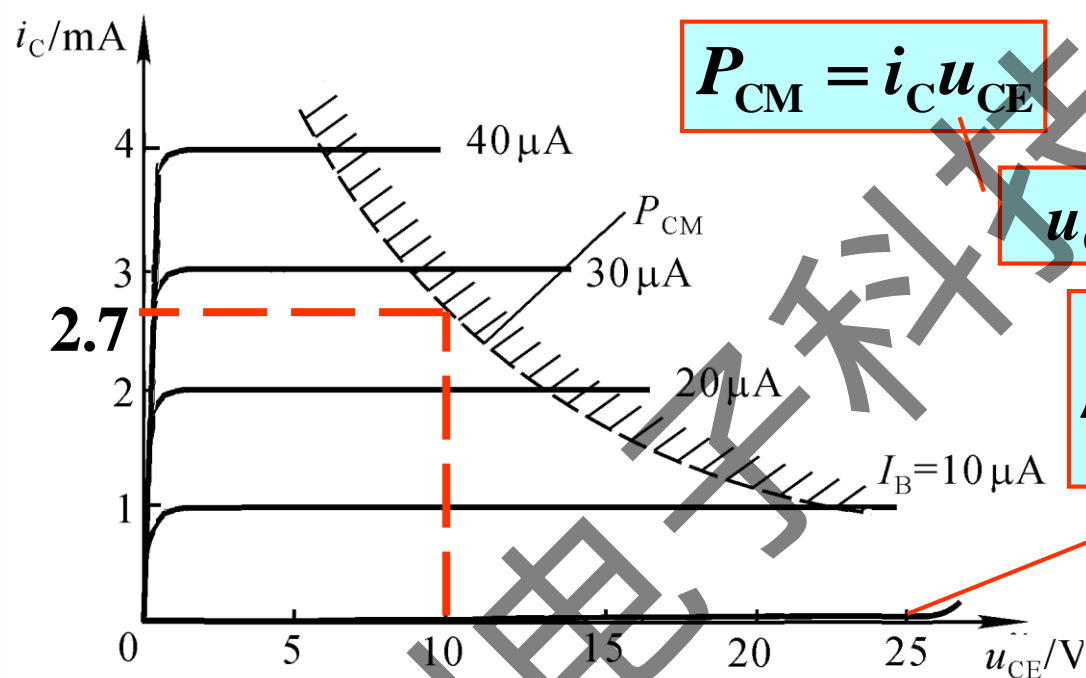
曲线的左下方均满足此之此 $P_C < P_{CM}$ 条件。



3DG4的安全工作区

6.1.4 晶体管的主要参数

讨论一



$$P_{CM} = i_C u_{CE}$$

$u_{CE} = 1V$ 时的 i_C 就是 I_{CM}

$$\beta = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE} = \text{常数}}$$

$$U_{(BR)CEO}$$

由图示特性求出 P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 β 。

6.2 放大电路的组成和工作原理

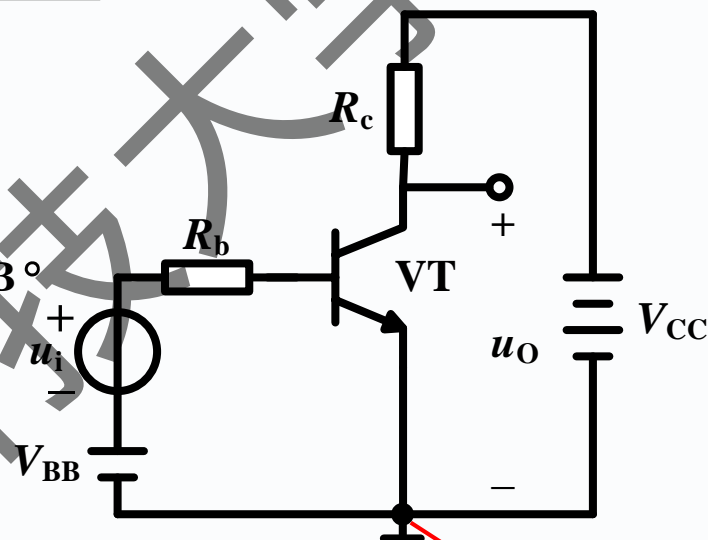
一、基本共射放大电路的工作原理

1. 电路的组成及各元件的作用

V_{BB} 、 R_b ：使 $U_{BE} > U_{on}$ ，且有合适的 I_B 。

V_{CC} ：使 $U_{CE} \geq U_{BE}$ ，同时作为负载的能源。

R_c ：将 Δi_C 转换成 $\Delta u_{CE}(u_O)$ 。

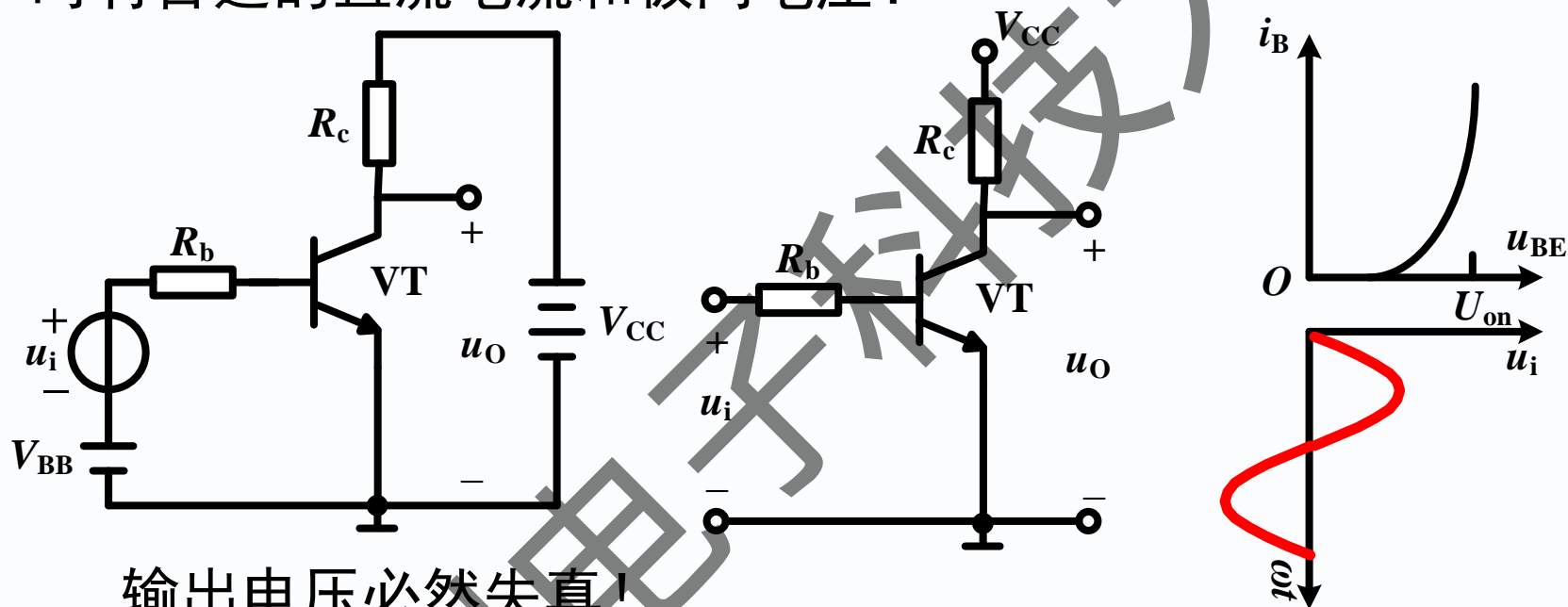


动态信号作用时： $\Delta u_i \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{R_c} \rightarrow \Delta u_{CE}(u_o)$

输入电压 u_i 为零时，晶体管各极的电流、b-e间的电压、管压降称为静态工作点 Q ，记作 I_{BQ} 、 I_{CQ} (I_{EQ})、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。

2. 设置静态工作点的必要性

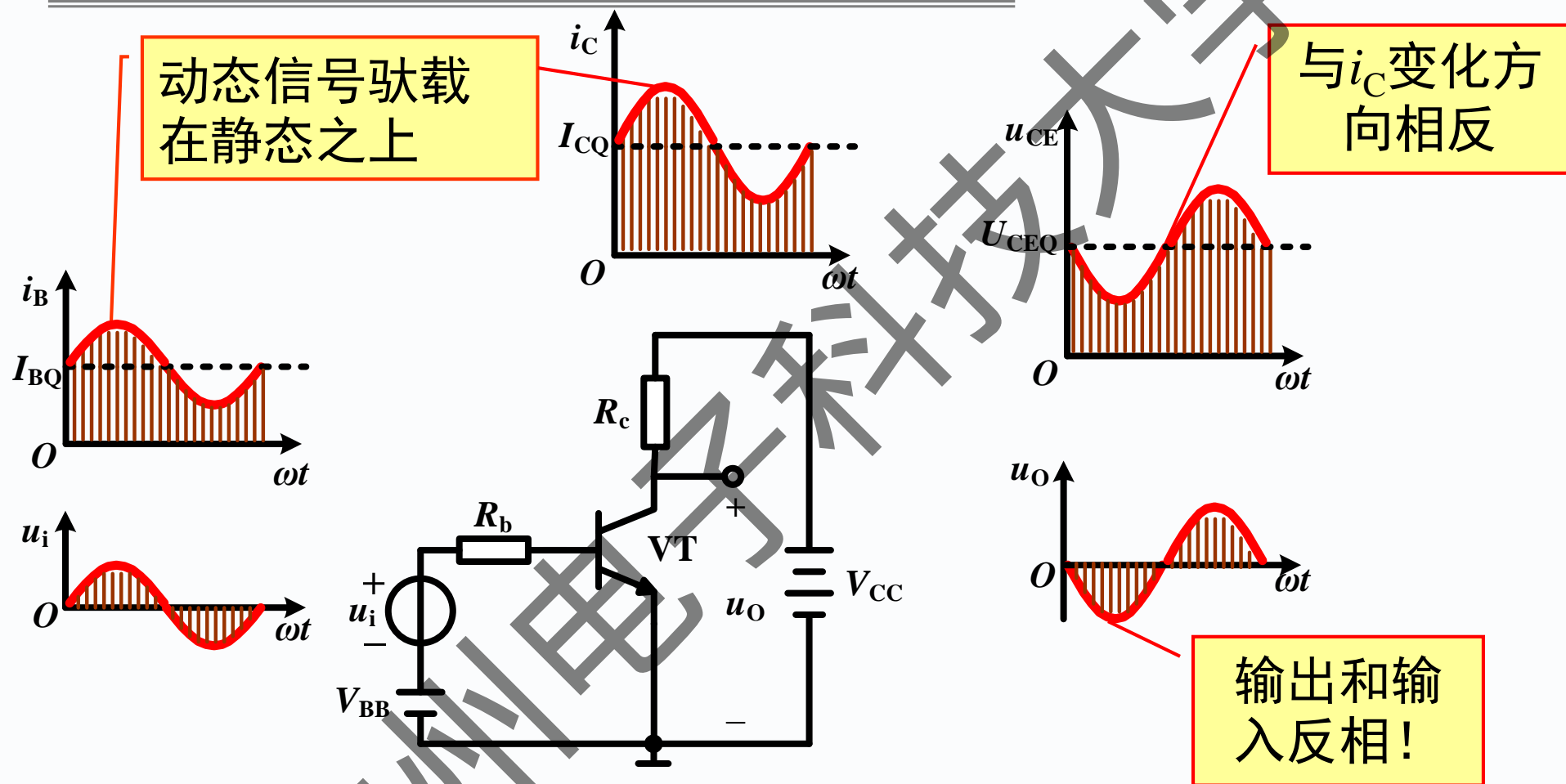
为什么放大的对象是动态信号，却要晶体管在信号为零时有合适的直流电流和极间电压？



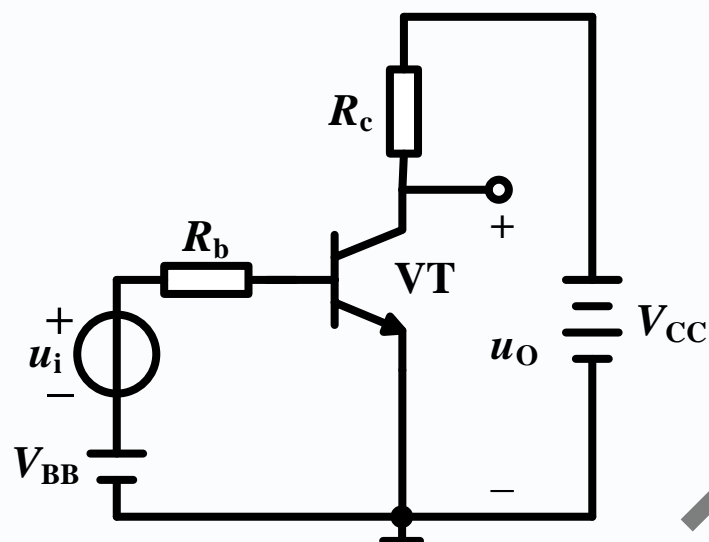
输出电压必然失真！

设置合适的静态工作点，首先要解决失真问题，但Q点几乎影响着所有的动态参数！

3、基本共射放大电路的波形分析

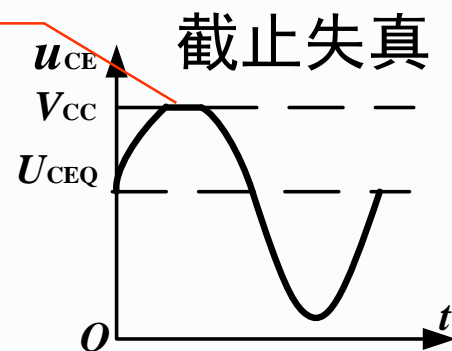
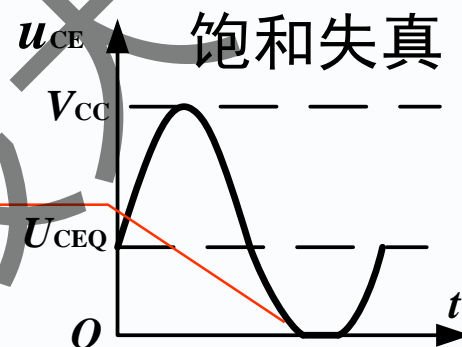


3、基本共射放大电路的波形分析



底部失真

顶部失真

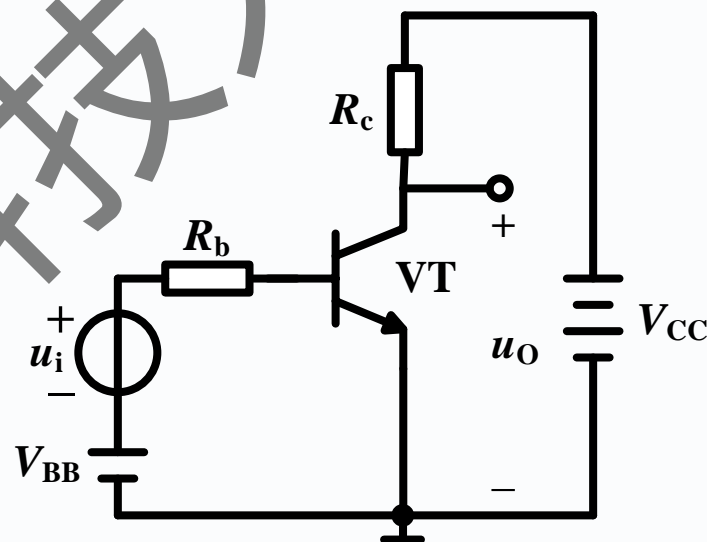


要想不失真，就要在信号的整个周期内保证晶体管始终工作在放大区！

二、如何组成放大电路

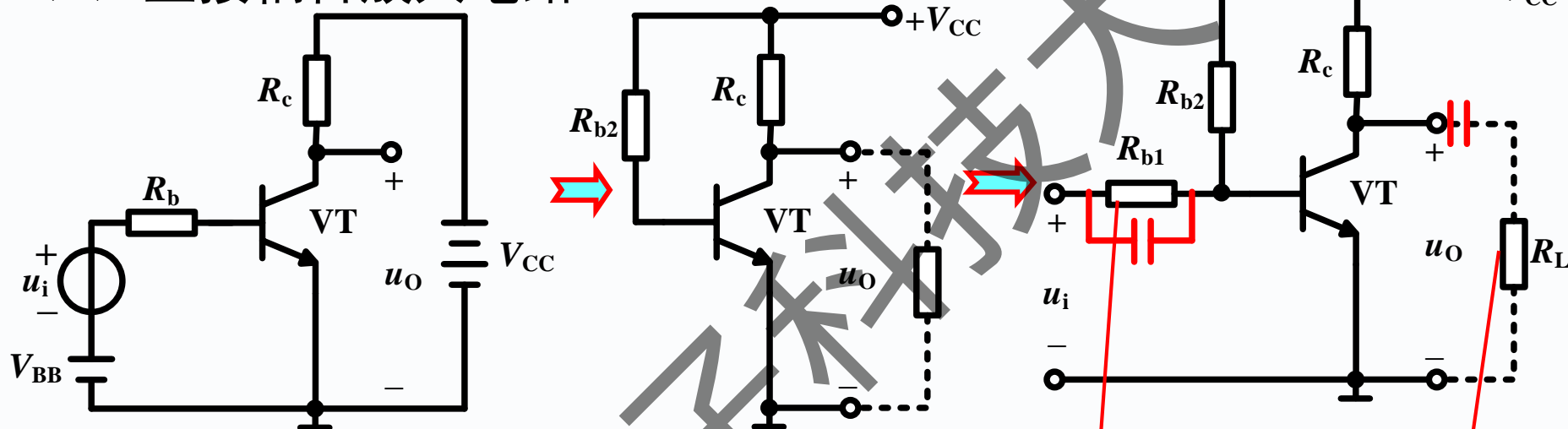
1. 组成原则

- **静态工作点合适**：合适的直流电源、合适的电路参数。
- **动态信号**能够作用于晶体管的输入回路，在负载上能够获得放大的动态信号。
- 对实用放大电路的要求：共地、直流电源种类尽可能少、负载上无直流分量。



2. 两种实用放大电路

(1) 直接耦合放大电路



问题：

1. 两个电源

2. 信号源与放大电路不“共地”

共地，且要使信号
驮载在静态之上

将两个电源
合二为一

有交流损失

有直流分量

静态时， $U_{BEQ} = U_{R_{b1}}$

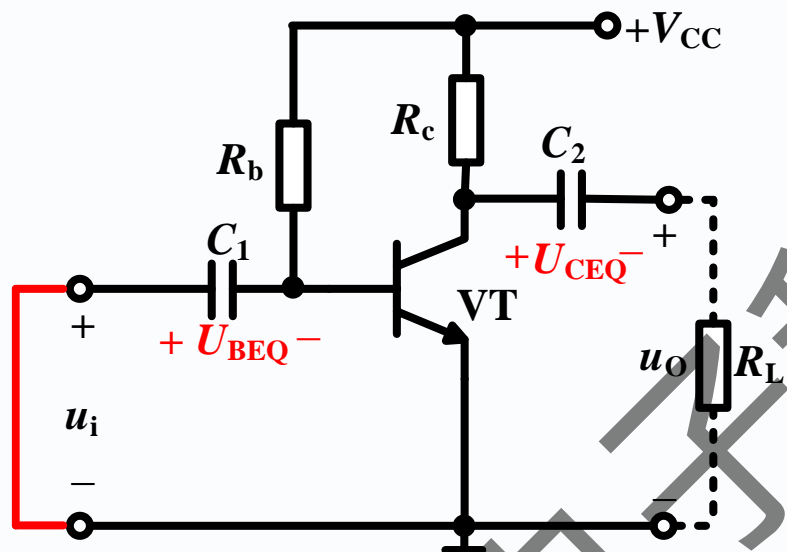
动态时，b-e间电压是 u_i 与
 V_{CC} 的共同作用的结果。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 两种实用放大电路

(2) 阻容耦合放大电路



C_1 、 C_2 为耦合电容！

耦合电容的容量应足够大，即对于交流信号近似为短路。其作用是“隔离直流、通过交流”。

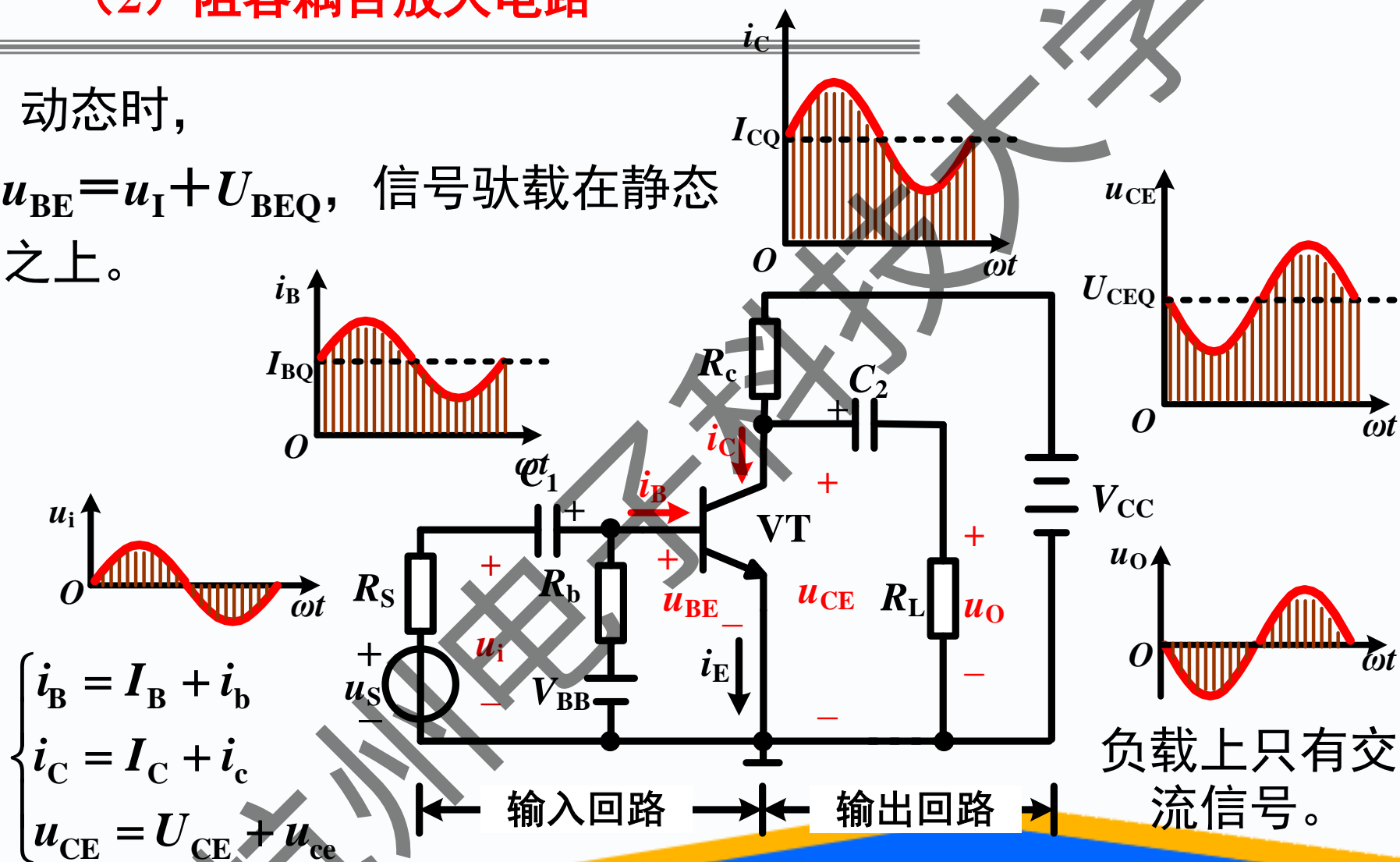
$$U_{C1} = U_{BEQ}, \quad U_{C2} = U_{CEQ}$$

静态时， C_1 、 C_2 上电压？

(2) 阻容耦合放大电路

动态时,

$u_{BE} = u_I + U_{BEQ}$, 信号驮载在静态之上。



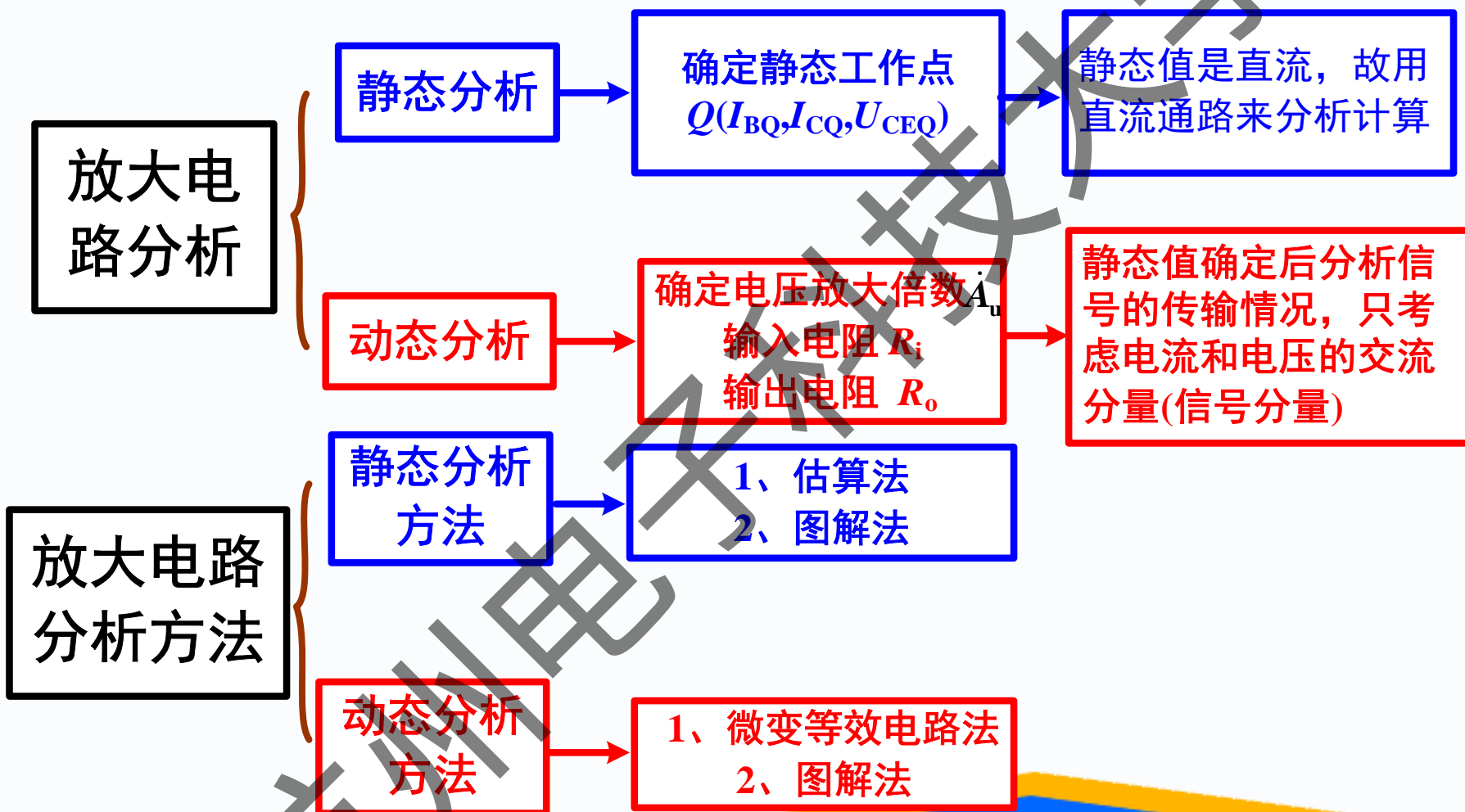
二、如何组成放大电路

讨论：

试用PNP型管分别组成直接耦合和阻容耦合共射放大电路。



6.3 放大电路的分析



6.3.1 放大电路的直流通路和交流通路

直流流过的路径

交流流过的路径

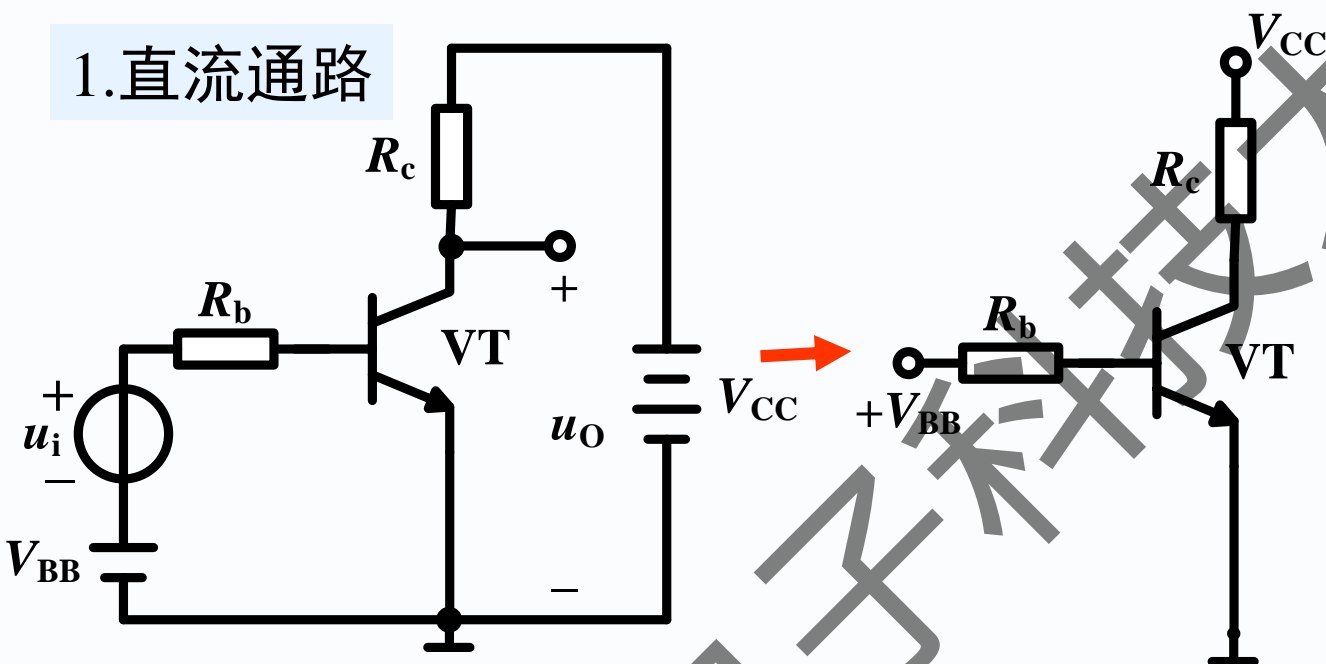
画法：

1. 直流通路：① $U_s=0$ ，保留 R_s ；②电容开路；③电感相当于短路（线圈电阻近似为0）。
2. 交流通路：①大容量电容相当于短路；②直流电压源相当于短路（内阻为0）。



(一) 基本共射放大电路的直流通路和交流通路

1. 直流通路

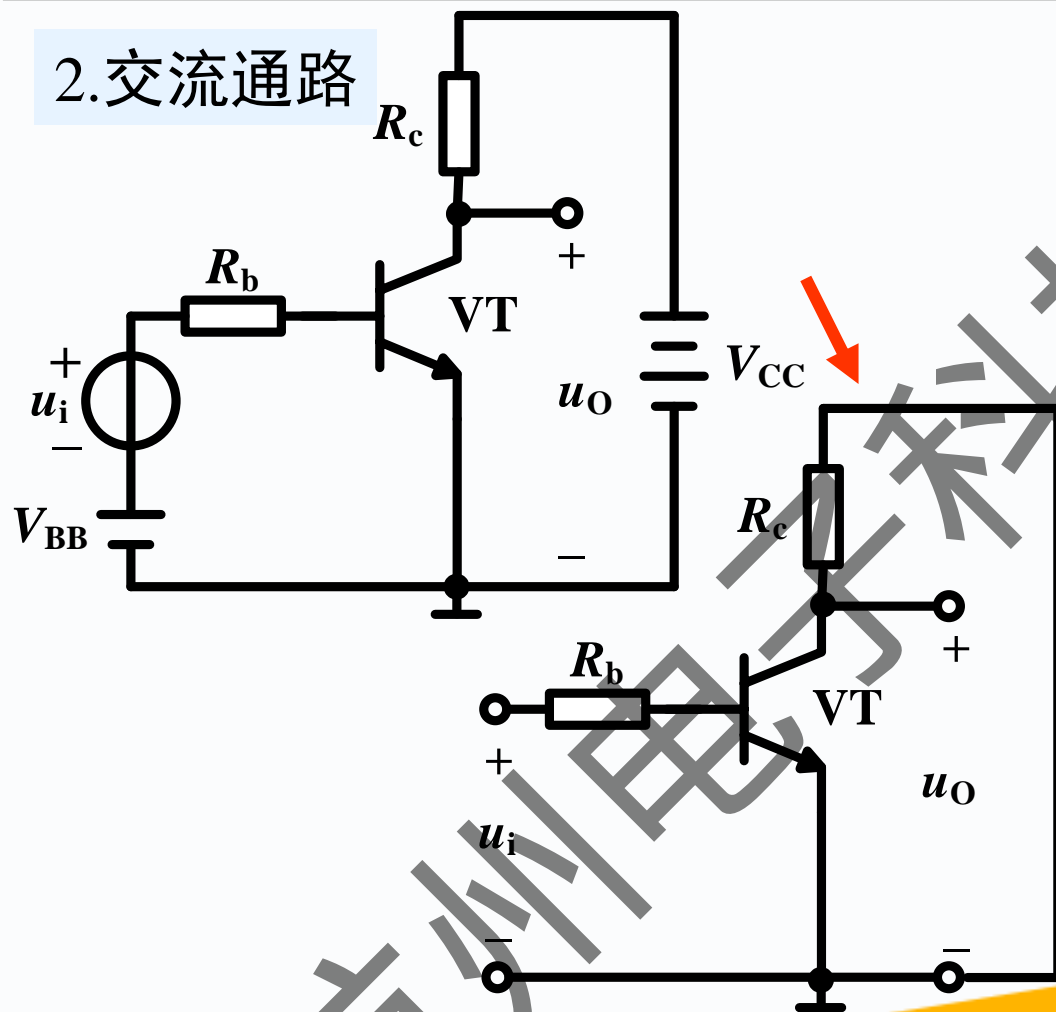


1. 直流通路：
- ① $u_s=0$ ，保留 R_s ；
 - ② 电容开路；
 - ③ 电感相当于短路（线圈电阻近似为0）

列晶体管输入、输出回路方程，将 U_{BEQ} 作为已知条件，令 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ，可估算出静态工作点 Q 。

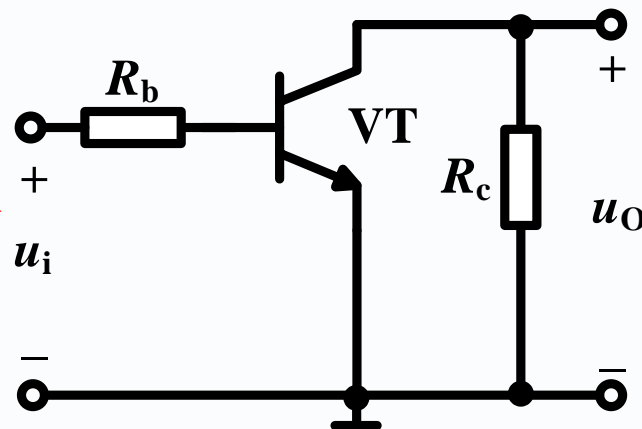
(一) 基本共射放大电路的直流通路和交流通路

2. 交流通路



2. 交流通路:

- ① 大容量电容相当于短路;
- ② 直流电压源相当于短路 (内阻为0)

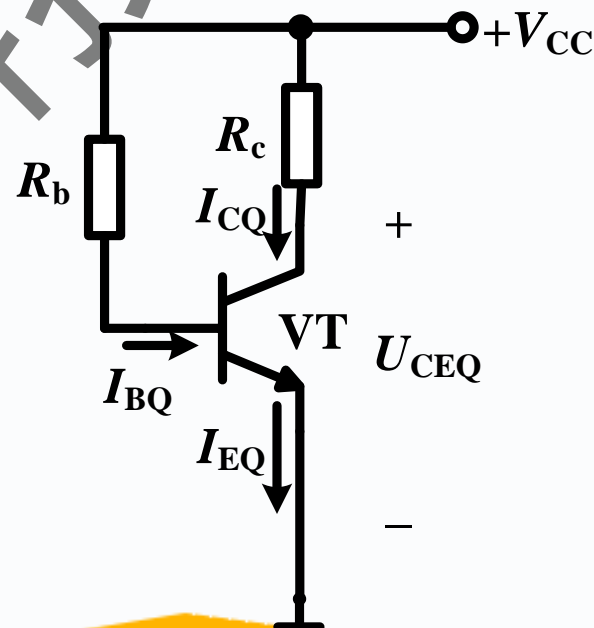
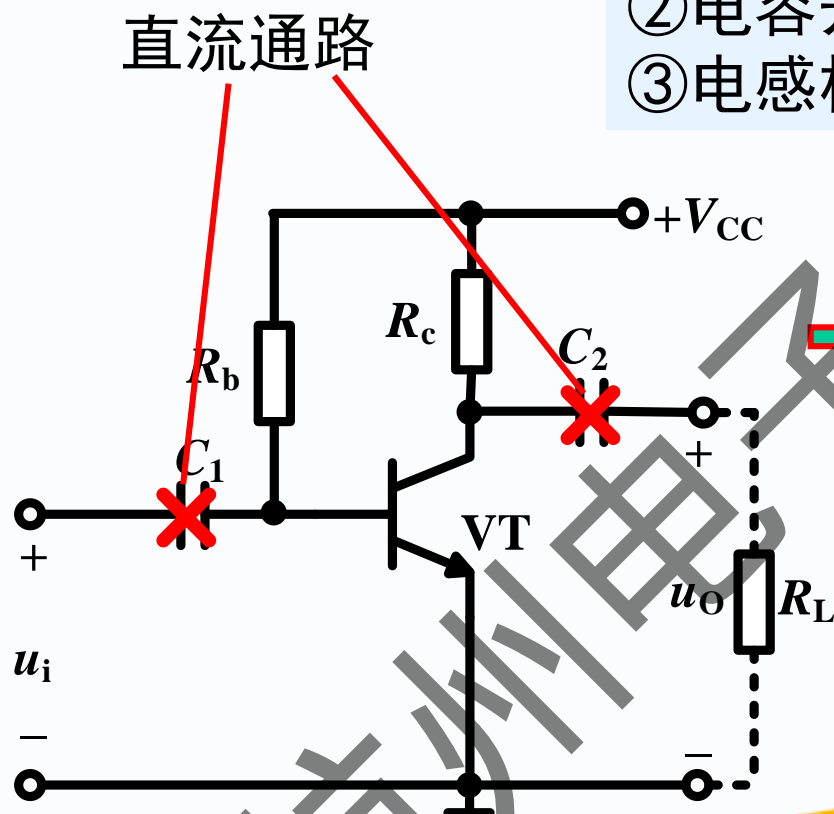


(二) 阻容耦合单管共射放大电路的直流通路和交流通路

1. 直流通路

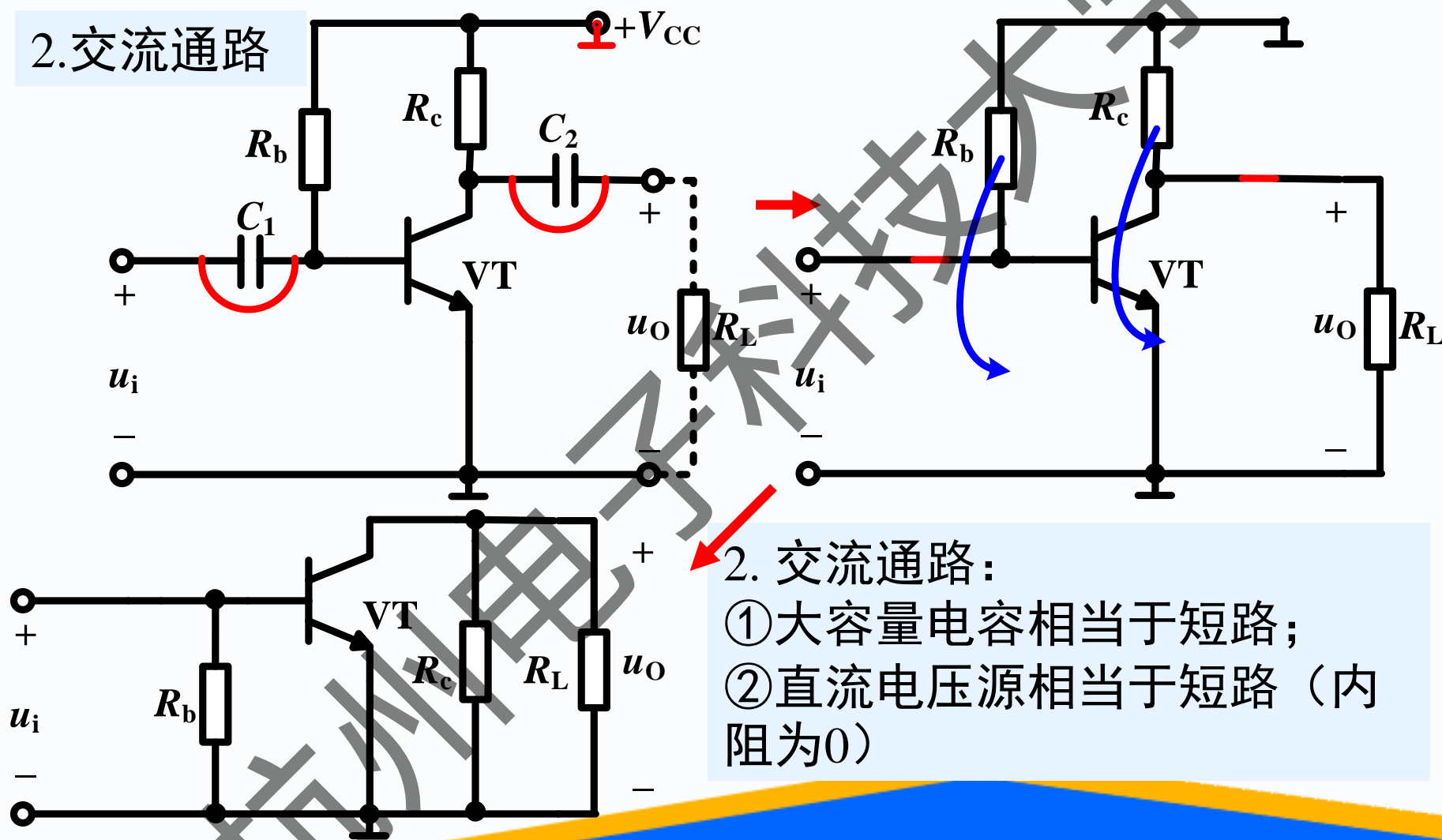
1. 直流通路:

- ① $u_s=0$, 保留 R_s ;
- ② 电容开路;
- ③ 电感相当于短路 (线圈电阻近似为0)



(二) 阻容耦合单管共射放大电路的直流通路和交流通路

2. 交流通路



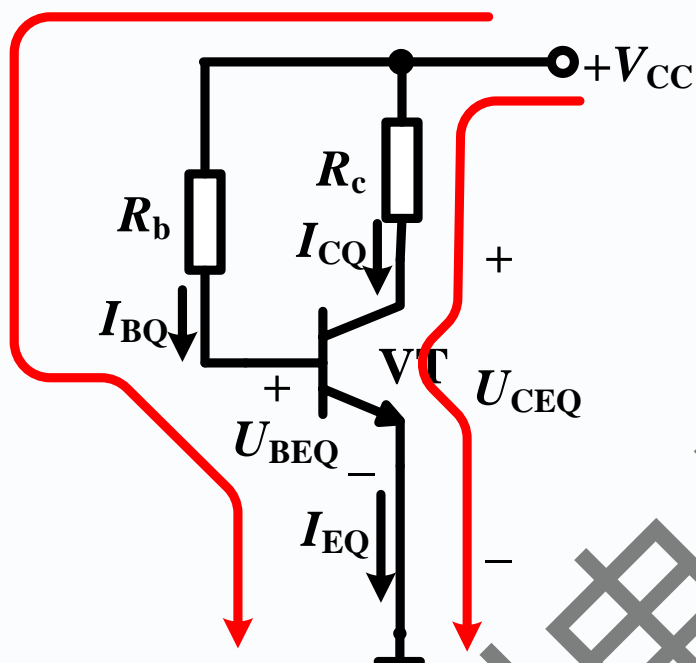
2. 交流通路:

- ① 大容量电容相当于短路;
- ② 直流电压源相当于短路 (内阻为0)



6.3.2 静态分析

1. 用直流通路计算静态值（估算Q点）



输入回路KVL $V_{CC} = I_{BQ} \cdot R_b + U_{BEQ}$

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

假设处于放大区:

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

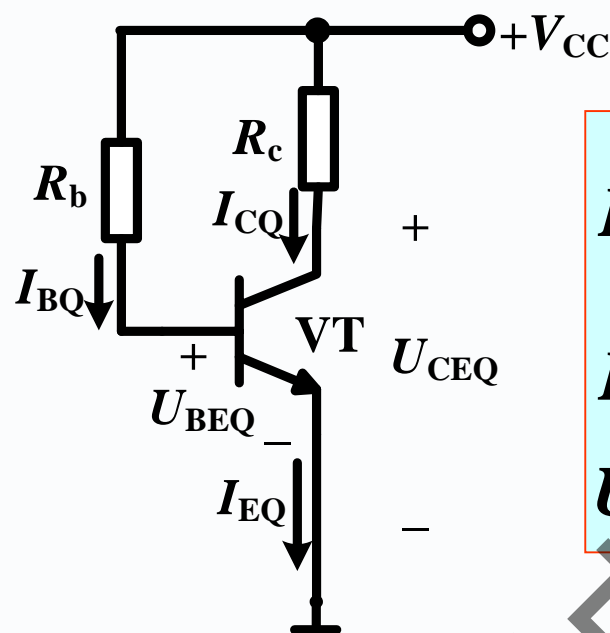
输出回路KVL $V_{CC} = I_{CQ} \cdot R_c + U_{CEQ}$

得到:

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

6.3.2 静态分析

1. 用直流通路计算静态值（估算Q点）



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

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

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

U_{BEQ} 硅管: 0.6V~0.7V,
锗管: 0.2V~0.3V

当 $V_{CC} \gg U_{BEQ}$ 时,

$$I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$$

已知: $V_{CC} = 12V$, $R_c = 3k\Omega$, $R_b = 600k\Omega$, $\beta = 100$ 。 $Q = ?$

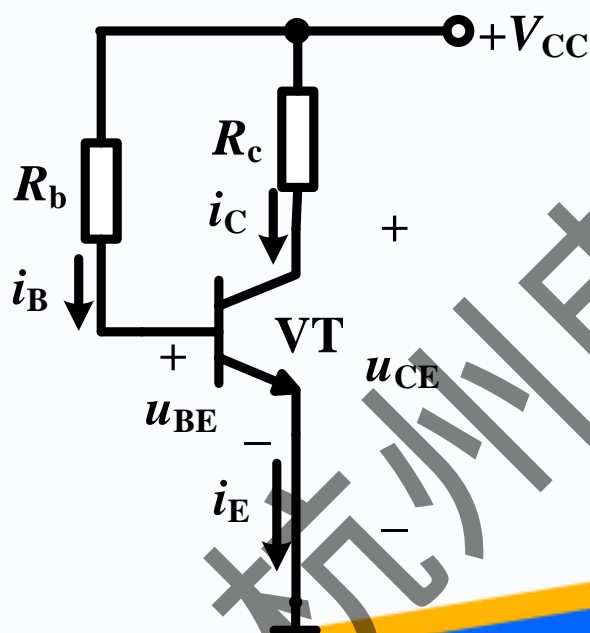
2.用图解法确定静态值

首先，画出直流通路

在输入回路确定 I_{BQ} , U_{BEQ}

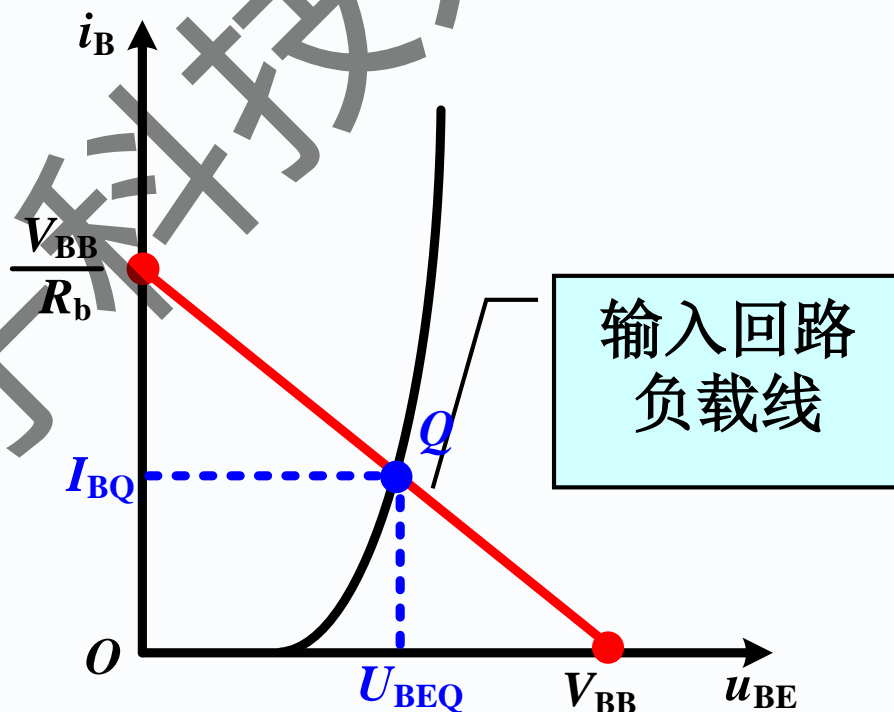
列输入回路方程

$$u_{BE} = V_{BB} - i_B R_b$$



三极管输入特性曲线:

$$i_B = f(u_{BE})$$

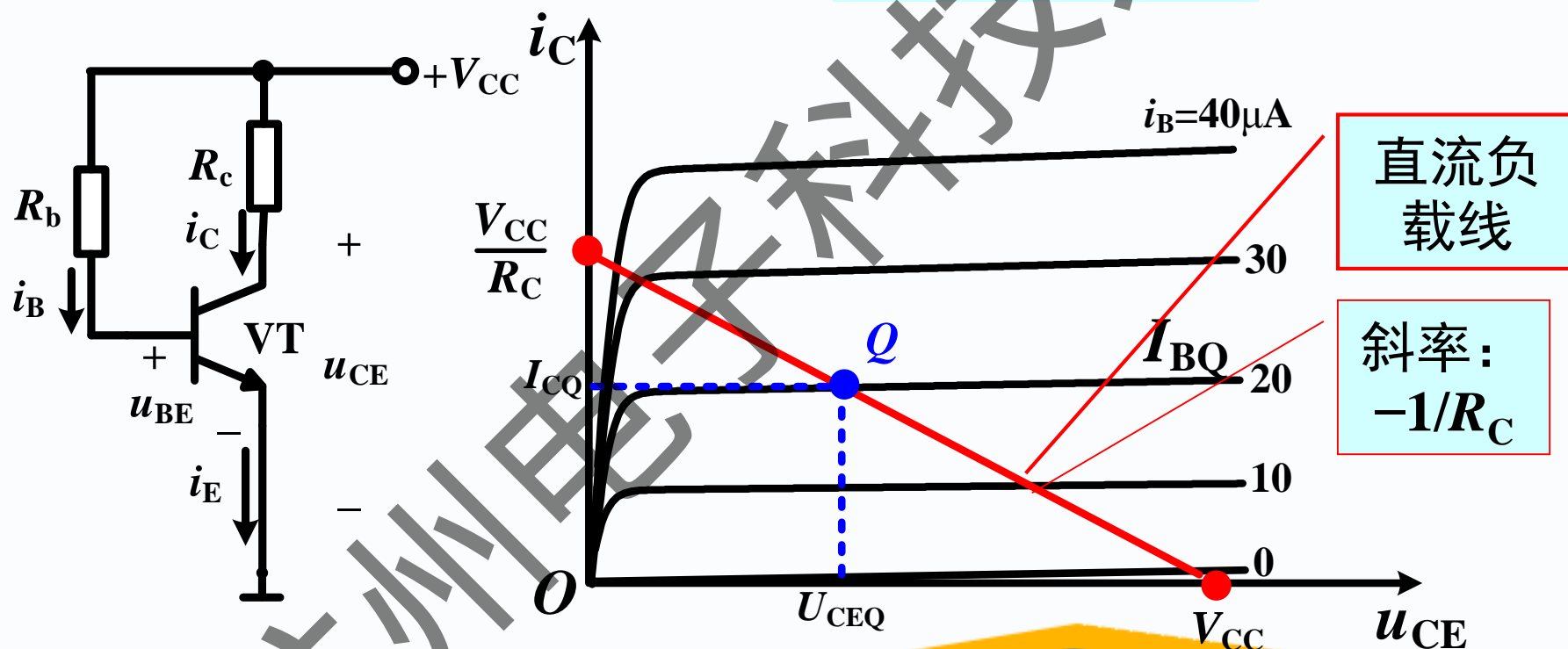


2. 用图解法确定静态值

在输出回路确定 I_{CQ} , U_{CEQ} 三极管输出特性曲线: $i_C = f(u_{CE})$

列输出回路方程 (直流负载线)

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$



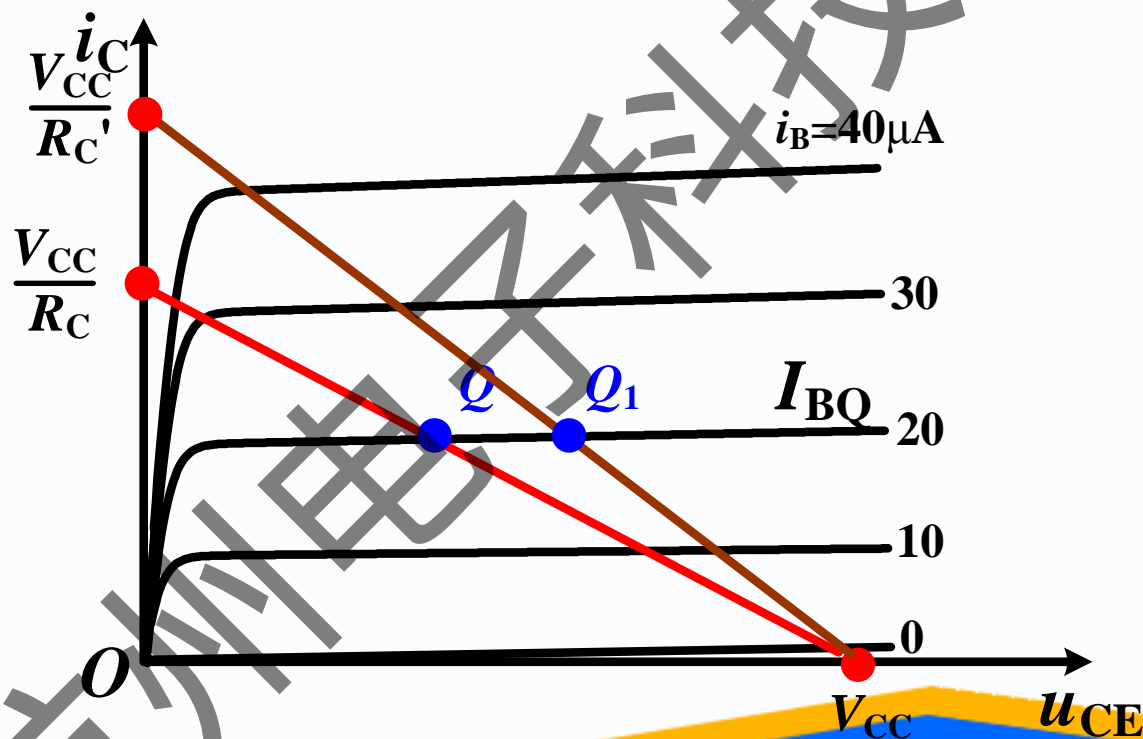
电路参数对输出特性上Q点的影响

减小 R_c 阻值

$$R_c \downarrow \rightarrow 1/R_c \uparrow \rightarrow V_{CC}/R_c \uparrow$$

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$

→ 负载线与曲线的交点右移。

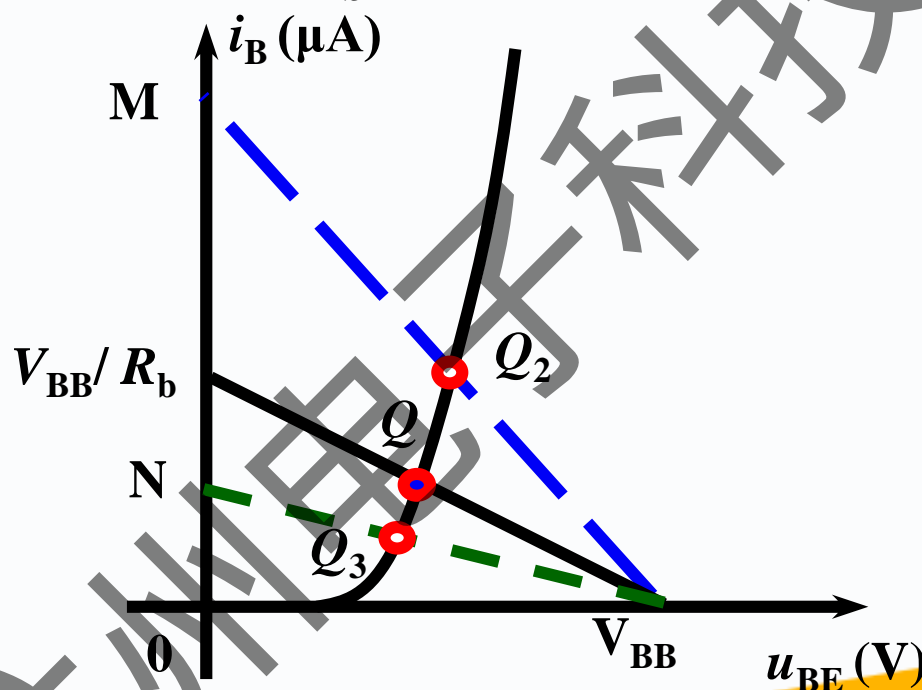


电路参数对输出特性上Q点的影响

R_b 对Q点的影响

$R_b \downarrow \rightarrow 1/R_b \uparrow \rightarrow V_{BB}/R_b \uparrow \rightarrow$ 静态工作点上移（饱和区）。

$R_b \uparrow \rightarrow$ 静态工作点下移（截止区）。

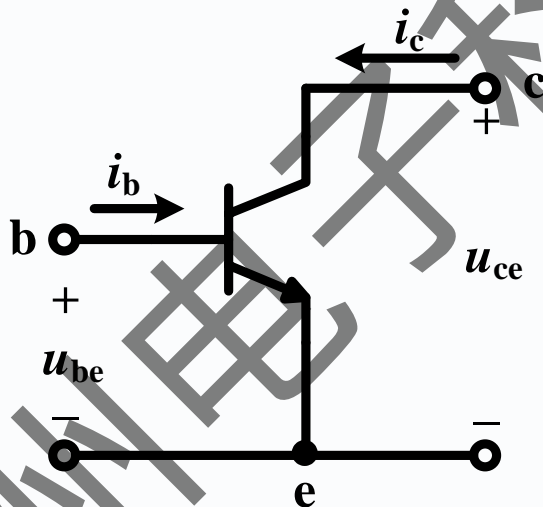


6.3.3 动态分析 (A_u 、 R_i 、 R_o)

1. 微变等效电路法

放大电路的微变等效电路，就是把非线性元件晶体管所组成的放大电路等效为一个线性电路，即把晶体管线性化，等效为一个线性元件。

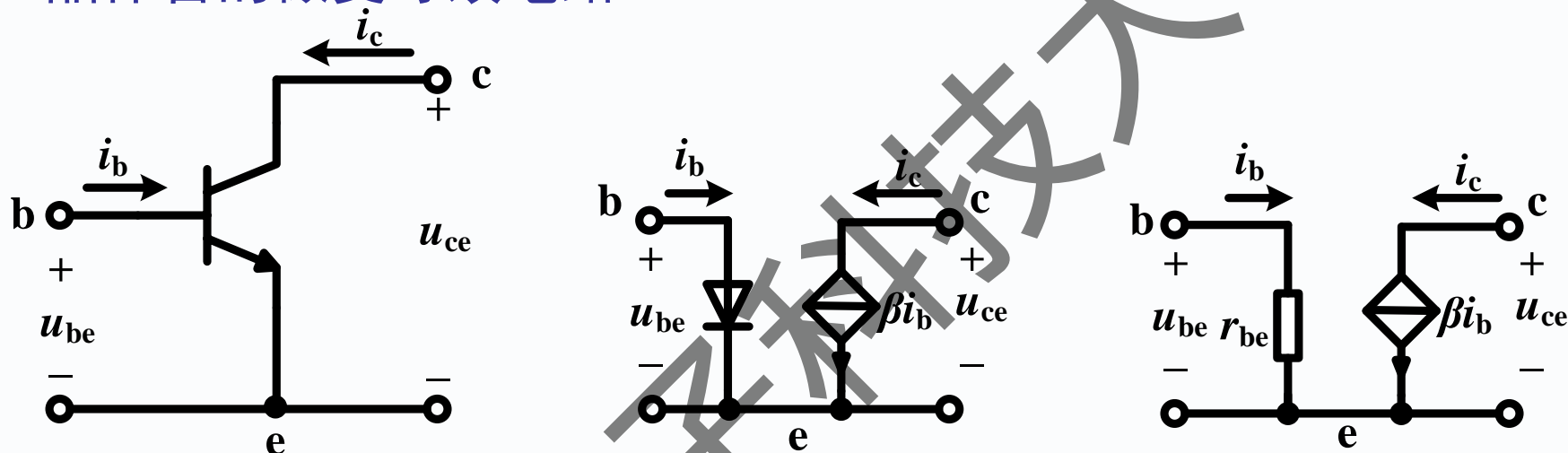
a. 晶体管的微变等效电路



(a) 共射接法的晶体管

6.3.3 动态分析 (A_u 、 R_i 、 R_o)

a. 晶体管的微变等效电路



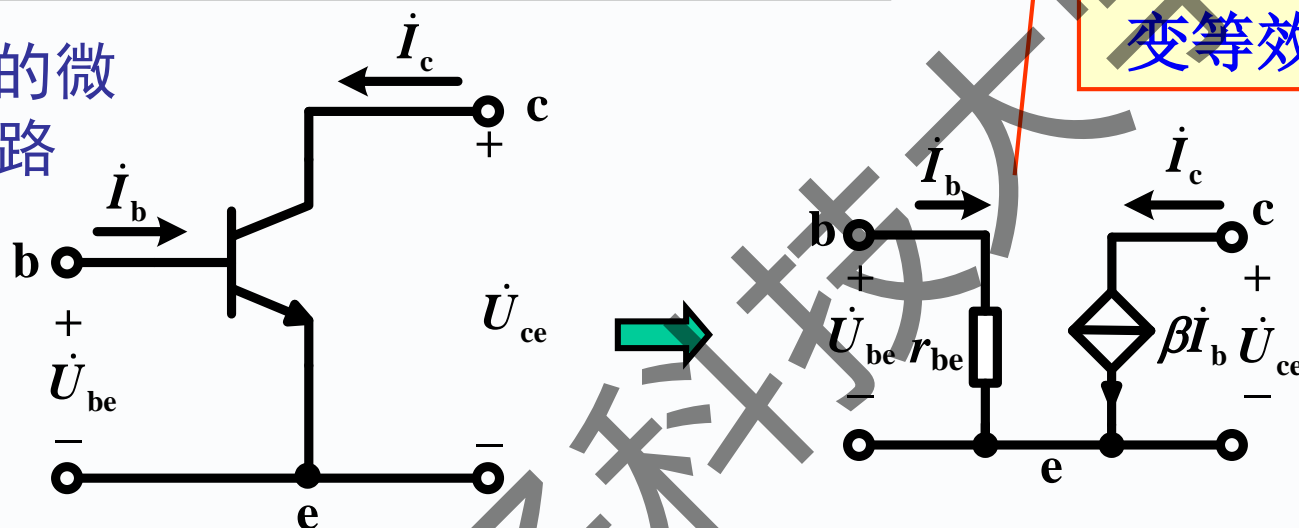
(a) 共射接法的晶体管 (b) 晶体管的一般电路模型 (c) 晶体管微变等效电路

在共发射极连接时，其一般电路模型可由图(b)描述。输入端是一个二极管，输出端则是受控电流源 βi_B

当输入信号比较小时，二极管可以进一步用它的小信号电路模型代替，其微变电阻 r_{be}

1.微变等效电路法

a. 晶体管的微变等效电路



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

I_{EQ} 为静态时的发射极电流mA

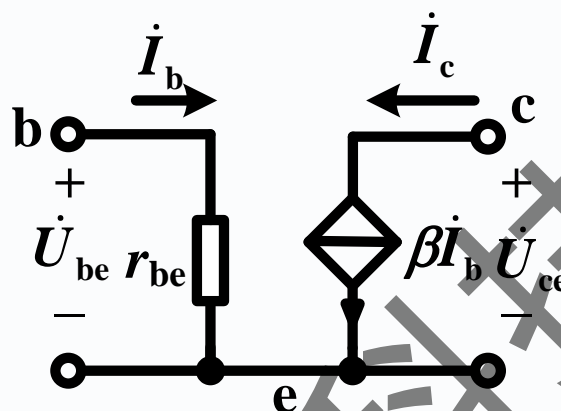
U_T 称为热电压，常温下取值26(mV)



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

1.微变等效电路法

a. 晶体管的微变等效电路



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

$r_{bb'}$ 称为晶体管的基区体电阻，可查手册得到，近似取值 300Ω

当 $0.1\text{mA} \leq I_{EQ} \leq 5\text{mA}$ 时

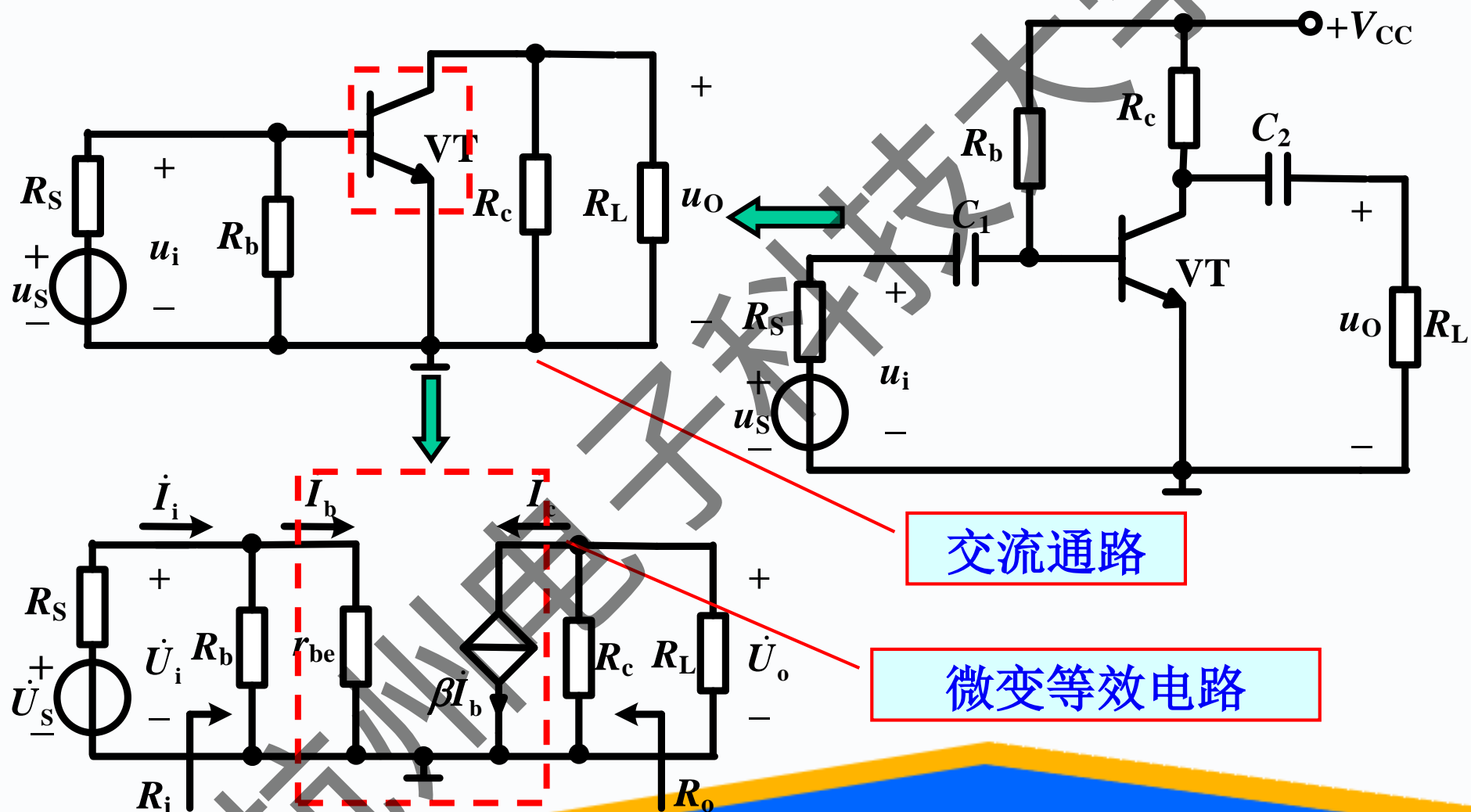
$$r_{be} = 300 + (1 + \beta)\frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

与Q点有关



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

(b) 放大电路的微变等效电路



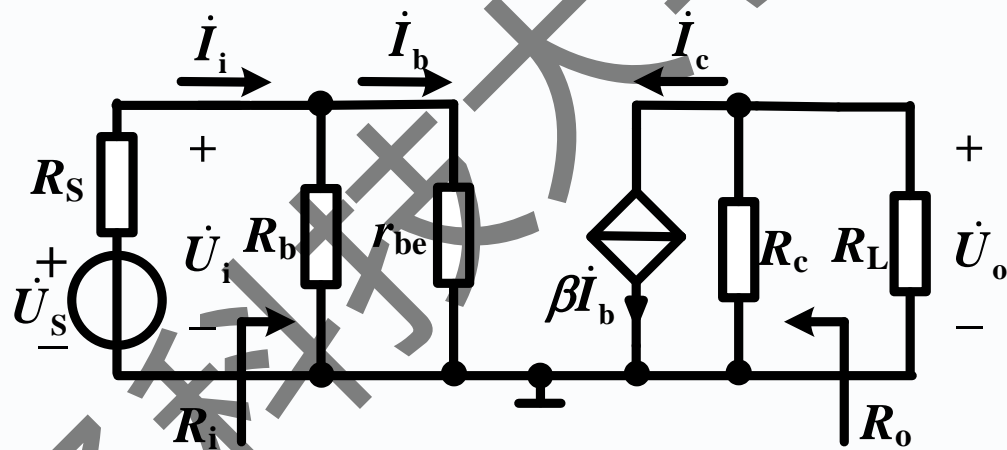
①求电压放大倍数（电压增益）

根据 $\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$

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

$$= -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)$$

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



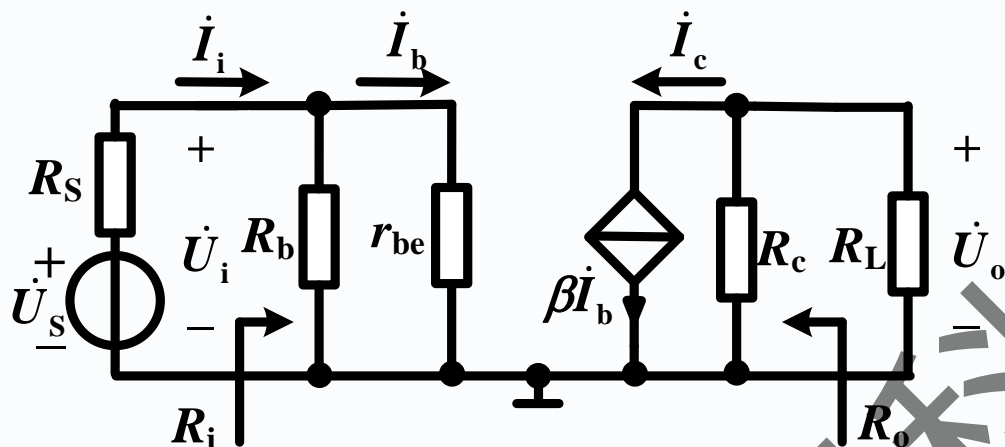
则电压增益为
(可作为公式)

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

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

输出电压与输入
电压相位相反。

② 求输入电阻



R_i 是放大电路的输入电阻，也是信号源的负载电阻，也就是从放大电路输入端看进去的交流等效电阻。

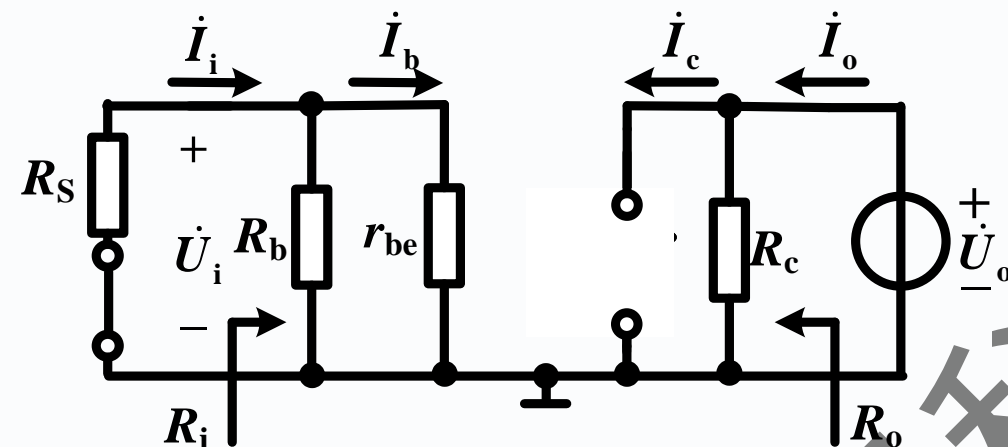
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be}$$

如果 R_i 小，则：

对上述电路通常希望 R_i 高一些

1. 放大电路将从信号源取用较大电流，增加信号源的负担；
2. 经过信号源内阻 R_s 和 R_i 分压，实际加到 R_i 上的电压 u_i 减小，从而减小了 u_o 。

③ 求输出电阻



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

求等效输出电阻时，用外加电源法：独立电源置0，负载断开

$$\dot{U}_S = 0 \rightarrow \dot{I}_b = 0 \rightarrow \beta \cdot \dot{I}_b = 0 \quad \text{所以} \quad R_o = R_c$$

放大电路对负载（或后级放大电路）来说，相当于一信号源，其内阻即为放大电路的输出电阻 R_o 。

输出电阻 R_o

$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \dot{U}_{oc} \quad \dot{I}_o = \frac{\dot{U}_{oc}}{R_o + R_L}$$

- ❖ 当 $R_o \ll R_L$ 时, 输出信号电压 $\dot{U}_o = \dot{U}_{oc}$ 。当 R_L 在较大范围内变化时, 就可基本维持输出信号电压的恒定。
- ❖ 如果输出电阻 R_o 很大, 满足 $R_o \gg R_L$ 的条件, 则输出信号电流 $\dot{I}_o = \dot{U}_{oc} / R_o$ 。当 R_L 在较大范围内变化时, 就可维持输出信号电流 \dot{I}_o 的恒定。
放大器在不同负载条件下维持输出信号电压（或电流）恒定的能力称为带负载能力。



④ 源电压放大倍数

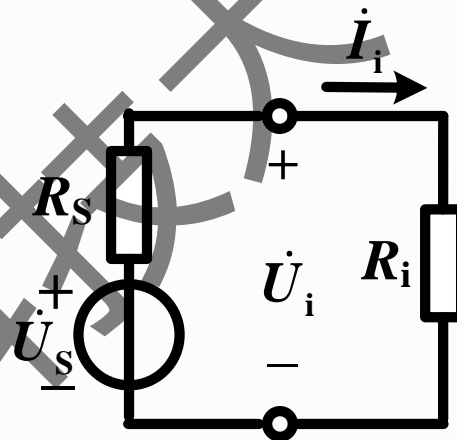
定义 $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}$$

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

$$\dot{U}_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \dot{U}_s$$

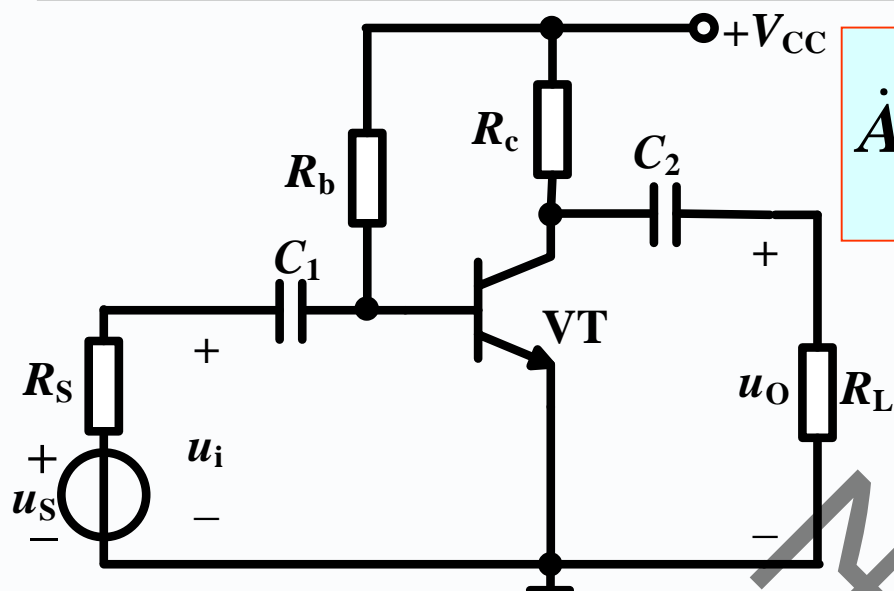
$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \dot{A}_u$$



R_i 为放大电路的输入电阻

放大电路对信号源(或前级放大电路)来说是一负载,可用一电阻 R_i 等效代替

1.微变等效电路法

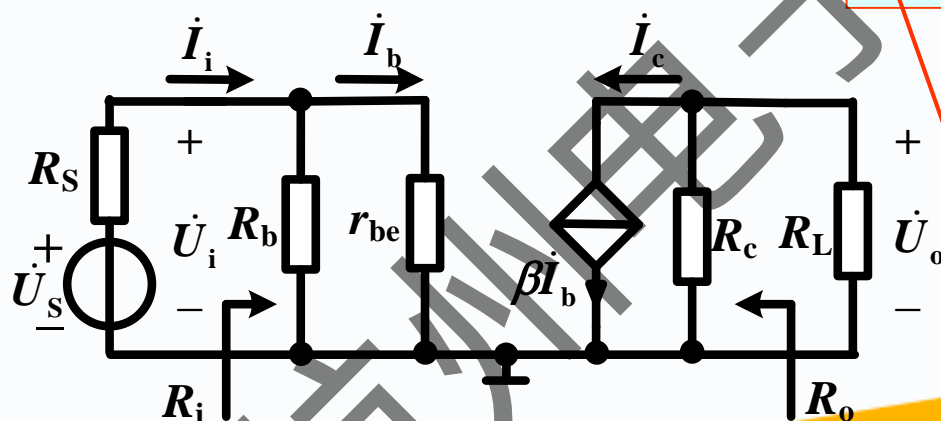


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c(R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_u$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be}$$

$$R_o = R_c$$



输入电阻中
不应含有 R_s !

输出电阻中
不应含有 R_L !



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

1.微变等效电路法

例 如图, 已知 $\beta=100$, $U_{BE}=-0.7V$, $r_{bb'}=200\Omega$ 。

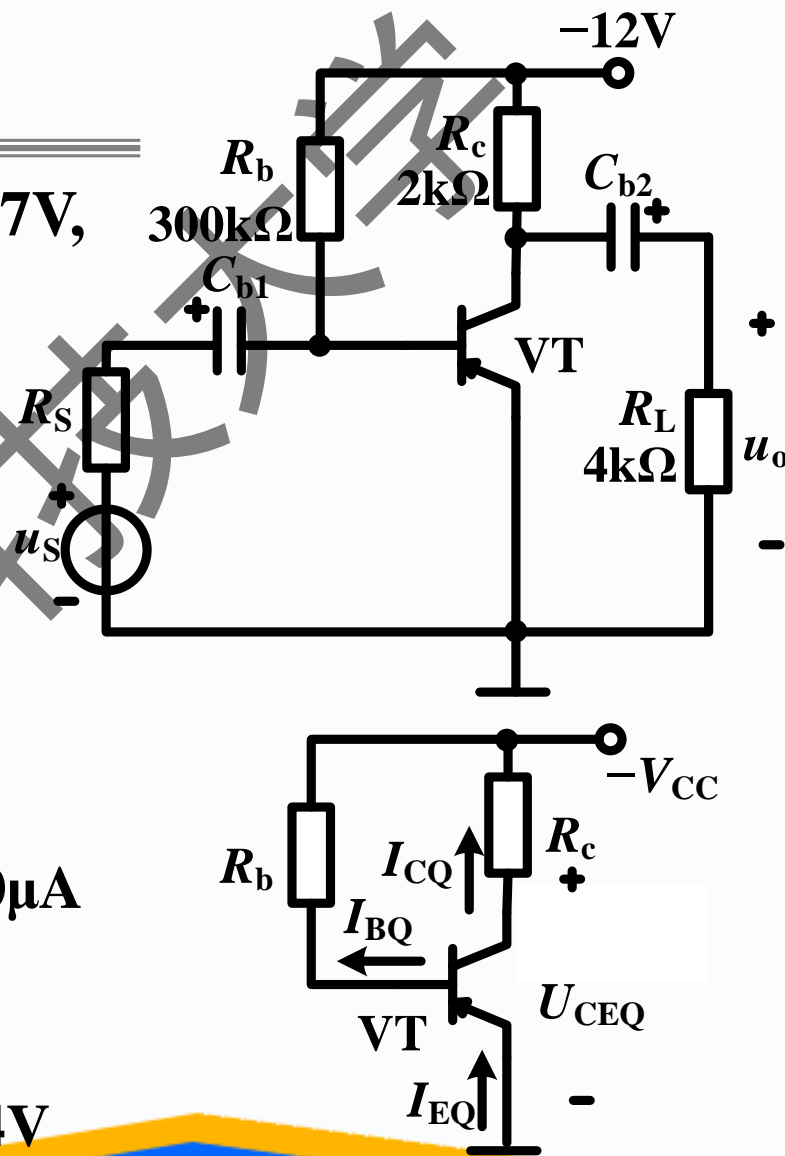
- (1) 试求该电路的静态工作点;
- (2) 画出简化的小信号等效电路;
- (3) 求该电路的电压增益 A_u , 输出电阻 R_o 、输入电阻 R_i 。

解 (1) 求 Q 点, 作直流通路

$$I_{BQ} = \frac{U_{BE} - (-V_{CC})}{R_b} = \frac{-0.7 - (-12)}{300} \approx 40\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times (40) = 4mA$$

$$U_{CEQ} = -V_{CC} + I_{CQ} R_c = -12 + 4 \times 2 = -4V$$



(2) 画出微变等效电路

i_b βi_b 的参考方向可以与三极管类型一致，也可以不一致

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

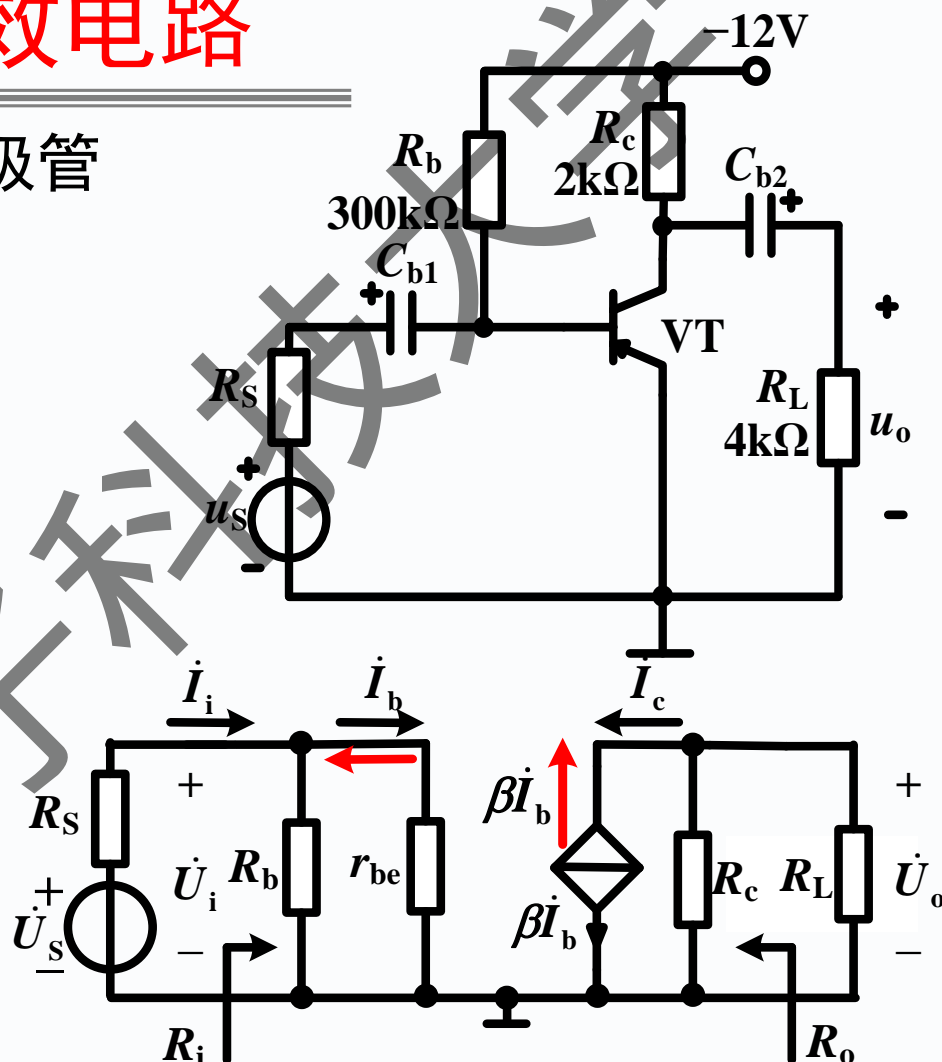
$$= 200 + (1 + 100) 26/4$$

$$= 865 \Omega$$

(3) 求电压增益

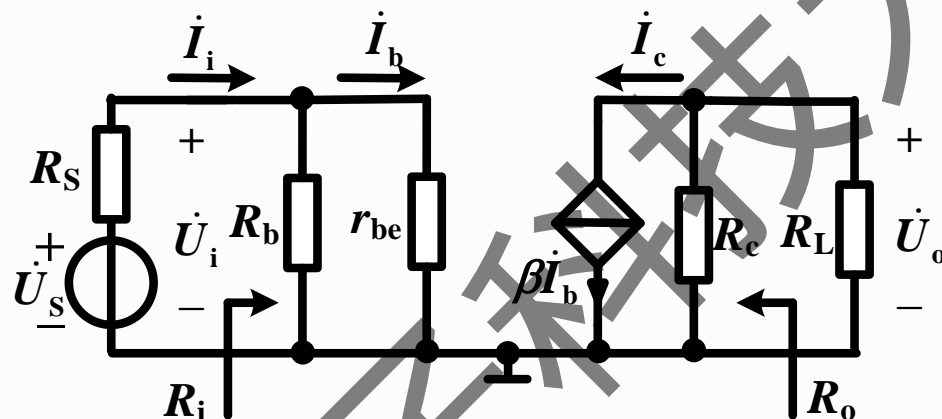
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}}$$

$$= -155.6$$



1.微变等效电路法

(4) 求输入电阻



$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be}$$

$$\approx 865\Omega$$

(5) 求输出电阻

$$R_o = R_c = 2k\Omega$$

1.微变等效电路法

【例6.3.2】在图示电路中，已知 $r_{bb}'=300\Omega$ ， $U_{BE(on)}=0.7V$ ， C_1 和 C_2 对交流信号可视为短路，试求电压放大倍数，输入电阻、输出电阻和源电压放大倍数。

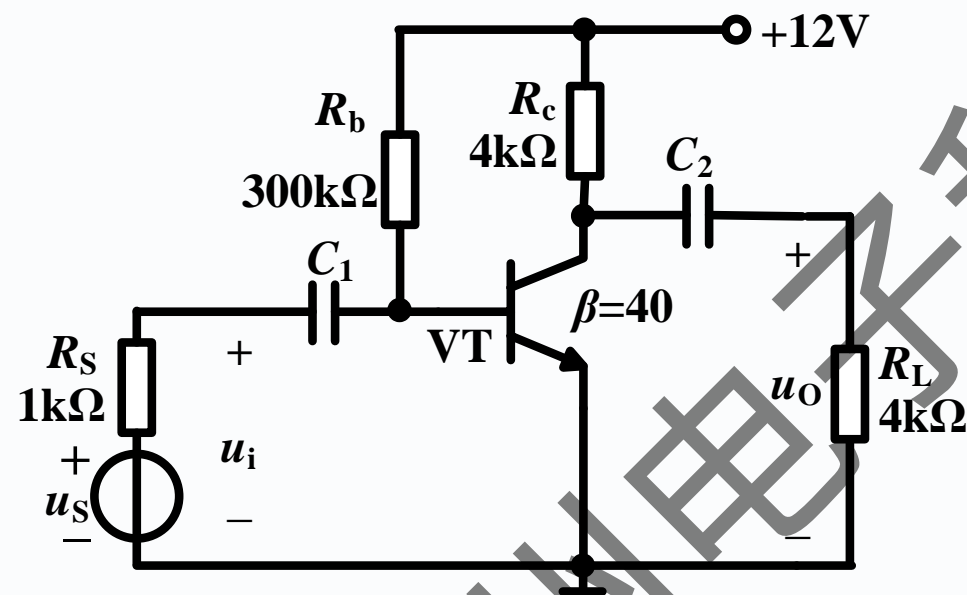
解：(1)静态分析

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b}$$

$$= \frac{12 - 0.7}{300} = 38(\mu A)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.52(mA)$$

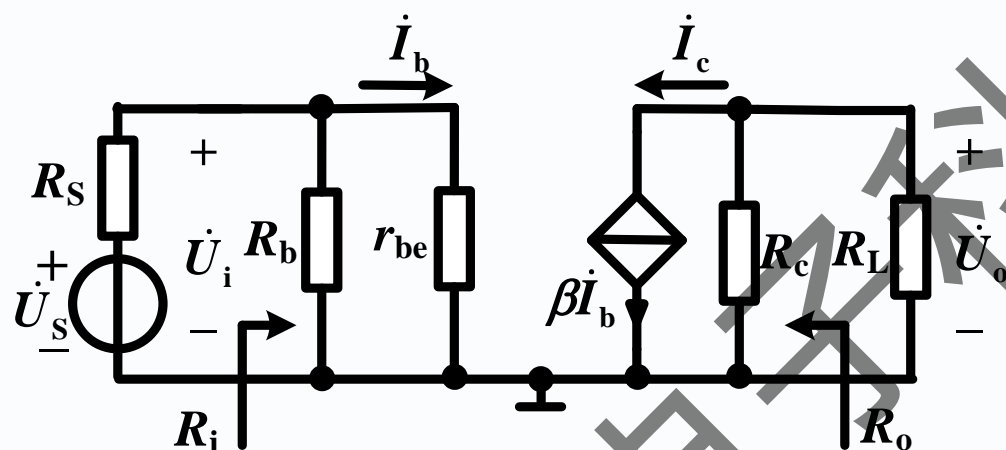
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 12 - 1.52 \times 4 = 5.92(V)$$



1.微变等效电路法

(2) 画出微变等效电路

$$r_{be} = 300 + (1 + 40) \frac{26(\text{mV})}{1.52(\text{mA})} = 1.0(\text{k}\Omega)$$



(3) 动态分析

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= - \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \\ &= - \frac{40 \times \frac{4}{2}}{1.0} = -80 \end{aligned}$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 1.0(\text{k}\Omega)$$

$$R_o = R_c = 4(\text{k}\Omega)$$

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_u \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -80 \times \frac{1.0}{1.0 + 1} = -40$$



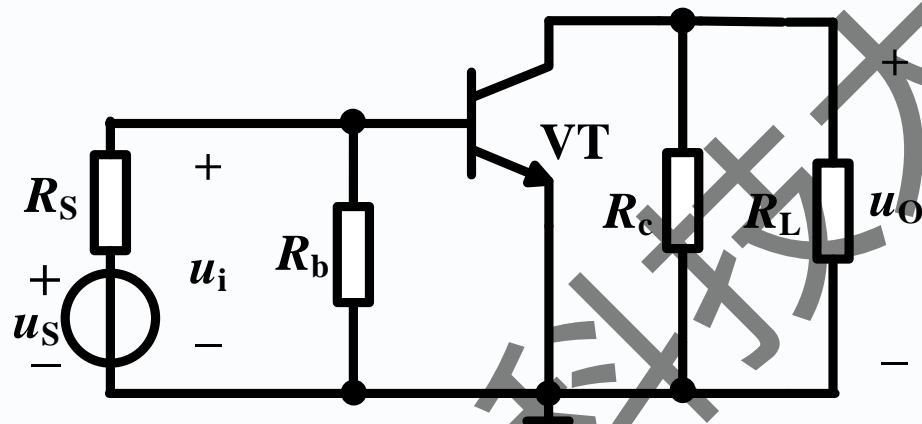
小结

■ 等效电路法的步骤(归纳)

- 1. 首先利用图解法或近似估算法确定放大电路的静态工作点 Q 。
- 2. 求出静态工作点处的微变等效电路，参数 r_{be} ， β 已知。
- 3. 画出放大电路的微变等效电路。可先画出放大电路的交流通路，然后将三极管换成其微变等效电路即可。
- 4. 列出电路方程并求解。



2. 图解法



$$u_o = i_c R_c // R_L \quad u_{ce} = i_c R'_L$$

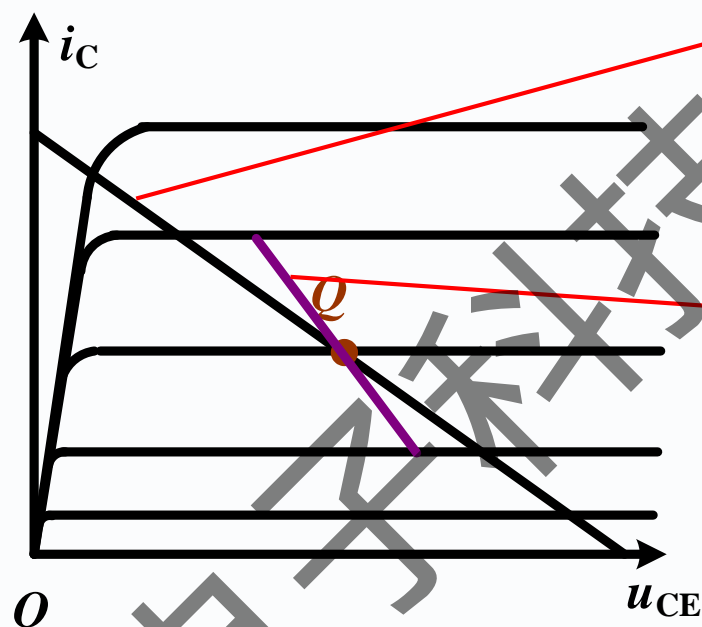
$$u_{CE} - U_{CE} = (i_C - I_C) R'_L \quad u_{CE} - U_{CEQ} = (i_C - I_{CQ}) R'_L$$

显然此方程描述的是关于 u_{CE} 和 i_C 的一条直线，此直线的斜率为 $-1/R'_L$ ，且过 (U_{CEQ}, I_{CQ}) 点。

此直线称为交流负载线。



2. 图解法



直流负载线

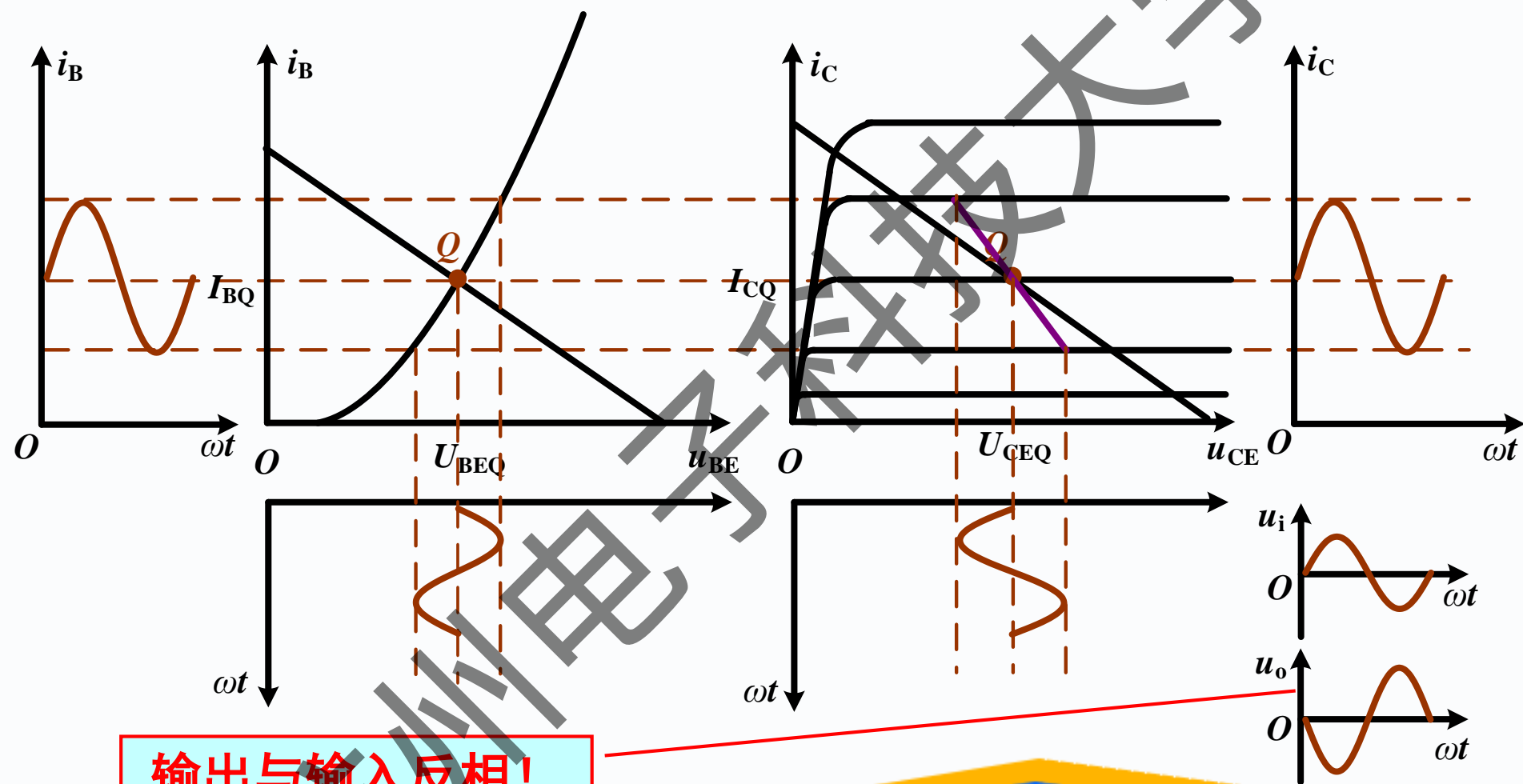
斜率: $-1/R_c$

交流负载线

斜率: $-1/R_L'$

交流负载线过 Q 点, 斜率为 $-1/R_L'$

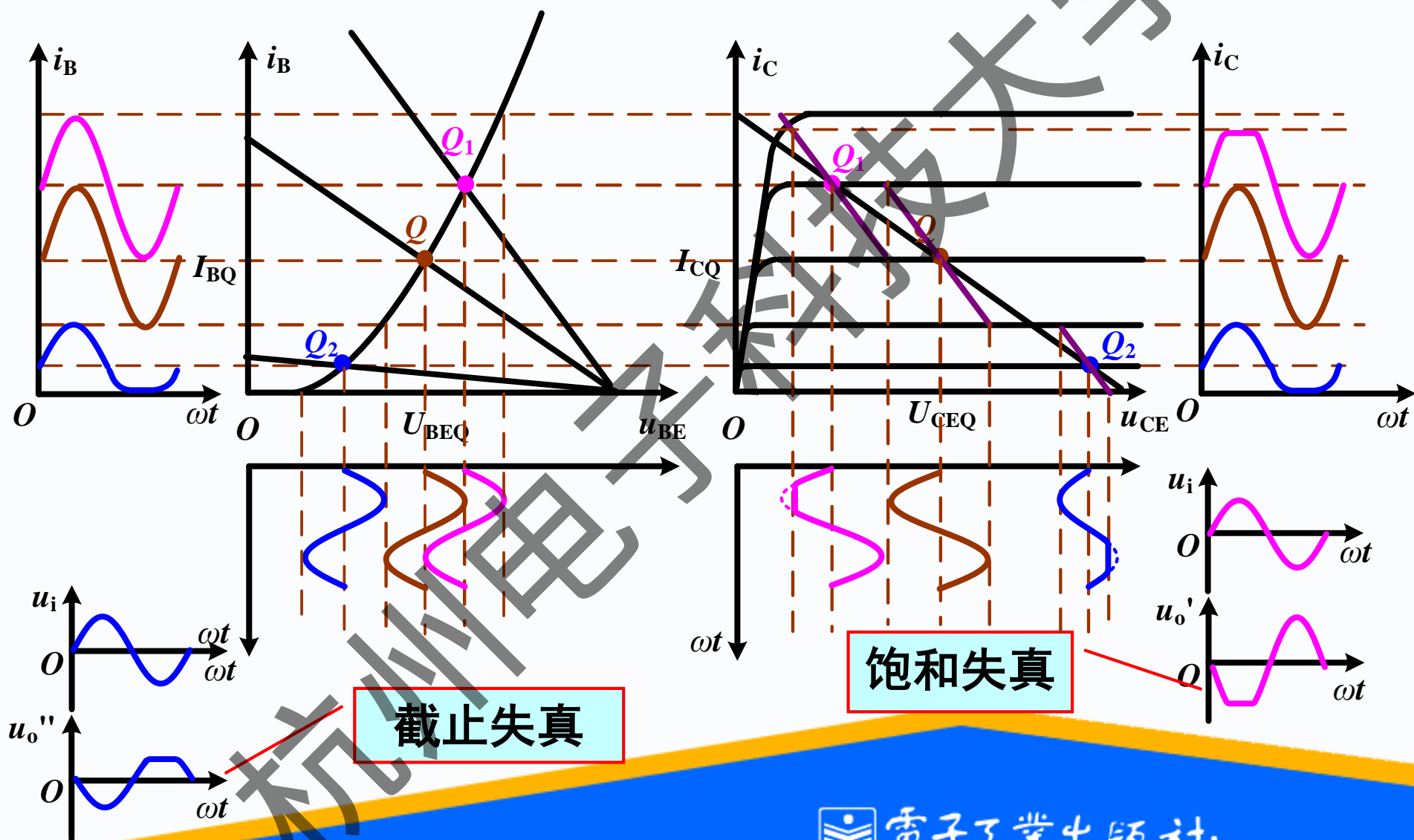
2. 图解法



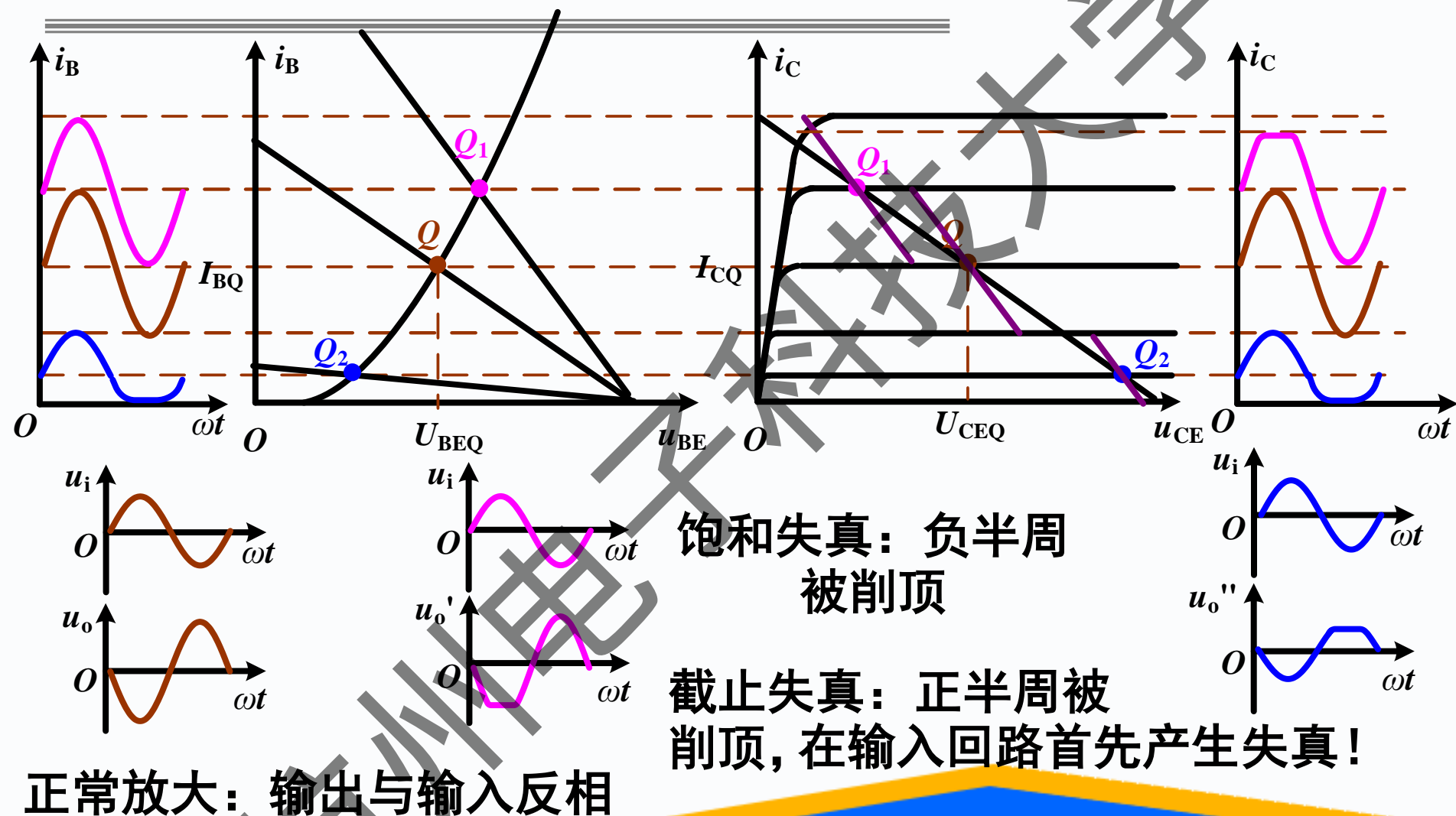
输出与输入反相!

6.3.4.动态分析之失真分析

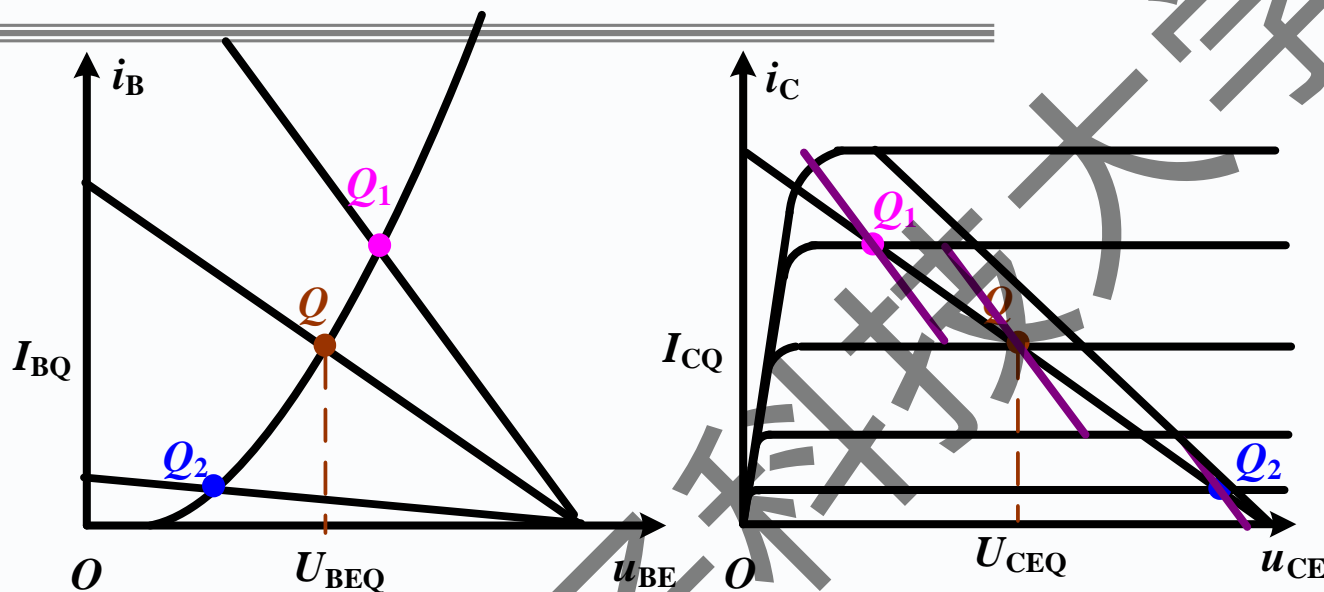
1、非线性失真



6.3.4.动态分析之失真分析



6.3.4.动态分析之失真分析



消除失真的方法:

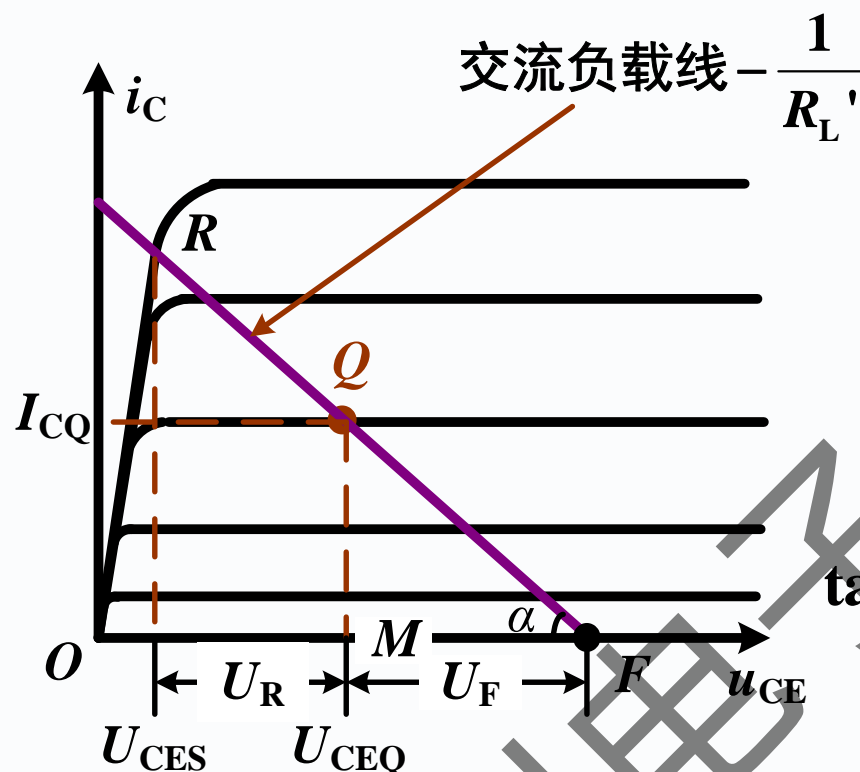
截止失真: Q 点上移 $R_b \downarrow$

饱和失真: Q 点下移 $R_b \uparrow$

Q 点右移 $R_c \downarrow$

不是一个好方法

2. 最大输出电压幅值



受饱和失真限制 求 U_R

$$U_R = U_{CEQ} - U_{CES}$$

对于小功率硅管, U_{CES} 一般取 $0.5 \sim 1V$ 。

受截止失真限制 求 U_F

$$\tan \alpha = \frac{QM}{MF} = \frac{1}{R'_L}$$

$$U_F = \frac{I_{CQ}}{1/R'_L} = I_{CQ} R'_L$$

$$U_{omax} = \min\{U_F, U_R\} = \min\{I_{CQ} R'_L, U_{CEQ} - U_{CES}\}$$



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

i_C 、 u_{CE} (u_o) 波形失真总结

1、输出波形顶部失真时：

对NPN管，是截止失真；对PNP管，是饱和失真

2、输出波形底部失真时：

对NPN管，是饱和失真；对PNP管，是截止失真

与是什么放大电路也有关，比如共射电路或共集电极电路。

NPN，比如同是消底，共射电路是饱和失真，共集电极电路就是截止失真。



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。

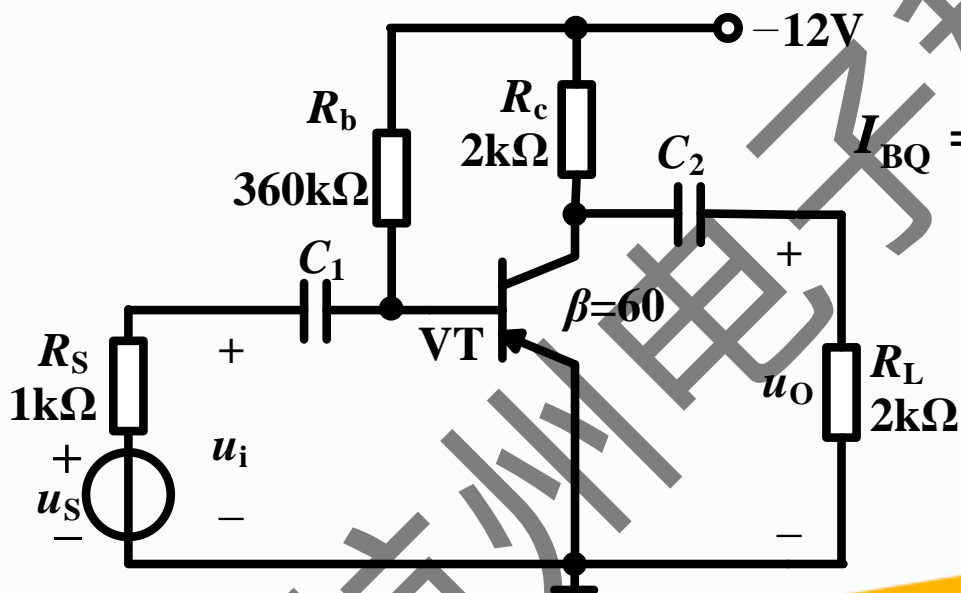
缺点：不够精确，过程较慢，人为因素很大。



6.3.4.动态分析之失真分析

【例6.3.3】 电路如图所示，已知晶体管VT为锗管， $r_{bb}'=300\Omega$ ， $U_{BE(on)}=-0.3V$ ， $U_{CES}=-0.5V$ C_1 和 C_2 对交流信号可视为短路；试求：（1）静态工作点 Q ；（2）电压放大倍数，输入电阻、输出电阻和动态范围 U_{P-P} 。

解：（1）静态分析：



$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} + U_{BEQ}}{R_b} = \frac{12 - 0.3}{360} = 0.0325(\text{mA})$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 60 \times 0.0325 = 1.95(\text{mA})$$

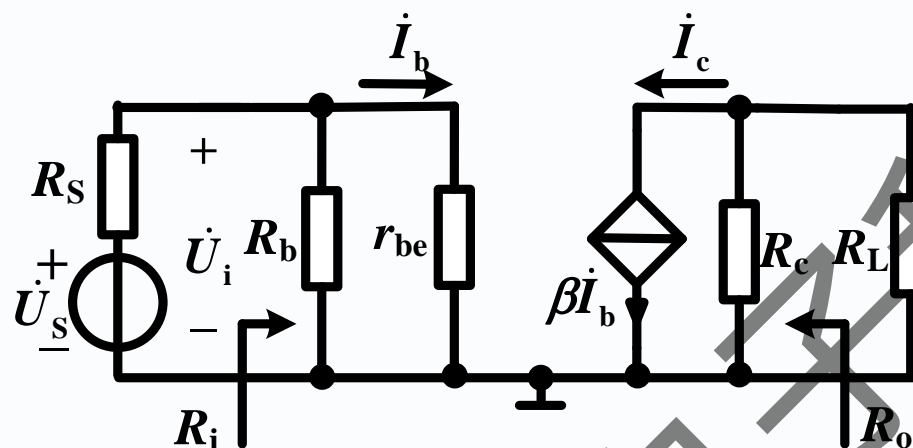
$$U_{CEQ} = -V_{CC} + I_{CQ} R_c = -8.1(\text{V})$$



6.3.4.动态分析之失真分析

(2) 画出微变等效电路

$$r_{be} = 300 + (1 + 60) \frac{26(\text{mV})}{1.95(\text{mA})} = 1.1(\text{k}\Omega)$$



(3) 动态分析

$$\begin{aligned} A_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} \\ &= -54.5 \end{aligned}$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 1.1(\text{k}\Omega)$$

$$R_o = R_c = 2(\text{k}\Omega)$$

6.3.4.动态分析之失真分析

(4) 动态范围

$$U_{\text{omax}} = \min\{|U_{\text{CEQ}}| - |U_{\text{CES}}|, I_{\text{CQ}} R_L'\} = \min\{8.1 - 0.5, 1.95 \times 1\} = 1.95(\text{V})$$

$$U_{\text{P-P}} = 2U_{\text{omax}} = 3.9(\text{V})$$

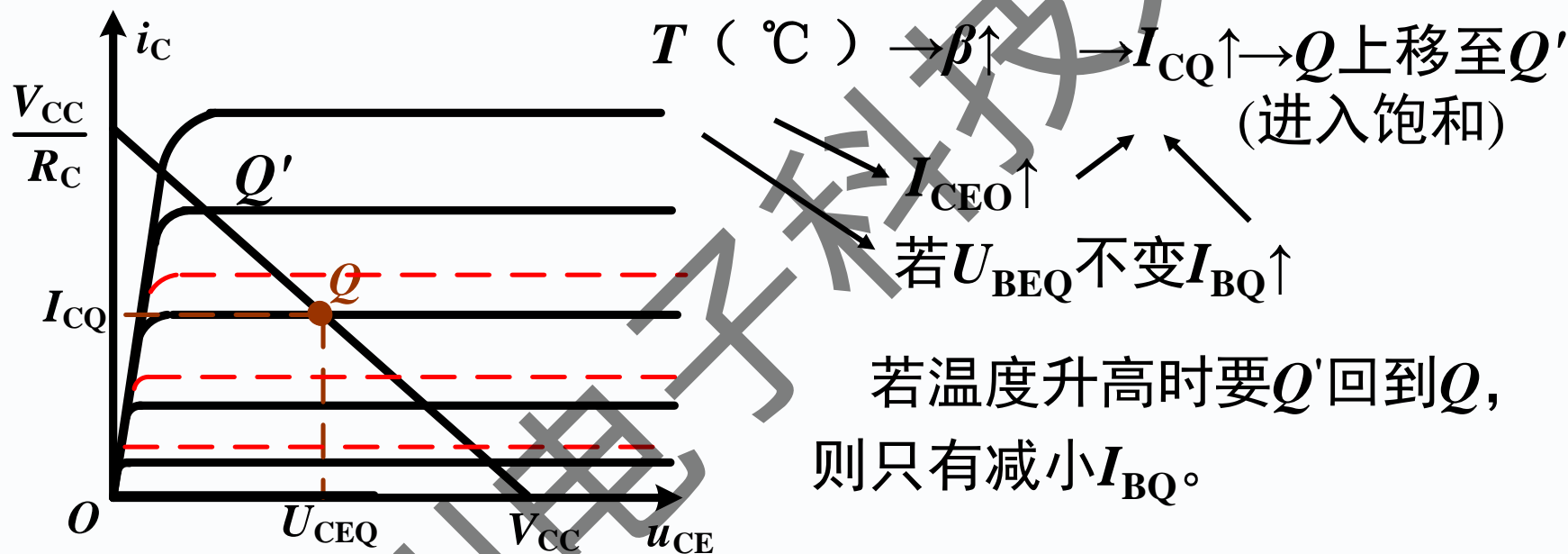
$$U_{\text{imax}} = \frac{U_{\text{omax}}}{A_u} = \frac{1.95}{54.5} \approx 35.8(\text{mV})$$



6.4 晶体管放大电路的三种接法

6.4.1、静态工作点稳定的共射放大电路

1. 温度对静态工作点的影响

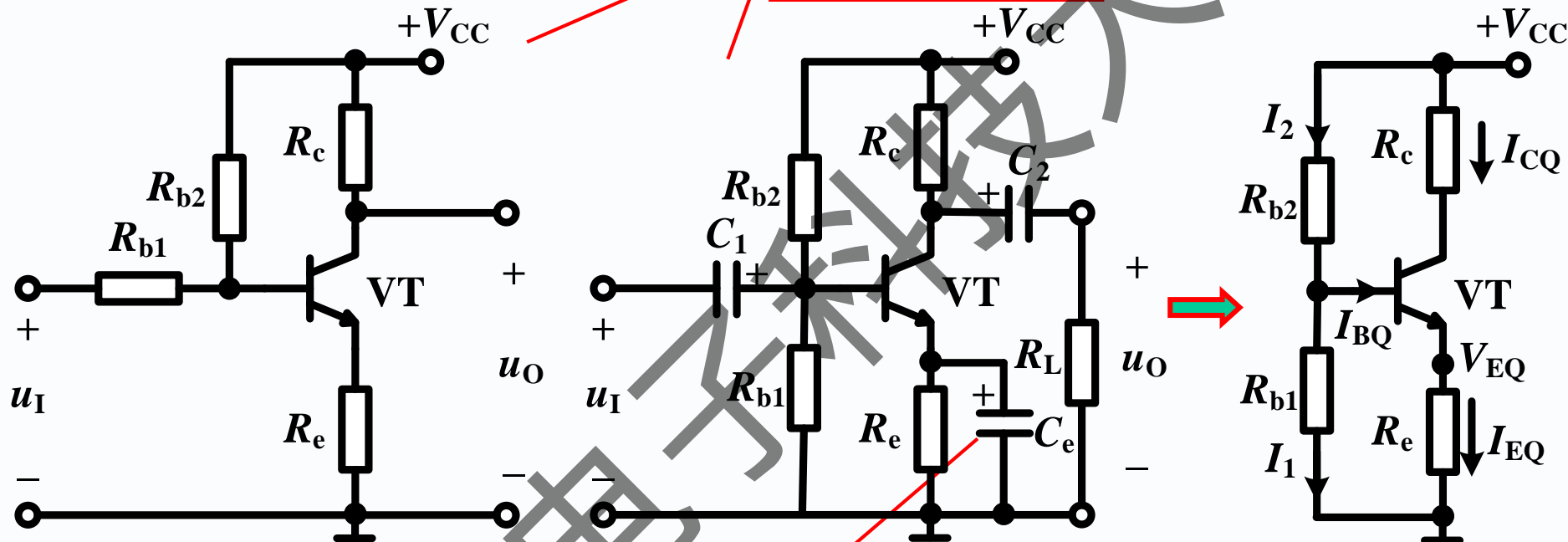


若温度升高时要 Q' 回到 Q ,
则只有减小 I_{BQ} 。

所谓 Q 点稳定, 是指 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 在温度变化时基本不变, 这是靠 I_{BQ} 的变化得来的。

2、静态工作点稳定的典型电路

(1) 电路组成

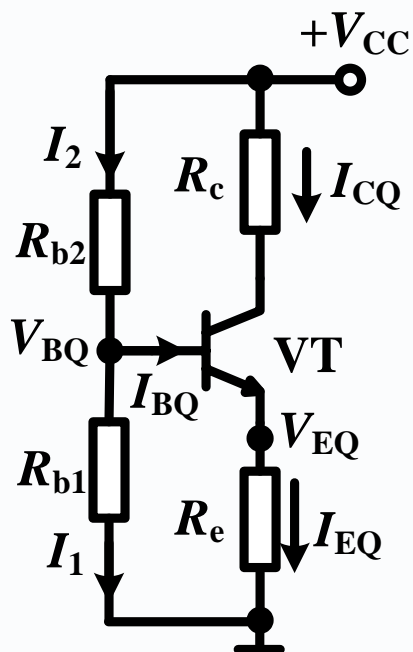


直流通路?

C_e 为旁路电容，在交流通路中可视为短路

加了 R_{b1} 和 R_e ，构成基极分压式射极偏置电路

(2) 稳定原理



为了稳定 Q 点, 通常 $I_1 \gg I_{BQ}$, 即 $I_1 \approx I_2$; 因此

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

基本不随温度变化

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

若使 $V_{BQ} \gg U_{BEQ}$, 则 I_{EQ} 稳定

一般对硅管, 取 $I_1 = (5 \sim 10) I_{BQ}$, $V_{BQ} = (5 \sim 10) U_{BEQ}$

这种电路稳定工作点的过程:

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow V_{EQ} (I_{EQ} R_e) \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow (V_{BQ} \text{基本不变}) \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

Re 的作用

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$ (V_B 基本不变) $\rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$

关于反馈的一些概念：

$$U_{BE} = V_B - I_C R_e$$

将输出量通过一定的方式引回输入回路影响输入量的措施称为反馈。

直流通路中的反馈称为直流反馈。

反馈的结果使输出量的变化减小的称为负反馈，反之称为正反馈。

I_C 通过 R_e 转换为 ΔU_E 影响 U_{BE}

温度升高 I_C 增大，反馈的结果使之减小

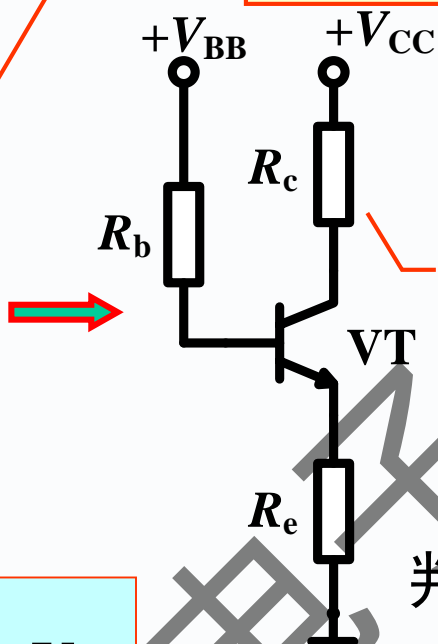
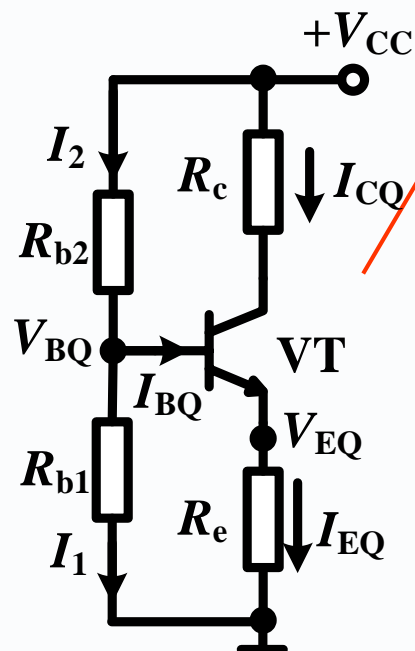
R_e 起直流负反馈作用，其值越大，反馈越强， Q 点越稳定。

R_e 有上、下限值吗？



(3) Q 点分析

分压式电流负反馈工作点稳定电路



$$V_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} \quad R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

R_b 上静态电压是否可忽略不计?

$$V_{BB} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e$$

判断方法: $R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta) R_e$?

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

$$I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

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

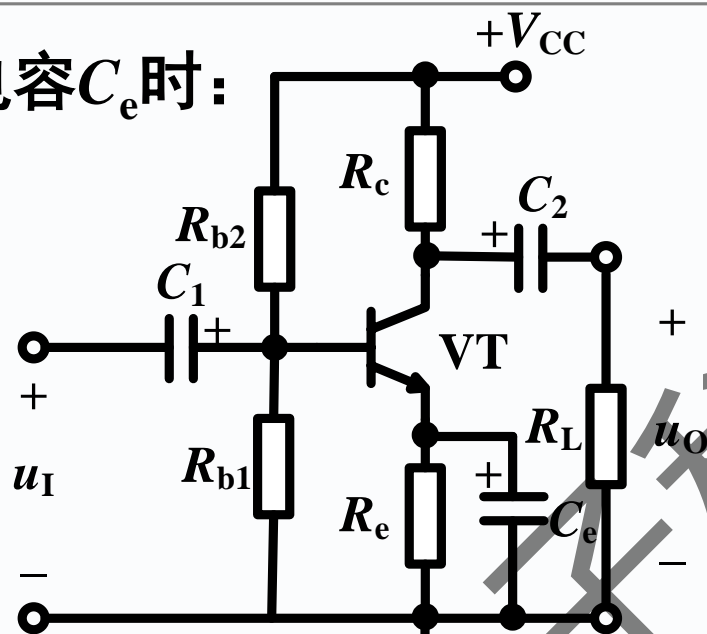
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e$$

$$\approx V_{CC} - I_{EQ} (R_c + R_e)$$



(4) 动态分析

有旁路电容 C_e 时:

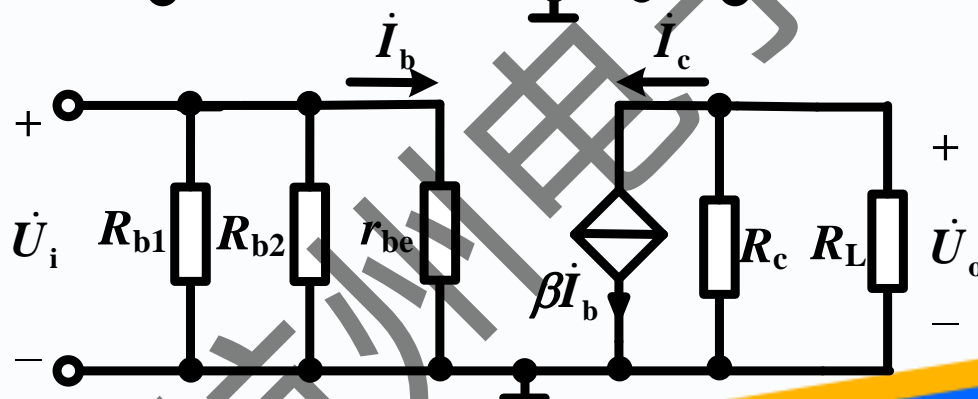


如何提高电压放大能力?

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

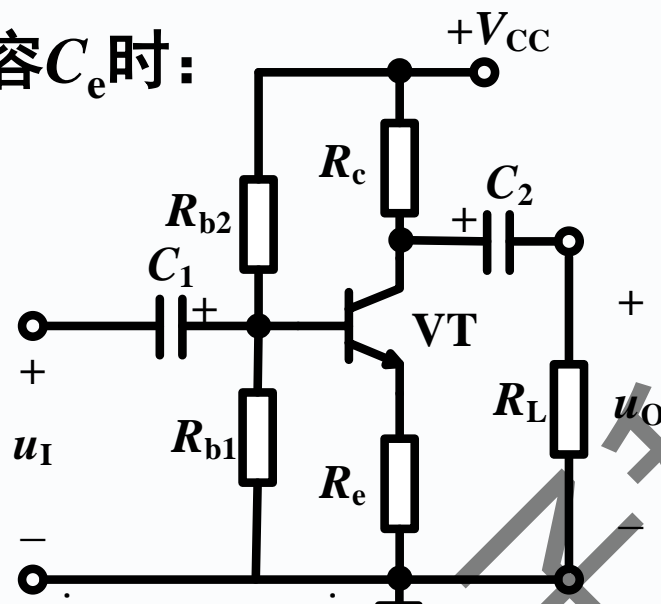
$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$R_o = R_c$$



(4) 动态分析

无旁路电容 C_e 时:

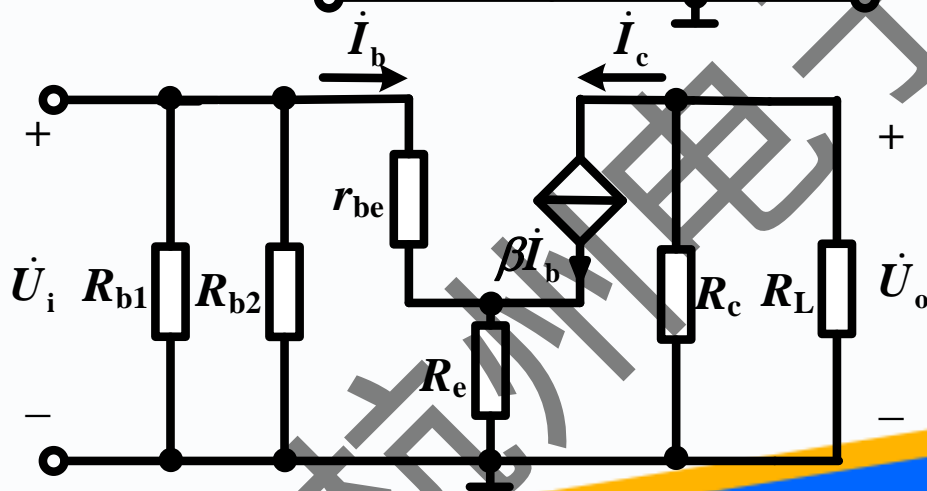


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

折合的概念

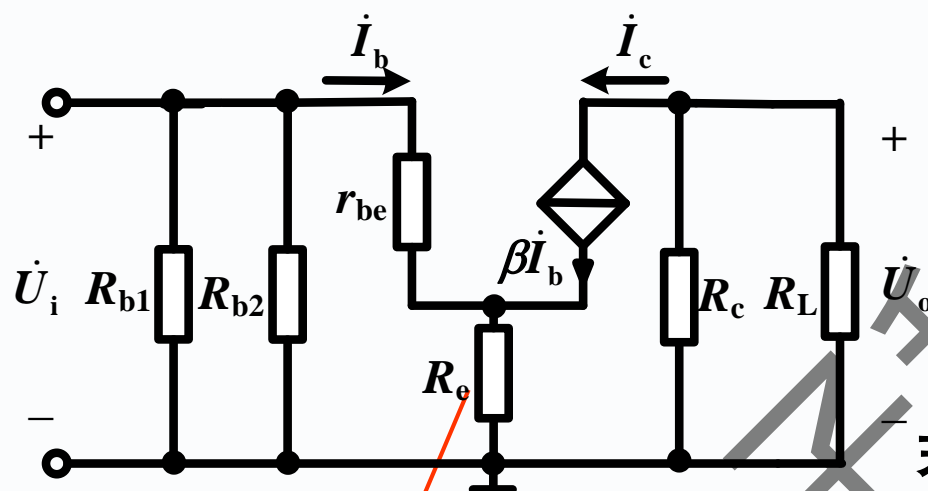
$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$R_o = R_c$$



(4) 动态分析

无旁路电容 C_e 时:



利?弊?

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

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$R_o = R_c$$

若 $r_{be} \ll (1 + \beta) R_e$

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

比较

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

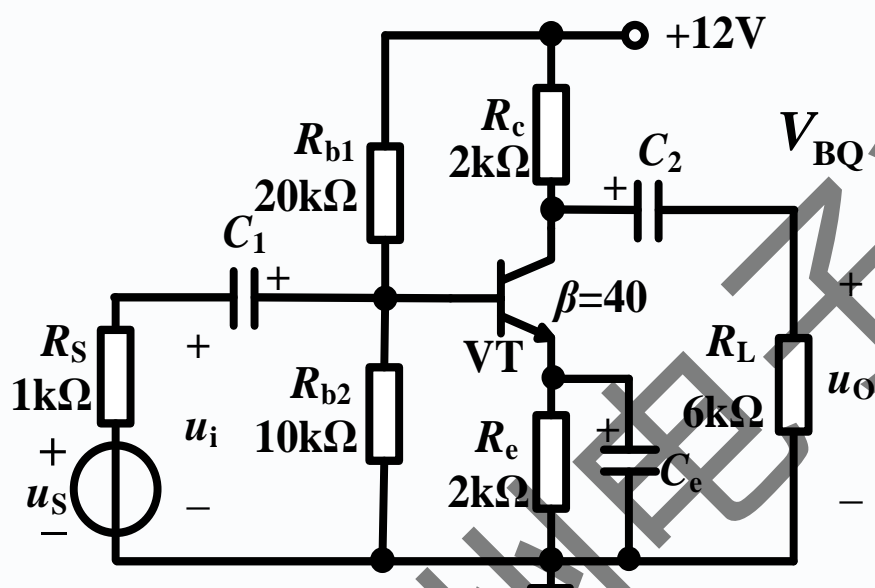
虽 R_e 使 A_u 减小, 但 A_u 仅取决于电阻值, 不受温度影响, 温度稳定性好



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

6.4.1、静态工作点稳定的共射放大电路

【例6.4.1】在图示分压式偏置放大电路中，已知晶体管的 $U_{BE(on)}=0.7V$ ，试计算：（1）静态工作点；（2）计算该电路的电压放大倍数 A_u ，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



解：（1）静态工作点

$$V_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} = 12 \times \frac{10}{10 + 20} = 4(V)$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BE(on)}}{R_e} = \frac{4 - 0.7}{2} = 1.65(mA)$$

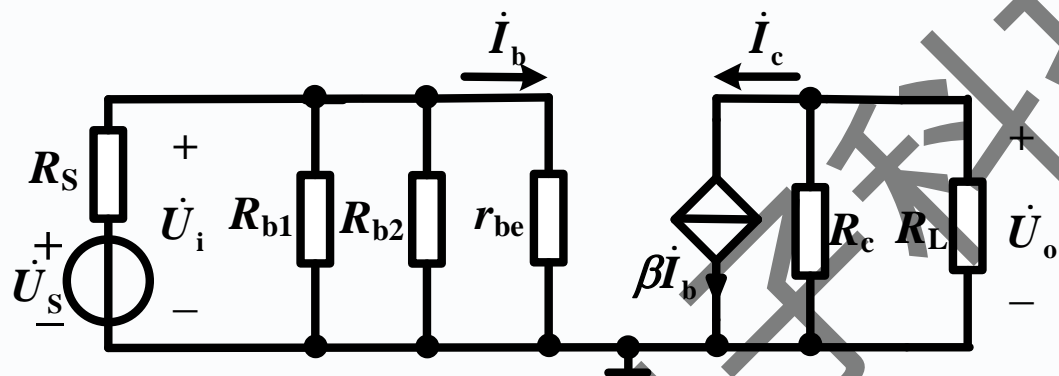
$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 12 - 1.65 \times (2 + 2) = 5.4(V)$$



6.4.1、静态工作点稳定的共射放大电路

(2) 画微变等效电路

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = 300 + (1 + 40) \times \frac{26}{1.65} = 0.95(\text{k}\Omega)$$



(3) 动态分析

$$\begin{aligned} R_i &= R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \\ &= 20 // 10 // 0.95 = 0.83(\text{k}\Omega) \end{aligned}$$

$$R_o = R_c = 2\text{k}\Omega$$

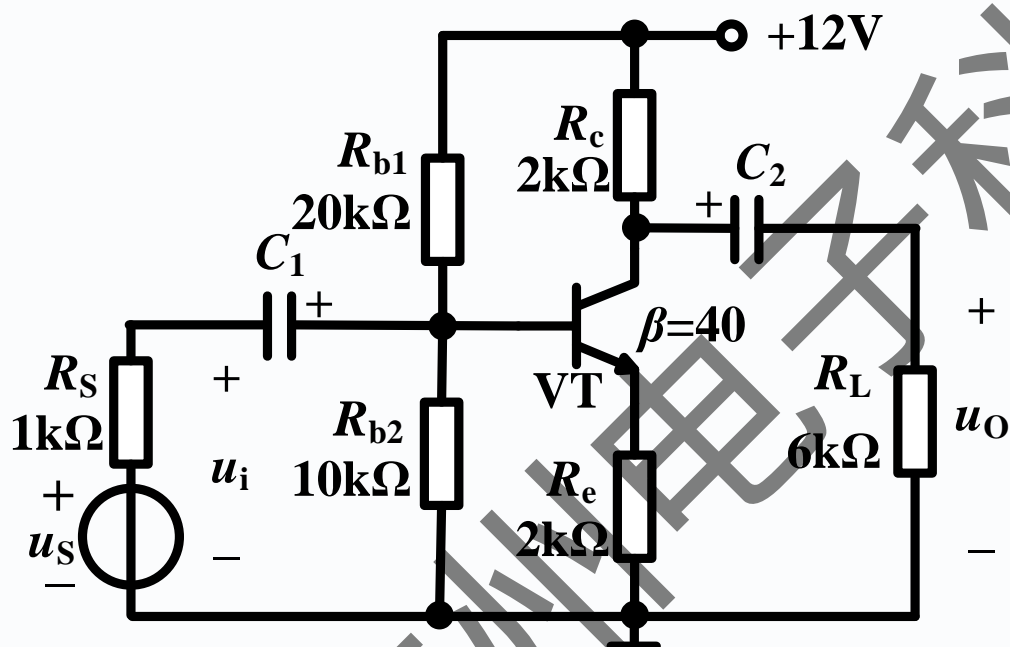
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -40 \times \frac{(2 // 6)}{0.95} = -63.2$$



6.4.1、静态工作点稳定的共射放大电路

【例6.4.2】 在例6.4.1中，如果没有并联旁路电容 C_e ，试计算：(1)计算该电路的电压放大倍数 \dot{A}_u ，(2)输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

解：没有并联旁路电容 C_e 的直流分析同上题一样。



$$V_{BQ} = 4(\text{V})$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = 1.65(\text{mA})$$

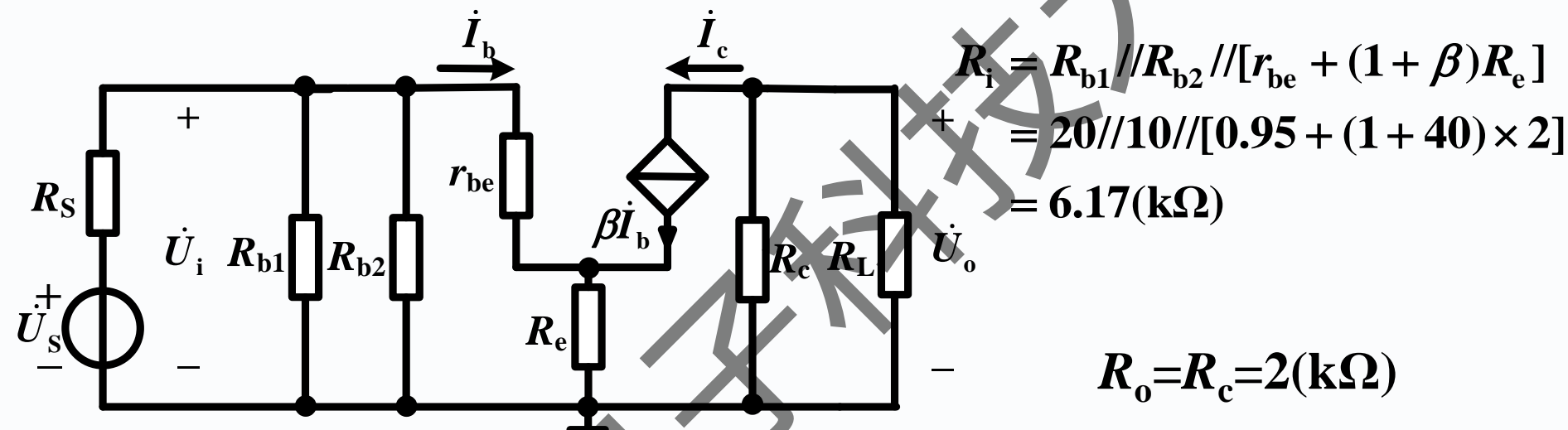
$$U_{CEQ} = 5.4(\text{V})$$

$$r_{be} = 0.95(\text{k}\Omega)$$



6.4.1、静态工作点稳定的共射放大电路

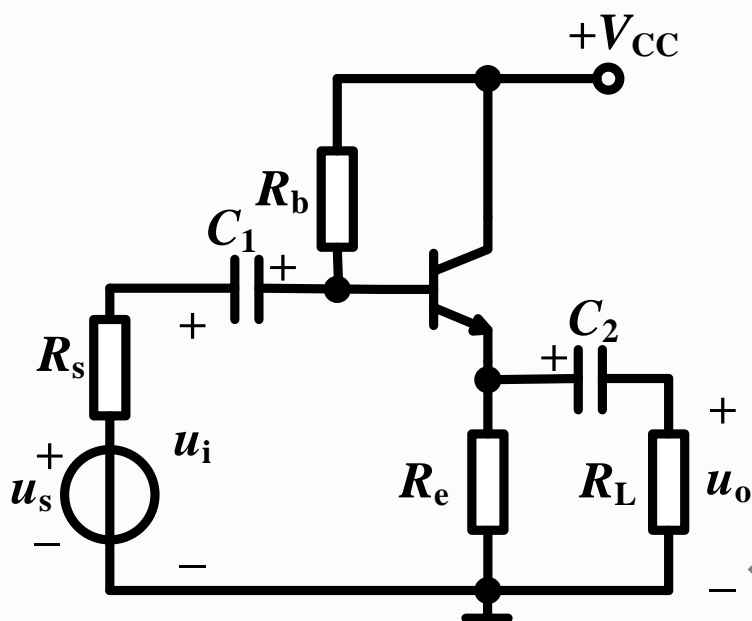
此时的微变等效电路如图所示



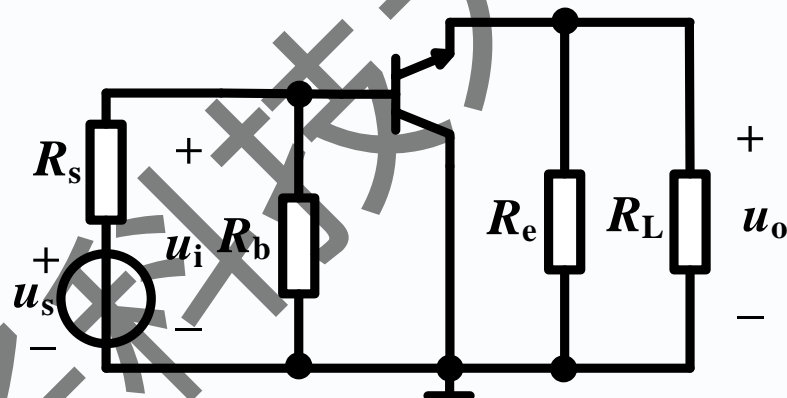
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} = -\frac{40 \times (2 // 6)}{0.95 + (1 + 40) \times 2} = -0.72$$

6.4.2 共集电极放大电路

b极输入，e极输出，c为公共端



(a) 原理图



(b) 交流通路

1. 静态分析

$$V_{CC} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e$$

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

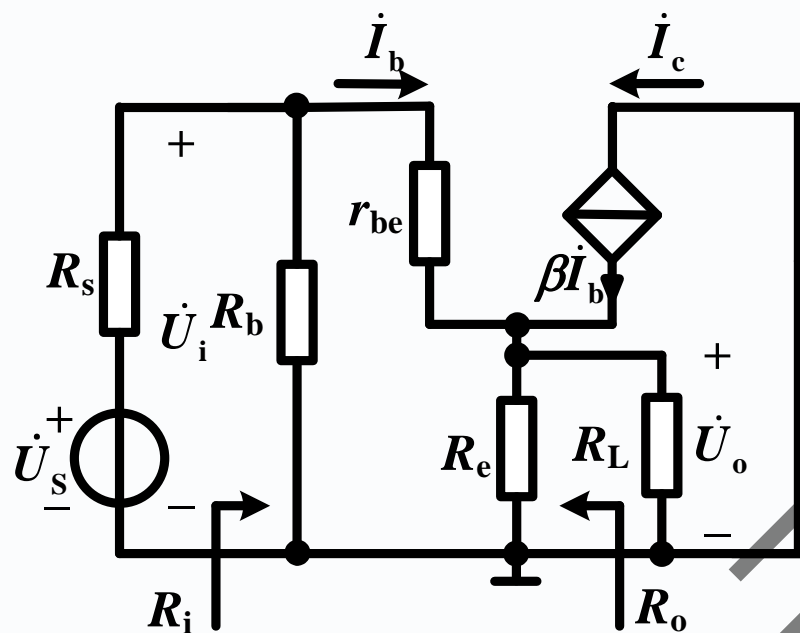
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_e \approx V_{CC} - I_{CQ} R_e$$



2. 动态分析：电压放大倍数



(c) 微变等效电路

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e (R_e // R_L)$$

$$= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}$$

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

若 $r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$, 则 $A_u \approx 1$ $\dot{U}_o \approx \dot{U}_i$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e (R_e // R_L) = (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

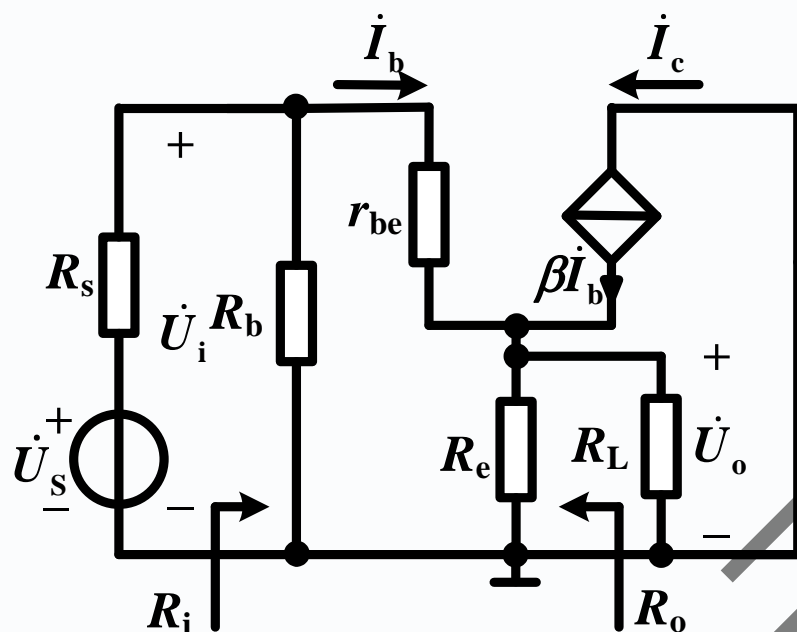
$$R'_L = R_L // R_e$$

故称之为射极跟随器



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 动态分析：输入电阻的分析



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

折合的概念

R_i 与负载有关!

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

R_o 与信号源内阻有关!

折合的概念



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

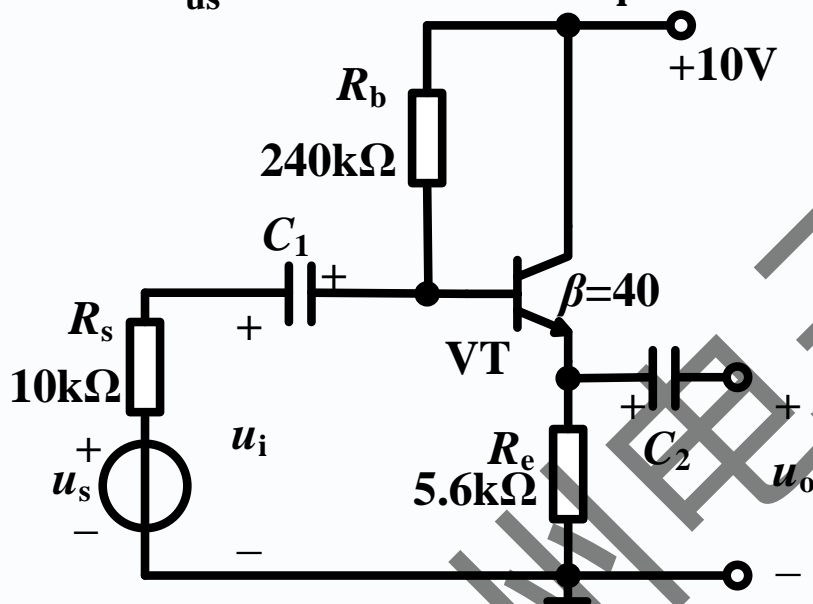
共集电极电路特点：

- ◆ 电压增益小于1但接近于1， u_o 与 u_i 同相
- ◆ 输入电阻大，对电压信号源衰减小
- ◆ 输出电阻小，带负载能力强



6.4.2 共集电极放大电路

【例6.4.3】在图示的共集电极放大电路中，锗晶体管的 $U_{BE(on)}=0.2V$ ，试估算静态工作点 Q ，求电压放大倍数 \dot{A}_u 和 \dot{A}_{us} 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。



解：(1)静态分析

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

$$= \frac{10 - 0.2}{240 + (1 + 40) \times 5.6} \approx 0.02(\text{mA})$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \beta I_{BQ} = 40 \times 0.02 = 0.8(\text{mA})$$

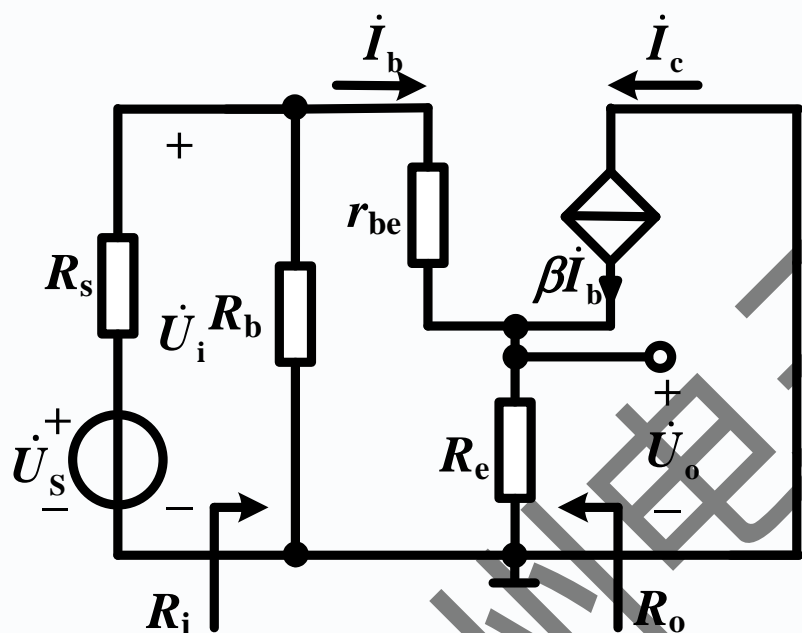
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_e = 10 - 0.8 \times 5.6 = 5.52(\text{V})$$



6.4.2 共集电极放大电路

(2) 微变等效电路图

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 1.63(\text{k}\Omega)$$



$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \\ &= \frac{(1 + 40) \times 5.6(\text{k}\Omega)}{1.63 + (1 + 40) \times 5.6(\text{k}\Omega)} \approx 0.99 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_i &= R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \\ &= 240 // [1.63 + (1 + 40) \times 5.6] \approx 117.8(\text{k}\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_o &= R_e // \frac{r_{be} + (R_b // R_s)}{(1 + \beta)} \\ &= 5.6 // \frac{1.63 + (10 // 240)}{1 + 40} = 0.26(\text{k}\Omega) \end{aligned}$$

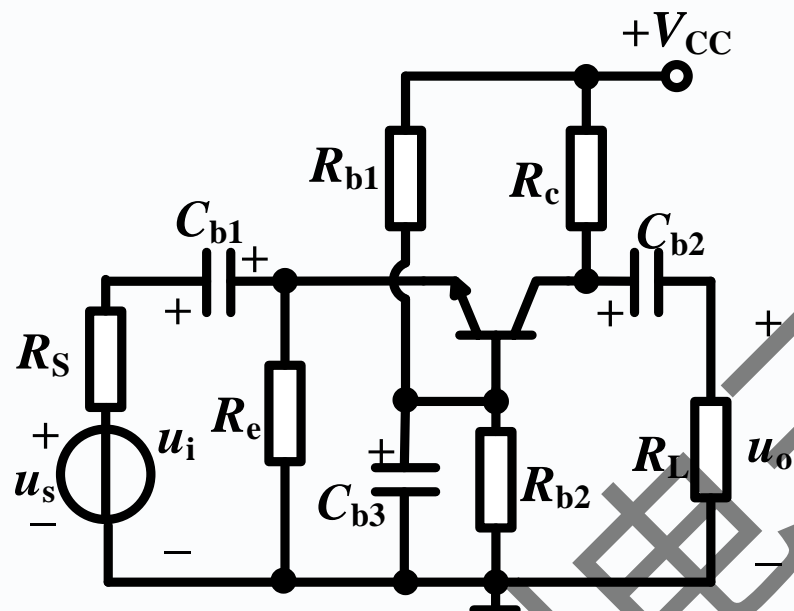
(3) 动态分析



6.4.3 共基极放大电路

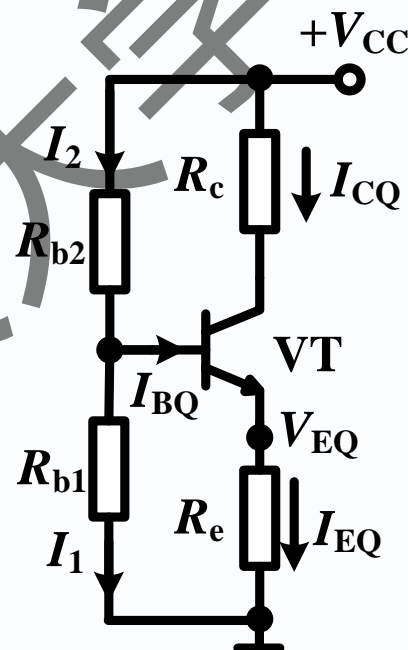
1. 静态分析

直流通路与射极偏置电路相同



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

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

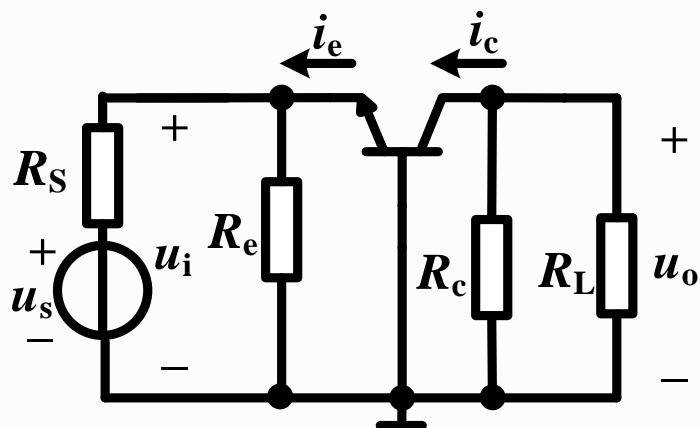


$$V_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

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



2. 动态指标



交流通路

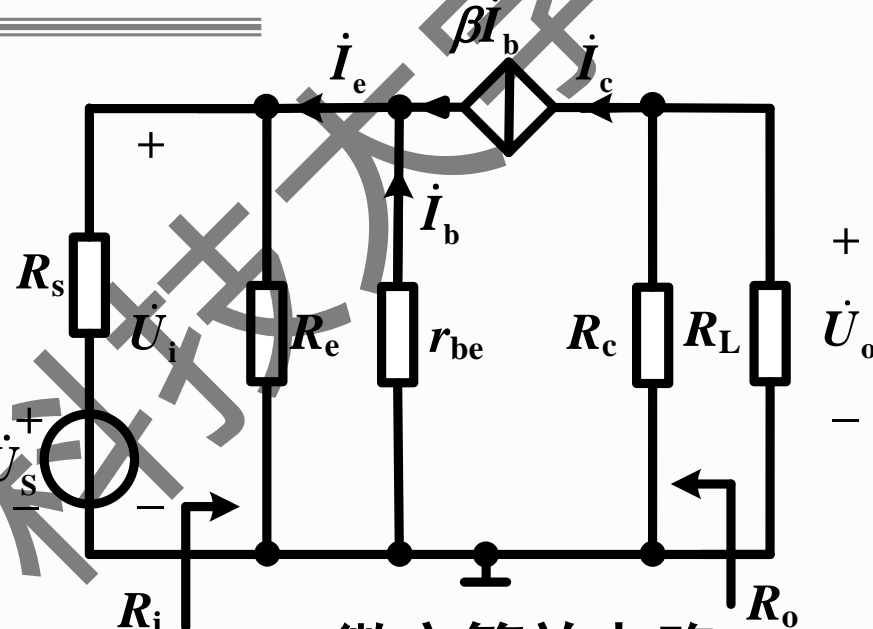
电压增益

输入回路:

$$\dot{U}_i = -\dot{I}_b r_{be}$$

输出回路:

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



微变等效电路

电压增益:

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

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



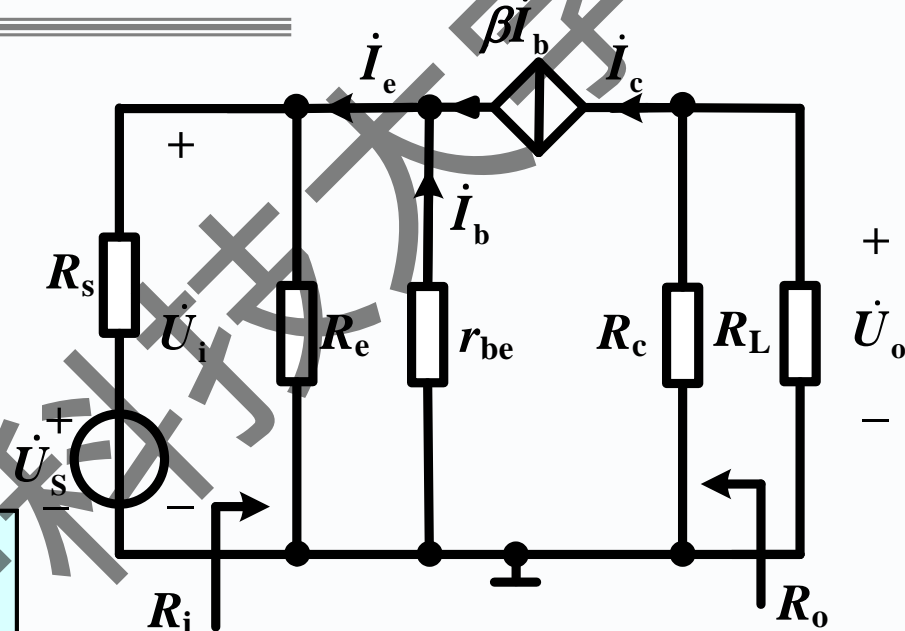
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2.动态指标

输入电阻

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

折合的概念



微变等效电路

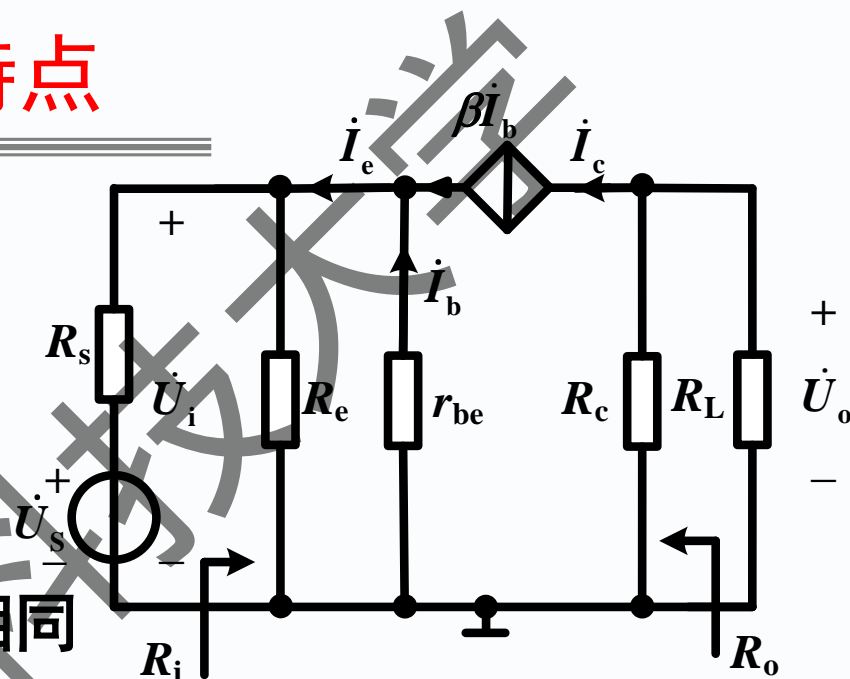
输出电阻

$$R_o \approx R_c$$

3. 基本共基放大电路的特点

输入电阻小，输出电阻大；
只放大电压，不放大电流！
频带宽！

- 1、输入电阻小
- 2、输出电阻大，与共射电路的相同
- 3、有电压放大能力，且输入输出同相
- 4、无电流放大作用：信号源为晶体管提供的电流为 I_e ，而输出回路电流为 I_c ， $I_c < I_e$
- 5、频带宽！电流放大系数为 α ， α 的截至频率远大于 β 的，故共基电路的通频带在三种接法中最宽，适于作宽频带放大电路



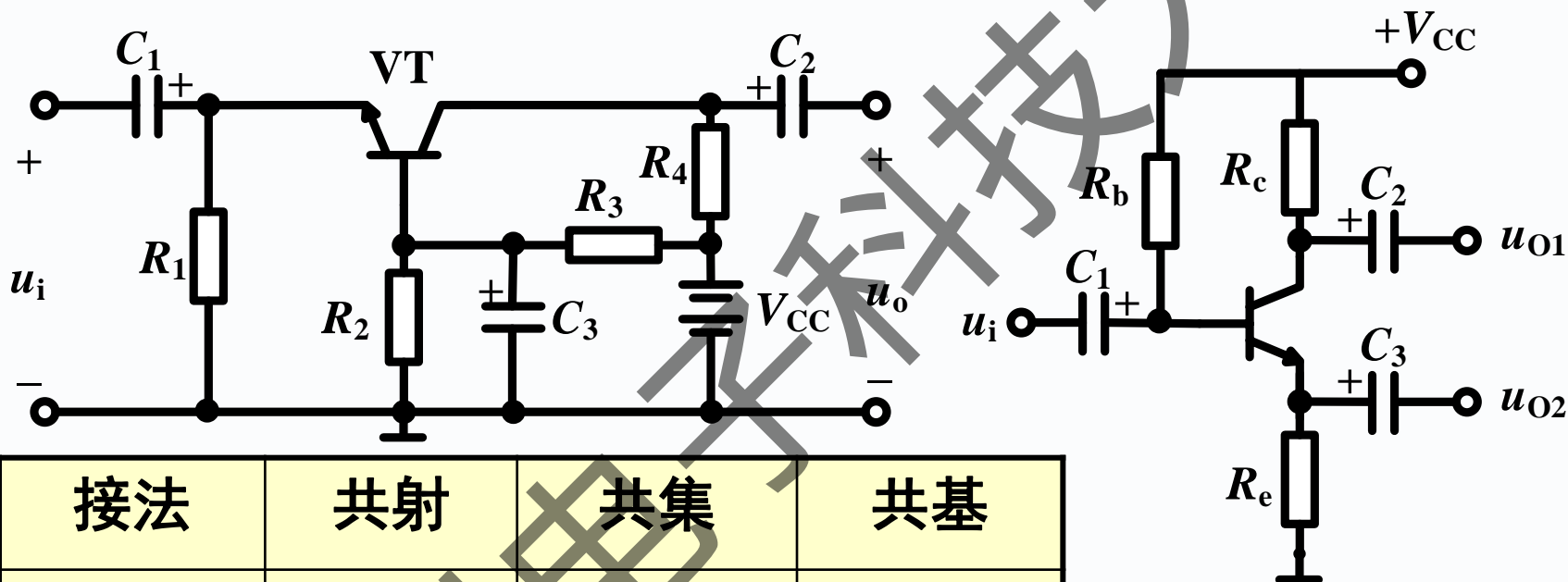
三种接法的比较：空载情况下

接法	共射	共集	共基
A_u	大	小于1	大
A_i	β 大	$1+\beta$ 大	α , 小于1
R_i	中	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中(较宽)	宽
用途	多级放大电路 中间级	输入级、中间 级、输出级	高频或宽频带 电路



讨论:

图示电路为哪种基本接法的放大电路？它们的静态工作点有可能稳定吗？
求解静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的表达式。



接法	共射	共集	共基
输入	b	b	e
输出	c	e	c

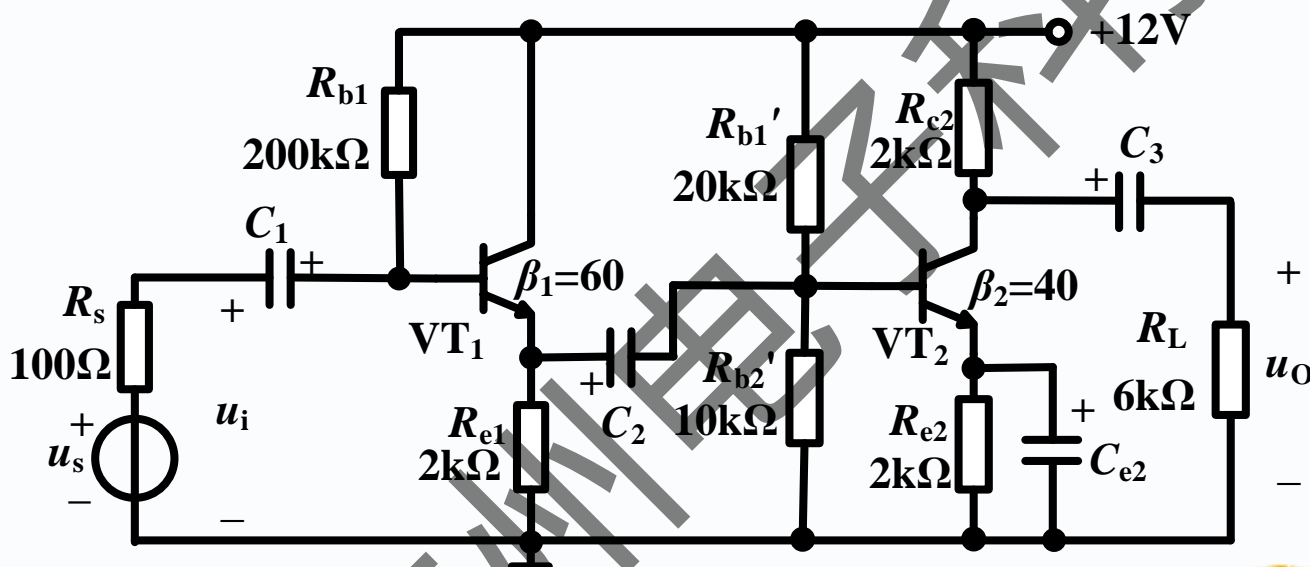
6.4 晶体管放大电路的三种接法

【例6.4.4】 今将射极输出器与共发射极放大电路组成两级放大电路，如图所示。试求：（1）前后级放大电路的静态值；（2）放大电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ；（3）各级电压放大倍数 \dot{A}_{u1} 、 \dot{A}_{u2} 及两级电压放大倍数 \dot{A}_u

解：此电路为两级放大电路，两级间通过电容和电阻耦合。

哪个电阻？

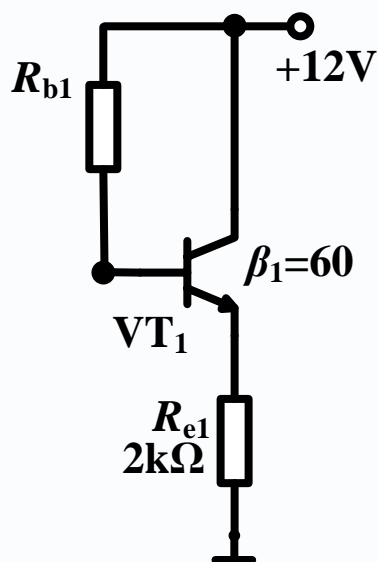
在分析时可以将两级拆开逐级分析。



6.4 晶体管放大电路的三种接法

(1) 静态分析

前级

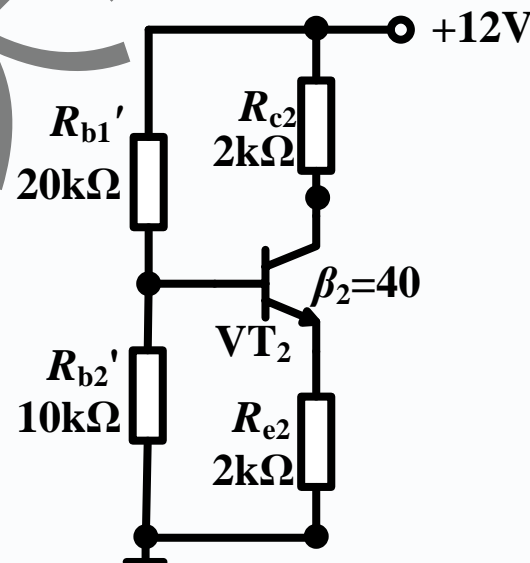


$$I_{B1Q} = \frac{V_{CC} - U_{BE1Q}}{R_{b1} + (1 + \beta_1)R_{e1}} = 0.035(\text{mA})$$

$$I_{C1Q} \approx I_{E1Q} = (1 + \beta_1)I_{B1Q} = 2.14(\text{mA})$$

$$U_{CE1Q} = V_{CC} - R_{c1}I_{E1Q} = 7.72(\text{V})$$

后级



$$V_{B2Q} \approx \frac{R_{b2}'}{R_{b1}' + R_{b2}'} V_{CC} = 4(\text{V})$$

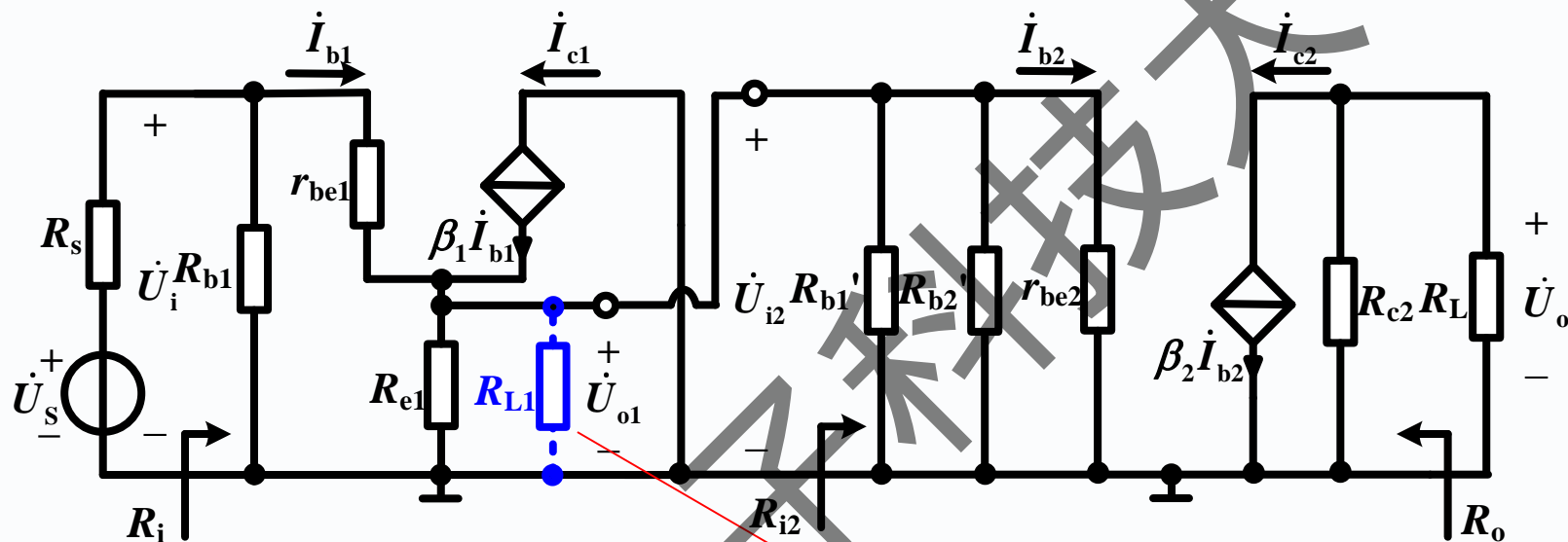
$$I_{C2Q} \approx I_{E2Q} = \frac{V_{B2Q} - U_{BE2(\text{on})}}{R_{e2}} = 1.65(\text{mA})$$

$$U_{CE2Q} \approx V_{CC} - I_{C2Q}(R_{c2} + R_{e2}) = 5.4(\text{V})$$



6.4 晶体管放大电路的三种接法

(2) 画出微变等效电路



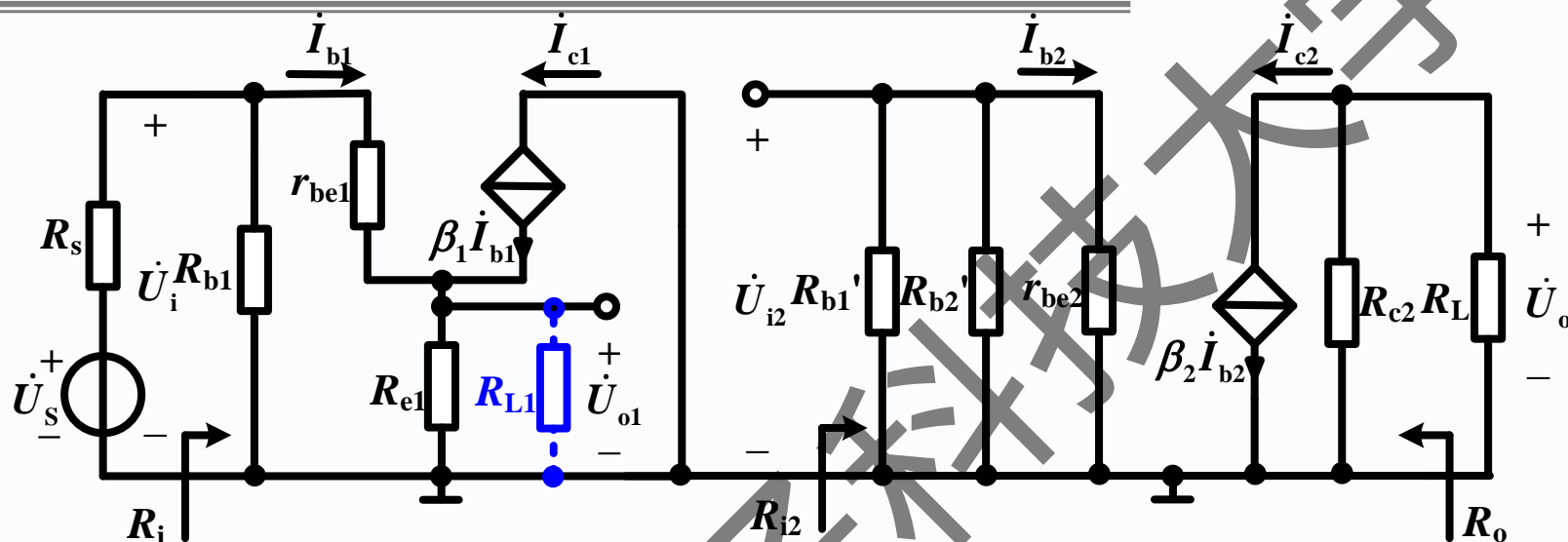
$$\dot{U}_{i2} = \dot{U}_{o1}$$

$$R_{i2} = R_{L1}$$

阻容耦合的“阻”

所以上述微变等效电路可以拆分为两级，如图所示。

6.4 晶体管放大电路的三种接法



$$r_{be1} = 300 + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E1Q}} = 1.04(\text{k}\Omega) \quad r_{be2} = 300 + (1 + \beta_2) \frac{26}{I_{E2Q}} = 0.95(\text{k}\Omega)$$

$$R_{L1} = R_{i2} = R_{b1}' // R_{b2}' // r_{be2} = 0.83(\text{k}\Omega)$$

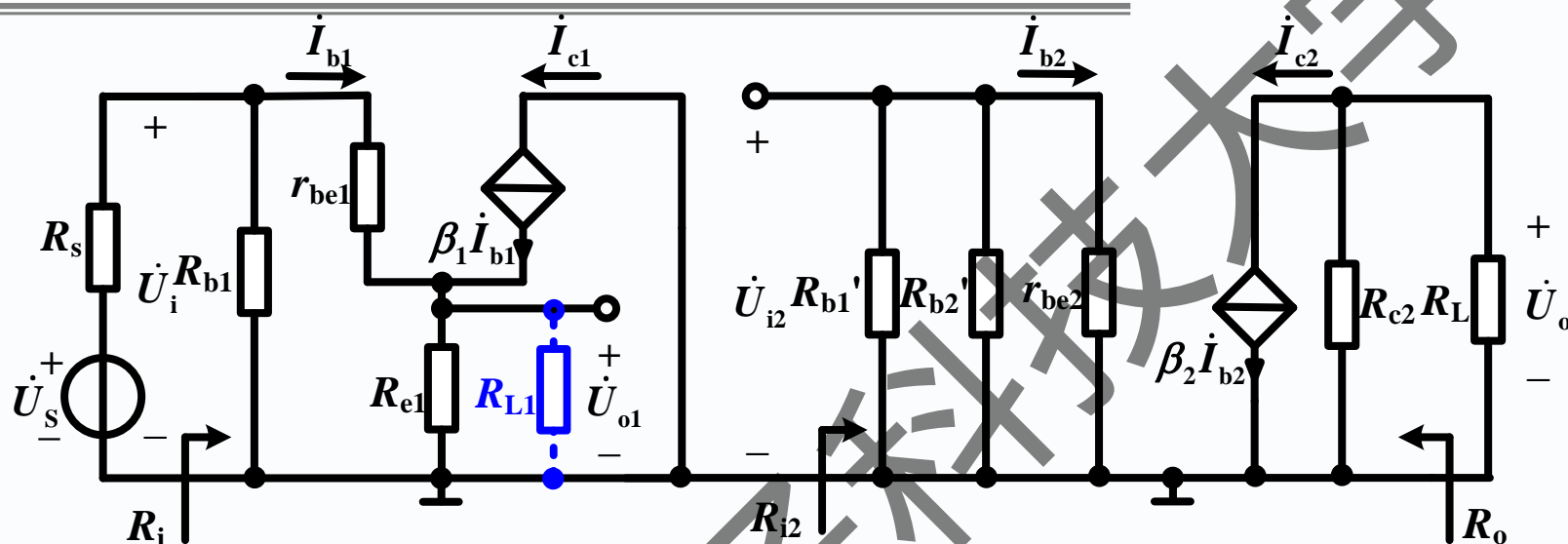
$$R_i = R_{i1} = R_{b1} // [r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_{e1} // R_{L1})]$$

$$= 200 // [1.04 + (1 + 60)(2 // 0.83)] = 31.2(\text{k}\Omega)$$

$$R_o = R_{c2} = 2\text{k}\Omega$$



6.4 晶体管放大电路的三种接法



$$\dot{A}_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)(R_{e1} // R_{L1})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_{e1} // R_{L1})} = 0.97 \quad \dot{A}_{u2} = -\frac{\beta_2(R_{c2} // R_L)}{r_{be2}} = -63.2$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \dot{A}_{u2} = 0.97 \times (-63.2) = -61.3$$

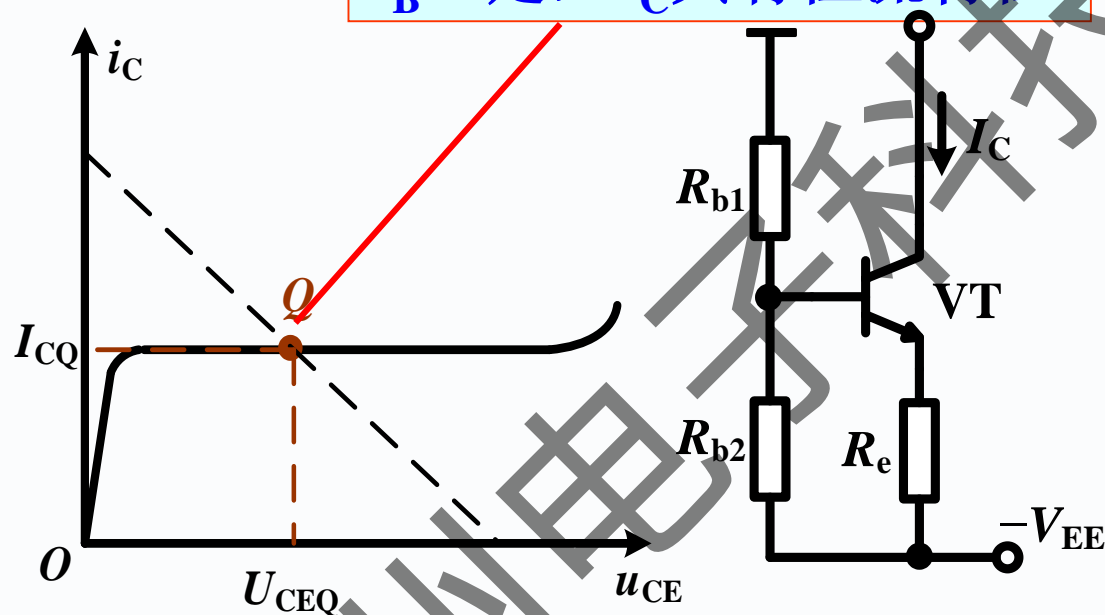
6.5 电流源电路

电流源的作用：**有源负载** **恒流偏置**

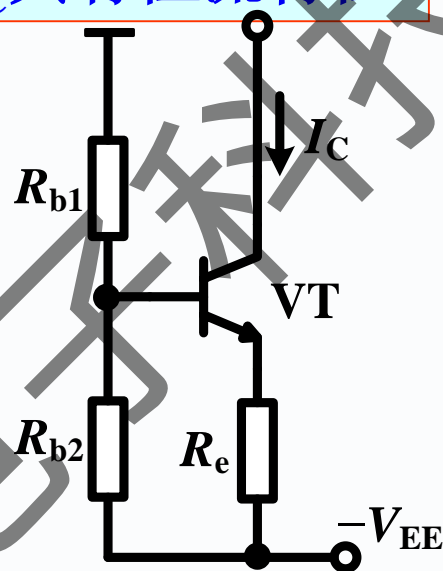
6.5.1 镜像电流源电路

I_B 一定, I_C 具有恒流特性

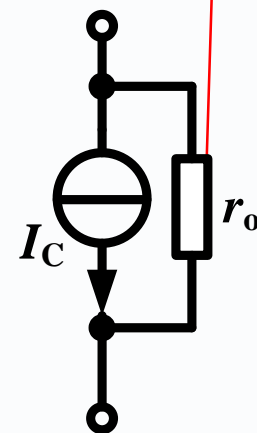
r_o 为等效电流源的
动态电阻 $r_o = r_{ce}$



(a) 晶体管的恒流特性



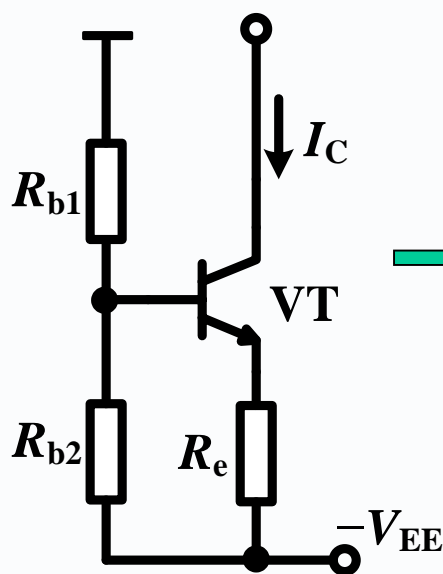
(b) 电流源电路



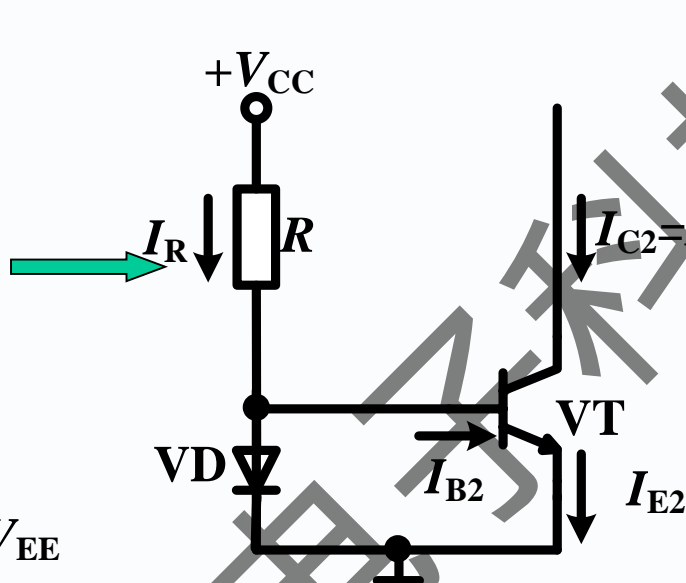
(c) 等效电流源表示法

6.5.1 镜像电流源电路

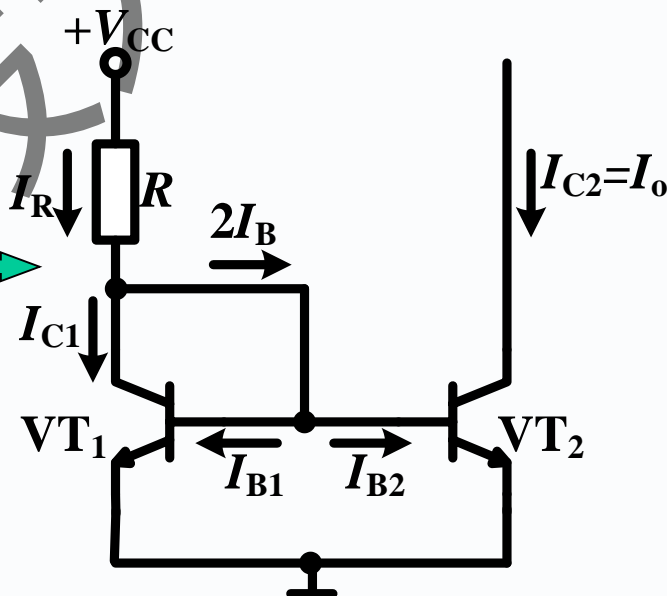
电阻比较多 → 用二极管代替 R_{b2} → 用三极管代替二极管



(a) 电流源电路



(b) 镜像电流源等效电路



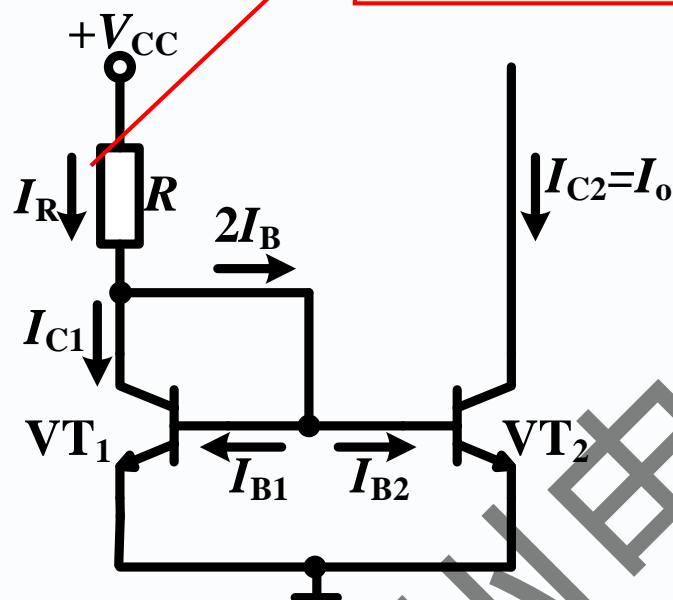
(c) 镜像电流源电路

6.5.1 镜像电流源电路

在电流源电路中充分利用集成运放中晶体管性能的一致性。

VT_1 和 VT_2 特性完全相同。

基准电流



$$I_R = (V_{CC} - U_{BE}) / R$$

$$U_{BE1} = U_{BE2}, \quad I_{B1} = I_{B2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_O$$

$$I_R = I_{C1} + 2I_B = I_{C1} + 2 \frac{I_{C1}}{\beta} = I_{C1} \left(1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

$$I_O = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

若 $\beta \gg 2$, 则 $I_O \approx I_R$



6.5.2 比例式电流源电路

成特定比例关系

VT_1 和 VT_2 特性完全相同。

$$U_{BE1} + I_{E1}R_1 = U_{BE2} + I_{E2}R_2$$

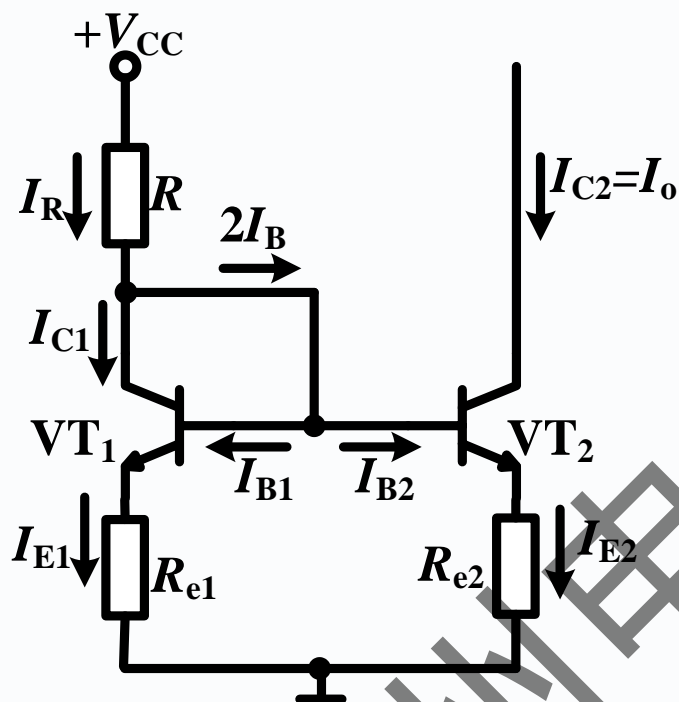
$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R + R_1}$$

只要 β 足够大,

$$I_R \approx I_{E1} \quad I_{C2} \approx I_{E2} \approx I_O$$

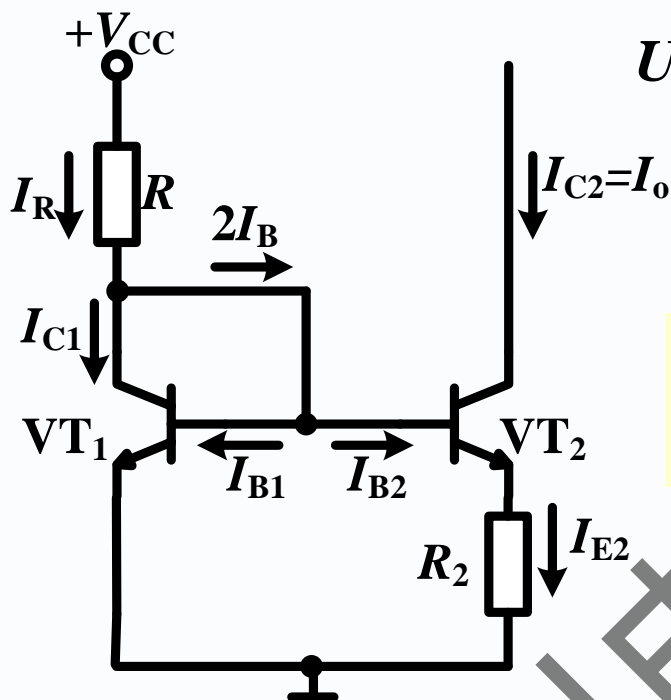
$$U_{BE1} \approx U_{BE2}$$

$$I_O \approx \frac{R_1}{R_2} I_R$$



6.5.3 微电流源电路

要求提供很小的静态电流，又不能用电阻。



$$U_{BE1} - U_{BE2} = \Delta U_{BE} \approx I_O R_2$$

$$I_O = \frac{\Delta U_{BE}}{R_2}$$

$$I_E \approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad U_{BE} \approx U_T \ln \frac{I_E}{I_S}$$

$$U_{BE1} - U_{BE2} = \Delta U_{BE} \approx U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}} \approx U_T \ln \frac{I_{C1}}{I_O}$$

$$I_O \approx \frac{U_T}{R_2} \ln \frac{I_R}{I_O}$$

$$I_{C1} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R}$$

超越方程

设计过程很简单，首先确定 I_R 和 I_O ，然后选定 R 和 R_2 。

6.5.4 电流源作有源负载

共射放大电路放大倍数与 R_c 成正比 $\dot{A}_u = -\frac{\beta R_c // R_L}{r_{be}}$

R_c 越大，电压放大倍数越大

R_c 过大，集成工艺制造困难

R_c 过大，静态工作点接近饱和区，输出幅度减小

最好是有一种器件，在直流时只拥有合适大小的电阻值，在交流时拥有较大的电阻值。

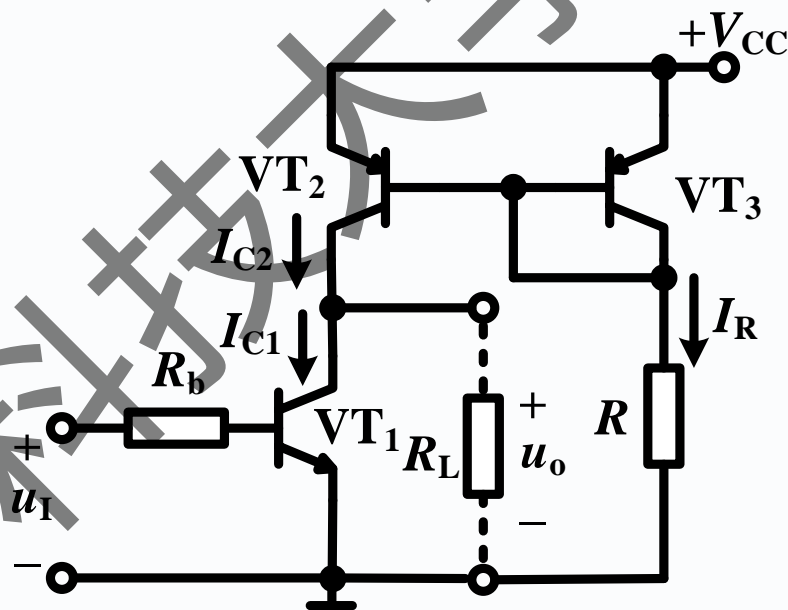
用电流源电路充当有源负载。



6.5.4 电流源作有源负载

- ①哪只管子为放大管？
②其集电结静态电流约为多少？

$$I_{CQ1} = I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE3}}{R}$$



6.6 功率放大电路

6.6.1 功率放大电路概述

1. 功率放大电路研究的问题

(1) **性能指标**：输出功率和效率。

若已知 U_{om} ，则可得 P_{om} 。

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

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

最大输出功率与电源损耗的平均功率之比为效率。

(2) **分析方法**：因大信号作用，故应采用图解法。



6.6 功率放大电路

1. 功率放大电路研究的问题

(3) 晶体管的选用：根据极限参数选择晶体管。

在功放中，晶体管集电极或发射极电流的最大值接近最大集电极电流 I_{CM} ，管压降的最大值接近c-e反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ ，集电极消耗功率的最大值接近集电极最大耗散功率 P_{CM} 。称为工作在极限状态。



2. 对功率放大电路的要求

- (1) 输出功率尽可能大:即在电源电压一定的情况下,最大不失真输出电压最大。
- (2) 效率尽可能高:即电路损耗的直流功率尽可能小,静态时功放管的集电极电流近似为0。
- (3) 减小失真

3. 晶体管的工作方式

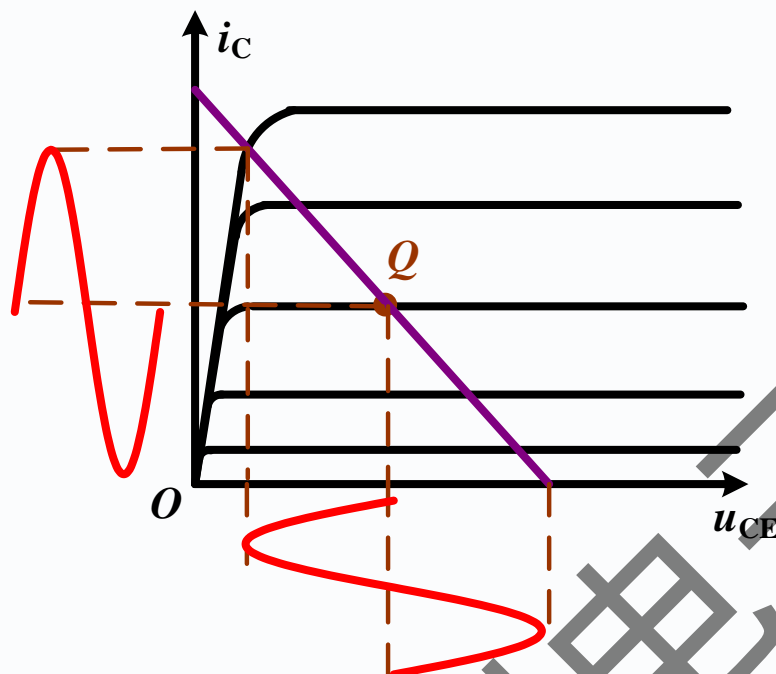
- (1) 甲类方式:晶体管在信号的整个周期内均处于导通状态
- (2) 乙类方式:晶体管仅在信号的半个周期处于导通状态
- (3) 甲乙类方式:晶体管在信号的多半个周期处于导通状态



6.6 功率放大电路

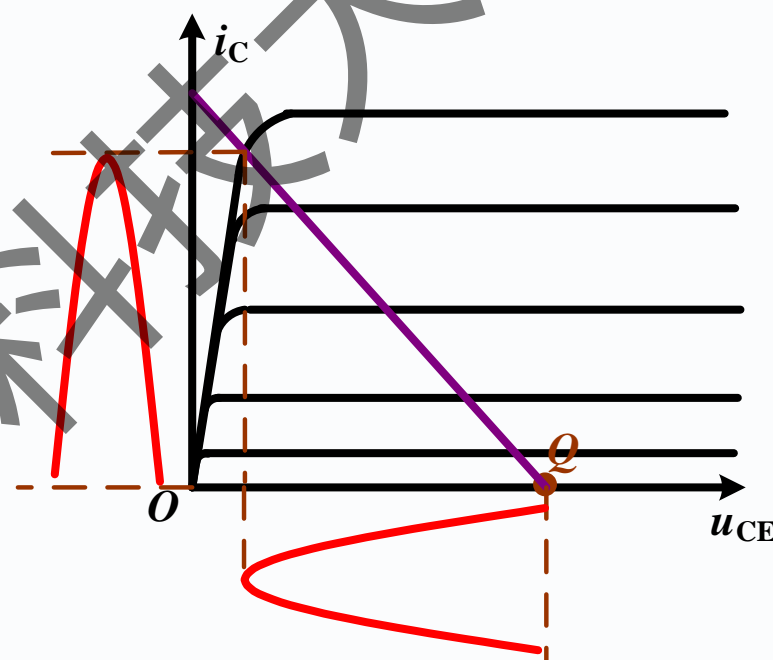
➤ 降低静态功耗，即减小静态电流。

四种工作状态



(a) 甲类

甲类：一个周期内均导通



(b) 乙类

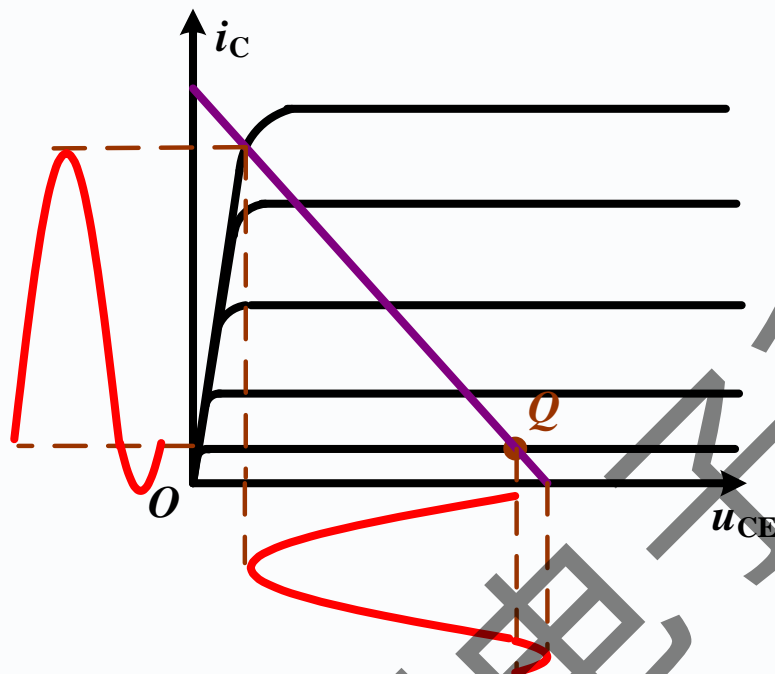
乙类：导通角等于 180°



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

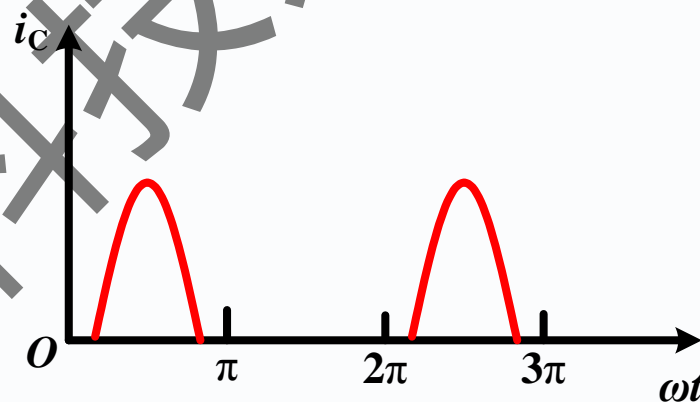
6.6 功率放大电路

- 降低静态功耗，即减小静态电流。



(c) 甲乙类

甲乙类：导通角大于 180°



(d) 丙类

丙类：导通角小于 180°

6.6.2 互补对称功率放大电路 (OCL)

1. 输出级的要求

互补输出级是直接耦合的功率放大电路。

对输出级的要求：带负载能力强；直流功耗小；负载电阻上无直流功耗；

最大不失真输出电压最大。

射极输出形式

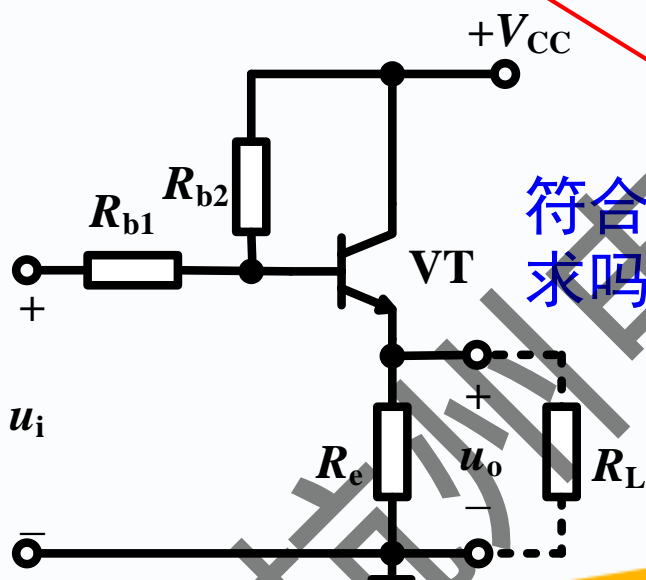
静态工作
电流小

输入为零时输出为零

符合要
求吗？

双电源供电时 U_{om} 的峰值接近电源电压。

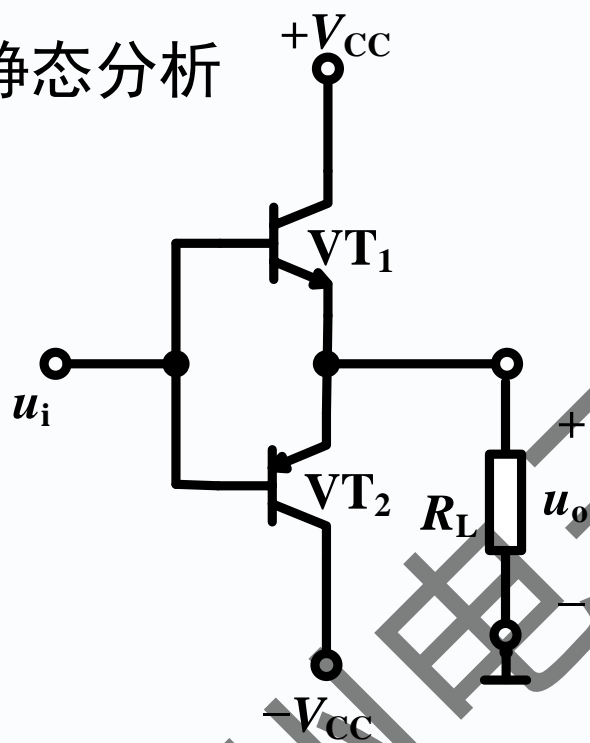
单电源供电 U_{om} 的峰值接近二分之一电源电压。



2.基本电路

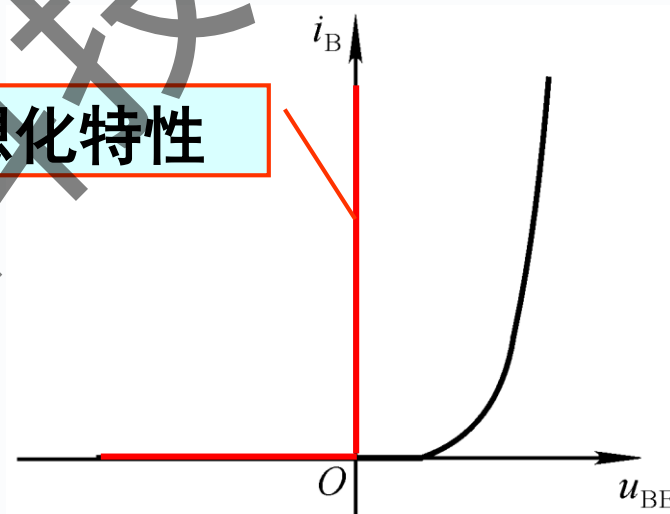
(1)特征： T_1 、 T_2 特性理想对称。

(2)静态分析



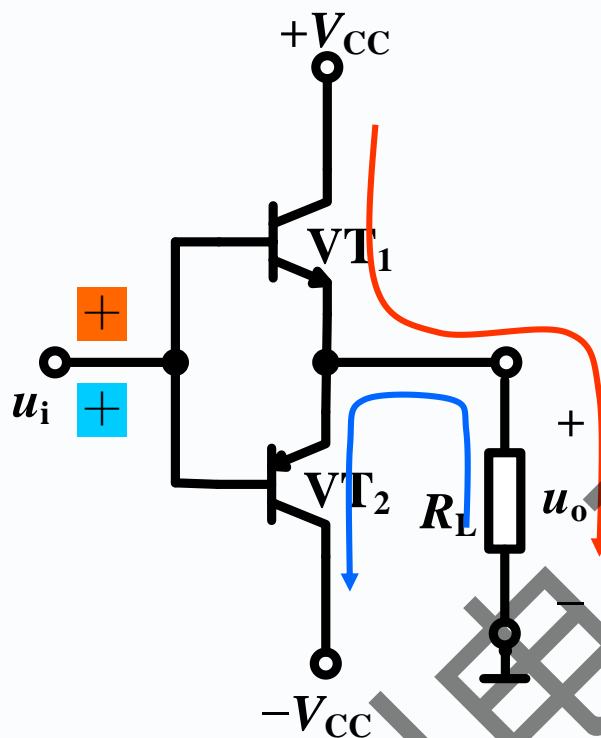
T_1 的输入特性

理想化特性



静态时 T_1 、 T_2 均截止， $V_B = V_E = 0$

(3) 动态分析



u_i 正半周, 电流通路为
 $+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{地}$,

$$u_o = u_i$$

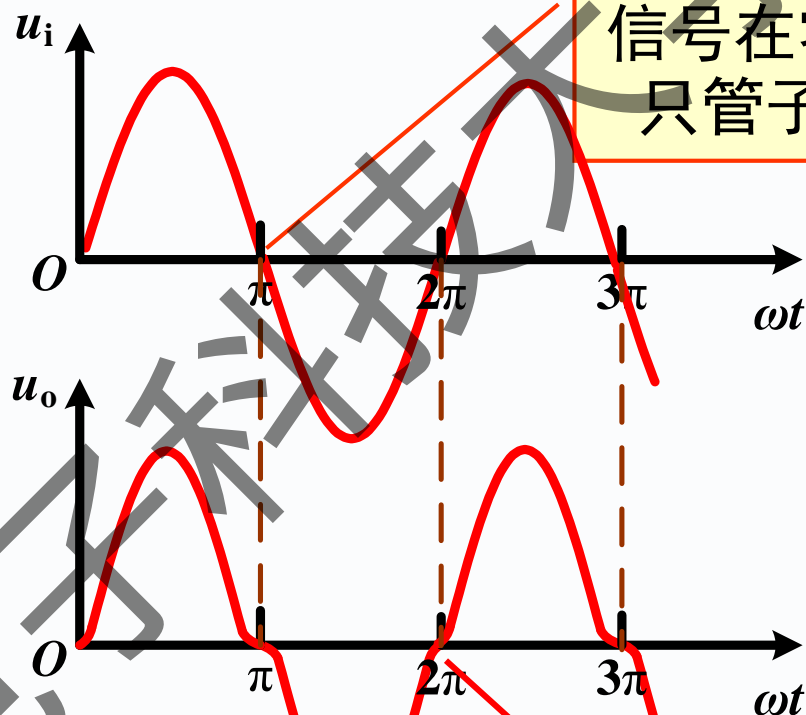
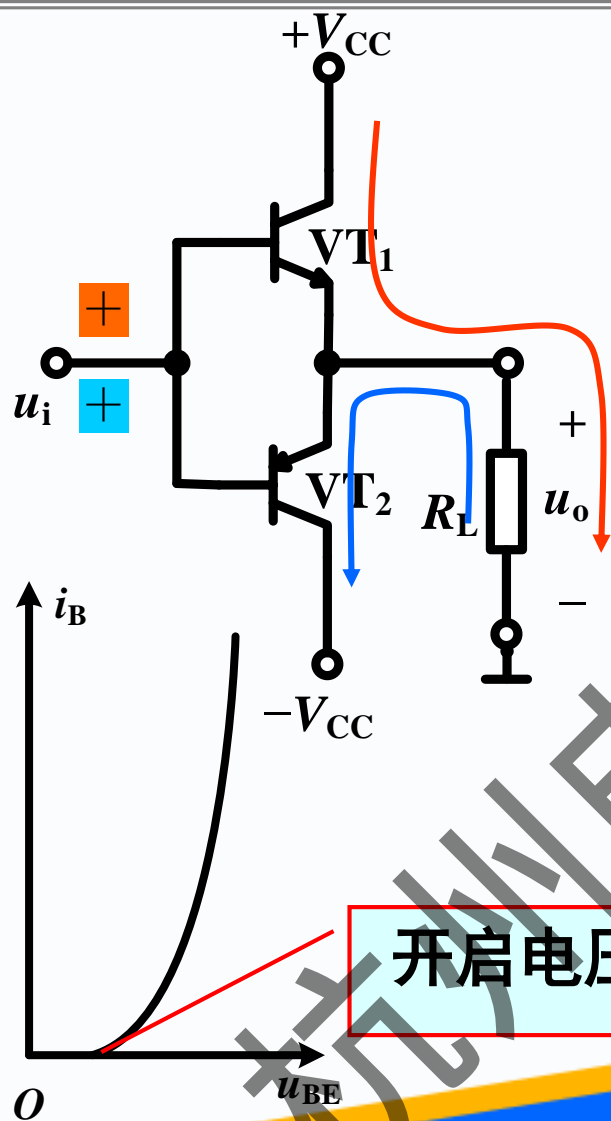
u_i 负半周, 电流通路为
 $\text{地} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$,

$$u_o = u_i$$

两只管子交替工作, 两路电源交替供电, 双向跟随。



3. 交越失真



信号在零附近两管子均截止

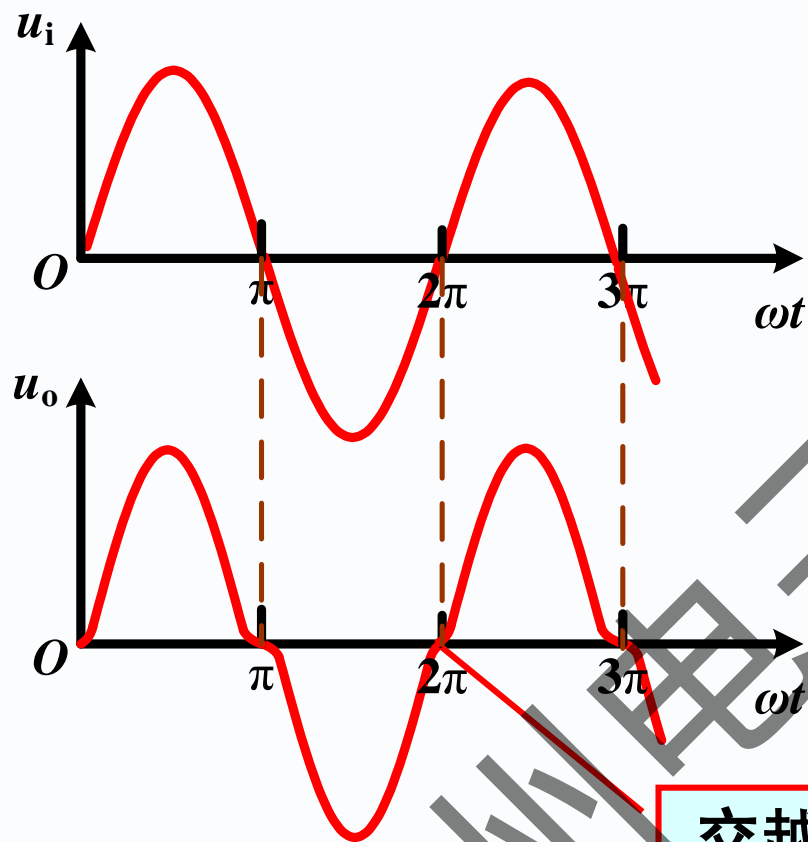
交越失真

开启电压



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 交越失真

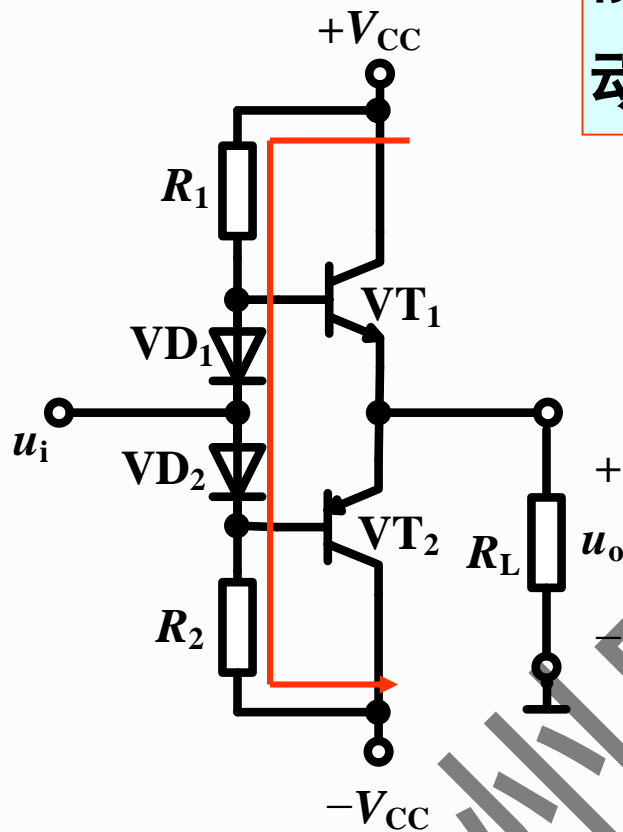


消除失真的方法：
设置合适的静态工作点。

- ① 静态时 T_1 、 T_2 处于临界导通状态，有信号时至少有一只导通；
- ② 偏置电路对动态性能影响要小。

交越失真

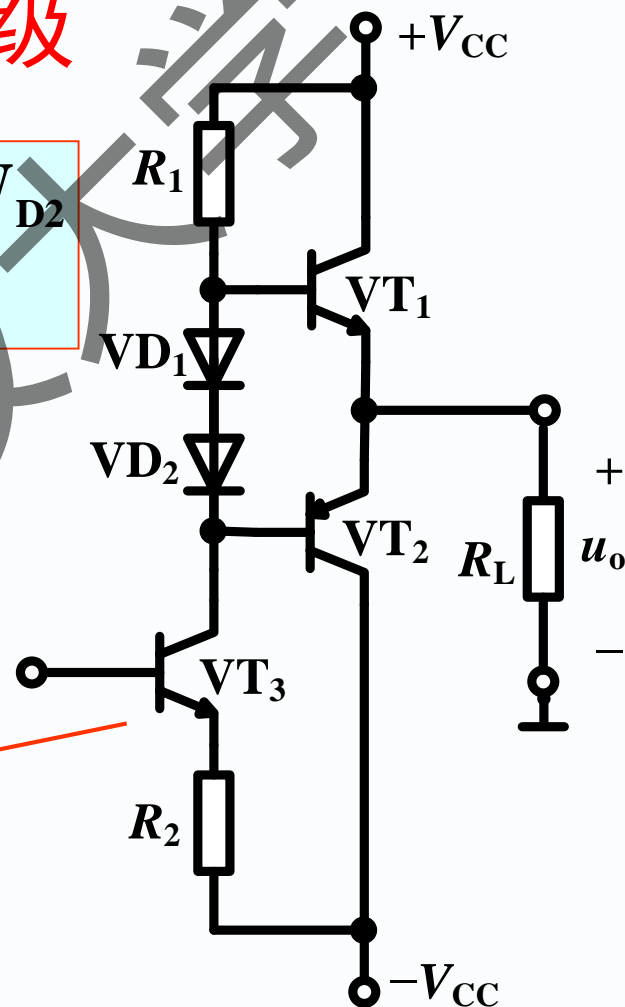
4. 消除交越失真的互补输出级



静态: $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

动态: $u_{be1} \approx u_{be2} \approx u_i$

VT_3 为前级放大管，设有合适的静态工作点



实用电路

5. OCL电路输出功率和效率的分析计算

求解输出功率和效率的方法：

在已知 R_L 的情况下，先求出 U_{om} ，则

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

然后求出电源的平均功率，

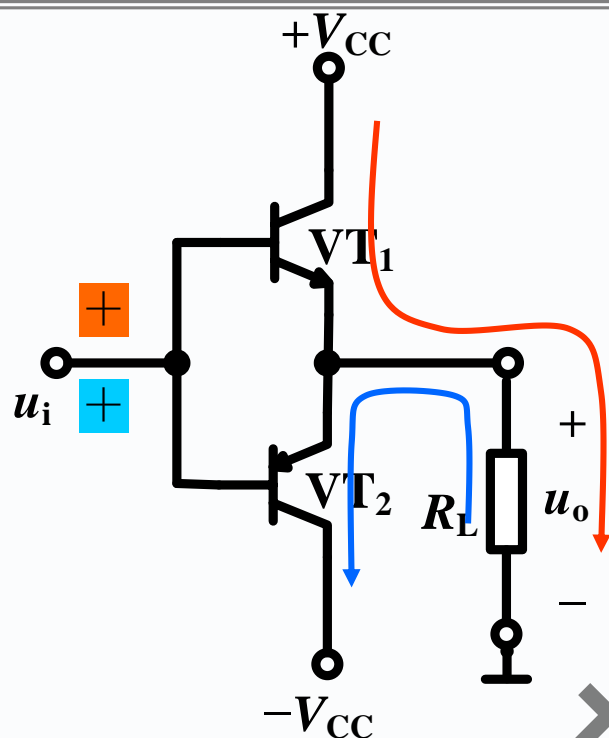
$$P_V = I_{C(AV)} \cdot V_{CC}$$

效率

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



(1) 输出功率



$$P_o = \frac{U_o^2}{R_L} = \frac{\left(\frac{U_{om}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

数值较大
不可忽略

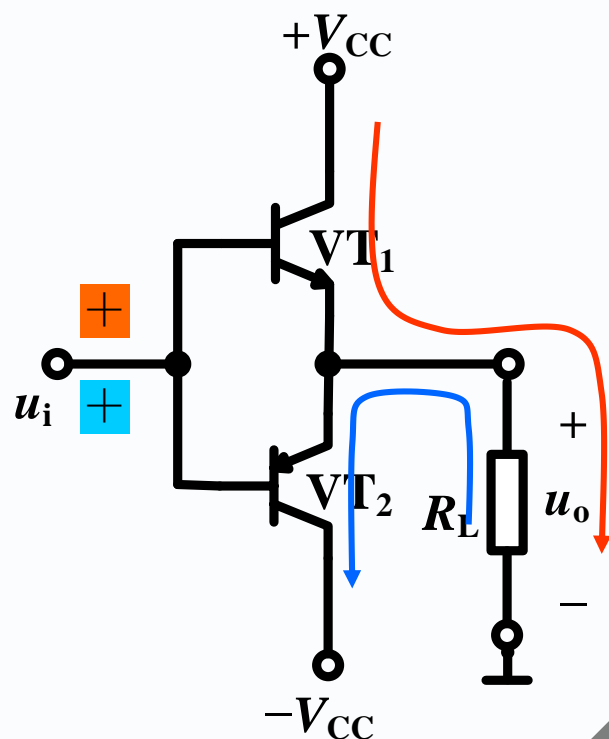
大功率管的 U_{CES} 常为 2~3V。

若忽略 U_{CES}

$$P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$



(2) 效率



$$I_C = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{U_{om}}{R_L} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \times \frac{U_{om}}{R_L}$$

$$P_V = 2V_{CC} I_C = \frac{2}{\pi} \times \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$$

若忽略 U_{CES} $U_{om} \approx V_{CC}$

$$P_{Vm} = \frac{2}{\pi} \times \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

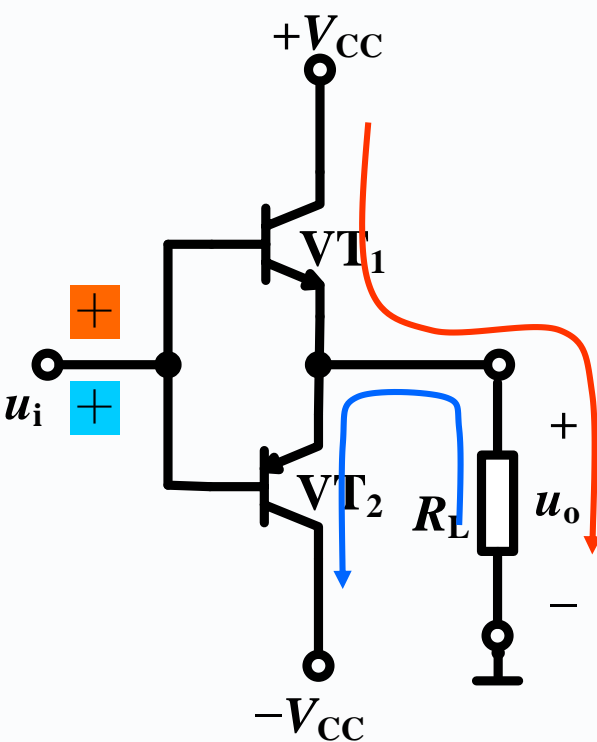
$$\eta = \frac{P_o}{P_V} = \left(\frac{U_{om}^2}{2R_L} \right) / \left(\frac{2V_{CC} U_{om}}{\pi R_L} \right) = \frac{\pi}{4} \times \frac{U_{om}}{V_{CC}}$$

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$



(3) 晶体管的极限参数



$$i_{C\max} \approx \frac{V_{CC}}{R_L} < I_{CM}$$

$$u_{CE\max} \approx 2V_{CC} < U_{CEO(BR)}$$

在输出功率最大时，因管压降最小，故管子损耗不大；输出功率最小时，因集电极电流最小，故管子损耗也不大。

管子功耗与输出电压峰值的关系为

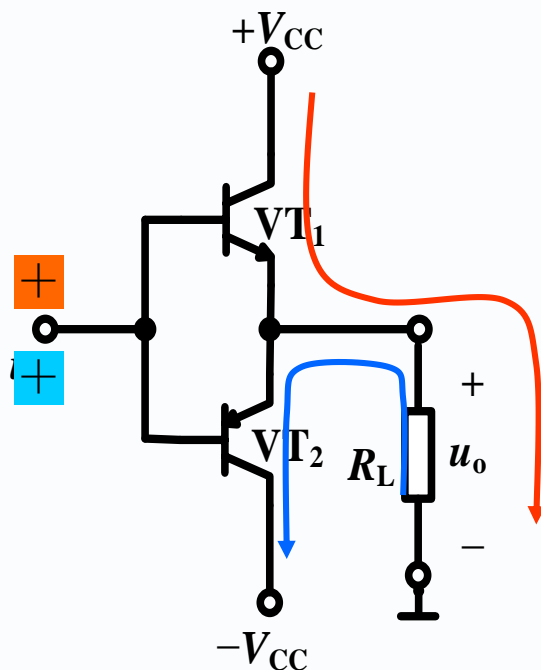
$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \underbrace{(V_{CC} - U_{OM} \sin \omega t)}_{\text{管压降}} \cdot \underbrace{\frac{U_{OM} \sin \omega t}{R_L}}_{\text{发射极电流}} d\omega t$$

管压降

发射极电流



(3) 晶体管的极限参数



$$i_{C\max} \approx \frac{V_{CC}}{R_L} < I_{CM}$$

$$u_{CE\max} \approx 2V_{CC} < U_{CEO(BR)}$$

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{CC} - U_{OM} \sin \omega t) \cdot \frac{U_{OM} \sin \omega t}{R_L} d\omega t$$

P_T 对 U_{OM} 求导, 并令其为0, 可得

$$U_{OM} = \frac{2}{\pi} \cdot V_{CC} \approx 0.6 V_{CC}$$

(3) 晶体管的极限参数

将 U_{OM} 代入 P_T 的表达式, 可得

$$P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$$

$$\text{若 } U_{CES} = 0, \text{ 则 } P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}, P_{Tmax} = \frac{2}{\pi^2} \cdot P_{om} \Big|_{U_{CES}=0} \approx 0.2 P_{om} \Big|_{U_{CES}=0}$$

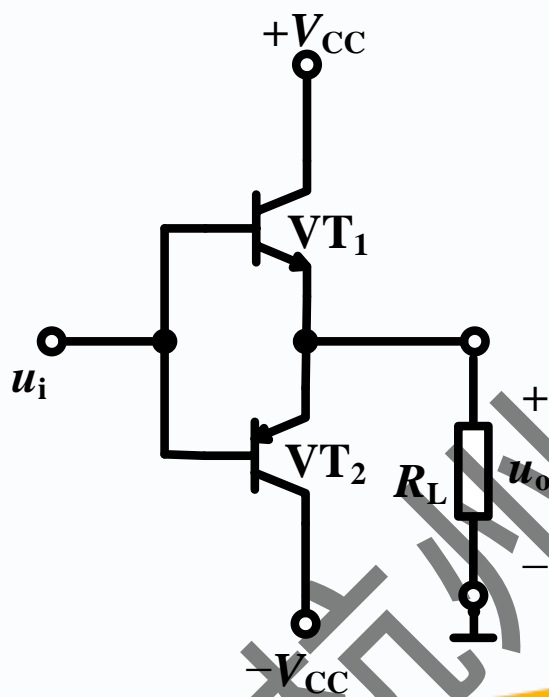
因此, 选择晶体管时,
其极限参数

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{CM} > i_{Cmax} \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \\ U_{CEO(BR)} > u_{CEmax} \approx 2V_{CC} \\ P_{CM} > P_{Tmax} \approx 0.2 \times \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \end{array} \right.$$



5. OCL电路输出功率和效率的分析计算

【例6.6.1】 乙类功放电路如图所示，设 $V_{CC}=15V$ ， $R_L=8\Omega$ ，输入信号 u_i 为正弦波信号。在忽略饱和压降情况下，试计算：
 (1)最大输出功率 P_{om} ；(2)每个晶体管容许的管耗 P_{cm} 至少为多少；(3)每个晶体管的耐压 $|U_{(BR)CEO}|$ 应大于多少。



解：(1) 最大输出功率 P_{om} ：

$$P_{om} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{15^2}{8} = 14.06(W)$$

(2) 每个晶体管的最大管耗为

$$P_{CM} \geq 0.2P_{om} = 2.8(W)$$

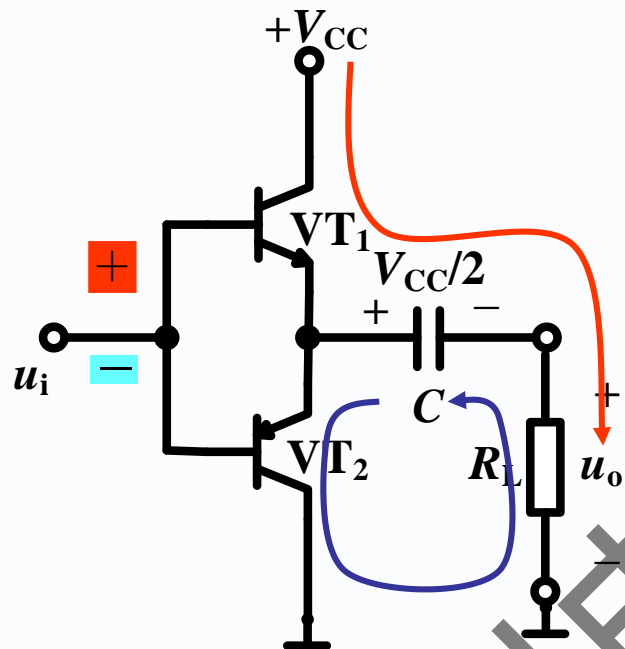
(3) 功率管c-e间的最大压降为

$$|U_{(BR)CEO}| \geq 2V_{CC} = 30(V)$$



6.单电源互补对称功率放大电路 (OTL)

单电源供电、零输入时零输出，最大不失真输出电压峰-峰值接近电源电压。



输入电压的正半周:

$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow C \rightarrow R_L \rightarrow \text{地}$ C 充电。

输入电压的负半周:

$C_+ \rightarrow T_2 \rightarrow \text{地} \rightarrow R_L \rightarrow C_-$ C 放电。

静态时

$$u_I = U_B = U_E = +\frac{V_{CC}}{2}$$

$$U_{om} = \frac{(V_{CC}/2) - U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

C 足够大，才能认为其对交流信号相当于短路。

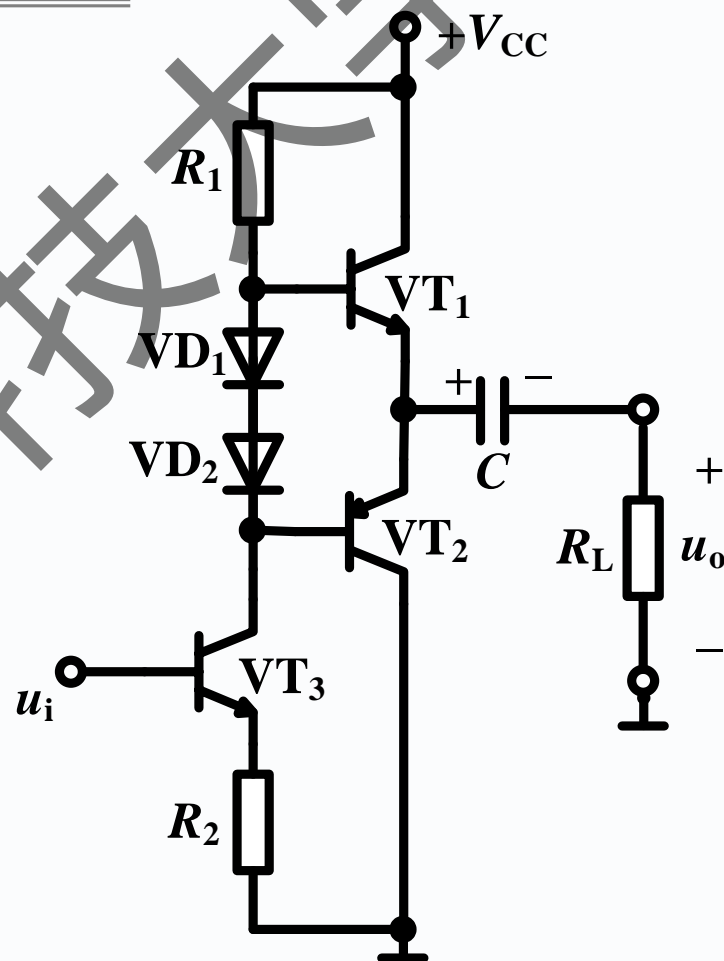
OTL电路低频特性差。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

甲乙类单电源互补对称电路

计算 P_o 、 P_T 、 P_V 和 P_{Tm} 的公式必须加以修正，以 $V_{CC}/2$ 代替原来公式中的 V_{CC} 。

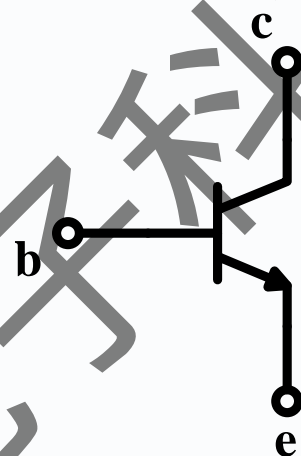
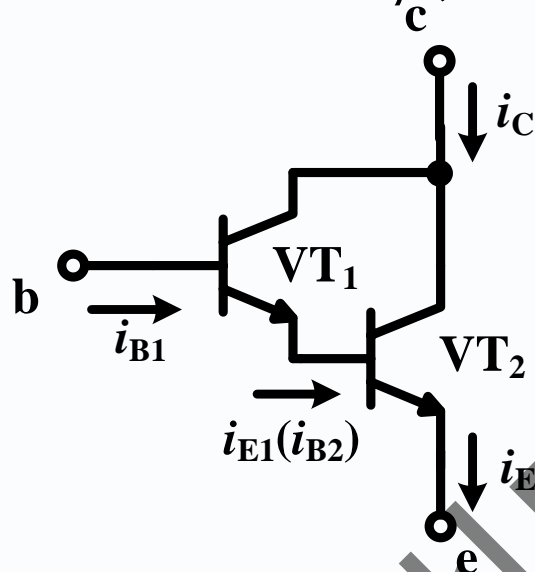


6.6.3 采用复合管的互补对称功率放大电路

复合管

复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。

目的：增大 β ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。

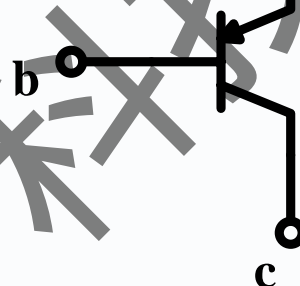
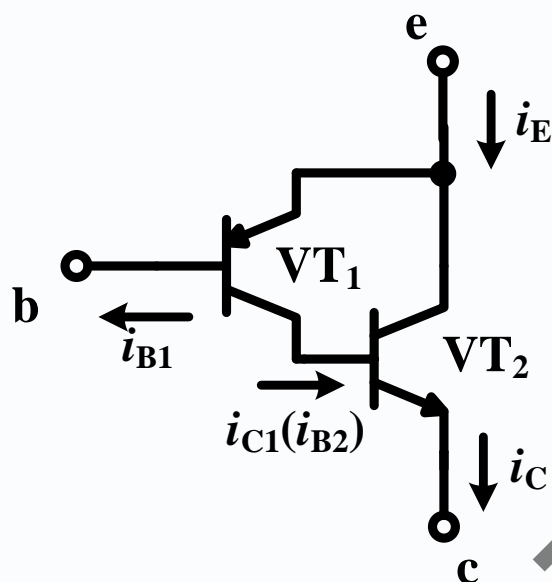


其等效三极管
类型同 T_1 管

$$i_{B2} = i_{E1} = i_{B1}(1 + \beta_1)$$

$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

6.6.3 采用复合管的互补对称功率放大电路



其等效三极管
类型同 T_1 管

$$i_{B2} = i_{C1} = i_{B1} \beta_1$$

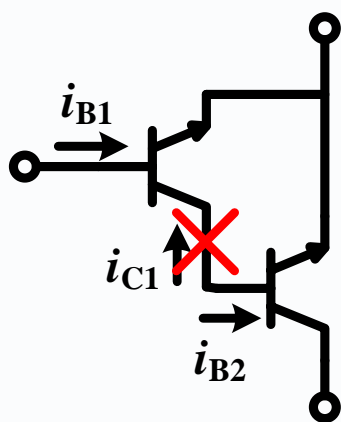
$$i_C = i_{B1} \beta_1 (1 + \beta_2)$$

不同类型的管子复合后，其类型决定于 T_1 管。

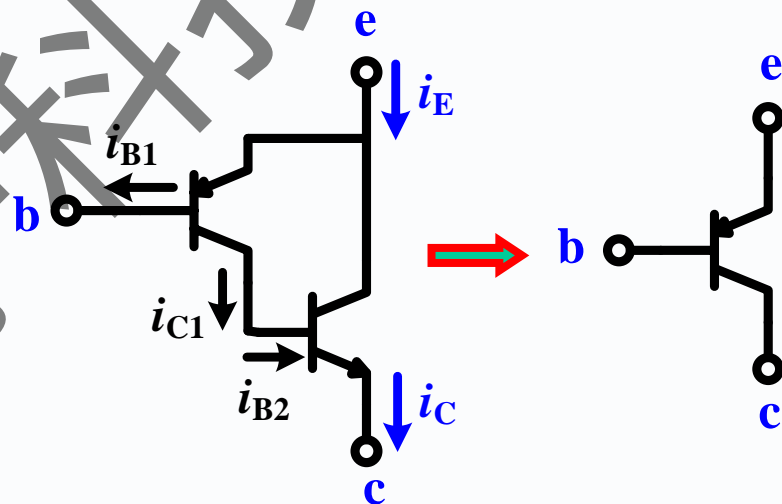
$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$$

6.6.3 采用复合管的互补对称功率放大电路

- ① 复合管的类型与前级 T_1 管相同；
- ② 复合管的电流放大系数近似等于两管的 β 相乘；
- ③ 两管正确连接成复合管，必须保证各自的电流方向正确。



不能构成复合管



能构成复合管 等效为PNP管

功率放大电路的种类

OTL电路：单电源供电，低频特性差。

OCL电路：双电源供电，效率高，低频特性好。

变压器耦合乙类推挽：单电源供电，能够输出特大功率，笨重，效率低，低频特性差。

应当注意：以上最大输出功率和效率的分析仅从功率放大电路自身角度考虑，而在实用电路中功放总是多级放大电路的末级电路，因而最大输出功率还与前级电路是否能够提供足够大信号有关。



6.6.4 集成功率放大电路

LM386的引脚和典型接法

