

电路与电子技术基础

第五章 基本交流放大电路

宋雪萌

songxuемeng@sdu.edu.cn

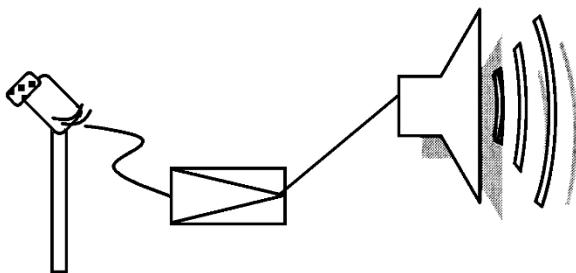
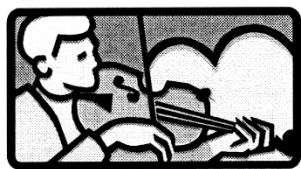
基本交流放大电路

电子技术的应用领域，大多需要把微弱信号放大到足够的幅度，以便进行显示、测量、变换、控制等处理。

基本交流放大电路

例子：扩音机就是放大器的典型应用。

- 话筒的作用是把声音信号转换成电信号，经扩音机对其放大后，送给扬声器（喇叭）；
- 扬声器（喇叭）的作用与话筒正好相反，是把电信号又还原成了声音信号。



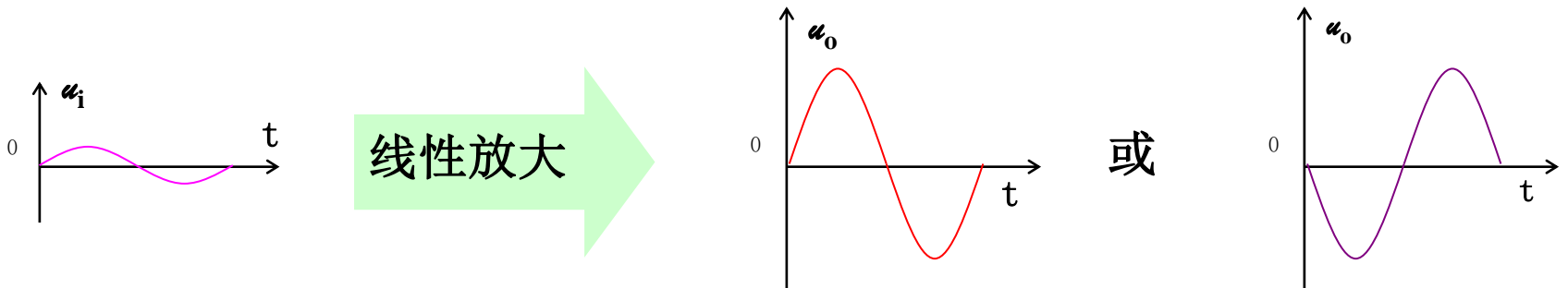
扩音机结构示意图



基本交流放大电路

信号的放大是由放大电路实现的。

本章主要讨论的放大电路可以将输入信号**不失真地**放大到电路的输出端，核心元件是三极管。



目录

- 晶体管基本放大电路
 - 电路组成
 - 放大原理
 - 静态分析（静态工作点）
 - 动态分析（微变等效电路）
- 分压偏置的晶体管放大器
- 射极输出放大器

基本交流放大电路

放大的实质：用较小的信号去控制较大的信号。

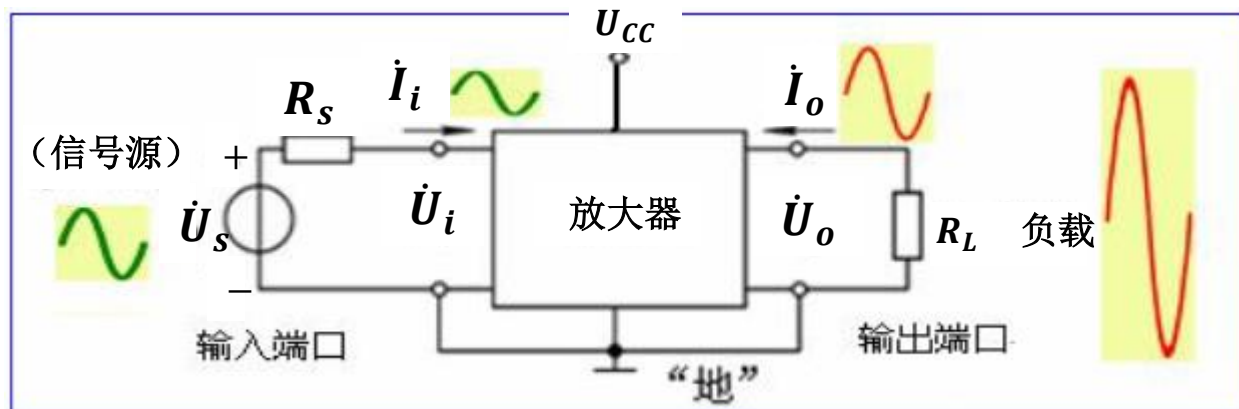
放大电路的实质：能量转换装置。

输出信号 $u_o(i_o)$ 的能量不是来源于输入信号，而是来源于电源。

放大器是在输入小信号 $u_i(i_i)$ 的控制下，将直流电源 U_{cc} 的能量转换成输出信号 $u_o(i_o)$ 的能量。

基本放大器的组成

基本放大器通常指由一个晶体管或场效应管构成的单级放大器。



放大器条件：

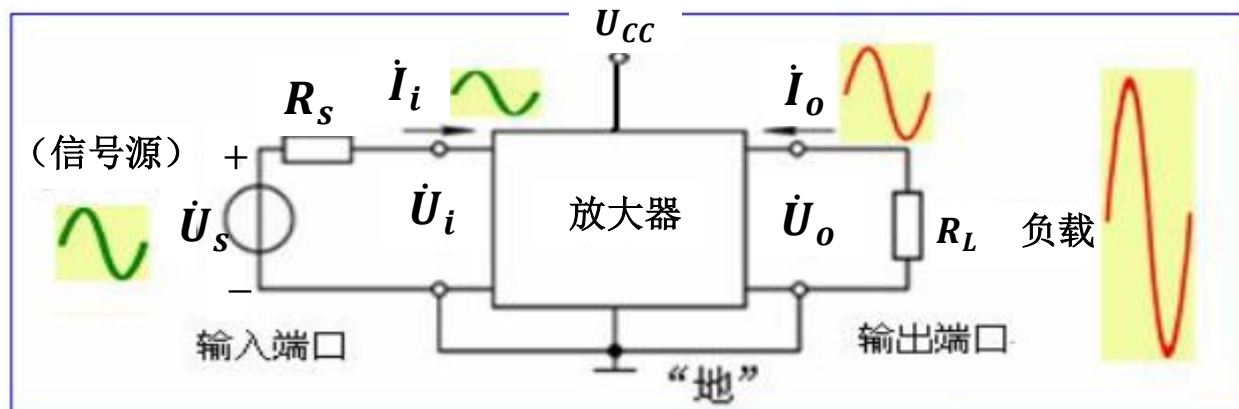
1. 要有控制元件：晶体管或场效应管；
2. 要有电源——提供能量；
3. 偏置在放大区；
4. 待放大信号一定加在发射结(或栅源结), 不可加到集电极(或漏极)；

$$i_C \approx i_E = I_S \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$

5. 信号可从集电极或发射极输出, 不可从基极(或栅极)输出；
6. 要有一定的负载(RC或RE), 将变化电流转为变化电压。

基本放大器的组成

基本放大器通常指由一个晶体管或场效应管构成的单级放大器。



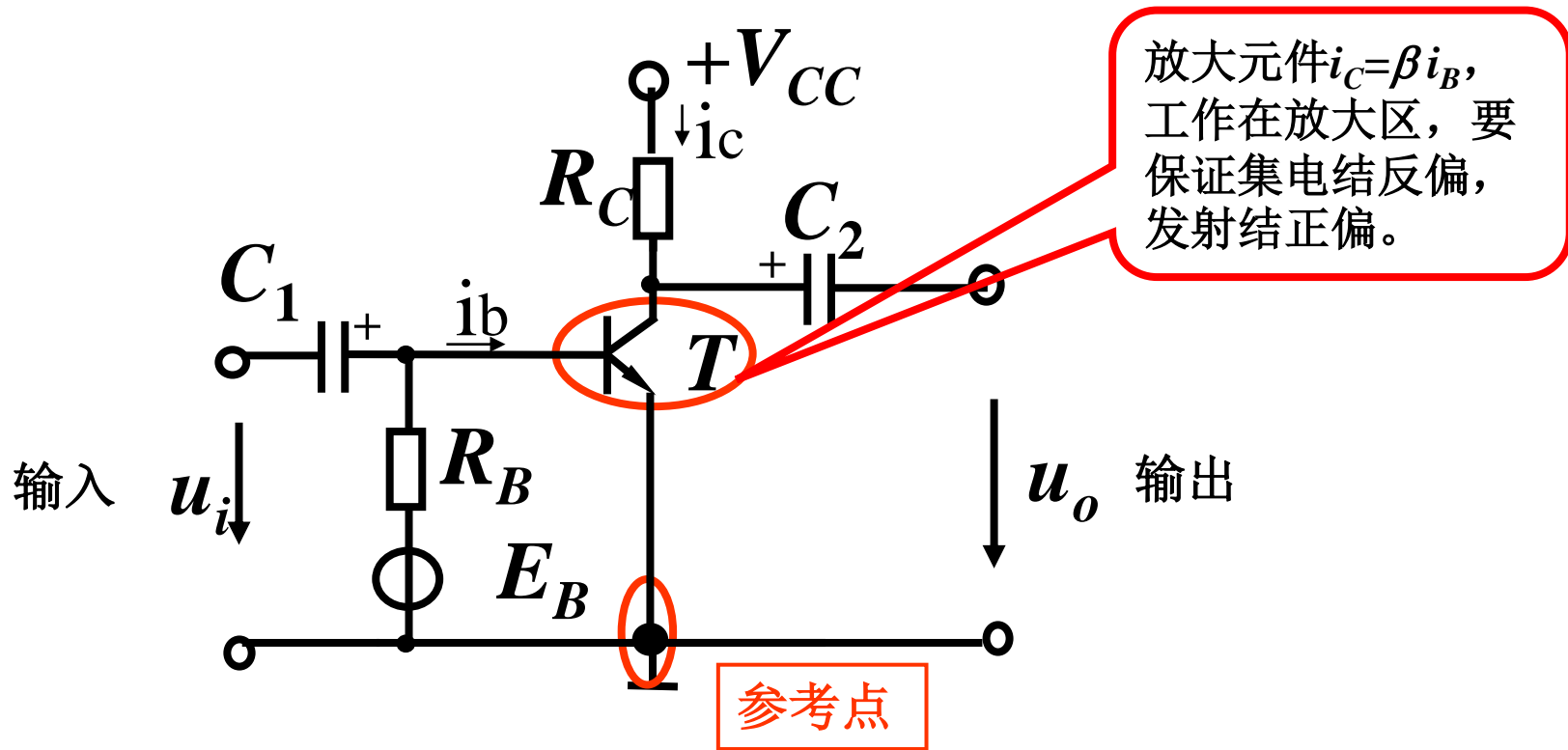
基本放大电路：输入信号源、晶体三极管、输出负载以及直流电源和相应的偏置电路。

直流电源和相应的偏置电路用来为晶体三极管提供静态工作点，以保证晶体三极管工作在放大区。

输出负载将电流的变化转变为电压的变化的作用。

共发射放大电路的组成

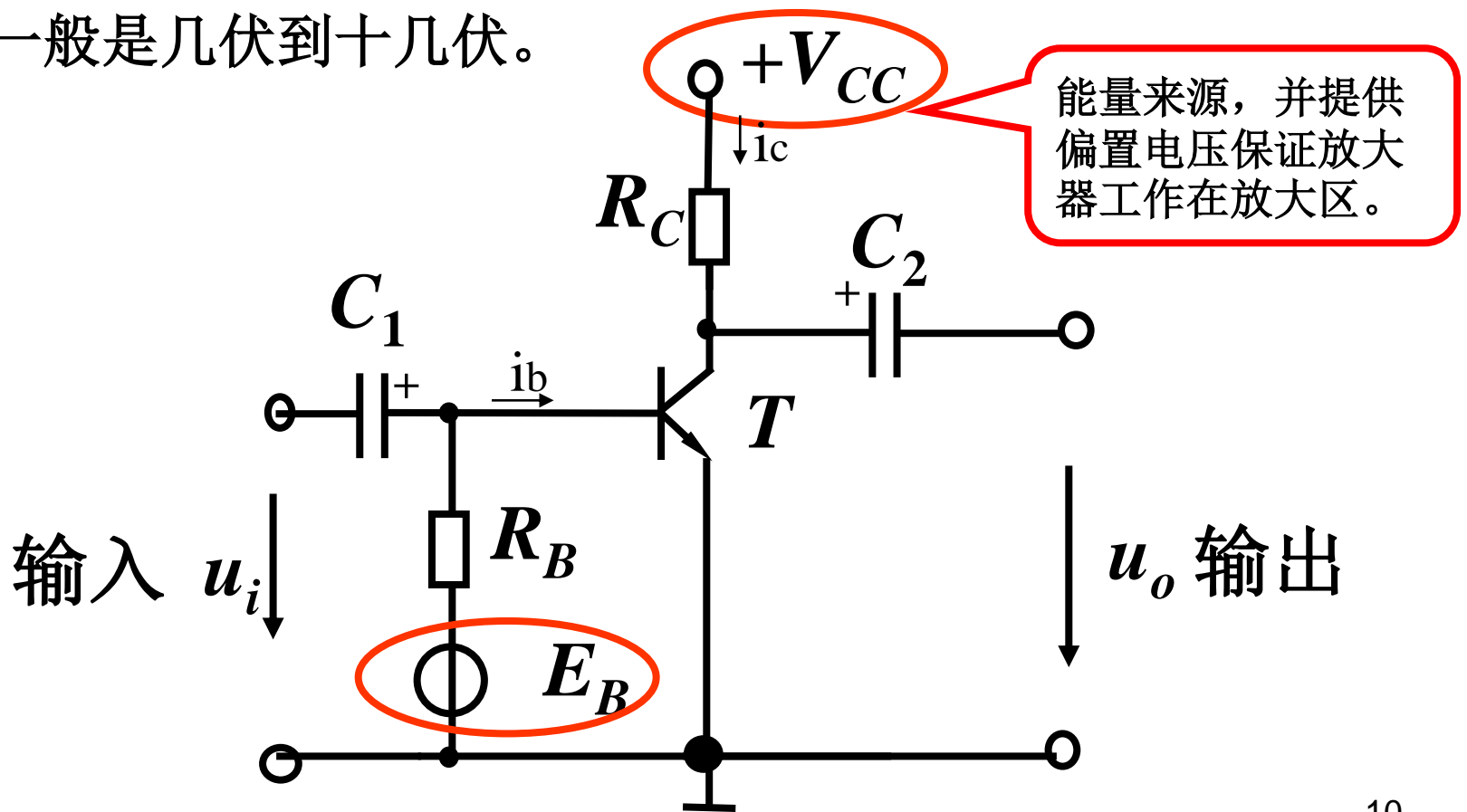
(1) 晶体管T：放大元件，用基极电流 i_B 控制集电极电流 i_C



共发射放大电路的组成

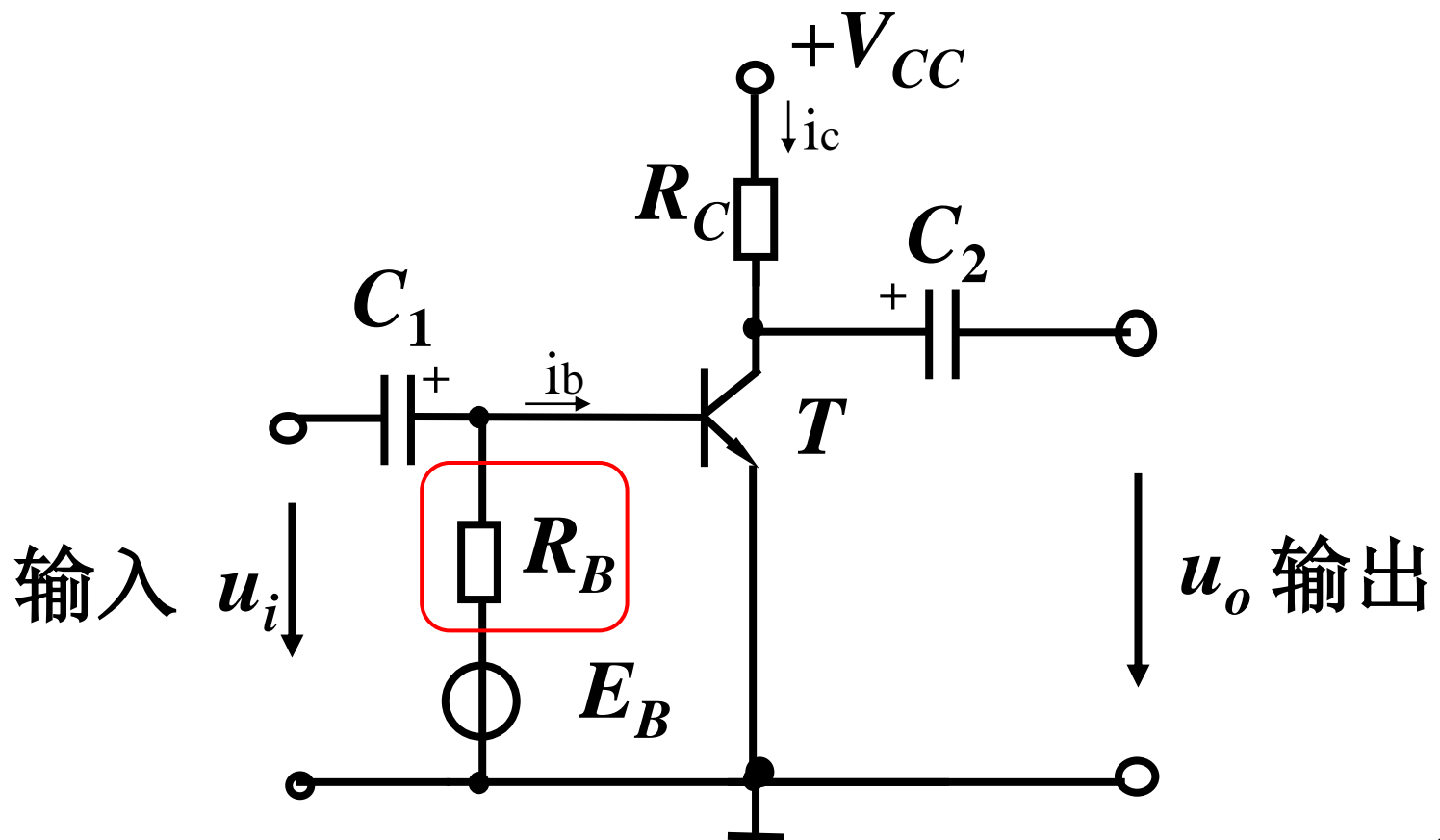
(2) 电源 V_{CC} 和 E_B ：使晶体管的发射结正偏，集电结反偏，晶体管处在放大状态，同时是能量来源，提供电流 i_B 和 i_C 。

V_{CC} 一般是几伏到十几伏。



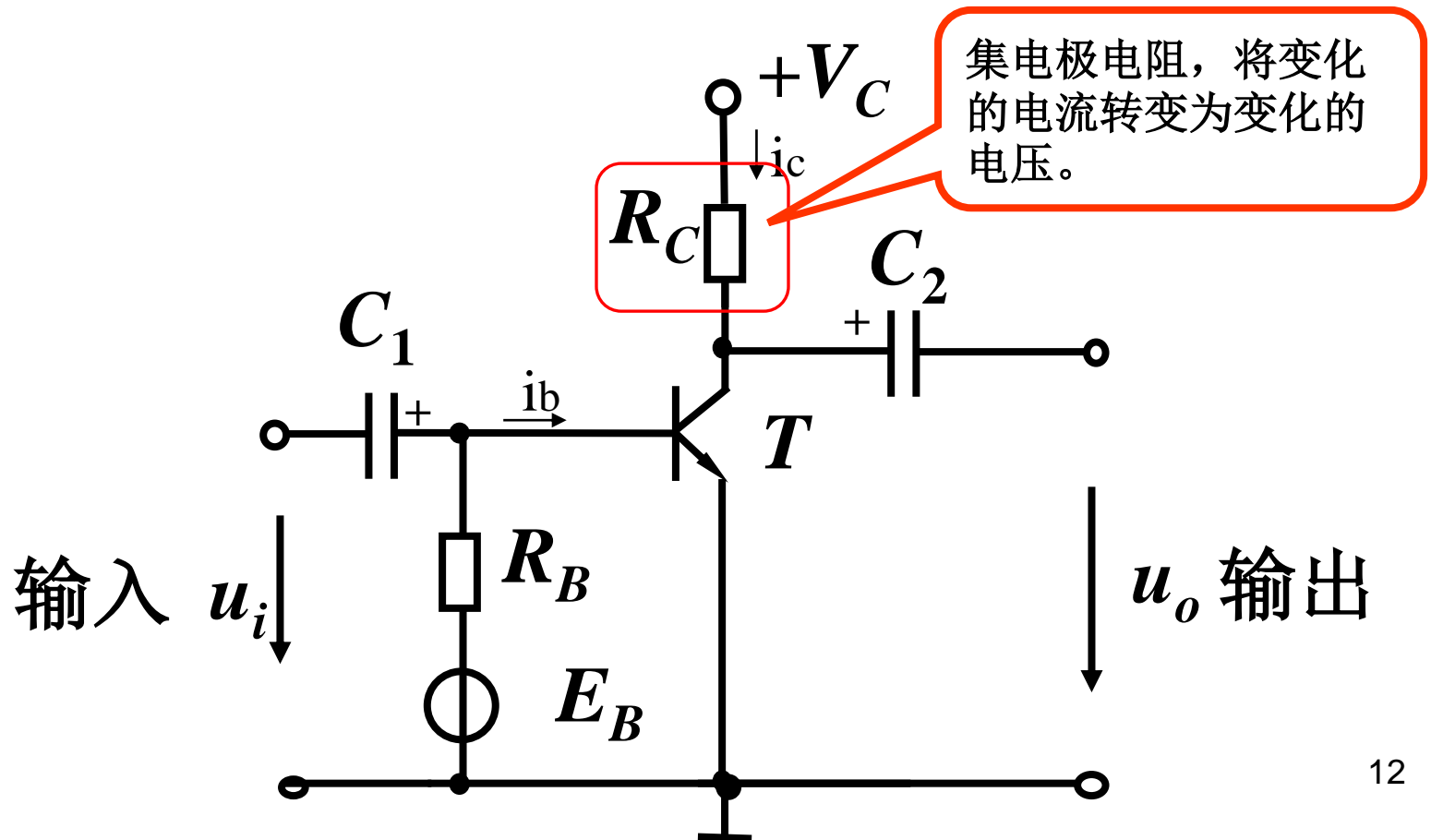
共发射放大电路的组成

(3) **偏置电阻 R_B** : 调节基极偏置电流 I_B , 使晶体管有合适的工作点, 一般为几十千欧到几百千欧。



共发射放大电路的组成

(4) 集电极负载电阻 R_C ：将集电极电流 i_C 的变化转换为电压的变化，以获得电压放大，一般为几千欧。



共发射放大电路的组成

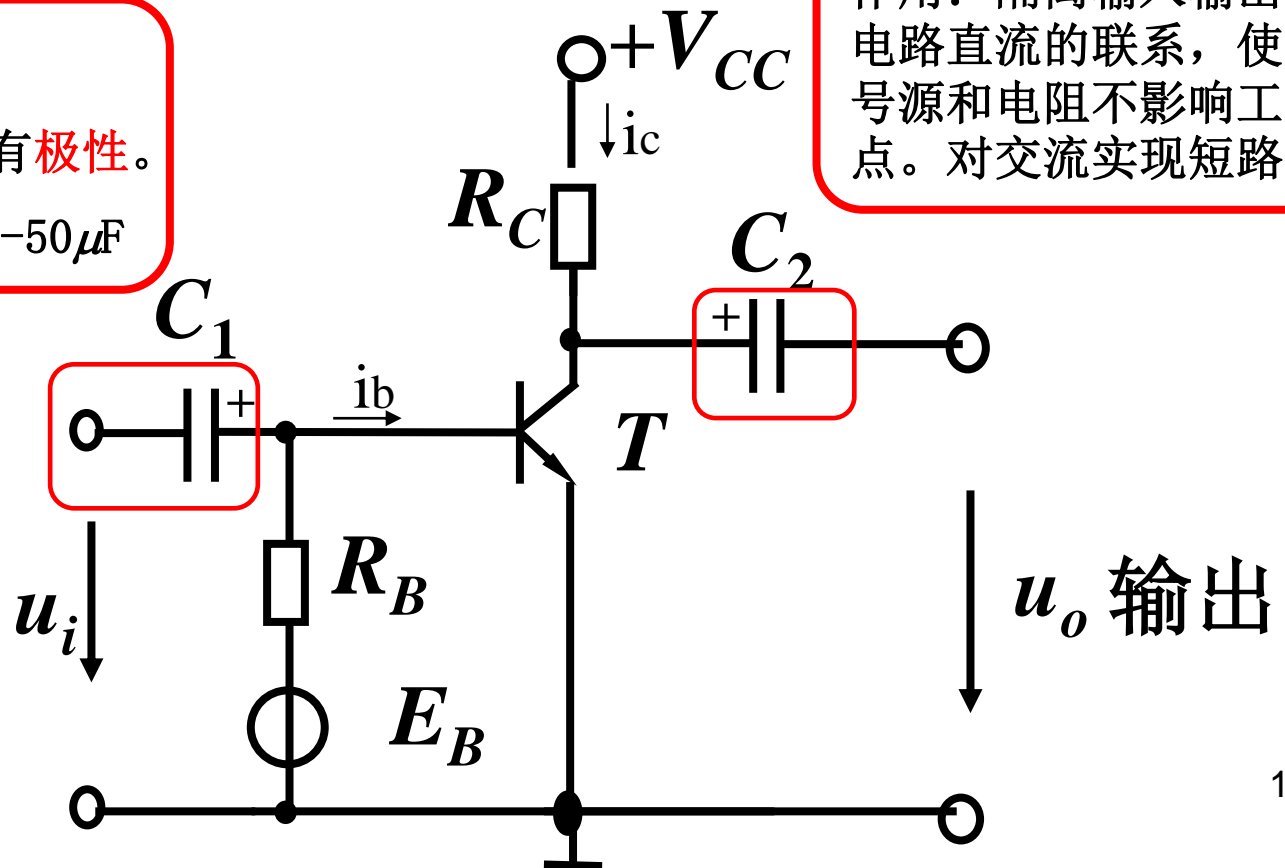
(5) 电容 C_1 、 C_2 ：传递交流信号（耦合作用）。同时，隔离直流信号。为了减小信号的电压损失， C_1 、 C_2 应足够大。

耦合电容：

电解电容，有极性。

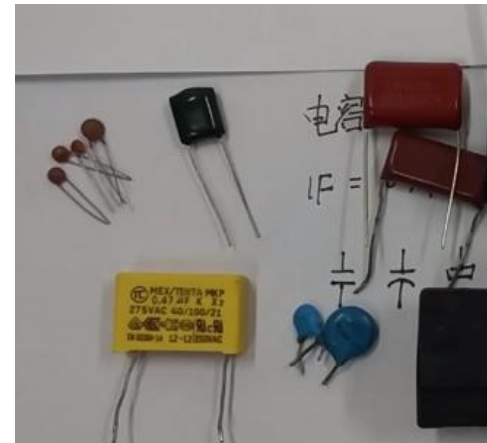
大小为 $10\mu\text{F}$ – $50\mu\text{F}$

作用：隔离输入输出与电路直流的联系，使信号源和电阻不影响工作点。对交流实现短路。

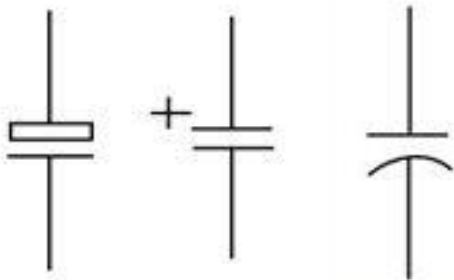


极性电容

- 极性电容（电解电容）一般容量相对较大（大于 $10\mu\text{F}$ ）。形状多为圆柱形。
- 无极性电容，容量较小（小于 $10\mu\text{F}$ ），形状千奇百变。



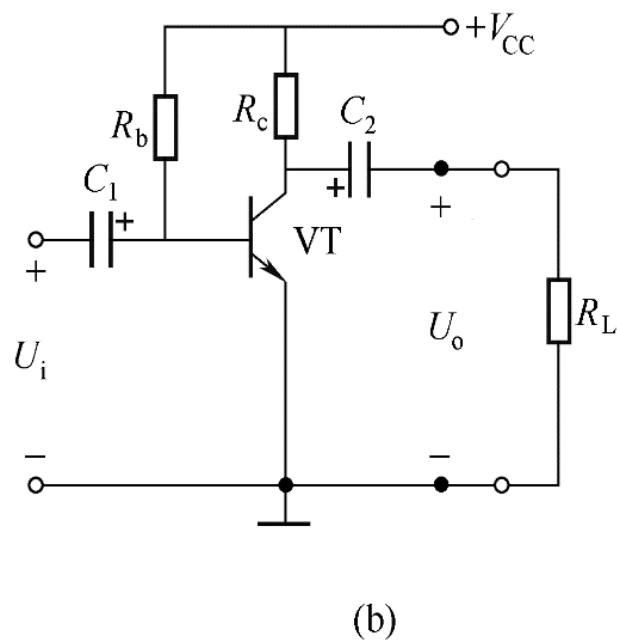
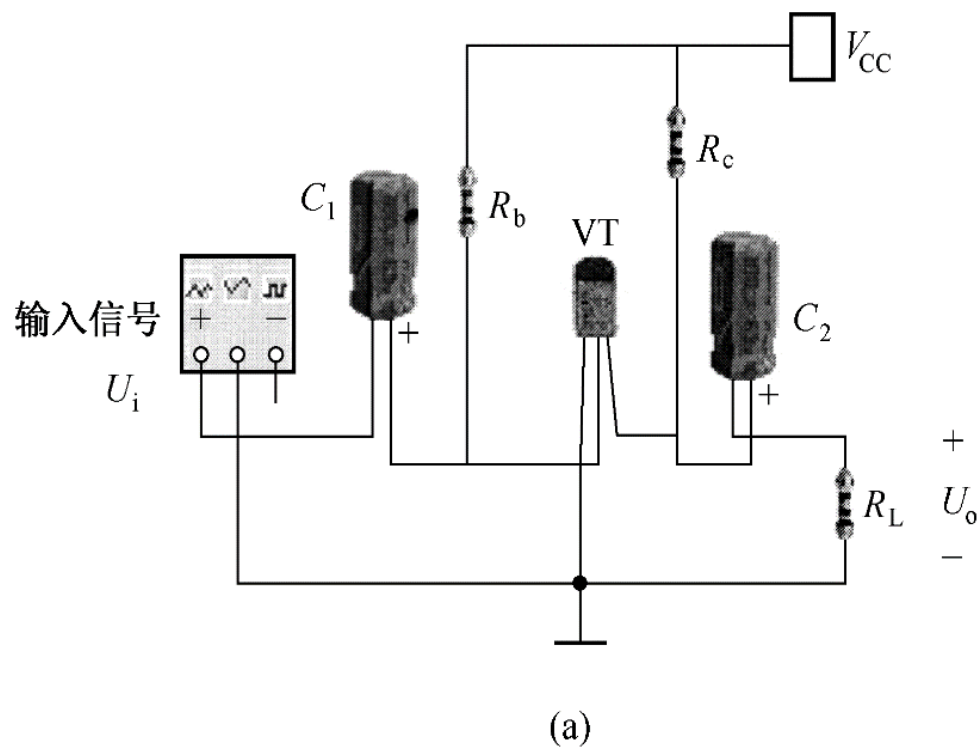
无极性电容



极性电容

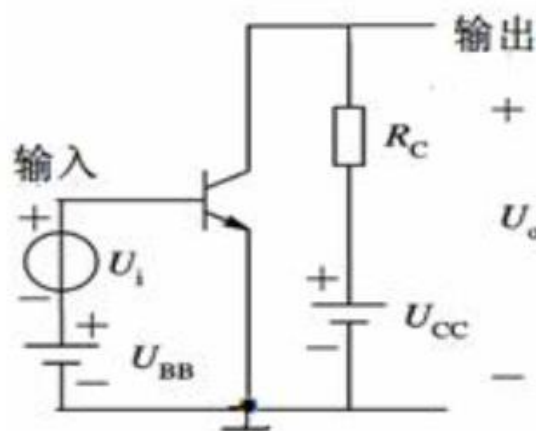
共发射放大器实用电路

晶体三极管T；直流电源 $+V_{CC}$ ；集电极负载电阻 R_c ；基极偏置电阻 R_b ；耦合电容 C_1 、 C_2 。



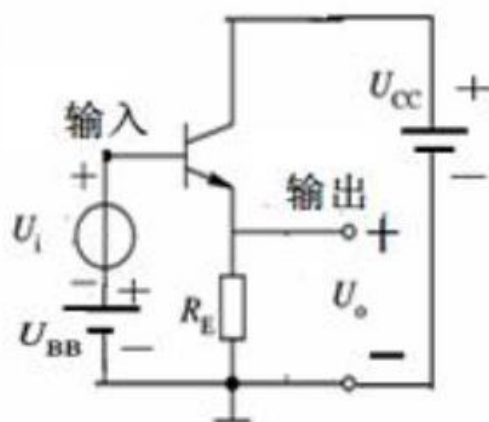
三种基本组态放大器

根据输入、输出回路公共端所接的电极不同，实际有共发射极、共集电极和共基极三种基本(组态)放大器。



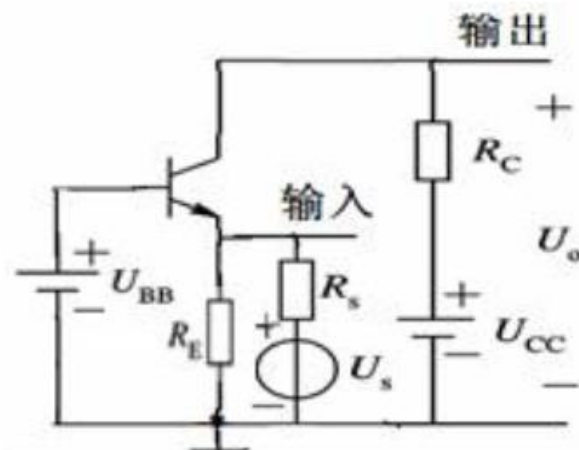
(a)

信号从基极输入，
从集电极输出，
-----共发射极



(b)

信号从基极输入，
从发射极输出，
-----共集电极



(c)

信号从发射极输入，
从集电极输出，
-----共基极

各电压、电流字母标识

放大电路中的电压、电流都有直流分量和交流分量。

通常使用：

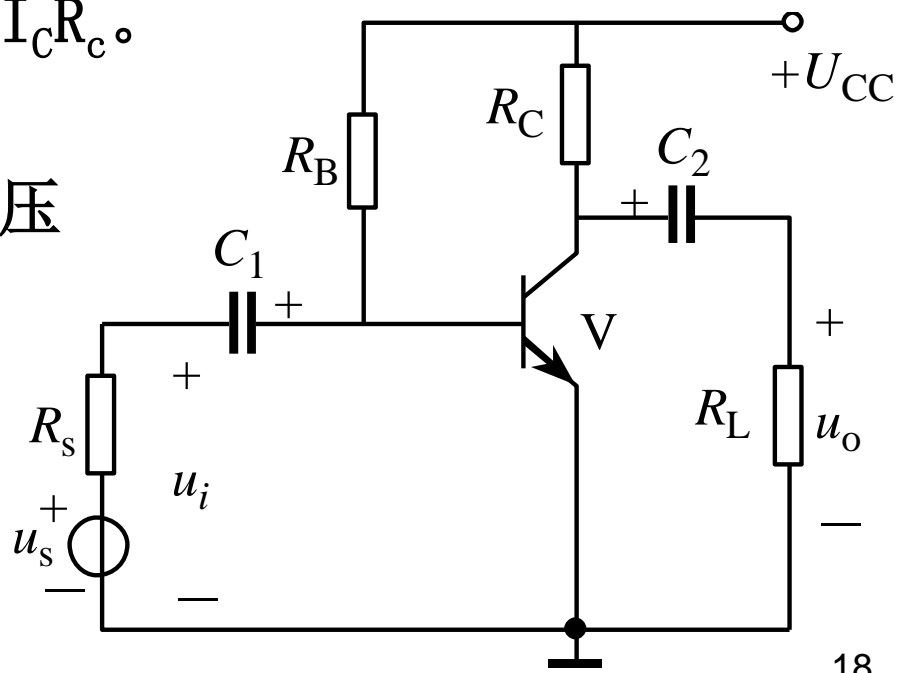
- 大写字母加大写下标表示直流分量，如 U_{CE} 、 I_B 等；
- 小写字母加小写下标表示交流分量，如 u_{ce} 、 i_b 等；
- 小写字母加大写下标表示总量（直流分量+交流分量），如 u_{CE} 、 i_B 等。

工作原理

1. 无输入信号时放大器的工作情况

在接通直流电源 V_{CC} 后，当 $u_i=0$ 时，由于基极偏流电阻 R_B 的作用，晶体管基极就有正向偏流 I_B 流过，由于晶体管的电流放大作用，有 $I_C = \beta I_B$ ， R_C 上的压降为 $U_C = I_C R_C$ 。

晶体管集电极-发射极间的管压降为 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 。



工作原理

1. 无输入信号时放大器的工作情况

当 $u_i=0$ 时，放大电路处于**静态或直流工作状态**，此时的基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和集电极发射极电压 U_{CE} 在三极管特性曲线上所确定的点称为**静态工作点**，习惯上用Q表示。

这些电压和电流值也称为**静态电压**和**静态电流**。

◆静态工作点的设置是放大器能否正常工作的**重要条件**。

工作原理

2. 输入交流信号时的工作情况

当 $u_i \neq 0$ 时，发射结上的电压瞬时值为

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

如果选择适当的静态电压值和静态电流值，输入信号电压的幅值又限制在一定范围之内，则在信号的整个周期内，发射结上的电压均能处于输入特性曲线的直线部分。

工作原理

2. 输入交流信号时的工作情况

基极电流 i_B 瞬时值为

$$i_B = I_B + i_b$$

由于晶体管的电流放大作用， 集电极电流 i_C 将随 i_B 变化。

同样 i_C 瞬时值为

$$i_C = I_C + i_c$$

R_C 上的电压降 $u_{RC} = i_C R_C$ ， 随 i_C 变化。

工作原理

2. 输入交流信号时的工作情况

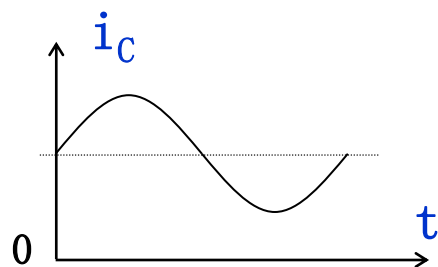
由于 $V_{CC}=i_C R_c + u_{CE}$ ， u_{CE} 由两部分组成：固定不变的静态管压降 U_{CE} ；作正弦变化的交流集电极-发射极电压 u_{ce} 。

如果负载电阻 R_L 通过耦合电容 C_2 接到晶体管的集电极-发射极之间，则由于电容 C_2 的隔直作用，负载电阻 R_L 上就不会出现直流电压。

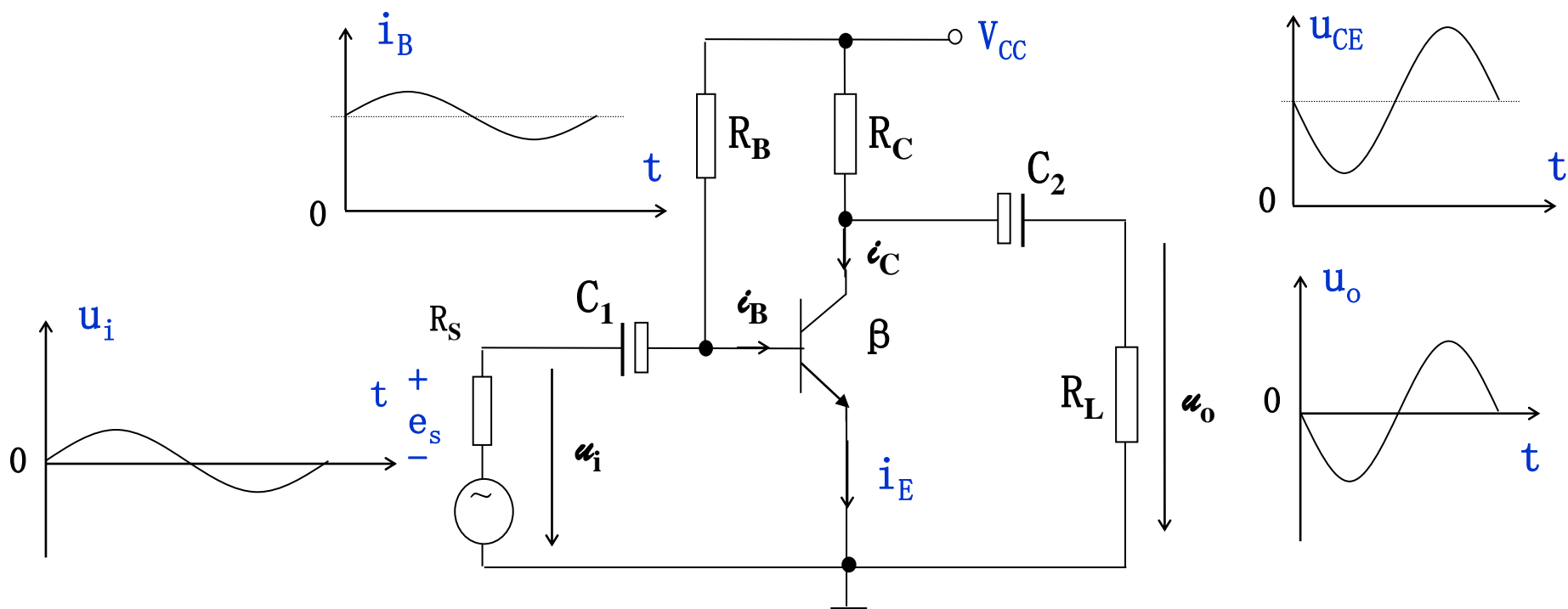
对交流信号 u_{ce} ，如果电容 C_2 的容量足够大，则对交流信号的容抗很小，忽略其上的压降，则管压降的交流成分就是负载上的输出电压，因此有 $u_o = u_{ce}$

工作原理

基极电流的变化放大 β
后成为集电极电流 i_C 。



i_C 流过电阻 R_C , 则 R_C 上电压发生变化, 输出电压 $u_{CE} = V_{CC} - R_C i_C$, 所以集—射极间的电压 u_{CE} 的变化与 i_C 变化情况正相反。



输入弱小的交流信号通过电容 C_1 的耦合送到三极管的基极和发射极, 控制 i_B 。

各处工作波形

u_{CE} 通过电容 C_2 隔离了直流成分 U_{CEQ} , 输出的只是放大信号的交流成分 u_o 。

工作原理

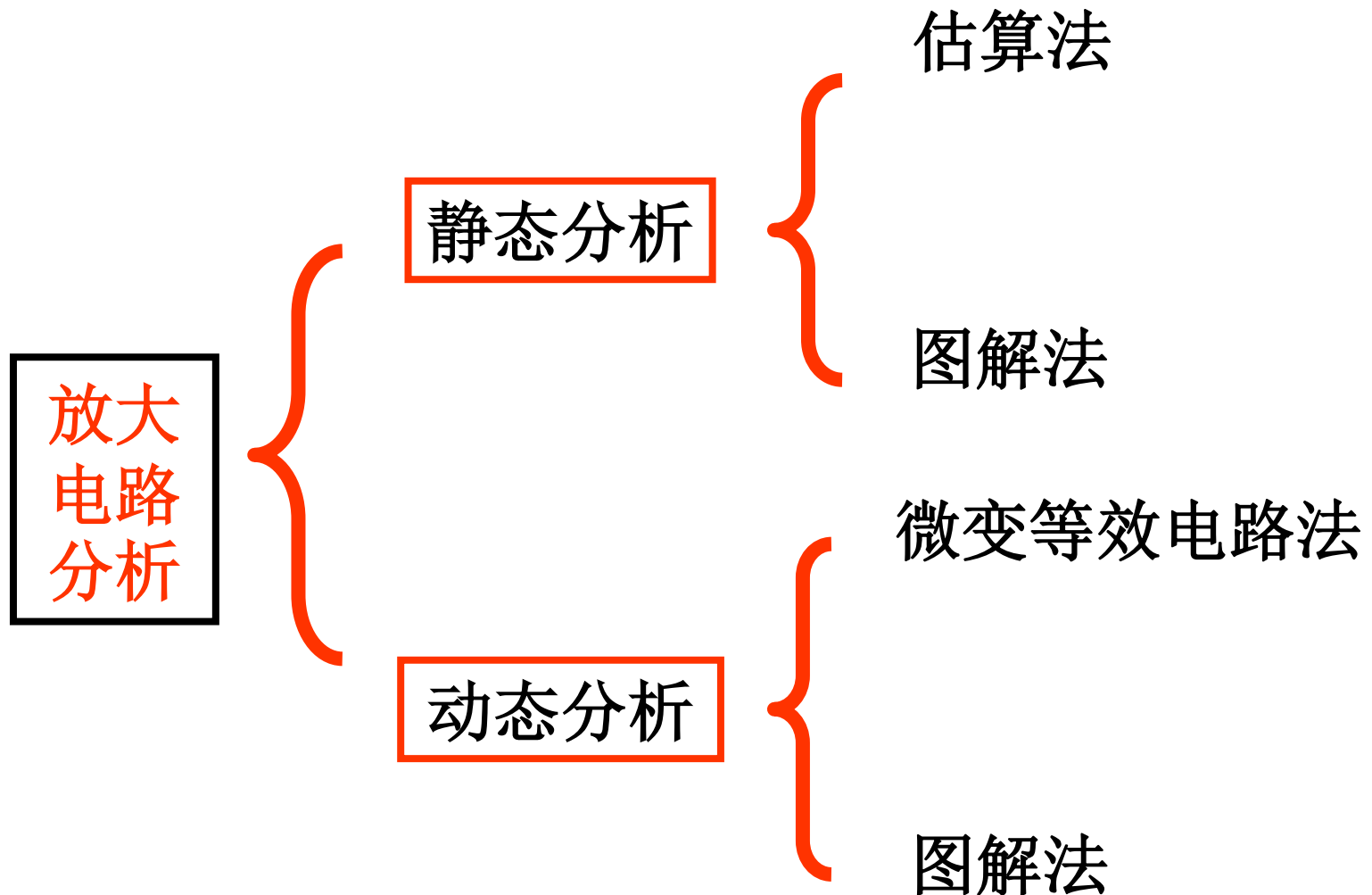
$$u_i \xrightarrow{C_1} i_B \xrightarrow{T} i_C = \beta i_B \xrightarrow{R_C} u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C \xrightarrow{C_2} u_o = -\beta i_B R_C$$

放大电路**工作原理实质**是用微弱的信号电压 u_i 通过三极管的控制作用去控制三极管集电极电流 i_C ， i_C 在 R_L 上形成压降作为输出电压。 i_C 由直流电源 V_{CC} 提供。

对比输出电压 u_o 和输入信号电压 u_i ：

- (1) 输出电压的波形和输入信号电压的波形相同，只是输出电压幅度比输入电压大。
- (2) 输出电压与输入信号电压相位差为 180° 。

放大电路的分析方法



静态分析（直流计算）

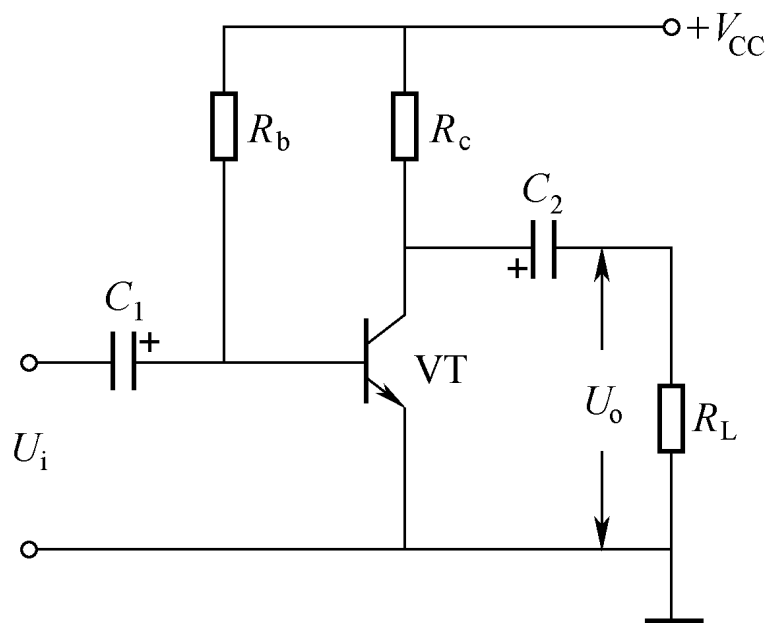
静态分析是计算放大电路在没有输入信号时的工作状态。

主要是确定放大电路中的静态值 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

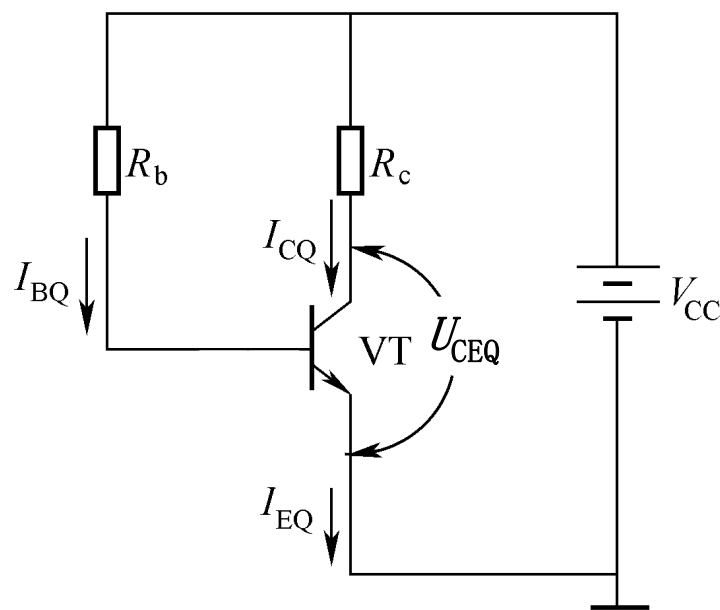
静态工作点对放大器的放大能力、输出电压波形都有影响。

晶体管放大电路的直流通路

- 画直流通路的原则——电容开路，电感短路；（直流稳态）
信号源不作用（即电压源短路，电流源开路）。（叠加原理）。



(a) 基本放大电路



(b) 基本放大电路的直流通路

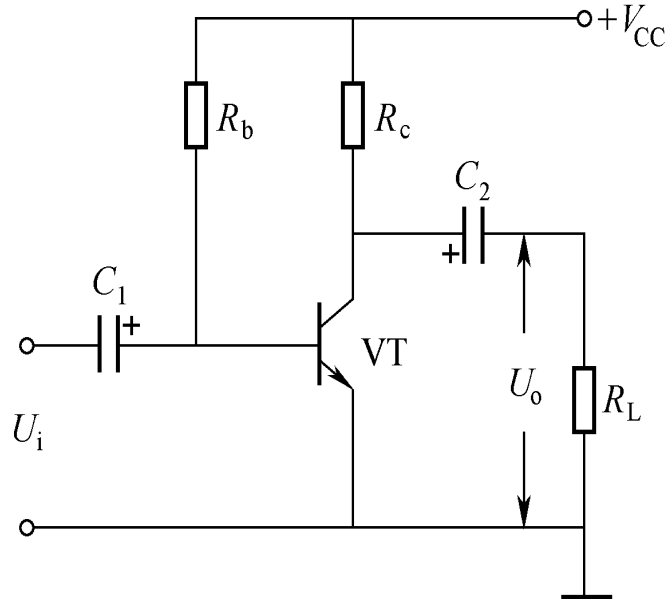
静态工作点的估算法

静态工作点的估算：用第四章介绍的方法，计算直流分量

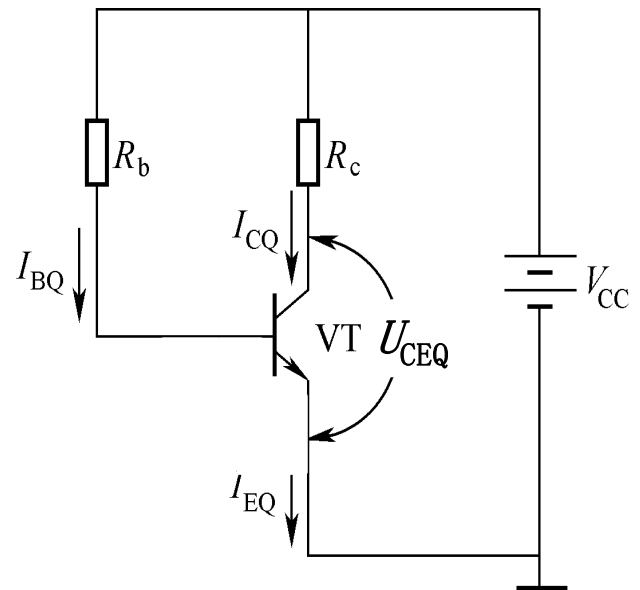
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B} \quad I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

忽略 U_{BEQ} $I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$ $I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$ $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$

固定偏置



(a) 基本放大电路



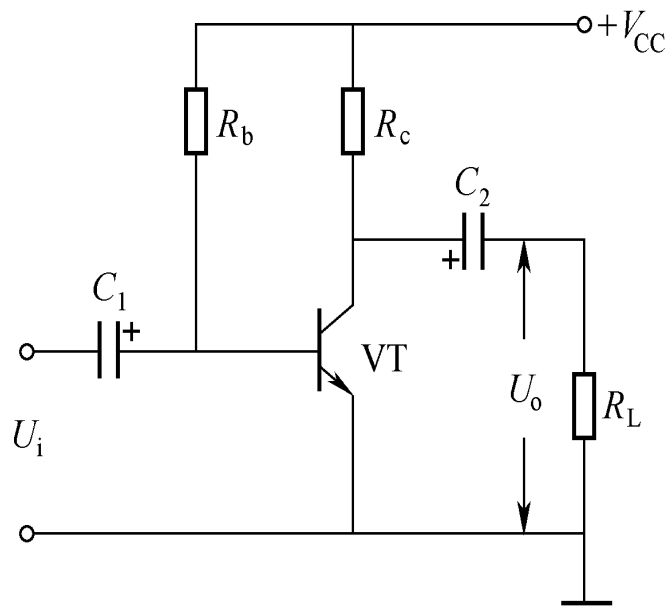
(b) 基本放大电路的直流通路

静态工作点的估算法

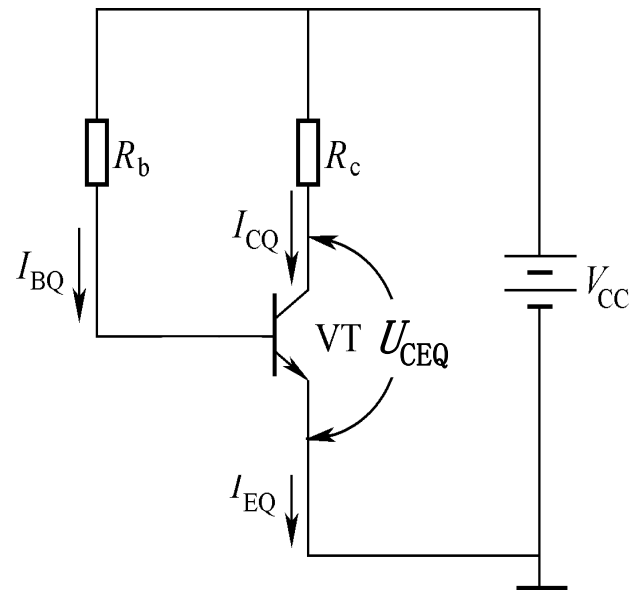
临界饱和基极电流 $I_{BS} = \frac{V_{CC}}{\beta R_C}$

放大状态 ($I_B < I_{BS}$) $I_C = \beta I_B$

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

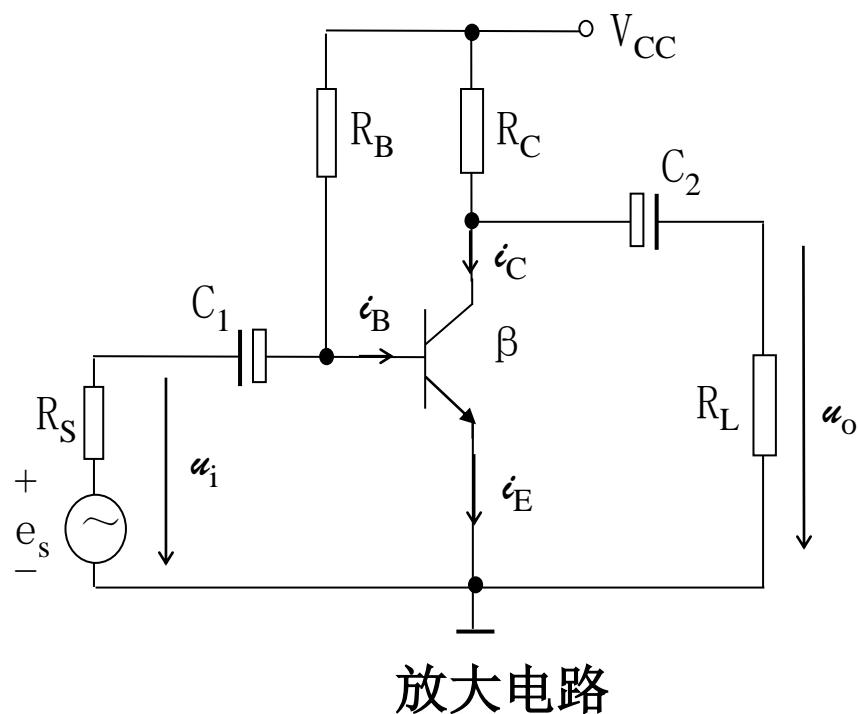


(a) 基本放大电路

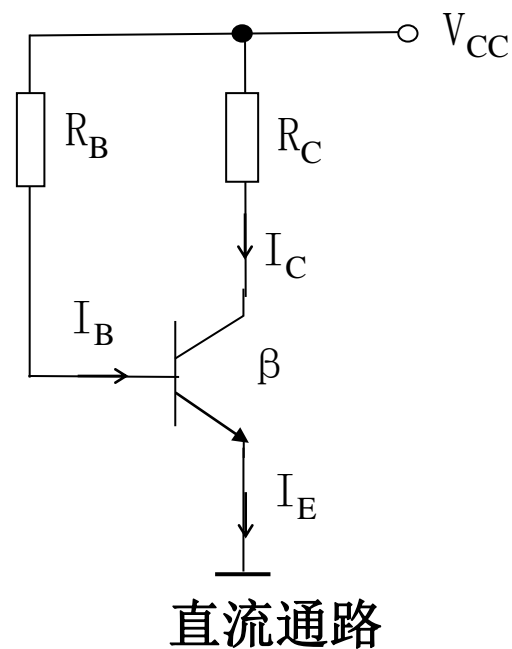


(b) 基本放大电路的直流通路

例5.1-1 如图, $V_{\text{BES}}=0.7\text{V}$, $\beta=60$, $R_{\text{B}}=200\text{k}\Omega$, $R_{\text{C}}=2\text{k}\Omega$, $V_{\text{CC}}=5\text{V}$ 。计算晶体管的静态工作点。



电容开路



例5.1-1 如图, $V_{BES}=0.7V$, $\beta=60$, $R_B=200k\Omega$, $R_C=2k\Omega$, $V_{CC}=5V$ 。计算晶体管的静态工作点。

解：作出电路的直流通路如图，显然晶体管应该导通，所以

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BES}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{200} = 0.0215 (mA)$$

因为 $I_{BS} = V_{CC} / (\beta R_C) = 5 / (60 \times 2) = 0.041 (mA)$, $I_B < I_{BS}$

所以晶体管处于放大状态

$$I_C = \beta I_B = 60 \times 0.0215 = 1.29 (mA)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 5 - 1.29 \times 2 = 2.42 (V)$$

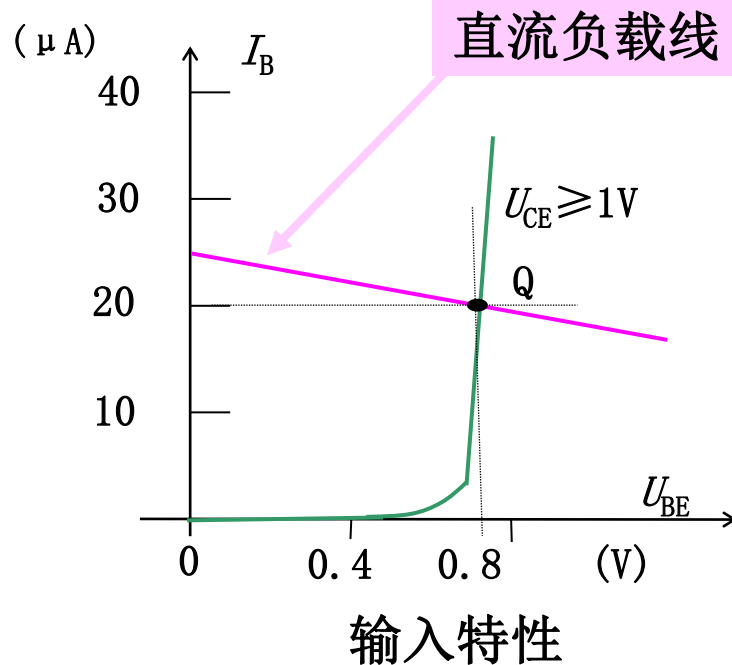
静态工作点的图解法

(1) 输入回路 (基极回路)

$$\begin{cases} I_B = f_i(U_{BE}) & (\text{T输入特性}) \\ U_{BE} = V_{CC} - R_B I_B & (\text{电路线性部分}) \end{cases}$$

在导通状态下, U_{BE} 变化较小 (恒压), 通常取 $U_{BE} = V_{BES}$

晶体管的静态基极电流 I_B 常称为“偏置电流”, 简称“偏流”; 提供偏置电流的电路, 常称为“偏置电路”。



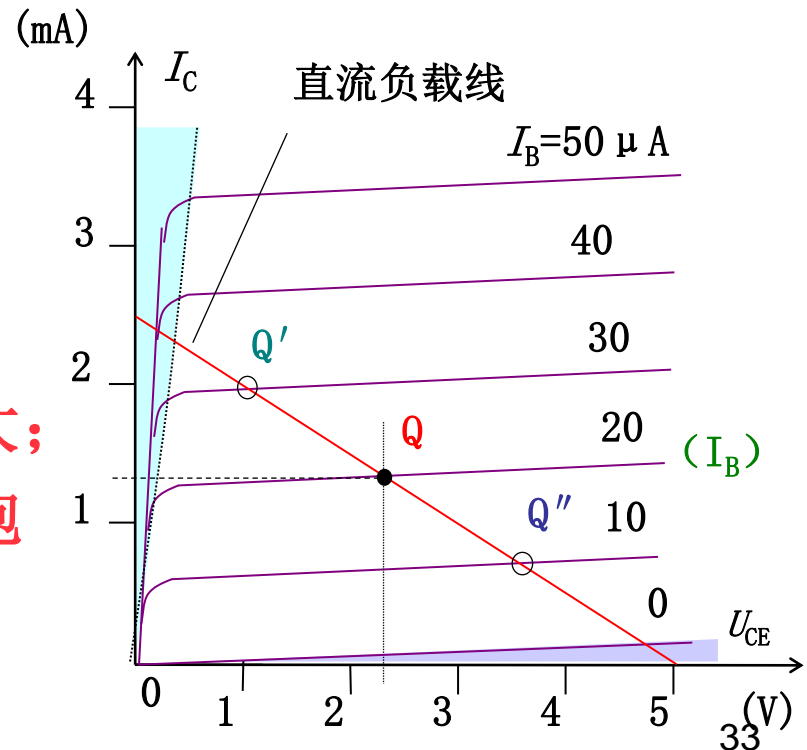
静态工作点的图解法

(2) 输出回路（集电极回路）

$$\begin{cases} I_C = f_o(U_{CE}, I_B) & (\text{T输出特性}) \\ U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C & (\text{电路线性部分}) \end{cases}$$

静态工作点：直流负载线和特性曲线的交点 (I_B , I_C , U_{CE})

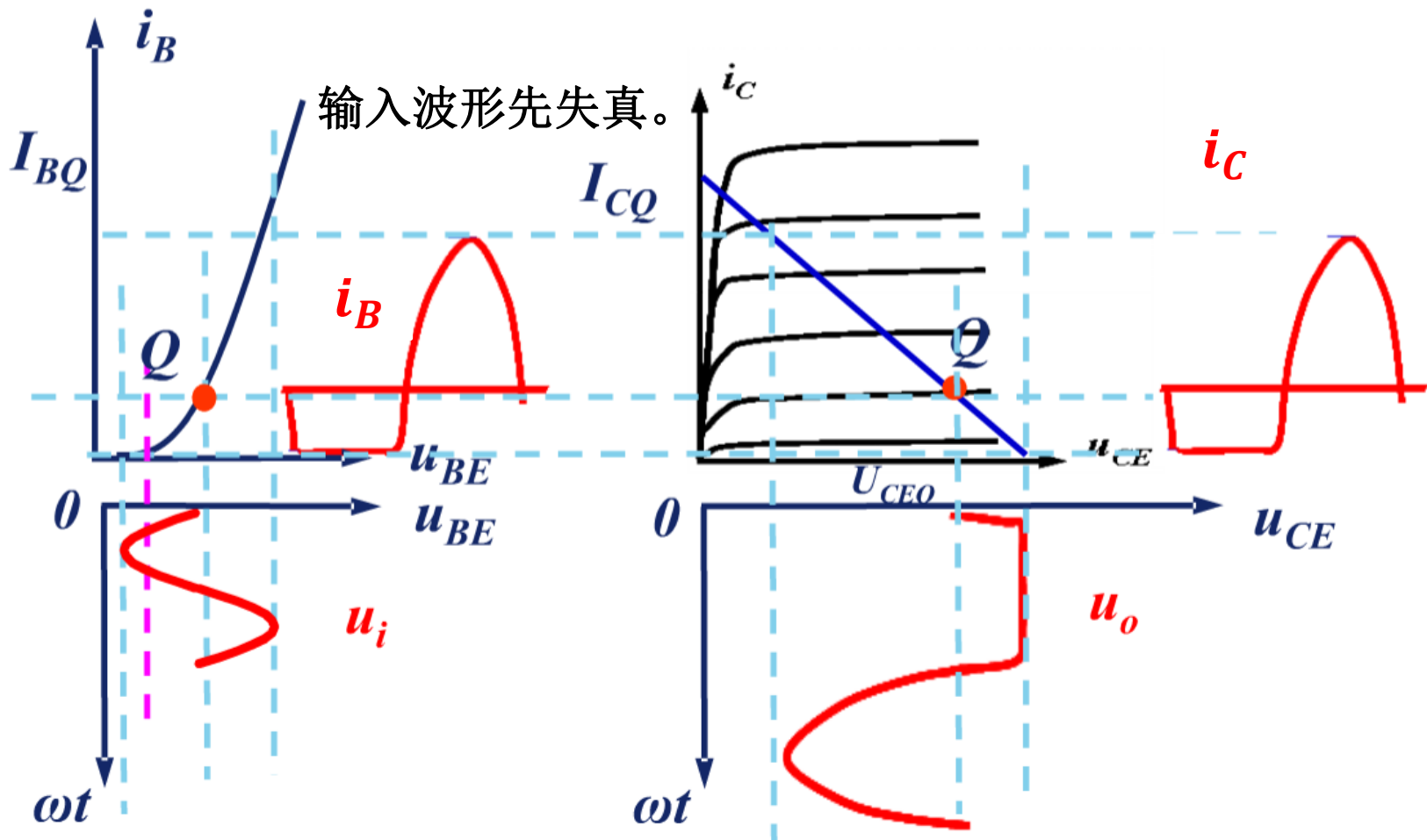
Q点较合适，不失真输出幅度较大；
Q' 和Q'' 点不合适，Q' 易出现饱和和失真；Q'' 易出现截止失真。



输出特性

截止失真

若 R_B 过大， I_{BQ} 会过小，发射结没有正向导通，三极管进入截止区。即Q点过低，输出波形出现顶部失真（上削波）。



截止失真

若 R_B 过大， I_{BQ} 会过小，发射结没有正向导通，三极管进入截止区。即Q点过低，输出波形出现顶部失真（上削波）。

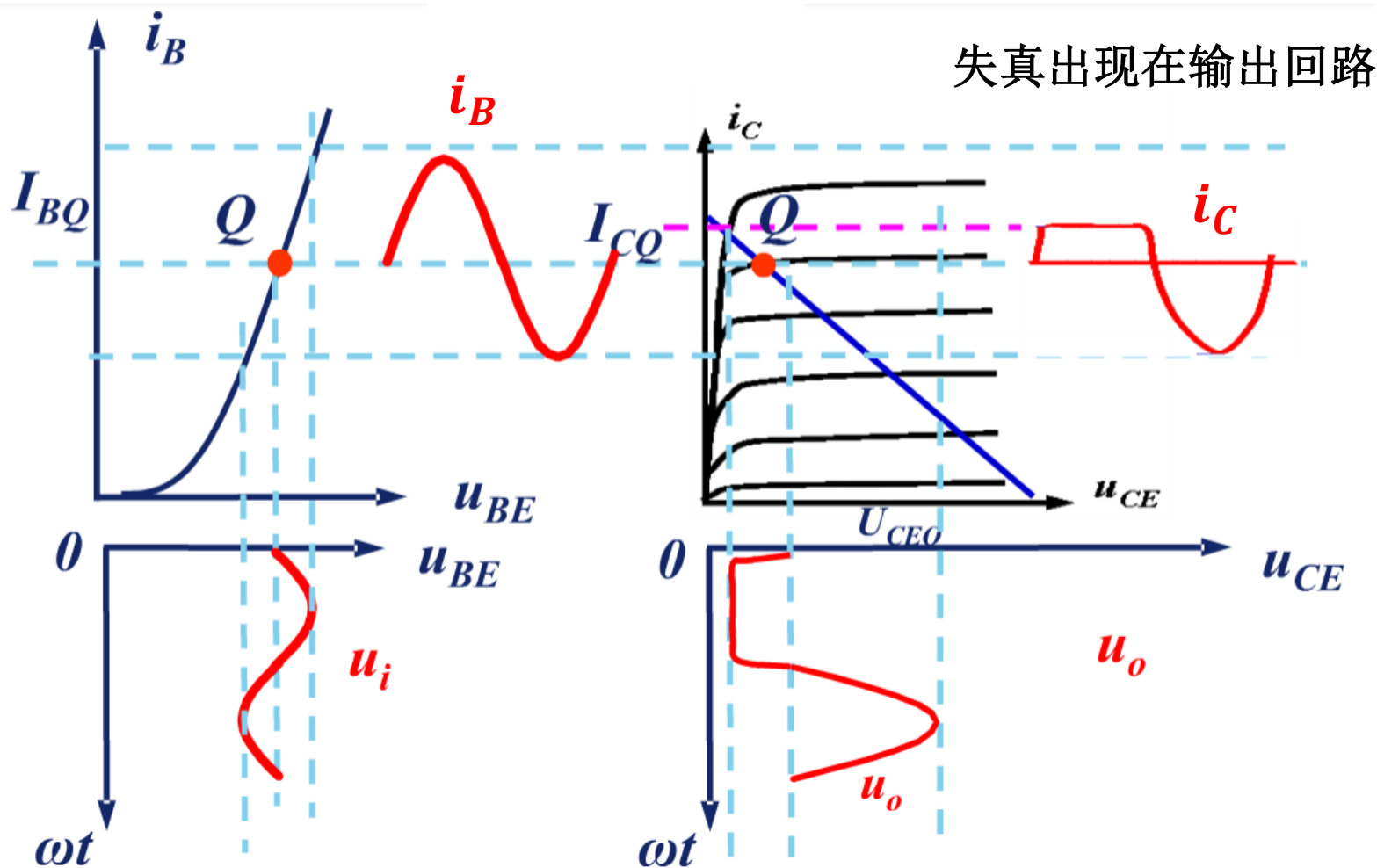


消除截止失真方法：
适当降低偏置电阻 R_B 。

截止失真示例

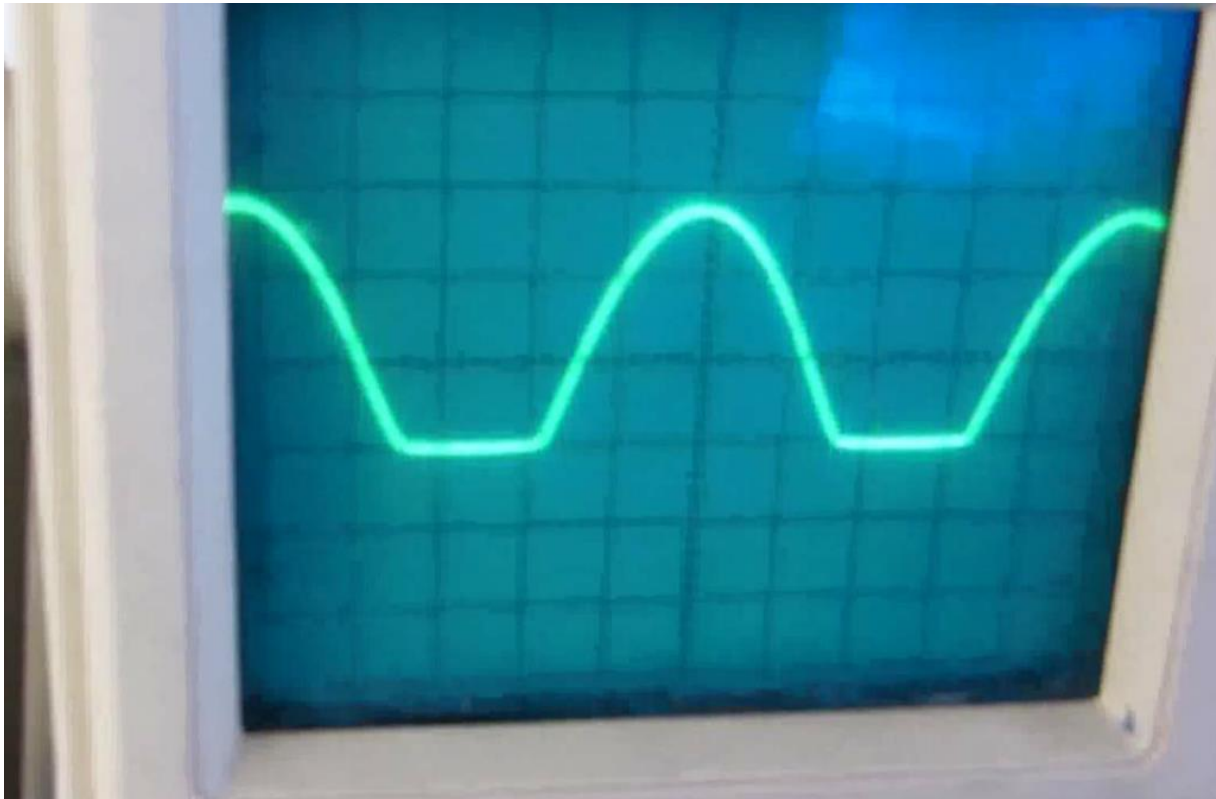
饱和失真

若 R_B 过小， I_{BQ} 会出现过大，集电结没有反向偏置，三极管进入饱和区。即Q点过高，输出波形出现底部失真（下削波）。



饱和失真

若 R_B 过小， I_{BQ} 会出现过大，集电结没有反向偏置，三极管进入饱和区。即Q点过高，输出波形出现底部失真（下削波）。



消除饱和失真的方法：
适当增大偏置电阻 R_B 。

饱和失真示例

静态工作点的图解法

图解步骤：

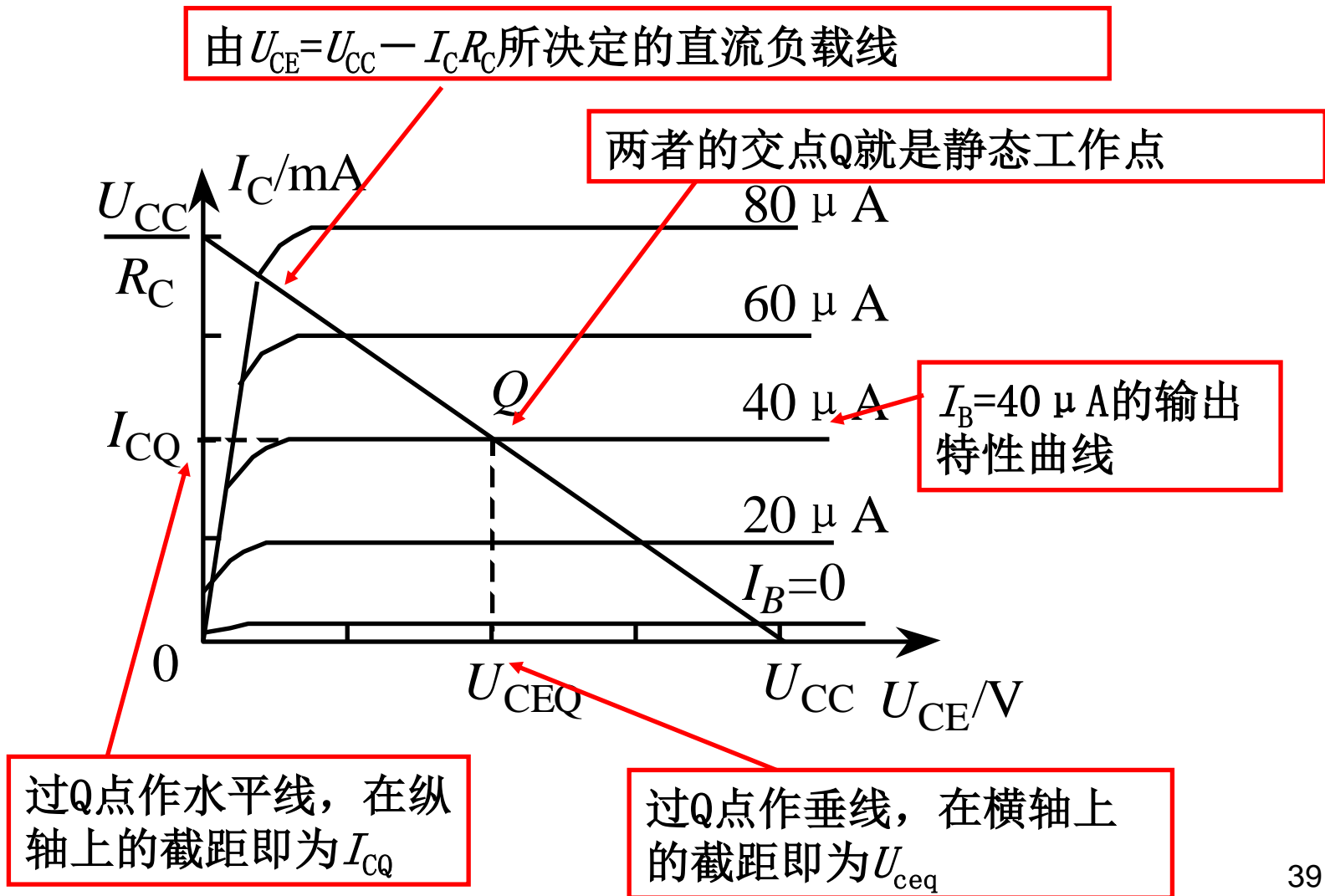
- (1) 用估算法求出基极电流 I_{BQ} (如 $40\ \mu\text{A}$) 。
- (2) 根据 I_{BQ} 在输出特性曲线中找到对应的曲线。
- (3) 作直流负载线。

根据 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 可画一条直线，其纵轴截距为 U_{CC}/R_C ，横轴截距为 U_{CC} ，斜率为 $-1/R_C$ ，只与负载电阻 R_C 有关，称为**直流负载线**。

- (4) 求静态工作点 Q ，并确定 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 的值。

I_{CQ} 和 U_{CEQ} 既要满足 $I_B = 40\ \mu\text{A}$ 的输出特性曲线，又要满足直流负载线，因而它们的**交点 Q** ，即静态工作点。由静态工作点 Q 便可在坐标上查得 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

静态工作点的图解法



动态分析

动态分析是指确定了静态值以后传输信号的分析，一般只考虑交流分量。通常采用**微变等效电路**近似计算。

微变等效电路：将非线性元器件（三极管）组成的放大电路等效为一个线性的电路，即将晶体管（三极管）线性化，用线性元器件等效其输入输出。

只有晶体管工作在小信号（**微变量**）时才能在静态点附近的小范围内用线性近似晶体管的特性曲线。

由于这种方法要求变化范围很小，因此，输入信号只能是小信号，一般要求 **$u_i \leq 10\text{mV}$** 。

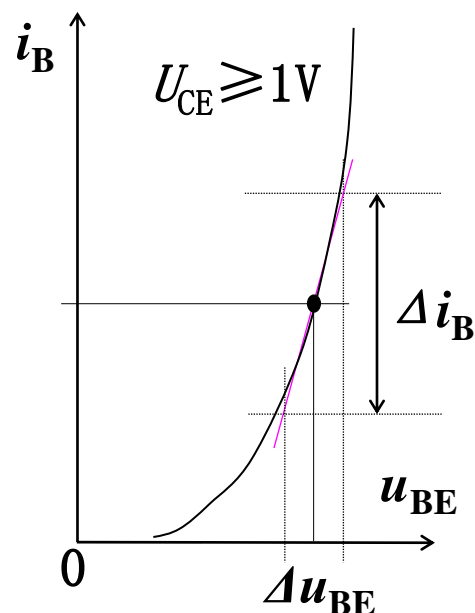
晶体管的微变等效电路

- 输入特性（基极）

在静态工作点附近晶体管的输入特性曲线可以用直线近似，即用一个动态电阻 r_{be} 来表示动态的输入电压与输入电流之间的关系，即：如图示

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} = \left. \frac{u_{be}}{i_b} \right|_{u_{CE} \geq 1V}$$

其中 r_{be} 称为三极管的**动态输入电阻**，它表示了晶体管在小信号时的输入特性，即三极管的交流输入特性可以用一个**线性电阻**近似。



输入特性

晶体管的微变等效电路

- 小功率晶体管动态输入电阻 r_{be} 的估算式

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_E(mA)}$$

I_E 是发射极的静态电流，以毫安为单位；

r_{be} 的大小与静态工作点（ I_{EQ} ）有关。

200（ Ω ）是晶体管的基区体电阻；

26mV是25℃时的温度电压当量值；

$(1 + \beta)$ 将晶体管的发射结电阻折算到基极回路的等效电阻。

小功率三极管的 r_{be} 一般为几百欧到几千欧。

晶体管的微变等效电路

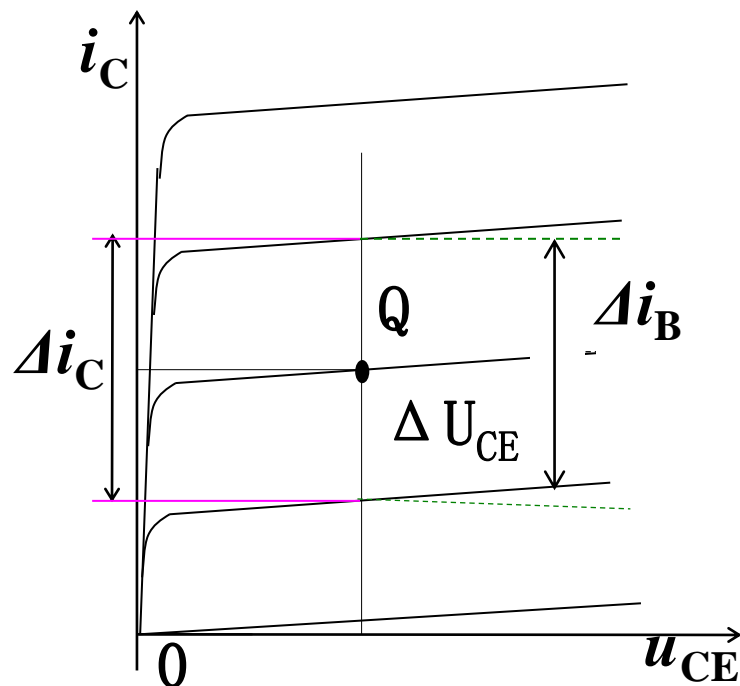
- 输出特性（集电极）

对于放大状态的三极管，忽略其反向电流时，

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B$$

$$i_c = \beta i_b$$

在小信号时， β 是常数，三极管的输出特性可以用一个**受控电流源**表示。

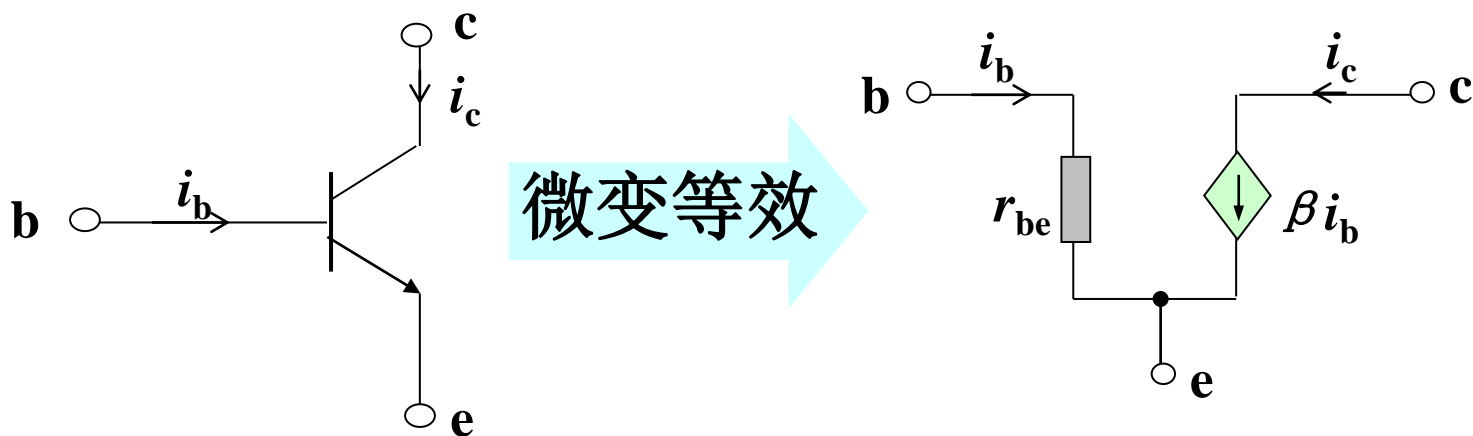


输出特性

晶体管的微变等效电路

- 三极管的微变等效电路

输入用动态电阻 r_{be} 近似，输出用受控电流源 βi_b 表示



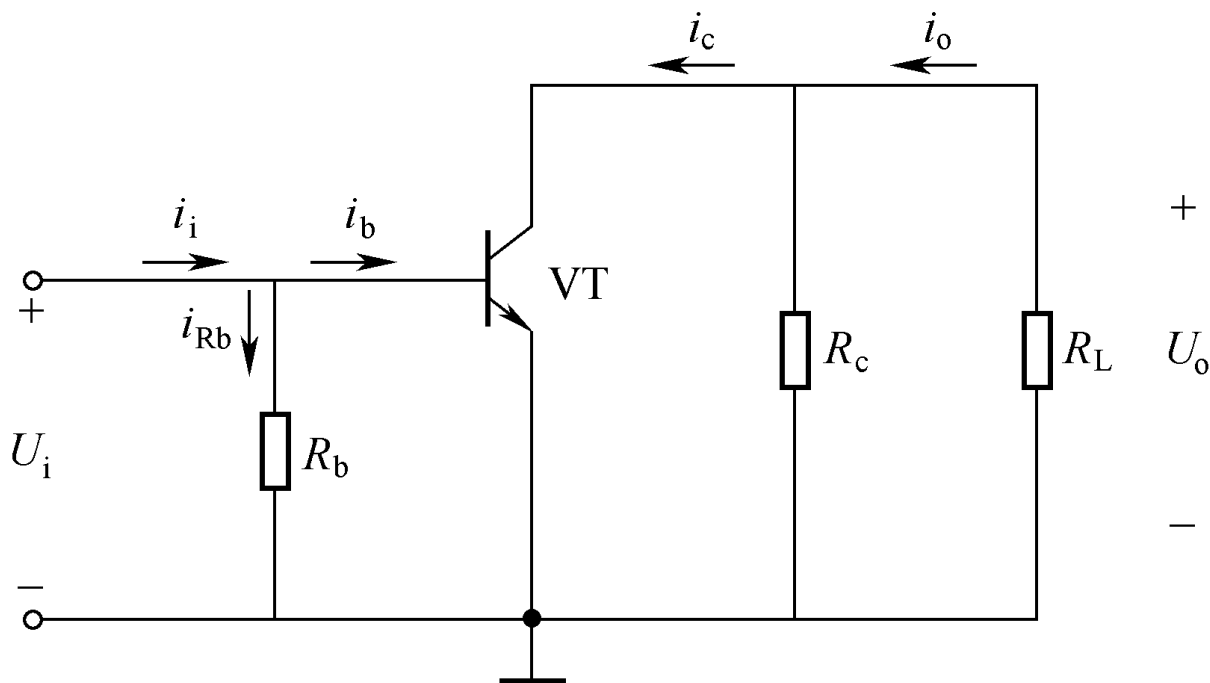
对于微变等效电路注意：

- ①使用条件：三极管处于**放大状态**，输入是**小信号**；
- ②作用：**只能用于计算交流量**，不能用于计算直流量。

晶体管放大电路的交流通路

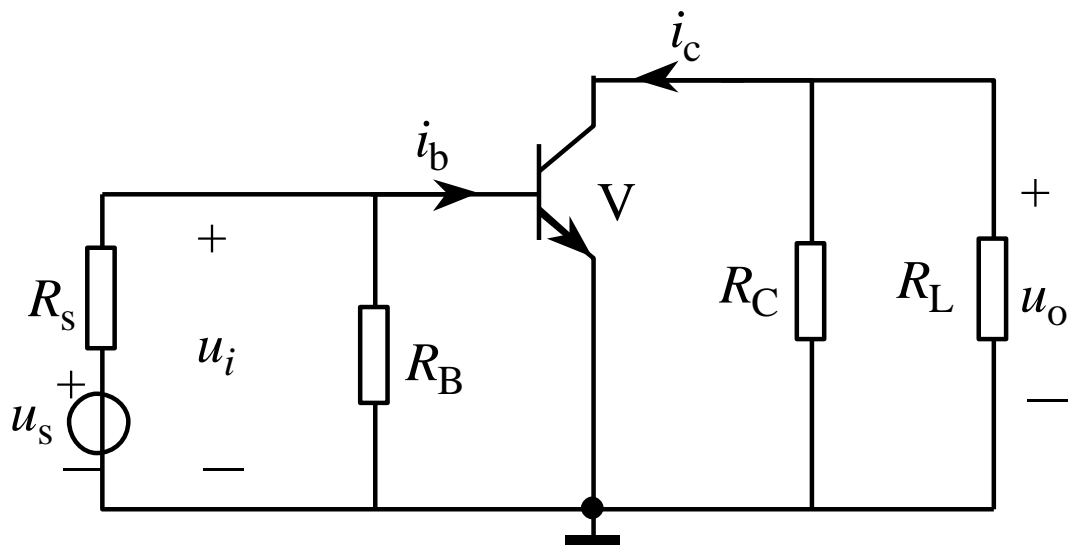
交流通路：输入交流信号时放大电路交流信号流通的路径。

画交流通路的原则——直流电源、电容短路



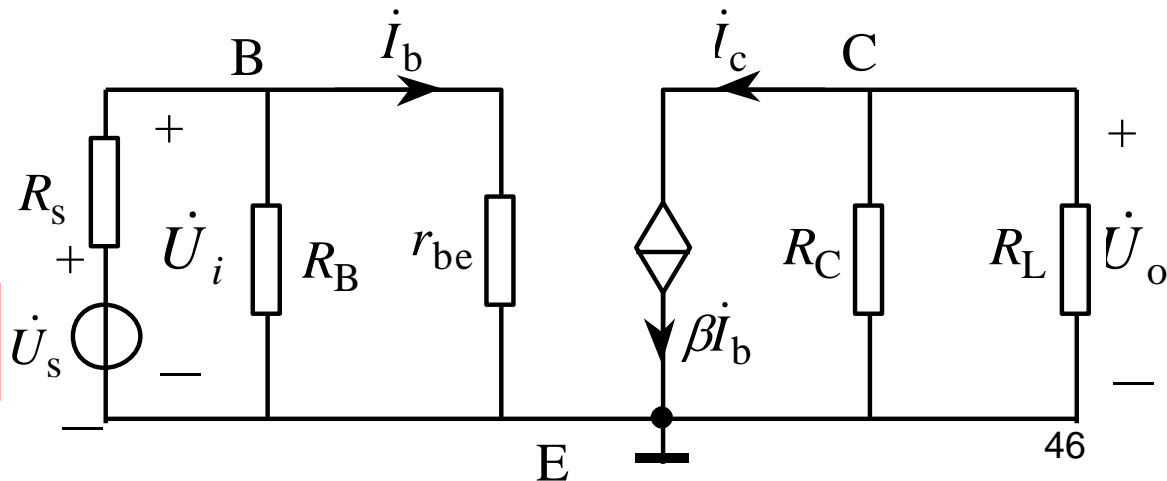
基本放大电路的交流通路

放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)



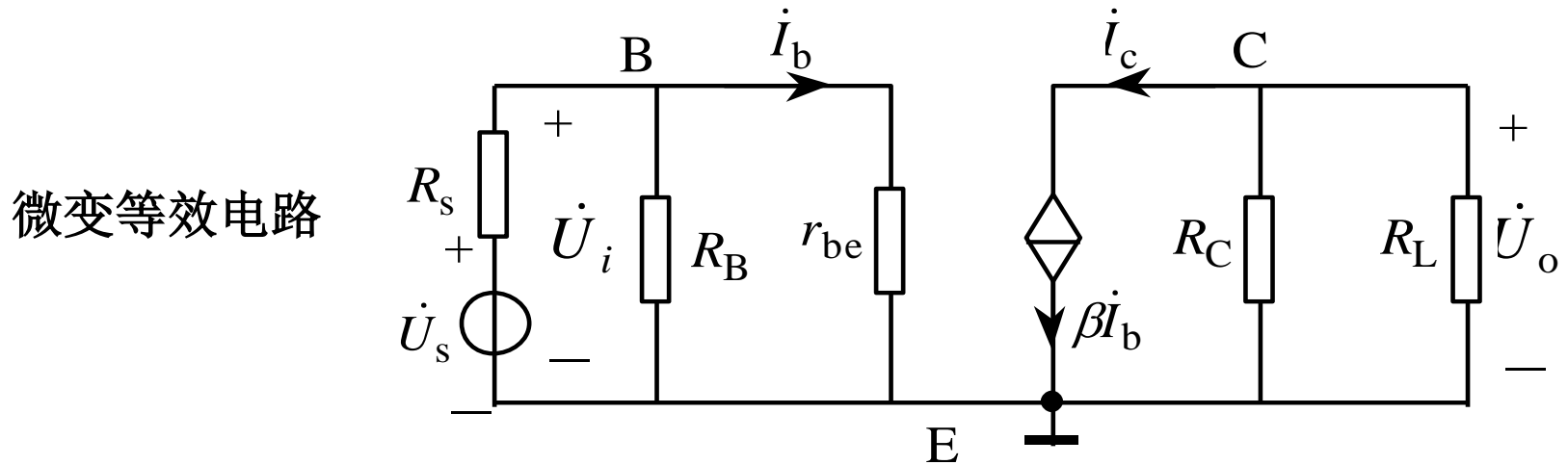
交流通路

微变等效电路



放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)

①电压放大倍数



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

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

放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)

①电压放大倍数

空载放大倍数 A_{u0}

当 $R_L = \infty$ （开路）时，即为空载时 $\dot{A}_u = -\frac{\beta R_C}{r_{be}}$

源载放大倍数 A_{us} （考虑信号源内阻）

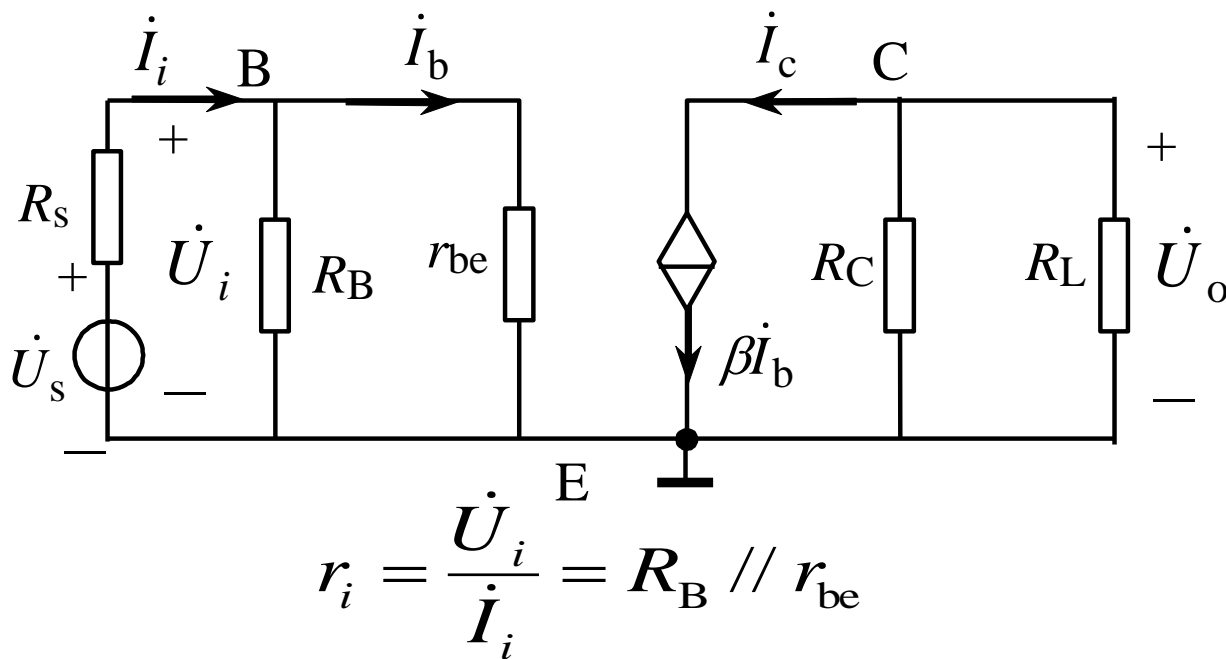
信号源有内阻 R_S 时，放大器得到的输入电压小于信号源的电动势。输出电压与信号源电动势之比为**源载放大倍数**，

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_S} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_S} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{r_i}{R_S + r_i} \cdot A_u$$

其中 r_i 是放大器的输入电阻。

放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)

②输入电阻 (r_i 越大越好)



输入电阻 r_i 的大小决定了放大电路从信号源吸取电流（输入电流）的大小。

放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)

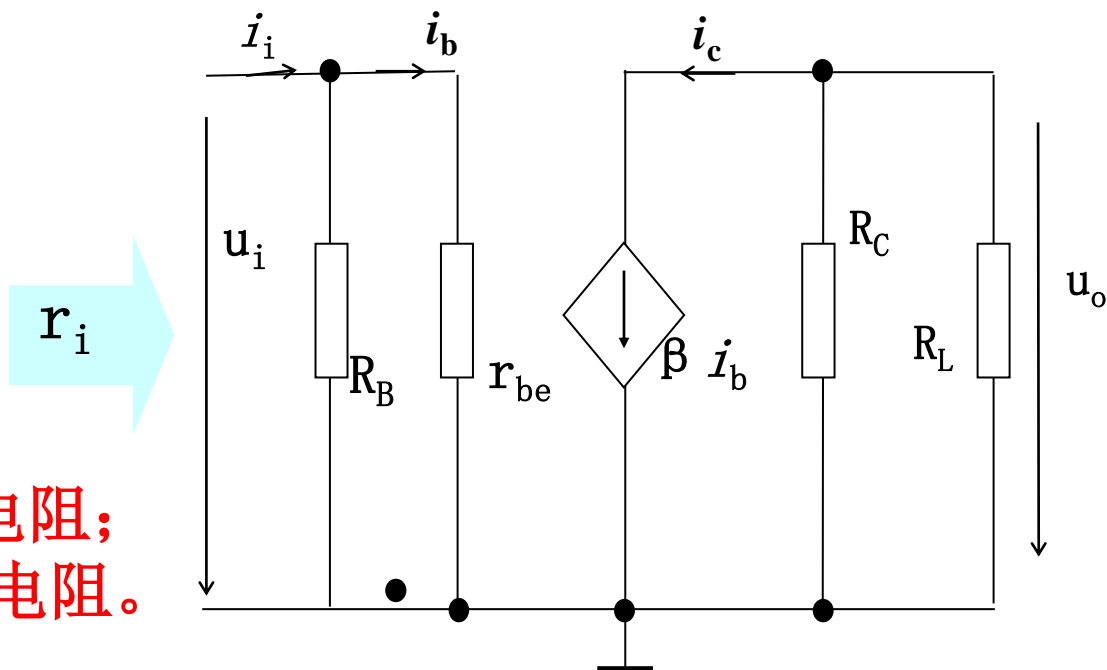
②输入电阻 (r_i 越大越好)

微变等效电路

$$r_i = r_{be} // R_B \approx r_{be}$$

注意

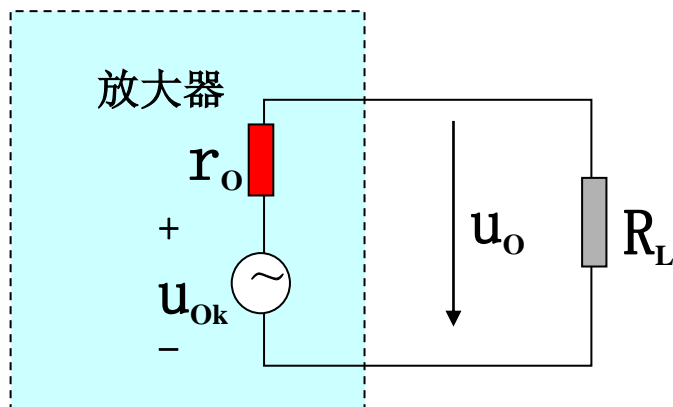
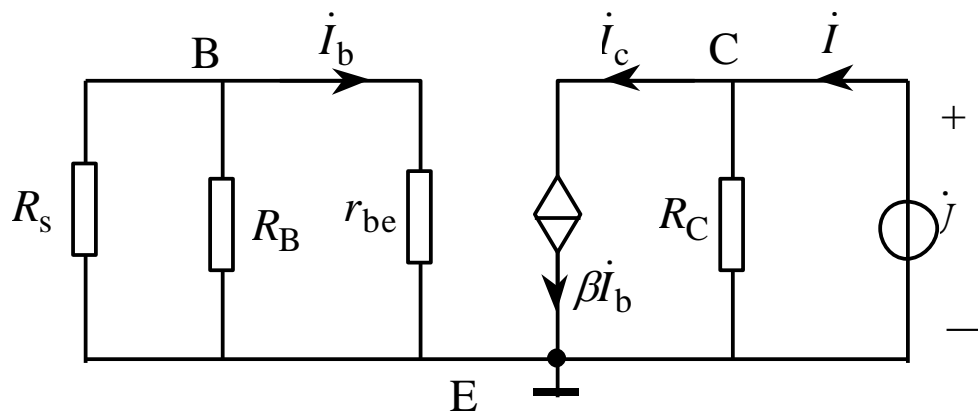
r_i : 放大器的输入电阻;
 r_{be} : 三极管的输入电阻。



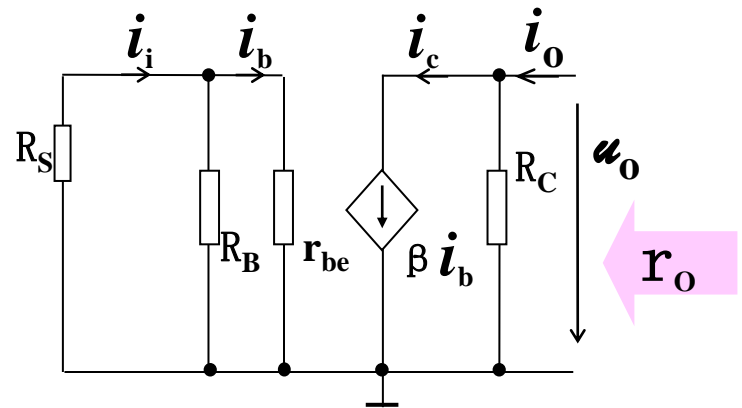
两者含义不同，但在很多情况下 $r_i \approx r_{be}$

放大电路与微变等效电路的转换(晶体管用简化等效电路替代)

③输出电阻 输出电阻是放大器输出端口的等效电阻。



微变等效电路



③输出电阻 (r_o 越小越好)

输出电阻 r_o 反映了放大器对负载的驱动特性。

r_o 的计算方法：信号源 \dot{U}_S 短路，断开负载 R_L ，在输出端加电压 \dot{U}_0 ，求出由 \dot{U}_0 产生的电流 \dot{I}_0 ，则输出电阻 r_o 为：

$$r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$$

\dot{U}_0 是外加电压，不是放大器工作时所产生的输出电压。

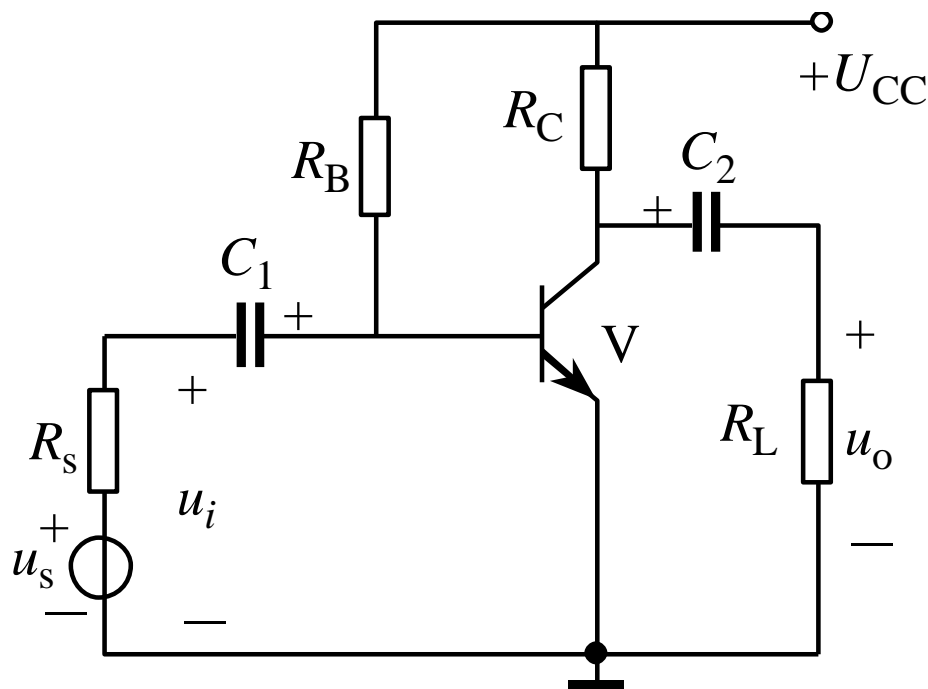
微变等效电路， $r_o = R_C$

例：图示电路，已知 $U_{CC} = 12V$ ， $R_B = 300\text{ k}\Omega$ ， $R_C = 3\text{ k}\Omega$ ， $R_L = 3\text{ k}\Omega$ ， $R_s = 3\text{ k}\Omega$ ， $\beta = 50$ ，试求：

(1) R_L 接入和断开情况下电压放大倍数 \dot{A}_u ；

(2) 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ；

(3) 输出端开路时的源电压放大倍数 $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 。



解：先求静态工作点

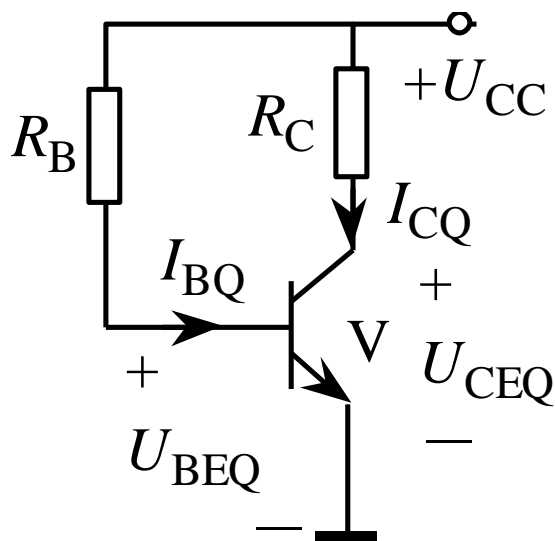
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300} \text{ A} = 40 \text{ } \mu\text{ A}$$

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

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

再求三极管的动态输入电阻

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = 200 + (1 + 50) \frac{26(\text{mV})}{2(\text{mA})} = 863 \text{ } \Omega$$
$$\approx 0.863 \text{ k}\Omega$$



解：（1） R_L 接入时的电压放大倍数 \dot{A}_u 为：

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{50 \times \frac{3 \times 3}{3 + 3}}{0.863} = -86.91$$

R_L 断开时的电压放大倍数 \dot{A}_u 为：

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{50 \times 3}{0.863} = -173.81$$

（2）输入电阻 R_i 为：

$$R_i = R_B // r_{be} = 300 // 0.863 \approx 0.86 \text{ k}\Omega$$

输出电阻 R_o 为：

$$R_o = R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

（3）源载放大倍数：

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u = -43.45$$

固定偏置放大电路

固定偏置电路：由 R_B 提供偏流 I_B 。可以通过改变 R_B 的阻值来调整 I_B 的大小，从而获得合适的工作点。

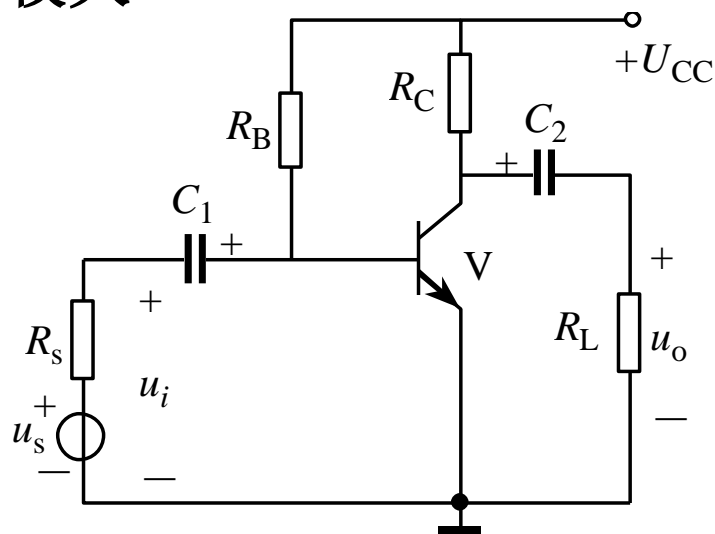
缺点： 晶体管的电气参数受温度影响较大

- 发射结的导通电压降 U_{BE} 随温度升高而减小， I_B 增大。
- β 随温度升高而变大。

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \frac{U_{CC} - 0.7}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

$$I_{CQ} = \beta \times I_{BQ} + (1 + \beta)I_{CB0}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} \times R_C$$



固定偏置的晶体放大器

固定偏置放大电路

固定偏置电路：由 R_B 提供偏流 I_B 。可以通过改变 R_B 的阻值来调整 I_B 的大小，从而获得合适的工作点。

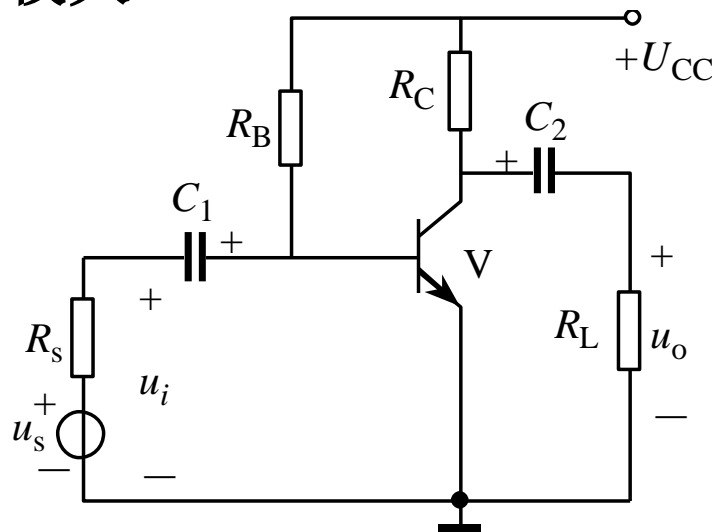
缺点： 晶体管的电气参数受温度影响较大

- 发射结的导通电压降 U_{BE} 随温度升高而减小， I_B 增大。
- β 随温度升高而变大。

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \frac{U_{CC} - 0.7}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

$$I_{CQ} = \beta \times I_{BQ} + (1 + \beta)I_{CB0}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} \times R_C$$



固定偏置的晶体放大器

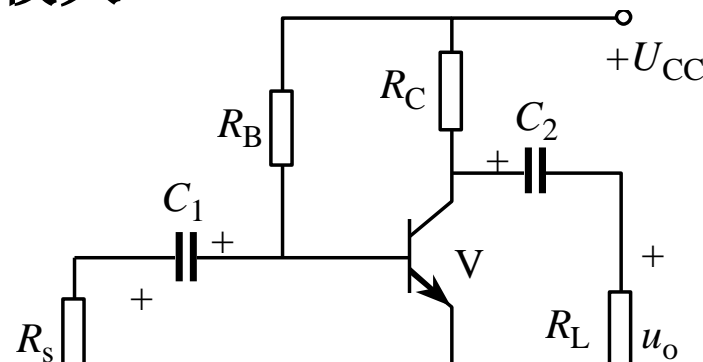
温度稳定性差！！ 57

固定偏置放大电路

固定偏置电路：由 R_B 提供偏流 I_B 。可以通过改变 R_B 的阻值来调整 I_B 的大小，从而获得合适的工作点。

缺点： 晶体管的电气参数受温度影响较大

- 发射结的导通电压降 U_{BE} 随温度升高而减小， I_B 增大。
- β 随温度升高而变大。



使晶体管的集电极电流 I_C 随温度的升高而变大，这就会使静态工作点偏离原来设置的位置，影响放大器的性能。这种现象称为“温漂”。

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

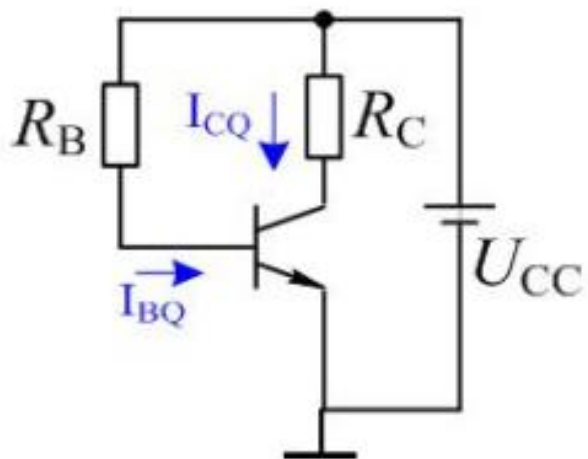
$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} \times R_C$$

固定偏置的晶体放大器

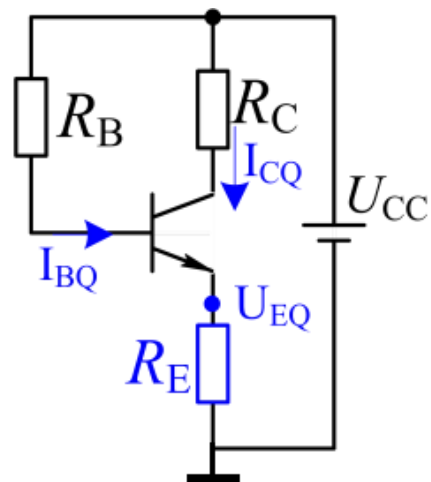
温度稳定性差！！ 58

固定偏置放大电路

引入电流负反馈



固定偏置



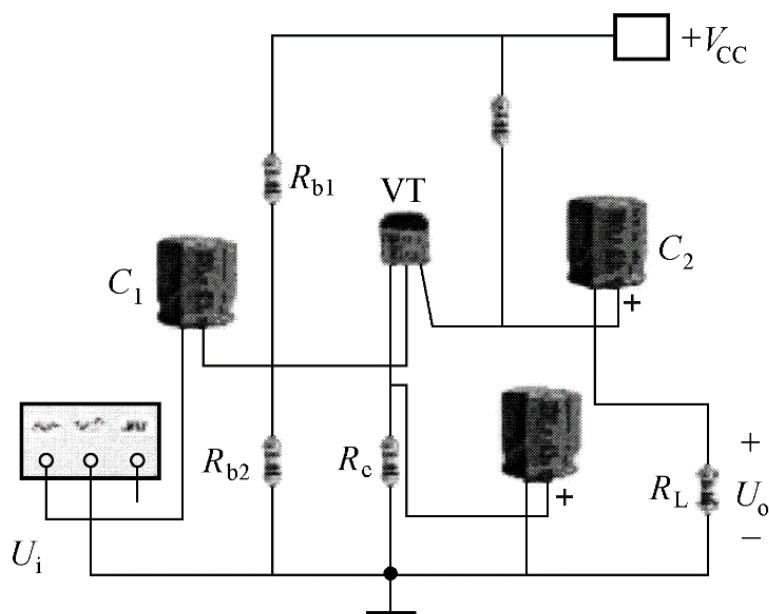
引入负反馈

不管何种原因，如果使 I_{CQ} 有增大趋向时，电路会产生如下自我调节过程：

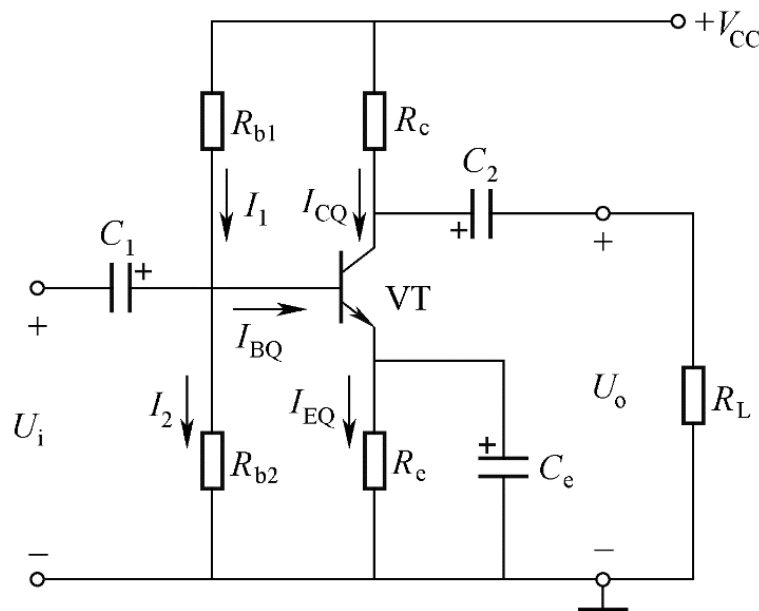
$$\begin{aligned} I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} (= I_{EQ} R_E) \uparrow \downarrow \\ \downarrow \\ I_{CQ} \downarrow \uparrow - I_{BQ} \downarrow \uparrow - U_{BEQ} (= U_{BQ} - U_{EQ}) \downarrow \uparrow \end{aligned}$$

分压式偏置放大电路

固定偏置电路不能克服温漂等原因引起的静态工作点偏移问题，分压式偏置电路，通过增加电阻 R_{b2} ，将基极电位 U_B 固定，具有稳定静态工作点的能力，是晶体管放大器的主要偏置形式。



分压式偏置放大电路实物图



分压式偏置放大电路图

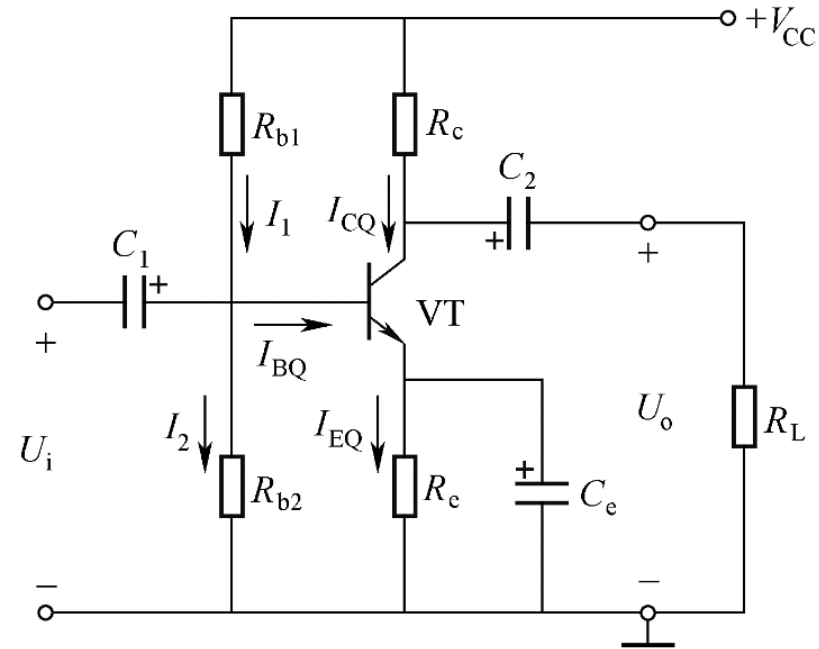
分压式偏置放大电路

- 通常选取 R_{b1} , R_{b2} , 使得 $I_1 \gg I_{BQ}$

$$I_1 = (5 \sim 10) I_{BQ} \quad (\text{硅管})$$

$$I_1 = (10 \sim 20) I_{BQ} \quad (\text{锗管})$$

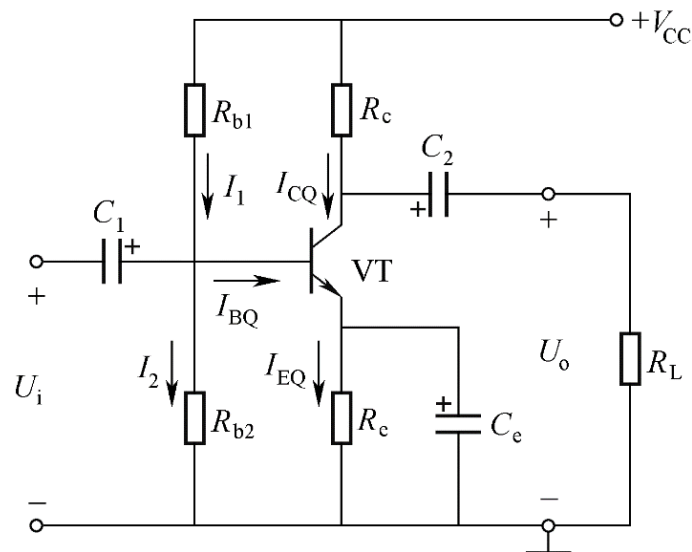
$$\text{并且 } U_B = (1/5 \sim 1/3) V_{cc}$$



- R_{b1} 、 R_{b2} 的比值不变，基极电压就保持不变(基极电流极小，基本不影响基极电压)。
- 为避免 R_e 对交流分量也产生负反馈，加上旁路电容，为交流分量提供一条低阻通路。

分压式偏置放大电路

稳定静态工作点原理



T° (温度) \uparrow (或 $\beta \uparrow$) $\rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{EQ} \downarrow$

$I_{CQ} \downarrow$



分压偏置放大电路具有自动调整功能，当 I_{CQ} 要增加时，电路不让其增加；当 I_{CQ} 要减小时，电路不让其减小，从而迫使 I_{CQ} 稳定。所以该电路具有稳定静态工作点的作用。

分压式偏置放大电路

静态分析

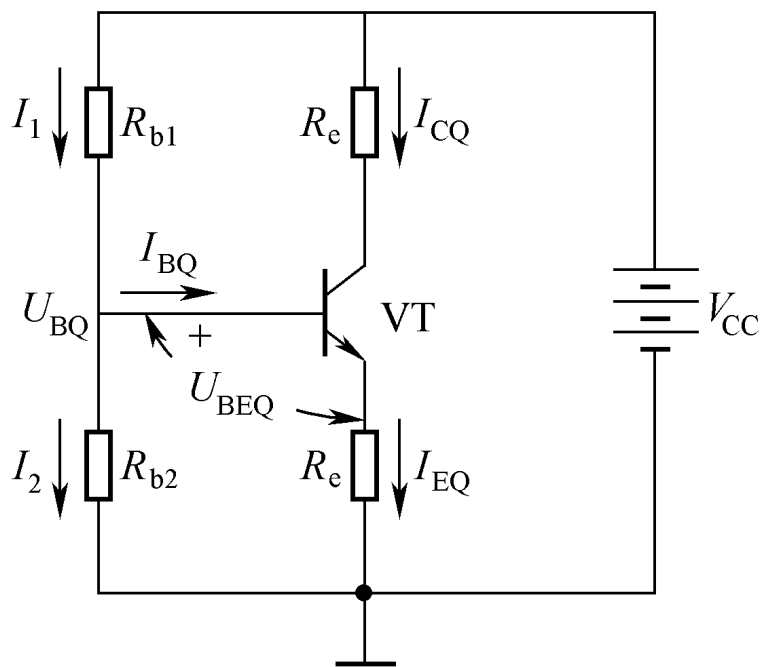
静态工作点的估算

$$U_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

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

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$



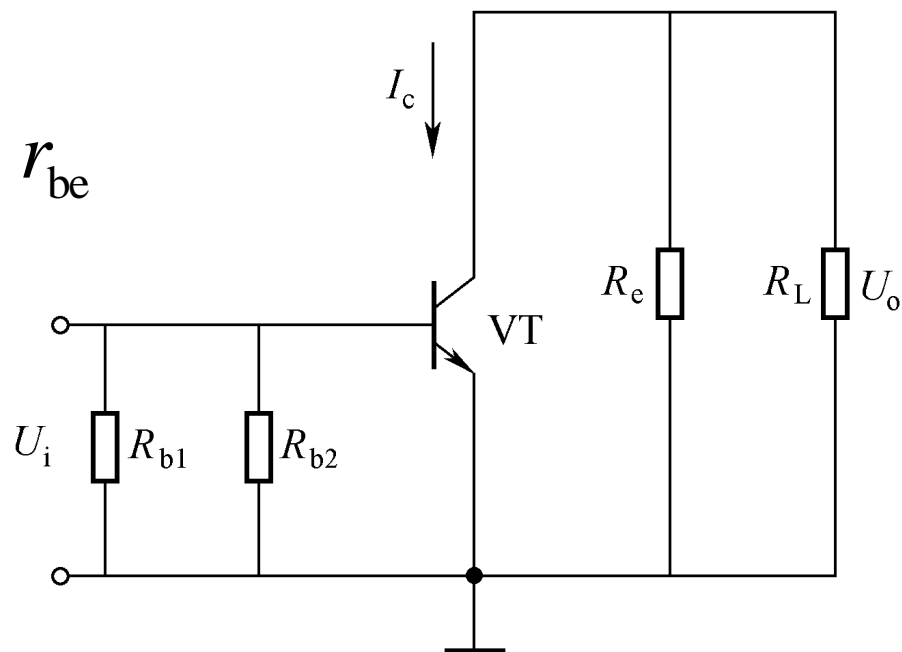
分压式偏置放大电路的直流通路

分压式偏置放大电路

交流分析

交流参数的估算

$$\left\{ \begin{array}{l} A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (R'_L = R_C // R_L) \\ R_i = r_{be} // R_{b1} // R_{b2} \approx r_{be} \\ R_o = R_C \end{array} \right.$$



分压式偏置放大电路的交流通路

分压式偏置放大电路

例 5.2-1 计算图 5-10 所示射极偏置放大器的静态工作点。设晶体管的参数为 $\beta = 50$, $V_{BE} = 0.7$ 伏。

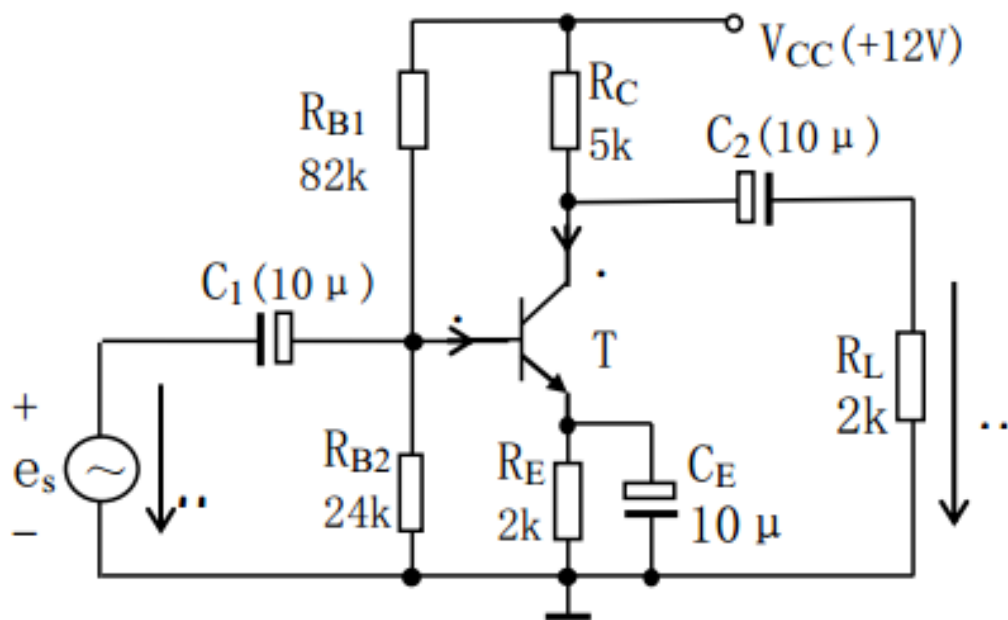


图 5-10 发射极偏置放大器

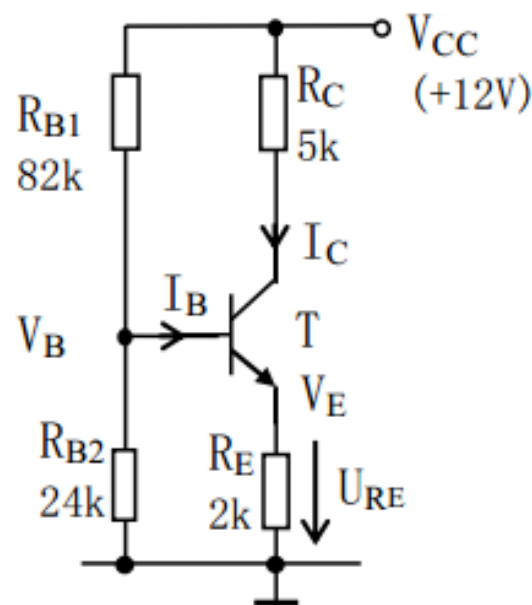


图 5-11 射极偏置电路

分压式偏置放大电路

例 5.2-1 计算图 5-10 所示射极偏置放大器的静态工作点。设晶体管的参数为 $\beta = 50$, $V_{BE} = 0.7$ 伏。

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{24}{82 + 24} \times 12 = 2.72(V)$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{2.72 - 0.7}{2} = 1.01(mA)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 12 - 1.01(5 + 2) = 4.92(V)$$

$$I_B = I_C / \beta = 1.01 / 50 = 0.020(mA)$$

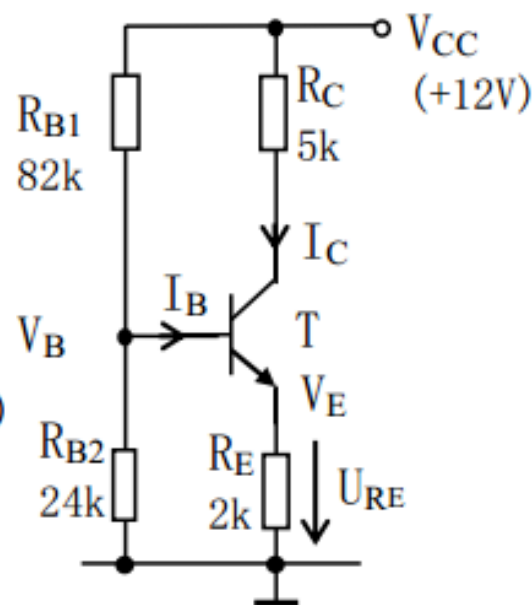


图 5-11 射极偏置电路

分压式偏置放大电路

放大器电路如图 5-7 所示，其中晶体管的 $\beta = 80$ ， $V_{BES} = 0.7V$ 。(1) 计算放大器的静态工作点。(2) 作出放大器的微变等效电路。(3) 计算放大器的 A_u ， r_i ， r_o 。(4) 若 $R_S = 500\Omega$ ，求 A_{us} 。

$$V_B = \frac{15K}{15K + 30K} * 5V = 1.67V$$

$$I_C = \frac{V_B - V_{BES}}{R_E} = \frac{1.67V - 0.7V}{1K} = 0.97mA$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \\ &= 5V - 0.97 * 3V = 2.09V \end{aligned}$$

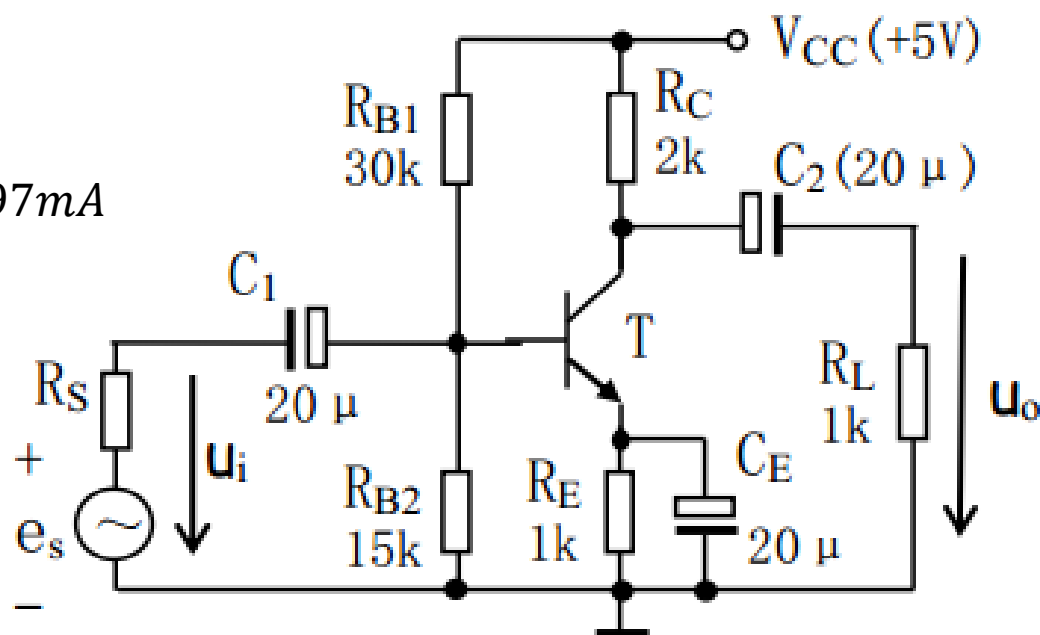


图 5-7 题 7 的电路图

分压式偏置放大电路

放大器电路如图 5-7 所示，其中晶体管的 $\beta = 80$ ， $V_{BE} = 0.7V$ 。(1) 计算放大器的静态工作点。(2) 作出放大器的微变等效电路。(3) 计算放大器的 A_u ， r_i ， r_o 。(4) 若 $R_S = 500 \Omega$ ，求 A_{us} 。

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

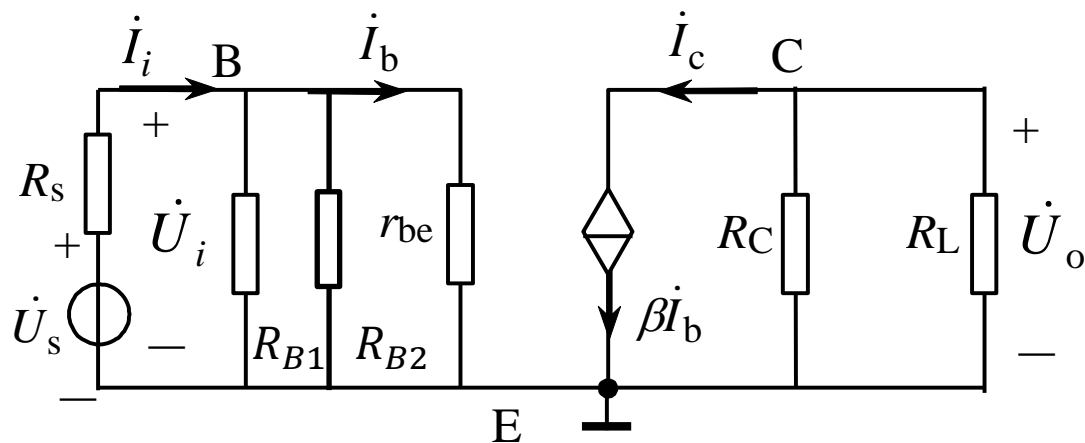
$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{0.97} = 2371 \Omega$$

$$\dot{A}_u = \frac{-80 * \frac{2}{3} * 1000}{2371} = -22.49$$

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$\approx r_{be} = 2371 \Omega$$

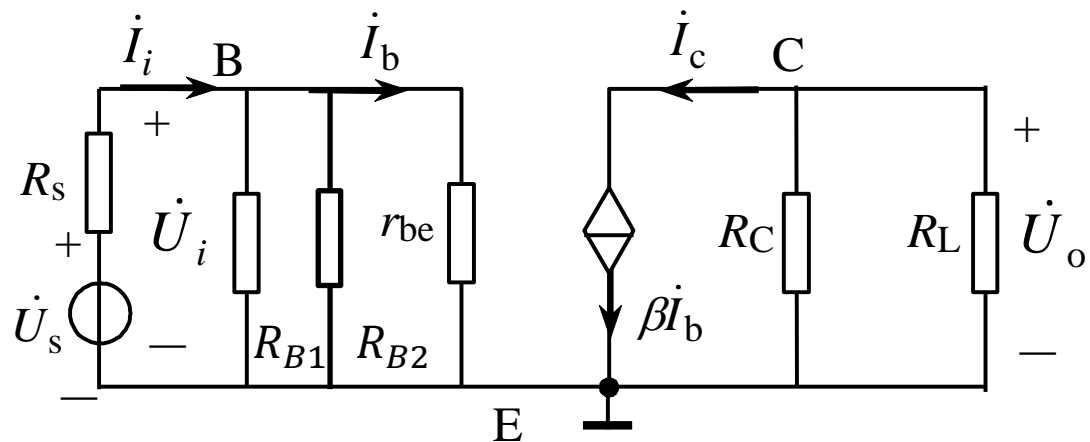
$$r_o = R_C = 2k\Omega$$



分压式偏置放大电路

放大器电路如图 5-7 所示，其中晶体管的 $\beta = 80$ ， $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。(1) 计算放大器的静态工作点。(2) 作出放大器的微变等效电路。(3) 计算放大器的 A_u ， r_i ， r_o 。(4) 若 $R_S = 500\ \Omega$ ，求 A_{us} 。

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \times \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \dot{A}_u * \frac{r_i}{r_i + R_s} = -22.49 * \frac{2.3}{2.3 + 0.5} = -18.47$$



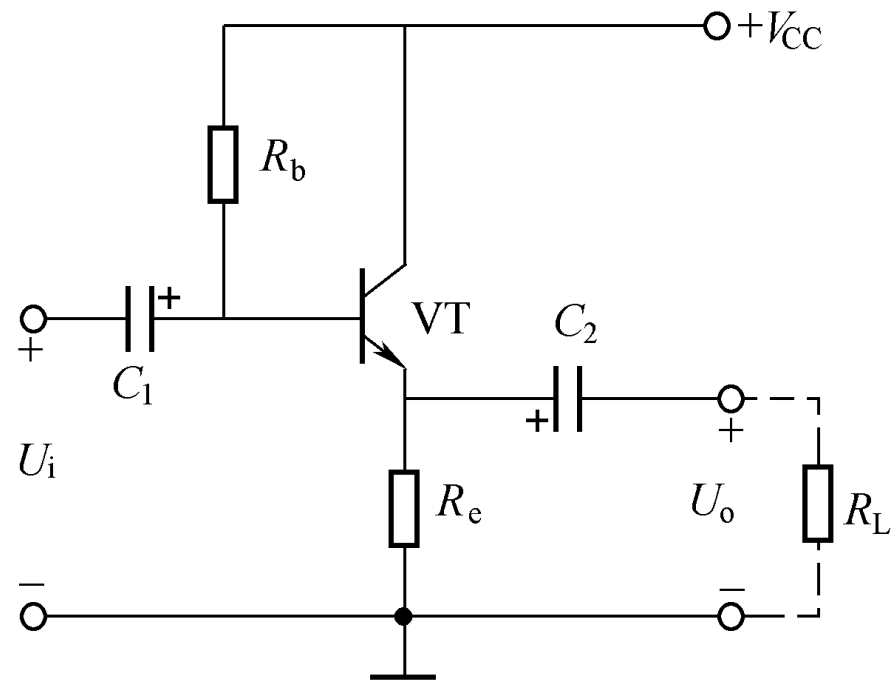
射极输出放大器

射极输出器是共集电极(简称共集) 组态的放大电路

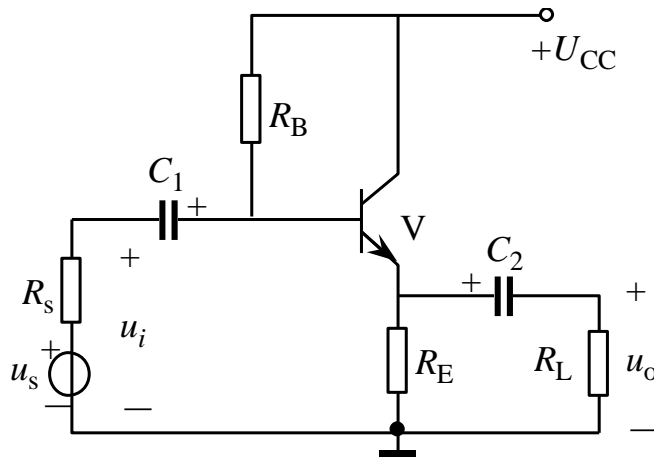
输出电压是从三极管的射极对“地”取出。

u_i 从基极和集电极之间输入, u_o 从射极与集电极之间输出, 交流的输入和输出共集电极。

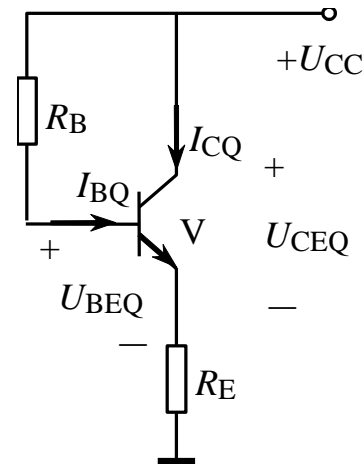
对于共射极共集电极或者共基极的判断: 只要看输出端在哪一极, 除掉输入端, 剩下的一极就是共什么极。



静态分析



射极跟随器



直流通路

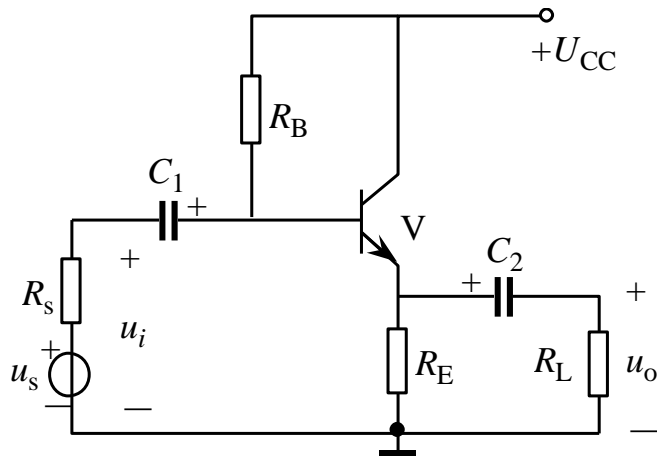
$$U_{CC} = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + I_{EQ}R_E = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + (1 + \beta)I_{BQ}R_E \quad (KVL)$$

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

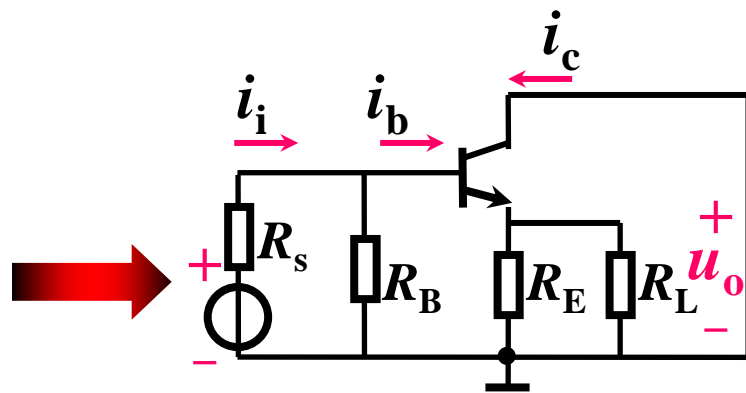
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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

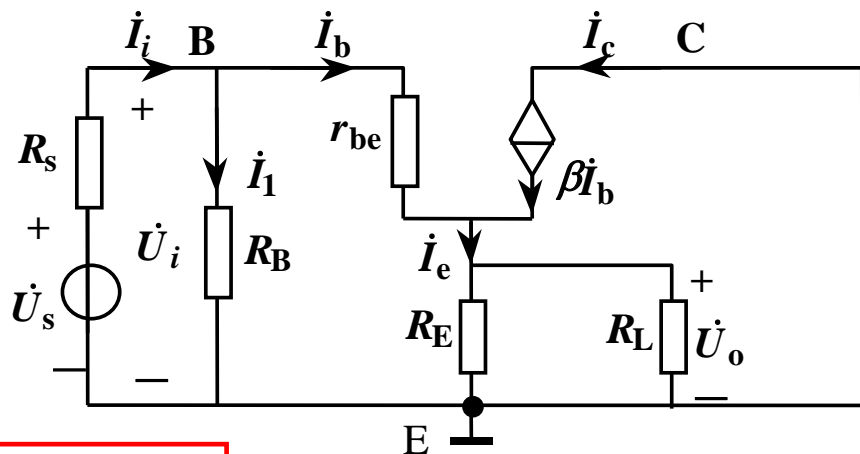
动态分析



射极跟随器



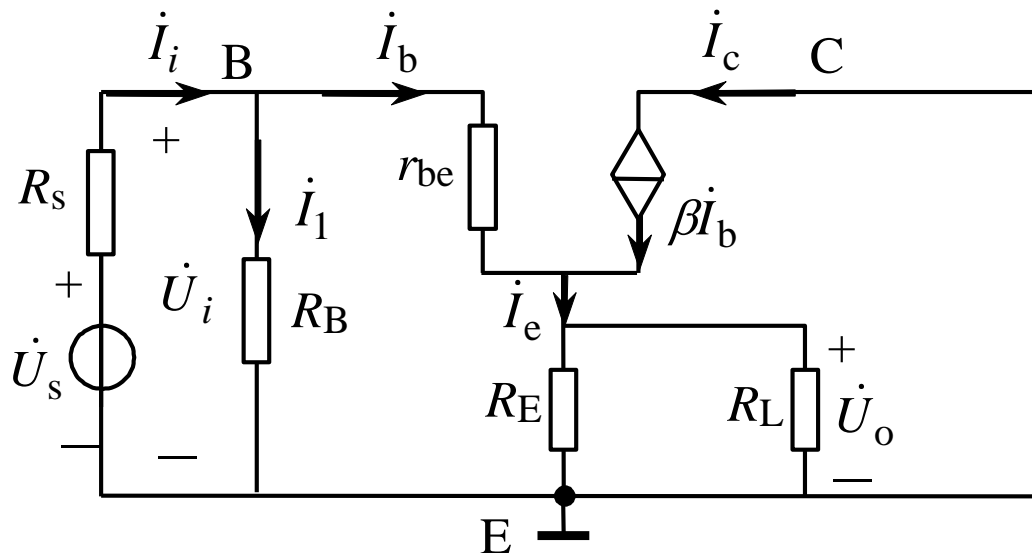
交流通路



微变等效电路

动态分析

①求电压放大倍数



射极输出器的微变等效电路

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

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{U}_o = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L \quad R'_L = R_L // R_E$$

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

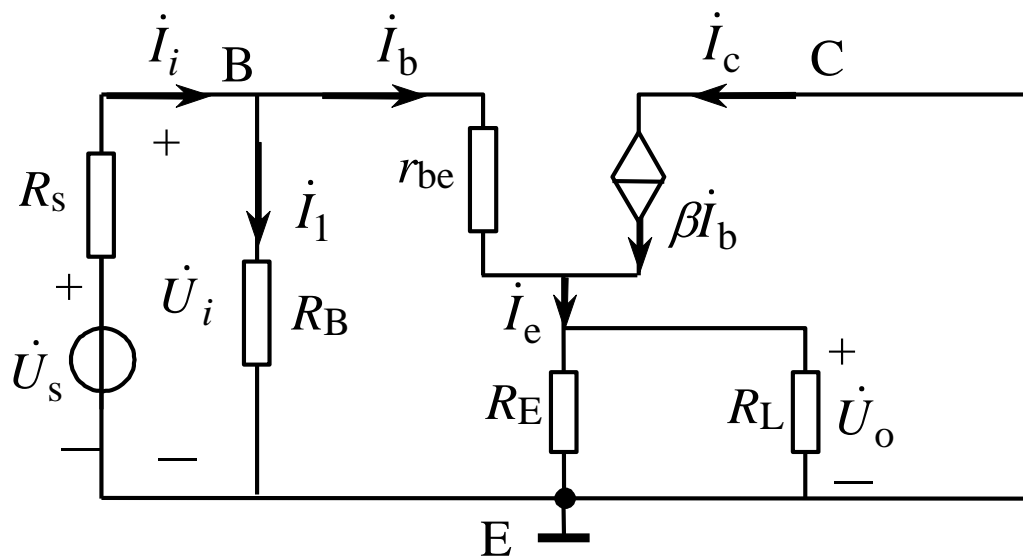
输出电压与输入电压**同相**，所以又叫射极跟随器。

动态分析

②求输入电阻

$$\dot{I}_i = \dot{I}_1 + \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{R_B} + \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$



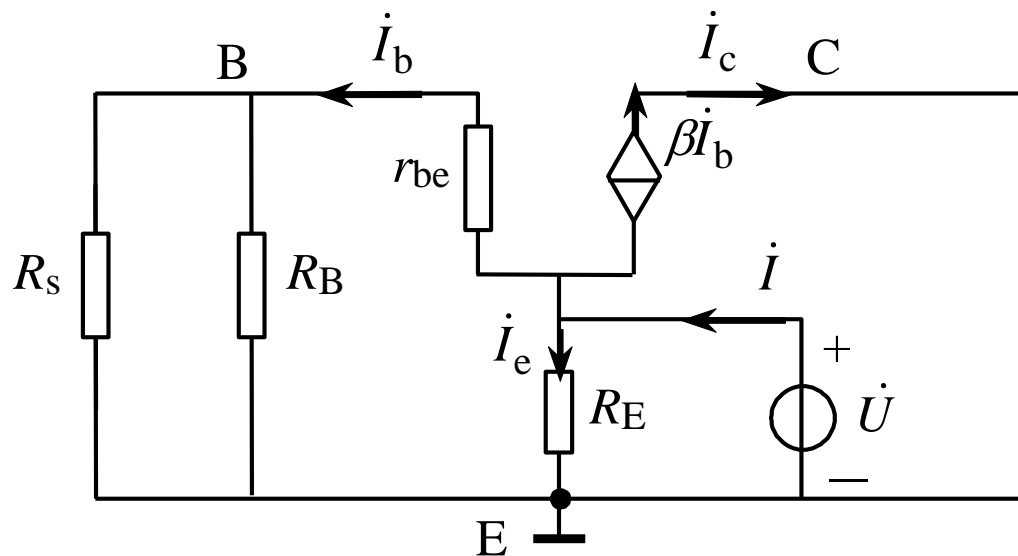
射极输出器的微变等效电路

动态分析

③求输出电阻

$$\dot{I} = \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b + \dot{I}_e = \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \beta \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \frac{\dot{U}}{R_E}$$

$$R_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_E // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$



计算输出电阻的等效电路

射极输出器的特点

- ①、电压放大倍数小于1，但约等于1，且同相，即**电压跟随**。
- ②、输入电阻较高。
- ③、输出电阻较低。

射极跟随器常用作多级放大器的第一级，最末级，或中间级。

用作**输入级**时，其高输入电阻可以提高放大器的输入电压。

用作**输出级**时，其低输出电阻可以减小负载变化对输出电压的影响，易于与低阻负载匹配，向负载传送尽可能大的功率。

本章小结

(1)、双极型晶体管可以构成放大电路，放大的实质是用小信号和小能量控制大信号和大能量。

(2)、放大电路的分析包括静态分析和动态分析。

◆ 静态分析通常采用估算法和图解法，来确定放大电路的静态工作点。

◆ 动态分析通常采用微变等效电路法和图解法。

□ 微变等效电路法：在小信号条件下，把非线性器件晶体管用线性电路等效代换。用来计算放大电路的电压放大倍数等技术指标。

□ 图解法：分析放大电路的工作状态和非线性失真，确定放大电路的动态范围和最佳工作点。

本章小结

(3)、射极跟随器是共集电极放大电路，具有较高的输入电阻和较低的输出电阻。电压放大倍数略小于1，无电压放大能力，但具有电流放大能力。

(4)、共发射级放大电路既有电压放大，又有电流放大能力。

(5)、放大电路存在非线性失真：饱和失真和截止失真。

(6)、失真可以通过选择放大电路元件参数、合适的工作点、采取稳定工作点；减小输入信号等方法得到削弱或消除。

第五章作业

- 5, 7, 10, 12, 14