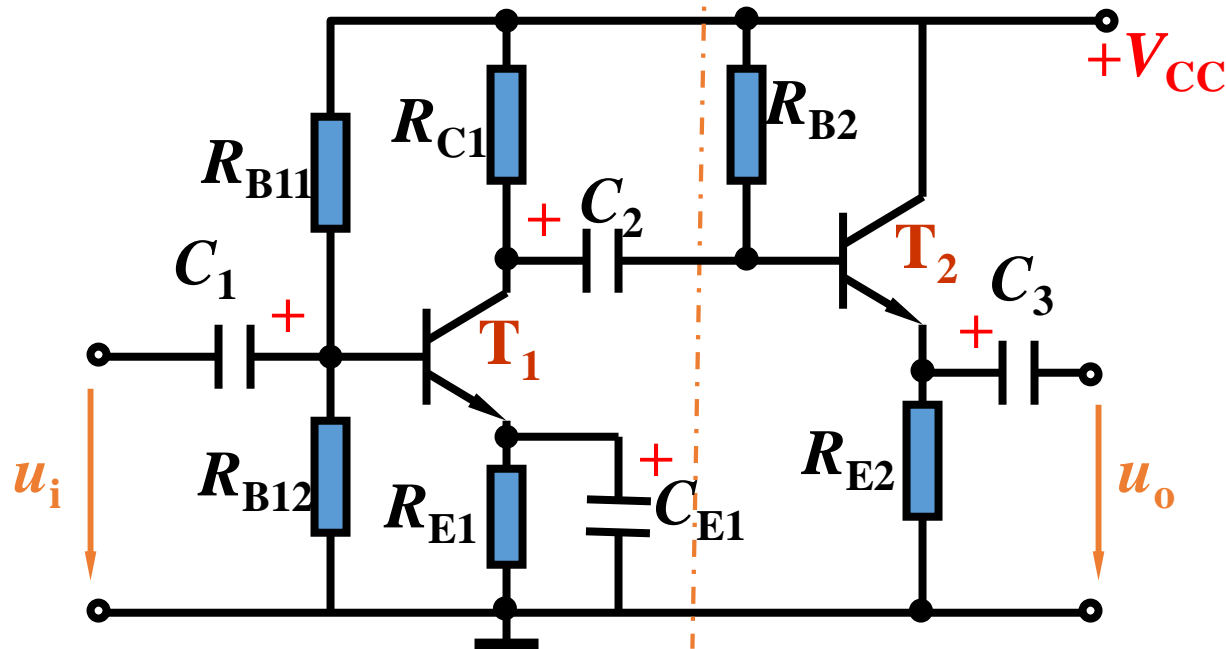


# 3.1.1 多级放大电路的耦合方式

**阻容耦合：**前级输出端通过电容接到后级输入端



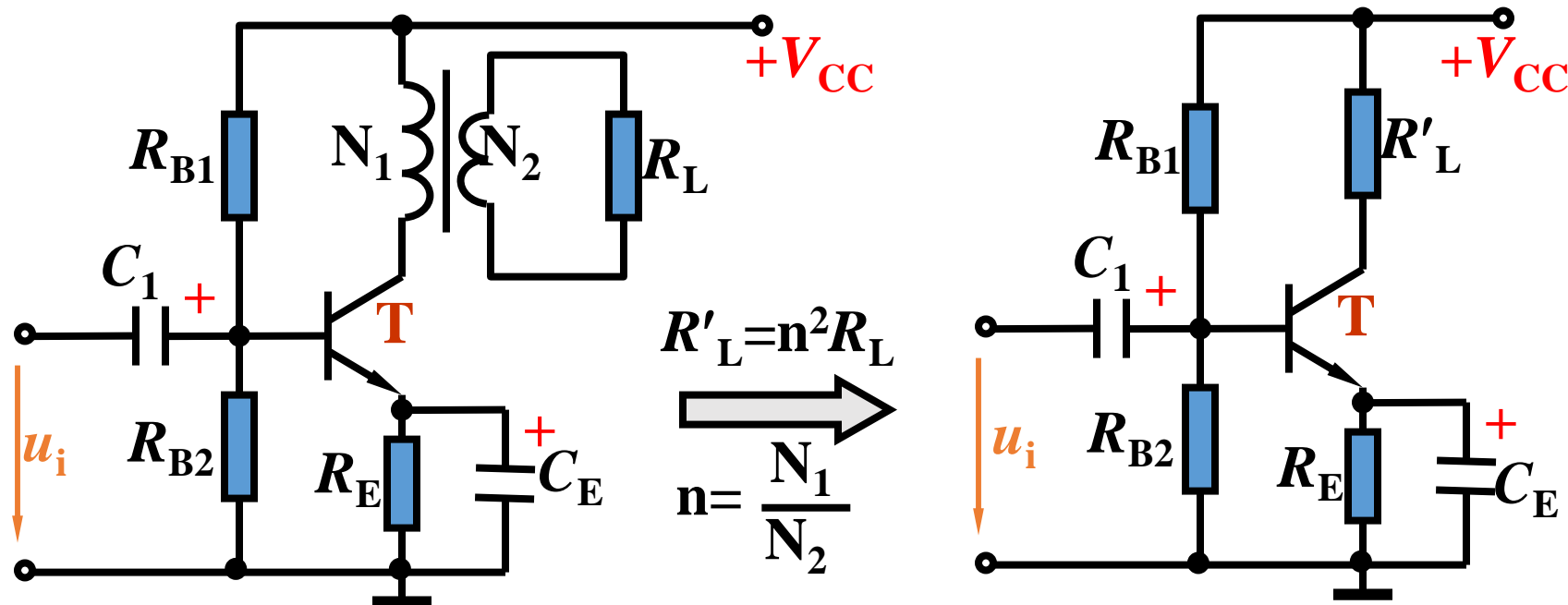
阻容耦合放大电路的低频特性差，不能放大变化缓慢的信号；在集成电路中不能制造大容量电容，因此阻容耦合放大电路不便于集成化。

阻容耦合放大电路各级之间的直流通路各不相连，各级的静态工作点相互独立，所以电路的分析、设计和调试简单易行。

在分立元件电路中阻容耦合方式应用非常广泛。

# 3.1.1 多级放大电路的耦合方式

**变压器耦合**：前级的输出端通过变压器接到后级输入端或负载上。

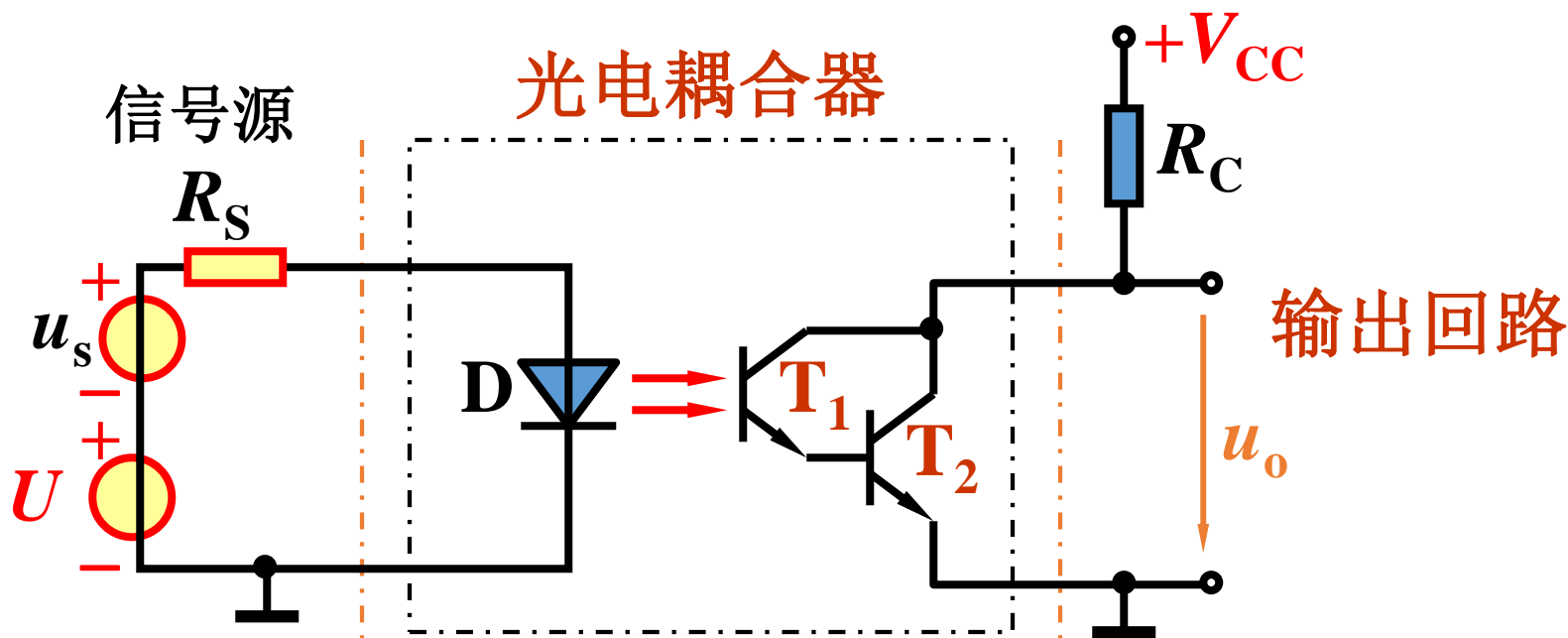


变压器耦合电路的前后级靠磁路耦合，因而其各级放大电路静态工作点相互独立，便于分析、设计和调试。

低频特性差，不能放大变化缓慢的信号，非常笨重，不能集成化。可以实现阻抗变换，在分立元件功率放大电路中被广泛应用。

# 3.1.1 多级放大电路的耦合方式

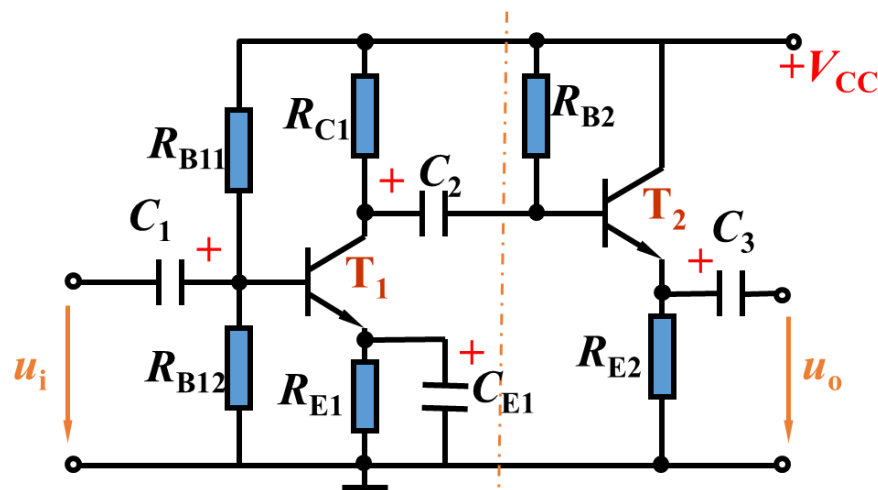
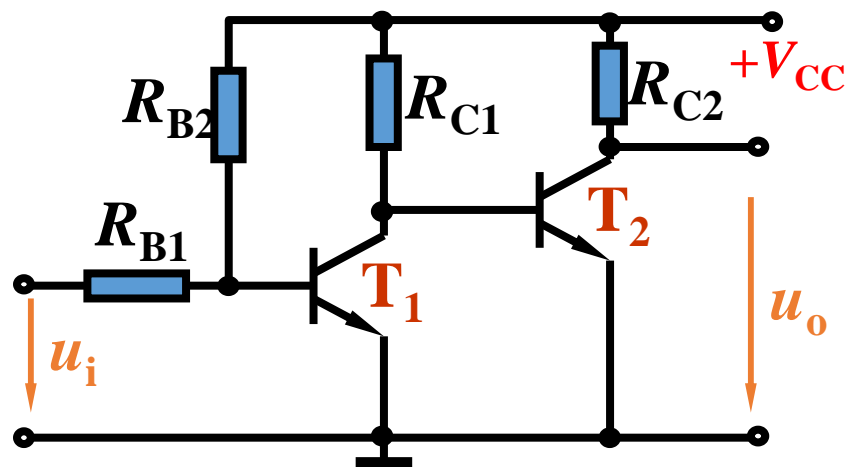
光电耦合：以光信号为媒介来实现电信号的耦合和传递



光电耦合放大电路抗干扰能力强，价格便宜，但其线性度不好。

# 3.1.2 多级放大电路的分析

## 多级放大电路的静态分析

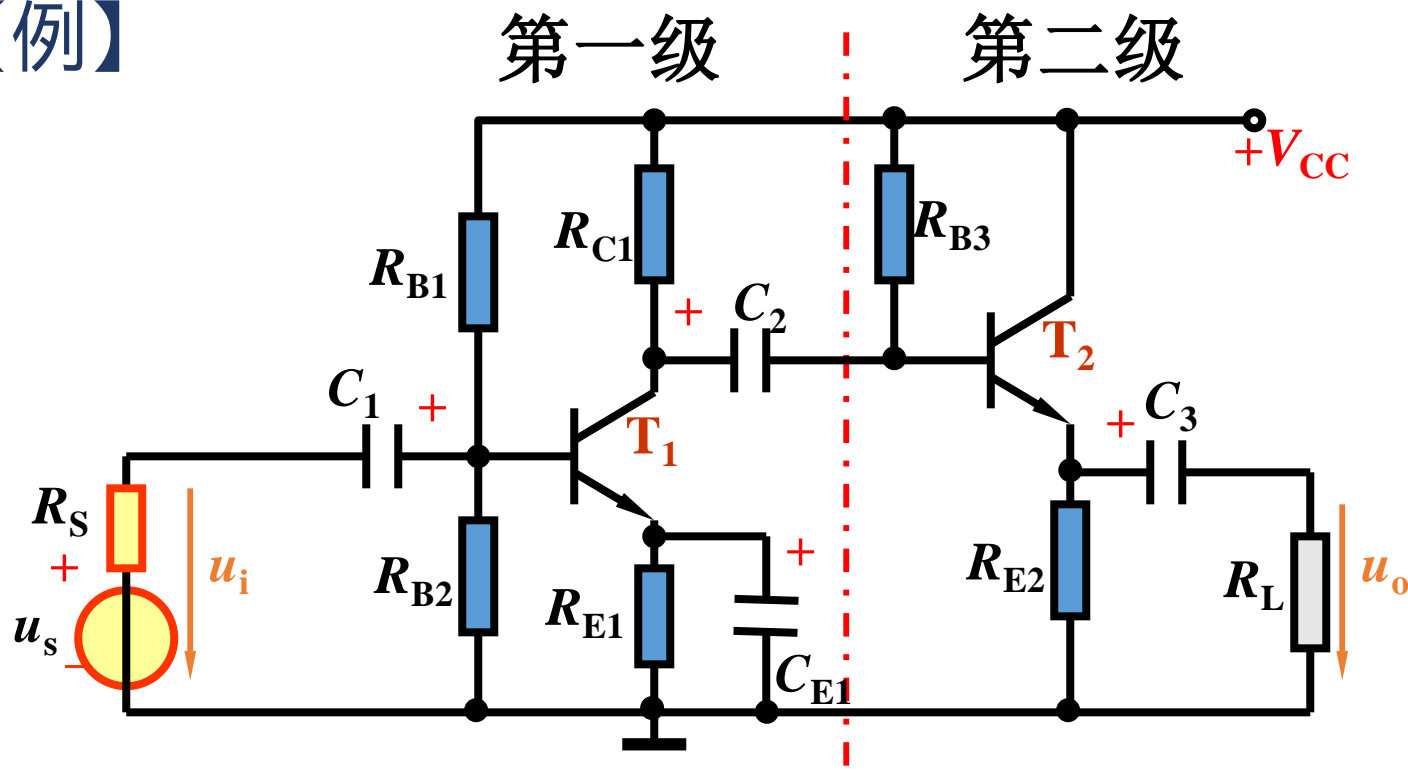


多级放大电路各级的静态值也是利用其直流通路来求解。对于直接耦合放大电路而言，应写出直流通路中各个回路的方程，然后求解。

对于阻容耦合放大电路，因其各级之间的直流通路各不相通，各级的静态工作点相互独立，求解静态值时可按单级处理。

## 3.1.2 多级放大电路的分析

【例】

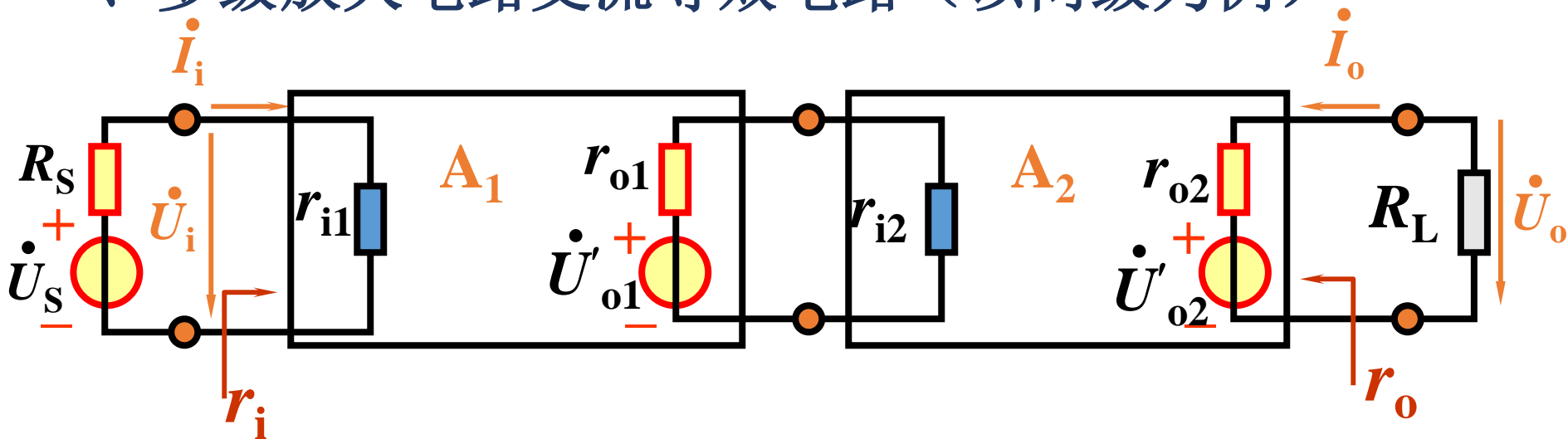


阻容耦合放大电路，第一级为共射放大电路，第二级为共集放大电路，各级静态值可按单级计算。

## 3.1.2 多级放大电路的分析

### 多级放大电路的动态分析

#### 一、多级放大电路交流等效电路（以两级为例）

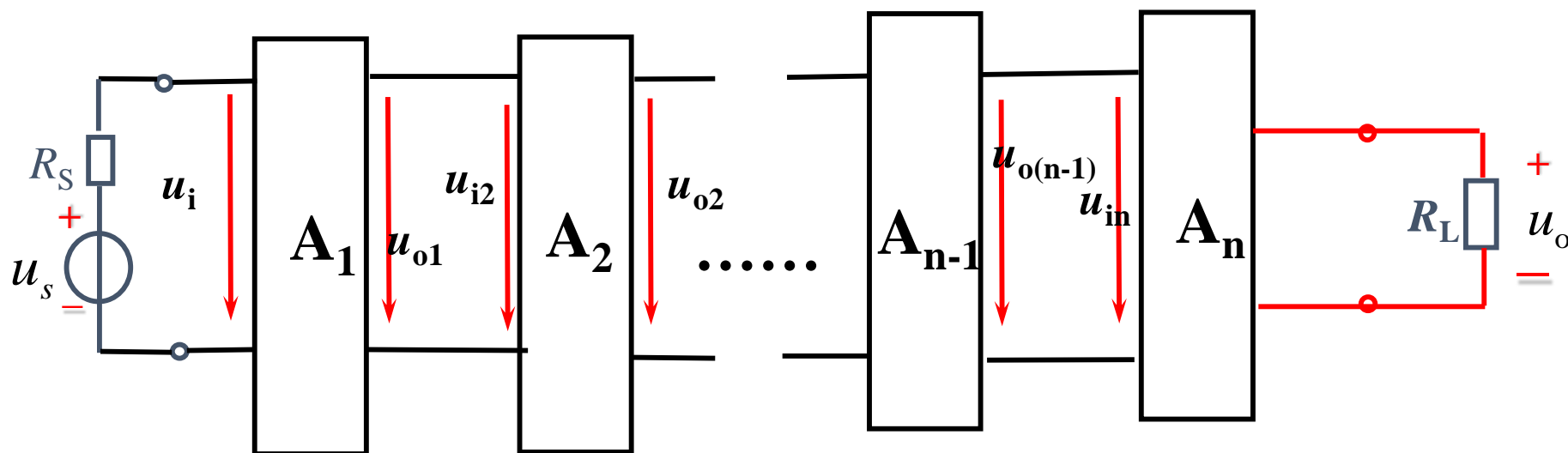


- \* 后级的输入电阻是前级的负载
- \* 前级的输出电阻是后级的信号源内阻

# 3.1.2 多级放大电路的分析

## 二、动态参数的计算

### 1. 电压放大倍数

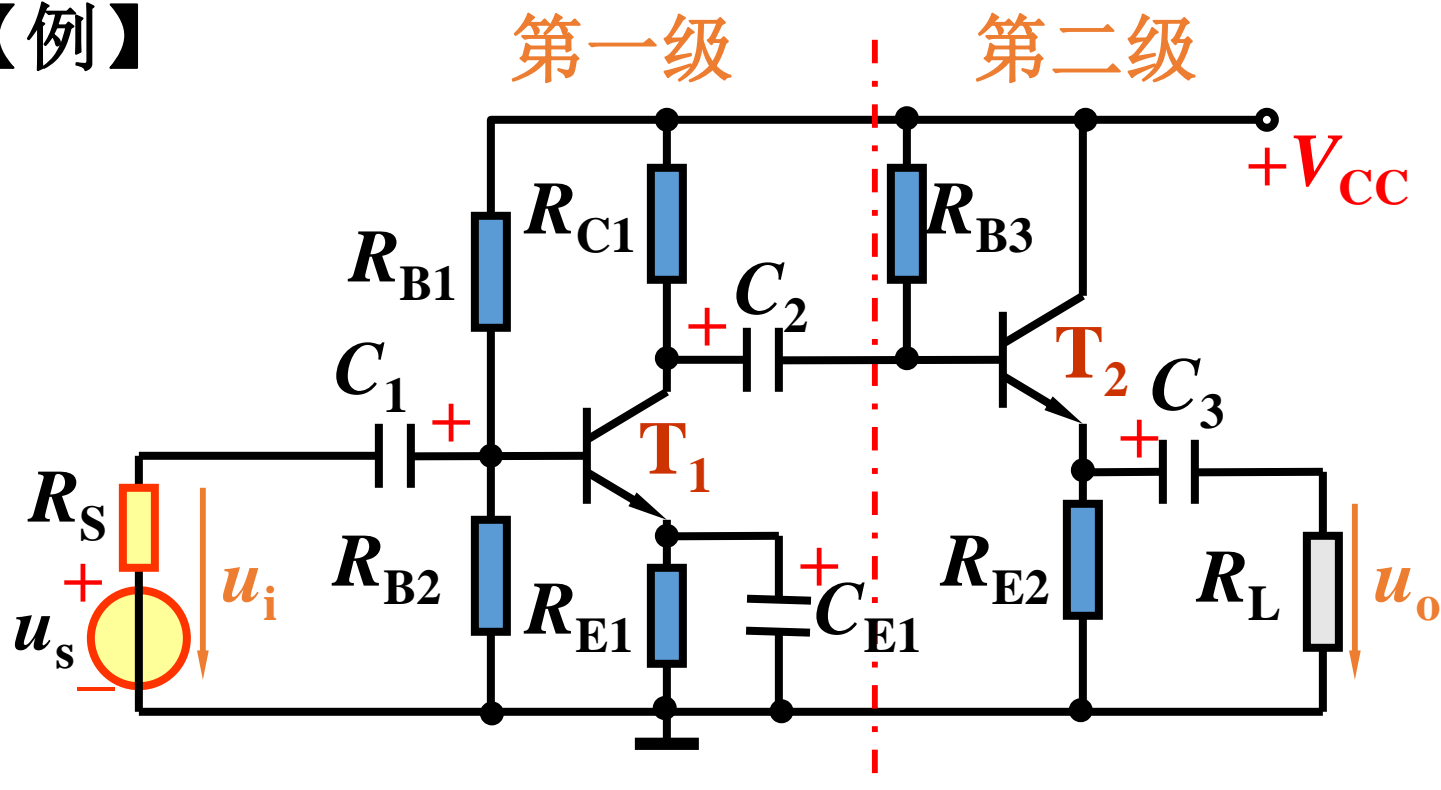


$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

多级放大电路的电压放大倍数等于各级放大倍数的乘积。

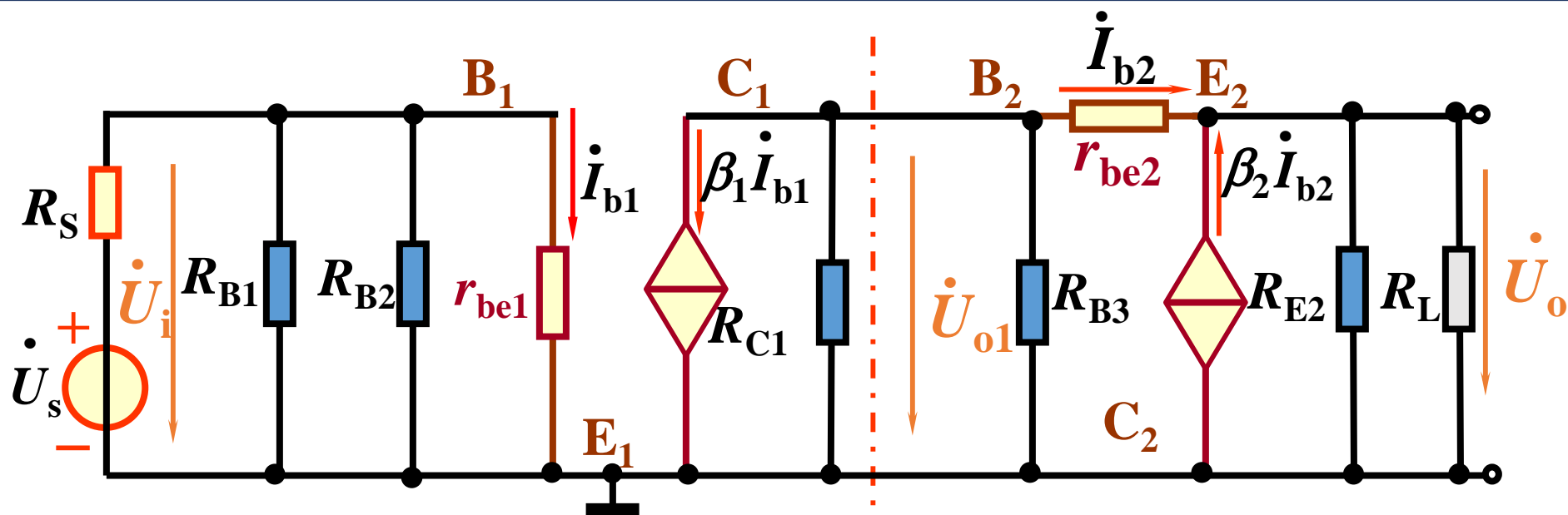
## 3.1.2 多级放大电路的分析

【例】



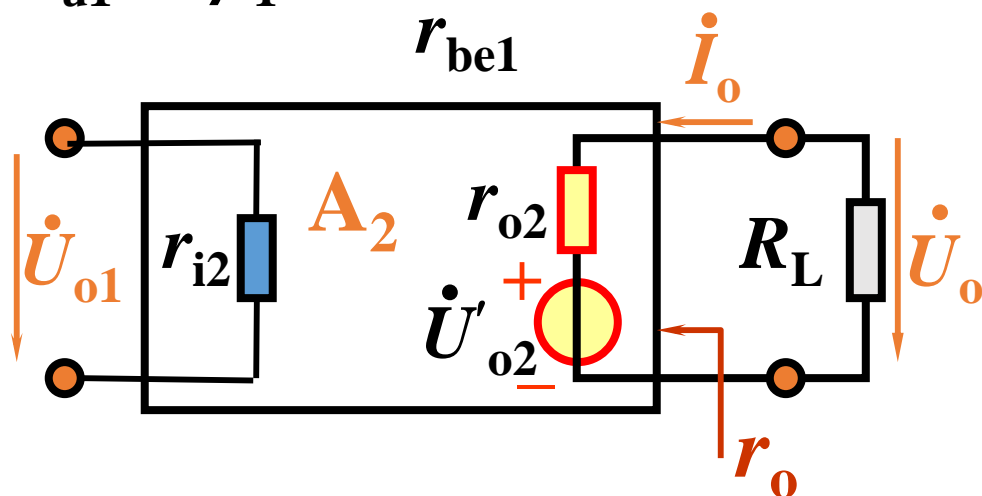


# 3.1.2 多级放大电路的分析



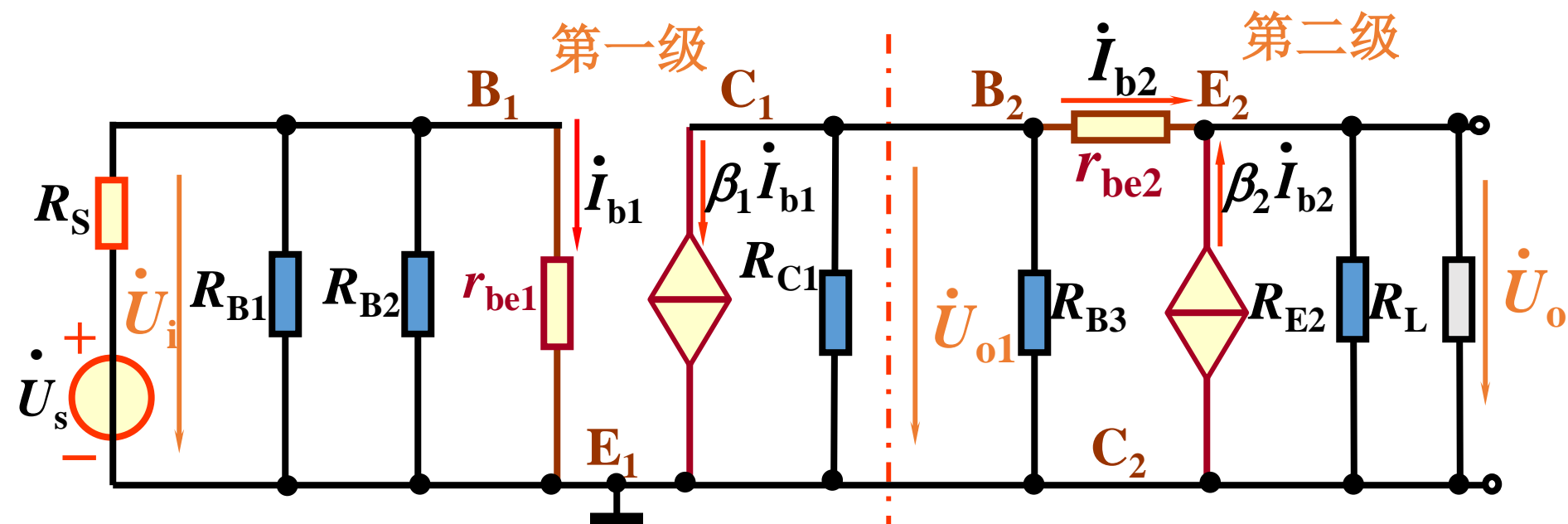
$$A_{u1} = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_{L1}}{r_{be1}}$$

$$R_{L1} = r_{i2} = R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)]$$



后级的输入电阻作为前级的负载

## 3.1.2 多级放大电路的分析



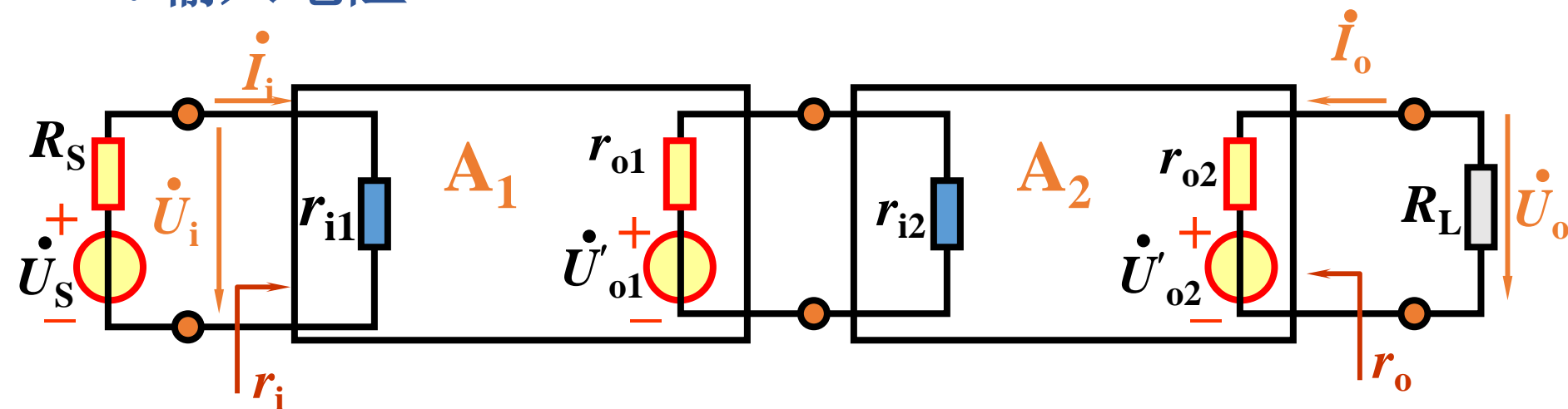
$$A_{u1} = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_{L1}}{r_{be1}} \quad \text{其中} \quad R_{L1} = r_{i2} = R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)]$$

$$A_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)(R_{E2} // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 1$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$$

# 3.1.2 多级放大电路的分析

## 2. 输入电阻

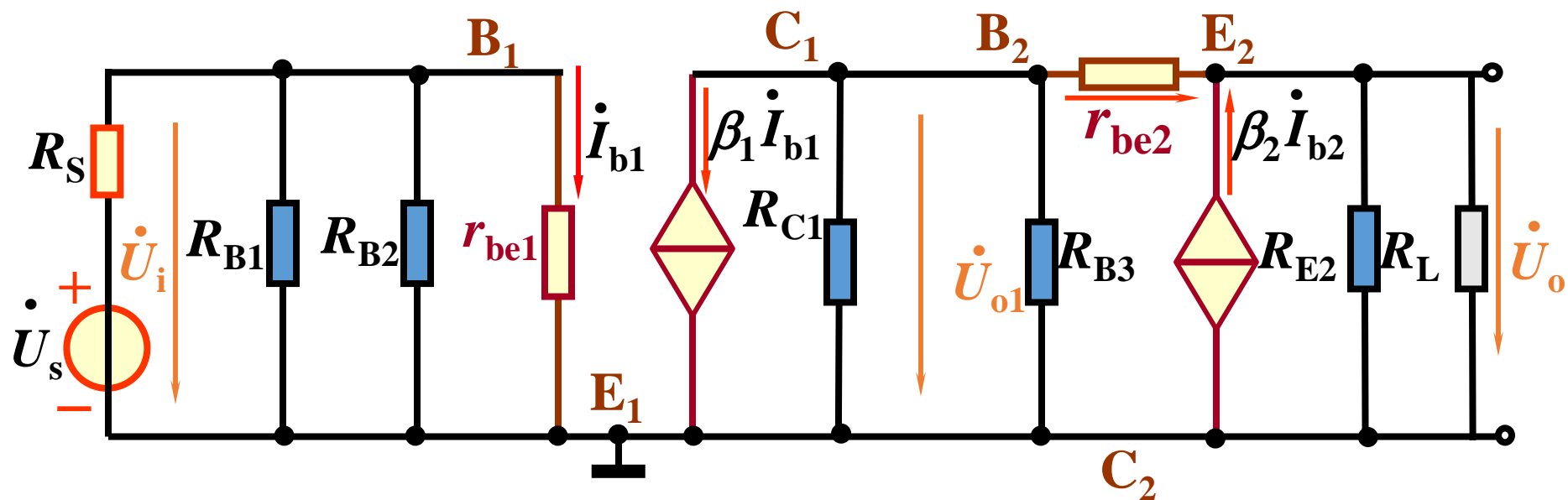


$$r_i = r_{i1}$$



多级放大电路的输入电阻等于第一级的输入电阻。

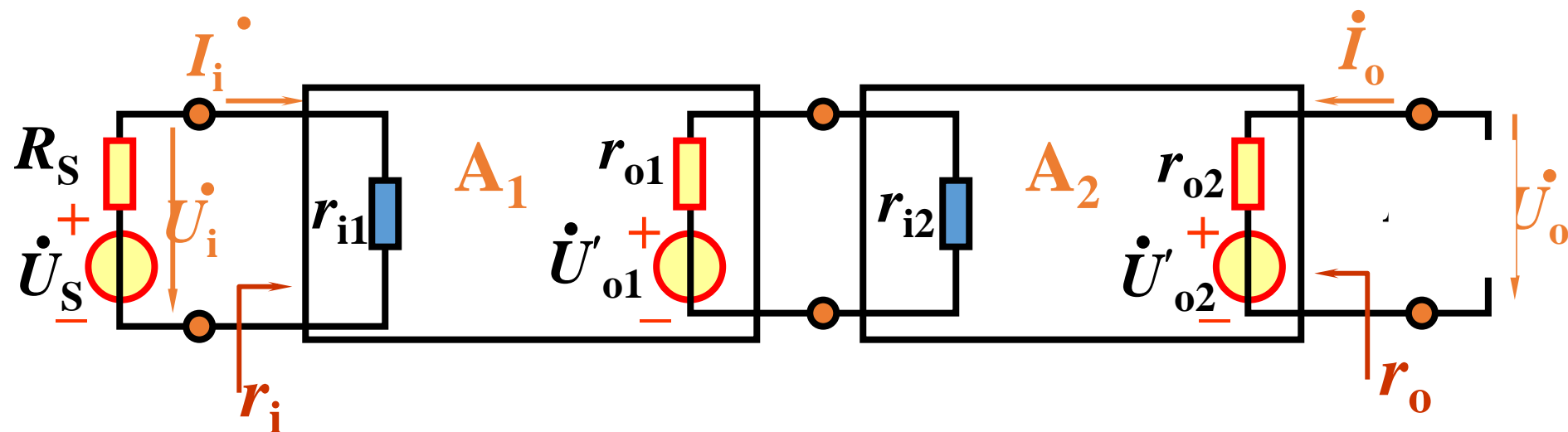
## 3.1.2 多级放大电路的分析



$$r_i = r_{i1} = R_{B1} // R_{B2} // r_{be1}$$

# 3.1.2 多级放大电路的分析

## 3. 输出电阻

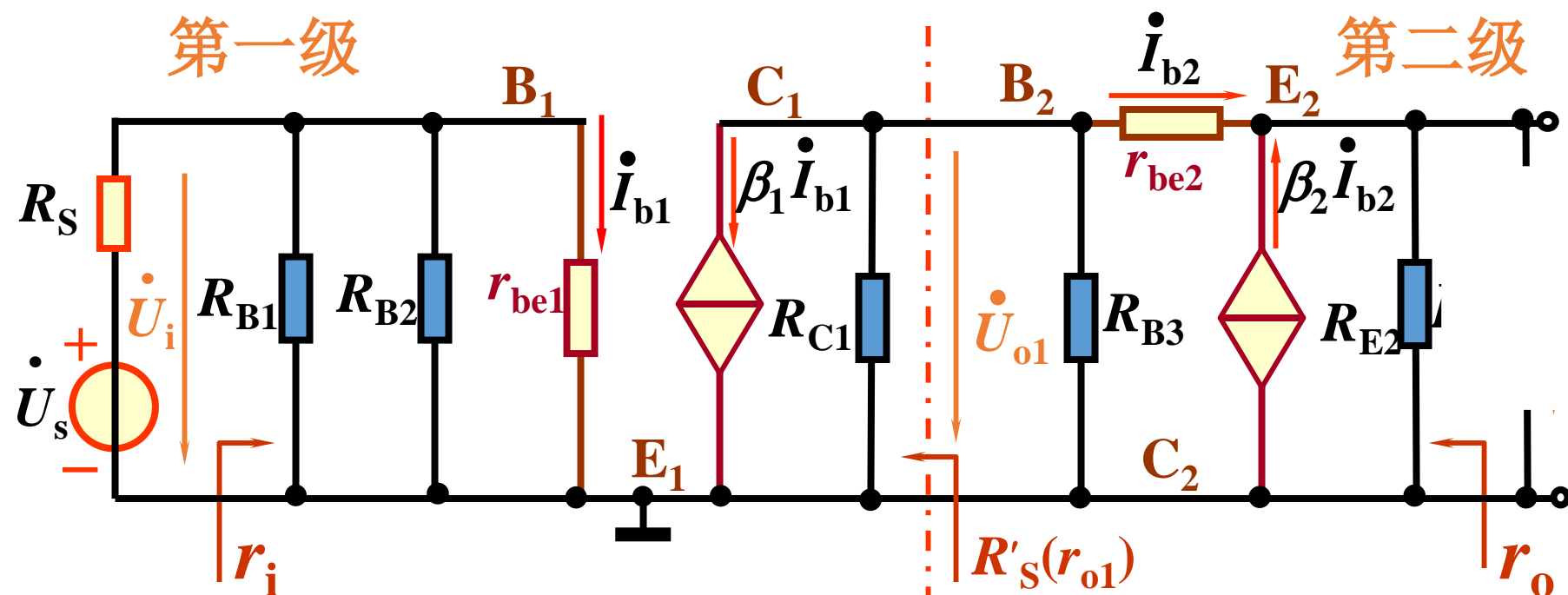


$$r_o = r_{o2}$$



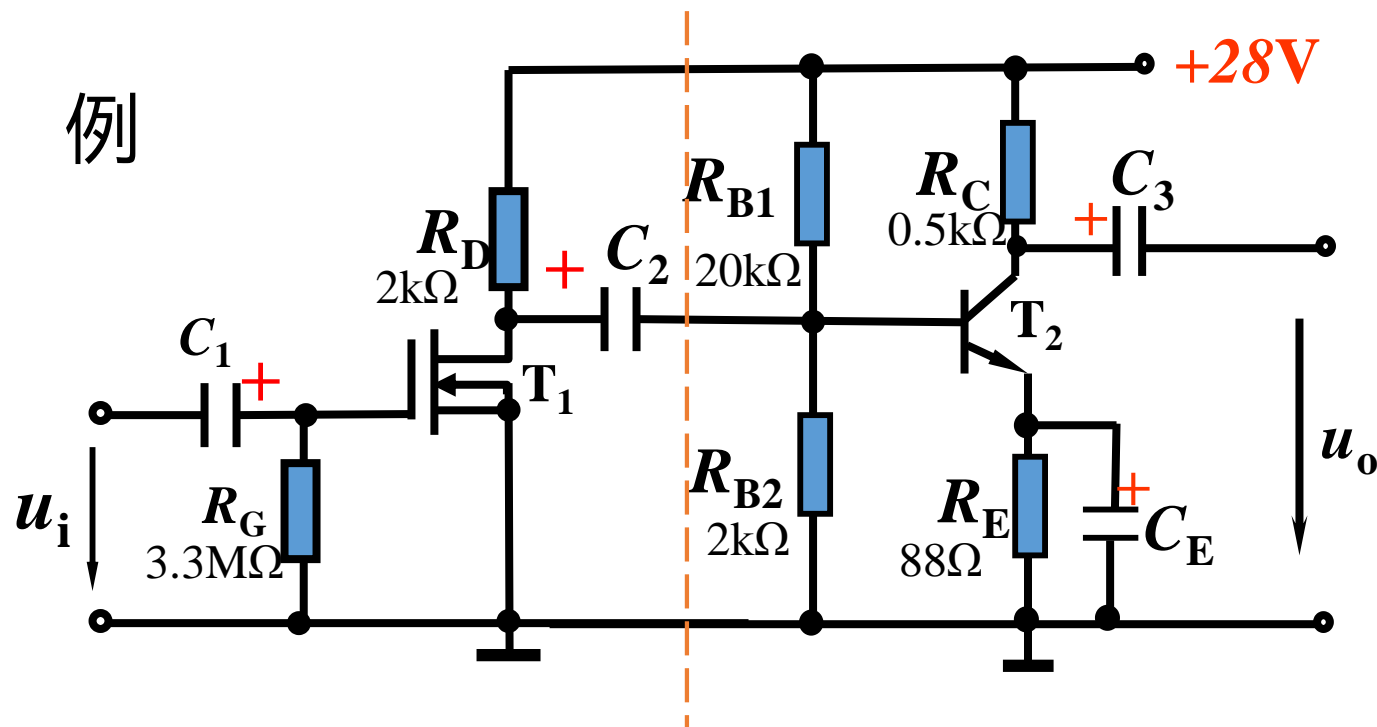
多级放大电路的输出电阻等于最后一级的输出电阻。

## 3.1.2 多级放大电路的分析

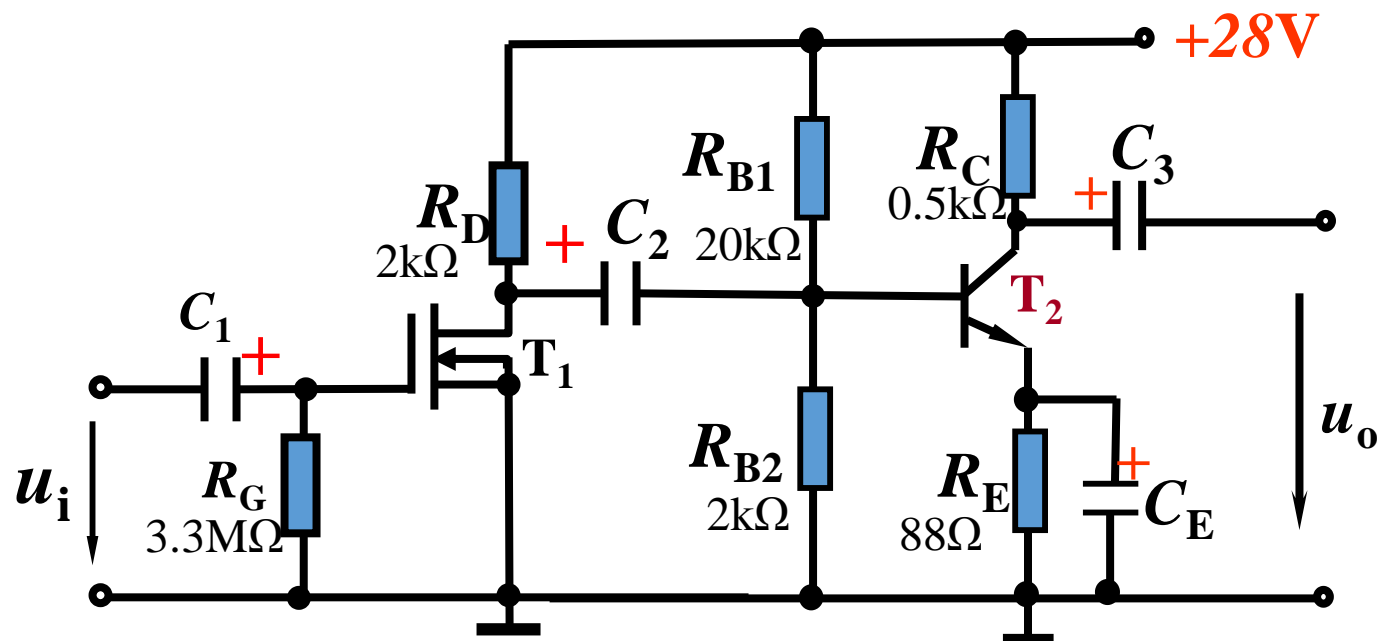


$$r_o = r_{o2} = \frac{R'_S // R_{B3} + r_{be2}}{(1 + \beta_2)} // R_{E2} \quad \text{其中 } R'_S = r_{o1} = R_{C1}$$

当共集放大电路作第一级时，输入电阻与其负载，即第二级的输入电阻有关；而当共集放大电路作最后一级时，它的输出电阻与其信号源内阻，即倒数第二级的输出电阻有关。



已知:  $I_{DSS}=2\text{mA}$ ,  $U_{(GS)\text{ off}}=-4\text{V}$ ,  $g_m=1\text{mS}$ ,  $\beta=80$ ,  
估算静态工作点, 电压放大倍数, 输入电阻及输出电阻



解：静态工作点

$$\mathbf{T_1} \quad U_{GS} = 0$$

$$I_D = I_{DSS} = 2mA$$

$$U_{DS} = 28 - I_D R_D = 24$$

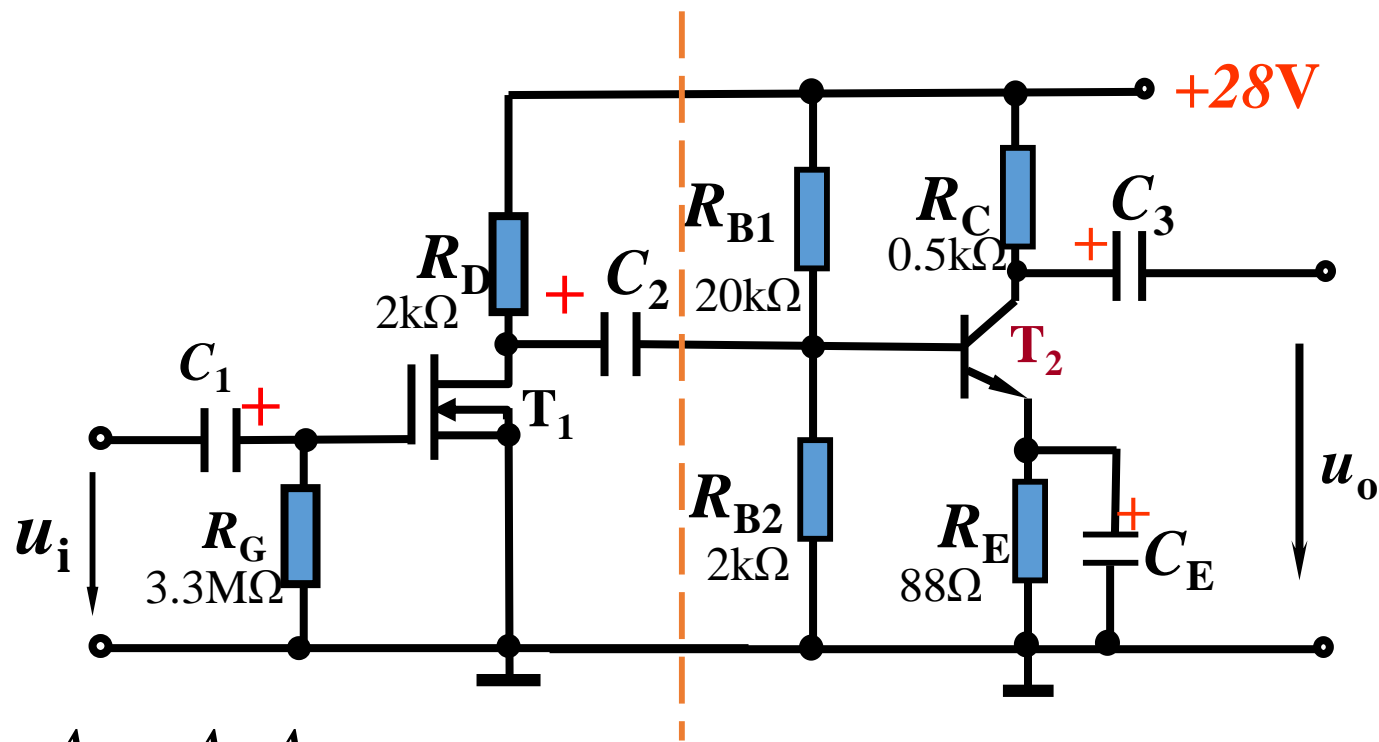
$$\mathbf{T_2} \quad U_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

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

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$





$$A_u = A_{u1} A_{u2}$$

$$A_{u1} = -g_m R_L' = -g_m (R_D // R_L)$$

$$= -g_m (R_D // R_{B1} // R_{B2} // r_{be})$$

$$r_i = R_G$$

$$r_o = R_C$$

$$A_{u2} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}}$$

# 作业

## 3.1,

## 3.4

# 第三章 集成运算放大电路

3.1 多级放大电路的一般问题

3.2 集成运算放大电路概述

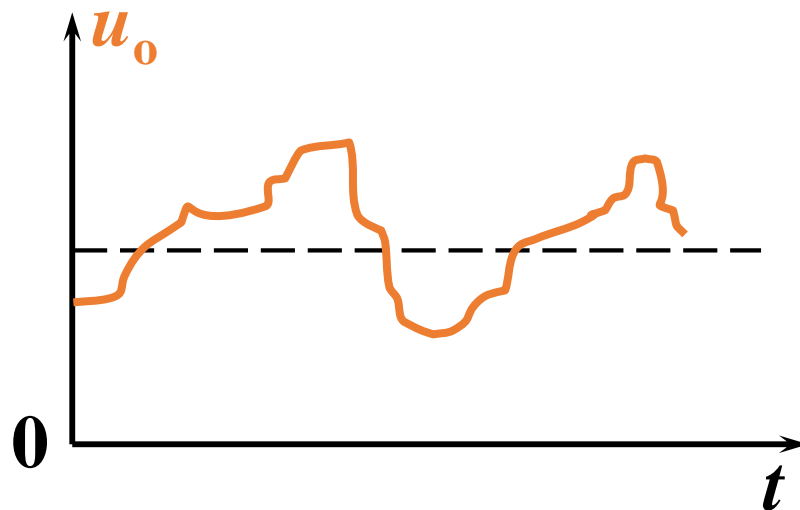
3.3 集成运放中的单元电路

3.4 集成运放电路简介

3.5 集成运放的性能指标及低频等效电路

# 3.3.1 直接耦合放大电路

## 零点漂移现象



$u_i=0$ 时，理论上 $u_o$ 应为常数，但实际上 $u_o$ 不为常数，而是缓慢无规则地变化着，这种现象称**零点漂移**。

## 引起零点漂移的原因

引起零点漂移的原因很多，如电源电压的波动、元器件的老化、半导体元件参数随温度的变化，都将产生 $u_o$ 的漂移。

由温度变化引起的半导体器件参数的变化是产生零点漂移的主要原因，因而**零点漂移也称温度漂移，简称温漂**。

# 3.3.1直接耦合放大电路

抑制放大电路第一级的漂移是至关重要的问题

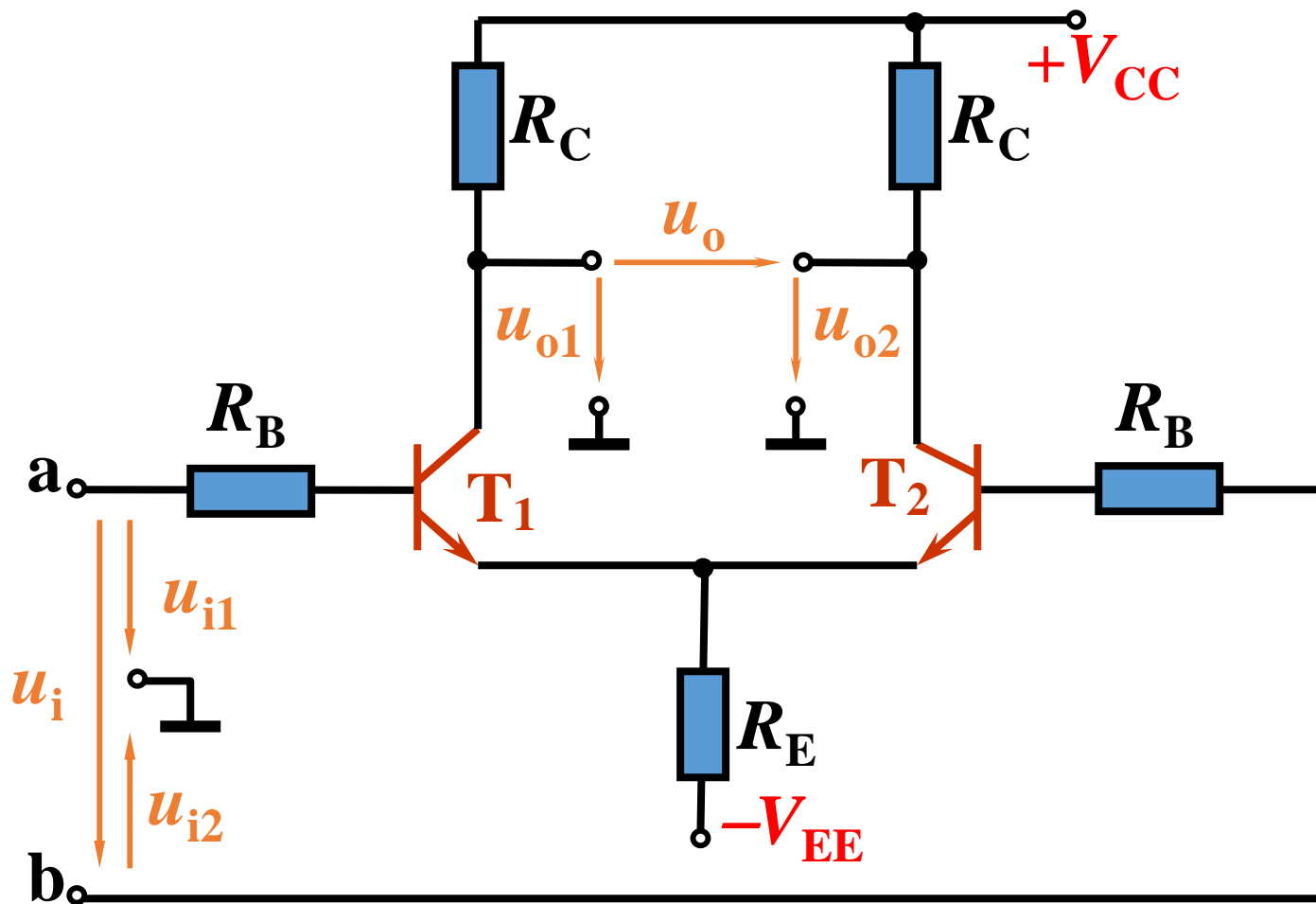
## 抑制零点漂移的方法

- ✦ 在电路中引入直流负反馈
- ✦ 用非线性元件进行温度补偿
- ✦ 采用差分式放大电路

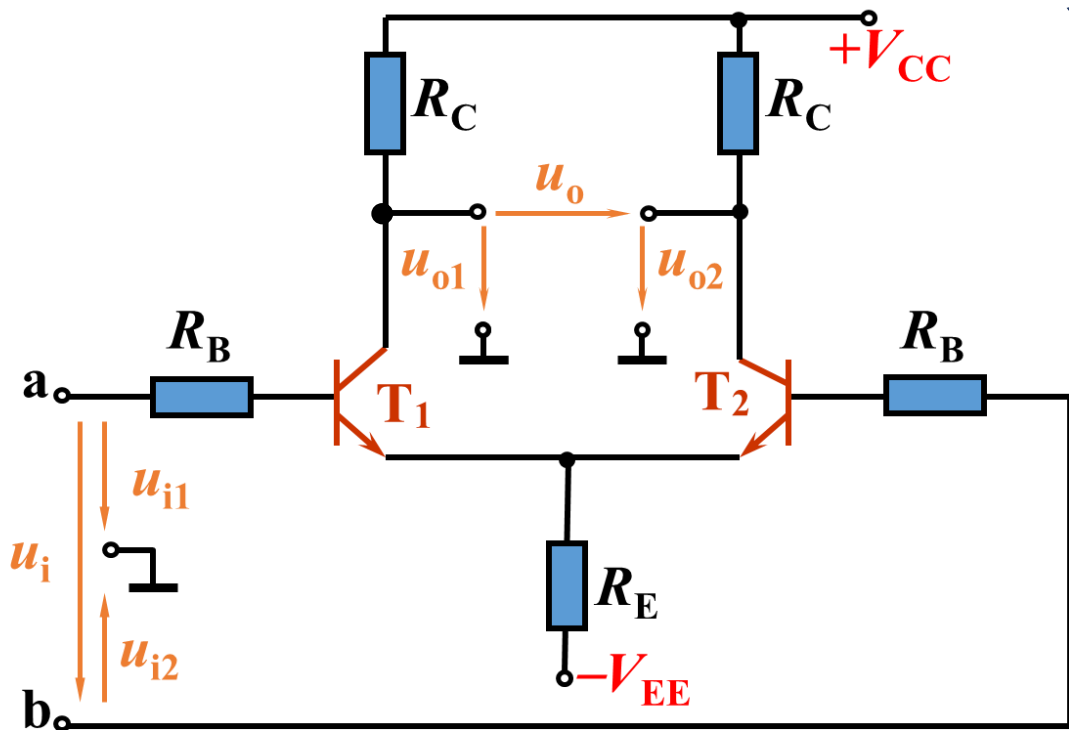
## 3.3.2 差分放大电路

### 一、电路结构

特点：  
结构对称



## 3.3.2 差分放大电路



抑制零点漂移的原理

当  $u_{i1} = u_{i2} = 0$  时:

$$u_{o1} = u_{o2}$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$$

当温度变化时:

$$\Delta u_{o1} = \Delta u_{o2}$$

$$u_o = (u_{o1} + \Delta u_{o1}) - (u_{o2} + \Delta u_{o2}) = 0$$

利用电路结构的对称性抑制零漂

## 3.3.2 差分放大电路

### 二、静态分析

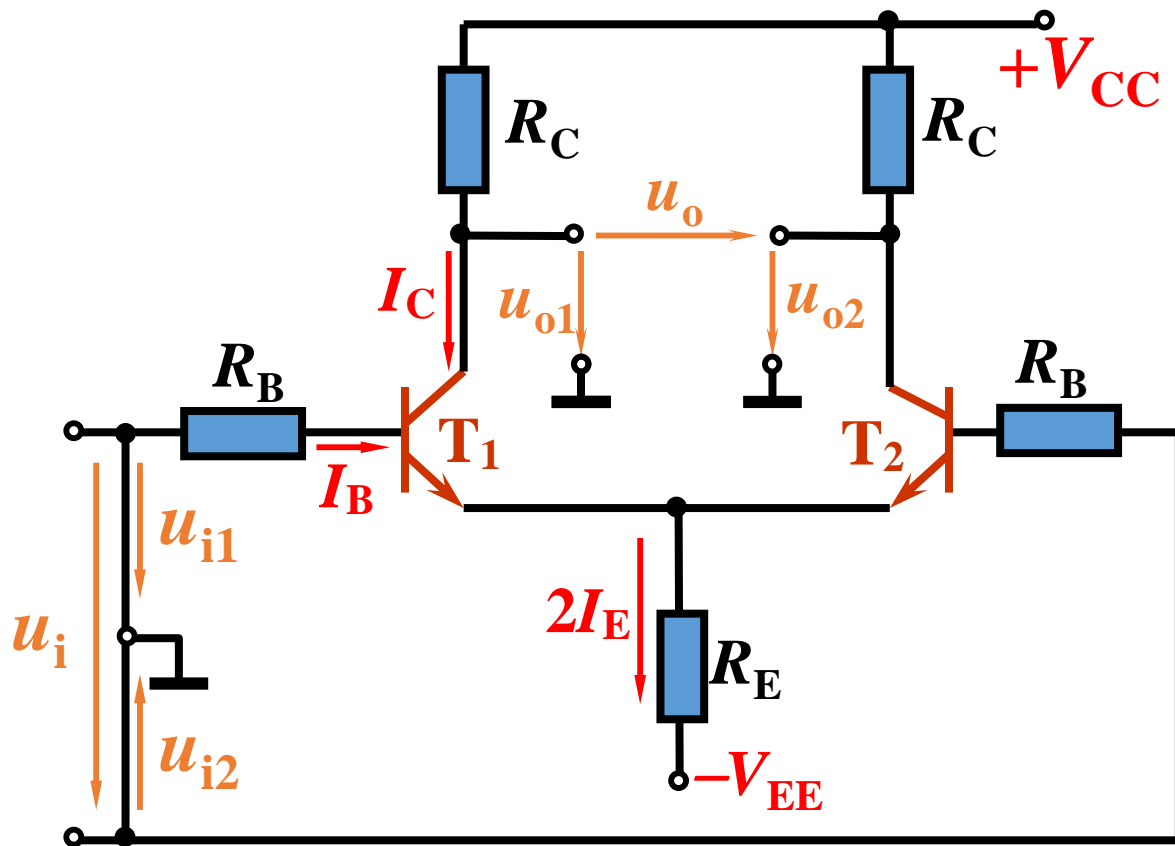
$$u_{i1}=u_{i2}=0$$

$$I_B R_B + U_{BE} + 2I_E R_E = V_{EE}$$

$$\begin{cases} I_B = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_B + 2(1 + \beta)R_E} \\ I_C = \beta I_B \end{cases}$$

$$U_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C R_C - 2I_E R_E$$

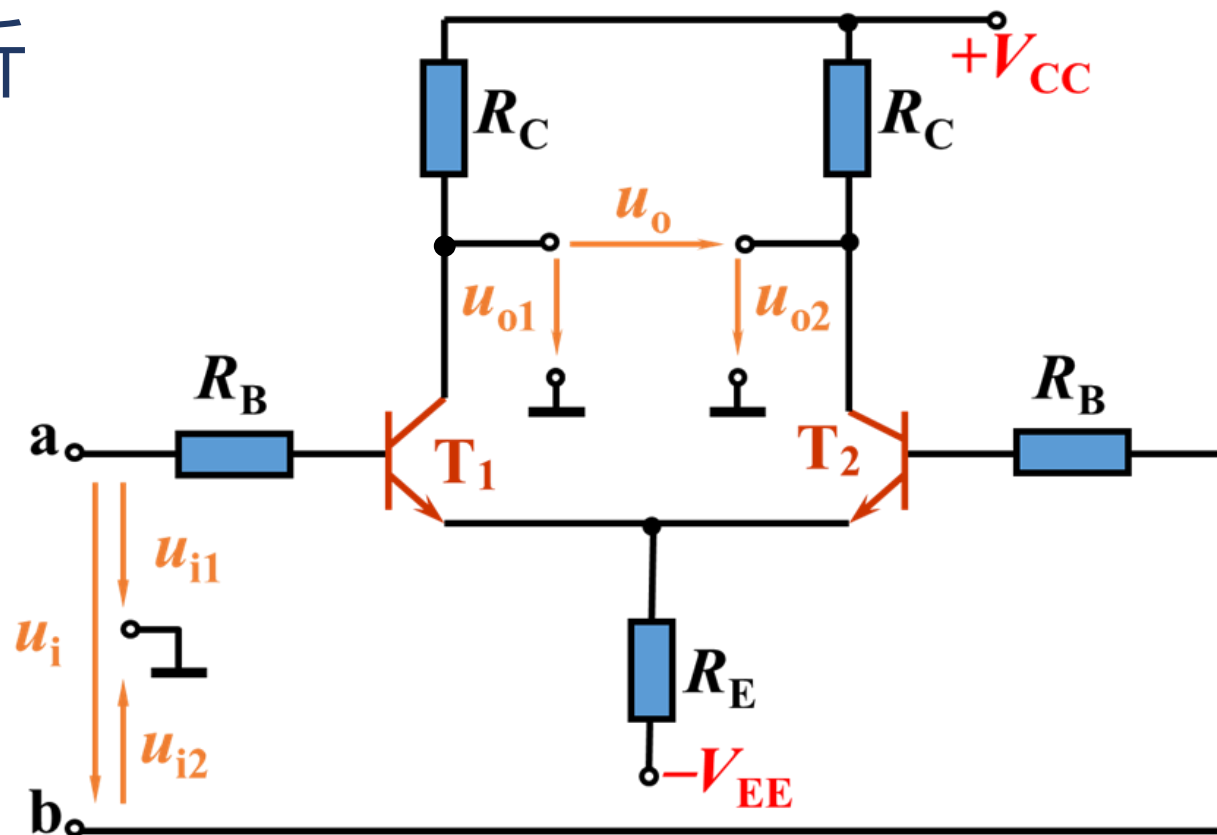
$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$$





## 3.3.2 差分放大电路

### 三、动态分析



1. 双端输入—双端输出

3. 单端输入—双端输出

2. 双端输入—单端输出

4. 单端输入—单端输出

## 3.3.2 差分放大电路

差模信号—大小相等，极性相反  $u_{i1} = -u_{i2}$

共模信号—大小相等，极性相同  $u_{i1} = +u_{i2}$

任意的  $u_{i1}$ ， $u_{i2}$

$$u_{i1} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} + \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2} = u_c + \frac{u_d}{2}$$

$$u_{i2} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} - \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2} = u_c - \frac{u_d}{2}$$

分解为一对差模信号分量和一对共模信号分量

$$u_d = u_{i1} - u_{i2} \quad u_c = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$$

## 3.3.2 差分放大电路

### 1. 双端输入，双端输出

$$u_{i1} = \frac{1}{2} u_i$$

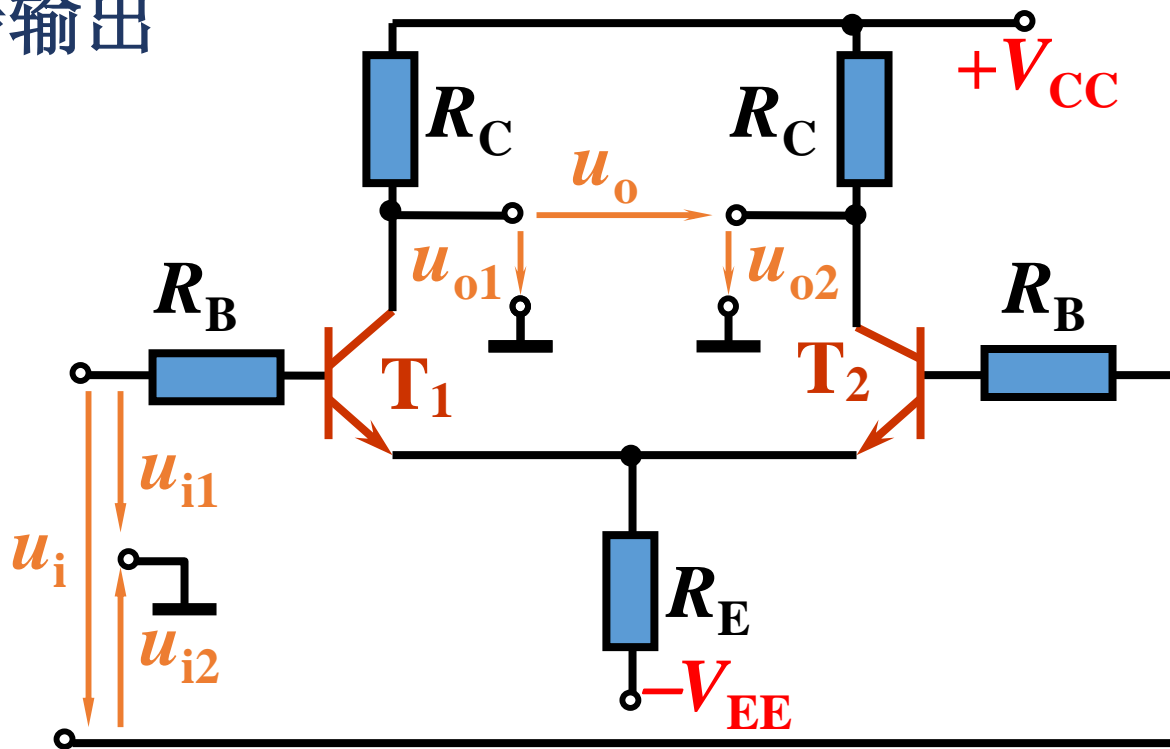
$$u_{i2} = -\frac{1}{2} u_i$$

—差模信号

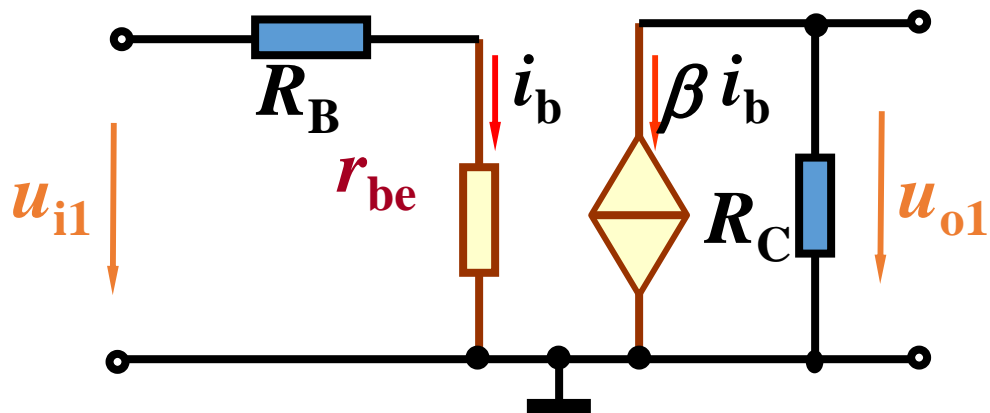
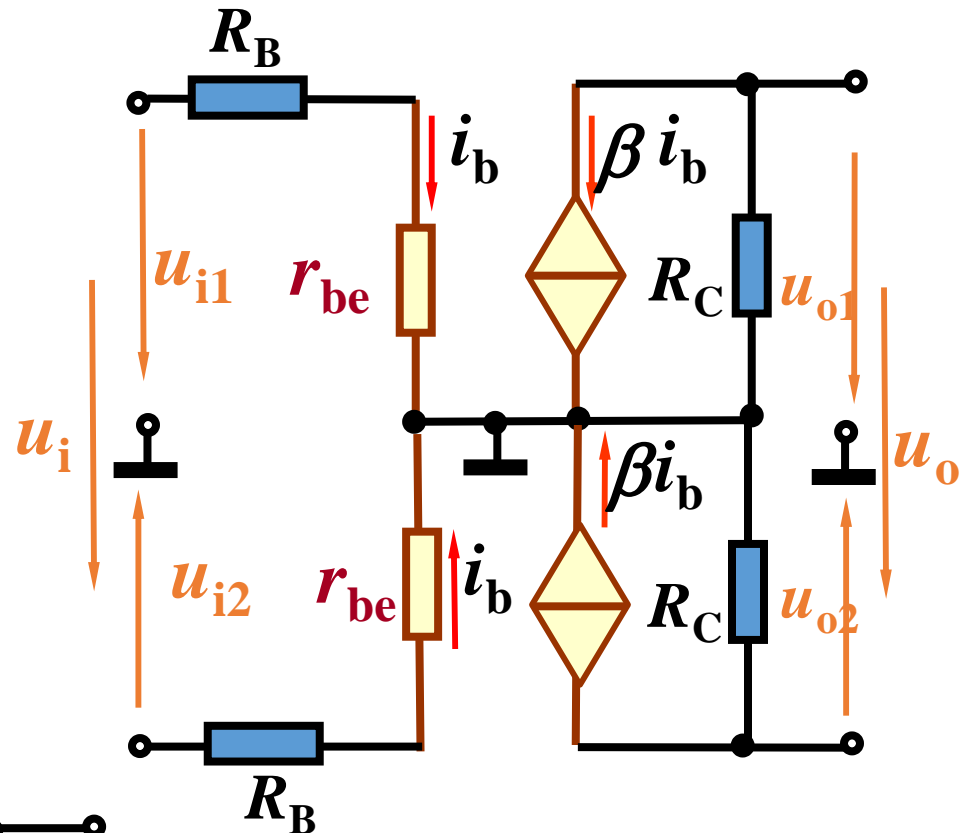
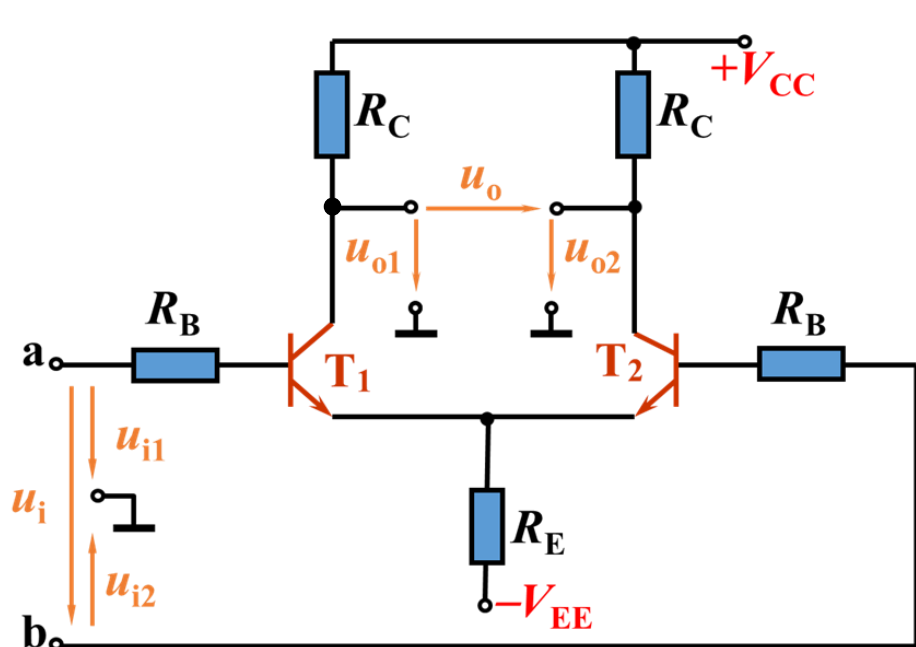
$$u_i = u_{i1} - u_{i2}$$

$$A_d = \frac{u_o}{u_i}$$

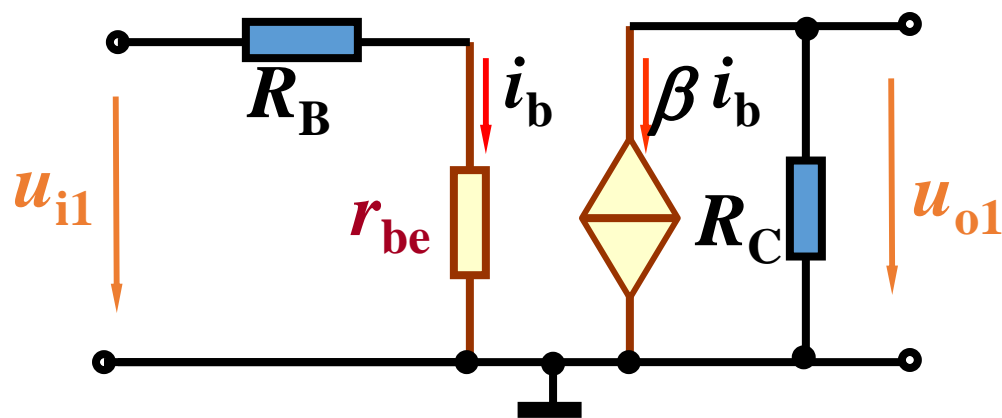
差模放大倍数



## 3.3.2 差分放大电路



## 3.3.2 差分放大电路

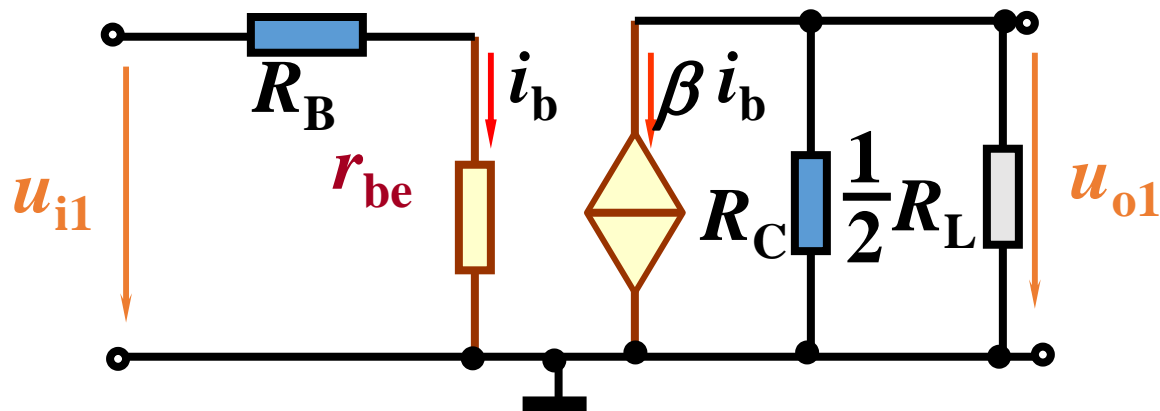


$$A_{d1} = -\beta \frac{R_C}{R_B + r_{be}}$$

$$\begin{aligned} A_d &= \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_i} = \frac{A_{d1}u_{i1} - A_{d2}u_{i2}}{u_i} \\ &= A_{d1} = -\beta \frac{R_C}{R_B + r_{be}} \end{aligned}$$

双端输出时差模放大倍数就等于单管的放大倍数

## 3.3.2 差分放大电路



若输出端带负载，则

$$A_{d1} = -\beta \frac{R_C // \frac{1}{2}R_L}{R_B + r_{be}}$$

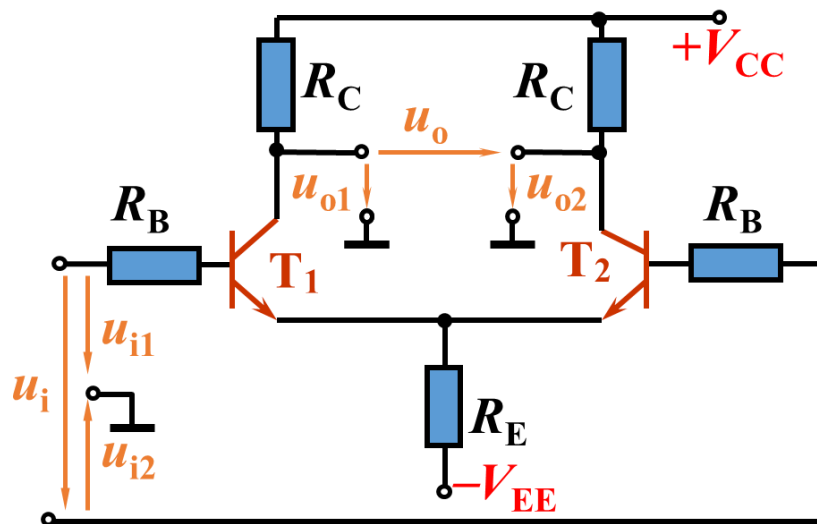
$$A_d = A_{d1} = -\beta \frac{R_C // \frac{1}{2}R_L}{R_B + r_{be}}$$

双端输出时差模放大倍数就等于单管的放大倍数

## 3.3.2 差分放大电路

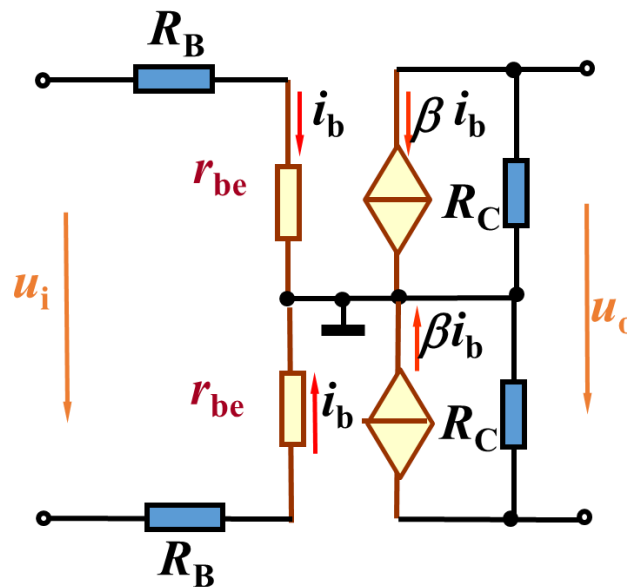
输入电阻

$$r_i = 2(R_B + r_{be})$$



输出电阻

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{2u_{o1}}{i_o} = 2R_C$$



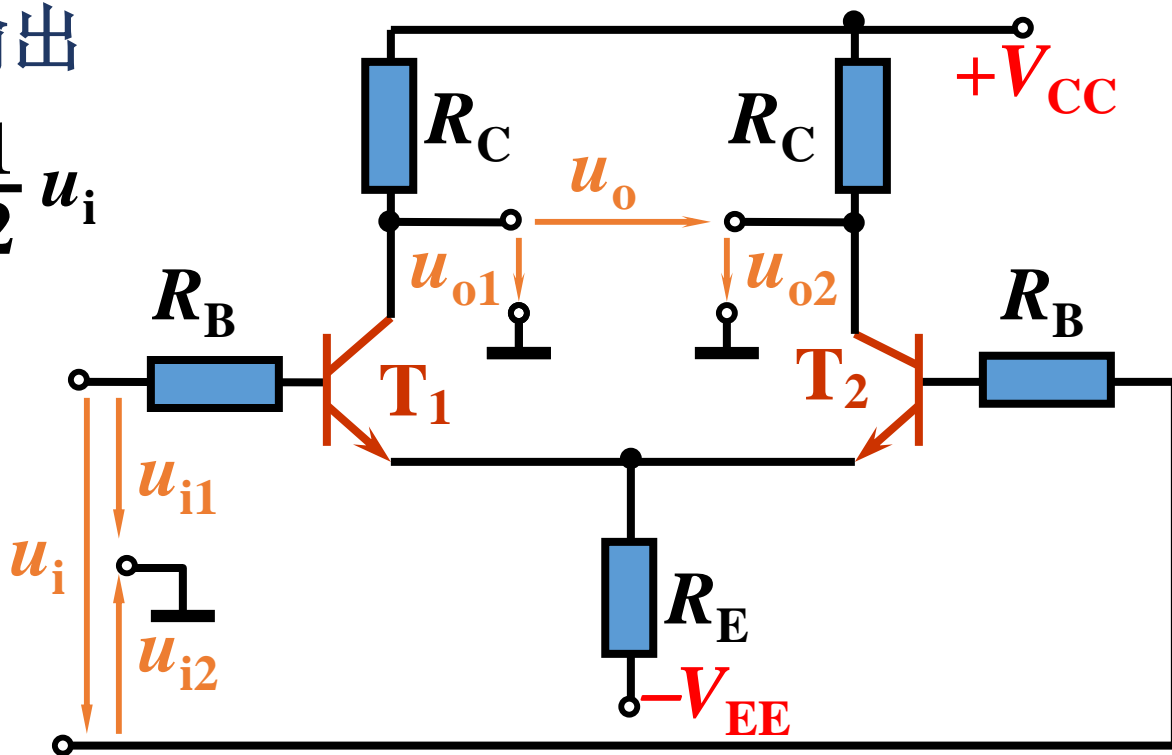
## 3.3.2 差分放大电路

### 2. 双端输入，单端输出

$$u_{i1} = \frac{1}{2} u_i \quad u_{i2} = -\frac{1}{2} u_i$$

$$A_d = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{A_{d1} u_{i1}}{2u_{i1}} = \frac{1}{2} A_{d1}$$

$$A_d = \frac{u_{o2}}{u_i} = \frac{u_{o2}}{-2u_{i2}} = -\frac{1}{2} A_{d2} = -\frac{1}{2} A_{d1}$$



单端输出时，差模放大倍数等于单管放大倍数的一半

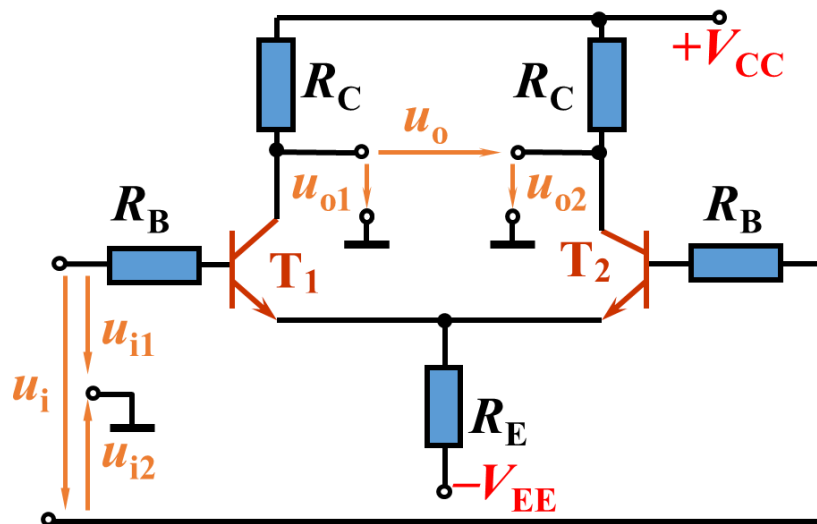


## 3.3.2 差分放大电路

### 输入电阻

$$r_i = 2(R_B + r_{be})$$

——与输出方式无关



### 输出电阻

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{u_{o1}}{i_o} = R_C$$

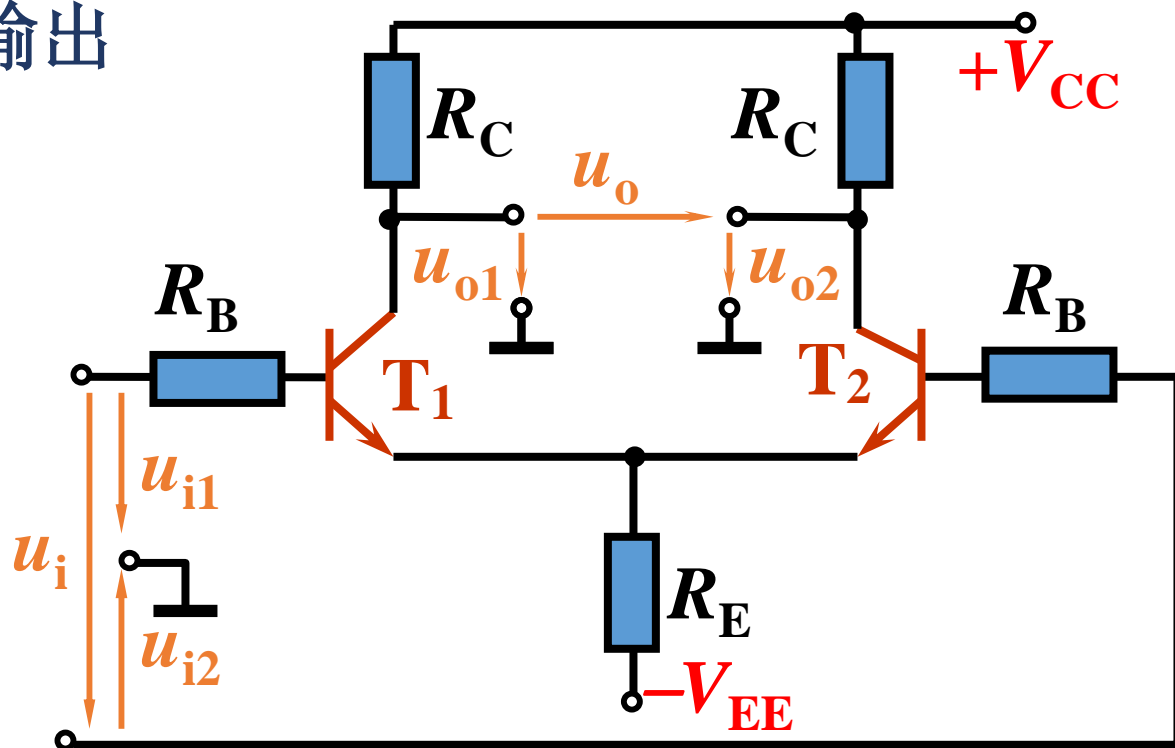
## 3.3.2 差分放大电路

### 3.单端输入，双端输出

$$\begin{cases} u_{i1}=u_i \\ u_{i2}=0 \end{cases}$$

$$u_{i1} = \frac{u_i}{2} + \frac{u_i}{2}$$

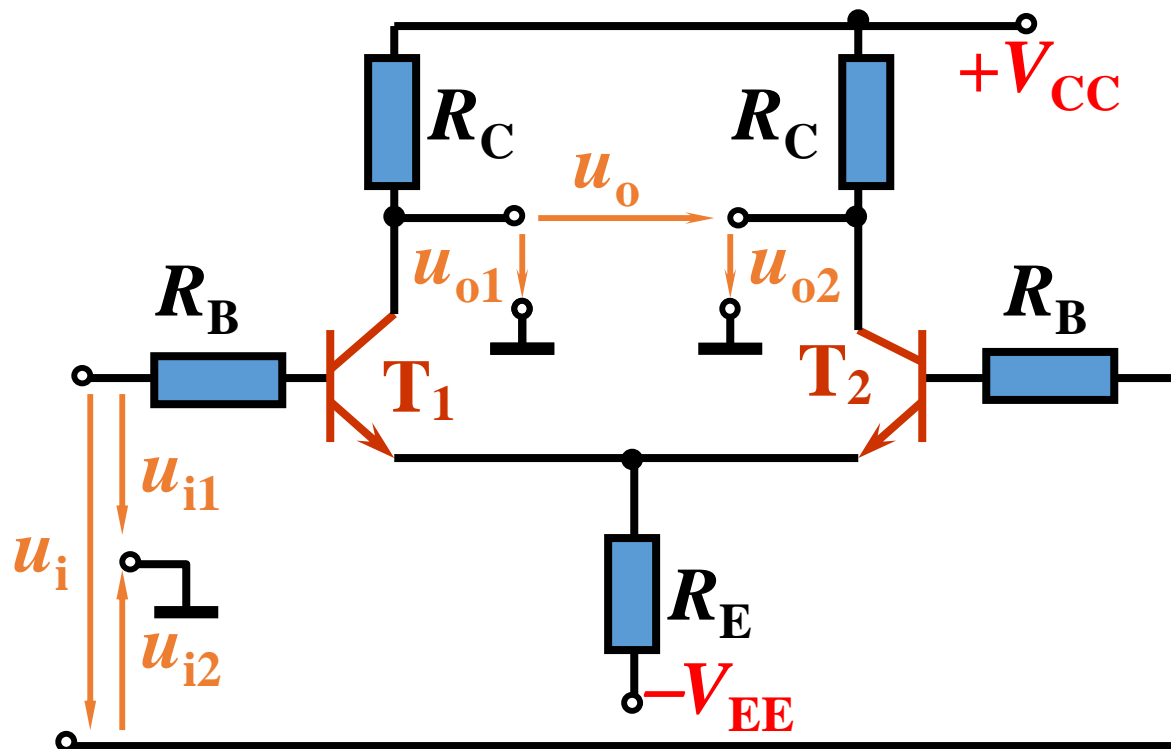
$$u_{i2} = \frac{u_i}{2} - \frac{u_i}{2}$$



分解为一对差模信号分量和一对共模信号分量

$$A_d = \frac{u_o}{u_i} = A_{d1} = -\beta \frac{R_C}{R_B + r_{be}}$$

## 3.3.2 差分放大电路



共模信号

$$u_{i1} = u_{i2}$$

共模电压放大倍数

$$A_c = \frac{u_o}{u_{i1}} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1}} = \frac{A_{d1}u_{i1} - A_{d2}u_{i2}}{u_{i1}} = 0$$

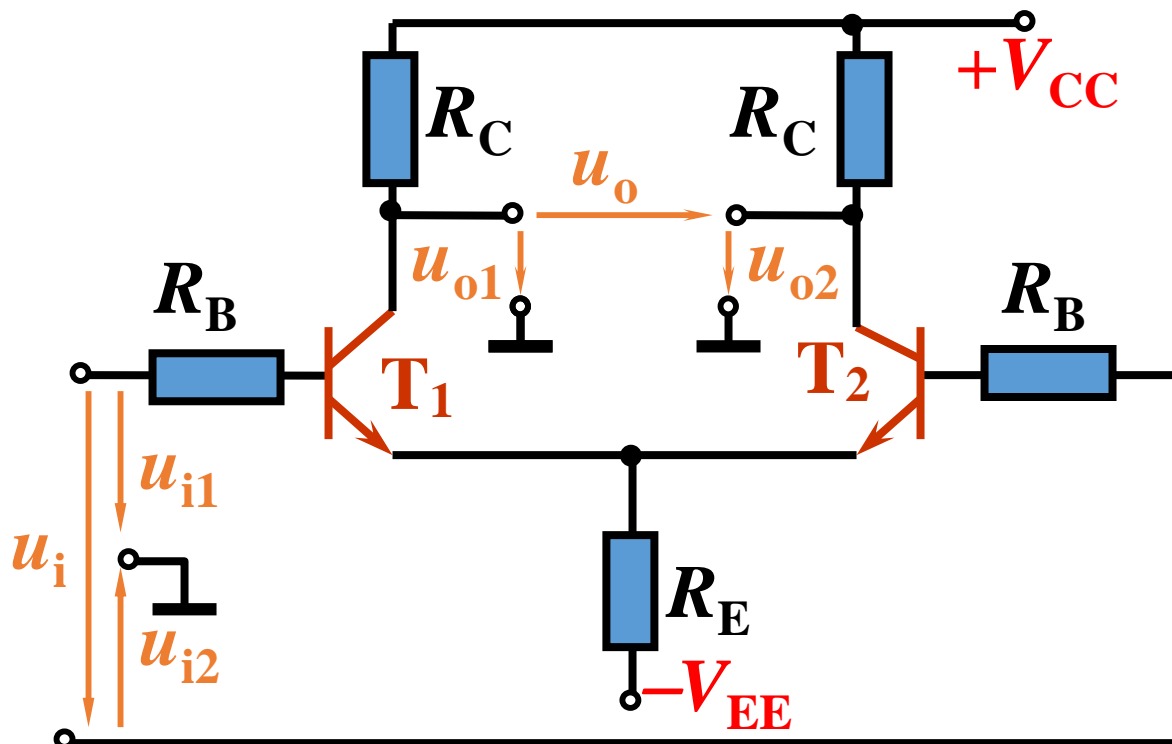
## 3.3.2 差分放大电路

输入电阻

$$r_i = 2(R_B + r_{be})$$

输出电阻

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{2u_{o1}}{i_o} = 2R_C$$

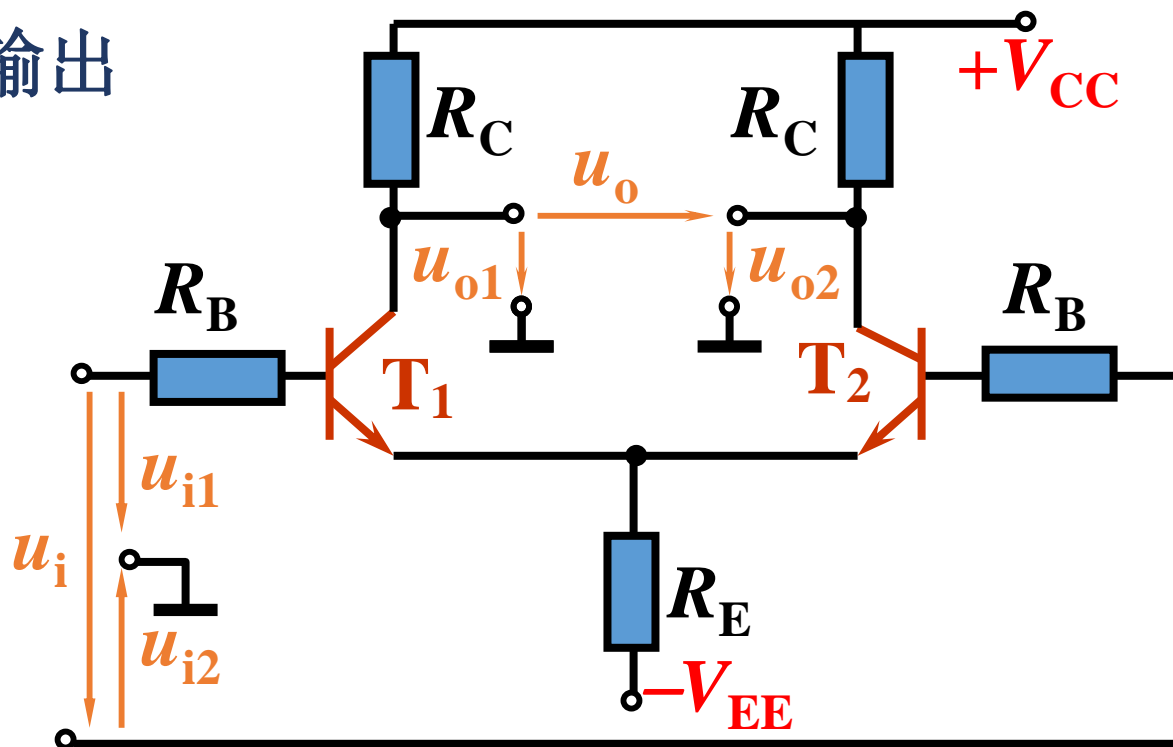


输出电阻与输出方式有关。双端输出时，输出电阻是单管放大电路输出电阻的两倍；单端输出时，就等于单管放大电路的输出电阻。

## 3.3.2 差分放大电路

### 4. 单端输入，单端输出

$$\begin{cases} u_{i1} = u_i \\ u_{i2} = 0 \end{cases}$$
$$u_{i1} = \frac{u_i}{2} + \frac{u_i}{2}$$
$$u_{i2} = \frac{u_i}{2} - \frac{u_i}{2}$$

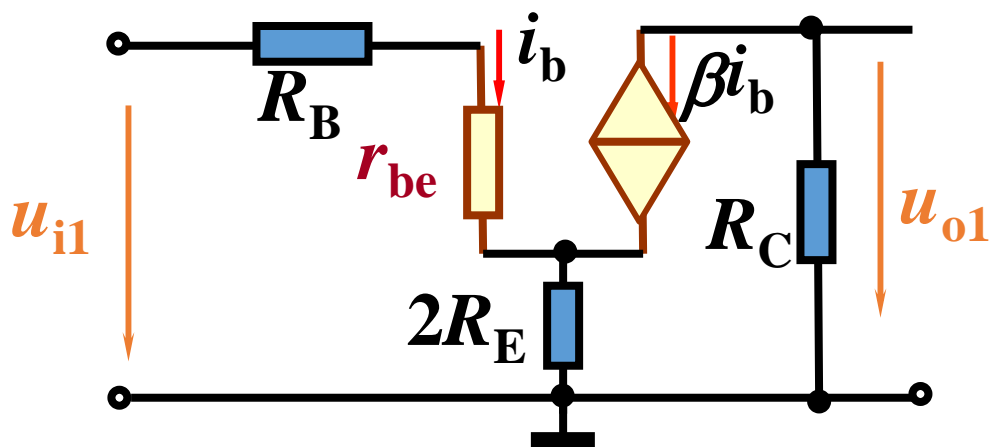


分解为一对差模信号分量  
和一对共模信号分量

$$A_d = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{u_{o1}}{2u_{i1}}$$
$$= \frac{1}{2}A_{d1}$$

## 3.3.2 差分放大电路

$$A_c = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = -\beta \frac{R_C}{R_B + r_{be}(1 + \beta)2R_E}$$



——单端输出时，只能靠 $R_E$ 来抑制共模信号。

## 3.3.2 差分放大电路

### 共模抑制比 $K_{\text{CRM}}$

**共模抑制比**反映了差分放大电路放大差模信号、抑制零漂和共模信号的能力。

$$K_{\text{CRM}} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad K_{\text{CRM}} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \text{dB}$$



$K_{\text{CRM}}$ 愈大，电路的性能就愈好。在理想情况下，若为双端输出，则由于 $A_c=0$ ， $K_{\text{CRM}}=\infty$ ；若为单端输出，则 $R_E$ 愈大， $K_{\text{CRM}}$ 愈大。

## 3.3.2 差分放大电路

### 四种接法的比较（电路参数理想对称条件）

- 输入方式： $R_i$ 均为 $2(R_B + r_{be})$ ；

双端输入时无共模信号输入，单端输入时有共模信号输入。

- 输出方式： $A_d$ 、 $A_c$ 、 $K_{CMR}$ 、 $R_o$ 均与之有关。

双端输出

$$A_d = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

$$r_o = 2R_C$$

单端输出

$$A_d = -\frac{\beta R_C}{2(R_B + r_{be})}$$

$$A_c = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E}{2(R_B + r_{be})}$$

$$r_o = R_C$$