

4 集成运算放大器

4.1 集成运算放大器的概述

集成电路——把整个电路中的元器件制作在一块硅基片上，构成具有某种特定功能的电子电路。

基尔比（集成电路
发明人）



1. 集成电路的主要特点

体积小，重量轻，成本低，可靠性高，组装和调试的难度小。

2. 集成电路的分类

(1) 按功能分

a. 模拟集成电路

主要用于放大和变换连续变化的电压和电流信号。

b. 数字集成电路

主要用于处理离散的、断续的电压和电流信号。

数字集成电路种类多，形式较为简单，通用性强。

(2) 按集成度分

a. 小规模集成电路 (SSI: small scale integration circuit) 一块芯片上包含的元器件在100个以下。

b. 中规模集成电路 (MSI: middle scale integration circuit) 一块芯片上包含的元器件在100~1000之间。

c. 大规模集成电路 (LSI: large scale integration circuit) 一块芯片上包含的元器件在1000~100000之间。

d. 超大规模集成电路 (VLSI: very large scale integration circuit) 一块芯片上包含的元器件在100000以上。

d. 目前的集成电路:

- (a) 已经可以在一片硅片上集成几千万只，甚至上亿只晶体管。
- (b) 集成电路的性能（高速度和低功耗等）也迅速提高。
- (c) 集成电路仍在高速发展。集成度每2~4年增加一倍。
- (d) 出现的系统级芯片（SOC—system on chip）。
- (e) 集成电路逐步向集成系统（integrated system）的方向发展。

(3) 按制造工艺分

a. 半导体集成电路

将元器件和电路集成在一块硅片上。

b. 薄膜集成电路

集成电路的元器件和电路由不到一微米厚的金属半导体或金属氧化物重叠而成。

c. 厚膜集成电路

厚膜集成电路与薄膜集成电路基本相同，膜的厚度约几微米到几十微米。

3. 模拟集成电路的分类

(1) 线性集成电路

输出信号与输入信号呈线性关系。

集成运算放大器、集成音频功率放大器、集成高频、中频放大器等。

(2) 非线性集成电路

输出信号与输入信号呈非线性关系。

集成振荡器、混频器、检波器、集成开关稳压电源等。

4. 集成运算放大器概述

(1) 集成运算放大器简称集成运放。

(2) 集成运算放大器的主要功能

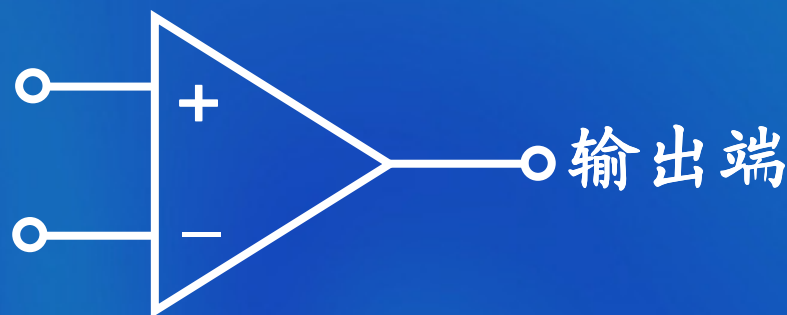
a. 完成比例、求和、积分、微分、对数、反对数、乘法等数学运算。

b. 信号处理。

c. 波形产生。

同相输入端

反相输入端



(3) 集成运放发展的三个阶段

- a. 通用型集成运放的广泛使用。
- b. 专用集成运放的出现。如高速型、高输入电阻型、高压型、大功率型，低漂移型和低功耗型等。
- c. 开发更高性能指标的产品，进一步提高集成度。

5. 集成运放的主要特点

- (1) 电压放大倍数高， $10^3 \sim 10^5$ 倍。
- (2) 输入电阻大，几十千欧到几兆欧。
- (3) 输出电阻小，几百欧以下。
- (4) 通用型和灵活性强、成本低、用途广、互换性好。
- (5) 是线性集成电路中发展最早、应用最广、最为庞大的一族成员。

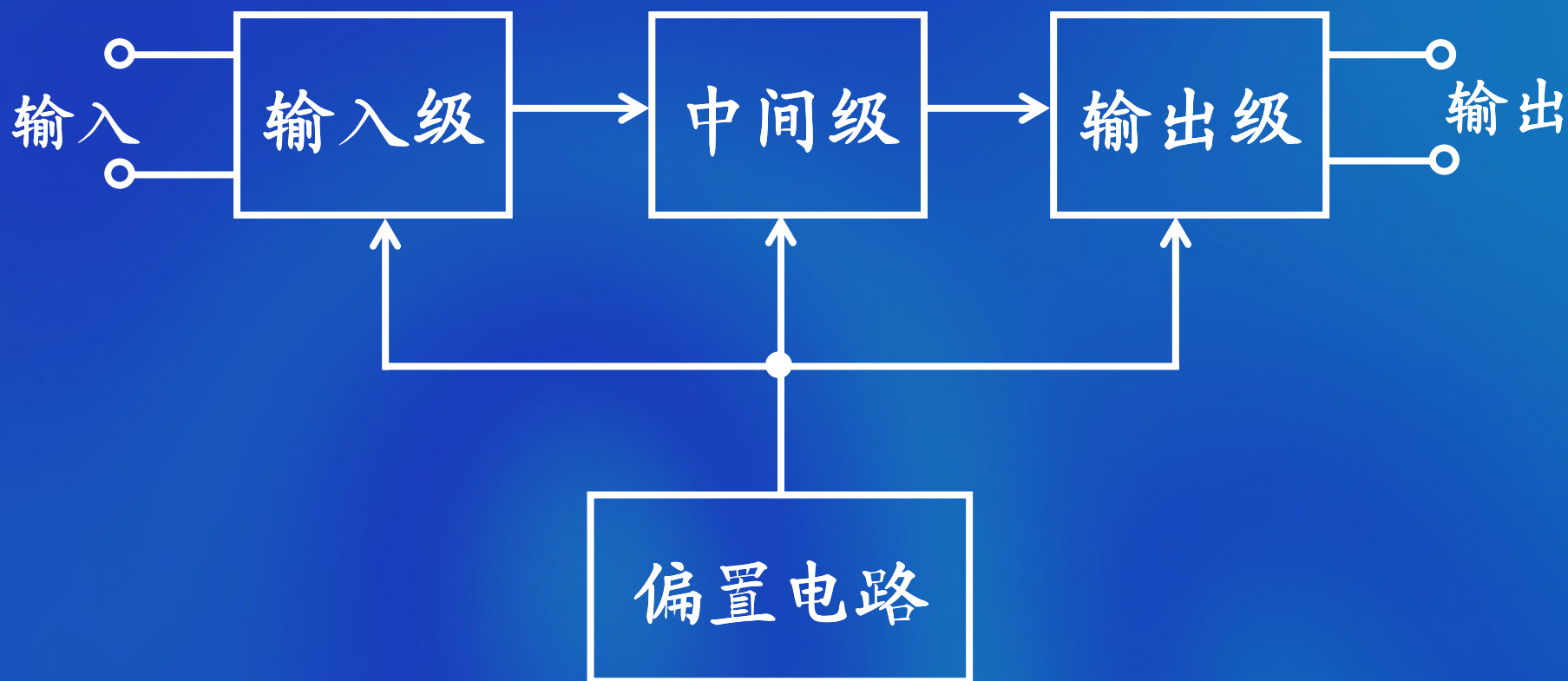
4.1.1 集成电路中元器件的特点

- (1) 相邻元器件的特性一致性好
- (2) 用有源器件代替无源器件
- (3) 二极管大多由三极管构成
- (4) 只能制作小容量的电容，不能制造电感
- (5) 电路采用直接耦合的方式。

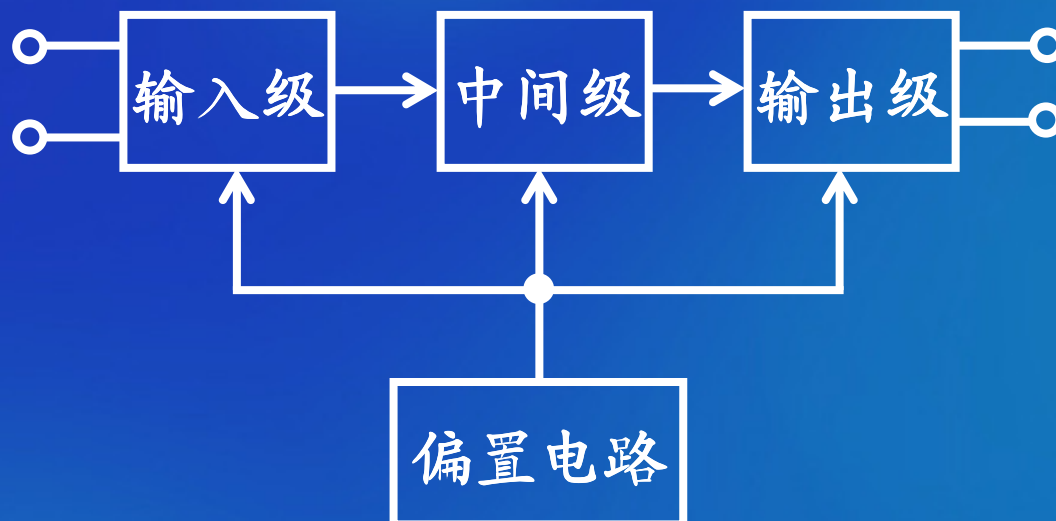


4.1.2 集成运算放大器的典型结构

1. 典型结构



2. 各部分的作用

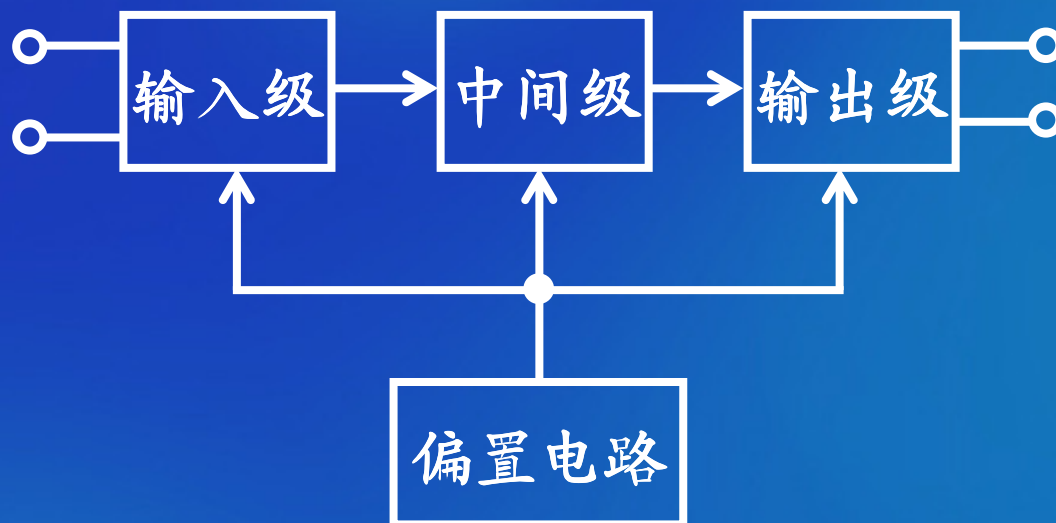


(1) 偏置电路

为各级电路提供直流偏置电流，并使整个运放的静态工作点稳定且功耗较小。

(2) 输入级

具有与输出同相和反相的两个输入端，较高的输入电阻和抑制干扰及零漂的能力。



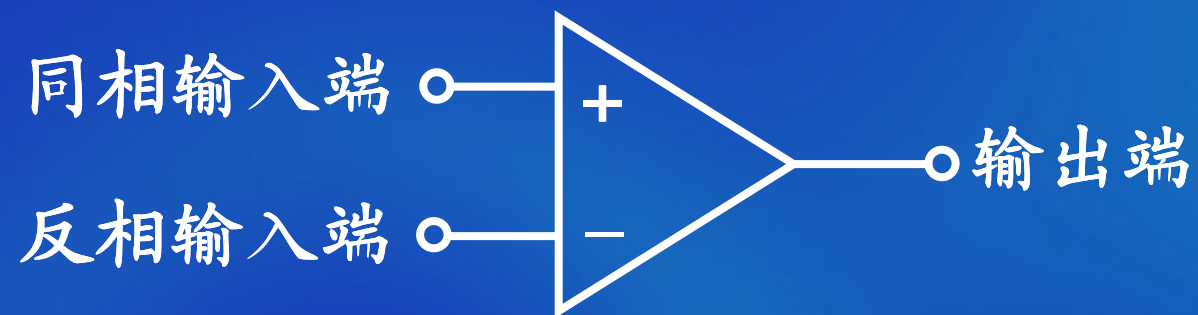
(3) 中间级

主要进行电压放大，具有很高的电压增益。

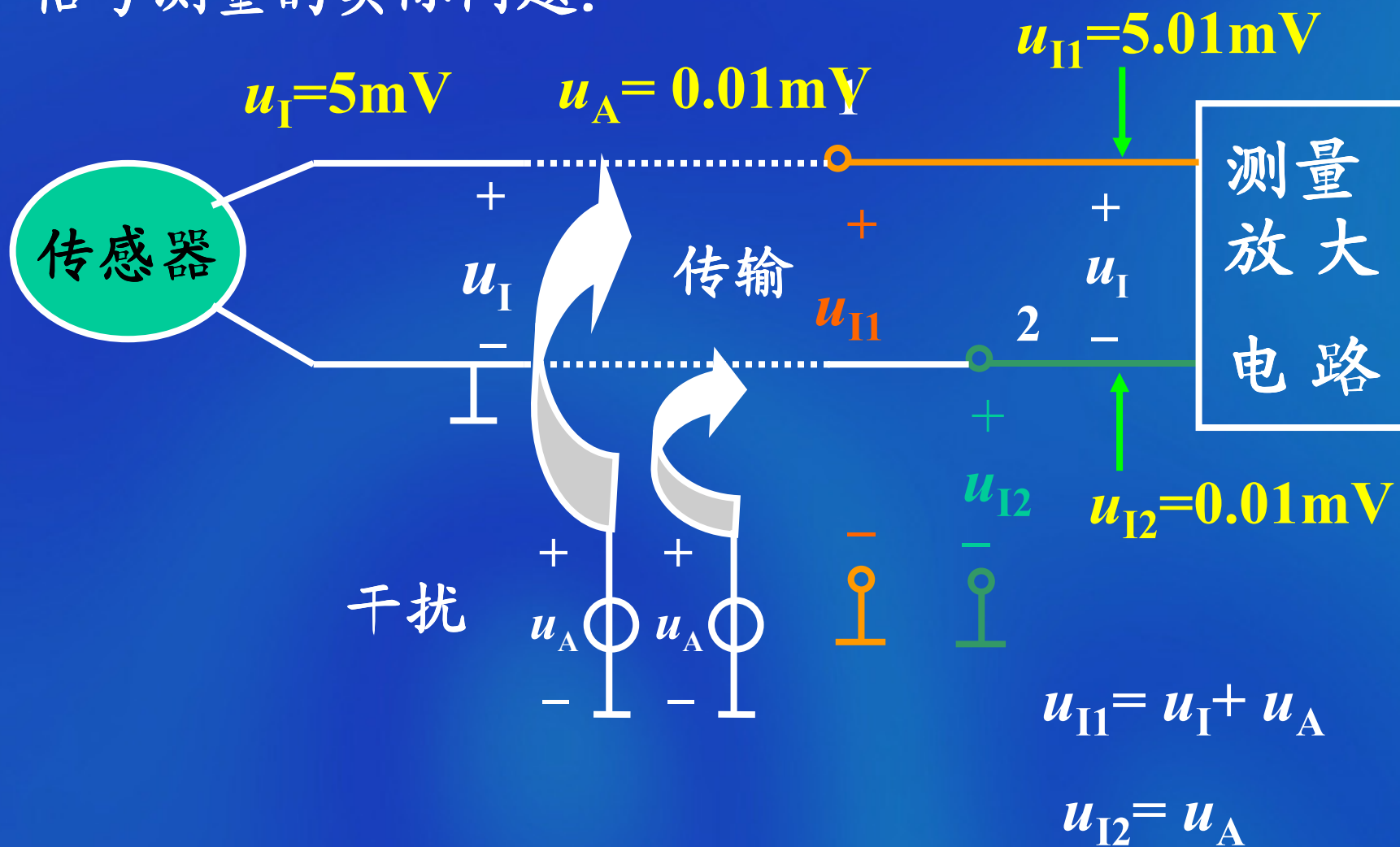
(4) 输出级

为负载提供足够的电压和电流，具有很小的输出电阻和较大的动态范围。

3. 集成运算放大器的电路符号



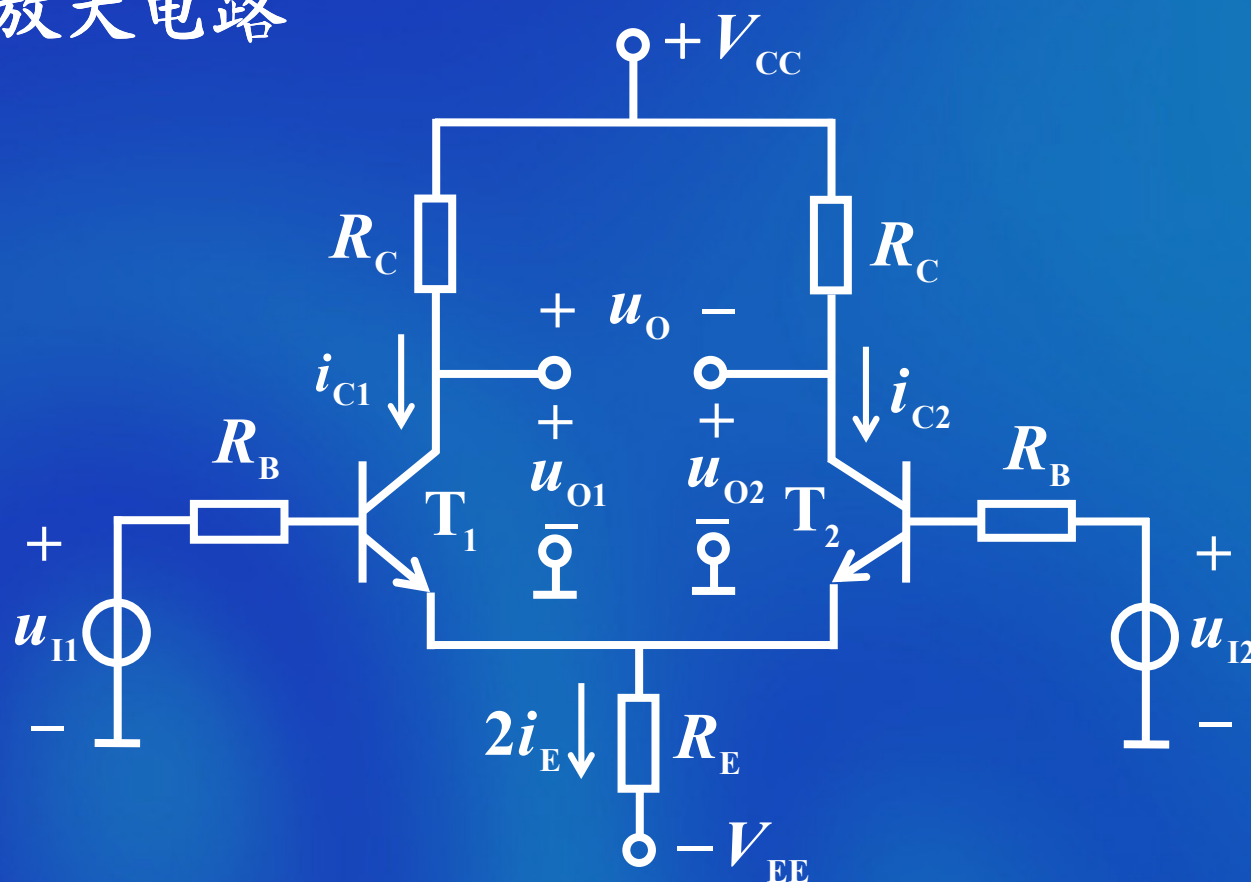
信号测量的实际问题:



4.2 集成运算放大器中的基本单元电路

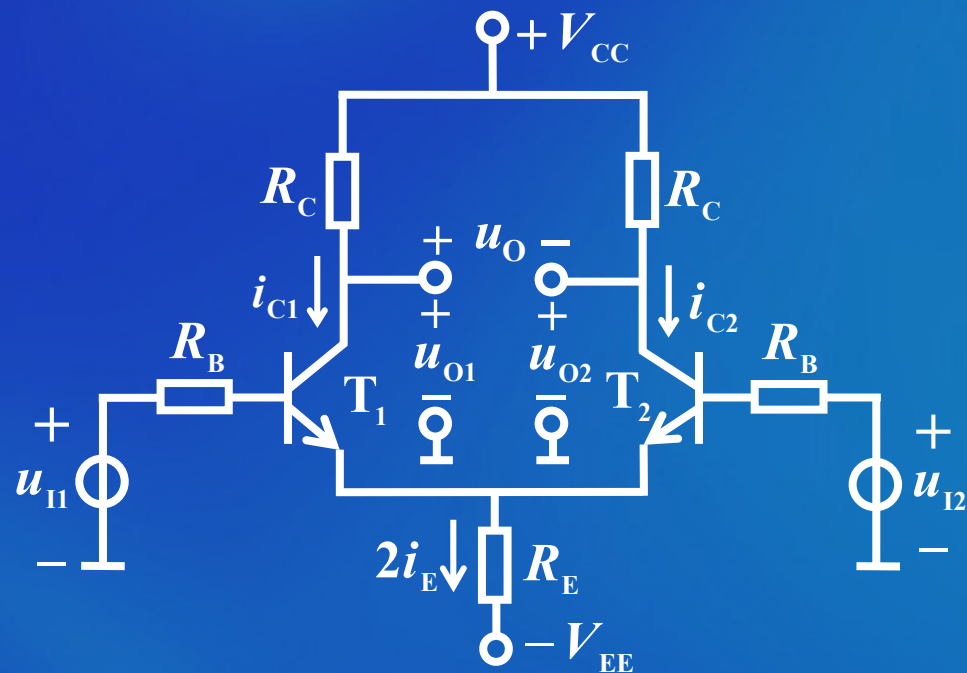
4.2.1 典型差分放大电路

1. 电路的组成

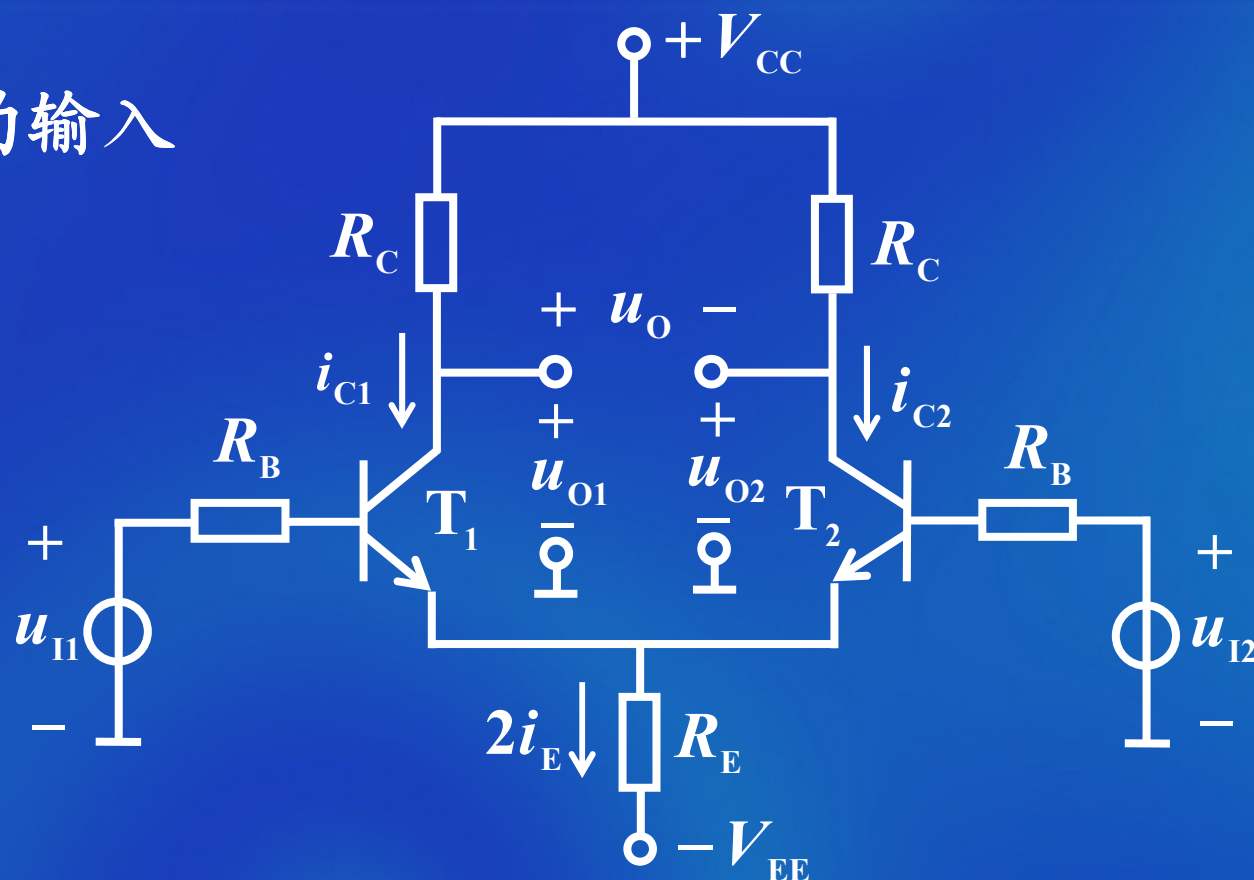


(1) 电路特点

- a. 电路两边对称。
- b. 两管共用发射极电阻 R_E 。
- c. 具有两个信号输入端。
- d. 信号可以双端或单端输出。



(2) 信号的输入



两个输入端信号电压的差值是有用的，称之为差模输入信号，因而该电路称为差分放大电路。

(3) 抑制零漂的原理

$$(u_{I1}=u_{I2}=0)$$

(T_1 和 T_2 特性相同)

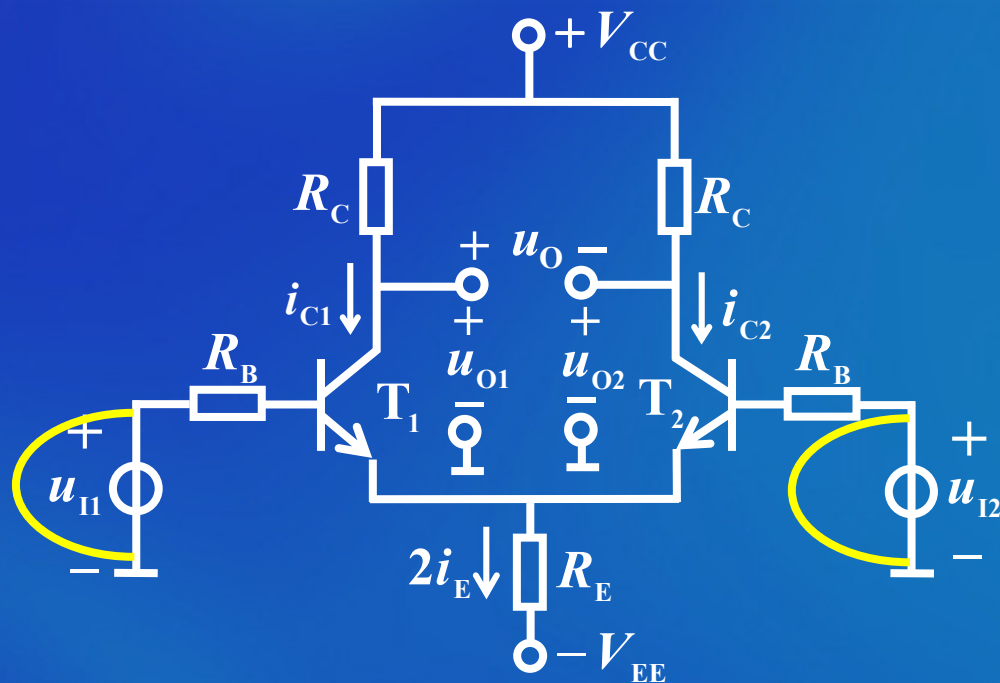
a. 电路双端输出

(a) 当温度 T 一定时

$$i_{C1} = i_{C2}$$

$$u_{O1} = u_{O2}$$

$$u_O = u_{O1} - u_{O2} = 0$$

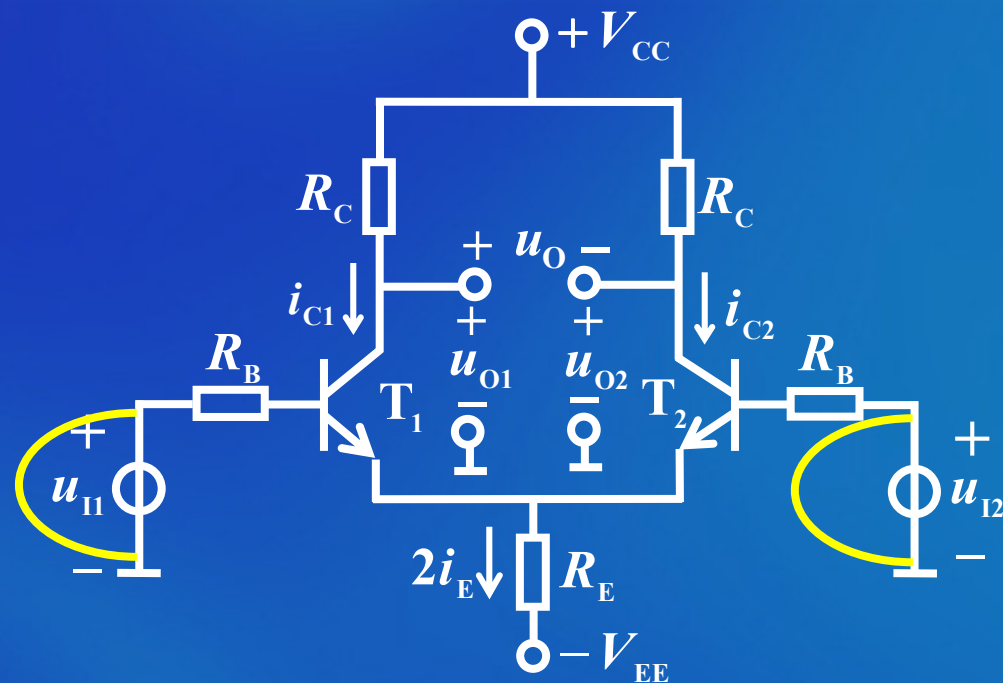


(b) 当温度增加 ΔT 时

$$\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}$$

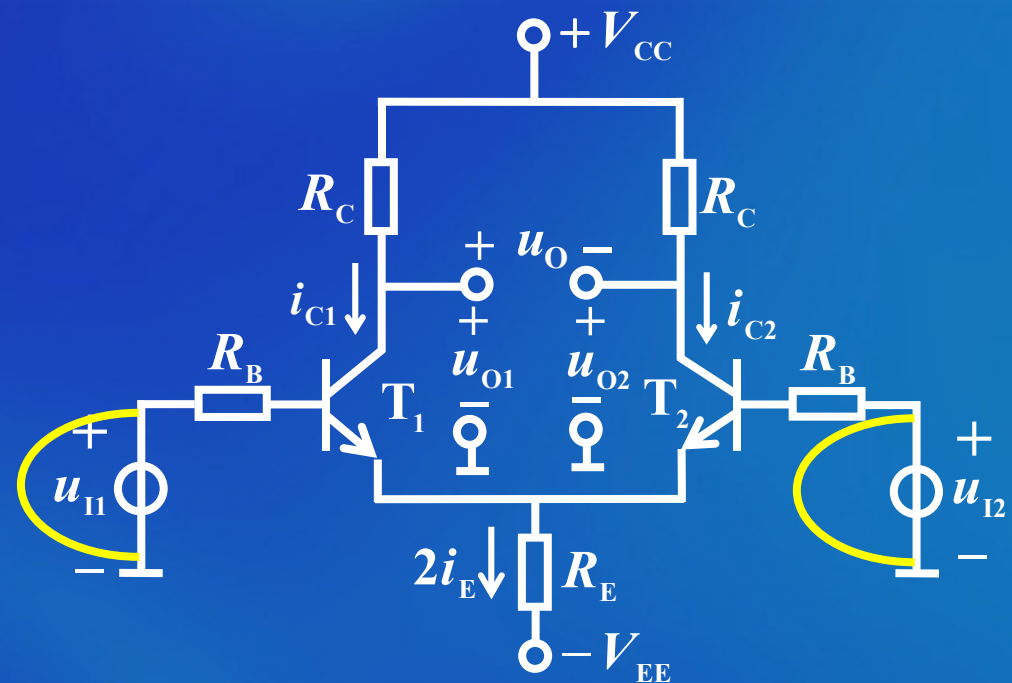
$$I_{C1} + \Delta I_{C1} = I_{C2} + \Delta I_{C2}$$

$$u_O = 0$$



在双端输出的情况下，漂移为零。

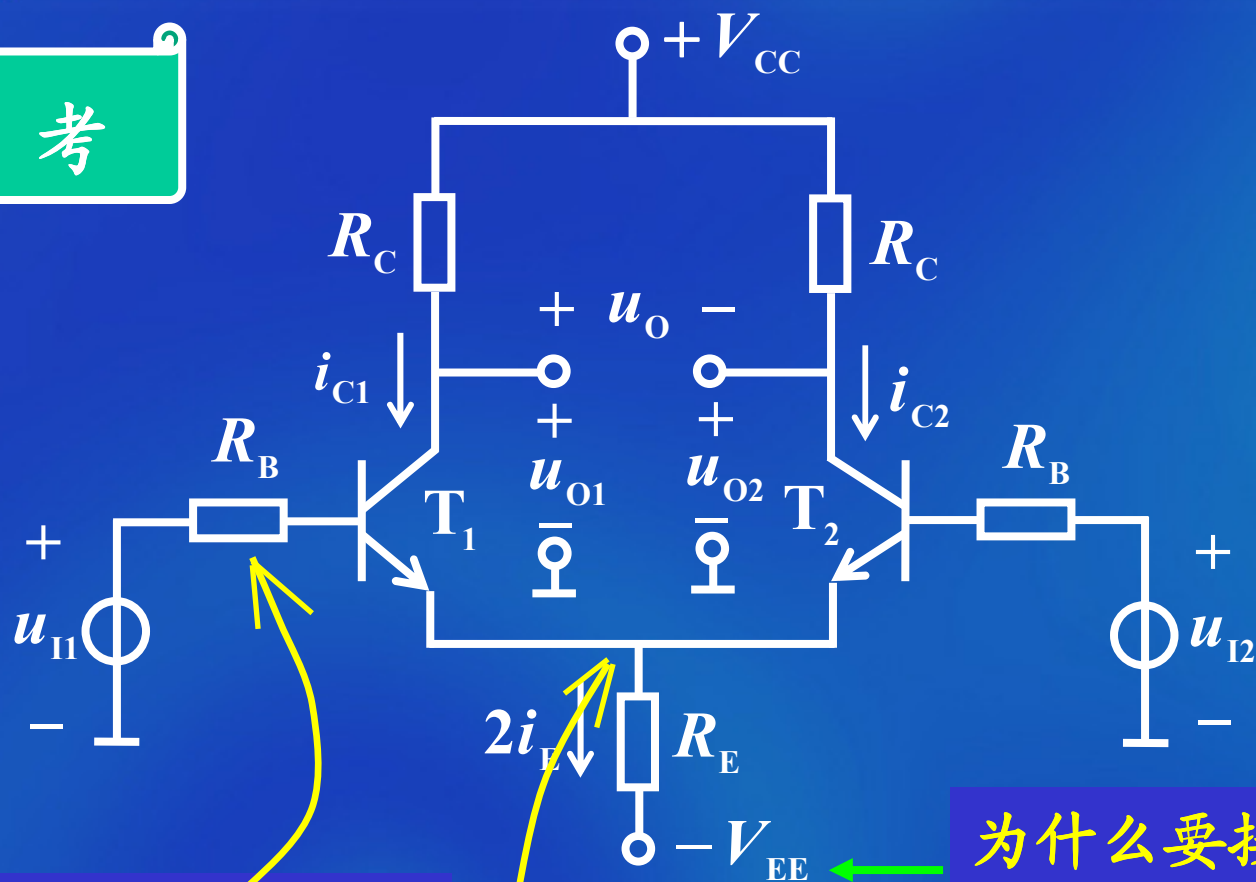
b. 单端输出时



因射极电阻 R_E 的负反馈作用

可以抑制零点漂移

思考



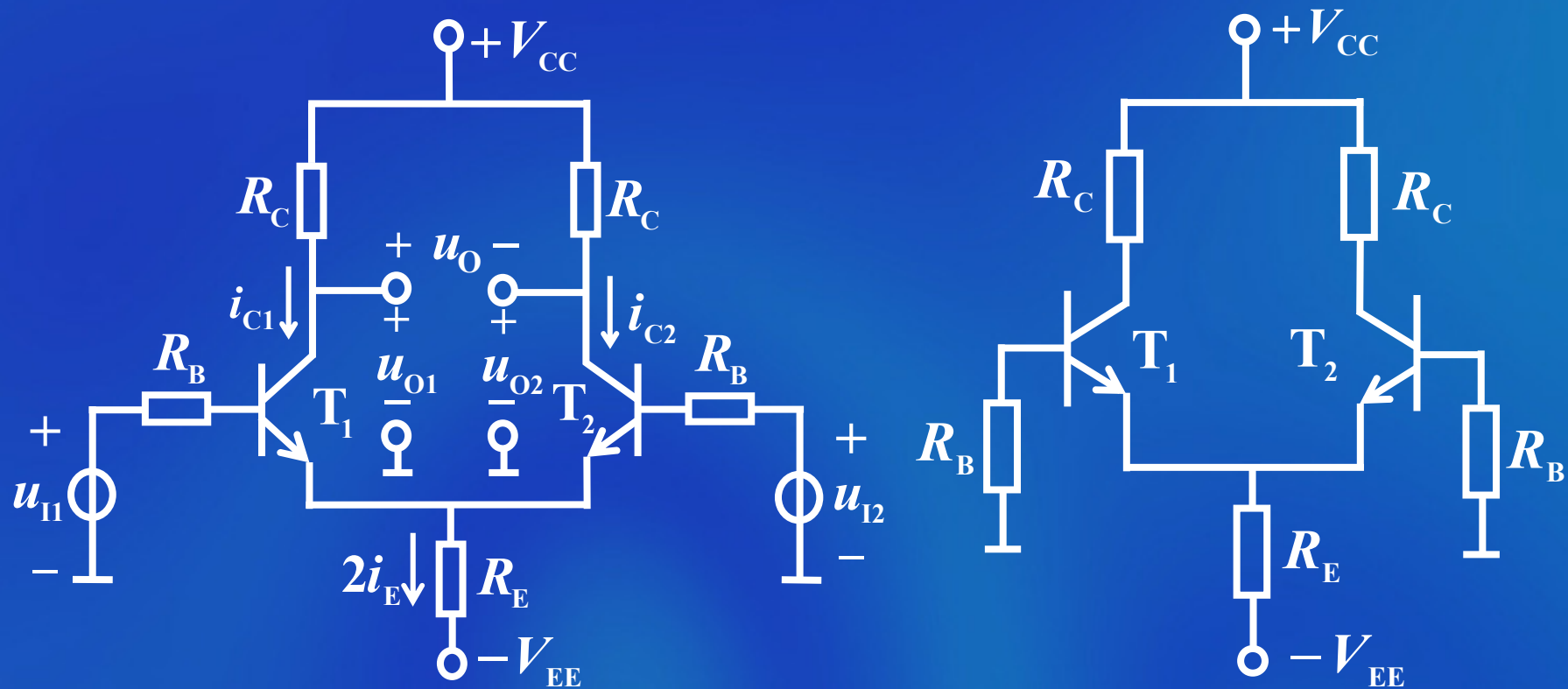
不要这个电阻行不行？

这点电位如何分析？

为什么要接负电源，接地行不行？

2. 静态分析

直流通路



因为电路对称，所以

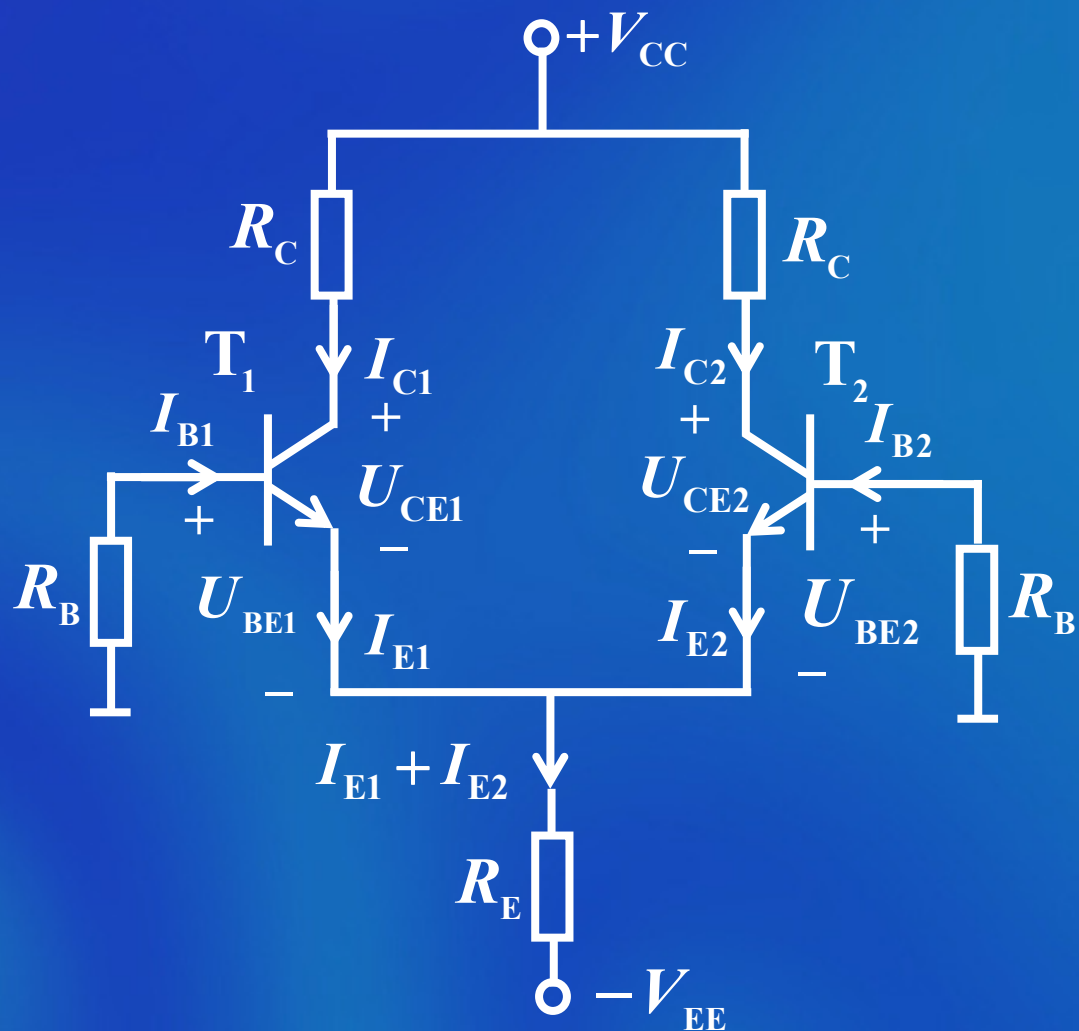
$$U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E$$

$$U_{CE1} = U_{CE2} = U_{CE}$$



列输入回路方程

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

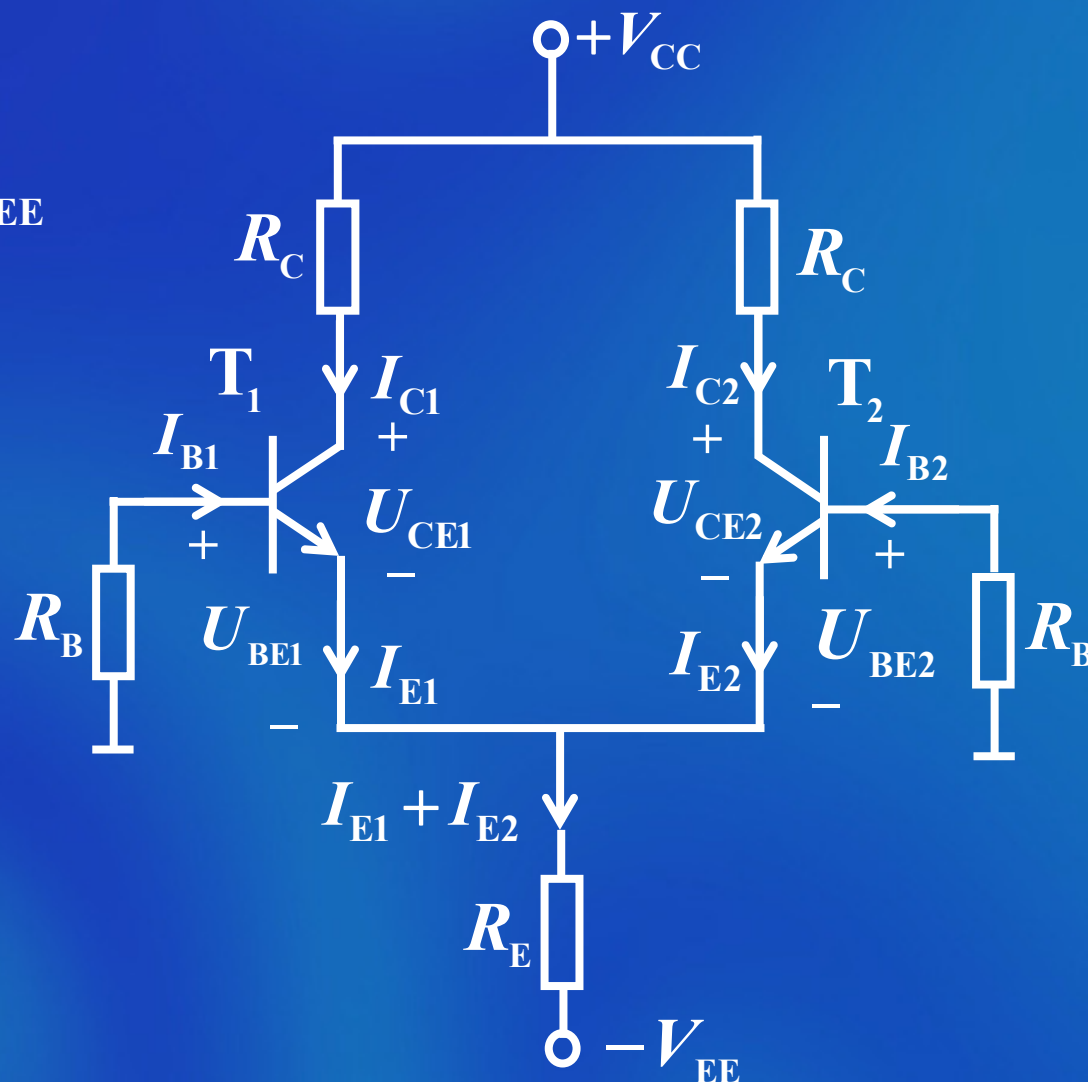
$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B$$

由此可得

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

因 $R_B \ll 2(1 + \bar{\beta}) R_E$

$$I_B \approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2(1 + \bar{\beta}) R_E}$$



$$I_C = \bar{\beta} I_B \approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2R_E}$$

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

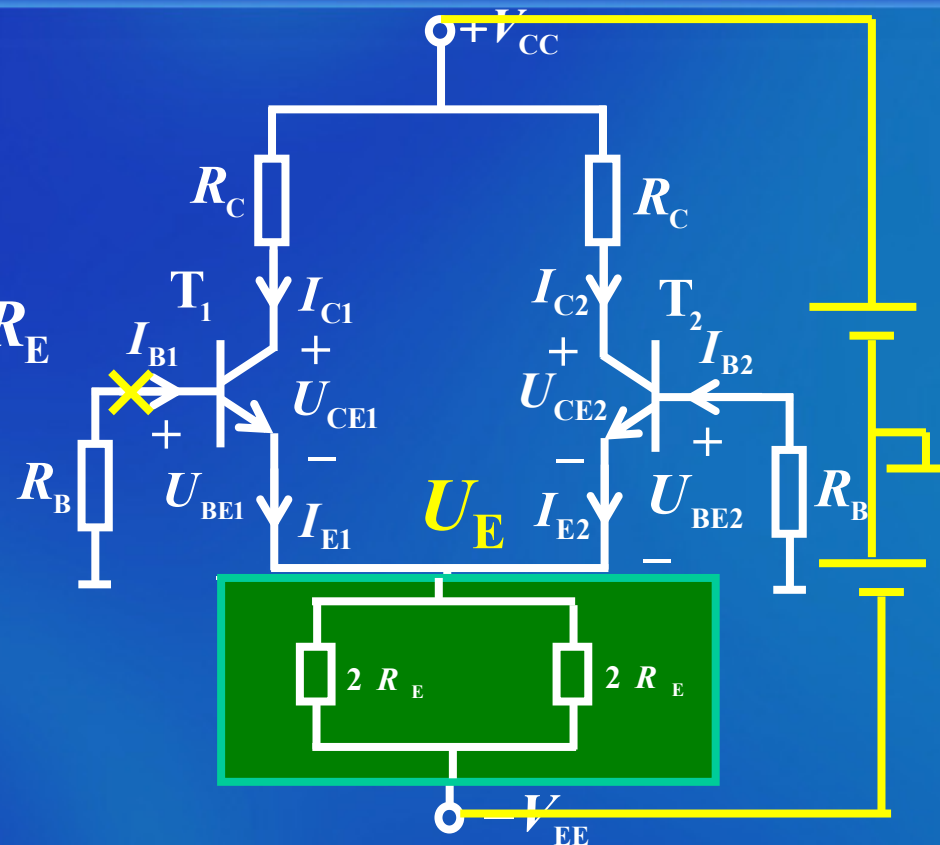
$$\approx V_{CC} + V_{EE} - I_C (R_C + 2R_E)$$

估算法

$$(1) \quad I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2R_E}$$

$$(2) \quad U_{CEQ} \approx V_{CC} + V_{EE} - I_C (R_C + 2R_E)$$

或 $U_{CQ} = V_{CC} - I_C R_C$



3. 动态分析

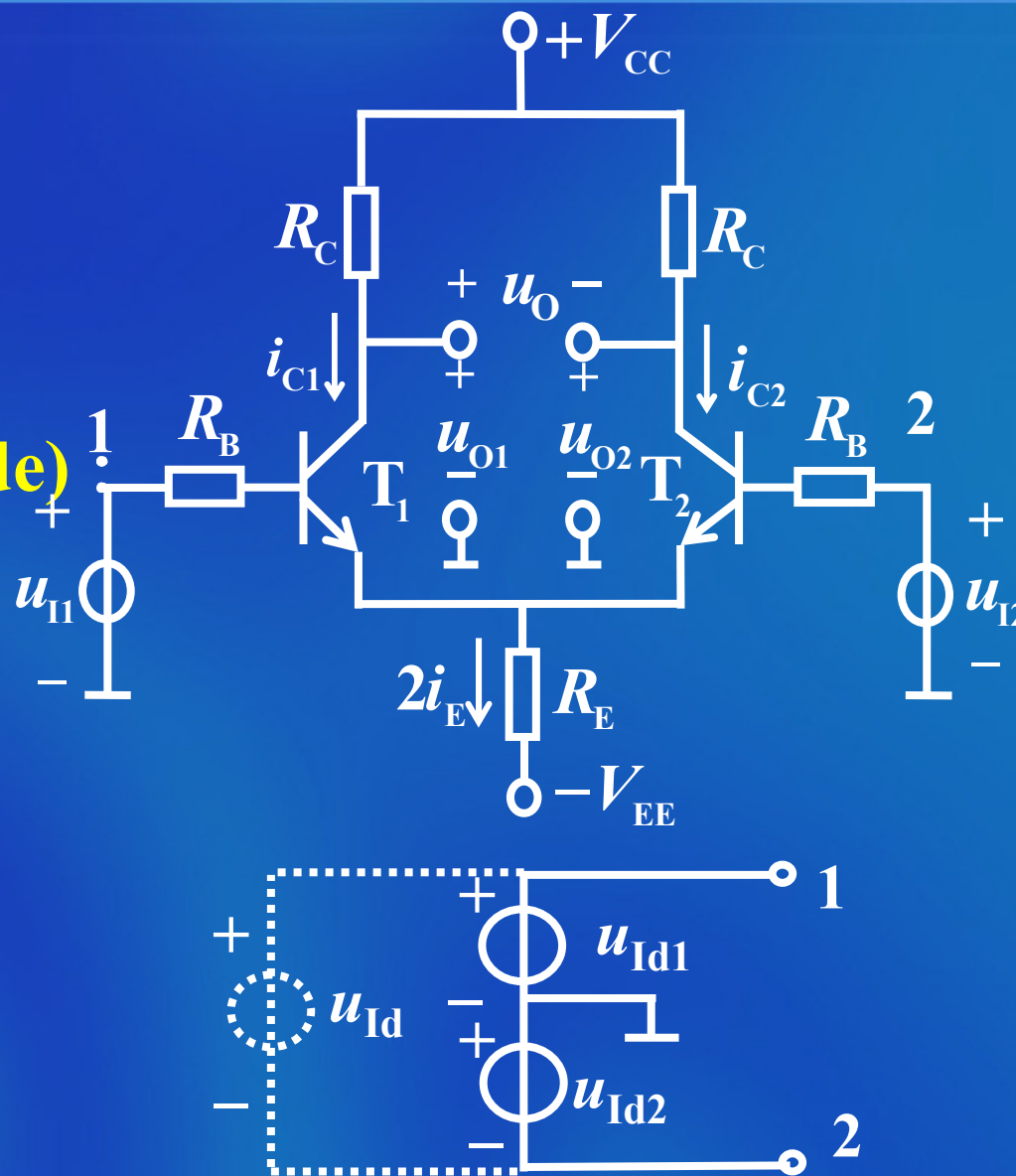
(1) 小信号差模特性

差模信号(differential mode)

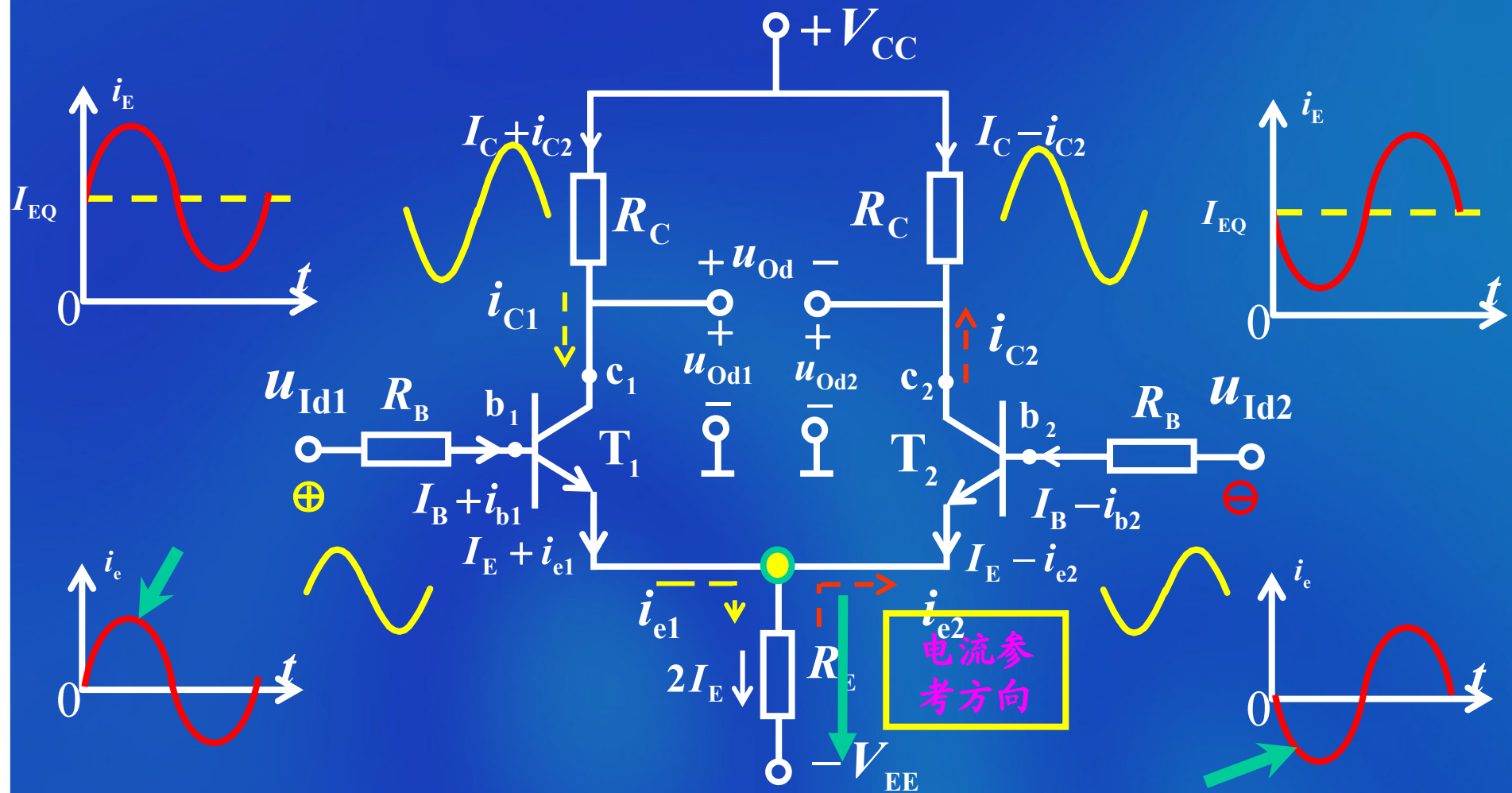
当 $u_{Id1} = -u_{Id2}$ 时的输入信号

记为

$$\begin{aligned} u_{Id} &= u_{Id1} - u_{Id2} \\ &= 2u_{Id1} \\ &= -2u_{Id2} \end{aligned}$$



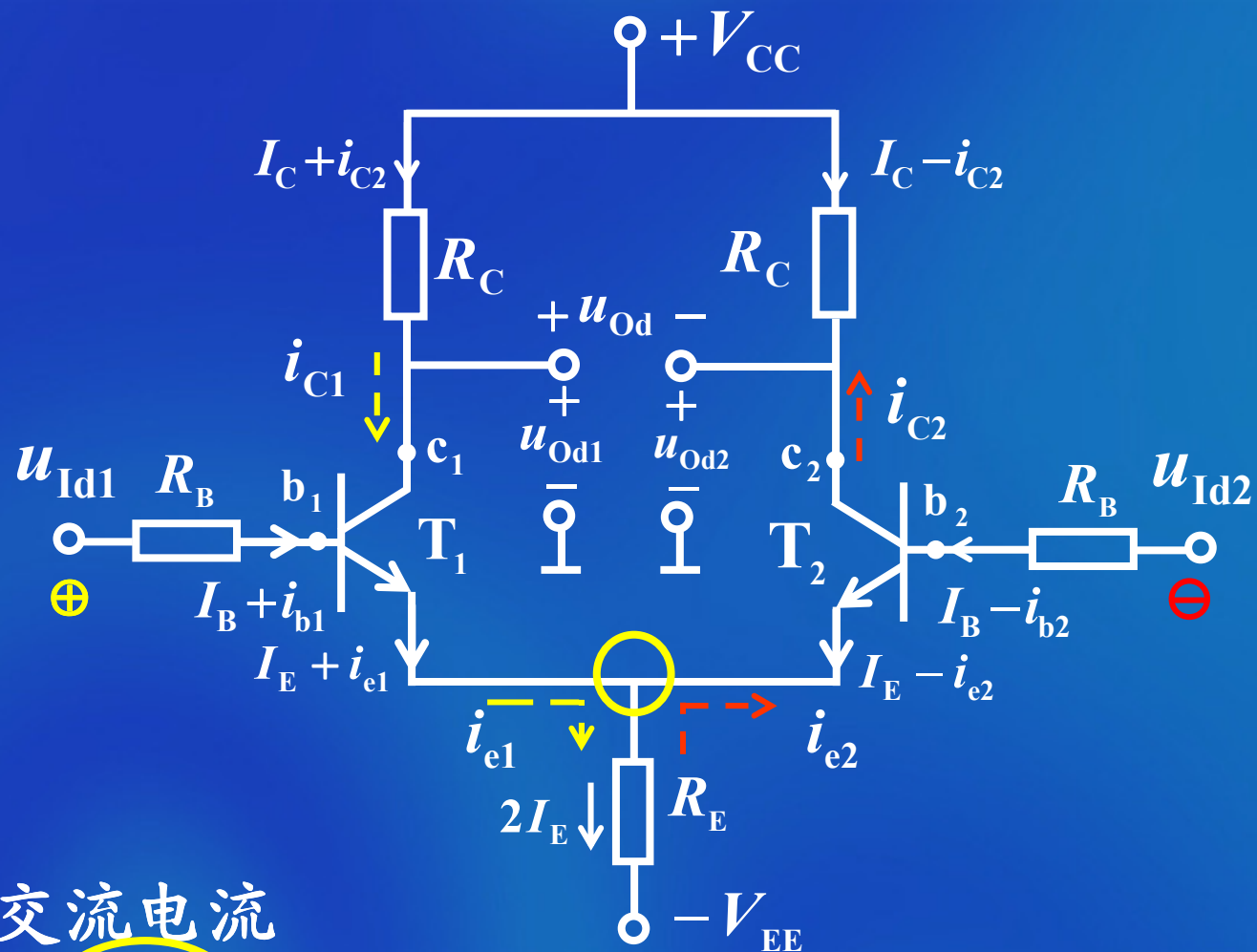
差模输入时放大电路中的电流



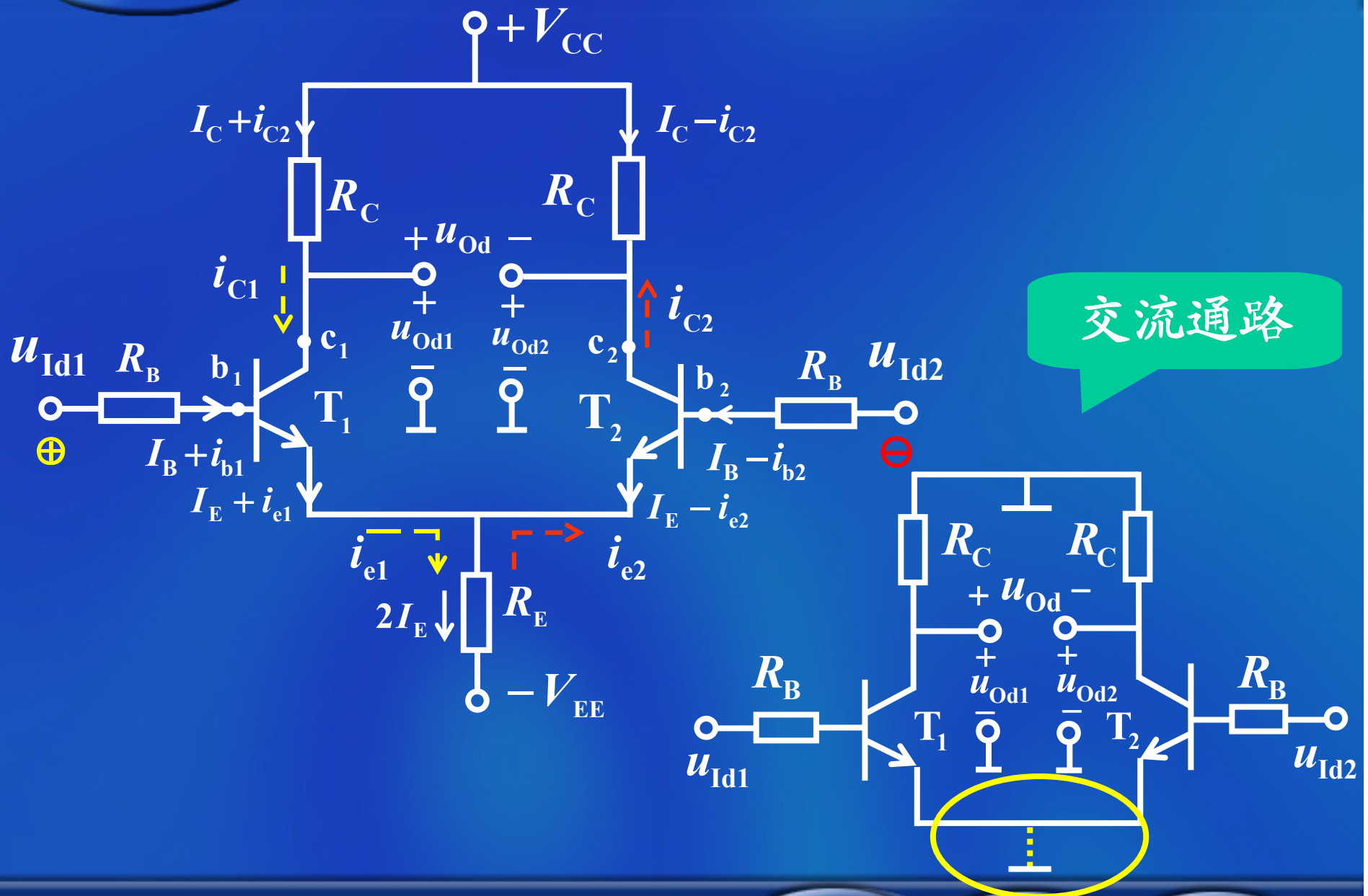
由于

$$u_{Id1} = -u_{Id2}$$

$$i_{e1} = -i_{e2}$$

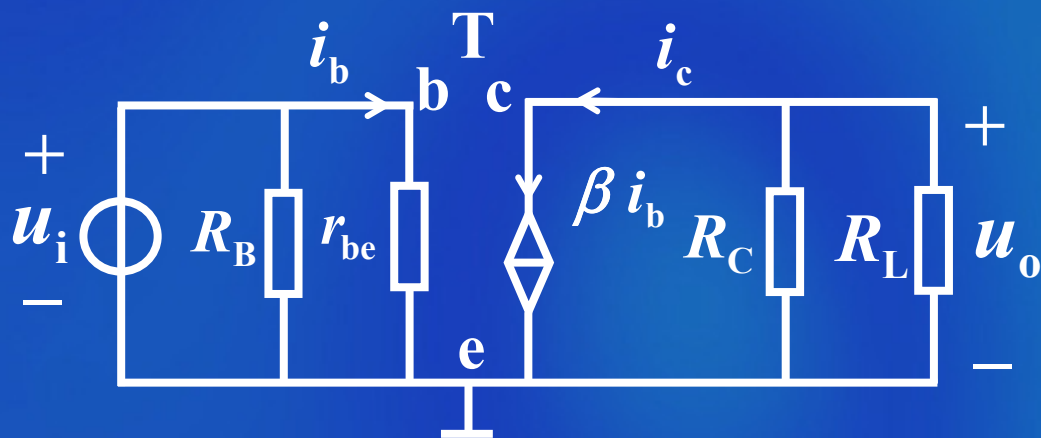
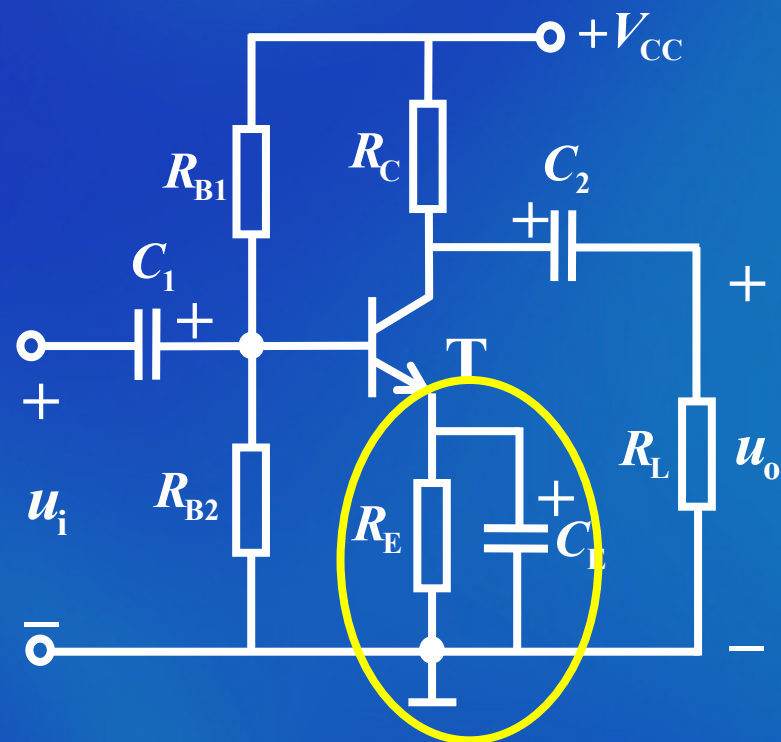


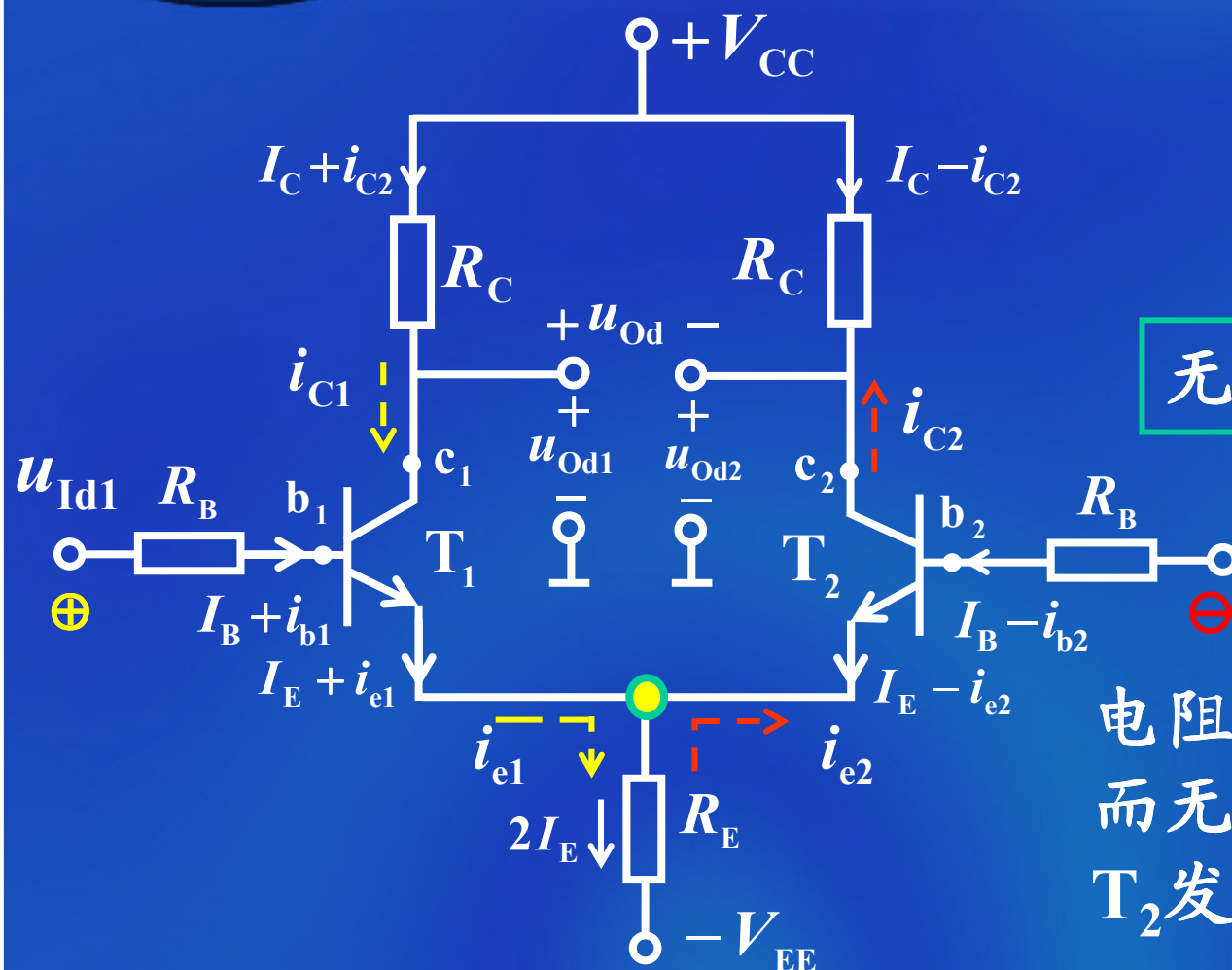
电阻 R_E 上无交流电流
 T_1 、 T_2 发射极虚地。



交流信号对地短路，使 R_E 只对直流信号有反馈，而对交流信号无反馈。

电容 C_E 称为旁路电容。





无旁路电容 C_E

电阻 R_E 上有直流电流
而无交流电流, T_1 、 T_2 发射极虚地。

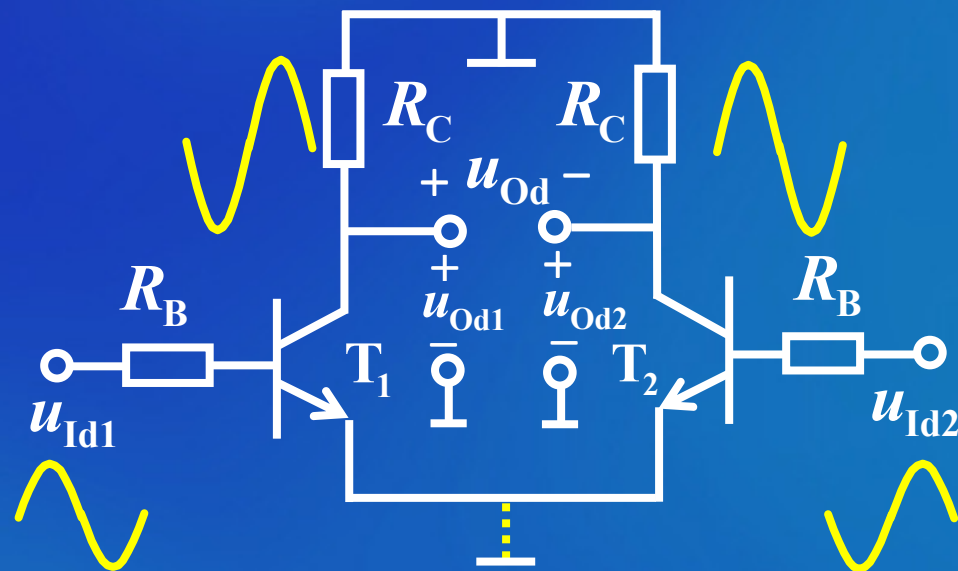
效果一致!

由于

$$\Delta u_{Id1} = -\Delta u_{Id2}$$

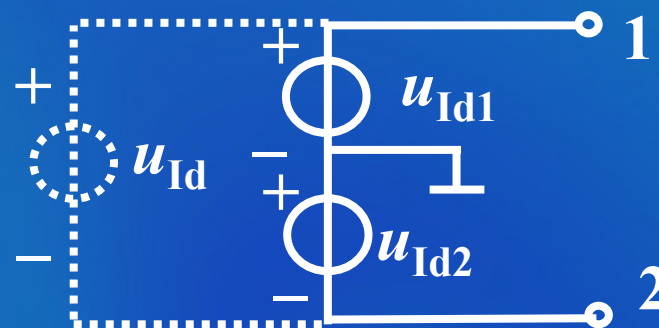
故

$$\Delta u_{Od1} = -\Delta u_{Od2}$$



$$\Delta u_{Id} = \Delta u_{Id1} - \Delta u_{Id2} = 2\Delta u_{Id1}$$

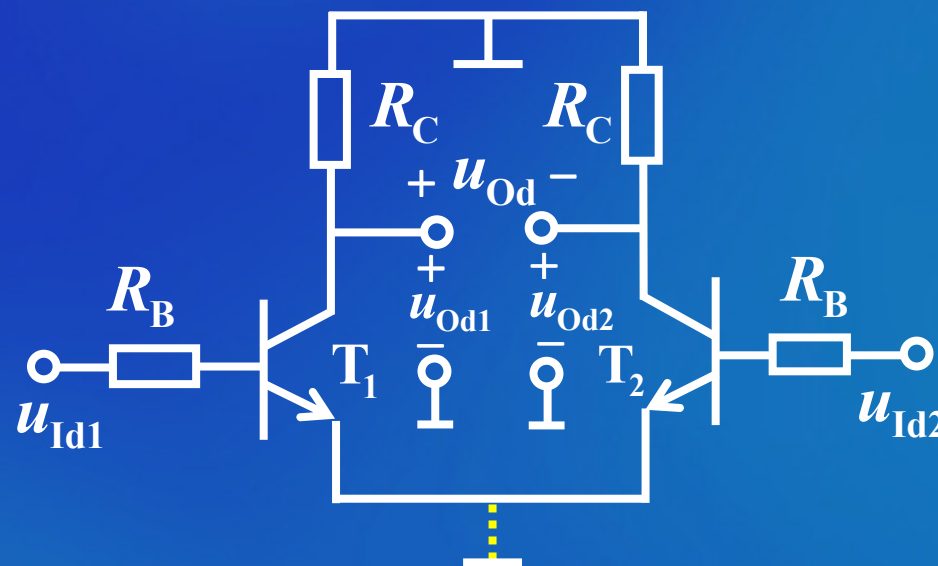
$$\Delta u_{Od} = \Delta u_{Od1} - \Delta u_{Od2} = 2\Delta u_{Od1}$$



1) 差模电压放大倍数

a. 双端输出

$$\begin{aligned} A_{ud} &= \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} \\ &= \frac{2\Delta u_{Od1}}{2\Delta u_{Id1}} \\ &= \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id1}} \\ &= A_{ud1} \end{aligned}$$



A_{ud} 与单级共射极电路电压放大倍数相同。可见，差分放大电路是用“数量换质量”。

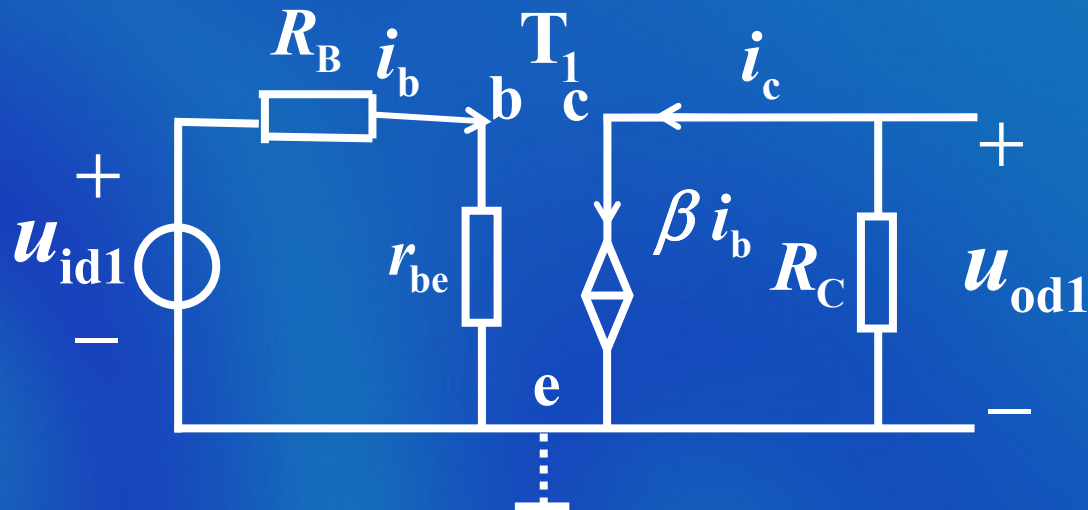
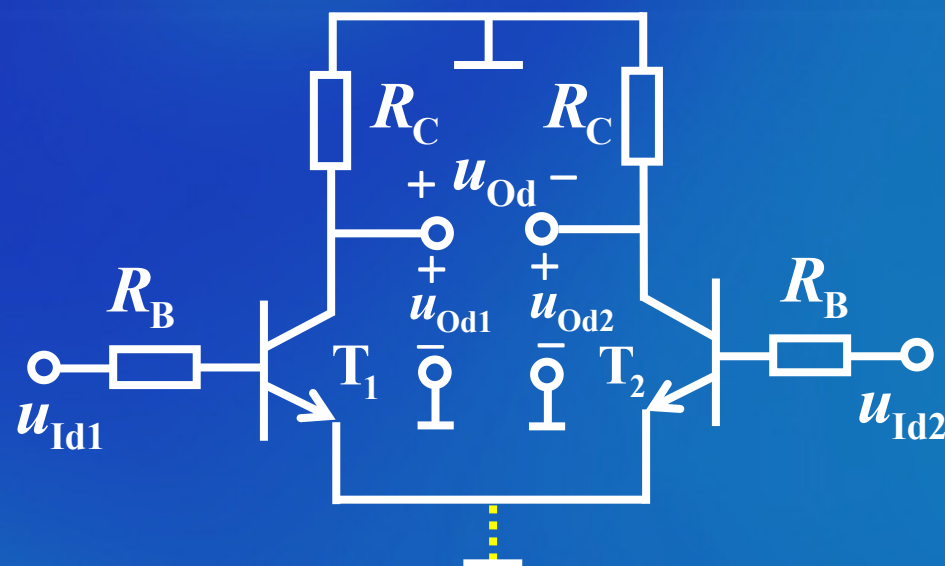
$$A_{ud1} = \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id1}}$$

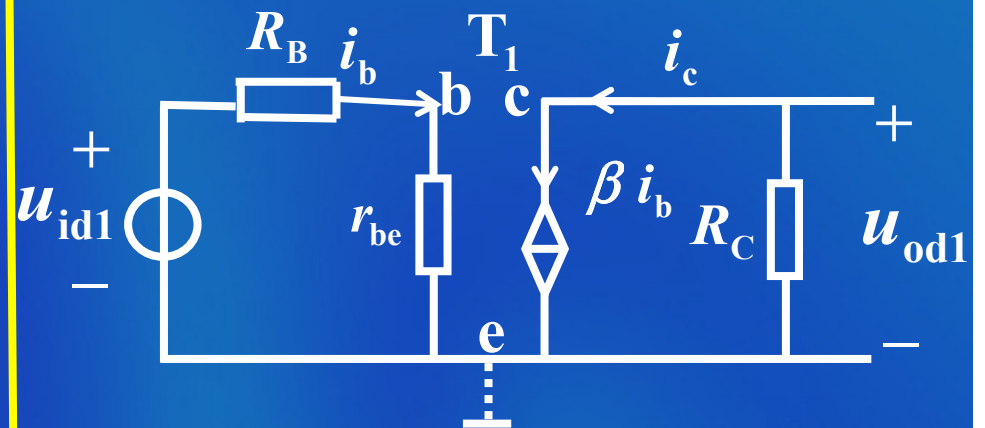
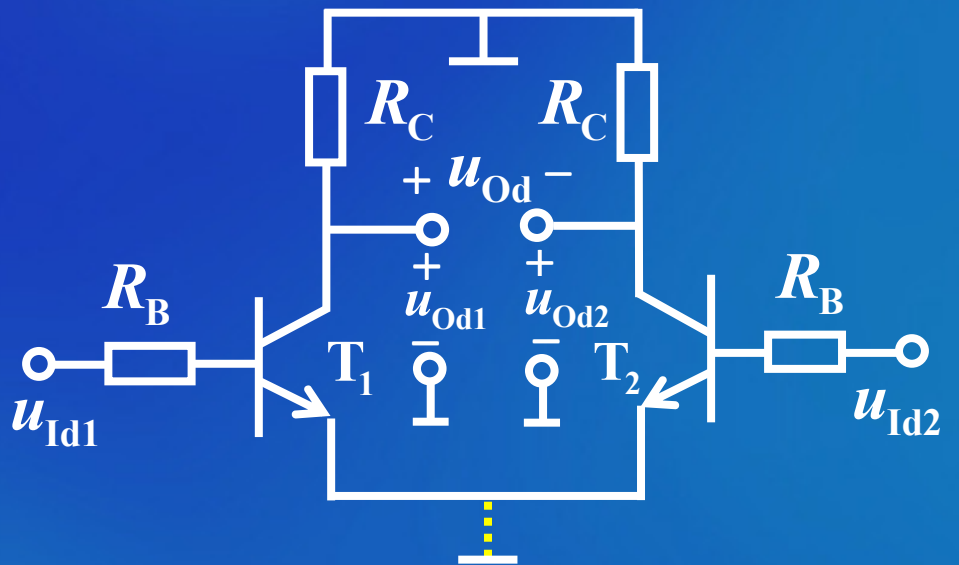
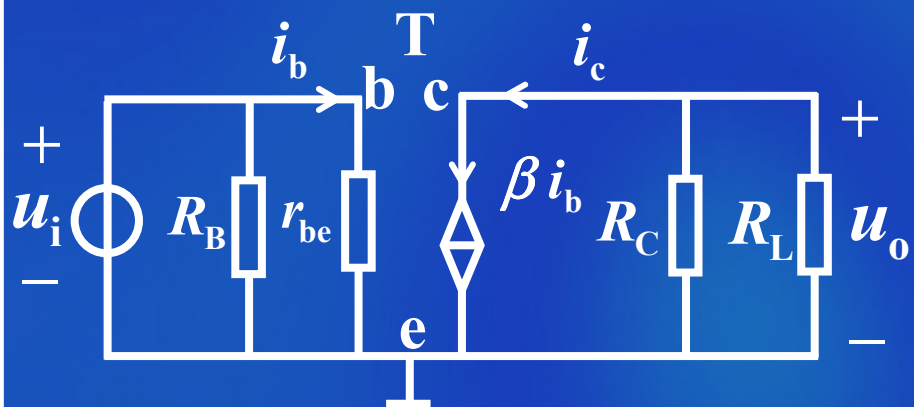
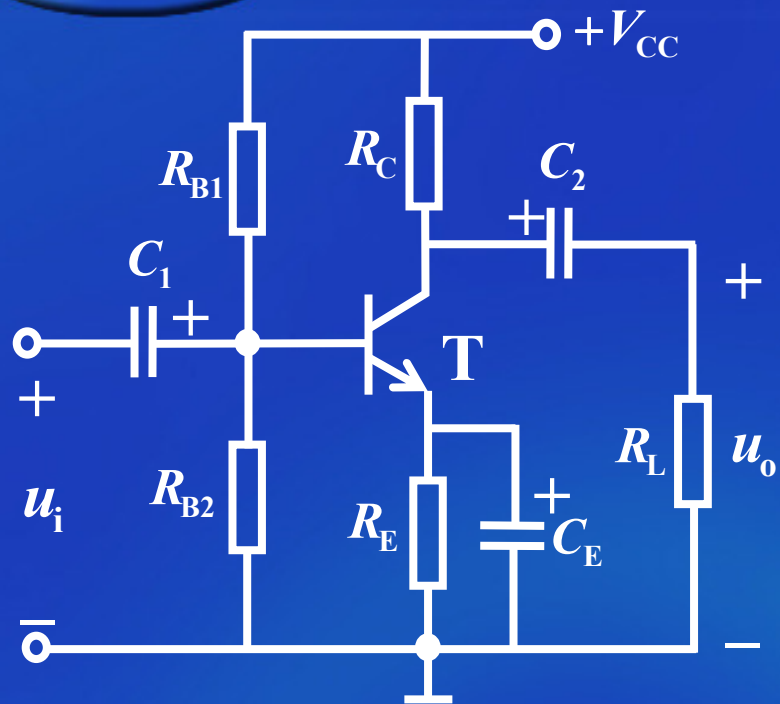
$$\Delta u_{Od1} = -\beta I_b R_C$$

$$\Delta u_{O11} = I_b (R_B + r_{be})$$

$$A_{ud1} = \frac{-\beta I_b R_C}{I_b (R_B + r_{be})}$$

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





b. 单端输出

(a) 输出 u_{O1}

单出

$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id}}$$

双入

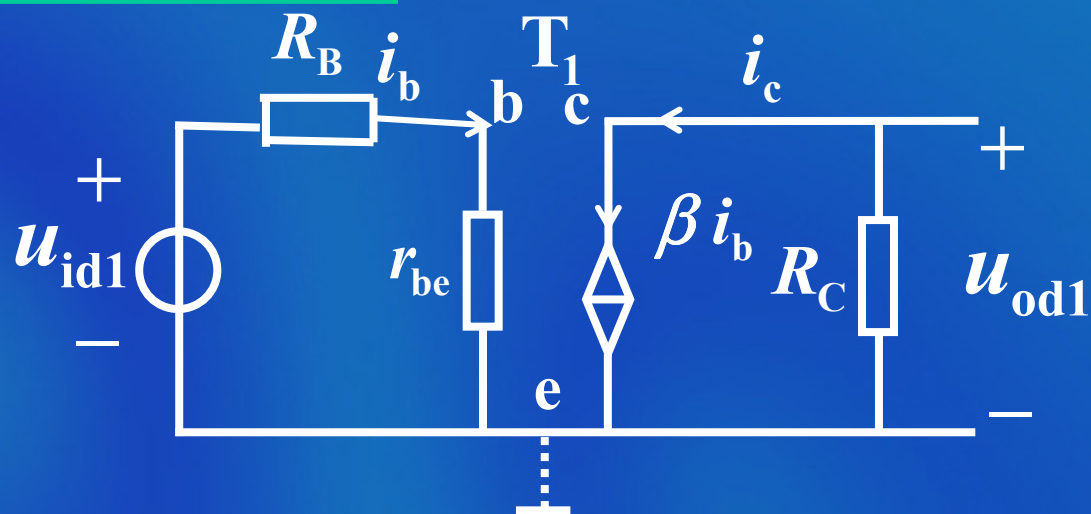
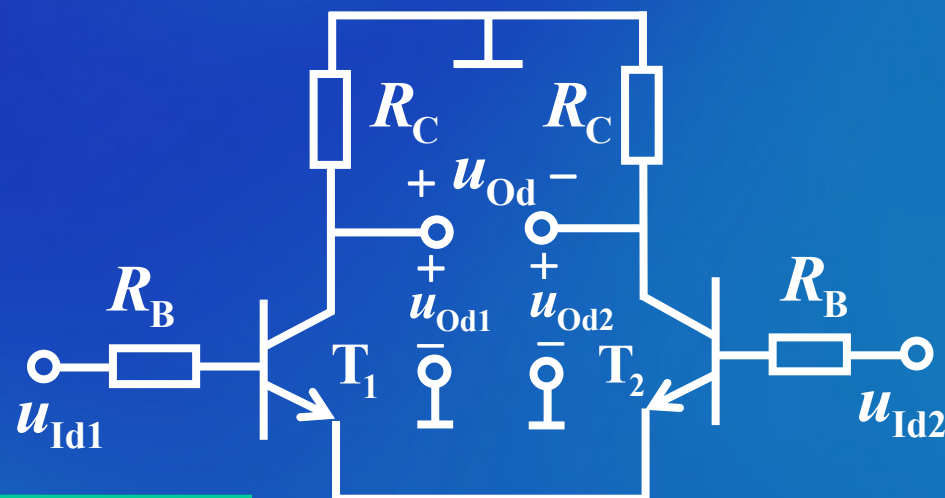
$$= \frac{\Delta u_{Od1}}{2\Delta u_{Id1}}$$

输出与输入反相

$$= \frac{1}{2} \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id1}}$$

$$= \frac{1}{2} A_{ud1}$$

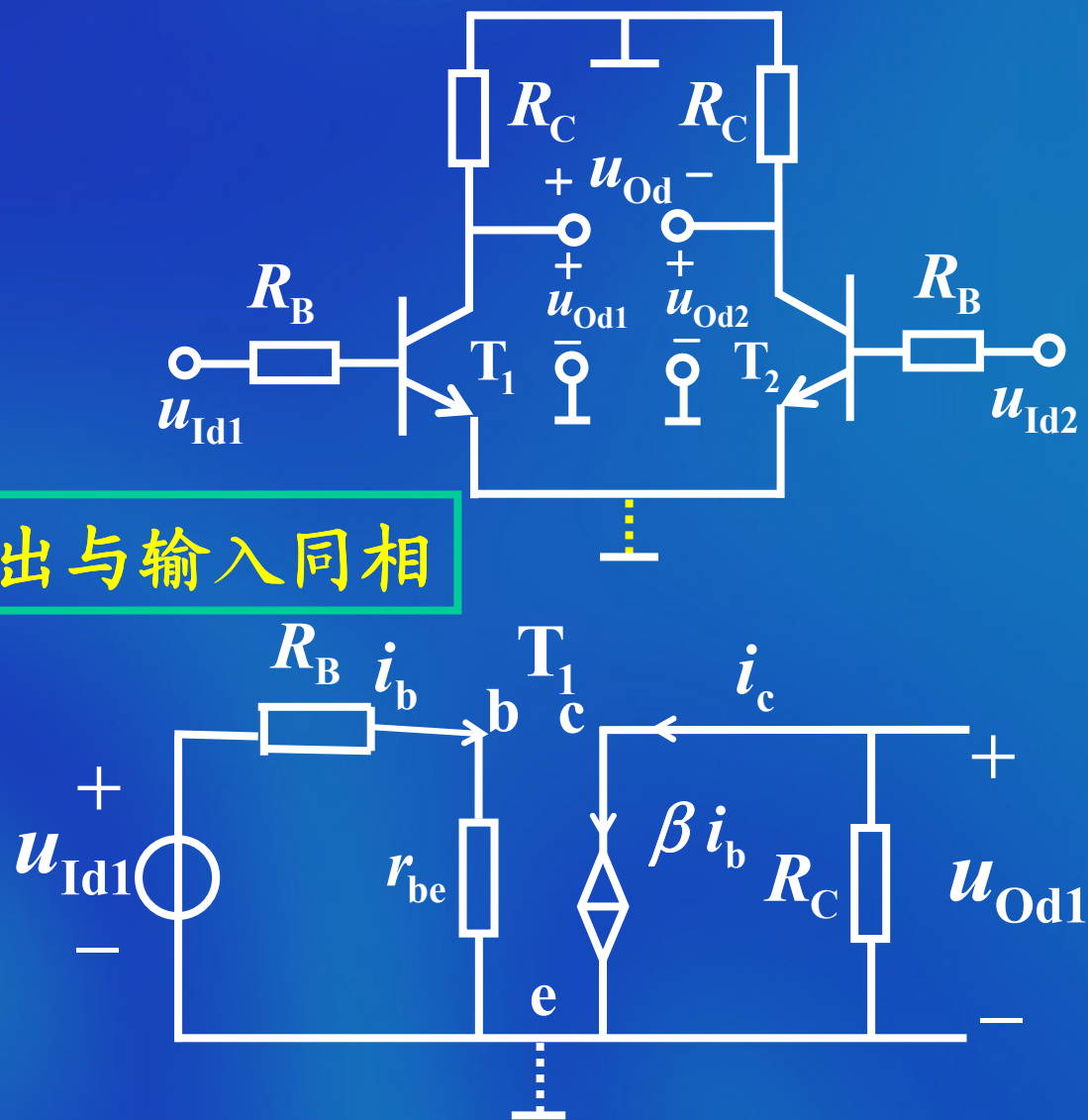
$$= -\frac{\beta}{2} \frac{R_C}{R_B + r_{be}}$$



(b) 输出 u_{O2}

$$\begin{aligned}
 A_{ud} &= \frac{\Delta u_{Od2}}{\Delta u_{Id}} \\
 &= \frac{-\Delta u_{Od1}}{2\Delta u_{Id1}} \\
 &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id1}} \\
 &= -\frac{1}{2} A_{ud1} \\
 &= \frac{\beta}{2} \frac{R_C}{R_B + r_{be}}
 \end{aligned}$$

输出与输入同相



c. $R_L \neq \infty$ 时

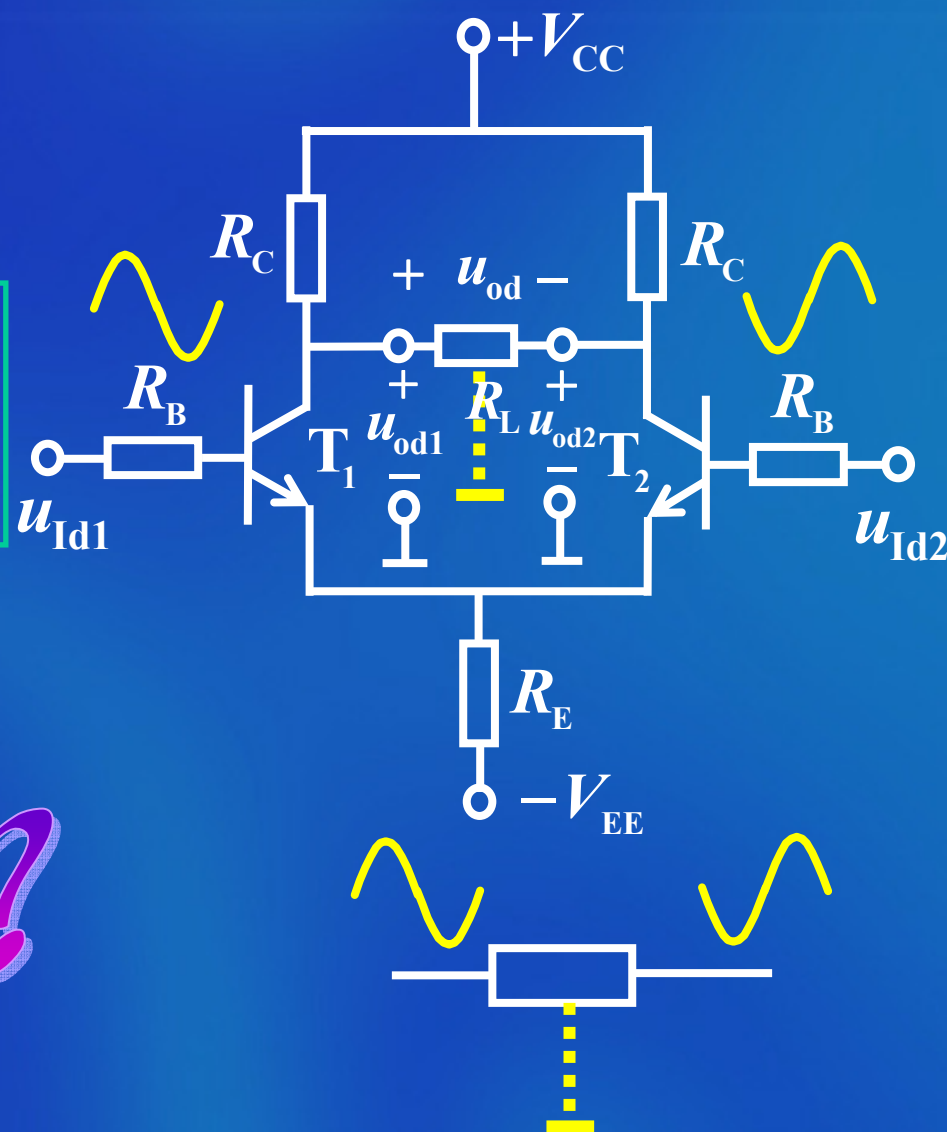
(a) 双端输出

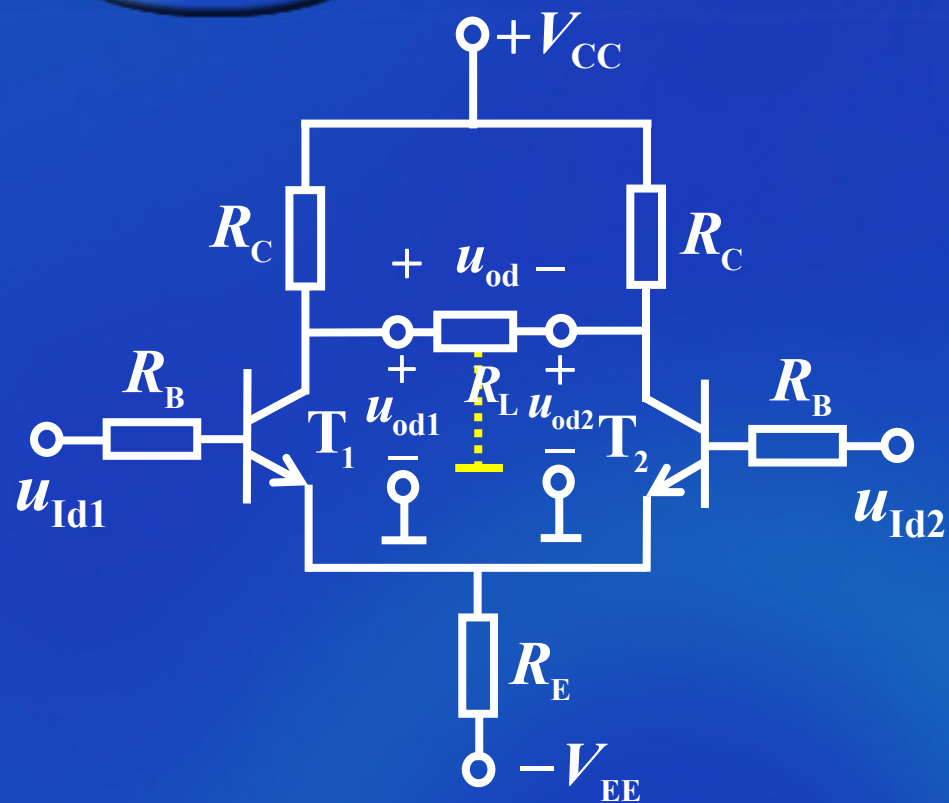
问题： 负载影响电路的静态分析吗？

不影响！

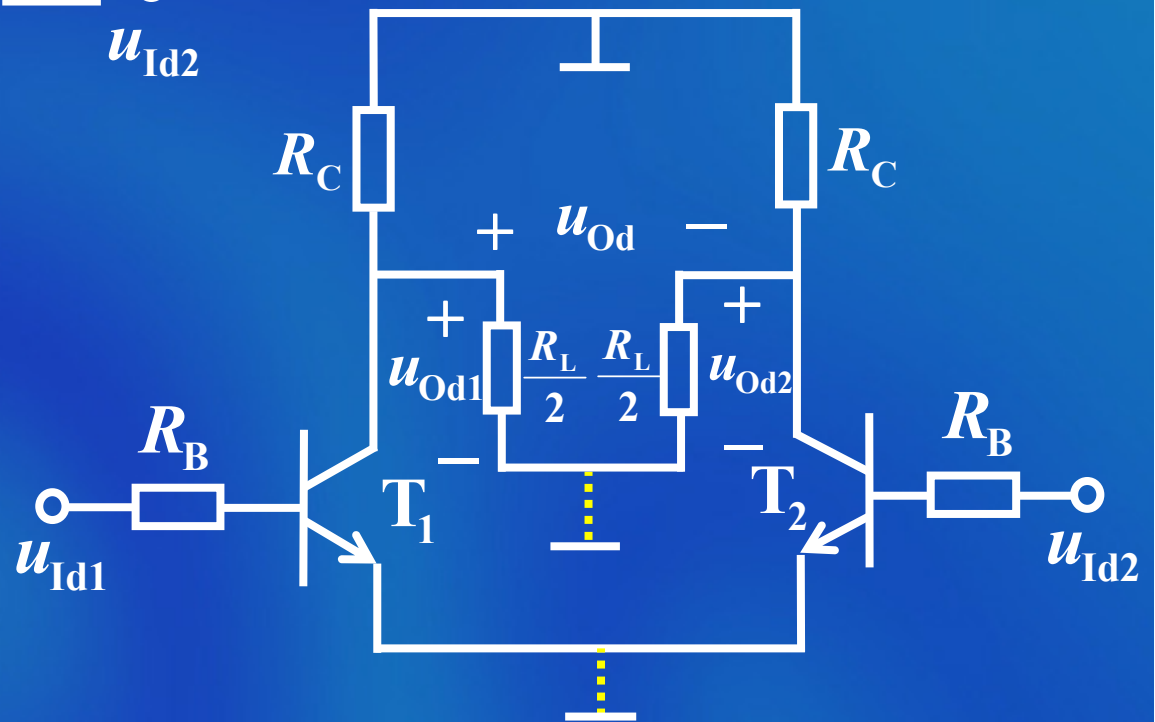
由于 $\Delta u_{Od1} = -\Delta u_{Od2}$

负载电阻 R_L 的中点虚地。





等效电路

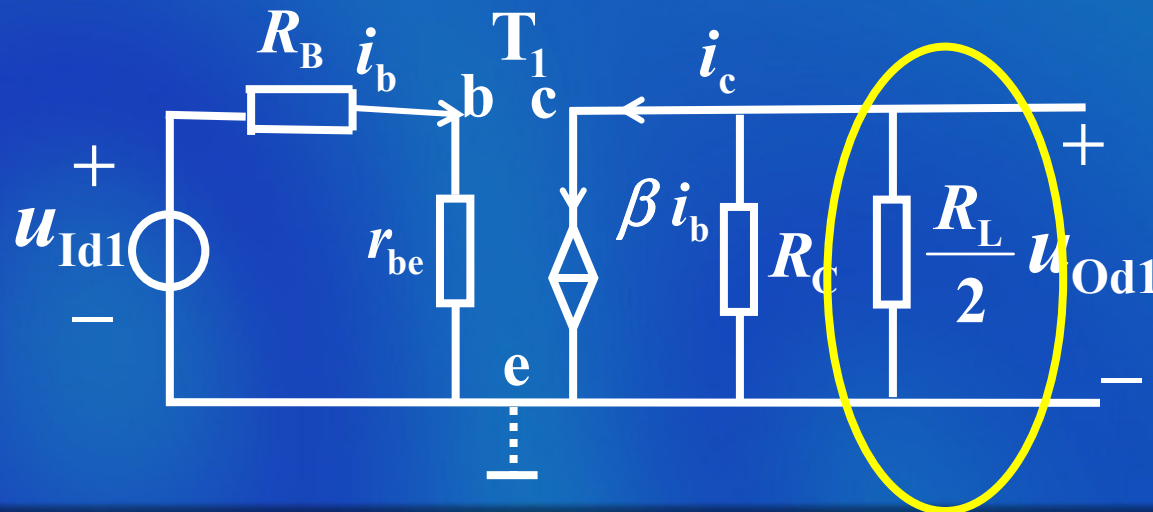
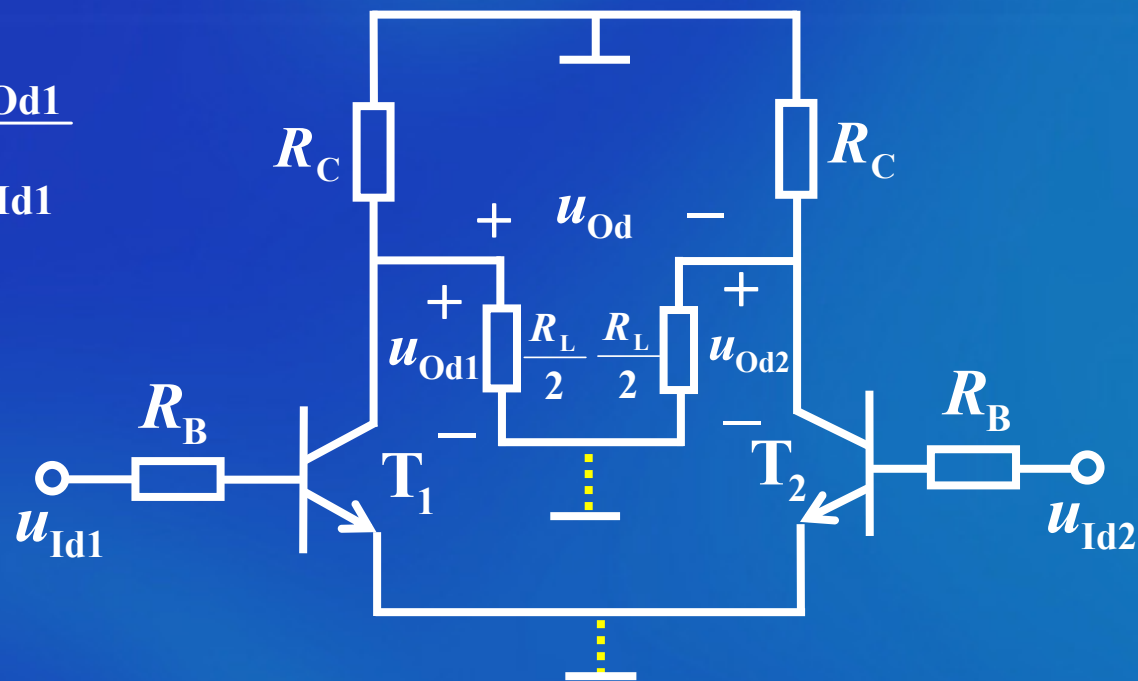


$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{2\Delta u_{Od1}}{2\Delta u_{Id1}}$$

$$= \frac{\Delta u_{Od1}}{\Delta u_{Id1}} = A_{ud1}$$

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

负载要减半!!!



(b) 单端输出

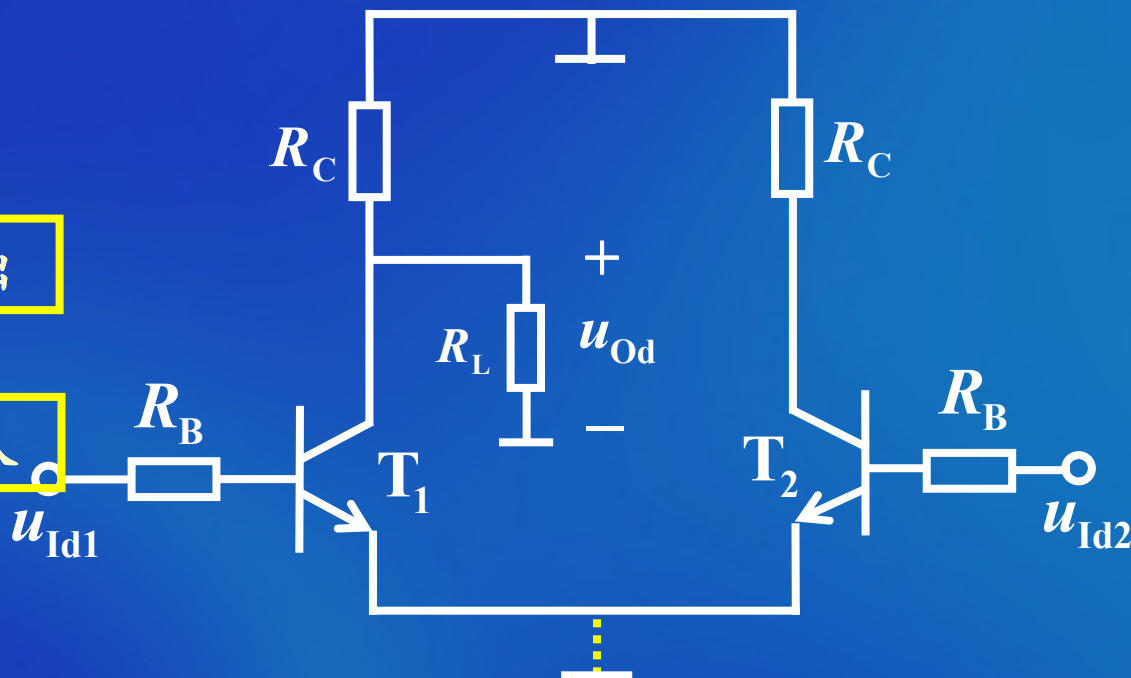
从 T_1 的集电极输出

$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{\Delta u_{Od}}{2\Delta u_{Id1}}$$

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

单出

双入



输出与输入反相

注意：单出负载不用分！

从T₂的集电极输出

$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

单出

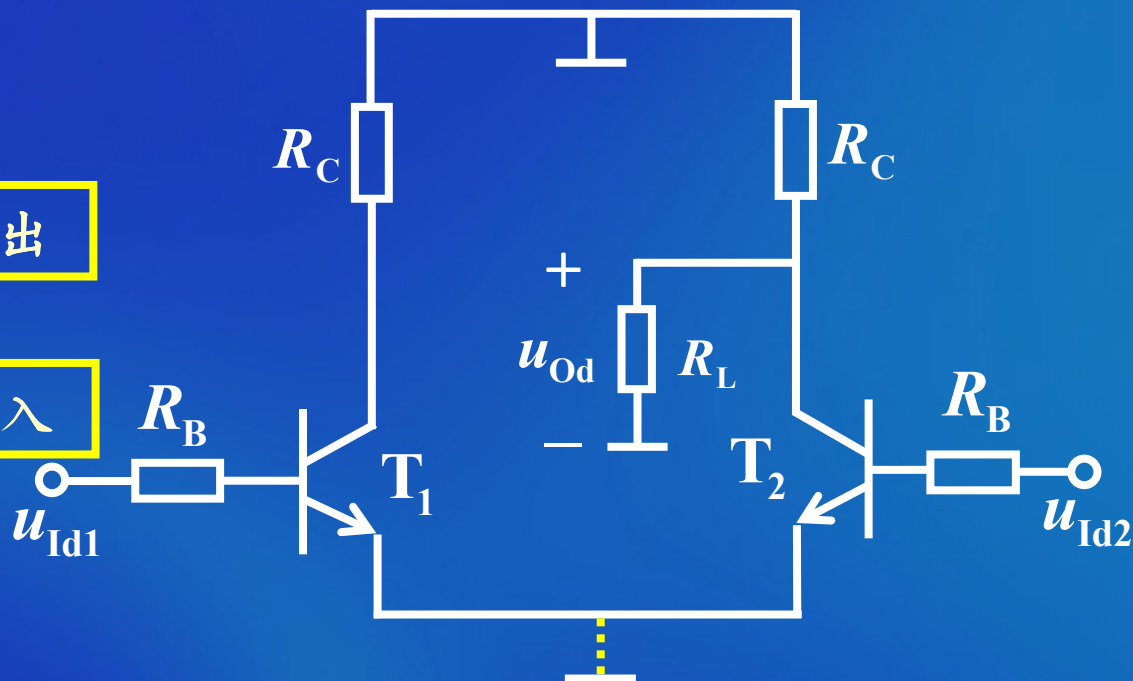
双入

$$= \frac{\Delta u_{Od}}{-2\Delta u_{Id2}}$$

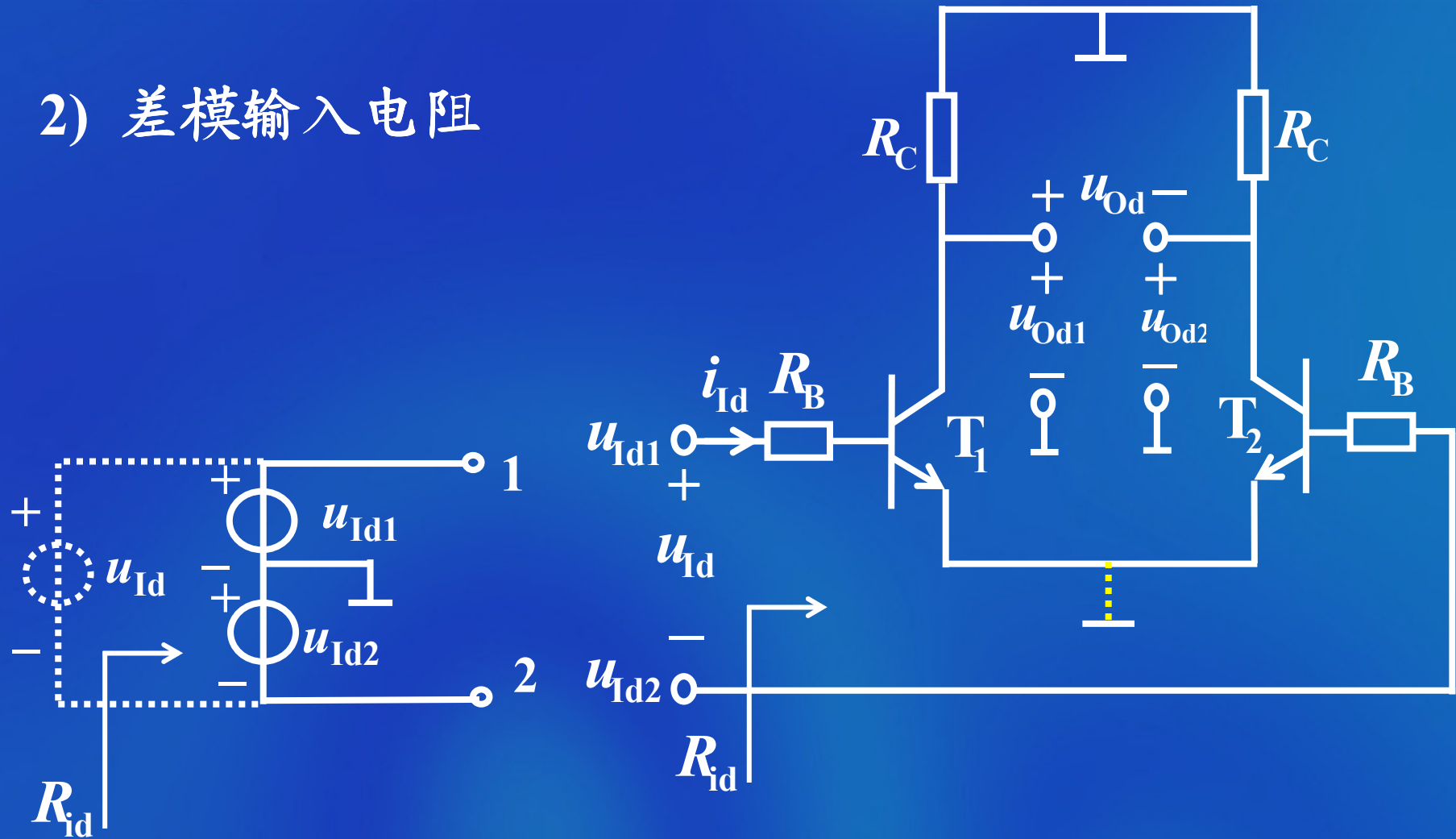
$$= \frac{\beta R_C // R_L}{2 R_B + r_{be}}$$

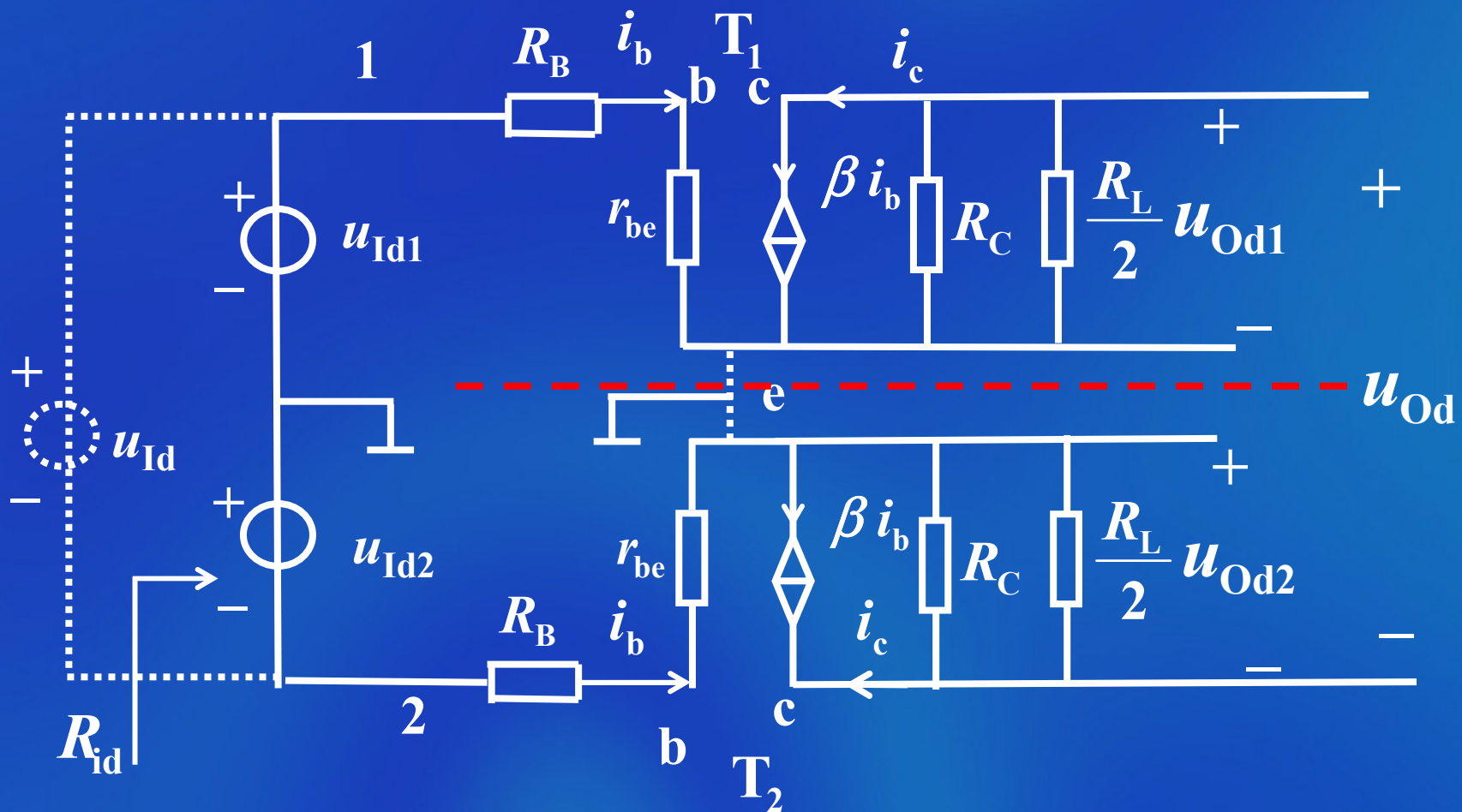
输出与输入同相

注意：单出负载不用分！



2) 差模输入电阻



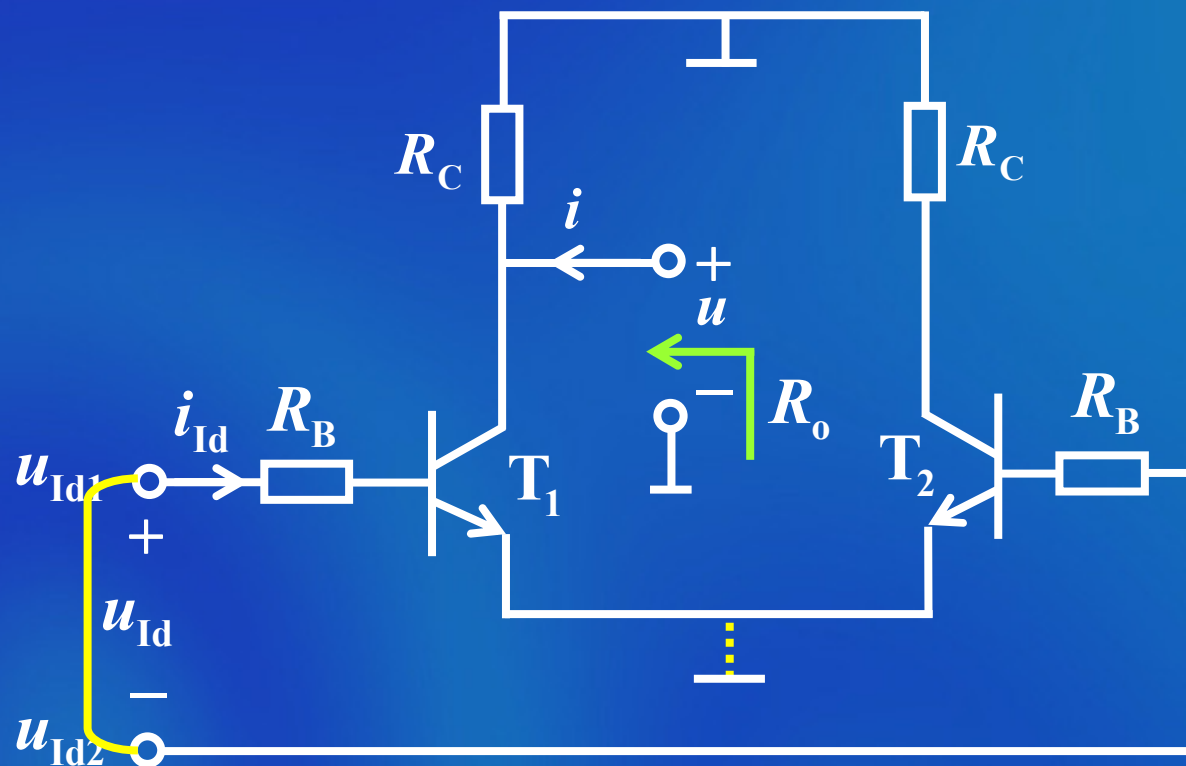


所以
$$R_{id} = \frac{U_{Id}}{I_{Id}} = 2(R_B + r_{be})$$

求 R_o 的等效电路

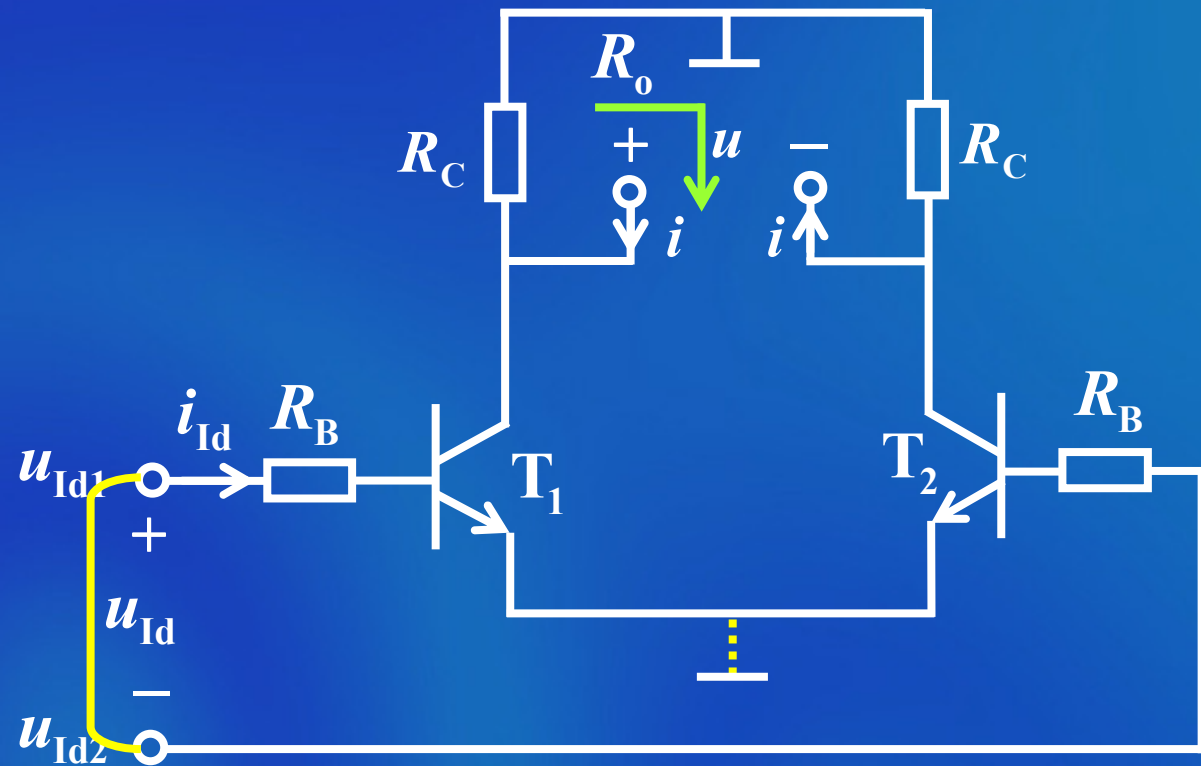
3) 输出电阻 R_o

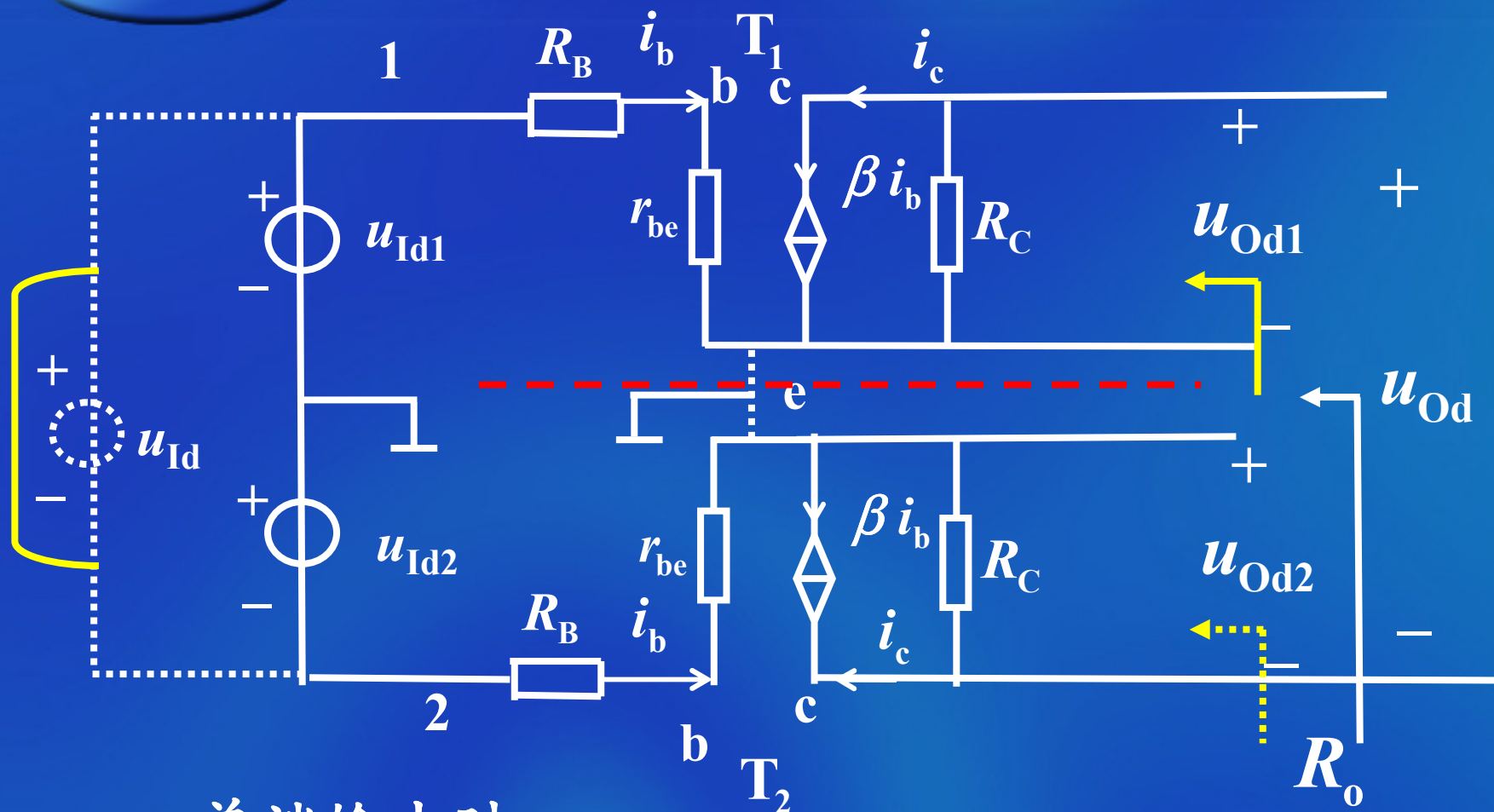
a. 单端输出时



求 R_o 的等效电路

b. 双端输出时





a. 单端输出时

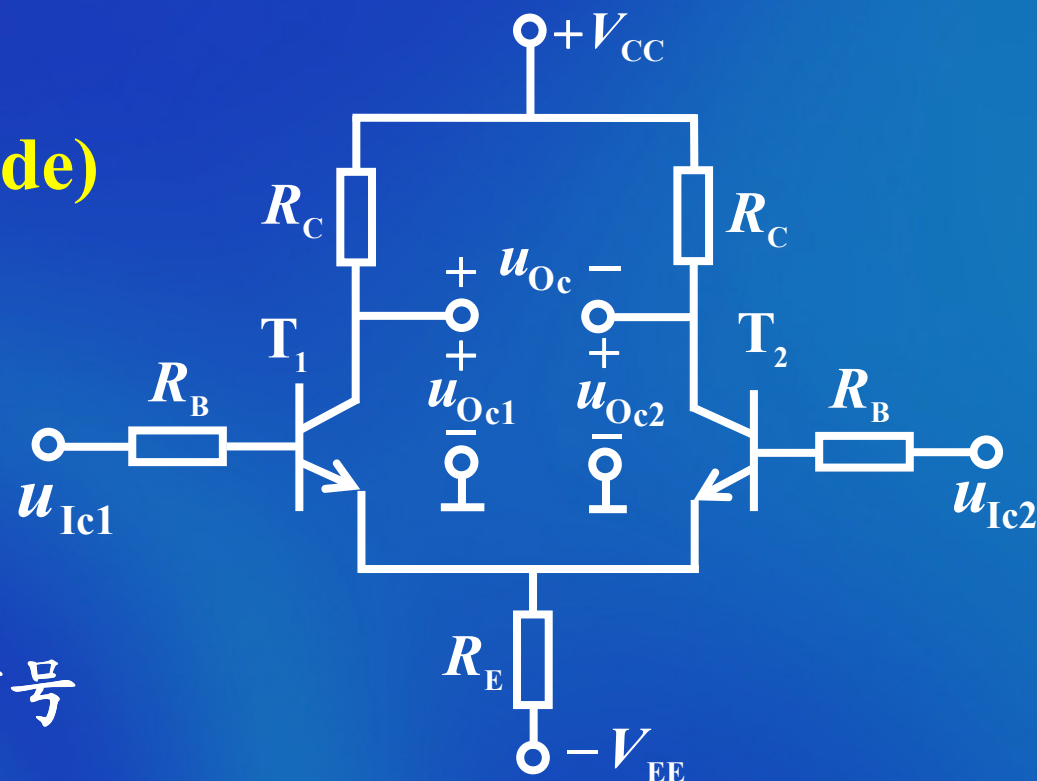
$$R_o = R_C$$

b. 双端输出时

$$R_o = 2R_C$$

(2) 小信号共模特性

共模信号(**common mode**)



当 $u_{Ic1} = u_{Ic2}$ 时的输入信号

记为 $u_{Ic1} = u_{Ic2} = u_{Ic}$

1) 共模电压放大倍数

由 $u_{Ic1} = u_{Ic2} = u_{Ic}$ 知

$$u_{Oc1} = u_{Oc2}$$

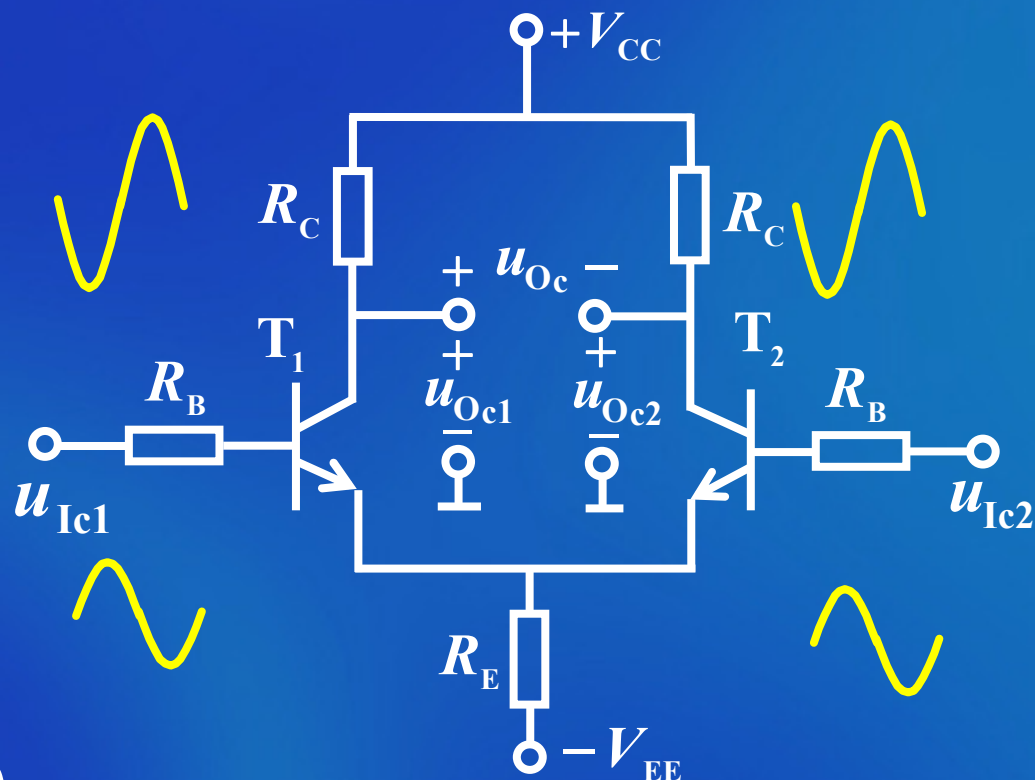
故

a. 双端输出共模电压

$$u_{Oc} = u_{Oc1} - u_{Oc2} = 0$$

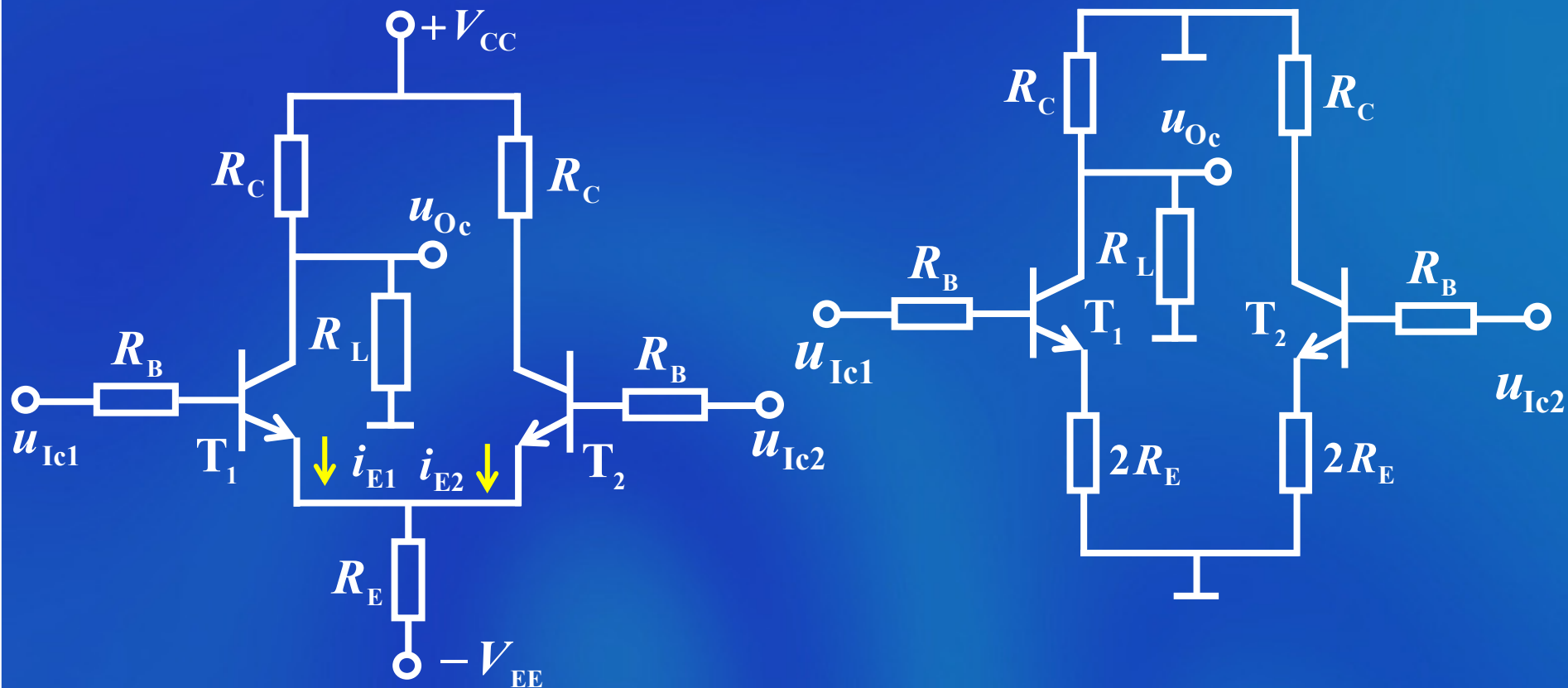
共模电压放大倍数

$$A_{uc} = \frac{u_{Oc}}{u_{Ic}} = 0$$



b. 单端输出

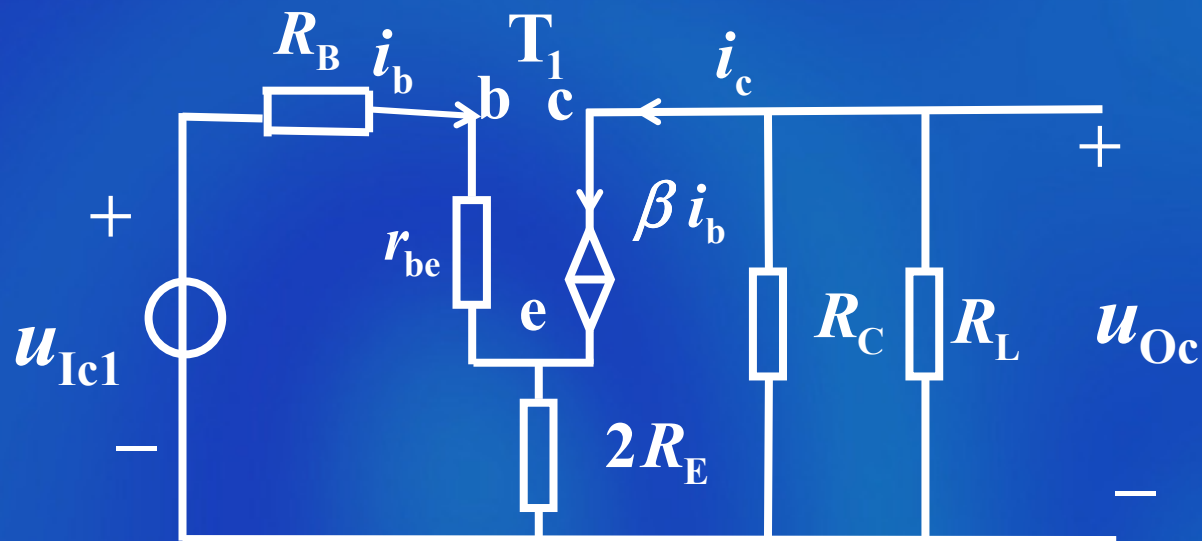
交流通路



共模电压放大倍数

$$A_{uc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic1}} = -\beta \frac{R_C // R_L}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) 2R_E}$$

注意：单出负载不用分！



$$A_{uc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = -\beta \frac{R_C // R_L}{R_B + r_{be} + (1 + \beta)2R_E}$$

实际中 $R_B + r_{be} \ll (1 + \beta)2R_E$

$$A_{uc} \approx -\frac{R_C // R_L}{2R_E}$$

一般电路中 $R_C // R_L < 2R_E$

故

$$|A_{uc}| = \left| \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} \right| < 1$$

差分电路可以抑制
共模信号

由讨论可知:

双端输出时

$$A_{uc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = 0$$

单端输出时

$$|A_{uc}| = \left| \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} \right| \approx \frac{R_C // R_L}{2R_E} < 1$$

差分放大电路对共模信号有抑制作用， R_E 越大，抑制共模信号的能力越强。

2) 共模抑制比 K_{CMR}

CMRR: Common Mode Rejection Ratio

共模抑制比的定义

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

或者

$$K_{\text{CMR}} = 20 \log \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| (\text{dB})$$

a. 双端输出

例: $A_d = -200$

$A_c = 0.1$

$K_{\text{CMRR}} = 20 \lg |(-200)/0.1| = 66 \text{ dB}$

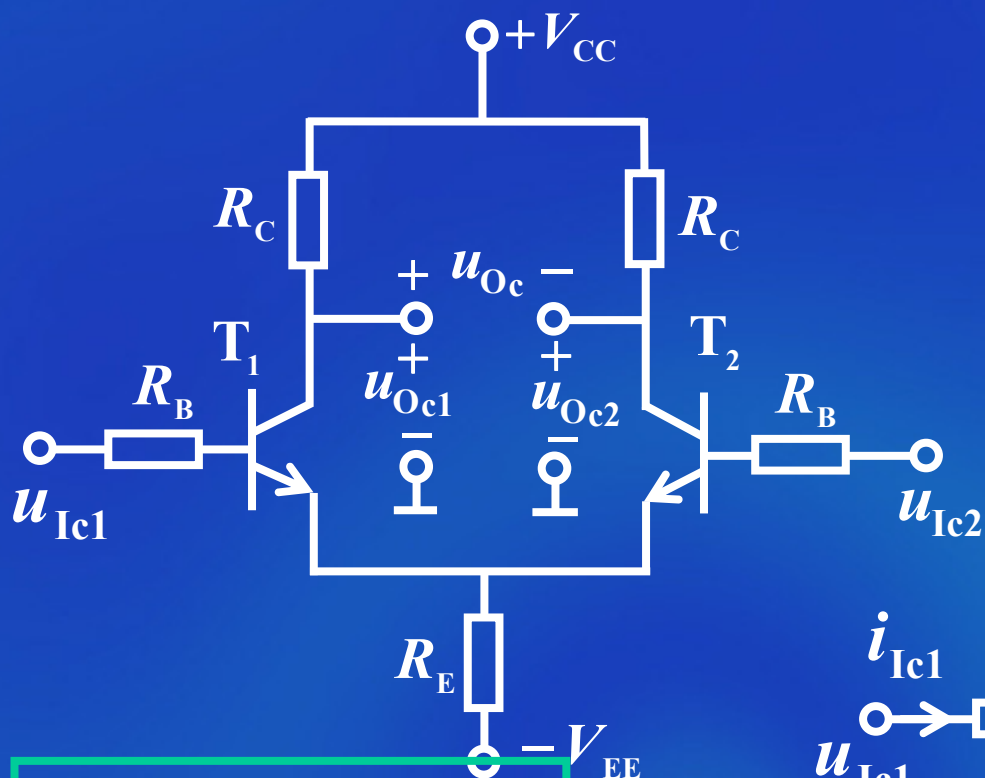
b. 单端输出

$$\text{因} \quad |A_{ud}| = \frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$$

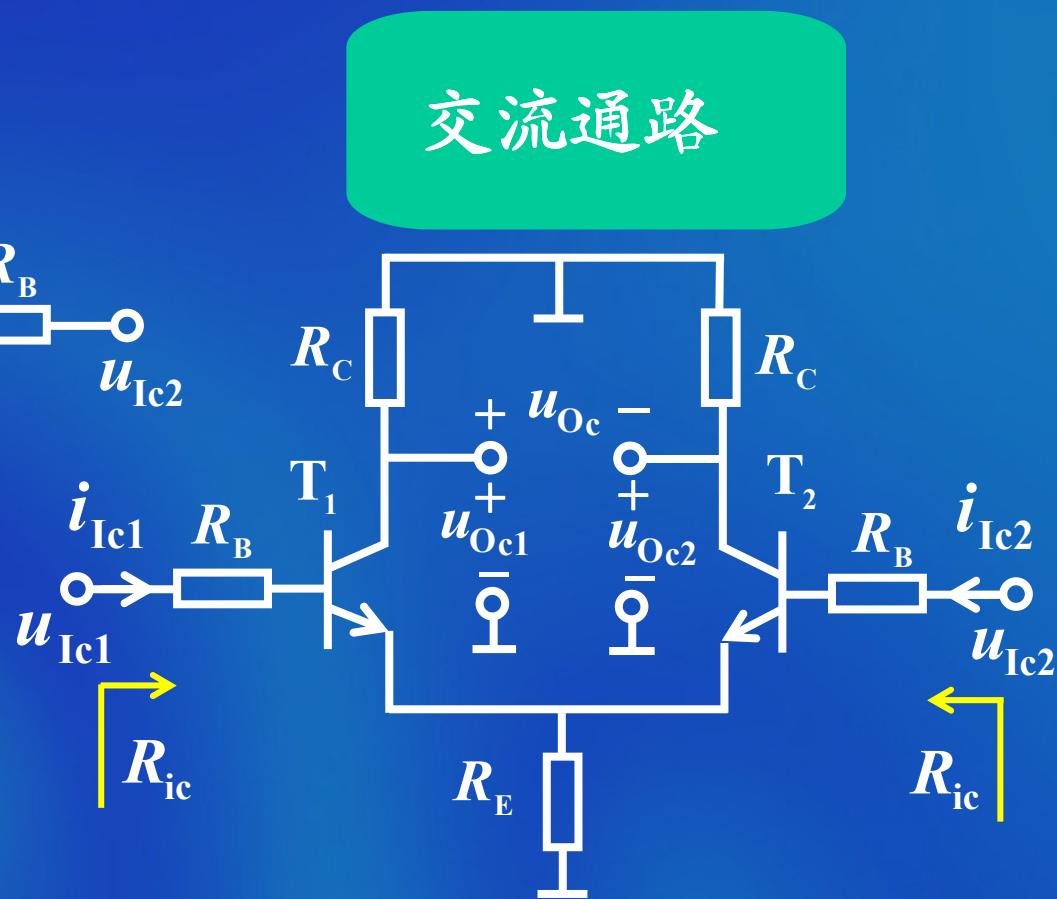
$$|A_{uc}| \approx \frac{R_C // R_L}{2R_E}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \approx \frac{\frac{\beta R_C}{2(R_B + r_{be})}}{\frac{R_C}{2R_E}} = \frac{\beta R_E}{R_B + r_{be}}$$

3) 共模输入电阻



两个端子各自引入的干扰，是两个信号源



因为

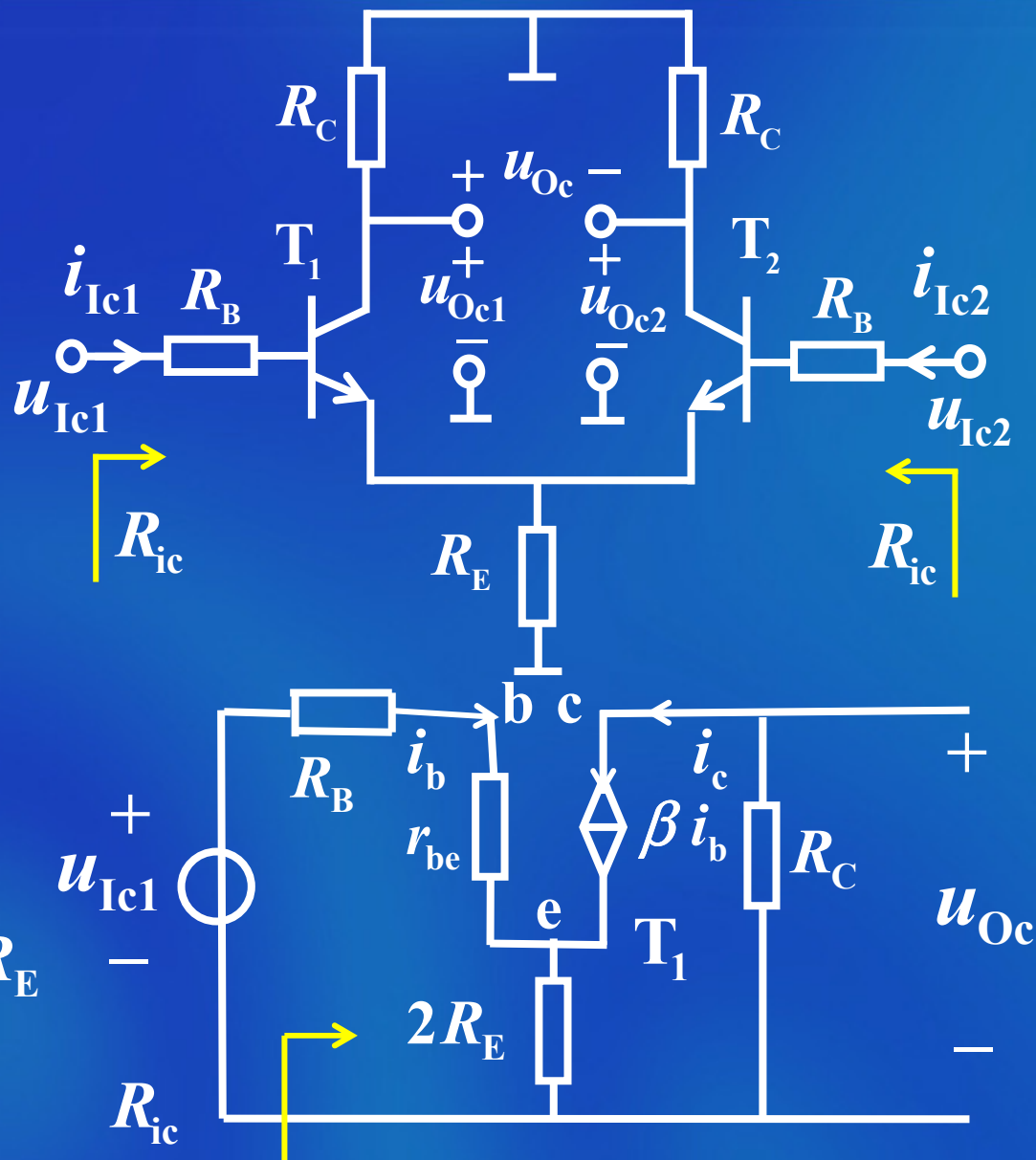
$$u_{Ic1} = u_{Ic2} = u_{Ic}$$

故

$$i_{Ic1} = i_{Ic2} = i_{Ic}$$

$$R_{ic} = \frac{U_{ic}}{I_{ic}}$$

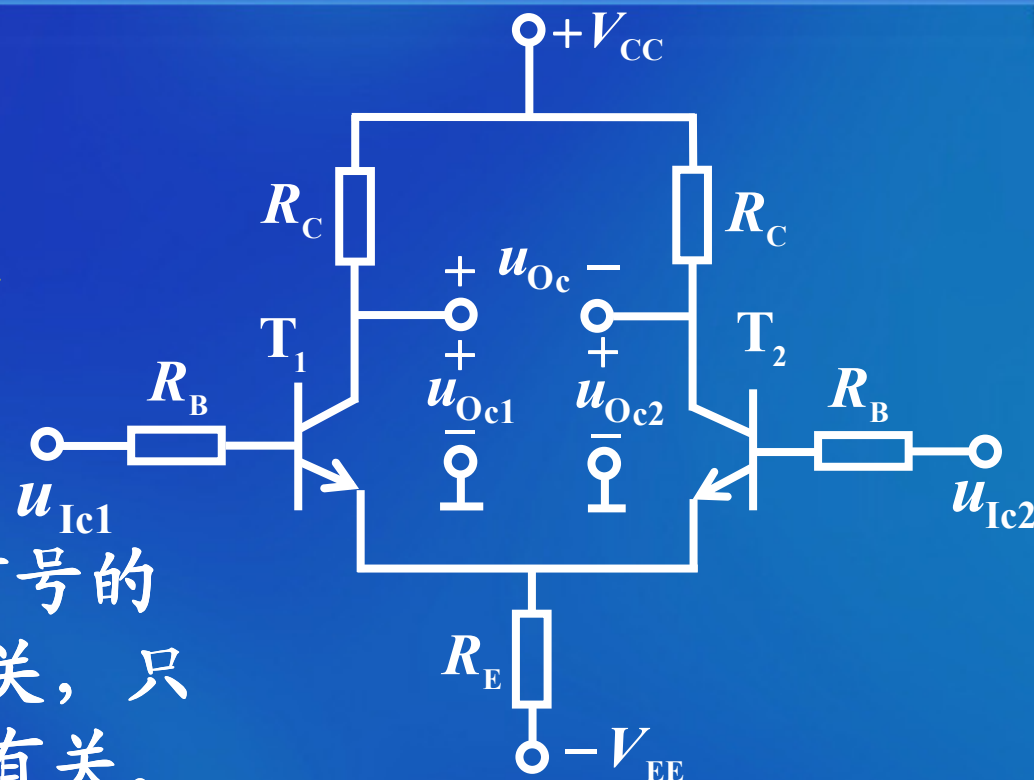
$$= R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E$$



思考

问：共模信号下电路的输出电阻是多少？

答：输出电阻与输入信号的性质（共模、差模）无关，只与信号是双出还是单出有关。

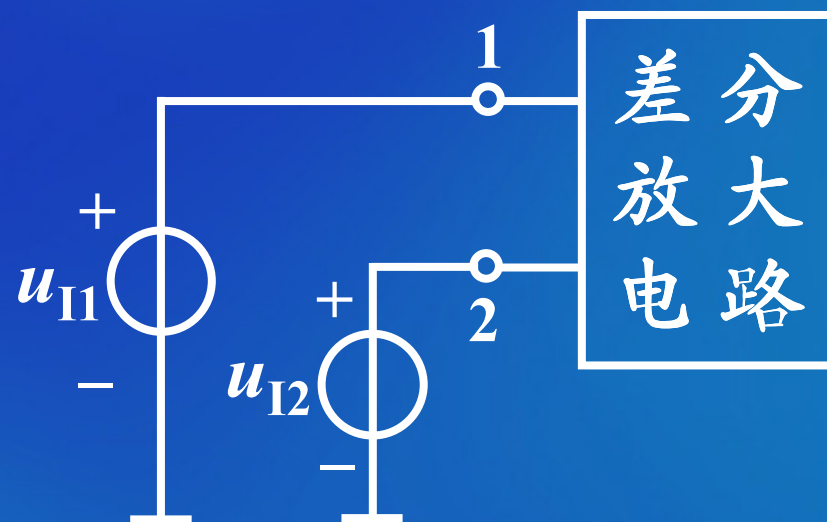


4) 共模输出电阻

单端输出时 $R_o = R_C$

双端输出时 $R_o = 2R_C$

(3) 任意输入信号的分解

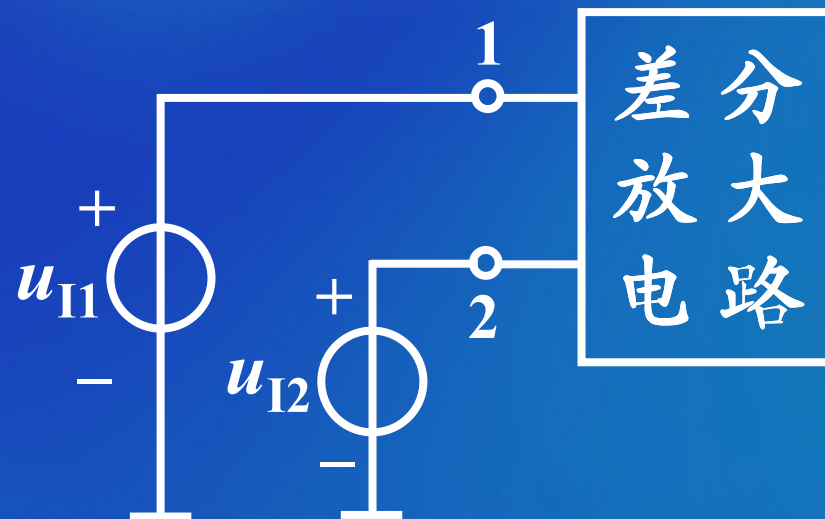


任意信号:

既不是差模信号又不是共模信号的输入信号。

令 $u_{Id} = u_{I1} - u_{I2}$

$$u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2}$$



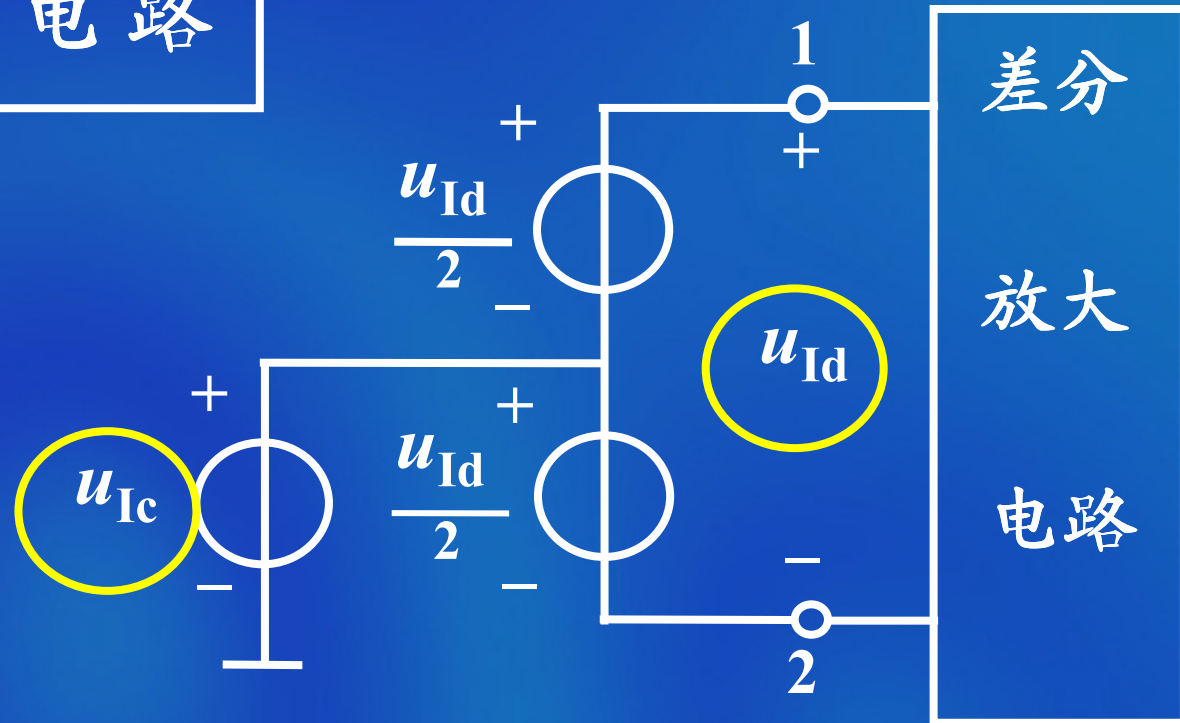
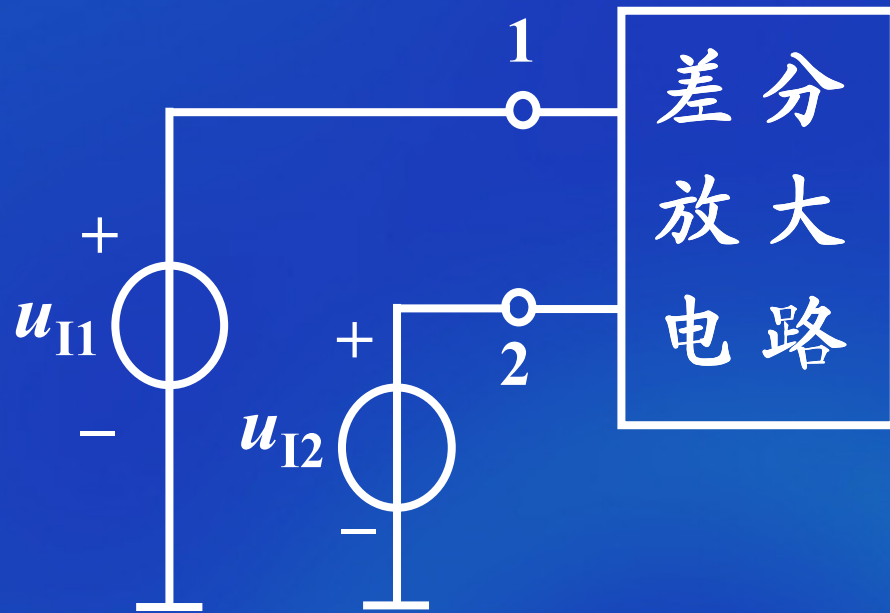
那么 $u_{I1} = u_{Ic} + \frac{u_{Id}}{2}$ $u_{I2} = u_{Ic} - \frac{u_{Id}}{2}$

例: $u_{i1} = 20 \text{ mV}$, $u_{i2} = 10 \text{ mV}$

则 $u_d = 10 \text{ mV}$, $u_c = 15 \text{ mV}$

任意信号可以分解成差模和共模信号

任意输入的等效电路



单端输入电路

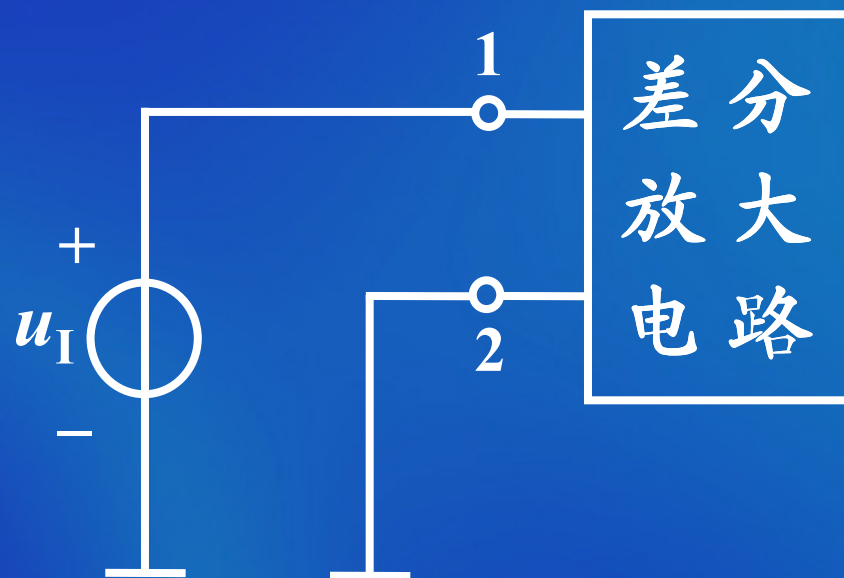
特别的，对于单端输入

即

$$u_{I1} \neq 0, u_{I2} = 0$$

或

$$u_{I1} = 0, u_{I2} \neq 0$$

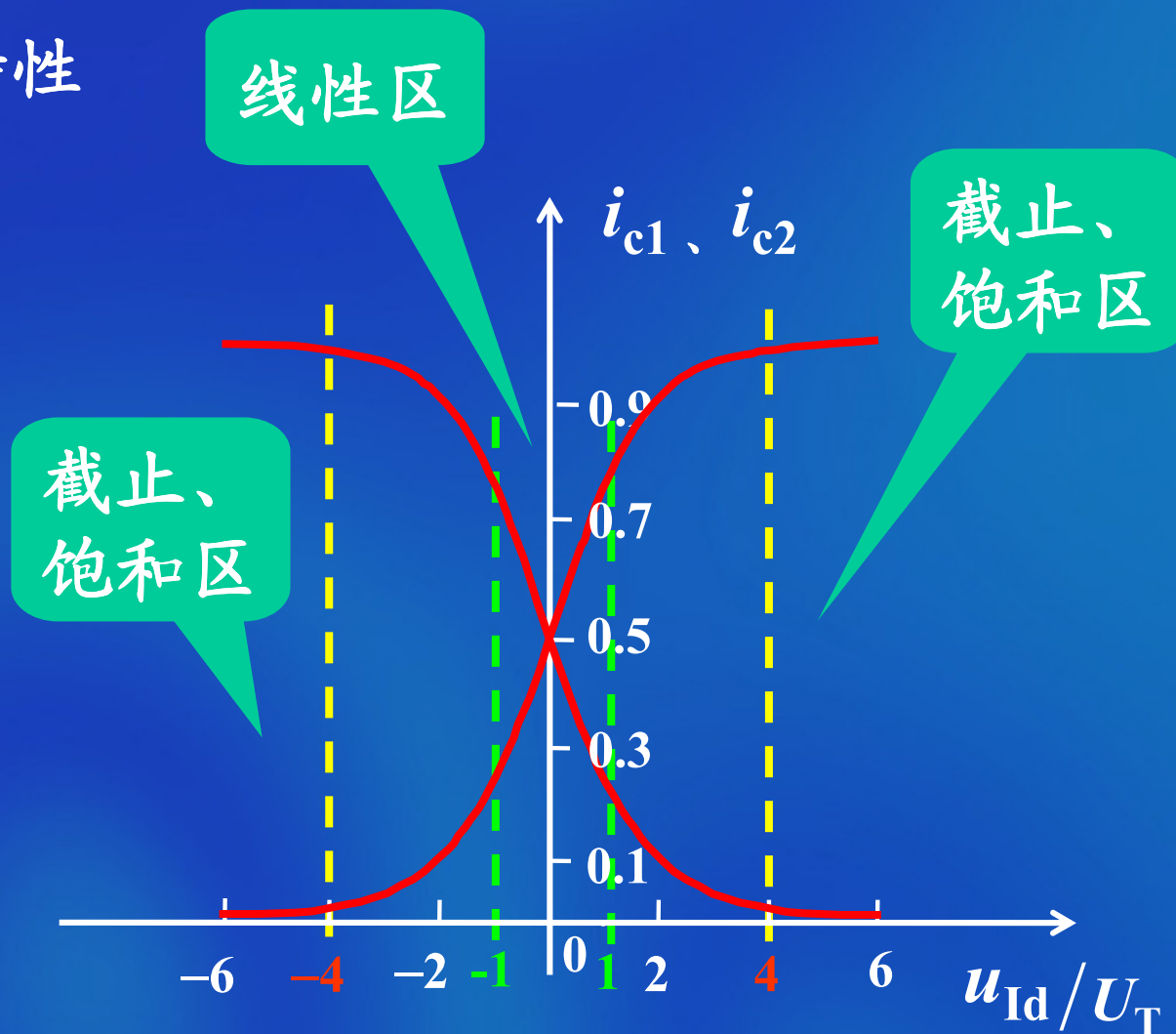


单端输入是一种特殊的双端输入形式

(4) 大信号传输特性

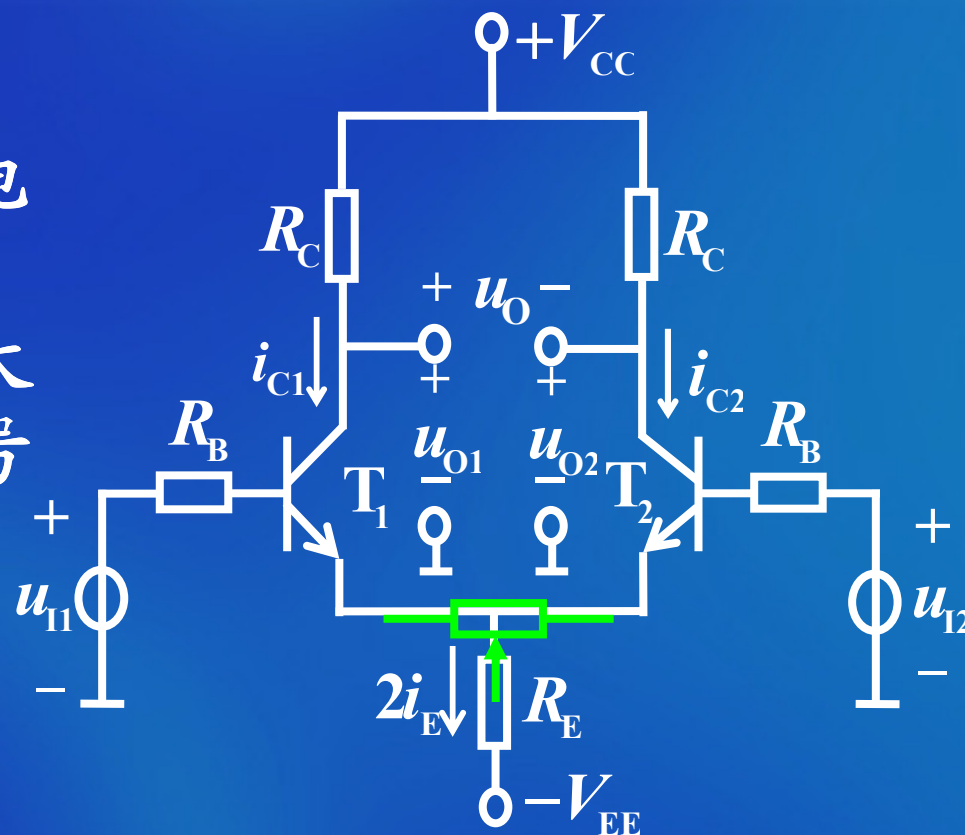
传输特性:

$$i_{C1}、i_{C2} = f(u_{Id})$$



小 结:

- 差分放大电路主要利用电路的**对称性**克服零点漂移，它对差模信号有较大的放大能力，对共模信号有较强的抑制能力。

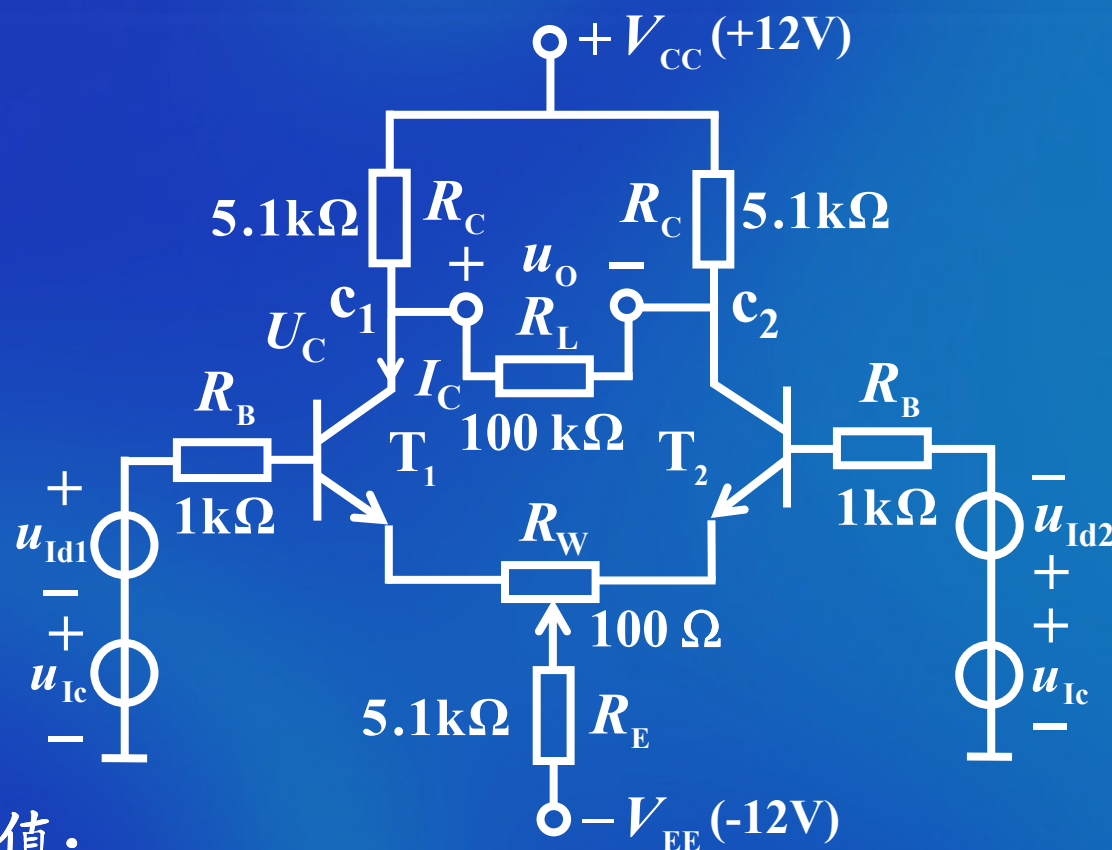


有不对称怎么办?

为了使左右平衡，可设置调零电位器：



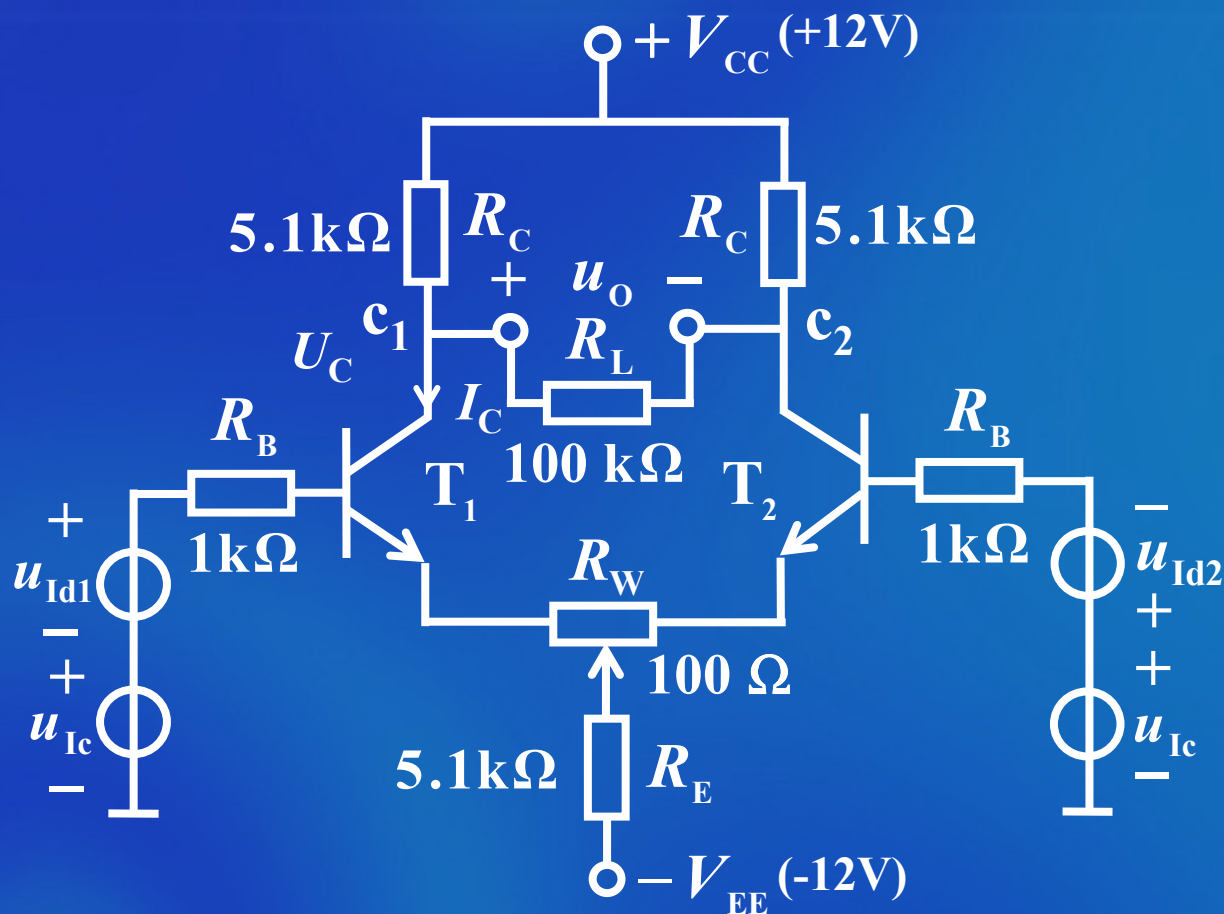
例 电路如图所示。设 T_1 、 T_2 的特性一致， $\beta=50$ ， $U_{BE}=0.7V$ ， $u_{Id1}=50mV$ ， $u_{Ic}=1V$ ，试求：



- 静态工作点 I_C 、 U_C 之值；
- Δu_O 及 K_{CMR} 之值；
- 若将 R_L 接在 C_1 对地之间，求 U_C 、 Δu_O 及 K_{CMR} 。
- R_{id} 、 R_{ic} 和 R_o 之值。

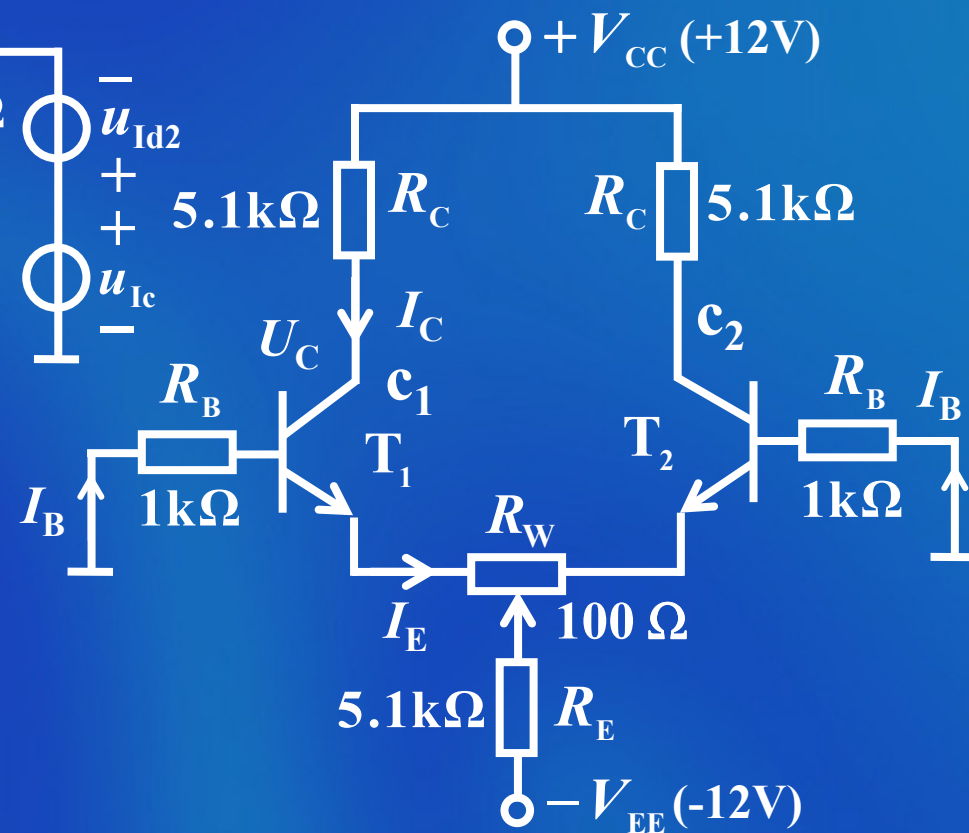
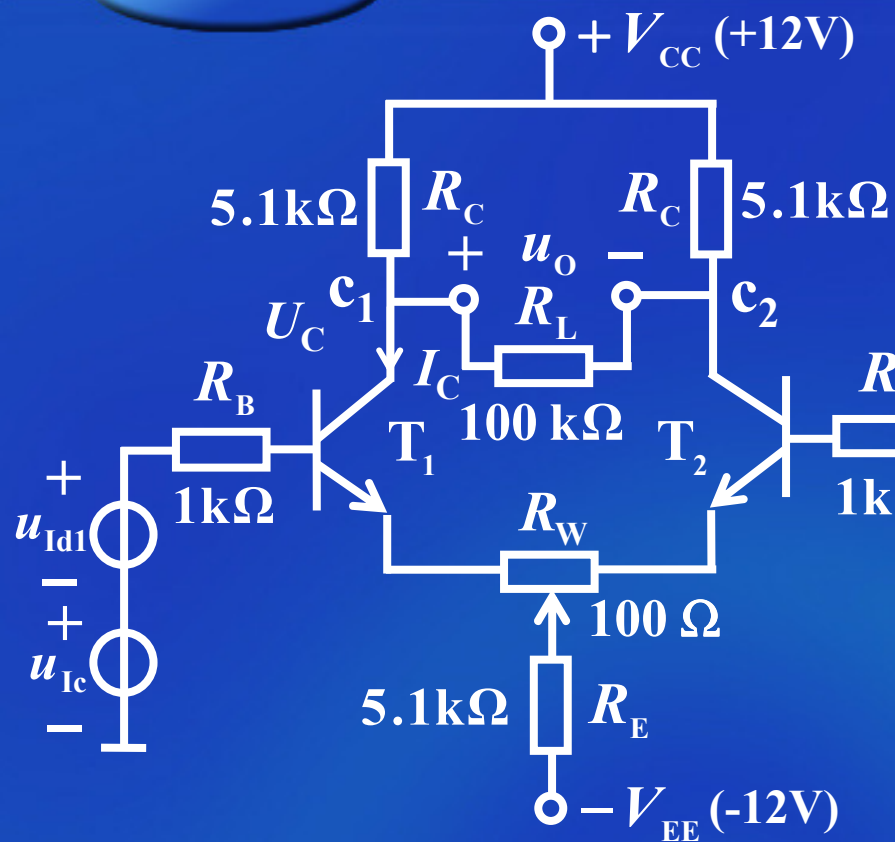
解:

为了计算简单,
设调零电位器 R_W
的滑动端在电位
器的中间。



(a) 画出放大电路的直流等效电路

直流等效电路



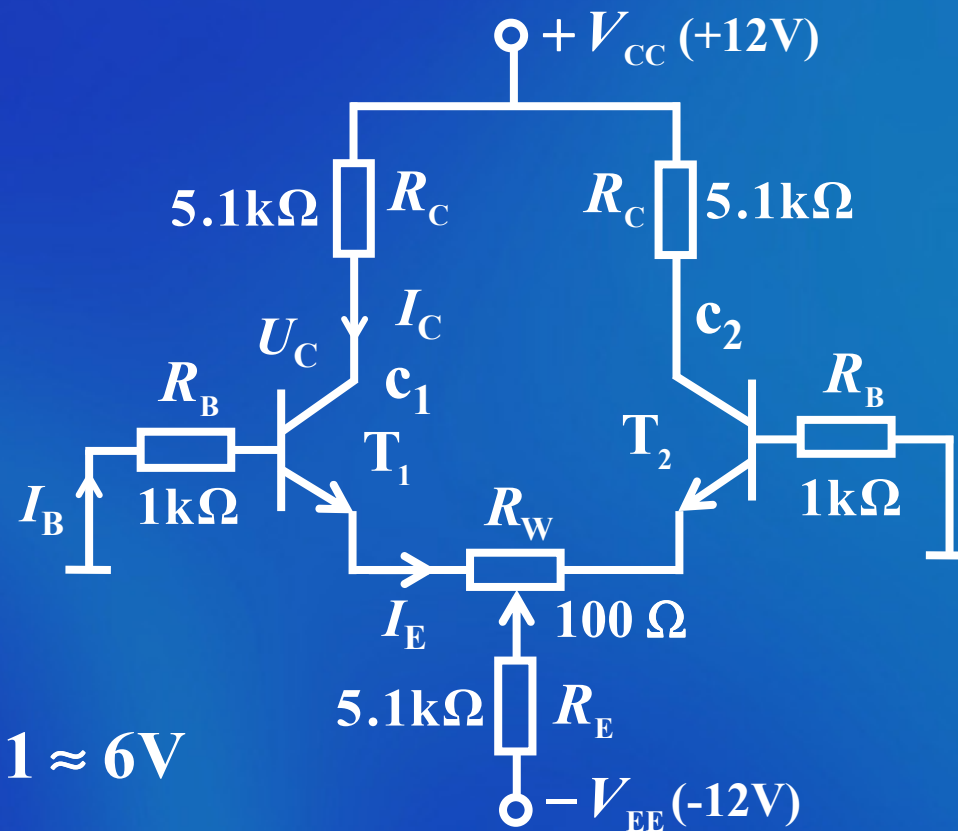
由图可得

$$I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_E}$$

$$= \frac{12 - 0.7}{2 \times 5.1}$$

$$\approx 1.2\text{mA}$$

$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C = 12 - 1.2 \times 5.1 \approx 6\text{V}$$



(b) 根据题意

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

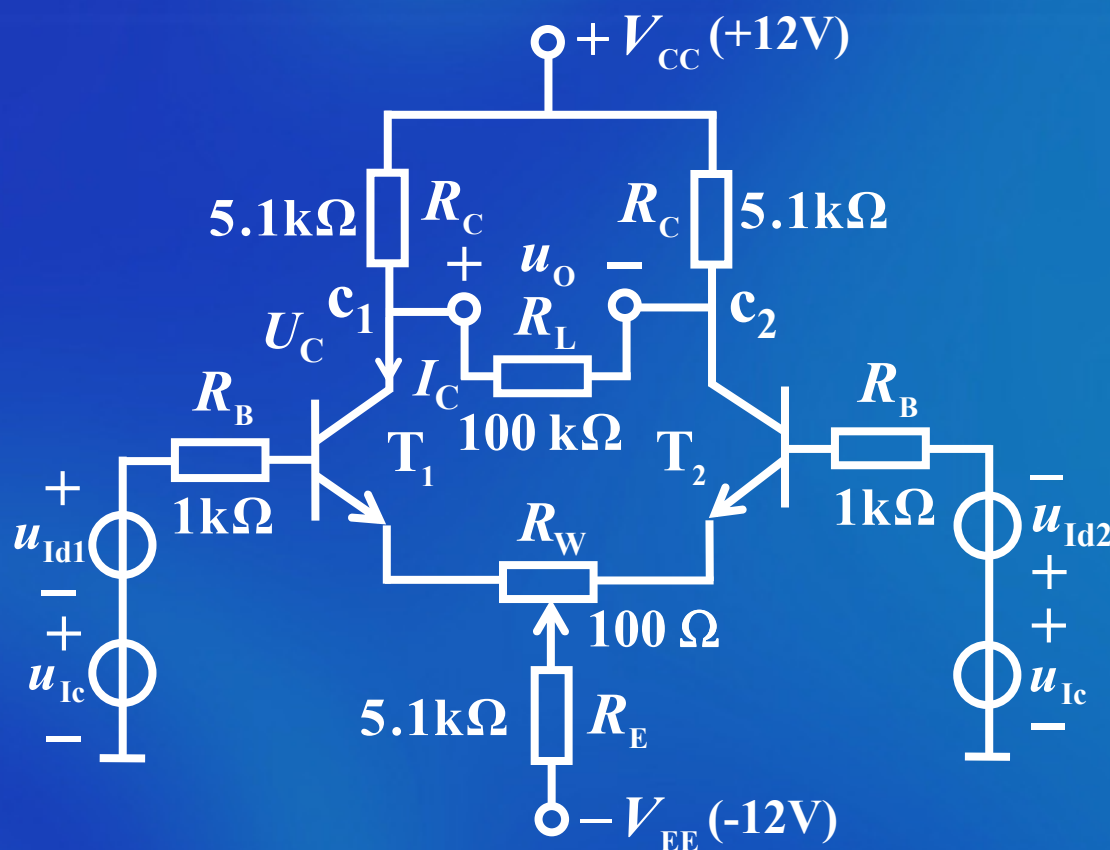
$$= 300 + 51 \times \frac{26}{1.2}$$

$$= 1.1 \text{ k}\Omega$$

双端输出:

$$A_{uc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = 0$$

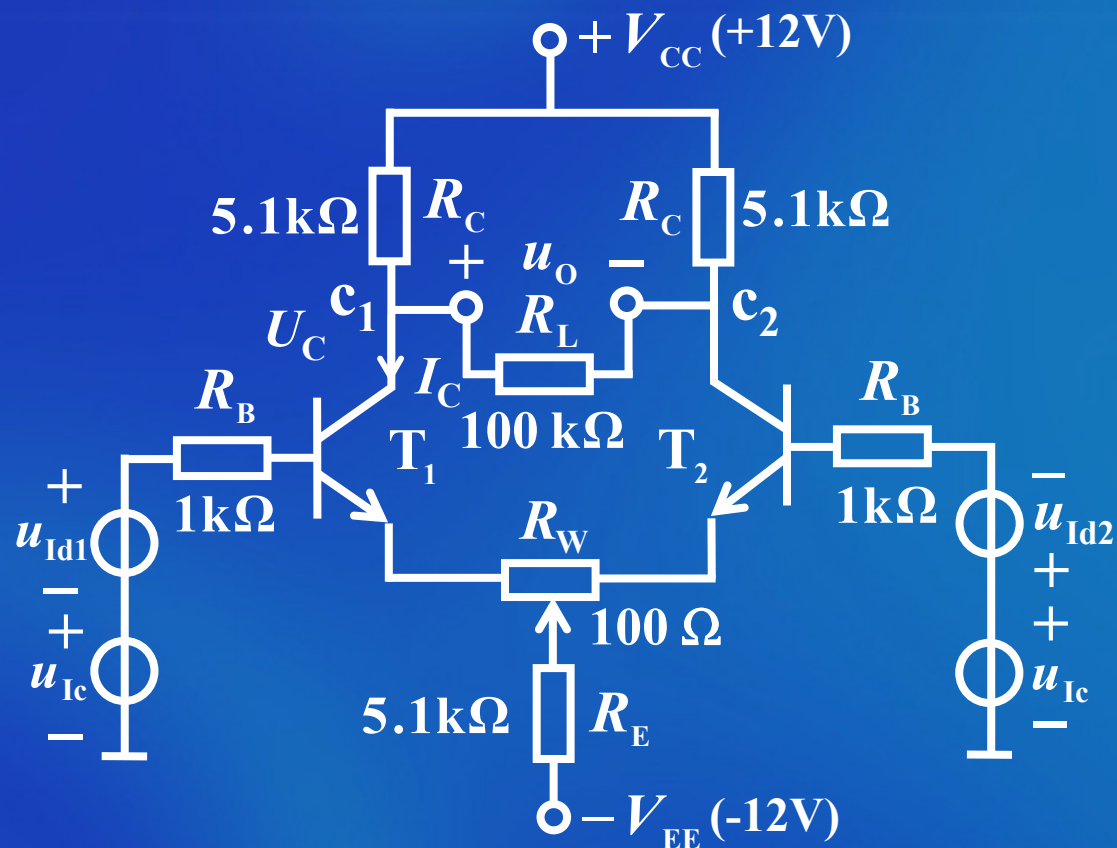
$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = - \frac{\beta R_C // \frac{R_L}{2}}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}} = - \frac{50 \times 5.1 // 50}{1 + 1.1 + 51 \times 0.05} \approx -54$$



双端输出:

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \infty$$

$$\begin{aligned} \Delta u_O &= A_{ud} \Delta u_{Id} + A_{uc} \Delta u_{Ic} \\ &= -54 \times 0.05 + 0 \times 1 \\ &= -2.7\text{V} \end{aligned}$$



(c) 当 R_L 在 C_1 对地之间时

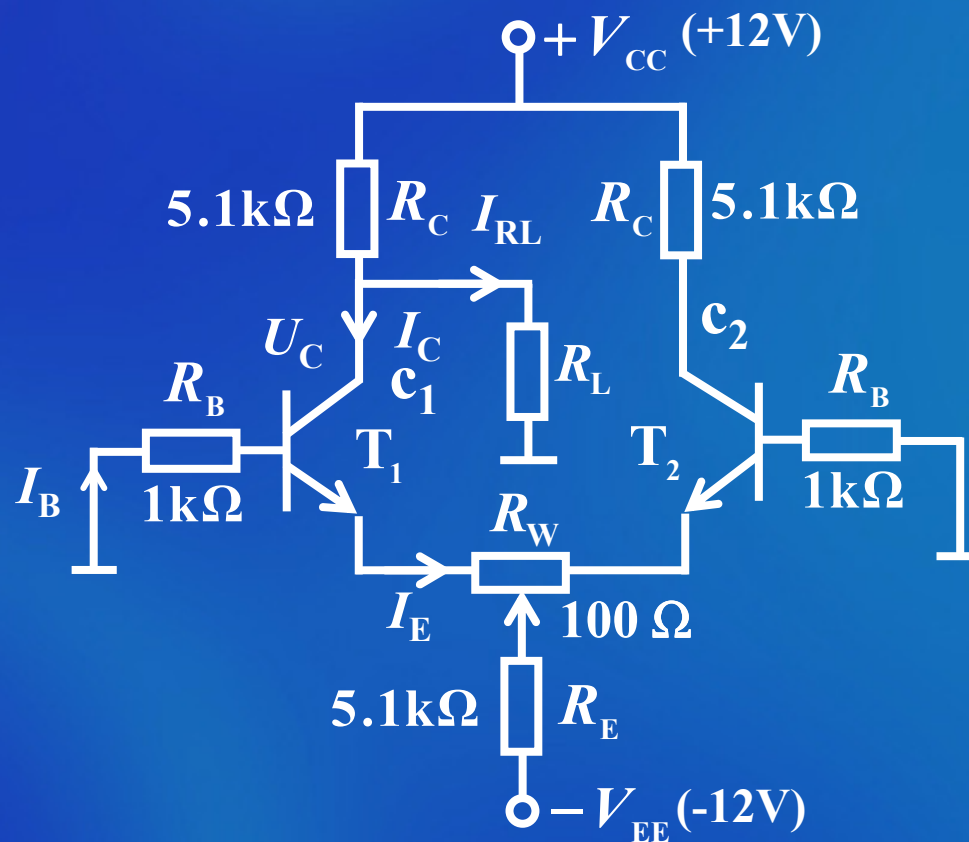
$$I_{RC} = I_C + I_{RL}$$

$$= I_C + \frac{U_C}{R_L}$$

$$U_C = V_{CC} - I_{RC} R_C$$

经整理可得

$$U_C = \frac{V_{CC} - I_C R_C}{1 + \frac{R_C}{R_L}} = \frac{12 - 1.2 \times 5.1}{1 + \frac{5.1}{100}} \approx 6V$$



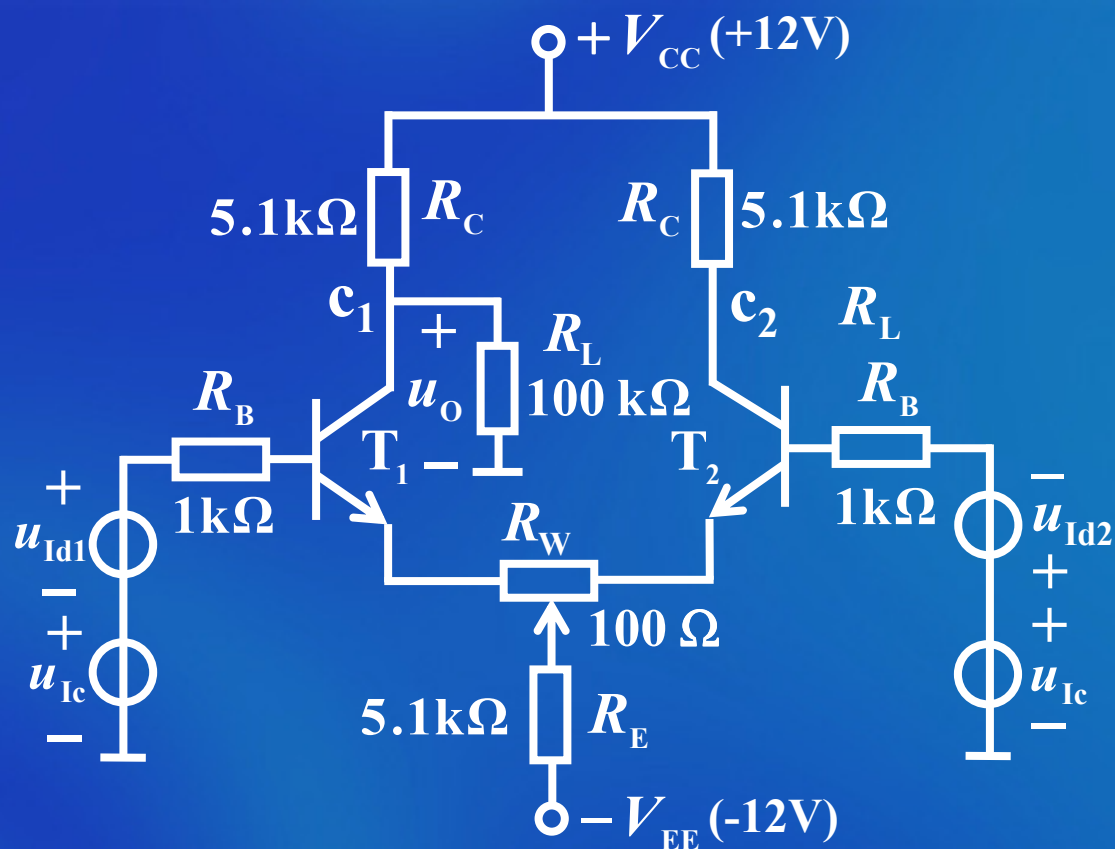
单端输出:

$$A_{uc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

$$\approx -\frac{R_C // R_L}{2R_E}$$

$$= -\frac{5.1 // 100}{2 \times 5.1}$$

$$\approx -0.5$$



$$A_{uc(双)} = 0$$

单端输出:

$$A_{ud} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

$$= - \frac{\beta R_C // R_L}{2[R_B + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}]}$$

$$= - \frac{50 \times 5.1 // 100}{2 \times (1 + 1.1 + 51 \times 0.05)}$$

$$\approx -27$$

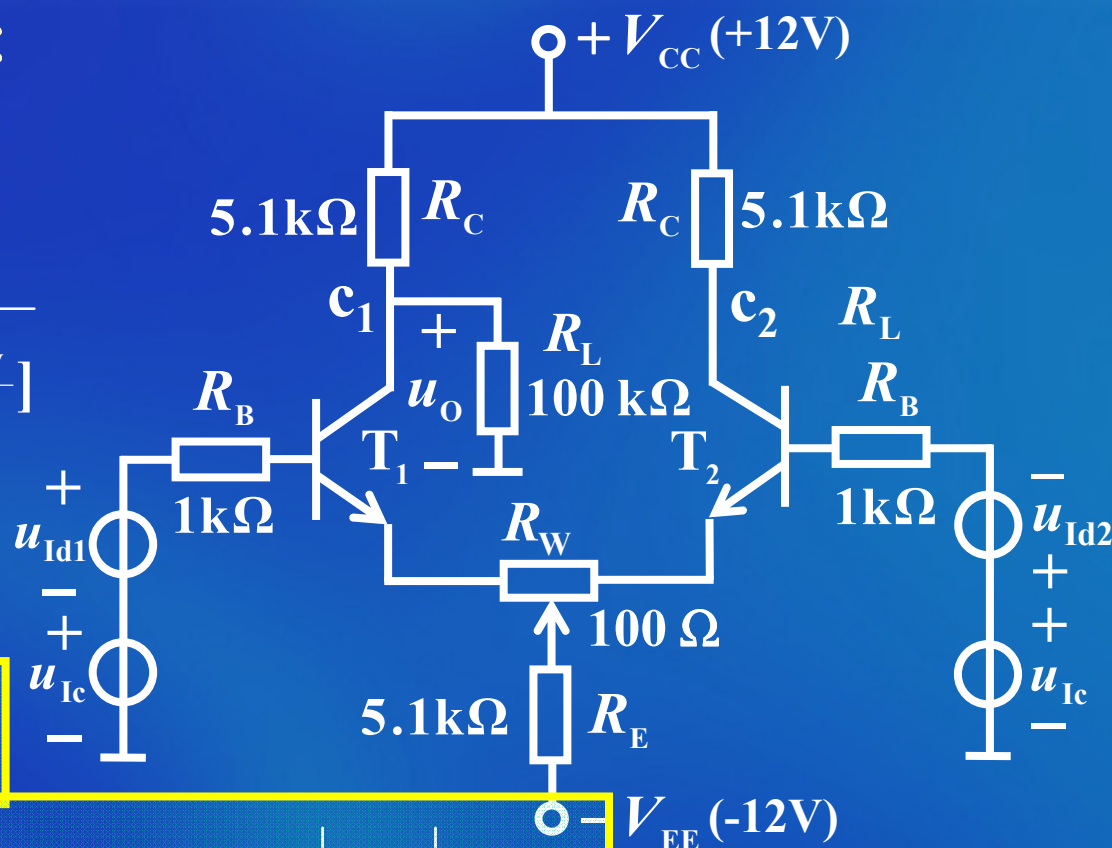
$$A_{ud(\text{双})} = -57$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \frac{27}{0.5} = 54$$

$$K_{CMR(\text{双})} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \infty$$

$$\Delta u_{O(\text{双})} = -2.7 \text{ V}$$

$$\Delta u_O = A_{ud} \Delta u_{Id} + A_{uc} \Delta u_{Ic} = -27 \times 0.05 - 0.5 \times 1 = -1.85 \text{ V}$$

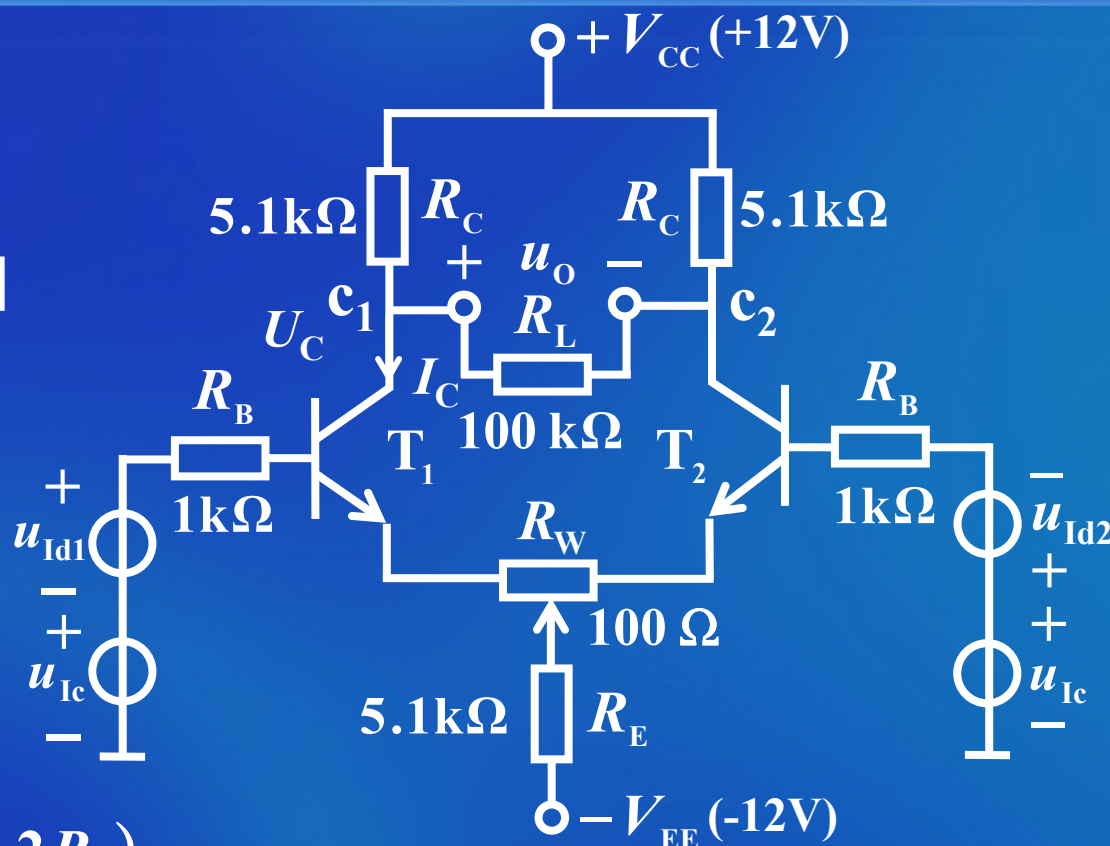


(d) 差模输入电阻

$$\begin{aligned} R_{id} &= 2[R_B + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}] \\ &= 2 \times (1 + 1.1 + 51 \times 0.05) \\ &= 9.3 \text{k}\Omega \end{aligned}$$

共模输入电阻

$$\begin{aligned} R_{ic} &= R_B + r_{be} + (1 + \beta) \left(\frac{R_W}{2} + 2R_E \right) \\ &\approx 2(1 + \beta)R_E \\ &= 2 \times 51 \times 5.1 \\ &\approx 520 \text{k}\Omega \end{aligned}$$



问：差模输入电阻 共模输入电阻
与输出方式（单or双）是否有关？
无关

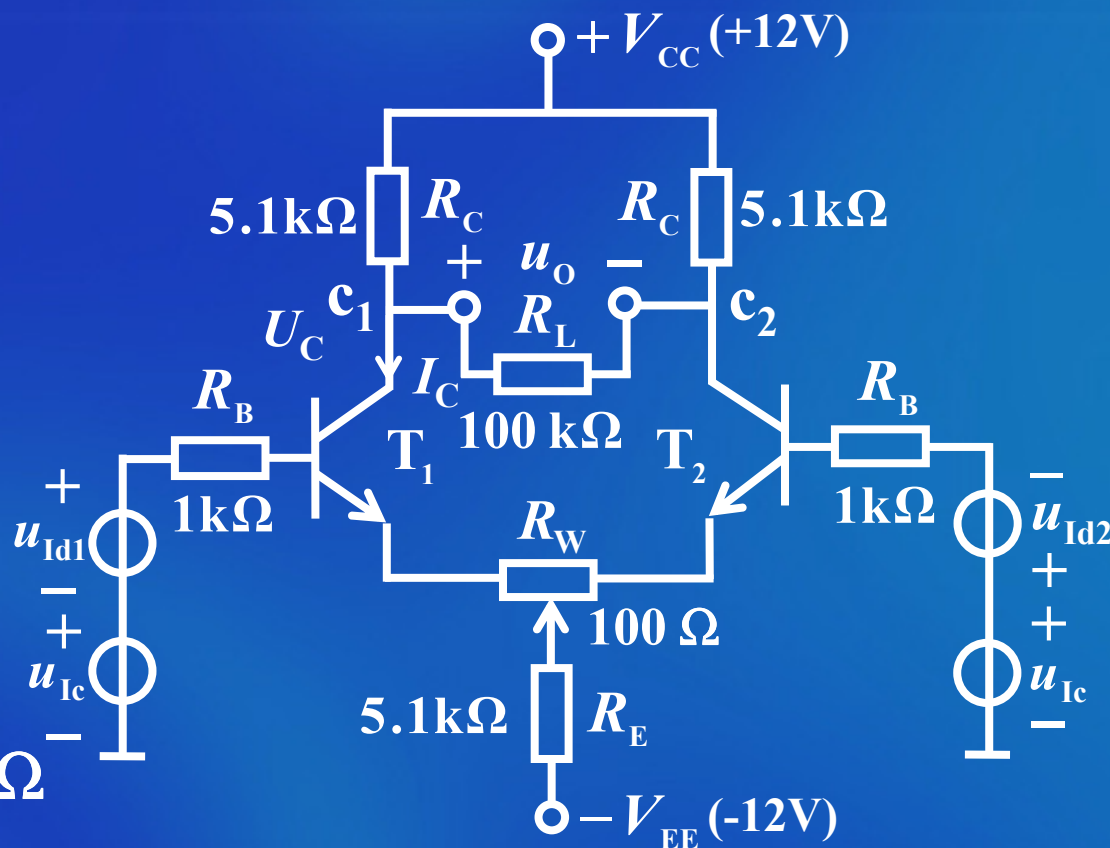
输出电阻 R_o

单端输出时

$$R_o = R_C = 5.1\text{k}\Omega$$

双端输出时

$$R_o = 2R_C = 2 \times 5.1 = 10.2\text{k}\Omega$$



问:

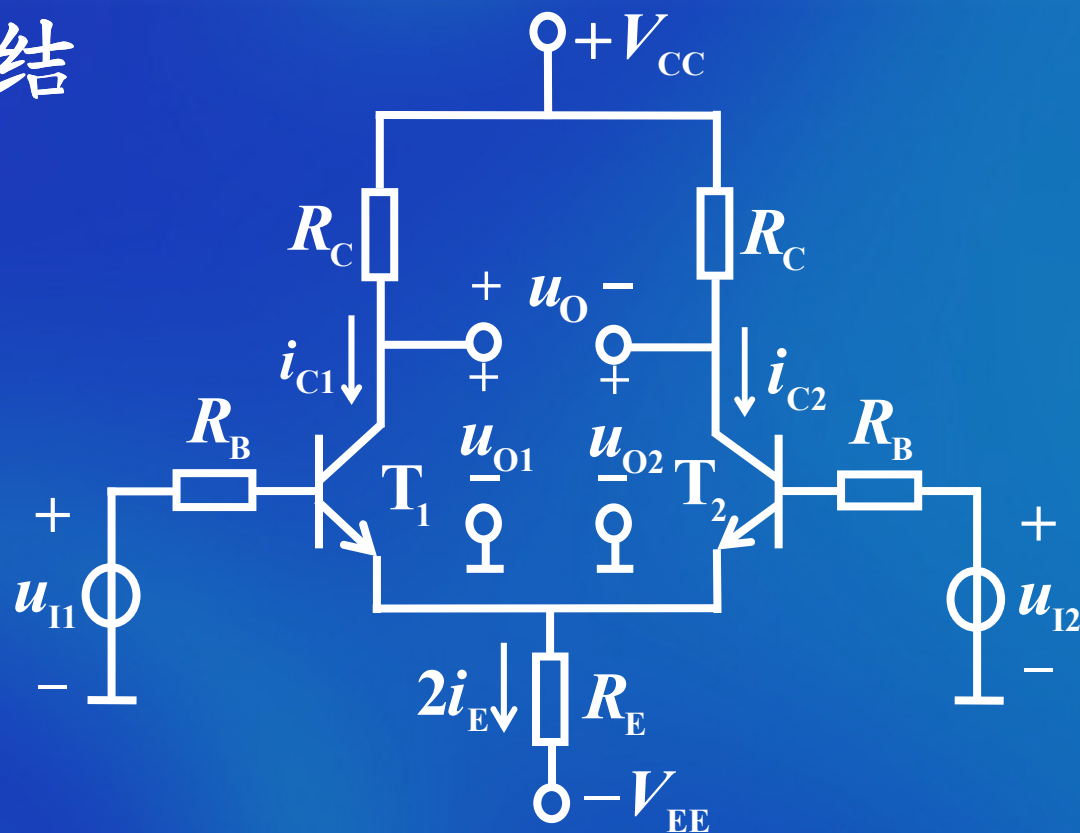
输出电阻与输入方式(单or双)是否有关?

无关

总结

输入端接法 { 双端
单端

输出端接法 { 双端
单端



单端输入是一种特殊的双端输入形式

4.2.2 带恒流源的差分放大电路

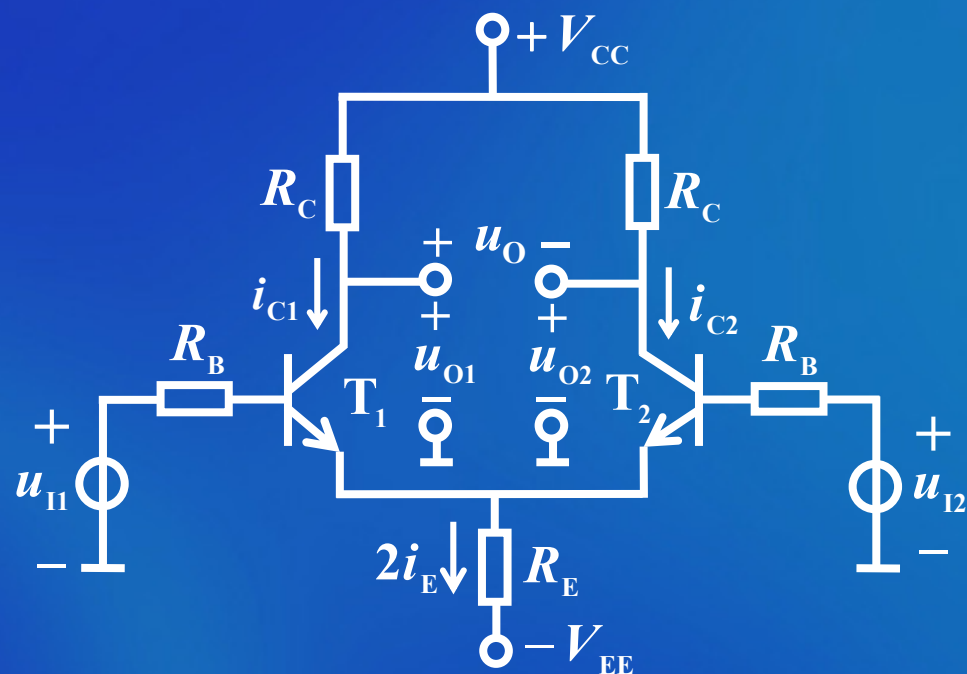
对于图示电路

双端输出

$$K_{\text{CMR}} = \infty$$

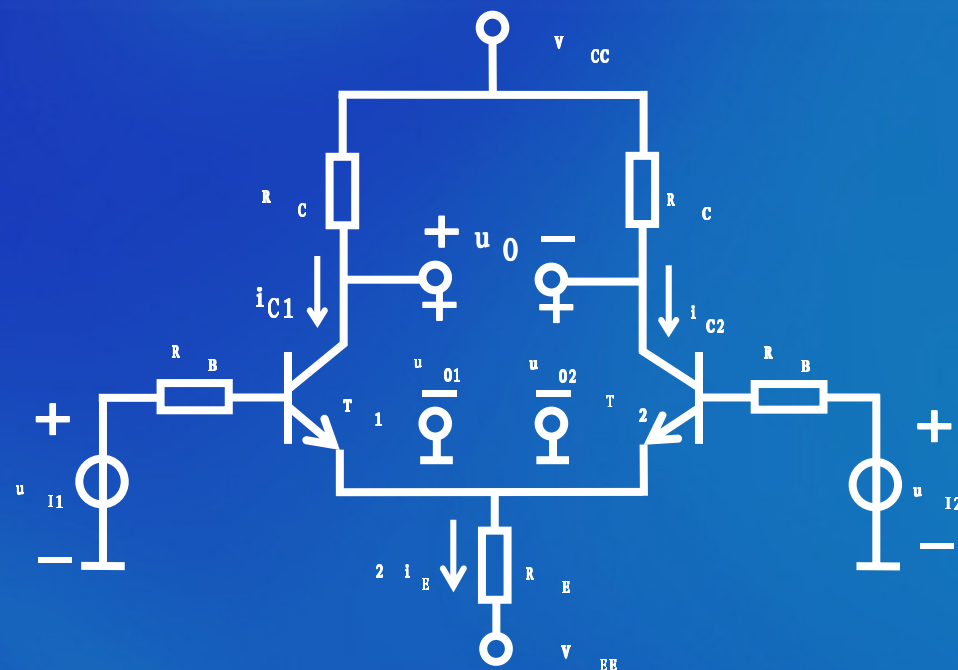
单端输出

$$K_{\text{CMR}} = \frac{\beta R_{\text{E}}}{R_{\text{B}} + r_{\text{be}}}$$



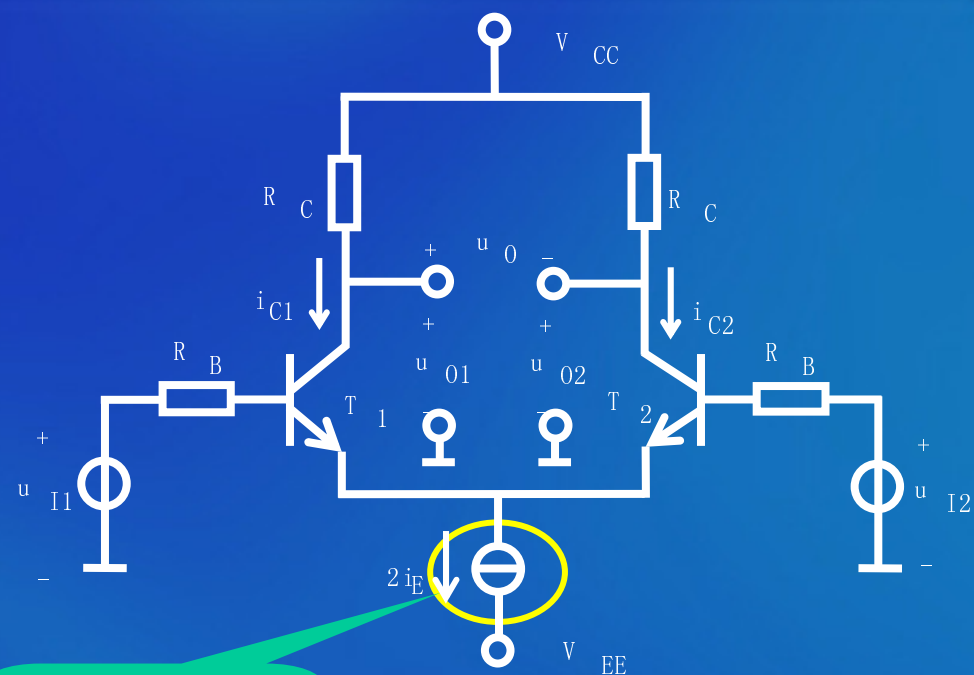
R_{E} 越大, K_{CMR} 越大, 电路抑制共模信号的能力越强

R_E 太大对电路的影响:



- 当 V_{EE} 一定, I_E 减小, r_{be} 增大, A_{ud} 减小。
- 为了维持 I_E 不变, 必须提高电源电压 V_{EE} 。
- 在集成电路中不易制作较大阻值的电阻。

通常采用恒流源来代替 R_E



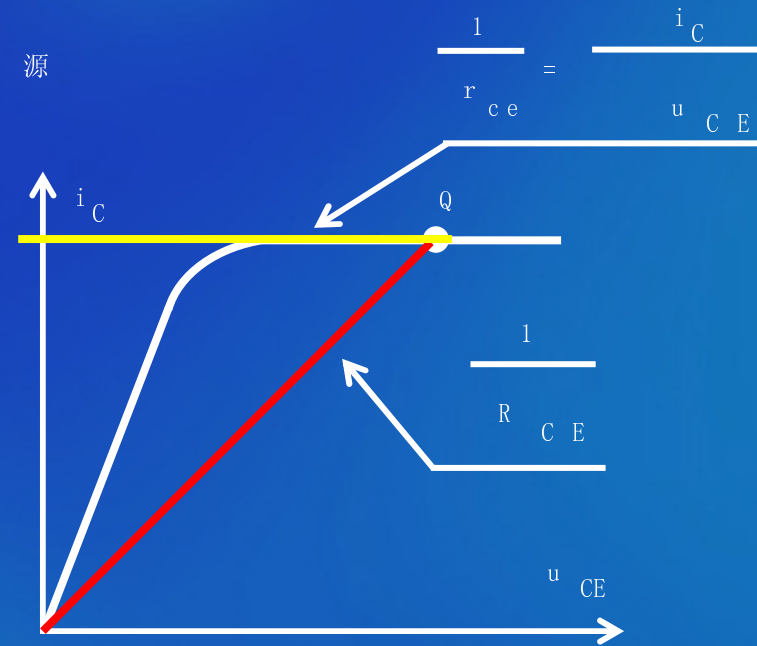
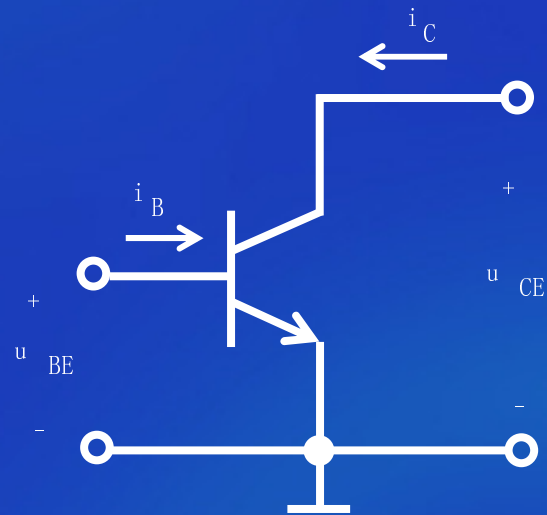
恒流源

恒流源的主要特点：

a. 具有很大的交流等效电阻。

b. 直流电阻较小。

晶体管恒流源

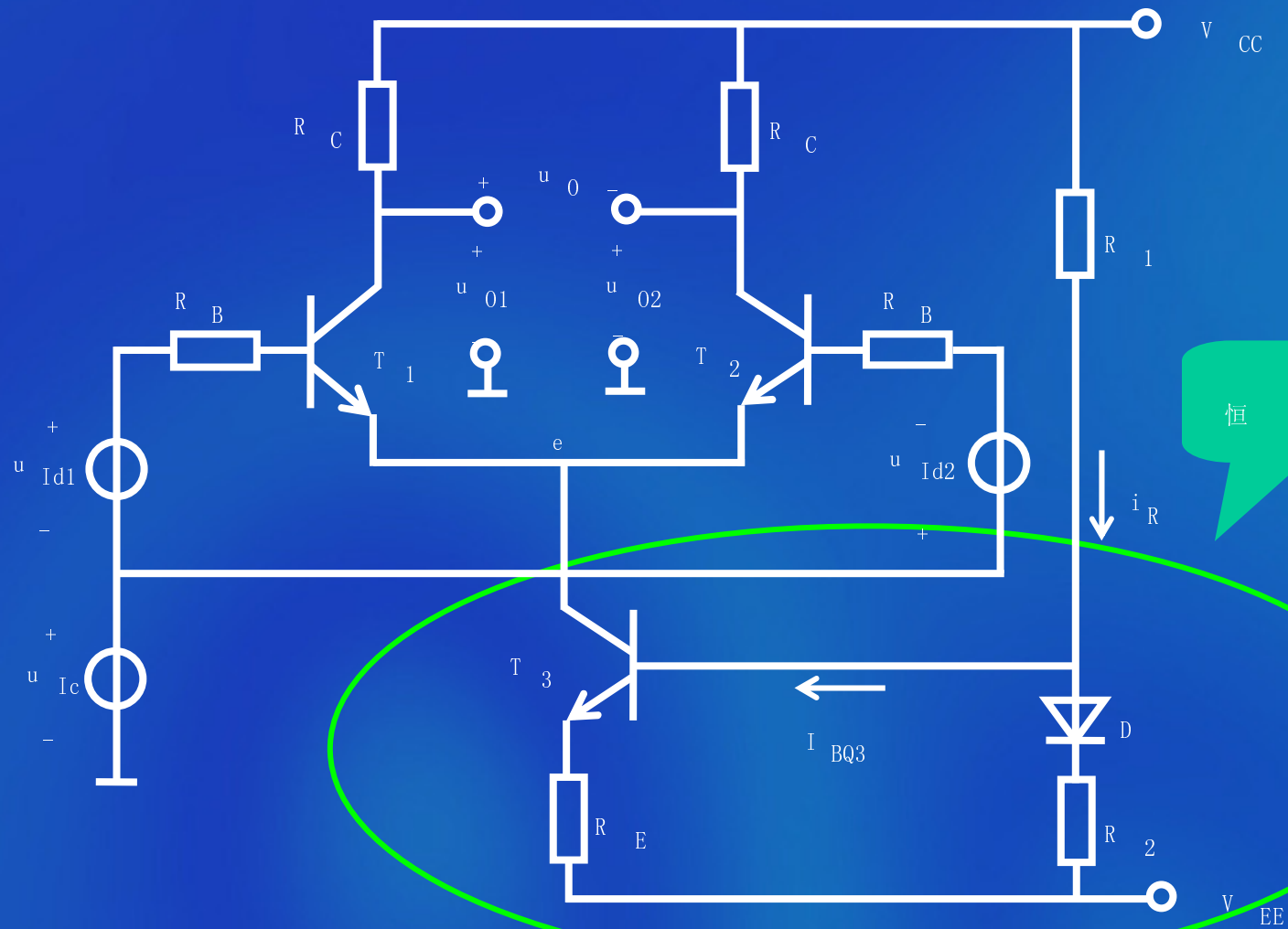


晶体管恒流源构成原理：

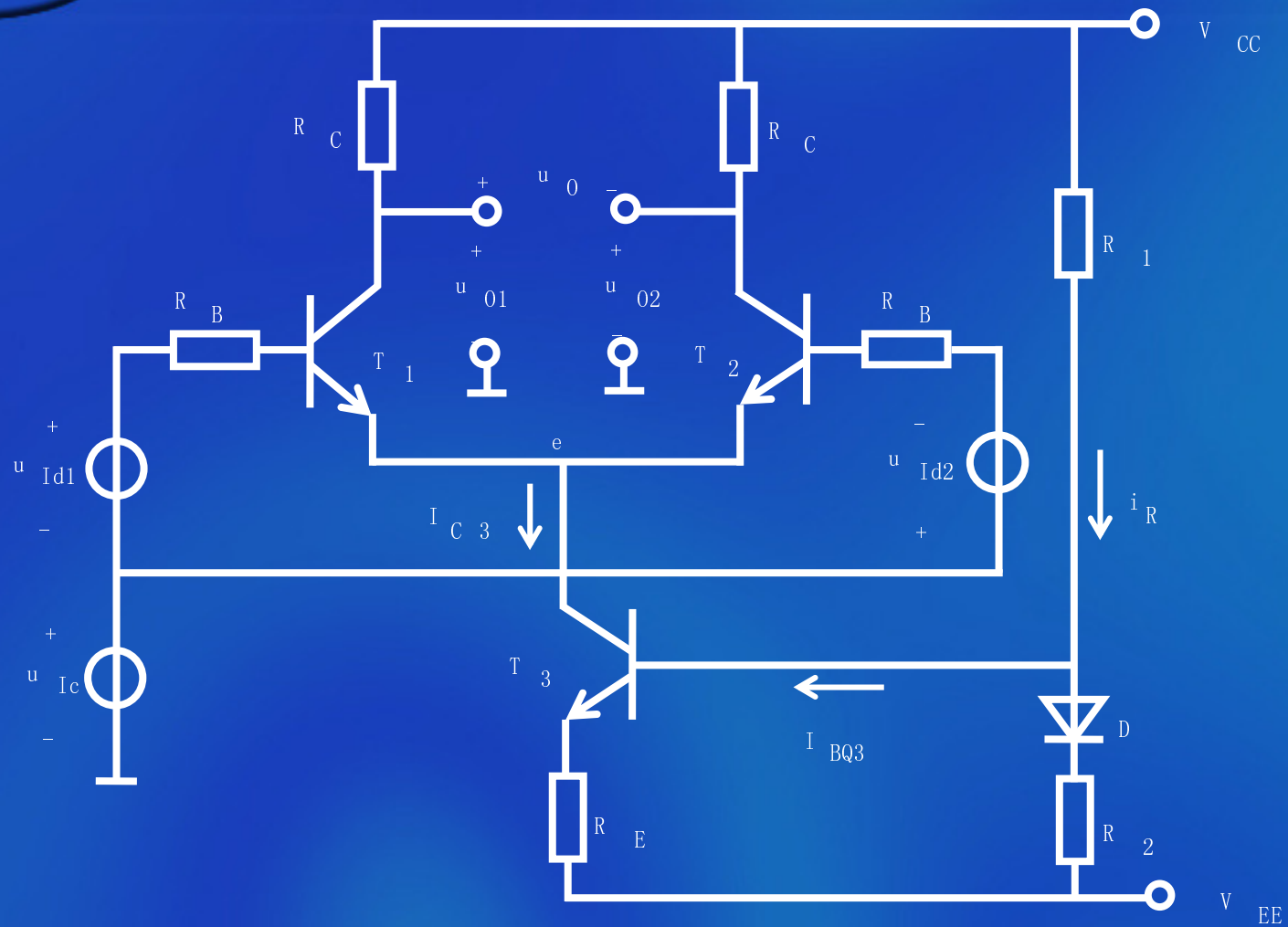
当晶体管工作在放大区时， i_C 基本上与 u_{CE} 无关，只取决于 i_B 。

当 i_B 恒定，则 i_C 恒定，晶体管相当于一个电流源。

带恒流源的差分放大电路



恒流源



选择 R_1 和 R_2 使 I_{BQ3} 恒定，则 I_{C3} 恒定。

恒 流 源 的 作 用 ；

1 . 恒 流 源 相 当 于 阻 值 很 大 的 电 阻 。

2 . 恒 流 源 不 影 响 差 模 放 大 倍 数 。

3 . 恒 流 源 影 响 共 模 放 大 倍 数 ， 使 共 模 放 大 倍
数 减 小 ， 从 而 增 加 共 模 抑 制 比 ， 理 想 的 恒 流
源 相 当 于 阻 值 为 无 穷 的 电 阻 ， 所 以 共 模 抑 制
比 是 无 穷 。

4.2.3 电流源电路

1. 电流镜电路

(1) 电路组成

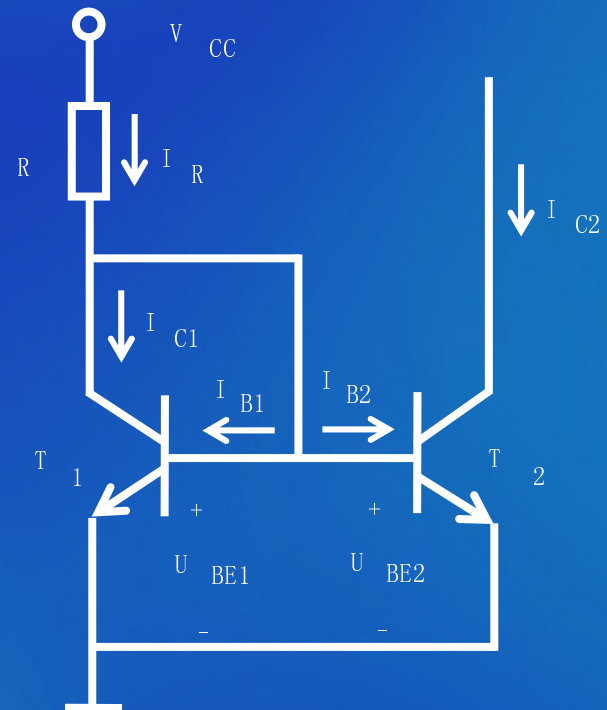
(2) 电路特点

T_1 和 T_2 特性相同

(3) 电路分析

设 I_1 I_2

由于 $U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}$



所以 $I_{B1} = I_{B2} = I_B$

I_{C2} I_{C1}

I_R $2 I_B$

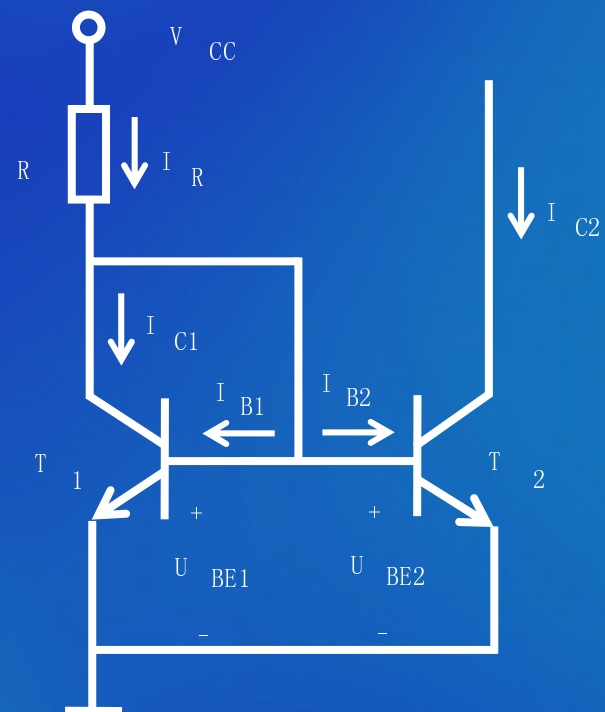
I_R $\frac{2 I_{C2}}{1}$

故

I_{C2} $\frac{I_R}{1}$ $\frac{2}{\beta}$

当 $\beta \gg 2$ 时

$I_{C2} \approx I_R \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$



2 . 比 例 电 流 源 电 路

(1) 电 路 组 成

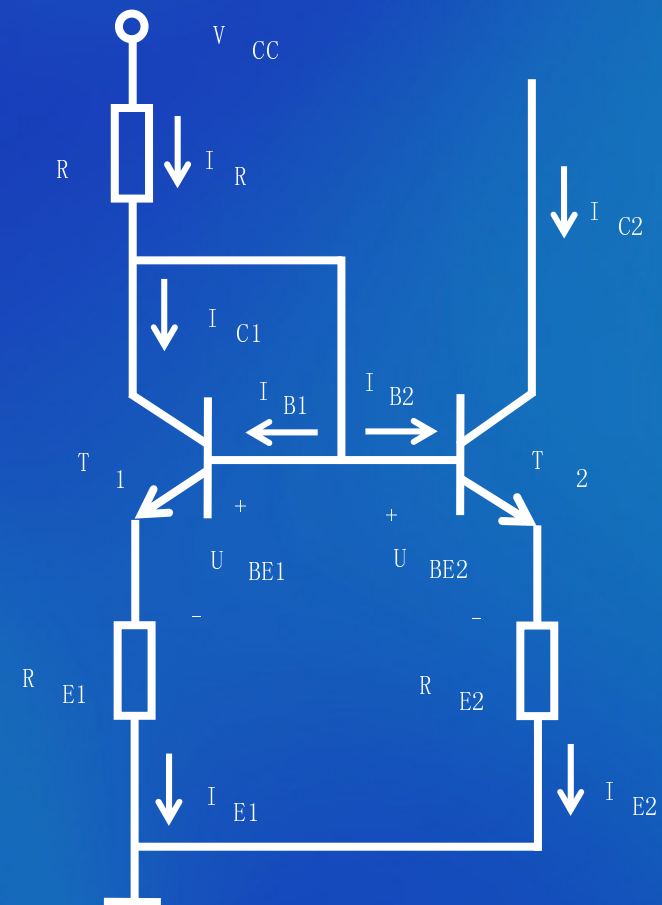
(2) 电 路 特 点

T_1 和 T_2 特 性 相 同

(3) 电 路 分 析

由 图 可 知

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R + R_{E1}} = \frac{V_{CC}}{R + R_{E1}}$$



$$I_{E1} R_{E1} + U_{BE1} = I_{E2} R_{E2} + U_{BE2}$$

由于

$$U_{BE1} = U_{BE2}$$

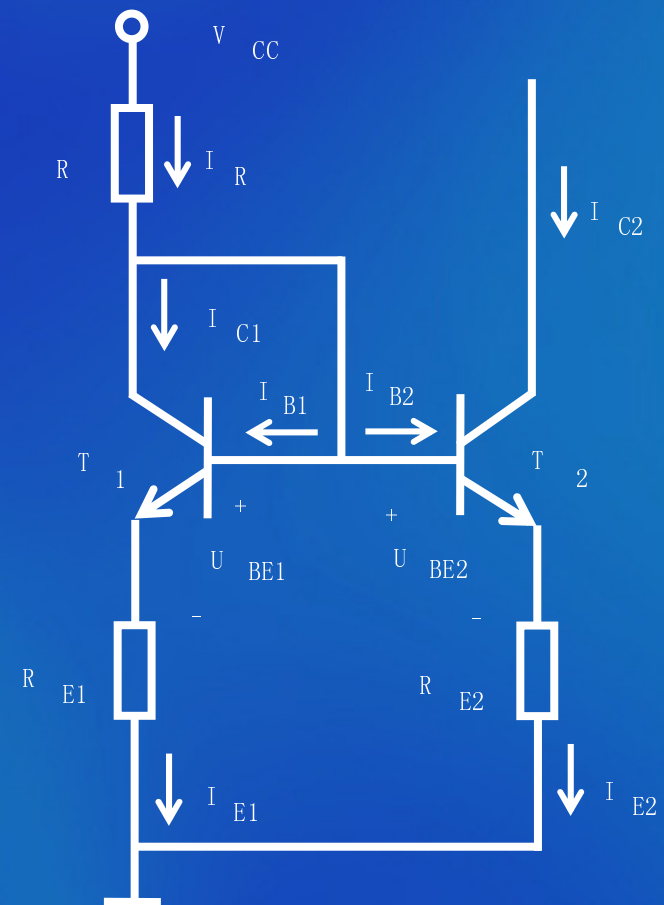
$$I_{C2} = I_{E2}$$

$$I_R = I_{E1}$$

故有

$$I_R R_{E1} = I_{C2} R_{E2}$$

$$I_{C2} = \frac{R_{E1}}{R_{E2}} I_R$$



3 . 微 电 流 源 电 路

(1) 电 路 组 成

(2) 电 路 特 点

T_1 和 T_2 特 性 相 同

(3) 电 路 分 析

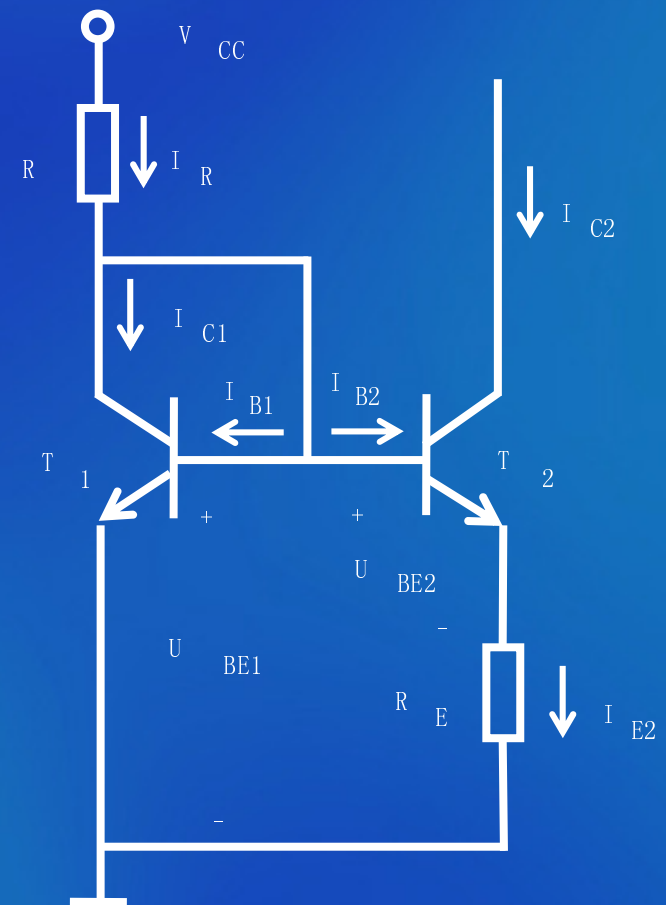
由 图 可 知

U_{BE1}

U_{BE2}

I_{E2} R_E

I_{C2} R_E



由 $i_C = I_S \exp(u_{BE} / U_T)$

得

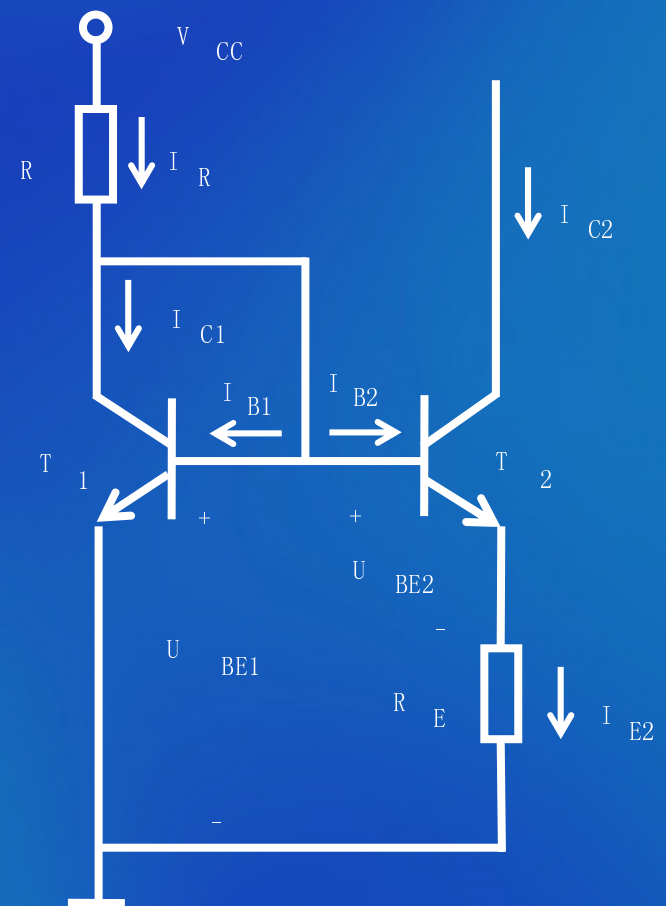
$$U_{BE1} = U_T \ln \frac{I_{C1}}{I_S}$$

$$U_T \ln \frac{I_R}{I_S}$$

$$U_{BE2} = U_T \ln \frac{I_{C2}}{I_S}$$

故 有

$$U_T \ln \frac{I_R}{I_S} = U_T \ln \frac{I_{C2}}{I_S} + I_{C2} R_E$$



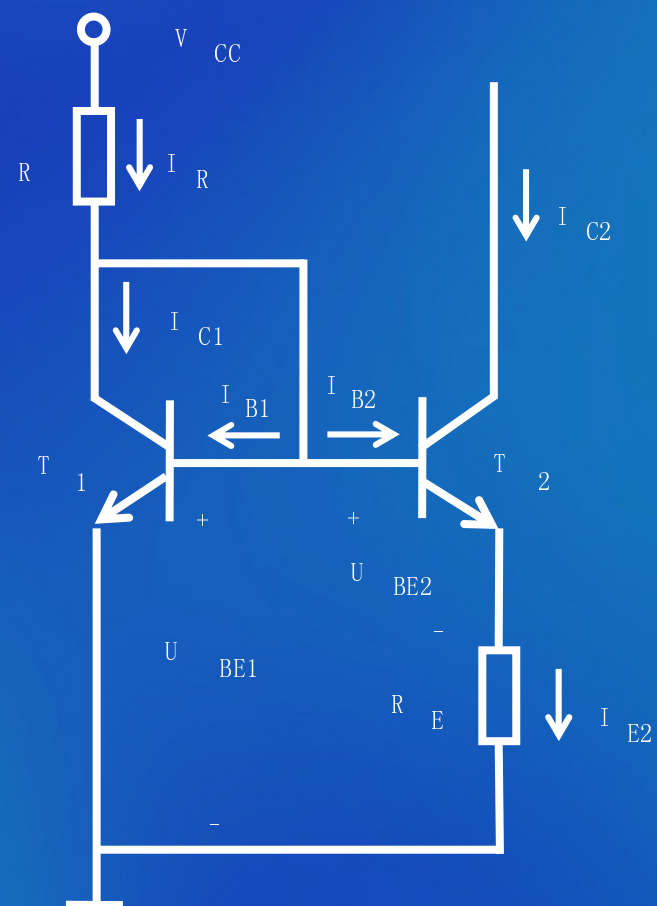
$$R_E = \frac{U_T}{I_{C2}} \ln \frac{I_R}{I_{C2}}$$

例 1 已知 $I_R = 0.73 \text{ mA}$, $I_{C2} = 20 \text{ }\mu\text{A}$,

求 $R_E = ?$

解 由 $R_E = \frac{U_T}{I_{C2}} \ln \frac{I_R}{I_{C2}}$ 得

$$R_E = \frac{26}{20 \times 10^{-3}} \ln \frac{0.73}{20 \times 10^{-3}} = 4.86 \text{ k}\Omega$$

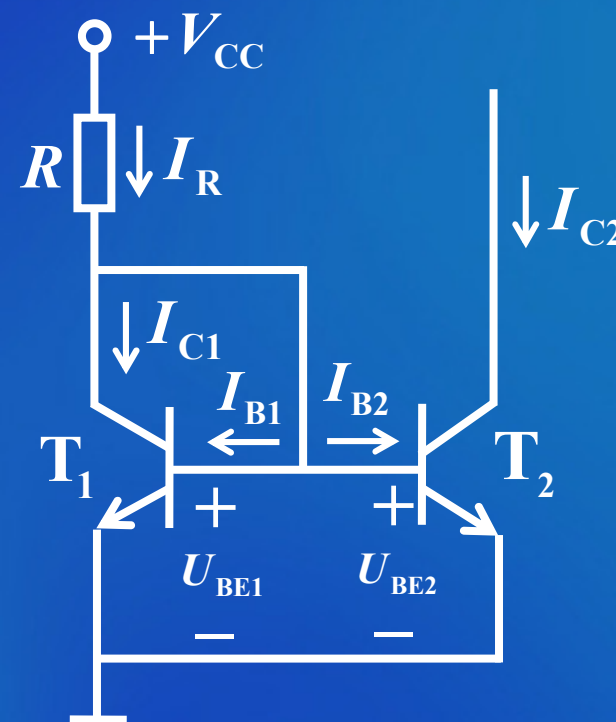


例2 上例中，如果不用微电流源，而采用电流镜，那么在 $V_{CC}=15V$ 时，欲获 $I_{C2}=20\mu A$ ，求 $R=?$

解 已知 $I_{C2}=20\mu A$ ，则

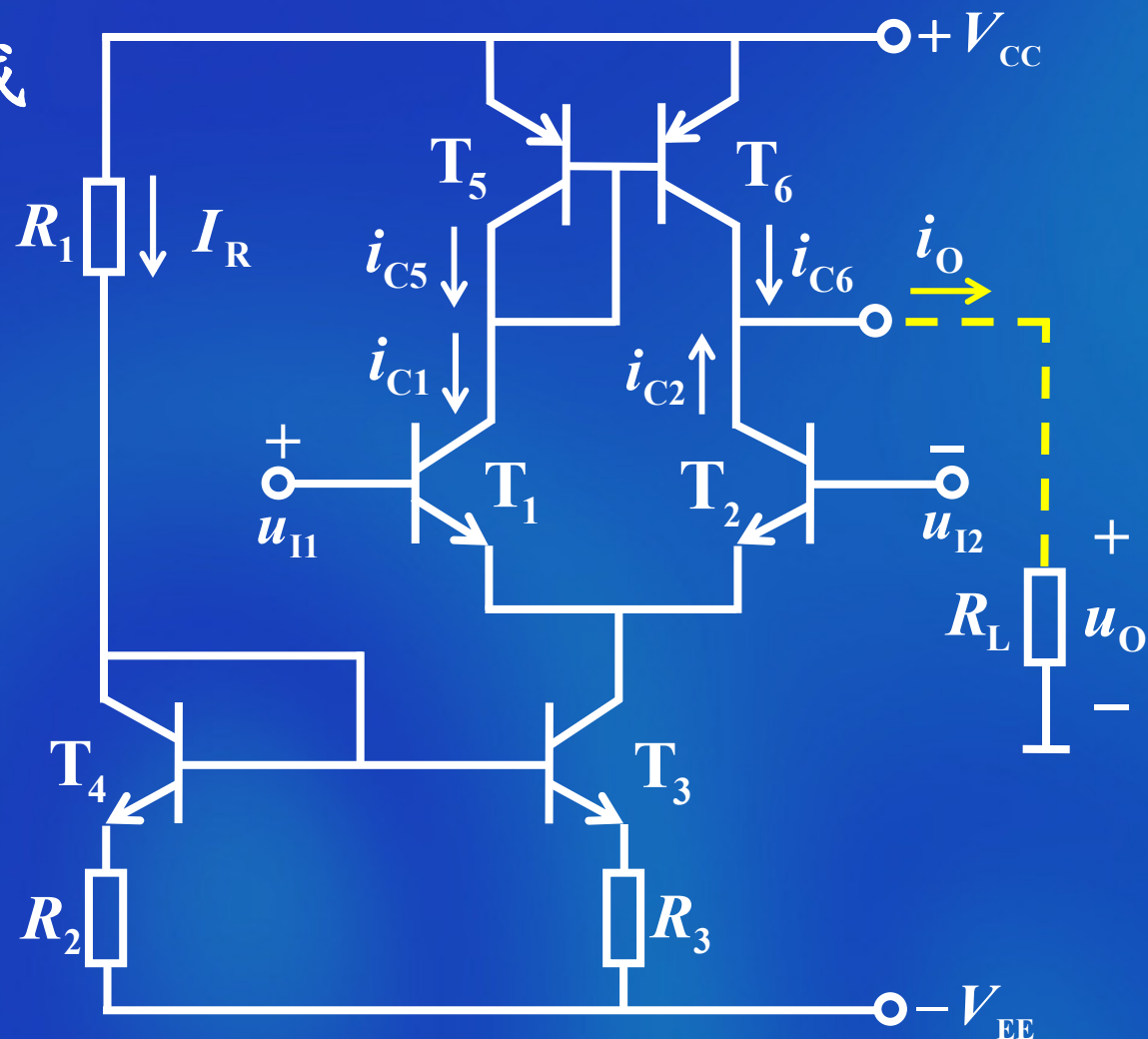
$$I_R=20\mu A$$

$$R \approx V_{CC}/I_R = 750k\Omega$$



4. 电流源作有源负载的差动放大电路

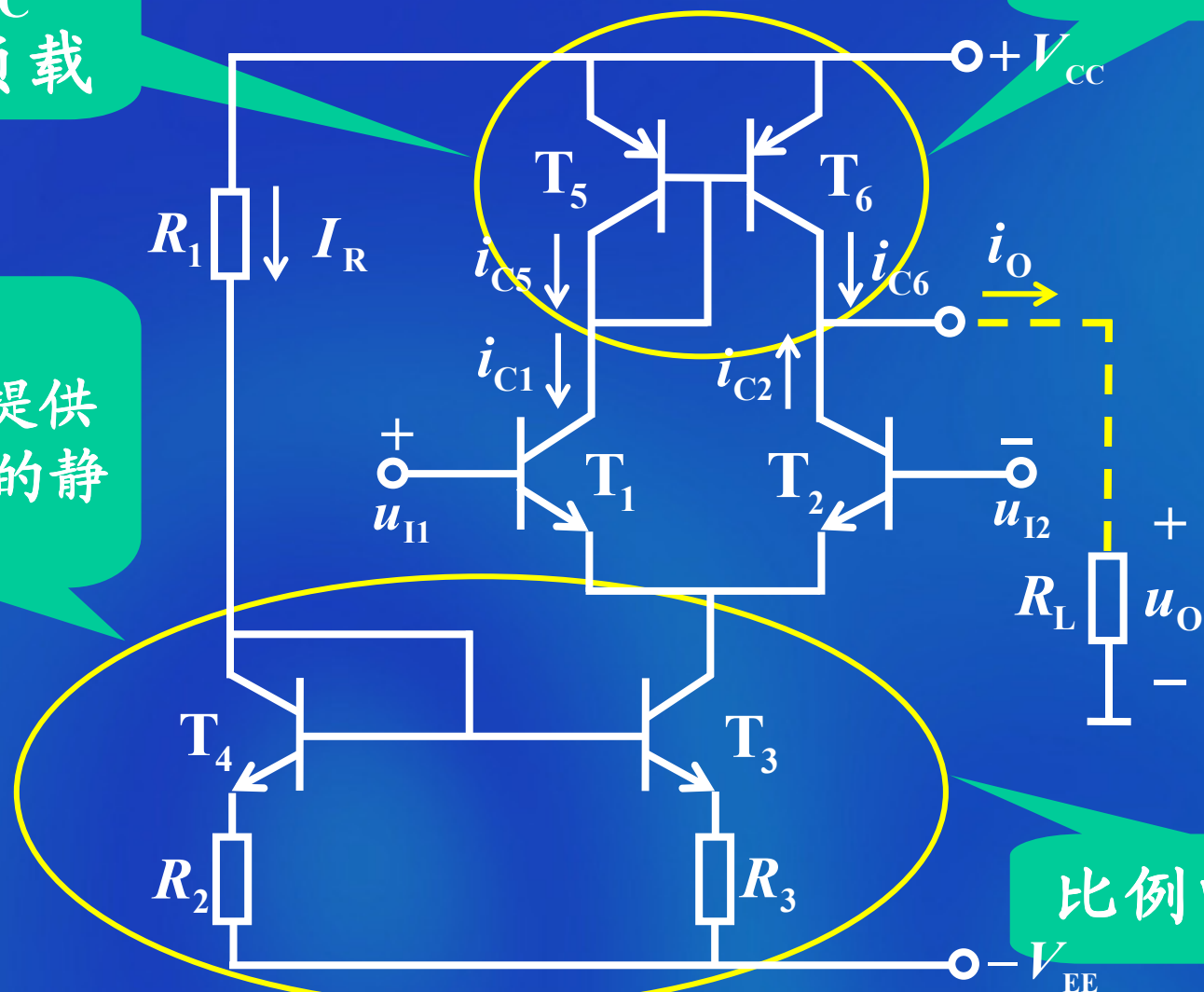
(1) 电路组成



代替 R_C
称有源负载

镜像电流源

代替 R_E
为 T_1 、 T_2 提供
合适稳定的静
态工作点



比例电流源

(2) 电路分析

因为 T_5 、 T_6 组成镜象电流源，所以

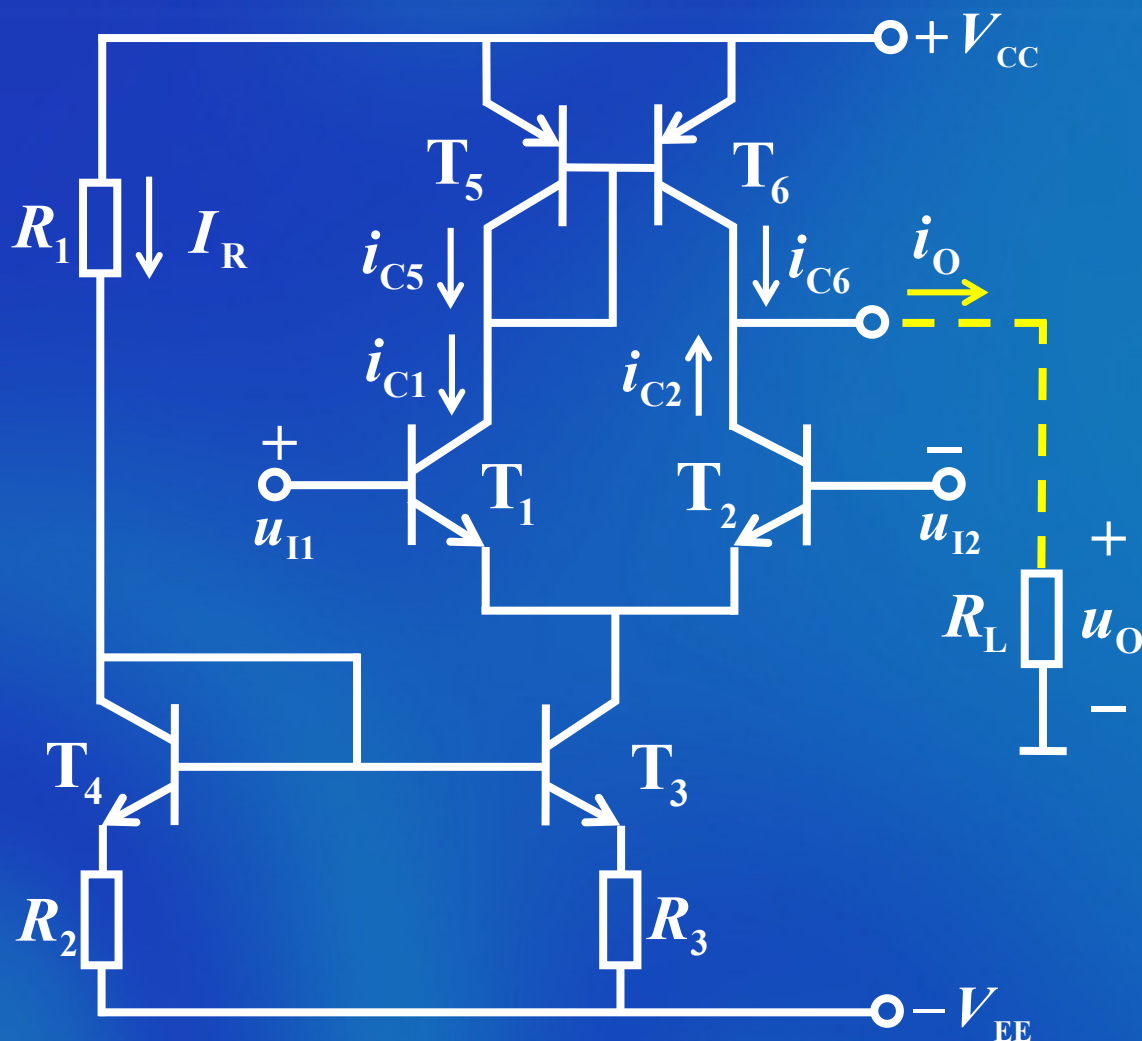
$$\Delta i_{C5} = \Delta i_{C6}$$

a. 当 $u_{i1} = u_{i2}$ 时

$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$$

忽略 T_5 、 T_6 的基极电流。则有

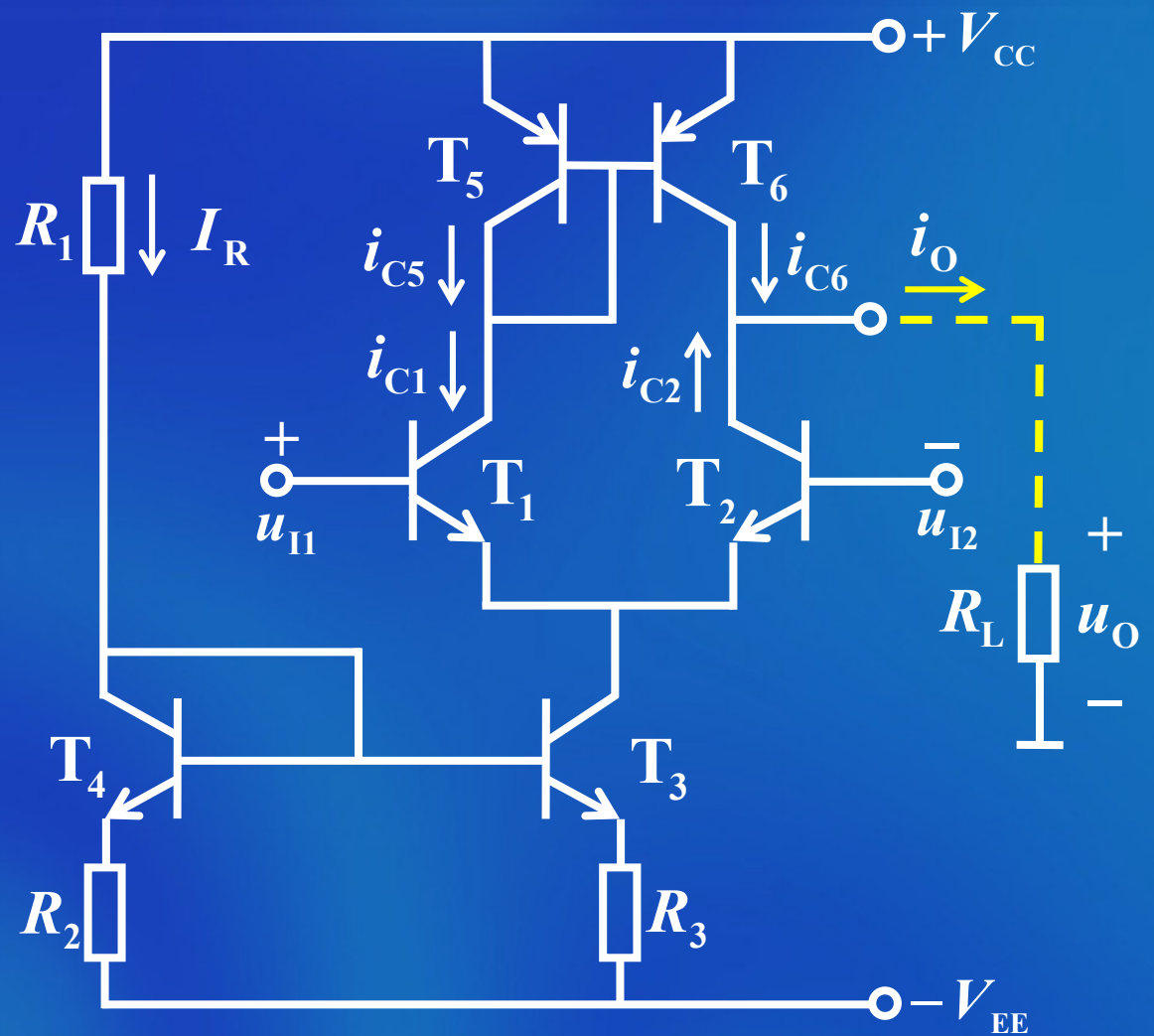
$$\Delta i_{C5} \approx \Delta i_{C1}$$



输出电流

$$\begin{aligned}\Delta i_O &= \Delta i_{C6} + \Delta i_{C2} \\ &= \Delta i_{C5} - \Delta i_{C1} \\ &\approx 0\end{aligned}$$

无共模信号输出



b. 当 $u_{I1} = -u_{I2}$ 时

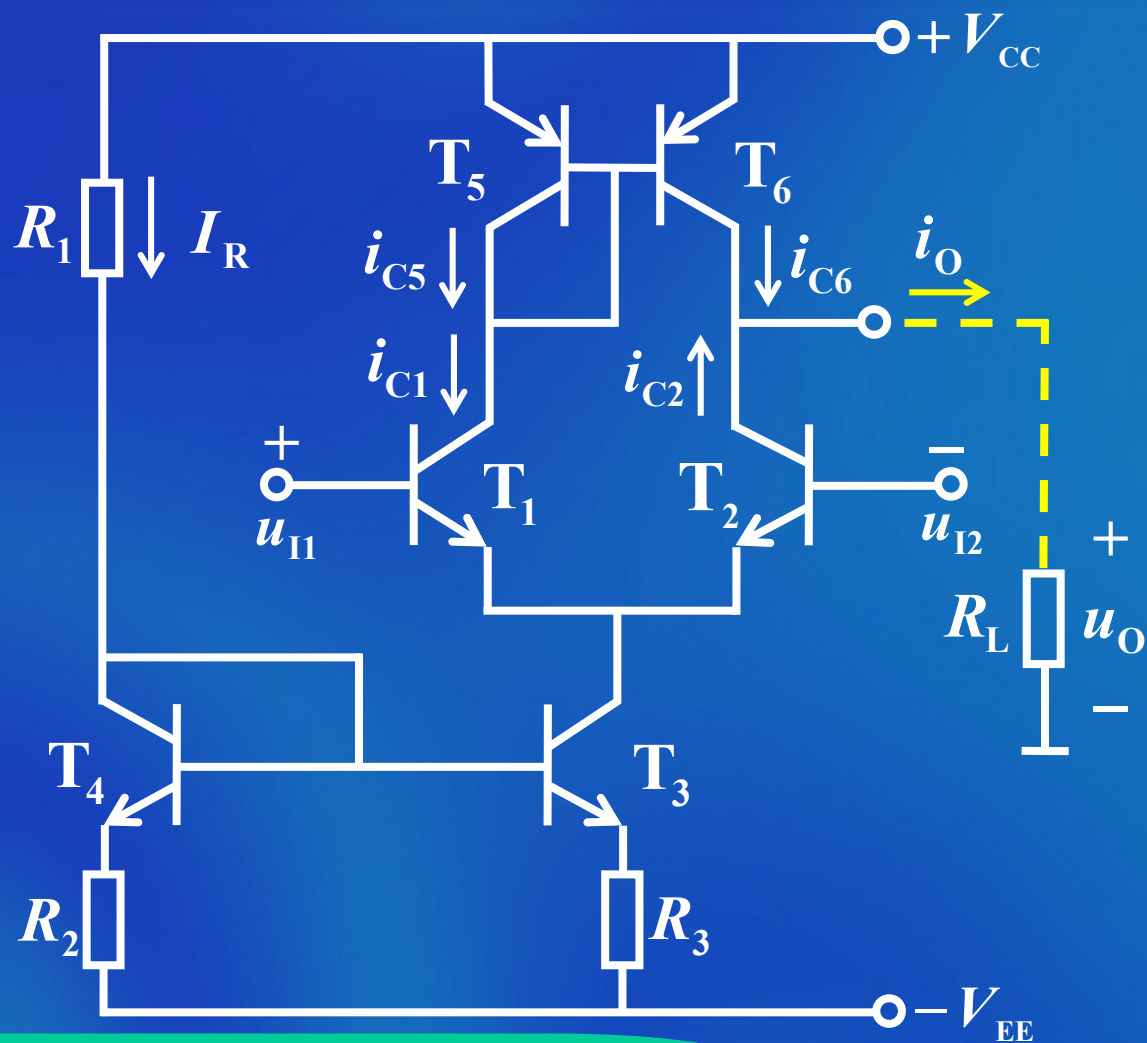
$$\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$$

输出电流

$$\Delta i_O = \Delta i_{C6} + \Delta i_{C2}$$

$$= \Delta i_{C1} + \Delta i_{C2}$$

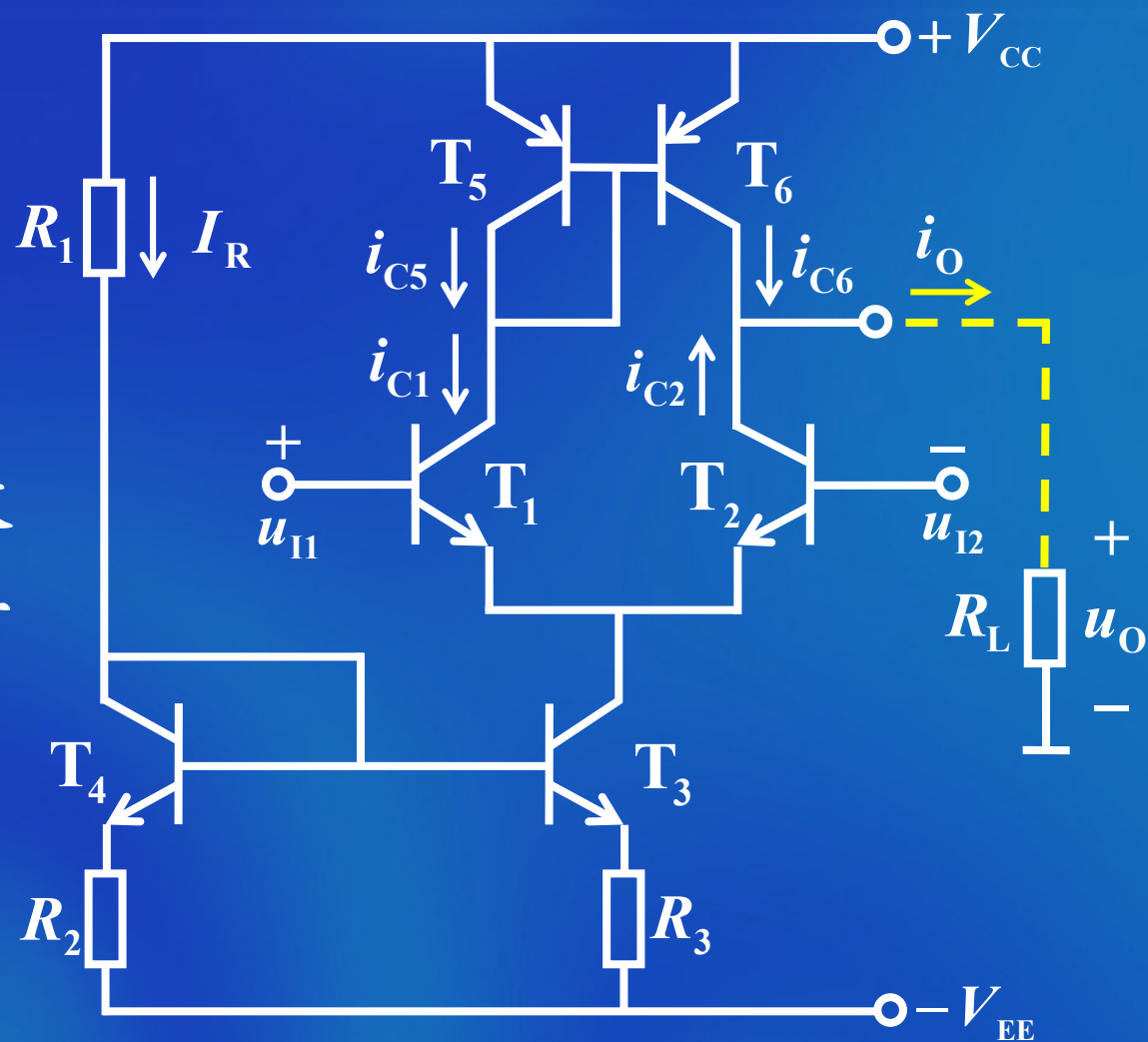
$$= 2\Delta i_{C1}$$



负载上得到了双端输出的电流

结论:

用电流镜取代差分放大电路的集电极电阻



单端输出的电路形式，实现了双端输出的功能。

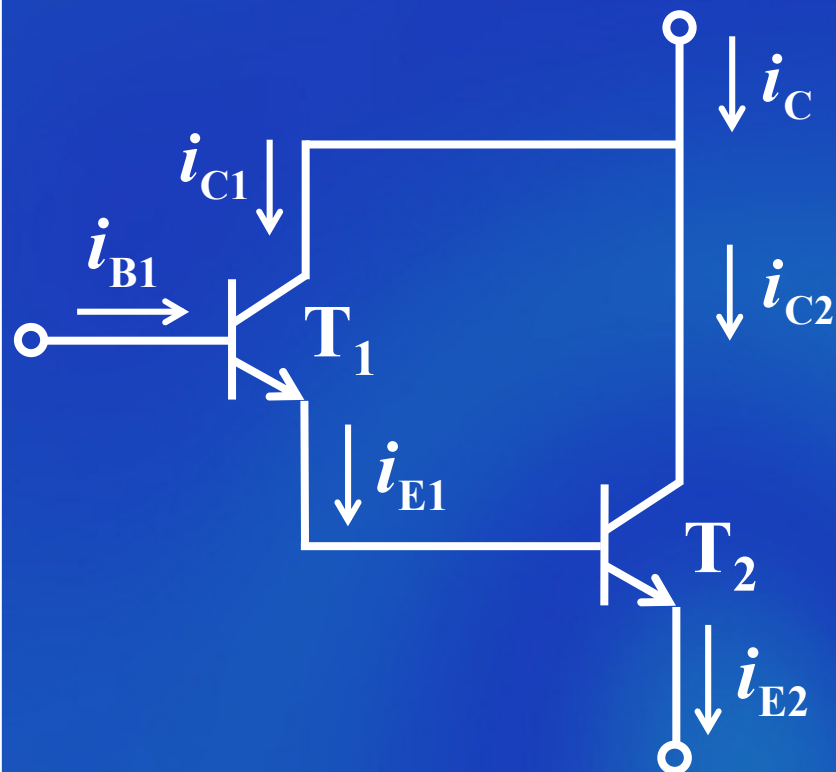
4.2.4 复合管电路

集成运放获得高电压增益，通常采用的方法：

- a. 采用电流源作有源负载。
- b. 利用多个晶体管组成复合管，以得到较大的电流放大系数 β 值。

常见的复合管结构

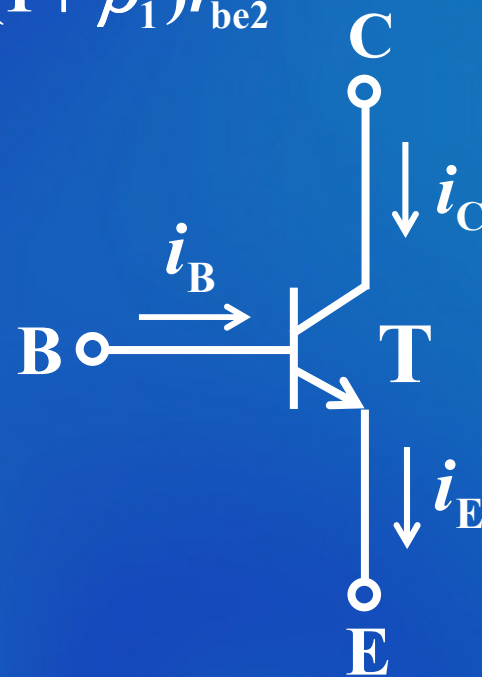
a. NPN管+NPN管



$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$$

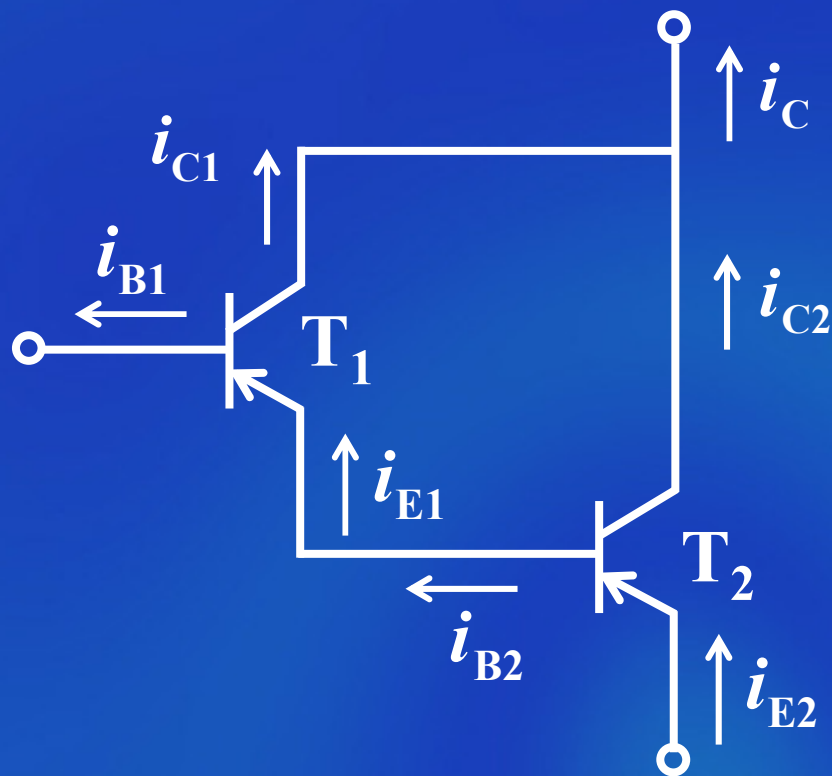
等效管



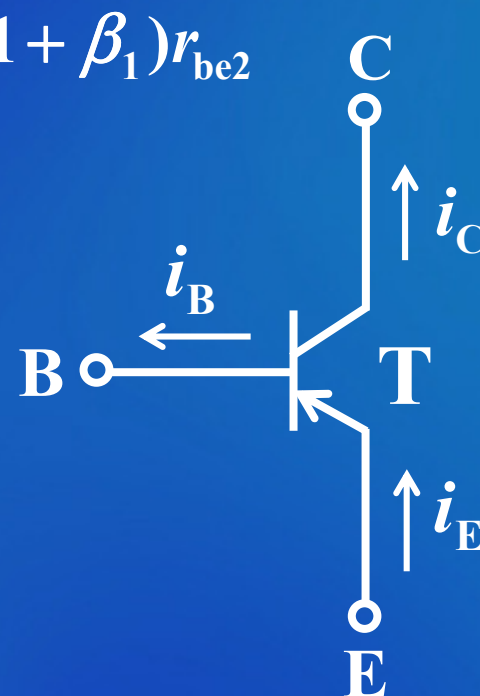
两个NPN型管可以复合成一个NPN型管

b. PNP管+PNP管

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2$$



等效管



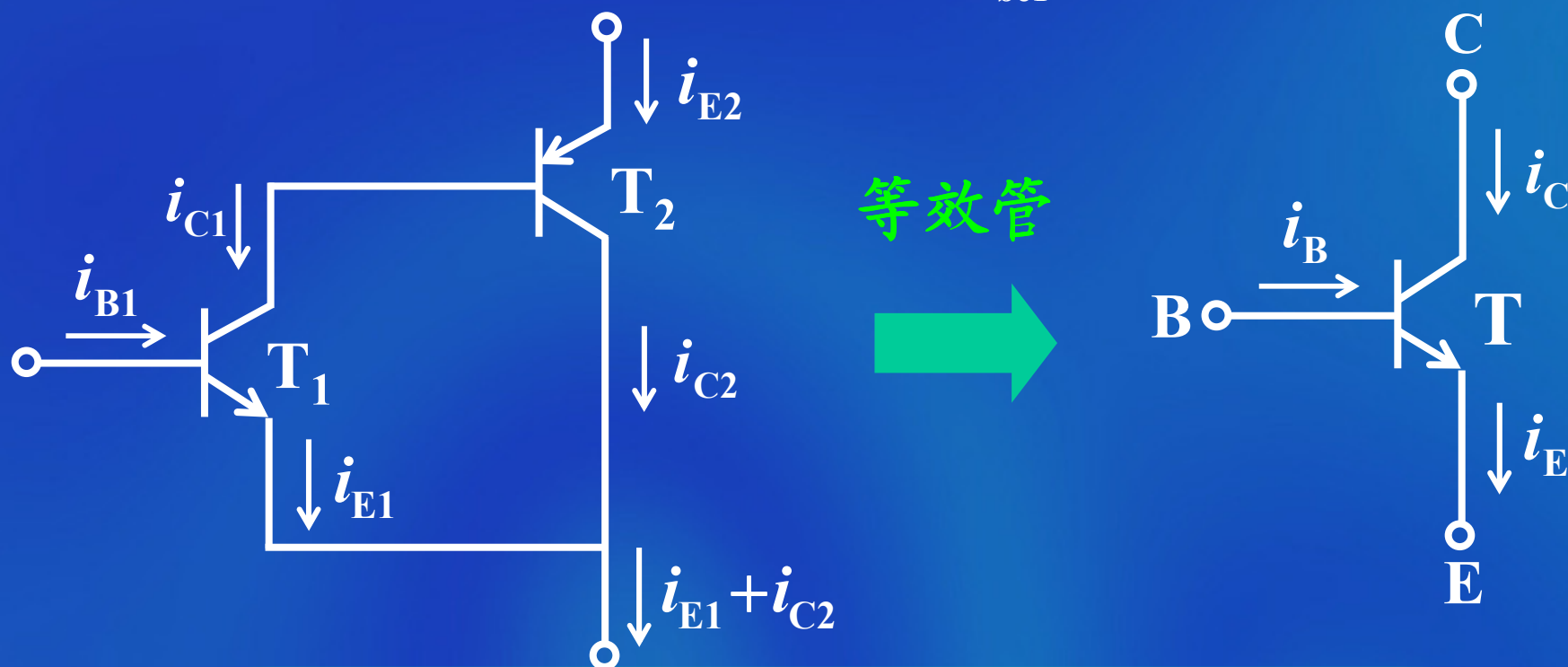
$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$$

两个PNP型管可以复合成一个PNP型管

c. NPN管+PNP管

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1}$$

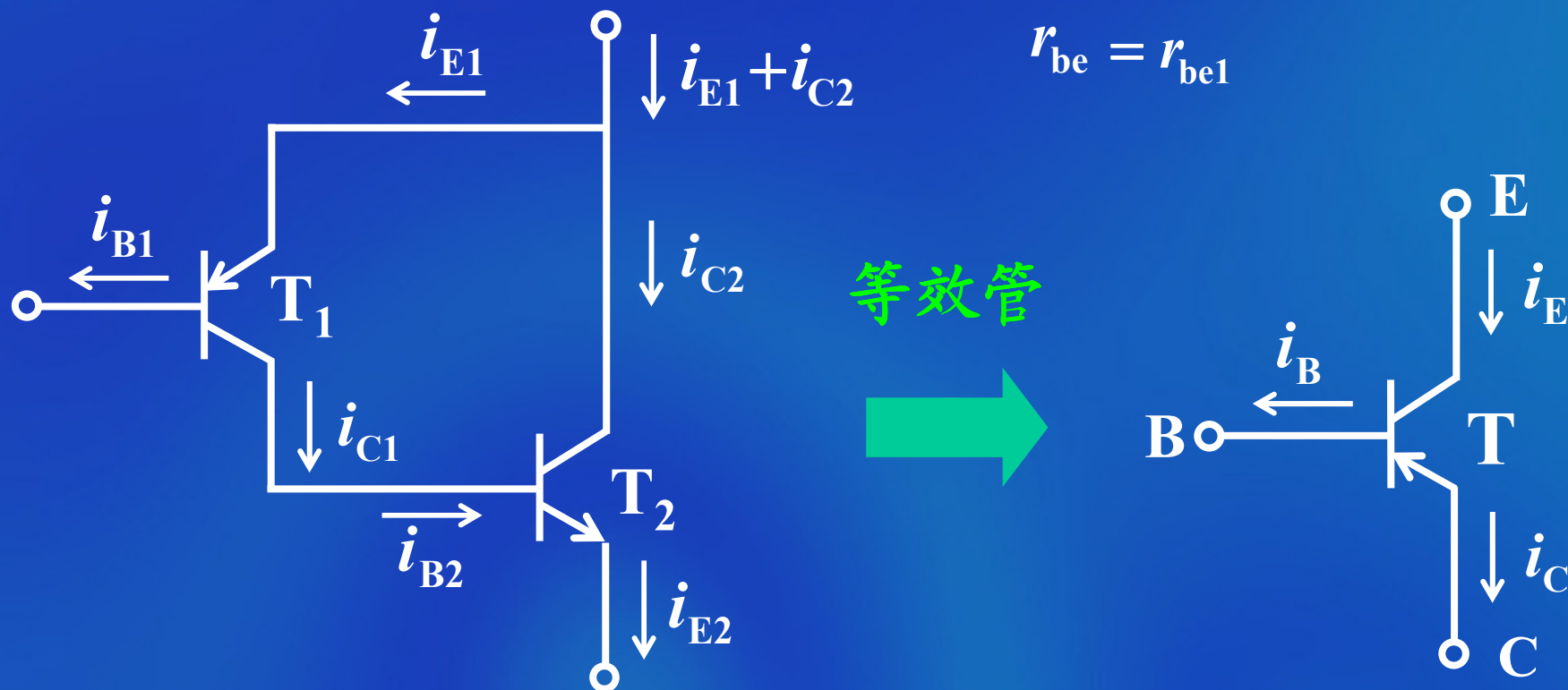


一个NPN和一个PNP型管可以复合成一个NPN型管

d. PNP管+NPN管

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1}$$



一个PNP和一个NPN型管可以复合成一个PNP型管

4.2.5 互补推挽放大电路

1. 电路组成

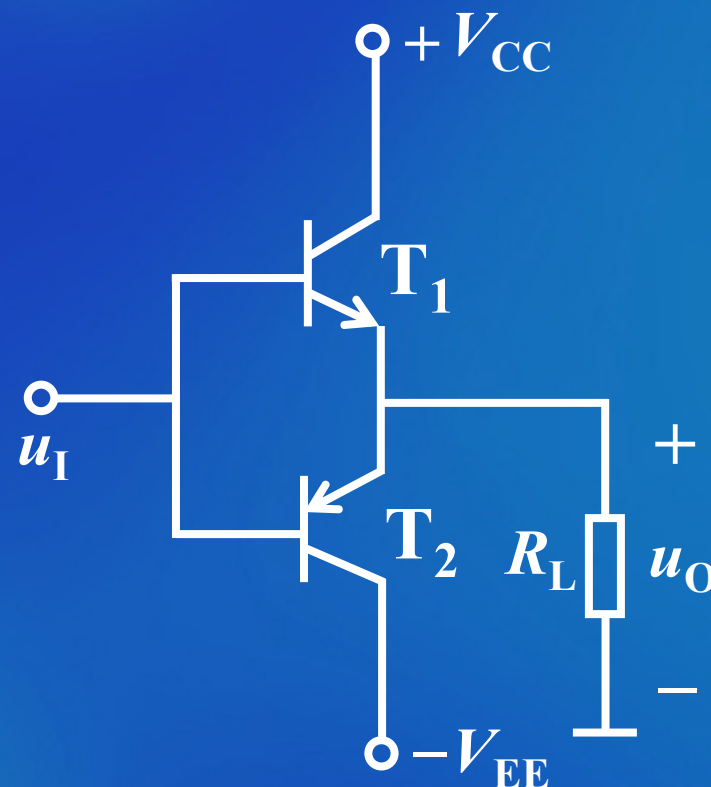
2. 电路主要特点

(1) T_1 、 T_2 参数相同

(2) 输出电阻小

(3) 动态范围大

(4) 带载能力强



$$U_{OP} = V_{CC} - U_{CES}$$

$$U_{OPP} = 2(V_{CC} - U_{CES})$$

3. 工作原理

(1) $u_I=0$ 时

T_1 、 T_2 截止

$$u_O=0$$

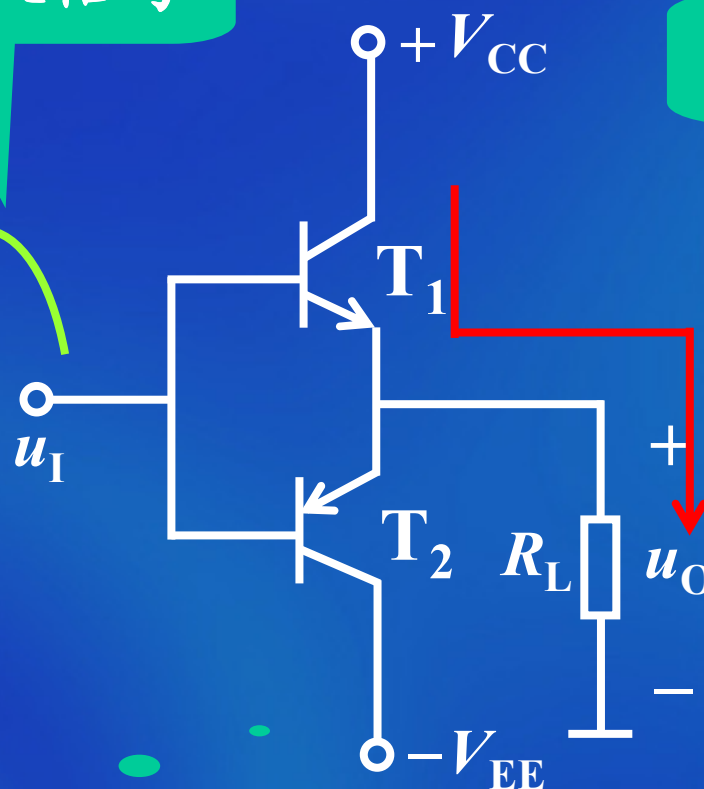
(2) $u_I>0$ 时

T_1 导通 T_2 截止

$$u_O \approx u_i$$

输入信号

输出信号



c. $u_i < 0$ 时

T_1 截止

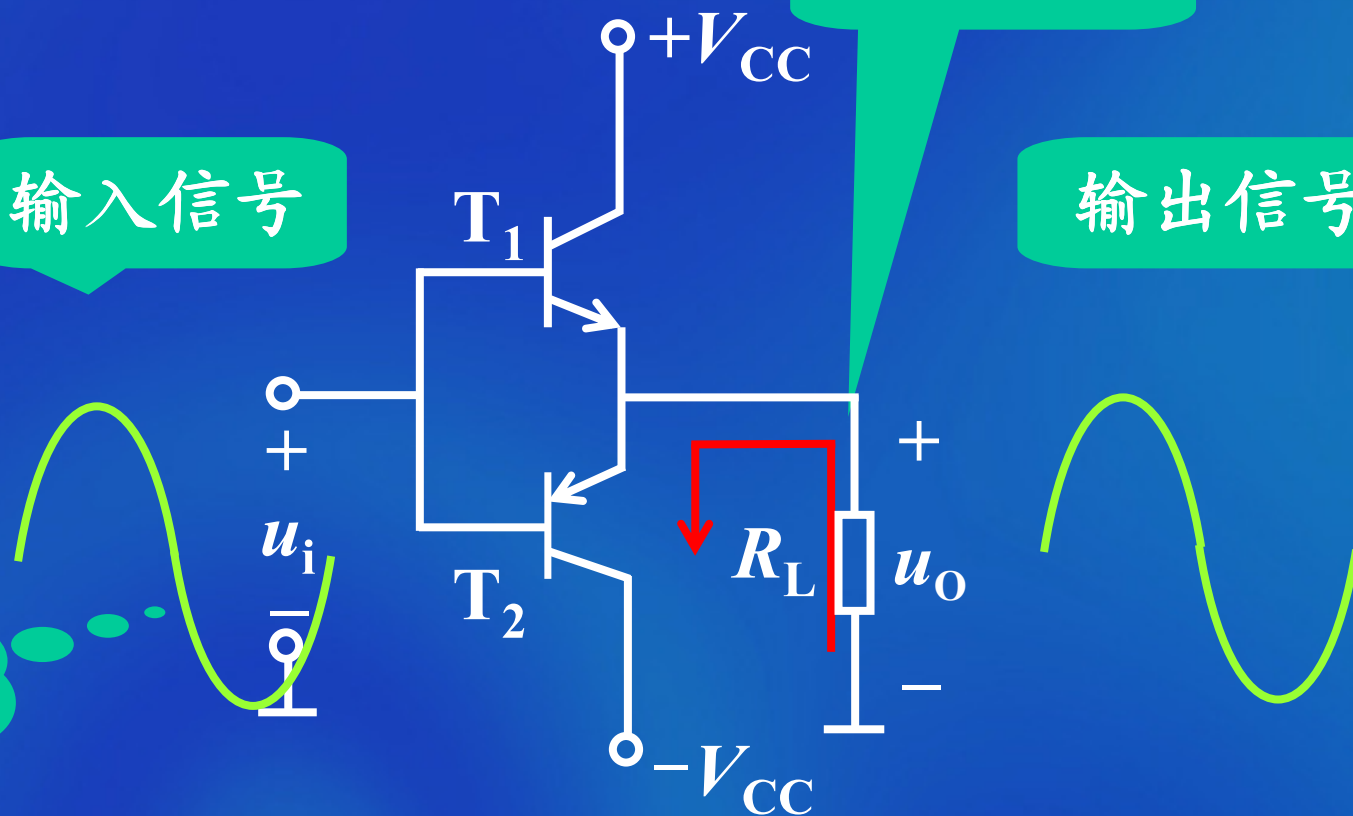
T_2 导通

输入信号

电流方向

输出信号

$u_o \approx u_i$



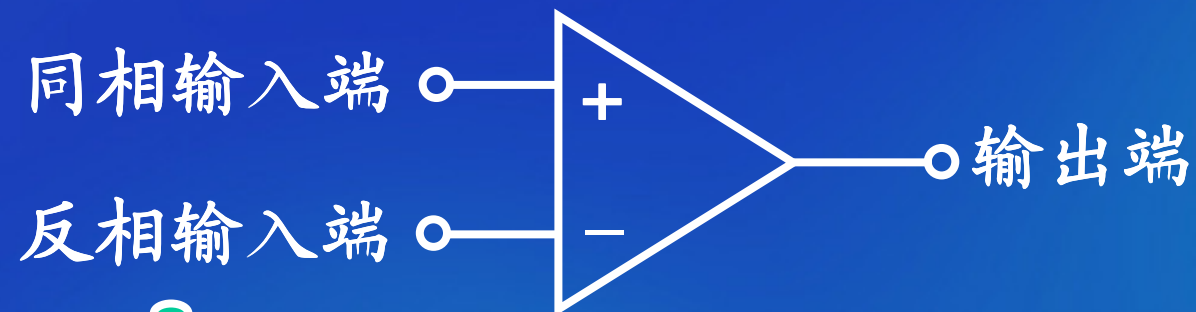
d. 输出动态范围

$U_{OPP} \approx 2V_{CC}$

思考题

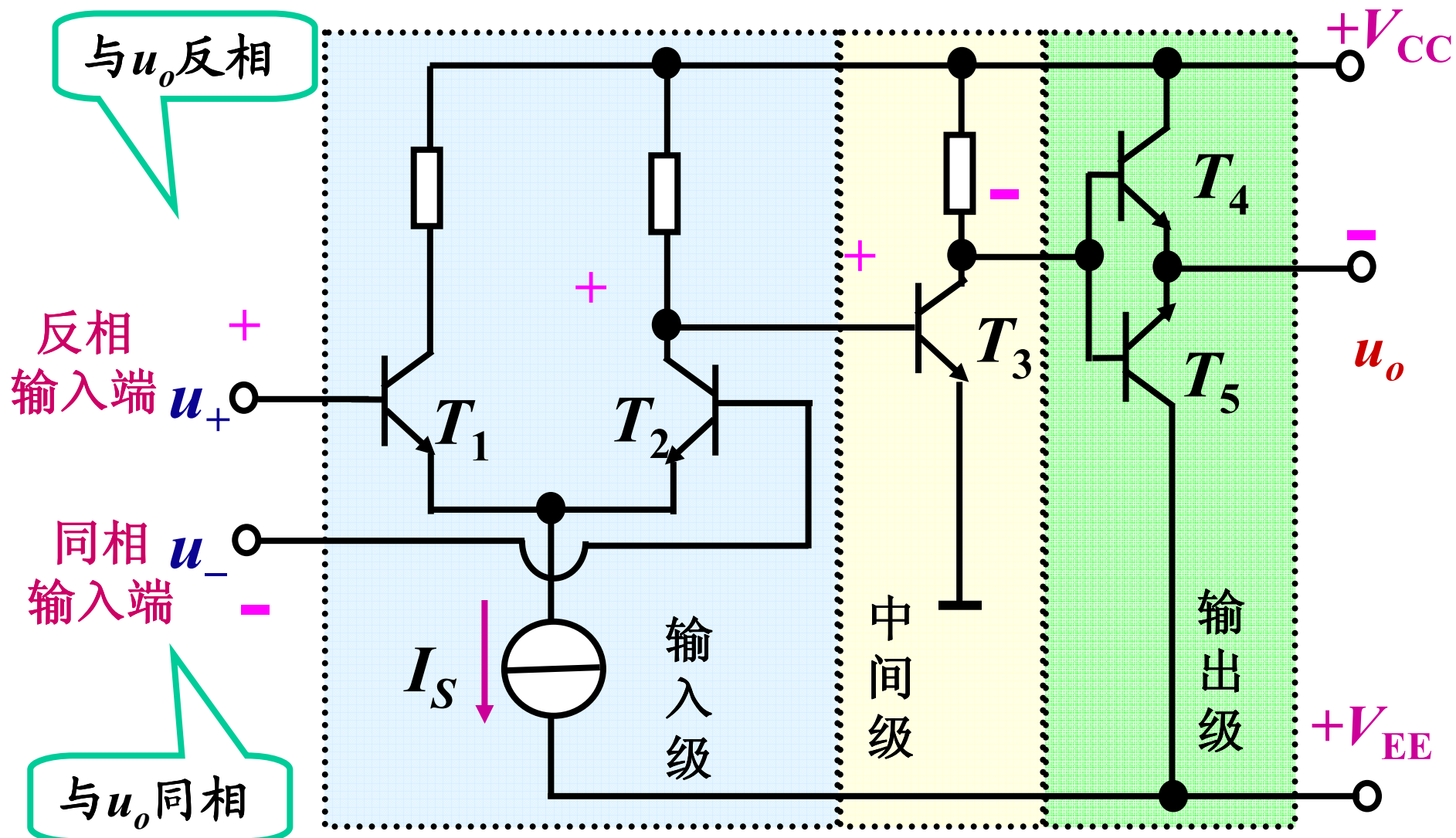
1. 单端输出的差分放大器输出电路并不对称，为什么也能抑制零点漂移？
2. 在放大电路中采用复合管的优缺点都有哪些？
3. 带恒流源的差分放大电路的主要特点是什么？

4.3 通用集成运算放大器

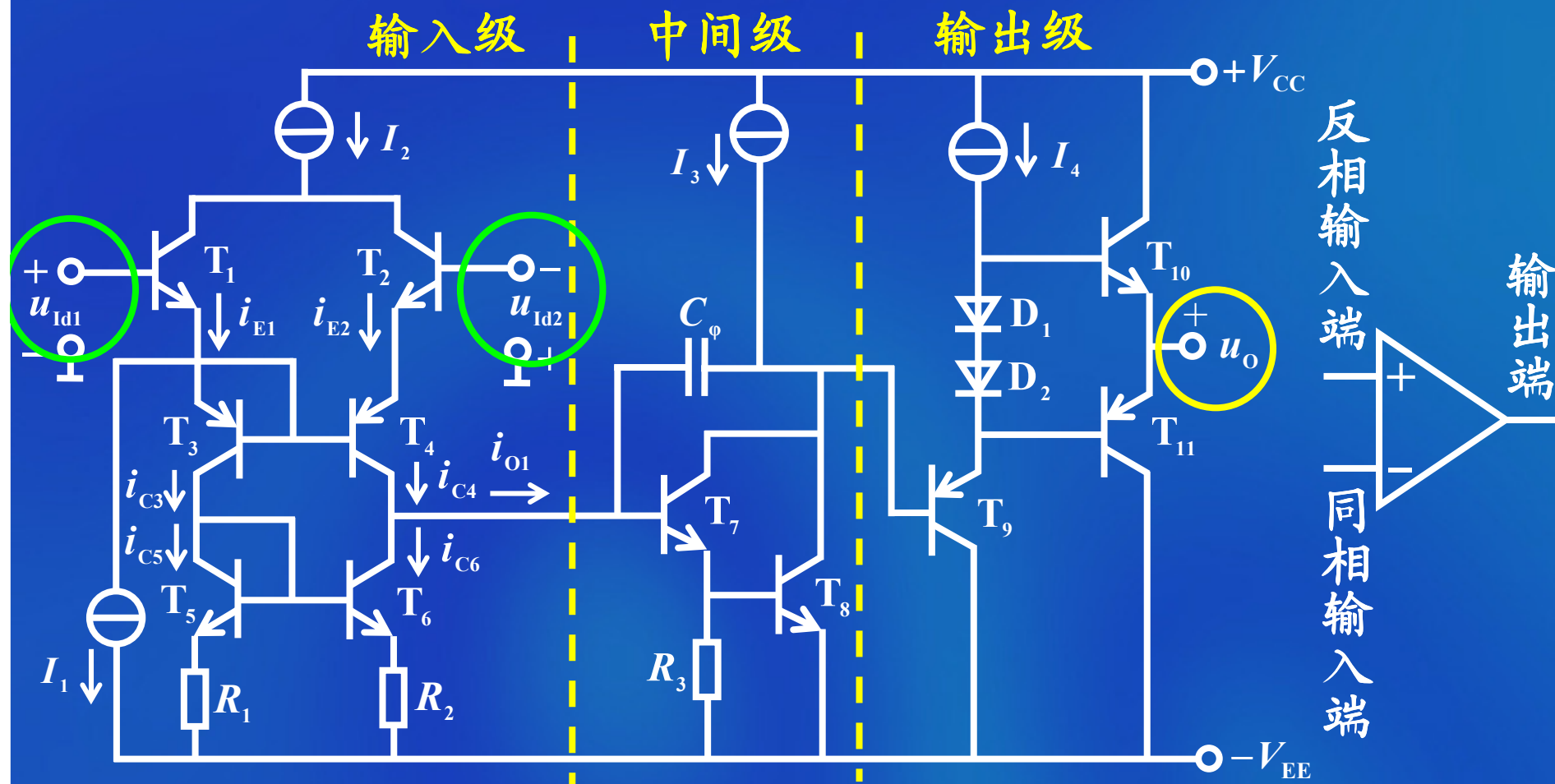


Why?

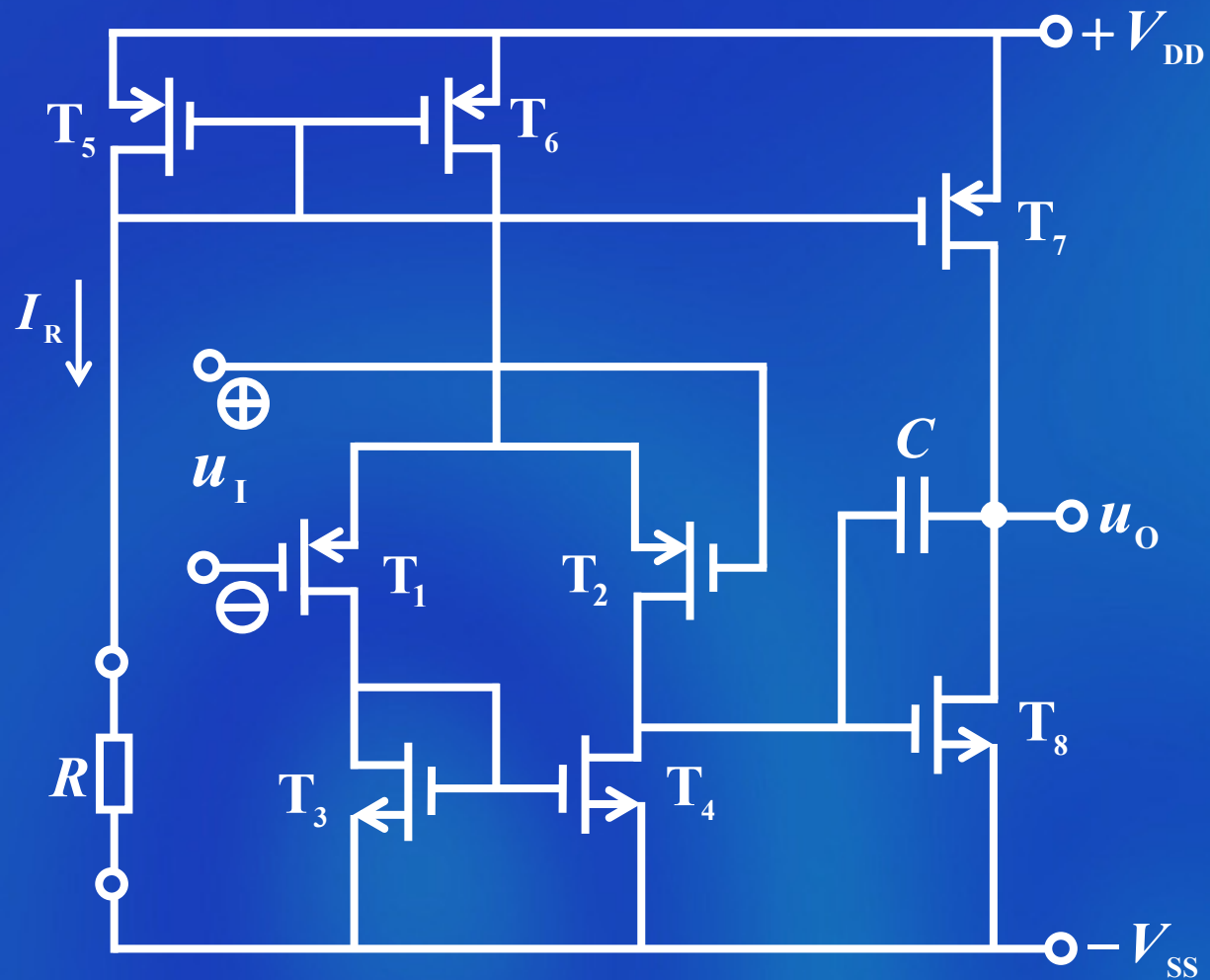
原理框图



4.3.1 双极型通用运算放大器简化电路



4.3.2 CMOS运算放大器



4.4 运算放大器的主要参数及简化低频等效电路

4.4.1 交流参数

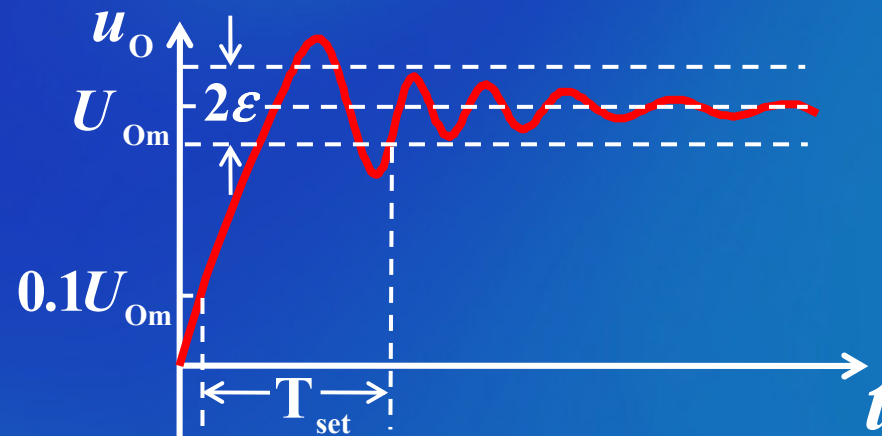
1. 开环差模电压增益 A_{ud}

2. 开环带宽（-3dB带宽） f_H

3. 单位增益带宽 f_{BWG}

4. 单位增益上升速率 S_R
$$S_R = \left| \frac{du_o}{dt} \right|_{\max} \quad (V/\mu S)$$

5. 建立时间 T_{set}



6. 最大差模输入电压 U_{IDM}

7. 最大共模输入电压 U_{ICM}

8. 最大输出电流 I_{OM}

9. 输出电压峰-峰值 U_{opp}

4.4.2 直流参数

1. 输入失调电压 U_{IO} $U_{IO} = |U_{BE1} - U_{BE2}|$

2. 输入偏置电流 I_{IB}

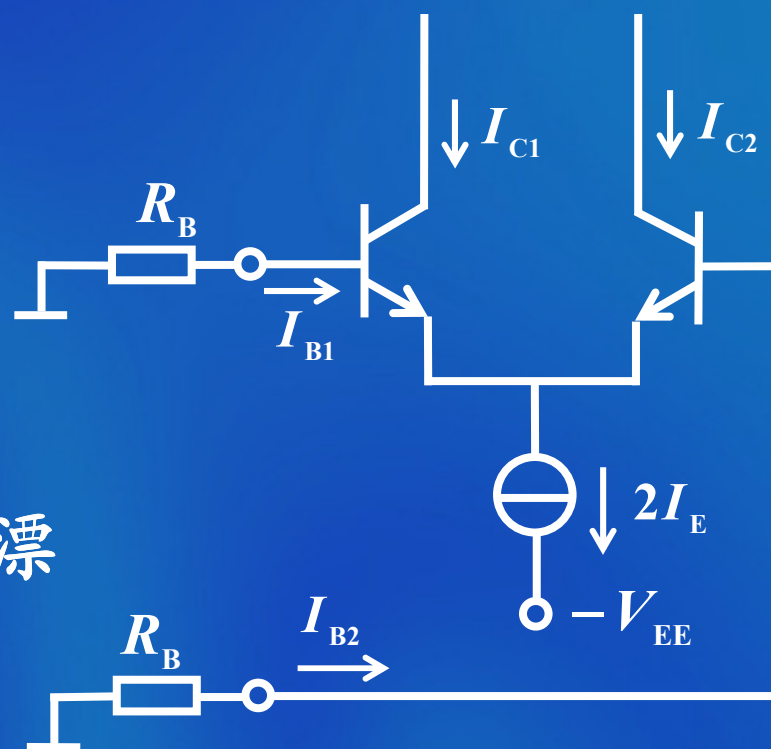
$$I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

3. 输入失调电流 I_{IO}

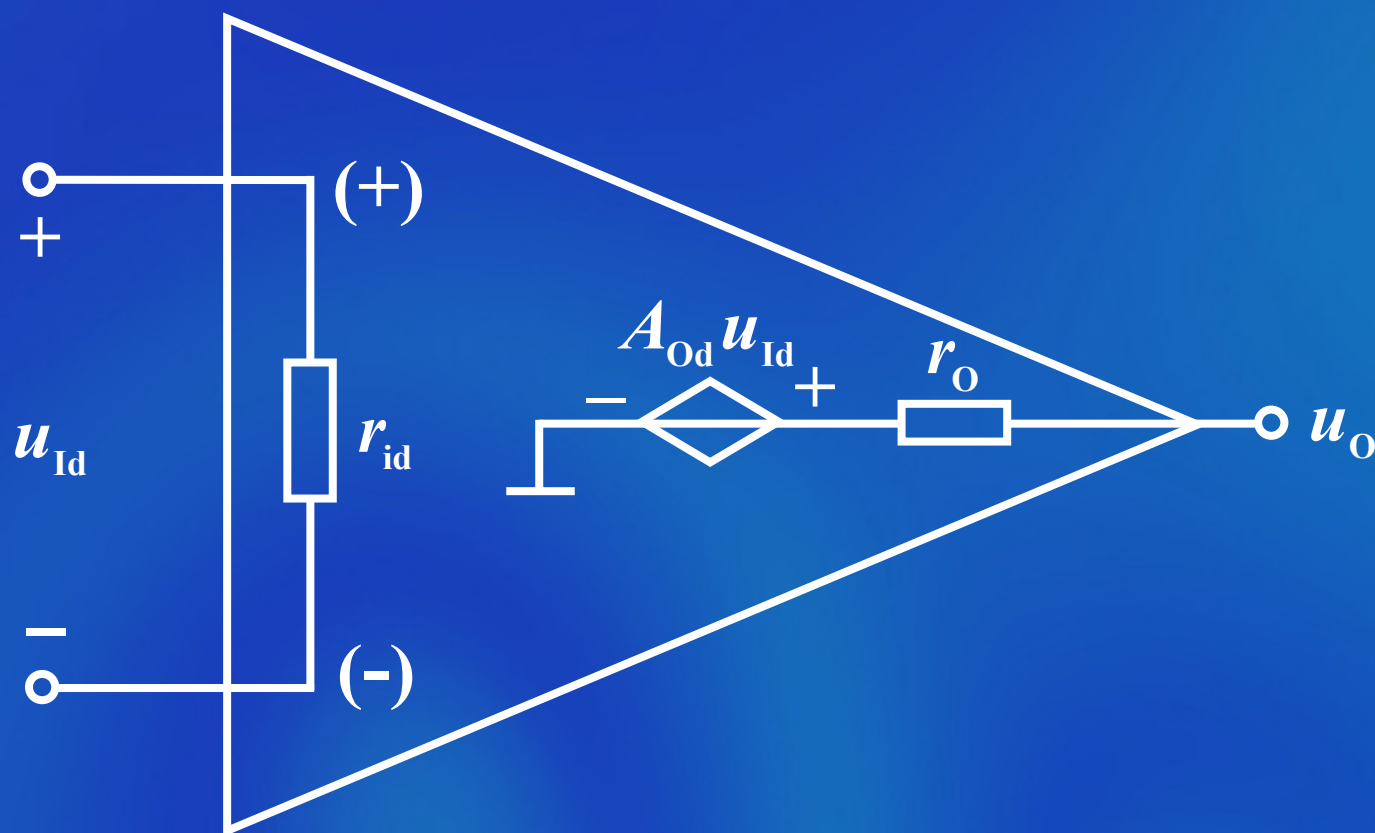
$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

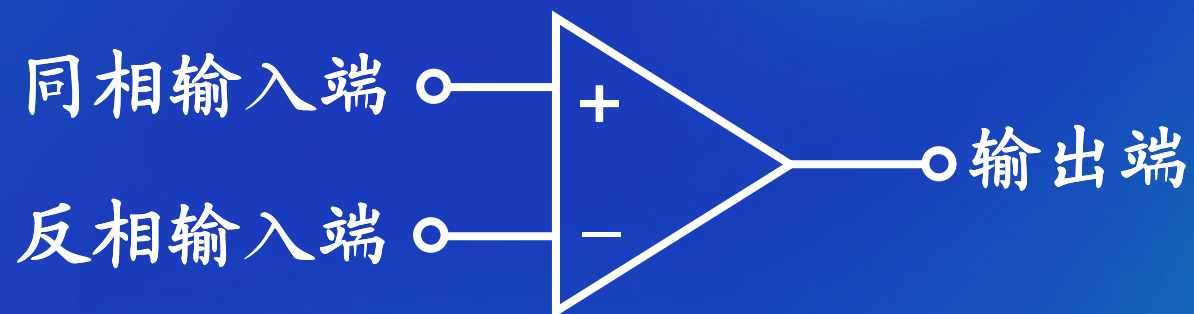
4. 失调电压和失调电流的温漂

$$\Delta U_{IO}/\Delta T, \Delta I_{IO}/\Delta T$$



4.4.3 简化低频等效电路





理想运放:

$$A_{ud} \rightarrow \infty$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$R_o \rightarrow 0$$

$$K_{CMR} \rightarrow \infty$$

$$f_{BW} \rightarrow \infty$$

4.5 其它集成运算放大器

4.5.1 几种特殊用途的运算放大器

1. 高精度运算放大器
2. 高输入阻抗运算放大器
3. 高速运算放大器
4. 低功耗运算放大器
5. 高压运算放大器

了解!!