



第八章 放大电路中的负反馈



8.1 反馈的基本概念与分类

8.1.1 反馈的基本概念

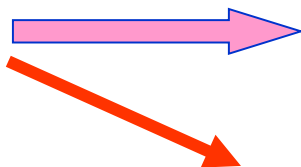
8.1.2 反馈的判断

8.2 负反馈对放大电路性能的影响

8.1.4 负反馈对放大电路性能的影响

掌握定性结论，无须定量分析

在放大器中引入负反馈



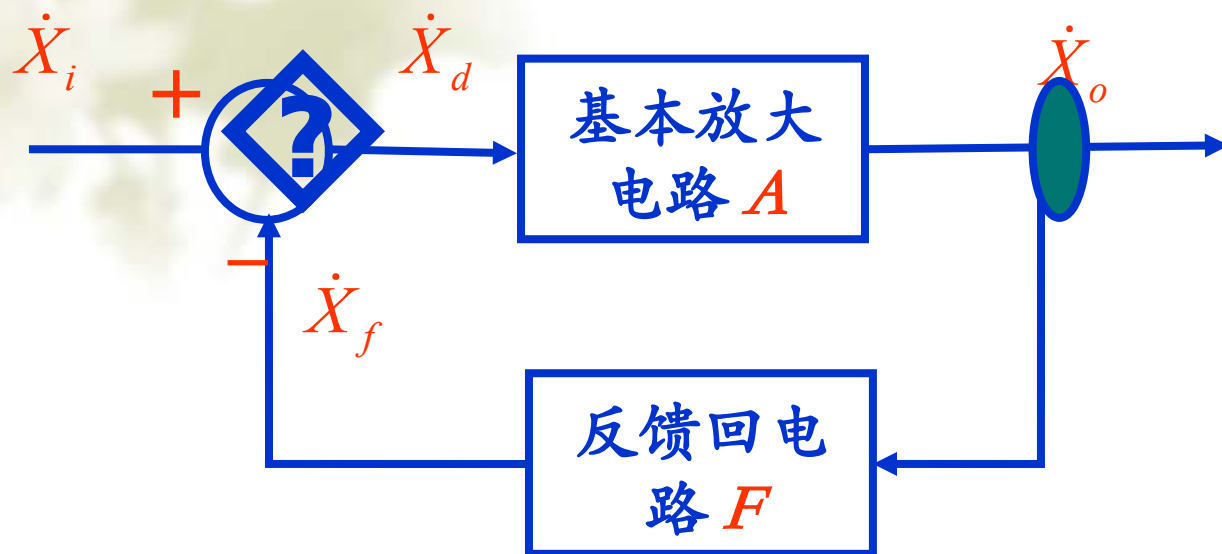
降低（方便调节）放大倍数

使放大器的性能得以改善:

- 提高增益的稳定性
- 减少非线性失真
- 扩展频带
- 改变输入电阻和输出电阻

1. 降低放大倍数

负反馈电路的
基本方程：



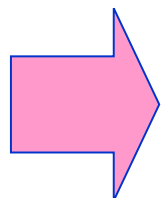
$$F = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

$$A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d}$$

$$\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

2. 提高放大倍数的稳定性

闭环时 $A_F = \frac{A}{1 + AF}$ 则 $\frac{dA_F}{dA} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$


$$\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

即闭环增益相对变化量比开环减小了 $1 + AF$ 倍

以 $10 = \frac{1000}{1 + 1000 * 0.099}$ 为例, 1000 变动 10% 变为 1100,

$$\frac{1100}{1 + 1100 * 0.099} = \frac{1100}{109.9} = 10.01, A \text{ 只变化 } 0.1\%$$

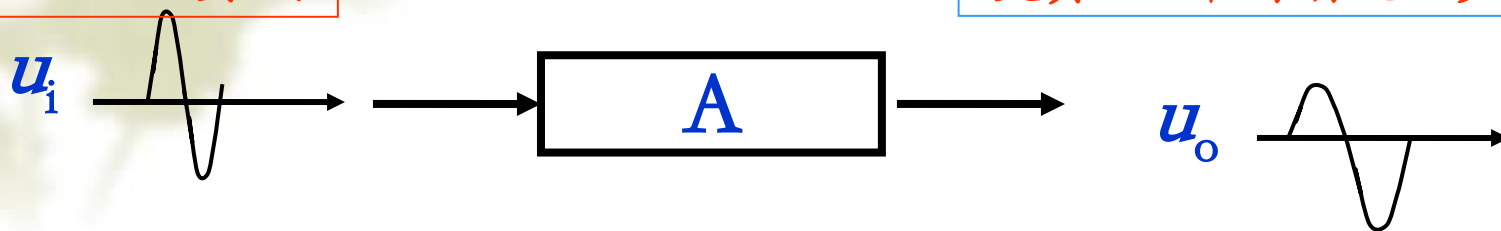
另一方面: 在深度负反馈条件下 $A_f \approx \frac{1}{F}$

即闭环增益只取决于反馈网络。当反馈网络由稳定的线性元件组成时, 闭环增益将有很高的稳定性。

A 的稳定性是以损失放大倍数为代价的。

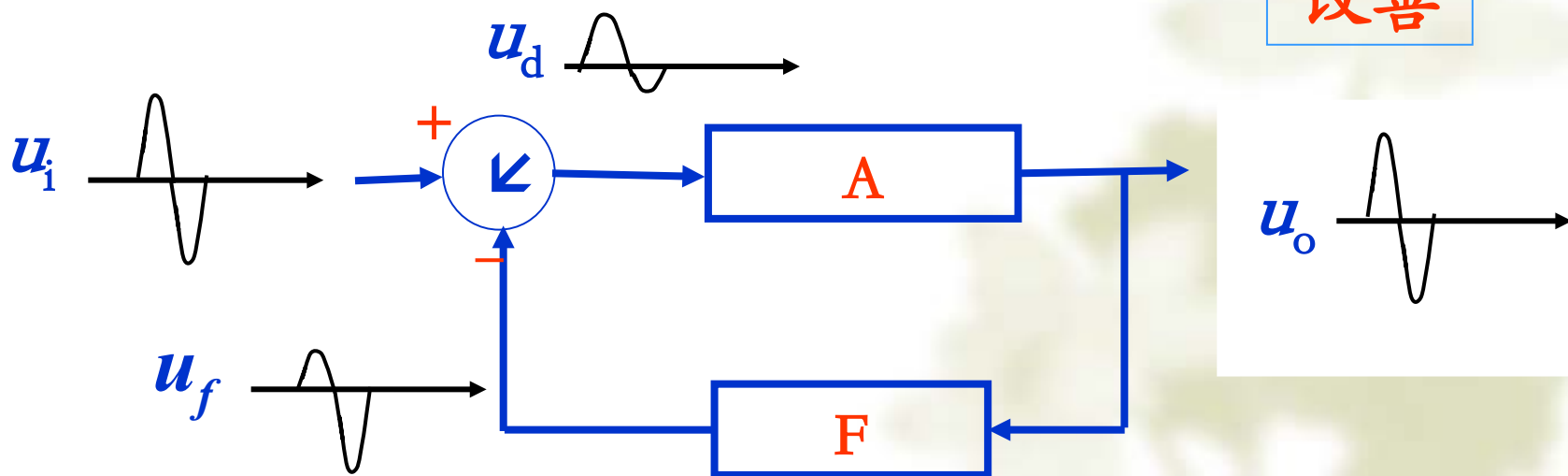
3. 改善放大器的非线性失真

加反馈前



失真：正半周期放大少一些

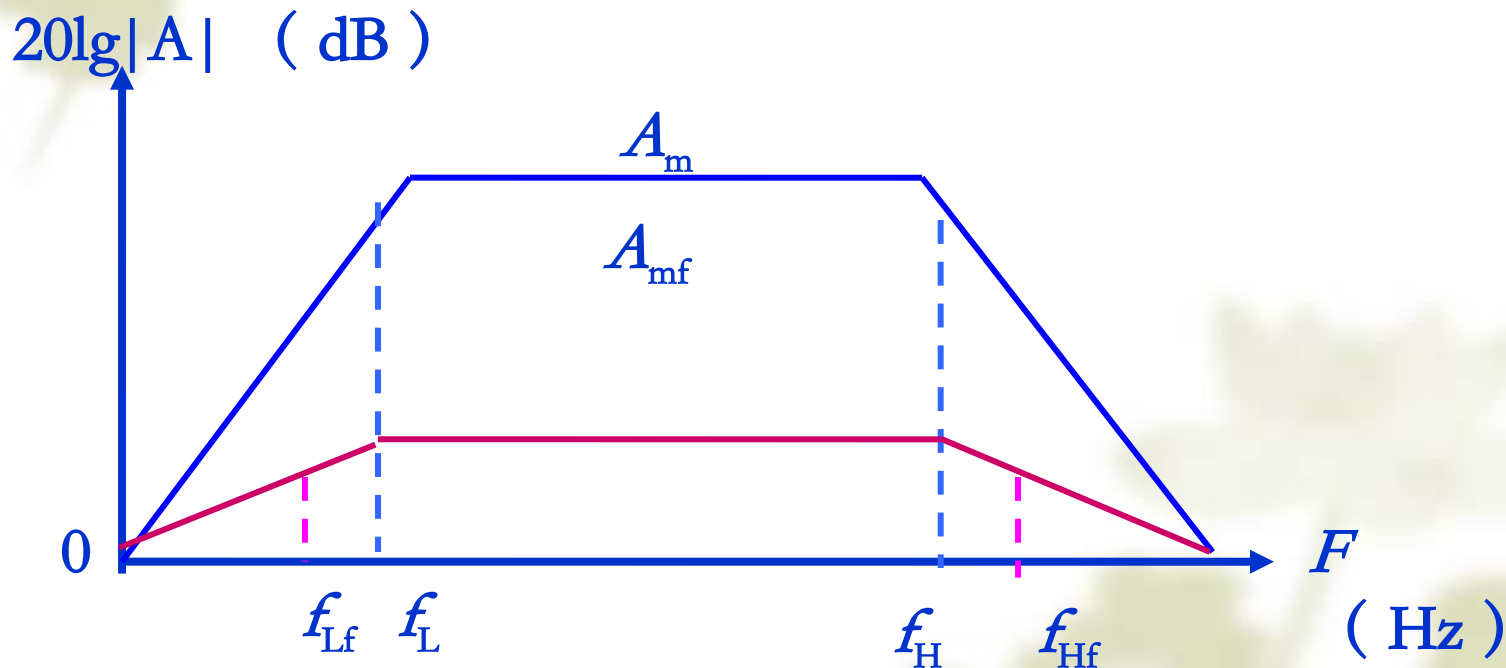
加反馈后



改善

4. 扩展放大器的通频带

放大电路加入负反馈后，增益下降，但通频带却加宽了。



无反馈时放大器的通频带: $f_{bw} = f_H - f_L$

有反馈时放大器的通频带: $f_{bwf} = f_{Hf} - f_{Lf}$

可以证明: $f_{bwf} = (1 + AF) f_{bw}$

5. 负反馈对输入电阻的影响

1) . 串联负反馈使电路的输入电阻增加:

$$r_{if} = r_i (1 + A F)$$

理解: 串联负反馈相当于在输入回路中串联了一个电阻,
故输入电阻增加。

2) . 并联负反馈使电路的输入电阻减小:

$$r_{if} = \frac{r_i}{(1 + A F)}$$

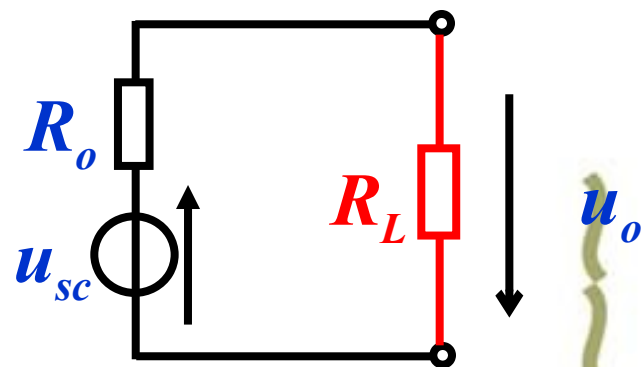
理解: 并联负反馈相当于在输入回路中并联了一条支路,
故输入电阻减小。

6. 负反馈对输出电阻的影响

(1) 电压负反馈使输出电阻减小

$$R_{of} = \frac{R_o}{(1 + AF)}$$

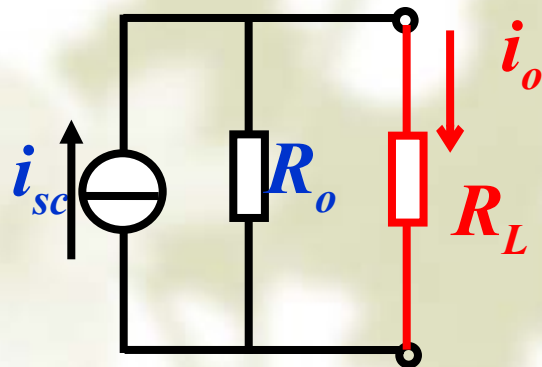
理解：电压负反馈→稳定输出电压（当负载变化时）→恒压源→输出电阻小。



(2) 电流负反馈使输出电阻提高

$$R_{of} = (1 + AF)R_o$$

理解：电流负反馈→稳定输出电流（当负载变化时）→恒流源→输出电阻大。



总结：

- 1、直流负反馈可以稳定直流工作点；交流负反馈可以改善放大电路的性能。
- 2、电压负反馈可以稳定输出电压、减小输出电阻；电流负反馈可稳定输出电流，增大输出电阻。
- 3、串联负反馈可增大输入电阻；并联负反馈减小输入电阻。
- 4、负反馈能减小自身产生的波形失真和噪声。
- 5、负反馈虽然降低了放大倍数，但使放大倍数更稳定，且通频带展宽了。

为改善性能引入负反馈的一般原则

- 要稳定直流量—— 引直流负反馈
- 要稳定交流量—— 引交流负反馈
- 要稳定输出电压—— 引电压负反馈
- 要稳定输出电流—— 引电流负反馈
- 要增大输入电阻—— 引串联负反馈
- 要减小输入电阻—— 引并联负反馈

注意：不同的交流负反馈对放大电路动态指标的改善是不同的
 所有的交流负反馈都可以通过牺牲 A_u 换取通频带的拓宽。P229

1、不同的输出端反馈类型的改善区别

稳定输出电压

$A_u \downarrow \rightarrow$ 减小 r_o

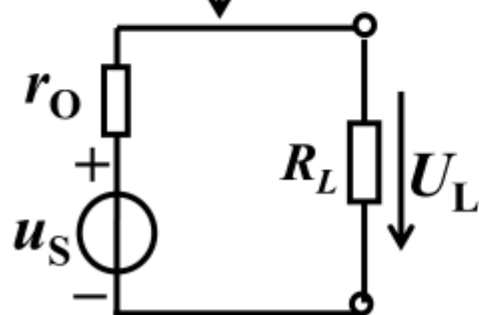
稳定输出电流

$A_u \downarrow \rightarrow$ 增大 r_o

电压负反馈 区别 电流负反馈

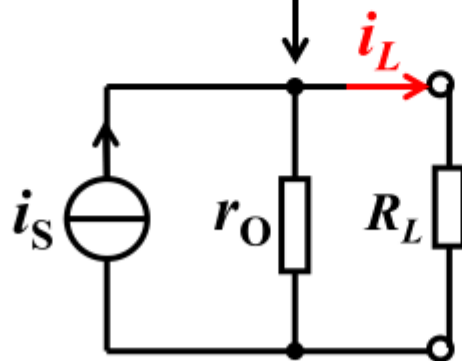
采集电压

采集电流



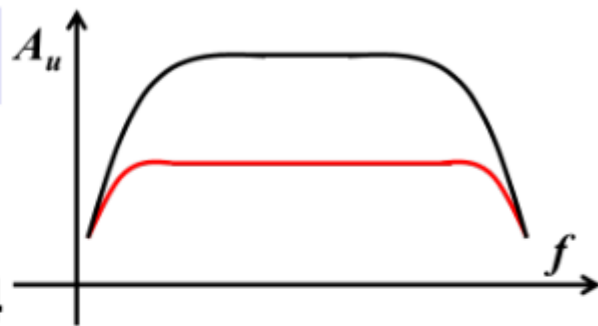
电压源

输出趋于恒压源



电流源

输出趋于恒流源



P234

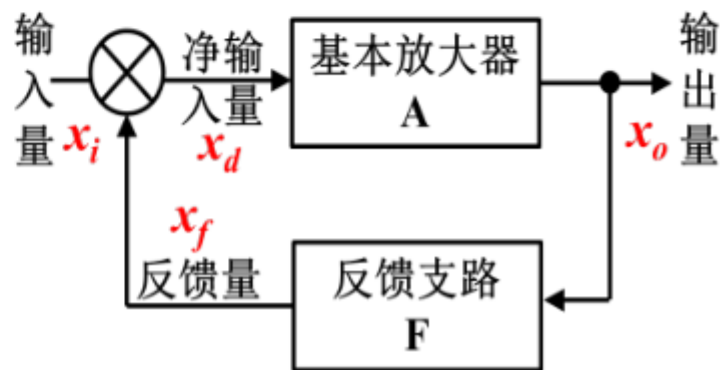
2、不同的输入端反馈类型的改善区别

串联负反馈

并联负反馈

增大 r_i

减小 r_i



注意：不同的交流负反馈对放大电路动态指标的改善是不同的

闭环输入电阻 r_{if} : $r_{if} = \frac{u_i}{i_i}$

开环输入电阻 r_i : $r_i = \frac{u_d}{i_i} = \frac{u_{be}}{i_i} \because u_{be} < u_i \therefore r_{if} > r_i$

① 串联负反馈: $u_{be} = u_i - u_f$ $r_i = \frac{u_i}{i_d} = \frac{u_i}{i_b} \because i_b < i_i \therefore r_{if} < r_i$

② 并联负反馈: $i_b = i_i - i_f$

思考：深度负反馈下改善程度如何？

$$|A_f| = \frac{|A|}{|1 + AF|} \rightarrow |1 + AF| \gg 1$$

截图(Ctrl + A)

牺牲越多放大倍数，性能改善越好

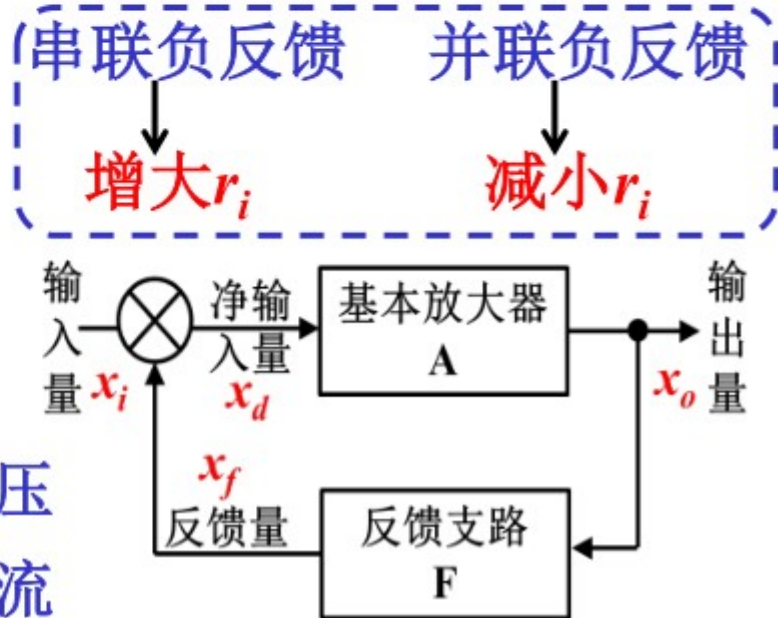
1、串联深度负反馈: $r_{if} \rightarrow \infty$

2、并联深度负反馈: $r_{if} \rightarrow 0$

3、电压深度负反馈: $r_{of} \rightarrow 0$ 输出恒压

4、电流深度负反馈: $r_{of} \rightarrow \infty$ 输出恒流

2、不同的输入端反馈类型的改善区别



第三章 负反馈放大电路

六、根据题目要求，按需引入合适负反馈

先固定反馈电阻 R_f 的一端

例如：题目要求减小输出电阻

必须引入电压负反馈

注意：当反馈一端固定后，另一端的两个选择中，**只有一个可以实现负反馈**，另一个必然实现的是正反馈。

根据 R_f 和 u_o 的关系

- ① u_o 和 R_f 接在**同一极** → 采集**电压** → **电压**负反馈
- ② u_o 和 R_f 接在**不同极** → 采集**电流** → **电流**负反馈

根据 R_f 和 u_i 的关系

- ① u_i 和 R_f 接在**同一极** → 信号**分流** → **并联**负反馈
- ② u_i 和 R_f 接在**不同极** → 信号**分压** → **串联**负反馈

另一端的选择：可以**先假设**某种连接，再用**瞬时极性法判断**是否是负反馈。若是，说明假设正确；若不是，说明假设错误。

8-7 请根据以下要求判断应引入何种负反馈，并画出反馈路径

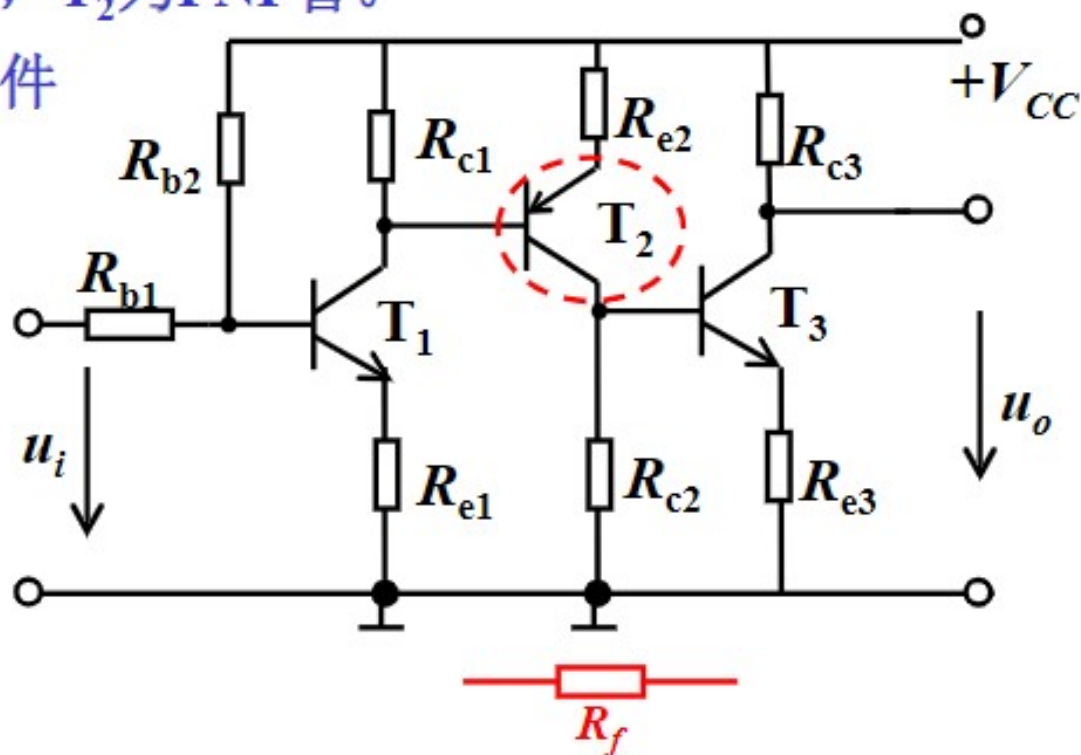
- (1) 希望电路元件参数的改变对输出端静态电压的影响比较小；
- (2) 希望加信号后， I_{c3} 的数值基本不受 R_{c3} 改变的影响；
- (3) 希望接上负载 R_L 前后电压放大倍数基本不变；
- (4) 希望输入端向信号源（电压源）索取的电流比较小。

注意： T_1 和 T_3 为NPN管， T_2 为PNP管。

NPN和PNP虽然放大条件相反，但结论相同。

B入C出
↓
共射接法
↓
电压反相放大

B入E出
↓
共集接法
↓
电压同相跟随



(1) 希望电路元件参数的改变对输出端静态电压的影响比较小;

即: 希望该电路能稳定直流输出电压 \rightarrow 直流电压负反馈

\therefore 可以首先确定 R_f 和 u_o 的连接 $\rightarrow u_o$ 和 R_f 接在同一个电极

另一端怎么接能实现负反馈? 先假设再用瞬时极性法验证

假设与 u_i 接在不同极

注意: T2的C在下面

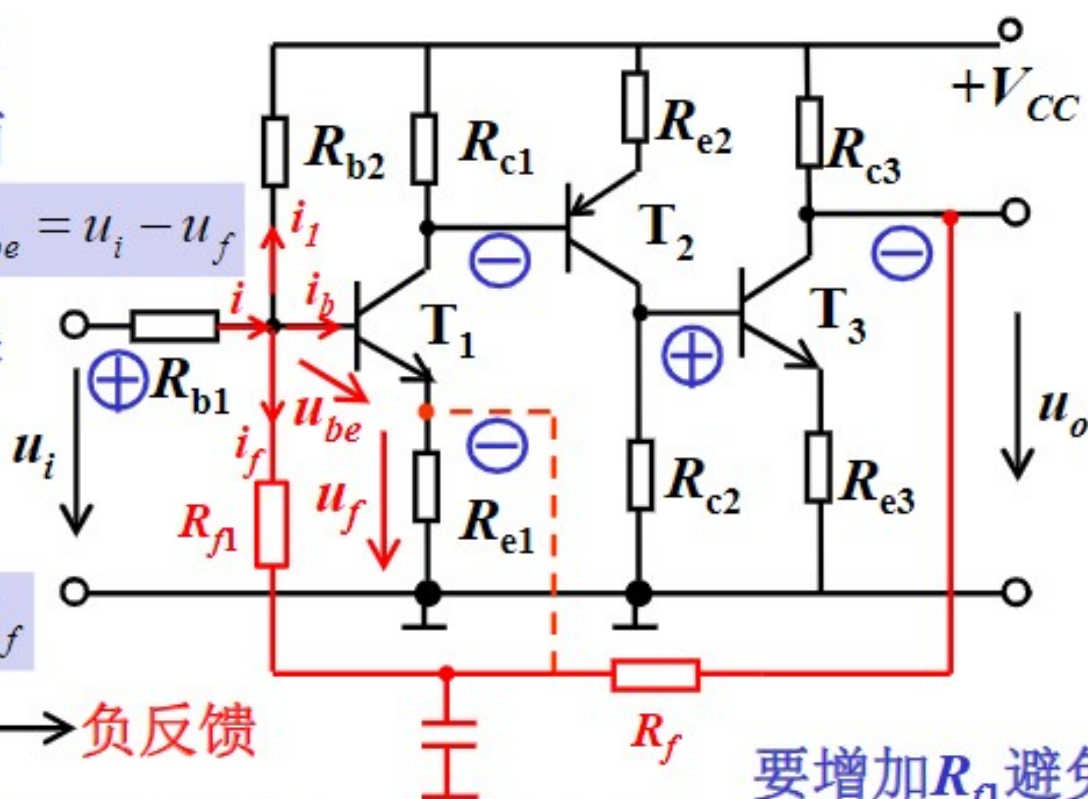
$\therefore u_f < 0 \rightarrow u_{be}$ 增大 $u_{be} = u_i - u_f$

\therefore 正反馈, 假设错误

$\therefore R_f$ 与 u_i 接在同一极

即电压并联负反馈

$i_b = i - i_1 - i_f$
 $i_f = \frac{u_i' - u_o}{R_f} > 0 \rightarrow i_b \downarrow \rightarrow$ 负反馈



要增加 R_{f1} 避免

若希望该反馈只对直流起作用可在 R_f 后接电容到地。T₁发射结短路

(2) 希望加信号后, I_{c3} 的数值基本不受 R_{c3} 改变的影响;

即: 希望该电路能稳定直流输出电流 \rightarrow 直流电流负反馈

\therefore 第一题已判断出该图采用电压并联接法才能实现负反馈

\therefore 第二题应采用电流串联接法才能实现负反馈

用瞬时极性法验证

$\therefore u_f > 0 \rightarrow u_{be}$ 减小 $u_{be} = u_i - u_f$

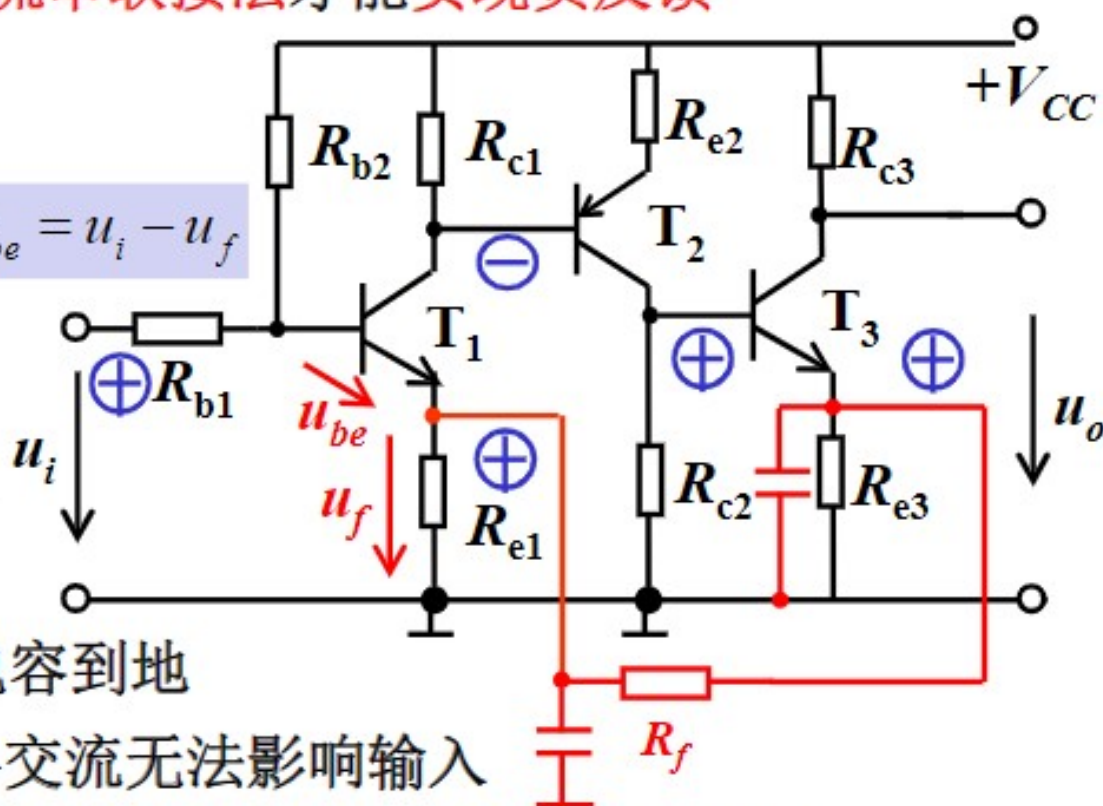
\therefore 负反馈

若希望该反馈只对直流起作用:

做法1: 可在 R_f 后接电容到地

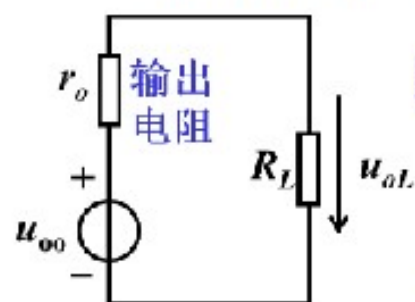
在 R_{e1} 并接旁路电容 \rightarrow 交流无法影响输入

做法2: 可在 R_{e3} 并接旁路电容 \rightarrow 无法采集到交流信号



(3) 希望接上负载 R_L 前后电压放大倍数基本不变;

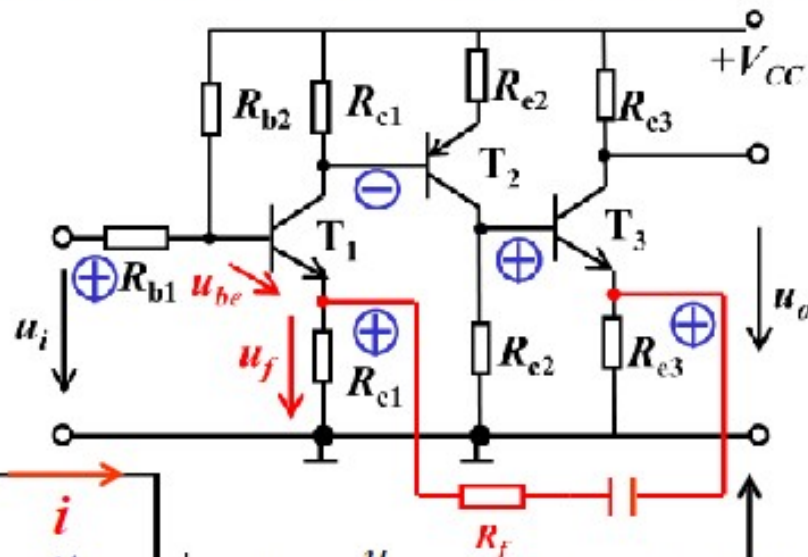
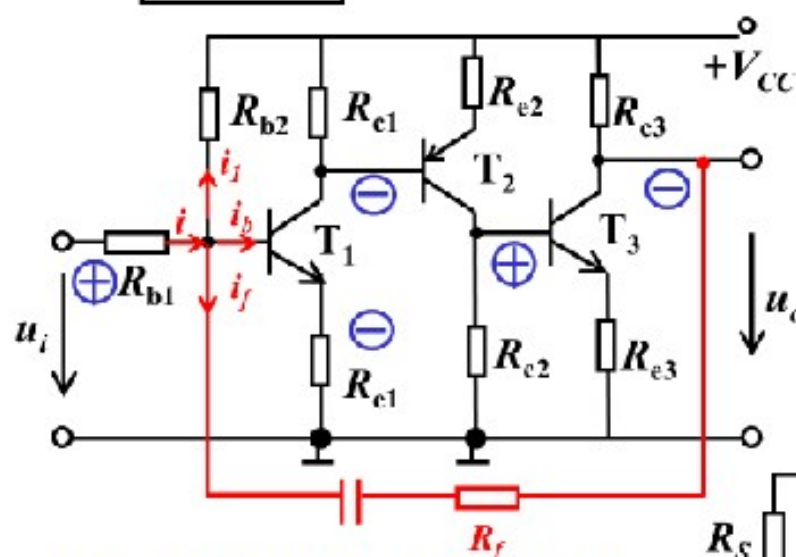
空载时 $A_u = \frac{u_{oo}}{u_i}$ 有载时 $A_u = \frac{u_{oL}}{u_i} \therefore u_{oo}$ 与 u_{oL} 越接近越好



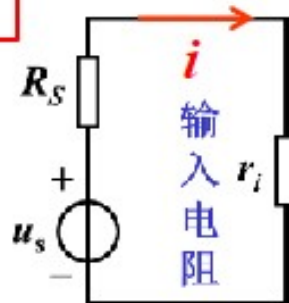
即输出电阻 r_o 越小越好 \rightarrow 引入电压交流负反馈

参考第一题, 输入端应采用并联反馈。

若希望只对交流起作用, 可在支路上串接电容。



(4) 希望输入端向信号源 (电压源) 索取的电流比较小



$i = \frac{u_s}{R_s + r_i}$ 希望 r_i 越大越好
电流串联交流负反馈

小结

1. 将电子系统输出回路的电量（电压或电流），以一定的方式送回到输入回路的过程称为反馈。

2. 常用的负反馈有四种组态：电压串联负反馈，电压并联负反馈，电流串联负反馈和电流并联负反馈。可以通过观察法，输出短路法和瞬时极性法等方法判断电路反馈类型。

3. 负反馈电路的四种不同组态可以统一用方框图加以表示，其闭环增益的表达式为：

$$A_F = \frac{A}{1 + AF}$$

4. 负反馈可以全面改善放大电路的性能，包括：提高放大倍数的稳定性，减小非线性失真，抑制噪声，扩展频带，改变输入、输出电阻等。

第7章 集成运算放大器

7.1 概述 + 直接耦合放大电路及其特殊问题

7.2 差动式放大电路

7.3 差动式放大电路的输入输出方式

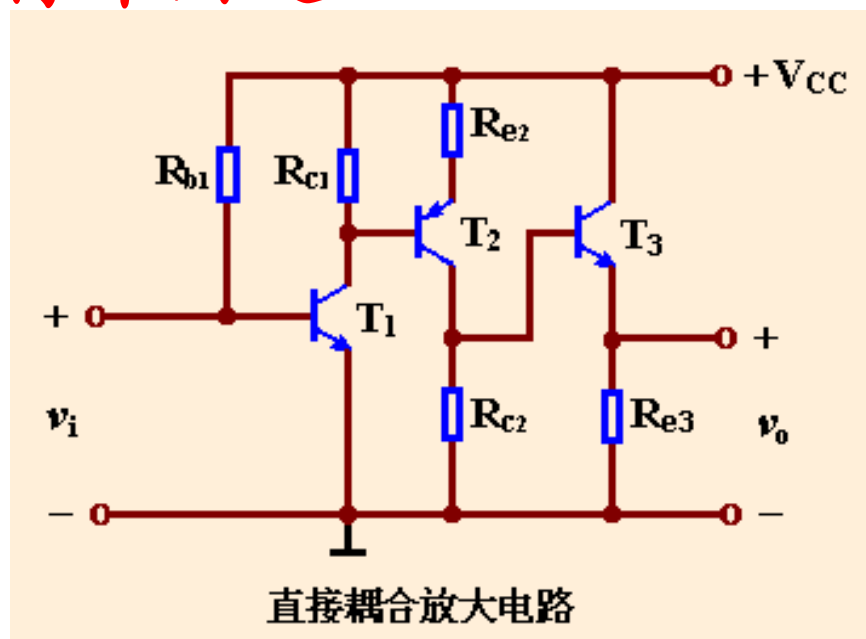
5.4 集成运算放大电路的概述

直接耦合放大电路及其特殊问题

1. 直接耦合放大电路

为什么一般的集成运算放大器都要采用直接耦合方式?

优点：大电容制作困难，
可以放大低频信号



2. 直接耦合放大电路的零点漂移

零漂：无输入信号时，输出仍有缓慢变化的电压产生

主要原因：温度变化引起，也称温漂。

电源电压波动
也是原因之一

温漂指标：温度每升高 1 度时，输出漂移电压按电压增益折算到输入端的等效输入漂移电压值。

例如

假设 $A_{V1} = 100$,
 $A_{V2} = 100$, $A_{V3} = 1$ 。

若第一级漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,
则输出漂移 1 V 。

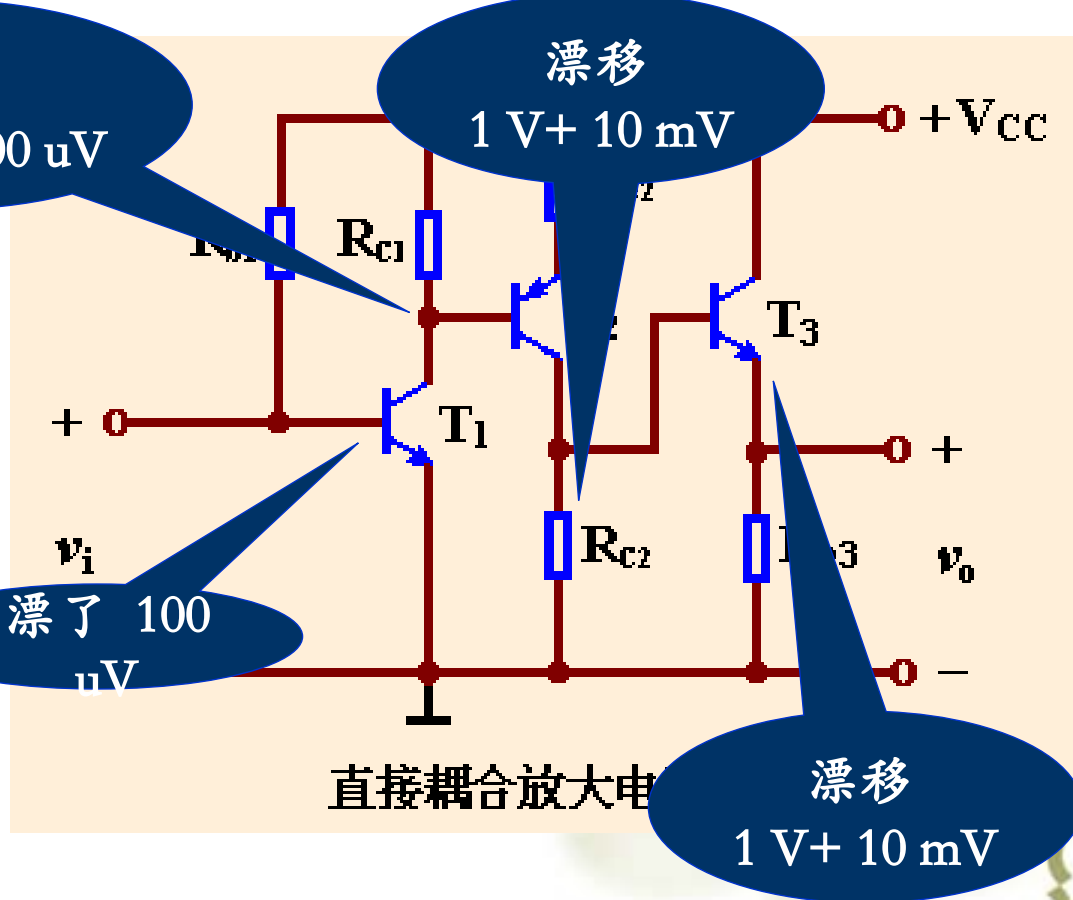
若第二级也漂了
 $100\text{ }\mu\text{V}$,

则输出漂移 10 mV 。

第一级是关键

3. 减小零漂的措施

- ⌚ 用非线性元件进行温度补偿
- ⌚ 采用差分式放大电路



7.2.1 基本差动放大电路

核心关键：对称性

1. 工作原理

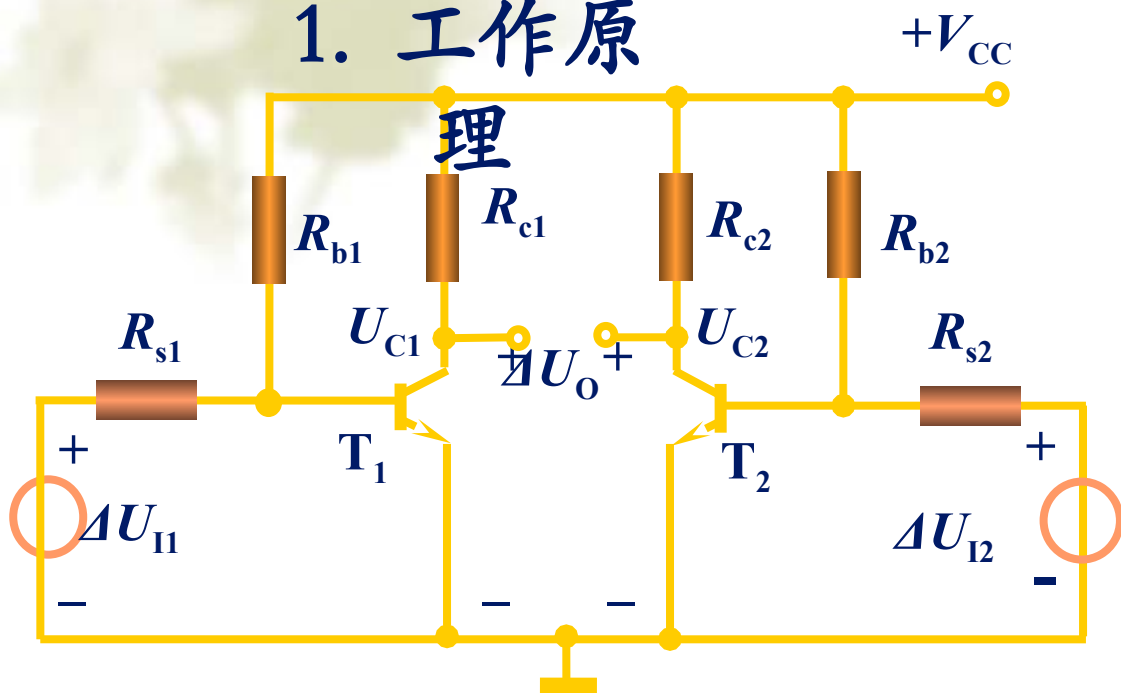


图 7.1 基本差动放大电路

➤ 组成：由两个相同的共射单管放大电路组成。即两边电路是完全对称的。

➤ 双端输入双端输出方式

➤ 输出： $\Delta U_O = U_{C1} - U_{C2}$ 。

当 $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow$
 $\begin{cases} I_{C1} \uparrow \rightarrow U_{C1} \downarrow \\ I_{C2} \uparrow \rightarrow U_{C2} \downarrow \end{cases}$

思考：对称和抑制零点漂移的关系。 由于电路对称，变化量相等，即 $\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}$

当温度变化时： $\Delta u_o = (u_{C1} \pm \Delta u_{C1}) - (u_{C2} \pm \Delta u_{C2}) = 0$

(2) 动态分析 (共模输入)

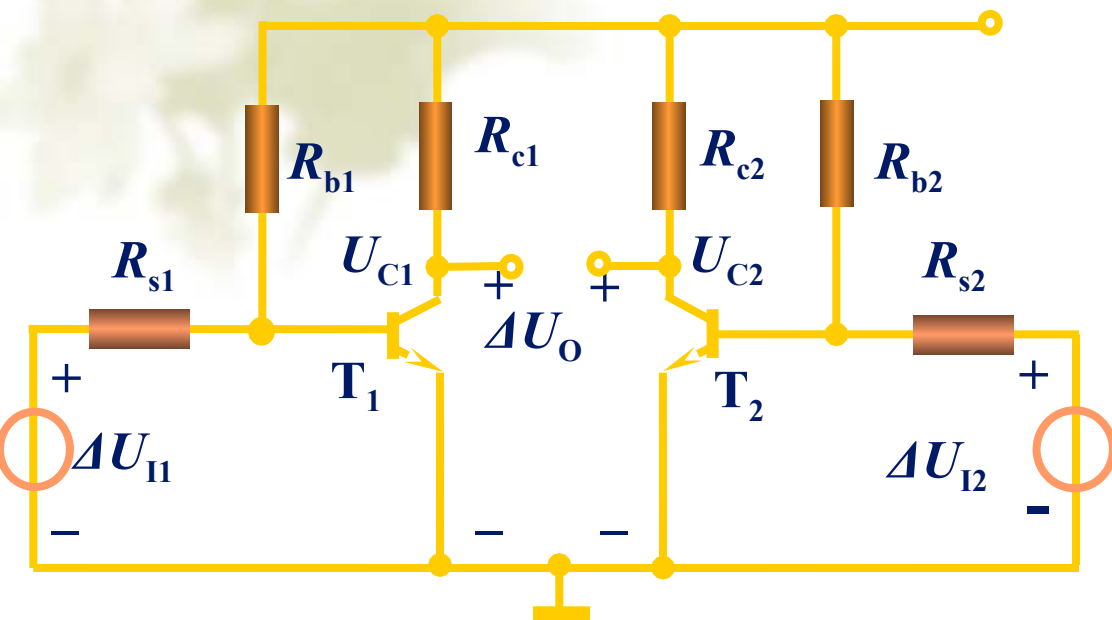


图 7.1 基本差动放大电路

• $\Delta U_{I1} = \Delta U_{I2} \rightarrow$ 共模信号 $\Delta U_{IC} = \Delta U_{I1}$

$= \Delta U_{I2}$

• 共模电压放大倍数 (Common-mode Gain):

$$A_{uc} = \frac{\Delta U_{OC}}{\Delta U_{IC}}$$

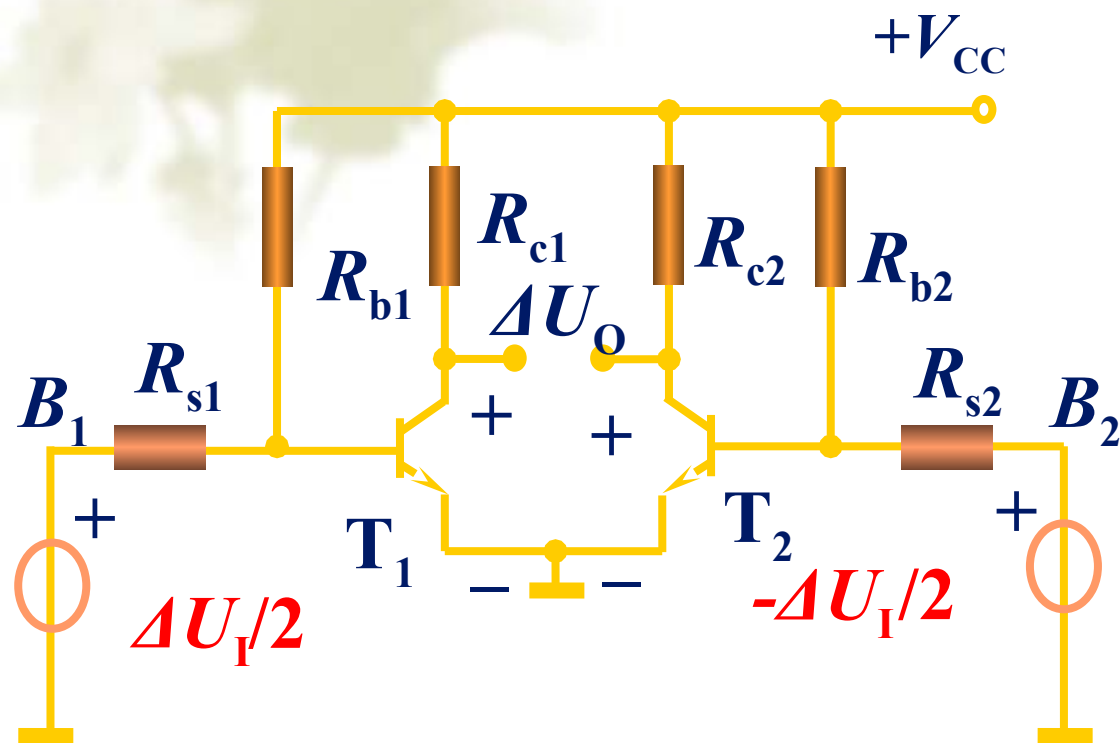
➤ 电路在理想对称情况下，双端输出时， $A_{uc} = 0$ 。可抑制共模信号

➤ 非理想对称情况下，输出不为 0

➤ A_{uc} 越小，抑制温漂作用越好。

疑问：放大能力会不会受影响？

(3) 动态分析 (差模输入)



在两边电路**完全对称**的条件下，输入信号 ΔU_I 相当于在两边电路的**输入端均分**，因此

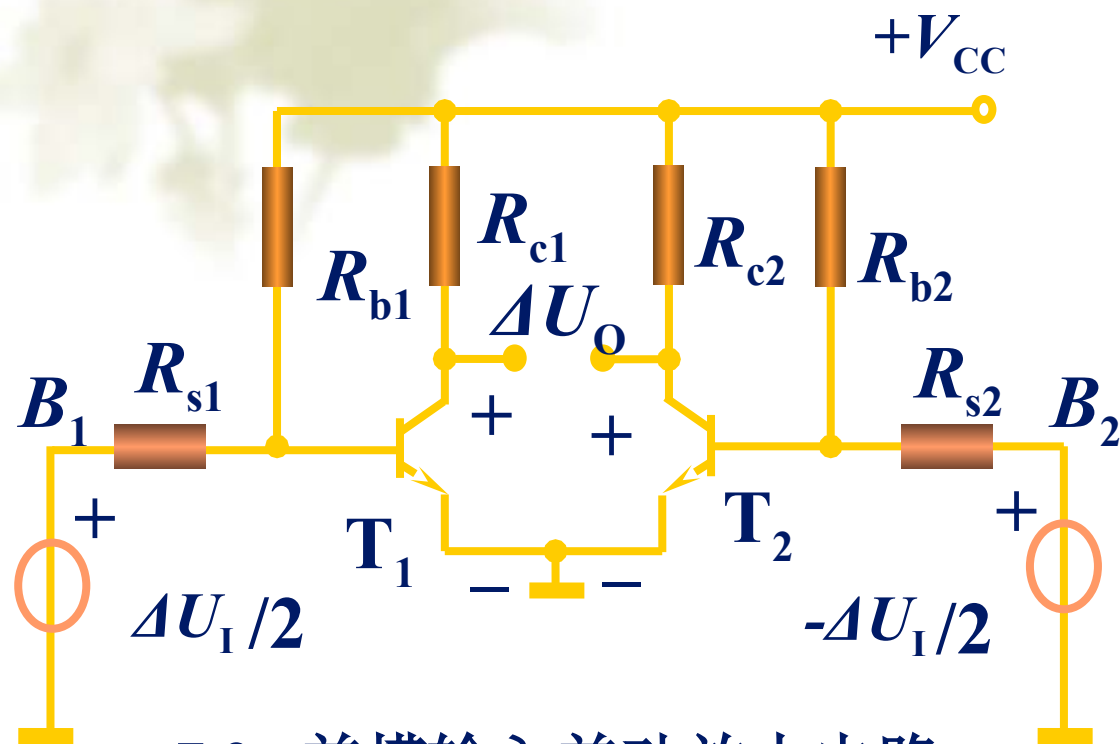
$$\Delta U_{I1} = \Delta U_I / 2,$$

$$\Delta U_{I2} = -\Delta U_I / 2$$

▶ T_1 和 T_2 的输入电压 ΔU_{I1} 和 ΔU_{I2} **大小相等，极性相反**，此时的输入信号 ΔU_I 称为**差模信号** (Difference-mode Signal)，记为 ΔU_{Id} 。 $\Delta U_{Id} = \Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}$ 。

7.2 差模输入差动放大电路

(3) 动态分析 (差模输入)



7.2 差模输入差动放大电路

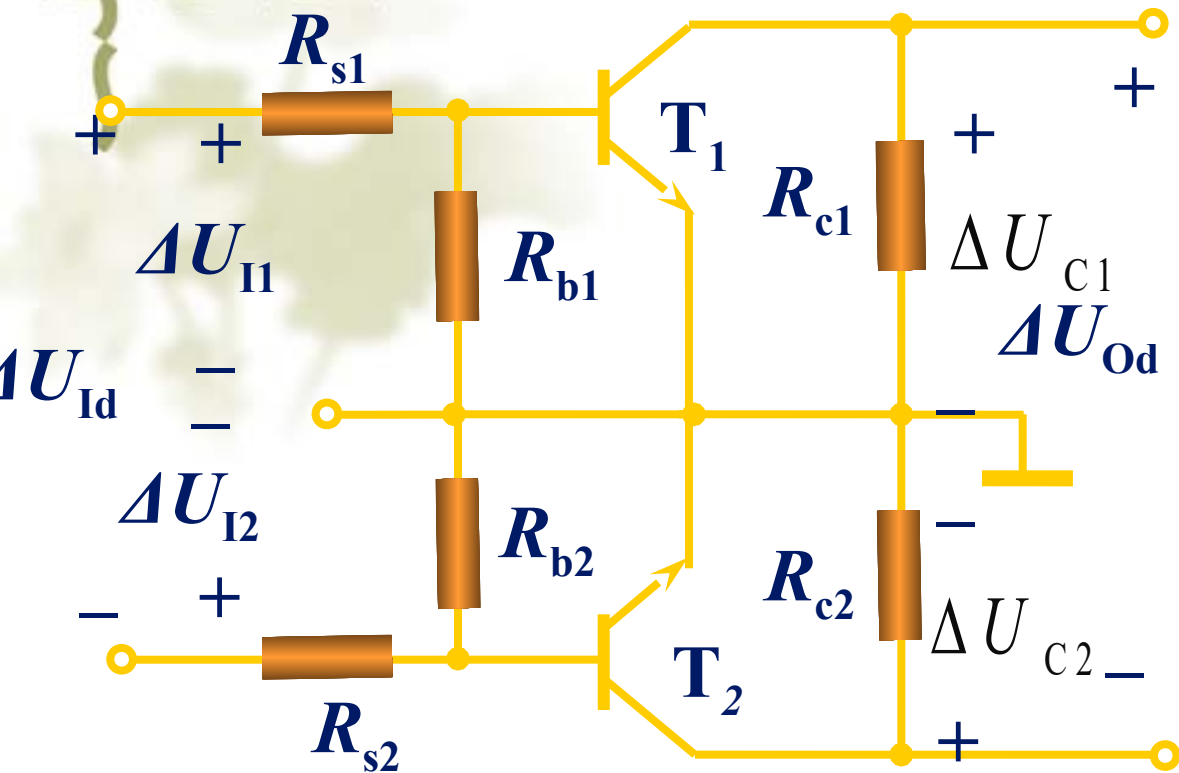
➤ 在差模信号作用下，
两管的 **电流和集电极电位** 变化相反。

➤ 当 ΔU_I 为正时，
 $\Delta U_{I1} > 0$, $\Delta U_{C1} < 0$

➤ $\Delta U_{I2} = -\Delta U_I/2 < 0$,
 $U_{C2} > 0$ 。

➤ 在两边电路完全对称的条件下， $\Delta U_{C1} = -$

$$\begin{aligned} \Delta U_O &= (U_{C1} + \Delta U_{C1}) - (U_{C2} + \Delta U_{C2}) \\ &= 2\Delta U_{C1} = -2\Delta U_{C2} < 0 \end{aligned}$$



根据图 7.3 可得在输入差模电压的作用下，
每边管子的输出电压为：

$$\begin{aligned}\Delta U_{C1} &= \Delta U_{I1} \cdot A_{U1} \\ &= \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} \\ \Delta U_{C2} &= \Delta U_{I2} \cdot A_{U2} \\ &= -\frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}\end{aligned}$$

图 7.3 差模输入差动放大电路交流通路

➤ 因为电路对称

$A_{u1} = A_{u2}$ ，
所以总的
输出电压

$$\Delta U_{Od} = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2}$$

$$= \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} + \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}$$

$$= \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} = \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}$$

$$\begin{aligned}A_{ud} &= \frac{\Delta U_{Od}}{\Delta U_{Id}} \\ &= A_{u1} = A_{u2}\end{aligned}$$

➤ 得到差模放大倍数为：

$$A_{ud} = \frac{\Delta U_{Od}}{\Delta U_{Id}} = A_{u1} = A_{u2}$$

➤ 差动放大电路电压放大倍数等于半边电路的放大倍数，
并没有提高放大倍数。

➤ 主要作用：抑制温漂。

放大差模，抑制共模，
能有效抑制零点漂移。

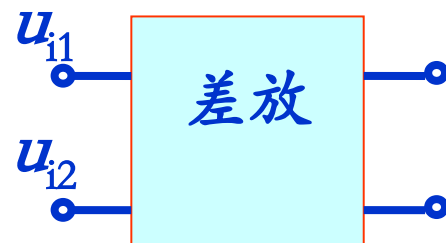
➤ 代价：多用一套电路。

1、差模信号、共模信号和任模信号

共模信号： $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ （大小相等极性相同）

差模信号： $u_{i1} = -u_{i2}$ （大小相等而极性相反）

任模信号： u_{i1} 、 u_{i2} 既非共模信号亦非差模信号。



2、任模信号的分解

任意的任模信号都可以分解为共模分量与差模分量的组合。

分解目的：方便应用差放对不同信号的放大公式。

$$\left. \begin{array}{l} \text{差模分量: } u_{id} = u_{i1} - u_{i2}; \\ \text{共模分量: } u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}); \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2} u_{id}; \\ u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2} u_{id}; \end{array} \right.$$

思考：差放的一端输入为 1mV，且差模输入分量与共模输入分量相等，则另一端的输入信号为多少？

关于差动放大电路动态分析的小结

不管差放的输入方式和输入信号的类型是什么，差放的输出电压都可以用下式来计算：

$$u_O = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$$

如果输入信号仅有差模成分时， $u_O = A_{ud}u_{id}$

如果输入信号仅有共模成分时， $u_O = A_{uc}u_{ic}$

当输入信号为任模信号时，将之分解为共模分量和差模分量的组合，然后利用叠加原理代入 $u_O = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$ 中进行计算。

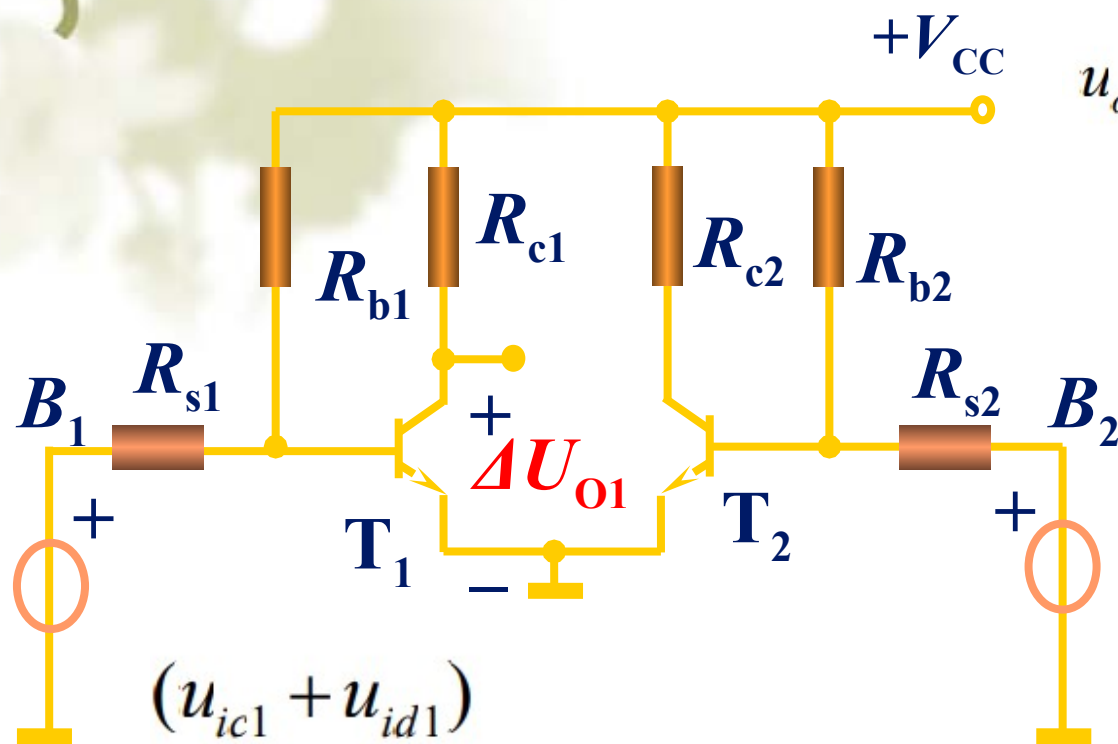
例如：已知某差放的 $A_{ud} = -100$, $A_{uc} = -0.1$,

$u_{i1} = 5 \sin \omega t (mV)$, $u_{i2} = -3 \sin \omega t (mV)$ ，写出输出电压 u_O 的表达式。

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 8 \sin \omega t (mV); \quad u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) = \sin \omega t (mV)$$

$$\begin{aligned} u_O &= A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} = -100 \times 8 \sin \omega t + (-0.1) \times \sin \omega t \\ &= -(800 + 0.1) \sin \omega t (mV) \end{aligned}$$

思考：单端输出时，输出多少？



$$u_{o1} = A_{u1} \times u_{i1} = A_{u1} \times (u_{ic1} + u_{id1})$$

结论：基本差动电路在单端输出时是无法抑制共模信号。

差模输入差动放大电路

思路：让单侧电路对 u_{ic1} 和 u_{id1} 的放大倍数不同。

7.2.2 具有射极公共电阻的差放电路

1. 射极公共电阻的作用

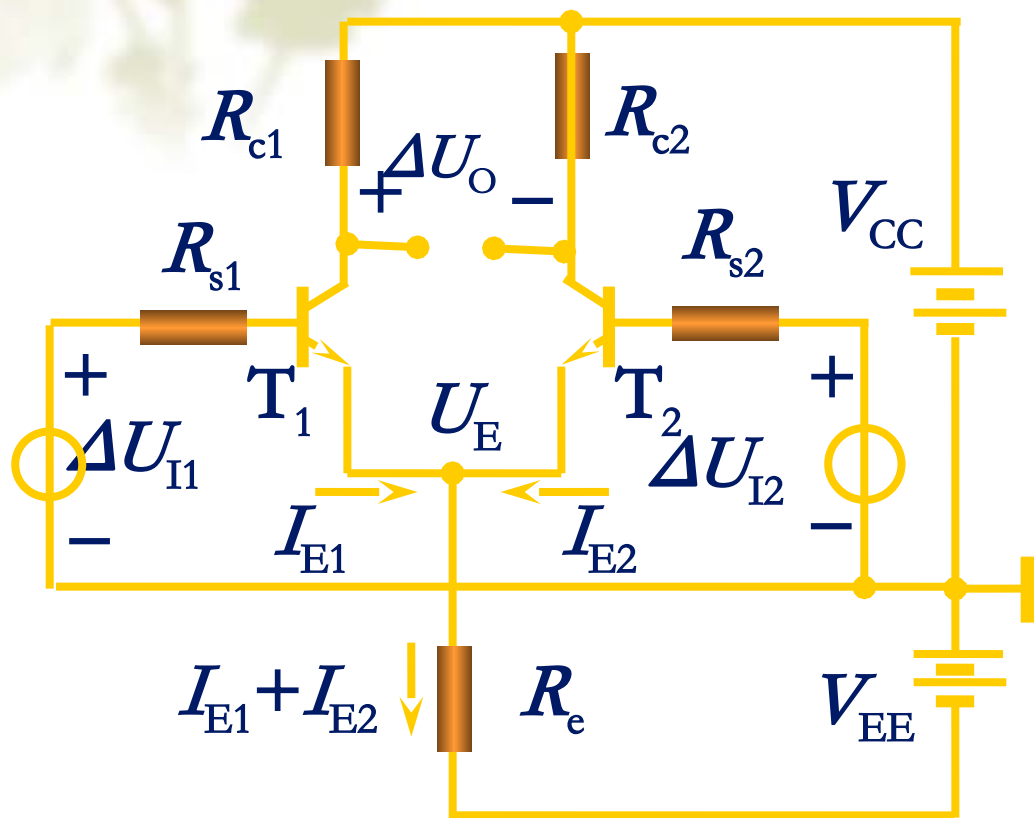


图 7.4 具有射极公共电阻的差放电路

由于温漂可以等效为输入端加共模信号，因此首先分析射极公共电阻 R_e 对共模信号的抑制作用。

也叫“长尾式差动放大电路”

考虑两个问题：

- 1 是否能抑制单边输出时的温漂？
- 2 是否会降低放大倍数？

(1) 电路结构

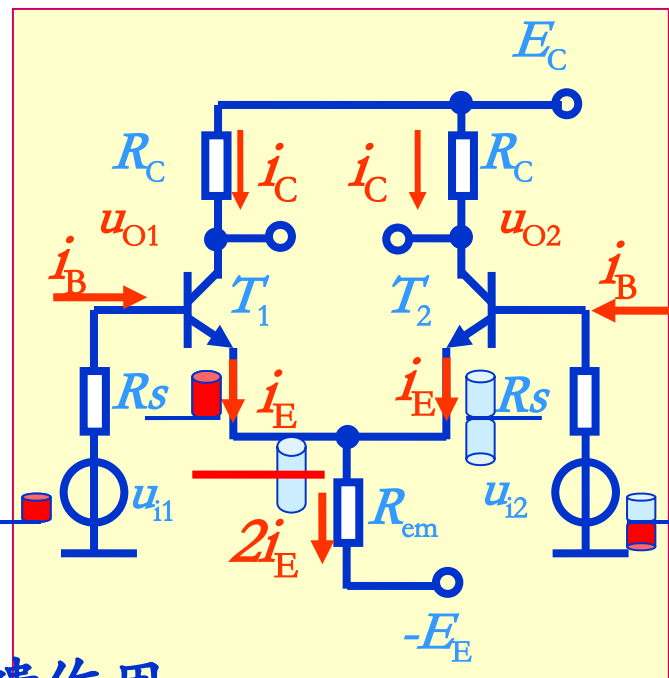
① T1、T2 差分对管组成对称电路。

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C; \quad R_{s1} = R_{s2} = R_s;$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta; \quad r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

② 采用双电源供电—— $E_C = -E_E$ 。

③ T1、T2 的发射极同时接射极电阻 R_{em} ，其作用是引入共模负反馈，抑制共模信号，但对差模信号没有负反馈作用。



给电路加上正的共模信号

$i_{B1}, i_{B2} \uparrow$

$i_{E1}, i_{E2} \uparrow$

$u_E \uparrow$

$u_{BE1}, u_{BE2} \downarrow$

$i_{B1}, i_{B2} \downarrow$

共模负反馈

加上差模信号

$i_{B1} \uparrow, i_{B2} \downarrow$

$i_{E1} \uparrow, i_{E2} \downarrow$

u_E 不变

无负反馈作用
不会影响放大倍数

(1) 电路结构

① T1、T2 差分对管组成对称电路。

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C; \quad R_{s1} = R_{s2} = R_s;$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta; \quad r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

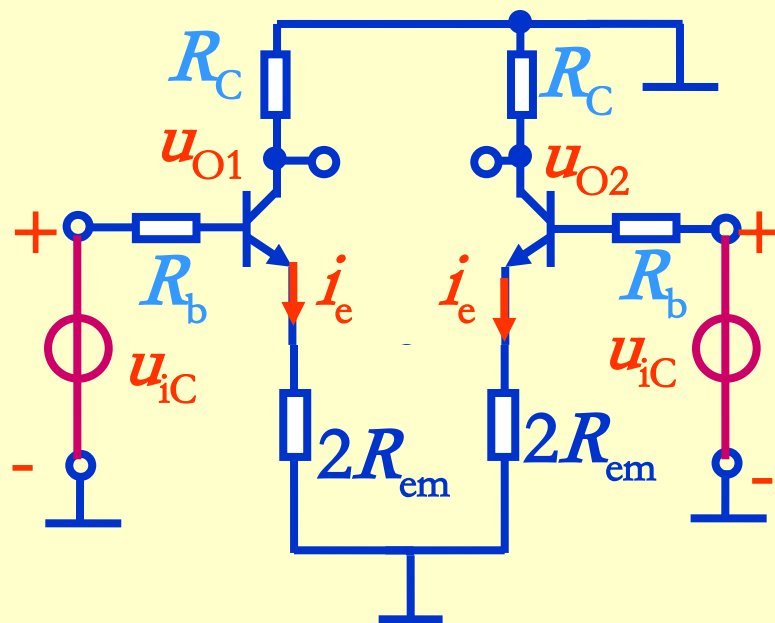
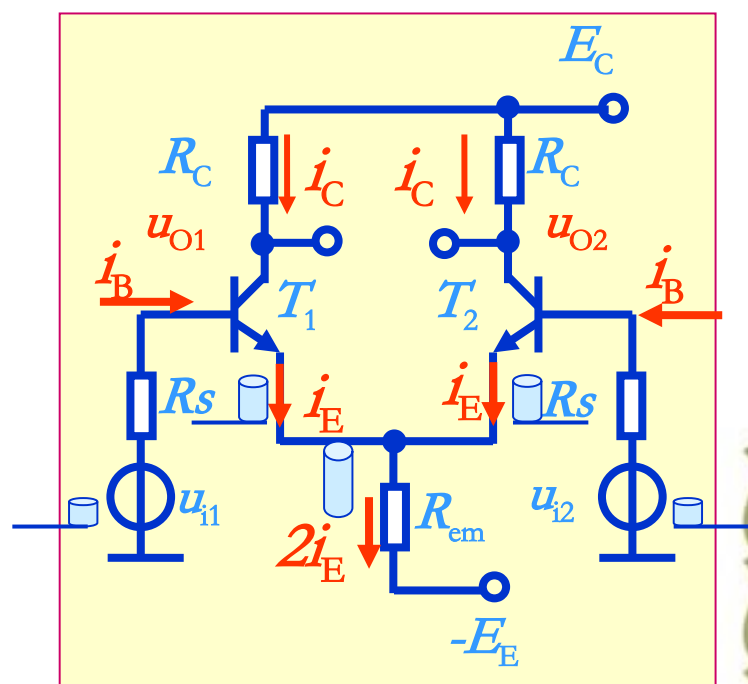
② 采用双电源供电—— $E_C = -E_E$ 。

③ T1、T2 的发射极同时接射极电阻 R_{em} ，其作用是引入共模负反馈，

可将 R_{em} 折合到两个差分对管的发射极。得到共模输入差放的交流等效电路如图所示：

$$A_{uC1} = u_{O1} / u_{iC}$$

$$\approx \frac{-R_C}{2R_{em}} \xrightarrow{R_{em} \gg R_C} |A_{uC1}| \ll 1$$



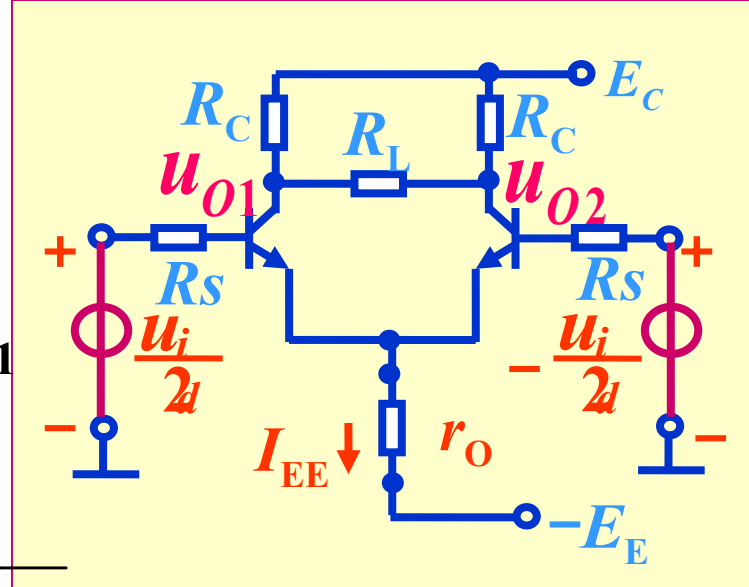
③ 双端输出差模电压增益:

$$A_{ud} = \frac{u_{Od}}{u_{id}} = \frac{u_{O1} - u_{O2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{O1}}{2u_{i1}} = A_{u1}$$

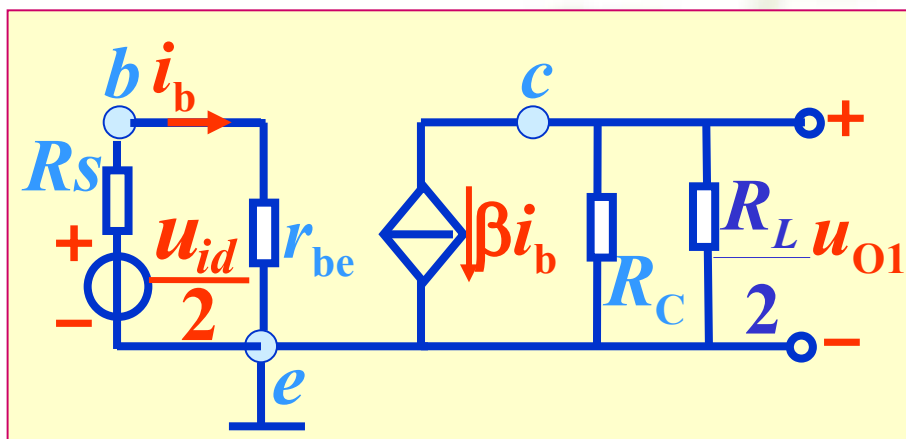
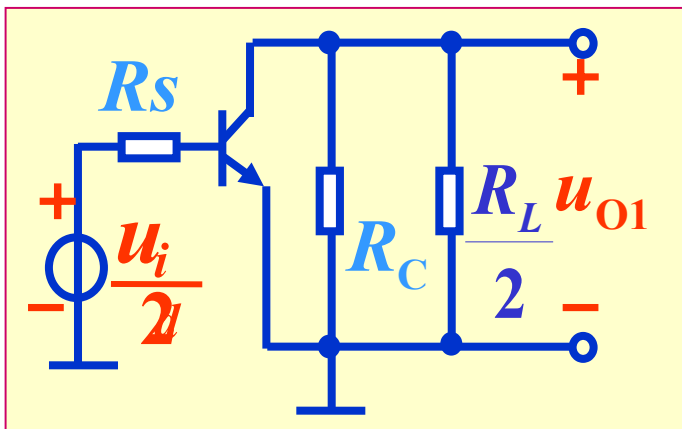
$$A_{ud} = \frac{u_{O1}}{u_{i1}} = \frac{-\beta i_b R'_L}{i_b (R_b + r_{be})} = -\beta \frac{R'_L}{R_b + r_{be}}$$

$$R'_L = R_C // (R_L / 2)$$

微变等效电路:



差放双端输出时的差模电压增益与单管电路的电压增益相等。

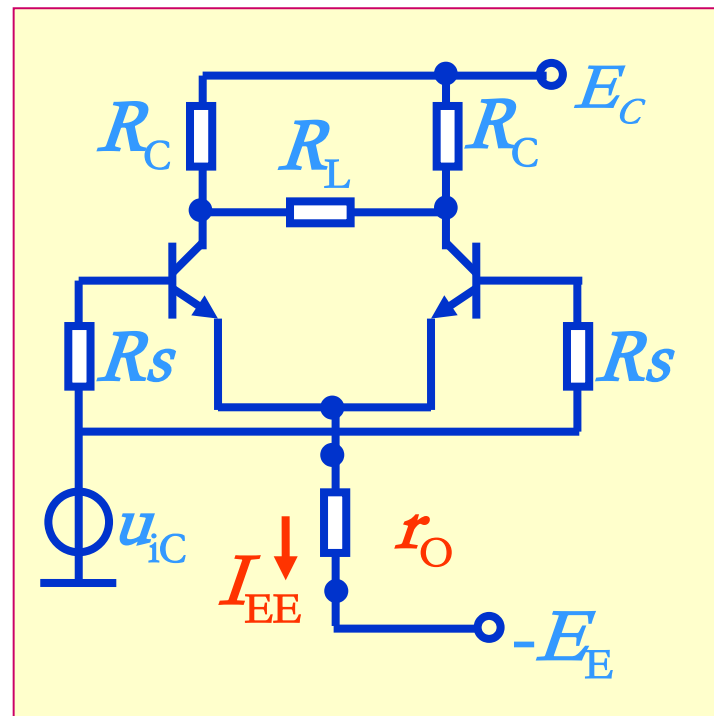


共模抑制比 K_{CMR}

---- 综合考察差放放大差模、
抑制共模的能力。

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

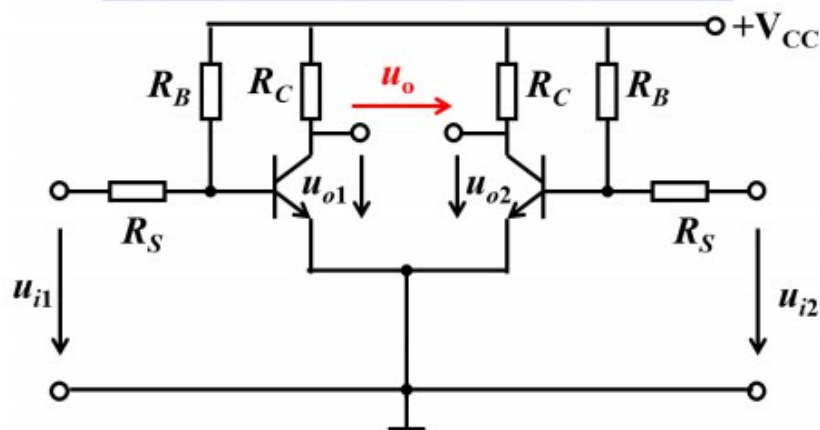
理想情况下, $K_{CMR} = \infty$



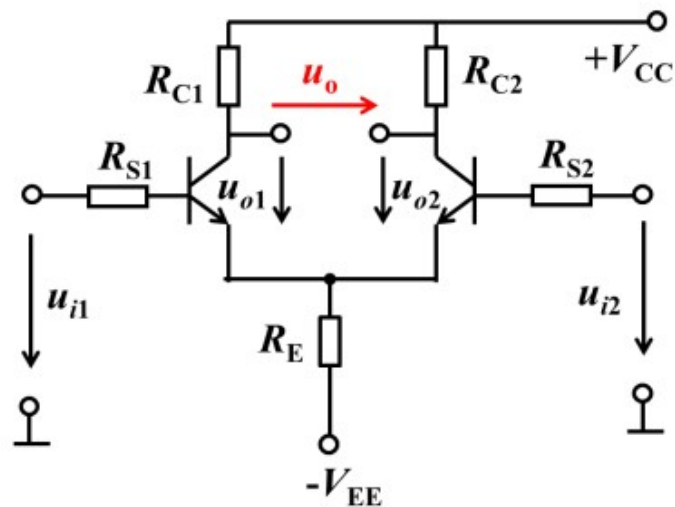
总 结

- 1、引入差动放大电路是为了解决**直接耦合**带来的**零点漂移**问题
- 2、差动放大电路的特点：**有效地抑制共模信号，放大差模信号**
- 3、**基本差动电路的原理**：利用电路的**左右对称**，在**双端输出**时将两边的**共模输出互相抵消**。→ 此电路不允许单端输出
- 4、**长尾差动电路的原理**：在**左右对称**的基础上，利用 R_E 对共模信号**引入负反馈**，在**单端输出**时也能有效抑制共模信号。

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_{u1} \times (u_{i1} - u_{i2})$$



基本差动放大电路



长尾差动放大电路

如何衡量差动电路对共模信号抑制的能力？

主要指标：共模抑制比 $K_{CMR} = \frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|}$ → 越大越好

调零装置 P203

左右完全对称

输出方式 ↗ 双端输出 → $u_o = u_{o1} - u_{o2}$ → $A_{uc} = 0$ → $K_{CMR} = \infty$

↘ 单端输出 → $u_o = u_{o1}$ 或 u_{o2}

基本差动 → K_{CMR} 很小

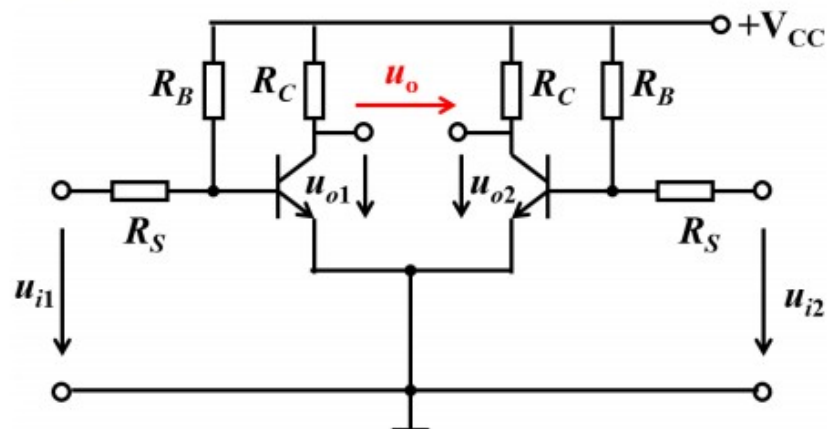
长尾差动 → K_{CMR} 很大

$$u_{i1} = u_{ic1} + u_{id1}$$

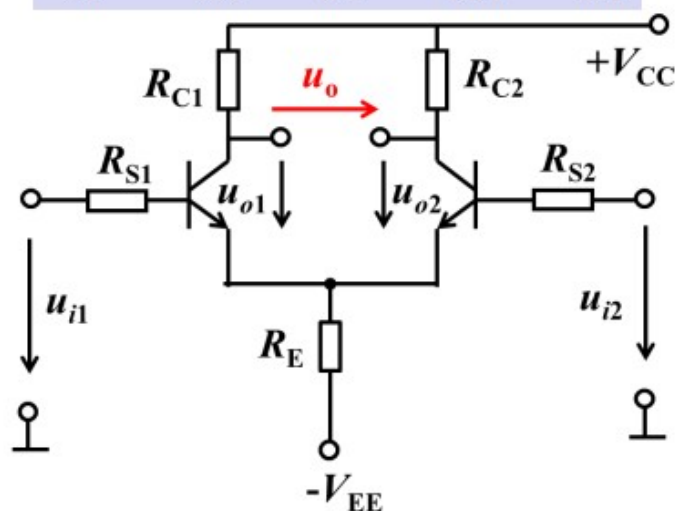
$$u_{i2} = u_{ic1} - u_{id1}$$

$$u_{o1} = A_{u1} \times u_{i1} = A_{u1} \times (u_{ic1} + u_{id1})$$

$$u_{o1} = A_{uc1} \times u_{ic1} + A_{ud1} \times u_{id1}$$



基本差动放大电路



长尾差动放大电路