



# 电子线路 分析与设计

## 第 18 讲 多管放大电路

陈江  
2022.11.9

# 差分放大电路：引入

? 放大器是否 稳定？ 稳定：有两种不同意思

stable

- ▶ 条件1：彻底丧失放大能力
- ▶ 条件2：且 是远离 Q 所致
- ▶ 条件3：且 难以自我恢复
- ▶ 极致：无输入也输出波形
- ▶ 闭环反馈才会导致自锁
- ▶ 但许多反馈并非故意引入
- ▶ 描述手段：**稳定条件**

暂不讨论

或 失稳条件

steady ≈ insensitive

- ▶ 性能指标是否对环境敏感
- ▶ 环境变化影响是否显著...
- ▶ 环境因素：温度、辅助源...
- ▶ 影响途径：器件参数，Q ...
- ▶ 描述手段：是否敏感、**免疫**

$$\text{抑制比} = \frac{\Delta \text{某性能指标}}{\Delta \text{某环境因素}}$$

? 如何改善稳定性？

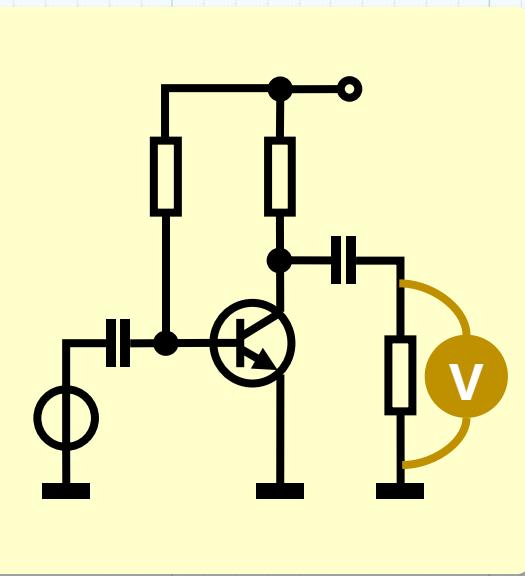
差分放大

有源偏置

运放

- ① **控制源头：**  
恒温 | 滤波 | 降温 ..
- ② **控制途径：**  
隔热 | 屏蔽 | 距离 ..
- ③ **提升免疫：**  
换件 | 老化 | 自适应  
**电路：更换思路**

# 差分放大电路：differential amplifier



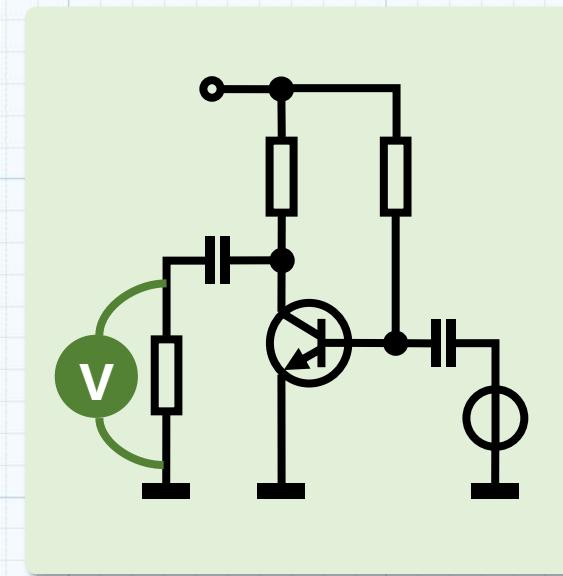
? 基本原理：重要思想!!!

恶劣背景1：干扰源头不可控

恶劣背景2：影响途径难以切断

恶劣背景3：器件敏感性难改善

思想：弃用绝对参考系  
做法：引入相对参考系



差分放大

有源偏置

运放

相对参考系：平行世界

设定1：完全相同器件

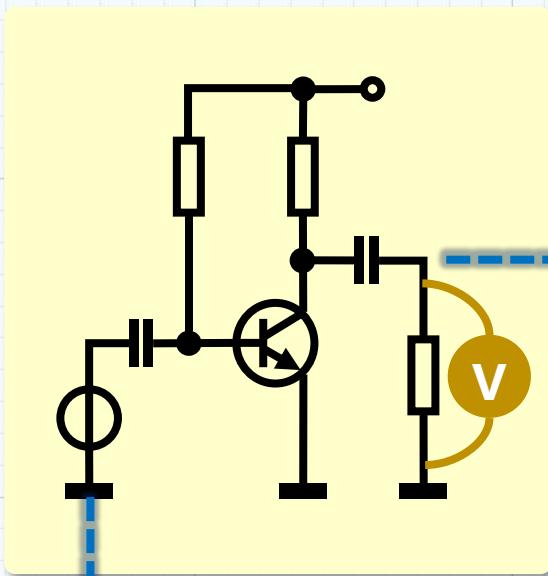
设定2：完全相同工作条件

设定3：完全相同外界影响

相同扰动→相同应变

相反扰动→相反应变

# 差分放大电路 : differential amplifier



？引入概念：**神电压表 神接地**

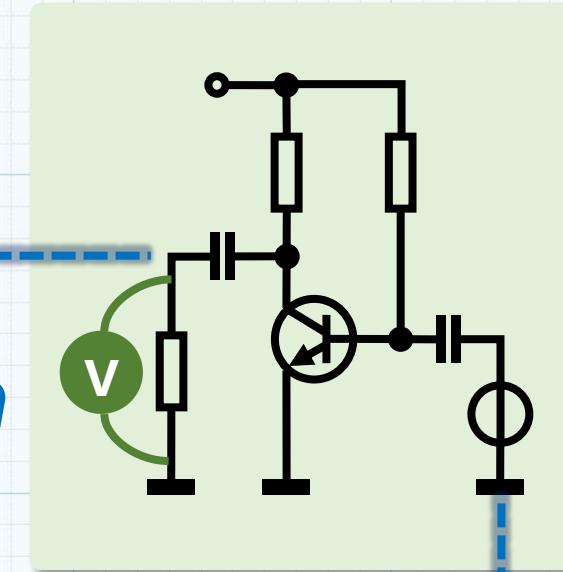


共模场景

- ▶ 若两世界信号源相同  
输出完全相同 → V 测不到压差
- ▶ 若两世界干扰相同  
输出完全相同 → V 测不到压差

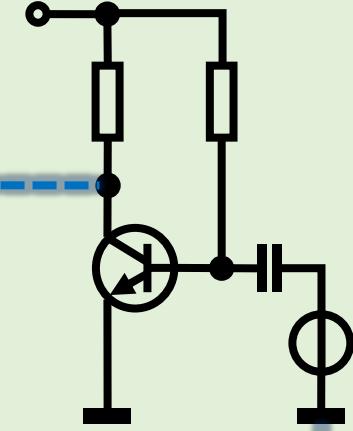
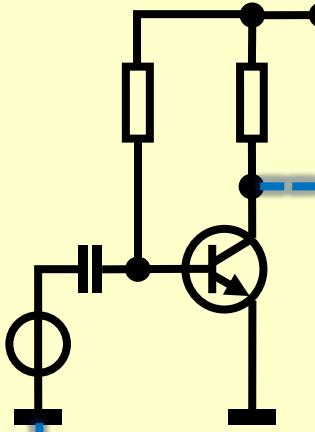
差模场景

- ▶ 若两世界信号源相反  
输出完全相反 → V 测到双倍电压



若干扰**共模**  
而信号**差模**  
则... ☺

# 差分放大电路 : differential amplifier



？引入：**神负载电阻**

- 可以直接耦合
- 对所有共模干扰免疫
- 共模信号激励时无输出 ← 来自共模前级
- 仅差模信号激励时有输出

？平行世界的合并...

**若干扰共模  
而信号差模**

则... ☺

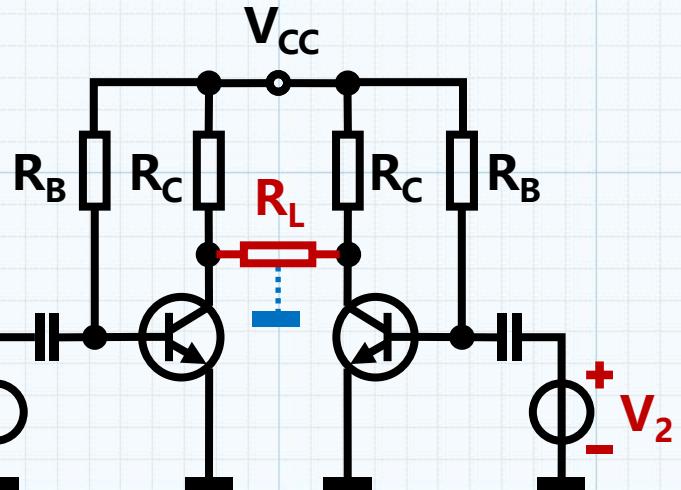
# 差放：共模抑制比 Common Mode Rejection Ration

若  $V_1 = V_2 = V_{ic}$

$V_{RL} = 0$

定义共模增益：

$$A_{VC} = \frac{V_{RL}}{V_{ic}} = 0$$



若  $V_1 = -V_2$ , 及  $V_{id} = V_1 - V_2$

$V_1 = V_{id}/2 = -V_2$

叠加原理... 或 神之中点  $\rightarrow V_{RL} = -\frac{\beta(R_c || \frac{R_L}{2})V_{id}}{r_{be}}$

定义差模增益：

$$A_{VD} = \frac{V_{RL}}{V_{id}} = -\frac{\beta(R_c || \frac{R_L}{2})}{r_{be}}$$

定义 共模抑制比

记为  $K_{CMR}$  或 CMRR

$$K_{CMR} = \frac{A_{VD}}{A_{VC}}$$

本电路中约为  $\infty$

一般输入情形？

$$V_1 = V_{ic} + V_{id}/2$$

$$V_2 = V_{ic} - V_{id}/2$$

$$V_{RL} = A_{VC}V_{ic} + A_{VD}V_{id}$$

# 差放：完善

## ？引入恒流源偏置

►  $K_{CMR} = ?$

若  $V_1 = V_2 = V_{ic}$

►  $I_{c1}, I_{c2}$  无变化

►  $V_{RL} = 0$

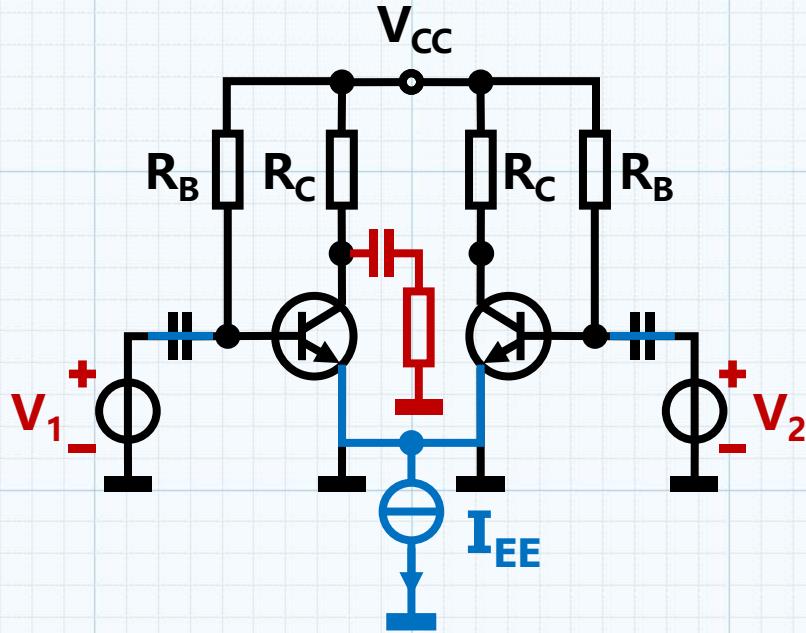
►  $K_{CMR} = \infty$

► 接近“完整版差分放大器”

► 历史上的长尾放大器 ...

► 基极可改为直接耦合

即使  $V_1, V_2$  有直流分量：共模信号



## ？定义共模抑制比

► 记为  $K_{CMR}$  或 CMRR

$$K_{CMR} = \frac{A_{VD}}{A_{VC}}$$

► 本电路中约为  $\infty$

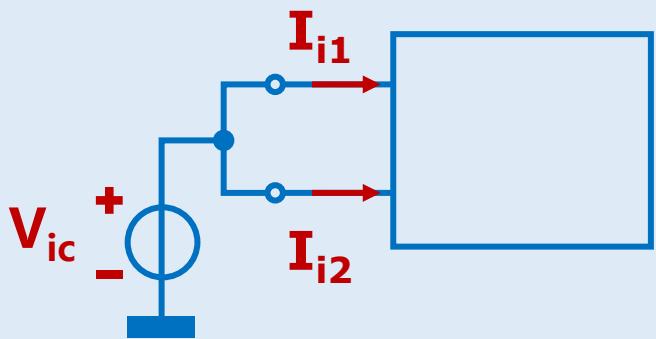
## ？若单端输出？

►  $K_{CMR} = ?$

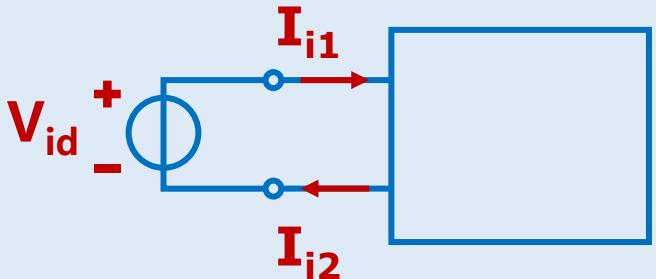
？能否单端输出， $K_{CMR} = \infty$ ？  
对侧放大器的用途呢？

# 差放：其它问题

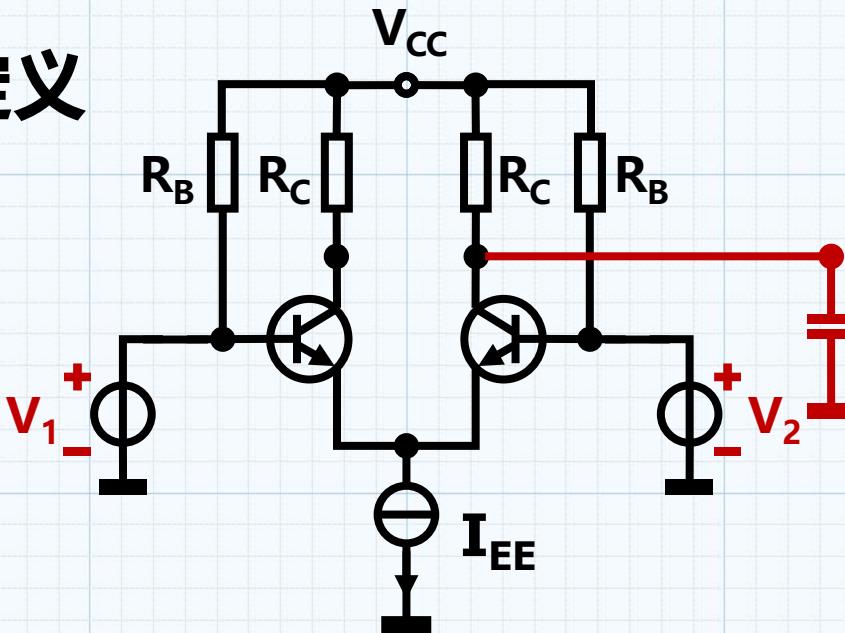
## ？ 输入电阻的补充定义



$$\text{共模输入电阻 } R_{ic} = V_{ic} / (I_{i1} + I_{i2})$$

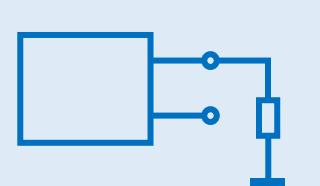


$$\text{差模输入电阻 } R_{id} = V_{id} / I_{i1}$$

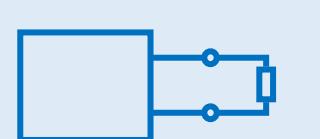


## ？ 输出电阻的补充定义：

▶ 单端输出  $R_{o1}$



▶ 双端输出  $R_{o2}$



## ？ 摆率的定义

- ▶ 若负载为纯电容  $C_L$
- ▶ 输入为大幅度阶跃
- ▶ 输出电压最大斜率

$$SR = \max \left| \frac{dV_o}{dt} \right|$$

$$= \max(I_{CL}/C_L)$$

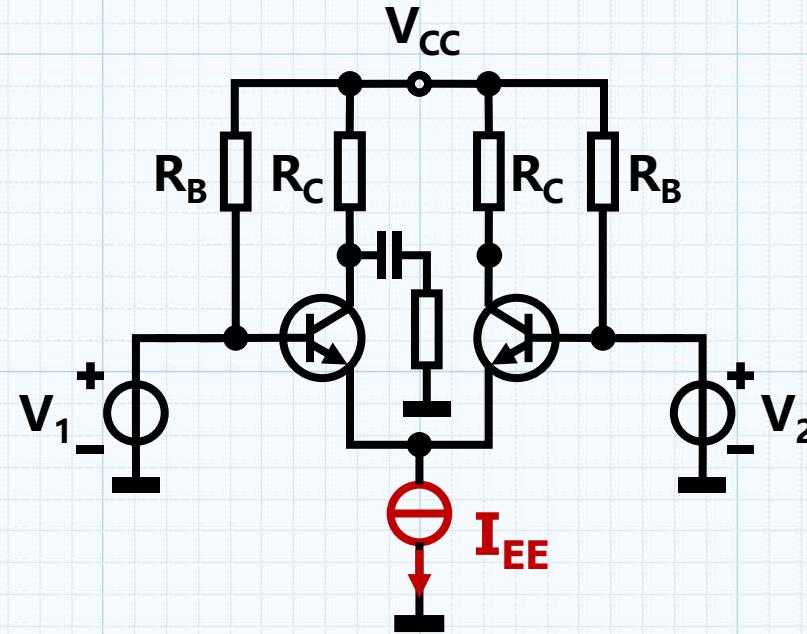
$$\approx I_{EE}/2C_L$$

# 电流源：引入

？ 有何价值？

- ▶ 构造偏置时...
- ▶ 在输入端...
- ▶ 在输出端...

也称为有源负载



?

## 电流源偏置的作用

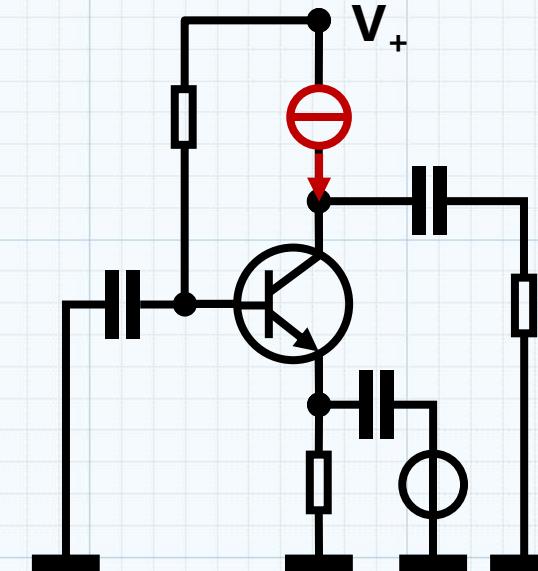
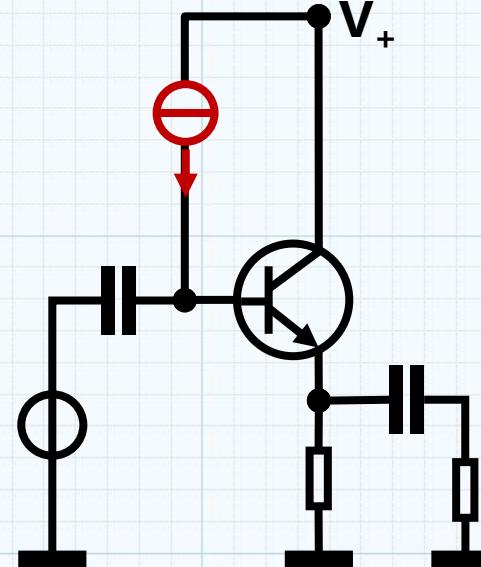
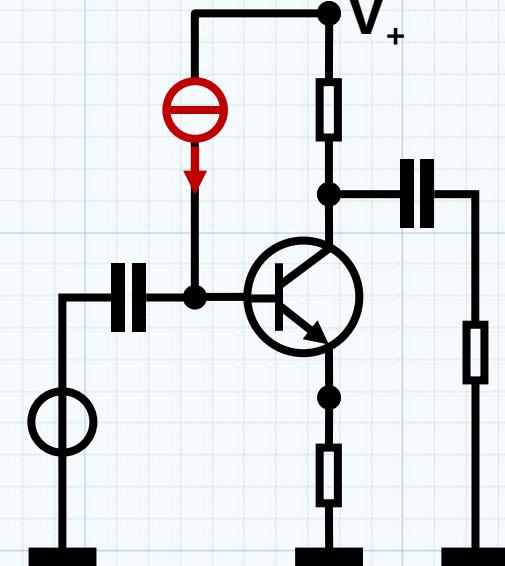
- ▶ 静态电流+动态断路

能否多极同时用？

- ▶ 罕见：风险较大

如何构造恒流源？

- ▶ 其实大家已经会了...



# 电流源：最简形式

## ✓ 使用压控电流源器件

- ▶ 控制端为稳定电压
- ▶ 受控电流流经  $R_L$ , 即可。
- ▶ 但  $R_L$  变化  $\rightarrow Q$  点移动

## ? 主要性能指标 $R_o = ?$

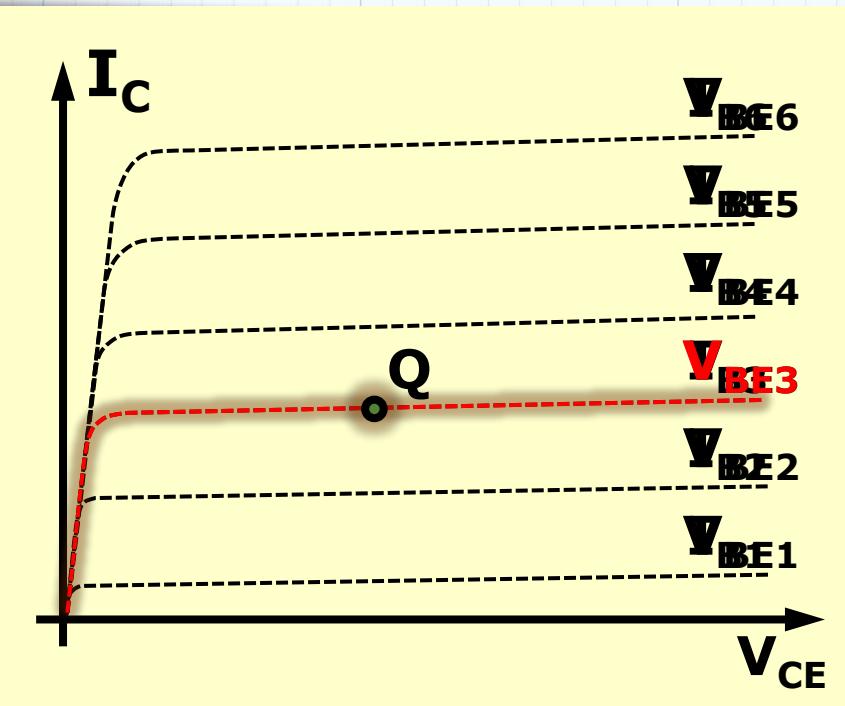
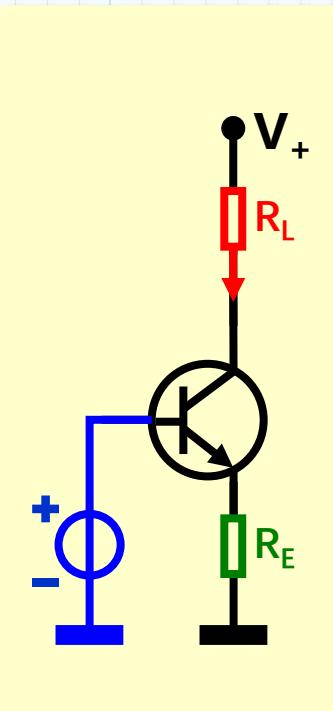
- ▶ 若  $r_c$  可忽略, 则  $R_o \rightarrow \infty$
- ▶ 若  $r_c$  不可忽略, 则  $R_o = \dots$

## ? 主要问题?

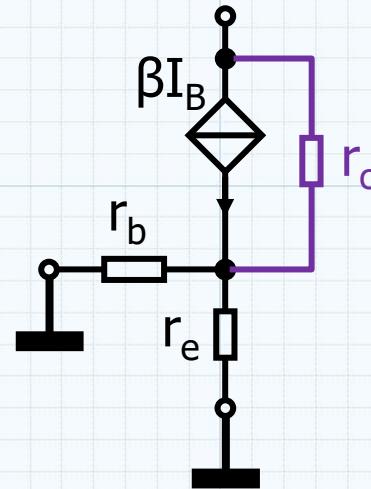
- ▶ 需两个电源  $\leftarrow$  电阻分压
- ▶ 对  $V_{BQ}$  太敏感
- ▶ 不易调节

## ? 改进办法: 引入 $R_E$

- ▶  $R_o$  算式中  $r_e \rightarrow r_e + R_E$
- ▶ 若  $R_E \gg r_e + r_b$ , 则  $R_o \rightarrow \beta r_c$
- ▶ 实际: 模型需更复杂



$$R_o = \left( 1 + \frac{\beta r_e}{r_e + r_b} \right) \cdot r_c + r_e \parallel r_b$$



# 电流源：镜像电流源 CM

? 更简单|可靠|易设定 ?

- ▶ 镜像电流源 (电流镜)
- ▶ BJT 一致：相同参数+状态
- ▶ 不全对称：连线 | R |  $V_+$  | Q

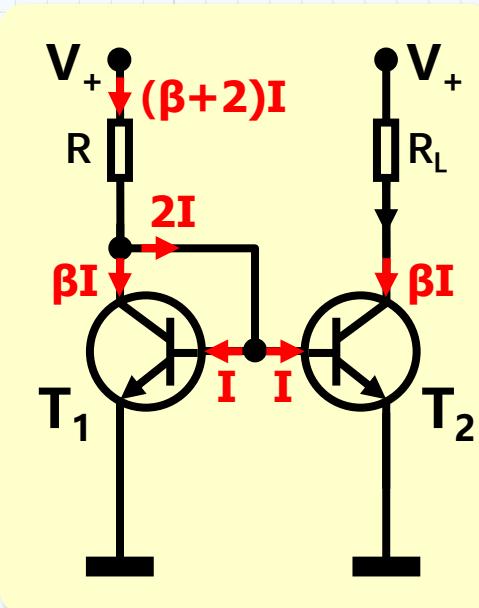
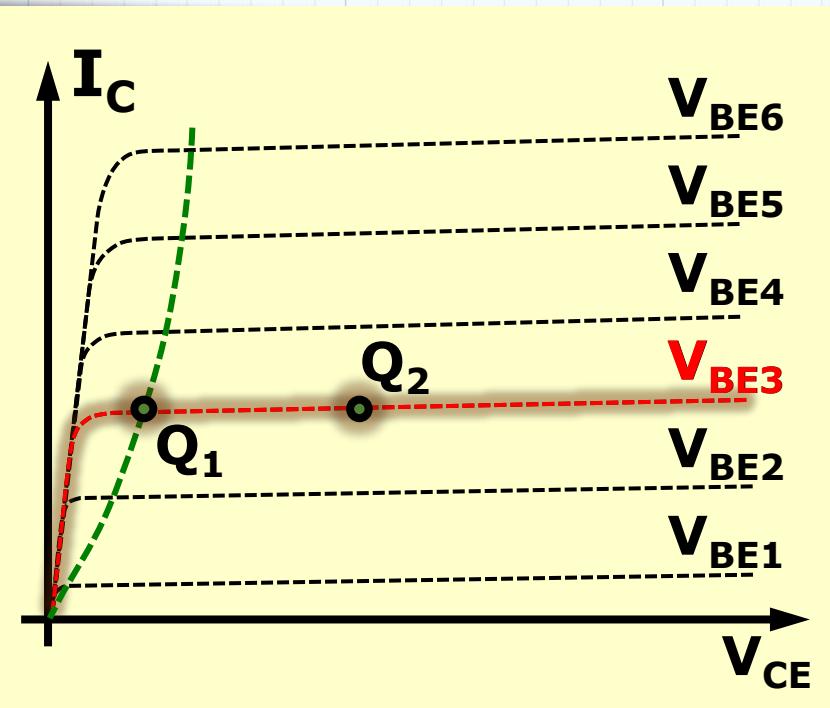
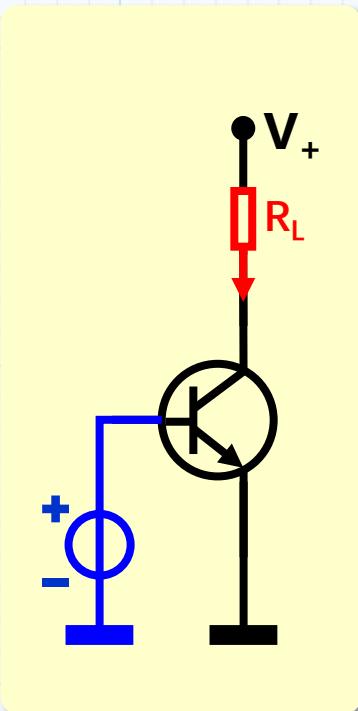
?  $I_{RL} = ?$  ▶ 标出电流 ...

▶  $(\beta + 2)I \cdot R + 0.7 = V_+$

$$I_{RL} = \beta \cdot \frac{V_+ - 0.7}{(\beta + 2)R}$$

? 性能指标 ?

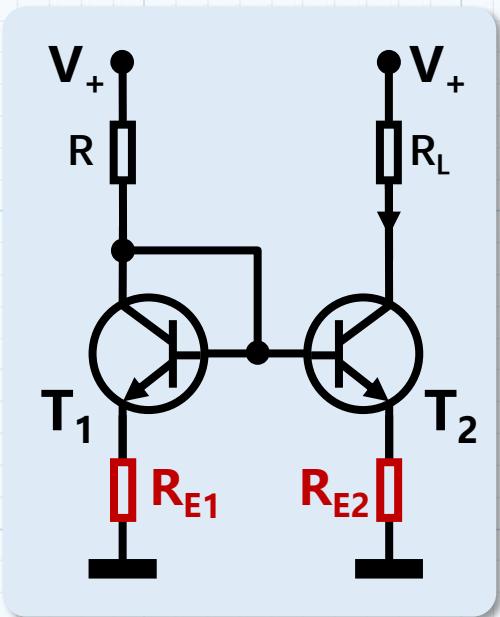
- ▶  $R_o$  基本同前
- 算式中  $r_{b2}$  改为  $r_{b2} + r_{be1}$
- ▶ 简洁方便：尤其集成电路中



? 不足和问题 ?

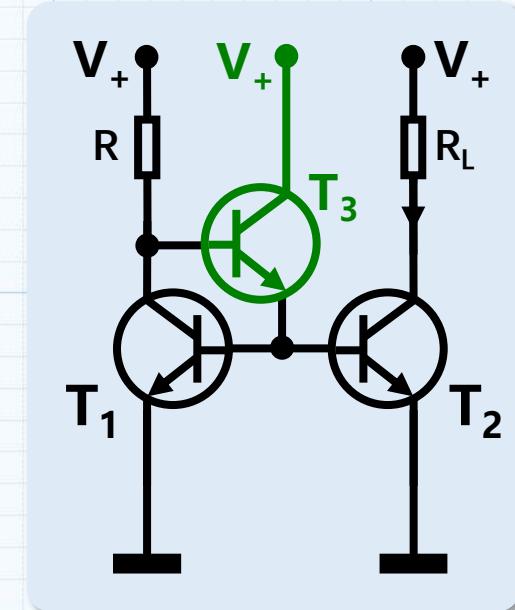
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 电流源：CM 的变型（1）



引入  $R_E$  的用处？

- 改善了  $I_{RL}$  和  $I_R$  之差
- 略减小对  $\beta$  的敏感性

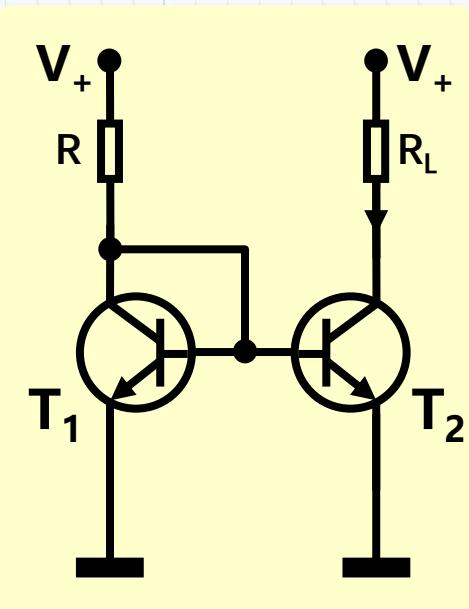


若  $R_{E1} \neq R_{E2}$ ？

- 比例电流源 ...

若  $R_1 \rightarrow 0$ ？

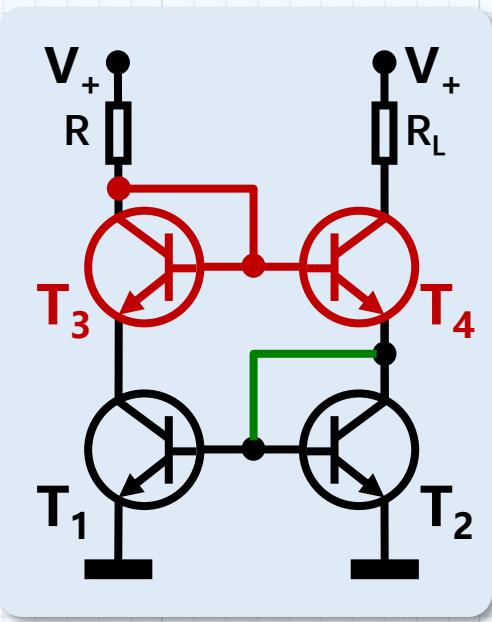
- $I_{RL}$  非常小 → 微电流源 ...
- 需要解超越方程 ...



不足和问题？

- $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- 要求  $\beta$  大且稳定
- 对 温度敏感
- $R_o$  不够大
- 要求 BJT 非常一致

# 电流源：CM 的变型（2）

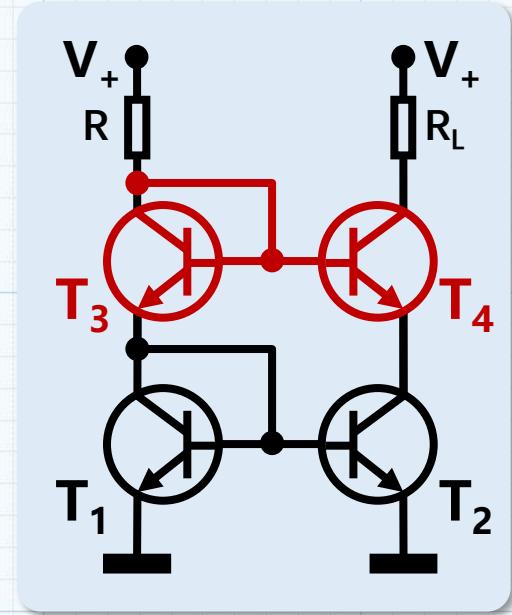


引入  $T_3$  和  $T_4$  的用处？ →

- ▶  $V_{CE2}$  不随  $R_L$  变化 ←  $R_o$  超级大
- ▶  $T_1$  和  $T_2$  相同 Q：不受  $\beta$  影响

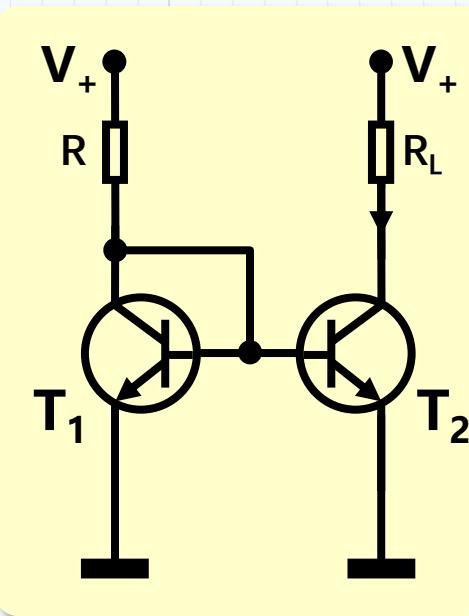
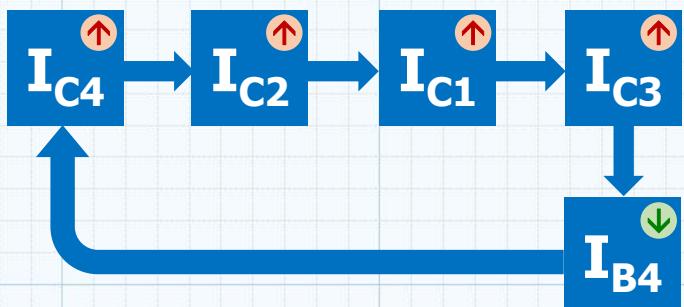
← 更换  $T_1$  和  $T_2$  角色？

- ▶ 威尔逊电流源
- ▶ 极好的输出特性和稳定性



↑ 如何理解？

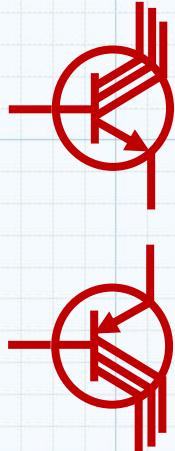
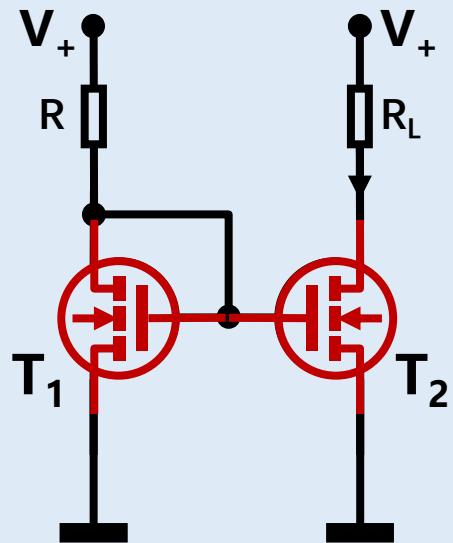
- ▶ 反馈的效果 ...



? 不足和问题？

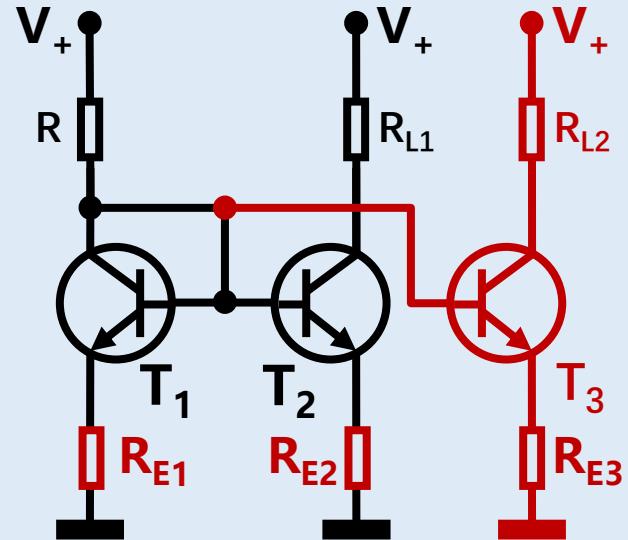
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 电流源：CM 的变型 (3)



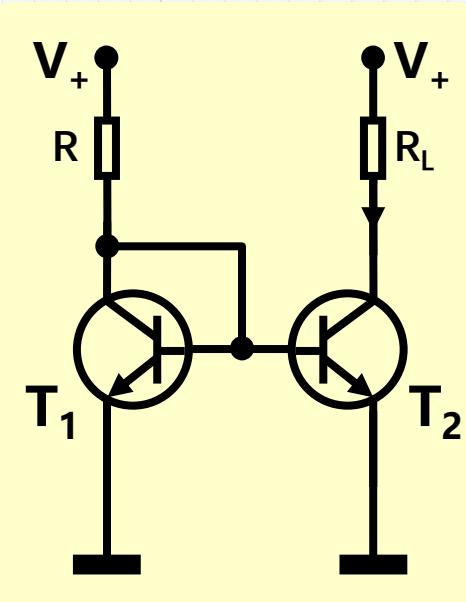
引入  $T_3$  和  $R_{L2}$  ➔

- ▶ 多路电流源
- ▶ 可引入  $R_E$  改善
- ▶ 多路比例电流源
- ▶ 多 C 极的 BJT
- ▶ 构造 BC 结面积比例..



↑ BJT 均可换为 FET

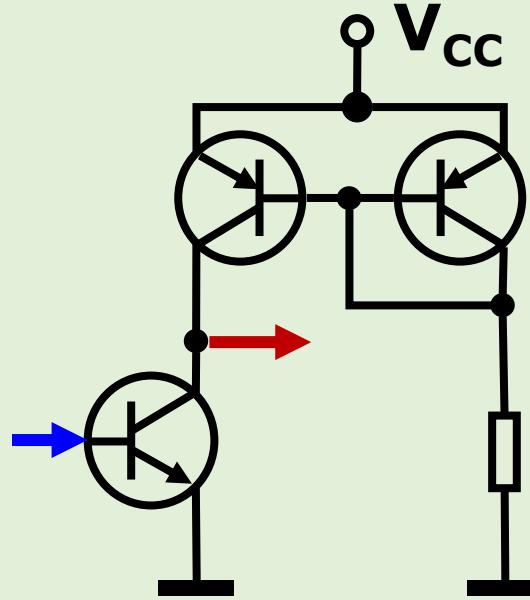
- ▶ 电流对称性更好
- ▶ 需解非线性方程或作图
- ▶ 各种变型改进适用于 FET
- ▶ 多FET：调沟道宽长比...



? 不足和问题？

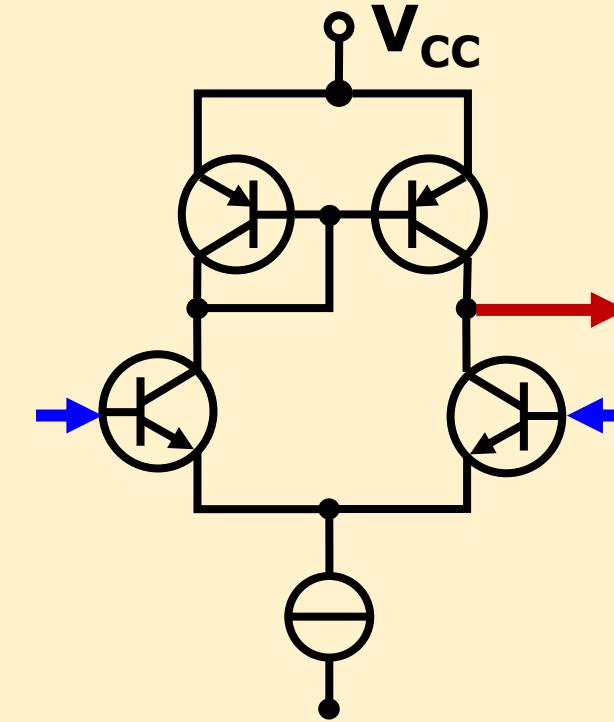
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 电流源：应用



## 用恒流源做有源负载

- ▶ 能提供足够的偏置电流
- ▶ 能提供足够大的  $R_C$
- ▶ 能构成非常大的单级增益
- ▶ 后级常需要接跟随器
- ▶ 在集成电路内很常见

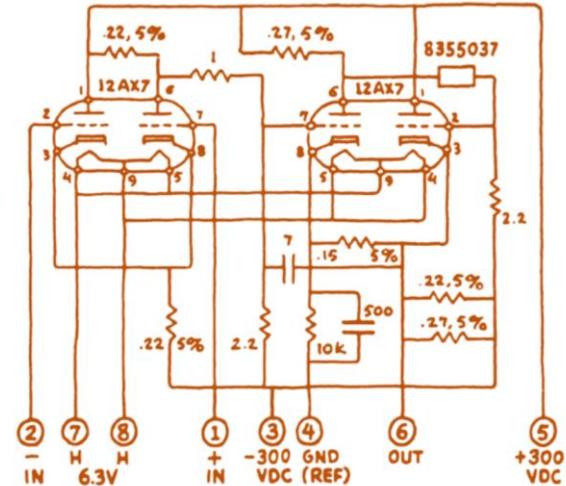


## 差分电路接镜像电流源

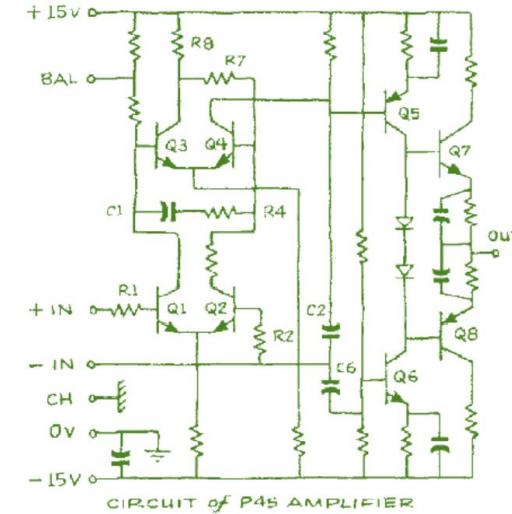
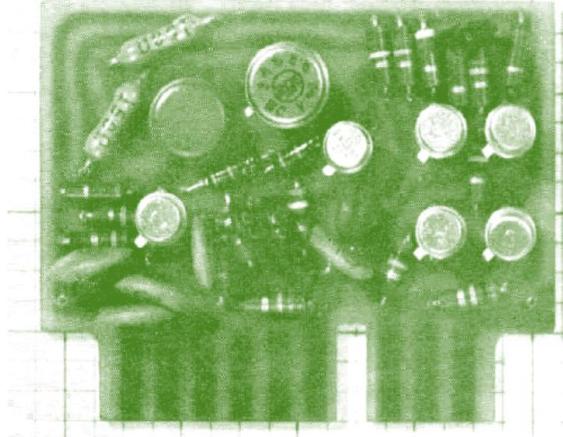
- ▶ 良好的静态对称性
- ▶ 良好的高输出阻抗
- ▶ 共模信号的抑制
- ▶ 输出动态电流加倍
- ▶ 注意：输出阻抗的计算...

复合级联  
推挽输出

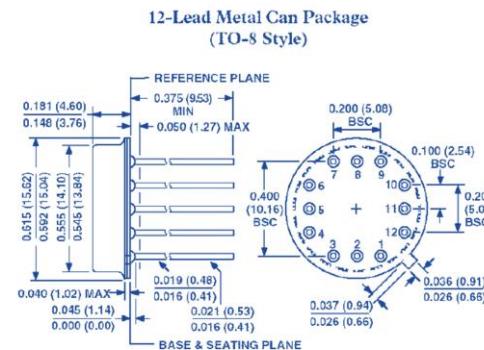
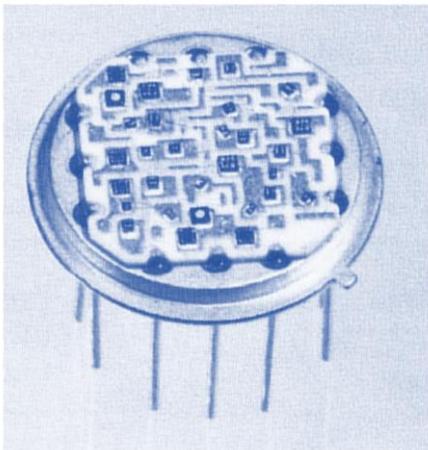
差分放大  
有源偏置



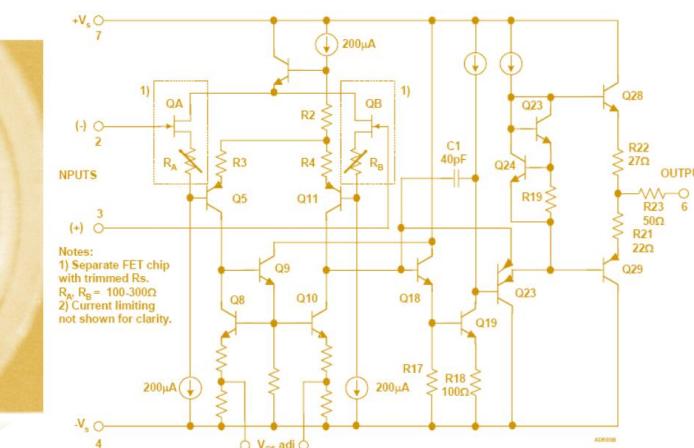
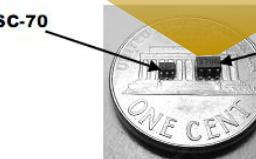
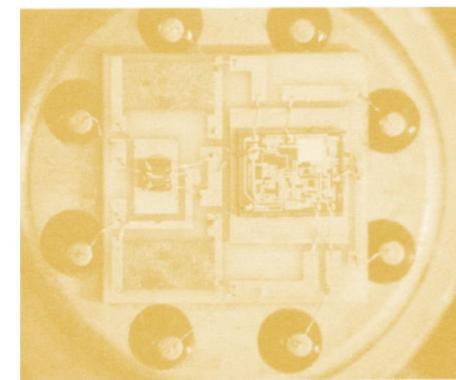
电子管运放



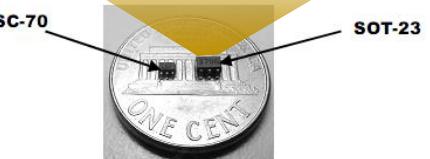
插卡式运放：分立晶体管



运算放大器



厚膜电路运放：集成封装



微型集成电路

运放

# 运放：概述



## 类型很多

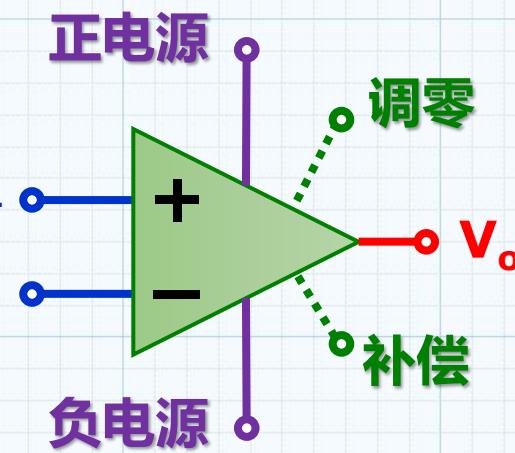
- ▶ 主流为 VFB 型

## VFB 运放：

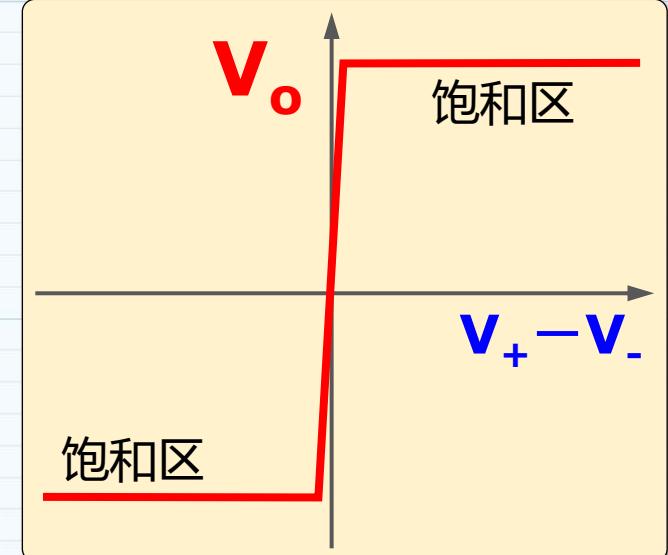
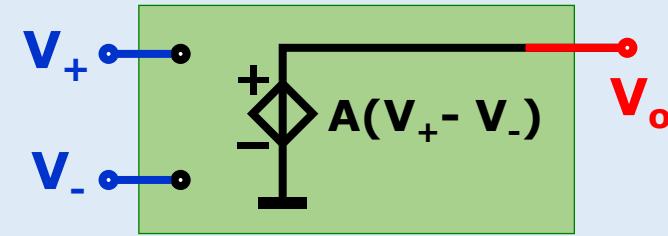
- ▶ 必备管脚：2入1出 + 两电源
- ▶ 其它管脚：辅助（调零、补偿、偏置..）或空闲
- ▶ 基本功能：仅对差模信号有极高增益 ( $A > 10^4$ )
- ▶ 其它特点：两输入端均为高阻  $I_+ \approx I_- \approx 0$  ← 虚断

## VFB运放的大信号转移特性：

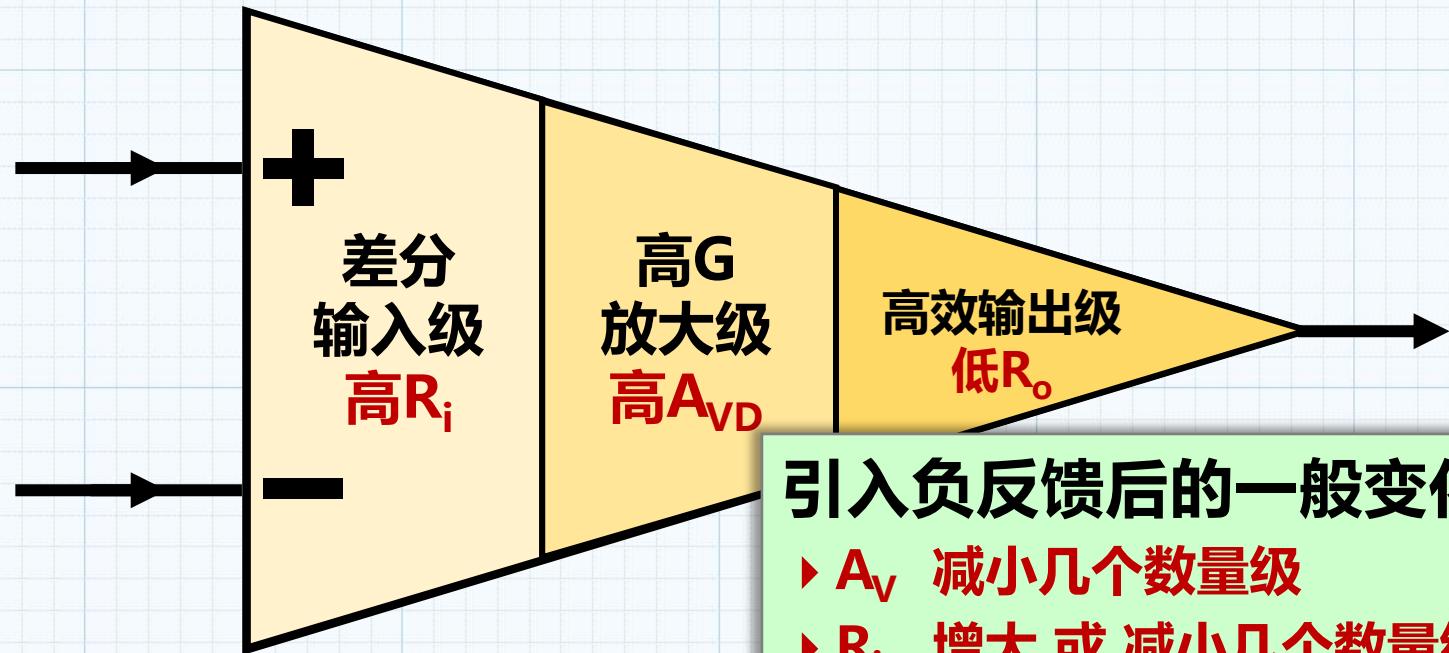
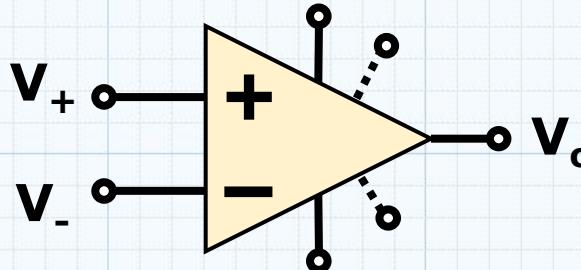
- ▶ 线性区：两输入端之间电压近似相等 ← 虚短
- ▶ 饱和区：虚短一般不成立



## 线性区小信号模型



# 运放：基本组成



引入负反馈后的一般变化：

- ▶  $A_v$  减小几个数量级
- ▶  $R_i$  增大 或 减小几个数量级
- ▶  $R_o$  减小几个数量级
- ▶  $f_H$  提升几个数量级
- ▶ 多数特性能得到大幅改善

多级放大器

输入阻抗极高： $R_i >$ 兆欧

电压增益极高： $A_{VD} > 10^4$

不准

不稳

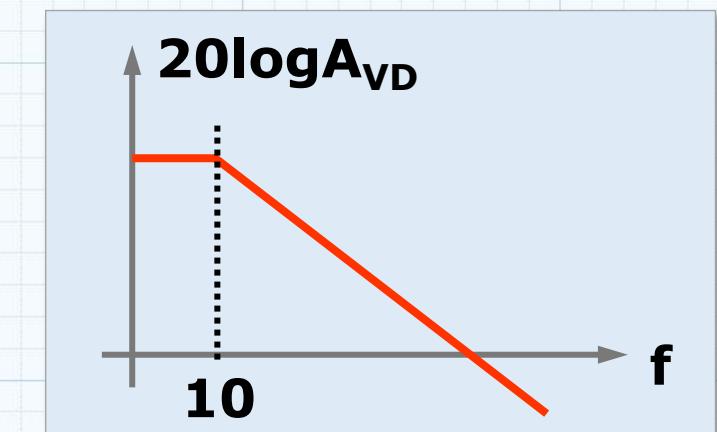
输出阻抗中等： $R_o \sim$ 百欧

太大

截止频率很差： $f_H \sim$ 十赫兹

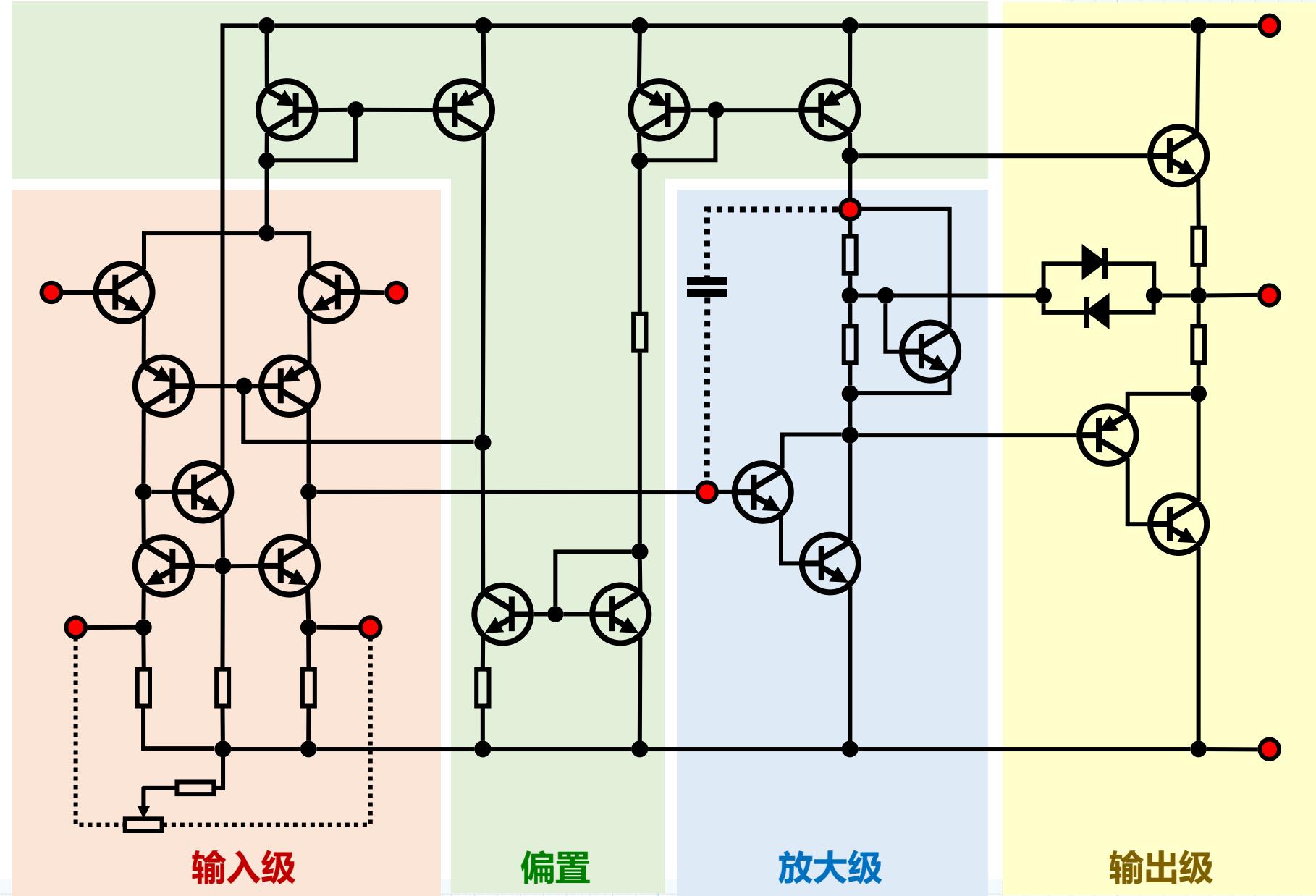
太小

保护电路丰富：  
便捷，安全



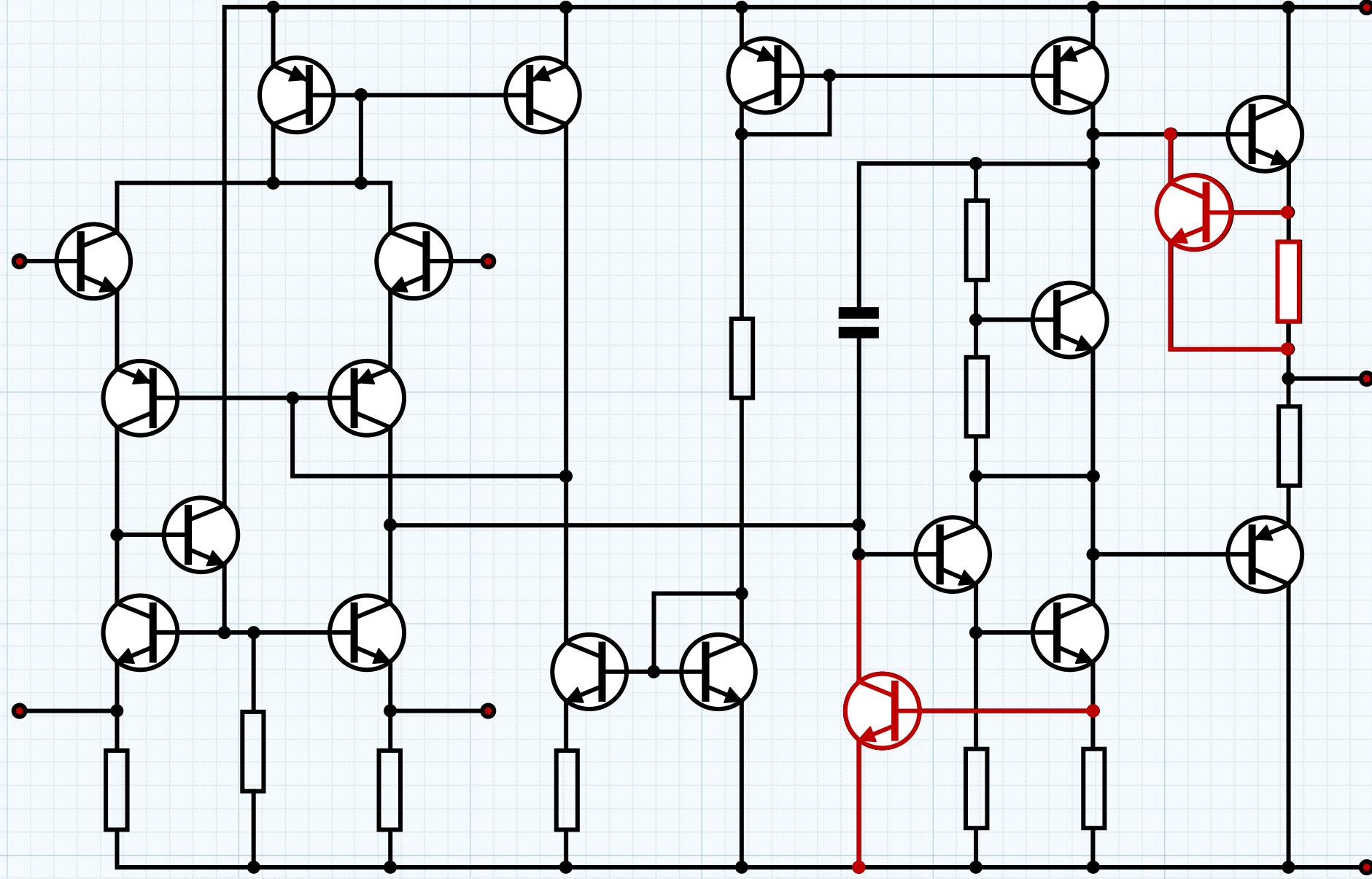
# F007 通用型运放

? 有几处镜像电流源?



复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置

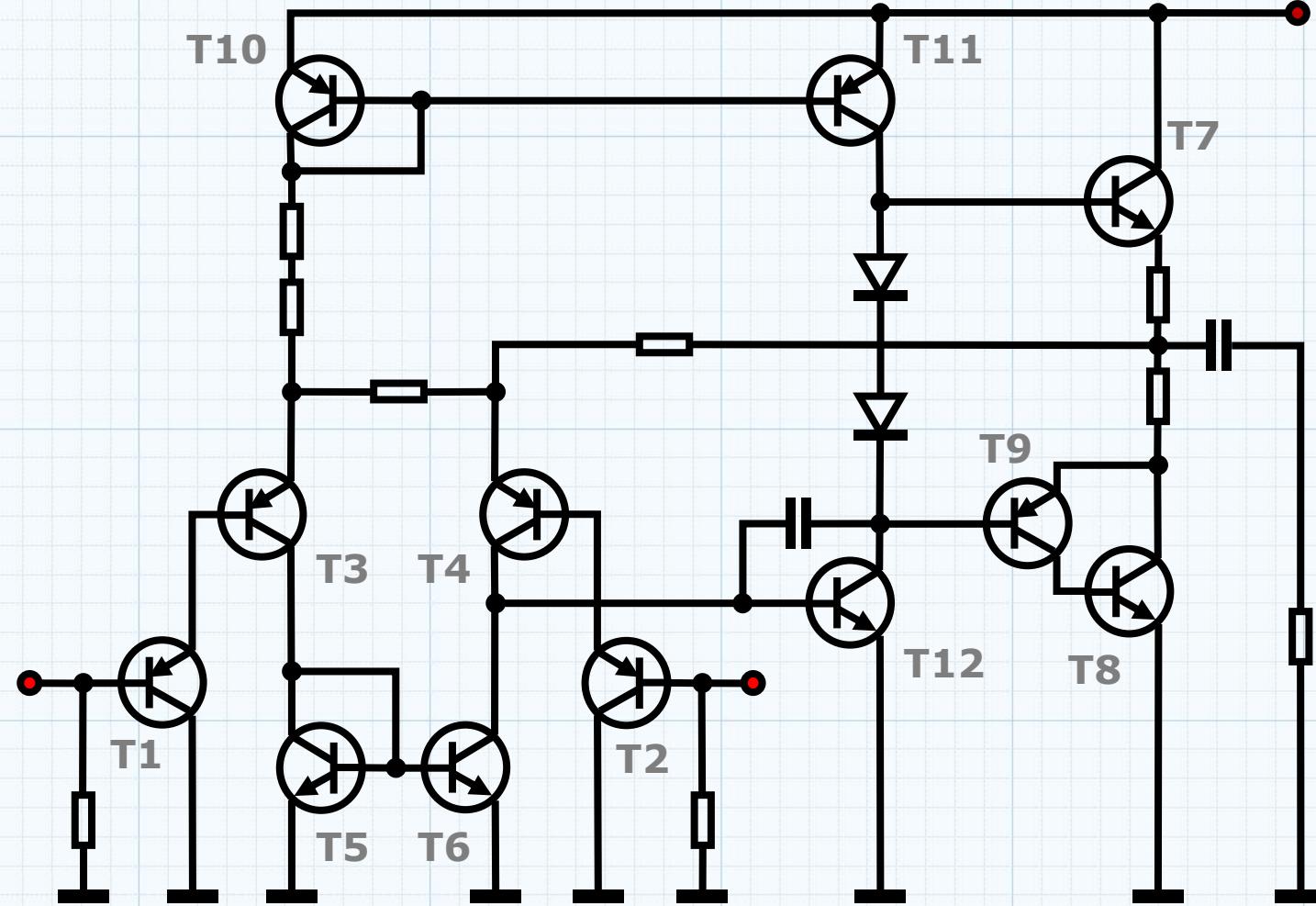
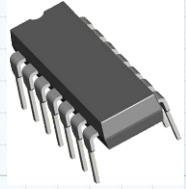
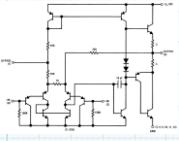
$\mu$ A741:



运放

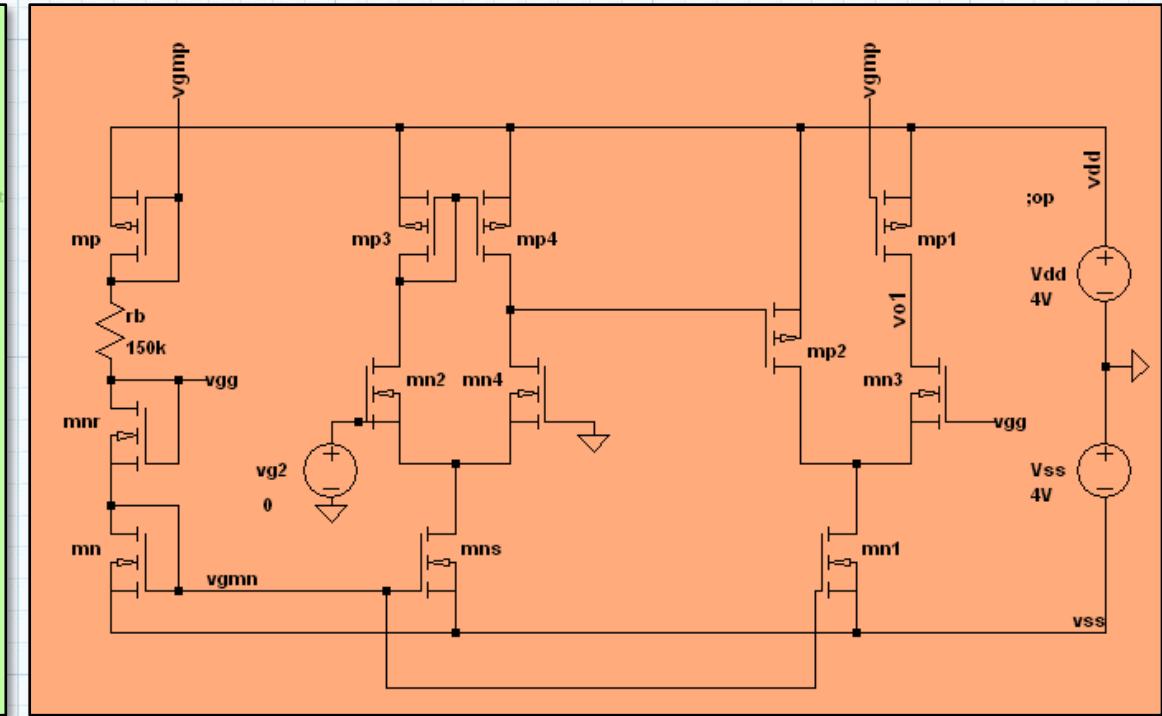
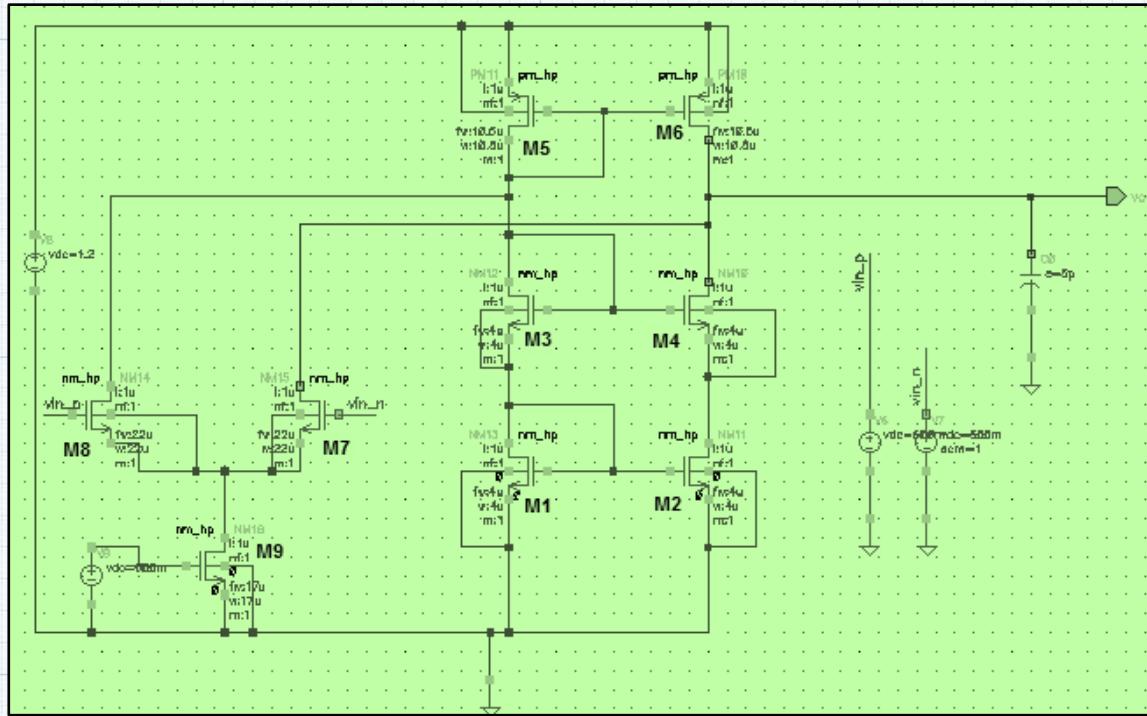
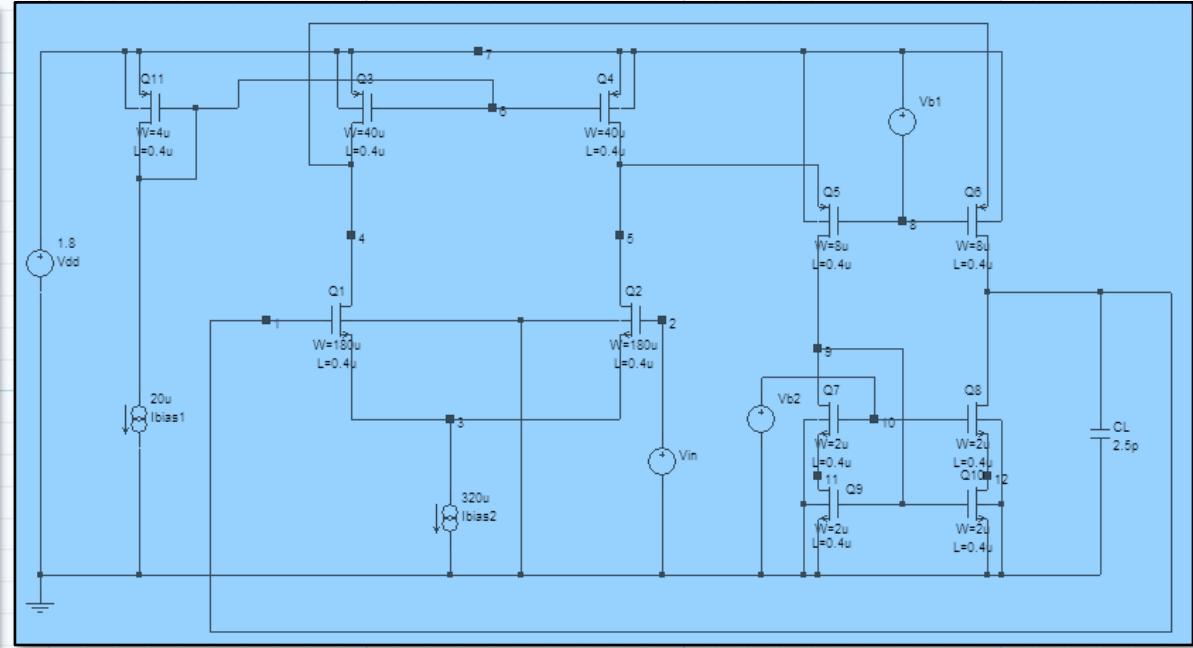
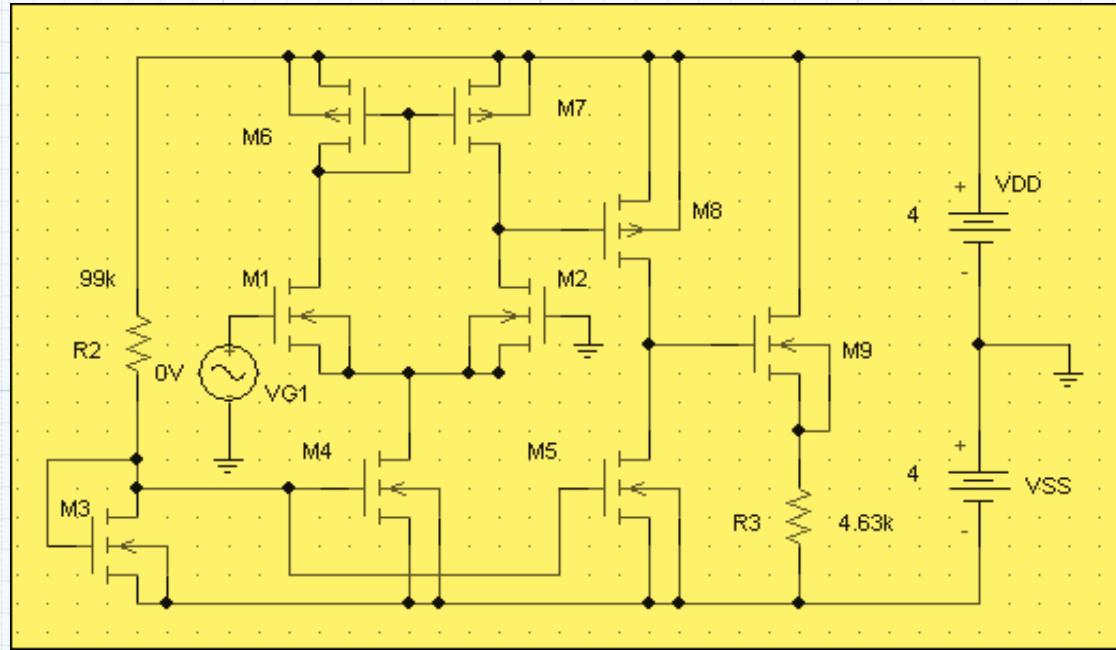
复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置

# LM380



运放

复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置



运放

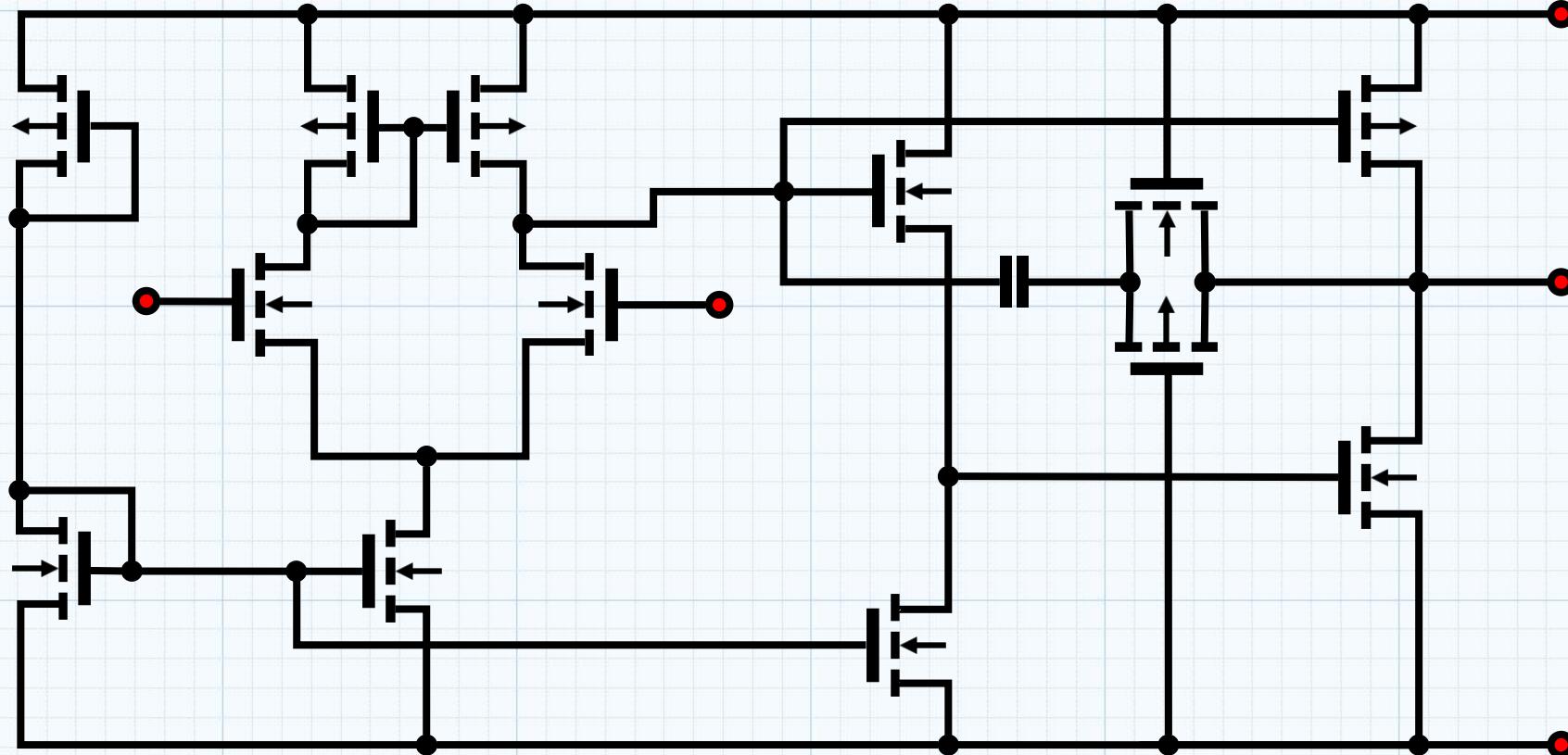
复合级联

推挽输出

差分放大

有源偏置

# 典型 MOS FET 运放



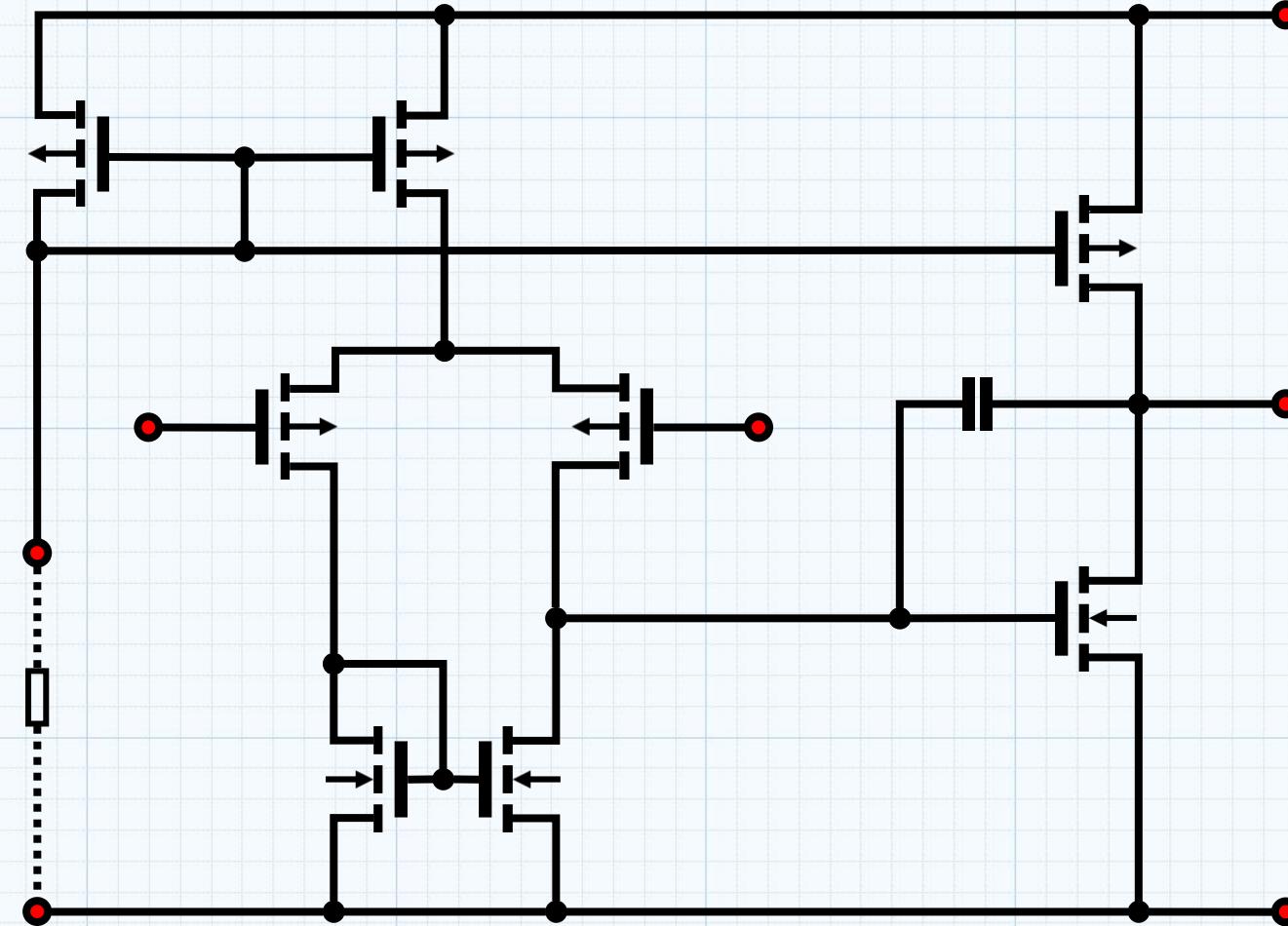
复合级联

推挽输出

差分放大

有源偏置

# C14573



运放

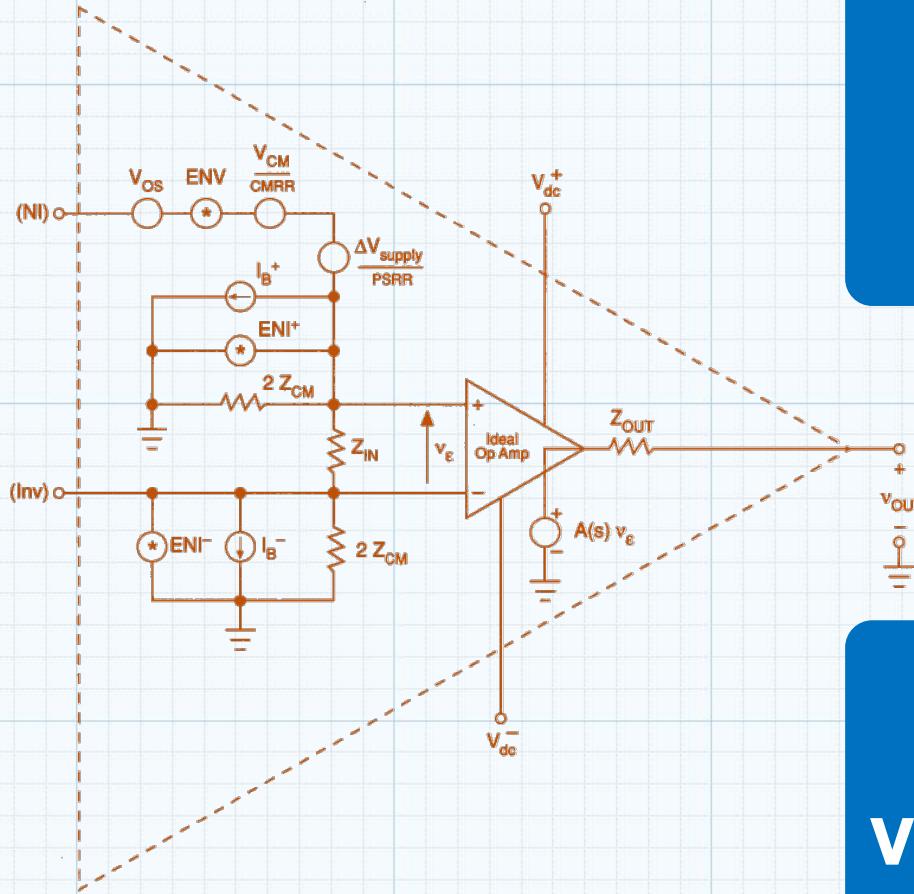
# 运放指标：最基本的一些...

## 信号放大

$A_{od}$ 、 $A_{oc}$ 、 $K_{CMR}$   
 $R_{id}$ 、 $R_{ic}$ 、 $R_{out}$

## 动态特性

$f_H$ 、 $f_c$ 、 $SR$ 、 $BW_p$



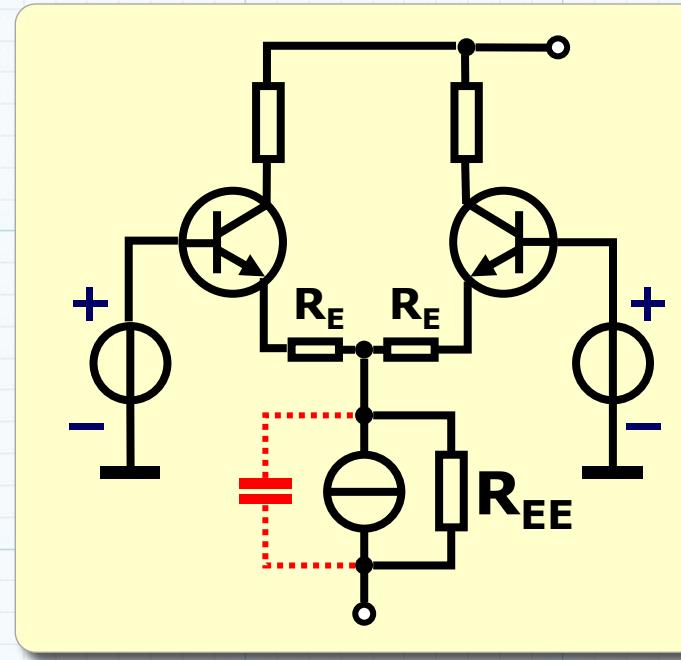
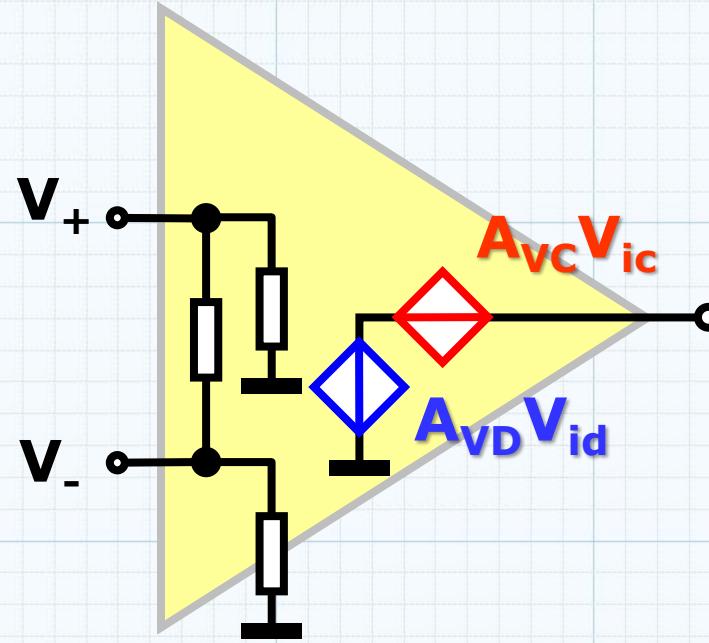
## 工作极限

$V_{idm}$ 、 $V_{icm}$ 、 $P_{dm}$

## 失调

$V_{IO}$ 、 $I_{IB}$ 、 $I_{IO}$ 、 $d/dT$

# 指标：信号放大



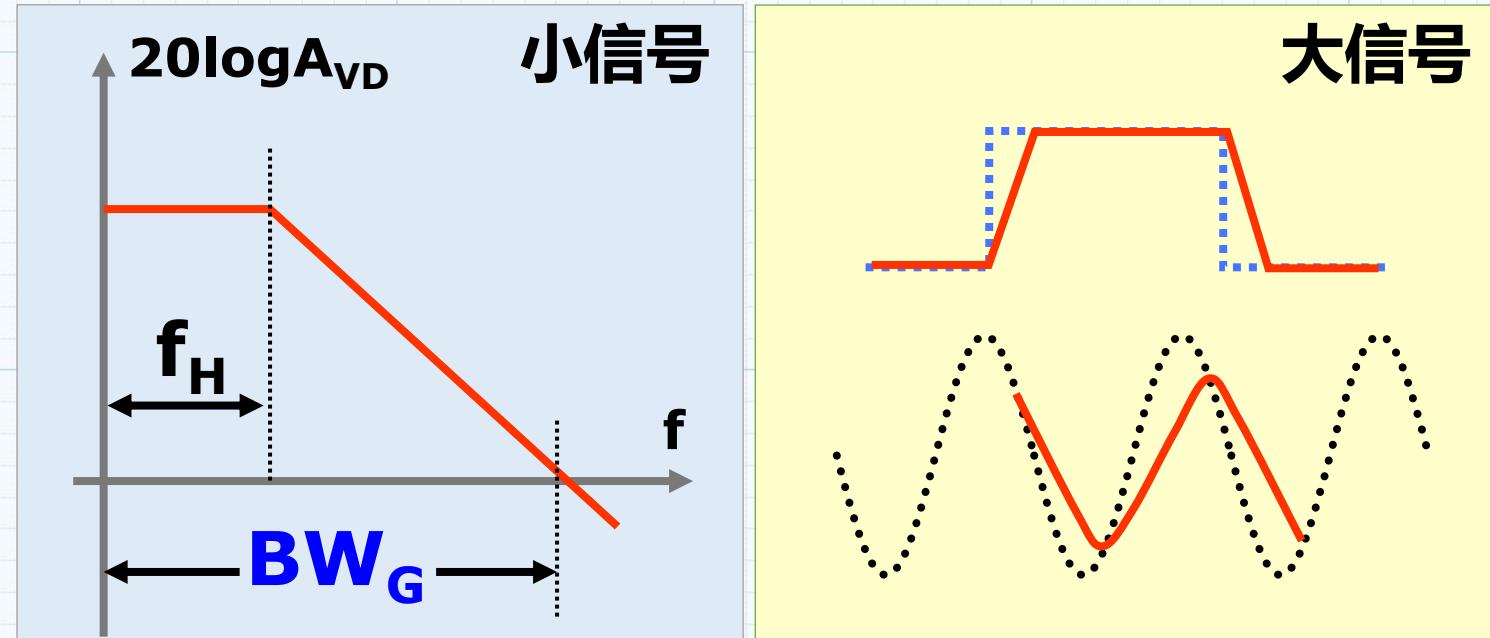
## 和信号幅度有关的参数

- ▶ 差模输入：差模增益  $A_{VD}$  和输入阻抗  $R_{id}$
- ▶ 共模输入：共模增益  $A_{VC}$  和输入阻抗  $R_{ic}$
- ▶  $R_{ic} \gg R_{id}$ : 一般大两个数量级以上

## 共模抑制比： $K_{CMR} = A_{VD} / A_{VC}$

- ▶  $A_{VC}$ 容易随频率上升  $\rightarrow K_{CMR}$ 随频率下降很快

# 指标：动态特性



## 小信号情形：

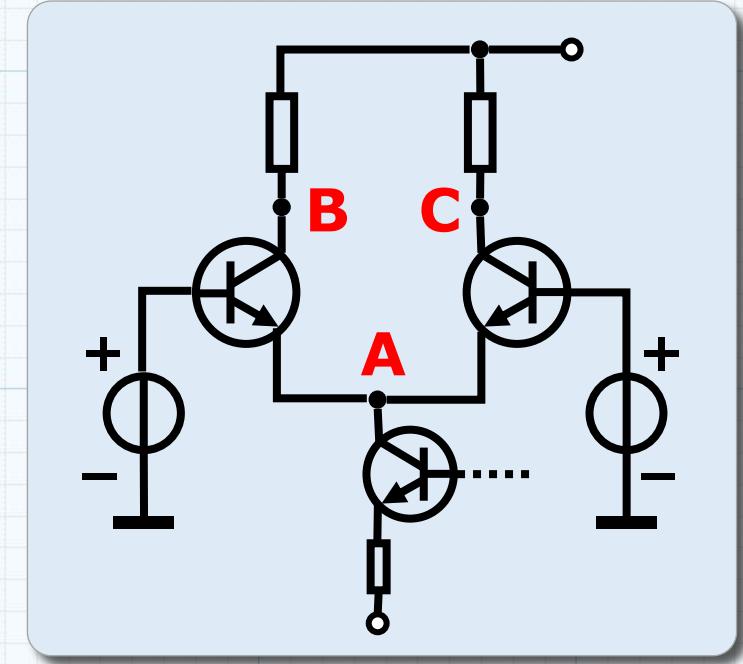
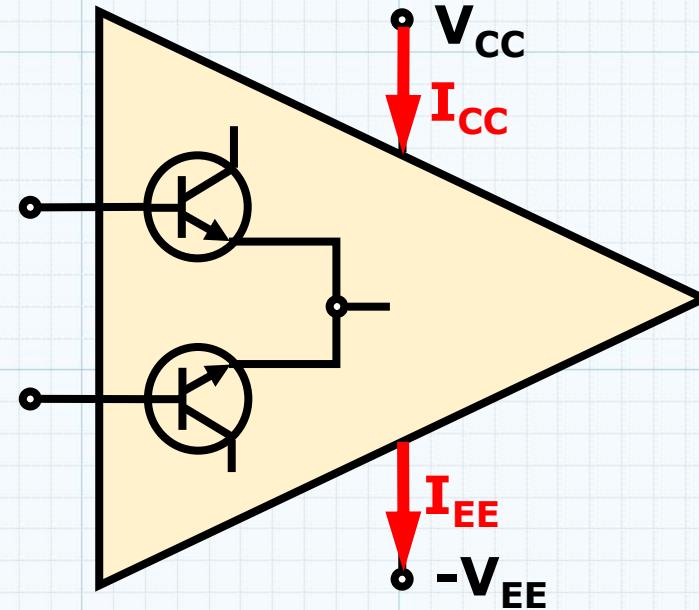
- 上限截止频率  $f_H$ :  $A_{VD}$  下降 3dB 的带宽
- 单位增益带宽  $f_c$ : 增益下降到1时的带宽( $f_T$ 、  $BW_G$ )

## 大信号情形：

- 转换速率(摆率)SR: 阶跃激励时电压变化率
- 全功率带宽  $BW_p$ : 正弦信号输入无三角失真

$A \sin(2\pi ft)$  过零点导数：  
 $2\pi f A$   
 由于:  $2\pi F V_{om} < SR$   
 $F_{max} \approx SR / 2\pi V_{om}$

# 指标：工作极限



## ✓ 最大差模输入电压 $V_{idm}$ :

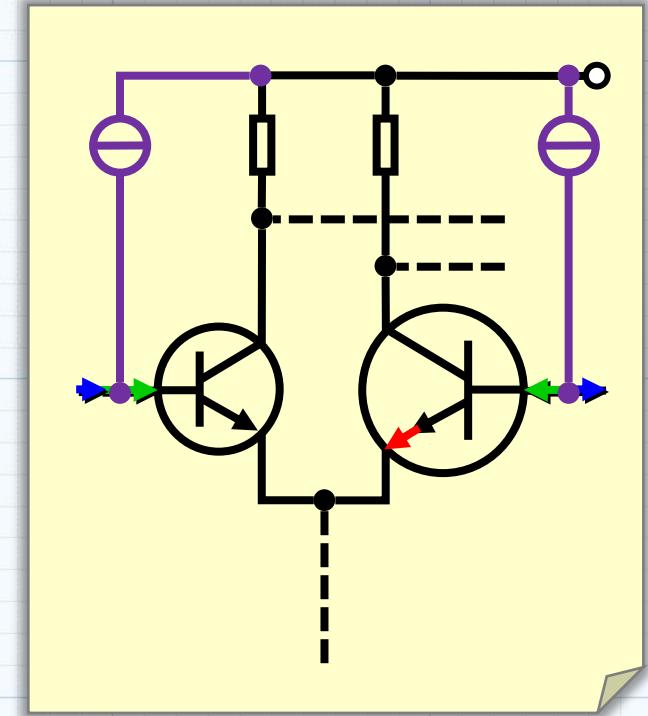
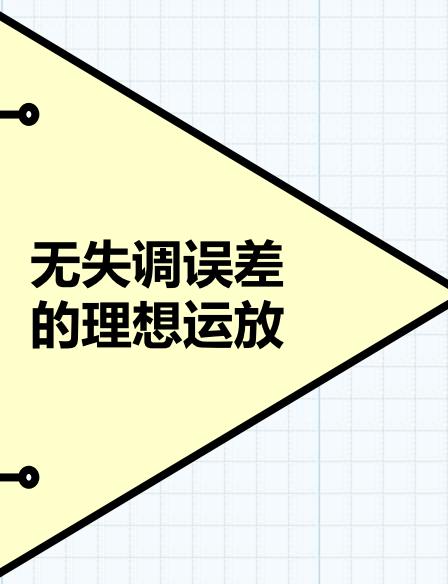
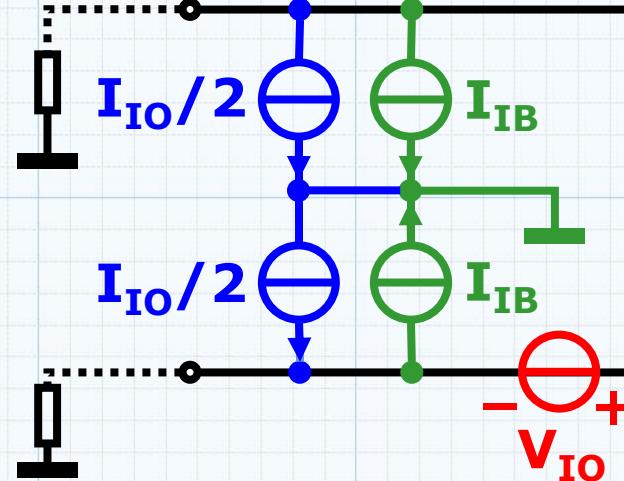
- ▶ 差模信号输入  $\rightarrow$  A点电压基本不变  $\rightarrow$   $T_1, T_2$ 发射结先击穿

## ✓ 最大共模输入电压 $V_{icm}$ :

- ▶ 共模信号输入  $\rightarrow$  A点基本跟随  $\rightarrow$   $T_3$ 集电结先击穿？
- ▶ 正电平共模输入时：B、C点电压不变  $\rightarrow$  正饱和条件
- ▶ 负电平共模输入时：A点电压跟随  $\rightarrow$  负饱和条件

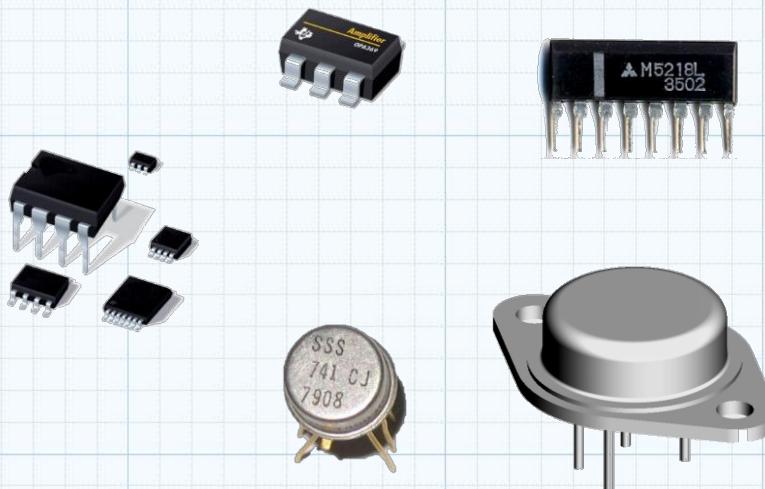
## ✓ 静态功耗： $P_{dm} = \max( V_{cc}I_{cc} + V_{ee}I_{ee} )$

# 指标：失调



- 失调电压  $V_{IO}$** : 电压方面的不对称性 (外部无电阻时)
  - ▶ 可以在芯片外、或芯片内进行调零
- 偏置电流  $I_{IB}$** : 输入管偏置到线性区所需
  - ▶ 外接阻抗不平衡将导致输出误差 → 要求输入端对地阻抗相近
- 失调电流  $I_{IO}$** : 偏置电流不对称所致
  - ▶ 一般比  $I_{IB}$  小一个数量级，但难以补偿/调零
- 少数运放内部提供  $I_{IB}$ ，则  $I_{IB}$  的符号不一定能确定**
  - ▶ 对于运放自己内部提供  $I_{IB}$ ，则  $I_{IB}$  和  $I_{IO}$  数量级相当

# 指标：通用与特种



	理想	通用型运放	高指标
$A_{VD}$	$\infty$	60~120dB	180 dB
$K_{CMR}$	$\infty$	70~90dB	170 dB
$R_i$	$\infty$	0.5~2M $\Omega$	10 <sup>13</sup> $\Omega$
$V_{IO}$	0	1~10mV	1 $\mu$ V
$I_{IB}$	0	10nA~1 $\mu$ A	5 pA
$I_{IO}$	0	1nA~0.1 $\mu$ A	0.5 pA
$dV_{IO}/dT$	0	5 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	50 nV/ $^{\circ}$ C
$dI_{IO}/dT$	0	5 pA/ $^{\circ}$ C	1 pA/ $^{\circ}$ C
$BW_G$	$\infty$	0.5~2 MHz	2 GHz
SR	$\infty$	0.5~0.7 V/ $\mu$ s	5 KV/ $\mu$ s
$P_D$	0	80~120 mW	30 $\mu$ W

按指标：高G/高阻/高速/高精度/微P/大功率..

按工艺：双极型/CB/CMOS/BiFET...

按电源：对称电源/单电源

按反馈：电压反馈VFB/电流反馈CFB

按输出：电压放大/跨导放大/电流放大..

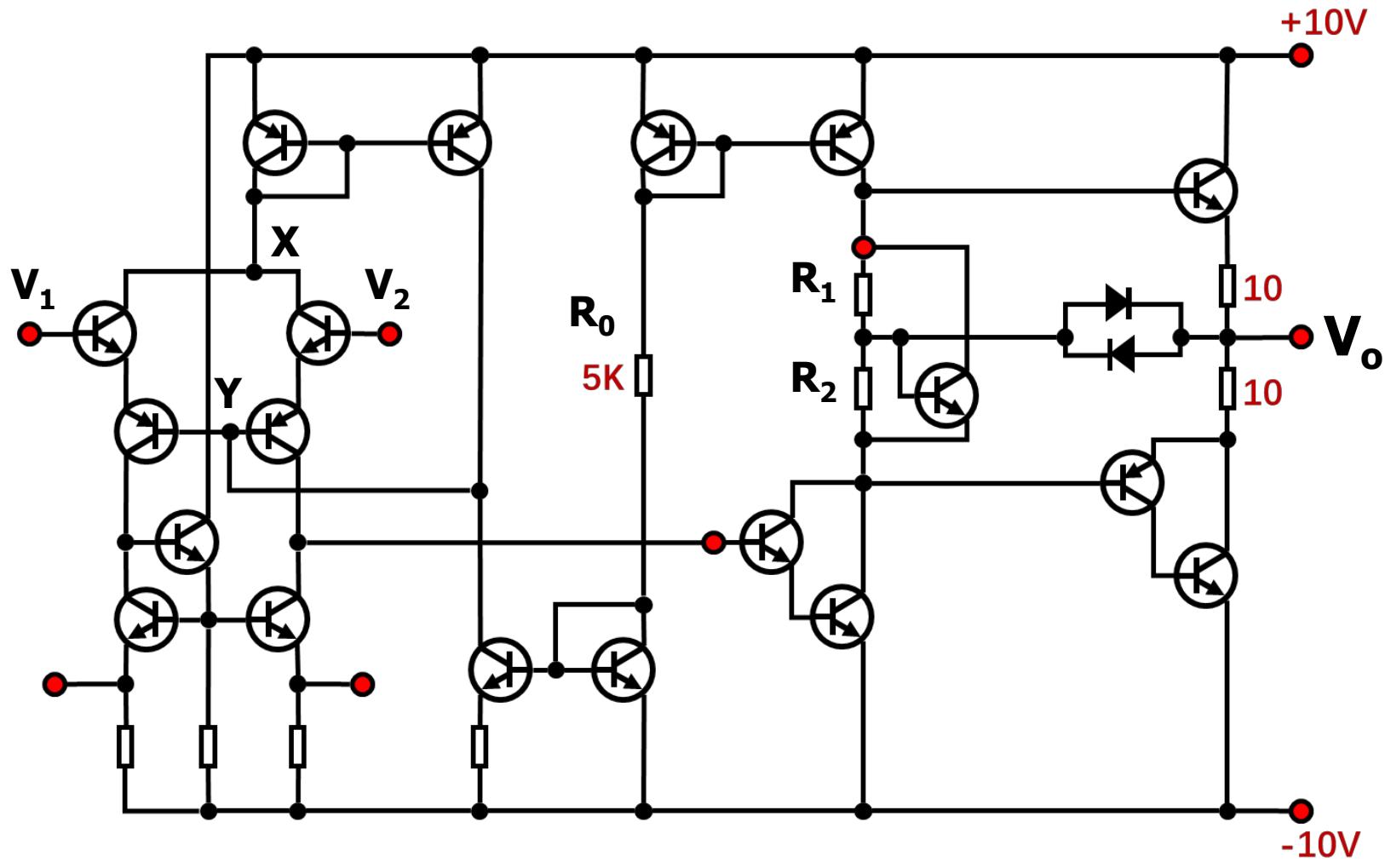
按其他功能：可选输入/可调增益/隔离放大...

## 1967年的指标和价格

PARAMETER	VARACTOR BRIDGE	CHOPPER STABILIZED	FET INPUT	TRANSISTOR DIFFERENTIAL
Current Drift 25 $^{\circ}$ C-35 $^{\circ}$ C	0.05pA/ $^{\circ}$ C (AVG.)	1pA/ $^{\circ}$ C (MAX. AVG.)	1.5pA/ $^{\circ}$ C (AVG.)	100pA/ $^{\circ}$ C (MAX. AVG.)
Current Noise DC-1Hz	0.01 pA	10 pA	0.1 pA	5 pA
Voltage Drift	60 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	0.5 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	2 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	0.75 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
Voltage Noise DC-1Hz	2 $\mu$ V	5 $\mu$ V	3 $\mu$ V	1 $\mu$ V
PRICE	\$110	\$157	\$135	\$110

## 20.1

## 运算放大器



设所有晶体管参数均一致。  
 $\beta=100, r_b \approx 0$ ; 请估算:

- ① 电路的静态功耗
- ② 输出电压  $V_o$  的最大线性动态范围
- ③ 若外接  $R_L = 1K$ , 在正常放大时, 它能获得的最大电流是多少?
- ④ 若  $C_{BC}=C_{BE}=10pF$ , 则  $f_H$  大约是多少?  
提示: 先判断  $f_H$  是哪级决定的
- ⑤ 若  $V_{ic}=(V_1+V_2)/2$   
则  $A_{VC} = V_o/V_{ic} = ?$
- ⑥ 若  $V_{id}=V_1-V_2$   
则  $A_{VD} = V_o/V_{id} = ?$   
注意图中 X, Y 点为动态地;  
在估算过程中大部分时候  
是用电流来算。