



# 电子线路 分析与设计

## 第 16 讲 多管放大电路

陈江  
2022.11.2

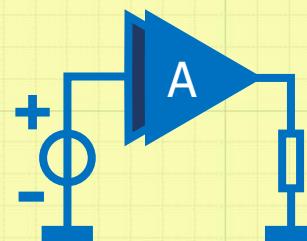


# 如何改进放大电路？

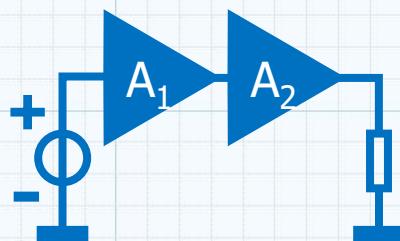
①改进器件

②优化参数

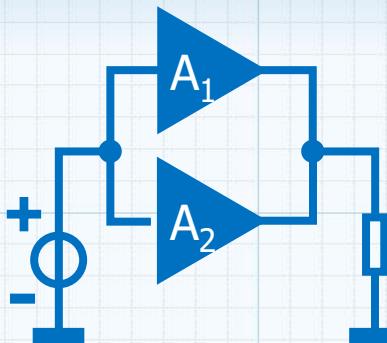
③多管放大电路



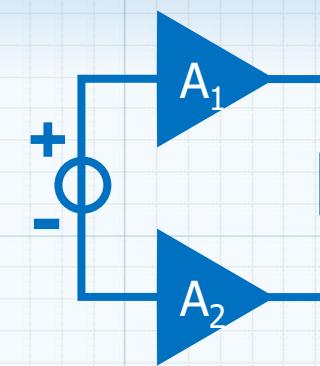
复合



级联



推挽



差分

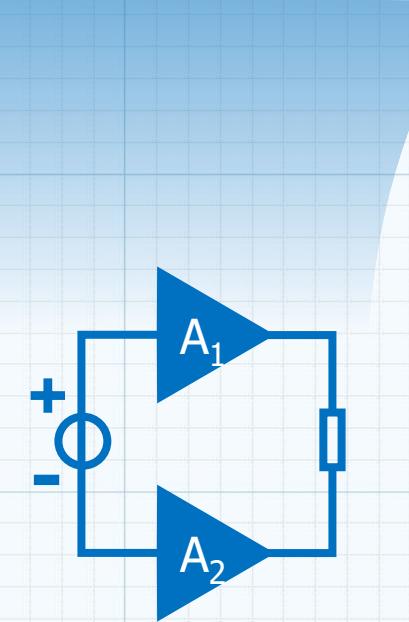
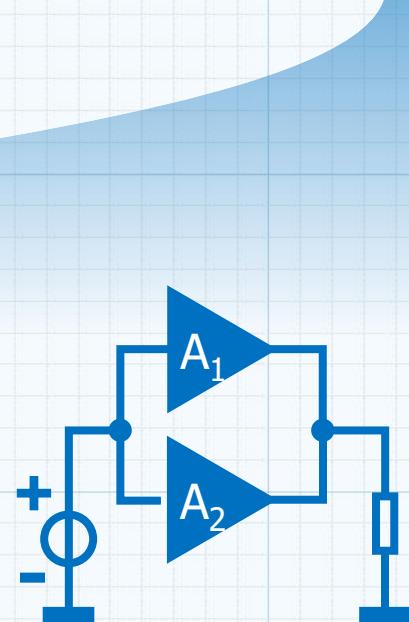
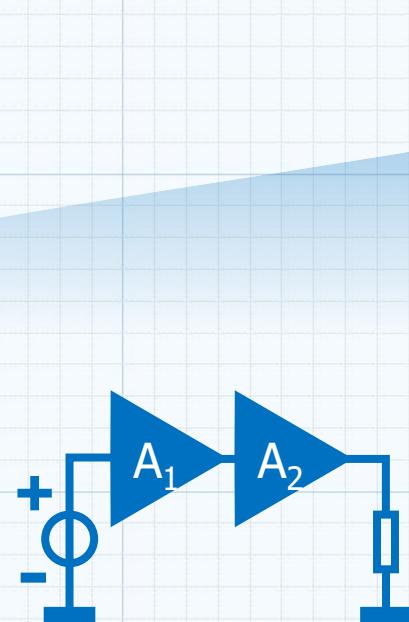
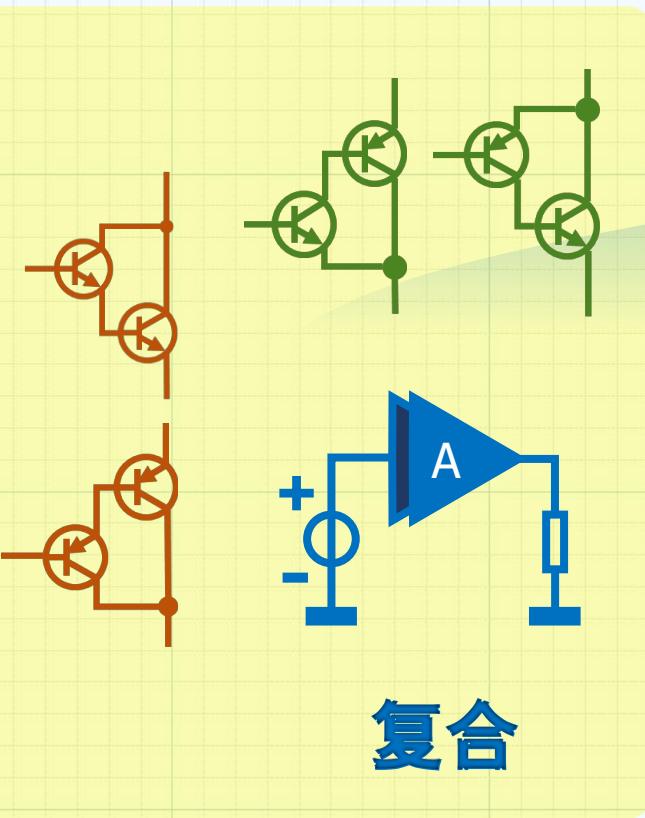


# 如何改进放大电路？

①改进器件

②优化参数

③多管放大电路



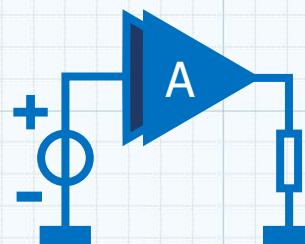


# 如何改进放大电路？

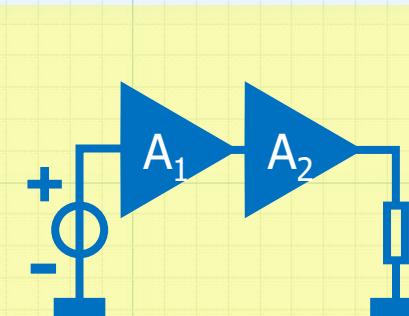
①改进器件

②优化参数

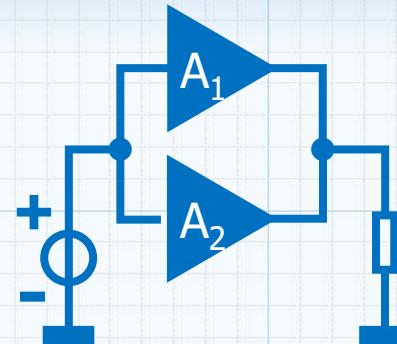
③多管放大电路



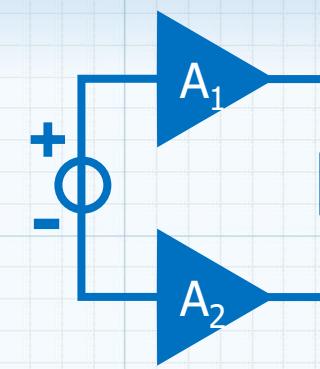
复合



级联



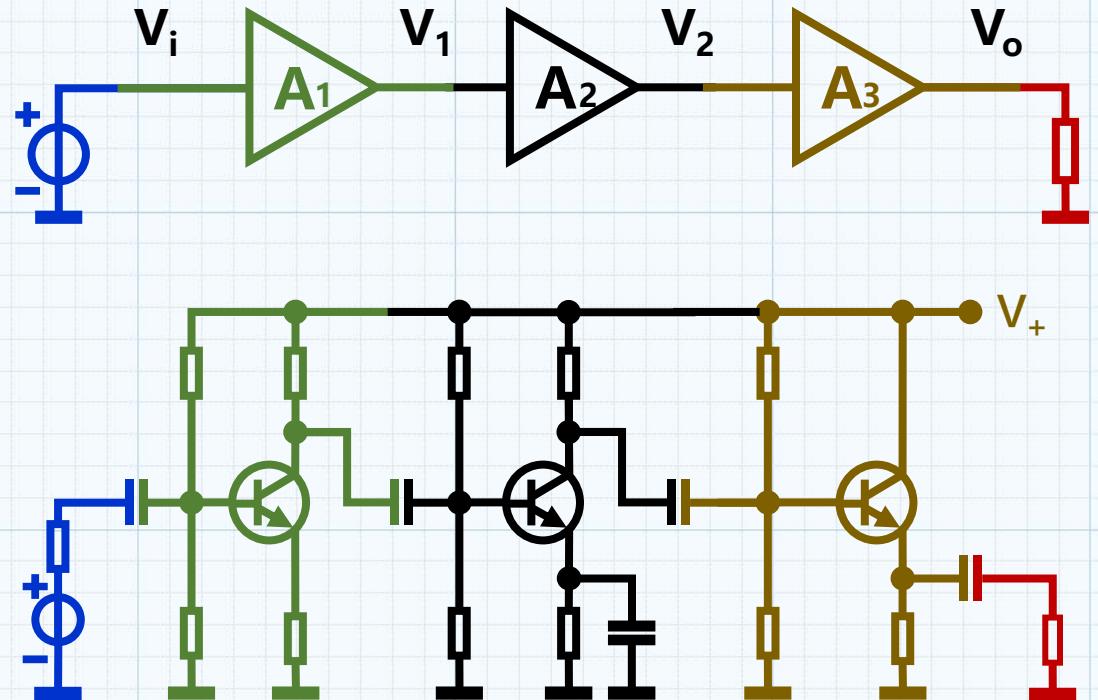
推挽



差分

# 级联：增益与亏损

$$A_{\text{总}} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_1}{V_i} \frac{V_2}{V_1} \frac{V_o}{V_2} = A_1 A_2 A_3$$



？ 级联可以获得高增益？  
可以 但非必然

？ 亏损出现在哪里？

前级  $R_o$  和 后级  $R_i$  关系

传递电压时，级间分压：

最好  $R_o \rightarrow 0$   $R_i \rightarrow \infty$

$$\frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}}$$

？ 典型级联组态？

$R_o$  尽量小  $\leftarrow$  末级 E 输出  $\leftarrow$  CC 组态

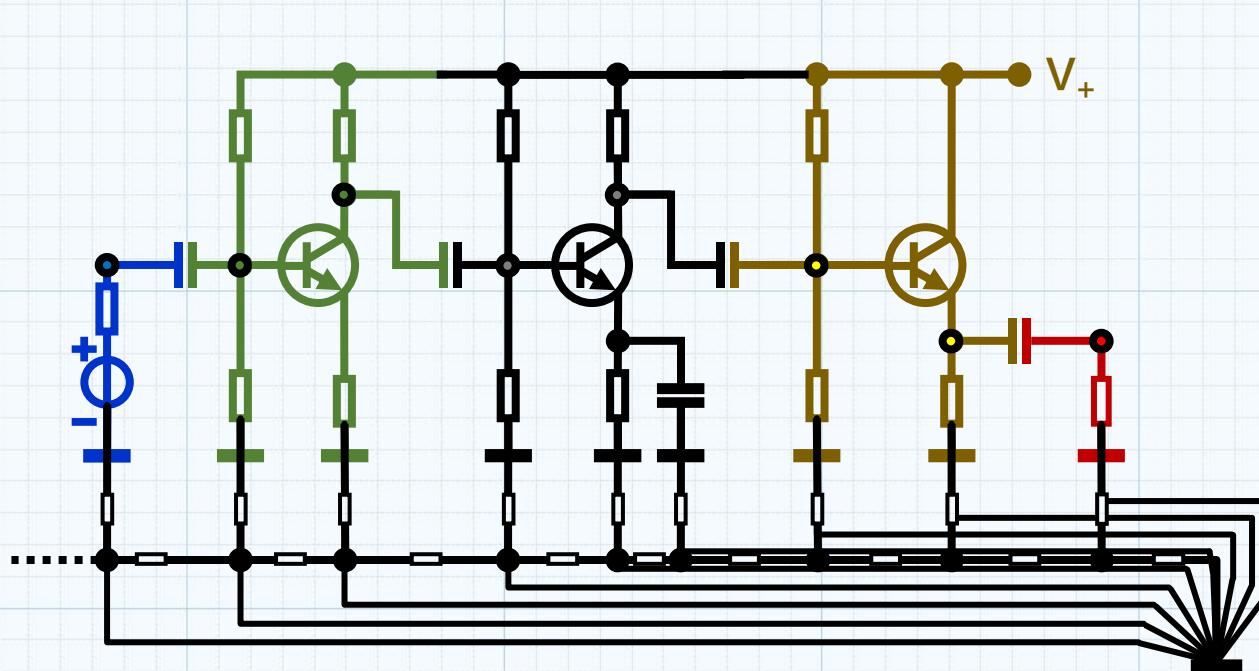
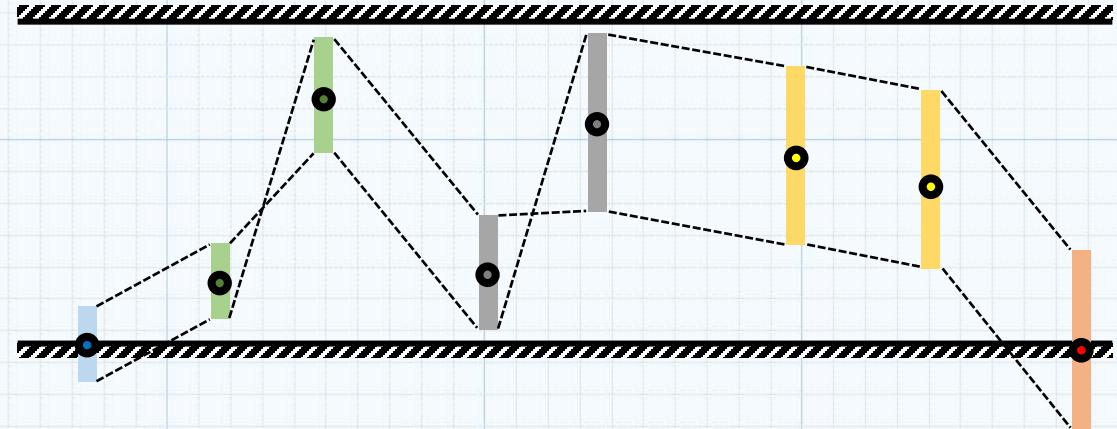
$R_i$  尽量大  $\leftarrow$  初级 B 输入  $\leftarrow$  CC 组态

CE 增益小  $\leftarrow$  E 极电阻大  $\uparrow$

？ 不同于匹配要求？  $R_o = R_L$

取决于：要传递  $V(t)$ ，还是传递  $P(t)$

# 级联：更多问题



？哪一级最容易失真？

后级  $\leftarrow$  越靠后级信号  $V$  越大  
静态工作点也越难设计

？哪一级功耗最大？

一般是最后的输出级  
前级信号小，后级  $V$ 、 $I$  最大 ...  
信号大  $\rightarrow$  偏置高  $\rightarrow$  功耗大 ...

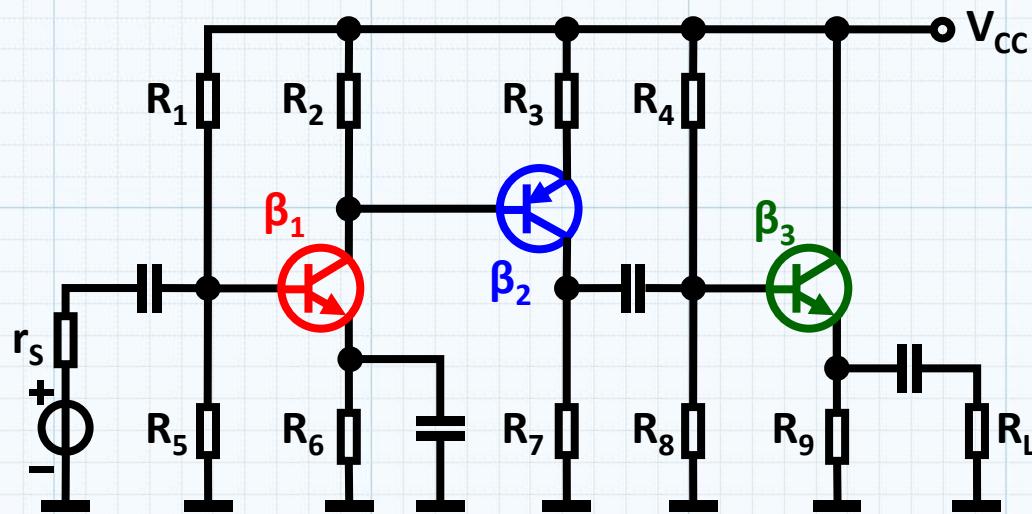
？直接耦合的利弊？

利：低频损失小  
弊：温漂影响大  $\leftarrow$  尤其高A场景

？高 A 级联还需注意啥？

前后级之间的串扰：无线 + 有线  
单点接地措施  $\rightarrow$  地线  $\uparrow$

# 级联：计算



与单管放大电路没有本质的不同

直流分析

画出直流通路

确定各管为线性放大状态

获取小信号参量

$$r_e = 26mV/I_{EQ}$$

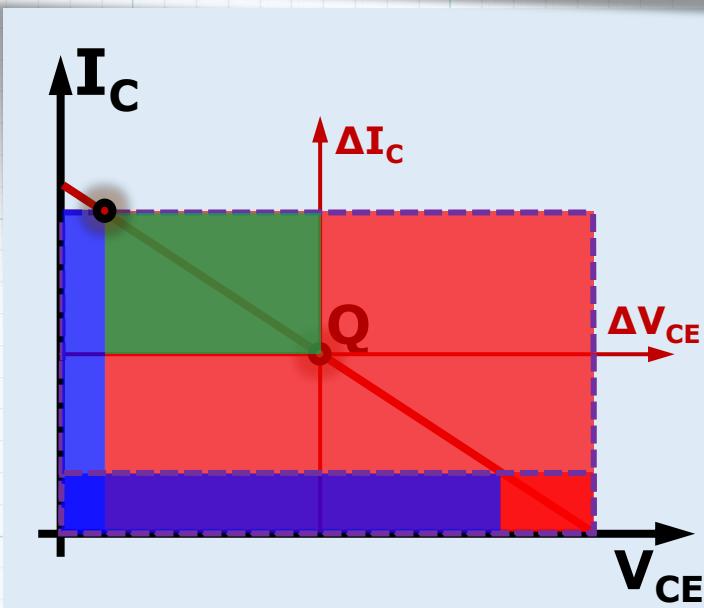
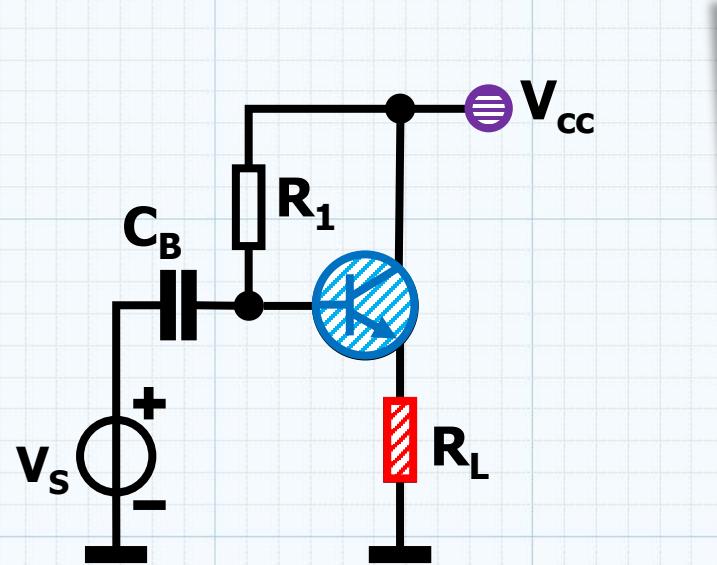
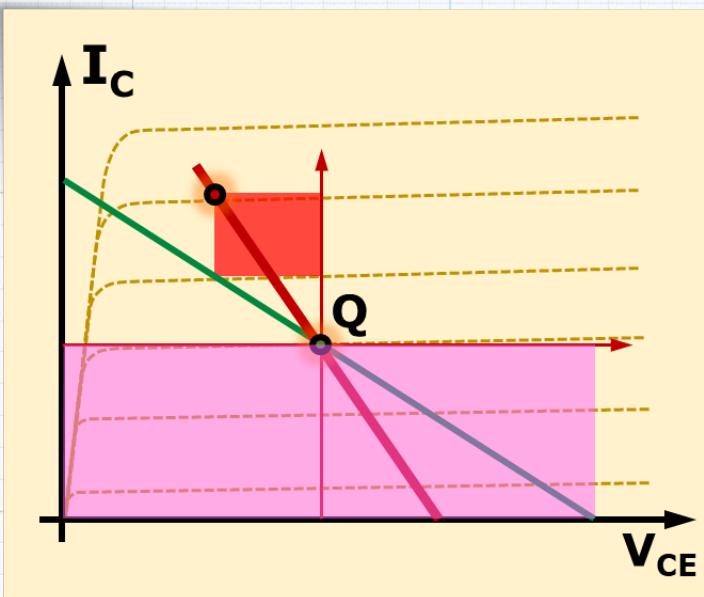
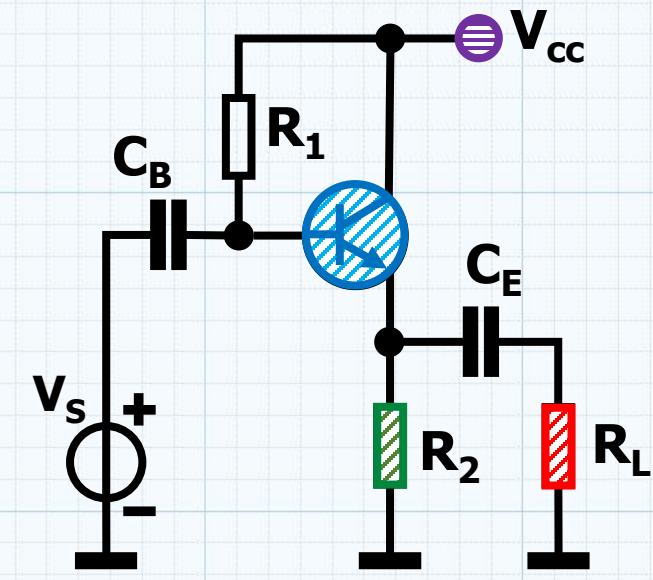
交流分析

画出交流通路  
求解电路方程

或估算阻抗+增益

- ? 是否可以套用公式?  
当然可以 但大多不必
- ? 估算可否直接写答案?  
当然可以 但风险太大
- ? 是否应该先判断组态?  
对理解电路有益; 若题目要求
- ? 同相? 反相?  
逢 CE | CS 反相
- ? 常见的坑?  
BJT | FET 极性  
电容电感的存在

# 推挽：效率的改进（1）



？ 效率低，如何改进？

$$\eta = \overline{P_{RL}} / \overline{P_{VCC}}$$

使正弦波最大？  $\eta < 25\% \dots$

使方波最大？  $\eta < 50\% \dots$

使  $\overline{P_{VCC}}$  尽量小？

降低  $I_{CQ}$ ？

动态变小

降低  $V_{CC}$ ？

可能  $\eta \downarrow$

？ 去除  $R_2$ ？

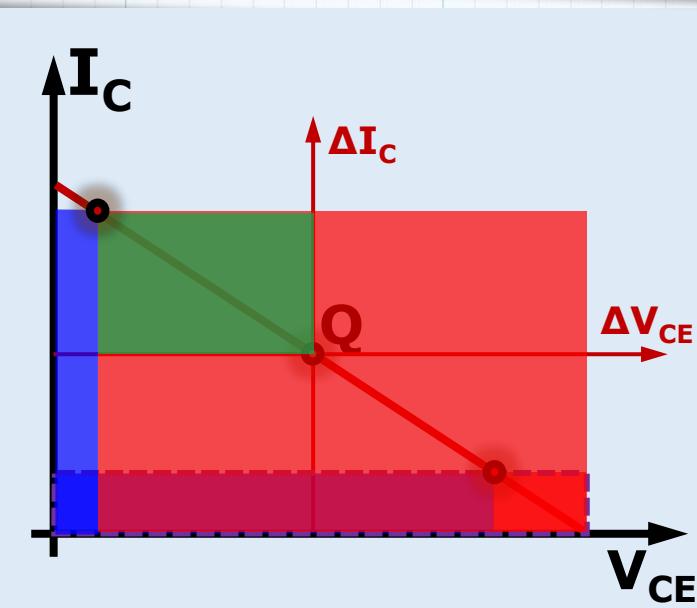
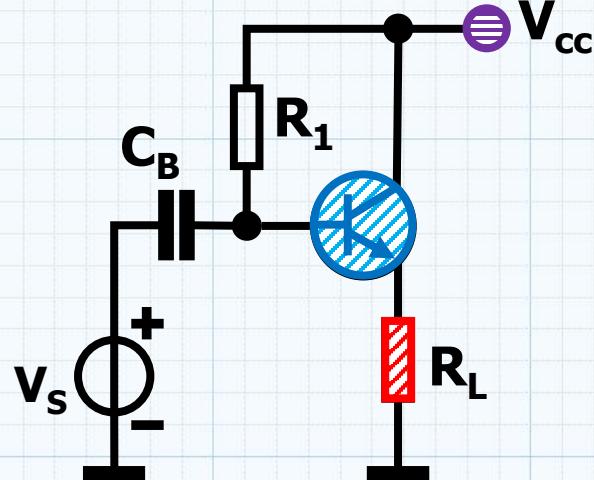
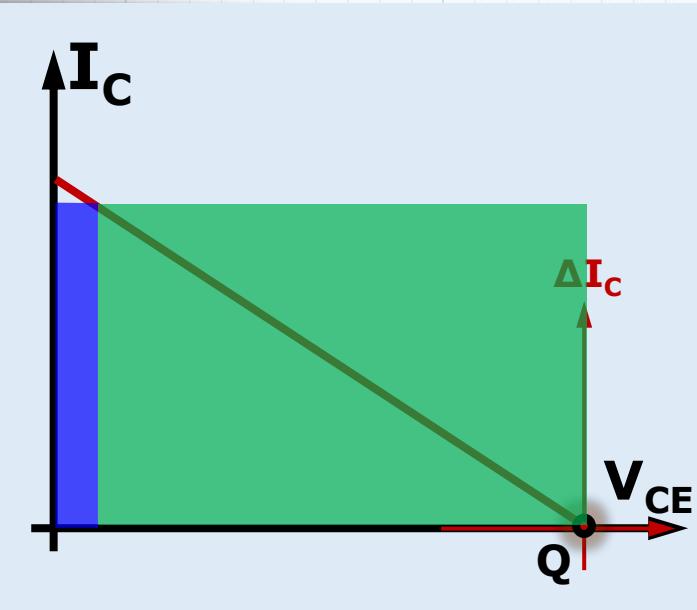
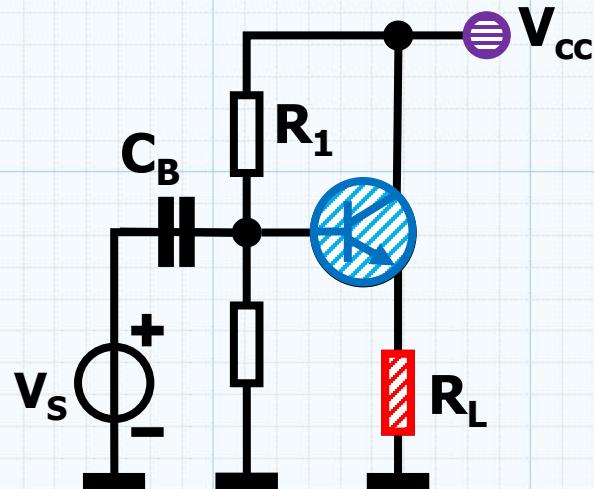
直流|交流负载线重合  
效率显著提高？

$R_L$  承担直流功率

负半周并不明显

偏置电路与  $R_L$  有关

# 推挽：效率的改进（2）



？ 平均功耗太大

Q点下移至截止区

电路的调整 ...

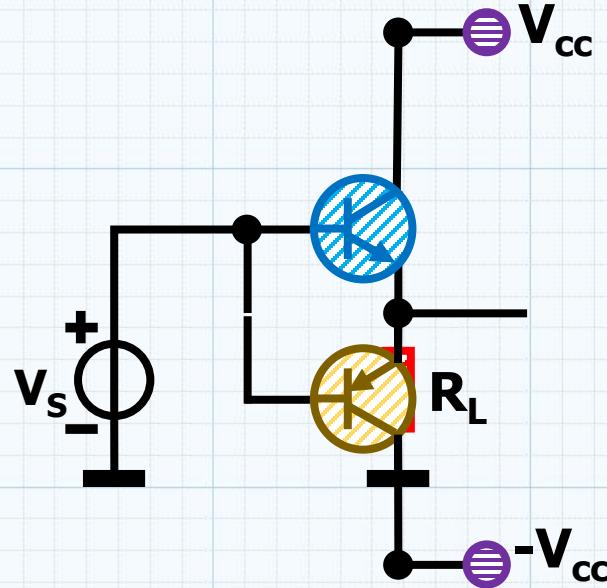
信号正半周 ...

效率喜人

信号负半周 ...

没有输出

# 推挽：效率的改进（3）



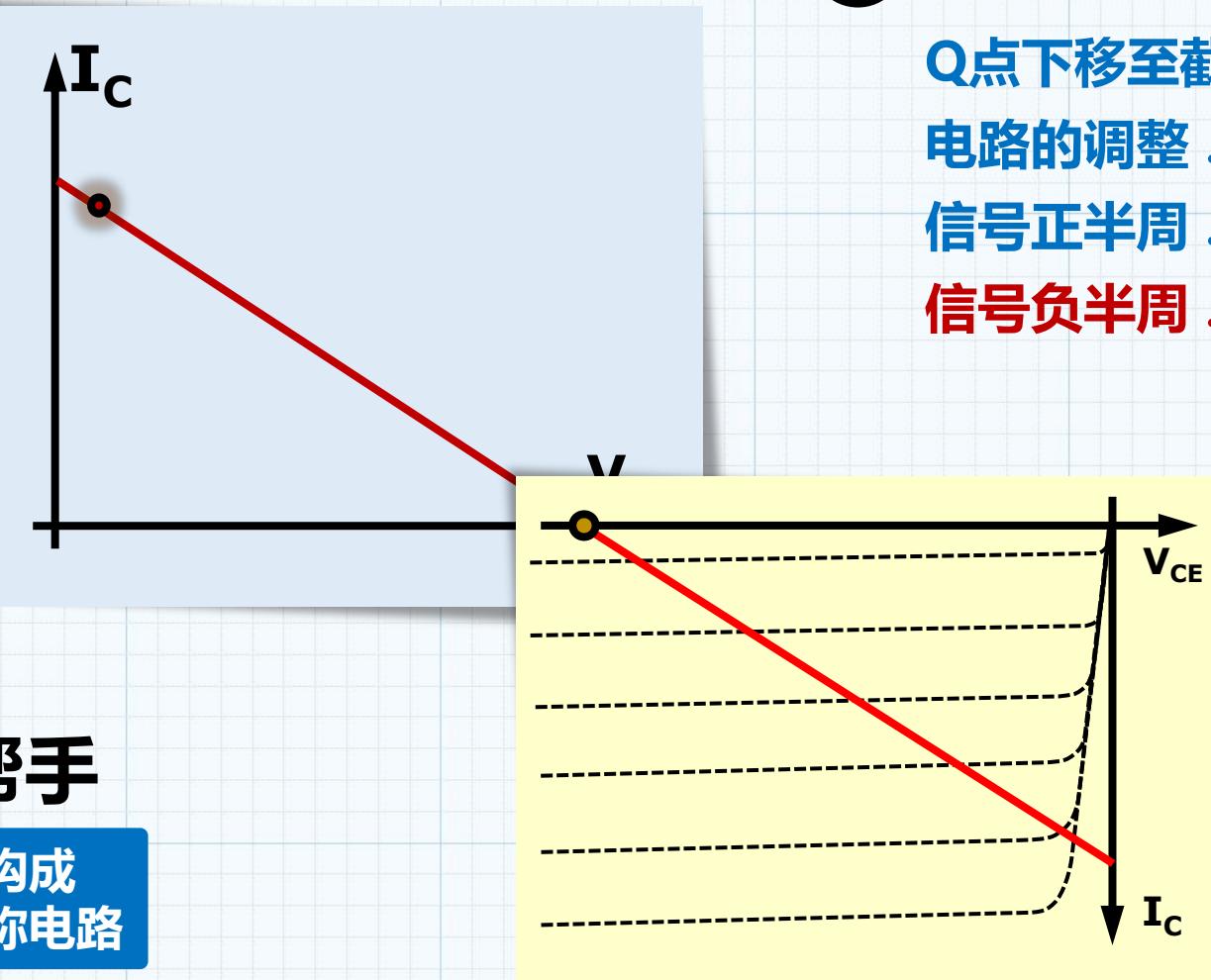
？寻找(负半周)帮手

增加互补 BJT

引入负直流电源

构成  
对称电路

新BJT负责放大负半周



？平均功耗太大

Q点下移至截止区

电路的调整 ...

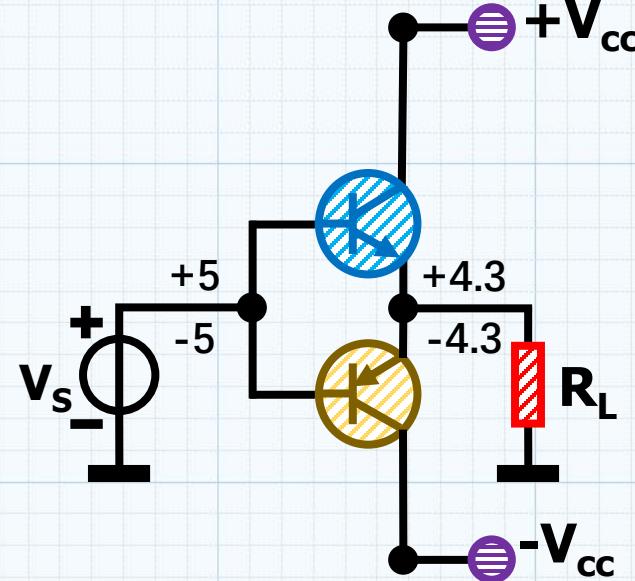
信号正半周 ...

效率喜人

信号负半周 ...

没有输出

# 推挽：理解分析



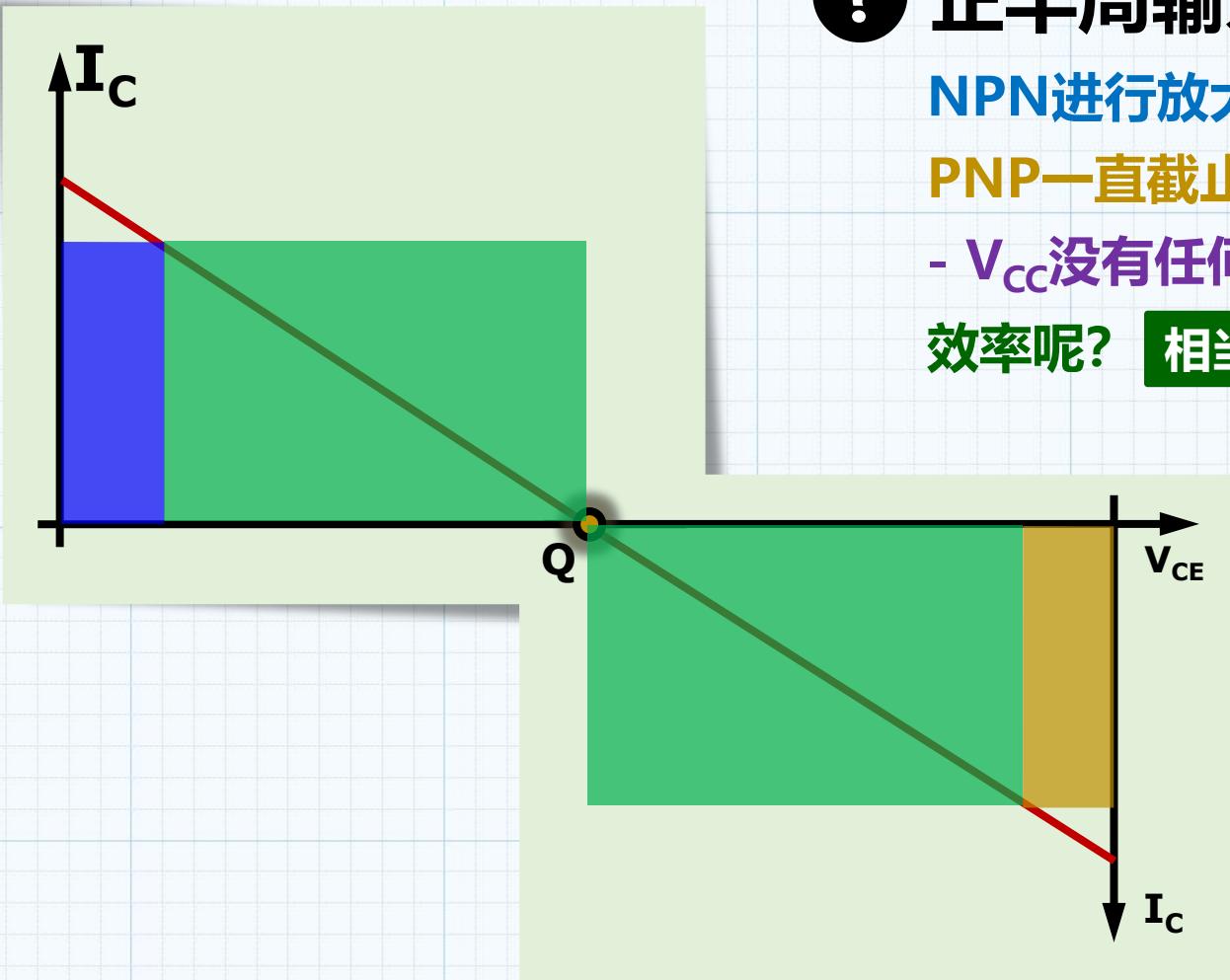
? 负半周输入？

NPN一直截止

PNP进行放大（跟随）

+V<sub>CC</sub>没有任何电流

效率呢？也相当不错



? 正半周输入？

NPN进行放大（跟随）

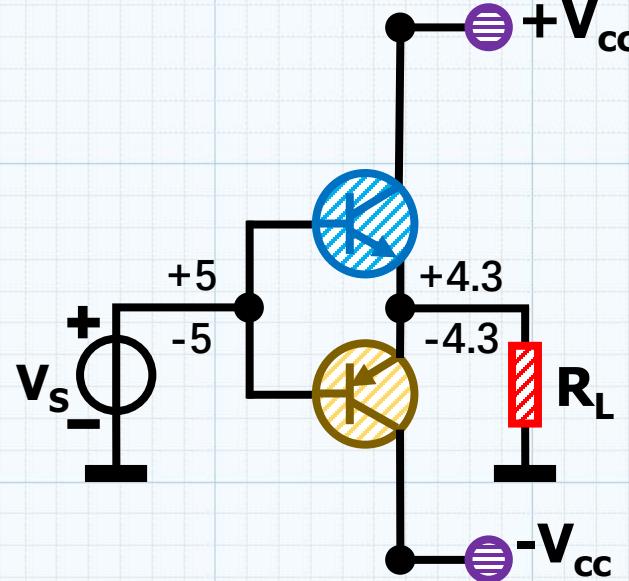
PNP一直截止

-V<sub>CC</sub>没有任何电流

效率呢？相当不错

$P_{VCCQ} \approx 0$  : 无信号输入时，几无功耗

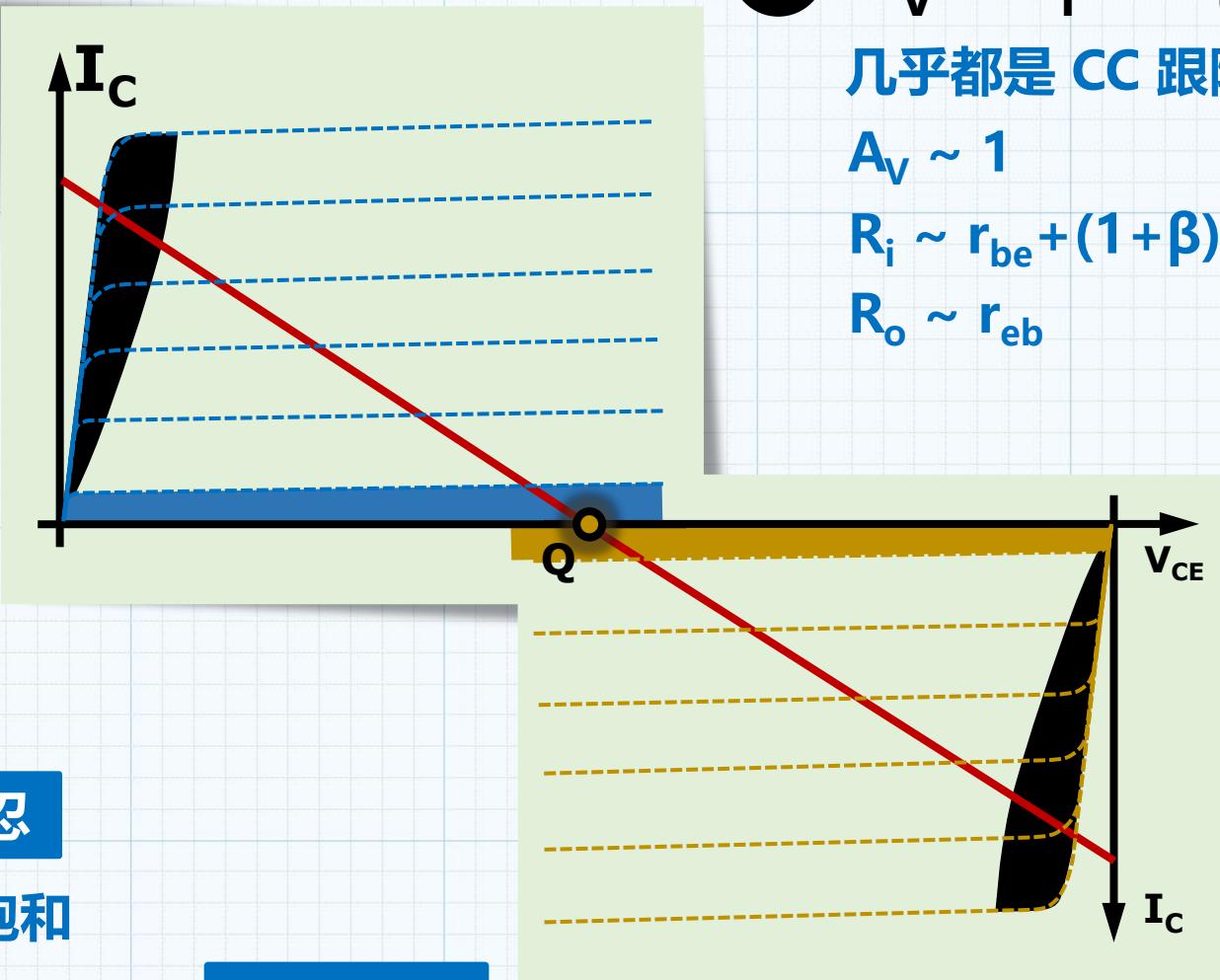
# 推挽：理解分析



? 失真呢？

- ① 正负半周不一致 忍
- ② 信号太大 → 两端饱和
- ③ 信号太小 → Q点附近截止

交越失真



Crossover Distortion

?  $A_V$ ?  $R_i$ ?  $R_o$ ?

几乎都是 CC 跟随器

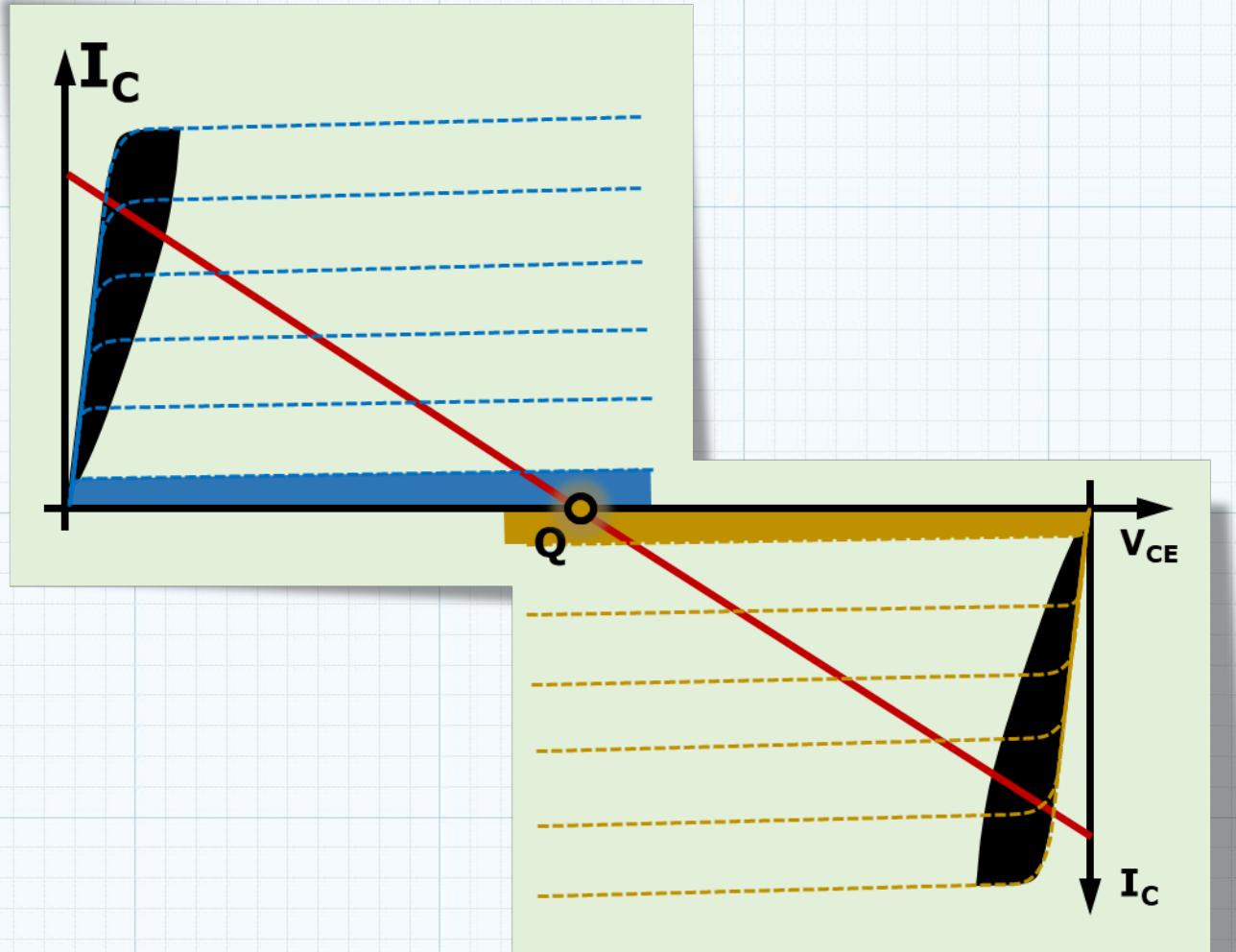
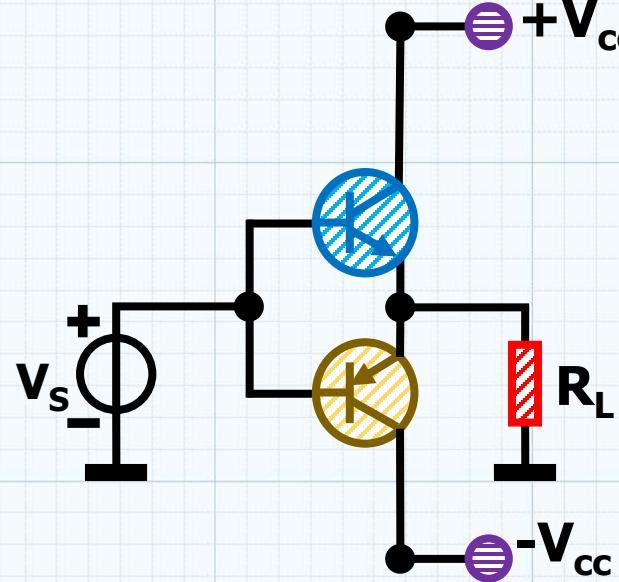
$$A_V \sim 1$$

$$R_i \sim r_{be} + (1+\beta)R_L$$

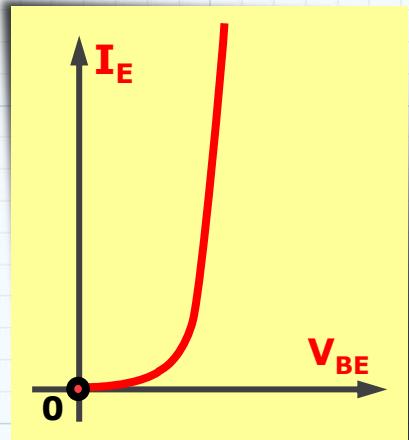
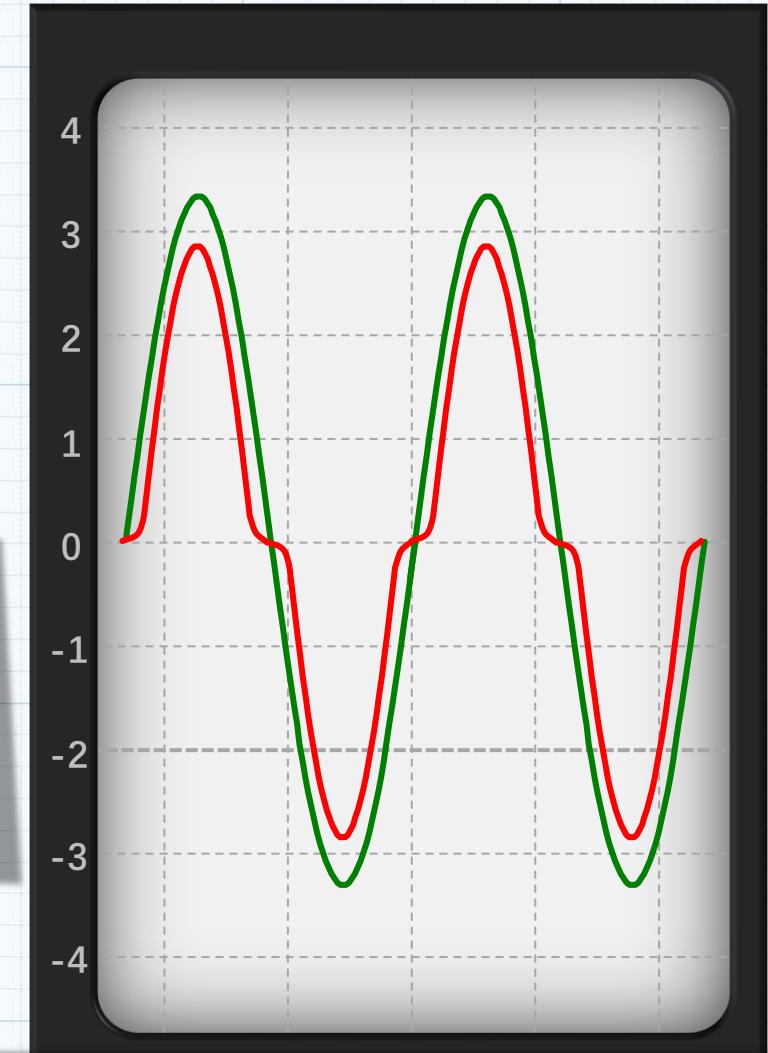
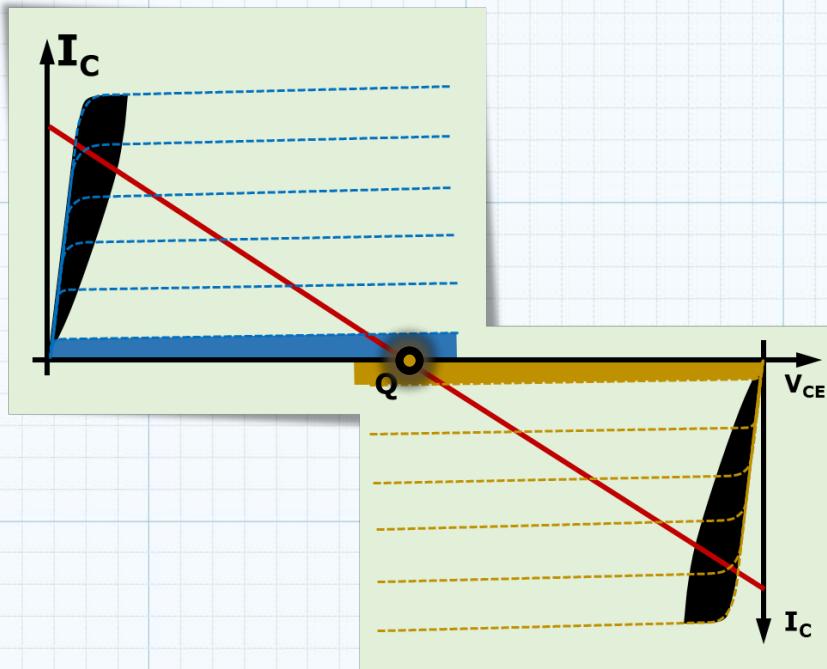
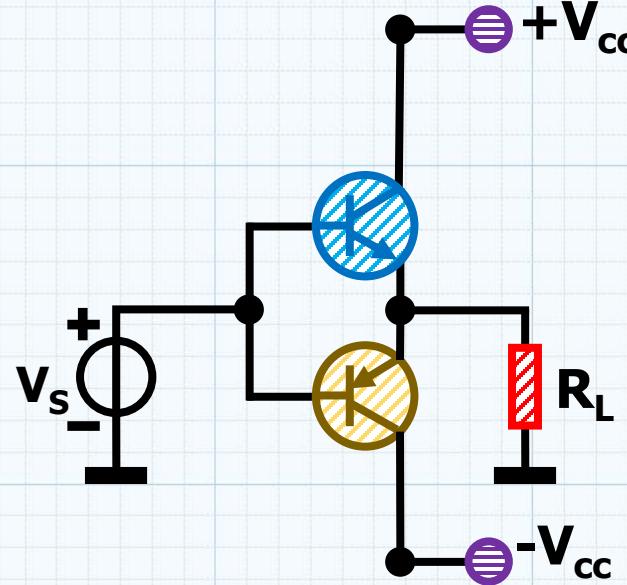
$$R_o \sim r_{eb}$$

正负半周  
不全一样

# 推挽：理解分析



# 推挽：交越失真，对策，导通角



**对策**

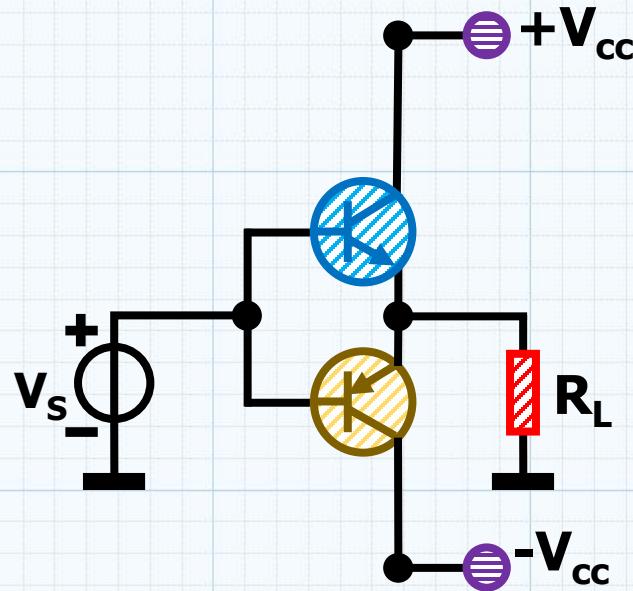
- Q 点 → 截止区边缘
- 虽：静态功耗不为零
- 导通角： $180 \rightarrow 180^+$

## 导通角

放大正弦信号时，  
单周期能够输出  
信号的角度范围。

360°：甲类 (Class A)  
180°：乙类 (Class B)  
180°~360°：甲乙类 (AB)

# 推挽：消除交越失真



？复合管如何？

考虑等效结压降；权衡导通角

？若前级 Q 点“比较歪”

不一定要从两管正中间馈入...

额外电源  
?

阻碍信号  
?

简单实用  
😊

调导通角  
但... 😐

导通角可调  
且交流电阻小

$V_{BE}$  增强电路

？推挽一般是直耦么？

如果是对称双电源供电，大多如此...

# 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

- ▶ 远远偏离放大条件/状态
- ▶ 陷入某种状态，难以自拔
- ▶ 不再能有效放大信号
- ▶ 或：无输入时也输出波形
- ▶ 反馈系统才需考虑此问题
- ▶ 但许多反馈“不是故意的”

暂不讨论

或 失稳条件

steady

insensitive

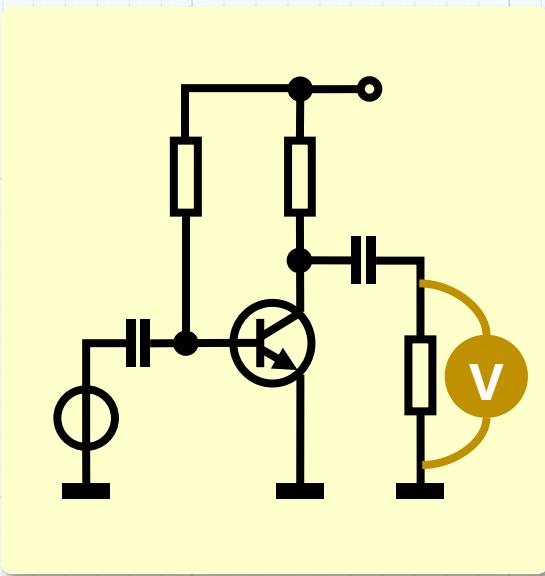
- ▶ 性能指标是否对环境敏感
- ▶ 环境变化影响是否显著...
- ▶ 环境因素：温度、辅助源...
- ▶ 影响途径：器件参数，Q ...

## ？如何提升稳定性？

- ① 控制途径：如隔热、屏蔽
- ② 控制源头：如恒温、稳压
- ③ 提升免疫：如换器件、差分

▶ 描述“免疫力”  
**抑制比**  
 $= \frac{\Delta \text{某性能指标}}{\Delta \text{某环境因素}}$

# 差分放大电路：differential amplifier



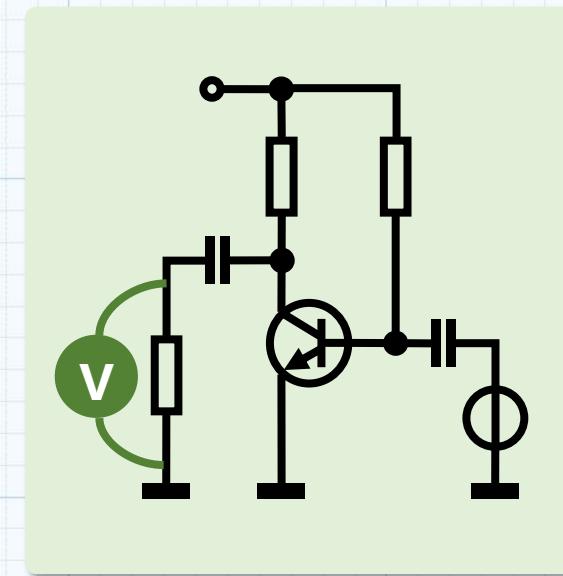
? 基本原理：重要思想!!!

背景1：环境变化了

背景2：影响过程难以隔离

背景3：影响器件参数、状态 → 指标

手段：弃用绝对参考系 → 相对参考系



? 何谓：相对参考系？平行世界 ☺

平行世界的设定

设定1：完全相同器件

设定2：完全相同工作条件

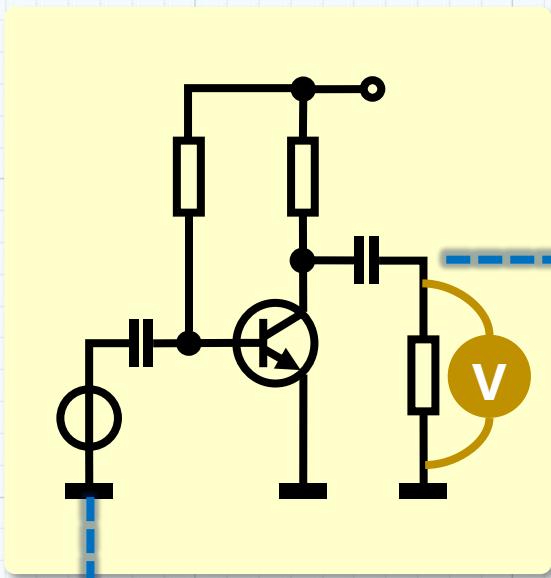
设定3：完全相同外界影响

相同扰动→相同应变

相反扰动→相反应变

以平行世界  
为  
相对参考系

# 差分放大电路 : differential amplifier



? 引入: 神电压表 神接地

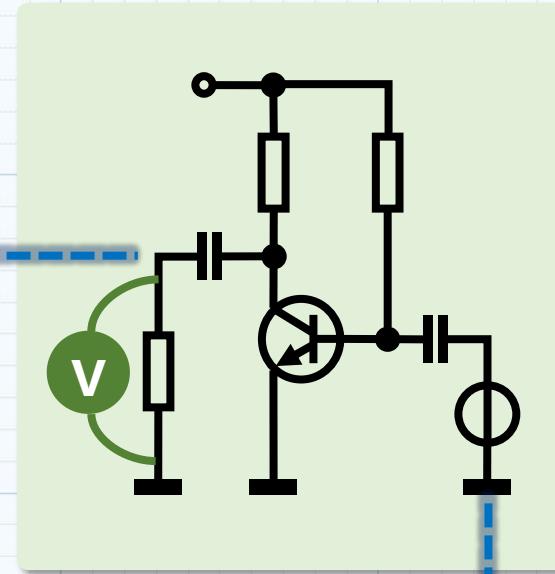


共模场景

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

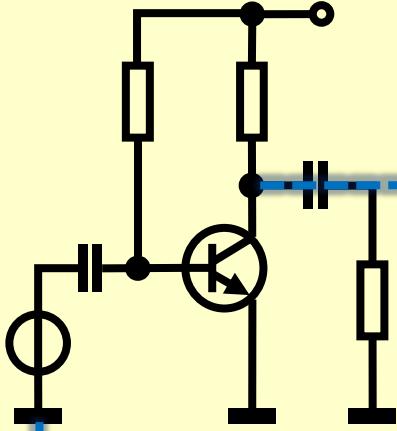
差模场景

- ▶ 若两世界信号源相反  
输出完全相反  $\rightarrow$  V 测到双倍电压



若信号差模  
而干扰共模  
则...

# 差分放大电路 : differential amplifier



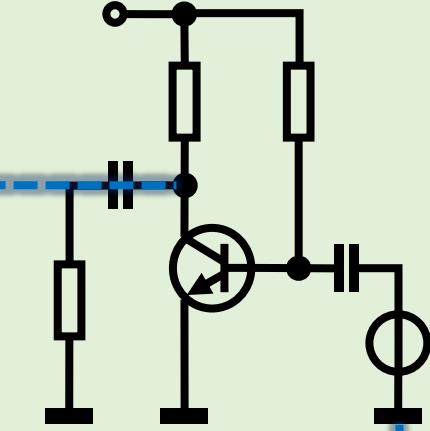
?

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...



若信号差模  
而干扰共模  
则...

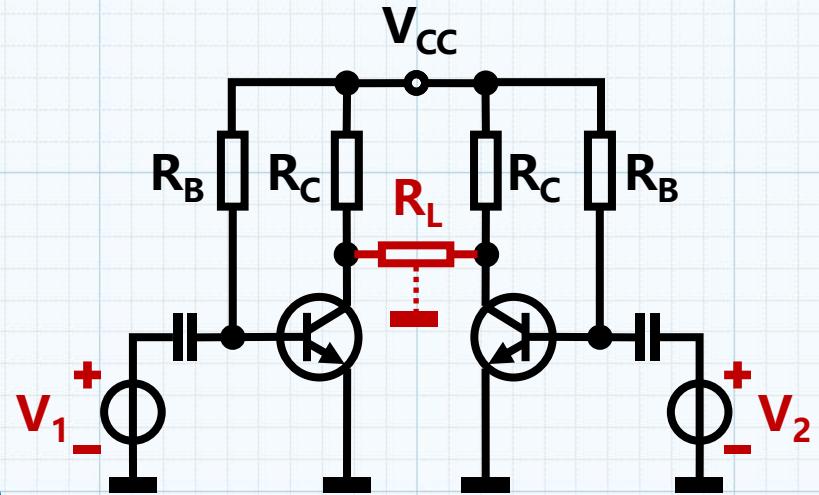
# 差放：共模抑制比 Common Mode Rejection Ration

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

►  $V_{RL} = 0$

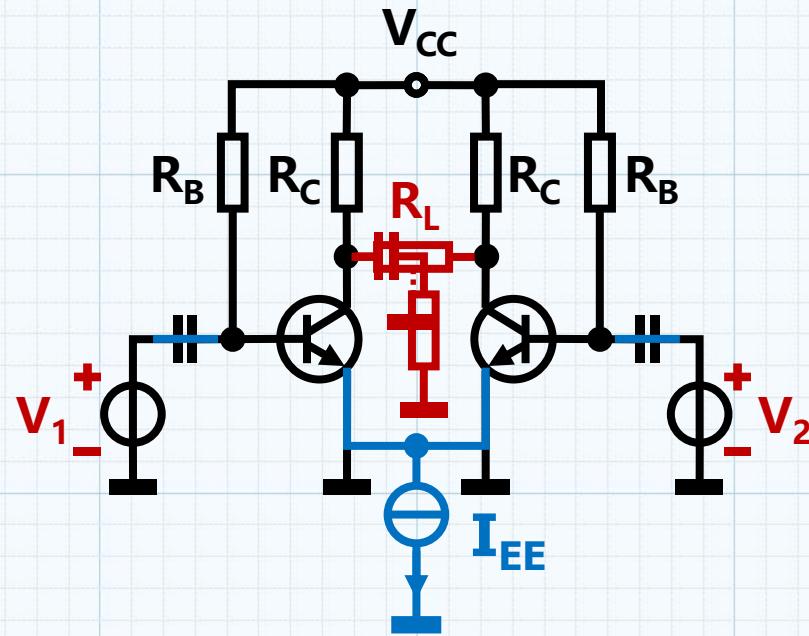
►  $K_{CMR} = \infty$

► 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

←  $V_1, V_2$  的直流量：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？

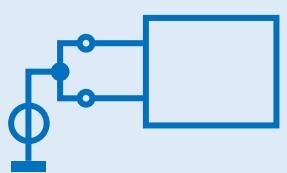
►  $K_{CMR} = ?$

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

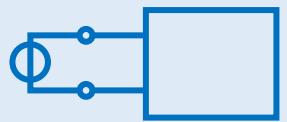
# 差放：其它问题

## ？ 输入电阻的定义

▶  $R_{ic}$

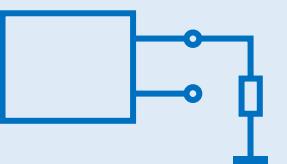


▶  $R_{id}$

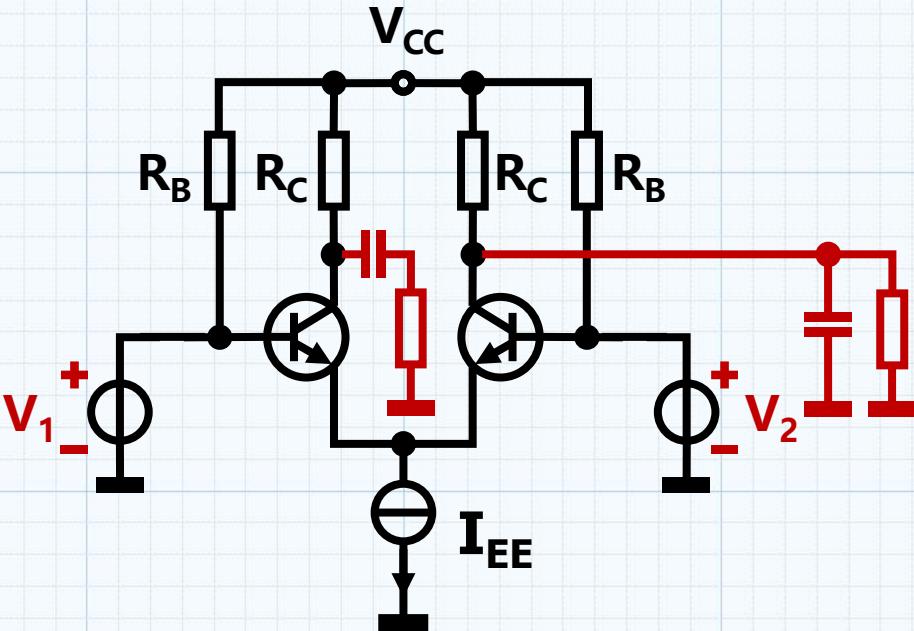
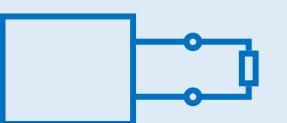


## ？ 输出电阻的定义

▶  $R_{o1}$



▶  $R_{o2}$



## ？ 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

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

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

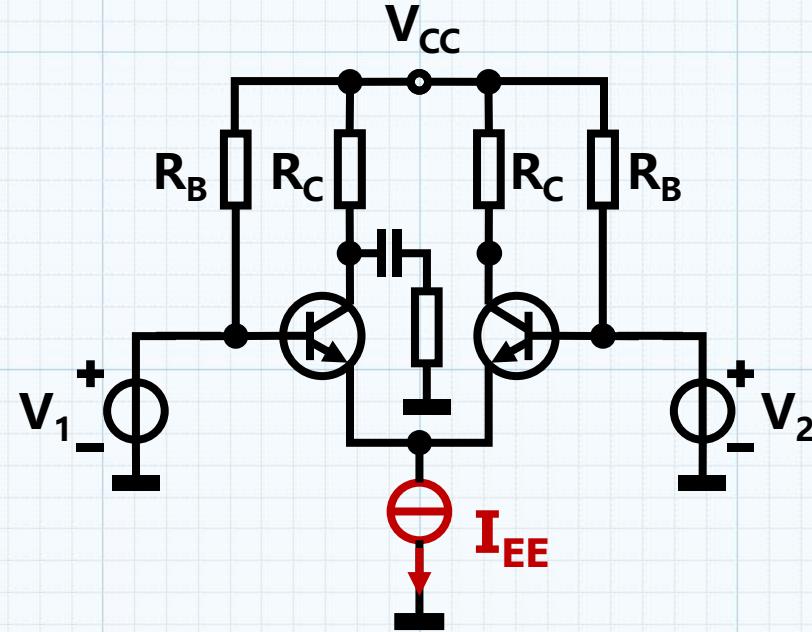
$$\approx I_{EE}/2C_L$$

# 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

?

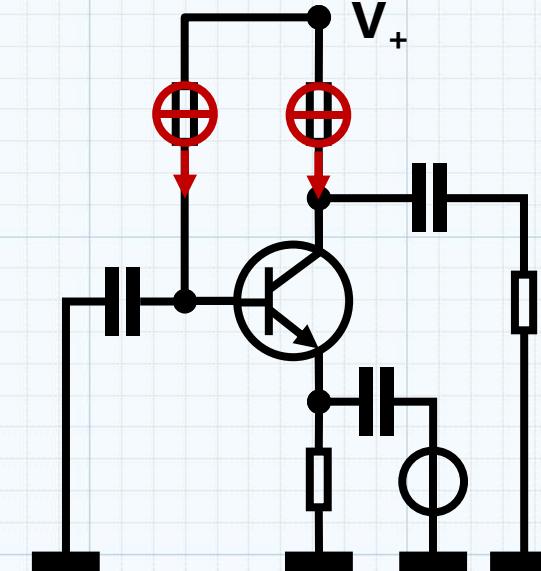
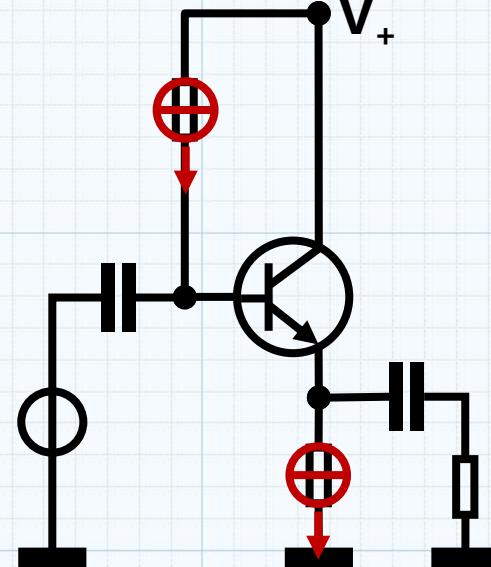
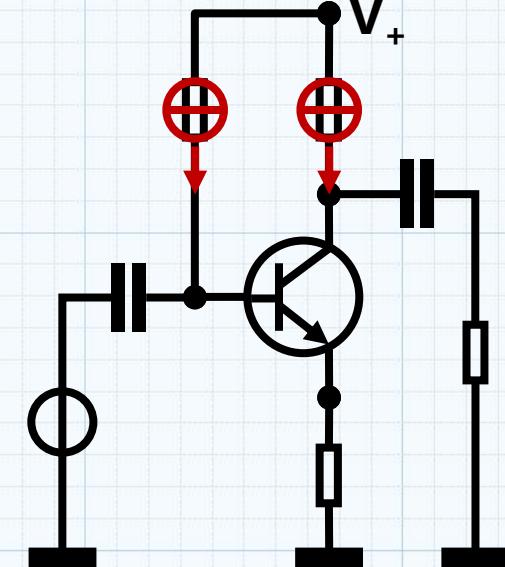
## 能否多极同时用？

- ▶ 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 $R_o = ?$

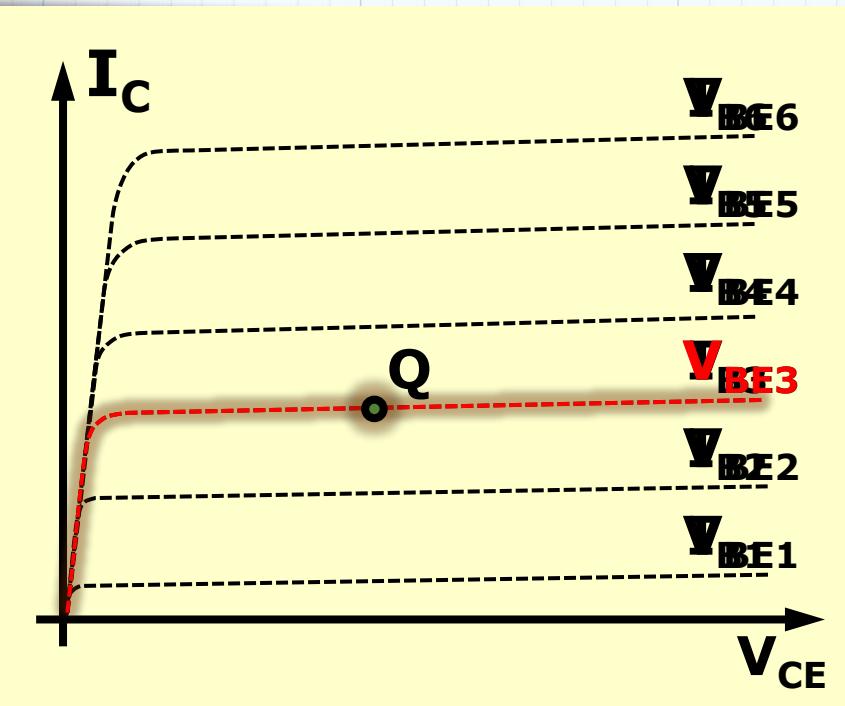
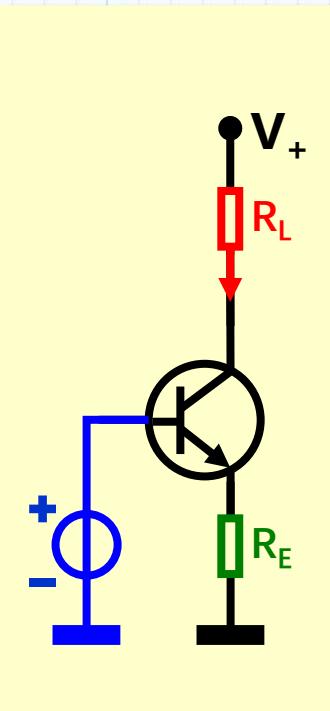
- ▶ 若  $r_c$  可忽略, 则  $R_o \rightarrow \infty$
- ▶ 若  $r_c$  不可忽略, 则  $R_o = \dots$

## ? 主要问题?

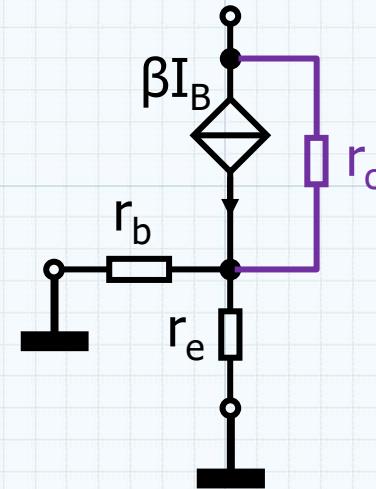
- ▶ 需两个电源  $\leftarrow$  电阻分压
- ▶ 对  $V_{BQ}$  太敏感
- ▶ 不易调节

## ? 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

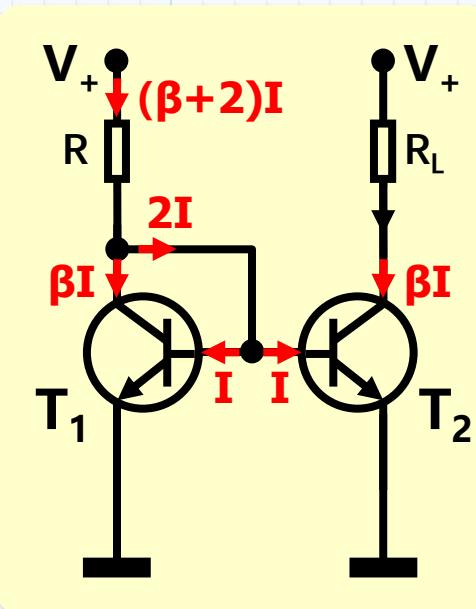
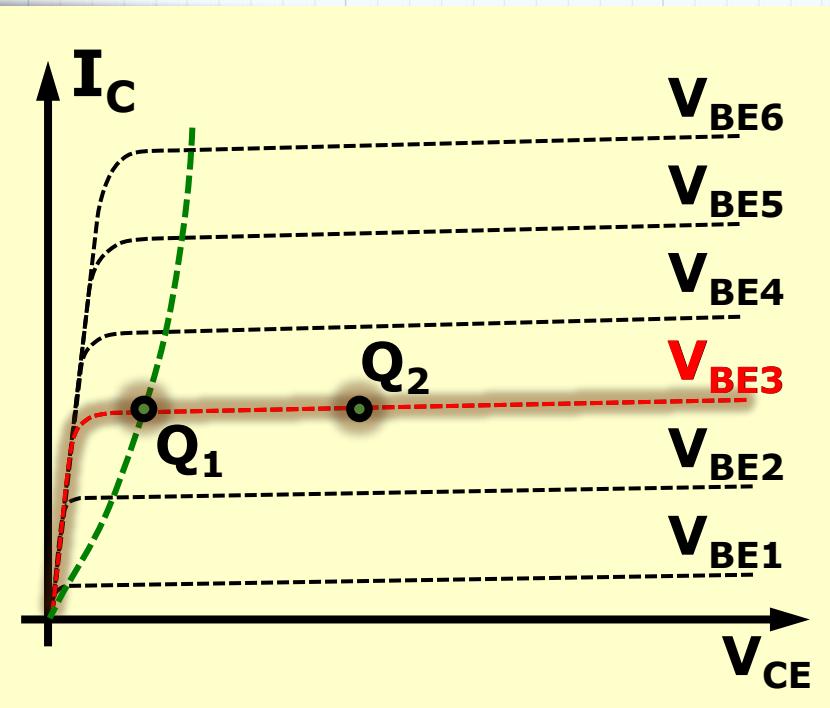
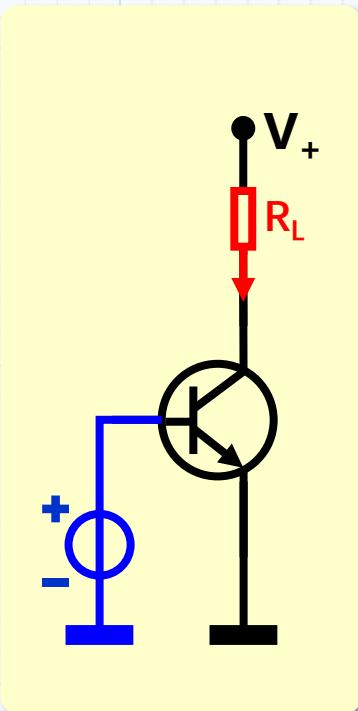
？ $I_{RL} = ?$  ▶ 标出电流 ...

▶  $(\beta + 2)I \cdot R + 0.7 = V_+$

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

？性能指标？

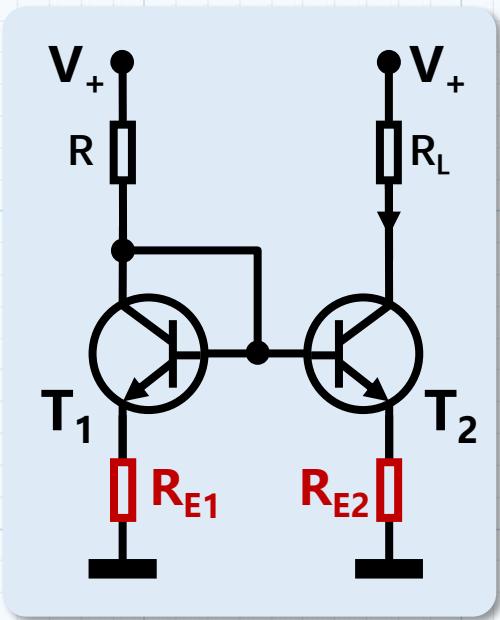
- ▶  $R_o$  基本同前  
算式中  $r_{b2}$  改为  $r_{b2} + r_{be1}$
- ▶ 简洁方便：尤其集成电路中



？不足和问题？

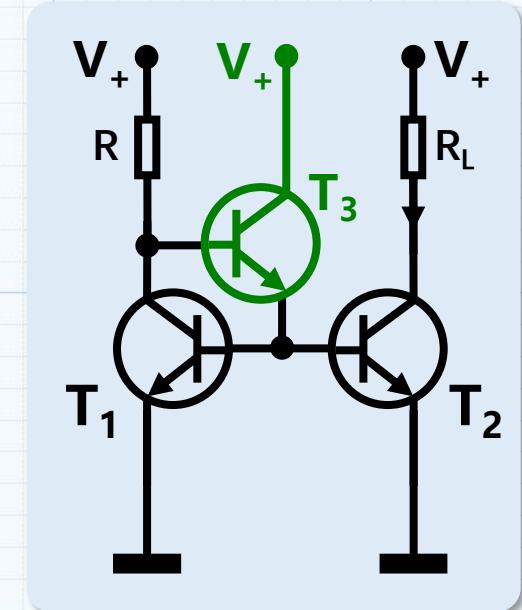
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 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

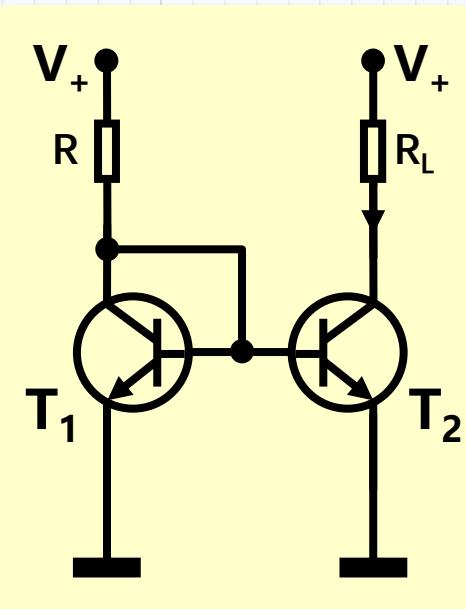


若  $R_{E1} \neq R_{E2}$ ？

- ▶ 比例电流源 ...

若  $R_1 \rightarrow 0$ ？

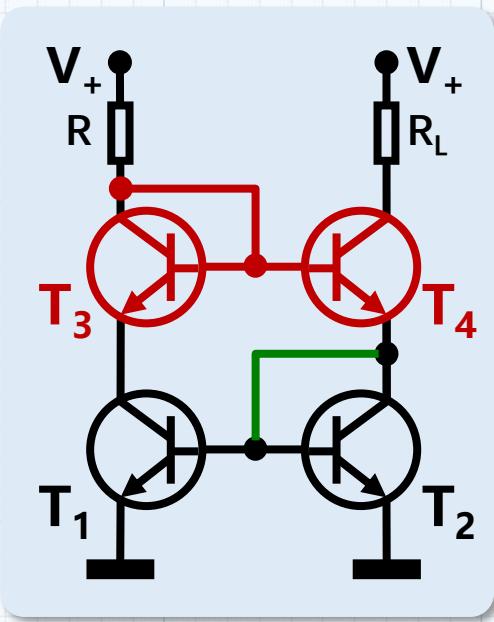
- ▶  $I_{RL}$  非常小 → 微电流源 ...
- ▶ 需要解超越方程 ...



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）

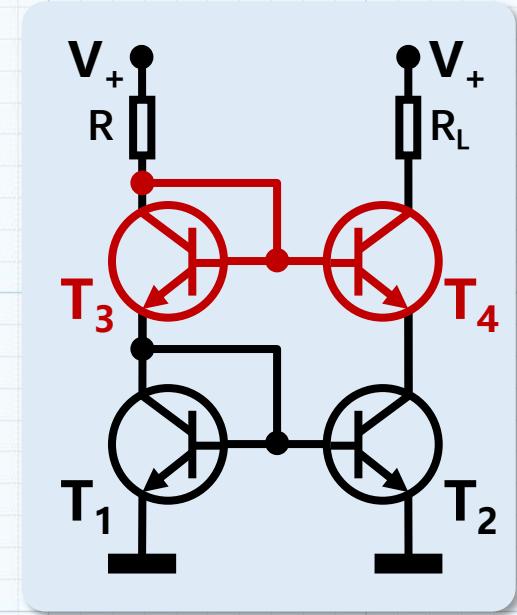


引入  $T_3$  和  $T_4$  的用处？ →

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

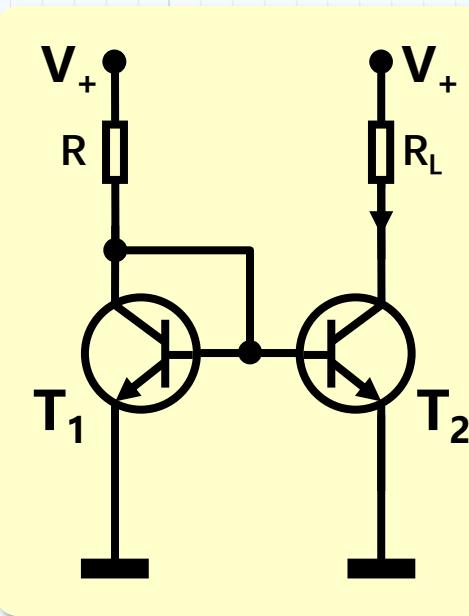
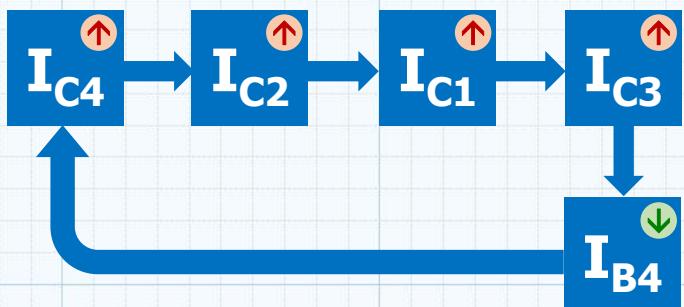
← 更换  $T_1$  和  $T_2$  角色？

- ▶ 威尔逊电流源
- ▶ 极好的输出特性和稳定性



↑ 如何理解？

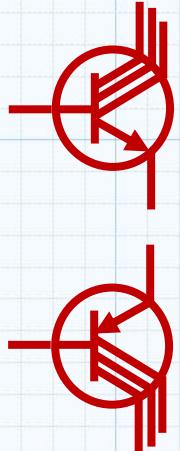
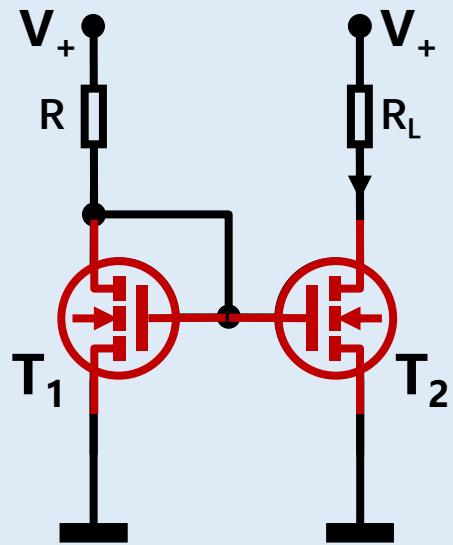
- ▶ 反馈的效果 ...



? 不足和问题？

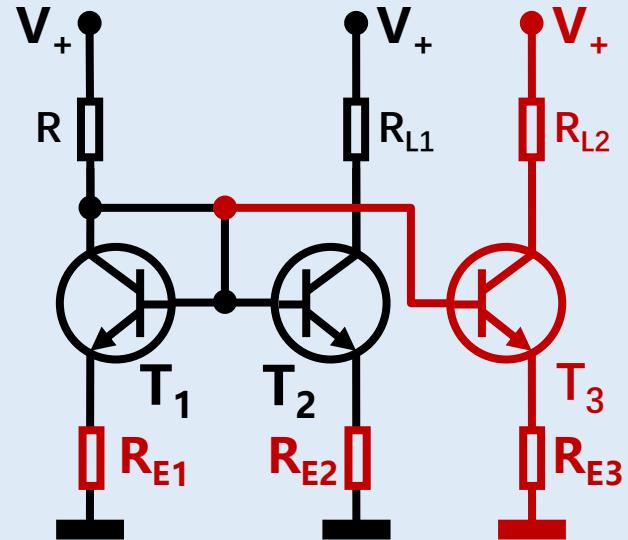
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 电流源：CM 的变型（3）



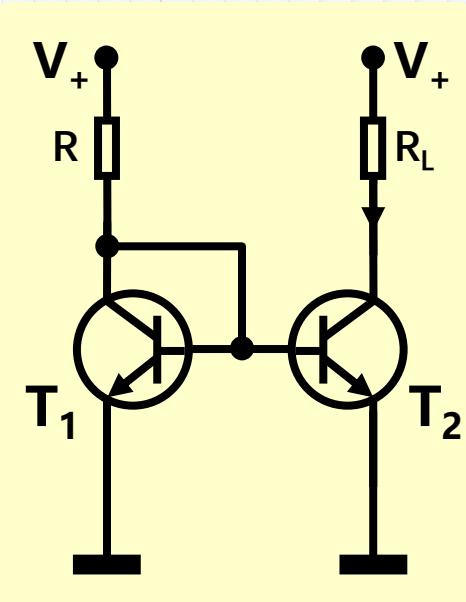
引入  $T_3$  和  $R_{L2}$  ➔

- ▶ 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

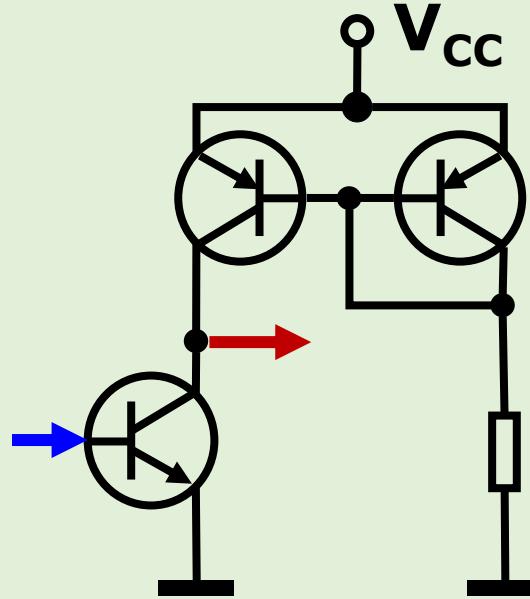
- ▶ 电流对称性更好
- ▶ 需解非线性方程或作图
- ▶ 各种变型改进适用于 FET
- ▶ 多FET：调沟道宽长比...



? 不足和问题？

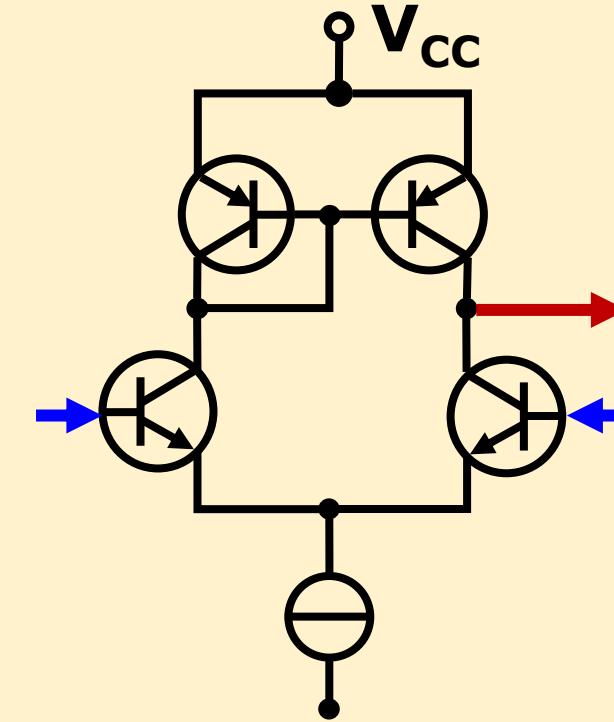
- ☒  $I_{RL}$  和  $I_R$  略有不同
- ☒ 要求  $\beta$  大且稳定
- ☒ 对 温度敏感
- ☒  $R_o$  不够大
- ☒ 要求 BJT 非常一致

# 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



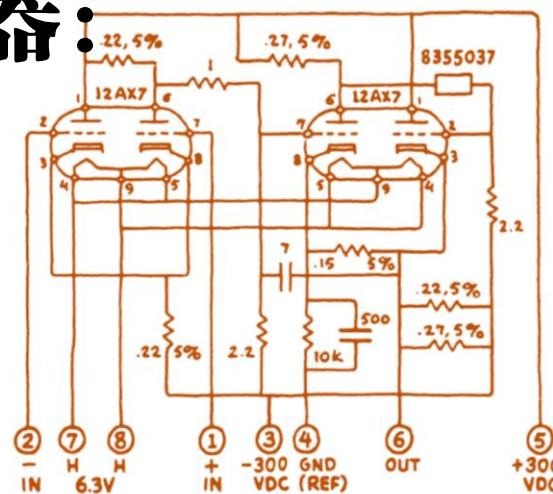
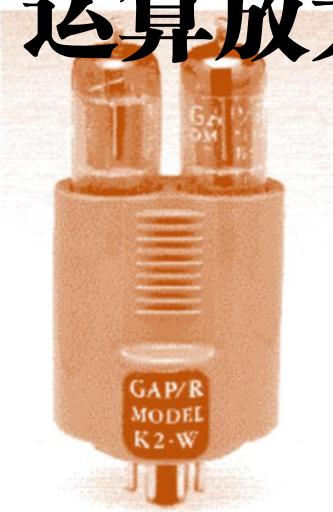
## 差分电路接镜像电流源

- ▶ 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...

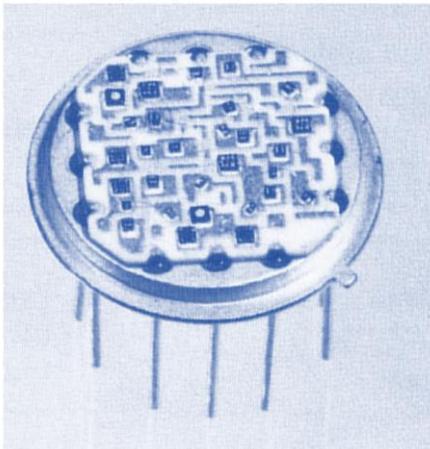
复合级联  
推挽输出

差分放大  
有源偏置

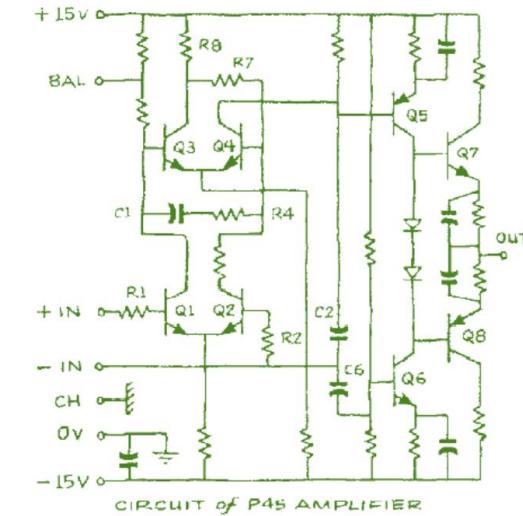
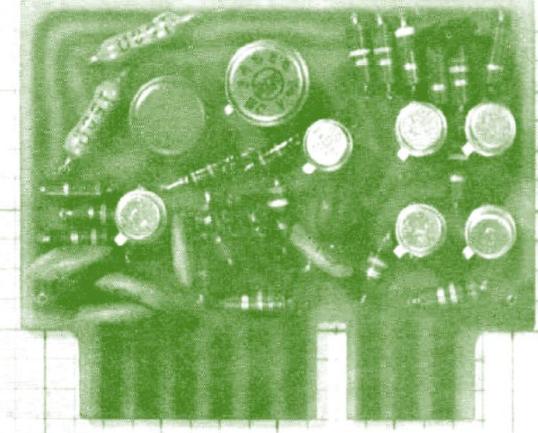
# 运算放大器：



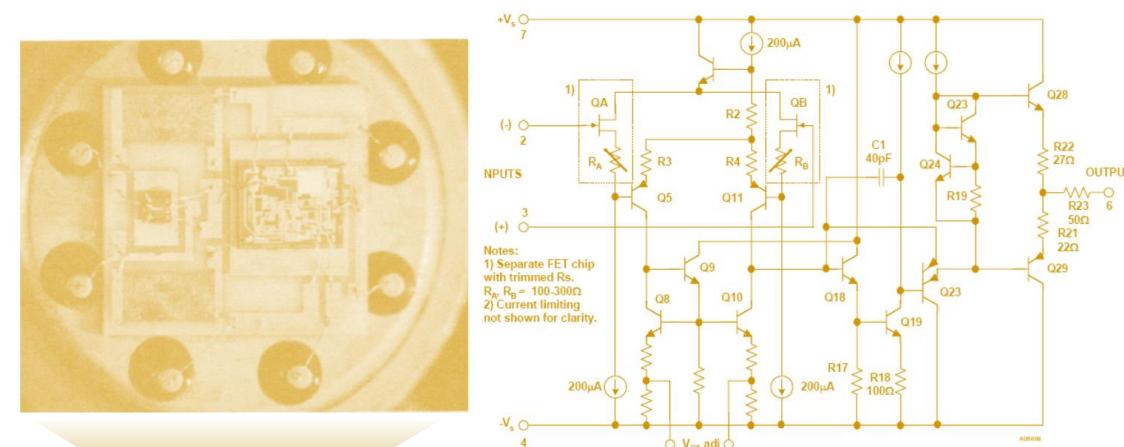
# 电子管运放



## 厚膜电路运放：集成封装



## 插卡式运放：分立晶体管



# 微型集成电路

运放

# 运放：概述



## 类型很多

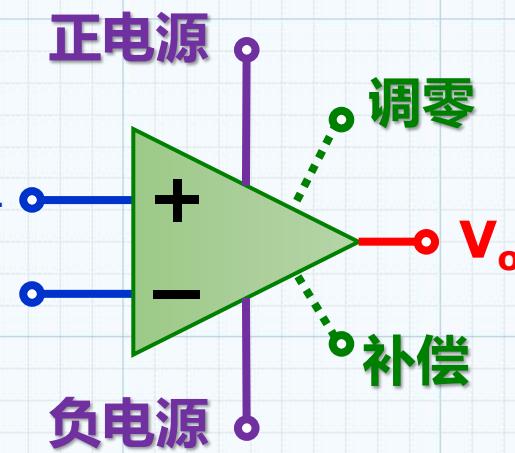
- ▶ 主流为 VFB 型

## VFB 运放：

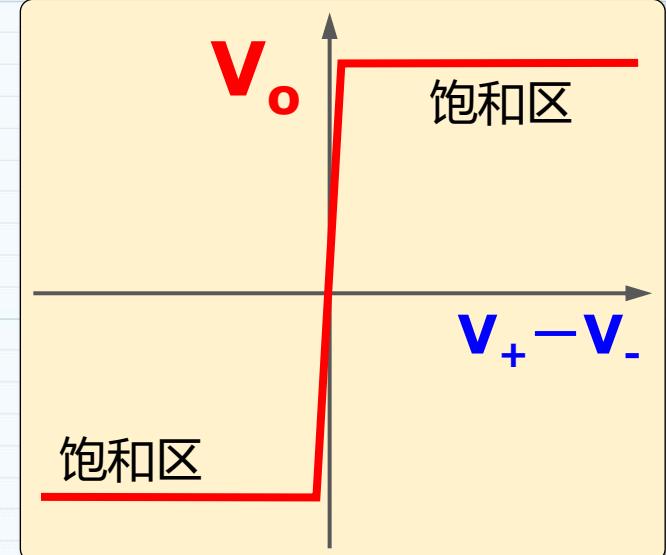
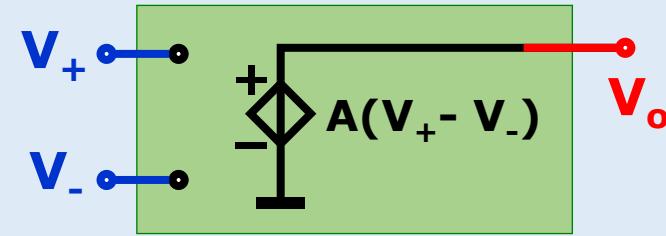
- ▶ 必备管脚：2入1出 + 两电源
- ▶ 其它管脚：辅助（调零、补偿、偏置..）或空闲
- ▶ 基本功能：仅对差模信号有极高增益 ( $A > 10^4$ )
- ▶ 其它特点：两输入端均为高阻  $I_+ \approx I_- \approx 0$  ← 虚断

## VFB运放的大信号转移特性：

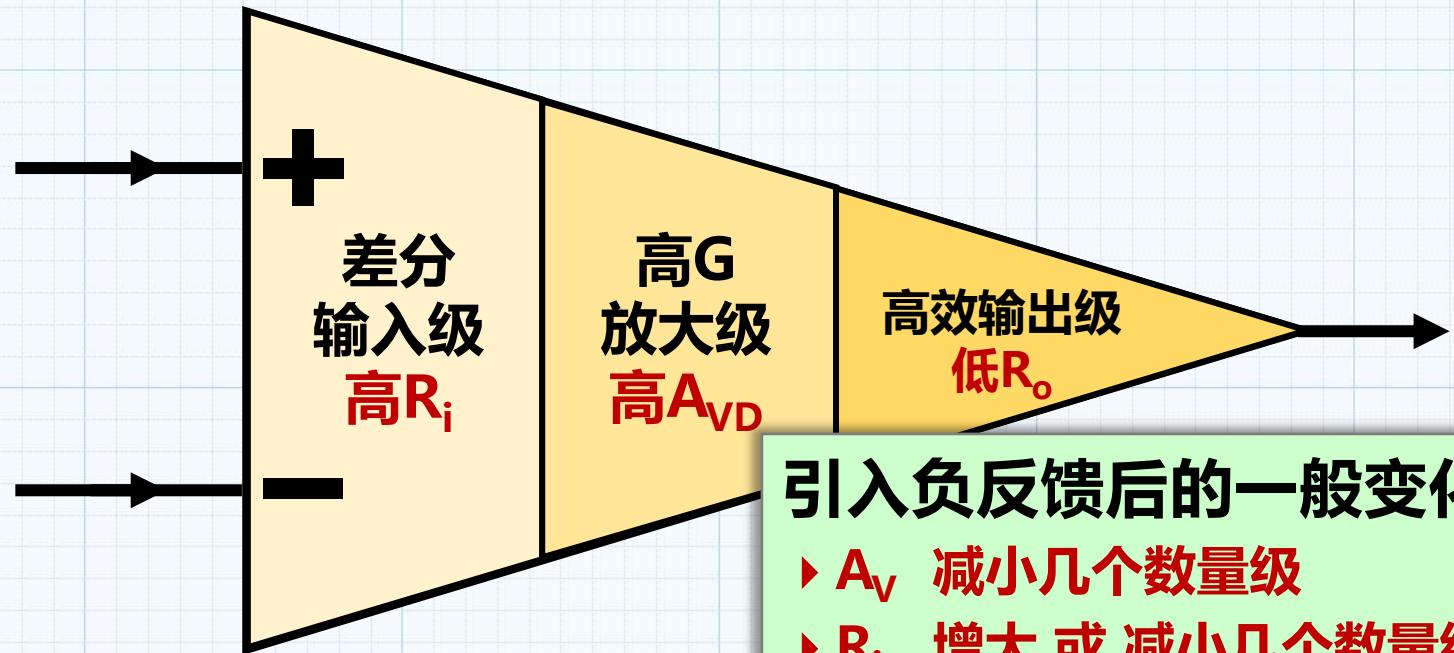
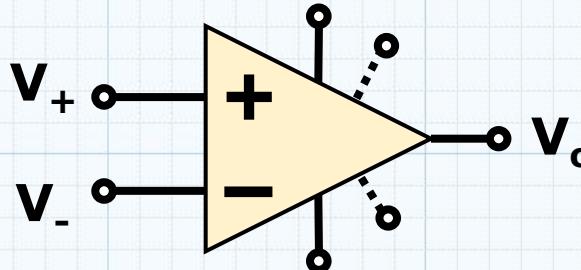
- ▶ 线性区：两输入端之间电压近似相等 ← 虚短
- ▶ 饱和区：虚短一般不成立



## 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

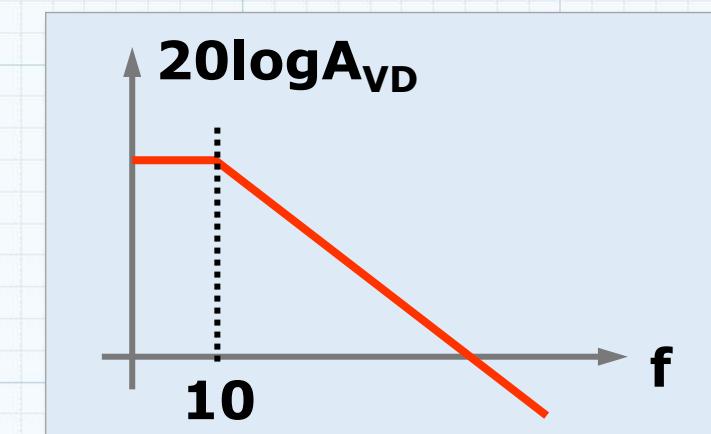
输出阻抗中等： $R_o \sim$ 百欧

太大

截止频率很差： $f_H \sim$ 十赫兹

太小

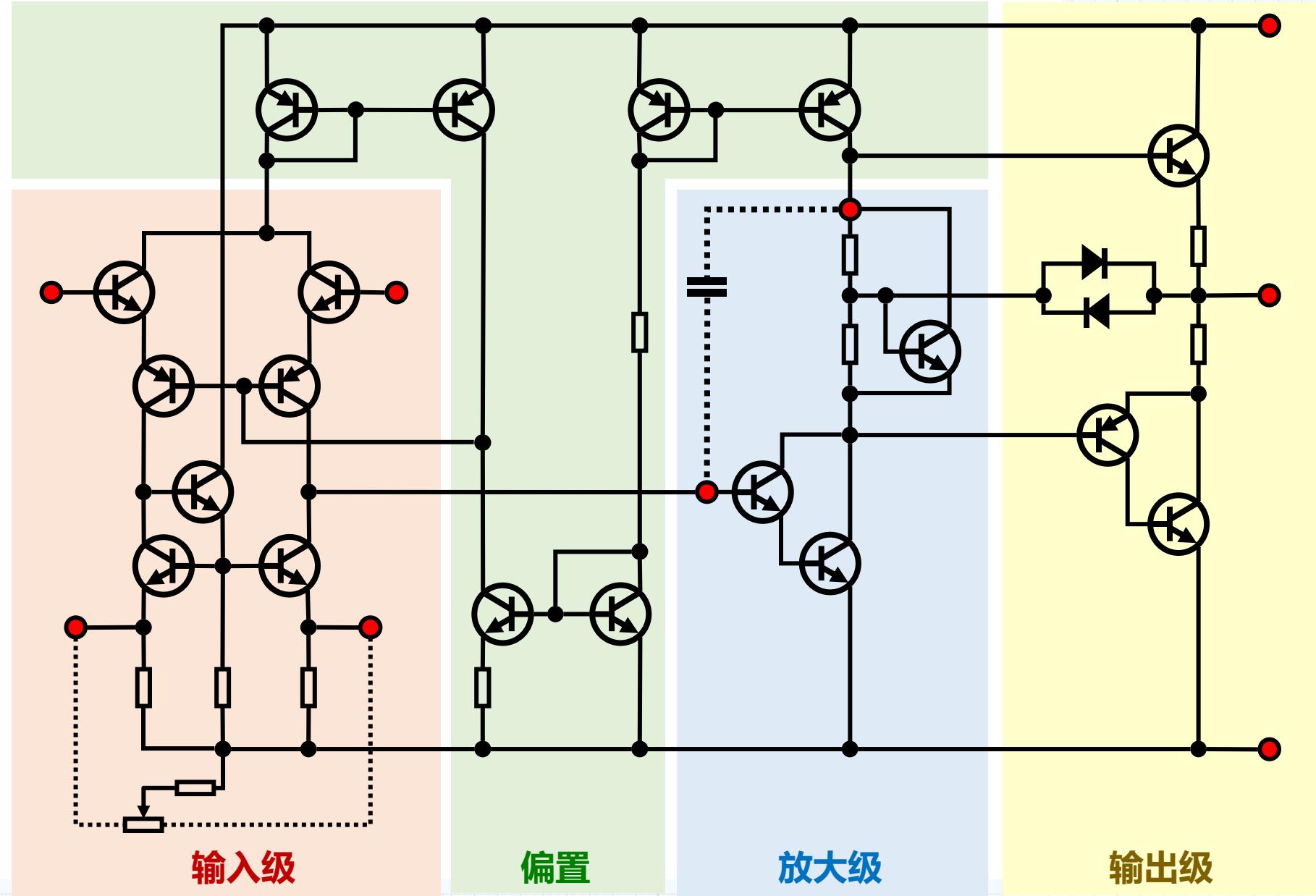
保护电路丰富：  
便捷，安全



复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置

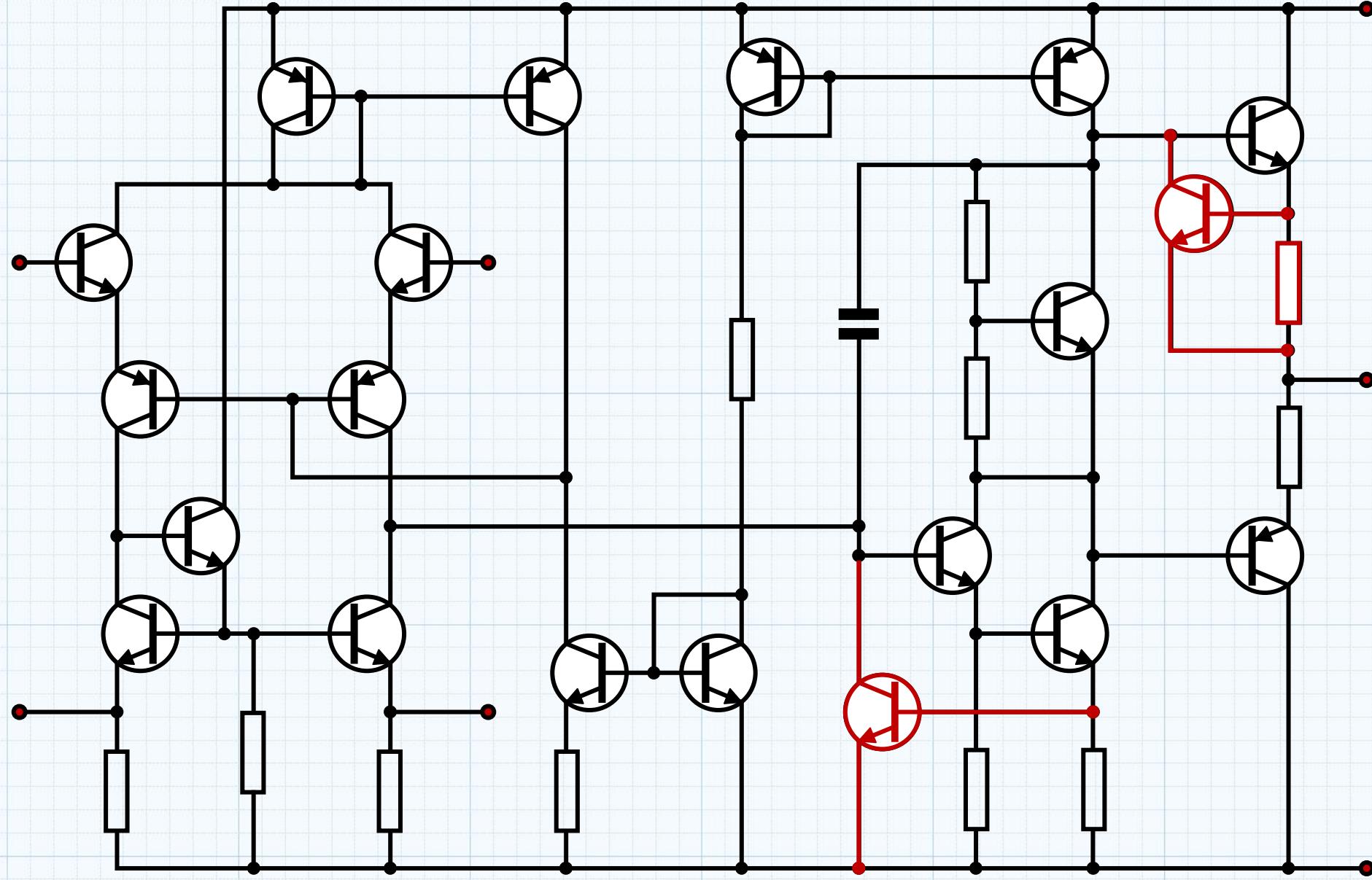
# F007 通用型运放

? 有几处镜像电流源?



复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置

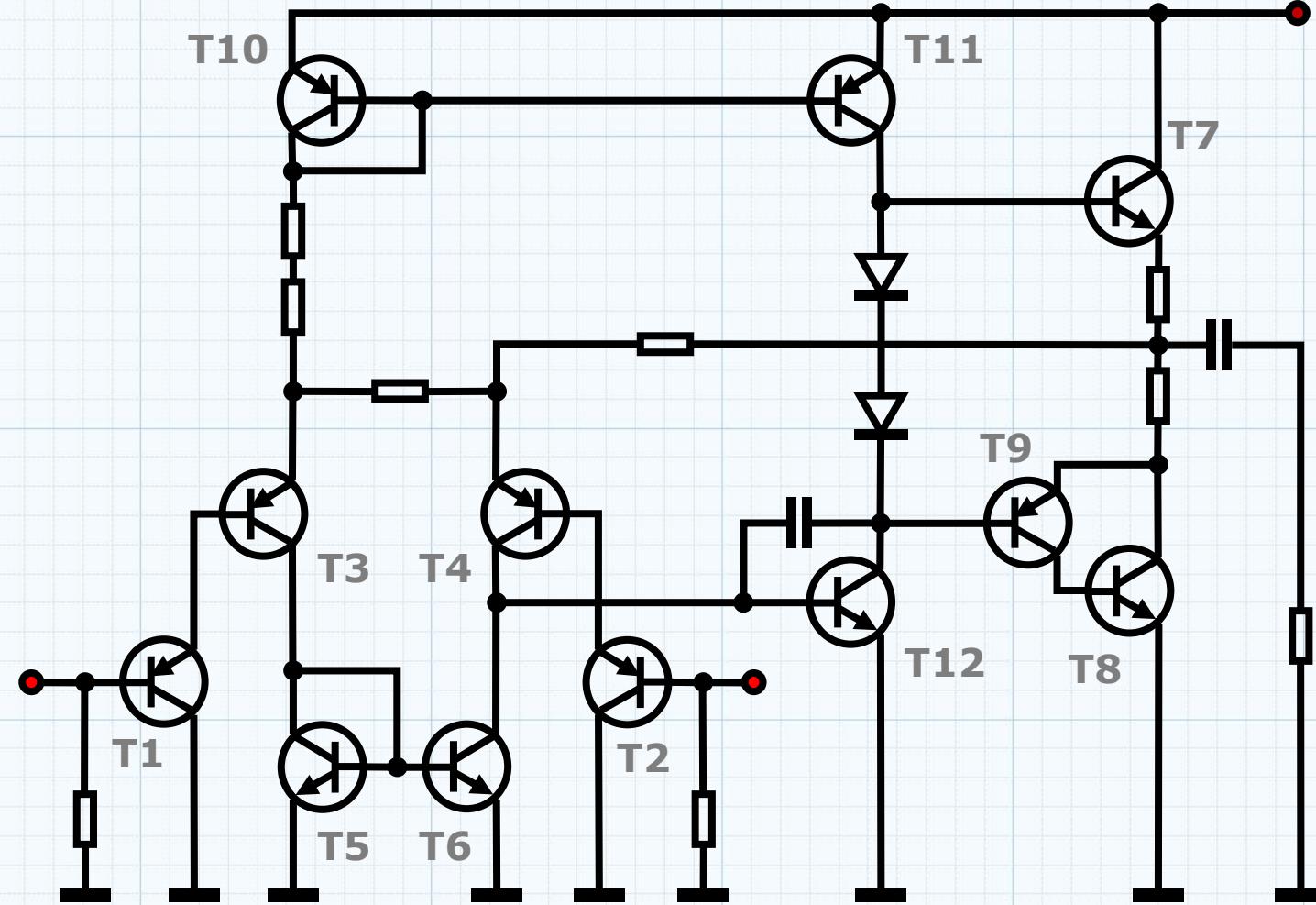
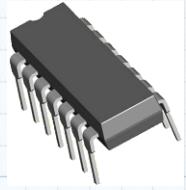
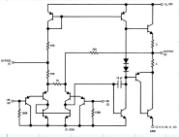
$\mu$ A741:



运放

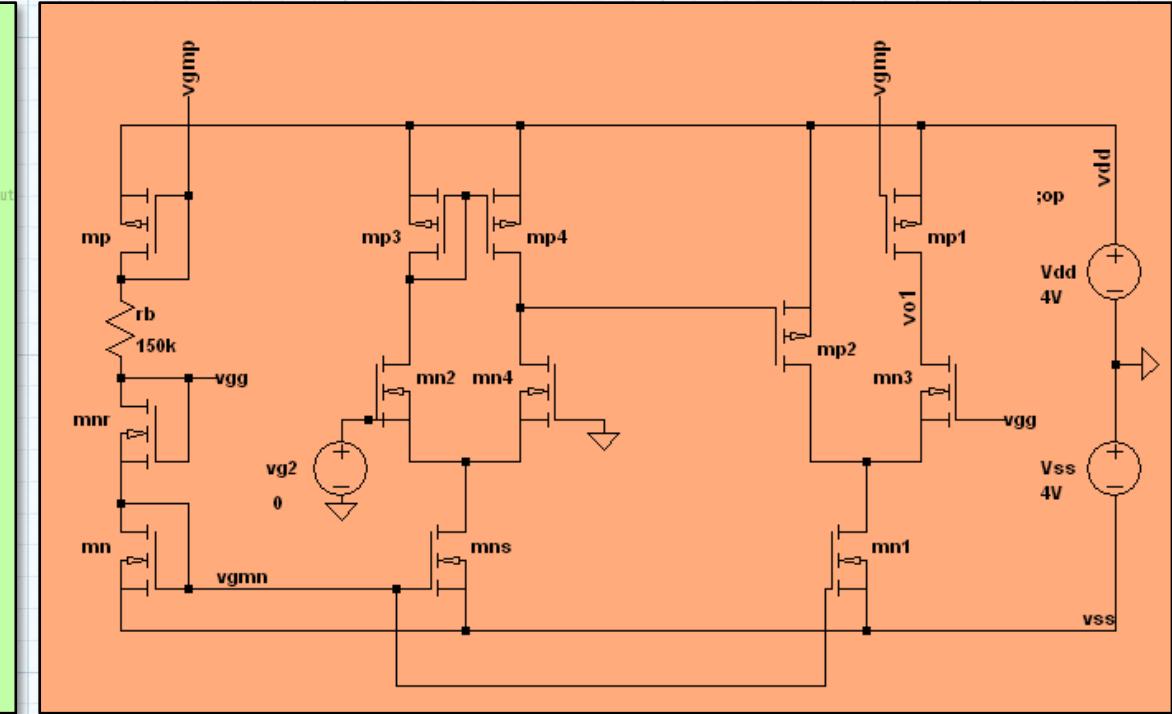
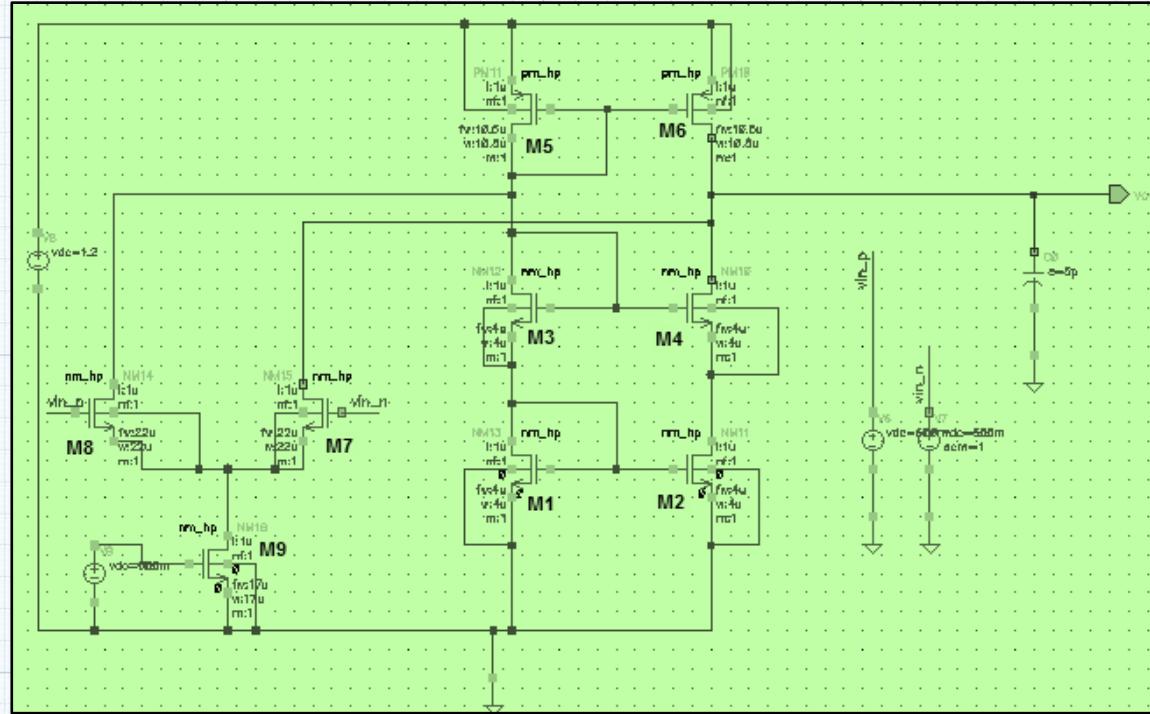
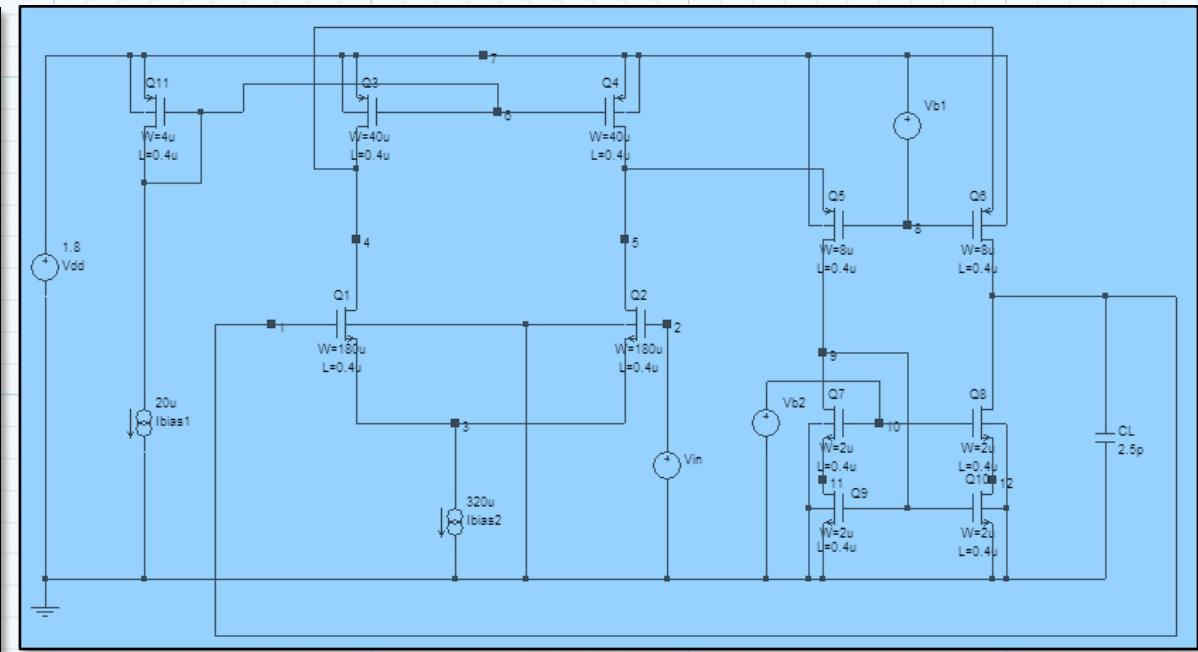
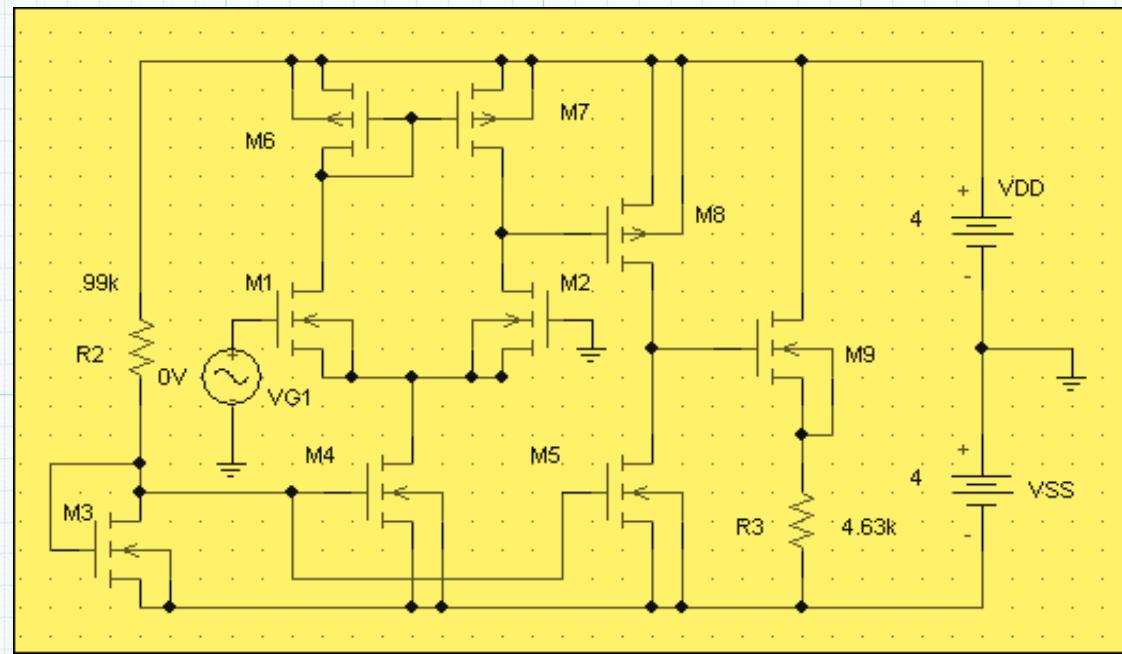
复合级联  
推挽输出  
差分放大  
有源偏置

# LM380



运放

复合级联 推挽输出 差分放大 有源偏置



运放

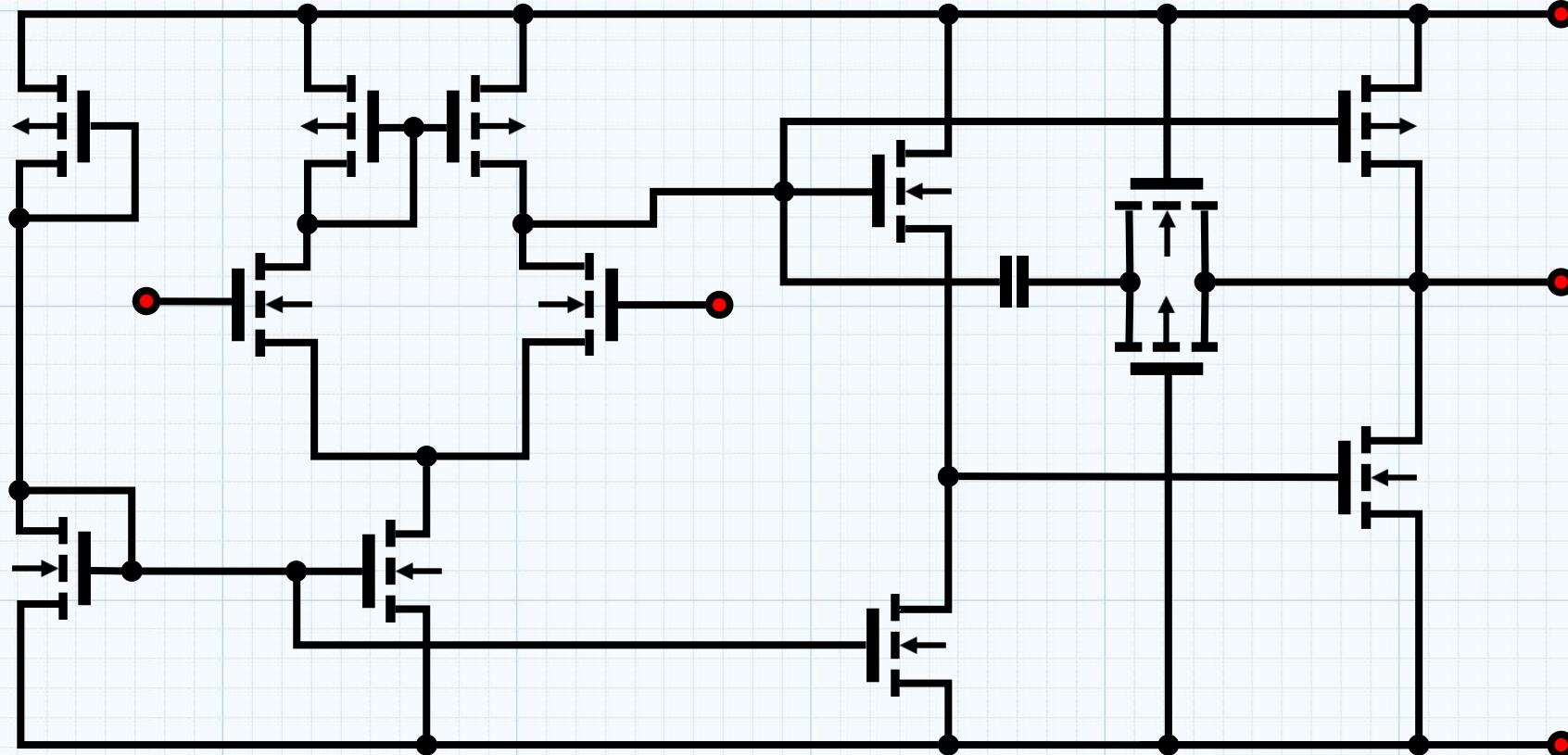
复合级联

推挽输出

差分放大

有源偏置

# 典型 MOS FET 运放



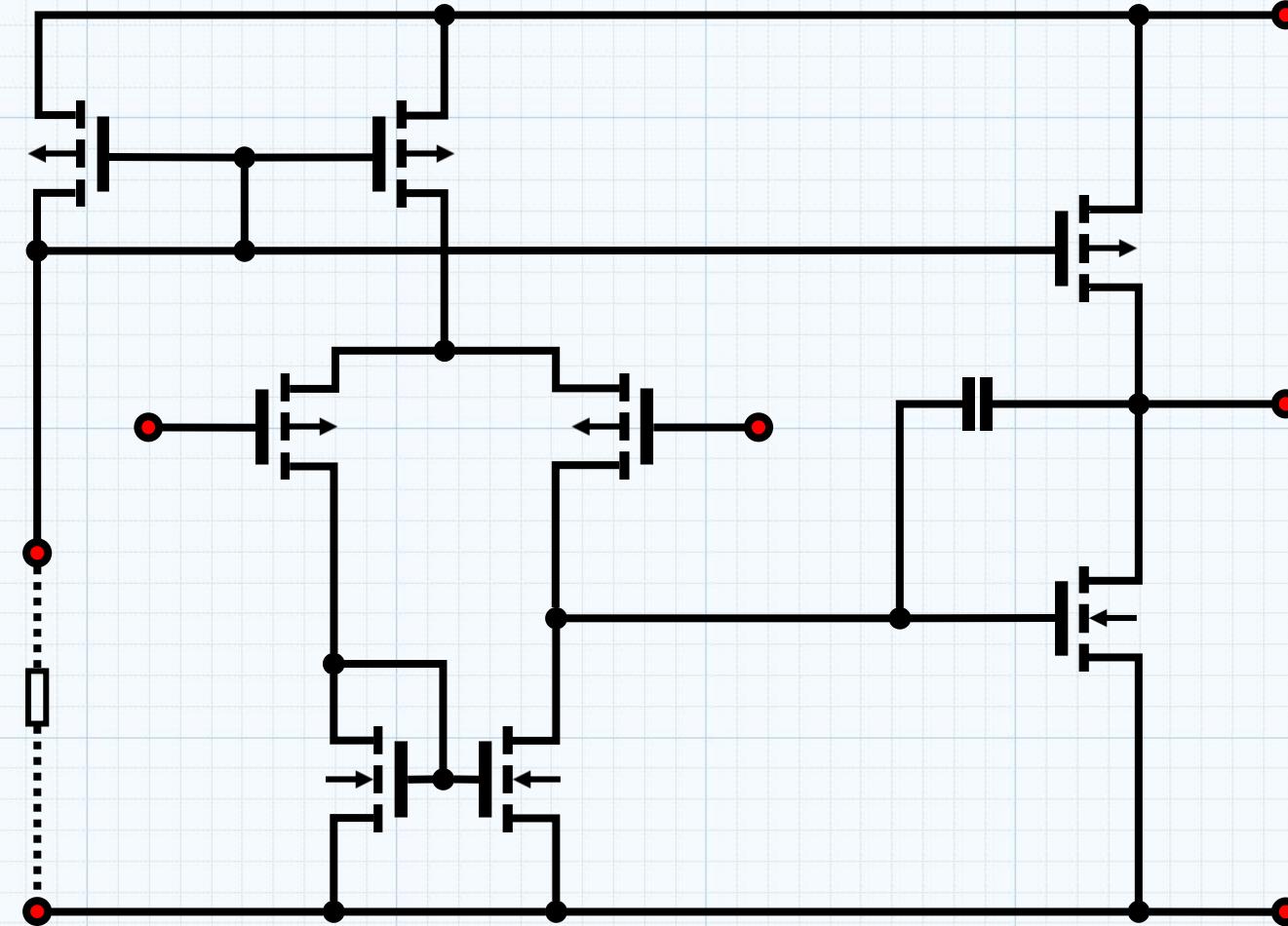
复合级联

推挽输出

差分放大

有源偏置

# C14573



运放

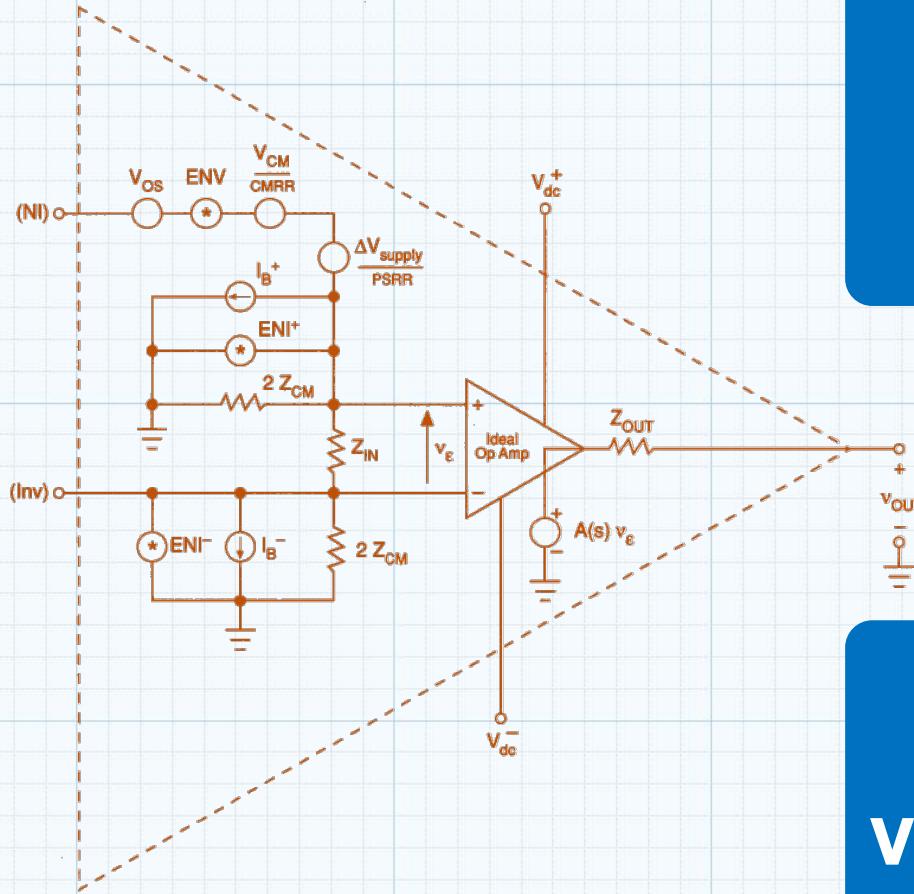
# 运放指标：最基本的一些...

## 信号放大

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

## 动态特性

$f_H$ 、 $f_c$ 、 $SR$ 、 $BW_p$



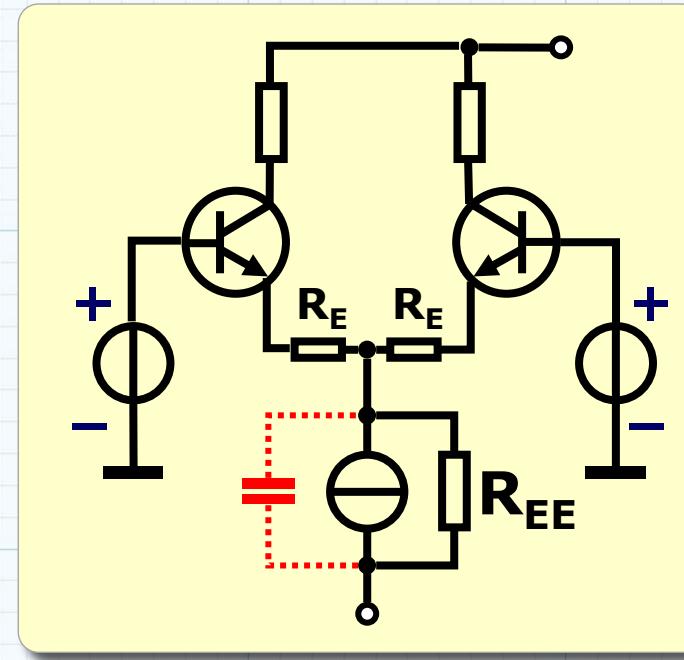
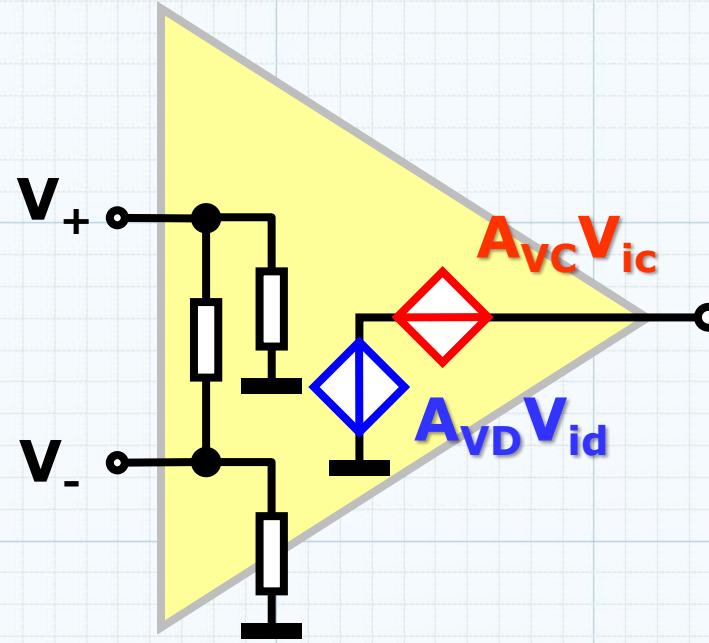
## 工作极限

$V_{idm}$ 、 $V_{icm}$ 、 $P_{dm}$

## 失调

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

# 指标：信号放大



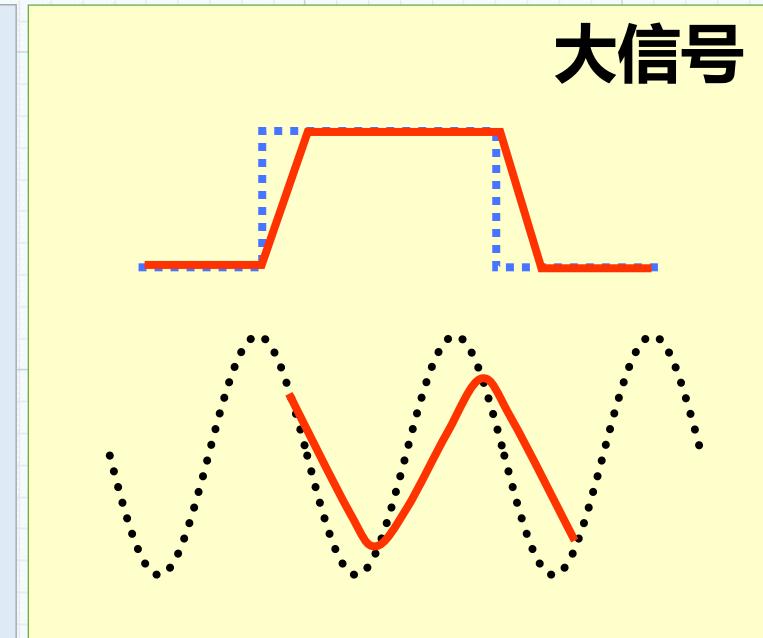
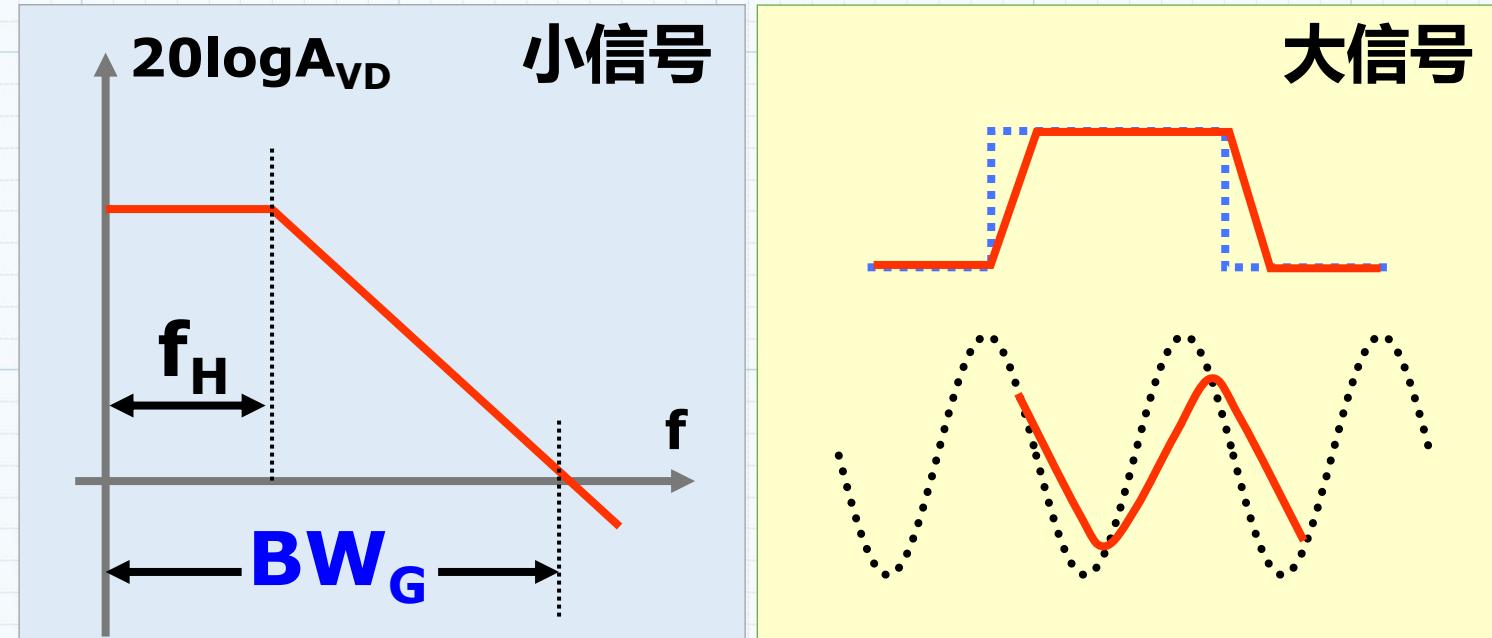
## 和信号幅度有关的参数

- ▶ 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：

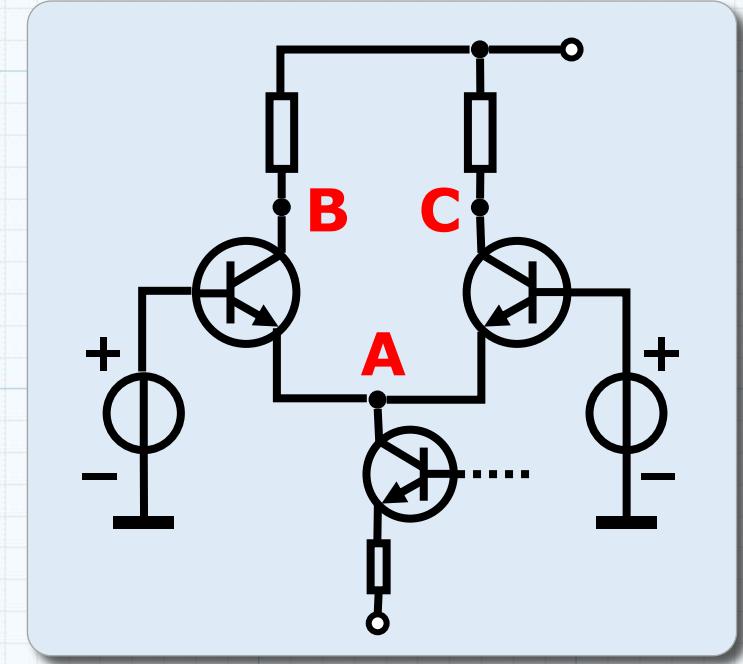
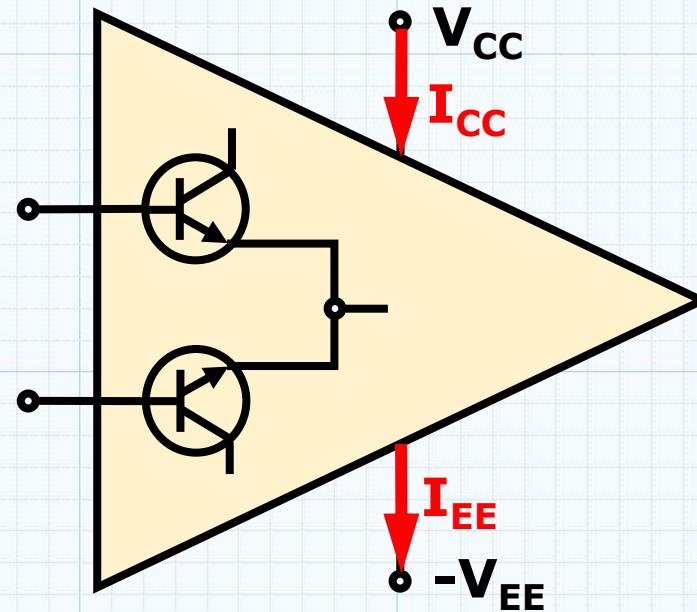
- 上限截止频率  $f_H$ :  $A_{VD}$  下降 3dB 的带宽
- 单位增益带宽  $f_c$ : 增益下降到1时的带宽( $f_T$ 、  $BW_G$ )

## 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 $V_{idm}$ :

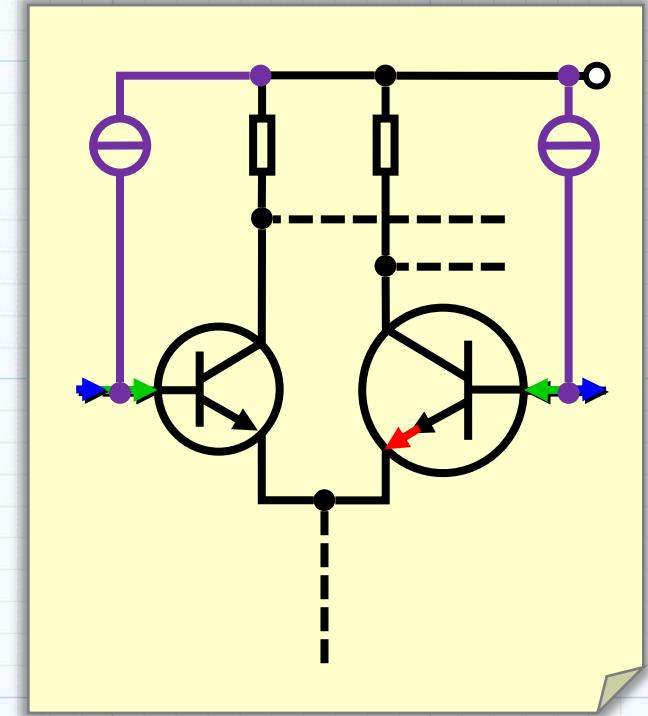
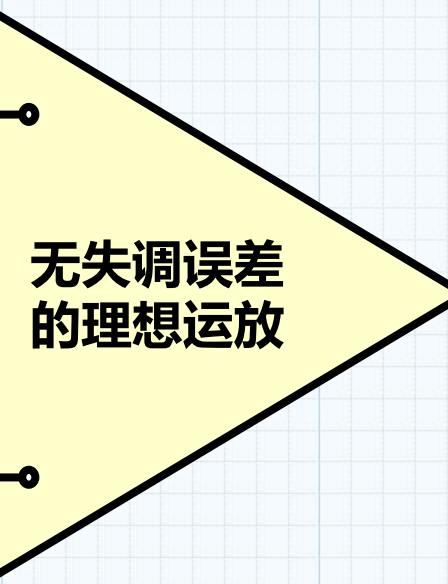
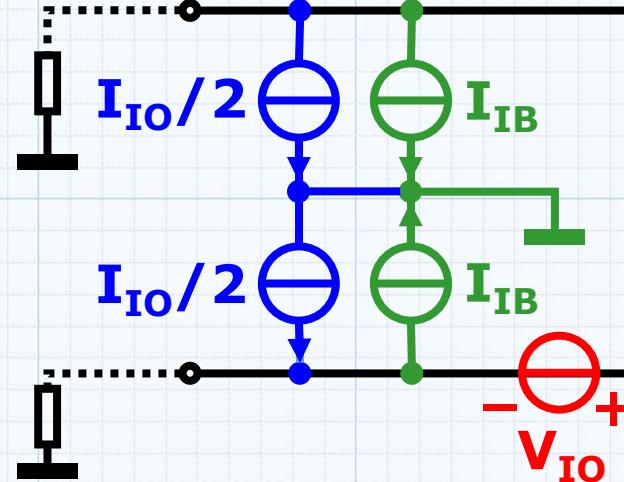
- ▶ 差模信号输入  $\rightarrow$  A点电压基本不变  $\rightarrow$   $T_1, T_2$ 发射结先击穿

## ✓ 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

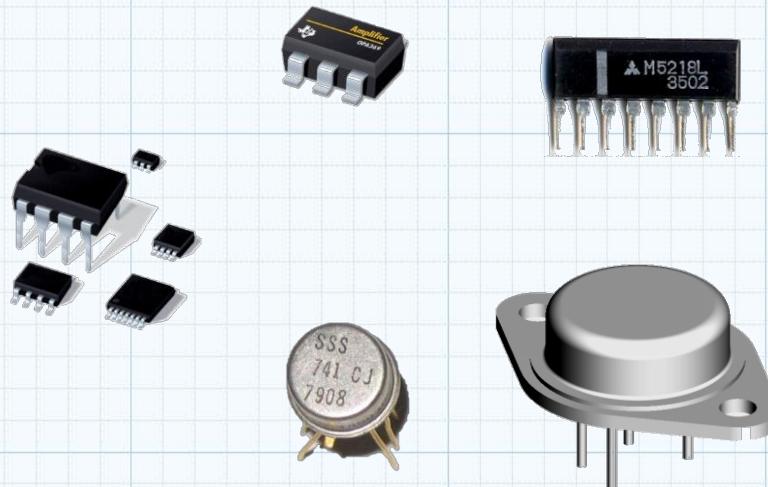
## ✓ 静态功耗： $P_{dm} = \max( V_{cc}I_{cc} + V_{ee}I_{ee} )$

# 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
$R_i$	$\infty$	0.5~2MΩ	$10^{13} \Omega$
$V_{IO}$	0	1~10mV	1 μV
$I_{IB}$	0	10nA~1μA	5 pA
$I_{IO}$	0	1nA~0.1μA	0.5 pA
$dV_{IO}/dT$	0	5 μV/°C	50 nV/°C
$dI_{IO}/dT$	0	5 pA/°C	1 pA/°C
$BW_G$	$\infty$	0.5~2 MHz	2 GHz
SR	$\infty$	0.5~0.7 V/μs	5 KV/μs
$P_D$	0	80~120 mW	30 μW

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..

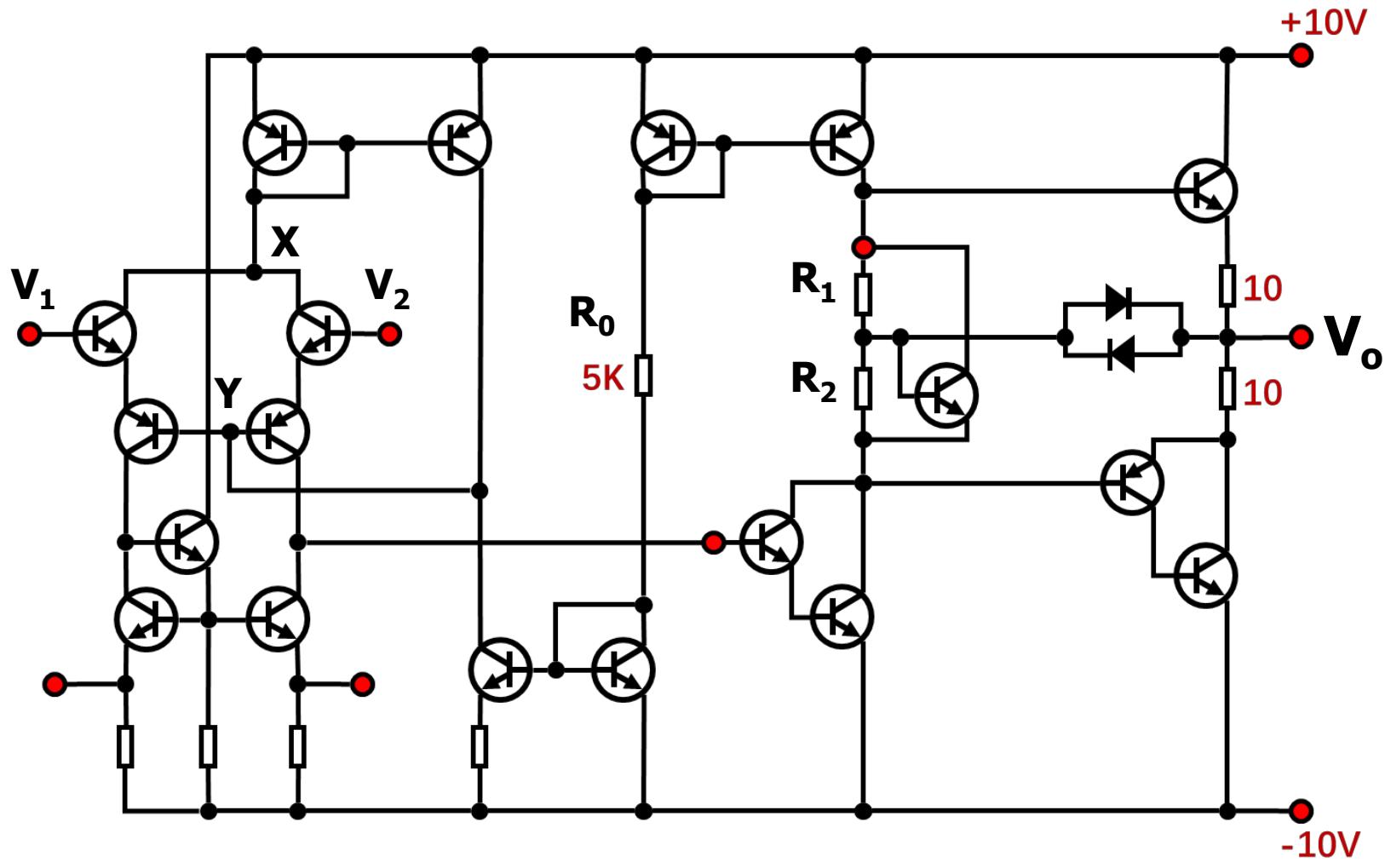
按其他功能：可选输入/可调增益/隔离放大...

## 1967年的指标和价格

PARAMETER	VARACTOR BRIDGE	CHOPPER STABILIZED	FET INPUT	TRANSISTOR DIFFERENTIAL
Current Drift 25°C-35°C	0.05pA/°C (AVG.)	1pA/°C (MAX. AVG.)	1.5pA/°C (AVG.)	100pA/°C (MAX. AVG.)
Current Noise DC-1Hz	0.01 pA	10 pA	0.1 pA	5 pA
Voltage Drift	60μV/°C	0.5μV/°C	2μV/°C	0.75μV/°C
Voltage Noise DC-1Hz	2 μV	5 μV	3 μV	1 μV
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。