

模拟与数字电路

Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十九讲： **单晶体管放大电路、差分放大电路**

Lecture 19: Single Transistor & Differential Amp

主 讲： 陈 迟 晓

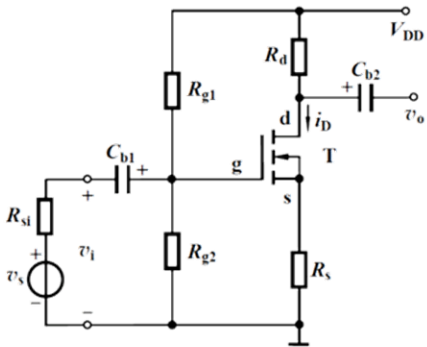
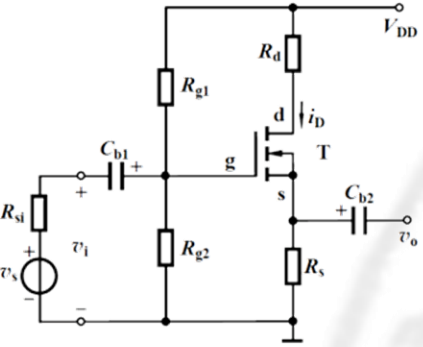
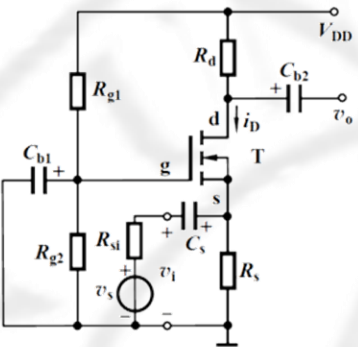
Instructor: Chixiao Chen

提纲

- 复习
 - 单晶体管放大电路有哪三种组态？
- 多晶体管放大器
- 有源负载、电流镜
- 差分放大电路

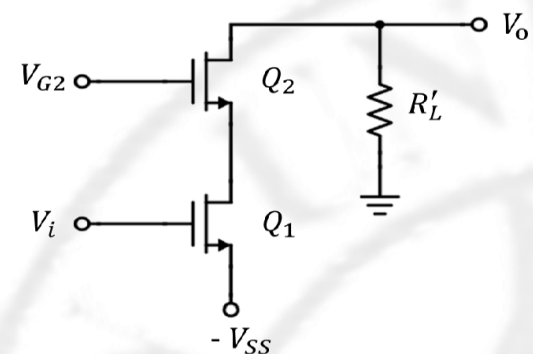
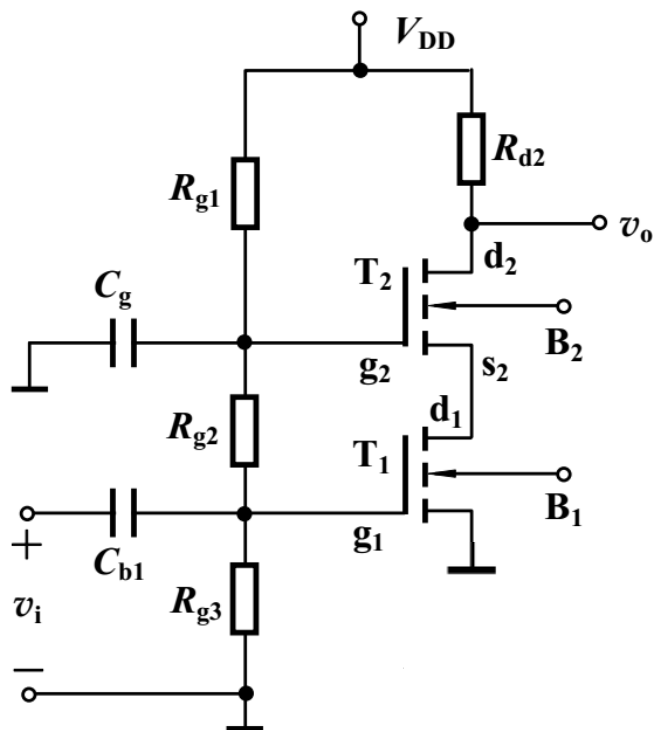


三种组态总结比较

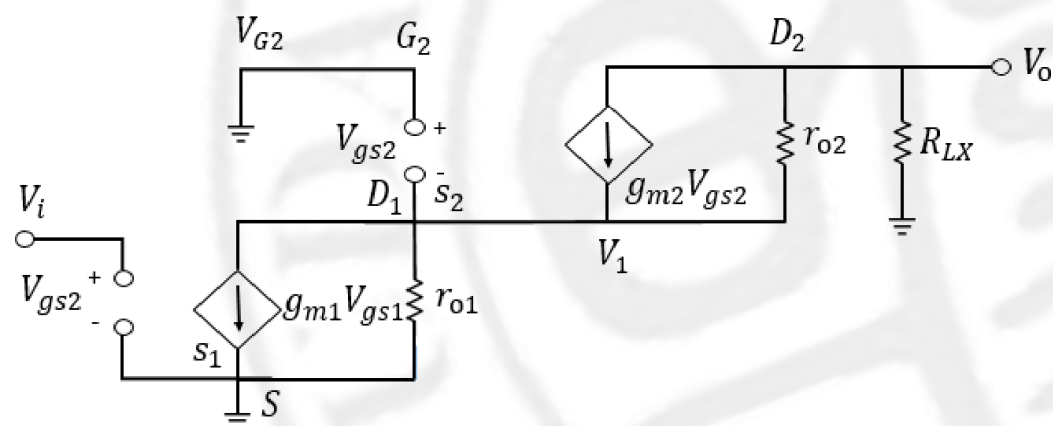
	共源	共漏	共栅
电压增益	 $A_v = -g_m (r_{ds} \parallel R_d)$	 $A_v = \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1$	 $A_v = g_m (R_d \parallel R_L)$
输入电阻	很高	很高	$R_i \approx \frac{1}{g_m}$
输出电阻	$R_o \approx R_d$	$R_o = R_s \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$	$R_o \approx R_d$

思考题：共源共栅放大电路

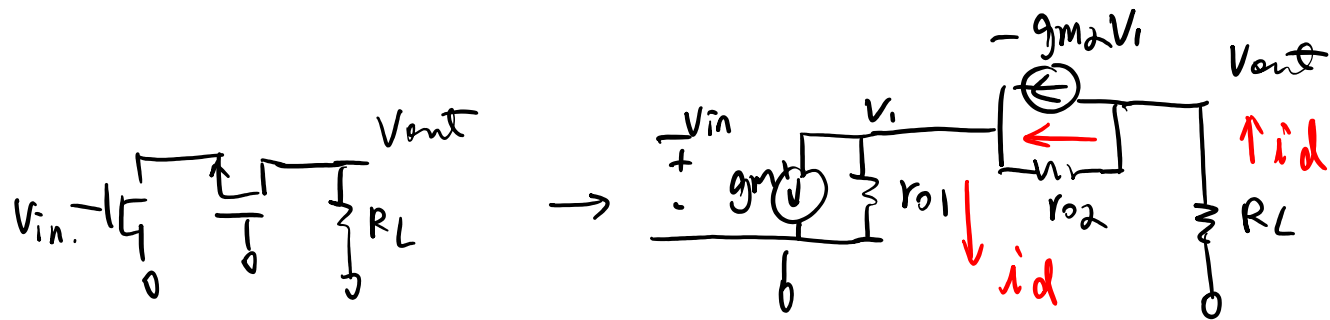
- Cascode Amplifier



(a)



(b)



$$i_d = -\frac{V_{out}}{R_L} \quad (1)$$

$$i_d = g_{m2} \cdot (-V_1) - \frac{V_1 - V_{out}}{r_{o2}} \quad (2)$$

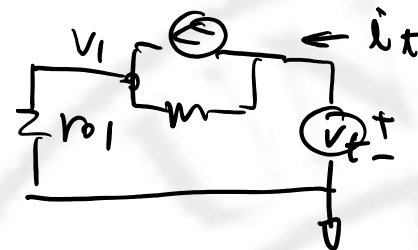
$$i_d = g_{m1} \cdot V_{in} + \frac{V_1}{r_{o2}} \quad (3) = \frac{1}{\frac{1}{g_{m1}} \parallel r_{o2}}$$

$$\text{联立 (1) + (2)} \quad V_{out} = V_1 \cdot (g_{m1} + \frac{1}{r_{o2}}) \cdot R_L \parallel r_{o2} \quad (4)$$

$$\text{联立 (1), (2), (4)} \quad V_{out} \left(\frac{1}{r_{o1}} \cdot \frac{r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}}}{R_L \parallel r_{o2}} + \frac{1}{R_L} \right) = g_{m1} V_{in}$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g_{m1} \left(R_L \parallel r_{o1} \cdot \frac{R_L \parallel r_{o2}}{r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}}} \right) \doteq \begin{cases} g_{m1} R_L & r_{o1} \text{ 或 } r_{o2} \gg R_L \\ g_{m1} g_{m2} r_{o1} r_{o2} R_L & R_L \gg r_{o1} \text{ 或 } r_{o2} \end{cases}$$

求输出电阻:

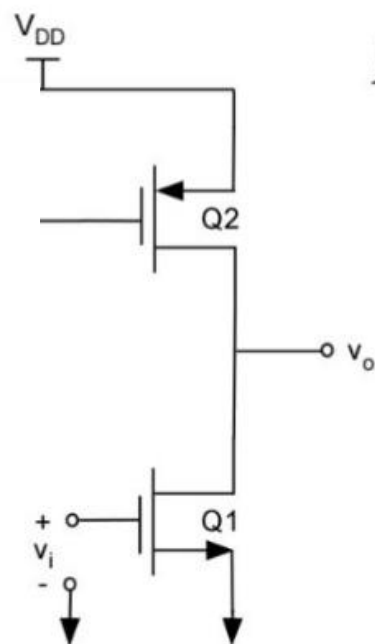


$$R_{out} = \frac{V_t}{i_t} = \frac{V_1 + (g_{m1} + \frac{1}{r_{o1}}) \cdot r_{o2} \cdot V_1}{V_1 / r_{o1}}$$

$$= g_{m2} r_{o1} r_{o2} + r_{o1} + r_{o2}$$

$$\doteq g_{m2} r_{o1} r_{o2}$$

共源放大器 + 有源负载



Let $r_{ds1} = r_{o1}$ for Q_1

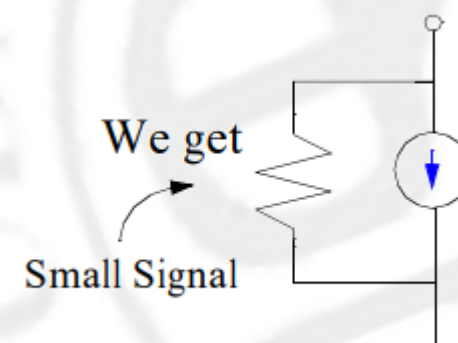
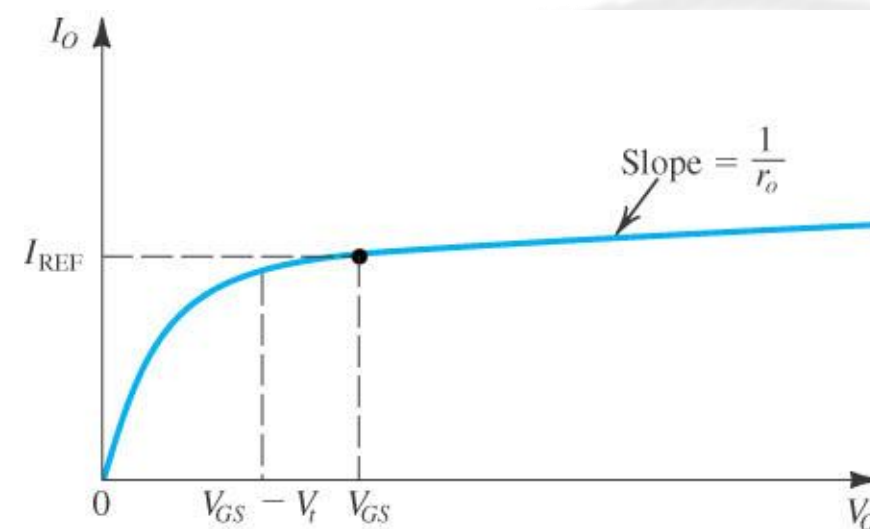
$r_{ds2} = r_{o2}$ for Q_2

then, $R_{out} = r_{o1} \parallel r_{o2}$

$A_{MB} = -g_{m1} R_{out}$

Let $g_{o1} = \frac{1}{r_{o1}} = g_{ds1}$

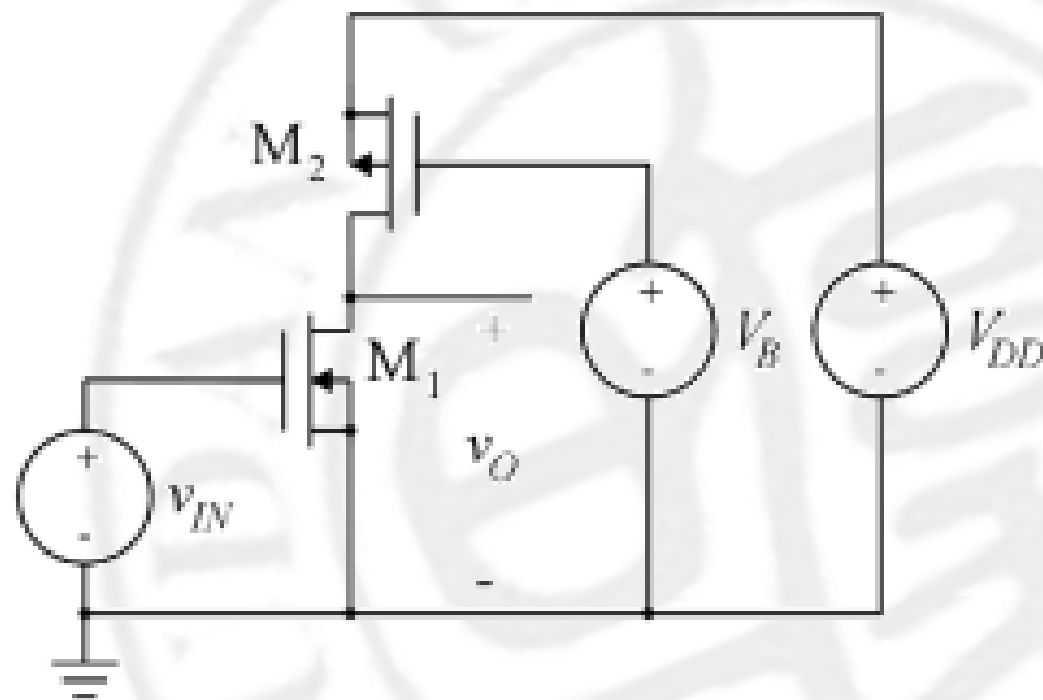
$g_{o2} = \frac{1}{r_{o2}} = g_{ds2}$



习题

右图中，已知 V_{IN} （输入静态） V_{DD} V_B K_p K_n λ_p λ_n
假设两个MOSFET都工作在饱和区

求 放大器的增益与小信号模型

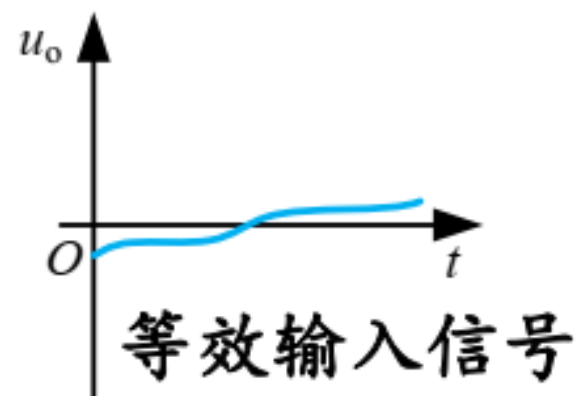
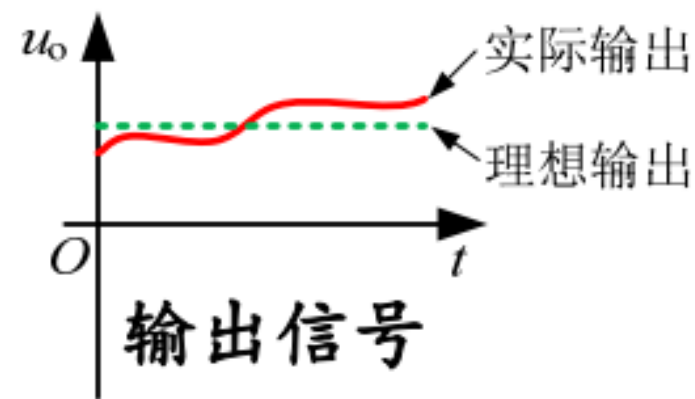
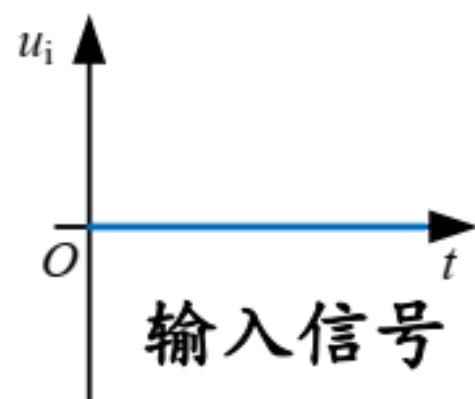
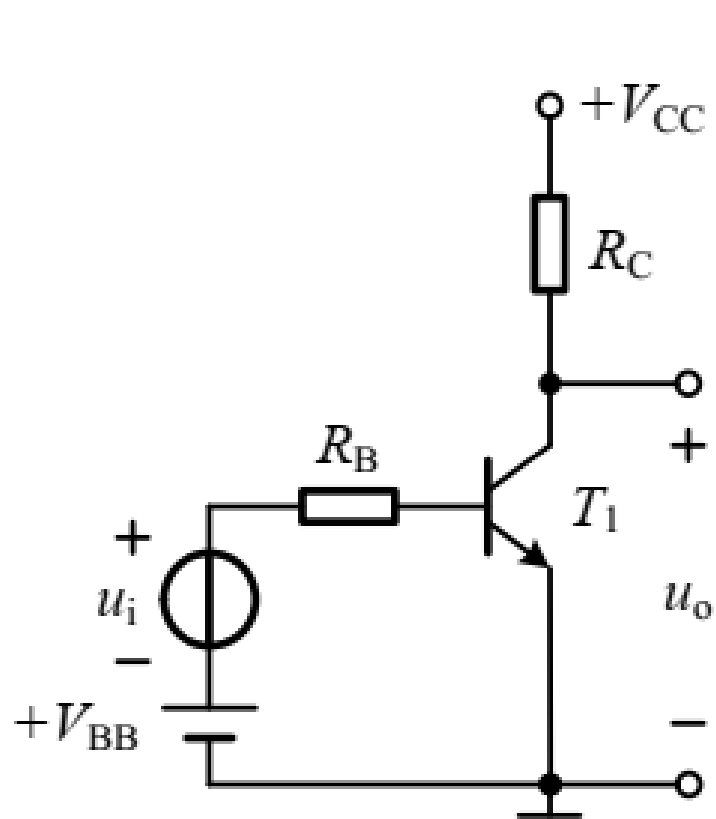


噪音与信号往往同时存在



如何解决环境噪音（**噪声**）
和语音（**信号**）同时被放大
的问题？

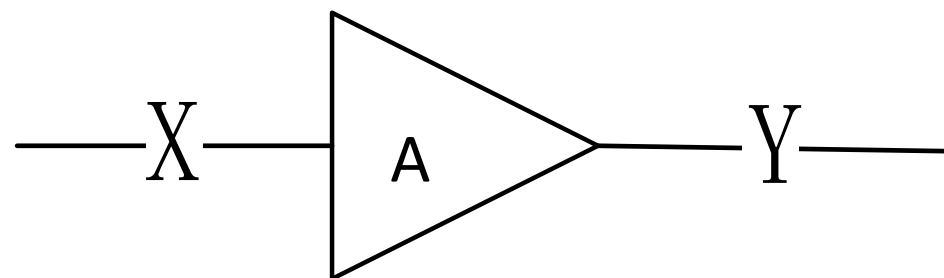
噪声信号导致零点漂移



差分放大电路

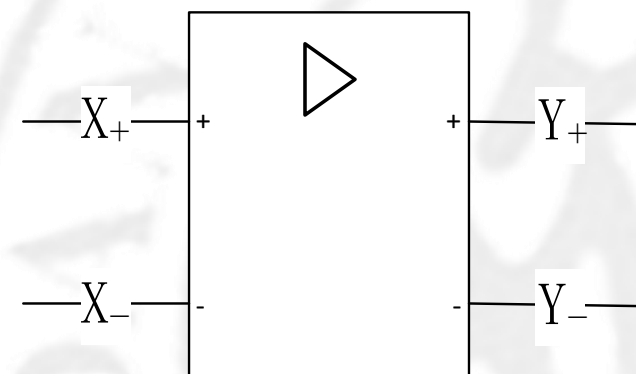
- 什么是“差分” (differential) ?

与之相对的是单端 (single-ended)，对于我们之前学过的放大器，输入是一个信号 X ，经过一段电路后变成一个信号 Y ：



由于信号 X 和信号 Y 只有一个端口，我们称之为：单端信号 (single-ended signal)

对于另一种放大器而言，其示意图如下：

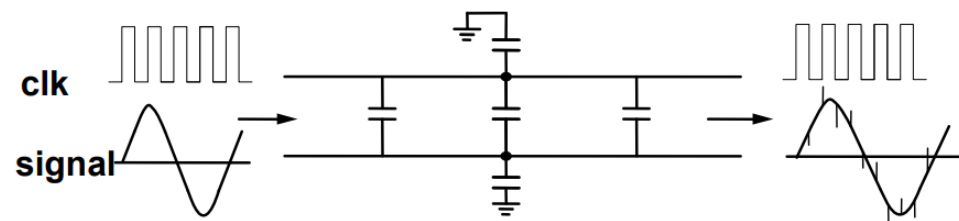


输入与输出现在不是单一的信号，而是两个量的差，输入信号 $X = X_+ - X_-$ ，输出 $Y = Y_+ - Y_-$ ，我们称这样的信号为差分信号 (differential signal)

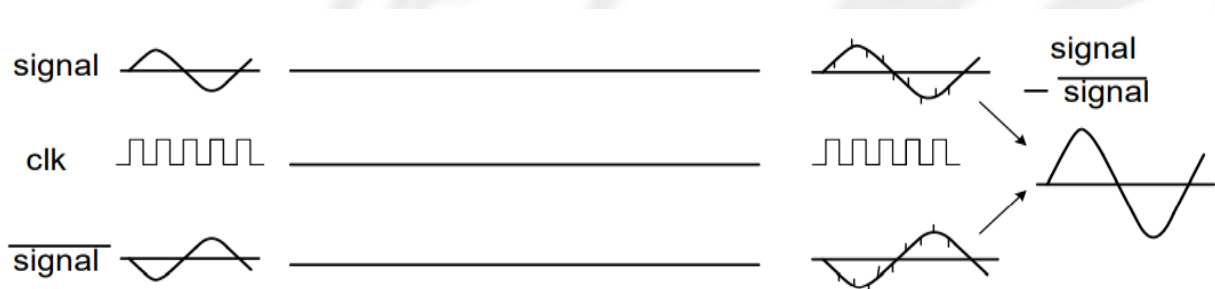
差分放大电路

- 为什么需要“差分” (differential) ?

举个例子，如果我们的电路中有时钟信号，由于电容的耦合，原始信号会受到时钟信号的干扰：



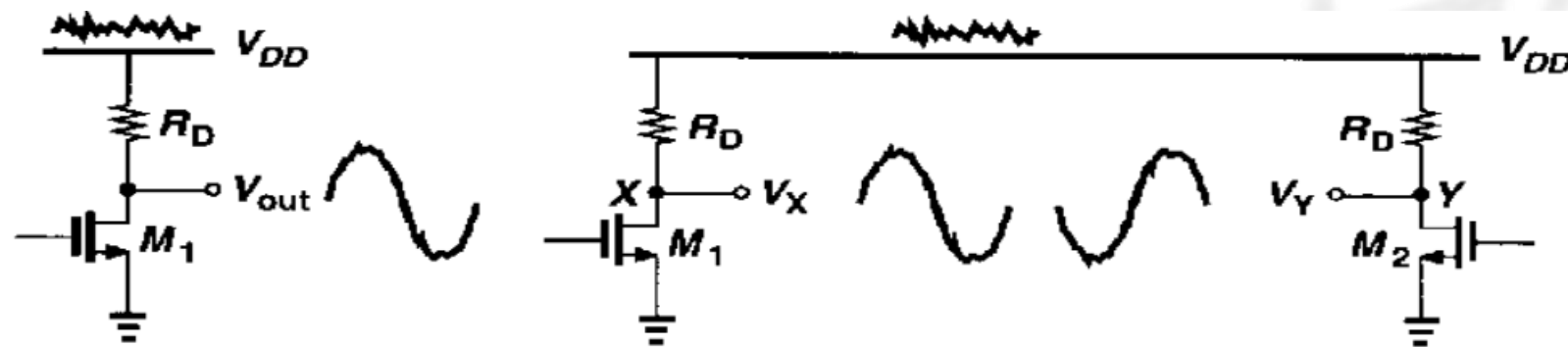
这时候，如果我们将原始信号变成两个信号的差值，就能很好的解决这个问题：



差分放大电路

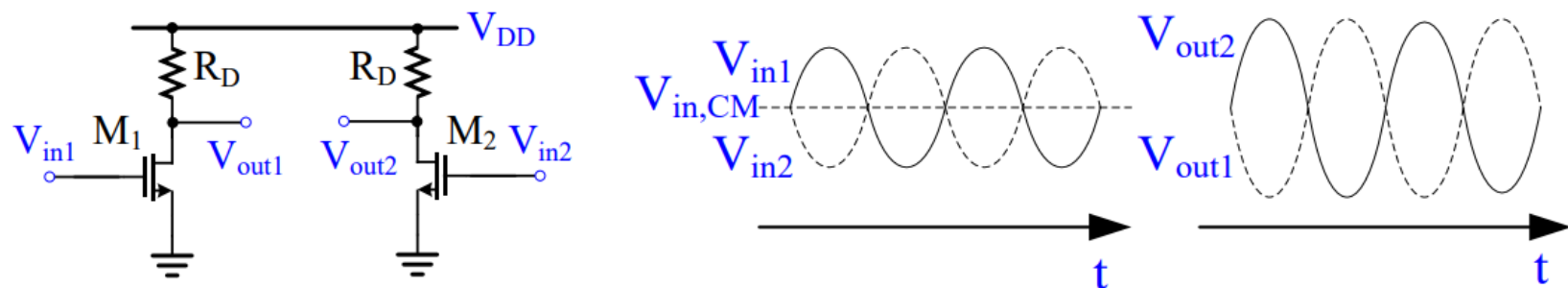
- 为什么需要“差分” (differential) ?

除了时钟信号之外，实际的电路中有很多会对输入输出信号产生干扰的因素，例如温度变化，电源电压波动，如果我们把输入信号变为两个相反信号的差值，只要这些因素对输出信号产生了相同的作用，那么这种“差分”的输出信号就可以抵消这些因素的干扰。因此相较于单端的电路，差分的电路有更强的“immunity”



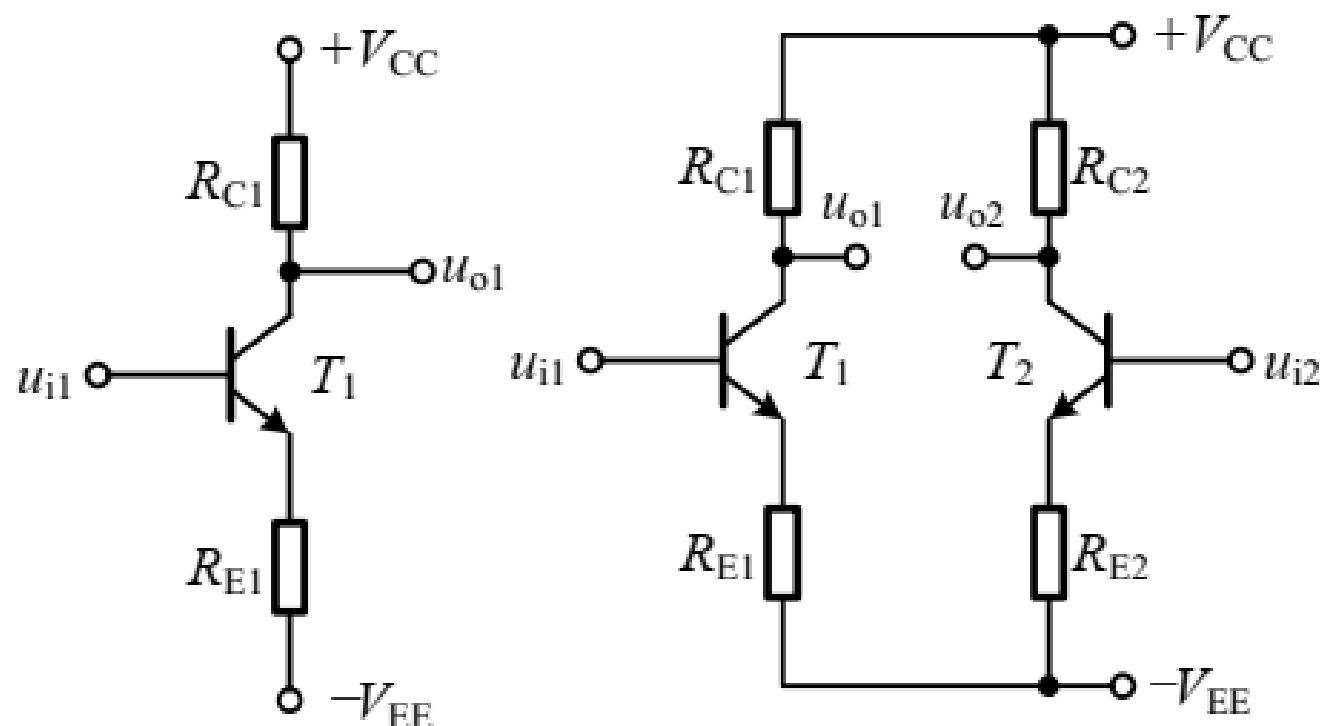
差分放大电路

- 如何实现差分信号的放大？考虑下面的电路：



这个电路是两个简单的单极共源级放大器，这两个放大器分别将一个差分信号的输入 $V_{in1} - V_{in2}$ 放大为 $V_{out1} - V_{out2}$ ，放大倍数与单极共源级放大器相同。我们把 $(V_{in1} + V_{in2})/2$ 称之为输入共模电压（ $V_{in,cm}$ ，cm表示common-mode）

从单端放大到差分放大



$$u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2}u_{id}$$

$$u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2}u_{id}$$

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

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

$$K_{CMR}(\text{dB}) = 20\log K_{CMR}$$

两个信号的算数平均值称为共模信号 u_{ic}

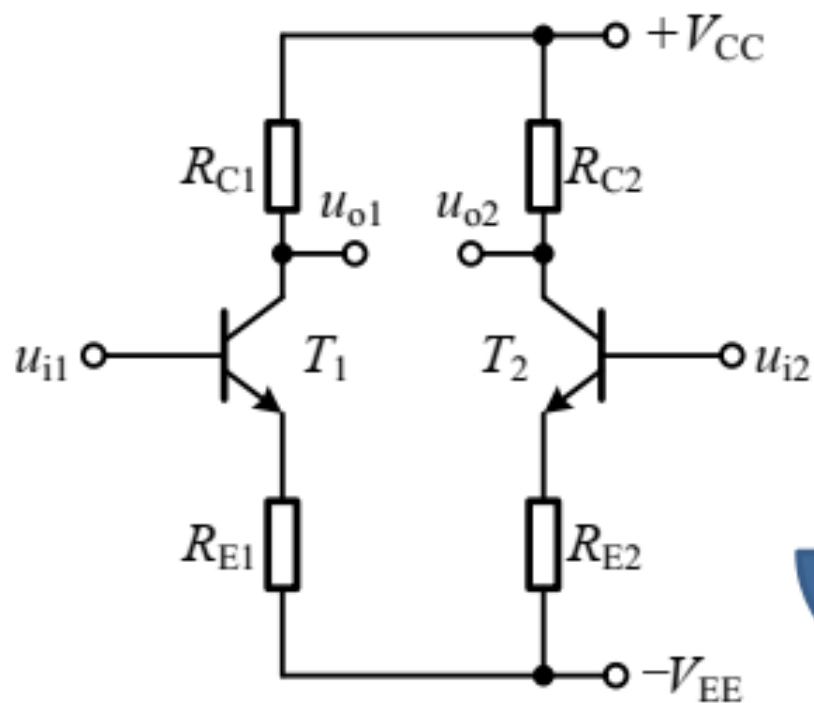
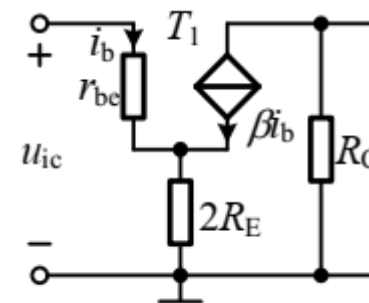
$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

两个信号的差值称为差模信号 u_{id}

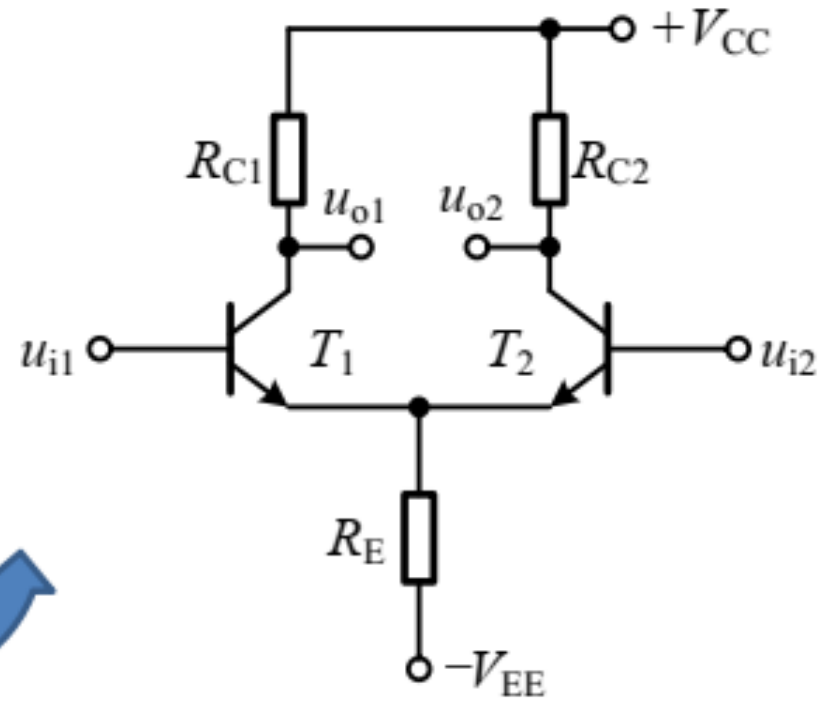
$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$$

差分放大电路

- 半电路分析：对共模信号的抑制

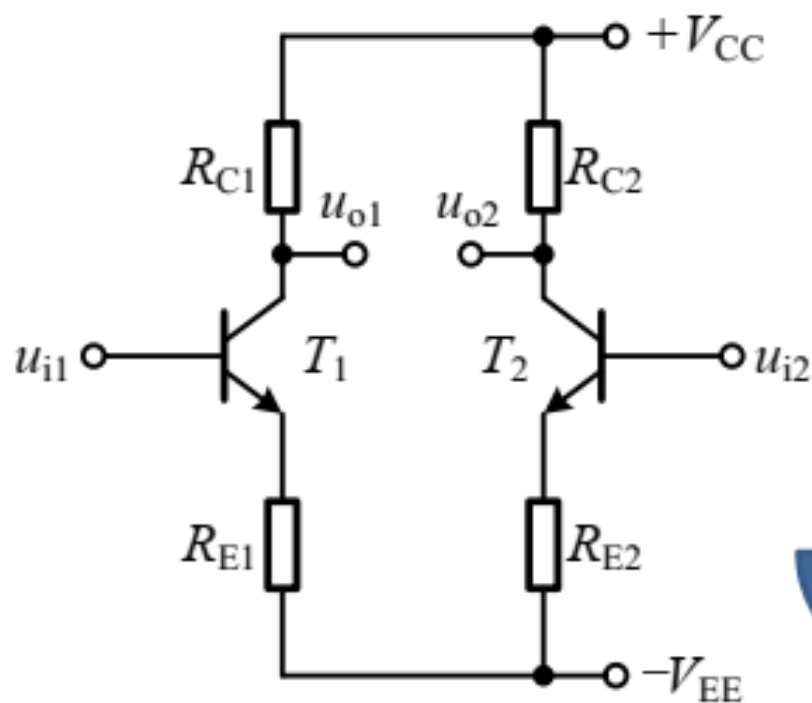


改进

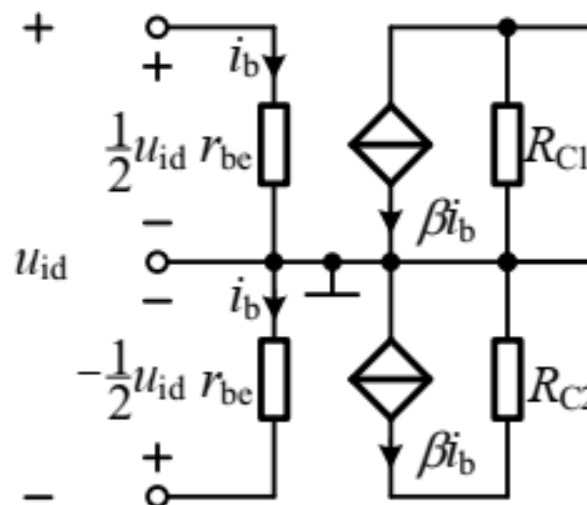
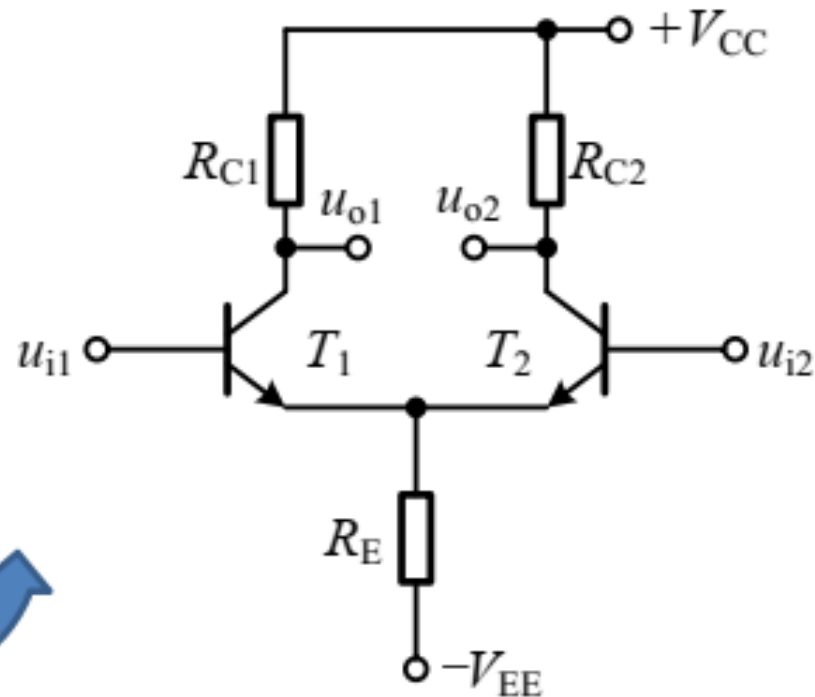


差分放大电路

- 半电路分析：对差模信号的放大



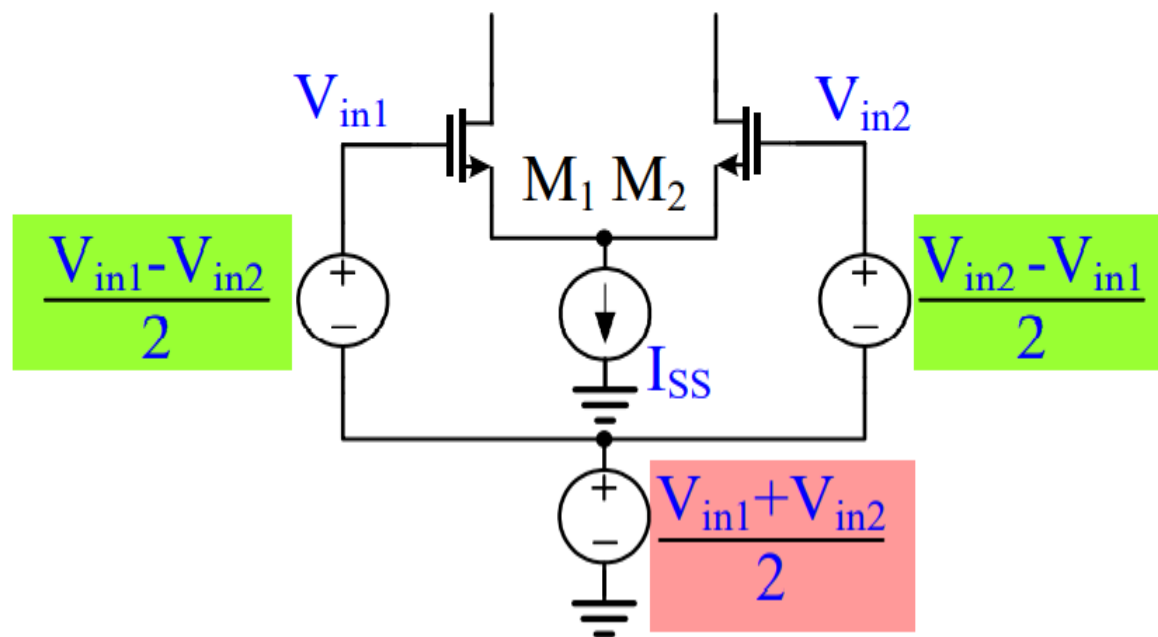
改进



差分放大电路

$$V_{id} = V_{in1} - V_{in2}$$

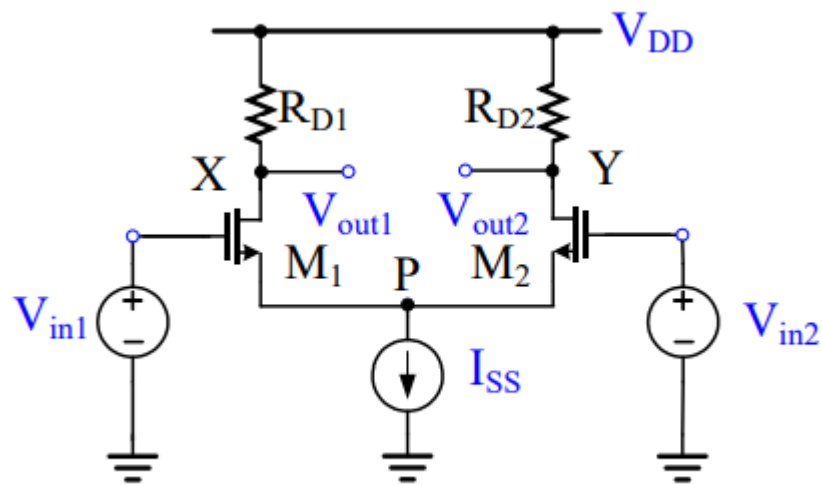
$$V_{ic} = \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$



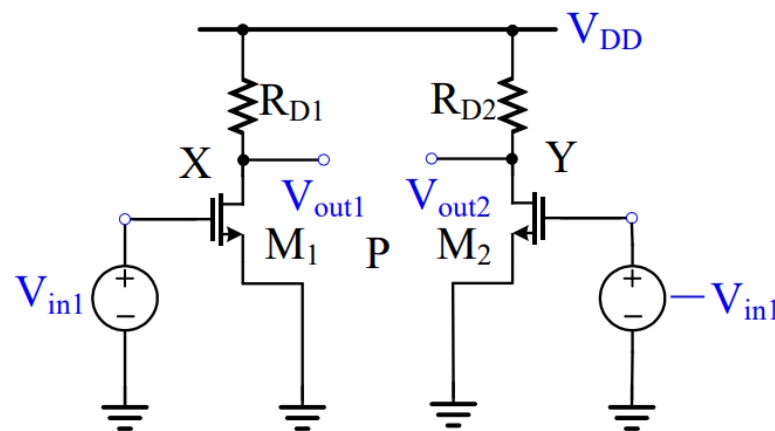
对于任意的差分输入信号，我们可以将输入 V_{in1} 和 V_{in2} 分为两部分，一部分是两个信号相同的部分（即输入共模信号），另一部分是相反的部分，称为输入差模信号。通常我们将共模信号作为大信号考虑，差模信号作为小信号。根据前面的分析，只要MOS管工作于饱和区，其静态工作点是与输入无关的！这是这个电路的一个巨大优势。

差分放大电路

- 小信号分析 ($V_{in1} \neq V_{in2}$, 默认电路处于合理的工作区域) :

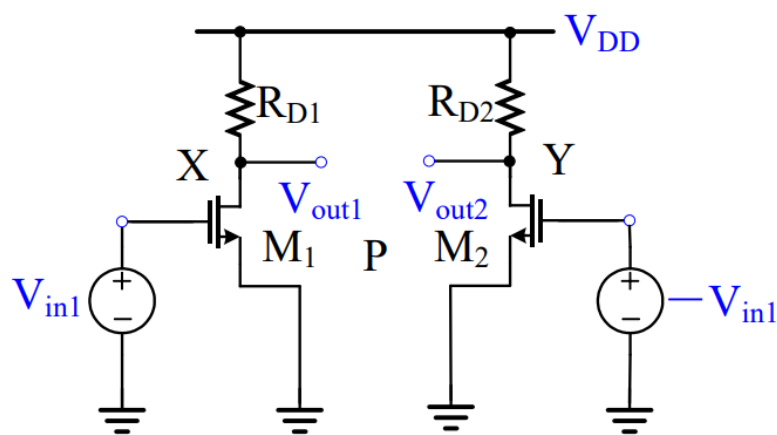


小信号分析中, 我们无需考虑共模电压, 即假设共模电压保持不变, P 点电压则为固定值, 小信号电路中可视为 P 点接地, 此时该电路可以等效为下图的电路, 此时我们可以单独分析半边电路的工作状况, 称之为半边电路法:

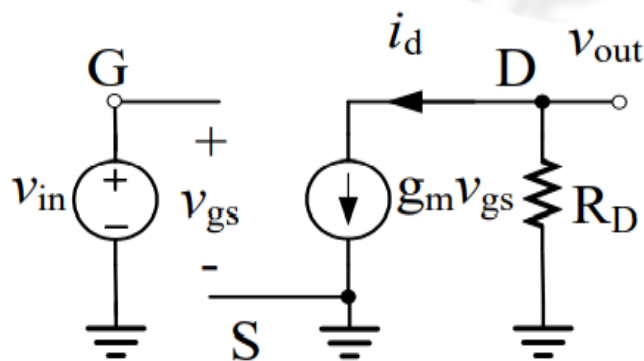


差分放大电路

- 小信号分析 ($V_{in1} \neq V_{in2}$, 默认电路处于合理的工作区域) :



此时半边电路的小信号分析与单极共源级放大器一致!



$$A_v = -g_m R_D$$