

# 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

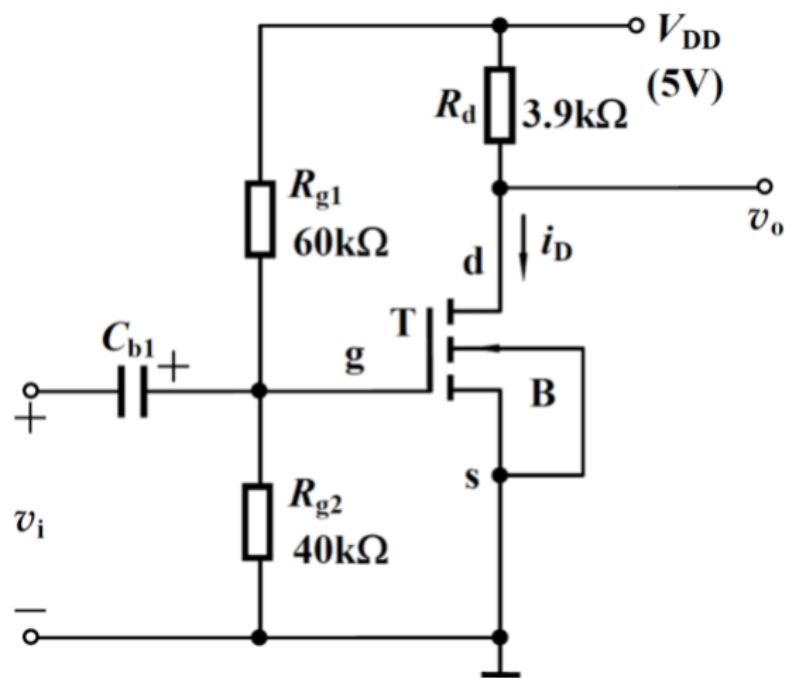
# 提纲

- 复习
  - BJT晶体管和MOS晶体管的小信号模型差别?
- 单晶体管放大电路
- 差分放大电路

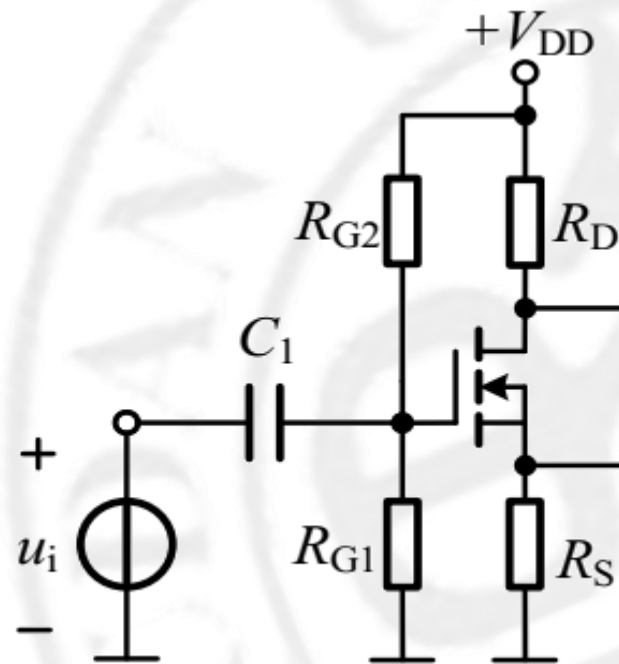


# 共源（射）放大器

- 简单共源放大电路

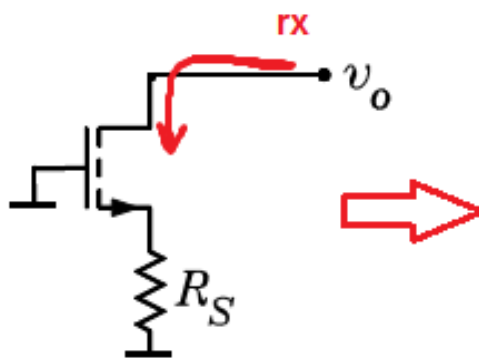
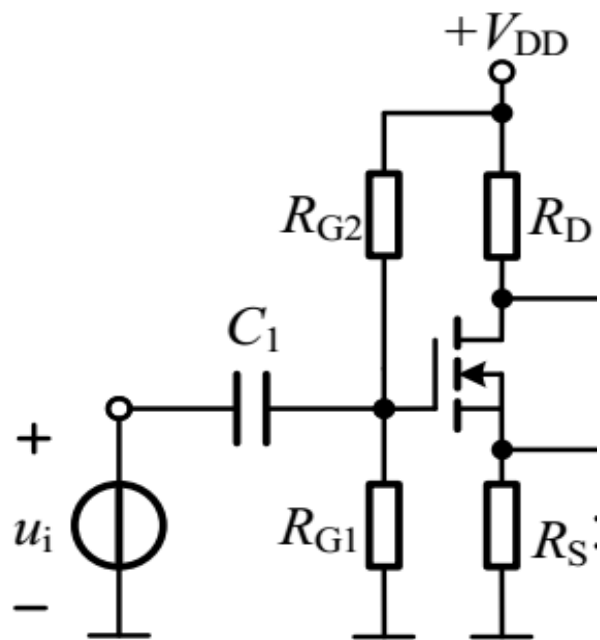


- 具有源级电阻的共源放大电路



# 具有源级电阻的共源放大电路

- 小信号模型分析  
Common Source Amplifier with source degeneration



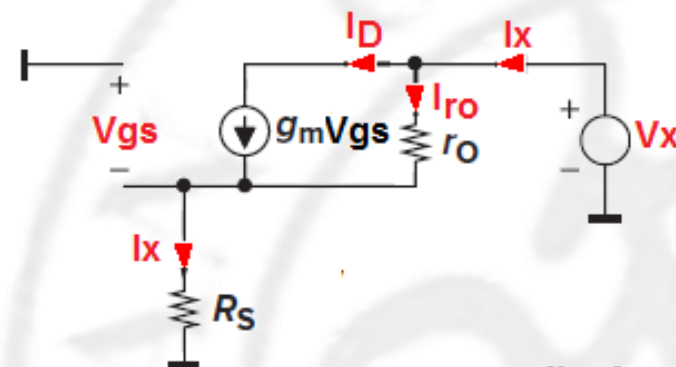
增益:

$$V_1 = V_{in} - I_D R_S = V_{in} - g_m V_1 R_S$$

$$\Rightarrow V_1 = \frac{V_{in}}{1 + g_m R_S} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{out} = -g_m V_1 R_D$$

$$A_v \approx \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$



输出电阻:

$$V_X = I_{ro} * r_o + I_X * R_S$$

$$I_{ro} = I_X - g_m * V_{GS}$$

$$V_X = (I_X - (g_m (-I_X) R_S)) r_o + I_X R_S$$

And solve for  $I_X$

$$I_X = \frac{V_X}{R_S + r_o + g_m * R_S * r_o}$$

And finally we have

$$r_x = R_S + r_o + g_m * R_S * r_o = r_o (1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_o})$$

$$r_x = r_o * (1 + g_m R_S) + R_S$$

# 共栅（基）放大电路

## 1. 静态分析

根据直流通路有

$$I_{DQ} = I$$

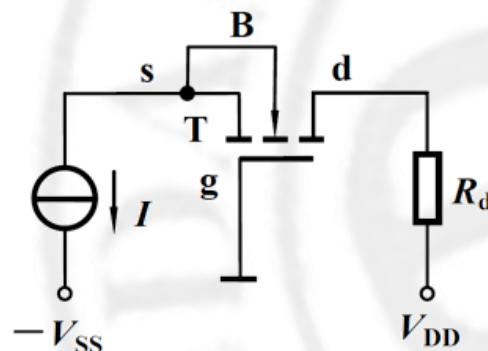
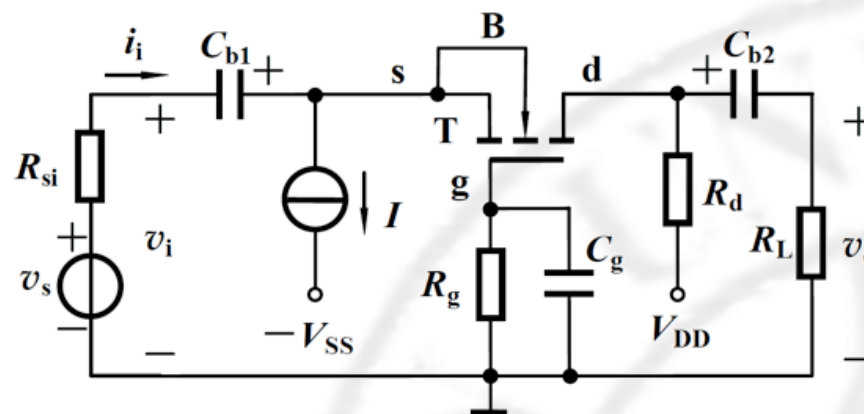
$$\text{由 } I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$$

可得  $V_{GSQ}$

$$\text{又 } V_S = -V_{GSQ} \quad V_D = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } V_{DSQ} &= V_D - V_S \\ &= V_{DD} - I_{DQ} R_d + V_{GSQ} \end{aligned}$$

需验证是否工作在饱和区



# 共栅放大电路

## 2. 动态分析

设 $\lambda=0$

电压增益

$$v_i = -v_{gs}$$

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_d \parallel R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m (R_d \parallel R_L)$$

源电压增益

$$v_s = v_i + i_i R_{si} = -v_{gs} - g_m v_{gs} R_{si}$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{g_m (R_d \parallel R_L)}{1 + g_m R_{si}}$$

输出与输入同相

输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{-v_{gs}}{-g_m v_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

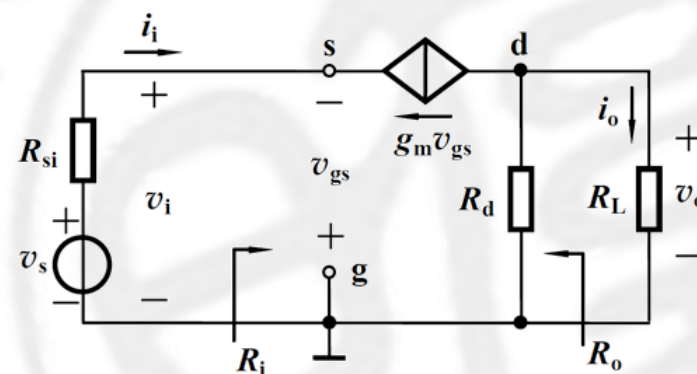
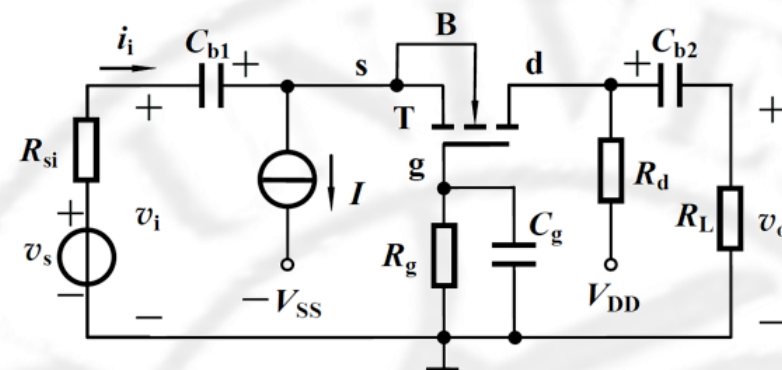
输入电阻远小于其它两种组态

输出电阻

当 $r_{ds} \gg R_d$  和  $r_{ds} \gg R_{si}$  时

$$R_o \approx R_d$$

与共源电路同相



# 共漏（集）放大电路

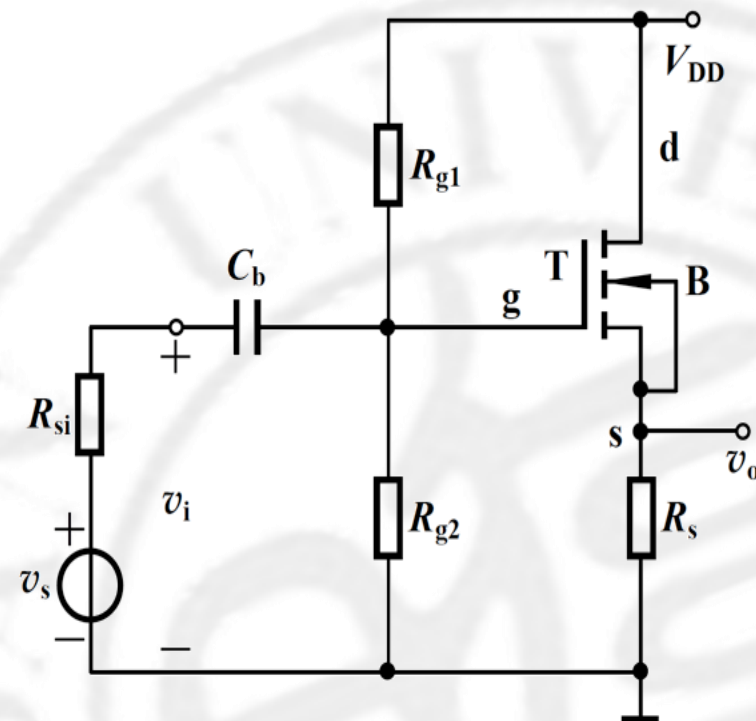
- 又称为源极跟随器

## 1. 静态分析

设MOS管工作于饱和区

$$\begin{cases} I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \\ V_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD} - I_{DQ} R_s \\ V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_s \end{cases}$$

需验证是否工作在饱和区



# 共漏放大电路

## 2. 动态分析

小信号等效电路

根据静态工作点可求得  $g_m$

$$g_m = 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN})$$

电压增益

$$\begin{aligned} v_i &= v_{gs} + v_o = v_{gs} + g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds}) \\ &= v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})] \end{aligned}$$

$$v_o = g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds})$$

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds})}{v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})]} \\ &= \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1 \end{aligned}$$

输出与输入同相，且增益小于等于1

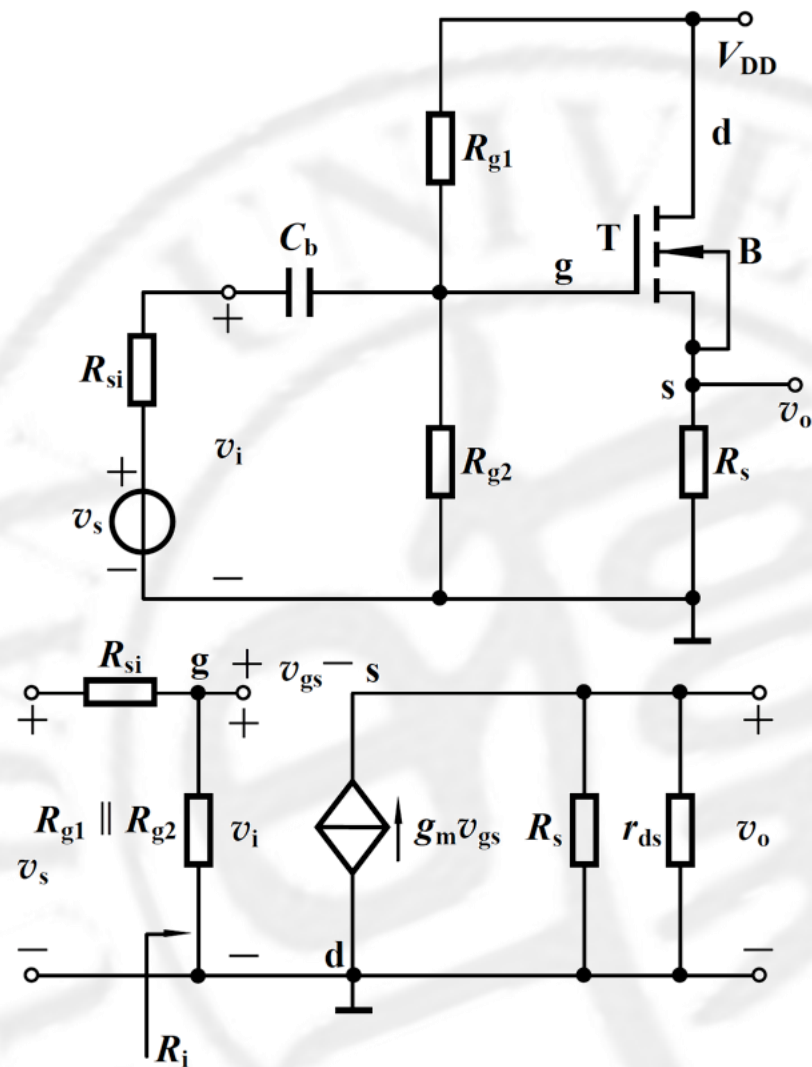
源电压增益

$$\begin{aligned} A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} \\ &= \frac{g_m (R_d \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_d \parallel r_{ds})} \cdot \left( \frac{R_i}{R_i + R_{si}} \right) \end{aligned}$$

输入电阻

$$R_i = R_{g1} \parallel R_{g2}$$

受静态偏置电路的影响，  
栅极绝缘的特性并未充分表现出来

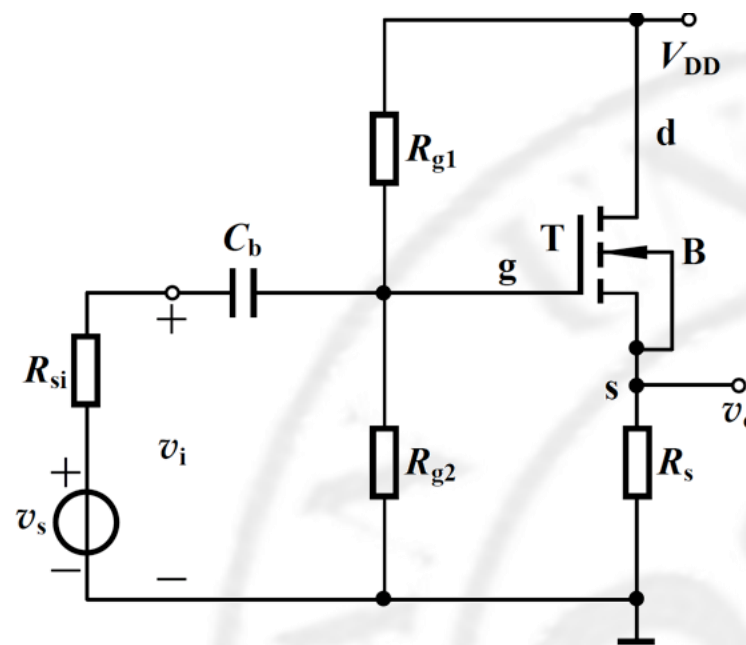
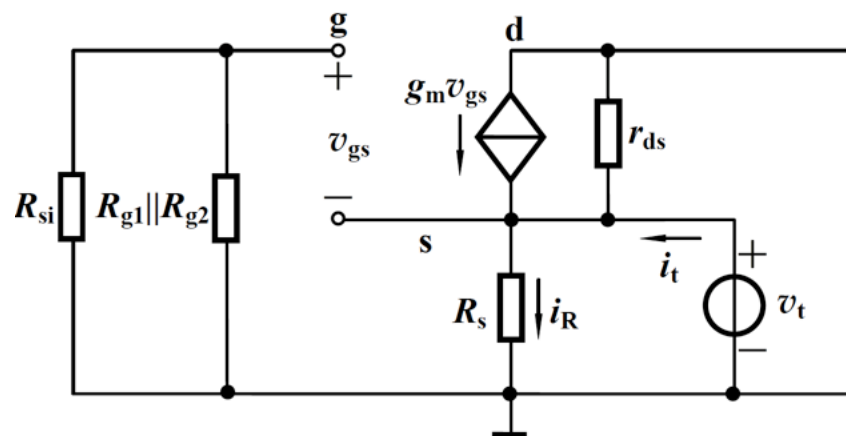




# 共漏放大电路

## 2. 动态分析

输出电阻

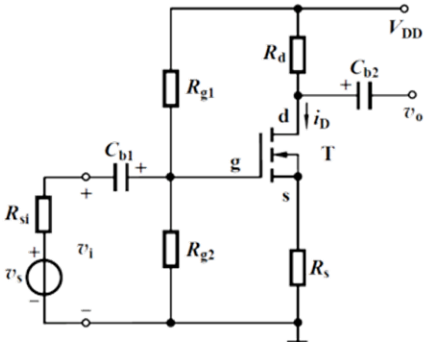
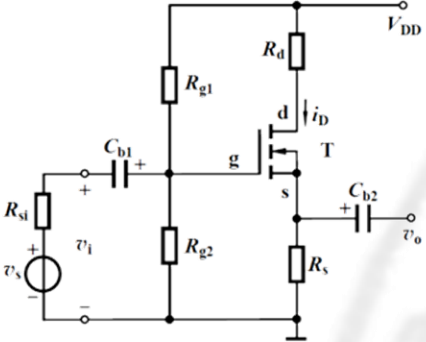
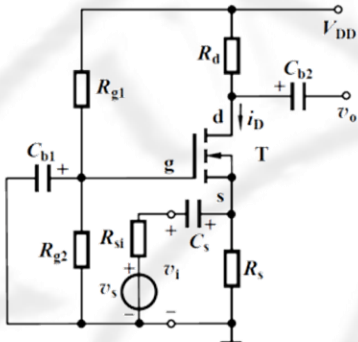


$$\begin{cases} i_T = \frac{v_T}{R_s} + \frac{v_T}{r_{ds}} - g_m v_{gs} \\ v_{gs} = -v_T \end{cases}$$

$$R_o = \frac{v_T}{i_T} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{r_{ds}} + g_m} = R_s \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$$

输出电阻较小

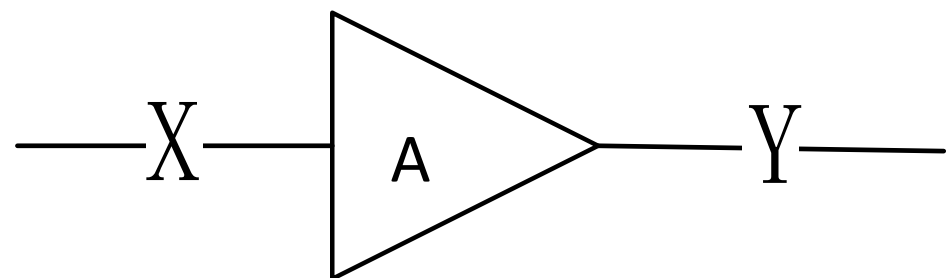
# 三种组态总结比较

	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	$R_o \approx R_d$	$R_o = R_s \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$	$R_o \approx R_d$

# 差分放大电路

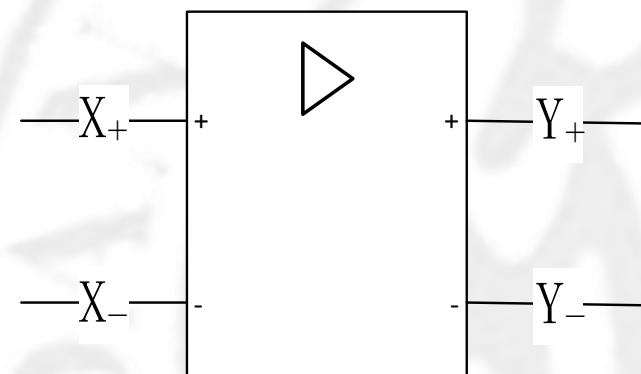
- 什么是“差分” (differential) ?

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：

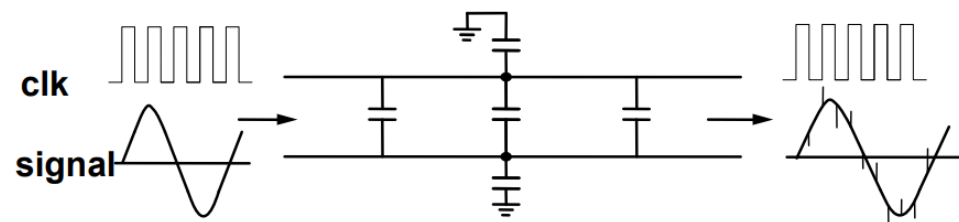


输入与输出现在不是单一的信号，而是两个量的差，输入信号 $X = X_+ - X_-$ ，输出 $Y = Y_+ - Y_-$ ，我们称这样的信号为差分信号 (differential signal)

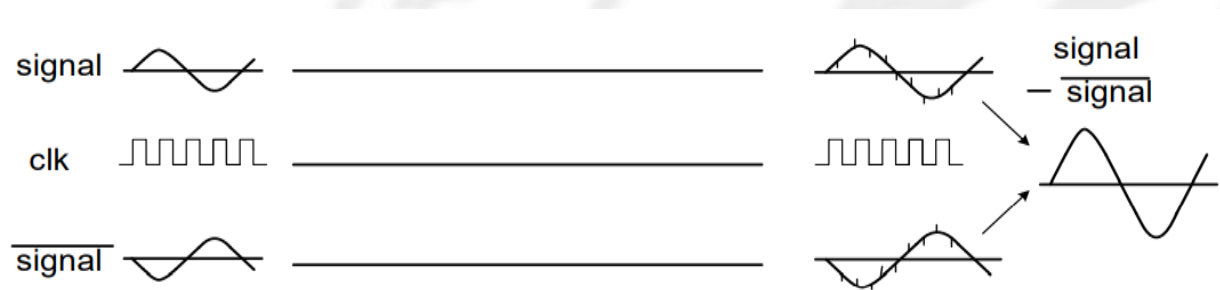
# 差分放大电路

- 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：



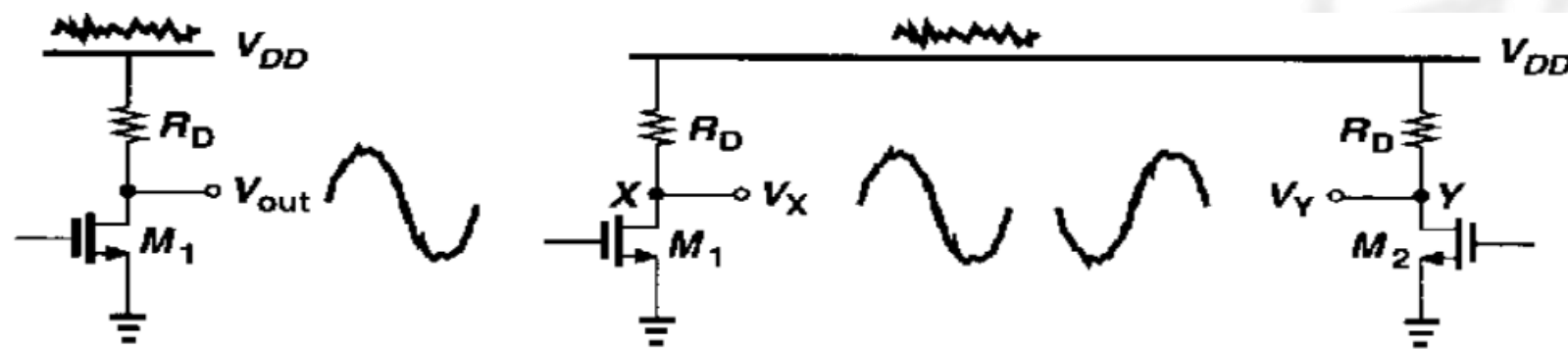
这时候，如果我们将原始信号变成两个信号的差值，就能很好的解决这个问题：



# 差分放大电路

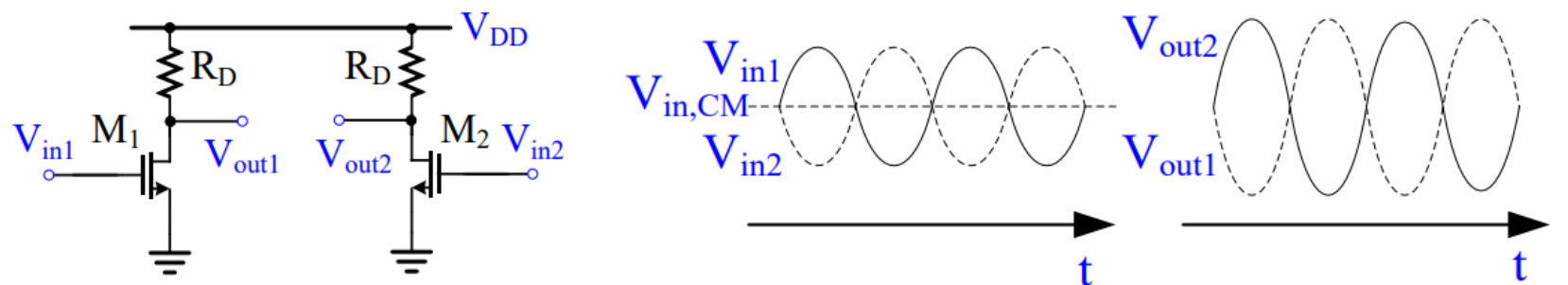
- 为什么需要“差分” (differential) ？

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

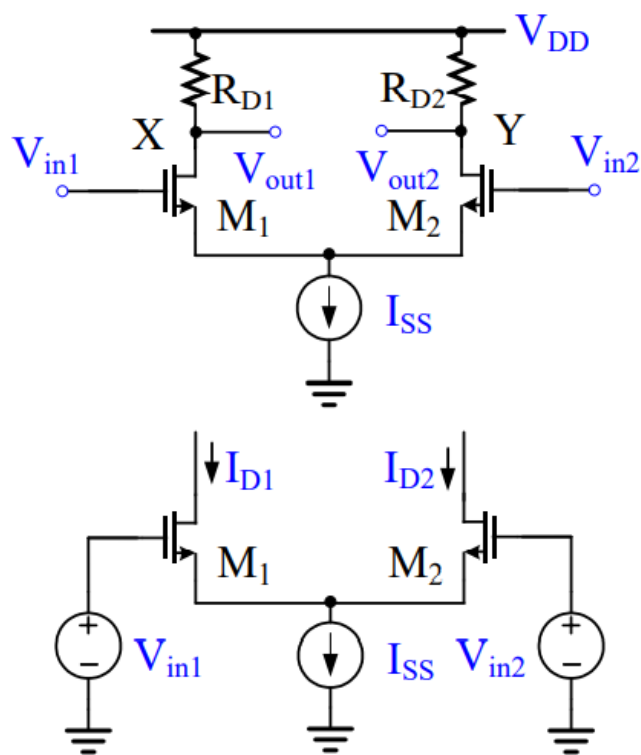
- 如何实现差分信号的放大？考虑下面的电路：



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）

# 差分放大电路

- 改进的电路：



与上图的区别在于，放大器的源极不再是一个固定的电压，而是共同连接了一个电流源。这时，如果  $V_{in1} = V_{in2} = V_{in}$ ：

由电路的对称性可知，  $I_{D1} = I_{D2} = I_{SS}/2$

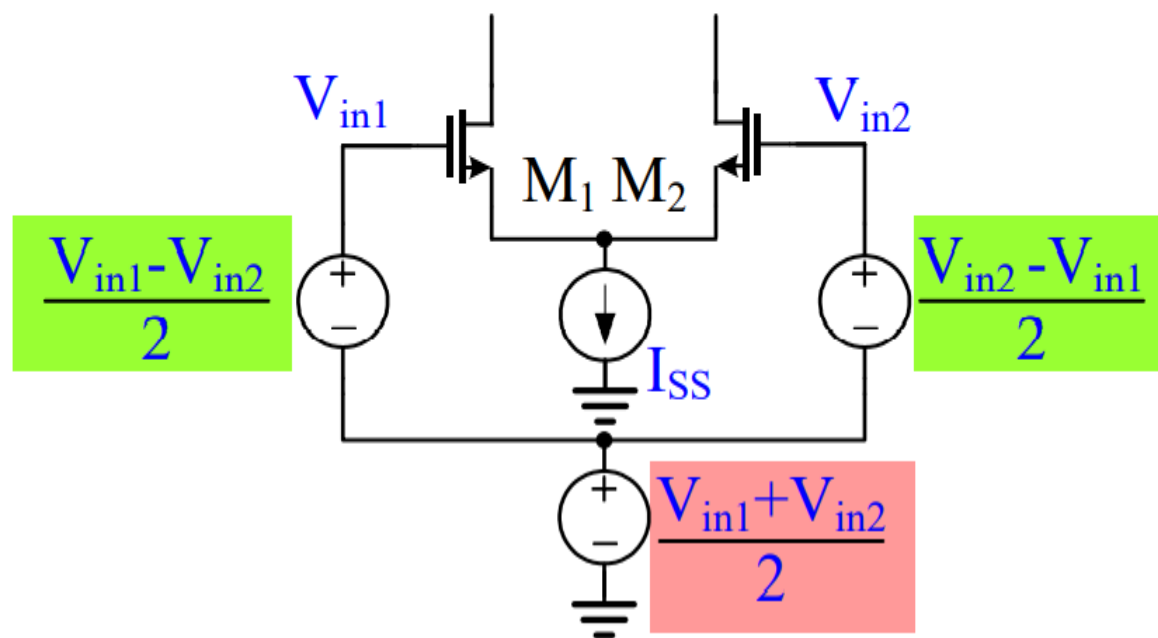
$$V_{S1} = V_{S2} = V_{in} - V_{gs} = V_{in} - V_{th} - [I_{SS}/(2 * K_n')]^{1/2}$$

这时的栅源电压与通过MOS管的电流均与输入电压无关！

# 差分放大电路

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

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

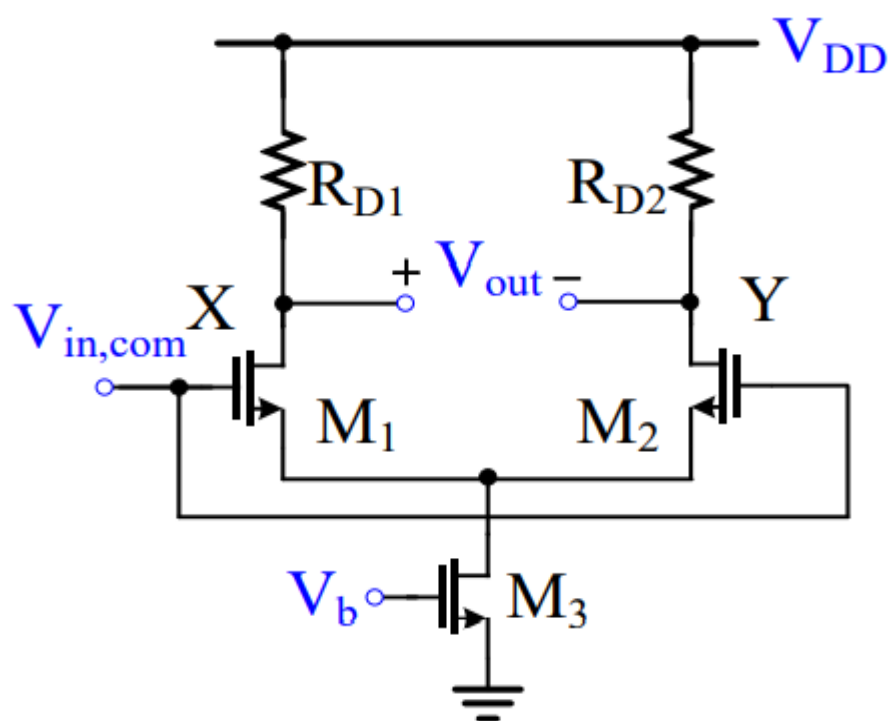


对于任意的差分输入信号，我们可以将输入 $V_{in1}$ 和 $V_{in2}$ 分为两部分，一部分是两个信号相同的部分（即输入共模信号），另一部分是相反的部分，称为输入差模信号。通常我们将共模信号作为大信号考虑，差模信号作为小信号。根据前面的分析，只要MOS管工作于饱和区，其静态工作点是与输入无关的！这是这个电路的一个巨大优势。



# 差分放大电路

- 共模分析 ( $V_{in1}=V_{in2}=V_{in,cm}$ ) :



源级电位  $V_{S1}=V_{S2}=V_{in}-V_{gs}=V_{in}-V_{th}-[I_{ss}/(2*K_n')]^{1/2}$

$$V_{out}=V_{DD}-I_{SS}*R_{D1,2}/2$$

为了保证MOS管处于饱和区，放大器不失真，还要满足：

$$V_{DS3} \geq V_b - V_{TH3}$$

$$V_{in,cm} \geq V_{GS1} + V_B - V_{TH3}$$

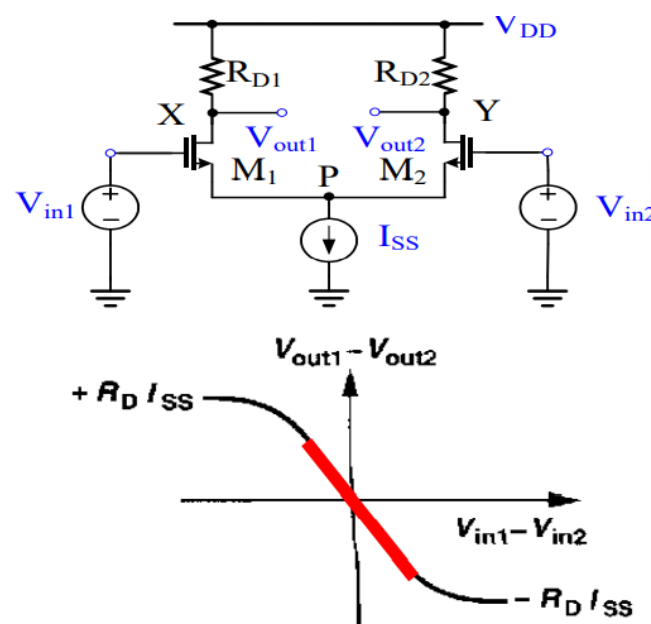
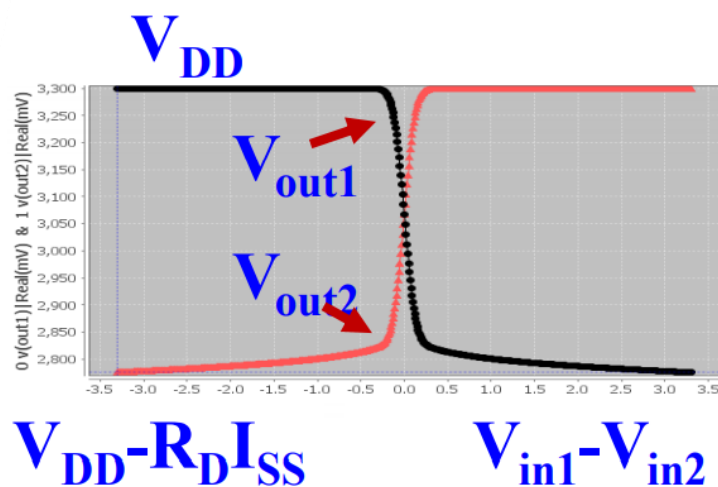
$$V_{in,cm} \leq V_{DD} - I_{SS} * R_D / 2 + V_{TH1}$$

$$V_{in,cm} \leq V_{DD}$$

# 差分放大电路

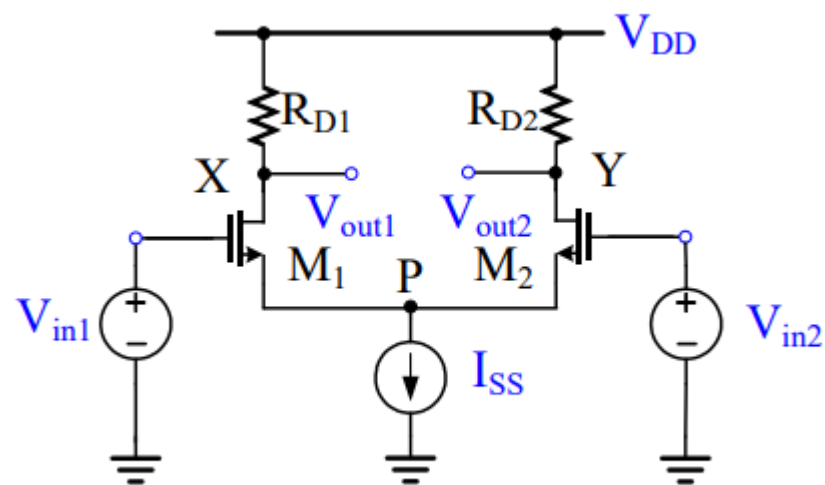
- 差模分析:

当 $V_{in1}-V_{in2}$ 从负值变化到正值，输出电压变化如图

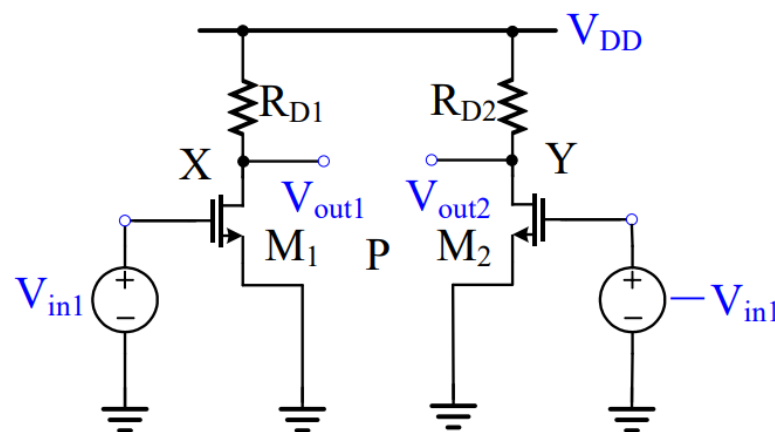


# 差分放大电路

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

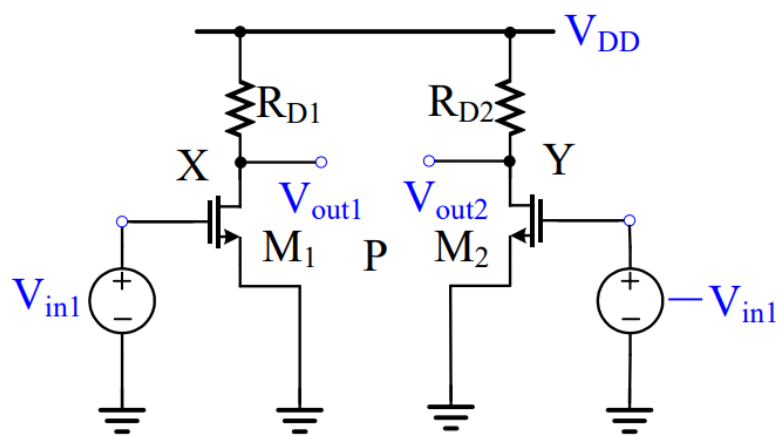


小信号分析中, 我们无需考虑共模电压, 即假设共模电压保持不变,  $P$ 点电压则为固定值, 小信号电路中可视为 $P$ 点接地, 此时该电路可以等效为下图的电路, 此时我们可以单独分析半边电路的工作状况, 称之为半边电路法:

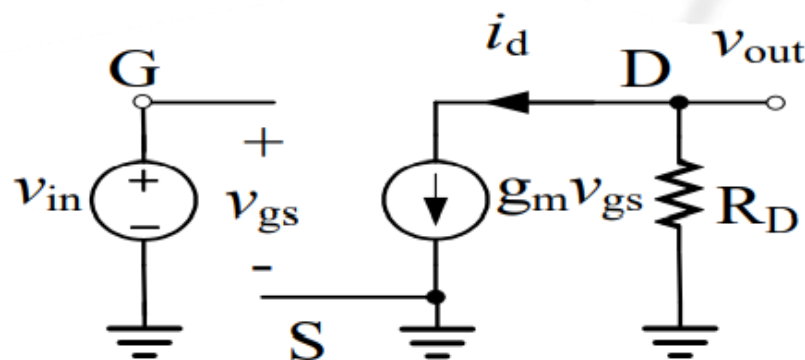


# 差分放大电路

- 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!



$$A_v = -g_m R_D$$