

模拟与数字电路

Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第十七讲：**Differential Amplifier**

Lecture 17: **差分放大电路**

主 讲：陈 迟 晓

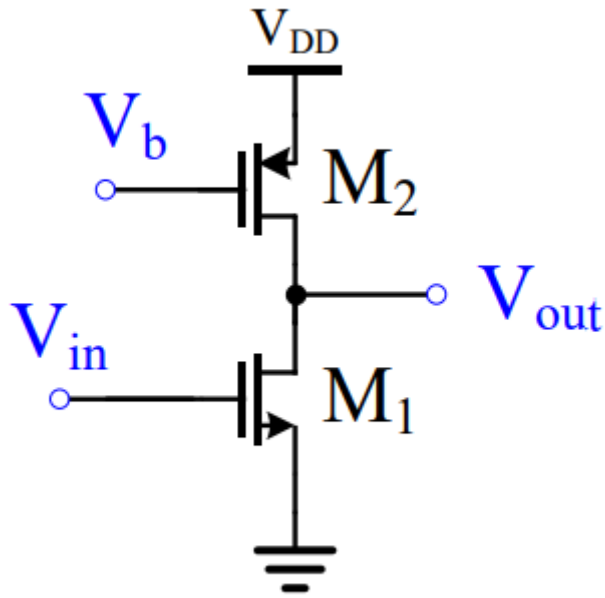
Instructor : Chixiao Chen

复习：单管放大器

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

有源负载

- 电流源负载的共源级放大器：

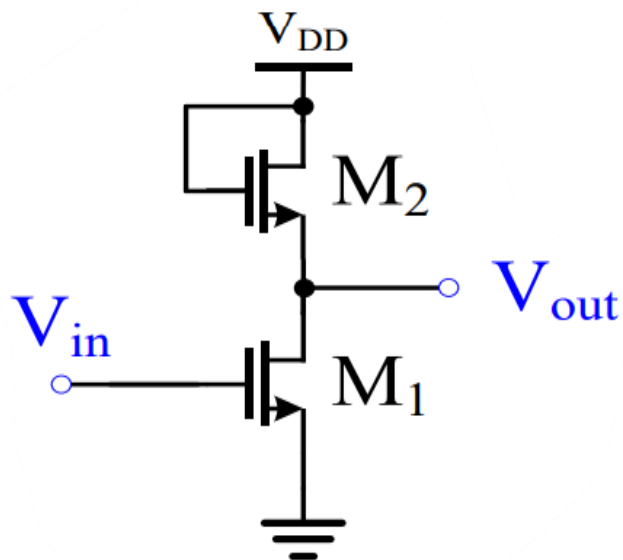


$$A_v = -g_m r_{o1} \parallel r_{o2}$$

由于 $r_{o1} \parallel r_{o2}$ 通常很大，因此可以获得极高的增益

有源负载

- 二极管连接的MOS管负载的共源级放大器：

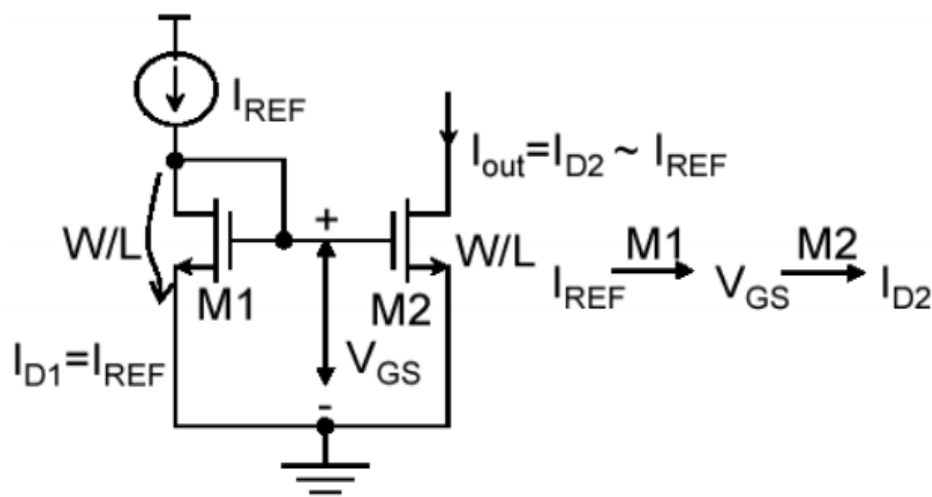


$$A_v = -g_{m1} / g_{m2} = -[(W_1/L_1)/(W_2/L_2)]^{1/2}$$

与通常的共源级放大器不同这是一个与流过MOS管的偏置电流无关的增益

电流镜

- 基础电流镜：



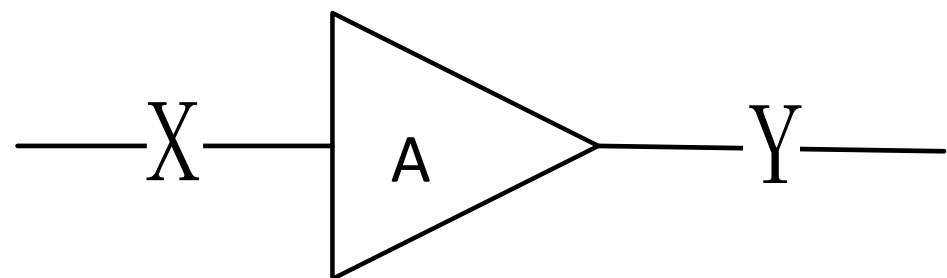
如果 M_1 、 M_2 都处在饱和区并且忽略 r_o ，那么流过M2的电流可以表示为：
$$I_{out} = I_{ref} * (W_2/L_2)/(W_1/L_1)$$

实现了 I_{out} 对 I_{ref} 的“镜像”

差分放大电路

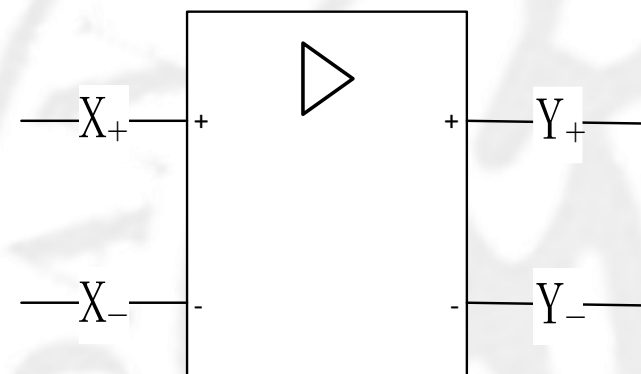
- 什么是“差分” (differential) ？

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：

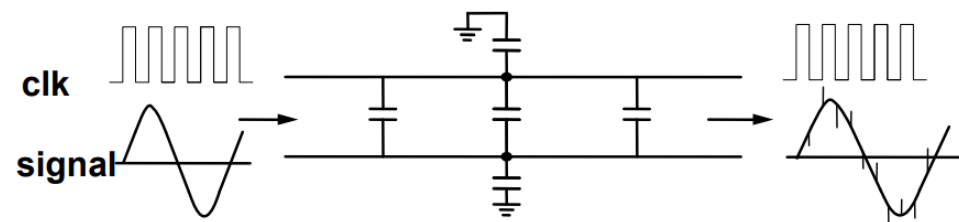


输入与输出现在不是单一的信号，而是两个量的差，输入信号 $X = X_+ - X_-$ ，输出 $Y = Y_+ - Y_-$ ，我们称这样的信号为差分信号 (differential signal)

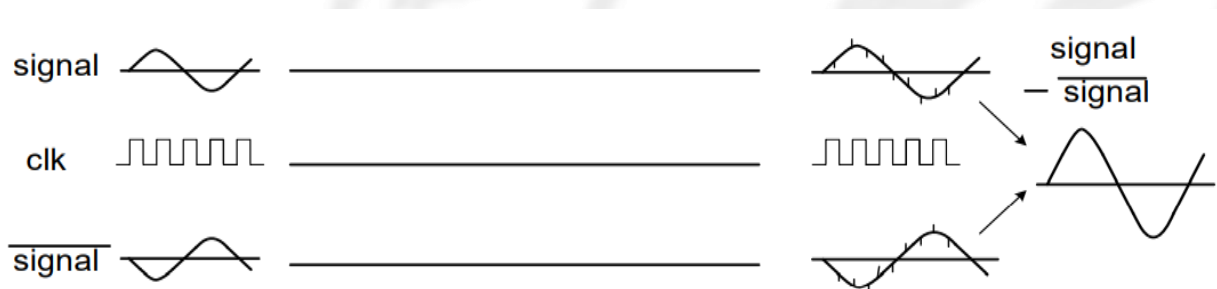
差分放大电路

- 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：



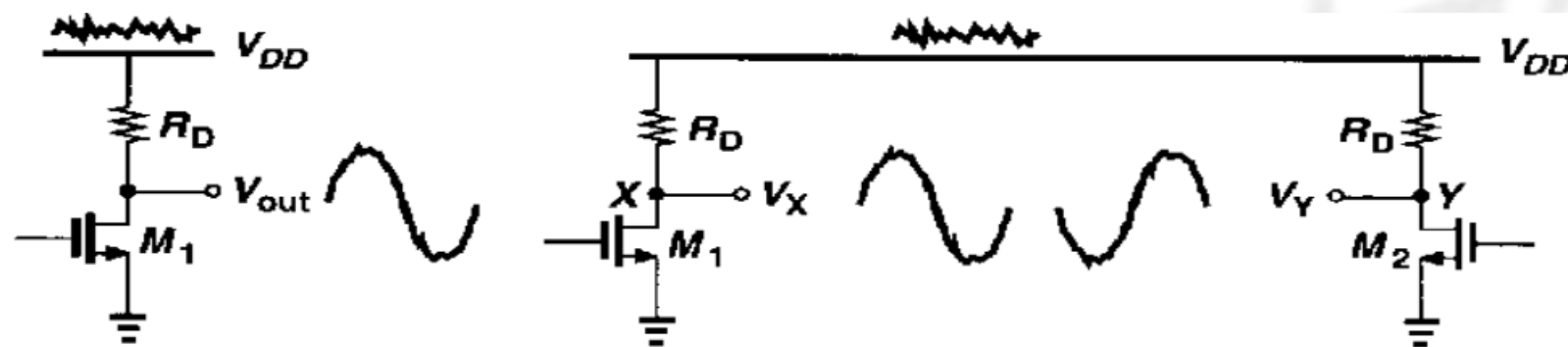
这时候，如果我们将原始信号变成两个信号的差值，就能很好的解决这个问题：



差分放大电路

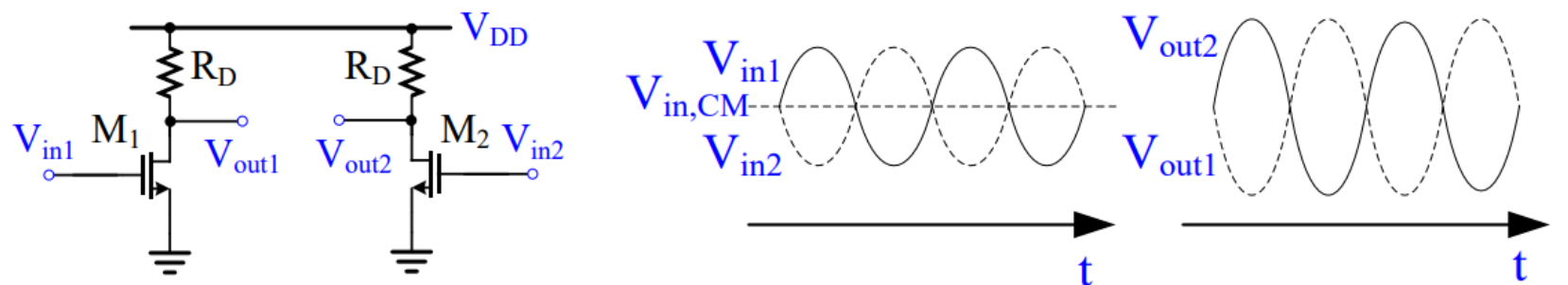
- 为什么需要“差分” (differential) ?

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

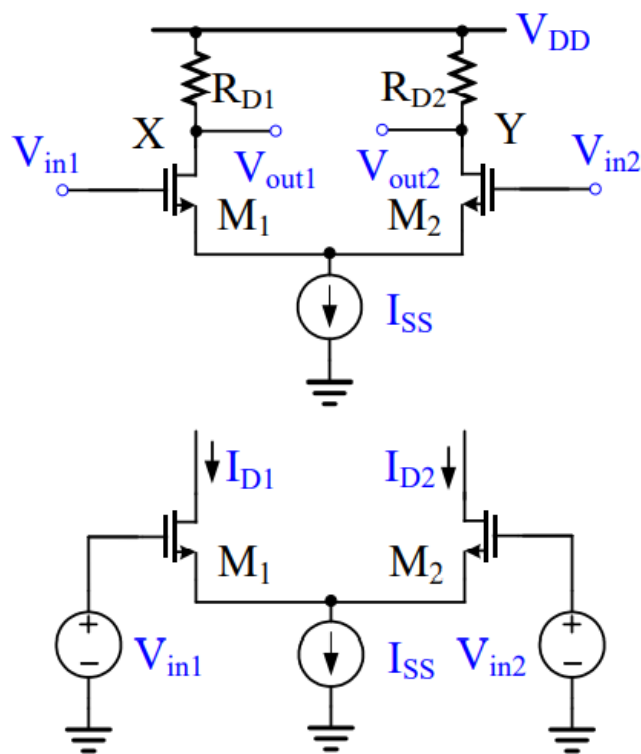
- 如何实现差分信号的放大？考虑下面的电路：



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， $I_{D1} = I_{D2} = I_{SS}/2$

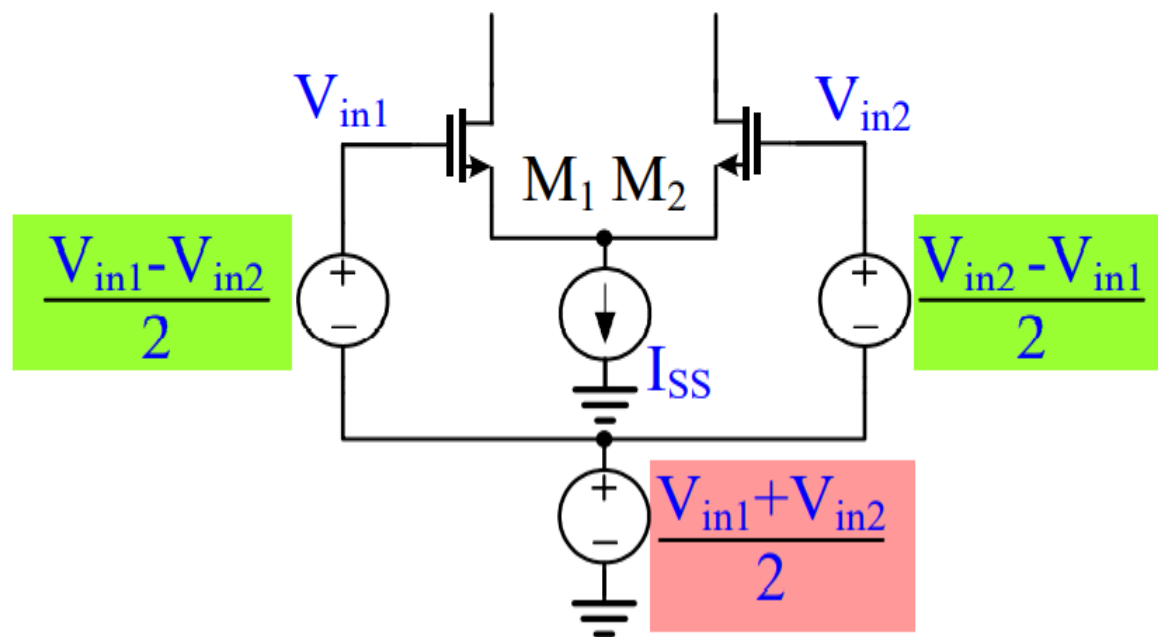
$$V_{S1} = V_{S2} = V_{in} - V_{gs} = V_{in} - V_{th} - [I_{SS}/(2 * K_n')]^{1/2}$$

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

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

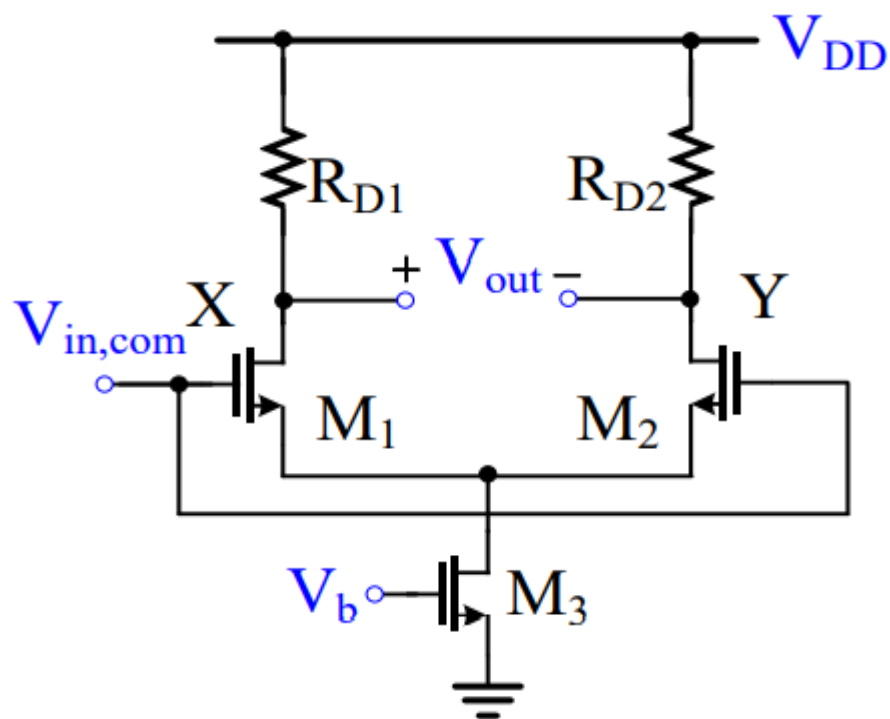
$$V_{ic} = \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$



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：

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

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

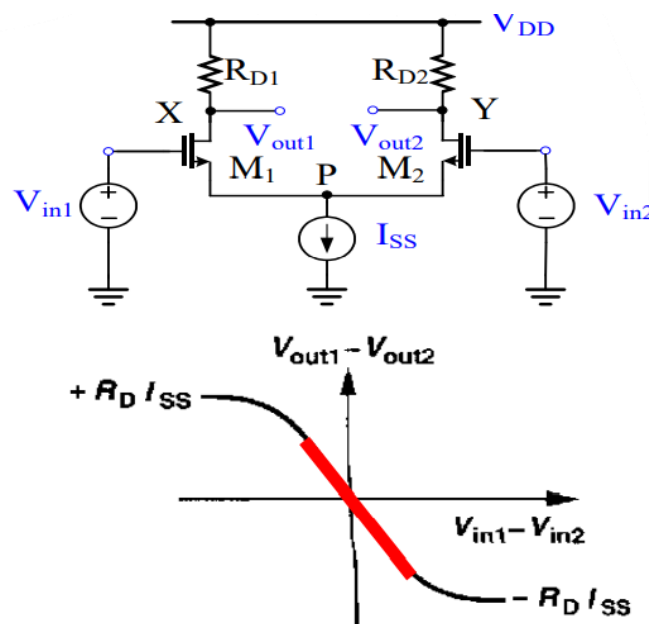
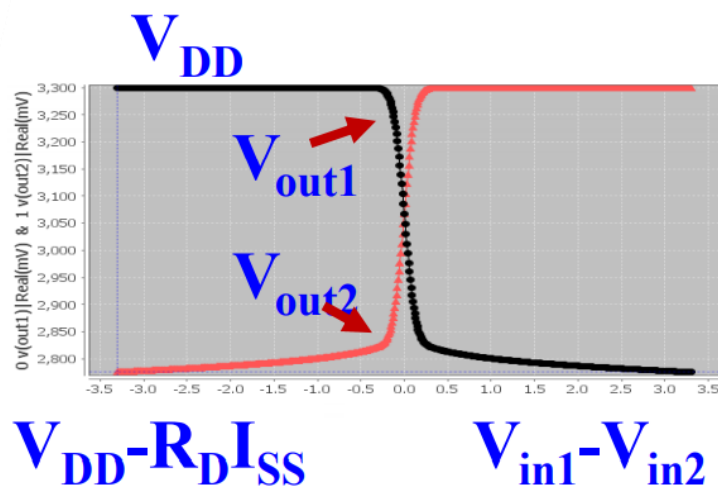
$$V_{in,cm} \leq V_{DD} - I_{SS} * R_D / 2 + V_{TH1}$$

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

差分放大电路

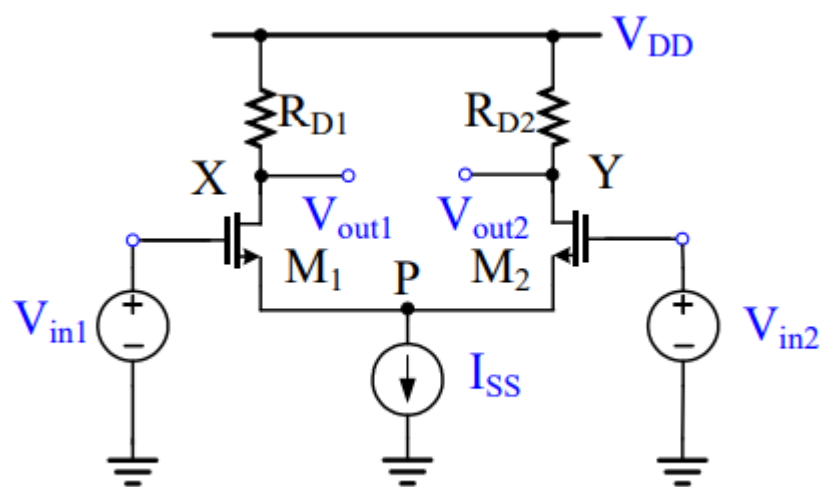
- 差模分析:

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

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



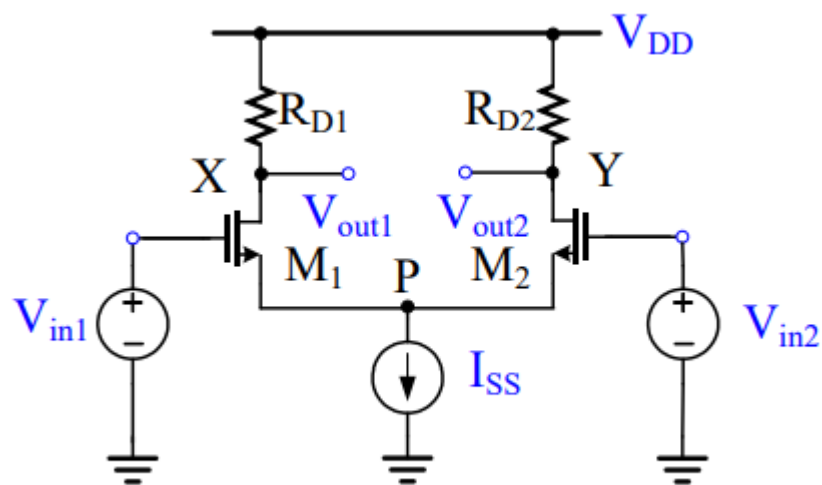
$$V_{in1} - V_{in2} = V_{GS1} - V_{GS2} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} - \sqrt{\frac{2I_{D2}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}}$$

两边平方可得：

$$(V_{in1} - V_{in2})^2 = \frac{2}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} (I_{SS} - 2\sqrt{I_{D1} \cdot I_{D2}})$$

差分放大电路

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



考虑到 $I_{D1} + I_{D2} = I_{SS}$ ，联立得到：

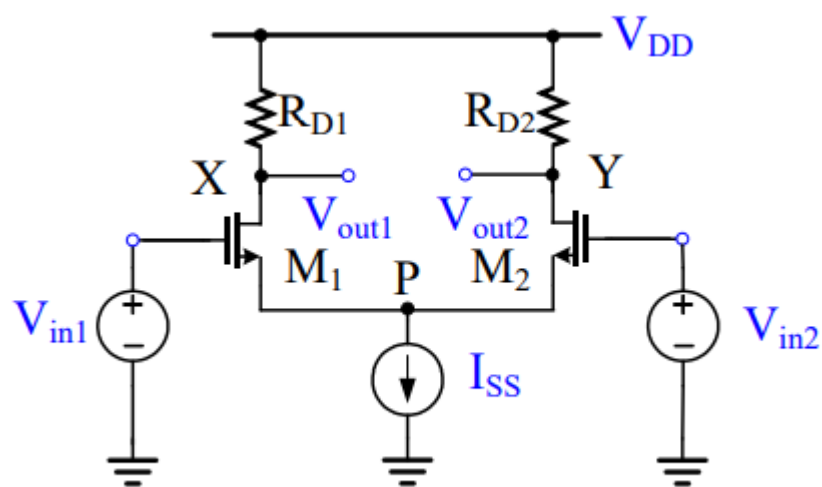
$$I_{D1} - I_{D2} = \frac{1}{2} k (V_{in1} - V_{in2}) \sqrt{\frac{4I_{SS}}{k} - (V_{in1} - V_{in2})^2}$$

$$I_{D1} = \frac{I_{SS}}{2} + \frac{k}{4} (V_{in1} - V_{in2}) \sqrt{\frac{4I_{SS}}{k} - (V_{in1} - V_{in2})^2}$$

$$I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2} - \frac{k}{4} (V_{in1} - V_{in2}) \sqrt{\frac{4I_{SS}}{k} - (V_{in1} - V_{in2})^2}$$

差分放大电路

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

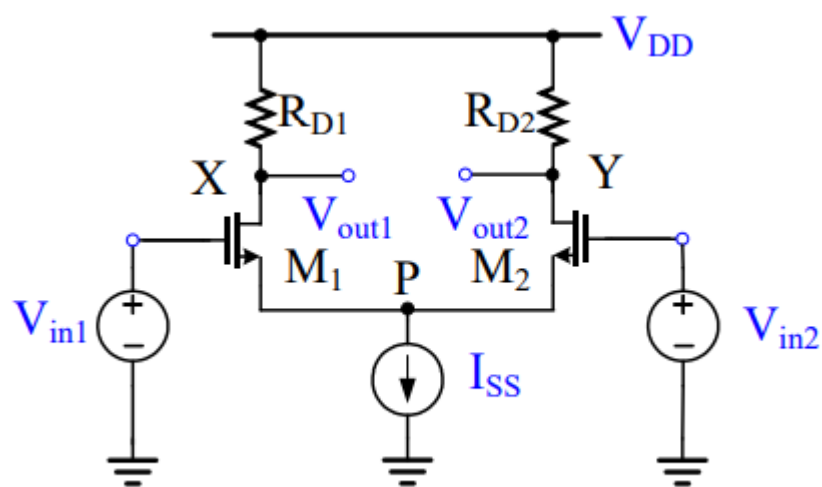


极限情况下，有一侧的电流刚好为0，
比如 $I_{D1} = I_{SS}$ ， $I_{D2} = 0$ ，可以得到电路正
常工作时，差模电压的上限：

$$\Delta V_{in1} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}}$$

差分放大电路

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



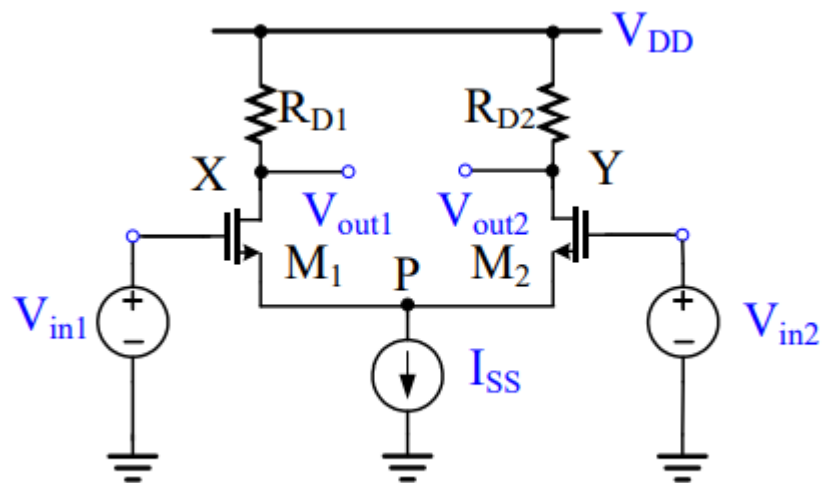
$I_{D1} - I_{D2} = \Delta I_D$, $V_{in1} - V_{in2} = \Delta V_{in}$, 此时跨导放大倍数和差模电压放大倍数为：

$$G_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{in}} = \frac{1}{2} k \frac{\frac{4I_{SS}}{k} - 2\Delta V_{in}^2}{\sqrt{\frac{4I_{SS}}{k} - \Delta V_{in}^2}}$$

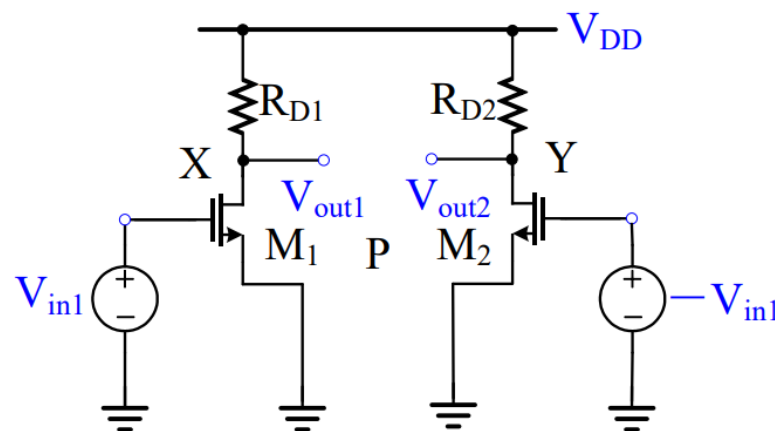
$$|A_V| = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = G_m \cdot R_D$$

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) :

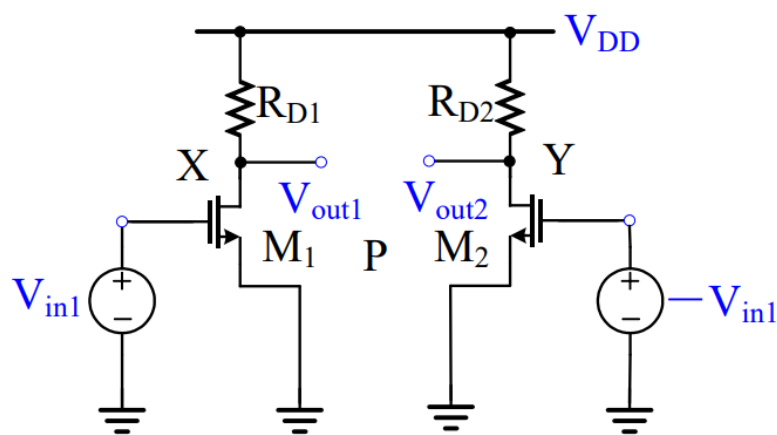


小信号分析中, 我们无需考虑共模电压, 即假设共模电压保持不变, P 点电压则为固定值, 小信号电路中可视为 P 点接地, 此时该电路可以等效为下图的电路, 此时我们可以单独分析半边电路的工作状况, 称之为半边电路法:

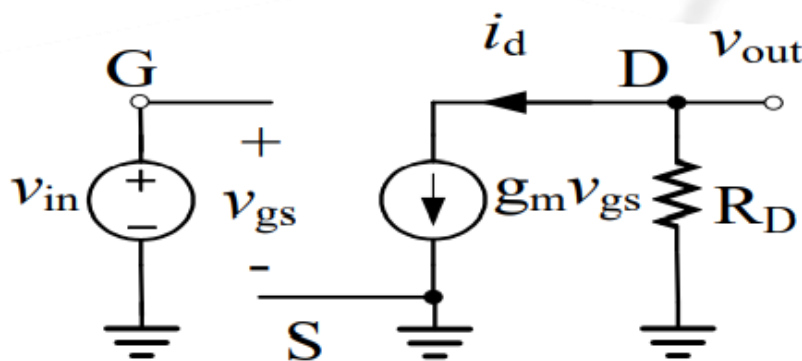


差分放大电路

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



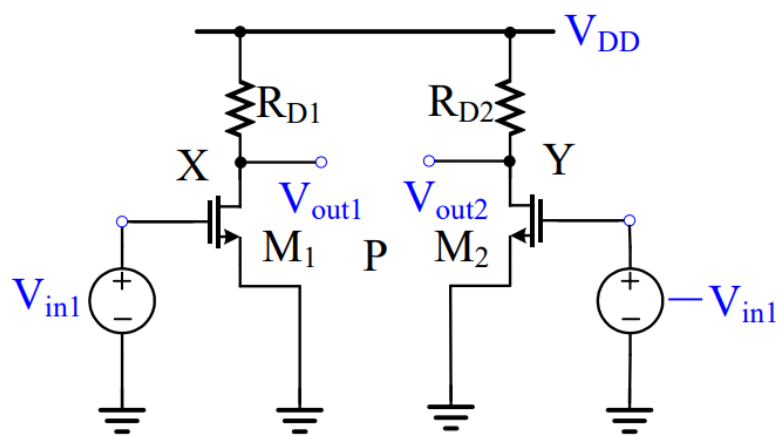
此时半边电路的小信号分析与单极共源级放大器一致!



$$A_v = -g_m R_D$$

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）：



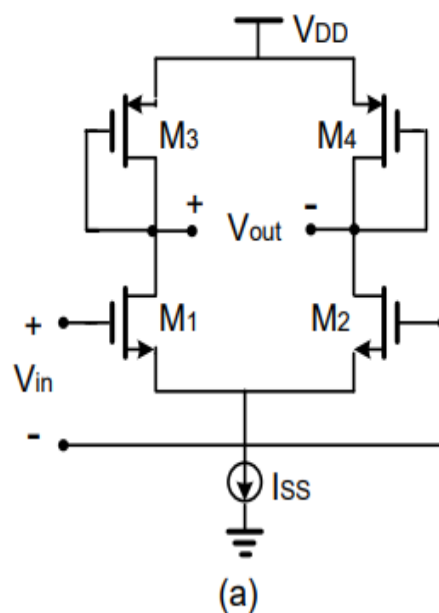
$$V_{out} = V_{out1} - V_{out2} = A_v * V_{in1} - A_v * V_{in2} = A_v * V_{in}$$

也就是说差分电路的放大倍数与单边的放大倍数一致

差分放大电路

- 单极放大器可以使用有源负载，如果用在差分对上会如何？

二极管负载的差分对：

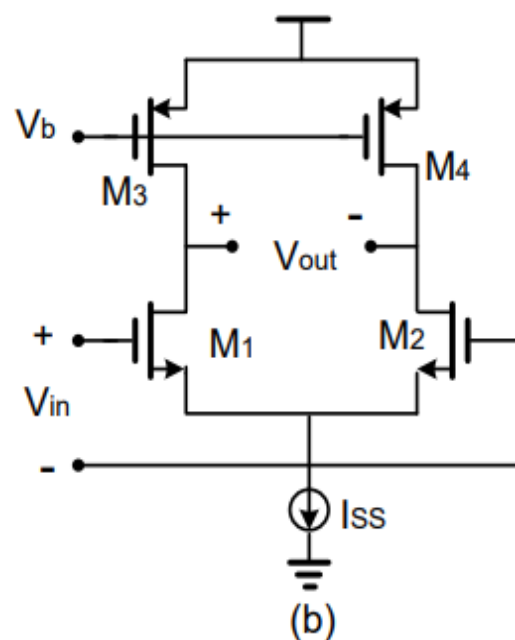


$$A_v = -\frac{g_{mn}}{g_{mp}} = \frac{\sqrt{\mu_n (W/L)_n}}{\sqrt{\mu_p (W/L)_p}}$$

差分放大电路

- 单极放大器可以使用有源负载，如果用在差分对上会如何？

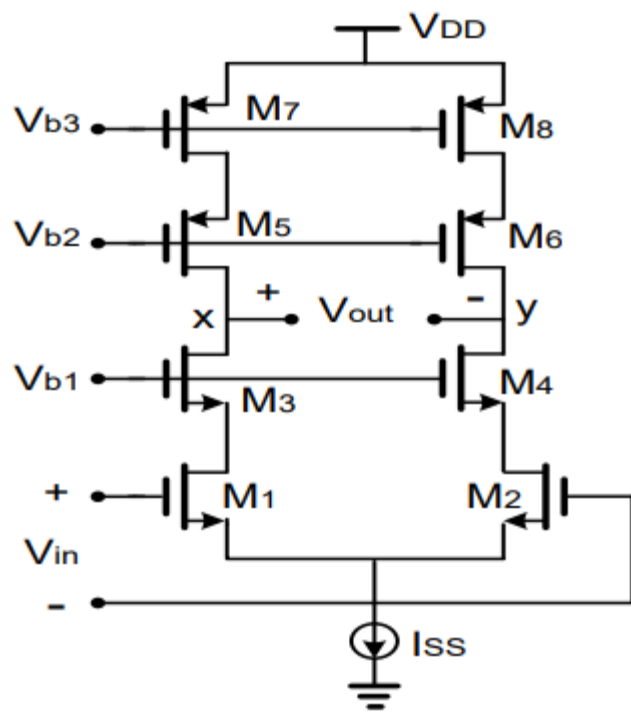
电流源负载的差分对：



$$A_V = -g_m (r_{on} // r_{op})$$

差分放大电路

- 如果需要提高增益，我们也可以在差分对上采用Cascode的结构：



$$A_V = -g_{m1} [g_{m3} r_{o1} r_{o3} // g_{m5} r_{o5} r_{o7}]$$