# 模拟集成电路设计课程

## 第4章 差动放大器

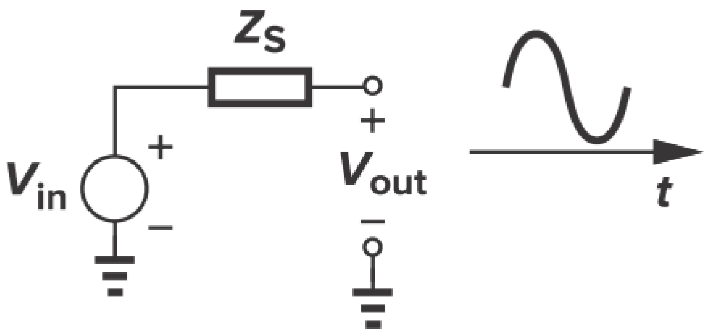
程 林，潘东方

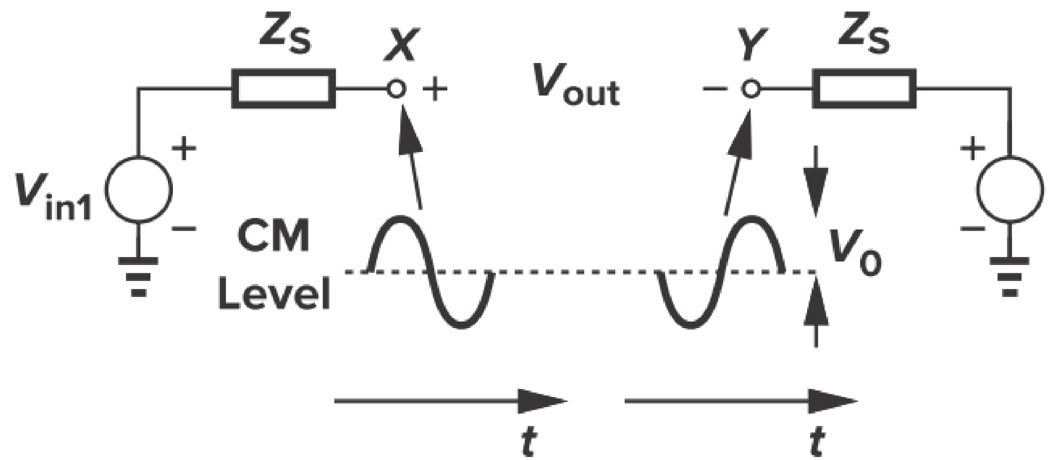
eecheng@ustc.edu.cn

# 本章内容

- 4.1 单端和差动的工作方式
- 4.2 基本差动对
- 4.3 共模响应
- 4.4 MOS为负载的差动对
- 4.5 吉尔伯特单元

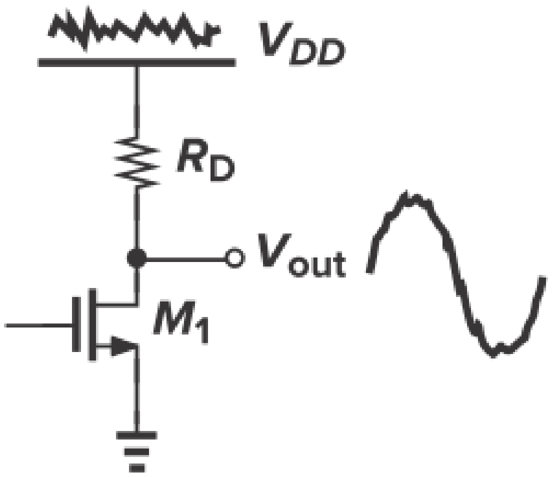
# 4. 1 单端和差动的工作方式

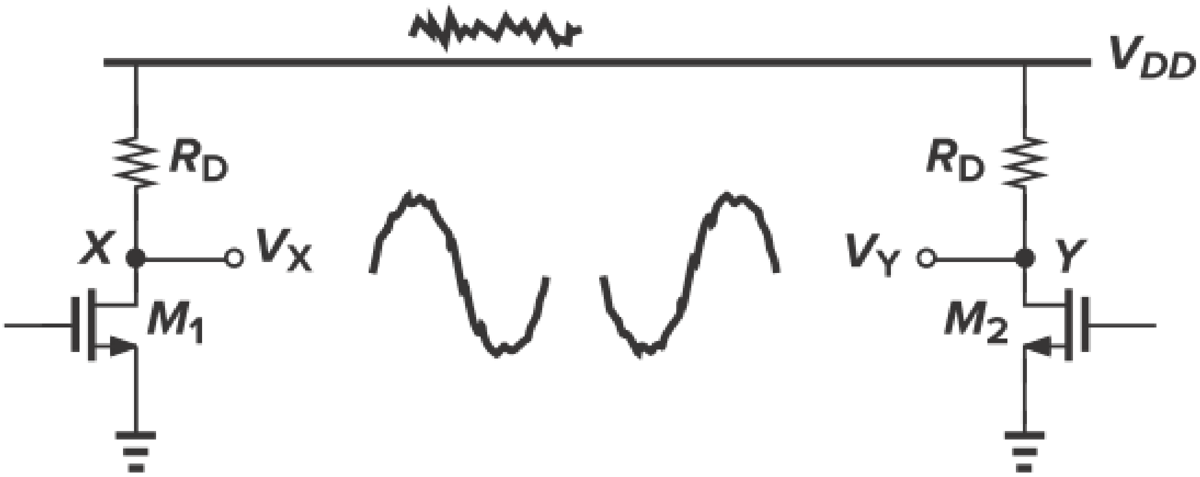



- 单端信号：参考地位为一固定定位，通常为地。
- 差动信号：两个节点电位之差
  - 直流电位相对于某一固定电位大小相等
  - 交变小信号相位相反
  - 与固定电位节点的小信号阻抗相等
  - 中心电位称为“共模”（common mode，CM）电平，可以理解为偏置电压
- 信号摆幅：单端信号（$2V_0$）*vs.* 差动信号（$4V_0$）

# 差动工作的优点

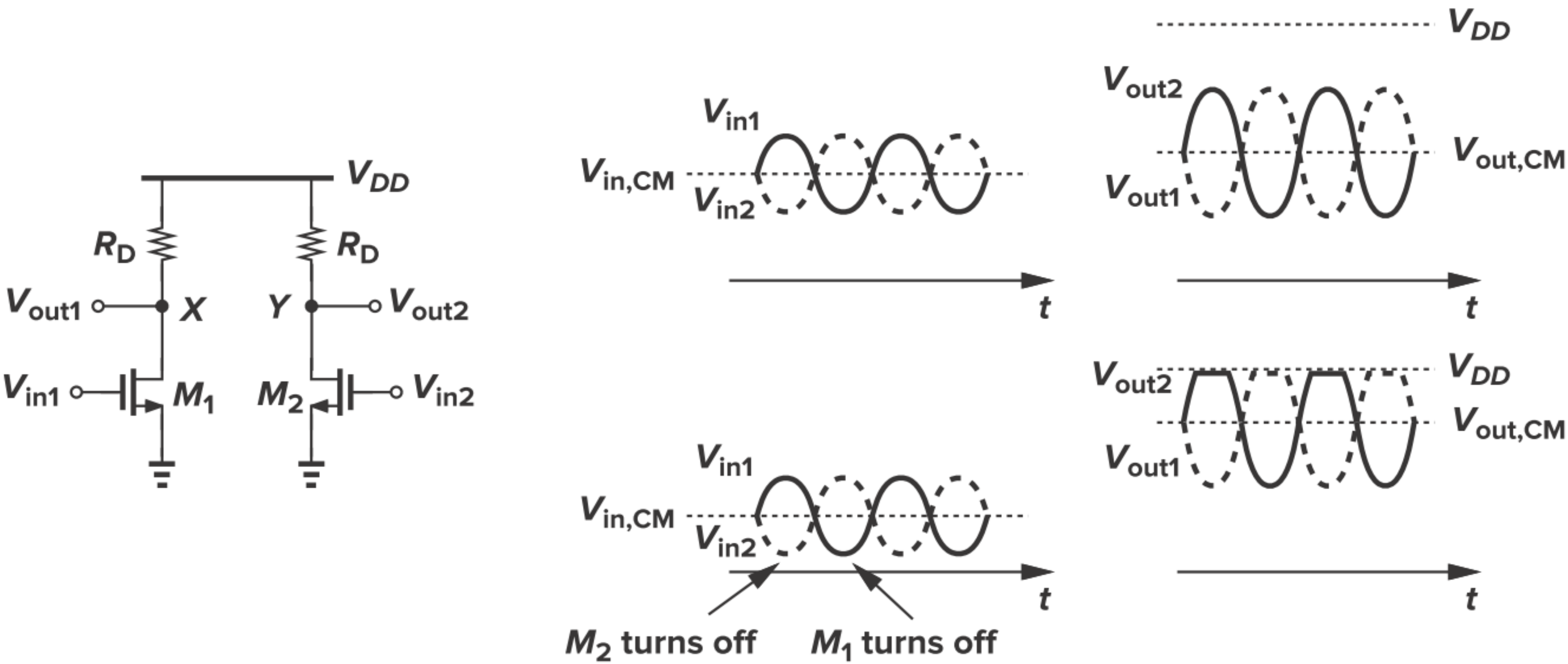



$V_X$-$V_Y$不受影响

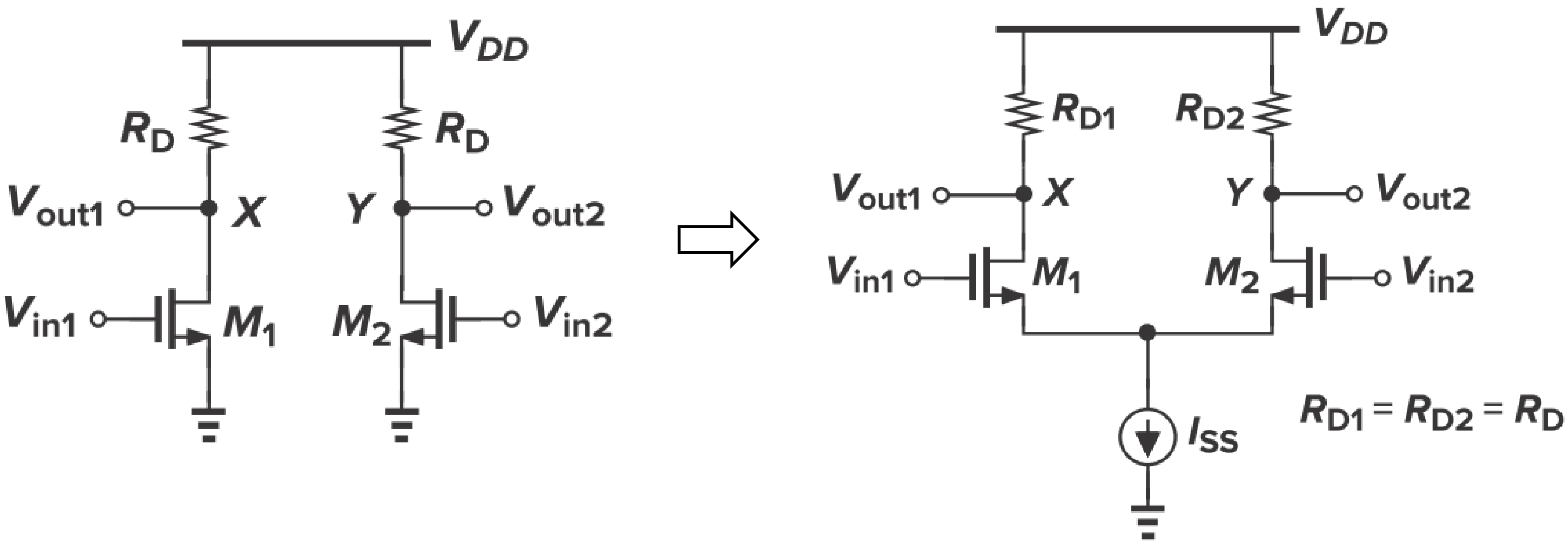
- 抑制共模噪声
- 增大输出摆幅
- 面积和功耗是单端电路的两倍

# 4.2 基本差动对




- 偏置电流随着输入共模电平$V_{in,CM}$变化，导致跨导和输出共模电平$V_{out,CM}$的变化
- 若$V_{in,CM}$很低，会导致$M_1$和$M_2$截止，输出出现失真
- 应使偏置电流受输入共模电平的影响尽可能小

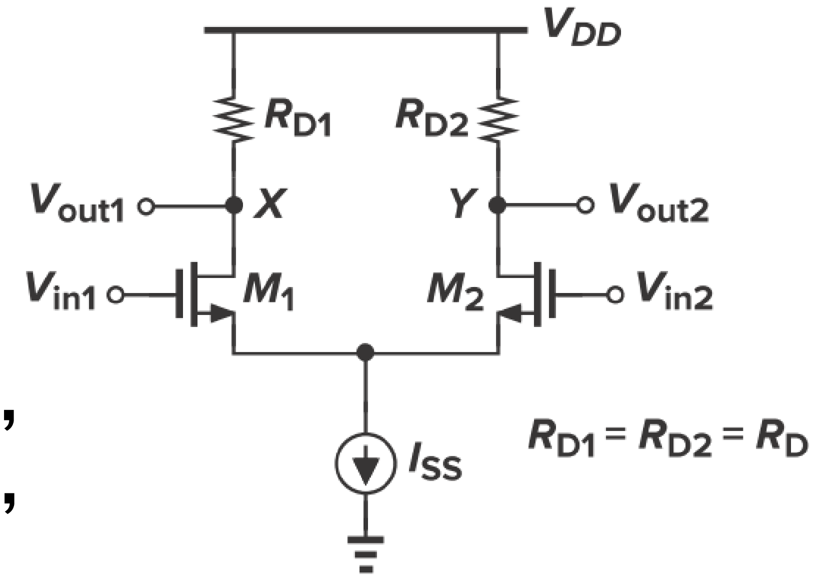
# 基本差动对




- 引入尾电流源，使得$I_{D1}+I_{D2}=I_{SS}$, 不依赖于$V_{in,CM}$
- 当$V_{in1}=V_{in2}$时, $I_{D1}$和$I_{D2}$都是$I_{SS}/2$, $V_{out,CM}$为$V_{DD}-R_DI_{SS}/2$

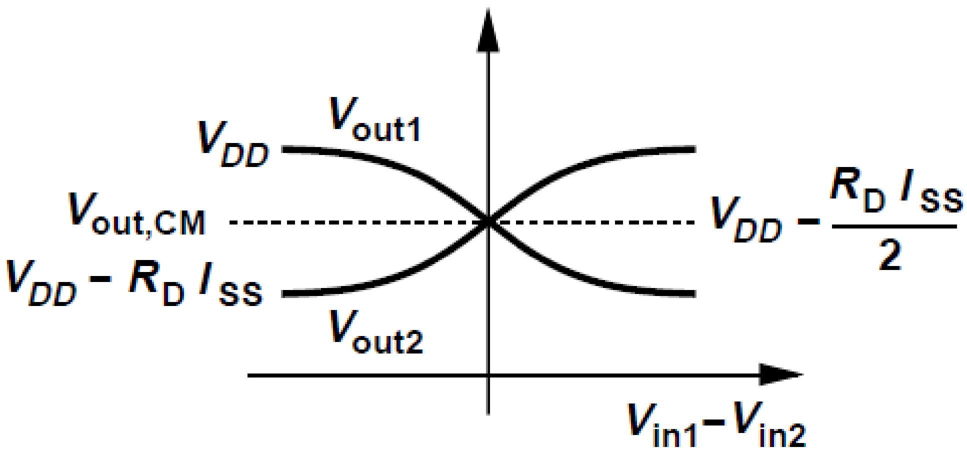
# 大信号特性：定性分析

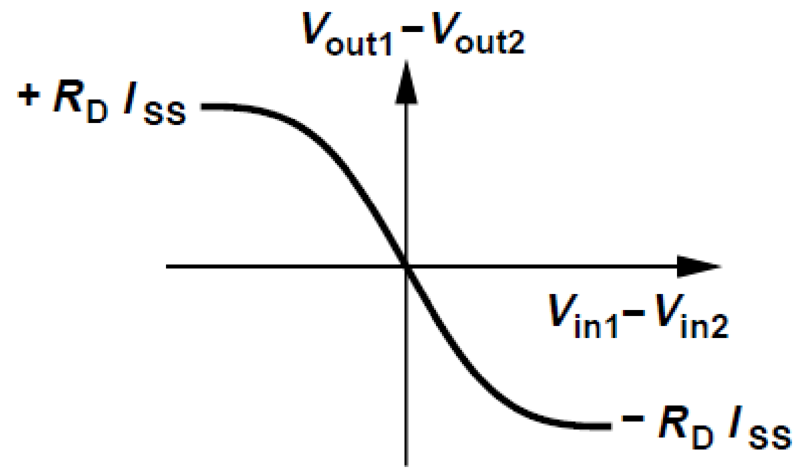
- 当$V_{in1}$比$V_{in2}$低很多, $M_1$截止, $M_2$导通， $I_{D2}=I_{SS}$, $V_{out1}=V_{DD}$, $V_{out2}=V_{DD}-R_DI_{SS}$
- 当$V_{in1}$接近$V_{in2}$时， $M_1$逐渐导通，从$I_{ss}$抽取一部分电流， $I_{D2}$ 减小，$V_{out1}$降低， $V_{out2}$增大




- 当$V_{in1}=V_{in2}$时， $V_{out1}=V_{out2}=V_{DD}-R_DI_{SS}/2$, 为输出共模电平
- 当$V_{in1}$比$V_{in2}$大后， $I_{D1}$高于 $I_{D2}$， $V_{out1}$变的比$V_{out2}$低
- 当$V_{in1}$比$V_{in2}$高很多时， $I_{D1}=I_{SS}$， $M_2$截止， $V_{out1}=V_{DD}-R_DI_{SS}$ and $V_{out2}=V_{DD}$

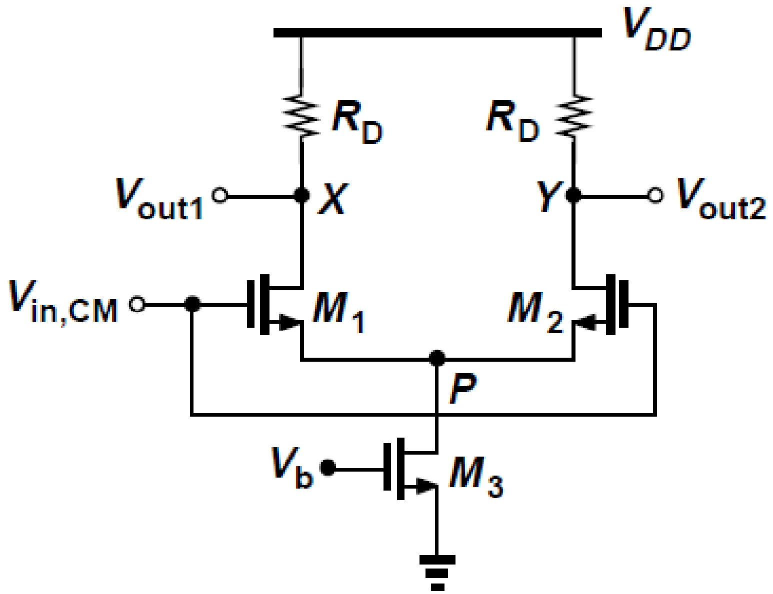
# 大信号特性：定性分析

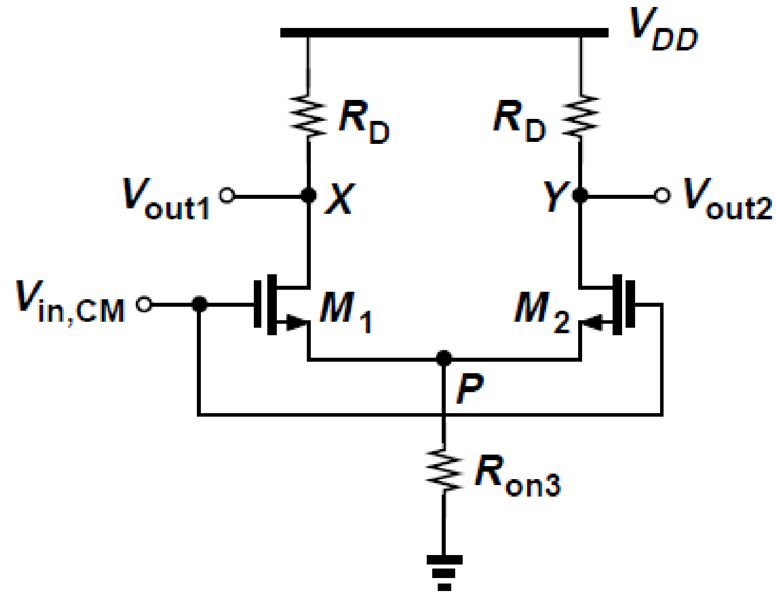



- 电路包含了三个差动对: $V_{in1}–V_{in2}$, $V_{out1}–V_{out2}$ 和$I_{D1}–I_{D2}$
- 输出端的最大和最小电平是完全确定的，与输入共模电平无关
- 小信号增益在$V_{in1}=V_{in2}$时最大，并且随着$|V_{in1}–V_{in2}|$ 的增大而逐渐减小到0
- 随着输入电压摆幅的增大，电流变得更加非线性
- 当$V_{in1}=V_{in2}$时，我们称电路处于“平衡状态”

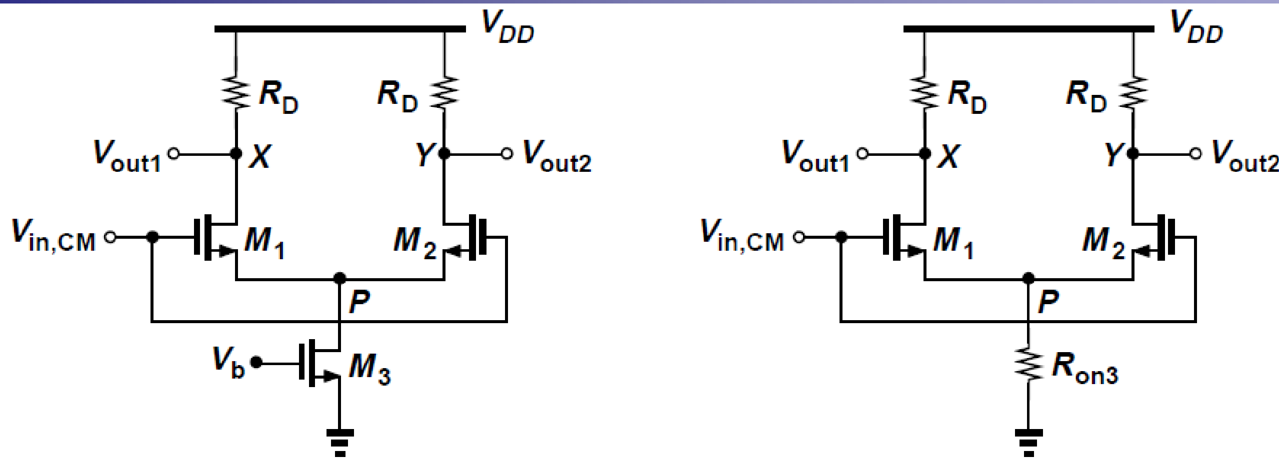
# 共模特性



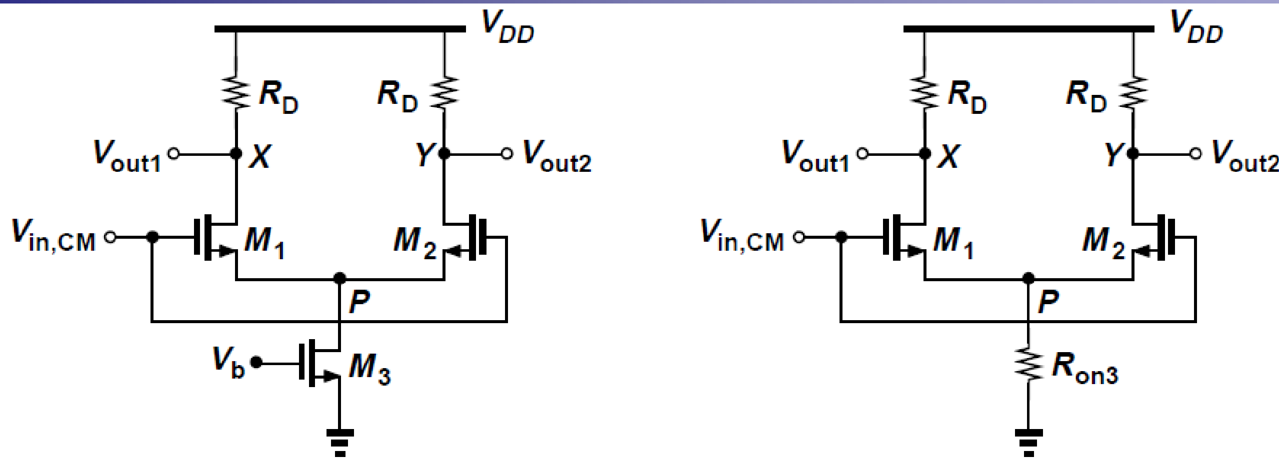

- 尾电流源的作用：抑制输入共模电平的变化对输入对管偏置电流和输出共模电平的影响
- 令$V_{in1}=V_{in2}=V_{in,CM}$，使$V_{in,CM}$从0变化到$V_{DD}$
- 由于电路左右是对称的，$V_{out1} = V_{out2}$
- 当$V_{in,CM}=0$, $M_1$和$M_2$截止, $I_{D3}=0$，$M_3$ 工作在深线性区
- $I_{D1}=I_{D2}=0$, 电路无法放大信号。$V_{out1}=V_{out2}=V_{DD}$, $V_P = 0$

# 共模特性




- 当$V_{in,CM}$≥$V_{TH}$时，$M_1$和$M_2$导通。随着$V_{in,CM}$增大，$I_{D1}$和$I_{D2}$也随着增加，$V_P$上升
- $M_1$和$M_2$构成一个源级跟随器，强制$V_P$跟随$V_{in,CM}$
- 当$V_{in,CM}$足够高时，$V_{DS3}$超过$V_{GS3}-V_{TH3}$，$M_3$工作在饱和区，因此$I_{D1}+I_{D2}$保持不变
- 电路正常工作应使$V_{in,CM} \geq V_{GS1}+(V_{GS3}-V_{TH3})$

# 共模特性

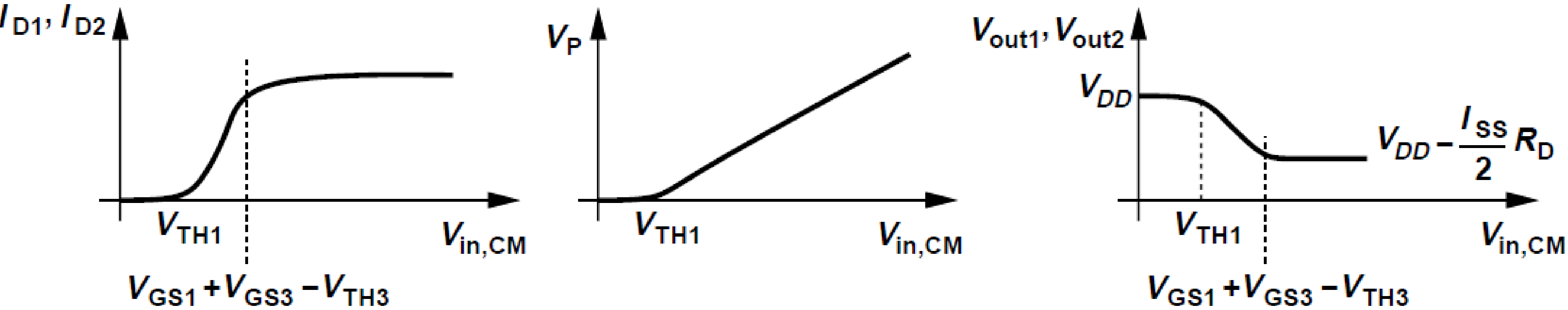



- 当$V_{in,CM}$进一步增大, $V_{out1}$和$V_{out2}$保持不变
- 当 $V_{in,CM} > V_{out1} + V_{TH} = V_{DD} - R_D I_{SS}/2 + V_{TH}$时，$M_1$和$M_2$ 进入三极管区
- 因此$V_{in,CM}$的范围如下:

$$V_{GS1} + (V_{GS3} - V_{TH3}) \le V_{in,CM} \le \min\left[V_{DD} - R_D \frac{I_{SS}}{2} + V_{TH},\ V_{DD}\right]$$

- 超过上限后，共模特性不会变化，但是差分增益会下降

# 共模特性

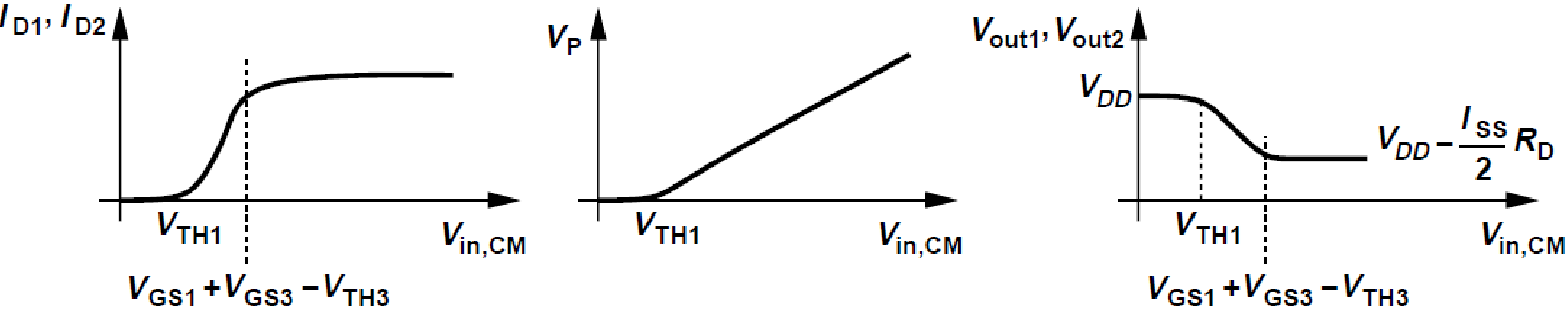



- 当$V_{in,CM}$进一步增大, $V_{out1}$和$V_{out2}$保持不变
- 当 $V_{in,CM} > V_{out1} + V_{TH} = V_{DD} - R_D I_{SS}/2 + V_{TH}$时，$M_1$和$M_2$ 进入三极管区
- 因此$V_{in,CM}$的范围如下:

$$V_{GS1} + (V_{GS3} - V_{TH3}) \le V_{in,CM} \le \min\left[V_{DD} - R_D\frac{I_{SS}}{2} + V_{TH},\ V_{DD}\right]$$

- 超过上限后，共模特性不会变化，但是差分增益会下降

# 共模特性

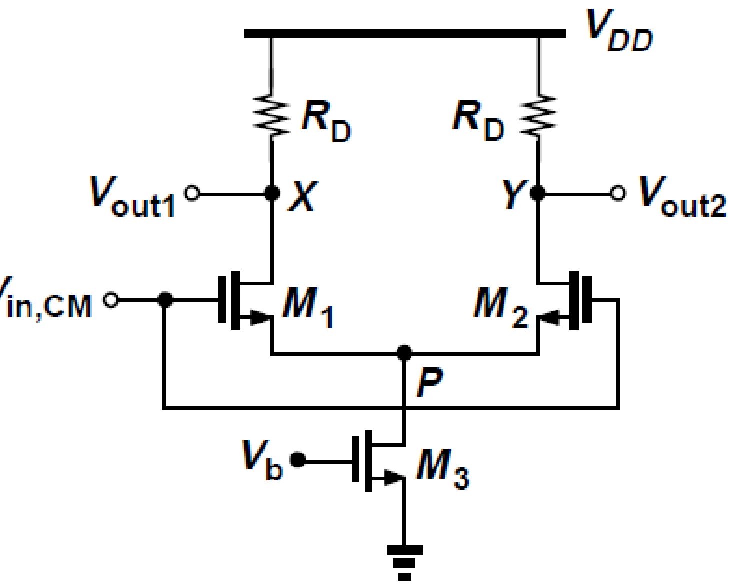


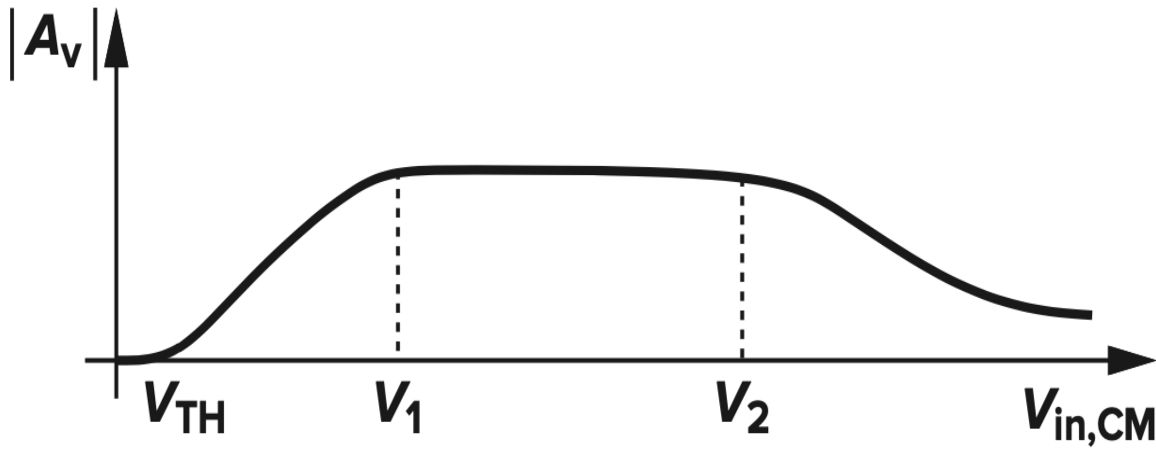

- 当$V_{in,CM}$进一步增大, $V_{out1}$和$V_{out2}$保持不变
- 当 $V_{in,CM} > V_{out1} + V_{TH} = V_{DD} - R_D I_{SS}/2 + V_{TH}$时，$M_1$和$M_2$ 进入三极管区
- 因此$V_{in,CM}$的范围如下:

$$V_{GS1}+(V_{GS3}-V_{TH3}) \le V_{in,CM} \le \min\left[V_{DD}-R_D\frac{I_{SS}}{2}+V_{TH},\ V_{DD}\right]$$

- 超过上限后，共模特性不会变化，但是差分增益会下降

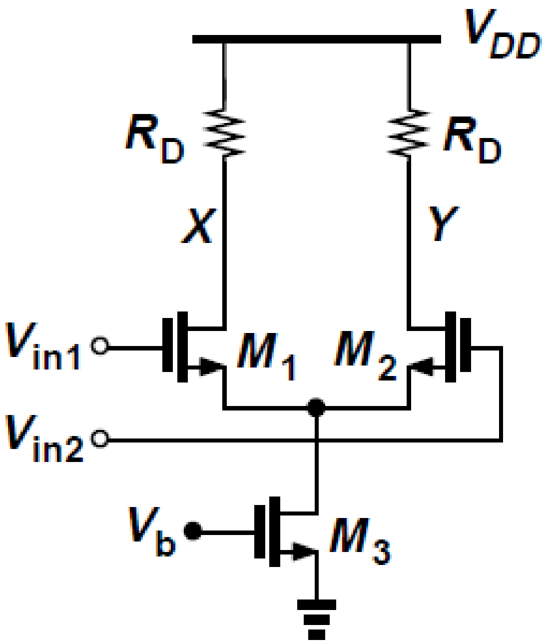
# 例4.2 基本差动对增益与$V_{in,CM}$关系

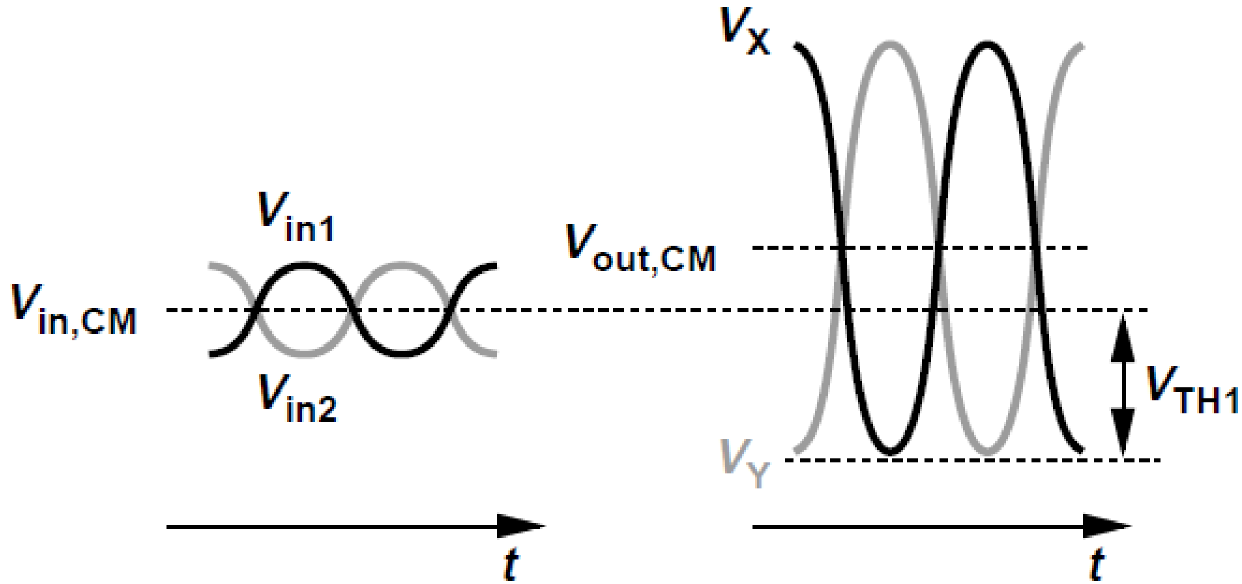



- 当$V_{in,CM}$大于$V_{TH}$后，增益逐渐增大
- 当尾电流源进入饱和区后，增益保持不变
- 当$V_{in,CM}$达到使晶体管进入线性区后，增益开始下降

# 基本差动对输出摆幅

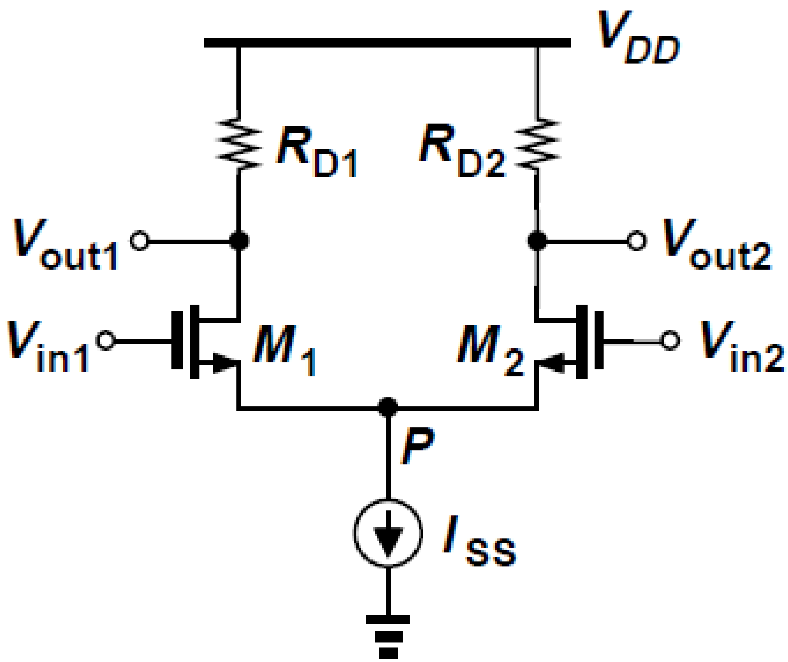



$$V_{DD} > V_{out} > V_{in,CM} - V_{TH1}$$

$$V_{DD} > V_{out} > (V_{GS1} - V_{TH1}) + (V_{GS3} - V_{TH3})$$

# 基本差动对：定量分析




$$R_{D1}=R_{D2}=R_D$$

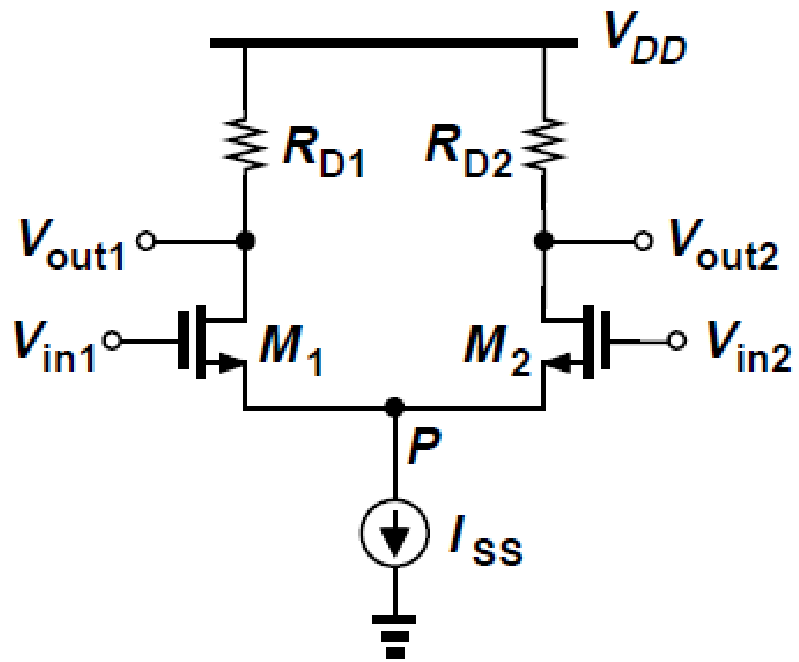
- 目标：确定$V_{out1}-V_{out2}$与$V_{in1}-V_{in2}$的关系

$$V_{out1}-V_{out2}=R_{D2}I_{D2}-R_{D1}I_{D1}=R_D(I_{D2}-I_{D1})$$

由于 $V_P=V_{in1}-V_{GS1}=V_{in2}-V_{GS2}$

$$\Rightarrow \quad V_{in1}-V_{in2}=V_{GS1}-V_{GS2}$$

# 基本差动对：定量分析




$$V_{in1} - V_{in2} = V_{GS1} - V_{GS2}$$

$$(V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{I_D}{\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}$$

$$\Rightarrow \quad V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}} + V_{TH}$$

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

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

$$(\ I_{D1} + I_{D2} = I_{SS}\ )$$

# 基本差动对：定量分析

$$\Rightarrow \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}(V_{in1}-V_{in2})^2 - I_{SS} = -2\sqrt{I_{D1}I_{D2}}$$

因为 $4I_{D1}I_{D2} = (I_{D1}+I_{D2})^2-(I_{D1}-I_{D2})^2 = I_{SS}^2-(I_{D1}-I_{D2})^2$

$$(I_{D1}-I_{D2})^2 = -\frac{1}{4}\left(\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}\right)^2(V_{in1}-V_{in2})^4 + I_{SS}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}(V_{in1}-V_{in2})^2$$

$$I_{D1}-I_{D2} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}(V_{in1}-V_{in2})\sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}-(V_{in1}-V_{in2})^2}$$

$$= \sqrt{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}(V_{in1}-V_{in2})\sqrt{1-\frac{\mu_n C_{ox}(W/L)}{4I_{SS}}(V_{in1}-V_{in2})^2}$$

- 当$V_{in1} = V_{in2}$时，$I_{D1} - I_{D2} = 0$；
- 当$|V_{in1} - V_{in2}|$ 从0逐渐增大时，$|I_{D1} - I_{D2}|$也逐渐增大

# 基本差动对：定量分析

$$\frac{\partial \Delta I_D}{\partial \Delta V_{in}} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}\frac{\dfrac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox}W/L} - 2\Delta V_{in}^2}{\sqrt{\dfrac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox}W/L} - \Delta V_{in}^2}}$$

- 当 $\Delta V_{in} = 0$，电路的等效跨导$G_m$最大：

$$G_{m,max} = \sqrt{\mu_n C_{ox}(W/L)I_{SS}} = g_m$$

$$|A_v| = \sqrt{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}R_D = g_m R_D$$

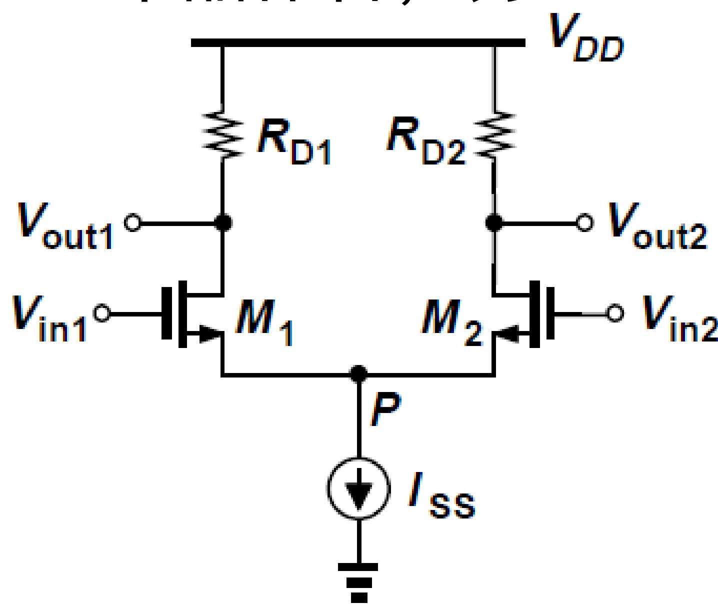
- 当$\Delta V_{in} = \sqrt{2I_{SS}/(\mu_n C_{ox}W/L)}$，$G_m$=0

$$I_{D1} - I_{D2} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}(V_{in1} - V_{in2})\sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}} - (V_{in1} - V_{in2})^2}$$

- 当$\Delta V_{in} = \sqrt{4I_{SS}/(\mu_n C_{ox}W/L)}$，$\Delta I_D$ =0 ?

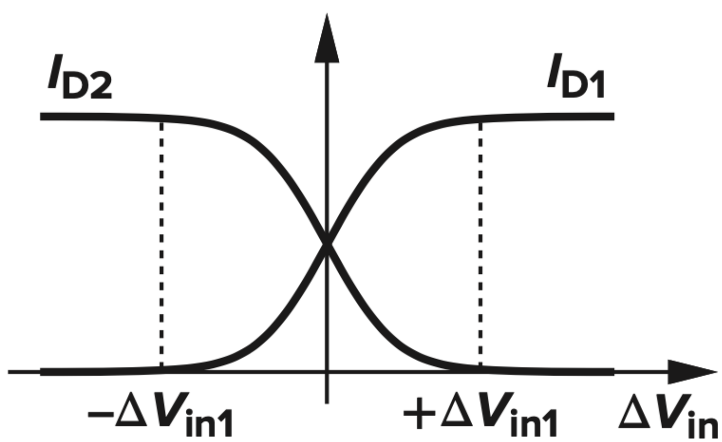
# 基本差动对：定量分析

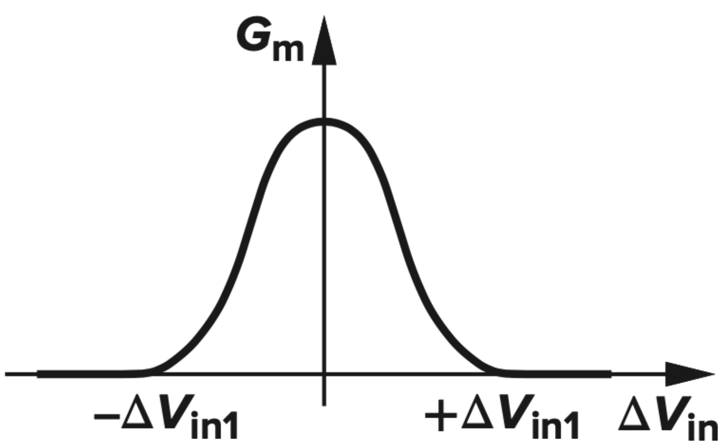
- 最大差模输入电压：所有的$I_{SS}$流经一个晶体管，另一个晶体管截止



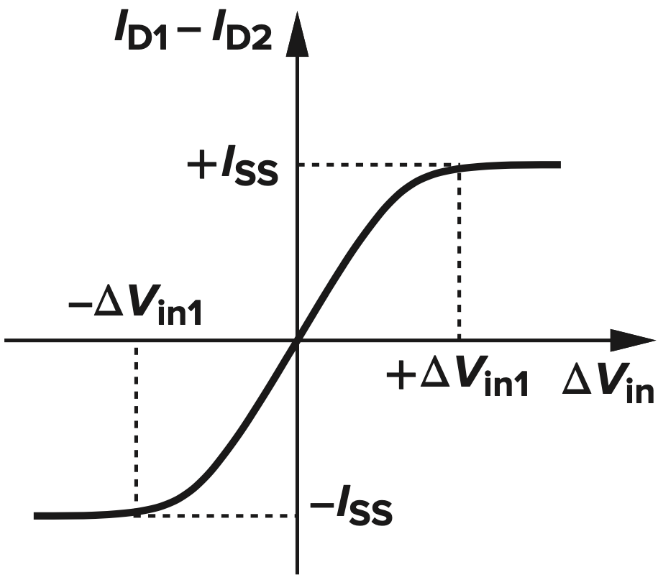

$$\Delta V_{in1}=\sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}}$$

为平衡态过驱动电压的$\sqrt{2}$倍

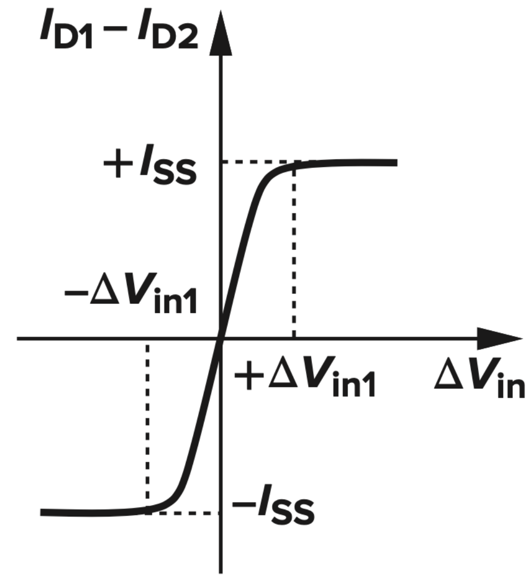


# W/L和$I_{SS}$对差动对的影响

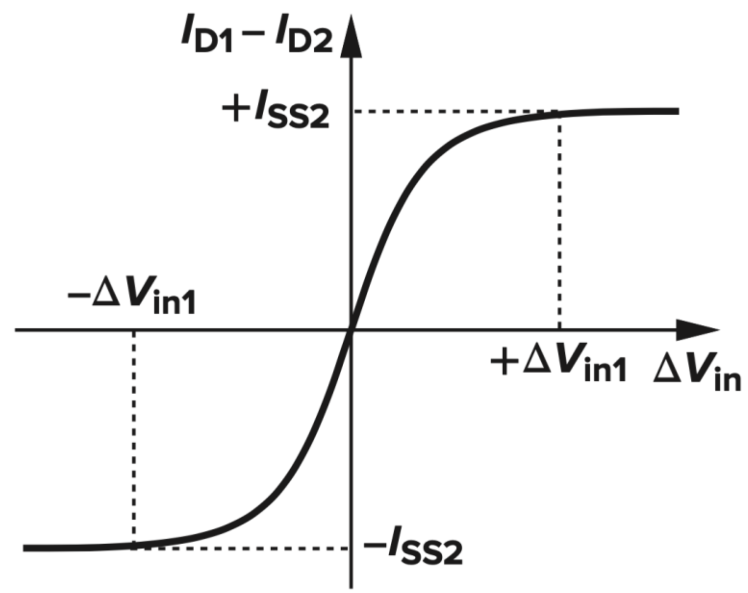



**增大W/L** ⇨




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

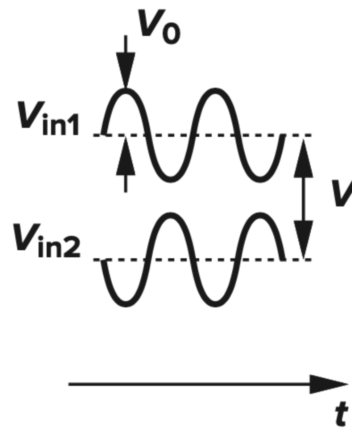
**增大$I_{SS}$** ⇨

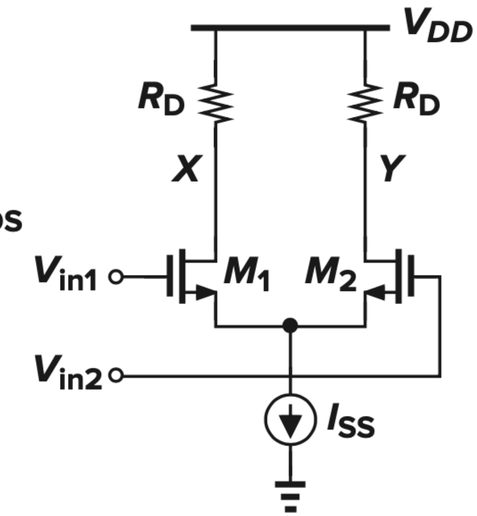


# 例4. 5 差动输入直流电平失衡$V_{OS}$

$$V_{OS}=\Delta V_{in1}/2$$

画出输出电压的波形图，求出小信号增益




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

$$I_{D1}-I_{D2}=\sqrt{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}(V_{in1}-V_{in2})\sqrt{1-\frac{\mu_n C_{ox}(W/L)}{4I_{SS}}(V_{in1}-V_{in2})^2}$$

$$=\frac{\sqrt{7}}{4}I_{SS}\ \Rightarrow\ I_{D1}\approx 0.83I_{SS},\ I_{D2}\approx 0.17I_{SS}$$

$$\Rightarrow\ V_X-V_Y=-(\sqrt{7}/4)I_{SS}R_D$$

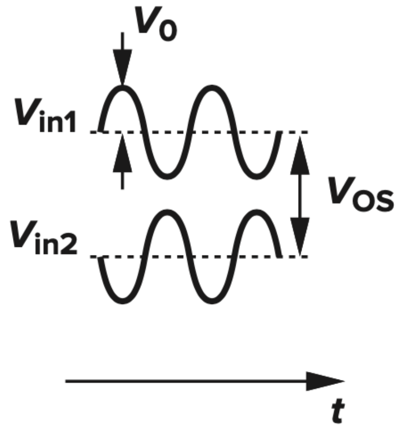
$$G_{m1}=\frac{3}{\sqrt{14}}\sqrt{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}$$

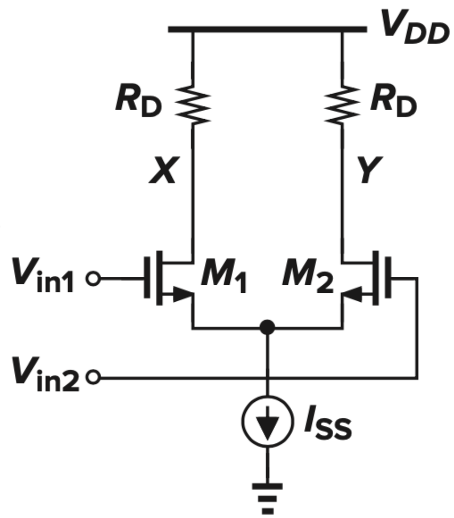
# 例4. 5 差动输入直流电平失衡$V_{OS}$

$$V_{OS}=\Delta V_{in1}/2$$

画出输出电压的波形图，
求出小信号增益

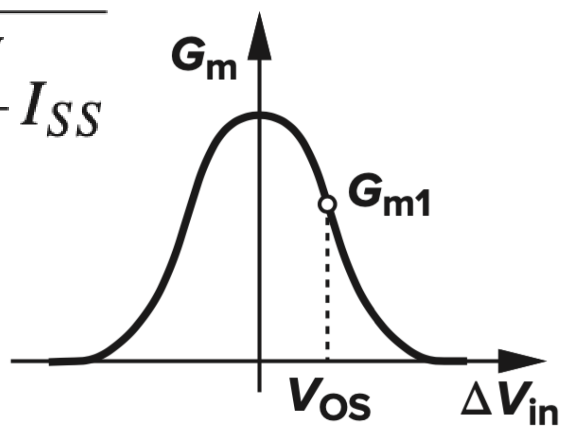
$$V_{in1}-V_{in2}=V_{OS}$$

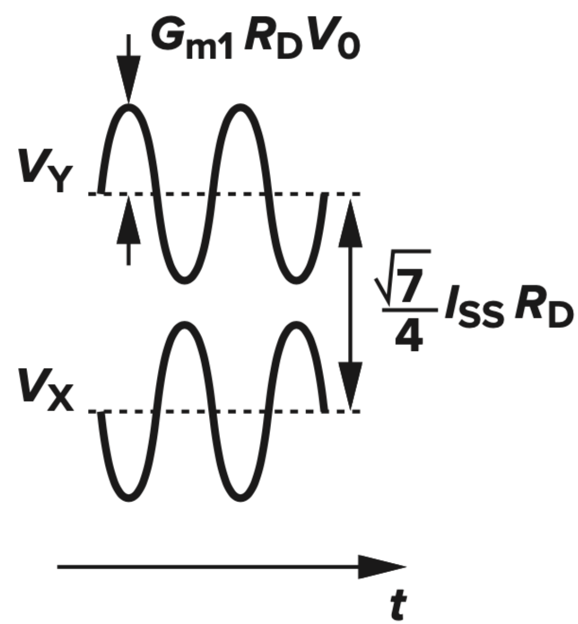


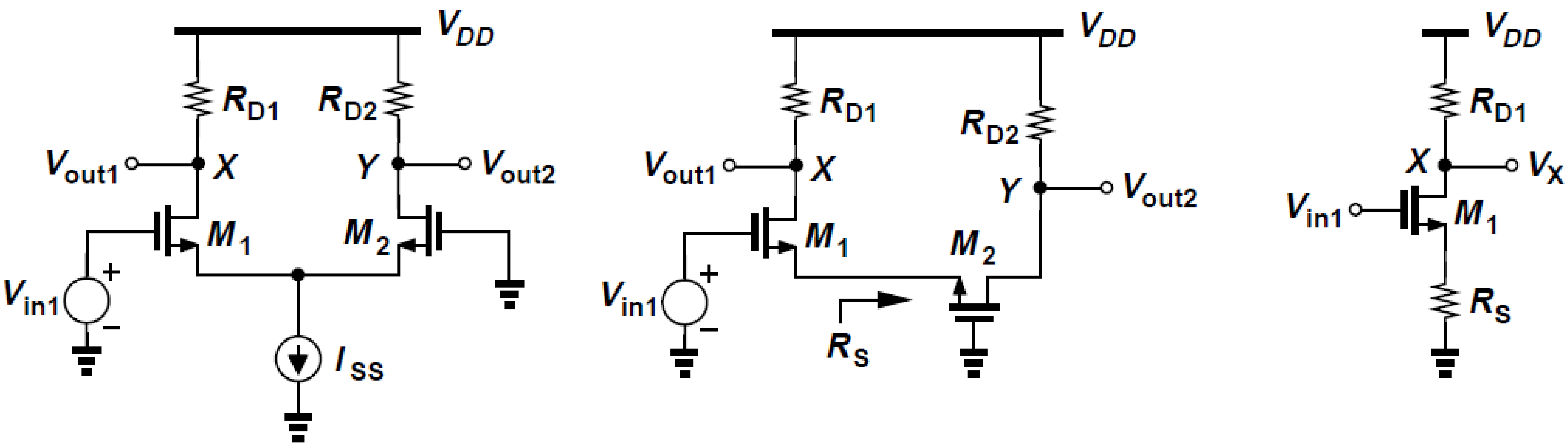

$$V_X-V_Y=-(\sqrt{7}/4)I_{SS}R_D$$

$$G_{m1}=\frac{3}{\sqrt{14}}\sqrt{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}$$



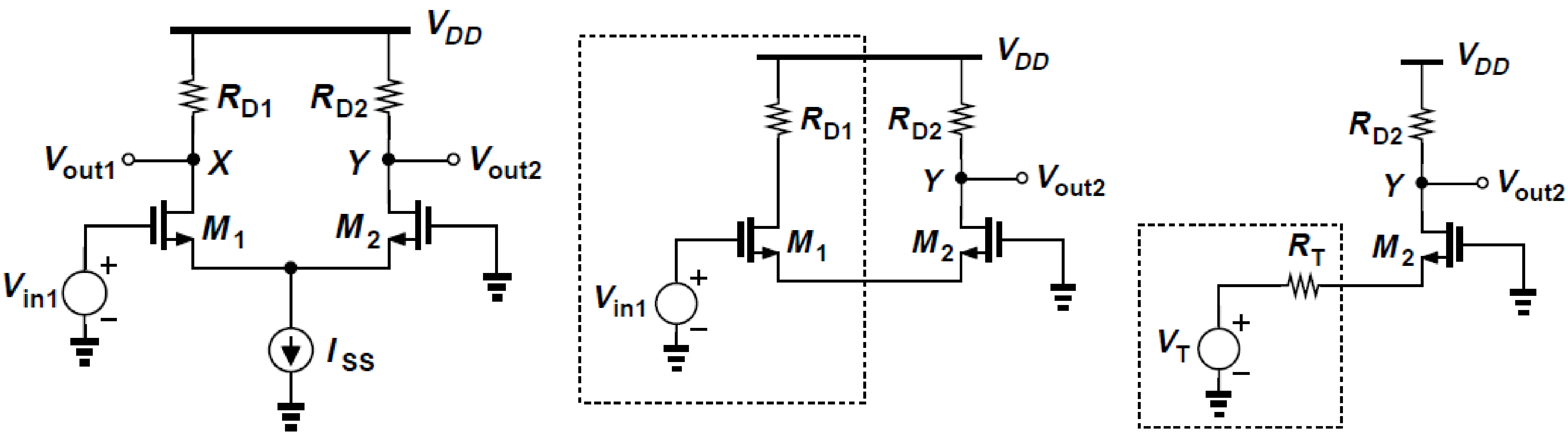
# 小信号分析（叠加法）




- 令$V_{in2} = 0$，找出$V_{in1}$对结点X和Y的影响
- $V_X$: $M_1$管构成了带有源极负反馈的共源级，$R_S = 1/g_{m2}$

$$\frac{V_X}{V_{in1}} = \frac{-R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}}$$

# 小信号分析（叠加法）




- $V_Y$: $M_1$管以源极跟随器的形式驱动$M_2$管

$$V_T = V_{in1}; \quad R_T = 1/g_{m1} \;; \quad \frac{V_Y}{V_{in1}} = \frac{R_D}{\frac{1}{g_{m2}} + \frac{1}{g_{m1}}}$$

- 对于$V_{in1}$总的电压增益为：$(V_X - V_Y)|_{\text{Due to } Vin1} = \dfrac{-2R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}} V_{in1}$

# 小信号分析（叠加法）

- 若$g_{m1}=g_{m2}=g_m$, 则可简化为

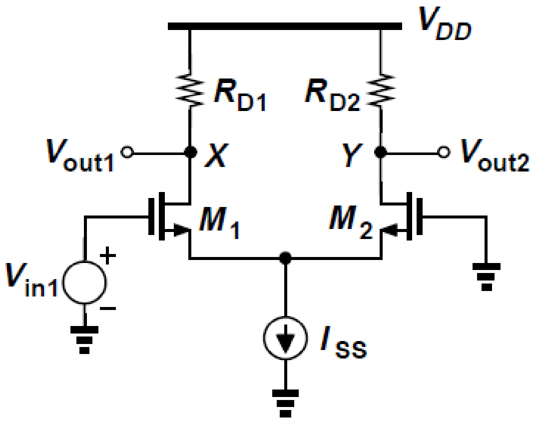
$$(V_X - V_Y)|_{\text{Due to } Vin1} = -g_m R_D V_{in1}$$

- 由于电路对称，除了极性相反，$V_{in2}$在X和Y点产生的作用与$V_{in1}$一样

$$(V_X - V_Y)|_{\text{Due to } Vin2} = g_m R_D V_{in2}$$

- 两边分别相加得：

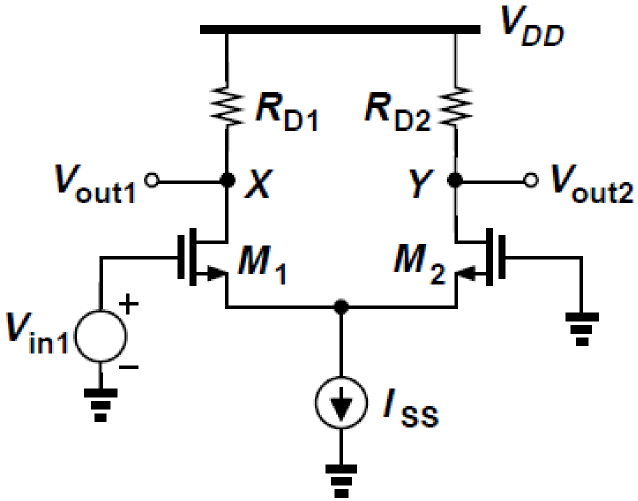
$$\frac{(V_X - V_Y)_{tot}}{V_{in1} - V_{in2}} = -g_m R_D$$

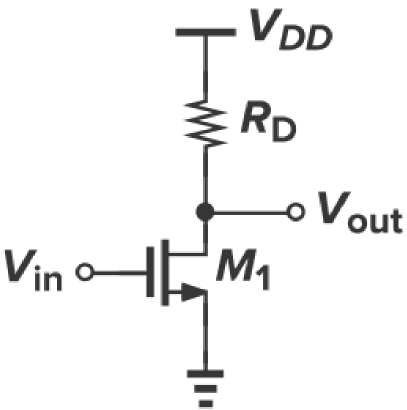



- 无论怎样施加输入信号，差动增益的幅度均为$g_mR_D$
- 如果是单边输出，增益减半

# 差动对和共源级的比较

- 偏置电流相等，均为$I_{SS}$



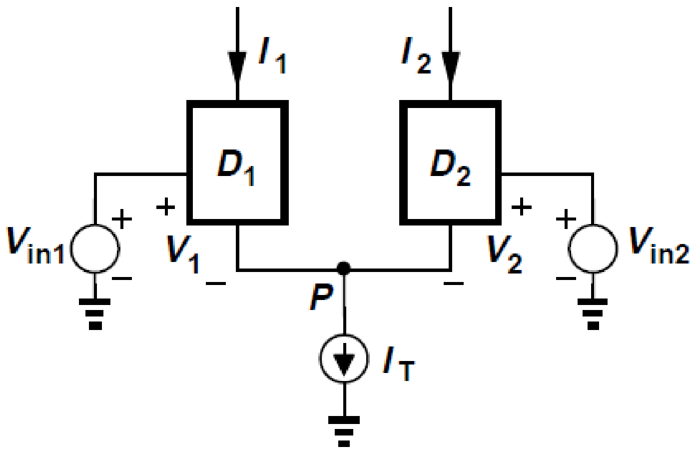



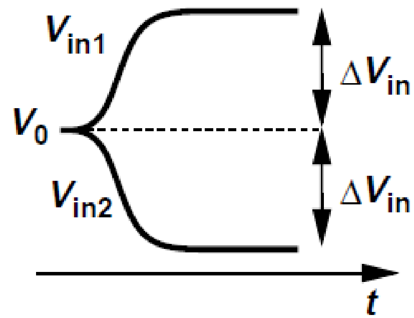

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{D1}} = \sqrt{2\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}\frac{I_{SS}}{2}}$$

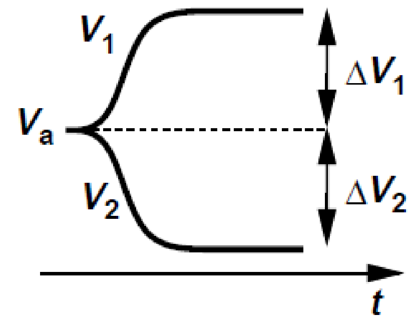
$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_{SS}}$$

相同功耗情况下，差动对增益为单管共源级增益的$1/\sqrt{2}$

# 小信号分析（半边电路法）



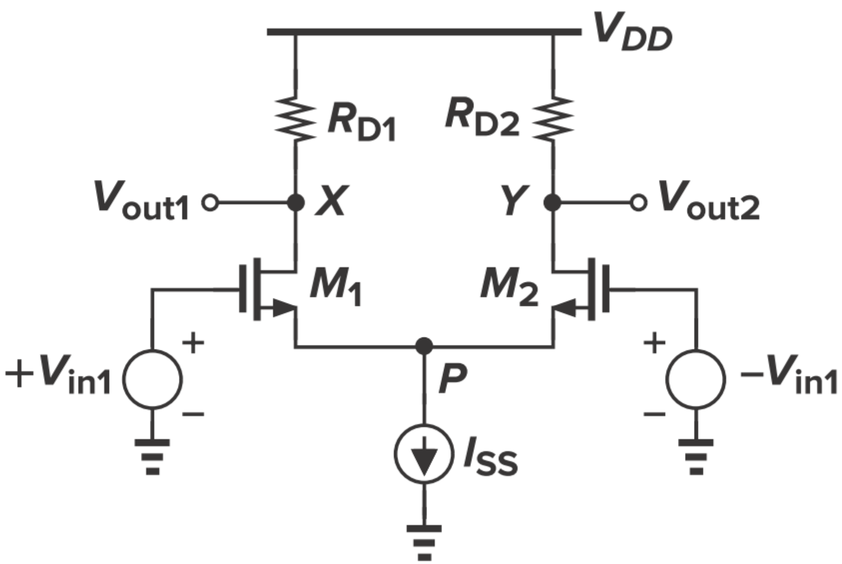

- 假设$V_{in1}$和$V_{in2}$差动变化，$V_{in1}$从$V_0$到$V_0+\Delta V_{in}$，$V_{in2}$从$V_0$到$V_0-\Delta V_{in}$
- 如果电路保持线性，则$V_P$不变（交流地）

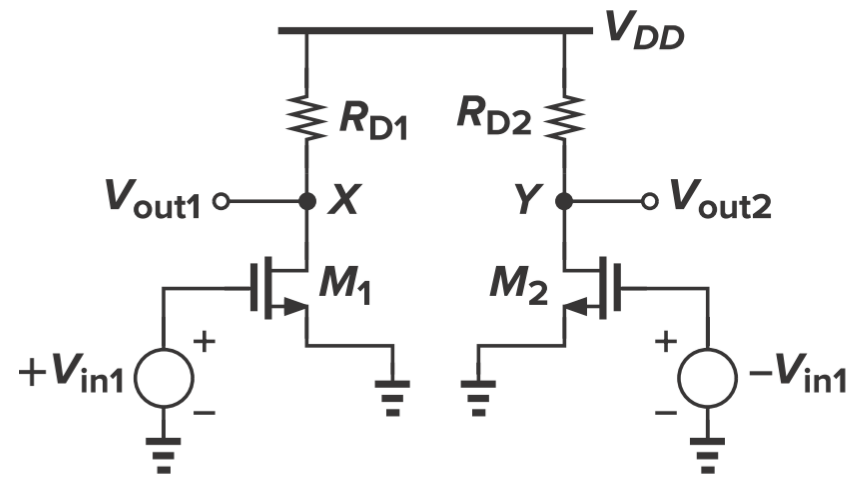
$$g_m \Delta V_1 + g_m \Delta V_2 = 0 \Rightarrow \Delta V_1 = -\Delta V_2$$

$$V_{in1} - V_1 = V_{in2} - V_2 \qquad 2\Delta V_{in} = \Delta V_1 - \Delta V_2 = 2\Delta V_1$$

$$\Rightarrow V_0 + \Delta V_{in} - (V_a + \Delta V_1) = V_0 - \Delta V_{in} - (V_a + \Delta V_2)$$

# 小信号分析（半边电路法）



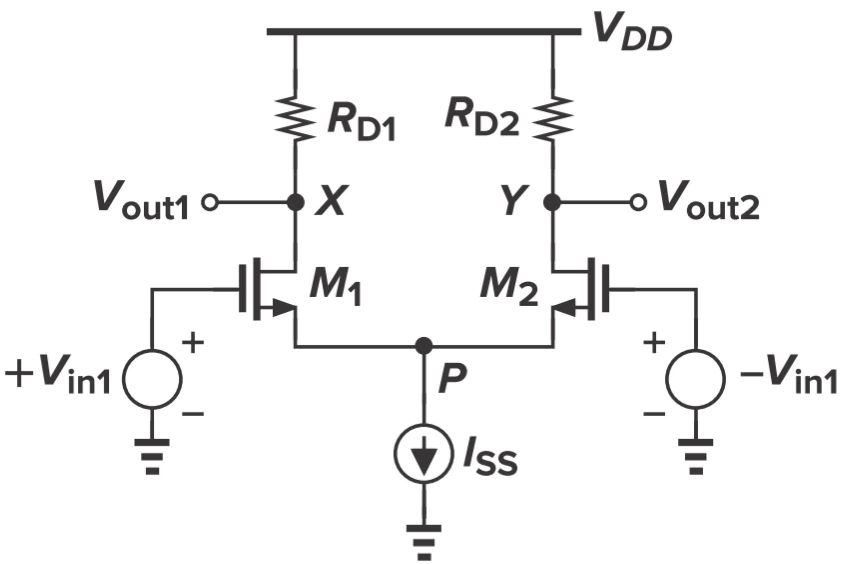



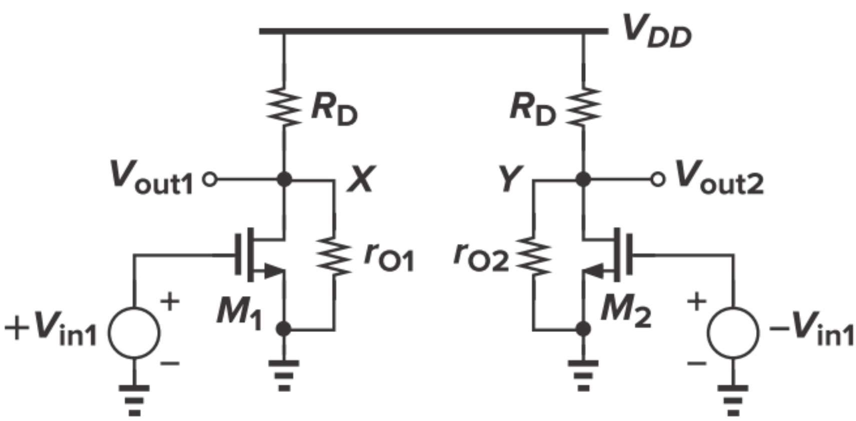

$$V_X/V_{in1} = -g_m R_D$$

$$V_Y/(-V_{in1}) = -g_m R_D$$

$$\Rightarrow (V_X - V_Y)/(2V_{in1}) = -g_m R_D$$

# 例4. 7 考虑沟道长度调制效应



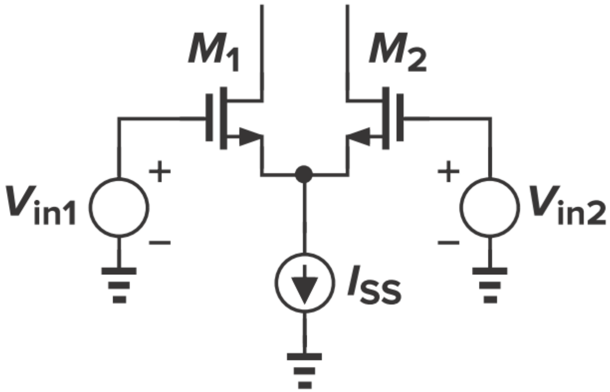



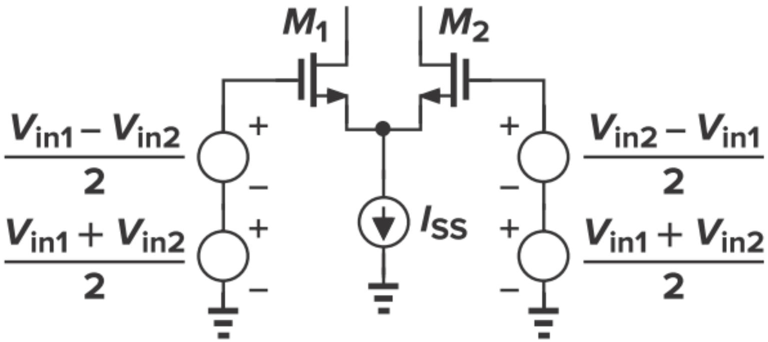

$$V_X/V_{in1} = -g_m(R_D \| r_{O1})$$

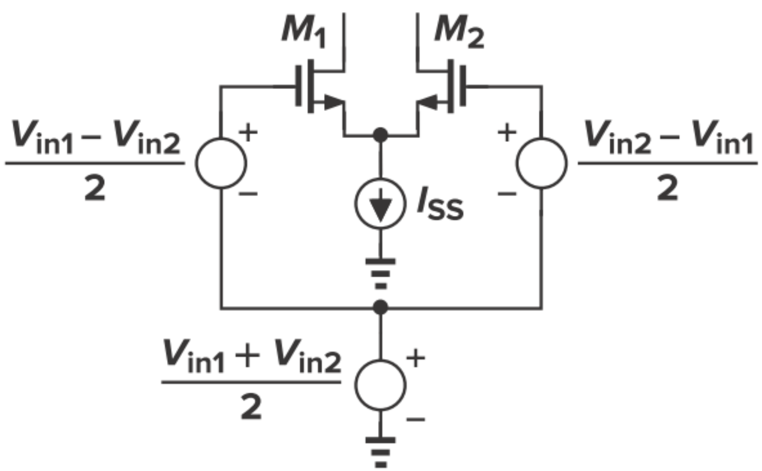
$$V_Y/(-V_{in1}) = -g_m(R_D \| r_{O2})$$

$$\Rightarrow \quad (V_X - V_Y)/(2V_{in1}) = -g_m(R_D \| r_O)$$

# 考虑非全差动的输入信号




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

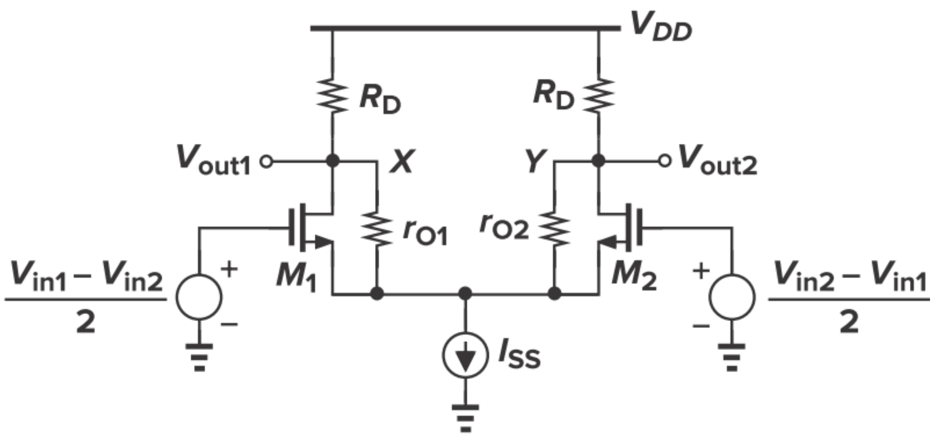
$$V_{in2} = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{2} + \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$

# 例4. 8 考虑非全差动的输入信号($\lambda\neq0$)

- 差模信号：

$$V_X = -g_m(R_D\|r_{O1})\frac{V_{in1}-V_{in2}}{2}$$

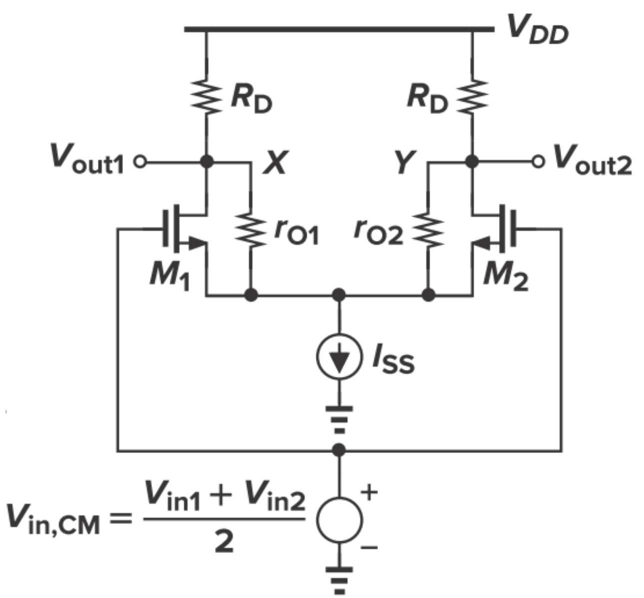
$$V_Y = -g_m(R_D\|r_{O2})\frac{V_{in2}-V_{in1}}{2}$$



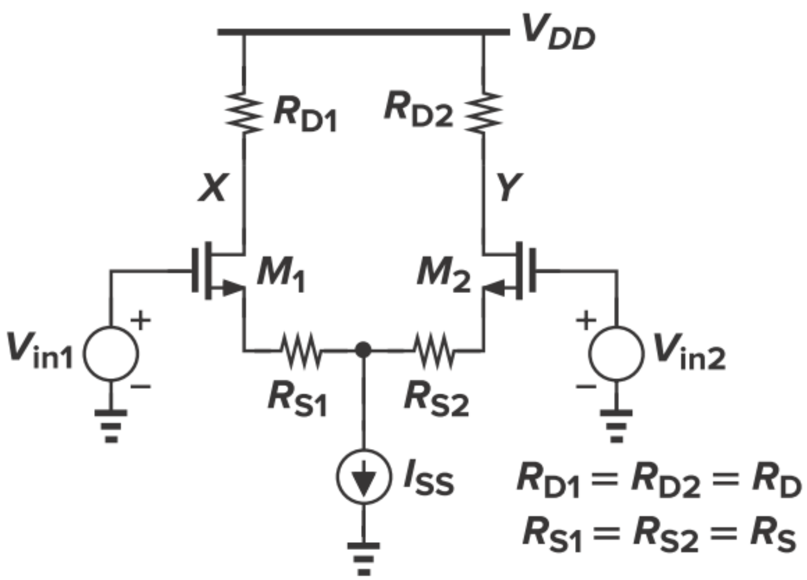

⇨ $V_X - V_Y = -g_m(R_D\|r_O)(V_{in1}-V_{in2})$

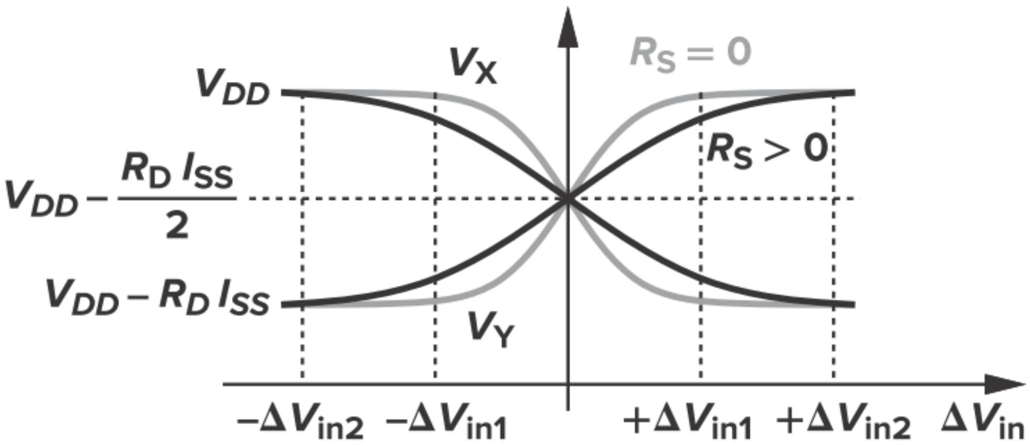
- 共模信号：

$M_1$和$M_2$的电流均为$I_{SS}/2$, $V_X$-$V_Y$=0



# 带源极负反馈的差动对



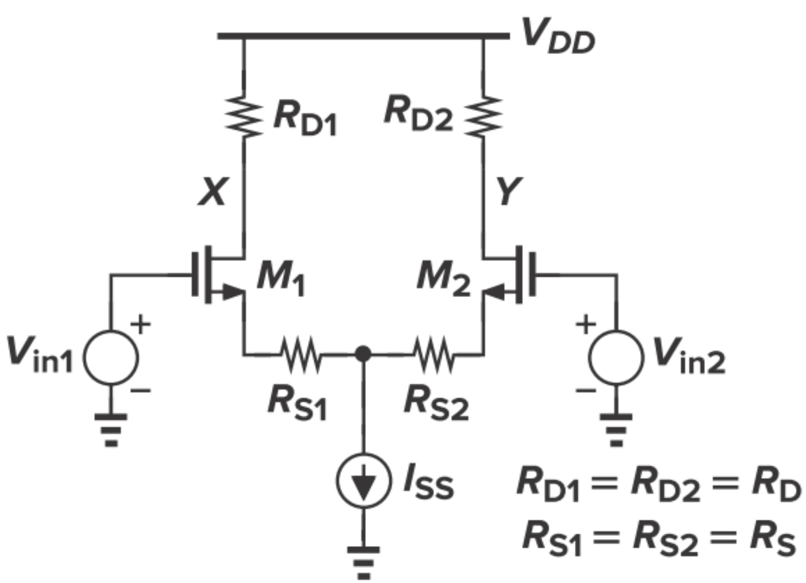



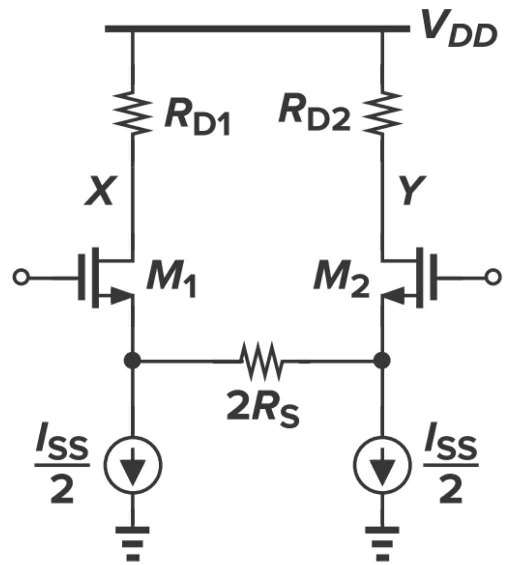

- 电阻 $R_{S1}$ 和 $R_{S2}$ 减轻了 $M_1$ 和 $M_2$ 的非线性
- 使一边关断所需的差动电压幅度：

$$V_{in1} - V_{GS1} - R_S I_{SS} = V_{in2} - V_{TH}$$

$$\Rightarrow V_{in1} - V_{in2} = V_{GS1} - V_{TH} + R_S I_{SS} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}} + R_S I_{SS}$$

# 带源极负反馈的差动对

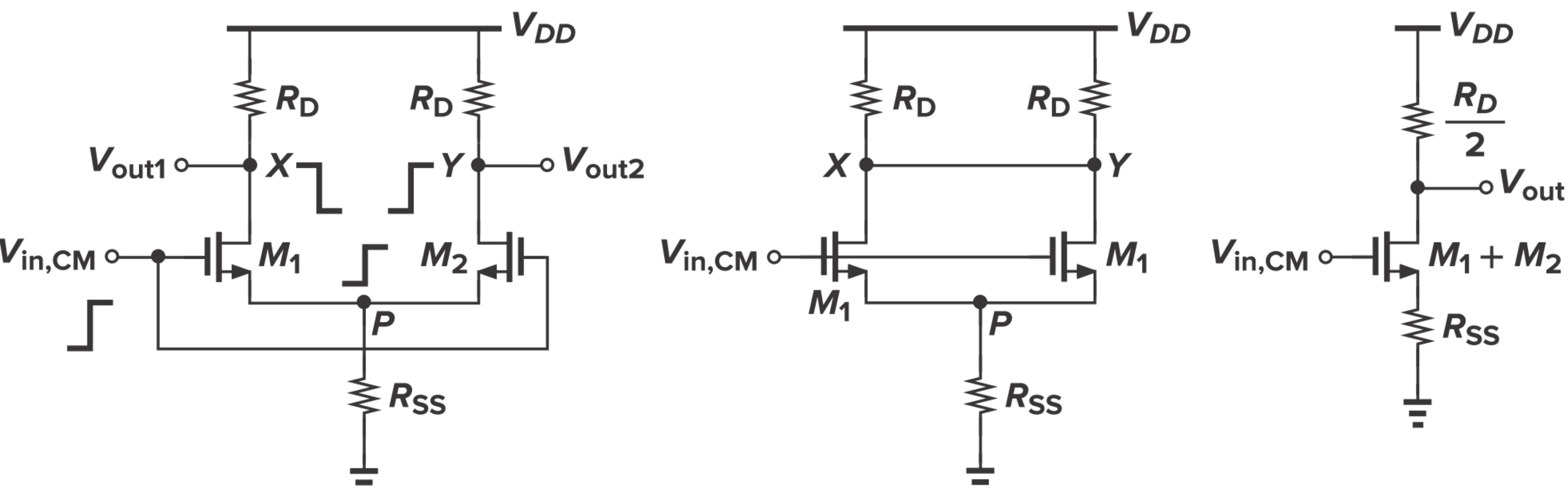



- 使用“半边电路法”，小信号增益为： $$|A_v| = \frac{R_D}{\frac{1}{g_m} + R_S}$$
- 在平衡条件下电阻上的电压降为$I_{SS}R_S/2$，导致输入和输出共模电平均需要提高$I_{SS}R_S/2$，输出摆幅减小了$I_{SS}R_S$
- 分割尾电流源的负反馈差动对

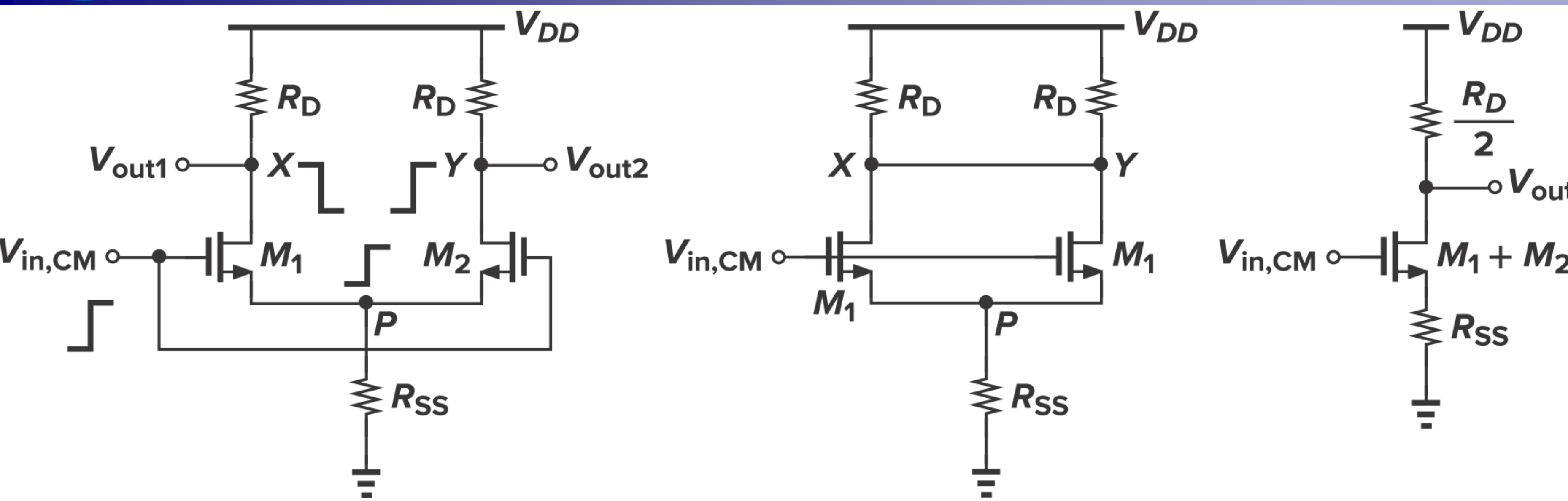
# 4. 3 共模响应

- 电路不可能完全对称，电流源的输出阻抗也不可能无穷大，无法完全抑制共模扰动
- 假设电路对称，电流源输出阻抗为$R_{SS}$




- $V_{in,CM}$ 升高导致$V_P$升高，$M_1$和$M_2$的漏电流增大，$V_x$和$V_Y$降低

# 4.3 共模响应




- 电路的共模增益为： $$A_{v,CM} = \frac{V_{out}}{V_{in,CM}} = -\frac{R_D/2}{1/(2g_m) + R_{SS}}$$

共模增益是指输入共模信号的变化引起的输出共模信号的变化

- 共模输入的变化会干扰偏置点，改变小信号增益和减小输出摆幅

# 例 4.9

$$(W/L)_{1,2} = 25/0.5,\ \mu_n C_{ox} = 50\ \mu\text{A/V}^2$$

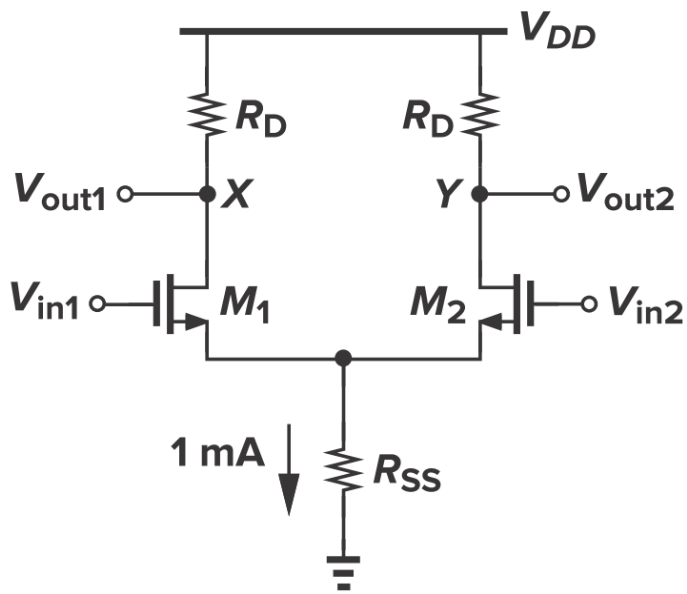
$$V_{TH} = 0.6\ \text{V},\ \lambda = \gamma = 0,\ V_{DD} = 3\ \text{V}.$$

(a) $V_{Rss}$=0.5V，输入共模电压应是多少？

（b）差模增益=5时，$R_D$=?

（c）输出共模电平？最低单端输出电平？

（d）输入共模增加50mV，输出变化多大?




解：(a) $I_{D1} = I_{D2} = 0.5\ \text{mA}$

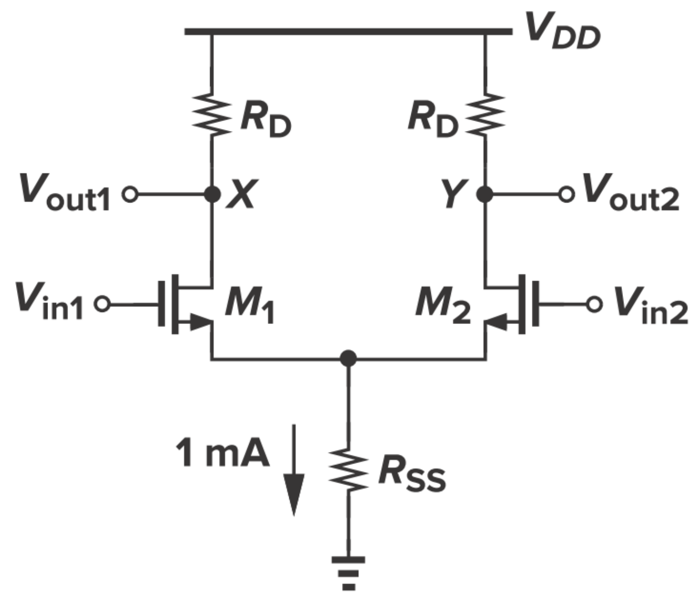
$$\Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}} + V_{TH} = 1.23\ \text{V}$$

$$\Rightarrow V_{in,CM} = V_{GS1} + 0.5\ \text{V} = 1.73\ \text{V}.$$

# 例 4. 9

$(W/L)_{1,2} = 25/0.5,\ \mu_n C_{ox} = 50\ \mu\text{A/V}^2$

$V_{TH} = 0.6\text{ V},\ \lambda = \gamma = 0,\ V_{DD} = 3\text{ V}.$




(a) $V_{Rss}$=0.5V，输入共模电压应是多少？

（b）差模增益=5时，$R_D$=?

（c）输出共模电平？最低单端输出电平？

（d）输入共模增加50mV，输出变化多大？

解：(b) $g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox}(W/L)I_{D1}} = 1/(632\ \Omega)$

$\Rightarrow R_D = 3.16\ \text{k}\Omega$

(c) $V_X = V_{DD} - I_{D1}R_D = 1.42\text{ V}.$

$$V_{X,\min} = V_{in,CM} - V_{TH} = 1.73V - 0.6V = 1.13V$$

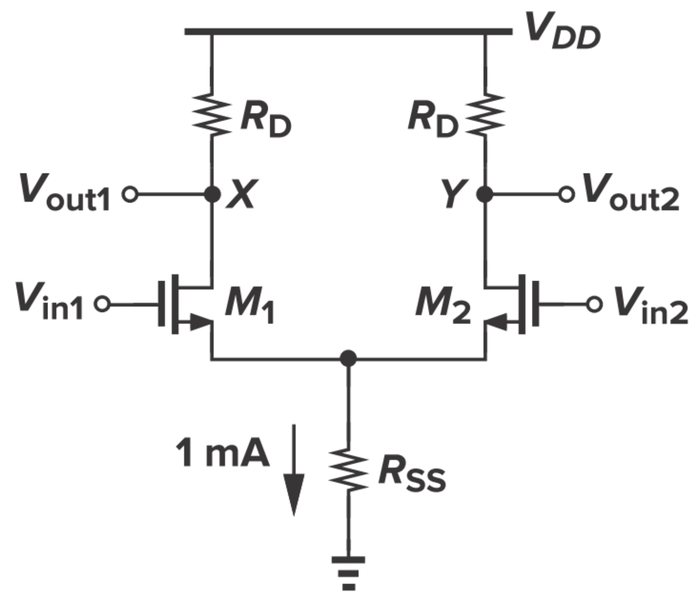
若输出电压减小0.29V，则$M_1$和$M_2$进入线性区

# 例 4. 9

$(W/L)_{1,2} = 25/0.5,\ \mu_n C_{ox} = 50\ \mu A/V^2$

$V_{TH} = 0.6\ V,\ \lambda = \gamma = 0,\ V_{DD} = 3\ V.$

(a) $V_{Rss}$=0.5V，输入共模电压应是多少？
（b）差模增益=5时，$R_D$=?
（c）输出共模电平？最低单端输出电平？
（d）输入共模增加50mV，输出变化多大？

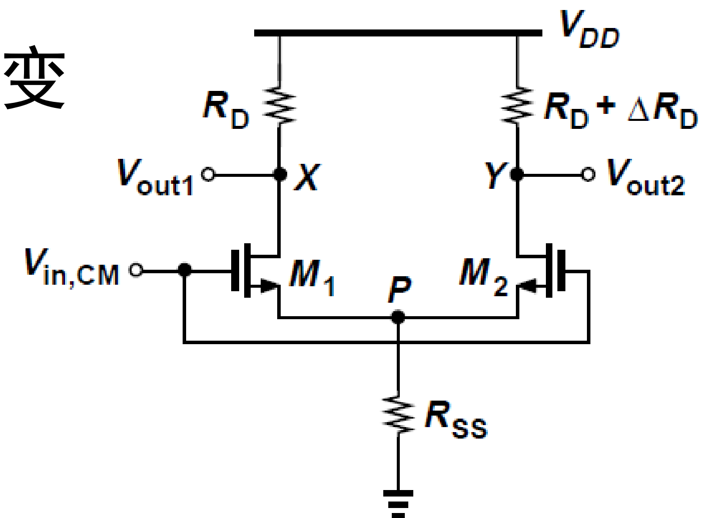



解：(d) $|\Delta V_{X,Y}| = \Delta V_{in,CM} \dfrac{R_D/2}{R_{SS} + 1/(2g_m)} = 50\ \text{mV} \times 1.94 = 96.8\ \text{mV}$

输出共模电平下降了96.8 mV，$M_1$和$M_2$离线性区更近

# 电路失配问题

- 实际电路并不是完全对称，在制造过程中两边的电路存在轻微的失配
- $V_{in,\,CM}$的变化会引起差动输出的改变

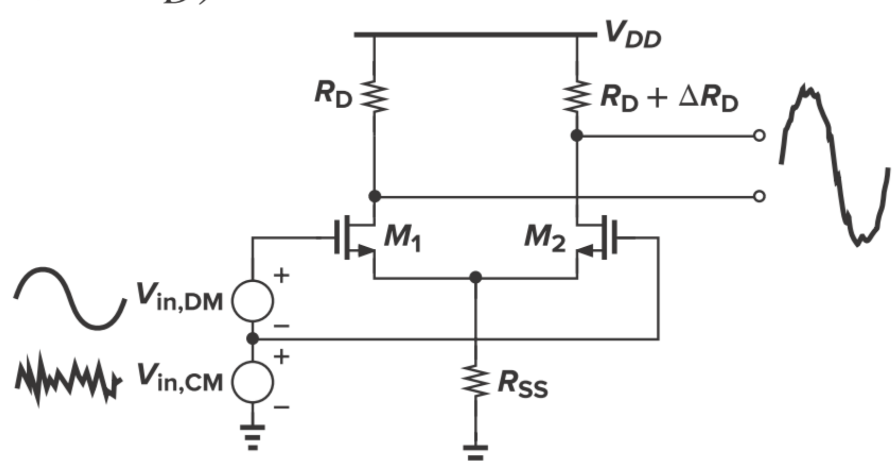



$$\Delta V_P = \frac{R_{SS}}{R_{SS}+\dfrac{1}{2g_m}}\Delta V_{in,CM}$$

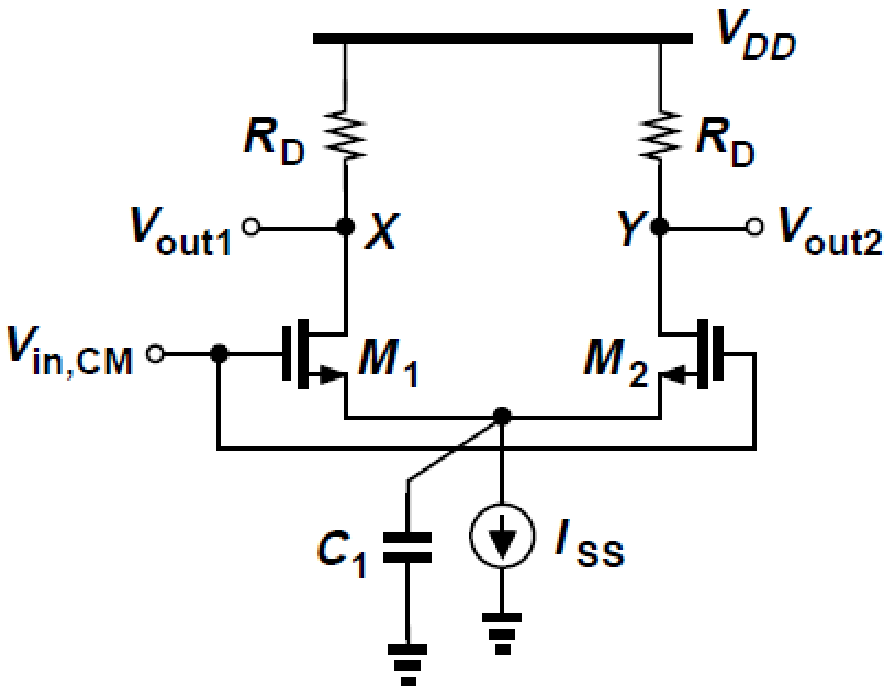
$$\Delta V_X = -\Delta V_{in,CM}\frac{g_m}{1+2g_m R_{SS}}R_D$$

$$\Delta V_Y = -\Delta V_{in,CM}\frac{g_m}{1+2g_m R_{SS}}(R_D+\Delta R_D)$$

- 共模信号转换为差模信号，损坏放大的差动信号

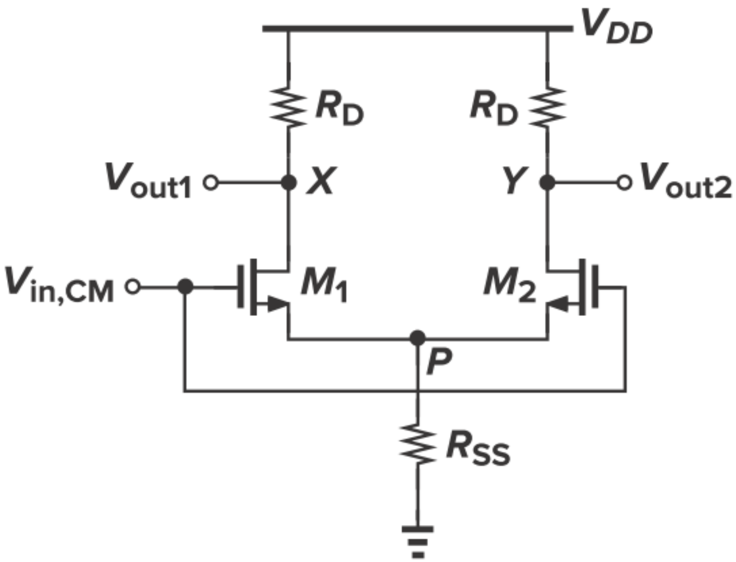


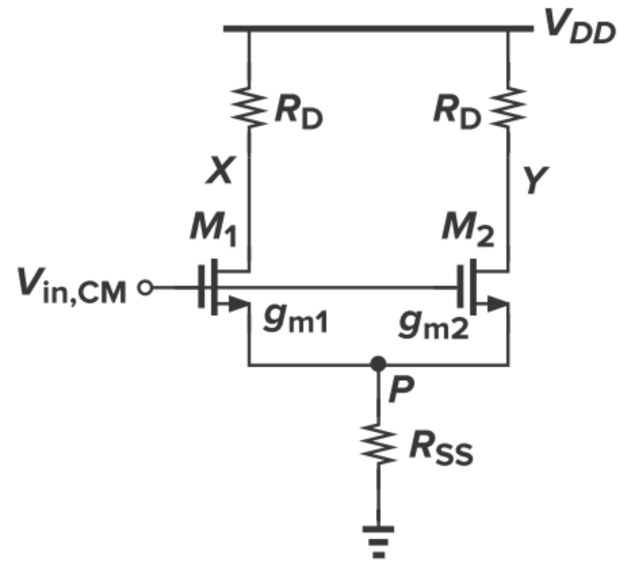
# 电路失配问题




- 寄生电容导致高频阻抗降低
- 电路的不对称不仅来自负载电阻，也来自输入对管的尺寸和阈值电压的失配, 晶体管的失配更严重。

# 输入对管失配



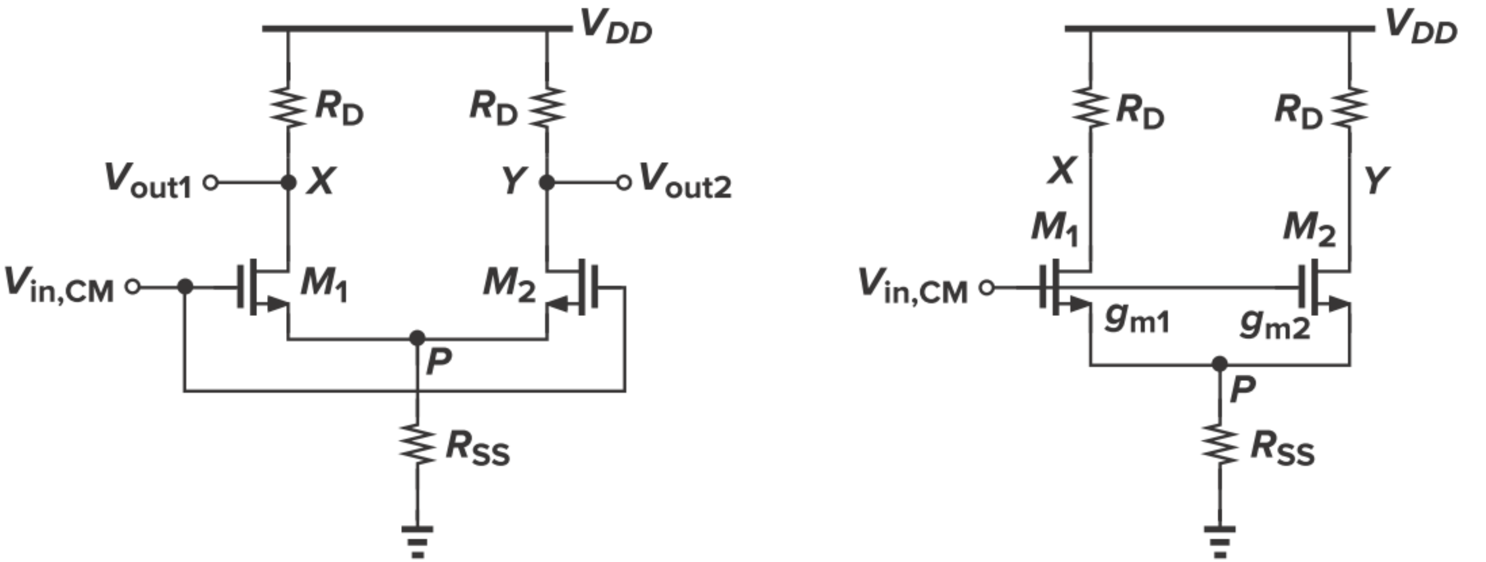

$$I_{D1} = g_{m1}(V_{in,CM} - V_P)$$

$$I_{D2} = g_{m2}(V_{in,CM} - V_P) \Rightarrow (g_{m1} + g_{m2})(V_{in,CM} - V_P)R_{SS} = V_P$$

$$(I_{D1} + I_{D2})R_{SS} = V_P$$

$$\Rightarrow \quad V_P = \frac{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} V_{in,CM}$$

# 输入对管失配




$$\Rightarrow \quad V_X = -g_{m1}(V_{in,CM} - V_P)R_D = \frac{-g_{m1}}{(g_{m1}+g_{m2})R_{SS}+1}R_D V_{in,CM}$$

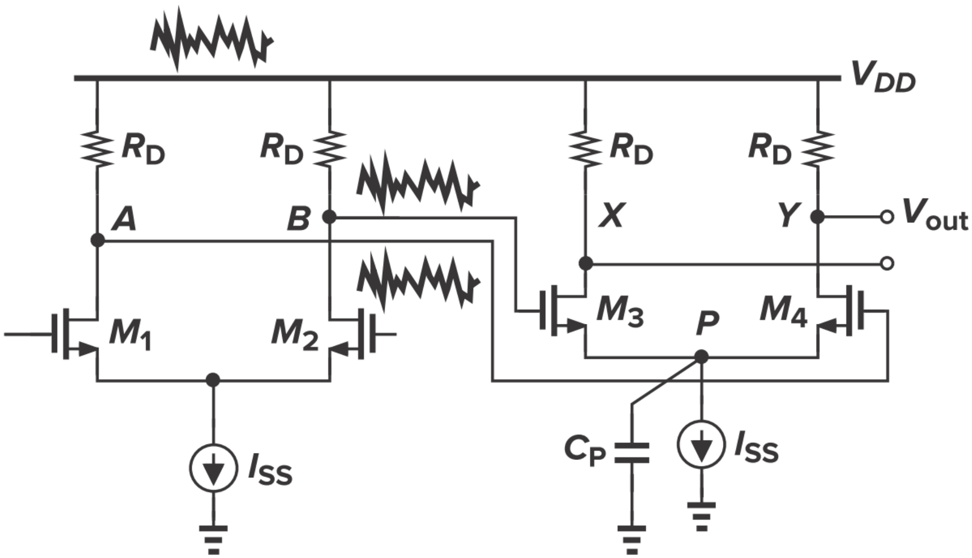
$$V_Y = -g_{m2}(V_{in,CM} - V_P)R_D = \frac{-g_{m2}}{(g_{m1}+g_{m2})R_{SS}+1}R_D V_{in,CM}$$

$$\Rightarrow \quad V_X - V_Y = -\frac{g_{m1}-g_{m2}}{(g_{m1}+g_{m2})R_{SS}+1}R_D V_{in,CM}$$

$$\Rightarrow \quad A_{CM-DM} = -\frac{\Delta g_m R_D}{(g_{m1}+g_{m2})R_{SS}+1} \quad (\Delta g_m = g_{m1} - g_{m2})$$

# 例4. 10 电源噪声对输出的影响

- M3和M4的跨导失配$\Delta g_m$
- 会多大比例的电源噪声（高频）以差动分量的形式出现在输出端?




- 电源噪声是共模噪声，全部加在A点和B点，成为$M_3$和$M_4$的共模输入信号

$$A_{CM-DM} = -\frac{\Delta g_m R_D}{(g_{m1}+g_{m2})R_{SS}+1}$$

⇦ $R_{SS}$用$1/(sC_P)$代替

$$|A_{CM-DM}| = \frac{\Delta g_m R_D}{\sqrt{1+(g_{m3}+g_{m4})^2\left|\frac{1}{C_P\omega}\right|^2}}$$

# 共模抑制比

- 共模抑制比：“期望的”增益（差分增益）与“不期望”的增益（共模转为差模的增益）之比：

$$\mathrm{CMRR} = \left| \frac{A_{DM}}{A_{CM-DM}} \right|$$

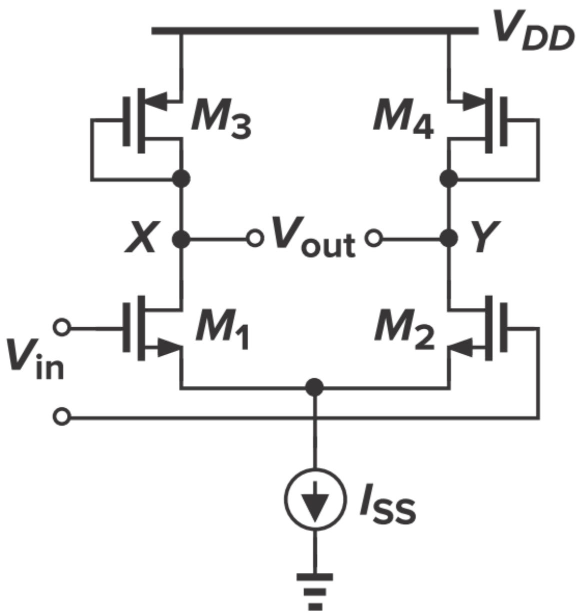
- 假如只有$g_m$失配，分析可得到：

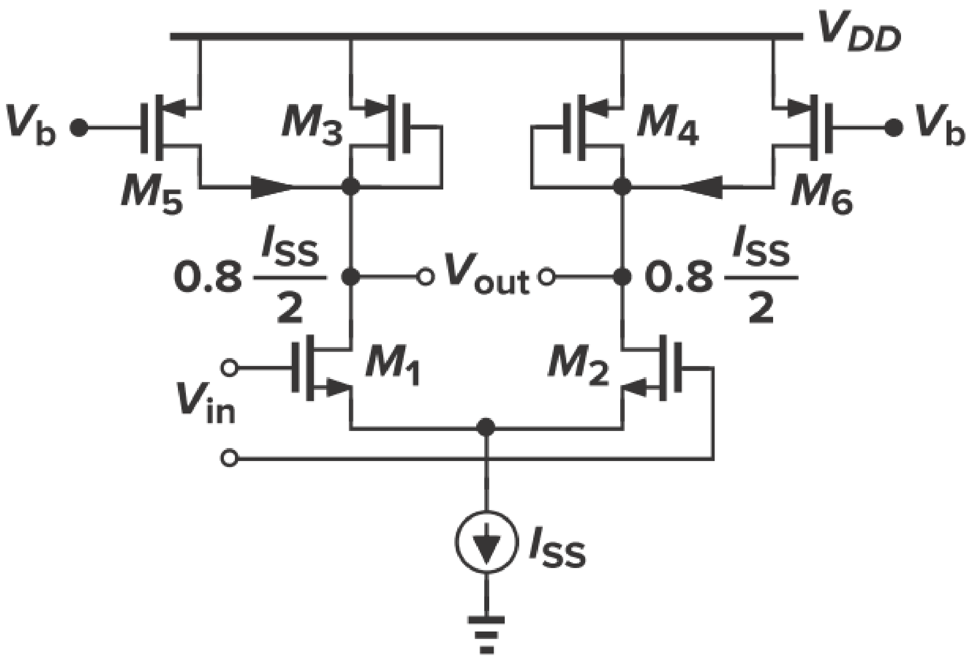
$$|A_{DM}| = \frac{R_D}{2} \frac{g_{m1} + g_{m2} + 4g_{m1}g_{m2}R_{SS}}{1 + (g_{m1} + g_{m2})R_{SS}}$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{CMRR} = \frac{g_{m1} + g_{m2} + 4g_{m1}g_{m2}R_{SS}}{2\Delta g_m} \approx \frac{g_m}{\Delta g_m}(1 + 2g_m R_{SS})$$

$$\left( g_m = (g_{m1} + g_{m2})/2 \right)$$

- 二极管连接的MOS管作负载



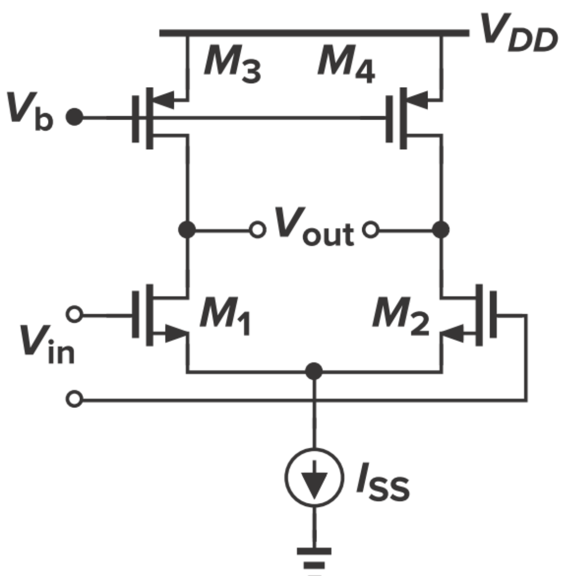



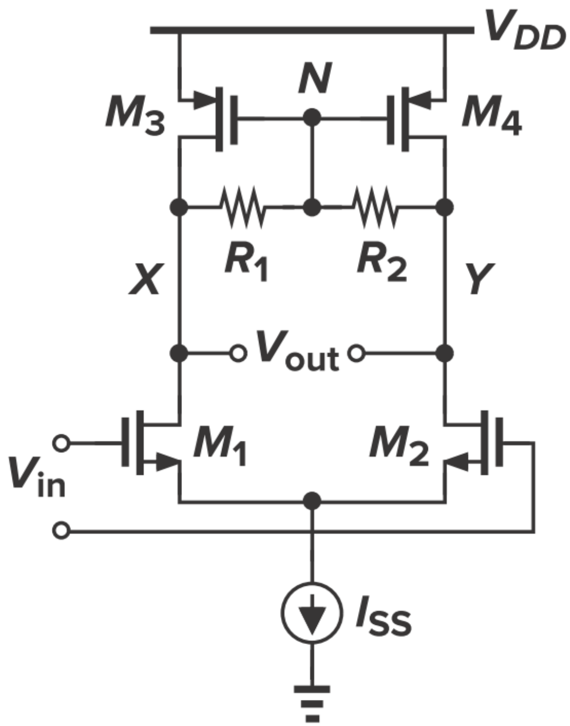

$$A_v = -g_{mN}\left(g_{mP}^{-1}\|r_{ON}\|r_{OP}\right) \approx -\frac{g_{mN}}{g_{mP}}$$

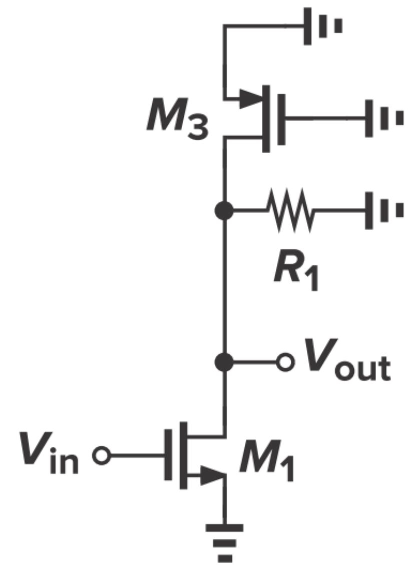
$$A_v \approx -\sqrt{\frac{\mu_n (W/L)_N}{\mu_p (W/L)_P}}$$

# 4.4 MOS为负载的差动对

- 电流源作负载



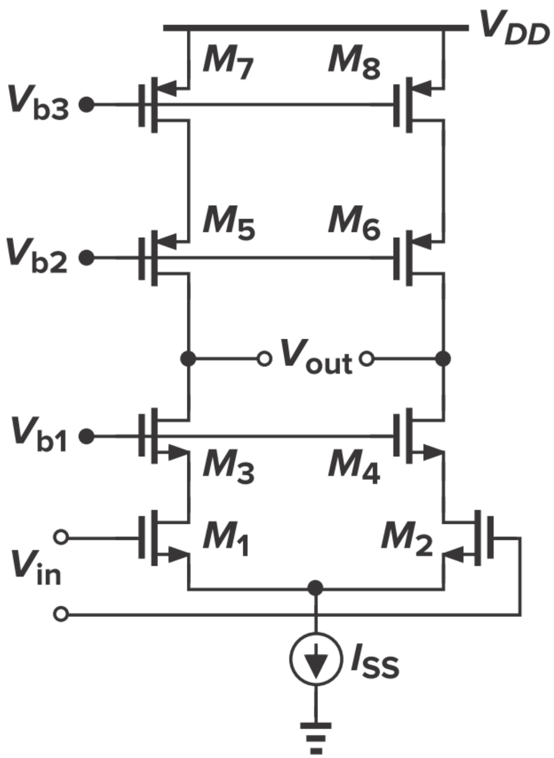



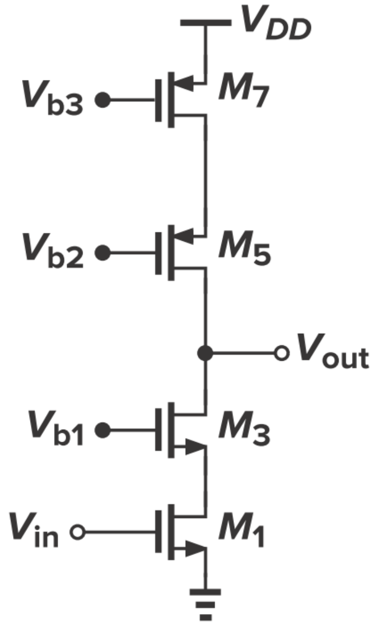




$$A_v = -g_{mN}(r_{ON} \| r_{OP})$$

$$|A_v| = g_{m1}(r_{O1} \| R_1 \| r_{O3})$$

- Cascode 差动对



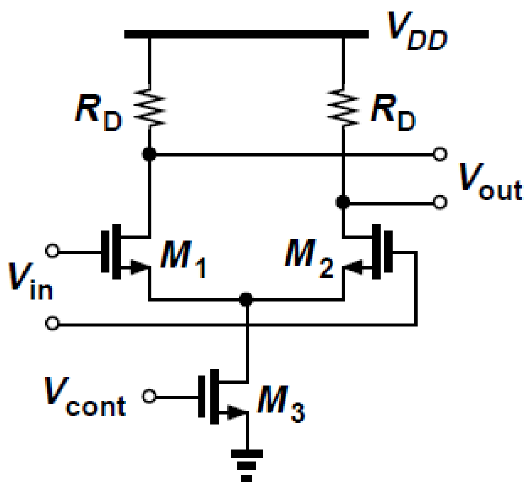



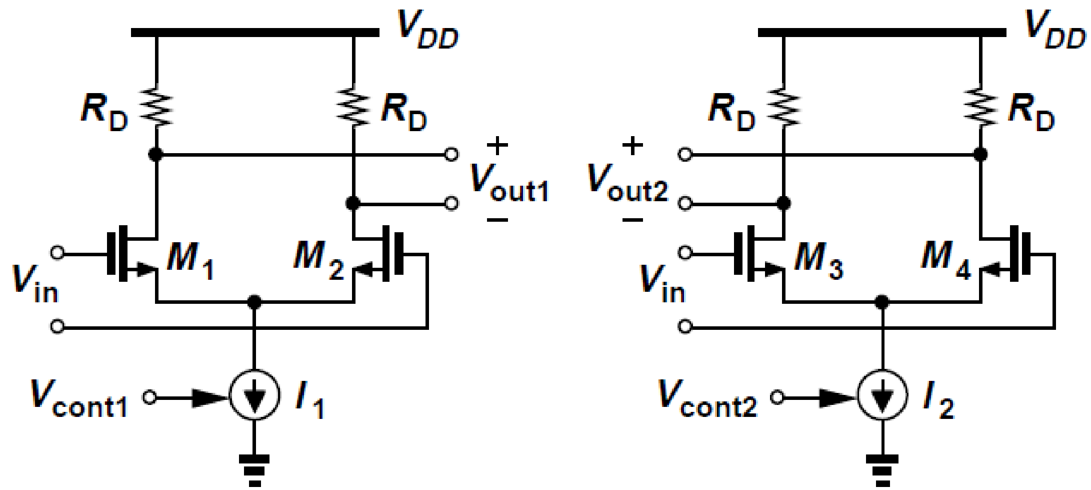

$$|A_v| \approx g_{m1}[(g_{m3}r_{O3}r_{O1})\|(g_{m5}r_{O5}r_{O7})]$$

# 4.5 吉尔伯特单元

- 差动放大器的小信号增益是尾电流的函数
- $V_{cont}$决定了尾电流的大小，从而决定了增益的大小

可变增益放大器(VGA)



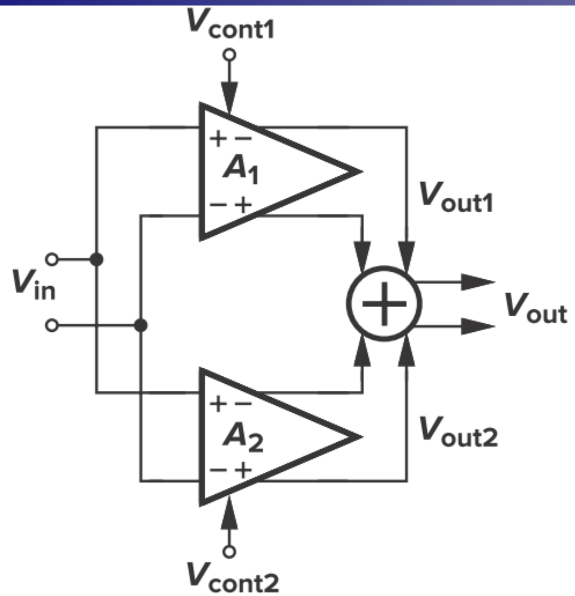



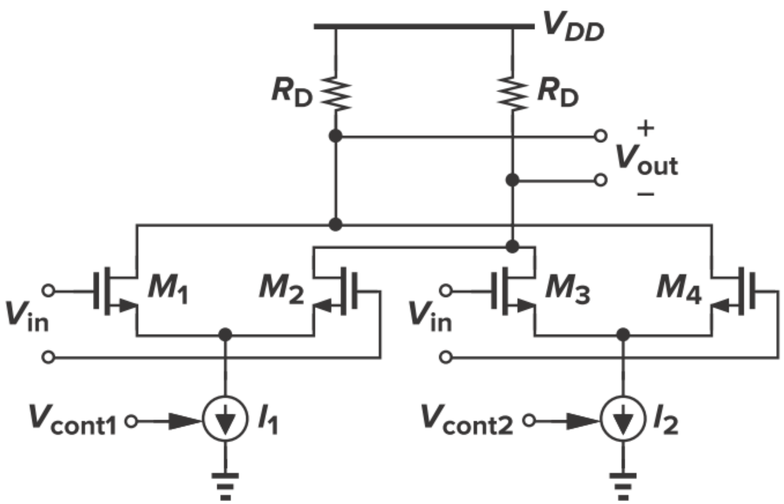

- 两个差动对以相反的增益对输入进行放大

$$V_{out1}/V_{in} = -g_m R_D$$
$$V_{out2}/V_{in} = +g_m R_D$$

- 如果$I_1$和$I_2$变化的方向相反， $|V_{out1}/V_{in}|$ 和 $|V_{out2}/V_{in}|$的变化方向也相反

# 4.5 吉尔伯特单元




- 将$V_{out1}$和$V_{out2}$合并为一个输出信号，产生：

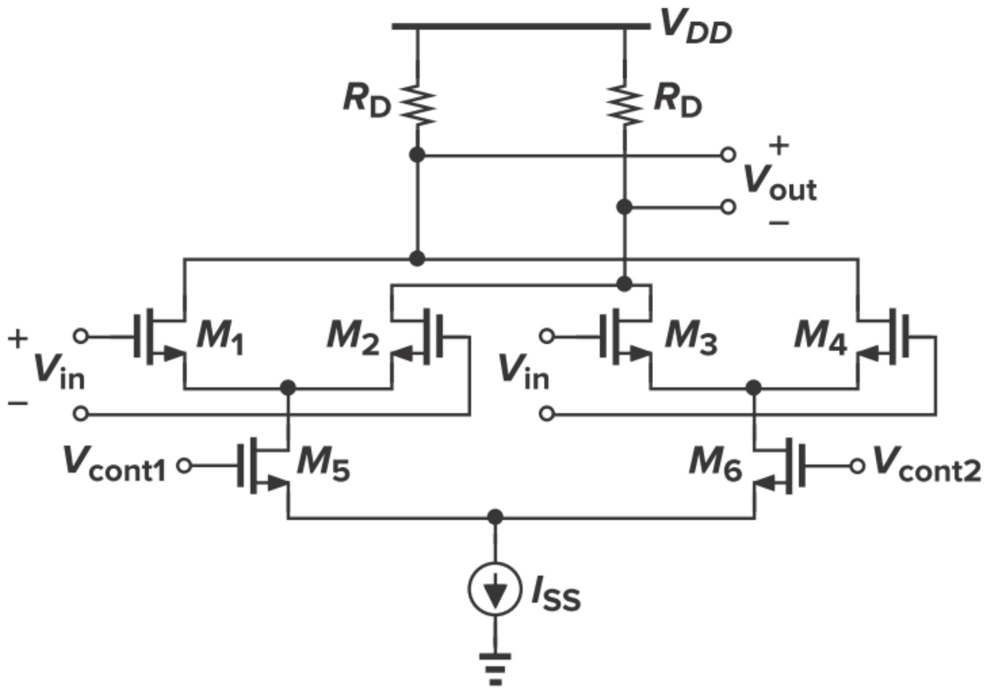
$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = A_1 V_{in} + A_2 V_{in}$$

- 将晶体管漏端短接即可

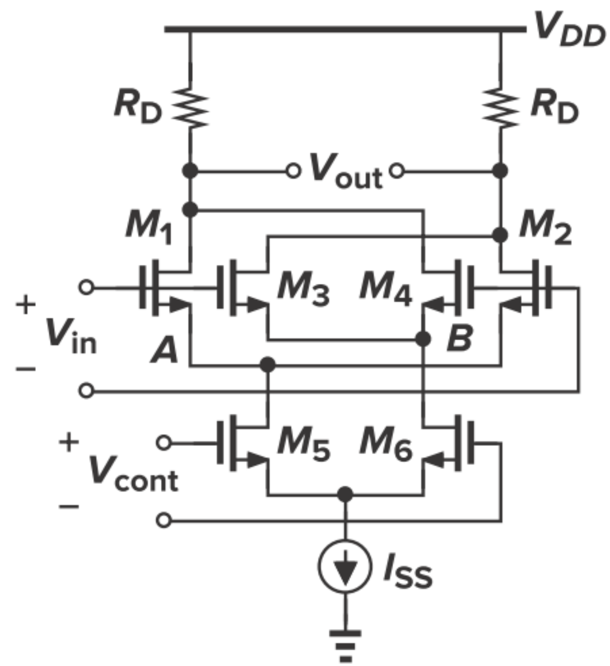
$$V_{out1} = R_D I_{D1} - R_D I_{D2}$$
$$V_{out2} = R_D I_{D4} - R_D I_{D3}$$

$$\Rightarrow V_{out1} + V_{out2} = R_D(I_{D1} + I_{D4}) - R_D(I_{D2} + I_{D3})$$

# 4.5 吉尔伯特单元



$V_{DD}$
$R_D$
$R_D$
+
$V_{out}$
−
$M_1$
$M_2$
$M_3$
$M_4$
+
$V_{in}$
−
$V_{in}$
$V_{cont1}$
$M_5$
$M_6$
$V_{cont2}$
$I_{SS}$

$V_{DD}$
$R_D$
$R_D$
$V_{out}$
$M_1$
$M_2$
$M_3$
$M_4$
+
$V_{in}$
−
A
B
$M_5$
$M_6$
+
$V_{cont}$
−
$I_{SS}$

# 本章知识要点

- 基本差动对
  - 大信号分析：定性分析、定量分析
  - 小信号分析：叠加法、半边电路法
- 共模响应
- MOS为负载的差动对电路
- 吉尔伯特单元

# Thank you

程 林

Email: eecheng@ustc.edu.cn