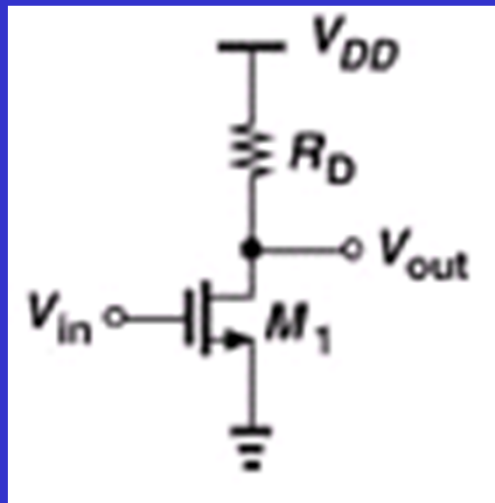


上一讲

□ 放大器基础知识

□ 电阻做负载的共源级

❖ 增益有非线性，电阻精度差或面积大

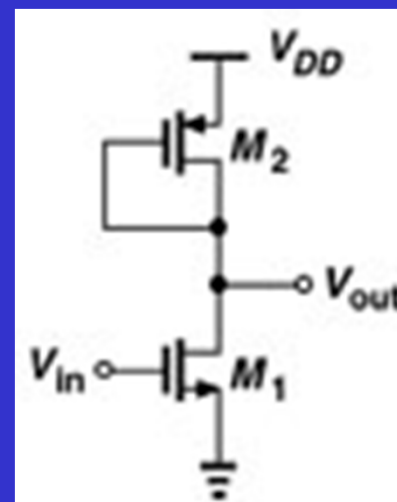
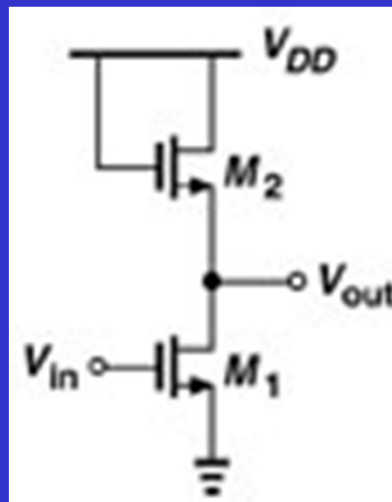


$$A_v = g_m R_D$$

上一讲

□ 二极管接法的MOS管做负载的共源级

- ❖ 线性度好，输出摆幅小，增益不能太大（否则摆幅小、带宽小）



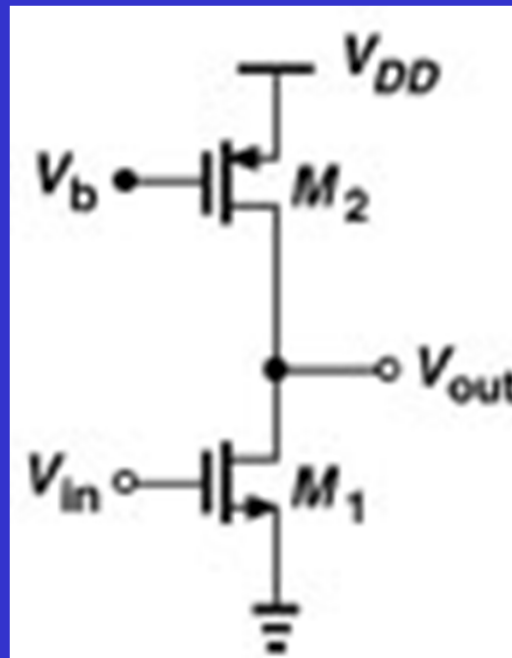
$$A_v = -\sqrt{\frac{(W/L)_1}{(W/L)_2}} \frac{1}{1 + \eta}$$

$$A_v = -\sqrt{\frac{\mu_n (W/L)_1}{\mu_p (W/L)_2}}$$

上一讲

□ 电流源做负载的共源级

❖ 增益大

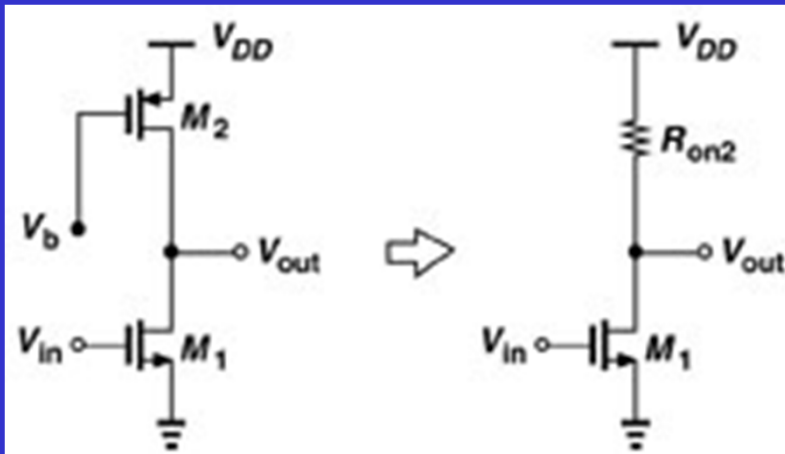


$$A_v = -g_m (r_{o1} \parallel r_{o2})$$

上一讲

□深线性区MOS管做负载的共源级

- ❖输出可以较大（可以为VDD）
- ❖得到精准的 R_{on2} 比较困难；受工艺、温度变化影响比较大，产生稳定、精确的 V_b 比较难



$$R_{ON2} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{DD} - V_b - |V_{THP}|)}$$

$$A_v = -g_m R_{ON2}$$

上一讲

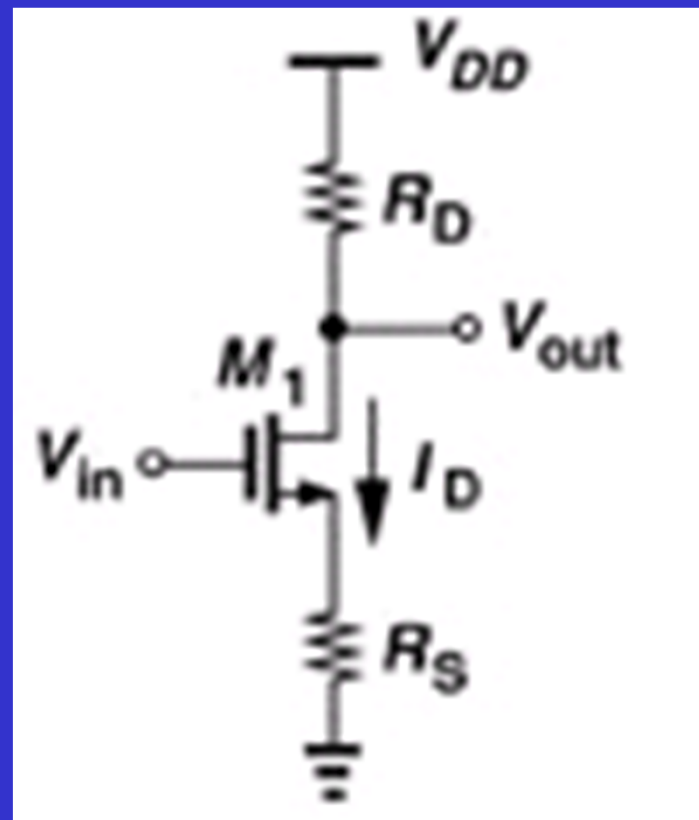
□带源极负反馈的共源级

- ❖ R_S 使 G_m 和增益变为 g_m 的弱函数，提高线性度
- ❖ 输出电阻大

$$R_{OUT} = [1 + (g_m + g_{mb})r_o]R_S + r_o$$

- ❖ 牺牲了增益

$$\begin{aligned} A_v &= -G_m R_D \\ &= -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \end{aligned}$$



上一讲

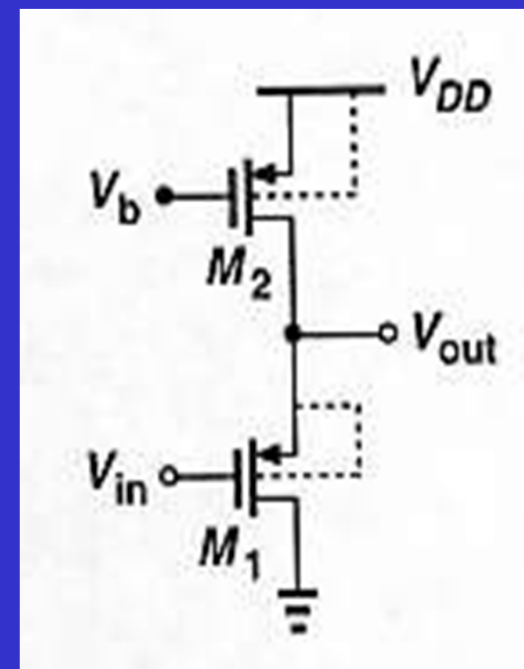
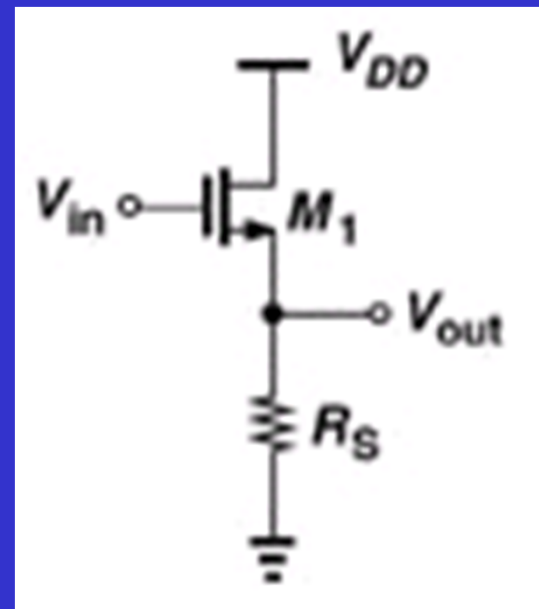
□共漏级—源跟随器

❖ **R_{in}**大, **R_{out}**中/小, 输出摆幅小, 增益有百分之几非线性, 噪声大; **PMOS**管能消除体效应, 提高线性度, 但输出阻抗大, 带宽降低; 电压缓冲器、电压平移

$$A_v = \frac{g_m R_S}{1 + (g_m + g_{mb}) R_S} = \frac{1}{\frac{1}{g_m R_S} + (1 + \eta)} \approx \frac{1}{1 + \eta}$$

$$A_v = \frac{g_{m1} (r_{o1} \parallel r_{o1})}{1 + g_{m1} (r_{o1} \parallel r_{o1})}$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$



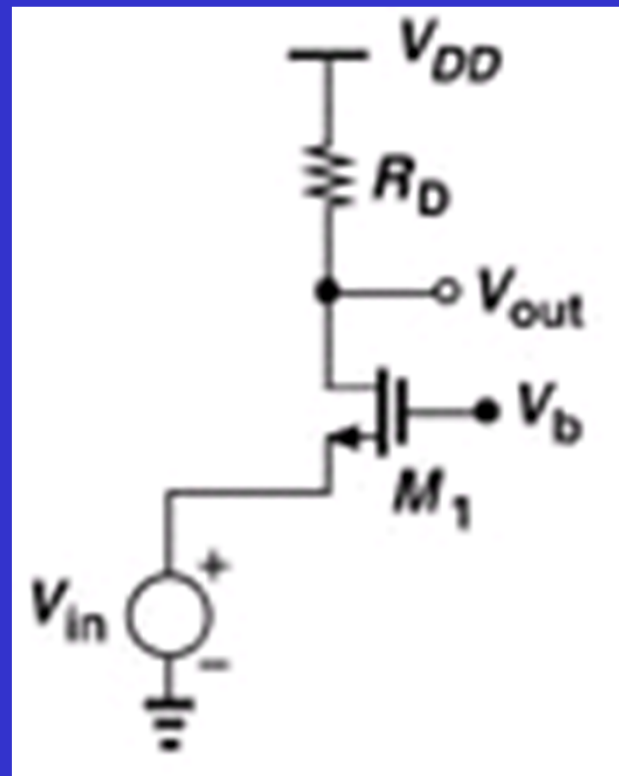
上一讲

□共栅级

❖ Rin小, Rout大

$$A_v = g_m(1+\eta)R_D$$

$$R_{in} = 1/[g_m(1+\eta)]$$



$$R_{in} = \frac{R_D + r_o}{1 + (g_m + g_{mb})r_o} \approx \frac{R_D}{(g_m + g_{mb})r_o} + \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

$$R_{out} = \{ [1 + (g_m + g_{mb})r_o] R_S + r_o \} \parallel R_D$$

上一讲

□共源共栅级

❖ R_{out} 大，高增益，屏蔽特性好

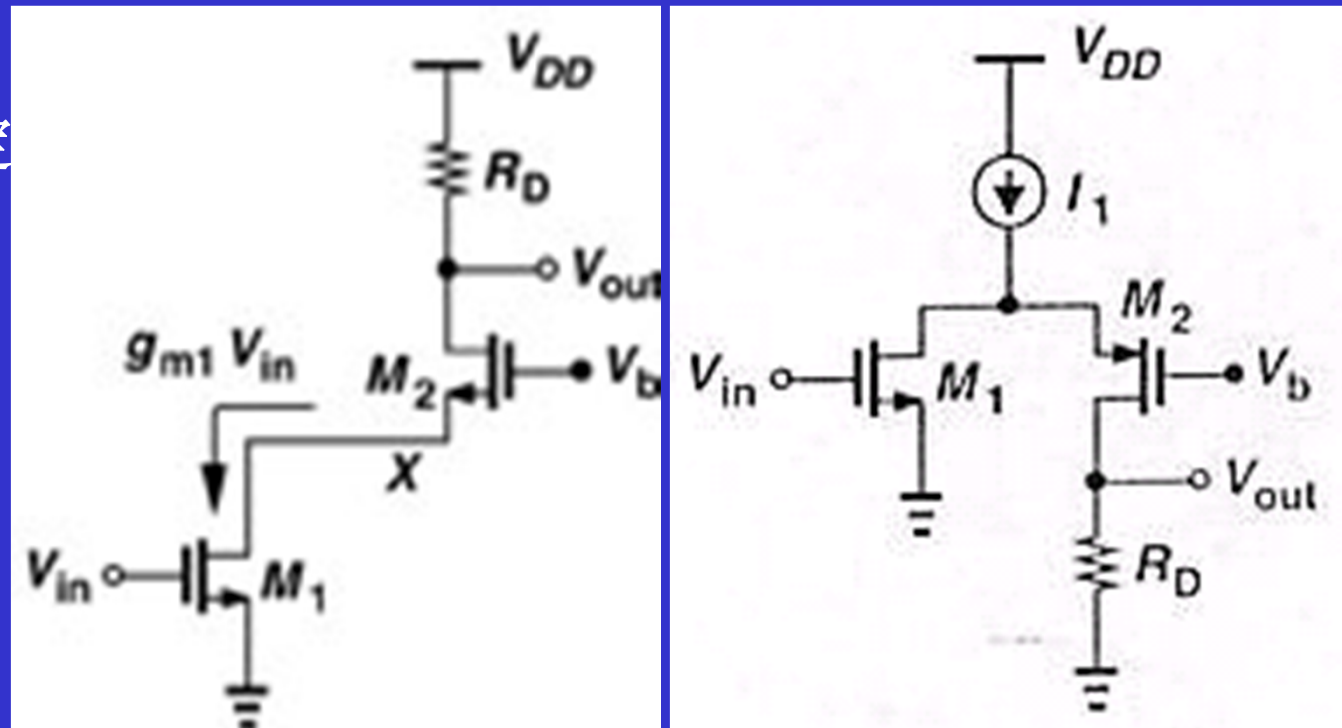
$$A_v = g_{m1} R_D$$

不足：

输出摆幅受一定影响

主要应用：

电流源
共源共栅OPA
折叠共源共栅OPA等



$$R_{out} = [1 + (g_{m2} + g_{mb2})r_{o2}]r_{o1} + r_{o2}$$

模拟集成电路原理与设计

第4章 差分放大器

陈中建

chenzj@pku.edu.cn

62759620, 理科2号楼2617

微电子学系

授课内容

绪论, 2学时	重要性、一般概念
器件物理基础, 2学时	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器, 5学时	共源、共漏、共栅、共源共栅
EDA系统使用常识 和设计实习实例演示, 2学时	做设计实习所需软硬件系统的使用
差动放大器, 3学时	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜, 2学时	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性, 4学时	米勒效应、极点与节点关系、单级放大器频率特性分析
噪声, 4学时	统计特性、类型、电路表示、单级放大器噪声分析、噪声带宽
期中考试 2学时, 评卷 1学时。习题课若干学时	
反馈, 6学时	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器, 6学时	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿, 6学时	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图, 3学时	叉指、对称、ESD等

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

差分放大器

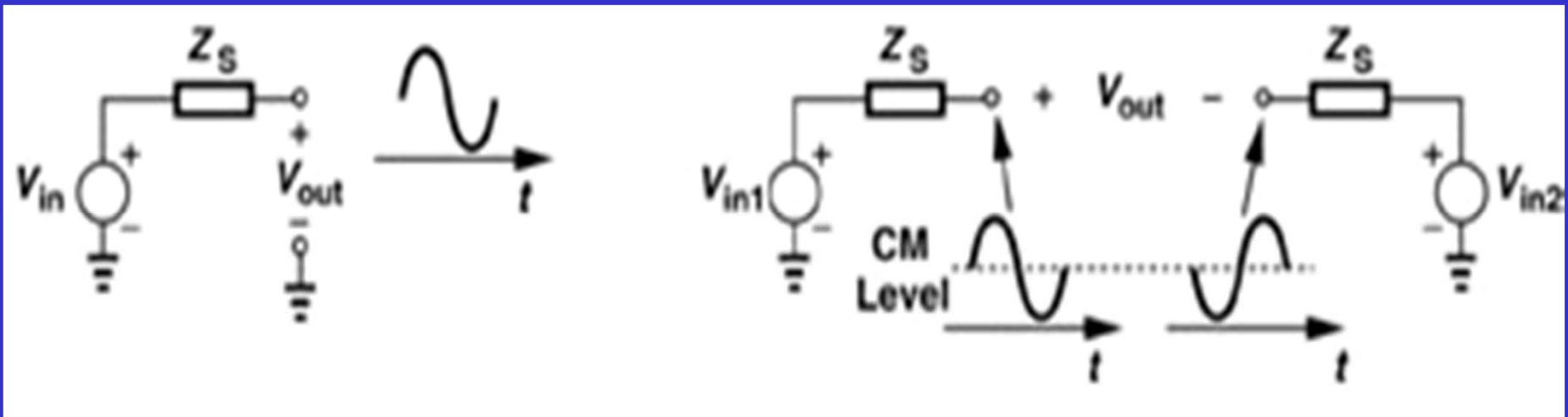
□ AIC中非常重要的电路模块

❖ 最重要的电路发明之一

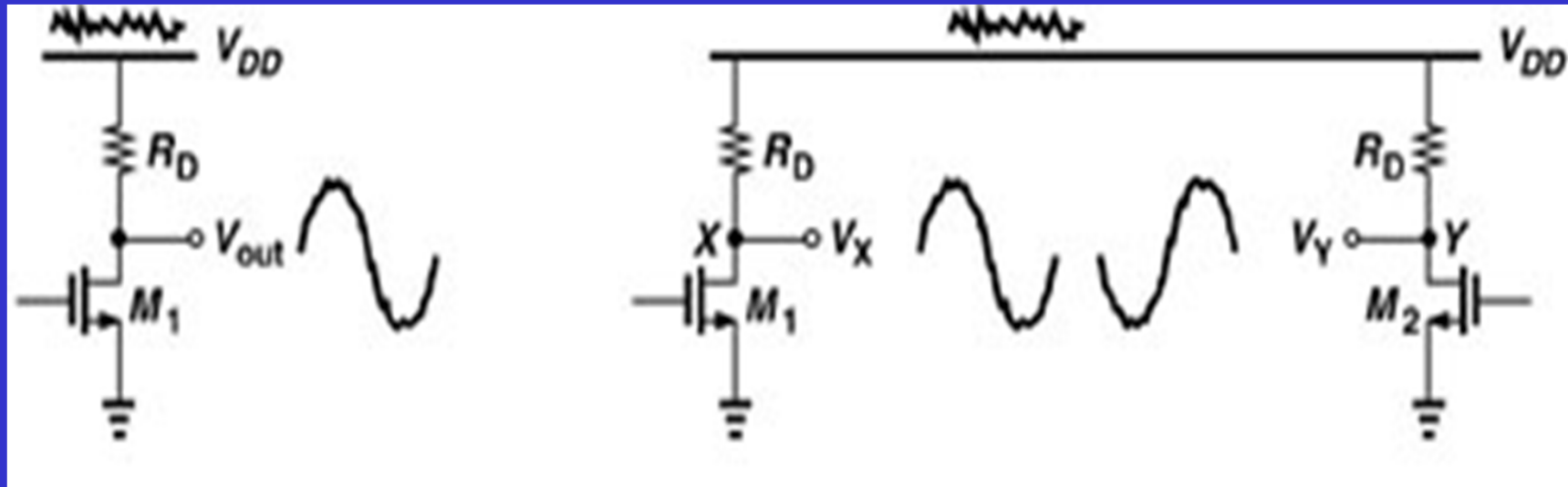
□ 对两个信号的差值进行放大

❖ **差分信号定义**：相对于共模电平而言，差分信号大小相等、极性相反

❖ **差分放大器优点**：抗干扰能力强，增大电压摆幅，高线性度等

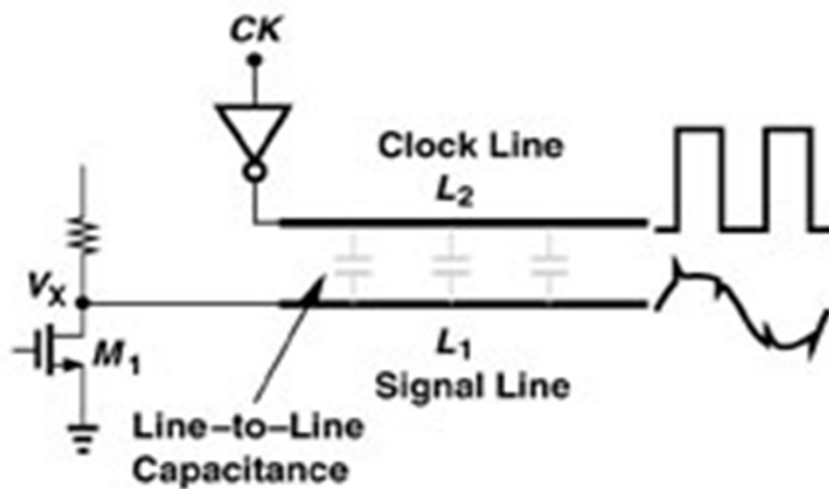


抗干扰能力



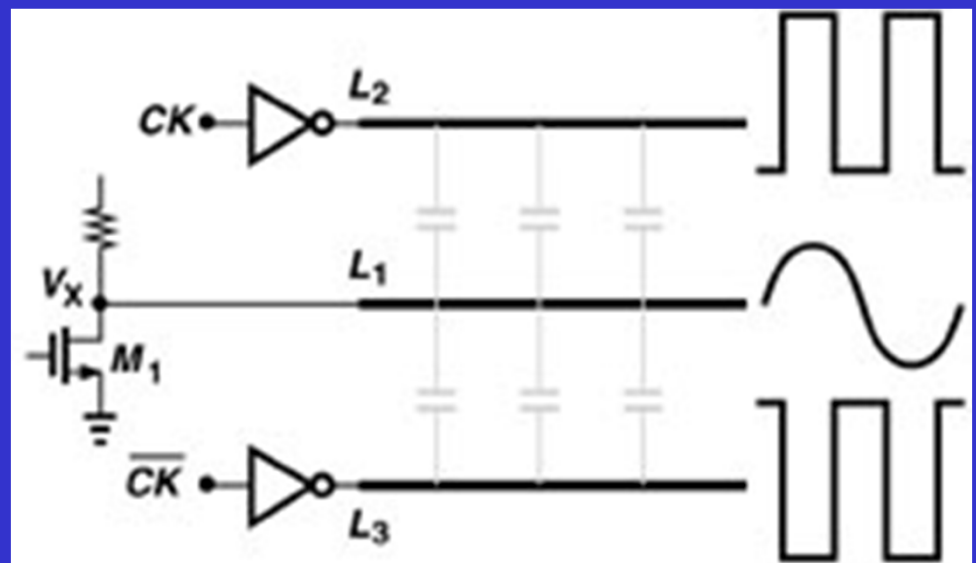
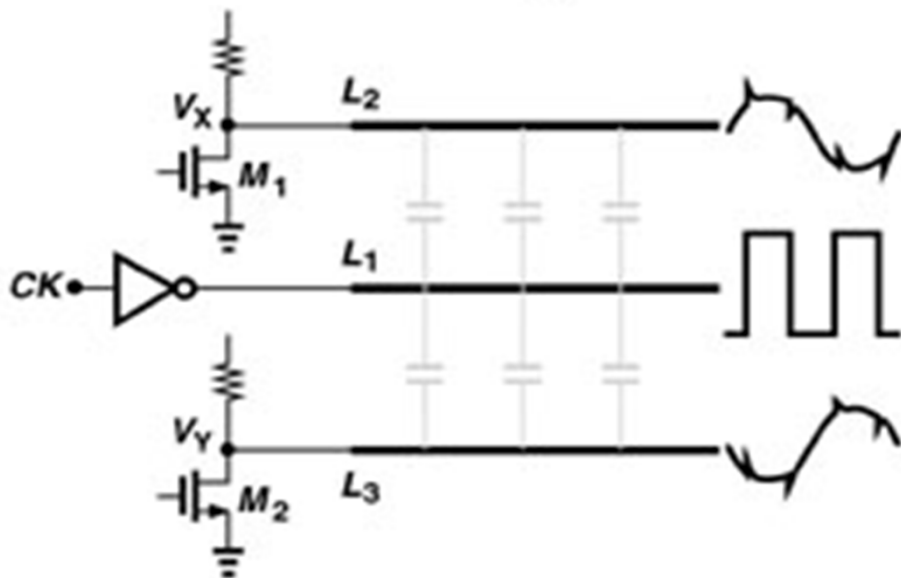
电源线上的干扰会影响共模电平，但不影响差分输出

抗干扰能力



(a)

时钟线上的干扰会影响共模电平，但不影响差分输出



增大电压摆幅

□ 共源级

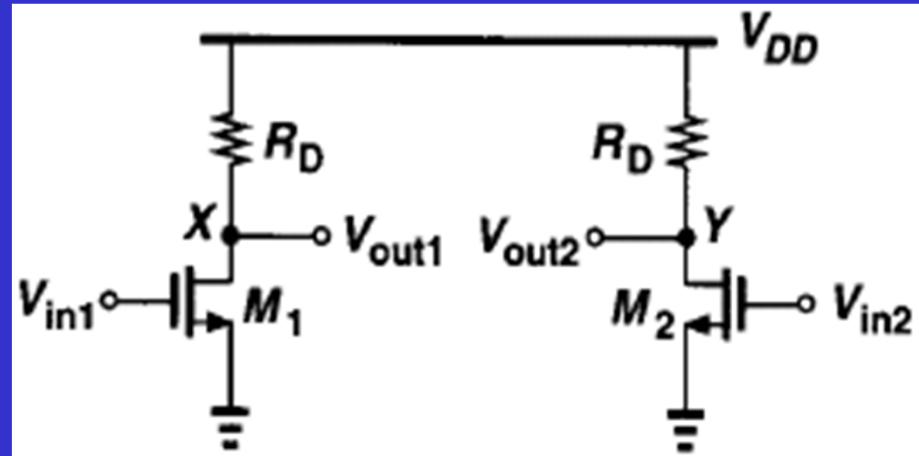
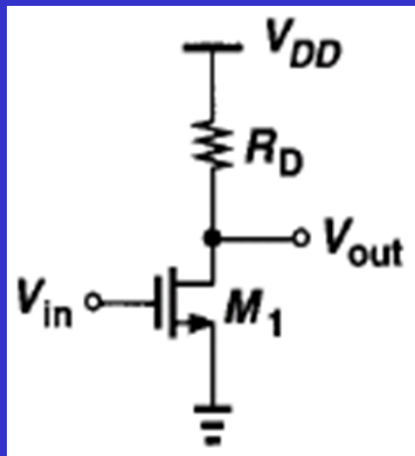
$$V_{out,min} = V_{ov}, \quad V_{out,max} = V_{DD}, \quad V_{out,swing} = V_{DD} - V_{ov}$$

□ 差分放大级

$$V_{out1} = V_{ov}, \quad V_{out2} = V_{DD}, \quad V_{out,min} = V_{out1} - V_{out2} = V_{ov} - V_{DD}$$

$$V_{out1} = V_{DD}, \quad V_{out2} = V_{ov}, \quad V_{out,max} = V_{out1} - V_{out2} = V_{DD} - V_{ov}$$

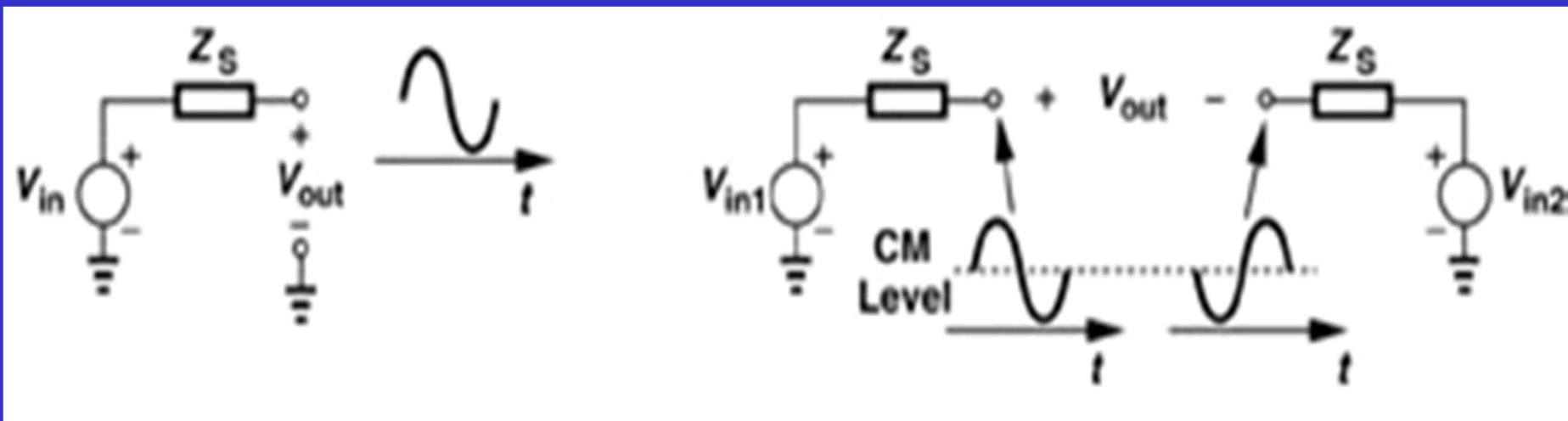
$$V_{out,swing} = V_{out,max} - V_{out,min} = 2(V_{DD} - V_{ov})$$



差分放大器总特点

□优点

- ❖ 抗干扰能力强，电压摆幅大，偏置电路简单，高线性度等
- ❖ 和单端电路相比，差分电路规模加倍
 - 与所获得的高性能相比，这个不算做缺点



本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

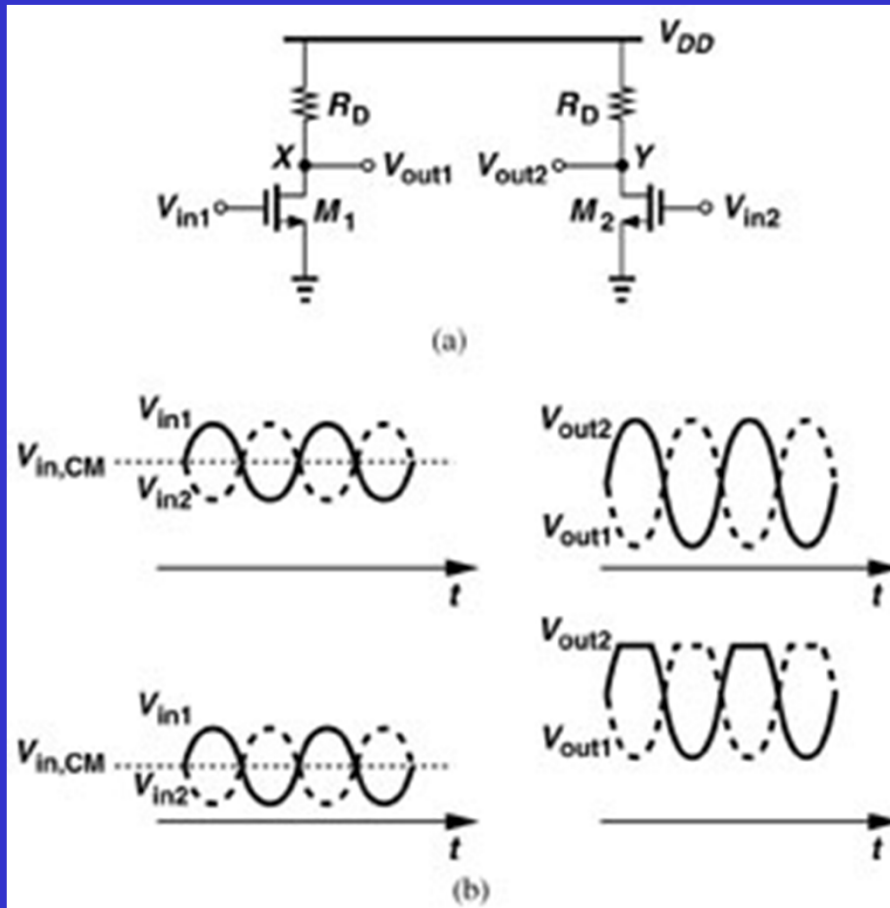
❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

简单差分电路



缺点1: 直流偏置电流受输入共模电平影响大, 从而影响跨导、增益

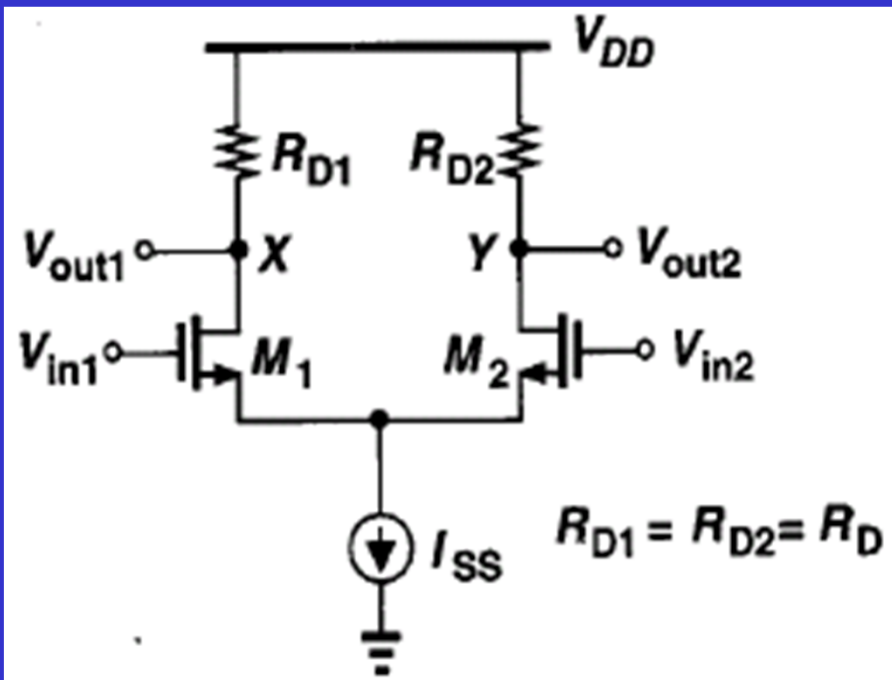
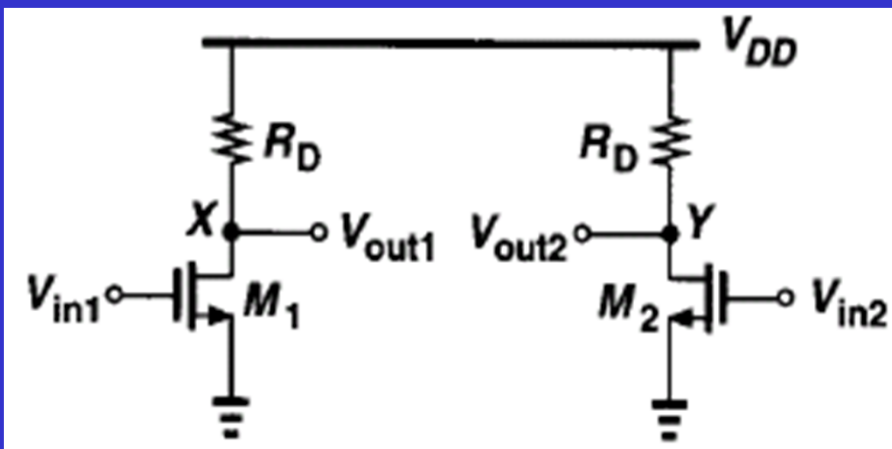
$$g_m = \sqrt{2I_D \mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}$$

$$A_v = -g_m R_D$$

缺点2: 输出共模电平对 $V_{in,CM}$ 敏感, 设置不当或受外界干扰而波动时, 会导致 $V_{out,CM}$ 偏离理想偏置点, 导致可用的输出电压摆幅减小

问题根源: 偏置电流随 $V_{in,CM}$ 改变

简单差分电路



缺点1: 直流偏置电流受输入共模电平影响大, 从而影响跨导、增益

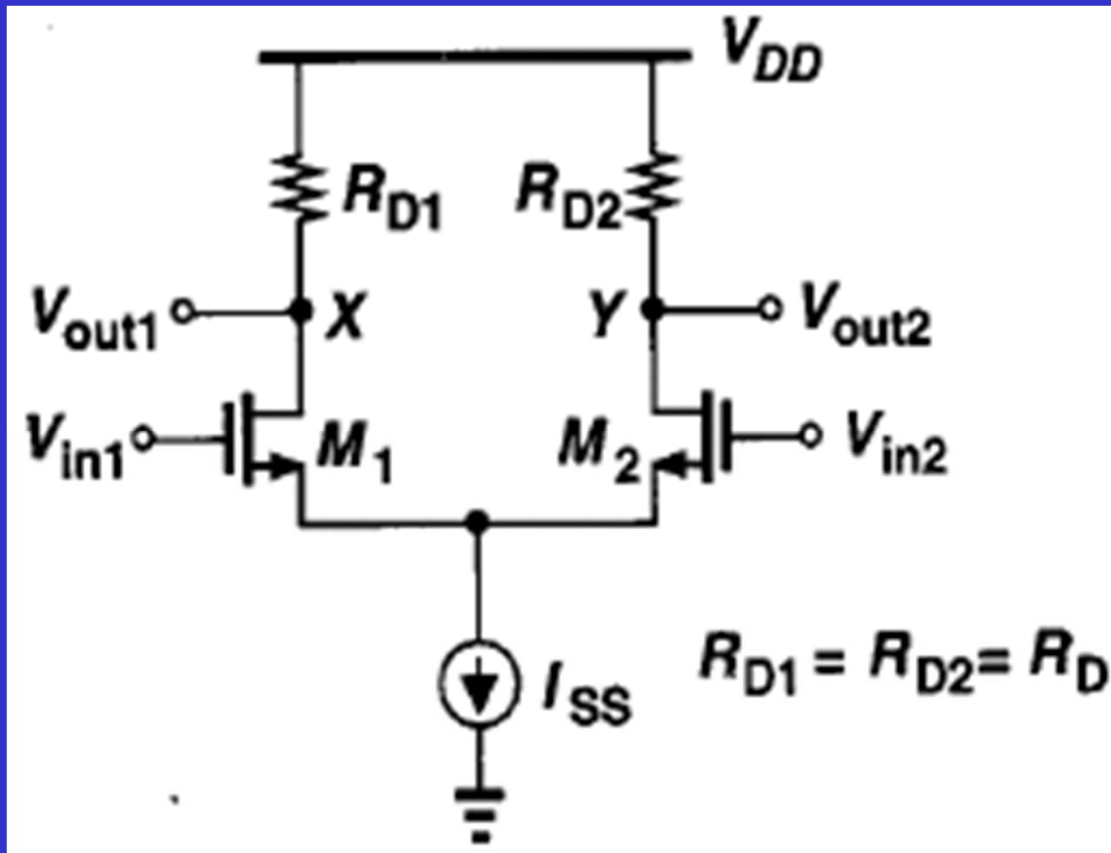
缺点2: 输出共模电平对 $V_{in,CM}$ 敏感, 设置不当或受外界干扰而波动时, 会导致 $V_{out,CM}$ 偏离理想偏置点, 导致可用的输出电压摆幅减小

问题根源: 偏置电流随 $V_{in,CM}$ 改变

解决办法: 稳定偏置电流

$$V_{out,CM} = V_{DD} - \frac{I_{SS}}{2} \cdot R_D$$

基本差分对电路



$$g_m = \sqrt{2I_D \mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}$$

$$A_v = -g_m R_D$$

$$V_{out,CM} = V_{DD} - \frac{I_{SS}}{2} \cdot R_D$$

直流偏置电流由 I_{SS} 决定，从而保证跨导、增益、输出共模电平受输入共模电平影响小

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

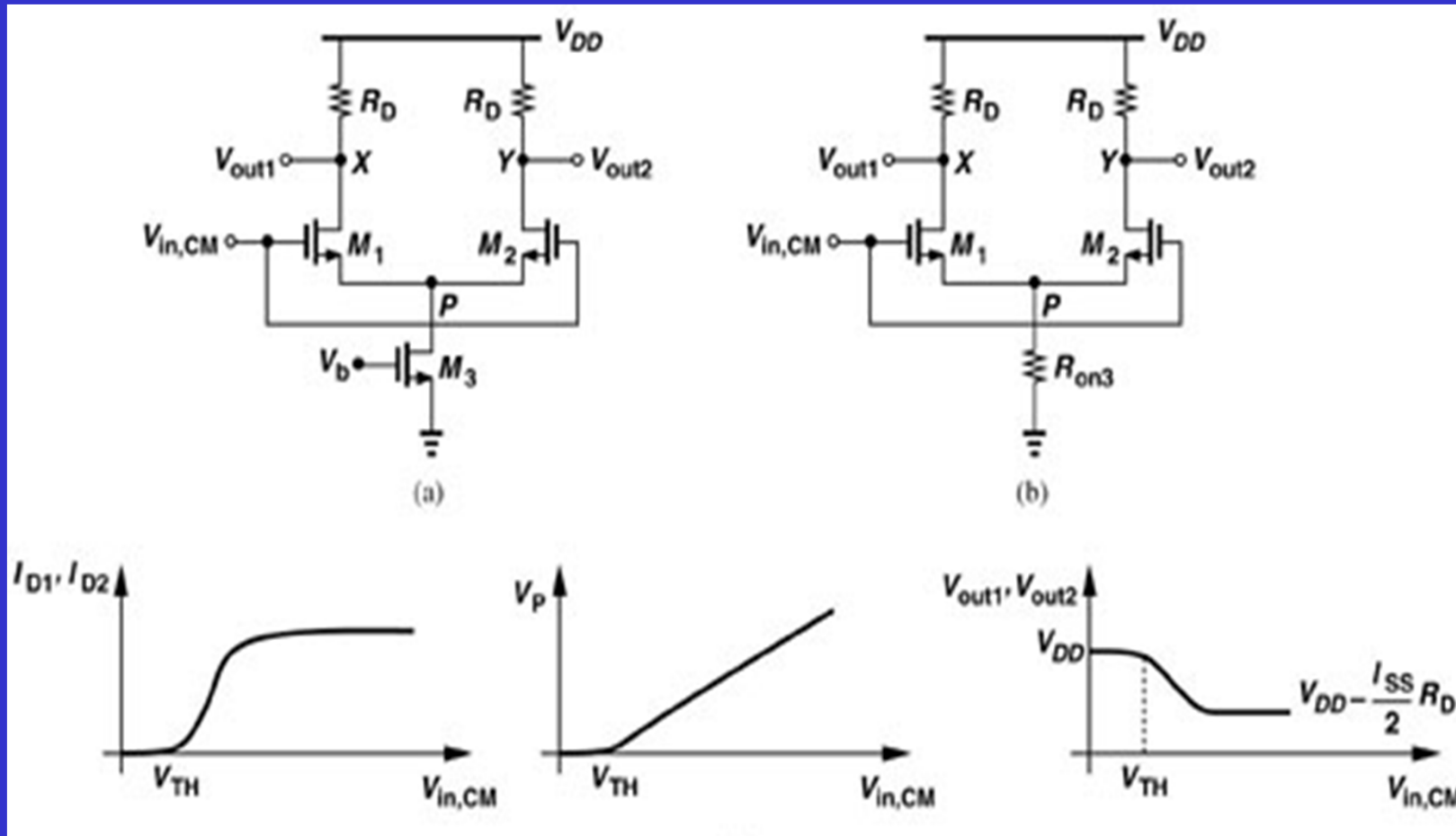
❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

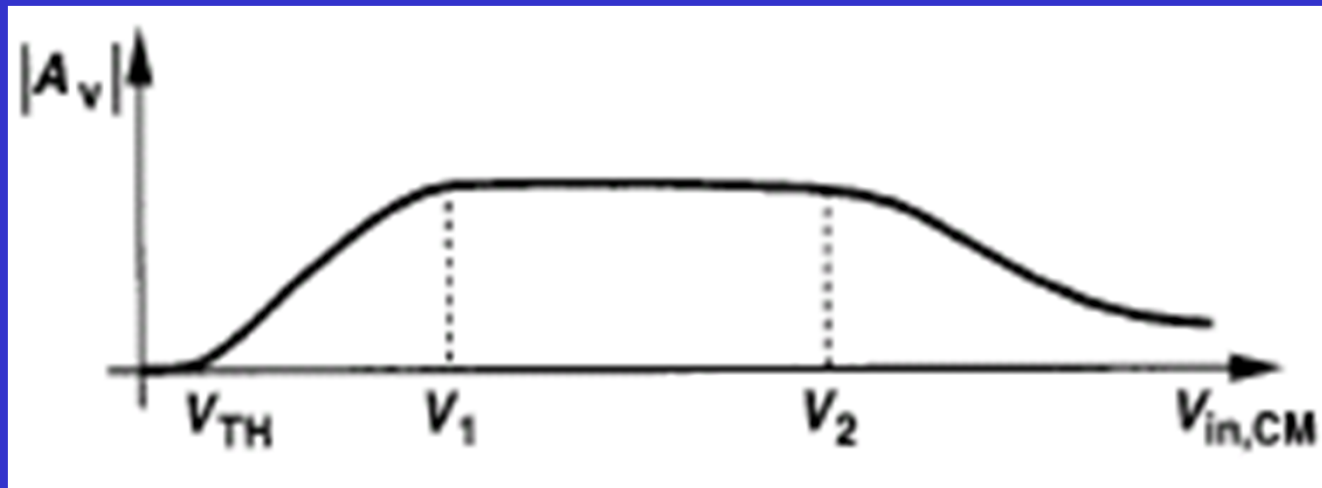
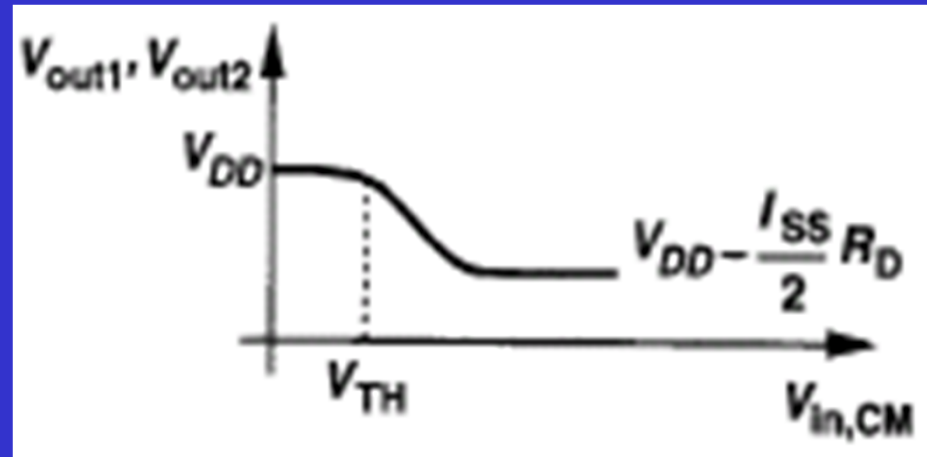
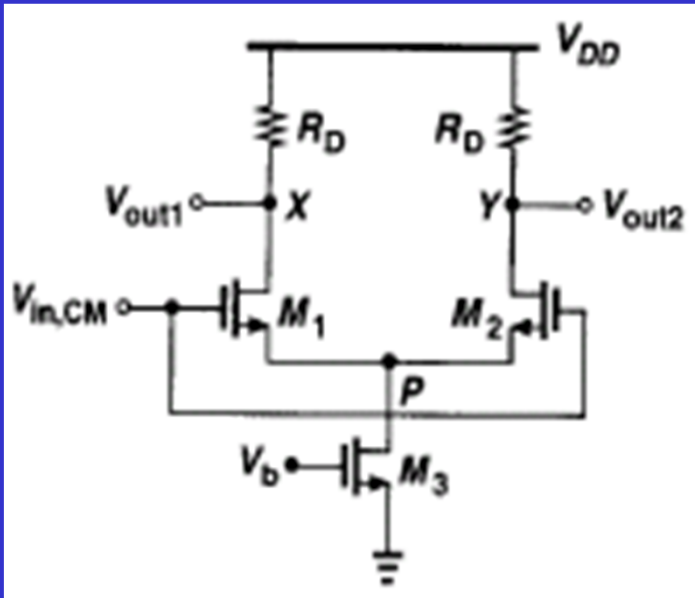
□差分放大器的应用—Gilbert单元

共模输入范围



$$V_{GS1} + V_{OV3} \leq V_{in,CM} \leq \min[V_{DD} - R_D \cdot \frac{I_{SS}}{2} + V_{TH}, V_{DD}]$$

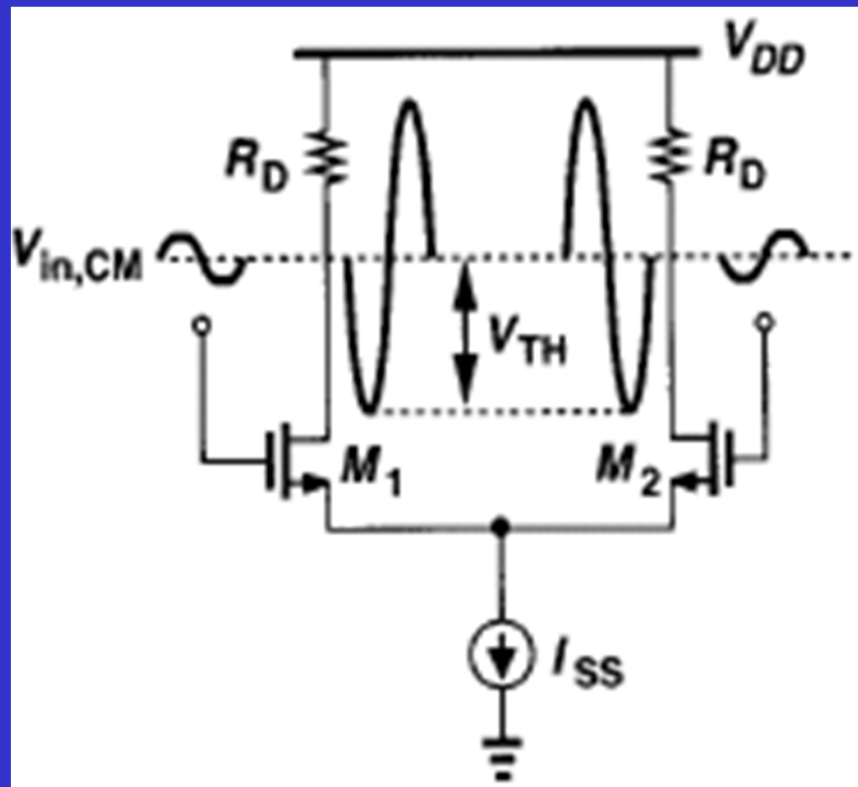
由转移特性曲线推导出 A_v



输出电压摆幅

□ 每个输出端

- ❖ 最大: V_{DD} , 最小: $V_{in,CM} - V_{TH}$
- ❖ $V_{in,CM}$ 越小, 输出电压摆幅越大, 也有利于 A_v 大



本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

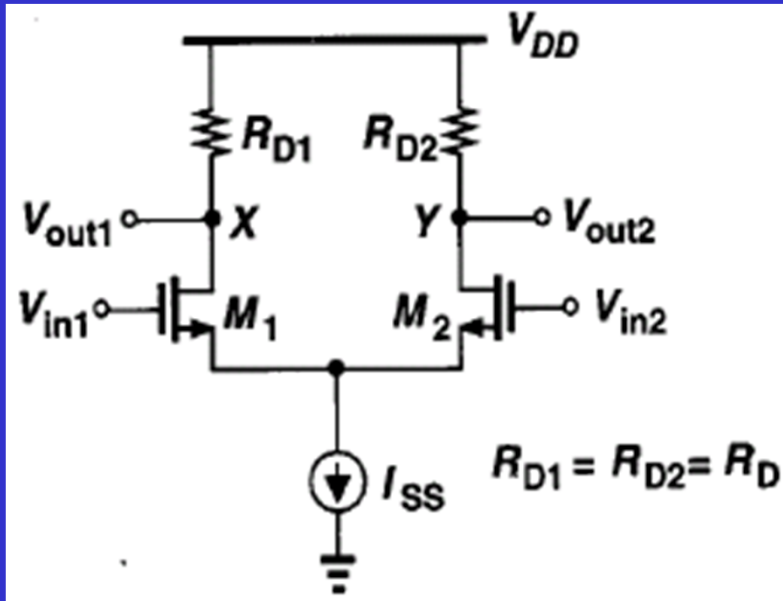
❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

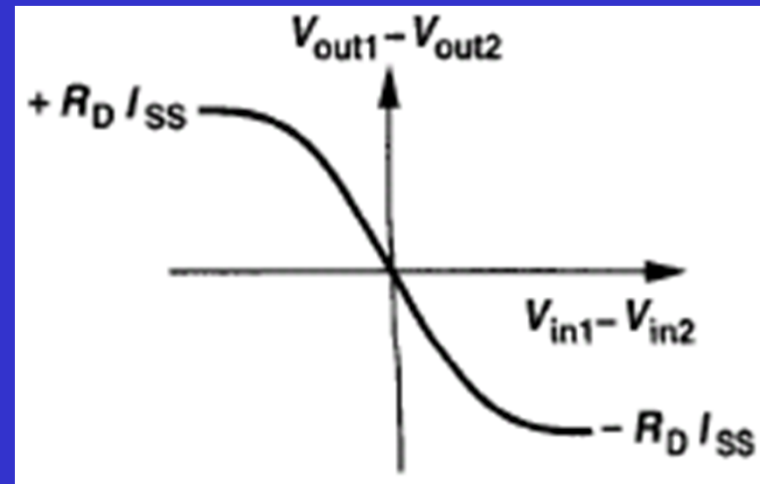
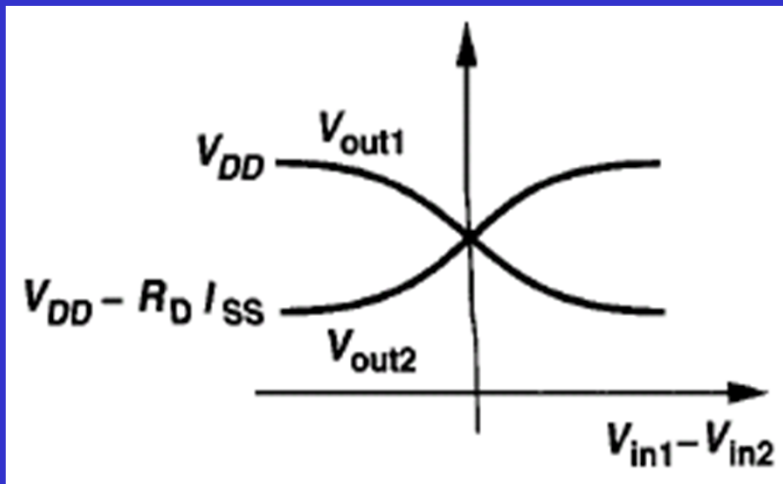
定性分析



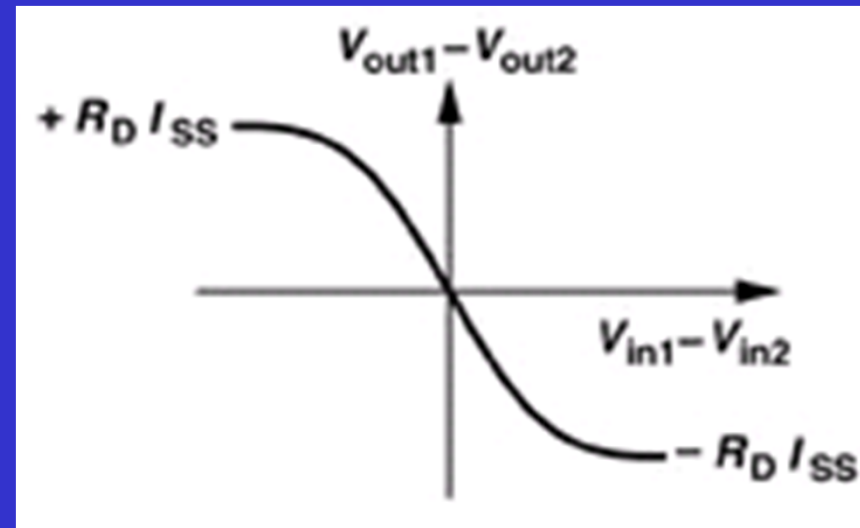
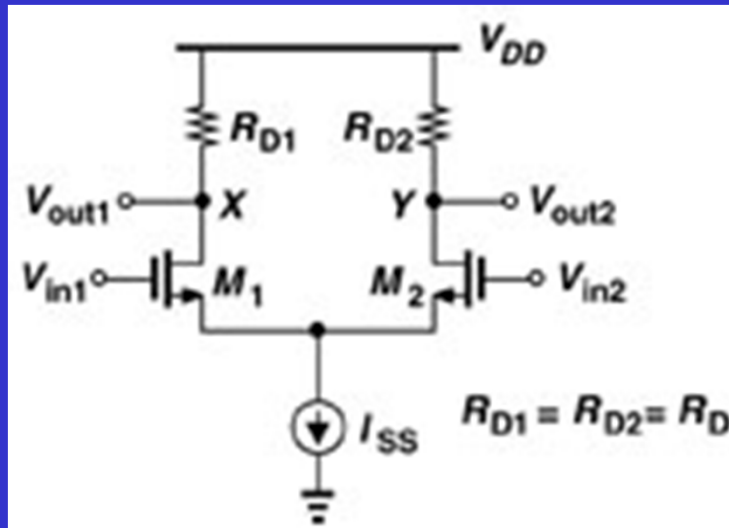
输出端的最大电平和最小电平分别是 V_{DD} 和 $V_{DD} - R_D I_{SS}$ ，与输入共模电平无关

$V_{in1} = V_{in2}$ 附近，增益最大，线性度好

求 $(V_{out1} - V_{out2})$ 与 $(V_{in1} - V_{in2})$ 的函数关系式



定量分析



思路: $V_{out1} - V_{out2} = -R_D(I_{D1} - I_{D2})$; 求出 $I_{D1} - I_{D2} = f(V_{in1} - V_{in2})$ 即可求出 ΔV_{out} 和 ΔV_{in} 的关系

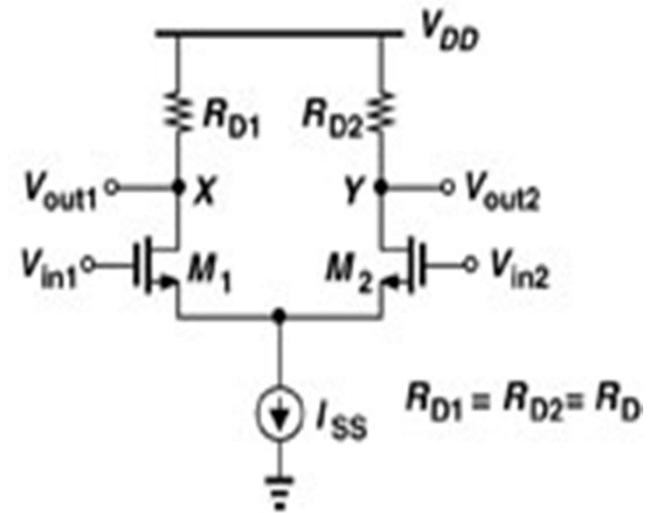
$$\because V_{in1} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu C_{ox} \frac{W}{L}}}, V_{in2} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_{D2}}{\mu C_{ox} \frac{W}{L}}}$$

$$\because V_{in1} - V_{in2} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu C_{ox} \frac{W}{L}}} - \sqrt{\frac{2I_{D2}}{\mu C_{ox} \frac{W}{L}}}$$

定量分析

$$\therefore V_{in1} - V_{in2} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu C_{OX} \frac{W}{L}}} - \sqrt{\frac{2I_{D2}}{\mu C_{OX} \frac{W}{L}}}$$

$$\therefore (V_{in1} - V_{in2})^2 = \frac{2}{\mu C_{OX} \frac{W}{L}} (I_{SS} - 2\sqrt{I_{D1}I_{D2}})$$



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

两边平方，得：

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

定量分析

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

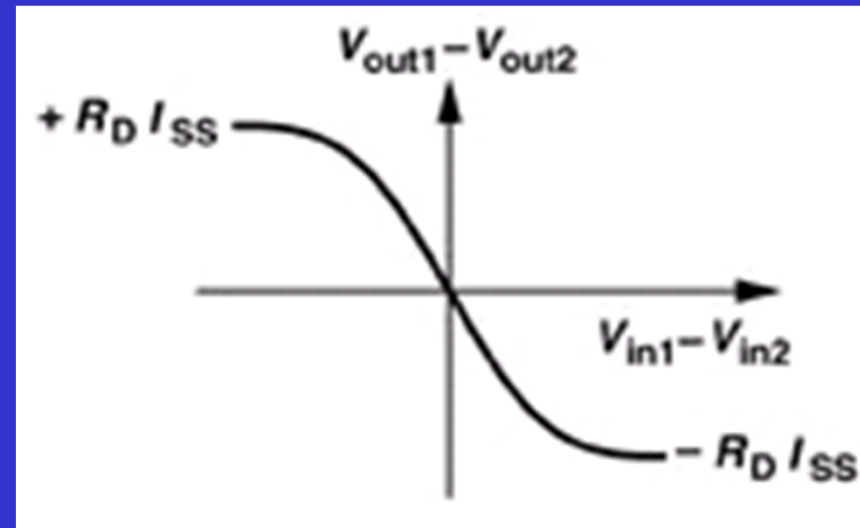
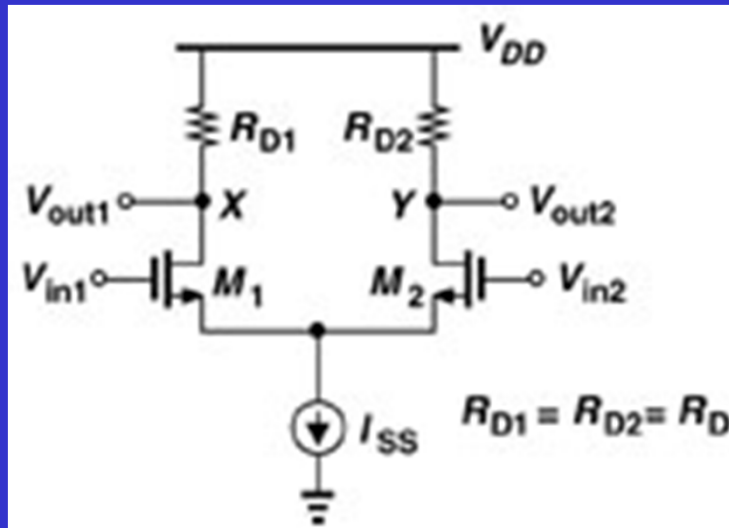
$$\frac{1}{4} \left(\mu C_{OX} \frac{W}{L} \right)^2 (V_{in1} - V_{in2})^2 \left[(V_{in1} - V_{in2})^2 - \frac{4I_{SS}}{\mu C_{OX} \frac{W}{L}} \right] + I_{SS}^2 = 4I_{D1}I_{D2}$$

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

$$\therefore (I_{D1} - I_{D2})^2 = -\frac{1}{4} \left(\mu C_{OX} \frac{W}{L} \right)^2 (V_{in1} - V_{in2})^2 \left[(V_{in1} - V_{in2})^2 - \frac{4I_{SS}}{\mu C_{OX} \frac{W}{L}} \right]$$

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

定量分析



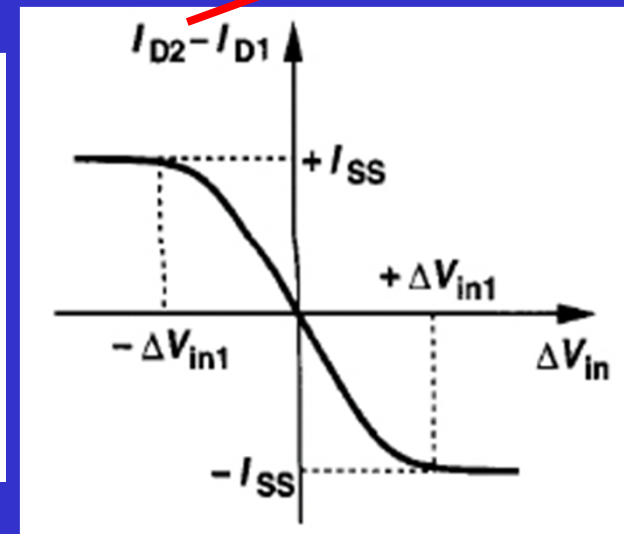
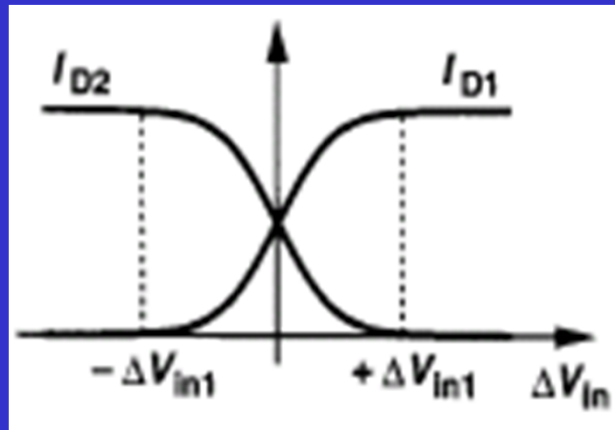
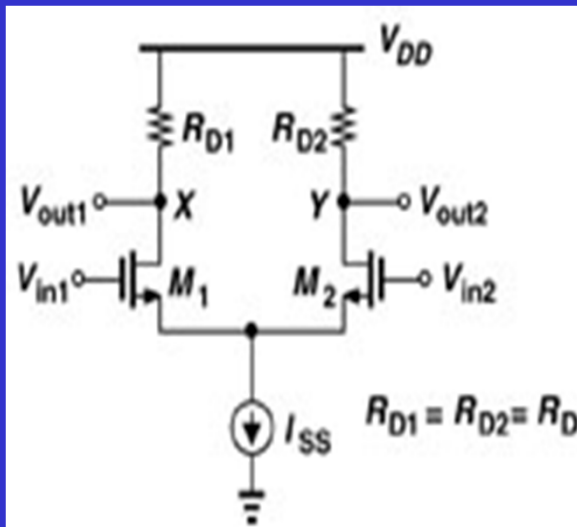
思路: $V_{out1} - V_{out2} = -R_D(I_{D1} - I_{D2})$; 求出 $I_{D1} - I_{D2} = f(V_{in1} - V_{in2})$ 即可求出 ΔV_{out} 和 ΔV_{in} 的关系

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

定量分析

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

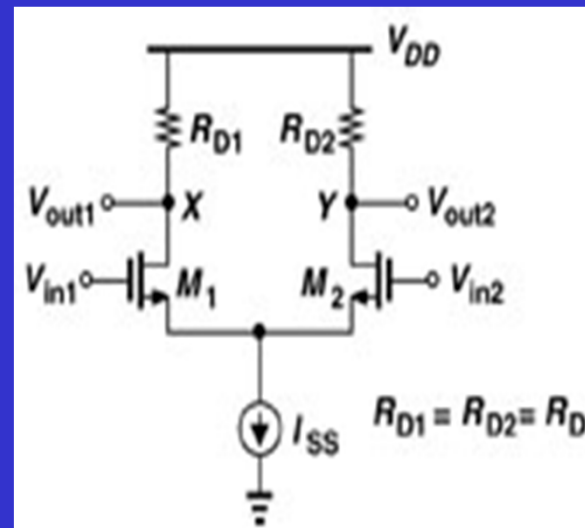
书上为 $I_{D1}-I_{D2}$, 错了



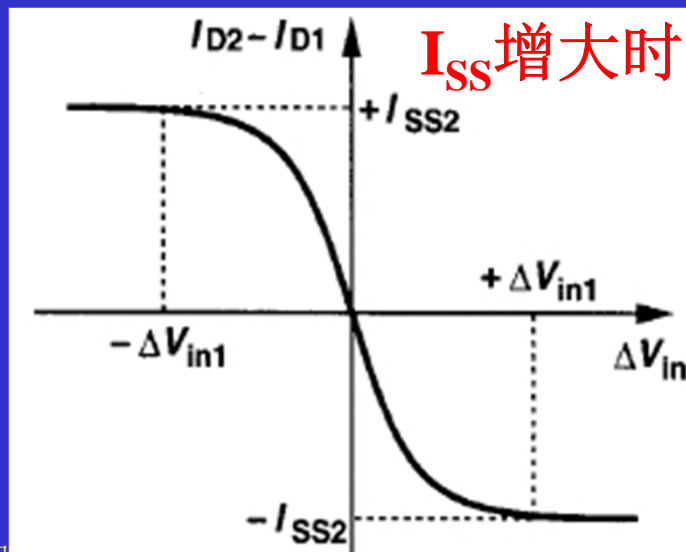
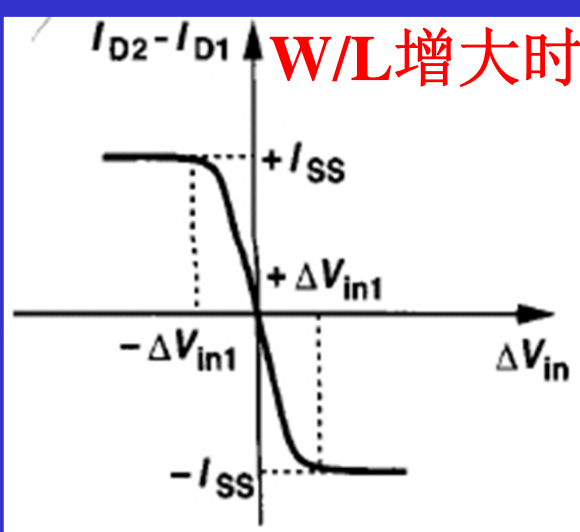
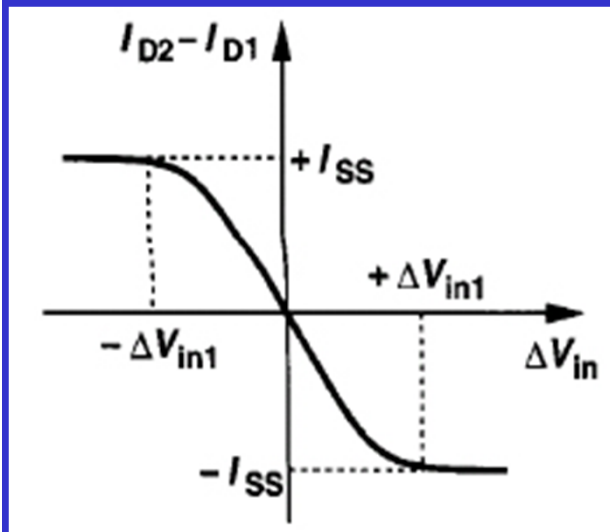
定量分析

□ ΔI_D 与 W/L 、 I_{SS} 的关系

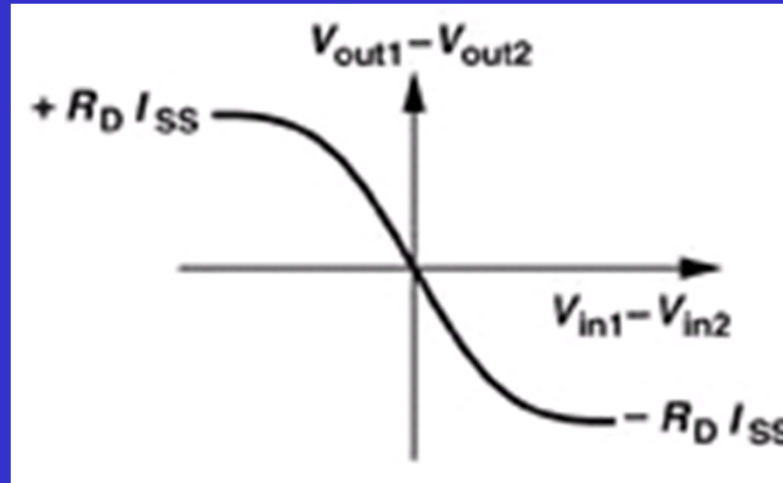
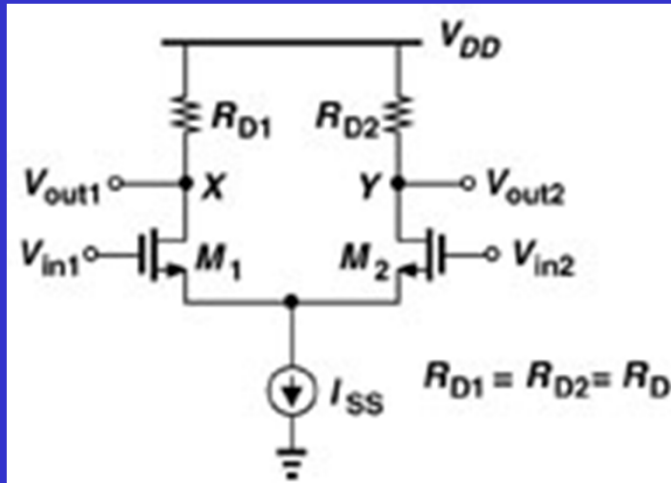
❖ W/L 减小或 I_{SS} 增大能提高线性度



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



定量分析



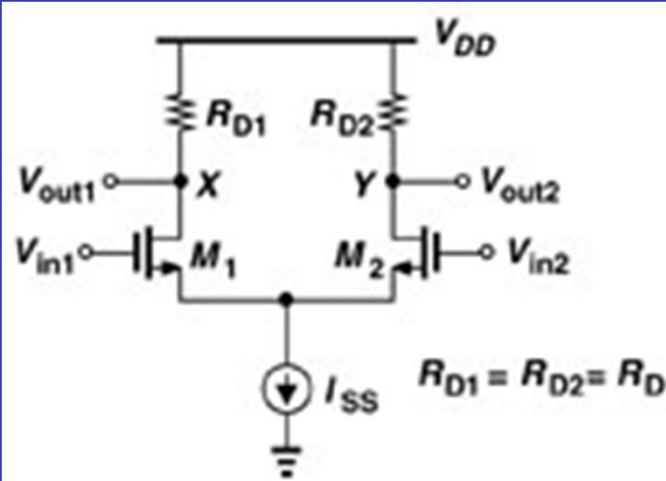
不合理

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

当 $\Delta V_{in} = 0$ 时,
 $\Delta I_D = 0$, $\Delta V_{out} = 0$

$$\text{当 } \Delta V_{in} = \sqrt{\frac{4 I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}} \text{ 时, } \Delta V_{out} = 0$$

定量分析



$$\text{当 } \Delta V_{in} = \sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}} \text{ 时, } \Delta V_{out} = 0$$

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

$$\text{当 } \Delta V_{in} \geq \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}} \text{ 时, 已有一个 MOS 管截止}$$

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

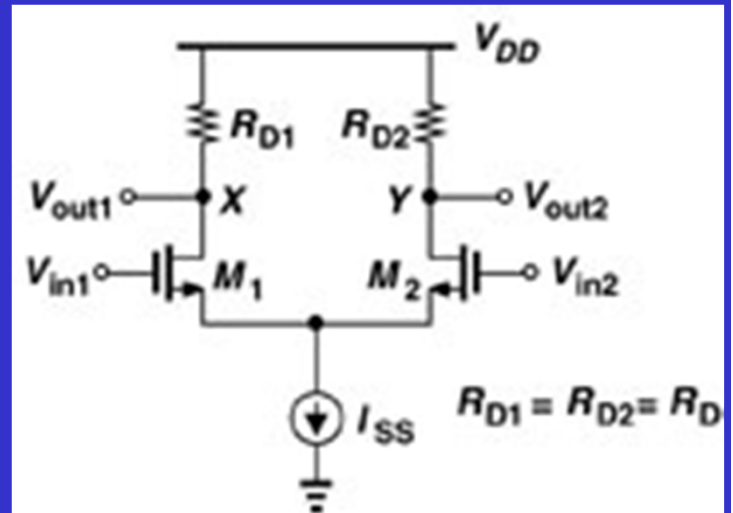
等价跨导公式

从大信号结果入手计算小信号差分增益

$$G_m = \frac{\partial \Delta I_D}{\partial \Delta V_{in}}$$

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

$$G_m = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \frac{\frac{4 I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}} - 2 \Delta V_{in}^2}{\sqrt{\frac{4 I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}} - \Delta V_{in}^2}}$$

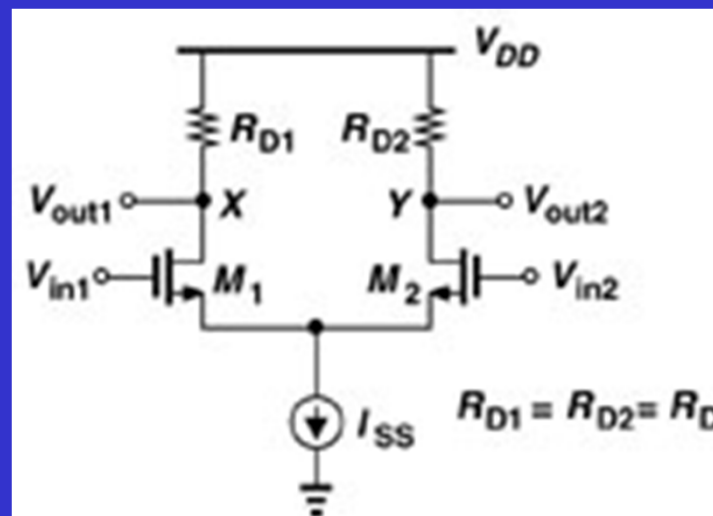
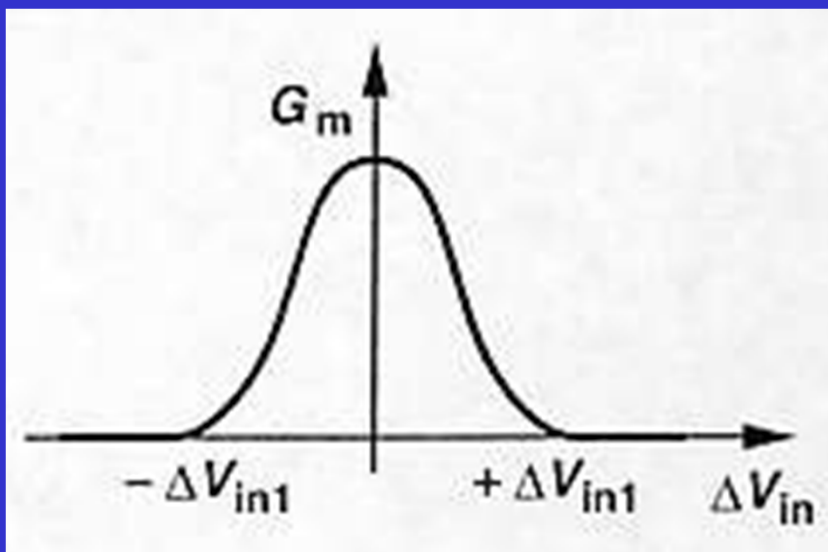


等价跨导曲线

$$G_m = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \frac{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}} - 2\Delta V_{in}^2}{\sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}} - \Delta V_{in}^2}}$$

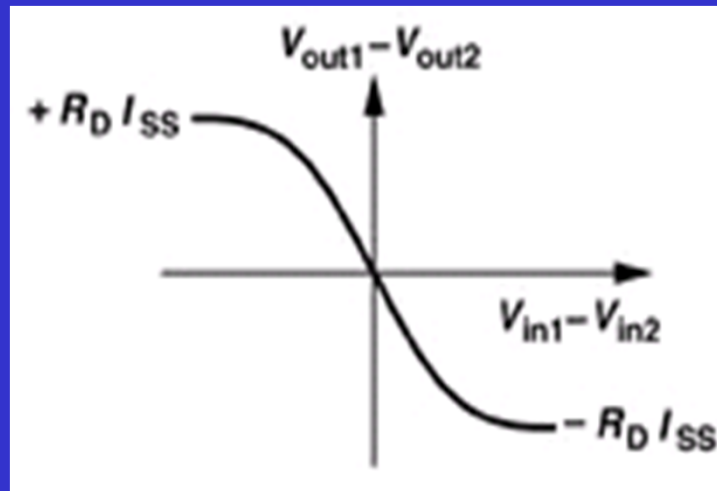
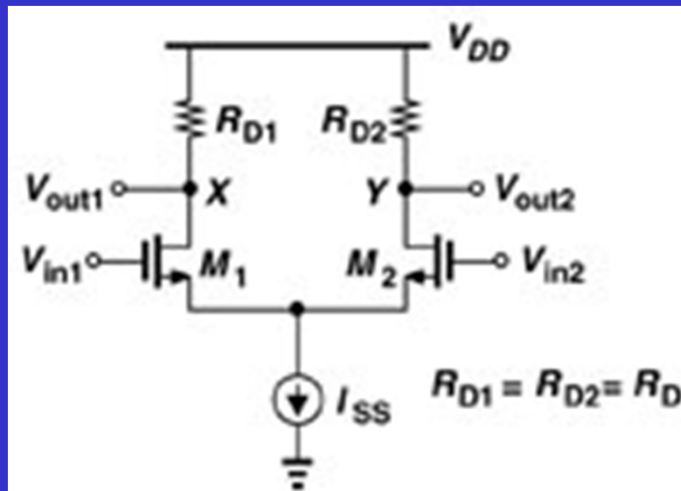
$$\Delta V_{in1} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}}$$

$$G_{m,max} = \sqrt{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} I_{SS}}$$



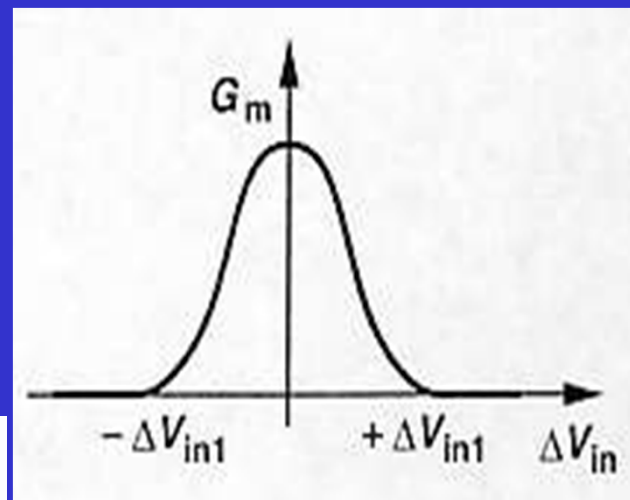
差模增益

$$A_v = \frac{\partial \Delta V_{out}}{\partial \Delta V_{in}}$$



$$\Delta V_{out} = V_{out1} - V_{out2} = -R_D \Delta I_D$$

$$A_v = \frac{\partial \Delta V_{out}}{\partial \Delta V_{in}} = \frac{\partial \Delta V_{out}}{\partial \Delta I_D} \cdot \frac{\partial \Delta I_D}{\partial \Delta V_{in}} = -R_D \cdot G_m$$



全差分
输入时
的增益

$$A_v = -R_D \cdot \sqrt{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} I_{SS}} = -R_D g_{m1,2}$$

用叠加法求全差分时的差模增益

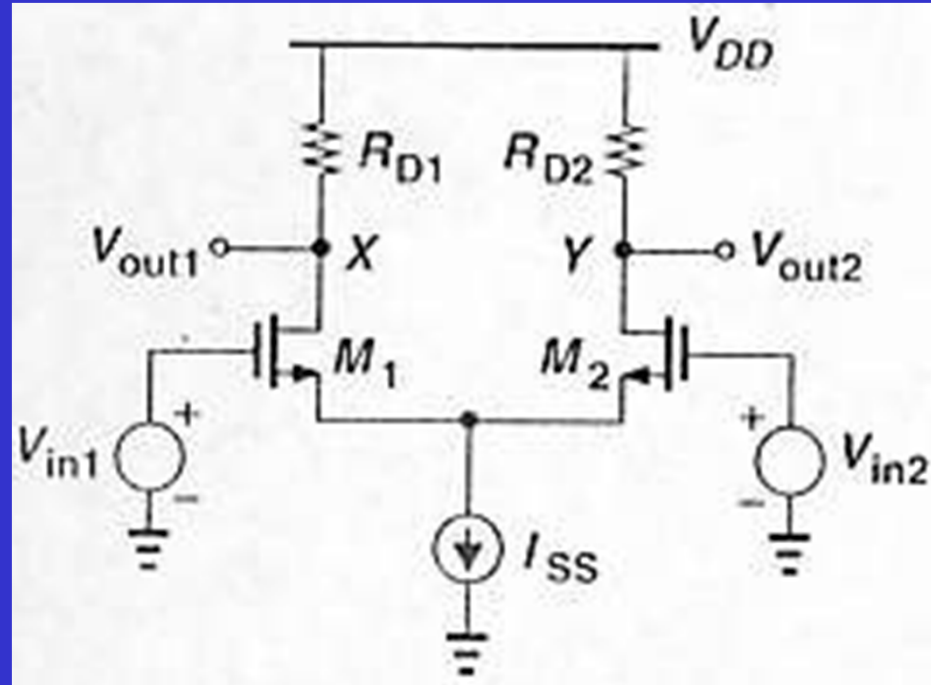
从小信号角度入手，计算小信号差分增益

问题1:

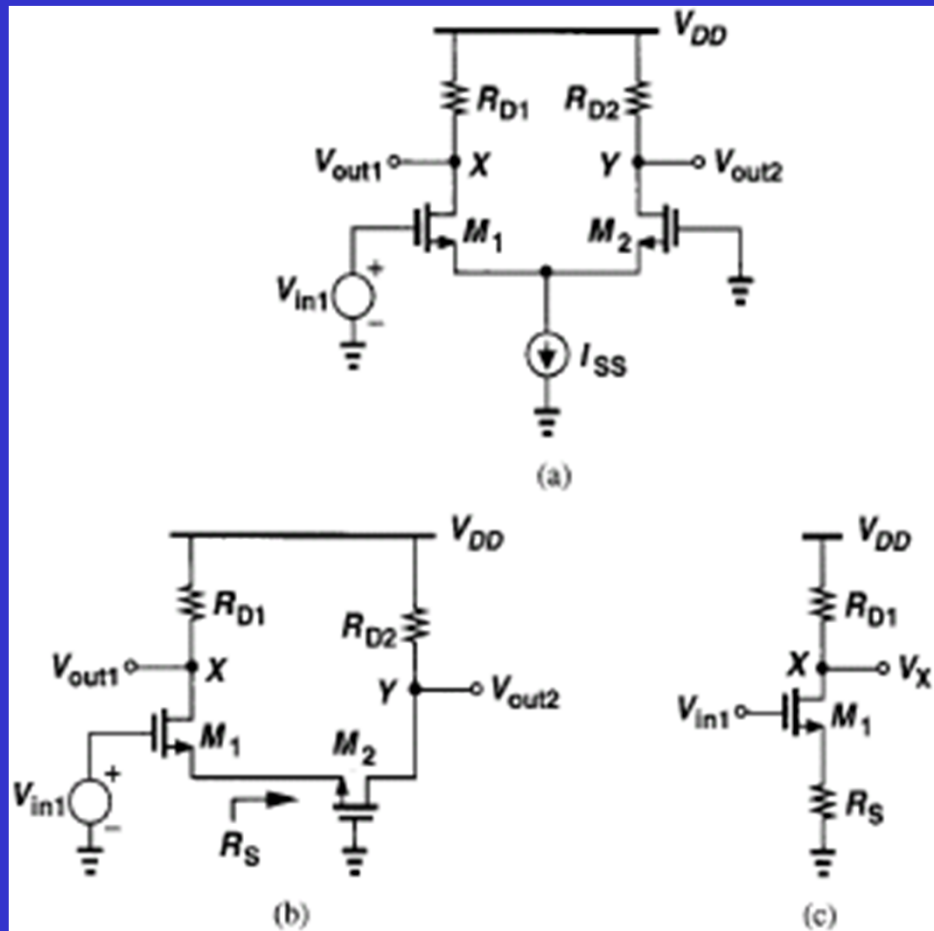
在电路完全对称、直流偏置电压相同的情况下，差分输入端施加两个彼此独立的信号 V_{in1} 和 V_{in2} ，计算 $(V_{out1} - V_{out2}) / (V_{in1} - V_{in2})$

思路:

用叠加法计算。先分别计算 V_{in1} 和 V_{in2} 与 $V_{out1} - V_{out2}$ 的函数关系



用叠加法求全差分时的差模增益



第一步:

令 $V_{in2}=0$, 计算 V_{in1} 与 $V_{out1}-V_{out2}$ 的函数关系

计算 V_{in1} 与 V_{out1} 的函数关系

带负反馈的共源放大级，
负反馈电阻为 $1/g_{m2}$

$$A_v = -\frac{\text{漏支路阻抗}}{\text{源支路阻抗}} = -\frac{R_D}{1/g_m + R_S}$$

$$\frac{V_X}{V_{in1}} = \frac{-g_m R_D}{2}$$

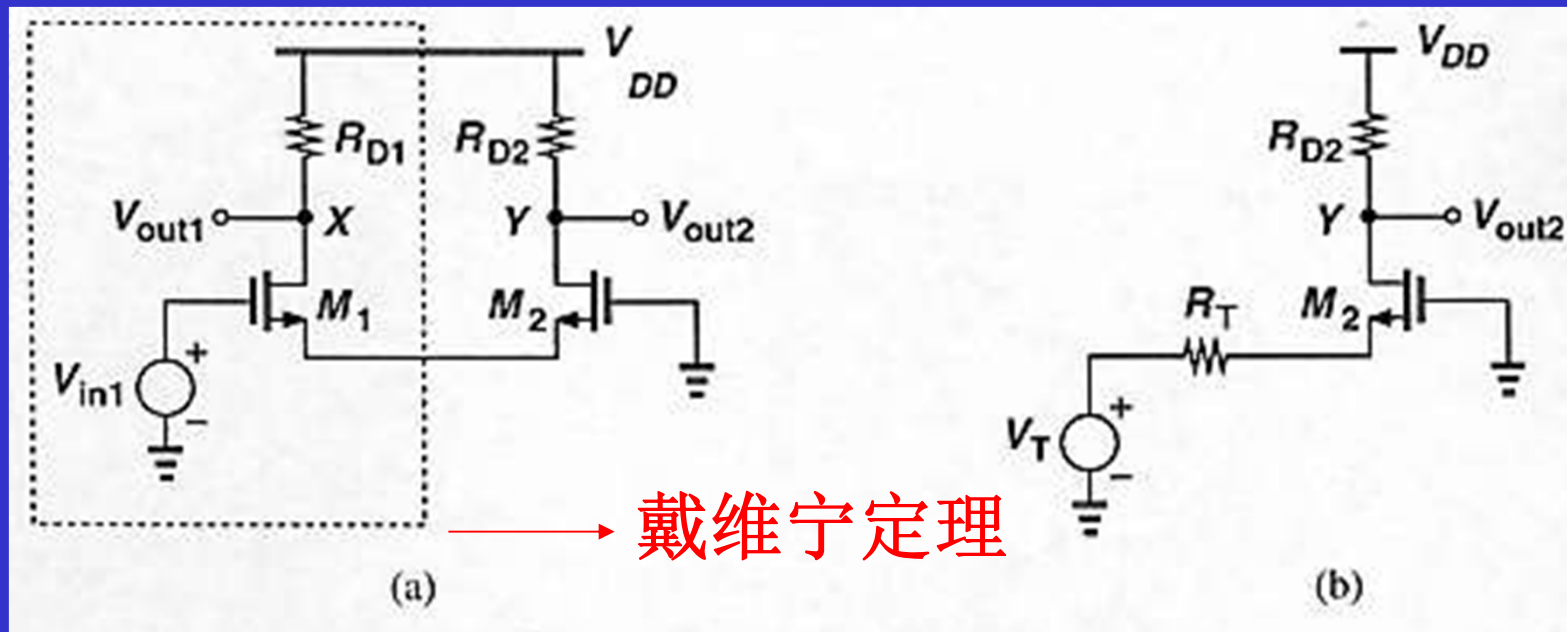
用叠加法求全差分时的差模增益

计算 V_{in1} 与 V_{out2} 的函数关系
用共栅级的结论

$$A_{v, cg} = \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$

$$R_S = R_T = \frac{1}{g_{m1}}$$

$$\frac{V_Y}{V_{in1}} = \frac{g_m R_D}{2}$$



用叠加法求全差分时的差模增益

第一步:

令 $V_{in2} = 0$, 计算 V_{in1} 与 $V_{out1} - V_{out2}$ 的函数关系

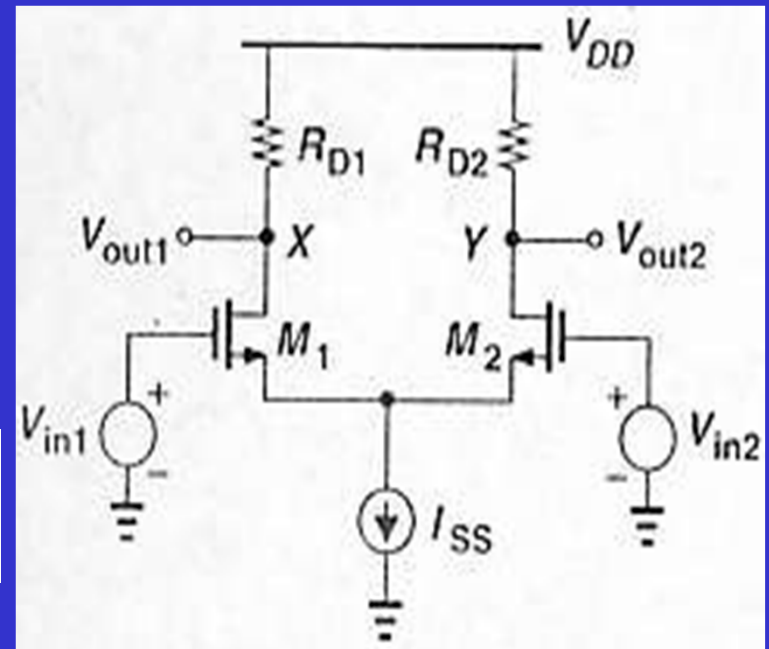
$$V_X = \frac{-g_m R_D}{2} V_{in1} \quad V_Y = \frac{g_m R_D}{2} V_{in1}$$

$$(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{引起的}} = -g_m R_D V_{in1}$$

第二步:

令 $V_{in1} = 0$, 计算 V_{in2} 与 $V_{out1} - V_{out2}$ 的函数关系

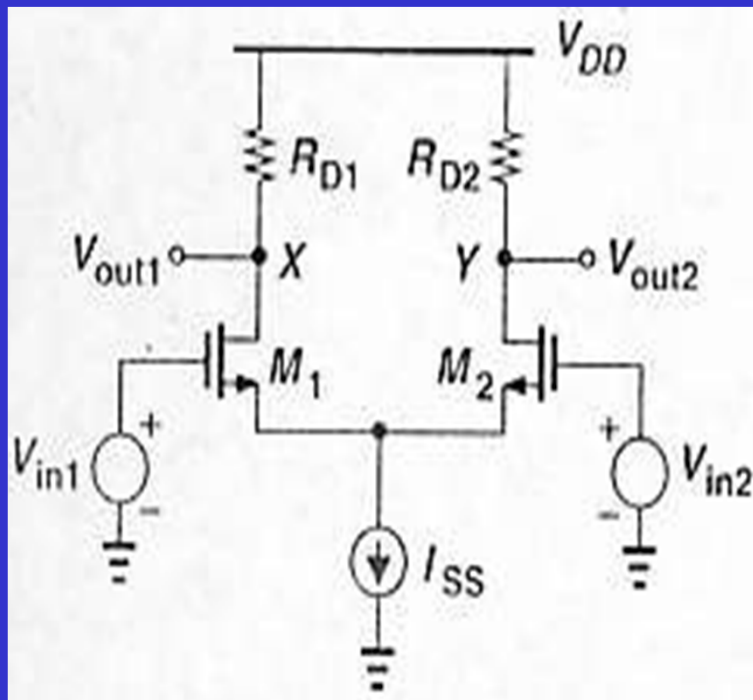
$$(V_X - V_Y)_{V_{in2} \text{引起的}} = g_m R_D V_{in2}$$



用叠加法求全差分时的差模增益

$$(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{引起的}} = -g_m R_D V_{in1} \quad (V_X - V_Y)_{V_{in2} \text{引起的}} = g_m R_D V_{in2}$$

$$(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{和} V_{in2} \text{共同引起的}} = -g_m R_D (V_{in1} - V_{in2})$$



第三步:

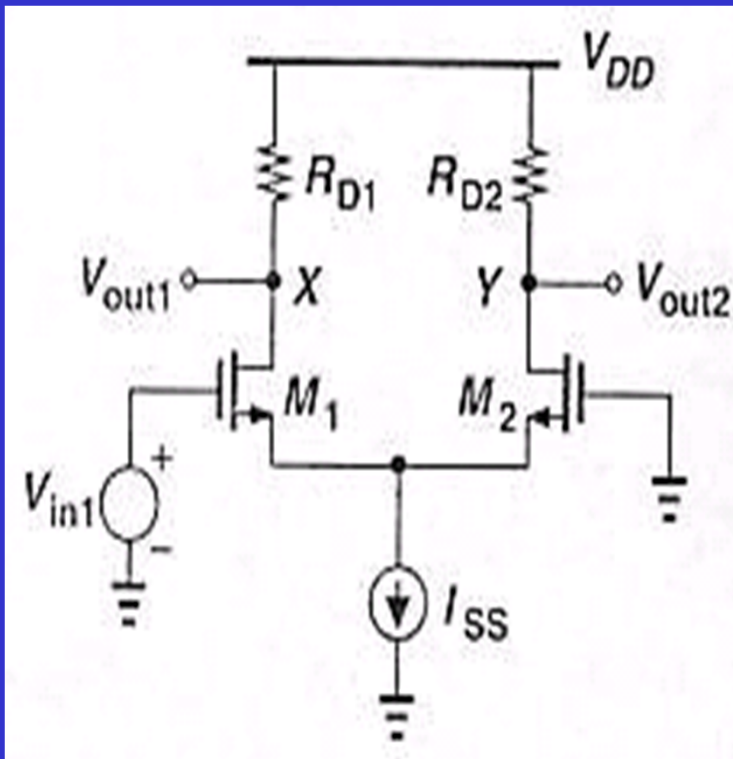
用叠加定理, 求得 $V_{in1} - V_{in2}$ 与 $V_{out1} - V_{out2}$ 的函数关系

$$\frac{(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{和} V_{in2} \text{共同引起的}}}{V_{in1} - V_{in2}} = -g_m R_D$$

用叠加法求全差分时的差模增益

$$(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{引起的}} = -g_m R_D V_{in1} \quad (V_X - V_Y)_{V_{in2} \text{引起的}} = g_m R_D V_{in2}$$

$$\frac{(V_X - V_Y)_{V_{in1} \text{和} V_{in2} \text{共同引起的}}}{V_{in1} - V_{in2}} = -g_m R_D$$



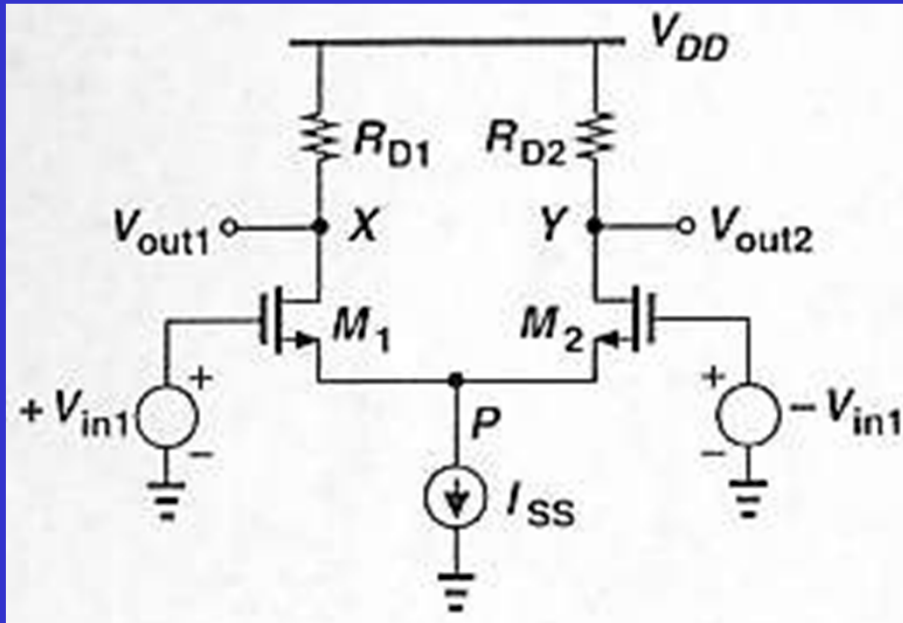
结论:

- 1、单边输入时差模增益为 $-g_m R_D$
- 2、差分输入时差模增益为 $-g_m R_D$
- 3、单边输入单端输出时增益为 $-g_m R_D / 2$

$$V_X = \frac{-g_m R_D}{2} V_{in1}$$

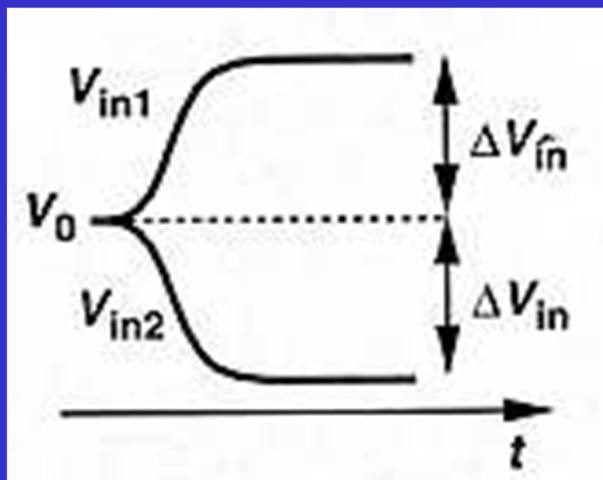
$$V_Y = \frac{g_m R_D}{2} V_{in1}$$

用半电路法求全差分时差模增益



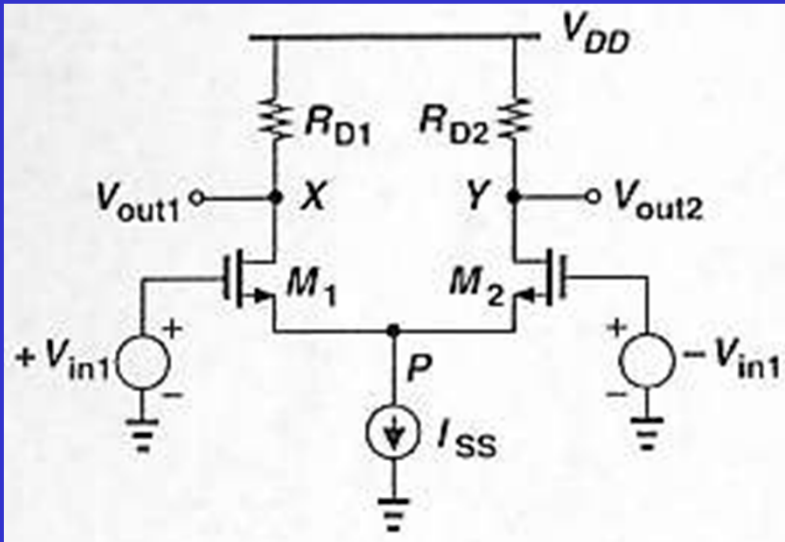
辅助定理:

如果电路完全对称, V_{in1} 从 V_0 变化到 $V_0 + \Delta V_{in}$, V_{in2} 从 V_0 变化到 $V_0 - \Delta V_{in}$, 变化过程大小相等、方向相反且电路仍保持为线性, 则 V_P 的值保持不变 (即为交流地)



证明过程参看教材
比较繁琐

用半电路法求全差分时差模增益



简单证明方法：在 V_{in1} 从 V_0 变化到 $V_0 + \Delta V_{in}$ 、 V_{in2} 从 V_0 变化到 $V_0 - \Delta V_{in}$ 过程中，假定 V_P 变化了 ΔV_P

$$\Delta I_X = (\Delta V_{in} - \Delta V_P) g_{m1}, \Delta I_Y = (-\Delta V_{in} - \Delta V_P) g_{m2}$$

$$\because \Delta I_X + \Delta I_Y = 0 (I_{SS} \text{ 为恒流}), g_{m1} = g_{m2} \text{ (电路完全对称)}$$

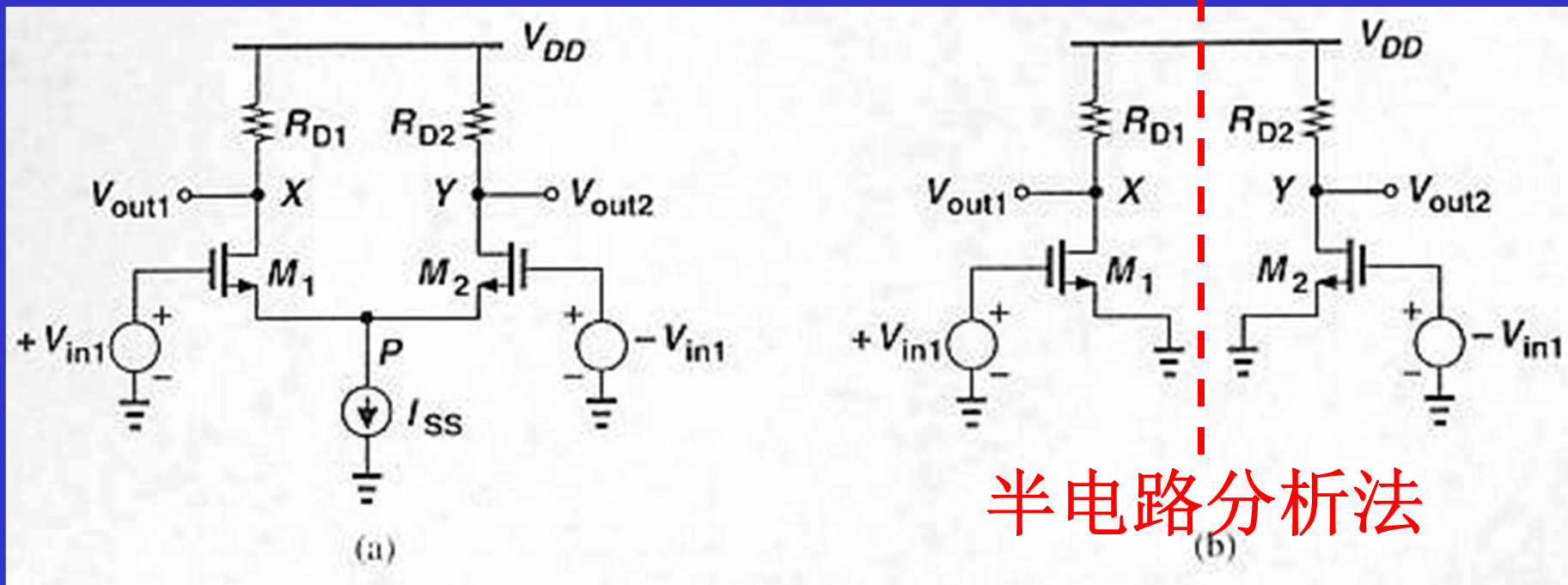
$$\therefore \Delta V_{in} g_m - \Delta V_P g_m - \Delta V_{in} g_m - \Delta V_P g_m = 0$$

$$\therefore \Delta V_P = 0, V_P \text{ 电压保持不变}$$

重要结论：在全差分输入的情况下， P 点为交流地

用半电路法求全差分时差模增益

“全差分输入时P点为交流地” 这一结论可简化差模增益的推导



$$V_X = -g_m R_D V_{in1} \quad V_Y = g_m R_D V_{in1}$$

$$V_X - V_Y = -2g_m R_D V_{in1}$$

$$\frac{V_X - V_Y}{2V_{in1}} = -g_m R_D$$

非全差分时差模增益的计算

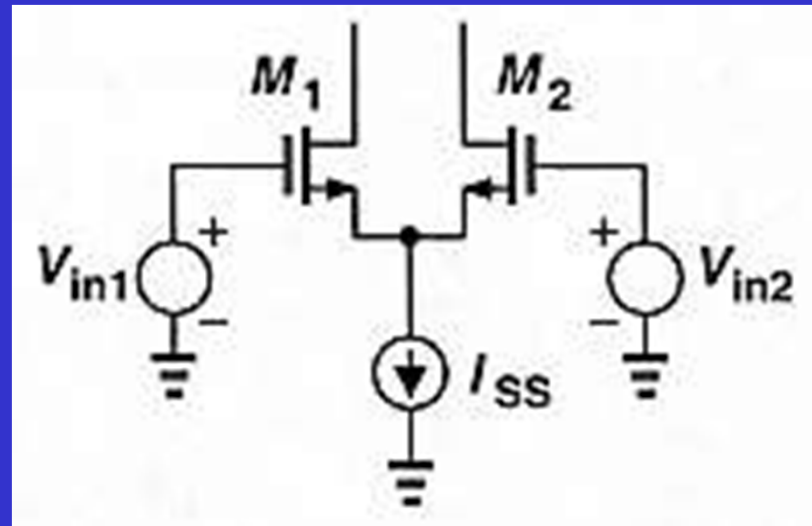
当输入不是“全差分”时，计算差模增益

$(V_{out1}-V_{out2})/(V_{in1}-V_{in2})$?

“非全差分”的含义：

输入信号 V_{in1} 和 V_{in2} 不是大小相等、方向相反

V_p 不是交流地，计算很复杂



简化的计算方法：将输入信号划分为共模分量（纯共模输入部分）和差模分量（全差分输入部分），对这两部分分别计算后再用叠加定理

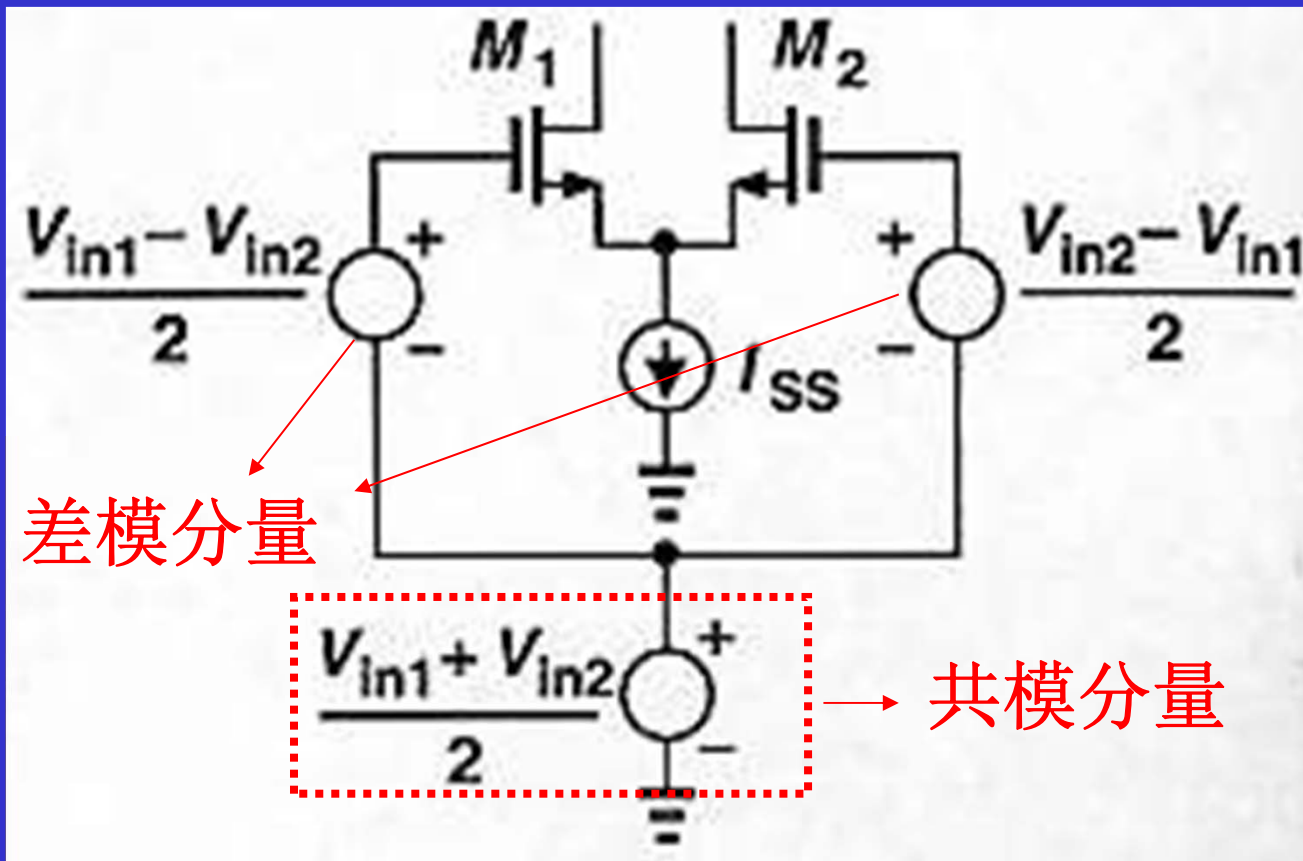
$$V_{in1} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{2} + \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$

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

非全差分时差模增益的计算

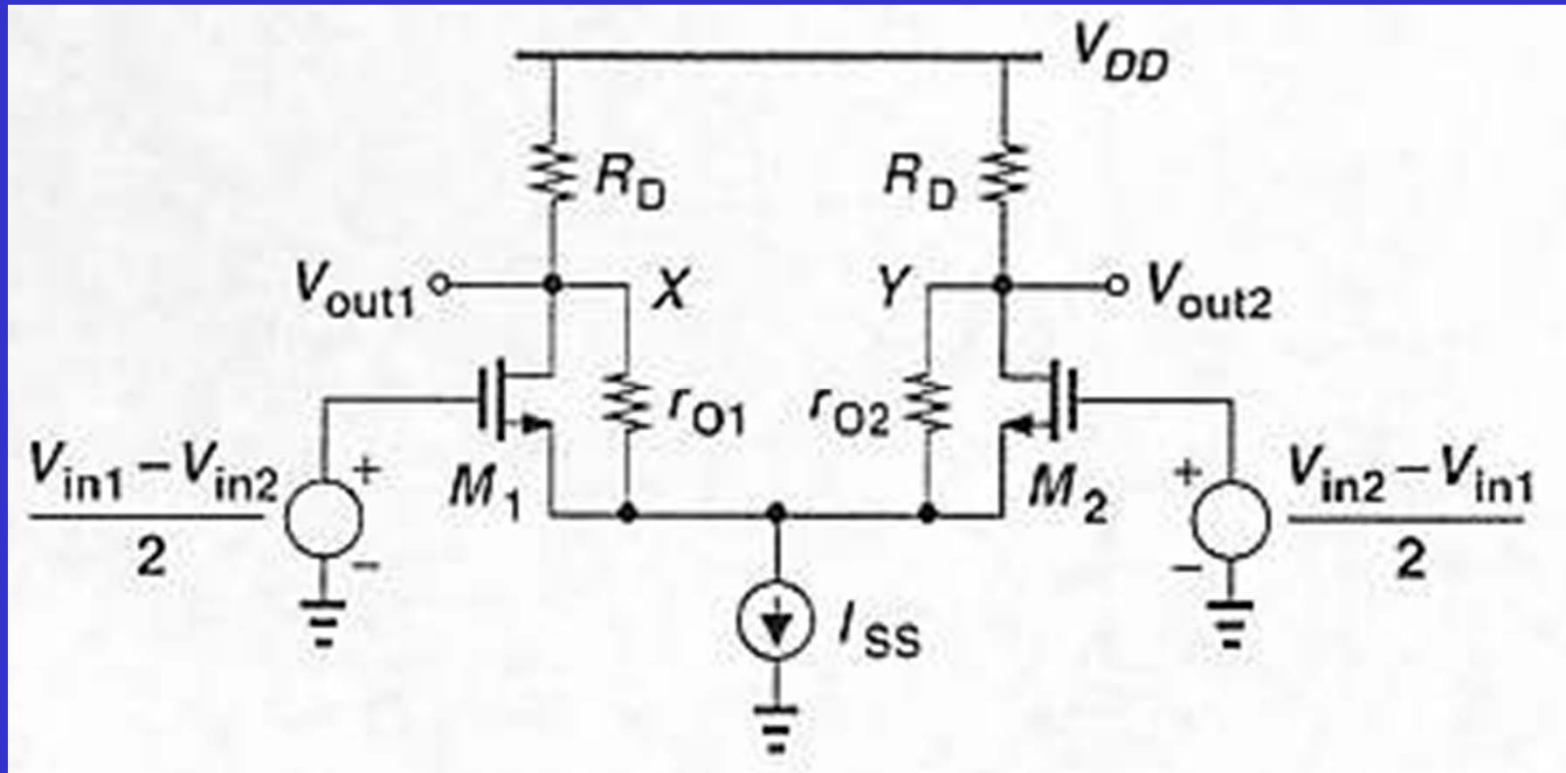
$$V_{in1} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{2} + \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$

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



非全差分时差模增益的计算

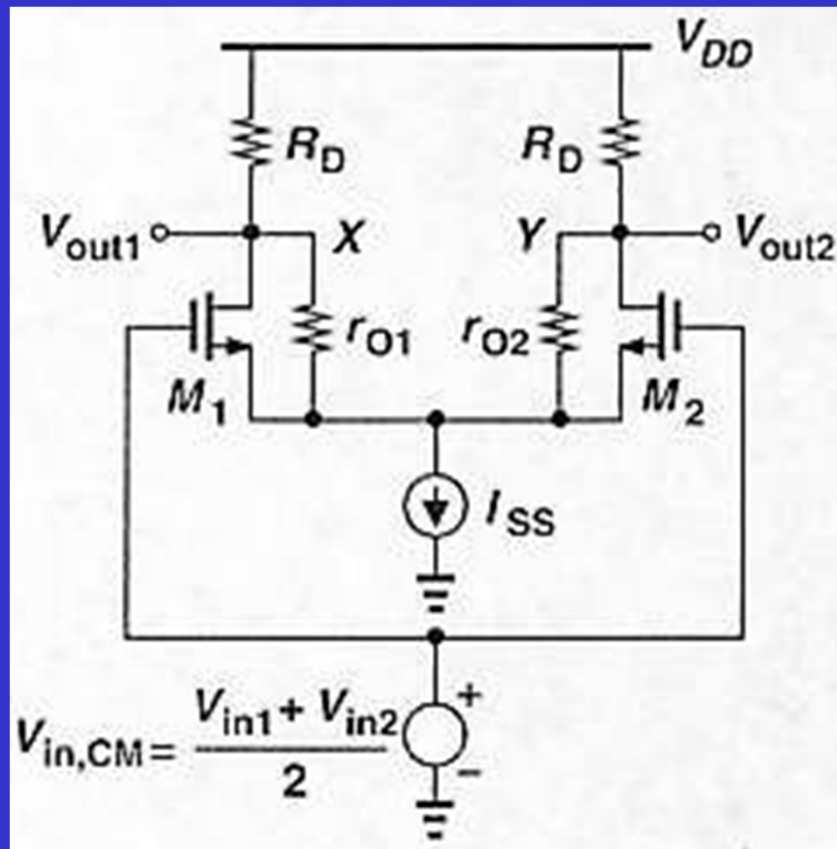
差模分量用半电路法计算



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

非全差分时差模增益的计算

共模分量



若电路完全对称，则流过M1和M2管的直流电流总为 $I_{SS}/2$ ，不随 $V_{in,CM}$ 的变化而变化，因此， V_X 和 V_Y 不变

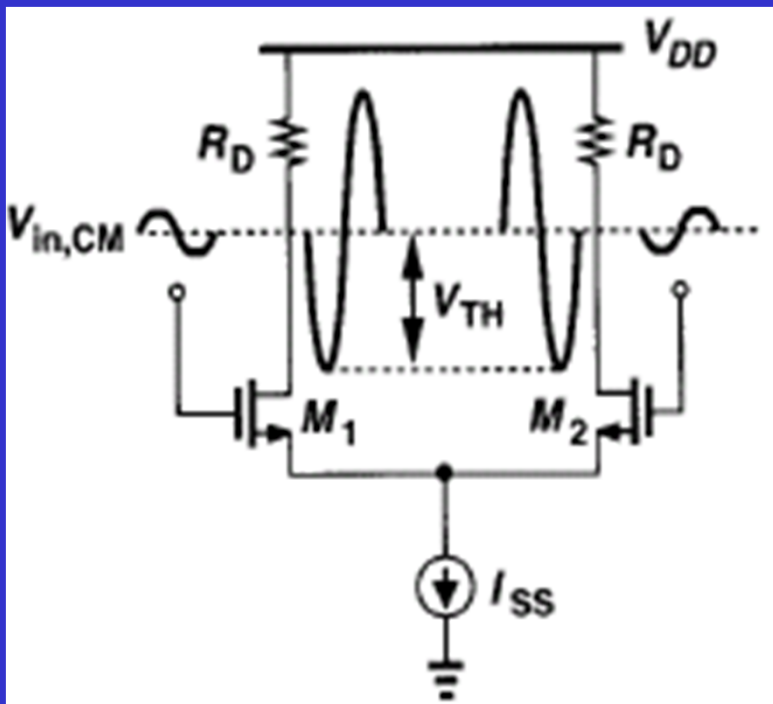
重要结论：

理想差分对只放大输入信号的差模部分，不放大共模部分

实际的差分对并不“理想”，对共模部分仍有放大作用——
差分对的共模响应

例题 电阻做负载的差分放大级

□对于图示电路， $(W/L)_{1,2}=50/0.5$ ， $I_{SS}=0.5\text{mA}$ 。(1) $V_{IN,CM}=1.2\text{V}$ 时，求最大允许的输出电压摆幅。(2) 求最大输出电压摆幅时的电压增益。



$$(1) V_{out,max} = V_{DD} = 3V$$

$$V_{out,min} = V_{in,CM} - V_{TH} \\ = 1.2 - 0.7 = 0.5V$$

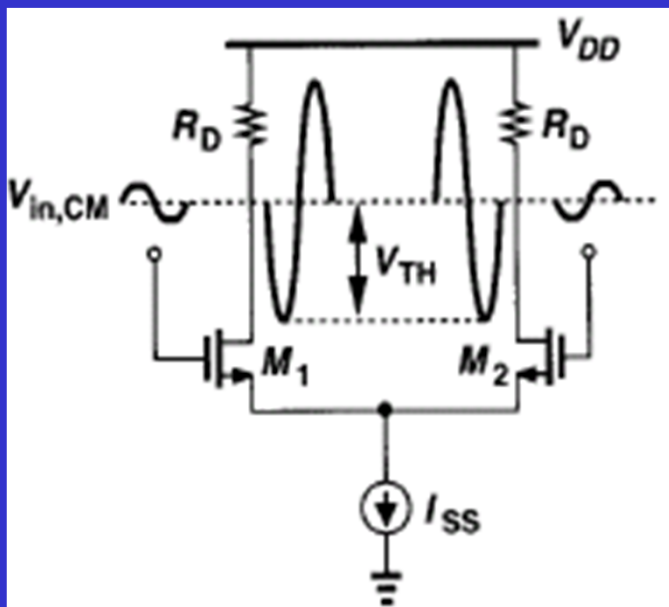
$$V_{out,swing} = 2 \times (V_{out,max} - V_{out,min}) \\ = 2 \times (3 - 0.5) = 5V$$

例题 电阻做负载的差分放大级

□ 对于图示电路, $(W/L)_{1,2}=50/0.5$, $I_{SS}=0.5\text{mA}$ 。

(1) $V_{IN,CM}=1.2\text{V}$ 时, 求最大允许的输出电压摆幅。

(2) 求最大输出电压摆幅时的电压增益。



$$(2) A_v = -g_m R_D$$

$$g_m = \sqrt{2I_{D1}\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}} = \sqrt{2 \times \frac{0.5}{2} \times 0.13429 \times \frac{50}{0.5}}$$

$$= 2.59 [\text{mA/V}]$$

输出摆幅被充分利用时

$$V_{out,CM} = \frac{V_{out,max} + V_{out,min}}{2} = \frac{3 + 0.5}{2} = 1.75\text{V}$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{out,CM}}{\frac{I_{SS}}{2}} = \frac{3 - 1.75}{0.25\text{m}} = 5\text{K}\Omega$$

$$\therefore A_v = -g_m R_D = -12.95$$

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

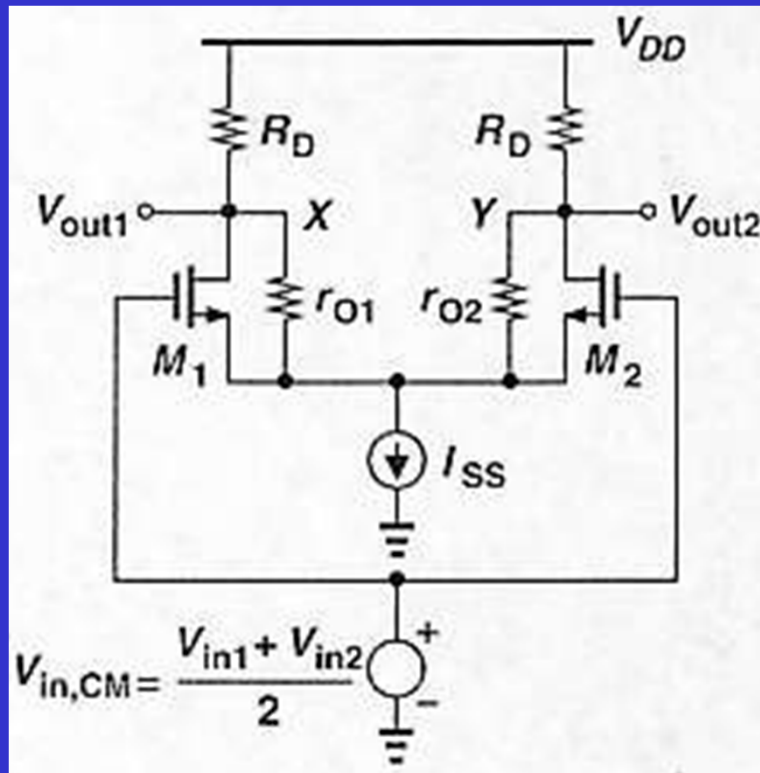
□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

共模响应

非理想性包括:

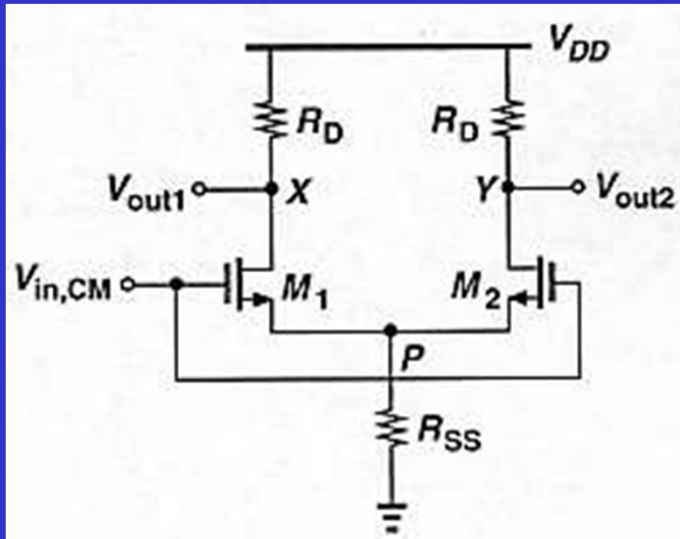
M1和M2之间有失配 (W/L 、 V_{TH} 等), R_{D1} 和 R_{D2} 之间有失配 (阻值不完全相等等); 尾电流源 I_{SS} 的内阻 R_{SS} 不是无穷大



首先考虑尾电流源 I_{SS} 的内阻 R_{SS} 不是无穷大时对共模响应的影响

R_{SS} 对共模响应的影响

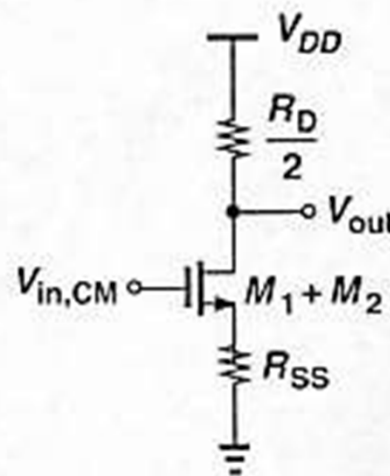
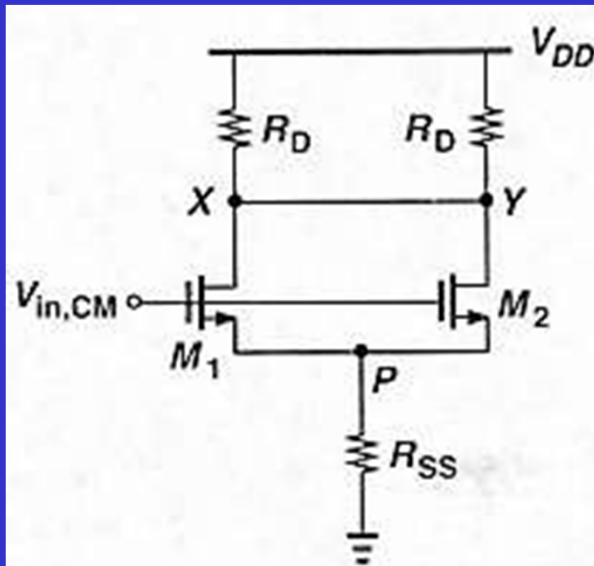
$$A_v = \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$



若电路完全对称，则 V_P 会随 $V_{in,CM}$ 的变化而变化，导致尾电流变化， V_{out1} 和 V_{out2} 会随之变化

影响1: $V_{out,CM}$ 会随 $V_{in,CM}$ 的变化而变化，可能影响实际可用的输出摆幅；

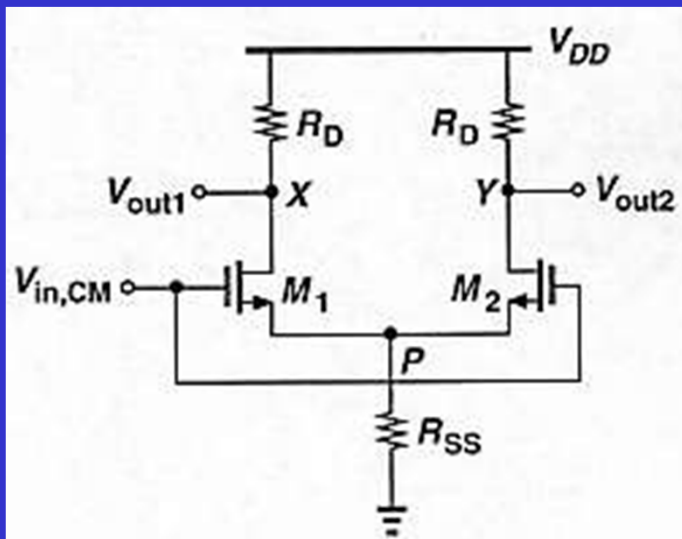
影响2: A_V 会随 $V_{in,CM}$ 的变化而变化



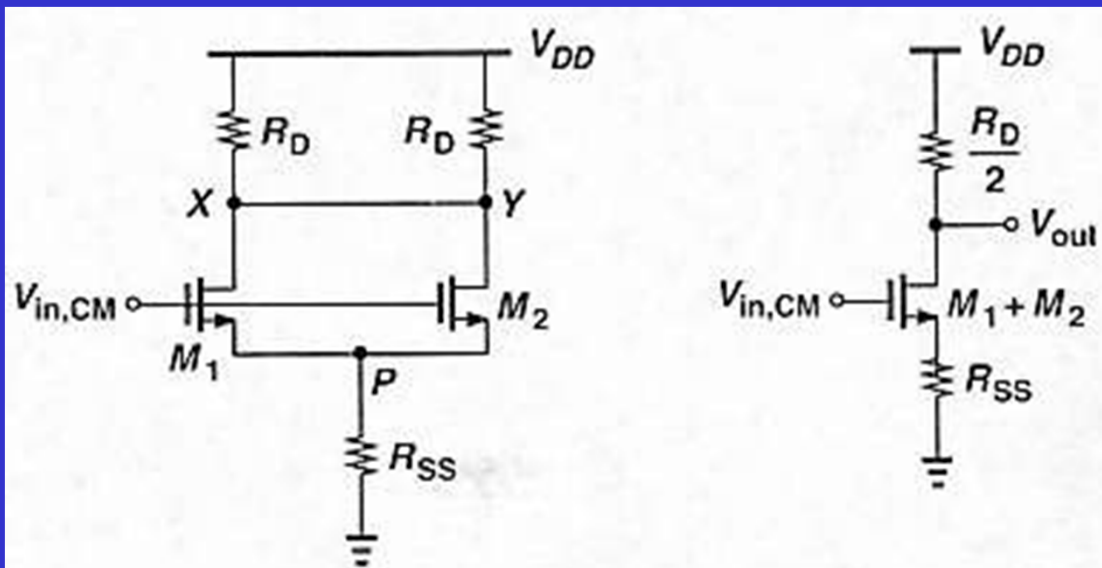
共模增益为:

$$A_{v,CM} = \frac{V_{out}}{V_{in,CM}} = -\frac{R_D / 2}{1 / (2g_m) + R_{SS}}$$

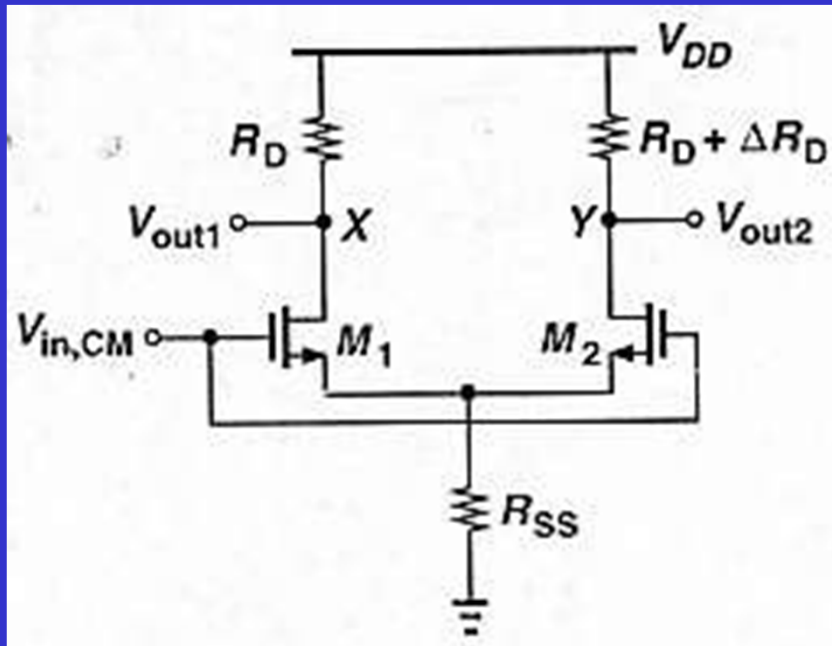
R_{SS} 对共模响应的影响



若电路完全对称，虽然 V_{out1} 和 V_{out2} 会随之变化，引入共模增益，但 V_{out1} 和 V_{out2} 总相等，不引入差模增益，通常不考虑



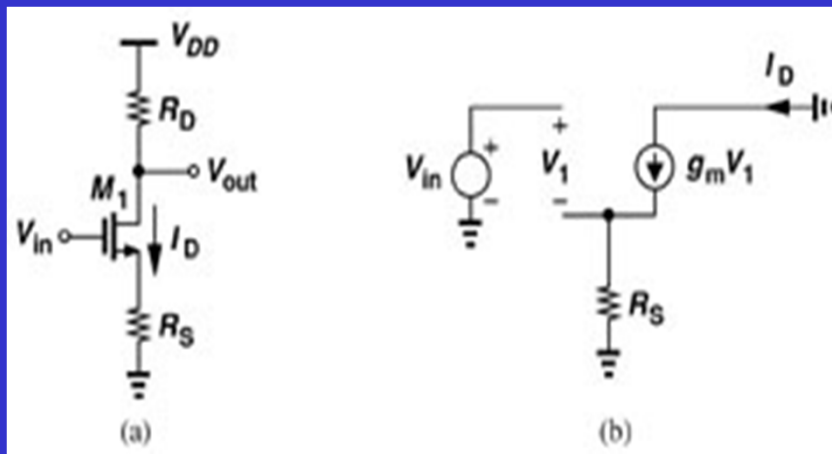
R_D 失配对共模响应的影响



由于M1和M2管完全对称，因此，支路电流随 $V_{in,CM}$ 的变化相等（ $\lambda=0$ 时）

带源极负反馈的共源放大级的等效跨导：

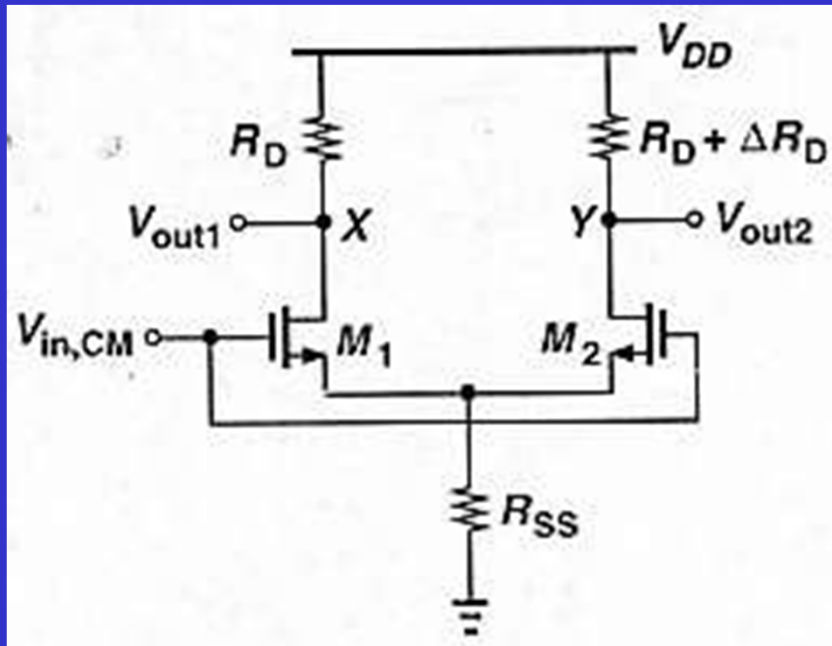
$$G_m = \frac{g_m}{1 + g_m R_S}$$



差分对每个支路电流对 $V_{in,CM}$ 的等效跨导：

$$G_m = \frac{g_m}{1 + 2g_m R_{SS}}$$

R_D 失配对共模响应的影响



差分对每个支路电流对 $V_{in,CM}$ 的等效跨导:

$$G_m = \frac{g_m}{1 + 2g_m R_{SS}}$$

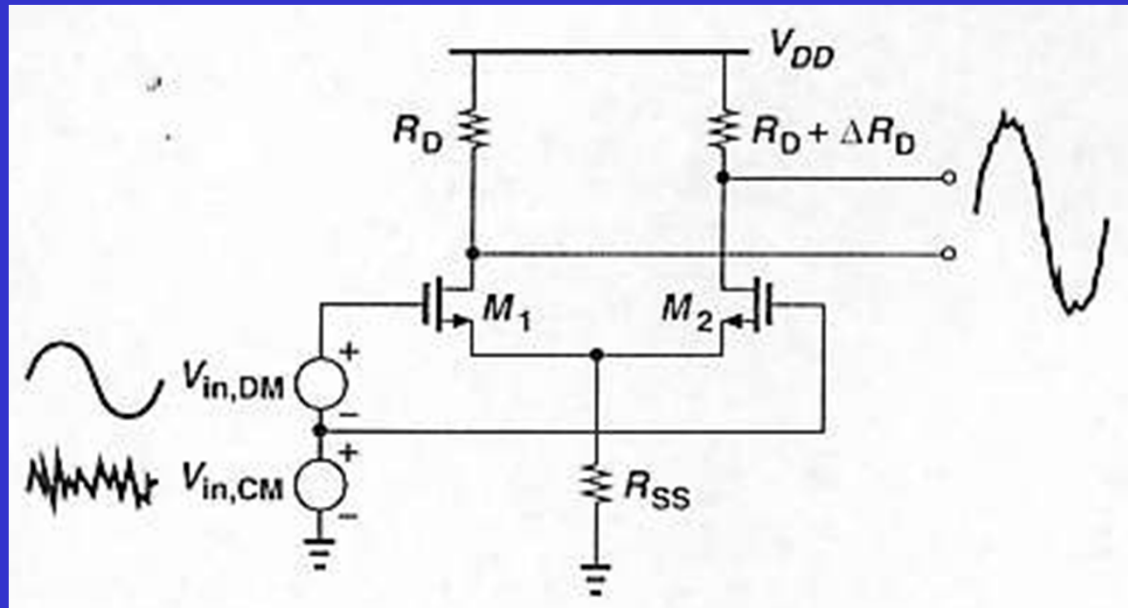
共模到差模的转换

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

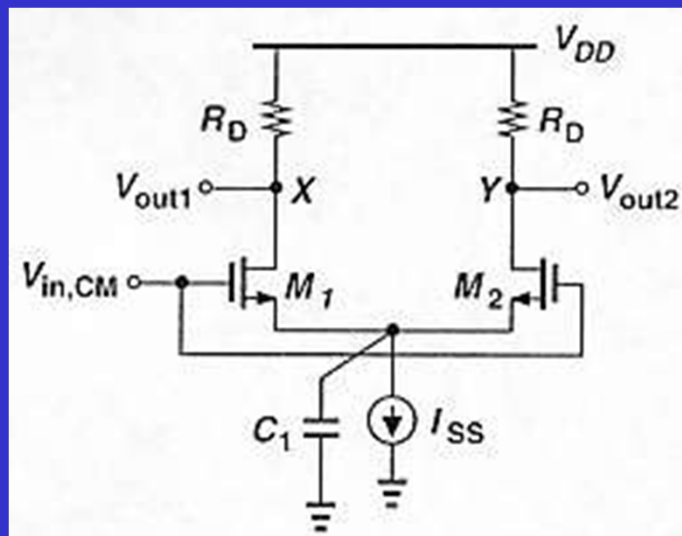
$$\Delta V_Y = -\Delta V_{in,CM} \cdot \frac{g_m (R_D + \Delta R_D)}{1 + 2g_m R_{SS}}$$

R_D 的失配会引入差分增益，在输出端产生差模分量。这个影响比 R_{SS} 不是无穷大引起的影响要严重得多

共模到差模转换的危害



共模分量的噪声在输出端引出差模信号，损害正常输出的差模输出信号

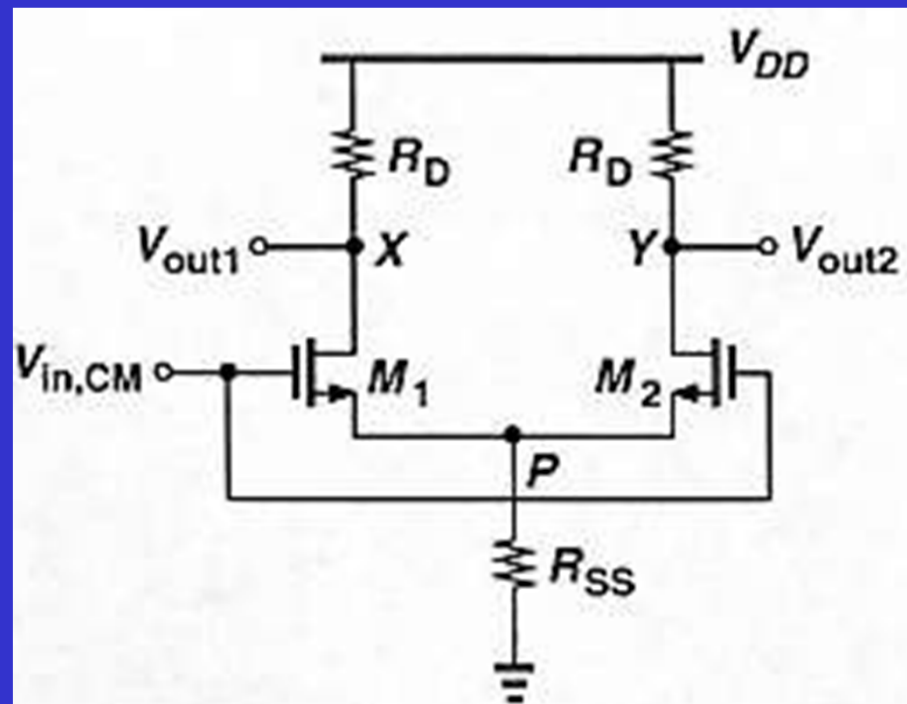


当共模扰动信号的频率增大时，电容 C_1 会导致 P 点到地的阻抗 $R_{SS} \parallel (1/sC)$ 变小， A_{CM-DM} 变大

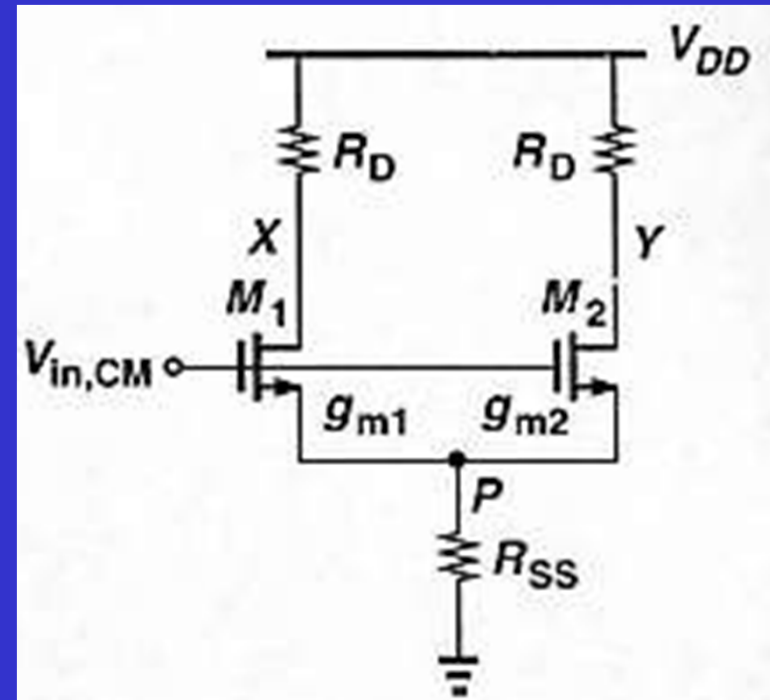
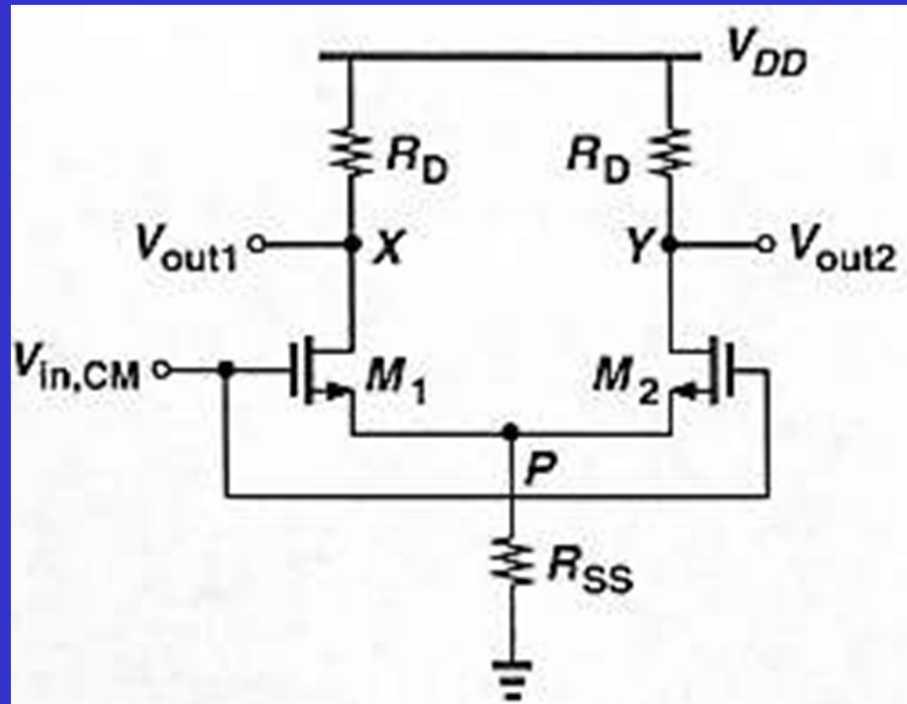
输入管失配对共模响应的影响

M1和M2管的尺寸和阈值电压失配

失配会导致流过M1管和M2管的电流不同，跨导也不同，从而引起共模到差模的转换



输入管失配对共模响应的影响



共模到差模转换的增益（书上有详细推导）：

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

小信号特性—CMRR

□CMRR—共模抑制比

- ❖ **Common-Mode Rejection Ratio**
- ❖ 用来综合反映差分放大器的性能
 - 差分放大能力
 - 共模抑制能力
- ❖ 用于差分放大器的性能比较

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

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号共模特性

❖大信号差分特性

❖小信号差分特性

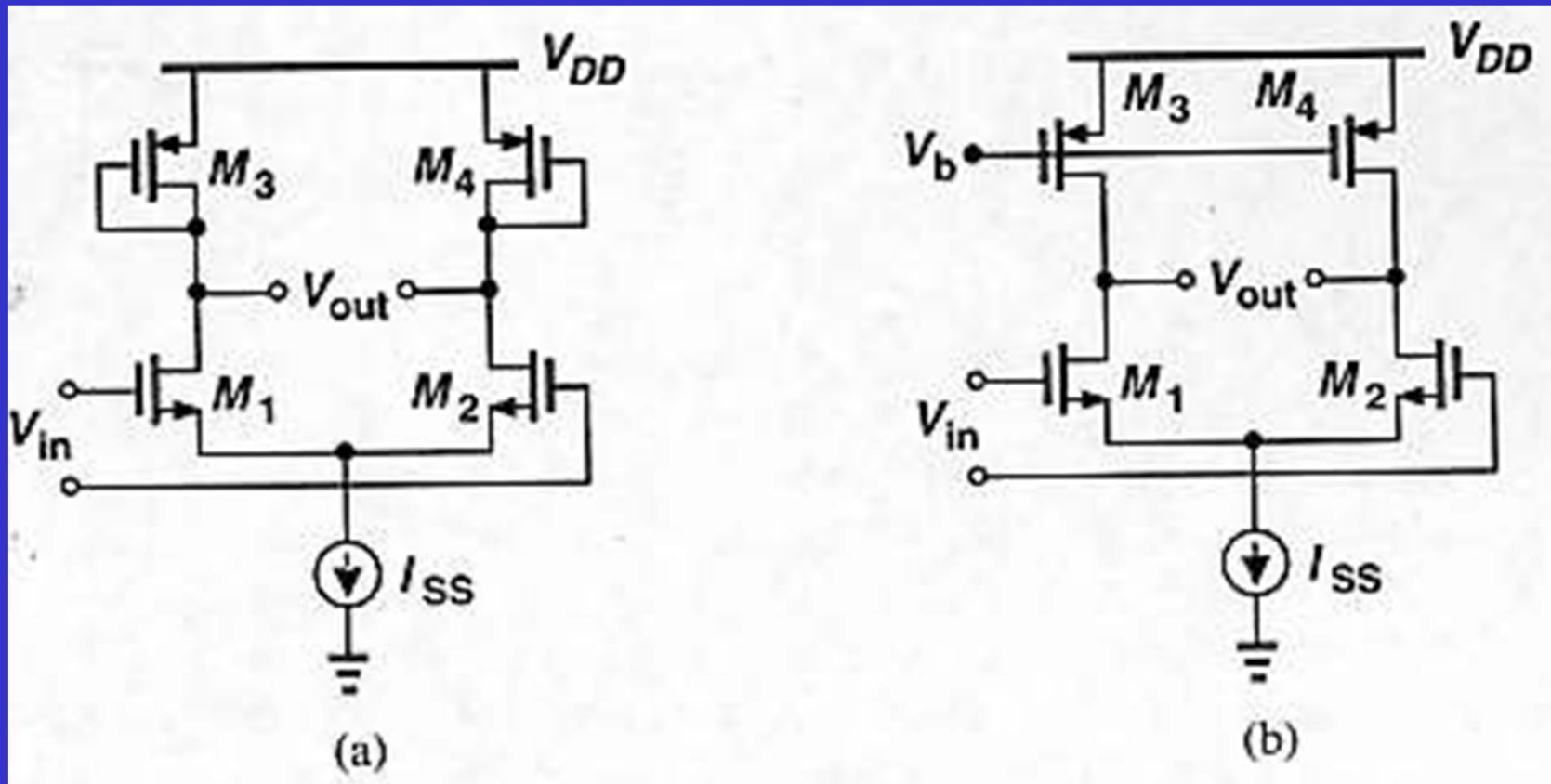
❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

MOS管做负载的差分对

- 二极管接法的MOS管做负载
- 电流源做负载



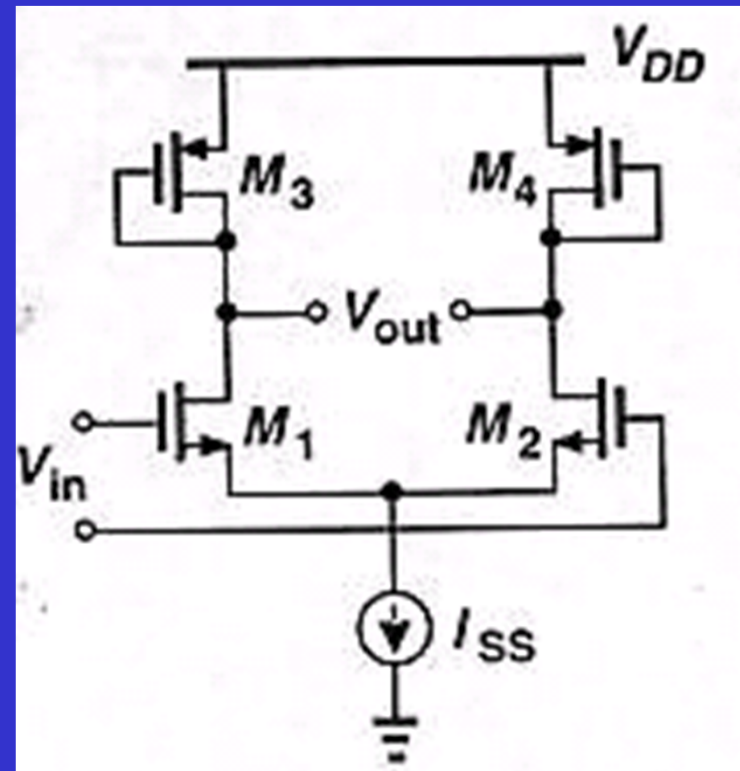
二极管接法MOS管做负载

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

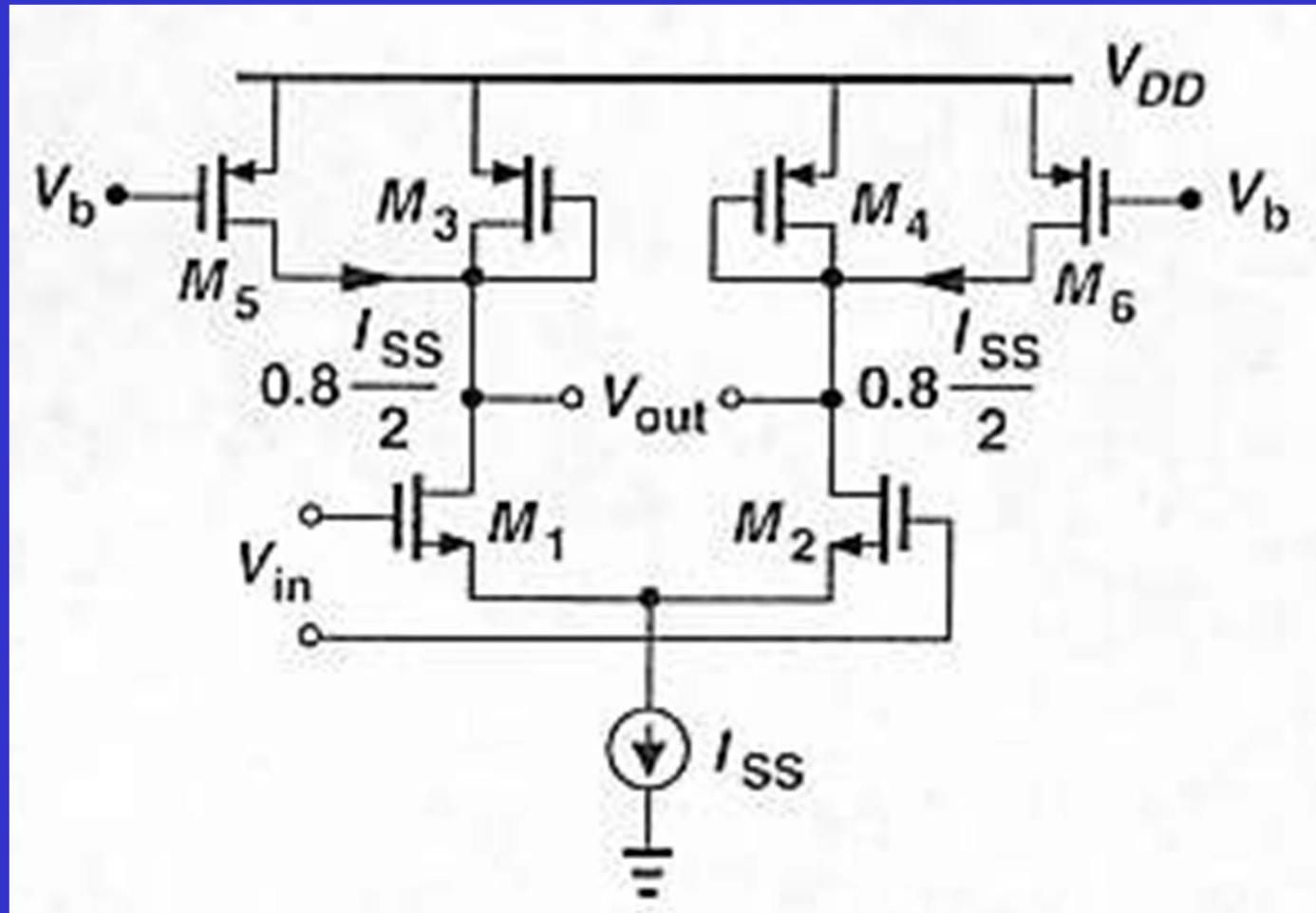
$$g_m = \sqrt{2I\mu C_{OX} (W/L)} = \frac{2I}{V_{OV}}$$

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

电压摆幅小；
增益不能太大，否则输出摆幅很小；
输出共模电平为 $V_{DD} - V_{GS,P}$

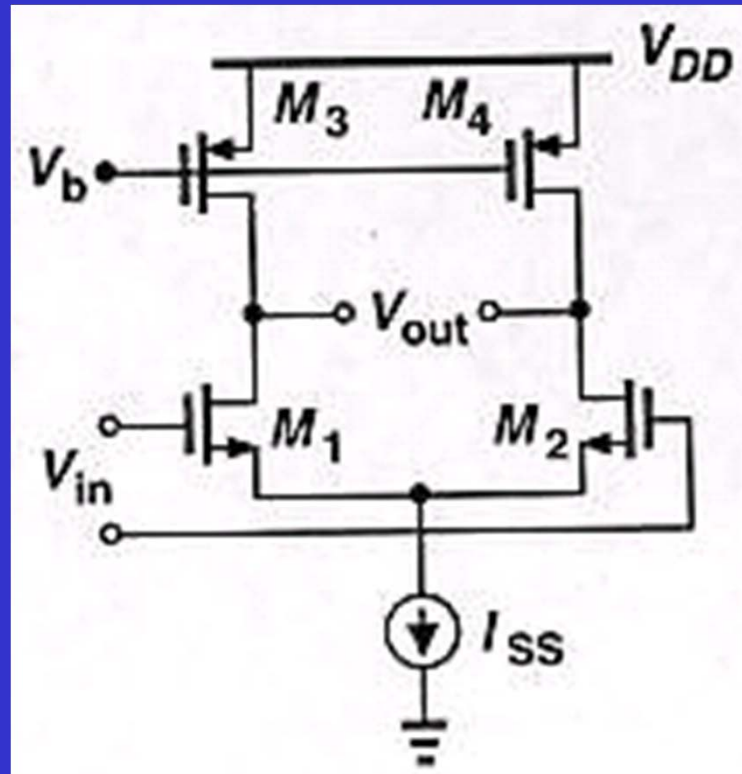


二极管接法MOS管做负载



用电流源来提高输出摆幅

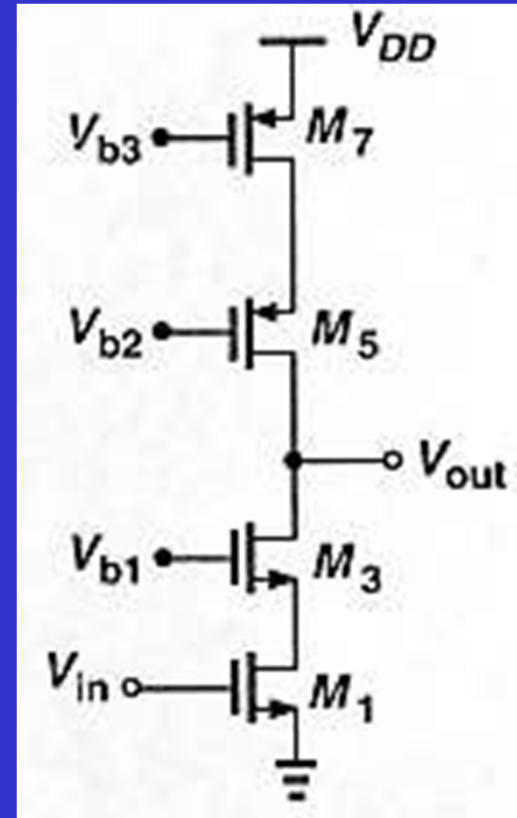
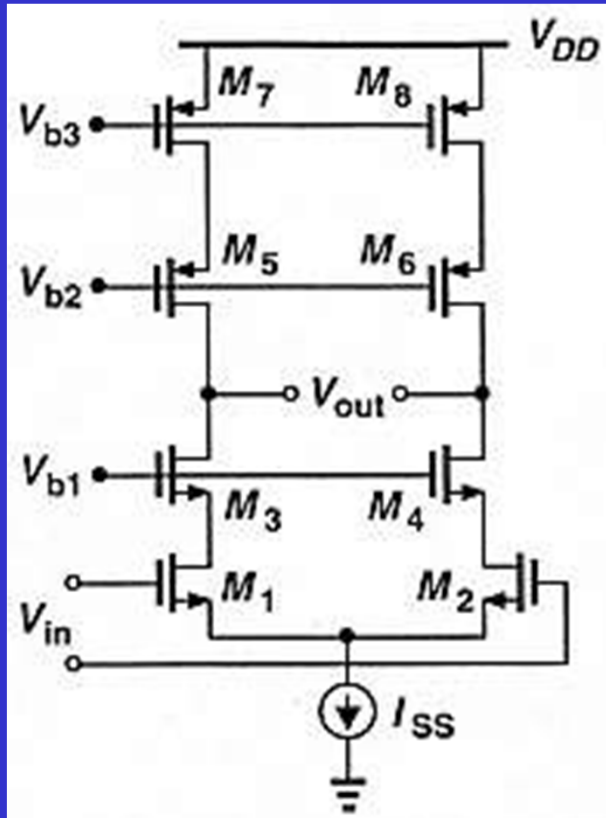
电流源做负载



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

电压摆幅和增益（对亚微米工艺可几十）都可以较大

共源共栅差分对



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

增益更大；但适当牺牲摆幅；

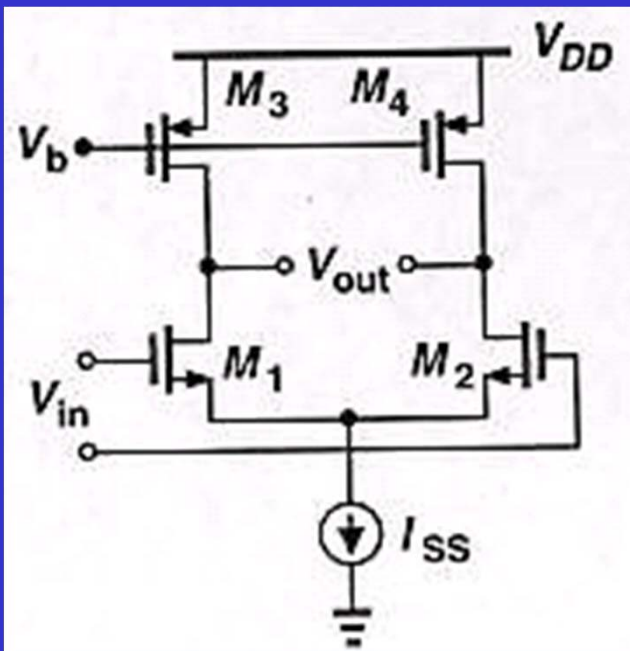
输出共模电平未确定，需通过共模反馈电路来设定

例题 电流源做负载的差分放大级

□ 对于图示电路, $(W/L)_1 = 50/0.5$, $I_{SS} = 1\text{mA}$ 。

(1) 求小信号差分电压增益。 (2)

$V_{IN,CM} = 1.5\text{V}$ 时, 求最大允许的输出电压摆幅。



$$(1) A_v = -g_{mn}(r_{ON} \parallel r_{OP})$$

$$g_{mn} = \sqrt{2I_{Dn}\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_n}$$

$$= \sqrt{2 \times \frac{1}{2} \times 0.13429 \times \frac{50}{0.5}}$$

$$= 3.66[\text{mA/V}]$$

$$r_{ON} = \frac{1}{\lambda_n I_{Dn}} = \frac{1}{0.1 \times 0.5\text{m}} = 20\text{K}\Omega$$

$$r_{OP} = \frac{1}{\lambda_p I_{Dp}} = \frac{1}{0.2 \times 0.5\text{m}} = 10\text{K}\Omega$$

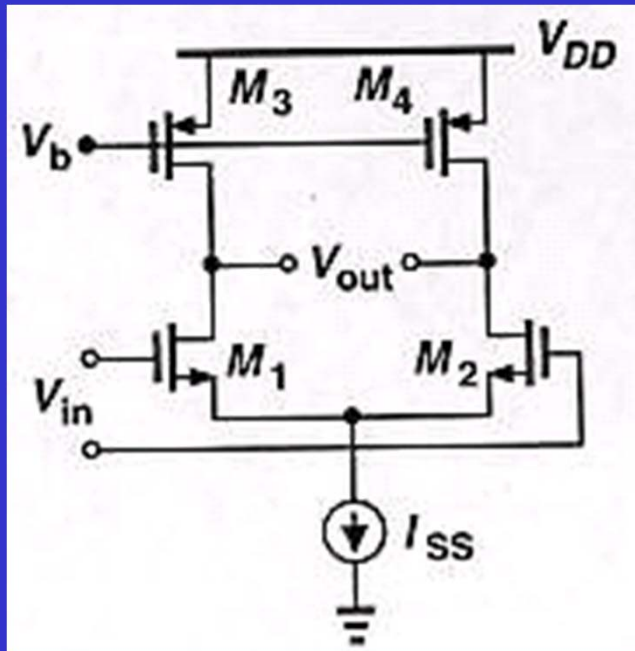
$$\therefore A_v = -g_m(r_{ON} \parallel r_{OP})$$

$$= -3.66[\text{mA/V}] \times (20\text{K}\Omega \parallel 10\text{K}\Omega) = -24.4$$

例题 电流源做负载的差分放大级

□ 对于图示电路, $(W/L)_1 = 4 = 50/0.5$, $I_{SS} = 1\text{mA}$ 。

(2) $V_{IN,CM} = 1.5\text{V}$ 时, 求最大允许的输出电压摆幅。



(2)

$$V_{ov,p} = \sqrt{\frac{2I_P}{\mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_p}}$$
$$= \sqrt{\frac{1}{0.03837 \times \frac{50}{0.5}}} = 0.51\text{V}$$

$$V_{out,max} = V_{DD} - V_{ov,p} = 3 - 0.51 = 2.49\text{V}$$

$$V_{out,min} = V_{in,CM} - V_{TH} = 1.5 - 0.7 = 0.8\text{V}$$

$$V_{out,swing} = 2 \times (V_{out,max} - V_{out,min})$$
$$= 2 \times (2.49 - 0.8) = 3.38\text{V}$$

本讲

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号差分特性

❖大信号共模特性

❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

差分放大器的应用——Gilbert单元

□ 一个通用的电路模块

- ❖ VGA—Variable Gain Amplifier

□ 是一个增益可变的放大器

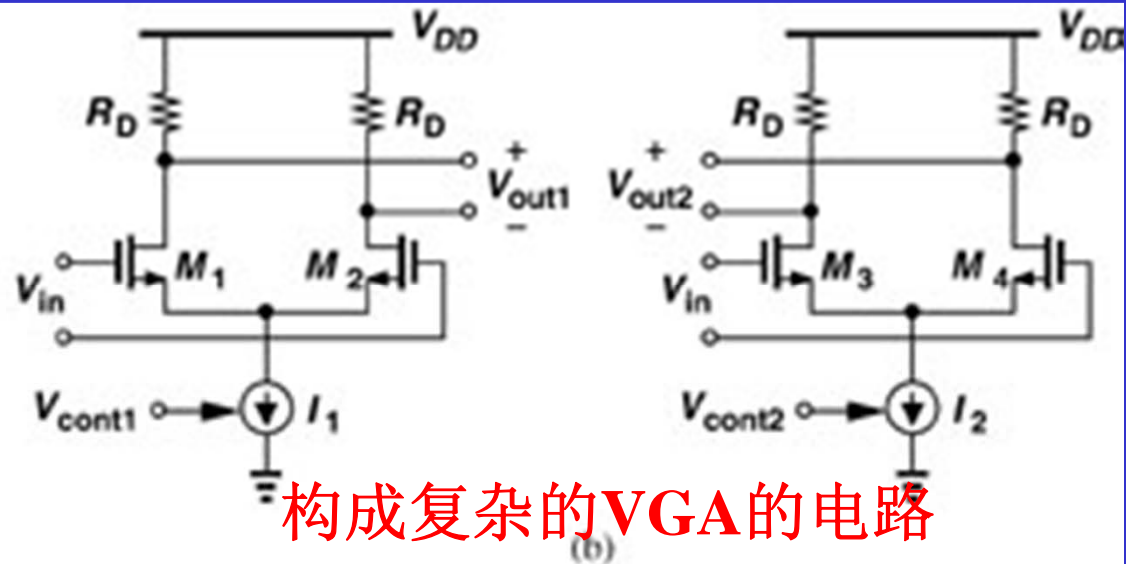
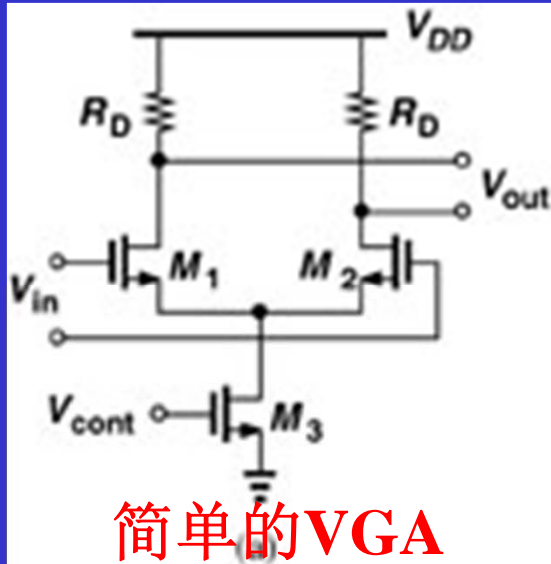
- ❖ 其增益受 V_{cont} 控制；可变

- ❖ 增益可从 $-g_m R_D$ 单调地变为 $+g_m R_D$

□ 广泛用于模拟系统和通信系统中

- ❖ 用于信号摆幅变化很大且要求增益能够反向变化的情形

可变增益放大器



$$A_v = -g_m R_D$$

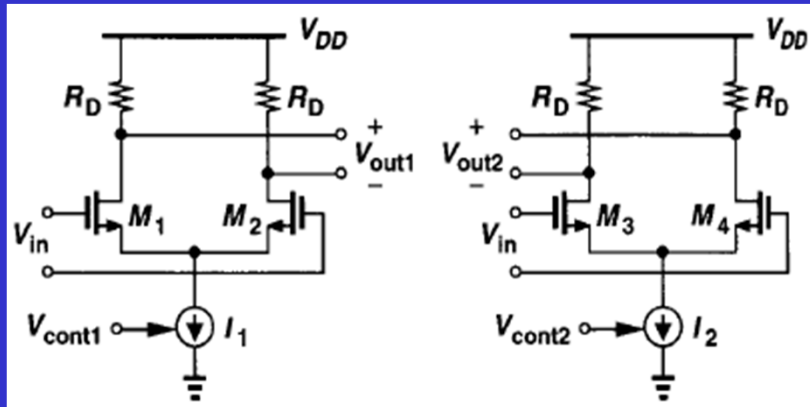
$I_{D3}=0$ 时，增益为0；
 I_{D3} 最大值时，增益最大

两个差分放大器以相反的增益对输入信号进行放大

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

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

复杂的可变增益放大器



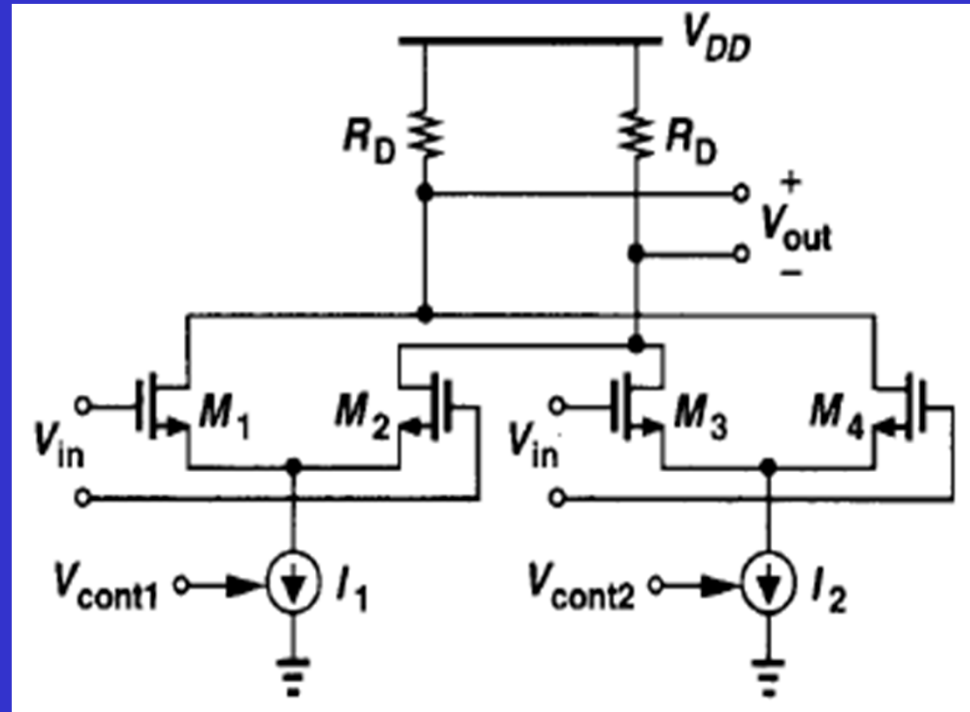
$$V_{out1} = R_D I_{D1} - R_D I_{D2}$$

$$V_{out2} = R_D I_{D4} - R_D I_{D3}$$

I_D 是交流量

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

$$V_{out} = A_1 V_{in} + A_2 V_{in} \quad A_1 \text{和} A_2 \text{分别受} V_{cont1} \text{和} V_{cont2} \text{控制}$$



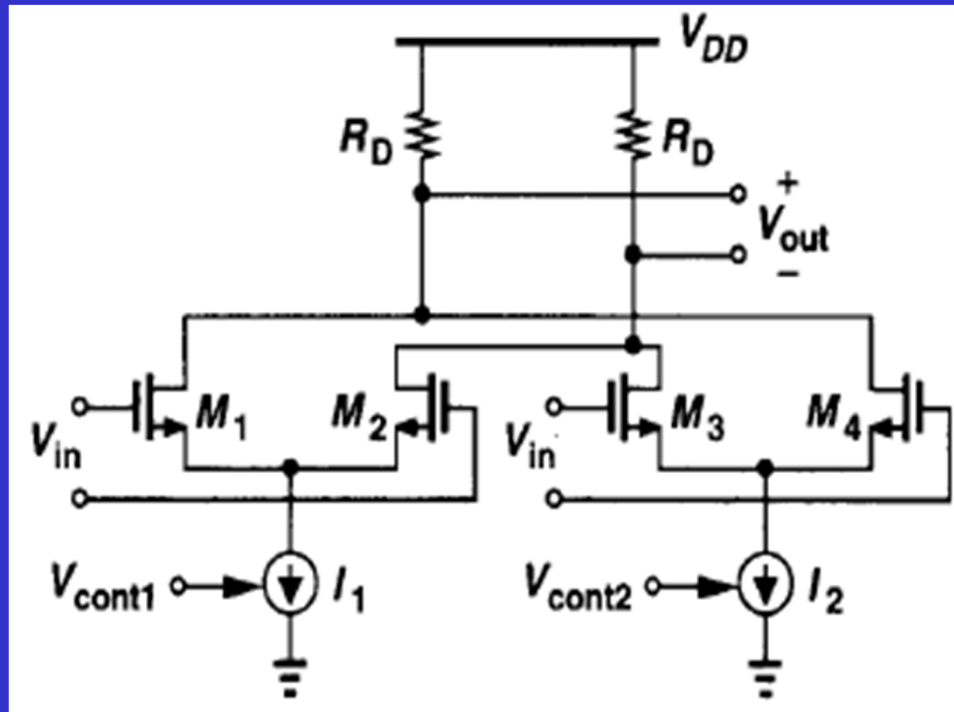
复杂的可变增益放大器

若 $I_1 = 0$, 则 $V_{out} = g_{m3} R_D V_{in}$

若 $I_2 = 0$, 则 $V_{out} = -g_{m1} R_D V_{in}$

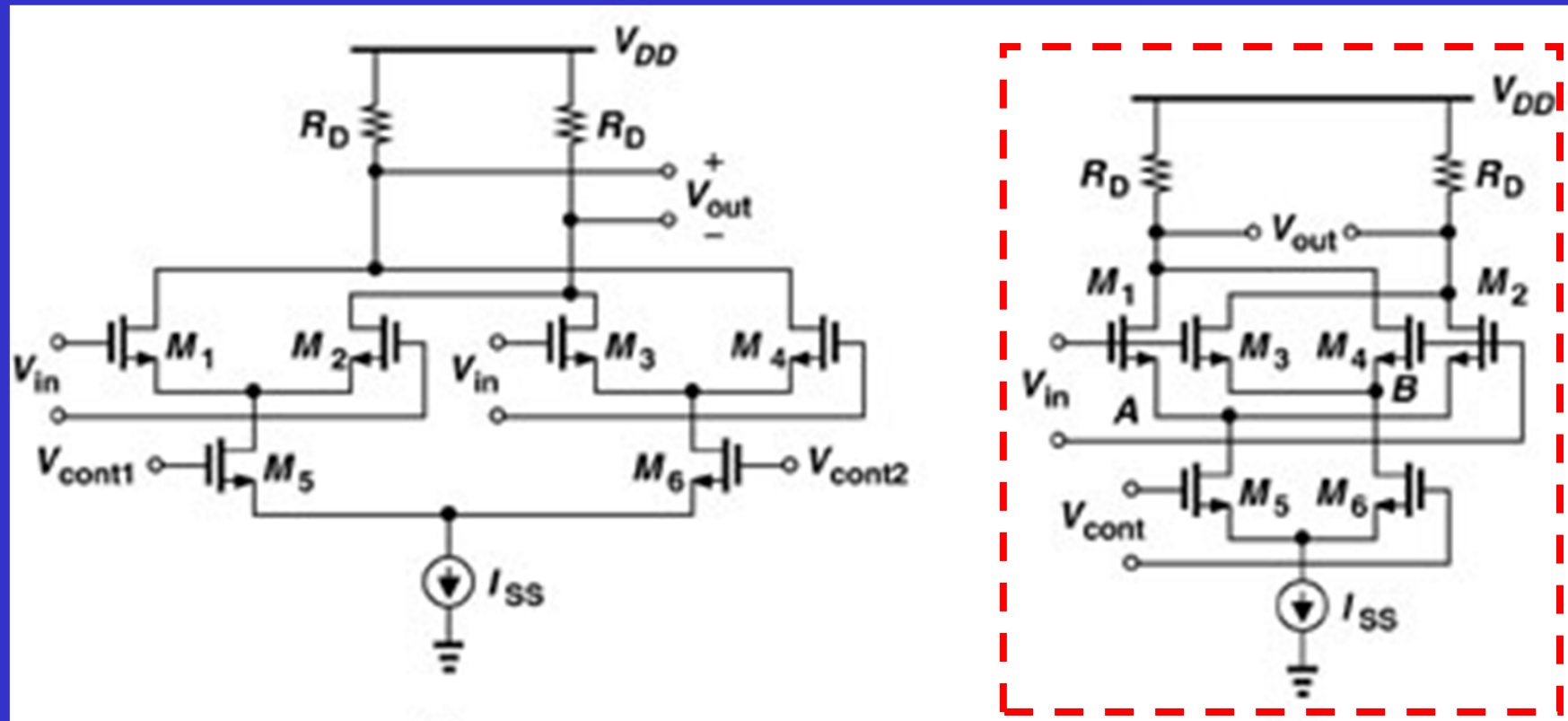
若 $I_1 = I_2$, 则 $V_{out} = 0$, 增益为0

在 V_{cont1} 和 V_{cont2} 控制下,
若 I_1 和 I_2 的变化方向相反,
则增益可从负值单调地变为正值



Gilbert单元

用差分对实现 I_1 和 I_2 的变化方向相反，从而增益从负值单调地变为正值



Gilbert单元

总结

□差分放大器简介

□简单差分放大器

□基本差分对放大器

❖大信号差分特性

❖大信号共模特性

❖小信号差分特性

❖小信号共模特性

□MOS管做负载的基本差分对放大器

□差分放大器的应用—Gilbert单元

重点掌握

□电阻做负载的基本差分对放大器

❖大信号共模特性

- 理解其原理，用来分析共模输入/输出范围

❖大信号差分特性

- 理解其原理

❖小信号差分特性

- 掌握用半电路法分析、计算 A_v 的方法

❖小信号共模特性

- 理解各种失配因素对共模响应的影响

□MOS管做负载的基本差分对放大器

❖重点掌握。最常用。

作业

□4.5

- ❖理解差分对的大信号差分特性的分析过程。计算 V_{ov} 、 I_{D1} 、 I_{D2} 、 G_m 、 ΔV_{in} 等

□4.11

- ❖理解二极管接法的MOS管做负载的差动对的原理。求 A_{dm} ，输入共模范围。

□4.14

- ❖理解电流源和二极管接法的MOS管做负载的差动对的原理。求 A_{dm} ，输入共模范围，输出摆幅

□交作业时间

- ❖听助教通知

设计实习4

□ 针对CSMC 0.5um工艺，设计一个差分放大级，电路结构如图4.32 (b)。图中的 I_{SS} 电流源用一个饱和区工作的NMOS管实现。要求：输出摆幅 $2 * (4.5V - 0.8V)$ 之间，NMOS管的L取1um，PMOS管的L取1.1um， $I_{SS}=1mA$ 左右， $V_{DD}=5V$ 。仿真得到它的差模转移特性曲线、共模转移特性曲线、差模电压增益。

□ 实习目的

❖ 设计常用的差分放大级，掌握差分放大级的设计方法

□ 实习后，提交《设计实习4报告》到助教Email信箱

❖ 报告内容

▪ 实习目的、实习内容、实习结果及对结果的必要分析

❖ 电子版

❖ 文件命名规范：学号-姓名-设计实习4报告

□ 参考结果

❖ $A_{DM}=21$

下一讲

绪论, 2学时	重要性、一般概念
器件物理基础, 2学时	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器, 5学时	共源、共漏、共栅、共源共栅
EDA系统使用常识 和设计实习实例演示, 2学时	做设计实习所需软硬件系统的使用
差动放大器, 3学时	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜, 2学时	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性, 4学时	米勒效应、极点与节点关系、单级放大器频率特性分析
噪声, 4学时	统计特性、类型、电路表示、单级放大器噪声分析、噪声带宽
期中考试 2学时, 评卷 1学时。习题课若干学时	
反馈, 6学时	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器, 6学时	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿, 6学时	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图, 3学时	叉指、对称、ESD等