

# 上一讲

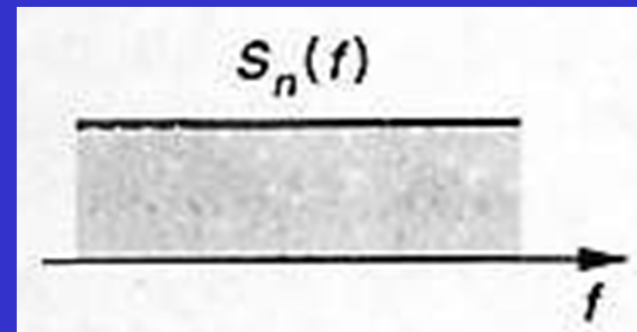
## □ 噪声的统计特性

- ❖ 平均功率
- ❖ 噪声谱（功率谱密度PSD）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

## □ 噪声的类型

- ❖ 环境噪声和器件噪声
- ❖ 热噪声和闪烁噪声

$$P_{av} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt$$



$$\overline{V_n^2} = 4kTR(\Delta f)$$

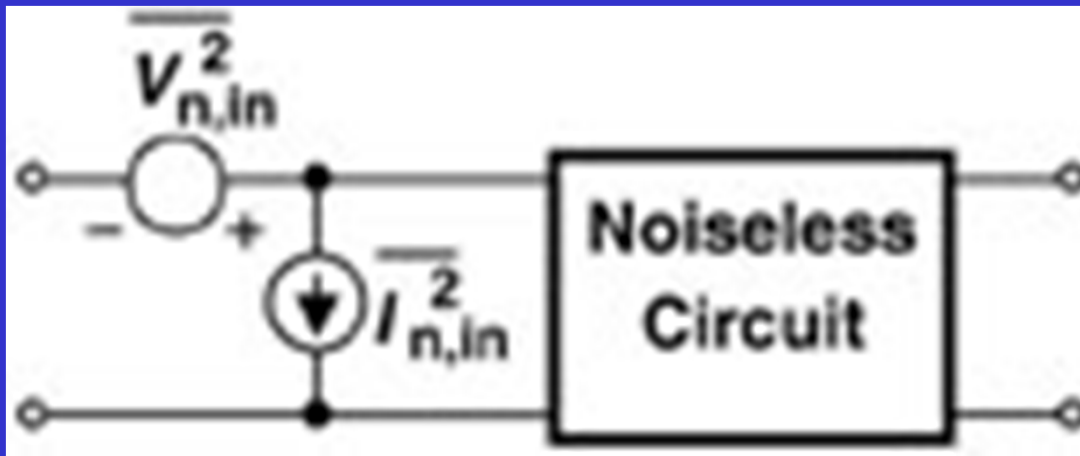
$$\overline{I_n^2} = \frac{4kT}{R}(\Delta f)$$

$$\overline{V_{n,MOS}^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$

$$\overline{I_{n,MOS}^2} = 4kT \left( \frac{2}{3} g_m \right)$$

# 上一讲

## □ 电路中噪声的表示



## □ 单级放大器中的噪声

❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

## □ 差分对中的噪声

## □ 噪声带宽

# 模拟集成电路原理与设计

## 第8章 反馈

陈中建

[chenzj@pku.edu.cn](mailto:chenzj@pku.edu.cn)

62759051, 理科2号楼2619

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 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 本章要求

## □负反馈电路的特性

- ❖增益灵敏度、终端阻抗、带宽、非线性的变化规律

## □反馈网络理想时

- ❖掌握四类反馈结构的开环增益、闭环增益、输入/输出阻抗的推导方法

## □反馈网络有负载效应时

- ❖掌握四类反馈结构的对应的反馈网络模型、开环增益、闭环增益、输入/输出阻抗的推导方法

# 为什么要学习反馈知识？

## □发明于1921年

- ❖负反馈放大器

- ❖美国Harold Black

## □广泛用于电路系统中

- ❖负反馈提高电路信号处理精度

- ❖正反馈实现振荡电路

## □本章只研究负反馈

# 负反馈系统概述

## 四大构成

❖ 前馈放大器，又称前馈网络

▪  $H(s)$  称为开环传输函数

❖ 反馈网络  $G(s)$

▪ 本书中  $G(s)$  通常是与频率无关的量，常用  $B$  表示，称为反馈系数

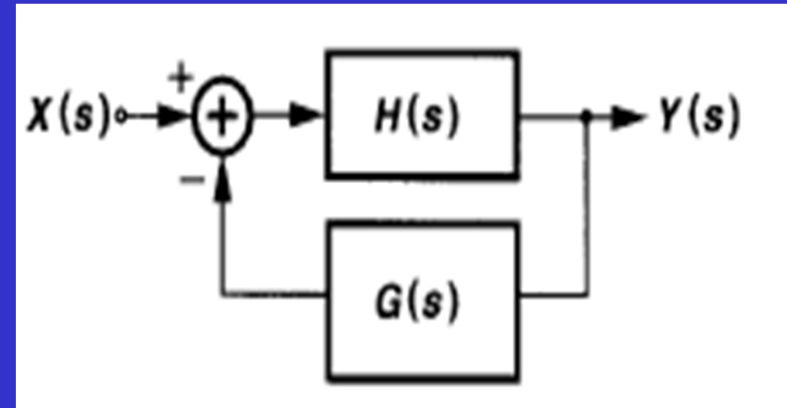
❖ 反馈误差产生电路： $X(s) - G(s)Y(s)$

❖ 输出信号的检测

$$Y(s) = H(s)[X(s) - G(s)Y(s)]$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

$Y(s)/X(s)$  称为闭环传输函数





# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

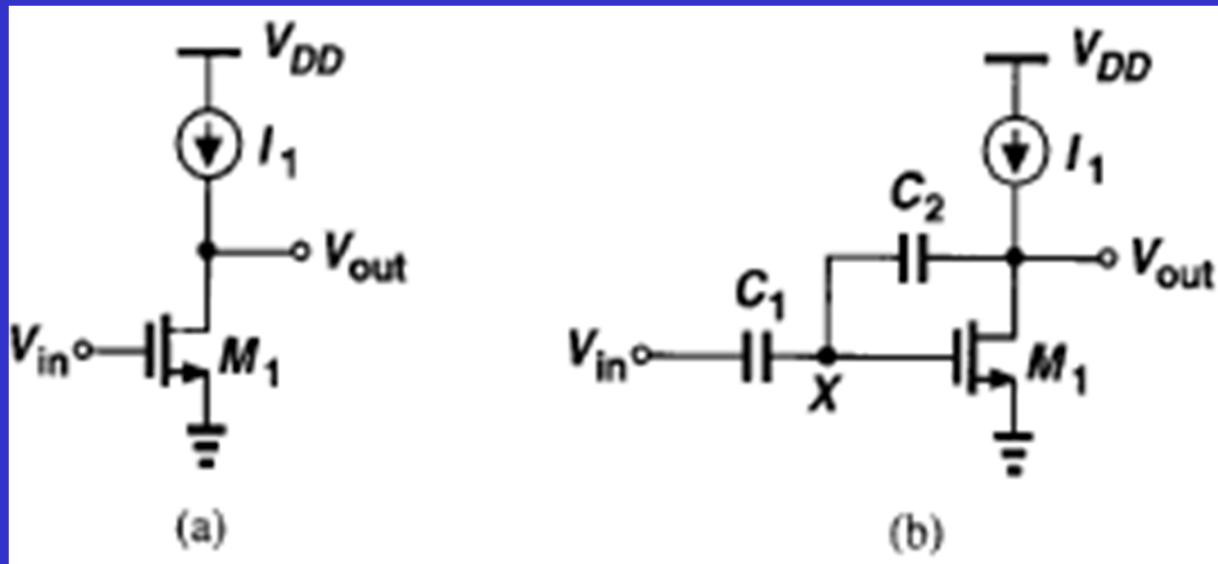
# 增益灵敏度降低

## □ A图

- ❖ 无反馈的共源放大级
- ❖ 电压增益 $A_v$ 为 $-g_{m1}r_{o1}$
- ❖  $A_v$ 随工艺和温度变化，不稳定

## □ B图

- ❖ 带反馈的放大级



# 增益灵敏度降低

## □B图——带反馈的放大级

- ❖ 该反馈系统的四大构成
- ❖ 低频电压增益

$$V_{out}/V_X = -g_{m1}r_{O1}$$

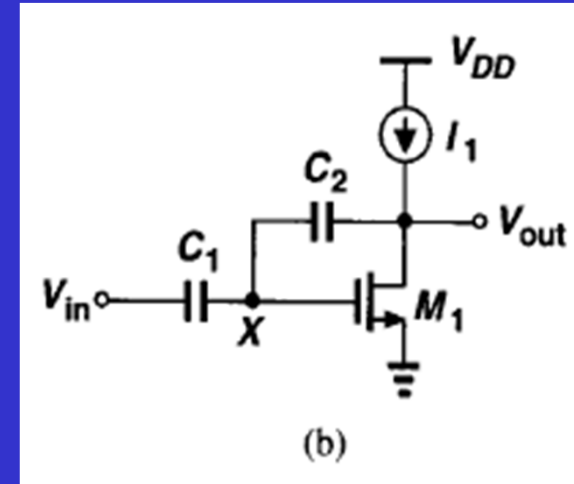
$$(V_{out} - V_X)C_2s = (V_X - V_{in})C_1s$$

上述两式联立，可得：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}\right) \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}}$$

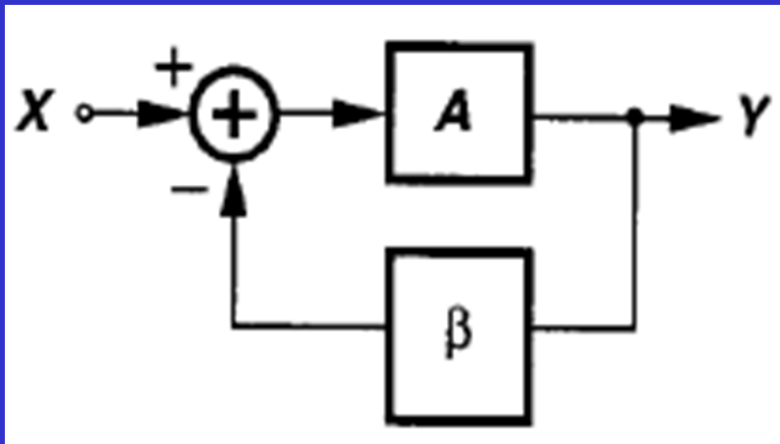
当 $g_{m1}r_{O1}$ 足够大时，等于 $-C_1/C_2$

采用负反馈的电路的电压增益对工艺、温度、频率、负载等改变更不敏感



# 增益灵敏度降低

## □通常情况下



$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 + \beta A}$$
$$\approx \frac{1}{\beta} \left( 1 - \frac{1}{\beta A} \right)$$

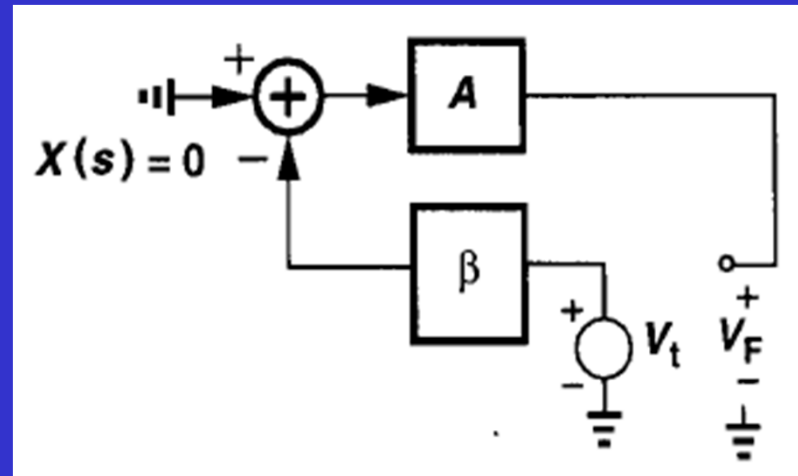
## □若 $BA \gg 1$ ，则闭环增益约等于 $1/B$

- ❖ 由反馈网络决定
- ❖ 即使开环增益 $A$ 有很大变化，只要 $BA \gg 1$ 仍成立，则闭环增益仍约等于 $1/B$
- ❖  $BA$ ：环路增益

# 增益灵敏度降低

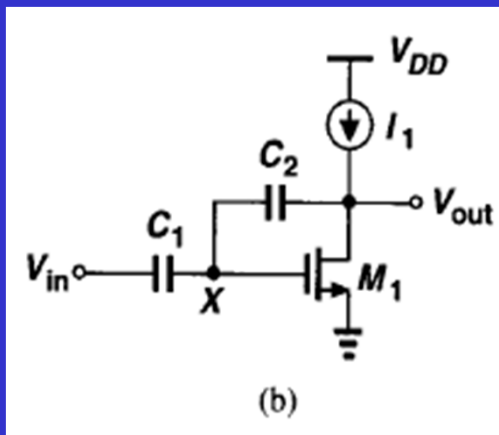
## □ 环路增益的计算方法

- ❖ 主输入置零
- ❖ 在环路的合适点断开环路，注入一个测试信号



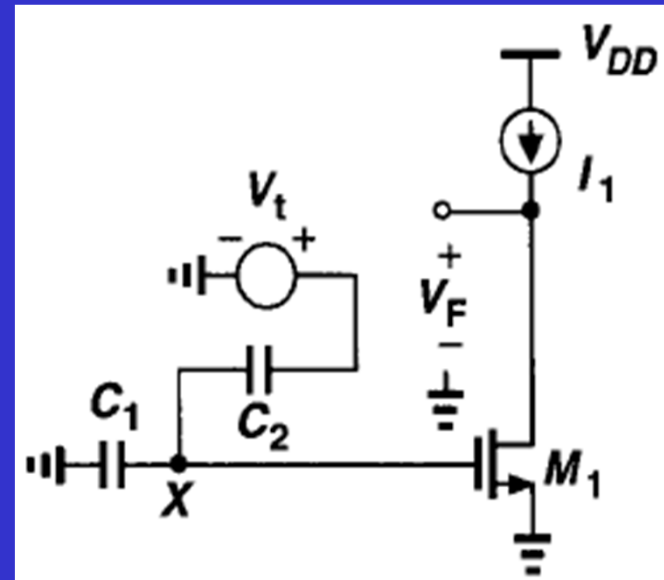
$$V_t \beta (-1) A = V_F$$

$$V_F / V_t = -\beta A$$



$$V_t \frac{C_2}{C_1 + C_2} (-g_{m1} r_{O1}) = V_F$$

$$\frac{V_F}{V_t} = -\frac{C_2}{C_1 + C_2} g_{m1} r_{O1}$$



# 终端阻抗变化

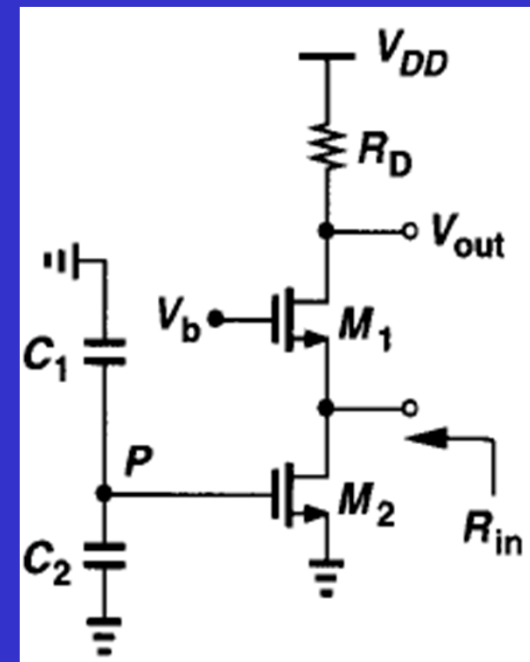
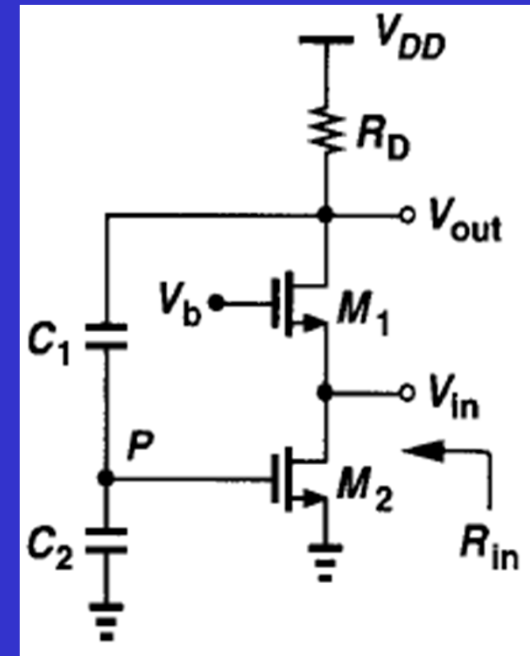
## □电压-电流反馈

- ❖ 计算有反馈和无反馈时的输入阻抗
- ❖ 忽略沟长调制效应

## □无反馈时

$$R_{in,open} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$$

## □有反馈时



# 输入阻抗的变化

## □有反馈时

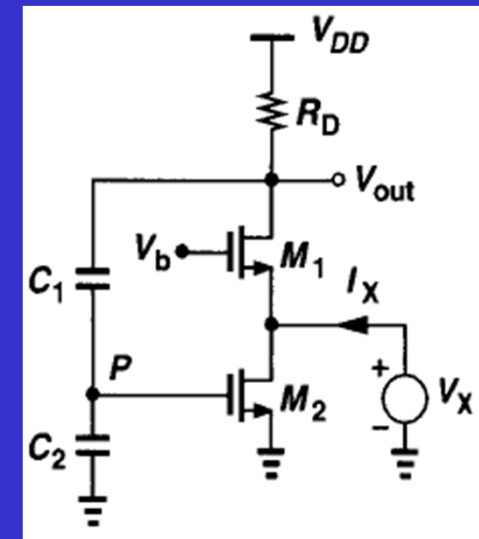
$$V_{out} = (g_{m1} + g_{mb1})V_X R_D \quad (\text{低频时, 且}\lambda=0)$$

$$V_P = V_{out} \frac{C_1}{C_1 + C_2} = (g_{m1} + g_{mb1})V_X R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

$$I_X = (g_{m1} + g_{mb1})V_X + g_{m2}(g_{m1} + g_{mb1}) \frac{C_1}{C_1 + C_2} R_D V_X$$
$$= (g_{m1} + g_{mb1}) \left( 1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) V_X.$$

$$R_{in,closed} = V_X / I_X$$

$$= \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}} \frac{1}{1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}}$$



$$R_{in,open} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$$

输入阻抗降低了  
降低了多少?

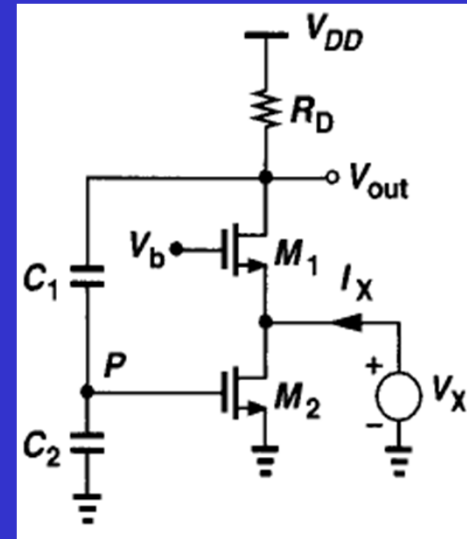
# 输入阻抗的变化

□有反馈时

$$V_{out} = (g_{m1} + g_{mb1})V_X R_D$$

$$R_{in,closed} = V_X / I_X$$

$$= \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}} \frac{1}{1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}}$$



$$A = \frac{V_{out}}{I_{in}} = R_D, B = \frac{I_{M2}}{V_{out}} = g_{m2} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

$$\text{环路增益 } AB = g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

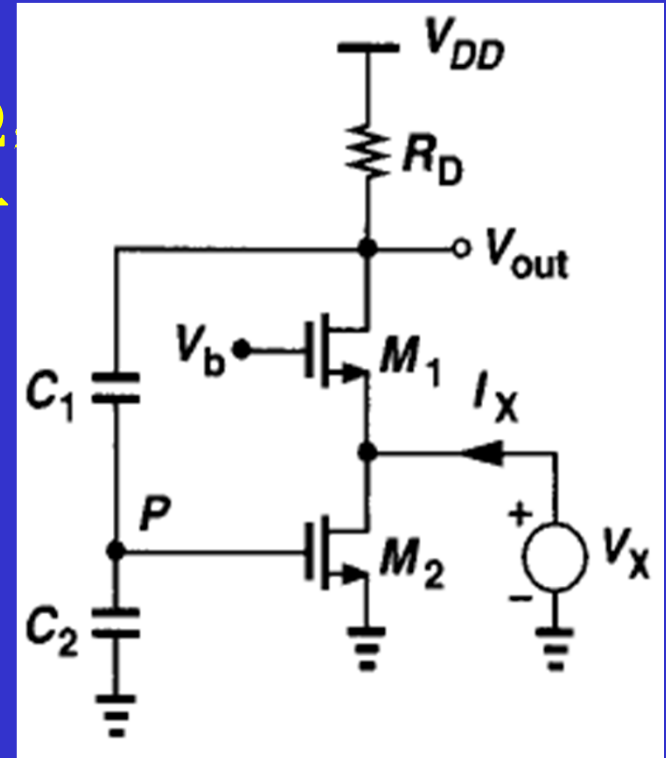
$$R_{in,open} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$$

输入阻抗降低了  
 $(1 + A\beta)^{-1}$



# 例题

□ 对右图电路，假定  $(W/L)_1=50/0.5$ ，  
 $(W/L)_2=100/0.5$ ， $C_2=C_1$ ， $R_D=2K\Omega$   
 $\lambda=0$ ， $\gamma=0$ ，要使低频输入阻抗等于  
 $50\Omega$ ，求M1和M2的偏置电流。



$$R_{in,closed} = V_X / I_X$$

$$= \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}} \frac{1}{1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}}$$

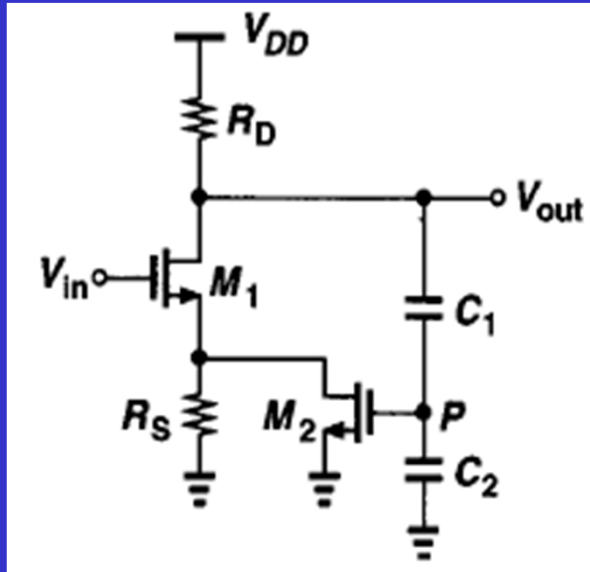
$$g_{mb} = 0$$

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

$$= \sqrt{2 * I_{bias} * 0.13429 [mA / V^2] * \frac{W}{L}}$$

解方程（有些繁琐），  
 得： $I_{bias} = 0.436mA$

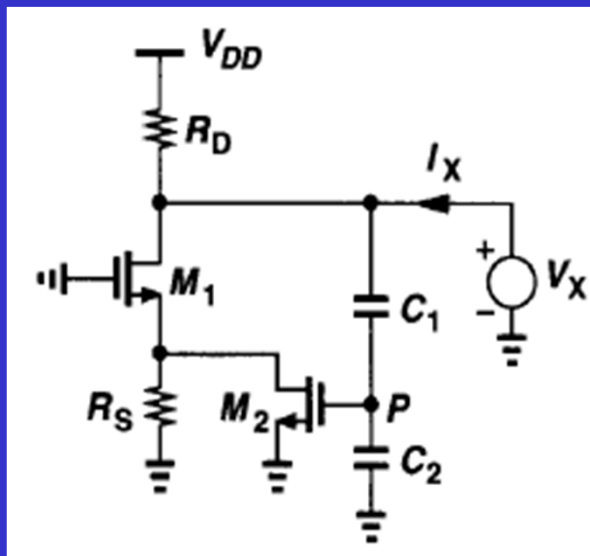
# 输出阻抗的变化



- 考察反馈对输出阻抗的影响
- 是否负反馈?
- 求低频输出阻抗

$$I_{D1} = g_{m2}V_P + \frac{V_{M1,S}}{R_S} \quad (1)$$

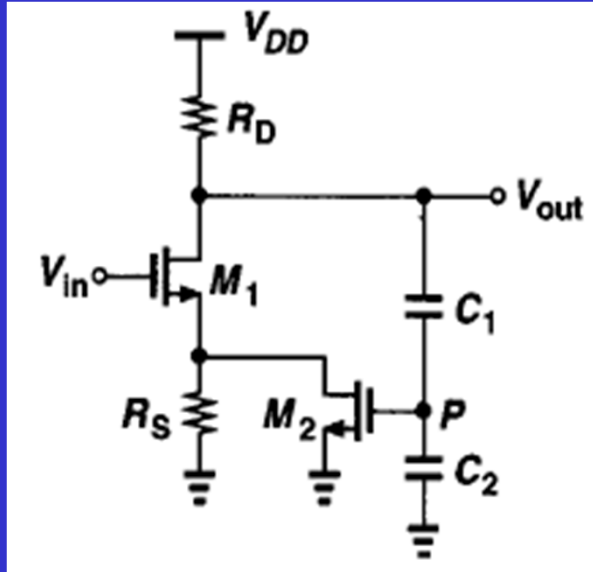
$$I_{D1} = (g_{m1} + g_{mb1})(-V_{M1,S}) \quad (2)$$



$$I_{D1} = V_X \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m2} \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}}$$

# 输出阻抗的变化

## □求低频输出阻抗



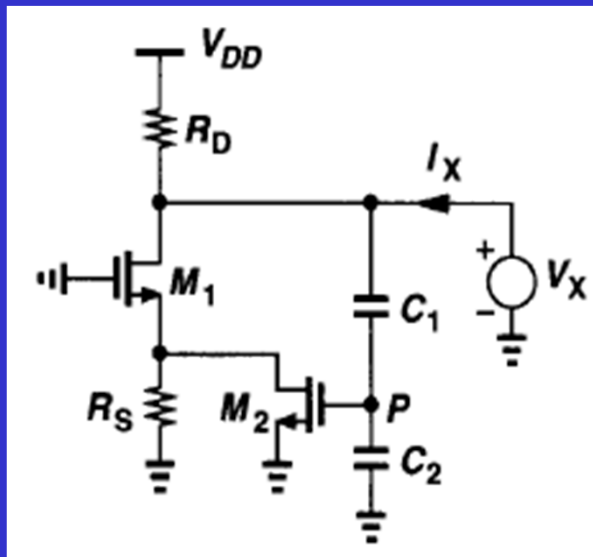
$$I_{D1} = V_X \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m2} \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}}$$

$$I_X = V_X / R_D + I_{D1}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_D}{1 + \frac{g_{m2} R_S (g_{m1} + g_{mb1}) R_D}{(g_{m1} + g_{mb1}) R_S + 1}} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

结论：负反馈使输出阻抗降低了  $(1+A\beta)^{-1}$

$$\text{环路增益 } AB = \frac{V_{out}}{V_X} = \frac{I_{D1} R_D}{V_X}$$



# 带宽变化

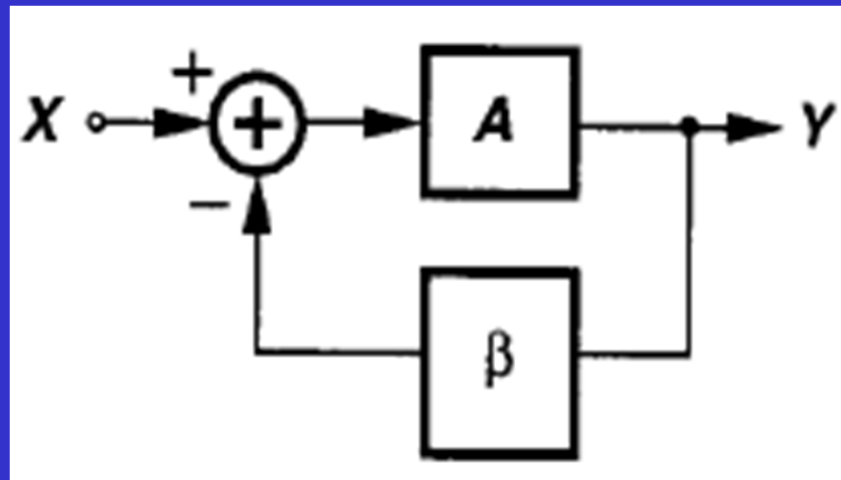
前馈放大器传输函数:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

3dB带宽为:  $\omega_0$

闭环系统传输函数:

$$\begin{aligned} \frac{Y}{X}(s) &= \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}}{1 + \beta \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}} \\ &= \frac{A_0}{1 + \beta A_0 + \frac{s}{\omega_0}} \\ &= \frac{A_0}{1 + \frac{s}{(1 + \beta A_0)\omega_0}} \end{aligned}$$



3dB带宽为:  $(1 + \beta A_0)\omega_0$ .

带宽增大了  $(1 + \beta A_0)$  倍  
(译著“ $\beta A_0$ 倍”错, 原著对)

# 带宽变化

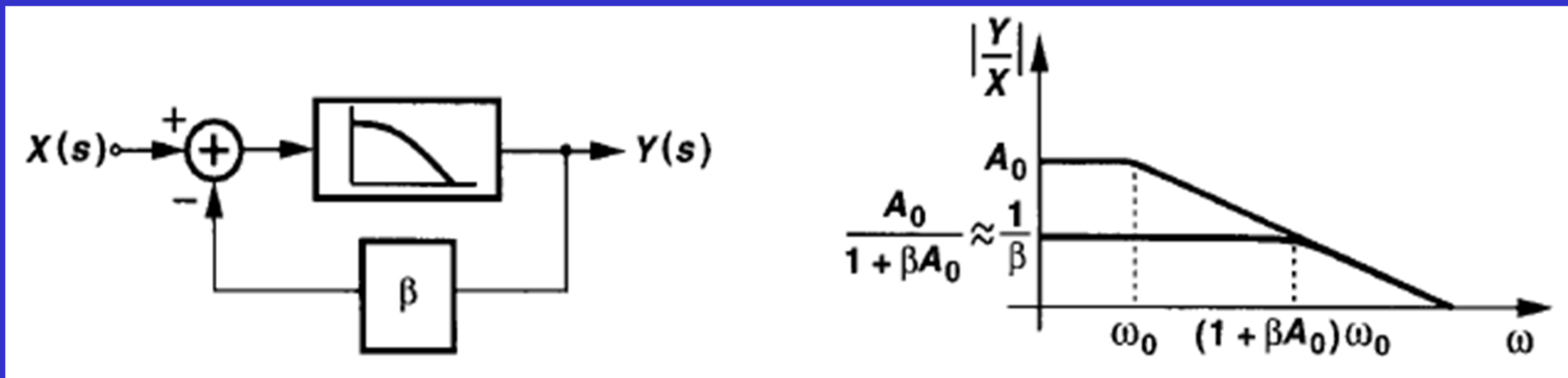
原因:

当前馈放大器增益 $A$ 随频率开始下降时, 闭环系统增益仍可在相当频率范围内不变 (保持为 $1/\beta$ )

增益缩小了  $(1 + \beta A_0)$  倍

结论: 单极点系统的增益和带宽的乘积 (GBW) 不随反馈变化

$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 + \beta A}$$
$$\approx \frac{1}{\beta} \left( 1 - \frac{1}{\beta A} \right)$$



$$A_o(s) = A_{o,0} / (1 + s/\omega_0)$$

当  $\omega \ll \omega_0$  时, 分母  $\approx 1$ :

$$20\lg A_o(s) = 20\lg A_{o,0}$$

当  $\omega = \omega_0$  时, 分母  $= 1 + j$ , 模为  $\sqrt{2}$ :

$20\lg A_o(s) = 20\lg A_{o,0} - 20\lg \sqrt{2} = 20\lg A_{o,0} - 3\text{dB}$ , 故又称-3dB频率。

当  $\omega \gg \omega_0$  时, 分母  $\approx \frac{j\omega}{\omega_0}$ :

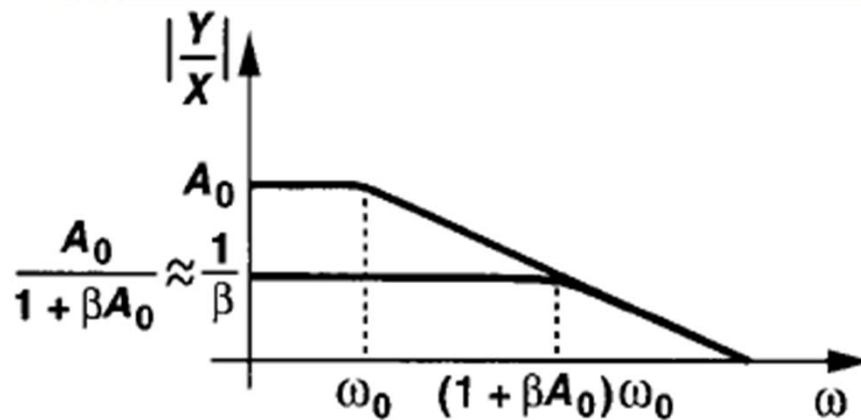
$$20\lg A_o(s) = 20\lg A_{o,0} - 20\lg \omega + 20\lg \omega_0 = 20\lg(A_{o,0}\omega_0) - 20\lg \omega,$$

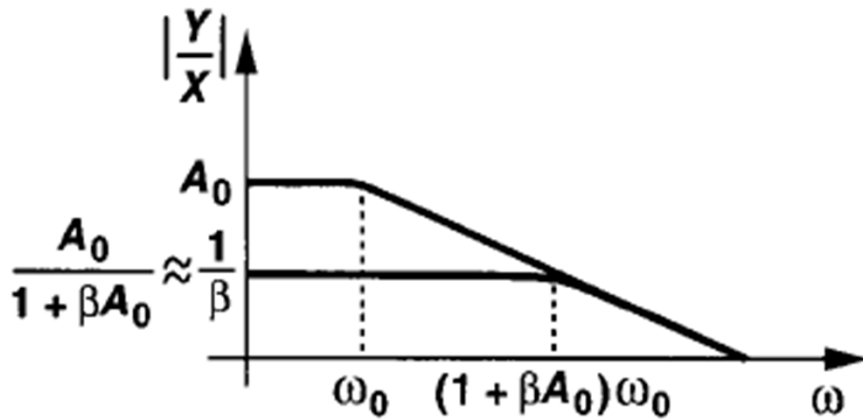
故,  $20\lg A_o(s)$  每10倍频下降-20dB。

什么时候  $20\lg A_o(s) = 0$ ?

$\omega = A_{o,0}\omega_0$ , 此频率下增益降为1, 故称为单位增益频率。

增益带宽积GBW为  $A_{o,0}\omega_0$ , 等于单位增益频率。





$$A_o(s) = A_{o,0} / (1 + s/\omega_0)$$

当  $\omega \gg \omega_0$  时, 分母  $\approx \frac{j\omega}{\omega_0}$ :

$$20\lg A_o(s) = 20\lg(A_{o,0}\omega_0) - 20\lg \omega,$$

$$A_c(s) = \frac{\frac{A_0}{1 + \beta A_0}}{1 + \frac{s}{(1 + \beta A_0)\omega_0}}$$

当  $\omega \ll \omega_0$  时, 分母  $\approx 1$ :  $20\lg A_c(s) = 20\lg \frac{A_0}{1 + \beta A_0} =$  低频增益  $A_{c0}$ ;

当  $\omega = (1 + \beta A_0)\omega_0$  时, 分母  $= 1 + j$ , 模为  $\sqrt{2}$ :  $20\lg A_c(s) = A_{c0} - 3\text{dB}$ ,  $-3\text{dB}$  频率。

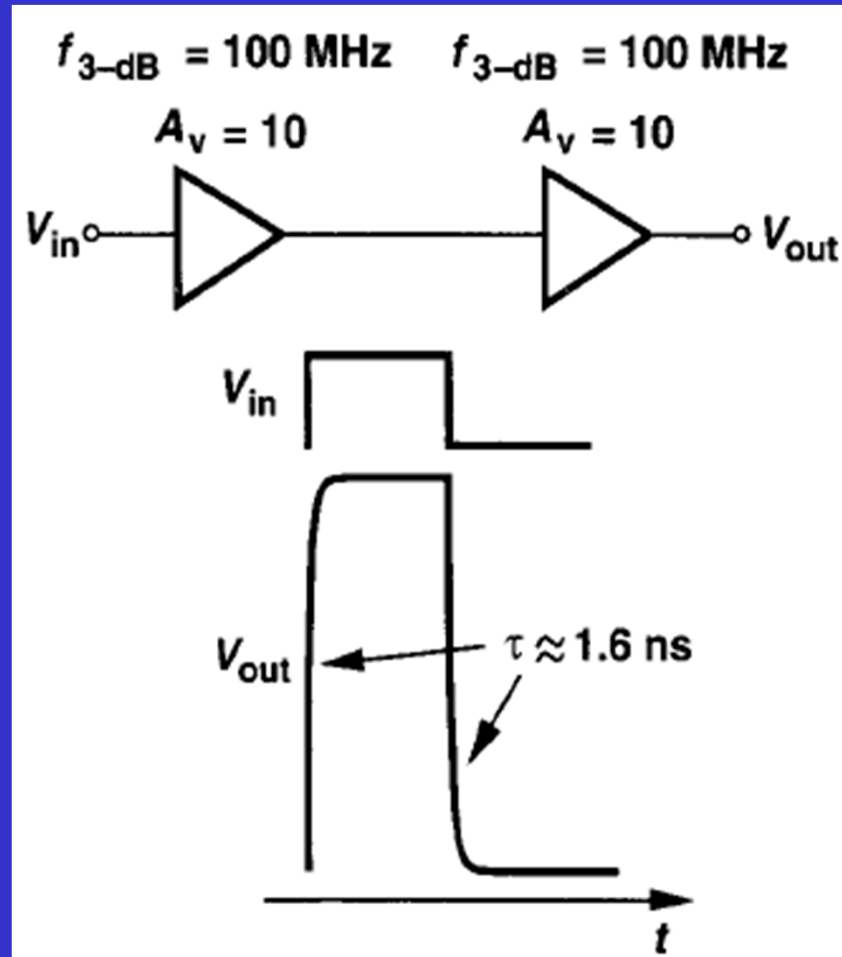
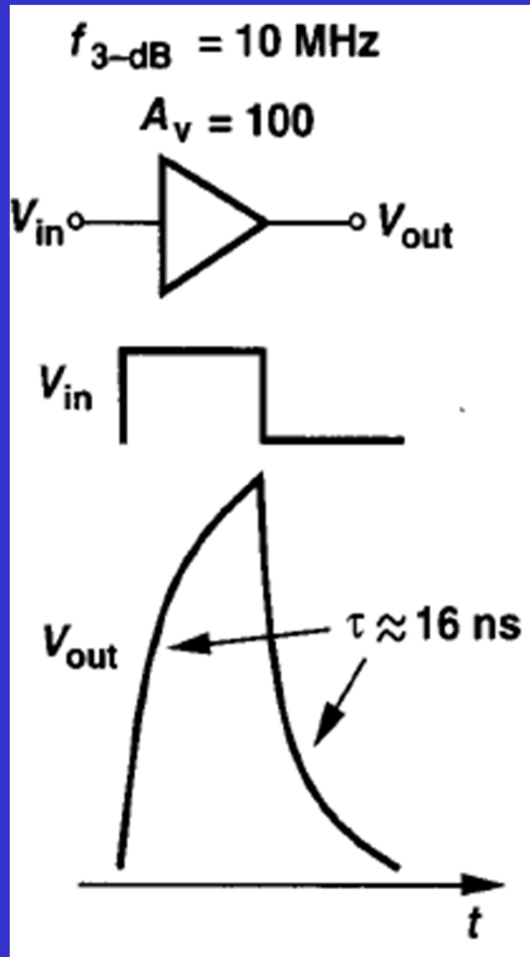
当  $\omega \gg (1 + \beta A_0)\omega_0$  时, 分母  $\approx \frac{j\omega}{(1 + \beta A_0)\omega_0}$ :  $20\lg A_c(s) = 20\lg \frac{A_0}{1 + \beta A_0} - 20\lg \omega + 20\lg[(1 + \beta A_0)\omega_0]$

$= 20\lg(A_0\omega_0) - 20\lg \omega$ , 与  $20\lg A_o(s)$  结果同, 故两条曲线重合。  $20\lg A_c(s)$  每10倍频下降  $-20\text{dB}$ 。

什么时候  $20\lg A_c(s) = 0$ ?  $\omega = A_0\omega_0$ , 单位增益频率, 与开环时同。

闭环时的增益带宽积GBW仍为  $A_0\omega_0$ , 与开环时同。

# 增大带宽的应用



对放大器采用负反馈后  
带宽增大、  
增益减小

总电压增益  
仍为**100**，  
但带宽增大，  
响应速度增大

## ❑ 功耗加倍

❖ 用一个放大器，即使功耗加倍，也很难获得这么大带宽



# 非线性减小

□采用负反馈可以抑制电路的非线性

□第13章中具体介绍

# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

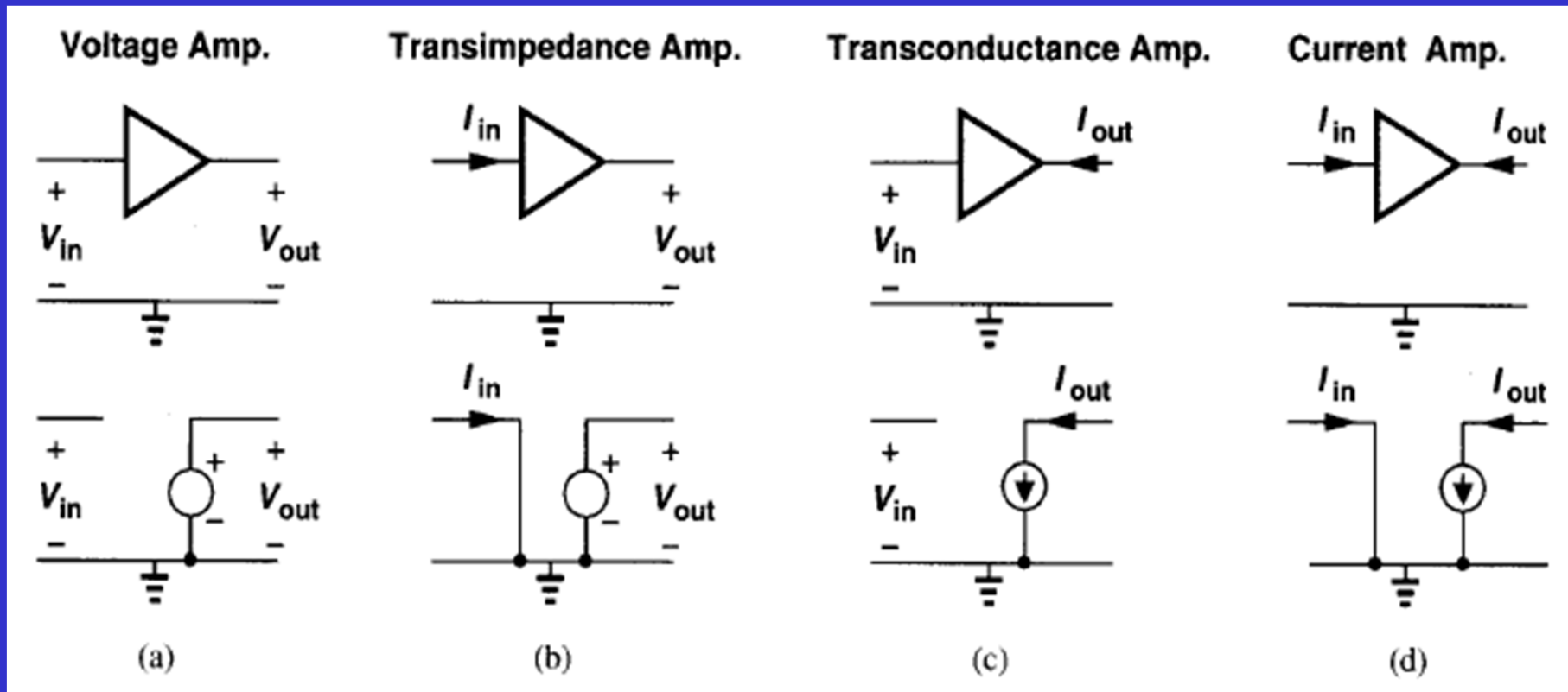
## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

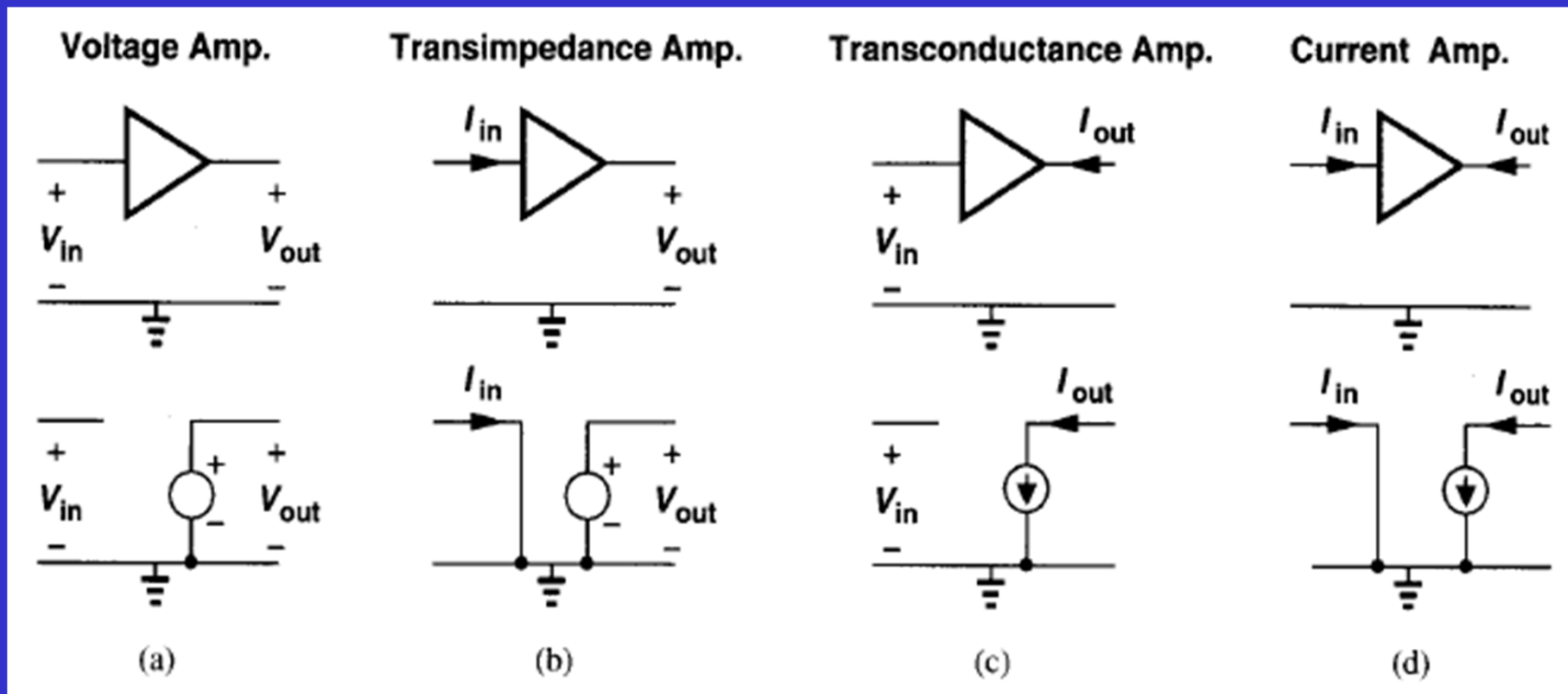
# 放大器类型

- 前面讲述最多的是电压放大器
- 四种类型

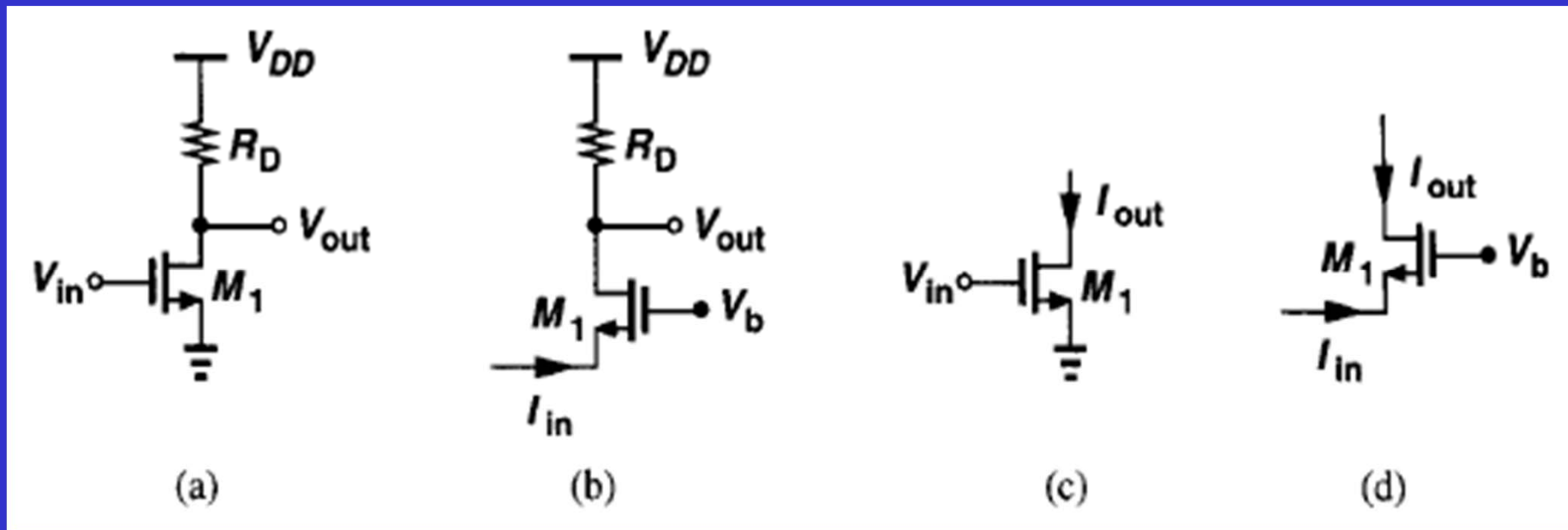


# 对各类放大器的共性要求

- 检测电压信号的放大器，必须高输入阻抗；检测电流信号者，需低输入阻抗
- 输出电压信号的放大器，必须低输出阻抗；输出电流信号者，需高输出阻抗

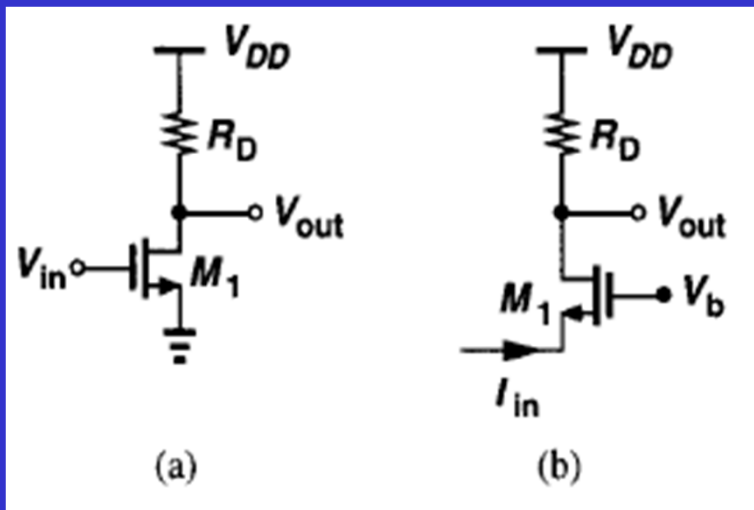


# 四类放大器电路的简单实例

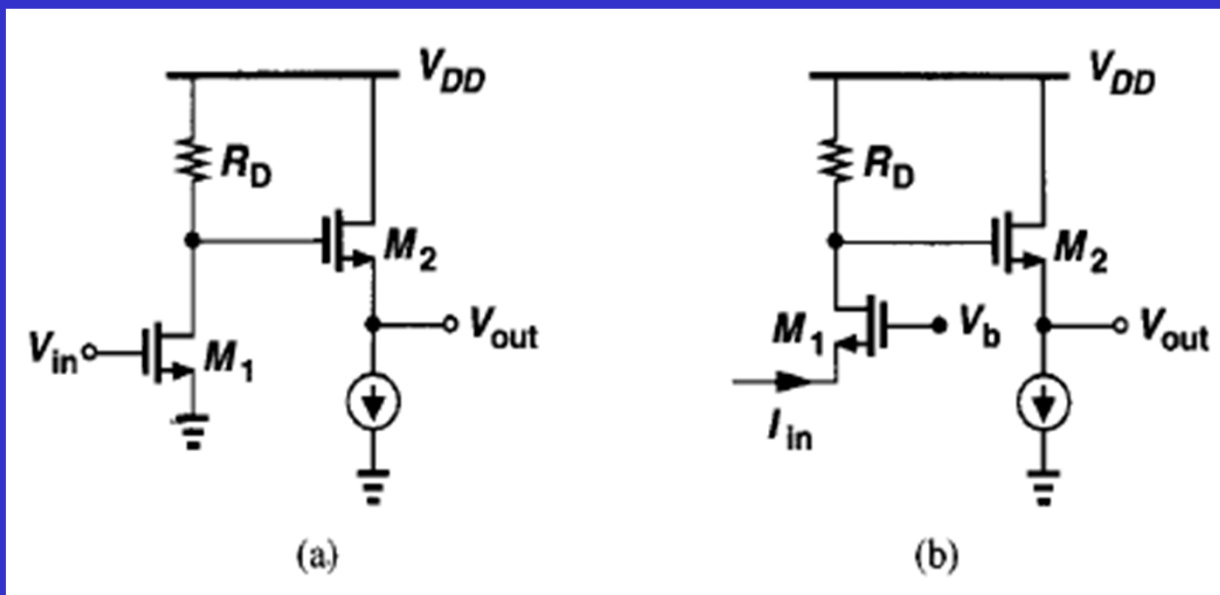


- a、c 检测电压信号，希望其高输入阻抗；
- b、d 检测电流信号，希望其低输入阻抗；
- a、b 输出电压信号，希望其低输出阻抗；
- c、d 输出电流信号，希望其高输出阻抗；

# 四类放大器电路实例的改进

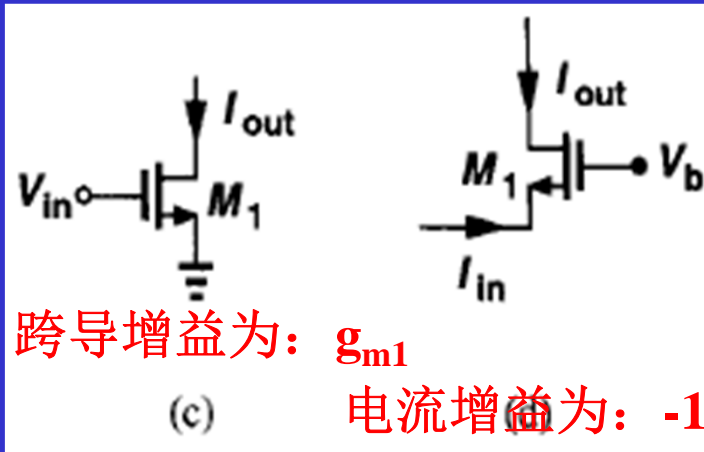


输出电压信号  
希望降低输出阻抗

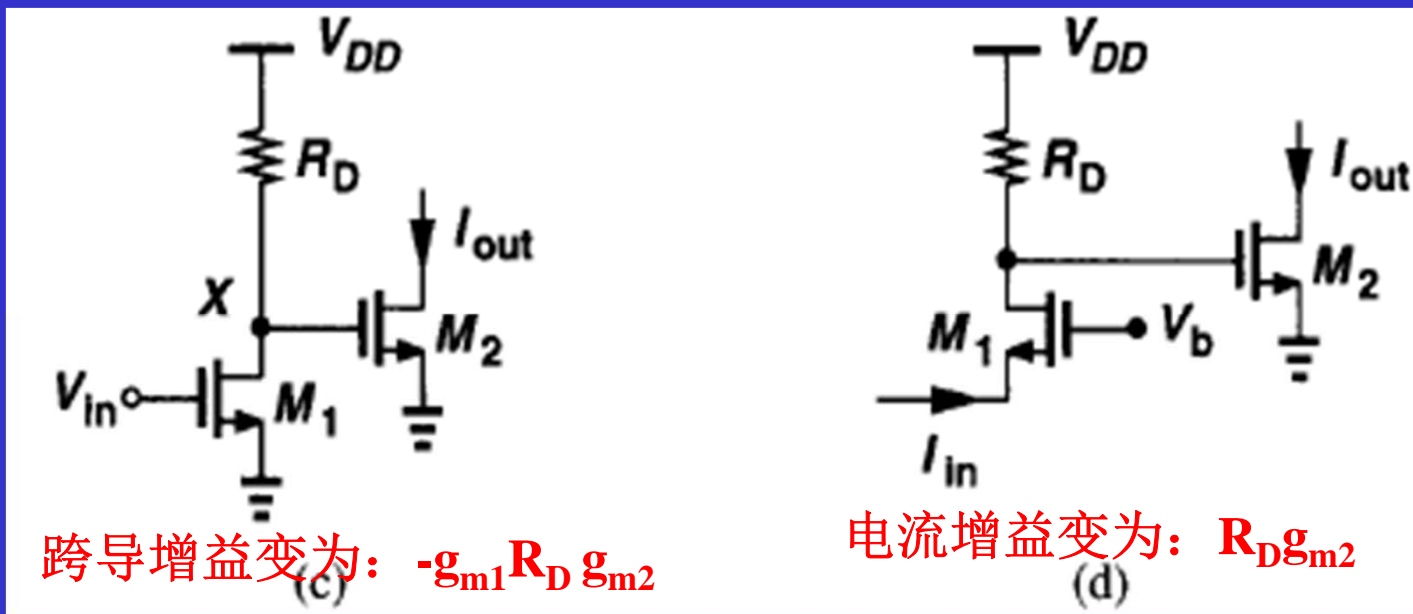


用SF级实现阻  
抗转换

# 四类放大器电路实例的改进



希望提高增益



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响



# 反馈类型

□根据检测和返回的信号的类型，有四种反馈类型

❖电压—电压反馈

❖电流—电压反馈

❖电压—电流反馈

❖电流—电流反馈

❖输出端检测的信号类型—反馈到输入端的信号类型

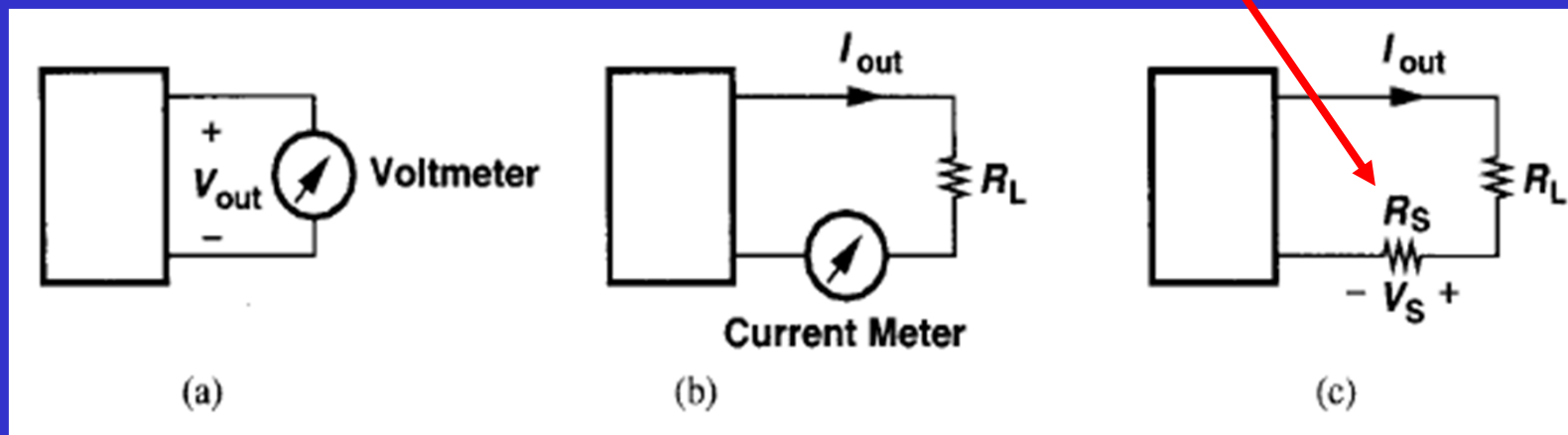
# 输出端信号的检测方法

## □ 检测电压

- ❖ 并联反馈
- ❖ 理想情况下，并联电压表阻抗为无穷大，不引入负载

## □ 检测电流

- ❖ 串联反馈
- ❖ 理想情况下，串联电流表阻抗为零，不引入负载
- ❖ 实际用小电阻，通过测电阻上压降来测电流



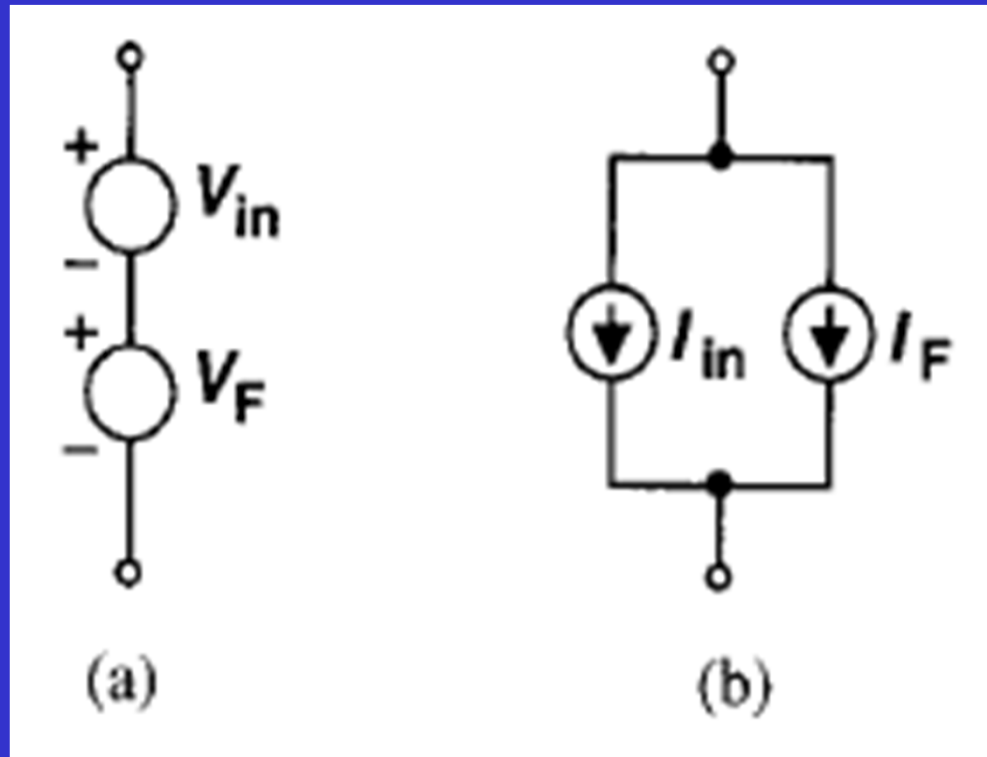
# 输入端信号的相加方法

## □ 电压信号

❖ 串联相加

## □ 电流信号

❖ 并联相加

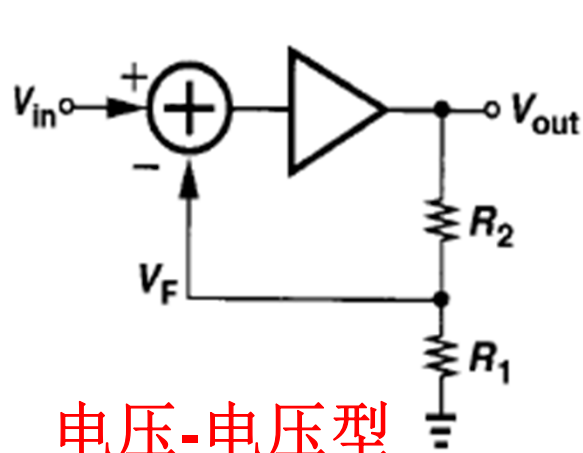


## □ 反馈网络对开环放大器的影响

❖ 理想情况下应该无影响

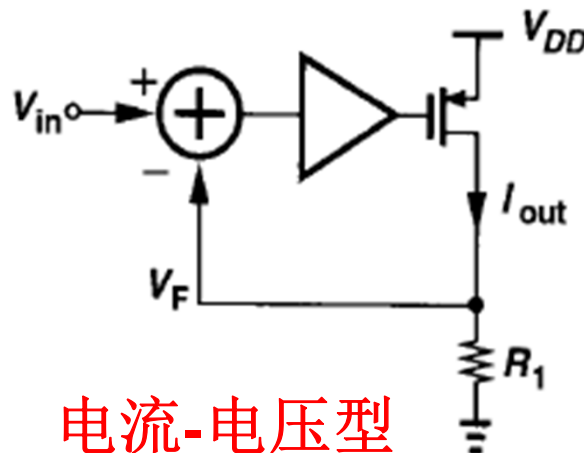
❖ 实际上会影响开环放大器的负载

# 信号检测和返回实例



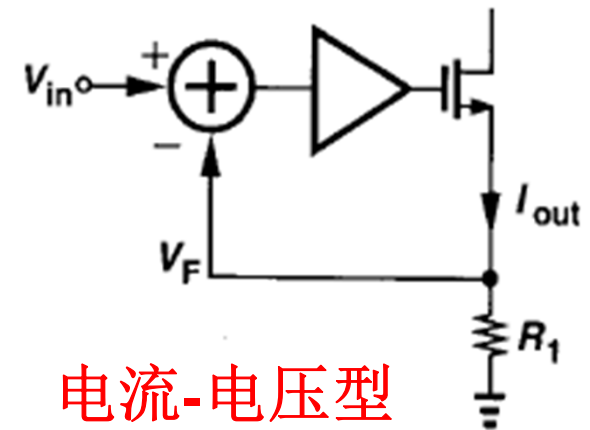
电压-电压型

(a)



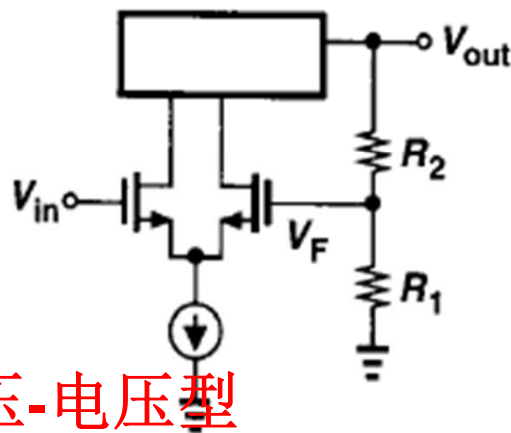
电流-电压型

(b)



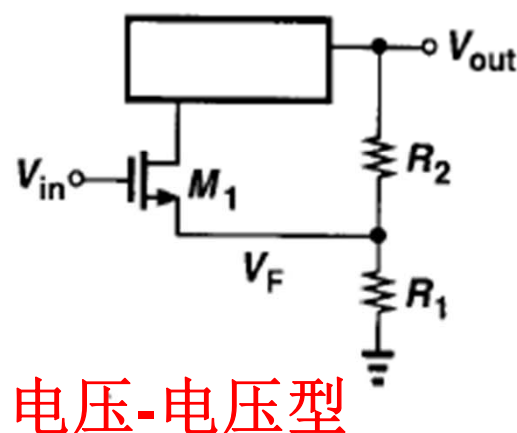
电流-电压型

(c)



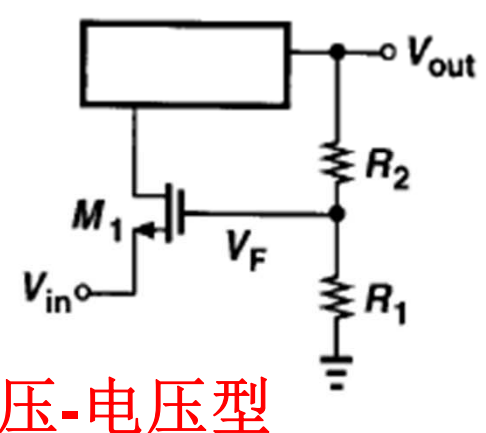
电压-电压型

(d)



电压-电压型

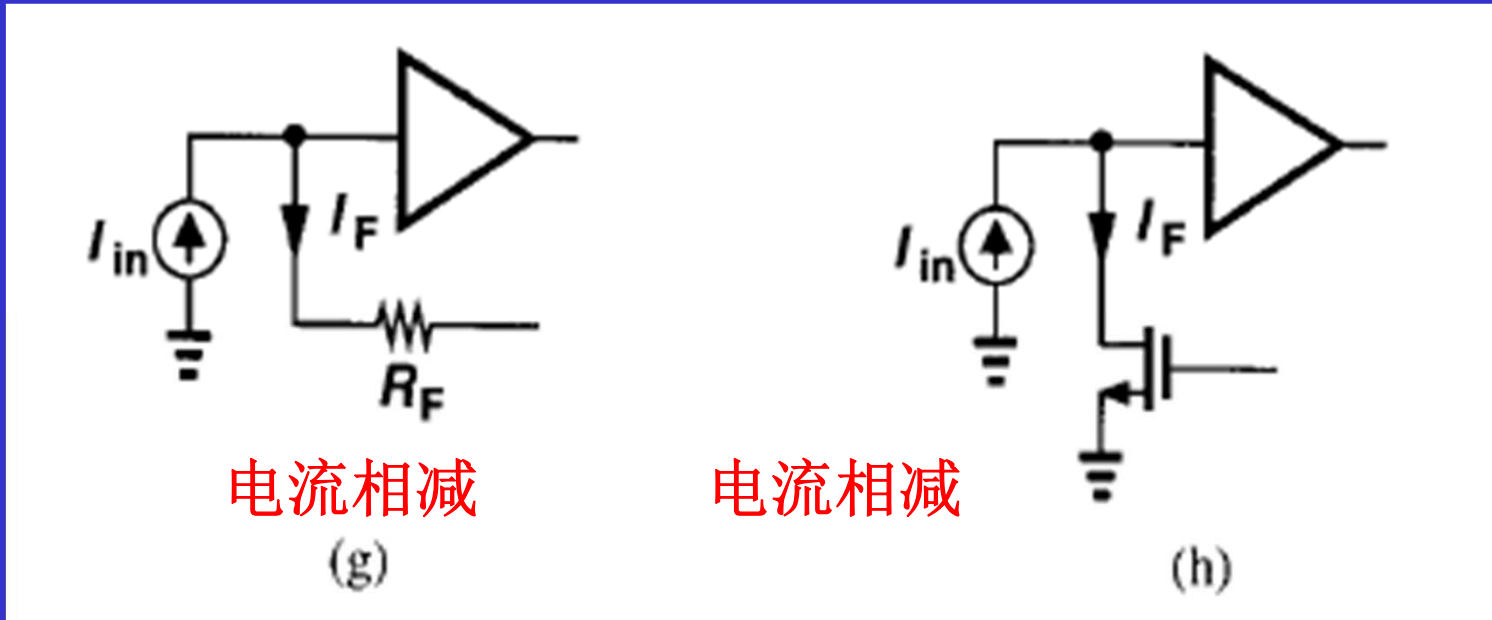
(e)



电压-电压型

(f)

# 信号检测和返回实例



## □ 如何区分反馈的类型？

- ❖ 电压相减时，输入信号和反馈信号接在两个不同的节点上
- ❖ 电流相减时，输入信号和反馈信号接在同一个节点上

# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 对每种反馈结构

□ 阐明其结构特点

□ 分析其

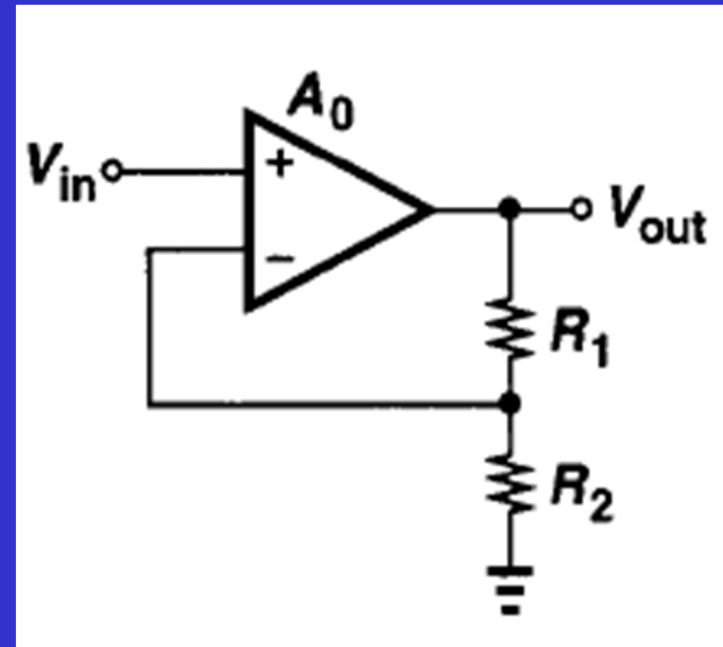
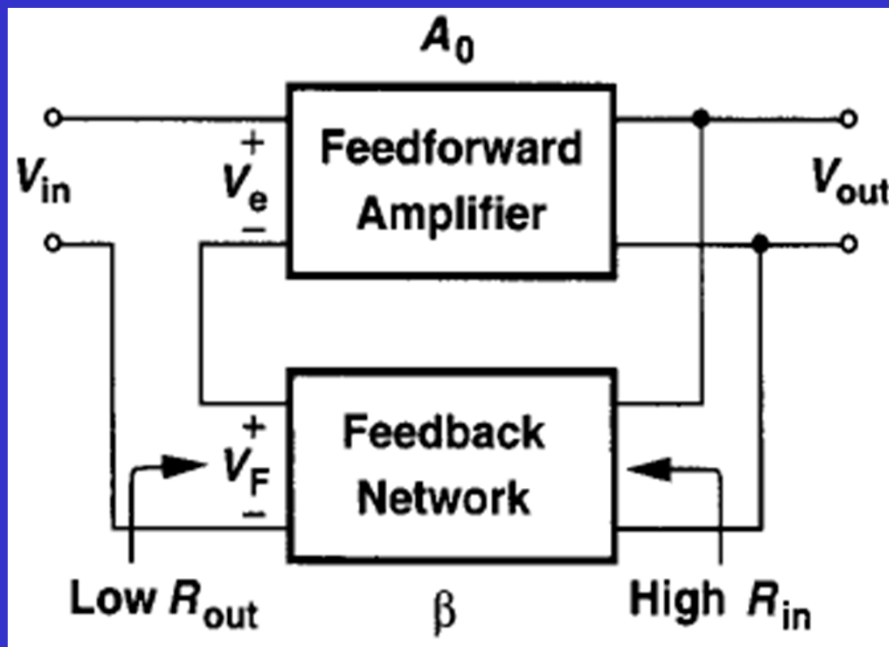
- ❖ 闭环增益
- ❖ 输入阻抗
- ❖ 输出阻抗

□ 举若干实例

# 电压—电压反馈

## □特点

- ❖对输出电压采样，反馈信号也是电压
- ❖反馈网络与输出并联，与输入串联
  - 理想的反馈网络应该是输入阻抗无限大，输出阻抗为零，不构成前馈放大器的负载





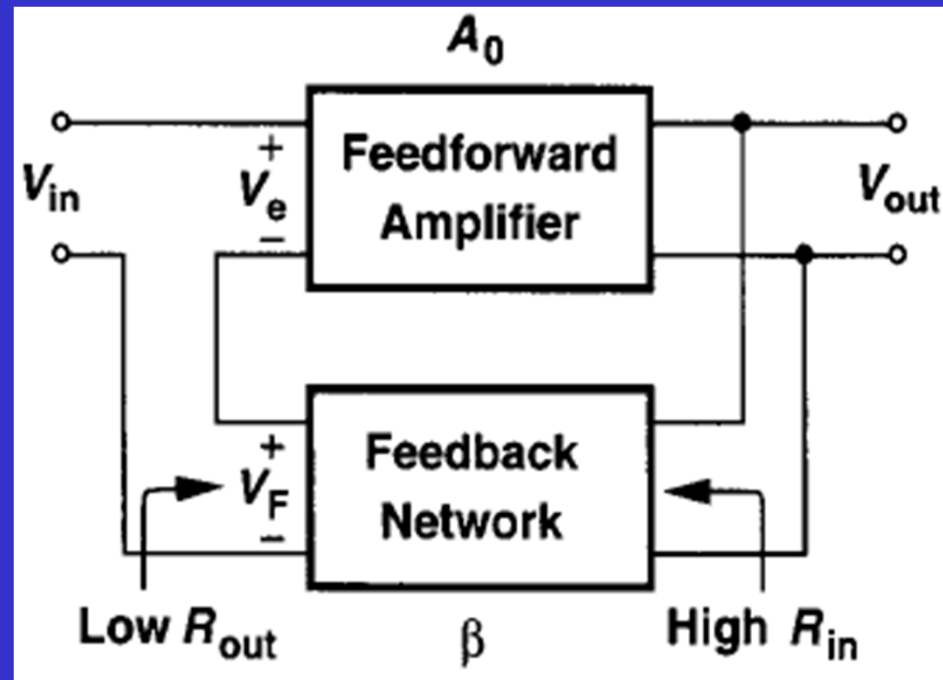
# 闭环增益

$$V_F = \beta V_{out}, \quad V_e = V_{in} - V_F$$

$$V_{out} = A_0(V_{in} - \beta V_{out})$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0}$$

$\beta A_0$ 是环路增益



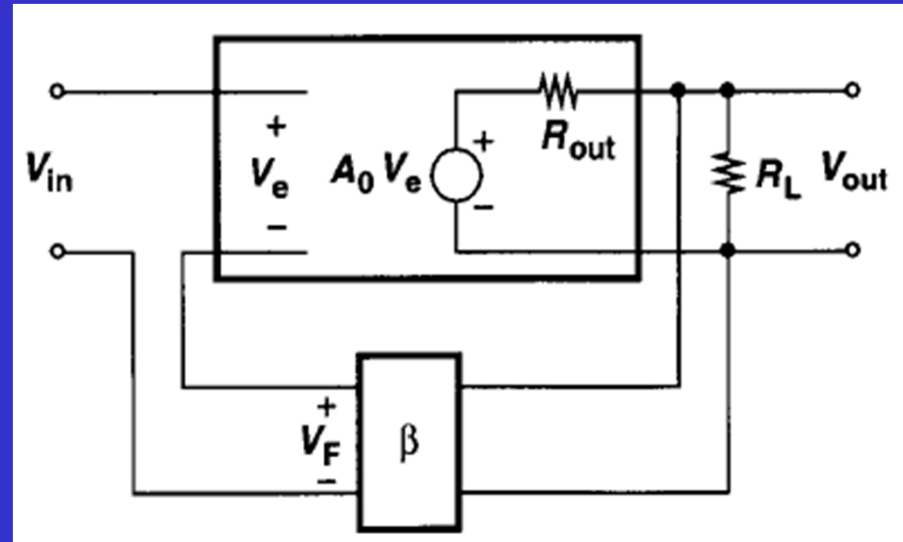
# 输出阻抗

## □直观理解——输出阻抗应该降低

- ❖应用负反馈后，负反馈使输出电压试图精确按比例（ $1/\beta$ ）复制输入电压
- ❖即使负载电阻 $R_L$ 减小，只要环路增益远大于1，输出电压幅值不变（ $=V_{in}/\beta$ ），因此，反馈系统类似一个电压源。电压源的特点是输出阻抗低

□开环结构的输出电压按 $R_L / (R_L + R_{OUT})$ 比例，随 $R_L$ 减小而减小

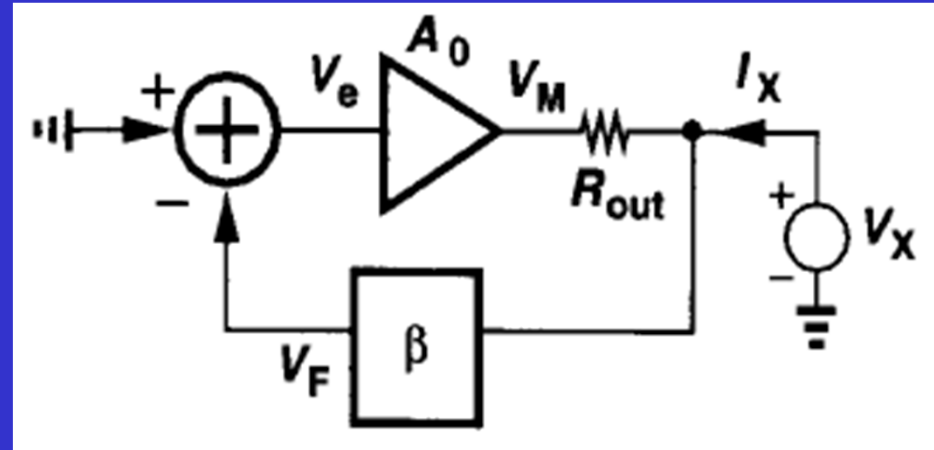
□闭环结构输出电压对 $R_L$ 变化的敏感度降低



# 输出阻抗的推导

□ 输入置零，在输出端加测试电压  $V_X$

❖  $R_{out}$  为前馈放大器的输出阻抗



$$V_F = \beta V_X, V_e = -\beta V_X, V_M = -\beta A_0 V_X,$$

$$I_X = [V_X - (-\beta A_0 V_X)] / R_{out} \quad \text{忽略流入反馈网络的电流}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{out}}{1 + \beta A_0}$$

# 例题 计算输出阻抗

## □ 计算放大器在低频时的闭环增益和输出阻抗

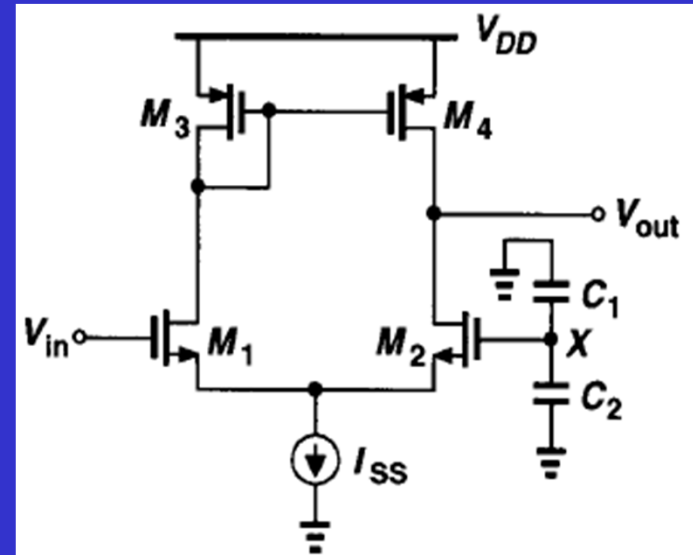
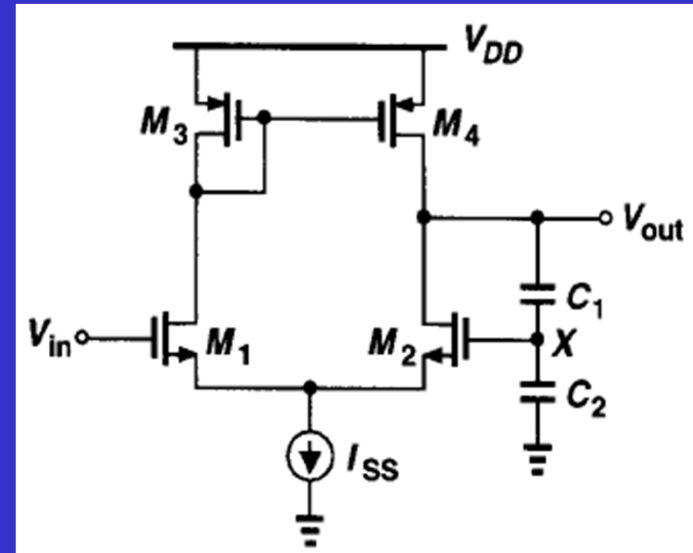
低频时由C1和C2构成的反馈网络所引入的负载可忽略

思路:

只要求出开环增益、开环输出阻抗、环路增益，直接用前面已推出的结论即可

开环增益:  $g_{m1}(r_{o2} \parallel r_{o4})$ .

开环输出阻抗:  $r_{o2} \parallel r_{o4}$



# 例题 计算输出阻抗

开环增益:  $g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})$ .

开环输出阻抗:  $r_{O2} \parallel r_{O4}$

环路增益:

$$V_F = -V_t \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4}).$$

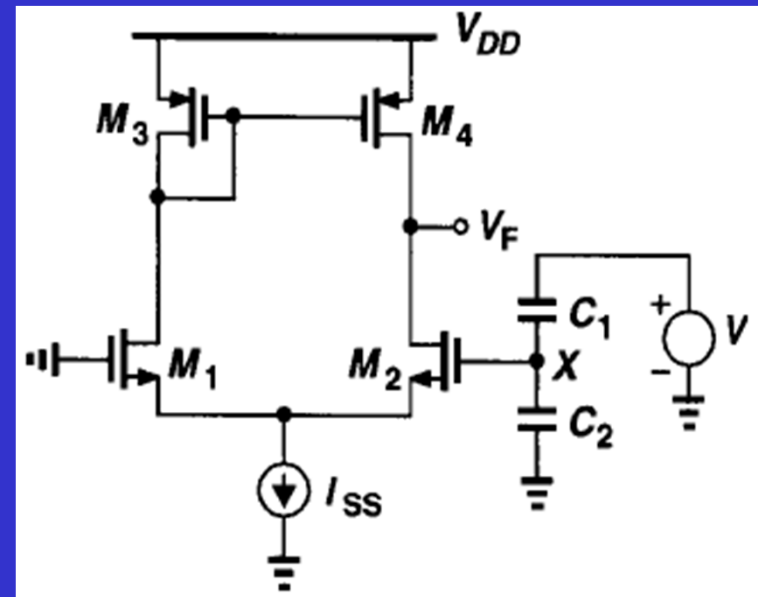
$$\beta A_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})$$

闭环增益:

$$A_{closed} = \frac{g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})}{1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})}$$

当  $\beta A_0 \gg 1$  时:

$$A_{closed} \approx 1 + C_2/C_1.$$



# 例题 计算输出阻抗

开环增益:  $g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})$ .

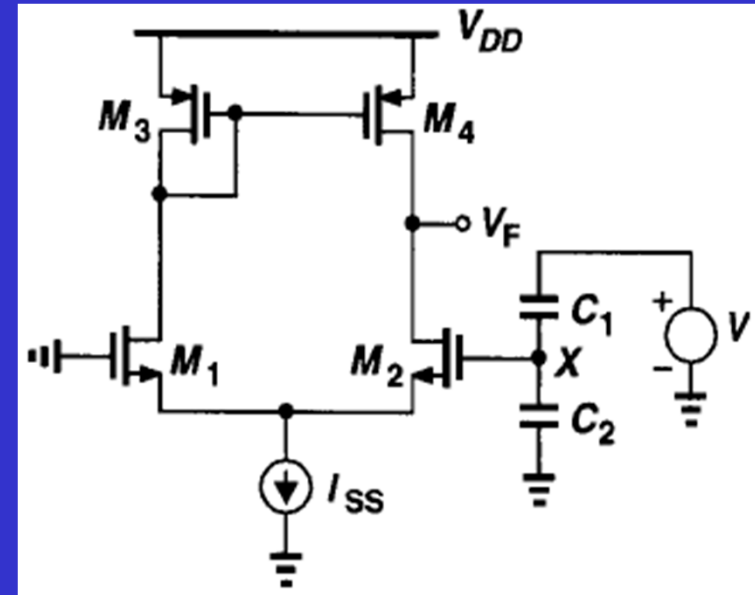
开环输出阻抗:  $r_{O2} \parallel r_{O4}$

环路增益:

$$\beta A_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})$$

闭环输出阻抗:

$$R_{out,closed} = \frac{r_{O2} \parallel r_{O4}}{1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})}$$



当  $\beta A_0 \gg 1$  时:

$$R_{out,closed} \approx \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \frac{1}{g_{m1}}$$

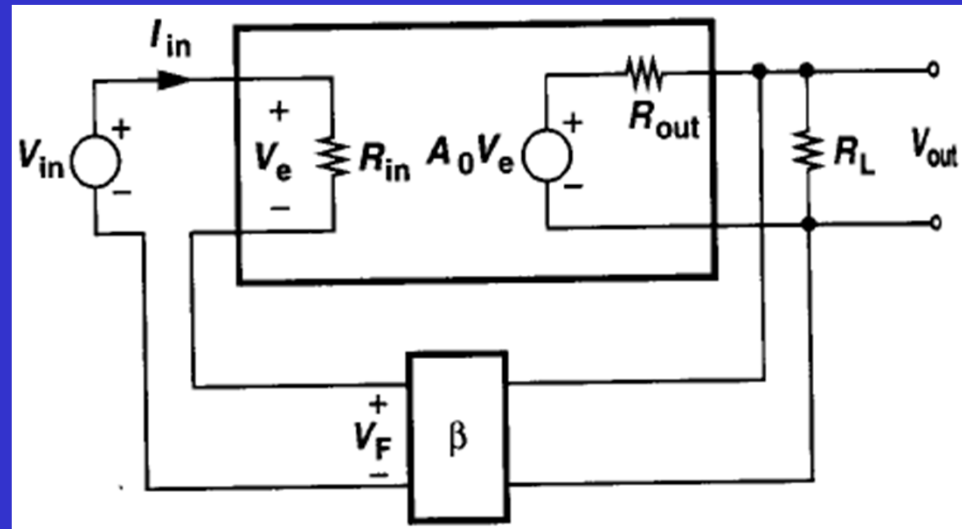
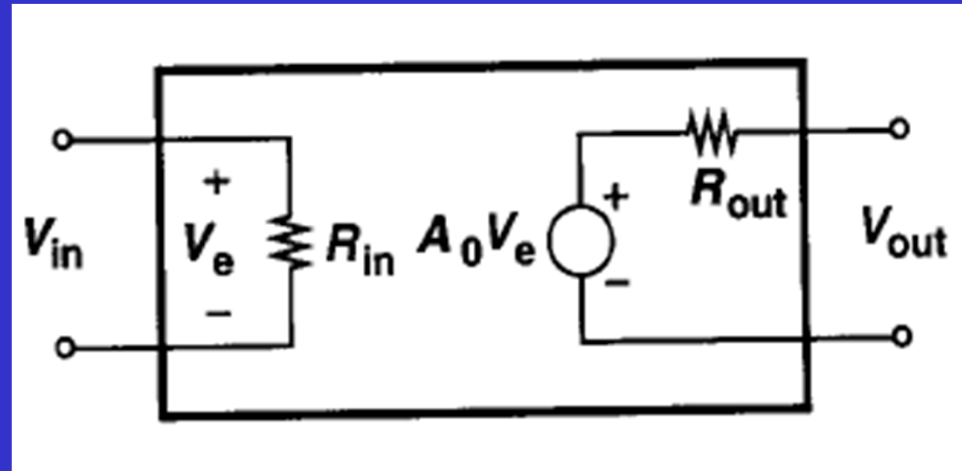
即使开环放大器的输出阻抗很高，闭环输出阻抗可能很低；可作为高阻抗源与低阻抗负载间的缓冲级使用 是否高输入阻抗？

# 输入阻抗

□ 计算并比较开环输入阻抗和闭环输入阻抗

□ 直观上看

- ❖ 开环时， $V_{in}$  全加持在  $R_{in}$  上
- ❖ 闭环时， $V_{in}$  只一部分加持在  $R_{in}$  上，因此，输入电流小
- ❖ 闭环输入阻抗大



# 输入阻抗的推导

□ 从严格推导看

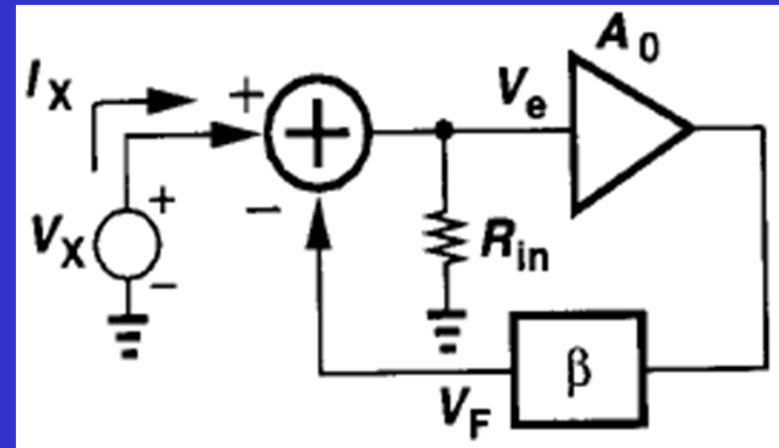
$$V_e = I_X R_{in}$$

$$V_F = \beta A_0 I_X R_{in}$$

$$V_e = V_X - V_F = V_X - \beta A_0 I_X R_{in}$$

$$I_X R_{in} = V_X - \beta A_0 I_X R_{in}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + \beta A_0).$$
 输入阻抗的确是增大了 $\beta A_0$ 倍





# 例题 计算输入阻抗

忽略沟长调制效应，计算右图电路的低频闭环输入阻抗

是否是电压-电压反馈？

开环输入阻抗是多少？

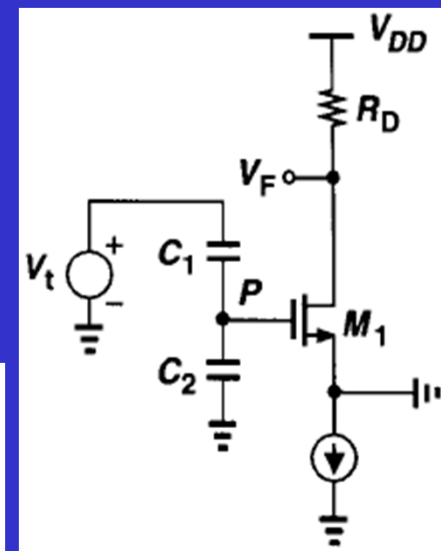
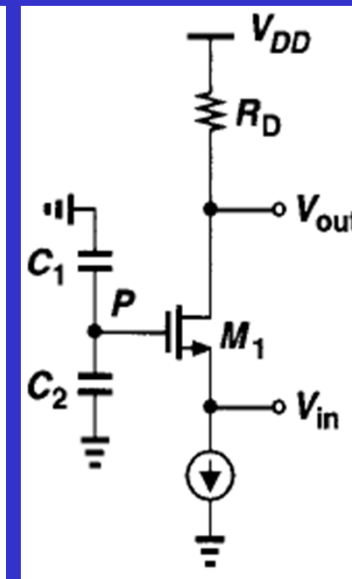
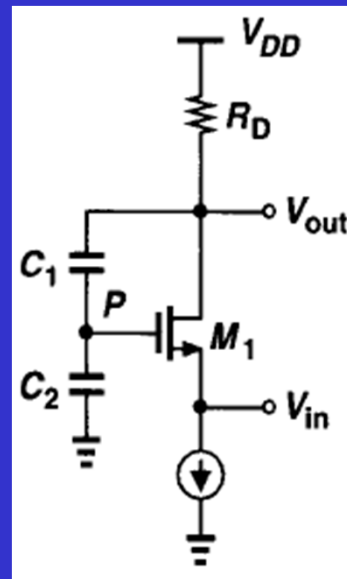
$$(g_{m1} + g_{mb1})^{-1}$$

环路增益是多少？

$$V_F / V_t = -g_{m1} R_D C_1 / (C_1 + C_2)$$

闭环输入阻抗是多少？

$$R_{in,closed} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}} \left( 1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1} R_D \right)$$



# 总结

- 电压—电压反馈使增益减小了 $\beta A_0$ 倍，使输入阻抗增大 $\beta A_0$ 倍，使输出阻抗减小 $\beta A_0$ 倍

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + \beta A_0).$$

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{out}}{1 + \beta A_0}.$$

- 可作为高阻抗源与低阻抗负载间的缓冲级使用

# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

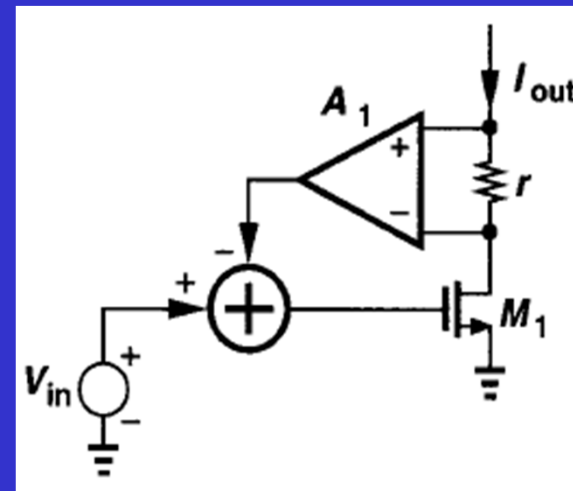
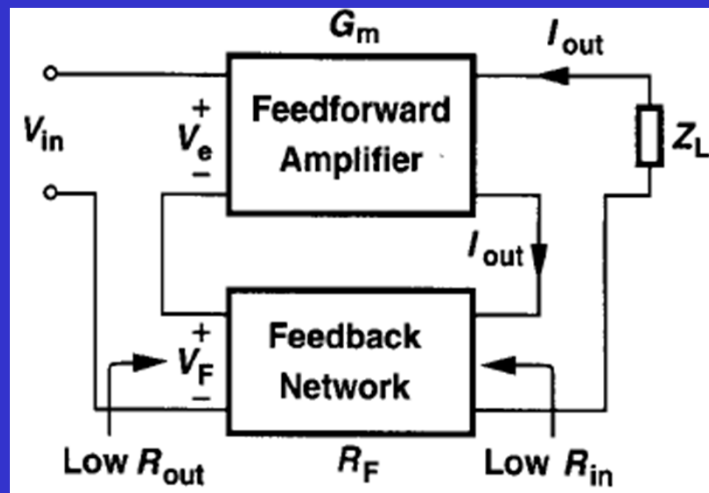
- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 电流—电压反馈

## □特点

- ❖ 对输出电流采样，反馈信号是电压
  - $\beta$ 为电阻量纲， $R_F$
- ❖ 反馈网络与输出串联，与输入串联
  - 串联一个小电阻，电阻上的压降做反馈信号
  - 理想的反馈网络应该是输入和输出阻抗均为零，不构成前馈放大器的负载



# 闭环增益

$$V_F = R_F I_{out}$$

$$V_e = V_{in} - R_F I_{out}$$

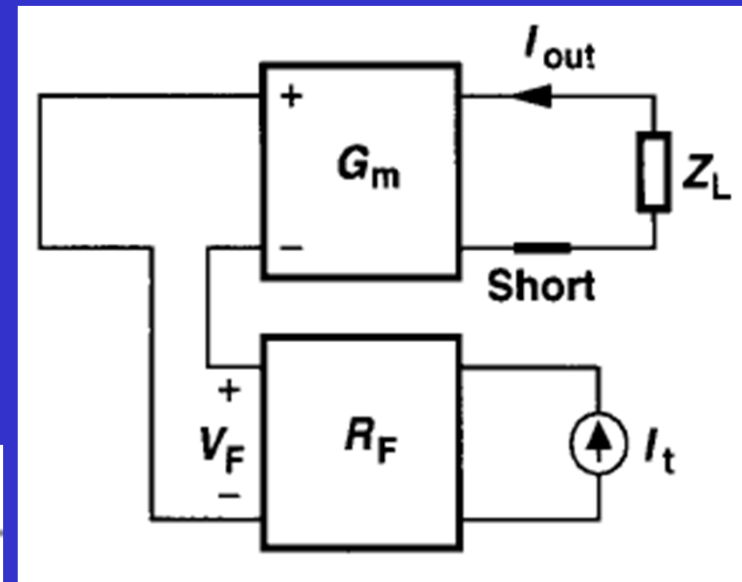
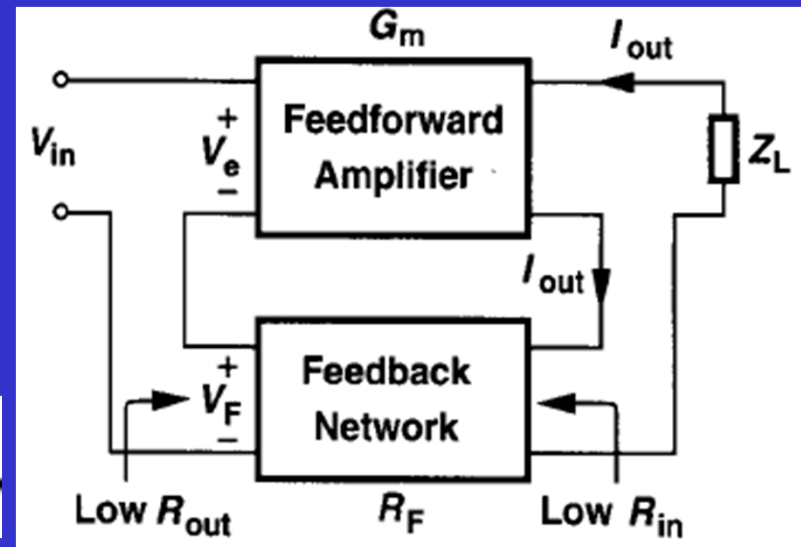
$$I_{out} = G_m (V_{in} - R_F I_{out})$$

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{G_m}{1 + G_m R_F}$$

$G_m R_F$  是环路增益

$$V_F = R_F I_t$$

$$I_{out} = -G_m R_F I_t$$



# 输出阻抗

## □直观理解——输出阻抗应该增大

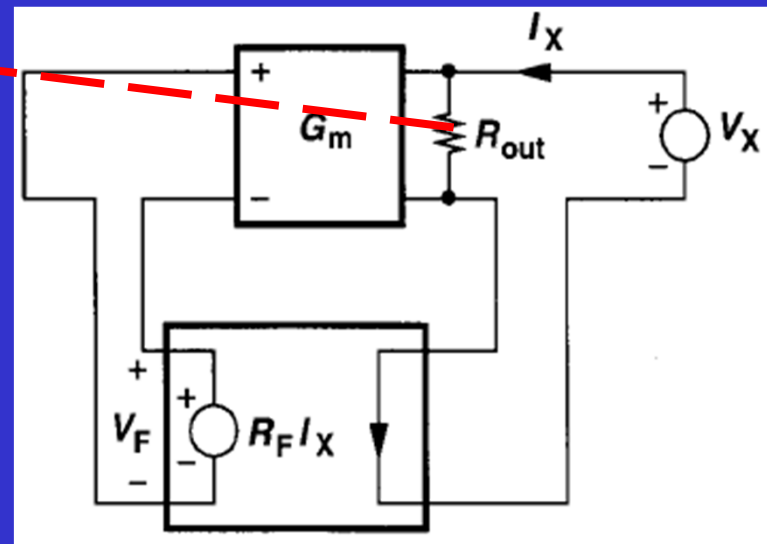
- ❖应用负反馈后，负反馈使输出电流试图精确成比例（ $1/\beta$ ）于输入电压
- ❖即使负载发生变化，只要环路增益远大于1，输出电流幅值不变，因此，反馈系统类似一个电流源。电压源的特点是输出阻抗高

$R_{out}$ 是前馈放大器输出阻抗

P216末尾译文错了：

“因而系统传送的电流波形和负载变化相同”，

改为：“当负载发生变化时，系统输出的电流波形并不随之改变”



# 输出阻抗

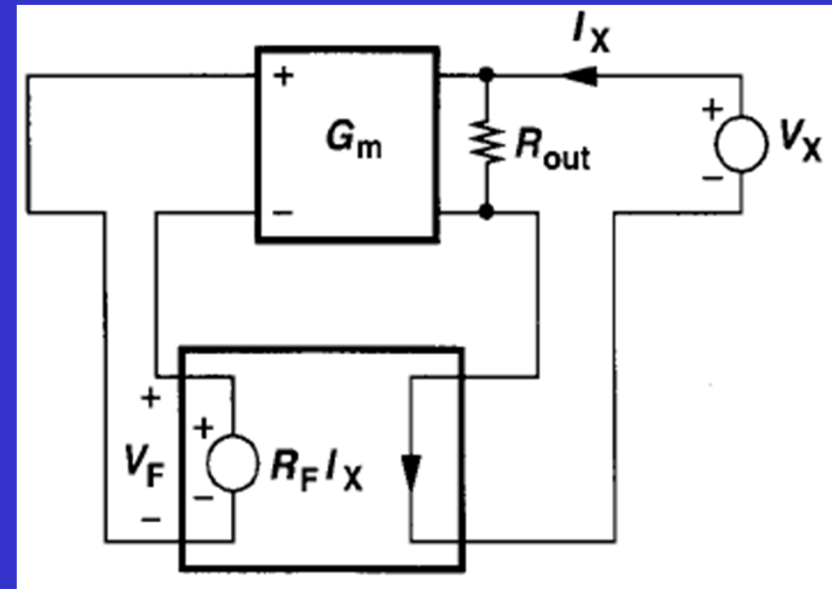
□ 直观理解——输出阻抗应该增大

□ 公式推导

$$V_F = R_F I_X$$

$$-R_F I_X G_m = I_X - V_X / R_{out}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{out}(1 + G_m R_F)$$



# 例题 计算输出阻抗

## □ 计算放大器的输出阻抗

是否是电流-电压反馈？

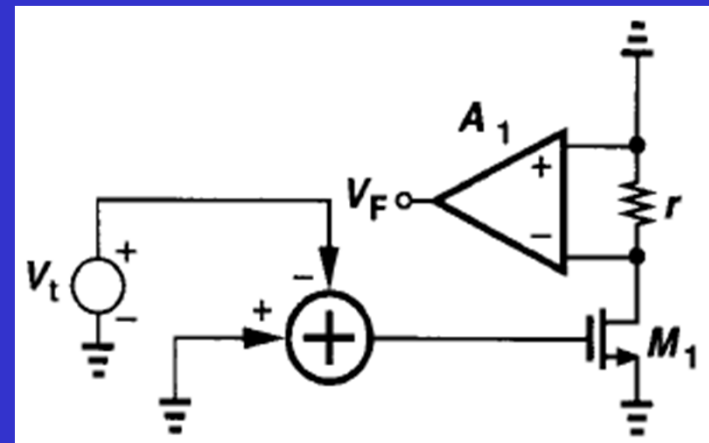
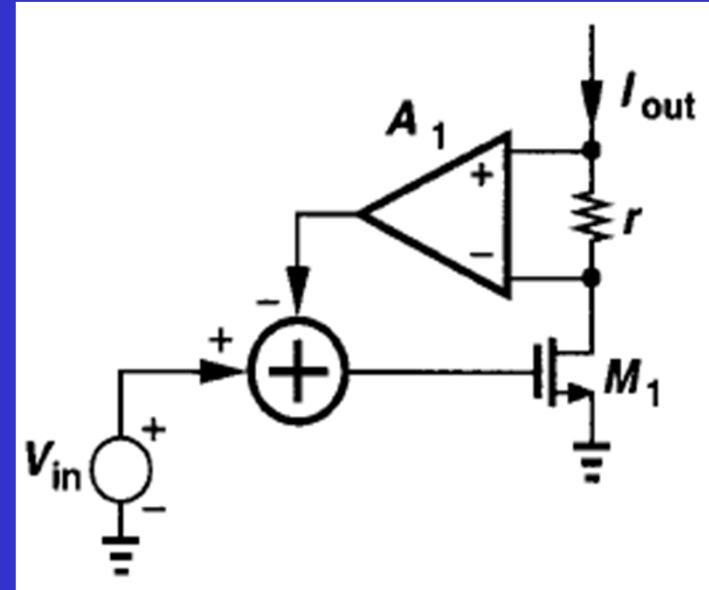
开环输出阻抗是多少？  $r_{O1}$

环路增益是多少？

$$\frac{V_F}{V_t} = -g_m r A_1.$$

闭环输出阻抗是多少？

$$R_{out, closed} = (1 + g_m r A_1) r_{O1}.$$



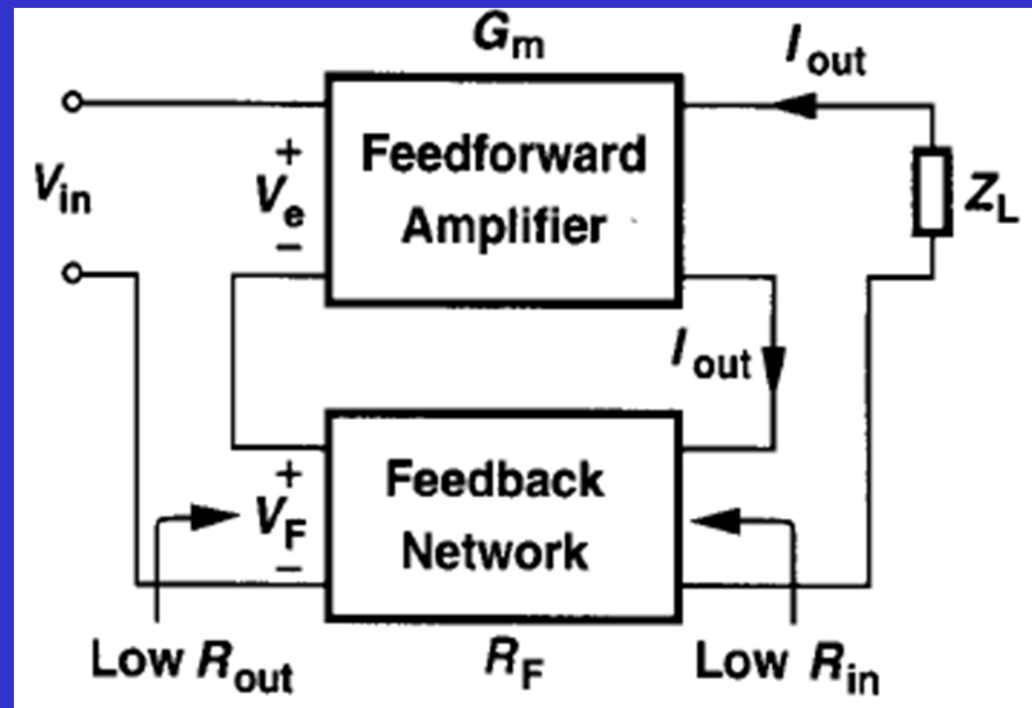


# 输入阻抗

□ 计算并比较开环输入阻抗和闭环输入阻抗

□ 直观上看

- ❖ 开环时， $V_{in}$ 全加持在 $R_{in}$ 上
- ❖ 闭环时， $V_{in}$ 只一部分加持在 $R_{in}$ 上，因此，输入电流小
- ❖ 闭环输入阻抗大



# 输入阻抗的推导

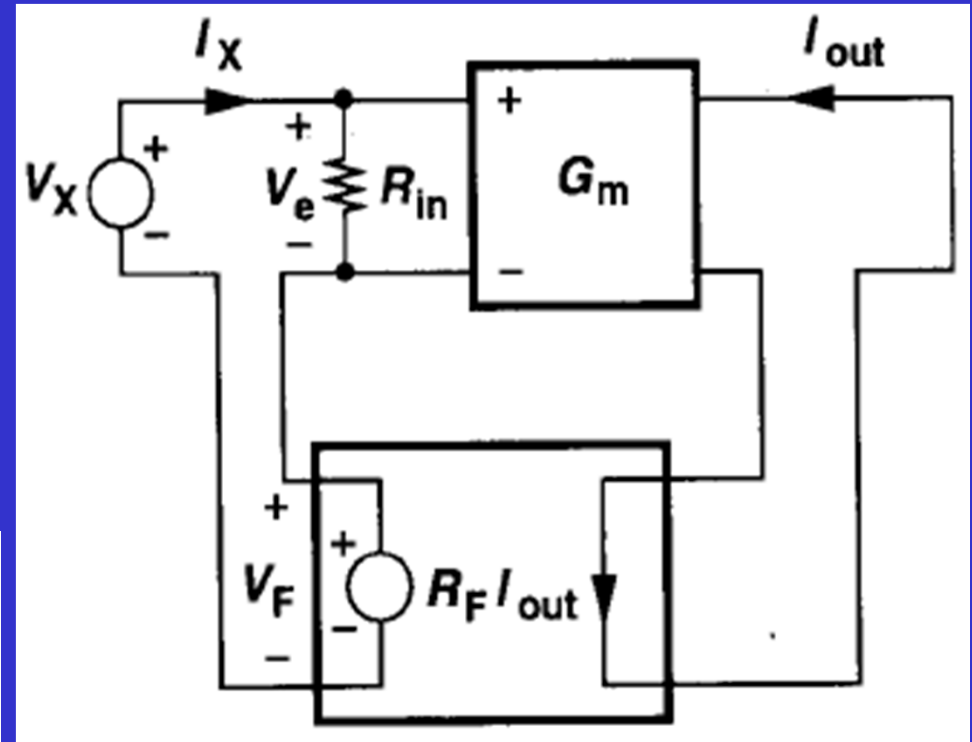
□ 从严格推导看

$$I_X R_{in} G_m = I_{out}$$

$$V_e = V_X - G_m R_F I_X R_{in}$$

$$\frac{V_e}{I_X} = R_{in} = \frac{V_X - G_m R_F I_X R_{in}}{I_X}$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + G_m R_F)$$



输入阻抗的确是增大了  $G_m R_F$  倍

# 总结

- 电流-电压反馈使增益减小了  $G_m R_F$  倍，使输入和输出阻抗增大  $G_m R_F$  倍

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{G_m}{1 + G_m R_F}.$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + G_m R_F).$$

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{out}(1 + G_m R_F).$$

- 高输出阻抗在高增益 OPA 设计中很有用

# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

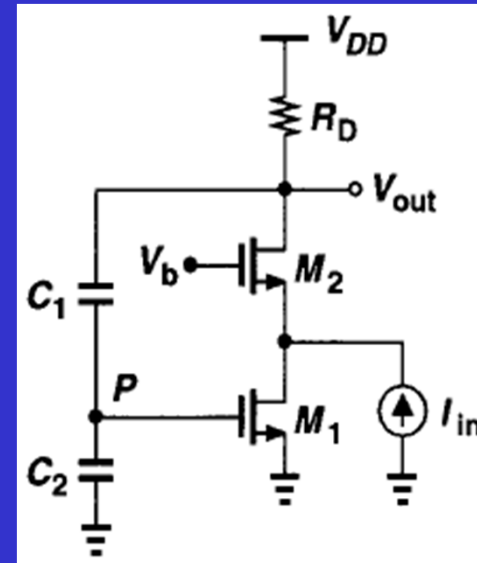
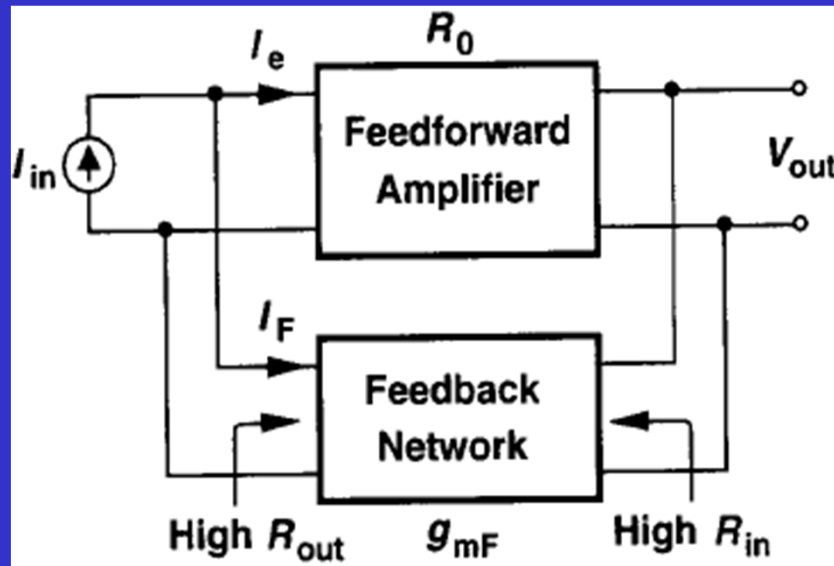
- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 电压—电流反馈

## □特点

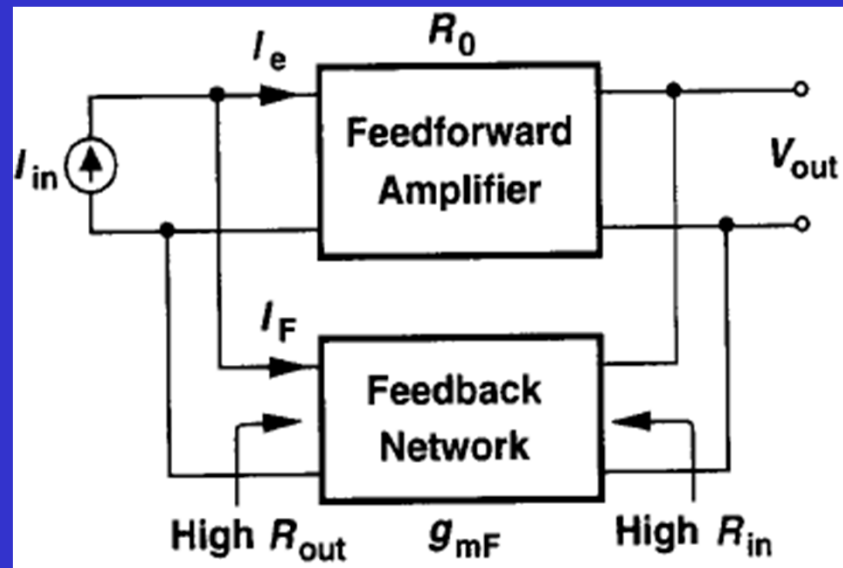
- ❖ 对输出电压采样，反馈信号是电流
  - 前馈通路为跨阻放大器， $\beta$ 为电导量纲 $g_{mF}$
- ❖ 反馈网络与输出并联，与输入并联
  - 理想的反馈网络应该是输入和输出阻抗均无限大，不构成前馈放大器的负载



# 闭环增益

$$I_F = g_{mF} V_{out}$$

$$I_e = I_{in} - I_F$$



$$V_{out} = R_0 I_e = R_0 (I_{in} - g_{mF} V_{out}).$$

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{R_0}{1 + g_{mF} R_0}.$$

$g_{mF} R_0$  是环路增益

# 例题 计算闭环增益

□ 计算右图电路的低频闭环增益

是否是电压-电流反馈？

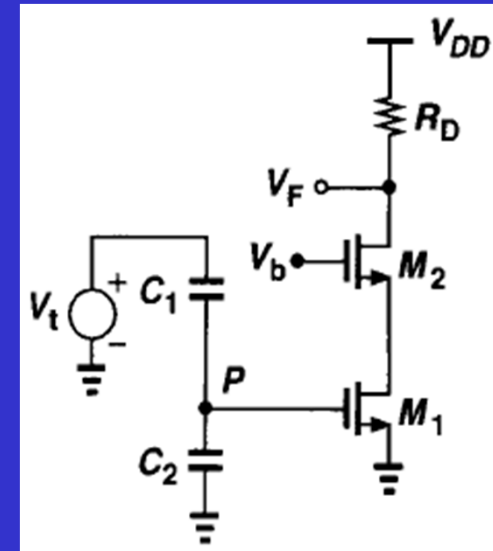
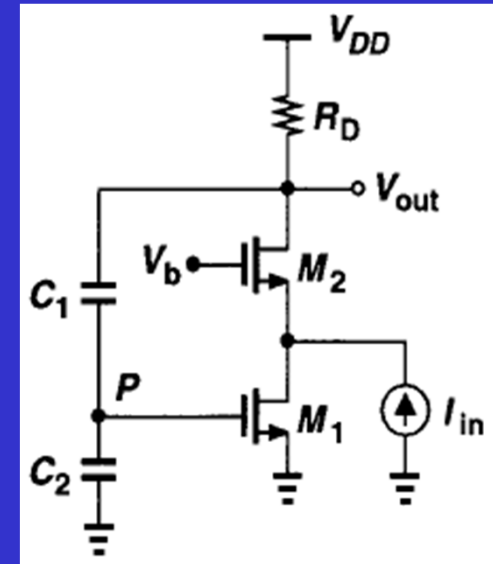
开环增益是多少？  $R_D$

环路增益是多少？

$$-V_t \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1} R_D = V_F$$

闭环增益（跨阻）是多少？

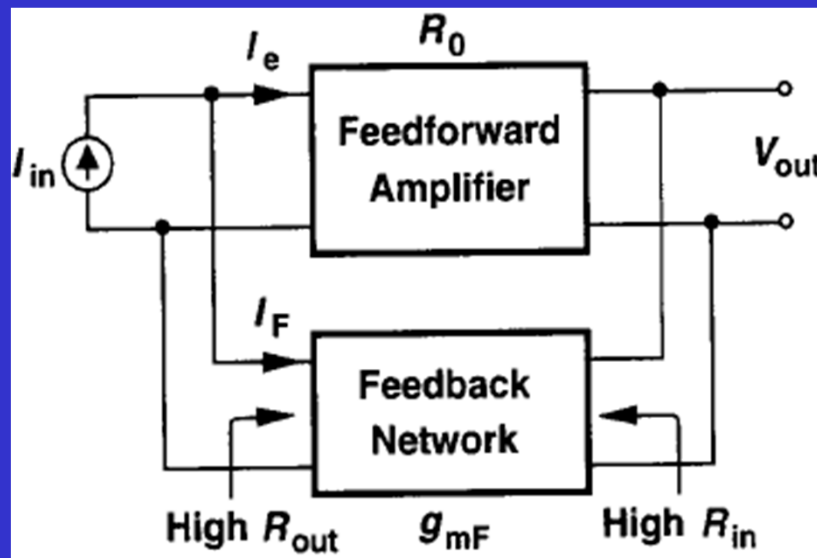
$$R_{tot} = \frac{R_D}{1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1} R_D}$$



# 输出阻抗

## 直观理解——输出阻抗应该降低

- ❖ 应用负反馈后，负反馈使输出电压试图精确按比例复制输入电流
- ❖ 即使负载电阻 $R_L$ 改变，只要环路增益远大于1，输出电压幅值不变，因此，反馈系统类似一个电压源。电压源的特点是输出阻抗低

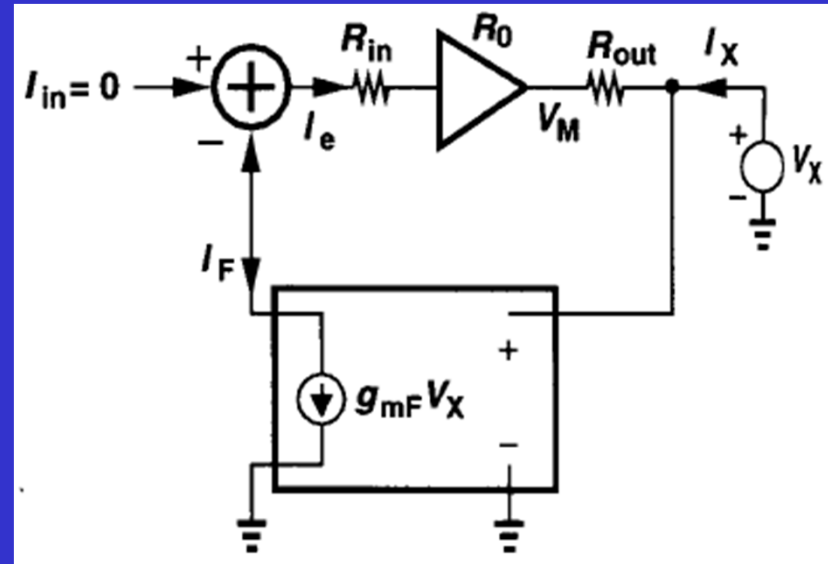




# 输出阻抗的推导

□ 输入置零，在输出端加测试电压  $V_X$

❖  $R_{out}$  为前馈放大器的输出阻抗



$$I_F = V_X g_{mF}$$

$$I_e = -I_F, \quad V_M = -R_0 g_{mF} V_X.$$

$$I_X = (V_X - V_M) / R_{out} = (V_X + g_{mF} R_0 V_X) / R_{out}$$

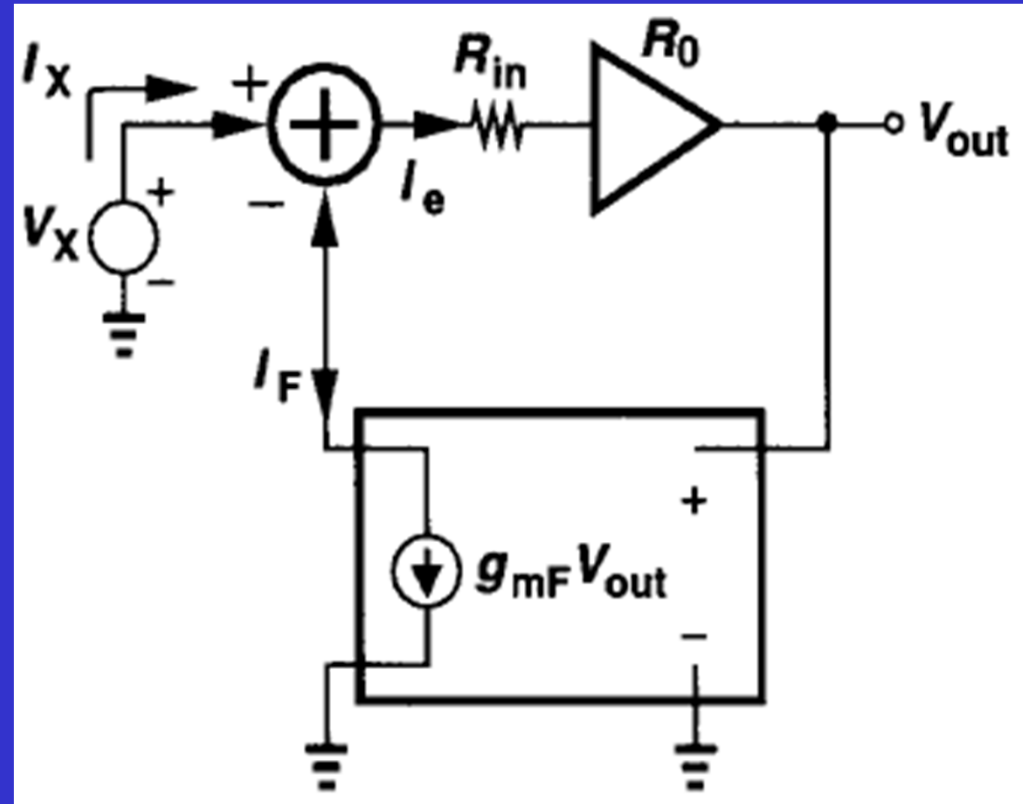
$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{out}}{1 + g_{mF} R_0}.$$

# 输入阻抗

□ 计算并比较开环输入阻抗和闭环输入阻抗

□ 直观上看

- ❖ 开环时， $I_{in}$ 全加持在 $R_{in}$ 上
- ❖ 闭环时， $I_{in}$ 只一部分加持在 $R_{in}$ 上，因此， $R_{in}$ 上的电压小
- ❖ 闭环输入阻抗低



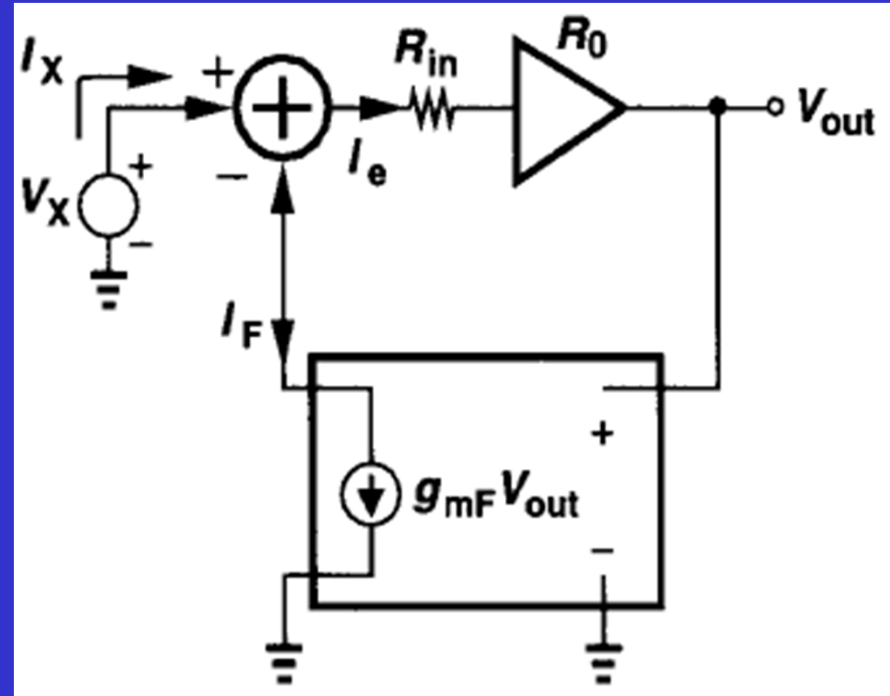
# 输入阻抗的推导

□ 从严格推导看

$$I_F = I_X - V_X / R_{in}$$

$$(V_X / R_{in}) R_0 g_{mF} = I_F$$

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{in}}{1 + g_{mF} R_0}$$



输入阻抗的确是减小了  $g_{mF} R_0$  倍

# 例题 计算输入和输出阻抗

□对右图所示电路，计算其输入和输出阻抗。假定 $R_F \gg R_D$  是否是电压-电流反馈？

开环输入阻抗是多少？  $R_F$

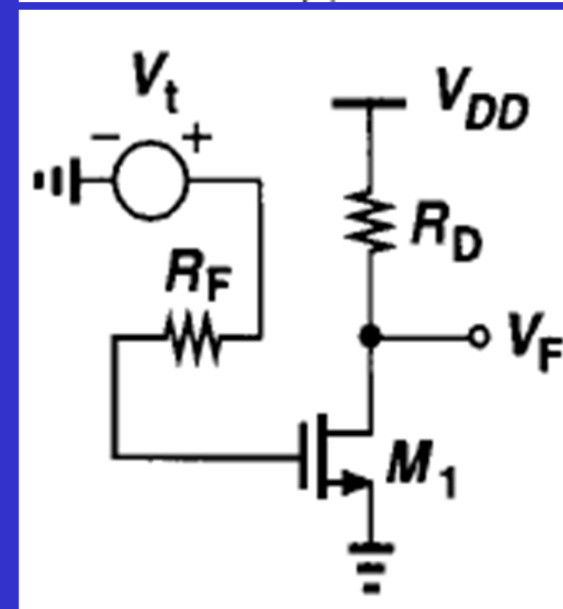
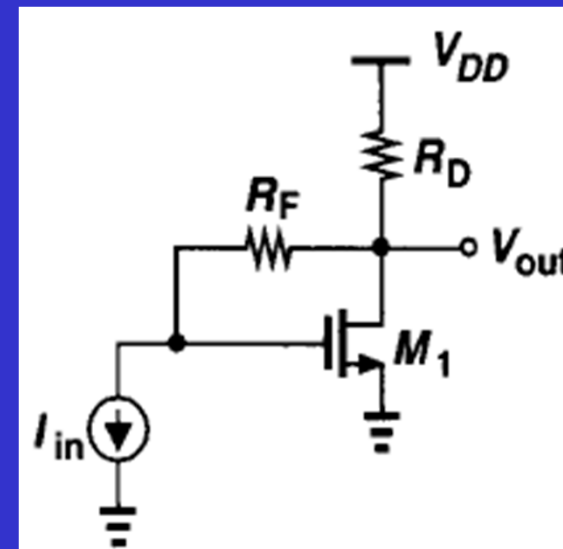
这是考虑了反馈网络的负载影响后的结果

环路增益是多少？

$$g_m R_D$$

闭环输入阻抗是多少？

$$R_{in,closed} = \frac{R_F}{1 + g_m R_D}$$



# 例题 计算输入和输出阻抗

□对右图所示电路，计算其输入和输出阻抗。假定 $R_F \gg R_D$ 是否是电压-电流反馈？

开环输出阻抗是多少？  $R_D$

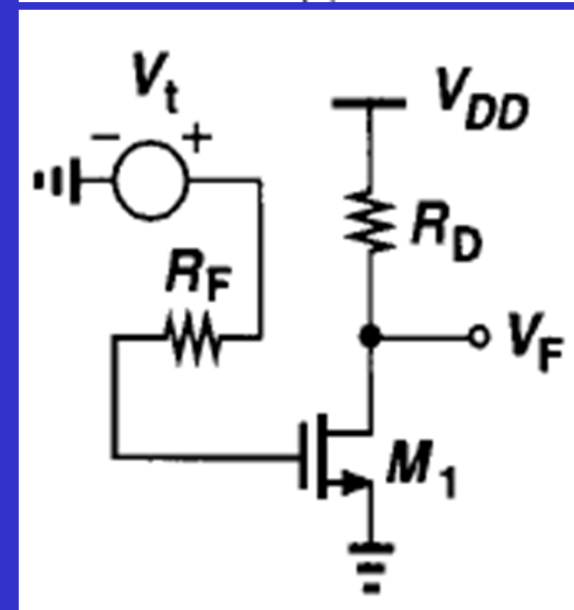
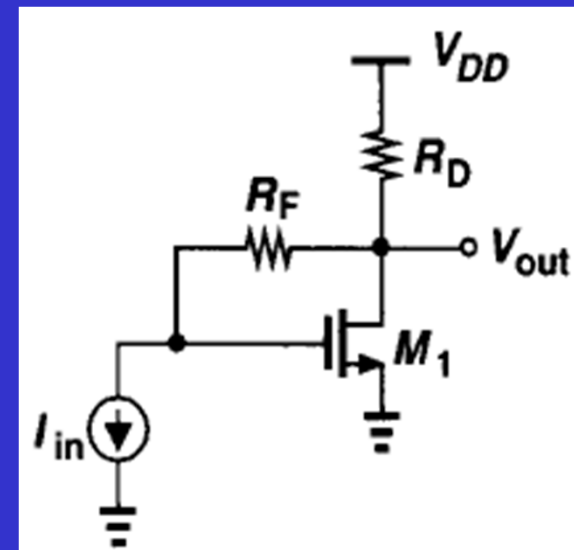
当 $R_F \gg R_D$ 时

环路增益是多少？

$$g_m R_D$$

闭环输入阻抗是多少？

$$R_{out, closed} = \frac{R_D}{1 + g_m R_D}$$



# 低输入阻抗特性的应用

## □ 光纤接收器

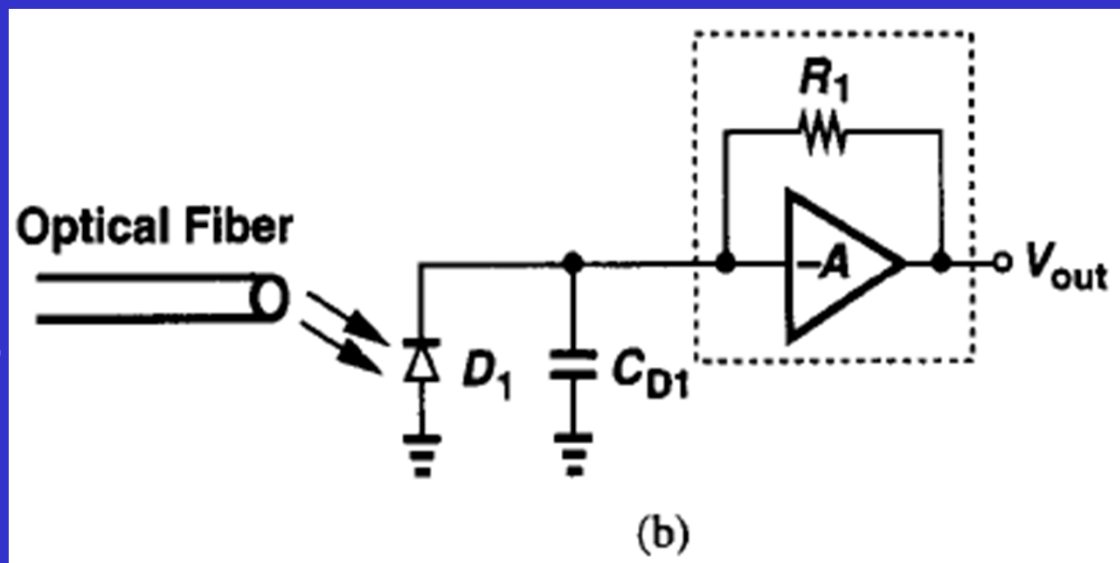
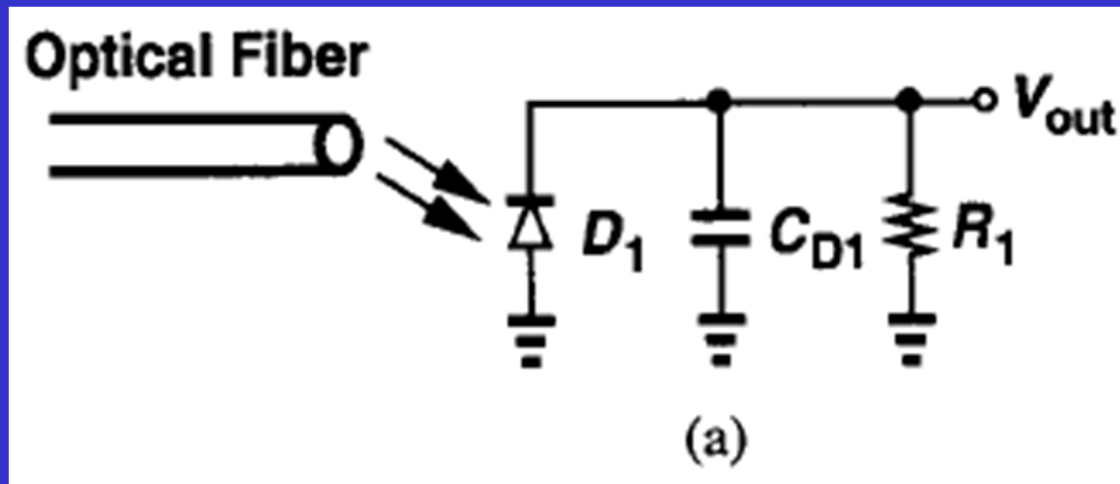
- ❖ 要求高带宽工作

## □ A结构

- ❖ 光转换为电流，输出为  $V_{out} = R_1 I_{D1}$
- ❖ 光电二极管结电容  $C_{D1}$ ，导致带宽小（由  $R_1 C_{D1}$  决定）

## □ B结构

- ❖ 带宽由  $R_1 C_{D1} / (1+A)$  决定，大
- ❖ 输出为  $V_{out} = R_{D1} I_{D1}$



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

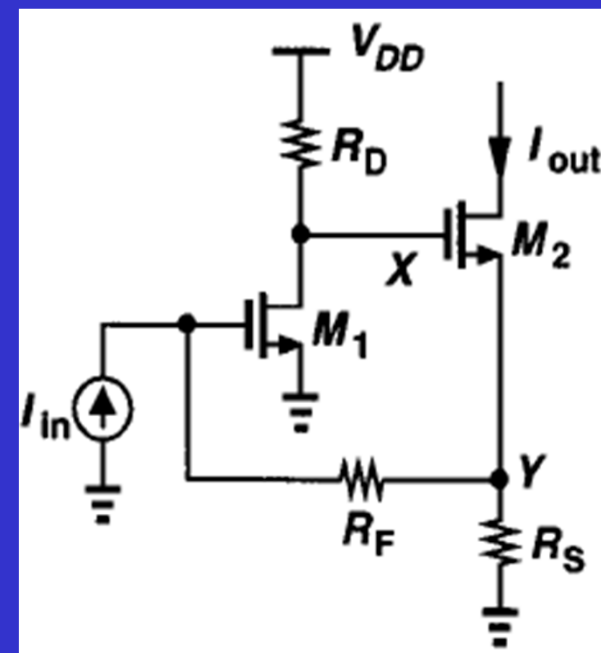
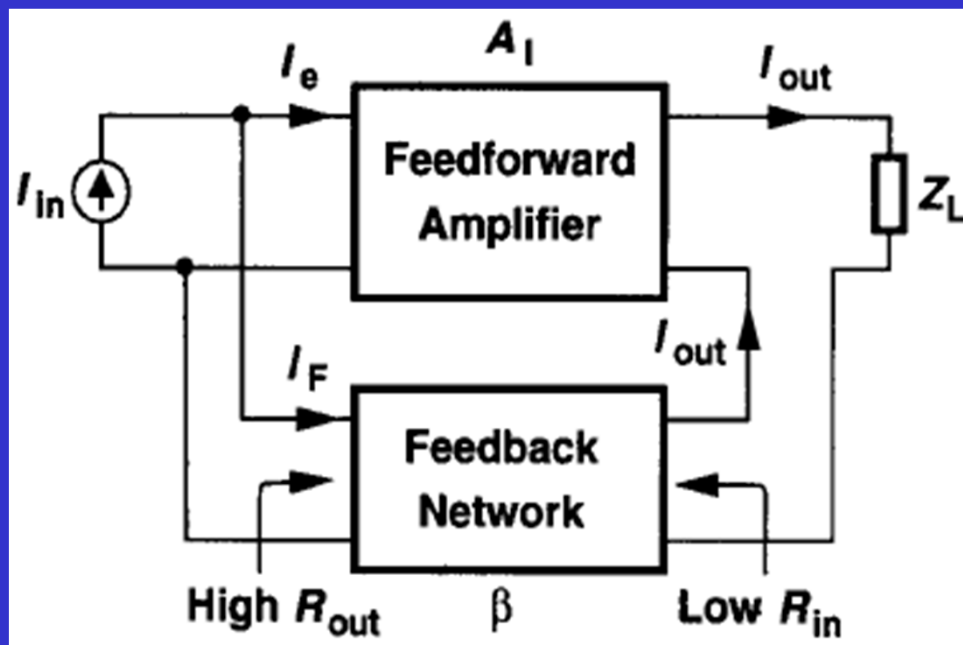
- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 电流—电流反馈

## □特点

- ❖ 对输出电流采样，反馈信号也是电流
- ❖ 反馈网络与输出串联，与输入并联
  - 理想的反馈网络应该是输入阻抗为零，输出阻抗为无穷大，不构成前馈放大器的负载





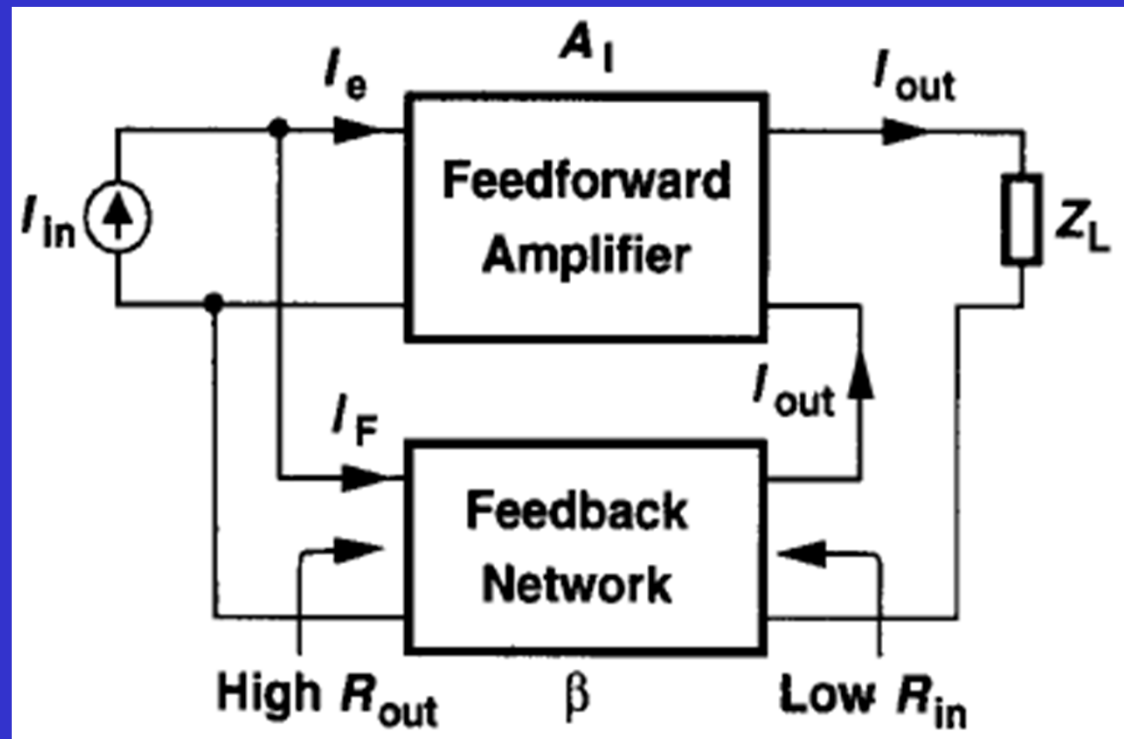
# 闭环增益、输入阻抗、输出阻抗

## □ 课下作业

- ❖ 利用前面的推导方法，推导闭环电流增益、输入阻抗、输出阻抗

## □ 结论

- ❖ 闭环电流增益
  - $A_I / (1 + \beta A_I)$
- ❖ 输入阻抗
  - $R_{in} / (1 + \beta A_I)$
- ❖ 输出阻抗
  - $R_{out} (1 + \beta A_I)$



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈
- ❖ 小结

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 小结

## □ 闭环增益

❖  $A_0 / (1 + \beta A_0)$

## □ 输入阻抗

❖ 反馈回来的是电压信号时:

$R_{in} * (1 + \beta A_I)$

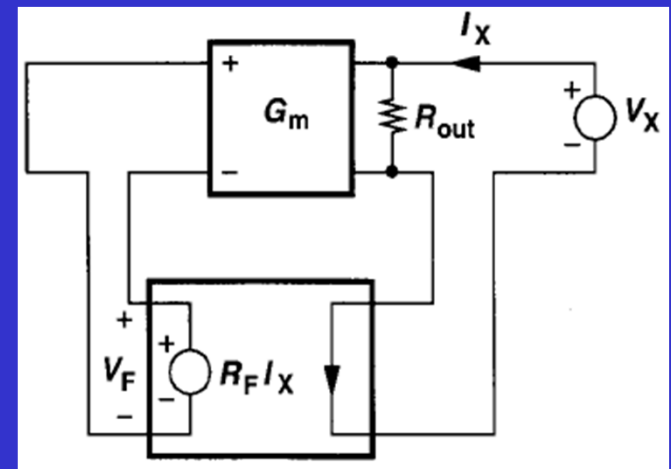
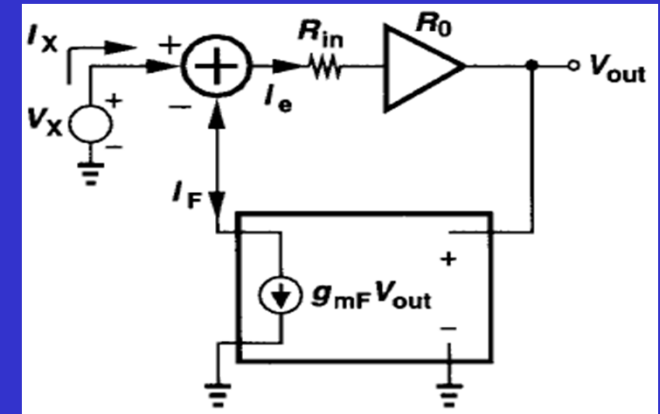
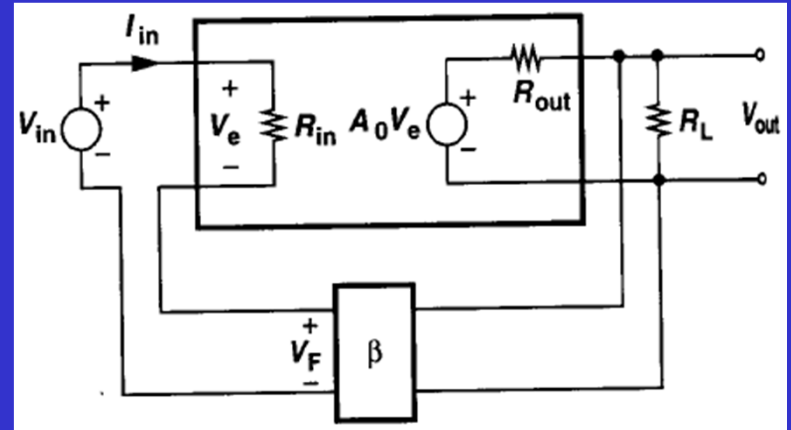
❖ 反馈回来的是电流信号时:

$R_{in} / (1 + \beta A_I)$

## □ 输出阻抗

❖ 检测的是电压信号时:  $R_{out} / (1 + \beta A_I)$

❖ 检测的是电流信号时:  $R_{out} * (1 + \beta A_I)$



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 概述
- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 概述

## □前面分析各反馈结构的特性时

### ❖基于一个重要的前提假设

- 反馈网络是理想的
- 没有给前馈放大器的输入和输出端引入任何负载

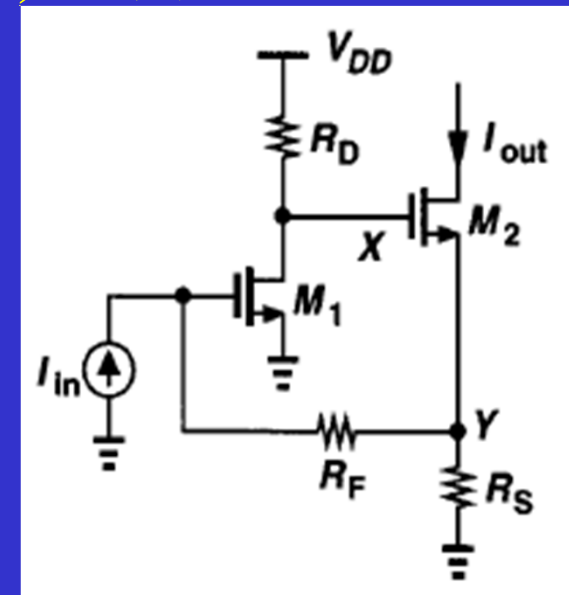
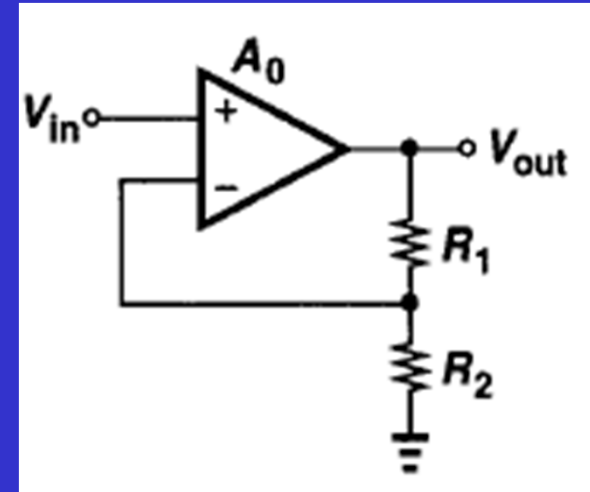
### ❖电压-电压反馈中

- 由 $R_1$ 和 $R_2$ 构成的反馈网路不应成为 $A_0$ 的输出端的负载，只有 $(R_1+R_2) \gg R_{out}$  ( $A_0$ 的输出阻抗)时才假设成立

### ❖电流-电流反馈中

- 反馈网络由 $R_S$ 和 $R_F$ 构成
- 可能在 $A_0$ 的输入和输出端均引入负载

## □前提假设的目的是简化分析



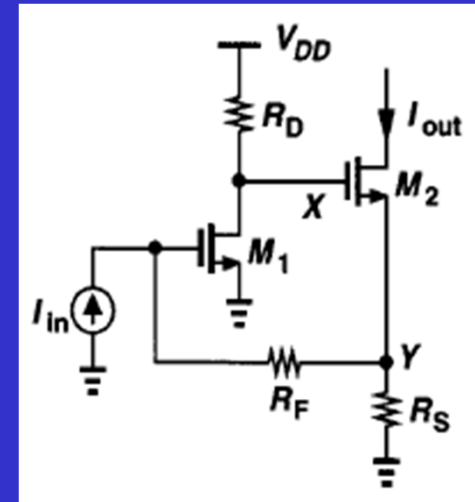
# 概述

## □事实上

- ❖ 反馈网络不是理想的，会给前馈放大器带来负载效应
  - 考虑反馈网络所引入的负载效应，再分析各反馈结构的特性，所得结果才更准确
- ❖ 分析过程会比较复杂

## □反馈网络

- ❖ 是一个二端口电路
- ❖ 对不同反馈结构，首先要选择合适的反馈网络模型



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

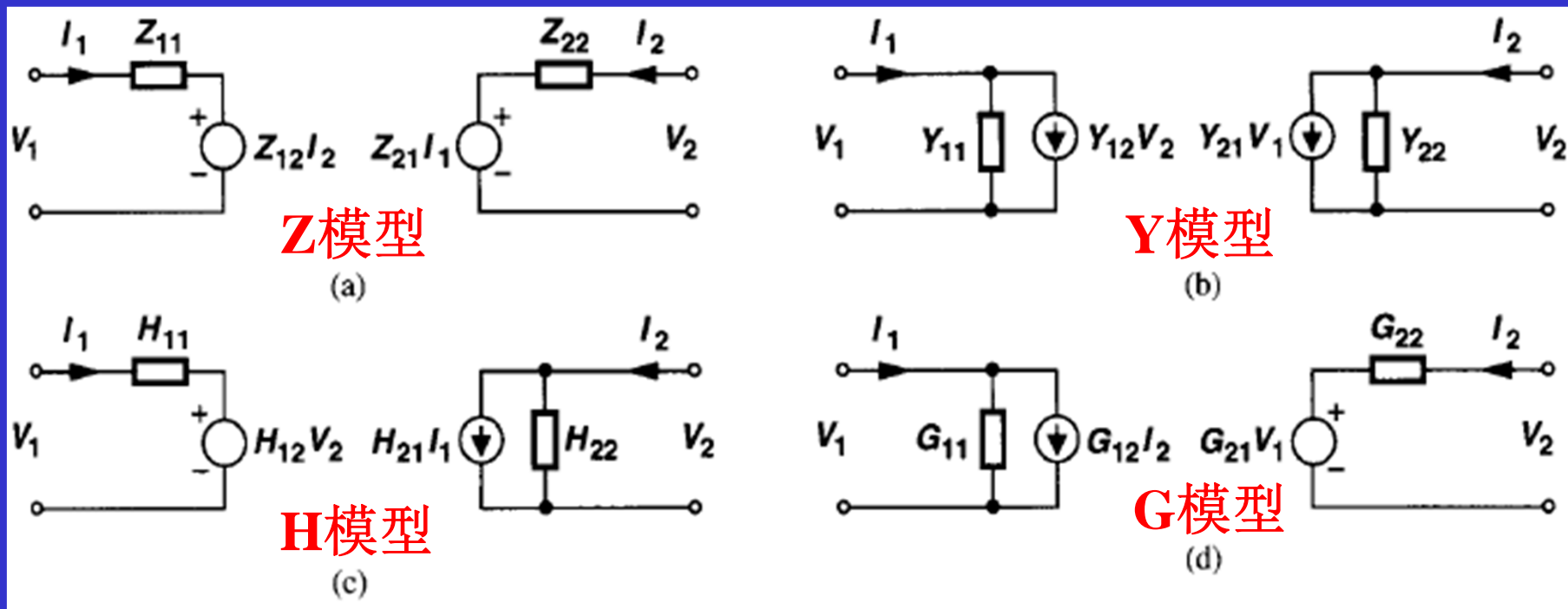
## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

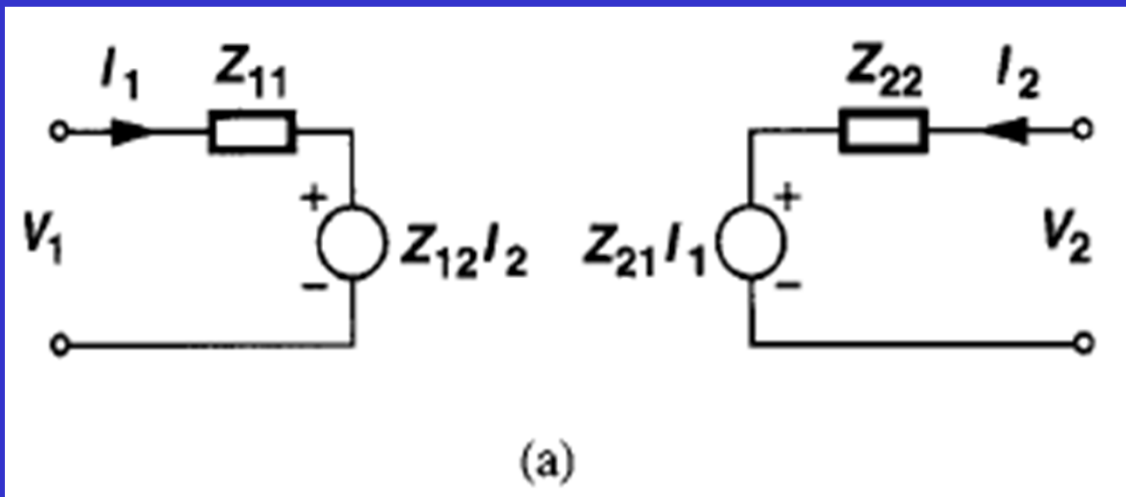
# 二端口网络模型

□ 二端口线性时不变网络可用下面四个模型中的任何一个来表示





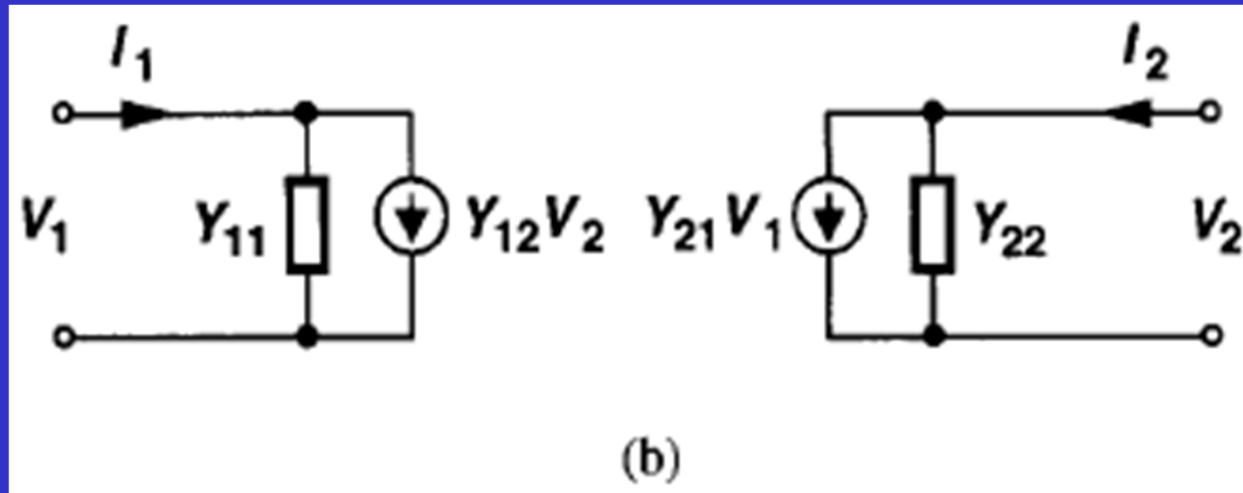
# Z模型



$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$
$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2.$$

□ 由输入和输出阻抗及与之串联的流控电压源构成

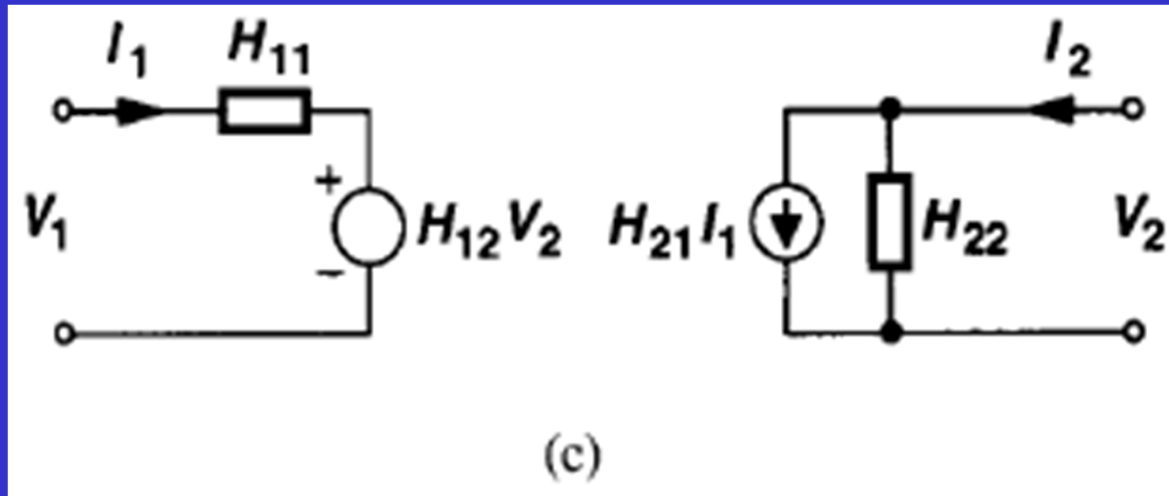
# Y模型



$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2$$
$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2,$$

□ 由输入和输出导纳及与之并联的压控电流源构成

# H模型

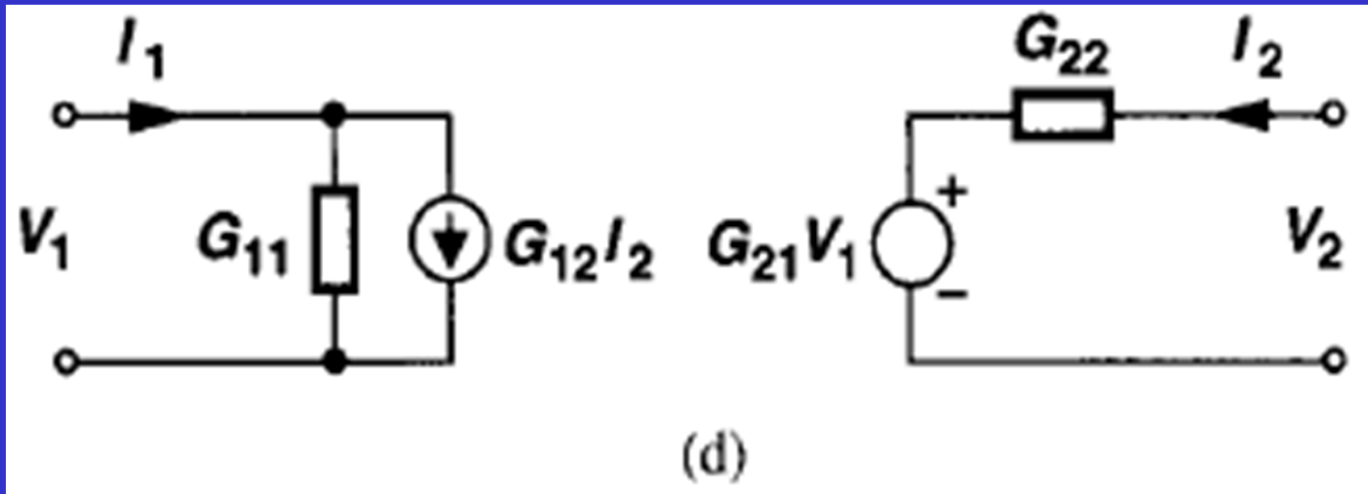


$$V_1 = H_{11}I_1 + H_{12}V_2$$

$$I_2 = H_{21}I_1 + H_{22}V_2,$$

□混合模型，由阻抗、导纳、电流源、电压源构成

# G模型



$$I_1 = G_{11} V_1 + G_{12} I_2$$
$$V_2 = G_{21} V_1 + G_{22} I_2.$$

□混合模型，由阻抗、导纳、电流源、电压源构成

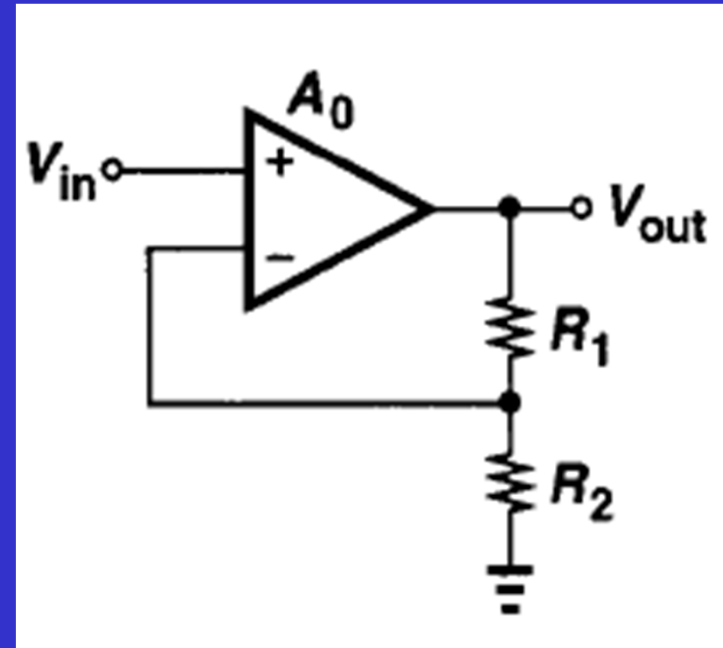
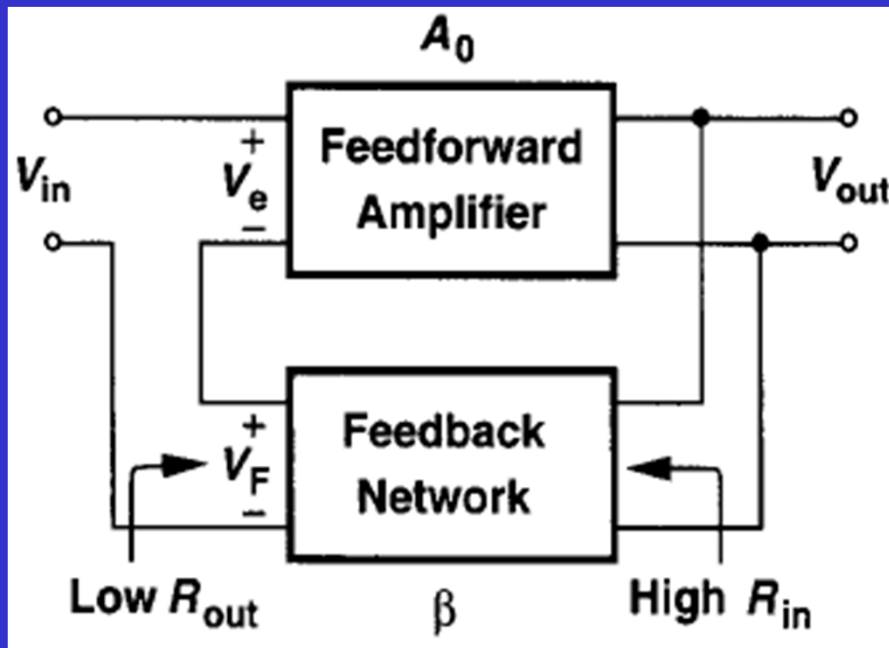
# 模型的选择

- 反馈网络可以用四个模型中的任何一个来表示
- 对电压—电压反馈结构中的反馈网络，用哪个模型来表示反馈网络呢？
  - ❖ 是否都可以？

# 电压—电压反馈

## □理想的反馈网络应具备什么特征？

- ❖对输出电压采样，反馈信号也是电压
- ❖反馈网络与输出并联，与输入串联
  - 理想的反馈网络应该是输入阻抗无限大，输出阻抗为零，才不构成前馈放大器的负载

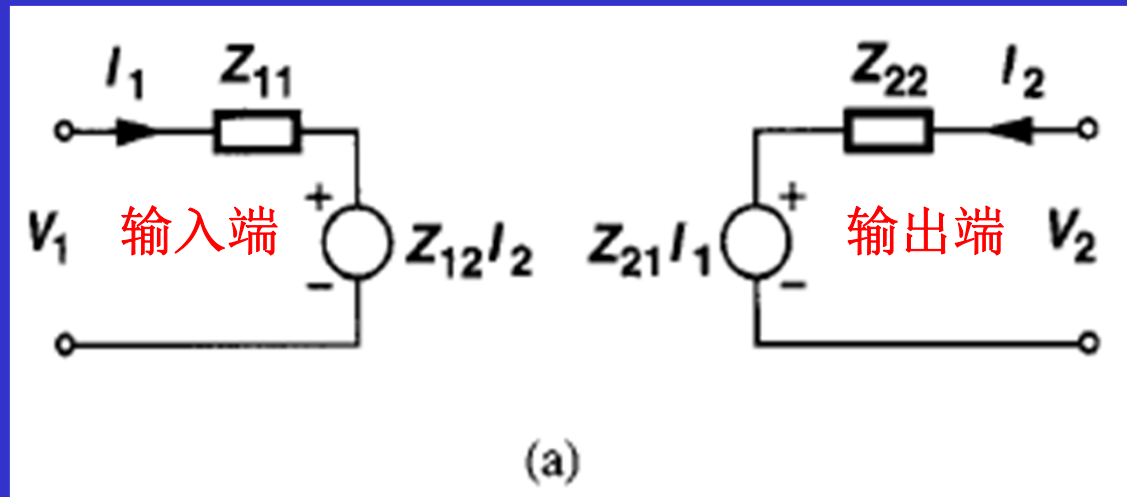


# Z模型行吗？

□模型得能表示理想和非理想两种情形

□理想时

❖输入阻抗无限大，输出阻抗为零



❖ $Z_{11}$ 无穷大，会使 $I_1$ 为零，会使 $Z_{21}I_1$ 为零，导致 $V_2$ 为零，无法反馈信号

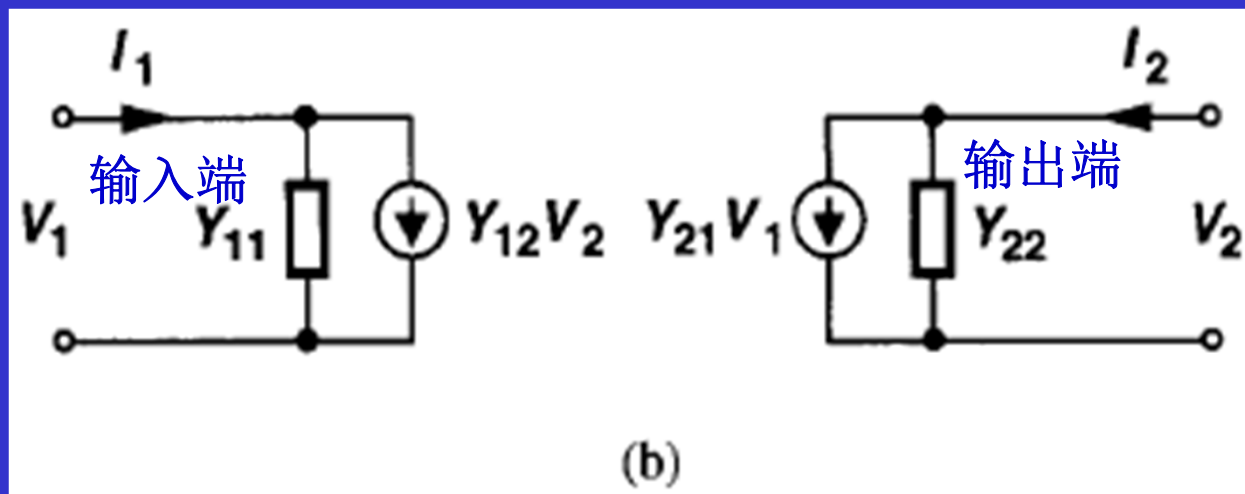
□不行！

# Y模型行吗？

□ 模型得能表示理想和非理想两种情形

□ 理想时

❖ 输入阻抗无限大，输出阻抗为零



❖  $Y_{22}$ 无穷大，会使 $V_2$ 为零，无法反馈信号

□ 不行！

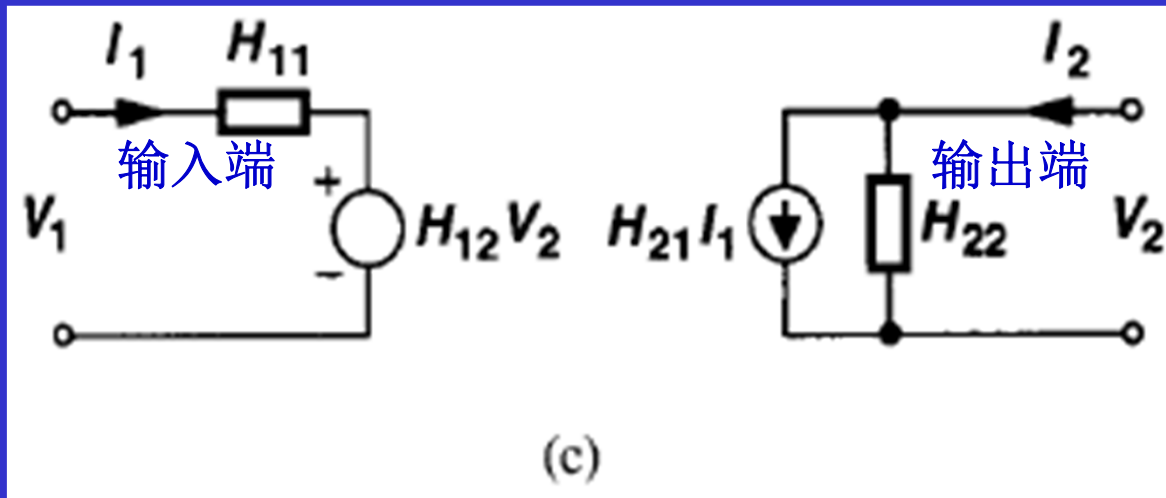


# H模型行吗？

□模型得能表示理想和非理想两种情形

□理想时

❖输入阻抗无限大，输出阻抗为零



❖ $H_{11}$ 无穷大，会使 $I_1$ 为零，会使 $H_{21}I_1$ 为零，导致 $V_2$ 为零，无法反馈信号

❖ $H_{22}$ 无穷大，会使 $V_2$ 为零，无法反馈信号

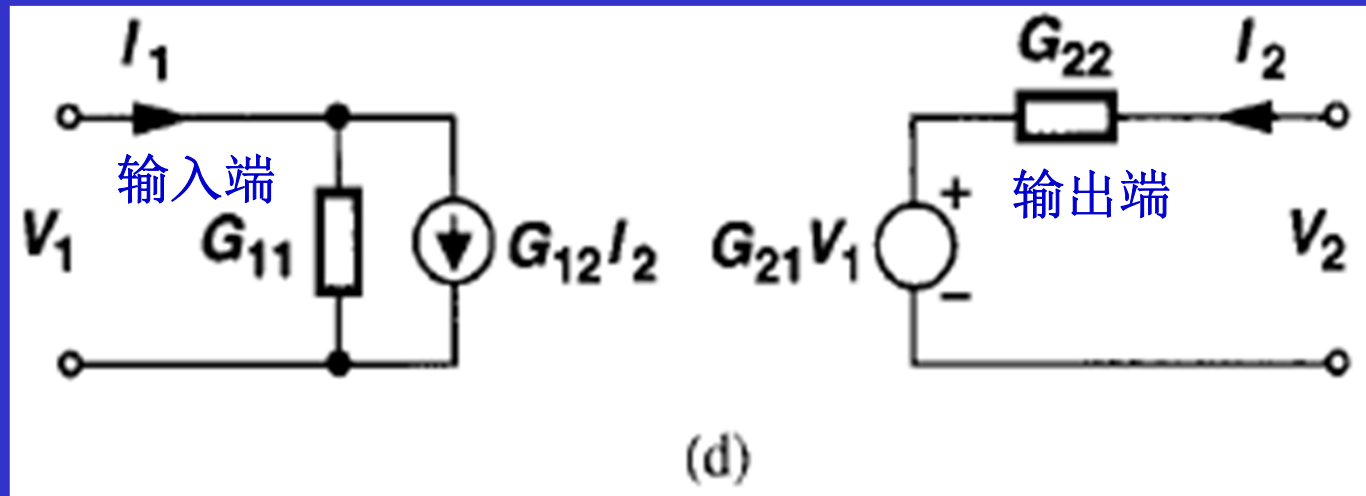
□不行！

# G模型行吗？

□ 模型得能表示理想和非理想两种情形

□ 理想时

❖ 输入阻抗无限大，输出阻抗为零



❖  $G_{11}$ 为零、 $G_{22}$ 为零时，能正常反馈信号

□ 非理想情形时

❖  $G_{11}$ 或 $G_{22}$ 不等于零，也能正常反馈信号

□ 行！

# 模型的选择

- 对电压—电压反馈结构中的反馈网络，必须用G模型来表示
- 对其他反馈结构中的反馈网络做同样分析，可知
  - ❖ 电压—电流反馈——Y模型
  - ❖ 电流—电压反馈——Z模型
  - ❖ 电流—电流反馈——H模型
- 课下作业
  - ❖ 确定最适合电流—电流反馈的模型
- 规律
  - ❖ 如果反馈网络检测的是电压，则这一端用电流源并联电导来表示；如果是电流，则电压源串联电阻
  - ❖ 如果反馈网络输出的是电压，则这一端用电压源串联电阻来表示；如果是电流，则电流源并联电导

# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 统一的分析方法
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

# 统一的分析方法

## □ S1

- ❖ 反馈网络用适合的模型替代

## □ S2

- ❖ 计算闭环增益表达式

## □ S3

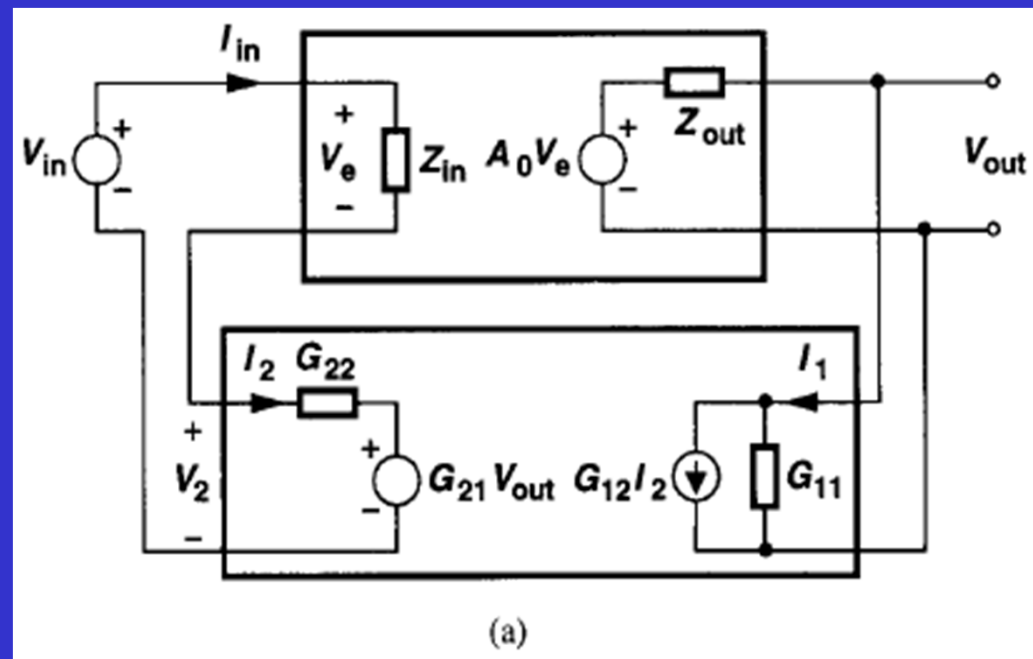
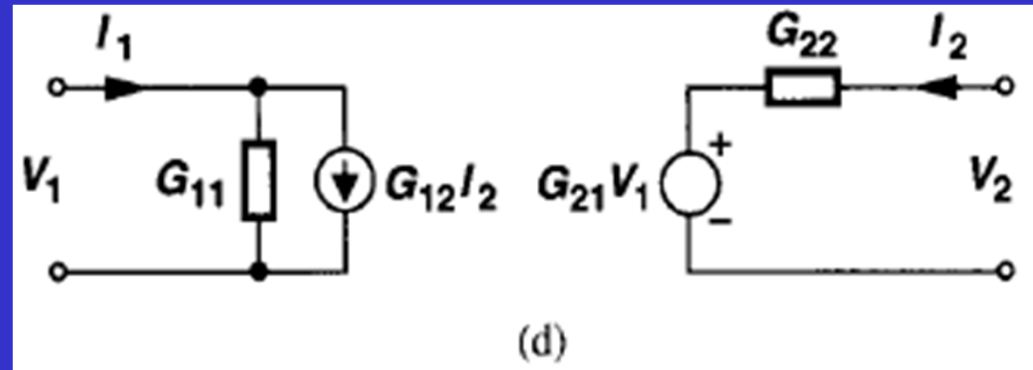
- ❖ 定义包含负载的开环增益的表达式

## □ S4

- ❖ 包含负载的开环增益的推导方法

## □ S5

- ❖ 反馈网络的正向增益的推导方法



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 统一的分析方法
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

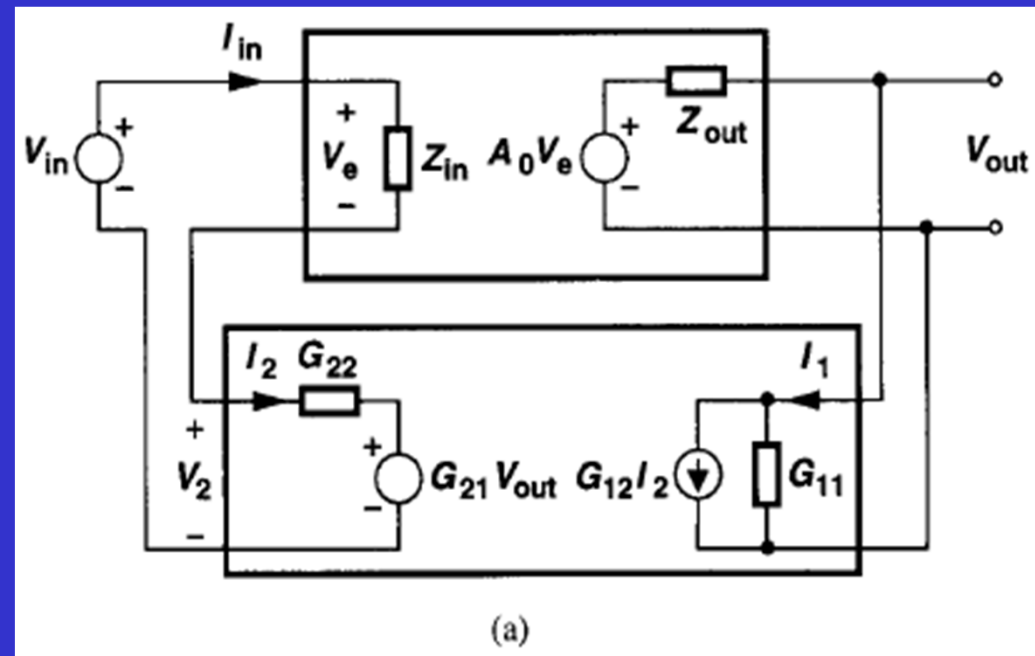
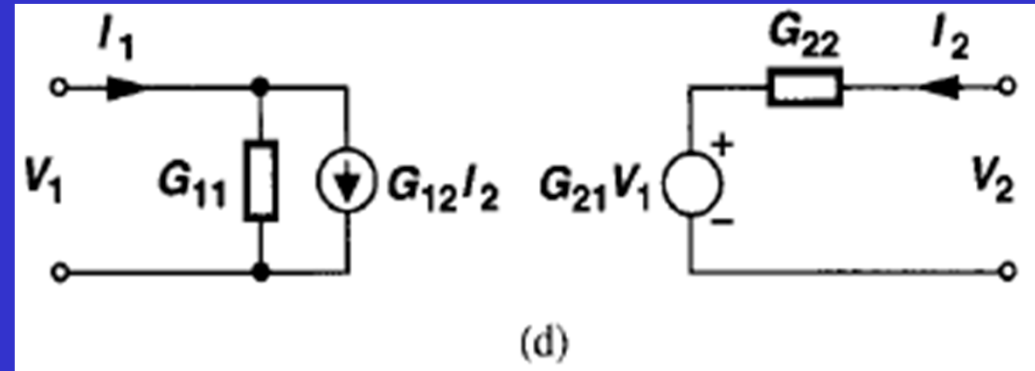
# 电压—电压反馈中的负载

## □S1

❖ 反馈网络用G模型替代

## □S2

❖ 计算闭环增益表达式



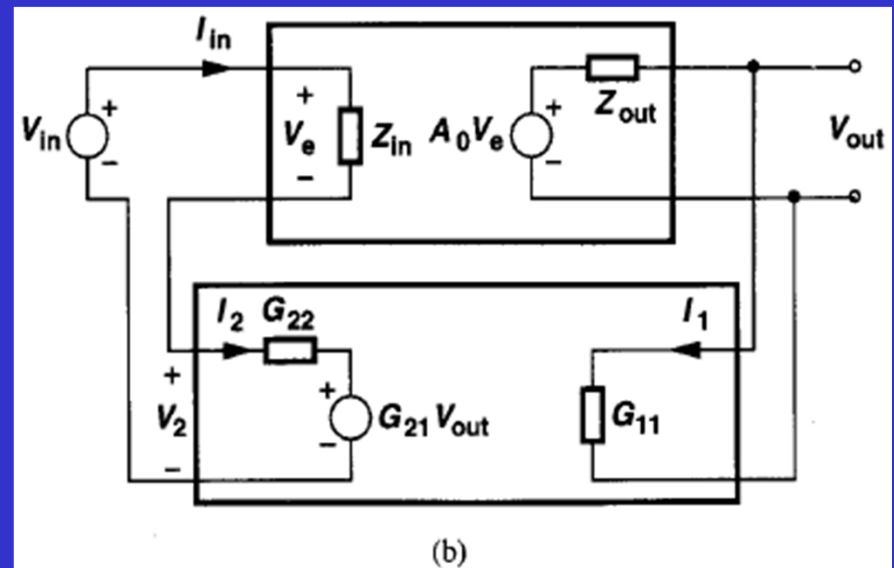
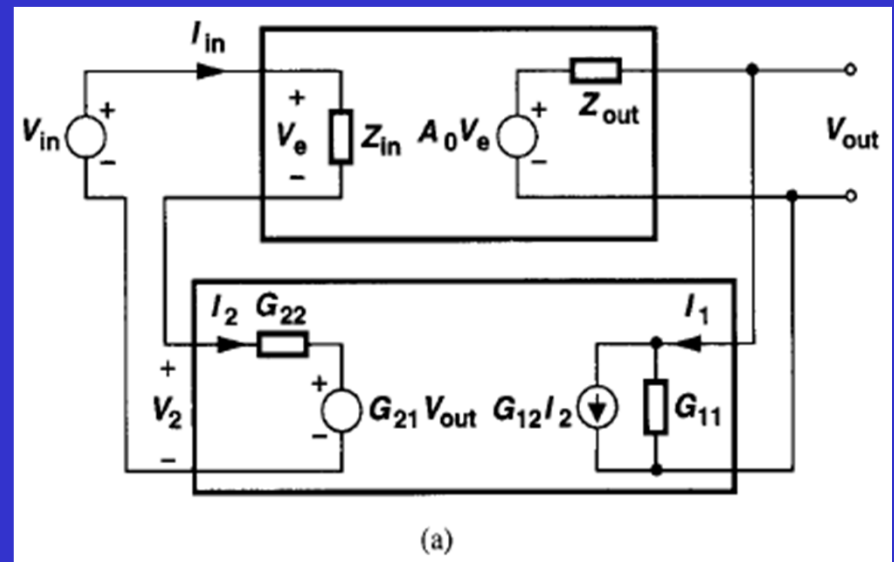
## S2—计算闭环增益表达式

### □忽略 $G_{12}$ 的影响

- ❖主放大器增益 $A_0$ 远大于反馈网络的反向增益

### □不忽略时

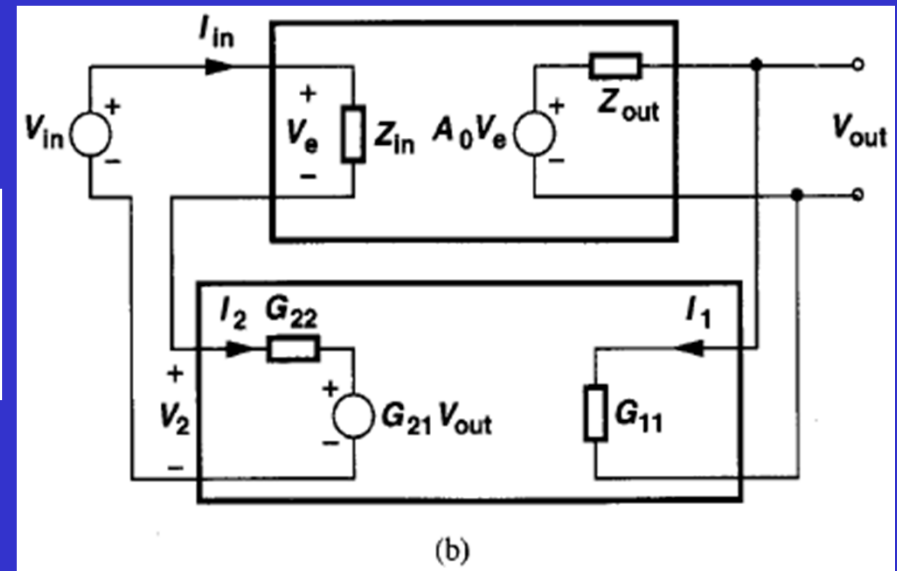
- ❖习题8.8，推导一下可忽略的条件
- ❖课下作业





## S2—计算闭环增益表达式

$$V_e = (V_{in} - G_{21} V_{out}) \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}}$$



$$(V_{in} - G_{21} V_{out}) \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} A_0 \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} = V_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0 \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}}}{1 + \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} G_{21} A_0}$$

理想反馈网络时：  
**G11=0, G22=0**

$$V_{out}/V_{in} = A_0/(1 + G_{21} A_0)$$

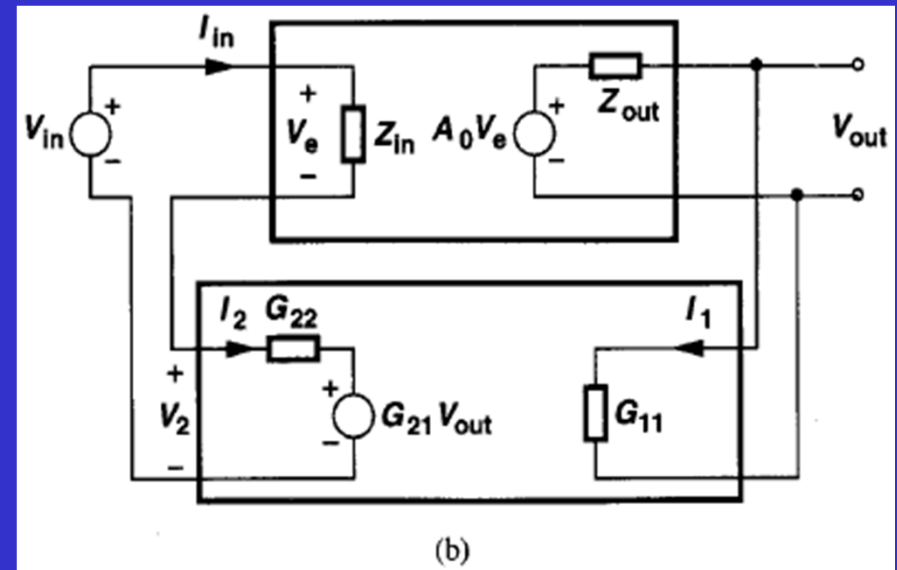
# S3—包含负载的开环增益的表达式

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0 \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}}}{1 + \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} G_{21} A_0}$$

定义包含负载的开环增益为:

$$A_{v,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} A_0$$

则, 包含负载的闭环增益为:



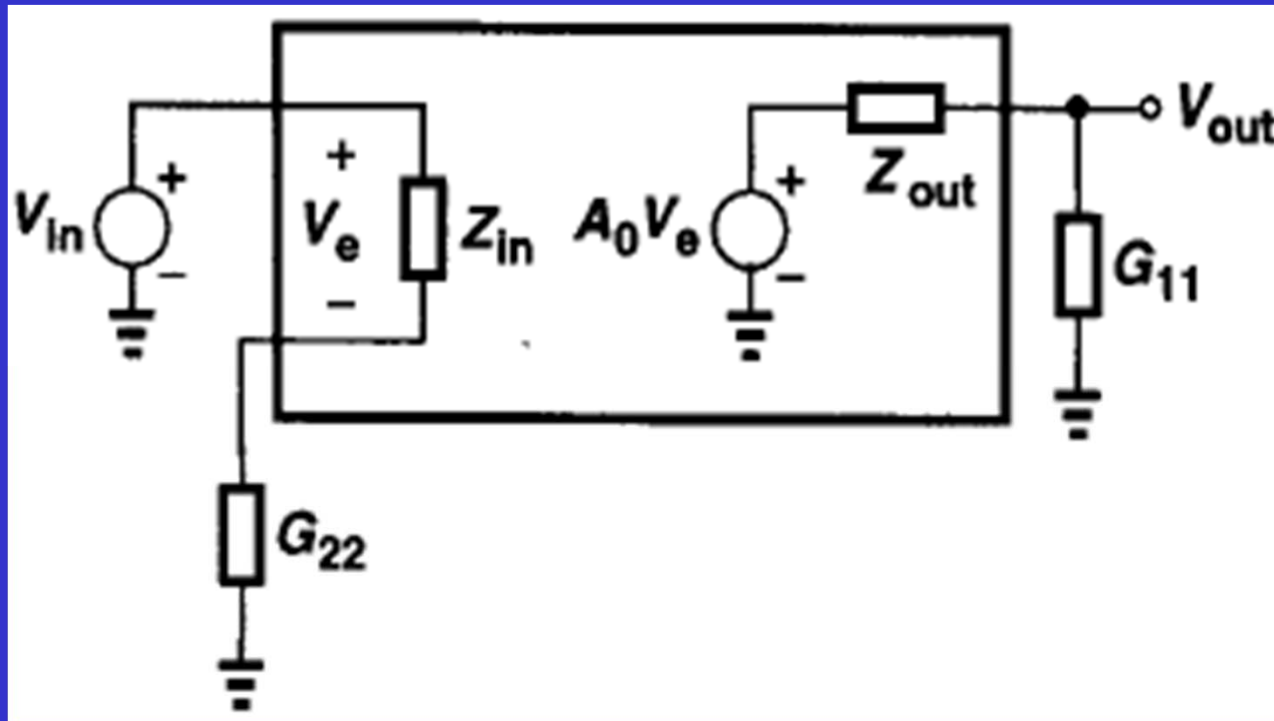
$$A_{v,close} = \frac{A_{v,open}}{1 + G_{21} A_{v,open}}$$

# S3—包含负载的开环增益的表达式

包含负载的开环增益为：

$$A_{v,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} A_0$$

反馈网络的输入和输出阻抗分别减小了输出电压和主放大器的输入端所看到的电压

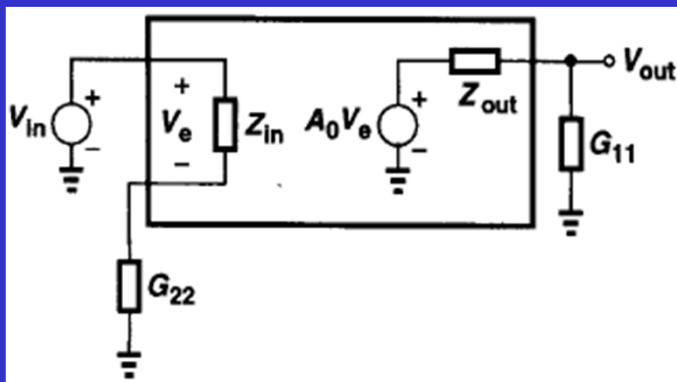
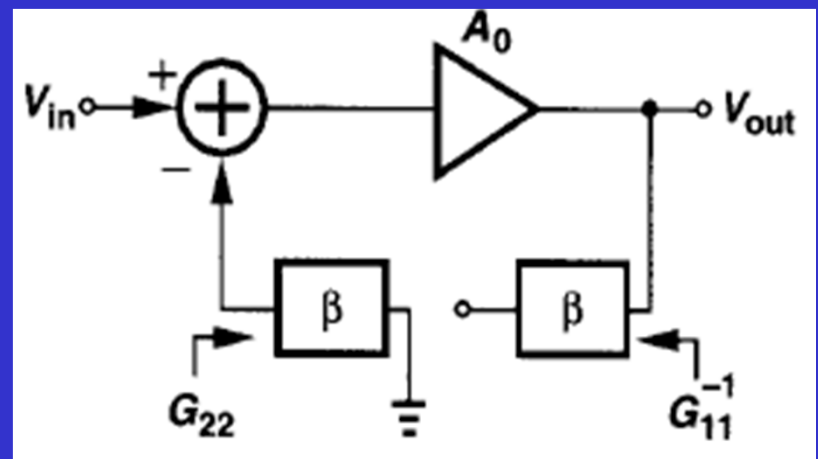
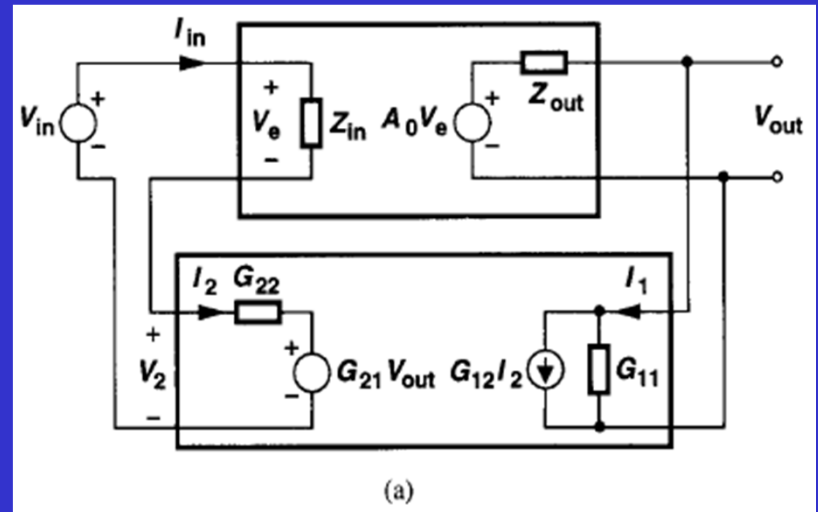


# S4—包含负载的开环增益的推导方法

令反馈网络的输入端短接地  
则： $V_{out}=0$

再令反馈网络的输出端开路  
则： $I_2=0$

即得到了包含负载的开环  
电路，推导其 $V_{out}/V_{in}$ ，就  
得到包含负载的开环增益

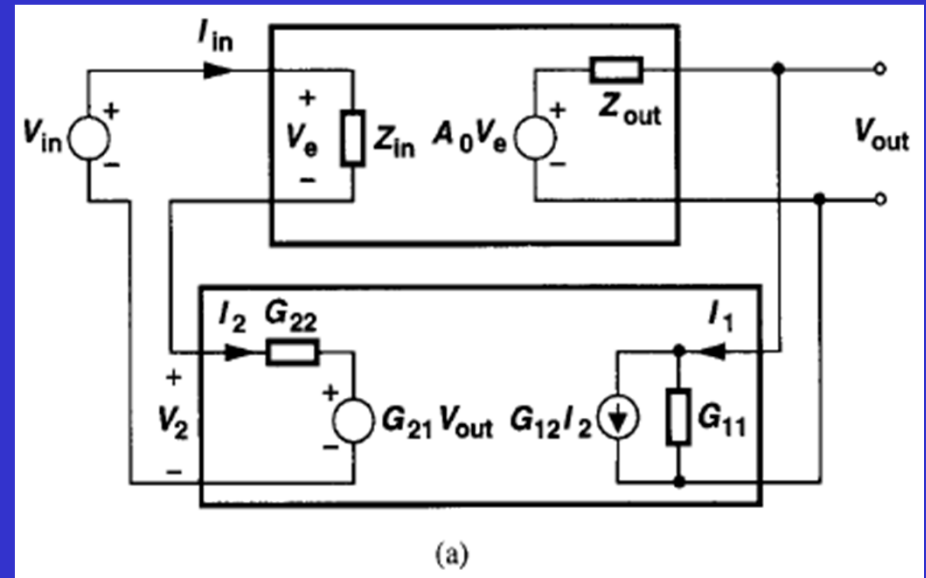


$$A_{v,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + G_{22}} \frac{G_{11}^{-1}}{G_{11}^{-1} + Z_{out}} A_0$$

## S5—推导反馈网络的正向增益 $G_{21}$ 的方法

- $G_{21}$  等于  $I_2=0$  时的  $V_2/V_1$
- 得到  $G_{21}$  和开环增益后，即可得到环路增益、闭环增益
- 闭环输入和输出阻抗

❖ 等于开环输入和输出阻抗乘以或除以  $(1 + G_{21}A_{v,open})$



**P225, 翻译错误,改:**  
“同样，从图8.39得到的开环输入和输出的阻抗乘以 $1+\dots\dots$ ”

## 例8.7 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

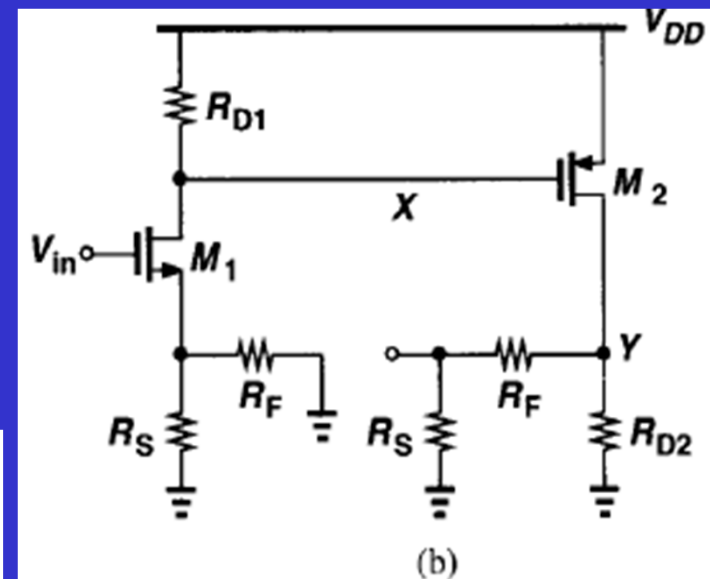
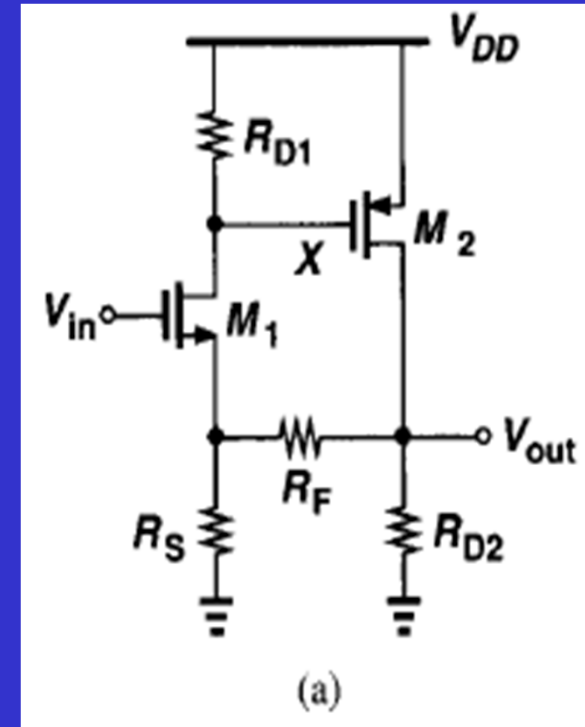
是电压—电压负反馈？

反馈网络是哪部分？

由  $R_F$  和  $R_S$  组成

构建开环电路，推导开环增益

忽略沟长调制效应

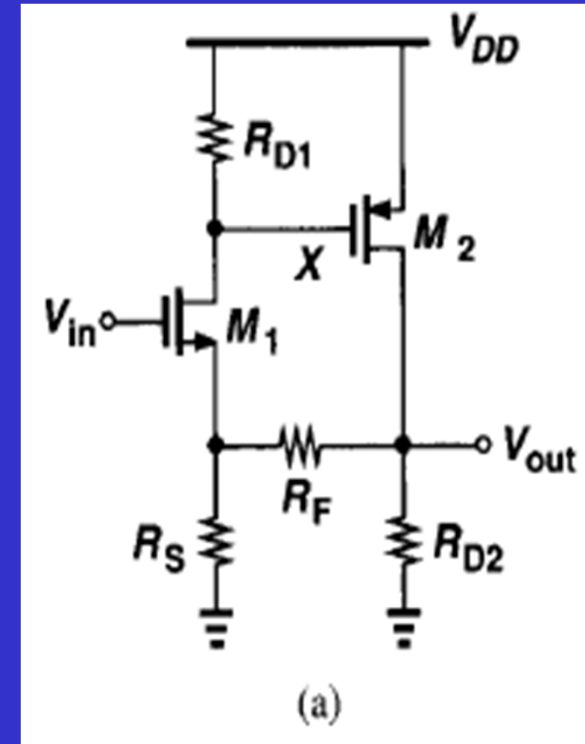


$$A_{v,open} = \frac{V_Y}{V_{in}} = \frac{-R_{D1}}{R_F \parallel R_S + 1/g_{m1}} \{-g_{m2}[R_{D2} \parallel (R_F + R_S)]\}.$$

## 例8.7 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

构建开环电路，推导开环增益



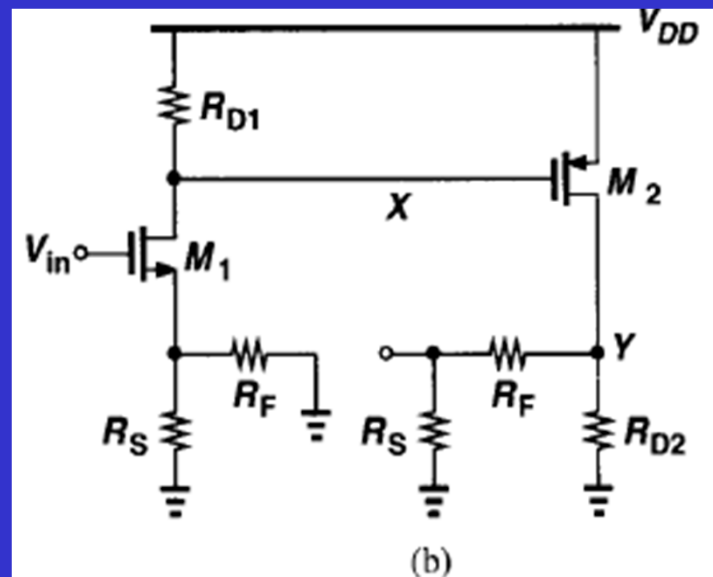
$$A_{v,open} = \frac{V_Y}{V_{in}} = \frac{-R_{D1}}{R_F \parallel R_S + 1/g_{m1}} \{-g_{m2}[R_{D2} \parallel (R_F + R_S)]\}.$$

求反馈网络的正向增益  $G_{21}$

$G_{21}$  等于  $I_2=0$  时的  $V_2/V_1$ ，  
等于  $R_S / (R_F + R_S)$

得闭环增益：

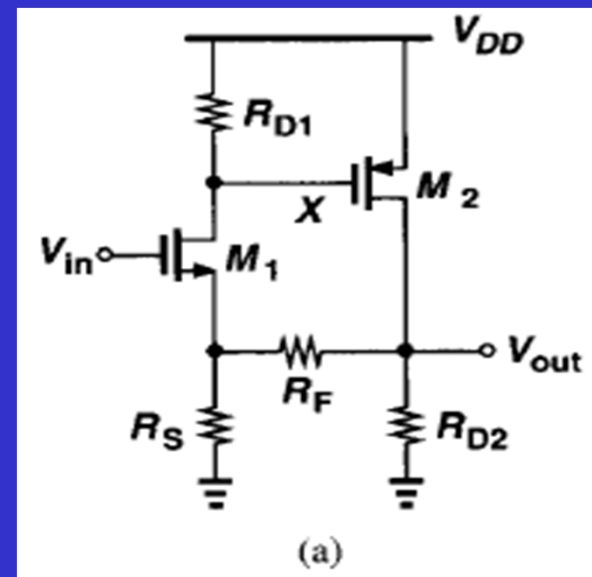
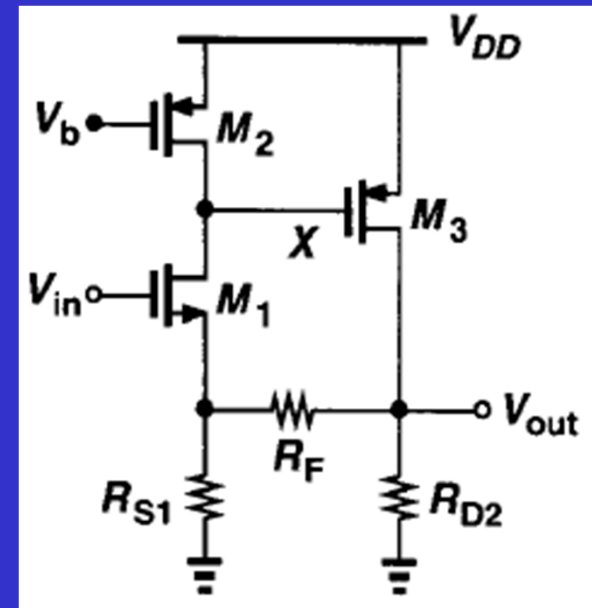
$$A_{v,closed} = A_{v,open} / (1 + G_{21} A_{v,open}).$$



# 例题

□ 对右图电路， $(W/L)_1=120/0.5$ ， $(W/L)_{2-3}=50/0.5$ ， $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ， $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ ，考虑沟长调制效应，忽略体效应，

- ❖ A: 要得到上面的电流，求输入偏置电压
- ❖ B: 计算闭环电压增益和输出电阻





# 例题

□ 对右图电路， $(W/L)_1=120/0.5$ ， $(W/L)_{2-3}=50/0.5$ ， $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ， $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ ，考虑沟长调制效应，忽略体效应，

- ❖ A: 要得到上面的电流，求输入偏置电压
- ❖ B: 计算闭环电压增益和输出阻抗

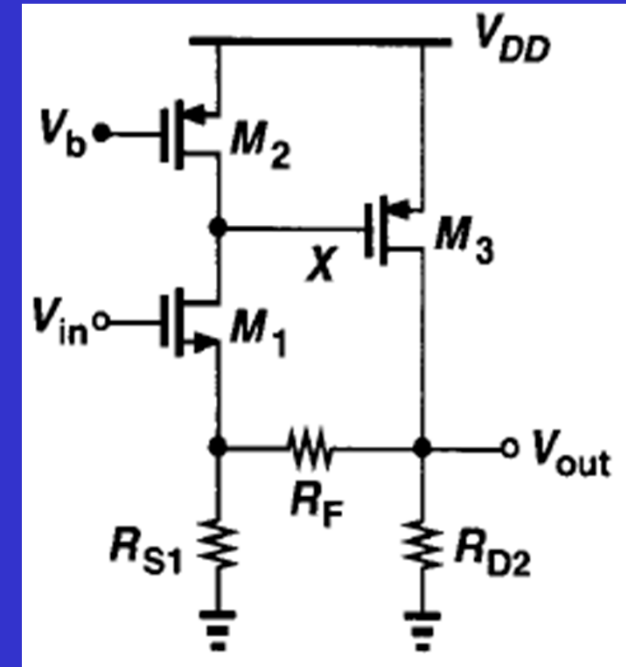
思路:

S1: 确定输入偏置电压（很容易）

S2: 画出考虑了反馈网络负载影响的开环电路，推导开环增益和开环输出阻抗；

S3: 推导环路增益（考虑了通过反馈网络的反向增益的影响了，比较准确）；或直接 $\beta$ 乘以开环增益得到环路增益（此时认为通过反馈网络的反向增益相比于前馈通路的正向增益小很多以至可忽略，不太精确）

S4: 根据开环增益、开环输出阻抗和环路增益，求出闭环增益和输出阻抗



# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_{2-3}=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  
 $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应, 忽略体效应,

❖ A: 要得到上面的电流, 求输入偏置电压

$$|V_{ov2}| = \sqrt{\frac{2I}{\mu_p C_{ox} \frac{W}{L}}} = 0.5105$$

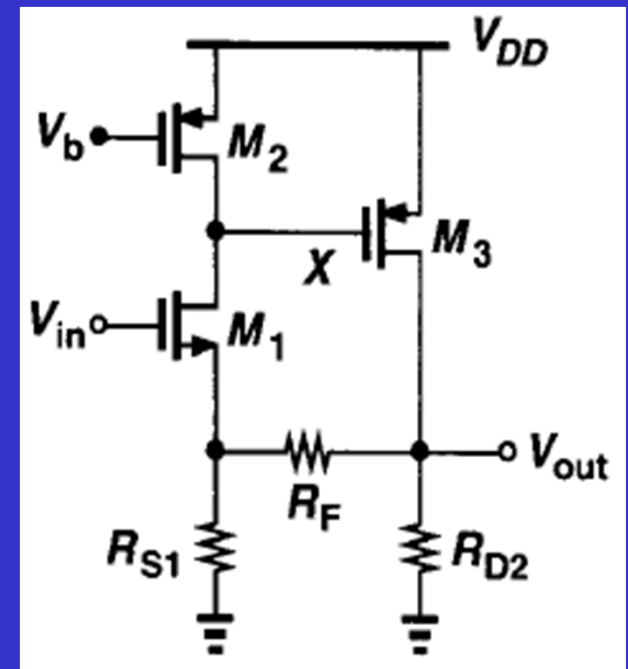
$$V_b = V_{DD} - |V_{ov2}| - |V_{THP}| = 1.69$$

$$V_X = V_b$$

$$V_{M1,S} = V_{out} = 3\text{K} * 0.5\text{m} = 1.5$$

$$V_{ov1} = \sqrt{\frac{2I}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = 0.176$$

$$V_{in} = V_{M1,S} - V_{ov1} - V_{THN} = 2.376$$



# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_2=3=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应, 忽略体效应,

❖ B: 计算闭环电压增益和输出阻抗

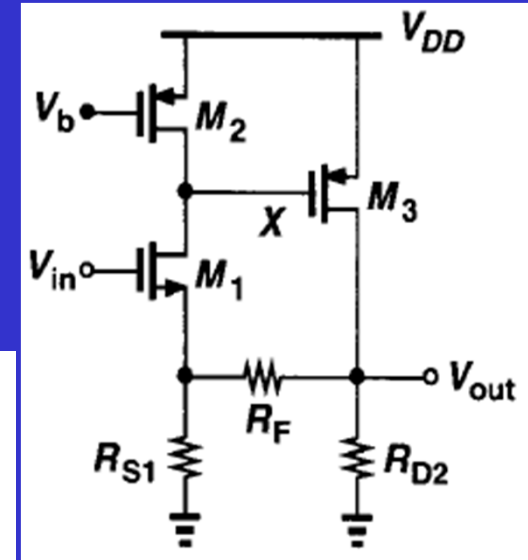
先求出各小信号参数, 以便于后面使用

$$g_{m1} = \sqrt{2 I \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} = 5.68 \text{ mS}$$

$$g_{m2} = g_{m3} = \sqrt{2 I \mu_p C_{ox} \frac{W}{L}} = 1.959 \text{ mS}$$

$$r_{o1} = \frac{1}{\lambda_n I} = 20 \text{ K}$$

$$r_{o2} = r_{o3} = \frac{1}{\lambda_p I} = 10 \text{ K}$$

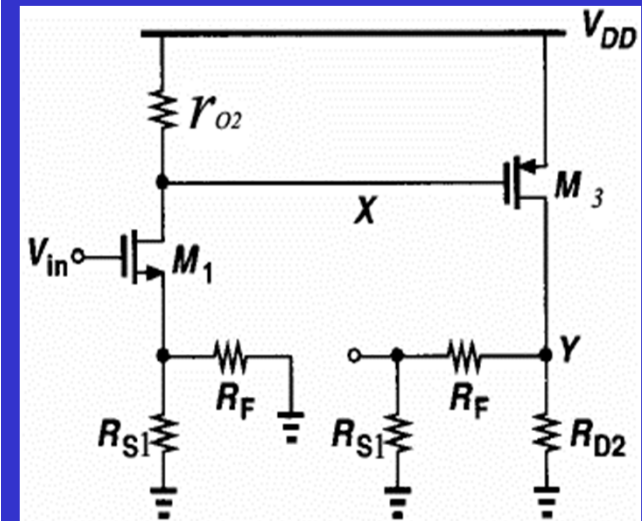
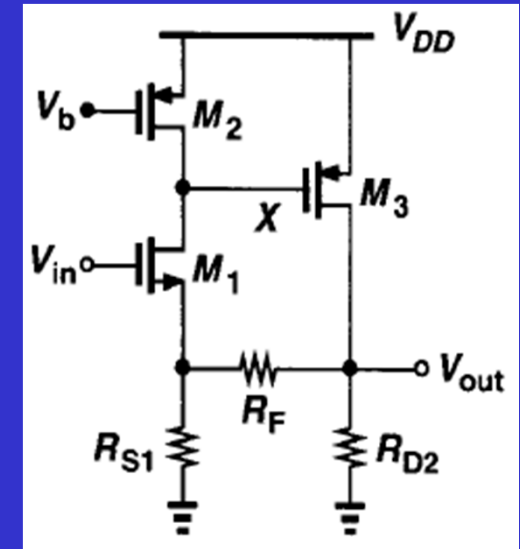


# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_2=3=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  
 $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应,  
 忽略体效应,

❖ B: 计算闭环电压增益和输出阻抗

S2: 画出考虑了反馈网络负载影响的开环电路, 推导开环增益和开环输出阻抗;



$$A_{v,open} = \frac{(g_{m1}r_{O1})r_{O2}}{r_{O1} + r_{O2} + [1 + (g_{m1} + g_{mb1})r_{O1}](R_{S1} \parallel R_F)}$$

$$\cdot g_{m3} \cdot [(R_{S1} + R_F) \parallel R_{D2} \parallel r_{O3}]$$

$$= 18.37$$

$$R_{out,open} = (R_{S1} + R_F) \parallel R_{D2} \parallel r_{O3}$$

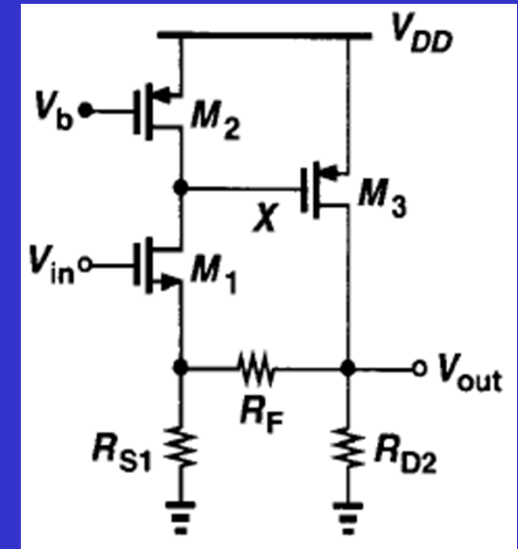
$$= 1.667\text{K}\Omega$$

# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_2=3=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应, 忽略体效应,

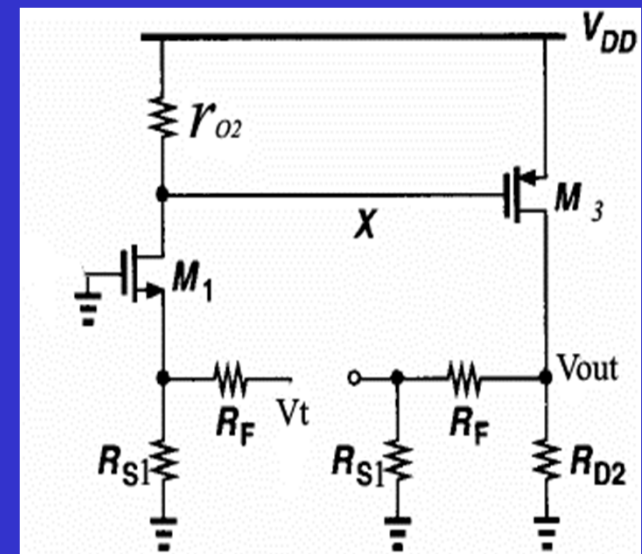
❖ B: 计算闭环电压增益和输出阻抗

S3: 推导环路增益; 或直接 $\beta$ 乘以开环增益得到环路增益  
 $V_{in}$ 接交流地, 把 $R_{S1}$ 、 $R_F$ 、 $V_t$ 构成的电路等效为一个电压源, 作为共栅级的输入。根据共栅级和共源级电压增益公式即可得到 $V_{out}/V_t$



$$\frac{V_{out}}{V_t} = \frac{R_{S1}}{R_{S1} + R_F} \cdot \frac{[(g_{m1} + g_{mb1})r_{O1} + 1]r_{O2}}{r_{O1} + r_{O2} + [1 + (g_{m1} + g_{mb1})r_{O1}](R_{S1} \parallel R_F)} \cdot g_{m3} \cdot [(R_{S1} + R_F) \parallel R_{D2} \parallel r_{O3}]$$

$$= 9.266$$



# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_2=3=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应, 忽略体效应,

❖ B: 计算闭环电压增益和输出阻抗

S4: 根据开环增益、开环输出阻抗和环路增益, 求出闭环增益和输出阻抗

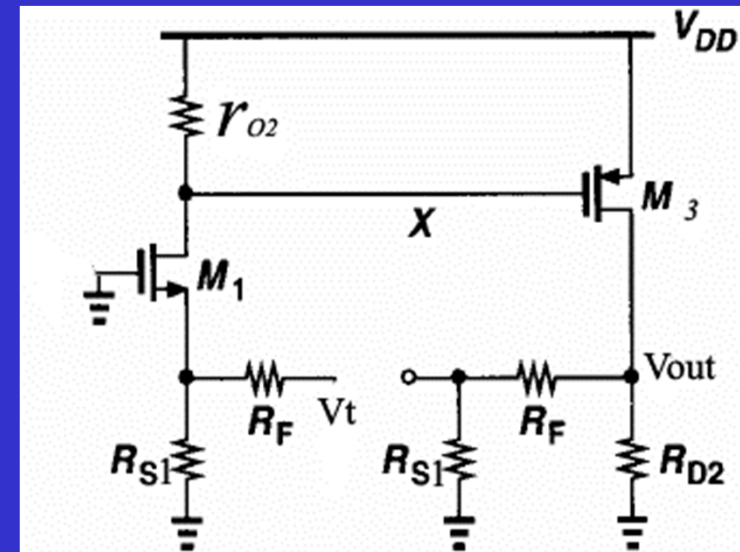
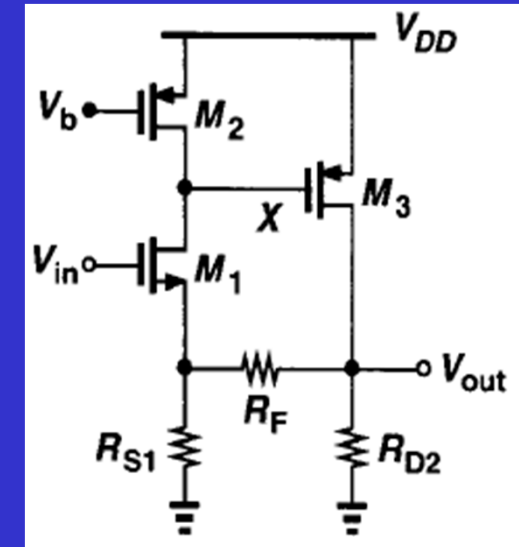
$$A_{v,open} = 18.37$$

$$loopgain = 9.266$$

$$R_{out,open} = 1.667\text{K}\Omega$$

$$A_{v,close} = \frac{A_{v,open}}{1 + loopgain} = 1.79$$

$$R_{out,close} = \frac{R_{out,open}}{1 + loopgain} = 162\Omega$$



# 例题

□ 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_{2-3}=50/0.5$ ,  
 $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应,  
 忽略体效应,

❖ B: 计算闭环电压增益和输出电阻

S3: 直接 $\beta$ 乘以开环增益得到环路增益

$$A_{v,open} = 18.37$$

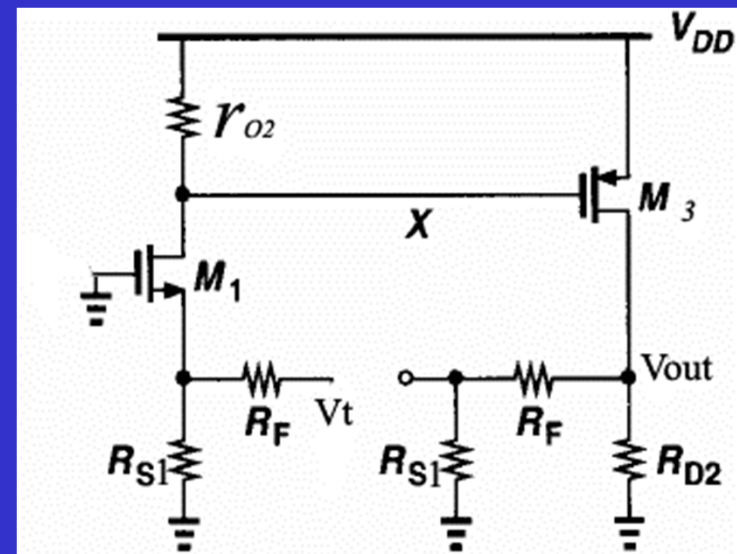
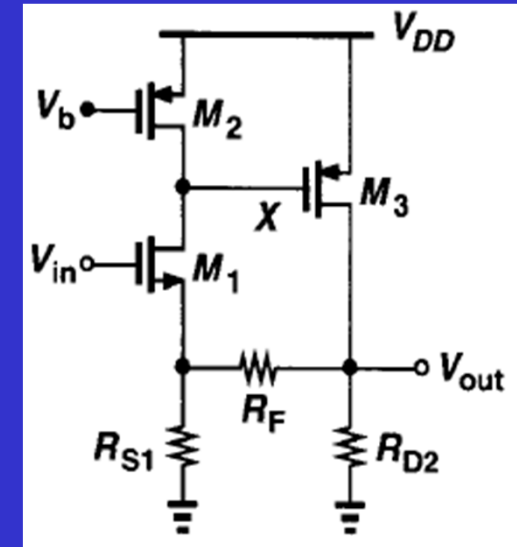
$$R_{out,open} = 1.667\text{K}\Omega$$

$$\beta = \frac{1}{2}$$

$$loopgain = \beta \cdot A_{v,open} = 9.185$$

$$A_{v,close} = \frac{A_{v,open}}{1 + loopgain} = 1.80$$

$$R_{out,close} = \frac{R_{out,open}}{1 + loopgain} = 164\Omega$$



# 例题

- 对右图电路,  $(W/L)_1=120/0.5$ ,  $(W/L)_{2-3}=50/0.5$ ,  $I_{D1-3}=0.5\text{mA}$ ,  
 $R_{S1}=R_F=R_{D2}=3\text{K}\Omega$ , 考虑沟长调制效应, 忽略体效应,  
❖ B: 计算闭环电压增益和输出电阻

S3: 直接 $\beta$ 乘以开环增益得到环路增益

$$A_{v,open} = 18.37$$

$$R_{out,open} = 1.667\text{K}\Omega$$

$$\beta = \frac{1}{2}$$

$$loopgain = \beta \cdot A_{v,open} = 9.185$$

$$A_{v,close} = \frac{A_{v,open}}{1 + loopgain} = 1.80$$

$$R_{out,close} = \frac{R_{out,open}}{1 + loopgain} = 164\Omega$$

S3: 推导环路增益

$$loopgain = 9.266$$

$$A_{v,close} = 1.79$$

$$R_{out,close} = 162\Omega$$



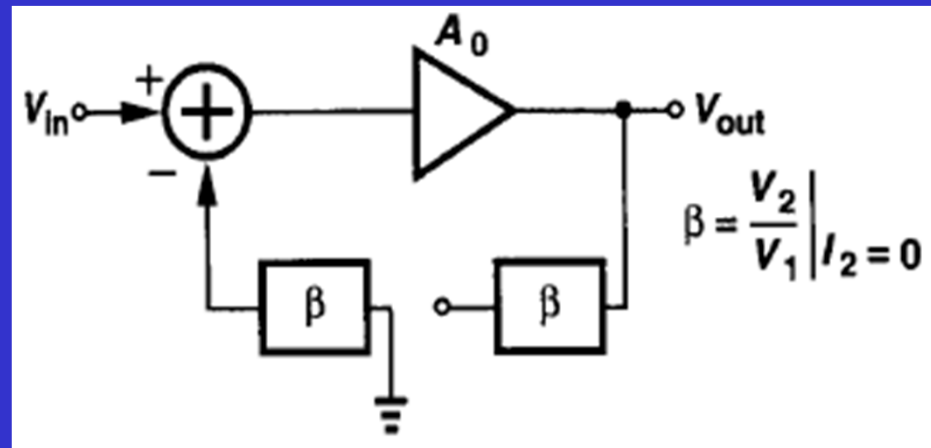
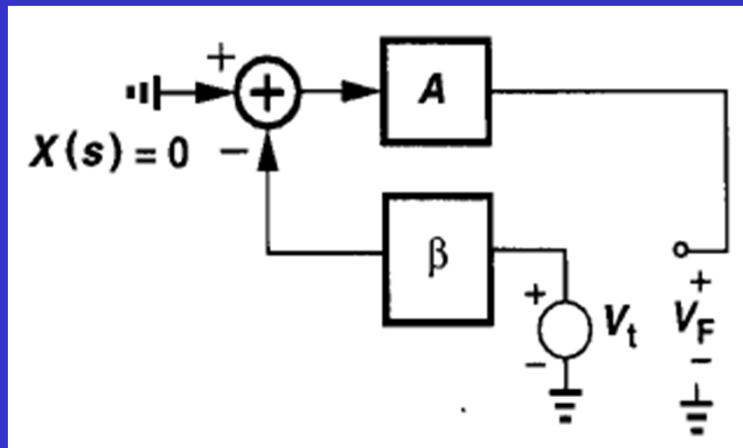
# 环路增益的计算方法

## □方法一

- ❖ 在环路的合适点断开环路，注入一个测试信号，计算环路增益

## □方法二

- ❖ 确定开环增益 $A_{OL}$ 和反馈系数 $\beta$ 后，得到环路增益 $\beta A_{OL}$



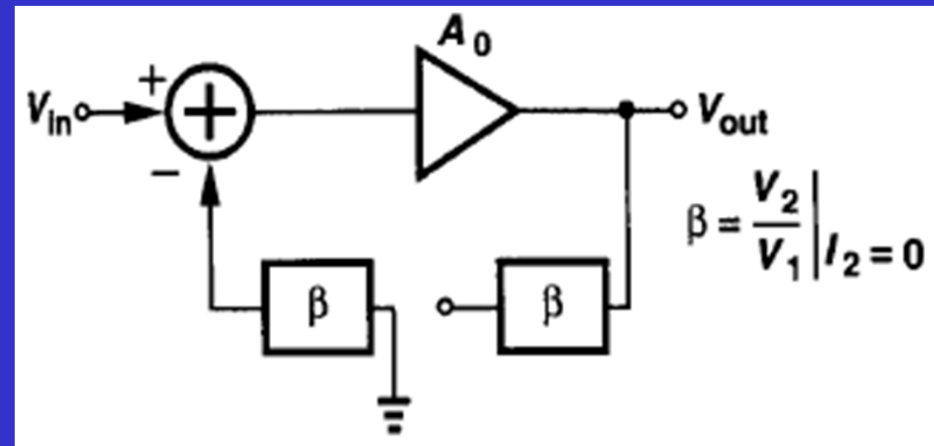
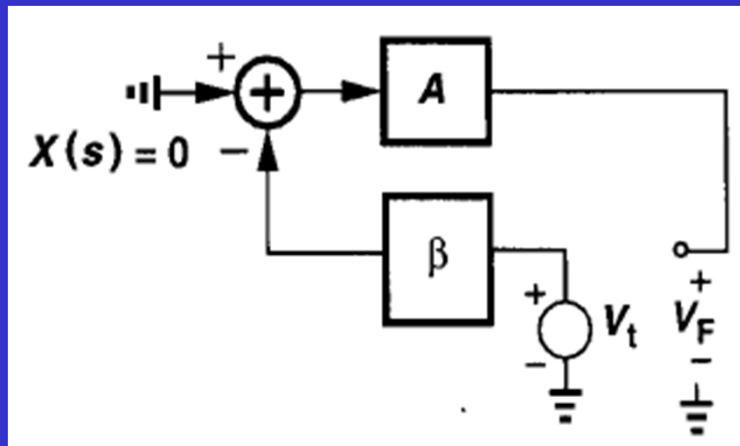
# 环路增益的计算方法

## □ 两种方法的结果会有不同

- ❖ 方法二忽略了通过反馈网络的反向增益
- ❖ 在前面电压-电压反馈中的例题中给出了两种计算方法
  - 结果稍有差别

## □ 我们采用哪种计算方法？

- ❖ 方法二



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

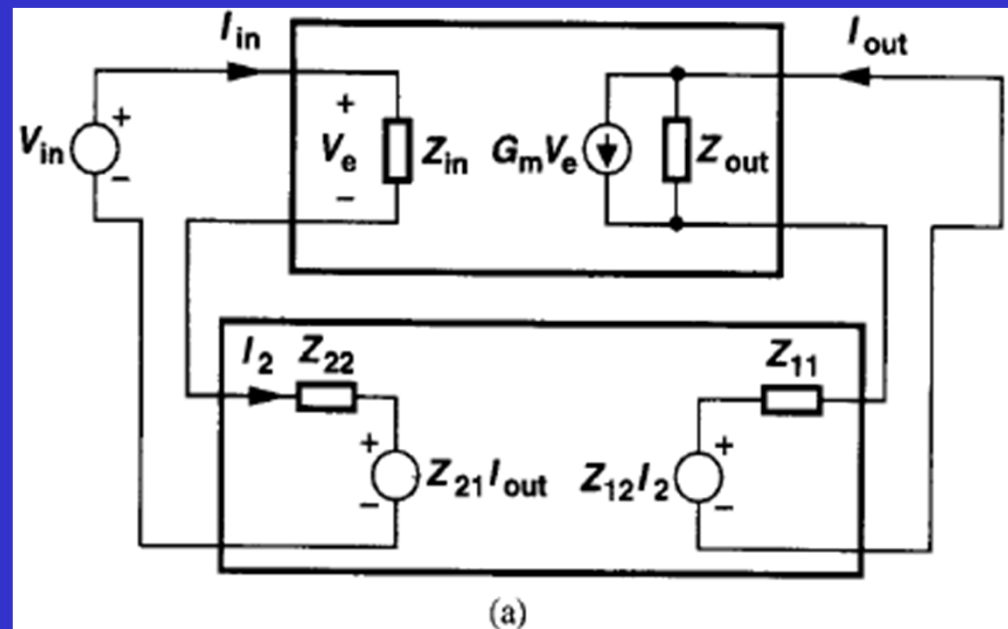
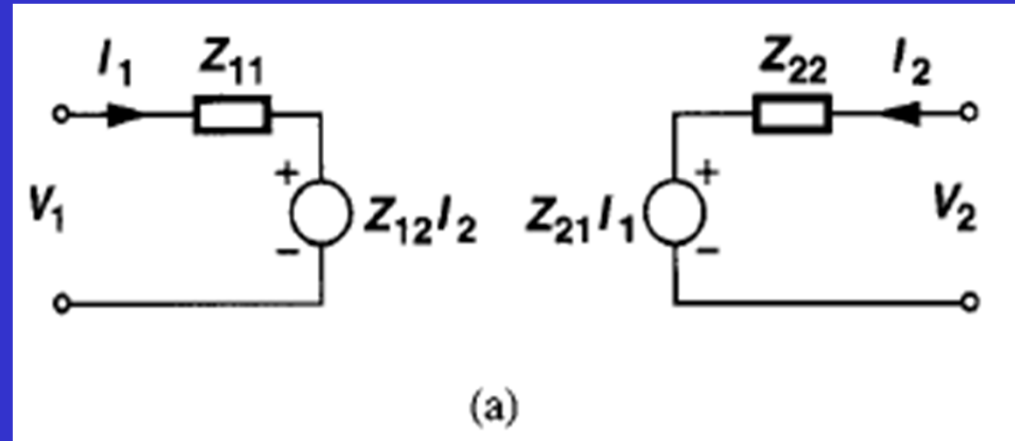
# 电流-电压反馈中的负载

## □S1

❖ 反馈网络用Z模型替代

## □S2

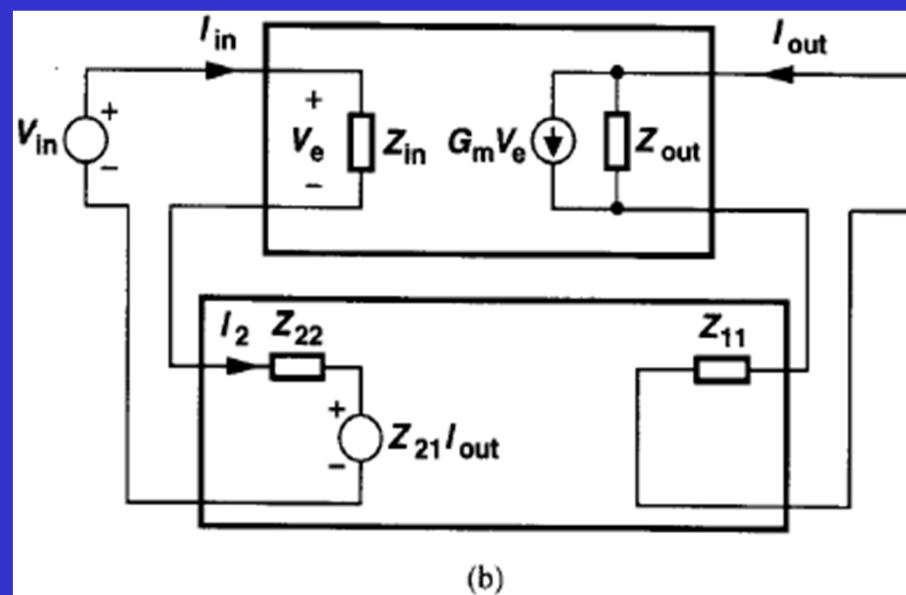
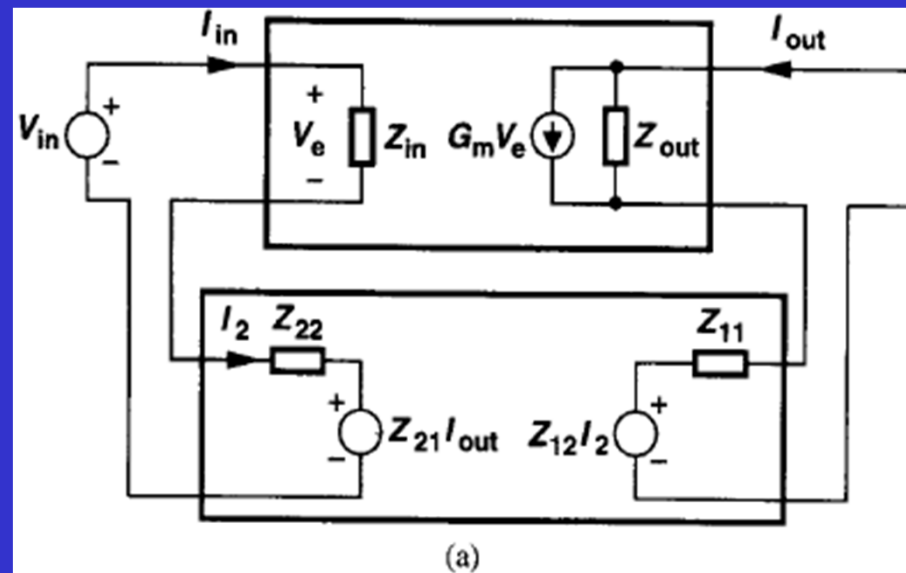
❖ 计算闭环增益表达式



## S2—计算闭环增益表达式

### □忽略 $Z_{12}$ 的影响

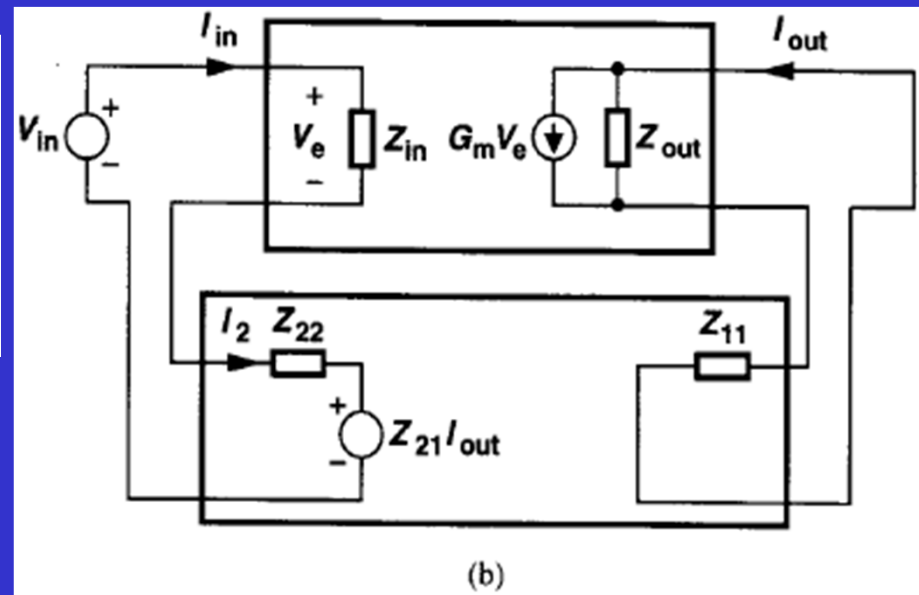
- ❖主放大器增益 $G_m$ 远大于反馈网络的反向增益



## S2—计算闭环增益表达式

$$(V_{in} - Z_{21}I_{out}) \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} G_m \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} = I_{out}$$

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} G_m}{1 + \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} G_m Z_{21}}$$



**S3:**

定义包含负载的开环增益为

$$G_{m,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} G_m$$

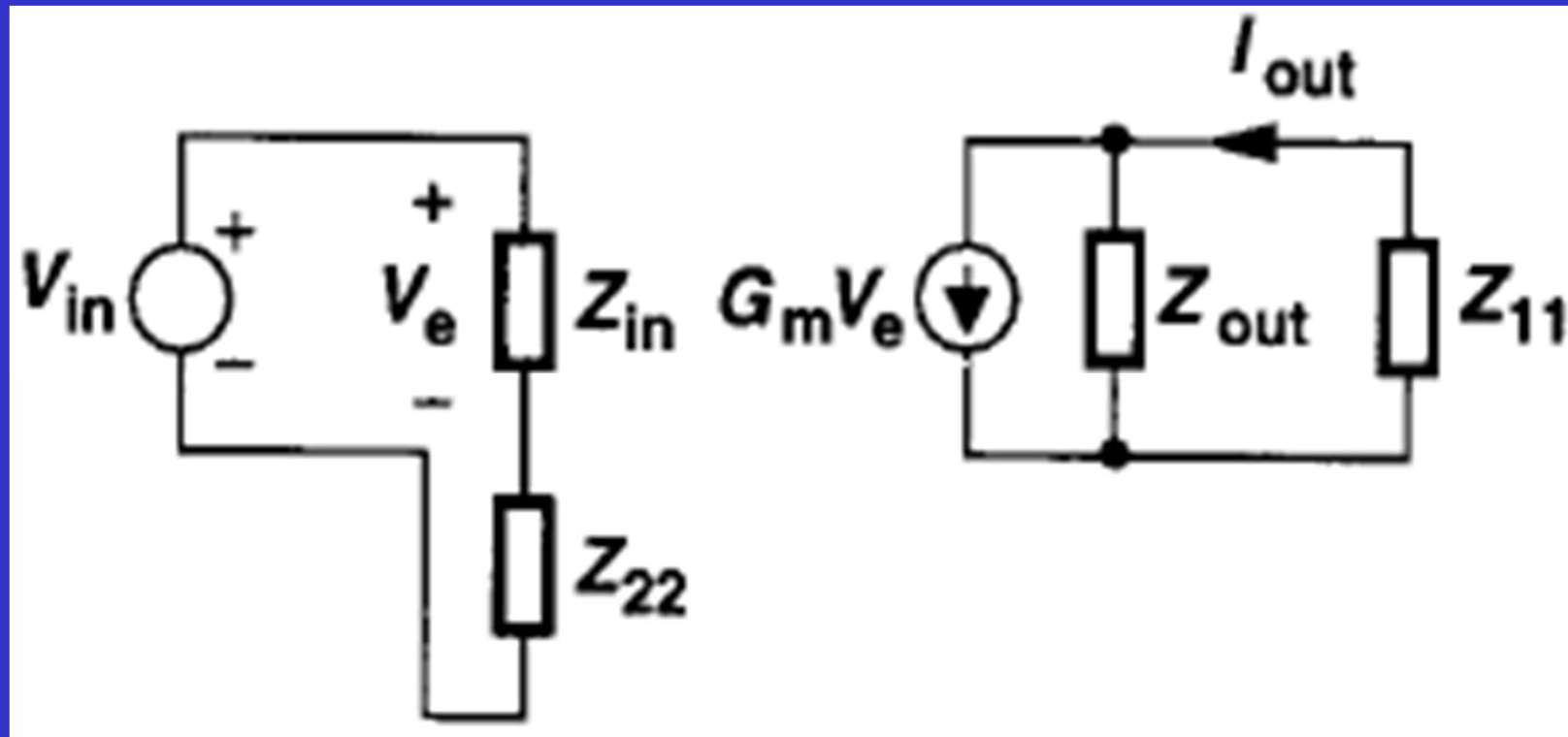
理想反馈网络时：  
 **$Z_{11}=0$ ,  $Z_{22}=0$**

# S3—包含负载的开环增益的表达式

包含负载的开环增益为：

$$G_{m,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} G_m$$

反馈网络的输入和输出阻抗分别减小了输出电流和主放大器的输入端所看到的电压



# S4—包含负载的开环增益的推导方法

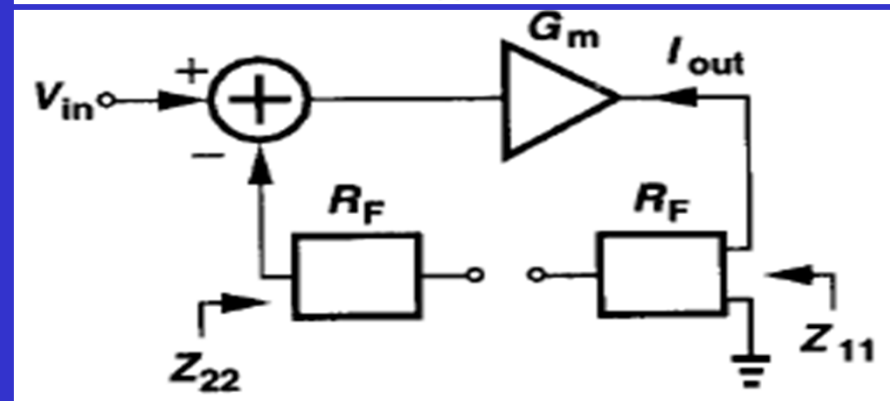
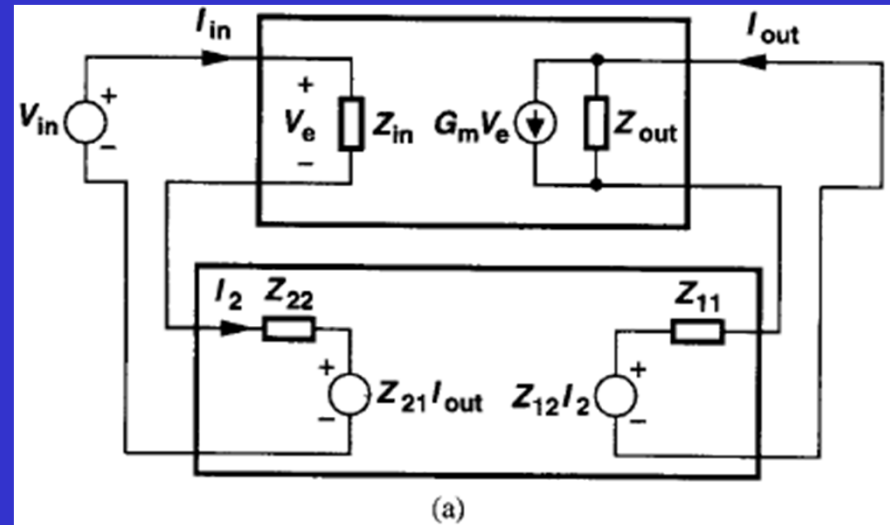
令反馈网络的输入端开路

则： $I_{out}=0$

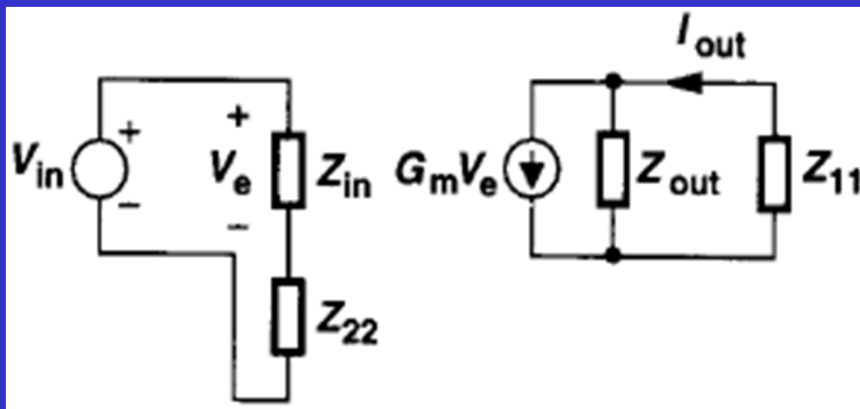
再令反馈网络的输出端开路

则： $I_2=0$

即得到了包含负载的开环电路，推导其 $I_{out}/V_{in}$ ，就得到包含负载的开环增益



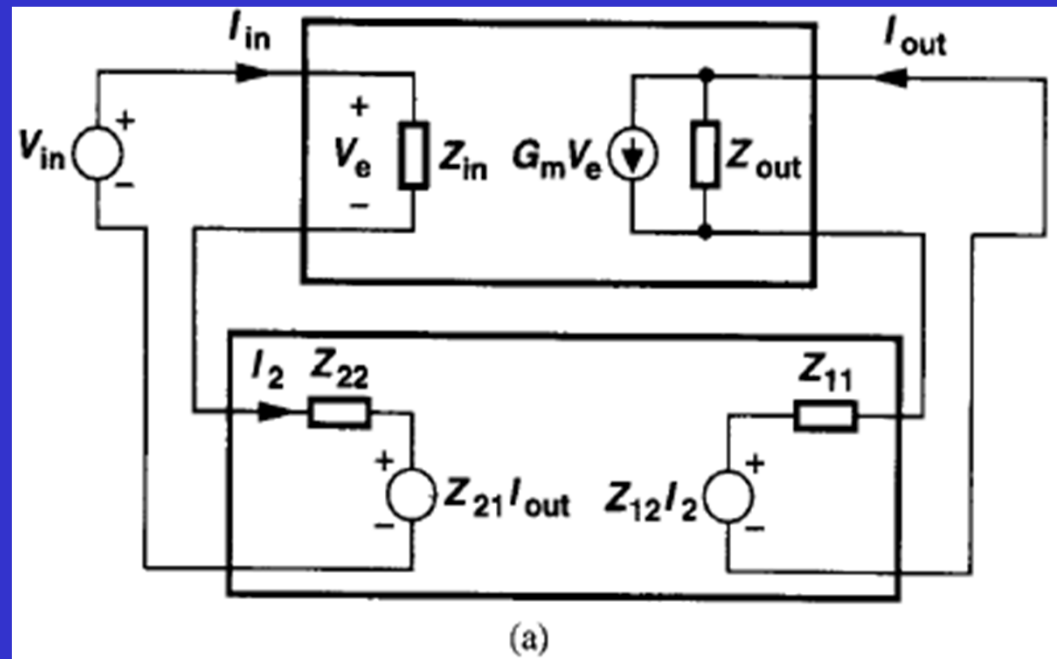
$$G_{m,open} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{22}} \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{11}} G_m$$





## S5—推导反馈网络的正向增益 $Z_{21}$ 的方法

- $Z_{21}$  等于  $I_2=0$  时的  $V_2/I_1$
- 得到  $Z_{21}$  和开环增益后，即可得到环路增益、闭环增益
- 闭环输入和输出阻抗
  - ❖ 等于开环输入和输出阻抗乘以或除以  $(1 + Z_{21}G_{m,open})$



## 例8.8 求增益

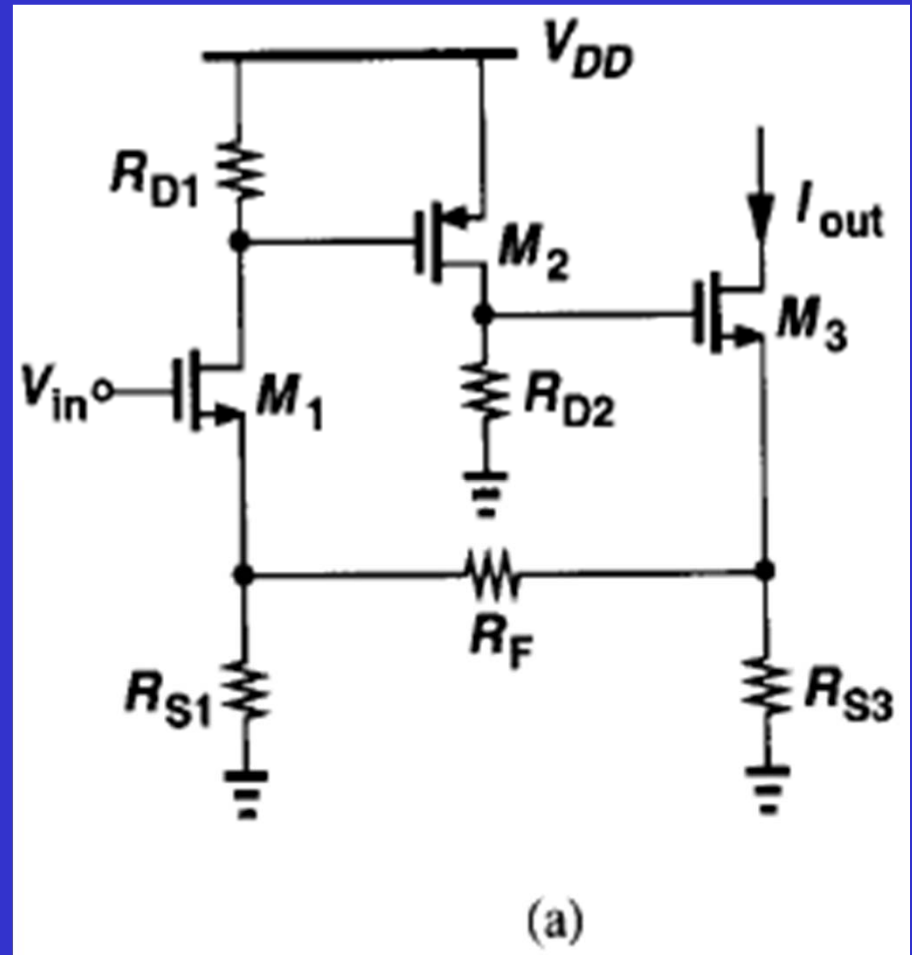
□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

是电流—电压负反馈？

反馈网络是哪部分？

由  $R_{S3}$ 、 $R_F$  和  $R_{S1}$  组成  
构建开环电路，推导开环增益

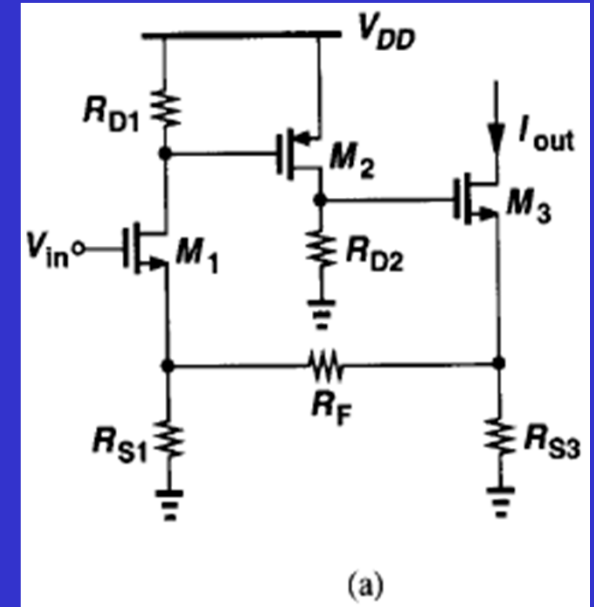
忽略沟长调制效应和体效应，以简化分析



## 例8.8 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

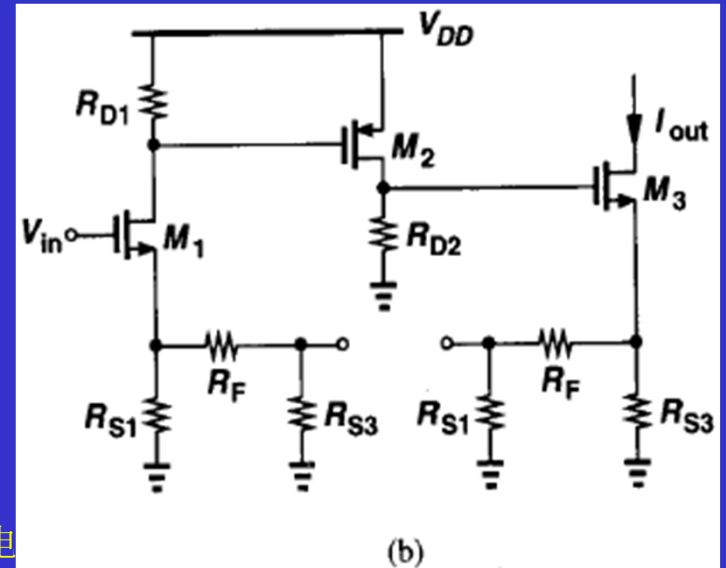
构建开环电路，推导开环增益



$$G_{m,open} = \frac{-R_{D1}}{R_{S1} \parallel (R_F + R_{S3}) + 1/g_{m1}} \cdot \frac{-g_{m2} R_{D2}}{R_{S3} \parallel (R_F + R_{S1}) + 1/g_{m3}}$$

求反馈网络的正向增益  $G_{21}$

$G_{21}$  等于  $I_2=0$  时的  $V_2/I_1$



## 例8.8 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

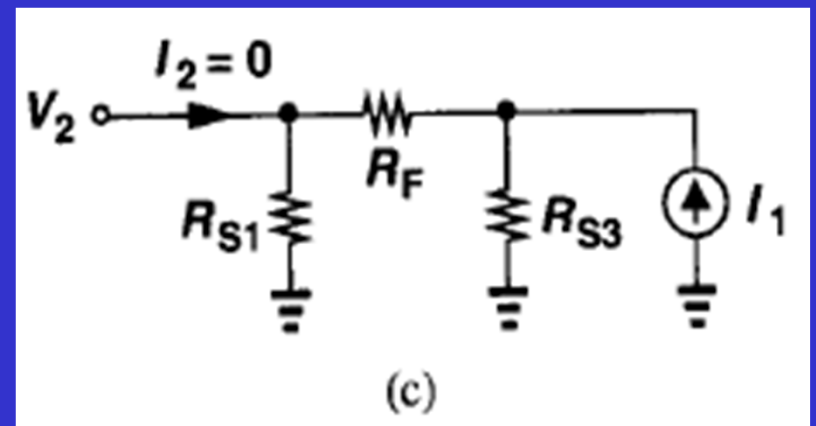
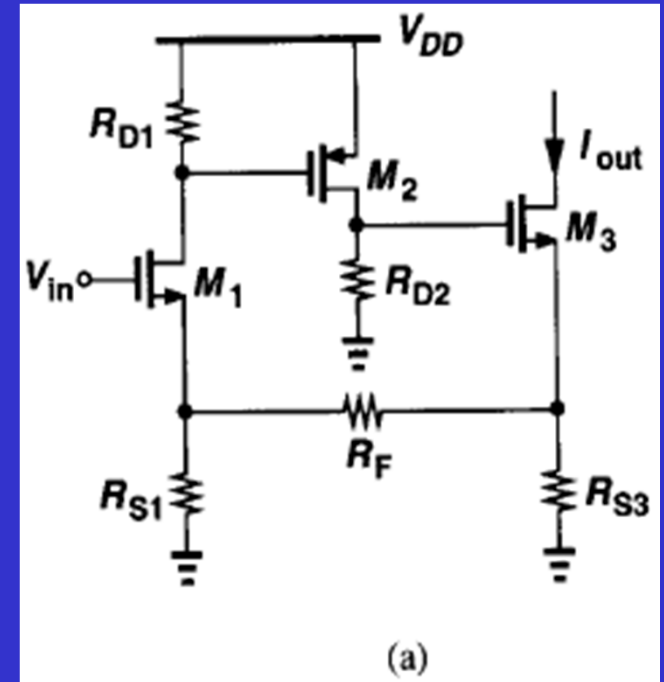
求反馈网络的正向增益  $Z_{21}$

$Z_{21}$  等于  $I_2=0$  时的  $V_2/I_1$ ，等于

$$Z_{21} = \frac{R_{S3}}{R_{S3} + R_{S1} + R_F} R_{S1}$$

得闭环增益：

$$G_{m,open} / (1 + Z_{21} G_{m,open})$$



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

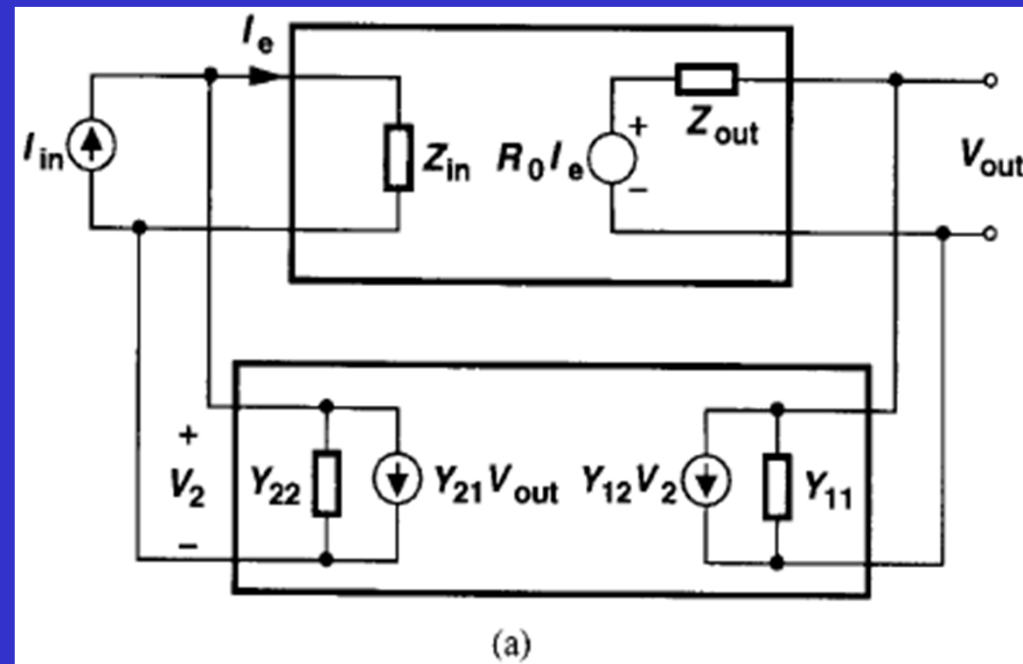
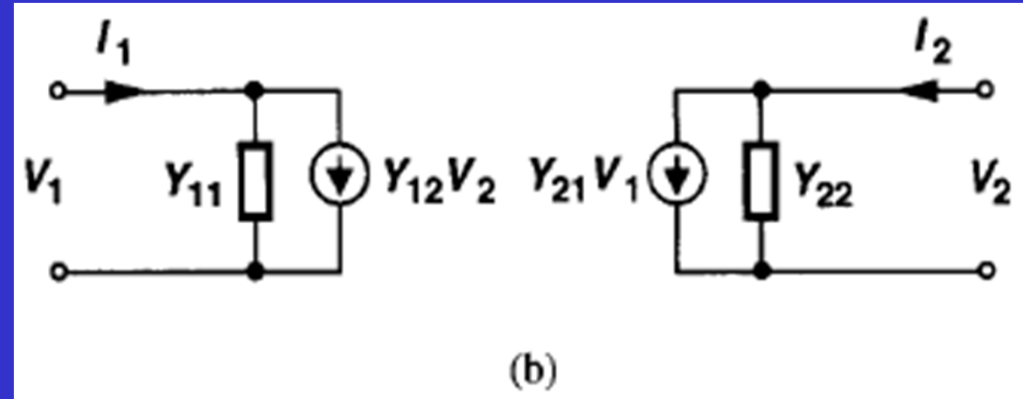
# 电压—电流反馈中的负载

## □S1

❖ 反馈网络用Y模型替代

## □S2

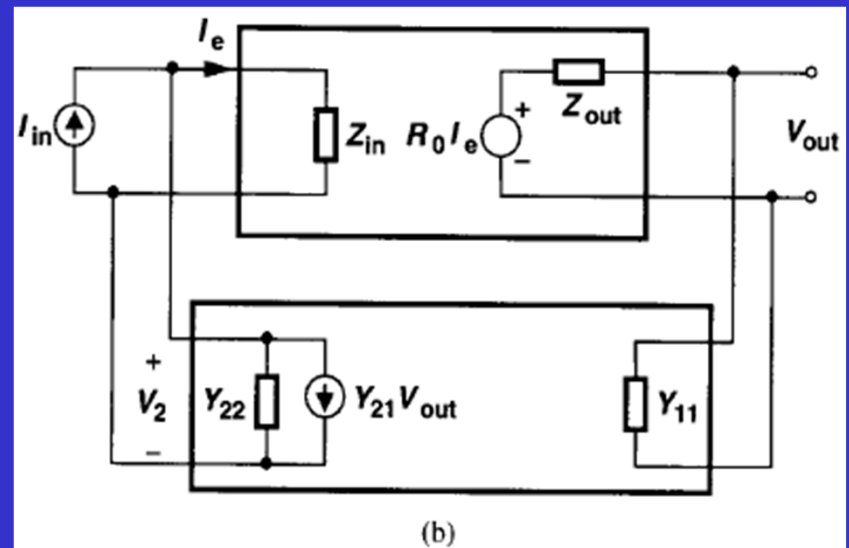
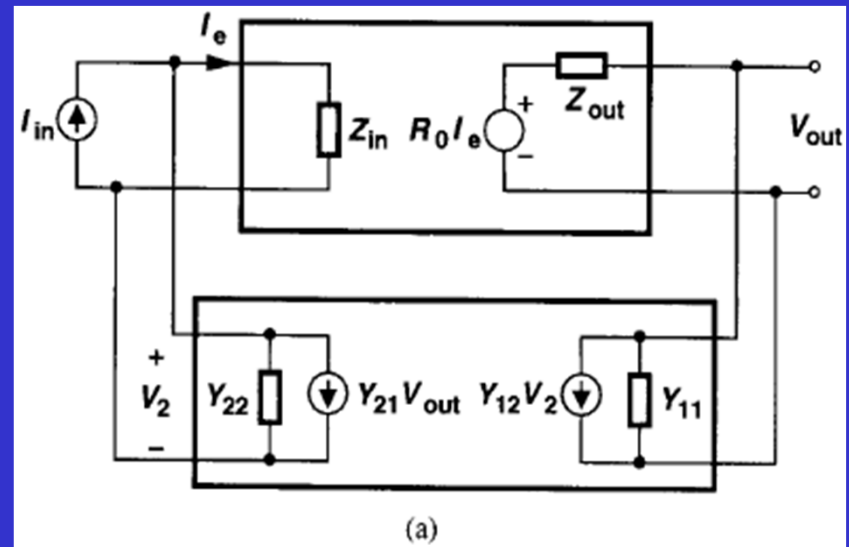
❖ 计算闭环增益表达式



## S2—计算闭环增益表达式

### □忽略 $Y_{12}$ 的影响

- ❖主放大器增益 $R_0$ 远大于反馈网络的反向增益



## S2—计算闭环增益表达式

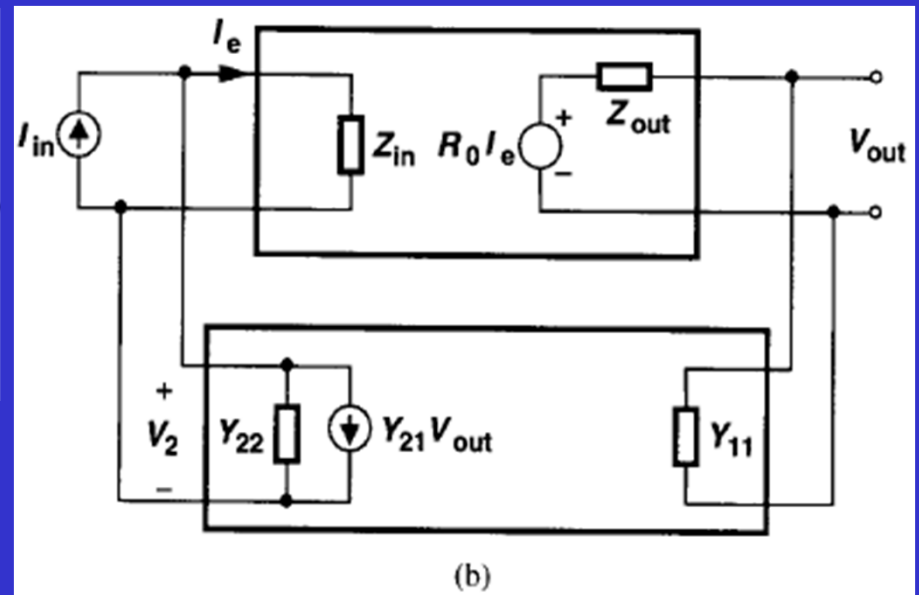
$$(I_{in} - Y_{21}V_{out}) \frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} R_0 \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}} = V_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} R_0 \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}}}{1 + \frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} R_0 \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}} Y_{21}}$$

**S3:**

定义包含负载的开环增益为

$$R_{0,open} = \frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}} R_0$$



理想反馈网络时：  
 **$Y_{11}=0$ ,  $Y_{22}=0$**

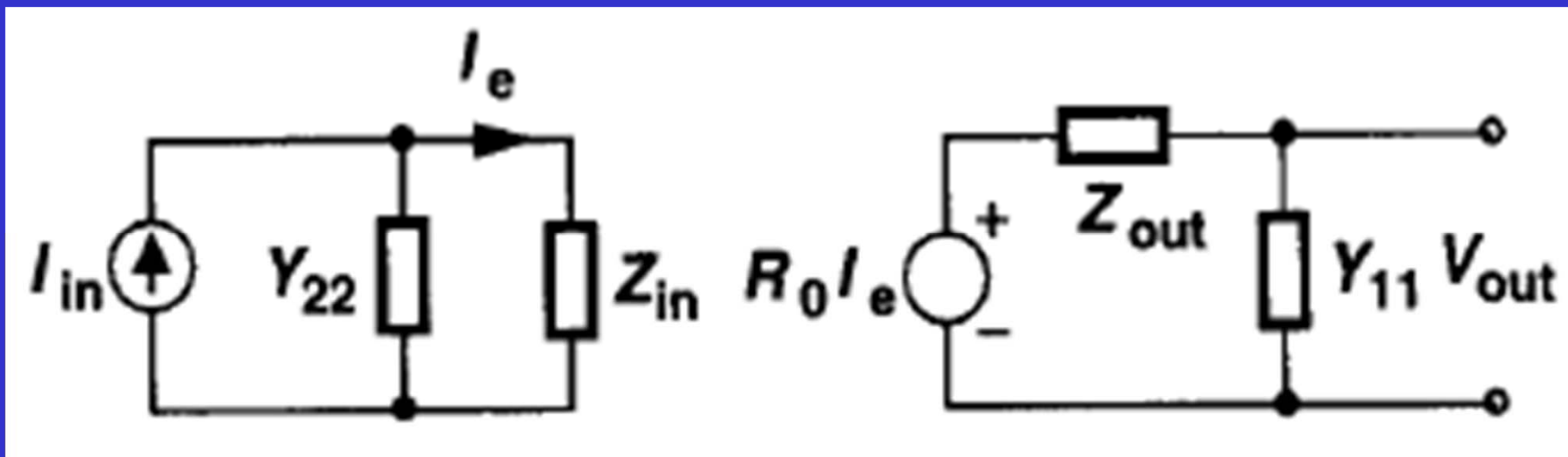


## S3—包含负载的开环增益的表达式

包含负载的开环增益为：

$$R_{0,open} = \frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}} R_0$$

反馈网络的输入和输出阻抗分别减小了输出电压和主放大器的输入端所看到的电流



# S4—包含负载的开环增益的推导方法

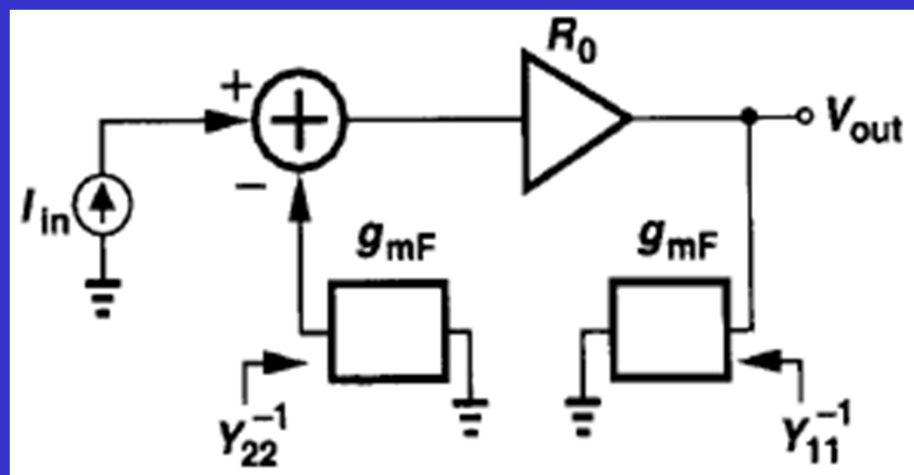
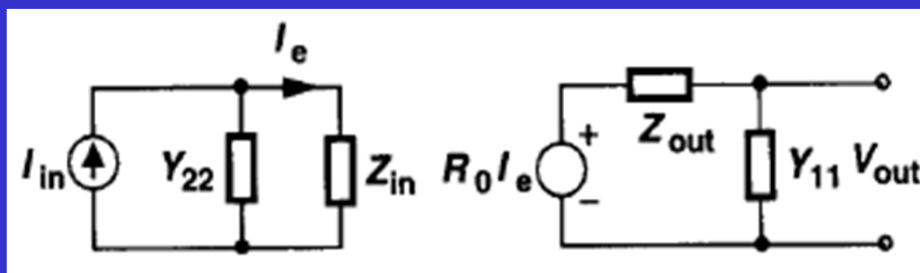
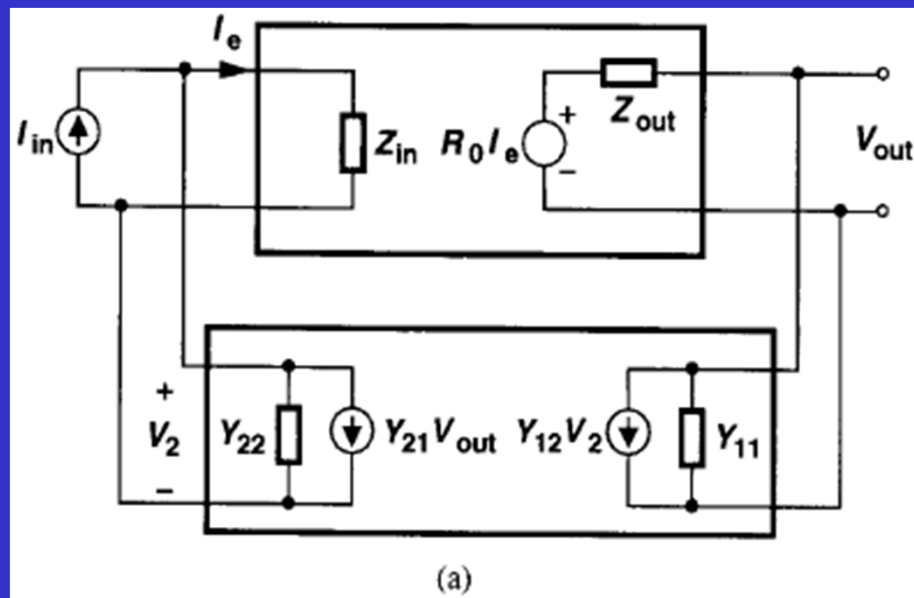
令反馈网络的输入端短路

则： $V_{out}=0$

再令反馈网络的输出端短路

则： $V_2=0$

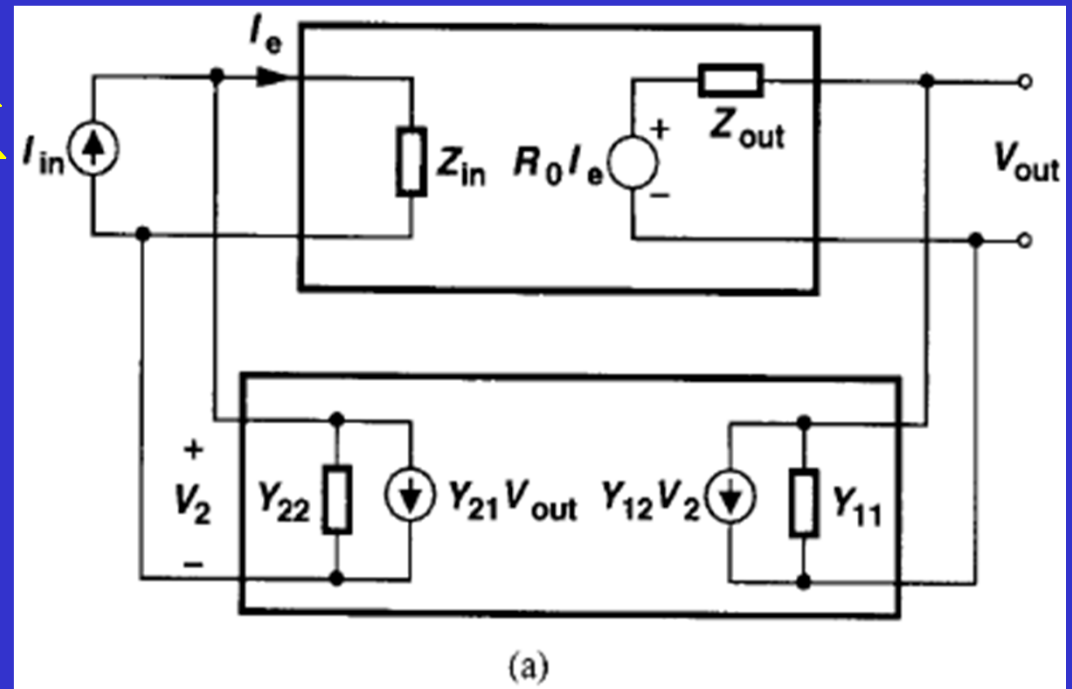
即得到了包含负载的开环电路，推导其 $V_{out}/I_{in}$ ，就得到包含负载的开环增益



$$R_{0,open} = \frac{Y_{22}^{-1}}{Y_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Y_{11}^{-1}}{Y_{11}^{-1} + Z_{out}} R_0$$

## S5—推导反馈网络的正向增益 $Y_{21}$ 的方法

- $Y_{21}$  等于  $V_2=0$  时的  $I_2/V_1$
- 得到  $Y_{21}$  和开环增益后，即可得到环路增益、闭环增益
- 闭环输入和输出阻抗
  - ❖ 等于开环输入和输出阻抗乘以或除以  $(1 + Y_{21}G_{m,open})$



## 例8.9 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

是电压—电流负反馈？

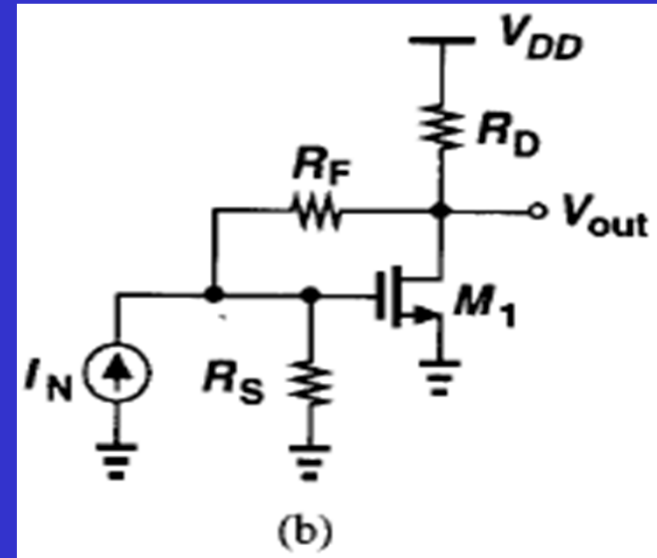
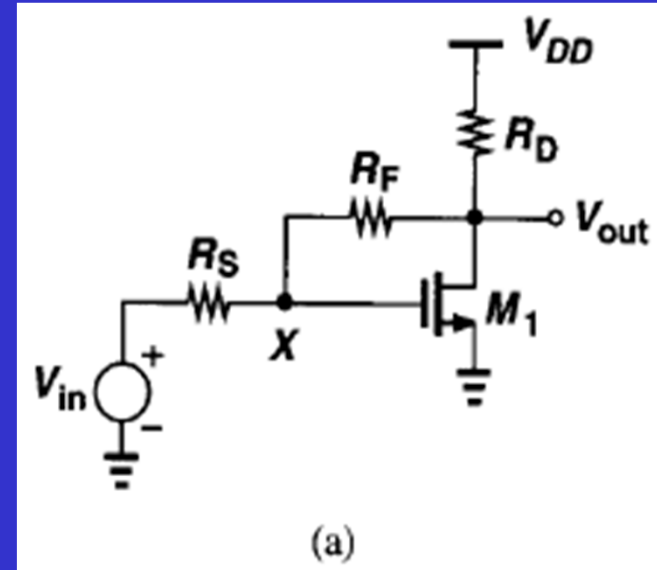
$V_{in}$  和  $R_S$  组合可诺顿等效成  
电流并联电阻形式

反馈网络是哪部分？

由  $R_F$  组成

构建开环电路，推导开  
环增益

忽略沟长调制效应



## 例8.9 求增益

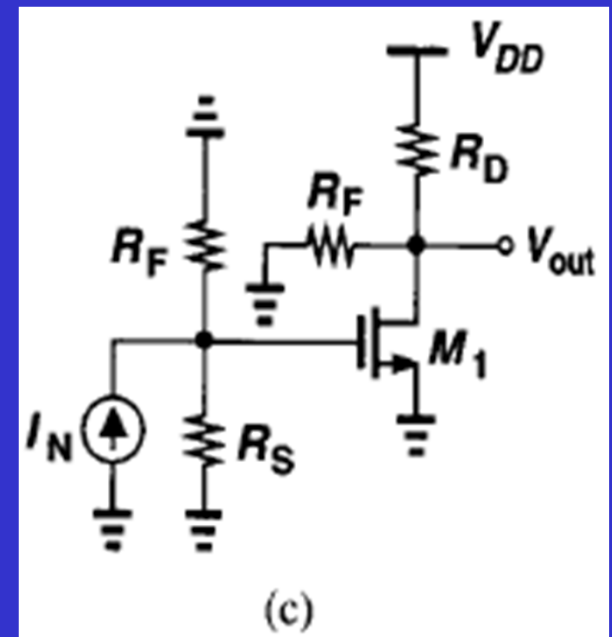
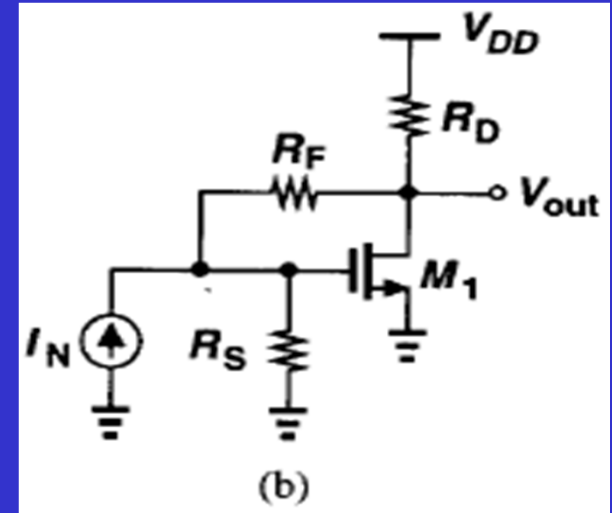
□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

构建开环电路，推导开环增益

$$\begin{aligned} R_{0,open} &= \left. \frac{V_{out}}{I_N} \right|_{open} \\ &= -(R_S \parallel R_F) g_m (R_F \parallel R_D) \end{aligned}$$

求反馈网络的正向增益  $Y_{21}$

$Y_{21}$  等于  $V_2=0$  时的  $I_2/V_1 = -1/R_F$   
进而可得闭环增益



## 例8.9 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

$$R_{0,open} = \left. \frac{V_{out}}{I_N} \right|_{open}$$

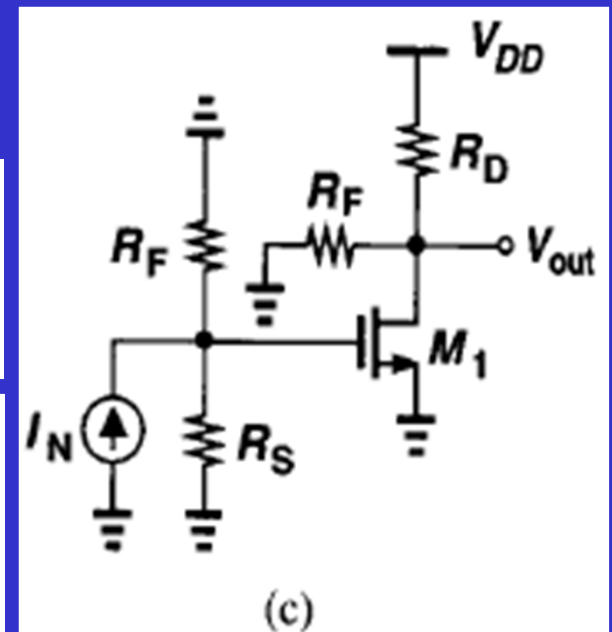
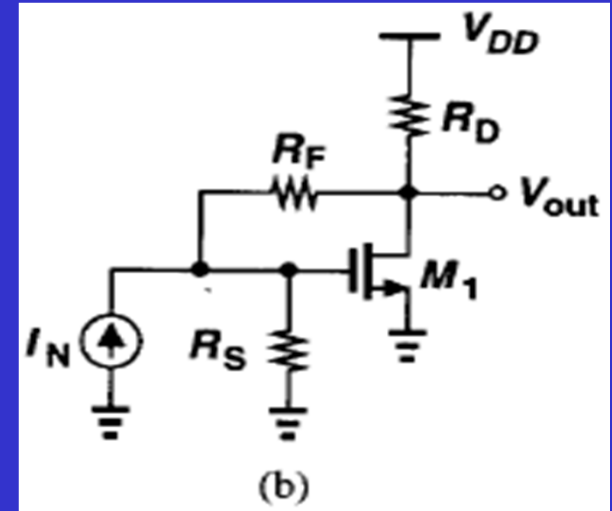
$$= -(R_S \parallel R_F) g_m (R_F \parallel R_D)$$

$$Y_{21} = -1/R_F$$

得闭环增益:

$$\frac{V_{out}}{I_N} = \frac{-(R_S \parallel R_F) g_m (R_F \parallel R_D)}{1 + g_m (R_F \parallel R_D) R_S / (R_S + R_F)} = \frac{V_{out}}{V_{in} / R_S}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_S} \cdot \frac{-(R_S \parallel R_F) g_m (R_F \parallel R_D)}{1 + g_m (R_F \parallel R_D) R_S / (R_S + R_F)}$$



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

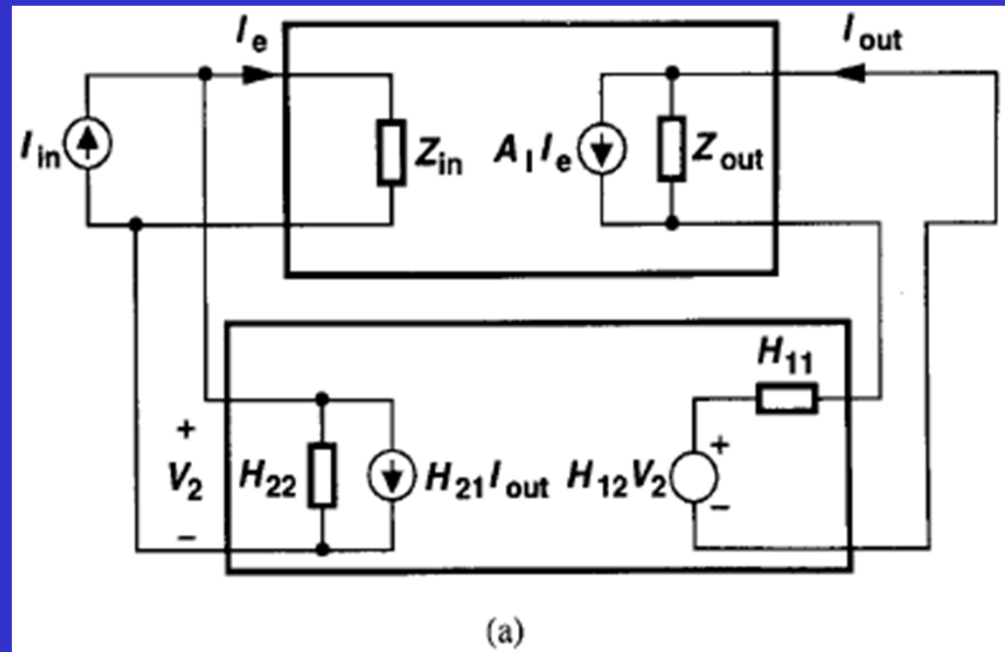
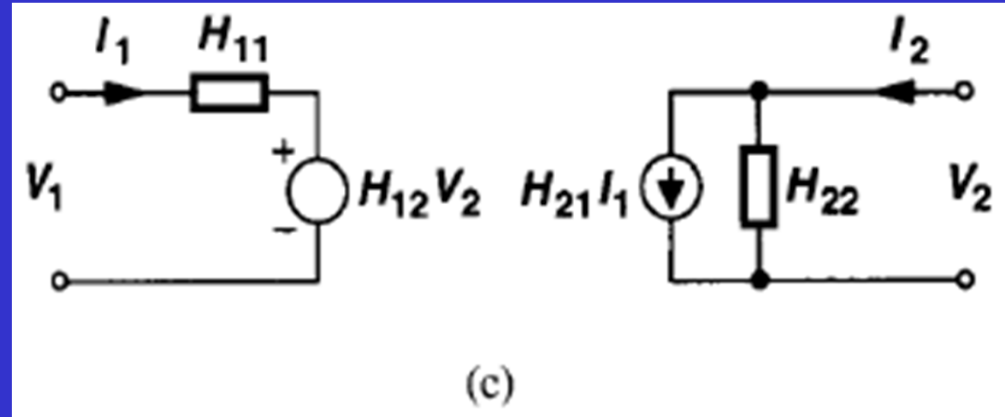
# 电流-电流反馈中的负载

## □S1

❖ 反馈网络用H模型替代

## □S2

❖ 计算闭环增益表达式

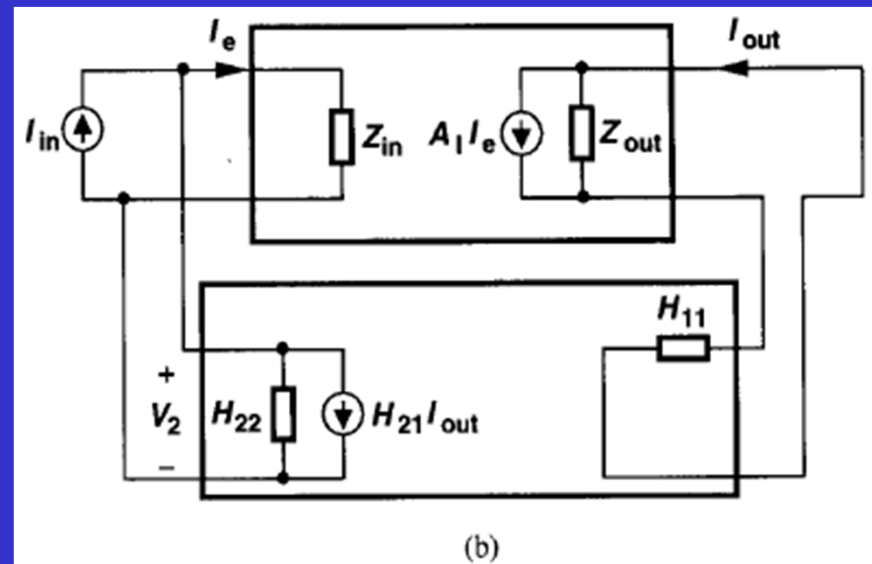
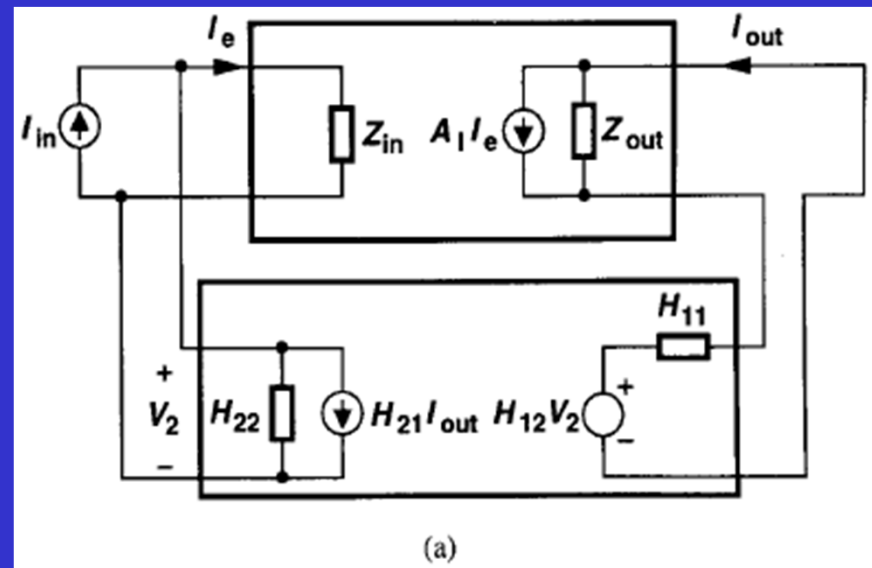




## S2—计算闭环增益表达式

### □忽略 $H_{12}$ 的影响

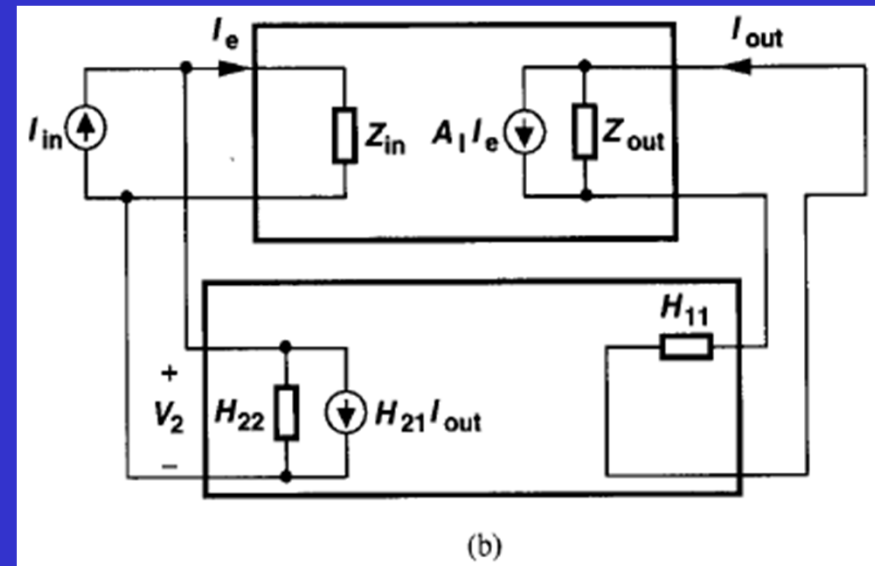
- ❖主放大器增益 $A_I$ 远大于反馈网络的反向增益



## S2—计算闭环增益表达式

$$(I_{in} - H_{21}I_{out}) \frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} A_I \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}} = I_{out}$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} A_I \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}}}{1 + \frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} A_I \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}} H_{21}}$$



**S3:**  
定义包含负载的开环增益为

$$A_{I,open} = \frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}} A_I$$

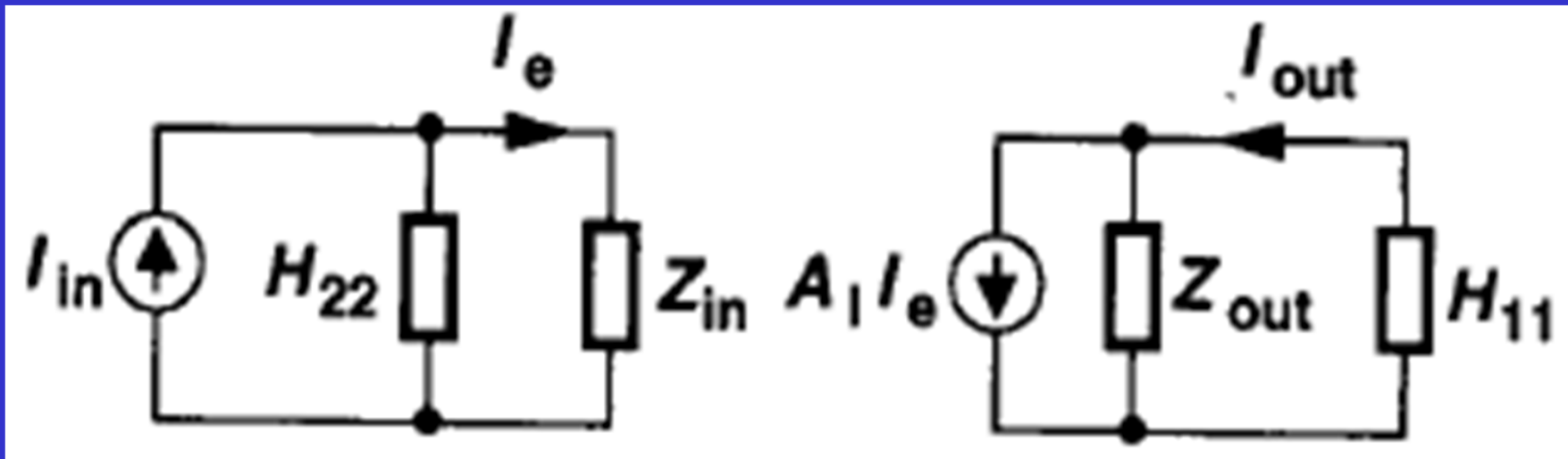
理想反馈网络时：  
**H11=0, H22=0**

## S3—包含负载的开环增益的表达式

包含负载的开环增益为：

$$A_{I,open} = \frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}} A_I$$

反馈网络的输入和输出阻抗分别减小了输出电流和主放大器的输入端所看到的电流



# S4—包含负载的开环增益的推导方法

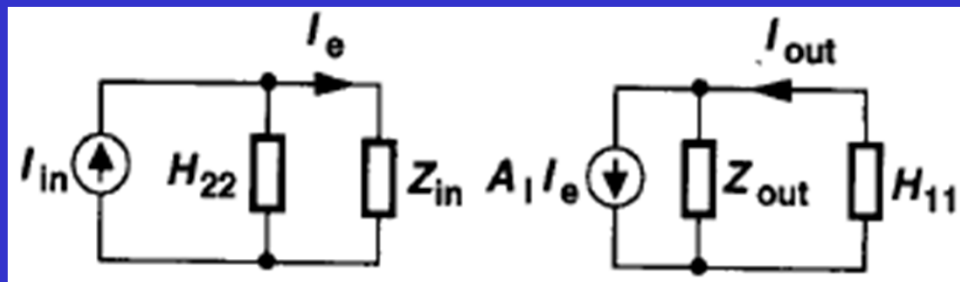
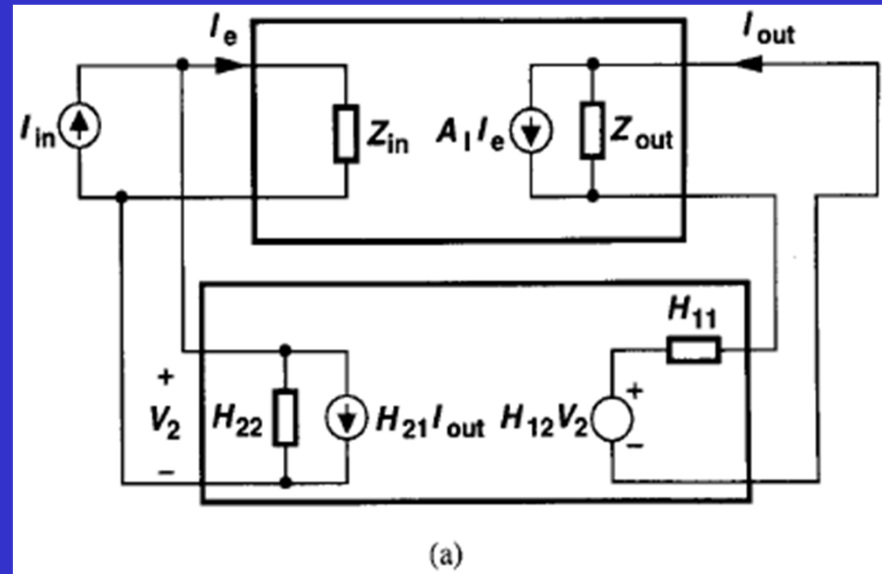
令反馈网络的输入端开路

则： $I_{out}=0$

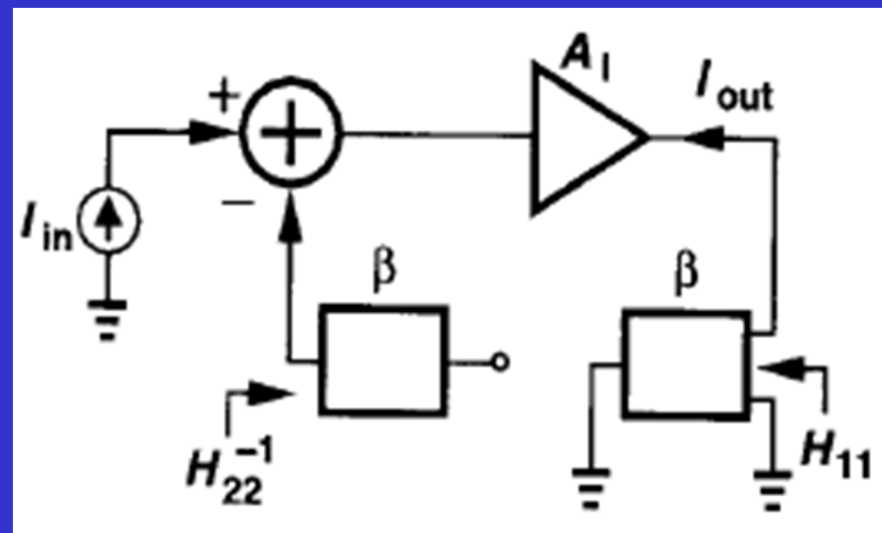
再令反馈网络的输出端短路

则： $V_2=0$

即得到了包含负载的开环电路，推导其 $I_{out}/I_{in}$ ，就得到包含负载的开环增益

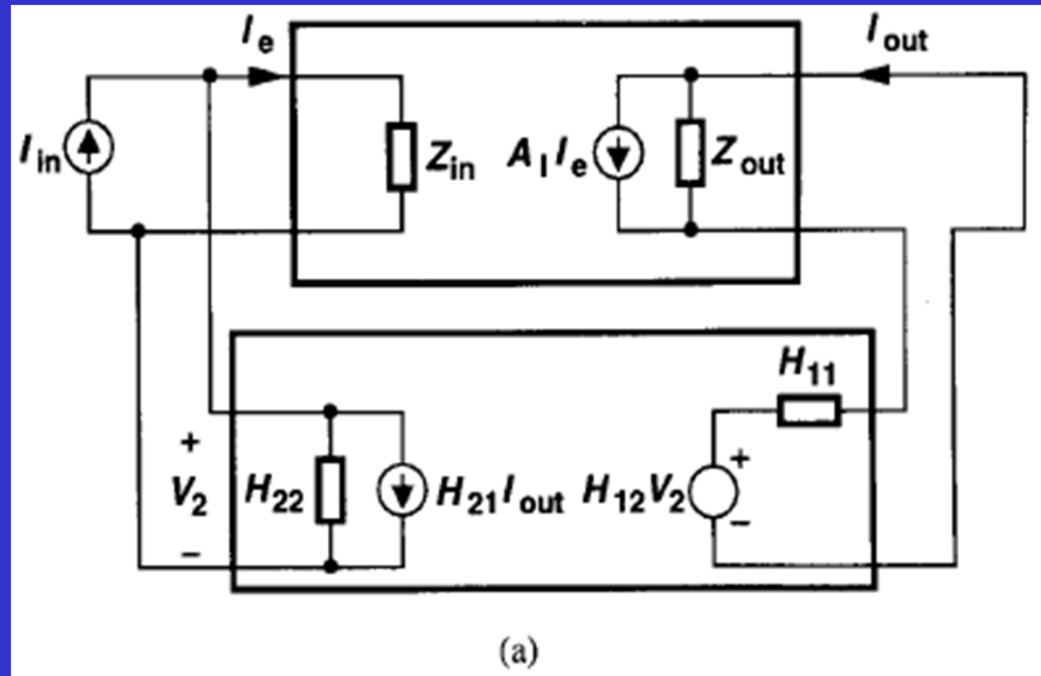


$$A_{I,open} = \frac{H_{22}^{-1}}{H_{22}^{-1} + Z_{in}} \frac{Z_{out}}{H_{11} + Z_{out}} A_I$$



## S5—推导反馈网络的正向增益 $H_{21}$ 的方法

- $H_{21}$  等于  $V_2=0$  时的  $I_2/I_1$
- 得到  $H_{21}$  和开环增益后，即可得到环路增益、闭环增益
- 闭环输入和输出阻抗
  - ❖ 等于开环输入和输出阻抗乘以或除以  $(1 + H_{21}A_{I,open})$



## 例8.10 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

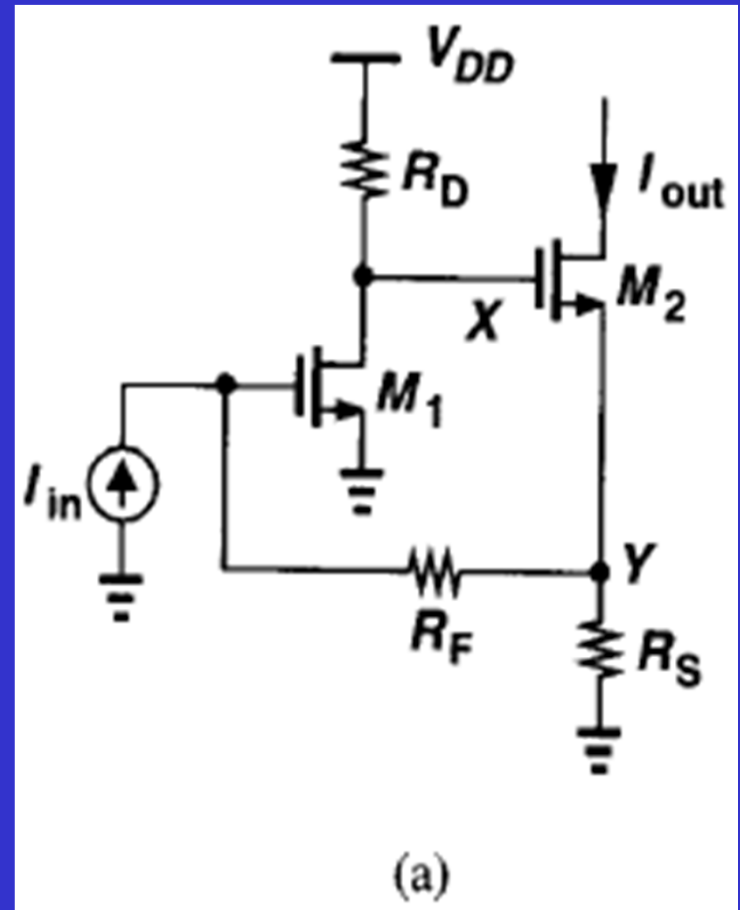
是电流—电流负反馈？

反馈网络是哪部分？

由 $R_S$ 和 $R_F$ 组成

构建开环电路，推导开环增益

忽略沟长调制效应和体效应，以简化计算



## 例8.10 求增益

□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

构建开环电路，推导开环增益

$$A_{I,open} = -(R_F + R_S)g_{m1}R_D \frac{1}{R_S \parallel R_F + 1/g_{m2}}$$

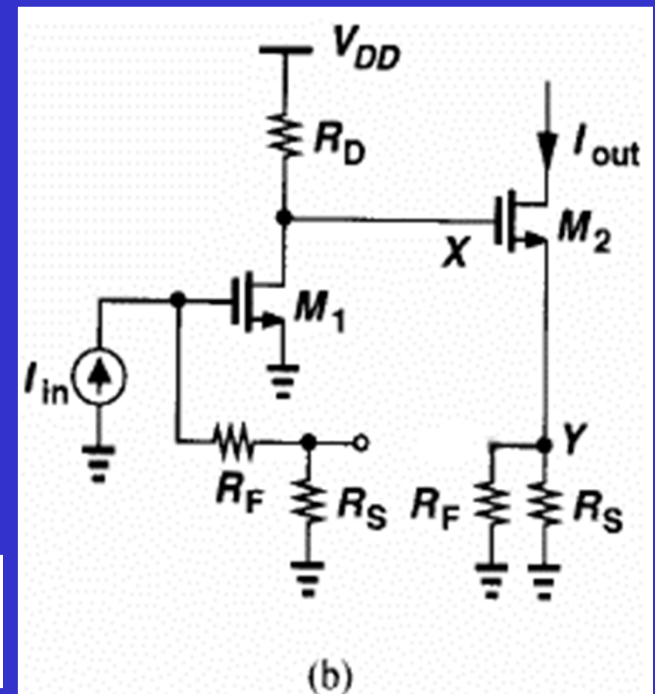
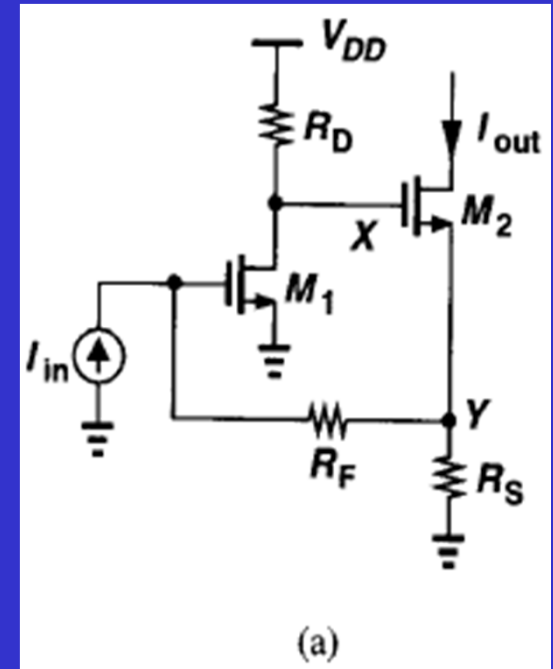
求反馈网络的正向增益 $H_{21}$

$H_{21}$  等于 $V_2=0$ 时的 $I_2/I_1$

$$H_{21} = -R_S / (R_S + R_F)$$

得闭环增益：

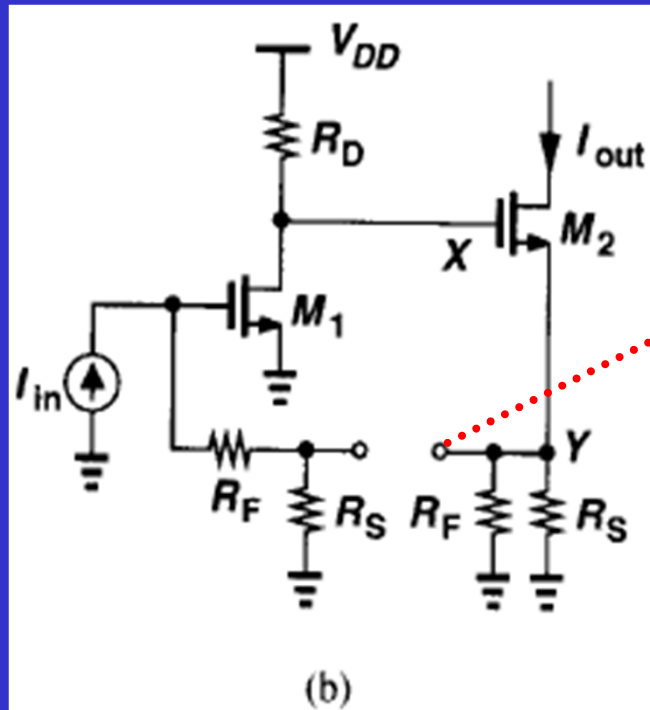
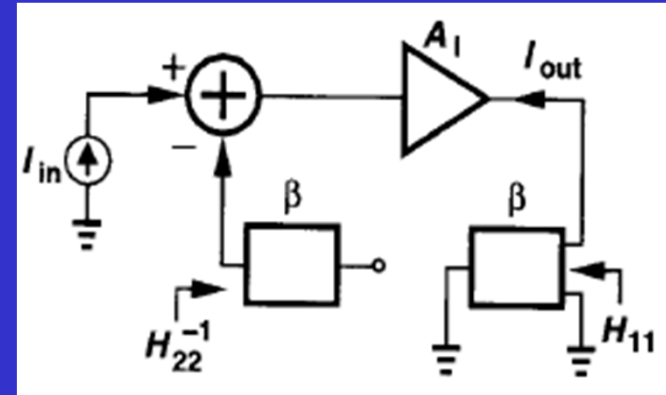
$$A_{I,open} / (1 + H_{21}A_{I,open})$$



# 例8.10 求增益

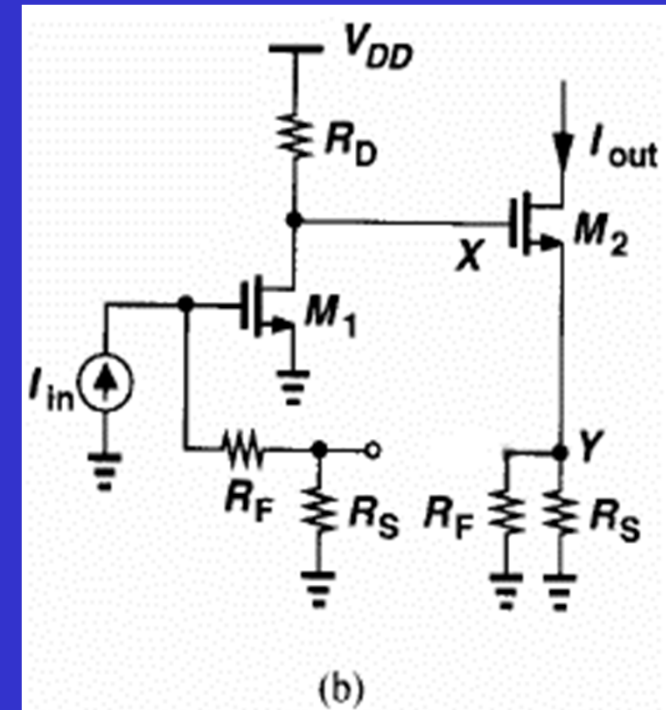
□ 计算图中所示电路的开环和闭环增益

书上P232, 图8.53 (b) 有个错误



此处不是开路

改为





# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

## □ 反馈对噪声的影响

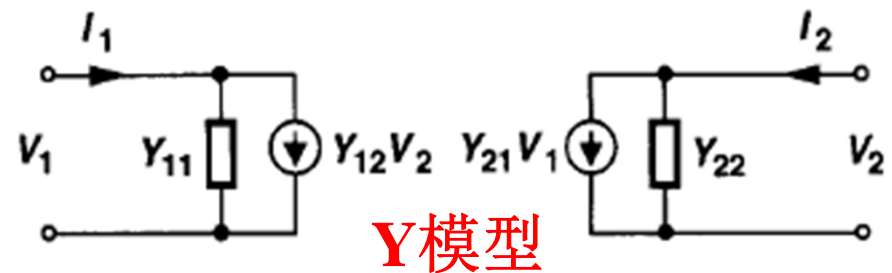
# 反馈网络模型的选择小结

- 检测电压：电流源并联电导；检测电流：电压源串联电阻
- 输出电压：电压源串联电阻；输出电流：电流源并联电导



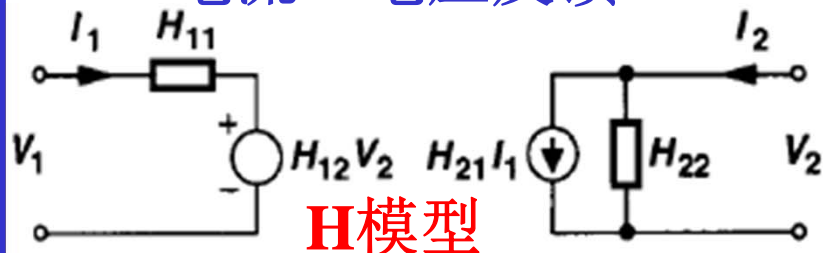
**Z模型**

电流—电压反馈



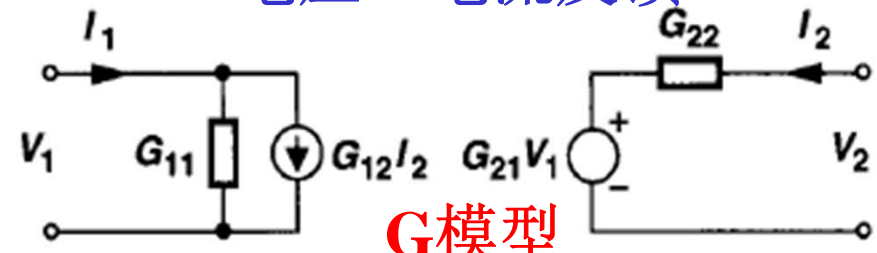
**Y模型**

电压—电流反馈



**H模型**

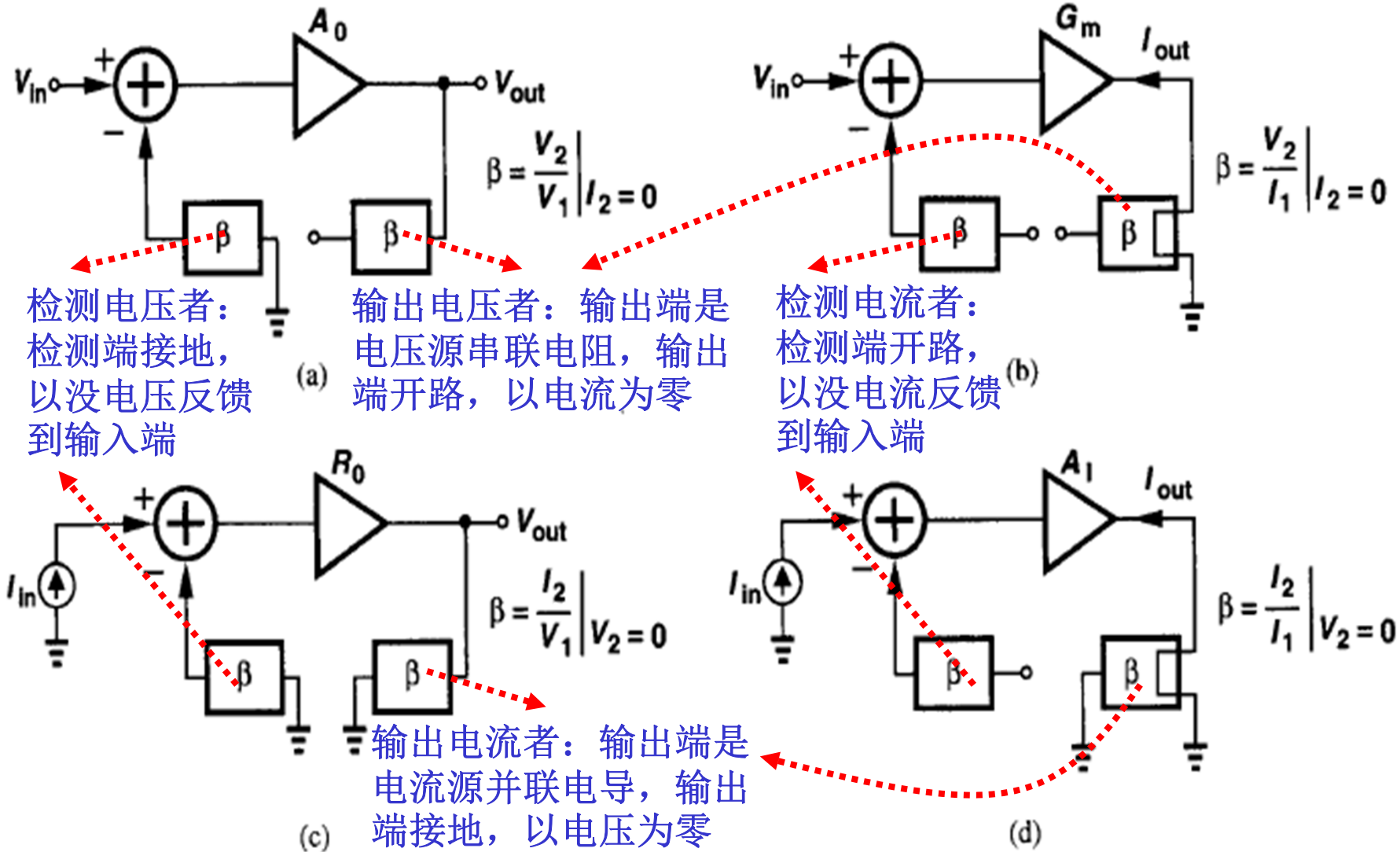
电流—电流反馈



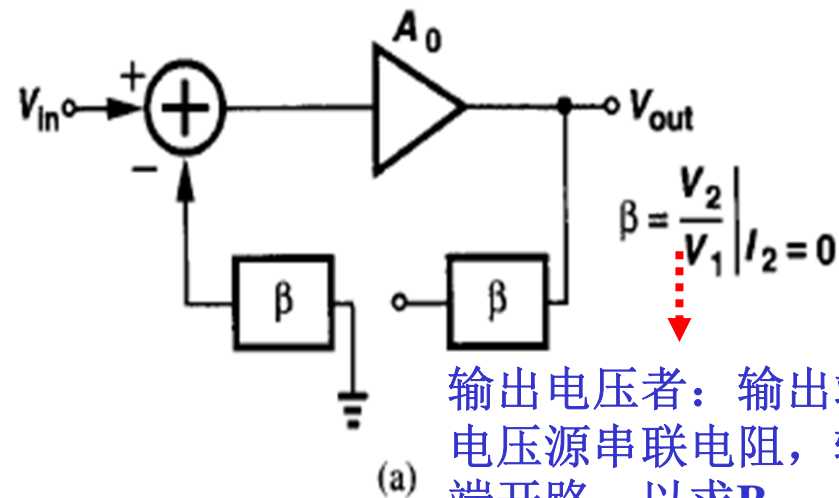
**G模型**

电压—电压反馈

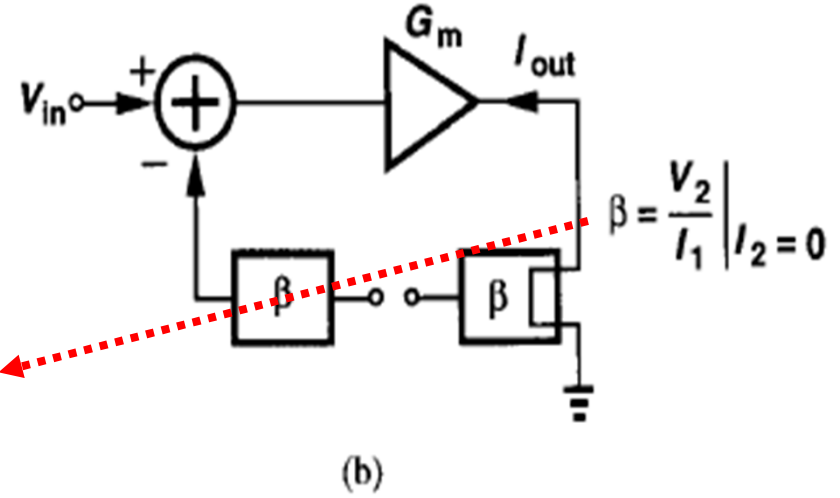
# 开环增益的计算小结



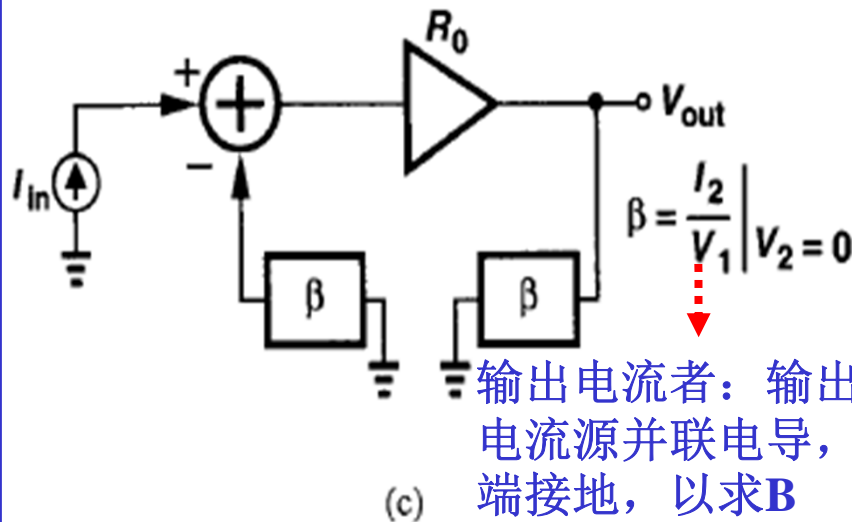
# 反馈网络的正向增益的计算小结



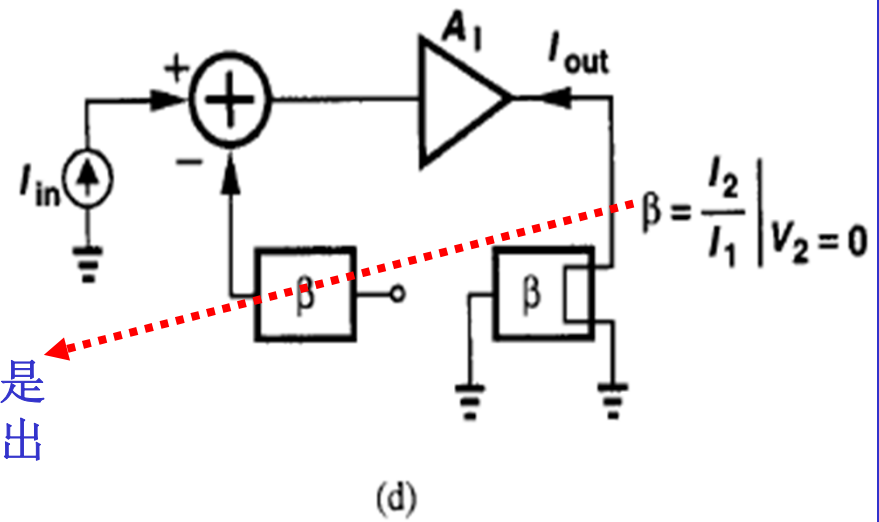
(a) 输出电压者：输出端是电压源串联电阻，输出端开路，以求B



(b)



(c) 输出电流者：输出端是电流源并联电导，输出端接地，以求B

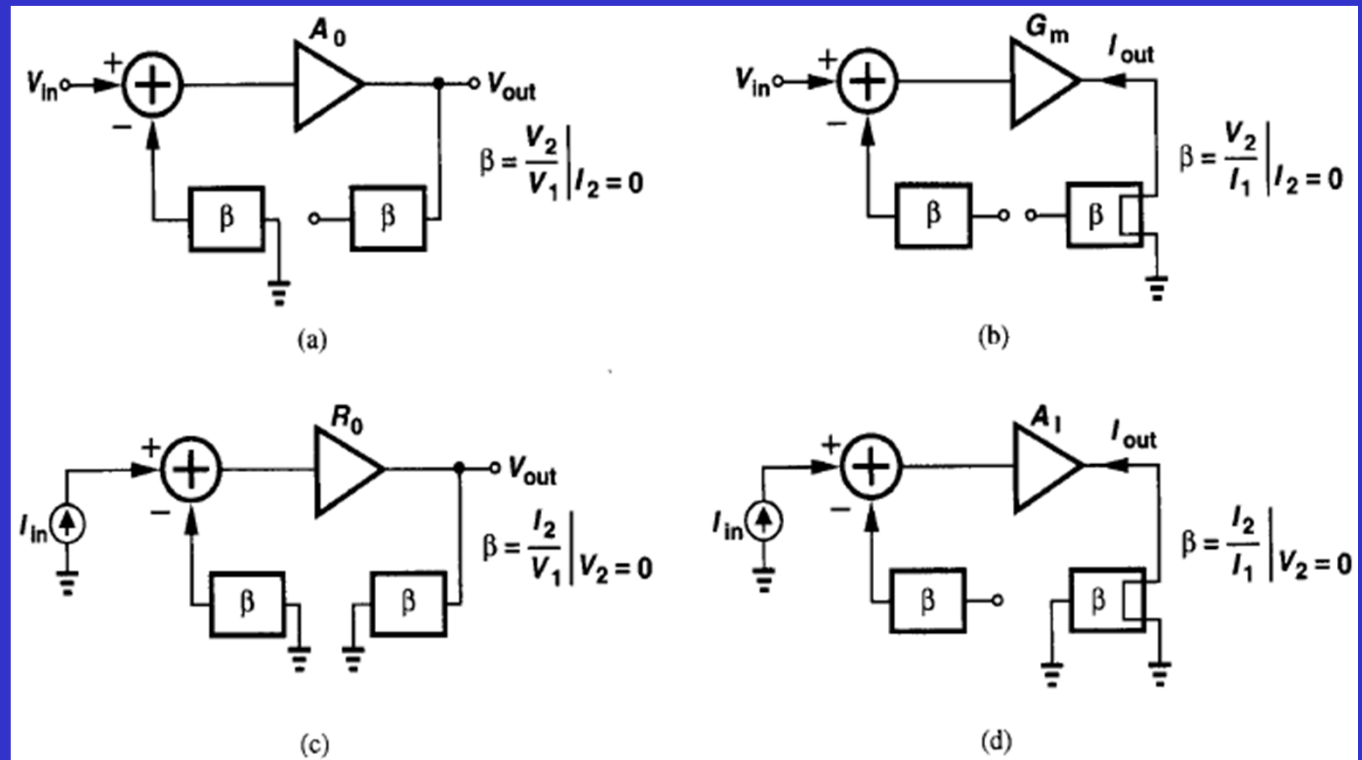


(d)

# 闭环增益的计算小结

## □ 计算步骤

- ❖ 断开环路，计算开环增益 $A_{OL}$ 、开环输入/输出阻抗
- ❖ 确定反馈系数 $\beta$ ，得到环路增益 $\beta A_{OL}$
- ❖ 通过比例因子 $(1 + \beta A_{OL})$ ，计算闭环增益、输入/输出阻抗



# 还有其他反馈结构吗？

□ 是否负反馈

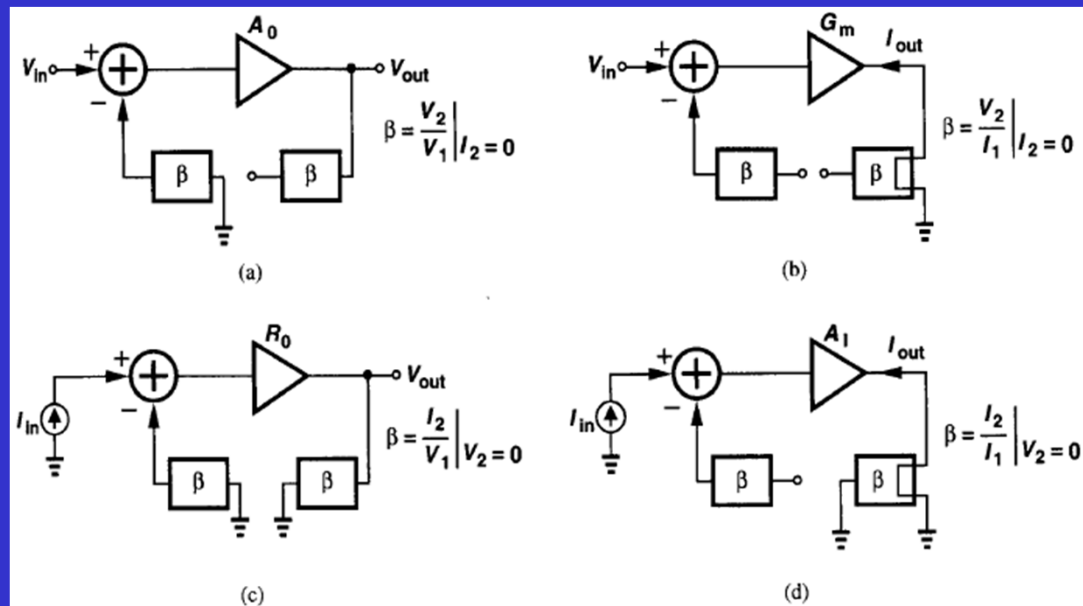
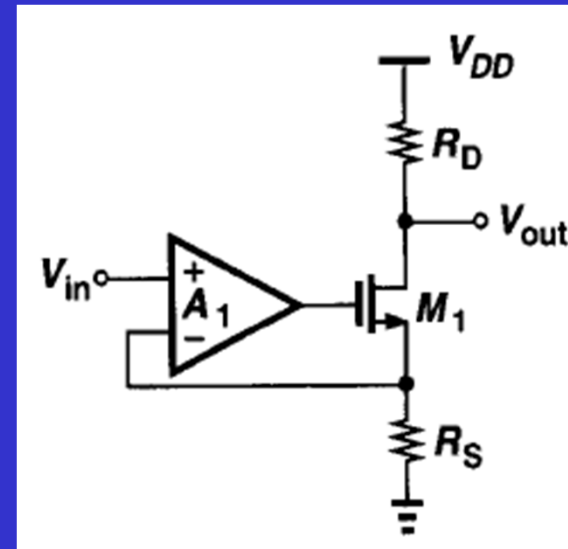
❖ 是

□ 属于前述4种反馈结构的哪一种？

❖ 都不属于。反馈网络检测的信号不直接是输出信号

□ 怎么分析？

❖ 单独分析



# 本讲 反馈

## □ 概述

- ❖ 反馈电路特性
- ❖ 放大器的种类
- ❖ 检测和返回机制

## □ 反馈结构

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 负载的影响

- ❖ 二端口网络模型
- ❖ 电压—电压反馈中的负载
- ❖ 电流—电压反馈中的负载
- ❖ 电压—电流反馈中的负载
- ❖ 电流—电流反馈中的负载
- ❖ 负载影响小结

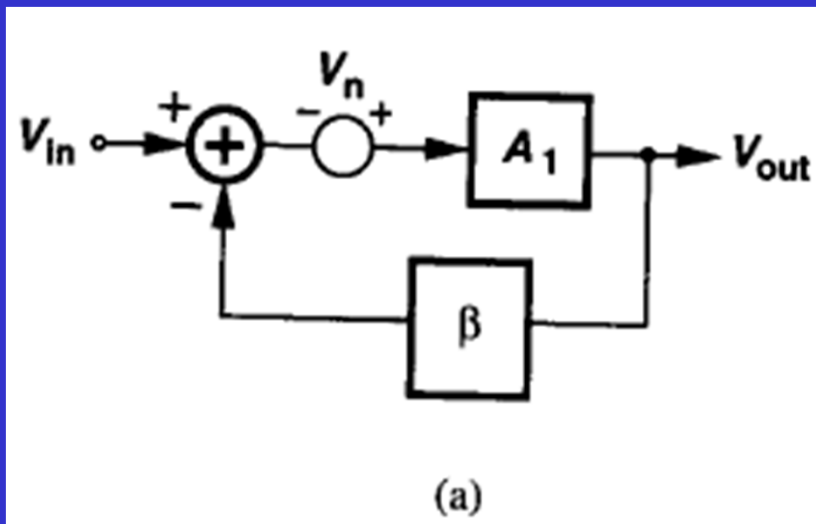
## □ 反馈对噪声的影响

# 反馈能否改善噪声特性？

## □考察一下

- ❖ 开环电压放大器 $A_1$ 用输入参考噪声电压 $V_n$ 来表示其噪声特性
- ❖ 反馈网络无噪声

$$(V_{in} - \beta V_{out} + V_n)A_1 = V_{out}$$



$$V_{out} = (V_{in} + V_n) \frac{A_1}{1 + \beta A_1}$$

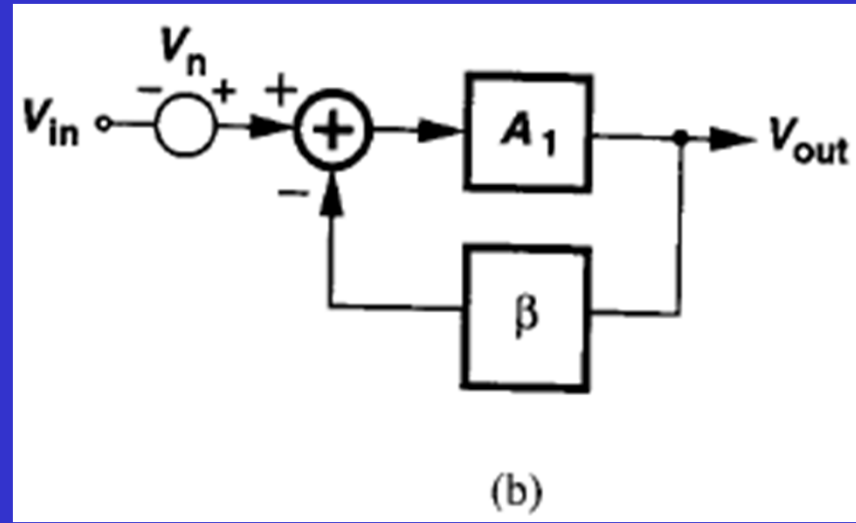
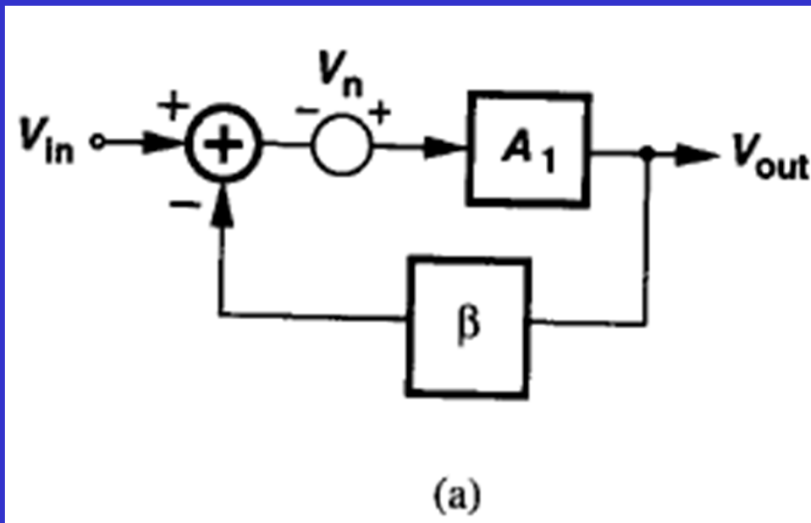


# 反馈能否改善噪声特性？

## □考察一下

- ❖ a电路可以用b电路等效
- ❖ 电路的输入参考噪声电压仍为 $V_n$ ，噪声特性无改善

$$V_{out} = (V_{in} + V_n) \frac{A_1}{1 + \beta A_1}$$



# 反馈对噪声特性的影响

## □该结论能推广到其他三种反馈结构

❖结论：“在四种反馈类型中，若反馈网络不引入噪声，则输入参考噪声电压和电流均保持不变”

## □反馈网络不会是理想无噪声电路

❖电阻、MOS管等贡献噪声

❖整个反馈电路的噪声特性变差

## □当输出信号和反馈电路所检测的信号不是同一个量时，上述结论是否仍成立？

❖考察一下

# 输出信号和被检测信号不同时

□ 只考虑 $R_D$ 的噪声

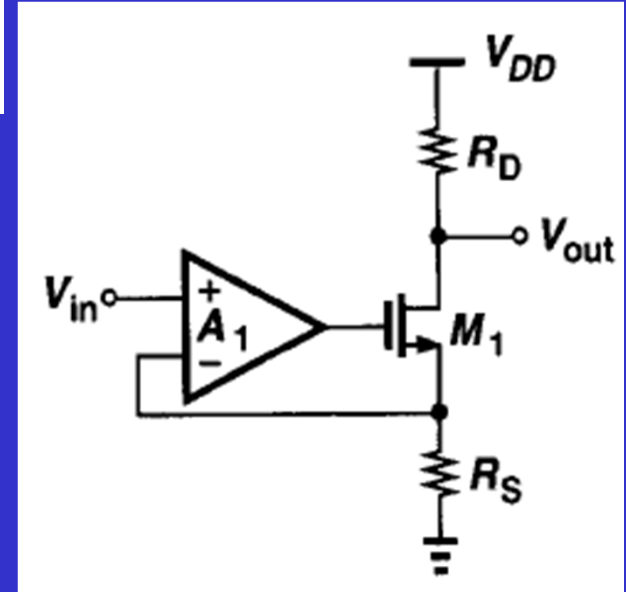
$$\overline{V_{n,RD}^2} = 4kTR_D$$

□ 闭环时输入参考噪声电压

❖ 闭环增益

$$g_{m1} [A_1 (V_{in} - i_{out} R_S) - i_{out} R_S] = i_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -R_D \times \frac{i_{out}}{V_{in}} = \frac{-A_1 g_{m1} R_D}{1 + [1 + A_1] g_{m1} R_S}$$

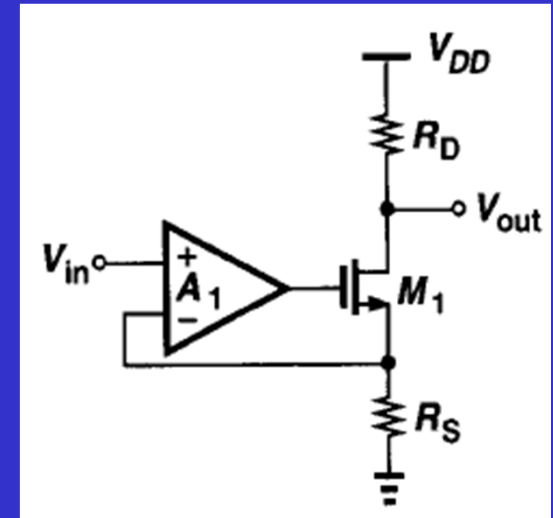


$$|V_{n,in,closed}| = \frac{|V_{n,RD}|}{A_1 R_D} \left[ \frac{1}{g_m} + (1 + A_1) R_S \right]$$

# 输出信号和被检测信号不同时

## □ 闭环时输入参考噪声电压

$$|V_{n,in,closed}| = \frac{|V_{n,RD}|}{A_1 R_D} \left[ \frac{1}{g_m} + (1 + A_1) R_S \right]$$



## □ 开环时输入参考噪声电压

$$g_{m1} [V_{in} A_1 - i_{out} R_S] = i_{out}, \quad \frac{i_{out}}{V_{in}} = \frac{g_{m1} A_1}{1 + g_{m1} R_S} = \frac{A_1}{\frac{1}{g_{m1}} + R_S},$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -R_D \times \frac{i_{out}}{V_{in}} = \frac{-A_1 R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + R_S}, \quad |V_{n,in,open}| = \frac{|V_{n,RD}|}{A_1 R_D} \left[ \frac{1}{g_{m1}} + R_S \right]$$

结论：开环和闭环情况下并不相同

# 总结

## □ 反馈技术在电路设计中有重要应用

- ❖ 正反馈构成振荡器，负反馈提高信号处理精度等

## □ 负反馈电路有什么特性？

- ❖ 增益灵敏度、终端阻抗、带宽、非线性

## □ 负反馈系统的构成？

- ❖ 前馈网络、反馈网络、反馈误差的产生、输出信号的检测

## □ 放大器的种类？

- ❖ 四类

## □ 负反馈系统中信号检测方法？

- ❖ 检测电压——并联反馈
- ❖ 检测电流——串联反馈

# 总结

## □ 负反馈系统信号相加方法？

- ❖ 电压信号——串联相加
- ❖ 电流信号——并联相加

## □ 常见四类反馈结构？

- ❖ 电压—电压反馈
- ❖ 电流—电压反馈
- ❖ 电压—电流反馈
- ❖ 电流—电流反馈

## □ 先假定反馈网络是理想的（无负载效应），对每种反馈结构

- ❖ 阐明了其结构特点
- ❖ 分析了其闭环增益、输入阻抗、输出阻抗，并举了若干实例

# 总结

## □ 当反馈网络不理想的（有负载效应）

### ❖ 讨论了每种反馈结构适合的反馈网络模型

- 电压—电压反馈——**G**模型
- 电压—电流反馈——**Y**模型
- 电流—电压反馈——**Z**模型
- 电流—电流反馈——**H**模型

### ❖ 对每种反馈结构

- **S1**——反馈网络用适合的模型替代
- **S2**——计算闭环增益表达式
- **S3**——定义包含负载的开环增益的表达式
- **S4**——包含负载的开环增益的推导方法
- **S5**——反馈网络的正向增益推导方法
- 通过比例因子  $(1 + \beta A_{OL})$ ，可计算输入/输出阻抗

# 总结

## □ 环路增益的两种计算方法

- ❖ 我们采用方法二：确定开环增益 $A_{OL}$ 和反馈系数 $\beta$ 后，得到环路增益 $\beta A_{OL}$

## □ 反馈对噪声的影响

- ❖ 噪声特性无改善



# 重点掌握

## □负反馈电路的特性

- ❖增益灵敏度、终端阻抗、带宽、非线性的变化规律

## □反馈网络理想时

- ❖掌握四类反馈结构的开环增益、闭环增益、输入/输出阻抗的推导方法

## □反馈网络有负载效应时

- ❖掌握四类反馈结构的对应的反馈网络模型、开环增益、闭环增益、输入/输出阻抗的推导方法

# 作业

## □8.6

- ❖ 计算电压—电压反馈的闭环增益

## □8.19

- ❖ 计算电压—电压反馈考虑反馈网络引入的负载影响后的闭环电压增益和输出电阻

## □8.20

- ❖ 计算电压—电流反馈考虑反馈网络引入的负载影响后的闭环电压增益、输出阻抗、对电源电压敏感度等

- ❖ 加个条件“ $\lambda \neq 0$ ”

## □交作业时间

- ❖ 听助教通知

# 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