



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

国家示范性微电子学院

School of Microelectronics

# 模拟集成电路设计课程

## 第8章 反馈

程 林，韩 旭

eecheng@ustc.edu.cn

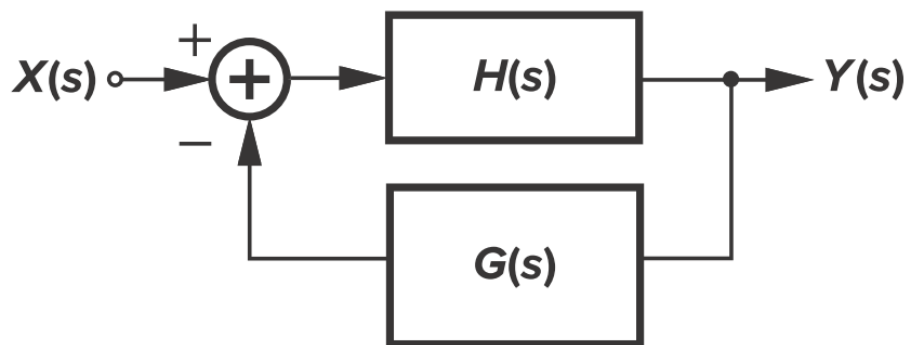


# 本章内容

- 8.1 概述
- 8.2 反馈结构
- 8.3 反馈对噪声的影响
- 8.4 反馈分析的困难
- 8.5 反馈支路的加载效应



## 8.1 概述



- 负反馈系统，其中 $H(s)$ 和 $G(s)$ 分别称为前馈网络和反馈网络
- $H(s)$ 的输入为 $X(s) - G(s)Y(s)$ , 称为反馈误差

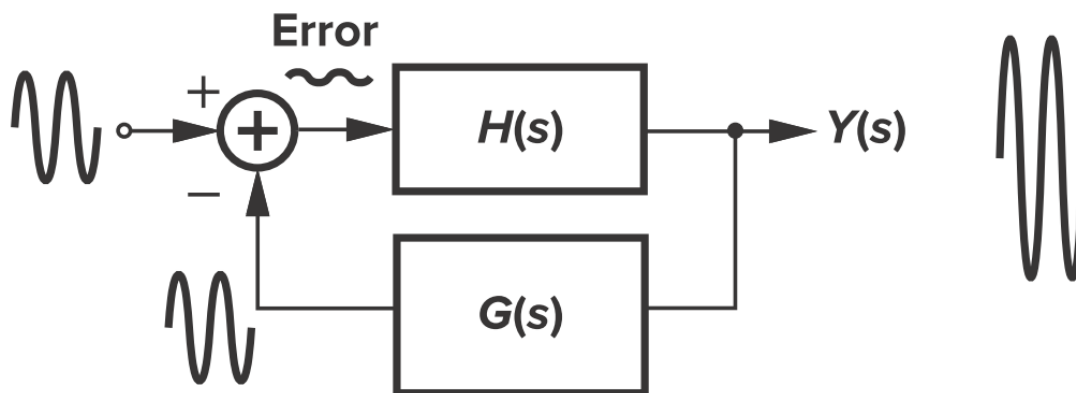
$$Y(s) = H(s)[X(s) - G(s)Y(s)]$$

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

- 称 $H(s)$ 为开环传输函数， $Y(s)/X(s)$ 为闭环传输函数



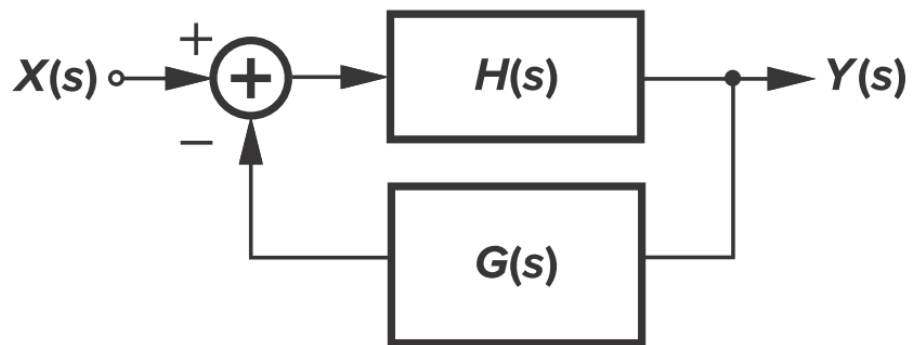
# 概述



- 一般 $H(s)$ 是一个放大器， $G(s)$ 是一个与频率无关的量
- 输出信号的一部分或全部被检测并与输入信号相比较，产生一个误差项
- 误差项很小，所以 $G(s)$ 的输出为输入精确的“复制”
- 用一个频率无关的量 $\beta$ 代替 $G(s)$ , 称为反馈系数
- 注意任何反馈电路要首先确定是正反馈还是负反馈



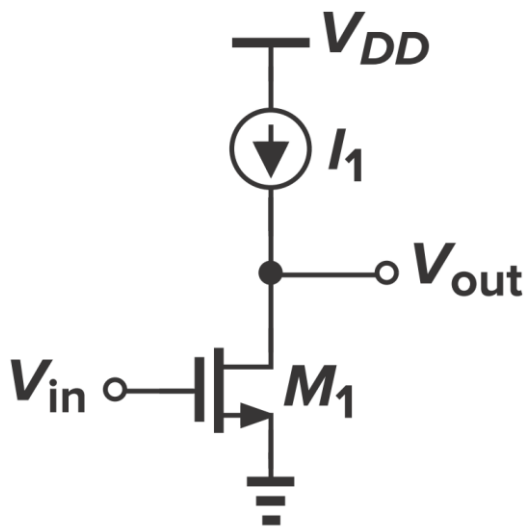
# 反馈系统的四个部分



- 前馈放大器
- 反馈网络
- 检测输出的方式
- 产生反馈误差的方式

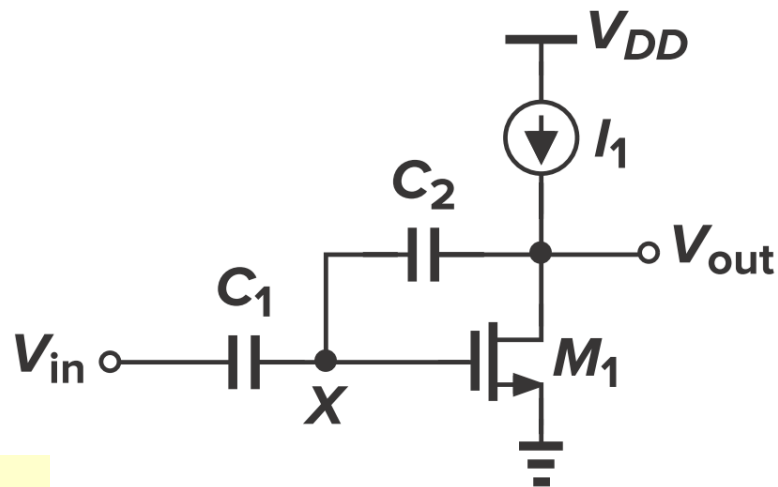


# 反馈电路的特性-增益灵敏度降低



$$A_v = -g_{m1}r_{O1}$$

随工艺和  
温度改变



$$\begin{aligned} V_{out}/V_X &= -g_{m1}r_{O1} \\ (V_{out} - V_X)C_2s &= (V_X - V_{in})C_1s \end{aligned}$$

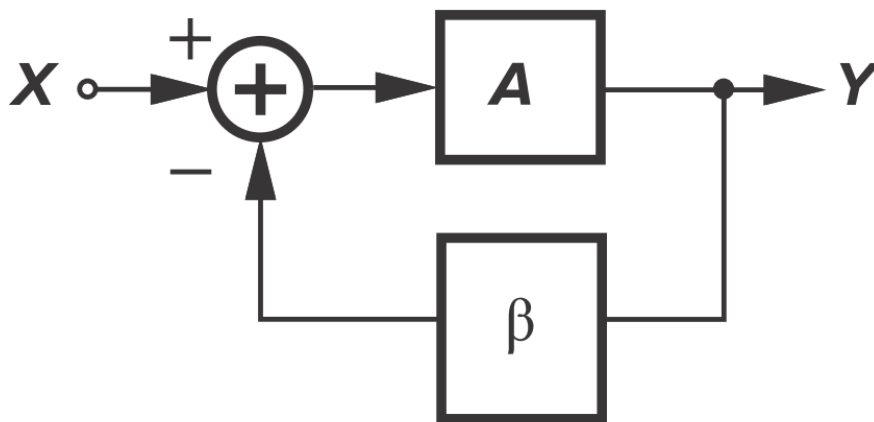
$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}\right) \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}}$$

$C_1/C_2$ 可不随工艺和  
温度改变

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1}{C_2}$$



# 增益灵敏度降低



- 闭环增益对器件参数的变化没有开环增益明显

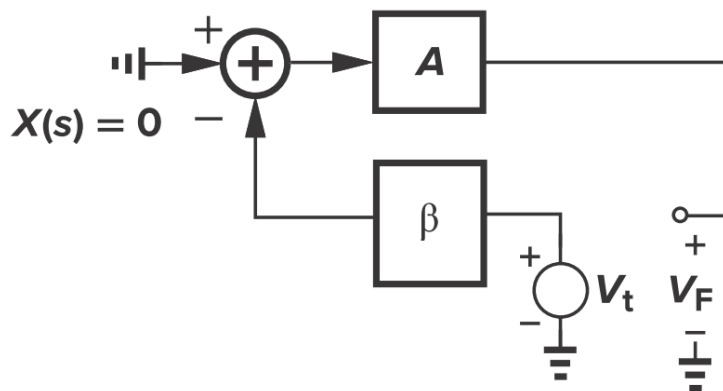
$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{1}{\beta} \left( 1 - \frac{1}{\beta A} \right) \quad \beta A \gg 1$$

- $\beta A$ 称为环路增益，其值越大，闭环增益对A的变化越不敏感。
- 增加 $\beta$ 存在闭环增益与精确度之间的折中
- 反馈网络的输出  $\beta Y = X \cdot \beta A / (1 + \beta A)$



# 环路增益的计算

- 计算步骤
  - 将主输入置为0
  - 在某点断开环路，注入测试信号
  - 使信号沿环路环绕，直到回到断点，得到一个电压值
  - 得到的传输函数的负值就是环路增益



$$V_t \beta (-1) A = V_F \quad \Rightarrow \quad V_F / V_t = -\beta A$$

- 环路增益是一个无量纲的值

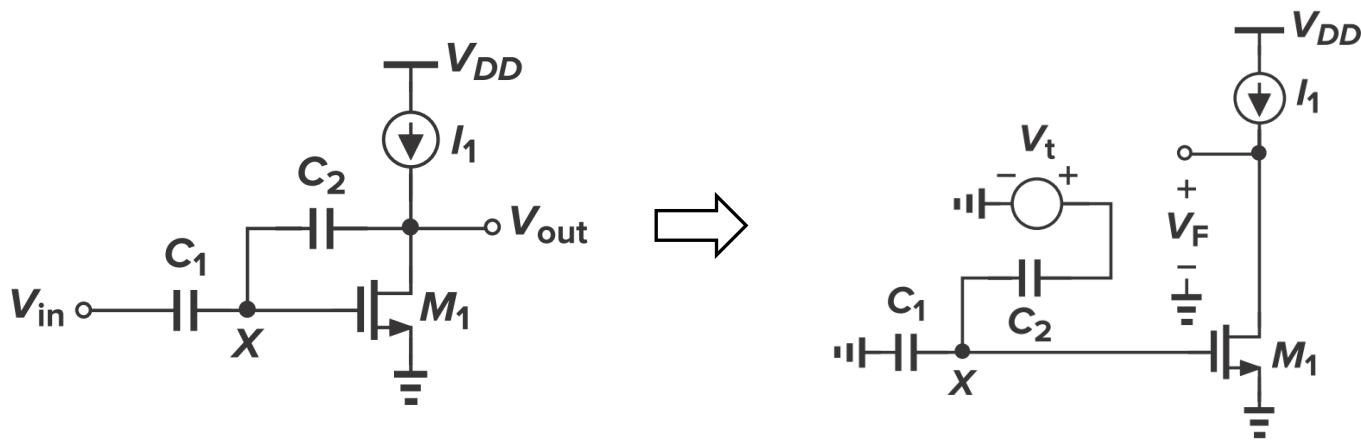




# 环路增益的计算

- 计算步骤

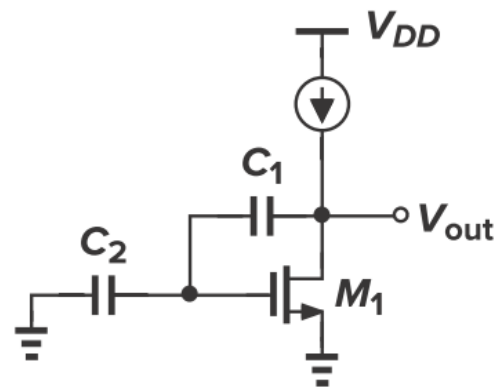
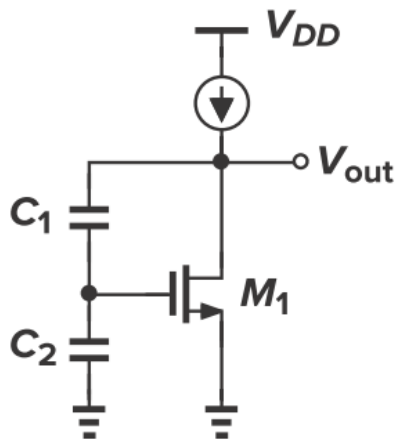
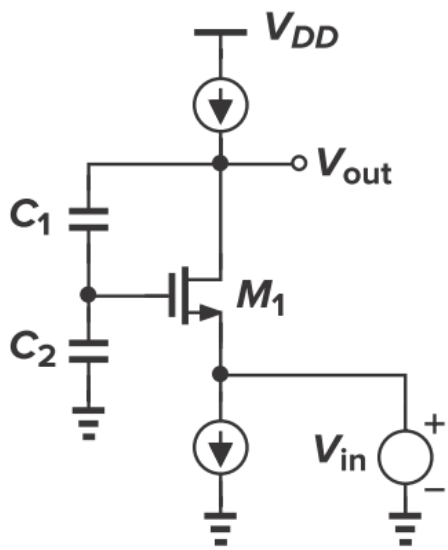
- 将主输入置为0
- 在某点断开环路，注入测试信号
- 使信号沿环路环绕，直到回到断点，得到一个电压值
- 得到的传输函数的负值就是环路增益



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



## 例8.1 计算带反馈共栅级的环路增益

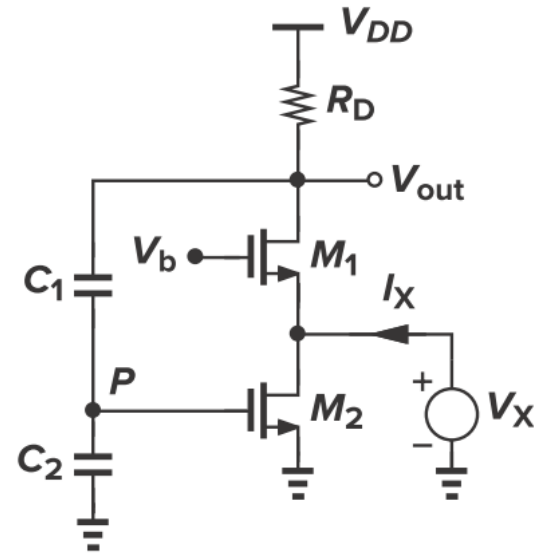
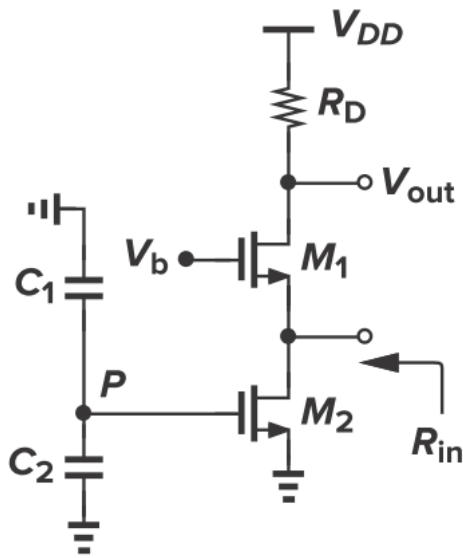
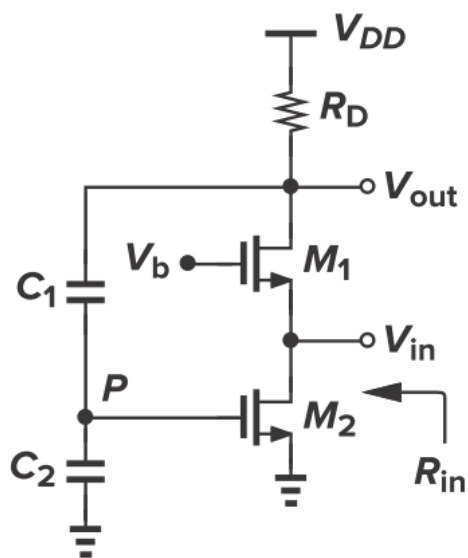


$$\frac{V_F}{V_t} = -\frac{C_2}{C_1 + C_2} g_{m1} r_{O1}$$

- 计算环路增益时，并不知道输入输出在哪里。因此，不同的电路结构可能具有相同的环路增益



# 反馈电路的特性-终端阻抗变化



- 计算有无反馈情况下低频的输入电阻  $R_{in,open} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$

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

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

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

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

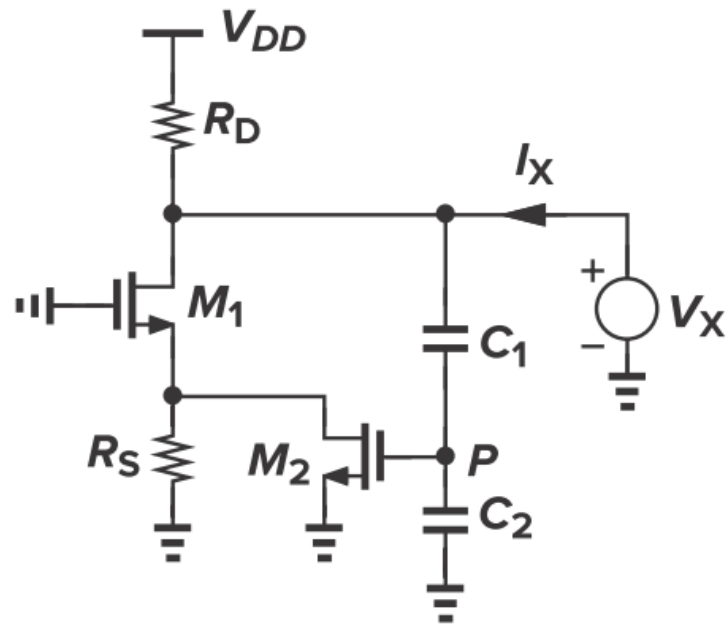
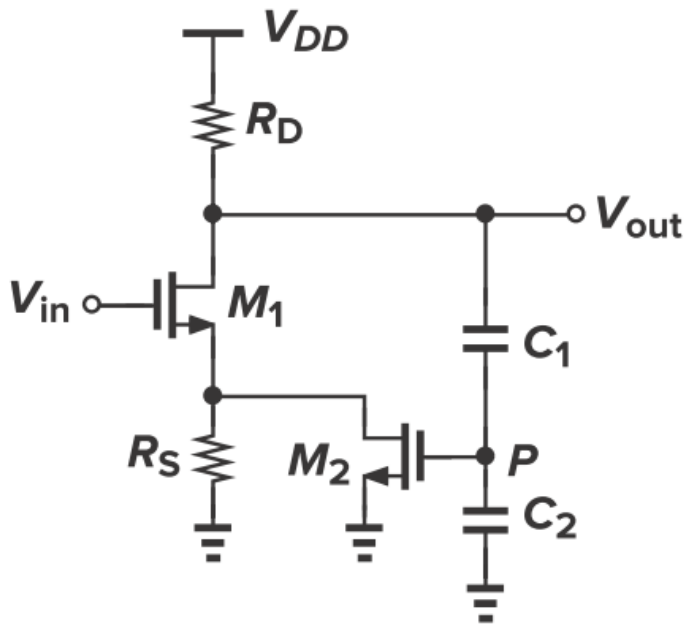
$$\Rightarrow R_{in,closed} = V_X / I_X$$

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

输入阻抗减小  
(1+环路增益)倍



# 反馈改变输出阻抗



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

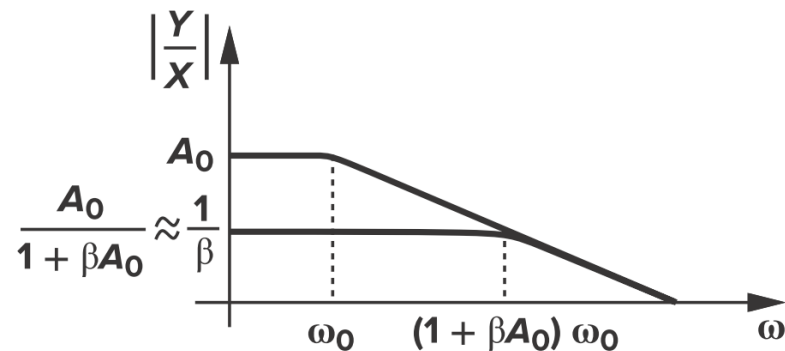
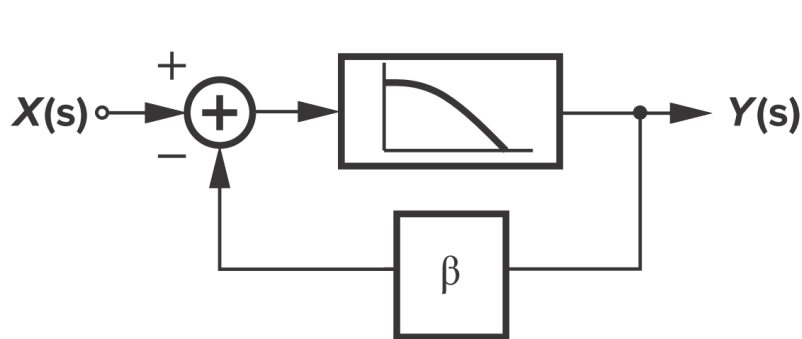
$$I_X = V_X / R_D + I_{D1}$$

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

输出阻抗减小  
(1+环路增益) 倍



# 反馈电路的特性-带宽变化



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

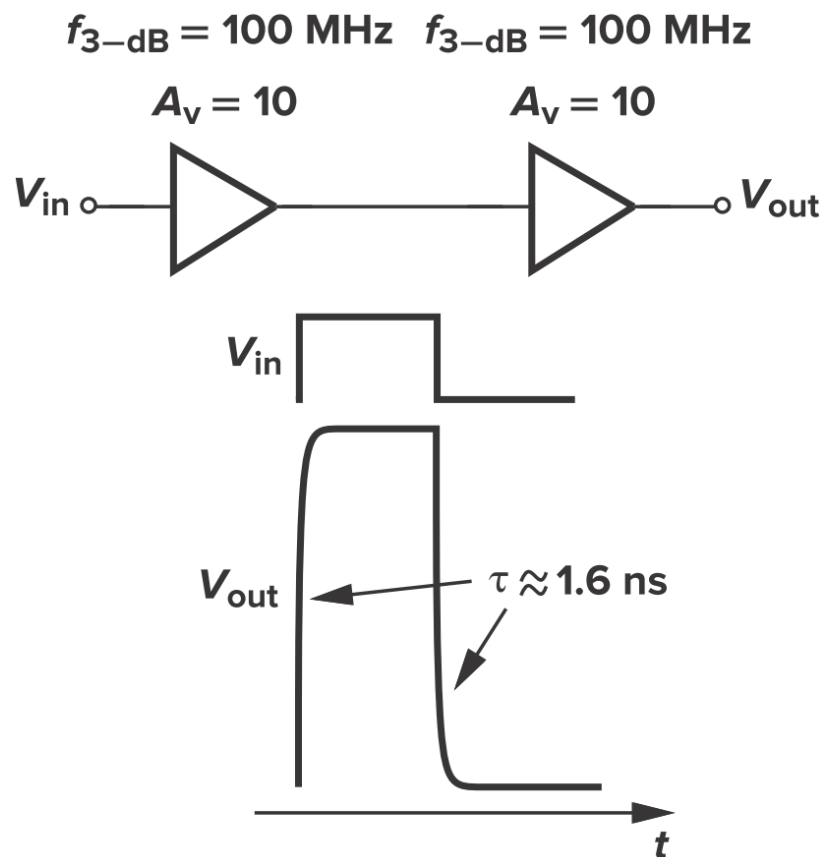
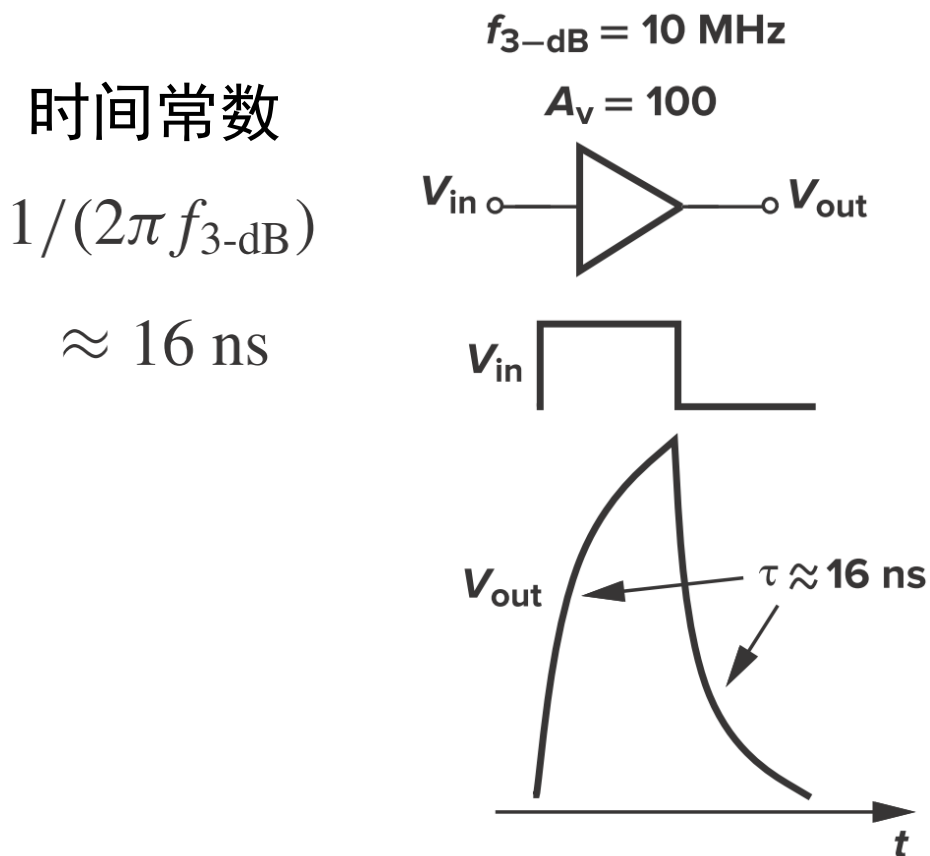
$$\frac{Y}{X}(s) = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}}{1 + \beta \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0 + \frac{s}{\omega_0}} = \frac{\frac{A_0}{1 + \beta A_0}}{1 + \frac{s}{(1 + \beta A_0)\omega_0}}$$

- 3dB带宽增加了环路增益倍，但是增益也同样比例减小
- 单极点系统，增益带宽积 $A_0\omega_0$ ，不随反馈变化



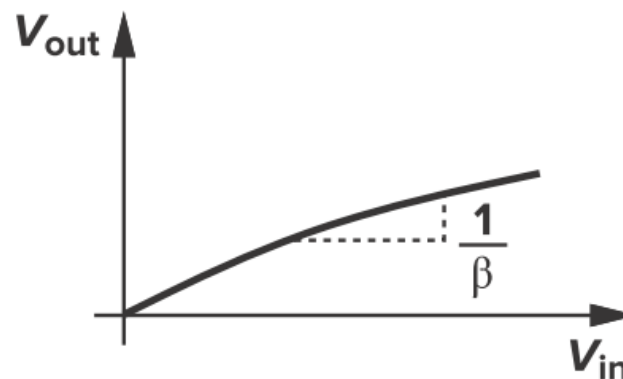
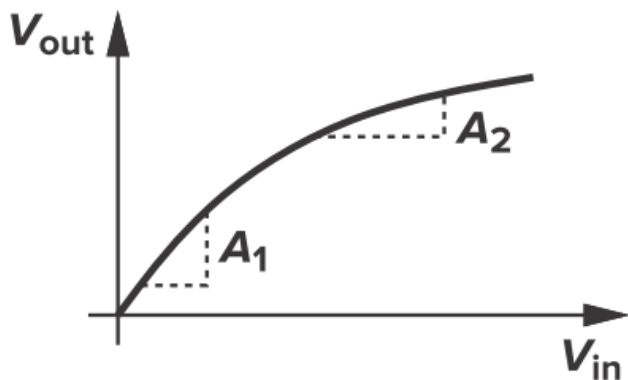
# 负反馈增加带宽

- 要把一个20MHz的方波放大为原来的100倍，现只有一种开环增益100，3dB带宽为10MHz的单极点放大器，如何设计？





# 反馈电路的特性-非线性减小



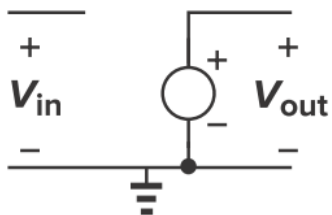
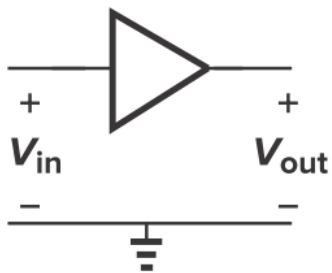
$$r_{open} = \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{\Delta A}{A_1} \quad A_2 = A_1 - \Delta A$$

$$\begin{aligned} r_{closed} &= \frac{\frac{A_2}{1 + \beta A_2}}{\frac{A_1}{1 + \beta A_1}} = \frac{1 + \frac{1}{\beta A_1}}{1 + \frac{1}{\beta A_2}} \approx 1 - \frac{\frac{1}{\beta A_2} - \frac{1}{\beta A_1}}{1 + \frac{1}{\beta A_2}} \approx 1 - \frac{A_1 - A_2}{1 + \beta A_2} \frac{1}{A_1} \\ &\approx 1 - \frac{\Delta A}{1 + \beta A_2} \frac{1}{A_1} \end{aligned}$$

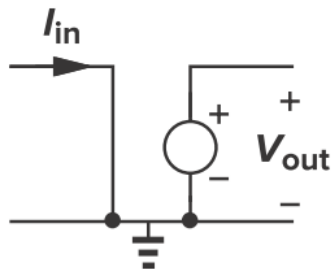
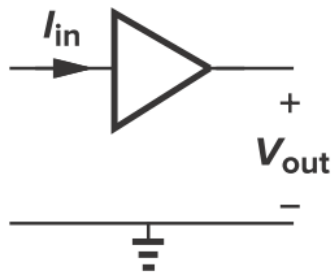


# 放大器的种类

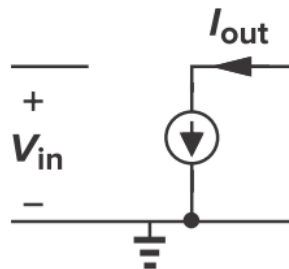
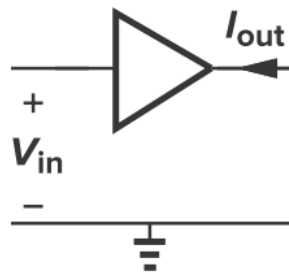
Voltage Amp.



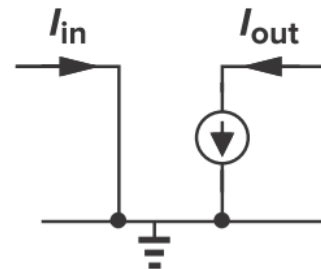
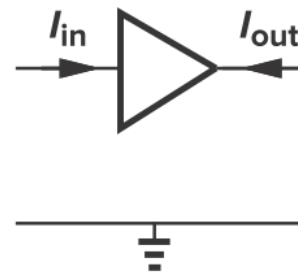
Transimpedance Amp.



Transconductance Amp.



Current Amp.

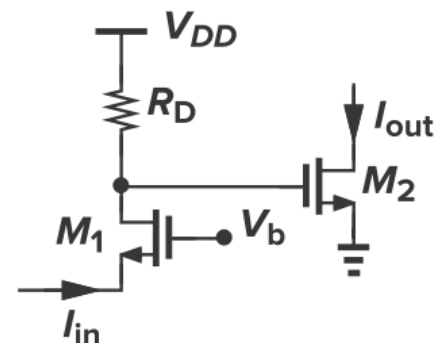
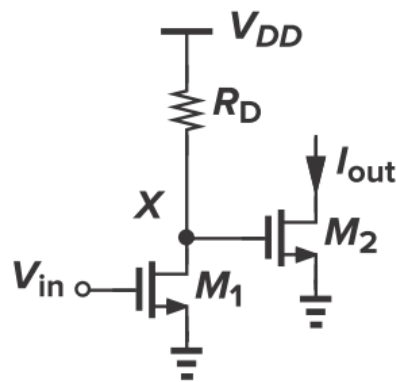
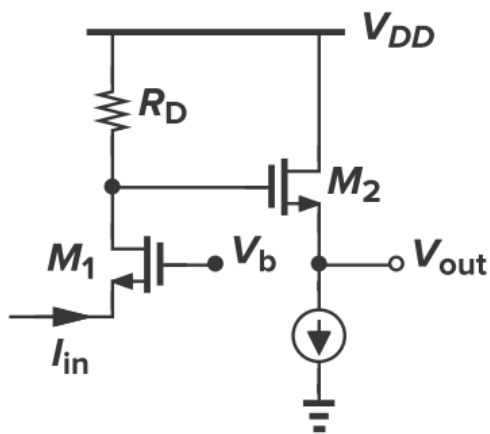
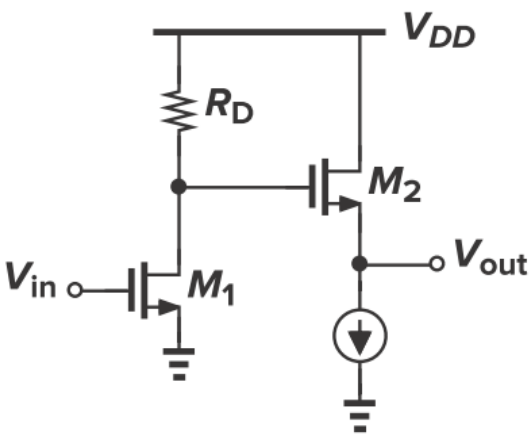
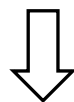
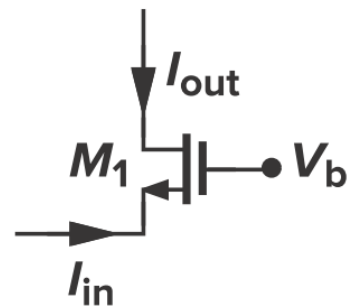
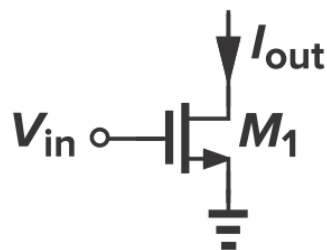
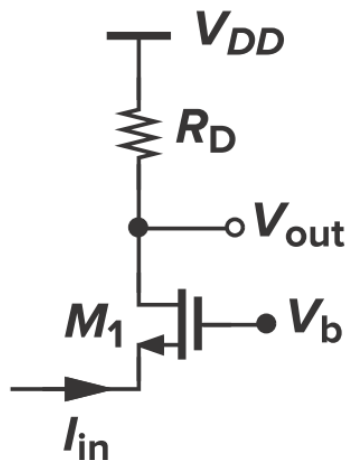
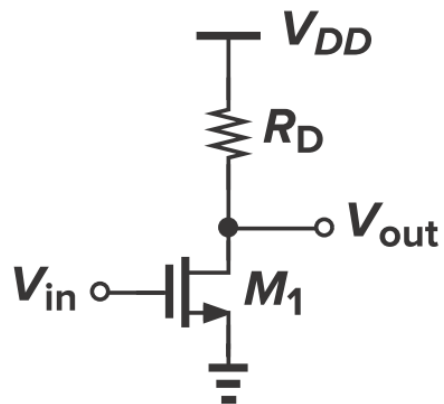


- 四种结构具有不同的输入输出阻抗特性
  - 检测电压信号  $\Rightarrow$  高输入阻抗 (电压表)
  - 检测电流信号  $\Rightarrow$  低输入阻抗 (电流表)
  - 产生电压信号  $\Rightarrow$  低输出阻抗 (电压源)
  - 产生电流信号  $\Rightarrow$  高输出阻抗 (电流源)



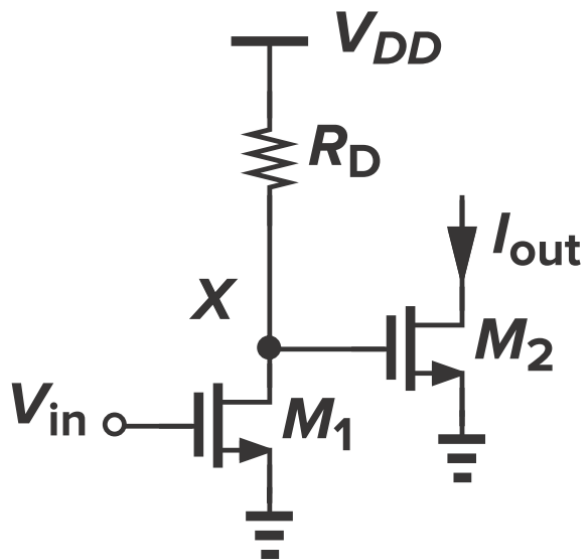


# 放大器的种类





## 例8.2 求跨导放大器的增益



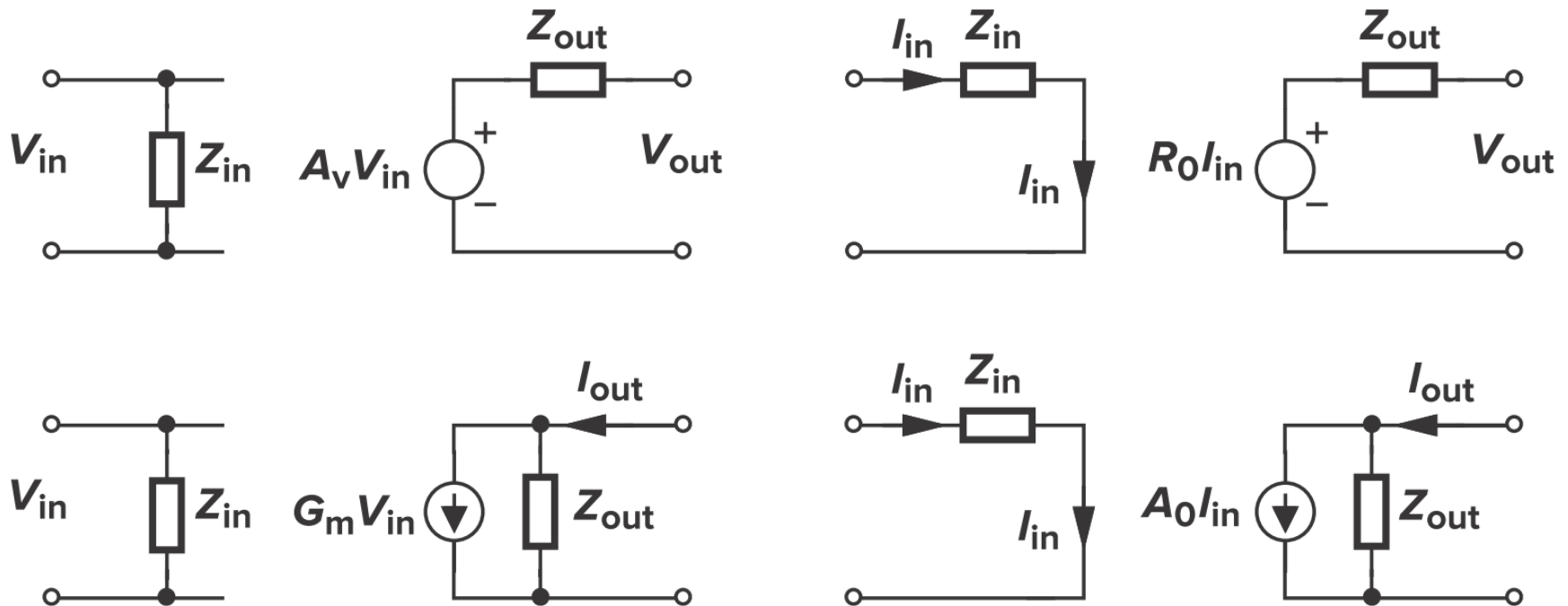
$$G_m = I_{out} / V_{in}$$

$$G_m = \frac{V_X}{V_{in}} \cdot \frac{I_{out}}{V_X}$$

$$= -g_{m1}(r_{O1} \parallel R_D) \cdot g_{m2}$$



# 非理想放大器的模型

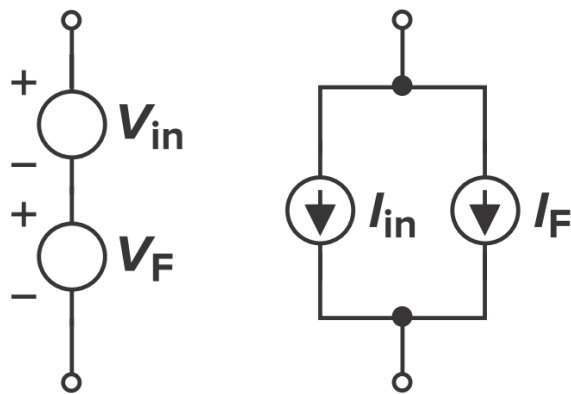
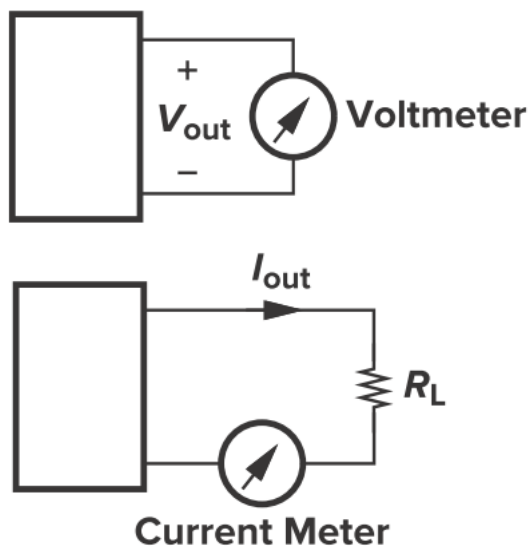


- 输入端检测电压/电流，输入电阻并联/串联；
- 输出端产生电压/电流，输出电阻串联/并联



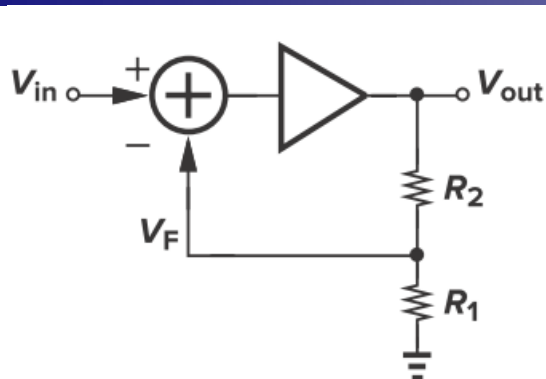
# 检测和返回机制

- 根据输入和输出信号是电压和电流值，定义四种类型的反馈
  - 电压-电压型、电压-电流型、电流-电流型、电流-电压型
  - 第一项表示在输出端检测的信号类型，第二项表示反馈到输入端的信号类型
- 我们如何检测电压电流及使其相加

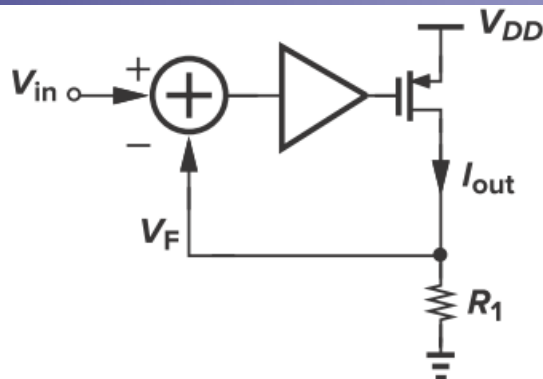




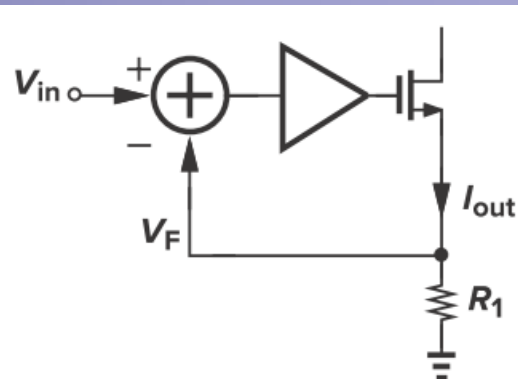
# 检测和返回机制



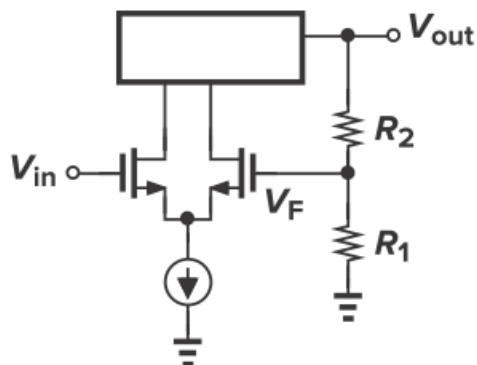
(a)



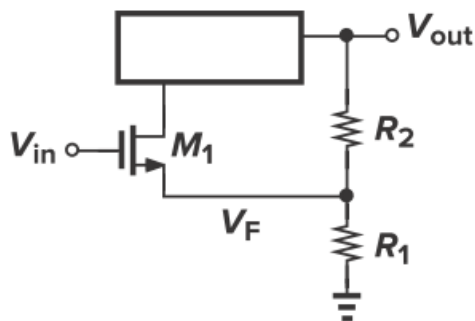
(b)



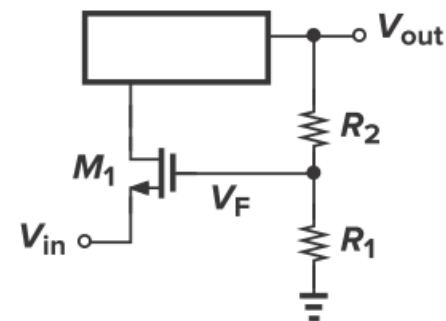
(c)



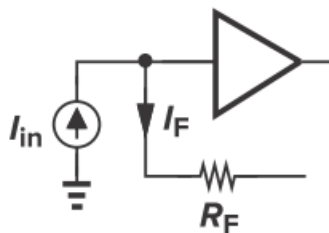
(d)



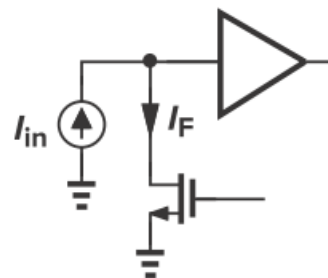
(e)



(f)



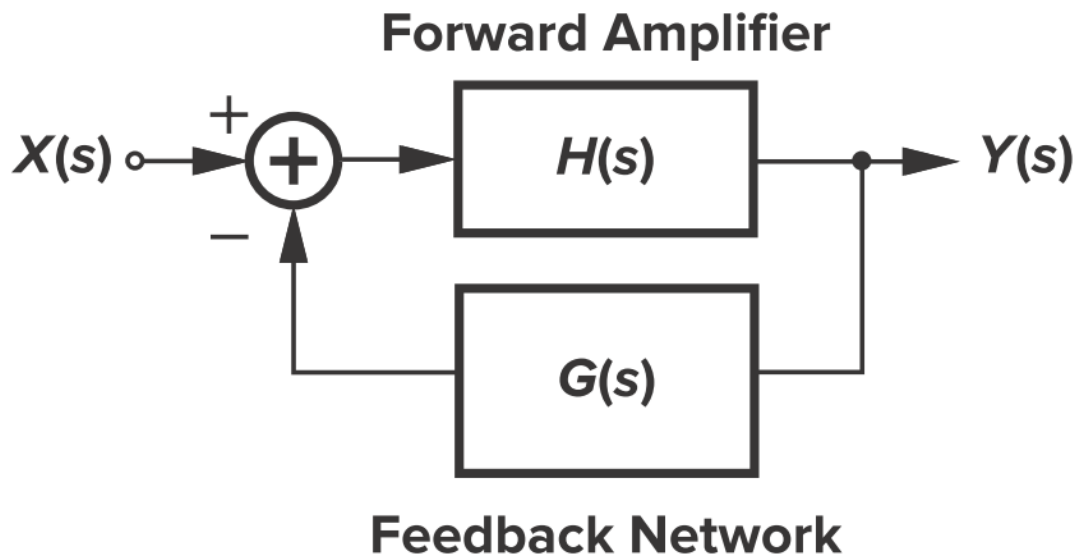
(g)



(h)



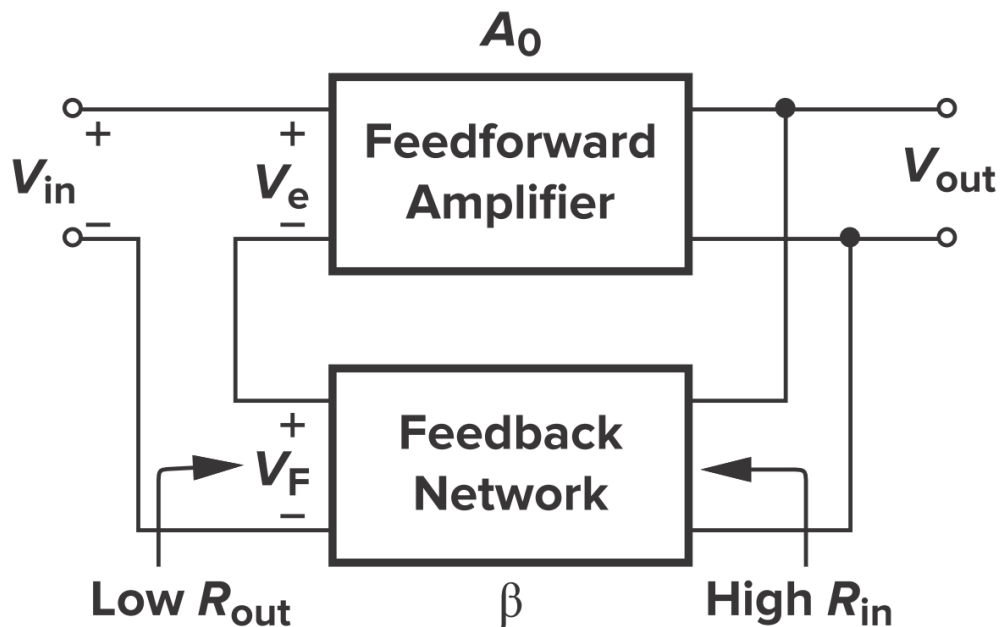
## 8.2 反馈结构



- 研究四种规范的结构，是由负反馈环路中放置四种放大器的一种产生的
- X和Y可以是电流或电压



# 电压-电压反馈



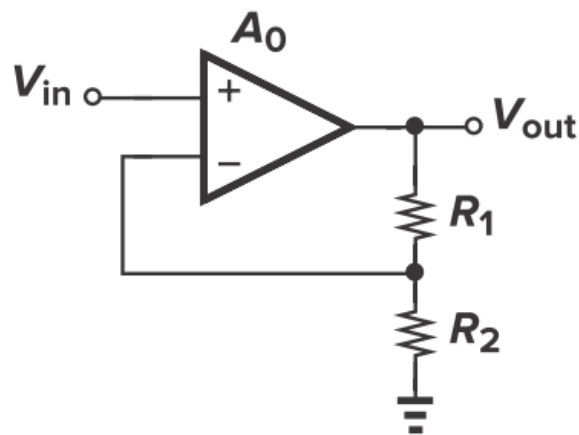
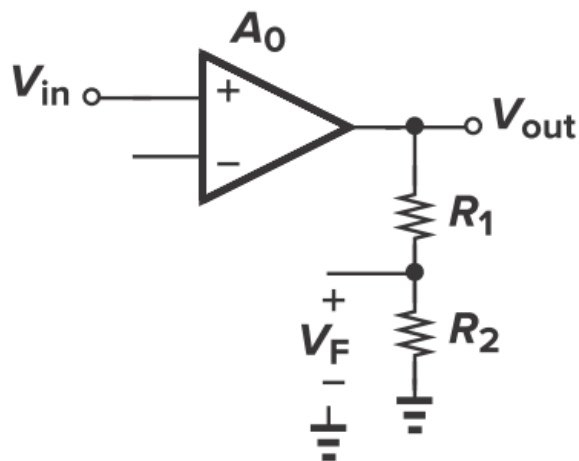
- 检测输出电压，返回成比例的电压信号到输入
- 反馈网络与输出并联，与输入串联
- 理想的反馈网络输入阻抗无穷大，输出阻抗为0

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

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



# 电压-电压反馈放大器

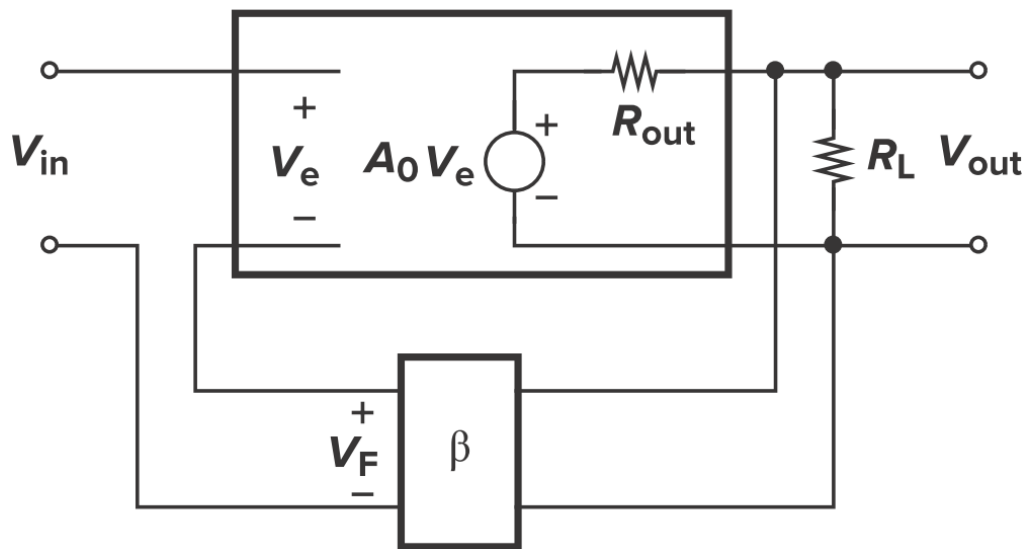


- 前馈放大器：单端输出的差分放大器
- 反馈网络：电阻分压器
- 分压器检测输出电压，并将其一部分作为反馈信号 $V_F$ 与放大器输入信号串联，实现两个电压相减





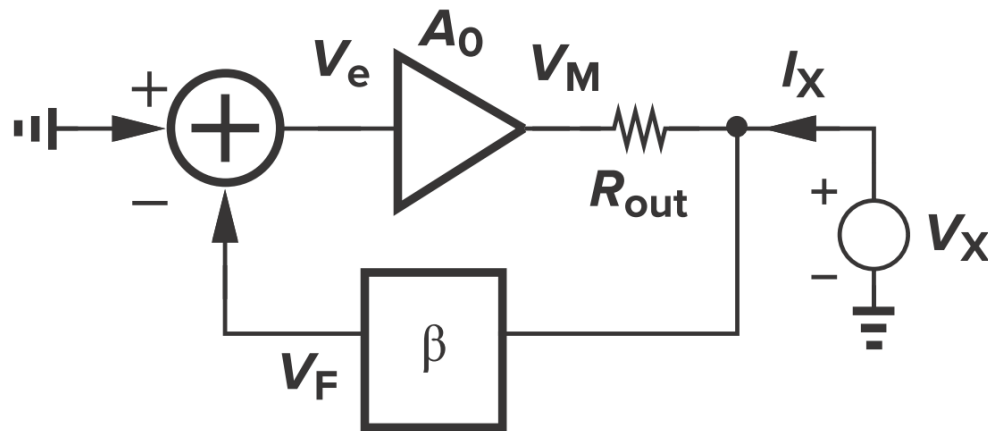
# 反馈改变输入输出阻抗



- 在开环结构中， $V_{out}$  随着  $R_L$  减小而下降
- 在反馈系统中，只要环路增益保持远大于 1， $V_{out}/V_{in}=1/\beta$ ，与  $R_L$  的值无关
- 尽管负载在改变，电路能稳定输出电压的幅值，相当于一个电压源，具有低输出阻抗
- 该特性源于反馈导致的增益灵敏度的降低



# 电压反馈降低输出电阻



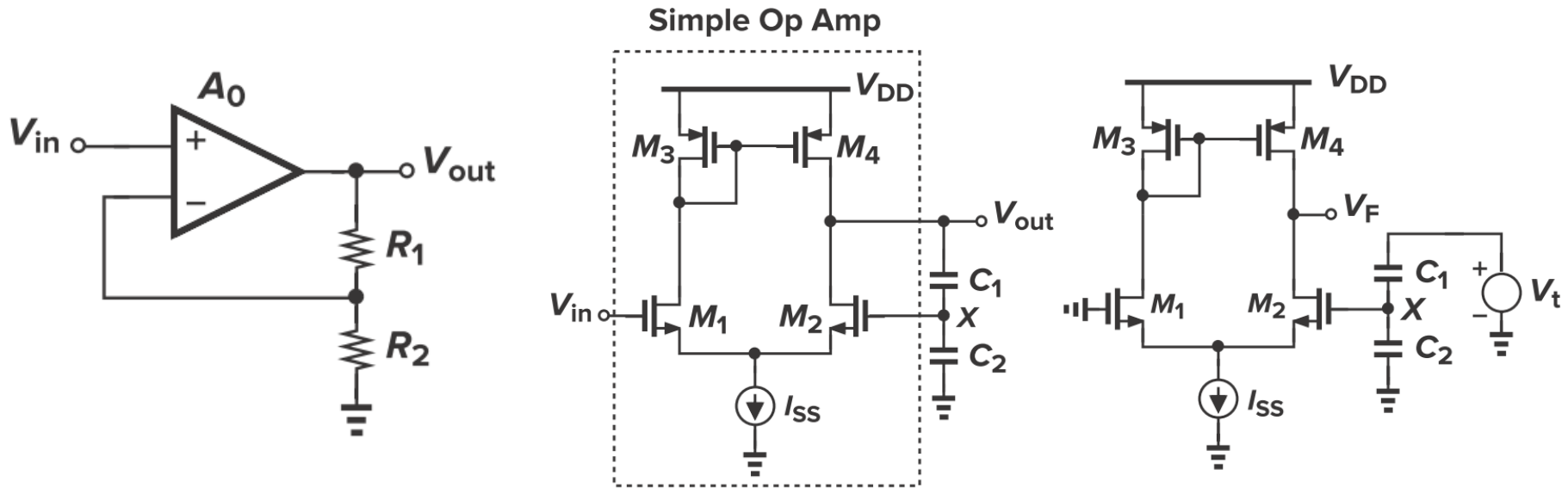
$$V_F = \beta V_X, V_e = -\beta V_X, V_M = -\beta A_0 V_X$$

$$I_X = [V_X - (-\beta A_0 V_X)] / R_{out}$$

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



# 例8.4 求低频时的闭环增益和输出电压



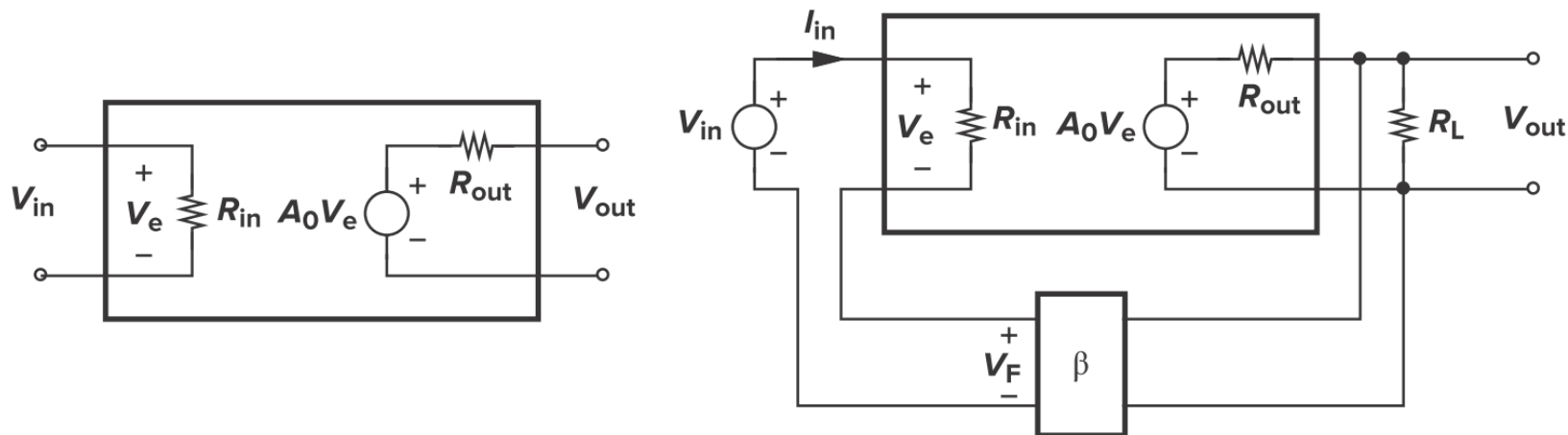
$$V_F = -V_t \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4}) \Rightarrow \beta A_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})$$

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

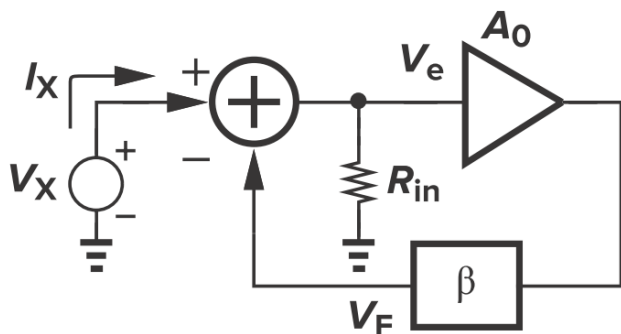
$$R_{out, closed} = \frac{r_{O2} \parallel r_{O4}}{1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{O4})} \approx \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \frac{1}{g_{m1}}$$



# 反馈电压增大输入阻抗



- 在反馈系统中，前馈放大器的输入阻抗只承受输入电压  $V_{in}$  的一部分，因此通过  $R_{in}$  的电流比开环系统小，说明输入阻抗增加



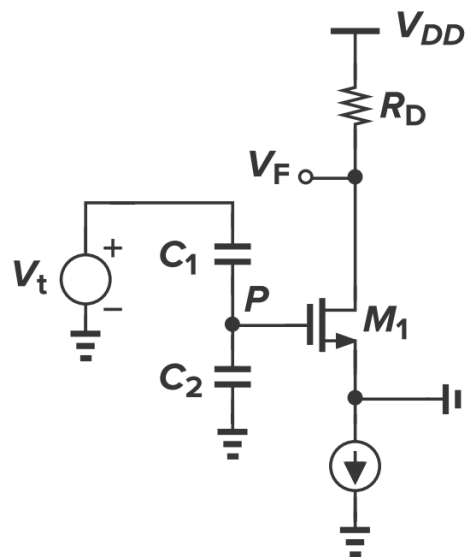
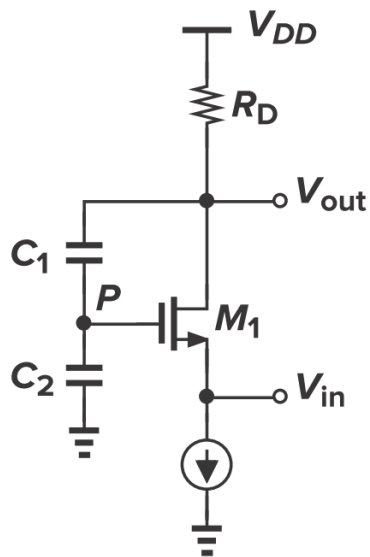
$$V_F = \beta A_0 I_X R_{in}$$

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

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



## 例8.6 求低频时的输入电阻



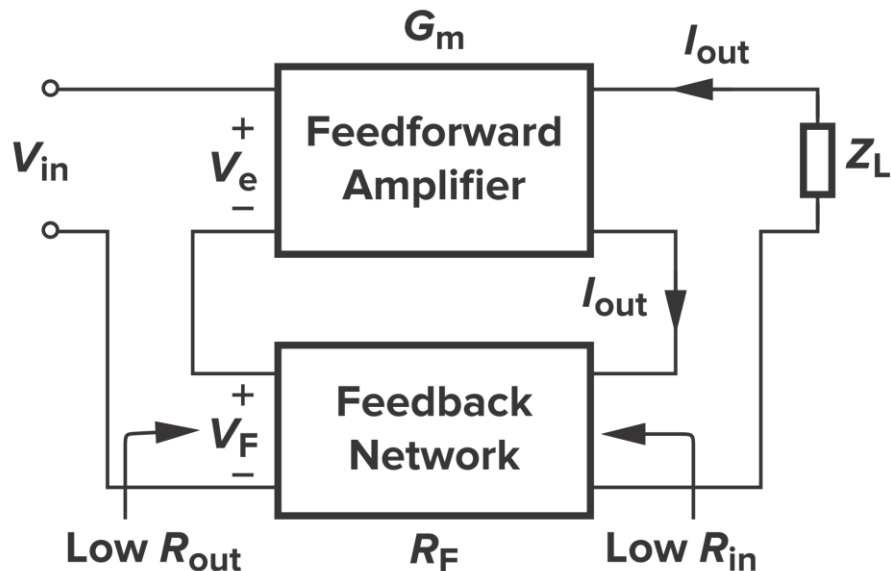
$$V_F / V_t = -g_{m1} R_D C_1 / (C_1 + C_2)$$

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

直观解释？



# 电流-电压反馈



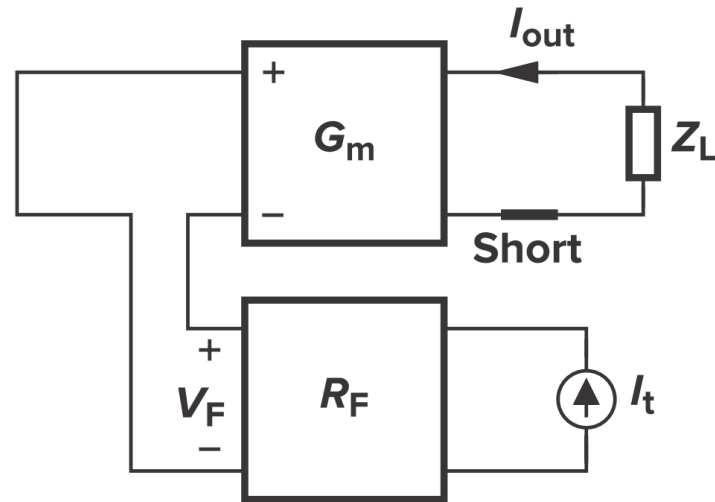
- 检测输出电流，反馈与其成比例的电压信号到输入
- 反馈系数具有电阻的量纲 ( $R_F$ )

$$\begin{aligned} V_F &= R_F I_{out} \\ V_e &= V_{in} - R_F I_{out} \end{aligned} \Rightarrow I_{out} = G_m (V_{in} - R_F I_{out}) \Rightarrow \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{G_m}{1 + G_m R_F}$$

- 理想的反馈网络输入和输出阻抗均为零



# 环路增益

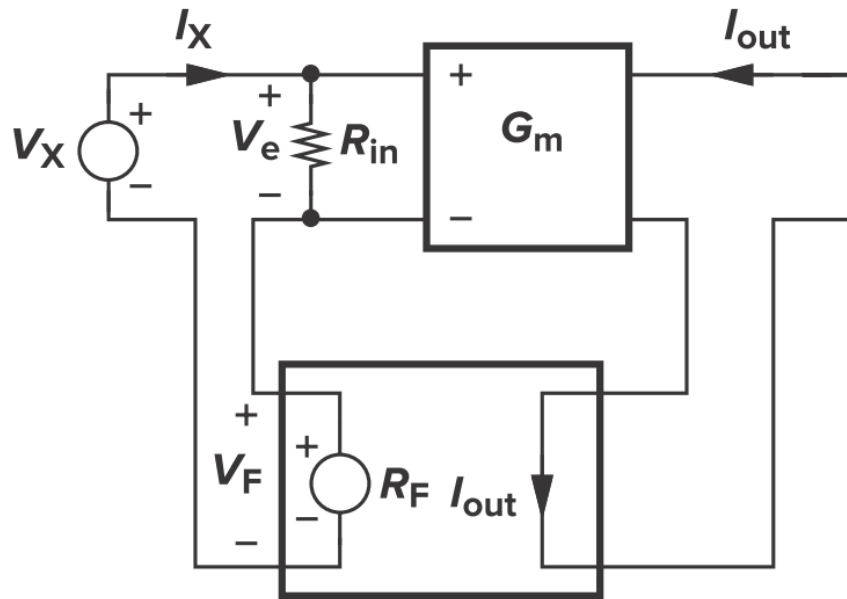


- 环路增益为  $G_m R_F$

$$V_F = R_F I_t \Rightarrow I_{out} = -G_m R_F I_t$$



# 输入阻抗



- 输入阻抗增大

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

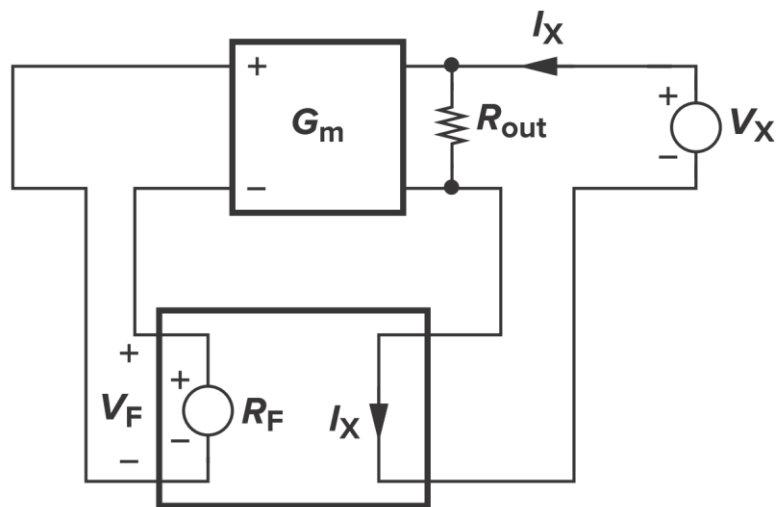
$$\Rightarrow V_e = V_X - G_m R_F I_X R_{in}$$

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





# 输出阻抗



- 输出电阻增加，更近似于一个理想的电流源

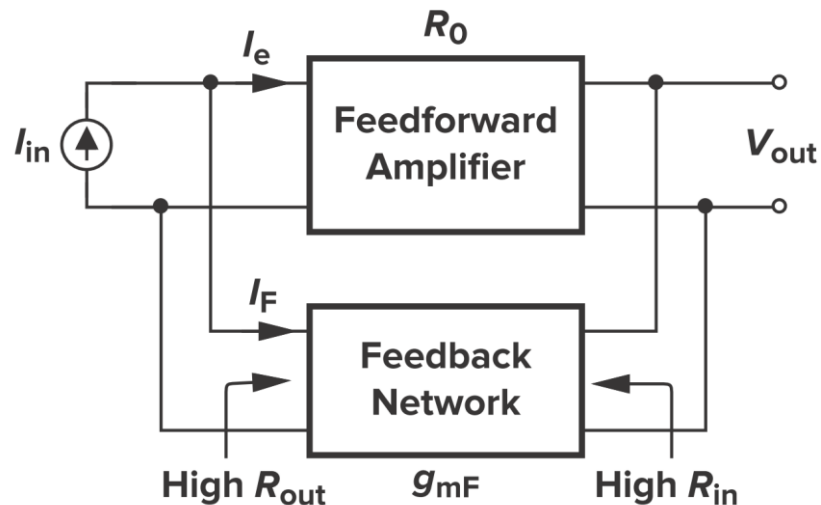
$$V_F = R_F I_X$$

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

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



# 电压-电流反馈



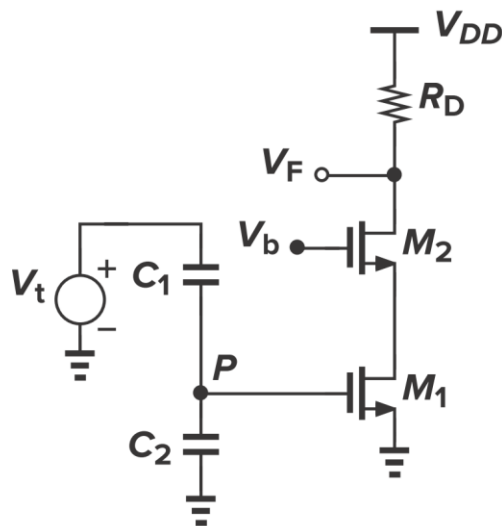
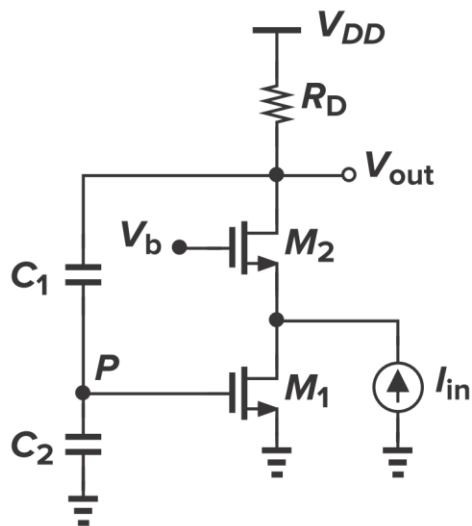
- 检测输出电压，反馈与其成比例的电流信号到输入
- 反馈系数具有电导的量纲 ( $g_{mF}$ )

$$\begin{aligned} I_F &= g_{mF} V_{out} \\ I_e &= I_{in} - I_F \end{aligned} \Rightarrow V_{out} = R_0 I_e = R_0 (I_{in} - g_{mF} V_{out}) \Rightarrow \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{R_0}{1 + g_{mF} R_0}$$

- 理想的反馈网络输入和输出电阻均为无穷大



## 例8.8 计算跨阻



- 开环跨阻:  $R_D$
- 环路增益:

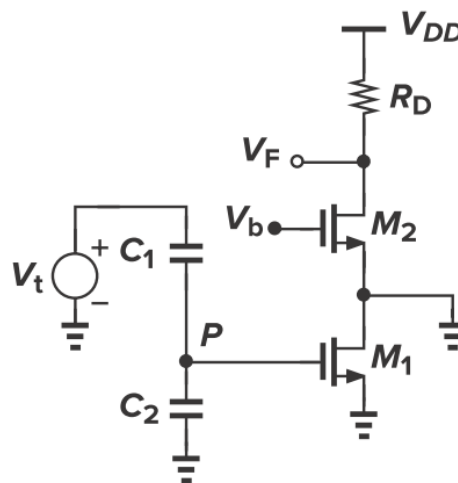
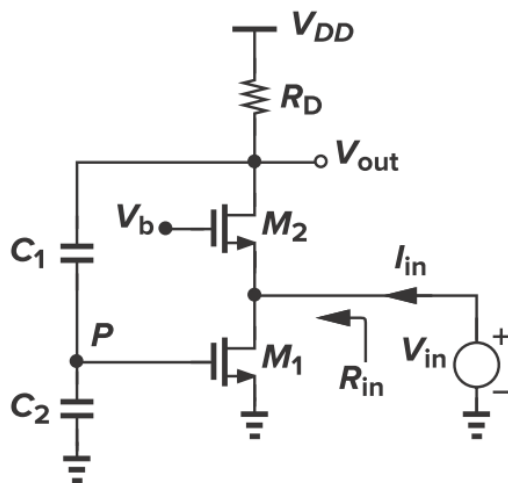
$$-V_t \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m1} R_D = V_F$$

- 闭环跨阻:

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



## 例8.9 采用电压源驱动



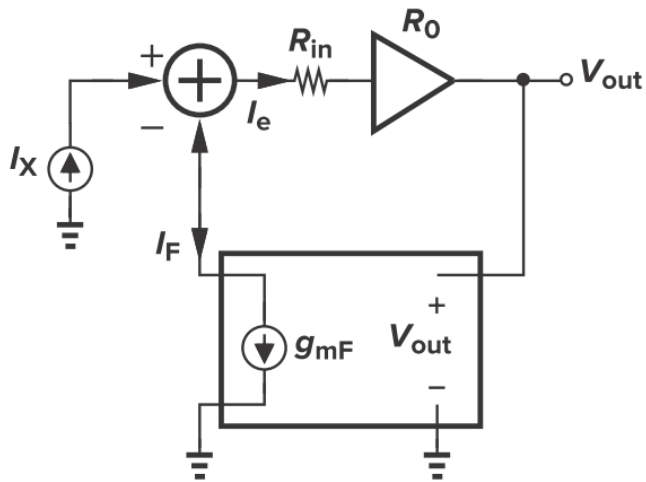
- 环路增益为0, 输入阻抗不变?

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

- 负反馈系统要求返回的量和输入具有相同的量纲
- 不能变换到规范的反馈系统, 计算环路增益时不能采用输入电压置为0和断开环路的方法



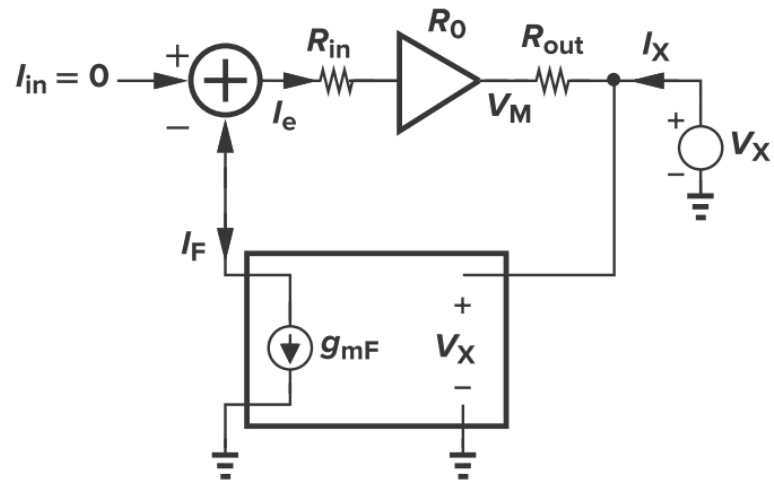
# 输入输出阻抗



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

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

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



$$I_F = V_X g_{mF}$$

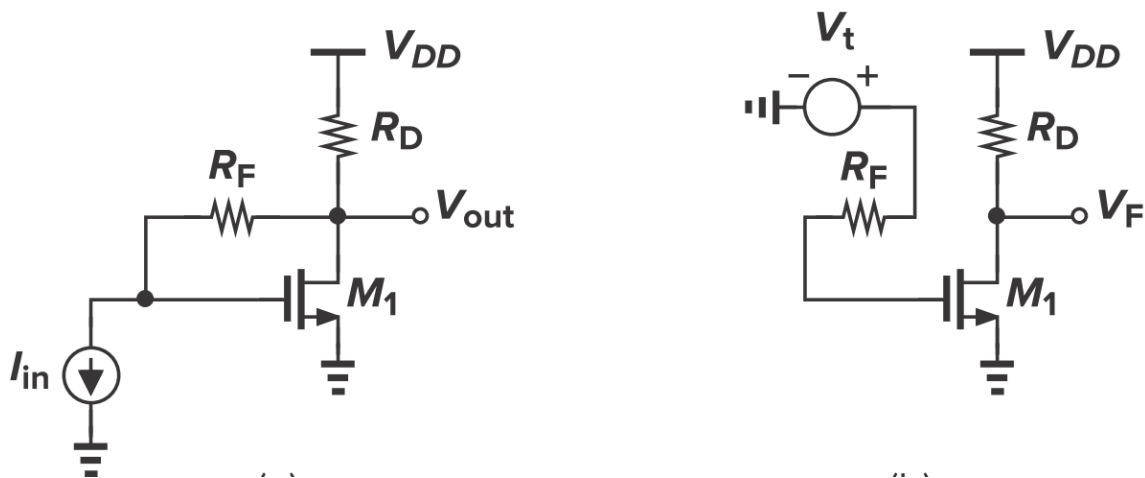
$$V_M = -R_0 g_{mF} V_X$$

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

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



## 例8. 10 计算输入和输出阻抗

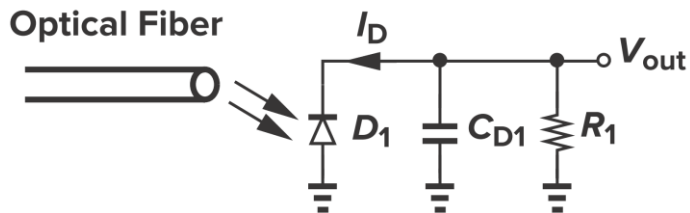


$$R_{in,closed} = \frac{R_F}{1 + g_m R_D}$$

$$\begin{aligned} R_{out,closed} &= \frac{R_D}{1 + g_m R_D} \\ &= \frac{1}{g_m} || R_D \end{aligned}$$

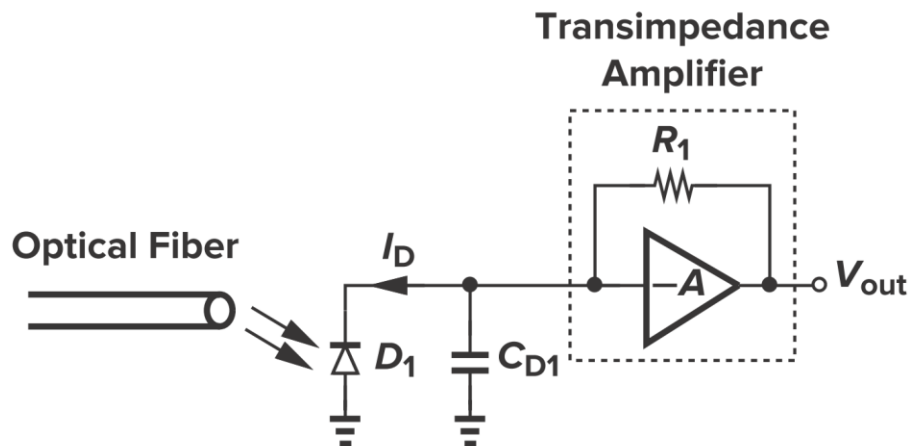


# 低输入阻抗放大器的应用



光纤接收机

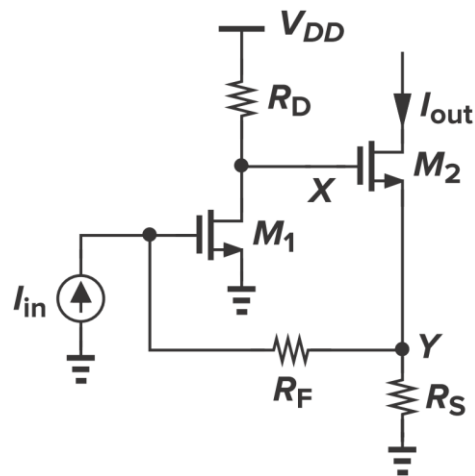
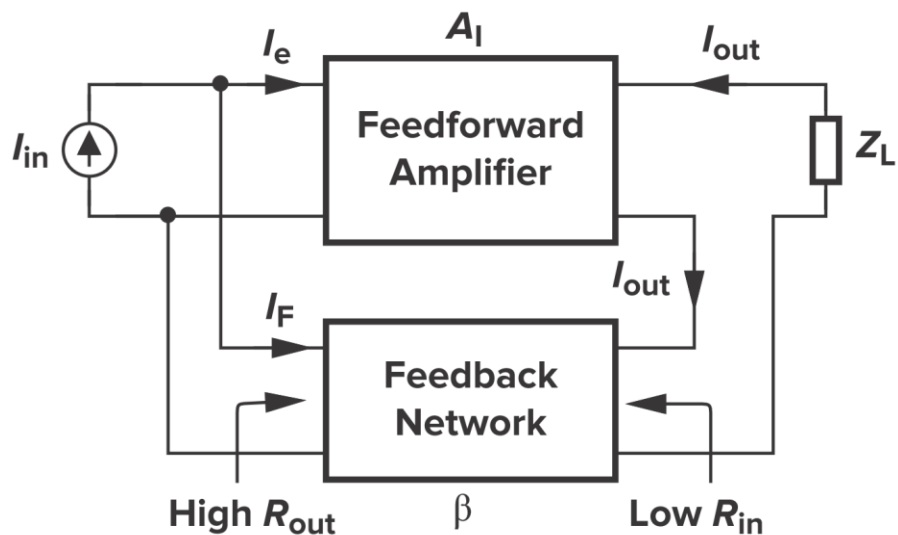
- 输入阻抗  $R_1$
- 带宽  $1/2\pi R_1 C_{D1}$



- 输入阻抗  $R_1/(1+A)$
- 带宽  $(1+A)/2\pi R_1 C_{D1}$



# 电流-电流反馈



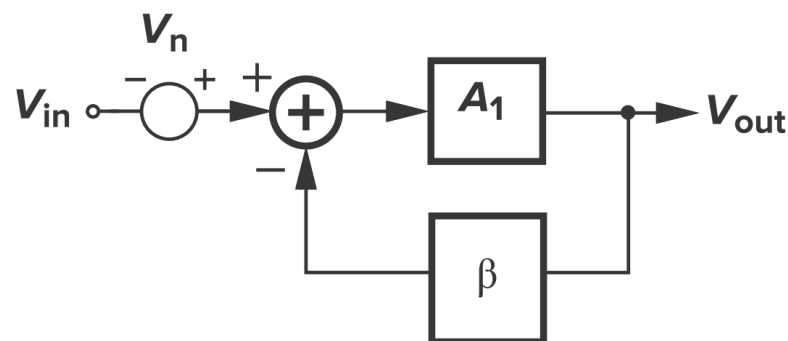
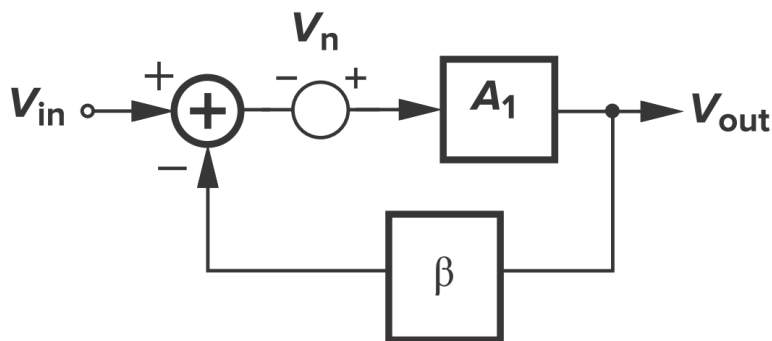
- 检测输出电流，反馈成比例的电流信号到输入
- 环路增益 $\beta A_I$
- 理想的反馈网络输入电阻无穷小，输出电阻无穷大
- 输入阻抗减小，输出阻抗增大





## 8.3 反馈对噪声的影响

- 反馈不能改善电路的噪声性能！



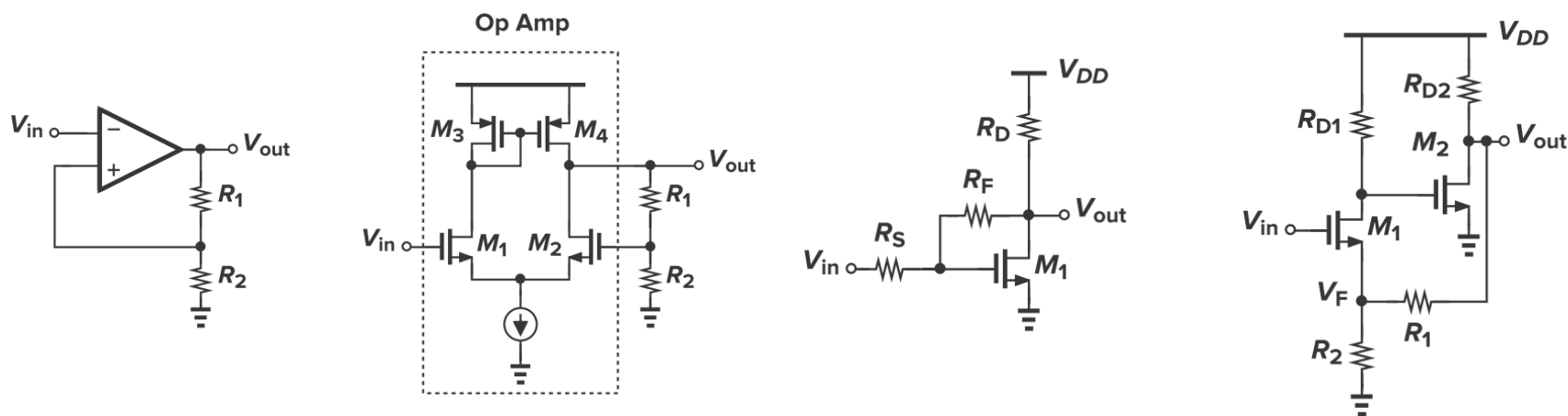
$$(V_{in} - \beta V_{out} + V_n)A_1 = V_{out} \quad \Rightarrow \quad V_{out} = (V_{in} + V_n) \frac{A_1}{1 + \beta A_1}$$

- 如果反馈网络不引入噪声，则输入参考噪声电压和电流均不变
- 由于反馈网络本身包含电阻和MOS管，会产生噪声，因此总的噪声性能会变差



## 8.4 反馈分析的困难

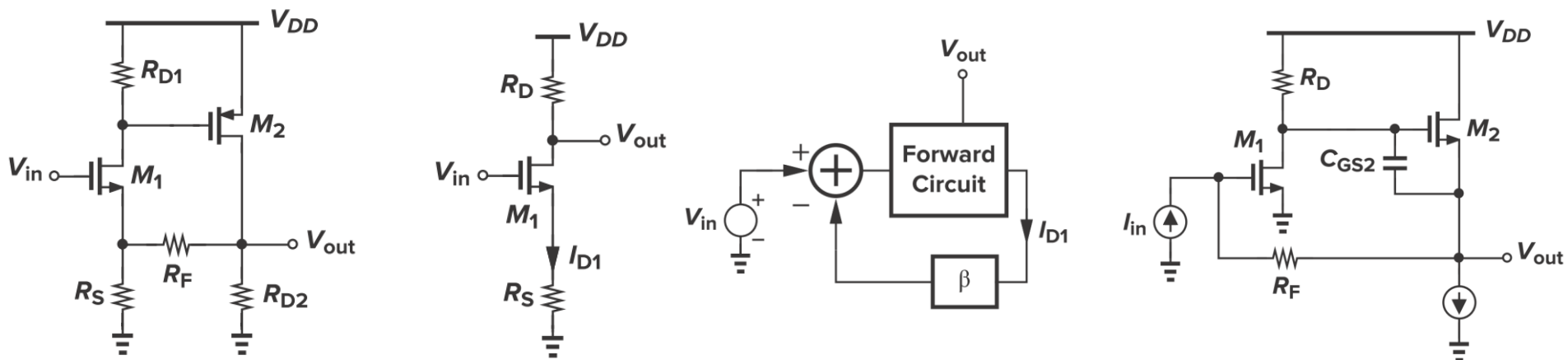
- 前述分析方法
  - 断开环路求得开环条件下的增益、输入和输出阻抗
  - 确定环路增益，确定各个闭环参数
  - 用环路增益研究一些特性，如稳定性
- 困难1：难以断开环路，反馈网络对前馈放大器有“加载”效应



反馈网络的输入输出阻抗非理想



# 反馈分析的困难

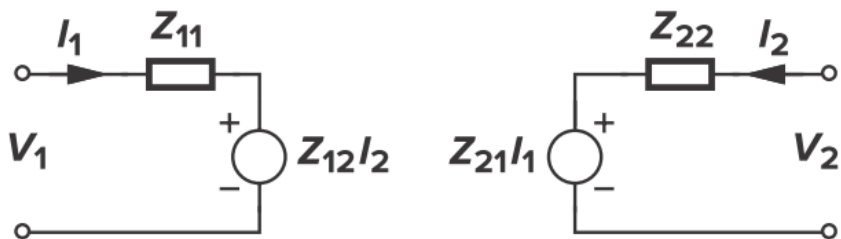


- 困难1：难以断开环路，反馈网络对前馈放大器有“加载”效应
- 困难2：电路无法明确地分解成前馈放大器和反馈网络
- 困难3：不容易被映射到四种规范结构
- 困难4：环路包含双向通路
- 困难5：包含多重反馈机制

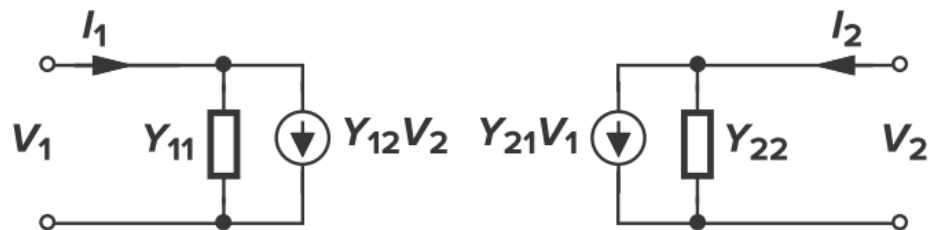


## 8.5 加载效应

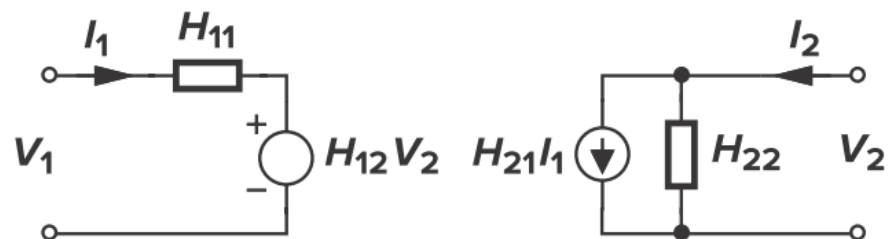
- 二端口网络模型
  - 反馈网络采用二端口模型作更精确的分析
  - 有四种模型可以采用



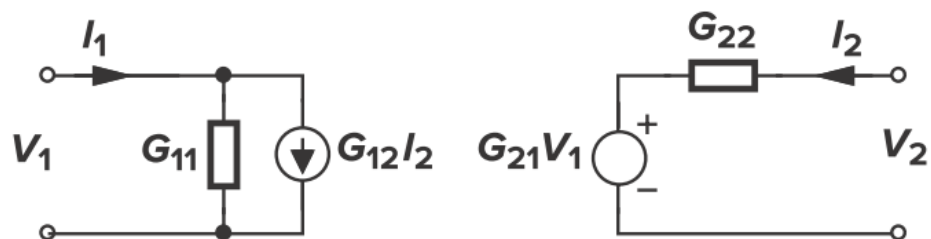
(a)



(b)



(c)

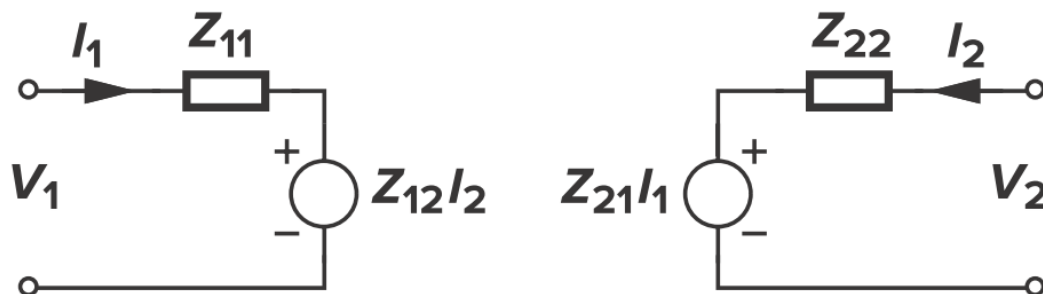


(d)



# 二端口网络模型

- Z模型：由输入输出阻抗及其串联的电流控制的电压源构成



$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

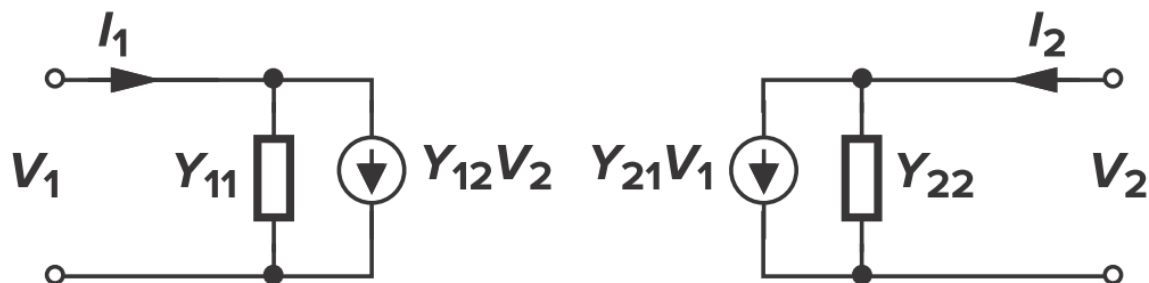
- 第一个下标1表示输入端，第二个下标2表示输出端
- 每个Z参数具有电阻的量纲，可以通过令一个端口开路求得
- $Z_{21}$ 为反馈项，其他为非理想参数
- 适合检测电流，反馈电压

电流-电压反馈  
采用Z模型



# 二端口网络模型

- Y模型：由输入输出导纳及其并联的电压控制的电流源构成



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

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2$$

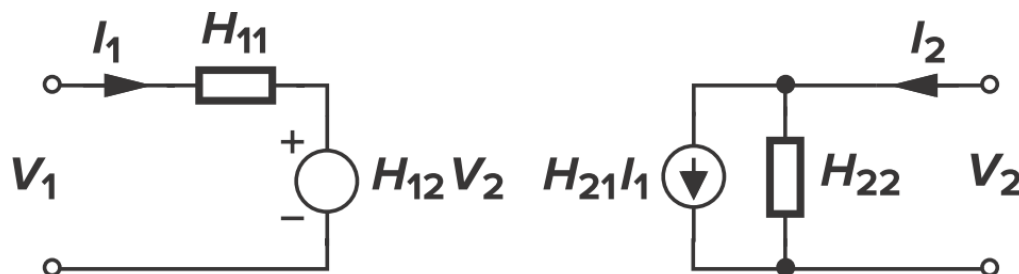
- 每个Y参数具有电导的量纲，可以通过令一个端口短路求得
- Y参数并不是Z参数的倒数，因为二者在不同条件下求得
- $Y_{21}$ 为反馈项，其他为非理想参数
- 适合检测电压，反馈电流

电压-电流反馈  
采用Y模型



# 二端口网络模型

- 混合模型（H参数）：由输入阻抗，输出导纳及电压源、电流源构成



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

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

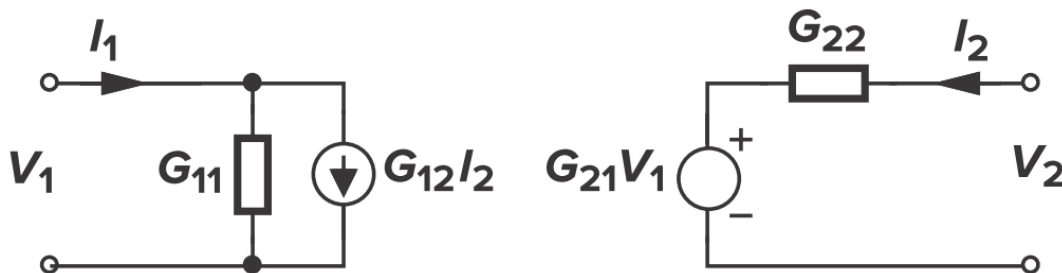
- $H_{21}$ 为反馈项，其他为非理想参数
- 适合检测电流，反馈电流

电流-电流反馈  
采用H模型



# 二端口网络模型

- 混合模型（G参数）：由输入导纳，输出阻抗及电压源、电流源构成



$$I_1 = G_{11} V_1 + G_{12} I_2$$

$$V_2 = G_{21} V_1 + G_{22} I_2$$

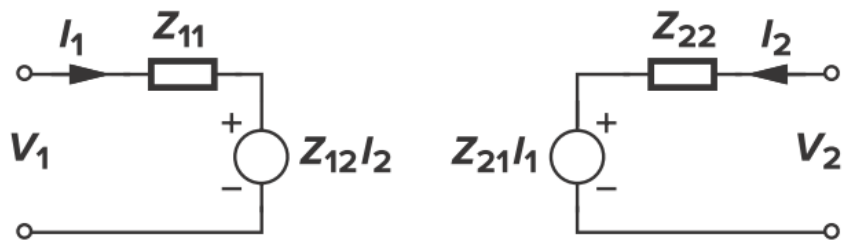
- $G_{21}$  为反馈项，其他为非理想参数
- 适合检测电压，反馈电压

电压-电压反馈  
采用G模型

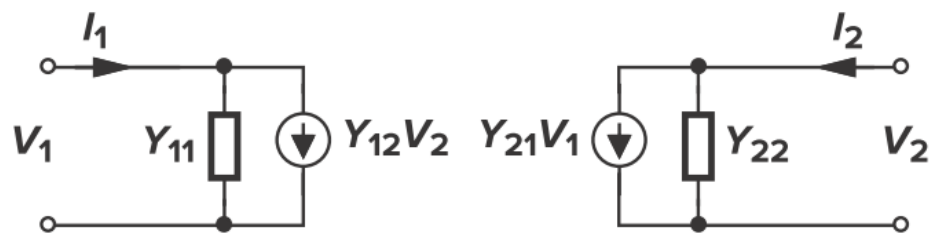




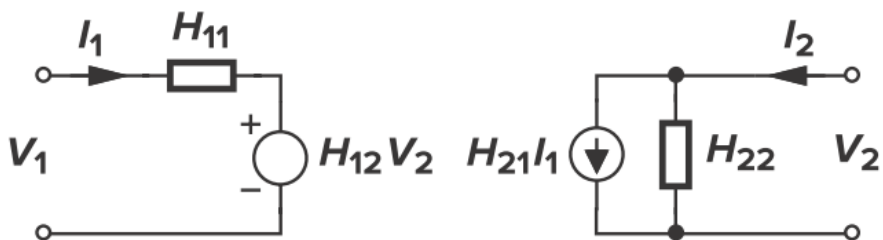
# 二端口网络模型



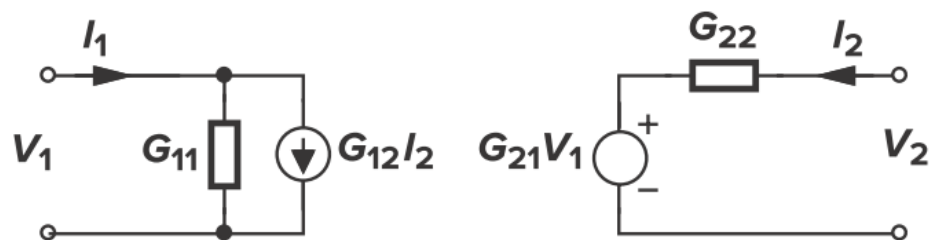
(a)



(b)



(c)

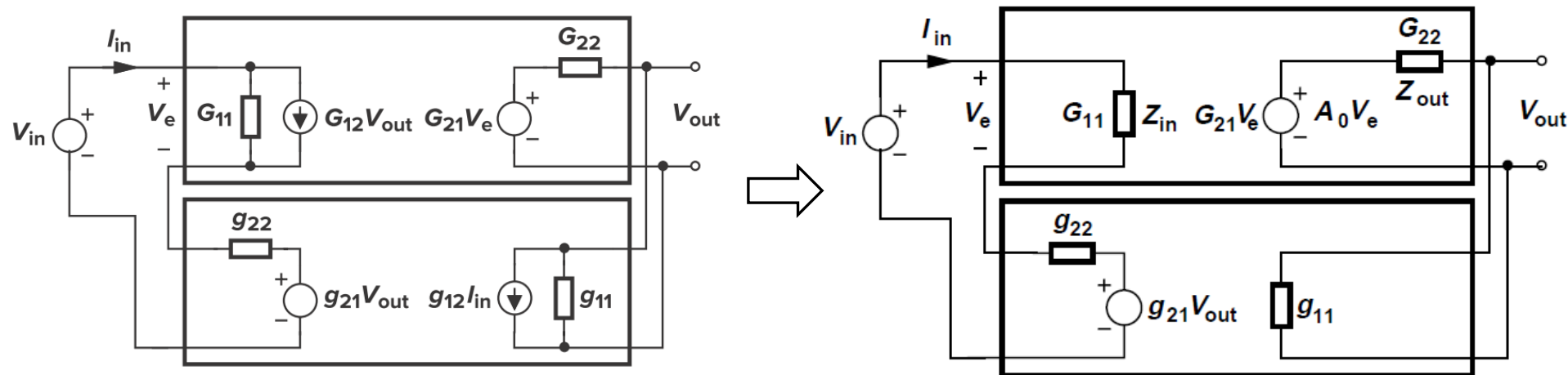


(d)

- $_{21}$ 项下标表示反馈项，理想反馈网络中没有其他3项
- $_{12}$ 项表示反馈网络的前通作用，一般无放大且输入信号小，与反馈放大器的输出信号相比可忽略
- $_{11}$ 项和 $_{22}$ 项表示反馈网络非理想的输入输出阻抗/导纳



# 电压-电压反馈中的加载



- 前馈放大器和反馈网络均采用G模型表示  $I_1 = G_{11}V_1 + G_{12}I_2$   
 $V_2 = G_{21}V_1 + G_{22}I_2$
- 简化电路（单向化）：忽略放大器内部反馈 $G_{12}V_{out}$ 和输入信号通过反馈网络的“前馈”传输 $g_{12}I_{in}$
- 计算闭环电压增益

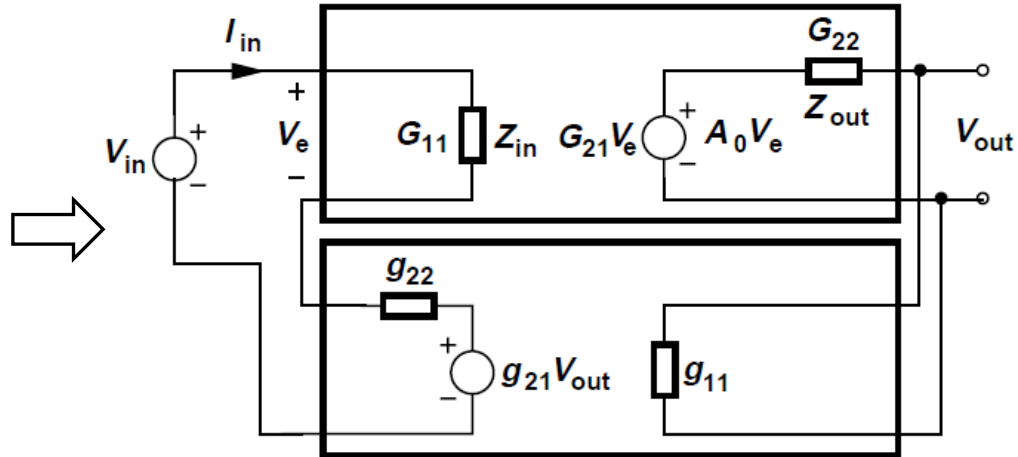
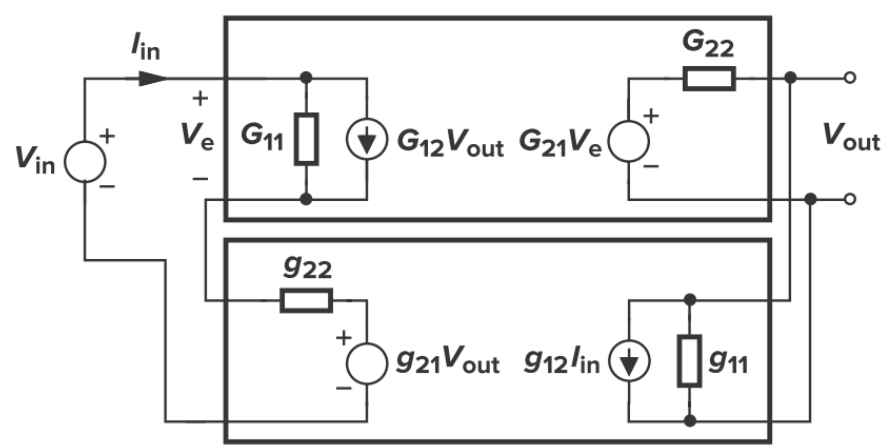
$$V_{in} = V_e + g_{22} \frac{V_e}{Z_{in}} + g_{21} V_{out}$$

$$g_{11} V_{out} + \frac{V_{out} - A_0 V_e}{Z_{out}} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11} Z_{out}) + g_{21} A_0}$$



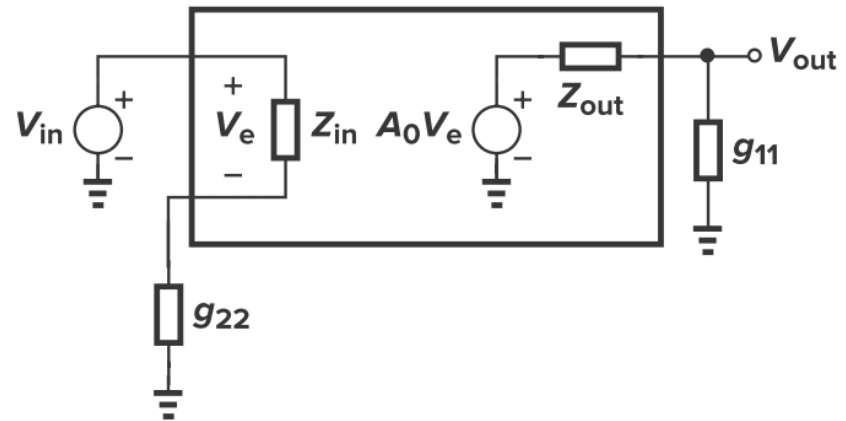
# 电压-电压反馈中的加载



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

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}}{1 + g_{21} \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}}$$

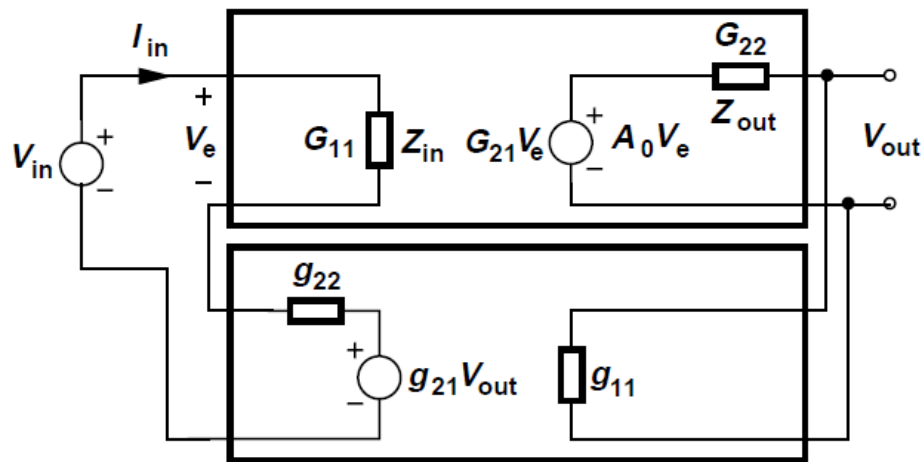
$$\Rightarrow A_{v,open} = \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}$$
$$\beta = g_{21}$$



反馈网络的有限输入和输出阻抗分别会减小输出电压和输入所看到的电压



# 电压-电压反馈中的加载



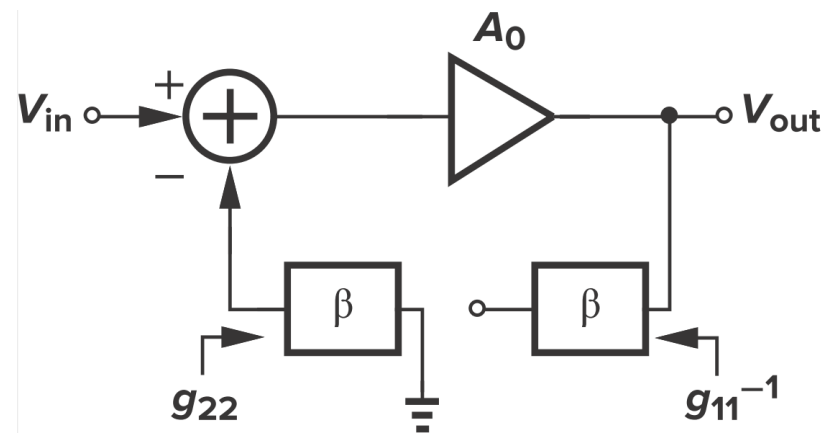
$$I_1 = G_{11}V_1 + G_{12}I_2$$

$$V_2 = G_{21}V_1 + G_{22}I_2$$

- 计算  $g_{11}$  和  $g_{22}$

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0} \quad g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

- 环路增益等于加载的开环增益乘以  $g_{21}$

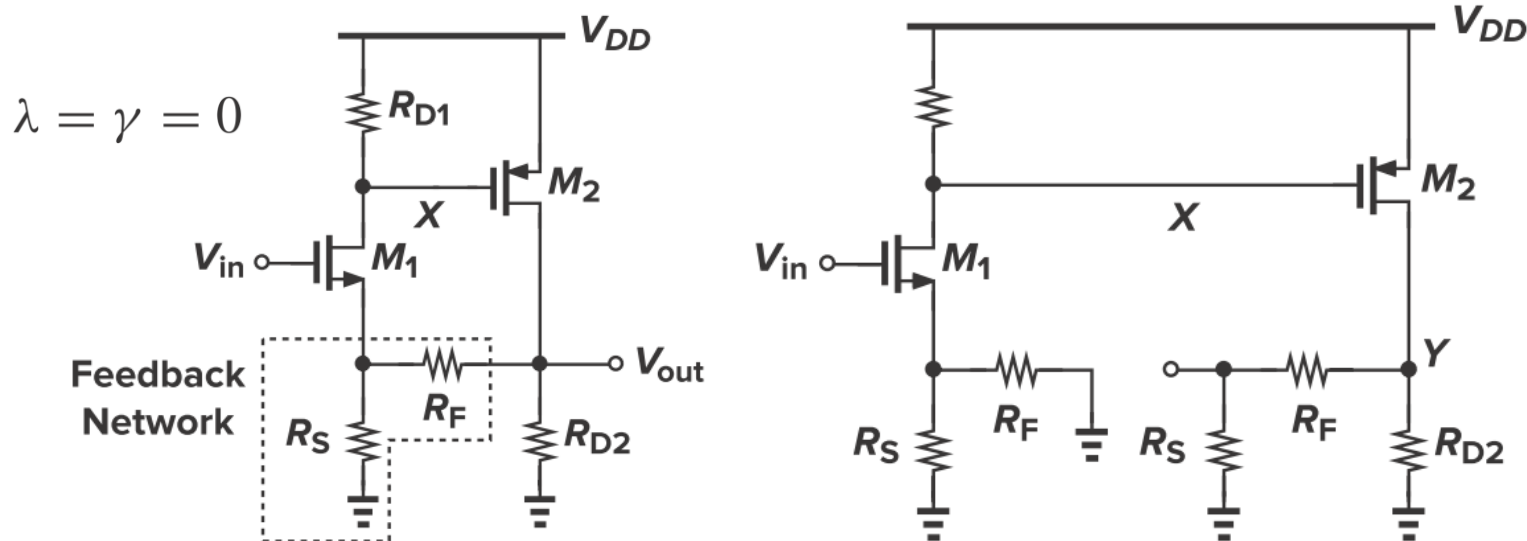


反馈网络  
输出短路

反馈网络  
输入开路



## 例8.12 计算开环增益和闭环增益



- 确认是负反馈电路，考虑反馈网络的加载效应

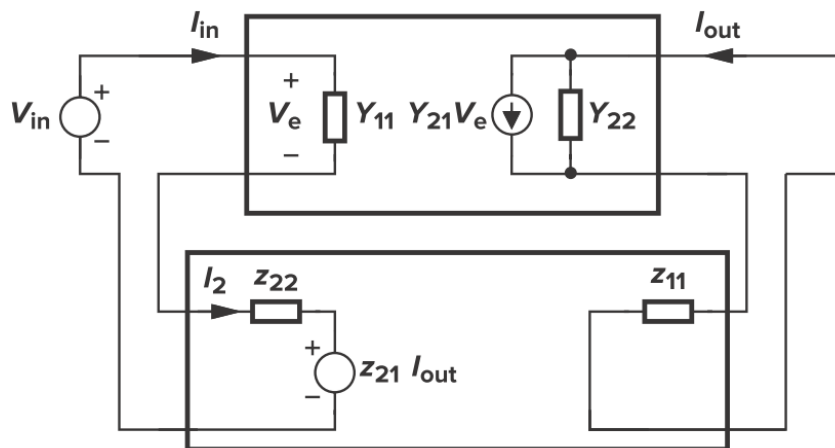
$$A_{v,open} = \frac{V_Y}{V_{in}} = \frac{-R_{D1}}{R_F \parallel R_S + 1/g_{m1}} \{-g_{m2}[R_{D2} \parallel (R_F + R_S)]\}$$

$$g_{21} = R_S / (R_F + R_S)$$

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



# 电流-电压反馈中的加载



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

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2$$

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2$$

- 用Y模型和Z模型来表示前馈放大器和反馈网络
- 忽略  $Y_{12} V_{out}$  和  $z_{12} I_{in}$
- 计算闭环增益

$$V_{in} = V_e + Y_{11} V_e z_{22} + z_{21} I_{out}$$

$$-I_{out} z_{11} = \frac{I_{out} - Y_{21} V_e}{Y_{22}}$$

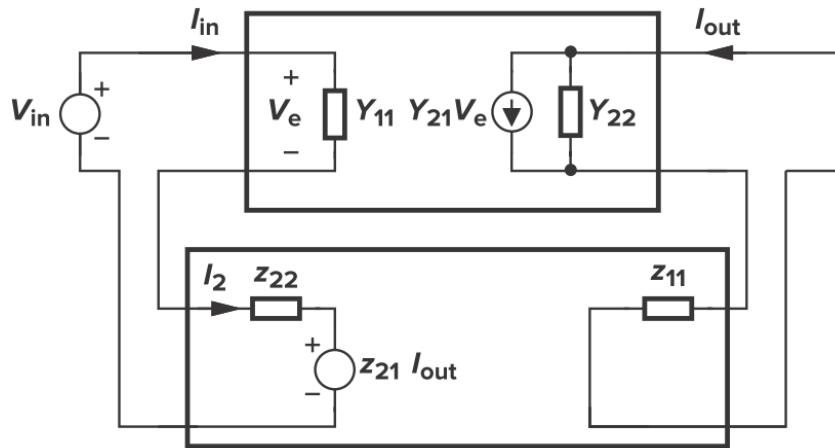
$$\Rightarrow \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{Y_{21}}{(1 + z_{22} Y_{11})(1 + z_{11} Y_{22})}}{1 + z_{21} \frac{Y_{21}}{(1 + z_{22} Y_{11})(1 + z_{11} Y_{22})}}$$

$$\Rightarrow G_{m,open} = \frac{Y_{21}}{(1 + z_{22} Y_{11})(1 + z_{11} Y_{22})}$$

$$\beta = z_{21}$$



# 电流-电压反馈中的加载

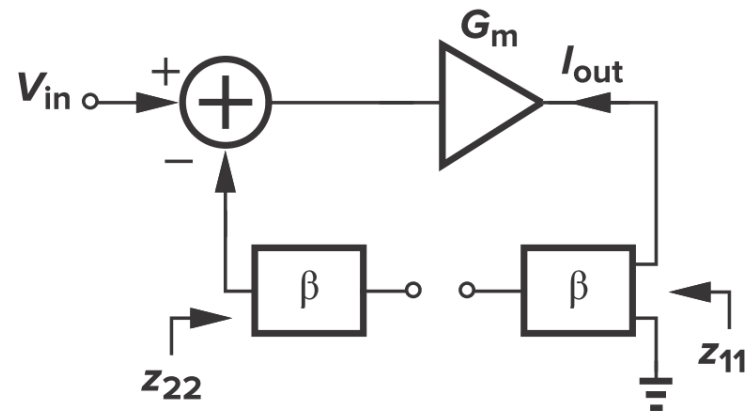
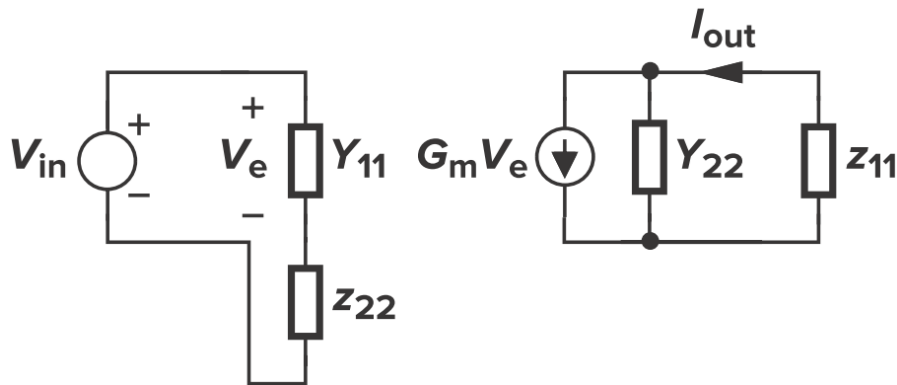


$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2$$

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2$$

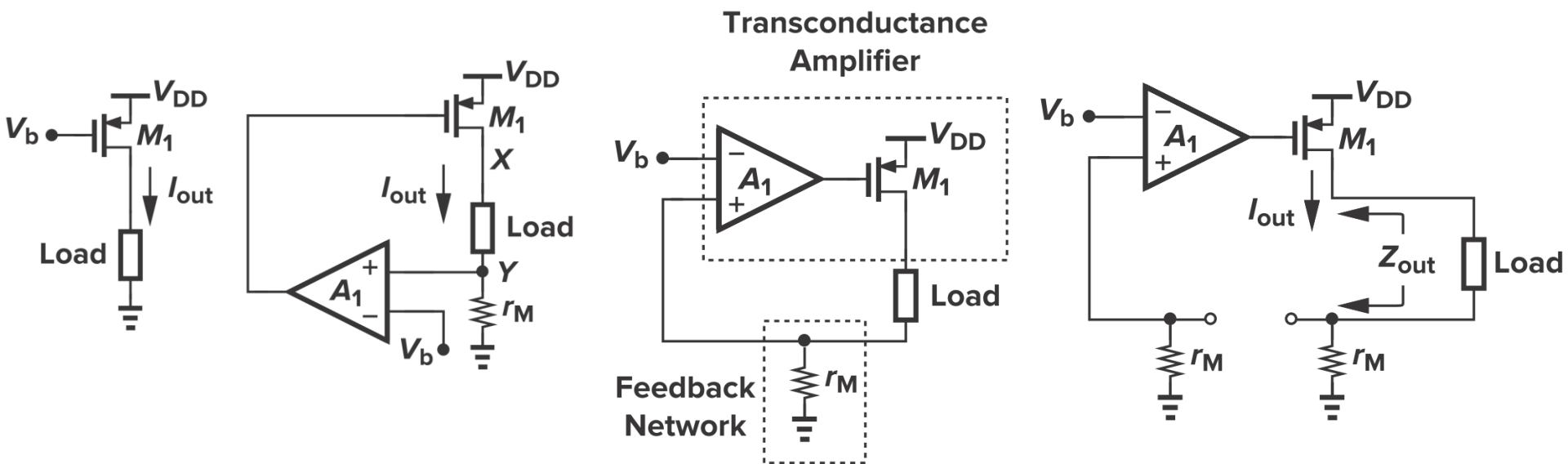
$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2$$





# 例8.14 确定 $I_{out}$ 和负载所看到的阻抗



- $V_b$  可以看成输入电压，环路增益很高情况下， $V_b = V_Y$ ，则  $I_{out} \approx V_b / r_m$

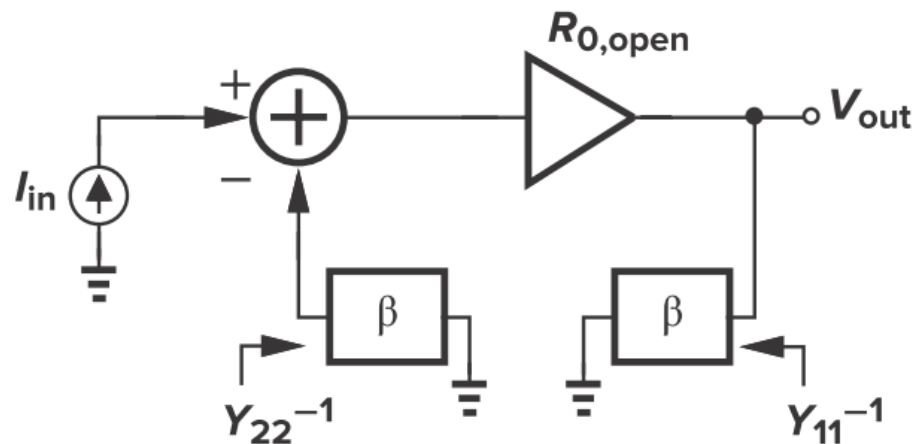
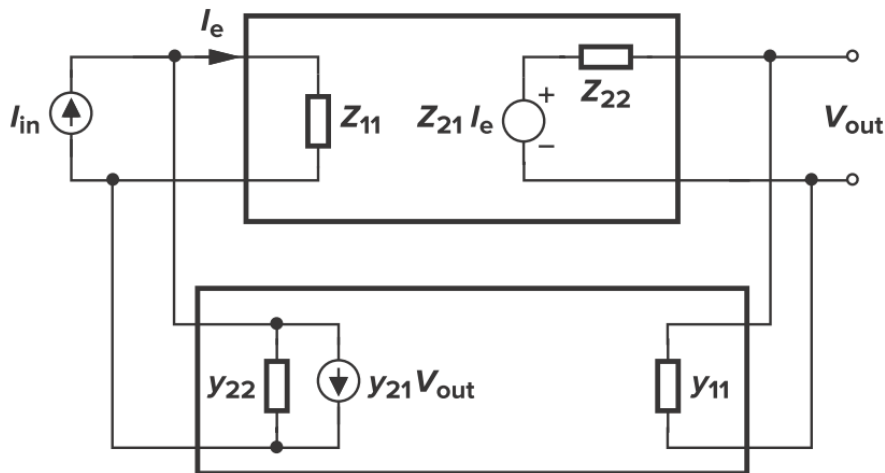
- 更精确分析 
$$G_{m,open} = \frac{I_{out}}{V_b} \approx A_1 g_m$$
$$\beta = z_{21} = r_M \quad \Rightarrow \quad I_{out} = \frac{A_1 g_m}{1 + A_1 g_m r_M} V_b$$

- 开环情况下，负载看到的阻抗是  $r_o + r_m$
- 闭环情况下，看到的阻抗提高  $(1 + \text{环路增益})$  倍





# 电压-电流反馈中的加载



- 采用Z模型和Y模型来表示前馈放大器和反馈网络
- 计算闭环增益

$$I_{in} = I_e + I_e Z_{11} y_{22} + y_{21} V_{out}$$

$$y_{11} V_{out} + \frac{V_{out} - Z_{21} I_e}{Z_{22}} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{(1 + y_{22} Z_{11})(1 + y_{11} Z_{22})}{Z_{21}}}{1 + y_{21} \frac{(1 + y_{22} Z_{11})(1 + y_{11} Z_{22})}{Z_{21}}}$$

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \quad I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2$$

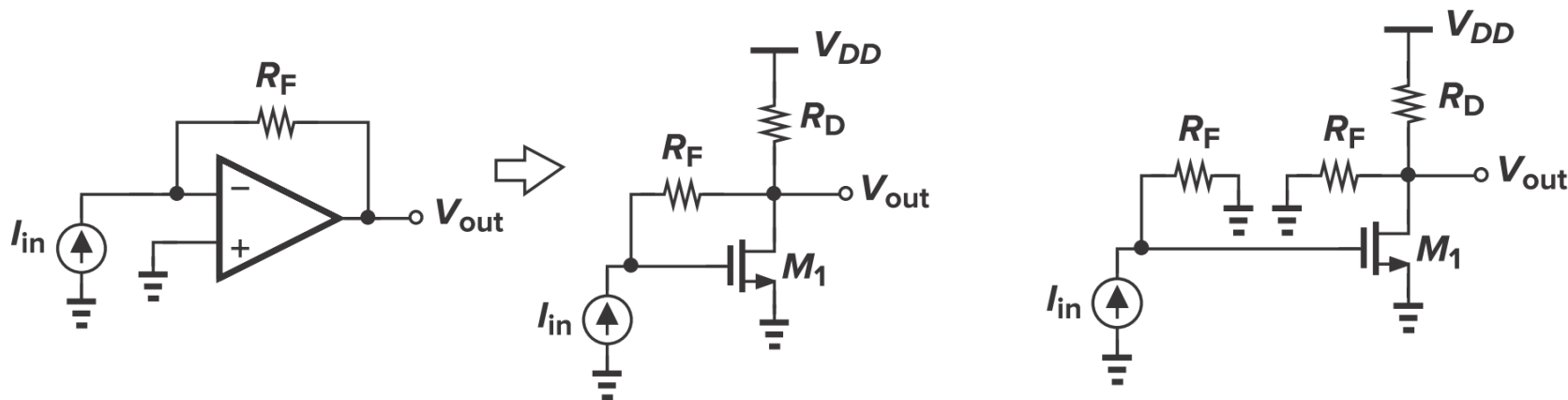
$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \quad I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2$$

$$\Rightarrow R_{0,open} = \frac{Z_{21}}{(1 + y_{22} Z_{11})(1 + y_{11} Z_{22})}$$

$$\beta = y_{21}$$



# 例8. 15 计算电路的增益和输入输出阻抗



- 反馈网络 $R_F$ , 检测输出电压, 返回电流

- 开环增益  $R_{0,open} = -R_F g_m (R_F || R_D)$

- 反馈系数  $y_{21} = -1/R_F$

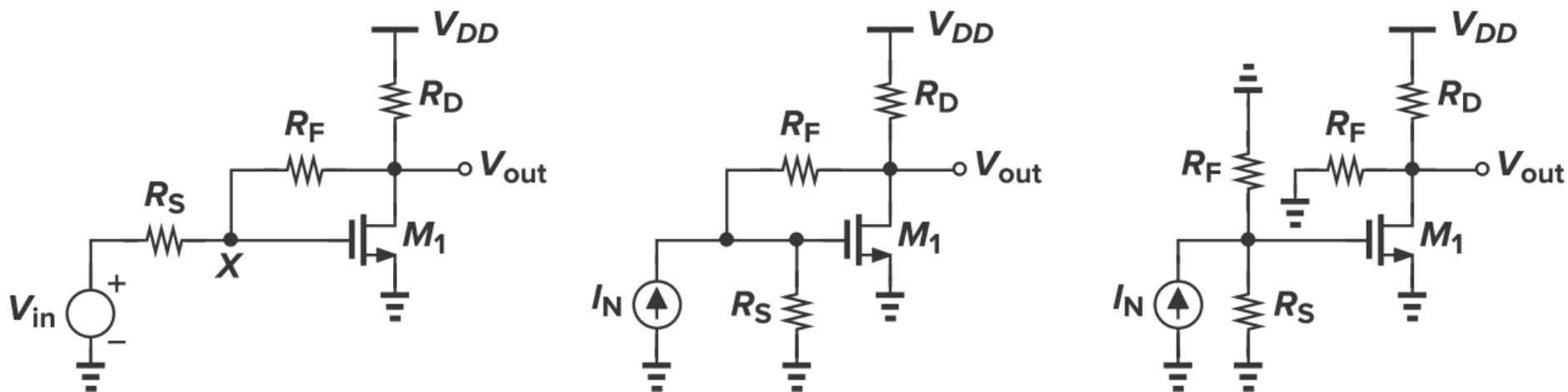
- 闭环增益  $\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{-R_F g_m (R_F || R_D)}{1 + g_m (R_F || R_D)}$

- 闭环输入输出阻抗

$$R_{in} = \frac{R_F}{1 + g_m (R_F || R_D)} \quad R_{out} = \frac{R_F || R_D}{1 + g_m (R_F || R_D)}$$



## 例8.16 计算电压增益



- 反馈类型：电压-电流型
- 输入信号为电压，采用诺顿等效

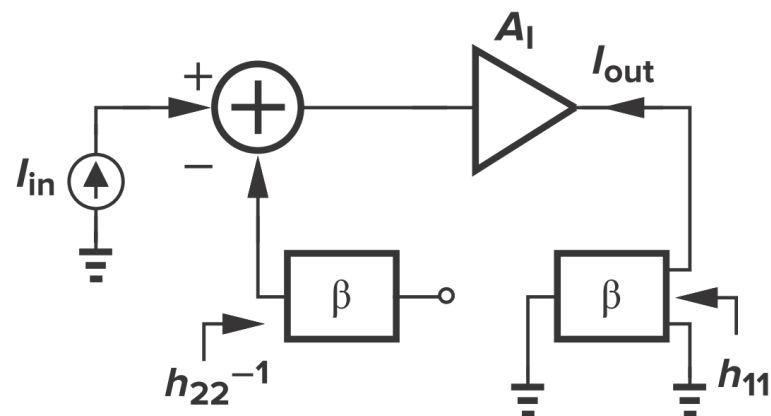
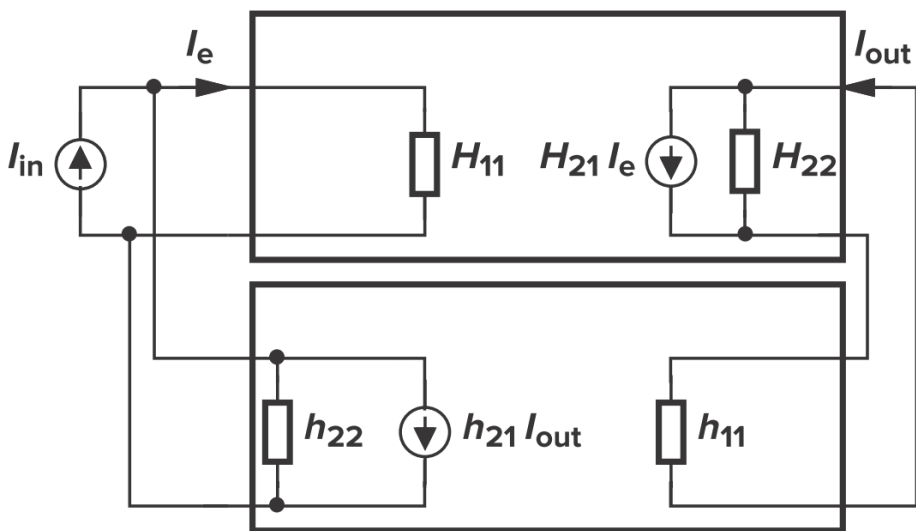
- 开环增益 
$$R_{0,open} = \left. \frac{V_{out}}{I_N} \right|_{open} = -(R_S \parallel R_F) g_m (R_F \parallel R_D)$$

- 闭环增益

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



# 电流-电流反馈中的加载



- 前馈放大器和反馈网络均采用H模型来表示
- 计算闭环增益

$$I_{in} = I_e H_{11} h_{22} + h_{21} I_{out} + I_e$$

$$I_{out} = -I_{out} h_{11} H_{22} + H_{21} I_e$$

$$\Rightarrow \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{H_{21}}{(1 + h_{22} H_{11})(1 + h_{11} H_{22})}}{1 + h_{21} \frac{H_{21}}{(1 + h_{22} H_{11})(1 + h_{11} H_{22})}}$$

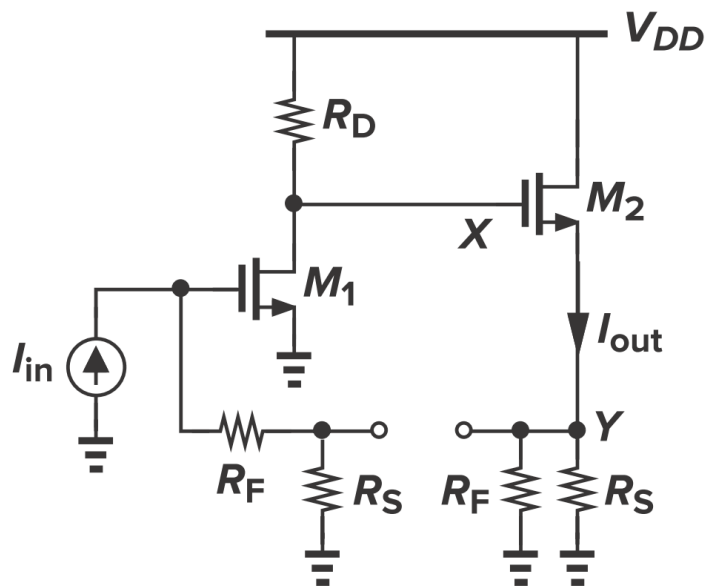
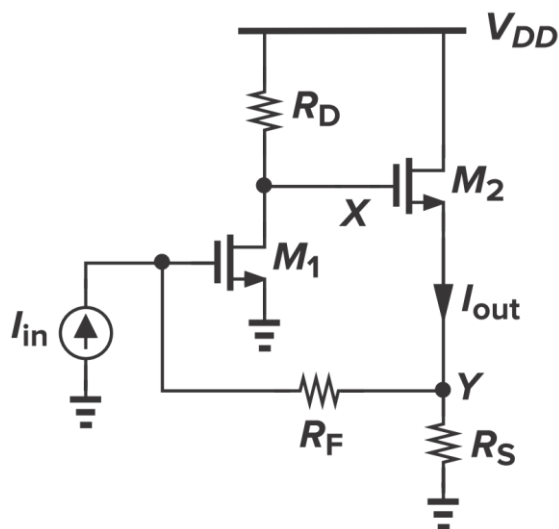
$$\Rightarrow A_{I,open} = \frac{H_{21}}{(1 + h_{22} H_{11})(1 + h_{11} H_{22})}$$
$$\beta = h_{21}$$

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

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



# 例8.17 计算开环和闭环增益



- 电流-电流反馈
- 开环增益
- 反馈系数
- 闭环增益

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

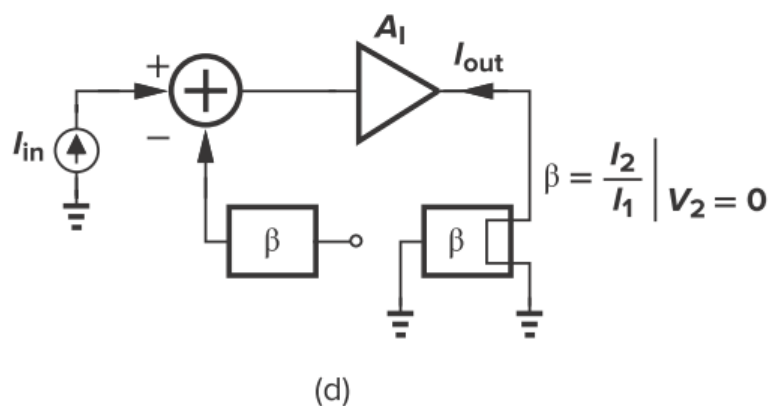
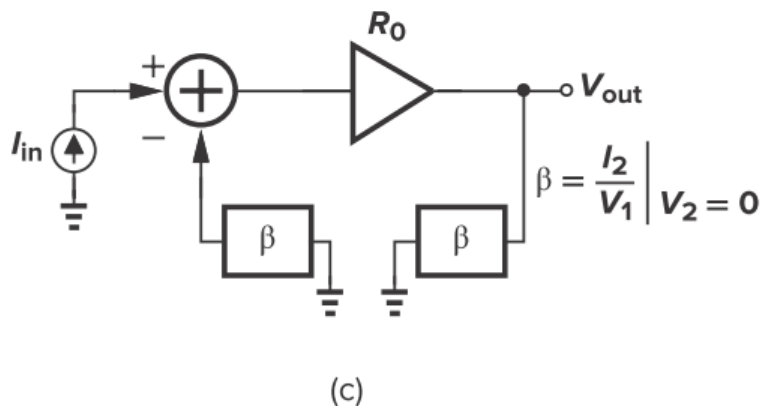
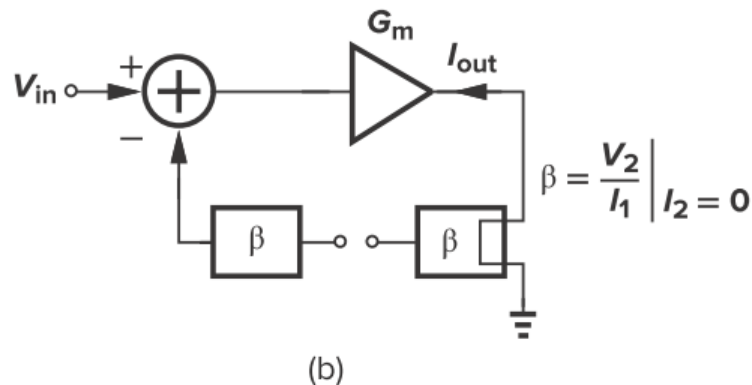
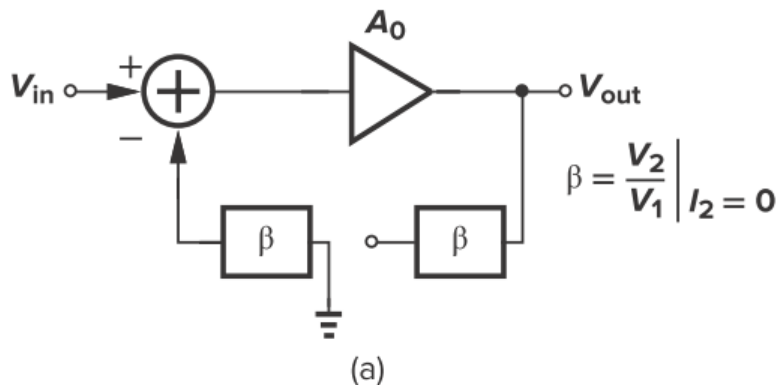
$$h_{21} = -R_S/(R_S + R_F)$$

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



# 加载效应小结

- 包含加载效应的分析：
  - 断开含有完全加载的环路，计算开环增益及输入输出阻抗
  - 确定反馈系数，得出环路增益
  - 计算闭环增益及输入输出阻抗





# 本章小结

- 反馈基本概念
  - 反馈系统的四个组成部分
  - 反馈电路的特性
  - 检测和返回机制
- 四种规范的反馈结构
  - 电压-电压反馈
  - 电压-电流反馈
  - 电流-电压反馈
  - 电流-电流反馈
- 反馈中的加载效应

# Thank you

程 林

Email: [eecheng@ustc.edu.cn](mailto:eecheng@ustc.edu.cn)