模拟与数字电路

Analog and Digital Circuits

课程主页 扫一扫

第二十一讲：**运算放大器的频率响应与补偿**

Lecture 21: **Opamp Frequency Compensation**

主　　讲：陈 迟 晓

Instructor ：Chixiao Chen

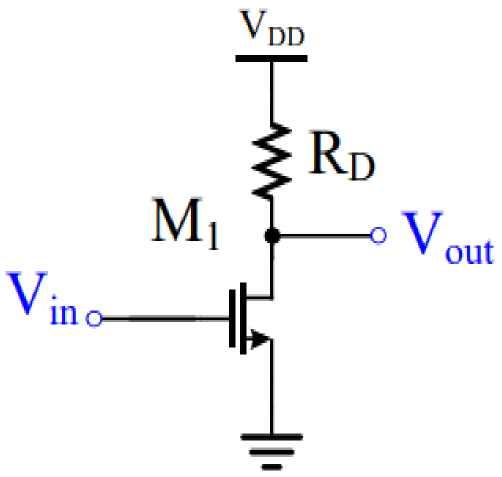
提纲

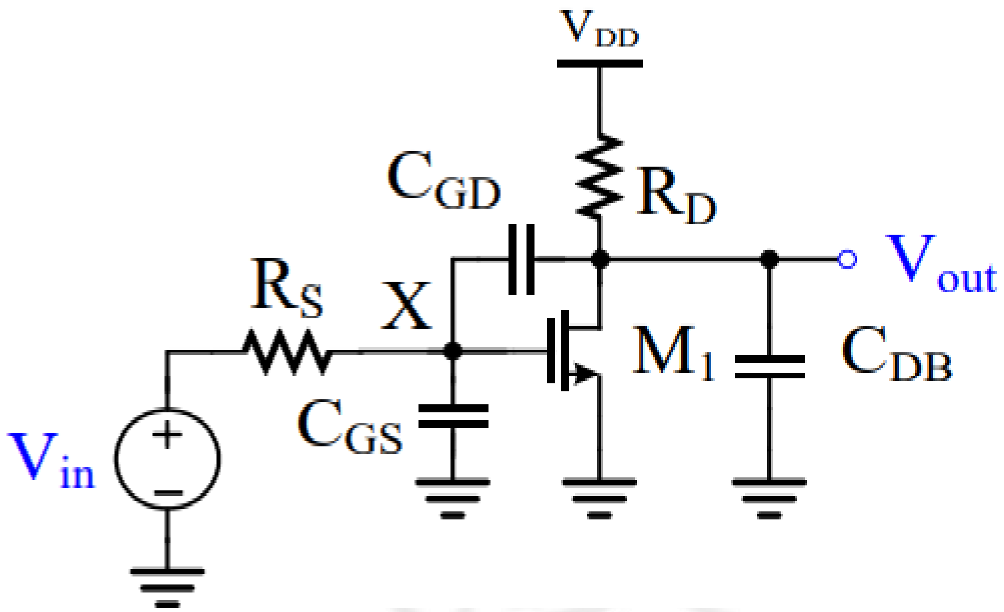
- 复习
  - 什么是虚短、虚断?

  - 放大器的频率响应
  - 密勒近似
  - 反馈电路的稳定性
  - 密勒补偿

频率响应

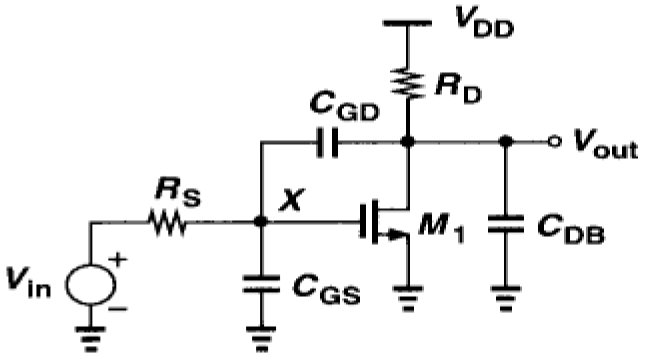
- 下面分析一个简单的共源级放大器。之前我们在做小信号分析时，得到增益为：$Av=-g_m R_{out}$
- 而实际上，MOS管的各端之间存在“寄生电容”，这些电容会影响不同频率下的小信号增益。这些寄生电容的存在是由MOS管的结构决定的。

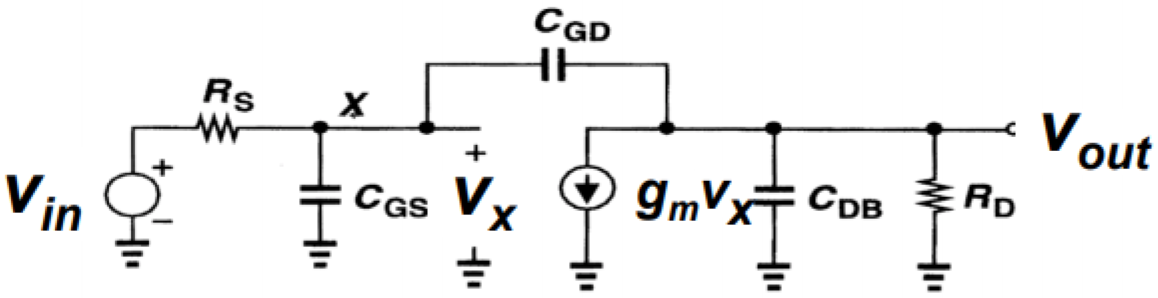




单级放大器的频率响应

- 如果我们直接对该电路进行小信号分析，会怎么样呢？





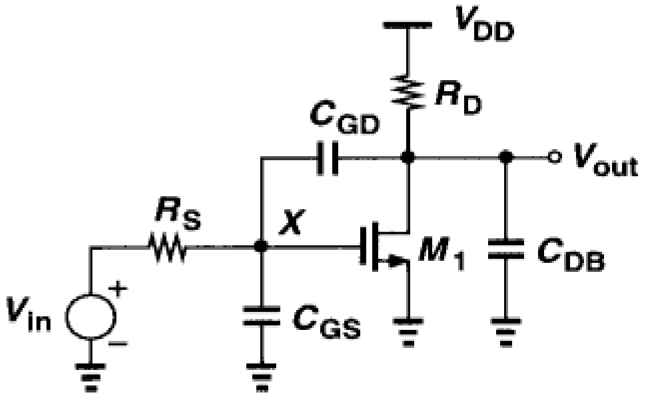
$$\frac{v_x - v_{in}}{R_S} + v_x \cdot sC_{GS} + (v_x - v_{out}) \cdot sC_{GD} = 0$$

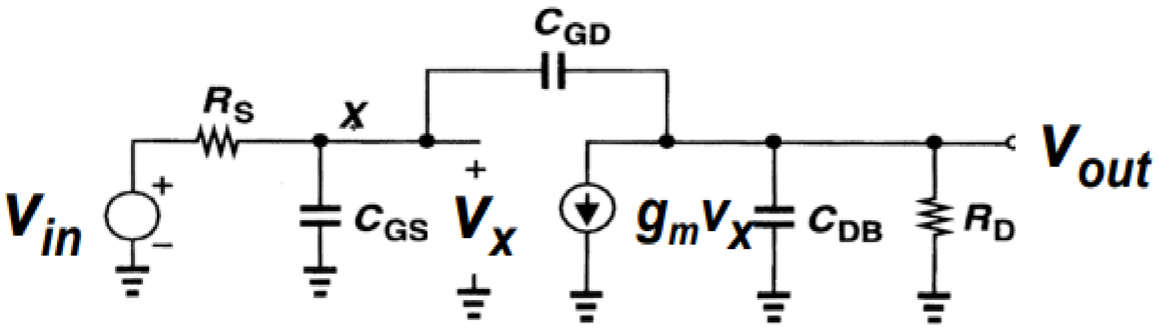
$$(v_{out} - v_x) \cdot sC_{GD} + g_m v_x + v_{out}\left(\frac{1}{R_D} + sC_{DB}\right) = 0$$

$\rightarrow$?

单级放大器的频率响应

- 如果我们直接对该电路进行小信号分析，会怎么样呢？





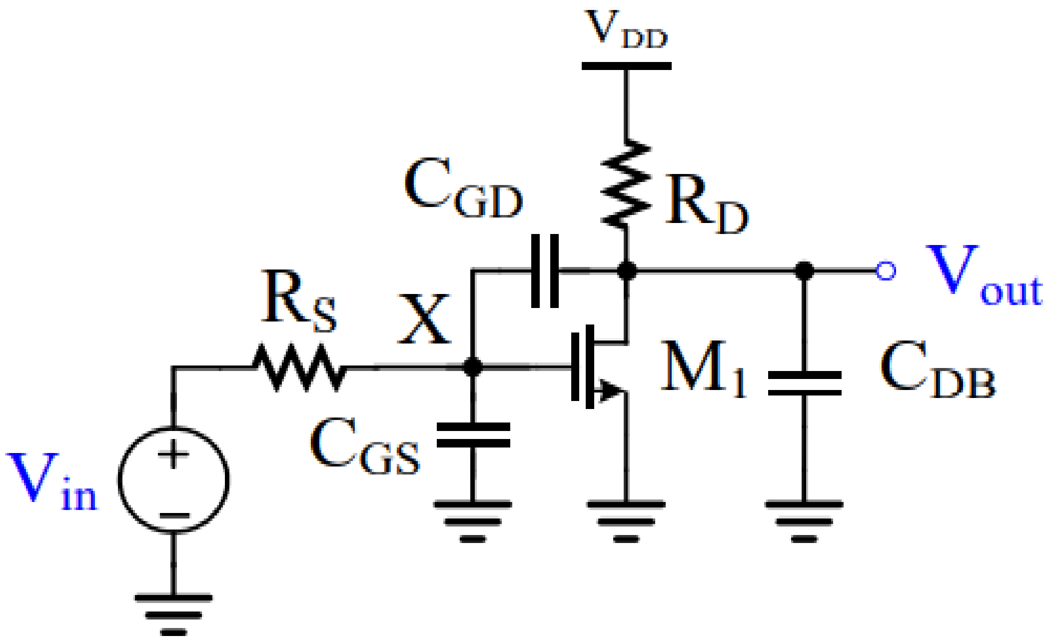
$$v_x = \frac{v_{out}(sC_{GD} + 1/R_D + sC_{DB})}{g_m - sC_{GD}}$$

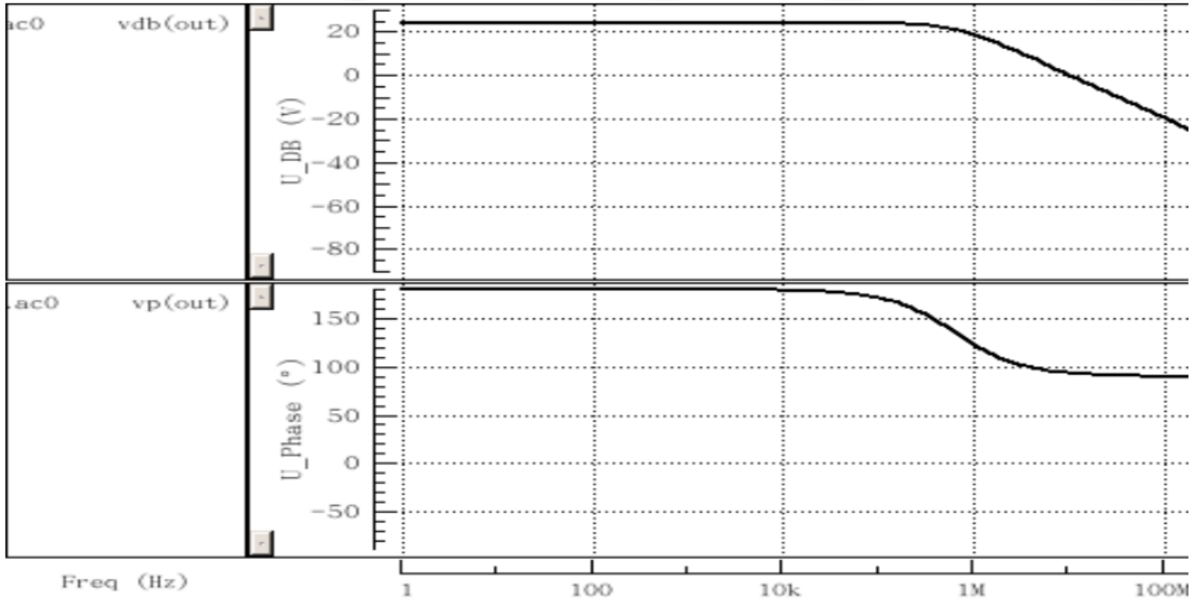
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{(sC_{GD} - g_m)R_D}{s^2 \cdot R_S R_D \cdot \zeta + s\left[R_S(1+g_m R_D)C_{GD} + R_S C_{GS} + R_D(C_{GD} + C_{DB})\right] + 1}$$

$$\zeta = C_{GS}C_{GD} + C_{GS}C_{SB} + C_{GD}C_{DB}$$

频率响应

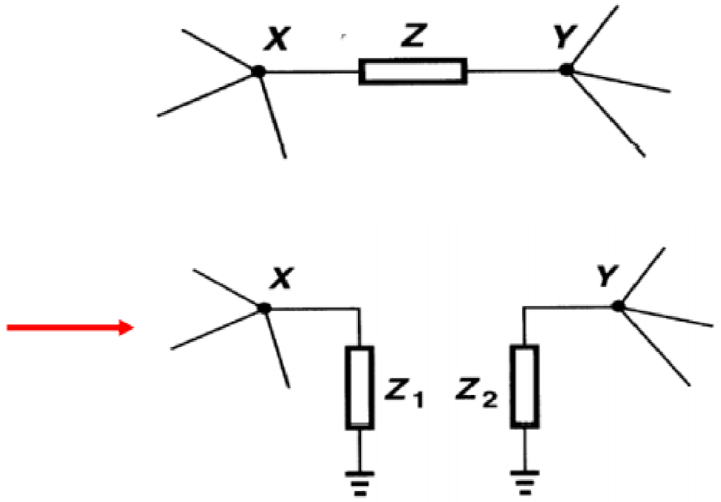
- 用仿真工具可以得到这个电路的增益与频率之间的关系，这种表示出增益的模与相位随频率变化的图，我们称之为波特图。（模的单位是分贝dB，X轴为对数坐标）

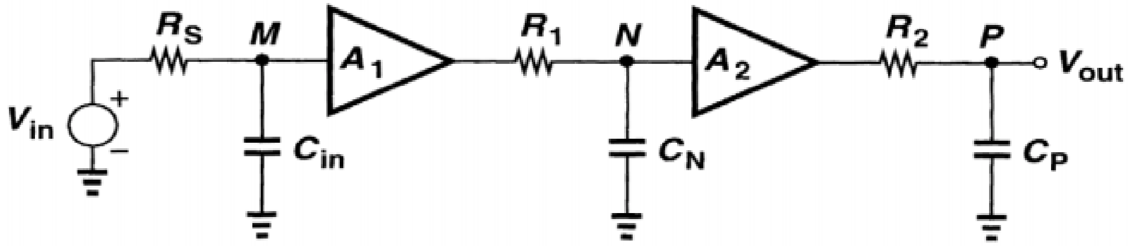




密勒近似

- 通过上述推导，我们可以确定存在两个极点。
- 科学思想：将跨接的电容分别近似到隔离的两个node
- 将上述近似方法称为——密勒近似



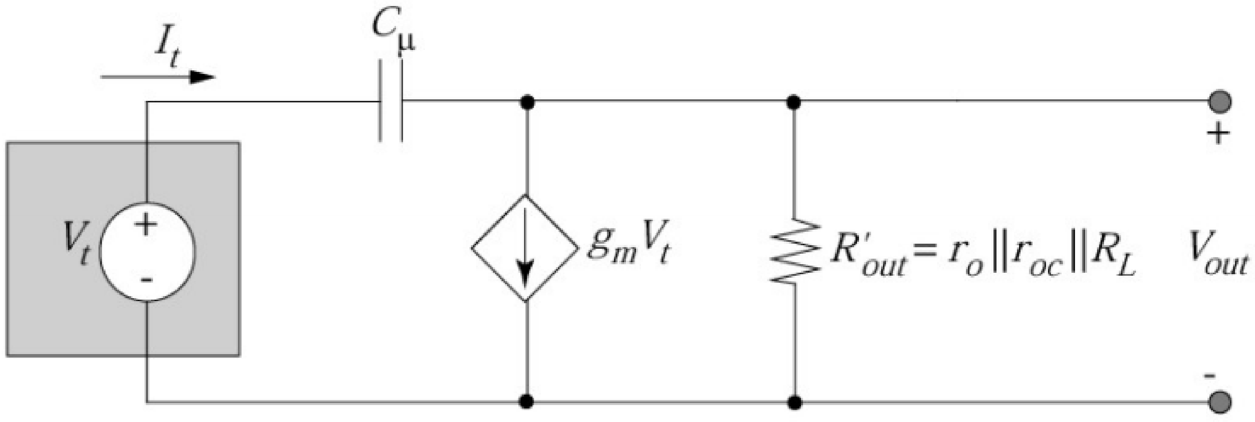


$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{1}{1+R_S C_{in} s}\cdot\frac{A_1}{1+R_1 C_N s}\cdot\frac{A_2}{1+R_2 C_p s}$$

$$= 1\cdot A_1 A_2 \frac{1}{1+s/\omega_{pM}}\cdot\frac{1}{1+s/\omega_{pN}}\cdot\frac{1}{1+s/\omega_{pP}}$$

密勒近似的推导

- 等效输入阻抗



$$I_t = (V_t - V_{out}) / Z_\mu$$

At output node:

$$V_{out} = (-g_m V_t - I_t) R'_{out} \approx -g_m V_t R'_{out}$$

$$I_t = (V_t - A_{vC_\mu} V_t) / Z_\mu$$

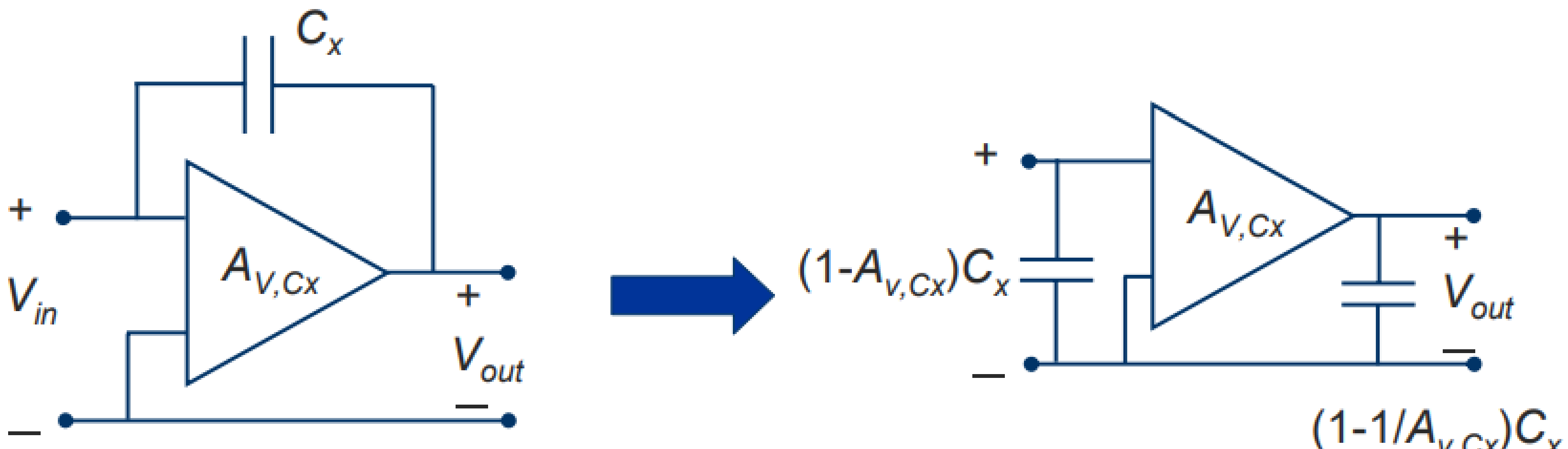
$$\boxed{Z_{in} = V_t / I_t = \frac{Z_\mu}{1 - A_{vC_\mu}}}$$

- 等效输出阻抗 = Cu

密勒近似用于负反馈电路

- 左侧的电容可以等效为右侧（假定$A \gg 1$）：

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_M} = \left(\frac{1}{1-A_{vC_\mu}}\right)\left(\frac{1}{j\omega C_\mu}\right) = \frac{1}{j\omega\left[\left(1-A_{vC\mu}\right)C_\mu\right]}$$

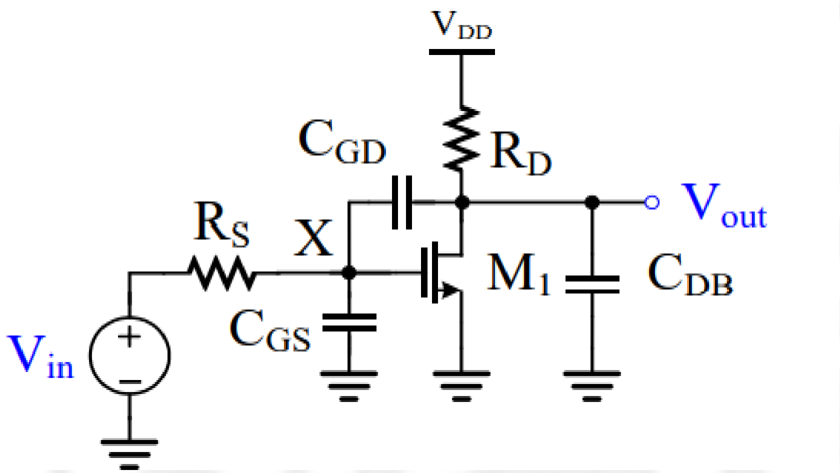


密勒等效

- 那么这个共源级放大器的两个极点可以写成:

$$\omega_{p,in} = \frac{1}{R_S\left[C_{GS} + (1+g_m R_D)C_{GD}\right]}$$

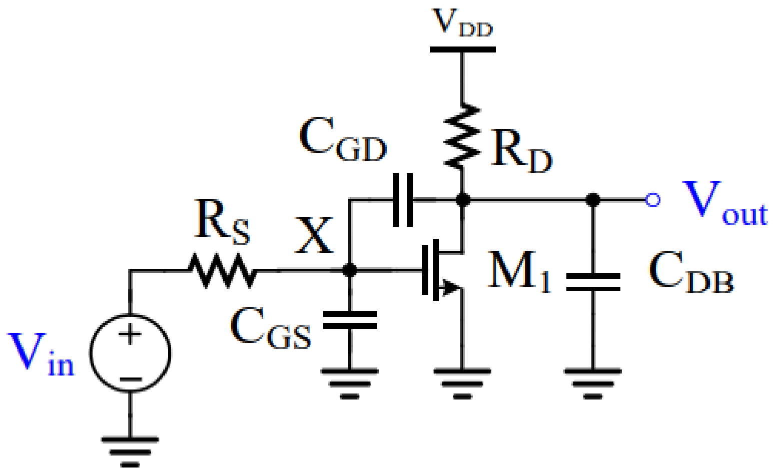
$$\omega_{p,out} = \frac{1}{\left(C_{GD} + C_{DB}\right)R_D}$$



这其实只是在R_s比较小的情况下所做出的近似，实际的表达式要更加的复杂。另外因为栅极和源极之间的电压比值也并非严格等于$g_m R_D$，因此这个式子依然需要修正。不过这个式子可以大致反映电路的频率特性。

密勒等效

- 如果R_s比较大，那么可以修正为：



$$\omega_{p,in} = \frac{1}{R_S\left[C_{GS} + (1 + g_m R_D)C_{GD}\right]}$$

$$\omega_{p,out} = \frac{1}{\left[R_D \left\| \left(\frac{C_{GD} + C_{GS}}{C_{GD}} \cdot \frac{1}{g_{m1}}\right)\right.\right](C_{eq} + C_{DB})}$$

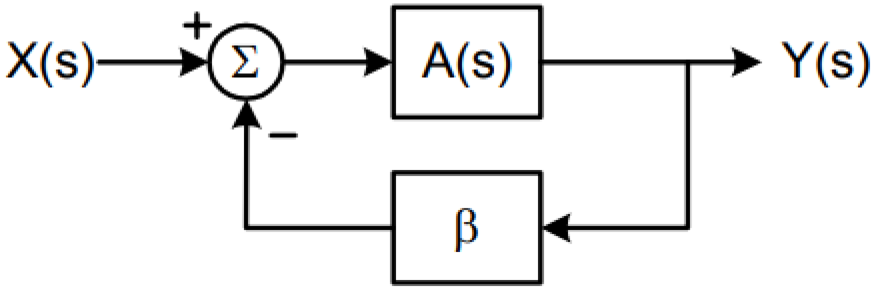
$C_{eq}=C_{GD}C_{GS}/(C_{GD}+C_{GS})$

$$A_v(s) = \frac{v_{out}}{v_{in}}(s) = \frac{-g_m R_D}{(1 + s/\omega_{in})(1 + s/\omega_{out})}$$

反馈电路的稳定性

- 具有频率特性的反馈电路

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

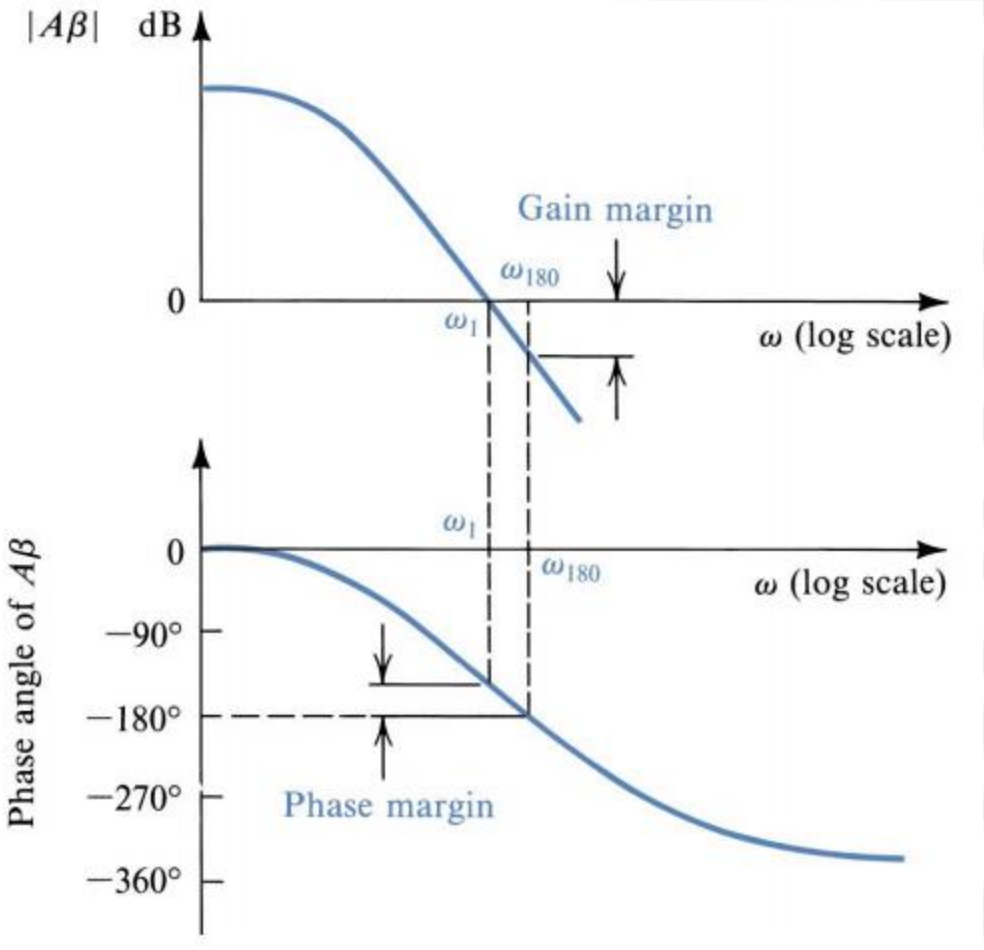


- 由于放大电路本征的低通特性，
- 考虑以下情况：存在一个频率使得
- 那么电路在该频率的实际增益是无穷大

$$|\beta A(j\omega_1)|=1$$
$$\angle \beta A(j\omega_1)=-180°$$

从波特图上分析稳定性

- 定义裕量来判断系统的稳定性
- 相位裕量（0-dB增益时的相位）
- 幅度裕量（180度相差时的幅度）
- 问题：由单极点放大器实现反馈电路是否稳定？



单极点放大器实现的反馈电路

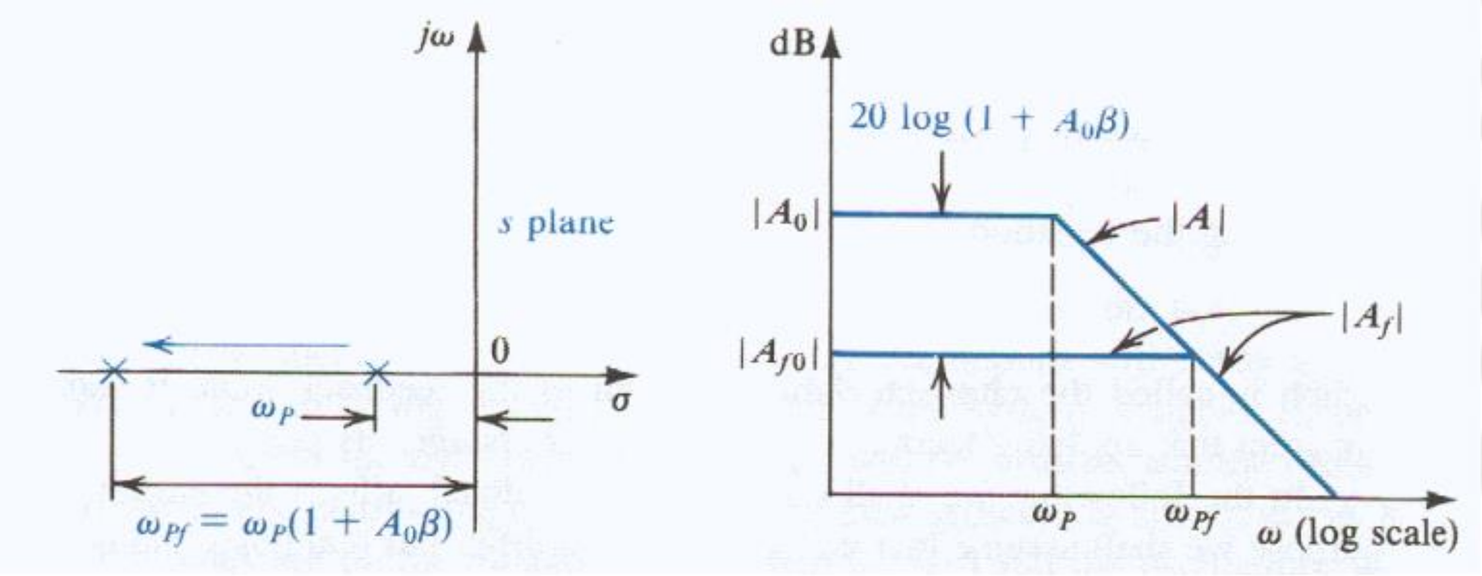
- 假设运放的频率响应 $A(s) = A_0/(1+s/\omega_p)$

$$A_f(s) = \frac{A_0/(1+A_0\beta)}{1+s/\omega_p(1+A_0\beta)}$$

- 那么反馈电路将极点移动到

$$\omega_{pf} = \omega_p(1+A_0\beta)$$

- 闭环波特图可表示



双极点放大器实现的反馈电路

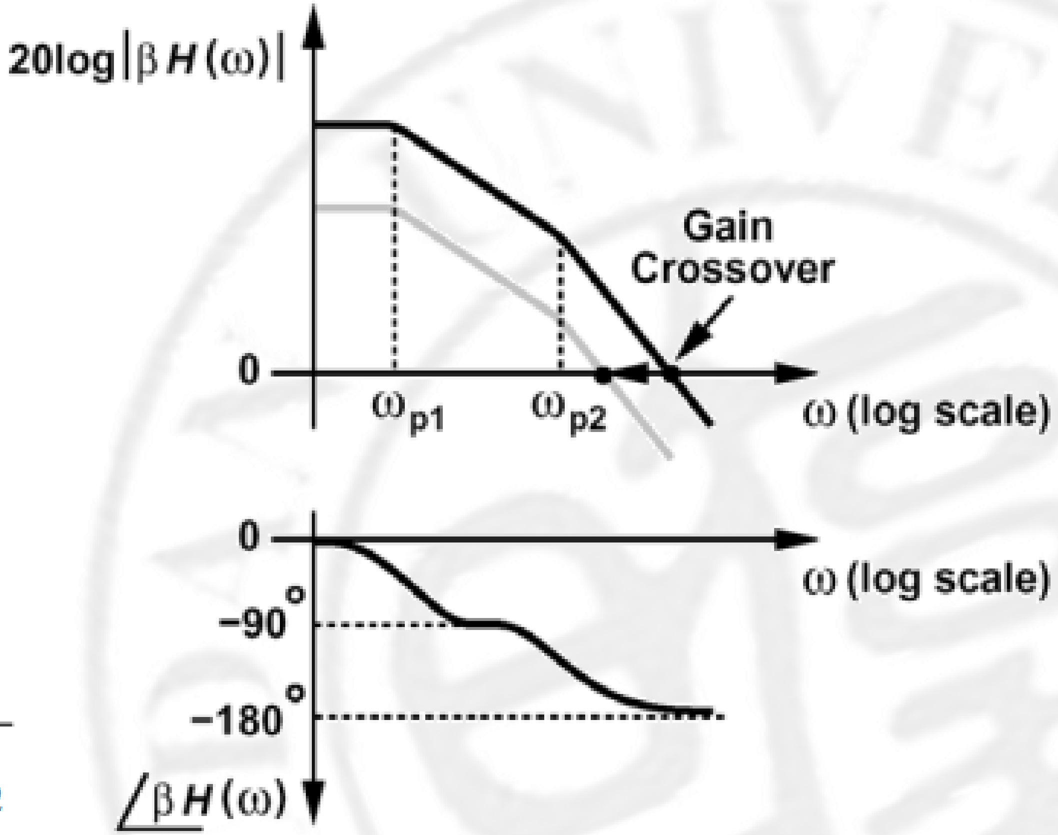
- 假设放大器的频率响应

$$A(s)=\frac{A_0}{(1+s/\omega_{p1})(1+s/\omega_{p2})}$$

- 闭环后的零极点分布：

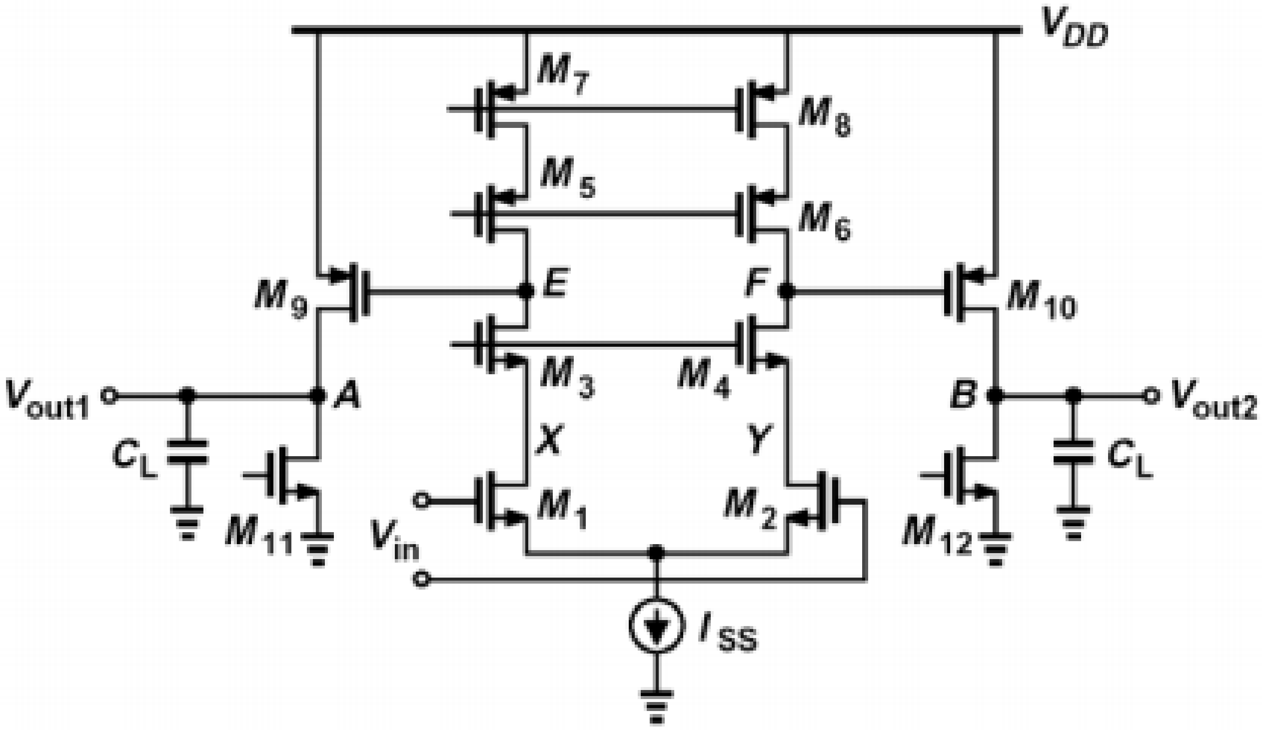
$$s^2+s(\omega_{p1}+\omega_{p2})+(1+A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}=0$$

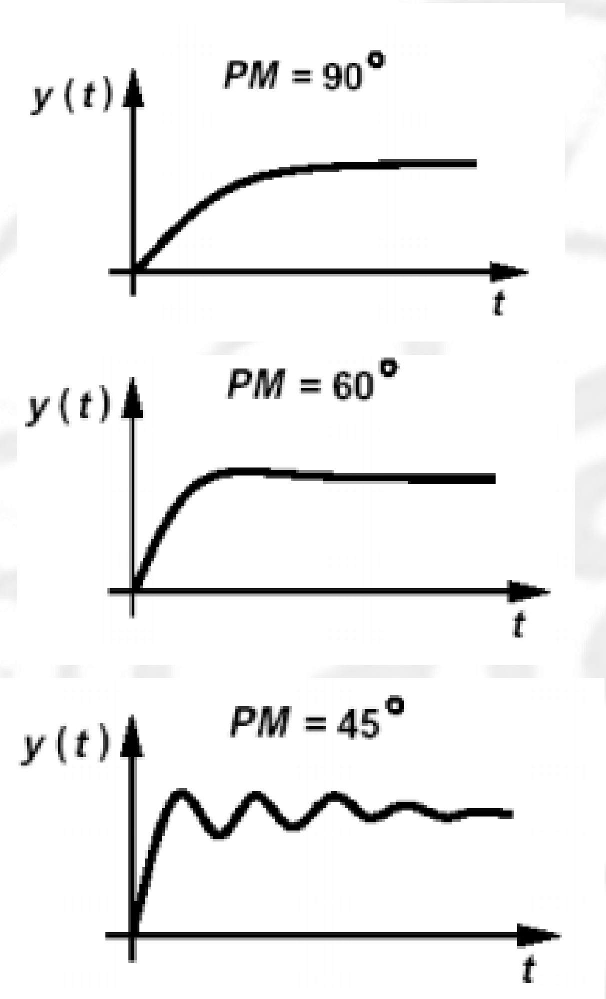
$$s=-\tfrac{1}{2}(\omega_{p1}+\omega_{p2})\pm\tfrac{1}{2}\sqrt{(\omega_{p1}+\omega_{p2})^2-4(1+A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}}$$



多级放大器的稳定性

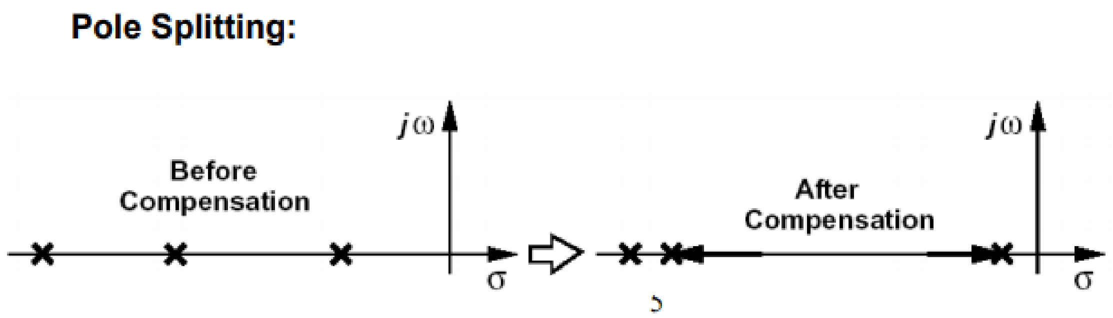
- 为了保证增益，常见的运算放大器均为多级放大器，即多极点放大器

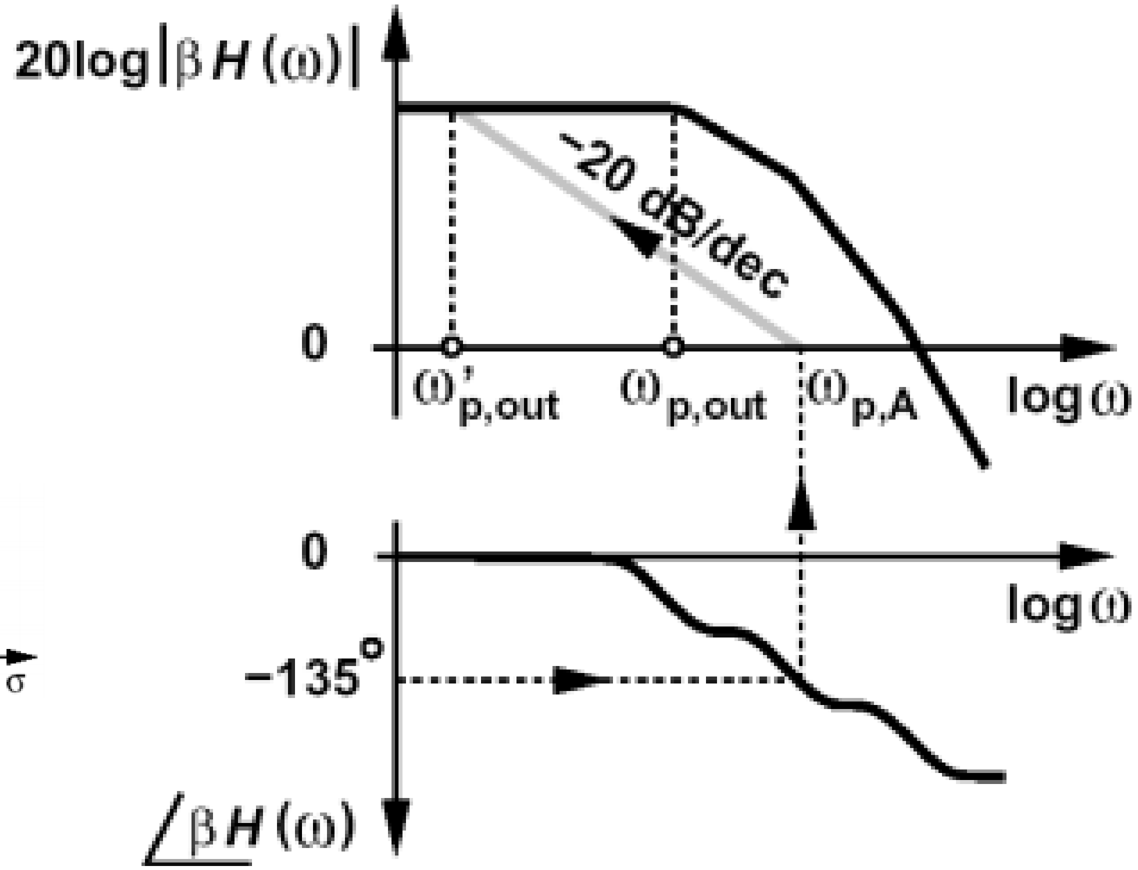




极点分离

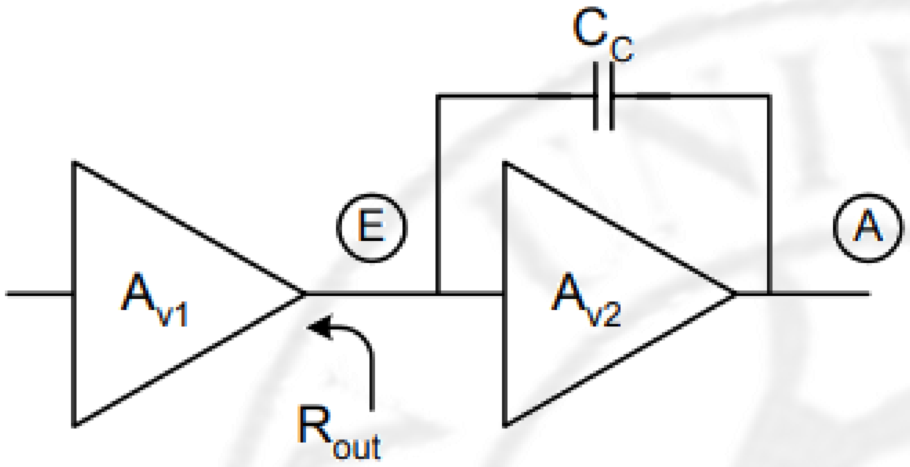
- 如果我们将第一个极点变小
- 非常靠近直流，那么其波特图发生何种变化





利用密勒实现极点分离

- 对于一个两级放大器而言：



- Miller补偿用一个不太大的电容实现了一个非常小的极点
  - Create a large capacitance at node E, $(1+A_{v2})C_C$
  - Pole associated with node E now becomes

$$\frac{1}{R_{out1}\left[C_E+\left(1+A_{v2}\right)C_C\right]}$$

- 称为主极点，该方法成为Miller 补偿

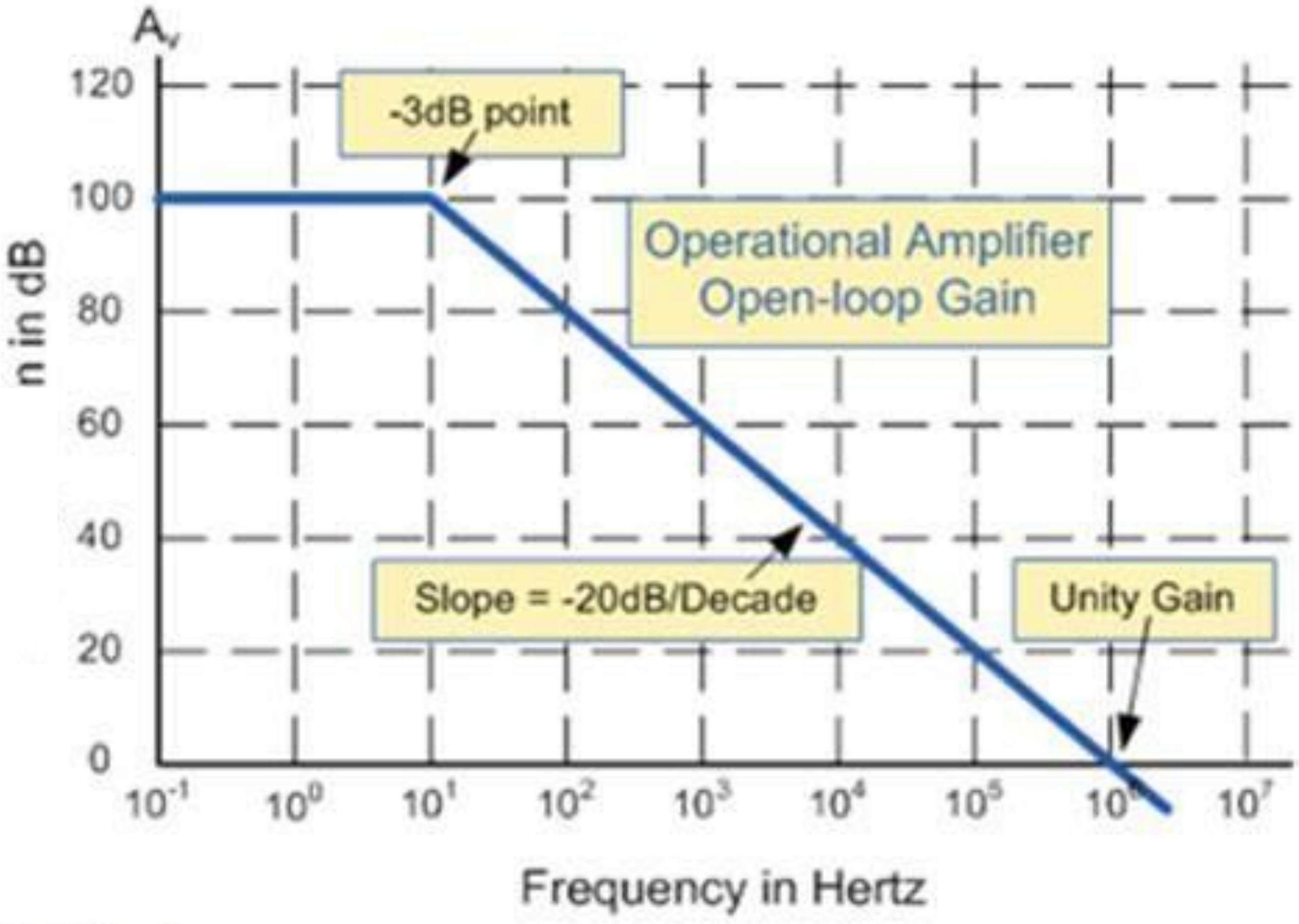
增益带宽积（GBP）

- 对于仅有主极点小于单位增益的运算放大器形成的闭环，定义增益带宽积

$$[A_o/(1+A_o\beta)]\omega_h = [A_o/(1+A_o\beta)]\omega_p(1+A_o\beta)$$
$$= A_o\omega_p$$

– which is the open-loop gain-BW product

- GBP是常数，已知带宽、增益→ 第一个极点



Amplifiers)