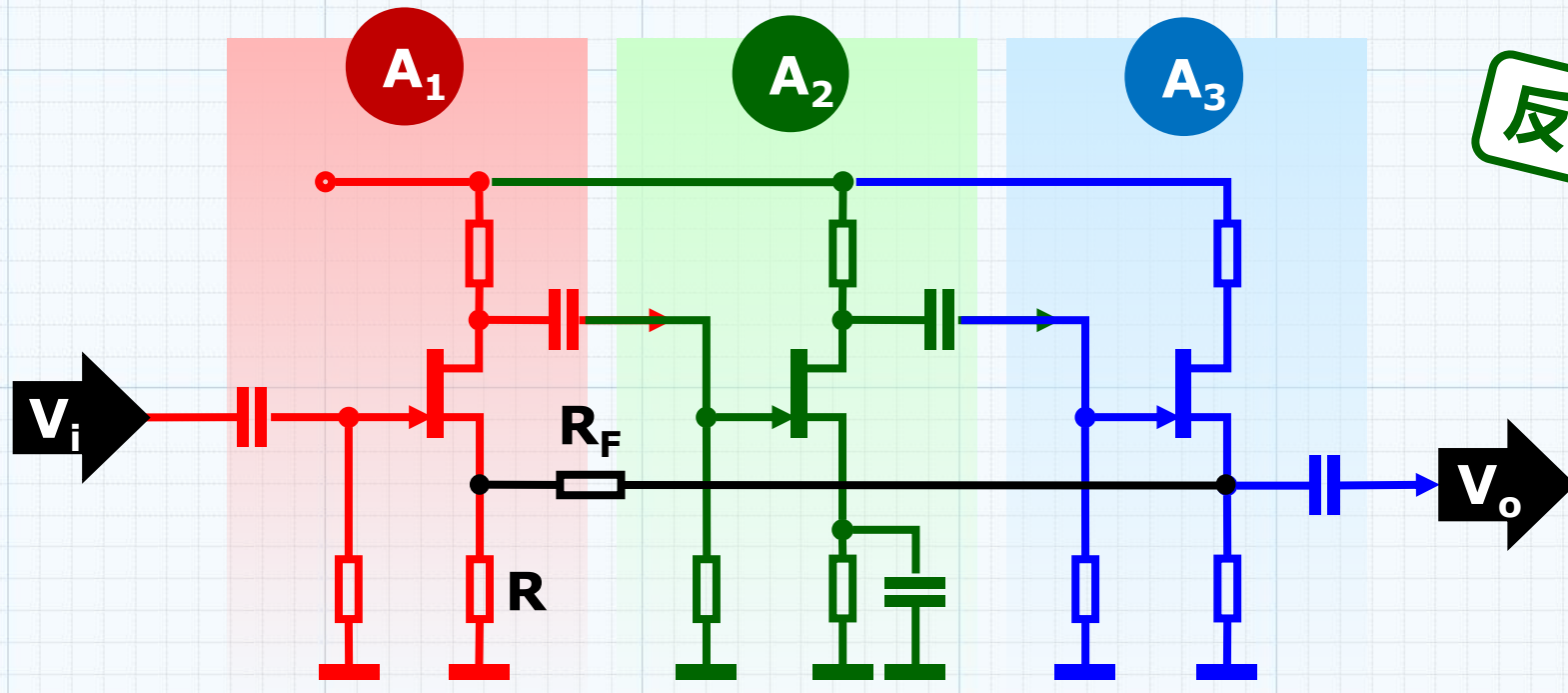




电子线路
分析与设计

第 19-20 讲 反馈

陈江
2022.11



反馈是个好东西

精确

指标高

稳定

? 请快速估算该放大器增益

- ▶ 稍嫌麻烦
- ▶ 负载|源变化 → 增益变化
- ▶ 环境变化 → 性能不稳定
- ▶ 设计电路更痛苦

? 但是如果做一小点点改动 ...

- ▶ 再做假设: $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ 很大
- ▶ 以及假设: R_F 相对 R 不是很大
- ▶ 可能的结论1: $A_{\text{总}} \approx 1 + (R_F/R)$
- ▶ 可能的结论2: $R_O \rightarrow 0$
- ▶ 可能的结论3: 相当稳定 ...

? 什么是反馈?

- ▶ 信号反向传输
- ▶ Feedback

无反馈系统

- ▶ 执行指令
- ▶ 无监督观测机制
- ▶ 动作尽量准确

不知效果

误差累积

快速

有反馈系统

- ▶ 执行指令
- ▶ 增加监督观测机制
- ▶ 根据观察结果修正执行

知晓效果

误差缩减

低速

管理体系

法制体系

新闻体系

教育体系

修身

齐家

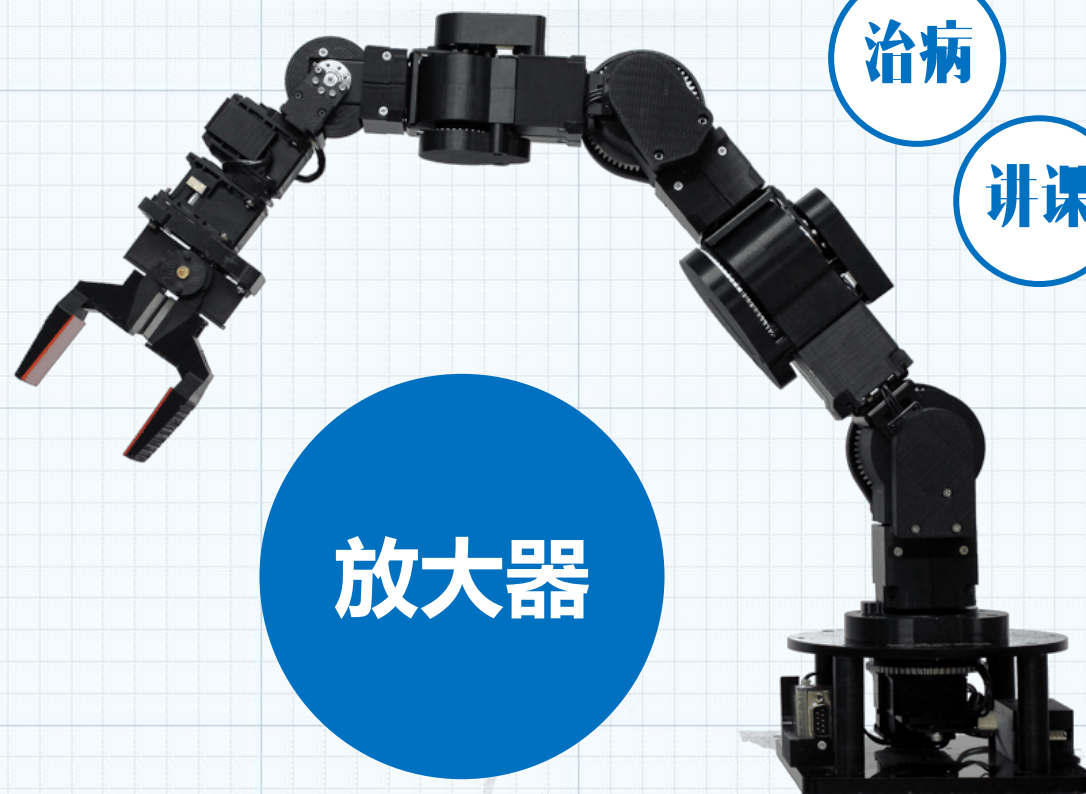
治国

平天下

吃饭

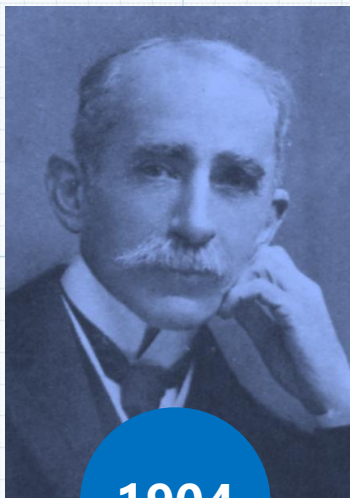
治病

讲课



放大器

John Fleming



1904

电子管

放大器
增益不足

Edwin Armstrong



1912

再生放大器

涨落

共线串扰

Harold Black



1927

负反馈

鸟叫

Harry Nyquist



1932

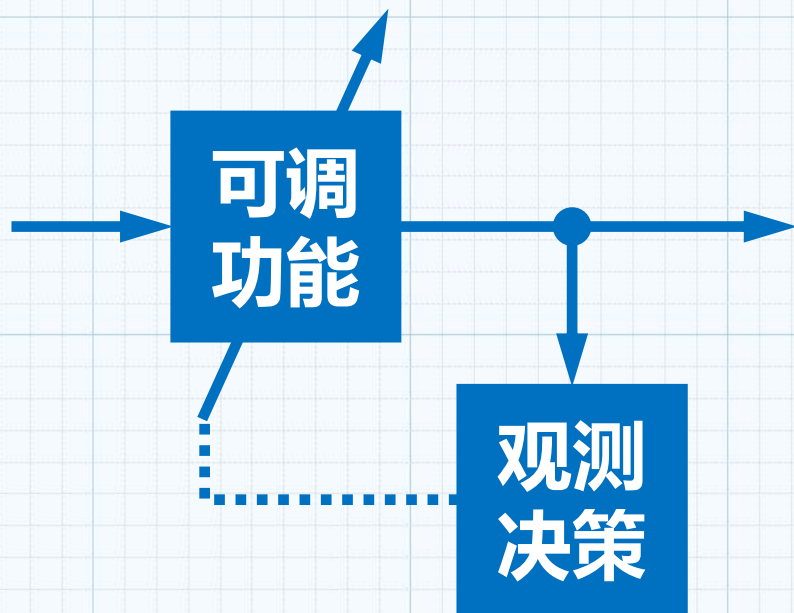
自激机理

Norbert Wiener



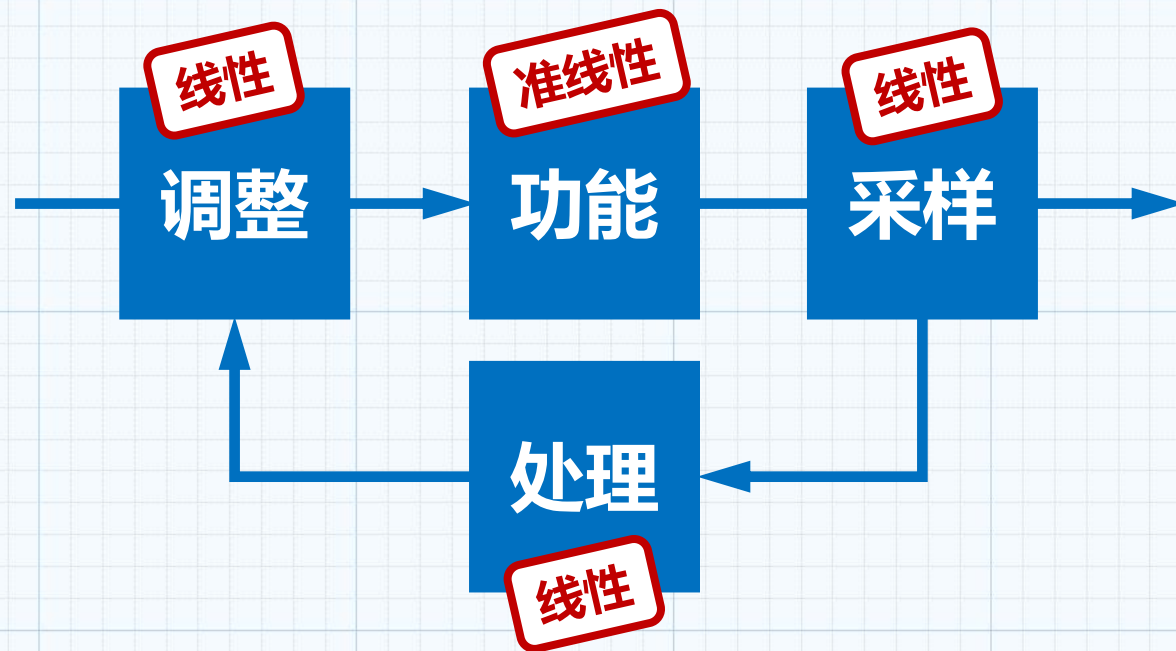
1948

控制论



? 反馈系统的两个模块？

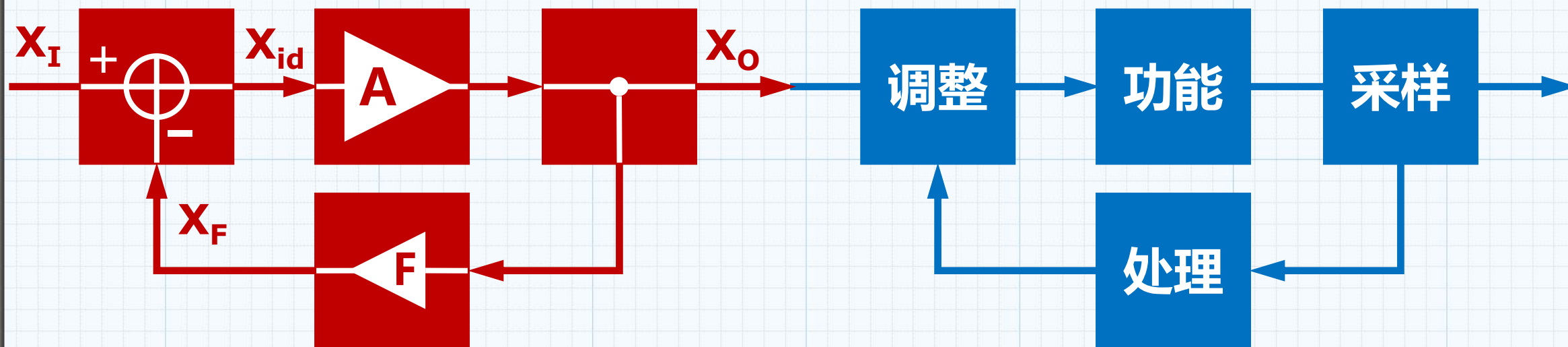
- ▶ 可调节的功能模块
- ▶ 观测后的调节措施



? 细分为四个原子模块：

- ▶ 基本功能：野蛮而傻乎乎
- ▶ 简易调整：或加，或减
- ▶ 反馈处理：产生调节量
- ▶ 简易采样：获取处理依据

线性
反馈
系统

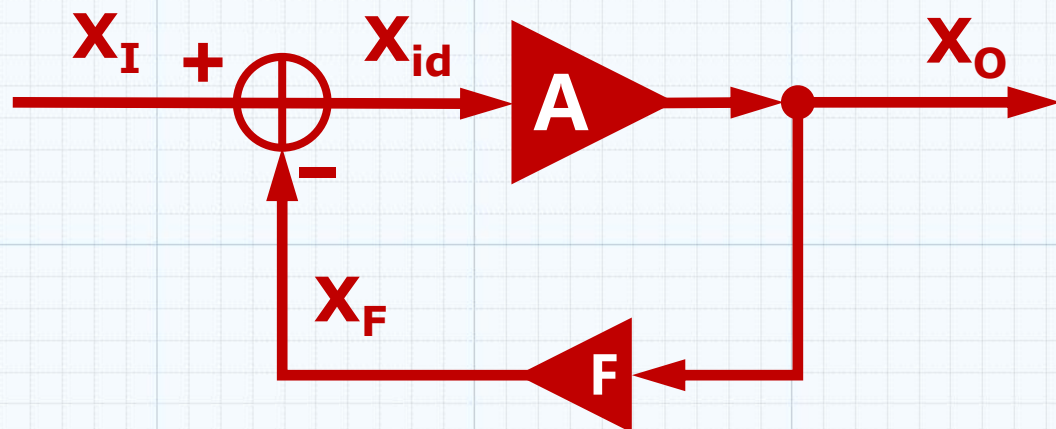


? 反馈放大器？

- ▶ 放大：普通放大器
- ▶ 调整：V 或 I 的加或减
- ▶ 处理：分压|分流| $V \rightarrow I$ | $I \rightarrow V$
- ▶ 采样：直接|间接取得 V 或 I

? 到底是电压还是电流？

- ▶ 既可以是 V，也可以是 I
- ▶ 一般性的框图中，使用 X
- ▶ X_F ：反馈量
- ▶ X_{id} ：净输入量



? 线性反馈放大器基本方程？

原放大器
增益定义

$$A = \frac{X_O}{X_{id}}$$

$$X_{id} = \frac{X_O}{A}$$

反馈系数
定义

$$F = \frac{X_F}{X_O}$$

$$X_F = X_O F$$

反馈调整
关系

$$X_{id} = X_I - X_F$$

$$\frac{X_O}{A} = X_I - X_O F$$

$$A_F = \frac{X_O}{X_I} = \frac{A}{1 + AF}$$

定义

A_F
闭环增益

定义

$D = 1 + AF$
反馈深度

定义

AF
环路增益

! 不同 D (或AF) 功能截然不同

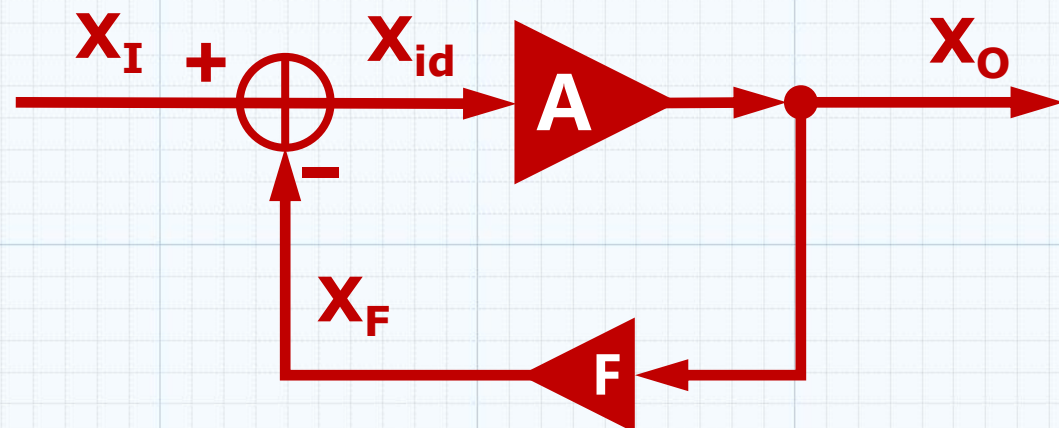
▶ $1 + AF > 1$ 负反馈

▶ $1 + AF = 1$ 无反馈

▶ $1 > 1 + AF > 0$ 收敛的正反馈

▶ $1 + AF = 0$ 自激振荡

▶ $1 + AF < 0$ 发散的正反馈



? 为什么要分类？

- ▶ 不同反馈效果可能相反
- ▶ 增益更大？ 还是更小？
- ▶ 更稳定？ 更不稳定？
- ▶ 稳定Q？ 还是稳定A？
- ▶ 稳定V？ 还是稳定I？

正反馈 负反馈

直流反馈 交流反馈

级内反馈 级间反馈

电压反馈 电流反馈

串联反馈 并联反馈

← 反馈信号极性：AF 是正|负？

← X_F 所处的频段：是直流|交流？

← 反馈环路跨度：单级内|多级间？ ✓

← X_O 是 V 还是 I

← X_F 是 V 还是 I

} 四种
组态

正 | 负反馈的功用?

正反馈

增益提升，趋于发散
牺牲稳定性换取增益/速度

负反馈

增益减小，趋于稳定
牺牲增益/速度换取稳定性

如何判定 正 | 负反馈？

瞬时极性法

1. 标出放大通道和反馈通道
2. 假定某节点信号的瞬时极性
3. 沿通道判定各节点瞬时极性
4. 闭环处极性和预设是否相同

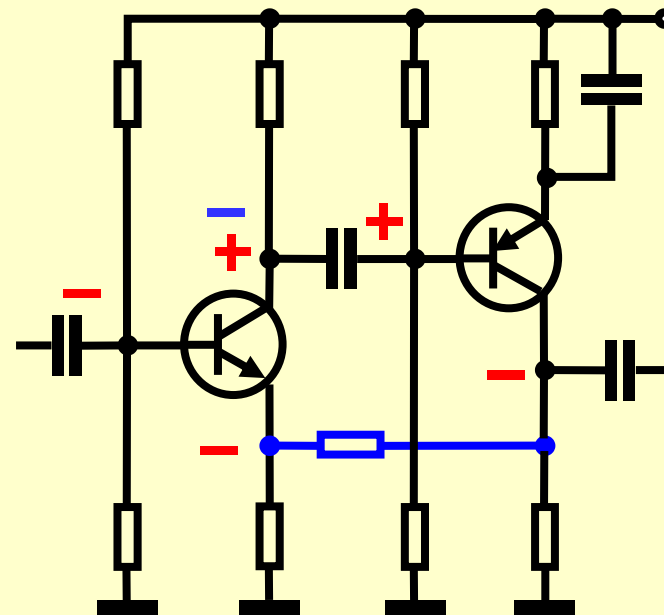
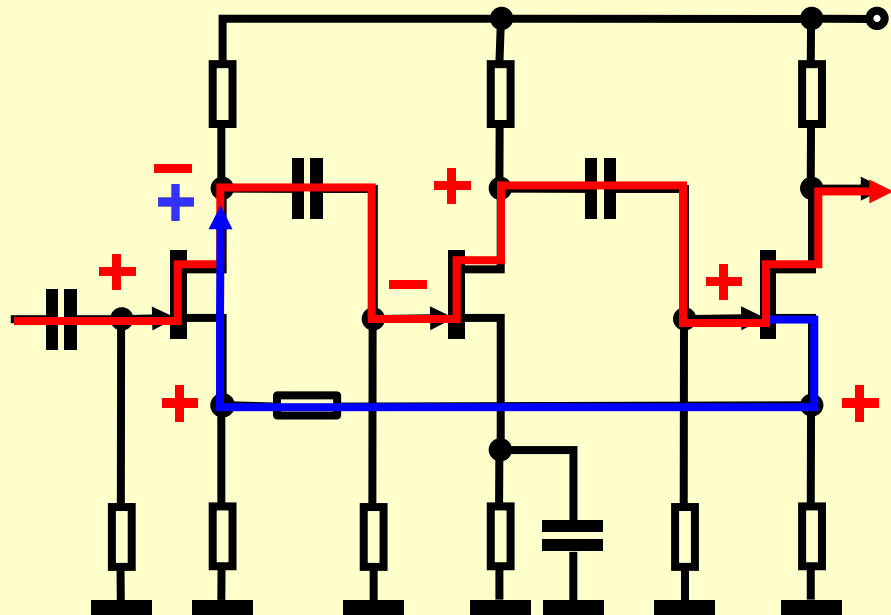
同→正
反→负

分类判定

深度负反馈

效用分析

稳定性



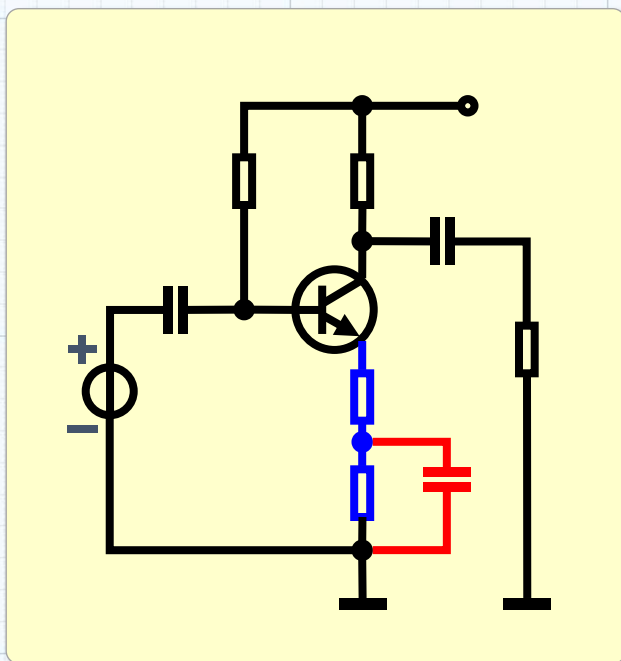
❓ 直流 | 交流负反馈功用？

直流负

反馈网络只有直流通路
稳定Q, 间接影响 A_v 等

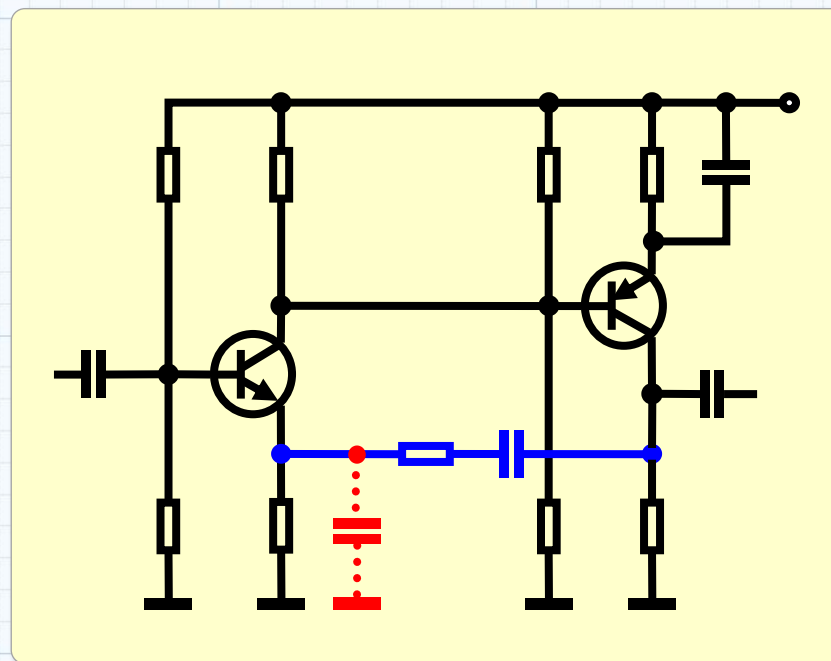
交流负

反馈网络只有交流通路
稳定 A_v , 间接影响Q

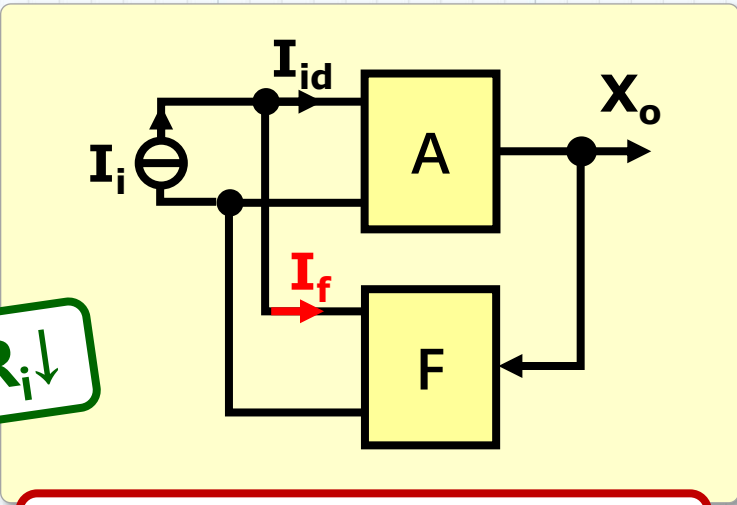
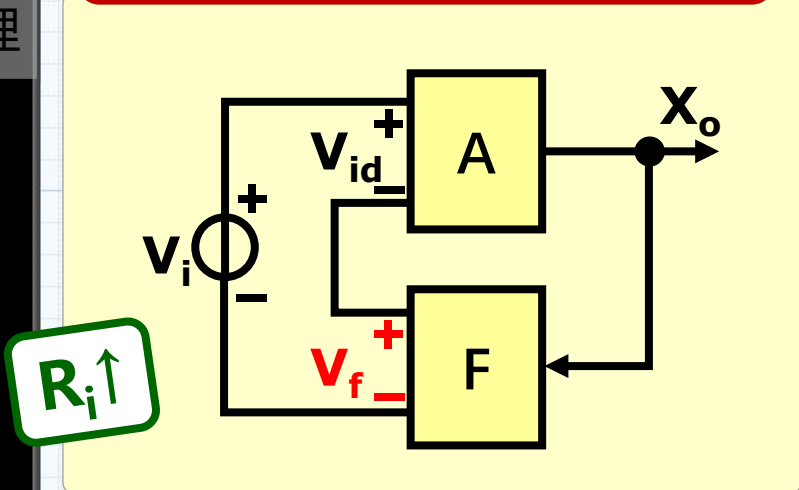


❓ 如何判定 直流 | 交流反馈？

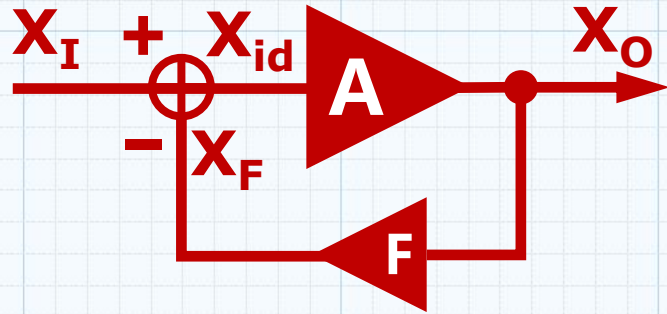
- ☑ 反馈通路是否有动态元件
- ☑ 耦合电容？
- ☑ 旁路电容？
- ☑ 其他动态元件？



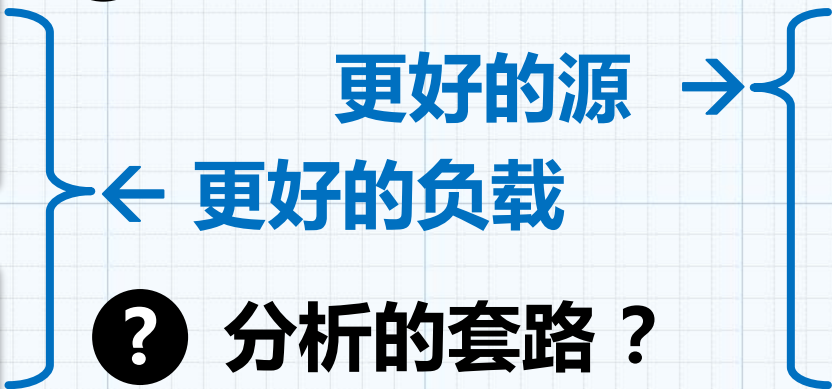
串联反馈：调整电压



并联反馈：调整电流

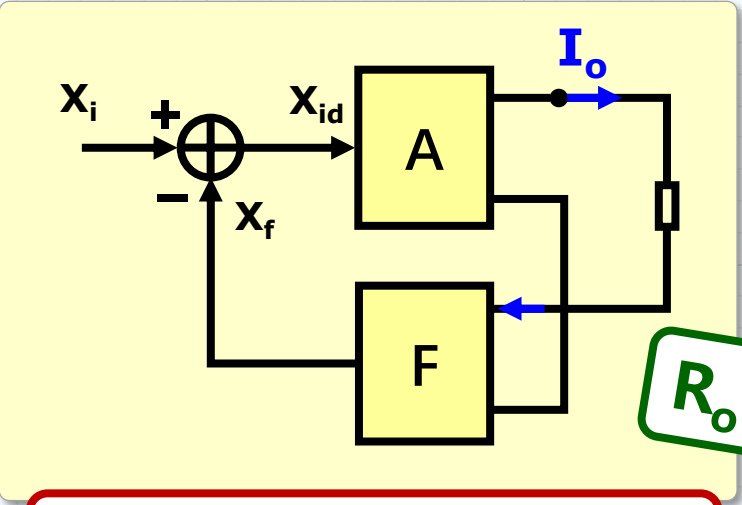
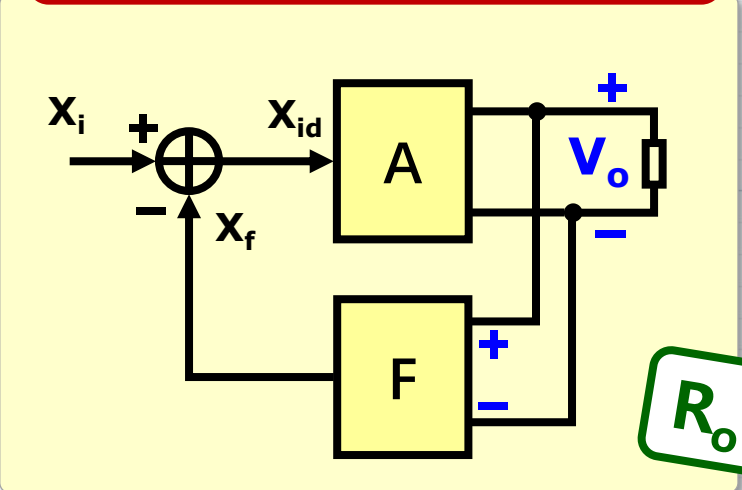


? 各组态负反馈效用



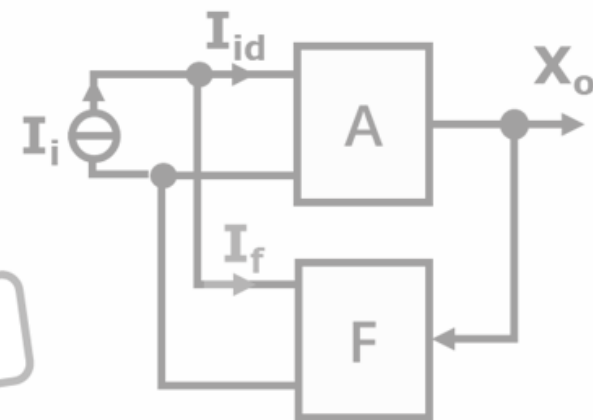
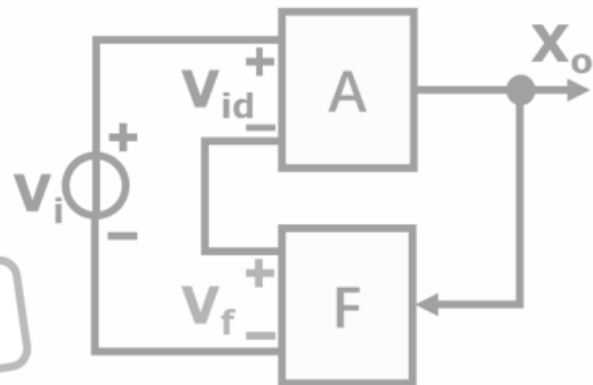
- ? 分析的套路？
- ▶ 假设遭某种扰动
 - ▶ 分析扰动极性
 - ▶ 负反馈→矫正扰动
 - ▶ 而扰动可以由更换 R_L 或 R_s 导致 ...

电压反馈：电压采样



电流反馈：电流采样

串联反馈：调整电压



并联反馈：调整电流

负反馈： $AF > 0$

情形1： $A, F > 0$

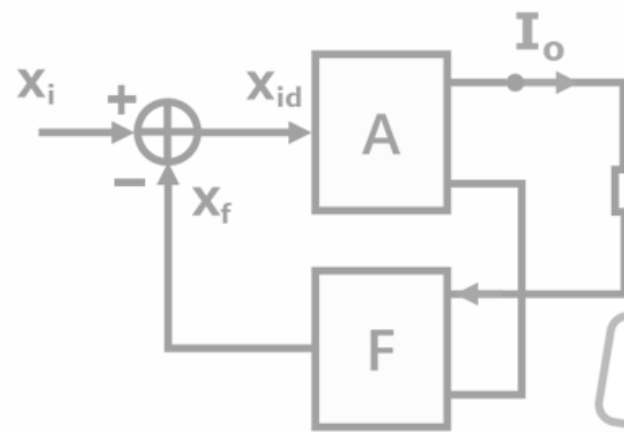
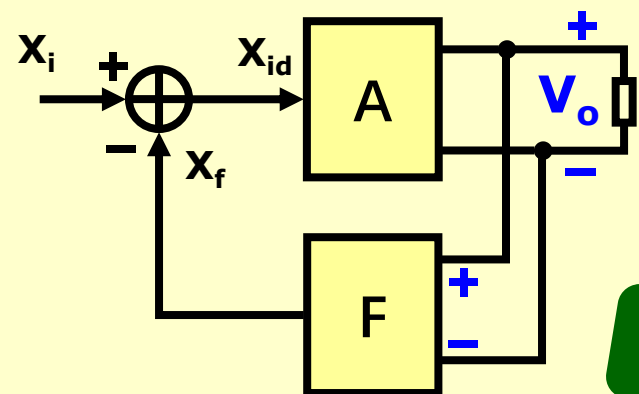
- ① 假设 $V_o \uparrow$
- ② $\rightarrow X_f \uparrow$
- ③ $\rightarrow X_{id} \downarrow$
- ④ $\rightarrow V_o \downarrow$

故输出 V_o 更稳定

- 若扰源假设为 R_L
- 则稳定根源是 $R_o \downarrow$

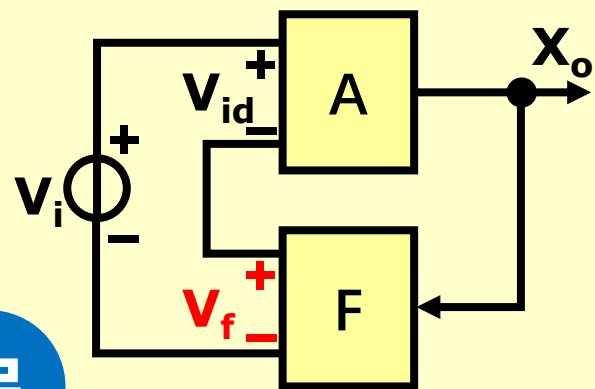
情形2： $A, F < 0$

电压反馈：电压采样

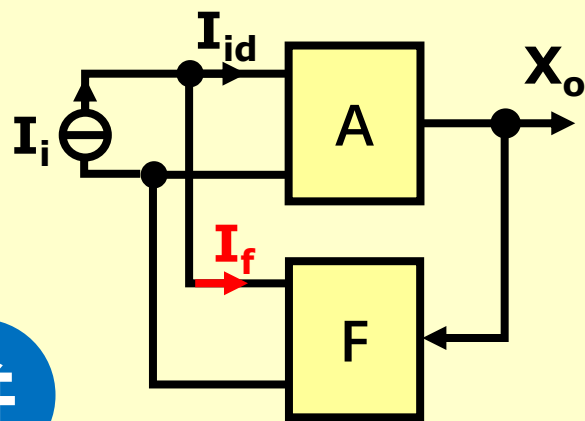


电流反馈：电流采样

- 若 $R_s \rightarrow 0$: 反馈最佳
- 若 $R_s \rightarrow \infty$: 反馈消失



串



并

- 若 $R_s \rightarrow 0$: 反馈消失
- 若 $R_s \rightarrow \infty$: 反馈最佳

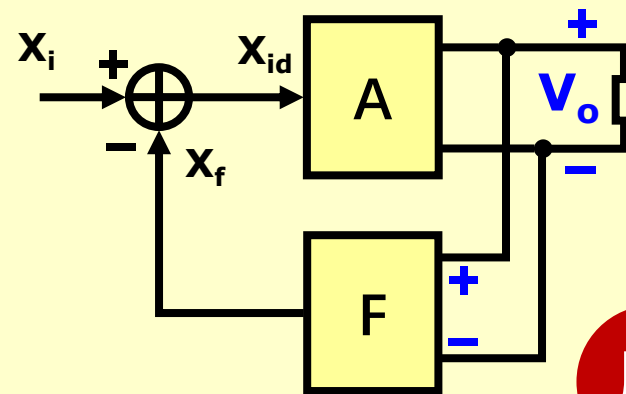
? 各组态如何判定?

- ① 假定反馈外部阻抗异常: $\rightarrow 0$ 或 $\rightarrow \infty$
- ② 判断是否仍有反馈
- ③ 即可区分组态

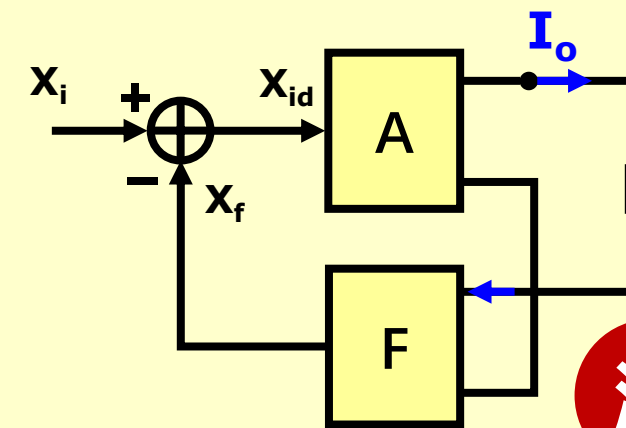
注意:

- 先确定反馈前|后端
→ 否则可能引出矛盾
- 组态互斥 → 唯一解
→ 短|断互为校验
- 只需分析“半圈”
→ 先假定对端有信号

- 若 $R_L \rightarrow 0$: 反馈消失
- 若 $R_L \rightarrow \infty$: 反馈最佳



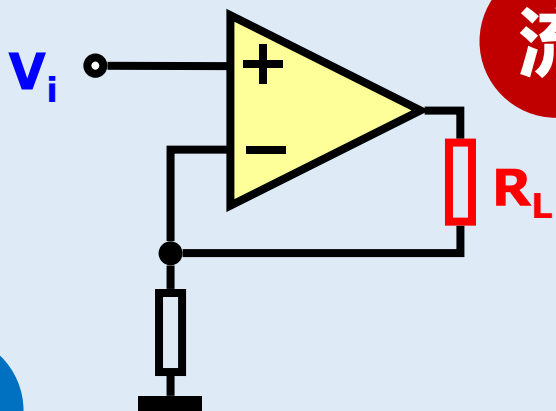
压



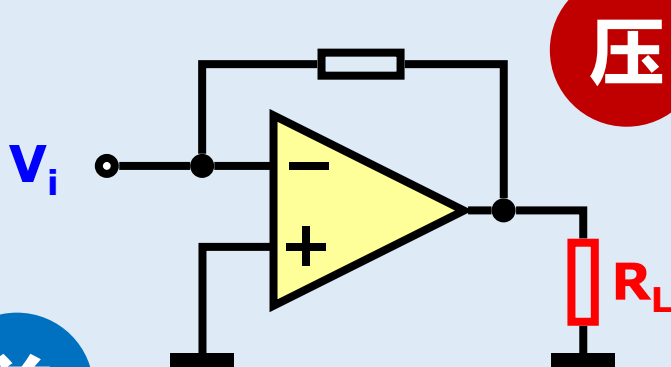
流

- 若 $R_L \rightarrow 0$: 反馈最佳
- 若 $R_L \rightarrow \infty$: 反馈消失

- 若 $R_S \rightarrow 0$: 反馈最佳
- 若 $R_S \rightarrow \infty$: 反馈消失



串



并

- 若 $R_S \rightarrow 0$: 反馈消失
- 若 $R_S \rightarrow \infty$: 反馈最佳

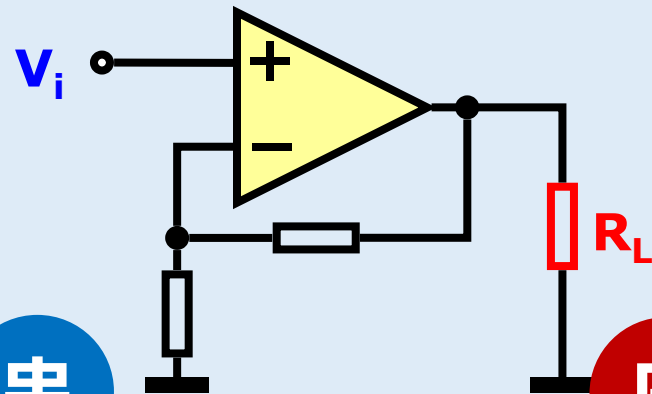
? 各组态如何判定?

- ① 假定反馈外部阻抗异常: $\rightarrow 0$ 或 $\rightarrow \infty$
- ② 判断是否仍有反馈
- ③ 即可区分组态

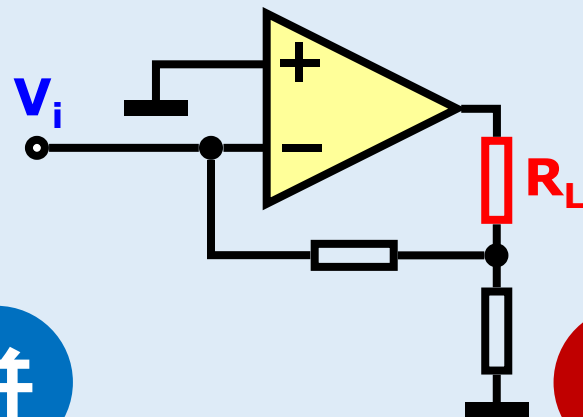
注意:

- 先确定反馈前|后端
→ 否则可能引出矛盾
- 组态互斥 → 唯一解
→ 短|断互为校验
- 只需分析“半圈”
→ 先假定对端有信号

- 若 $R_L \rightarrow 0$: 反馈消失
- 若 $R_L \rightarrow \infty$: 反馈最佳



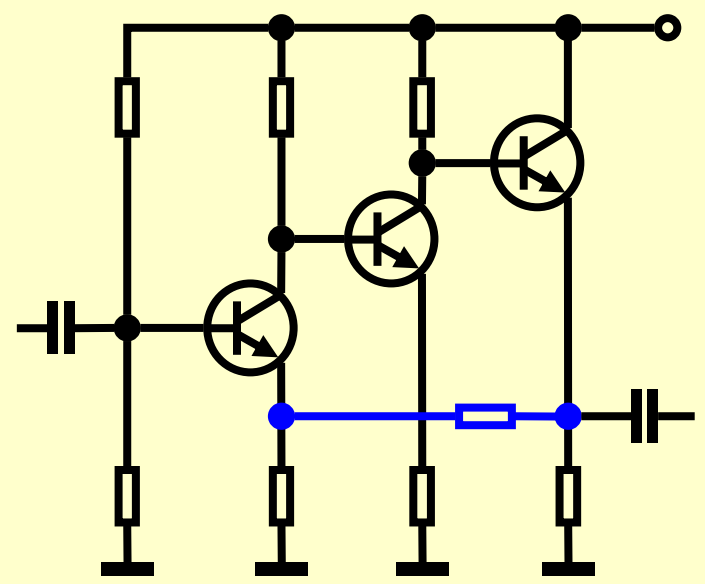
串



并

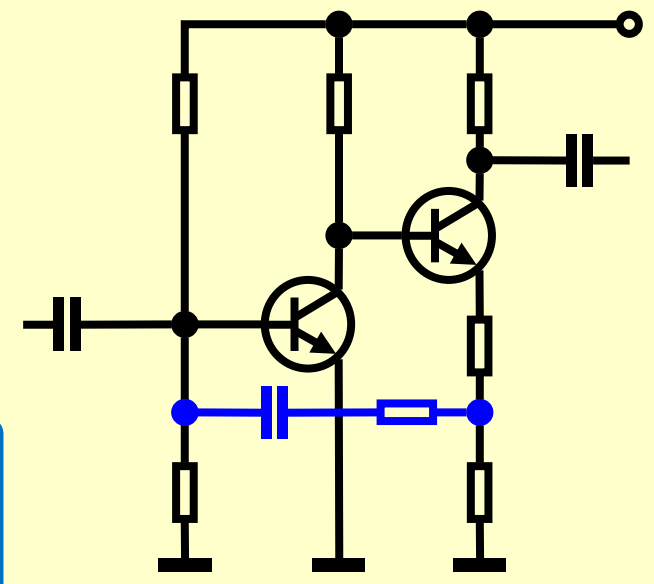
- 若 $R_L \rightarrow 0$: 反馈最佳
- 若 $R_L \rightarrow \infty$: 反馈消失

串联
反馈



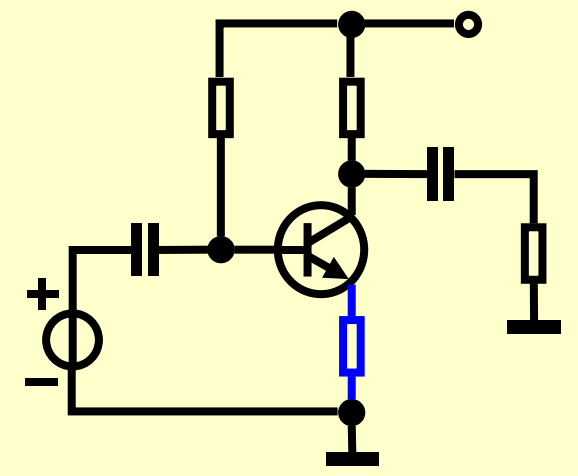
电压
反馈

并联
反馈



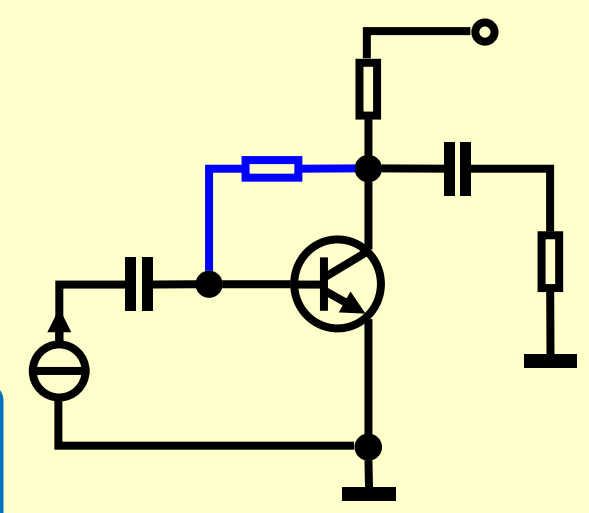
电流
反馈

串联
反馈



电流
反馈

并联
反馈



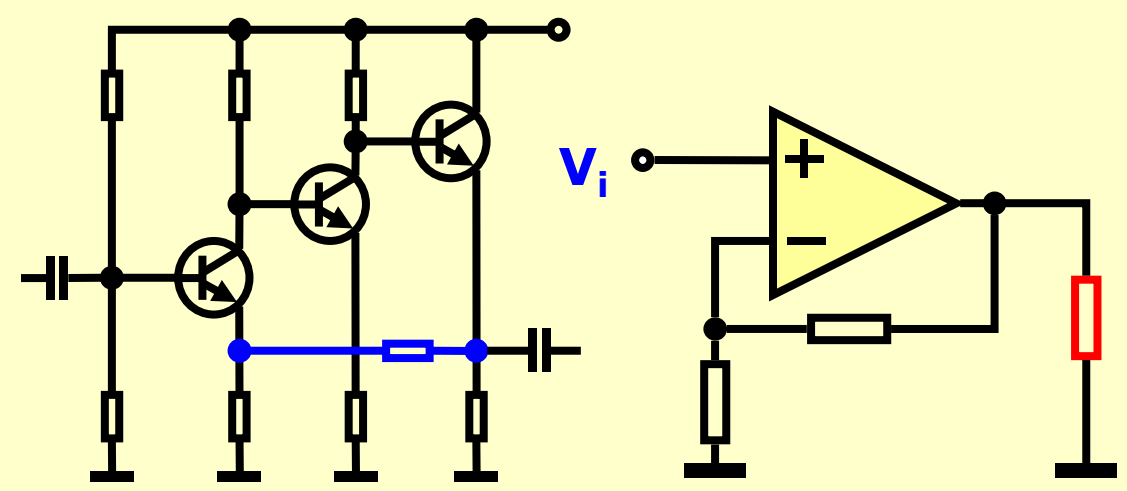
电压
反馈

分类判定

深度负反馈

效用分析

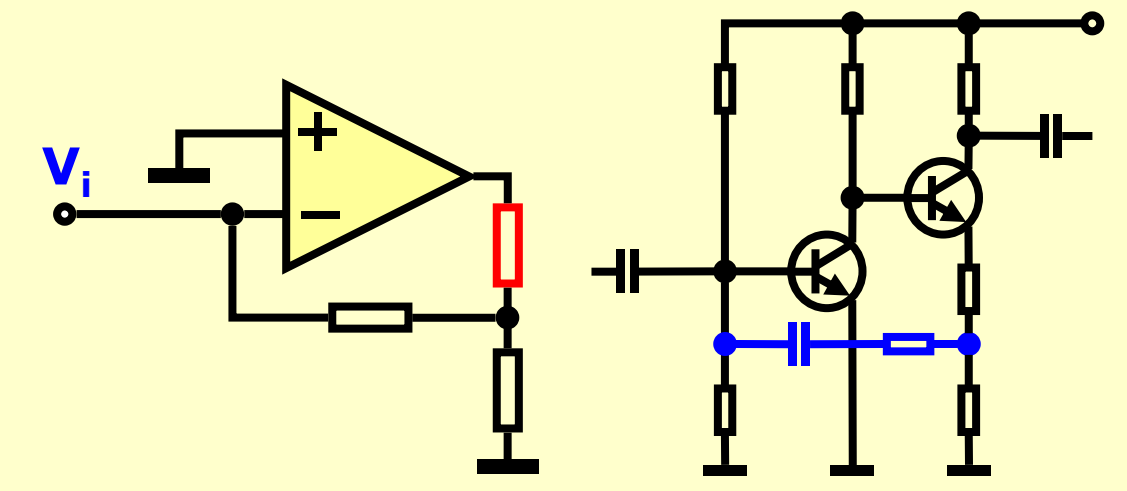
稳定性



串联
反馈

? 有何经验?

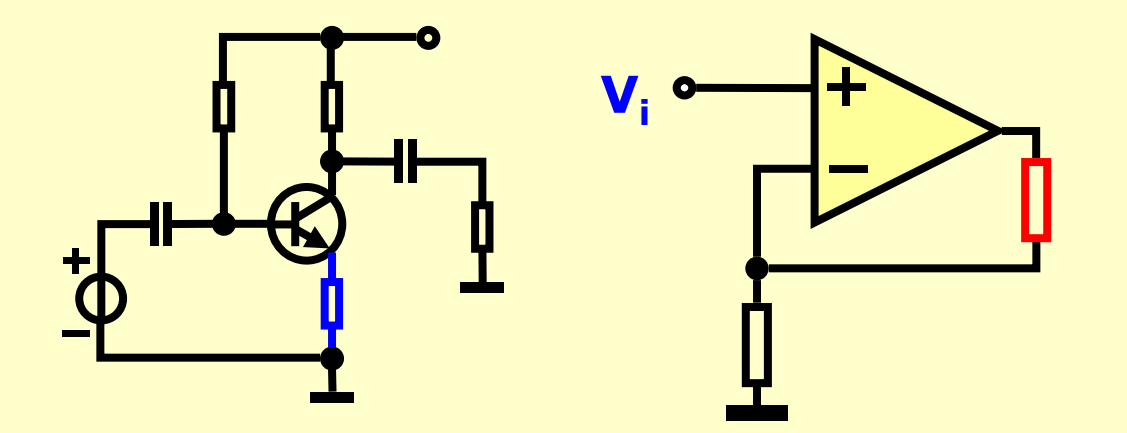
电压
反馈



并联
反馈

? 有何经验?

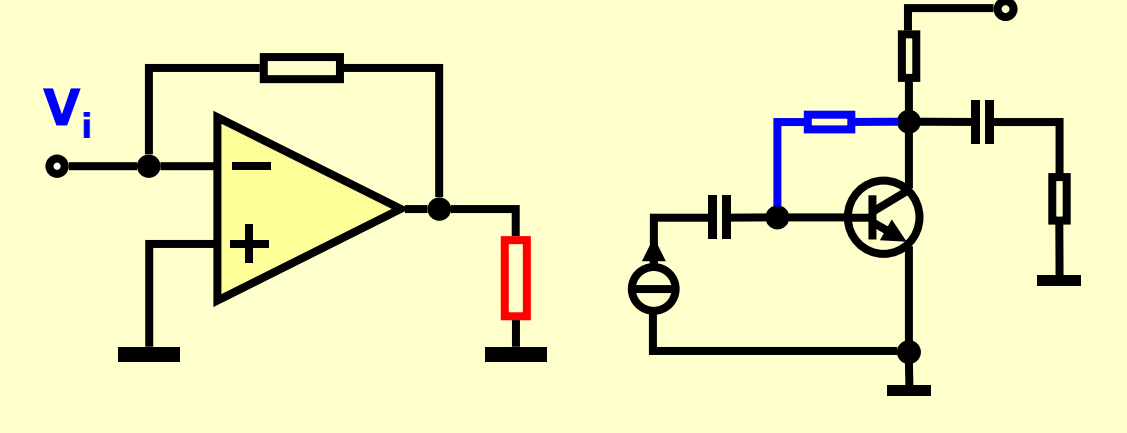
电流
反馈



串联
反馈

? 有何经验?

电流
反馈



并联
反馈

? 有何经验?

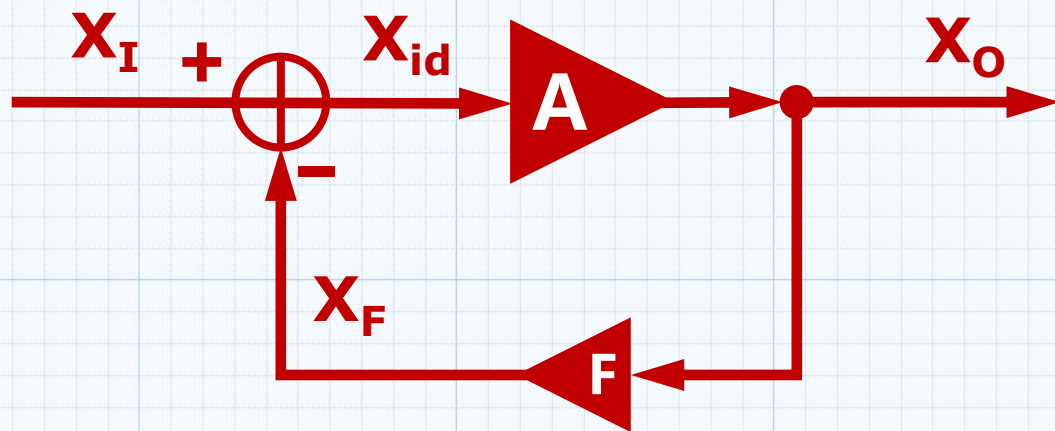
电压
反馈

分类判定

深度负反馈

效用分析

稳定性



? 线性反馈放大基本方程

原放大器
增益定义

$$A = \frac{X_O}{X_{id}}$$

$$X_{id} = \frac{X_O}{A}$$

反馈系数
定义

$$F = \frac{X_F}{X_O}$$

$$X_F = X_O F$$

反馈调整
关系

$$X_{id} = X_I - X_F$$

$$\frac{X_O}{A} = X_I - X_O F$$

$$A_F = \frac{X_O}{X_I} = \frac{A}{1 + AF}$$

! 极限情形 $D \rightarrow +\infty$ 深度负反馈

- 近似结论
- 可快速估算
- 直接推算 A_F
- 间接得 R_{if} R_{of}



$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

$$X_f = \frac{AF}{1 + AF} X_i ? X_f$$



$$X_{id} = \frac{1}{1 + AF} X_i ? 0$$

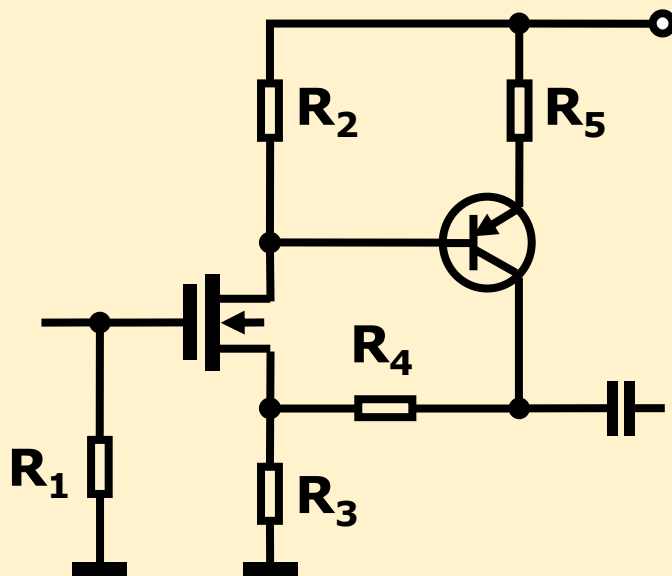
? 如何定量分析?

拆环

- 需分离出 A , F
- 多数电路难以清晰拆环

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

$$X_{id} = \frac{1}{1 + AF} X_i \approx 0$$



$$V_i - \frac{R_3}{R_3 + R_5} V_o = 0$$

$$A_f = \frac{R_3 + R_5}{R_3}$$

$$F = \frac{R_3}{R_3 + R_5}$$

❓ 极速估算方法？

→ 使用条件不满足

❓ 解方程组方法？

→ 仍然有效，准确

→ 仍然痛苦

❗ 若深度负反馈成立

→ 组态：电压串联

→ X_F : V_o 经 R_3, R_5 分压成 V_F

→ $X_{id} \approx 0$: $V_{be1} \approx 0$

→ 推算: $I_{E1} \approx 0$

❗ R_{iF} 和 R_{oF} ?

● A_F 与 R_L 无关

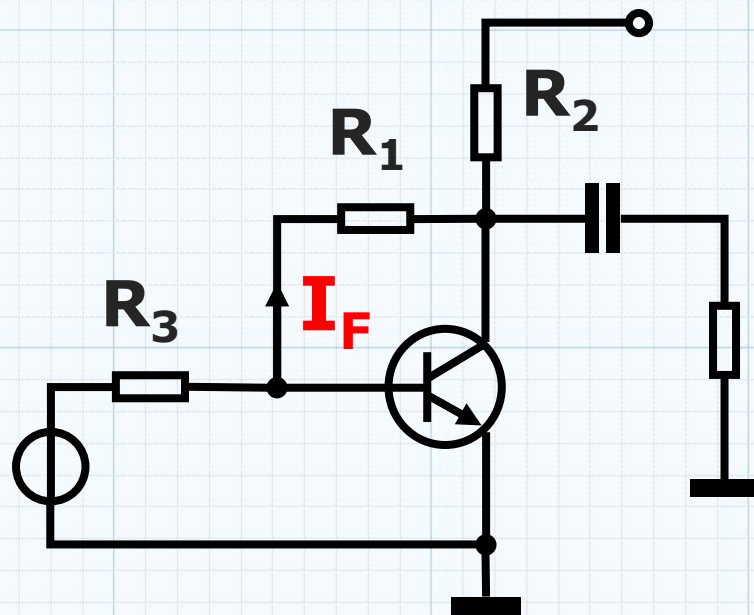
→ $R_{oF} \approx 0$

● $I_{B1} \approx 0$

→ $R_{iF} \approx R_1$

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

$$X_{id} = \frac{1}{1 + AF} X_i \approx 0$$



$$I_i = \frac{V_i}{R_3}$$

$$A_{vf} = -\frac{R_1}{R_3}$$

$$F = \frac{I_f}{V_o} = -\frac{1}{R_1}$$

$$A_{rf} = \frac{V_o}{I_i} = \frac{V_o}{V_i/R_3} = \frac{1}{F}$$

❗ 若深度负反馈成立

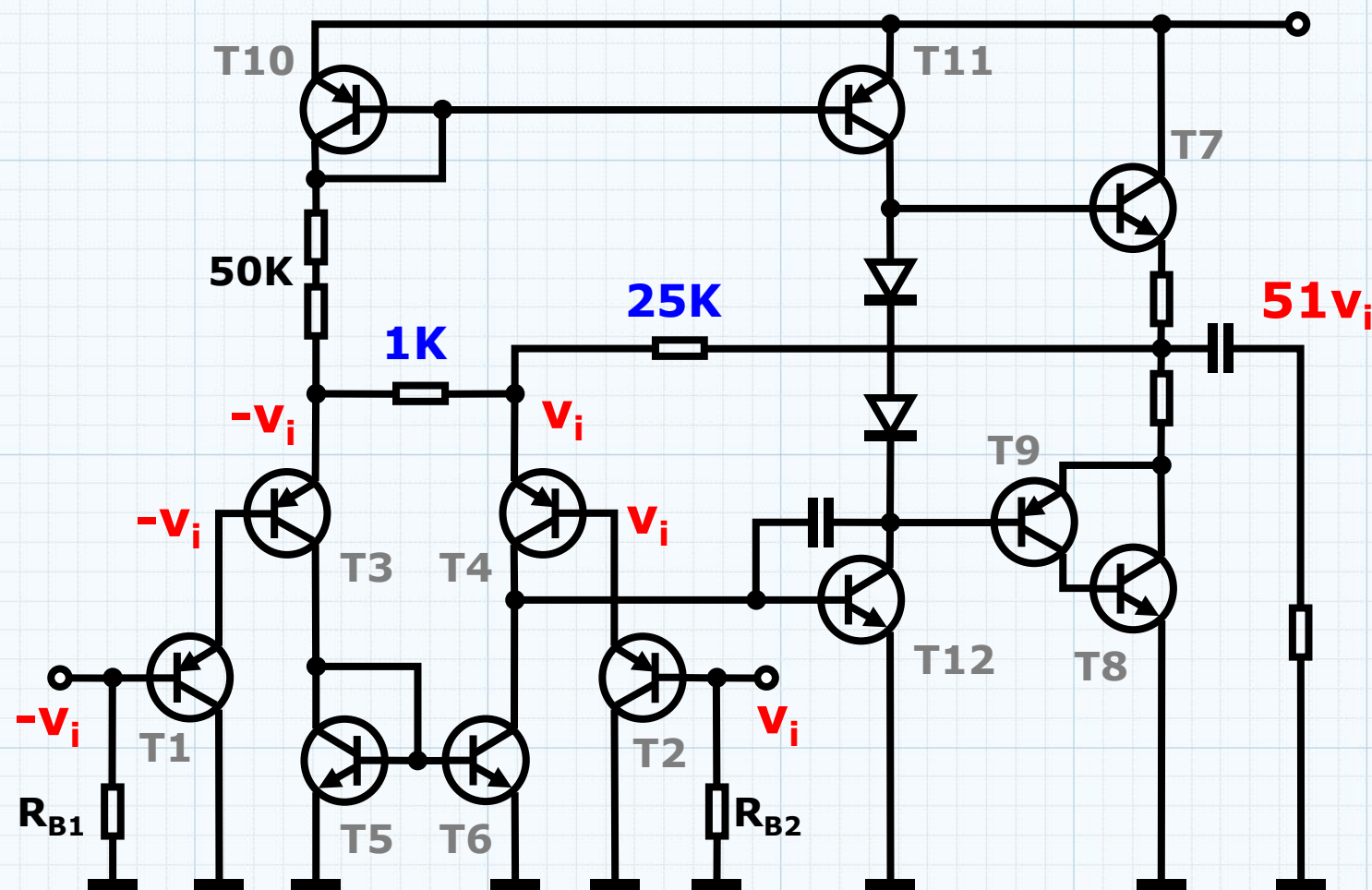
- 组态: 电压并联
- X_F : V_o 经 R_1 产生 I_F
- $X_{id} \approx 0$: $I_B \approx 0$
- 推算: $V_{BE} \approx 0$

❗ R_{iF} 和 R_{oF} ?

- A_{VF} 与 R_L 无关
- $R_{oF} \approx 0$
- $V_{BE} \approx 0$
- $R_{iF} \approx R_3$

❗ F 和 $1/F$?

- 反馈电流 I_F !
- 需换算成电压



❗ 若深度负反馈成立

- 组态: 电压串联
- X_F : V_o 经 25K 产生 V_F
- $X_{id} \approx 0$: $V_{BE4} \approx 0$
- 推算: $I_{E4} \approx 0$
- 增益: $A_{VDF} \approx 51/2$

❗ R_{iF} 和 R_{oF} ?

- A_{VF} 与 R_L 无关
 - $R_{oF} \approx 0$
- $I_{B1} \approx I_{B2} \approx 0$
 - $R_{idF} \approx R_{B1} + R_{B2}$

反馈效用的小结

正反馈 → 增益提升，趋于发散
牺牲稳定性换取增益

负反馈 → 增益减小，趋于稳定
牺牲增益换取稳定性

电压负 → V_o 受 R_L 影响变小
 R_o 缩小

电流负 → I_o 受 R_L 影响变小
 R_o 增加

直流负 → 直接稳定 Q
间接影响 A_v 等

交流负 → 直接稳定 A_v
可能间接影响 Q

串联负 → V_{in} 受 R_s 影响变小
 R_i 增加

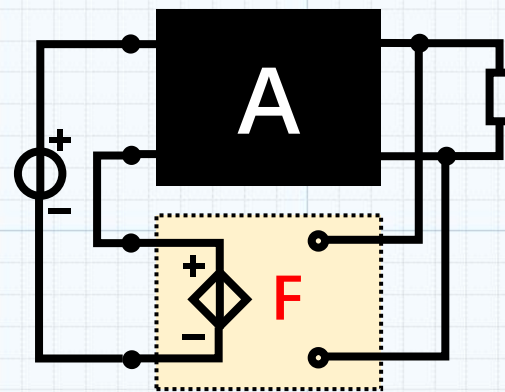
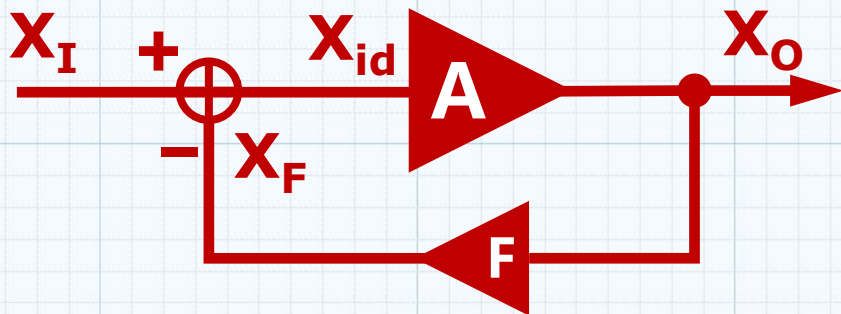
并联负 → I_{in} 受 R_s 影响变小
 R_i 减少

级内负 → 仅稳定本级
作用不如级间反馈

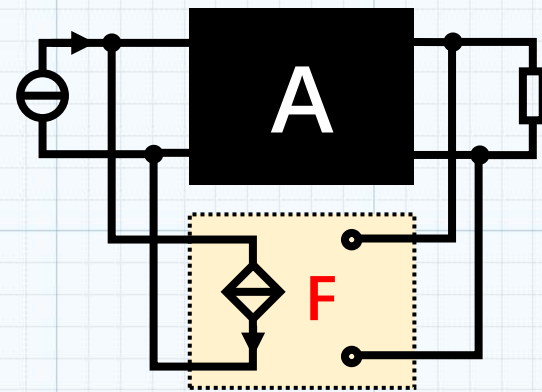
级间负 → 稳定全局
稳定其中各级

深度负反馈 → $X_{id} \approx 0$, 或 $X_F \approx X_i$
 $A_F \approx 1/F$
 $R_i \rightarrow 0$ 或 ∞ (看组态)
 $R_o \rightarrow 0$ 或 ∞ (看组态)

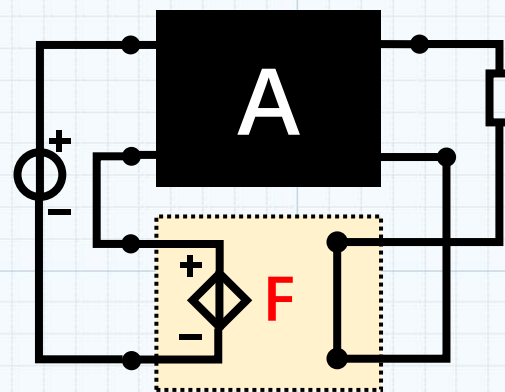
反馈的效用：定量分析



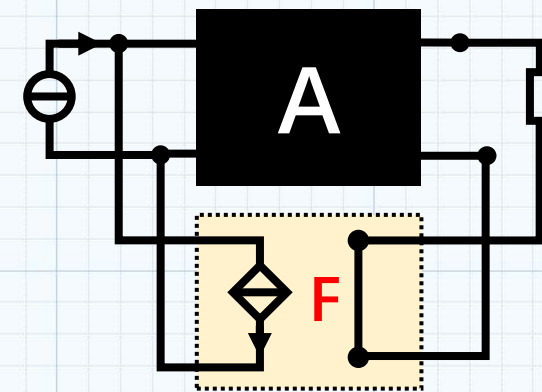
理想电压串联



理想电压并联



理想电流串联



理想电流并联

❓ 定量分析？一般并不容易

- ▶ 从开环到闭环：A、F 相互影响
- ▶ 从闭环到开环：拆环 极为困难

❓ 哪种情况较容易？

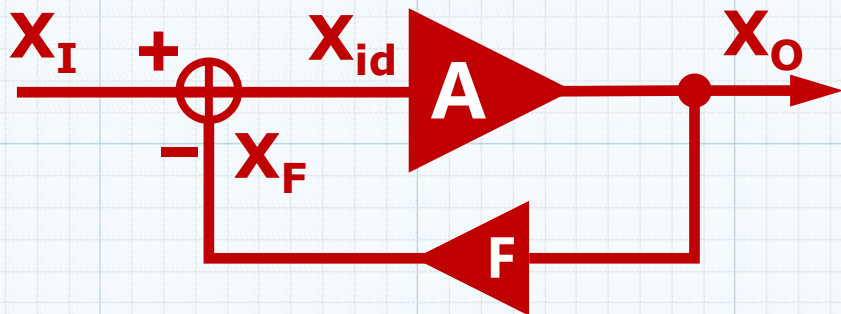
理想
反馈

输入电阻：0 或 ∞

输出电阻：0 或 ∞

理想单向

反馈的效用：定量分析



$$A_f = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AF}$$

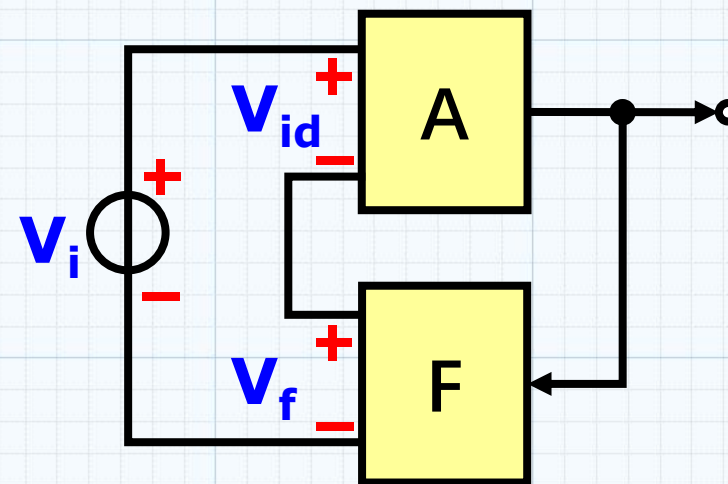
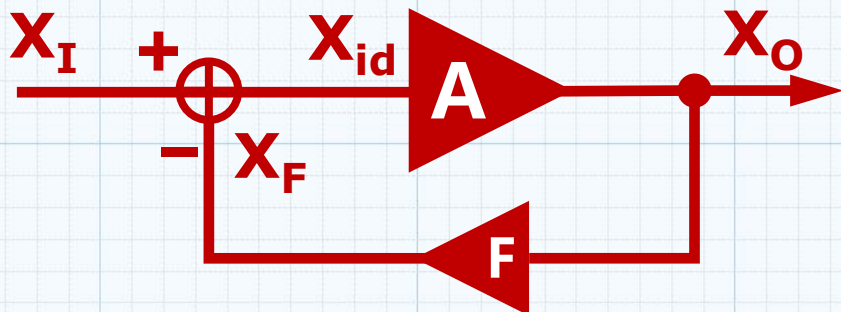
若 $A = 100$; $F = 0.2$; $\rightarrow A_f \approx 4.762$
 $[90, 110]$ $\pm 10\%$ $[4.737, 4.783]$ $\pm 0.48\%$

? 若假设为理想反馈...

- ▶ **增益 | 增益稳定性** steady
- ▶ **输入电阻 | 输出电阻**
- ▶ **截止频率 | 带宽**
- ▶ **失真**

$$\begin{aligned} \frac{\Delta A_f / A_f}{\Delta A / A} &= \frac{A}{A_f} \frac{\Delta A_f}{\Delta A} \approx A \frac{d \ln A_f}{dA} \\ &= A \left(\ln \frac{A}{1 + AF} \right)' = A [\ln A - \ln(1 + AF)]' \\ &= A \left(\frac{1}{A} - \frac{F}{1 + AF} \right) = \frac{1}{1 + AF} \end{aligned}$$

反馈的效用：定量分析

**串联
反馈**

? 若假设为理想反馈...

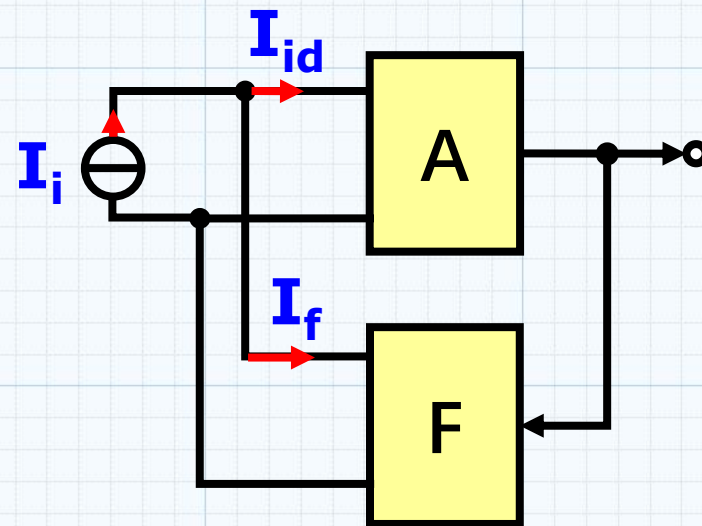
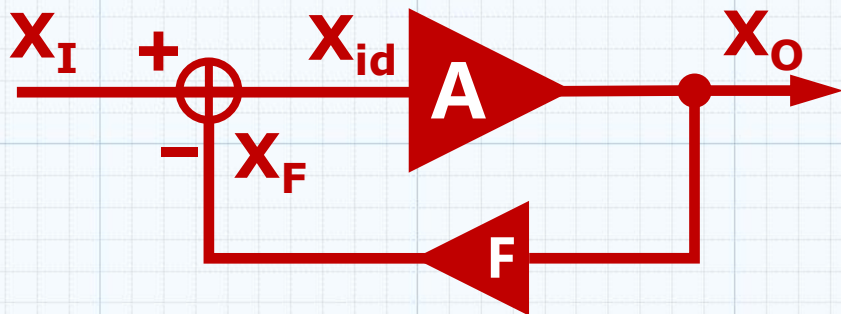
- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真

$$R_i = \frac{V_{id}}{I_i}$$

$$R_{if} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_{id} + V_{id}AF}{I_i}$$

$$R_{if} = (1 + AF)R_i$$

反馈的效用：定量分析



并联
反馈

❓ 若假设为理想反馈...

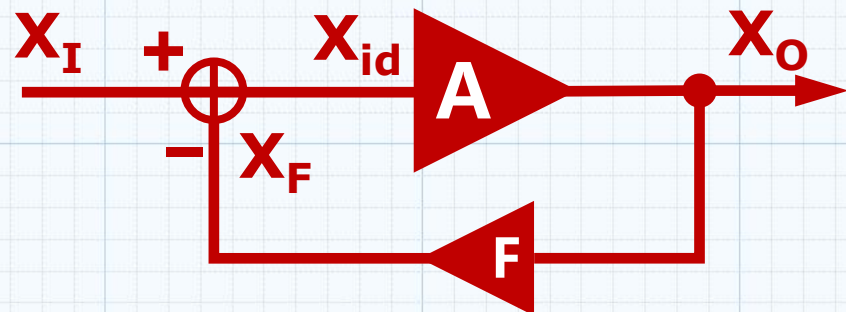
- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真

$$R_i = \frac{V_i}{I_{id}}$$

$$R_{if} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{I_{id} + I_{id}AF}$$

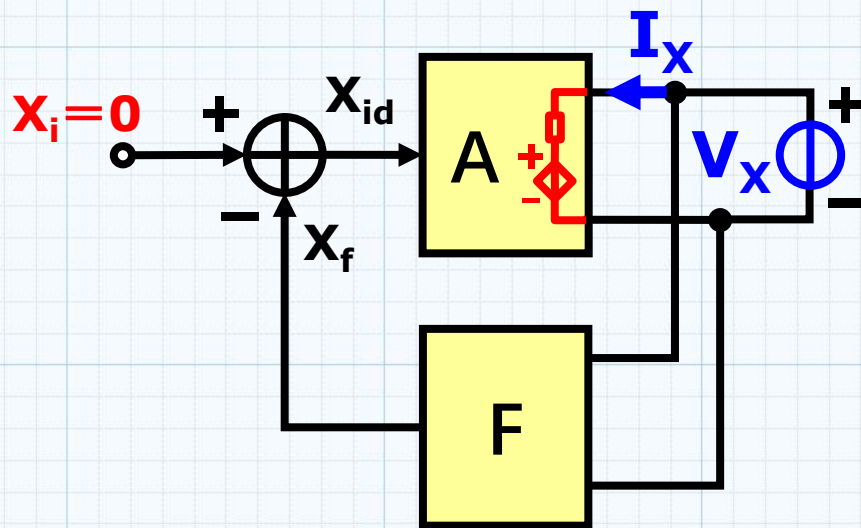
$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

反馈的效用：定量分析



? 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真



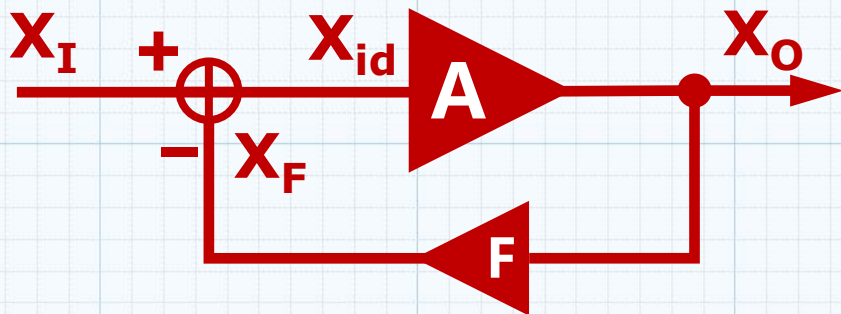
电压
反馈

$$X_{id} = -X_f = -FV_x$$

$$AX_{id} + I_x R_o = V_x$$

$$R_{of} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{R_o}{1 + AF}$$

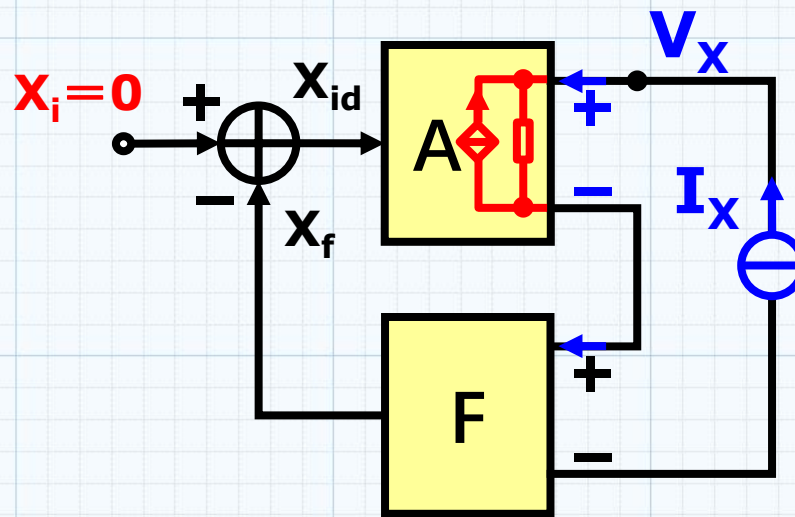
反馈的效用：定量分析



❓ 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真

电流
反馈

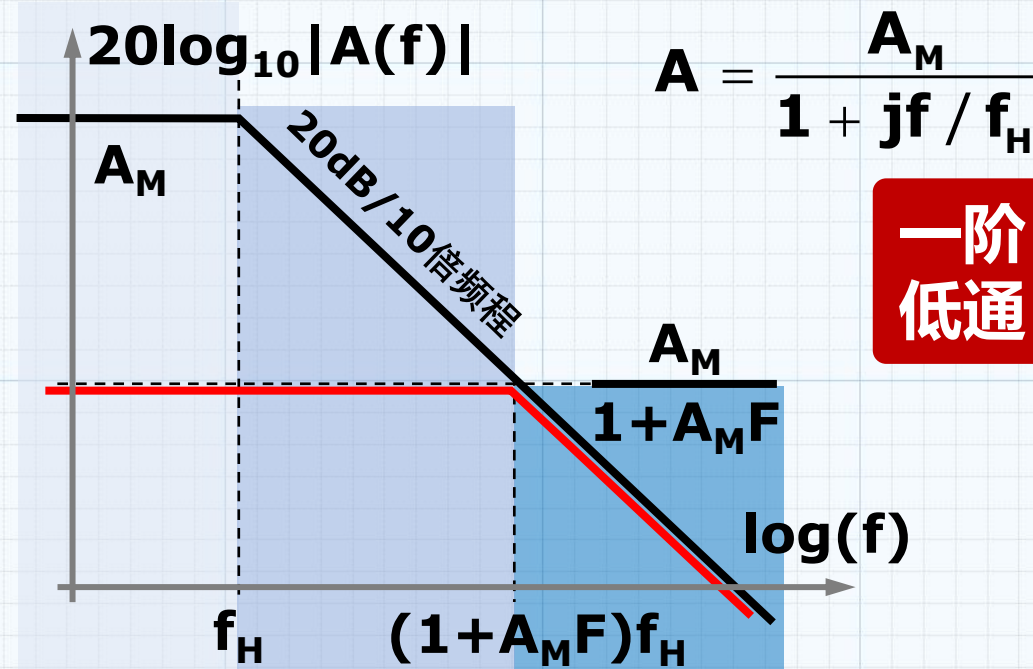
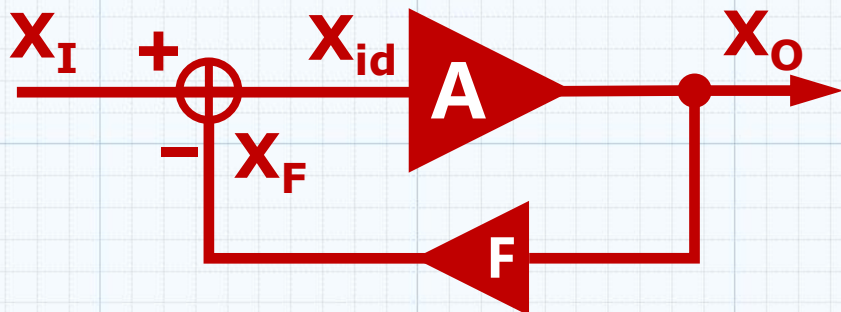


$$X_{id} = -X_f = -FI_o = FI_x$$

$$R_o (AX_{id} + I_x) = V_x$$

$$R_{of} = \frac{V_x}{I_x} = (1 + AF)R_o$$

反馈的效用：定量分析



❓ 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽 一阶 F 阻性
- ▶ 失真

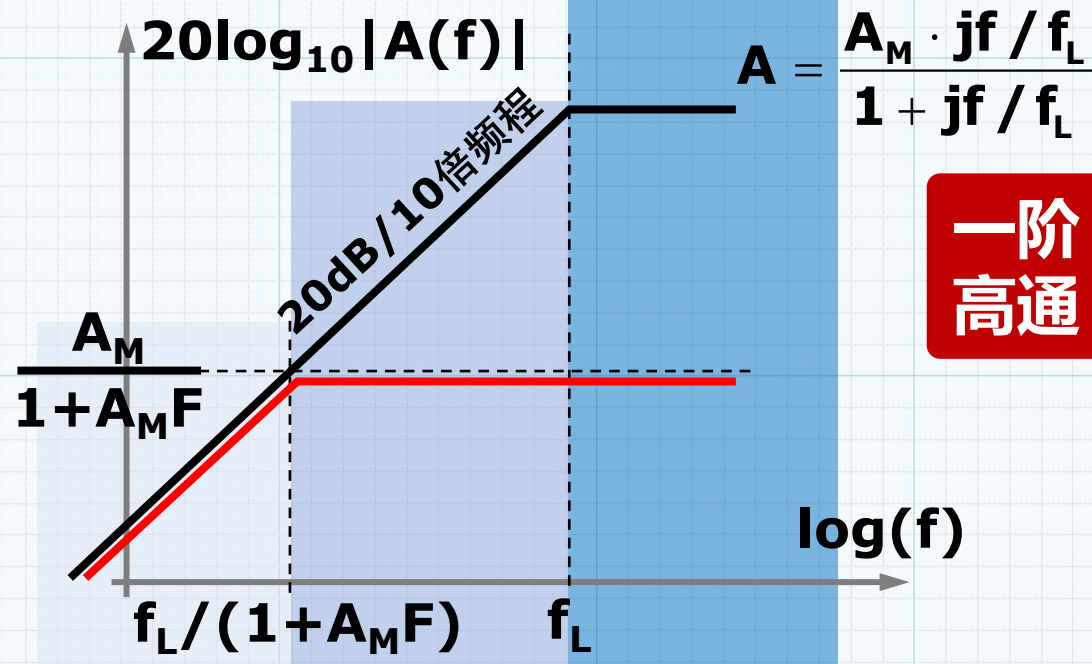
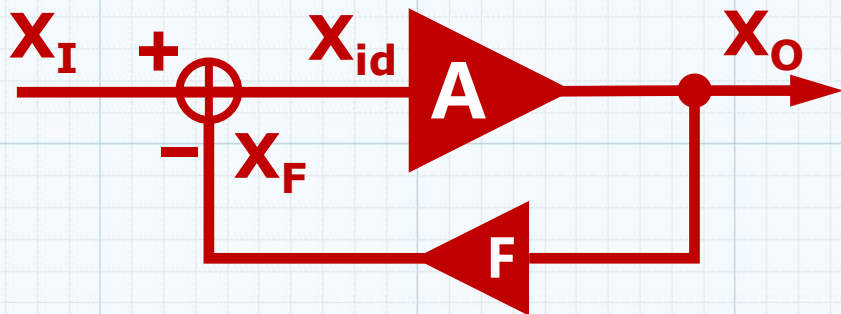
❓ 巧合么?

$$\frac{\Delta A_F / A_F}{\Delta A / A} = \frac{1}{1 + AF}$$

①小F ②中F ③大F

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{A}{1 + AF} = \frac{1}{1/A + F} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{A_M} + \frac{jf}{f_H} + F} = \frac{A_M}{1 + \frac{jf}{f_H} + A_M F} \\ &= \frac{A_M / (1 + A_M F)}{1 + \frac{jf}{(1 + A_M F) f_H}} = \frac{A_{MF}}{1 + \frac{jf}{f_{HF}}} \end{aligned}$$

反馈的效用：定量分析



❓ 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽 **一阶** **F 阻性**
- ▶ 失真

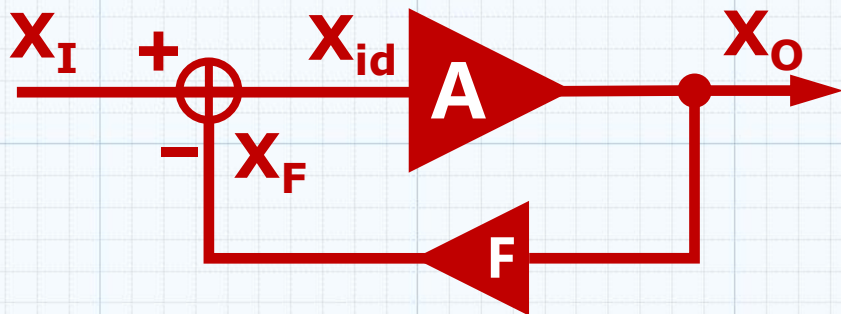
❓ 巧合么?

$$\frac{\Delta A_F / A_F}{\Delta A / A} = \frac{1}{1 + AF}$$

①小F ②中F ③大F

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{A}{1 + AF} = \frac{1}{1/A + F} = \frac{1}{\frac{1 + jf / f_L}{jA_M f / f_L} + F} \\ &= \frac{jA_M f / f_L}{1 + j(f / f_L)(1 + A_M F)} \\ &= \frac{A_M / (1 + A_M F) \cdot j(f / f_L)(1 + A_M F)}{1 + j(f / f_L)(1 + A_M F)} \end{aligned}$$

反馈的效用：定量分析

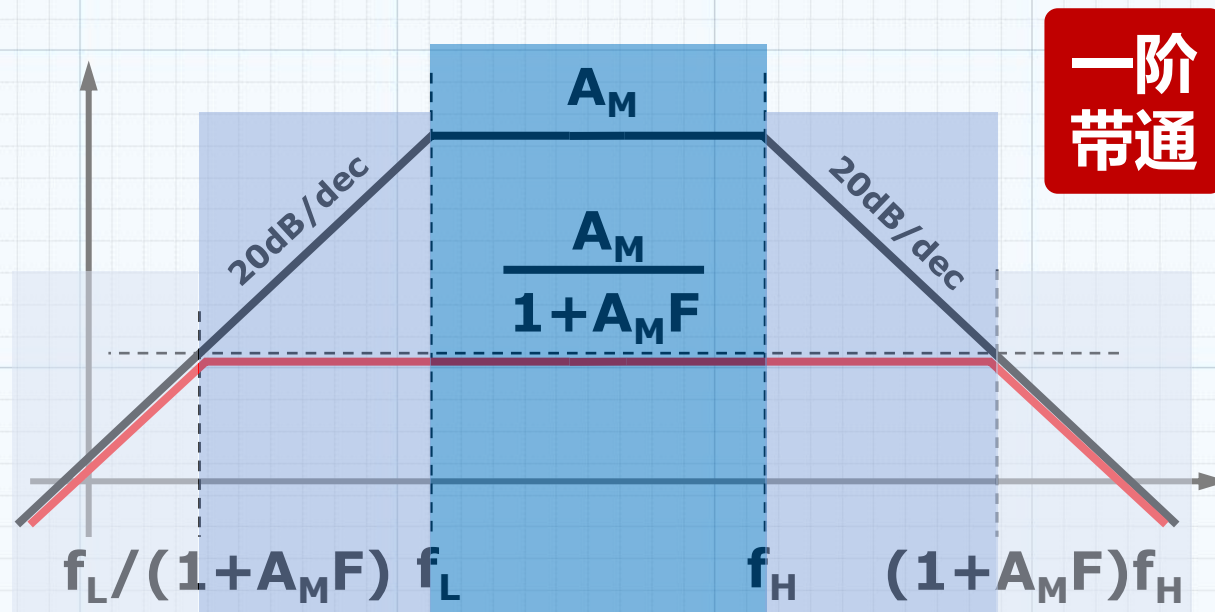


❓ 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真

一阶 F 阻性

$$F_L \ll F_H$$



$$BW_F \approx BW \cdot (1 + A_M F)$$

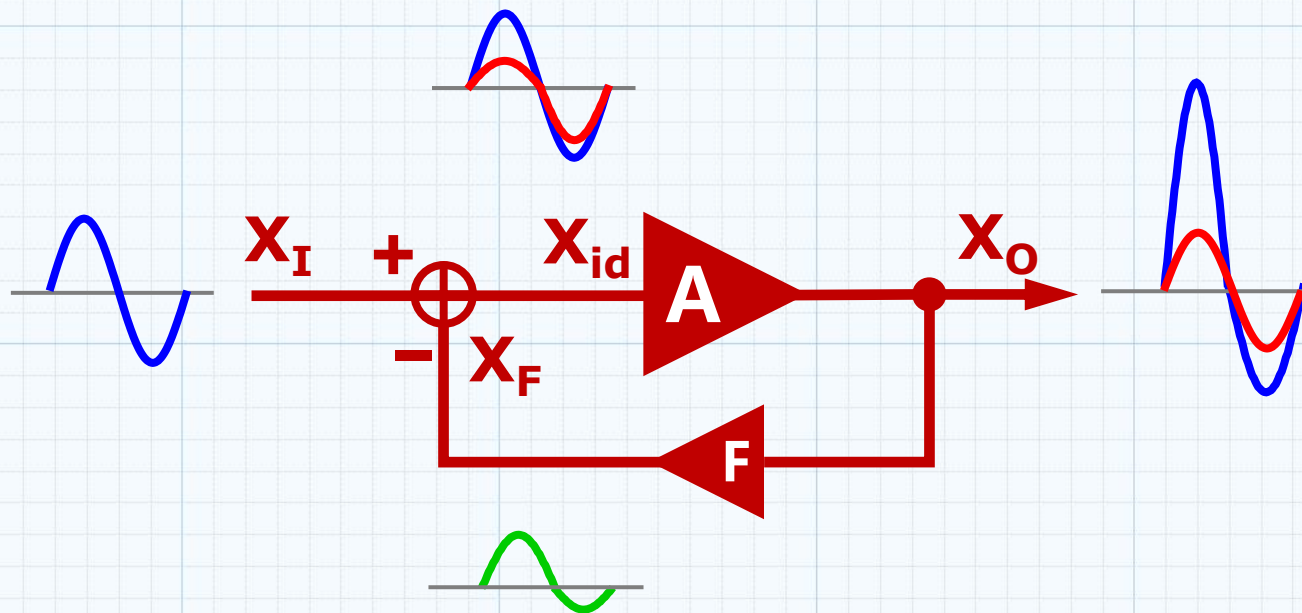
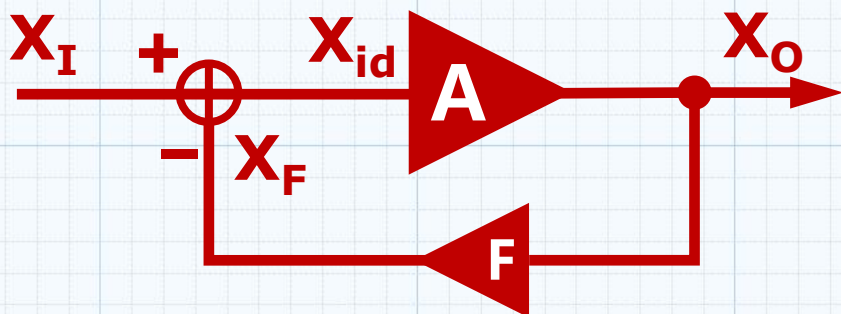
❓ 巧合么?

带内

带外近处

带外远处

反馈的效用：定量分析



? 若假设为理想反馈...

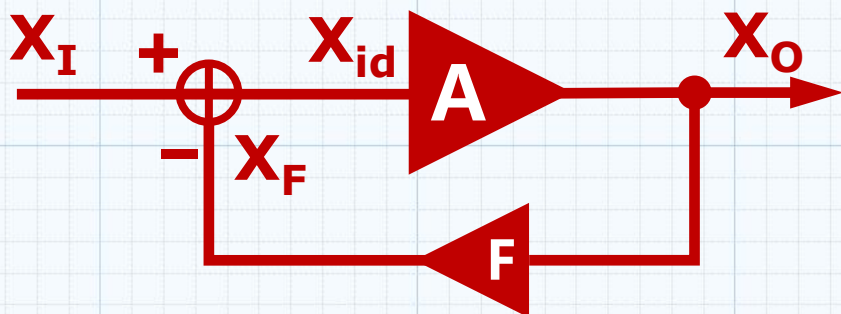
- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻 | 输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真 定性

? 定量分析？

- ▶ 较困难 ▶ 需更多假设 ▶ 随幅度变化
- ▶ 非线性失真：可看成增益随幅度变化

$$\frac{\Delta A_F / A_F}{\Delta A / A} = \frac{1}{1 + AF}$$

反馈的效用：定量分析



❓ 若假设为理想反馈...

- ▶ 增益 | 增益稳定性
- ▶ 输入电阻|输出电阻
- ▶ 截止频率 | 带宽
- ▶ 失真

增益

增益减小 $\rightarrow 1/D$
深负 $\rightarrow 1/F$

正反馈

相反

稳定性

变动减小 $\rightarrow 1/D$
深负 $\rightarrow 0$

正反馈

相反

R_i

串联 $\rightarrow \times D$
并联 $\rightarrow 1/D$

正反馈

相反

R_o

电压 $\rightarrow 1/D$
电流 $\rightarrow \times D$

正反馈

相反

f_H 和 f_L

$f_H \rightarrow \times D$
 $f_L \rightarrow 1/D$

正反馈

相反

反馈的稳定性 (stability)

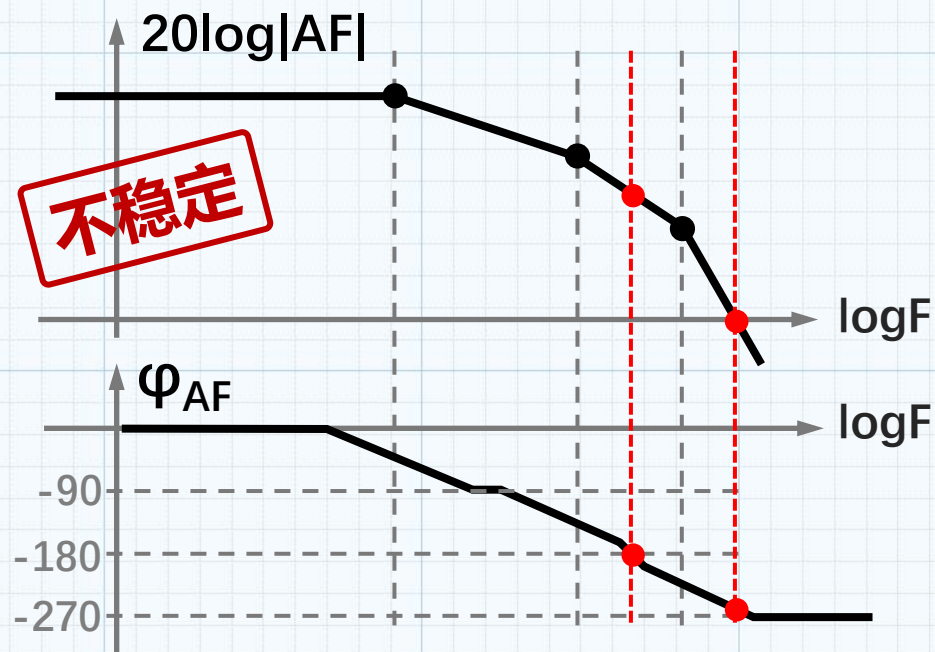
! 不同 D 或 AF 功能截然不同

- ▶ $1 + AF > 1$ 负反馈
- ▶ $1 + AF = 1$ 无反馈
- ▶ $1 > 1 + AF > 0$ 收敛的正反馈
- ▶ $1 + AF = 0$ 自激振荡
- ▶ $1 + AF < 0$ 发散的正反馈

$$AF \leq -1$$

? 负反馈会自己演变为正反馈 ?

- ▶ 中频: 设计为纯负反馈
- ▶ 带外: A 幅度下降 + 相移...
- ▶ 若相移 180, 而 |A| 还较大...



判
据

$$\delta\varphi = 180^\circ \text{ 处, } AF_{dB} > 0?$$

$$AF_{dB} = 0 \text{ 处, } \varphi > 180?$$

! 一般取 F 为实数 ...

电压串联 | 电流并联: $F < 1$

稳定性：裕度|余量(Margin)

❓ 如何定量描述“稳定性”？

- ▶ 增益裕度： $G_M = AF_{dB} \mid \delta\varphi = 180^\circ$
- ▶ 相位裕量： $\varphi_M = (\delta\varphi - 180^\circ) \mid AF=0dB$

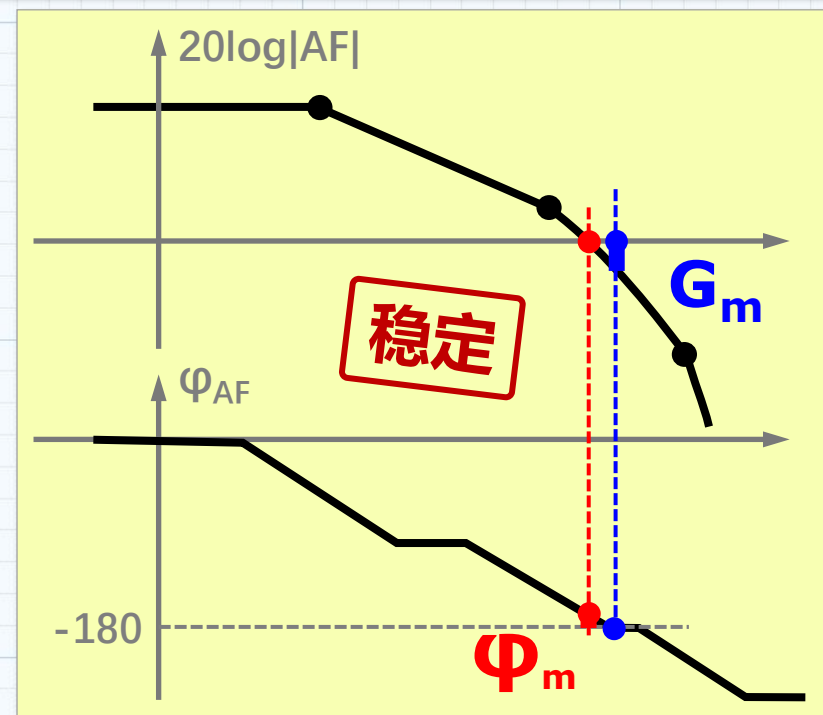
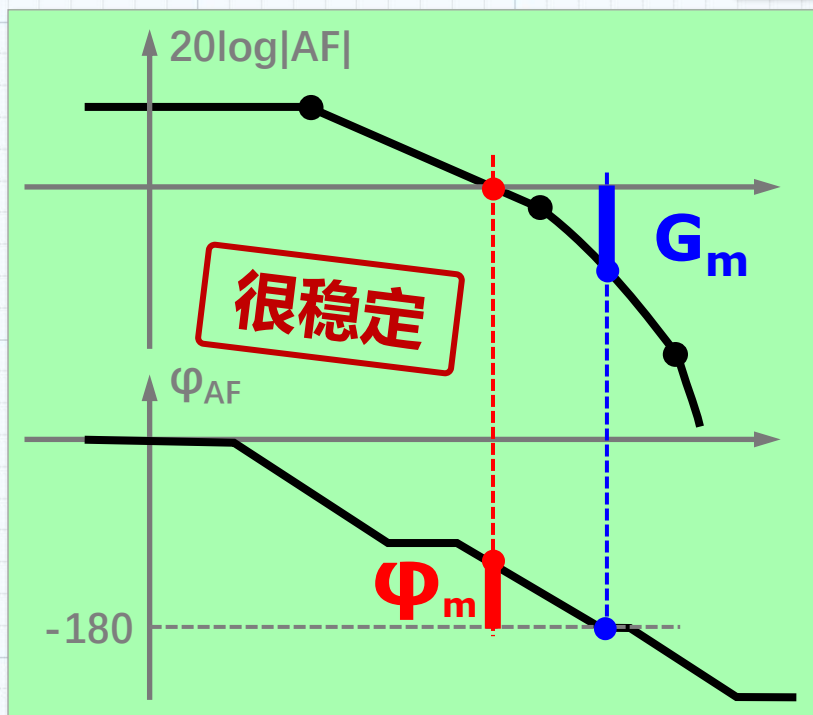
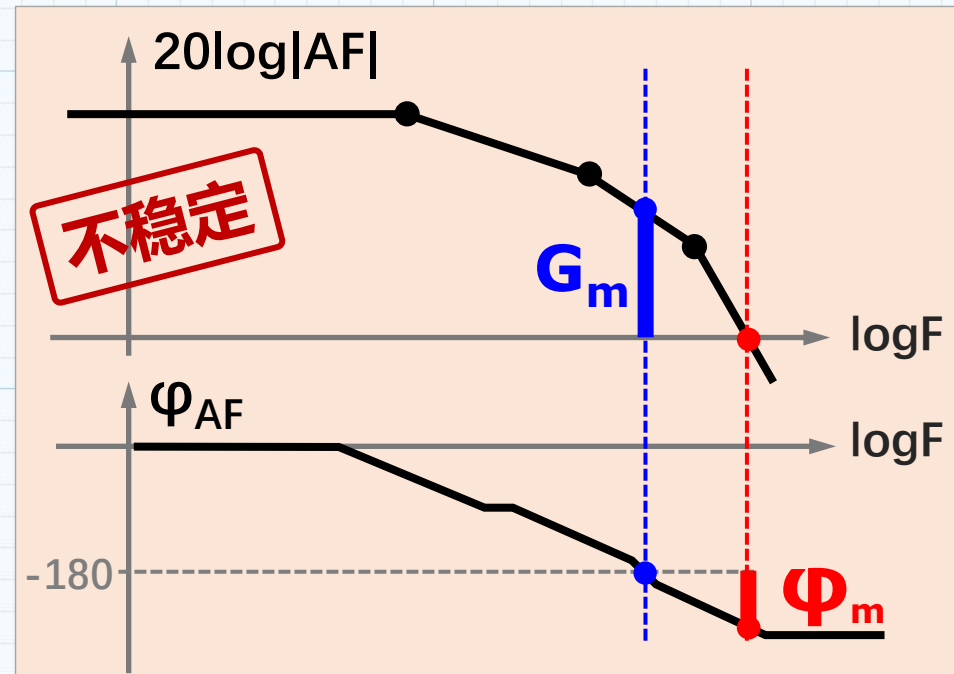
❓ 最低要求？

- ▶ $G_M < 0dB$
- ▶ $\varphi_M > 0^\circ$

❓ 工程要求？

- ▶ $G_M < -10dB$
- ▶ $\varphi_M > 45^\circ$

AF 极点2低于横轴



稳定性：条件稳定 | 绝对稳定

❗ 不稳定可能是 A 和 F 共同造成

▶ A: 厂商生产; F: 据需求设定

❗ A的属性: 绝对稳定 或 条件稳定

▶ 绝对稳定: 纯电阻反馈必然稳定

▶ 条件稳定: 纯电阻反馈未必稳定

❗ 如何判定 条件稳定 | 绝对稳定?

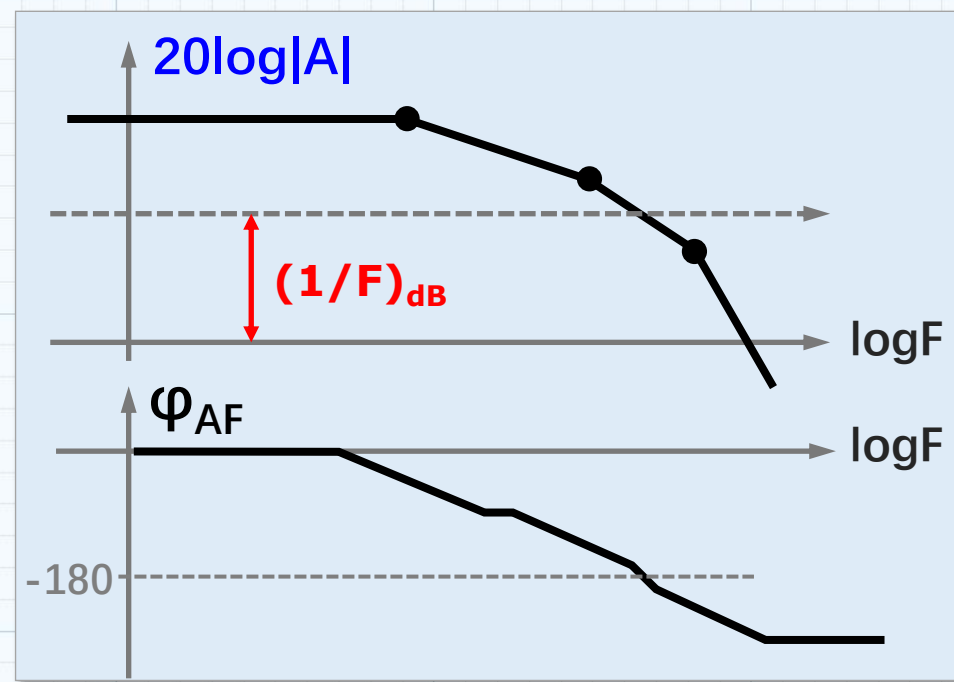
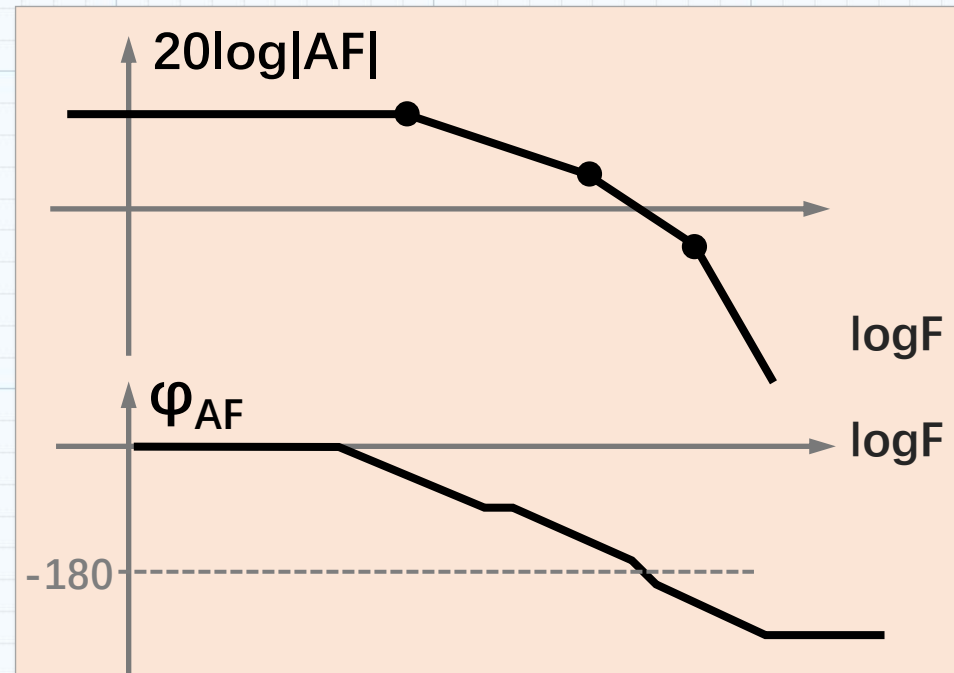
▶ 纯阻性反馈: F 为实数

▶ 电压串联|电流并联时: $|F| < 1$

▶ $(1/F)_{dB}$ 在横轴上方

AF 极点2低于横轴

A 极点 2 低于横轴



稳定性：相位补偿

❓ 如何 条件稳定 → 绝对稳定?

- ▶ 相位补偿电路：也称频率补偿
- ▶ 如何调整 A 的电路？

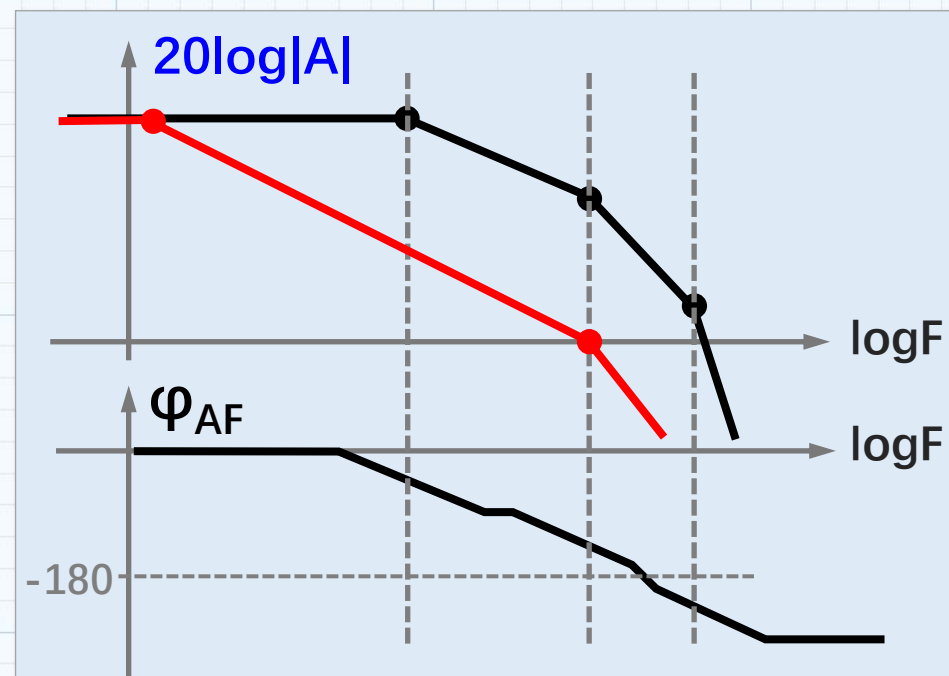
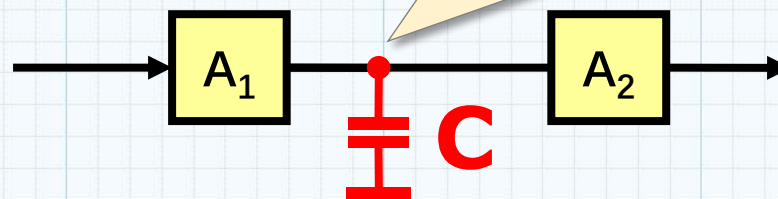
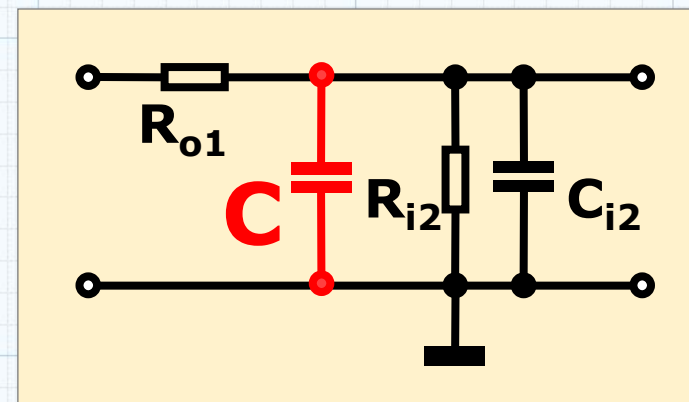
❗ 典型做法1：滞后补偿

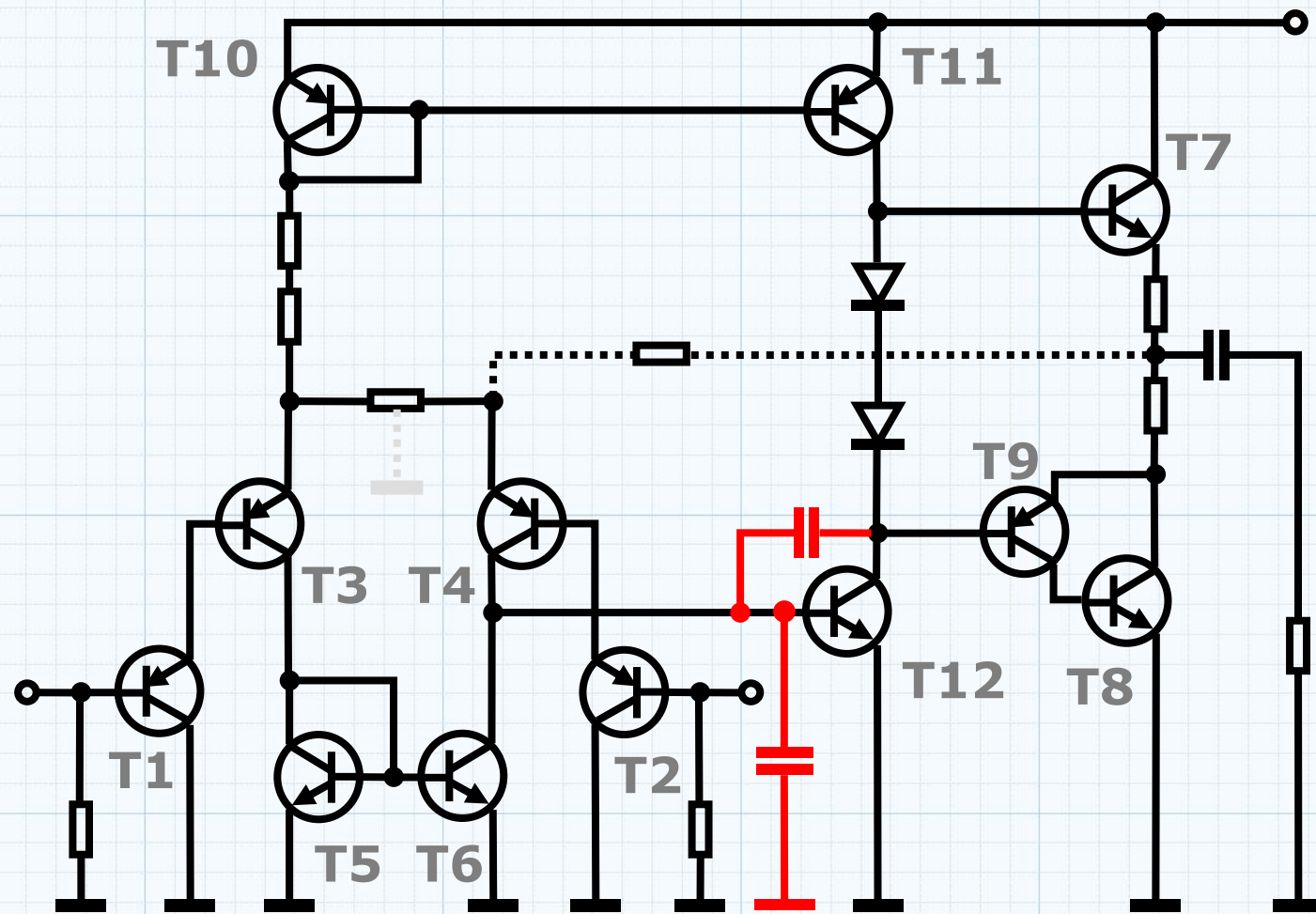
- ▶ 极大降低主极点： $f_H \rightarrow f_H'$
- ▶ 使 $A_{dB}(f_{H2})$ 落在横轴以下
- ▶ 找到电路中构成 f_{H1} 的电容
- ▶ 将其增大 ...

主极点
补偿

AF 极点2低于横轴

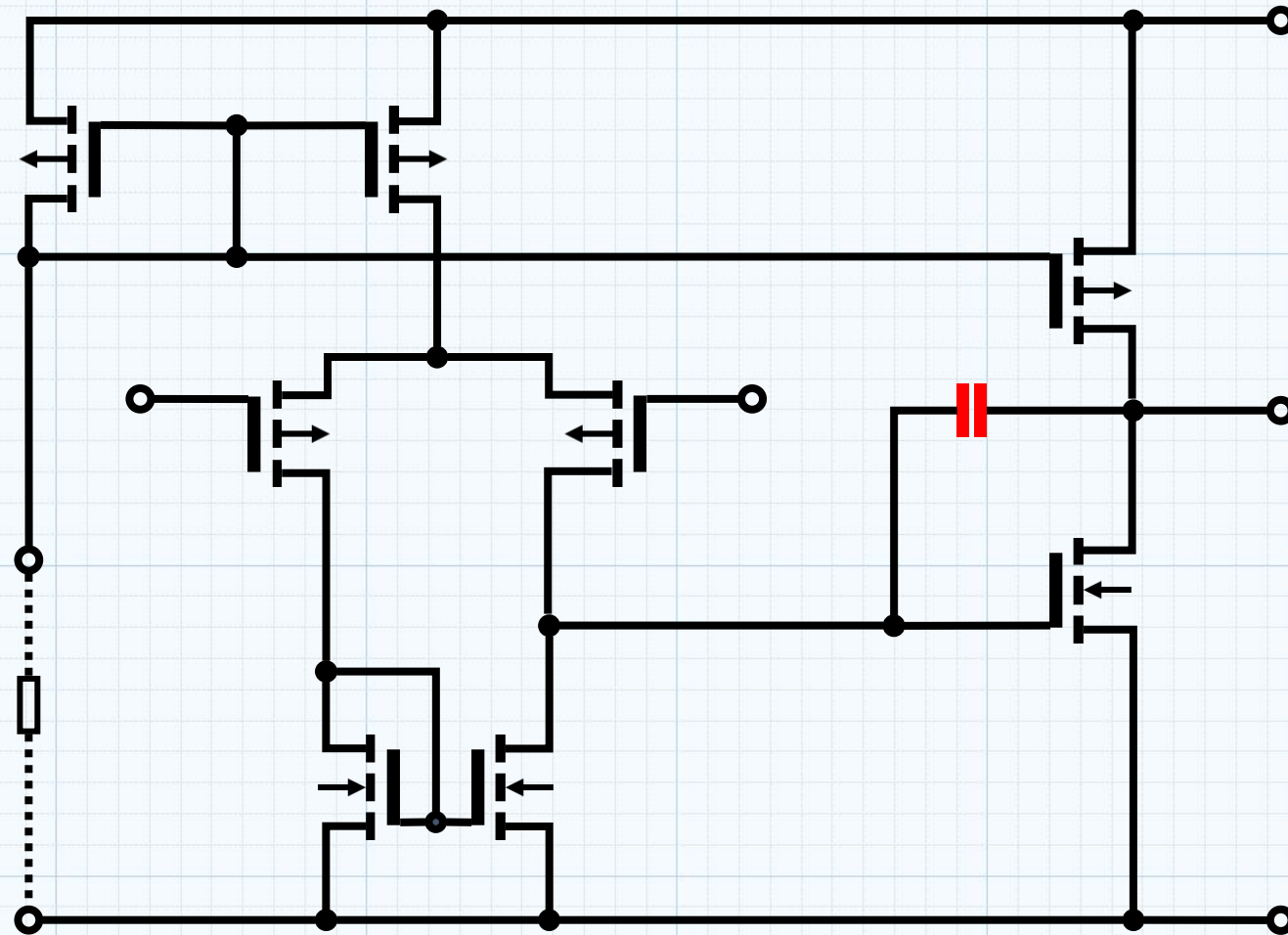
A 极点 2 低于横轴





主极点 滞后补偿

借助密勒效应



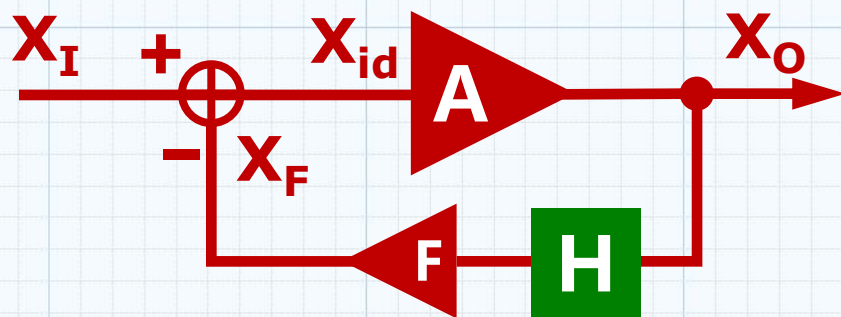
主极点 滞后补偿

借助密勒效应

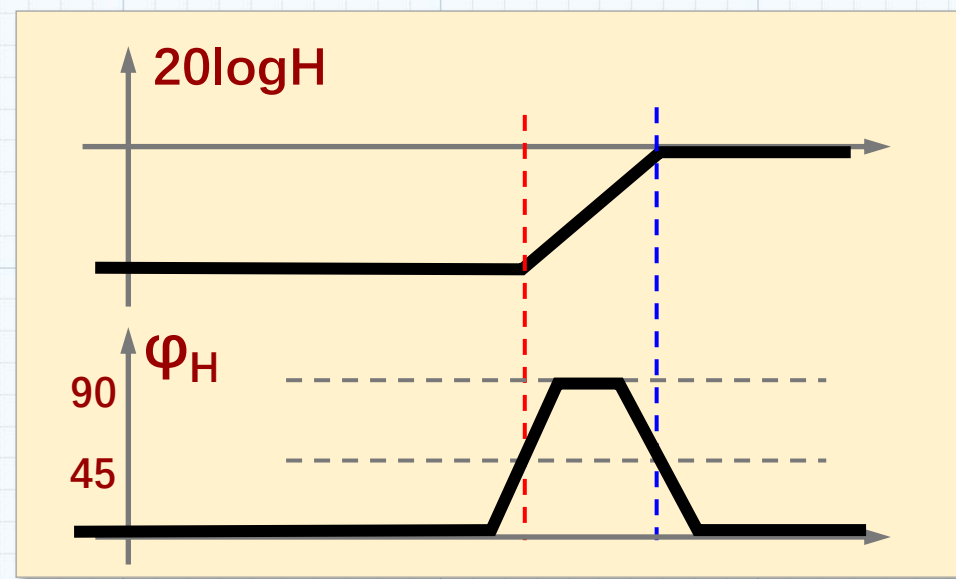
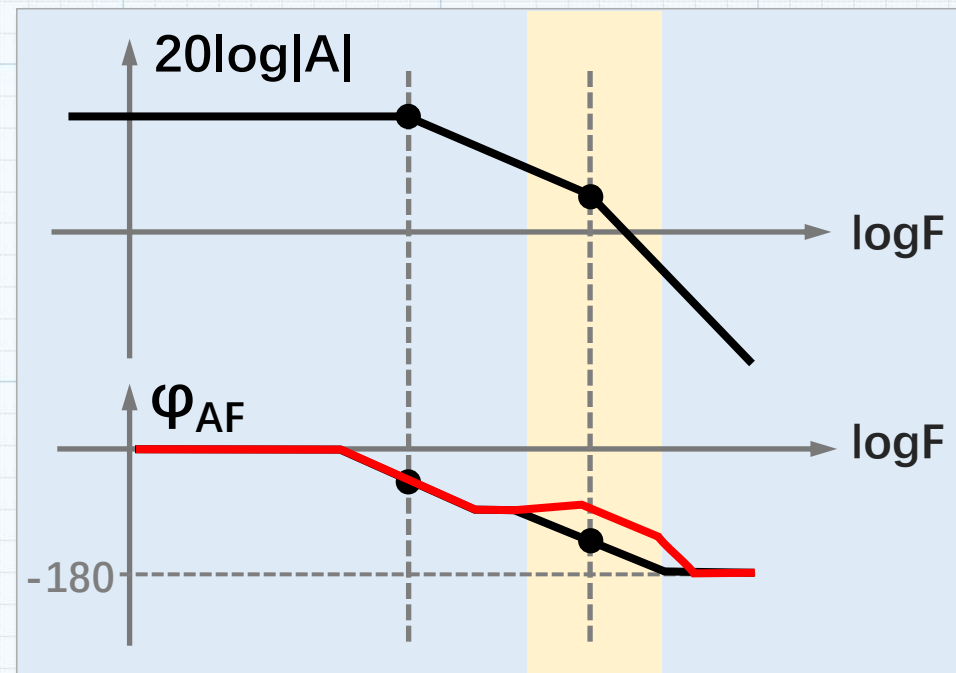
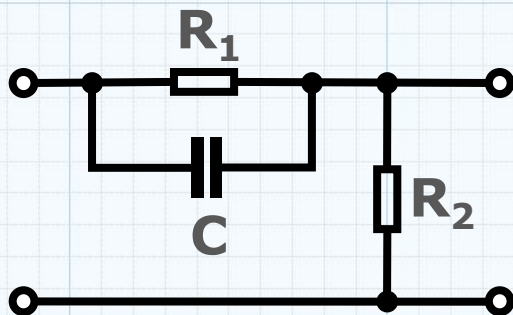
稳定性：相位补偿

典型做法2：超前补偿

- ▶ 若相位裕度不够充足
- ▶ 在临界区域稍渐少相移 → 增加裕度
- ▶ 具体做法：引入超前相移网络

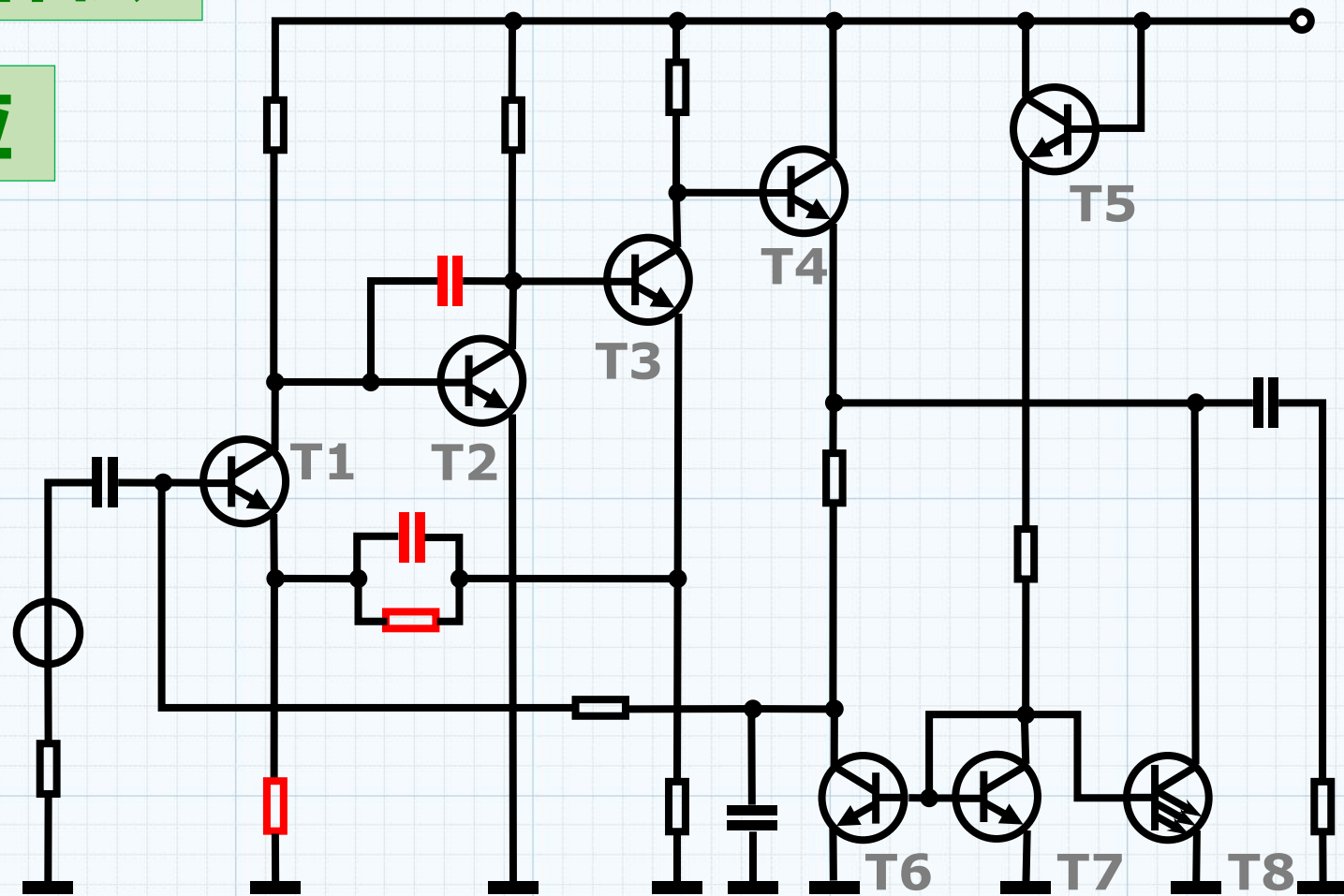


$$H = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1 + jf/f_z}{1 + jf/f_p}$$



主极点 滞后补偿

借助密勒效应



级间 超前补偿