



电子线路分析与设计

# 第 23 讲 信号调理与运算

陈江



# 反相比例放大

## ! 运用最广泛的放大电路

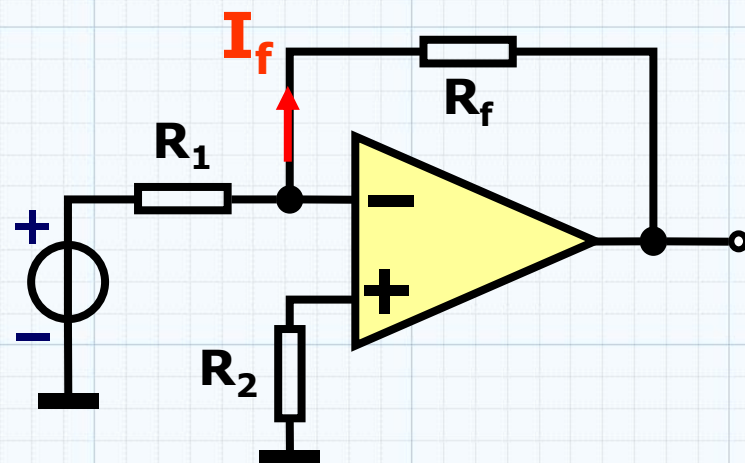
- ▶ 简单易用, 性能稳定
- ▶ 许多运算电路的基础

## ? 分析方法

- ▶ 前提: 负反馈 → 线性区
- ▶ 方法1: 运放等效电路
- ▶ 方法2: 虚短、虚断
- ▶ 方法3: 深度负反馈

## ? $R_2$ 的作用?

- ▶ 尽可能消除  $I_{IB}$  的影响
- ▶ 取值:  $R_2 = R_1 || R_f$



$$I_{R1} = \frac{V_S}{R_1} = I_f$$

$$V_o = -V_{R1} = -\frac{R_f}{R_1} V_S$$

$$A_f = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$R_i = R_1$$



$$R_o = 0$$



$$V_{ic} = \frac{1}{2}(V_- + V_+) \approx 0$$

$A_{VC}$  随  $f$  快速增大

$$V_o = A_{VC} V_{ic} + A_{VD} V_{id}$$

# 同相比例放大

## ? 分析方法

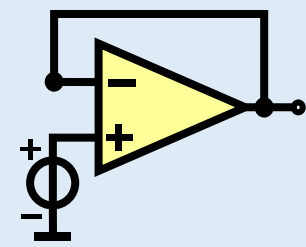
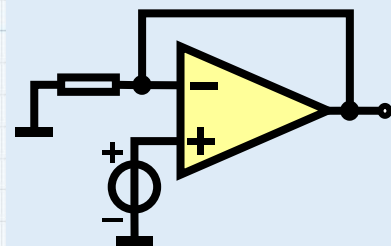
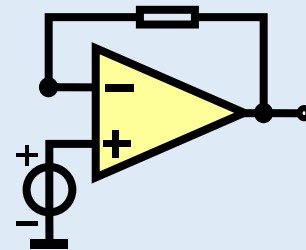
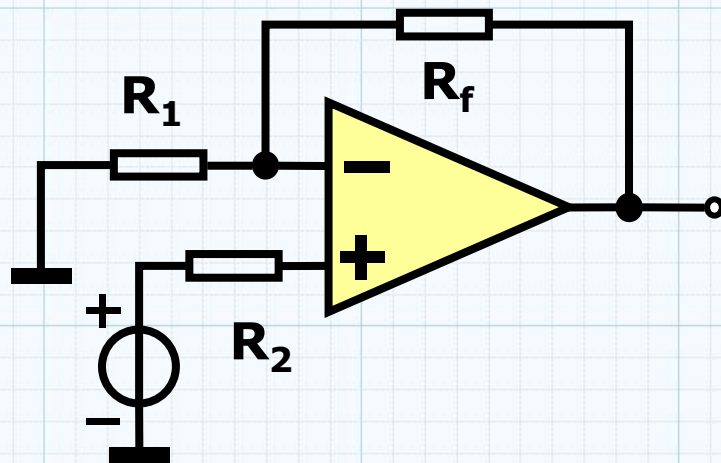
- ▶ 前提：负反馈 → 线性区
- ▶ 方法1：运放等效电路
- ▶ 方法2：虚短、虚断
- ▶ 方法3：深度负反馈

## ? $R_2$ 的作用？

- ▶ 同前：消除  $I_{IB}$  的影响
- ▶ 取值：  $R_2 = R_1 || R_f$

## ? $A_f = 1$ : 跟随器

- ▶ 几种做法
- ▶ 隔离、缓冲、驱动



$$V_- = V_s = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o$$

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$V_{ic} = \frac{1}{2} (V_- + V_+) \approx V_i$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = 0$$





# T形桥反馈放大

## ? 分析方法

- ▶ 等效电路、虚短虚断、深负

## ? 相对普通反相放大器？

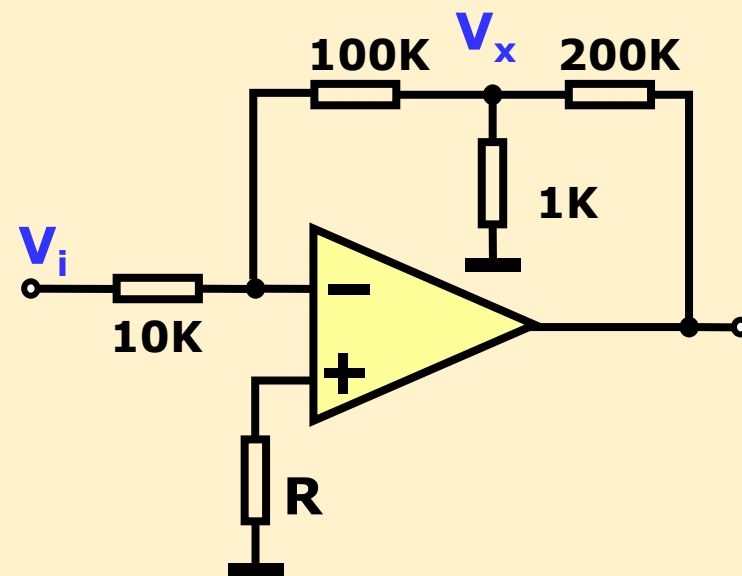
- ▶ 可以实现相对大的增益
- ▶ 而且：  $R_i$  并不是非常小 🍷
- ▶ 而且： 并不需要极大的电阻 🍷
- ▶ ← 大电阻：难集成 + 不准确 + 不稳定

## ? 电路的本质？

- ▶ 电阻网络 → 减小了负反馈

## ? R 如何计算？

- ▶  $R \approx 10K \parallel (100K + 1K \parallel 200K)$



$$V_x = -10V_i$$

$$I_{1K} = \frac{10V_i}{1K}$$

$$I_{200K} = \frac{V_i}{10K} + \frac{10V_i}{1K}$$

$$A_F = - \left( \frac{101}{10} 200 + 10 \right)$$

# 仪表放大器

## 问题目标

接近理想的差分放大器:

$R_i$  极高

极高的  $K_{CMR} \leftarrow A_{VC}$  极小

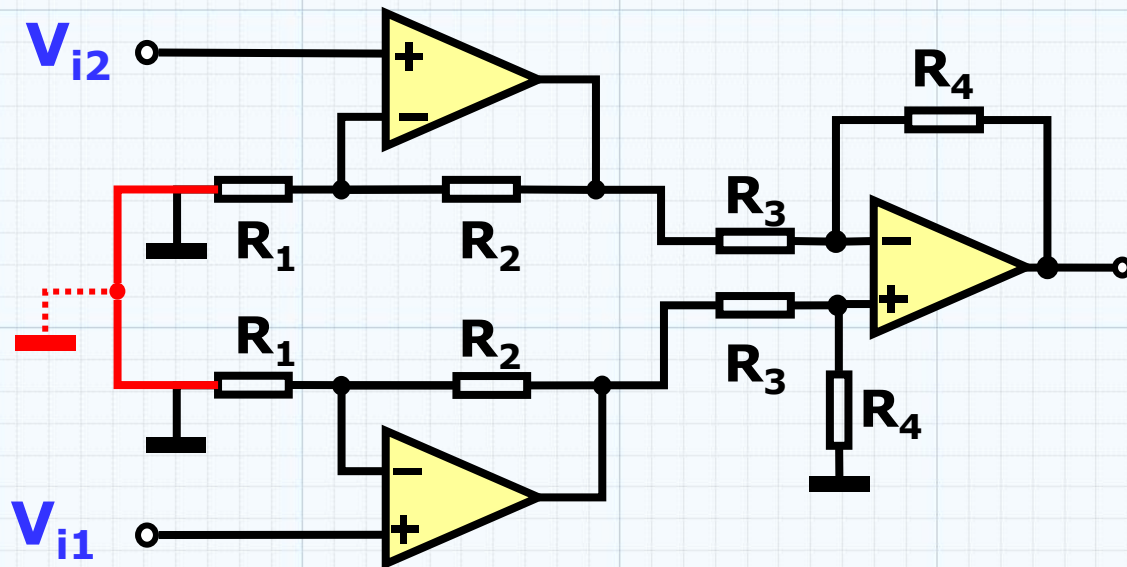
极低的失调 和 极低的温漂

带宽尽量大

## !

对策:

- ▶ 双同相放大+减法电路
- ▶ 前级完全对称  $\rightarrow$  消除共模
- ▶  $V_{IC}$ 、失调、温漂 均为共模
- ▶  $R_1$ 左端相连且不接地  $\rightarrow$  差模: 奇对称信号地  $\rightarrow$  无需俩 $R_1$ 一致
- ▶ 后级仍有失调等, 但前级已有所放大



## ?

电路的分析?

▶ 等效电路、虚短虚断、深负

$$A_{VDF} = - \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3} \right)$$

# 自举放大器

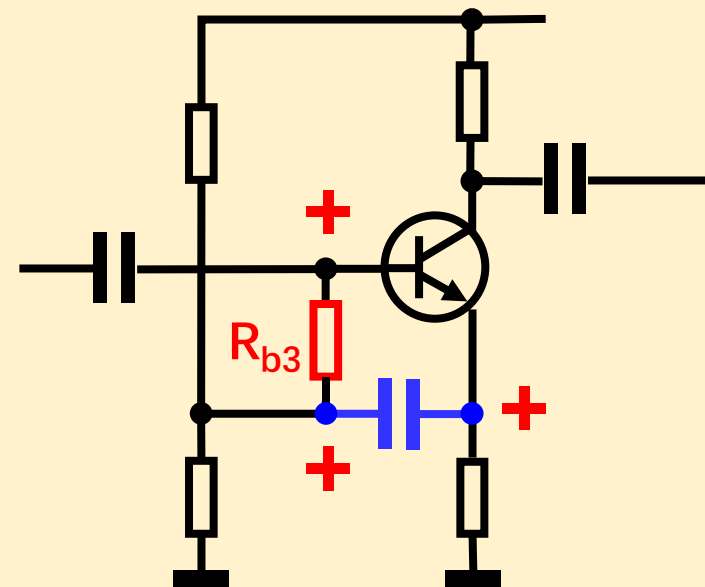
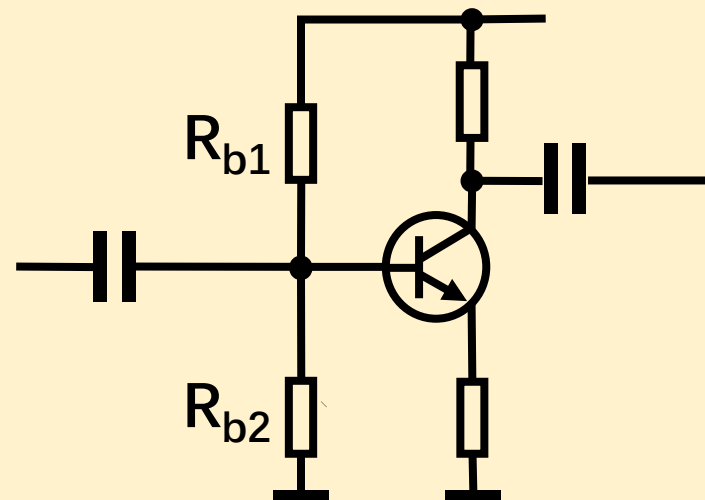
## 问题目标

高增益  $\rightarrow R_E$  小  $\rightarrow R_i$  小  
 $R_{b1}, R_{b2}$  约束了  $R_i$   
极高的  $R_{b1}, R_{b2} \rightarrow Q$  不稳定  
 $\leftarrow$  大电阻不准、不稳  
 $\leftarrow I_{BQ}$  不易忽略+环境敏感

!

对策:

- ▶ 三电阻偏置: 需较大的  $R_{b3}$
- ▶ 矛盾未完全解决
- ▶ 改较小的  $R_{b3} \rightarrow Q$  稳 但  $R_i$  小
- ▶ 引入交流并联正反馈  $\rightarrow R_{iF} \uparrow$
- ▶ 输入电阻的计算: 解方程组



放大

滤波

转换

运算

其它

# 电荷放大器

## 问题目标

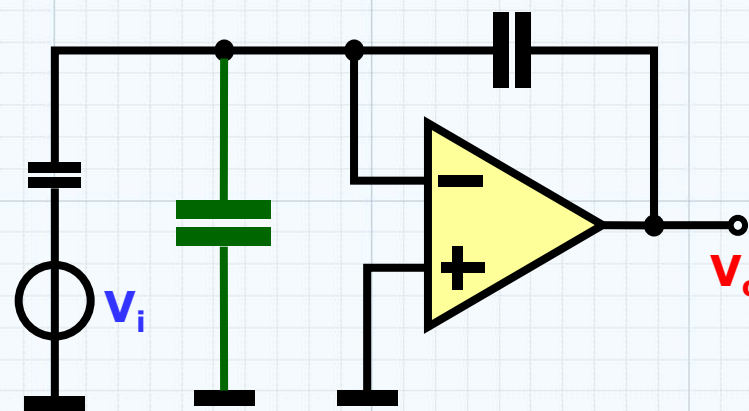
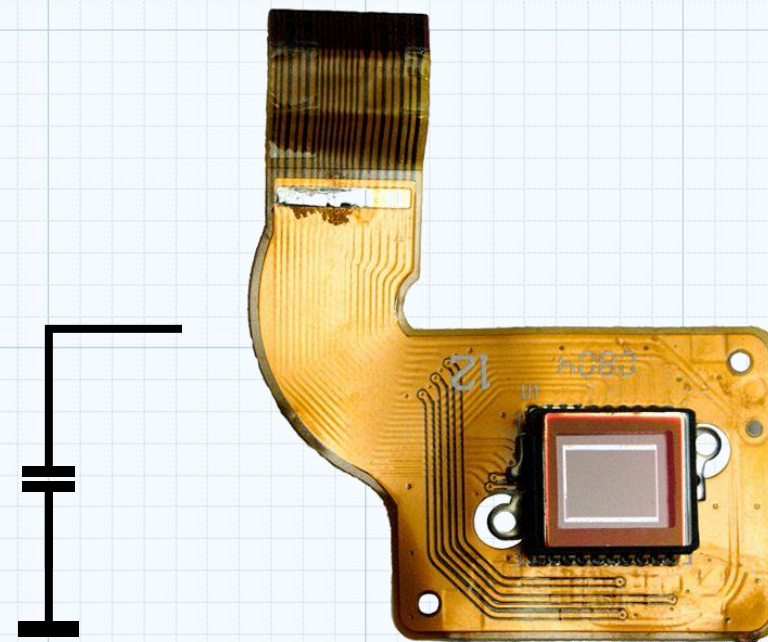
信源是存储有限电荷的电容  
如 CCD、某些加速度传感器  
信源电容可能非常微小  
电路中分布电容相对很大！

## ✓ 对策：

- ▶ 利用虚地抑制分布电容
- ▶ → 构成了微分电路
- ▶ 再采用容性反馈
- ▶ → 增益：复阻抗之比 = 实数

## ✓ 实质：

- ▶ 构成“电荷-电压”转换电路

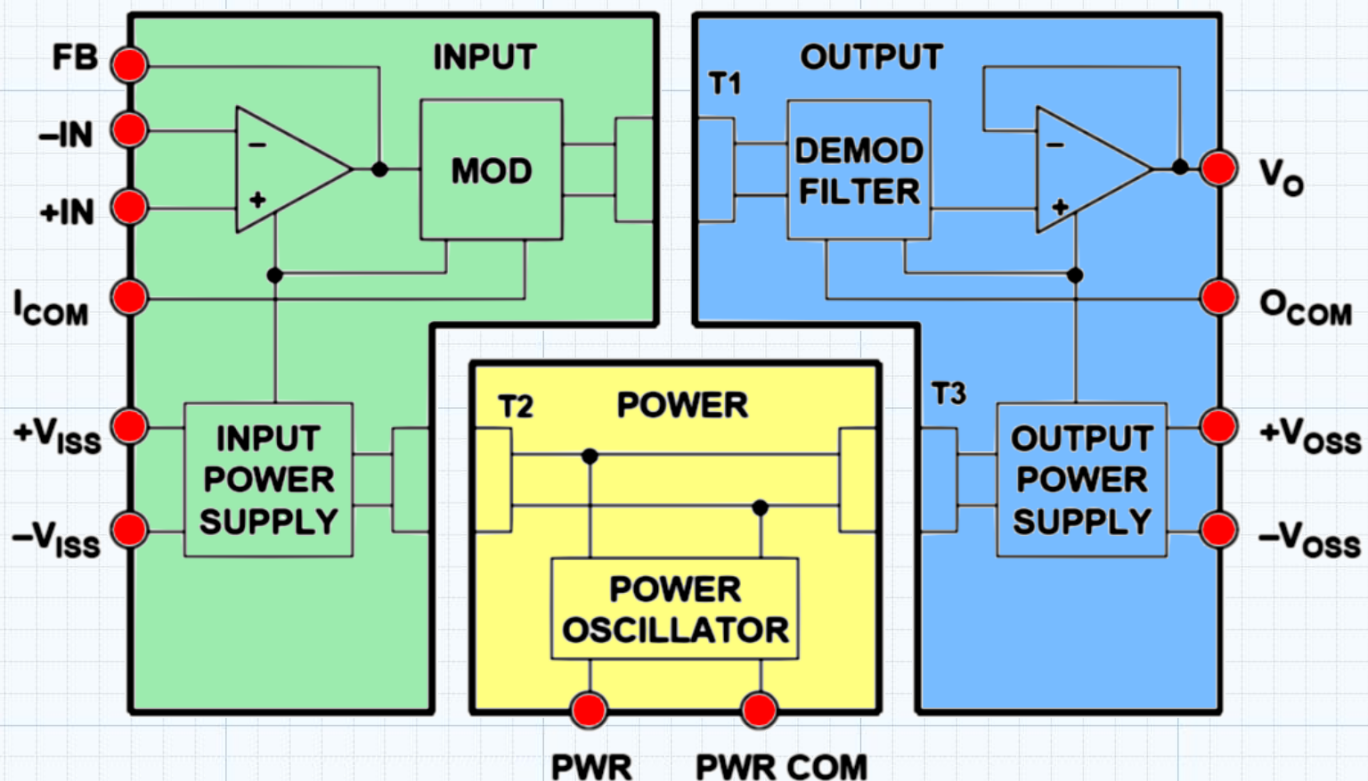




# 隔离放大器

## 问题目标

- 源-负载之间需高度隔离
- 可能存在上千伏的直流电压差
- 最好完全阻断反向传递
- 最好能传递低频信号



## ✓ 对策:

- ① 调制放大: 低频  $\rightarrow$  高频
- ② 交流耦合: 通过变压器
- ③ 解调输出: 高频  $\rightarrow$  低频

## ✓ 补充细节:

- ▶ 管脚分组, 间隔较远
- ▶ 供电电源: 可来自三处
- ▶ 前后级之间不易反馈

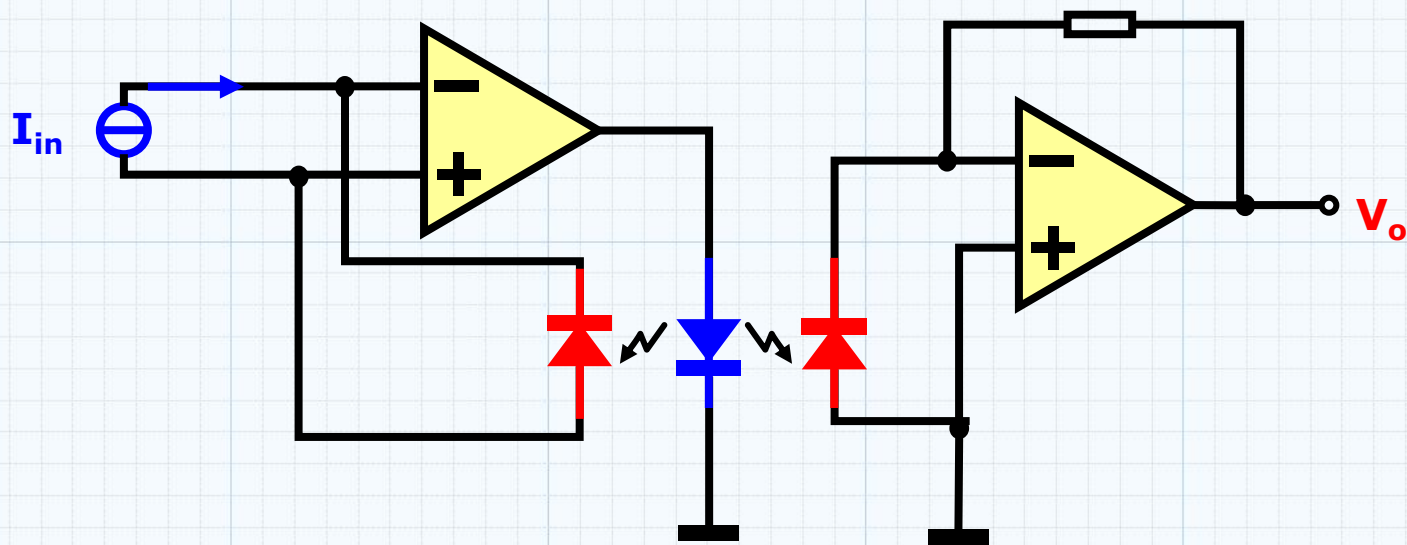
# 隔离放大器

## 问题目标

- 源-负载之间需高度隔离
- 可能存在上千伏的直流电压差
- 最好完全阻断反向传递
- 最好能传递低频信号

## ✓ 对策:

- 引入：光电耦合
- 但：非线性严重
- 故：需良好的发光控制
- 引入级间负反馈！
- LED同时照射两个光电管！
- + 两个光电管完全一致
- + 一个后接  $I \rightarrow V$  电路
- + 一个光电管负责反馈
- 构成“光采样”！
- 总体：电流并联负反馈



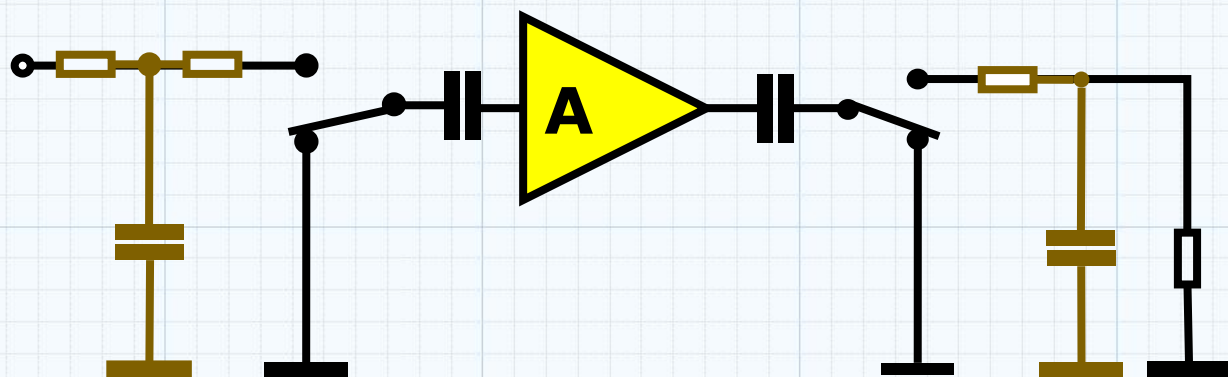
# 斩波放大器

## 问题 目标

低频微弱信号需高精度放大  
低频 → 难以交流耦合  
直耦 → 失调 (零入非零出)  
人工调零 → 难以应对温漂

## 很多名字:

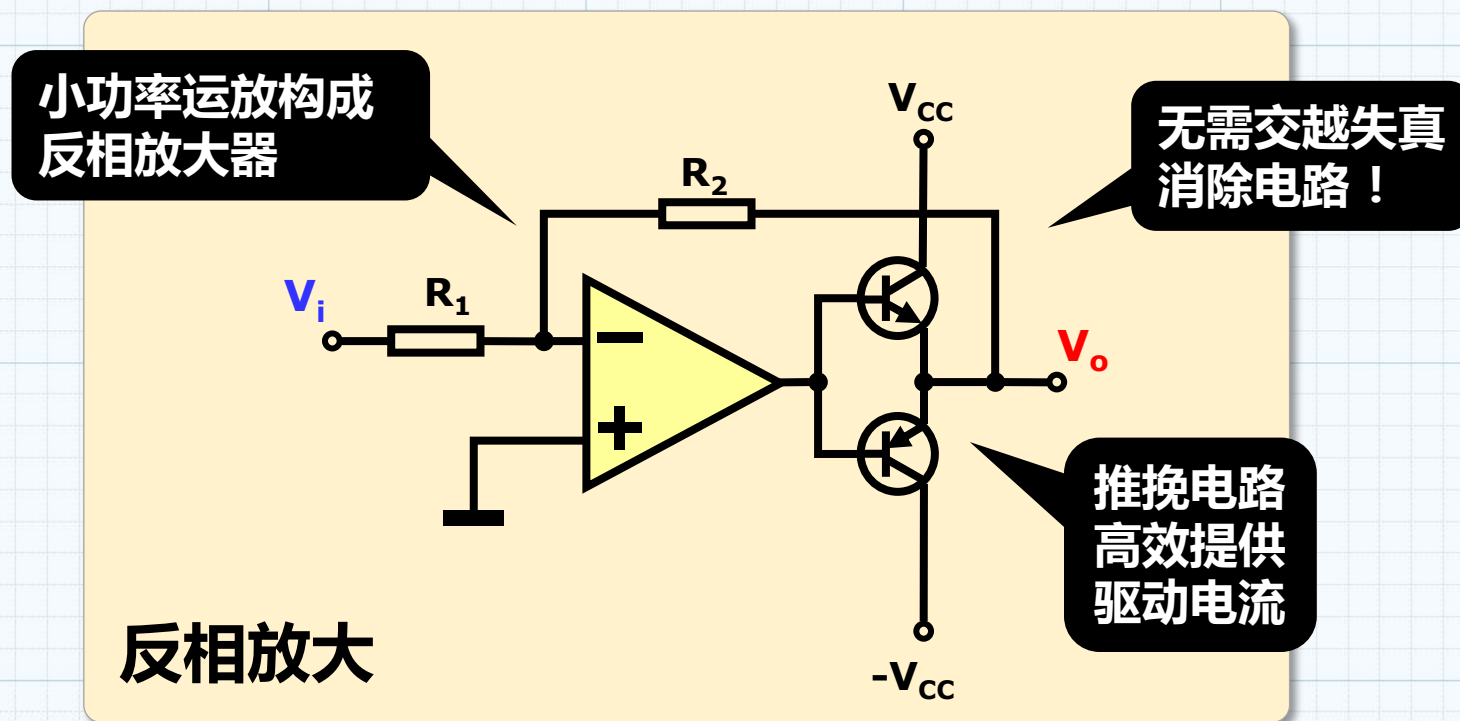
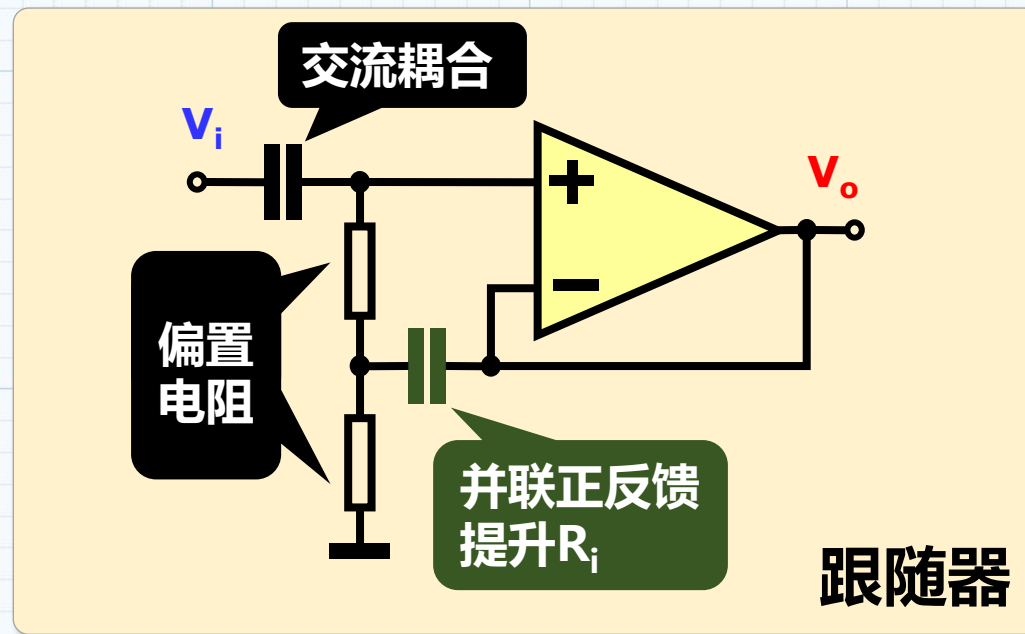
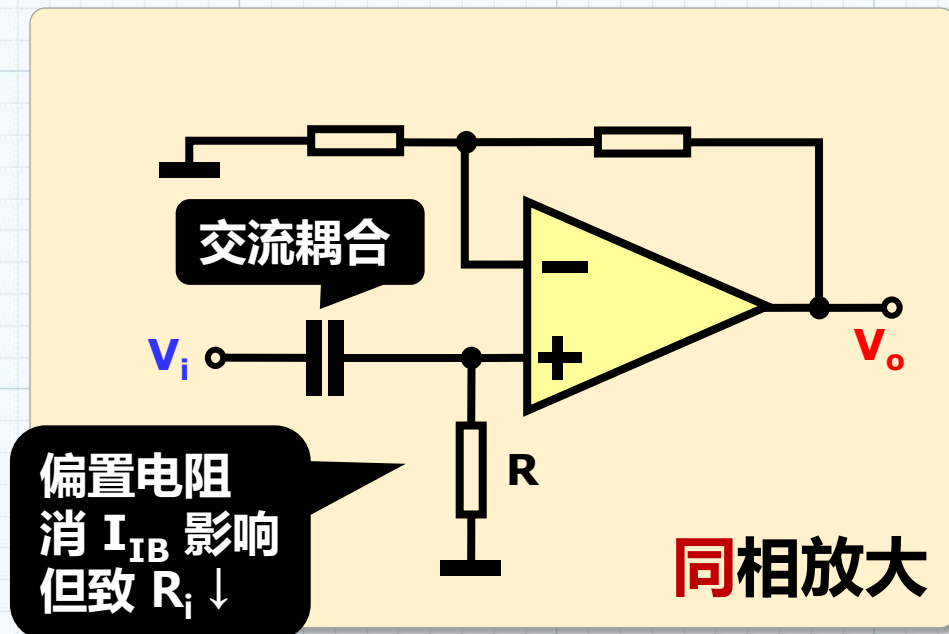
- ▶ Chopper Stabilized Amplifier
- ▶ Auto-Zero Amplifier
- ▶ Auto-Null Amplifier
- ▶ Ping-Pong Amplifier
- ▶ Commutated Amplifier



## ✓ 对策:

- ▶ 交流耦合: 小电容!
- ▶ 电路分两个状态
- ▶ 状态1: 归零, 耦合电容充电
- ▶ 使得两端: 零入零出
- ▶ 状态2: 放大, 信号接入
- ▶ + 两端补充低通滤波

# 其它



放大

滤波

转换

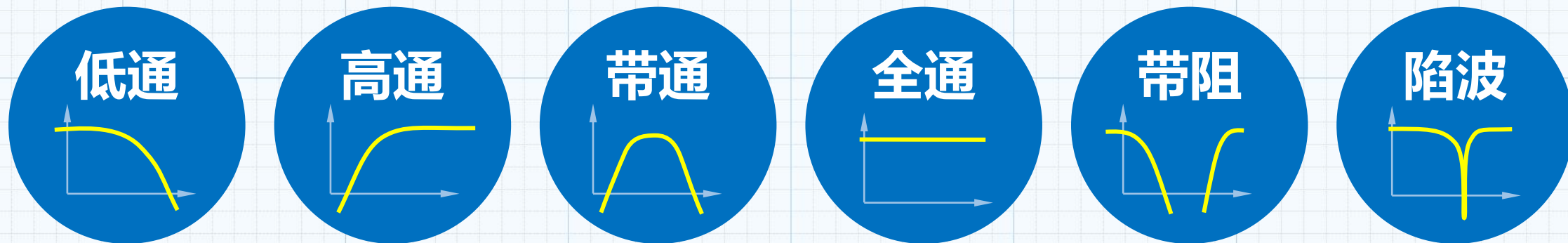
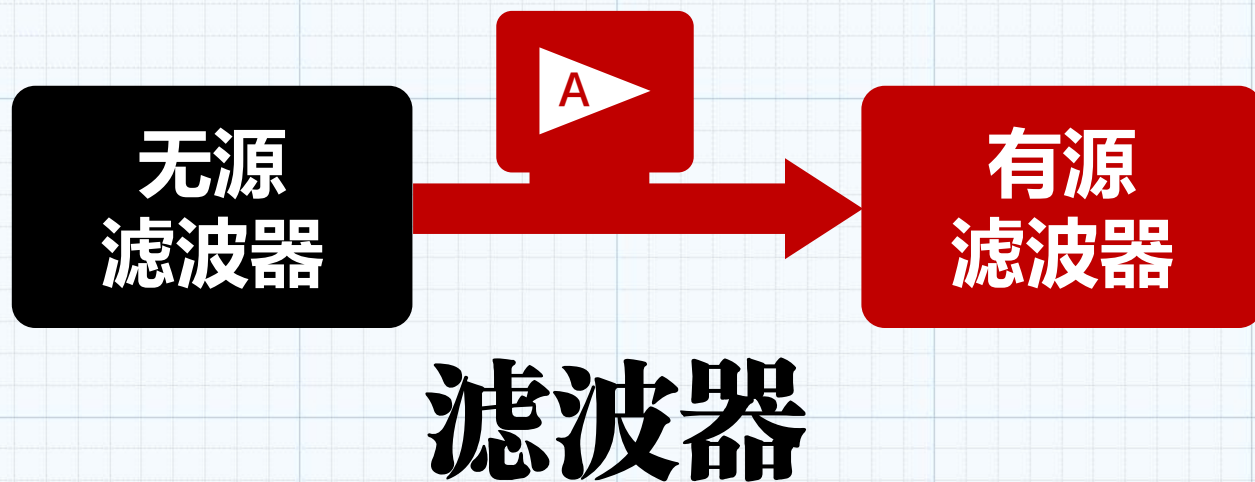
运算

其它



若干经典架构/模板

许多线上/离线设计工具



响应类型

## Filter Properties

Response

Bandpass

Type

Chebyshev

频响特征

网络模板

Topology

Direct-Coupled, Series Capacitor

Order

3

阶数

截止频率

Lower Cutoff Frequency

90

MHz

Upper Cutoff Frequency

110

MHz

带内波纹

Passband  
Ripple (dB)

0.10

两端阻抗

Input  
Impedance ( $\Omega$ )

50

Output  
Impedance ( $\Omega$ )

50

耦合电感

Direct Coupled  
Inductor Value

100.00

nH

元件数值

Additional Settings

Component Values

Exact

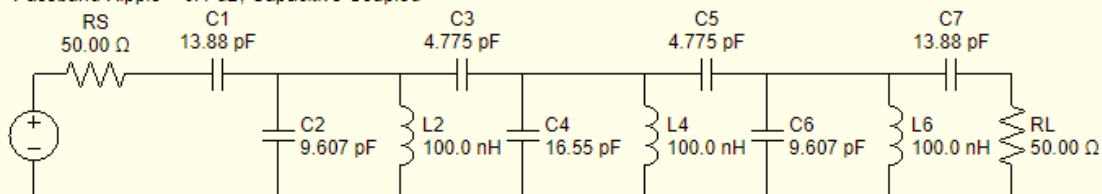
Compute

Reset

## 3rd Order Chebyshev Bandpass

Lower Cutoff Freq. = 90.00 MHz; Upper Cutoff Freq. = 110.0 MHz

Passband Ripple = 0.1 dB; Capacitive Coupled



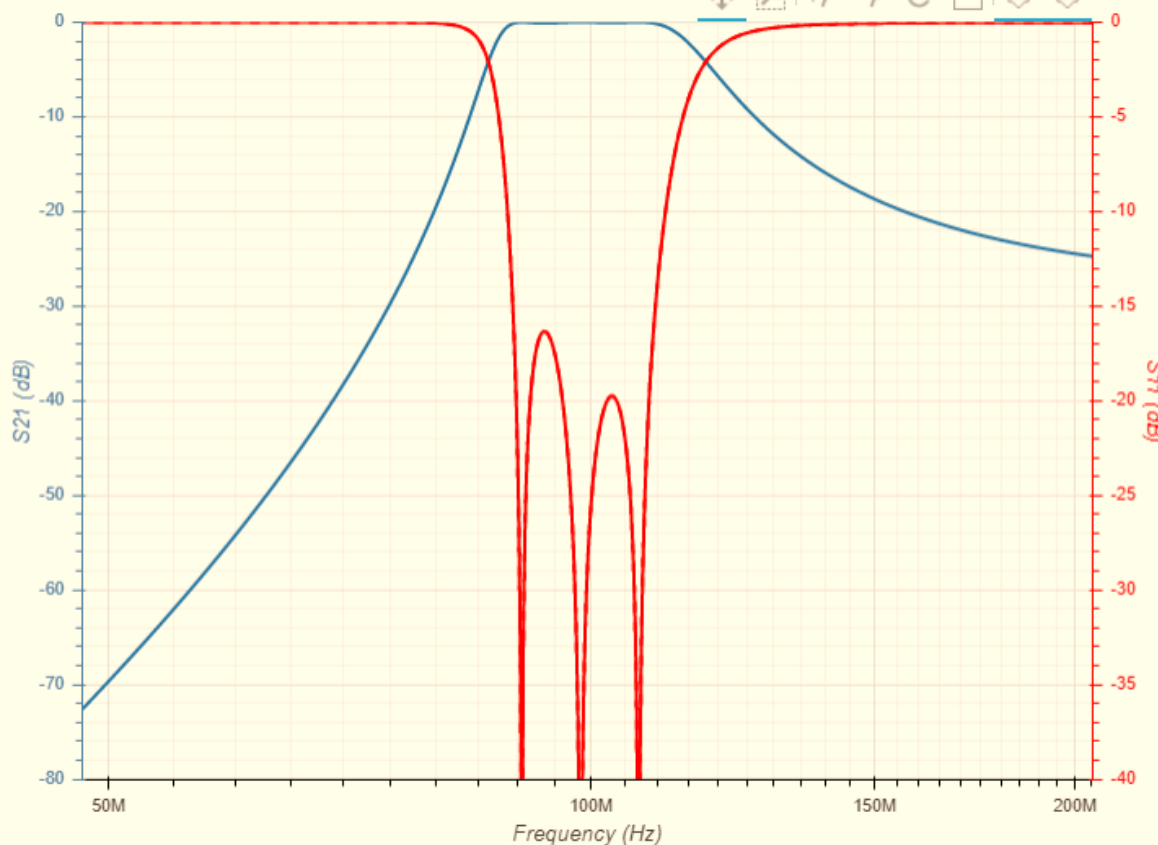
rf-tools.com | Dec 20, 2020

Insertion Loss and Return Loss

Phase and Group Delay

S-Parameters

Export



rf-tools.com

滤波

转换

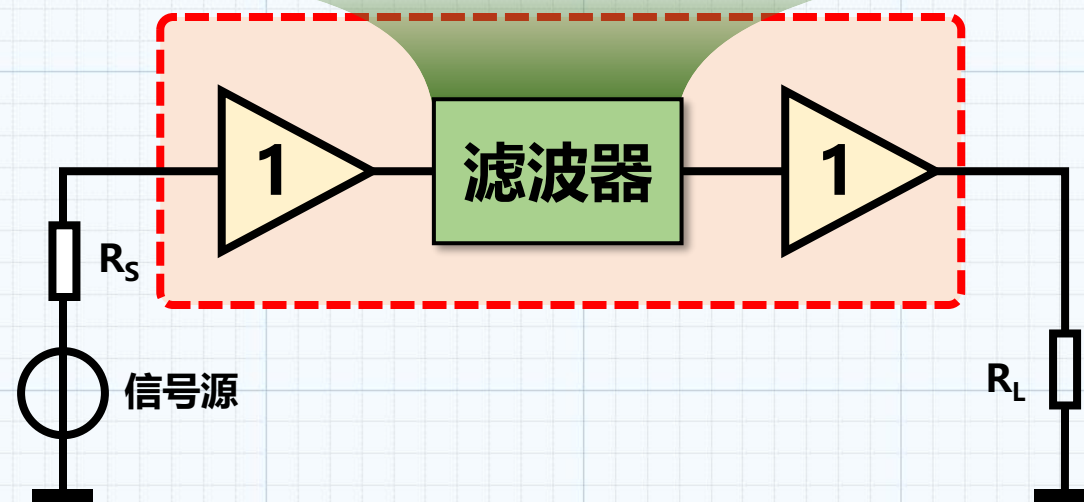
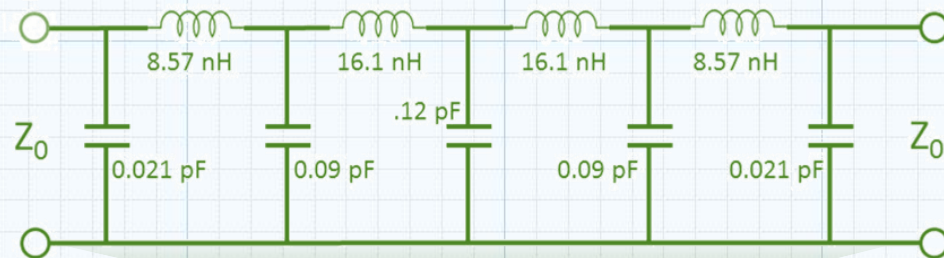
运算

其它

# 有源滤波器：引入

## ? 无源滤波器的优、缺点?

- ✓ 无需电源和放大器
- ✓ 可工作到极高频率 (无GBW限制)
- ✗ 常需要用到电感
- ✗ 有时需要用到较大 C、L
- ✗ 只滤波，不放大
- ✗ 滤波性能与  $R_L$ 、 $R_S$  有关
- ✗ 多个滤波器联接时相互影响



## ? 有源滤波器怎么做？

- ▶ 简法1：跟随|放大器做隔离
- ▶ 简法2：有源阻抗变换

# 有源滤波器：引入

## ? 无源滤波器的优、缺点?

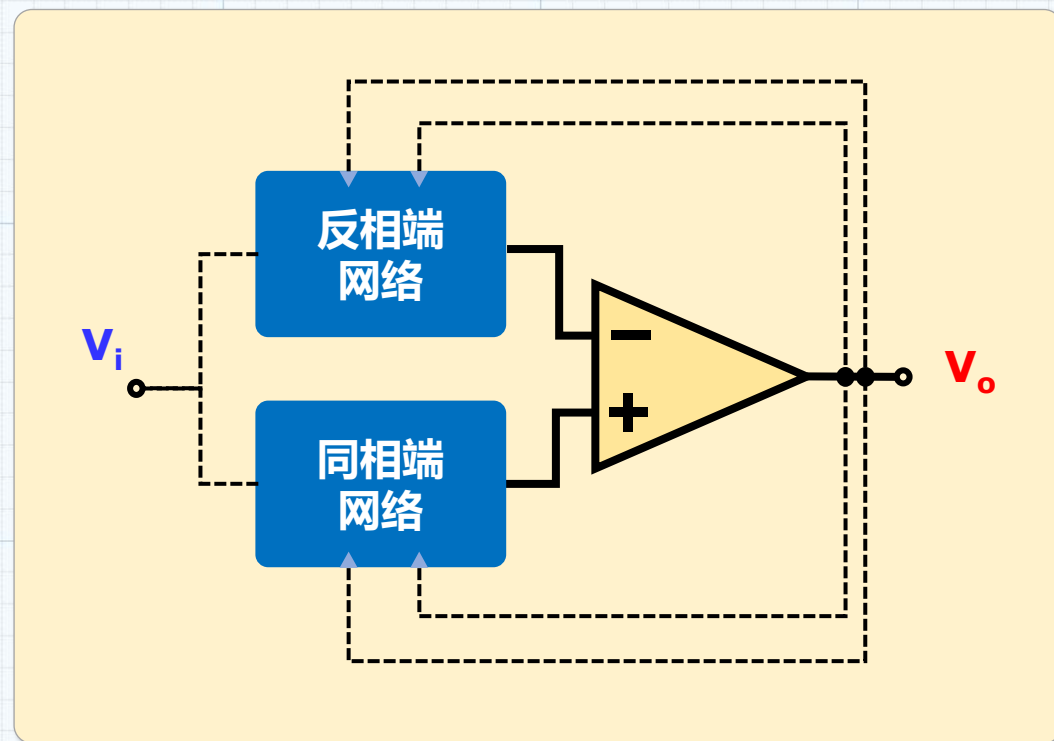
- ✓ 无需电源和放大器
- ✓ 可工作到极高频率 (无GBW限制)
- ✗ 常需要用到电感
- ✗ 有时需要用到较大  $C$ 、 $L$
- ✗ 只滤波，不放大
- ✗ 滤波性能与  $R_L$ 、 $R_S$  有关
- ✗ 多个滤波器联接时相互影响

## ? 有源滤波器怎么做？

- ▶ 简法1：跟随|放大器做隔离
- ▶ 简法2：有源阻抗变换

## ? 高级的有源滤波器怎么做？

- ▶ 放大器+动态元件 紧密结合
- ▶ 经典的设计模板 和 工具
- ▶ 主流：运放 + 多重反馈



- ▶ 高阶：1阶 和 2阶 级联 组成



放大

Low-Pass; 6th order Butterworth; 10kHz passband

## Voltage Supplies

+Vs : 5 V

-Vs : -5 V

## Components

☒ Pick for me

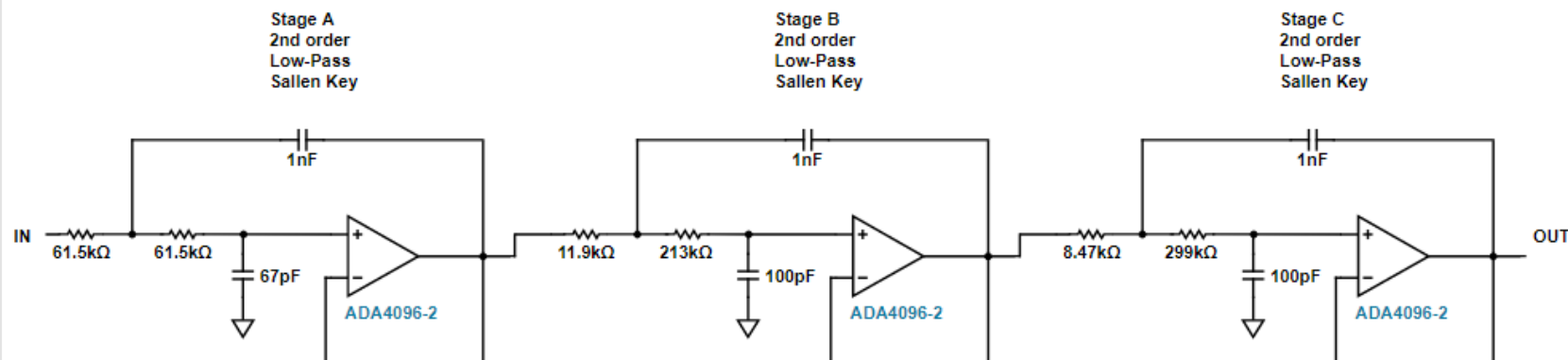
☐ I want to choose

☐ Compensate for GBW ?

## Optimization

Low Power

View: Circuit



滤波

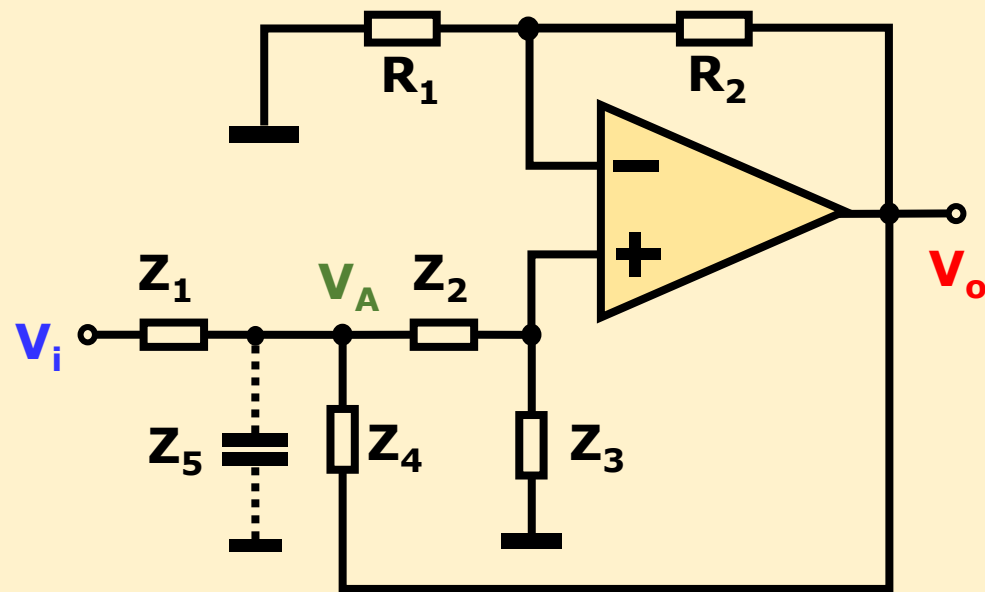
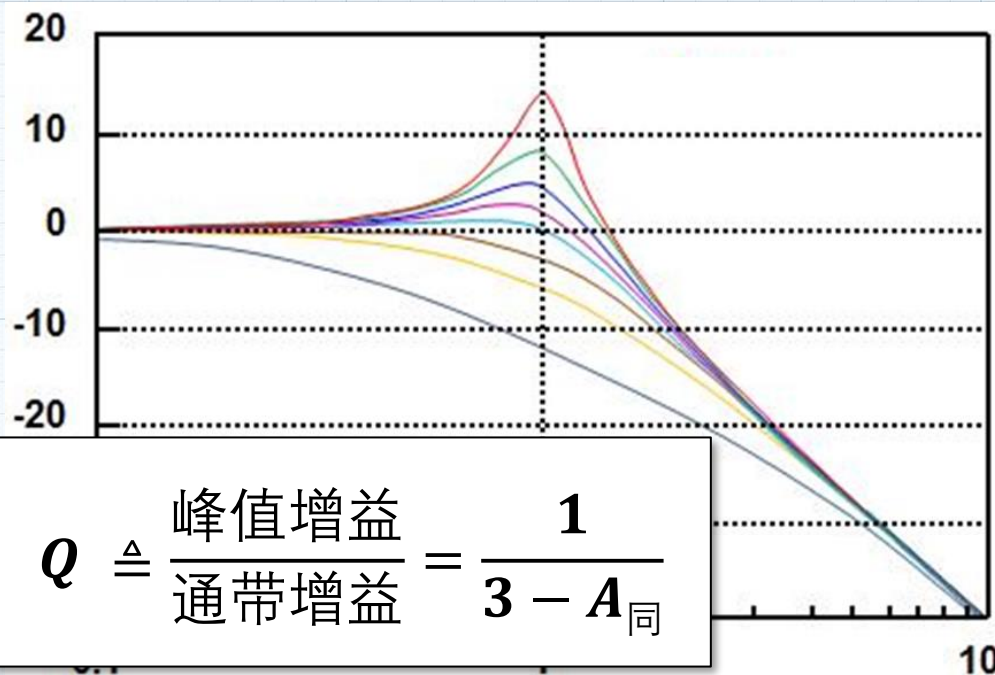
转换

运算

其它

# 有源滤波器：Sallen-Key结构

- ☑ 低通： $Z_3, Z_4$ 为电容；
- ☑ 高通： $Z_1, Z_2$ 为电容；
- ☑ 带通： $Z_2$ 为电容，增加  $Z_5$  电容
- ☑ 若引入  $R_1, R_2 \rightarrow$  增益  $A_{\text{同}}$ 
  - ▶  $A_{\text{同}}$ 过大  $\rightarrow$  可能会自激



$$\frac{V_i - V_A}{Z_1} = \frac{V_A - V_o}{Z_2 \parallel Z_4}$$

$$V_o = \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} V_A$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2 + Z_3) Z_4}$$

# 有源滤波：多重反馈

## ✓ 构造：

## ✓ 二阶RC滤波器：

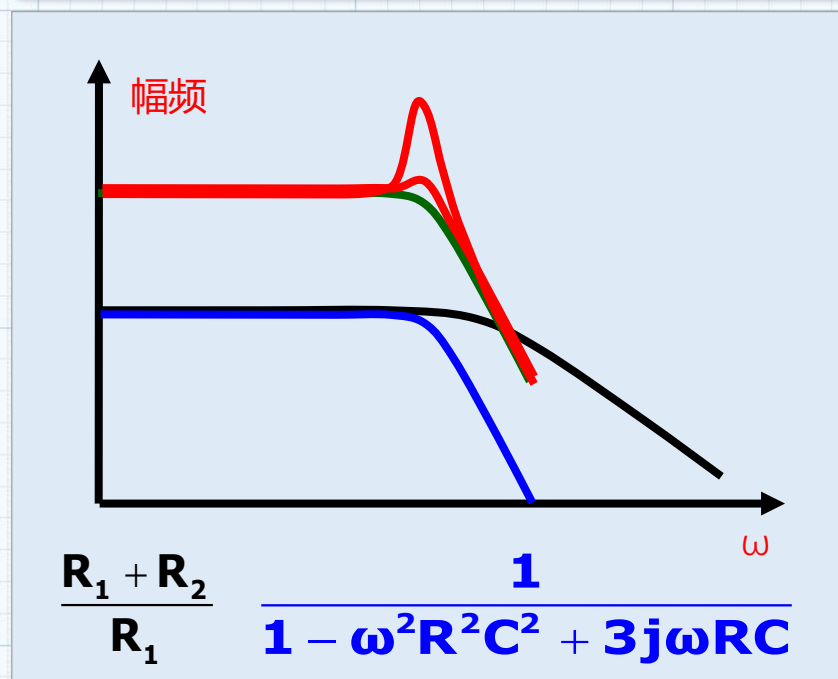
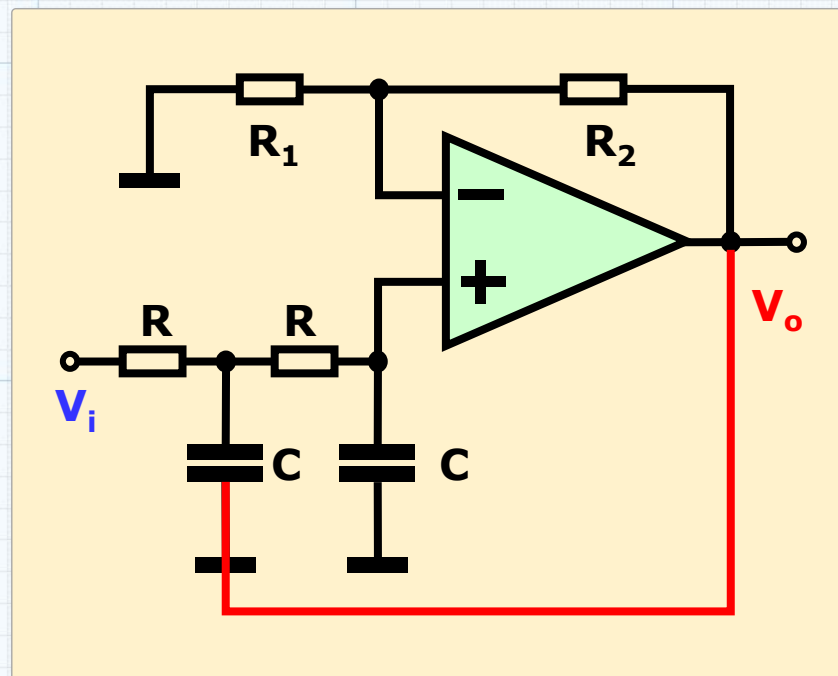
- ▶ 劣于两个一阶RC频响的乘积
- ▶  $f_H = 0.37 \cdot f_0$ ; 40dB/dec

## ✓ 增加运放：

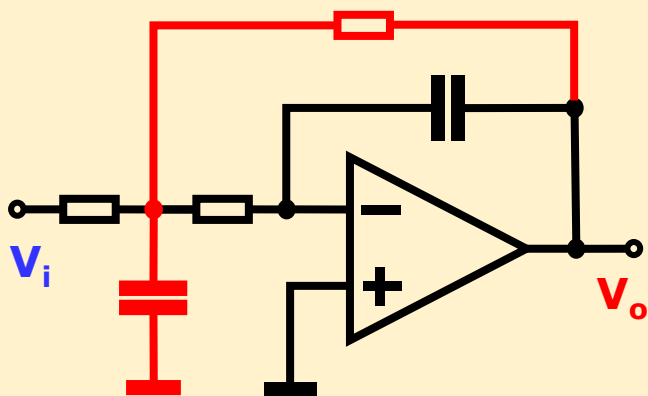
- ▶ 引入了增益，隔离了负载

## ✓ 引入正反馈 → ....

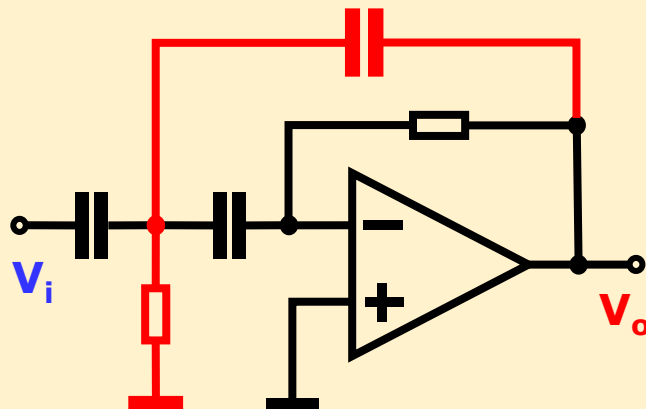
- ▶ Sallen-Key有源二阶滤波器
- ▶ 定性理解：仅在截止频率处引入了正反馈
- ▶ 有时也被理解为引入了自举原理



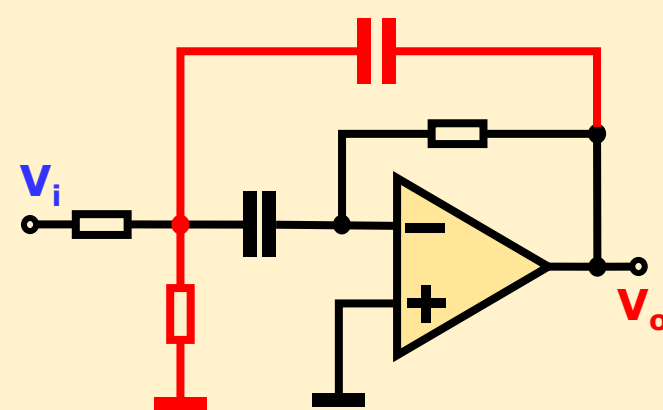
# 无限增益多重反馈有源滤波



二阶低通滤波器



二阶高通滤波器

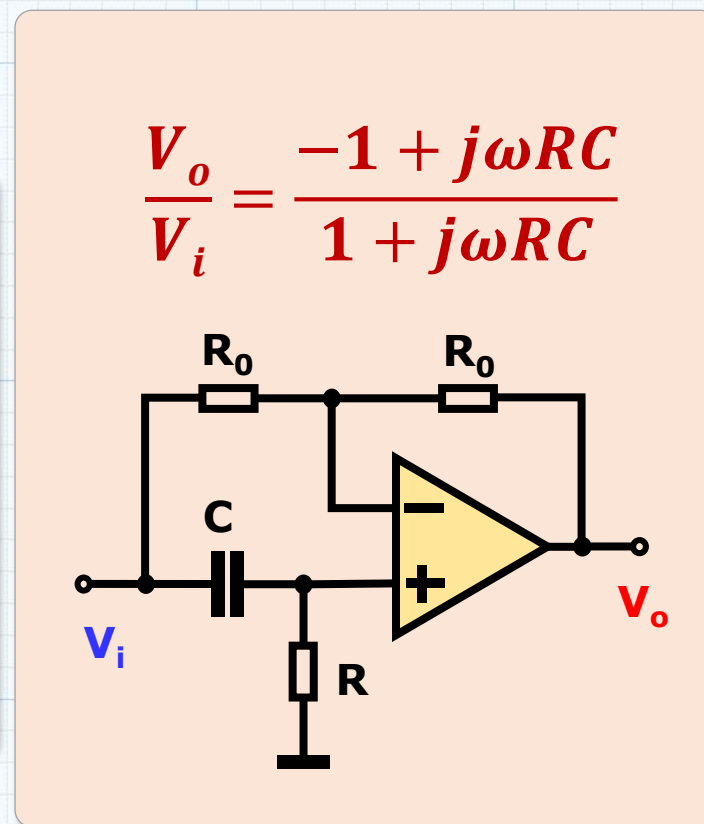
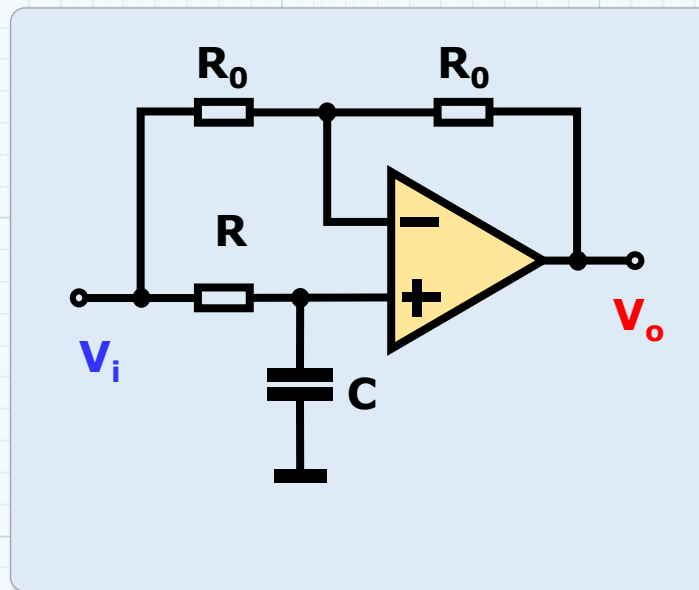
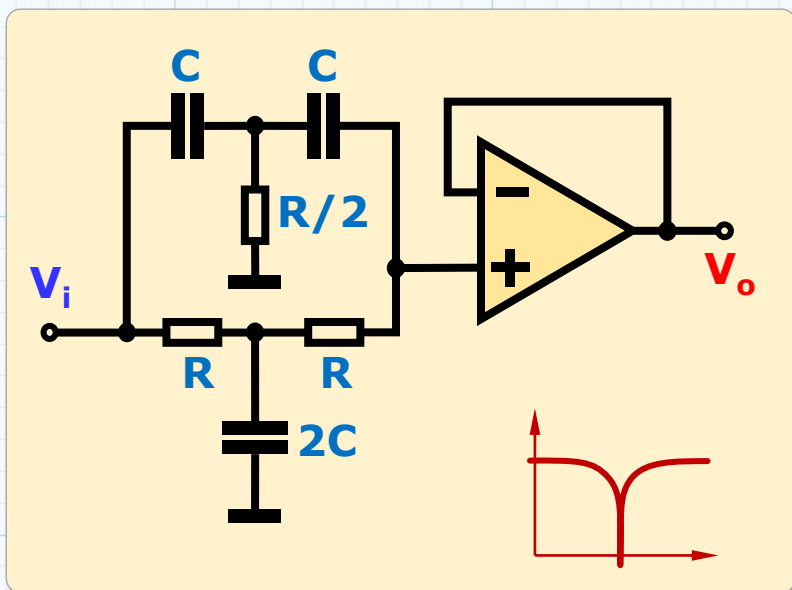


二阶带通滤波器

- ✓ **共同特征：**运放积分/微分 + 第二层反馈
- ✓ **“无限” 来由：**理想积分/微分器在  $f \rightarrow 0$  或  $\infty$  时增益趋于无限
- ✓ **性能优良：**
  - ▶ 稳定，失真小，可单独设  $f_H$  和  $Q$ ，对元器件一致性要求不高

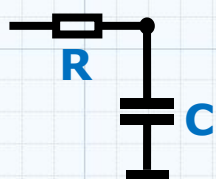


# 更多的有源滤波器



## ! 双T桥带阻滤波器

- 四个 L 型电路拼成
- 低通臂+高通臂
- 两臂电路相互影响
- 需  $R_L = \infty \rightarrow$  跟随器



## ! 全通滤波器

$$V_+ = \frac{1}{1+j\omega RC} V_i = V_- = \frac{V_i + V_o}{2}$$

$$2V_i = (1 + j\omega RC)V_i + (1 + j\omega RC)V_o$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

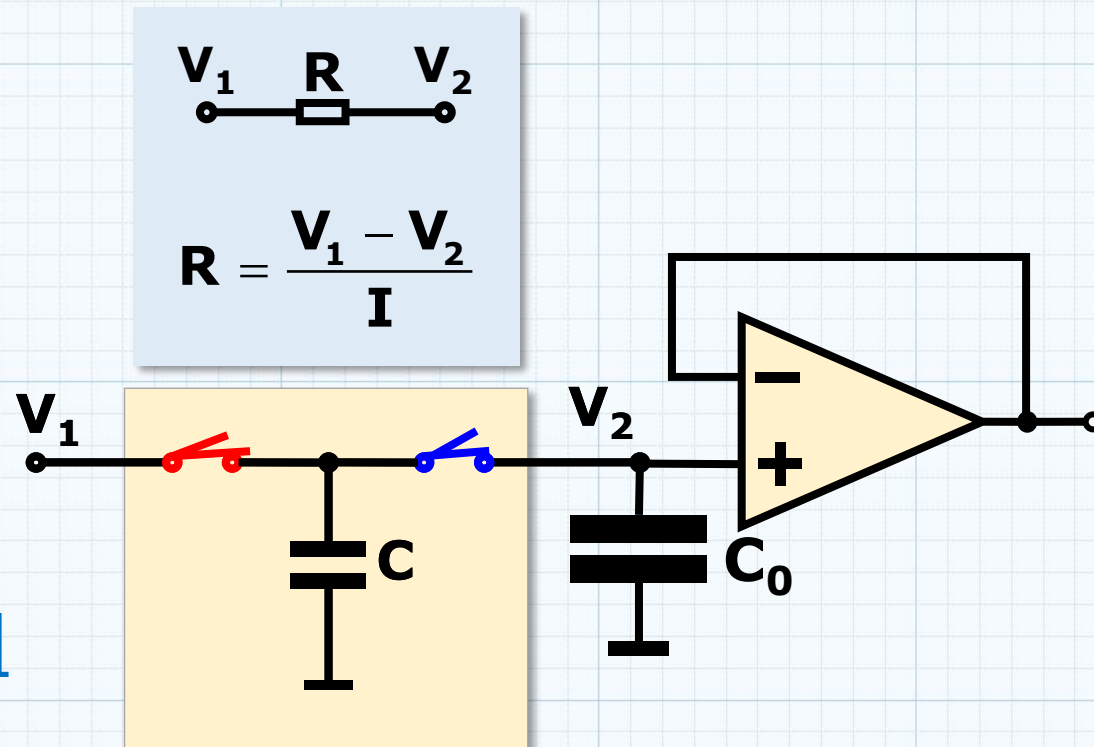
# 开关电容式有源滤波

## 问题目标

IC内常需对低频信号做低通滤波  
截止频率非常低  $\rightarrow R, C$  过大 ☹️  
精度要求高  $\rightarrow$  而  $C$  精度不足 ☹️  
有时需  $f_H$  可调  $\rightarrow$  数控最佳

✓ 对策：用并联构造等效平均电阻

- ▶ 状态1：仅  $S_1$  导通； $V_C = V_1$
- ▶ 状态2：仅  $S_2$  导通； $V_C = V_2$
- ▶ + 假设信号变化很慢
- ▶ + 设  $C$  很小  $\rightarrow$  充放电不影响前后电路
- ▶ 每周期搬运电荷量： $Q = C(V_1 - V_2)$
- ▶ 平均电流： $I_{AV} \approx Q/T_C = C(V_1 - V_2)/T_C$
- ▶ 平均电阻： $R_{AV} = (V_1 - V_2)/I_{AV} \approx T_C / C$
- ▶ 后续 大电容+跟随器  $\rightarrow H = 1/(1+j\omega C_0 R_{AV}) \approx 1/(1+j\omega T_C C_0 / C)$



$T_C$  基本可以随意控制 ☺️

无需制作大  $C$ 、大  $R$  ☺️

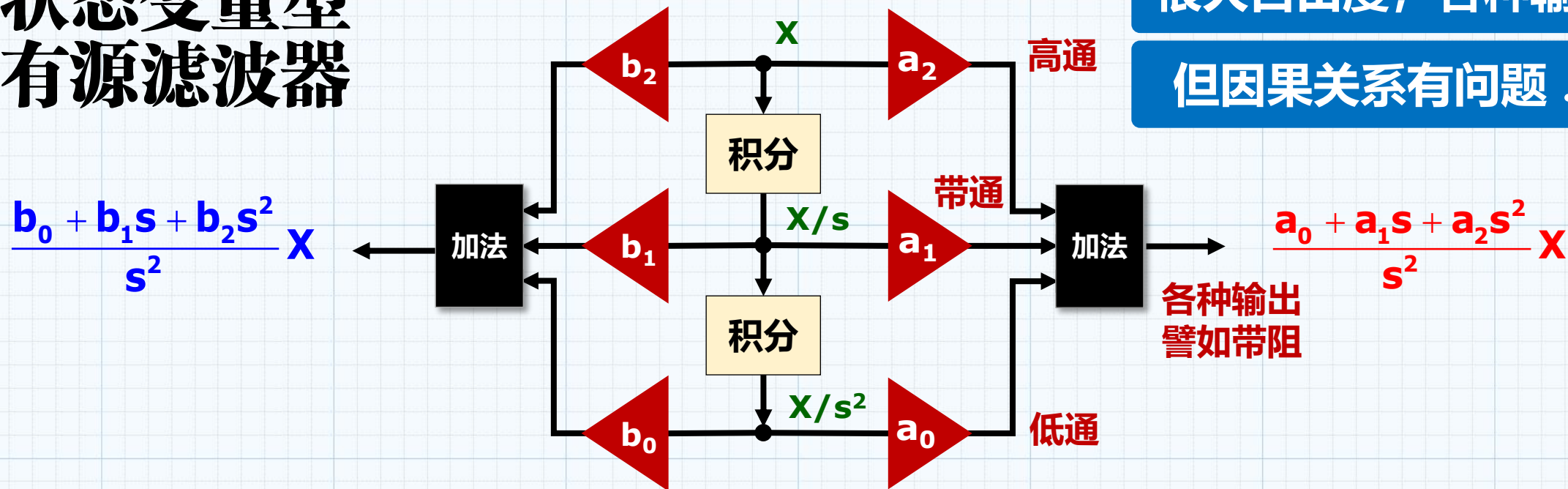
精度取决于  $C_0/C$  ☺️

仅适用于很低频的信号 ☹️

# 状态变量型 有源滤波器

很大自由度，各种输出

但因果关系有问题 ...



$$A(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2}{b_0 + b_1s + b_2s^2}$$

低通:  $a_1 = a_2 = 0 \rightarrow$  高频 40 dB/dec

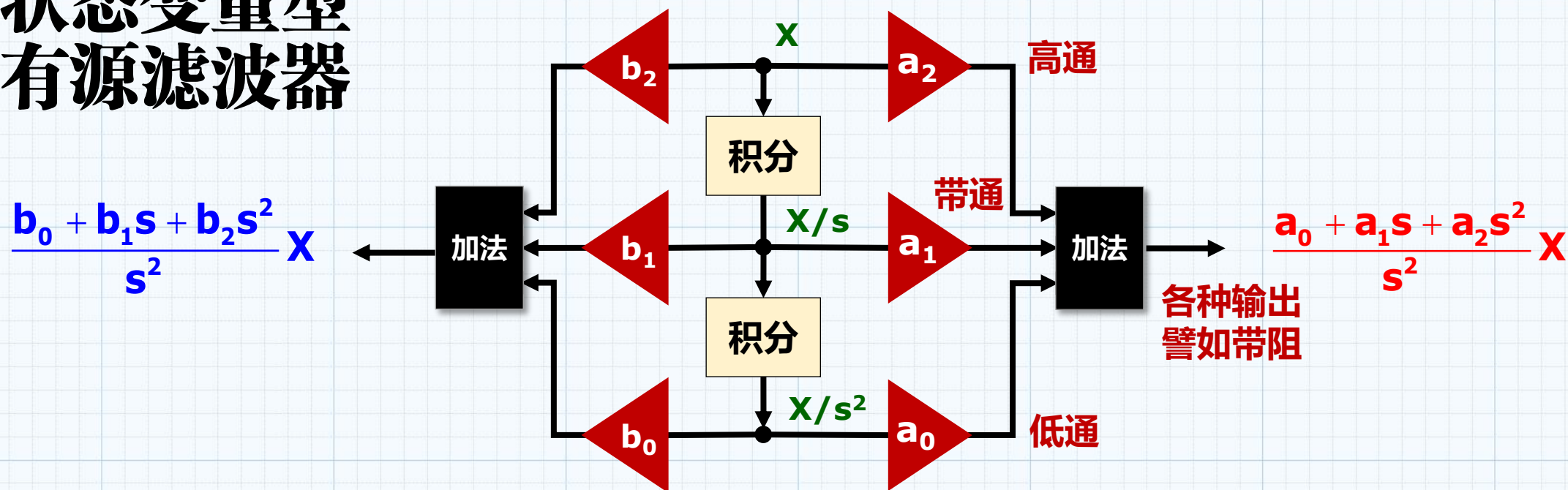
高通:  $a_0 = a_1 = 0 \rightarrow$  低频 40 dB/dec

带通:  $a_0 = a_2 = 0 \rightarrow$  两侧 20 dB/dec

带阻:  $a_1 = 0$

☑ 框图：拼凑出传递函数

# 状态变量型 有源滤波器



滤波

转换

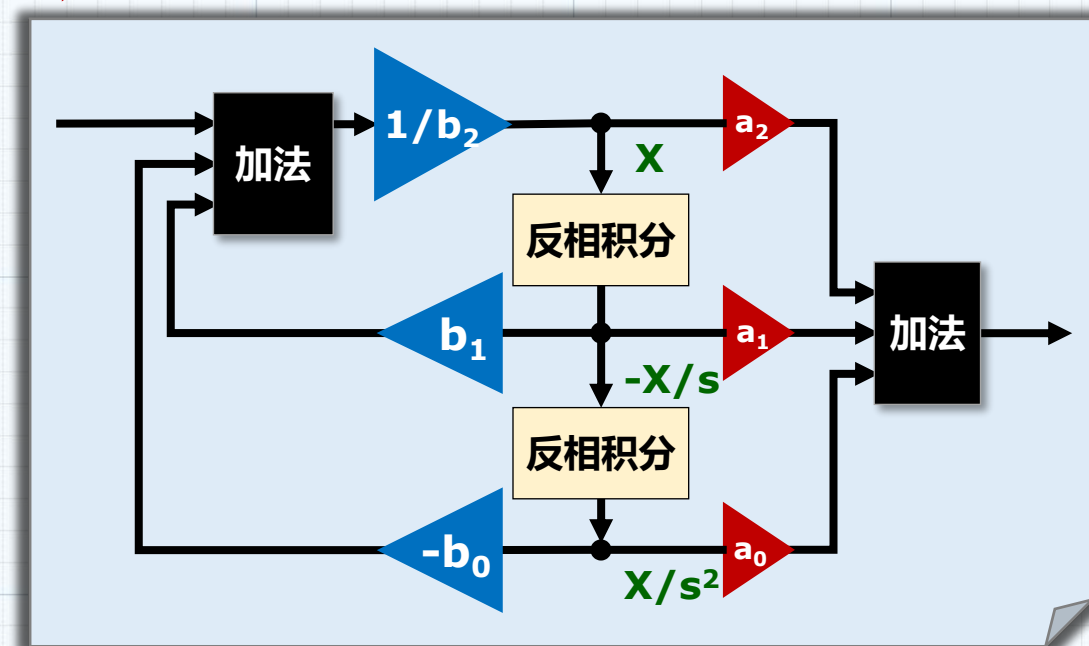
运算

其它

❗ 修改左侧加法器信号因果关系

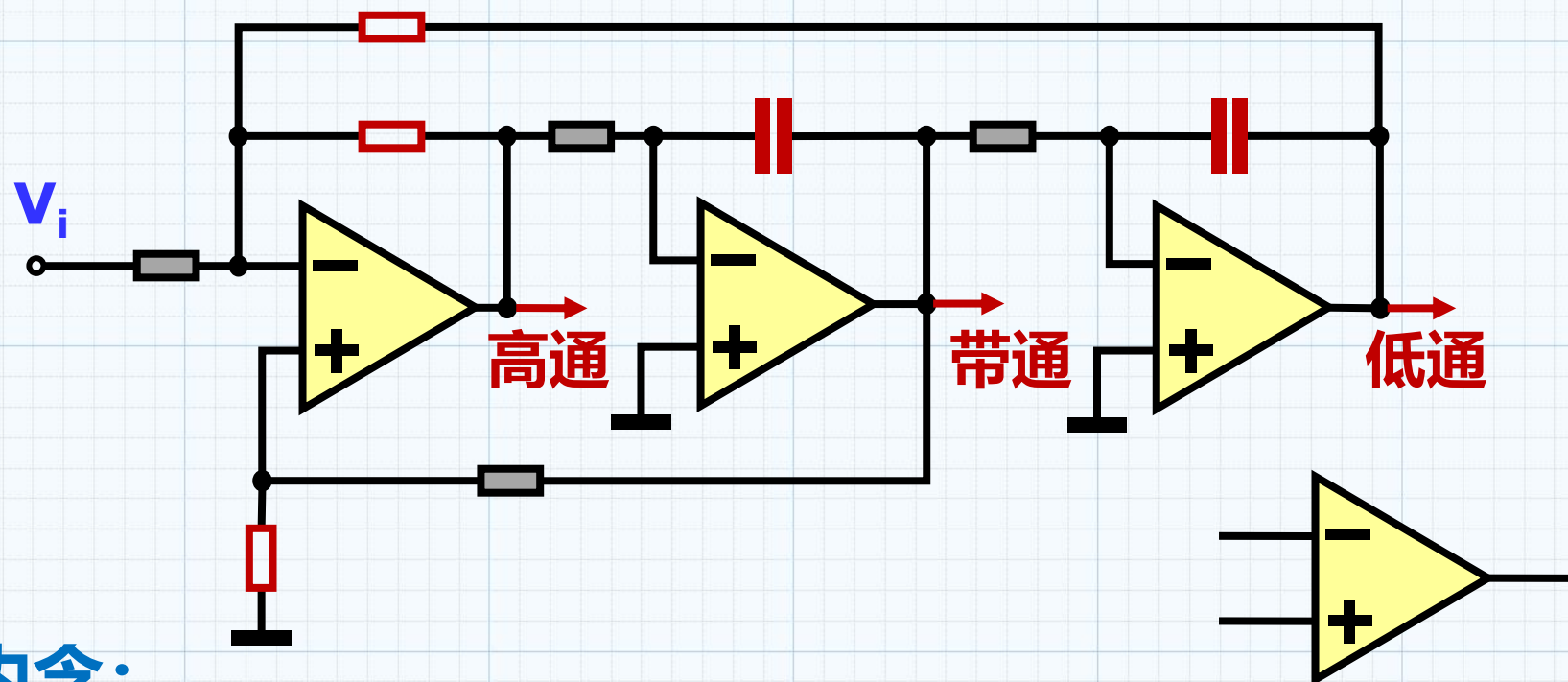
- ☑ 加法 → 减法
- ☑ 最左端为信号源
- ☑ 放大器  $b_2$  翻转

❗ 运放反相积分:  $Y = -X/s$





# 状态变量型 有源滤波器



滤波

转换

运算

其它

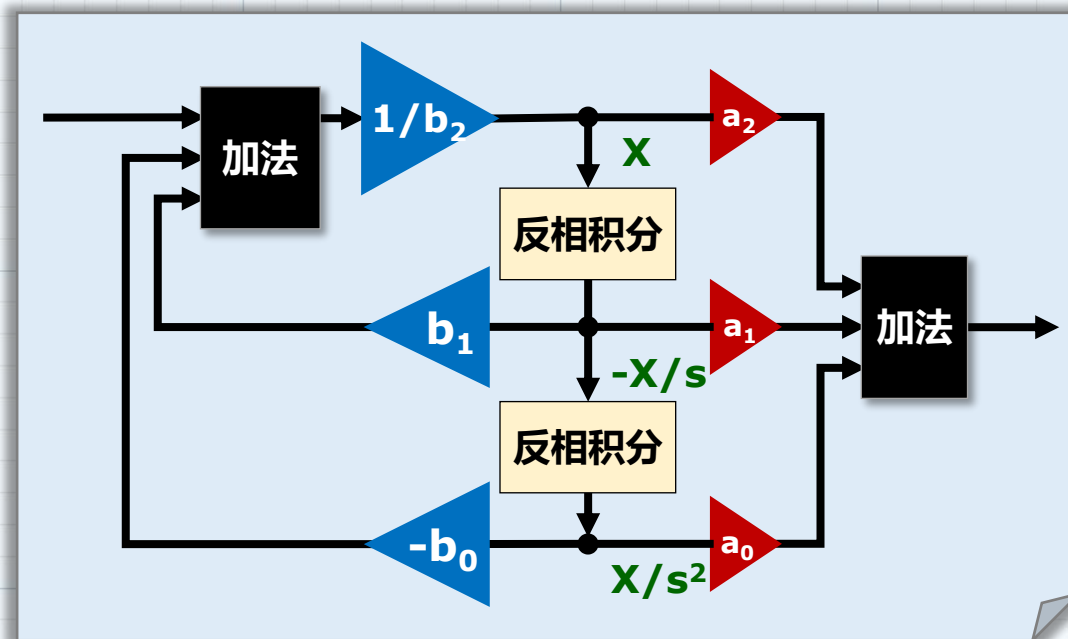
## ✓ 集成滤波器，内含：

- ▶ 四个运放：两级积分+加法+加法
- ▶ +两个精密电容
- ▶ +三个精密电阻

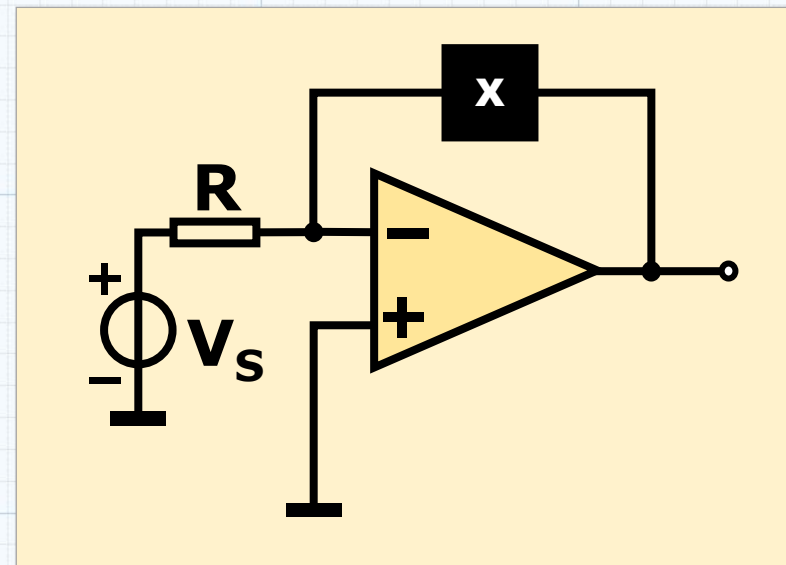
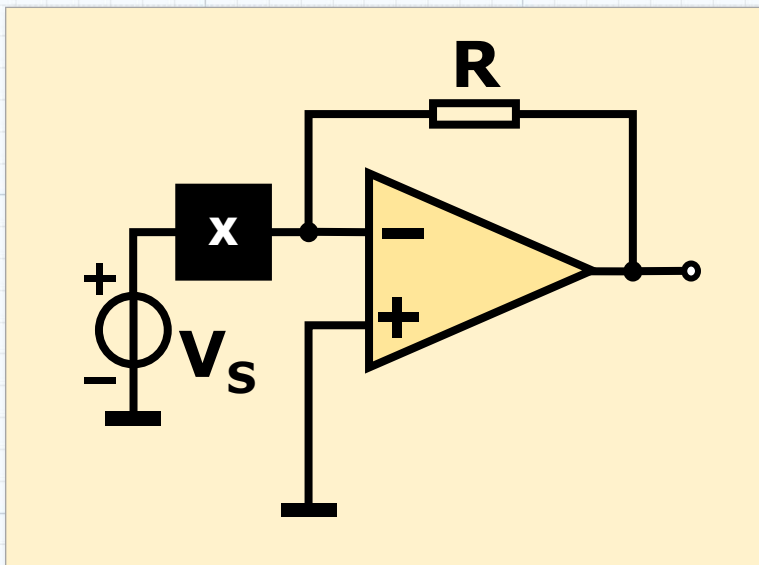
## ✓ 外接电阻：设 $a_2 a_1 a_0$ , $b_2 b_1 b_0$

## ✓ 固定输出：高通，带通，低通

## ✓ 第四加法器：带阻，或可选反相



# 基于反相放大器的拓展



☑ 设某元件  $X$  的 VCR:  $I_X = F(V_X)$

- ▶ 利用虚地
- ▶ 引入  $R$ : 电流  $\leftrightarrow$  电压
- ▶ 若将  $X$  设为输入支路  $\rightarrow V_O = -RF(V_S)$
- ▶ 若将  $X$  设为反馈支路  $\rightarrow V_O = -F^{-1}(V_S/R)$

☑  $X$ :  $R, C, L, D, \text{BJT} \dots$

? 若已知  $V_O/V_S$  ?

▶ 可利用跟随器 ...

? 若是多端元件 ?

▶ 看情况 ...

# 波形转换与运算

## 线性方式

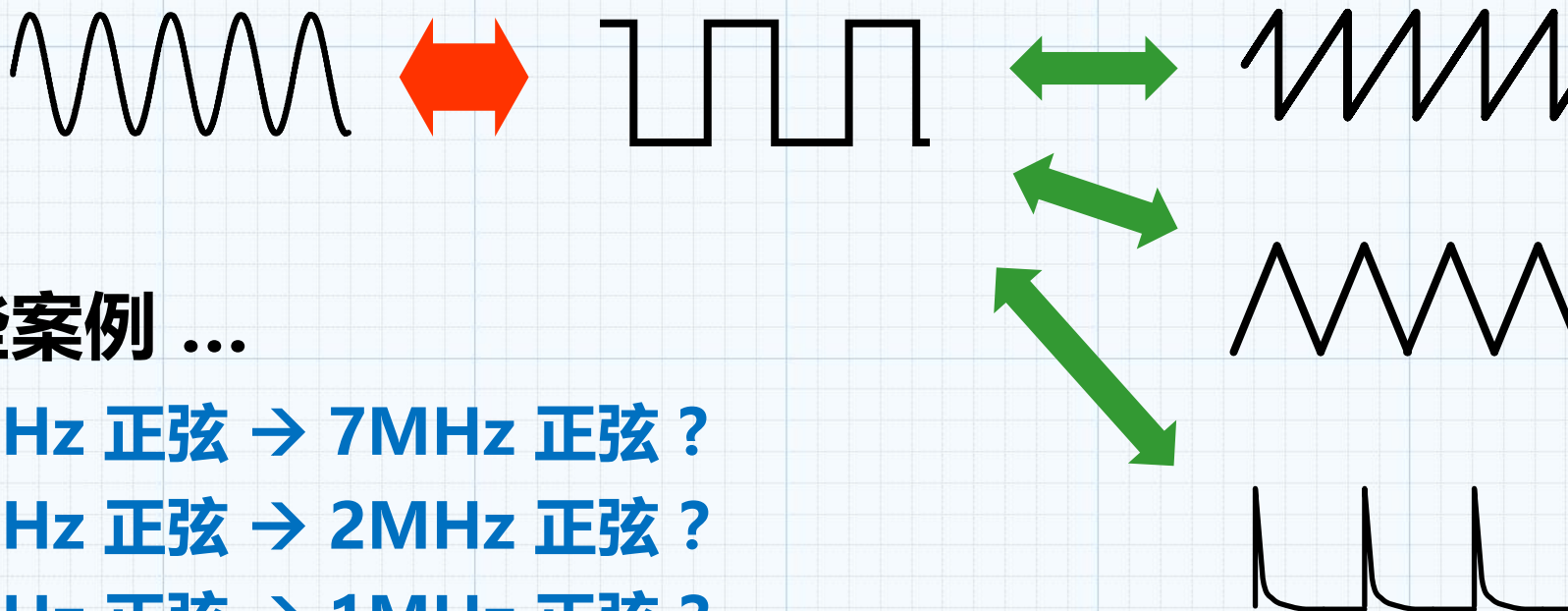
~~放大~~

滤波 | 隔直 | 陷波  
微分 | 积分 | 高阶  
加法 | 减法

## 非线性方式

指数 | 对数  
整流 (绝对值)  
限幅 | 箝位  
绝大部分信号处理...

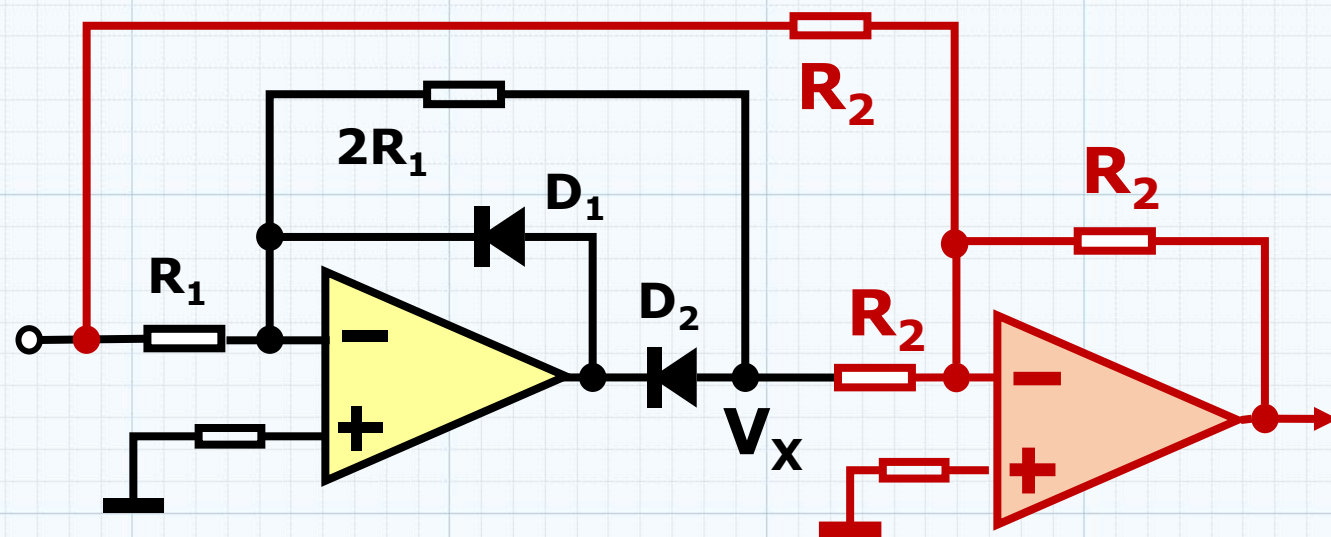
- ▶ 分段处理：按幅度
- ▶ 分段处理：按时间
- ▶ 数字化方式



## ? 一些案例 ...

- ▶ 1MHz 正弦 → 7MHz 正弦 ?
- ▶ 1MHz 正弦 → 2MHz 正弦 ?
- ▶ 2MHz 正弦 → 1MHz 正弦 ?

# 波形转换：精密整流



! 精密整流:  $V_o = |V_{in}|$

- 方法有多种
- 引入二极管区分信号极性
- 但要回避 0.7V 结压降
- 与运放结合

## ! 实例 1：分两级

### 1: 精密半波整流

▶  $V_{in} > 0$ :  $D_1$  断,  $D_2$  通

$$V_x = -2V_{in}$$

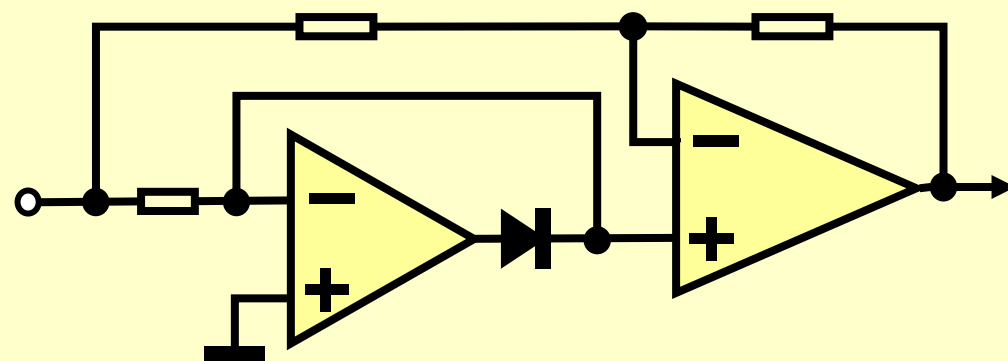
▶  $V_{in} < 0$ :  $D_1$  通,  $D_2$  断

$$V_x = 0$$

### 2. 反相加法器:

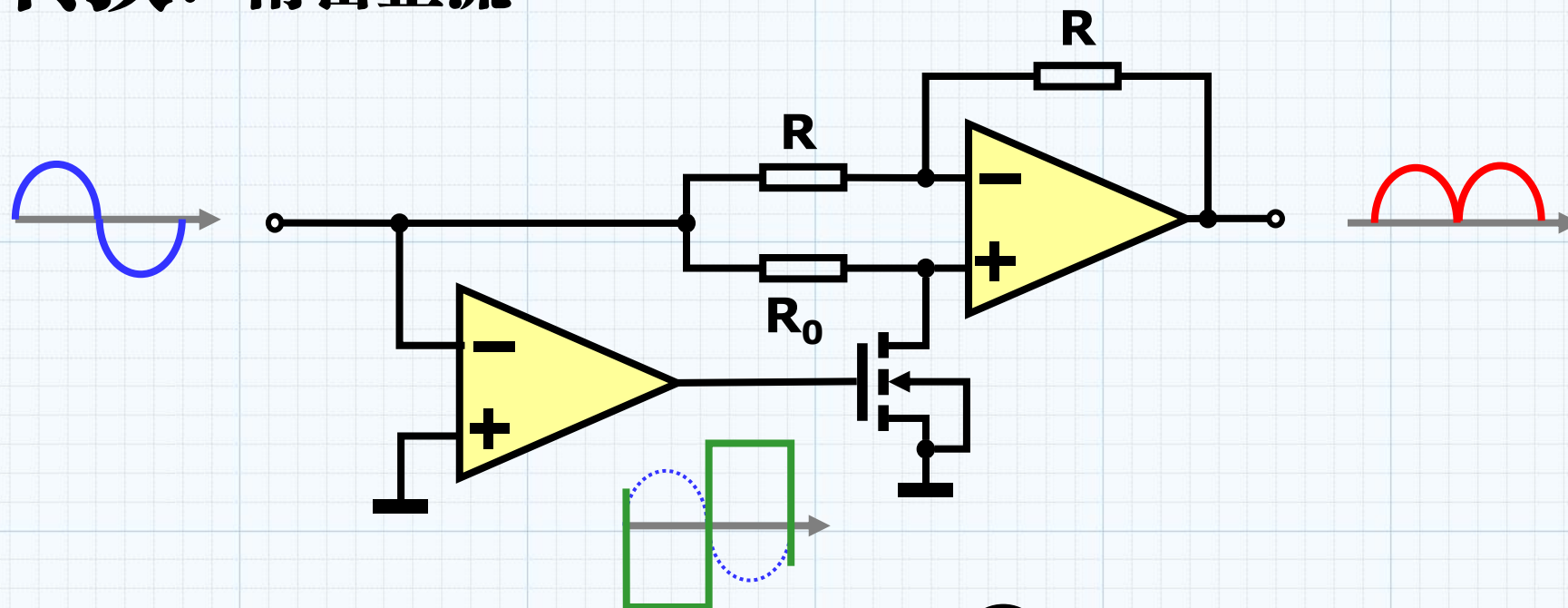
▶  $V_o = -(V_x + V_{in})$

### 简化版





# 波形转换：精密整流



## ！ 实例 2：两级电路

- ▶ 第一级：正半周：FET 断
- ▶ 第一级：负半周：FET 短
- ▶ 第二级：正半周：跟随器
- ▶ 第二级：负半周：反相放大器

## ？ 有何优点？

- ▶ 整流范围大 ( $\text{mV} \sim 10\text{V}$ )
- ▶ 没有死区电压

## ？ 需要注意啥？

- ▶  $R_0$  的取值..  $R$  的取值

# 波形转换：三角波→正弦

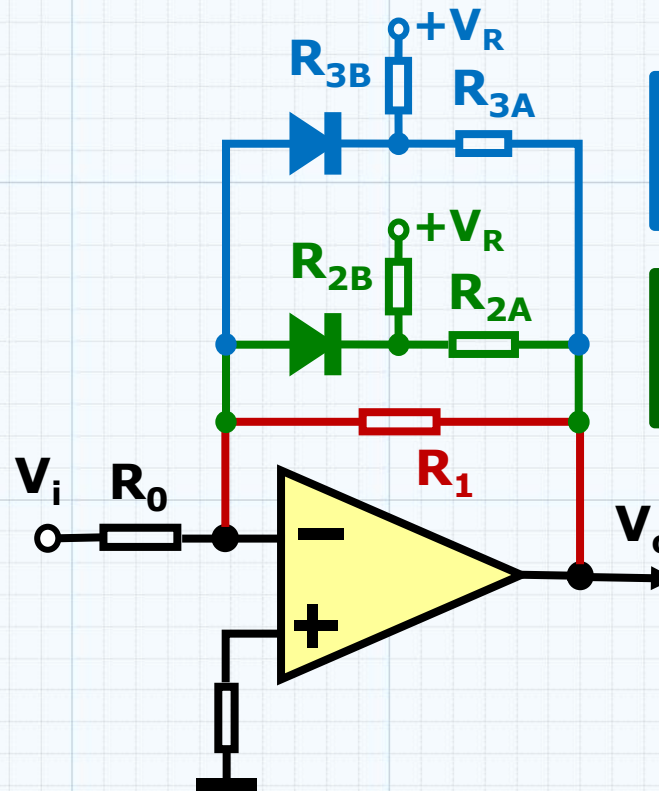
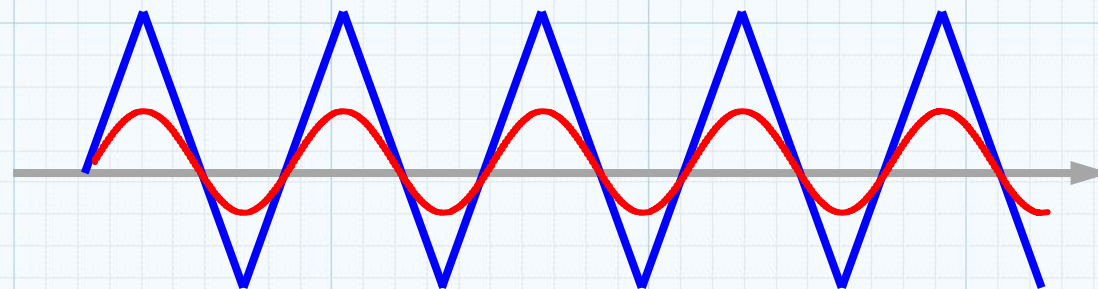
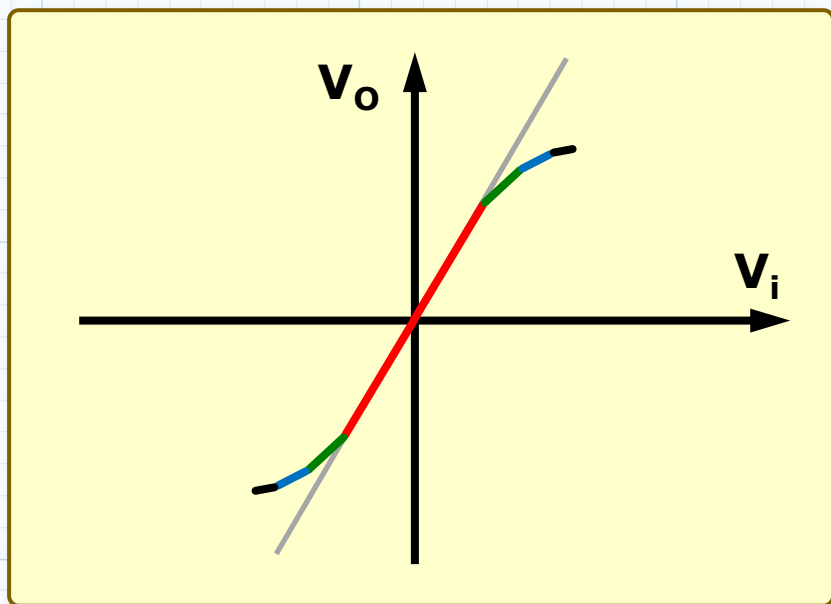
❓ 三角波如何转成正弦？

▶ 最直观手段：滤波

❓ 如果信号频率未知？

▶ 检测频率+可调滤波

▶ 若幅度固定：多折线拟合



叠加直流偏压→连续

$$|A_3| = (R_{3A} || R_{2A} || R_1) / R_0$$

中央节点 = -0.7V 时  
二极管开始导通 ...

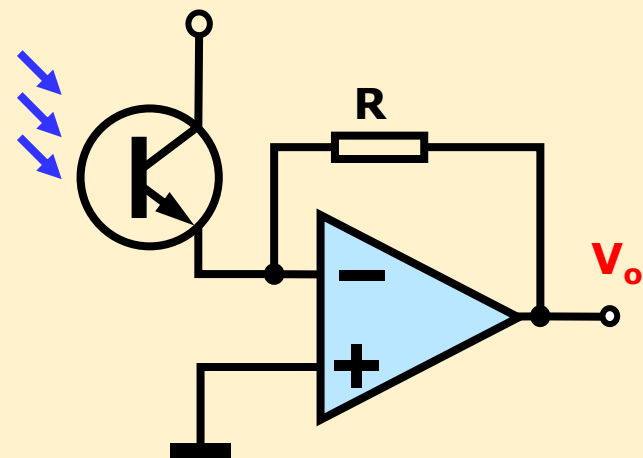
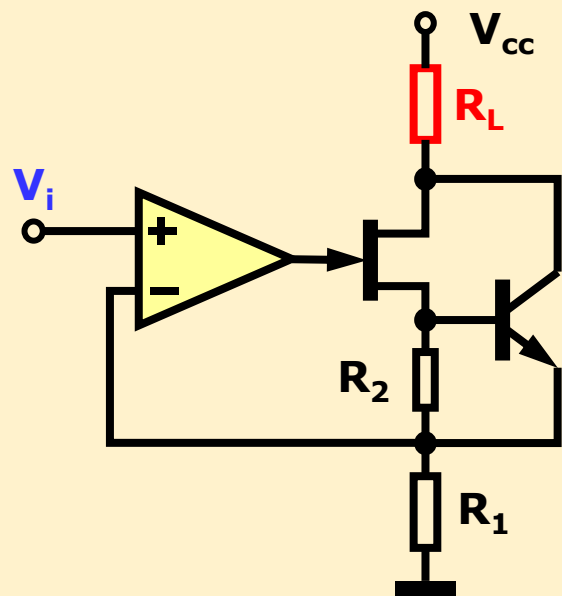
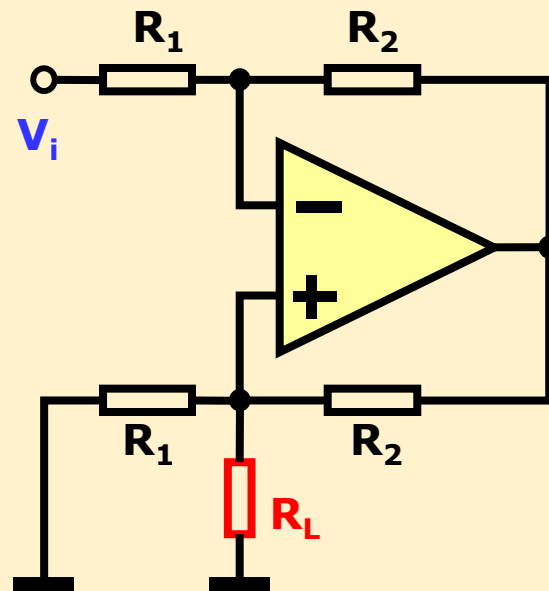
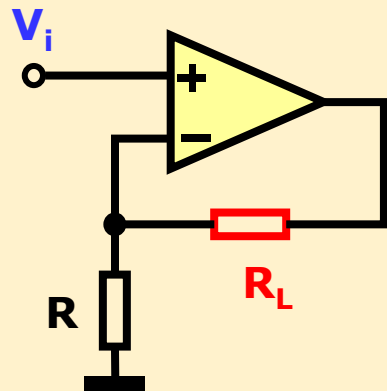
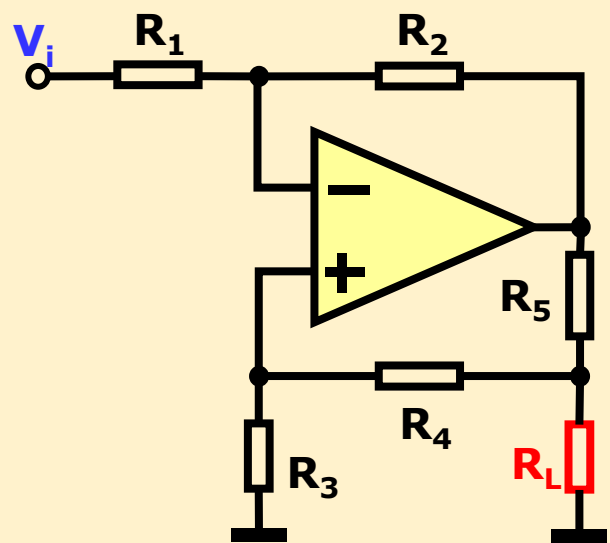
中央节点 = -0.7V 时  
二极管开始导通 ...

$$|A_2| = (R_{2A} || R_1) / R_0$$

叠加直流偏压→连续

放大

滤波



转换

运算

其它

# 加法运算

## ! 两种做法

- ▶ 反相加法和 同相加法
- ▶ 调节电阻：增益，加权

## ? 分析方法？

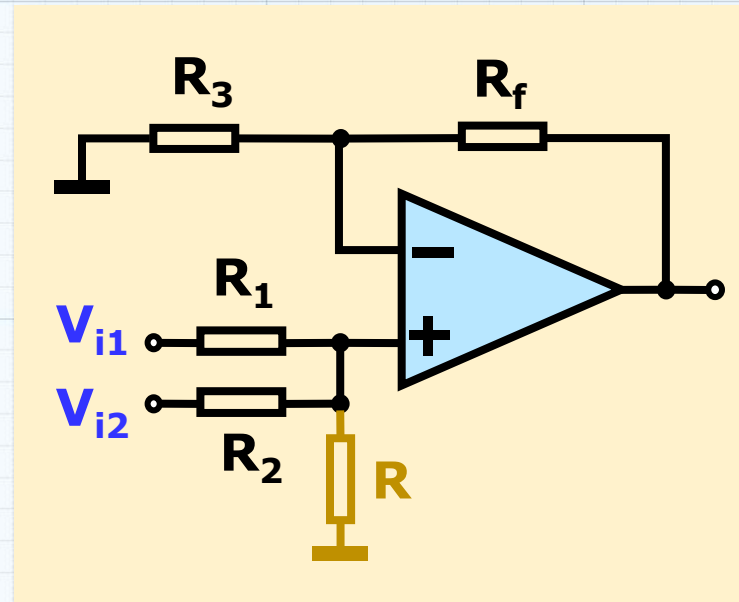
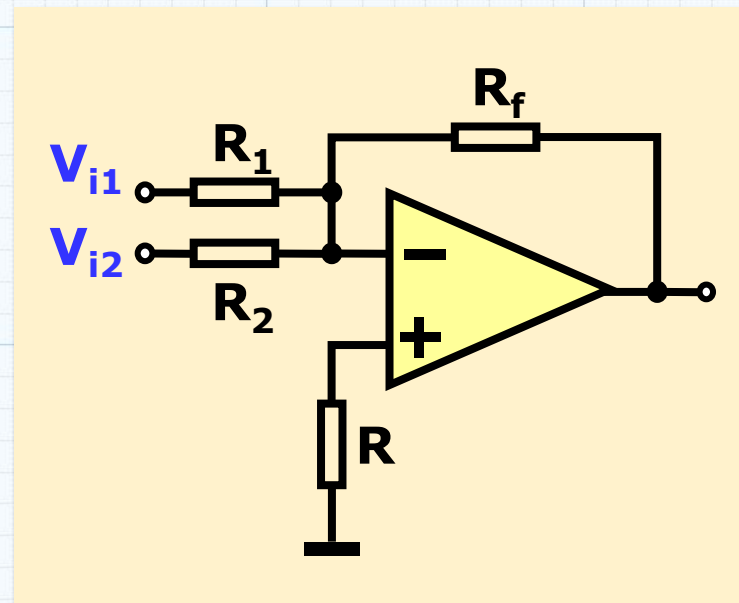
- ▶ 等效电路、虚短虚断、深负

## ? R 的计算？

- ▶ 简单配平 ...

## ! 反相放大更受青睐

- ▶ 无  $V_{ic}$  → 不担心  $A_{VC}$  恶化 → 频响好
- ▶ 各信号源的负载：不受其他源影响
- ▶ 同相放大器的优势（高  $R_i$ ）不复存在





# 减法运算

## ! 两种常见做法

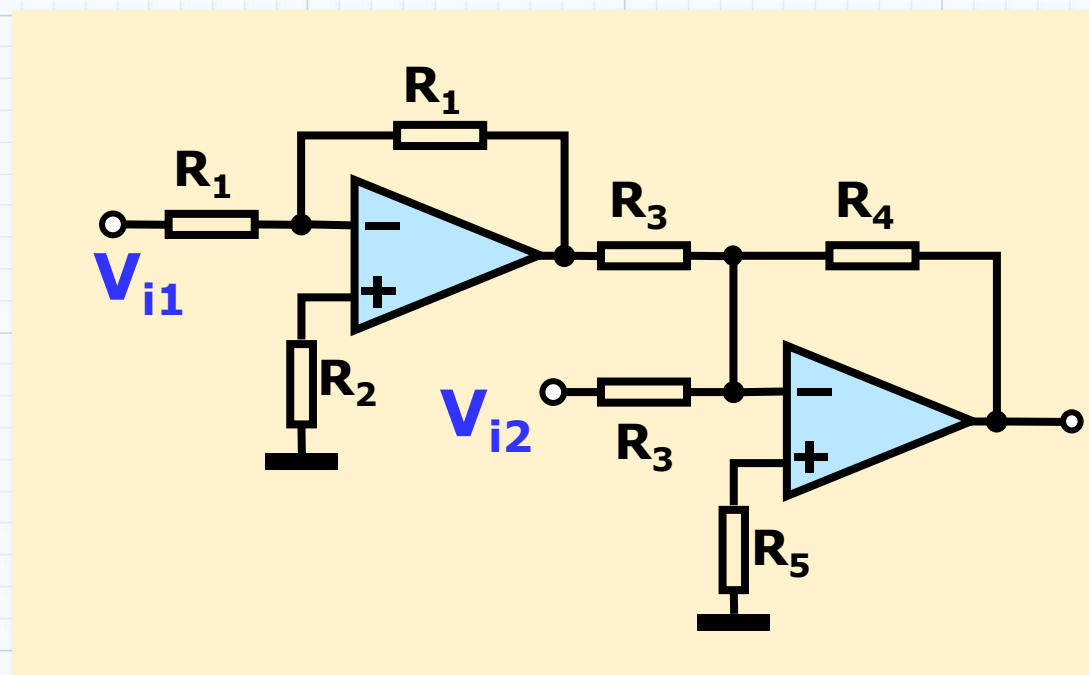
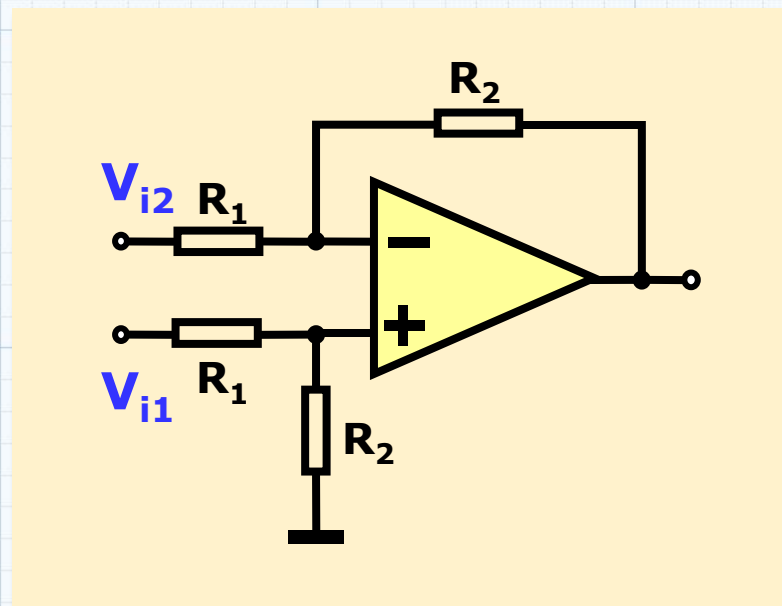
- ▶ 单运放，双运放
- ▶ 调节电阻：增益，加权

## ! 不惜使用双运放的目的

- ▶ 避免共模量 → 频响好一些

## ? 配平电阻 的计算？

- ▶ 单运放：自然相同
- ▶ 双运放： $R_2 = R_1/2$   
 $R_5 = R_3 || R_3 || R_4$



# 积分运算

$$A_F = -\frac{Z_C}{R_1} = \frac{-1}{j\omega R_1 C}$$

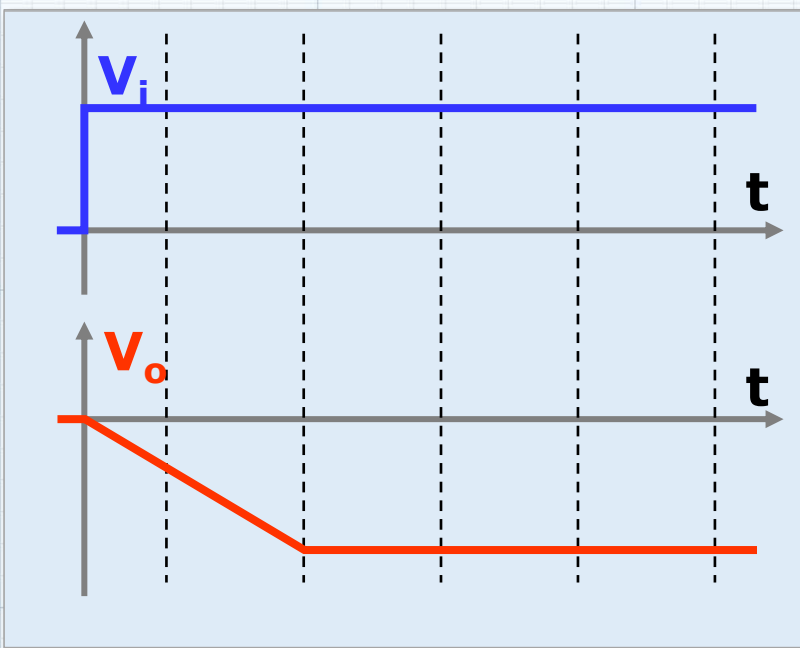
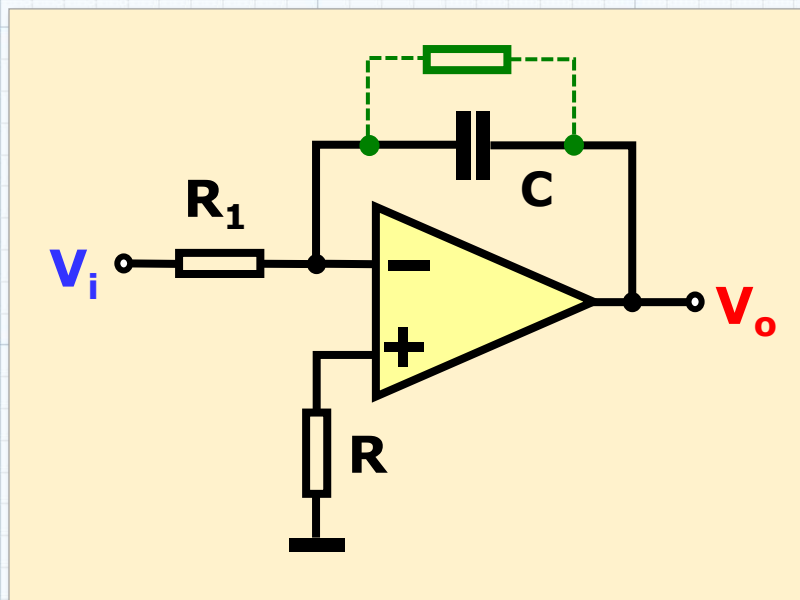
## ? 分析方法？

- ▶ 等效电路、虚短虚断、深负
- ▶ 套用反相放大结论： $R_f \rightarrow Z_C$

$$V_o = \frac{-1}{R_1 C} \int_{-\infty}^t V_i(t) dt$$

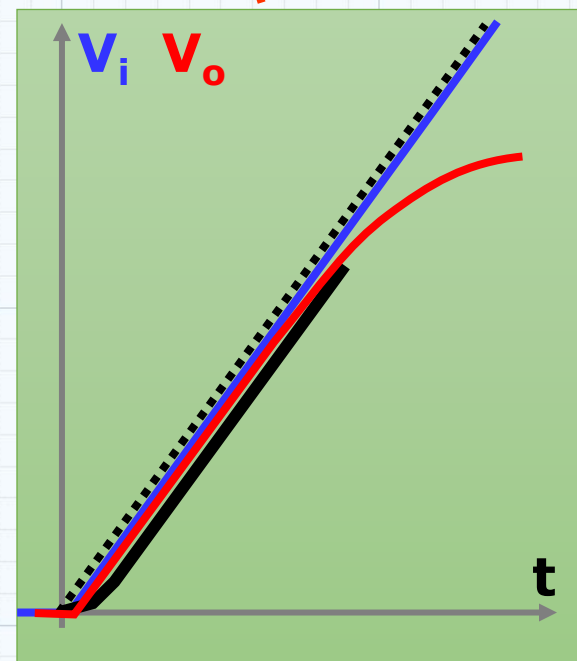
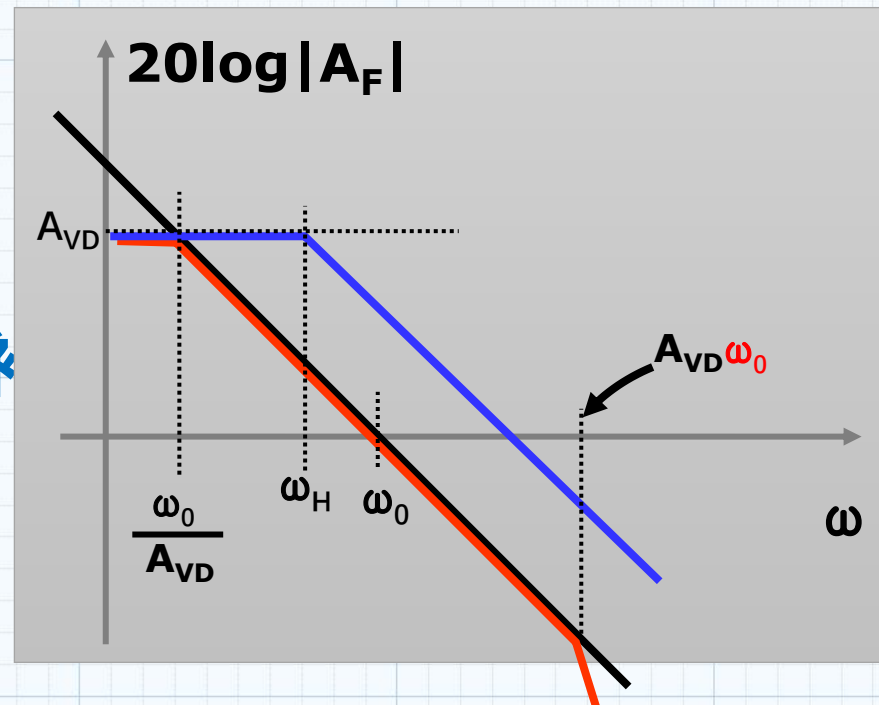
## ? 需要注意的问题？

- ▶ 静态工作点？ ← 引入直流反馈电阻
- ▶ 积分输出幅度有限：运放动态范围
- ▶ 线性失真：不适合频率极低 和 极高场景
- ▶ 失调： $V_{IO}$ ,  $I_{IB}$ ,  $I_{IO}$ , 及其温漂
- ▶ 电容：漏阻、吸附效应 ...



# 积分运算

- ☑ 积分运算的误差
- ☑ 反馈支路  $C$  可以看成是电抗性的相位补偿
  - ▶ 但并未修改原主极点  $\rightarrow$  变成两阶系统
- ☑ 高半功率点急剧降低
  - ▶  $\rightarrow \approx \omega_0 / A_{VD} \rightarrow$  很低
  - ▶ 阶跃响应具有长时误差：一般看不到
- ☑ 另外生成一个极点
  - ▶  $\rightarrow \approx \omega_0 A_{VD} \rightarrow$  比较高
  - ▶ 阶跃响应具有启动误差：一般也不明显
- ☑ 运放积分电路适用频段：上述两个频率之间



# 微分运算

## ? 分析方法?

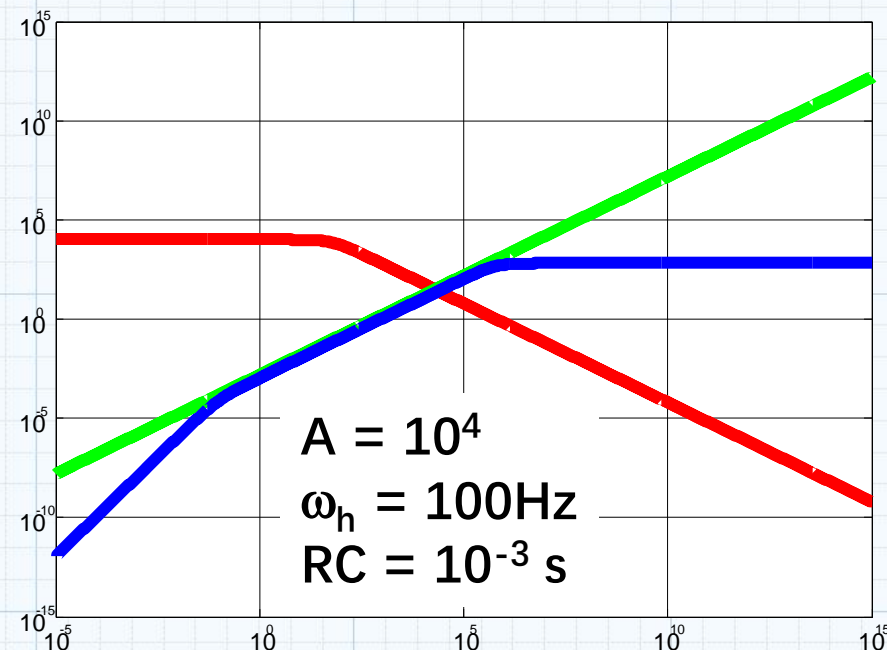
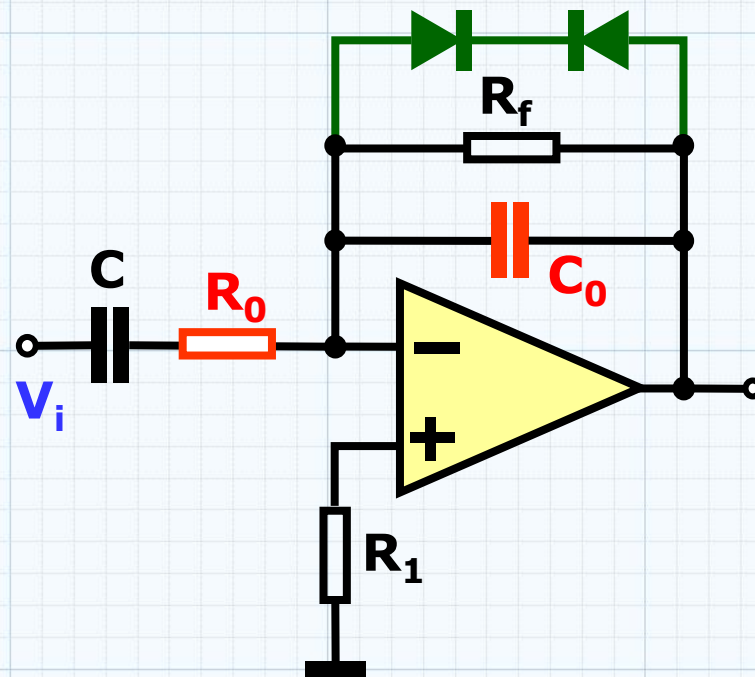
- ▶ 等效电路、虚短虚断、深负
- ▶ 套用反相放大结论:  $Z_C$

$$A_F = -\frac{R_F}{Z_C} = -j\omega R_F C$$

$$V_o = -R_F C \frac{dV_i(t)}{dt}$$

## ? 需要注意的问题?

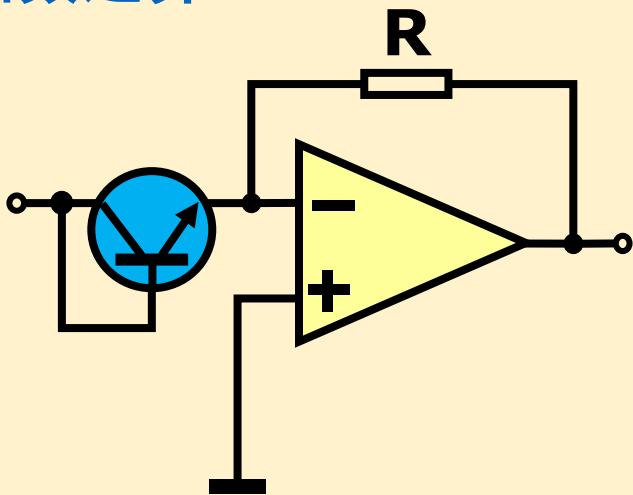
- ▶ Q? 失调? 电容不理想? : 还好
- ▶ 微分输出幅度有限: 运放动态范围
- ▶ 线性失真: 不适合频率极低 和 极高场景
- ▶ 严重问题1: 输出噪声大 ← 高频增益高
- ▶ 严重问题2: 容易产生自激 ← 高频相移
- ▶ 对策: 适当控制高频增益 → 引入  $R_0, C_0$  ..



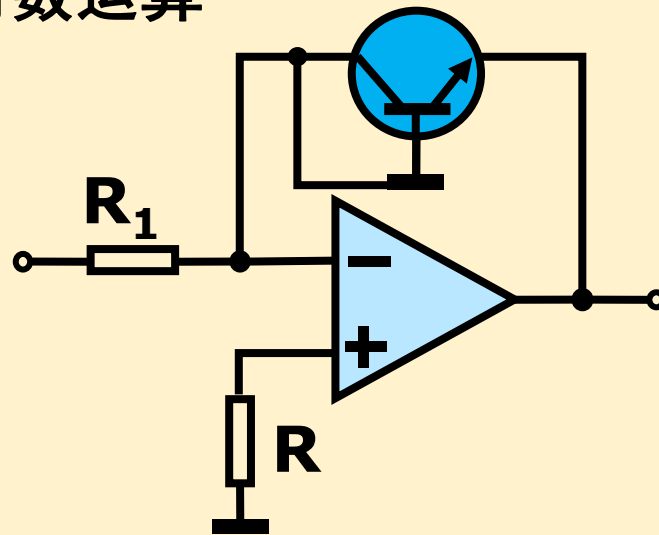


# 指数与对数运算

指数运算



对数运算



✓ 理想二极管在较大电流时的特性:  $I_D \approx I_S e^{V_D/V_T}$

✓ 指数运算: 以二极管为输入支路

✓ 对数运算: 以二极管为反馈支路

✓ D 换为 BJT 可扩大电流动态范围

‣  $V_{CB} \approx 0 \rightarrow$  工作于线性区和饱和区边界

❓ 若信号幅度为很小?

‣ 指数: 加法  $\rightarrow$  指数  $\rightarrow$  缩小

‣ 对数: 放大  $\rightarrow$  对数  $\rightarrow$  减法

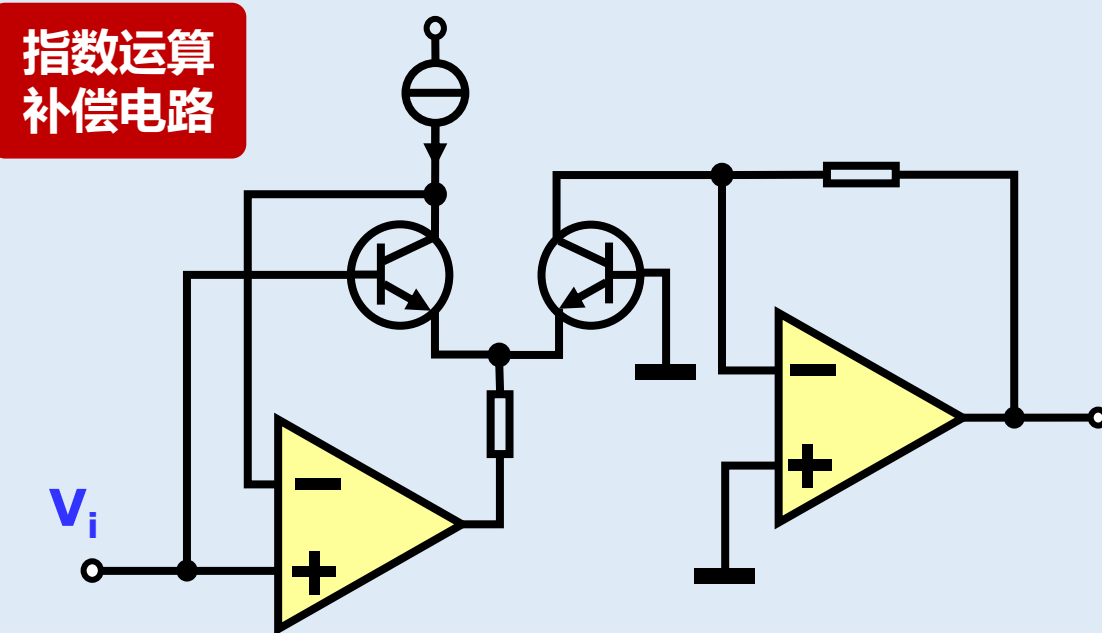
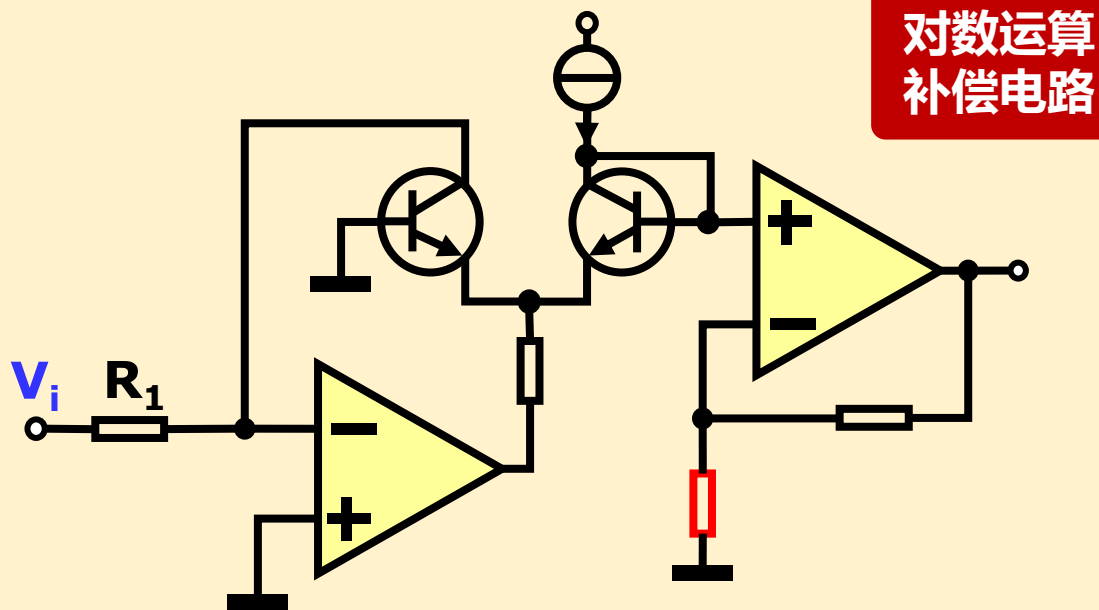
❓ 若信号幅度为负?

# 信号运算：对数、指数的温度补偿

## ☑ 对数和指数运算的补偿 ← $I_S$ 受温度影响的敏感性

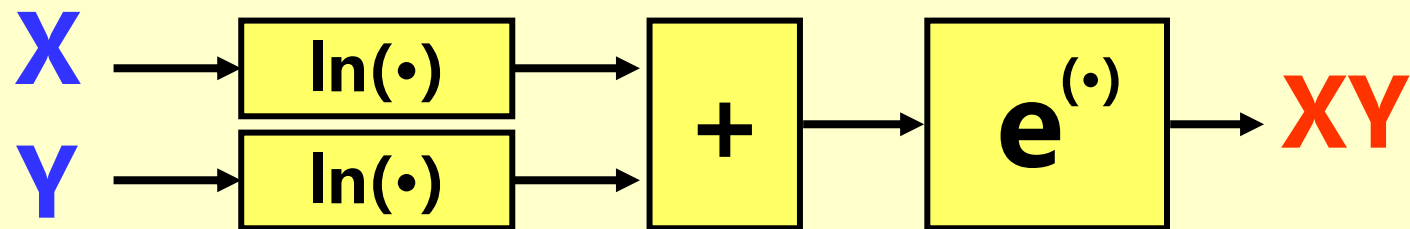
- ▶ 思路：构造对称电路抵消  $I_S$  的影响
- ▶ 相同BJT，相同状态
- ▶ 两BJT的 E 极相连
- ▶ 一个BJT的  $I_C$  固定
- ▶ 两BJT均要求：  $V_{CB} \approx 0$

$$I_{c1} / I_{c2} \approx e^{(V_{be1} - V_{be2}) / V_T}$$

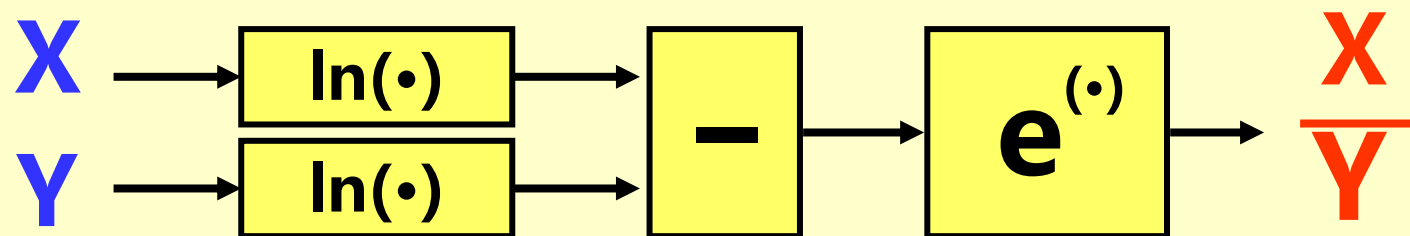


# 指数与对数运算的延伸

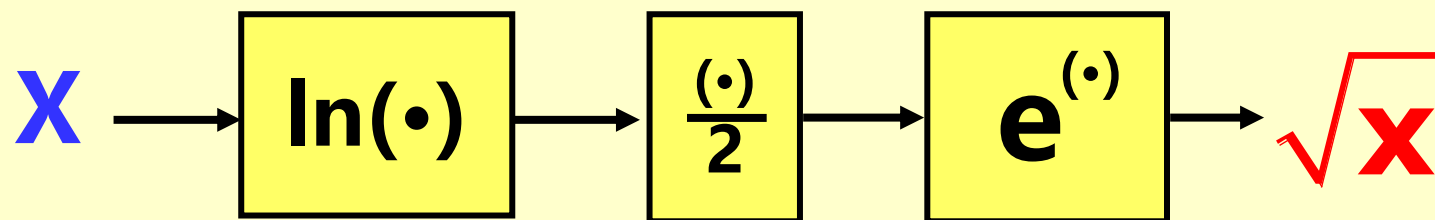
乘法电路示意



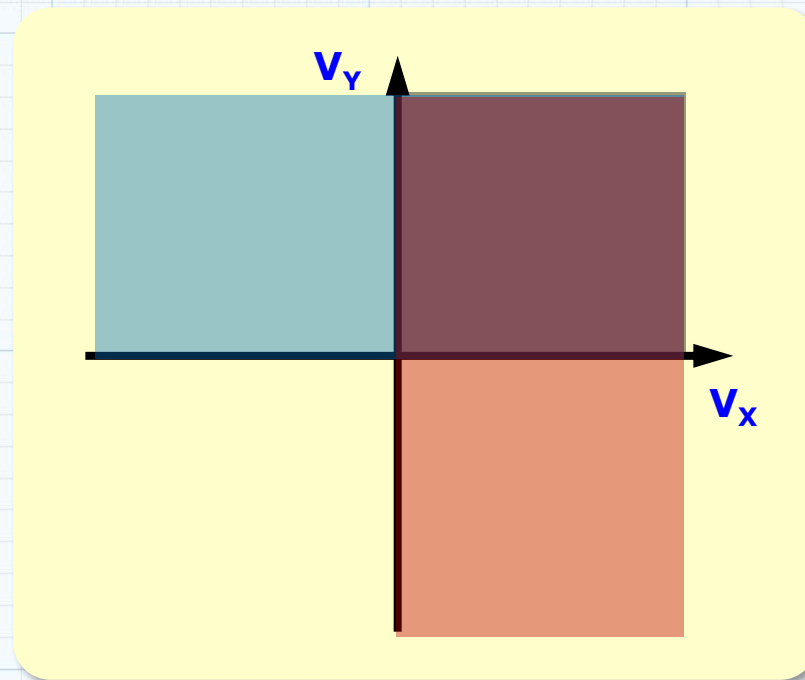
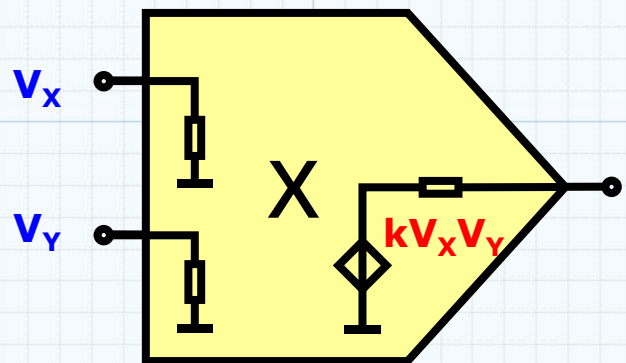
除法电路示意



开方电路示意



# 模拟乘法器



## ☑ 理想特性:

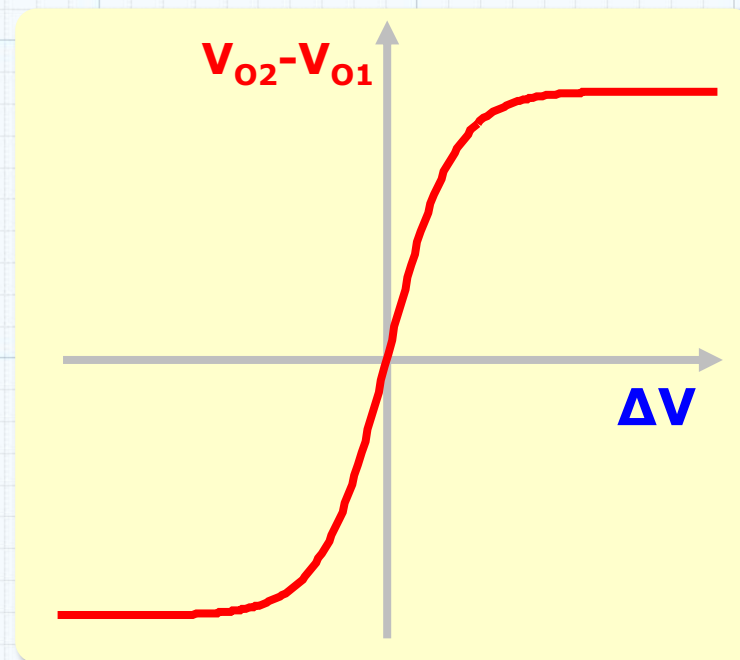
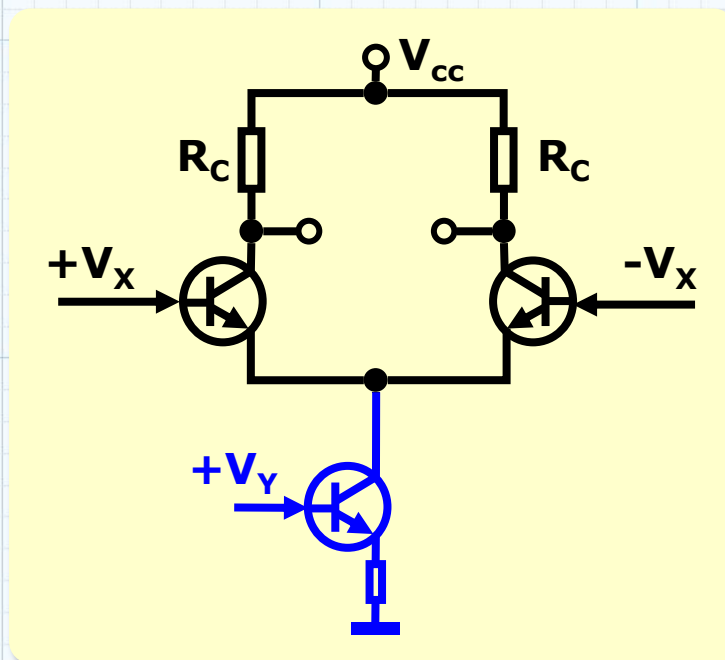
- ▶ 两输入端  $R_i$  极大; 输出端  $R_o$  极小
- ▶  $k$  是常数, 保持很好的线性 ← 有正有负

## ☑ 单象限、二象限、四象限乘法器..

- ▶ 对  $V_x$ ,  $V_y$  的极性的要求



# 变跨导乘法器

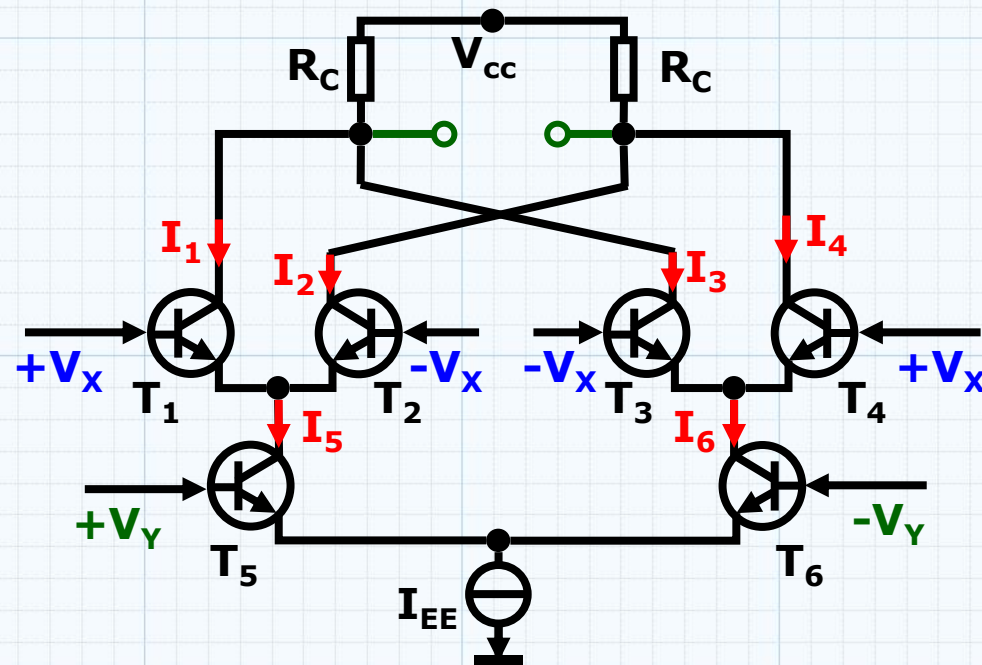


☑ 差模信号输入时：双端输入为  $\pm V_X$

- ▶ 差模输出  $\approx 2V_X R_C / r_{eb} = I_{EQ} V_X R_C / 13_{mV}$
- ▶ 为实现乘法，只需用另一个电压控制  $I_{EQ}$  ...
- ▶ 注意， $I_{EQ}$  必须是正数 → 二象限乘法器

☑  $1/r_{eb}$  是BJT的  $g_m$  → 得名"变跨导乘法器"

# 变跨导 四象限乘法



☑ 计算:  $I_{5Q} = I_{6Q} = I_{EE}/2$ ;  $\Delta I_5 = -\Delta I_6 = V_Y/r_{eb5}$

- ▶  $I_1 \approx I_{EE}/4 + \Delta I_5/2 + V_X(I_{5Q} + V_Y/r_{eb5})/52\text{mV}$
- ▶  $I_2 \approx I_{EE}/4 + \Delta I_5/2 - V_X(I_{5Q} + V_Y/r_{eb5})/52\text{mV}$
- ▶  $I_3 \approx I_{EE}/4 - \Delta I_5/2 - V_X(I_{5Q} - V_Y/r_{eb5})/52\text{mV}$
- ▶  $I_4 \approx I_{EE}/4 - \Delta I_5/2 + V_X(I_{5Q} - V_Y/r_{eb5})/52\text{mV}$

☑ 双端输出:  $V_o = R_c(I_1 + I_3 - I_2 - I_4) \propto V_Y V_X$

❓ 使用原则 ?

☑  $V_Y$  相对缓变