

# 电路分析与电子技术基础

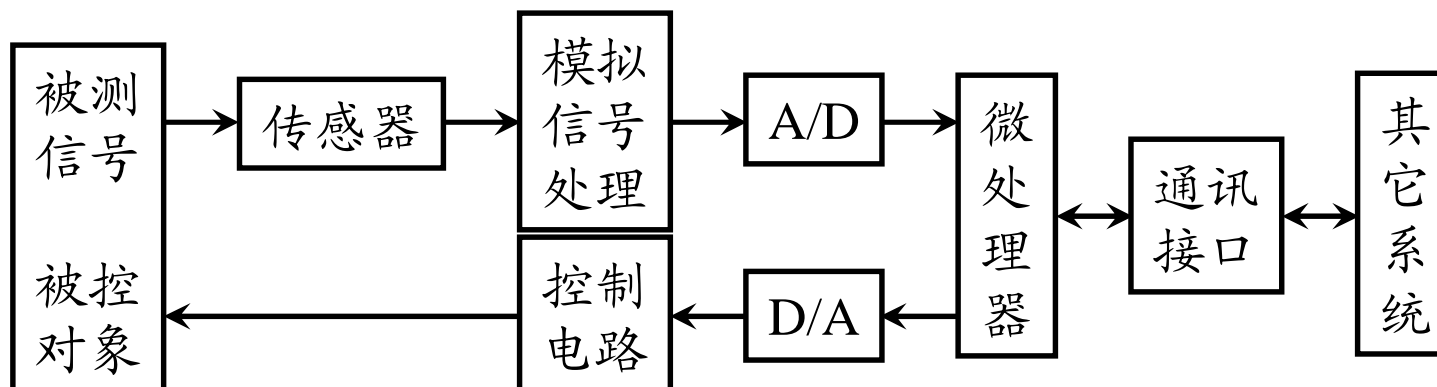
模拟信号处理电路

(16)

## n 模拟信号处理电路

ü 电子系统：能完成某些特定功能的整体性电路，内部包含了多个具有不同功能的电路模块。

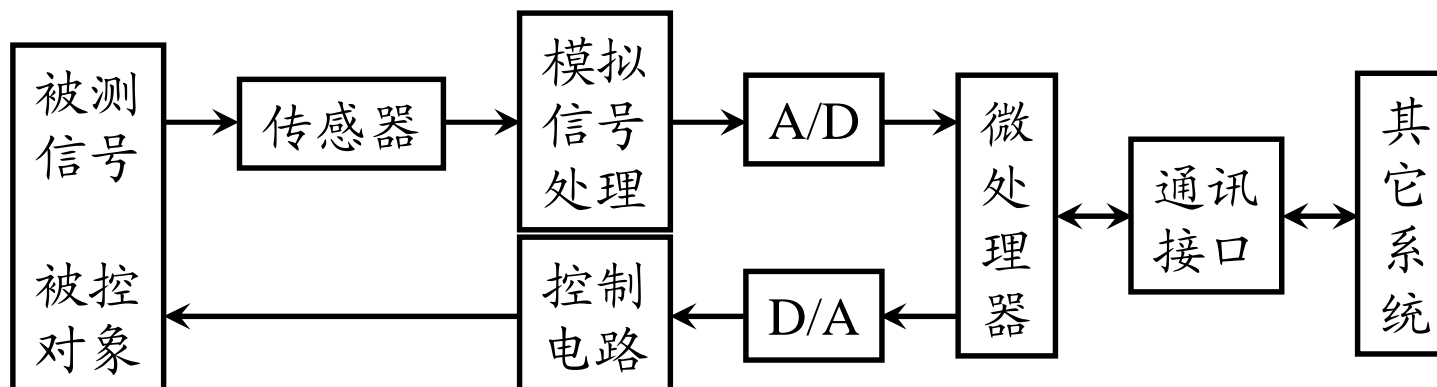
ü 例：智能型电子测控系统原理框图。



## Ø 模拟信号处理电路

Ü 功能模块：传感器、模拟信号处理电路、模数转换器（A/D）与数模转换器（D/A）、控制电路、通讯接口等。

Ü 模拟信号处理：放大、滤波、线性 ...



Ü 专用集成电路

## Ø 模拟信号处理电路

Ü 介绍常用的模拟信号处理功能电路。

✓ 仪用放大器（16.2）

✓ 可编程增益放大器（16.3）

✓ 隔离放大器（16.4）

✓ 模拟乘法器（16.5）

✓ 有源滤波器（16.6）

## ✓ 仪用放大器

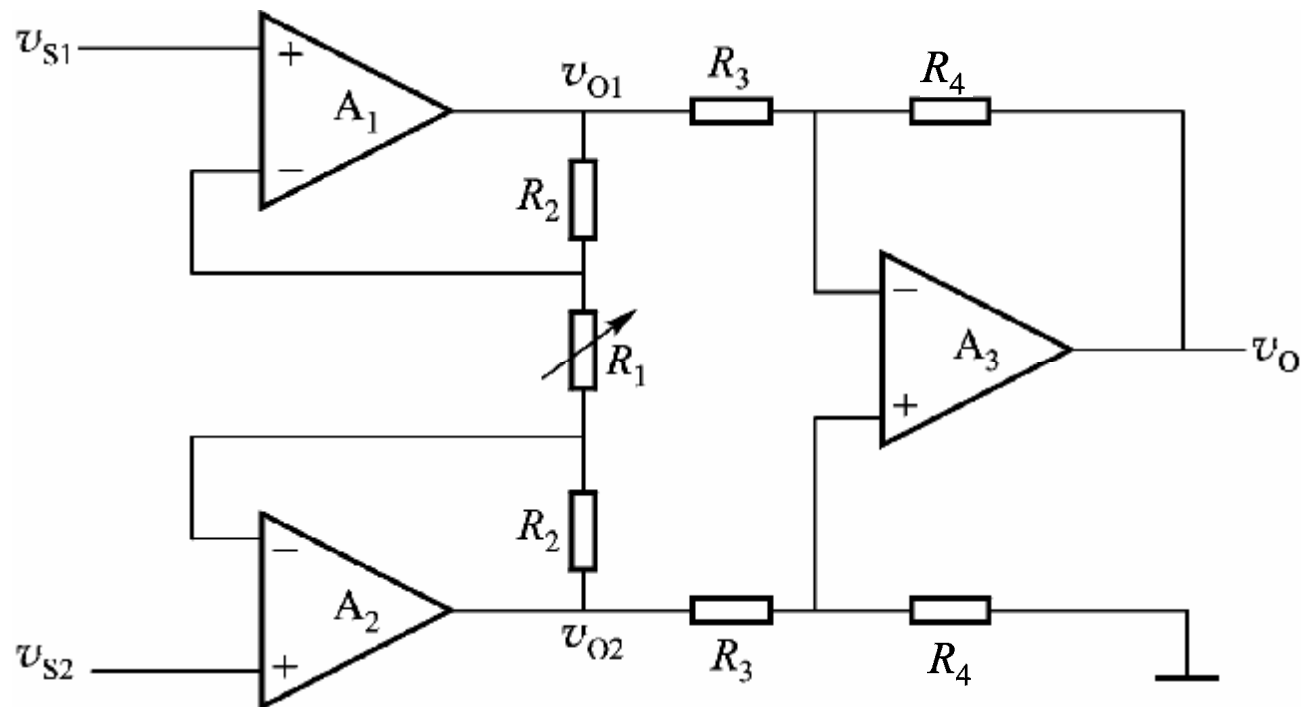
ü (实际) 外部信号特征: 强噪声/共模背景、微弱信号。

ü 仪用放大器:

高输入电阻、高增益、高共模抑制比和低输出电阻、低漂移、低噪声 ...

又称仪表放大器或数据放大器，是测量用放大器的一种。

ü 典型电路



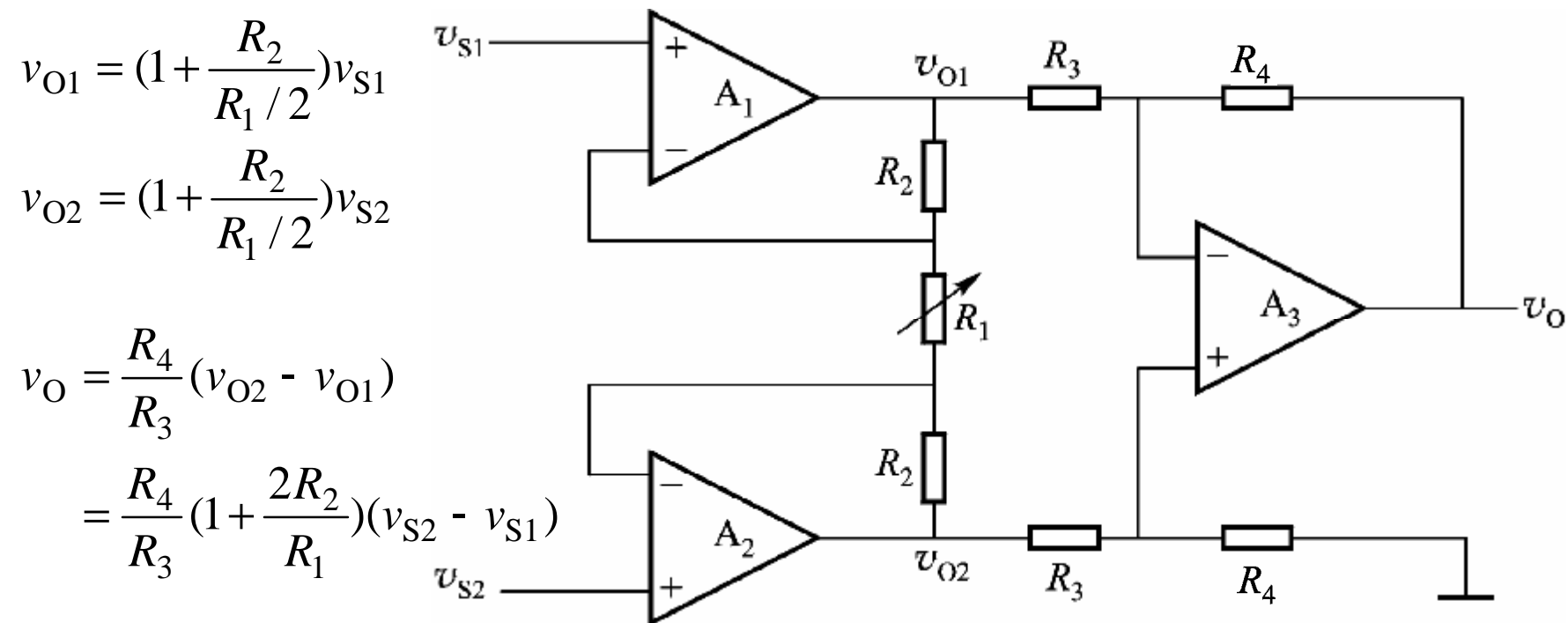
## Ø 仪用放大器

Ü 三运放结构，两级放大电路。

$A_1$ 、 $A_2$ ：同相输入放大器（双端输入、双端输出）；

$A_3$ ：差分放大电路。

Ü 参数严格对称，理论上可完全消除共模、漂移信号。

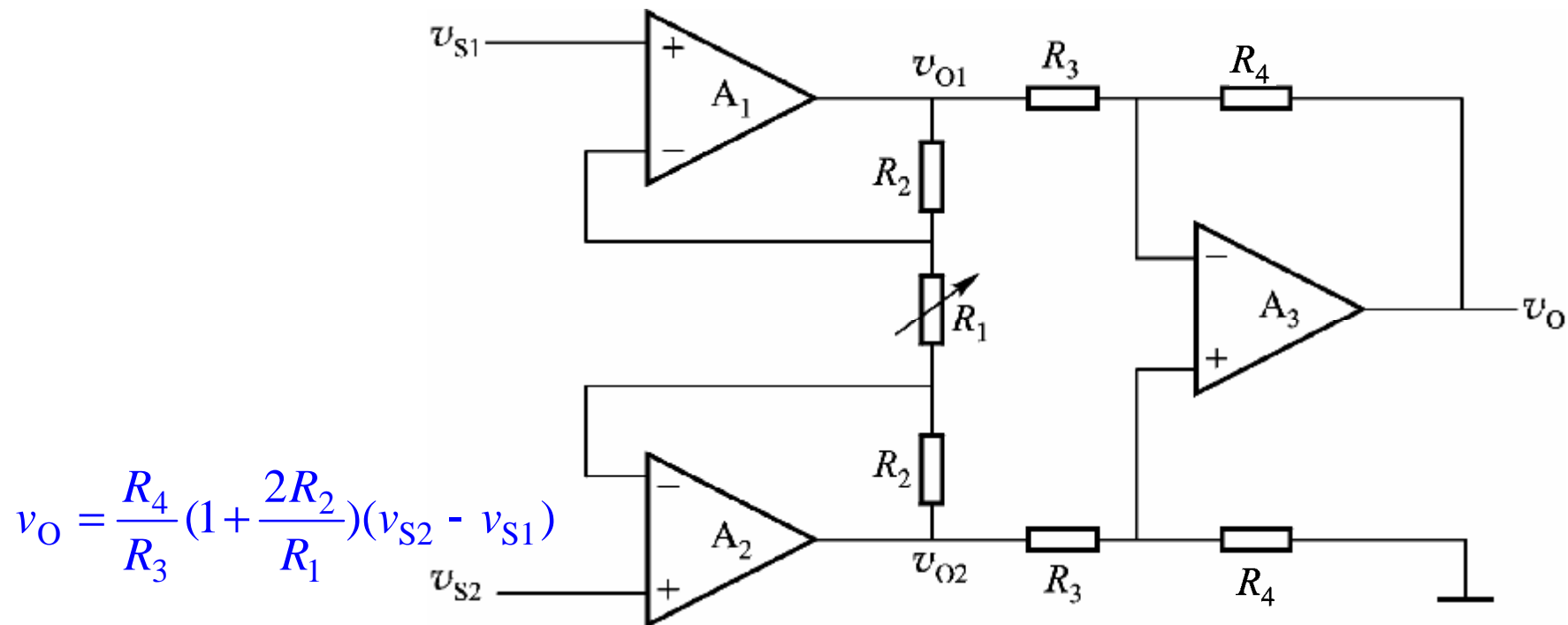


## Ø 仪用放大器

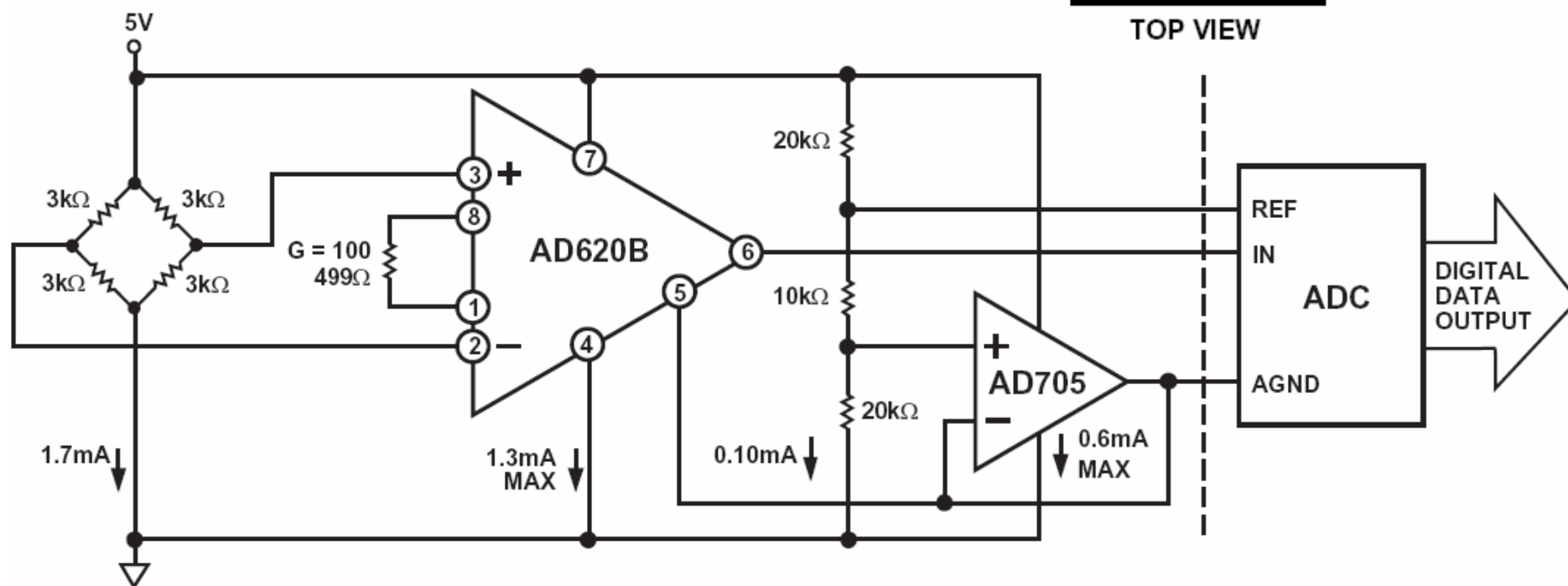
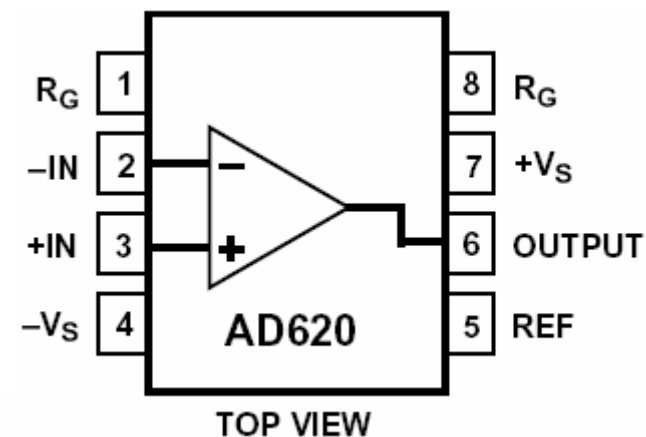
ü 若  $R_3 = R_4$  (即第二级增益为 1), 则:  $v_O = (1 + \frac{2R_2}{R_1})(v_{S2} - v_{S1})$

ü 差模增益:  $A_v = 1 + \frac{2R_2}{R_1}$

(只要调节  $R_1$ , 即可方便地调整放大器的增益而并不影响电路的对称性)



## Ø 仪用放大器（实用芯片例）





## ✓ 可编程增益放大器

ü 可编程增益放大器：放大倍数由程序控制的放大器。

又称程控增益放大器 PGA（Programmable Gain Amplifier）。

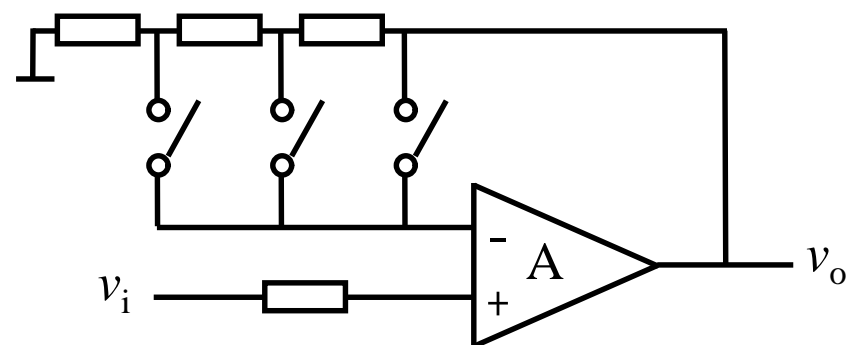
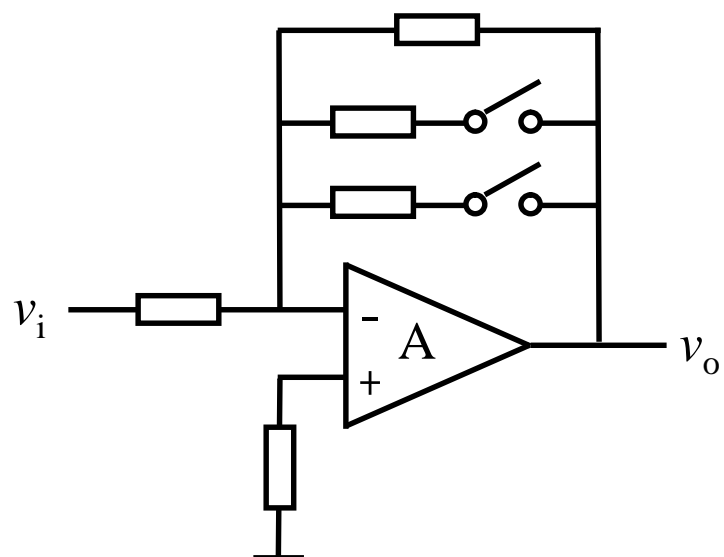
ü 应用：多通道、多参数的数据采集系统中；

可实现自动控制增益或量程自动切换。

ü 结构形式：单运放、多运放、仪用放大器型；

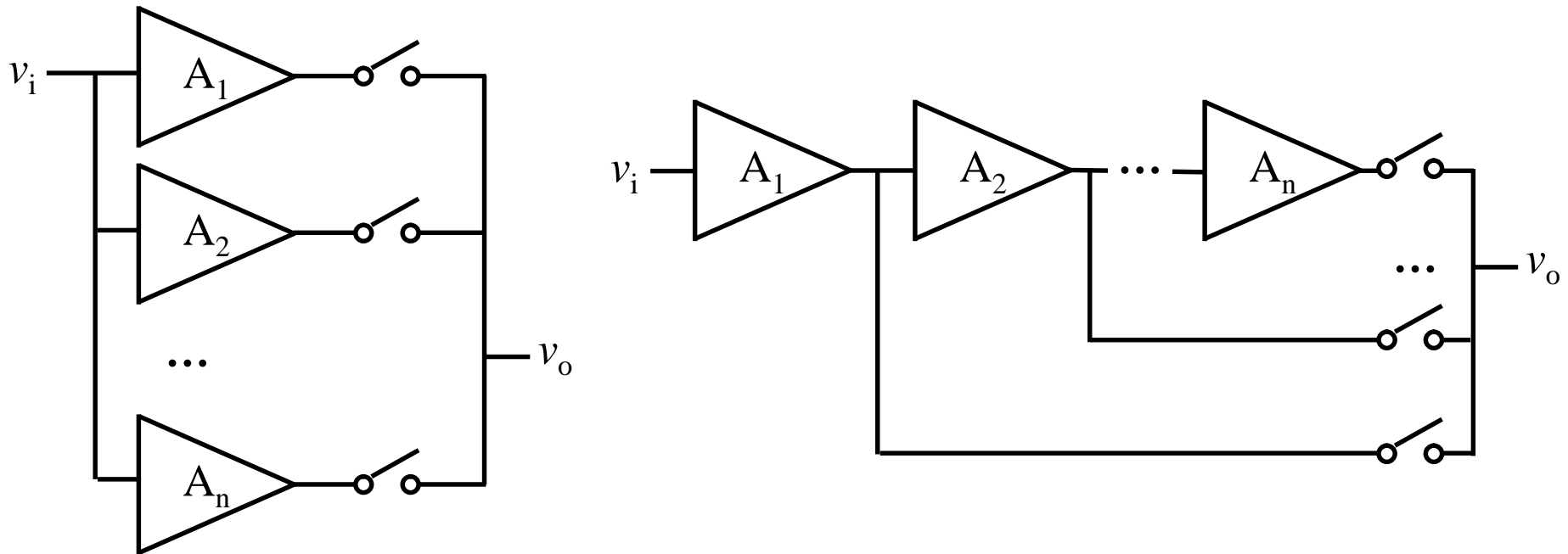
控制形式：模拟式、数字式。

## ❌ 可编程增益放大器（单运放型）



ü 适于对增益精度、传输速度等均要求不高的场合。

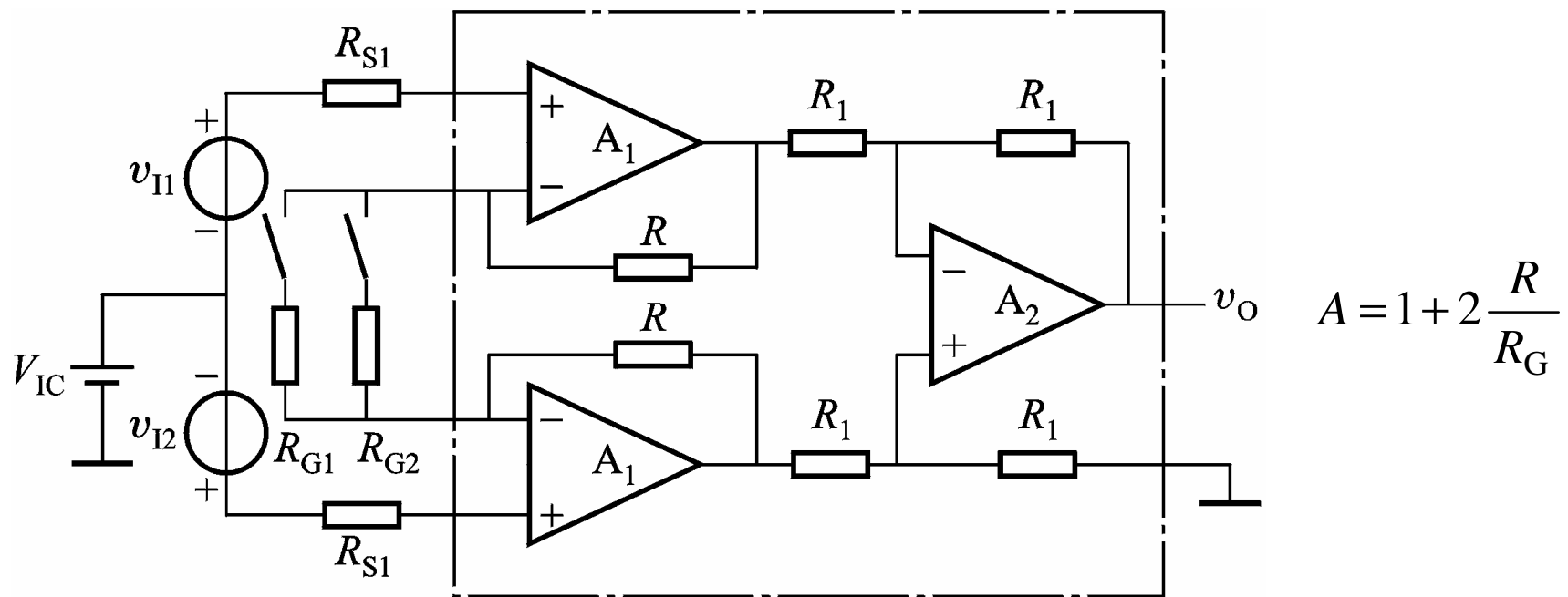
## ❌ 可编程增益放大器（多运放型）



ü 优势：模拟开关对放大器的增益精度和工作速度影响较小；

缺陷：采用了多个放大单元，成本高，且调试困难。

## Ø 可编程增益放大器（仪用放大器型）



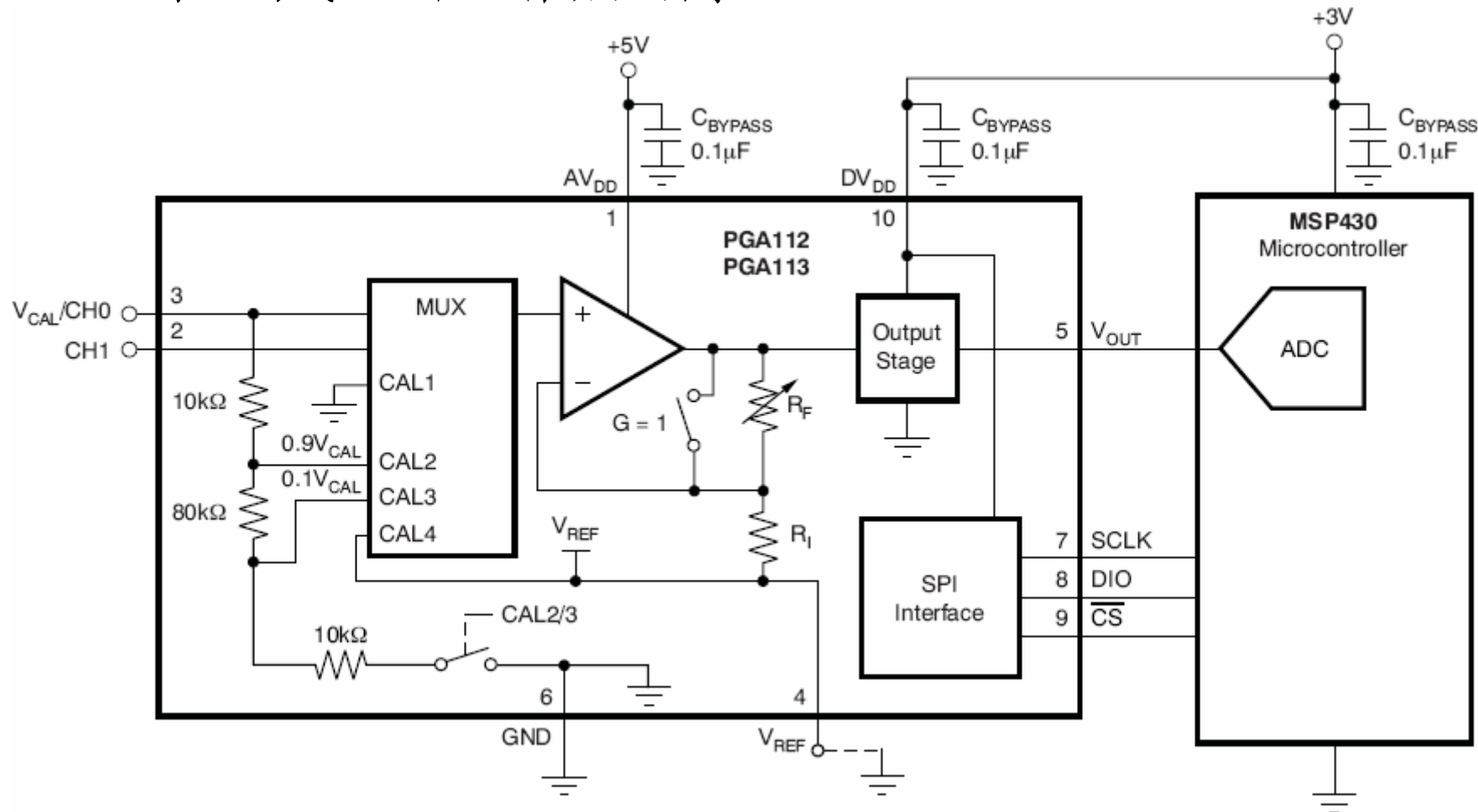
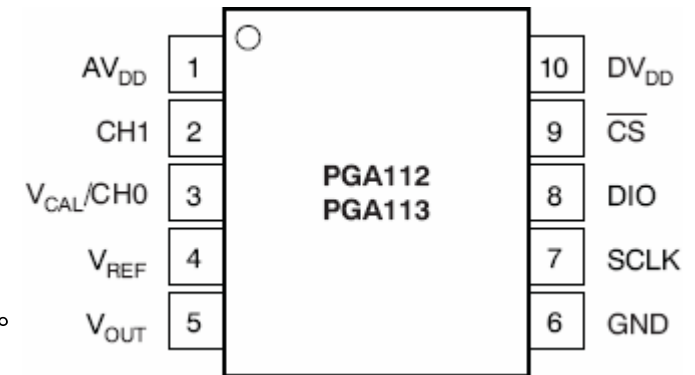
ü 具有仪用放大器的全面高性能指标;

仅  $R_G$  采用外接方式，调试简便。

## ❏ 可编程增益放大器（实用芯片例）

ü 双通道、可编程增益（1~128），SPI 接口。

ü 适于便携式、远程、自动控制等。



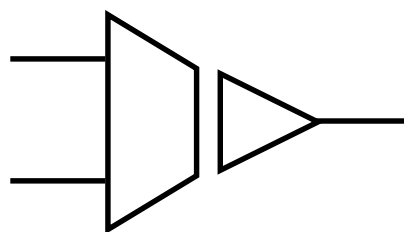
## ✓ 隔离放大器

### ü 隔离放大器:

输入、输出之间没有直接电气关联的放大器。

### ü 结构框图

电路符号:



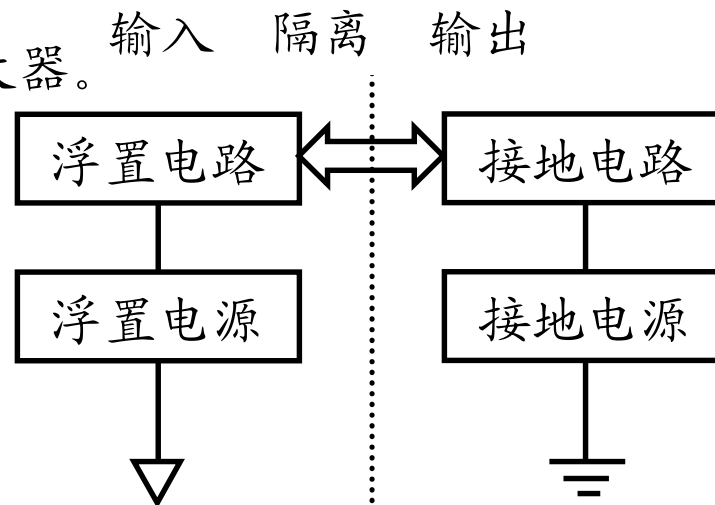
### ü 特点/优势:

采用两套独立的供电系统，信号在传输过程中没有公共的接地端；减少噪声，共模抑制能力高；有效保护后续电路不受前端高共模电压的损坏。

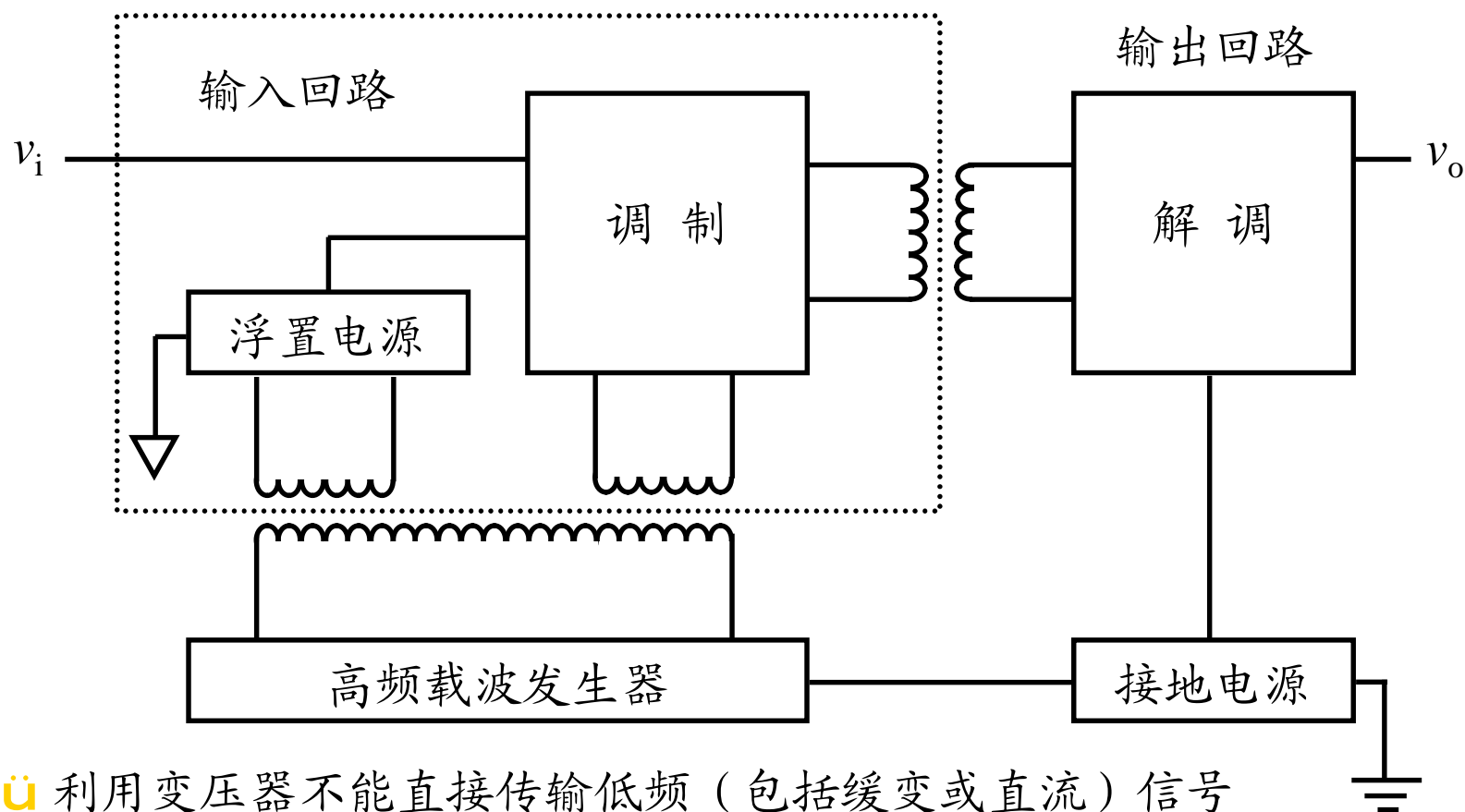
### ü 应用:

电力电子电路中用于主回路与控制回路的隔离（如电机控制系统中）；  
测量环境中含有较多干扰和噪声的场合；

生物医学中与人体测量有关的设备（如生物电信号，保证人体安全）。



## Ø 隔离放大器（变压器耦合）

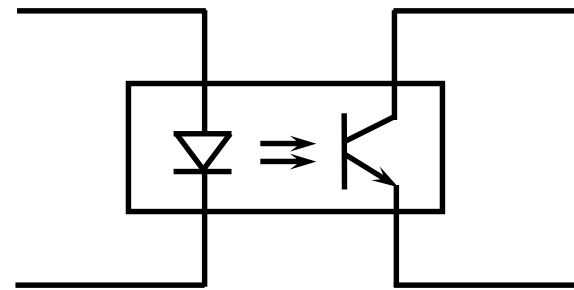
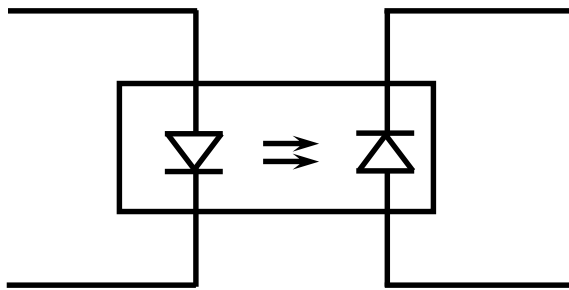


ü 利用变压器不能直接传输低频（包括缓变或直流）信号这一特性，实现对低频信号的隔离。

ü 采用载波调制/解调技术，隔离效果主要取决于变压器匝间的分布电容的大小。具有较高的隔离性能和线性度，共模抑制能力和噪声性能也相对较好，但带宽较低（一般 1kHz 以下）。

## Ø 隔离放大器（光电耦合）

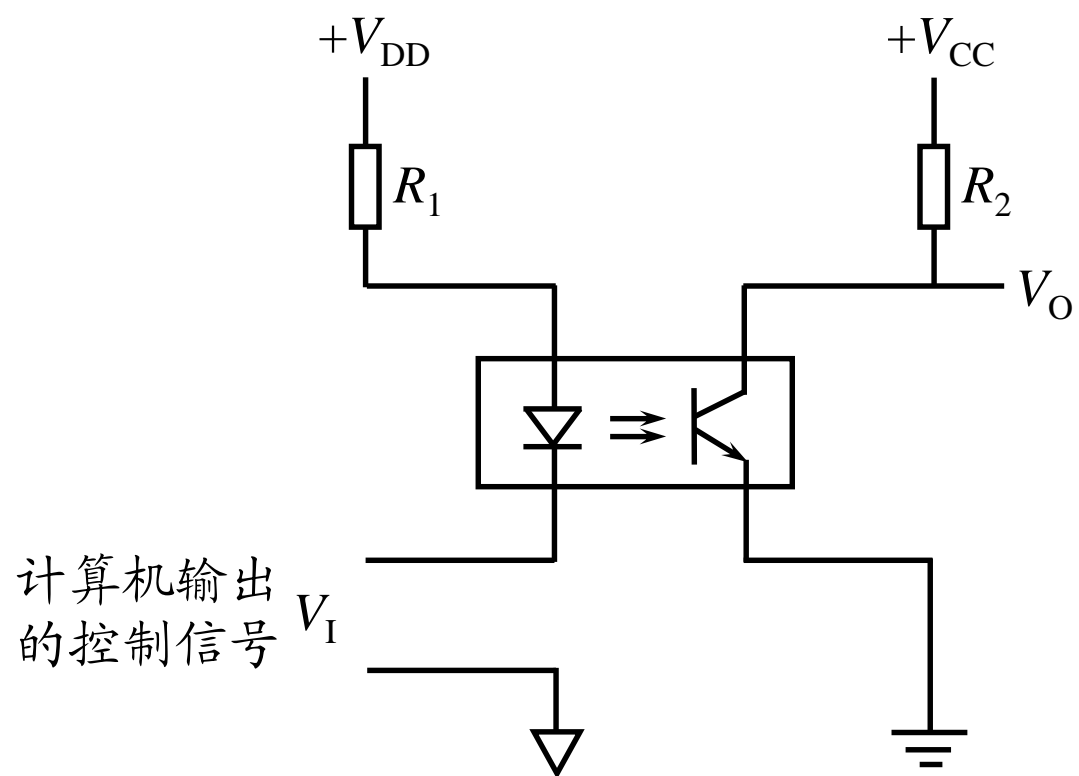
ü 利用光电耦合器件或光纤传递信号。



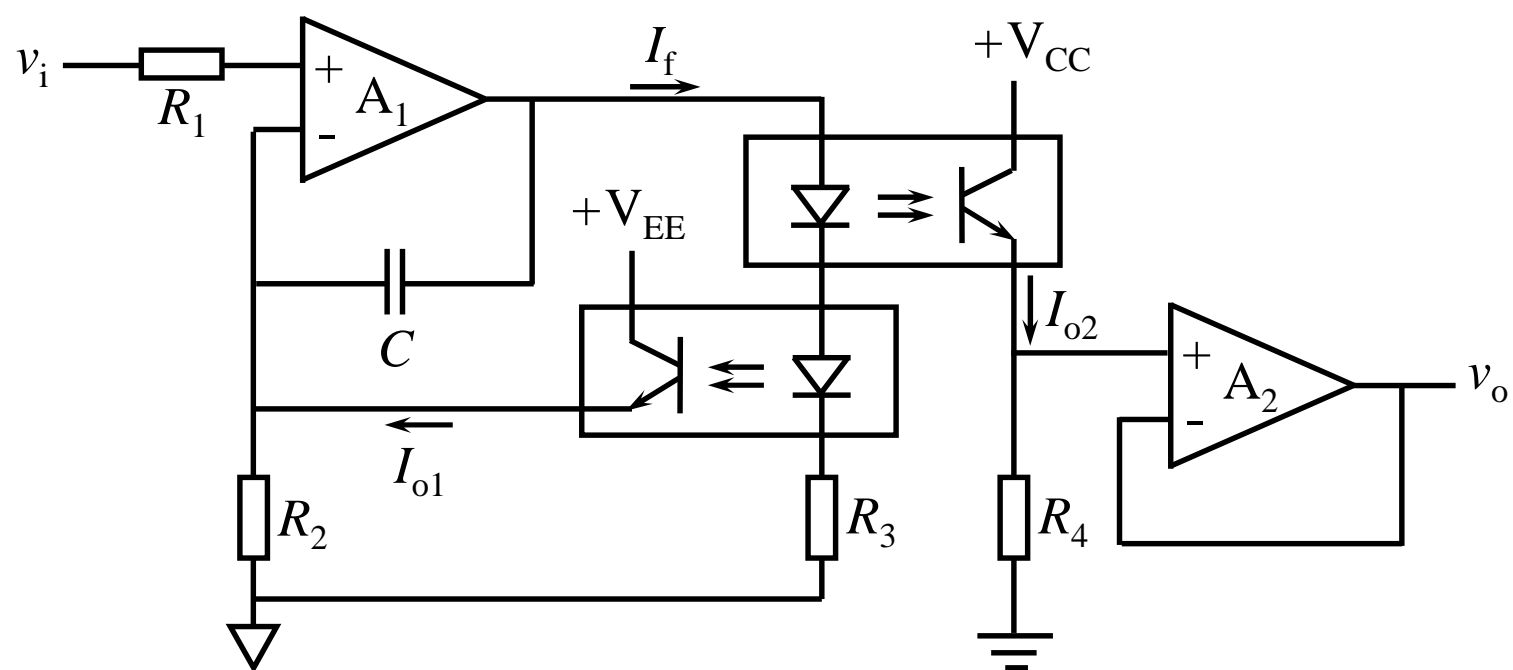
ü 工作频率主要受光电晶体管集基之间结电容的限制，理论上限可达 100kHz；而光电二极管的工作频率可达 1MHz。



## Ø 隔离放大器（光电耦合 — 数字信号传输）



Ø 隔离放大器（光电耦合 — 模拟信号传输）

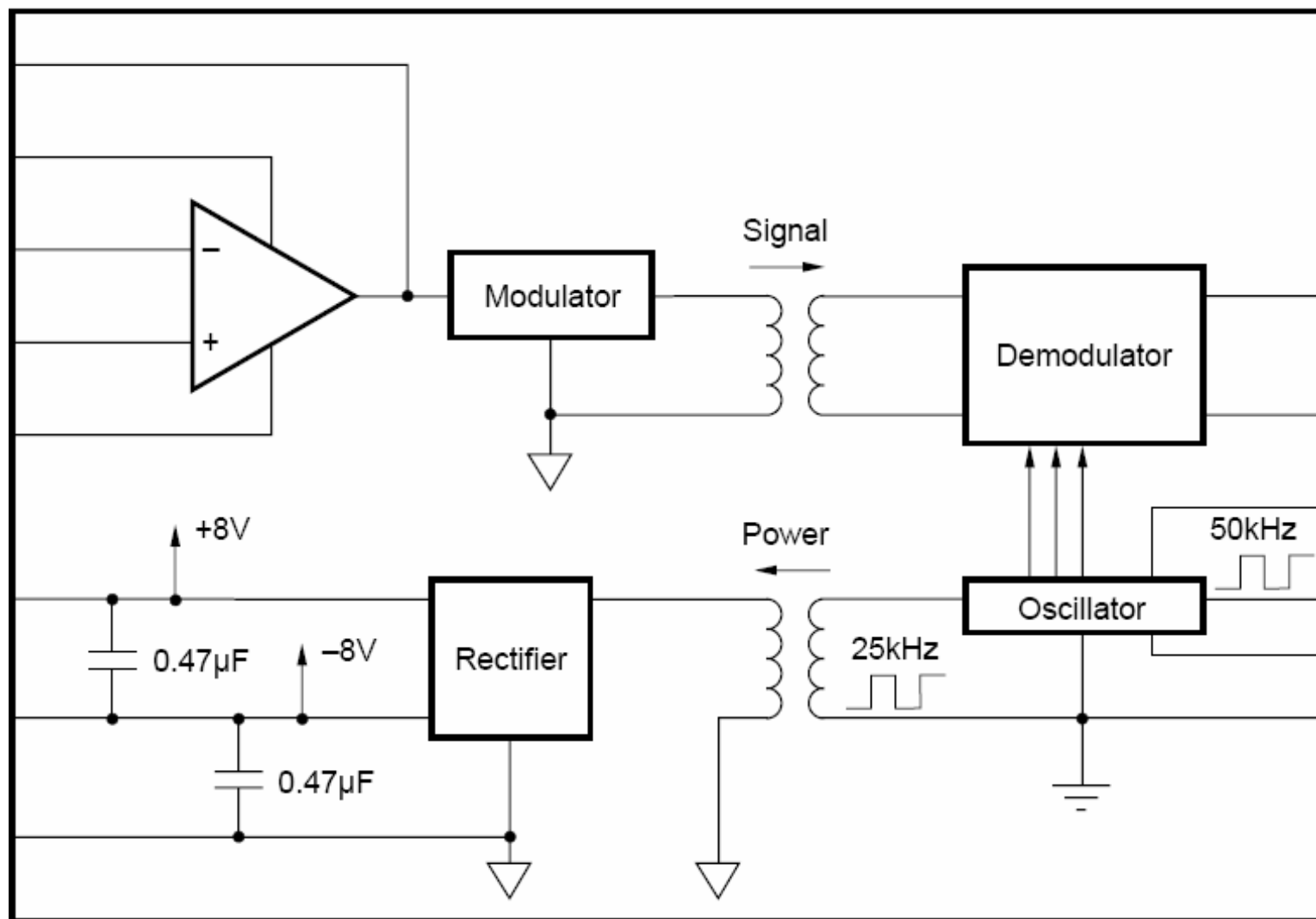


$$I_{o1} = \frac{v_i}{R_2}$$

$$I_{o2} = \frac{v_o}{R_4}$$

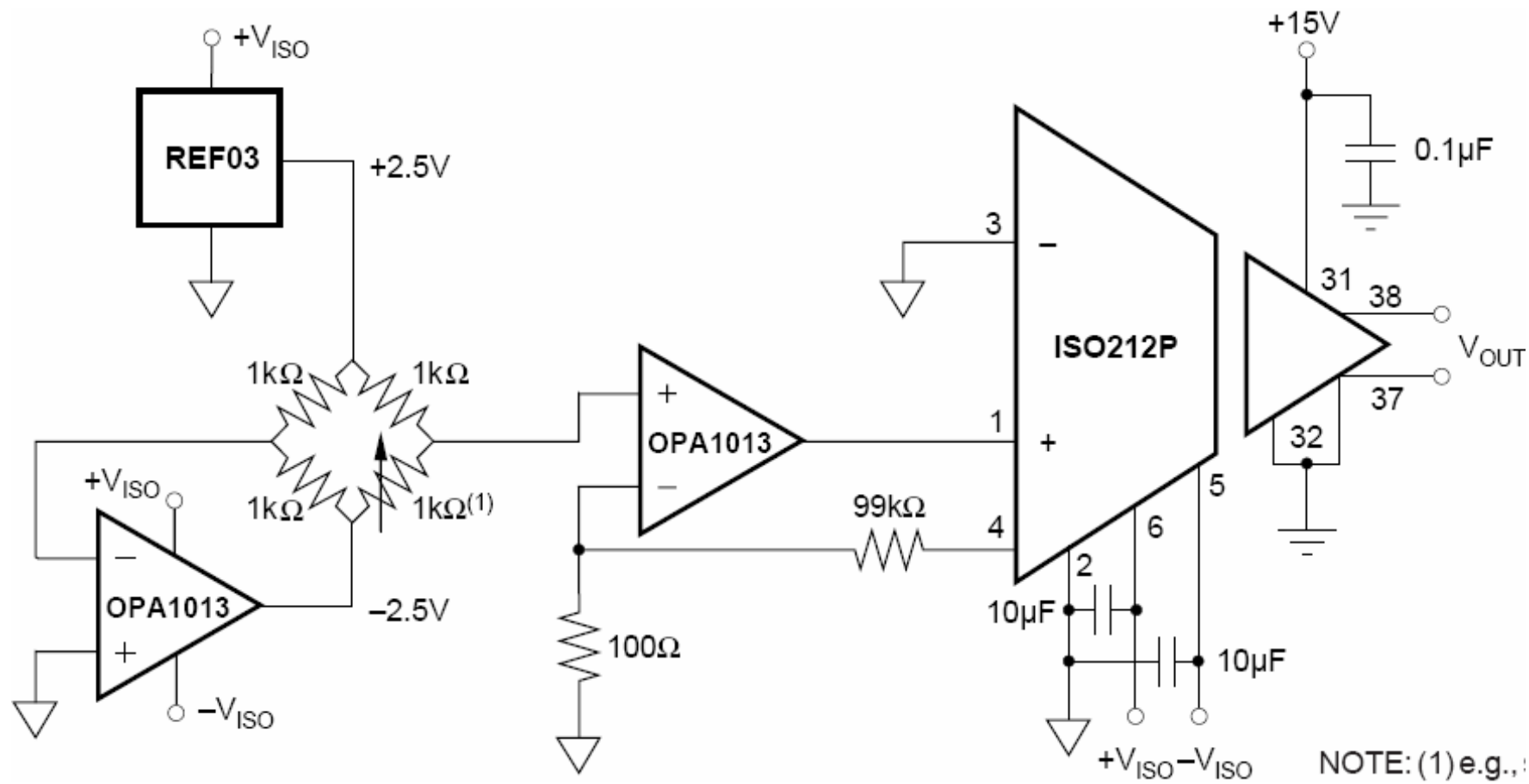
$$\text{即 } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_4}{R_2}$$

## Ø 隔离放大器（实用芯片例）

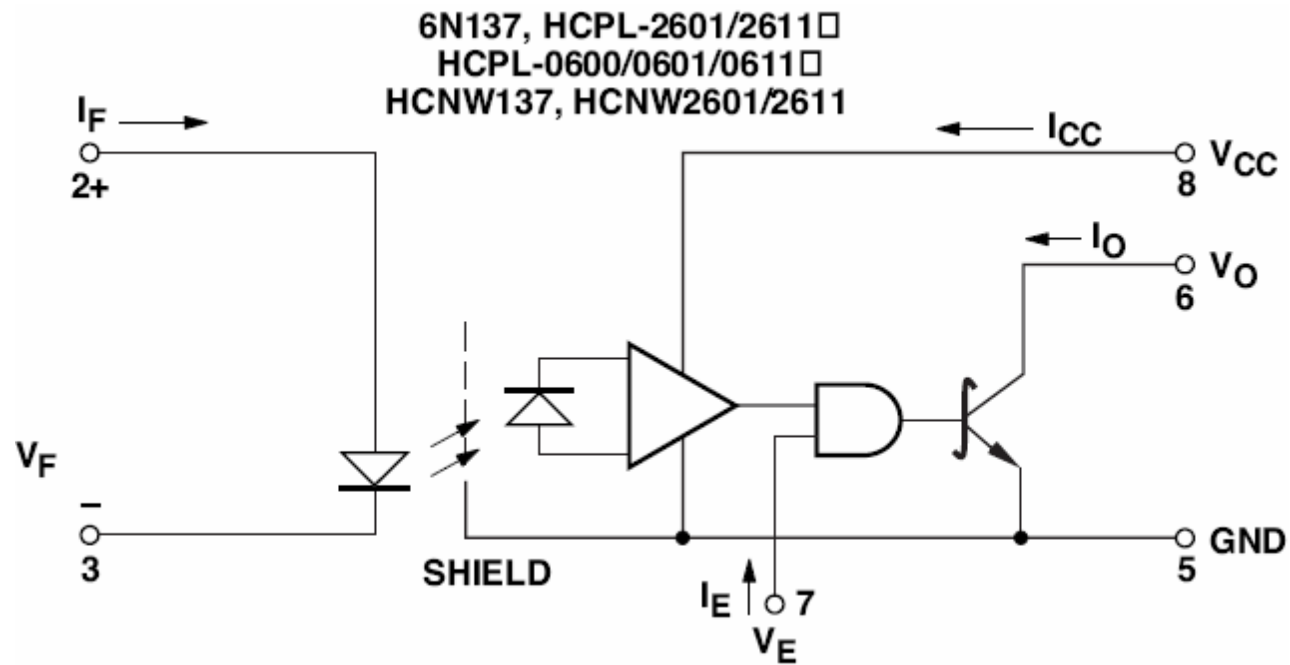


ü ISO212：隔离电压大于 2000V，隔离模抑制比大于 100dB。

## Ø 隔离放大器（实用芯片例）

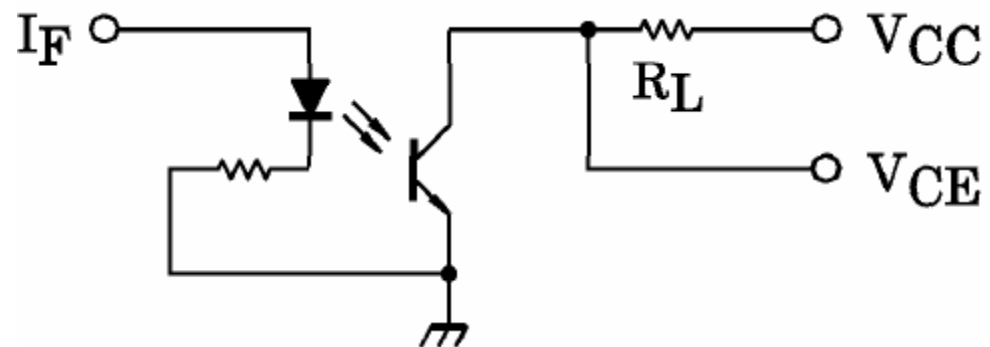


## Ø 隔离放大器（实用芯片例）



Ü 6N137: 单通道、高速光电耦合器，内部包括一个发光二极管和由光敏二极管、高增益线性运放及 OC 结构三级管构成的集成检测器，隔离电压近 1000V，转换速率可达 10MBit/s，压摆率为  $10\text{kV}/\mu\text{s}$ 。

## Ø 隔离放大器（实用芯片例）



Ü TLP521系列：单/双/四通道的低速光电耦合器；使用方式与 6N137 基本类似，隔离电压可达 2500V，只是转换速率相对偏低，一般适用于几百 kHz 以下的信号传输。

## ✓ 模拟乘法器

✎ 是一种通用性很强的非线性电子器件。

✎ 主要功能：实现两个模拟信号的相乘运算。

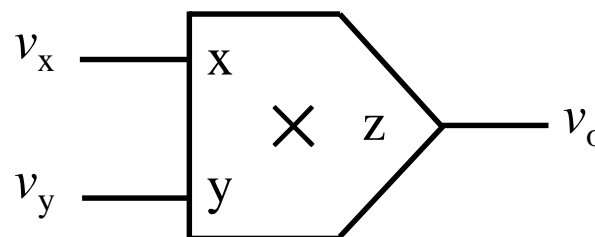
可方便地实现乘、除、乘方和开方等运算，还可以组成自动增益控制、调制、解调、鉴频、倍频等功能组件；

目前有多种类型高性能的单片器件和组件。

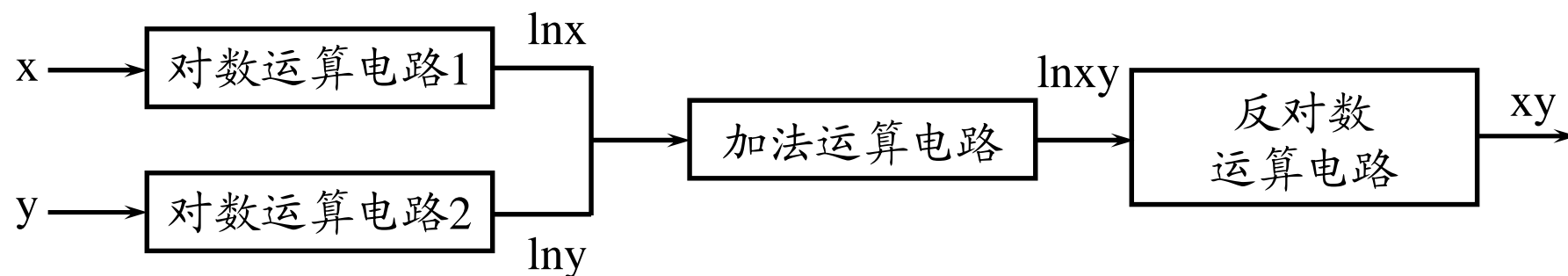
✎ 通常具有两个输入端和一个输出端。

电路符号：

输出特征方程： $v_o = K v_x v_y$



## Ø 模拟乘法器（实现方式）

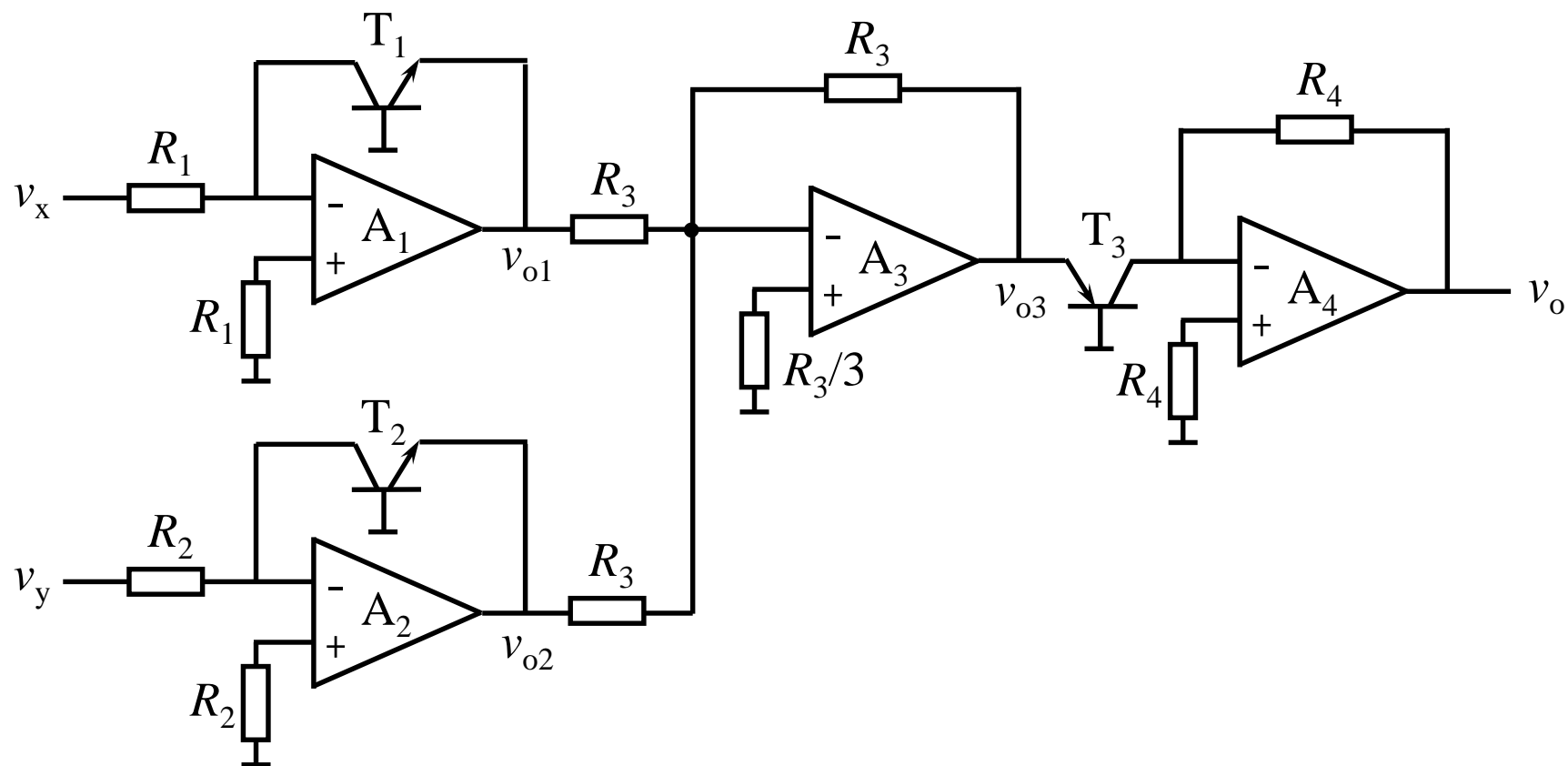


ü 对数/反对数型模拟乘法器

ü 其它方式：可变跨导型、时分分割型、霍尔效应型 ...



## ❖ 模拟乘法器（对数/反对数型实用电路）



## Ø 模拟乘法器（主要参数）

Ü 线性误差：实测输出电压与理论计算电压之间的最大偏差。

$$\text{x 方向误差（} v_y \text{ 满幅输入时）: } d_x = \frac{|v_z - K v_x v_y|_{\max}}{v_z}$$

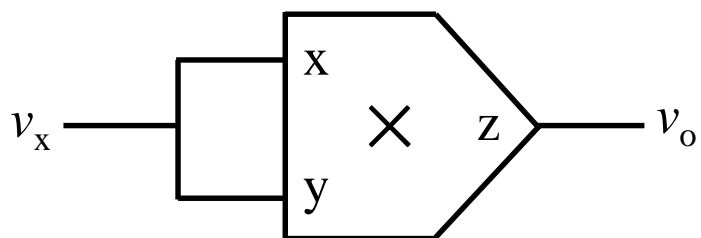
$$\text{y 方向误差（} v_x \text{ 满幅输入时）: } d_y = \frac{|v_z - K v_x v_y|_{\max}}{v_z}$$

表示：当一个输入量为最大值时，另一个输入量所产生的误差。

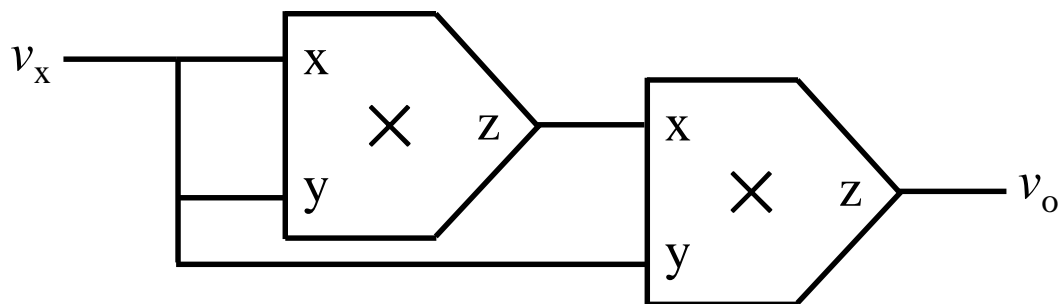
Ü 馈通误差：当一个输入量为 0 时，另一个输入量所产生的误差。

$$\text{Ü 平方误差: } d = \frac{|v_z - K v_x^2|_{\max}}{u_z}$$

## Ø 模拟乘法器（乘方、立方）

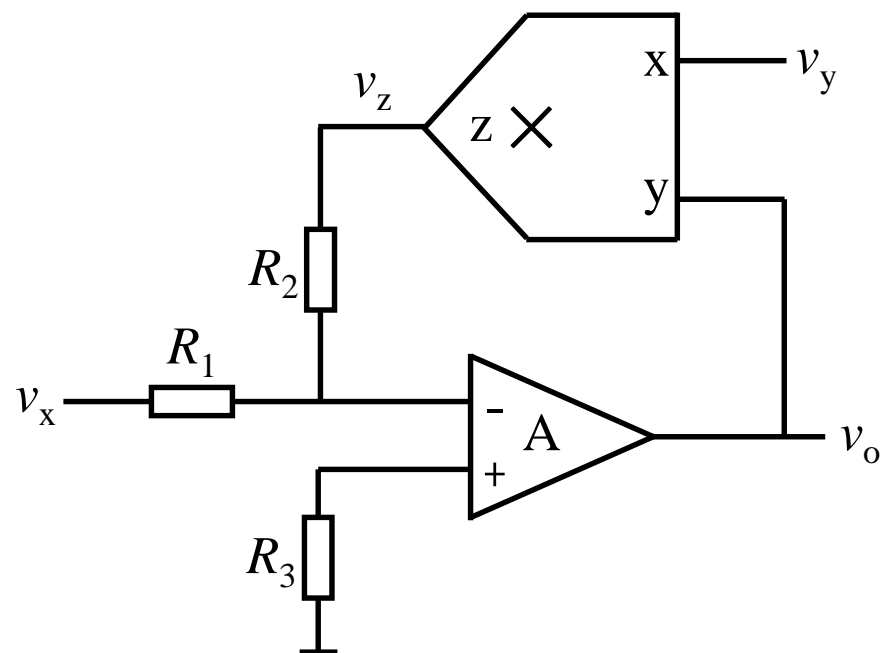


$$v_o = K (v_x)^2$$



$$v_o = K^2 (v_x)^3$$

## Ø 模拟乘法器（除法）

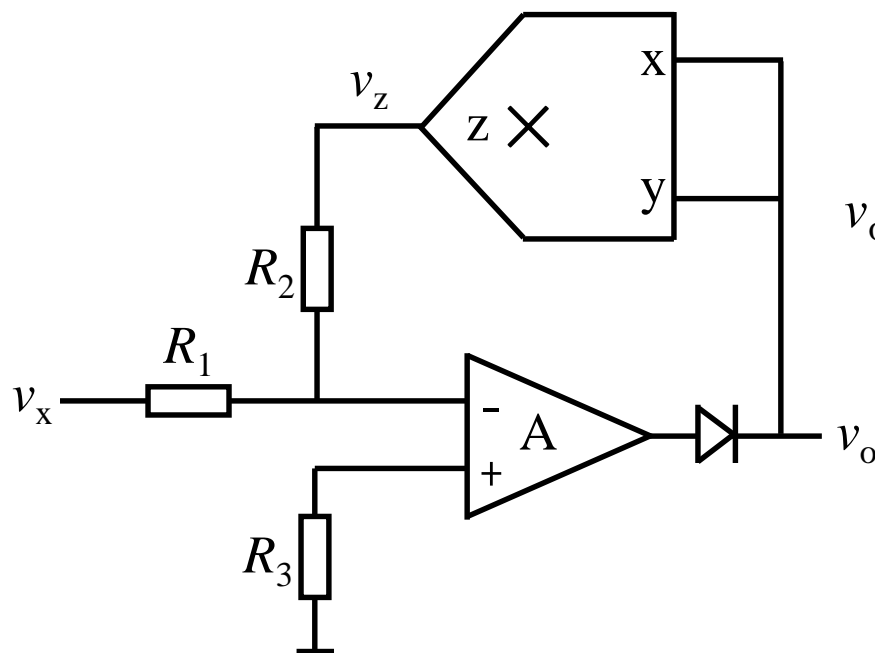


$$\frac{v_x}{R_1} = - \frac{v_z}{R_2}$$

$$v_z = K v_y v_o$$

$$v_o = - \frac{1}{K} \times \frac{R_2}{R_1} \times \frac{v_x}{v_y} = K \phi \times \frac{v_x}{v_y}$$

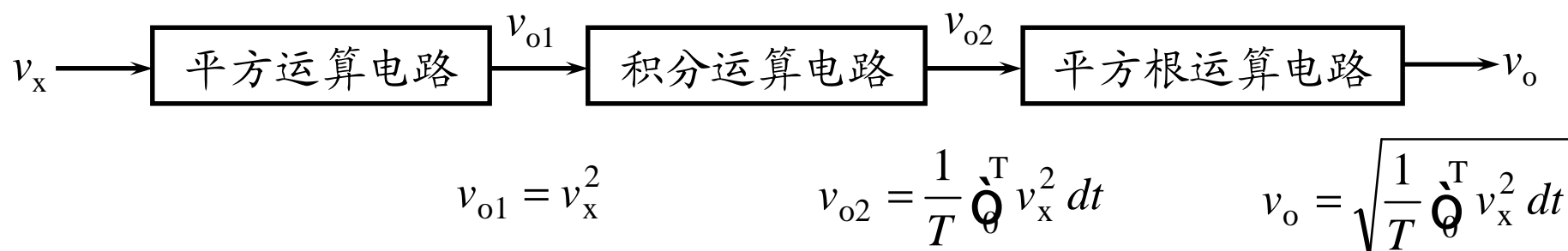
## 模拟乘法器（平方根）



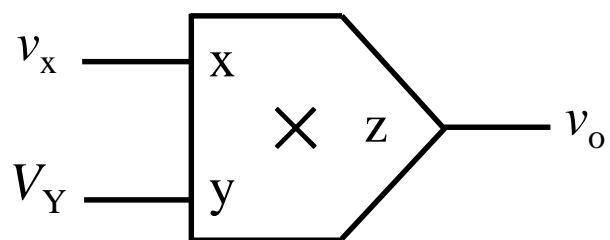
$$v_o = \sqrt{\frac{1}{K} \times \frac{R_2}{R_1} \times (-v_x)} = K \sqrt{-v_x}$$

$$v_o = -\frac{1}{K} \times \frac{R_2}{R_1} \times \frac{v_x}{v_y} = K \frac{v_x}{v_y}$$

## Ø 模拟乘法器（均方根）



## Ø 模拟乘法器（压控增益）

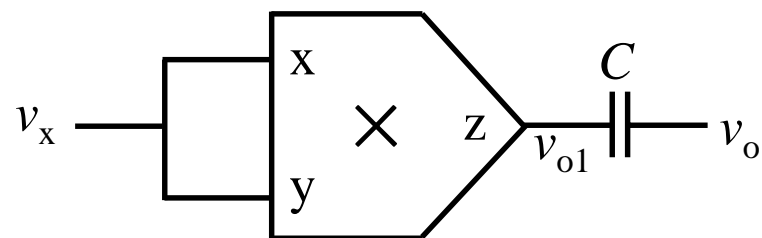


$$v_o = K v_x v_y$$

$$= (K V_Y) v_x$$

$$= A_Y v_x$$

## Ø 模拟乘法器（倍频）



定义  $v_x = V_{xm} \cos \omega t$

$$v_{o1} = K v_x^2 = \frac{1}{2} K V_{xm}^2 (1 + \cos 2\omega t)$$

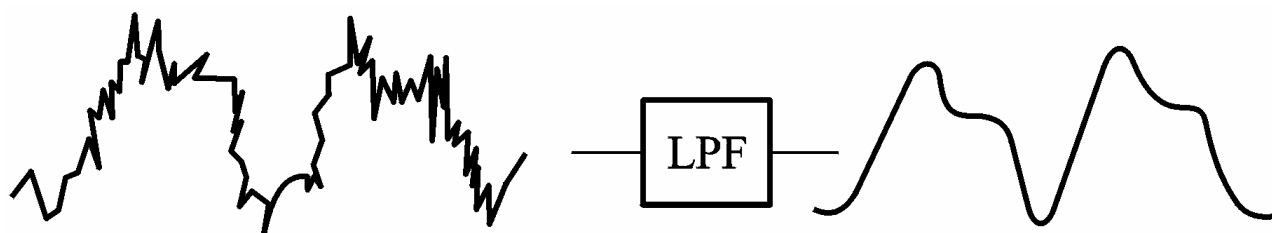
$$v_o = \frac{1}{2} K V_{xm}^2 \cos 2\omega t = K \phi \cos 2\omega t$$



## ✓ 有源滤波器

### ü 滤波器:

让指定频段的信号通过，而抑制其它频段的信号（或使其急剧衰减）；  
本质上是一种选频电路。



ü 无源滤波器：早期的，由  $R$ 、 $L$  和  $C$  组成的模拟滤波器；

有源滤波器：采用集成运放和  $RC$  网络为主体；

单片集成有源滤波器、开关电容滤波器、数字滤波器 ...

## Ø 有源滤波器

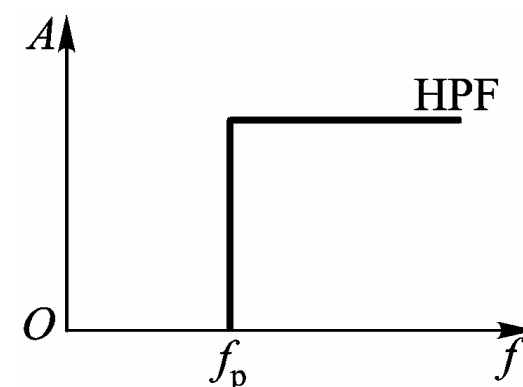
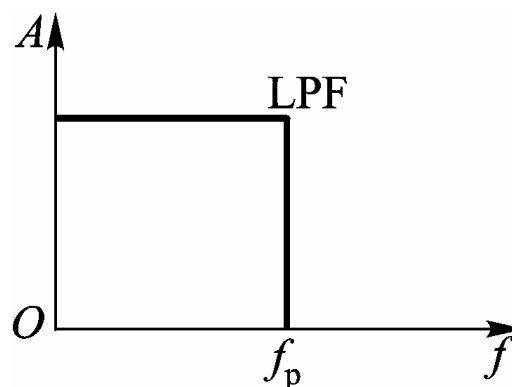
ü 通带：能够通过（或在一定范围内衰减）的信号频率范围；

阻带：被抑制（或急剧衰减）的信号频率范围。

过渡带、截止频率；

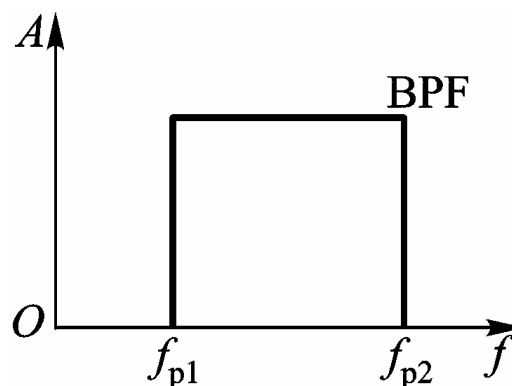
ü 分类（以频段区分）

低通滤波器（LPF）

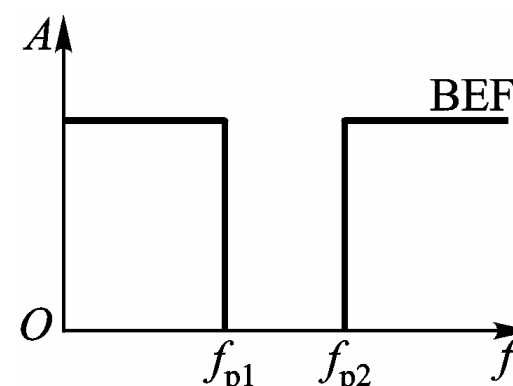


高通滤波器（HPF）

带通滤波器（BPF）



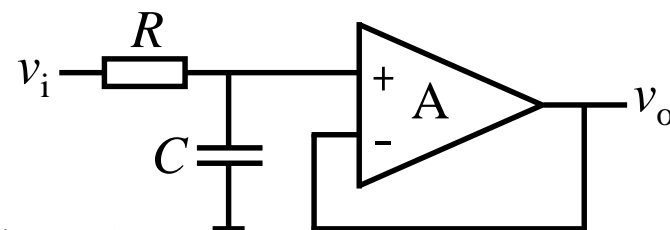
带阻滤波器（BEF）



## 有源滤波器（一阶低通）

主要技术指标：通带增益  $A_v$ 、截止频率  $f_p$ 。

右图所示有源一阶低通滤波器。

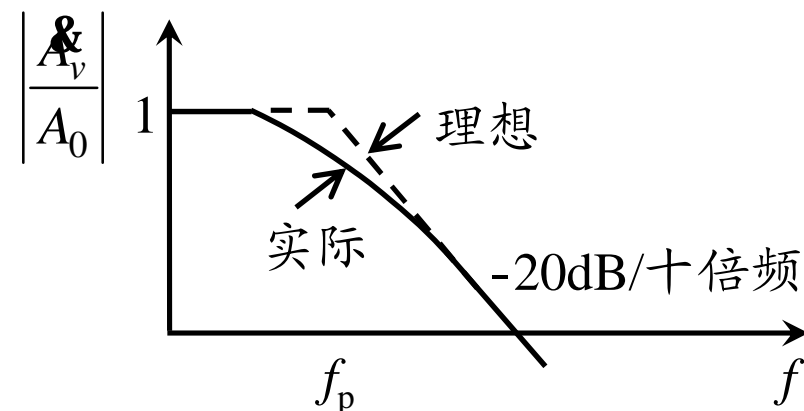


通带增益  $A_0 = 1$ （低频时，电容  $C$  可视为开路）

增益的频率特性： $\dot{A}_v = \frac{A_0}{1 + j\frac{f}{f_c}}$ ，其中  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

根据定义，当  $f = f_p$  时， $|\dot{A}_v| = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$

所以，截止频率  $f_p = f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

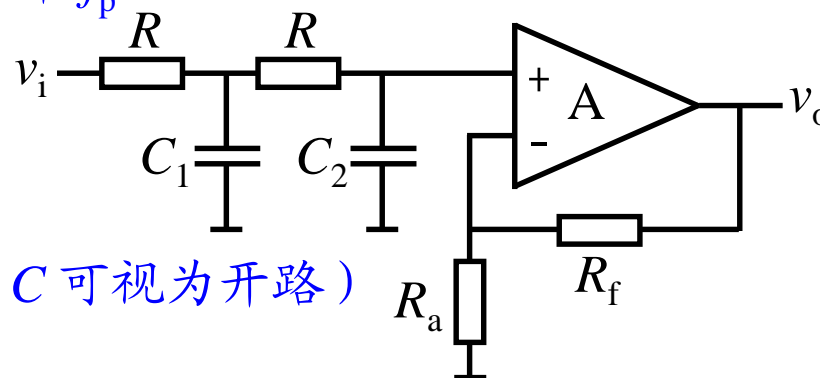


滤波效果不是很好（波特图）。

## 有源滤波器（二阶低通）

主要技术指标：通带增益  $A_v$ 、截止频率  $f_p$ 。

右图所示有源二阶低通滤波器。



通带增益  $A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_a}$ （低频时，电容  $C$  可视为开路）

增益的频率特性： $A_v = \frac{A_0}{[1 - (\frac{f}{f_c})^2] + j3\frac{f}{f_c}}$ ，其中  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

根据定义，当  $f = f_p$  时， $|A_v| = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$

所以，截止频率  $f_p \approx 0.37 f_c = \frac{0.37}{2\pi RC}$

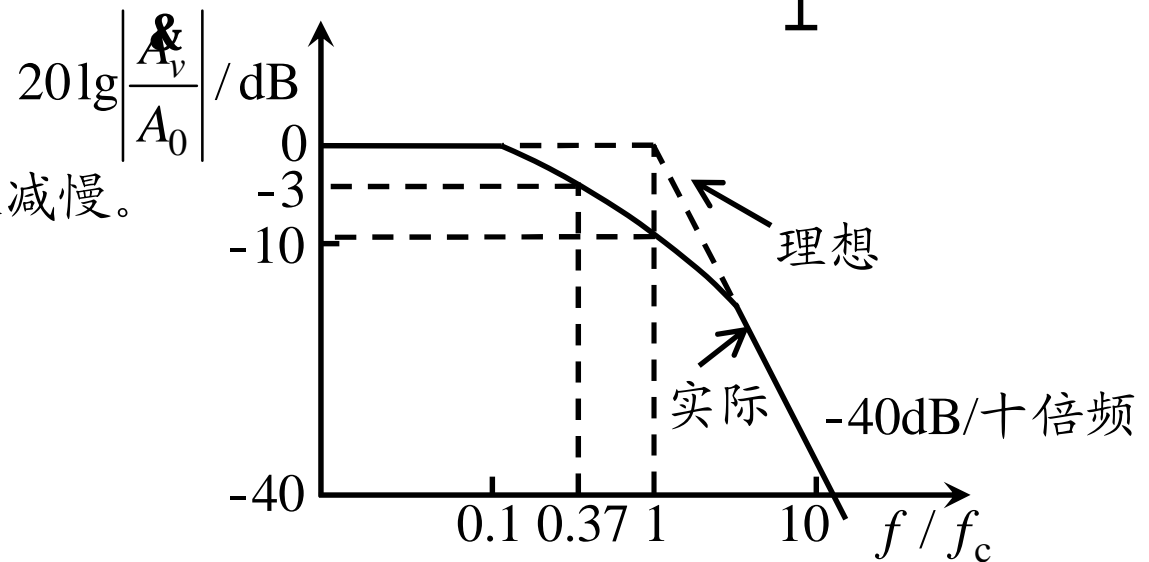
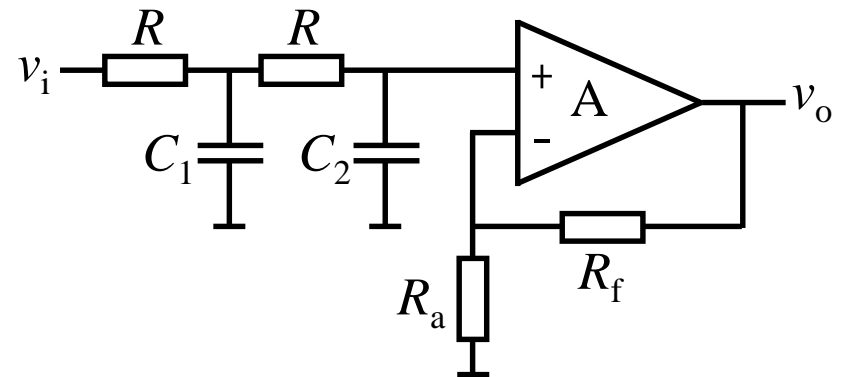
## 有源滤波器（二阶低通）

右图所示有源二阶低通滤波器。

通带增益  $A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_a}$

截止频率  $f_p \gg \frac{0.37}{2\pi RC}$

滤波效果相对较好，  
但通带有衰减，且阻带衰减慢。



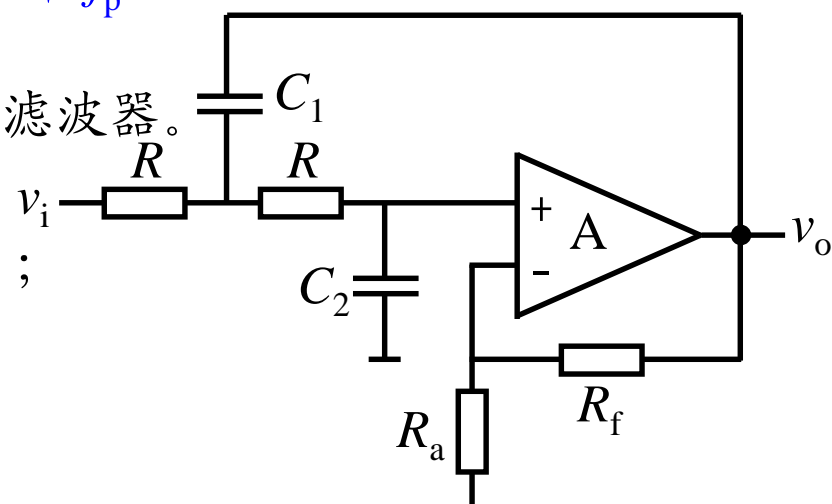
## 有源滤波器（二阶单一正反馈型低通）

主要技术指标：通带增益  $A_v$ 、截止频率  $f_p$ 。

右图所示有源二阶单一正反馈型低通滤波器。

由于  $C_1$  的反馈信号是正反馈，  
电路在  $f_c$  附近的增益不衰减（或提升）；

当频率远离  $f_c$  时，正反馈效果减弱。

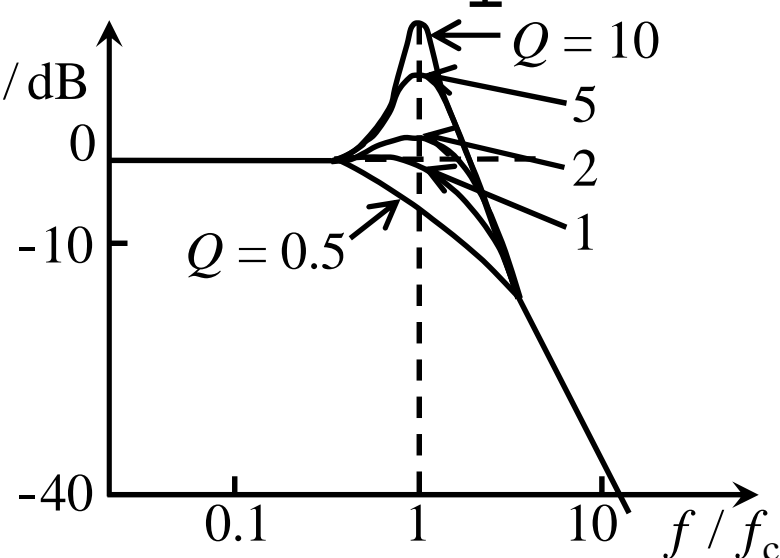


增益的频率特性

$$\frac{A_v}{A_0} = \frac{A_0}{[1 - (\frac{f}{f_c})^2] + j(3 - A_0)\frac{f}{f_c}}$$
$$20\lg\left|\frac{A_v}{A_0}\right|/\text{dB}$$

选择合适的  $Q$  值，可以使  
电路的幅频特性接近理想情况；

缺陷：同时存在着正负反馈，  
容易产生自激振荡。



## Ø 开关电容滤波器

### Ü 开关电容滤波器:

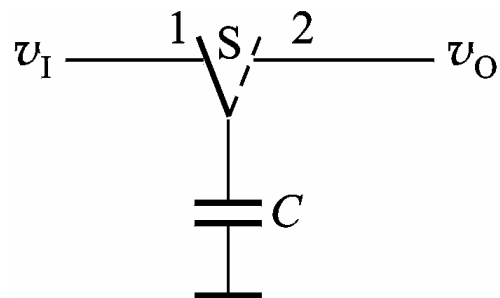
由 MOS 电容、模拟开关和运放组成的开关电容网络，以及由此网络构成的电阻、反相/同相积分器；

可以对模拟量的离散值直接进行处理（无需模数转换器）。

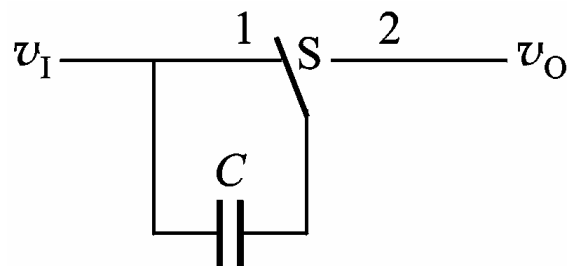
Ü 基本结构：电路两个节点间接有带高速开关的电容器。

（在开关的作用下，其效果相当于两个节点间连接的电阻）

并联型



串联型



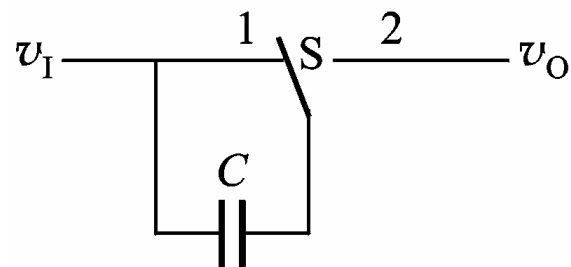
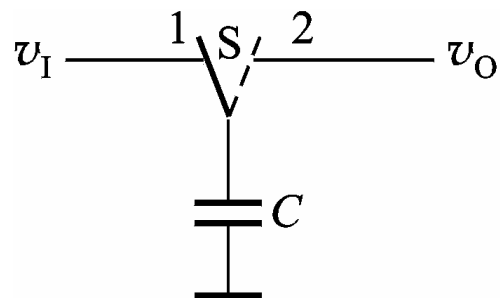
## Ø 开关电容滤波器

Ü 并联型:

开关  $S$  接向 1:  $C$  被  $v_I$  充电; 开关  $S$  接向 2:  $C$  对  $v_O$  放电;  
 $C$  的电荷变化量:  $C (v_I - v_O)$ 。

Ü 串联型:

开关  $S$  接向 1:  $C$  被短路; 开关  $S$  接向 2:  $C$  储存电荷;  
 $C$  的电荷变化量:  $C (v_I - v_O)$ 。





## Ø 开关电容滤波器

ü 并联型/串联型:

$C$  的电荷变化量:  $C(v_I - v_O)$ 。

ü 假定开关的频率  $f_C$  很高, 则电容  $C$  的充放电可认为是连续的, 其电流也为连续, 即平均电流为: 
$$I = \frac{q_c}{T_C} = \frac{C(v_I - v_O)}{T_C} = C f_C (v_I - v_O)$$

ü 等效电阻: 
$$R_{eq} = \frac{v_I - v_O}{I} = \frac{1}{C f_C}$$

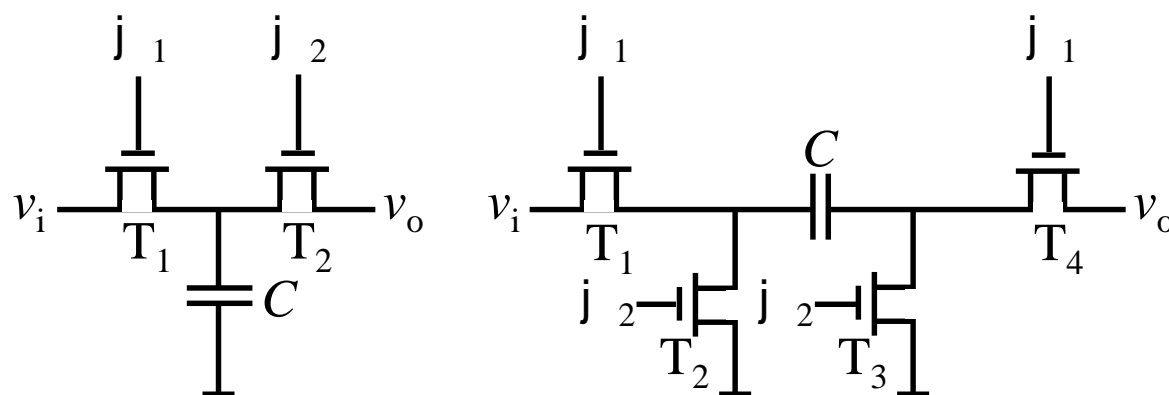
ü 优势:

可以用非常小的开关电容等效出很大的电阻 (利于集成电路制作);

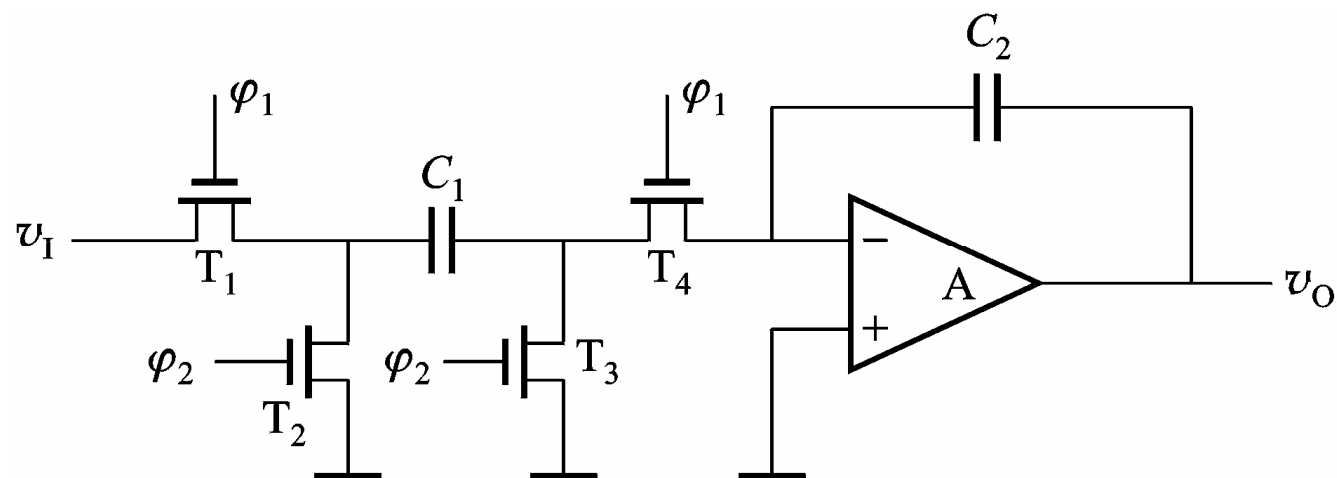
通过改变时钟转换周期  $T_C$ , 即可改变等效电阻的阻值。

## Ø 开关电容滤波器（实用电路）

Ü 并联型/串联型:

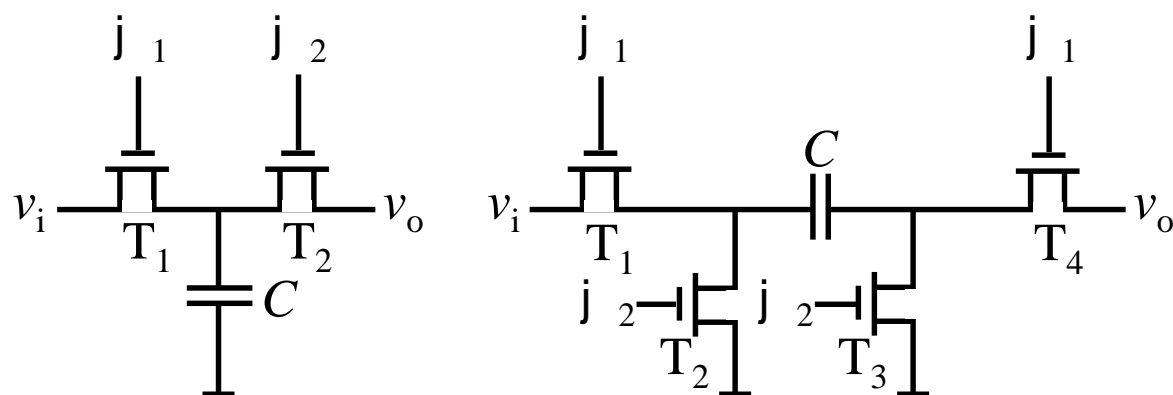


Ü 反向积分器



## Ø 开关电容滤波器（实用电路）

Ü 并联型/串联型:



Ü 一阶开关电容低通滤波器

