

复旦大学电子工程系 陈光梦



第6章 信号处理电路



运算电路

两个基本放大电路

加减运算

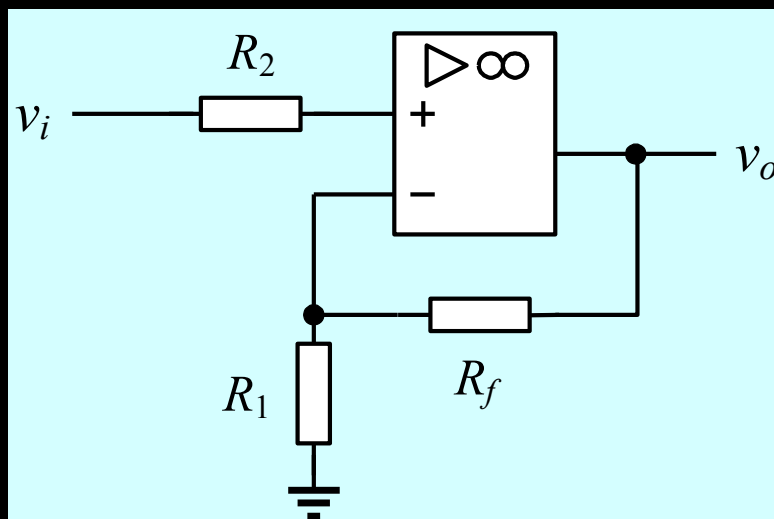
微分与积分运算

对数和指数运算

乘法器

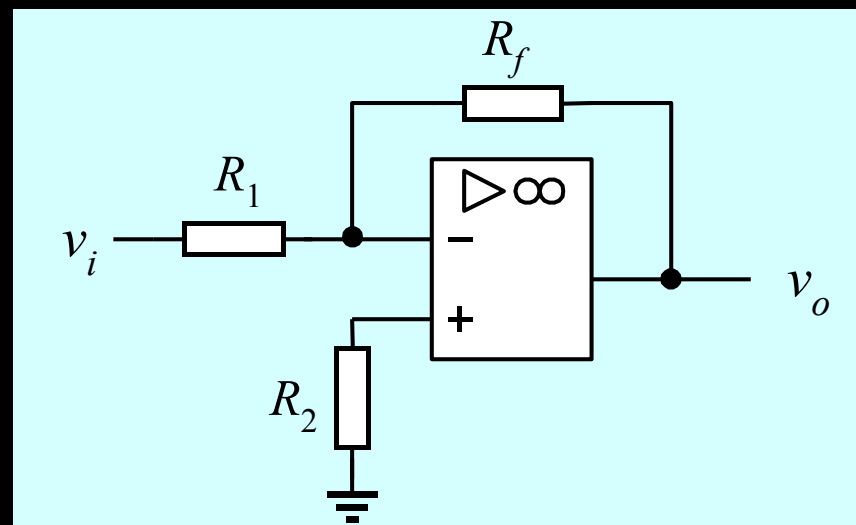
两个基本放大电路

同相放大器



$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i$$

反相放大器



$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i$$

可以虚短路、虚开路原则得到上述放大器的输入输出电压关系

基本放大电路的深度负反馈条件

■ 同相放大器

$$A_o = A_{vd} \frac{r_{id}}{r_{id} + R_f // R_1} \cdot \frac{R_f + R_1}{R_f + R_1 + r_o}, \quad F = \frac{R_1}{R_f + R_1}$$

□ 深度负反馈条件:

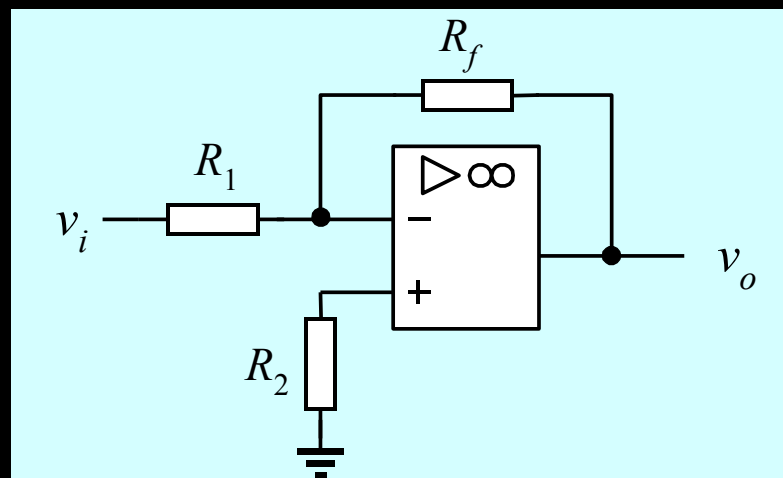
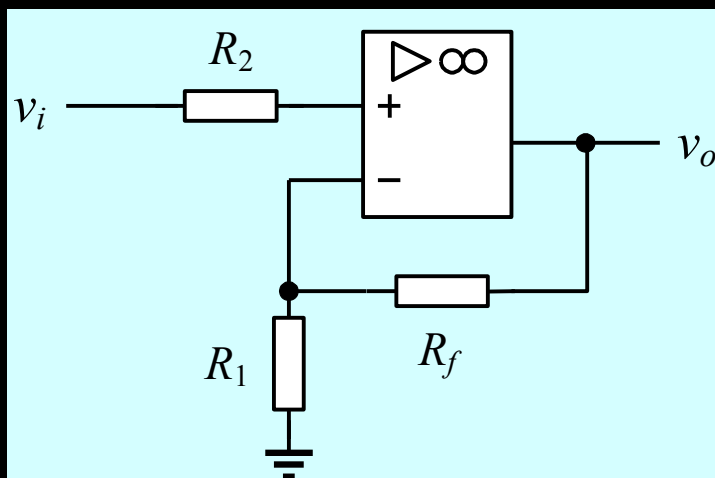
$$A_{vd} \gg 1, \quad (R_f + R_1) \ll r_{id}, \quad (R_f + R_1) \gg r_o$$

■ 反相放大器

$$A_o = A_{vd} (R_f // r_{id}) \frac{R_f}{R_f + r_o}, \quad F = \frac{1}{R_f}$$

□ 深度负反馈条件:

$$A_{vd} \gg 1, \quad R_f \ll r_{id}, \quad R_f \gg r_o$$



- 电阻 R_2 的补偿作用：保证集成运放输入端的差分放大电路的对称性，从而使得集成运放的输入失调及其温度漂移得以补偿
- 由于要求输入接地（同时输出亦为零）时运放两个输入端对称，所以有 $R_2 = R_1 // R_f$
- 在要求不高的电路中，可以将此电阻省略

基本放大器的特点与应用

- 同相放大器的输出与输入相位相同，反相放大器的输出与输入相位相反
- 反馈网络由电阻构成。在满足深度负反馈条件下，放大倍数仅由反馈网络确定
- 经常用来构成信号放大电路
- 实际应用时，除了必须满足 $A_0F \gg 1$ 以外，还要根据被放大信号的实际情况，分别考虑放大器的频率特性、输入失调、噪声、输出动态范围等一系列因素

由基本放大器发展成其他电路

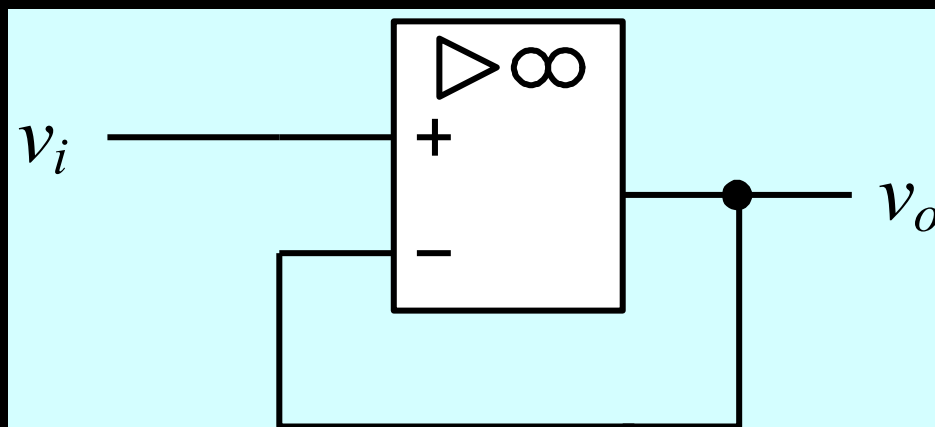
- 基本放大器的反馈网络由电阻构成
- 可以用一个网络取代基本放大器反馈网络中的电阻。在满足深度负反馈条件下，虚短路、虚开路分析原则仍然成立
- 若该网络的网络阻抗已知，则基本放大器的输入和输出关系式仍然成立，只要将其中的电阻改为相应的网络阻抗即可。即有

同相放大器：
$$v_o = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1}\right)v_i$$
 反相放大器：
$$v_o = -\frac{Z_f}{Z_1}v_i$$

- 可以由上述原理发展出许多基于运放的应用电路

电压跟随器

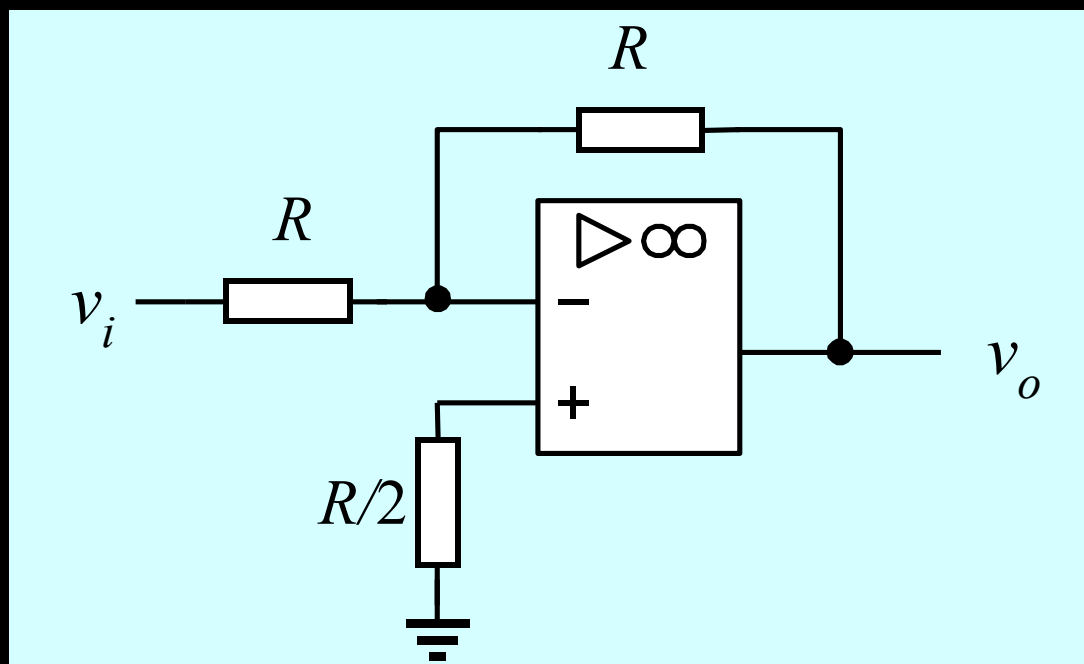
- 令同相放大器中的 $R_f = 0$ ，即运放的输出直接与反相端连接， $v_o = v_i$ ，电路成为一个电压跟随器
- 由于此时 R_1 可以取任意值，所以通常将其开路
- 极高的输入阻抗、极低的输出阻抗



$$v_o = v_i$$

倒相器

- 令反相放大器中的 $R_f = R_1$ ，则电路输出电压与输入电压数值相等，相位相反， $v_o = -v_i$ ，电路成为一个倒相器

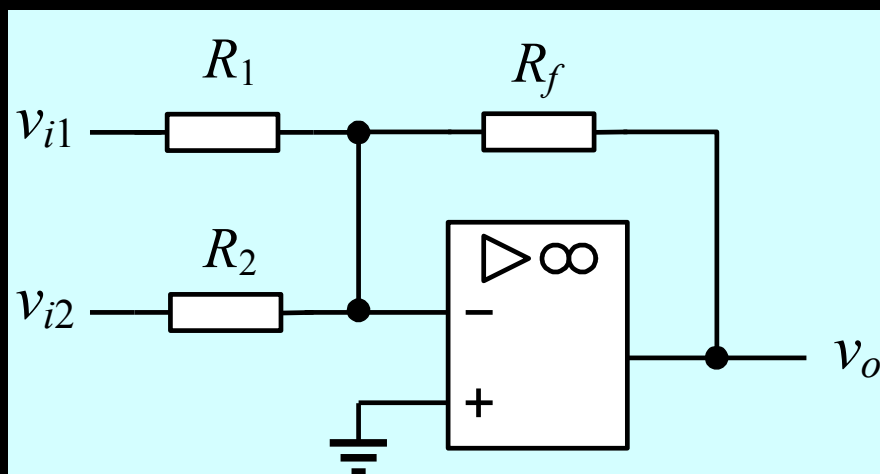


$$v_o = -v_i$$

加减运算

- 结构：将基本放大器中的输入由一个变为多个
- 原理：根据线性电路的叠加定理，输出是每个输入的独立响应的线性叠加

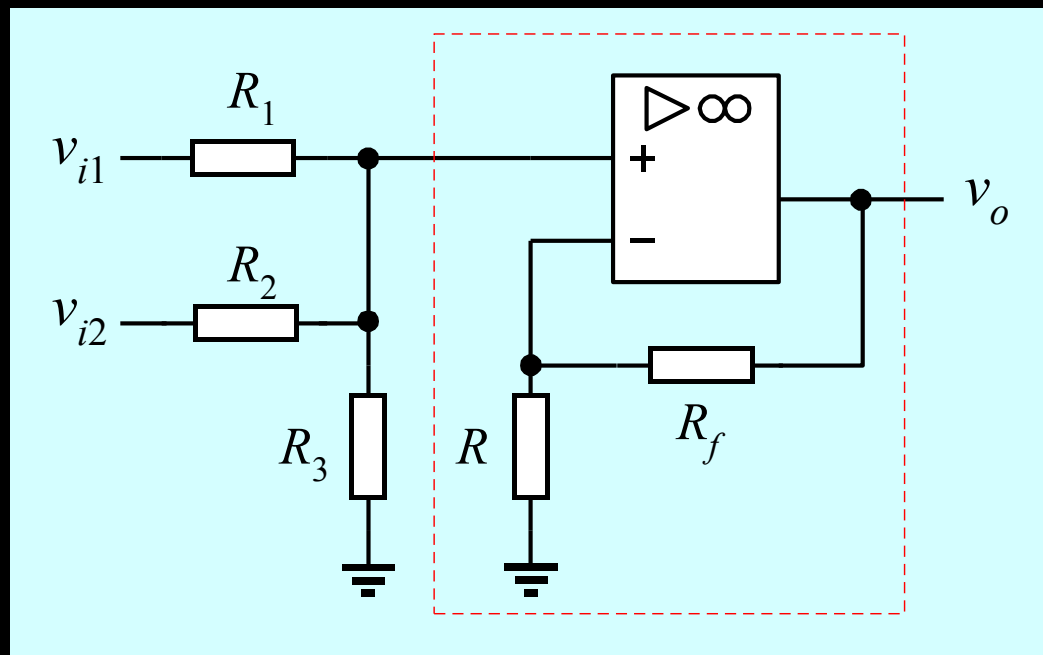
反相加法器



$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_{i1} + \frac{R_f}{R_2} v_{i2}\right)$$

- 特点1：带权相加，每个信号前面的系数可以看成某种权重
- 特点2：每个权重系数可以独立调节
- 特点3：输出与输入反相

同相加法器

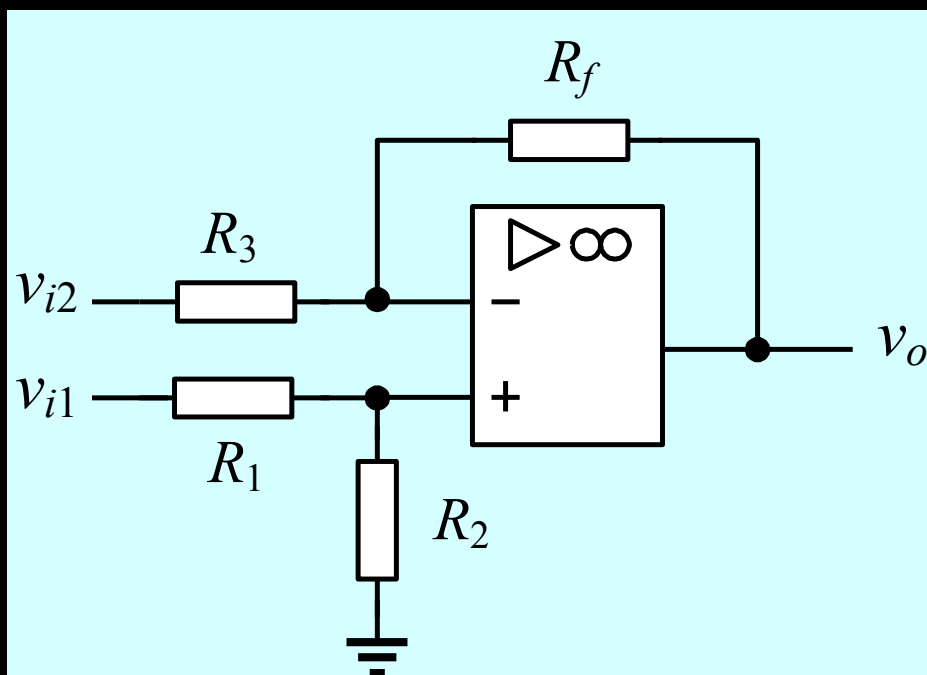


- 特点1：输出与输入同相
- 特点2：权重系数相互不独立

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left(\frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} v_{i1} + \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3} v_{i2} \right)$$

$$= \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left(\frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} v_{i1} + \frac{R_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} v_{i2} \right)$$

减法器



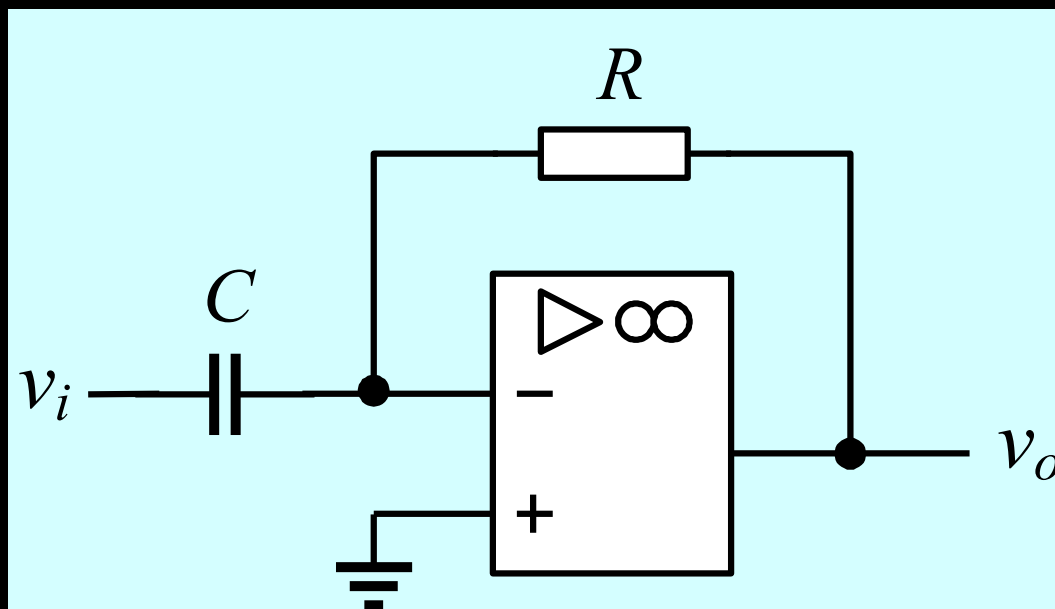
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{i1} - \frac{R_f}{R_3} v_{i2}$$

- 当满足 $R_2=R_f$, $R_1=R_3$ 条件时, 也称为差动放大器
- 由于负反馈的存在, 差模输入范围和共模输入范围均比晶体管差分放大器大得多
- 通常使用在需要将差模信号转换为单端输出信号的情况

微分电路与积分电路

- 结构：以电容取代基本放大器反馈网络中的一个电阻
- 原理：电容两端的电压和流过电容的电流互为积分和微分关系

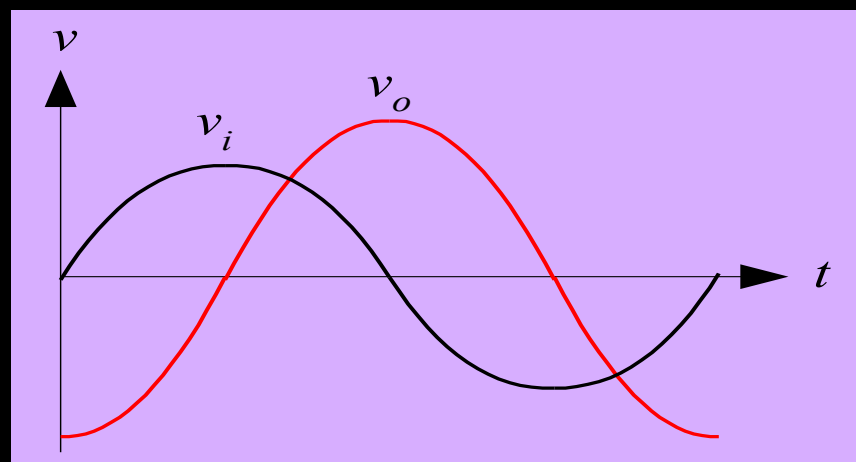
反相微分电路



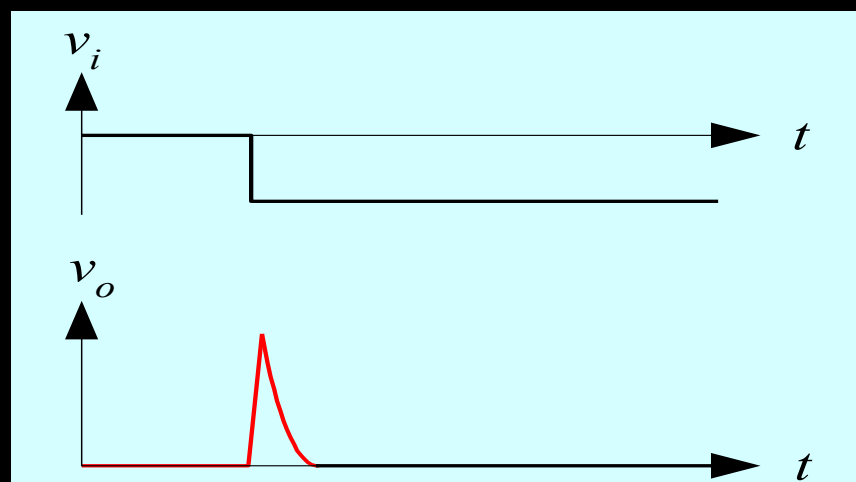
$$v_o(t) = -RC \frac{d}{dt} v_i(t)$$

反相微分电路的输入输出波形

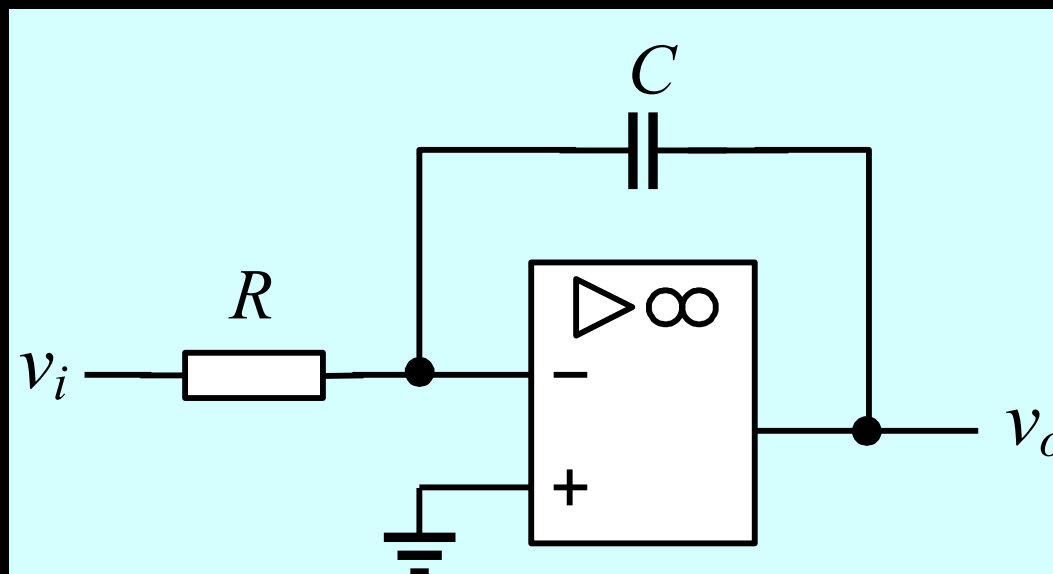
■ 稳态输入响应



■ 瞬态输入响应

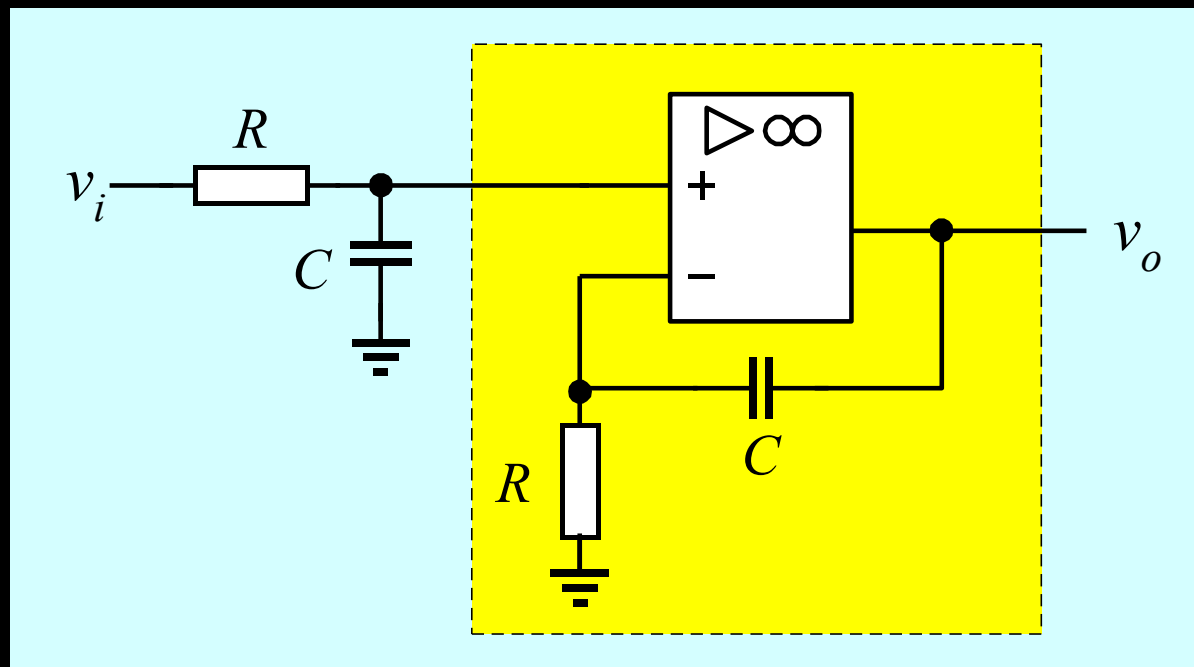


反相积分电路



$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

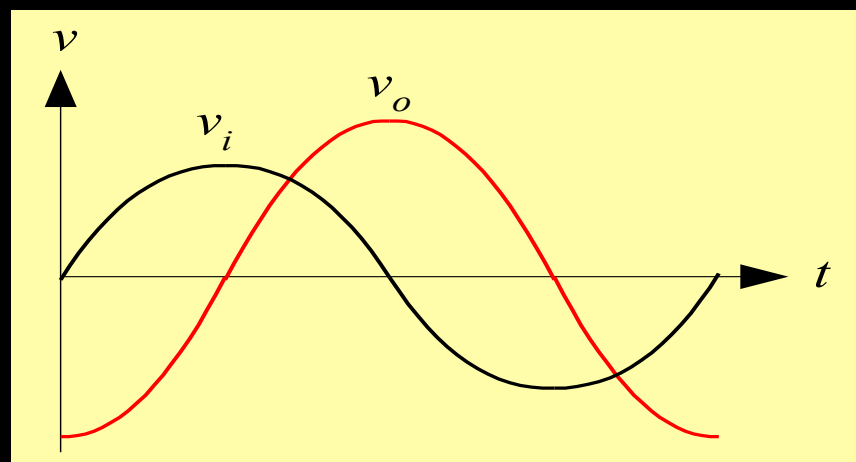
同相积分电路



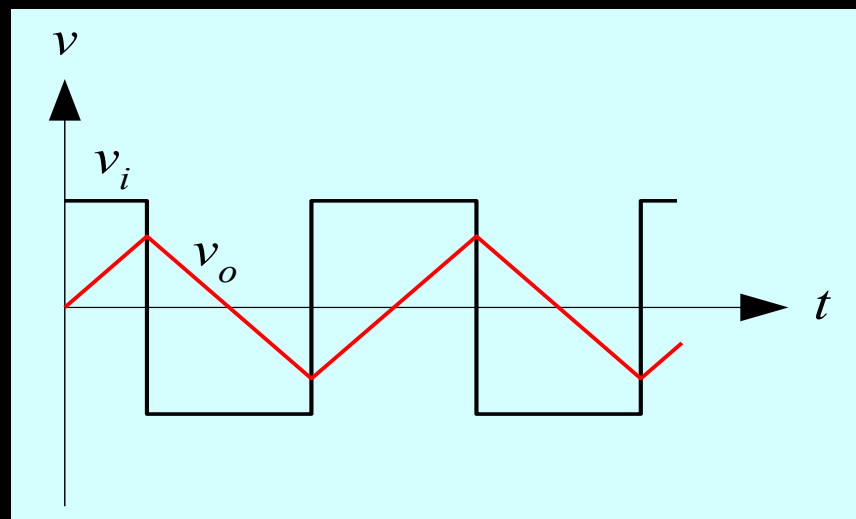
$$v_o(t) = \frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

同相积分电路的输入输出波形

■ 稳态输入响应



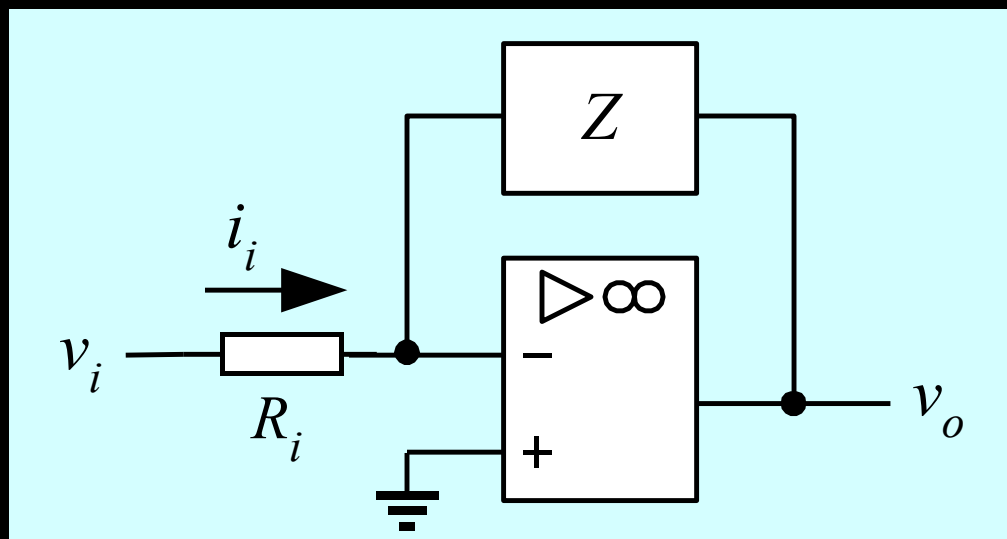
■ 阶跃输入的响应



函数电路 (1)

将反相放大器中的反馈电阻更换成一个器件Z，该器件Z的电压-电流关系为某个函数 $v = f_Z(i)$ 由于虚地的存在，使得 $i_i = v_i / R_i$ 而 $v_o = -f_Z(i_i)$ 所以有

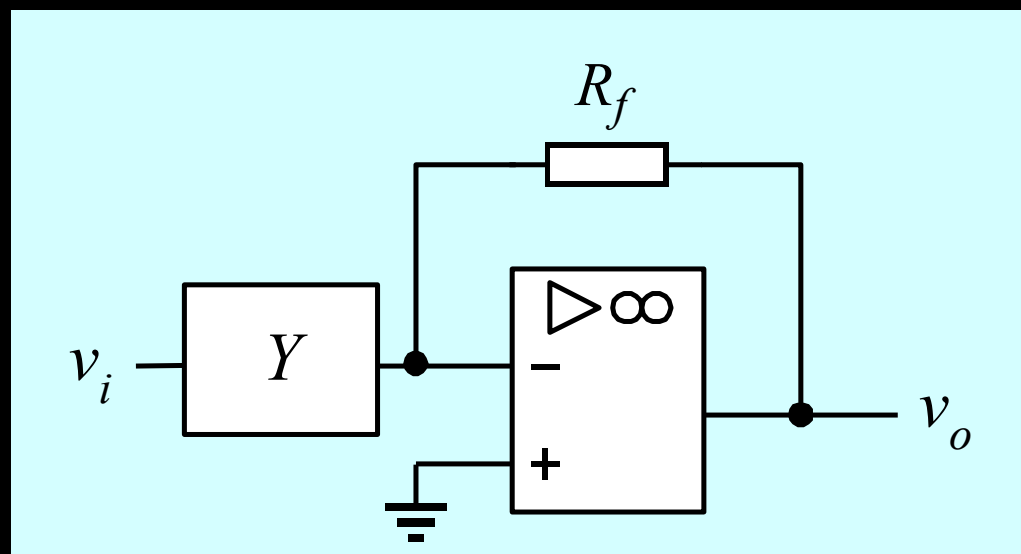
$$v_o = -f_Z\left(\frac{v_i}{R_i}\right)$$



函数电路 (2)

将反相放大器中的输入电阻 R_1 更换成一个器件 Y ，该器件 Z 的电流-电压关系为函数 $i = f_Y(v)$ ，则有 $i_i = f_Y(v_i)$ ， $v_o = -R_f i_i$ 所以有

$$v_o = -R_f f_Y(v_i)$$



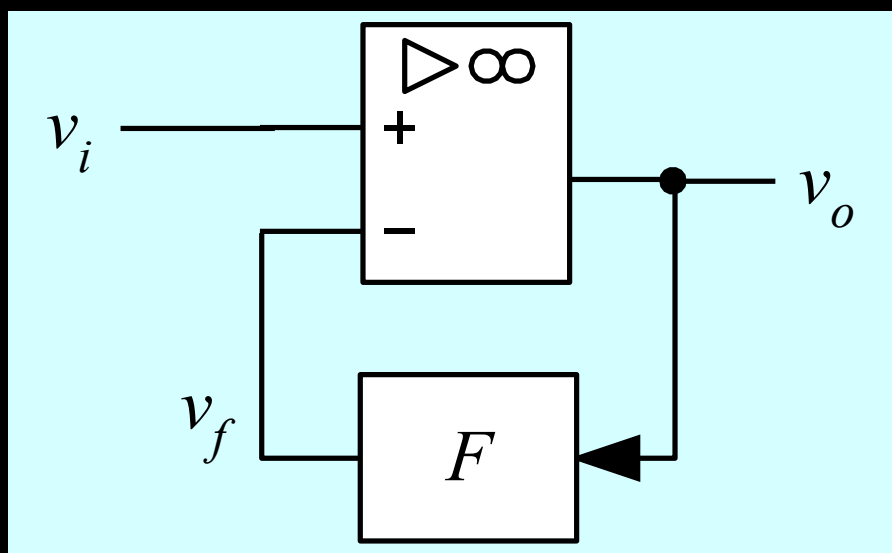
函数电路的特点

- 利用器件的伏安特性具有某种函数关系，并利用运放虚地点，将输入输出隔离，从而得到电路的输入输出关系与反馈网络与输入网络的函数关系相关的结果
- 若器件的伏安特性是非线性的，则可以得到非线性电路

反函数电路

以一个函数电路作为一个同相放大器的反馈网络，其中 F 是一个用运放构成某个函数关系的电路， $v_f = f(v_o)$ 。根据虚短路虚开路原则可以得到 $v_i = v_f = f(v_o)$ 有

$$v_o = f^{-1}(v_i)$$



对数和指数放大器

- 二极管的电流-电压关系近似为

$$i_D \approx I_s \exp\left(\frac{v_D}{V_T}\right)$$

- 电压-电流关系近似为

$$v_D \approx V_T \ln \frac{i_D}{I_s}$$

- 利用二极管的上述伏安特性，结合函数电路原理，可以用二极管构成对数放大器和指数放大器

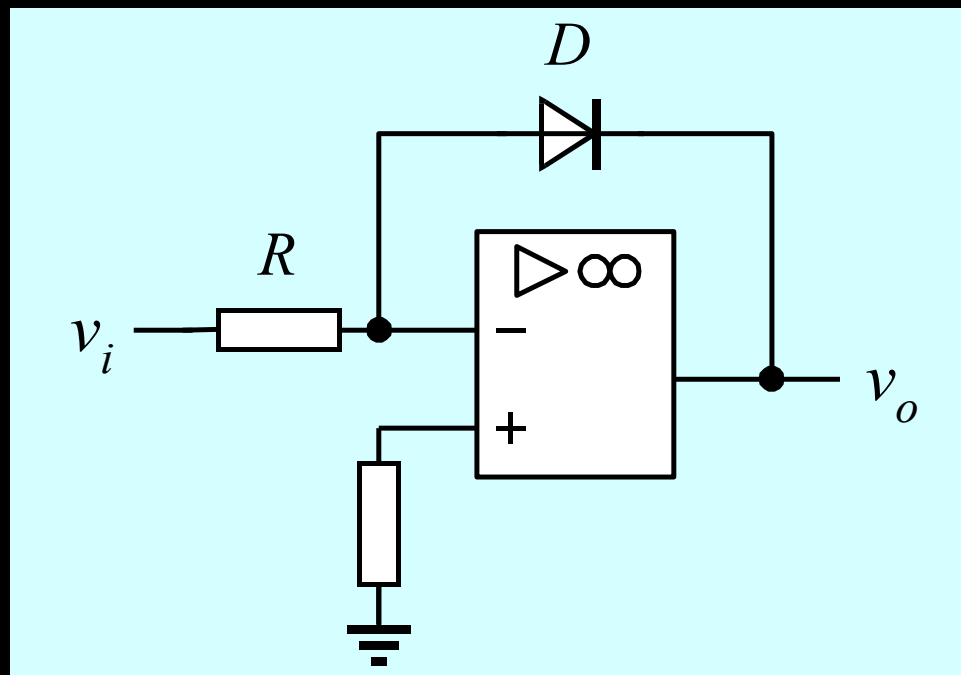
对数放大器基本电路

$$v_D = f_Z(i_D)$$

$$= V_T \ln \frac{i_D}{I_s}$$

$$v_o = -f_Z\left(\frac{v_i}{R}\right)$$

$$= -V_T \ln \frac{v_i}{I_s R}$$



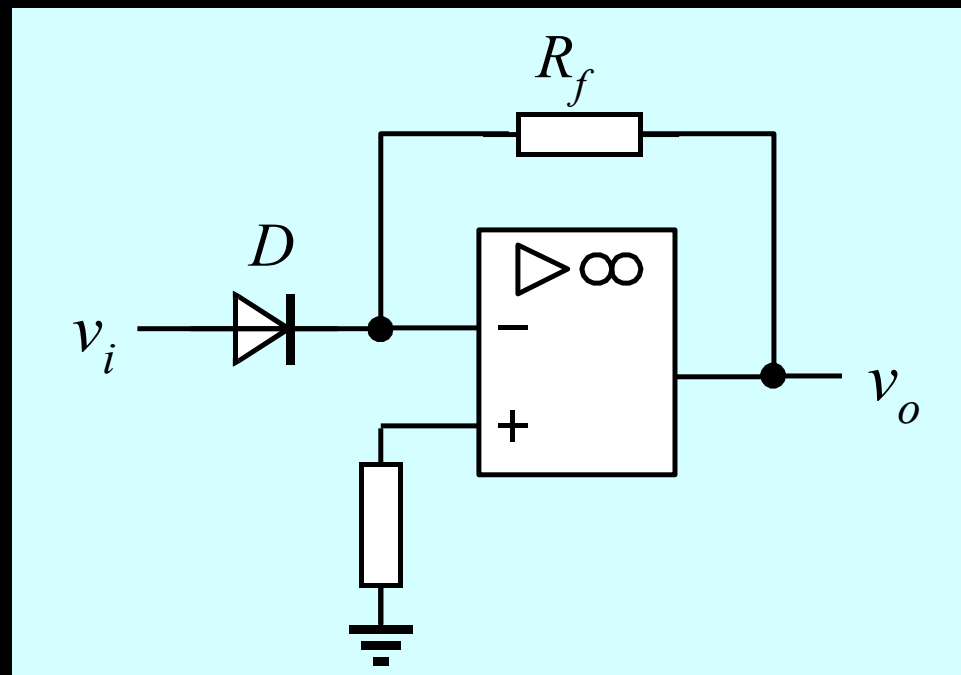
指数放大器基本电路

$$i_D = f_Y(v_D)$$

$$= I_s \exp\left(\frac{v_D}{V_T}\right)$$

$$v_o = -R_f f_Y(v_i)$$

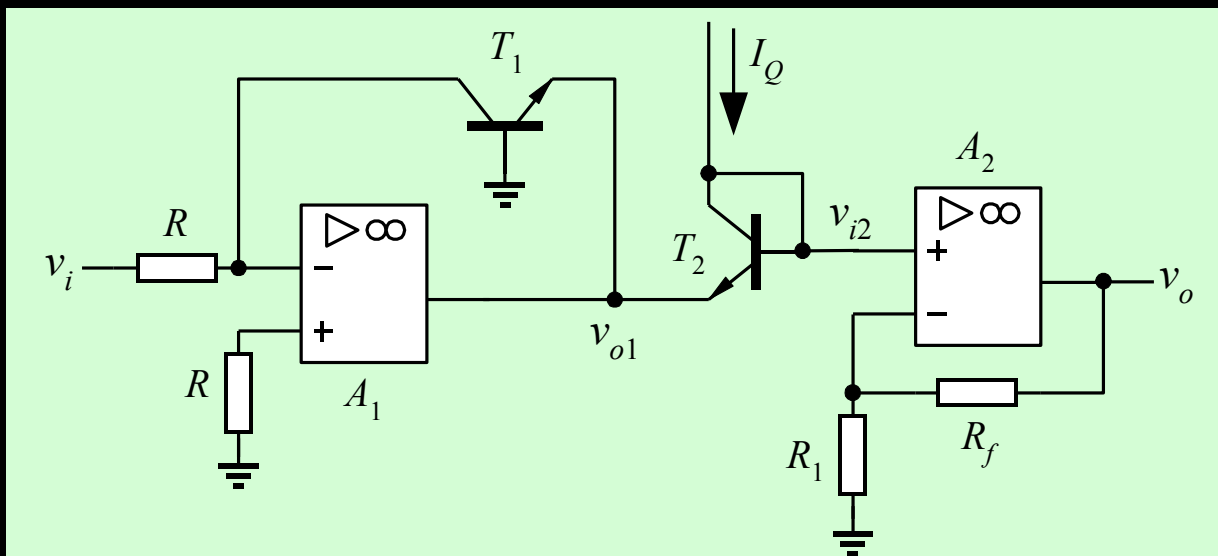
$$= -R_f I_s \exp\left(\frac{v_i}{V_T}\right)$$



对数与指数放大器基本电路的缺陷

- I_s 与晶体管的发射极面积以及材料的掺杂浓度有关
- I_s 和 V_T 都是温度的函数
- 基本对数放大器和基本指数放大器的电压放大系数与晶体管有关，并且是温度的函数

实用对数放大器

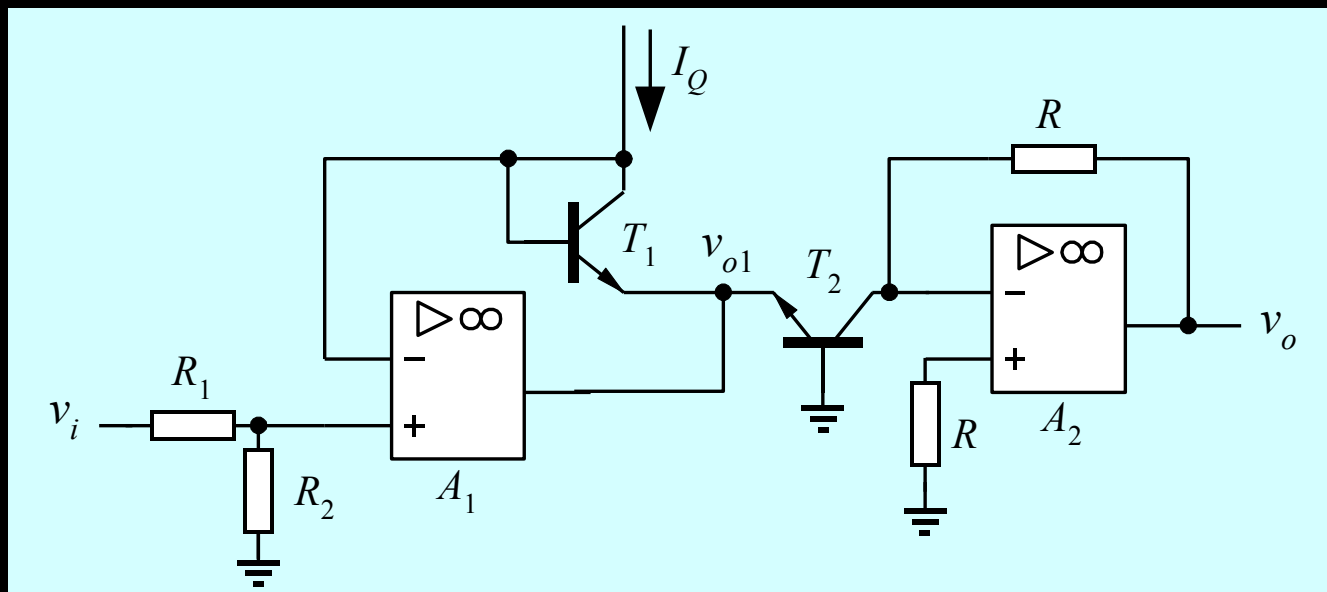


$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_{i2} = -\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)V_T \ln \frac{v_i}{I_Q R}$$

利用晶体管 T_1 、 T_2 的对称性，消除 I_S 的影响

R_1 或 R_f 选用合适的热敏电阻，可以补偿 V_T 的温度系数

实用指数放大器

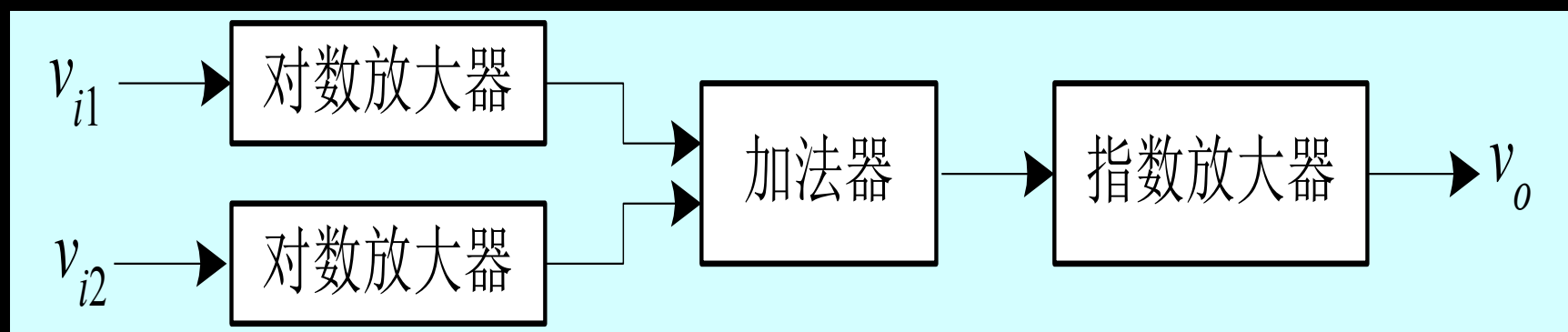


$$v_o = I_Q R \exp\left[\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \frac{v_i}{V_T}\right]$$

利用晶体管 T_1 、 T_2 的对称性，消除 I_S 的影响

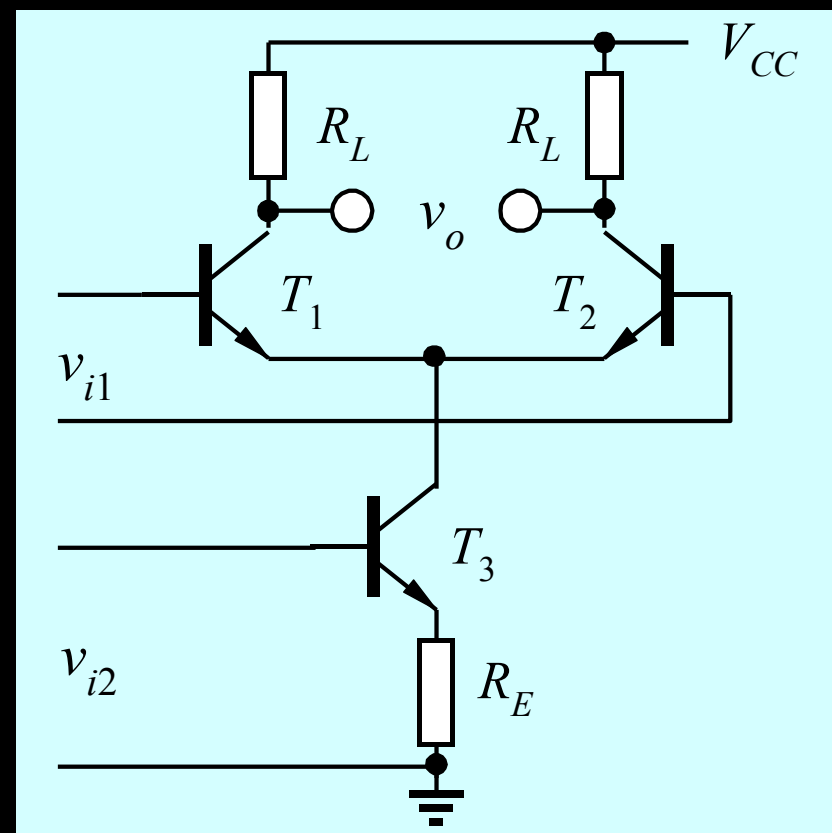
R_1 或 R_f 选用合适的热敏电阻，可以补偿 V_T 的温度系数

用对数与指数放大器构成乘法器



集成乘法器原理

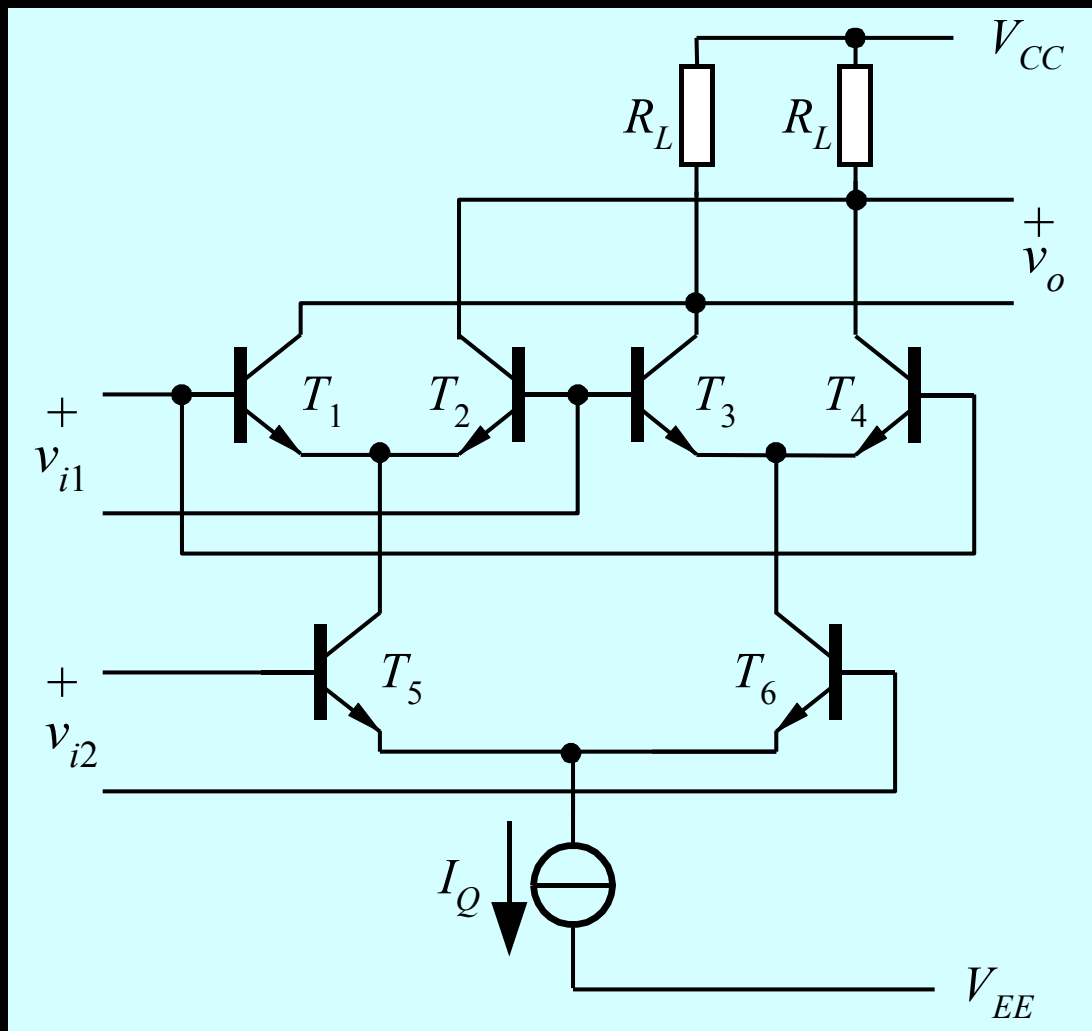
- 在集成电路中，常用的乘法器是利用差分放大器的跨导正比于静态工作点电流的特点构成的乘法器。将两个输入信号中的一个作为差分放大器的差模输入，另一个控制放大器的静态工作点，则可以实现两个信号的相乘。



Gilbert乘法器

- 实际电路中考
虑了利用对称
晶体管的温度
补偿等性质，
使得电路特性
更为理想

$$v_o = \frac{I_Q R_L}{4V_T^2} \cdot v_{i1} \cdot v_{i2}$$



有源滤波器

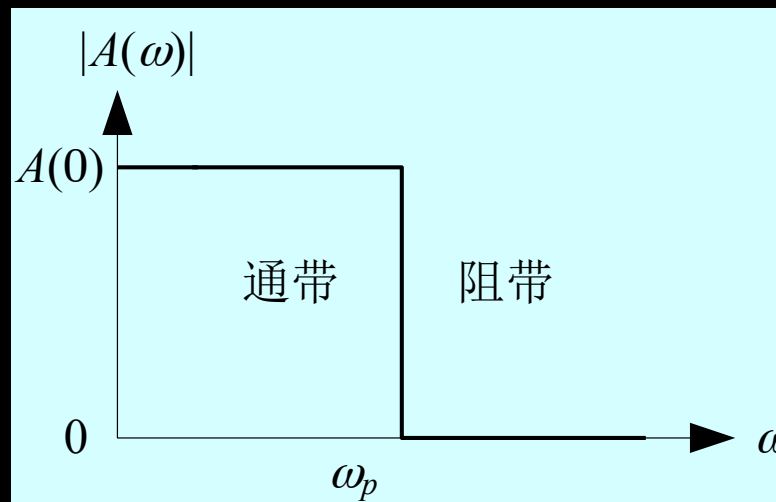
有源滤波器的分类 有源滤波器电路的分析

有源滤波器概述

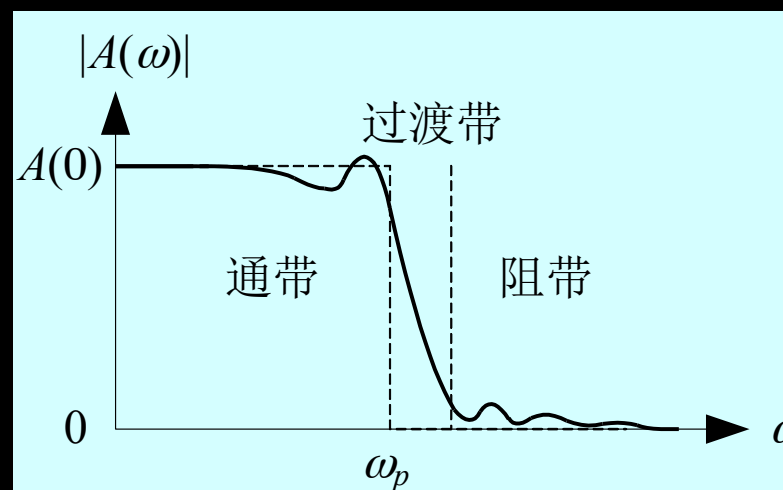
- 作用：从输入信号中选取有用的频率成分，剔除不需要的频率成分
- 从滤波器取舍信号的频率范围分类：
 - 低通滤波器 (LPF)、高通滤波器 (HPF)
 - 带通滤波器 (BPF)、带阻滤波器 (BEF)
 - 全通滤波器 (APF)
- 从通带与阻带的特性分类：
 - 巴特沃斯型
 - 契比雪夫型
 - 椭圆型

低通滤波器的幅频特性

■ 理想的低通特性

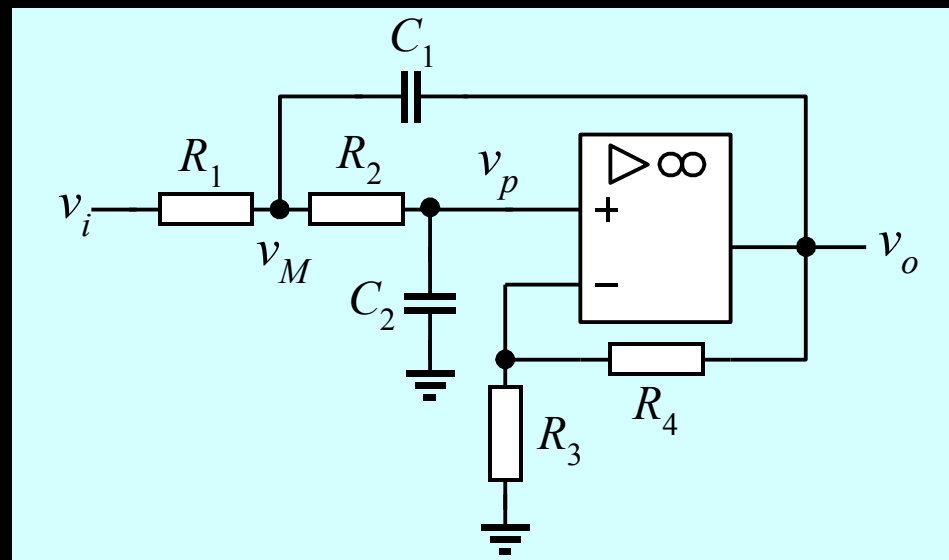


■ 实际的低通特性



有源低通滤波器的例子

- 此电路可以看成是一个由 R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 构成的滤波网络加上一个同相放大器构成



$$\begin{cases} \frac{v_i - v_M}{R_1} + \frac{v_p - v_M}{R_2} + sC_1(v_o - v_M) = 0 \\ \frac{v_p - v_M}{R_2} + sC_2 v_p = 0 \end{cases}$$

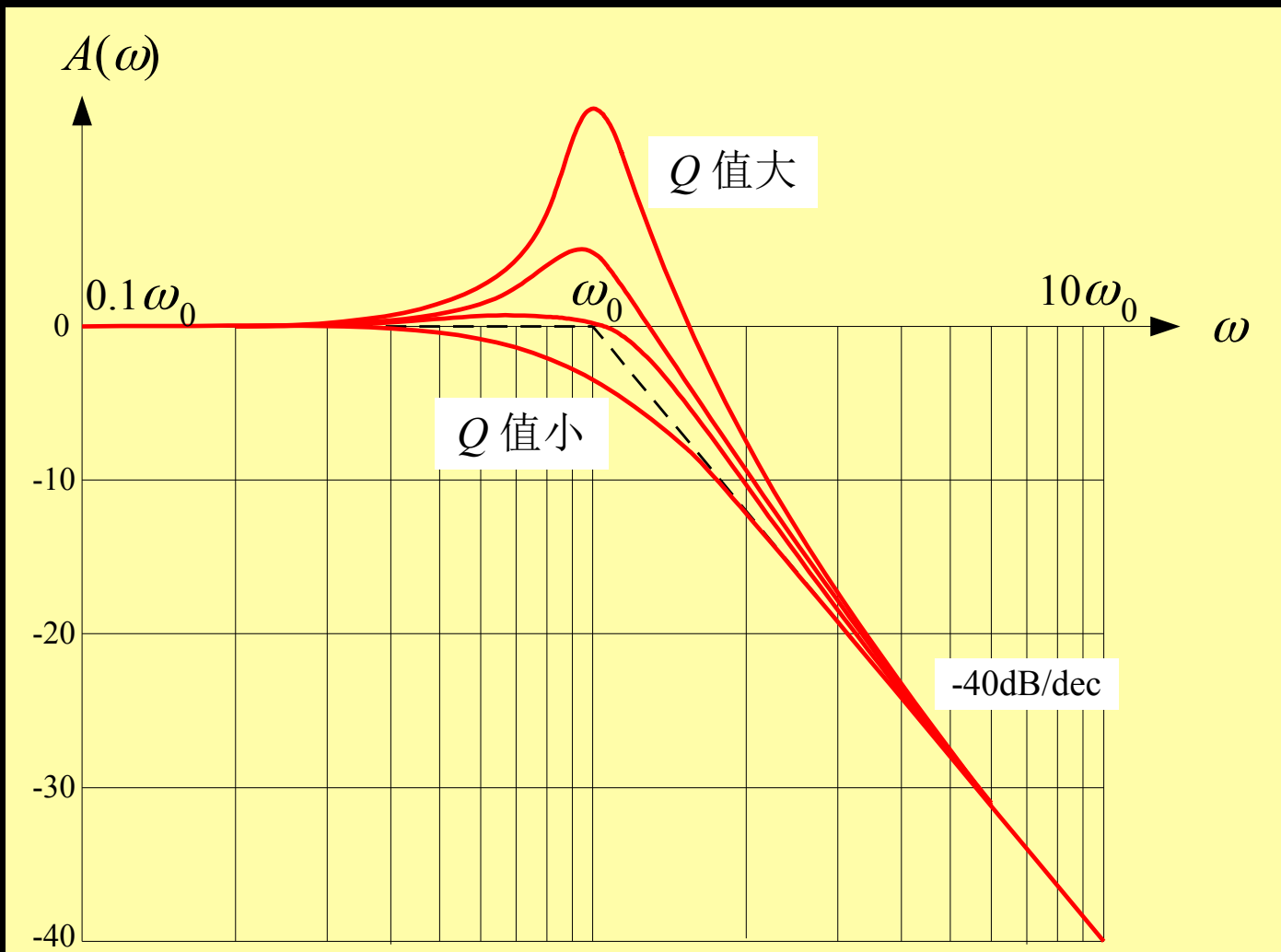
- 将上述方程加上条件 $v_o = A_{v0} v_p$ ，其中 $A_{v0} = 1 + \frac{R_4}{R_3}$ 是同相放大器的放大倍数，可以解得此电路的电压传递函数为

$$H(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{A_{v0}}{1 + s[R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 - A_v R_1 C_1] + s^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$= A_{v0} \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}$$

- 其中 $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ ， $Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 - A_{v0} R_1 C_1}$

■ 幅频特性



- 若令此电路中 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 则有

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$
$$Q = \frac{1}{3 - A_{v0}}$$

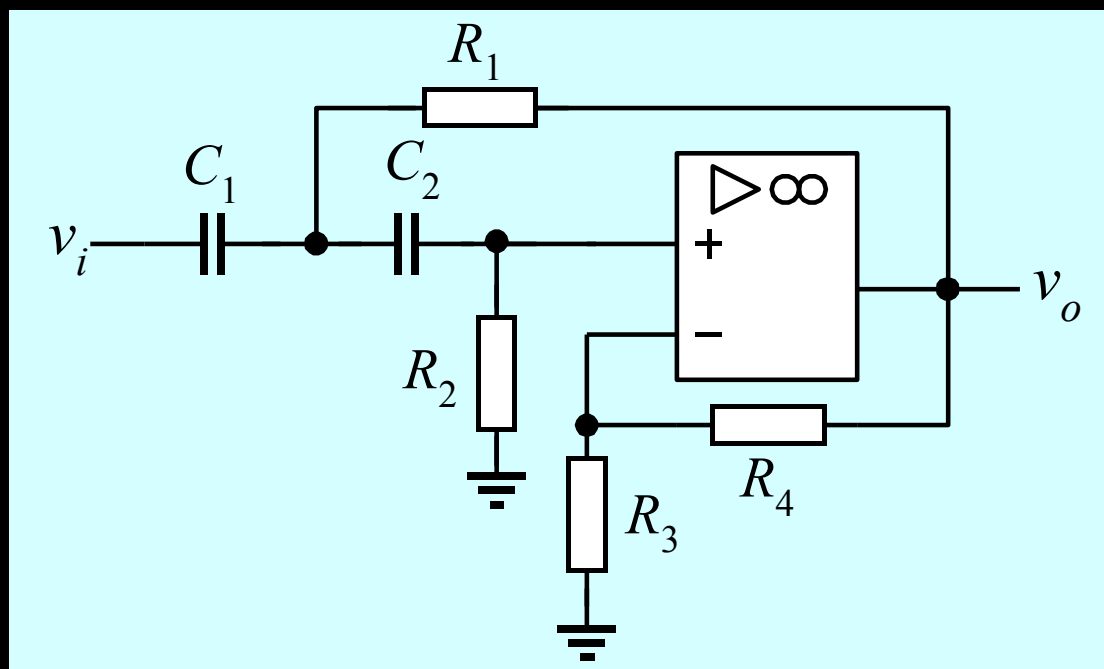
- 由于在二阶系统中 Q 值不能为无穷大, 否则系统将振荡, 所以在此条件下, 该电路中同相放大器的放大倍数必须小于3

有源滤波器的一般分析过程

- 将电路元件全部用复阻抗表示，采用虚短路虚开路的原则，写出系统的节点方程
- 解方程，得到电路在复频域的电压传递函数
- 将复频域的电压传递函数转换到频域，就是电路的频率特性表达式，据此分析电路的频率特性

有源高通滤波器的例子

■ 典型电路



■ 电压传递函数

$$A_v(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = A_{v0} \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

其中

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$A_{v0} = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 - A_{v0} R_2 C_2}$$

- 令此电路中 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 则有

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{v0}}$$

高通滤波器与低通滤波器的对偶性

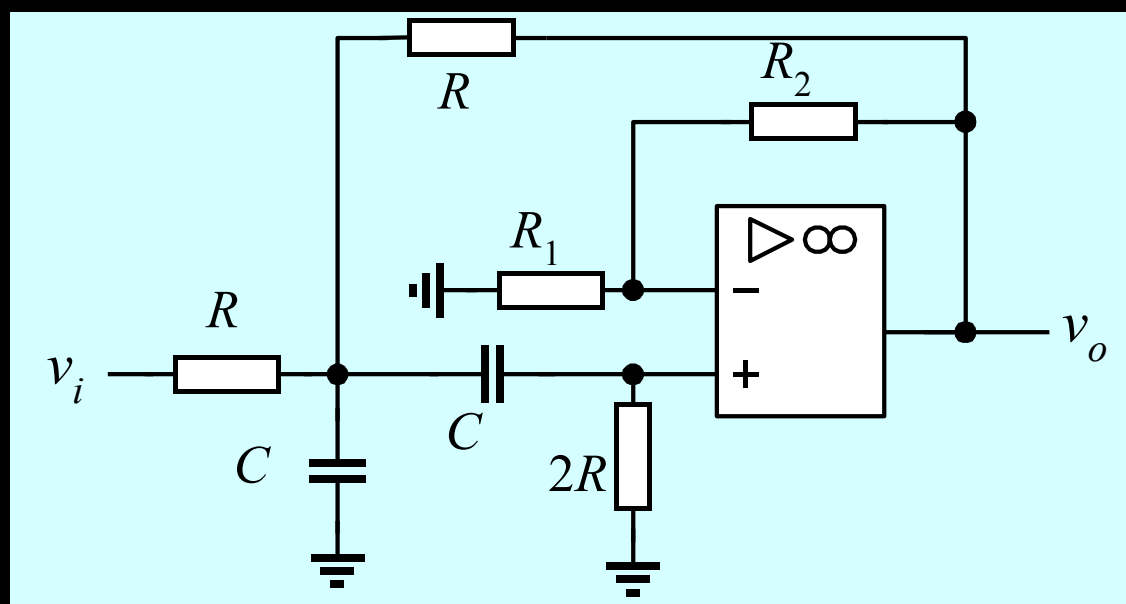
- 高通滤波器与低通滤波器具有对偶性：
将一个低通滤波器的滤波网络中的电阻与电容互换，则该滤波器就成为高通滤波器，反之亦然

有源带通滤波器

- 带通滤波器可以用两个有源滤波器串联实现，也可以在一个运放中实现
- 两个有源滤波器串联实现时，选择高通滤波器的截止频率为 f_L ，低通滤波器的截止频率为 f_H ，两个滤波器的通带有交叠，即 $f_H > f_L$
- 最后输出的通带范围就是两个滤波器通带的交叠部分，即 $f_L \sim f_H$

有源带通滤波器的例子

- 采用单个运放实现的典型电路如图，它的无源滤波网络可以看成是一个低通和一个高通的串联



■ 电压传递函数

$$A_v(s) = A_{v0} \frac{s\omega_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

其中

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{RC}}$$

$$A_{v0} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{v0}}$$

■ 通带放大倍数

$$A_v = QA_{v0}$$

■ 两个截止频率点

$$\omega_L = \frac{1}{2}[\sqrt{(3 - A_v)^2 + 4} - (3 - A_v)]\omega_0$$

$$\omega_H = \frac{1}{2}[\sqrt{(3 - A_v)^2 + 4} + (3 - A_v)]\omega_0$$

■ 通频带

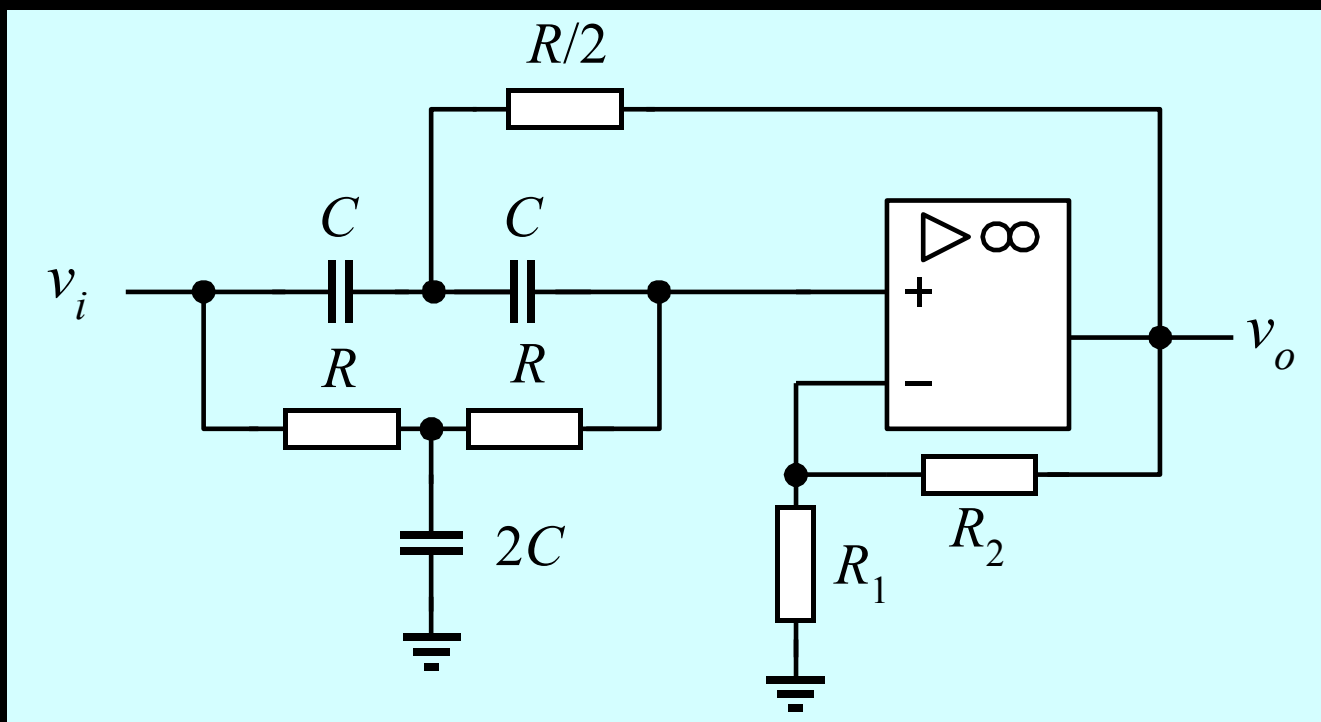
$$BW = \frac{(\omega_H - \omega_L)}{2\pi} = (3 - A_v) \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega_0}{2\pi}$$

有源带阻滤波器

- 带阻滤波器可以用两个有源滤波器并联实现，也可以用一个运放实现
- 两个有源滤波器并联实现的做法与带通滤波器类似，选择两个滤波器的阻带有交叠，最后实现的阻带范围就是两个滤波器阻带的交叠部分

有源带阻滤波器的例子

- 一种常用的单运放带阻滤波器如图，它的无源滤波网络可以看成是一个低通和一个高通的并联



■ 电压传递函数

$$A_v(s) = A_v \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

其中

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{RC}}$$

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Q = \frac{1}{2(2 - A_v)}$$

■ 上下截止频率

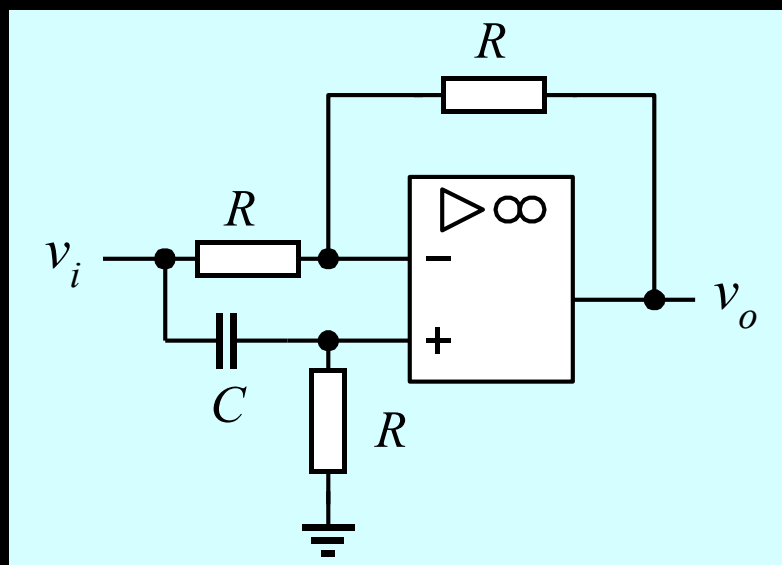
$$\omega_L = [\sqrt{(2 - A_v)^2 + 1} - (2 - A_v)]\omega_0$$
$$\omega_H = [\sqrt{(2 - A_v)^2 + 1} + (2 - A_v)]\omega_0$$

■ 阻带宽度

$$BW = \frac{(\omega_H - \omega_L)}{2\pi} = 2(2 - A_v) \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega_0}{2\pi}$$

有源全通滤波器的例子

- 全通滤波器的特性是：对所有频率的信号，其幅频特性为一直线，而其相频特性在特定频率处发生转折
- 一个全通滤波器的例子



■ 频率特性

$$A_v(j\omega) = -\frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} = -\frac{1 - j\omega / \omega_0}{1 + j\omega / \omega_0}$$

其中

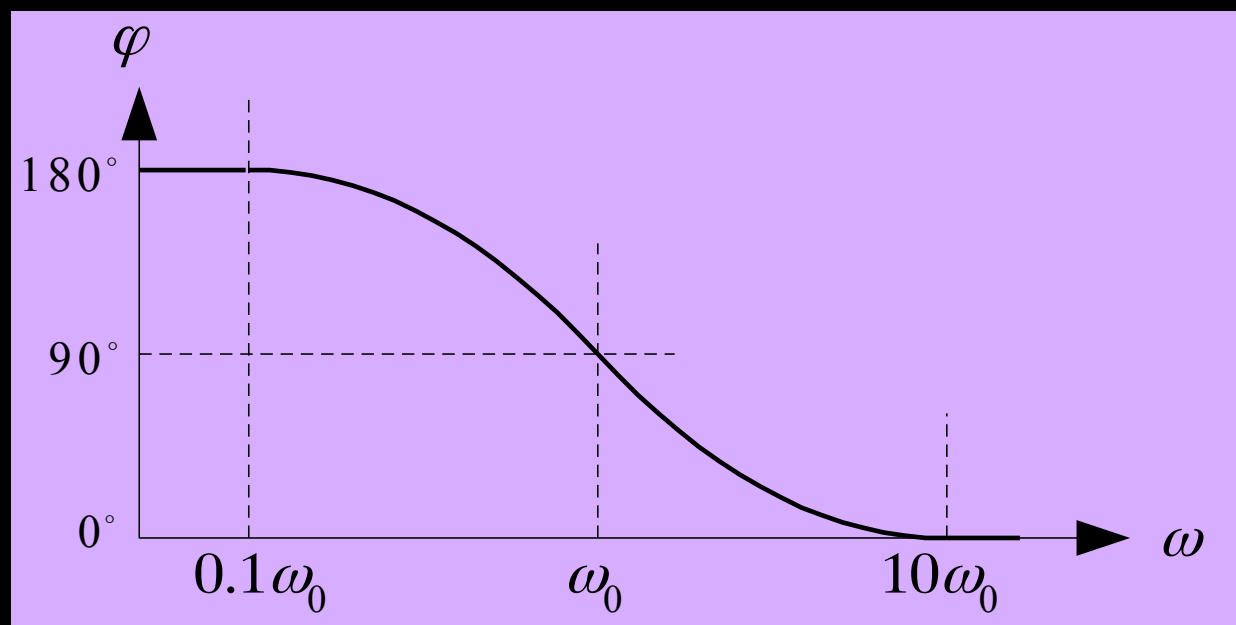
$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

■ 将上式写成模与幅角形式：

$$|A_v| = 1$$

$$\varphi = 180^\circ - 2\text{tg}^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}$$

■ 相频特性



- 将此电路中运放同相端的 RC 交换，也可以形成一个全通滤波器，但是它的相频特性将与该全通滤波器电路的不同

用集成运放构成的 其他信号处理电路

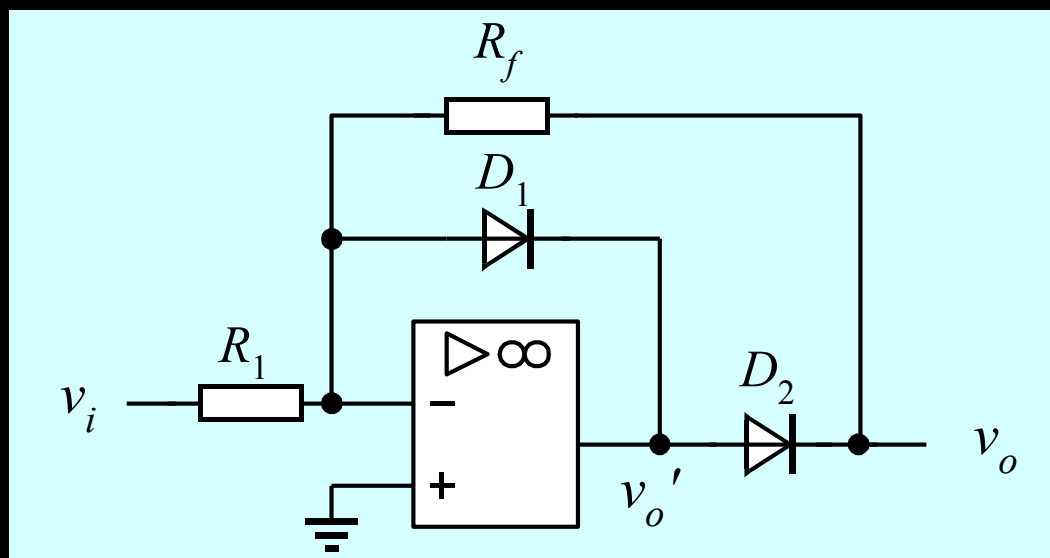
精密整流电路

电流源电路

仪表放大器

精密整流电路

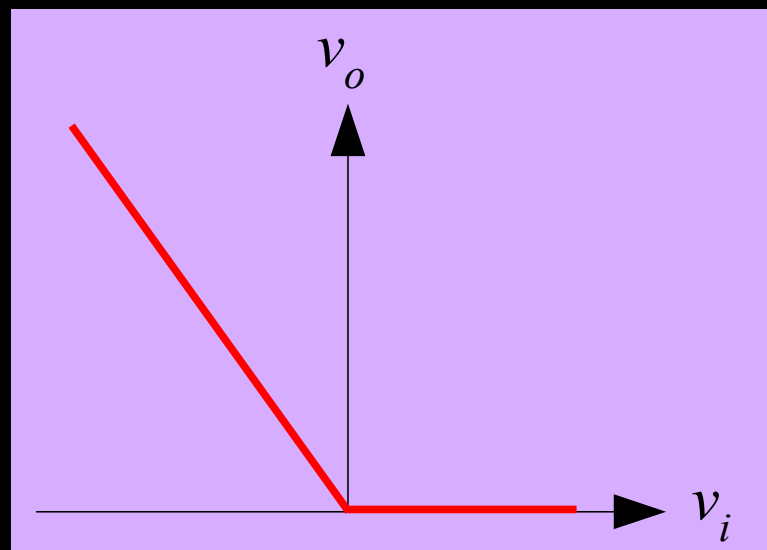
- 能够作为信号处理电路应用的整流电路称为精密整流电路
- 利用运放的高增益特性，将二极管置于深度负反馈电路的环内，从而消除二极管正向压降的影响
- 具体电路：



- 当输入信号为正信号时，运放的输出 v_o' 为负，所以二极管 D_1 导通， D_2 截止。由于在反馈电阻 R_f 上无电流，所以输出 v_o' 等于虚地电压0。
- 当输入信号为负信号时，运放的输出 v_o' 为正，所以二极管 D_1 截止， D_2 导通。此时电路等效于一个反相放大器。电路的输出符合深度负反馈的关系，即

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i$$

■ 传输特性



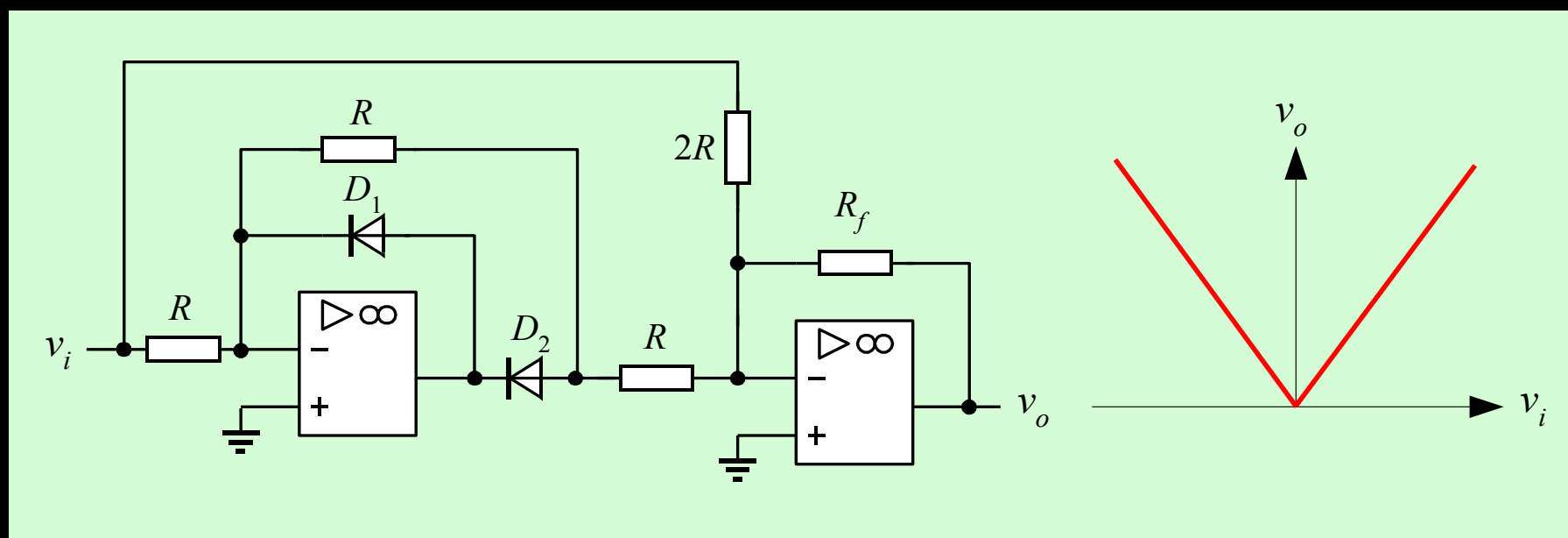
- $v_i > 0$ 时的输出始终为0， $v_i < 0$ 时的输出符合线性关系。

精密整流电路的作用

- 精密整流电路除了它的整流功能外，在信号处理电路中还经常用它构成精密转折点电路。由于精密转折点电路可以设定转折点的位置（电压）以及转折后的斜率（增益），所以可以用若干个精密转折点电路构成折线近似的函数信号。

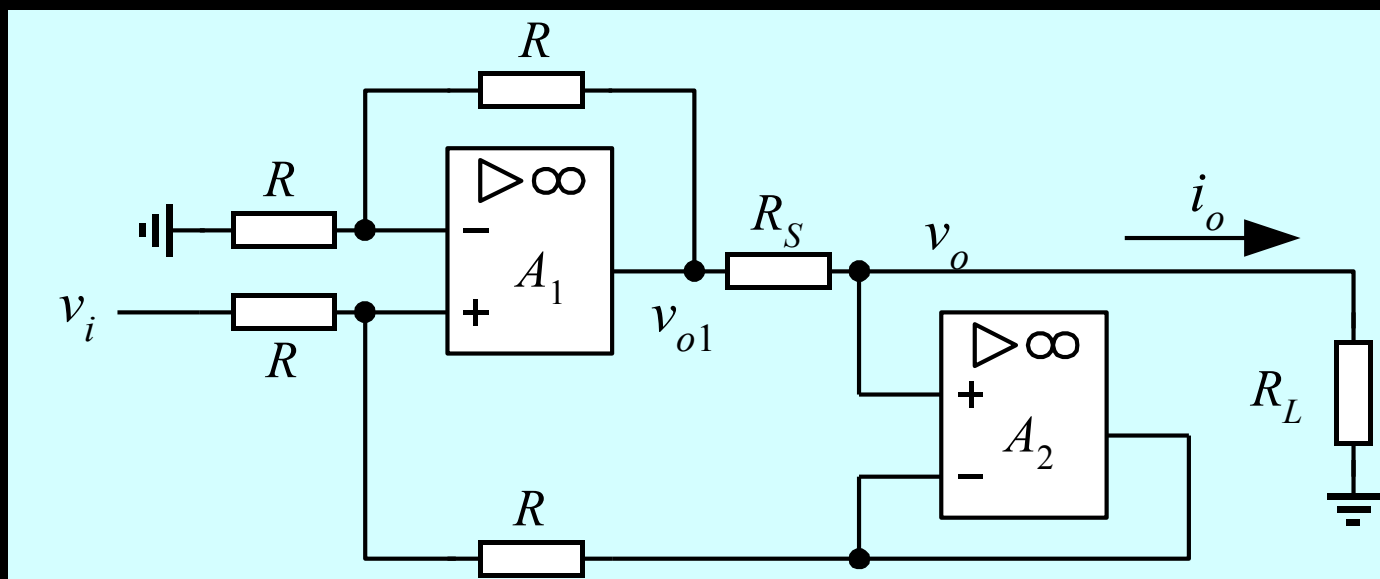
全波精密整流电路

- 利用以上精密整流电路和加法器可以组成绝对值电路（全波精密整流电路）。以下分别是这个电路以及它的电压传输特性。



电流源电路

- 利用运放的高增益特性，可以构成多种形式的电流源电路
- 典型电流源电路



- 由一个同相加法器和一个跟随器构成。加法器的输入电压为输入 v_i 和跟随器输出的 v_o ，其输出为

$$v_{o1} = \left(\frac{1}{2}v_i + \frac{1}{2}v_o\right)\left(1 + \frac{R}{R}\right) = v_i + v_o$$

- 流过负载的电流全部流过取样电阻 R_S ，所以输出电流为

$$i_o = \frac{v_{o1} - v_o}{R_S}$$

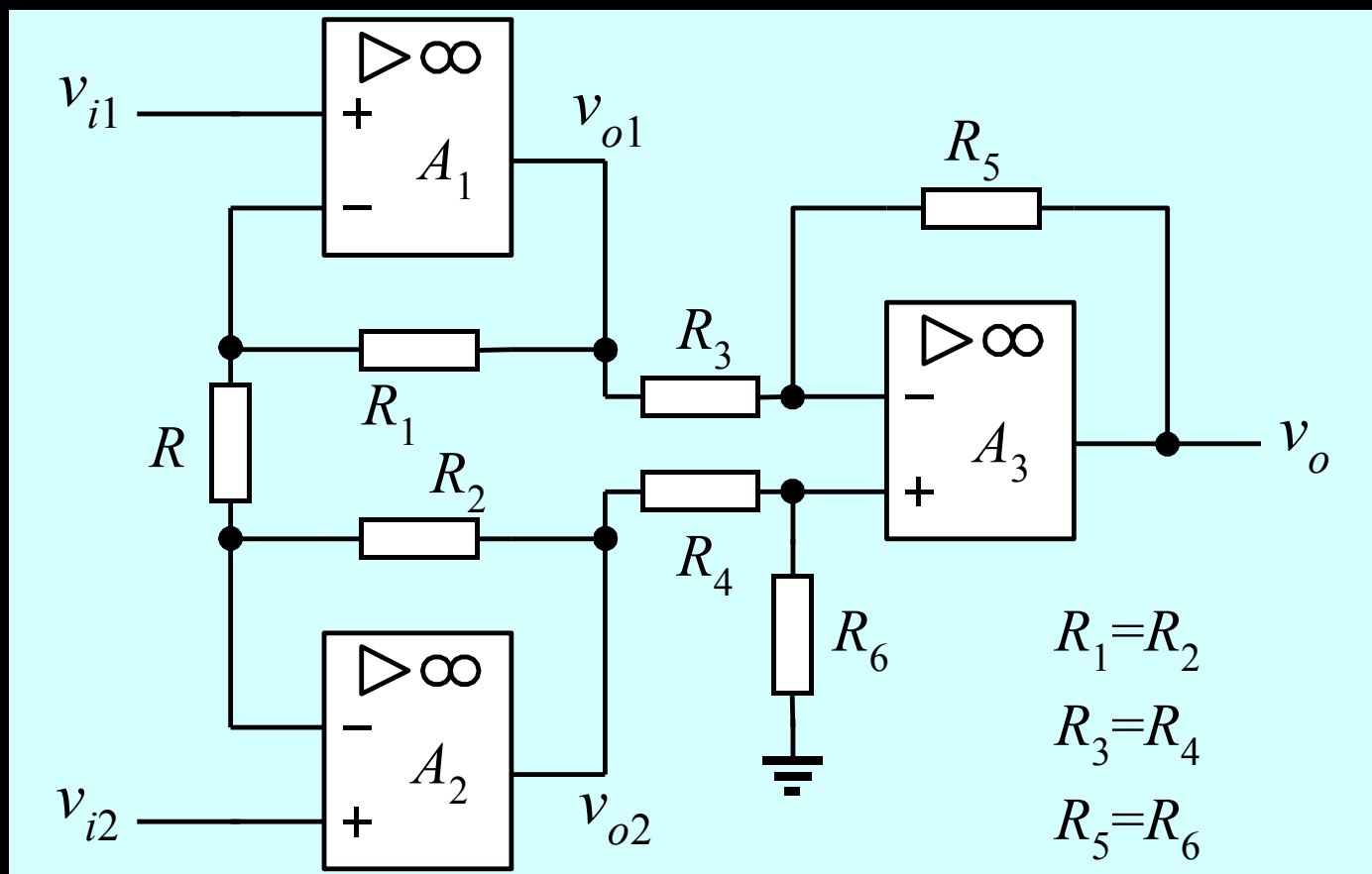
- 联立上面两式，得到输出电流

$$i_o = \frac{v_i}{R_S}$$

电流源电路的特点

- 电路的输出电流取决于输入电压，也有将它称为电压-电流转换电路的
- 这类电路的构成特点是：通过一个取样电阻，将流过负载的电流转换成电压，然后利用集成运放构成的运算电路，将此电流与输入电压构成某种相关关系，最后使得输出电流成为输入电压的函数

仪表放大器



仪表放大器的差模放大性能

- 由于电路的对称性，可以认为在电阻 R 两端的电压变化大小相等方向相反，所以可以将电阻 R 分成上下两半，每半个的阻值为 $R/2$ ，而这个电阻的中点接地

- 运放 A_1 、 A_2 都构成了同相放大器，运放 A_3 构成差动放大电路

- 输出

$$v_o = -\frac{R_5}{R_3} \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) (v_{i1} - v_{i2})$$

- 其中由 A_1 、 A_2 组成的放大器对于差模信号具有的增益为

$$\frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{i1} - v_{i2}} = 1 + \frac{2R_1}{R}$$

仪表放大器的共模放大性能

- 假定电路完全对称，则电阻 R 两端电压相等，在电阻 R 中无电流，可以认为电阻 R 开路
- 运放 A_1 、 A_2 都构成了电压跟随器，它们的共模增益为1，即 A_1 、 A_2 对于共模信号没有放大作用
- 由于 A_1 、 A_2 的输出就是差动放大器 A_3 的输入，所以在共模输入时，整个电路的共模增益就是差动放大器 A_3 的共模增益

仪表放大器的特点

- 通过改变电阻 R 可以改变此放大器的差模增益，并且不会影响电路的对称性
- 相对于一般的差动放大器，此电路的差模增益增加了 $(1 + \frac{2R_1}{R})$ 倍，而共模增益没有增加，所以共模抑制比提高了 $(1 + \frac{2R_1}{R})$ 倍
- 以上结论的前提是电路完全对称，所以在实际的仪表放大器电路中，想要得到高的共模抑制比，必须注意电路的对称性，包括运放 A_1 、 A_2 的对称以及电阻的对称

复旦大学电子工程系 陈光梦



第6章结束

