

# 第14章 运算放大器

运算放大器的理想模型

运算放大器应用电路分析

运算放大器的大信号分析

典型运放内部电路结构

## 14.1 运算放大器的理想模型

### 14.1.1 运算放大器的电路符号与器件结构

#### 一、概述

运算放大器（简称运放）是一种有着十分广泛用途的电子器件。最早开始应用于1940年，1960年后，随着集成电路技术的发展，运放逐步集成化，大大降低了成本，获得了越来越广泛的应用。

## 二、应用

① 信号的运算电路



比例、加、减、对数、指数、积分、微分等运算。

② 信号的处理电路



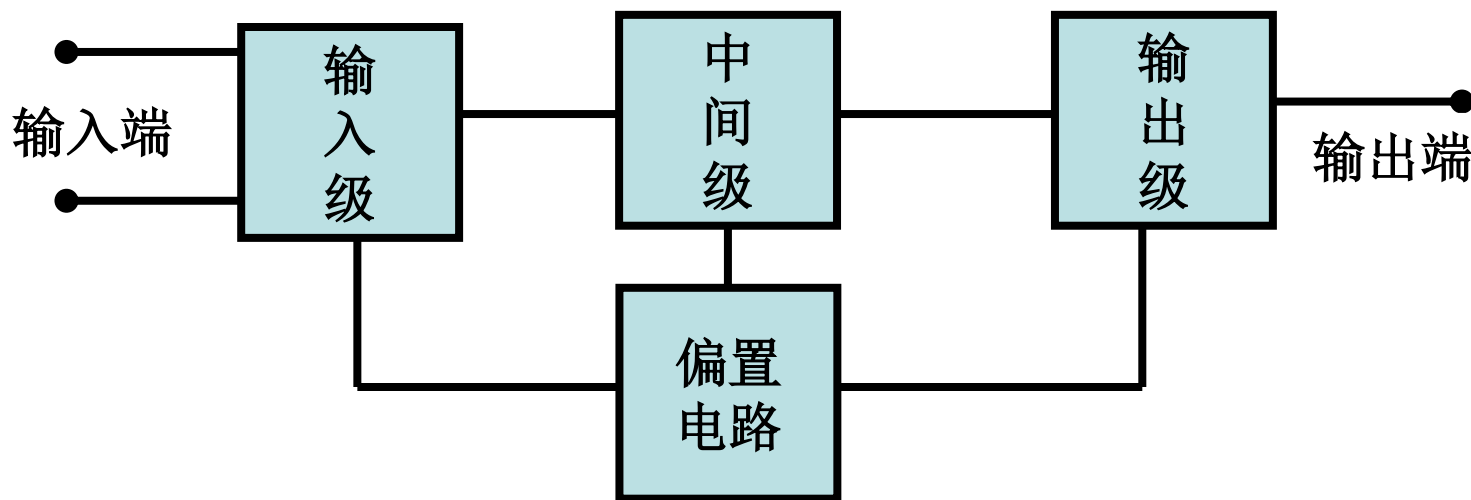
有源滤波器、精密整流电路、电压比较器、采样—保持电路。

③ 信号的发生电路



产生方波、锯齿波等波形

### 三、电路结构及其特性

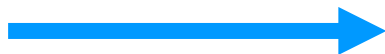


缺点:

① 频带过窄

② 线性范围小

加入负反馈



① 扩展频带

② 减小非线性失真

优点:

① 高增益

② 输入电阻大, 输出电阻小



## 四、符号

8个管脚:

2: 反相输入端

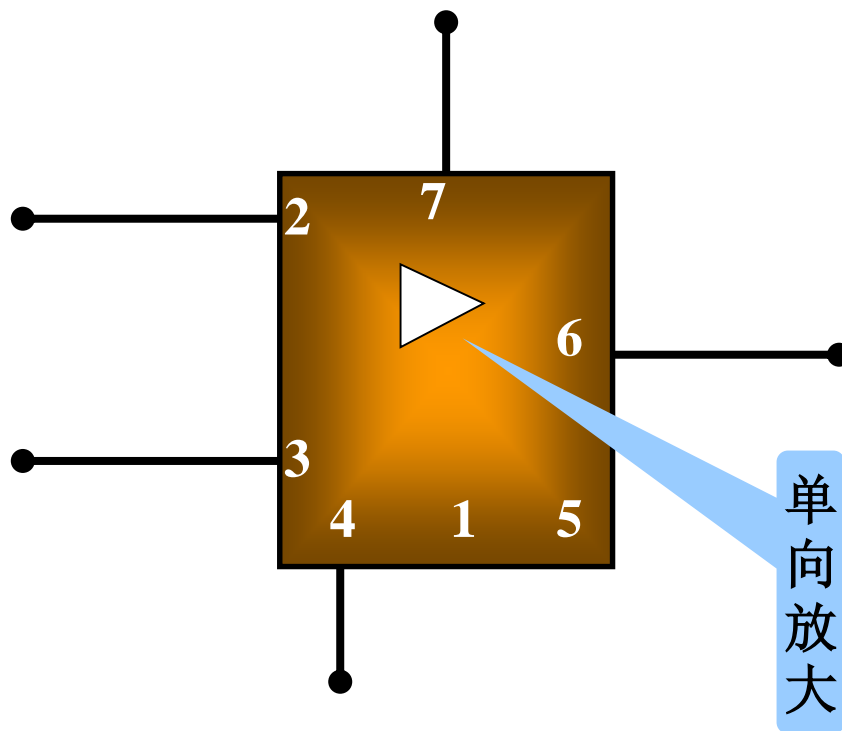
3: 同相输入端

4、7: 电源端

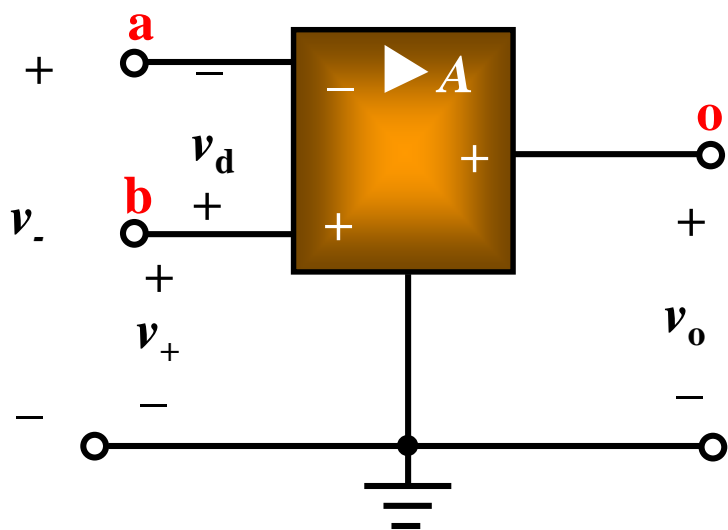
6: 输出端

1、5: 外接调零电位器

8: 空脚



## 五、国家标准电路符号



在电路符号图中一般不画出直流电源端，而只有a, b, o三端和接地端。

**a:** 反相输入端，输入电压  $v_-$

**b:** 同相输入端，输入电压  $v_+$

**o:** 输出端，输出电压  $v_o$

 : 公共端(接地端)

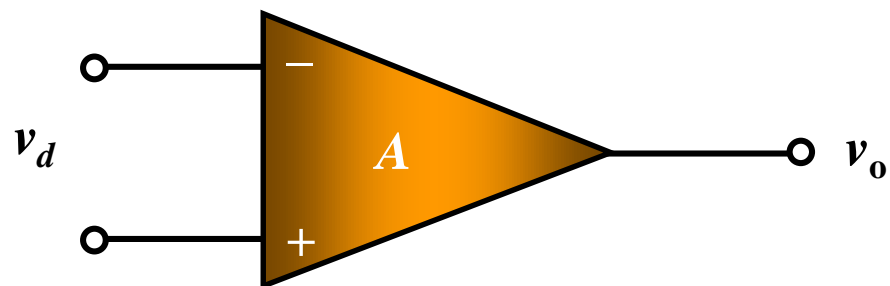
A: 开环电压放大倍数，可达十几万倍。



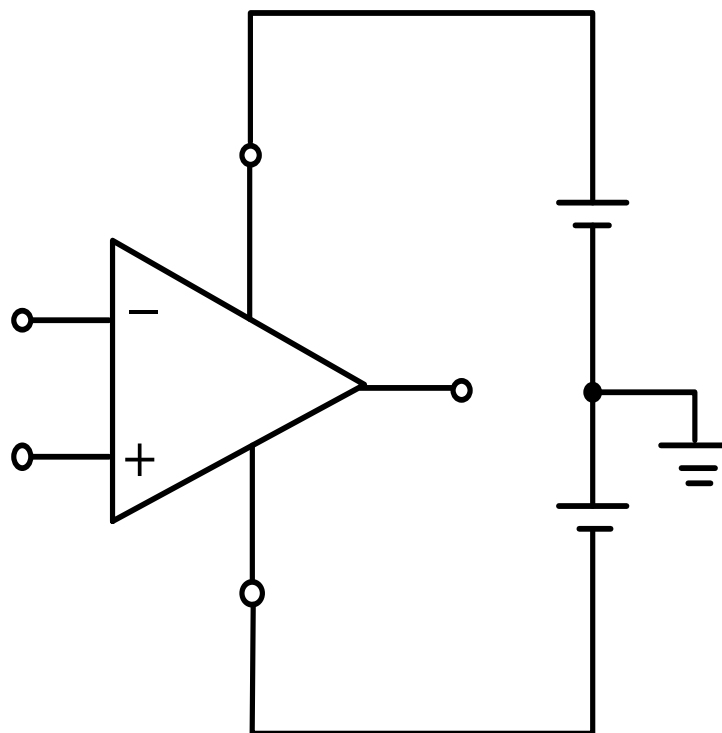
**注意**

图中参考方向表示每一点对地的电压，在接地端未画出时尤需注意。

## 六、简化电路符号



连接了双电源直流供电  
的运算放大器





## 14.1.2 理想运算放大器

(1) 差模增益趋于无穷大 ( $A \rightarrow \infty$ )

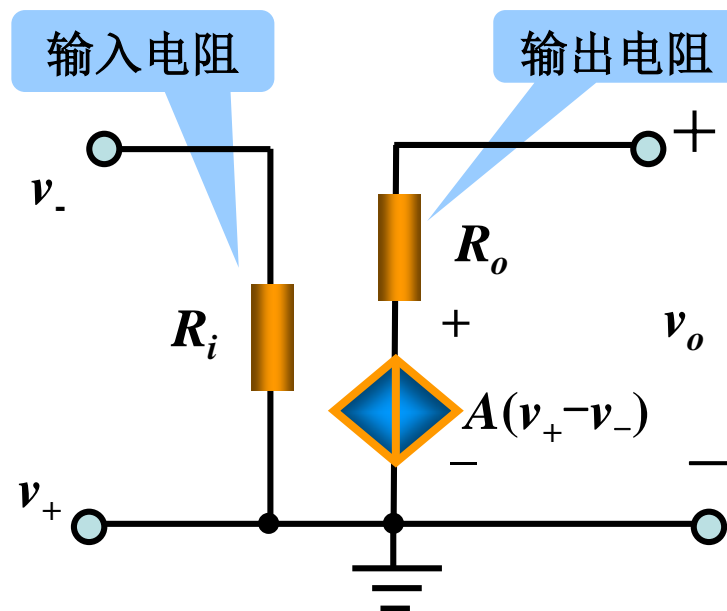
$v_o$  为有限值, 则  $v_+ \rightarrow v_-$ , 两个输入端之间相当于短路(虚短)。

(2) 输入阻抗趋于无穷大 ( $R_i \rightarrow \infty$ )

$i_+ \rightarrow 0, i_- \rightarrow 0$ 。即从输入端看进去, 元件相当于开路(虚断)。

(3) 输出阻抗趋于零 ( $R_o \rightarrow 0$ )

输出电压与负载无关,  $v_o = A(v_+ - v_-)$ 。



电路模型

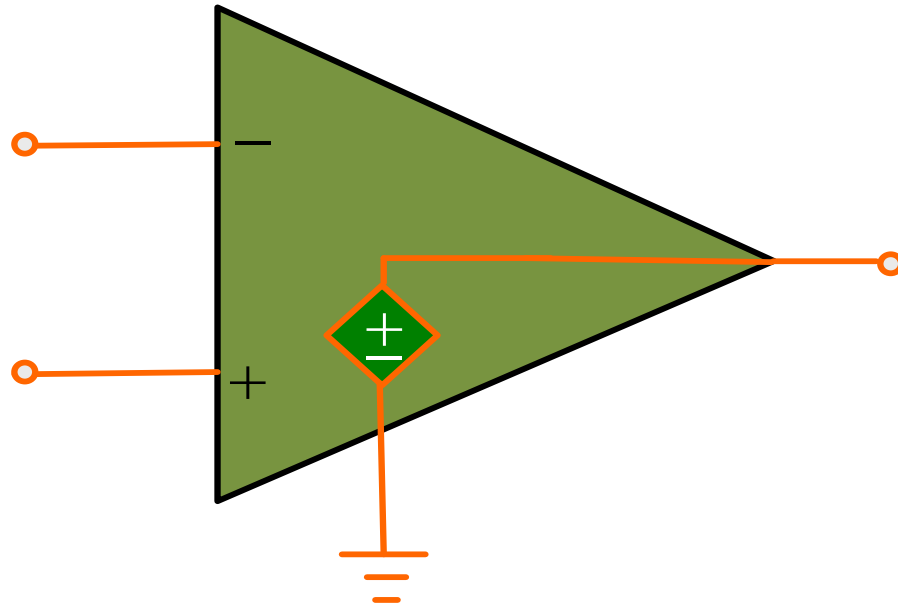
(4) 共模抑制比趋于无穷大 ( $CMRR \rightarrow \infty$ )

$v_o$ 为有限值, 则 $v_+ \rightarrow v_-$ , 两个输入端之间相当于短路(虚短)。

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{cm}} \right| = \left| \frac{\frac{v_o}{v_+ - v_-}}{\frac{v_o}{(v_+ + v_-)/2}} \right| \rightarrow \infty$$

(5) 带宽无穷大

## 理想运算放大器的等效电路

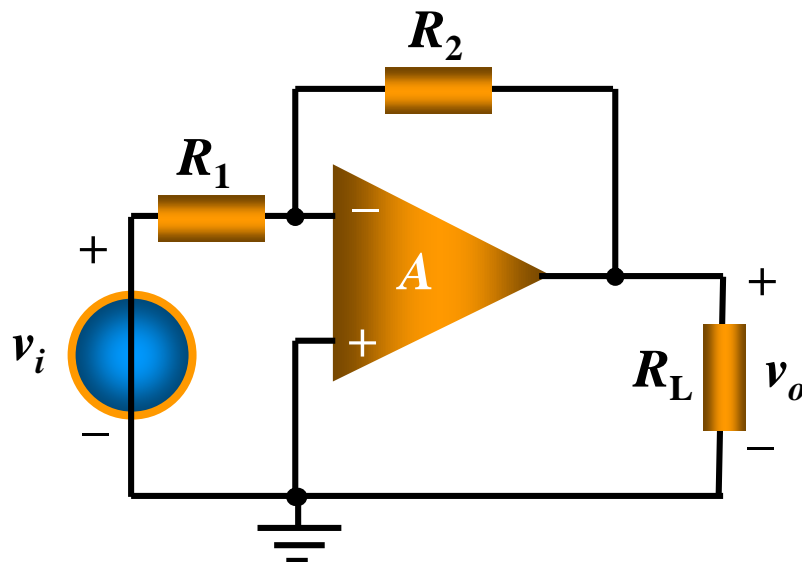


## 14.2 运算放大器基本应用电路的分析

### 14.2.1 反相和同相接法电路的分析

#### 一、运放的反相接法电路及分析

运放开环工作极不稳定，一般外部接若干元件( $R$ 、 $C$ 等)，使其工作在闭环状态。



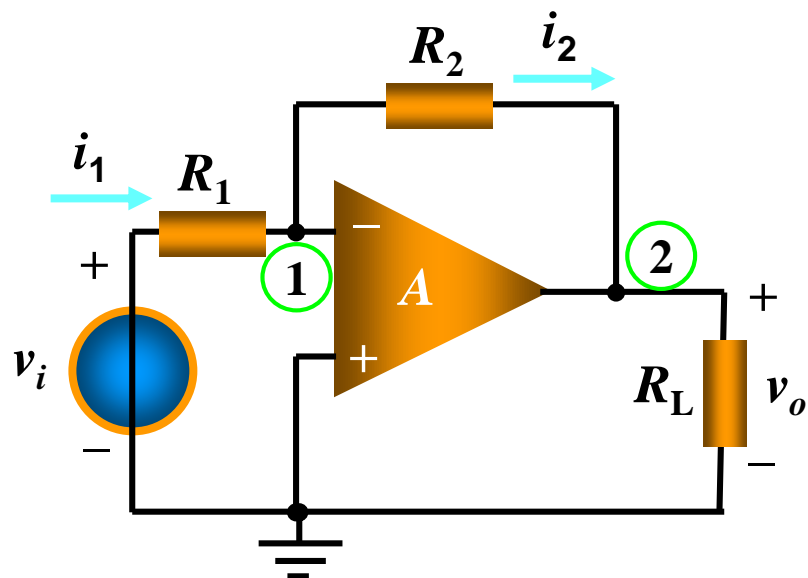
① 根据“虚短”：

$$v_+ = v_- = 0, \quad i_1 = v_i / R_1 \quad i_2 = -v_o / R_2$$

② 根据“虚断”：

$$i_- = 0, \quad i_2 = i_1$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



表明

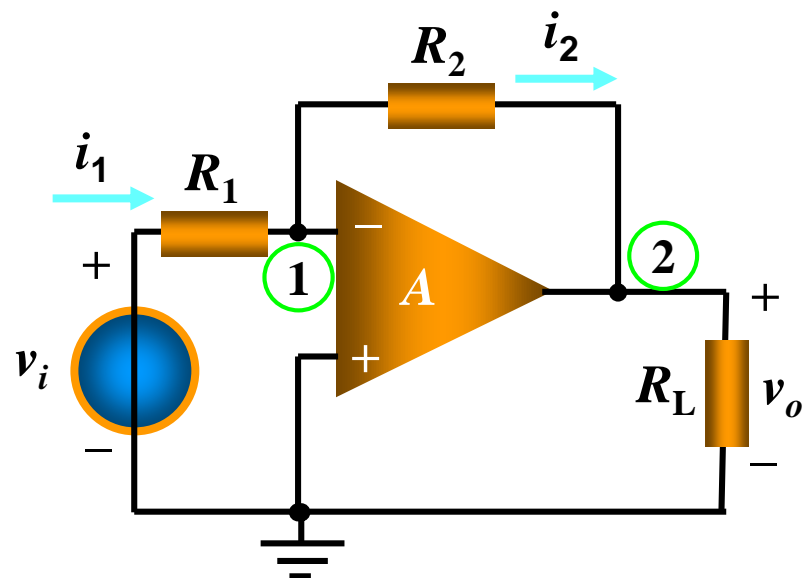
$A_v$  只取决于反馈电阻  $R_2$  与  $R_1$  比值，而与放大器本身的参数无关。  
负号表明  $v_o$  和  $v_i$  总是符号相反 (反相比例器)。

输入电阻

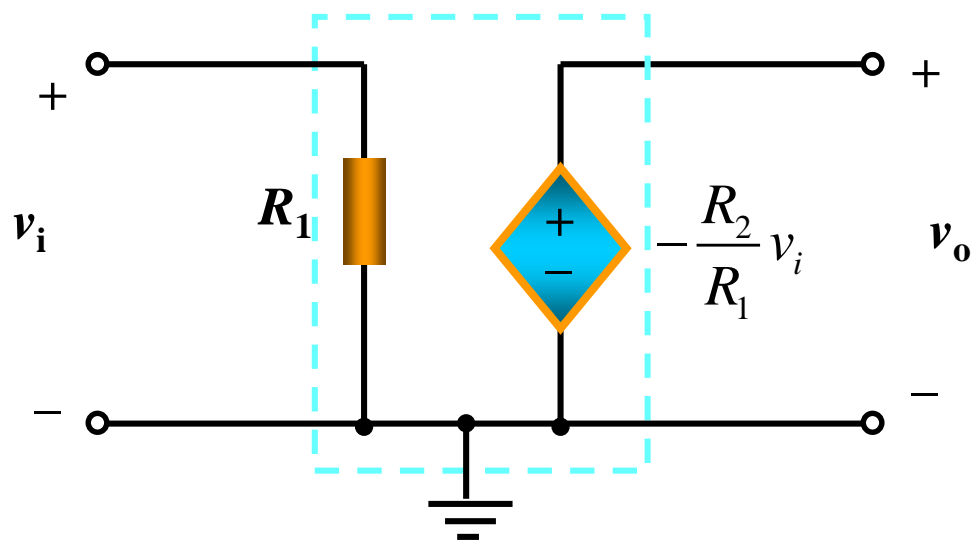
$$R_i = R_1$$

输出电阻

$$R_o = 0$$

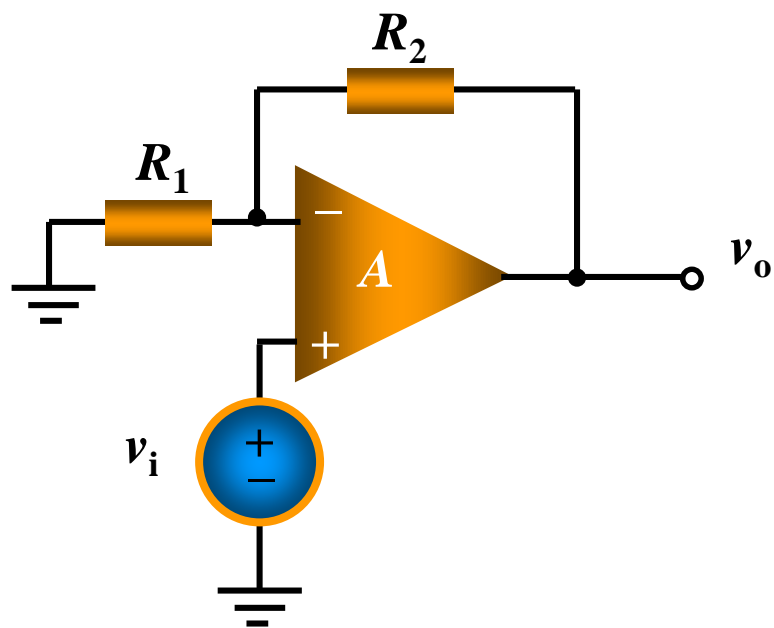


## 反相放大电路的电路模型



## 二、运放的同相接法电路及分析

### 基本电路





① 根据“虚短”：

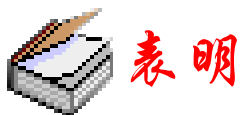
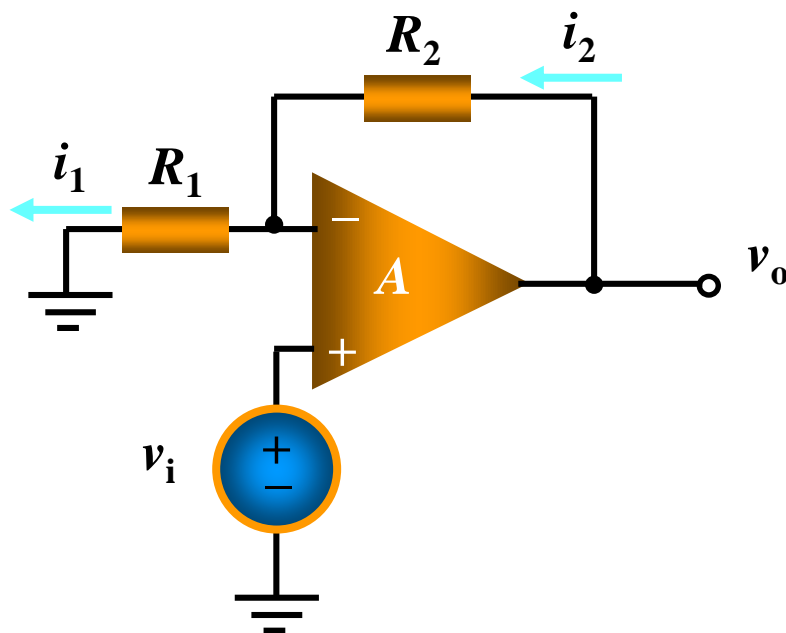
$$v_+ = v_- = v_i, \quad i_1 = v_i / R_1$$

② 根据“虚断”：

$$i_2 = i_1$$

$$v_o = (R_1 + R_2) i_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i$$

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

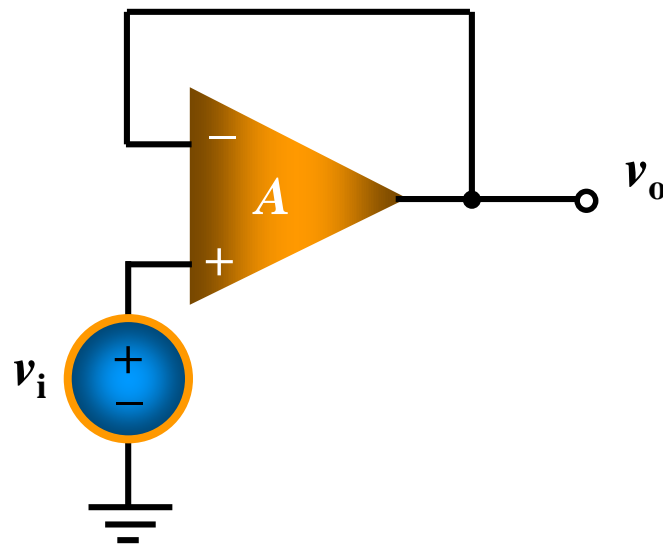


同样， $A_v$  只取决于反馈电阻  $R_2$  与  $R_1$  比值，而与放大器本身的参数无关。

## 特殊情况

$$\left. \begin{array}{l} R_1 \longrightarrow \infty \\ R_2 = 0 \end{array} \right\}$$

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



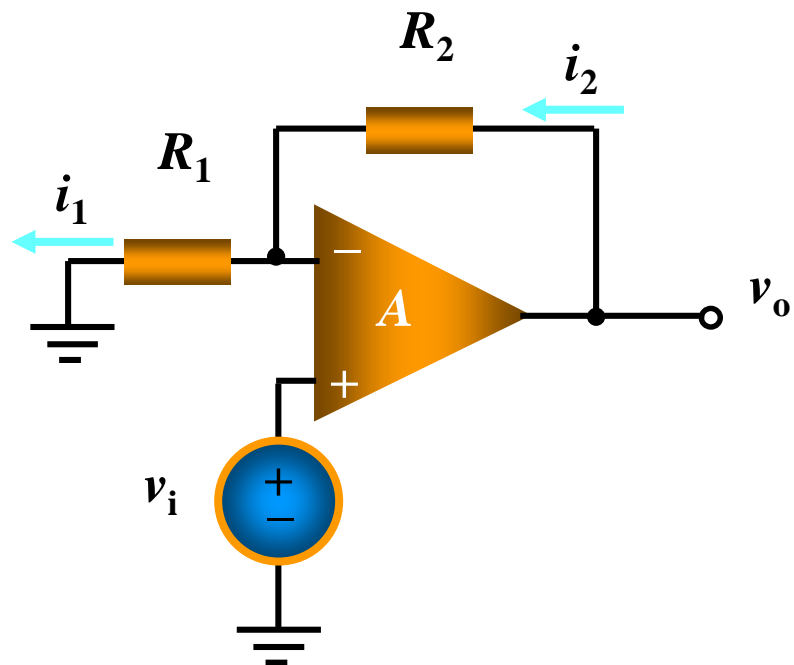
该电路称为**电压跟随器**。

① 输入电阻

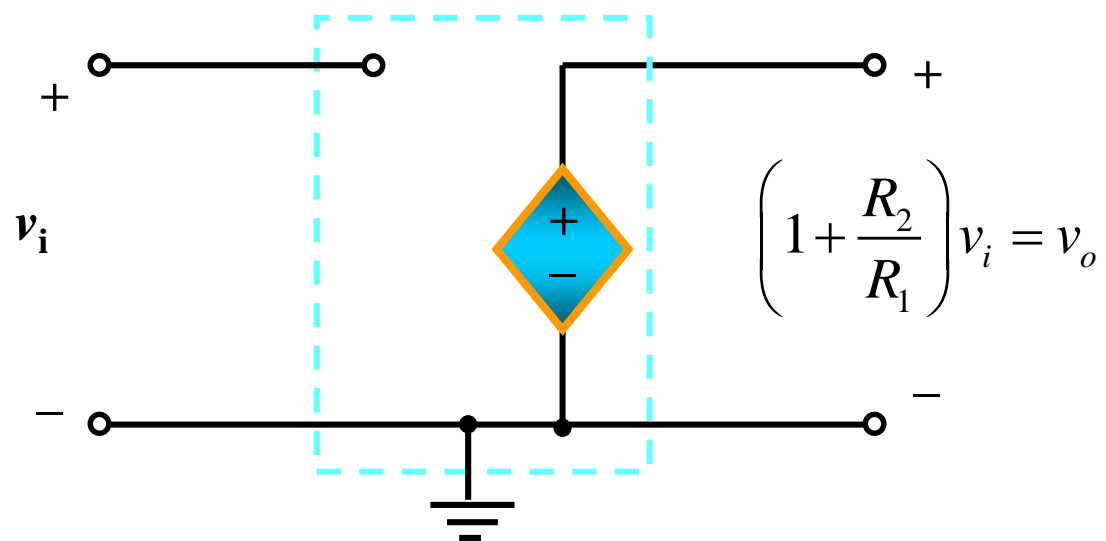
$$R_i = \infty$$

② 输出电阻

$$R_o = 0$$



## 同相放大电路的电路模型



## 运放电路分析方法小结

①根据理想运放的性质，抓住以下两条规则：

(a) 反相端和同相端的输入电流均为零；

[“虚断（路）”]

(b) 对于公共端（地），反相输入端的电压与同相输入端的电压相等。

[“虚短（路）”]

②合理地运用这两条规则，并与结点电压法相结合。

## 14.2.2 常用运算放大器应用电路分析

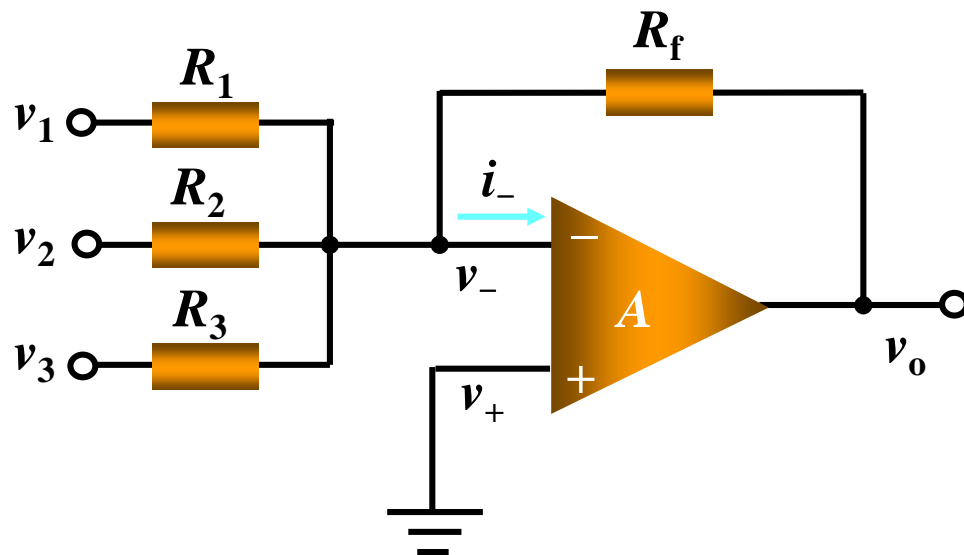
### 一、运算放大器的线性应用

#### 1、加法电路

$$\begin{cases} v_- = v_+ = 0 \\ i_- = 0 \end{cases}$$

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} + \frac{v_o}{R_f} = 0$$

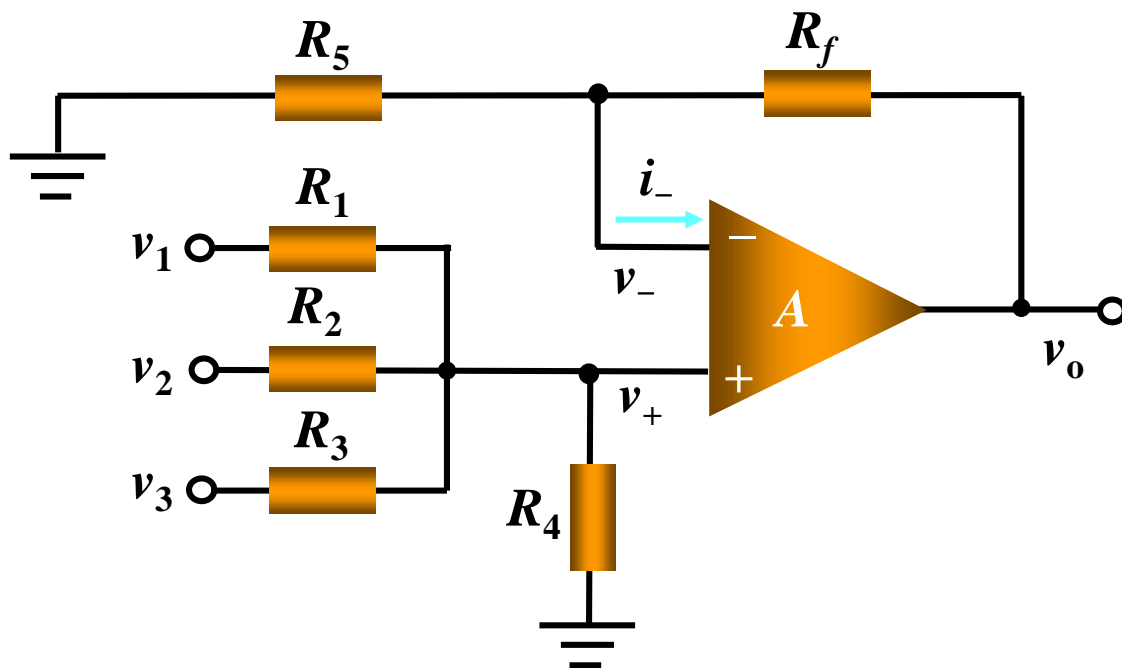
$$\Rightarrow v_o = - \left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 \right)$$



反相加权（或权重）加法器

## 同相加权（或权重）加法器

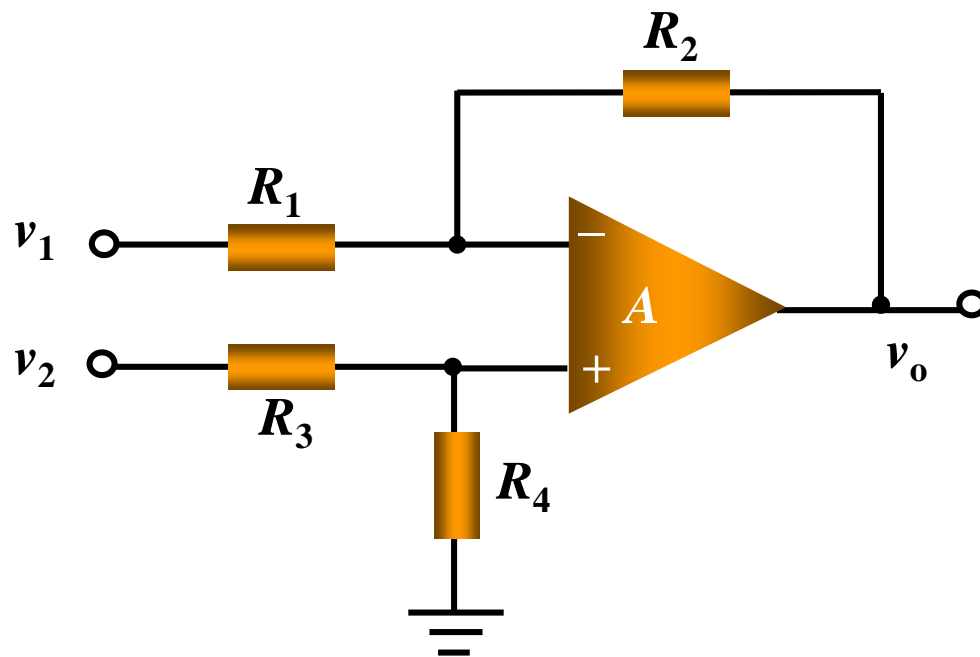
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_5}\right) v_+$$



$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_5}\right) \left( \frac{R_+}{R_1} v_1 + \frac{R_+}{R_2} v_2 + \frac{R_+}{R_3} v_3 \right)$$

$$\frac{1}{R_+} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

## 2、差分放大电路

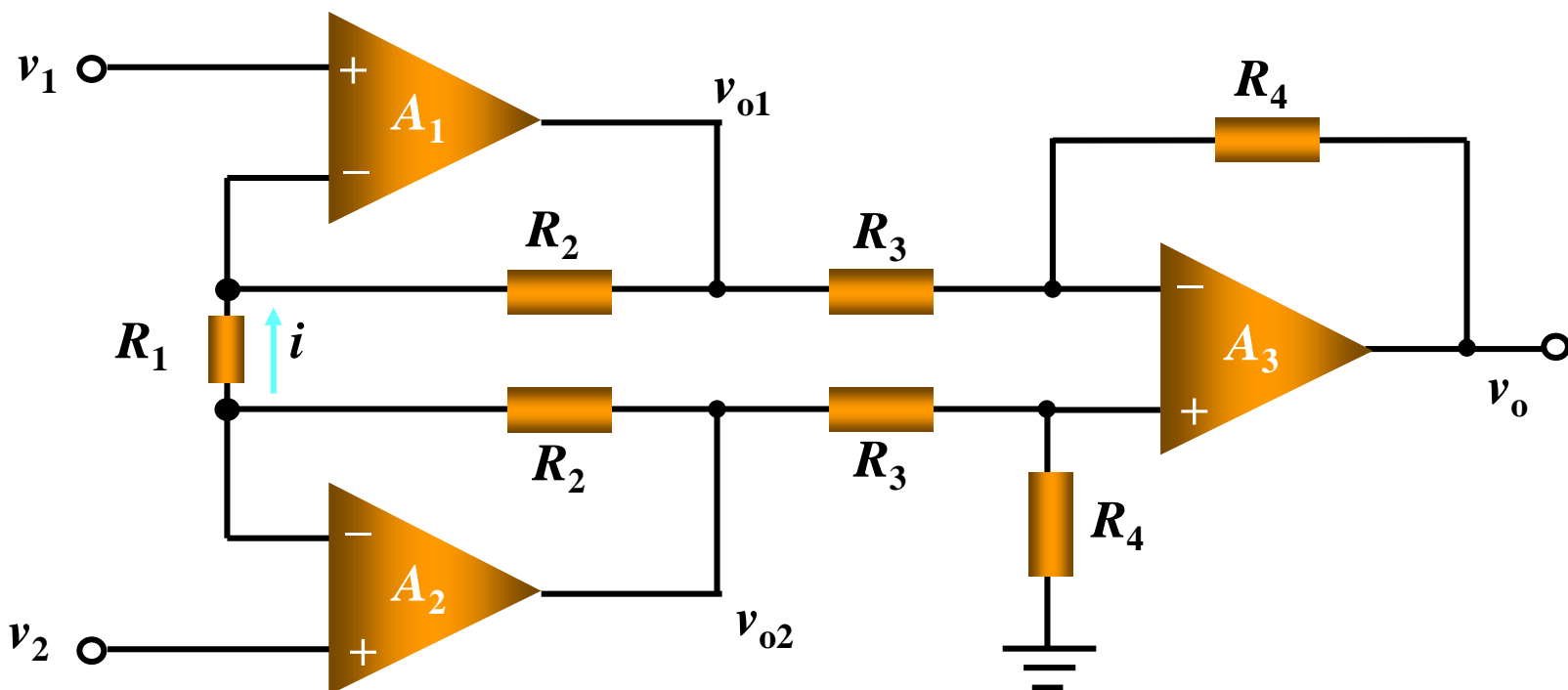


$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

$$\text{若 } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad \longrightarrow \quad v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

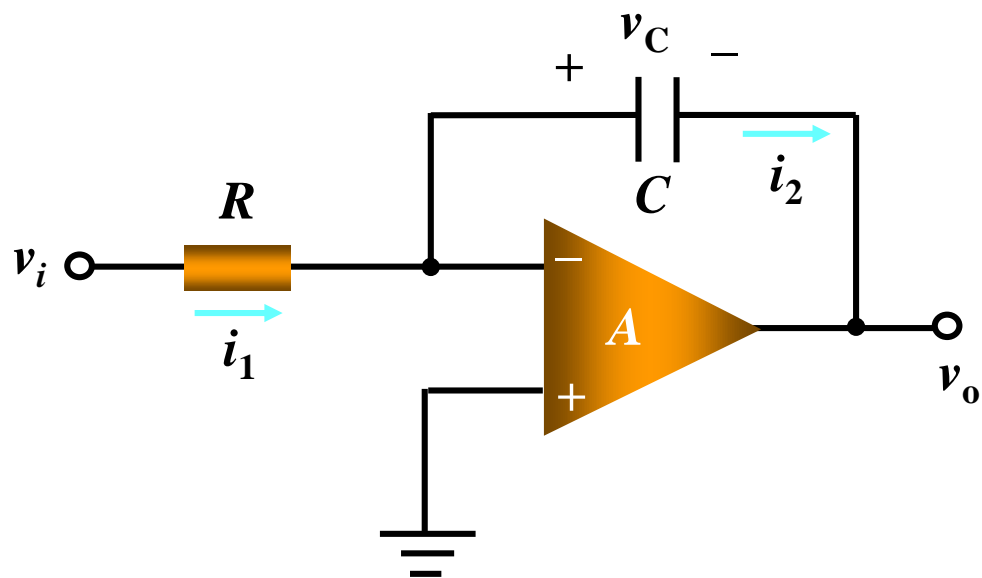


### 3、典型的仪表放大电路



$$\begin{aligned}
 v_{o1} &= v_1 - iR_2 \\
 v_{o2} &= v_2 + iR_2
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad
 v_o = \frac{R_4}{R_3} (v_{o2} - v_{o1}) = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) (v_2 - v_1)$$

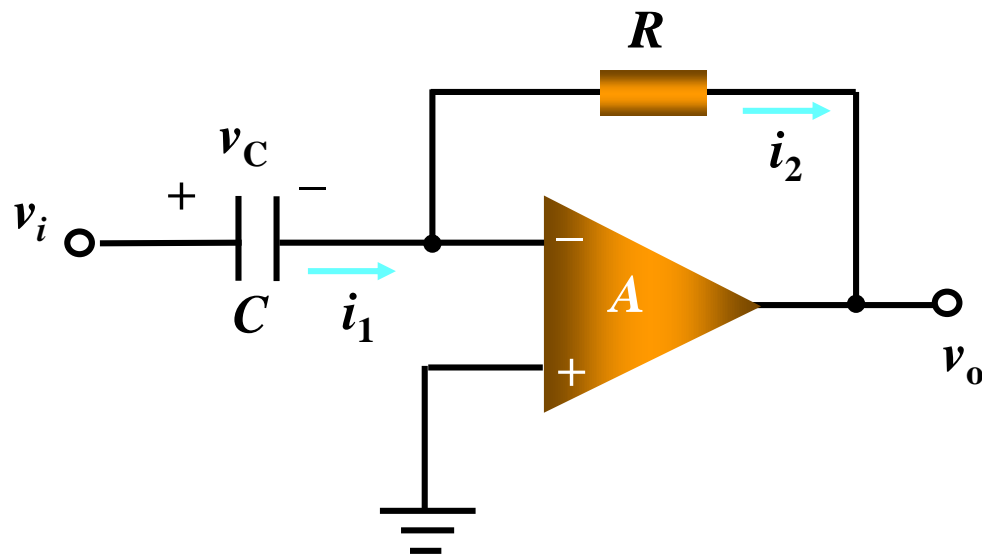
#### 4、积分电路



$$i_1 = i_2 = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{d(-v_o)}{dt} = \frac{v_i}{R}$$

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

## 5、微分电路



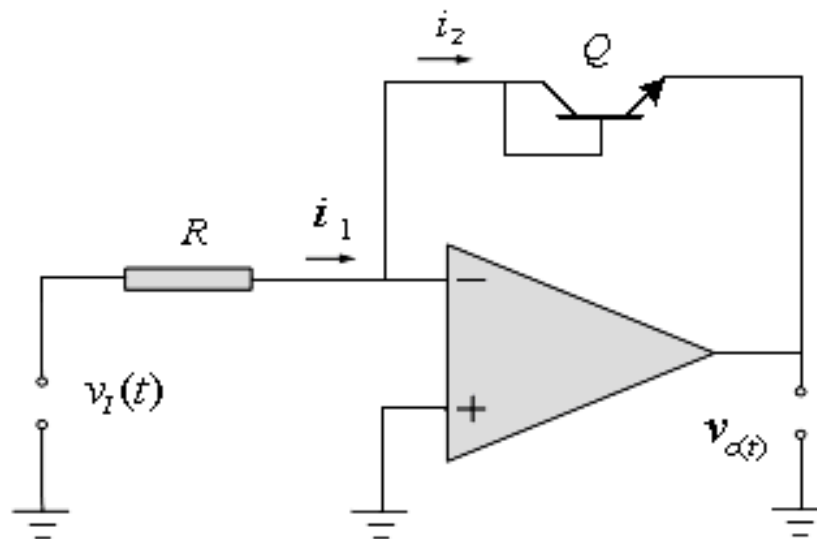
$$i_1 = i_2 = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{dv_i}{dt}$$

$$v_o(t) = -CR \frac{dv_i(t)}{dt}$$

## 6、对数运算电路

$$v_{BE} = V_T \ln \frac{i_C}{I_s} \approx V_T \ln \frac{i_2}{I_s}$$

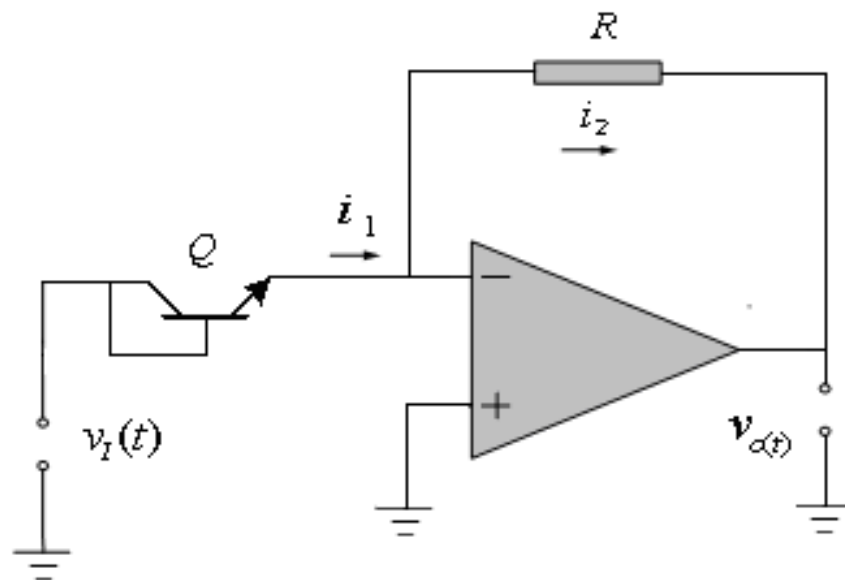
$$i_2 = i_1 = \frac{v_I}{R}$$



$$v_O = -v_{BE} = -V_T \ln \frac{i_2}{I_s} = -V_T \ln \frac{v_I}{RI_s} = -V_T [\ln v_I - \ln(RI_s)] = -V_T \ln v_I + K$$

## 7、指数运算电路

$$i_2 = i_1 = I_s e^{v_I/V_T}$$

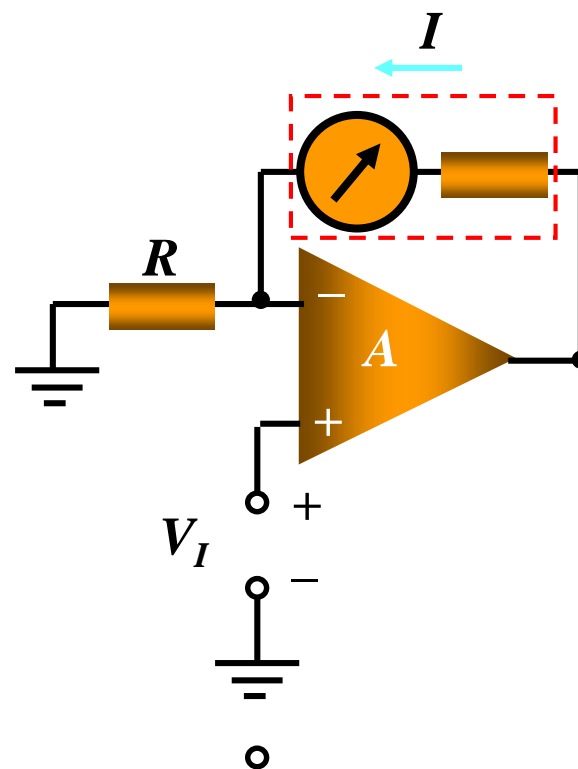


$$v_O = -i_2 R = -R I_s e^{v_I/V_T}$$

## 8、模拟电压表电路

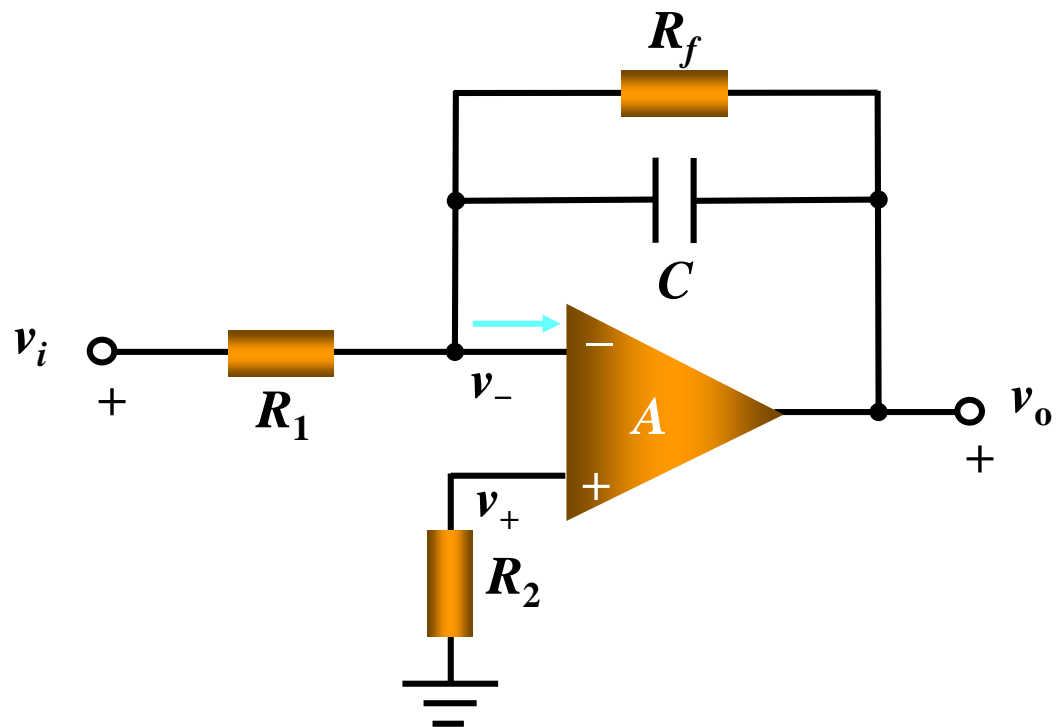
$$I = \frac{V_I}{R}$$

$$R_i = \infty$$



## 9、有源滤波电路

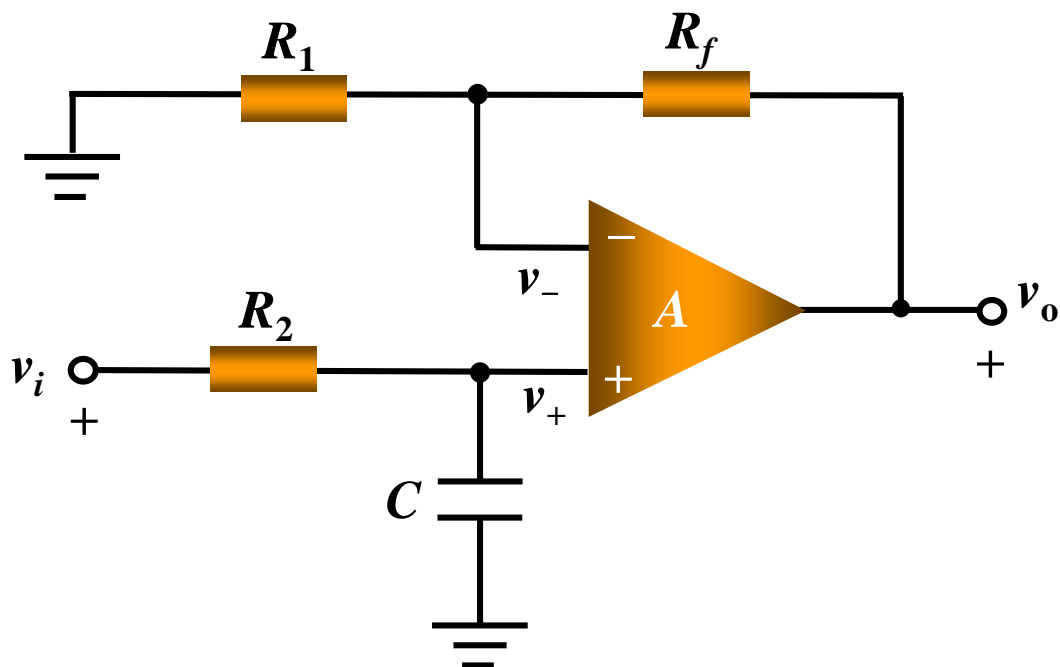
反相输入一阶低通



$$A(s) = -\frac{R_f // \frac{1}{j\omega C}}{R_1} = \frac{-R_f / R_1}{1 + j\omega R_f C} = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_f C} \quad s = j\omega \quad A_M = -\frac{R_f}{R_1}$$

## 同相输入一阶低通

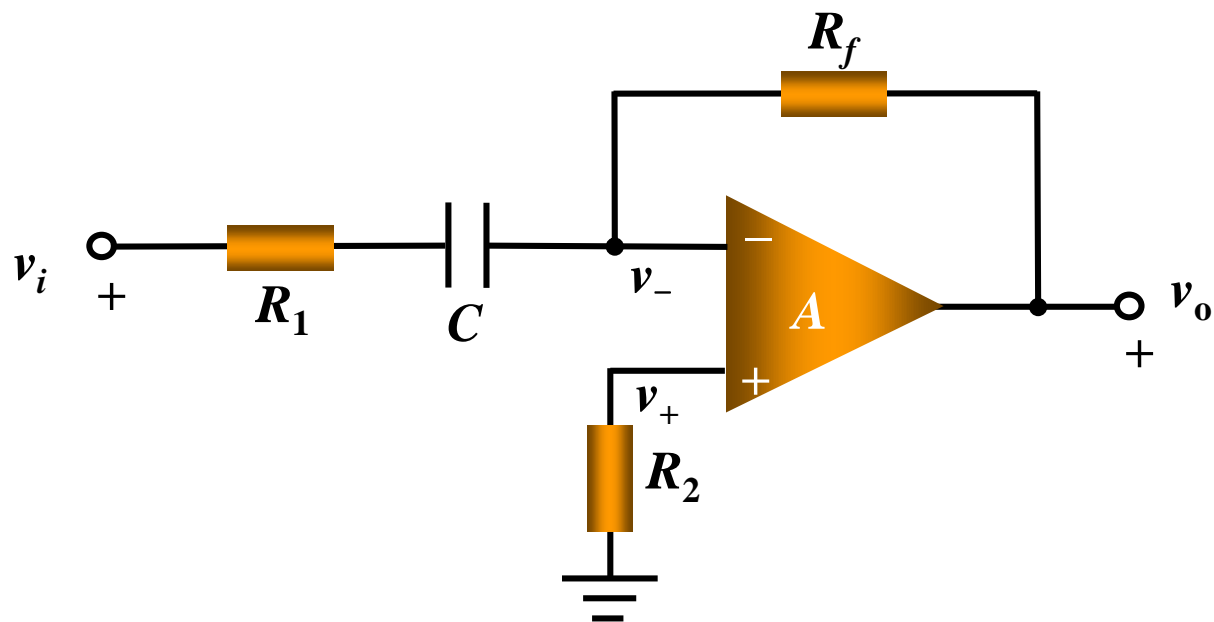


$$A(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{\frac{1}{sC}}{R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{1 + R_f/R_1}{1 + sR_2C} = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_2C} \quad A_M = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



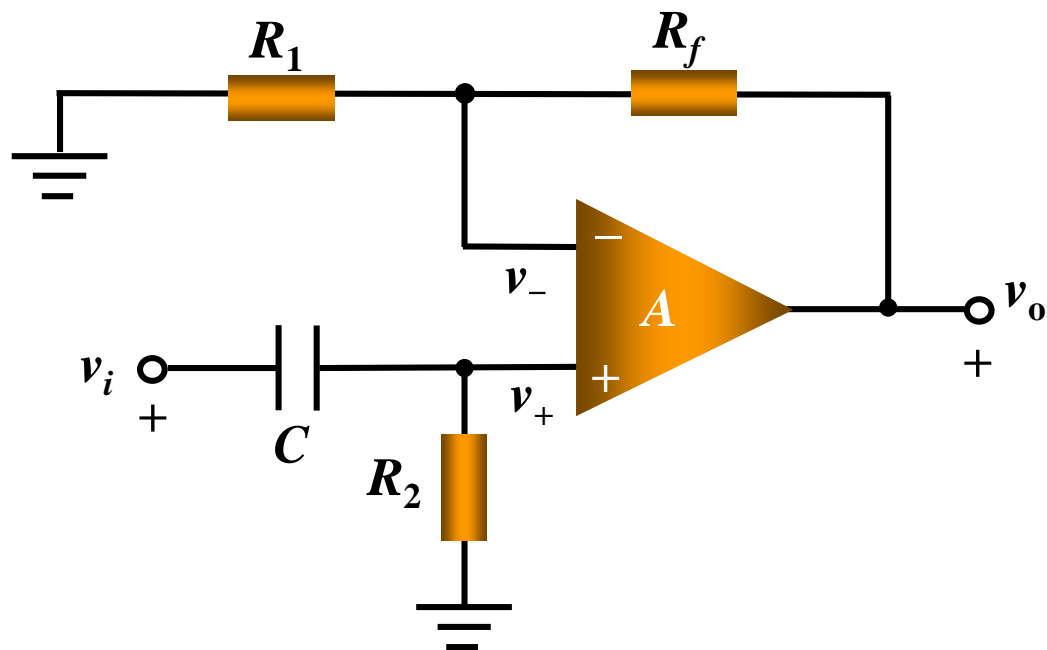
## 反相输入一阶高通



$$A(s) = -\frac{R_f}{R_1 + \frac{1}{sC}} = \frac{-R_f/R_1}{1 + \frac{1}{sR_1C}} = \frac{A_M}{1 + \omega_L/s}$$

$$\omega_L = \frac{1}{R_1C}$$

## 同相输入一阶高通

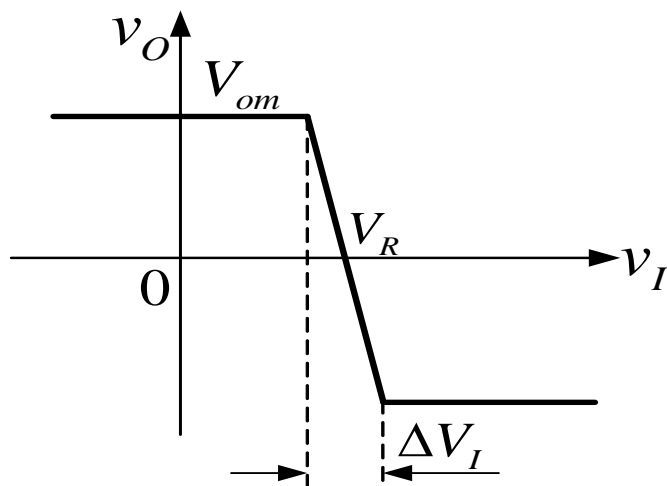
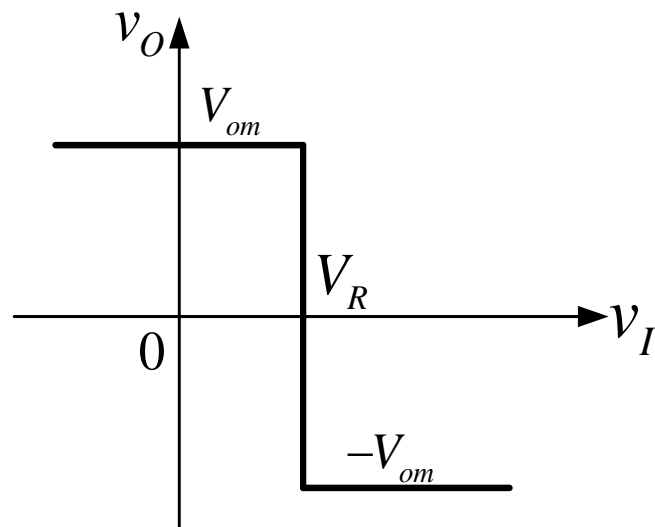
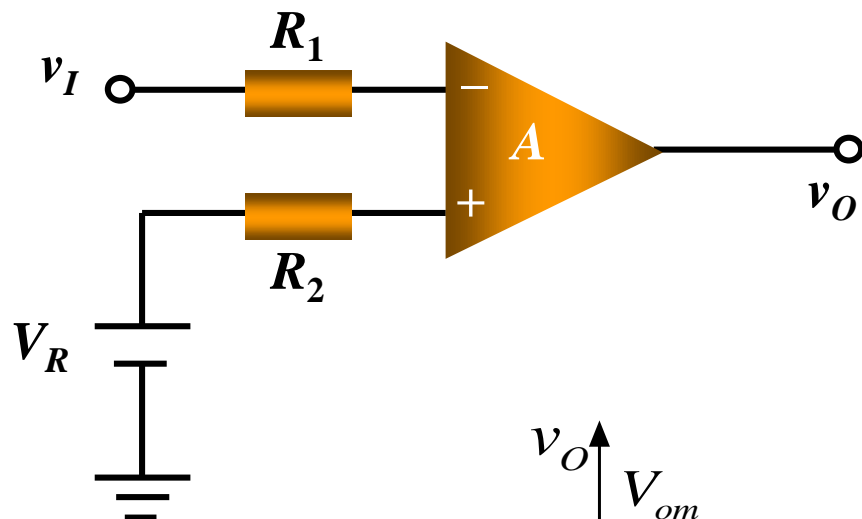


$$A(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{1 + R_f/R_1}{1 + \frac{1}{sR_2C}} = \frac{A_M}{1 + \omega_L/s}$$

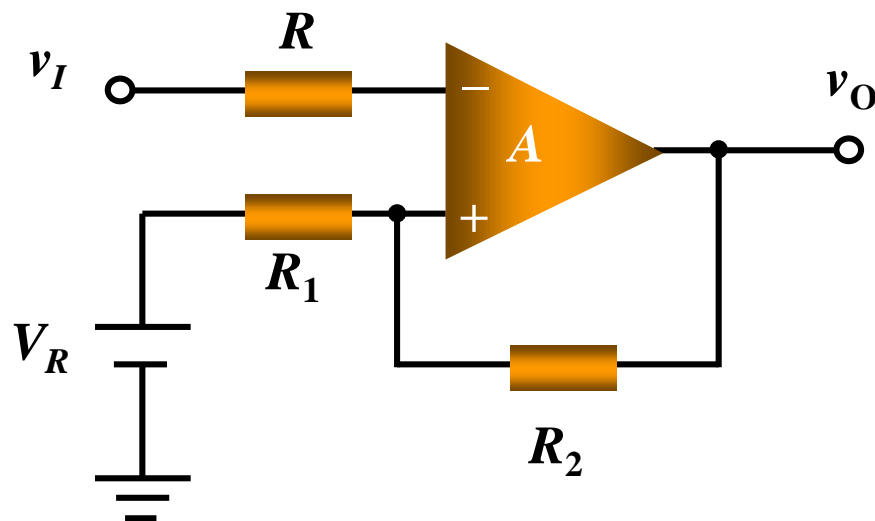
$$\omega_L = \frac{1}{R_2C}$$

## 二、运算放大器的非线性应用

### 1、单限电压比较器

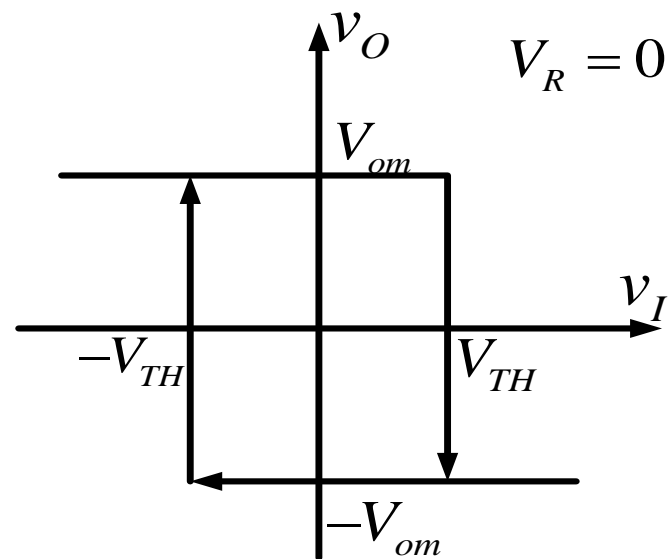


## 2、迟滞（双限）电压比较器（施密特触发器）



门限电压

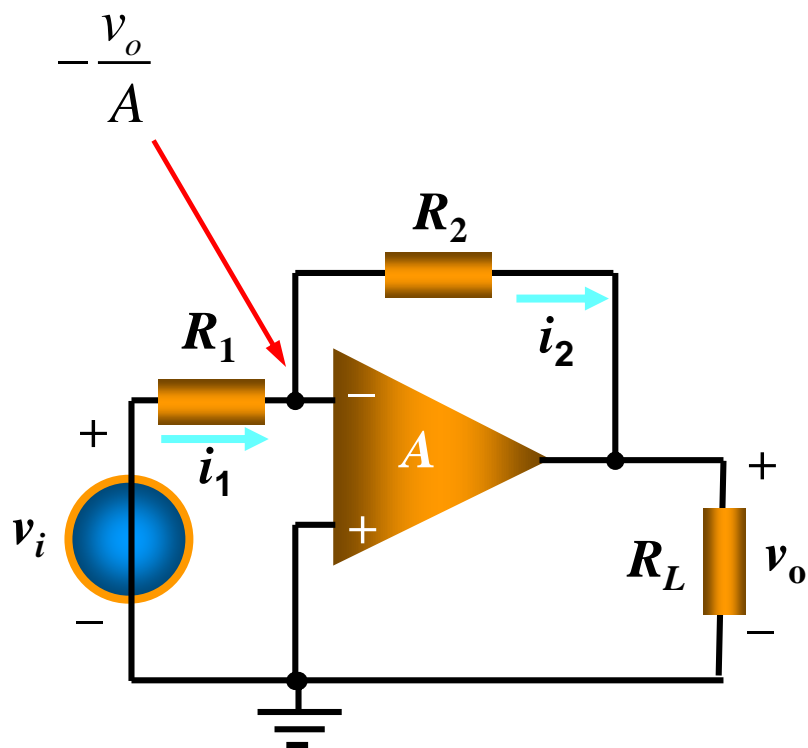
$$V_{TH} = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{om} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_R$$



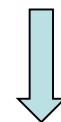
## 14.3 运算放大器性能参数及其对电路的影响

### 14.3.1 有限开环增益和带宽的影响

#### 一、有限开环增益 $A$ 对反相接法放大电路增益的影响



$$i_1 = i_2 = \frac{v_i - (-v_o/A)}{R_1}$$

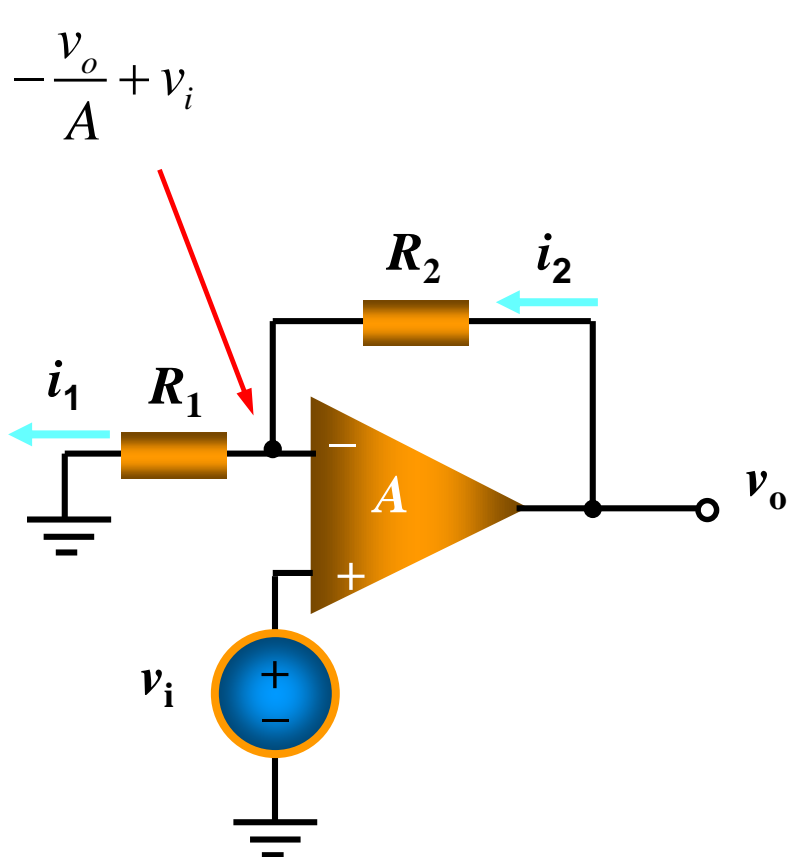


$$v_o = -i_2 R_2 - \frac{v_o}{A}$$

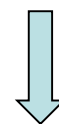


$$A_v = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A}$$

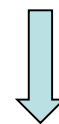
## 二、有限开环增益对同相接法放大电路增益的影响



$$i_1 = i_2 = \left( -\frac{v_o}{A} + v_i \right) / R_1$$

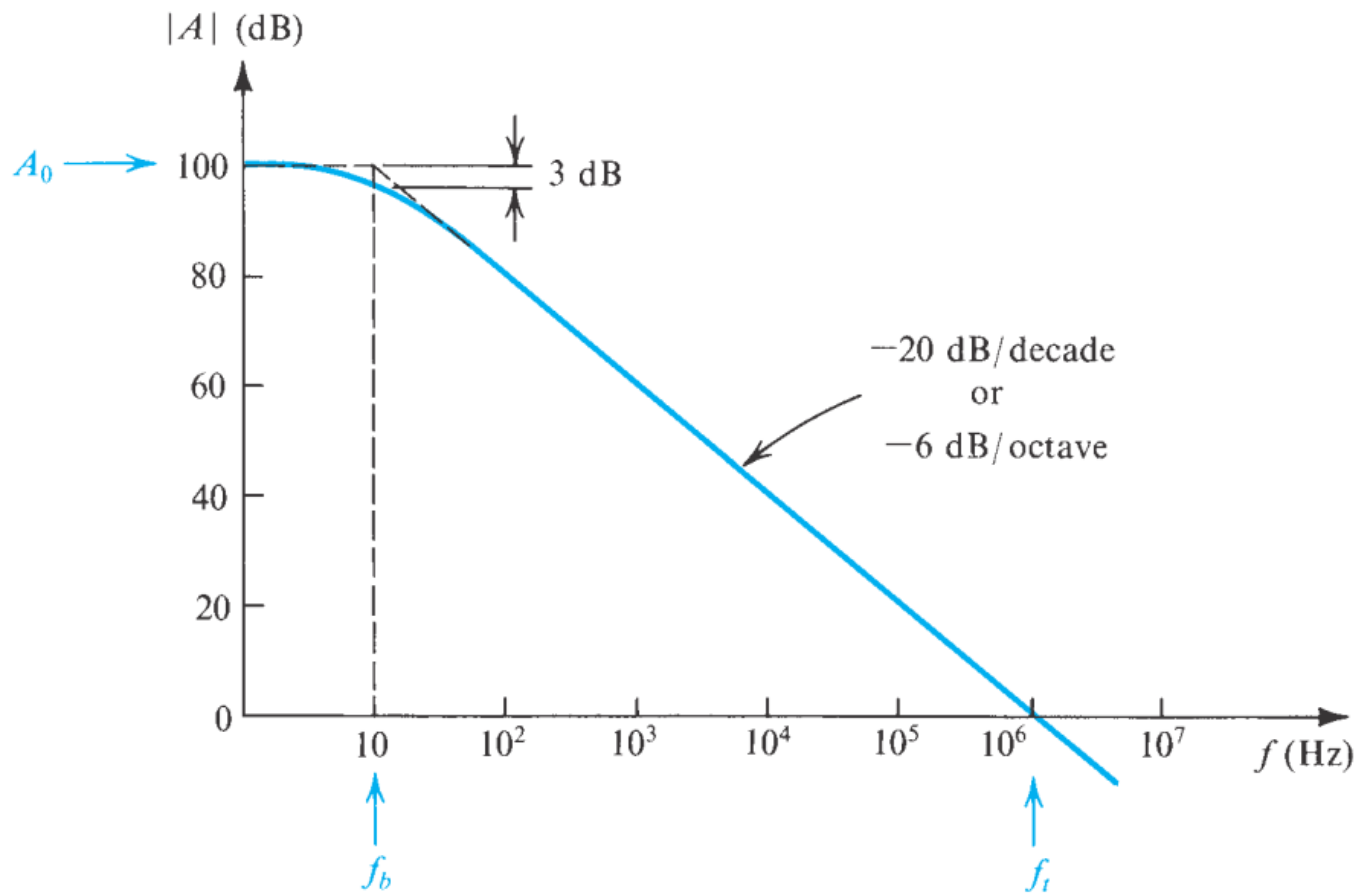


$$v_o = -i_2 (R_1 + R_2)$$



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

### 三、有限带宽对放大电路增益的影响

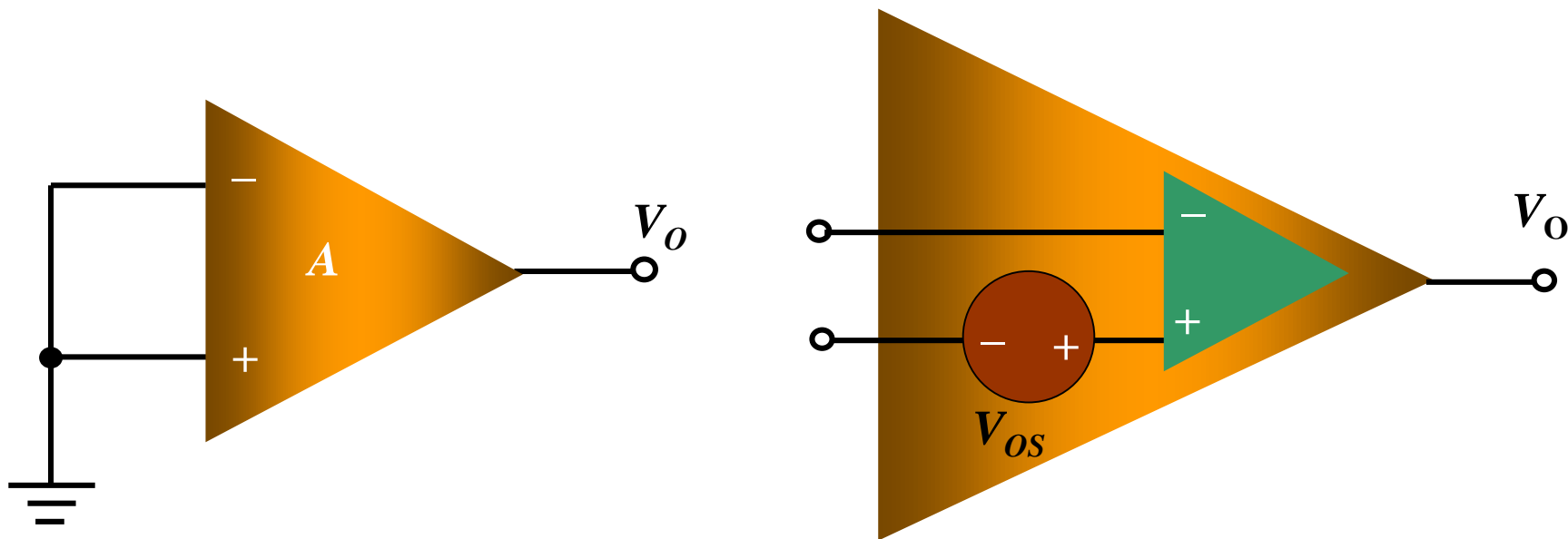


## 14.3.2 直流误差

### 一、输入失调电压 (Input Offset Voltage)

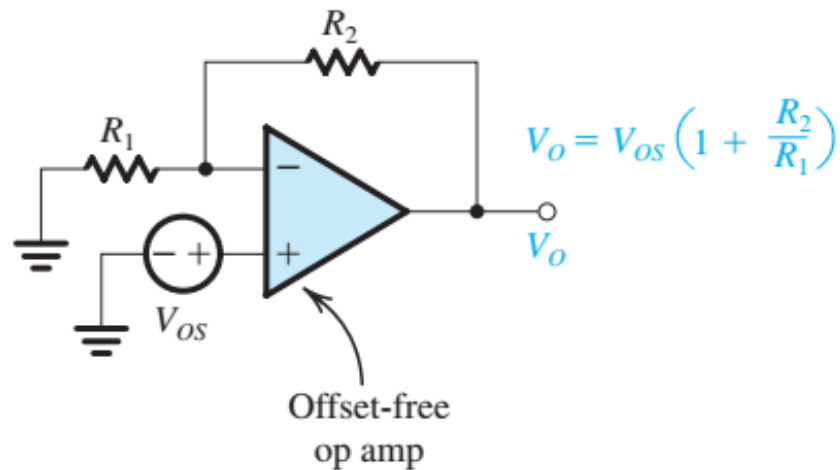
----- 运放内部差分输入级的失配导致。

#### 1、输入失调电压的影响



$$|V_{os}| = 1 \sim 5 \text{ mV}$$



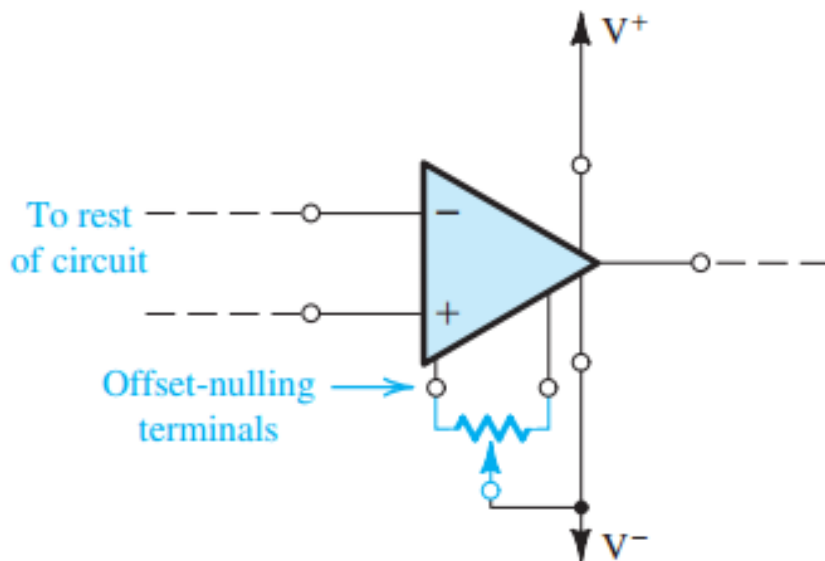


若放大器闭环增益较大，输入失调电压将导致：

- 1、允许的输出信号摆幅（swing）减小
- 2、可能使输出饱和
- 3、若输入是直流信号，则无法正常工作

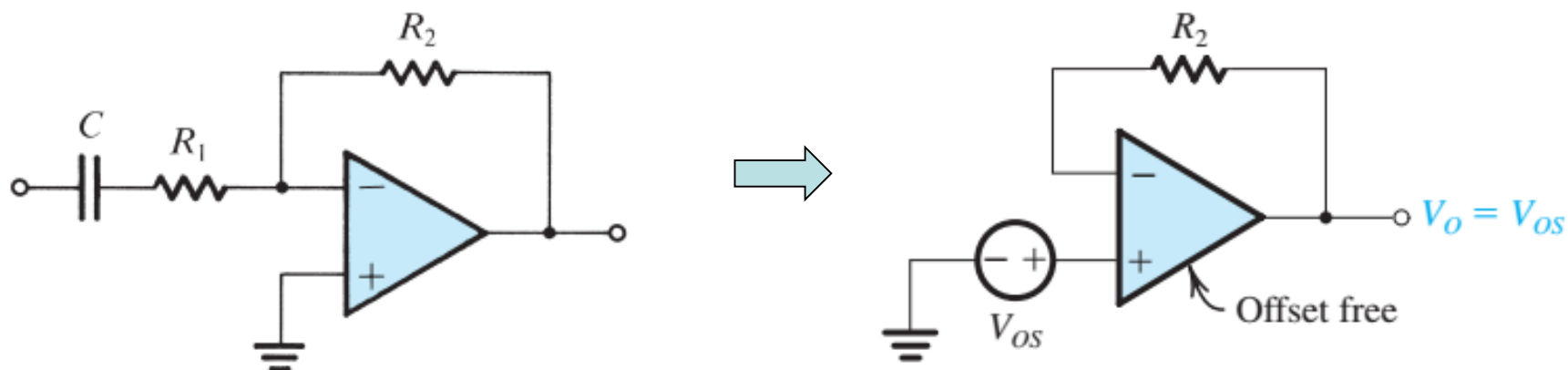
## 2、减小输入失调电压影响的方法

### ➤ 带调零端的运算放大器



运放的失调电压大小与温度有关，因此该方法并不能完全解决问题。

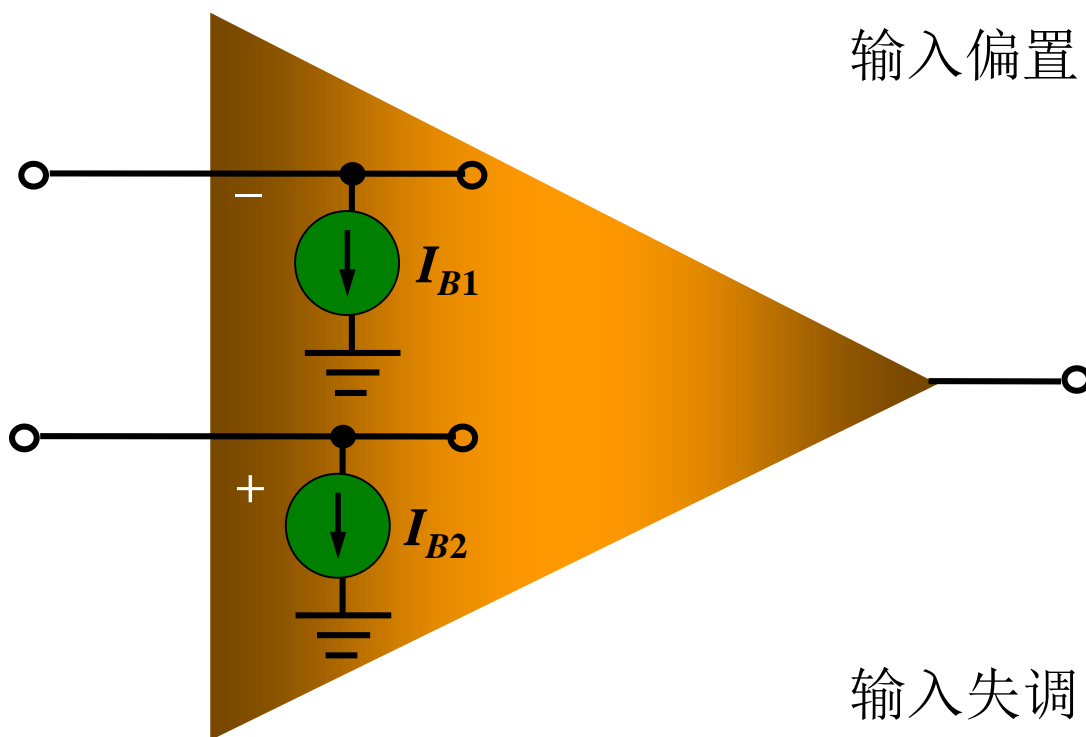
➤ 输入端加电容（电容耦合）



- 1、前提是不需要放大直流或极低频的信号
- 2、输入失调电压在输出端没有被放大
- 3、相当于一个有源高通滤波器

## 二、输入偏置电流和失调电流 ( Input Bias & Offset Currents )

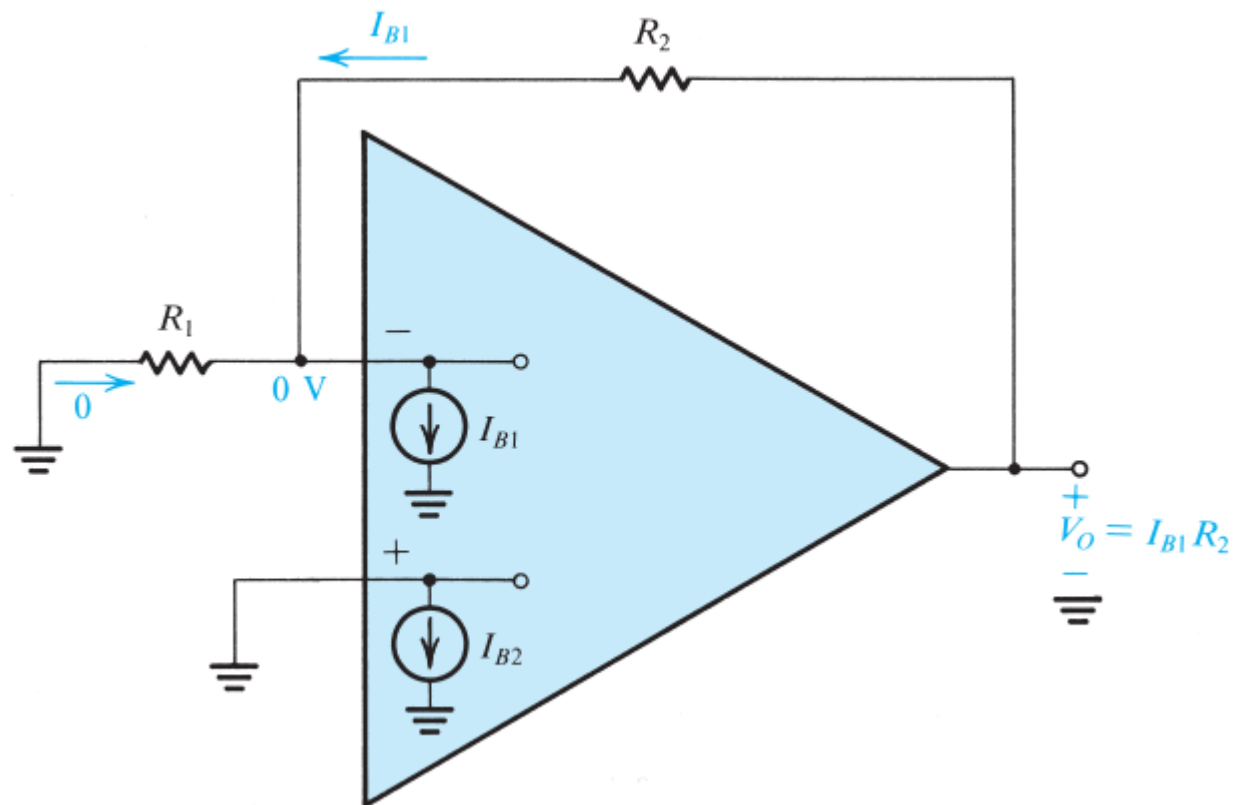
----- 运放输入电阻有限导致。



输入偏置电流 
$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

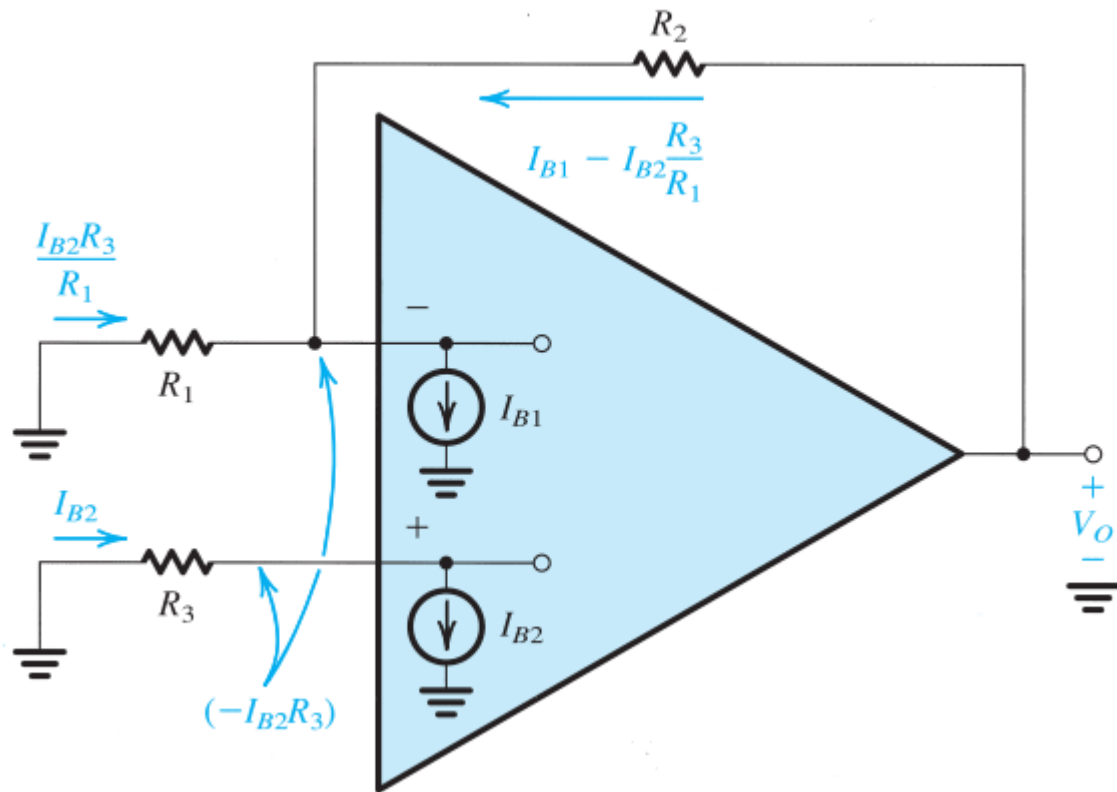
输入失调电流 
$$I_{os} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

## 1、输入失调电流的影响



$$V_O = I_{B1} R_2$$

## 2、减小输入失调电流影响的方法



$$V_O = -I_{B2}R_3 + R_2 \left( I_{B1} - I_{B2} \frac{R_3}{R_1} \right)$$

假设  $I_{B1} = I_{B2} = I_B$



$$V_O = I_B \left[ R_2 - R_3 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right]$$

若取  $R_3 = \frac{R_2}{1 + R_2/R_1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 // R_2$

$$I_{B1} = I_{B2}$$

$$V_O = 0$$

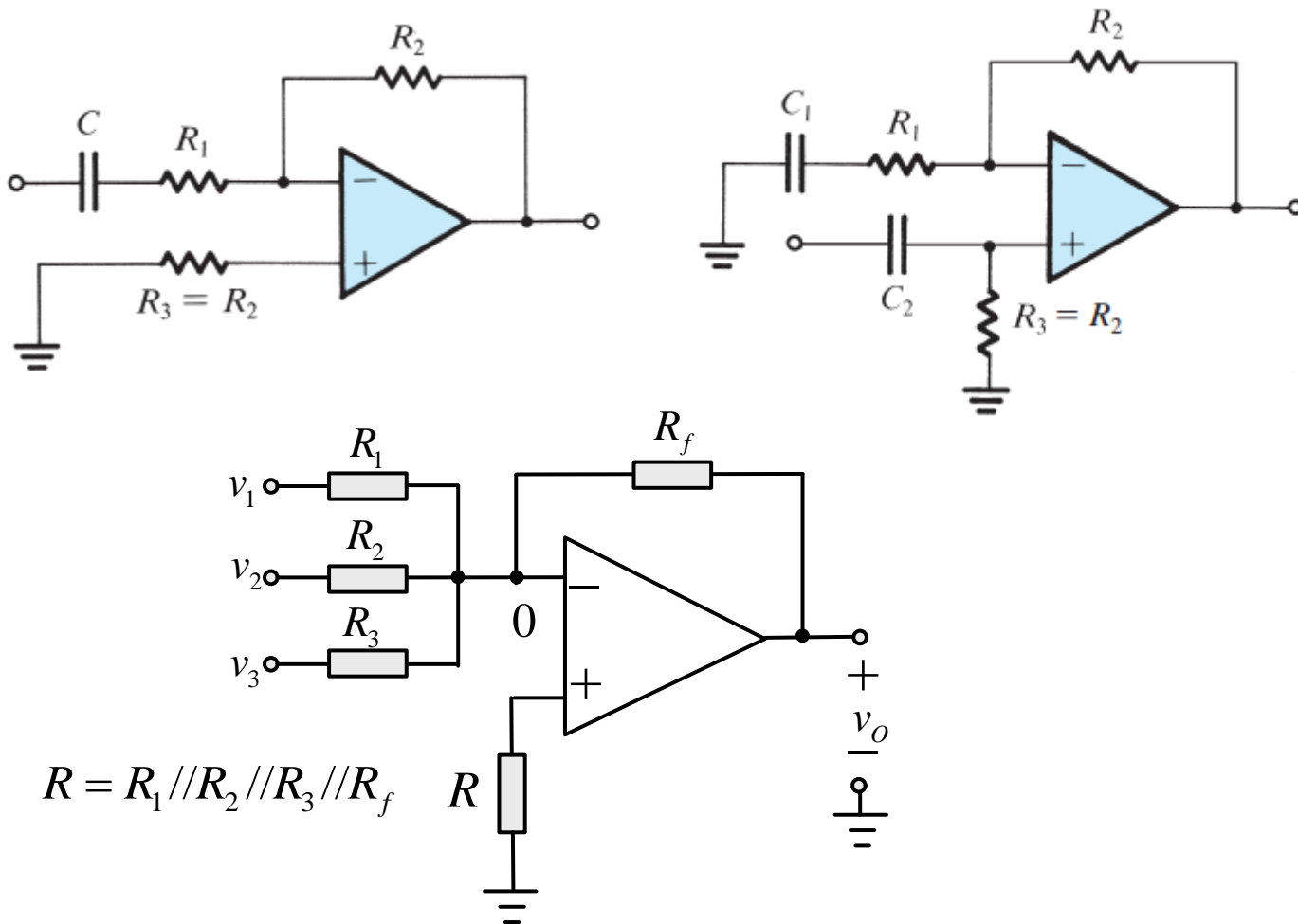
$$I_{B1} \neq I_{B2}$$

$$V_O = R_2 (I_{B1} - I_{B2}) = R_2 I_{OS}$$



## 结论

为了减小输入失调电流的影响，运放同相端的直流电阻必须等于反相端的直流电阻。





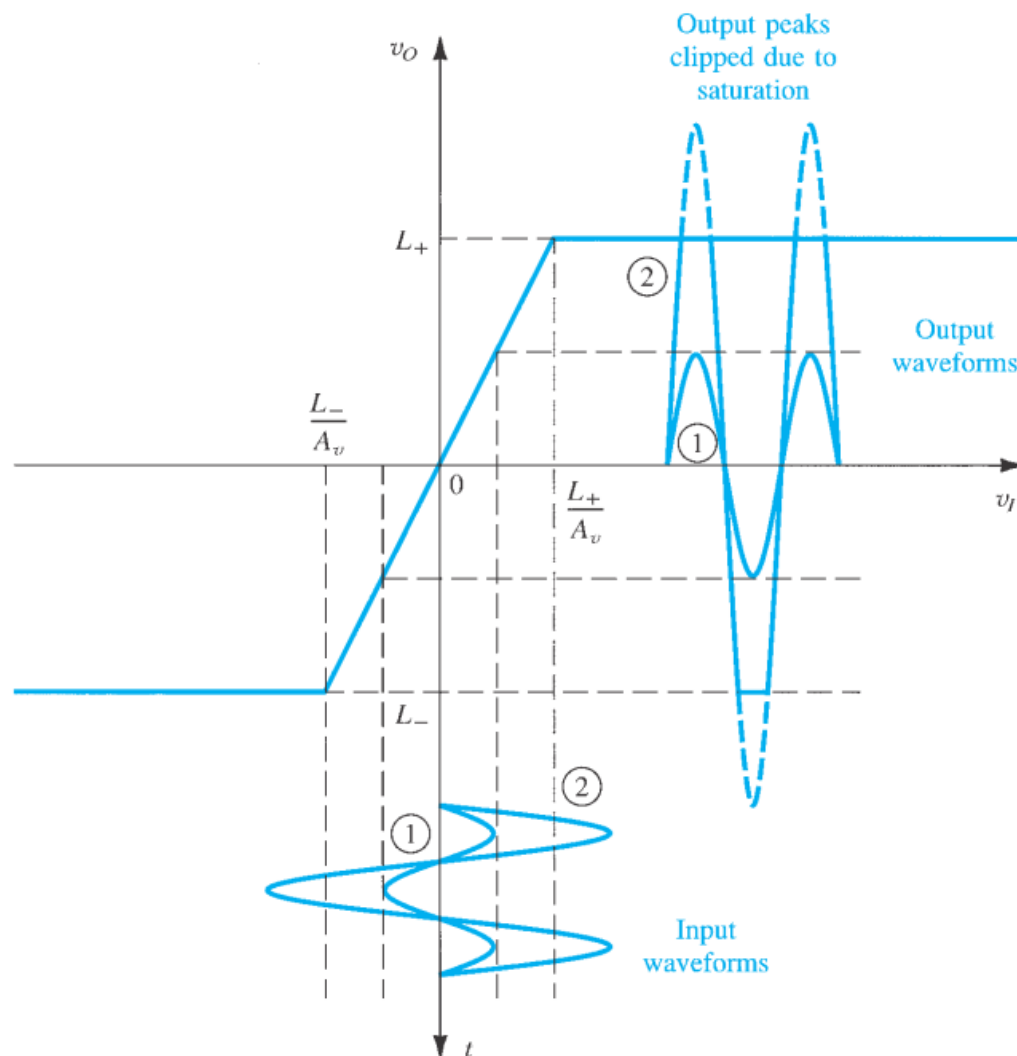
## 14.4 运算放大器的大信号分析

### 一、输出电压饱和

运放的输出电压将受到正负电源电压的限制，而不可能无限制地上升或下降。这种情况被称之为放大器的饱和。

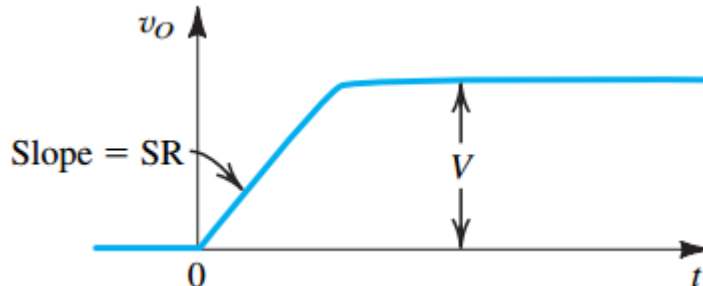
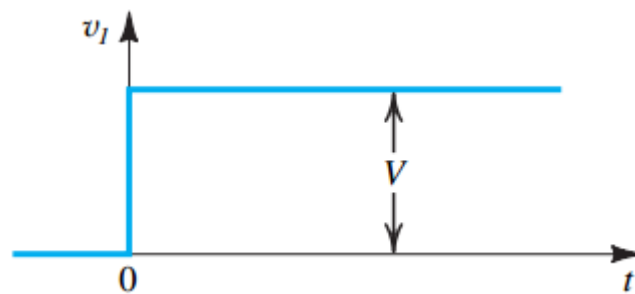
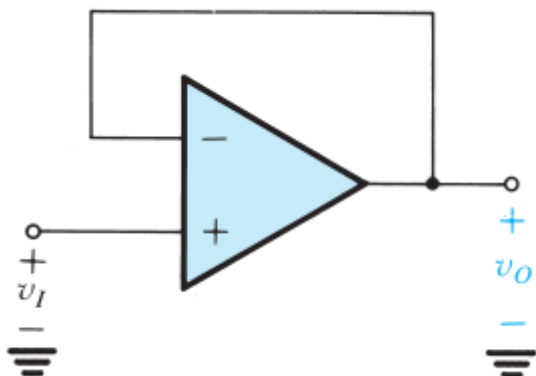
### 二、输出电流限制

运放的输出电流也有最大值。如741为 $\pm 20\text{ mA}$ 。

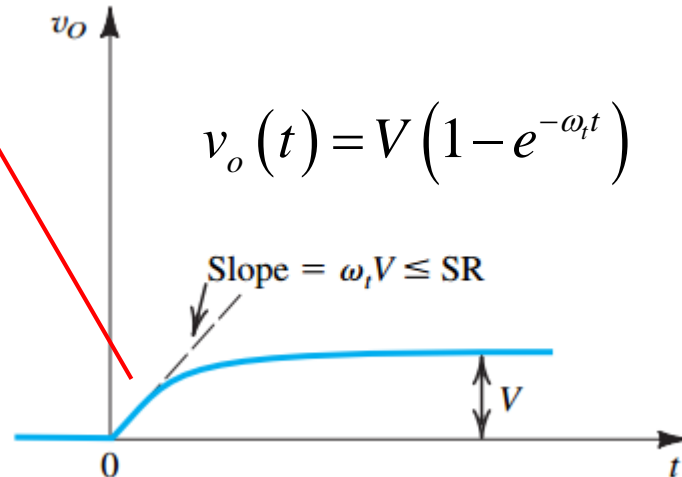


### 三、摆率 (Slew Rate)

---- 输出电压随时间变化的最大值称为摆率。  $SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$



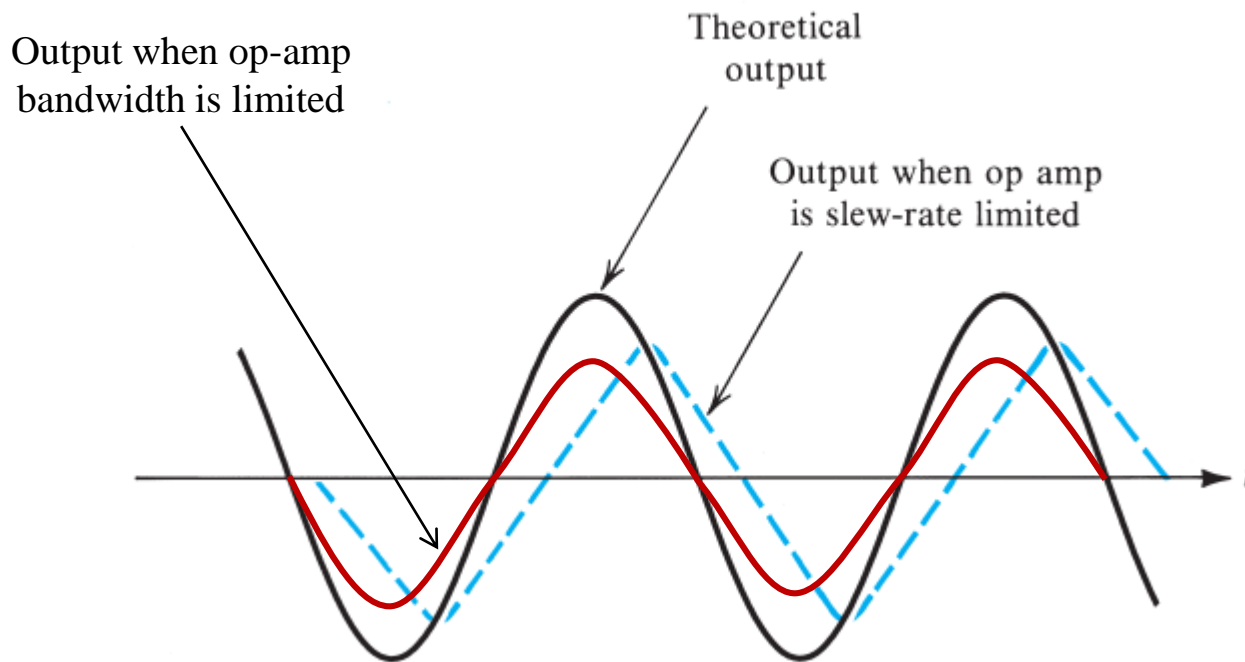
当输入信号足够小时，其输出响应仅受限于放大器的带宽。



$$v_o(t) = V(1 - e^{-\omega_t t})$$



受摆率限制和受带宽限制的运放输出是完全不同的，前者是非线性现象，而后者是线性现象。



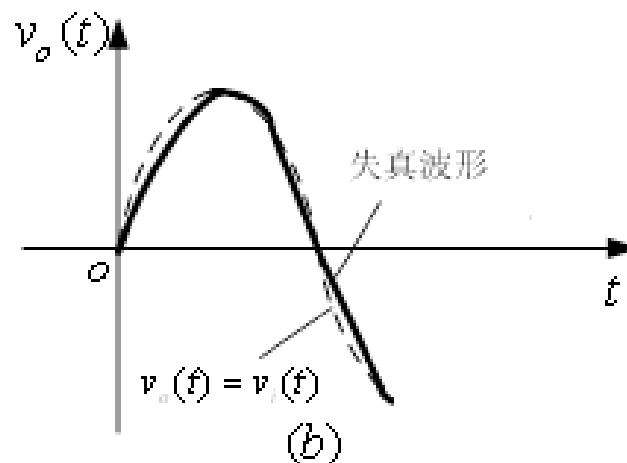
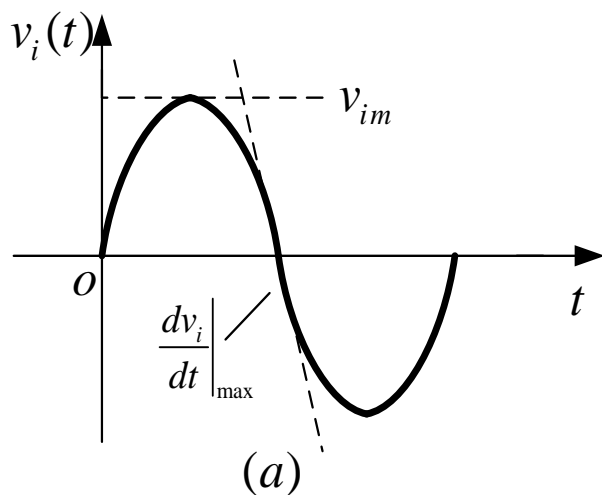
## 四、满功率带宽（ Full-power Bandwidth）

满功率带宽是指运算放大器输出**最大峰值电压**时允许的**最大频率**。

若  $v_o(t) = V_{o\max} \sin \omega t$

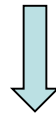
$$\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \left. \frac{d(V_{o\max} \sin \omega t)}{dt} \right|_{\max} = \omega \cdot V_{o\max} \cos \omega t \Big|_{t=0}^{t=\pi} = \pm \omega \cdot V_{o\max}$$

当  $|\omega \cdot V_{o\max}| \leq SR$  时，输出波形不失真。否则，输出波形失真。



由输出波形不失真条件  $|\omega \cdot V_{o\max}| \leq SR$  可得该放大器的**满功率带宽**

$$f_M = \frac{SR}{2\pi V_{o\max}}$$



这意味着减小放大信号幅度可以增加放大器的不失真带宽。

$$V_{o\max} f_M = V_o f$$

## 14.5 典型运放内部电路结构介绍

### 14.5.1 集成运放内部结构

#### 一、典型运放结构组成

第一级：输入级，差分放大电路，输入电阻高，差模增益高，共模抑制强，一般同时还带有射级恒流源。

第二级：中间级，主放大器，采用共射基本放大电路，增益大。

第三级：输出级，一般采用互补对称电路，带负载能力较强，输出电阻小，输出电压线性范围宽，非线性失真小。

## 二、读图方法

已知电路图，分析其原理和功能、性能。

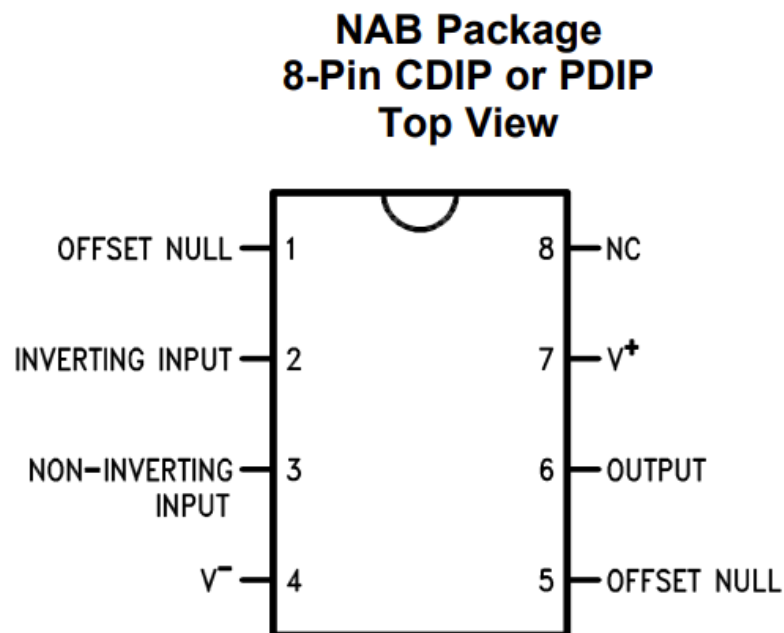
1. 了解用途：了解要分析的电路的应用场合、用途和技术指标。
2. 化整为零：将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路。
3. 分析功能：定性分析每一部分电路的基本功能和性能。
4. 统观整体：电路相互连接关系以及连接后电路实现的功能和性能。
5. 定量计算：必要时可估算或利用计算机计算电路的主要参数。

## 14.5.2 典型运放内部电路介绍

### 一、BJT运放电路（LM741）

**LM741**是一种应用非常广泛的通用型运算放大器。电路比较简单不易自激，工作点稳定，使用方便，而且设计了完善的保护电路，不易损坏。可应用于各种数字仪表及工业自动控制设备中。

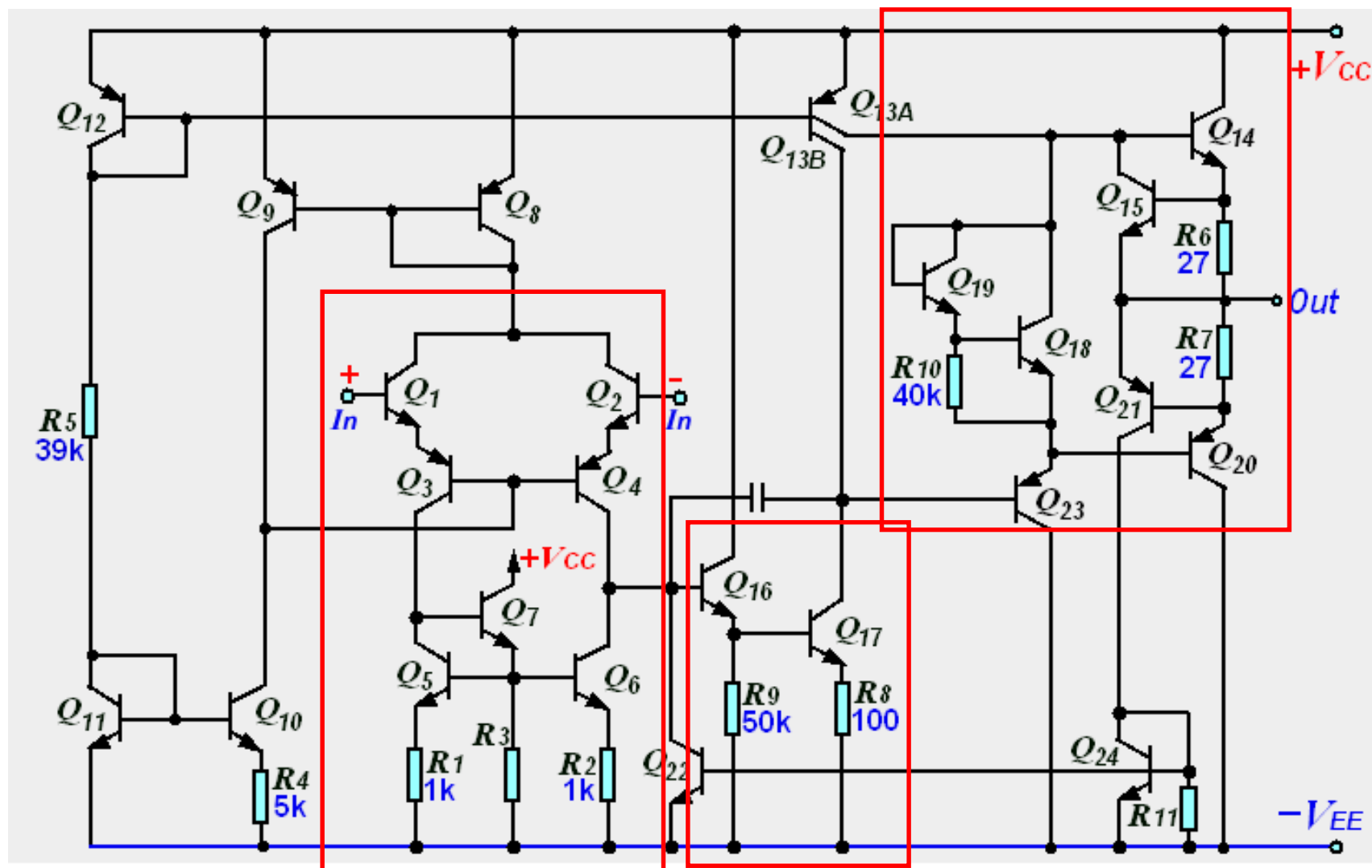
8引脚芯片





## 741运放内部结构

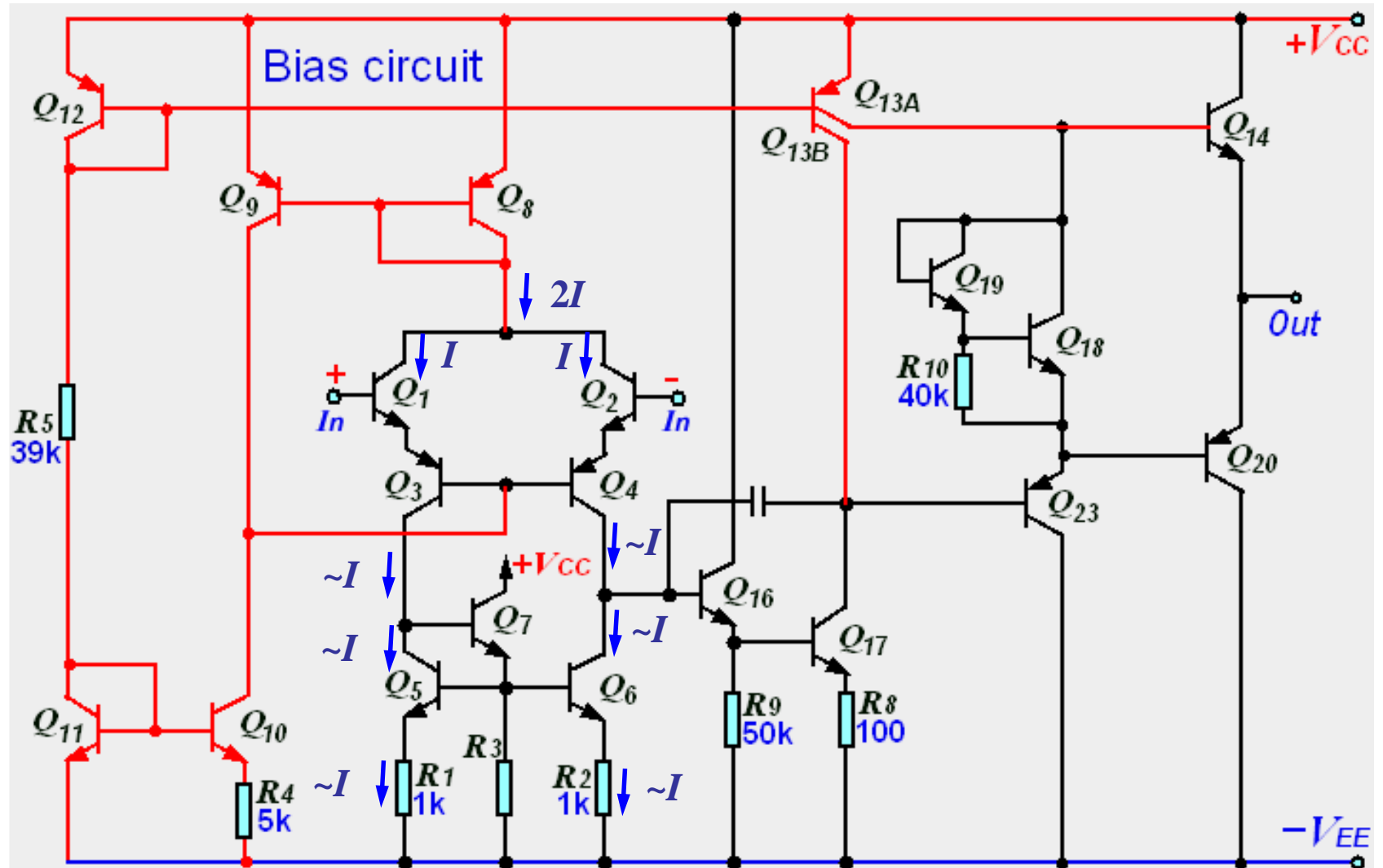
输出级



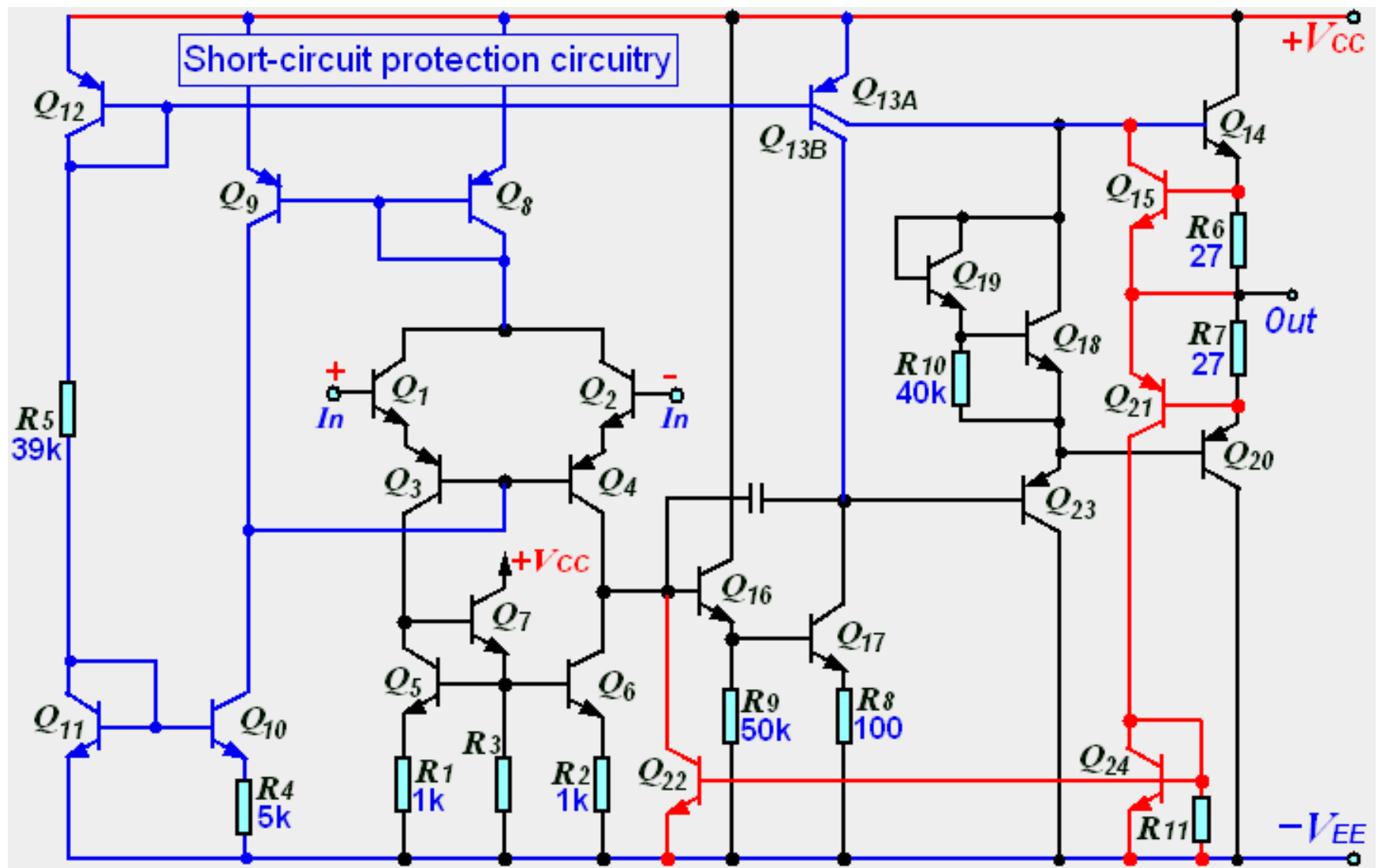
输入级

中间级

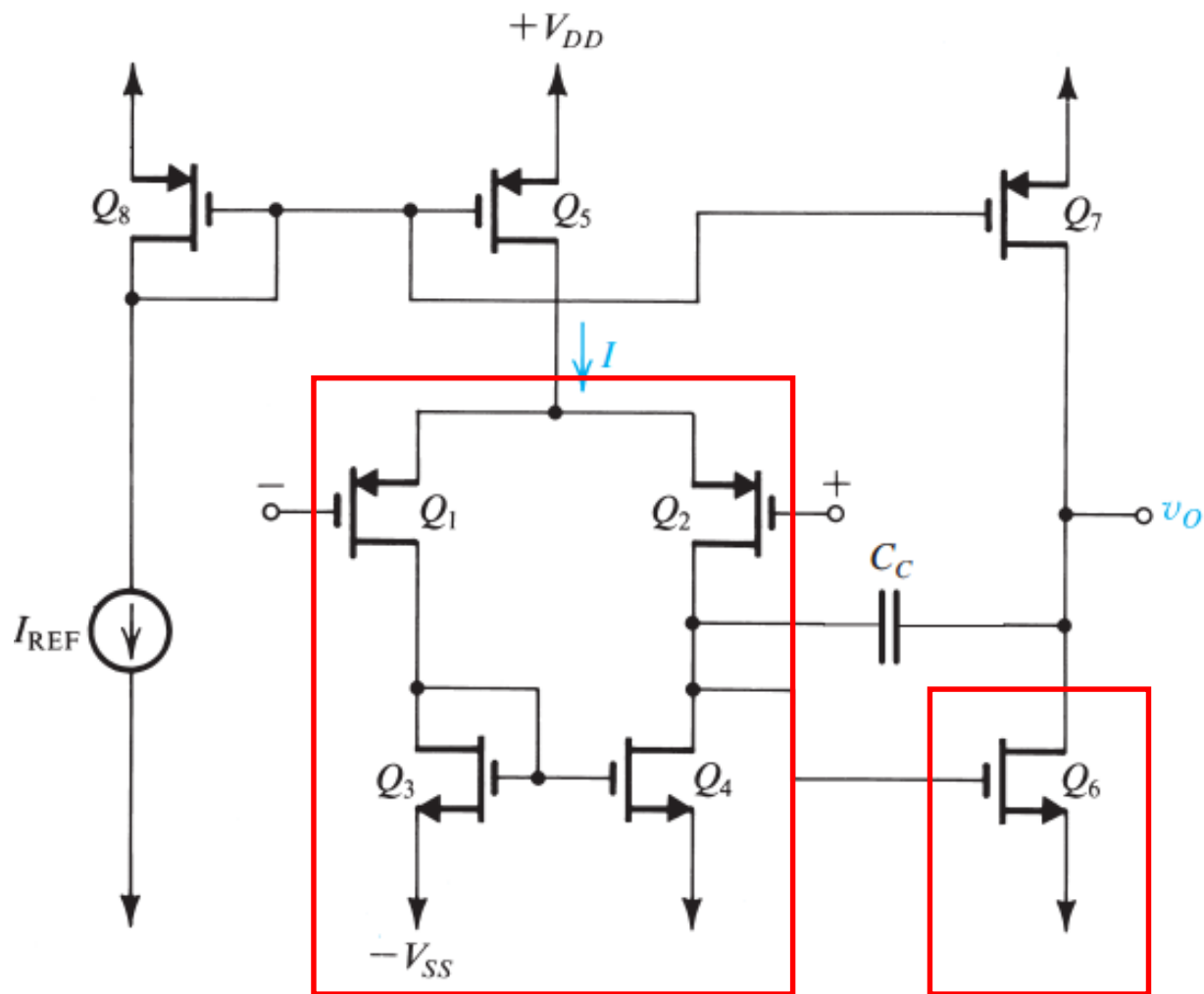
## 1、静态偏置



## 2、短路保护电路



## 二、CMOS运放电路



输入级

第二级