



南京农业大学

机械电子学

Mechatronics

4 信号调理电路

安秋

南京农业大学工学院

信号调理电路（一）

- 1 信号调理概述
- 2 集成运算放大器及其应用电路
- 3 滤波电路

1 信号调理概述

- 信号调理是对模拟信号进行加工处理以满足后续电路的采集和处理要求。
- 这些处理包括保护后续电路、得到正确类型的信号、得到正确范围的信号、去除噪声干扰（滤波）、线性化、调制、阻抗匹配等。
 - 电平调整（放大或衰减）
 - 线性化（把非线性信号调整为线性信号）
 - 信号形式变换（电压电流转换）
 - 滤波与阻抗变换（滤波电路、传感器内部阻抗或电缆阻抗引起重大误差的处理）
 - 保护下一个元件（比如微处理器）不受高电流或电压的损害。

信号调理电路包括接口（适配）、放大、整形、滤波、变换、隔离电路等

1 信号调理概述

- 信号调理
 - 放大电路：运放
 - 滤波电路
 - 信号变换电路
 - 信号隔离电路

运算放大器是传感器信号调理电路中最常用的器件之一。

2 集成运算放大器及其应用电路

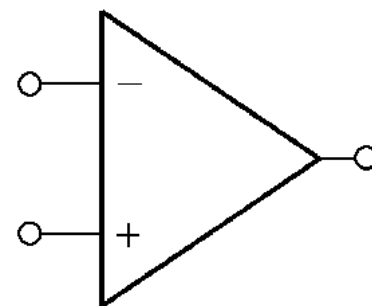
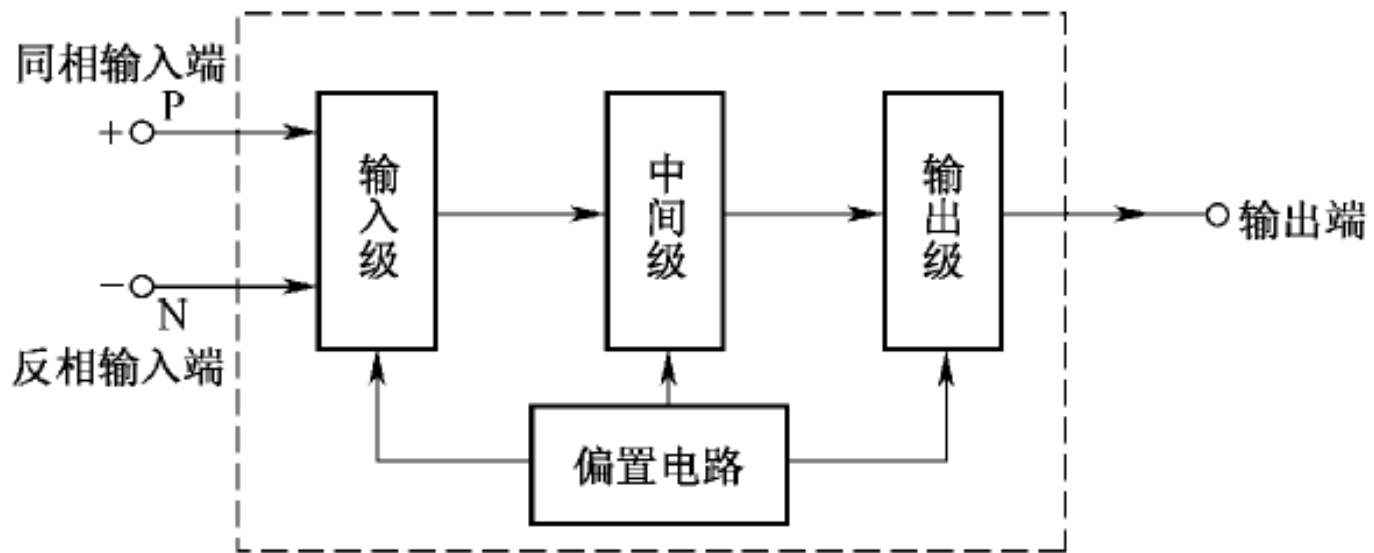
- 2.1 集成运算放大器的基础知识
- 2.2 集成运算放大器的线性应用电路
- 2.3 双运算放大器 LM358 及其应用电路
- 2.4 四运算放大器 LM324 及其应用电路
- 2.5 集成运算放大器的非线性应用电路
- 2.6 集成运算放大器的保护

2 集成运算放大器及其应用电路

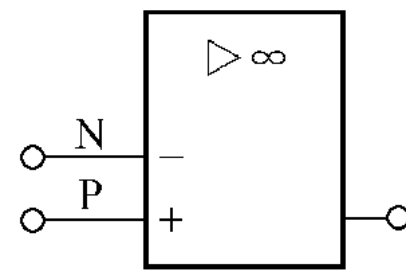
- 运算放大器是把许多晶体管、电阻和电容制造在单个硅芯片上的低成本、多功能集成电路。它可以与外部分立元件相结合创建各种各样的信号处理电路。
 - 放大器
 - 加法器
 - 积分器
 - 微分器
 - 比较器
 - A—D和D—A转换器
 - 有源滤波器
 - 采样和保持电路

2.1 集成运算放大器的基础知识

1. 集成运算放大器的组成与符号



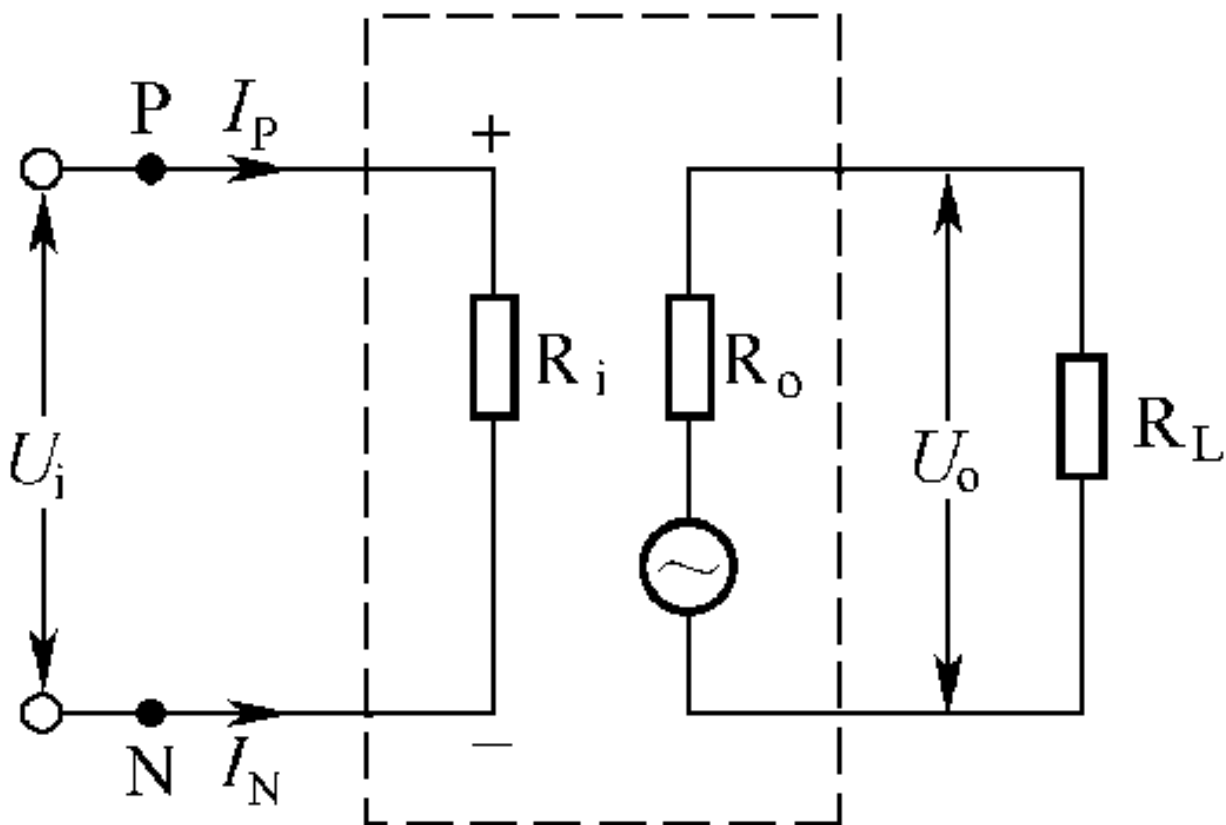
旧符号



新符号

2.1 集成运算放大器的基础知识

2. 集成运算放大器的理想特性



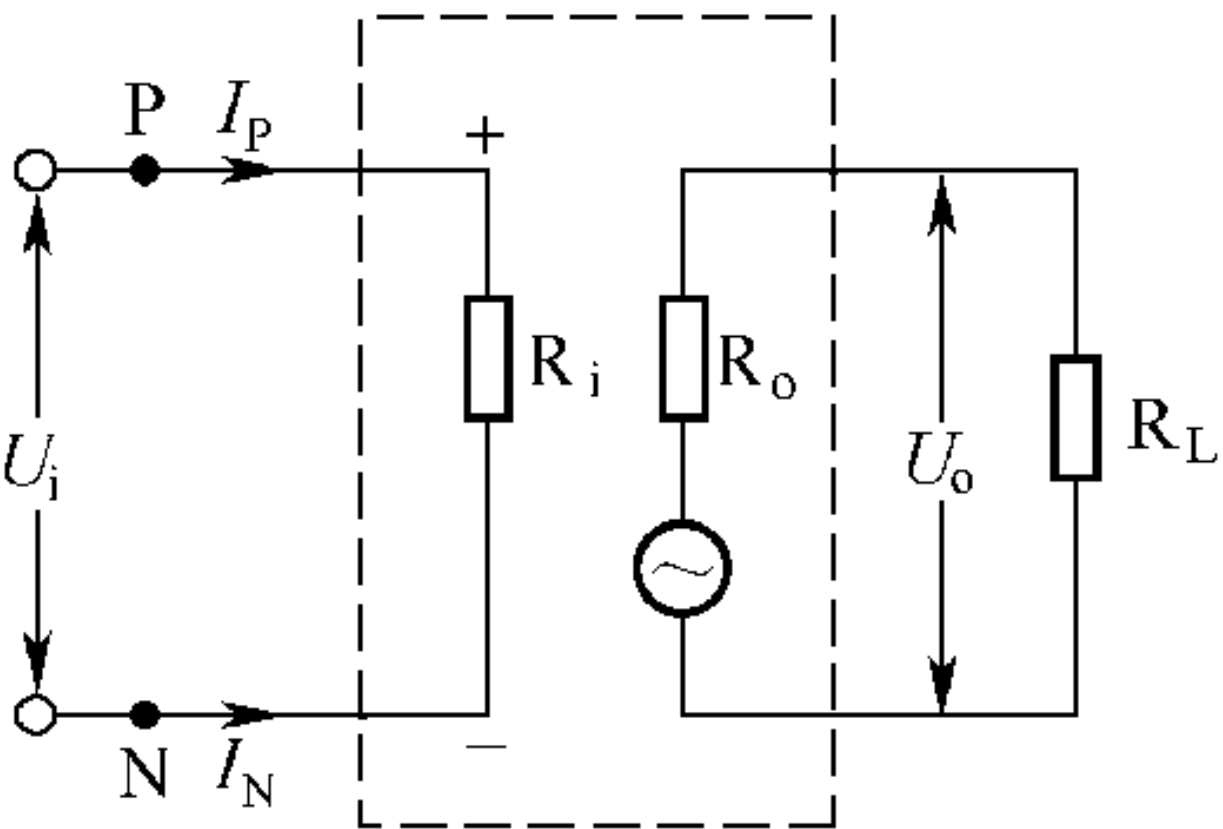
集成运算放大器等效图

为了分析方便，常将集成运算放大器看成是理想的，理想集成运算放大器主要有以下特性：

- ① 电压放大倍数 $A \rightarrow \infty$ ；只要有信号输入，就会输出很大的信号。
- ② 输入电阻 $R_i \rightarrow \infty$ ；无论输入信号电压 U_i 多大，输入电流都近似为 0。
- ③ 输出电阻 $R_o \rightarrow 0$ ；输出电阻接近 0，输出端可带很重的负载。
- ④ 共模抑制比 $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$ ；对差模信号有很大的放大倍数，而对共模信号几乎能全部抑制。

2.1 集成运算放大器的基础知识

2. 集成运算放大器的理想特性



集成运算放大器等效图

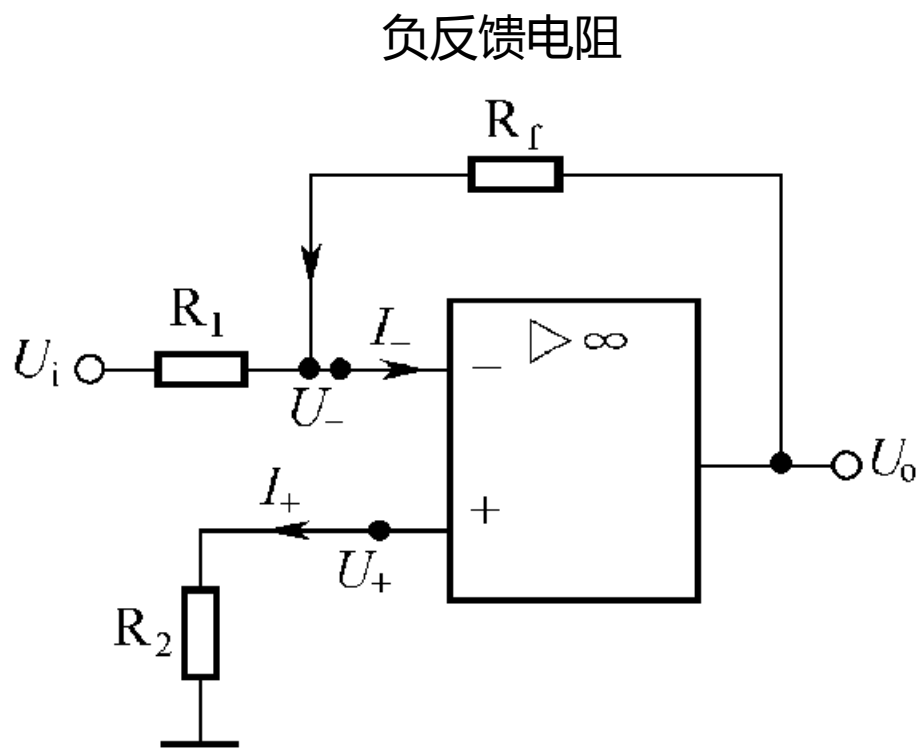
集成运算放大器的工作状态有两种：线性状态和非线性状态。

当给集成运算放大器加上负反馈电路时，它就会工作在线性状态（线性状态是指电路的输入电压与输出电压成正比关系）；

如果给集成运算放大器加正反馈电路或在开环工作时，它就会工作在非线性状态。



2.2 集成运算放大器的线性应用电路



加入负反馈电路的集成运算放大器

运算放大器的两个输入端之间相当于断路，实际上又不是断路，故称为“虚断”。

运算放大器两个输入端电压相等，两个输入端相当于短路，但实际上又不是短路的，故称为“虚短”。

从电位来看，运算放大器“-”端相当于接地，但实际上又未接地，故该端称为“虚地”。

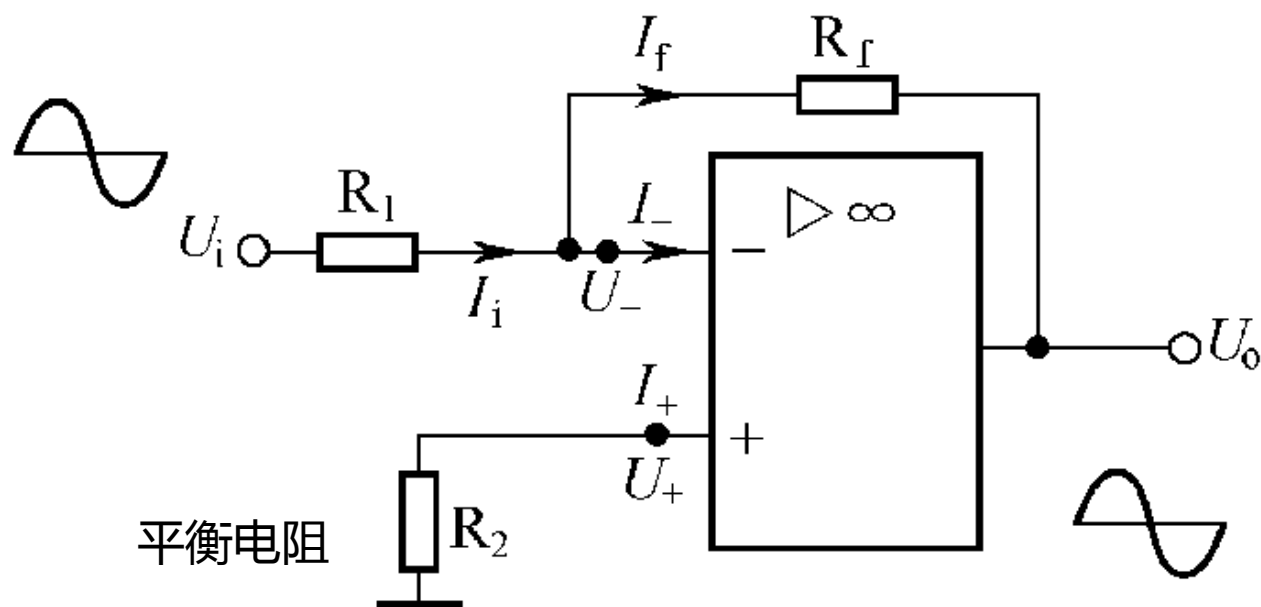


2.2 集成运算放大器的线性应用电路



1. 反相比例运算放大器

输入信号和反馈信号都加在集成运算放大器的反相输入端。



相比例运算放大器的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

反相比例运算放大器的电压放大倍数只与 R_f 和 R_1 有关。

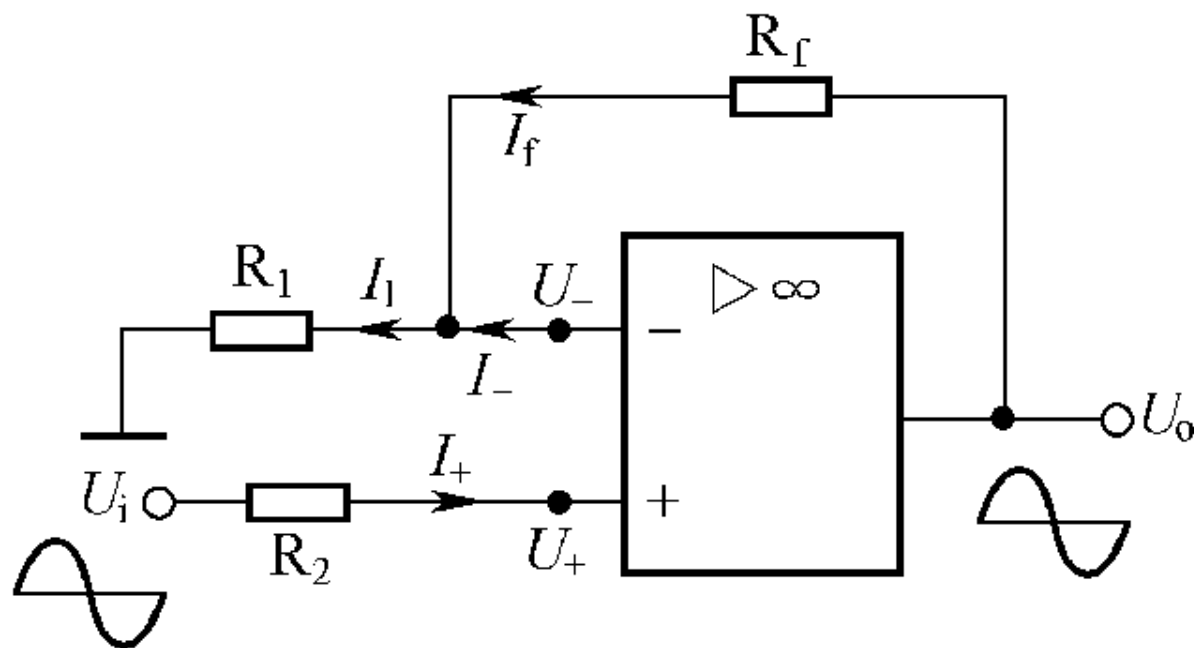
使集成运算放大器内部输入电路（是一个差分电路）保持对称，有利于抑制零点漂移， $R_2 = R_1 // R_f$

当 $R_f = R_1$ 时，变成反相器

2.2 集成运算放大器的线性应用电路

2. 同相比例运算放大器

该电路的输入信号加到运算放大器的同相输入端，反馈信号送到反相输入端。



同相比例运算放大器的电压放大倍数为

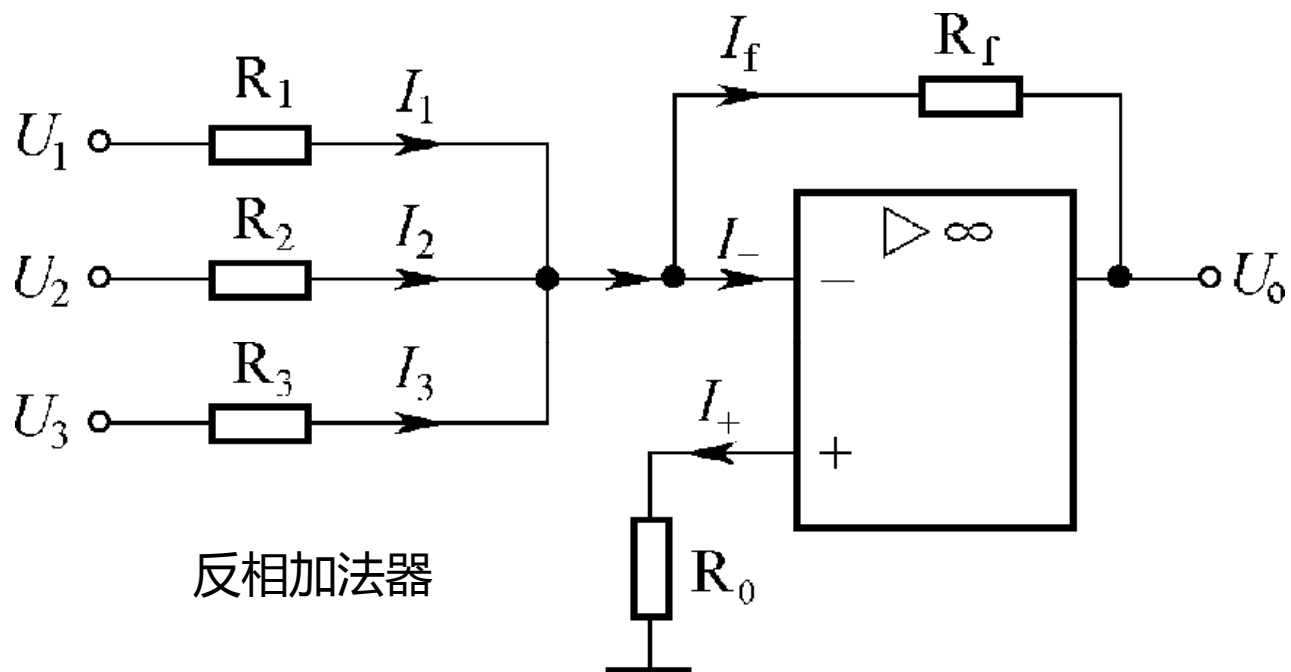
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

当 $R_f \neq \infty$ (不断开) 且 $R_1 = \infty$ (断开) 时, $A_u = 1$, 此时输出电压与输入电压大小相等, 极性相同, 称之为“**电压跟随器**”。其特点是高输入电阻、低输出电阻, 常用作同相阻抗变换器。



2.2 集成运算放大器的线性应用电路

3. 加法器



输出电压是各输入电压之和，从而实现了加法运算

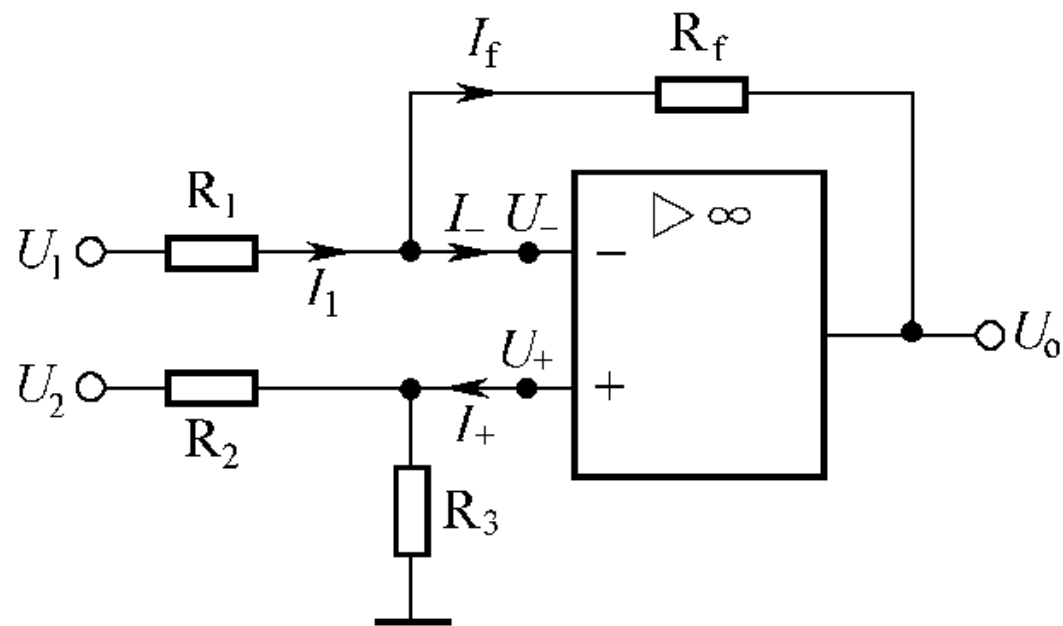
$$U_o = -(U_1 + U_2 + U_3)$$

R_0 为平衡电阻， $R_0 = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$

同相加法器

2.2 集成运算放大器的线性应用电路

4. 减法器 (差动放大器)



减法器

$$R_2 \parallel R_3 = R_1 \parallel R_f$$

输出电压 U_o 等于两输入电压 U_2 、 U_1 的差，从而实现了减法（差动）运算。

$$U_o = U_2 - U_1$$

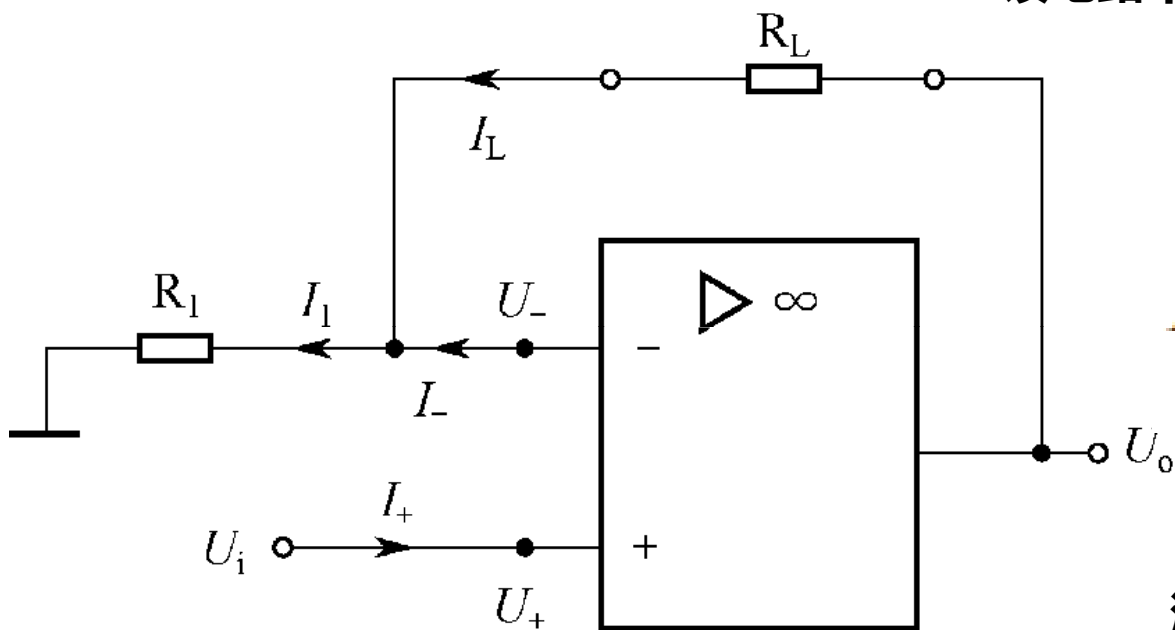
要求会推导
用叠加原理



2.2 集成运算放大器的线性应用电路

5. 电压-电流转换器

它与同相比例运算放大器有些相似，但该电路的负载 R_L 接在负反馈电路中。



$$I_L = I_1 = \frac{U_-}{R_1}$$

$$I_L = \frac{U_i}{R_1}$$

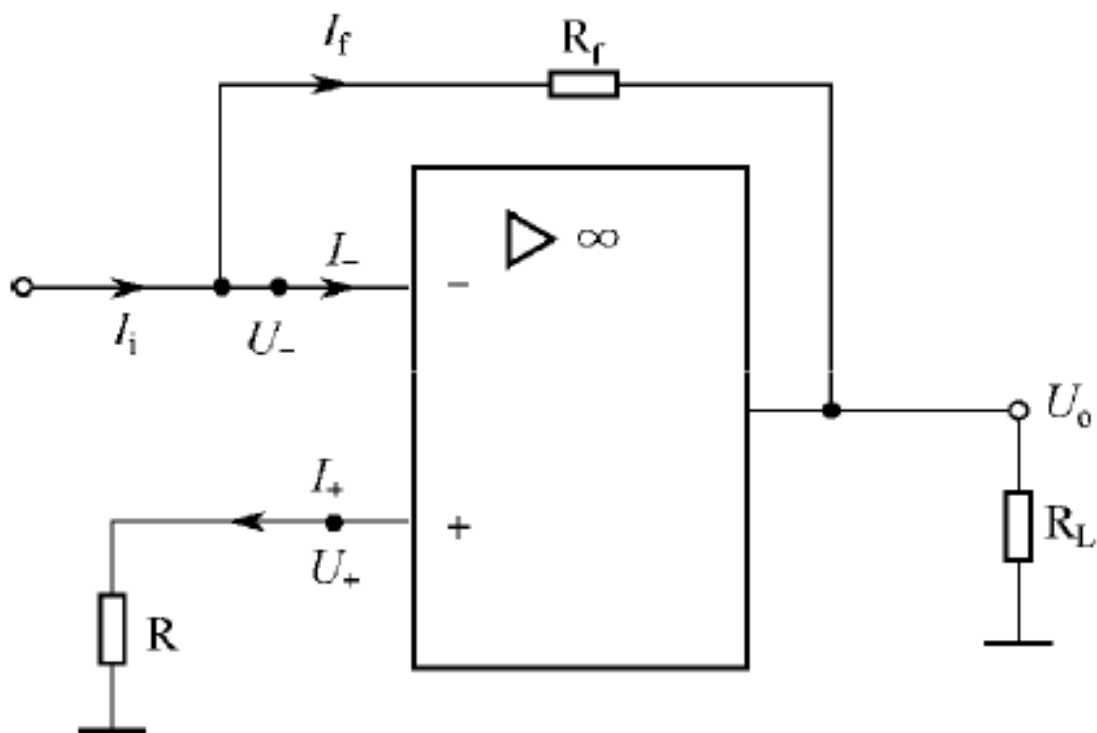
电压-电流转换器

流过负载的电流 I_L 只与输入电压 U_i 和电阻 R_1 有关，与负载 R_L 无关，当 R_1 固定后，负载电流 I_L 只与 U_i 有关。当 U_i 电压发生变化，流过负载的电流 I_L 也相应变化，从而将电压转换成电流。



2.2 集成运算放大器的线性应用电路

6. 电流-电压变换器



$$I_i = I_f$$
$$I_i = \frac{U_- - U_o}{R_f}$$

$$I_i = -\frac{U_o}{R_f}$$

$$U_o = -I_i R_f$$

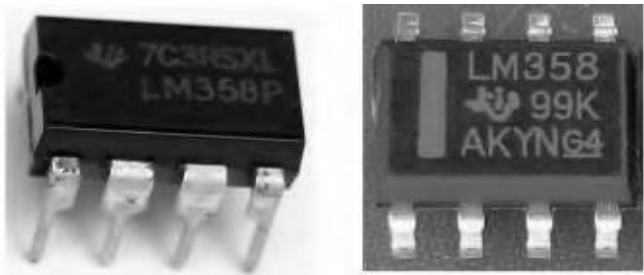
输出电压 U_o 与输入电流 I_i 和电阻 R_f 有关，与负载 R_L 无关，当 R_f 固定后，输出电压 U_o 只与输入电流 I_i 有关。当 I_i 电流发生变化时，负载上的电压 U_o 也相应变化，从而将电流转换成电压。



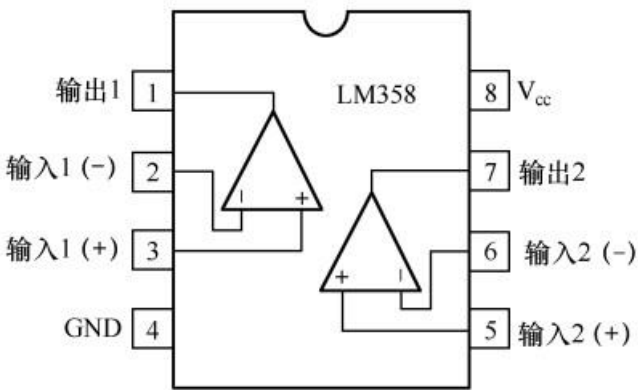
电流-电压变换器

2.3 双运算放大器 LM358 及其应用电路

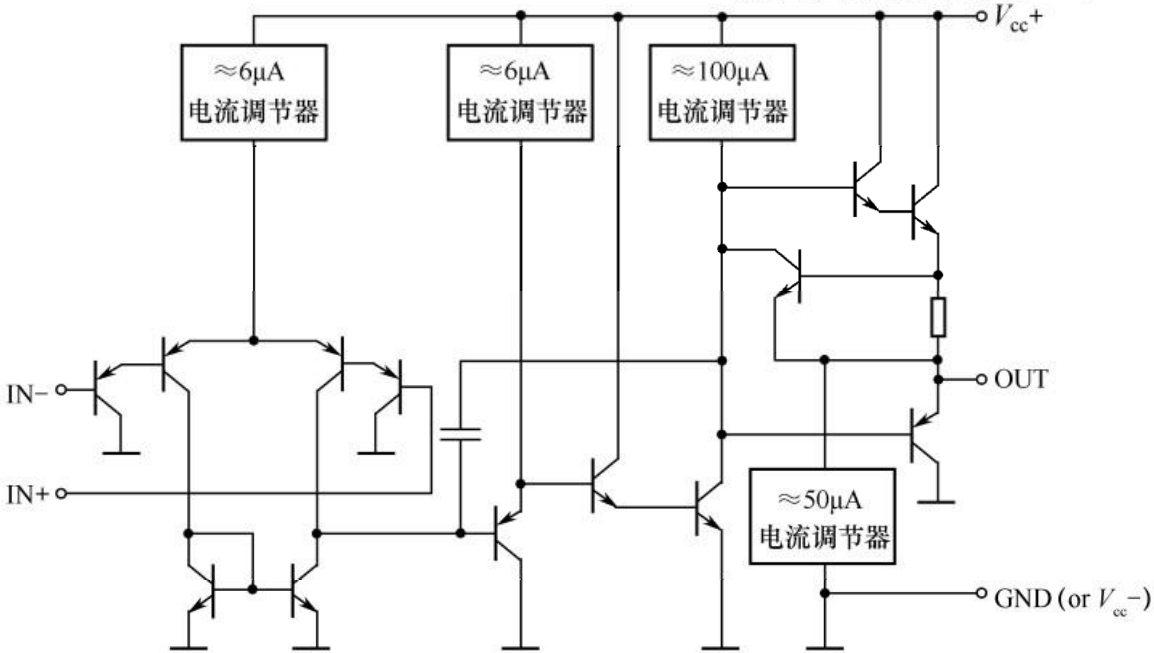
LM358 内部有两个独立、带频率补偿的高增益运算放大器，它可使用电源电压范围很宽的单电源供电，也可使用双电源供电，在一定的工作条件下其工作电流与电源电压无关。



LM358 的外形

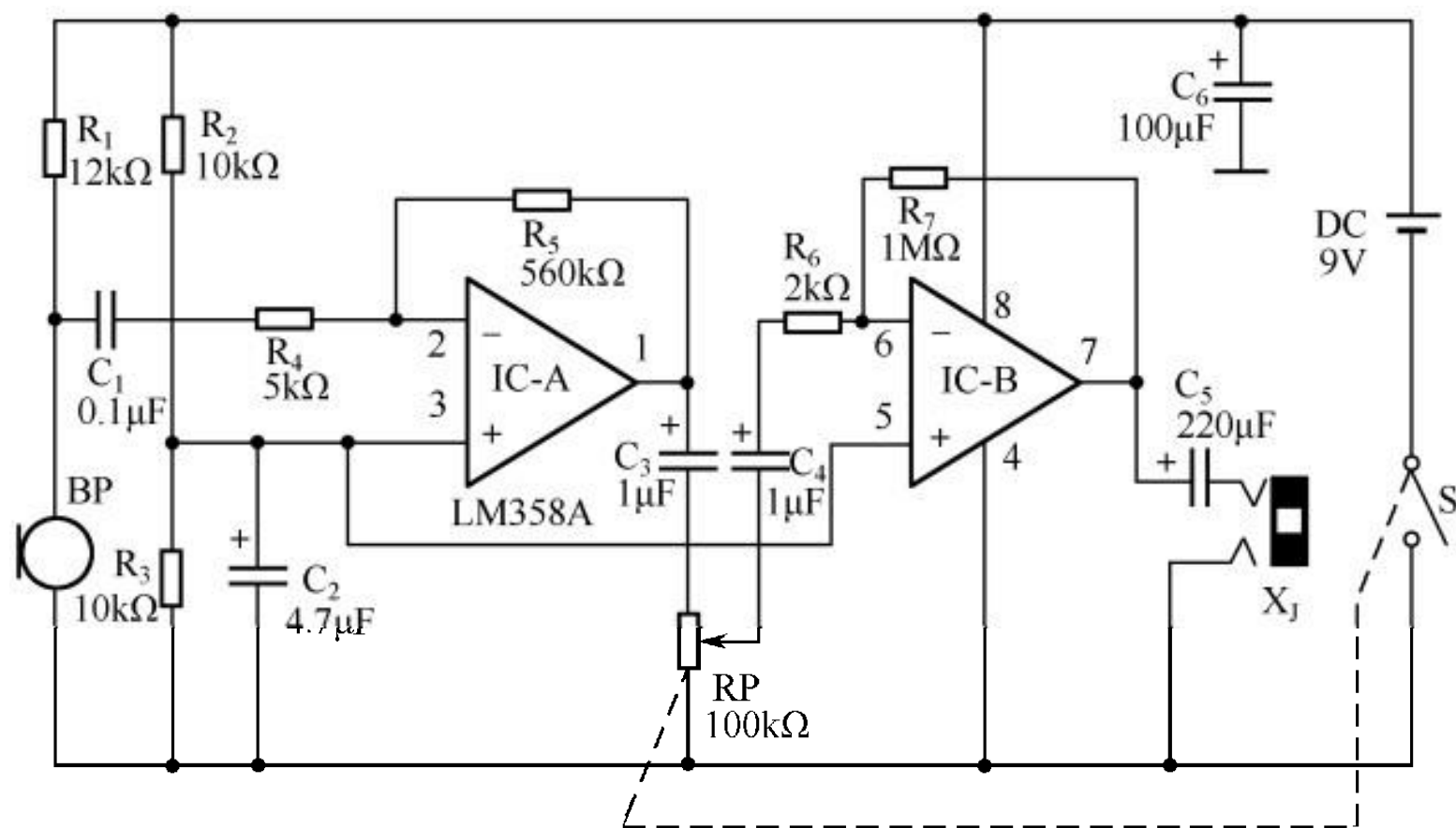


- 特性:
- 内部频率补偿;
 - 直流电压增益高 (约100dB);
 - 单位增益频带宽 (约1MHz);
 - 电源电压范围宽: 单电源 (3~30V); 双电源 ($\pm 1.5 \sim \pm 15V$);
 - 低功耗电流, 适于电池供电;
 - 低输入偏流;
 - 低输入失调电压和失调电流;
 - 共模输入电压范围宽, 包括接地;
 - 差模输入电压范围宽, 等于电源电压范围;
 - 输出电压摆幅大 (0至 $V_{cc}-1.5V$)。



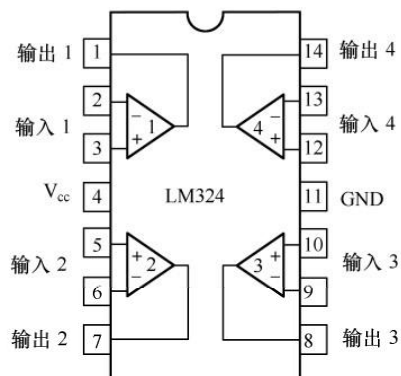
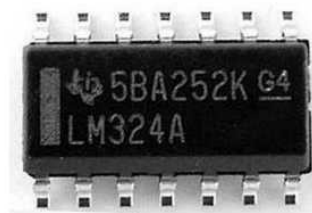
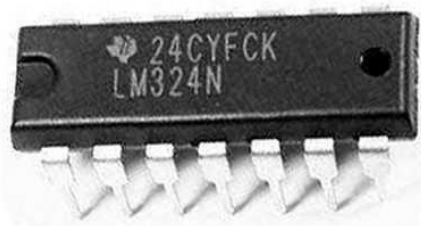
单个运算放大器电路结构

2.3 双运算放大器 LM358 及其应用电路



采用 LM358 作为放大器的高增益话筒信号放大电路

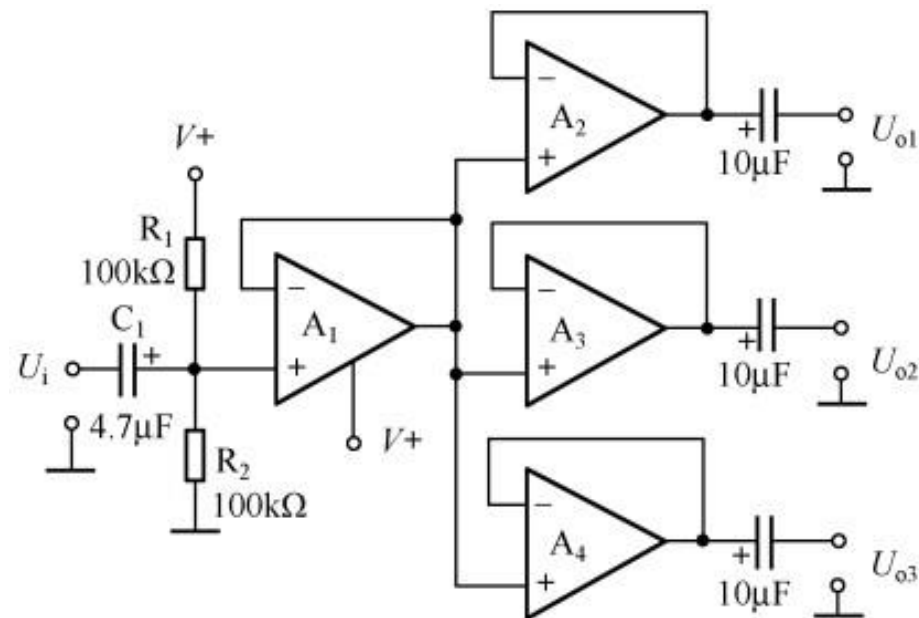
2.4 四运算放大器 LM324 及其应用电路



主要特性:

- 短路保护输出;
- 真正的差分输入级;
- 单电源供电: 3.0~32V (LM224、LM324、LM324A);
- 低输入偏置电流: 100nA最大值 (LM324A);
- 每个封装有4个放大器;
- 内部补偿;
- 共模范围扩展至负电源;
- 输入端的ESD钳位提高了可靠性, 且不影响器件工作。

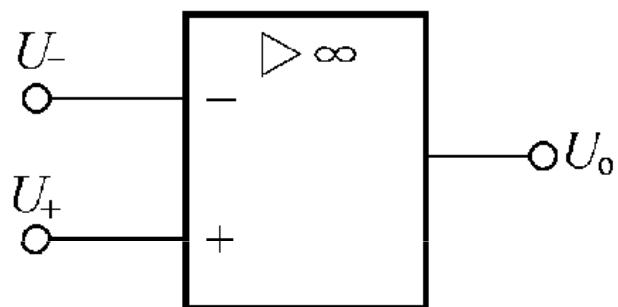
LM324 内部结构、引脚功能和特性



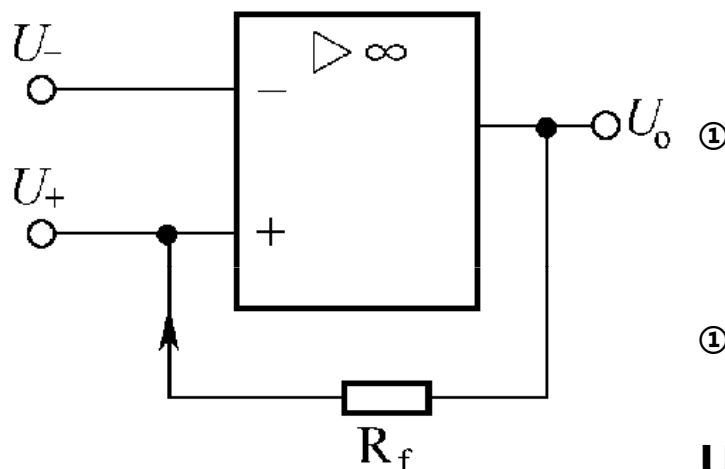
采用 LM324 构成的交流信号三路分配器

2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

当集成运算放大器处于**开环或正反馈**时，它会工作在**非线性**状态



(a) 开环(未加反馈)



(b) 加正反馈

集成运算放大器工作在非线性状态的两种形式

工作在非线性状态的集成运算放大器具有以下特点：

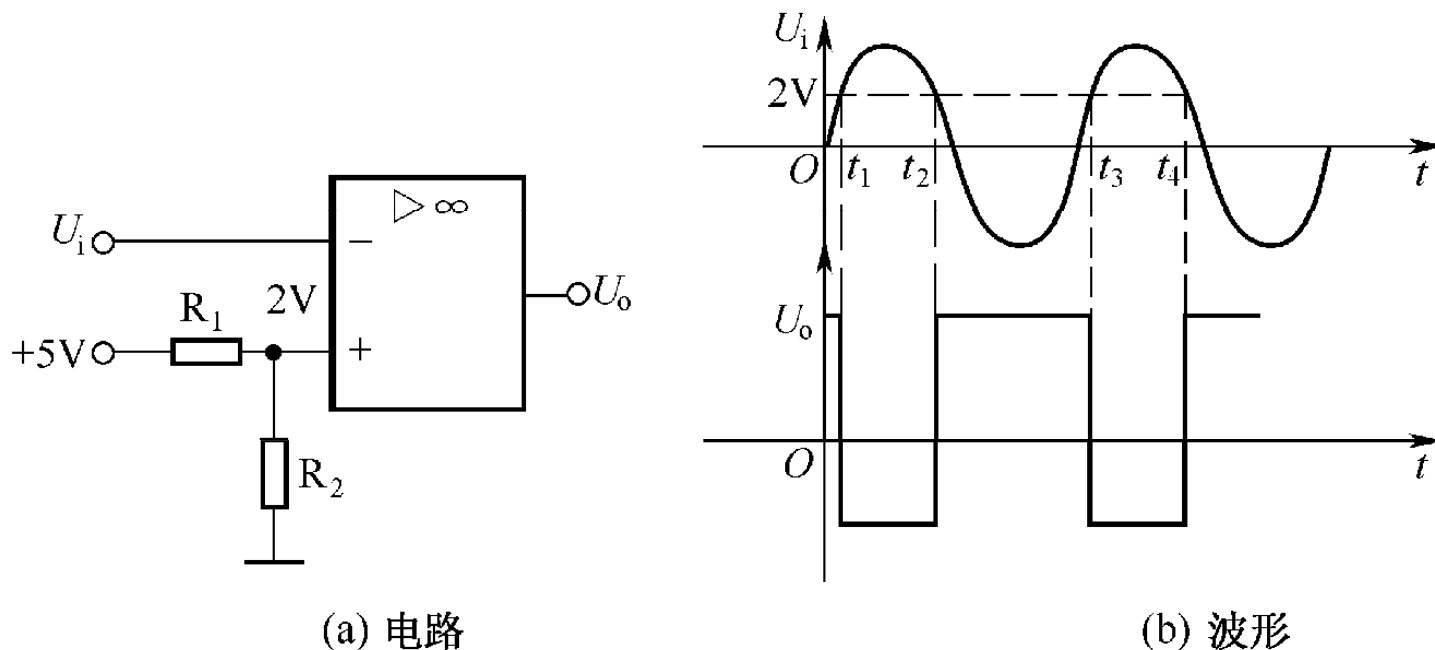
- ① 当同相输入端电压大于反相输入端电压时，输出电压为高电平，即
 $U_+ > U_-$ 时， $U_o = +U$ (高电平)
- ① 当同相输入端电压小于反相输入端电压时，输出电压为低电平，即
 $U_+ < U_-$ 时， $U_o = -U$ (低电平)

电平转换电路



2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

1. 电压比较器 电压比较器通常可分两种：单门限电压比较器和双门限电压比较器。



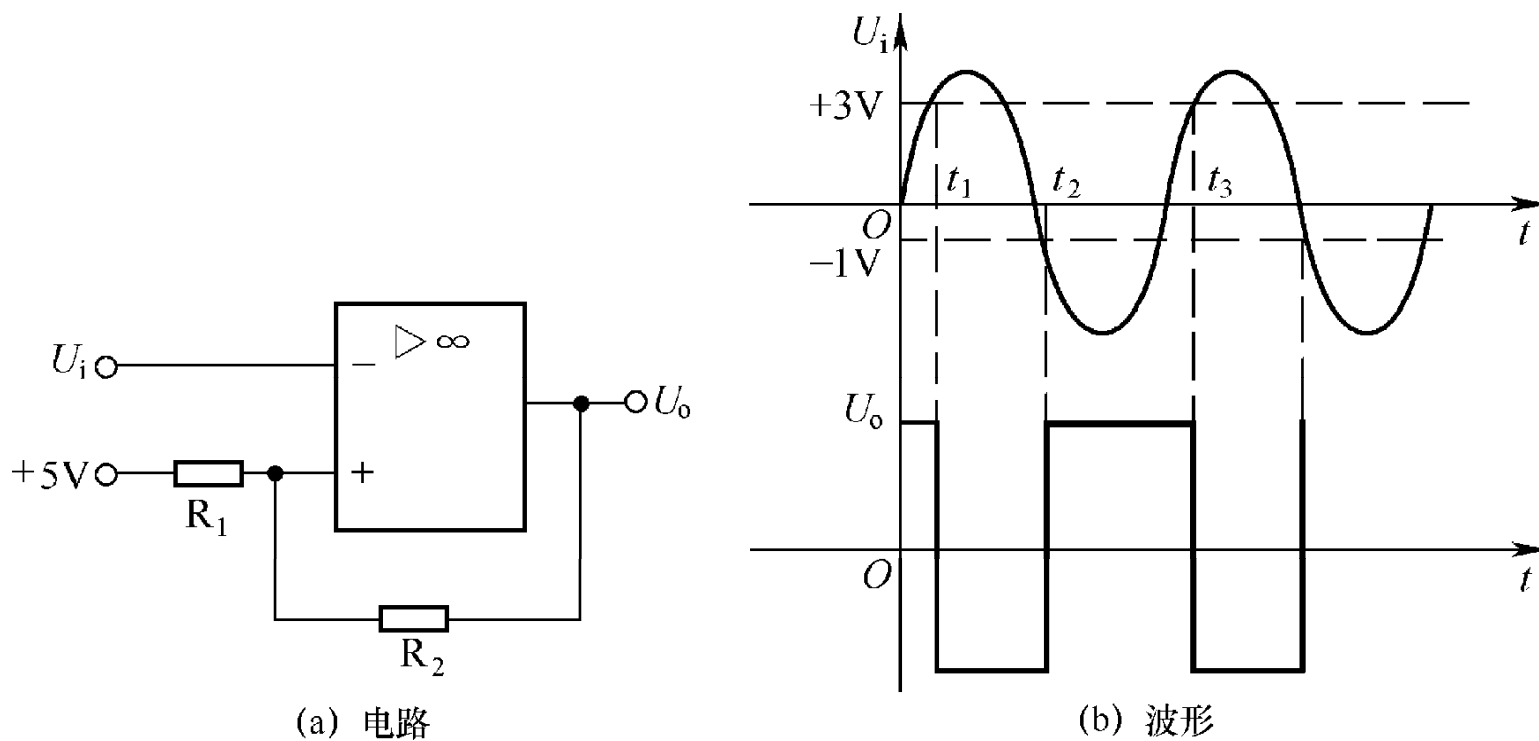
通过两输入端电压的比较作用，集成运算放大器将输入信号转换成方波信号， U_+ 电压大小不同，输出的方波信号 U_o 的宽度就会发生变化。

门限电压（又称阈值电压、基准电压） 单门限电压比较器

过零比较器
电平检测器
窗口比较器
区域比较器

2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

1. 电压比较器 电压比较器通常可分两种：单门限电压比较器和双门限电压比较器。



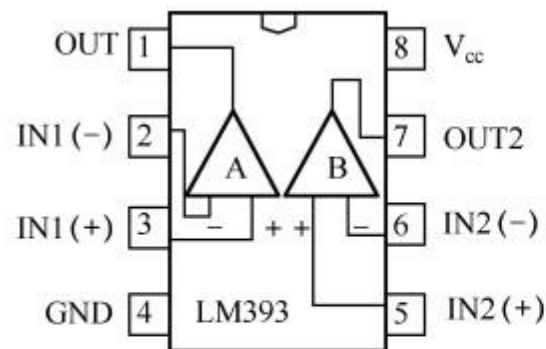
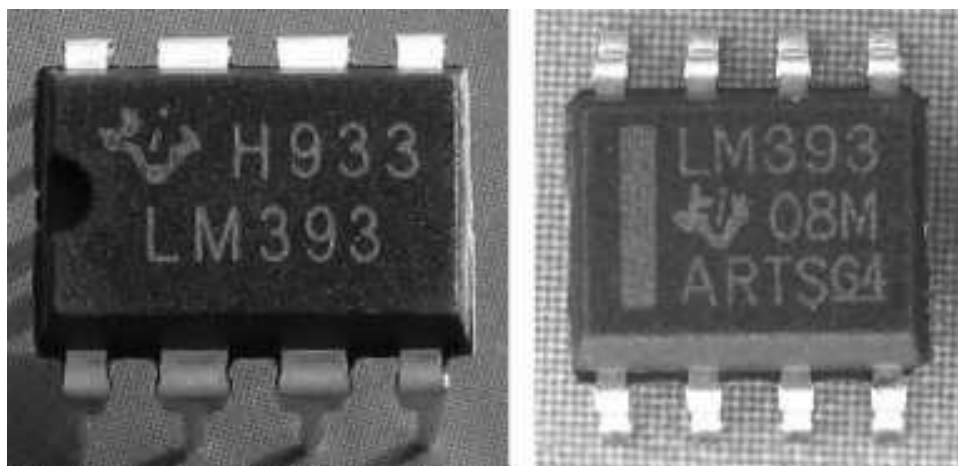
双门限电压比较器的“+”端电压由+5V电压和输出电压 U_o 共同来决定，而 U_o 有高电平和低电平两种可能，因此“+”端电压 U_+ 也有两种：当 U_o 为高电平时， U_+ 电压被 U_o 抬高，假设此时的 U_+ 为3V；当 U_o 为低电平时， U_+ 电压被 U_o 拉低，假设此时的 U_+ 为-1V。

双门限电压比较器



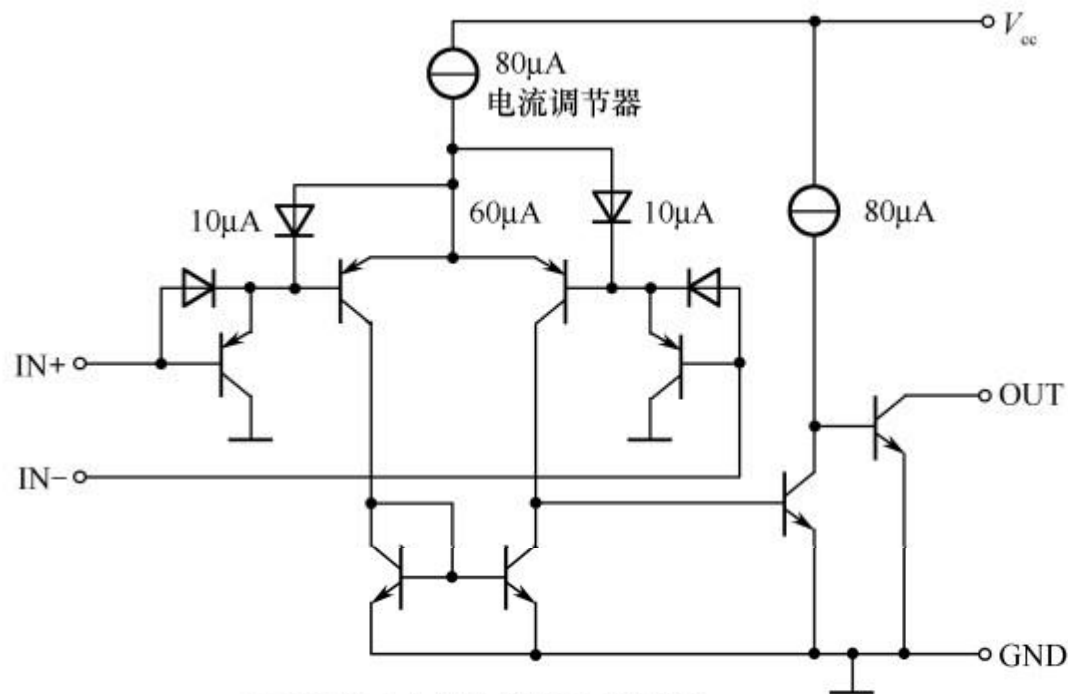
2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

1. 电压比较器



特性:

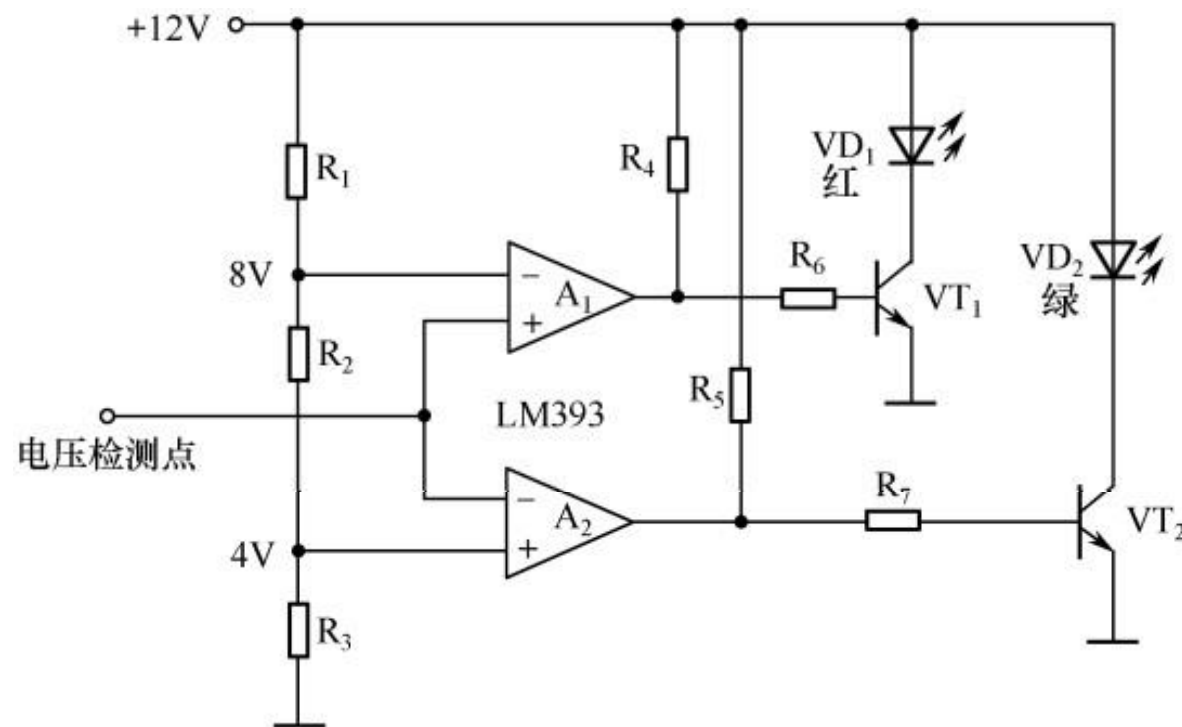
- 工作电源电压范围宽, 单电源、双电源均可工作, 单电源为 $2\sim 36\text{V}$, 双电源为 $\pm 1\sim \pm 18\text{V}$;
- 消耗电流小, $I_{CC}=0.4\text{mA}$;
- 输入失调电压小, $V_{IO}=\pm 2\text{mV}$;
- 共模输入电压范围宽, $V_{IC}=0\sim (V_{CC}-1.5\text{V})$;
- 输出端可与TTL、DTL、MOS、CMOS等电路连接;
- 输出可以用开路集电极连接或门。



LM393单个电压比较器的电路结构

2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

1. 电压比较器

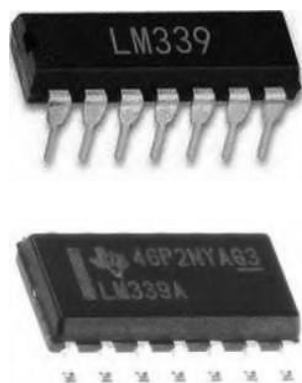


采用 LM393 构成的电压检测指示电路

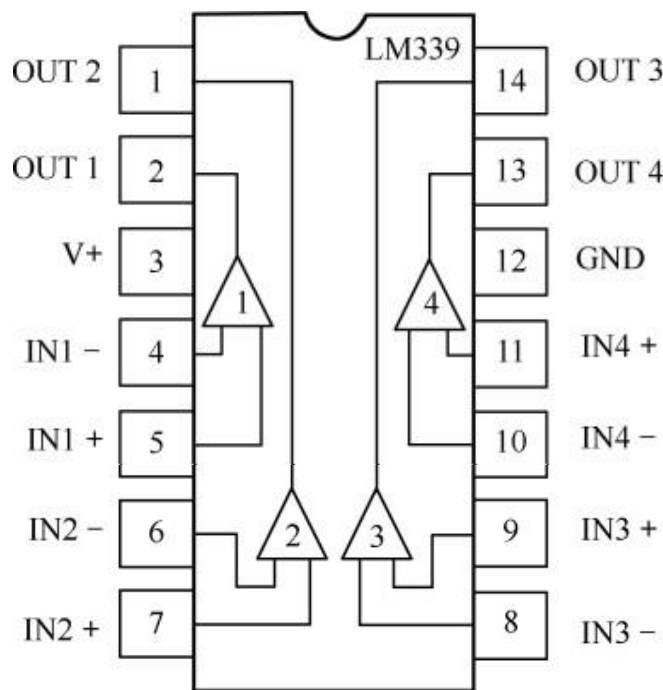


2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

1. 电压比较器



LM339 的外形



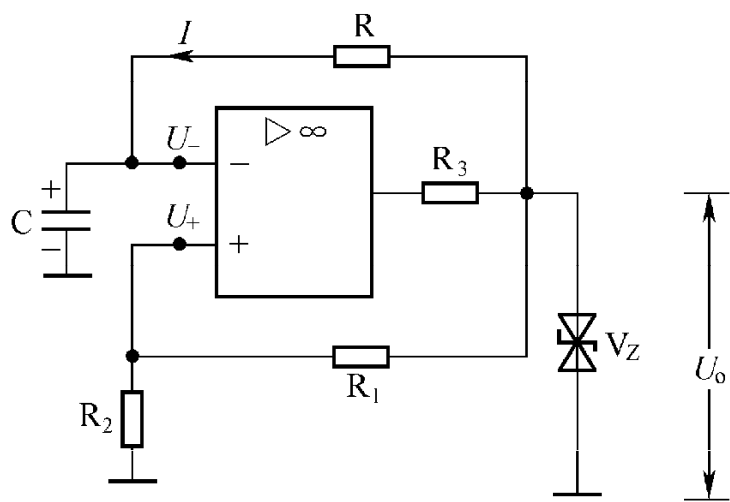
特性:

- 电压失调小, 一般是2mV;
- 共模范围大, $0 \sim (V_{cc} - 1.5V)$;
- 对比较信号源的内阻限制很宽;
- 可使用单电源或双电源供电, 单电源为2~36V, 双电源电压为+1V~ $\pm 18V$;
- 差动输入电压范围大, 甚至可等于 V_{cc} ;
- 输出端可与TTL、CMOS等电路直接连接。

LM393 是一个内含四个独立电压比较器的集成电路, 可以单电源供电 (2~36V), 也可以双电源供电 ($\pm 1 \sim \pm 18V$)。

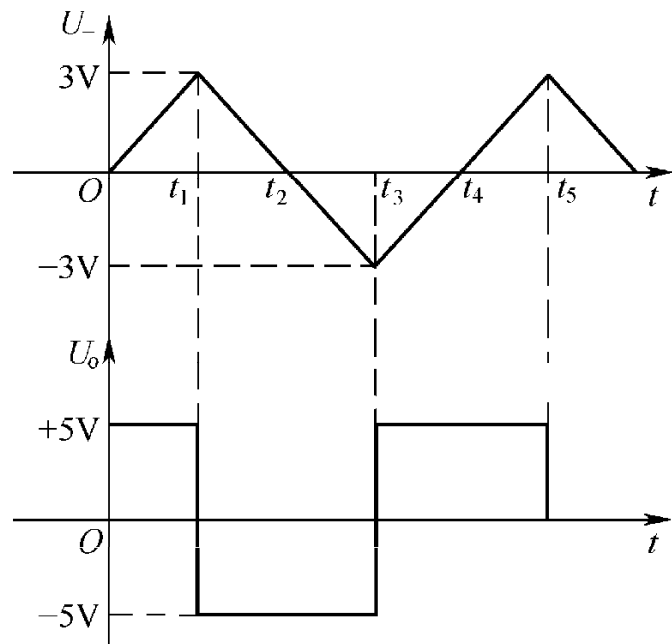
2.5 集成运算放大器的非线性应用电路

2. 方波信号发生器



(a) 电路

方波信号发生器

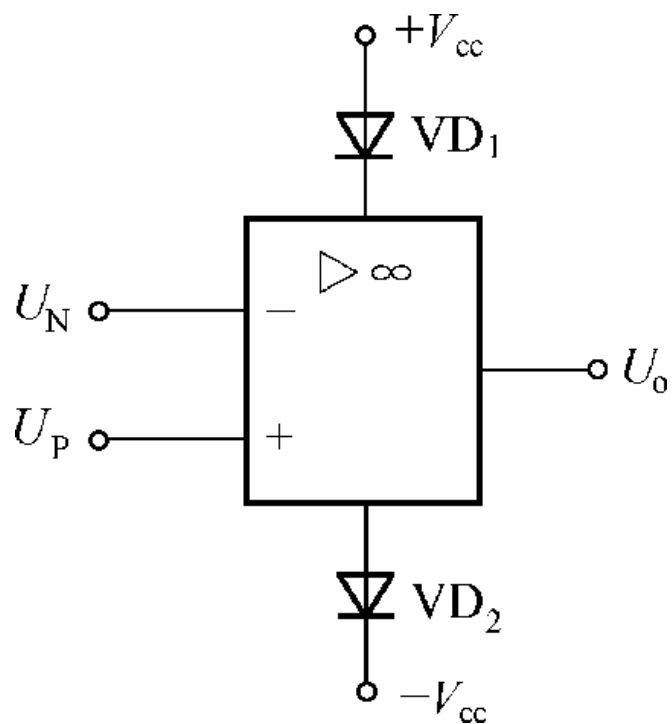


(b) 波形

在集成运算放大器上同时加上正、负反馈电路构成的， V_Z 为双向稳压管，假设它的稳压值 U_Z 是 $5V$ ，它可以使输出电压 U_o 稳定在 $-5 \sim +5V$ 范围内。

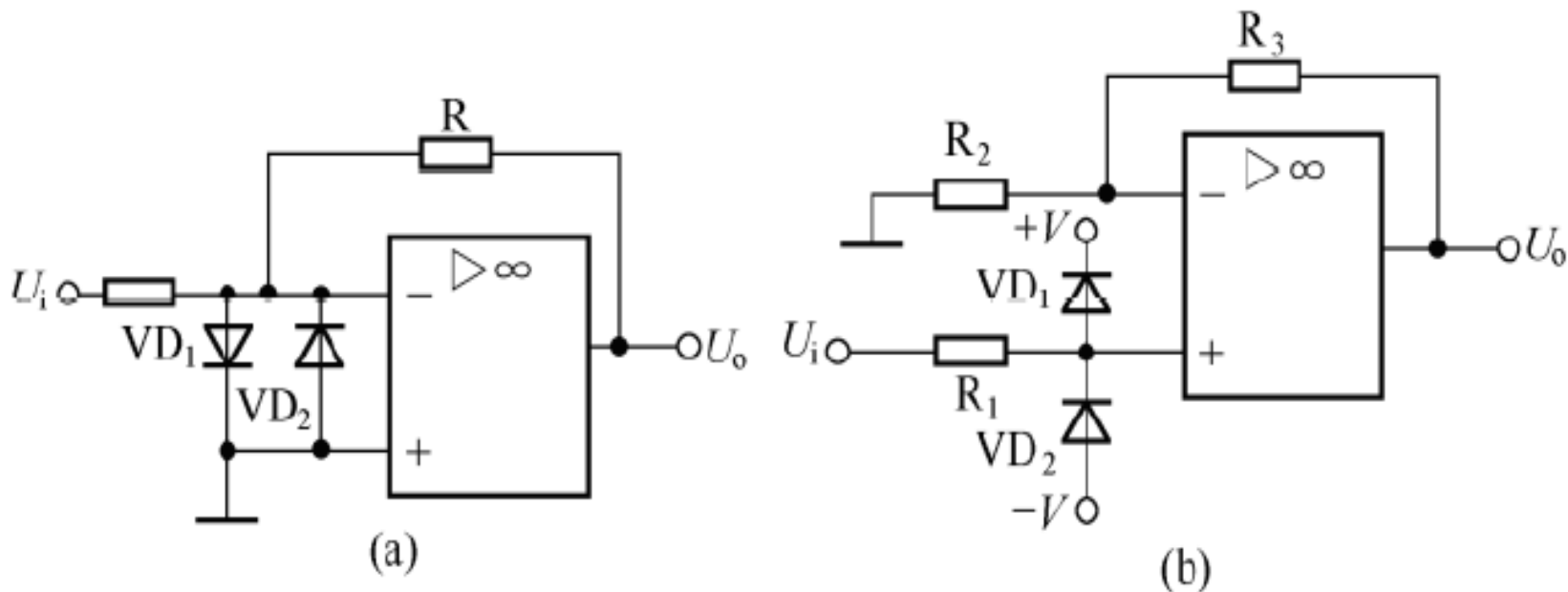


2.6 集成运算放大器的保护



运算放大器电源极性接错保护电路

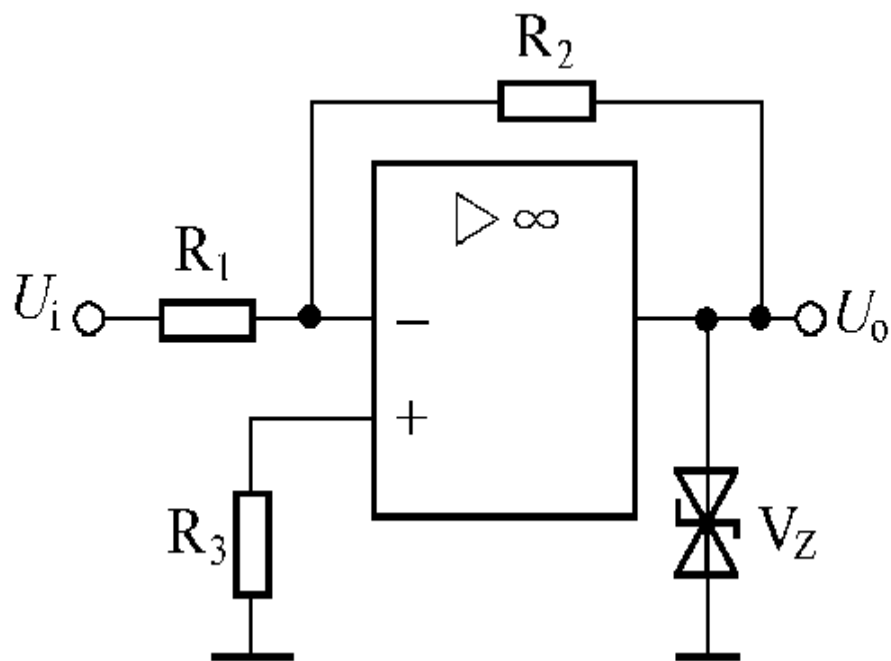
该电路是在运算放大器的正、负电源处各接了一个二极管，由于二极管具有单向导电性，如果某电源极性接错，相应的二极管无法导通，电源就不能加到运算放大器的电源引脚，从而保护了运算放大器。



运算放大器的输入保护电路

为了防止输入信号幅度过大。

2.6 集成运算放大器的保护



该电路在输出端接了一个双向稳压管 V_Z ，它的稳压范围是 $-U_Z \sim +U_Z$ ，一旦输出电压超过这个范围， V_Z 就会被击穿，将输出信号幅度限制在 $-U_Z \sim +U_Z$ 范围内。

运算放大器的输出保护电路

为了防止输出信号幅度过大。

3 滤波电路

选频滤波电路

- 3.1 低通滤波器 (LPF)
- 3.2 高通滤波器 (HPF)
- 3.3 带通滤波器 (BPF)
- 3.4 带阻滤波器 (BEF)
-
- 3.5 有源滤波器

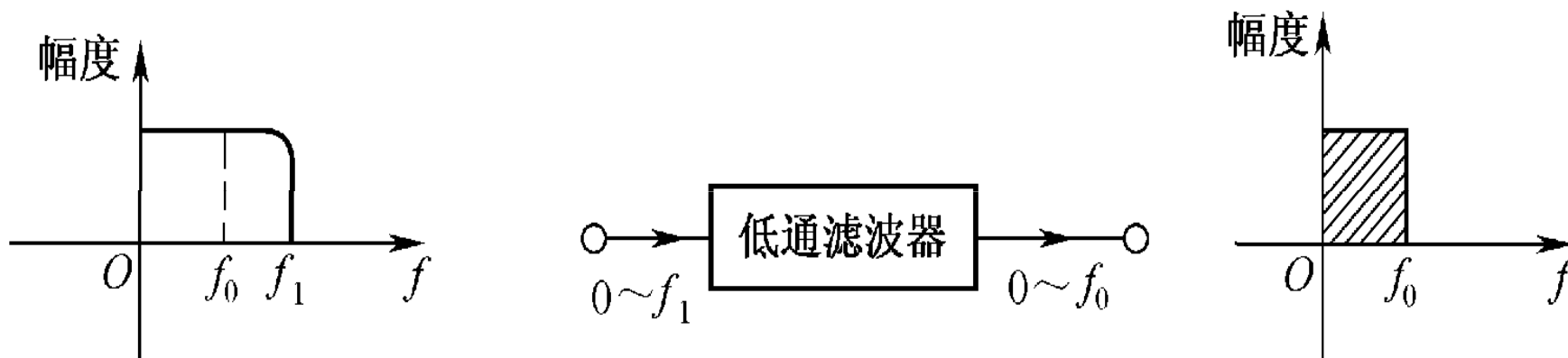
根据电路工作时**是否需要电源**，滤波电路分为无源滤波器和有源滤波器；

根据电路**选取信号**的特点，滤波器可分为四种：低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。



3.1 低通滤波器 (LPF)

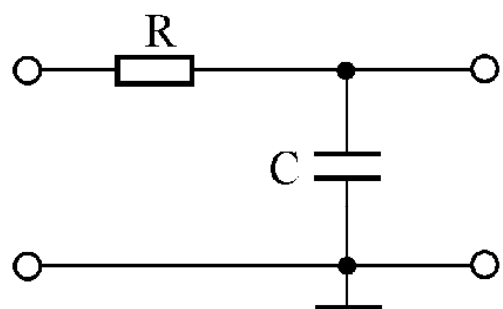
选取低频信号



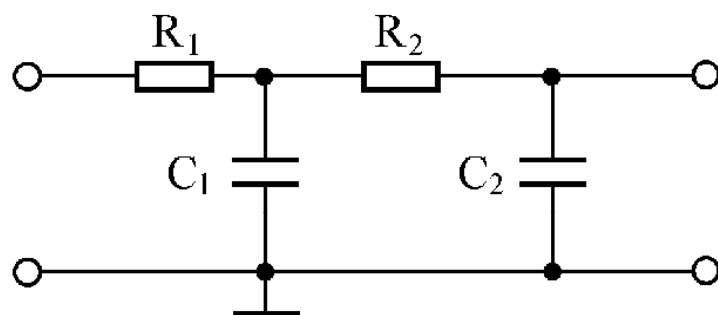
低通滤波器性质说明图

f_0 频率称为截止频率，又称转折频率，低通滤波器只能通过频率低于截止频率 f_0 的信号。

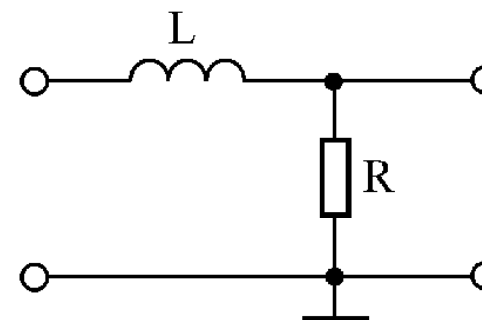
3.1 低通滤波器 (LPF)



(a)



(b)



(c)

几种常见的低通滤波器

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_L = 2\pi fL$$

3.2 高通滤波器 (HPF)

选取高频信号

高通滤波器能通过频率高于截止频率 f_0 的信号。

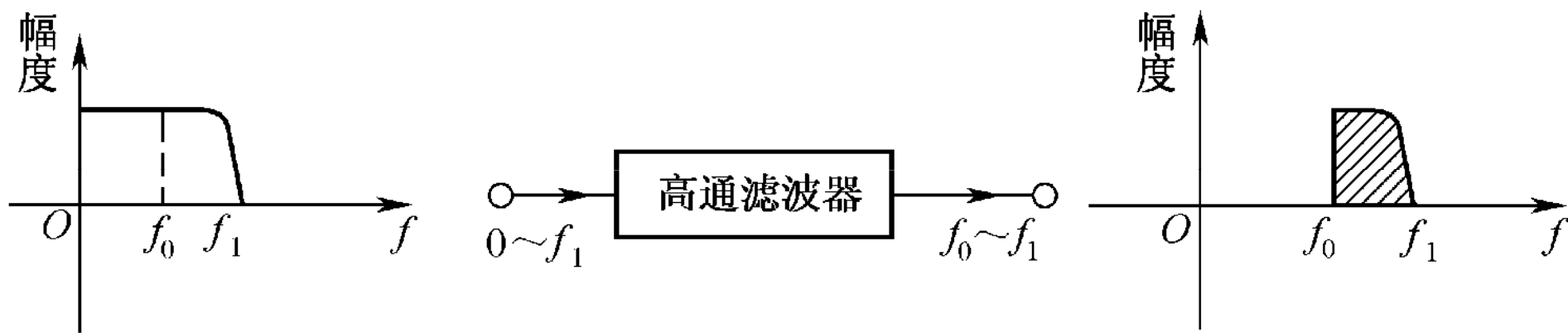
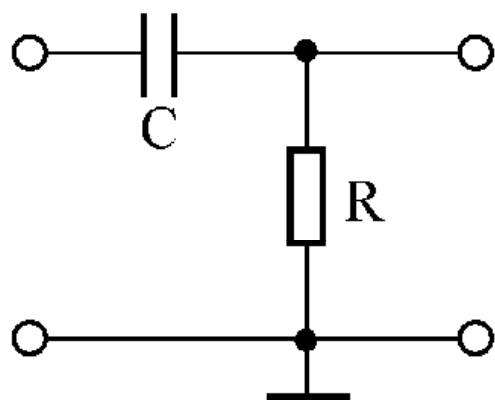
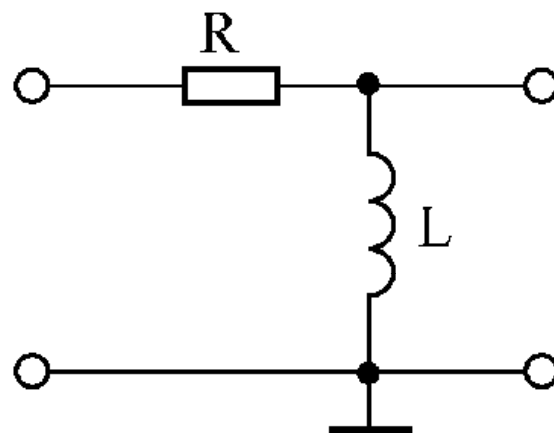


图31 高通滤波器性质说明图

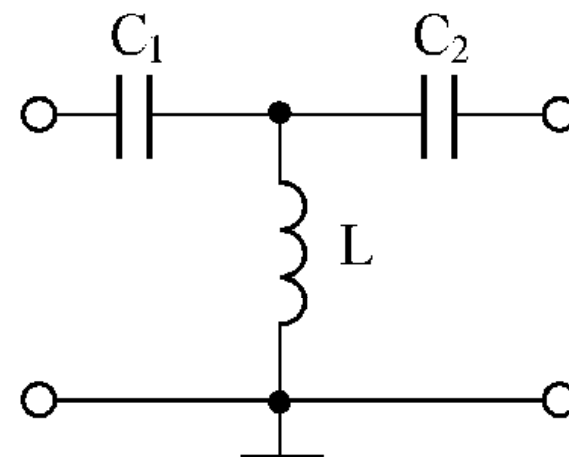
3.2 高通滤波器 (HPF)



(a)



(b)

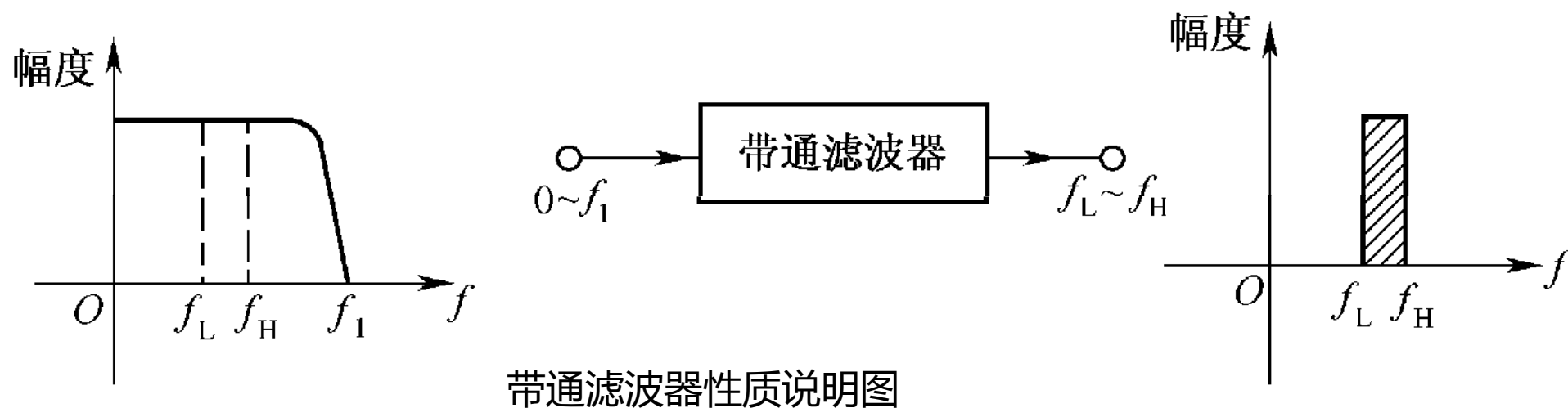


(c)

几种常见的高通滤波器

3.3 带通滤波器 (BPF)

选取某一段频率范围内的信号

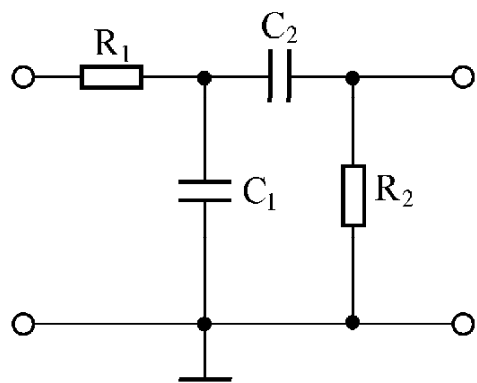


带通滤波器性质说明图

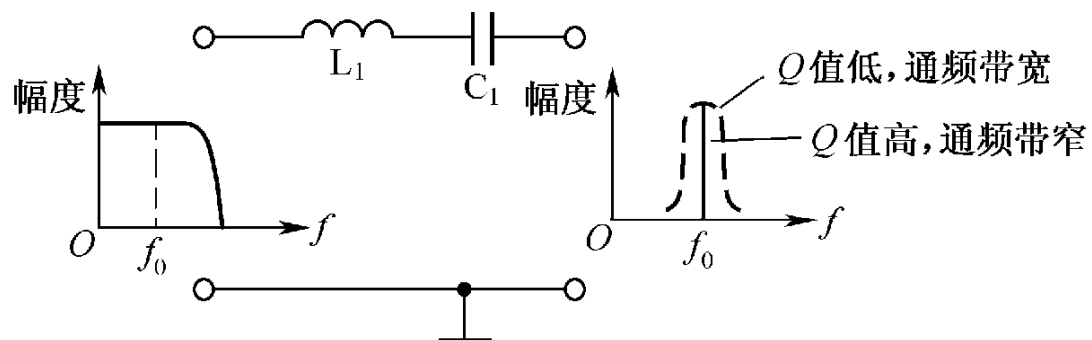
f_L 称为下限截止频率， f_H 称为上限截止频率。带通滤波器能通过频率在下限截止频率 f_L 和上限截止频率 f_H 之间的信号（含 f_L 、 f_H 信号），如果 $f_L=f_H=f_0$ ，那么这种带通滤波器就可以选择单一频率 f_0 的信号。

3.3 带通滤波器 (BPF)

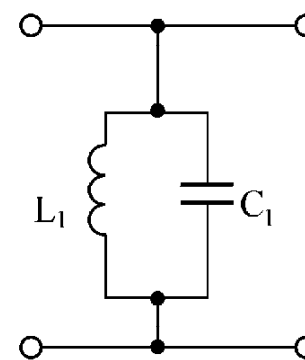
几种常见的带通滤波器



(a)



(b)

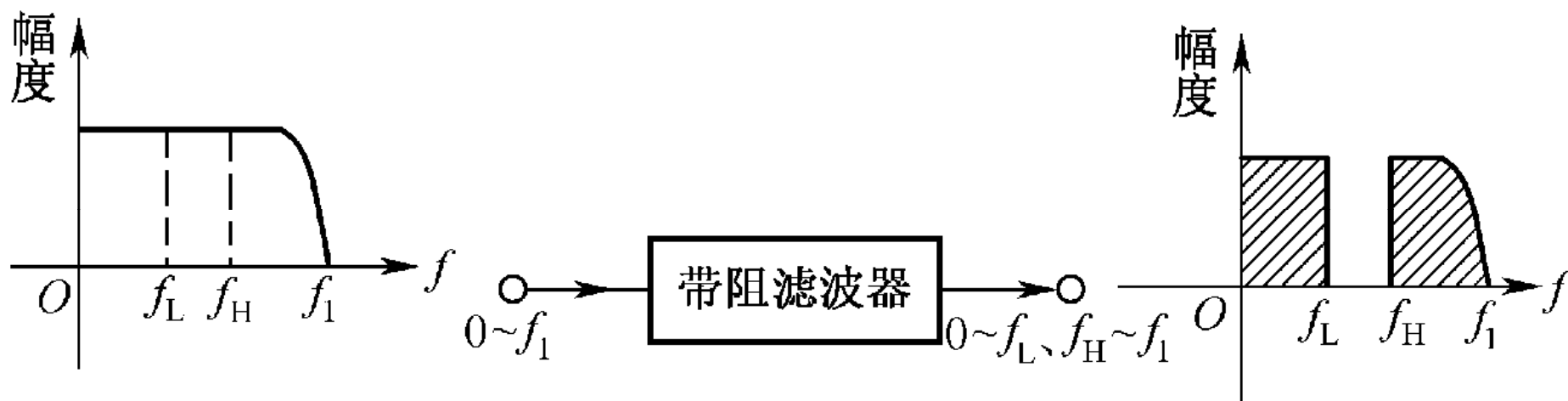


(c)

$$Q = \frac{2\pi fL}{R}$$

3.4 带阻滤波器 (BEF)

选取某一段频率范围以外的信号。带阻滤波器又称陷波器，它的功能与带通滤波器恰好相反。



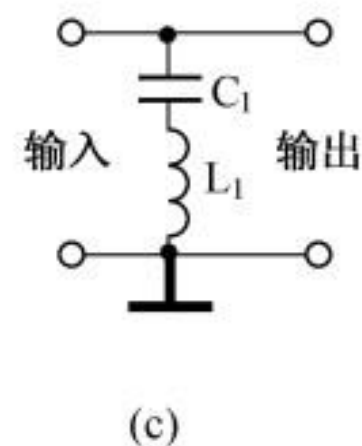
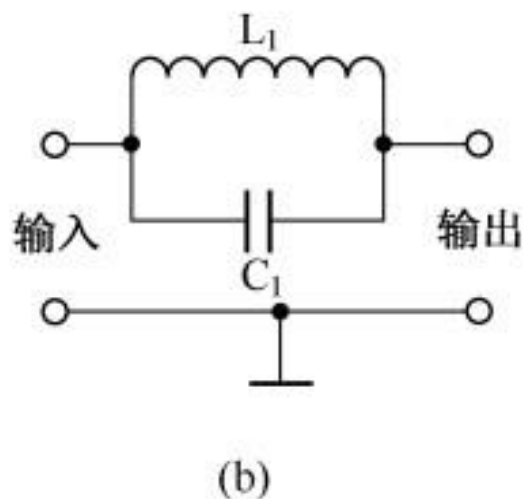
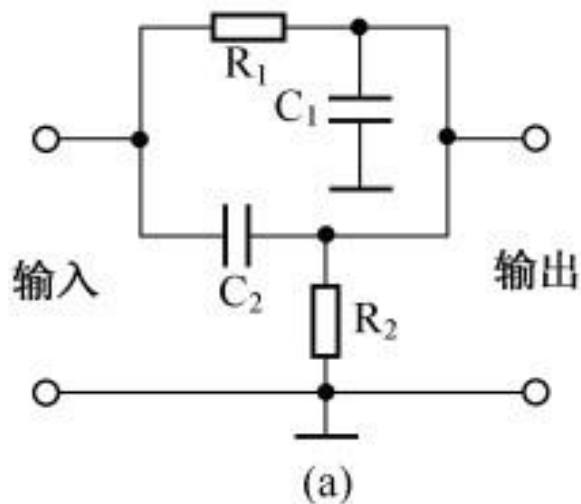
带阻滤波器性质说明图

带阻滤波器能通过频率在下限截止频率 f_L 以下的信号和上限截止频率 f_H 以上的信号（不含 f_L 、 f_H 信号），如果 $f_L=f_H=f_0$ ，那么带阻滤波器就可以选择 f_0 以外的所有信号。

3.4 带阻滤波器 (BEF)



几种常见的带阻滤波器



$$Q = \frac{2\pi fL}{R}$$

3.5 有源滤波器



无源滤波器一般由 LC 或 RC 元件构成，无信号放大功能。

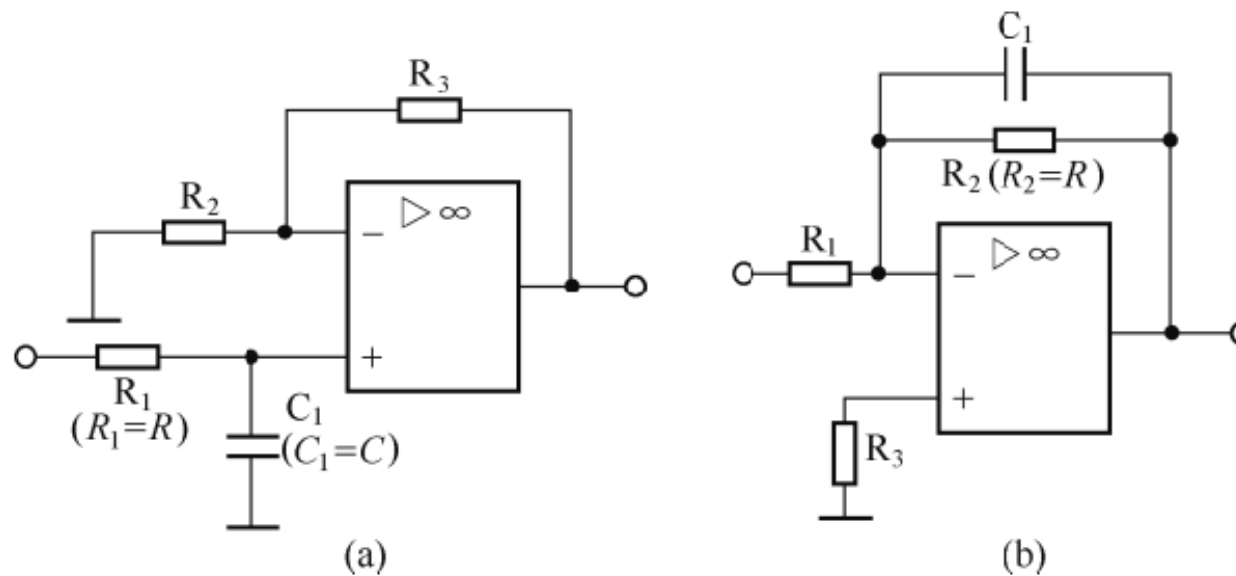
有源滤波器一般由有源器件（运算放大器）和 RC 元件构成。

有源滤波器的优点是不采用大电感和大电容，故体积小、质量小，并且对所选取的信号有放大功能；缺点是因为运算放大器频率带宽不够理想，所以**有源滤波器常用在几千赫频率以下的电路中，而高频电路中采用LC无源滤波电路效果更好。**

3.5 有源滤波器



1. 一阶低通滤波器

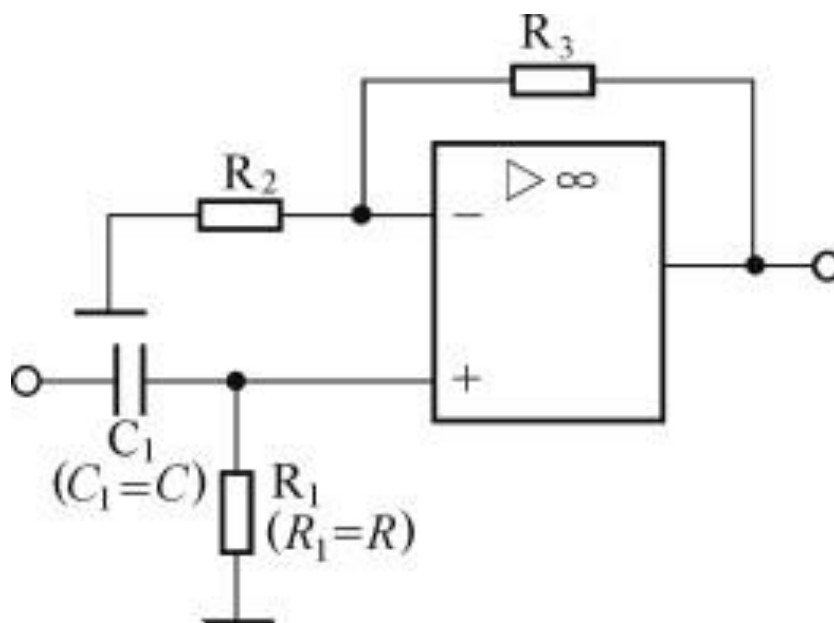


一阶低通滤波器

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

3.5 有源滤波器

2. 一阶高通滤波器

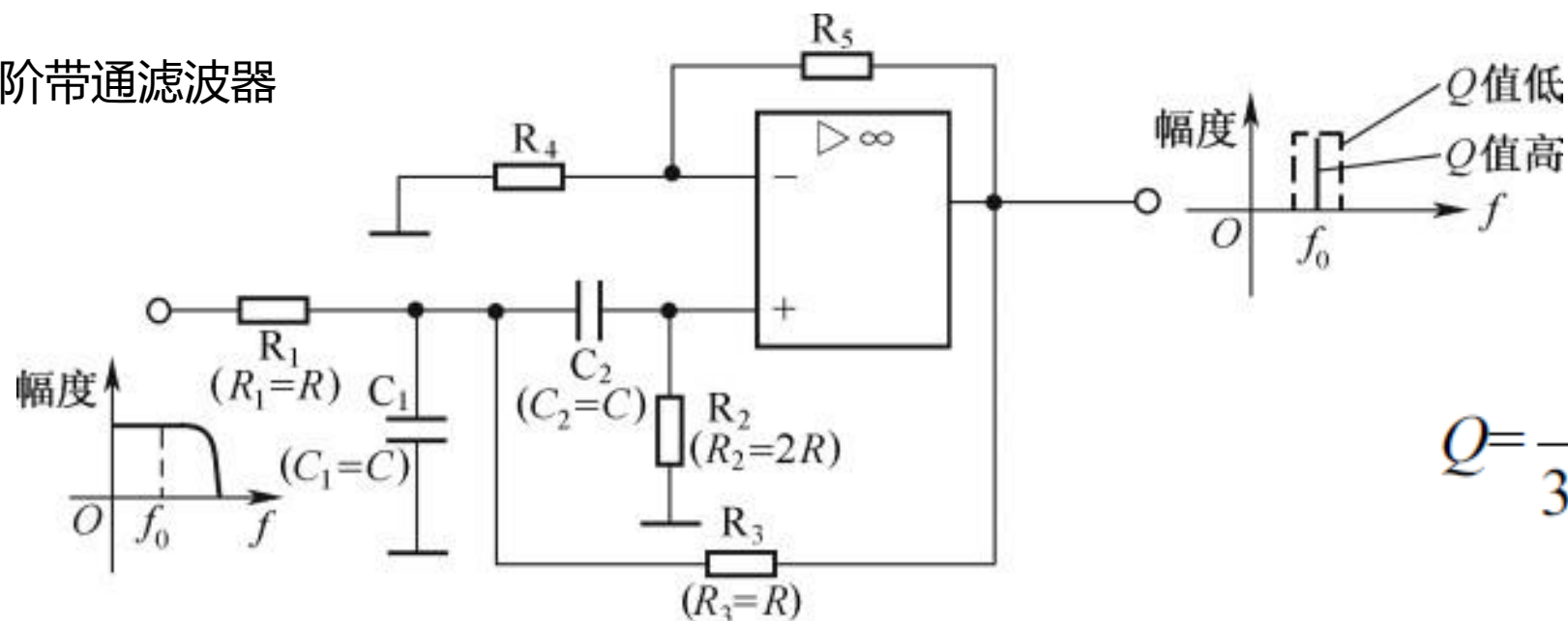


$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

一阶高通滤波器

3.5 有源滤波器

3. 二阶带通滤波器



二阶带通滤波器

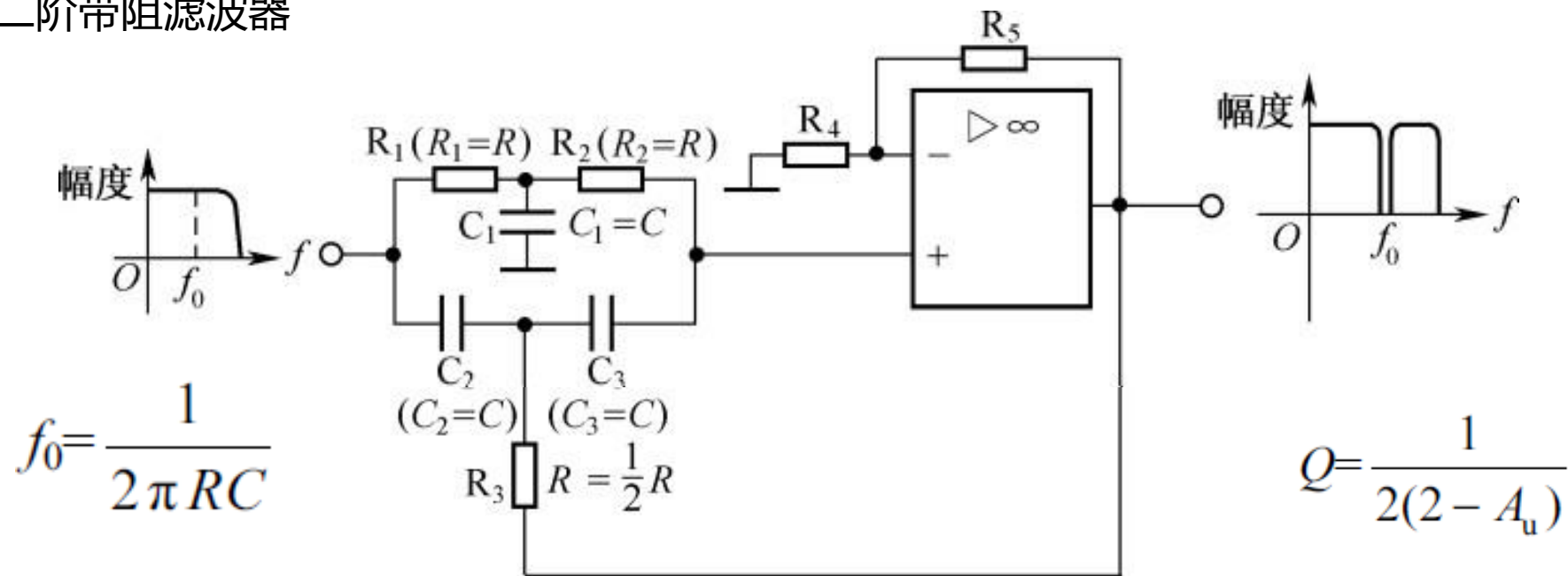
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_u}$$

$$A_u = 1 + \frac{R_5}{R_4}$$

3.5 有源滤波器

4. 二阶带阻滤波器



二阶带阻滤波器

$$A_u = 1 + \frac{R_5}{R_4}$$

