

## § 8.4 有源滤波电路

### § 8.4.1 滤波电路概述

滤波电路简称滤波器，是一种能使某一部分频率的信号顺利通过，而使其它频率的信号被大幅衰减的电路。

无源滤波器，是由R、L和C等无源元件组成的；

有源滤波器，由集成运放构成的滤波器。



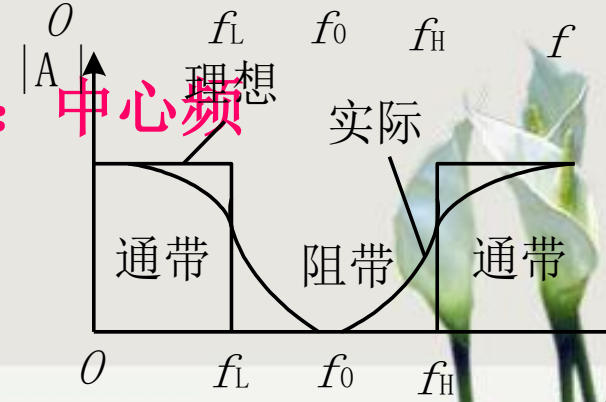
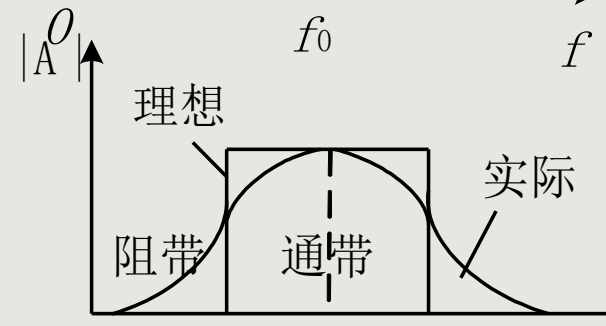
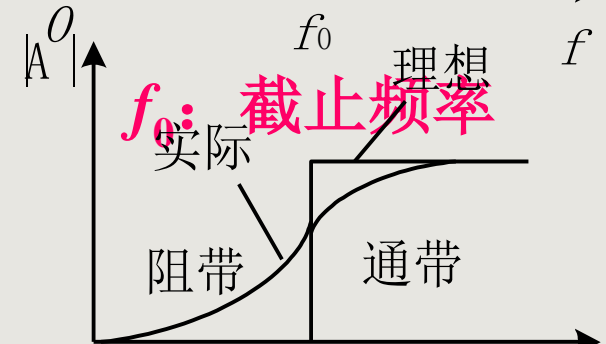
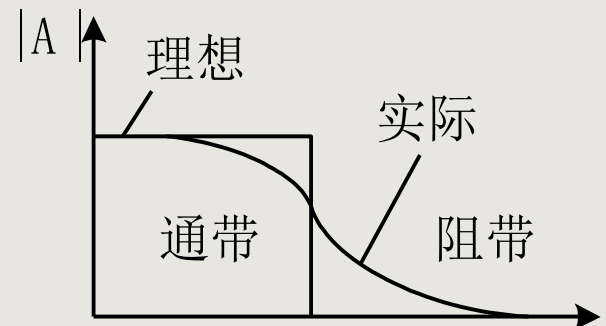
## 滤波器的分类

(1) **低通滤波器**: 低频信号能够通过, 而高频信号不能通过的滤波器称为低通滤波器

(2) **高通滤波器**: 只允许频率高于截止频率的信号通过而低频信号不能通过的滤波器

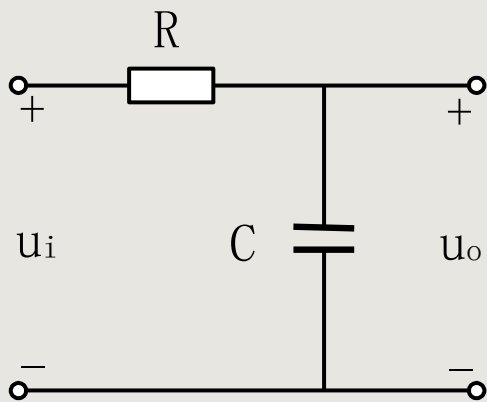
(3) **带通滤波器**: 频率在某一个频带范围内的信号能够通过, 而其余频率的信号不能通过的滤波器

(4) **带阻滤波器**: 不允许某一频带范围内的信号通过, 而允许其余频率的信号通过的滤波器  
 $f_L$ : 高通截止频率,  $f_H$ : 低通截止频率,  $f_0$ : 中心频率



## § 8.4.2 低通滤波器

### 1. 一阶低通无源滤波器



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + jf/f_o}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{为截止频率} \quad f=f_o \text{时}, A_u=0.707$$

$$\text{幅频特性为} \quad |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_o)^2}}$$

对数幅频特性

$$20 \lg |\dot{A}_u| = -10 \lg [1 + (f/f_o)^2]$$



对数幅频特性  $20\lg | \dot{A}_u | = -10\lg [1 + (f / f_0)^2]$

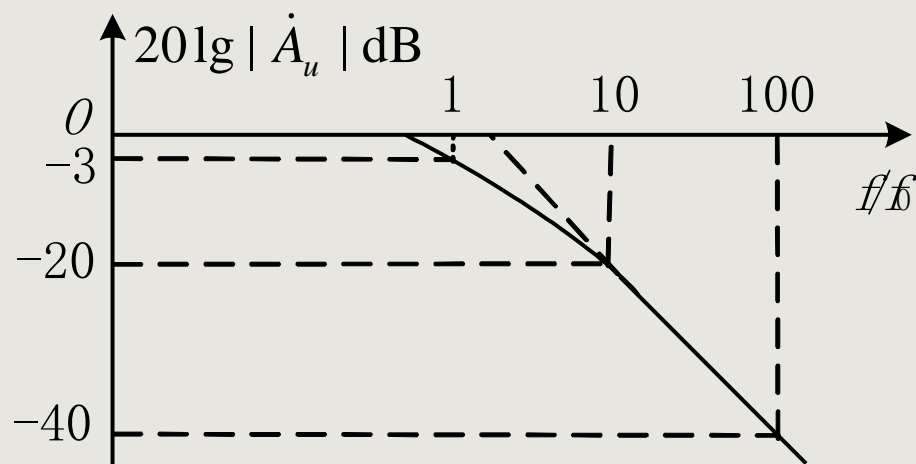
$f=f_0$        $20\lg | \dot{A}_u | = -3\text{dB}$       截止频率也称为 **-3dB频率**

$f=10f_0$        $20\lg | \dot{A}_u | = -20\text{dB}$

$f=100f_0$        $20\lg | \dot{A}_u | = -40\text{dB}$

$f=1000f_0$        $20\lg | \dot{A}_u | = -60\text{dB}$

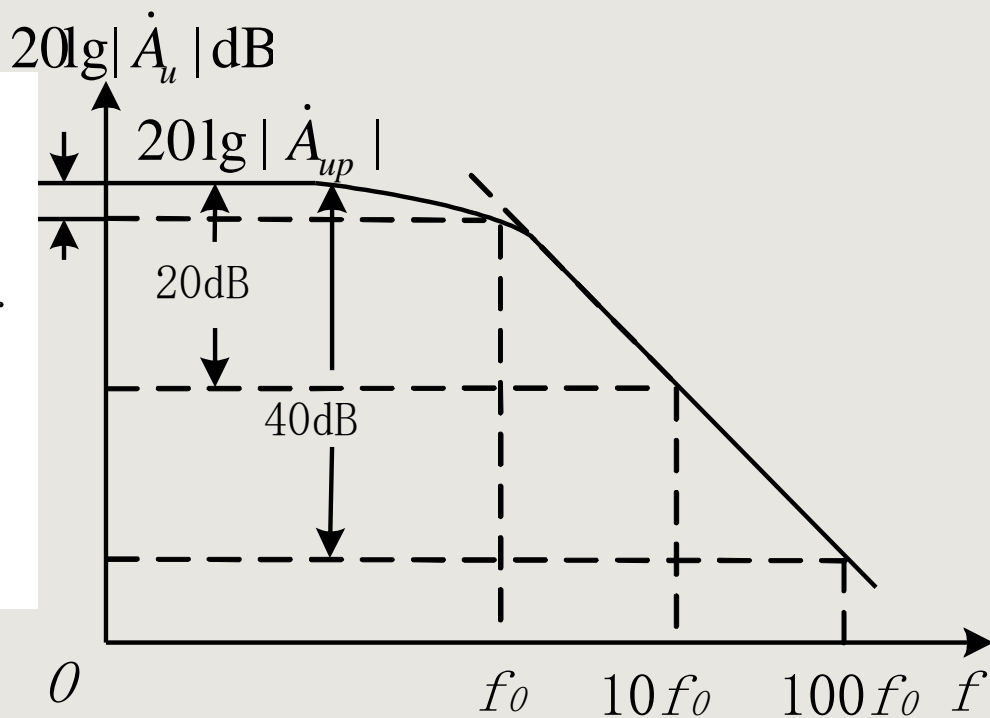
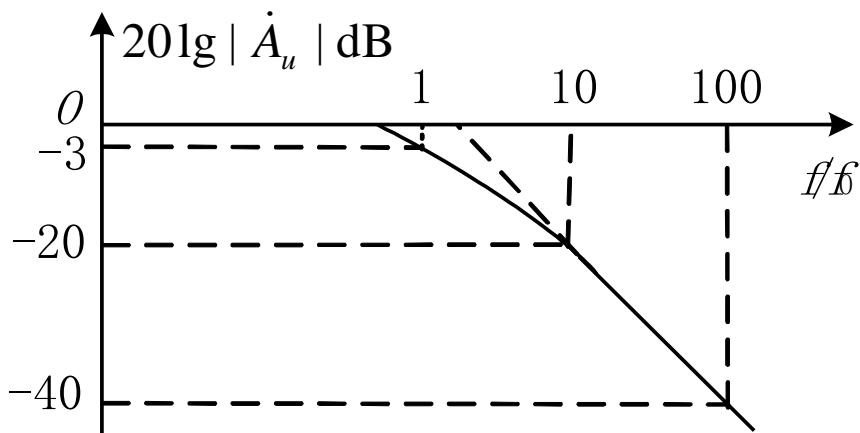
对数放大倍数以 **-20dB/十倍频**  
的速率下降.



RC低通无源滤波器的主要缺点是电压放大倍数低，带负载能力差。若在输出端并接一个负载电阻，除了使电压放大倍数降低外，还将影响截止频率 $f_0$ 的值。



## 2. 一阶低通有源滤波器



$$\dot{U}_+ = \frac{\dot{U}_i}{1 + jf / f_0}$$

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + jf / f_0} \left( 1 + \frac{R_F}{R_1} \right) = \frac{A_{up}}{1 + jf / f_0}$$

$$A_{up} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad \text{通带电压放大倍数}$$

一阶滤波器的对数放大倍数以  
-20dB/十倍频的速率下降



### 3.二阶低通滤波器

由“虚断”和“虚短”得

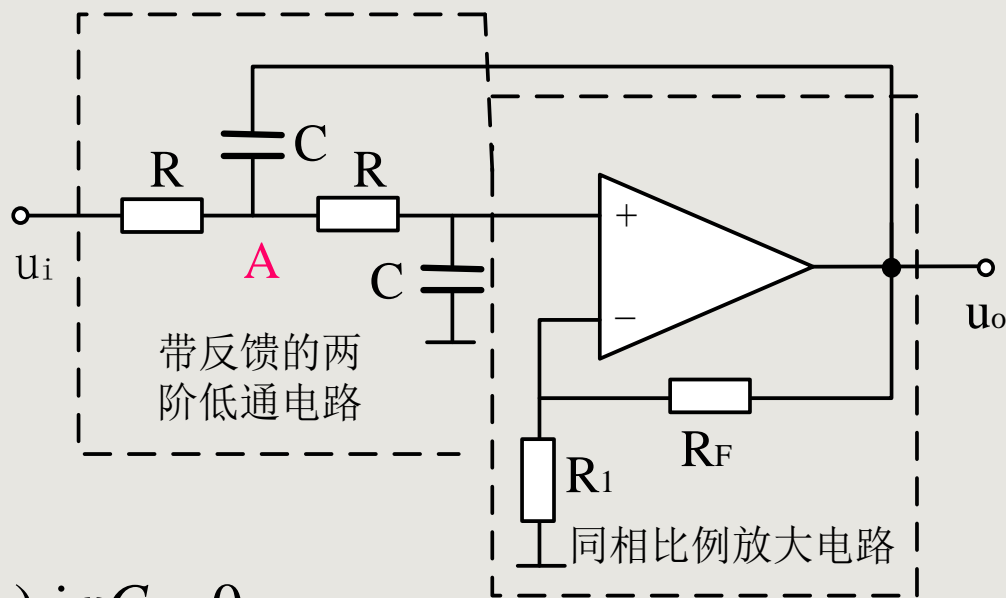
$$\dot{U}_+ = \dot{U}_- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} \dot{U}_o$$

A点的节点电流方程

$$\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_A}{R} - \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_+}{R} + (\dot{U}_o - \dot{U}_A)j\omega C = 0$$

同相输入端的节点电流方程  $\frac{\dot{U}_A - \dot{U}_+}{R} - j\omega C \dot{U}_+ = 0$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{A_o}{1 + (3 - A_o)j\omega RC + (j\omega RC)^2} = \frac{A_{up}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\frac{f}{f_0}}$$





$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{A_o}{1 + (3 - A_o)j\omega RC + (j\omega RC)^2} = \frac{A_{up}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\frac{f}{f_0}}$$

$$A_{up} = A_o = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

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

$$Q = \frac{1}{3 - A_o} \quad \text{称为等效品质因数}$$

$Q > 0$ ，即  $A_o < 3$  时，电路能稳定工作； $Q < 0$ ，即  $A_o \geq 3$  时，电路将发生自激振荡。

要求： $R_F < 2R_1$



## 滤波器的幅频特性

$$|\dot{A}_u| = \frac{A_o}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{1}{Q} \frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

对数幅频特性为

$$20 \lg \left| \frac{\dot{A}_u}{A_o} \right| = -10 \lg \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^2 + \left( \frac{1}{Q} \frac{f}{f_0} \right)^2 \right\}$$



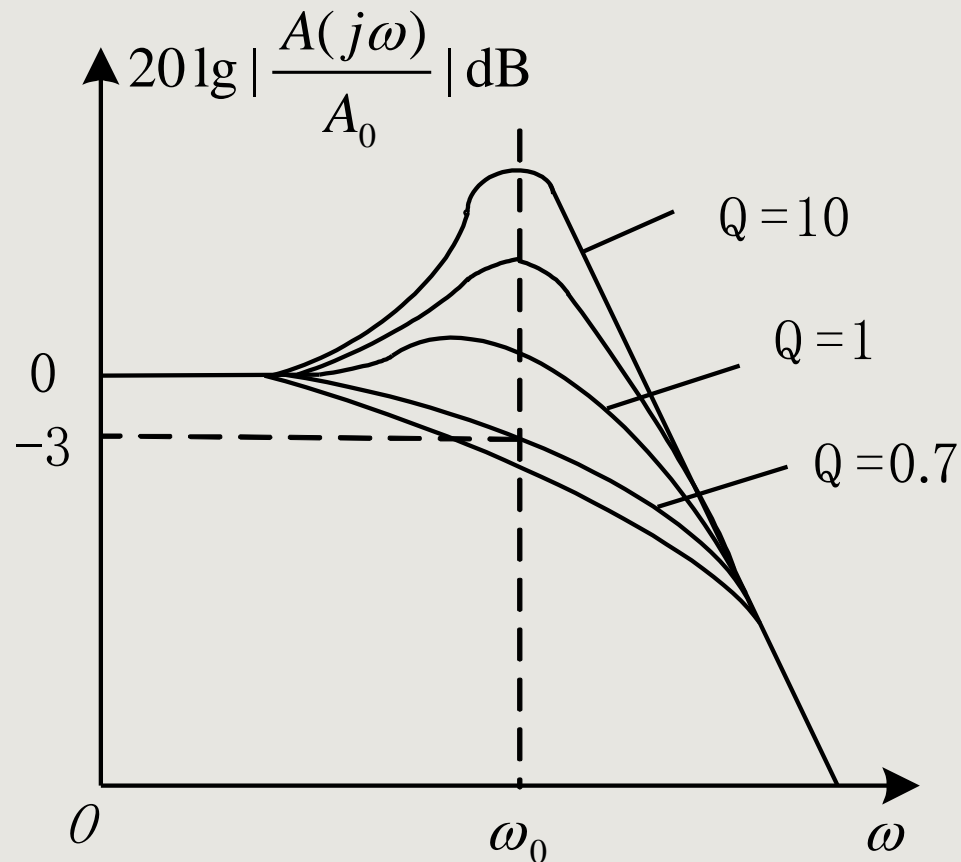


当 $Q=0.707$ 时,

在 $f=f_0$ 处  $20 \lg \left| \frac{A_u}{A_o} \right| = -3 \text{dB}$

在 $f=10f_0$ 处  $20 \lg \left| \frac{A_u}{A_o} \right| = -40 \text{dB}$

在 $f=100f_0$ 处  $20 \lg \left| \frac{A_u}{A_o} \right| = -80 \text{dB}$



二阶低通滤波器的对数幅频特性以40dB/十倍频的速度下降

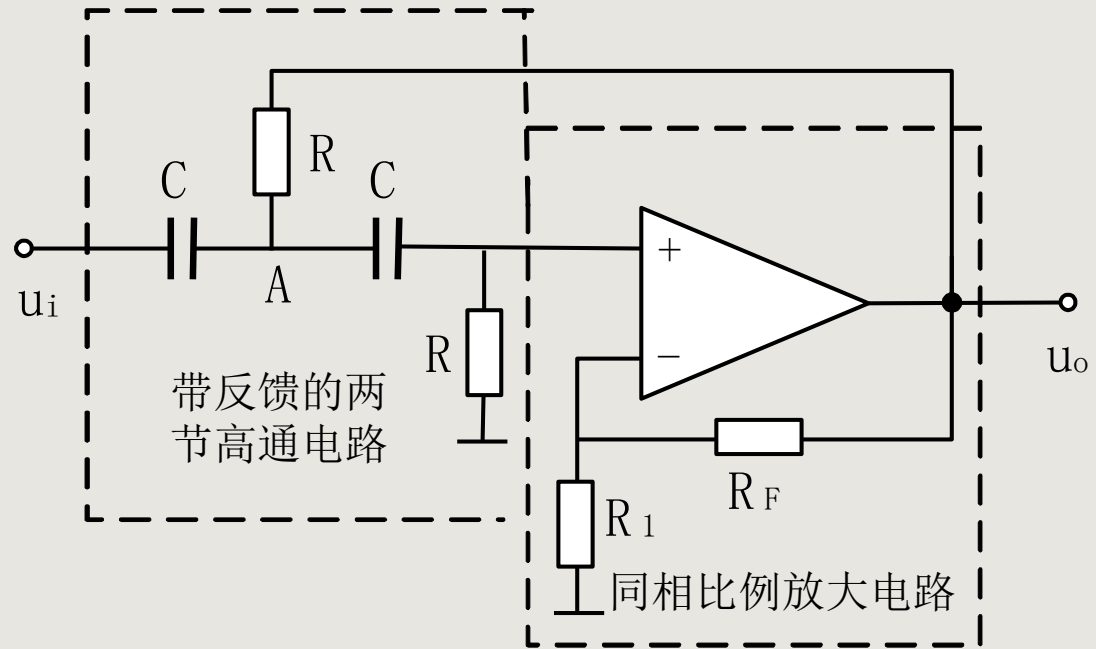
三阶滤波器由一阶滤波器和二阶滤波器串接而成。

四阶滤波器由两个二阶滤波器串接起来；

五阶滤波器由两个二阶滤波器和一个一阶滤波器串接起来。

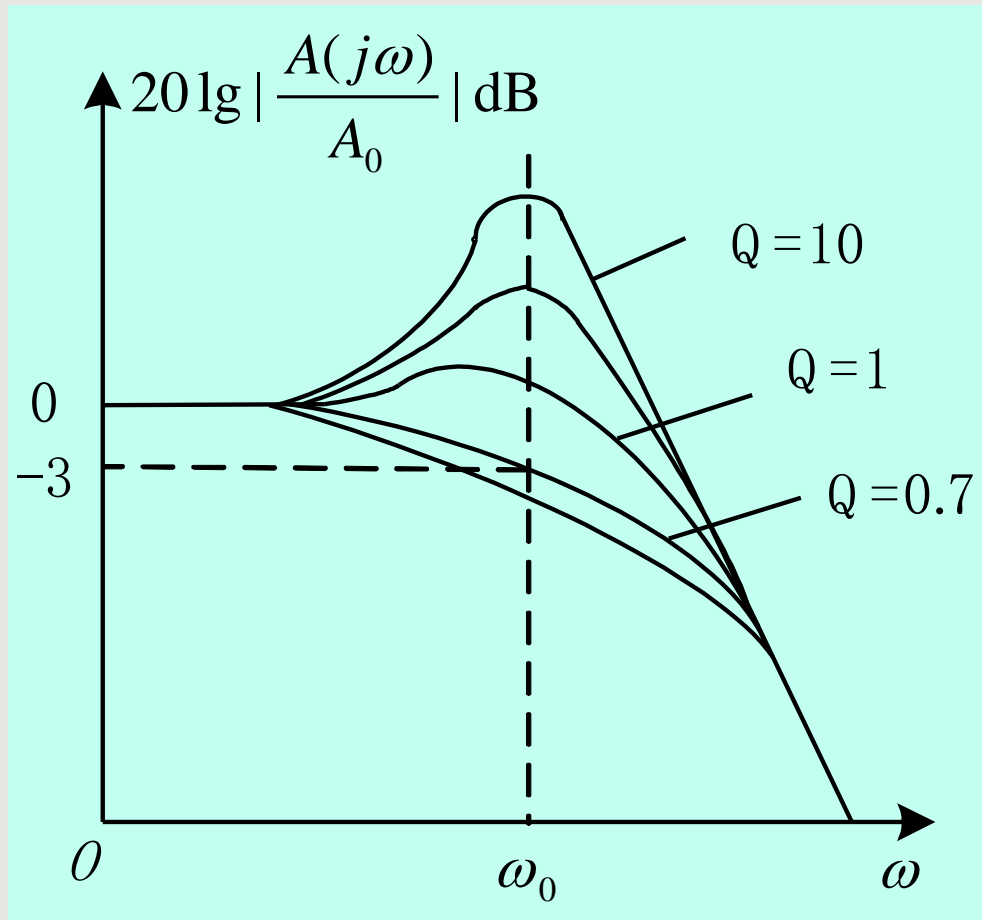
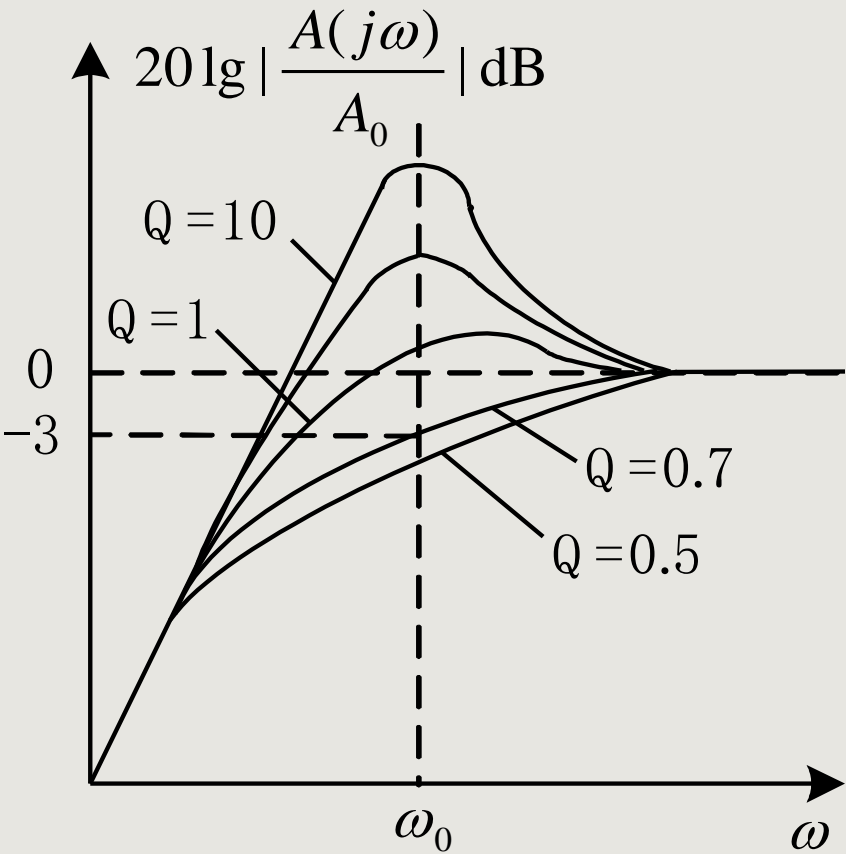


## § 8.4.3 高通滤波器



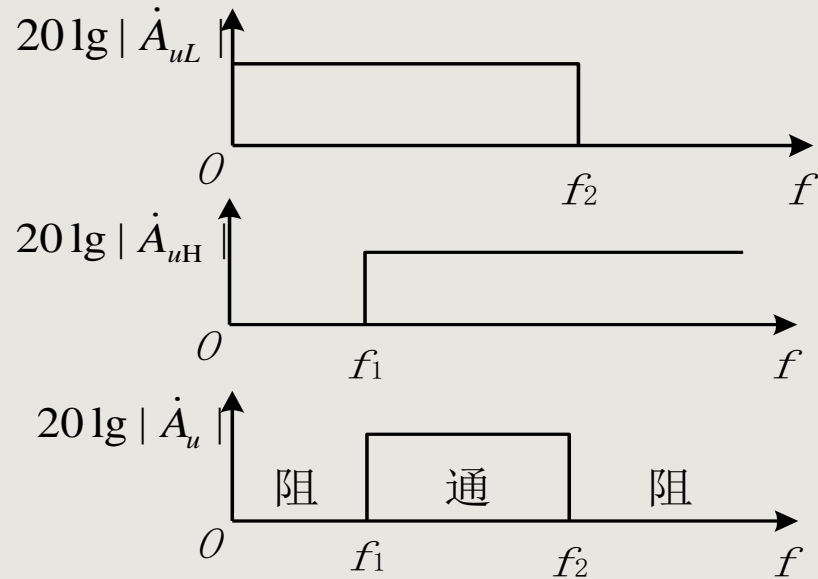
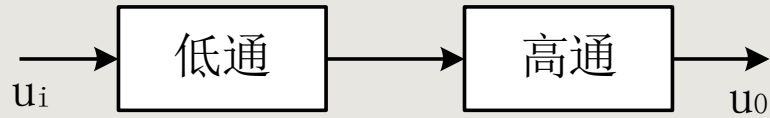
将低通滤波器中的起滤波作用的电阻和电容互换位置，则构成相应的高通滤波器。

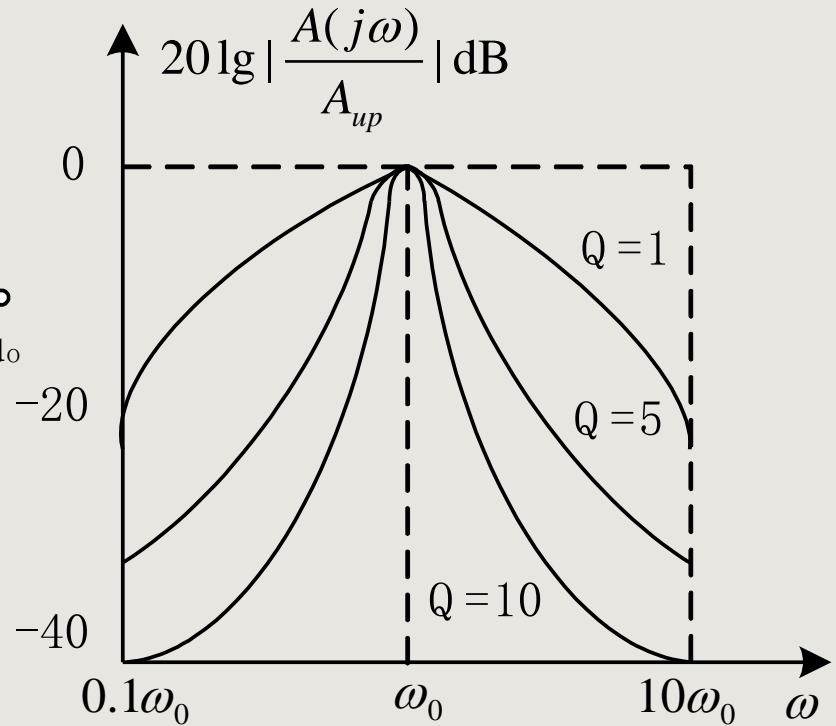
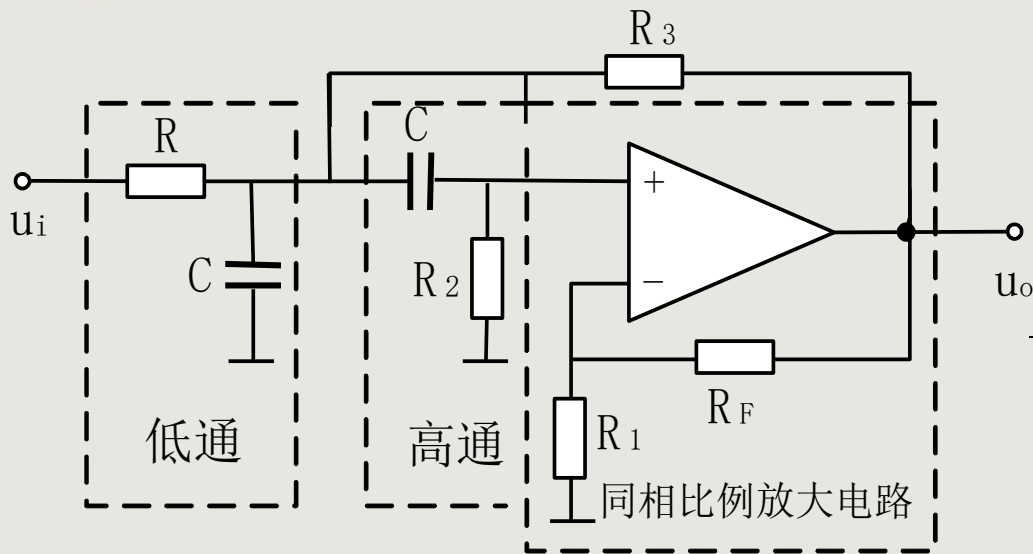
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(Q\omega RC)^2 A_o}{1 + (3 - A_o)j\omega RC + (j\omega RC)^2} = \frac{A_{up}}{1 - (\frac{f_0}{f})^2 - j\frac{f_0}{Qf}}$$



高通滤波器与低通滤波器的对数幅频特性具有“镜像”关系

## § 8.4.4 帶通濾波器





$R_2=2R$ ,  $R_3=R$ 时，带通滤波器的电压放大倍数为

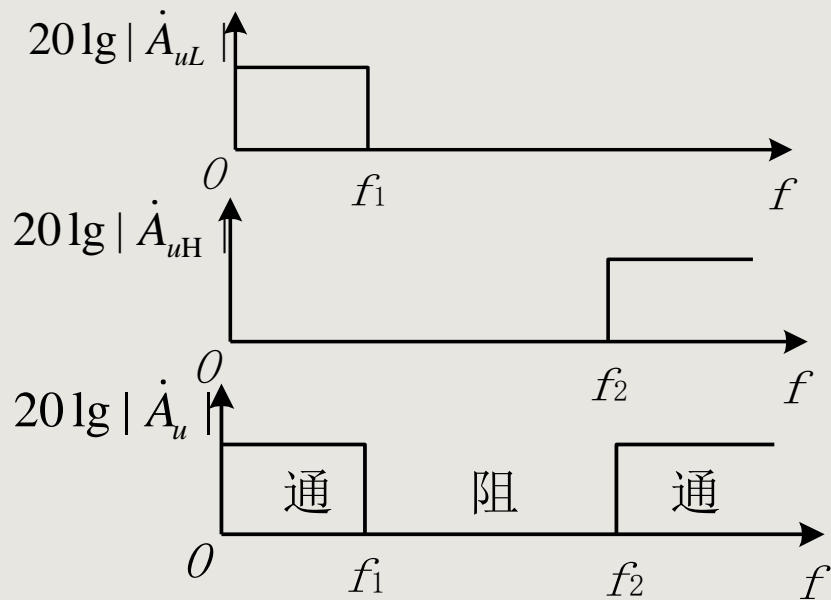
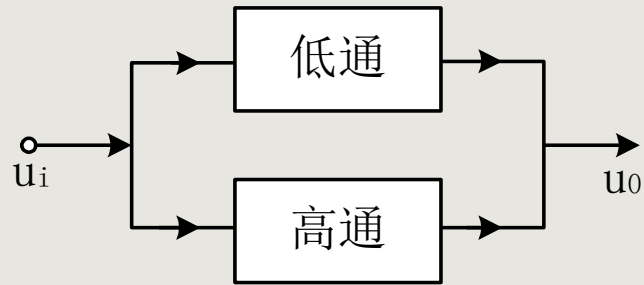
$$\dot{A}_u = \frac{A_{up}}{1 + jQ\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)}$$

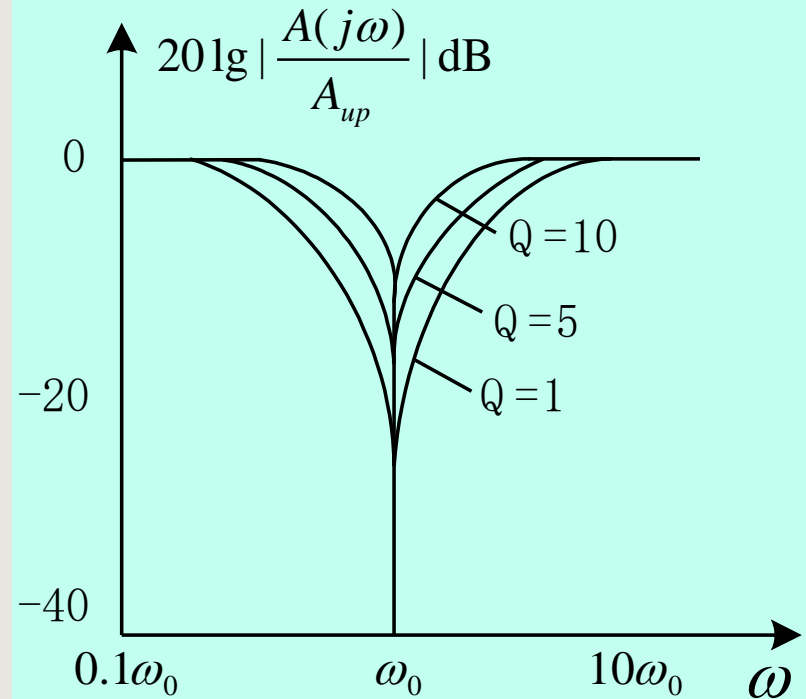
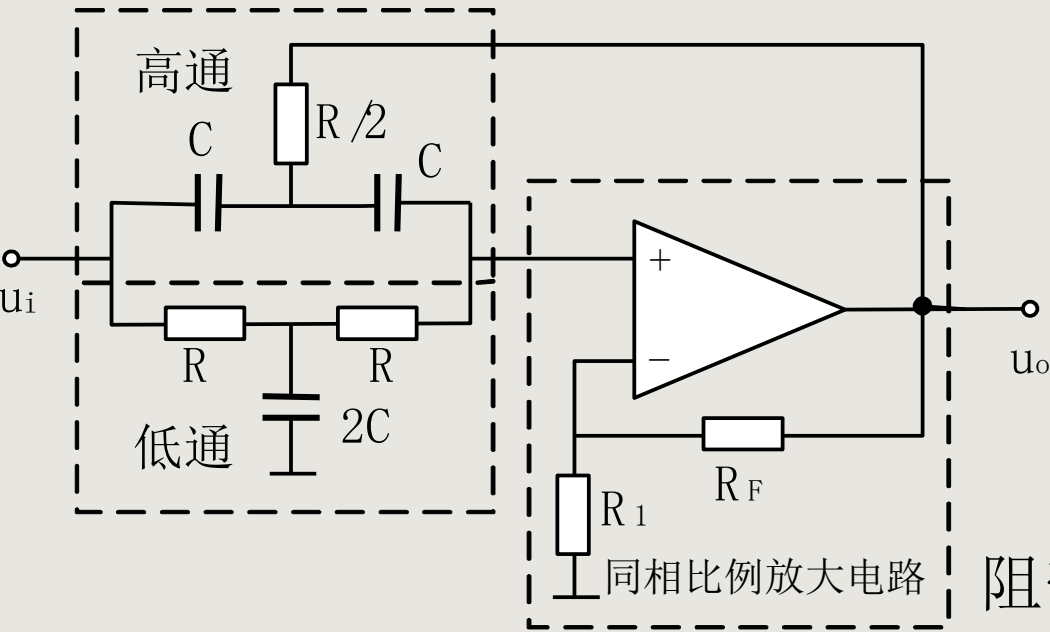
通带宽度  $B = f_2 - f_1 = (3 - A_o)f_o = \frac{f_o}{Q}$

$$A_{up} = \frac{A_o}{3 - A_o} = QA_o$$



## § 8.4.5 帶阻濾波器





阻带宽度  $B = f_2 - f_1 = 2(2 - A_{up})f_0$

$$\text{令 } Q = \frac{f_0}{B} = \frac{1}{2(2 - A_{up})}$$

为电路的等效品质因数

$$\dot{A}_u = \frac{A_{up}}{1 + j \frac{1}{Q} \cdot \frac{f_0 f}{f_0^2 - f^2}}$$

双T带阻滤波器的电压放大倍数

$$1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2$$

$$\dot{A}_u = \frac{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j2(2 - A_{up}) \frac{f}{f_0}} A_{up}$$

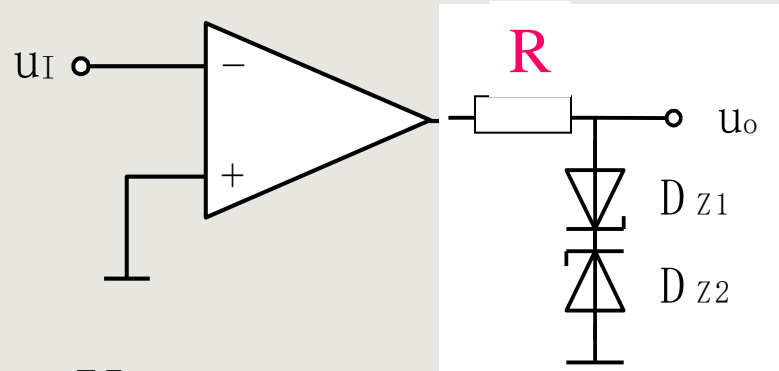
## § 8.5 电压比较器

- 电压比较器是一种用来比较输入信号电压与参考电压大小，并将比较结果以高电平或低电平形式输出的一种信号处理电路，广泛应用于各种非正弦波的产生和变换电路中，在自动控制和自动测量系统中，常常用于越限报警、模/数转换等。
- 根据电压传输特性，比较器可分过零比较器、单门限比较器、滞回比较器和窗口比较器



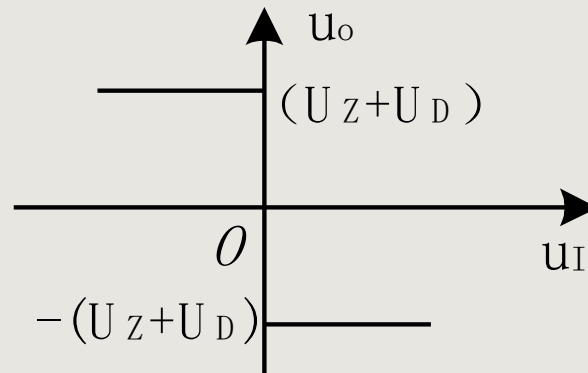


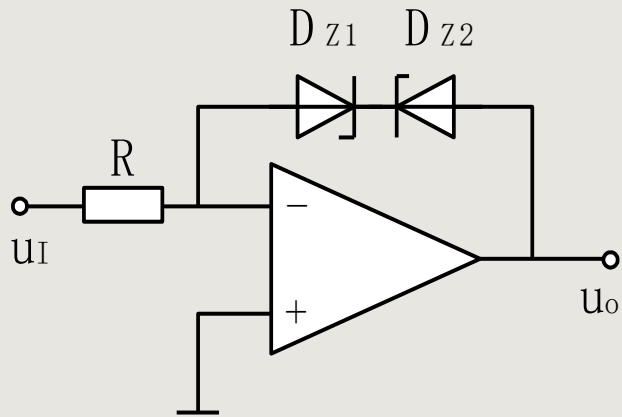
## § 8.5.1 过零比较器 参考电压为零的电压比较器



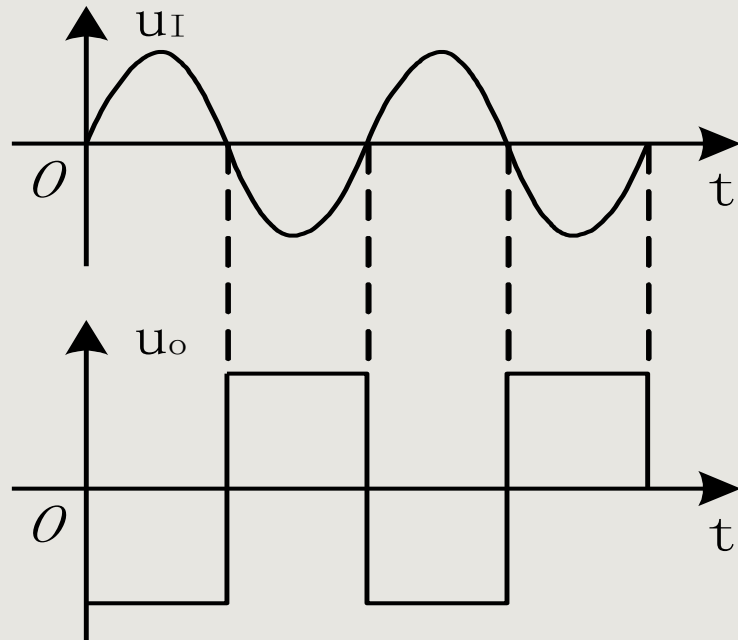
$$u_I > 0, u_o = -U_{opp};$$

$$u_I < 0, u_o = +U_{opp}$$





稳压管接在反馈通路中的  
过零比较器



过零比较器实现波形变换

$u_I > 0$ ,  $D_{Z1}$  导通,  $D_{Z2}$  反向击穿,  $u_O = -U_Z$

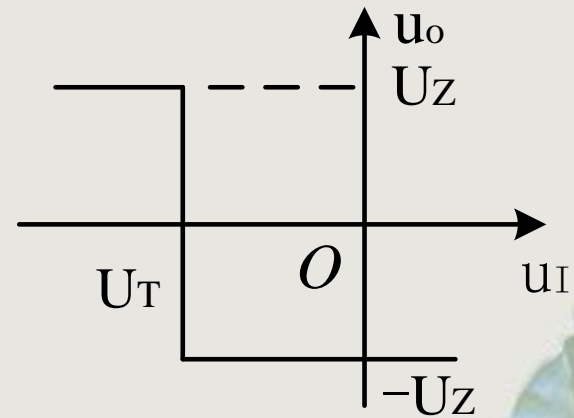
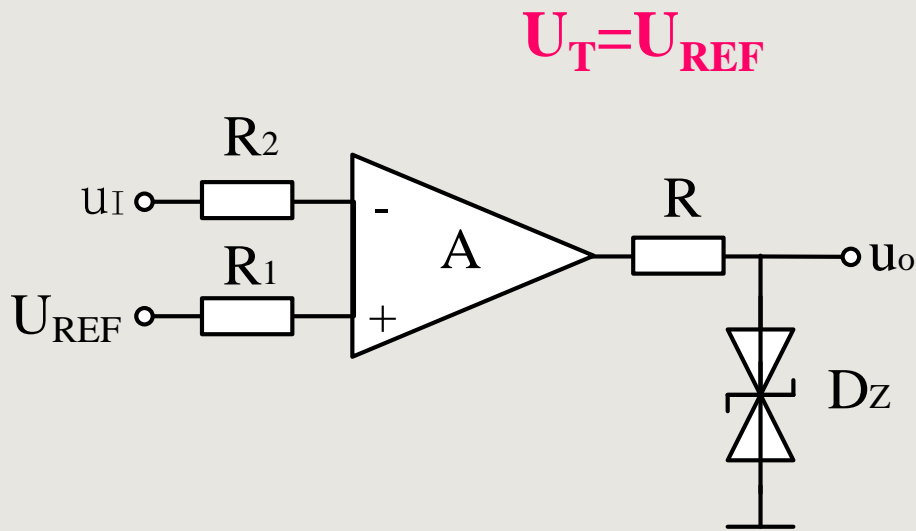
$u_I < 0$ ,  $D_{Z2}$  导通,  $D_{Z1}$  反向击穿,  $u_O = +U_Z$

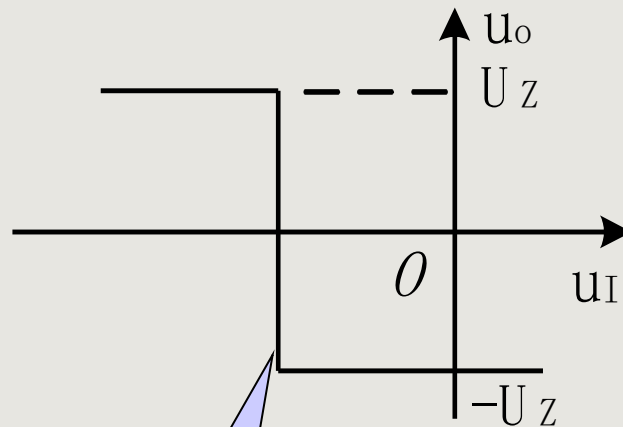
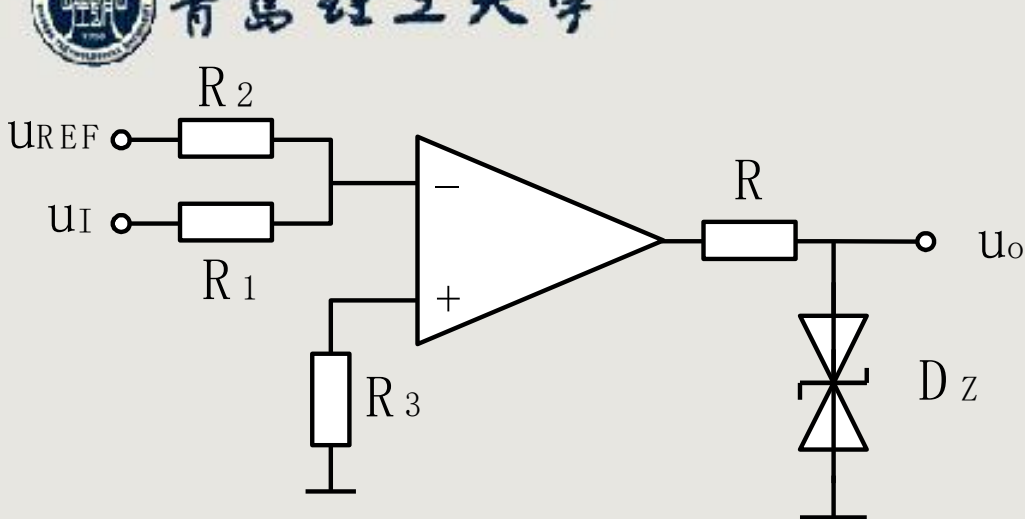


## § 8.5.2 单门限比较器

门限电压：输出电压跳变时的输入电压值，用 $U_T$ 表示

$u_I > U_{REF}$ ，运放负饱和输出； $u_I < U_{REF}$ ，运放正饱和输出。





$$-\frac{R_2}{R_1} U_{REF}$$

$u_+ = 0$ , 当  $u_- = 0$  时, 输出电压发生跳变

与  $u_- = 0$  对应的输入电压即为门限电压

反相端“虚断”, 由弥尔曼定理得

$$u_- = \frac{\frac{u_I}{R_1} + \frac{U_{REF}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

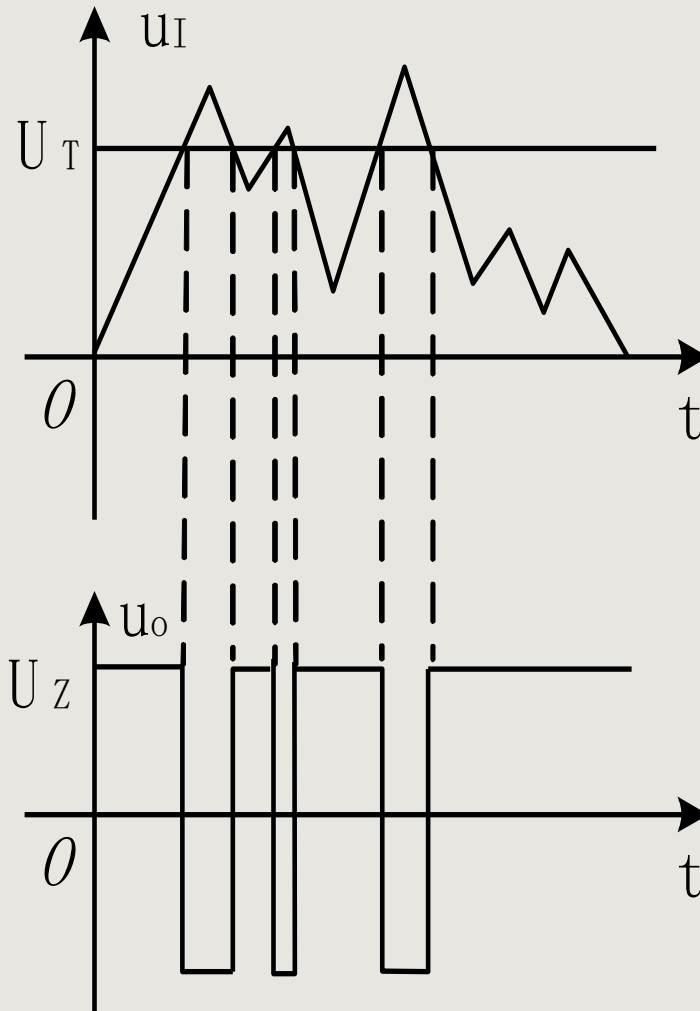
$u_I < U_T$  时,  $u_- < 0$ ,  $u_0 > 0$   
 $u_I > U_T$  时,  $u_- > 0$ ,  $u_0 < 0$

输出跳变时

$$\frac{u_I}{R_1} + \frac{U_{REF}}{R_2} = 0 \quad \longrightarrow \quad U_T = -\frac{R_1}{R_2} U_{REF}$$

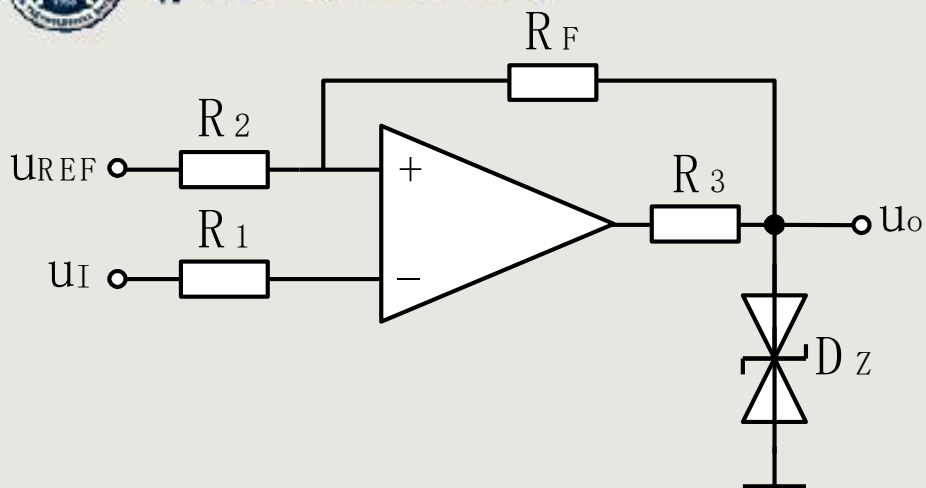


### § 8.5.3 滯回比較器 (施密特觸發器)



有干扰时单门限比较器的输入输出电压





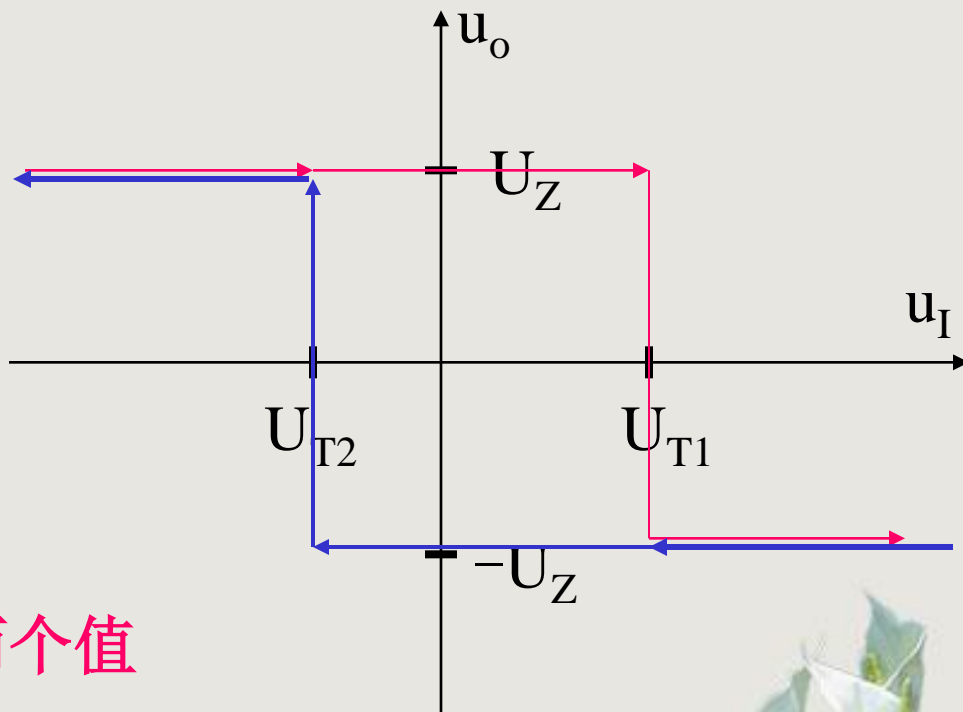
$$U_{T1} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

$$U_{T2} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} - \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

由“虚断”和叠加原理可得

$$u_+ = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} u_o$$

$$u_- = u_I$$

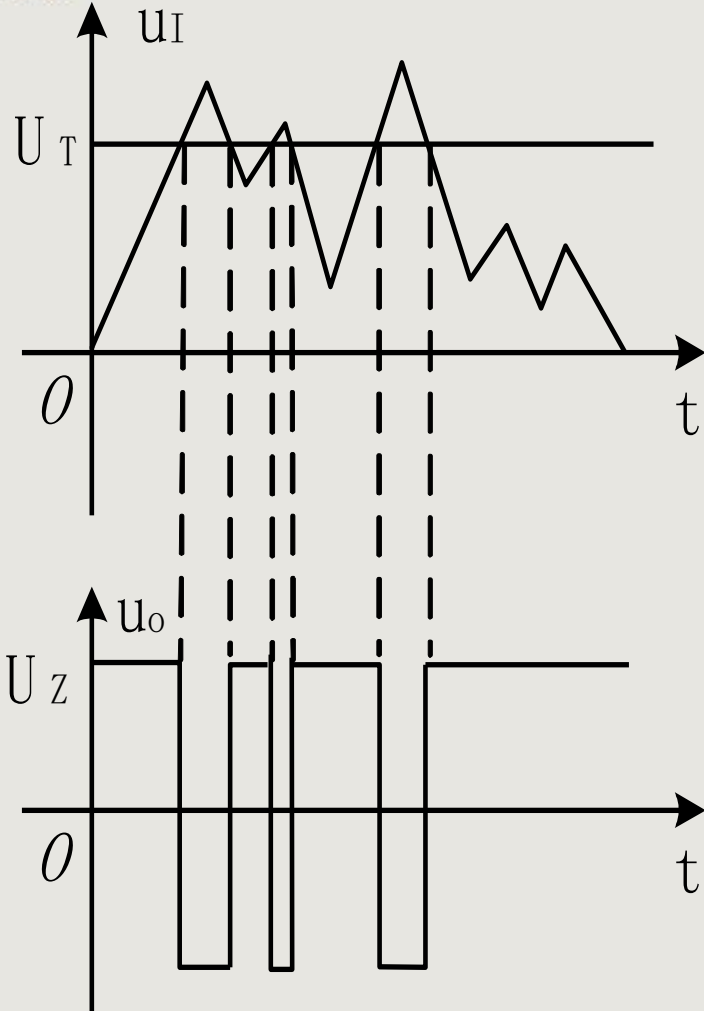


电路有两个输出电压值 →  $u_+$  有两个值

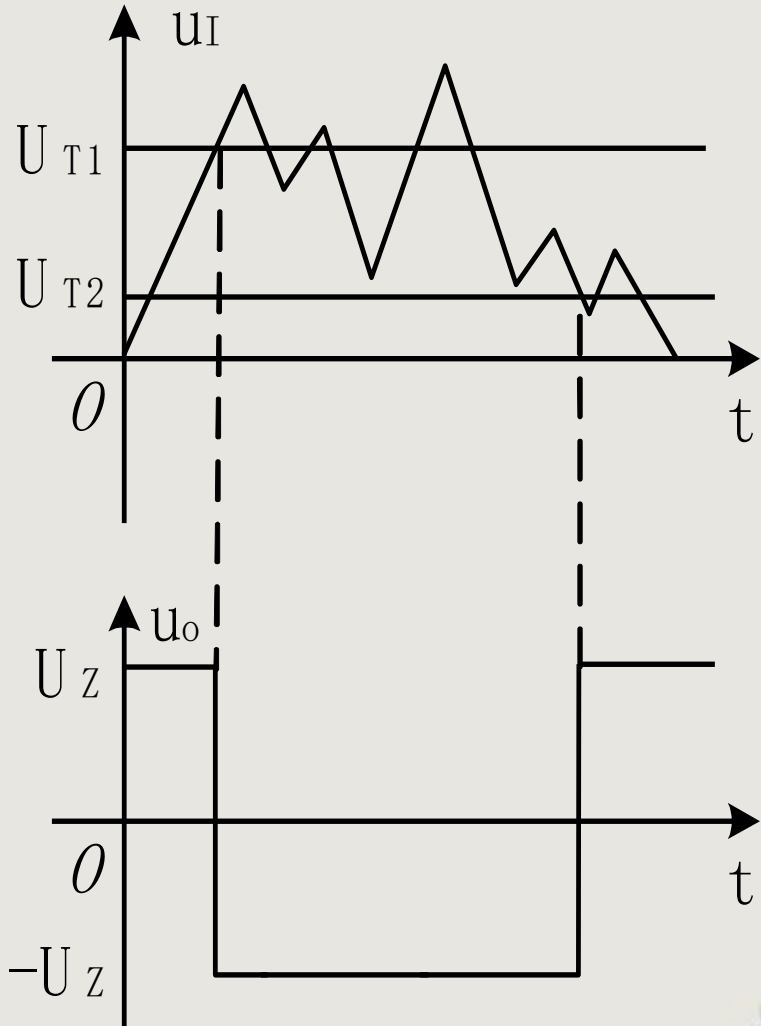
输出跳变时  $u_I = u_- = u_+$ ,

**回差电压(门限宽度)**

$$\Delta U_T = U_{T1} - U_{T2} = \frac{2R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$



有干扰时单门限比较器的输入输出电压



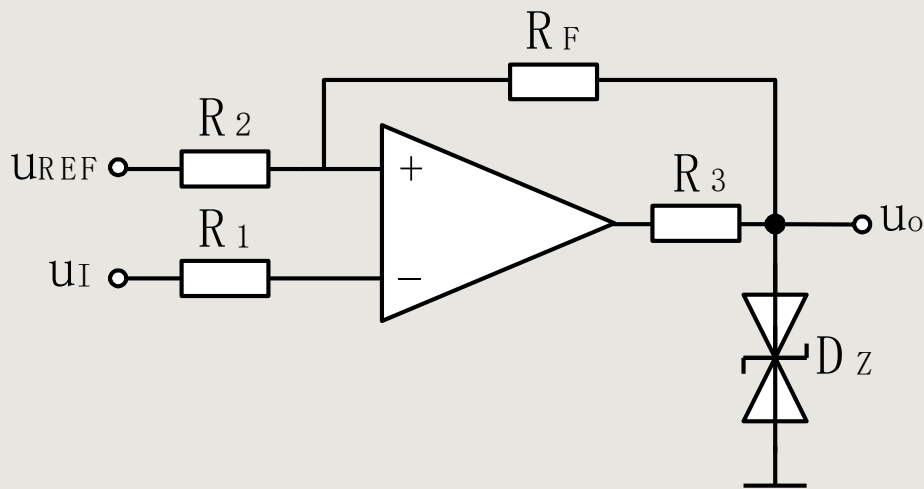
存在干扰时滞回比较器的输入输出电压

滞回比较器具有抗干扰作用



**例：** 图示滞回比较器中，设参考电压 $U_{REF}=3V$ ，稳压管的稳压值 $U_Z=\pm 6V$ ，各电阻为 $R_2=10k\Omega$ ， $R_F=50k\Omega$ ， $R_1=8.2k\Omega$ 。

- (1) 求电路的门限电压和回差电压，并画出电压传输特性；
- (2) 设电路其他参数不变，参考电压由3V增大至6V，分析传输特性如何变化？



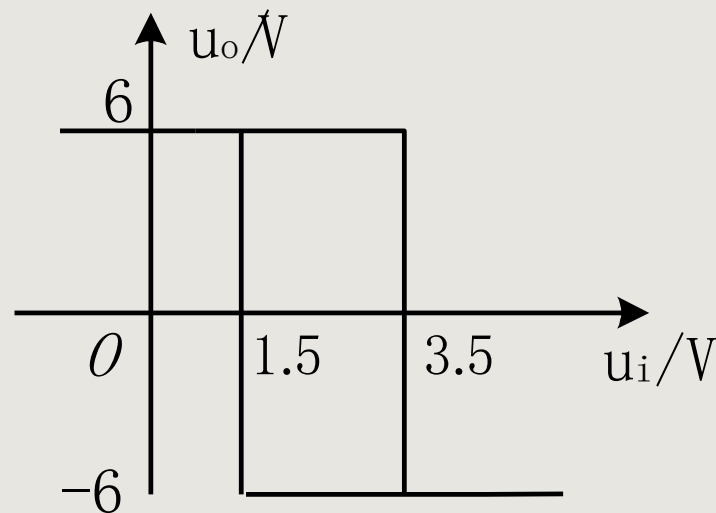


解:(1)

$$U_{T1} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$
$$= \frac{50}{10 + 50} \times 3 + \frac{10}{10 + 50} \times 6 = 3.5V$$

$$U_{T2} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} - \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$
$$= \frac{50}{10 + 50} \times 3 - \frac{10}{10 + 50} \times 6 = 1.5V$$

$$\Delta U_T = U_{T1} - U_{T2} = 2V$$



(2)  $U_{REF}=6V$  时

$$U_{T1} = \frac{50}{10+50} \times 6 + \frac{10}{10+50} \times 6 = 6V$$

$$\Delta U_T = U_{T1} - U_{T2} = 6 - 4 = 2V$$

$$U_{T2} = \frac{50}{10+50} \times 6 - \frac{10}{10+50} \times 6 = 4V$$

当  $U_{REF}$  增大时，两个门限电压同时增大，但门限宽度不变，传输特性向右平移  $2.5V$

若  $U_Z$  增大，则  $U_{T1}$  将增大， $U_{T2}$  将减小， $\Delta U_T$  增大，即传输特性向两侧扩展，门限宽度变宽

$$\Delta U_T = U_{T1} - U_{T2} = \frac{2R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

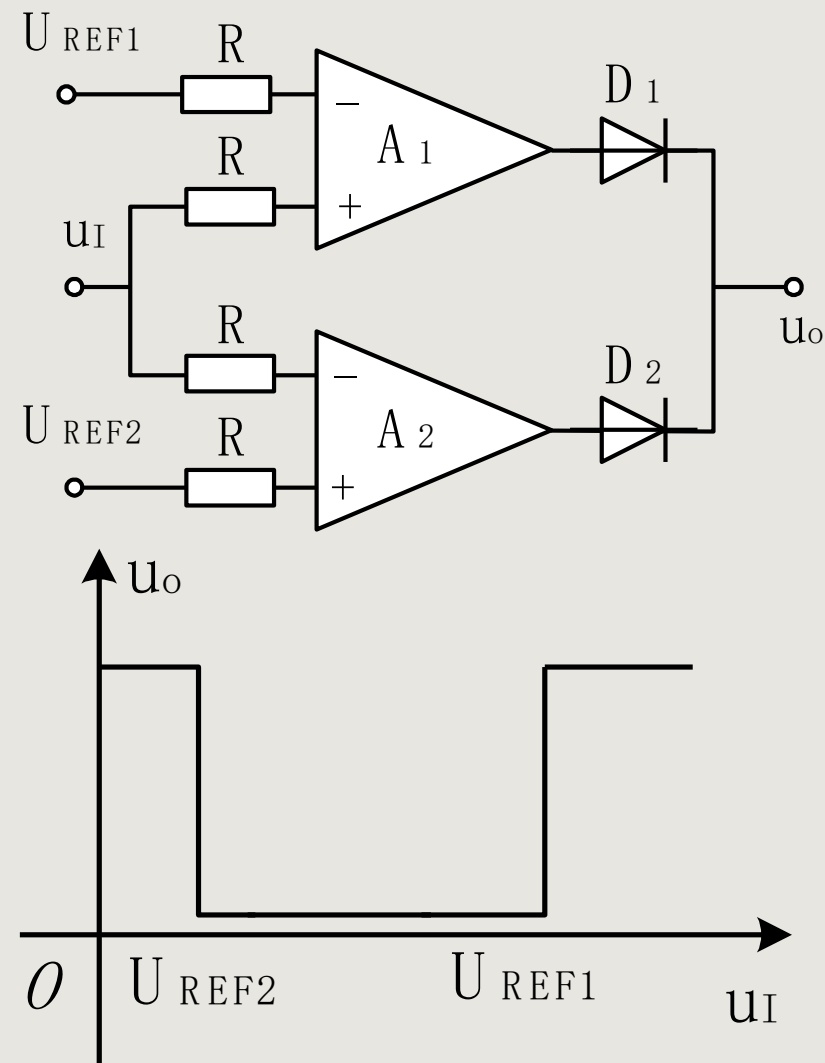


## § 8.5.4 窗口比较器

单门限比较器和滞回比较器有一个共同点，当输入电压单一方向变化时，输出电压只跳变一次。

要检测输入电压是否在两个电压之间，则需采用窗口比较器。





设  $U_{REF1} > U_{REF2}$ 。当  $u_I < U_{REF2} < U_{REF1}$  时

运放  $A_1$  输出低电平，运放  $A_2$  输出高电平，这样，二极管  $D_2$  导通， $D_1$  截止，输出电压为高电平。

当  $u_I > U_{REF1} > U_{REF2}$  时

$A_1$  输出高电平， $A_2$  输出低电平，二极管  $D_1$  导通， $D_2$  截止，输出电压仍为高电平。

当  $U_{REF2} < u_I < U_{REF1}$  时

$A_1$ 、 $A_2$  均输出低电平，二极管  $D_1$  和  $D_2$  均截止，输出电压为低电平。



青島理工大學

作业:

8.14、8.15、8.20

