



石家莊鐵道大學  
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

# 在线开放课程

## 测试信号的调理与记录

### 滤波器（二）

主讲：牛江川

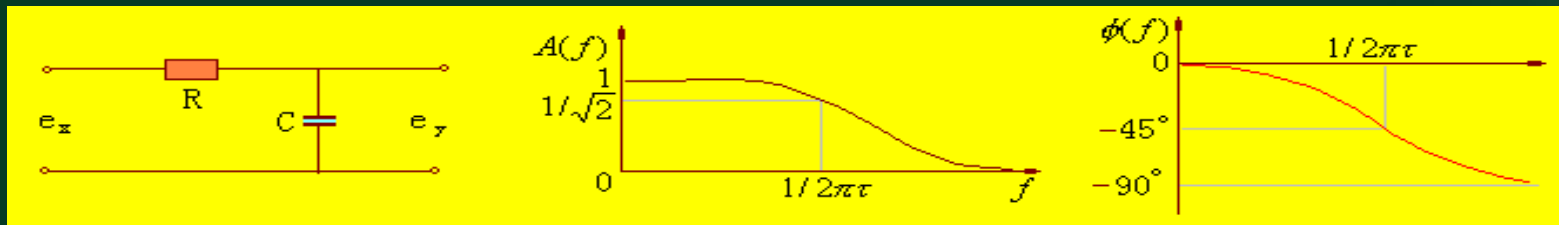


## (2) RC无源滤波器

在测试系统中，常用RC滤波器。因为在这一领域中，信号频率相对来说不高。而RC滤波器电路简单，抗干扰性强，有较好的低频性能，并且选用标准的阻容元件，所以在工程测试的领域中最经常用到的滤波器是RC滤波器。

### 1) 一阶RC低通滤波器

RC低通滤波器的电路及其幅频、相频特性如下图所示。



设滤波器的输入电压为 $e_x$ ，输出电压为 $e_y$ ，电路的微分方程为

$$RC \frac{de_y}{dt} + e_y = e_x$$

(克希荷夫电压定律)

这是一个典型的一阶系统。令  $\tau = RC$ ，称为时间常数，对上式取拉氏变换，有

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

或

$$H(f) = \frac{1}{j2\pi f\tau + 1}$$

其幅频、相频特性公式为

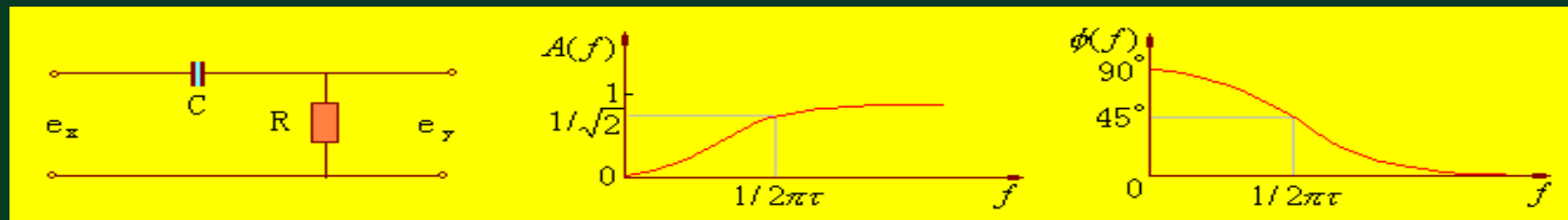
$$A(f) = |H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau 2\pi f)^2}}$$
$$\varphi(f) = -\arctg(\tau 2\pi f)$$

分析可知，当 $f$ 很小时， $A(f)=1$ ，信号不受衰减地通过；当 $f$ 很大时， $A(f)=0$ ，信号完全被阻挡，不能通过。

## 2) 一阶RC高通滤波器

在线开放课程

RC高通滤波器的电路及其幅频、相频特性如下图所示。



设滤波器的输入电压为 $e_x$ ，输出电压为 $e_y$ ，电路的微分方程为

$$e_y + \frac{1}{RC} \int e_y dt = e_x$$

同理，令 $\tau = RC$ ，对上式取拉氏变换，有

$$H(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1}$$

或

$$H(f) = \frac{j2\pi f\tau}{j2\pi f\tau + 1}$$

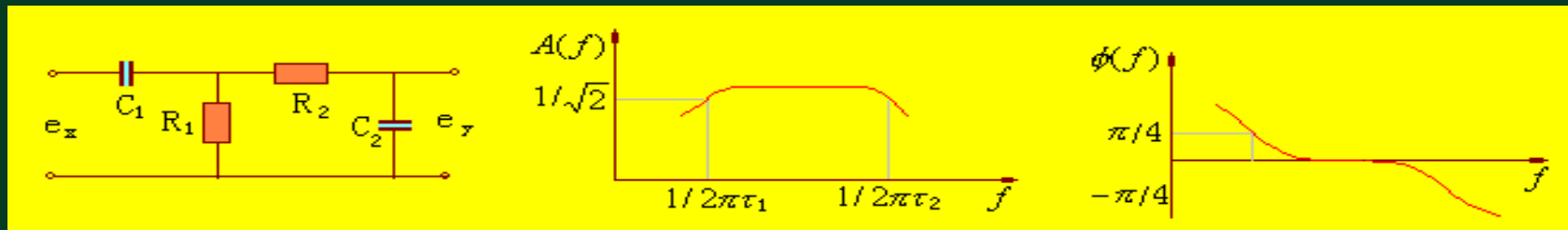
其幅频、相频特性公式为

$$A(f) = |H(f)| = \frac{2\pi f\tau}{\sqrt{1 + (\tau 2\pi f)^2}}$$
$$\varphi(f) = \arctg\left(\frac{1}{2\pi f\tau}\right)$$

分析可知，当 $f$ 很小时， $A(f)=0$ ，信号完全被阻挡，不能通过；  
当 $f$ 很大时， $A(f)=1$ ，信号不受衰减的通过。

### 3) RC带通滤波器

带通滤波器可以看作为低通滤波器和高通滤波器的串联，其电路及其幅频、相频特性如下图所示。



其幅频、相频特性公式为

$$A(f) = \frac{2\pi f\tau_1}{\sqrt{1 + (\tau_1 2\pi f)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau_2 2\pi f)^2}}$$

$$\varphi(f) = \arctg\left(\frac{1}{2\pi f\tau_1}\right) - \arctg(2\pi f\tau_2)$$

$$H(s) = H_1(s)H_2(s)$$

式中  $H_1(s)$  为高通滤波器的传递函数，  
 $H_2(s)$  为低通滤波器的传递函数。

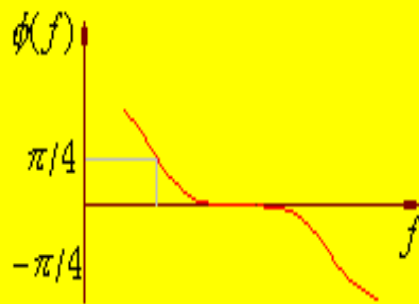
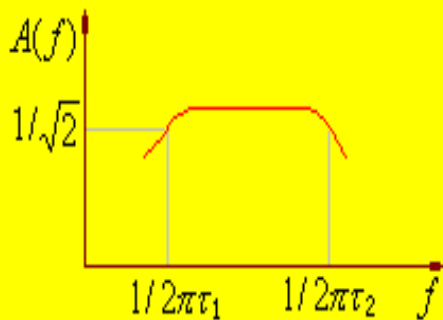
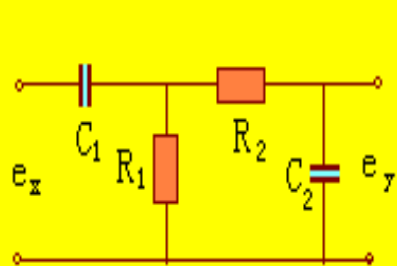
这时极低和极高的频率成分都完全被阻挡，不能通过；只有位于频率通带内的信号频率成分能通过。



石家庄铁道大学  
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

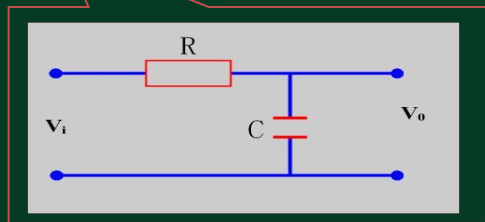
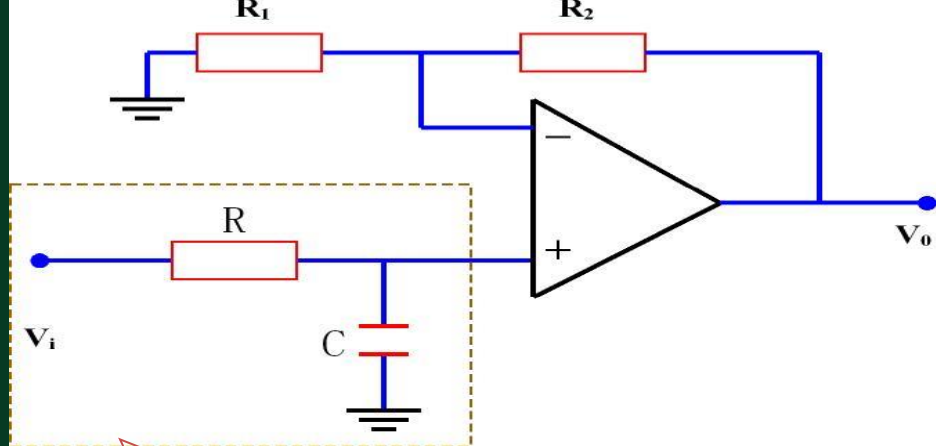
应注意，当高、低通两级串联时，应消除两级耦合时的相互影响，因为后一级成为前一级的“负载”，而前一级又是后一级的信号源内阻。实际上两级间常用射极输出器或者用运算放大器进行隔离。所以实际的带通滤波器常常是有源的。有源滤波器由**RC**调谐网络和运算放大器组成。运算放大器既可起级间隔离作用，又可起信号幅值的放大作用。



如果在低通滤波器后面接一个放大器——有源滤波器

运算放大器的作用——隔离、增益和提高带负载能力的作用。

截止频率不变

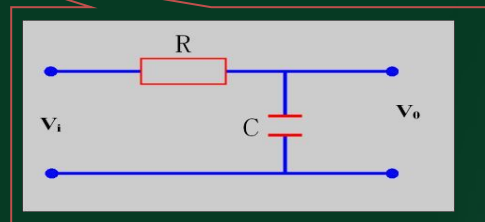
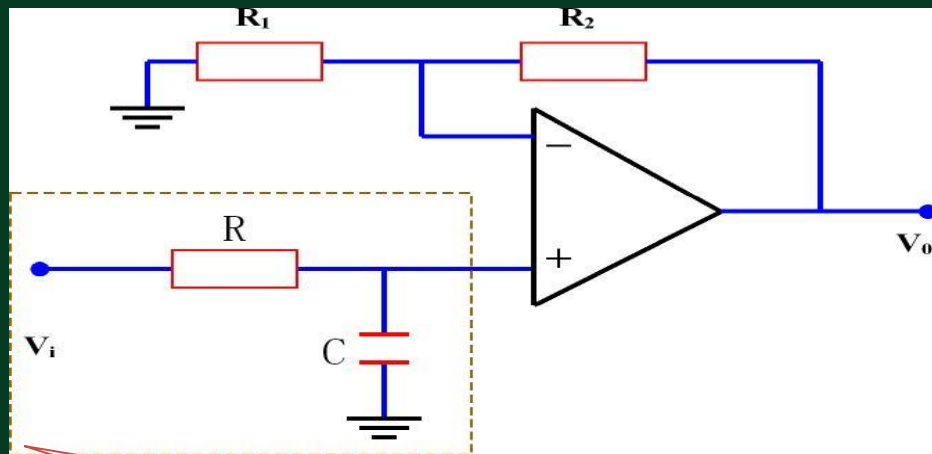


其增益由  $1 + \frac{R_2}{R_1}$  确定，而与时间常数  $RC$  无关。



如果在低通滤波器后面接一个放大器：

$$H(j\omega) = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{j\omega RC + 1}$$
$$|H(j\omega)| = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + 1}}$$



可见，其增益由  $1 + \frac{R_2}{R_1}$  确定，而与时间常数  $RC$  无关。

# 恒带宽比与恒带宽滤波器

- 对信号做频谱分析或为了获取信号中某些特殊的频率成分时，可以将信号通过放大倍数相同而中心频率不同的多个带通滤波器。

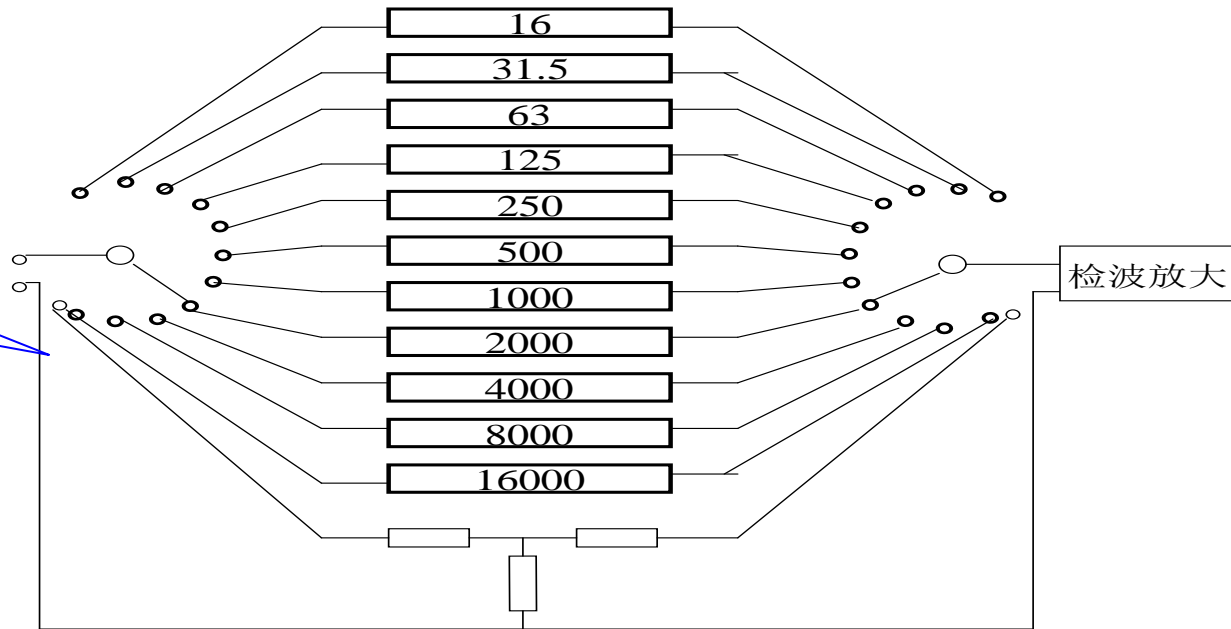
两种方式：

1. 采用一组各自中心频率可调的带通滤波器，通过改变滤波器的参数使其中心频率随所需要的测量信号频段变化；
2. 使用各自中心频率固定，但按一定规律相隔的滤波器组

恒带宽比滤波器，也称恒定百分比带通滤波器，指的是相对带宽为常数的滤波器组。

中心频率固定

$Q=f/B$ .  $Q$   
相同. 中  
心频率 $f$ 越  
高, 带宽 $B$   
越宽.



## 恒带宽比滤波器（恒定百分比带通滤波器）

特点： $\frac{B}{f_0} = \frac{1}{Q} = \text{constant}$ ，即品质因数恒定。

显然，中心频率 $f_0$ 越高，带宽越大。

恒带宽比滤波器的低端截止频率 $f_{c1}$ 与高端截止频率 $f_{c2}$ 之间常满足如下关系：

$$f_{c2} = 2^n f_{c1}$$

$n$ 称为倍频程数。 $n=1$ 称为倍频程滤波器；  
 $n=1/3$ 称为1/3倍频程滤波器。

由于:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1}f_{c2}}$$

$$B = f_{c2} - f_{c1} = f_0/Q$$

$$f_{c2} = 2^n f_{c1}$$

从而有:

$$\frac{1}{Q} = 2^{n/2} - 2^{-n/2}$$

$n=1$ 时,  $Q=1.41$ ;

$n=1/3$ 时,  $Q=4.38$ ;

$n=1/5$ 时,  $Q=7.2$ 。

显然, 倍频程数越小,  $Q$ 值越大, 滤波器分辨力越高。

• 对邻接的滤波器组, 易得:  $f_{02} = 2^n f_{01}$

• 只要选定  $n$  值, 即可设计覆盖给定频率范围的邻接式滤波器。

# 表1 倍频程滤波器

中心频率	16	31.5	63	125	250	...
带宽(Hz)	11.31	22.27	44.55	88.39	176.78	...

在线开放课程...

# 表2 1/3倍频程滤波器

中 心 频率	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	...
带宽 (Hz)	2.9	3.7	4.6	5.8	7.3	9.3	11.6	14.6	...

高频段分辨率低

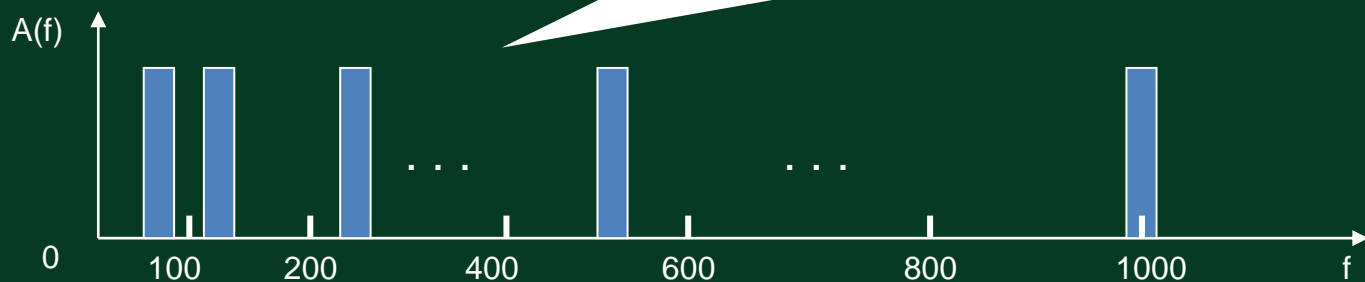
## 2. 恒带宽滤波器

恒带宽滤波器带宽恒定。在所有频带内都具有良好的频率分辨力。

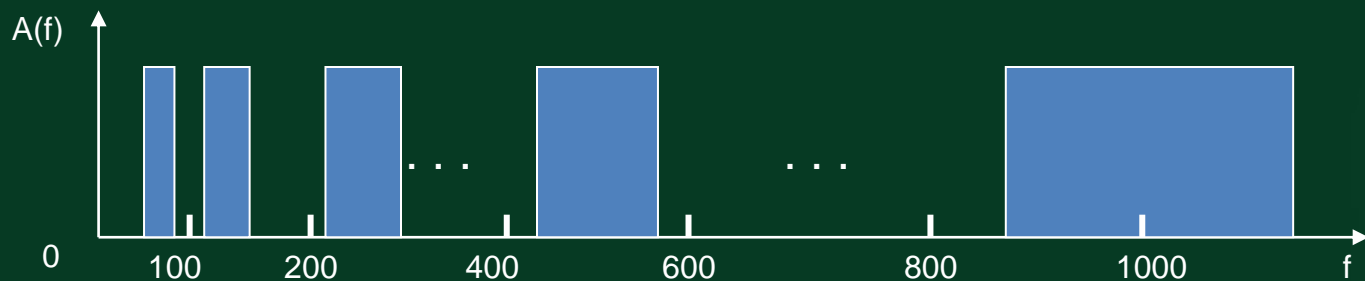
恒带宽滤波器一般不宜做成固定中心频率。

而是利用一个定带宽、定中心频率的滤波器加上可变参考频率的差频变换来适应各种不同中心频率的定带宽滤波需要

常用恒带宽滤波器  
有相关滤波和跟踪滤波两种。



a) 恒带宽带通滤波器



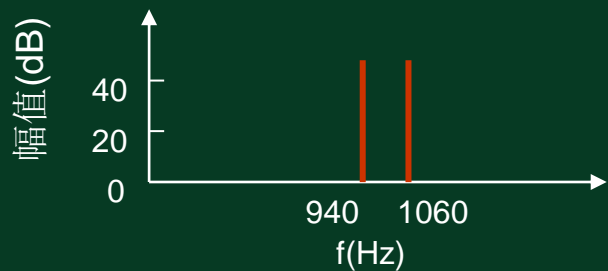
b) 恒带宽比带通滤波器

恒带宽与恒带宽比带通滤波器比较

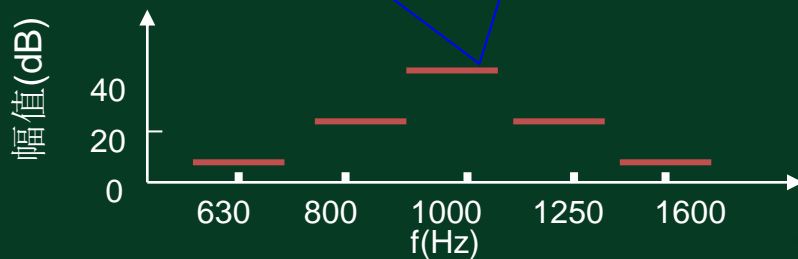


中心频率在不同  
频率时均有输出

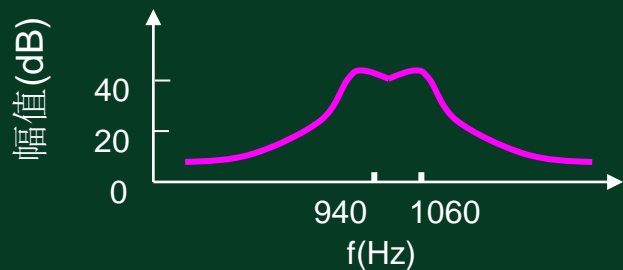
## (4) 三种滤波器测量结果比较



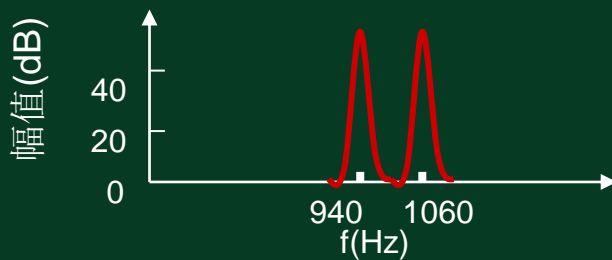
a) 实际信号



b) 用1/3倍频程分析的结果



c) 用1/10倍频程分析的结果



d) 用恒带宽滤波器分析的结果

三种滤波器测量结果比较

## 3.6 数字滤波

数字滤波是指利用离散时间系统的特性对数字信号进行加工处理，从而改变信号频谱的过程。

数字滤波器指的是输入、输出均为数字信号，利用相应的数学运算改变输入信号中所含频率成分的比例或滤除某些频率成分的器件。数字滤波器利用数字方法，按预定的要求对信号进行变换，从而达到改变信号频谱的目的。

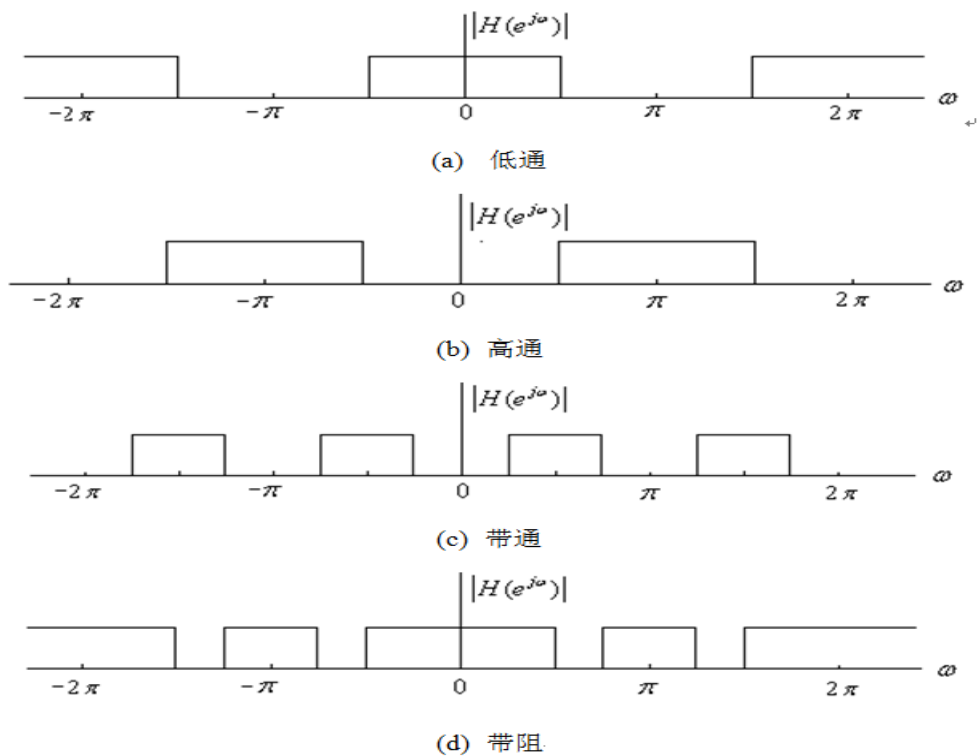
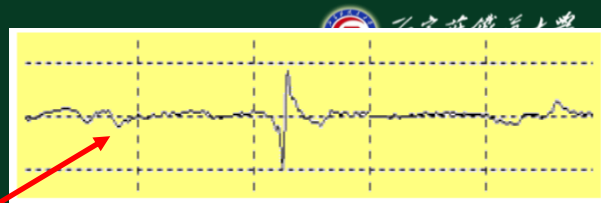


图5.25数字滤波器的幅频特性

# 滤波器的应用

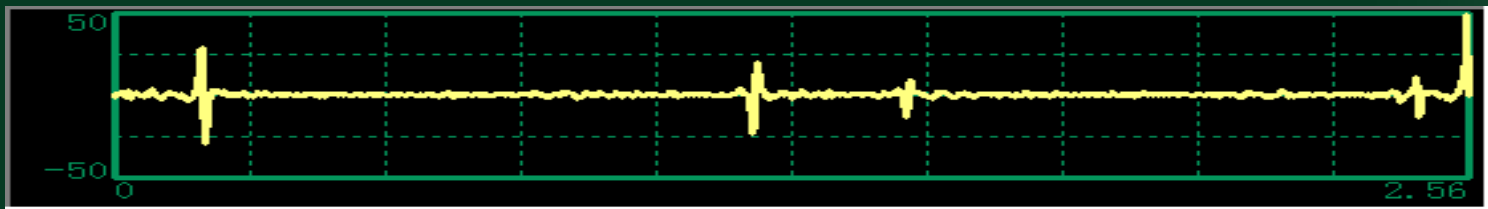
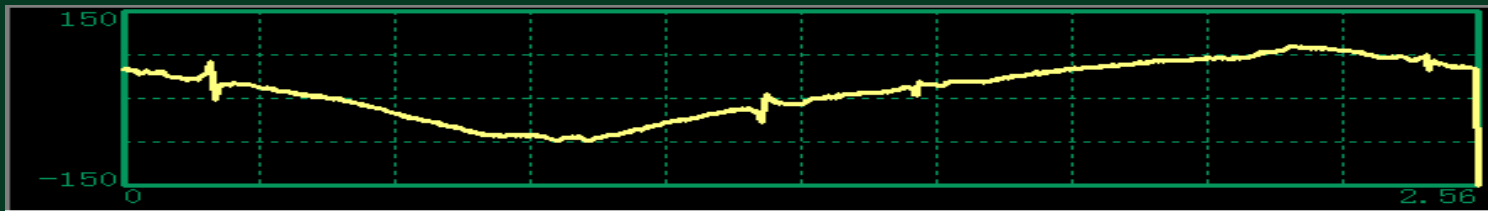
## 案例1：旅游索道钢缆检测



切口附近

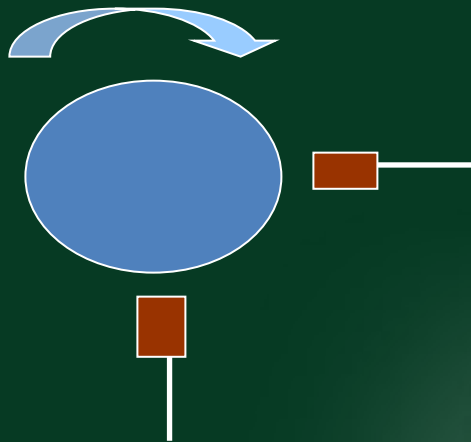


## 案例2：钢管无损探伤

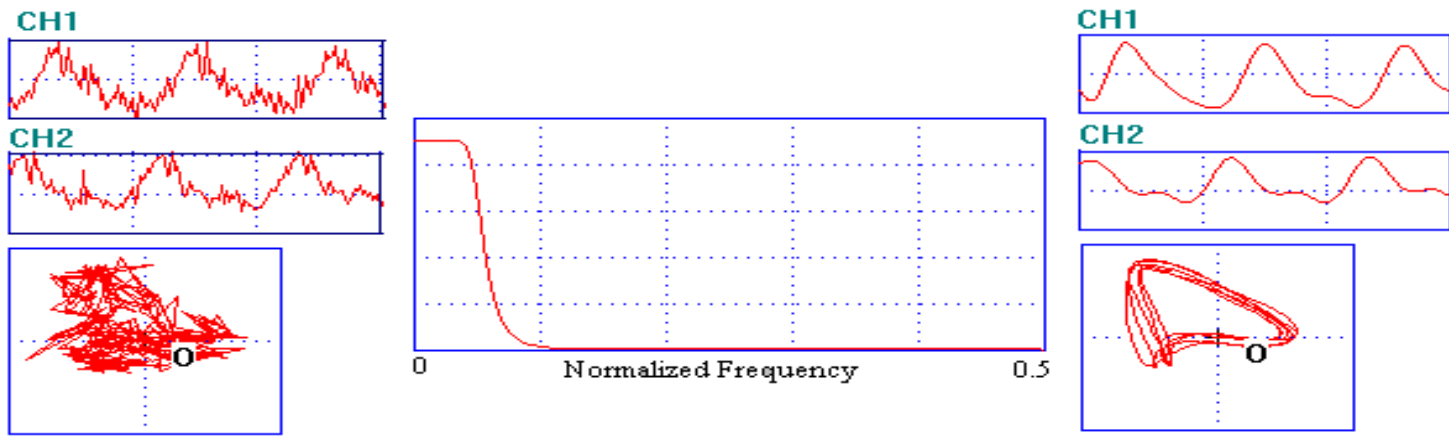


滤除信号中的零漂和低频晃动，便于门限报警

# 案例3：机床轴心轨迹的滤波处理



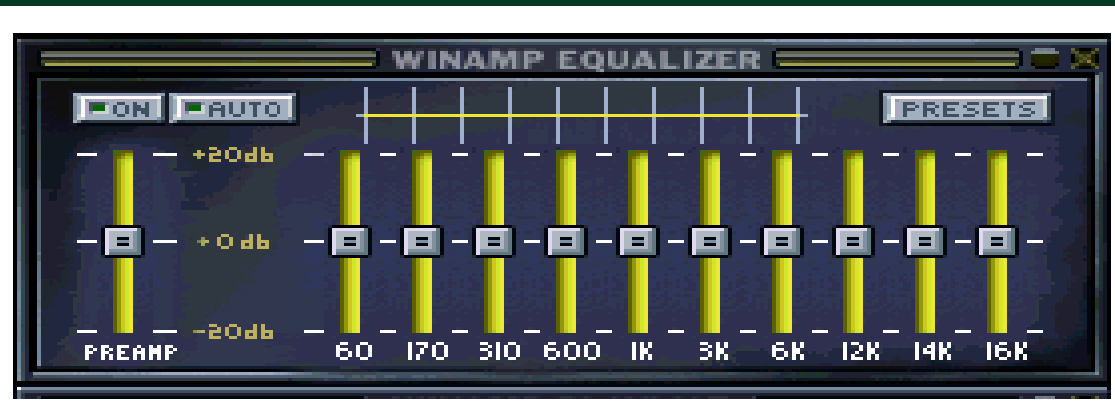
# 案例：机床轴心轨迹的滤波处理



滤除信号中的高频噪声，以便于观察轴心运动规律

动手做：

调节计算机mp3播放器等软件中的声音均衡器，试验其对音乐信号的滤波情况。





# 小结

- RC滤波器
- 数字滤波器



在线开放课程

