

4.1 电桥

4.2 调制与解调

4.3 滤波器

4.4 信号的指示和记录装置

4.1 电桥

电桥是将电阻、电感、电容等参量的变化变为电压或电流输出的一种测量电路。

分类：

按激励电压的性质  $\left\{ \begin{array}{l} \text{直流电桥} \\ \text{交流电桥} \end{array} \right.$

按输出方式  $\left\{ \begin{array}{l} \text{不平衡桥式电路} \\ \text{平衡桥式电路} \end{array} \right.$

电桥平衡：直流电桥输出为零

4.1 电桥

一、直流电桥

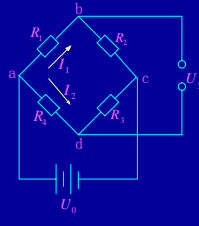
1. 电路形式

$U_0$ —输入的直流电源的电压

$U_y$ —输出电压

$$U_y = U_{ab} - U_{cd} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_0 - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_0$$

$$= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0$$



2. 平衡条件

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

一、直流电桥

3. 输出特性

$$U_y = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0$$

为了简化, 采用全等臂电桥, 即

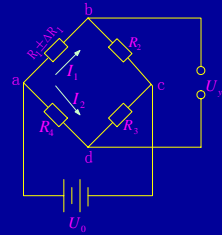
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$$

若  $\Delta R_1 \ll R_1$   $\Delta R_2 \ll R_2$

$\Delta R_3 \ll R_3$   $\Delta R_4 \ll R_4$

则电桥的输出  $U_y = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)$

电桥的差特性：相邻相减，相对相加



3. 输出特性

$$U_y = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)$$

1) 半桥单臂接法：

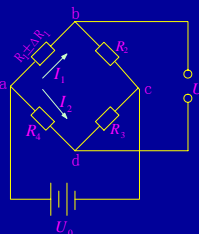
$R_1$  随被测量变化，变化量为  $\Delta R$

为了简化, 采用全等臂电桥, 即

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$  则： $U_y = \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R} U_0$

若  $\Delta R \ll R_0$  则：

$$U_y \approx \frac{\Delta R}{4R_0} U_0 = S \cdot \Delta R \quad \text{灵敏度 } S = \frac{U_0}{4R_0}$$



3. 输出特性

2) 半桥双臂接法：

$R_1$  和  $R_2$  随被测量发生变化，分别为  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$

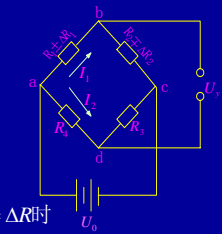
$$U_y = \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U_0$$

当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ， $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$  时

$$U_y = \frac{\Delta R}{2R_0} U_0$$

灵敏度  $S = \frac{U_y}{\Delta R} = \frac{U_0}{2R_0}$

与半桥单臂相比，灵敏度提高了一倍



### 3. 输出特性

#### 3) 全桥接法

四个桥臂的电阻均随被测量变化  
 当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$   
 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$  时

输出  $U_y = \frac{\Delta R}{R_0} U_0$

灵敏度  $S = \frac{U_y}{\Delta R} = \frac{U_0}{R}$

上述电桥是在不平衡条件下工作的，它的缺点是当电源电压不稳定，或环境温度变化时，会引起电桥输出的变化，从而产生测量误差。  
 因此，在某些情况下采用平衡电桥。

### 一. 直流电桥

#### 平衡电桥

设被测量等于零时，电桥处于平衡状态，此时指示仪表G及可调电位器H指零。

当某一桥臂随被测量变化时，电桥失去平衡，调节电位器H，改变电阻R5触电位置，可使电桥重新平衡，电表G指针回零。

电位器H上的标度与桥臂电阻值的变化成比例，故H的指示值可以直接表达被测量的数值。

### 直流电桥

#### 和差特性的应用

$$U_y = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)$$

### 4.1 电桥

#### 二. 交流电桥

交流电桥采用交流激励电压。电桥的四个臂可为电感、电容或电阻。

电桥平衡条件  $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

把各阻抗用指数式表示

$$Z_1 = Z_{01} e^{j\varphi_1} \quad Z_2 = Z_{02} e^{j\varphi_2}$$

$$Z_3 = Z_{03} e^{j\varphi_3} \quad Z_4 = Z_{04} e^{j\varphi_4}$$

代入上式

$$Z_{01} Z_{03} e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_{02} Z_{04} e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

### 二. 交流电桥

$$Z_{01} Z_{03} e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_{02} Z_{04} e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

要使上式成立，必须有

$$\begin{cases} Z_{01} Z_{03} = Z_{02} Z_{04} \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases}$$

交流电桥平衡必须满足两个条件：  
 即相对两臂阻抗之模的乘积应相等，并且它们的阻抗角之和也必需相等。

### 二. 交流电桥

电容传感器  $Z_c = r + \frac{1}{j\omega c}$

电感传感器  $Z_L = r + j\omega L$

电阻传感器  $Z_R = R // \frac{1}{j\omega c}$

## 第四章 信号调理、处理和记录

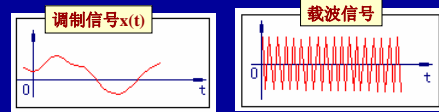
### 4.2 调制与解调

- 调制**：使一个信号的某些参数在另一个信号的控制下发生变化的过程。
- 载波**：被控制信号，为高频振荡波
- 调制信号**：控制信号，又称基带信号，低频缓变信号，不适合在信道中直接传送，不适合放大。
- 已调波/调制波**：经调制之后得到的高频振荡信号；
- 调制器**：具有调制功能的仪器
- 解调**：从已调制波中恢复出调制信号的过程
- 解调器**：具有解调功能的仪器

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 4.2 信号的调制与解调

#### 分类



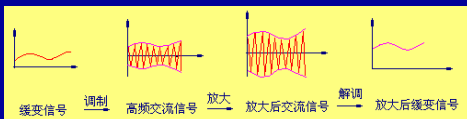
- 调幅**：幅值调制(AM)，使高频载波信号的幅值随基带信号作线性变化，得到的调制波称为调幅波。
- 调频**：频率调制(FM)，使高频载波信号的瞬时频率随基带信号作线性变化，得到的调制波称为调频波。
- 调相**：相位调制(PM)，使高频载波信号的瞬时相位随基带信号作线性变化，得到的调制波称为调相波。  
频率调制和相位调制又合称为角度调制。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 4.2 调制与解调

#### 目的

解决微弱缓变信号的放大以及信号的传输问题。



先将微弱的缓变信号加载到高频交流信号中去，然后利用交流放大器进行放大，最后再从放大器的输出信号中取出放大的缓变信号。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 4.2 调制与解调

#### 一.调幅及其解调

##### 1. 调幅原理

将一个高频简谐信号（载波）与测试信号（调制信号）相乘，使高频信号的幅值随测试信号的变化而变化。

$$x(t) \xrightarrow{\text{乘法器}} x_m(t) = x(t)y(t)$$

基带信号： $x(t)$

载波信号： $y(t) = \cos 2\pi f_0 t$

调幅波： $x_m = x(t) \cos 2\pi f_0 t$

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

#### 一.调幅及其解调

##### 2. 调幅的频谱分析

由傅立叶变换的性质知：在时域中两个信号相乘，则对应于频域中这两个信号进行卷积。即

$$x(t)y(t) \Leftrightarrow X(f)*Y(f)$$

余弦函数的频域图形是一对脉冲谱线

$$\cos 2\pi f_0 t \Leftrightarrow \frac{1}{2} \delta(f - f_0) + \frac{1}{2} \delta(f + f_0)$$

一个函数与单位脉冲函数卷积的结果，就是将其图形由坐标原点平移至该脉冲函数处。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

若以高频余弦信号作载波，把信号 $x(t)$ 和载波信号相乘，其结果就相当于把原信号的频谱图形由原点平移至载波频率 $f_0$ 处，幅值减半。即，

$$x(t) \cos 2\pi f_0 t \Leftrightarrow \frac{1}{2} X(f) * \delta(f - f_0) + \frac{1}{2} X(f) * \delta(f + f_0)$$

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 一.调幅及其解调

$x(t)$  调制器  $x_m(t) = x(t) \cos 2\pi f_0 t$

$y(t) = \cos 2\pi f_0 t$

$x(t)$

$x_m(t) = x(t) \cos 2\pi f_0 t$

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 一.调幅及其解调

从调幅原理看，载波频率  $f_0$  必须高于原信号中的最高频率  $f_m$  才能使已调波仍保持原信号的频谱图形，不致重叠。

为了减小放大电路可能引起的失真，信号的频宽 ( $2f_m$ ) 相对中心频率 (载波频率  $f_0$ ) 应越小越好。

实际载波频率常至少数倍甚至数十倍于调制信号。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 2、解调

#### (1) 同步解调

把调幅波再次与原载波信号相乘，则频域图形将再一次进行“偏移”。

若用一个低通滤波器滤去中心频率为  $2f_0$  的高频成分，那么将可以复原原信号的频谱 (幅值减小为一半)，这一过程称为同步解调。

“同步”指解调时所乘的信号与调制时的载波信号具有相同的频率和相位。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 一.调幅及其解调

#### (2) 偏置解调

把调制信号进行偏置，叠加一个直流分量  $A$ ，使偏置后的信号都具有正电压，那么调幅波的包络线将具有原调制信号的形状。把该调幅波简单地整流、滤波就可恢复原调制信号。

如果原调制信号中有直流分量，则在整流后应准确地减去所加的偏置电压。

若所加的偏置电压未能使信号电压都在零线的一侧，则对调幅波简单地整流不能恢复原调制信号。相敏检波技术可解决此问题。

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 一.调幅及其解调

### 3、相敏检波

相敏检波器利用载波信号作为参考信号来鉴别信号的极性：当调幅波与载波同相时，相敏检波器输出的电压为正；当调幅波与载波反相时，其输出的电压为负。相敏检波器输出电压的大小仅与调幅波的电压成比例，与载波电压无关。

(原信号  $x(t)$  为负) \ 载波电压为负

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

### 一.调幅及其解调

### 4、动态电阻应变仪

调制信号

载波

电桥

放大

相敏检波

低通滤波

还原信号调制

调幅波

放大后波形

解调后波形

机电工程学院 2007年5月21日星期一 18:41

## 4.2 调制与解调

### 二、调频及其解调

调频（频率调制）是利用信号电压的幅值控制一个振荡器，振荡器输出的是等幅波，但其振荡频率偏移量和信号电压成正比。

当信号电压为零时，调频波的频率等于中心频率；  
当信号电压为正值时频率提高，负值时则降低。

两种常用的调频方法及一种解调方案：

#### （一）直接调频测量电路

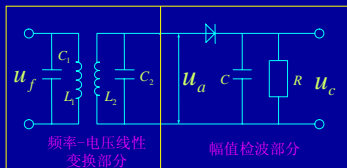
把被测量的变化直接转换为振荡频率的变化称为直接调频式测量电路，其输出也是等幅波。

#### （二）压控振荡器

压控振荡器的输出瞬时频率与输入的控制电压值成线性关系。

#### （三）变压器耦合的谐振回路鉴频法

调频波的解调又称为鉴频，是将频率变化恢复成调制信号电压幅值变化的过程。



随着测量参数的变化，幅值  $|u_a|$  随调频波频率近似线性变化，调频波  $u_f$  的频率和测量参数保持近似线性关系。

因此，把  $u_a$  进行幅值检波就能获得测量参量变化的信息，且保持近似线性关系。

## 第三节 滤波器

### 一、概述

#### 1、定义：

2. 作用：选频作用
- ①进行频谱分析
  - ②滤除干扰噪声

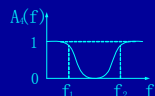
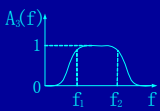
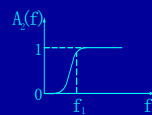
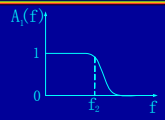
- ①进行频谱分析
- ②滤除干扰噪声

### 一. 滤波器概述

#### 2、分类

按选频作用分

- ①低通滤波器
- ②高通滤波器
- ③带通滤波器
- ④带阻滤波器



按构成元件类型分

- ①RC谐振滤波器
- ②LC谐振滤波器
- ③晶体谐振滤波器

按构成电路性质分

- ①有源滤波器
- ②无源滤波器

按所处理的信号信号分

- ①模拟滤波器
- ②数字滤波器

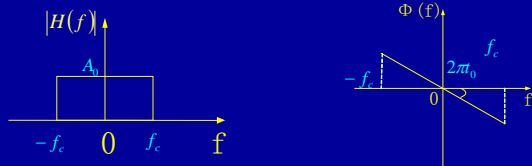
## 二 滤波器性能分析

### 1. 理想滤波器

若滤波器的频率响应 $H(f)$ 满足条件

$$H(f) = \begin{cases} A_0 e^{-j2\pi f t_0} & |f| < f_c \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

则称为理想滤波器。

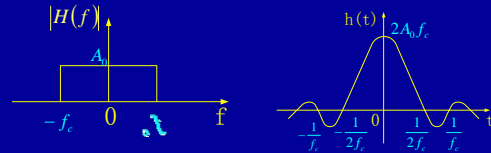


### 脉冲响应函数

在频域为矩形窗函数的“理想”低通滤波器的时域脉冲响应函数是sinc函数。

如无相角滞后, 即 $t_0 = 0$ , 则  $h(t) = 2A_0 f_c \frac{\sin(2\pi f_c t)}{2\pi f_c t}$

$h(t)$ 具有对称的图形。



理想滤波器是不能实现的。

因为 $h(t)$ 是滤波器在 $\delta(t)$ 作用下的输出, 其图形却表明, 在输入 $\delta(t)$ 到来之前, 即 $t < 0$ , 滤波器就有了与输入相对应的输出。显然, 这违背了因果关系, 任何现实的滤波器不可能有这种预知未来的能力, 所以理想低通滤波器是不可能存在的。

可以推论, 理想的高通、带通、带阻滤波器都是不存在的。

### 阶跃响应

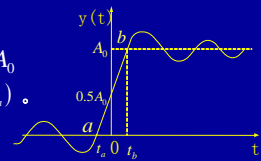
给滤波器以单位阶跃输入 $u(t)$ , 滤波器的输出 $y(t)$ 将是该输入和脉冲响应函数 $h(t)$ 的卷积:

$$y(t) = h(t) * u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) h(t-\tau) d\tau$$

不考虑前、后瓣波,

输出从零值 (a点) 到应有稳定值 $A_0$  (b点) 需要一定的建立时间 ( $t_b - t_a$ )。

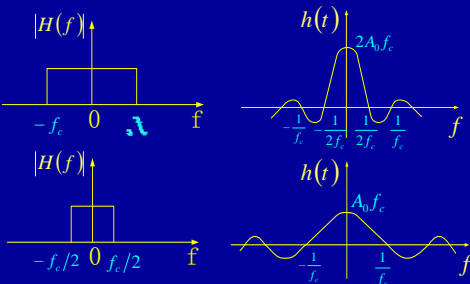
$$t_b - t_a = \frac{0.61}{f_c}$$



时移: 只影响输出曲线 $y(t)$ 的右移, 不影响 $t_b - t_a$ 值。

上 页  
目 录

滤波器的通频带越宽, 即 $f_c$ 越大, 则 $h(t)$ 的图形越陡峭, 响应的建立时间 ( $t_b - t_a$ ) 也将越小。



需要一定建立时间的解释:

输入信号如有突变处必然含有丰富的高频分量。低通滤波器阻衰了高频分量, 其结果是把输出波形“圆滑”了。通带越宽, 阻衰的高频分量越少, 使信号能量更多、更快地通过, 所以建立时间就短; 反之, 则长。

低通滤波器对阶跃响应的建立时间 $T_r$ 和带宽 $B$ 成反比, 或者说带宽和建立时间的乘积是常数, 即

$$BT_r = \text{常数}$$

## 实际滤波器的特征参数

### 2. 基本参数

1)、纹波幅度  $d \ll A_0 / \sqrt{2}$

2)、截止频率

幅频特性值等于  $A_0 / \sqrt{2}$  所对应的频率。

3)、带宽  $B$  和品质因数  $Q$  值

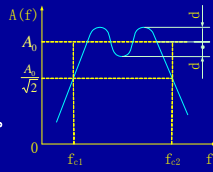
上下两截止频率之间的频率范围称为滤波器带宽。

中心频率  $f_0$  和带宽  $B$  之比称为滤波器的品质因数  $Q$ 。

4)、倍频程选择性

倍频程选择性是指在上截止频率  $f_{c2}$  与  $2f_{c2}$  之间，或者在下截止频率  $f_{c1}$  与  $f_{c1}/2$  之间幅频特性的衰减量。

5)、滤波器因数  $\lambda = \frac{B_{-60dB}}{B_{-3dB}}$



## (二) RC调谐式滤波器的基本特性

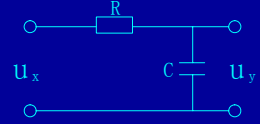
### 1、一阶RC低通滤波器

电路的微分方程式：

$$RC \frac{du_y}{dt} + u_y = u_x$$

令  $\tau = RC$ ，称时间常数。

传递函数  $H(s) = \frac{U_y(s)}{U_x(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$



上 页  
目 录

1°、当  $f \ll \frac{1}{2\pi RC}$  时， $A(f)=1$ ，

$\phi(f)$  近似于一条通过原点的直线。

此时，RC低通滤波器是一个不失真传输系统。

2°、当  $f = \frac{1}{2\pi RC}$  时， $A(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ，即

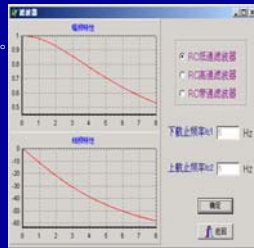
$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi RC}$$

表明，RC值决定着上截止频率。

3°、当  $f \gg \frac{1}{2\pi RC}$  时，输出  $u_y$  与输入  $u_x$  的积分成正比，即

$$u_y = \frac{1}{RC} \int u_x dt$$

此时，RC低通滤波器起着积分器的作用。



上 页  
目 录

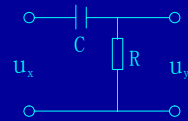
### 2、RC高通滤波器

微分方程式

$$u_y + \frac{1}{RC} \int u_y dt = u_x$$

令  $RC = \tau$ ，则传递函数

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



上 页  
目 录

1°、当  $f = \frac{1}{2\pi\tau}$  时， $A(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$

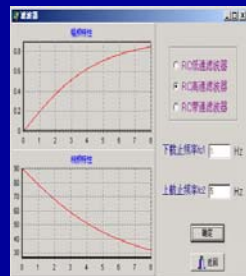
滤波器的-3dB截止频率为  $f_{c1} = \frac{1}{2\pi RC}$

2°、当  $f \gg \frac{1}{2\pi\tau}$  时， $A(f) \approx 1$ ； $\phi(f) \approx 0$

RC高通滤波器可视为不失真传输系统。

3°、当  $f \ll \frac{1}{2\pi\tau}$  时，输出与输入的微分成正比，

RC高通滤波器起着微分器的作用。



上 页  
目 录

### 3、RC带通滤波器

带通滤波器可看成是低通滤波器和高通滤波器串联组成。

串联所得的带通滤波器以原高通滤波器的截止频率为下截止频率，即

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi\tau_1}$$

其上截止频率为原低通的截止频率，即

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi\tau_2}$$

分别调节高、低通环节的时间常数 ( $\tau_1$  及  $\tau_2$ )，就可得到不同的上、下截止频率和带宽的带通滤波器。

#### 四、恒带宽比滤波器和恒带宽滤波器

多个滤波器

- ①使带通滤波器的中心频率可调，通过改变RC调谐参数而使其中心频率跟随所需量测的信号频段。
- ②使用一组各自中心频率固定的、但又按一定规律相隔的滤波器组。

#### (一) 恒带宽比滤波器

带宽比  $Q = \frac{f_n}{B}$

滤波器的中心频率越高，其带宽越大。

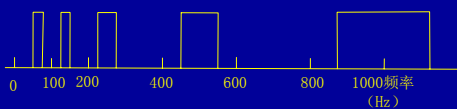
若一个带通滤波器的低端截止频率为  $f_{c1}$ ，高端截止频率为  $f_{c2}$ ，则其关系为： $f_{c2} = 2^n f_{c1}$  n称为倍频程数

滤波器中心频率  $f_n = \sqrt{f_{c1} f_{c2}}$

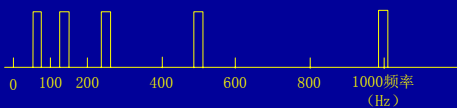
恒带宽比滤波器的频率分辨力在低频段较好，在高频段则甚差。

上 一 页

目 录



恒带宽比滤波器



恒带宽滤波器

上 一 页

目 录

#### (二) 恒带宽滤波器

恒带宽滤波器在所有频段都具有同样良好的频率分辨力。

恒带宽滤波器不宜做成固定中心频率的。

一般利用一个定带宽的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的需要。

上 一 页

目 录

### 第四节 信号的指示和记录装置

- 动圈式磁电指示机构
- 光线示波器
- 伺服式记录仪
- 采用阴极射线管的信号显示和记录装置
- 数字式波形存储记录仪
- 磁记录器
  - 磁带记录器
  - 磁盘记录器