

测试系统特性

检测技术与自动化工程系

闫蓓

新主楼E905



yanbei@buaa.edu.cn



◆ 测试系统基本要求

◆ 测试系统静态特性

◆ 测试系统动态特性

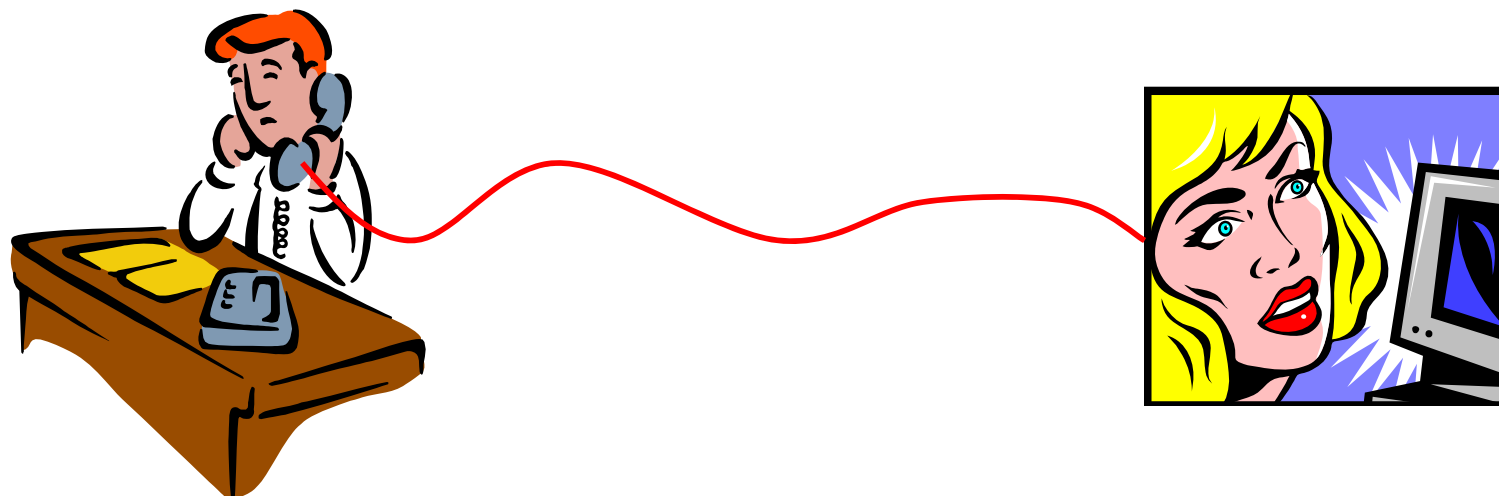
◆ 其他特性

测试系统特性

◆ 信号分析方法工程应用实例

◆ 仪表的信号制

输出信号能够**真实反映**被测物理量(输入信号)的变化过程, 不使信号发生畸变, 即实现**不失真测试**。



系统传递（输出）特性：

系统的输出与输入量之间的变换或运算关系。

$$y(t) = k \times x(t - t_0)$$

1 测试系统基本要求——不失真的时域条件

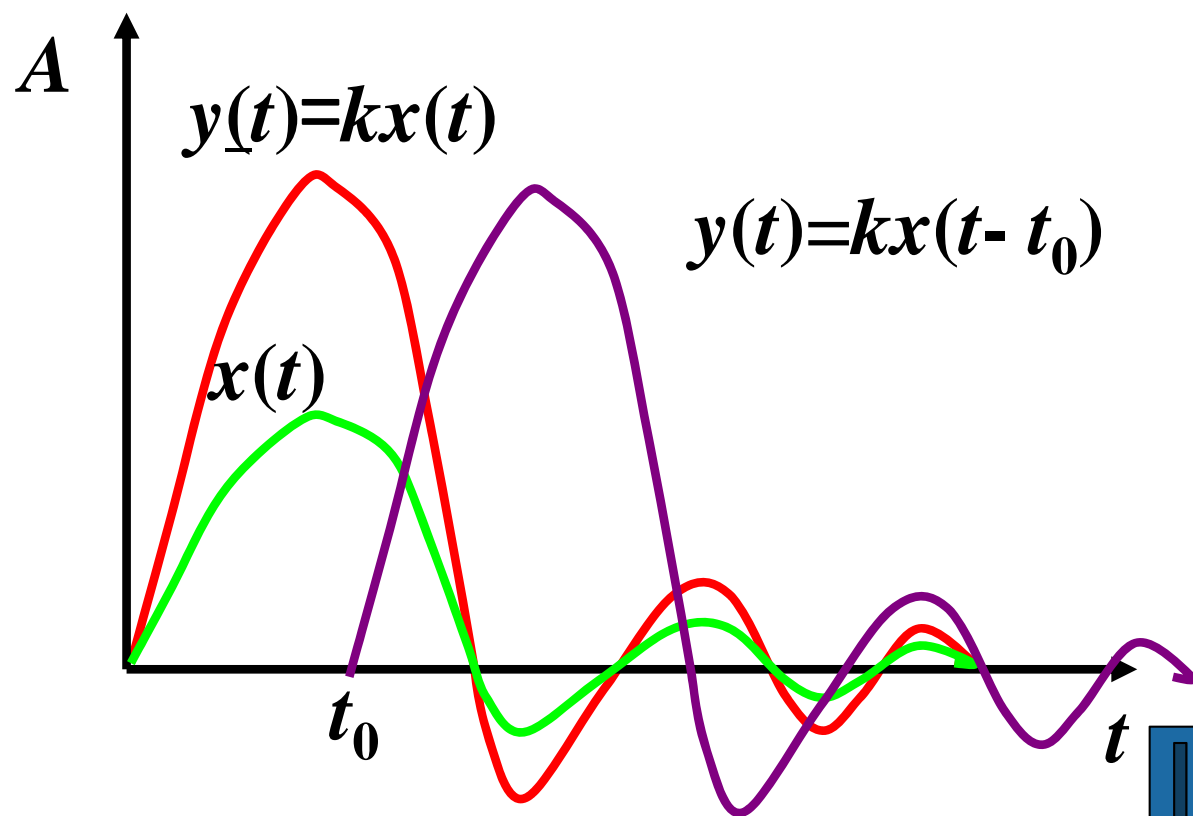
设测试系统的输出为 $y(t)$ 、输入为 $x(t)$

时域条件



$$y(t) = kx(t - t_0)$$

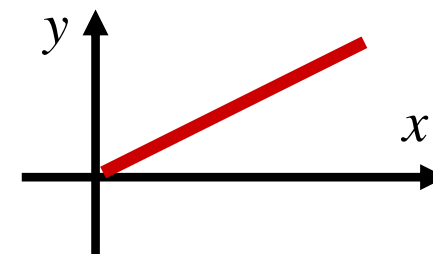
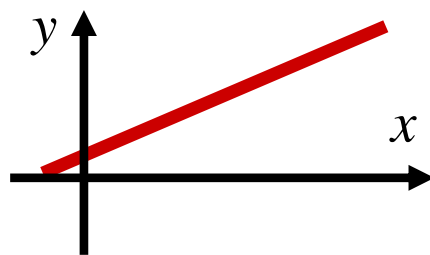
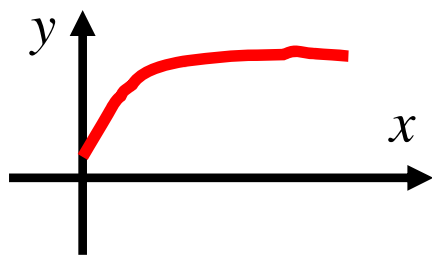
不失真的特性——系统的输出波形与输入信号的波形完全相似，只是幅值放大了 k 倍，在时间上延迟了 t_0 而已。



2 测试系统静态特性

1. 静态特性 (Static characteristics)：即输入量和输出量不随时间变化或随时间变化的程度远缓慢于系统的固有最低阶运动模式的变化时，输出与输入之间的关系，**代数方程**表示。

$$y = f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad \Rightarrow \quad y = a_0 + a_1 x \quad \xrightarrow{\text{零位补偿}} \quad y = a_1 x$$



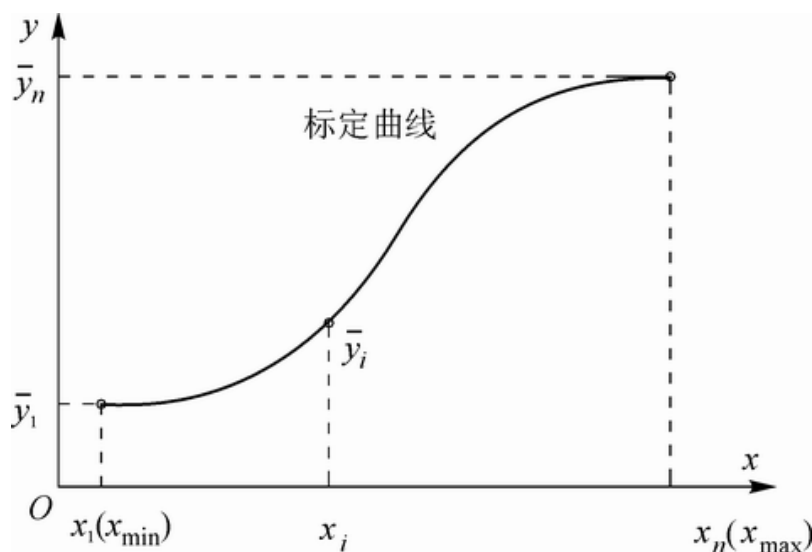
式中 a_i 是与测试装置结构有关的系数。

静态特性如何获得? \Rightarrow 静态标定

2 测试系统静态特性

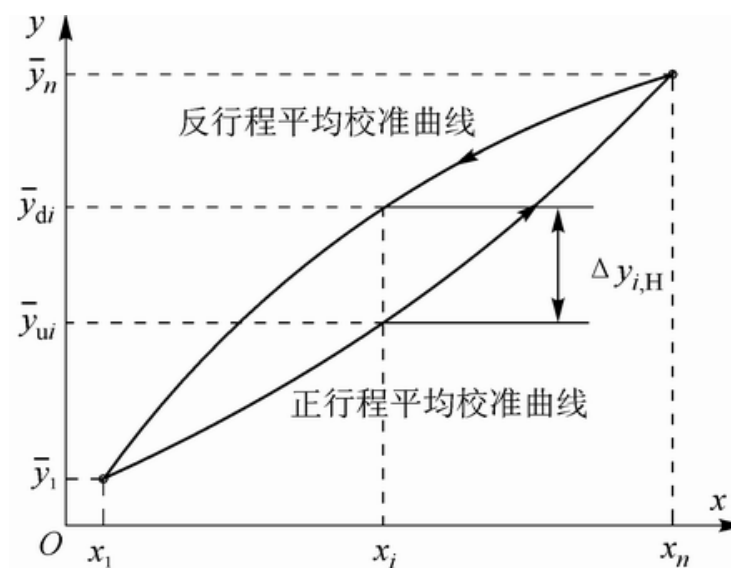
2. 静态标定实验：在标准条件下，利用一定等级的标定设备对测试系统进行多次往复测试的过程，以获取被测试系统的静态特性。

静态实验数据处理



$$\bar{y}_i = \frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m (y_{uij} + y_{dij})$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$



$$\bar{y}_{di} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{dij}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\bar{y}_{ui} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{uij}, i = 1, 2, \dots, n$$

2 测试系统静态特性

一、测量范围

二、量程

三、静态灵敏度

四、分辨力与分辨率

五、阈值/死区

六、漂移（时漂）

七、温漂

八、线性度

（绝对、端基、最小二乘、独立）

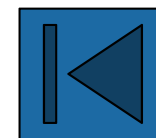
九、符合度

十、迟滞

十一、重复性

十二、精度

十三、不确定度



1. 动态特性 (Dynamic characteristics) : 即输入量和输出量随时间迅速变化时, 输出与输入之间的关系。

微分方程

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ &= b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned}$$

传递函数

$$y(t) = L^{-1} [H(s)X(s)]$$

频响函数

$$y(t) = [A_m |H(\omega_0)|] \sin[\omega_0 t + \varphi(\omega_0)] \quad H(\omega_0)$$

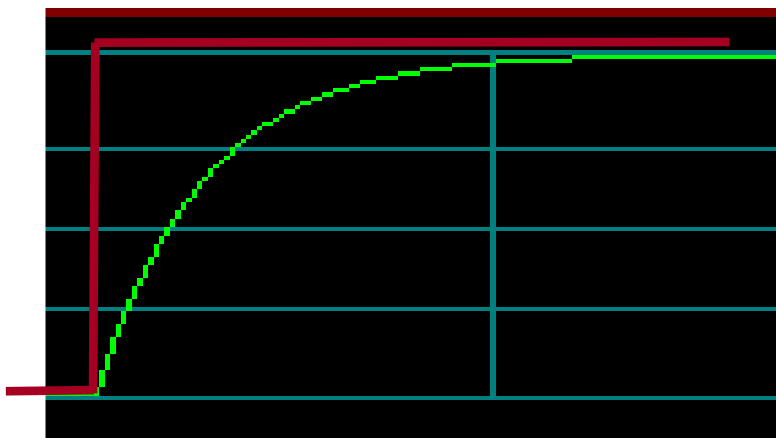
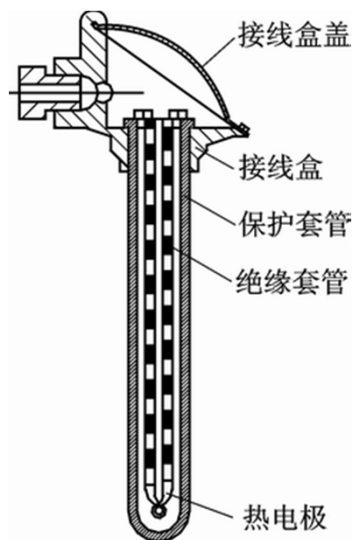
状态方程

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

动态特性如何获得?
动态标定

3 测试系统动态特性

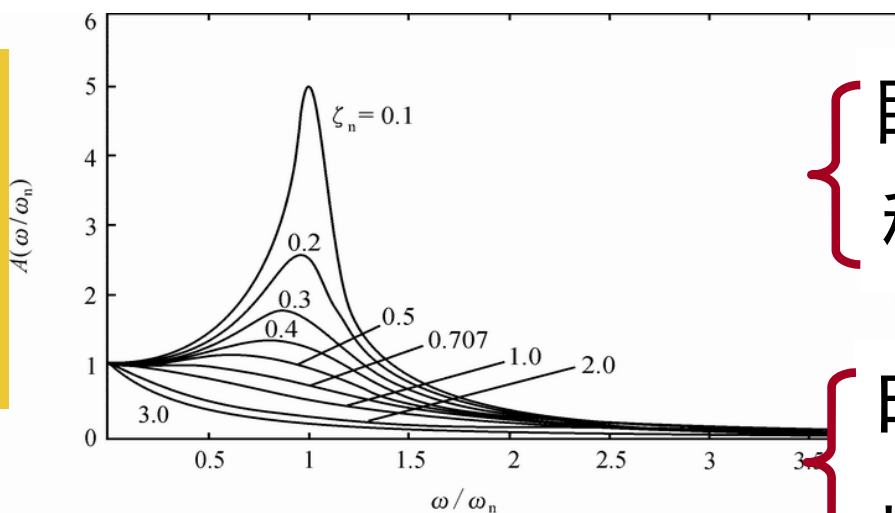
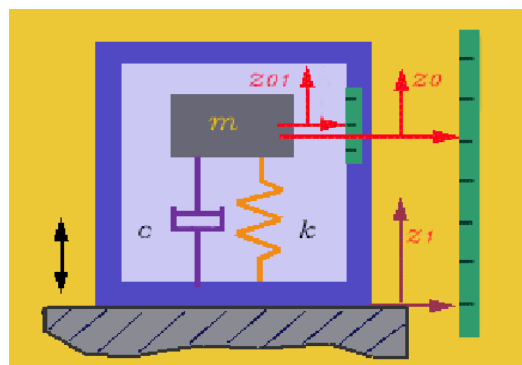
温度测量



误差

$$e(t) = \frac{y(t)}{A} - x(t)$$

振动位移测量

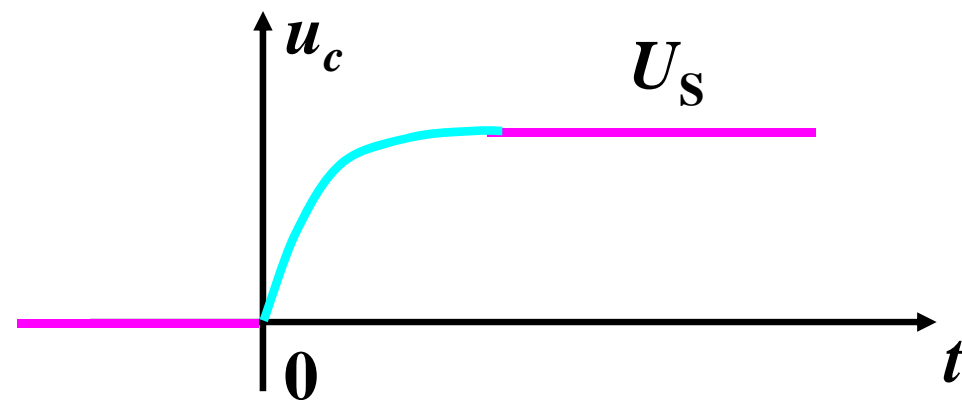
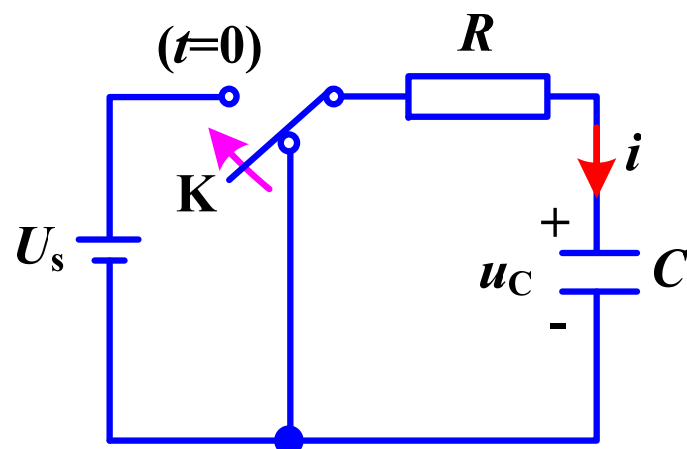


瞬态误差 阶跃 冲激
稳态误差 正弦

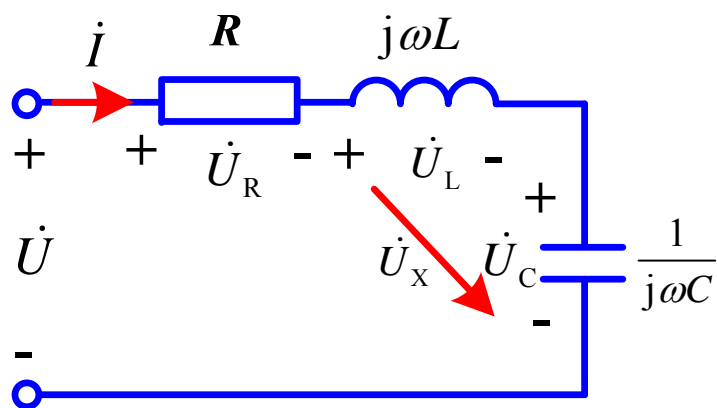
时域特性 一阶系统
频域特性 二阶系统

3 测试系统动态特性

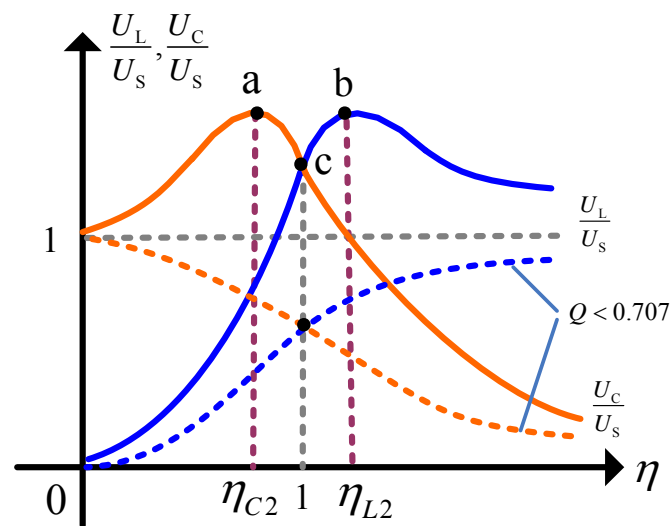
一阶电路RC 充电过程



二阶电路RLC 频率响应



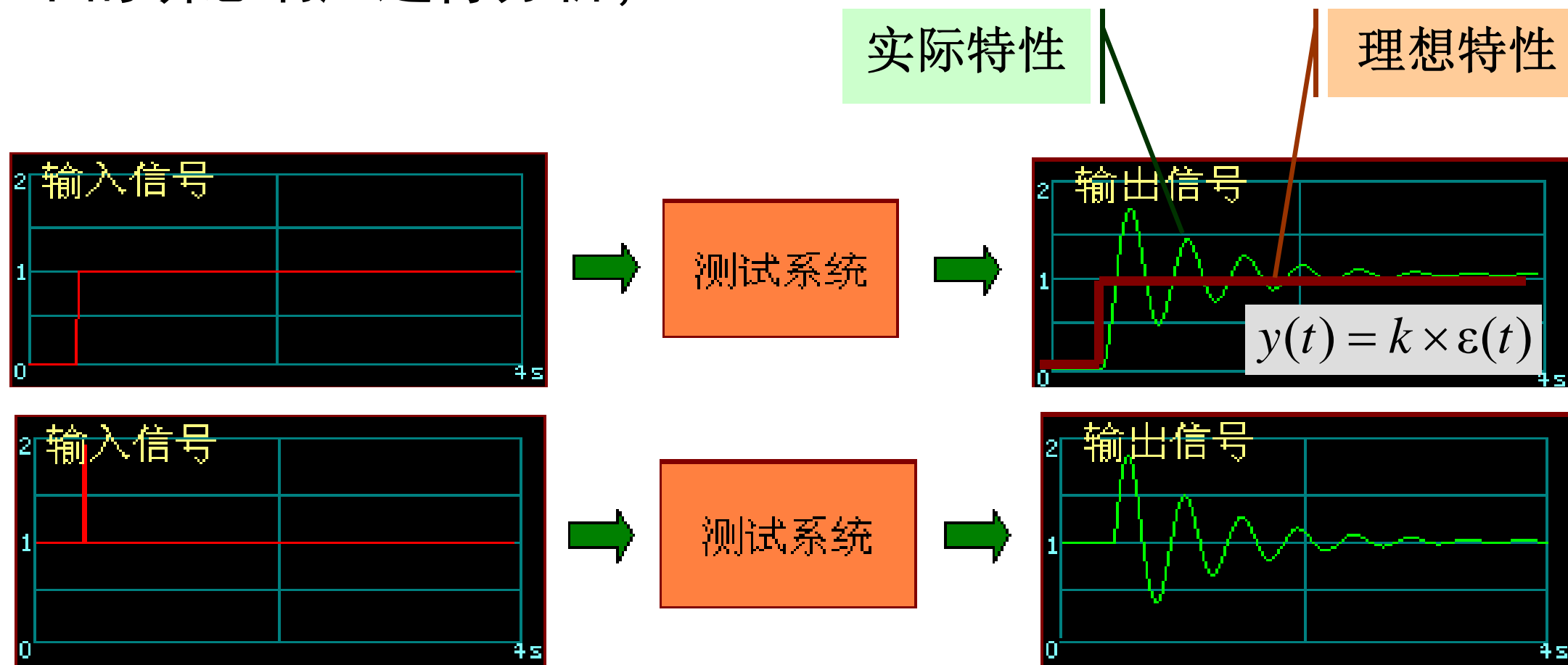
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_C(j\omega)}{\dot{U}_s(j\omega)}$$



$$H_C(j\eta) = \frac{-jQ}{\eta + jQ(\eta^2 - 1)}$$

3 测试系统动态特性

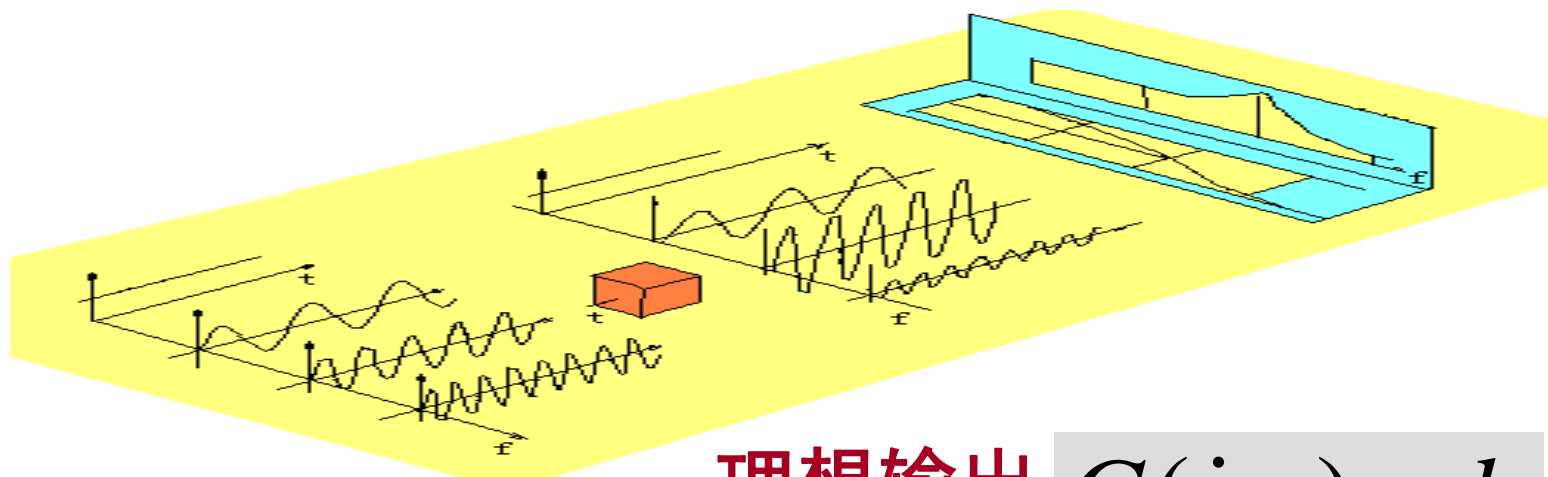
时域，对测试系统在**阶跃输入**、**回零过渡过程**、**脉冲输入**下的瞬态响应进行分析；



3 测试系统动态特性

频域，对系统在**正弦输入**下的**稳态响应**的幅值增益和相位差进行分析。

动态性能指标
动态模型
预测输出
测量
动态补偿模型



理想输出 $G(j\omega) = k$

典型信号
发生器

待标定
测试系统

数据采集处理系统
或动态信号记录仪

一阶系统时域性能指标

时间常数 T 响应时间 t_s 延迟时间 t_d 上升时间 t_r

二阶系统时域性能指标

$\zeta > 1$: 上升时间 t_r , 延迟时间 t_d , 响应时间 t_s

$\zeta = 1$: 上升时间 t_r , 延迟时间 t_d , 响应时间 t_s

$\zeta < 1$: 上升时间 t_r , 延迟时间 t_d , 响应时间 t_s , 允许
振荡次数 N , 峰值时间 t_p , 阻尼振荡周期 T_d , 超调量
 σ_p , 振荡衰减率 d 。

一阶系统频域性能指标

(转折频率) 通频带 ω_B

工作频带 ω_g

二阶系统频域性能指标

工作频带 ω_g

频域最佳阻尼比 $\zeta_{best,\sigma}$

最大工作频带 $\omega_{g,max}$

谐振频率 ω_r



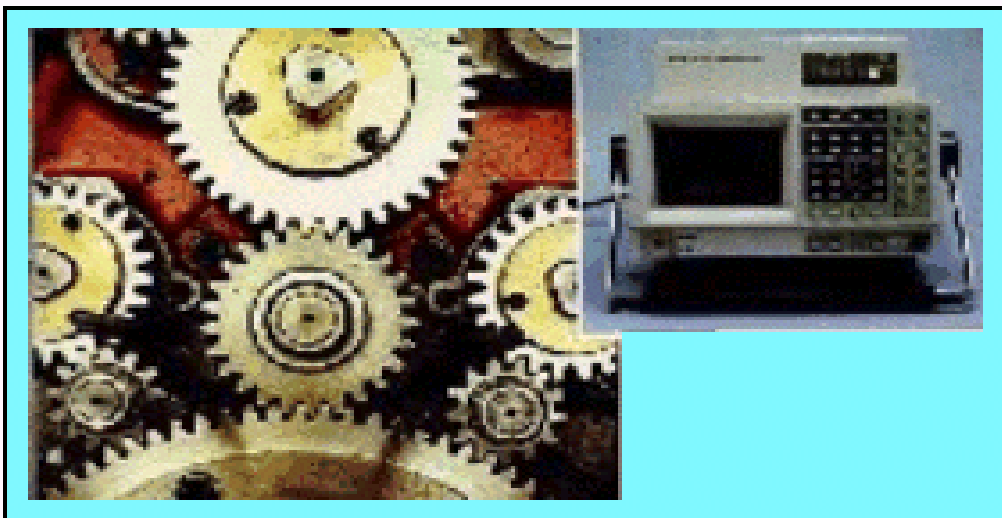
负载效应

抗干扰特性

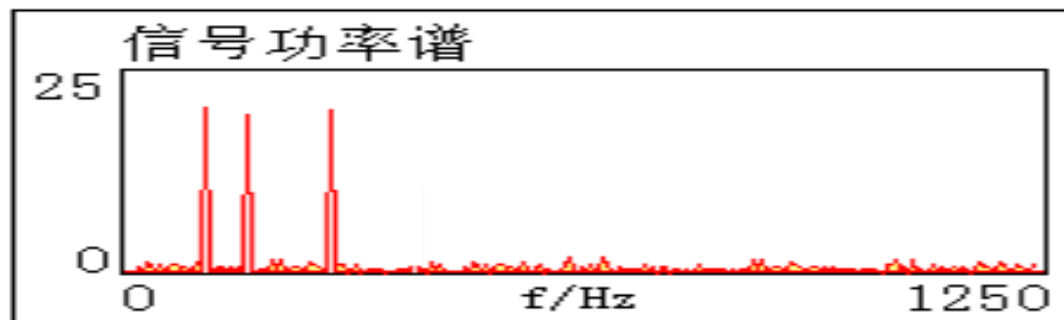
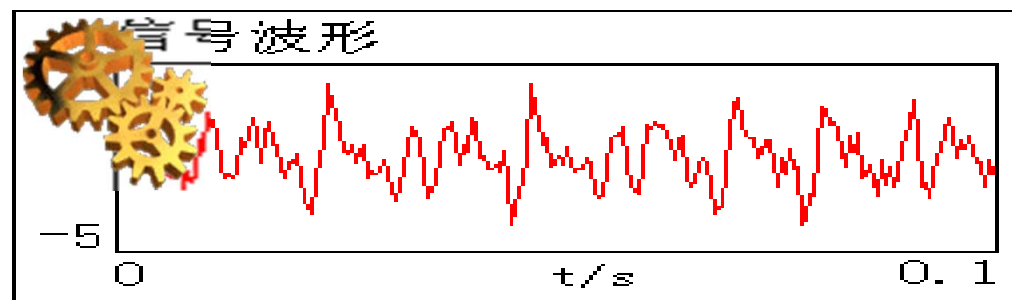
- 静态测量的测试系统，一般只需衡量其静态特性、负载效应和抗干扰特性指标。
- 动态测试，则需要静态特性、动态特性、负载效应、抗干扰特性指标来衡量。



频谱分析主要用于识别信号中的周期分量，是信号分析中最常用的一种手段。



案例：在齿轮箱故障诊断
通过齿轮箱振动信号频谱分析，确定最大频率分量，然后根据机床转速和传动链，找出故障齿轮。

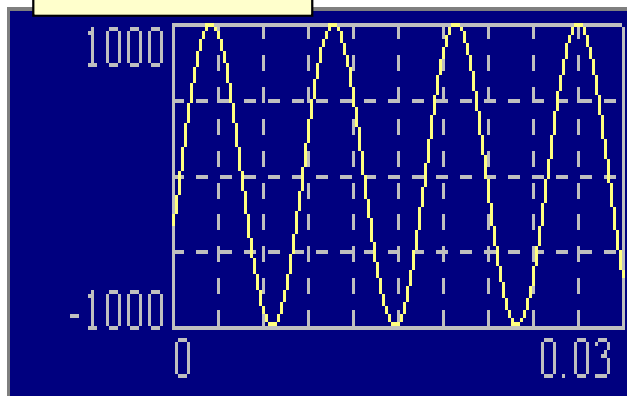


$$\left. \begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ R_{xx}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \right\}$$

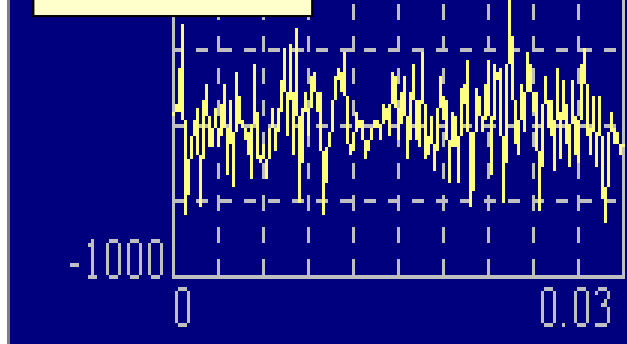
自相关分析：微弱信号的检测

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt$$

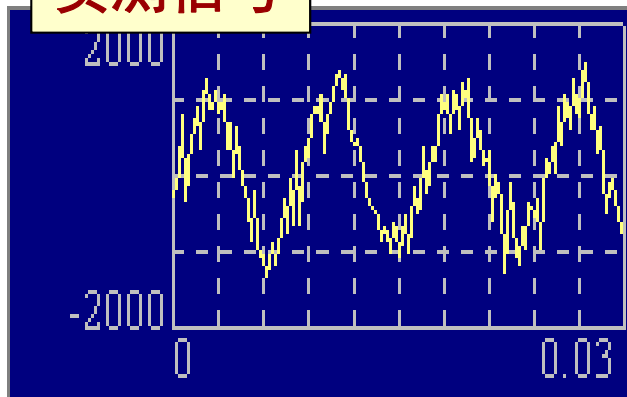
被测信号



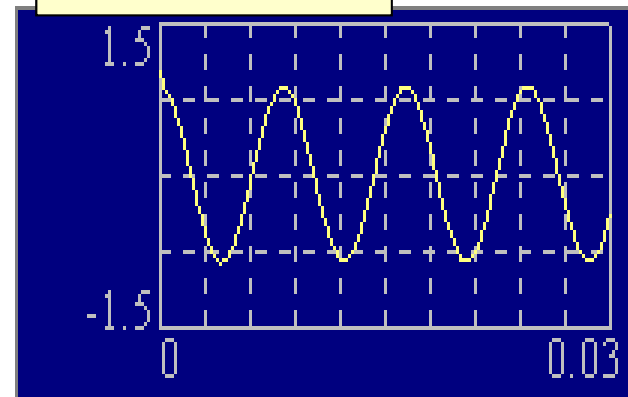
干扰信号



实测信号

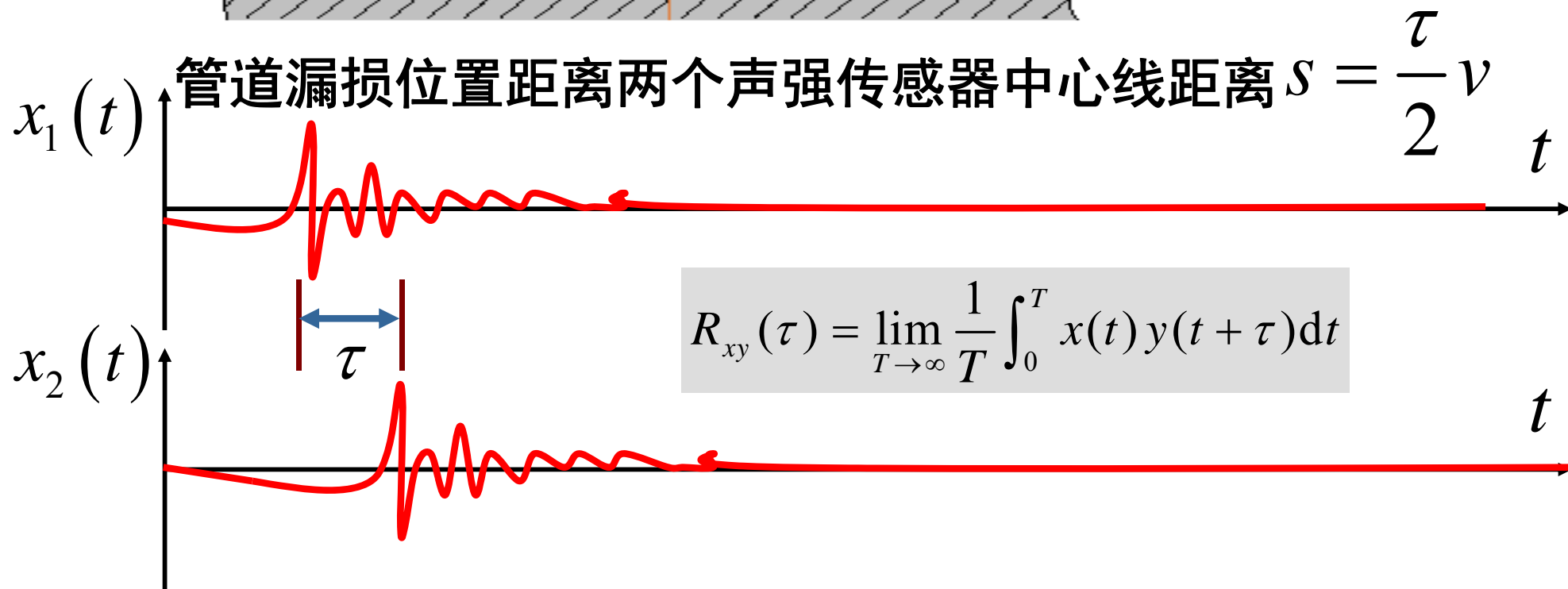
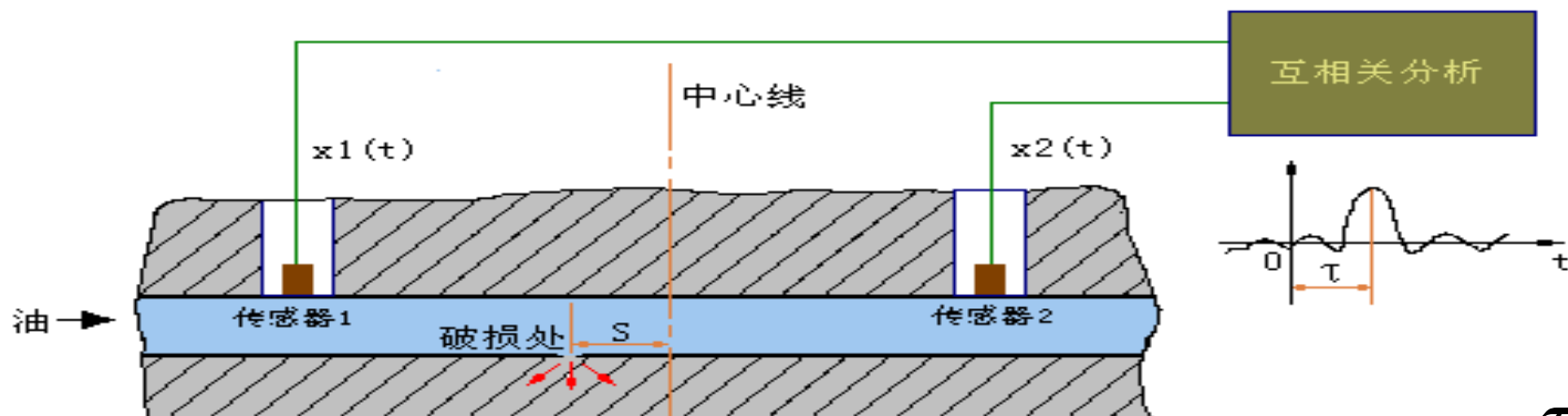


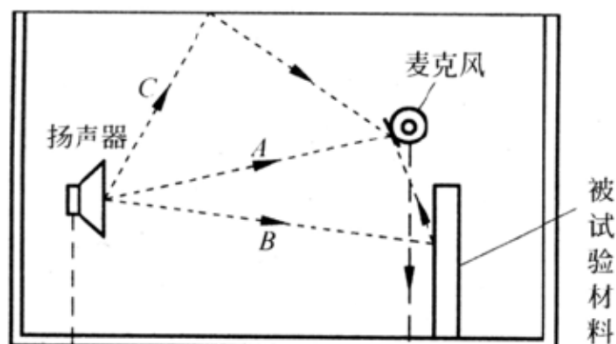
自相关函数



自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 包含信号的幅值和周期信息，抑制了噪声的影响，提高了信噪比。

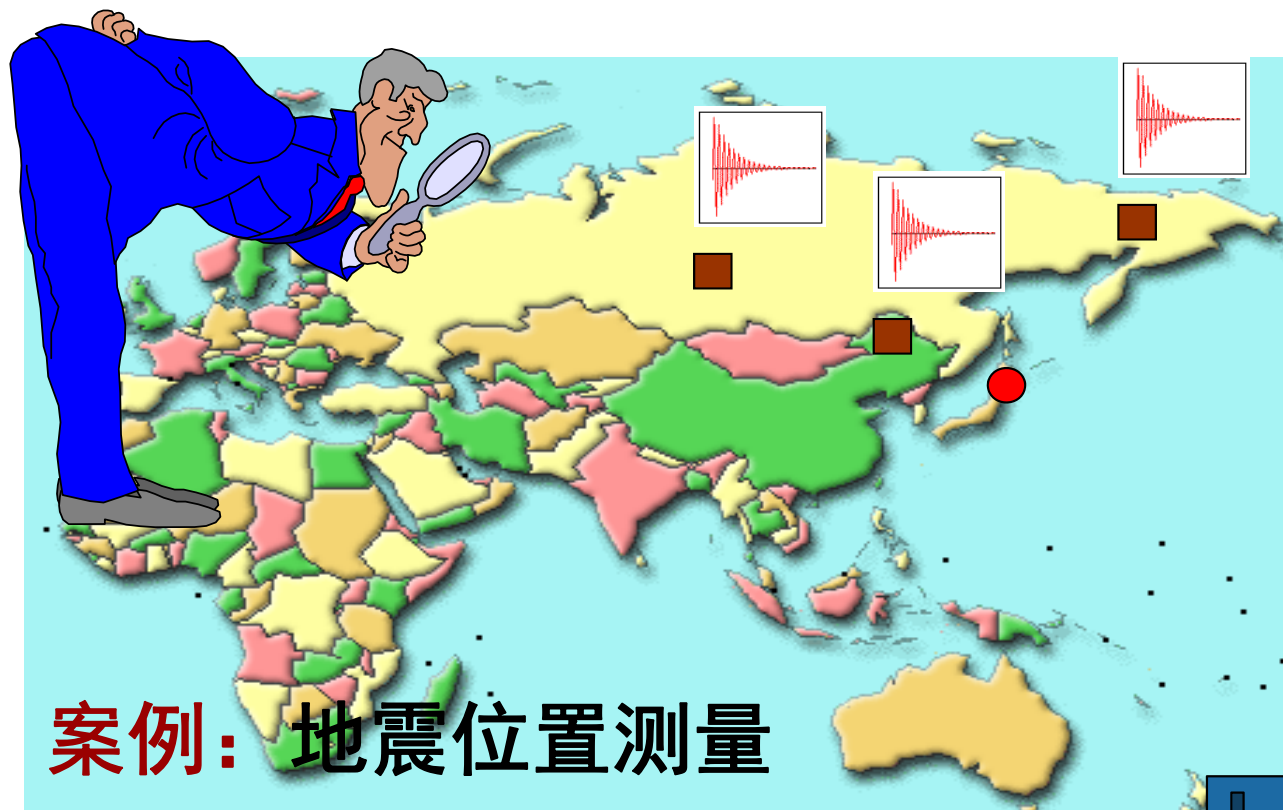
信号源定位和故障诊断 —— 地下输油管道漏损位置的探测





v 为声速

$$T_A = \frac{A}{v} \quad T_B = \frac{B}{v} \quad T_C = \frac{C}{v}$$



案例：地震位置测量

◆ 气动仪表的信号标准

GB 777 《化工自动化仪表用模拟气动信号》

20kPa (0.2kgf/cm^2) \sim 100kPa (1kgf/cm^2)



温度计 威卡(德国 WIKA)

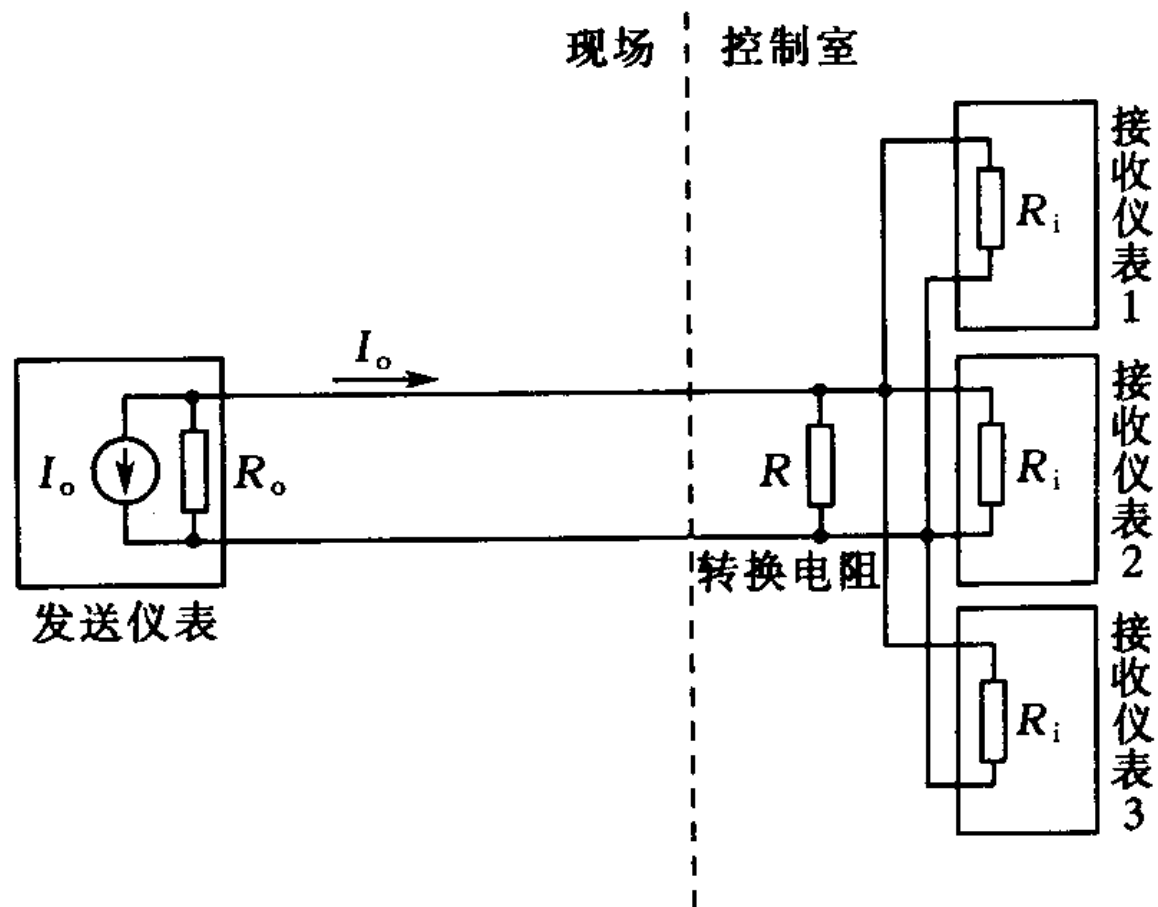
◆ 电动仪表的信号标准

包括模拟信号、数字信号、频率信号和脉冲信号等。

4~20mADC, 1~5VDC。

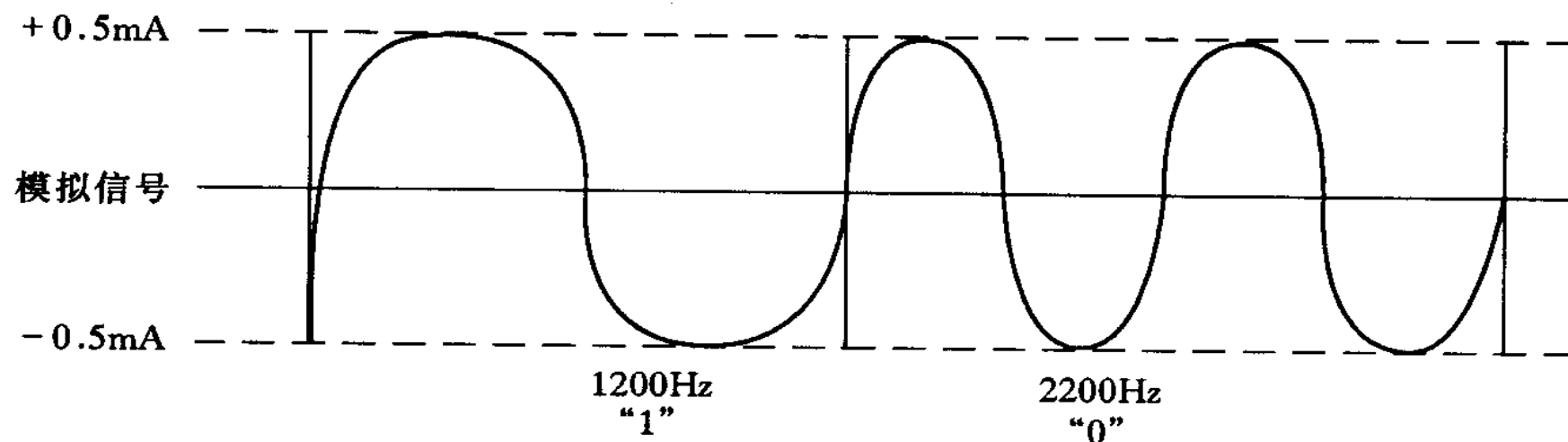
- 直流信号干扰小，抗干扰能力强。
- 接线简单，不受传输线路的电感、电容和负载性质的影响。
- 获得基准电压容易。
- 便于A/D转换和现场仪表与数字控制仪表及装置配用。

序 号	电流信号	负载电阻
1	4~20mADC	250~750Ω
2	0~10mADC	0~1000Ω 0~3000Ω



◆ HART通信协议 Highway Addressable Remote Transducer

可寻址远程传感器高速通道的开放通信协议，数字通信协议，可以在一条电缆上同时传输4~20mA的模拟信号和数字信号。



HART数字通信信号

◆ modbus、RS-232、RS-485通讯协议等

