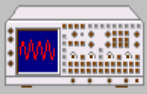


第4章 测试系统特性

本章学习要求：

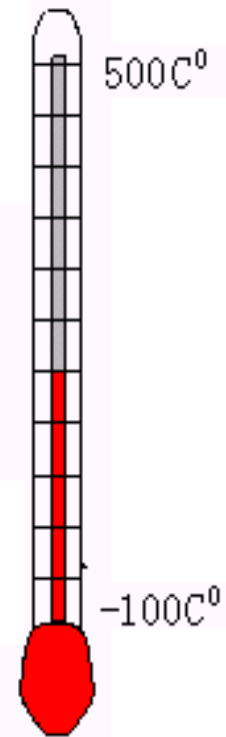
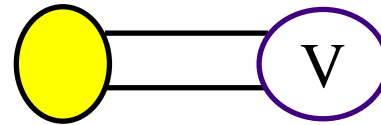
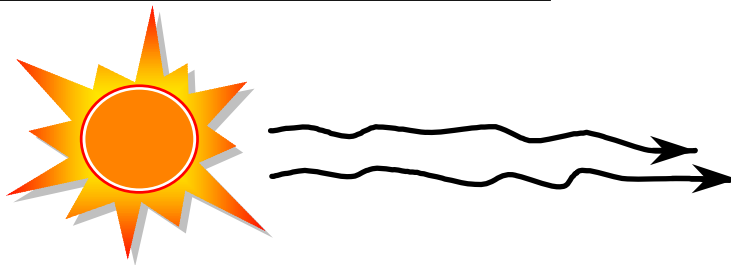
1. 建立测试系统的概念
2. 了解测试系统特性对测量结果的影响
3. 了解测试系统特性的测量方法

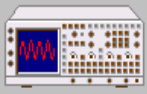


4.1 测试系统概论

测试系统是执行测试任务的传感器、仪器和设备的总称。

简单测试系统(光电池)

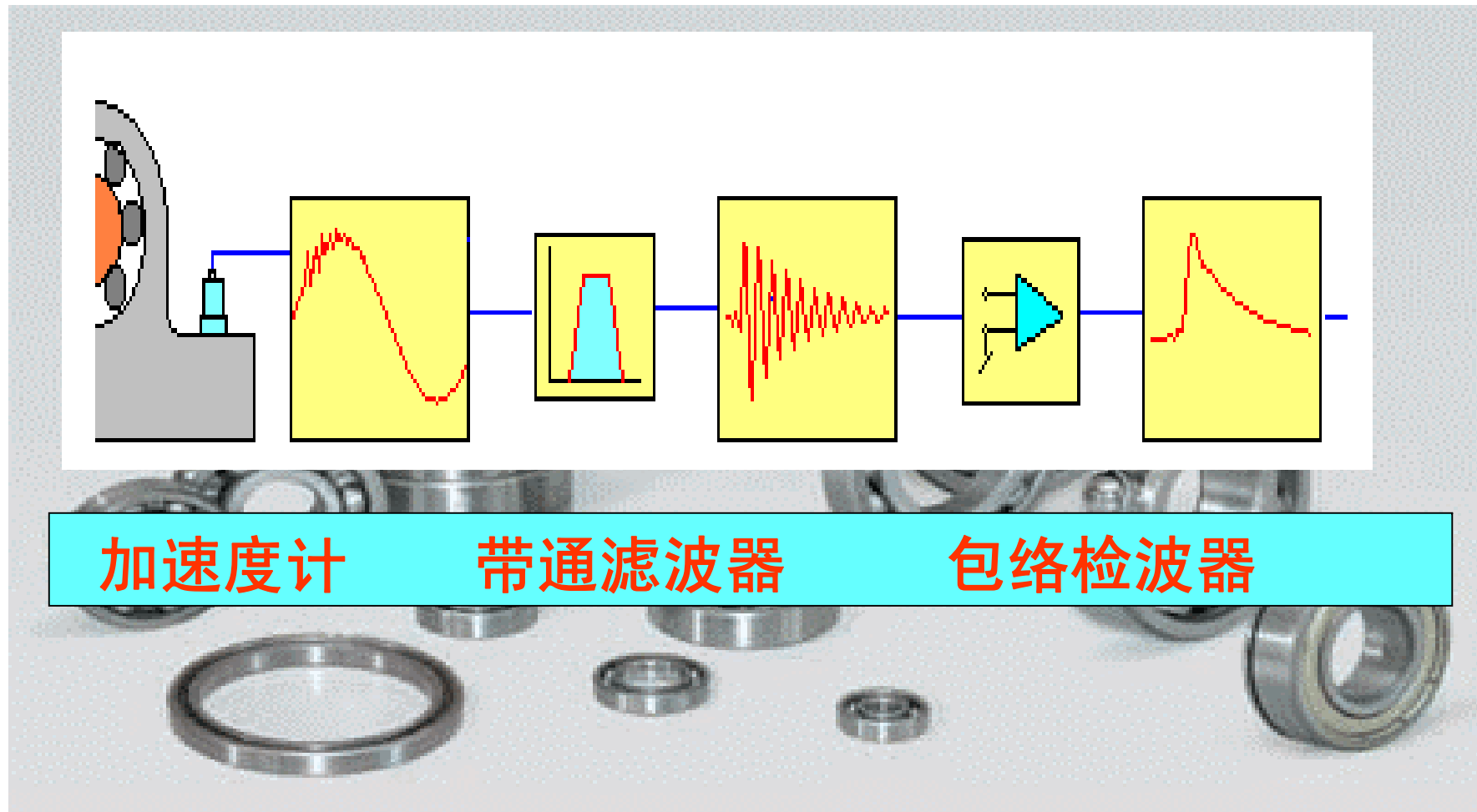


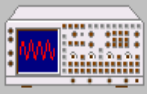


4.1 测试系统概论

华中科技大学机械学院

复杂测试系统(轴承缺陷检测)





4.1 测试系统概论

测量失真:

 [语音片段1 \(Good\)](#)

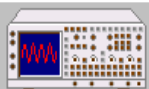
 [语音片段2 \(bad\)](#)



系统特性评定:

测试系统静态响应特性

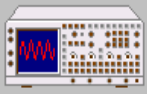
测试系统的动态响应特性



4.2 测试系统静态响应特性

如果测量时，测试装置的输入、输出信号不随时间而变化，则称为静态测量。



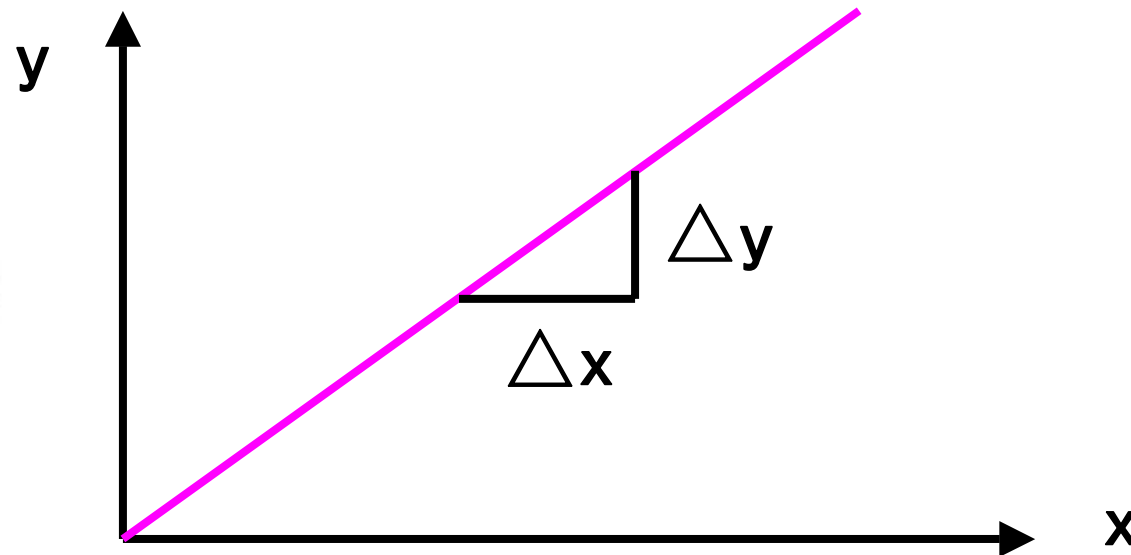


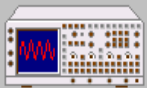
4.2 测试系统静态响应特性

静态测量时，测试装置表现出的响应特性称为静态响应特性。

a) 灵敏度

当测试装置的输入 x 有一增量 Δx ,引起输出 y 发生相应变化 Δy 时,定义: $S = \Delta y / \Delta x$





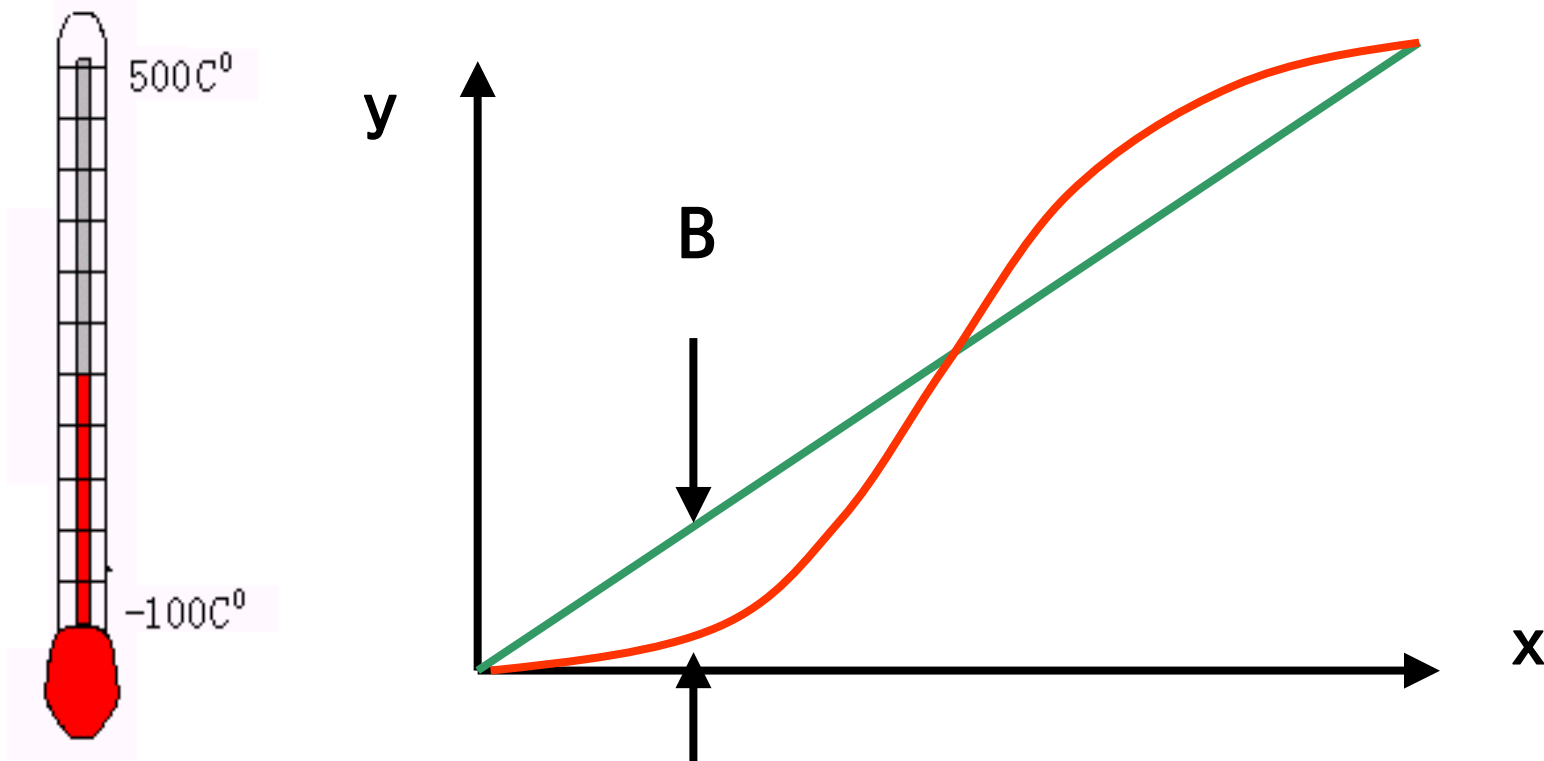
4.2 测试系统静态响应特性

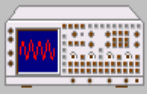
华中科技大学机械学院

b)非线性度

标定曲线与拟合直线的偏离程度就是非线性度。

$$\text{非线性度} = \mathbf{B/A} \times 100\%$$



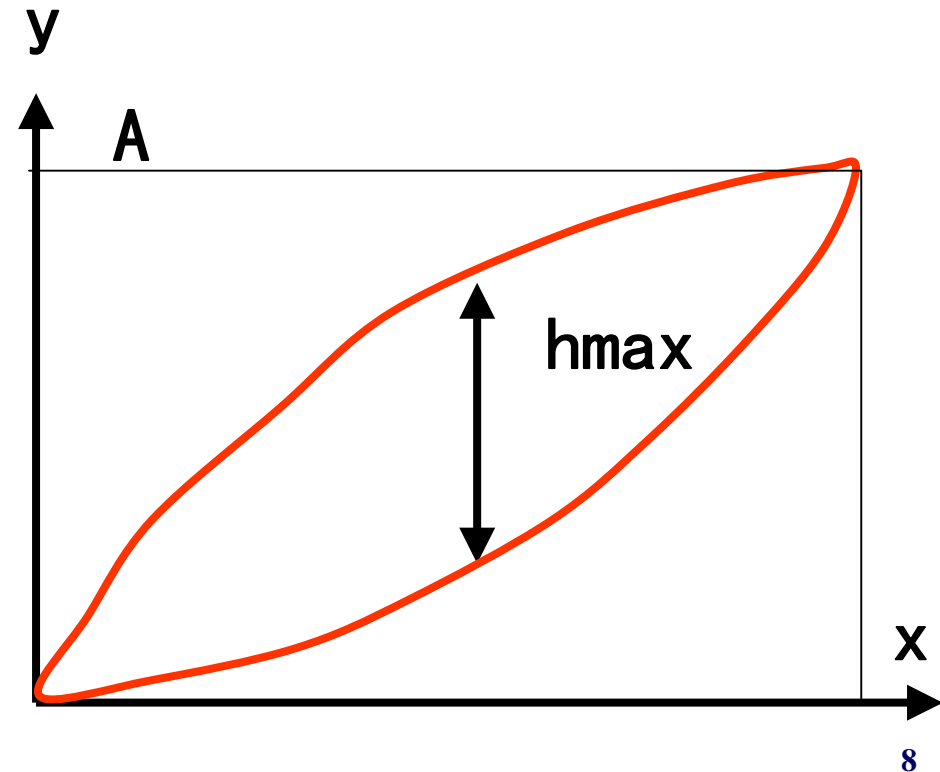
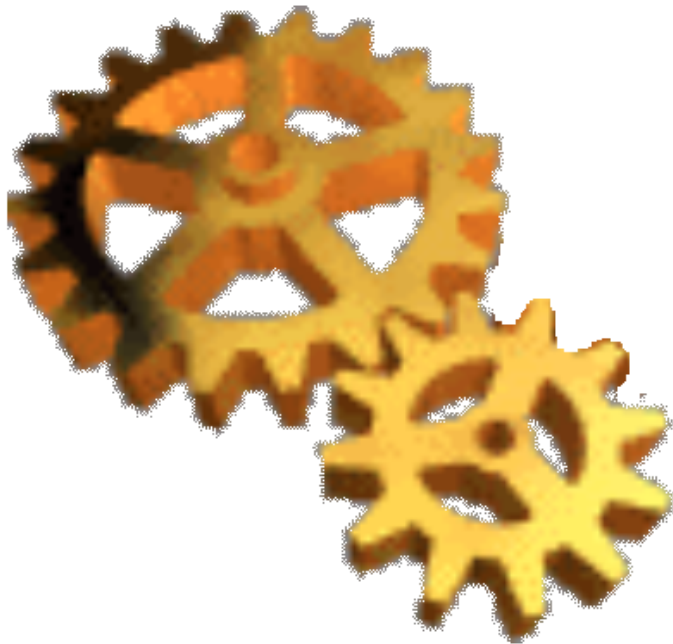


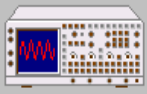
4.2 测试系统静态响应特性

华中科技大学机械学院

c) 回程误差

测试装置在输入量由小增大和由大减小的测试过程中，对于同一个输入量所得到的两个数值不同的输出量之间差值最大者为 h_{max} ，则定义回程误差为： $(h_{max}/A) \times 100\%$





4.2 测试系统静态响应特性

华中科技大学机械学院

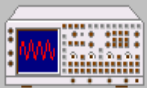
d) 静态响应特性的其他描述

精度：是与评价测试装置产生的测量误差大小有关的指标。

灵敏阈：又称为死区，用来衡量测量起始点不灵敏的程度。

分辨力：指能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量，表明测试装置分辨输入量微小变化的能力。



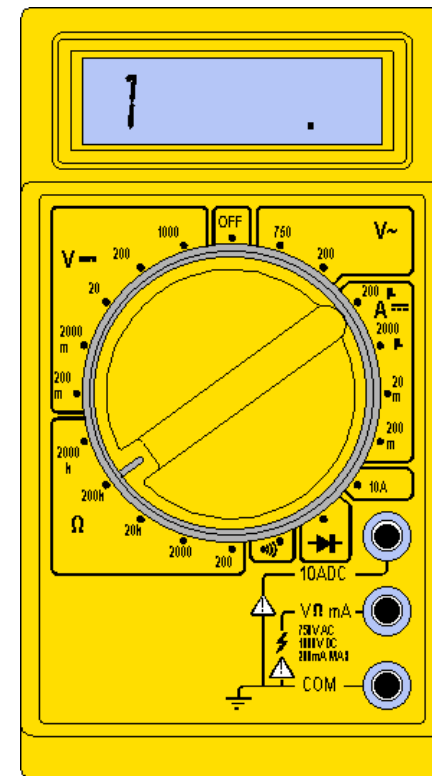


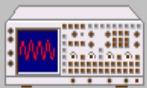
4.2 测试系统静态响应特性

测量范围：是指测试装置能正常测量最小输入量和最大输入量之间的范围。

稳定性：是指在一定工作条件下，当输入量不变时，输出量随时间变化的程度。

可靠性：是与测试装置无故障工作时间长短有关的一种描述。

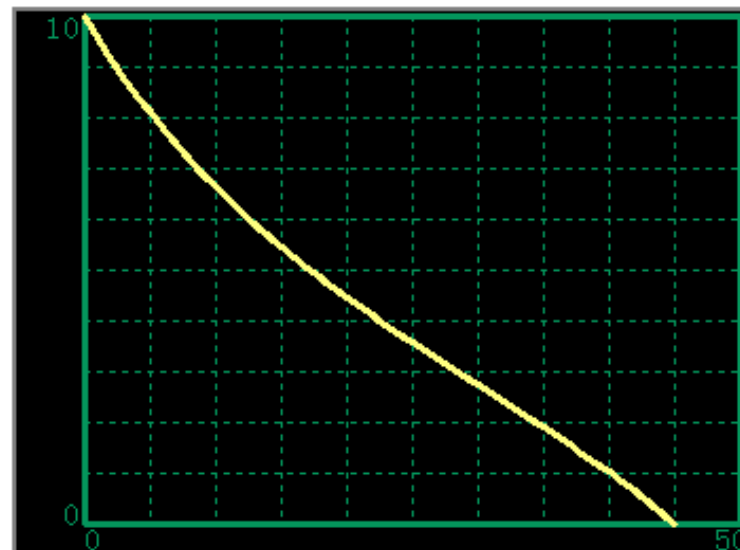
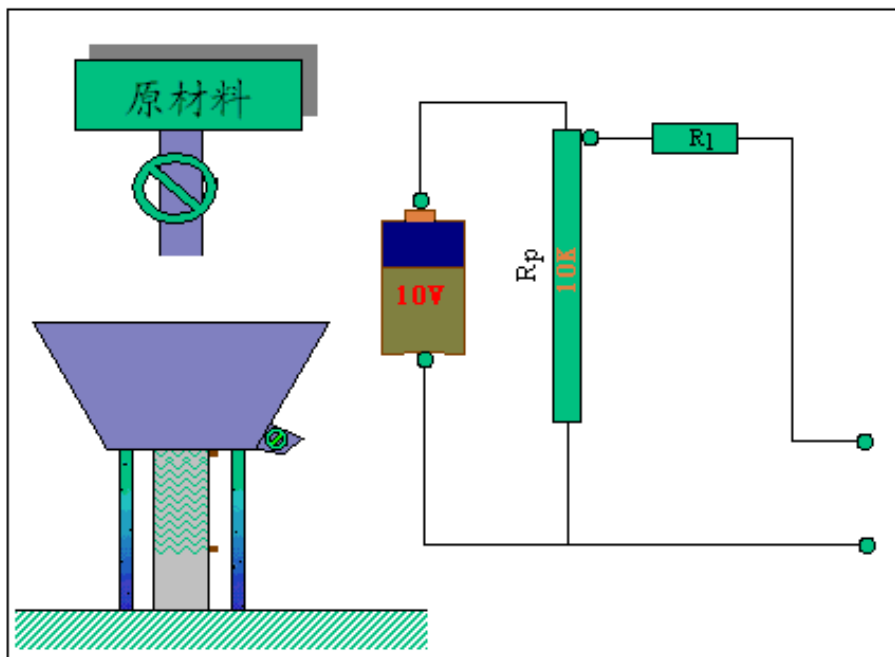




4.2 测试系统静态响应特性

华中科技大学机械学院

案例：物料配重自动测量系统的静态参数测量

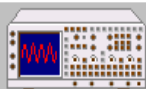


$$\text{灵敏度} = \Delta y / \Delta x$$

$$\text{回程误差} = (h_{\max} / A) \times 100\%$$

$$\text{非线性度} = B / A \times 100\%$$

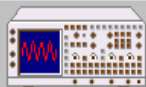
测量范围：



4.3 测试系统的动态响应特性

无论复杂度如何，把测量装置作为一个系统来看待。问题简化为处理输入量 $x(t)$ 、系统传输特性 $h(t)$ 和输出 $y(t)$ 三者之间的关系。





4.3 测试系统的动态响应特性

复习：时域卷积定理

如果
$$h(t) \xrightarrow{FT} H(\omega);$$

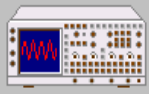
$$x(t) \xrightarrow{FT} X(\omega);$$

则
$$h(t) * x(t) \xrightarrow{FT} H(\omega)X(\omega);$$

卷积的傅立叶变换算法：

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

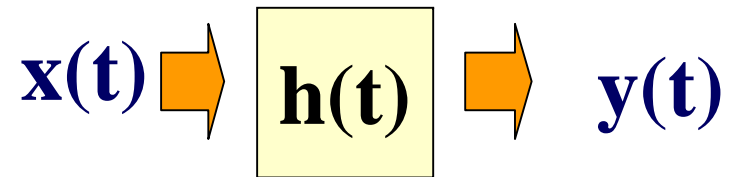
$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad \Rightarrow \quad y(t) = F^{-1}[Y(\omega)]$$



4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

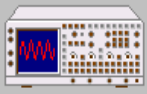
系统分析中的三类问题：



1) 当输入、输出是可测量的(已知), 可以通过它们推断系统的传输特性。(系统辨识)

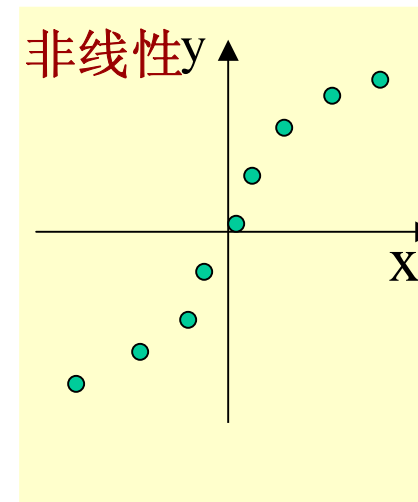
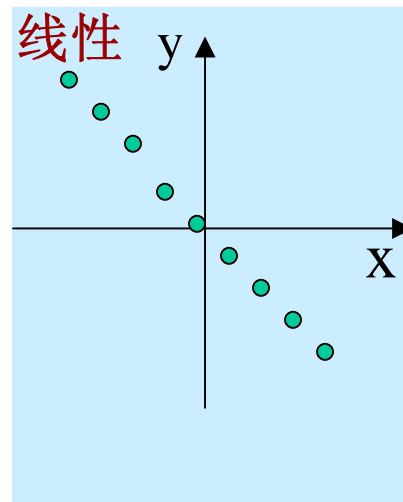
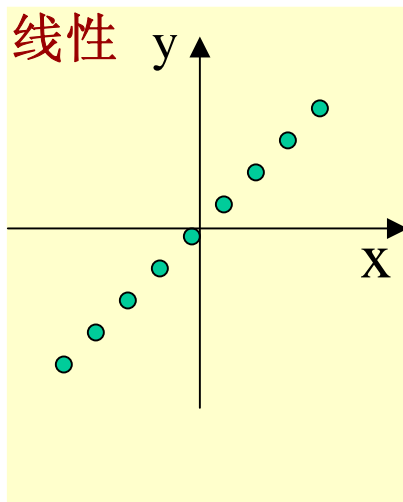
2) 当系统特性已知, 输出可测量, 可以通过它们推断导致该输出的输入量。(反求)

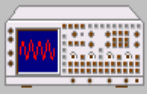
3) 如果输入和系统特性已知, 则可以推断和估计系统的输出量。(预测)



测试系统基本要求

理想的测试系统应该具有单值的、确定的输入—输出关系。对于每一输入量都应该只有唯一的输出量与之对应。知道其中一个量就可以确定另一个量。其中以输出和输入成**线性关系**最佳。



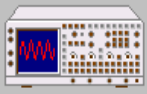


线性系统(时域描述)

系统输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 间的关系可以用常系数线性微分方程来描述:

$$\begin{aligned} & a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + \dots a_1 y(t) + a_0 \\ & = b_m x^m(t) + b_{m-1} x^{m-1}(t) + \dots b_1 x(t) + b_0 \end{aligned}$$

一般在工程中使用的测试装置都是线性系统。



线性系统性质:

a) 叠加性

系统对各输入之和的输出等于各单个输入的输出之和,

即

若 $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$, $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$

则 $x_1(t) \pm x_2(t) \rightarrow y_1(t) \pm y_2(t)$

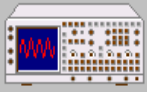
b) 比例性

常数倍输入所得的输出等于原输入所得输出的常数倍,

即:

若 $x(t) \rightarrow y(t)$

则 $kx(t) \rightarrow ky(t)$



c) 微分性

系统对原输入信号的微分等于原输出信号的微分，即

若 $\mathbf{x}(t) \rightarrow \mathbf{y}(t)$

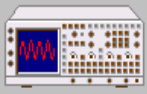
则 $\mathbf{x}'(t) \rightarrow \mathbf{y}'(t)$

d) 积分性

当初始条件为零时，系统对原输入信号的积分等于原输出信号的积分，即

若 $\mathbf{x}(t) \rightarrow \mathbf{y}(t)$

则 $\int \mathbf{x}(t)dt \rightarrow \int \mathbf{y}(t)dt$



4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

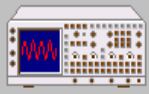
e) 频率保持性

若系统的输入为某一频率的谐波信号，则系统的稳态输出将为同一频率的谐波信号，即

若
$$\mathbf{x}(t) = A \cos(\omega t + \phi_x)$$

则
$$\mathbf{y}(t) = B \cos(\omega t + \phi_y)$$

线性系统的这些主要特性，特别是符合叠加原理和频率保持性，在测量工作中具有重要作用。



4.3 测试系统的动态响应特性

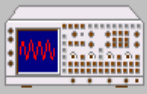
传递函数:

拉氏变换(数学定义): $H(s) = Y(s) / X(s)$

富氏变换(数字计算): $H(j\omega) = Y(j\omega) / X(j\omega)$

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}[H(j\omega)]^2 + \operatorname{Im}[H(j\omega)]^2}$$

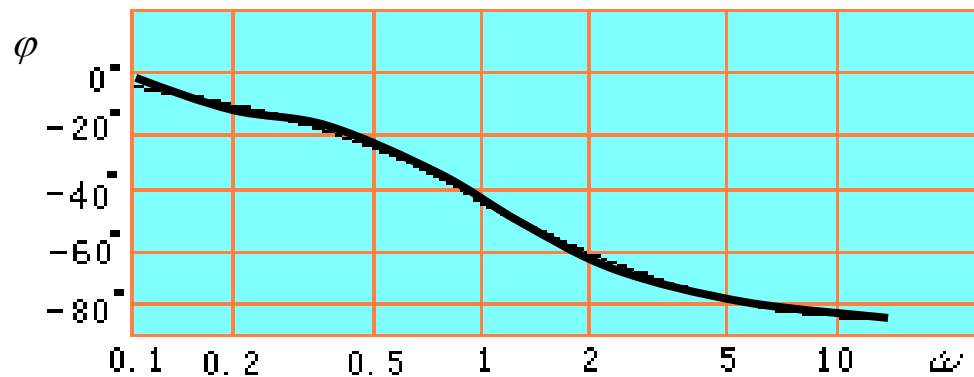
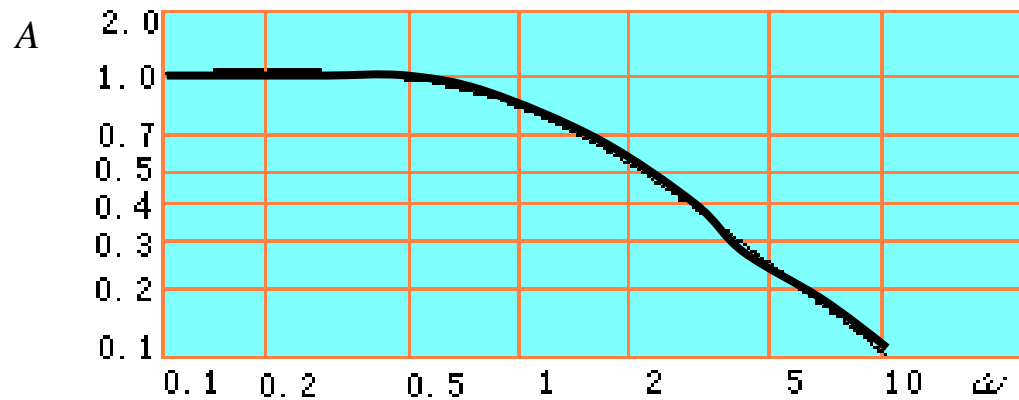
$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}(\operatorname{Re}[H(j\omega)] / \operatorname{Im}[H(j\omega)])$$

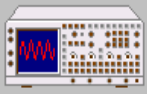


4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

传递函数:直观的反映了测试系统对不同频率成分输入信号的扭曲情况。





4.3 测试系统的动态响应特性

a) 传递函数的测量(正弦波法)

依据：频率保持性

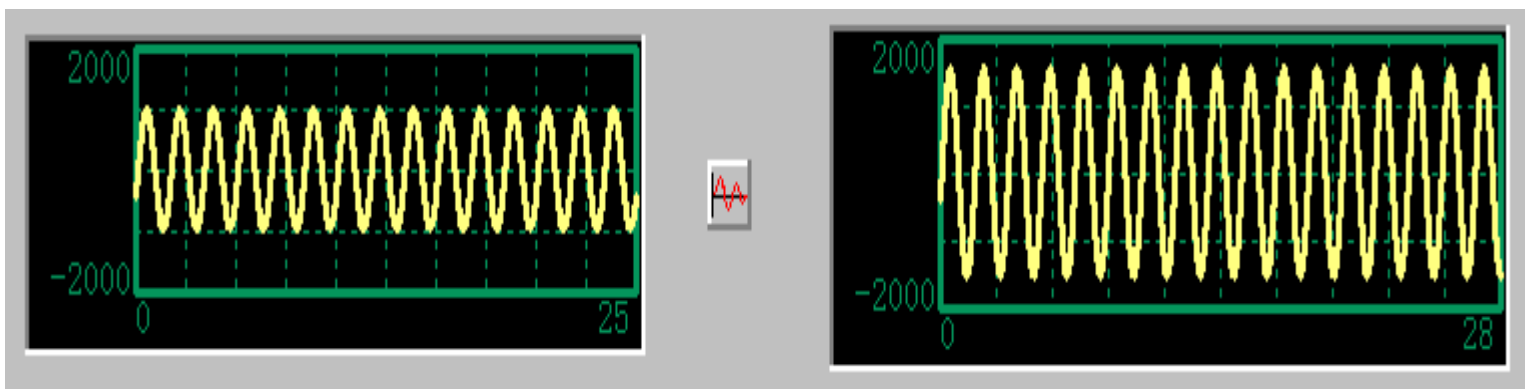
若

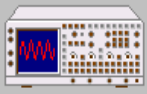
$$\mathbf{x}(t)=A\cos(\omega t+\phi_x)$$

则

$$\mathbf{y}(t)=B\cos(\omega t+\phi_y)$$

依次用不同频率 f_i 的简谐信号去激励被测系统，同时测出激励和系统的稳态输出的幅值、相位，得到幅值比 A_i 、相位差 ϕ_i 。

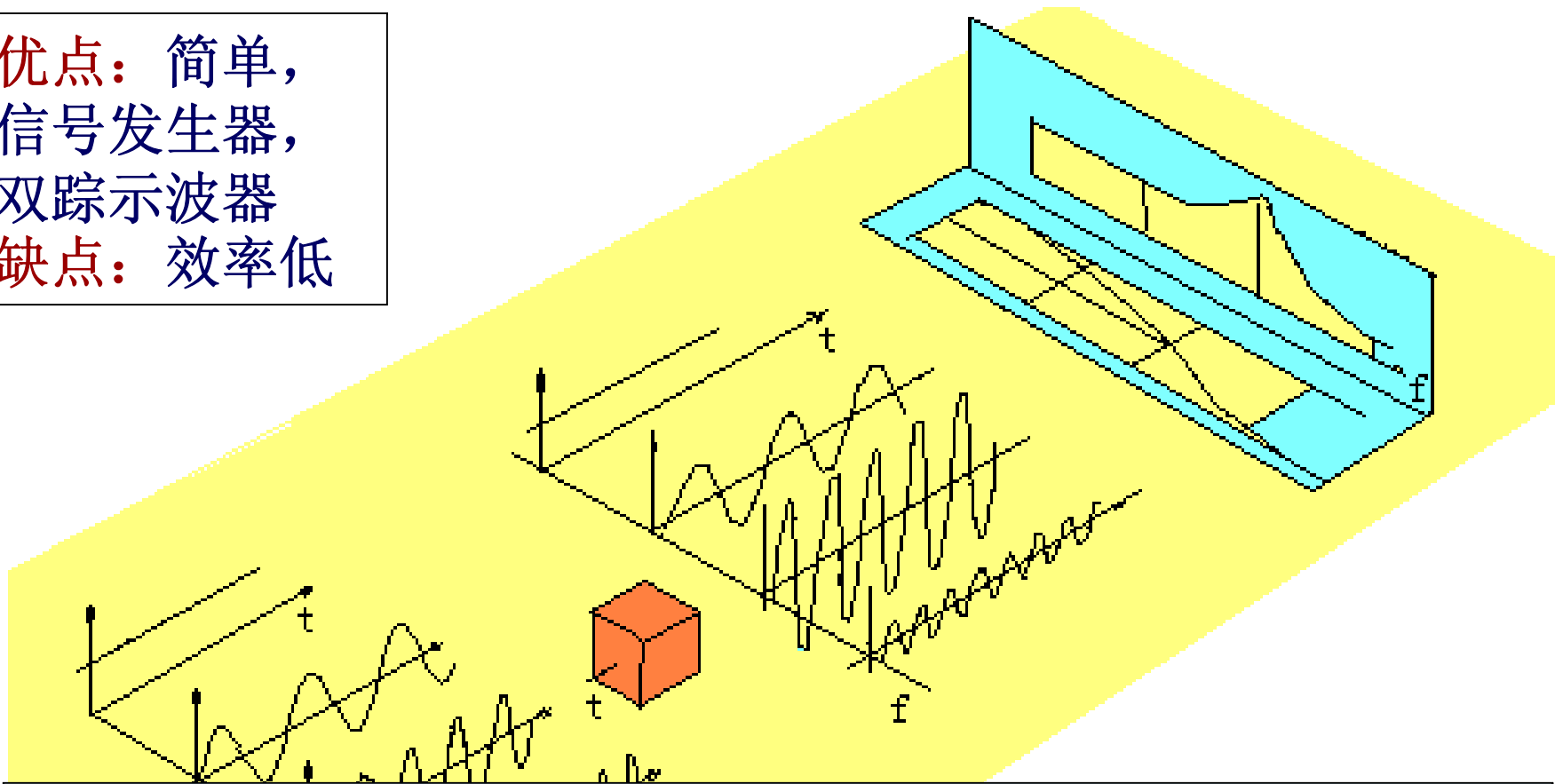




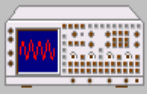
4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

优点：简单，
信号发生器，
双踪示波器
缺点：效率低



从系统最低测量频率 f_{min} 到最高测量频率 f_{max} ，逐步增加正弦激励信号频率 f ，记录下各频率对应的幅值比和相位差，绘制就得到系统幅频和相频特性。



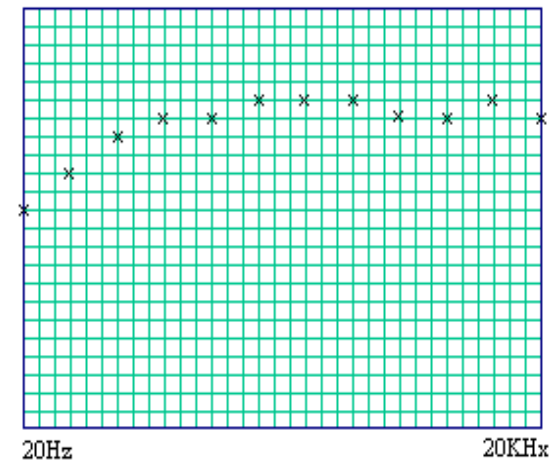
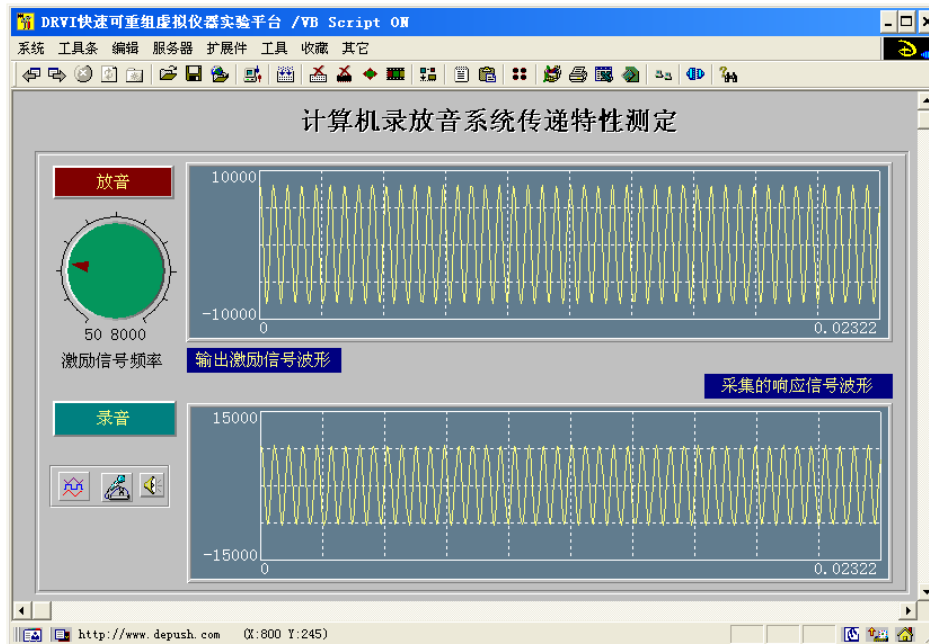
4.3 测试系统的动态响应特性

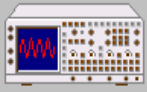
华中科技大学机械学院

实验：计算机录放音系统频率特性测定

激励声音信号==》声卡==》喇叭

麦克风==》声卡==》响应声音信号

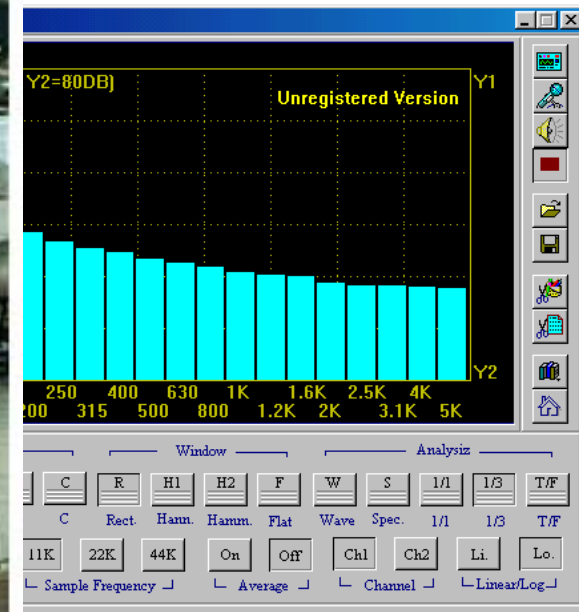
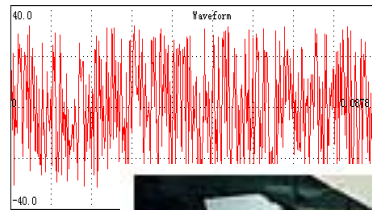


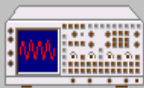


4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

改进：白噪声输入，测量输出，再求输出频谱。





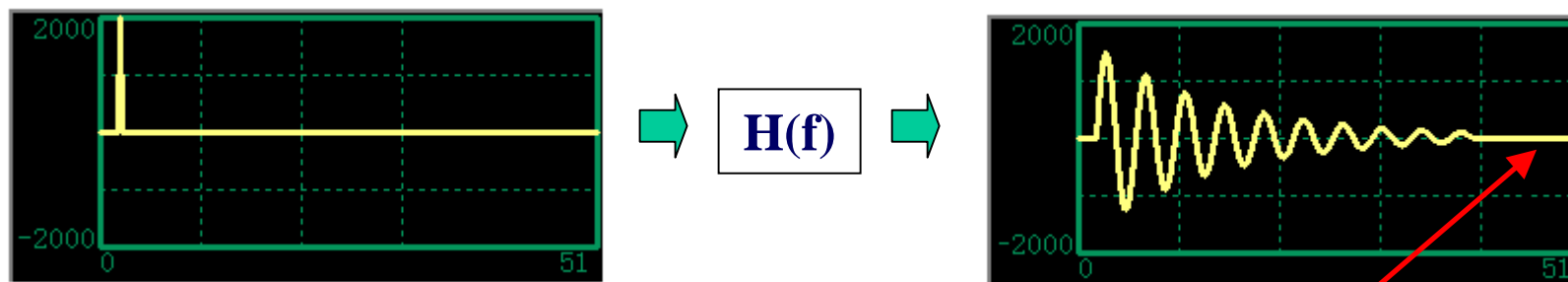
4.3 测试系统的动态响应特性

b) 脉冲响应函数

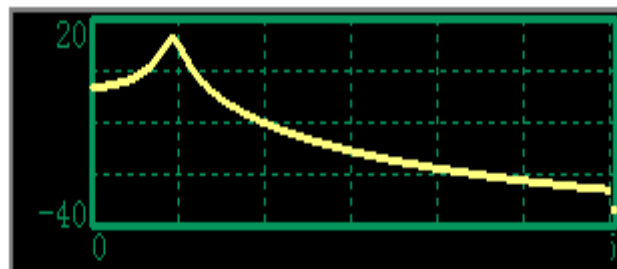
若装置的输入为单位脉冲 $\delta(t)$ ，因 $\delta(t)$ 的傅立叶变换为1，有：

$$Y(f) = H(f), \text{ 或 } y(t) = F^{-1}[H(S)]$$

记为 $h(t)$ ，称它为脉冲响应函数。

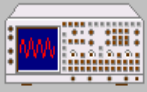


傅立叶
变换



固频、阻尼参数

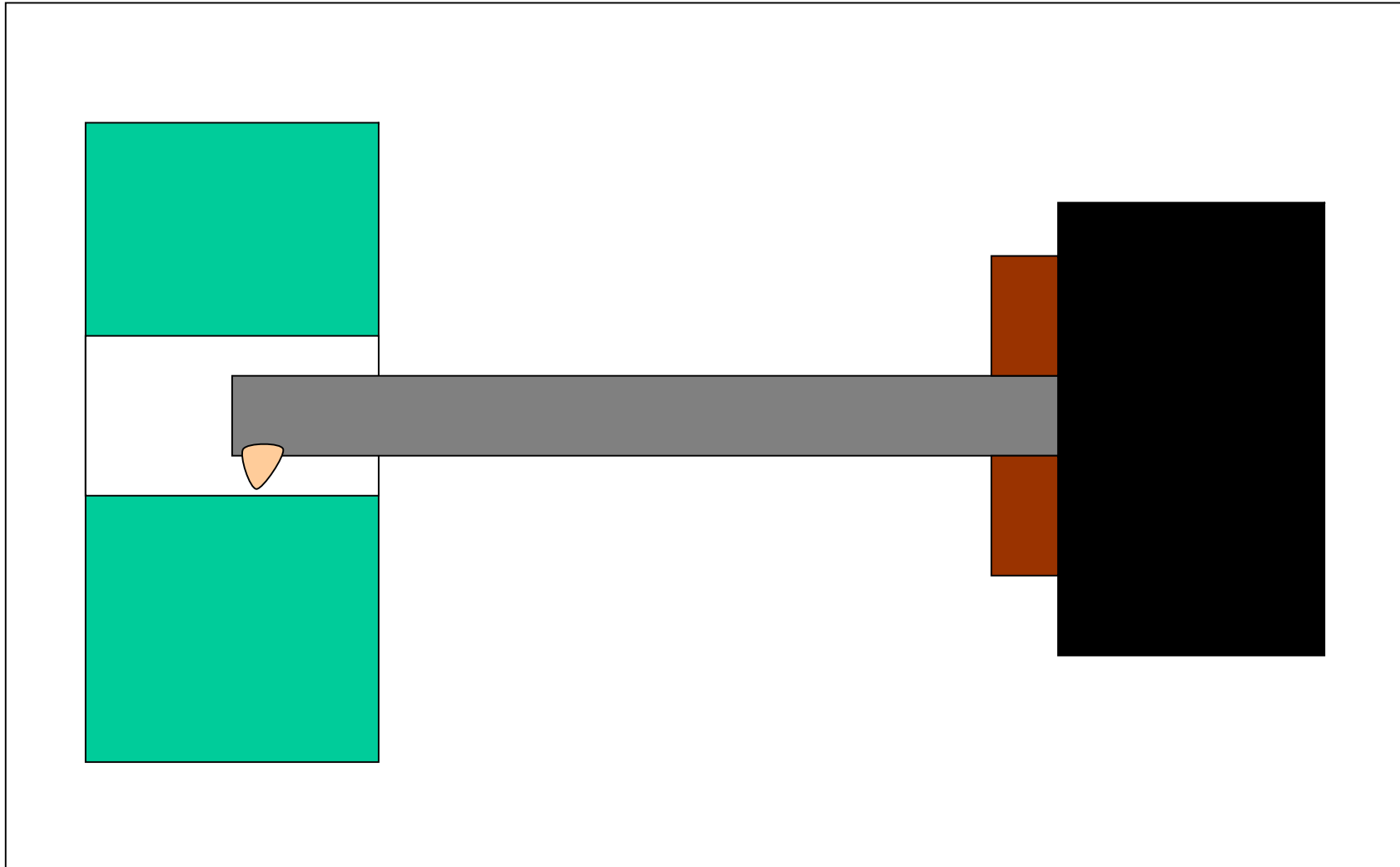
优点：直观
缺点：简单系统识别

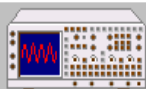


4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

案例: 镗杆固有频率测量

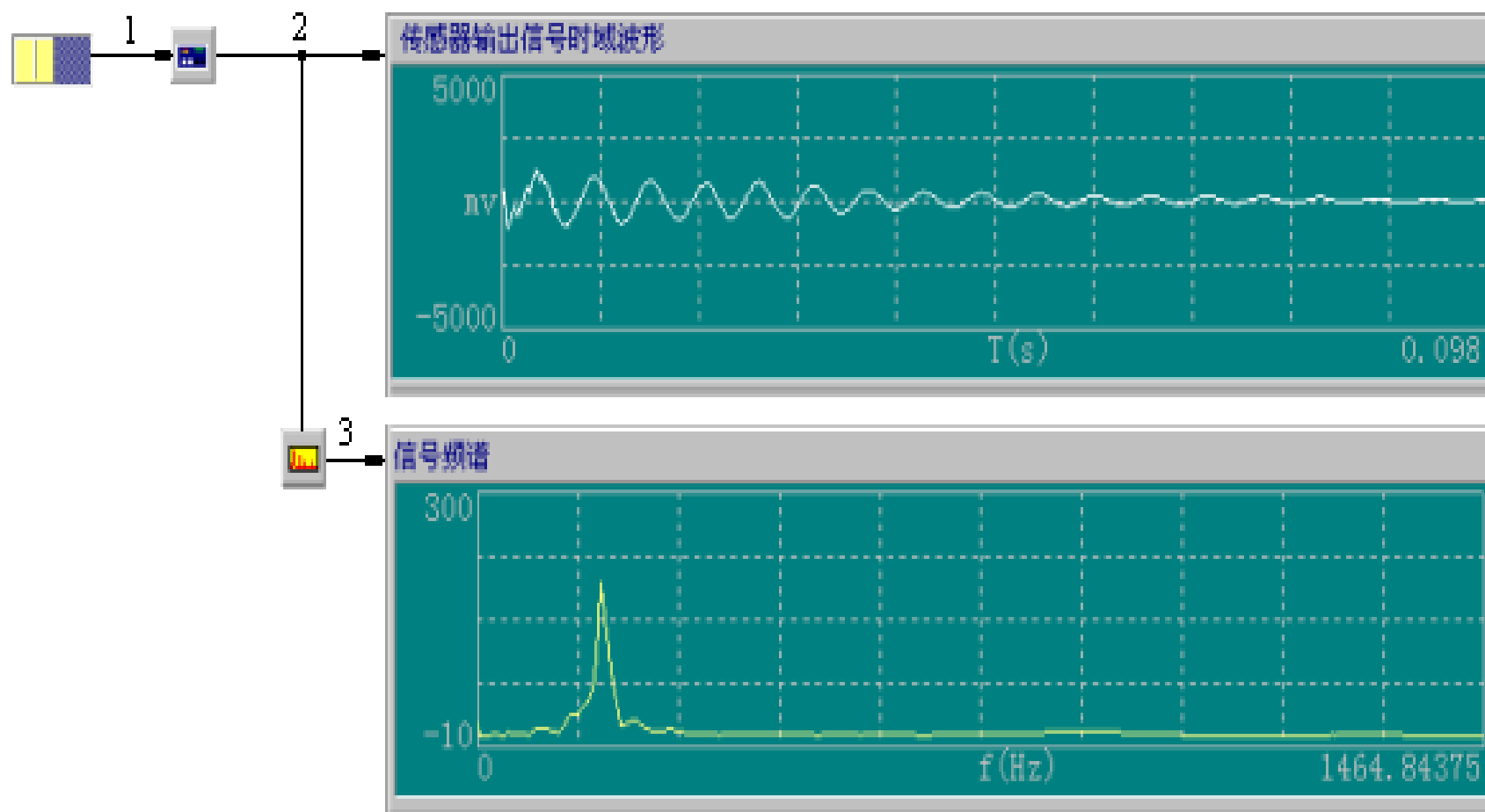


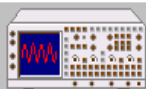


4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

实验：悬臂梁固有频率测量

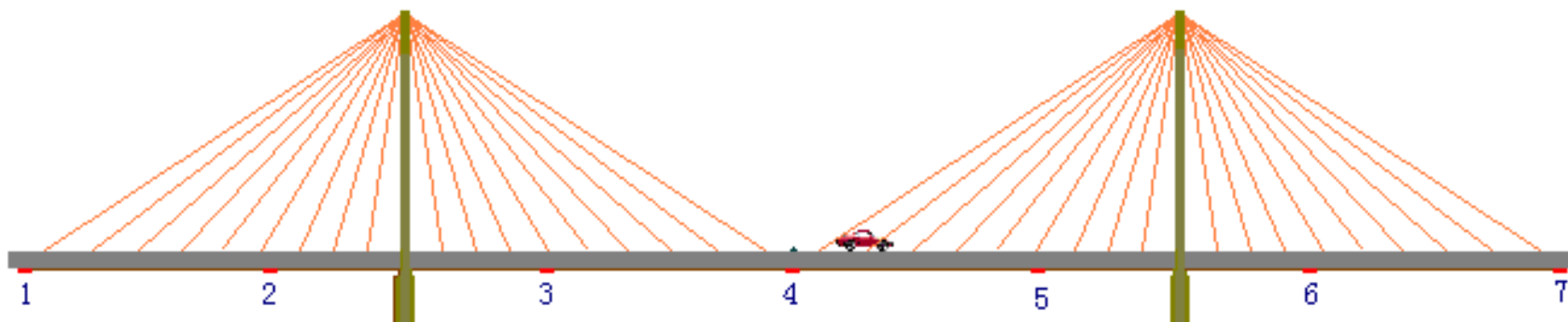
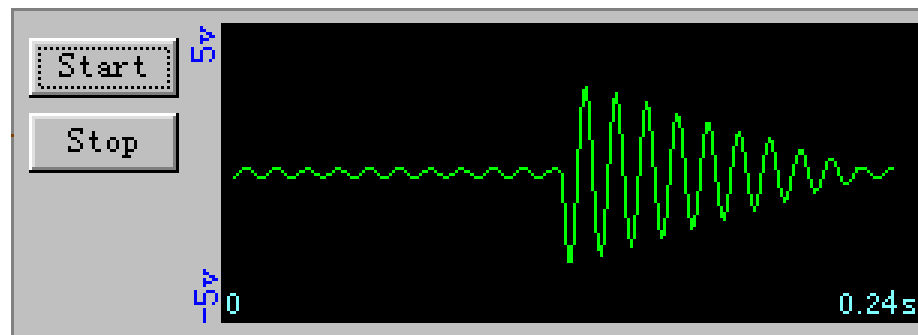




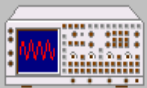
4.3 测试系统的动态响应特性

华中科技大学机械学院

案例：桥梁固频测量

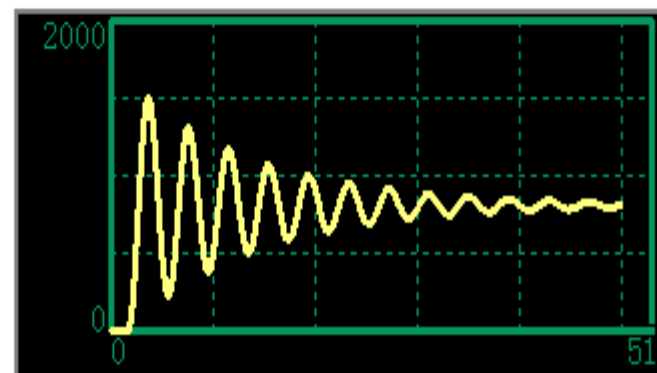
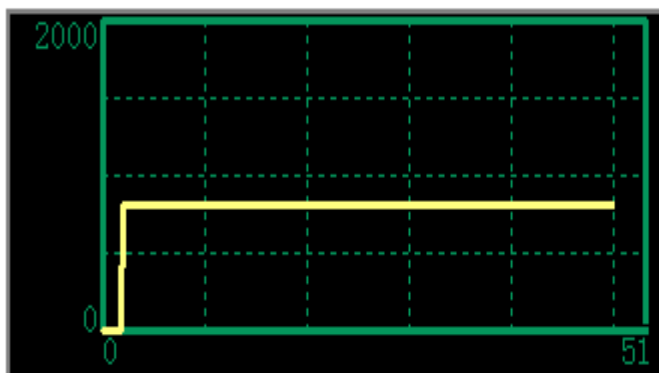


原理：在桥中设置一三角形障碍物，利用汽车碍时的冲击对桥梁进行激励，再通过应变片测量桥梁动态变形，得到桥梁固有频率。

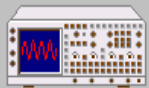


c) 阶跃响应函数

若系统输入信号为单位阶跃信号，即 $x(t)=u(t)$ ，则 $X(s)=1/s$ ，此时 $Y(s)=H(s)/s$



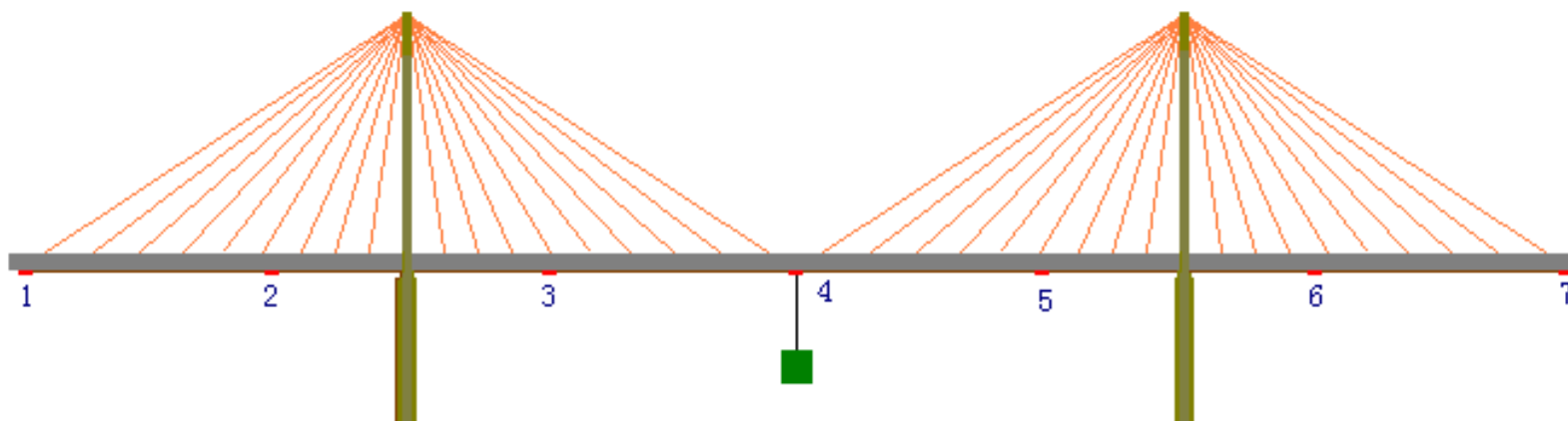
时域波形参数识别



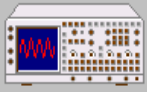
阶跃响应函数测量

实验求阶跃响应函数简单明了，产生一个阶跃信号，再测量系统输出就可以了。

案例：桥梁固有频率测量



原理：在桥中悬挂重物，然后突然剪断绳索，产生阶跃激励，再通过应变片测量桥梁动态变形，得到桥梁固有频率。



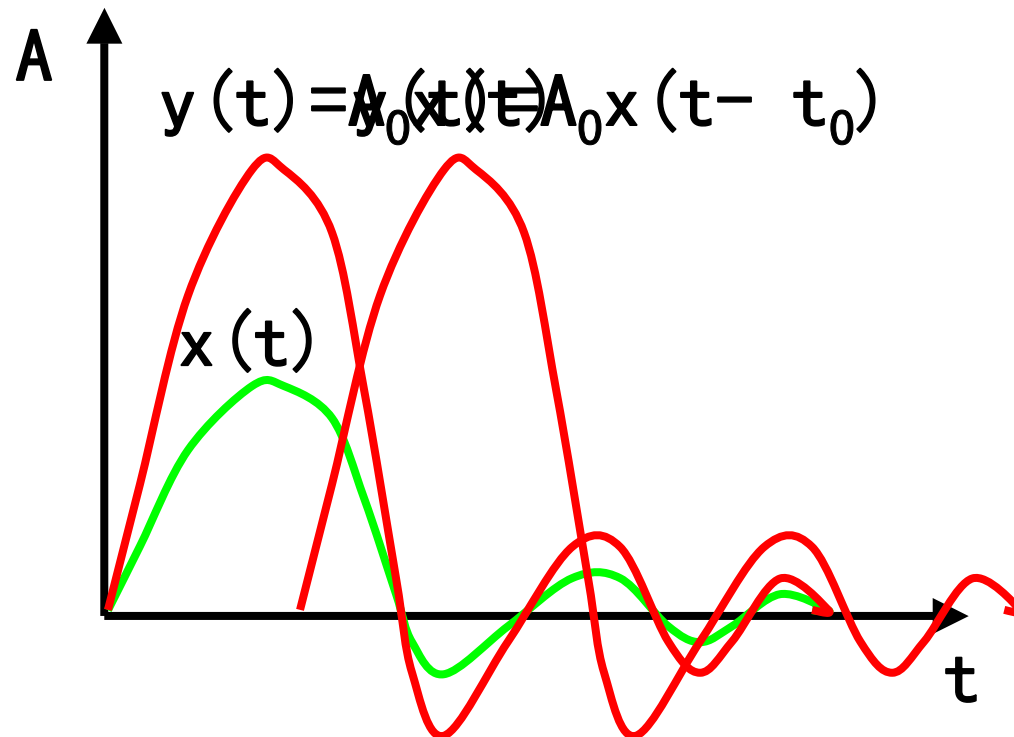
4.4 系统不失真测量条件

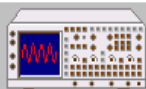
设测试系统的输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 满足关系

$$y(t) = A_0 x(t - t_0)$$

时域条件

该系统的输出波形与输入信号的波形精确地一致，只是幅值放大了 A_0 倍，在时间上延迟了 t_0 而已。这种情况下，认为测试系统具有不失真的特性。





4.4 系统不失真测量条件

做傅立叶变换

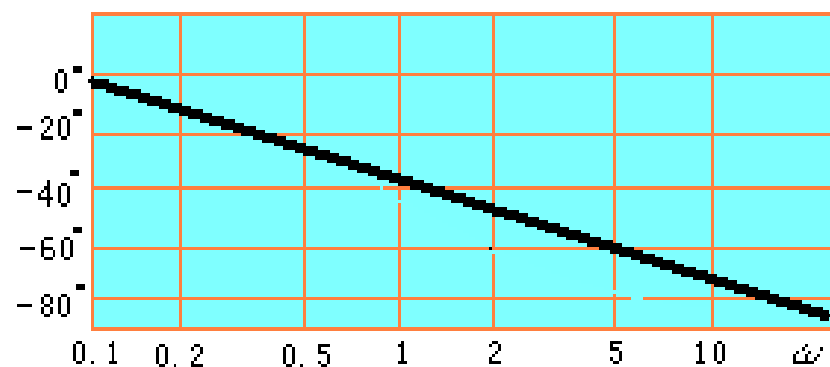
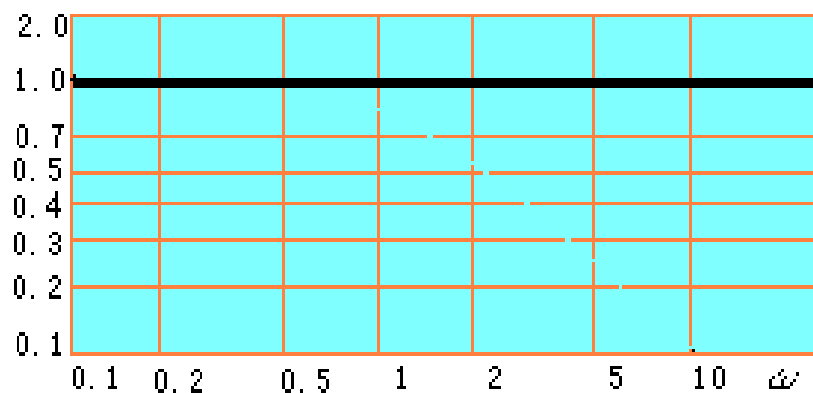
$$y(t)=A_0x(t-t_0) \rightarrow Y(\omega)=A_0e^{-j\omega t_0}X(\omega)$$

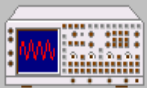
不失真测试系统条件的幅频特性和相频特性应分别满足

$$A(\omega)=A_0=\text{常数}$$

$$\phi(\omega)=-t_0\omega$$

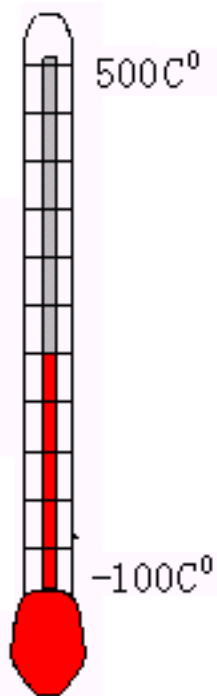
频域定义





4.5 典型系统的动态响应

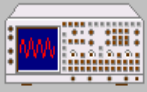
4.5.1 一阶系统 $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$



温度



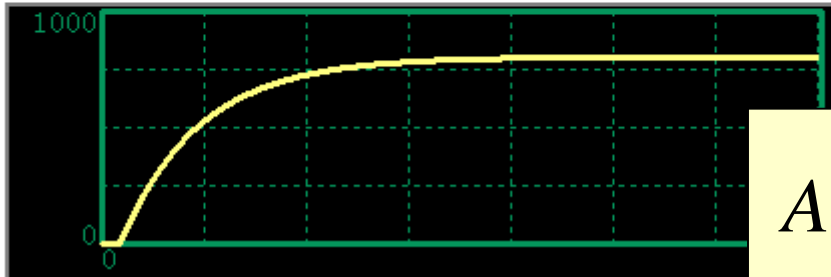
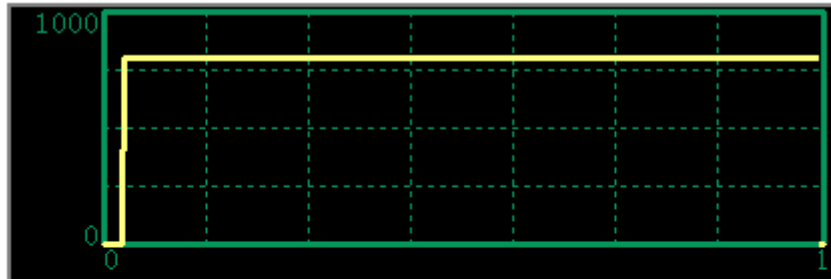
湿度



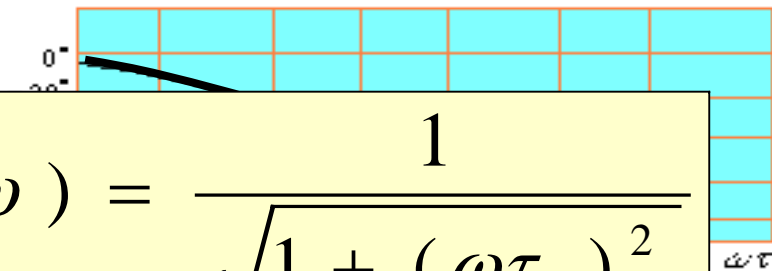
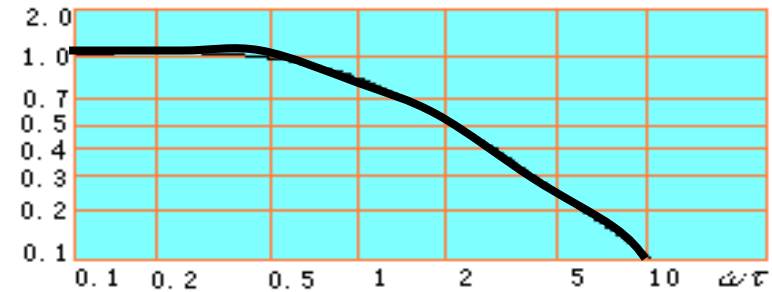
4.5 典型系统的动态响应

特征：测量滞后

阶跃响应



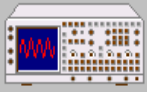
传递函数



$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

$$\Rightarrow H(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1}$$



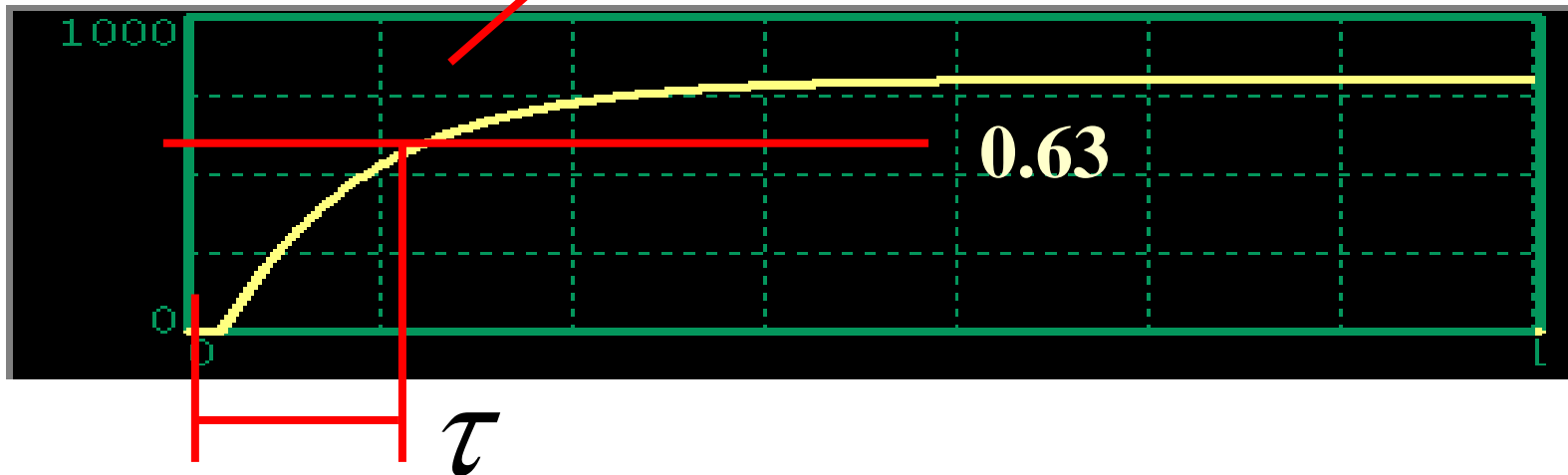
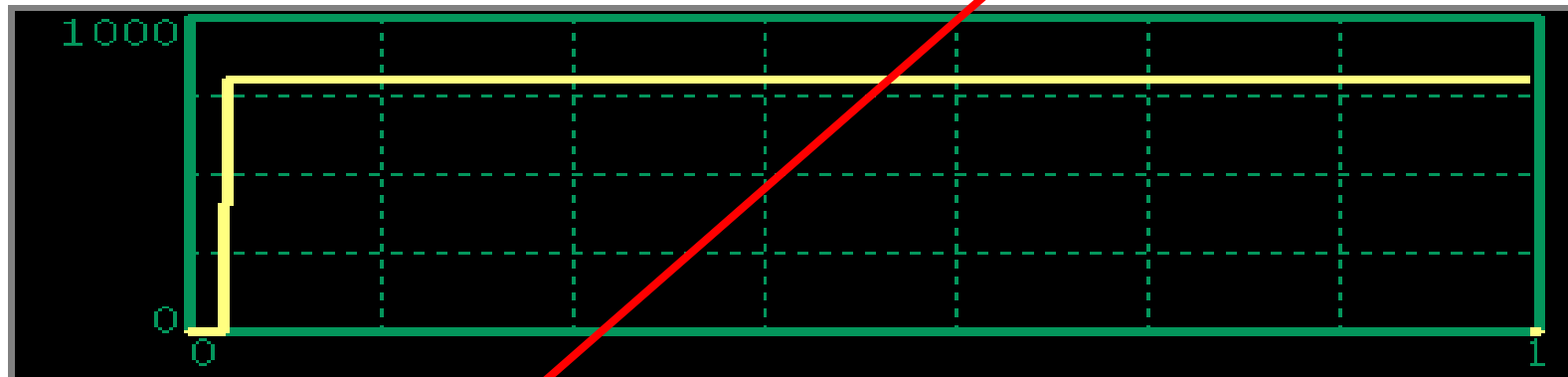
4.5 典型系统的动态响应

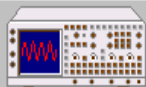
华中科技大学机械学院

一阶系统时间常数测量:

阶跃响应

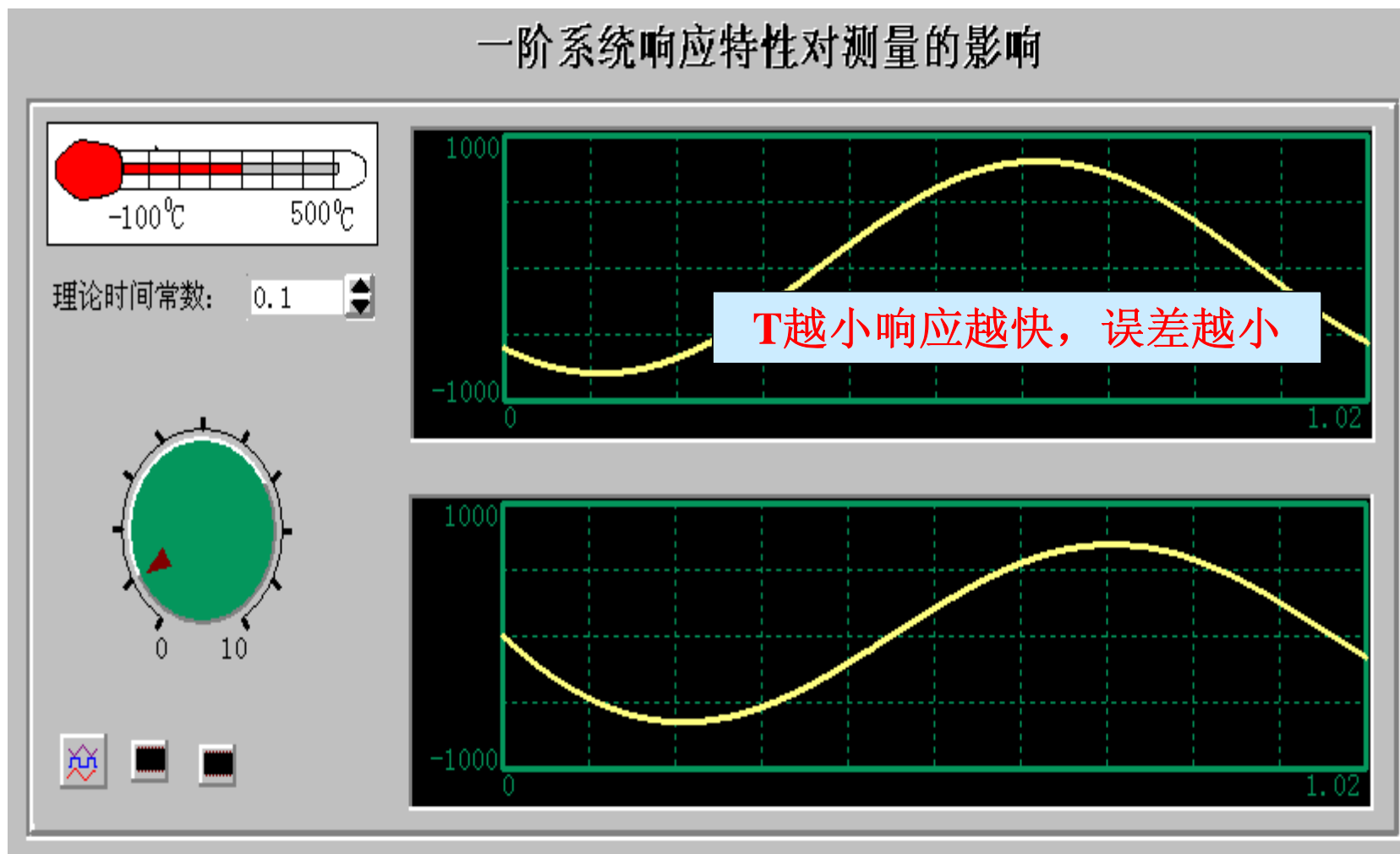
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

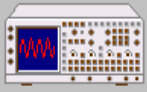




4.5 典型系统的动态响应

实验：一阶系统时间常数对测量的影响





4.5 典型系统的动态响应

华中科技大学机械学院

4.5.2 二阶系统

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

加速度

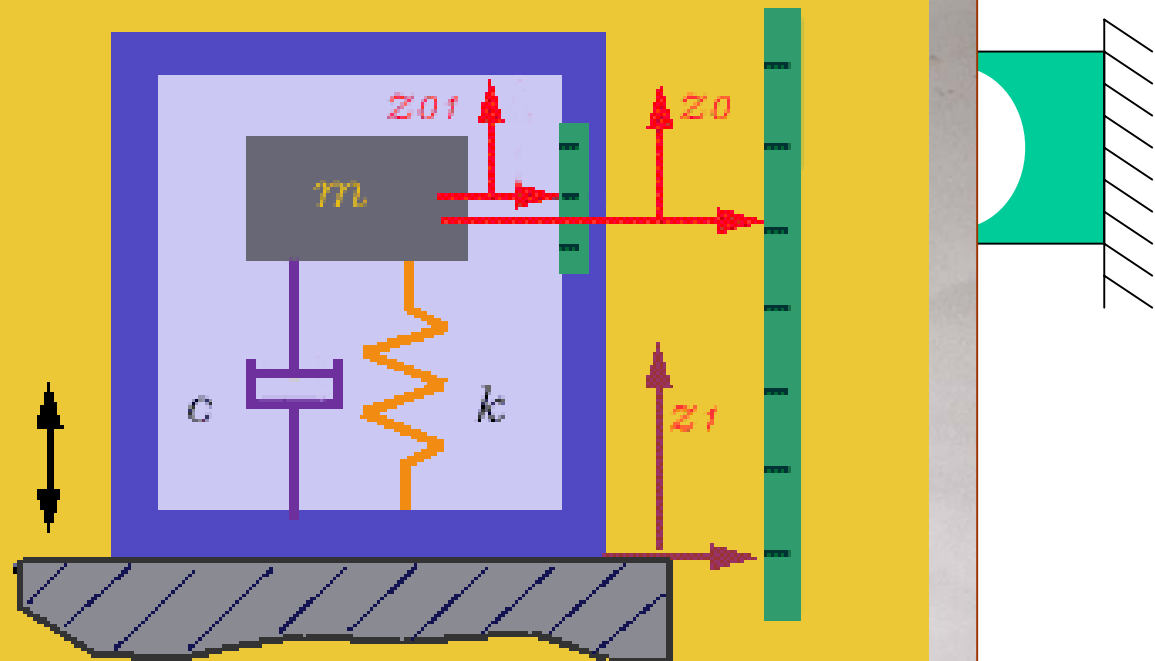
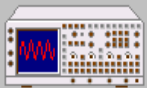


图8.4-2 惯性式拾振器的力学模型

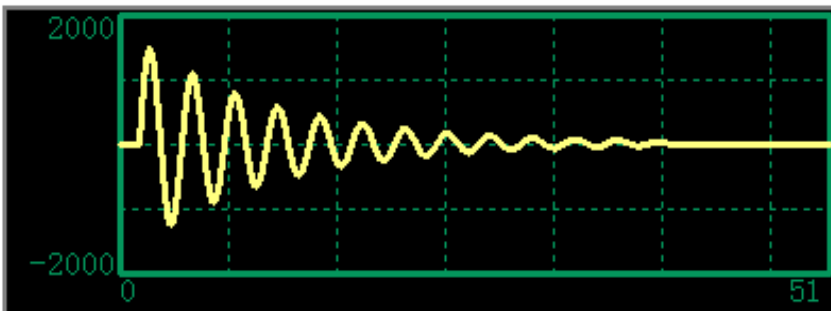
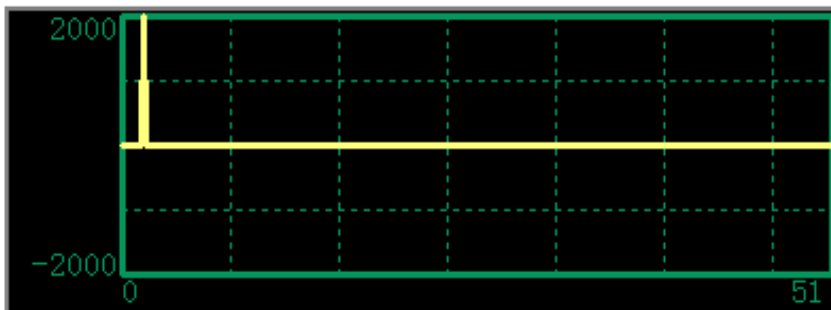


4.5 典型系统的动态响应

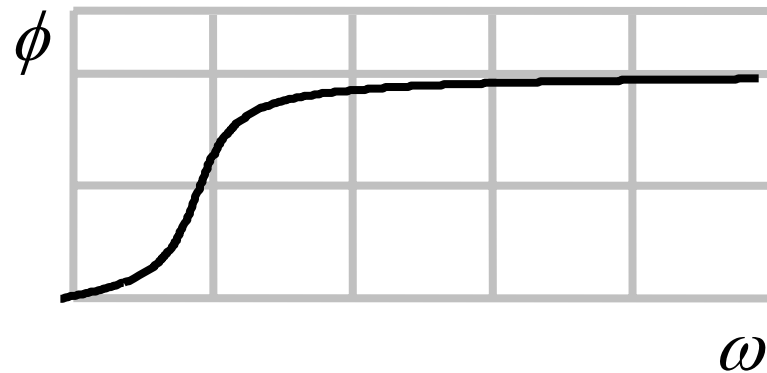
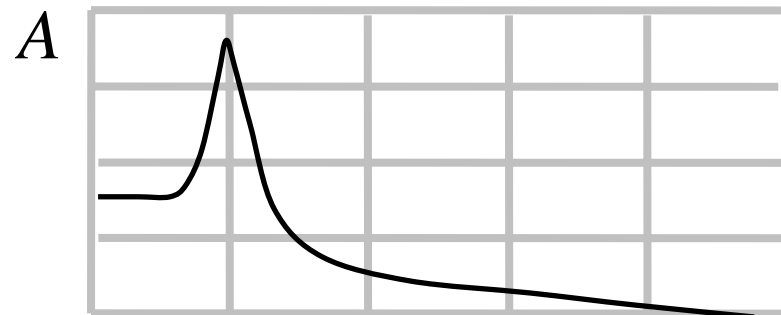
华中科技大学机械学院

特征：震荡

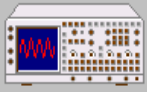
脉冲响应



传递函数



$$H(\omega) = \frac{b_0}{a_0} \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + 2j\omega\xi\omega_n + \omega_n^2} (t)$$



4.5 典型系统的动态响应

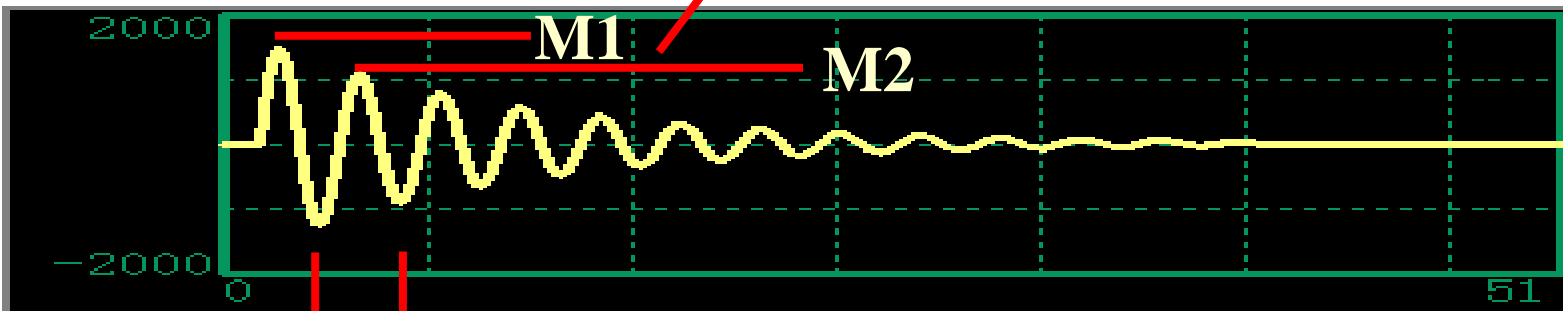
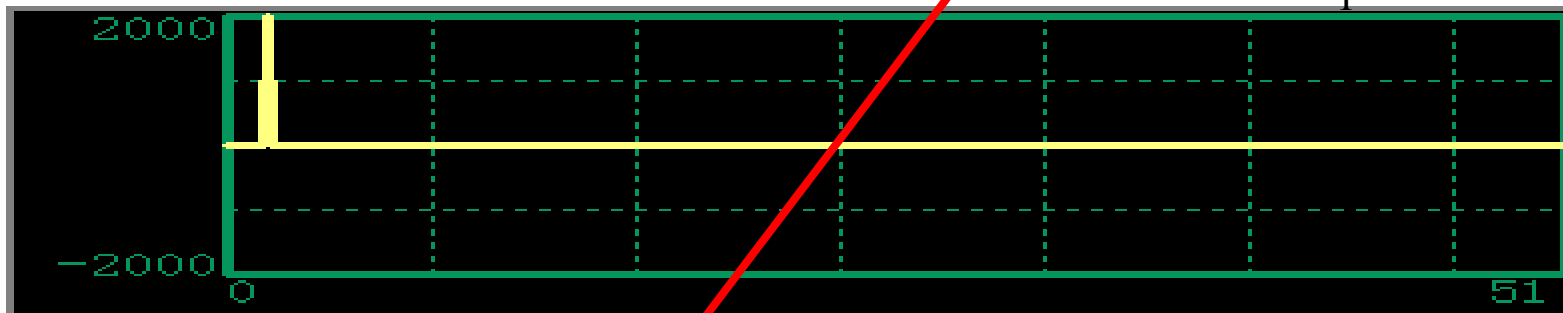
华中科技大学机械学院

二阶系统参数测量

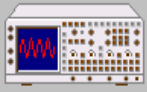
$$H(\omega) = \frac{b_0 \omega_n^2}{a_0 - \omega^2 + 2j\omega\xi\omega_n + \omega_n^2}$$

脉冲响应/阶跃响应函数法:

$$\xi = \ln \frac{M}{M_1} / 2\pi$$

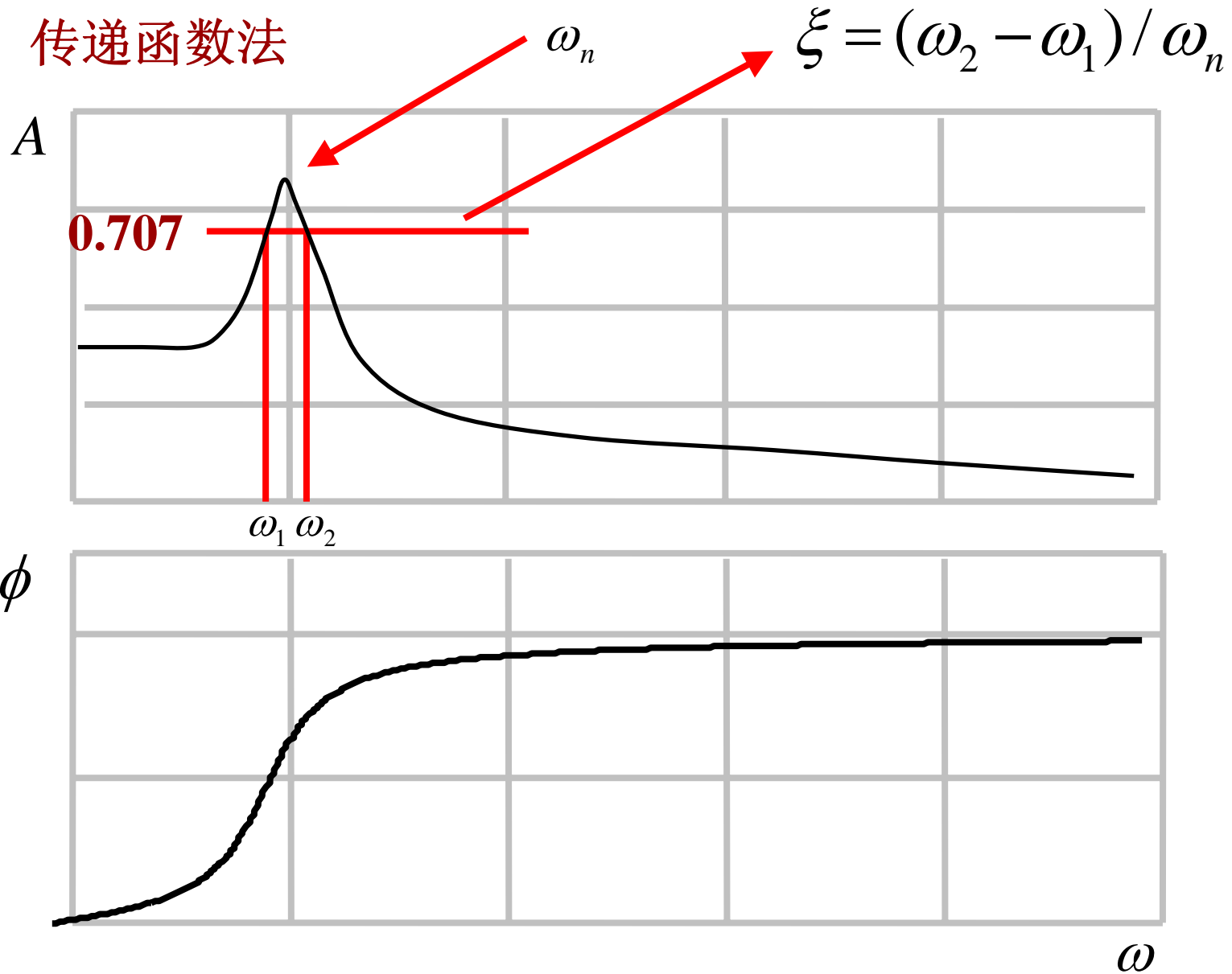


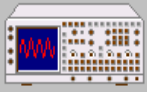
$t_b \Rightarrow f_n = 1/t_b$



4.5 典型系统的动态响应

传递函数法

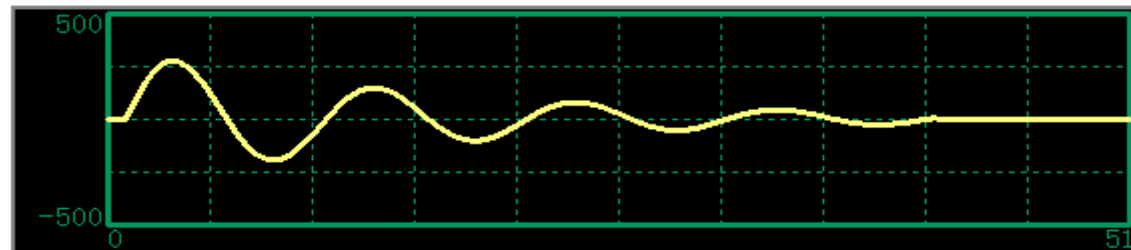
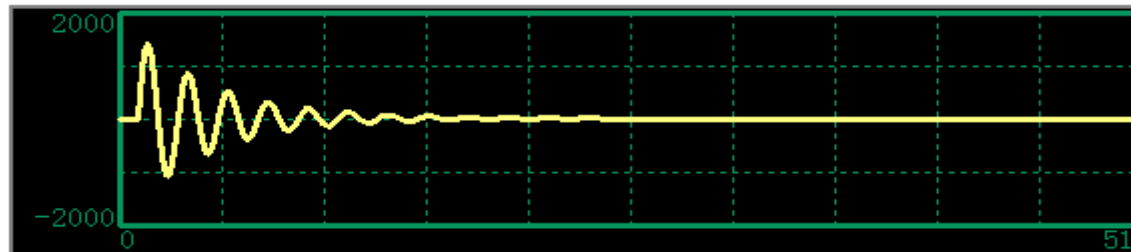
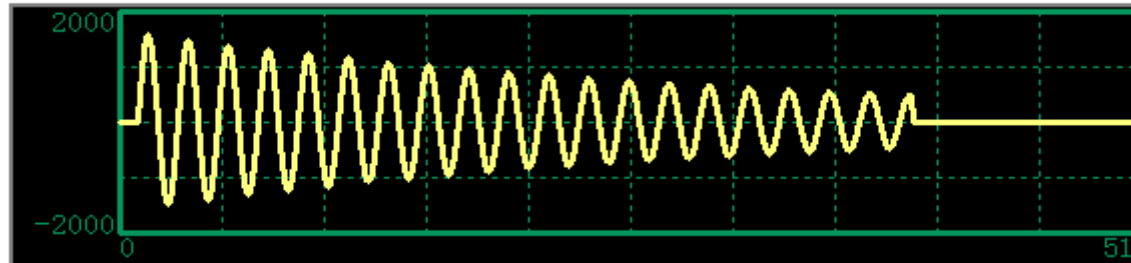
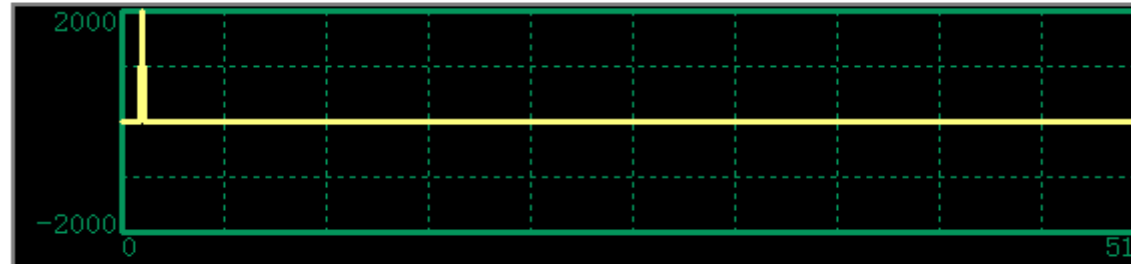


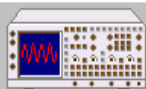


4.5 典型系统的动态响应

华中科技大学机械学院

阻尼系数和固频的作用





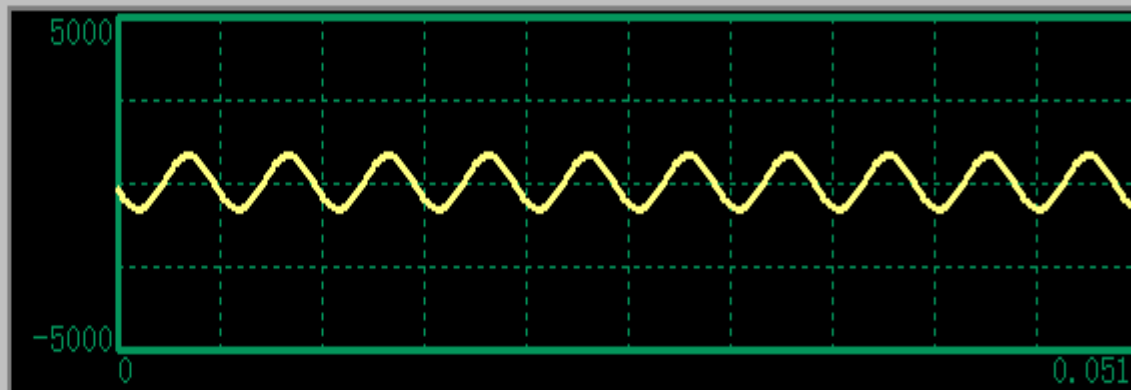
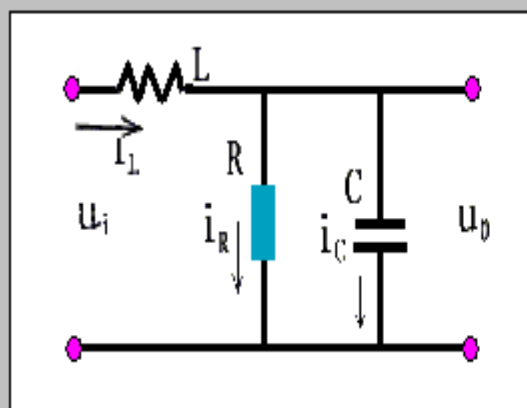
4.5 典型系统的动态响应

华中科技大学机械学院

实验：二阶系统参数对测量的影响

$$\omega_n \gg \omega_{\max} \text{信号}$$

二阶系统特性对测量的影响

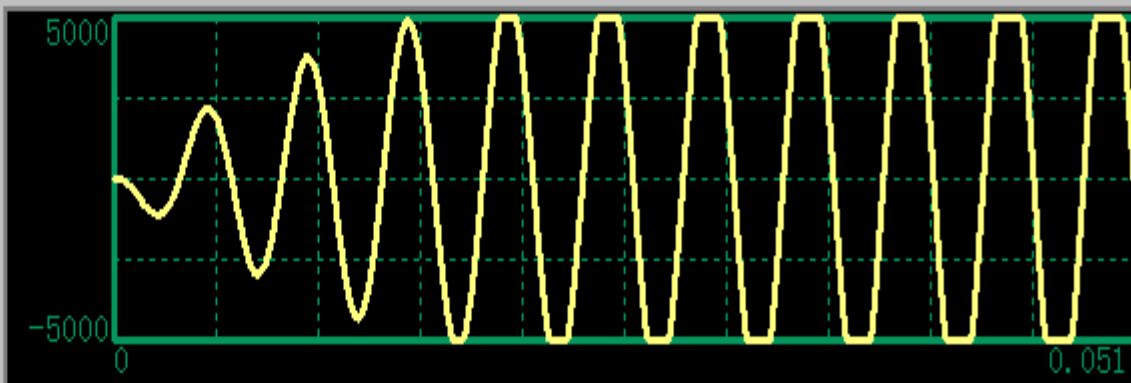
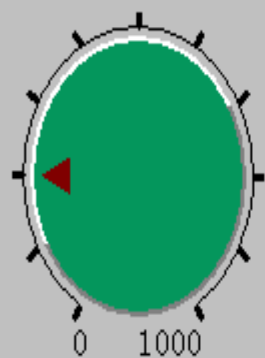


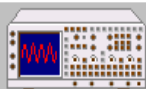
理论阻尼系数:

0.05

理论固有频率:

200

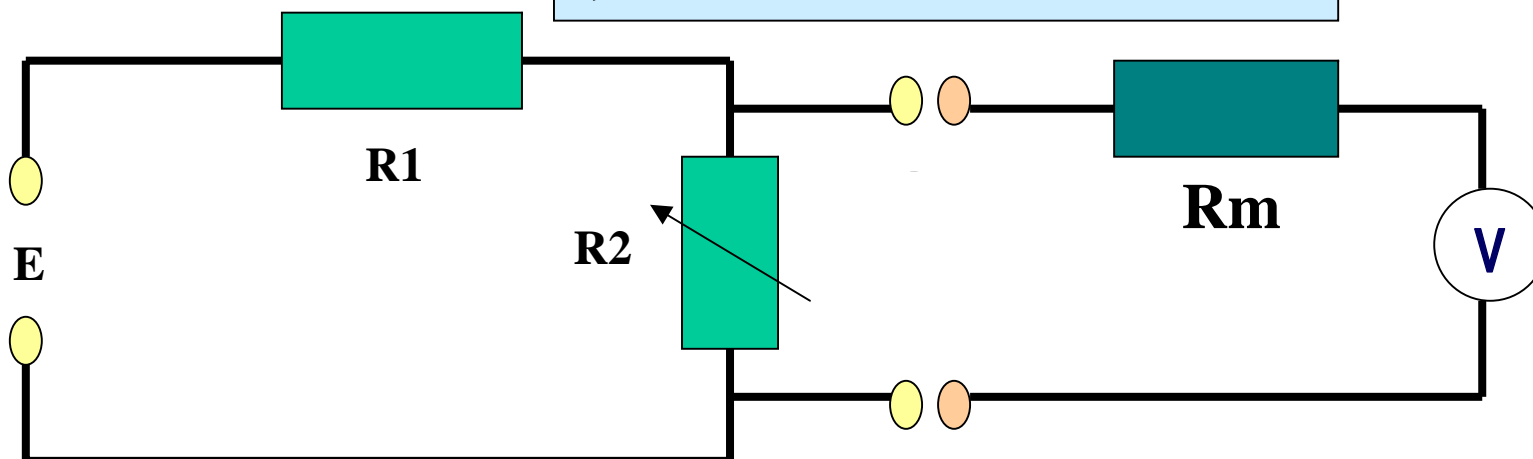




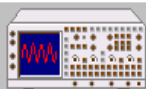
4.6 负载效应

实际测量工作中，测量系统和被测对象会产生相互作用。测量装置构成被测对象的一部分，引起能量交换和相互影响，以致系统总传递函数的叠加或连乘。

令 $R_1=100\text{K}$, $R_2=150\text{K}$, $R_m=150\text{K}$, $E=150\text{V}$,
得: $U_0=90\text{V}$, $U_1=64.3\text{V}$,
误差达28.6%。

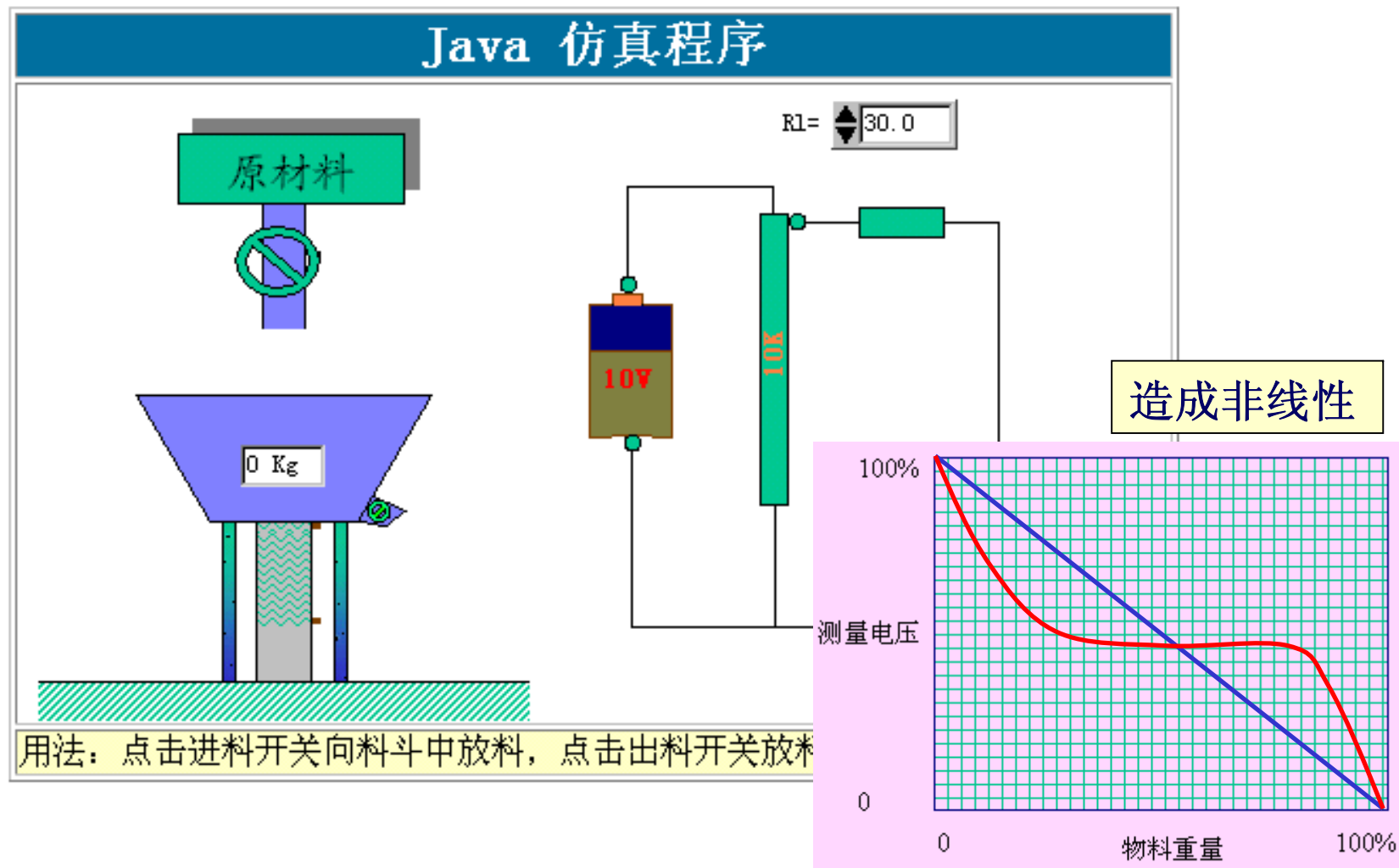


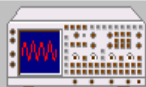
$$V = ER_2 R_m / [R_1(R_m + R_2) + R_m R_2]$$



4.6 负载效应

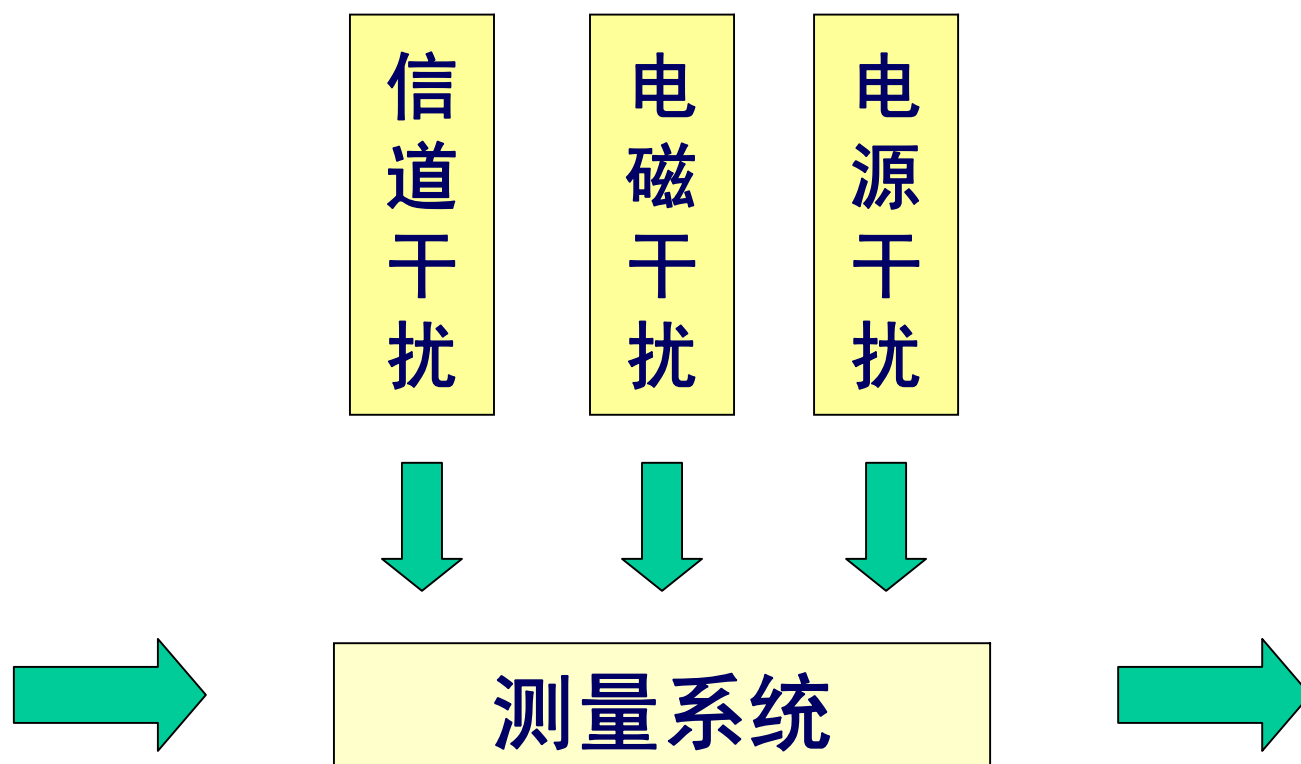
案例：电阻传感器重量测量

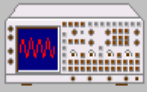




4.7 测量系统的抗干扰

测量过程中，除待测量信号外，各种不可见的、随机的信号可能出现在测量系统中。这些信号与有用信号叠加在一起，严重扭曲测量结果。

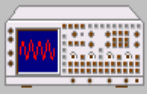




4.7 测量系统的抗干扰

- 1)电磁干扰:干扰以电磁波辐射方式经空间串入测量系统。
- 2)信道干扰: 信号在传输过程中, 通道中各元件产生的噪声或非线性畸变所造成的干扰。
- 3)电源干扰: 这是由于供电电源波动对测量电路引起的干扰。

一般说来, 良好的屏蔽及正确的接地可去除大部分的电磁波干扰。使用交流稳压器、隔离稳压器可减小供电电源波动的影响。信道干扰是测量装置内部的干扰, 可以在设计时选用低噪声的元器件, 印刷电路板设计时元件合理排放等方式来增强信道的抗干扰性。

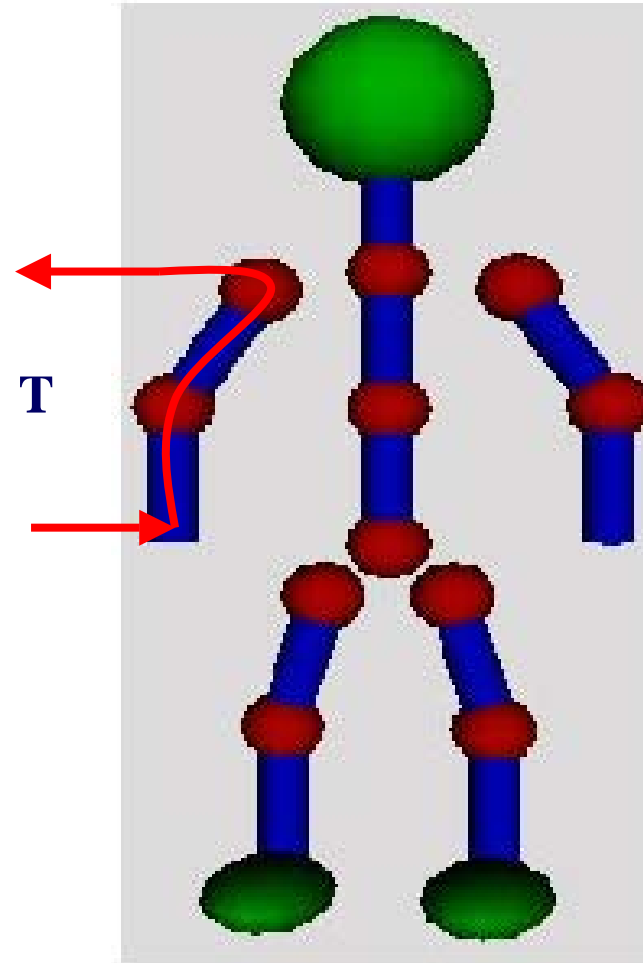


4.7 测量系统的抗干扰

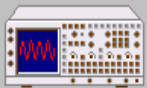
华中科技大学机械学院

其它应用:

肌电诱发电位仪

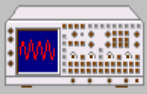


生理信号传导速度60m/s-70m/s



习题：

- 1 测量系统不失真测量的条件 ？
- 2 用一个时间常数为0.35S的一阶装置去测量周期为1S，2S和5S的信号，问幅度减小量是多少？
- 3 一温度计，时间常数 $\tau = 7$ 秒，若将其从20C的空气中突然插入到80C的热水中，问达到15秒后该温度计指示的温度值？



3已知一二阶系统测力传感器阻尼系数为0.707，固有频率为 $\omega_n = 2\pi \cdot 1200$ 。当测量信号：

$$x_1(t) = \sin(2\pi \cdot 600t)$$

$$x_2(t) = \sin(2\pi \cdot 1800t)$$

请分别写出传感器输出信号的幅值和相位变化。