ELSEVIER

Sensors and Actuators A 46–47 (1995) 509–515

SENSORS AND ACTUATORS A PHYSICAL

Design of smart sensors: towards an integration of design tools

Jean-Michel Rivière, Damien Luttenbacher, Michel Robert, Jean-Pierre Jouannet

Centre de Recherche en Automatique de Nancy, CNRS URA D821, Université Henri Poincaré-Nancy I, CRAN-ESSTIN, 2 rue Jean Lamour, 54500 Vandoeuvre, France

Abstract

In a previous article the authors detailed the concept of smart sensors through an examination of its functionalities: the measurement functionality, the validation functionality, the configuration functionality and the communication functionality. An outline of a methodology for the design of a reference model for smart sensors was also presented. This paper presents further information on the methodology, as well as putting it into practice for the modelling of a smart temperature sensor. The use of different design tools is also envisaged to build up a computer based environment for the design of smart sensors.

Keywords: Smart sensors; Modelling methodology; Design tools

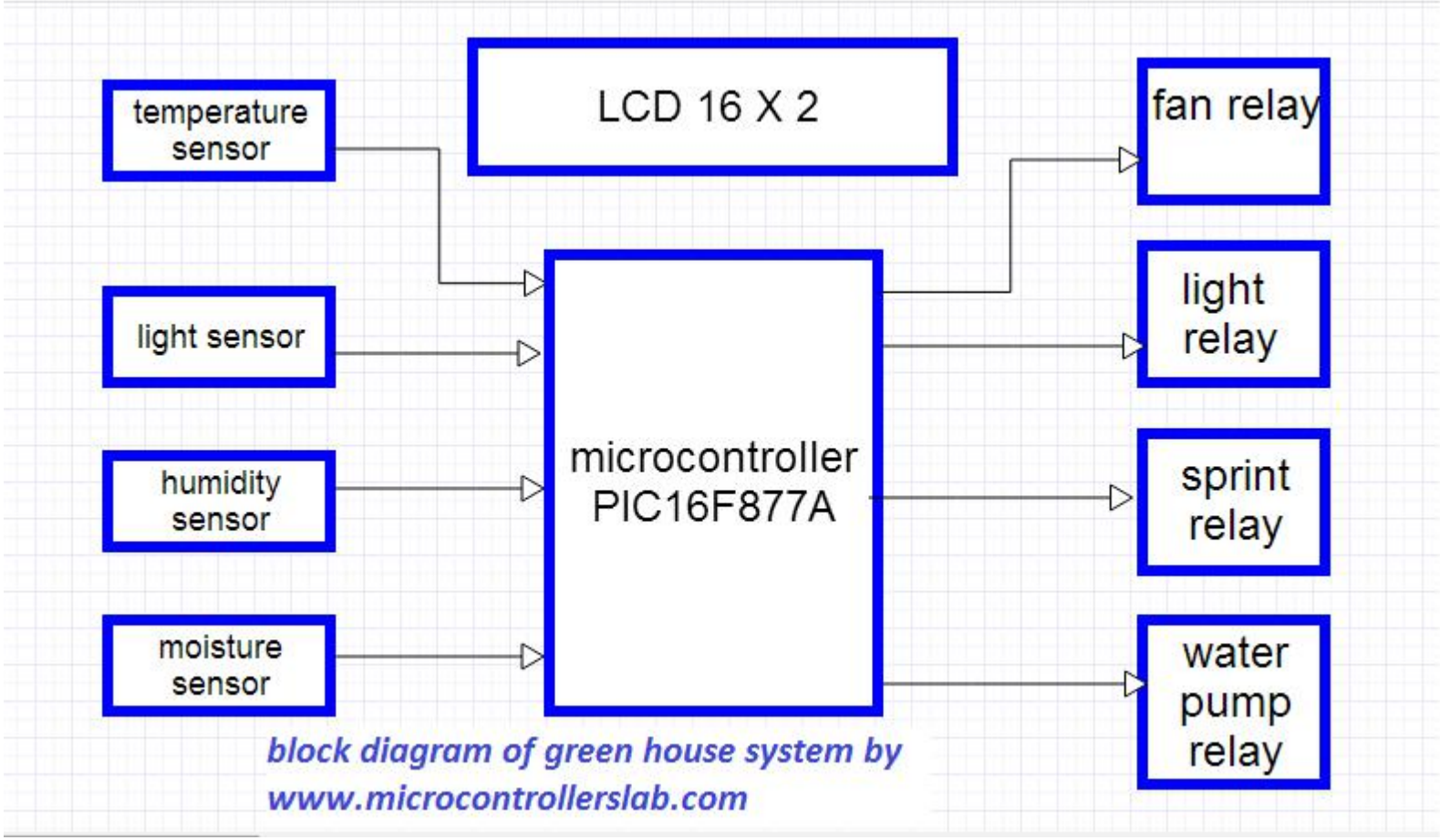
智能仪器仪表设计

Intelligent Instrument: Principle, design and Applications

传感器的基本特性

静态特性和动态特性

- ***Transducers, sensors and measurements***
- ***Calibration, interfering and modifying inputs***
- ***Static sensor characteristics***
- ***Dynamic sensor characteristics***


temperature sensor
LCD 16 X 2
fan relay
light sensor
light relay
humidity sensor
microcontroller PIC16F877A
sprint relay
moisture sensor
water pump relay
block diagram of green house system by
www.microcontrollerslab.com

- 传感器一般变换各种信息量为电量，对不同的输入信号，输出特性是不同的，由于受传感器内部储能元件（电感、电容、质量块、弹簧等）的影响，对快变信号与慢变信号，反应大不相同。

➢快变信号—— 输入量X随时间 t 较快变化时考虑输出的动态特性即随时间变化的特性；

➢慢变信号—— 输入X为静态或变化极缓慢的信号时研究静态特性，即不随时间变化的特性。

2.1 传感器静态特性

- 当输入量（X）为静态（常量）或变化缓慢的信号时（如环境温度、压力），讨论传感器的静态特性，输入输出关系称静态特性。
- 静态特性包括：

  线性度、迟滞、重复性、灵敏度、稳定性…
- 静态特性可以用函数式表示为：

$$Y = f(X)$$

关系式中不含有时间变量！

（1）线性度

- 传感器的输入输出关系可以用多项式表示：

$$Y = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \ldots\ldots a_n x^n$$

其中：　X — 输入量，
Y — 输出量；
a_0 — x = 0 时的输出值
a_1 — 理想灵敏度
a_2, a_3…. a_n —— 非线性项系数

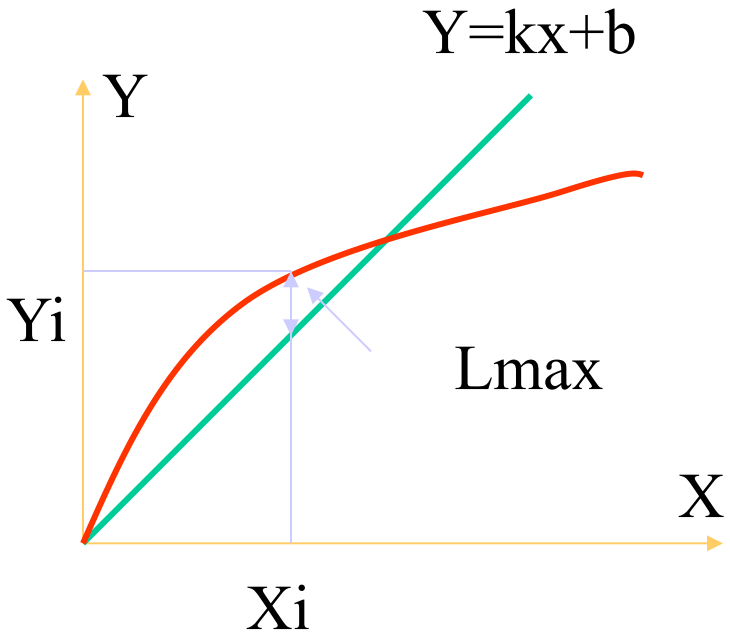
各项系数决定了特性曲线的形式！

- 传感器的非线性误差（线性度）用相对误差表示：

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

—— 最大非线性绝对误差
—— 满量程输出
—— 线性度

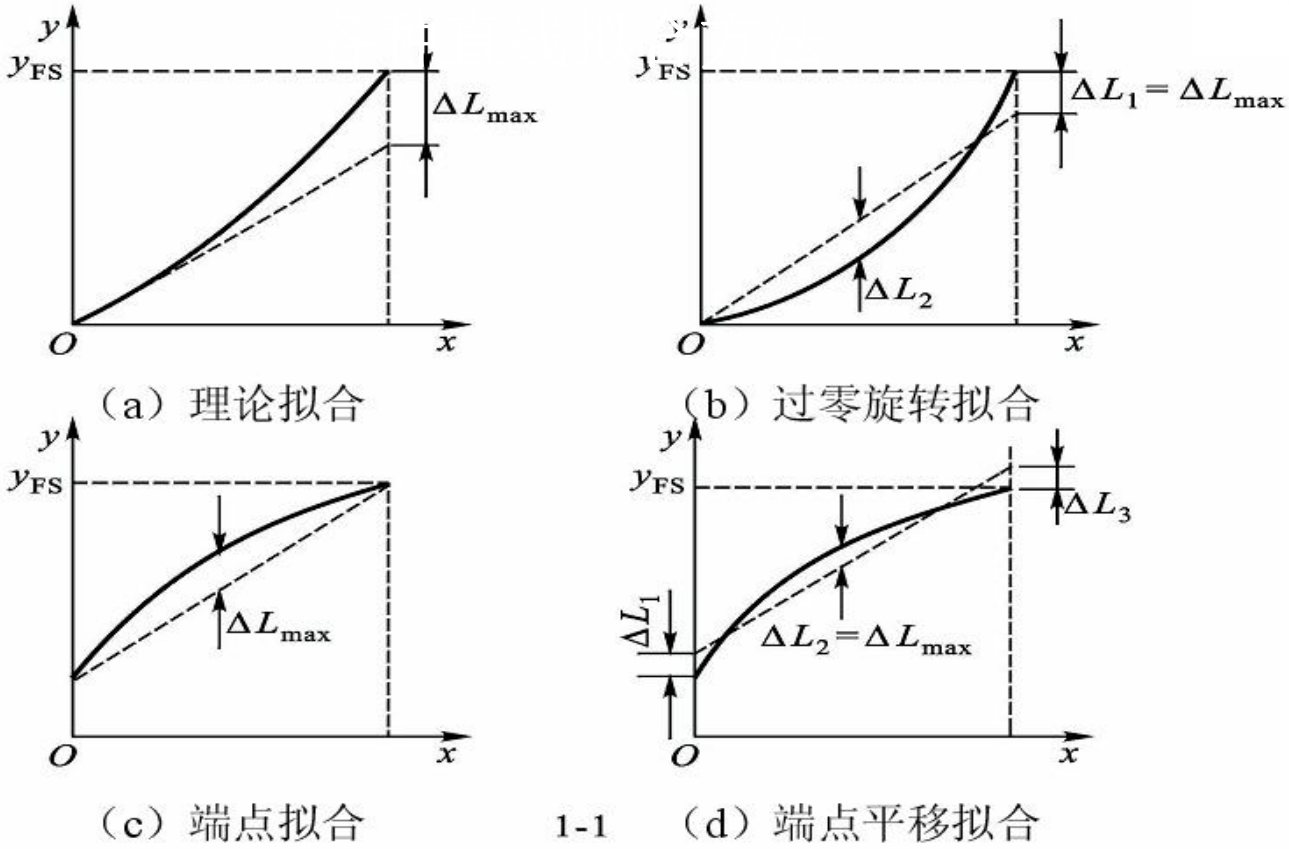
线性度是表征实际特性与拟合直线不吻合的参数



不同的拟合方法得到不同的线性度！

非线性误差大

非线性误差与前者小



1-1

非线性误差大

非线性误差减小了一半

最小二乘法线性度

非线性误差小！

设拟合直线方程:

$$y = kx + b$$

取 n个测点, 第i 残差为:

$$\Delta i = y_i - (kx + b)$$

求残差平方和为最小

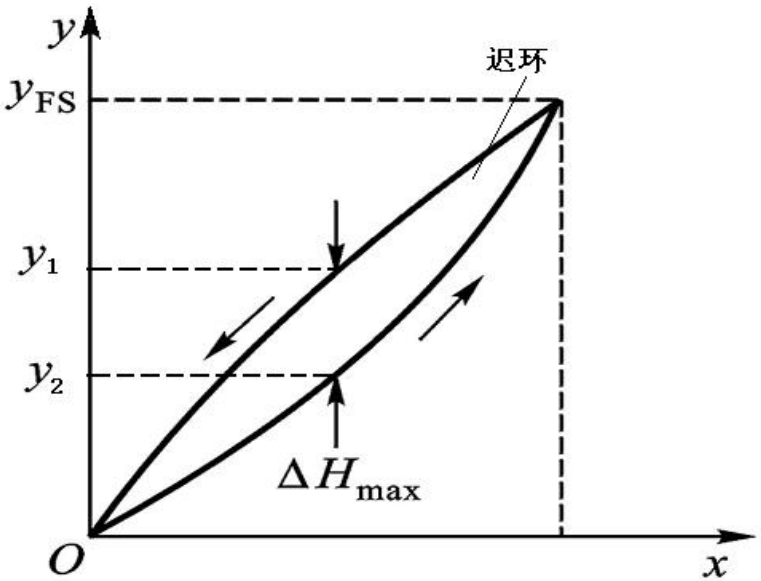
$$\frac{\partial}{\partial k}\sum_{i=1}^{n} \Delta i^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b}\sum_{i=1}^{n} \Delta i^2 = 0$$

解出k、b代入作拟合直线，△i为非线性误差

（2）迟滞

❖ 传感器在正、反行程期间输入、输出曲线不重合的现象称迟滞。



例：一电子秤

增加砝码	10g	——	50g	——	100g	——	200g
电桥输出	0.5mv	——	2mv	——	4mv	——	10mv
减砝码输出	1mv	——	3mv	——	6mv	——	10mv

- 迟滞误差计算由满量程输出的百分数表示：

$$\gamma_H = \pm\left(\Delta H_{\max} / Y_{FS}\right)\times 100\%$$

$\Delta H_{\max} = Y_2 - Y_1$ 为正、反 行程输出值间的最大差值

- 产生迟滞误差的原因：

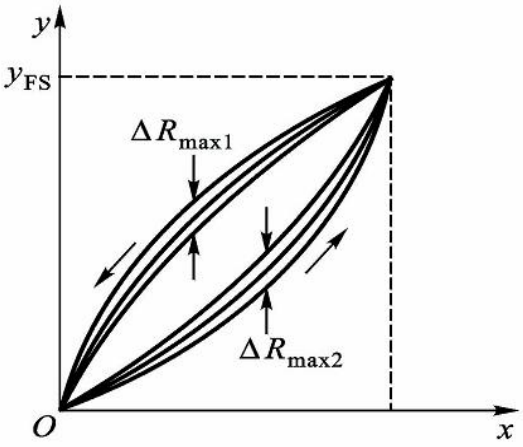
由于敏感元件材料的物理性质缺陷造成的。

如弹性元件的滞后、外加磁场、电场作用的铁磁体、铁电体。

迟滞误差的存在使输入输出不能一一对应。

（3）重复性

- 传感器输入量按同一方向作多次测量时输出特性不一致的程度。
- 属于随机误差可用标准偏差表示：



$$\gamma_R = \pm \frac{(2-3)\sigma_{max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

σ max —— 最大标准差；

（2—3）—— 置信度；

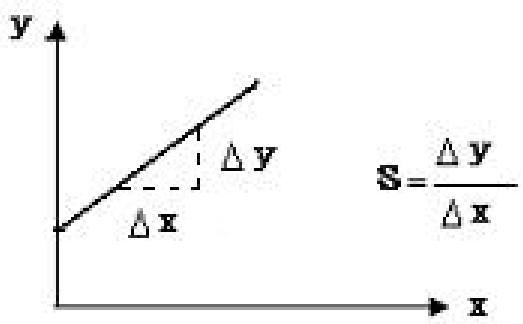
或用最大重复偏差表示：

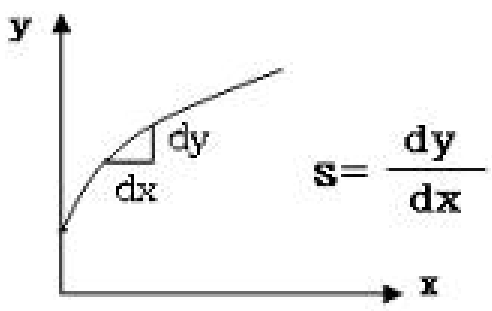
$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

（4）灵敏度

❖在稳定条件下输出微小增量与输入微小增量的比值

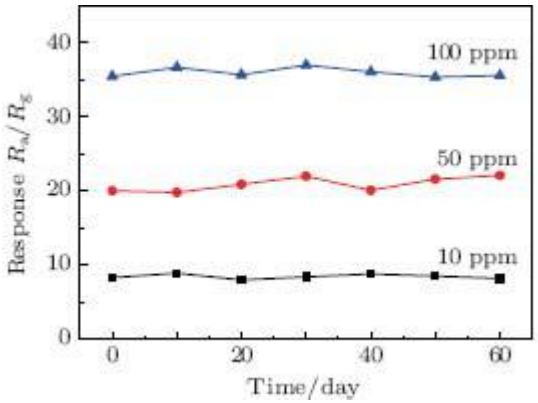
- 对线性传感器灵敏度是直线的斜率：$S = \Delta Y / \Delta X$
- 对非线性传感器灵敏度为一变量：　$S = dy/dx$
- 灵敏度单位，mv/mm　mv/℃

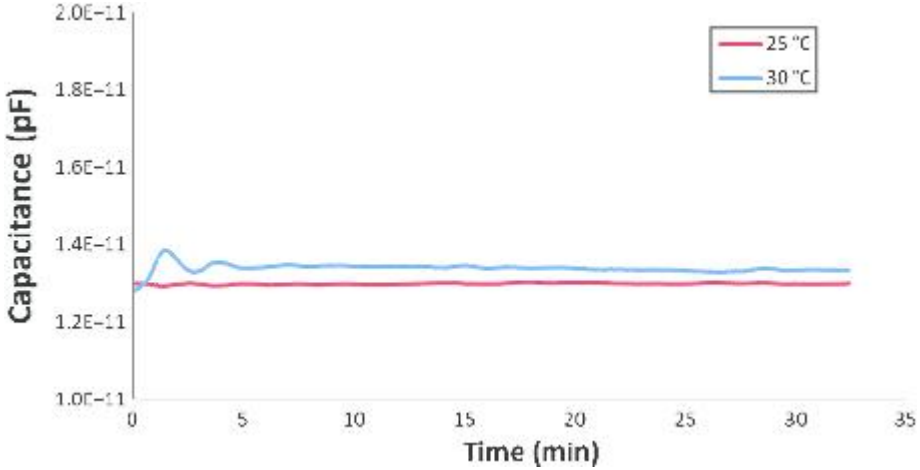




（5）稳定性(有时称为长时间工作稳定性或零点漂移)

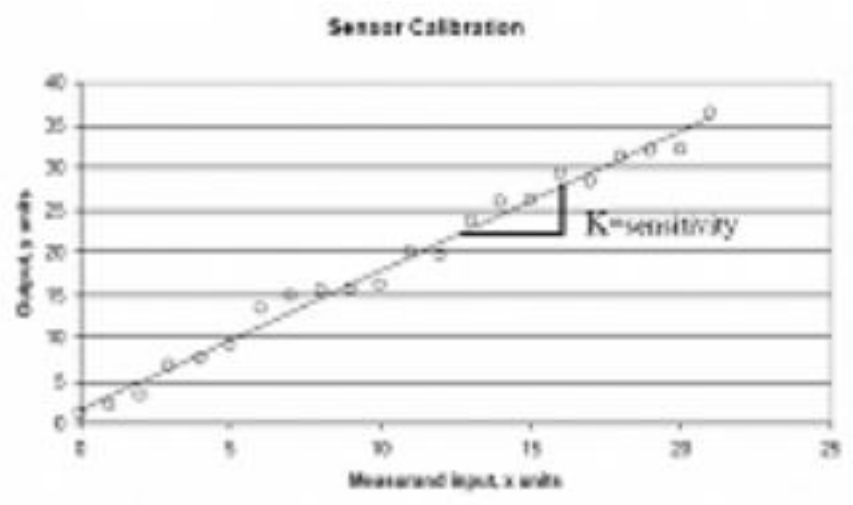
- 表示传感器在一较长时间内保持性能参数的能力





（6）分辨率和阈值

- 分辨率 —— 传感器能够检测到的最小输入增量；
- 阈值 —— 输入小到某种程度输出不再变化的值；
- 门槛灵敏度—— 指输入零点附近的分辨能力。



Resolution=the smallest increment of change
in the measured value that can be determined
from the readout or recording instrument
Sensitivity=the change of output (measured value)per unit of input (measurand).
Sensitivity is the slope of the static calibration curve at a given value of the input.

（7）漂移 输入量不变，输出量随时间变化！

产生原因（1）自身结构，（2）周围环境

温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度（ 20℃ ）时的输出值的变化量与温度变化量之比（ § ）来表示：

$$\S = (Y_t - Y_{20}) / \triangle t$$

温度稳定性误差：

测试时先将传感器置于一定温度（例如）下，将其输出调至零点或某一特定点，使温度上升或下降一定的度数（例如5℃或10℃），再读出输出值，前后两次输出之差即为温度稳定性误差。温度稳定性误差用每若干℃的绝对误差或相对误差表示，每℃的误差又称温度误差系数。

2.2 传感器动态特性

- 动态特性是指传感器输出对时间变化的输入量的响应特性：
- 除理想状态，多数传感器的输入信号是随时间变化的，输出信号一定不会与输入信号有相同的时间函数，这种输入输出之间的差异就是动态误差；
- 传感器输出对时间变化的输入量的响应即反映了传感器的动态特性。

- 当输入量随时间变化时，讨论传感器的动态特性。如 ：加速度、振动等，这时被测量是时间的函数，或是频率的函数。

用时域法表示：

$$Y(t) = f\left[X(t)\right]$$

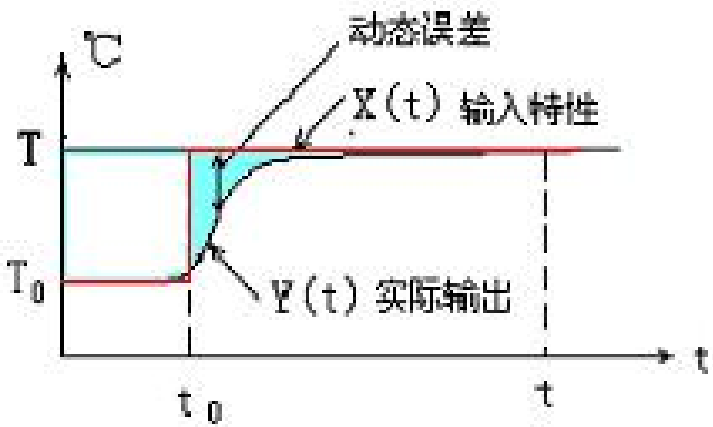
用频域法表示：

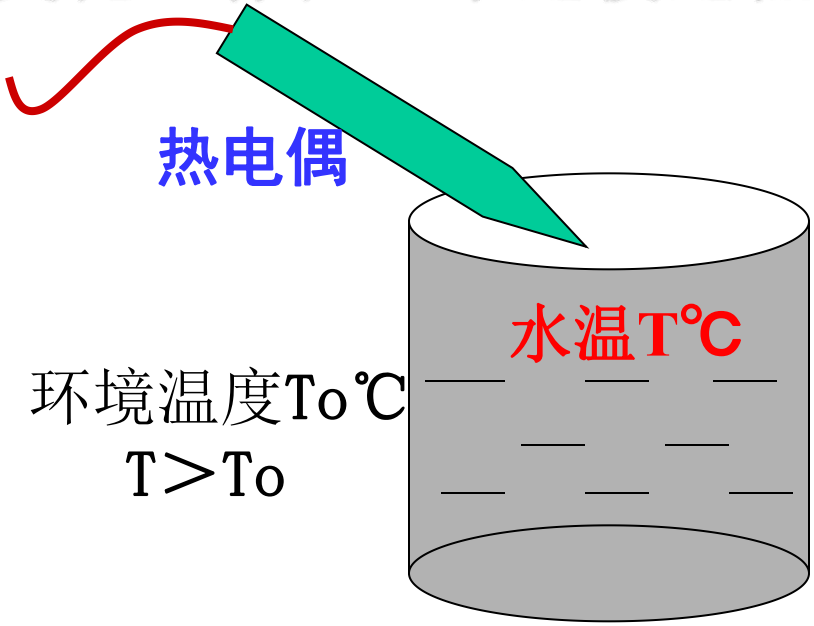
$$Y(j\omega) = f\left[X(j\omega)\right]$$

动态特性是传感器输出对时间变化的输入量的响应特性，输入与输出之间存在的差异就是动态误差！

例：动态测温

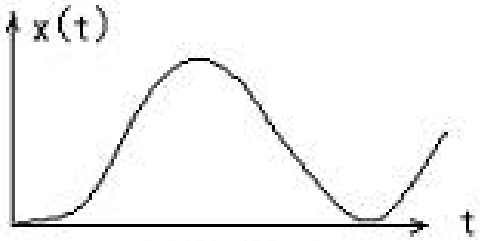
- 设环境温度为T_0，水槽中水的温度为T，而且 $T>T_0$
- 用热电偶测温，传感器突然插入被测介质中；
- 理想情况测试曲线T是阶跃变化的；
- 实际热电偶输出值是缓慢变化，存在一个过渡过程



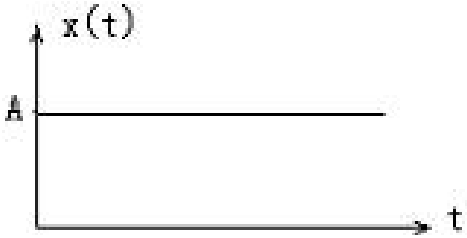


影响动态特性的因素还与输入信号的形式有关，

- 输入信号为阶跃变化时，对传感器随时间变化过程进行分析，称阶跃响应（瞬态响应）；
- 在对传感器进行动态分析时一般采用标准正弦信号和阶跃信号。 输入信号按正弦变化时，分析动态特性的相位、振幅、频率，称频率响应；



正弦输入信号



阶跃输入信号

$X(t)=0 \quad t<=0$

$X(t)=1 \quad t>0$

（1） 传递函数

假设传感器输入、输出在线性范围变化，当输入量随时间变化时，它们的关系可用高阶常系数线性微分方程表示：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dx} + a_0 y = \mathrm{b}_m \frac{d^m x}{dt^m} + \cdots + \mathrm{b}_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

式中： Y—输出；X—输入；a_i 、b_i 为常数

$t \le 0$ $y = 0$

$$y(s) = L[F(t)] = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} d_t$$

$$x(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} d_t$$

微分方程两边取拉氏变换，将实函数变换到复变函数

$$y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0)$$

$$= x(s)\,(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0)$$

传感器的传递函数：

$$H(S)=\frac{y(s)}{x(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}$$

传感器传递函数在数学上的定义是：初始条件为零（t≤0，y=0），输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比，可由输入和传递函数求出输出拉氏变换，再求逆变换得出y(t)将频域变换为时域 。

$$y(s)=x(s)H(s)$$

大多数传感器的情况一般有

$$\mathrm{b}_m = \mathrm{b}_{m-1} = \cdots = b_1 = 0$$

传递函数可化简为：

$$H(S) = \frac{y(s)}{\mathrm{x}(\mathrm{s})} = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0}$$

分母多项式中的方程式有n个根，总可以分解为一次和二次的实系数因子

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0 = 0$$

传递函数可写成：

$$H(S)=A\prod_{i=1}^{r}\left(\frac{1}{S+P_i}\right)\prod_{j=1}^{(n-r)/2}\left(\frac{1}{S^2+2\xi_i\omega_{nj}S+\omega_{nj}{}^2}\right)$$

式中每个因子式可以看成一个子系统的传递函数

其中 A 是零阶系统传递函数

一阶系统传递函数：

$$\frac{1}{S+P_i}$$

二阶系统传递函数：

$$\frac{1}{S^2+2\xi_i\omega_{nj}S+\omega_{nj}{}^2}$$

零阶系统是个特例，无时间滞后，n=0时

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = kx$$

一阶系统, n = 1

$$H(S) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0}$$

二阶系统, n = 2

$$H(S) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

用分母的阶次代表传感器的特征，数学模型是n阶就称n阶传感器。一个高阶系统可以看成若干个零阶、一阶、二阶系统串联。传感器种类很多，一般可简化为一阶或二阶系统，高阶传感器较少，也可分解成若干低阶环节。

（2）一阶系统的动态响应（惯性系统）

❖ 一阶系统传递函数

$$H(S)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_0}{a_1 s+a_0}=\frac{b_0/a_0}{a_1/a_0\,S+1}=\frac{k}{\tau s+1}$$

$k=\dfrac{b_0}{a_0}$ 静态灵敏度

$\tau=\dfrac{a_1}{a_0}$ 时间常数

设k=1传递函数可简化为：

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

❖ 一阶传感器的阶跃响应（瞬态响应）

单位阶跃信号拉氏变换为：

$$X(t) = 1(t)$$

$$X(S) = \frac{1}{S}$$

$$L\{X(t)\} = \frac{1}{S}$$

一阶系统输出拉氏变换为：

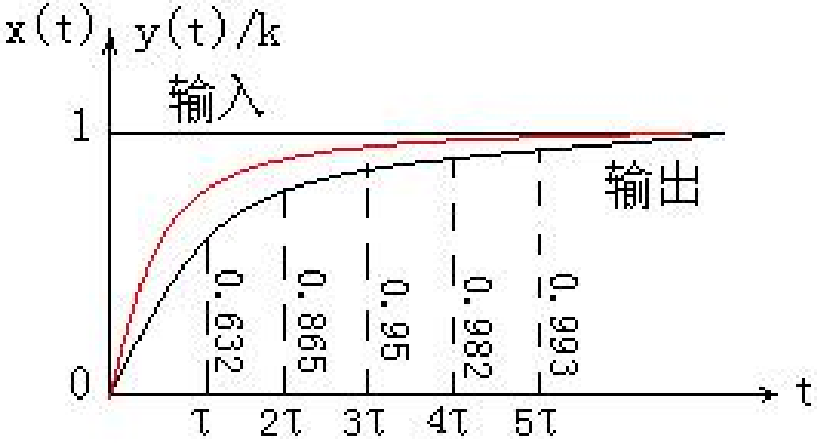
$$Y(s) = X(\mathrm{s})\,H(S) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{S}$$

由拉氏反变换得到单位阶跃的响应信号为：

$$y(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

讨论：

- 暂态响应是指数函数，输出曲线成指数变化逐渐达到稳定；
- 因为惯性存在输出不能立刻达到稳定，理论上t—∞时才能达到稳定，当t= τ 时即达到稳定值的63.2%，可见时间常数 τ 越小越好，是反映一阶传感器的重要参数；
- 实际运用时t = 4 τ 时工程上认为已达到稳定；
- 由曲线看出它与动态测温相似，所以动态测温是典型的一阶系统 。



❖ 一阶传感器的频率响应

输入正弦信号的拉氏变换

$$X(t) = \sin \omega t$$

$$L\{X(t)\} = \frac{\omega}{S^2 + \omega^2}$$

通过传递函数求出输出：

$$Y(s) = H(s) \cdot X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

$$Y(S) = \frac{\omega}{\tau} \cdot \frac{1}{(s + 1/\tau)(s^2 + \omega^2)}$$

❖ 一阶传感器的频率响应

拉氏逆变换后得到输出的振幅和频率变化特性

$$y(t)=\frac{\omega}{\tau}\frac{e^{-t/\tau}}{(1/\tau)^2+\omega^2}+\frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{(\omega/\tau)^2}{(1/\tau)^2+\omega^2}}\sin(\omega t+\varphi)$$

输出Y(t)有个两部分，

瞬态响应成分、稳态响应成分，

瞬态响应随时间t逐渐消失。

忽略瞬态响应，稳态响应整理后为：

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

幅—频特性：

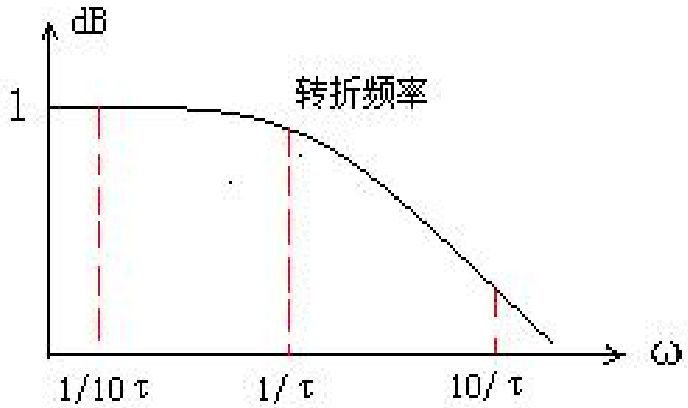
$$A(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$$

相—频特性：

$$\varphi(\omega)=-\arctan(\omega\tau)$$

讨论：

- 一阶系统在时间常数 $\tau \ll 1$才近似零阶系统特性，$A(\omega) \approx k$, $\phi(\omega) \approx 0$；输出y(t)反映输入x(t)变化；
- 当 $\tau = 1$ 时，传感器灵敏度下降了3dB，如果灵敏度下降到3dB时的频率为工作频率上限，则：上限频率为$\omega_H = 1/\tau$，所以时间常数 τ 越小，ω_H越高工作频率越宽，响应越好；
- 一阶系统的动态响应主要取决于时间常数 τ，减少 τ 可改善传感器的频率特性，加快响应过程。



（3）二阶系统的动态响应（振动系统）

- 二阶系统传递函数

$$H(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_0}{a_2s^2+a_1s+a_0}=\frac{k\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$$

阻尼固有频率

$$\omega_n=\sqrt{a_0/a_2}$$

固有频率ωn与传感器运动部件质量m和弹性敏感元件的刚度k有关.

$$\xi=\frac{a_1}{2\sqrt{a_0a_2}}$$

阻尼比

$$k=b_0/a_0$$

静态灵敏度

❖ 二阶传感器的阶跃响应

输入阶跃信号时拉氏变换为

$$L\{X(t)\} = \frac{1}{s}$$

输出拉氏变换

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s}$$

❖ 二阶传感器的阶跃响应

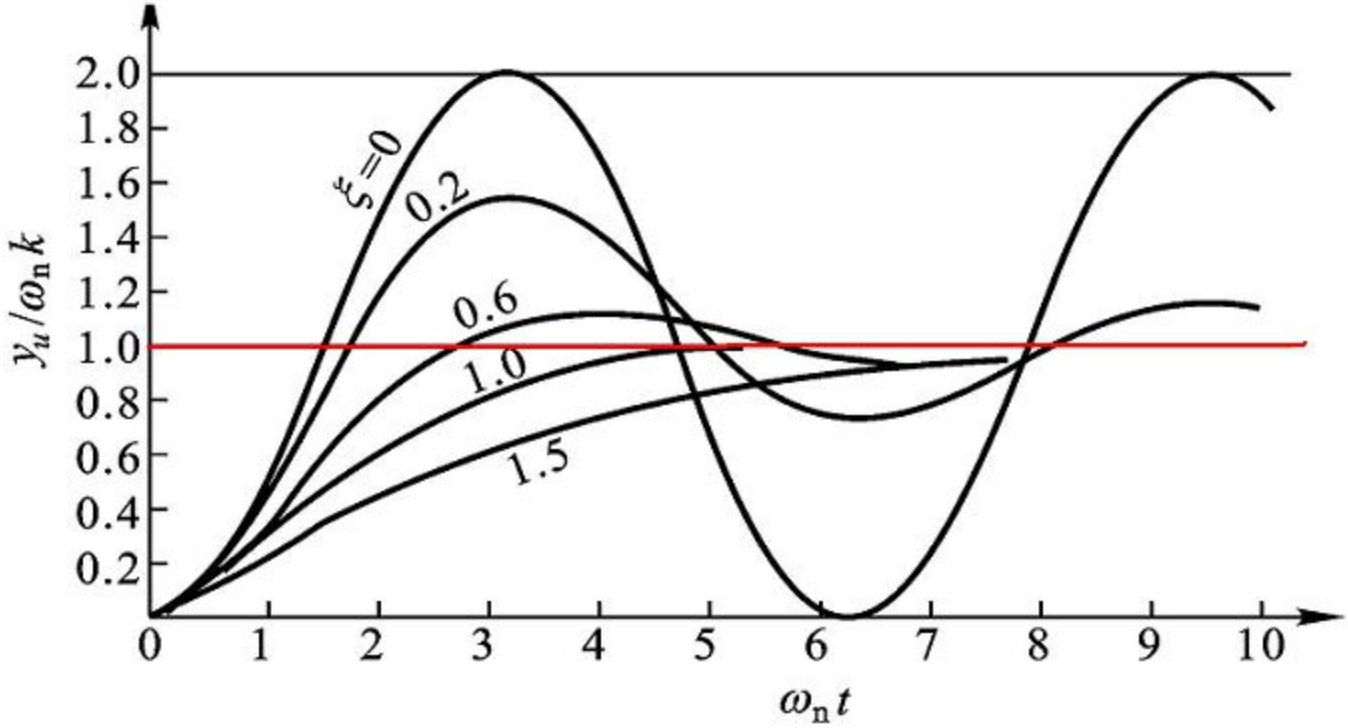
反变换求出输出函数为：

$$Y(t)=1-\left[\frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}}\right]\cdot\sin\left(\omega_d t+\phi\right)$$

$$\phi=-arcth\left[\sqrt{1-\xi\left(\frac{\omega_d}{\omega_n}\right)^2}/\xi\right]$$

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$$

用 y(t)作图，不同阻尼比ξ值曲线形式不同

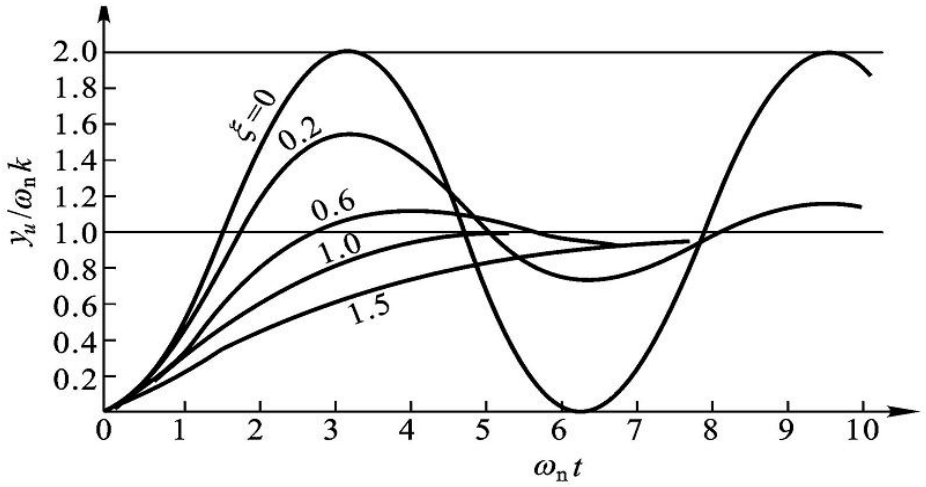


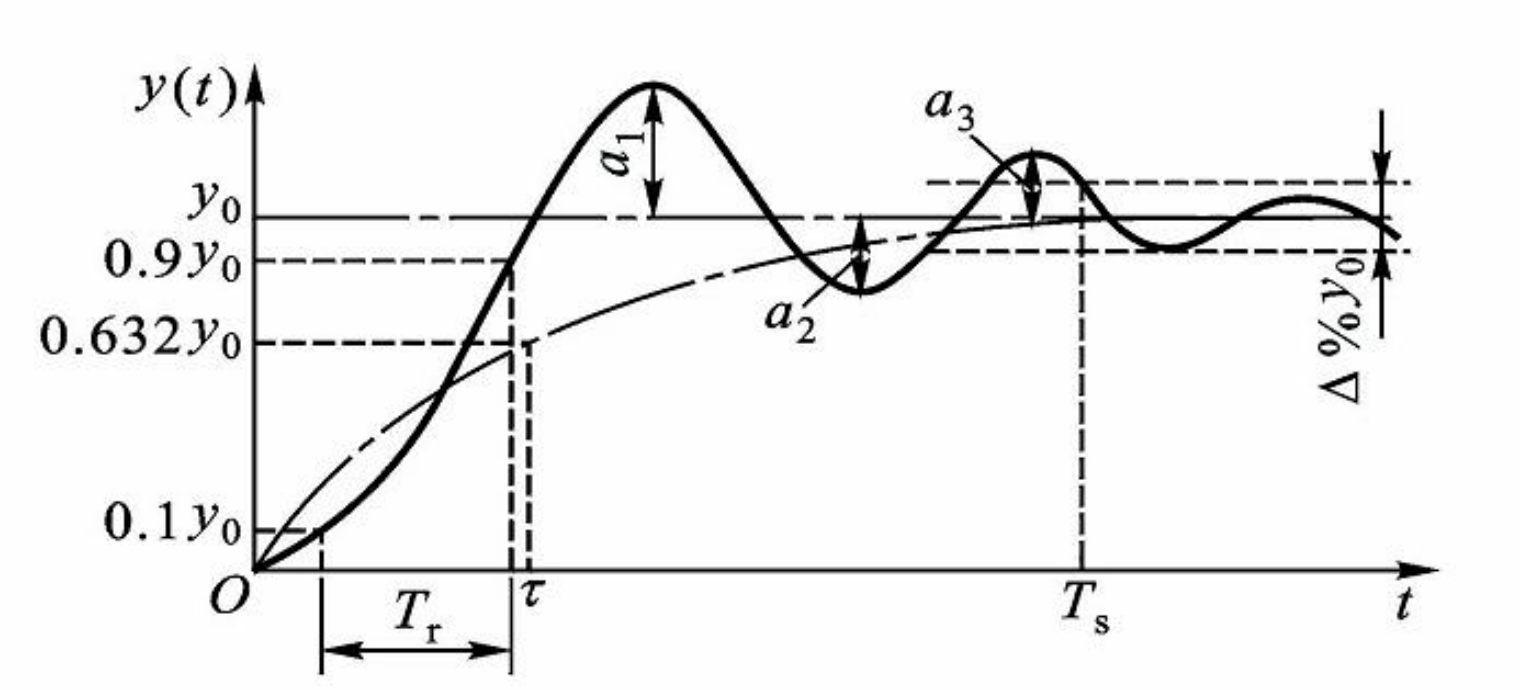
讨论：

根据阻尼比ξ大小可分四种情况：

1. ξ=0, 零阻尼, 等幅振荡，产生自激永远达不到稳定；
2. ξ<1, 欠阻尼, 衰减振荡, 达到稳定时间随ξ下降加长；
3. ξ=1, 临界阻尼，响应时间最短；
4. ξ>1, 过阻尼，稳定时间较长。

➢实际取值稍有一点欠阻尼调整, ξ取0.6—0.8 过冲量不太大，稳定时间不太长。





一阶、二阶两条典型的阶跃响应曲线

❖ 二阶传感器的频率响应

➢ 一个起始静止的二阶系统，输入正弦信号

$$X(t) = \sin \omega t$$

频率为ω时输出拉氏变换为：

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

式中， ω_n传感器的固有频率， ω信号频率

❖ 二阶传感器的频率响应

拉氏反变换为

$$Y(t)=\frac{k\omega_n\omega}{\sqrt{(\omega_n^2-\omega^2)^2+4\xi^2\omega_n^2\omega^2}}\sin(\omega t+\varphi_1)$$

$$+\frac{k\omega_n\omega}{(1-\xi^2)\sqrt{(\omega_n^2-\omega^2)^2+4\xi^2\omega_n^2\omega^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin\left[\omega_n\left(1+\xi^2\right)t+\varphi_2\right]$$

❖ 二阶传感器的频率响应

幅——频特性

$$A(\omega)=\left|\frac{Y(t)}{k}\right|=\frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2+\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

相——频特性

$$\varphi(\omega)=-\arctan\frac{2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

讨论：

- 当$\xi<1$(或$\xi<0.707$)，且$\omega_n>>\omega$时，幅值$A(\omega)\approx 1$，$\phi(\omega)\approx 0$；
- 当$\xi<1$，且$\omega_n=\omega$ ($\omega/\omega_n=1$)时，在$\omega/\omega_n=1$附近有个峰值，会产生共振，相位差90^0-180^0；
- 传感器固有频率ω_n至少应大于被测信号频率ω的3～5倍，$\omega_n\geqslant(3\sim5)\omega$，保证增益避免共振。
- 二阶传感器的动态特性主要决定传感器的固有频率ω_n和阻尼系数ξ。

- 影响传感器动态特性的主要参数是：
  - ✓时间常数τ， τ越小响应越快，频带越宽；
  - ✓传感器固有频率ω_n，选择在（3～5）ω（信号）；
  - ✓阻尼比ξ，选择在0.6～0.8，原则是过冲不太大，稳定时间不太长。

问题：

（1）正确理解传感器的静态特性指标包括：线性度、迟滞、重复性、灵敏度、稳定性等等；
（2）理解传感器系统的传递函数表示方法，什么是传感器的动态特性中的一阶传感器、二阶传感器的传递函数；
（3）一阶传感器和二阶传感器的频率响应特性（幅频特性、相频特性）参数有哪些？