

第一章 传感器的一般特性

- **1.1 传感器的静态特性**
- **1.2 传感器的动态特性**
- **1.3 传感器的技术指标**

- 在工程应用中，任何测量装置性能的优劣总要以一系列的**指标参数**衡量，通过这些参数可以方便地知道其性能。这些指标又称之为**特性指标**。
- 传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系。它通常根据输入(传感器所测量的量)的性质来决定采用何种指标体系来描述其性能。
- 当被测量(输入量)为**常量**，或变化**极慢**时，一般采用静态指标体系，其输入与输出的关系为**静态特性**；
- 当被测量(输入量)随**时间**较快地变化时，则采用动态指标体系，其输入与输出的关系为**动态特性**。

1.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出与输入的关系。如果被测量是一个不随时间变化，或随时间变化缓慢的量，可以只考虑其静态特性，这时传感器的输入量与输出量之间在数值上一般具有一定的对应关系，关系式中不含有时间变量。对静态特性而言，传感器的输入量 x 与输出量 y 之间的关系通常可用一个如下的多项式表示：

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_nx^n$$

式中： a_0 ——输入量 x 为零时的输出量；

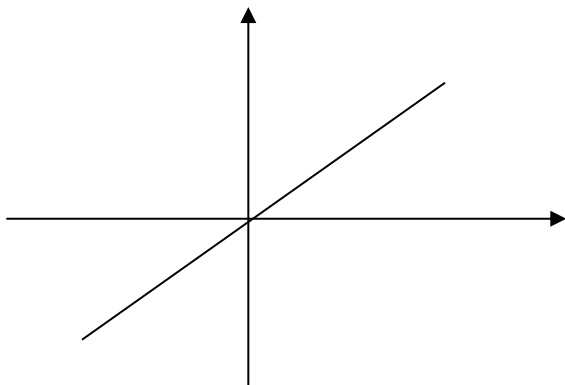
a_1 ——传感器的灵敏度，常用 K 表示。

a_2, \dots, a_n ——非线性项系数。

各项系数决定了特性曲线的具体形式。

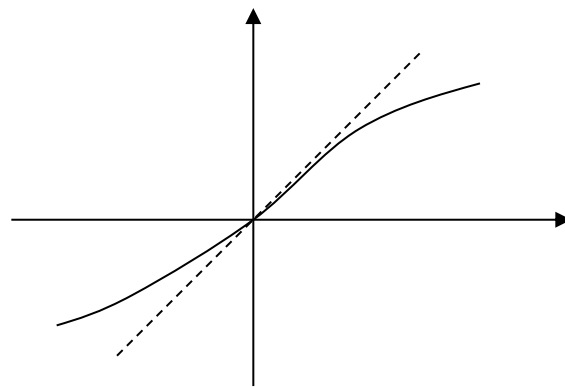
传感器的静态特性可以用一组性能指标来描述，如：灵敏度、迟滞、线性度、重复性和漂移等。

四种典型情况



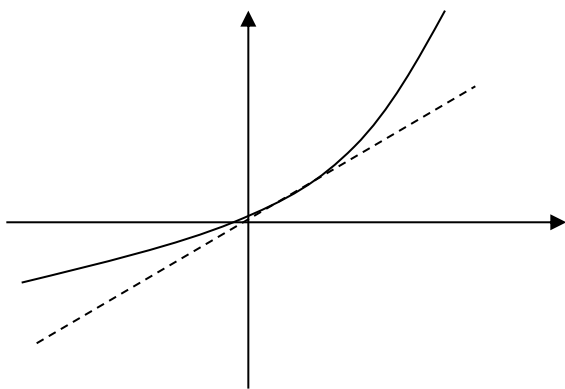
$$y = a_1x$$

a) 理想线性



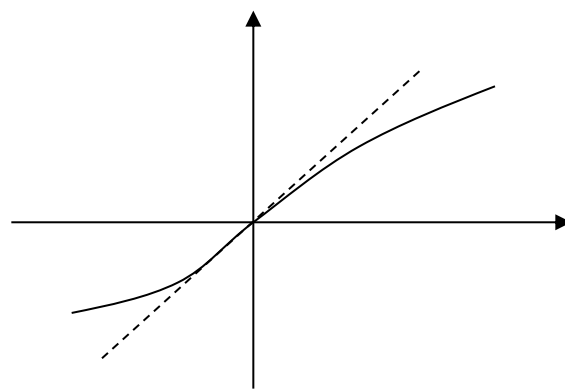
$$y = a_1x + a_3x^3 + \dots$$

b) x奇次项的非线性



$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 \dots$$

c) x偶次项的非线性



$$y = a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

d) x奇、偶次项的非线性

1、线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。

输出与输入关系可分为**线性特性**和**非线性特性**。从传感器的性能看，**希望具有线性关系**，即，理想输入输出关系。但实际遇到的传感器大多为非线性。

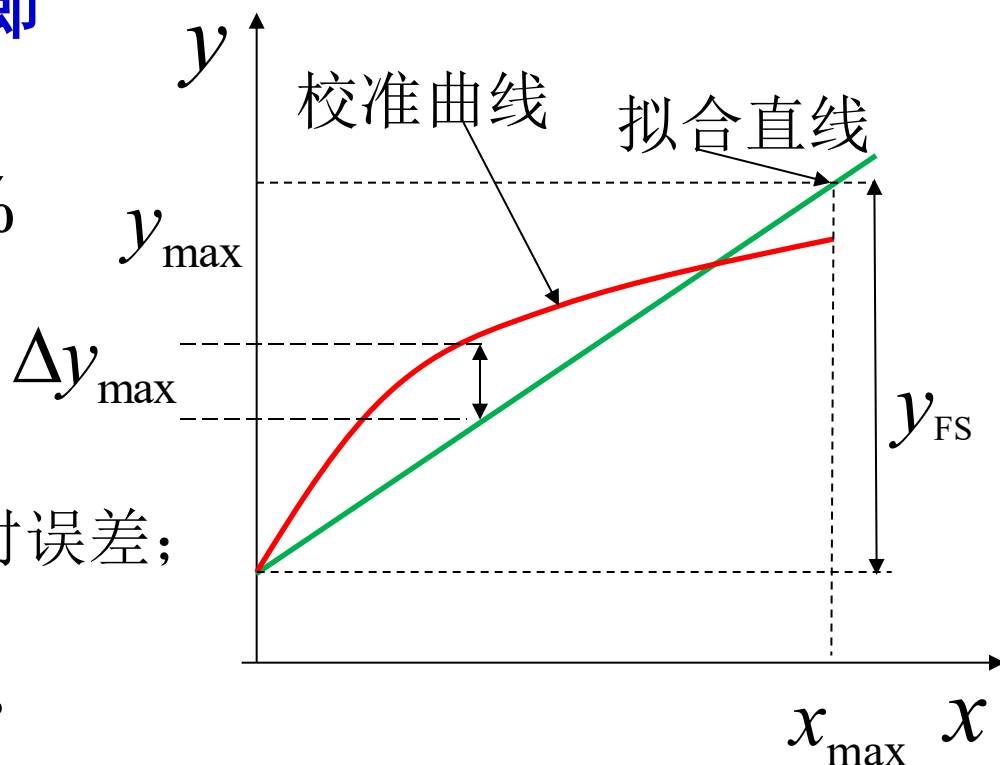
在实际使用中，为了**标定**和**数据处理**的方便，也希望得到线性关系，因此，引入各种非线性补偿环节，如：采用**非线性补偿电路**或**计算机软件**进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系为**线性或接近线性**，但，如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围较小时，可用一条直线（**切线**或**割线**）近似地代表**实际曲线的一段**，使传感器输入输出特性**线性化**，所采用的直线称为**拟合直线**。

传感器的线性度是指在全量程范围内校准曲线与拟合直线之间的最大偏差值 Δy_{\max} 与满量程输出值 y_{FS} 之比。线性度也称为**非线性误差**，用 δ_L 表示，即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\%$$

式中： Δy_{\max} ——最大非线性绝对误差；

y_{FS} ——满量程输出值。



直线拟合线性化

● 出发点 → 获得最小的非线性误差

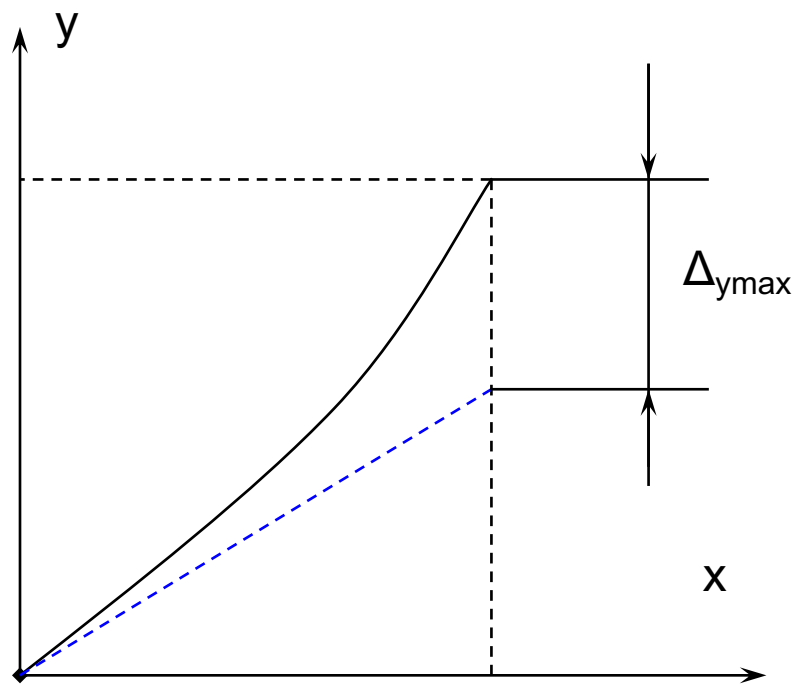
拟合方法：

- ①理论拟合；
- ②过零旋转拟合；
- ③端点连线拟合；
- ④端点连线平移拟合；
- ⑤最小二乘拟合

①理论拟合

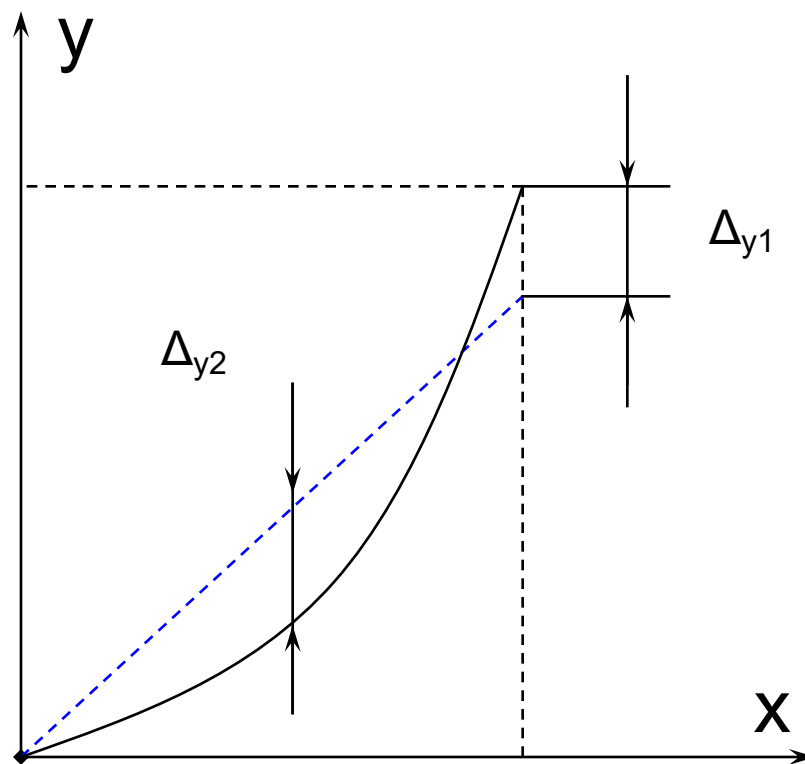
拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关。

方法十分简单，但一般说 $\Delta_{y\max}$ 较大



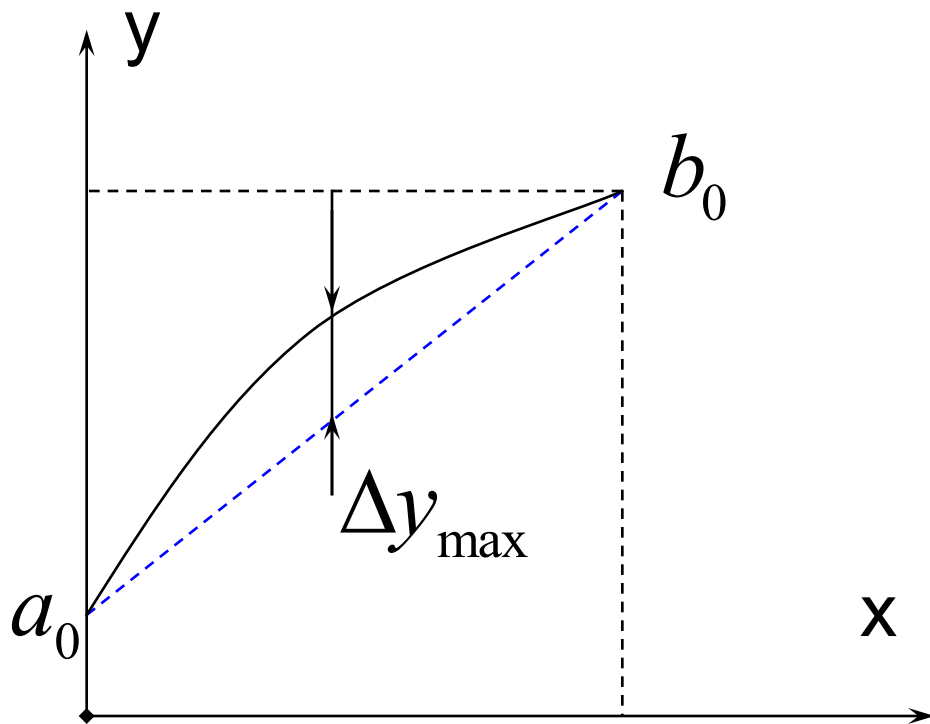
②过零旋转拟合

曲线过零的传感器。拟合时，使 $\Delta_{y1} = |\Delta_{y2}| = \Delta_{y\text{Max}}$



③端点连线拟合（端基法）

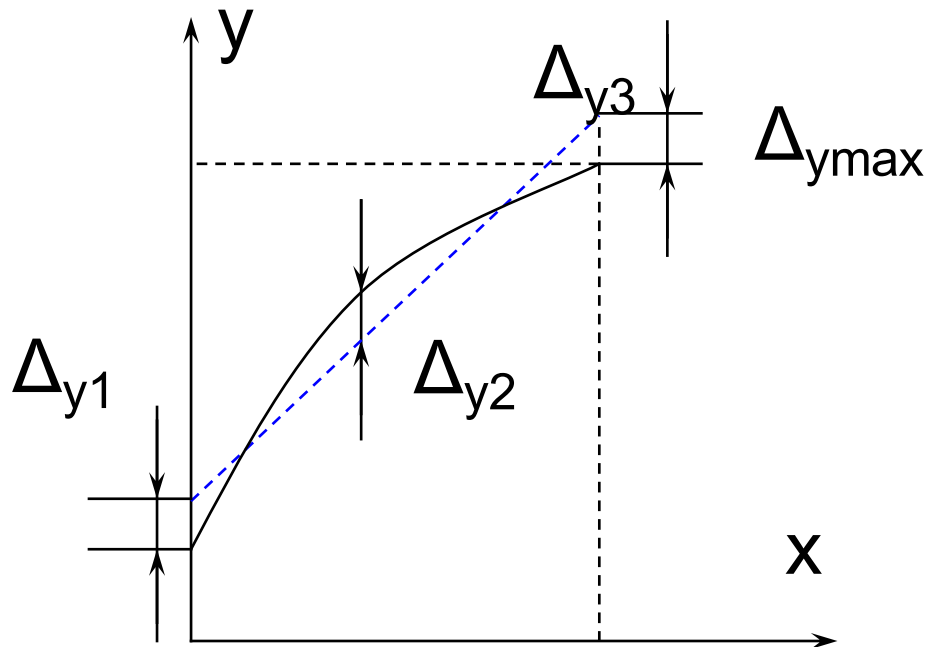
- 把输出曲线两端点的连线作为拟合直线



$$y = a_0 + Kx$$

④端点连线平移拟合

- 在端点连线拟合基础上使直线**平移**，移动距离为原先的**一半** $\Delta_{y2} = |\Delta_{y1}| = |\Delta_{y3}| = \Delta_{y\text{Max}}$



⑤最小二乘拟合

设拟合直线方程： $y=kx+b$

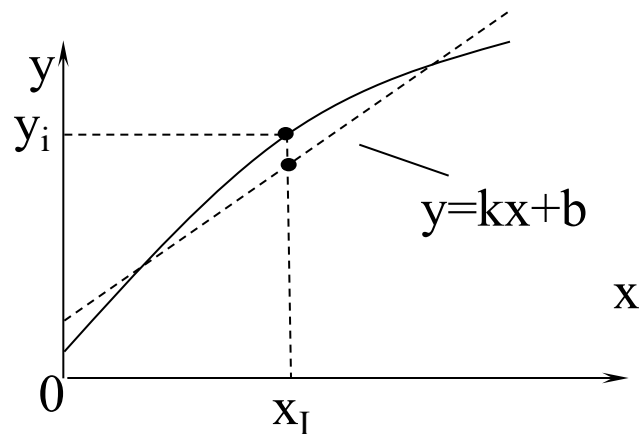
若实际校准测试点有 n 个，则第 i 个校准数据 y_i 与拟合直线上对应的理想值 (kx_i+b) 之间的线差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum \Delta_i^2$ 为最小值，即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min$$

$\sum \Delta_i^2$ 对 k 和 b 一阶偏导数等于零，求出 k 和 b 的表达式



最小二乘拟合法

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0$$

即得到 k 和 b 的表达式

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

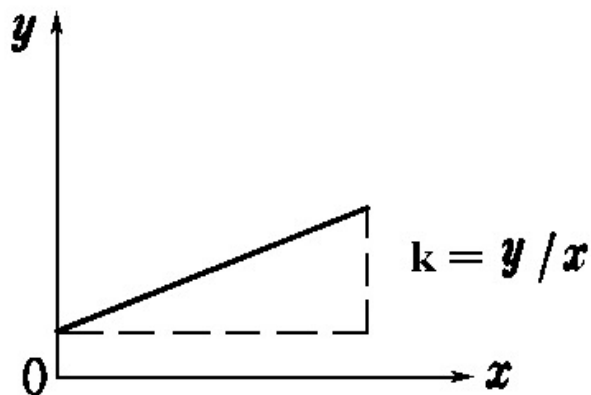
将 k 和 b 代入拟合直线方程，即可得到拟合直线，然后求出线差的最大值 L_{max} 即为非线性误差。

2、灵敏度

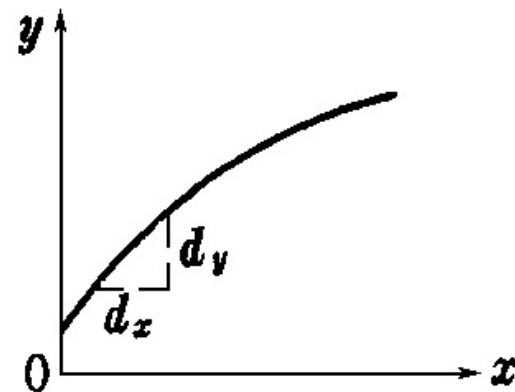
- 传感器输出的变化量与引起该变化量的输入变化量之比即为其静态灵敏度

$$k = \Delta y / \Delta x$$

表征传感器对输入量变化的反应能力



(a) 线性传感器



(b) 非线性传感器

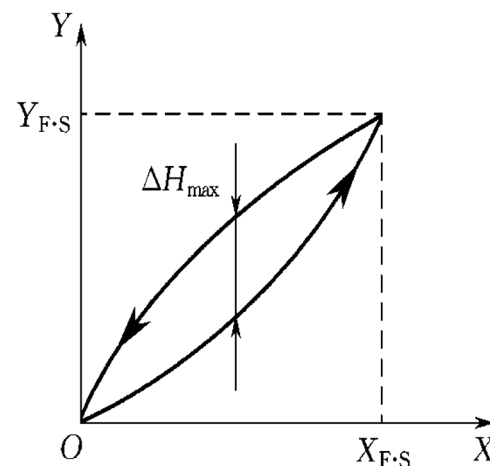
3、迟滞

- 正（输入量增大）反（输入量减小）行程中输出输入曲线不重合称为迟滞

$$\delta_H = \pm \left(\frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \right) \times 100\%$$

ΔH_{\max} ——正反行程间输出的最大差值。

y_{FS} ——满量程输出值



产生这种现象的主要原因这是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的，例如，弹性敏感元件弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。迟滞误差又称为回程误差、回差或变差。

4、重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度。重复性误差属于随机误差，常用标准差 σ 计算。

标准差 σ 由贝塞尔公式计算时，则有：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$$

Y_i —测量值；

\bar{Y} —测量值的算术平均值；

n —测量次数。

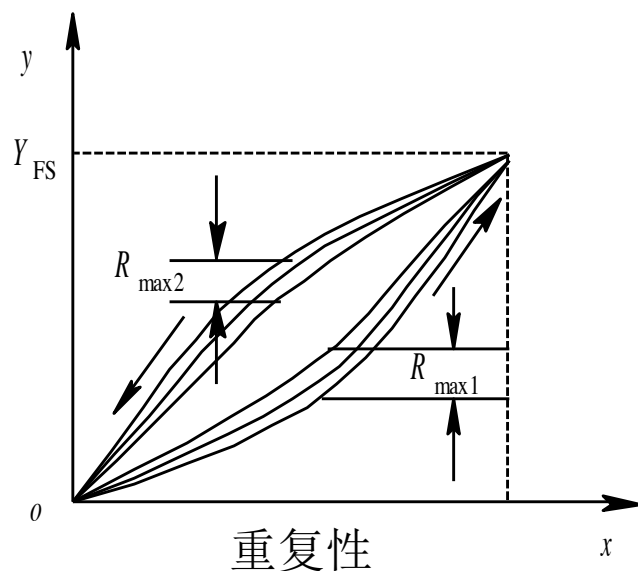
重复性误差用正反行程标准偏差最大值的2或3倍与满量程 Y_{FS} 的百分比表示，

即

$$\delta_k = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\%$$

也可用正反行程中最大重复差值 ΔR_{\max} 计算，
即

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



5. 零点漂移

- 传感器**无输入**（或某一输入值不变时），每隔一段时间进行读数，其输出**偏离零值**（或**原指示值**），即为零点漂移

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中 ΔY_0 ——最大零点偏差；
 Y_{FS} ——满量程输出。



6、温漂

- 传感器在外界温度下输出量发出的变化.
- 一般以温度变化 1°C 输出最大偏差与满量程的百分比值来表示。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS} \Delta T} \times 100\%$$

式中 Δ_{\max} —— 输出最大偏差;
 ΔT —— 温度变化范围;
 Y_{FS} —— 满量程输出。

7、精确度

与精确度有关指标：精密度、准确度和精确度(精度)

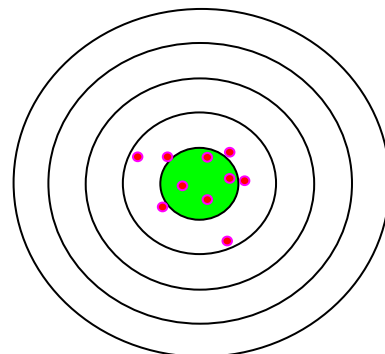
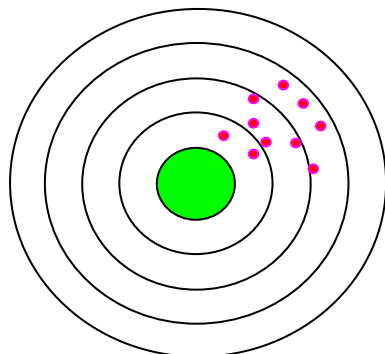
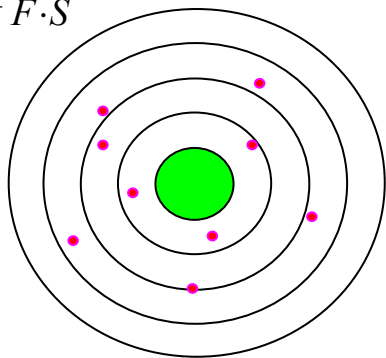
精密度：说明测量传感器输出值的**分散性**，即对某一稳定的被测量，由同一个测量者，用同一个传感器，在相当短的时间内连续重复测量多次，其测量结果的**分散程度**。例如，某测温传感器的精密度为 0.5°C 。精密度是**随机误差**大小的标志，精密度高，意味着随机误差小。注意：精密度高不一定准确度高。

准确度 说明传感器输出值与**真值**的**偏离程度**。如，某流量传感器的准确度为 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ ，表示该传感器的输出值与真值偏离 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 。准确度是**系统误差**大小的标志，准确度高意味着系统误差小。同样，准确度高不一定精密度高。

精确度：是精密度与准确度两者的总和，精确度高表示精密度和准确度都比较高。在最简单的情况下，可取两者的**代数和**。传感器的精确度常以**测量误差的相对值**表示。

$$A = \frac{\Delta A}{Y_{F.S}} \times 100\%$$

ΔA 测量范围内允许的最大绝对误差

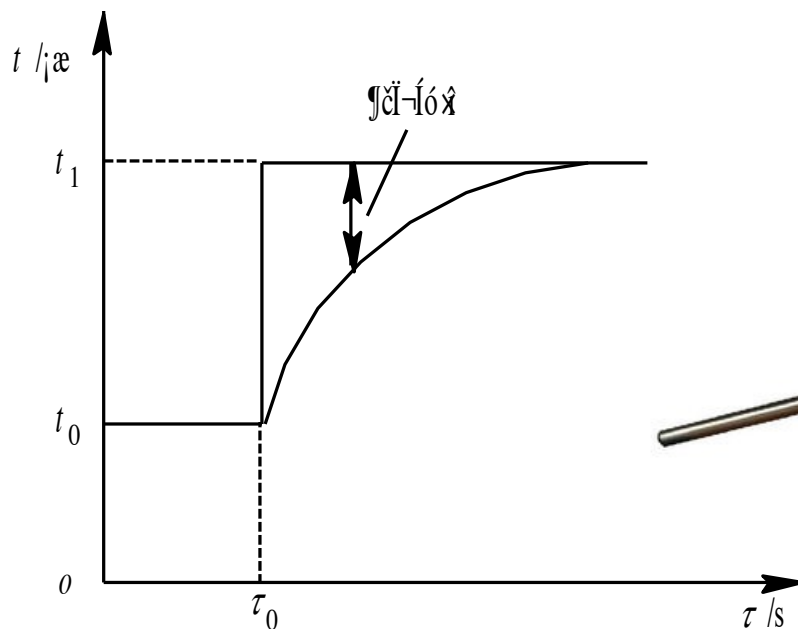


(a) 准确度高而精密度低 (b) 准确度低而精密度高 (c) 精确度高

1.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。由于传感器的惯性和滞后，当被测量随时间变化时，传感器的输出往往来不及达到平衡状态，处于动态过渡过程之中，所以，传感器的输出量也是时间的函数，其间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器，其输出将再现输入量的变化规律，即，具有相同的时间函数。实际的传感器，输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数，这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

为了说明传感器的动态特性，下面简要介绍动态测温的问题。当被测温度随时间变化或传感器突然放入被测介质中，以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况时，都存在动态测温问题。如把一支热电偶从温度为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 环境中迅速放入一个温度为 $t_1^{\circ}\text{C}$ 的恒温水槽中（放入时间忽略不计），这时热电偶测量的介质温度从 t_0 突然上升到 t_1 ，而热电偶反映出来的温度从 $t_0^{\circ}\text{C}$ 变化到 $t_1^{\circ}\text{C}$ 需要经历一段时间，即有一段过渡过程，如图2-7所示。热电偶反映出来的温度与其介质温度的差值就称为动态误差。



造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因，是温度传感器有**热惯性**（由传感器的**比热容**和**质量**大小决定）和**传热热阻**，使得在动态测温时传感器输出总是滞后于被测介质的温度变化。如带有**套管热电偶**其热惯性要比裸热电偶大得多。这种热惯性是热电偶固有的，它决定了热电偶测量快速变化的温度时会产生动态误差。**影响动态特性的“固有因素”任何传感器都有，只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。**



1. 传感器的基本动态特性方程

传感器的种类和形式很多，但它们的动态特性一般都可以用下述的**微分方程**来描述：

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

式中， a_0 、 a_1 、 \dots 、 a_n 、 b_0 、 b_1 、 \dots 、 b_m 是与传感器的结构特性有关的**常系数**。

1) 零阶系统

在方程式中的系数除了 a_0 、 b_0 之外，其它的系数均为零，则微分方程就变成简单的代数方程，即

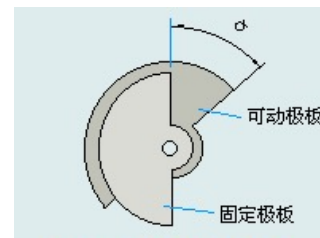
$$a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

通常将该代数方程写成

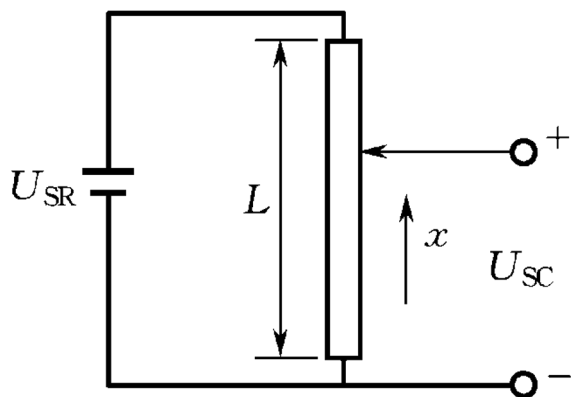
$$y(t) = kx(t)$$

式中， $k=b_0/a_0$ 为传感器的静态灵敏度或放大系数。传感器的动态特性用方程式来描述的就称为零阶系统。

零阶系统具有理想的动态特性，无论被测量 $x(t)$ 如何随时间变化，零阶系统的输出都不会失真，其输出在时间上也无任何滞后，所以零阶系统又称为比例系统。



在工程应用中，电位器式的电阻传感器、变面积式的电容传感器及利用静态式压力传感器测量液位均可看作零阶系统。



线性电位器

2) 一阶系统

若在标准的动态特性描述方程式中的系数除了 a_0 、 a_1 与 b_0 之外，其它的系数均为零，则微分方程为

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

上式通常改写成为

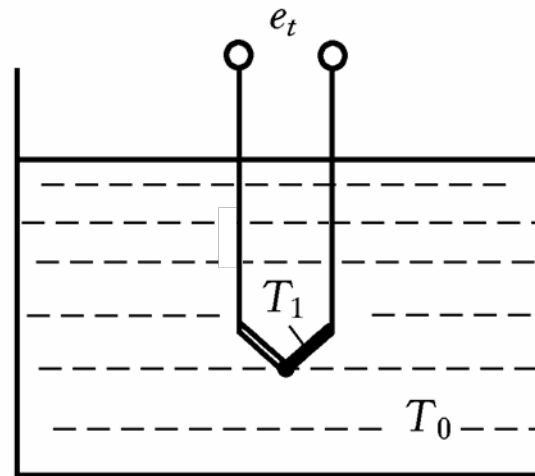
$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$$

式中： τ ——传感器的时间常数， $\tau = a_1/a_0$ ；

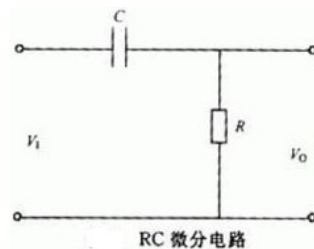
k ——传感器的静态灵敏度或放大系数， $k = b_0/a_0$ 。

时间常数 τ 具有时间的量纲，它反映传感器的惯性的大小，静态灵敏度 k 则说明其静态特性。用此方程式描述其动态特性的传感器就称为一阶系统，一阶系统又称为惯性系统。

如前面提到的不带套管热电偶测温系统、电路中常用的阻容滤波器等均可作为一阶系统。



一阶测温传感器



3) 二阶系统

二阶系统的微分方程为

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

二阶系统的微分方程通常改写为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 kx(t)$$

式中： k —传感器的静态灵敏度或放大系数， $k=b_0/a_0$ ；

ξ —传感器的阻尼系数， $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$

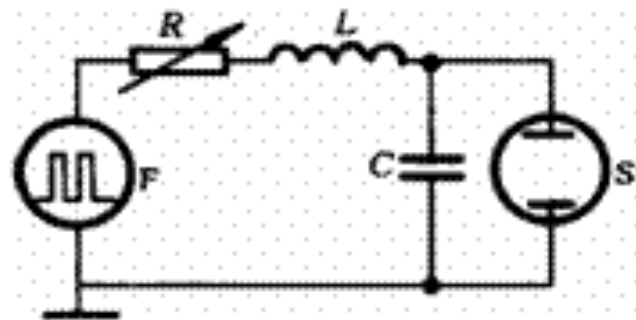
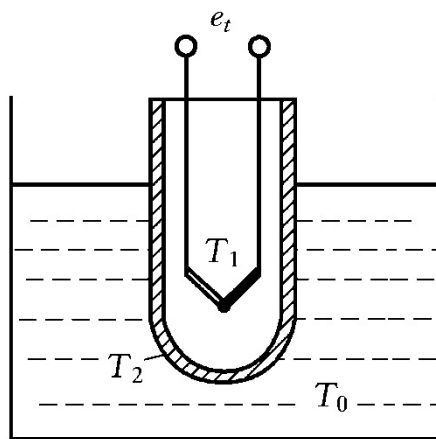
ω_n —传感器的固有频率， $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$

根据二阶微分方程的**特征方程根**的性质不同，二阶系统又可分为：

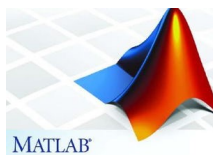
① **二阶惯性系统**：其特点是特征方程的根为两个**负实根**，它相当于两个一阶系统**串联**。

② **二阶振荡系统**：其特点是特征方程的根为一对带**负实部**的**共轭复根**。

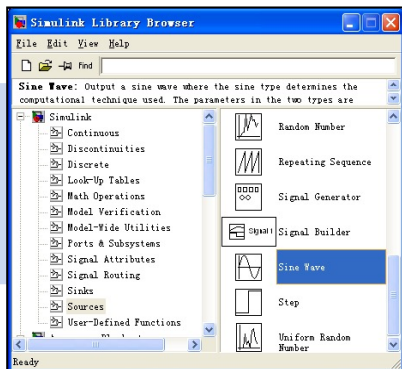
带有套管的热电偶、**电磁式的动圈仪表**及**RLC振荡电路**等均可看作为二阶系统。



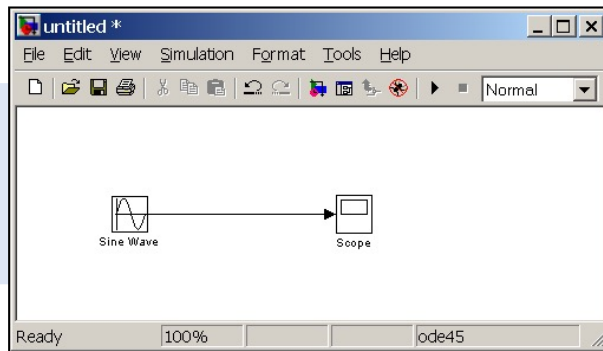
几种典型的标准输入信号



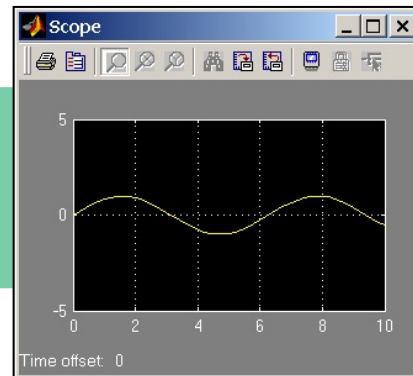
Simulink
的基本
模块包
括9个子
模块库。



Simulink界面



Simulink模型窗口



示波器窗口

1、输入信号源模块库(Sources)

输入信号源模块是用来向模型提供输入信号。常用的输入信号源模块如表所示。








常用的输入信号源模块表

名称	模块形状	功能说明
Constant	 Constant	恒值常数，可设置数值
Step	 Step	阶跃信号
Ramp	 Ramp	线性增加或减小的信号
Sine Wave	 Sine Wave	正弦波输出
Signal Generator	 Signal Generator	信号发生器，可以产生正弦、方波、锯齿波和随机波信号
From File	 From File	从文件获取数据
From Workspace	 From Workspace	从当前工作空间定义的矩阵读数据
Clock	 Clock	仿真时钟，输出每个仿真步点的时间
In	 In1	输入模块

2、接收模块库(Sinks)

接收模块是用来接收模块信号的，常用的接收模块如表所示。



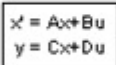



常用的接收模块表

名称	模块形状	功能说明
Scope	 Scope	示波器，显示实时信号
Display	 Display	实时数值显示
XY Graph	 XY Graph	显示 X-Y 两个信号的关系图
To File	 To File	把数据保存为文件
To Workspace	 To Workspace	把数据写成矩阵输出到工作空间
Stop Simulation	 Stop Simulation	输入不为零时终止仿真，常与关系模块配合使用
Out	 Out1	输出模块

3、连续系统模块库(Continuous)

连续系统模块是构成连续系统的环节，常用的连续系统模块如表所示。








常用的连续系统模块表

名称	模块形状	功能说明
Integrator	 Integrator	积分环节
Derivative	 Derivative	微分环节
State-Space	 State-Space	状态方程模型
Transfer Fcn	 Transfer Fcn	传递函数模型
Zero-Pole	 Zero-Pole	零一极点增益模型
Transport Delay	 Transport Delay	把输入信号按给定的时间做延时

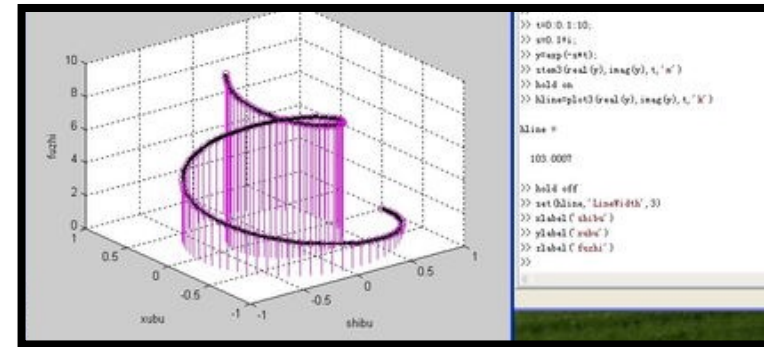
4、离散系统模块库(Discrete)

离散系统模块是用来构成离散系统的环节，常用的离散系统模块如表所示。

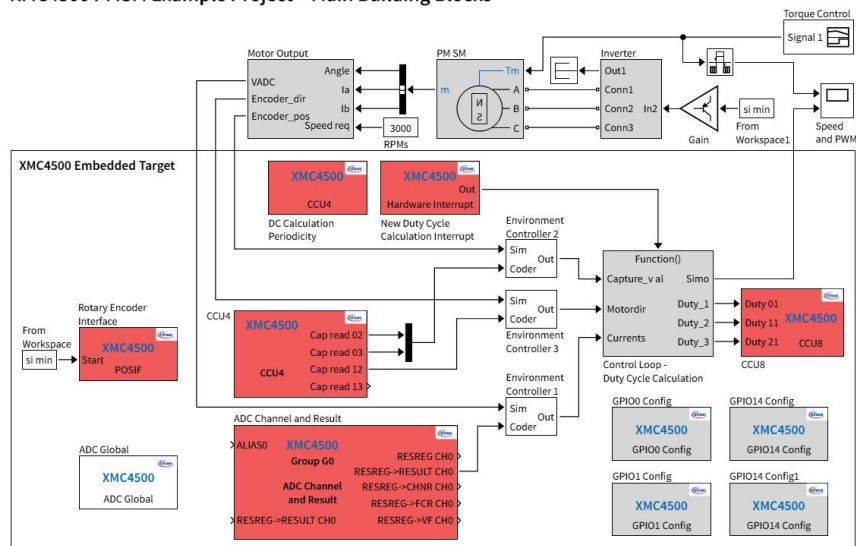
常用的离散系统模块表

名称	模块形状	功能说明
Discrete Transfer Fcn	 Discrete Transfer Fcn	离散传递函数模型
Discrete Zero-Pole	 Discrete Zero-Pole	离散零极点增益模型
Discrete State-Space	 Discrete State-Space	离散状态方程模型
Discrete Filter	 Discrete Filter	离散滤波器
Zero-Order Hold	 Zero-Order Hold	零阶保持器
First-Order Hold	 First-Order Hold	一阶保持器
Unit Delay	 Unit Delay	采样保持，延迟一个周期

复杂系统的模拟仿真

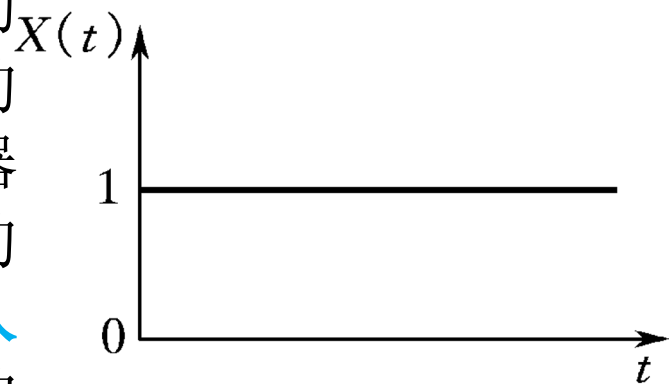


XMC4500 PMSM Example Project – Main Building Blocks



2. 传感器的动态响应特性

传感器的动态特性不仅与传感器的“固有因素”有关，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，同一个传感器在不同形式的输入信号作用下，输出量的变化是不同的，通常选用几种典型的输入信号作为标准输入信号，来研究传感器的响应特性。



瞬态响应特性

传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时，有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析，这种分析方法称为时域分析法。传感器在进行时域分析时，用得比较多的标准输入信号有阶跃信号和脉冲信号，传感器的输出瞬态响应分别称为阶跃响应和脉冲响应。

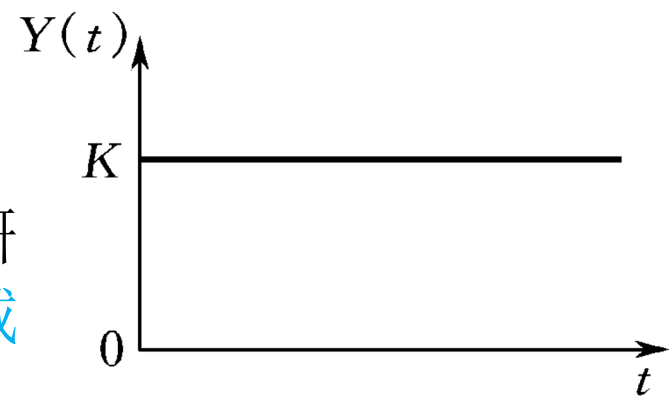


图1-15 零阶传感器的单位阶跃响应, 其阶跃响应与输入成正比

2. 传感器的动态响应特性

(1) 一阶传感器的单位阶跃响应

一阶传感器的微分方程为：
$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$$

设传感器的静态灵敏度 $k=1$ ，写出它的传递函数为

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

对初始状态为零的传感器，若输入一个单位阶跃信号，即

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

输入信号 $x(t)$ 的拉氏变换为 $X(s) = \frac{1}{s}$

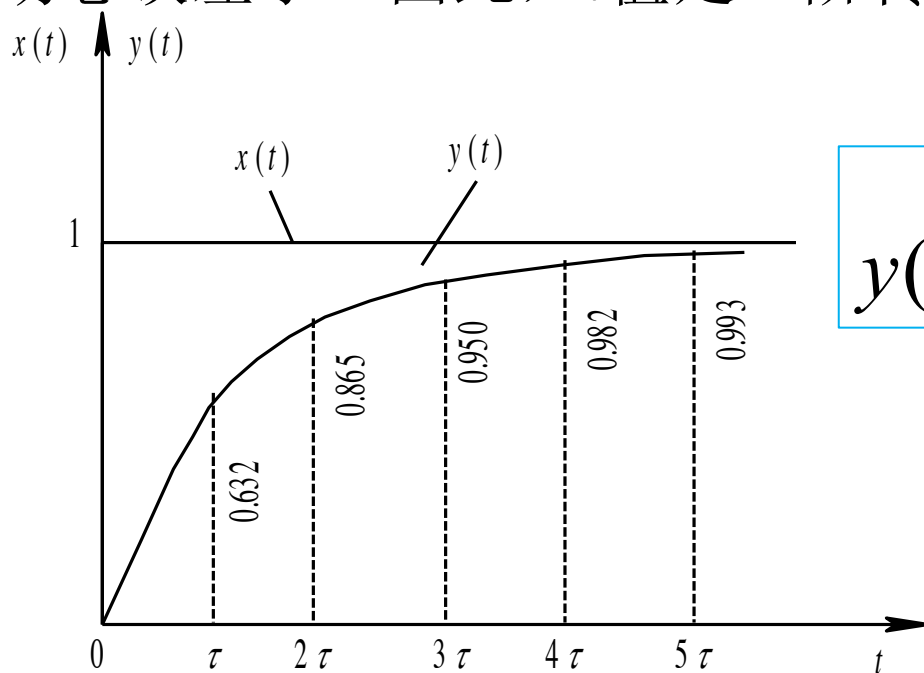
一阶传感器的单位阶跃响应拉氏变换式为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (2-13)$$

对式(2-13)进行拉氏反变换，可得一阶传感器的单位阶跃响应信号为

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

相应的响应曲线如图所示。由图可见，传感器存在惯性，它的输出不能立即复现输入信号，而是从零开始，按指数规律上升，最终达到稳态值。理论上传感器的响应只在 t 趋于无穷大时才达到稳态值，但通常认为 $t = (3 \sim 4) \tau$ 时，如当 $t = 4\tau$ 时其输出就可达到稳态值的98.2%，可以认为已达到稳态。所以，一阶传感器的时间常数 τ 越小，响应越快，响应曲线越接近于输入阶跃曲线，即动态误差小。因此， τ 值是一阶传感器重要的性能参数。



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

(2) 二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的微分方程为：

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 kx(t)$$

ξ 为阻尼比系数， ω_n 为固有角频率。

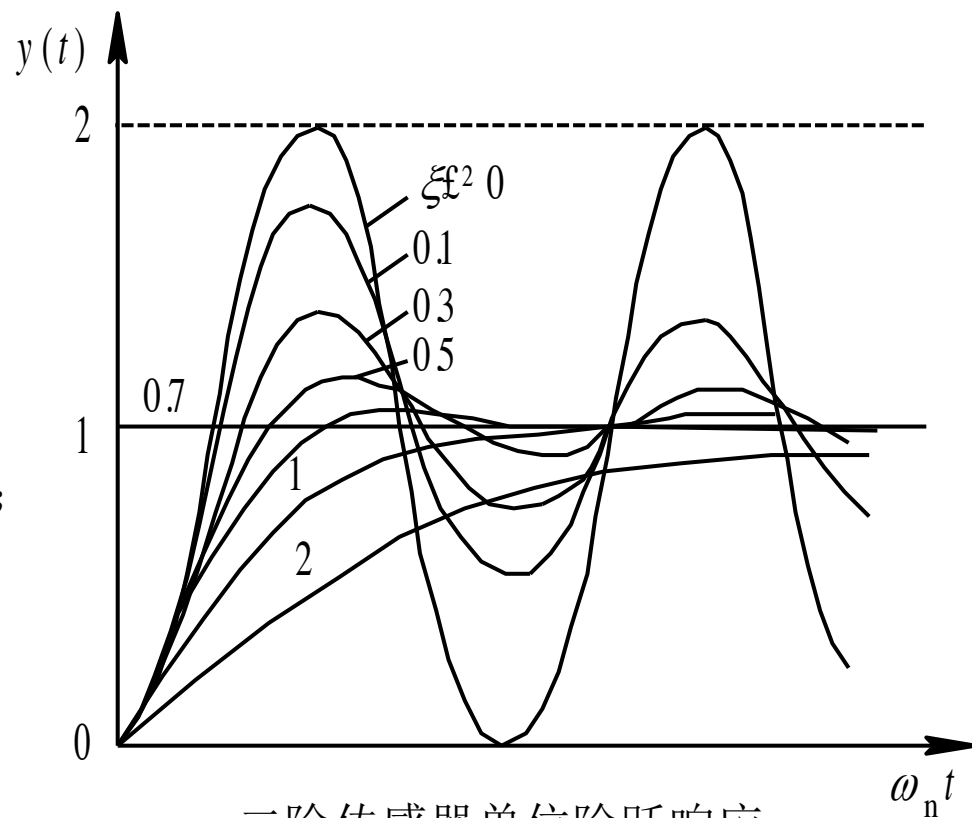
设传感器的静态灵敏度 $k=1$ ，其二阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

传感器输出的拉氏变换为

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

由 $Y(s)$ 通过拉氏反变换得到 $y(t)$ ，图为二阶传感器的单位阶跃响应曲线，二阶传感器对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有角频率 ω_n 。 $\xi=0$ 时，特征根为一对虚根，阶跃响应是一个等幅振荡过程，这种等幅振荡状态又称为无阻尼状态； $\xi>1$ 时，特征根为两个不同的负实根，阶跃响应是一个不振荡的衰减过程，这种状态又称为过阻尼状态； $\xi=1$ 时，特征根为两个相同的负实根，阶跃响应也是一个不振荡的衰减过程，但是它是一个由不振荡衰减到振荡衰减的临界过程，故又称为临界阻尼状态； $0<\xi<1$ 时，特征根为一对共轭复根，阶跃响应是一个衰减振荡过程，在这一过程中 ξ 值不同，衰减快慢也不同，这种衰减振荡状态又称为欠阻尼状态。



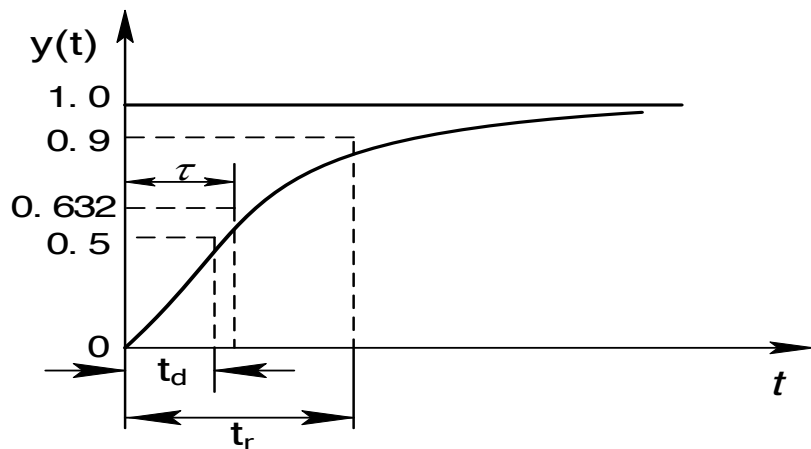
二阶传感器单位阶跃响应

阻尼比 ξ 直接影响超调量和振荡次数，为了获得满意的瞬态响应特性，实际使用中常按稍欠阻尼调整，对于二阶传感器取 $\xi=0.6\sim0.7$ 之间，则最大超调量不超过10%，趋于稳态的调整时间也最短，约为 $(3\sim4)/(\xi\omega)$ 。固有频率 ω_n 由传感器的结构参数决定，固有频率 ω_n 也是等幅振荡的频率， ω_n 越高，传感器的响应也越快。

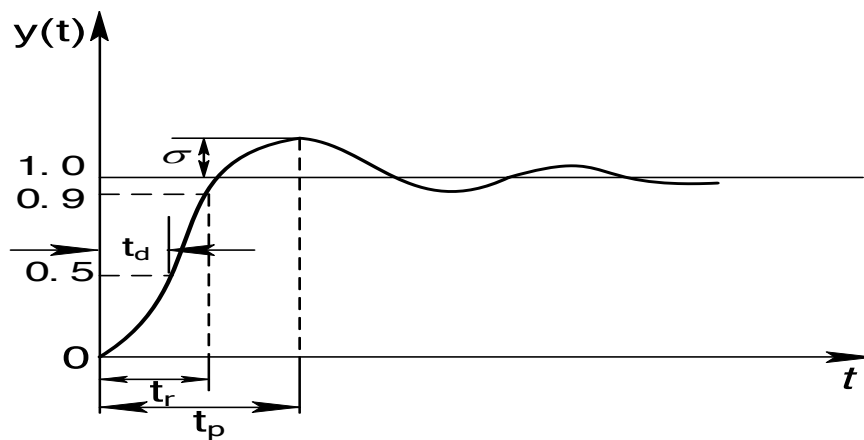
(3) 传感器的时域动态性能指标

时域动态性能指标叙述如下：

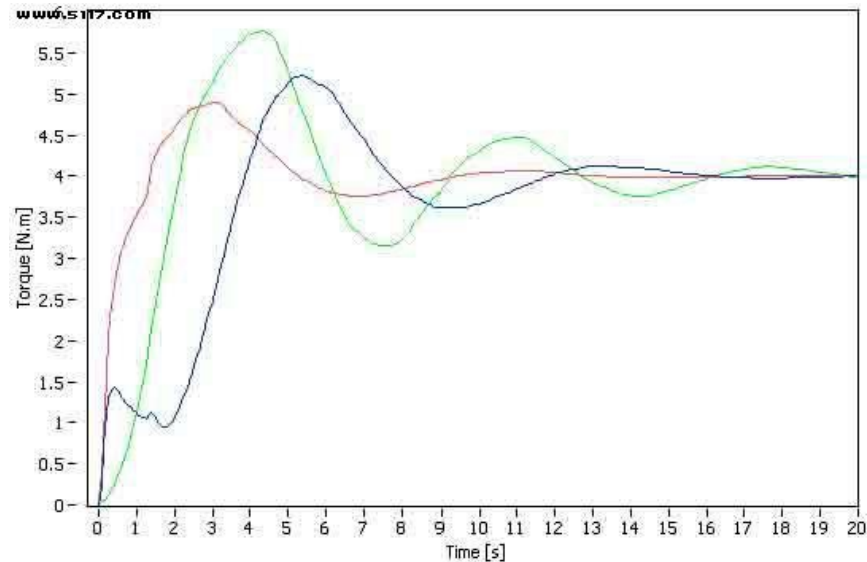
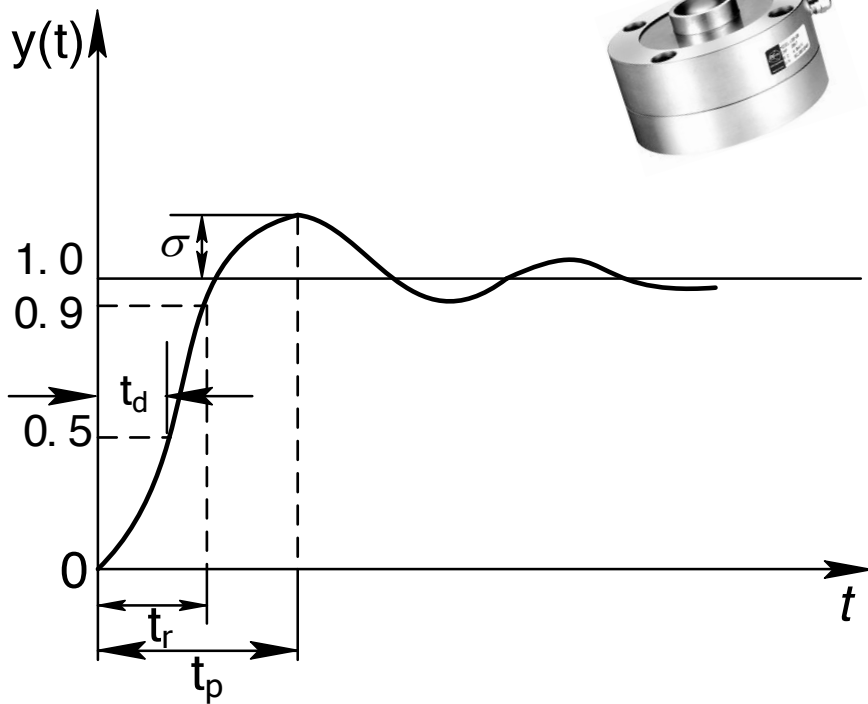
- ① 时间常数 τ ：一阶传感器输出上升到稳态值的**63.2%**所需的时间,称为时间常数。
- ② 延迟时间 t_d ：传感器输出达到稳态值的**50%**所需的时间。
- ③ 上升时间 t_r ：传感器输出达到稳态值的**90%**所需的时间。
- ④ 峰值时间 t_p ：二阶传感器输出响应曲线达到**第一个峰值**所需的时间。
- ⑤ 超调量 σ ：二阶传感器输出超过稳态值的**最大值**。
- ⑥ 衰减比 d ：衰减振荡的二阶传感器输出响应曲线第一个峰值与第二个峰值之比。



一阶传感器的时域动态性能指标



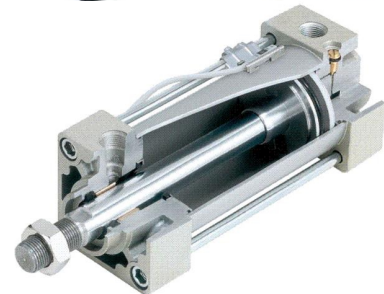
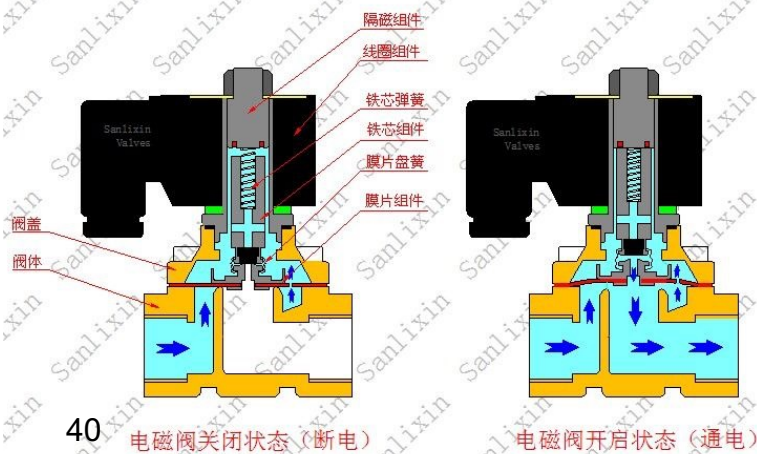
二阶传感器的时域动态性能指标



PID控制算法阶跃响应比较

二阶传感器的时域动态性能指标

ZS二位二通大口径直动式电磁阀（常闭型）



2) 频率响应特性

传感器对不同频率成分的正弦输入信号的响应特性，称为频率响应特性。一个传感器输入端有正弦信号作用时，其输出响应仍然是同频率的正弦信号，只是与输入端正弦信号的幅值和相位不同。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的输出与输入的幅值比和两者相位差的变化。

(1) 一阶传感器的频率响应

将一阶传感器传递函数公式中的 s 用 $j\omega$ 代替后，即可得如下的频率特性表达式：

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1} = \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} - j \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$$

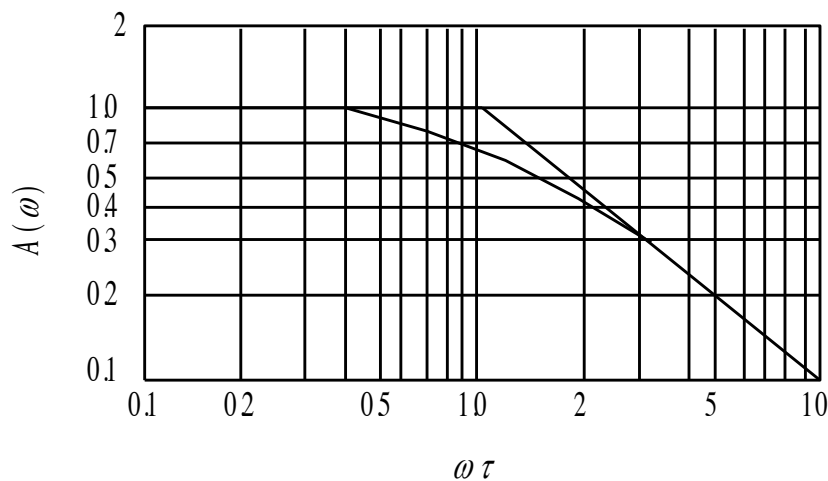
幅频特性:

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

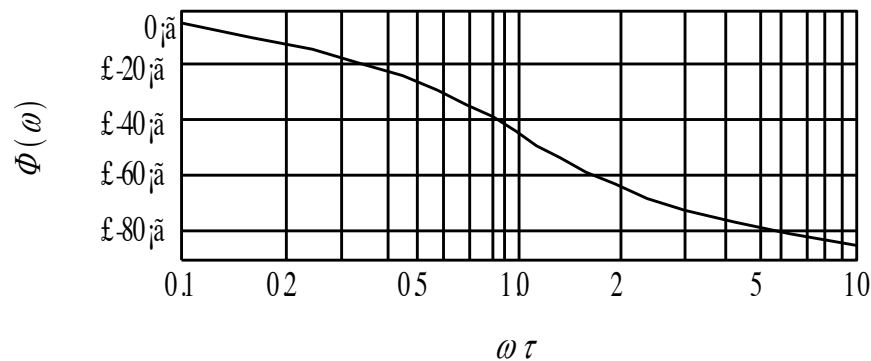
相频特性:

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

可看出，时间常数 τ 越小，频率响应特性越好。当 $\omega\tau \ll 1$ 时， $A(\omega) \approx 1$ ， $\phi(\omega) \approx 0$ ，表明传感器输出与输入成线性关系，且相位差也很小，输出 $y(t)$ 比较真实地反映了输入 $x(t)$ 的变化规律。因此减小 τ 可改善传感器的频率特性。除了用时间常数 τ 表示一阶传感器的动态特性外，在频率响应中也用截止频率来描述传感器的动态特性。所谓截止频率，是指幅值比下降到零频率幅值比的 $1/\sqrt{2}$ 倍时所对应的频率，截止频率反映传感器的响应速度，截止频率越高，传感器的响应越快。对一阶传感器，其截止频率为 $1/\tau$ 。图2-12为一阶传感器的频率响应特性曲线。



(a)



(b)

一阶传感器频率响应特性
(a) 幅频特性； (b) 相频特性

(2) 二阶传感器的频率响应

由二阶传感器的传递函数公式可写出二阶传感器的频率特性表达式，即

$$H(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\xi\omega_n(j\omega) + \omega_n^2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}$$

其幅频特性、相频特性分别为

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

$$\Phi(\omega) = \angle H(j\omega) = -\arctan \frac{2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

相位角负值表示相位滞后

可画出二阶传感器的幅频特性曲线和相频特性曲线，如图所示。

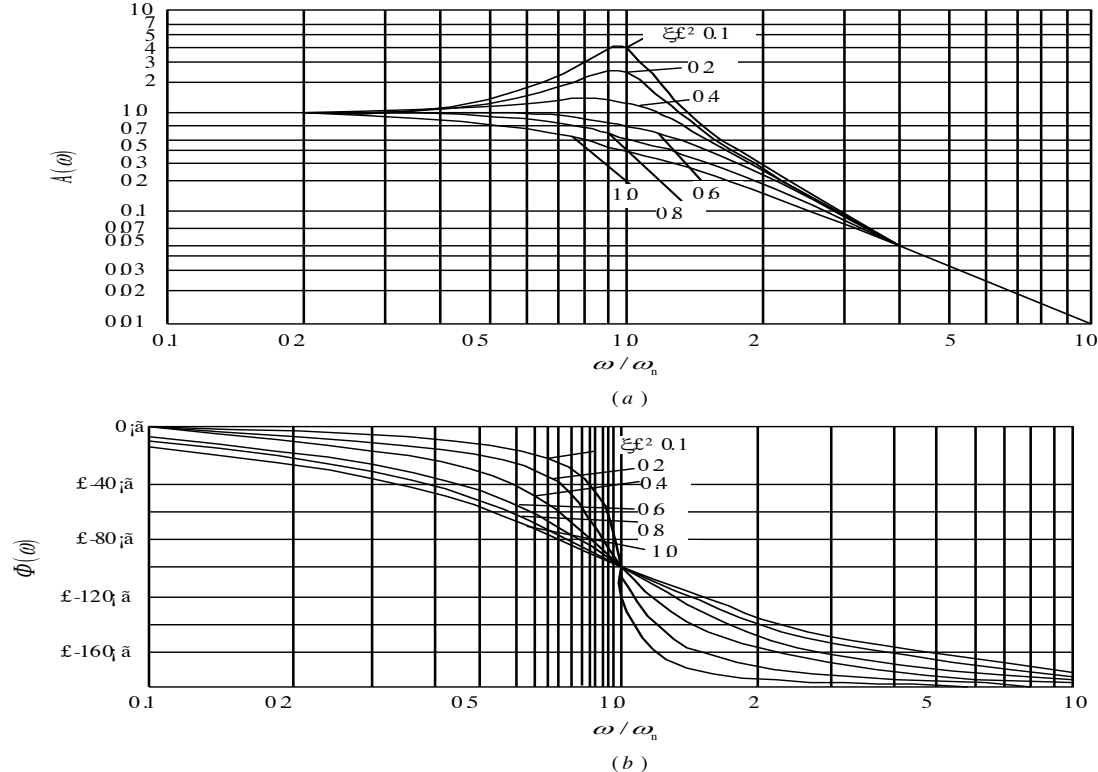
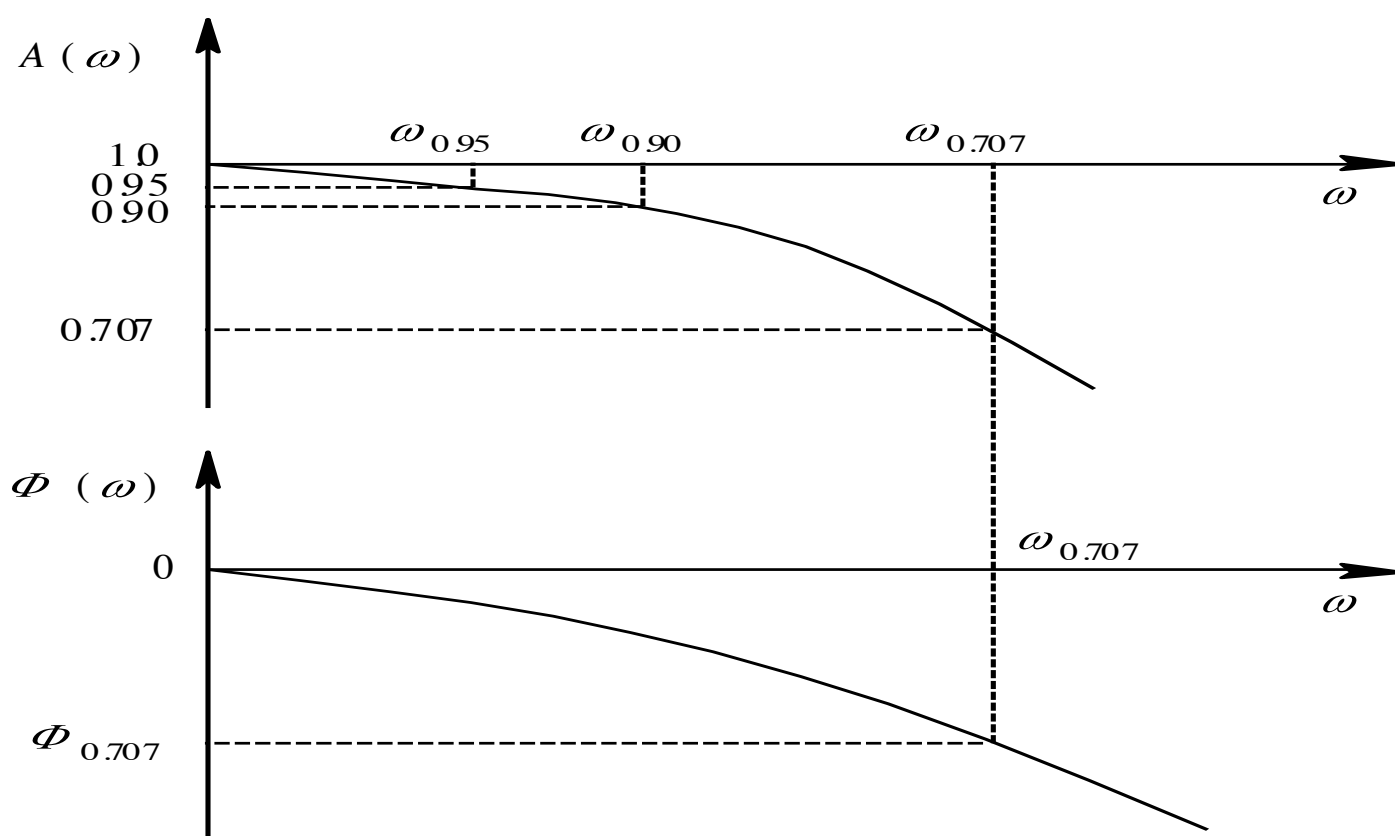


图2-13 二阶传感器频率响应特性曲线
(a) 幅频特性； (b) 相频特性

可见，传感器的频率响应特性好坏主要取决于传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。当 $\xi < 1$ ， $\omega_n \gg \omega$ 时， $A(\omega) \approx 1$ ， $\phi(\omega)$ 很小，此时，传感器的输出 $y(t)$ 再现了输入 $x(t)$ 的波形，通常固有频率 ω_n 至少应为被测信号频率 ω 的（3~5）倍，即 $\omega_n \geq (3 \sim 5) \omega$ 。

为了减小动态误差和扩大频率响应范围，一般是提高传感器固有频率 ω_n ，而固有频率 ω_n 与传感器运动部件质量 m 和弹性敏感元件的刚度 k 有关，即 $\omega_n = (k/m)^{1/2}$ 。增大刚度 k 和减小质量 m 都可提高固有频率，但刚度 k 增加，会使传感器灵敏度降低。所以在实际中，应综合各种因素来确定传感器的各个特征参数。

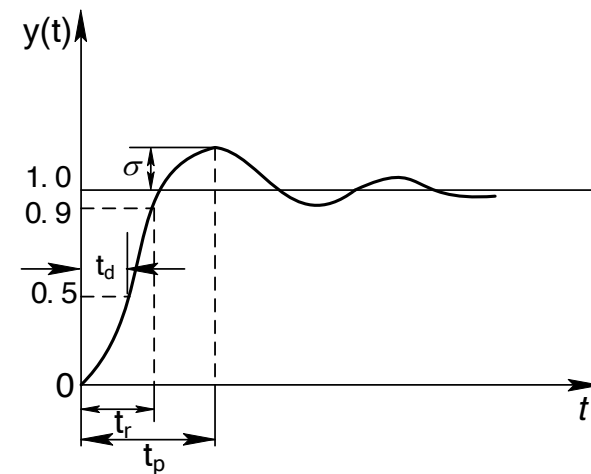
图2-14 传感器的频域动态性能指标



(3) 频率响应特性指标叙述如下：

- ① **通频带** $\omega_{0.707}$ ：传感器在对数幅频特性曲线上幅值衰减3dB（分贝）时所对应的频率范围。
- ② **工作频带** $\omega_{0.95}$ （或 $\omega_{0.90}$ ）：当传感器的幅值误差为±5%（或±10%）时，其增益保持在一定值内的频率范围。
- ③ **时间常数** τ ：用时间常数 τ 来表征一阶传感器的动态特性。 τ 越小，频带越宽。
- ④ **固有频率** ω_n ：二阶传感器的固有频率 ω_n 表征其动态特性。
- ⑤ **相位误差**：在工作频带范围内，传感器的实际输出与所希望的无失真输出间的相位差值，即为相位误差。
- ⑥ **跟随角** $\Phi_{0.707}$ ：当 $\omega=\omega_{0.707}$ 时，对应于相频特性上的相角，即为跟随角。

3. 传感器的基本特性的讨论意义



二阶传感器的时域动态性能指标

(1) 静态特性

掌握传感器的基本测量精度。

(2) 动态特性

① 频率响应特性(了解传感器的幅频特性和相频特性目的)

在动态量测量时使其频率处于传感器的通带之内，且输出信号的相移尽可能的小；

设计传感器时，即要保证传感器的通带（与 ω_n 有关），又要控制阻尼即可能达到临界阻尼。

② 阶跃响应特性

传感器的阶跃响应时间，对数据的采集十分重要(防止采错)，设计传感器时，即要减小输出的过冲，又要尽量减小阶跃响应时间。

1.4 传感器的选用原则

一、与测量条件有关的因素

- (1) 测量的目的；
- (2) 被测试量的选择；
- (3) 测量范围；
- (4) 输入信号的幅值，频带宽度；
- (5) 精度要求；
- (6) 测量所需要的时间。



二、与传感器有关的技术指标

- (1)精度；
- (2)稳定度；
- (3)响应特性；
- (4)模拟量与数字量；
- (5)输出幅值；
- (6)对被测物体产生的**负载效应**；
- (7)校正周期；
- (8)超标准过大的输入信号保护。



三、与使用环境条件有关的因素

- (1) 安装现场条件及情况;
- (2) 环境条件(湿度、温度、振动等);
- (3) 信号传输距离;
- (4) 所需现场提供的功率容量。

四、与购买和维修有关的因素

- (1) 价格;
- (2) 零配件的储备;
- (3) 服务与维修制度, 保修时间;
- (4) 交货日期。



基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其他指标
<p>量程指标： 量程范围、过载能力等</p> <p>灵敏度指标： 灵敏度、分辨力、满量程输出等</p> <p>精度有关指标： 精度、误差、线性、滞后、重复性、灵敏度误差、稳定性</p> <p>动态性能指标： 固定频率、阻尼比、时间常数、频率响应范围、频率特性、临界频率、临界速度、稳定时间等</p>	<p>温度指标： 工作温度范围、温度误差、温度漂移、温度系数、热滞后等</p> <p>抗冲振指标： 允许各向抗冲振的频率、振幅及加速度、冲振所引入的误差</p> <p>其他环境参数： 抗潮湿、抗介质腐蚀等能力、抗电磁场干扰能力等</p>	<p>工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压及抗飞弧等</p>	<p>使用有关指标： 供电方式（直流、交流、频率及波形等）、功率、各项分布参数值、电压范围与稳定度等</p> <p>外形尺寸、重量、壳体材质、结构特点等</p> <p>安装方式、馈线电缆等</p>