



# 传感器原理与工程应用

**Principle & Application of Sensors**

主讲：戴蓉

电话：13343589839

传感器课程学习群QQ：301931174

本课程为省级精品课，欢迎同学们登陆课程网站获取  
学习资料、讨论学习问题！

<http://wlxt.whut.edu.cn/new/cgqyl/course/index.asp>



“传感器原理及应用”是仪器仪表、机电工程、自动化等相关专业的一门学科基础课程。课程系统地介绍了几何量、机械量、热工量等非电物理量检测中常用传感器的工作原理、组成结构、特性参数、设计和选用的基本知识，以及各类传感器的典型工程应用实例。

通过本课程的学习，学生应掌握各种传感器的工作原理、基本特性、测量电路、误差补偿、工程应用等基础知识，了解传感器的发展动态，培养学生进行工程测试所需要的基本技能，具备合理选用传感器、配置测试系统和从事基本工程实验的能力。



全国高等院校仪器仪表及  
自动化类“十二五”规划教材

传感器原理与工程应用

电子工业出版社



全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

# 传感器原理 与工程应用

◎ 戴 蓉 刘波峰 主编



每章均以“引例”开篇，并配以相应的实物照片

正文设置“特别提示”“例题”“应用示例”“引例分析”

结合工程应用，提高读者的实践应用能力和创新思维能力



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



# 本章内容

- 1.1 传感器在自动测量中的作用
- 1.2 传感器的定义与组成
- 1.3 传感器的分类
- 1.4 传感器的发展趋势
- 1.5 传感器的静态特性
- 1.6 传感器的动态特性
- 1.7 传感器的技术性能指标及选用原则
- 1.8 改善传感器性能的技术途径





# 什么是传感器?





# 电容传感器——电容触摸屏图例



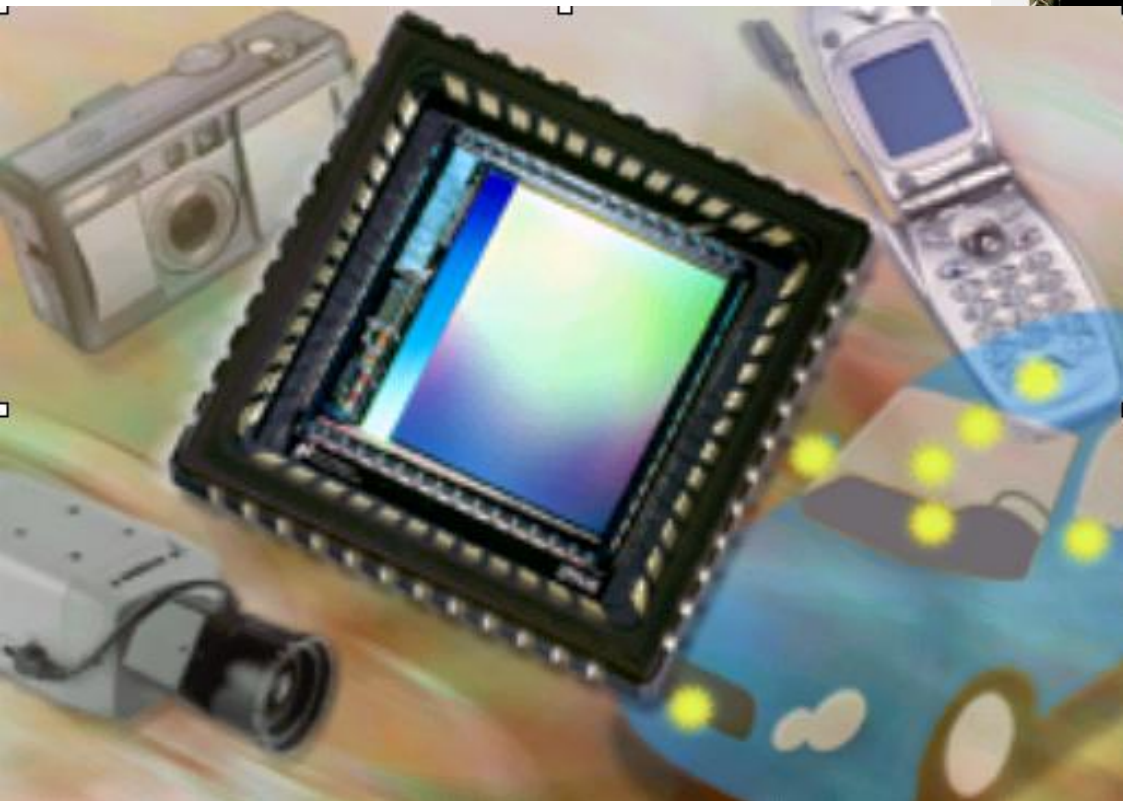
IMP3.NET







## CCD图像传感器用于 图像记录

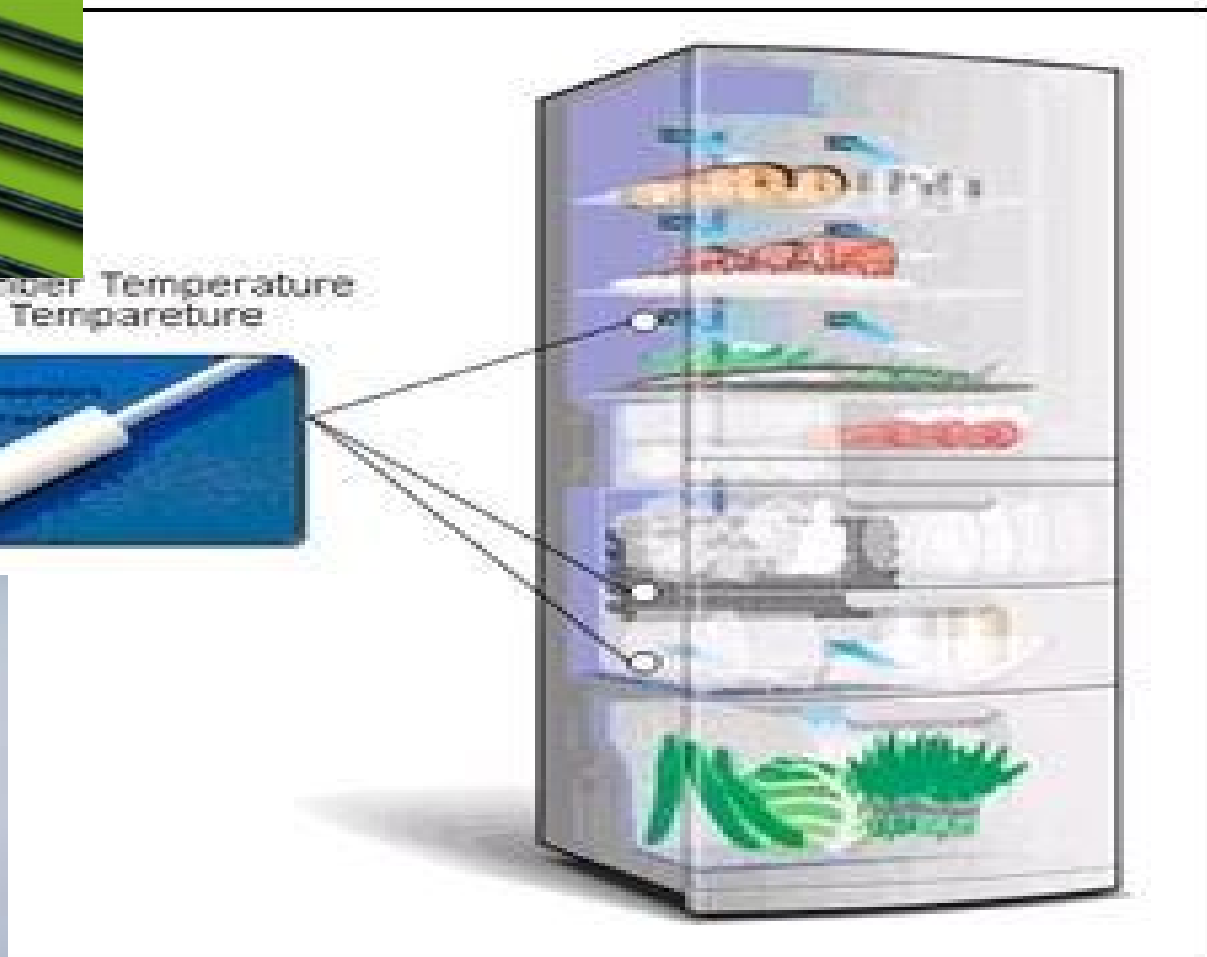




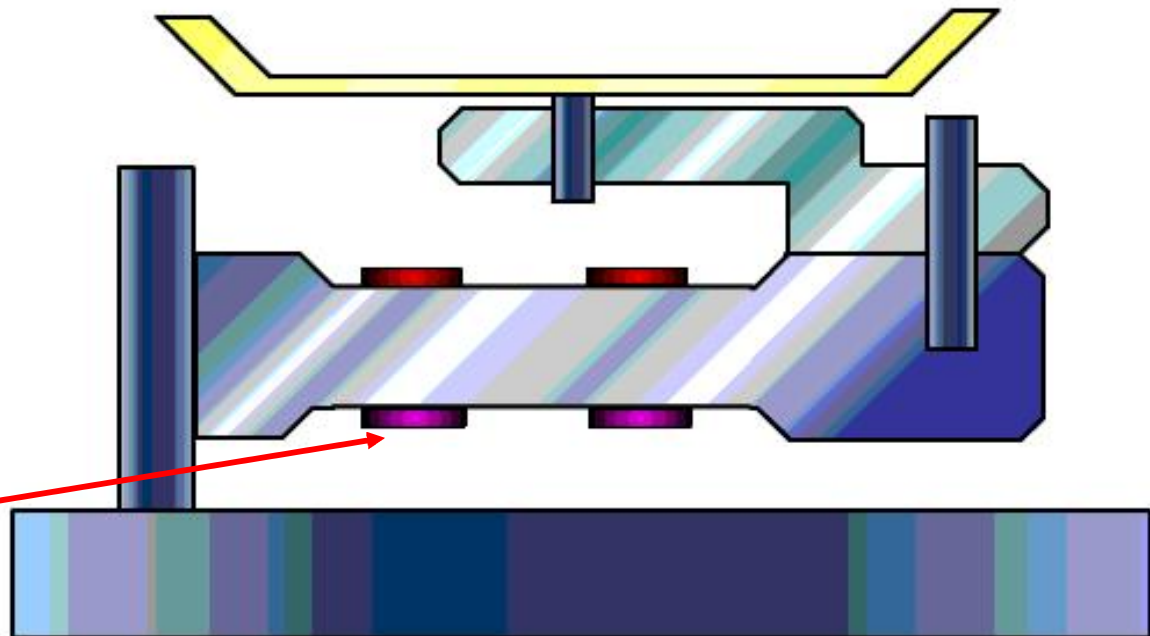
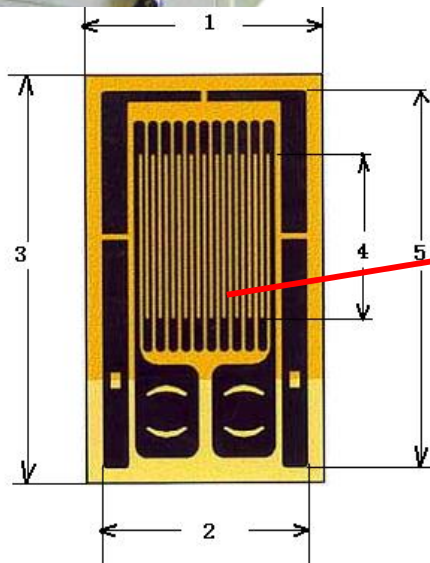
## 度传感器



In-Chamber Temperature  
Defrost Temperature



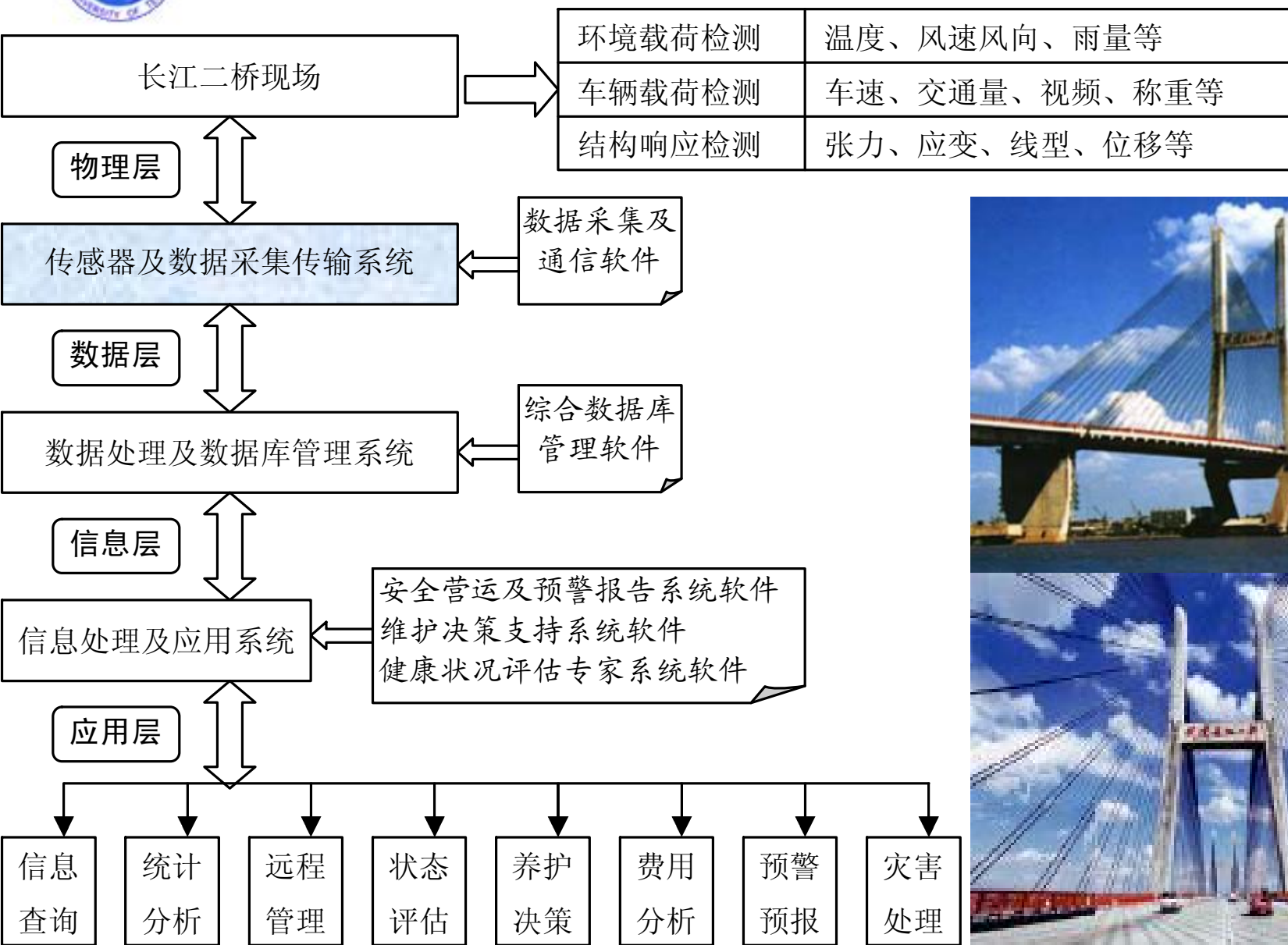






## 汽车中的传感器









## 安装有直线光栅的数控机床加工实况

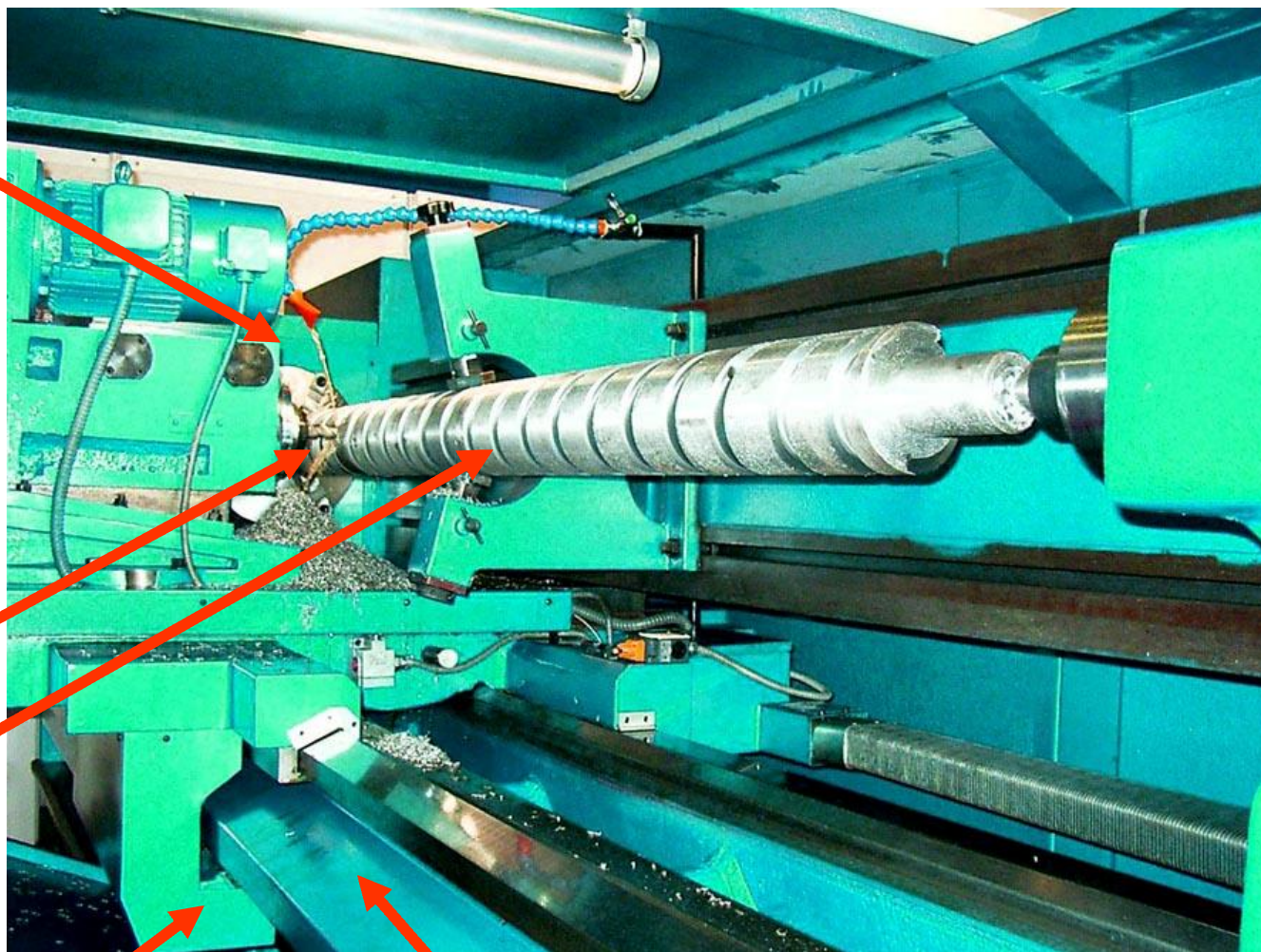
角编码器安  
装在夹具的  
端部

切削刀具

被加工工件

光栅扫描头

防护罩内为直线光栅

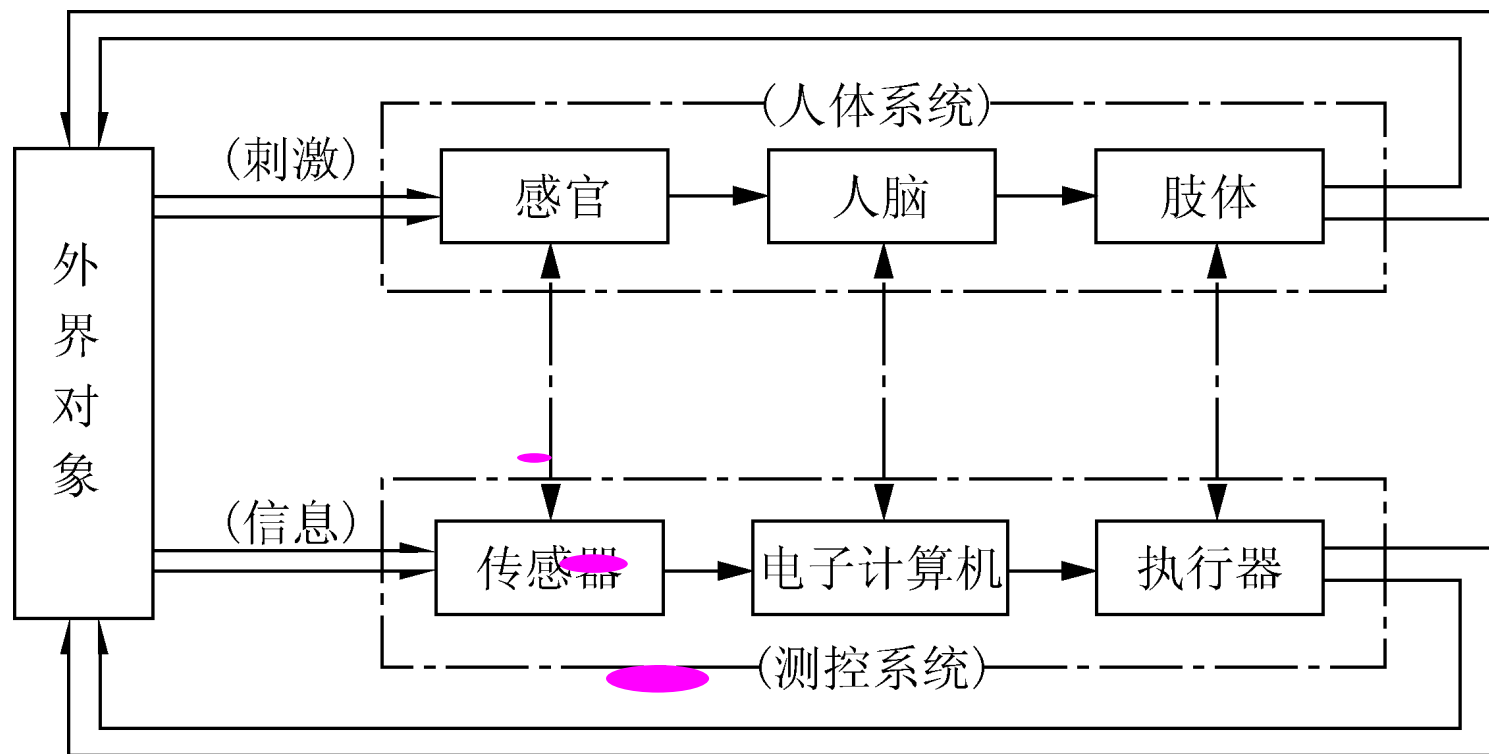




# 为什么需要传感器?

## 1.1 传感器在自动测量中的作用

人体与自动化测控系统的对应关系



“电五官”



## 1.2 传感器的定义与组成

### 1.2.1 传感器的定义

定义：传感器 (*Transducer/Sensor*) 是能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。（国标GB7665—2005）

传感器定义有下述含义：

（1）传感器是测量装置，能完成检测任务；

（2）传感器的输入量是某一被测量，可以是物理量、化学量……





## 工业检测中涉及的物理量分类

### ❖ 热工量:

- ❖ 温度  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{K}$ 、 $^{\circ}\text{F}$ )
- ❖ 压力 (压强)  $p$  ( $\text{Pa}$ )、压差  $\Delta p$ 、真空度、流量  $q$  ( $\text{t}$ 、 $\text{m}^3$ )、流速  $v$  ( $\text{m/s}$ )、物位、液位  $h$  ( $\text{m}$ )

### ❖ 机械量:

- ❖ 直线位移  $x$  ( $\text{m}$ )、角位移  $\alpha$ 、速度、加速度  $a$  ( $\text{m/s}^2$ )、转速  $n$  ( $\text{r/min}$ )、应变  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m/m}$ )、力矩  $T$  ( $\text{Nm}$ )、振动、噪声、质量 (重量)  $m$  ( $\text{kg}$ 、 $\text{t}$ )

### ❖ 几何量:

- ❖ 长度、厚度、角度、直径、间距、形状、粗糙度、硬度、材料缺陷等



## ❖ 物体的性质和分量：

◆ 空气的湿度（绝对、相对）、气体的化学成分、浓度、液体的粘度、浊度、透明度、物体的颜色

## ❖ 状态量：

◆ 工作机械的运动状态（启停等）、生产设备的异常状态（超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等）

## ❖ 电工量：

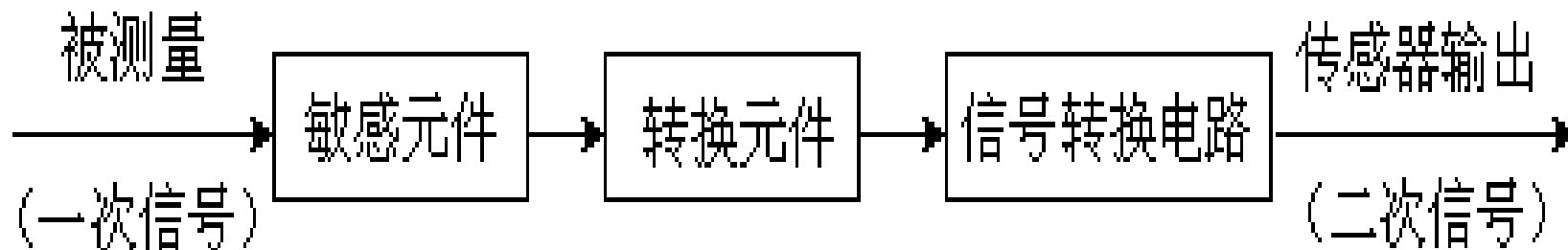
◆ 电压、电流、频率、电阻、电容、电感…… 这些量在电工、电子等课程中讲授，大多数不属于本课程的范围。



(3) 传感器的输出量是某种物理量，一般为便于传输、转换、处理、显示的电量（电压、电流、电阻、电感、、、）；

(4) 传感器的输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度；

## 1.2.2 传感器的组成







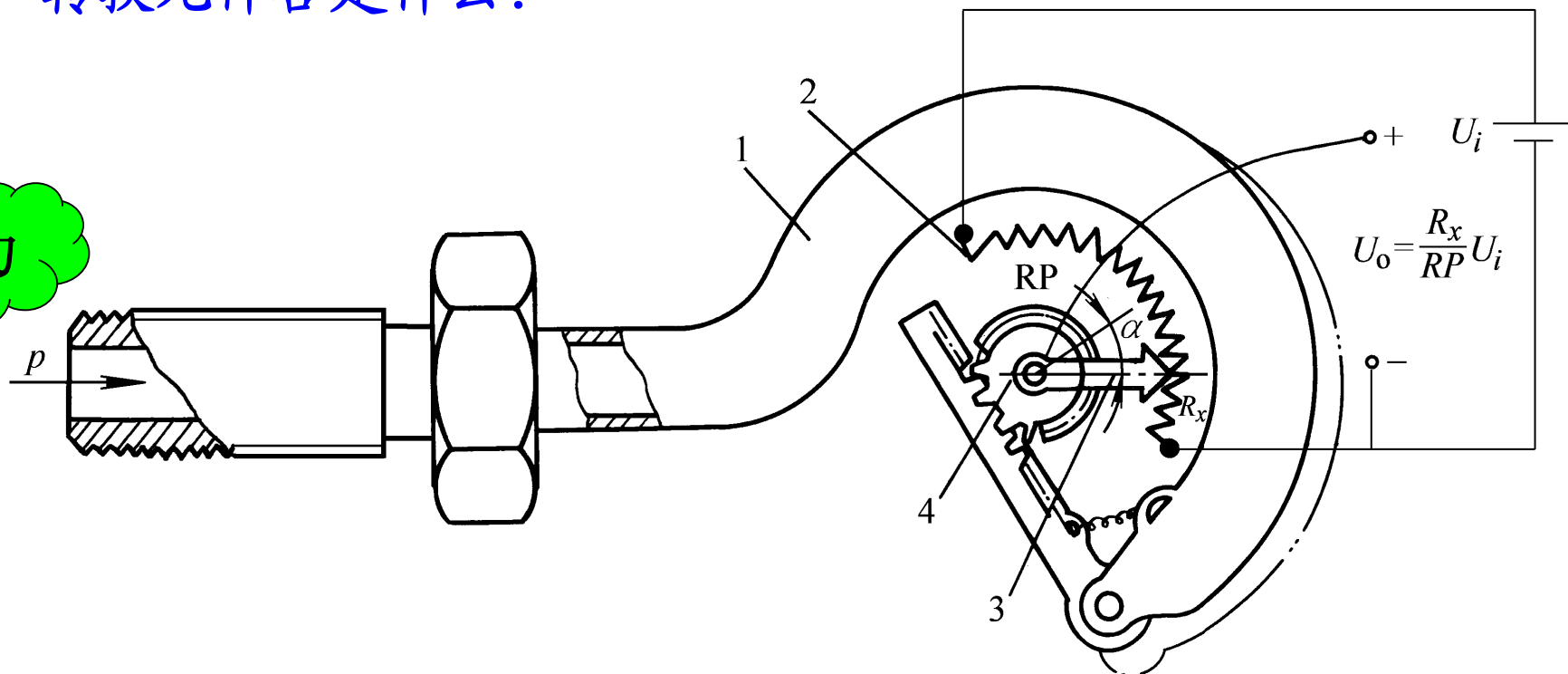
敏感元件在传感器中直接感受被测量，并转换成与被测量有确定关系、更易于转换的非电量。

转换元件：以敏感元件的输出为输入，把输入转换成电路参数，如电阻 $R$ ，电感 $L$ ，电容 $C$ 或电流、电压等。

信号转换电路：将转换元件输出的电路参数接入信号调理电路并将其转换成易于处理的电压、电流或频率量。



图示压力传感器的敏感元件、转换元件各是什么？



1-弹簧管; 2-电位器; 3-电刷; 4-齿条、齿轮副

当被测压力  $p$  增大时，弹簧管撑直，通过齿条带动齿轮转动，从而带动电位器的电刷产生角位移。



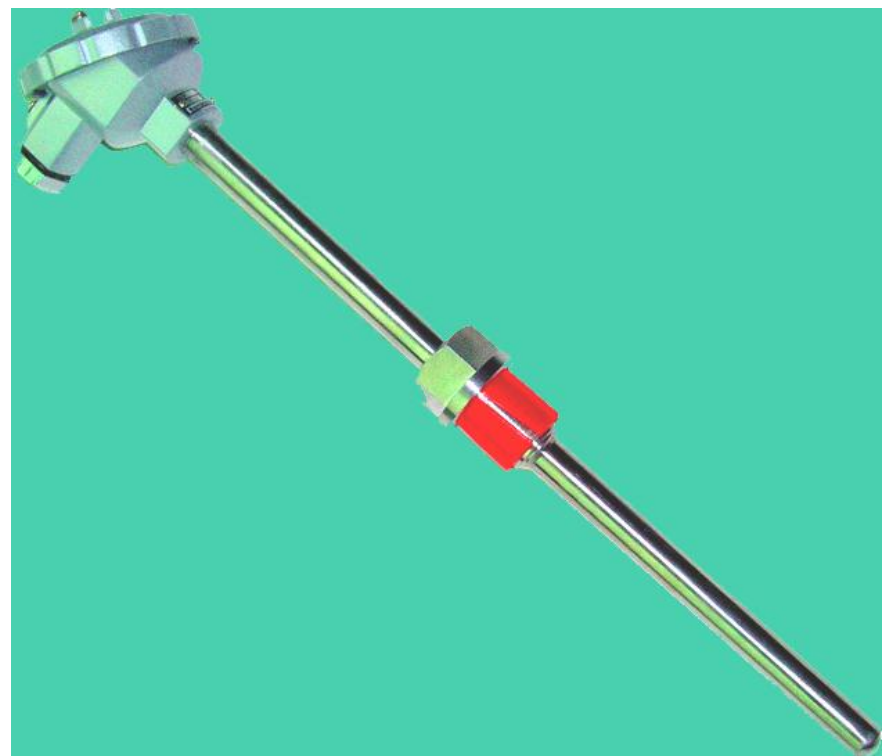
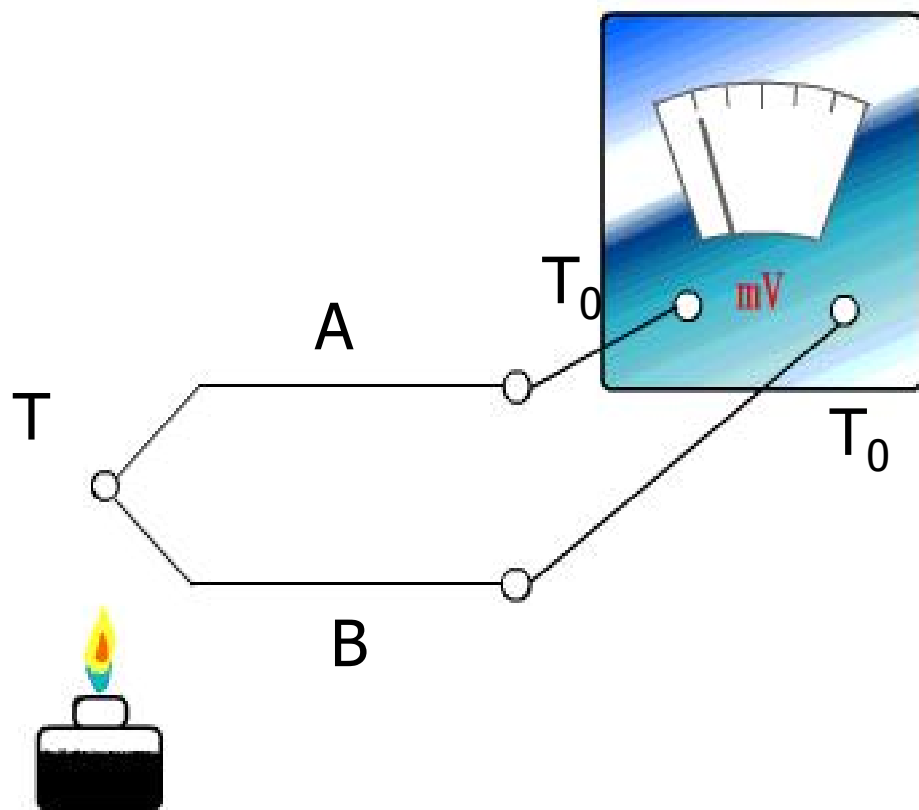
弹簧管实物图







## 能将温度转换为电压的传感器——热电偶





## 1.3 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说明
按输入量分类	位移传感器、温度传感器、压力传感器、 、 、	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式、	传感器以工作原理命名
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	传感器直接将被测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量



## 1.4 传感器技术的发展动向

### 1.4.1 新原理、新材料、新工艺的开发利用

传感器的工作机理是基于各种效应和定律，由此启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料，并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件，这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。结构型传感器发展得较早，目前日趋成熟。结构型传感器，一般说它的结构复杂，体积偏大，价格偏高。物性型传感器大致与之相反，具有不少诱人的优点，加之过去发展也不够。世界各国都在物性型传感器方面投入大量人力、物力加强研究，从而使它成为一个值得注意的发展动向。



传感器材料是传感器技术的重要基础，由于材料科学的进步，人们在制造时，可任意控制它们的成分，从而设计制造出用于各种传感器的功能材料。用复杂材料来制造性能更加良好的传感器是今后的发展方向之一。

- (1) 半导体敏感材料
- (2) 陶瓷材料
- (3) 磁性材料
- (4) 智能材料

如，半导体氧化物可以制造各种气体传感器，而陶瓷传感器工作温度远高于半导体，光导纤维的应用是传感器材料的重大突破，用它研制的传感器与传统的相比有突出的特点。有机材料作为传感器材料的研究，引起国内外学者的极大兴趣。





## 1.4.2 微型化、智能化、多功能传感器

为同时测量几种不同被测参数，可将几种不同的传感器元件复合在一起，作成集成块。例如一种温、气、湿三功能陶瓷传感器已经研制成功。

把多个功能不同的传感元件集成在一起，除可同时进行多种参数的测量外，还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价，可反映出被测系统的整体状态。

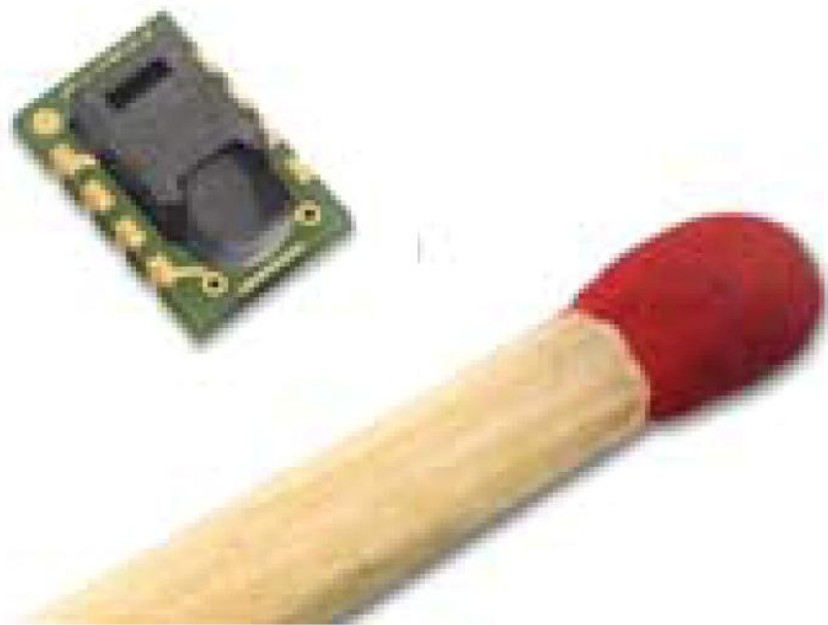
同一功能的多元件并列化，即将同一类型的单个传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来，如CCD图像传感器。

多功能一体化，即将传感器与放大、运算以及温度补偿等环节一体化，组装成一个器件。



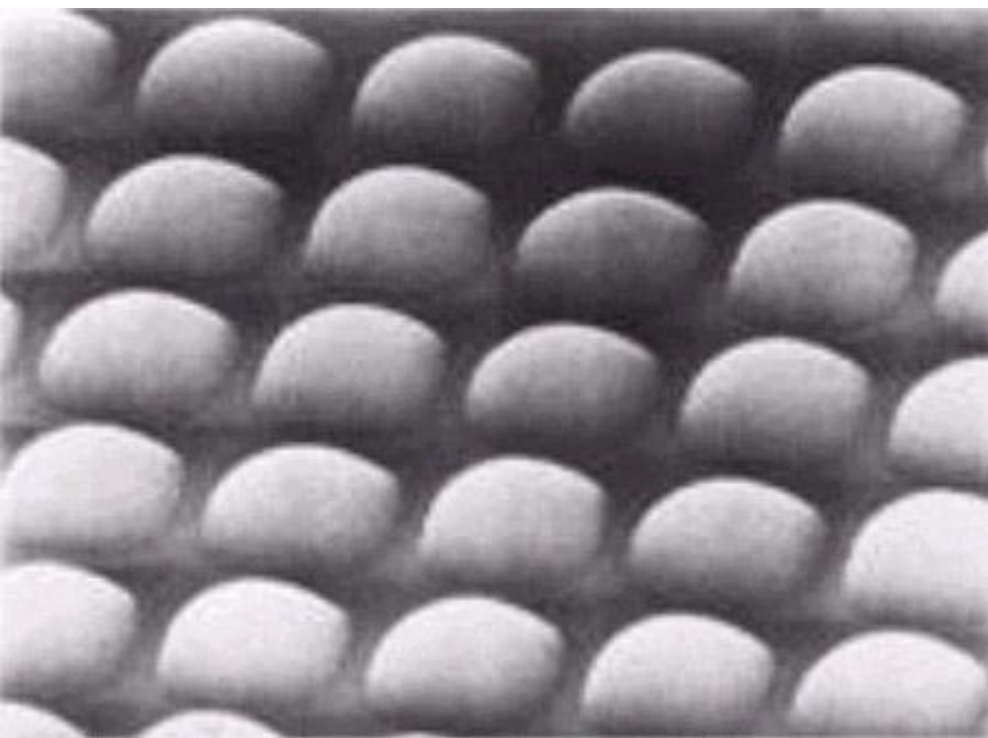
例如：瑞士Sensirion公司的SHT11/15型高精度、自校准、多功能式智能传感器。能同时测量相对湿度、温度和露点等参数；兼有数字湿度计、温度计和露点计这3种仪表的功能；可广泛用于工农业生产、环境监测、医疗仪器、通风及空调设备等领域。

SHT11/15型智能传感器的外形尺寸仅为7.62mm（长）×5.08mm（宽）×2.5mm（高），质量只有0.1g，其体积与一个大火柴头相近。

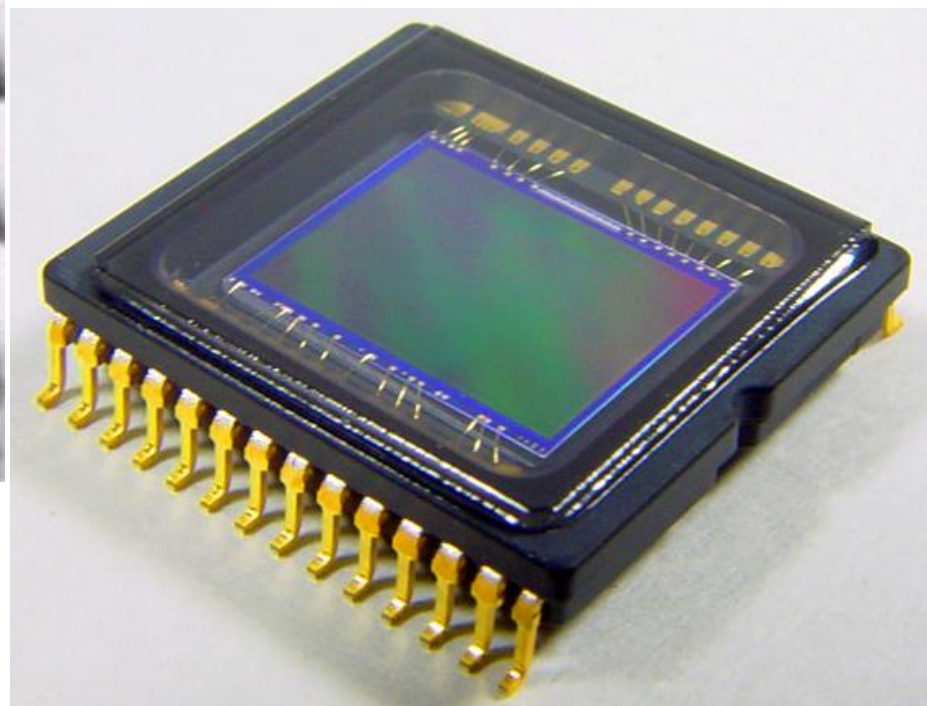




## CCD光敏元显微照片



## 面阵CCD外形





## 智能传感器 (smart sensor)

智能传感器指具有判断能力、学习能力的传感器。事实上是一种带微处理器的传感器，它具有检测、判断和信息处理功能。如美国霍尼韦尔公司制作的ST-3000型智能传感器，采用半导体工艺，在同一芯片上制作静态压力、压差、温度三种敏感元件，芯片中还包含了微处理器、存储器、A/D、D/A、转换器和数字I/O接口，能提供4~20mA标准输出和数字量输出。设计得平均故障间隔时间为470年，实际使用寿命不低于15年。

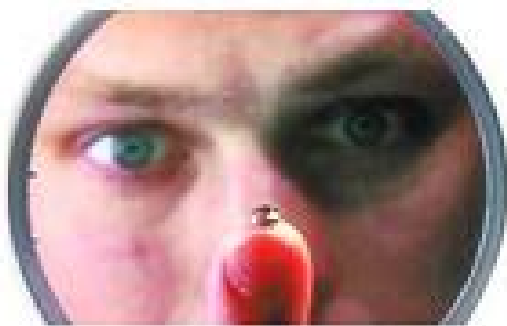




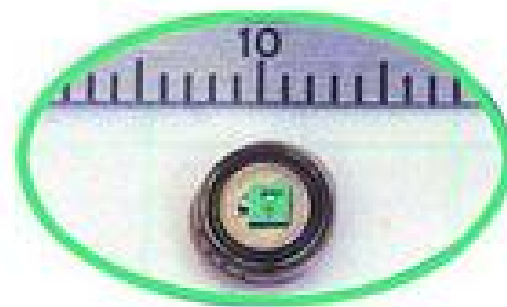


智能微尘传感器：**智能微尘**（Smart Micro Dust）是一种具有电脑功能的**超微型传感器**。从肉眼看来，它和一颗沙粒没有多大区别。但内部却包含了从信息收集、信息处理到信息发送所必需的全部部件。

目前，直径约为5mm的智能微尘已经问世，智能微尘的外形及内部结构如图所示。未来的智能微尘甚至可以悬浮在空中几个小时，搜集、处理并无线发射信息。



a)



b)

a) 肉眼所看到的智能微尘      b) 智能微尘的内部结构



## 1.4.3 无线网络化传感器

智能传感器的另一发展方向就是网络传感器。网络传感器是包含**数字传感器、网络接口和处理单元**的新一代智能传感器。

**被测模拟量→数字传感器→数字量→微处理器→测量结果→网络。**  
可实现各传感器之间、传感器与执行器之间、传感器与系统之间的数据交换及资源共享，在更换传感器时无须进行标定和校准，可做到“**即插即用**”。

例如，美国Honeywell公司开发的PPT系列、PPTR系列和PPTE系列智能精密压力传感器就属于网络传感器。

在构成网络时，能确定每个传感器的**全局地址、组地址和设备识别号（ID）**地址。用户通过网络就能获取任何一只传感器的数据并对该传感器的参数进行设置。



无线传感器网络的主要组成部分就是一个个的传感器节点。它们的体积都非常小巧。这些节点可以感受温度的高低、湿度的变化、压力的增减、噪声的升降。更让人感兴趣的是，每一个节点都是一个可以进行快速运算的微型计算机，它们将传感器收集到的信息转化成为数字信号，进行编码，然后通过节点与节点之间自行建立的无线网络发送给具有更大处理能力的服务器。

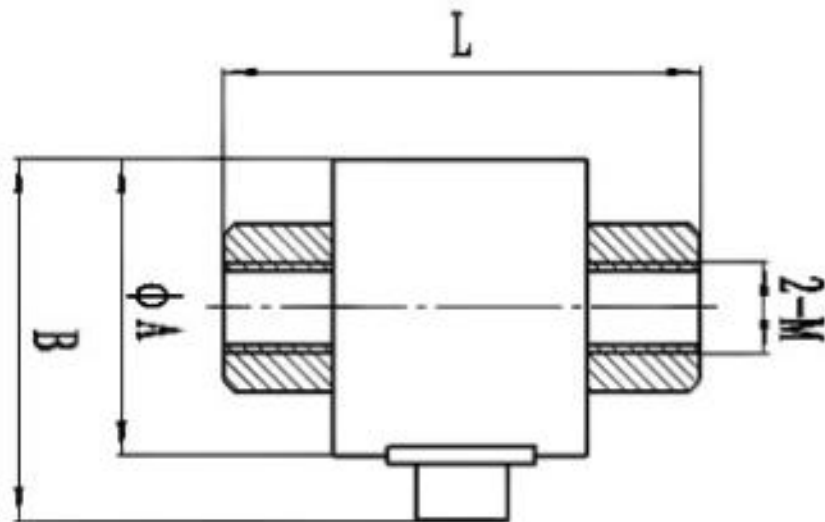


## 1.5 传感器的静态特性

传感器特性主要是指输出与输入之间的关系。

测力范围 (t)	0.2~1, 1.5~7, 10~20, 30~50,	工作温度	-10℃~55℃
桥路电阻	350 Ω	重复性误差	<1%
非线性误差	<±0.5%F.S	温度零点变化	0.04%F.S/℃
灵敏度	1~1.5mV/V	激励电压	<10V
允许过载能力	120%F.S	绝缘电阻	≥2000 M Ω
迟滞误差	<0.5%F.S		





测量范围		外形尺寸(mm)	连接螺纹(mm)
t	KN	$\Phi \times L \times B$	M
0.2~1	2~10	$\Phi 52 \times 84 \times 68$	M16×1.5
1.5~7	15~70	$\Phi 70 \times 115 \times 90$	M24×1.5
10~20	100~200	$\Phi 90 \times 160 \times 110$	M36×3
30~50	300~500	$\Phi 117 \times 210 \times 132$	M45×4.5
70~100	700~1000	$\Phi 130 \times 224 \times 145$	M56×4



## 1.5 传感器的静态特性

当输入量为常量，或变化极慢时，这一关系称为静态特性；

当输入量随时间较快地变化时，这一关系称为动态特性。

传感器输出与输入关系可用微分方程来描述。理论上，将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时，即得到静态特性。因此，传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。

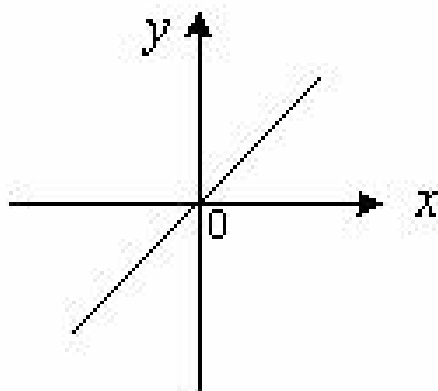


## 1.5.1 传感器的静态模型

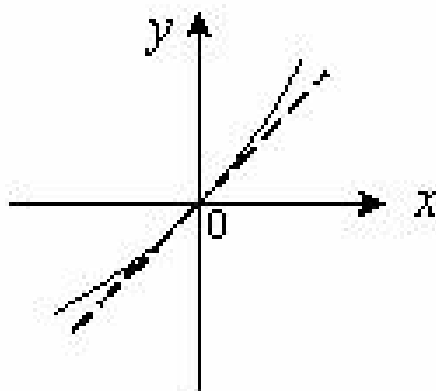
在输入量（被测量）处于稳定状态（常量，或变化极慢的量）时传感器的输入/输出关系称为静态特性。静态特性的数学描述就是传感器的静态模型。

在不考虑迟滞、蠕变和摩擦等外部因素的情况下，传感器的输出与输入静特性可用多项式代数方程来表示：

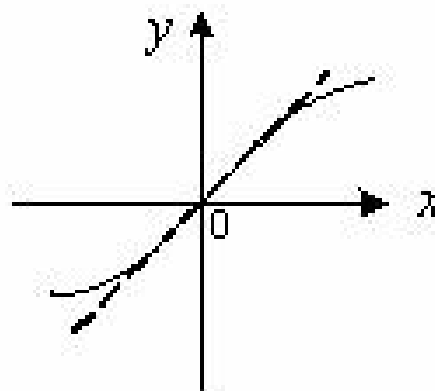
$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$$



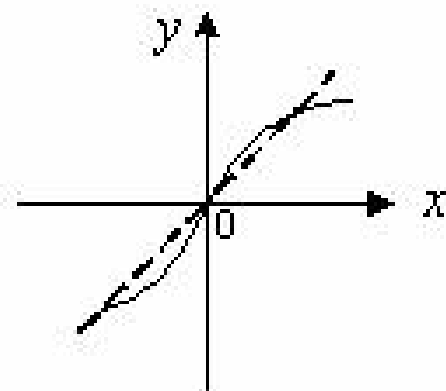
(a)理想线性



(b)只有偶次非线性项



(c)只有奇次非线性项



(d)实际特性曲线



## 1.5.1 传感器的静态模型

### (1) 线性度(*Linearity*)

指传感器输出与输入之间的线性程度。

具有线性输出—输入关系的优点：

- ❖ 可大大简化传感器的理论分析和设计计算；
- ❖ 传感器的标定、数据处理很方便；
- ❖ 仪表刻度盘可均匀刻度，制作、安装、调试容易；
- ❖ 避免了非线性补偿环节。

传感器的输出输入关系或多或少地存在非线性。





理想的线性特性:  $y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$

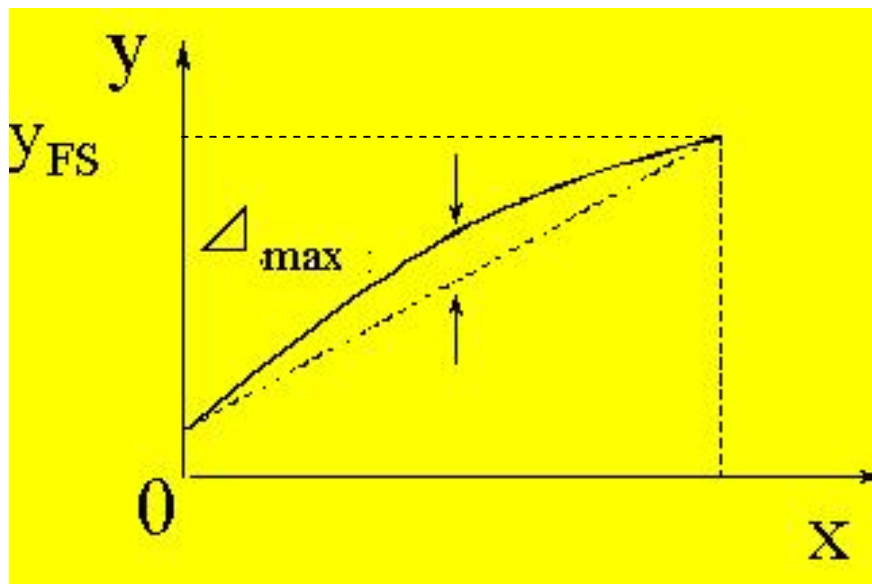
静态特性曲线可实际测试获得。在获得特性曲线之后，可以说问题已经得到解决。但是为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系。这时可采用各种方法，其中也包括硬件或软件补偿，进行线性化处理。

一般来说，这些办法都比较复杂。所以在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

在使用非线性特性的传感器时，在测量误差容许的条件下，用切线或割线等直线来近似地代表实际曲线的一段，这种方法称为传感器非线性特性的“线性化” (Linearization)



在采用直线拟合线性化时，输出输入的校正曲线与其拟合曲线之间的最大偏差，就称为非线性误差(*Linearity Error*)或线性度(*Linearity: the closeness between the calibration curve and a specified straight line.*)



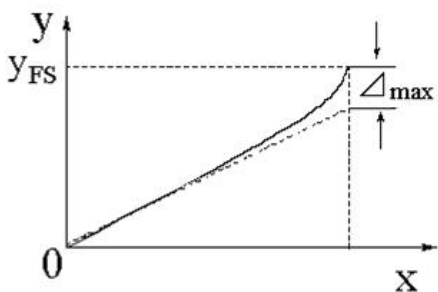
通常用相对误差 $e_L$ 表示：
$$e_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

$\Delta_{\max}$ —最大非线性误差； $y_{FS}$ —满量程输出。

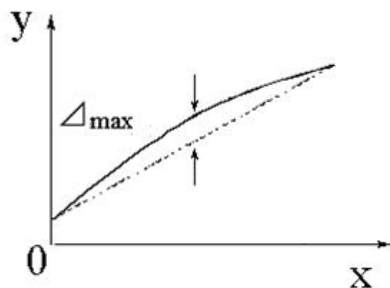


非线性偏差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同。所以，选择拟合直线的主要出发点，应是获得最小的非线性误差。另外，还应考虑使用是否方便，计算是否简便。

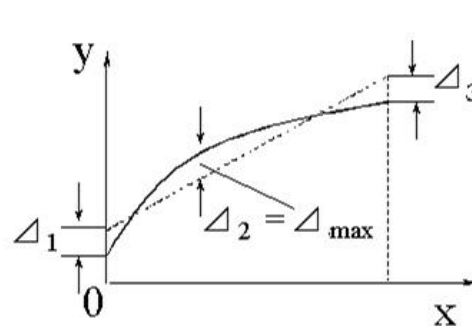
①理论拟合；②端点连线平移拟合；③端点连线拟合；④过零旋转拟合；⑤最小二乘拟合；⑥最小包容拟合



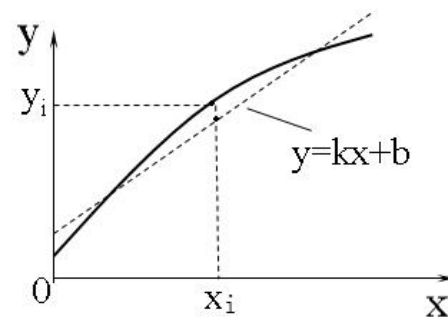
(a) 理论直线法



(b) 端点连线法



(c) 端点连线平移法



(d) 最小二乘拟合法



## 最小二乘法拟合

设拟合直线方程:

$$y=kx+b$$

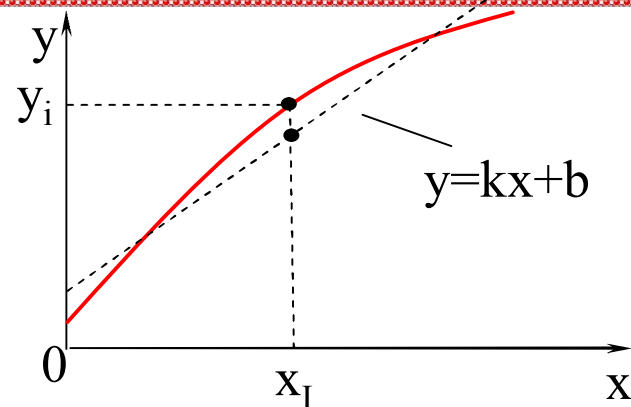
若实际校准测试点有 $n$ 个, 则第 $i$ 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

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

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 $a$ 和 $k$ 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，然后求出残差的最大值 **$L_{\max}$** 即为非线性误差。



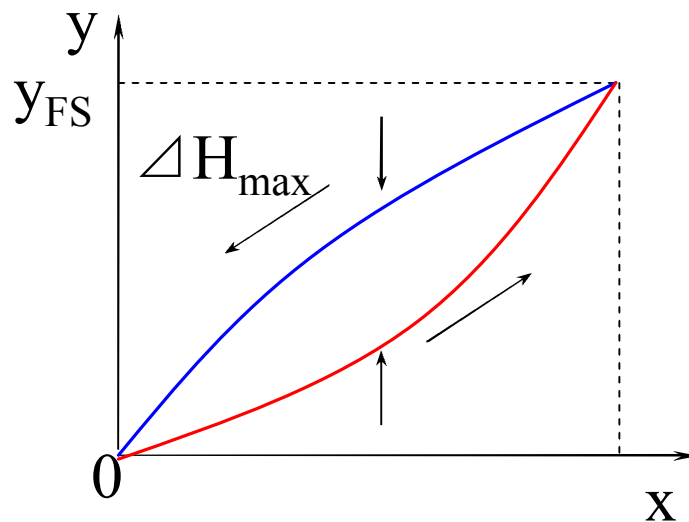
## (2) 迟滞(Hysteresis)

传感器在正(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。迟滞特性如图所示,它一般是由实验方法测得。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示,即

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FgS}} \times 100\%$$

式中  $\Delta H_{\max}$ ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时,可选择几个测试点。对应于每一输入信号,传感器正行程及反行程中输出信号差值的最大者即为回程误差。



迟滞特性



## (3) 重复性 (Repeatability)

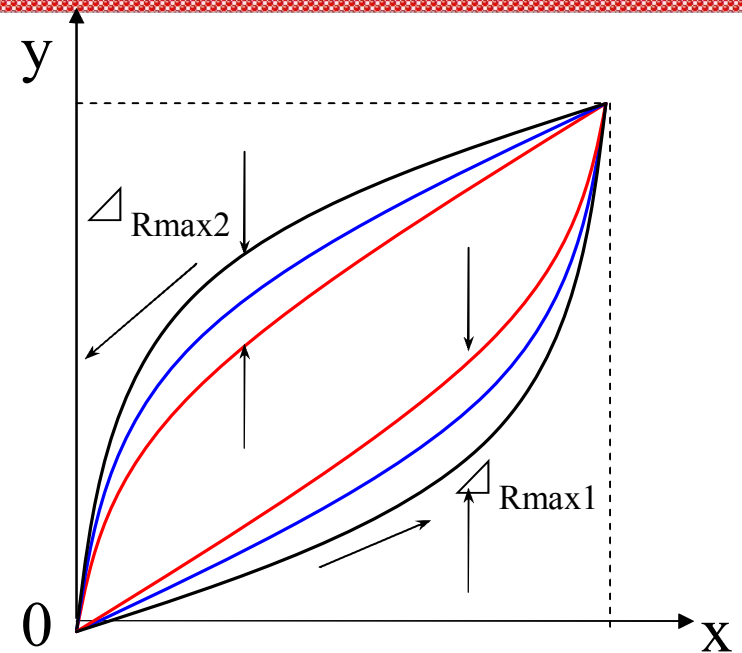
重复性是指传感器在输入按同一方向连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

重复性误差可用正反行程的最大偏差表示，即

$$e_R = \pm (\Delta_{Rmax} / y_{FS}) \times 100\%$$

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取几个测试点，对应每一点多次从同一方向趋近，获得输出值系列  $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}$ ，算出最大值与最小值之差或  $3\sigma$  作为重复性偏差  $\Delta_{Ri}$ ，在几个  $\Delta_{Ri}$  中取出最大值  $\Delta_{Rmax}$  作为重复性误差。

$$e_R = \pm ((2 \sim 3)\sigma / y_{FS}) \times 100\%$$



$\Delta_{Rmax1}$  正行程的最大重复性偏差，  
 $\Delta_{Rmax2}$  反行程的最大重复性偏差。



## (4) 灵敏度 (*Sensitivity*)

传感器输出的变化量  $y$  与引起该变化量的输入变化量  $x$  之比即为其静态灵敏度，其表达式为

$$K = \Delta y / \Delta x$$

可见，传感器输出曲线的斜率就是其灵敏度。对线性特性的传感器，其特性曲线的斜率处处相同，灵敏度  $k$  是一常数，与输入量大小无关。

由于某种原因，会引起灵敏度变化，产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示，即

$$e_s = (\Delta k / k) \times 100\%$$





## (5) 分辨力 (*Resolution*) 与 阈值 (*threshold*)

分辨力是指传感器能检测到的最小的输入增量。有些传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只作阶梯变化, 则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。

分辨力用绝对值表示, 用与满量程的百分数表示时称为分辨率。在传感器输入零点附近的分辨力称为阈值。

## (6) 漂移 (*Drift*)

漂移指在一定时间间隔内, 传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移 (时漂) 和温度漂移 (温漂)。时漂是指在规定条件下, 零点或灵敏度随时间的缓慢变化; 温漂为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

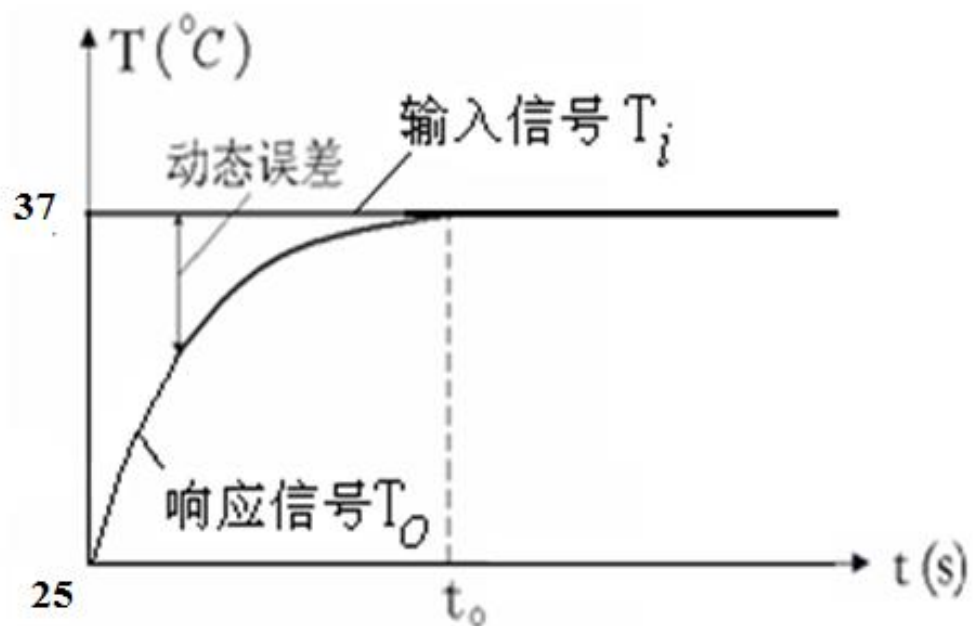


## 1.6 传感器的动态特性(Dynamic Characteristics)

对随时间变化的动态信号测量时，要求传感器能迅速准确地测出信号幅值的大小和无失真地再现被测信号随时间变化的波形。

**传感器的动态特性**指传感器对随时间变化的输入信号的响应特性。

想一想，生活中有哪些反映传感器动态特性的实例？





## 研究传感器动态特性的方法及其指标

► 时域：瞬态响应法 ( *Transient inputs* )

输入信号：阶跃函数 (*step signal*)、斜坡函数 (*ramp signal*)、脉冲函数 (*impulse signal*)

指标：时间常数、上升时间、响应时间、超调量...

► 频域：频率响应法 (*Periodic inputs*)

输入信号：正弦周期信号 (*sinusoidal signal*)

指标：频带宽度





## 1.6.1 传感器的动态数学模型

### 1. 常系数线性微分方程

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

$y$ ——输出量；  $x$ ——输入量；  $t$ ——时间。

$a_0, a_1, \dots, a_n$ ——常数；  $b_0, b_1, \dots, b_m$ ——常数

$d^n y / dt^n$  ——输出量对时间 $t$ 的 $n$ 阶导数；

$d^m x / dt^m$  ——输入量对时间 $t$ 的 $m$ 阶导数

求解上述微分方程的方法：采用传递函数、频率响应函数等足以反映系统动态特性的函数将系统的输出与输入联系起来。



## 2. 传递函数

动态特性的传递函数在线性或线性化定常系统中是指初始条件为0时，系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

当传感器的数学模型初值为0时，对其进行拉氏变换，即可得出系统的传递函数

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

$Y(s)$ ——传感器输出量的拉氏变换式；  $X(s)$ ——传感器输入量的拉氏变换式

上式分母是传感器的特征多项式，决定系统的“阶”数。可见，对一定常系统，当系统微分方程已知，只要把方程式中各阶导数用相应的 $s$ 变量替换，即求出传感器的传递函数。



### 3. 频率响应函数

正弦输入下传感器的动态特性（即频率特性），由传递函数导出

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0}$$

$H(j\omega)$ 为一复数，它可用代数形式及指数形式表示，即

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = R_e(\omega) + jI_m(\omega)$$

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[R_e(\omega)]^2 + [I_m(\omega)]^2} = \frac{Y_0(\omega)}{X_0(\omega)}$$

$$\varphi(\omega) = \angle |H(j\omega)| = \arctan \frac{I_m(\omega)}{R_e(\omega)}$$



$A(\omega)$  表达了传感器的输出、输入的幅值比随频率变化的关系，称为**幅频特性**。

$\varphi(\omega)$  表达了传感器的输出对输入的相位差随频率的变化关系，称为**相频特性**。

作为测量装置，传感器的输出、输入幅值比理想状态下应该是什么样的？输出、输入信号之间的相位关系又应该是什么样的？





## 1.6.2 传感器实现动态测试不失真的频率响应特性

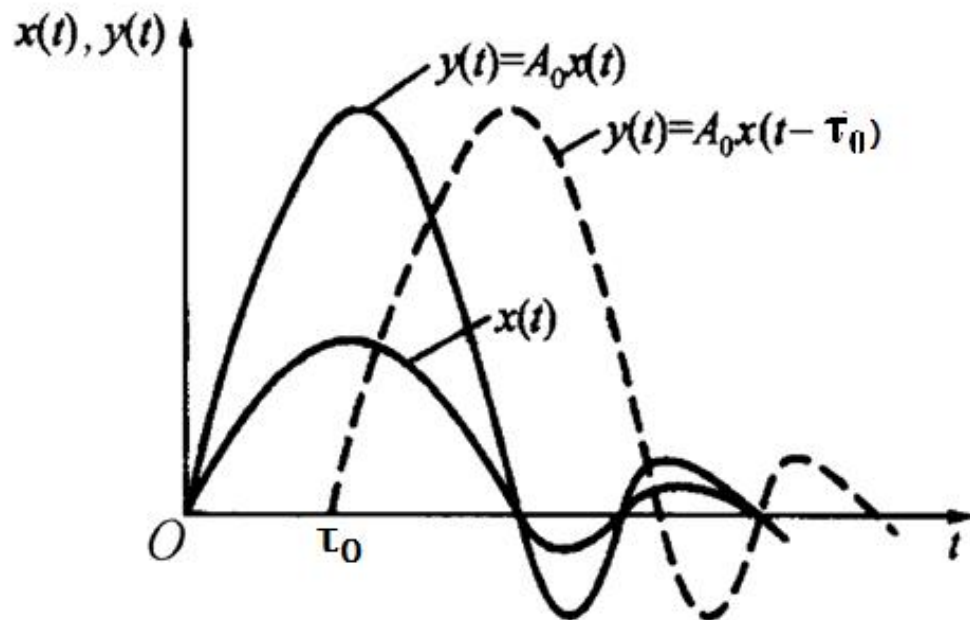
若传感器的输出 $y(t)$ 和输入 $x(t)$ 满足关系：

$$y(t) = A_0 x(t - \tau_0)$$

则说明输出波形无失真地复现输入波形。

对上式取傅立叶变换：

$$Y(j\omega) = A_0 e^{-j\tau_0\omega} X(j\omega)$$





即传感器的频率响应 $H(j\omega)$ 应满足:

$$H(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega) = A_0 e^{-j\tau_0\omega}$$

所以传感器的无失真测试条件为:

$$A(\omega) = A_0 = \text{常数}$$

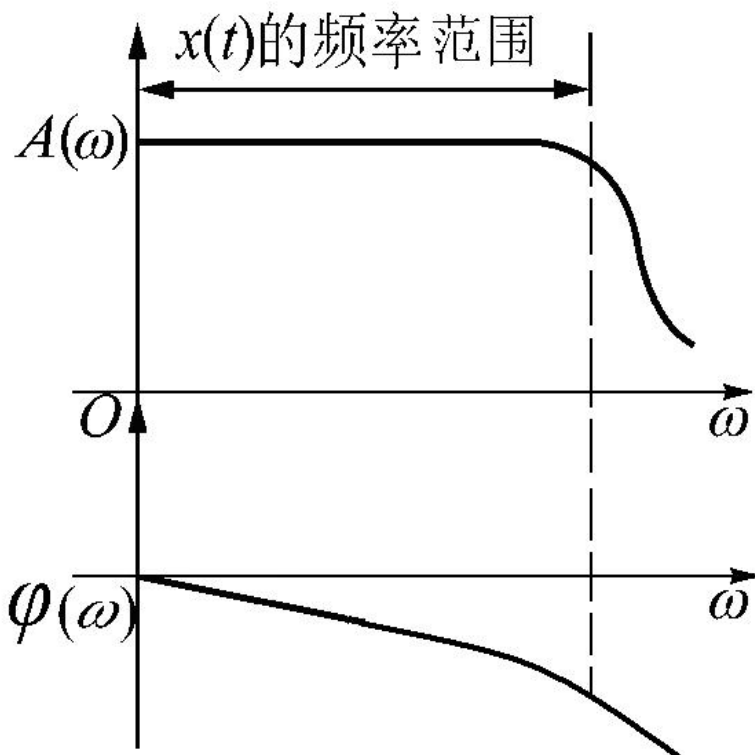
$$\Phi(\omega) = -\tau_0\omega$$

实际的传感器能不能满足无失真测试?

如果测试结果要用作反馈控制信号, 允许信号的相位滞后吗?

$$A(\omega) = A_0 = \text{常数}$$

$$\Phi(\omega) = 0$$





## 1.6.3 典型传感器动态特性分析

### 1. 零阶传感器的动态特性分析

在零阶传感器中，只有 $a_0$ 与 $b_0$ 两个系数，微分方程为

$$a_0 y = b_0 x$$

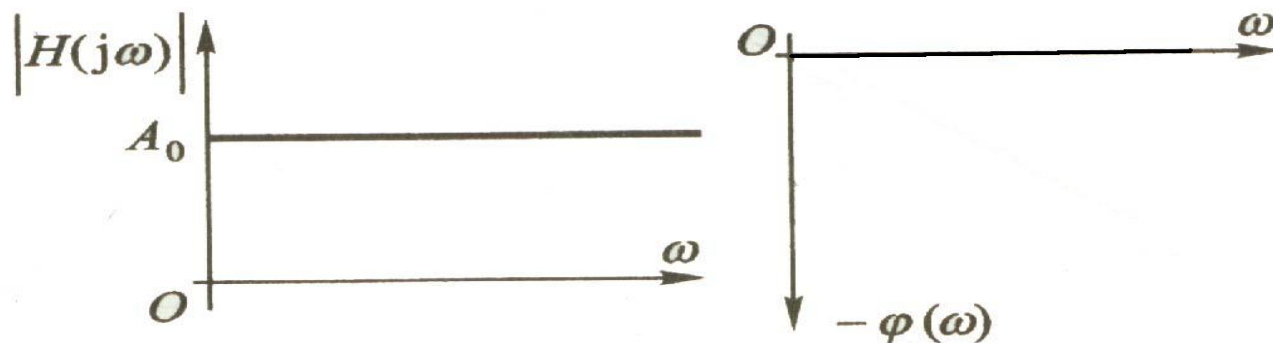
$$y = (b_0 / a_0) x = Kx$$

$K$ ——静态灵敏度

频率特性:

$$A(\omega) = k$$

$$\varphi(\omega) = 0$$



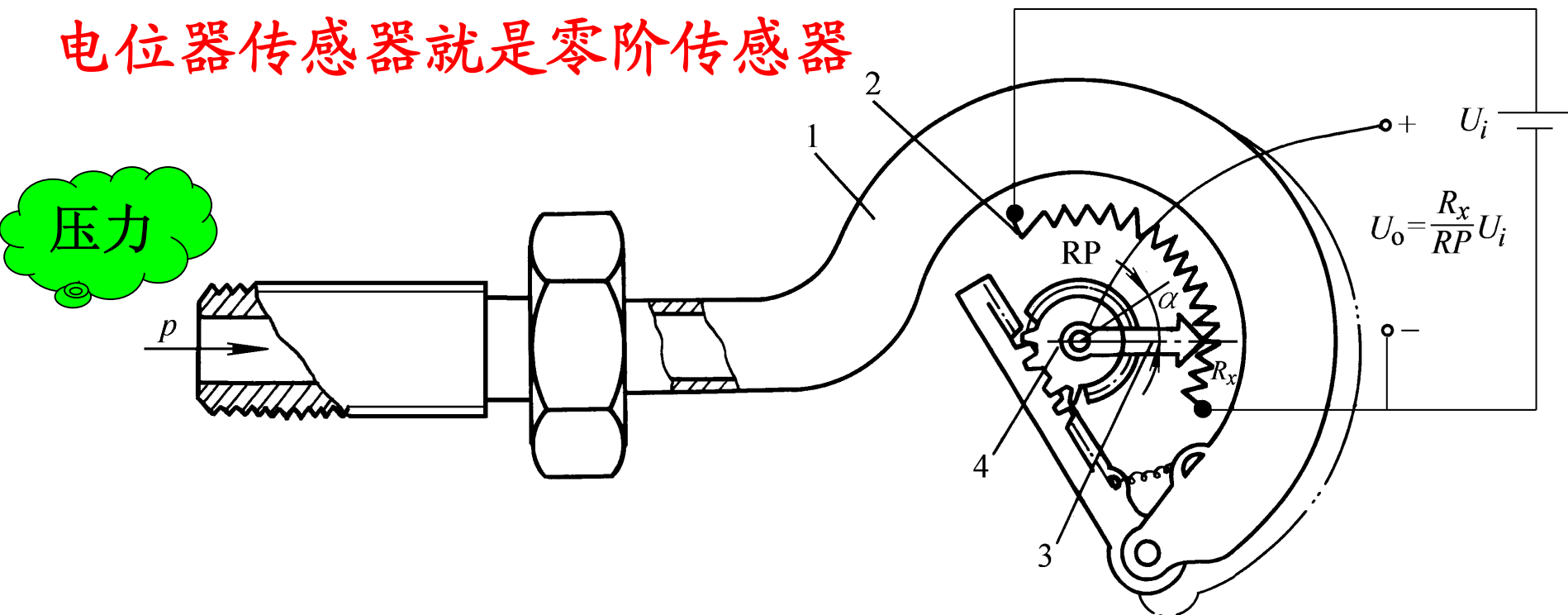
零阶(理想)系统的幅频和相频特性曲线

零阶传感器满足无失真测试条件!



## 哪些传感器是零阶传感器？

电位器传感器就是零阶传感器



1-弹簧管; 2-电位器; 3-电刷; 4-齿条、齿轮副

在实际应用中，许多高阶系统在变化缓慢、频率不高时，都可以近似地当作零阶系统处理。





## 2. 一阶传感器的动态特性分析——频率响应函数及特性分析

微分方程除系数 $a_1$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ 外其他系数均为0, 则

$$a_1(dy/dt) + a_0y = b_0x \quad \Rightarrow \quad \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0}x \quad \Rightarrow \quad \tau \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

$\tau$  —时间常数(*time constant*)(  $\tau = a_1/a_0$ );  $K$ ——静态灵敏度(*static sensitivity*)(  $K = b_0/a_0$ )

传递函数:  $H(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$

频率特性:  $H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega\tau}$

幅频特性:  $|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$

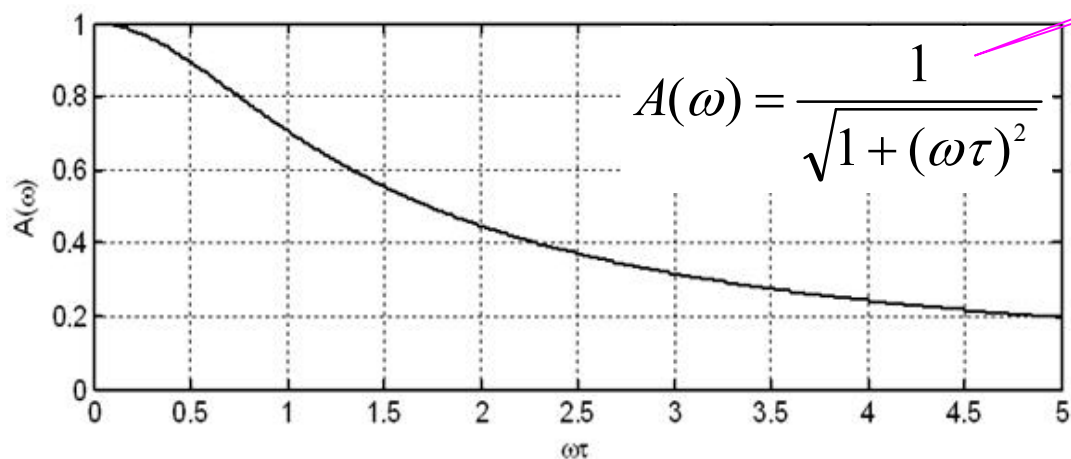
相频特性:  $\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau)$

负号是什么含义?

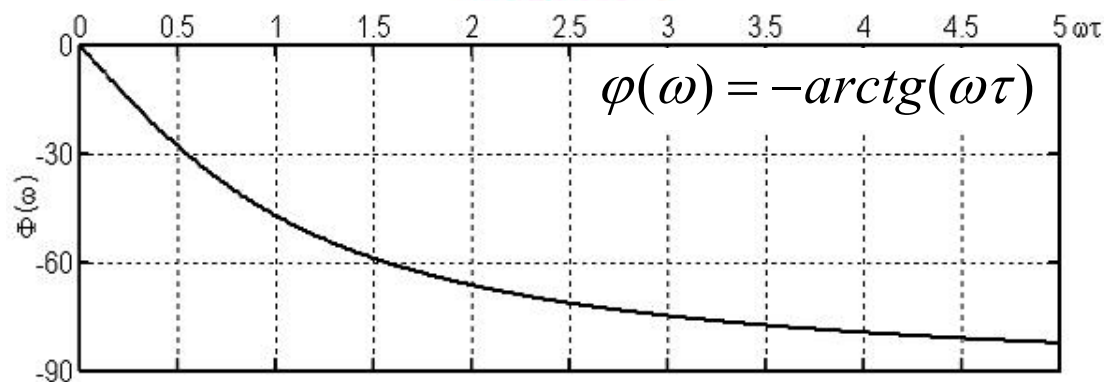


归一化

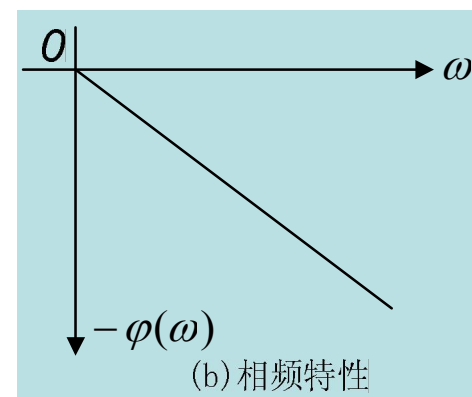
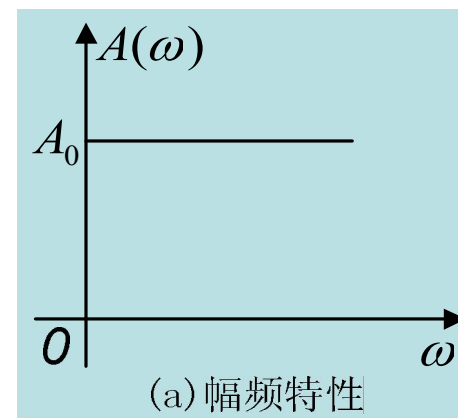
# 一阶传感器满足无失真测试吗？



(a) 幅频曲线



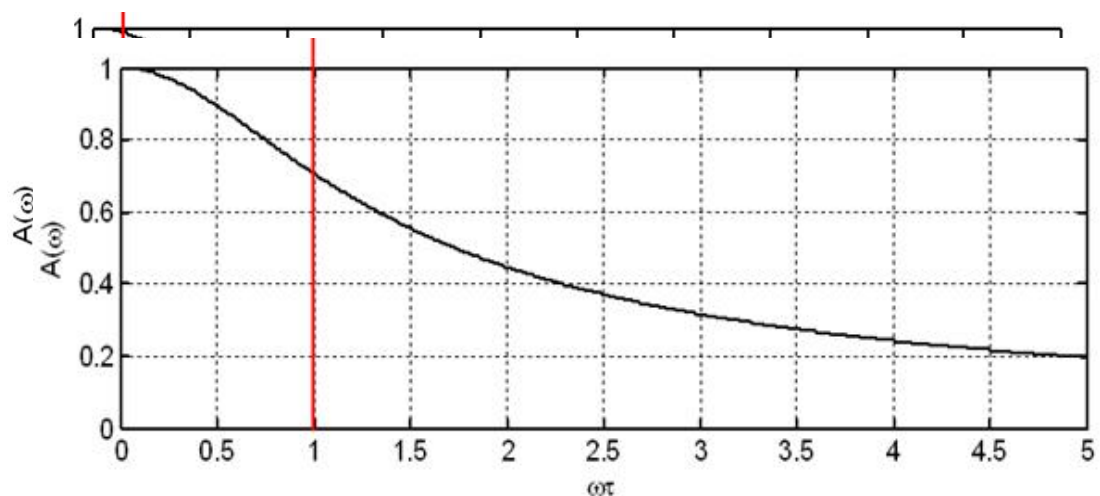
(b) 相频曲线



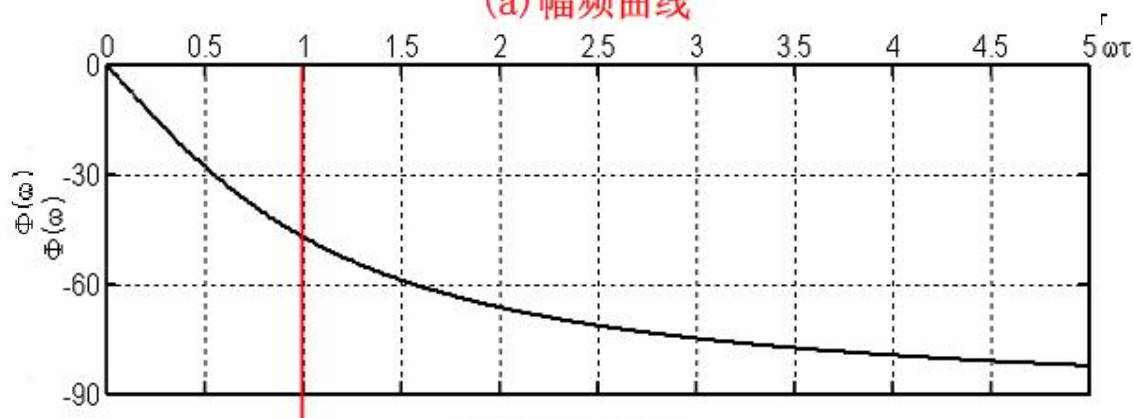
动态测试不失真的条件



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



(a) 幅频曲线



(b) 相频曲线

1) 在某一频率范围内，误差不超过一定限度

→ 认为不失真。

2) 当  $\omega\tau \ll 1$  约  $\omega\tau = 1/5$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/25}} = 0.9806$$

$A(\omega) \approx 1$  误差不超过2%

一般要求幅值误差不超过**5%**

3) 当  $\omega\tau = 1$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1}} = 0.707$$

$$\phi(\omega) = -\arctg(1) = -45^\circ$$

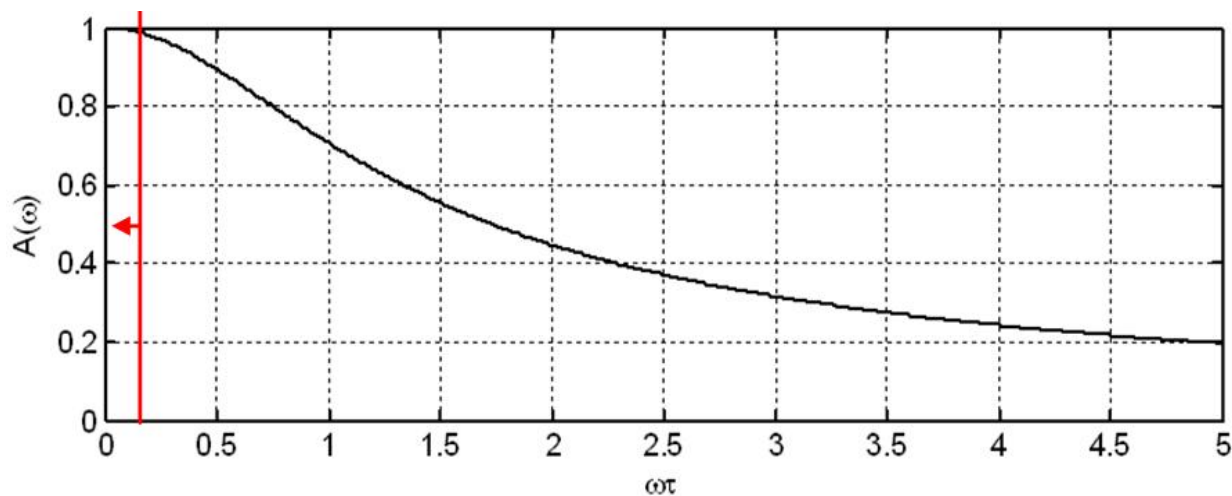
一阶系统的转折频率。



➤  $\omega$  一定，即被测信号最高频率一定， $\tau$  越小，系统输出的幅值误差越小。

➤  $\omega \tau$  一定，即幅值误差一定， $\tau$  越小，系统能够测量的频率就越高。

➤  $\tau$  越小，对测试越有利。



(a) 幅频曲线

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

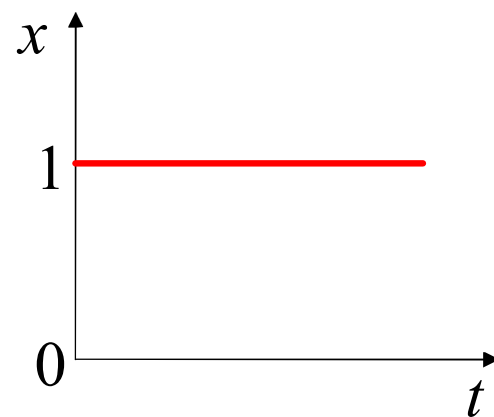




## 2. 一阶传感器的动态特性分析——单位阶跃响应

对一阶传感器系统，设在 $t=0$ 时， $x$ 和 $y$ 均为0。当 $t>0$ 时，有一单位阶跃信号输入，如图。此时微分方程为

$$a_1(dy/dt) + a_0y = b_0x$$



齐次方程通解：

$$y_1 = C_1 e^{-t/\tau}$$

非齐次方程特解：

$$y_2 = 1 \quad (t > 0)$$

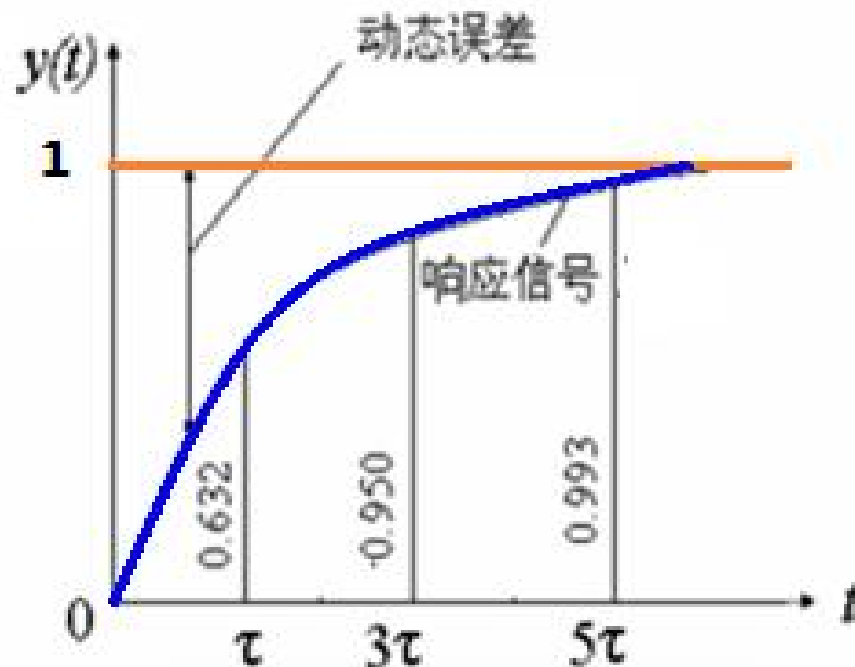
方程解：

$$y = y_1 + y_2 = C_1 e^{-t/\tau} + 1$$



以初始条件  $y(0)=0$  代入上式，  
即得  $t=0$  时， $C_1=-1$ ，所以

$$y = 1 - e^{-t/\tau}$$



输出的初值为0，随着时间推移  $y$  接近于1，当  $t=\tau$  时， $y=0.63$

一阶传感器时间常数的物理含义是什么？

频域和时域分析都表明，在一阶系统中，时间常数值是决定其响应速度的重要参数。



### 3. 二阶传感器的动态特性分析——频率响应函数及特性分析

很多传感器，如振动传感器、压力传感器等属于二阶传感器，其微分方程为：

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad \rightarrow \quad \frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

令  $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$  ——系统固有频率(*natural frequency*)

$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$  ——系统阻尼比(*damping coefficient*)

$k = \frac{b_0}{a_0}$  ——静态灵敏度



$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = kx$$

拉氏变换:

$$\left( \frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) Y(s) = kX(s)$$

传递函数

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





频率特性

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

幅频特性

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

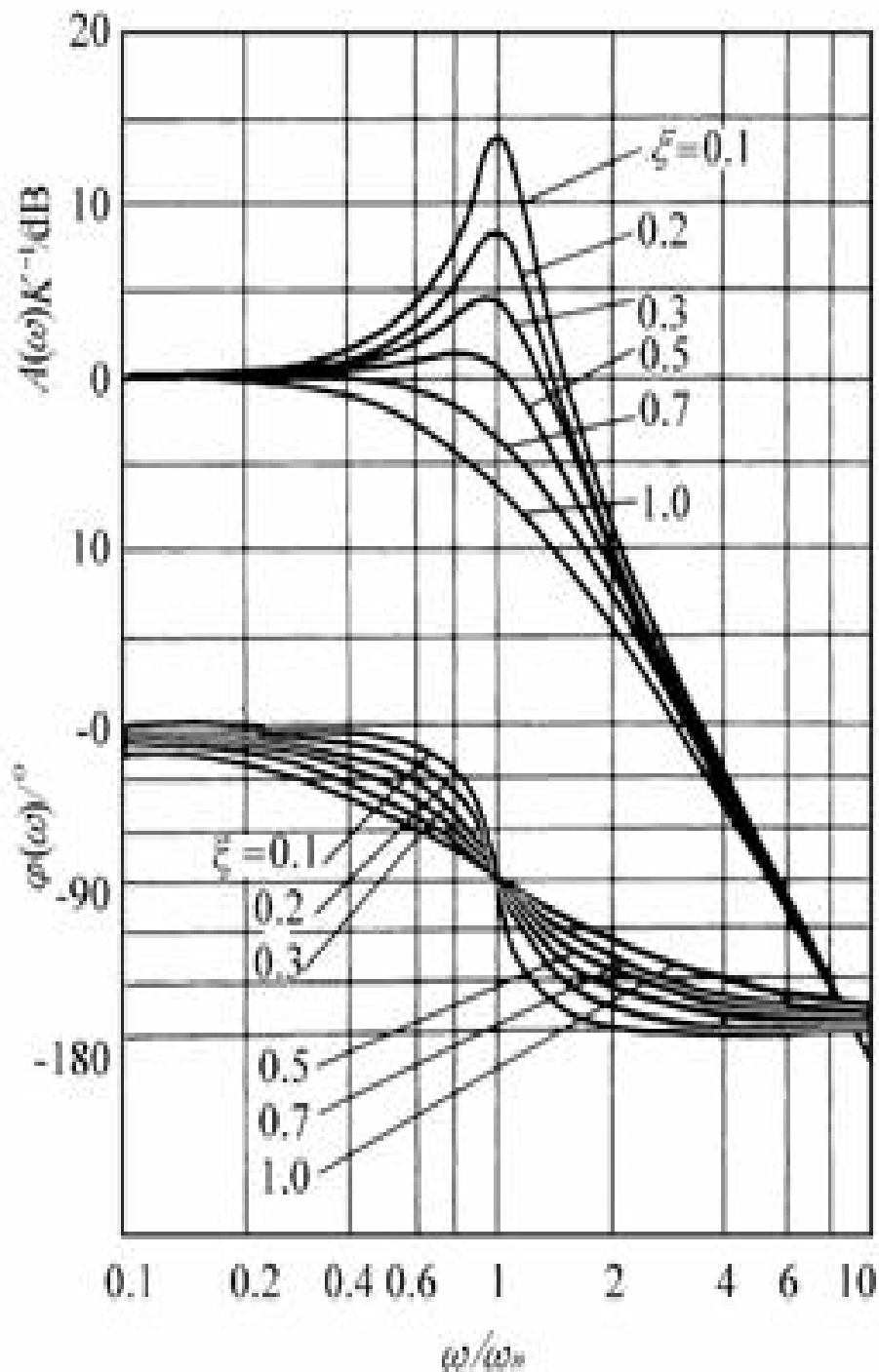
相频特性

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

二阶传感器的  
动态特性由什  
么参数决定？



当  $\zeta < 1$ ,  $\omega_n \gg \omega$  时,  
 $\approx 1$ , 幅频特性平直, 输出  
与输入为线性关系;  $\phi(\omega)$   
很小, 与  $\omega$  为线性关系;  
计算表明,  $\zeta = 0.7$ ,  
 $\omega / \omega_n = (0 \sim 0.58)$  范围  
内,  $A(\omega)$  的变化小于  
5%,  $\phi(\omega)$  也接近于过坐  
标原点的斜直线。在设计  
传感器时, 必须使阻尼比  
 $\zeta < 1$ , 固有频率  $\omega_n$  至少  
应大于被测信号频率  $\omega$  的  
3~5倍





### 3.二阶传感器动态特性分析——阶跃响应

单位阶跃信号  $u(t) = \begin{cases} 0 (t < 0) \\ 1 (t \geq 0) \end{cases}$  其拉氏变换  $X(s) = \frac{1}{s}$

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

求拉氏逆变换可得系统对单位阶跃输入的响应函数  
根据阻尼比的大小不同, 分为四种情况:

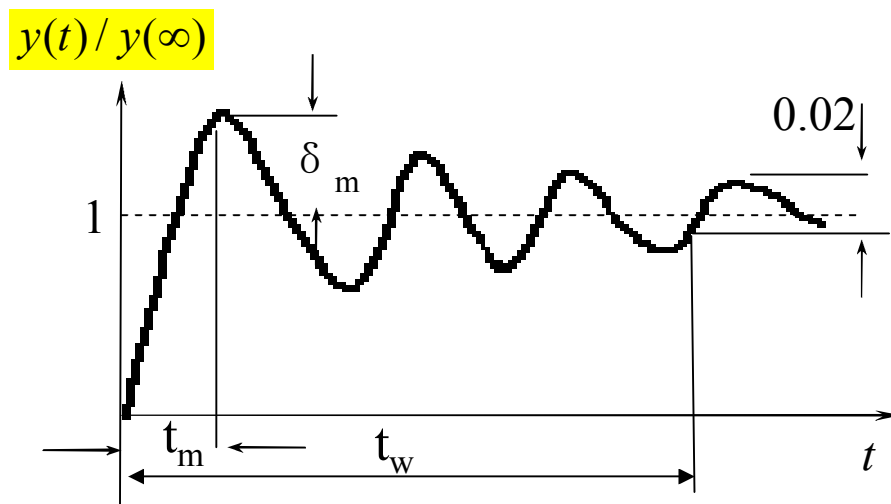
1)  $0 < \xi < 1$  (欠阻尼 *under-damped*):

输出为

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right)$$



欠阻尼情况下曲线如图，这是一衰减振荡过程，固有频率越高，曲线上升越快； $\xi$  越小，振荡频率越高，衰减越慢。



$\xi < 1$  的二阶传感器的过渡过程

2)  $\xi = 0$  (零阻尼): 输出变成等幅振荡, 即

$$y(t) = kA [1 - \sin(t / \tau + \varphi_0)]$$

3)  $\xi = 1$  (临界阻尼 *critically damped*):

$$y(t) = kA \left[ 1 - \exp(-t / \tau) - \frac{t}{\tau} \exp(-t / \tau) \right]$$

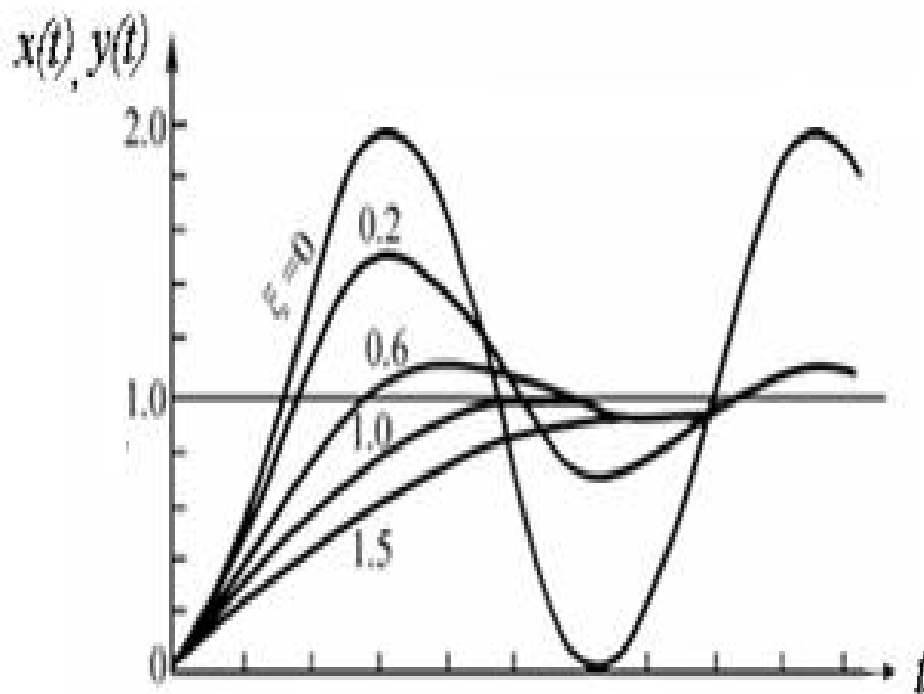




## 4) $\xi > 1$ (过阻尼 *over-damped*) :

$$y = kA \left[ 1 + \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \exp\left(\frac{-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} t\right) - \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \exp\left(\frac{-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} t\right) \right]$$

上两式表明，当  $\xi \geq 1$  时，该系统不再是振荡的，而是由两个一阶阻尼环节组成，前者两个时间常数相同，后者两个时间常数不同。





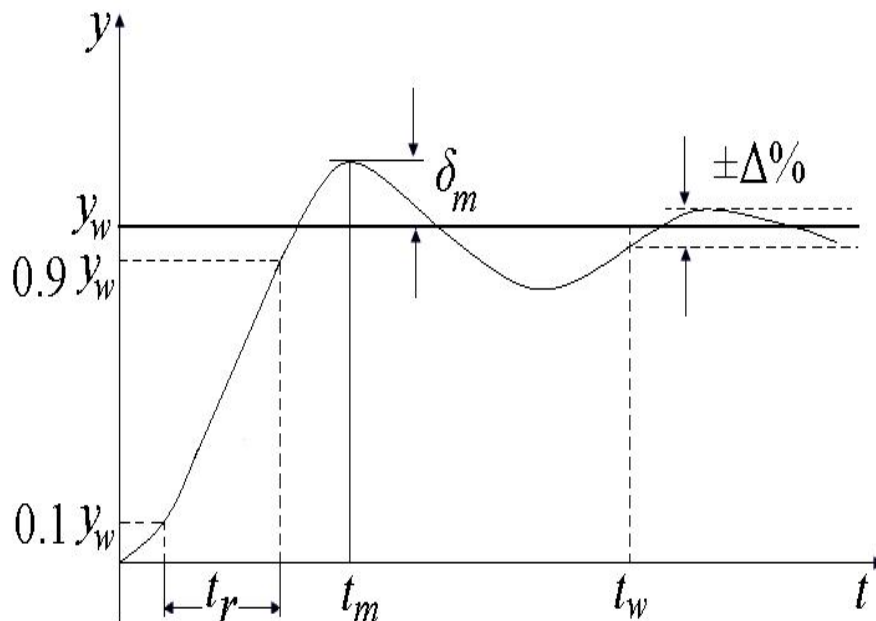
## 二阶系统动态特性主要指标:

1. 时间常数  $\tau$ : 输出值上升到稳态值63%所需时间。

2. 上升时间  $t_r$ : 输出从稳态值的10%上升到90%所需时间

3. 稳定时间  $t_w$ : 输出值进入稳态值的5%或2%的误差带内所需时间

4. 超调量  $\delta_m$ : 响应曲线第一次超过稳态值的峰值



实际传感器， $\xi$  值一般可适当安排，兼顾过冲量  $\delta_m$  不要太大，稳定时间  $t_w$  不要过长的要求。在  $\xi = 0.6 \sim 0.8$  范围内，可获得较合适的综合特性。对正弦输入来说，当  $\xi = 0.6 \sim 0.8$  时，幅值比  $k(\omega)/k$  在比较宽的范围内变化较小。



【例】用一个时间常数  $\tau = 5 \times 10^{-4} \text{ s}$  的一阶传感器测量正弦信号。问：(1) 如果要求限制振幅误差在5%以内，则被测正弦信号的频率为多少？此时的振幅误差和相角差各是多少？

(2) 若用具有该时间常数的同一系统作50 Hz信号的测试，此时的振幅误差和相角差各是多少？

解：对一阶系统，若设  $K=1$ ，则其幅频特性和相频特性分别为：

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}}, \quad \varphi = \arctan(-\omega\tau)$$

(1) 因为  $\delta = |1 - A(\omega)|$ ， $\delta \leq 0.05$  时，

即要求  $1 - A(\omega) \leq 0.05$ ，所以  $1 - \frac{1}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \leq 0.05$

化简得：  $(\omega\tau)^2 \leq \frac{1}{0.95^2} - 1 = 0.108$



故有 
$$f \leq \sqrt{0.108} \times \frac{1}{2\pi\tau} = \sqrt{0.108} \times \frac{1}{2\pi \times 5 \times 10^{-4}} \text{ Hz} = 104 \text{ Hz}$$

即被测正弦信号的频率不能大于104 Hz。此时产生的幅值误差和相位误差分别为

$$\delta = 1 - \frac{1}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(2\pi f\tau)^2 + 1}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(2\pi \times 104 \times 5 \times 10^{-4})^2 + 1}} = 1 - 0.9506 = 4.94\%$$

$$\varphi = \arctan(-\omega\tau) = \arctan(-2\pi f\tau) = \arctan(-2\pi \times 104 \times 5 \times 10^{-4}) = -18.9^\circ$$

(2) 当作50Hz信号测试时，有

$$\delta = 1 - \frac{1}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(2\pi f\tau)^2 + 1}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(2\pi \times 50 \times 5 \times 10^{-4})^2 + 1}} = 1 - 0.9878 = 1.21\%$$

$$\varphi = \arctan(-\omega\tau) = \arctan(-2\pi f\tau) = \arctan(-2\pi \times 50 \times 5 \times 10^{-4}) = -8.92^\circ$$



## 1.7 传感器的技术性能指标及选用原则

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其他指标
<p><b>量程指标：</b>量程范围、过载能力</p> <p><b>灵敏度指标：</b>灵敏度、分辨力、满量程输出</p> <p><b>精度有关指标：</b></p> <p>精度、误差、线性、滞后、重复性、灵敏度误差、稳定性</p> <p><b>动态性能指标：</b></p> <p>固有频率、阻尼比、时间常数、频率特性、频响范围、稳定时间、临界频率、临界速度、</p>	<p><b>温度指标：</b>温度误差、温漂、热滞后、温度系数</p> <p><b>抗冲振指标：</b>抗冲振频率、幅度</p> <p><b>其它环境参数：</b></p> <p>抗潮湿、抗腐蚀、抗电磁干扰</p>	<p>工作寿命、疲劳性能、绝缘性能、</p> <p>平均无故障时间、</p>	<p>供电方式、电压范围、</p> <p>外形尺寸、重量、</p> <p>安装方式、</p>





## 1.7.2 传感器的选用原则

### 1. 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。



## 2. 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。



### 3. 与传感器的经济指标有关的因素

- (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。

### 4. 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。



## 1.8 改善传感器性能的技术途径

### 如何进一步提高传感器的技术性能？

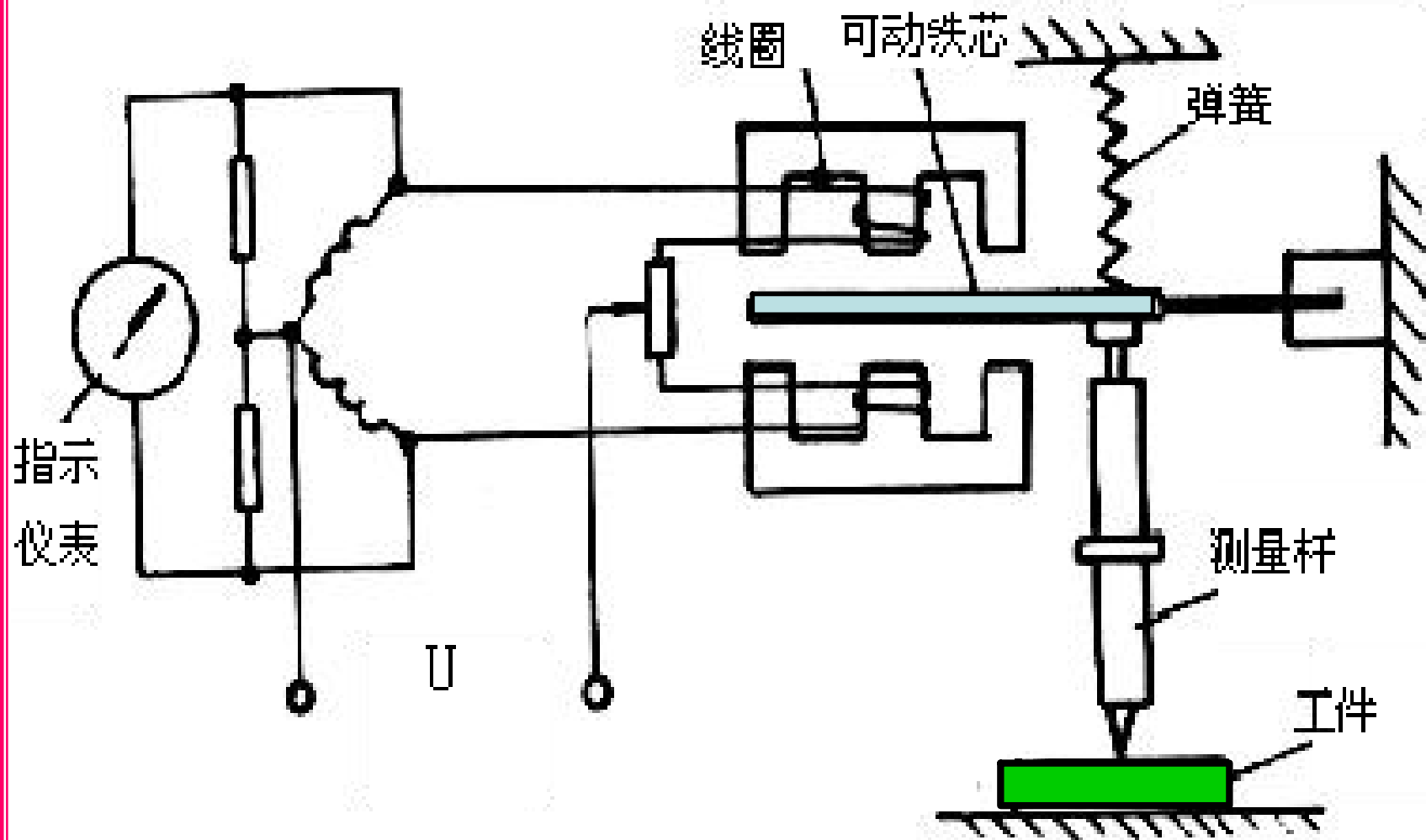
#### 1. 结构、材料与参数的合理选择

#### 2. 差动技术

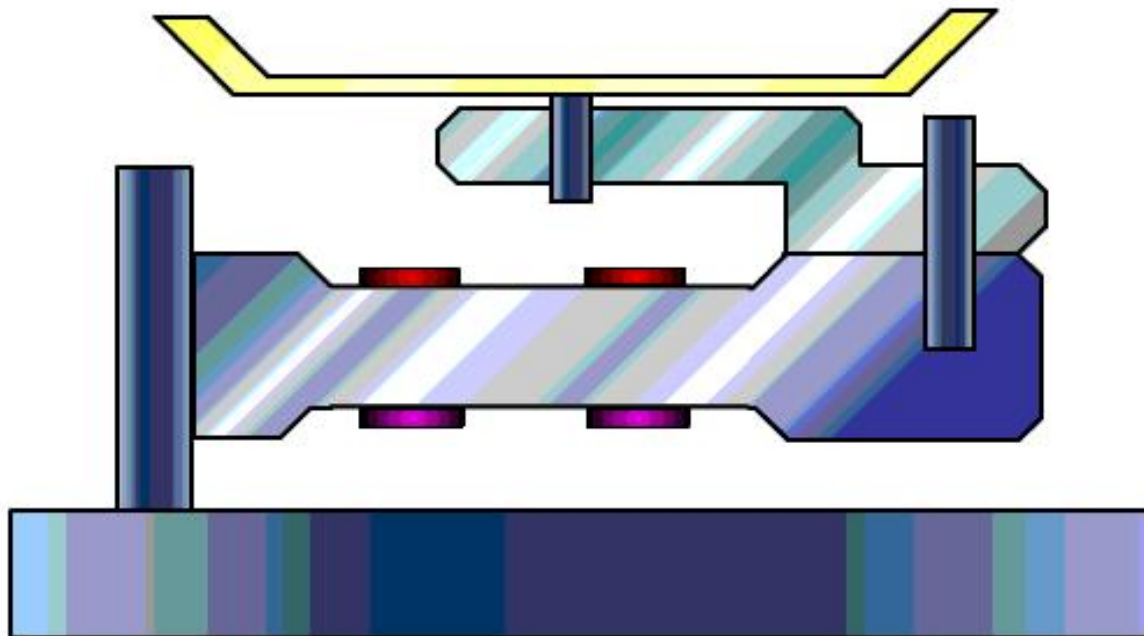
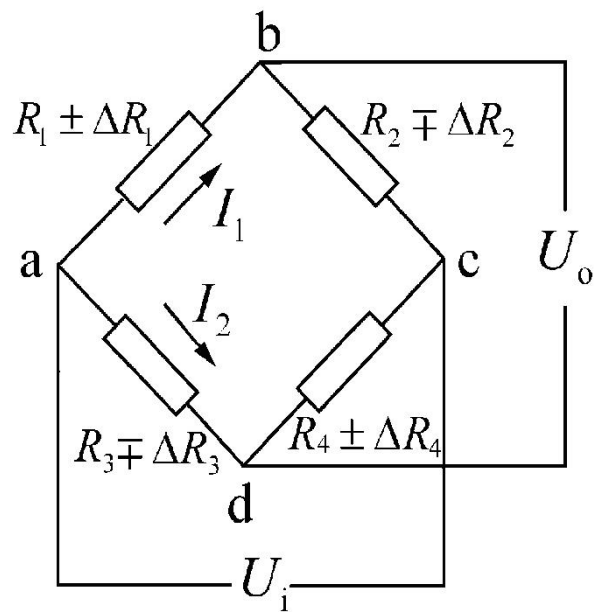
差动技术是传感器中普遍采用的技术。它的应用可显著地减小温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响，抵消了共模误差，减小非线性误差等。不少传感器由于采用了差动技术，还可使灵敏度增大。

例如：变气隙式电感测微仪：

## 变气隙式电感测微仪









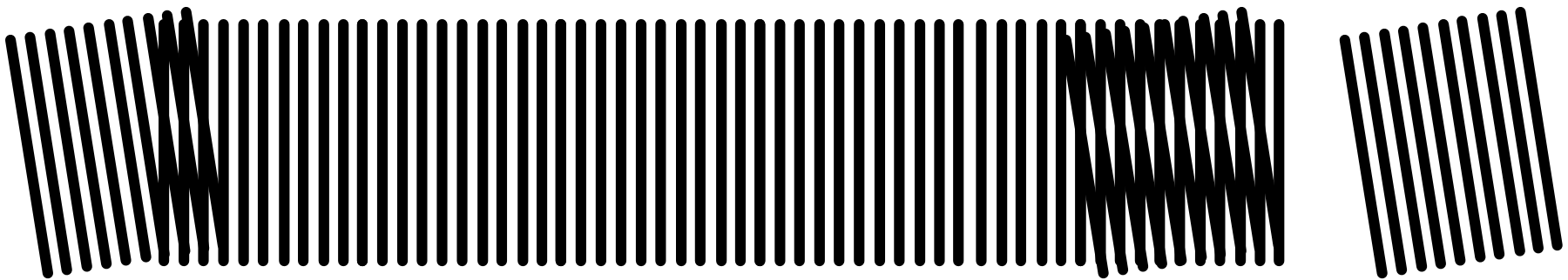
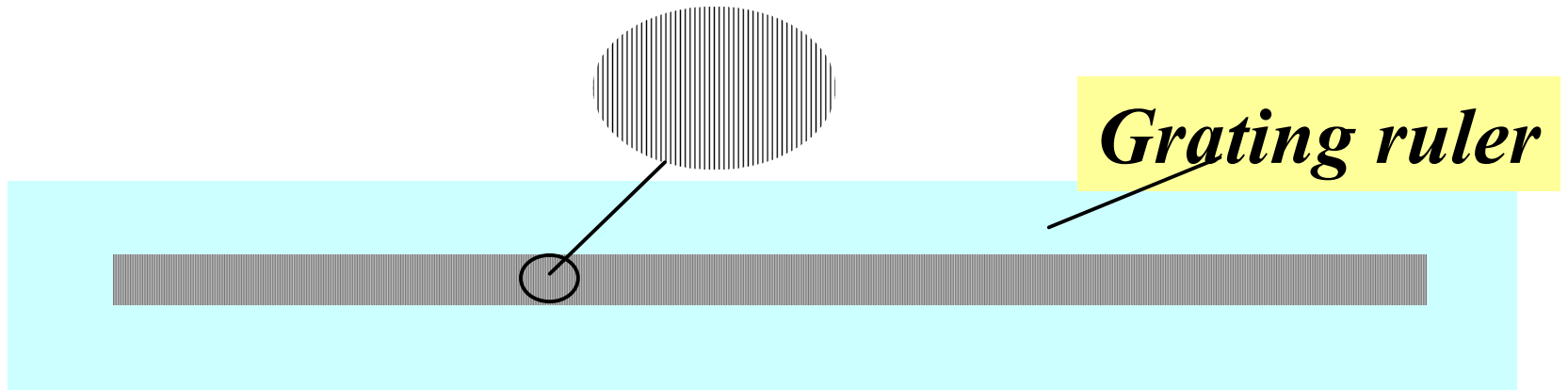
### 3. 平均技术

在传感器中普遍采用平均技术可产生平均效应，其原理是利用若干个传感单元同时感受被测量，其输出则是这些单元输出的平均值，若将每个单元可能带来的误差均可看作随机误差且服从正态分布，根据误差理论，总的误差将减小为：

$$\delta_{\Sigma} = \pm \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad \text{式中, } n \text{—传感单元数}$$

可见，在传感器中利用平均技术不仅可使传感器误差减小，且可增大信号量，即增大传感器灵敏度。

例如：光栅传感器





## 4. 稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的器件，其稳定性显得特别重要，其重要性甚至胜过精度指标，尤其是对那些很难或无法定期标定的场合。

造成传感器性能不稳定的原因是：随着时间的推移和环境条件的变化，构成传感器的各种材料与元器件性能将发生变化。

提高传感器性能的稳定性措施：对材料、元器件或传感器整体进行必要的稳定性处理。如永磁材料的时间老化、温度老化、机械老化及交流稳磁处理、电气元件的老化筛选等。

在使用传感器时，若测量要求较高，必要时也应对附加的调整元件、后续电路的关键元器件进行老化处理。



## 5. 屏蔽、隔离与干扰抑制

传感器大都要在现场工作，现场的条件往往是难以充分预料的，有时是极其恶劣的。各种外界因素要影响传感器的精度与各有关性能。为了减小测量误差，保证其原有性能，就应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。其方法有：

- ◆ 减小传感器对影响因素的灵敏度
- ◆ 降低外界因素对传感器实际作用的程度

对于电磁干扰，可以采用**屏蔽、隔离**措施，也可用**滤波**等方法抑制。对于如温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射、甚至气流等，可采用相应的隔离措施，如隔热、密封、隔振等，或者在变换成为电量后对干扰信号进行分离或抑制，减小其影响。





## 6. 补偿与修正技术

补偿与修正技术的运用大致针对两种情况：

- ★ 针对传感器本身特性
- ★ 针对传感器的工作条件或外界环境

对于**传感器特性**，找出误差的变化规律，或者测出其大小和方向，采用适当的方法加以补偿或修正。

针对**传感器工作条件或外界环境**进行误差补偿，也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感，由于温度变化引起的误差十分可观。为了解决这个问题，必要时可以控制温度，搞恒温装置，但往往费用太高，或使用现场不允许。而在传感器内引入温度误差补偿又常常是可行的。这时应找出温度对测量值影响的规律，然后引入温度补偿措施。

补偿与修正，可以利用电子线路（硬件）来解决，也可以采用微型计算机通过软件来实现。



## 本章要求

- ◆ 掌握传感器的定义及组成
- ◆ 了解传感器的分类、发展趋势
- ◆ 掌握描述传感器静态特性的指标
- ◆ 掌握一阶、二阶传感器的动态特性及相关指标
- ◆ 了解改善传感器性能的技术途径



## 本章习题

教材P30页：1-8、1-9