



自动控制实践I 测量元件概述

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

- 1 学习重点
- 2 作用、定义、组成和分类
- 3 元件特性
- 4 选择元件时的注意事项
- 5 讨论

1 学习重点

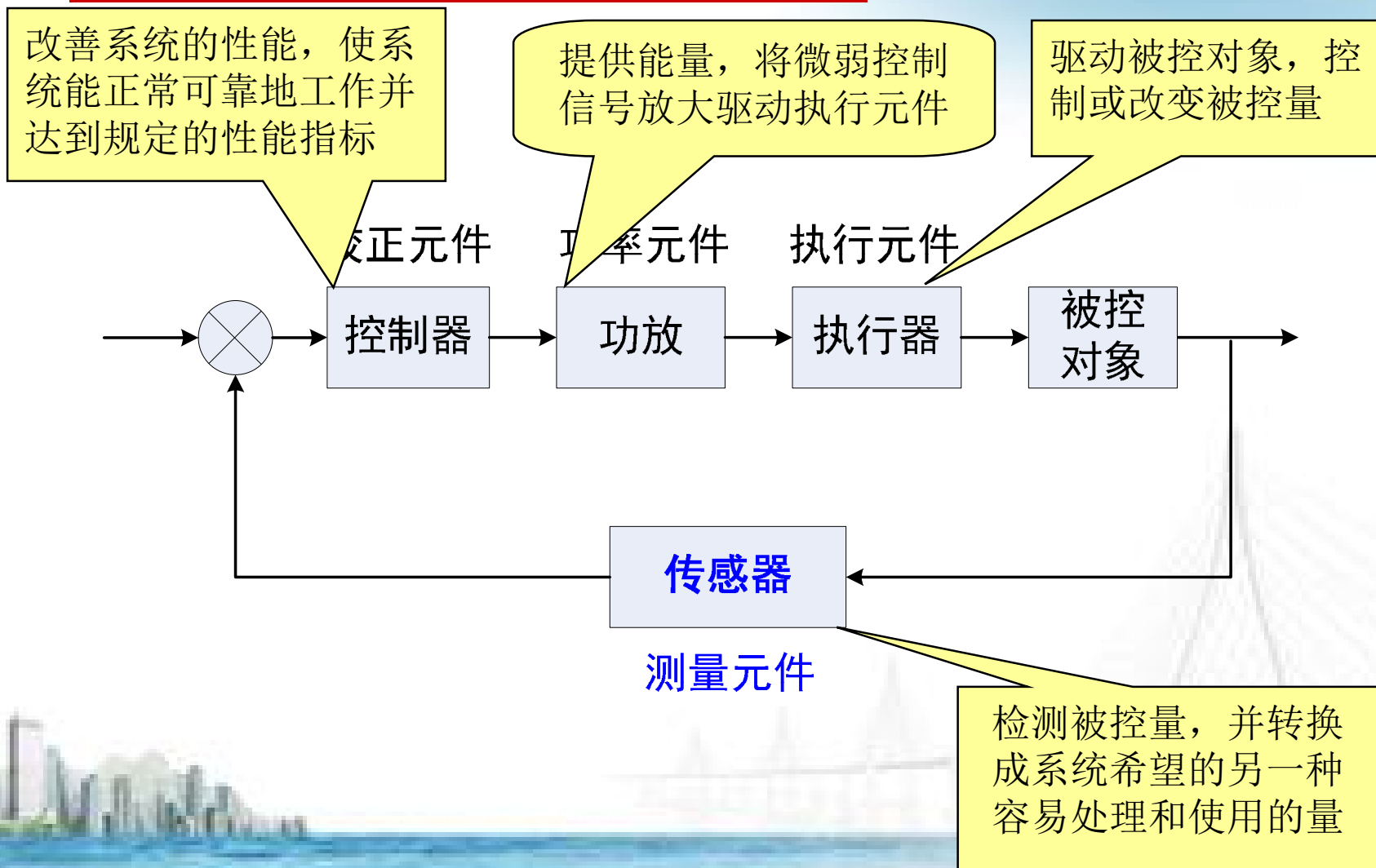
- 掌握常用测量元件的工作原理，了解其设计思想
- 熟悉常用测量元件的特点，关键技术指标，能够根据控制系统需要正确选择
- 熟悉常用测量元件使用方法，能够正确使用
 - n 测量元件的作用
 - n 测量元件的定义、组成和分类
 - n 测量元件的特性（静态和动态）

目 录

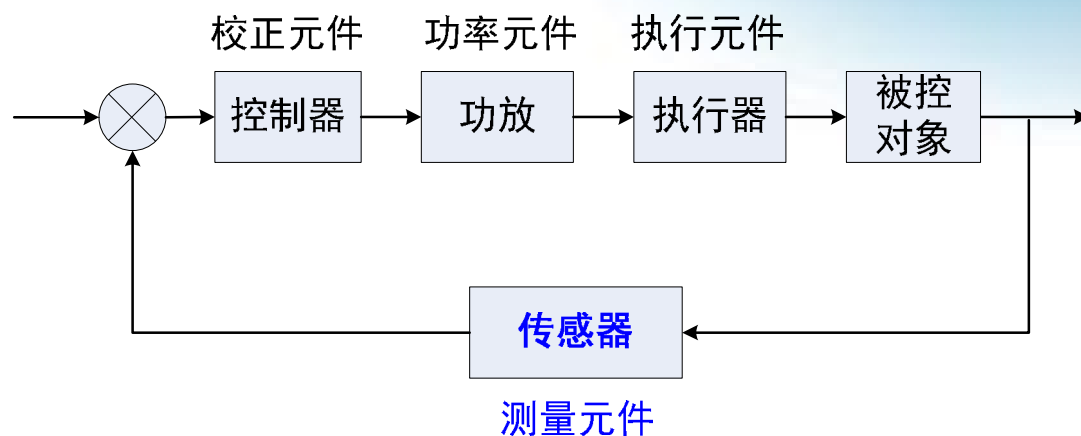
- 1 学习重点
- 2 作用、定义、组成和分类
- 3 元件特性
- 4 选择元件时的注意事项
- 5 讨论



2.1 测量元件的作用



2.1 测量元件的作用

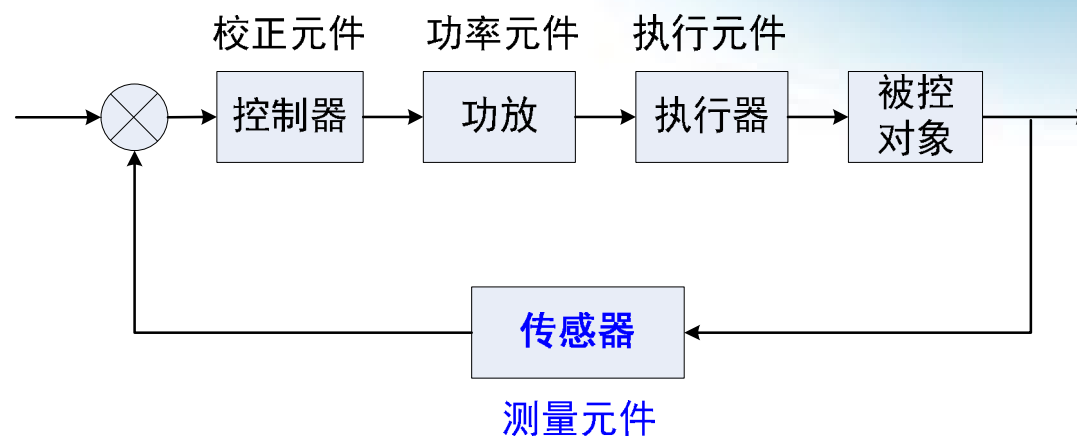


执行元件和测量元件哪个更重要？

没有执行元件就谈不上控制（检测系统，烟雾）

没有测量元件只是开环控制（风扇）

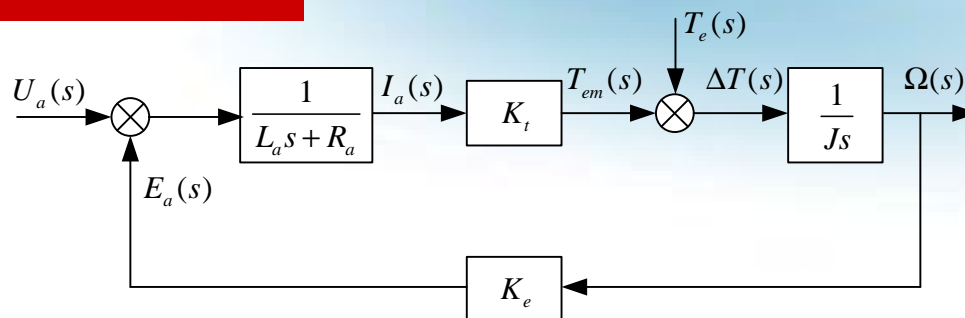
2.1 测量元件的作用



控制系统中为什么需要反馈（测量元件）？

2.1 测量元件的作用

控制系统中存在各种不确定性:



1. 模型结构不确定性（假设、降阶、近似）

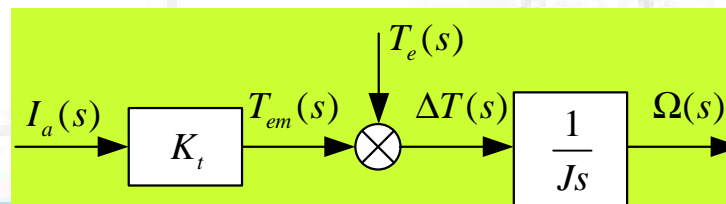
$$G(s) = G_0(s) + \Delta G(s)$$

2. 模型参数不确定性（老化、温度、工况、工艺）

$$G_0(s) = \frac{1/K_e}{(t_m s + 1)(t_e s + 1)}$$

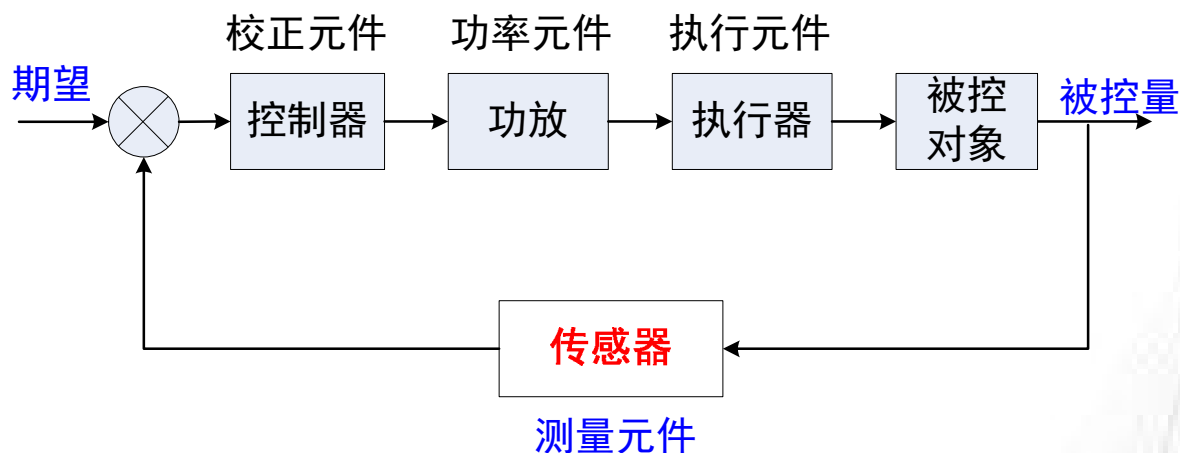
$$K_e = K_{e0} + \Delta K_e, t_m = t_{m0} + \Delta t_m, t_e = t_{e0} + \Delta t_e$$

3. 各种外部扰动



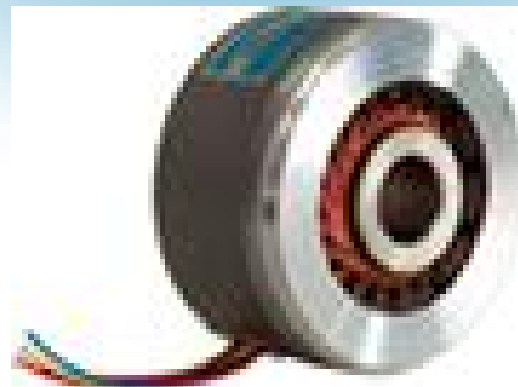
2.1 测量元件的作用

所有不确定性的影响，在输出上都有体现，我们可以通过测量元件获取被控量的信息，采取相应的控制方法对不确定性的影响进行有效的抑制。



一个控制系统要有效的抑制各种不确定性，保证一定的控制性能，就必须加入测量元件实现闭环控制

2.1 测量元件的作用

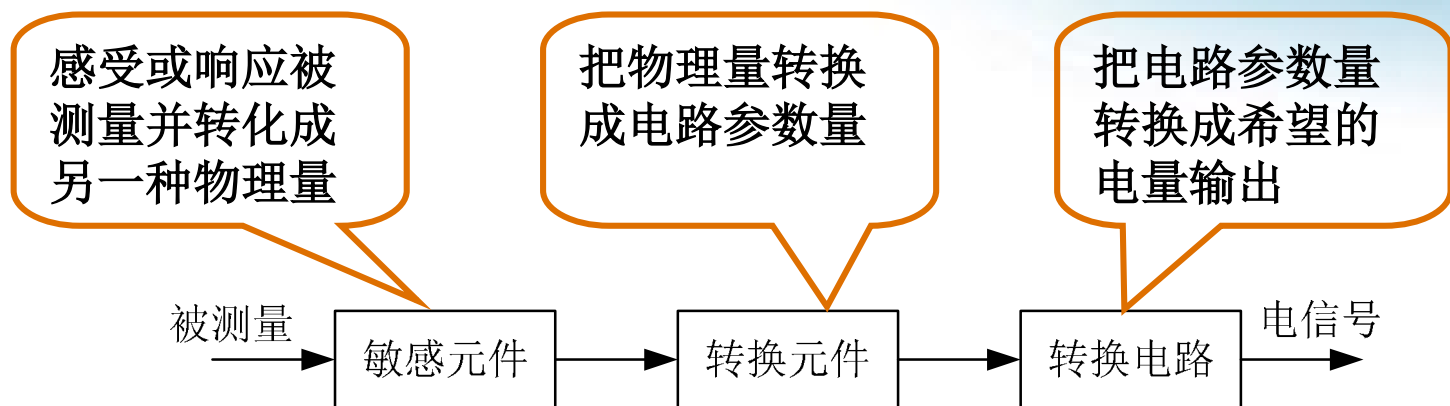


1. 测量元件是控制系统的感觉器官，只有知道生产过程的具体情况才能进行自动控制。起“眼、耳、鼻、触觉”的作用。
2. 在检测与控制系统中，传感器和检测电路用于信息的提取、转换与处理，是整个系统的基础，**整个系统的精度、性能往往取决于测量元件的精度和性能。**
3. 最重要！分辨率、量程、精度、稳定性、可靠性.....

2.2 测量元件的定义

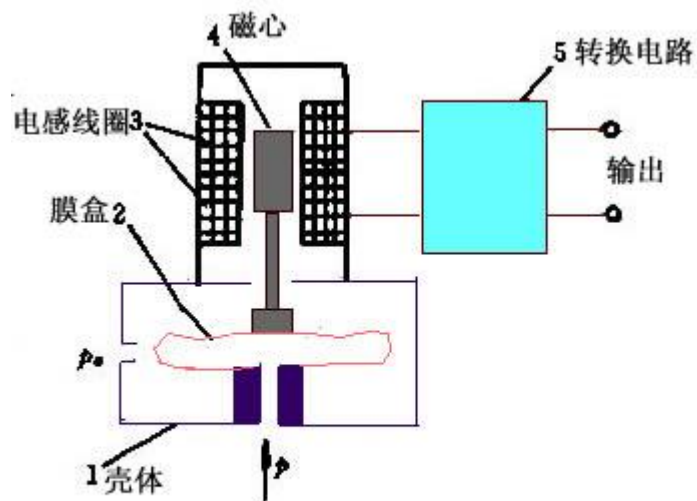
- 测量元件又叫传感器
- 将一种量按照某种规律转换成容易处理的另一种量
- 被测量：物理量、化学量、生物量等
- 输出量：主要指电信号
- 国际电工委员会(**IEC: International Electrotechnical Committee**)的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件”，它将输入变量转换成可供测量的信号。
- 基本功能是检测和转换

2.3 测量元件的组成



- 测量元件：检测出一种量并转换成容易处理的另一种量
- 处理：放大、加减、积分、微分、滤波、存储和传送

2.3 测量元件的组成举例

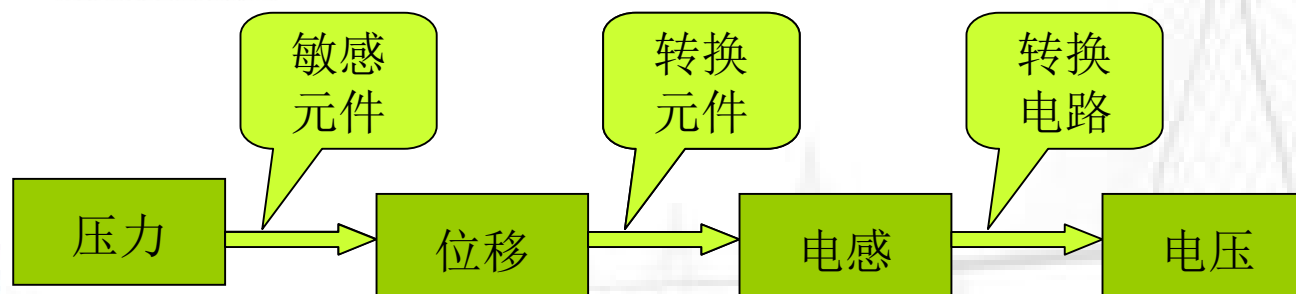


气体压力传感器

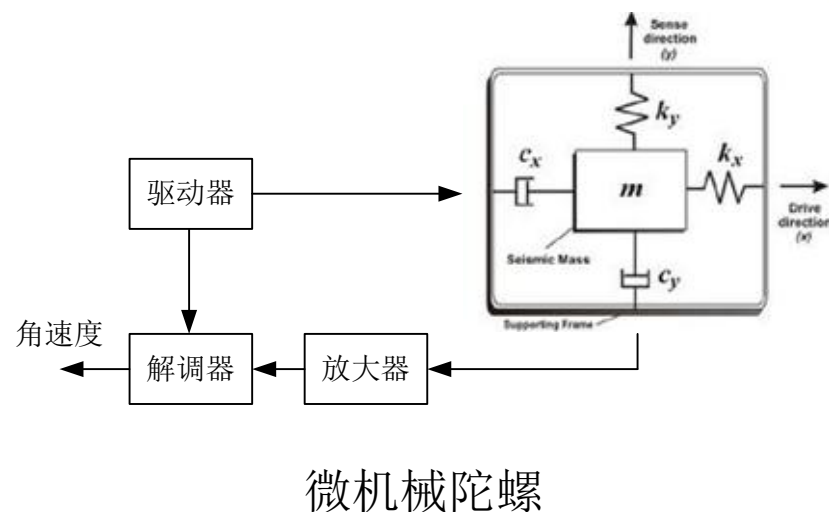
敏感元件——膜盒，把气压转换成磁芯位移

转换元件——可变电感3，把磁芯位移转换成电感的变换

转换电路——将电感转换成电压



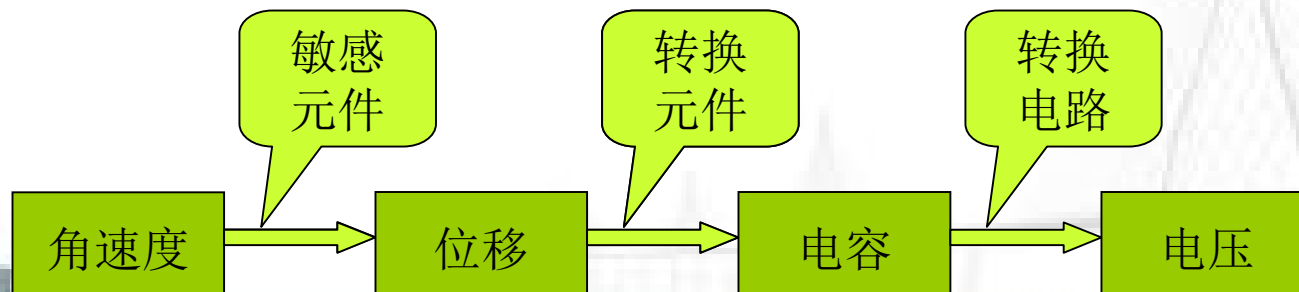
2.3 测量元件的组成举例



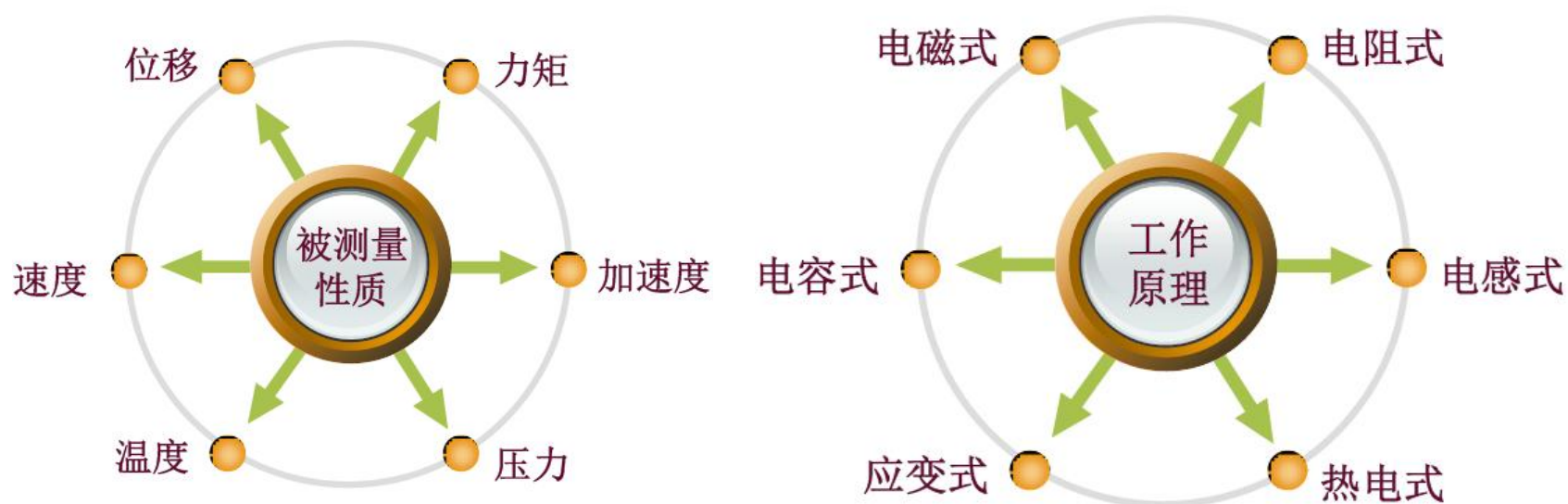
敏感元件——质量块，把角速度转换成位移

转换元件——可变电容 c_y ，把质量块位移转换成电容的变换

转换电路——将电容转换成电压

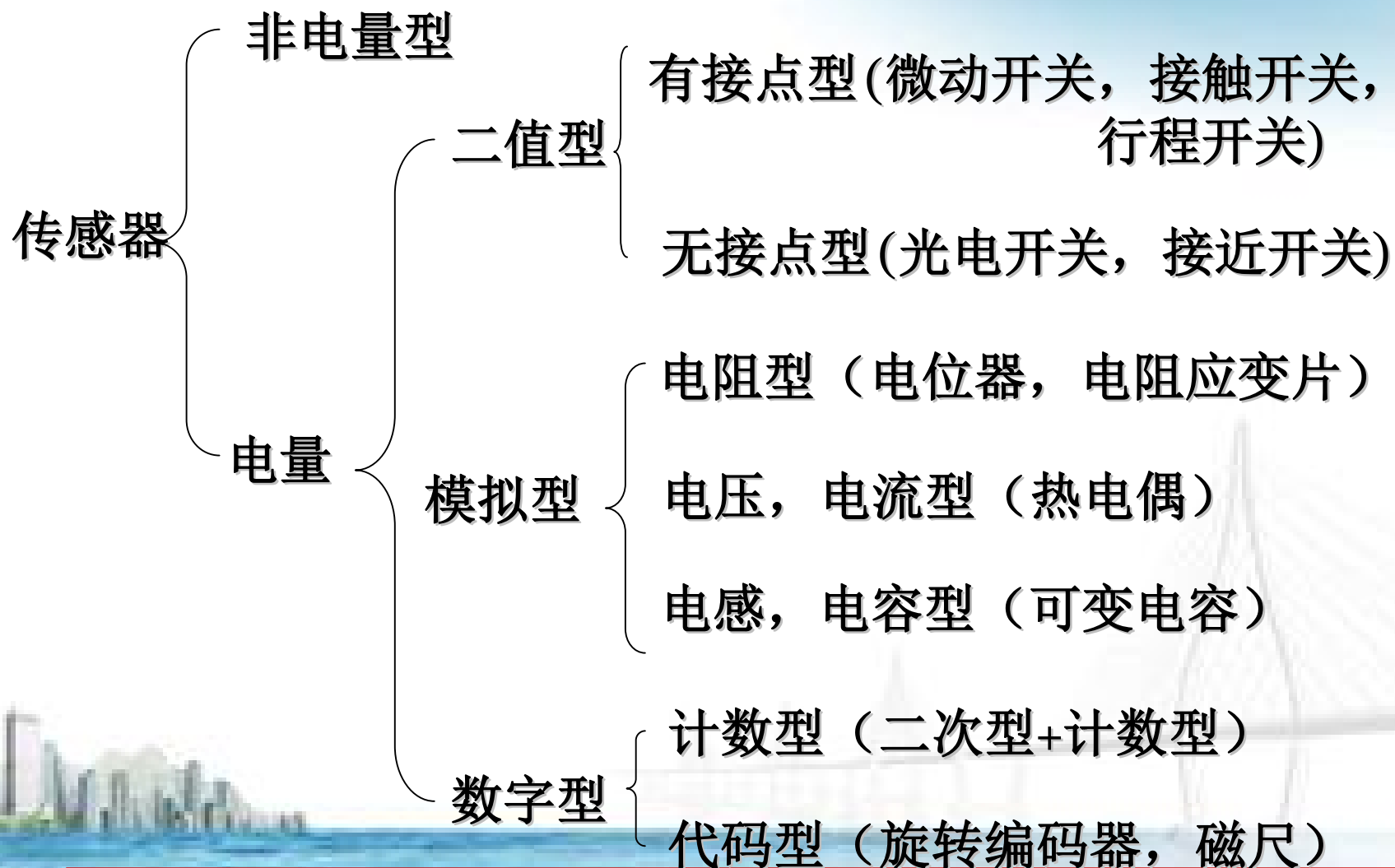


2.4 测量元件的分类



- 根据结构可分为结构型、物性型和复合型传感器。
- 结构型传感器是依靠传感器结构参数的变换实现信号变换(电容式传感器)
- 物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理性质变化来实现信号变换(热电偶)

2.4 测量元件的分类

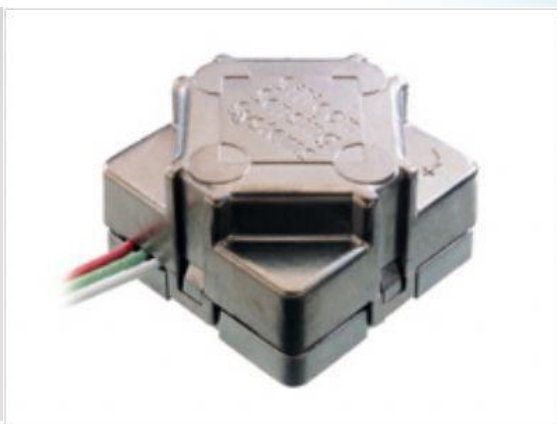


2.4 测量元件的分类



气体压力传感器

- 压力传感器
- 电磁感应原理
- 结构型
- 模拟型



微机械陀螺

- 角速度传感器
- 电容式
- 结构型
- 模拟型



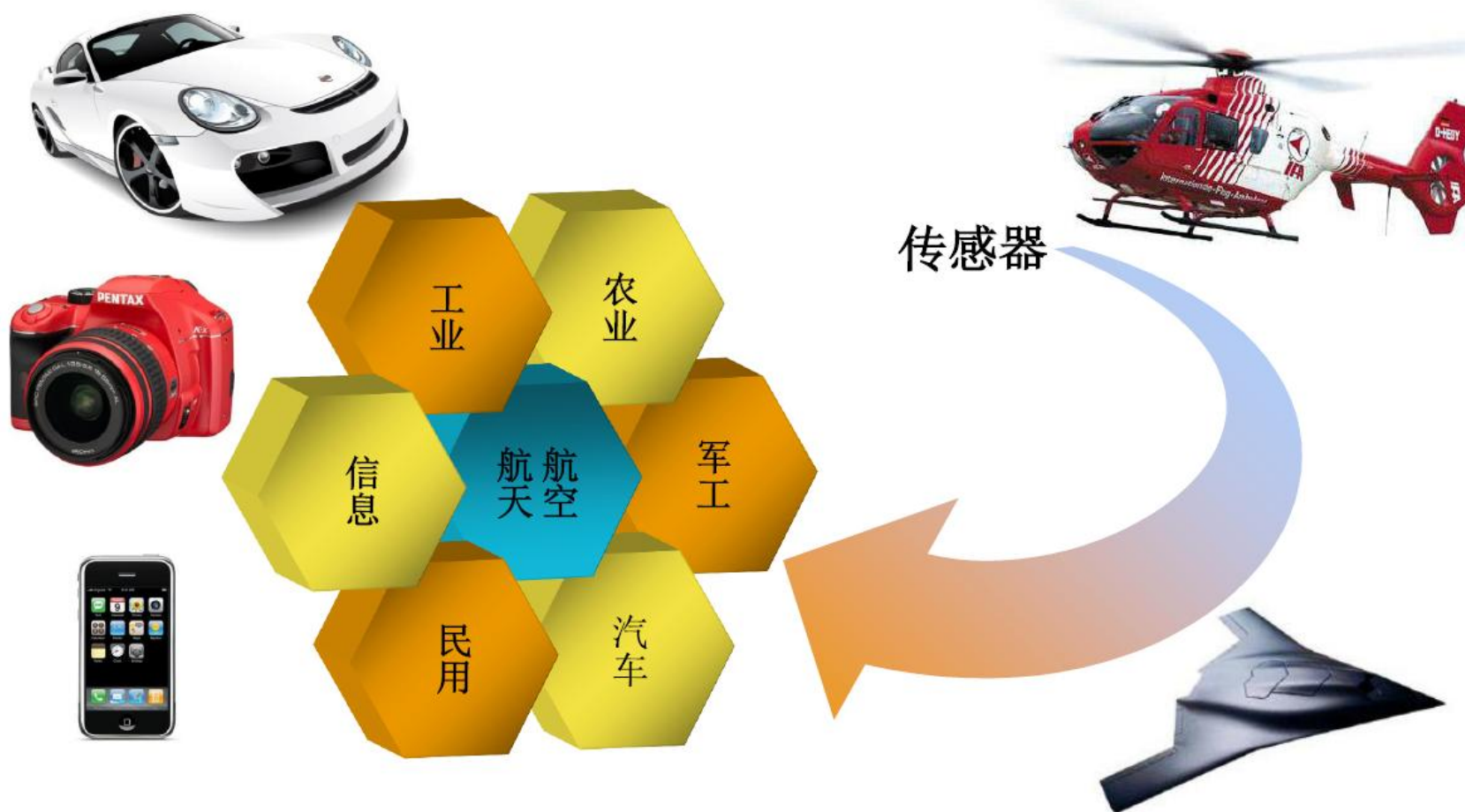
光电编码器

- 角位置传感器
- 光电原理
- 结构型
- 数字型

2.5 测量元件的发展趋势

- 开发新型传感器(新现象、新材料)
- 向高精度发展
- 向微型化发展
- 向微功耗、无源化发展
- 向传感器融合发展(冗余、互补、低成本)
- 向智能化发展
- 向高可靠性发展

2.6 测量元件的应用



目 录

- 1 学习重点
- 2 作用、定义、组成和分类
- 3 元件特性**
- 4 选择元件时的注意事项
- 5 讨论



3 测量元件的特性

- 理想特性：输入和输出一一对应。
- 静特性：输入量和输出量都为常量，或变化极慢时，输出和输入之间的关系称为静特性。数学关系式中无变量对时间的微分。
- 动特性：输入量和输出量都随时间变化，输出和输入的关系称为动特性。数学关系式中有变量对时间的微分。
- 动特性 \Rightarrow 静特性？

3.1 测量元件的静特性——变换函数

1. 变换函数：描述静特性的数学方程

$$y = f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n$$

式中 y ——输出量；

x ——输入量；

a_0 ——零点输出；

a_1 ——理论灵敏度；

a_2, a_3, \cdots, a_n ——非线性项系数。

大多数测量元件 $y = kx$

3.1 测量元件的静特性——变换函数

1. 变换函数：描述静特性的数学方程

$$y = f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n$$

变换函数的结构和形式一般都是在分析的基础上建立的，参数实际标定中予以确定。一些变换函数建立在试验的基础上，利用统计分析和曲线拟合的方法建立。

曲线拟合方法很多，例如最小二乘曲线拟合法

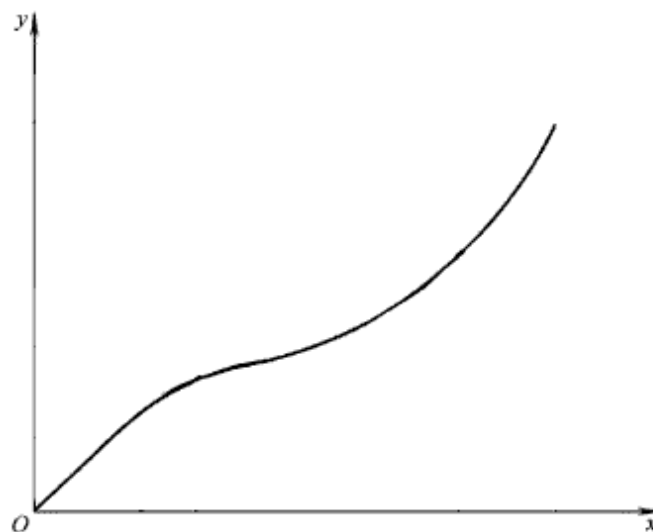
3.1 测量元件的静特性——灵敏度

2. **灵敏度**：输出量的微小增量与输入量微小增量的比值，变换函数的一阶导数或静特性曲线的斜率。

非线性的静特性，不同的点有不同的灵敏度。

线性的静特性，灵敏度在测量范围内保持恒定。

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$



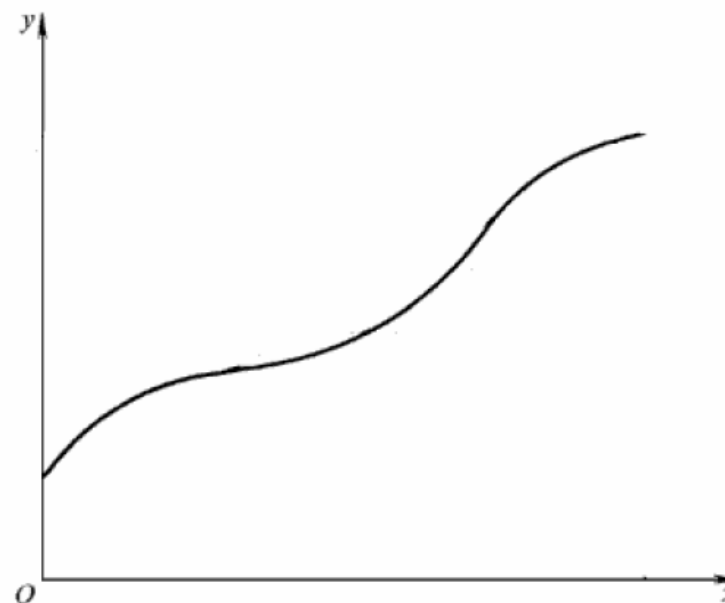
3.1 测量元件的静特性——线性度

3. **线性度(非线性误差)**: 静特性曲线偏离某种拟合直线或规定直线的程度。

$$\varepsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} * 100\%$$

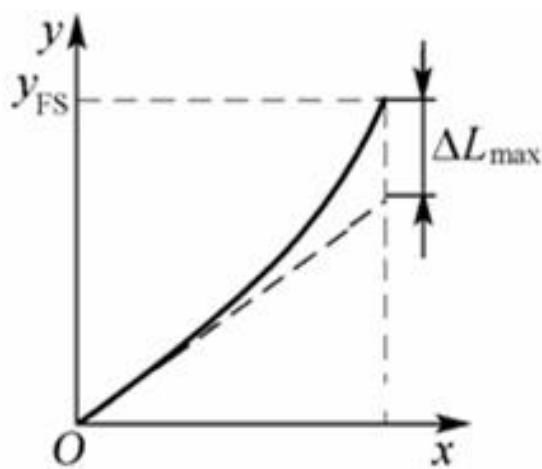
式中 Δy_m ——非线性最大偏差

y_{FS} ——满量程值

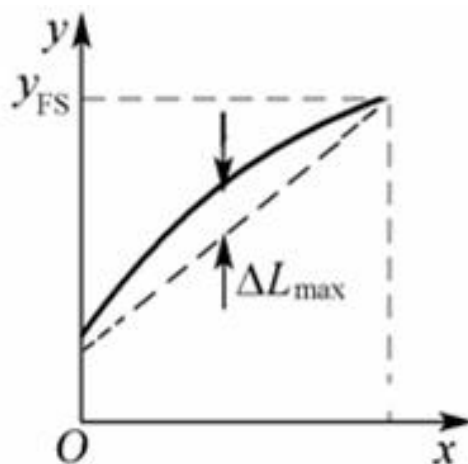


3.1 测量元件的静特性——线性度

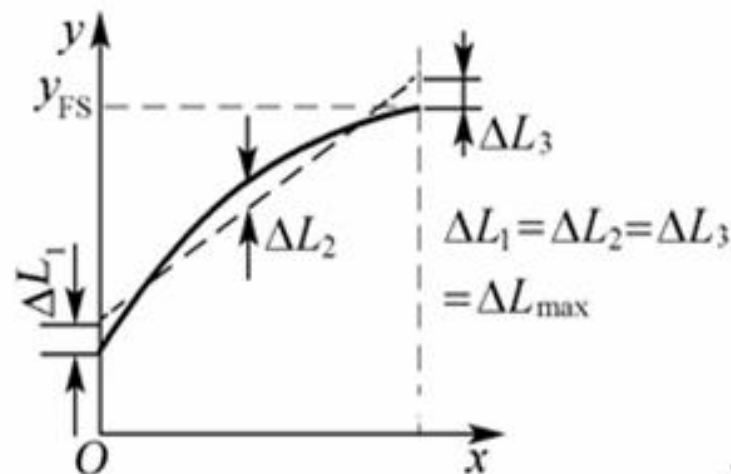
在非线性误差不太大的情况下，通常采用直线拟合的方法来线性化。常用的直线拟合方法有理论拟合、端点拟合和端点平移拟合等。采取不同的方法选取拟合直线，可以得到不同的线性度。



(a)理论拟合



(b)端点拟合



(c)端点平移拟合

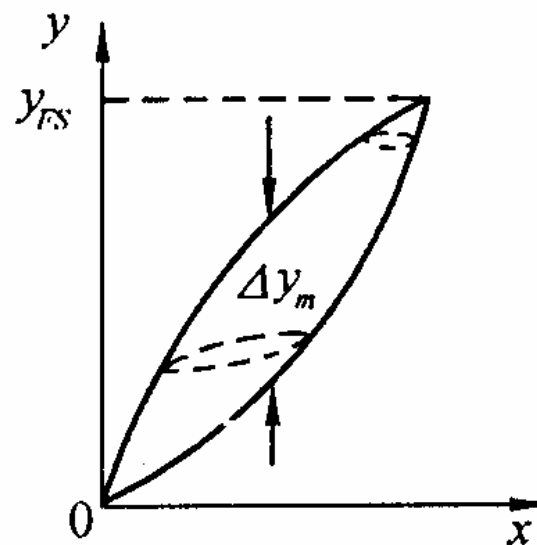
3.1 测量元件的静特性——滞环

4. **滞环(磁滞)**: 测量元件正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输入输出曲线不重合的现象称为滞环特性或迟滞。

它由上升分支和下降分支组成。对应同一输入量，两个分支所对应的输出不同。

$$\epsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

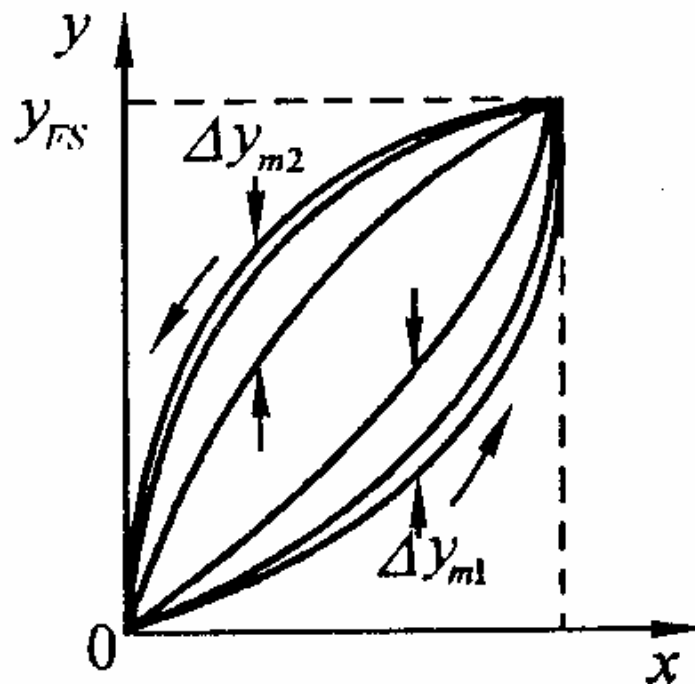
机械部分摩擦和间隙，敏感材料结构缺陷，磁性材料磁滞



3.1 测量元件的静特性——重复性误差

5. **重复性误差**：测量元件在输入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。

$$\epsilon_R = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$



3.1 测量元件的静特性——静态误差

6. **静态误差**：测量元件在全量程内任意一点的输出值与其理论输出值的偏离程度。

求取方法：把全部测试数据与理论输出(一般是拟合直线)对应值的残差，看成是随机分布，求其标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}$$

取 2σ 或 3σ 作为测量元件的静态误差。

综合性误差：非线性、迟滞、重复性等。

3.1 测量元件的静特性——静态误差

6. 静态误差

其它几种提法：

精度：测量的精确程度。真实值与测量值之差

绝对误差：测量值与被测量真值之差：测量值-真实值，有单位、有正负

相对误差： $|\text{测量值}-\text{真实值}|/|\text{测量值}| \times 100\%$ ，用来说明测量结果的准确程度

3.1 测量元件的静特性——其他性能参数

7. 测量范围和量程

测量元件能够满足规定精度时检测到的最小输入量和最大输入量，称为测量范围

测量元件能够满足规定精度时检测到的最大输入量和最小输入量之差，称为量程

如果被测量最小输入量为零，可以不做区分

3.1 测量元件的静特性——其他性能参数

8. 分辨率和分辨力

传感器的输入/输出关系不可能做到处处连续。输入量太小输出不会变化。

分辨率和分辨力都是表示传感器能检测被测量的最小值的性能指标。

分辨率是以满量程的百分数来表示，无量纲；

分辨力是以最小量程的单位值来表示，有量纲。

机械运动的摩擦、电路中的储能元件、AD位数

在最小输入处的分辨力被称为阈值

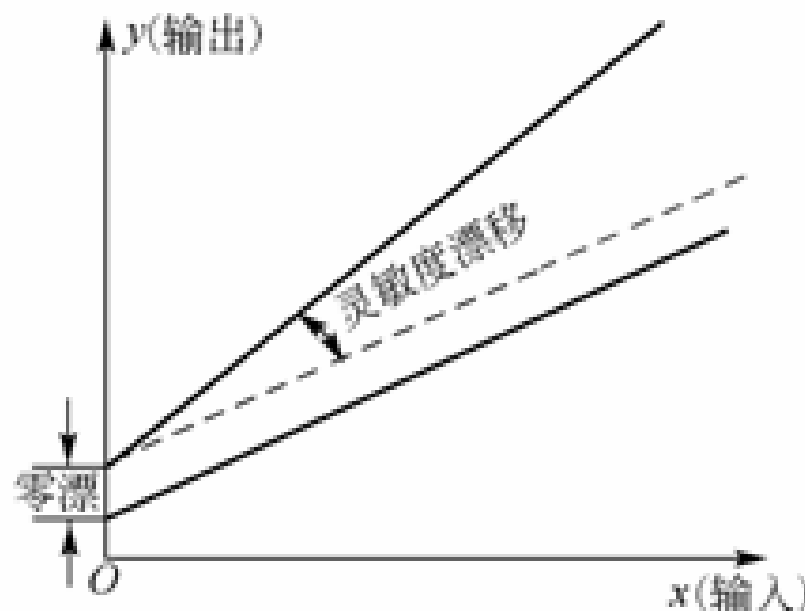
3.1 测量元件的静特性——其他性能参数

9. 稳定性:

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。

10. 漂移:

漂移是指在外界的干扰下，在一定时间间隔内，传感器输出量发生与输入量无关的或不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等，如图所示。

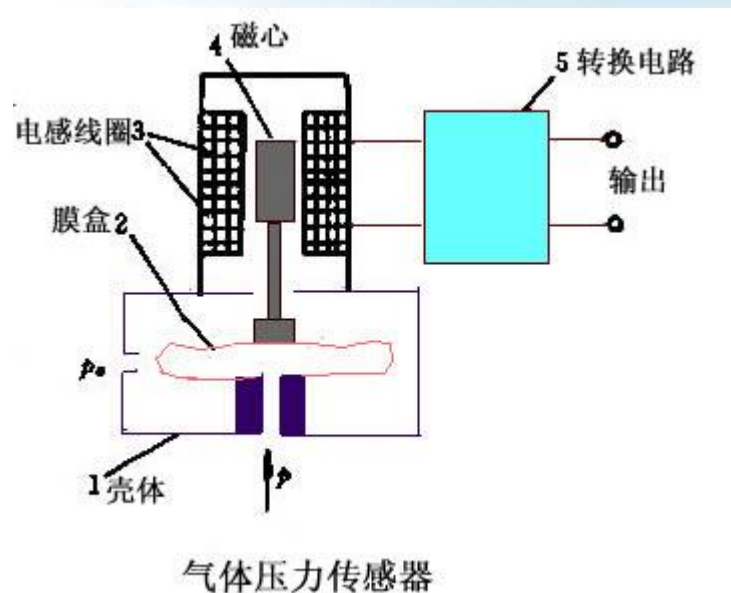


3.1 测量元件的静特性

提高传感器性能的技术途径:

如果采用差动、对称结构和差动电路（如电桥）相结合的**差动技术**，可以达到消除零位值、减小非线性、提高灵敏度、实现温度补偿和抵消共模误差干扰等的效果，改善传感器的技术性能。

（各类传感器讲授中会有相关介绍）



3.2 测量元件的动特性

测量元件的输入量由一个数值迅速变到另一个数值的过程中，呈现的特性就是动特性。数学式中含有变量对时间的导数。

和控制系统类似有三种描述方式？

1 微分方程

2 传递函数

3 频率特性

传感器动态特性研究方法

1 瞬态响应法；

2 频率响应法；

3 冲击响应法；

3.2 测量元件的动特性

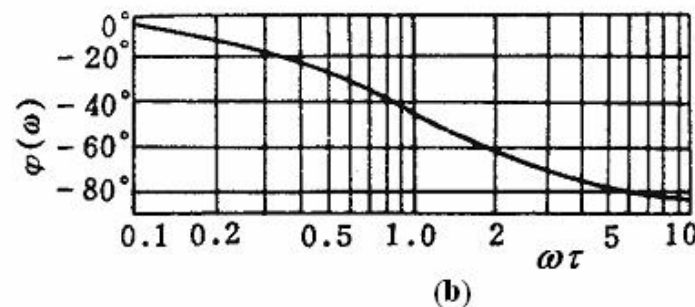
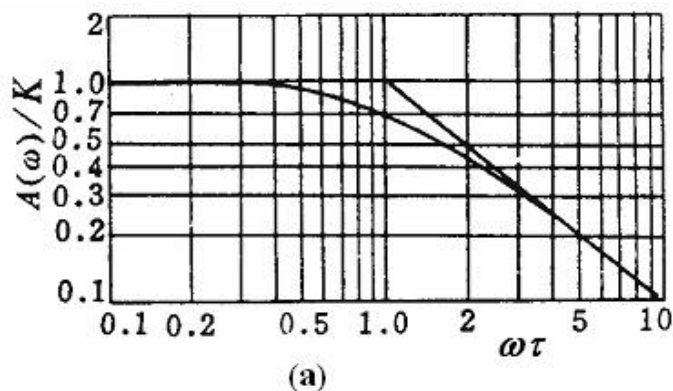
- 瞬态响应：指系统在某一典型信号输入作用下，其系统输出量从初始状态到稳定状态的变化过程。也称动态响应或暂态响应。
- 频率响应：系统对正弦信号的稳态(在过渡过程结束后的状态)响应特性叫频率响应，据其可以比较直观地评价系统复现信号的能力和过滤噪声的特性。包括幅频特性和相频特性。
- 冲击响应：系统在单位冲激函数激励下引起的零初始状态响应。在实际工程中，用一个持续时间很短，但幅度很大的脉冲来代替冲击函数。

3.2 测量元件的动特性

- 测量元件的动特性可以用测量元件的传递函数或频率特性来表示。
- 一阶测量元件：测量元件的传函是惯性环节

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T}$$

T 为时间常数， T 越小，响应速度越快



3.2 测量元件的动特性

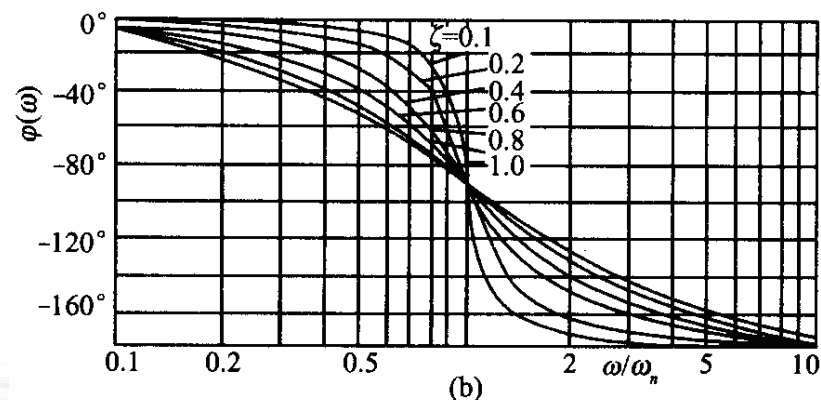
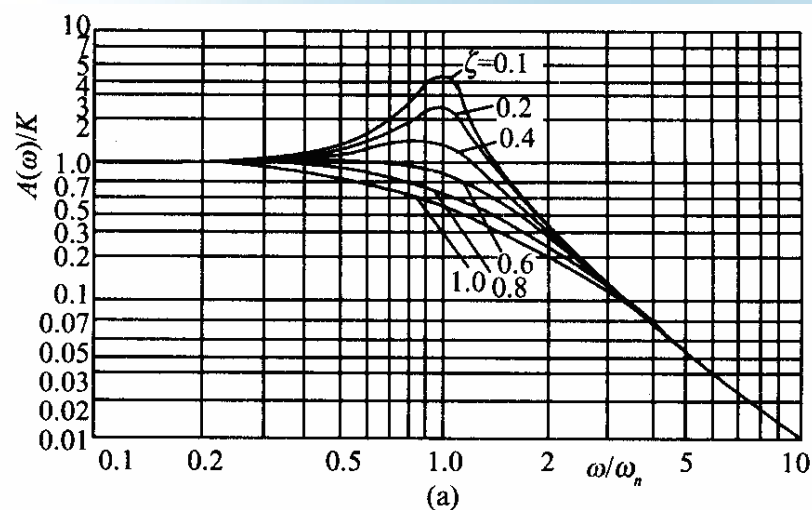
- 二阶测量元件：测量元件的传函是二阶振荡环节

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t)$$

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

ζ 称为阻尼比

ω_n 称为无阻尼自振角频率



3.2 测量元件的动特性

- 零阶测量元件：传递函数是常数 K ，即 $y=Kx$
- 当 $1/T$ 远大于控制系统的带宽，一阶测量元件可以简化为零阶测量元件
- 当 w_n 远大于控制系统的带宽，二阶测量元件可以简化为零阶测量元件
- 控制系统中，测量元件都可看成是零阶测量元件——比例环节。
- 从时域角度看，测量元件的动态特性应具有足够快的响应速度和适当的阻尼比。从频域角度看，测量元件应当具有足够宽的频带宽度。

目 录

- 1 学习重点
- 2 作用、定义、组成和分类
- 3 元件特性
- 4 选择元件时的注意事项
- 5 讨论



4 选择测量元件时的注意事项

- 静态精度要求

量程、精度、分辨力

- 动态性能要求

频域：测量的带宽高于系统带宽的**3-5**倍

时域：延时短、响应快，输出更新频率

- 环境要求

温度、湿度、化学度、冲击振动等

- 接口要求

信号形式，外形结构尺寸

4 选择测量元件时的注意事项

- 熟悉程度
尽量使用熟悉的元件
- 其它要求
价格、可靠性、维护等
- 原则：满足指标要求的前提下用最成熟的测量元件。

目 录

- 1 学习重点
- 2 作用、定义、组成和分类
- 3 元件特性
- 4 选择元件时的注意事项
- 5 讨论

5 系统中的测量元件



5 系统中的测量元件

