



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A

8.1- 测量元件概述



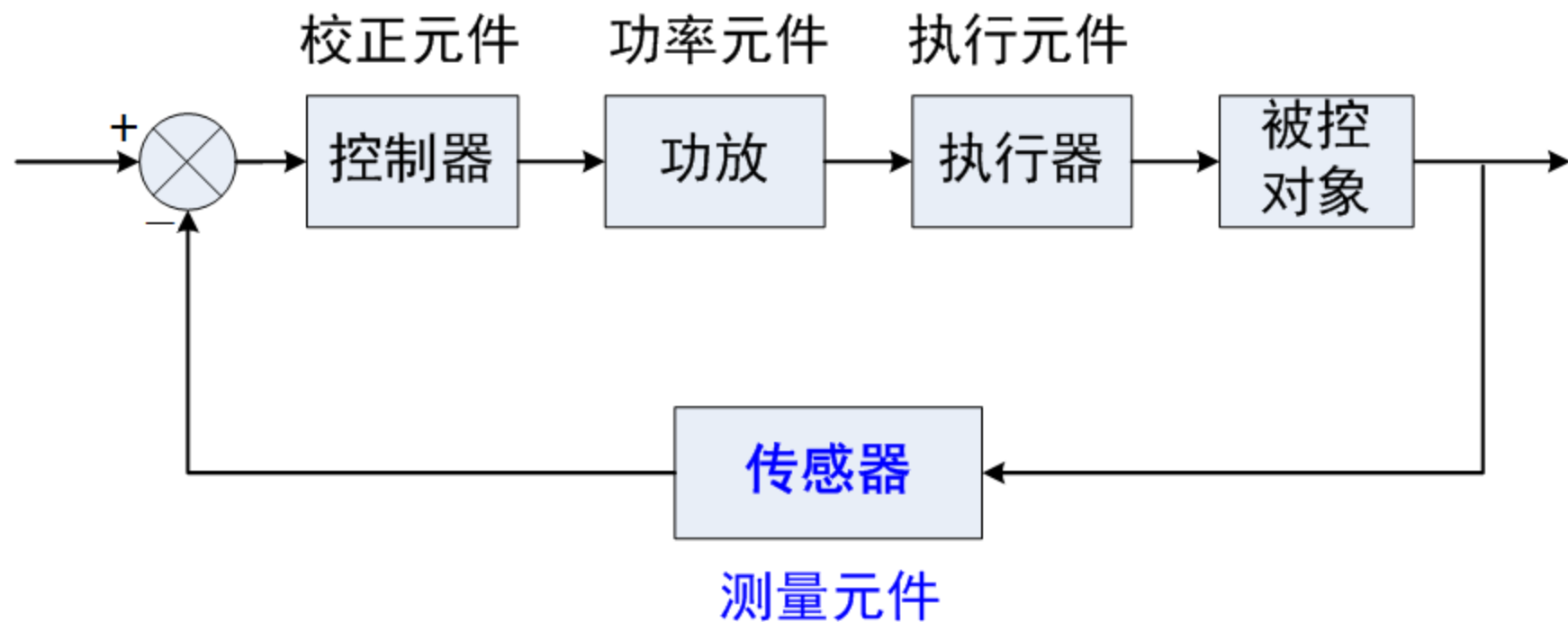
目 录

1. 测量元件的作用
2. 测量元件的定义、组成和分类
3. 测量元件的特性
4. 选择测量元件时的注意事项
5. 测量元件的发展
6. 小结



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件



1. 测量元件的作用

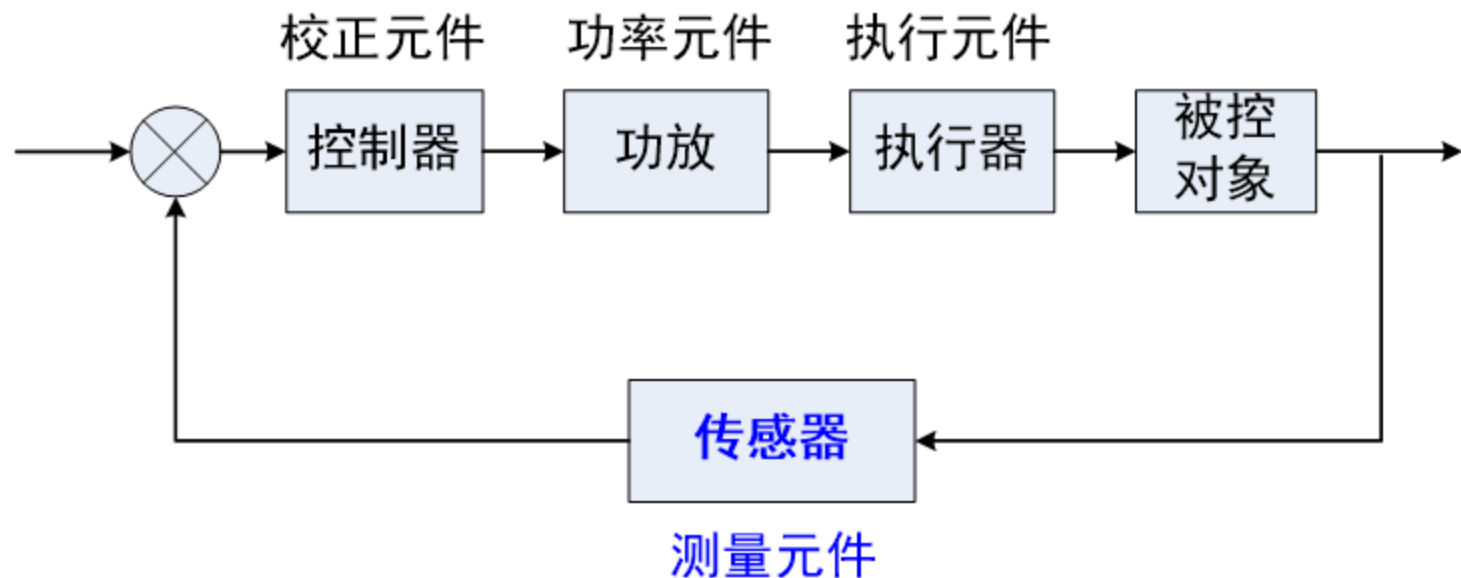
1.1 控制系统与测量元件

1. 校正元件：作用是改善系统的性能，使系统能正常可靠地工作并达到规定的性能指标。
2. 功放元件：提供能量，将微弱控制信号放大驱动执行元件。
3. 执行元件：功能是驱动被控对象，控制或改变被控量。
4. 测量元件：功能是检测被控量，并转换成系统希望的另一种容易处理和使用的量。



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件



- 控制系统中为什么需要反馈（测量元件）？



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件

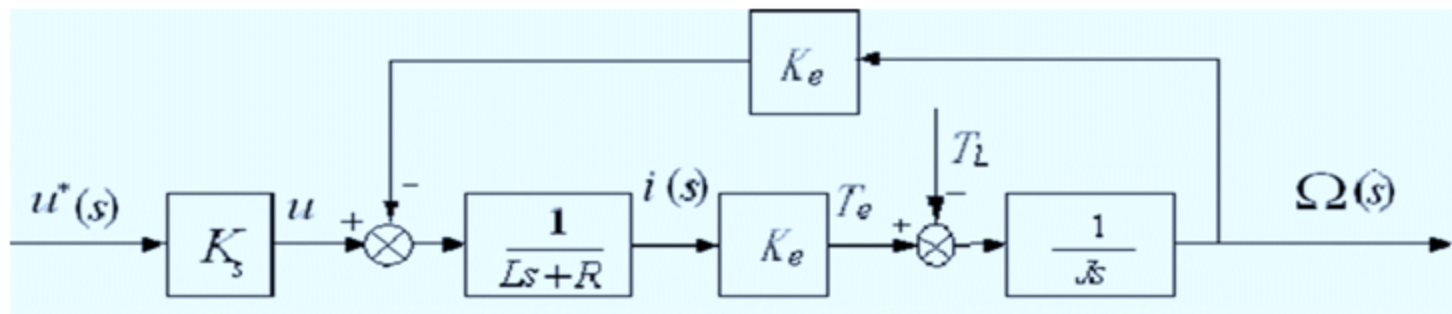
- 控制系统中存在各种不确定性
 - 1. 模型结构不确定性（假设、降阶、近似）

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

- 2. 模型参数不确定性（老化、温度、工况、工艺）

$$K + \Delta K, L + \Delta L, R + \Delta R, J + \Delta J, D + \Delta D$$

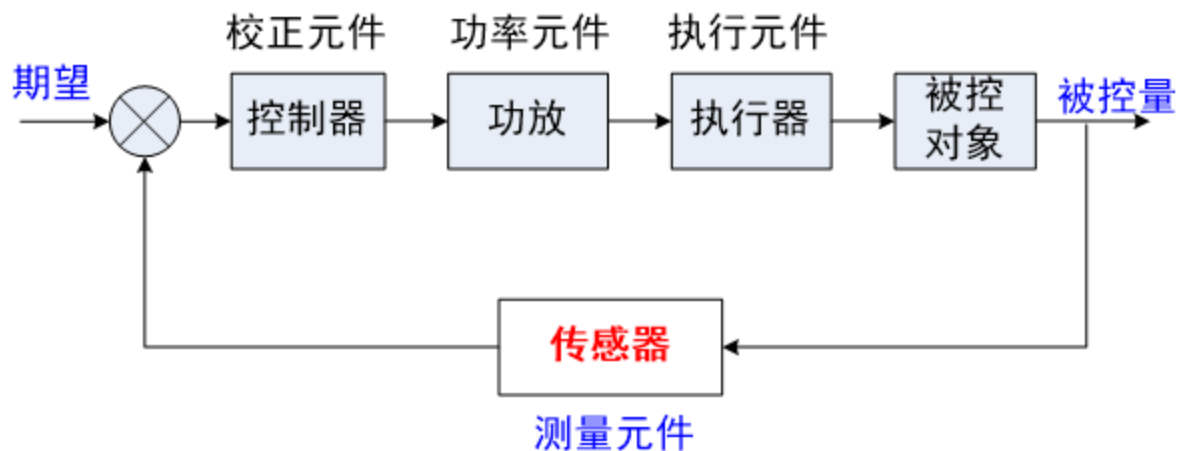
- 3. 各种外部扰动



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件

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。

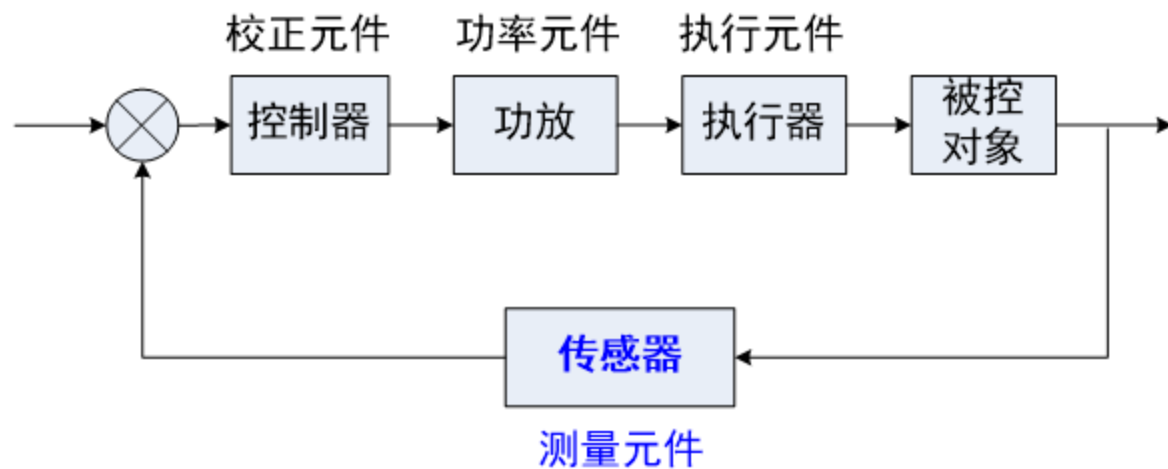


控制系统要有效抑制各种不确定性，保证控制性能，就必须应用测量元件实现负反馈闭环控制。



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件



- 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
 - 没有测量元件只是开环控制



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件



- 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，是整个系统实现的关键，整个系统的精度、性能往往取决于测量元件的精度和性能。
- 测量元件是控制系统的感觉器官，只有能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”作用。



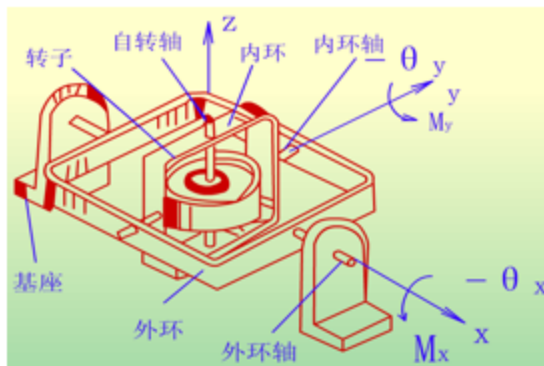
1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件

- 两种元件相互依赖
- 一些执行元件中用到测量元件



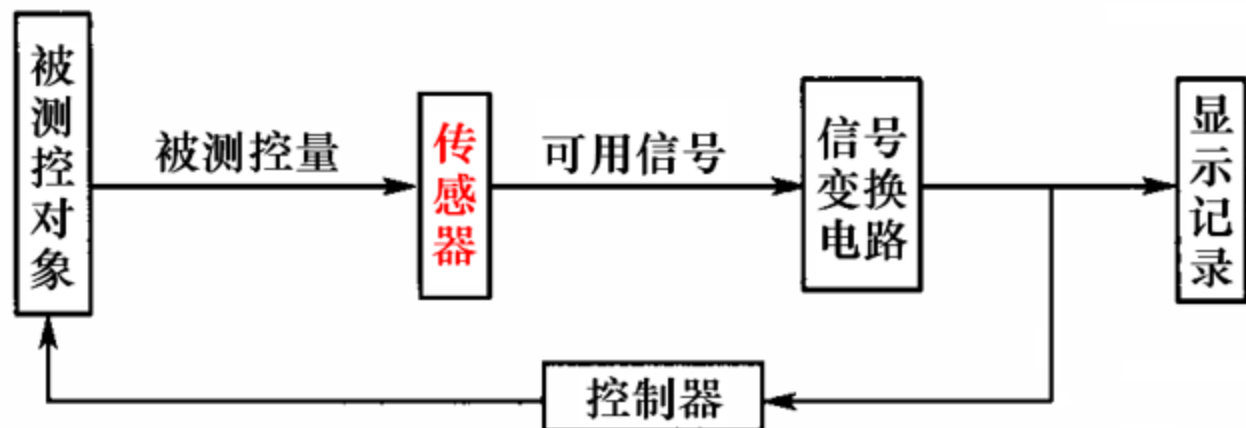
- 一些测量元件中用到执行元件



1. 测量元件的作用

1.1 控制系统与测量元件

- 自动化控制系统，大量使用各种传感器。传感器与传感器技术是现代工业自动检测与控制发展的关键支撑。



- 二十一世纪作为信息时代，传感器与传感器技术是现代信息技术（传感器技术、通信技术和计算机技术）的三大支柱之一，是信息系统的“源头”。

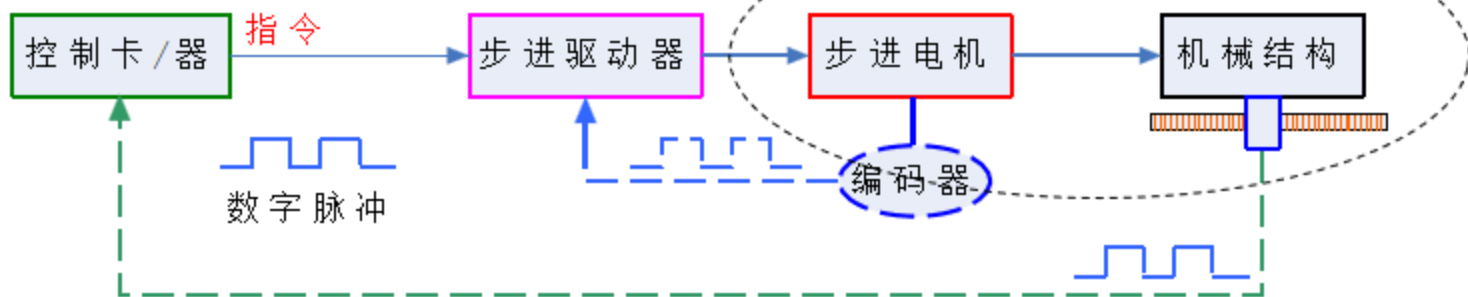


1. 测量元件的作用

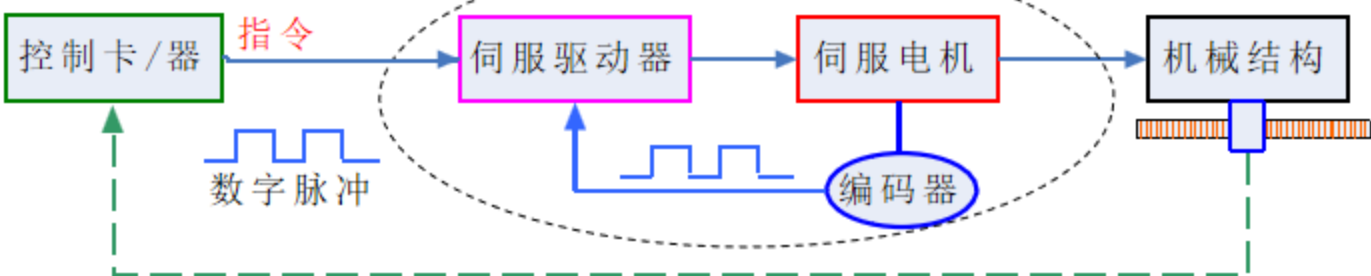
1.2 根据测量元件不同的控制系统

三大系统

开环系统



半闭环系统



全闭环系统

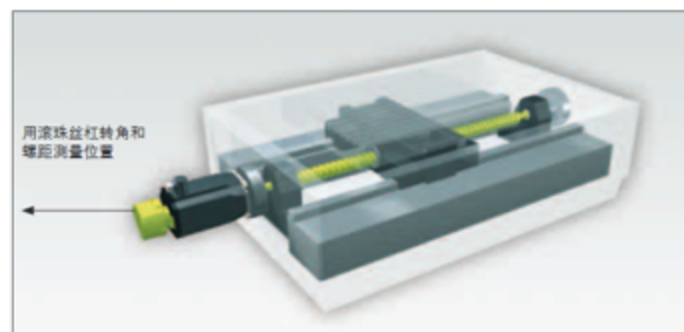
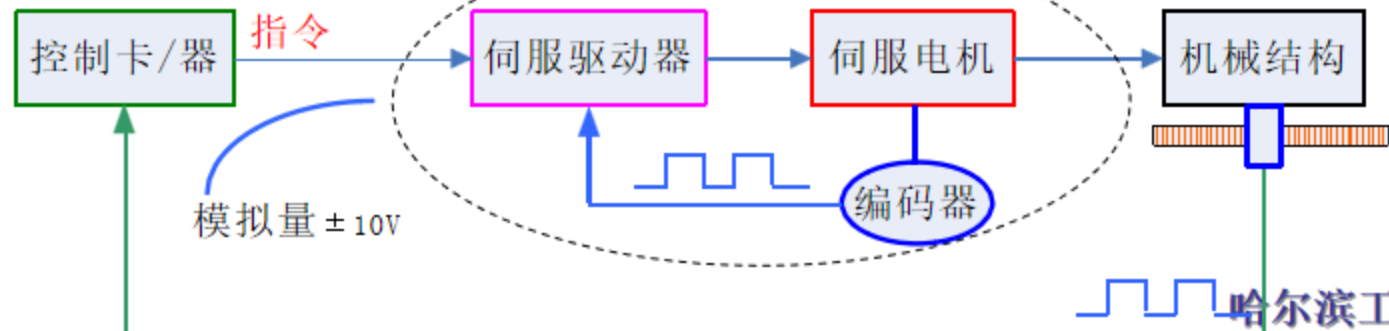


图2 半闭环控制的滚珠丝杠与旋转编码器的位置反馈控制

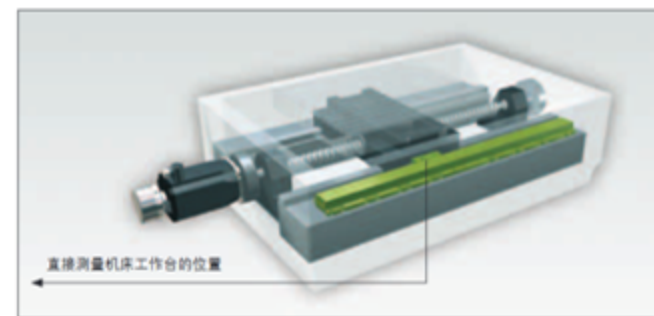


图3 全闭环控制模式下的直线光栅尺位置反馈控制



1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统

开环控制方式

- 没有位置测量装置（有位置测量元件但没有接入在回路中，测量元件只做观测），**信号流是单向的**（数控装置→进给系统），故系统**稳定性好**。
- 无位置反馈，**精度相对闭环系统来讲不高**，其精度主要取决于**伺服驱动系统和机械传动机构的性能和精度**。
- 一般以**功率步进电机**作为伺服驱动元件。
- 这类系统具有**结构简单、工作稳定、调试方便、维修简单、价格低廉**等优点，在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用。



1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统

半闭环控制方式

- 半闭环系统的位置采样点是从**驱动装置**(常用伺服电机)或**丝杠**引出, 采样**旋转角度**进行检测, 不是直接检测运动部件的实际位置。
- 半闭环环路内不包括或只**包括少量机械传动环节**, 因此可获得稳定的控制性能, 其系统的**稳定性**虽不如开环系统, 但比闭环要好。
- 由于**丝杠的螺距误差和反向间隙**引起的运动误差难以消除。因此, 其精度较闭环差, 较开环好。但可对这类误差进行补偿, 因而仍可获得满意的精度。**由于传动机构部在控制回路中, 故这部分的精度完全由传动机构的传动精度来保证。**
- 半闭环系统**结构简单、调试方便、精度也较高。**



1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统

全闭环控制方式

- 全闭环控制系统的位置采样点如图所示，直接检测运动部件的实际位置，精度高。
- 全闭环环路内包括**机械传动环节多**，易导致系统不稳定。
- 全闭环系统**复杂、调试较难、成本高**。
- **从理论上讲，闭环系统的定位精度取决于测量元件的精度，但这并不意味着可降低对传动机构的精度要求。传动副间隙等非线性因素也会造成系统调试困难**，严重时还会对系统的性能下降，甚至引起振荡。



1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统

驱动精度的保证

举例：阵列孔工件

闭环控制或半闭环控制模式的进给轴精度可以用连续加工简单阵列孔工件说明，阵列孔沿长度方向均匀分布。半闭环控制模式加工时，温度导致的误差造成钻孔位置改变，可以明显看出滚珠丝杠的受热影响。半闭环控制模式下的加工误差也可以用同一毛坯被加工为同批次的多个零件方法检查。

图4为同一毛坯被加工为同批次多个工件情况。第一步，加工两个端面和三个孔。然后空刀运动模拟这些加工步骤30次。之后，用2 mm进给对工件进行铣削加工。

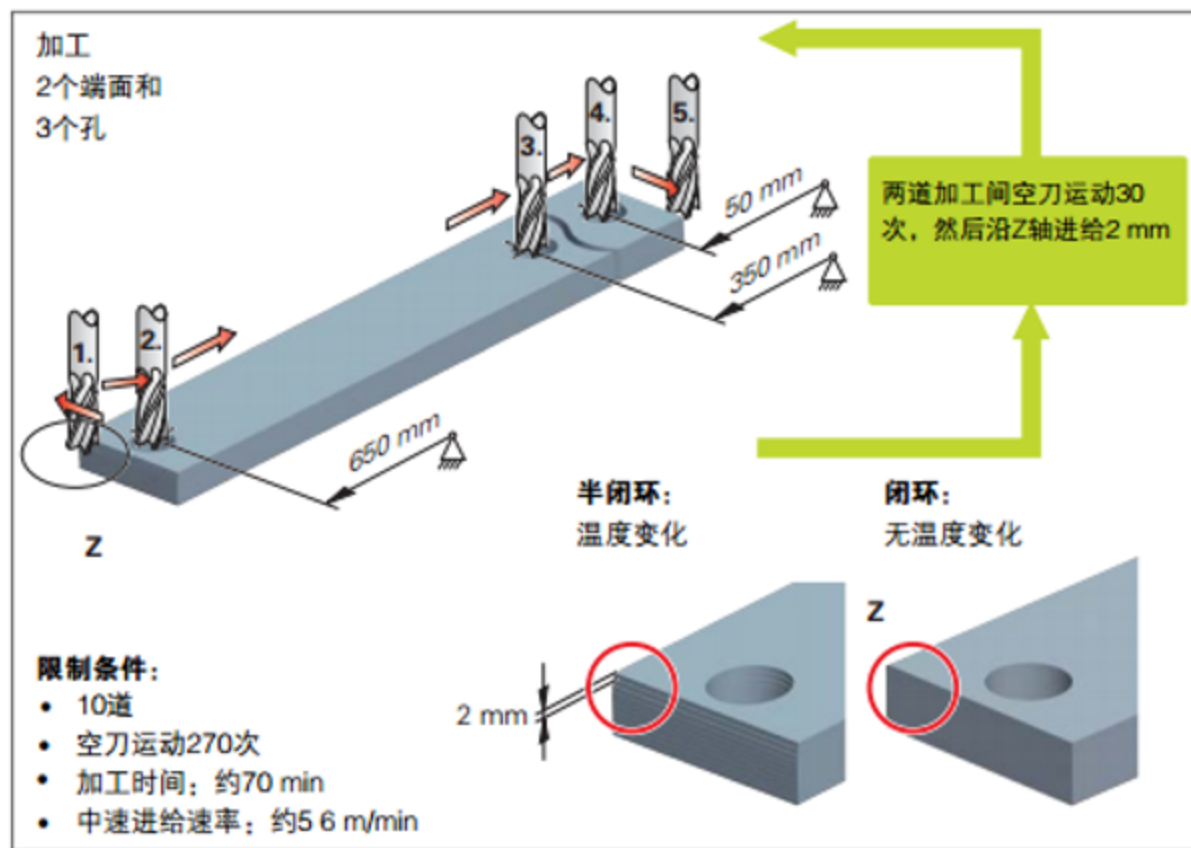


图4： 驱动精度对连续生产的影响
△ = 滚珠丝杠的固定轴承

1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统

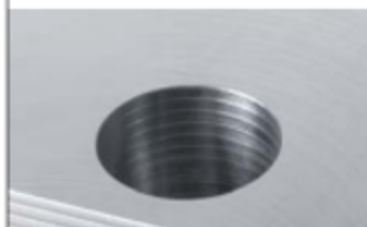
70分钟后进行了10道走刀和共270次空刀运动，加工结束。滚珠丝杠产生的大量热量造成正端面和孔内表面（图5）形成台阶状误差。

距离滚珠丝杠固定轴承最远位置处孔偏移距离达 $213\ \mu\text{m}$ 。按照DIN ISO 230-3标准用VM 182比较仪测量热稳定性造成的位置误差也能得到类似结果：滚珠丝杠螺母距离固定轴承位置越远，位置偏移越大。在闭环控制模式下，高精度直线光栅尺可以补偿温度变化影响。

VDI-DGQ 3431和DIN/ISO 230-2测试标准通常用于确定机床验收精度，但它不包括温度影响的精度。

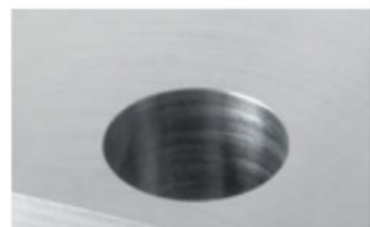
总结

要成功完成加工订单，必须要求机床具有高的热稳定性。即使负荷受力不同，也必须保证加工精度。这样才能在整个行程上保证要求的公差精度，包括速度和切削力大幅变化时。直线进给轴驱动的滚珠丝杠



半闭环：
温度变化

闭环：
无温度变化



1. 测量元件的作用

1.2 根据测量元件不同的控制系统



图6: 连杆, 一个毛坯加工两次

350 mm和公差等级为IT7的功能尺寸相当于 $\pm 28 \mu\text{m}$ 的允许偏差。半闭环控制模式的第二件无法满足这项要求。偏差达 $44 \mu\text{m}$ 。采用了直线光栅尺全闭环控制模式的机床上加工的零件没有这个棱边。

全闭环控制模式下 $10 \mu\text{m}$ 偏差是由于机床几何形状的热变形和结构变形造成的。甚至, 两孔尺寸要求公差还提高到IT5。因此从最开始就能保证高的加工精度。



目 录

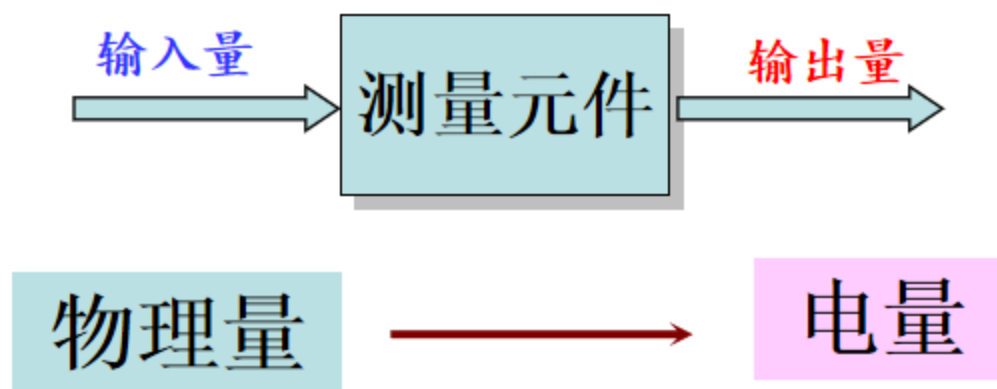
1. 测量元件的作用
2. 测量元件的定义、组成和分类
3. 测量元件的特性
4. 选择测量元件时的注意事项
5. 测量元件的发展
6. 小结



2 测量元件的定义、组成、分类

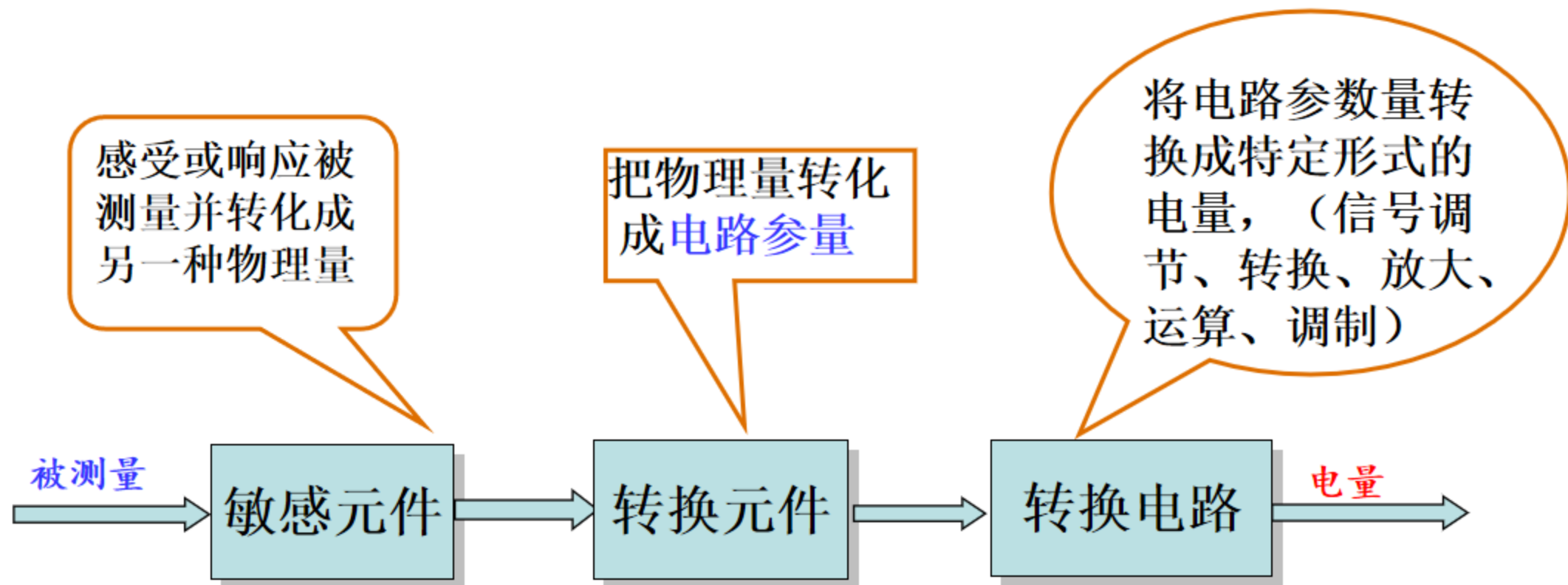
测量元件：检测一种物理量，（按照一定的对应关系/精确度）转换成容易处理的另一种物理量。

- 功能：检测和转换。
- 处理：放大、加减、积分、微分、滤波、存储和传送。
- 容易处理的物理量：主要指的是电信号。



2 测量元件的定义、组成、分类

传感器的组成



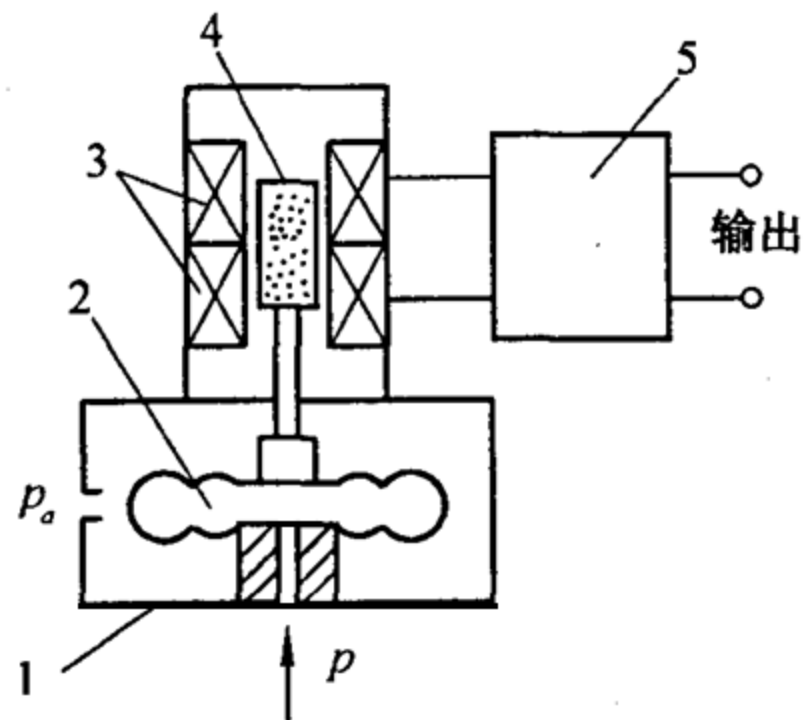
2 测量元件的定义、组成、分类

例：气体压力传感器

敏感元件—膜盒，把气压 p 转换成位移

转换元件—可变电感 3 ，把位移量转换成电感

转换电路—将电感转换成电压

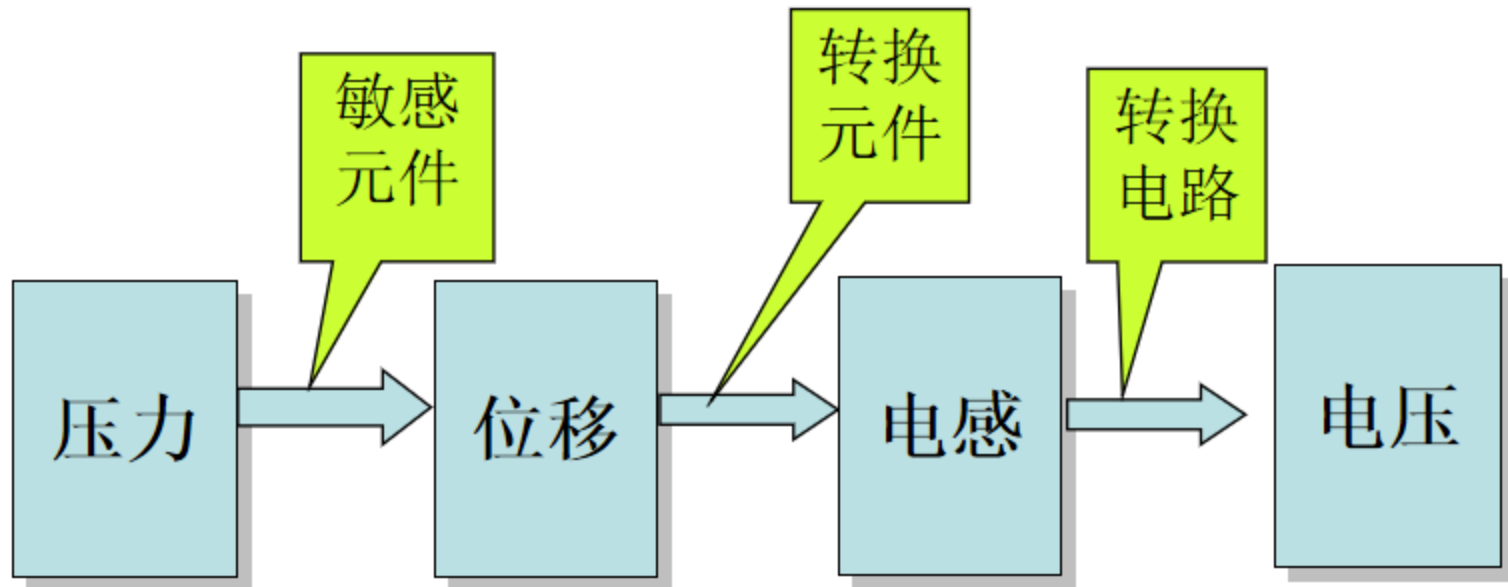
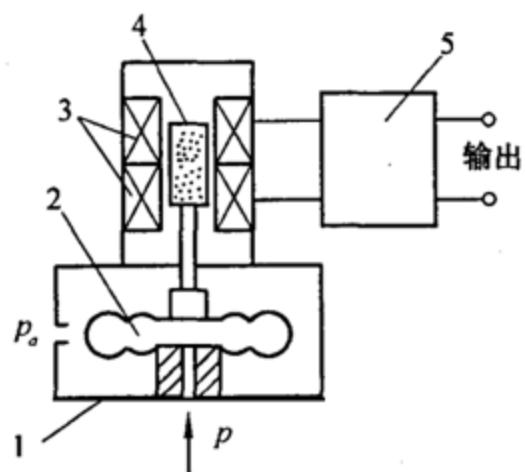


1、壳体；2、膜盒；3、电感线圈；
4、磁芯；5、转换电路
 p_a 大气压； p 被测气压



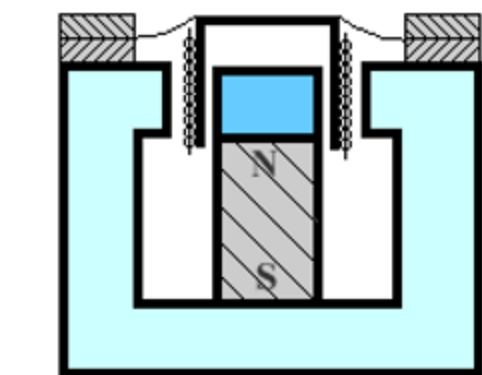
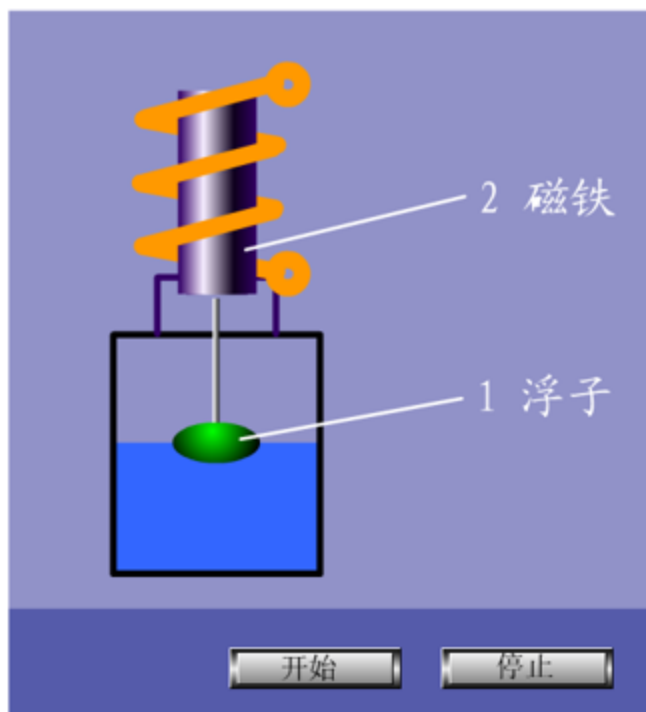
2 测量元件的定义、组成、分类

例：气体压力传感器



2 测量元件的定义、组成、分类

例子：其它传感器



动圈式磁电传感器工作原理
线速度型



柱式测力传感器

2 测量元件的定义、组成、分类

- **变送器**：输出标准信号的传感器。将一种量变换成标准信号（另一种量）并把它送出去。
- **常用的标准信号**：物理量的形式和数值范围

电压： $-10\sim+10\text{V}$ ， $0\sim10\text{V}$ ； 电流： $4\sim20\text{mA}$ 、 $0\sim10\text{mA}$ ； 气压 $20\sim100\text{kPa}$

标准信号与非标准信号以及标准信号之间也可以用**转换器**进行相互转换（气/电）。
物理量的形式和数值范围都符合国际标准的信号，兼容性好、互换性好。



2 测量元件的定义、组成、分类

测量元件的分类

- 根据被测量的性质:

位移（角位移、线位移）、速度、加速度、温度、力矩、压力、电压、电流等

- 根据工作原理:

电磁式（旋转变压器、感应同步器、测速发电机等）、电阻式、电容式、电感式、变压器式、应变式、热电式、光电式传感器等



2 测量元件的定义、组成、分类

- **根据实现方式：**

可分为物性型、结构型和复合型传感器。

物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换，如：热电偶、应变片。

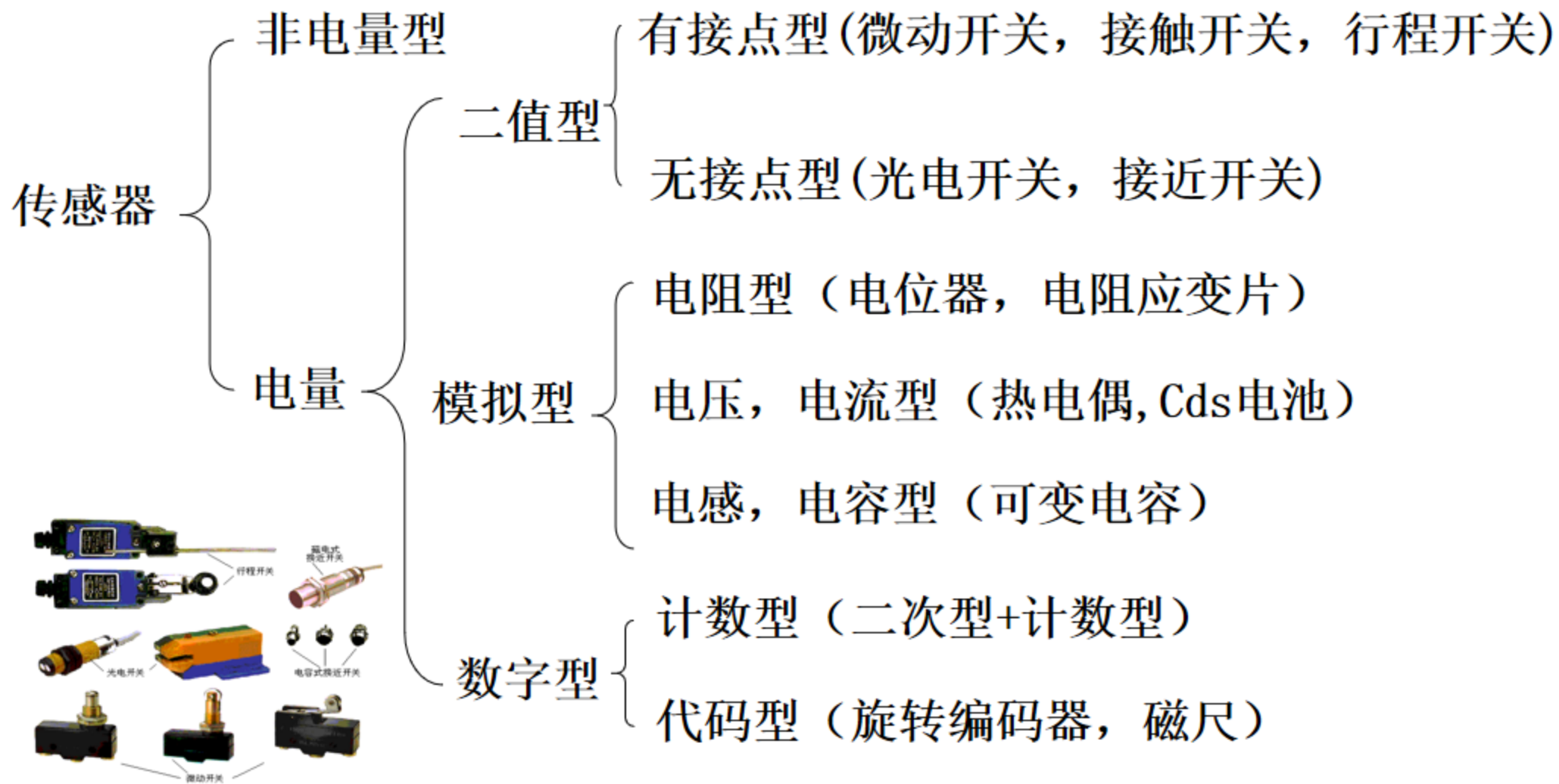
结构型传感器是依靠传感器结构参数的变化实现信号变换，如：电容式、电感式传感器。

- **根据输出信号形式** 见下页。



2 测量元件的定义、组成、分类

- 根据输出信号形式



2 测量元件的定义、组成、分类

例：气体压力传感器

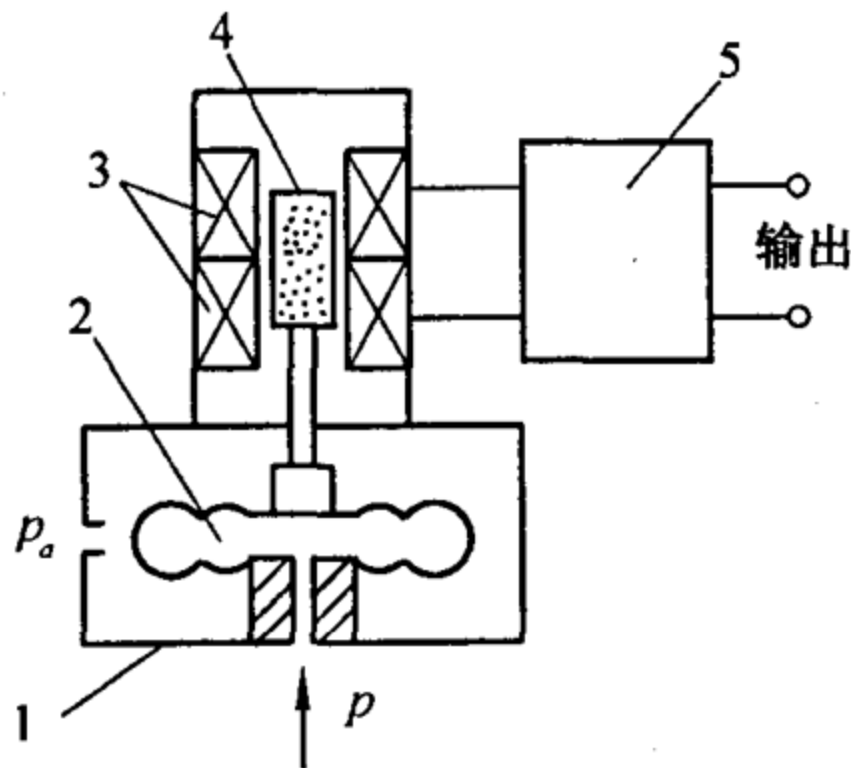
属于哪一类传感器？

压力传感器

电磁感应原理

结构型

模拟型



目 录

1. 测量元件的作用
2. 测量元件的定义、组成和分类
3. 测量元件的特性
4. 选择测量元件时的注意事项
5. 测量元件的发展
6. 小结



3 测量元件的特性

- **理想特性**：输入和输出一一线性对应。
- **静态特性**：在稳态条件下(输出中无暂态分量，输入量和输出量不再变化)用分析或实验方法所确定的输出输入关系。静特性适用于输入不随着时间变化或变化缓慢的情况。
- **动态特性**：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，它呈现的特性就是动特性，此时变量对时间的导数项不可忽略。

3 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

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中： y —— 输出量；

x —— 输入量；

a_0 —— 零点输出；

a_1 —— 理论灵敏度；

$a_2, a_2 \cdots a_n$ —— 非线性系数

大多数测量元件的**理想静特性**：

$$y = f(x) = kx$$



3 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

$$\text{变换函数: } y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

变换函数的结构和形式一般是在分析或实验的基础上建立的，其参数多在实际标定实验中，利用统计分析和曲线拟合的方法予以确定。

曲线拟合方法很多，有理论拟合、过零拟合、端点拟合、端点平移拟合、最小二乘拟合等。

最小二乘拟合在实际中应用较多，多采用线性方程式： $y=ax+b$ 的形式。以 N 个测试点数据，计算得到系数 a 和 b ，使实验数据对拟合直线上对应值残差的平方和最小。

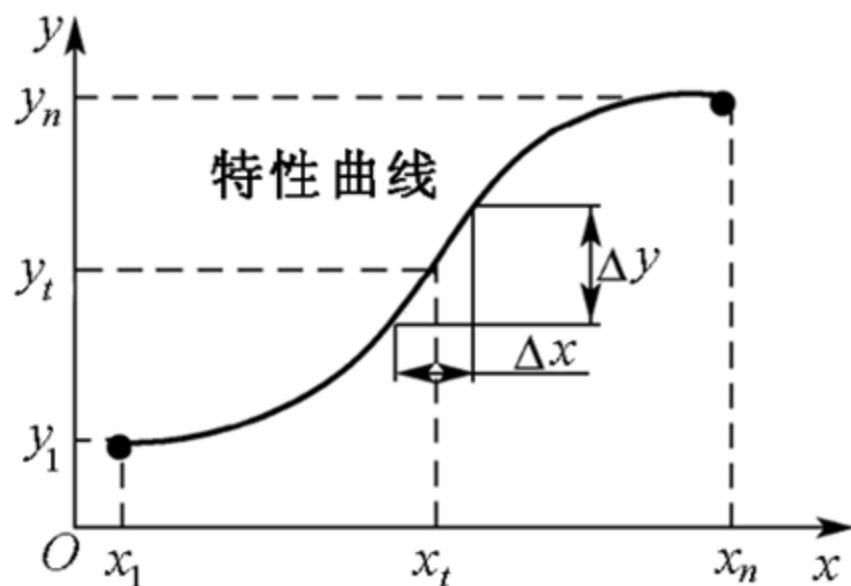


3 测量元件的静特性—灵敏度

2. 灵敏度和线性度（非线性误差）

- 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。非线性静特性，不同的点有不同的灵敏度。线性静特性，灵敏度不变。

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{d y}{d x}$$

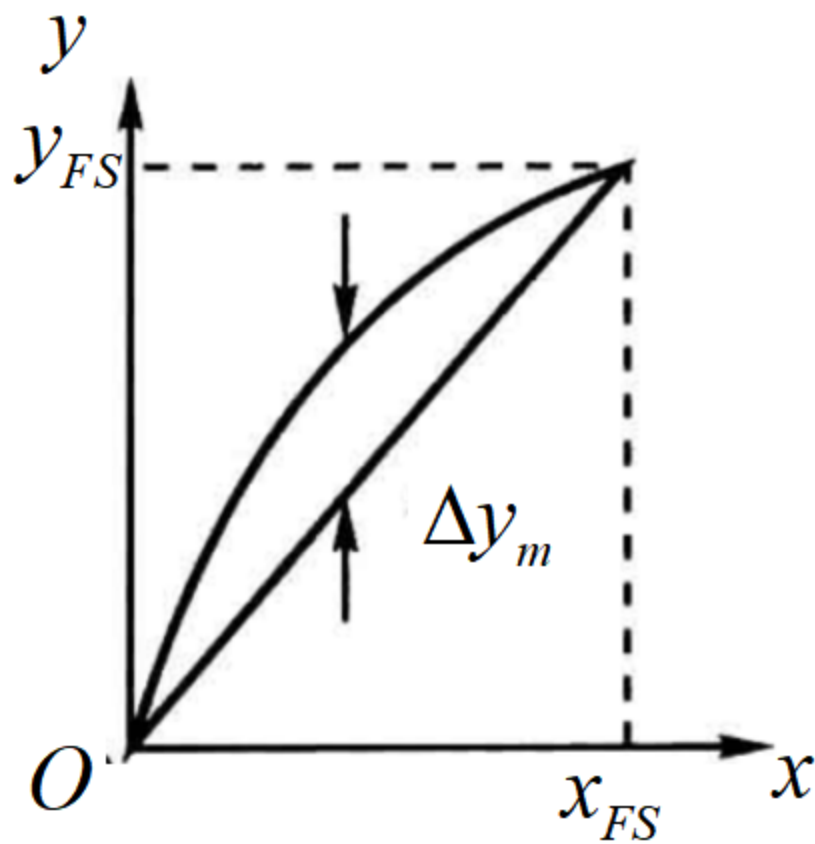


3 测量元件的静特性—线性度

2. 灵敏度和线性度（非线性误差）

- 线性度或非线性误差：静特性曲线偏离某种拟合直线或规定直线的程度。

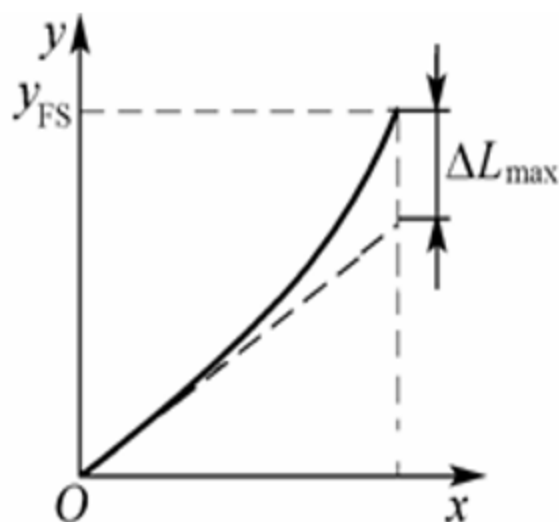
$$\varepsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$



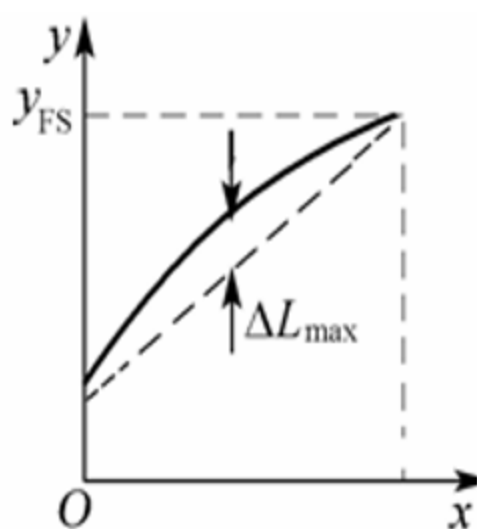
3 测量元件的静特性—线性度

2. 灵敏度和线性度（非线性误差）

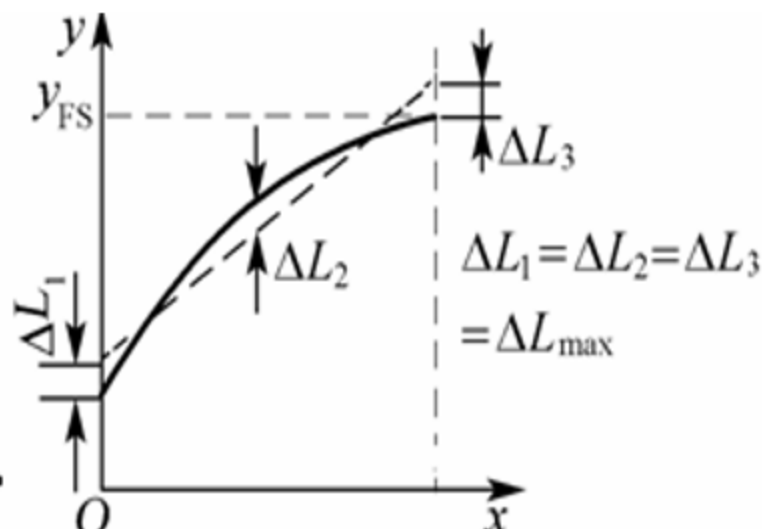
- 在非线性误差不太大的情况下，通常采用直线拟合的方法来线性化。采取不同的方法选取拟合直线，可以得到不同的线性度。



(a)理论拟合



(b)端点拟合



(c)端点平移拟合



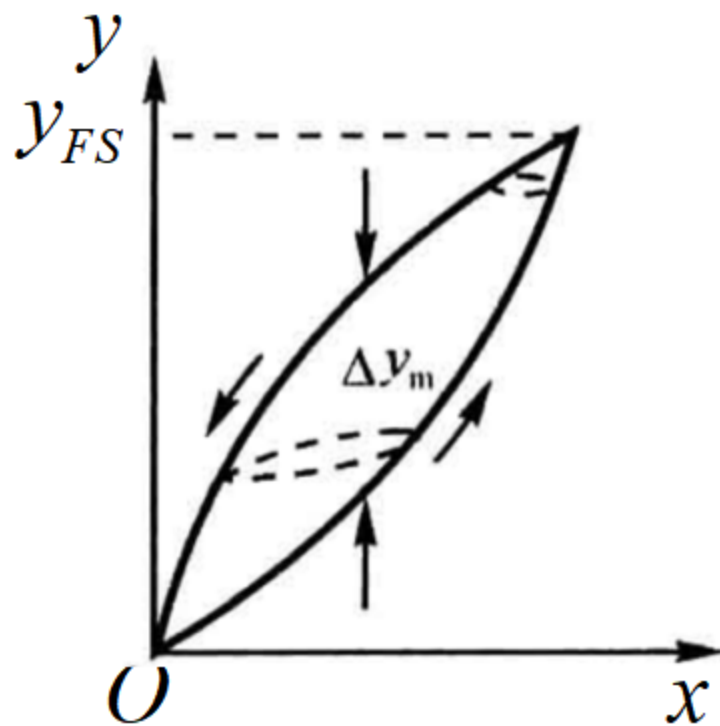
3 测量元件的静特性—滞环

3. 滞环（迟滞）

测量元件正反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。滞环误差的计算同上。

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

机械部分摩擦和间隙，
敏感材料结构缺陷，
磁性材料磁滞

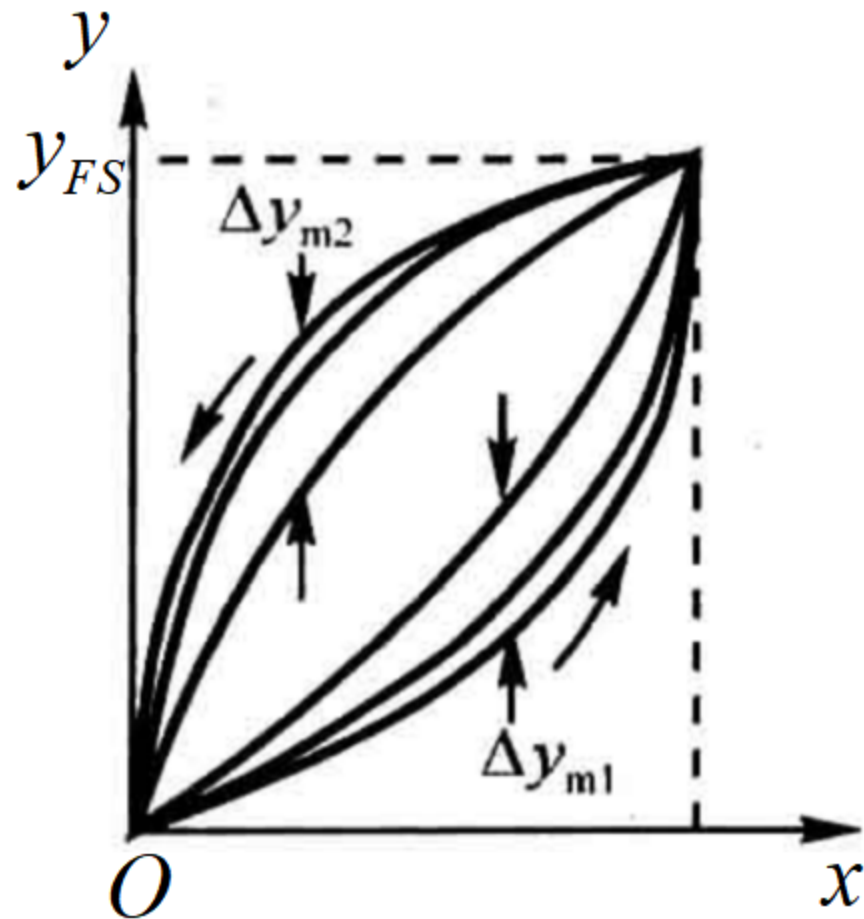


3 测量元件的静特性—重复性误差

4. 重复性误差

输入按同一方向作全量程连续多次变化时的误差。

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



3 测量元件的静特性—静态误差

5. 静态误差

- 定义：全量程范围内，测量元件输出值与理论值的偏离误差。
- 求取方法：测试数据与理论输出值的标准偏差

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

取 2σ 或 3σ 作为测量元件的静态误差。

综合性误差，包含了非线性、迟滞、重复性等。



3 测量元件的静特性—静态误差

5. 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 测量元件的静特性—其它性能参数

- 测量范围和量程

测量范围：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。

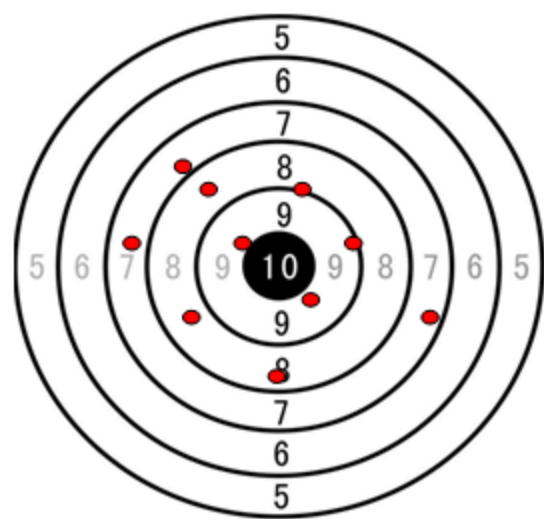
量程：测量元件能够满足规定精度时检测到的最大输入量和最小输入量之差。

如果被测量最小输入量为零，上述二者可以不做区分，如力矩、速度等。

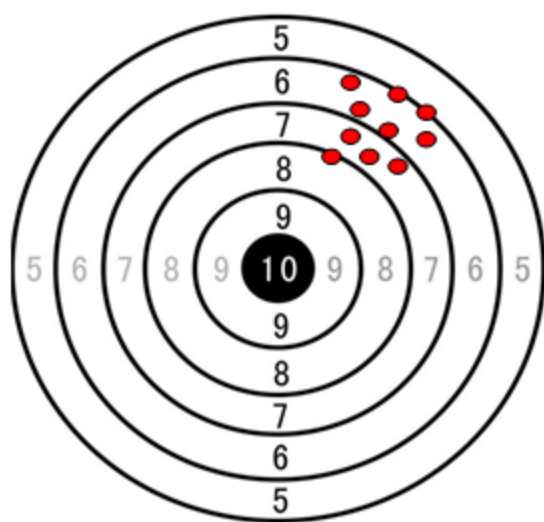


3 测量元件的静特性—其它性能参数

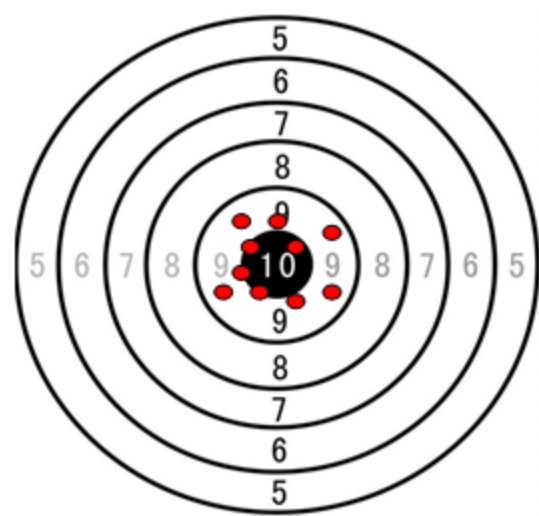
1. 准确度 反映测量结果中系统误差的影响程度；
2. 精密度 反映测量结果中随机误差的影响程度；
3. 精确度 反映测量结果中以上两个误差综合影响程度；



准确度高
系统误差小而随机误差大



精密度高
系统误差大而随机误差小



精确度高
系统误差与随机误差都小



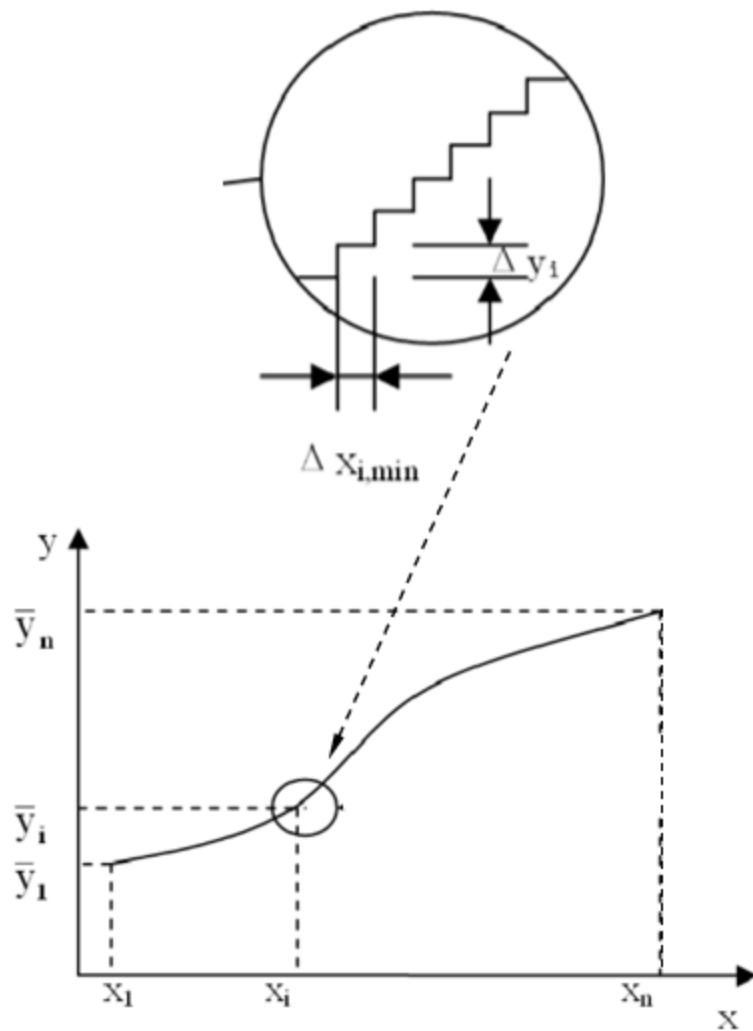
3 测量元件的静特性—其它性能参数

分辨力的物理意义及其产生原因

1、当输入 Δx_i 太小时，输出量不变，系统对此输入变化不能进行有效分辨。当输入量变化大到一定程度时，输出量才会发生变化

2、分辨力是指测量系统能够有效地辨别输出量的最小变化量，是有量纲的数。当被测量的变化小于分辨力时，传感器对输入量的变化无任何反应。

3、够引起测量系统分辨力有限的原因多种多样，主要包括各种机械摩擦，**A/D**转化位数限制等。



3 测量元件的静特性—其它性能参数

分辨力的定义

- 1、对于第*i*个测量点 x_i ，当输入变化量 $\Delta x_i < \Delta x_{i,\min}$ 时，即 $x_i < x < x_i + \Delta x_{i,\min}$ ，而系统的输出 y 维持不变。只有当 $\Delta x_i > \Delta x_{i,\min}$ 时，即 $x > x_i + \Delta x_{i,\min}$ ，系统的输出才会出现可以观察到的变化量 Δy_i 。则 $\Delta x_{i,\min}$ 为测量点 x_i 处的分辨力；
- 2、在测量系统整个测量范围 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 内，每一点 x_i 的分辨力不同；
- 3、只要输入量的变化 Δx 大于所有点的分辨力中的最大者，在整个测量范围内都能产生可观测的输出变化。
- 4、测量系统的分辨力定义为 $R = \max |\Delta x_{i,\min}|$



3 测量元件的静特性—其它性能参数

- **分辨率和分辨力**（两者在英文中都是"**Resolution**"，英文中的具体含义，需要根据上下文来判断）

分辨力定义为： $R=\max|\Delta x_{i,\min}|$

分辨率定义为： $y=\max|\Delta x_{i,\min}|/(x_{\max}-x_{\min}) =R/(x_{\max}-x_{\min})$

分辨率和分辨力都是表示传感器能**检测**被测量**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。

对最小输入的分辨力被称为灵敏阈值或者灵敏限。

目前在工业现场提到的分辨率，大部分实际上指的就是分辨力，**教材里的分辨率实际上指的也是分辨力**。因此，为了不造成混乱，我们在所有论述中，就用分辨率表示**分辨力**。



3 测量元件的静特性—其它性能参数

如何提高测量系统分辨率

通常，测量系统分辨率，不单单取决于反馈系统的分辨率，比如光栅尺，或者其他位移传感器的分辨率，而且还和传动系统有关系。

如用齿轮齿条传动，如果没有预压，啮合间隙会导致传动间隙，使分辨率下降。

如用滚珠丝杠传动，如果没有预压，也会有传动间隙，使分辨率下降。

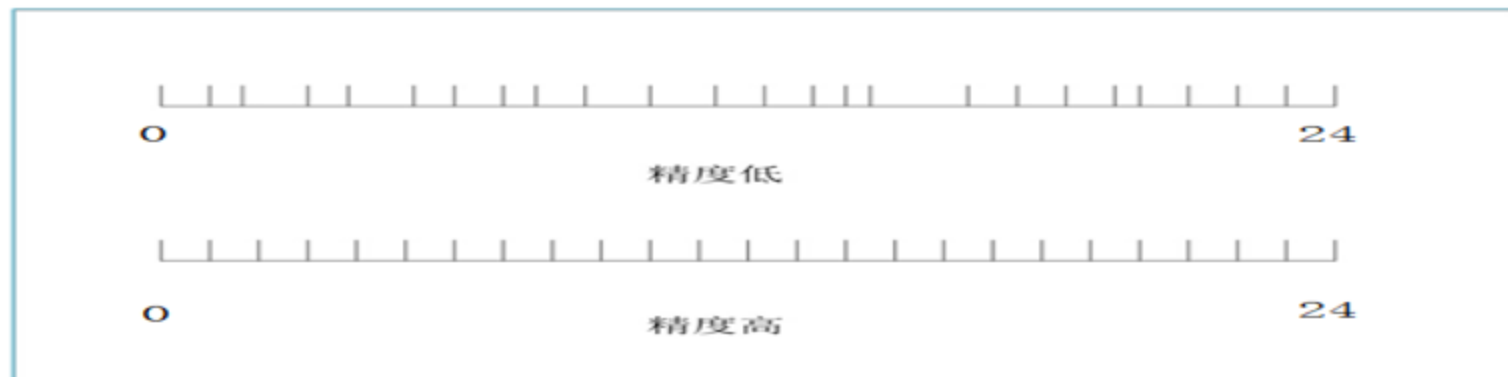
而用直线电机，直接驱动，可以达到零间隙传动，使得分辨率接近位移传感器的分辨率。

提高系统的分辨率，重点在于提高机械系统的分辨率，而不只在于提高位移传感器的分辨率，因为有些传感器的分辨率，可以通过细分达到很高，但是机械分辨率跟不上，会使得细分失去意义。



3 测量元件的静特性—其它性能参数

分辨率和精度之间关系



“精度”是用来描述物理量的准确程度，其反应的是测量值与真实值之间的误差。

精度，更多的偏向于机械方面，一个产品生产出来后，它的精度基本已经固定（有些高精度的产品可以对信号进行补偿等来提高精度），这个数值是通过检测出来的。

简单比喻：一把常见的量程为**10**厘米的刻度尺，上面有**100**个刻度，最小能读出**1**毫米的有效值。那么我们就说这把尺子的分辨率是**1**毫米，用这把尺读出来的**2**毫米，我们并不知道读数值与真实绝对的**2**毫米之间的误差值，**读数值和真实值两个值之间的偏差就是精度**。所以说，精度是在分辨率的基础上描述的。



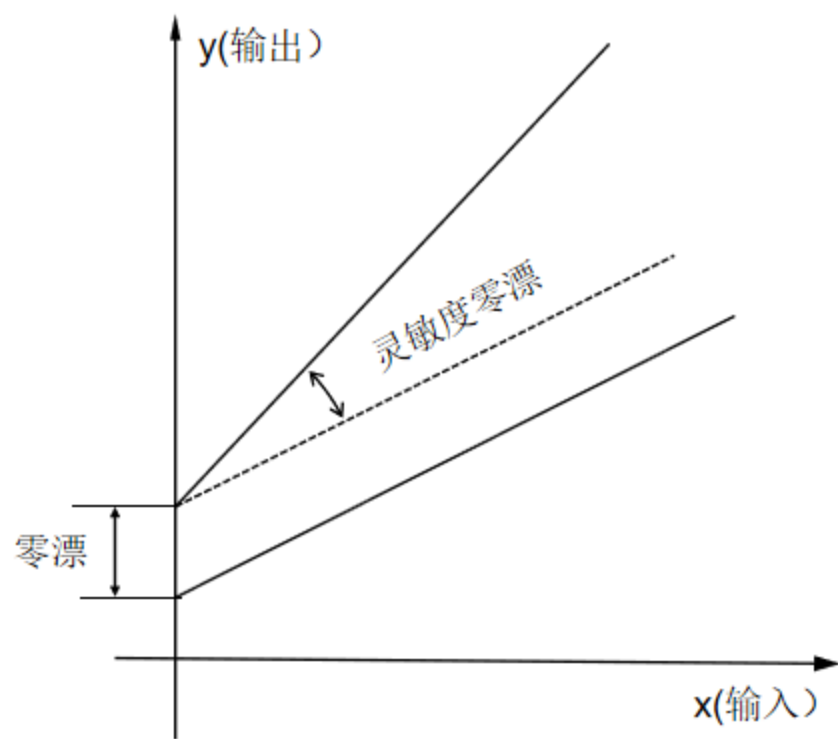
3 测量元件的静特性—其它性能参数

- 稳定性:

传感器在较长工作时间内保持其性能参数的能力。

- 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。



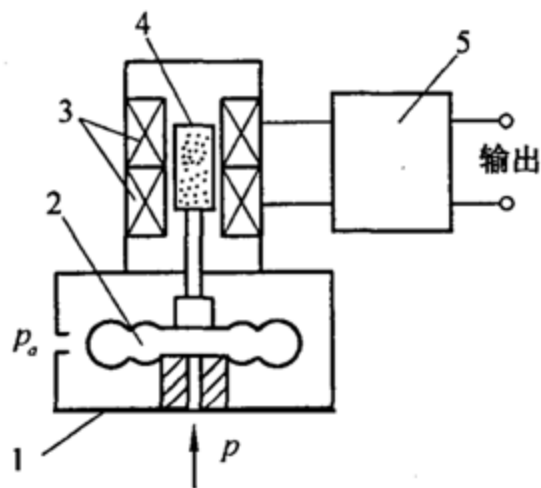
零漂示意图



3 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效果，改善传感器的性能指标。

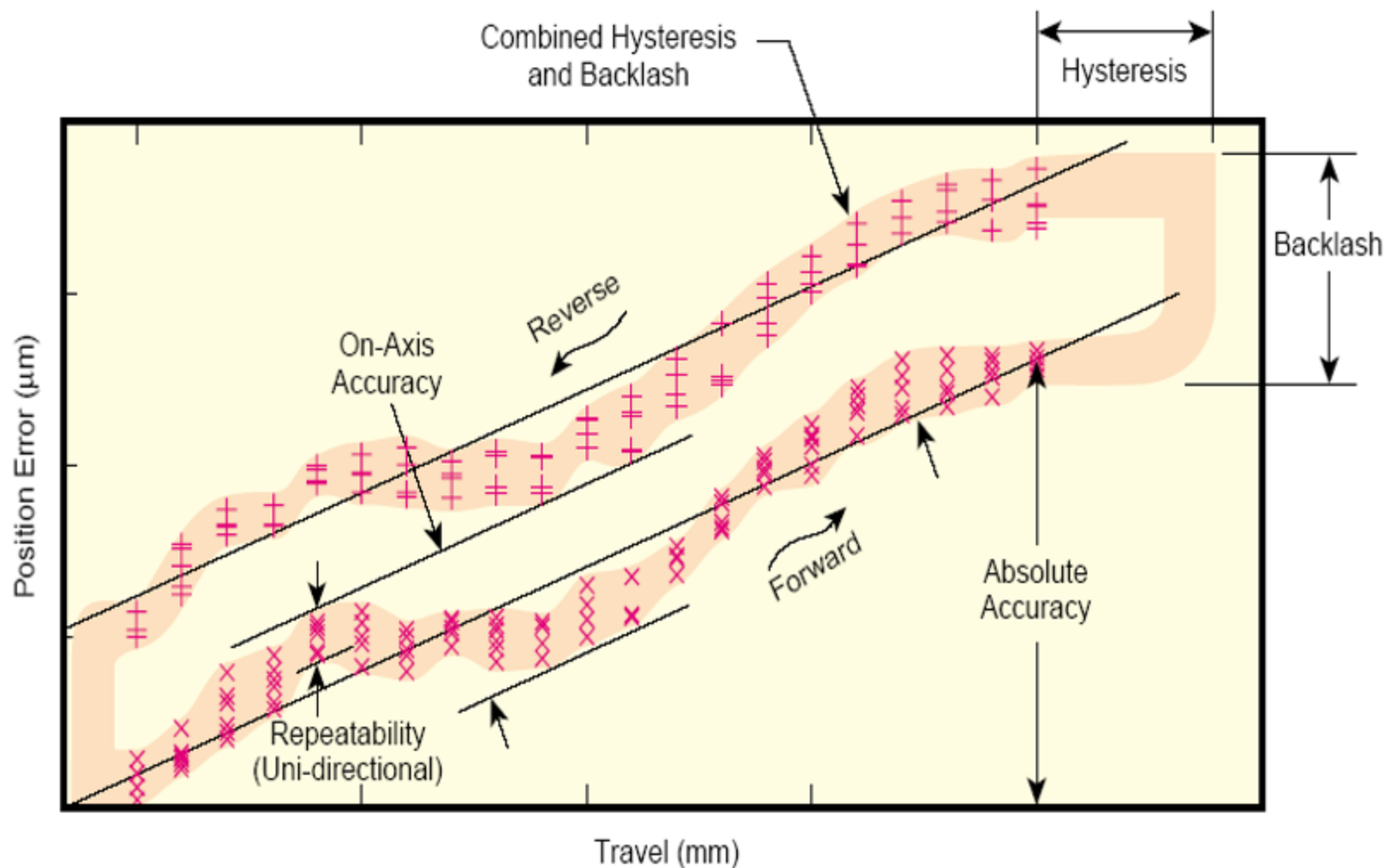


柱式测力传感器



3 测量元件的静特性

实际测量举例：



3 测量元件的动特性

测量元件的输入量由一个数值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。

和控制系统类似的描述方式：**1** 微分方程、**2** 传递函数、**3** 频率特性。

动态特性相关指标：时域：最大超调量、上升时间、调整时间；频域：带宽、频率响应范围、临界频率等。

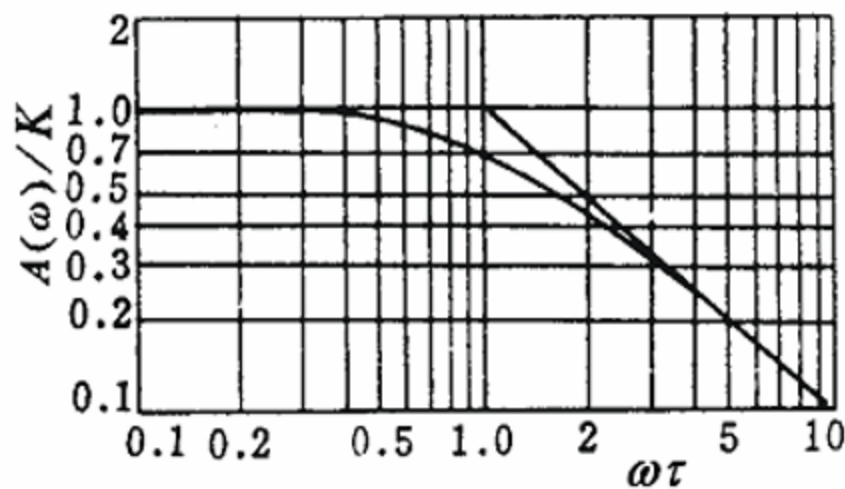


3 测量元件的动特性

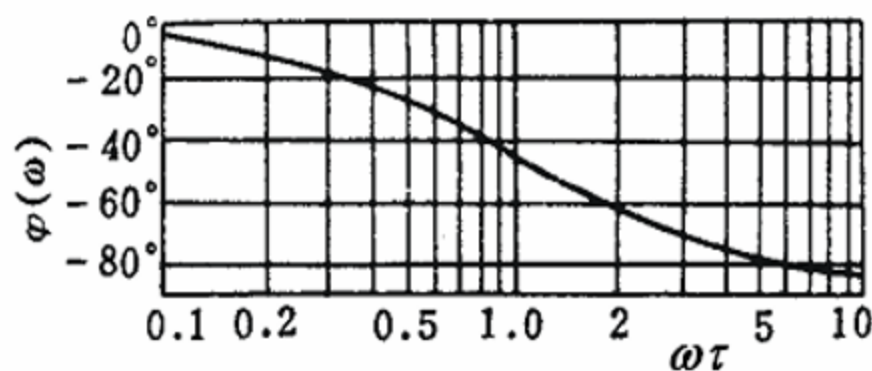
- 一阶测量元件（惯性环节）

T 为时间常数， T 越小，响应速度越快。

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



(a)



(b)

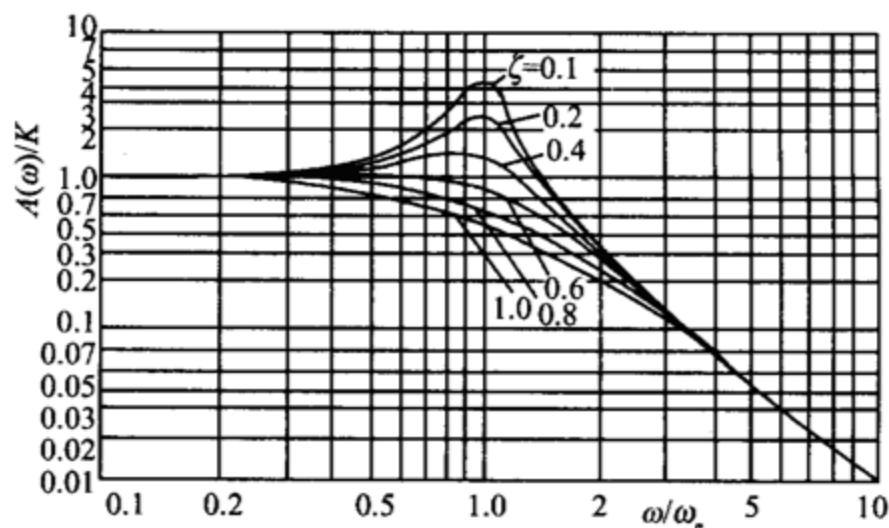


3 测量元件的动特性

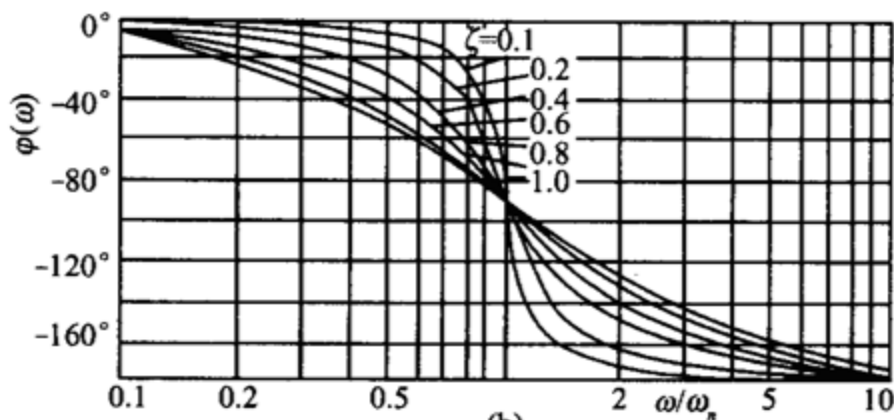
- 二阶测量元件

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

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



(a)



(b)



3 测量元件的动特性

- 零阶测量元件：

传递函数是常数 K 。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. 测量元件的作用
2. 测量元件的定义、组成和分类
3. 测量元件的特性
4. 选择测量元件时的注意事项
5. 测量元件的发展
6. 小结



4 选择测量元件时的注意事项

1 静态性能要求

量程、精度、分辨率

2 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

3 环境要求

温度、湿度、化学度、冲击振动等

4 接口要求

信号形式，外形结构尺寸

5 熟悉程度

尽量使用熟悉的元件

6 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。



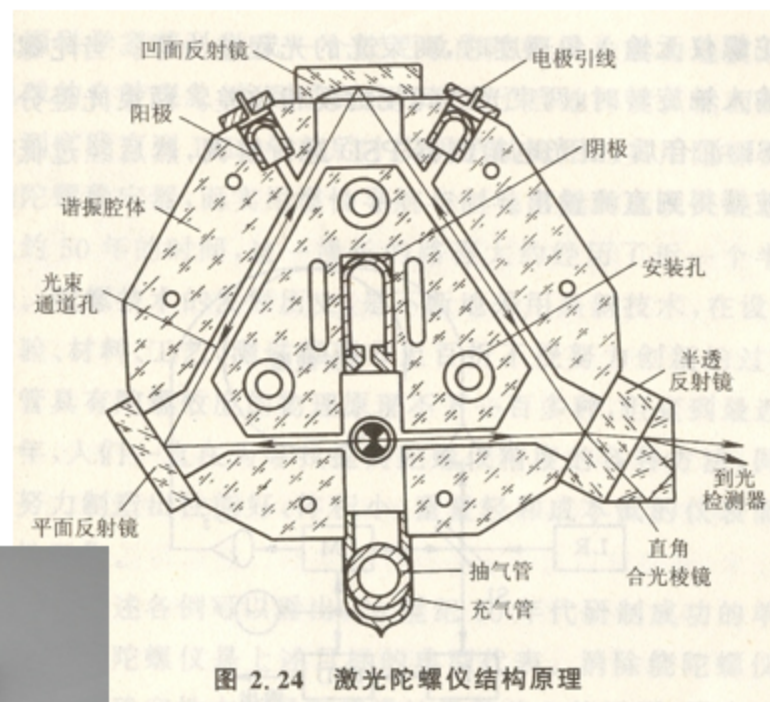
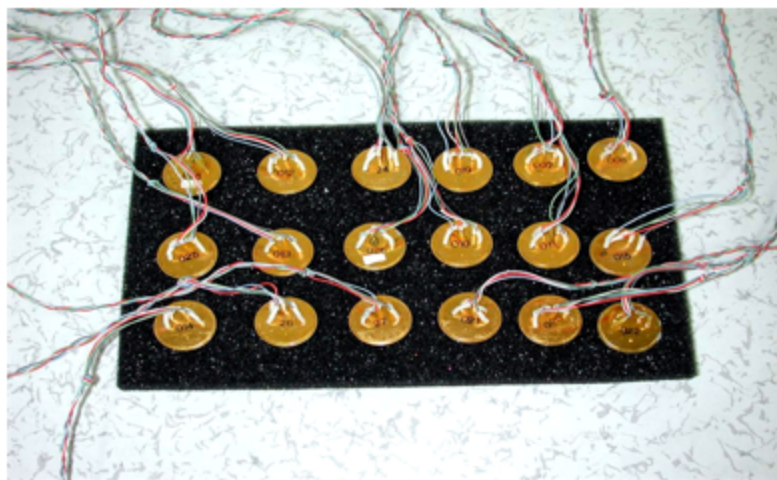
目 录

1. 测量元件的作用
2. 测量元件的定义、组成和分类
3. 测量元件的特性
4. 选择测量元件时的注意事项
5. 测量元件的发展
6. 小结



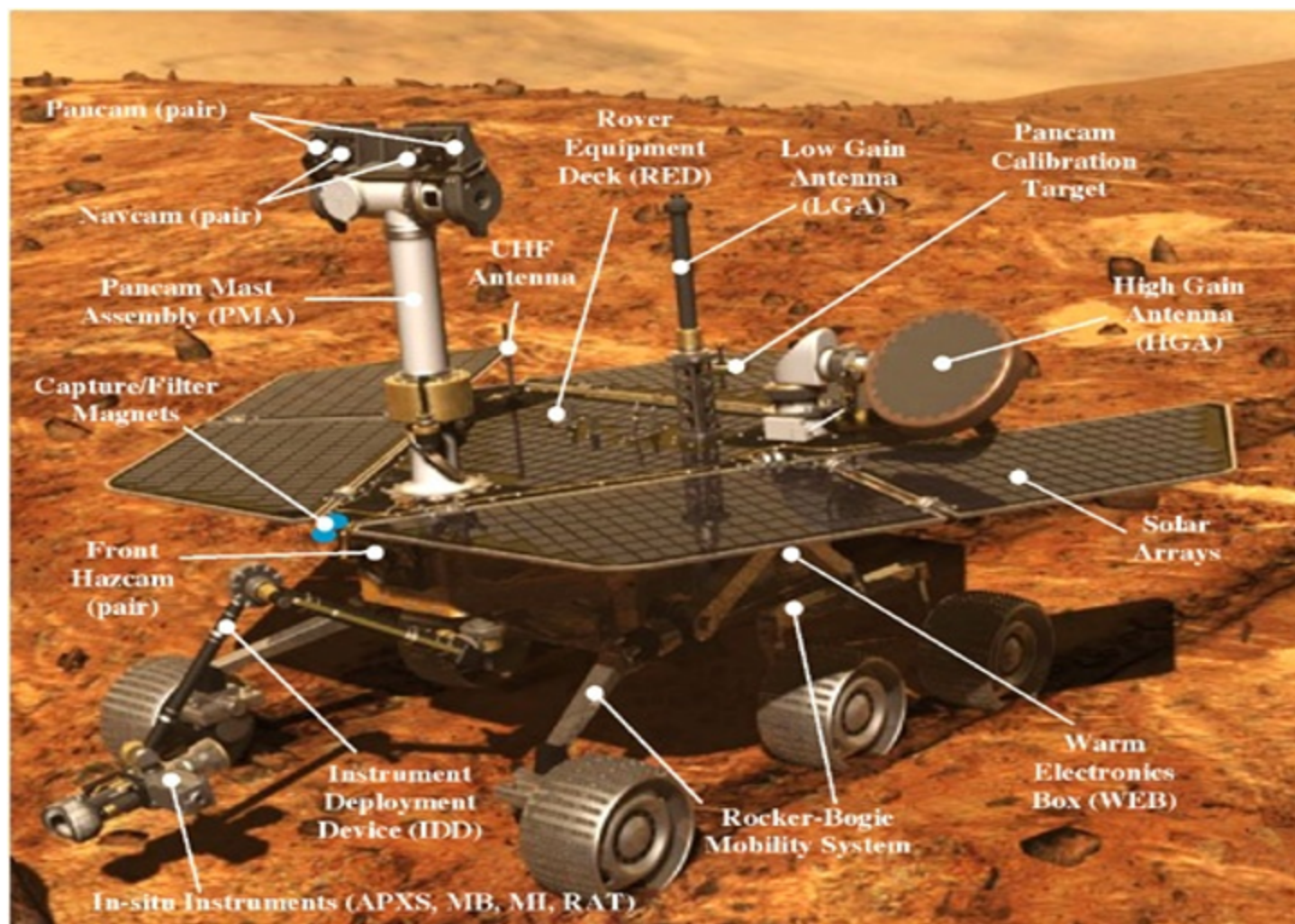
5 控制元件的发展趋势

伴随材料、电子、光学等等学科的发展，新原理、新材料的测量元件不断出现，性能指标不断提升



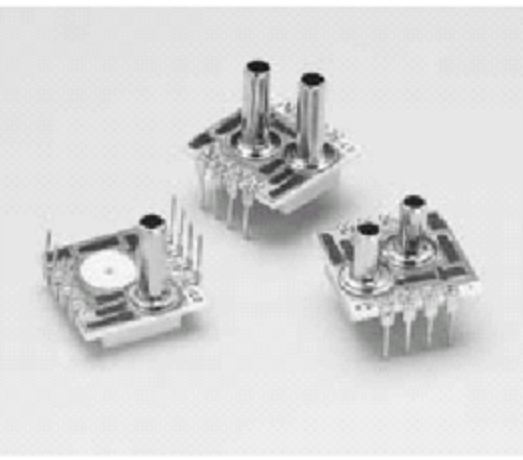
5 控制元件的发展趋势

测量元件向多信息融合的自主智能发展



5 控制元件的发展趋势

测量元件向高度集成化的方向迅速发展



6 小结

测量元件环节学习的要求：

- 掌握常用测量元件的工作原理
- 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

本节课学习要点：

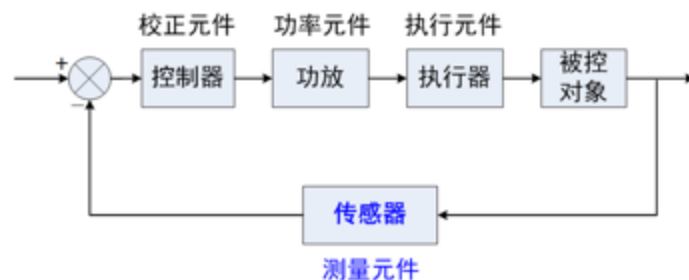
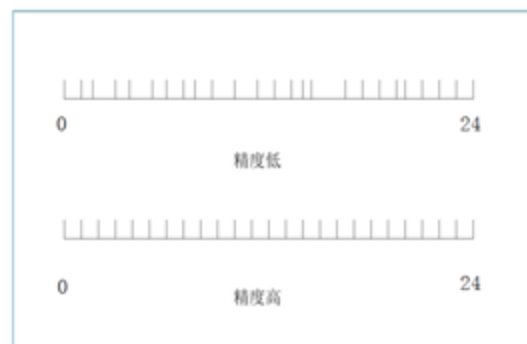
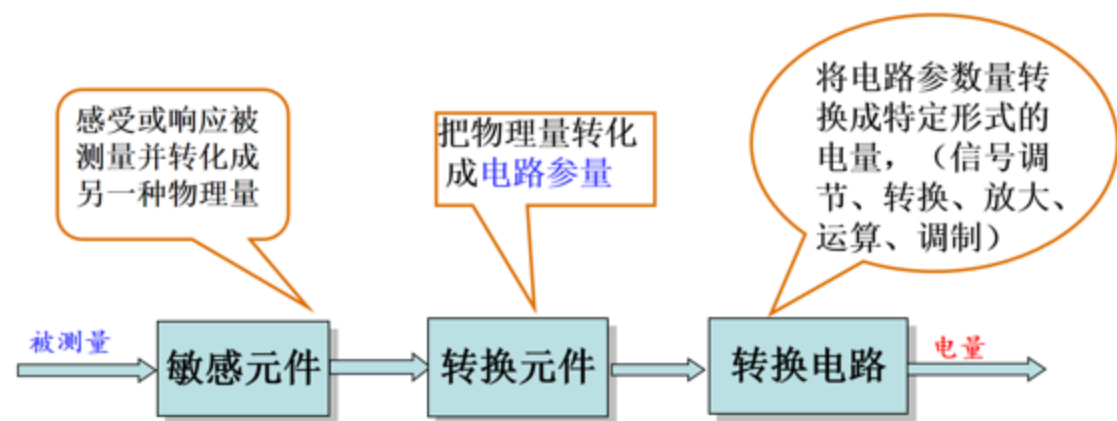
- 测量元件的作用
- 测量元件的定义、组成和分类
- 测量元件的特性（静态和动态）
- 测量元件应用选择的考虑事项



6 小结

思考：

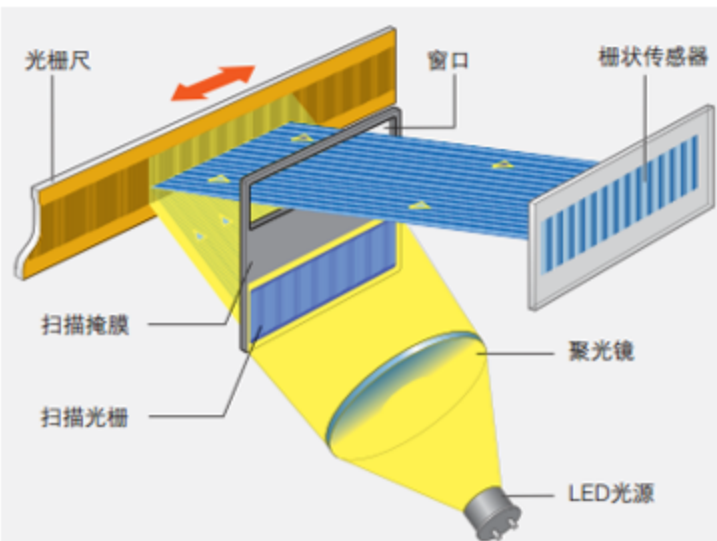
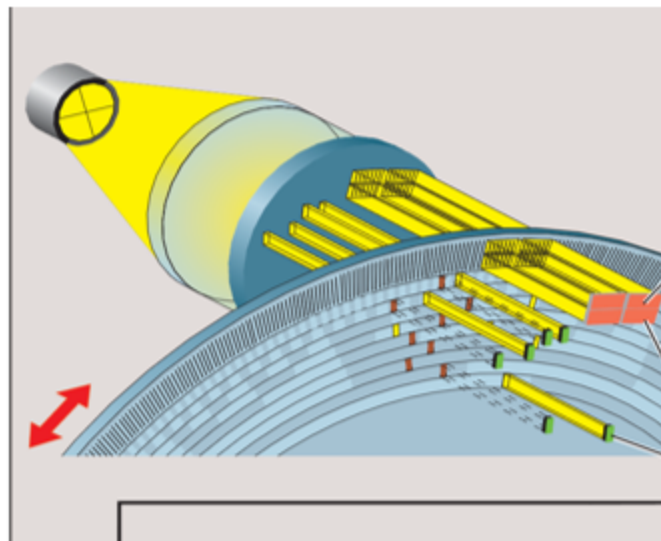
- 1、测量元件组成是什么？
- 2、传感器的精度和分辨率是一样吗？
- 3、在各类控制元件中，为什么对测量元件的精度要求最高？



6 小结

测量元件环节学习内容:

- 旋转变压器
- 感应同步器
- 光电编码器及测速



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

