



# 哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



# 自动控制实践I-20

## - 测量元件概述



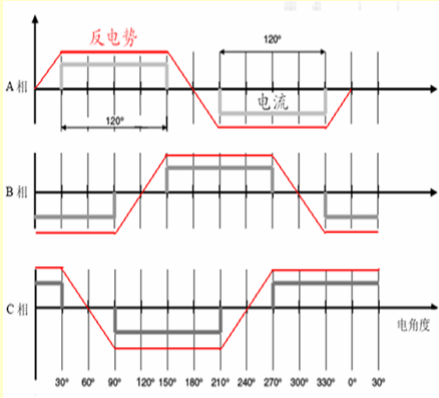
00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 复习

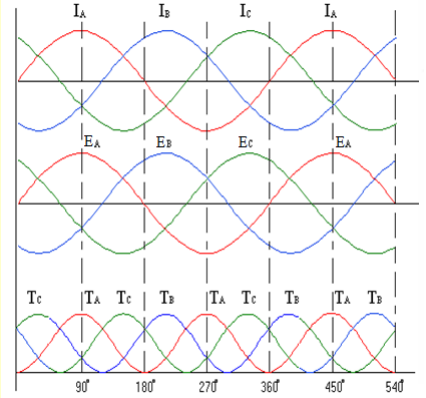
根据不同的驱动波形，永磁交流伺服电机分为：无刷直流电机(BLDCM)、永磁同步电机(PMSM)。



反电势

电流

电角度




$I_A, I_B, I_C, I_A$

$E_A, E_B, E_C, E_A$

$T_c, T_A, T_c, T_b, T_A, T_c, T_b, T_A, T_b$

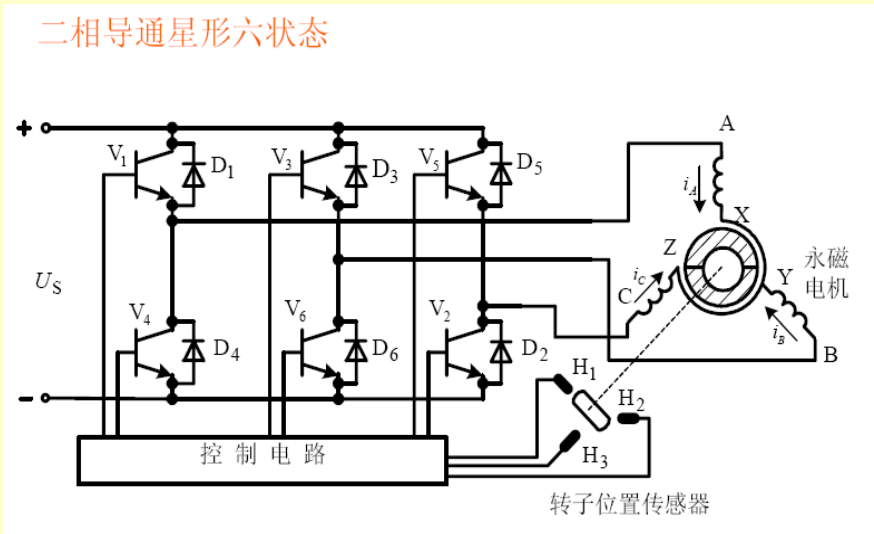
00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 复习

## 二相导通星形六状态

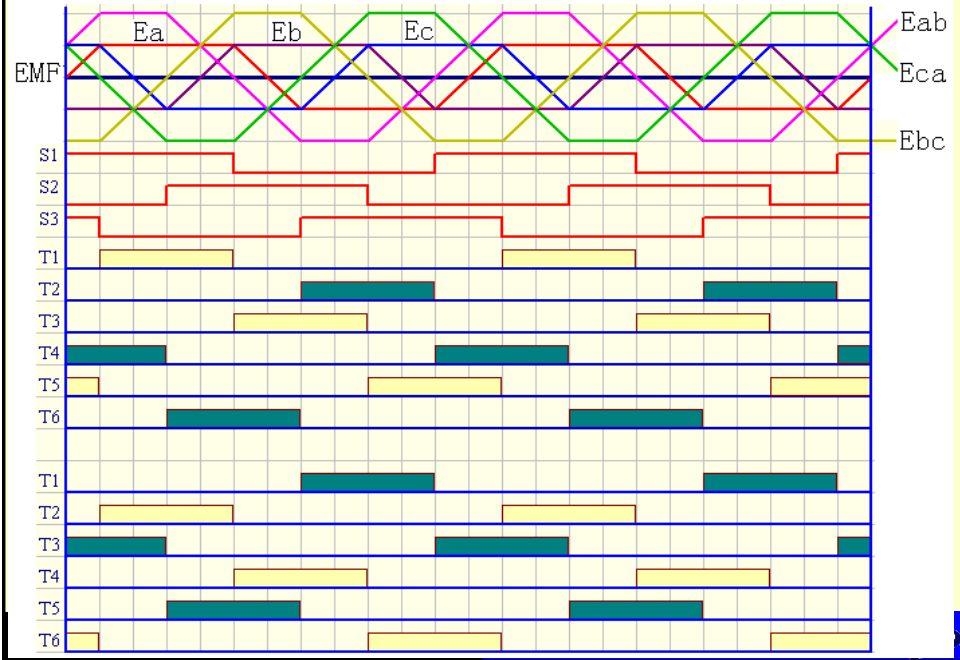


00:00:00

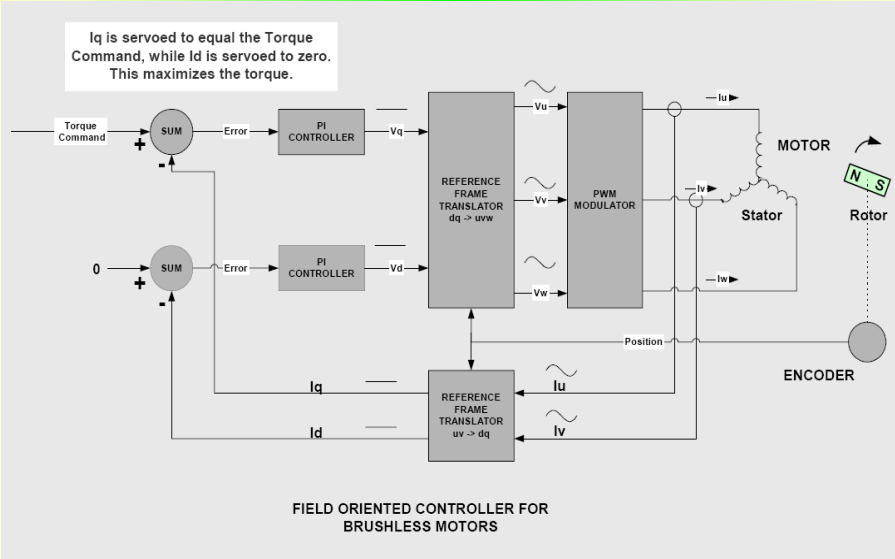
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



注：T1-T6排序为：T1-T2，T3-T4，T5-T6各为上下桥臂对管。



# 复习



# 复习

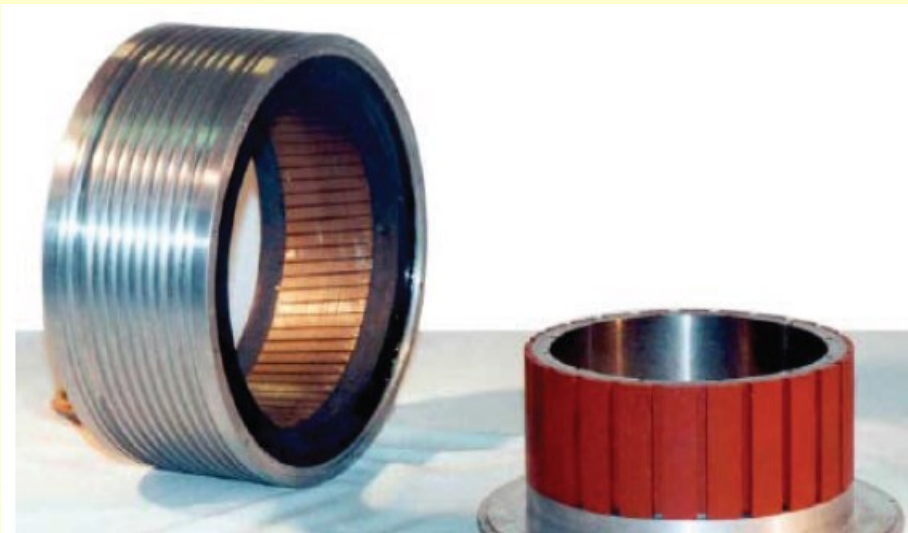
**DYNAMIC LINE I** - motors are available with

- different rated speed
- Insulation class F
- Degree of protection IP65 (DIN EN 60034-5)
- Resolver or
- high-resolution Hiperface- / Endat- / SSI encoder

Rotating connection socket for power and feedback are general standards.



复习



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



复习

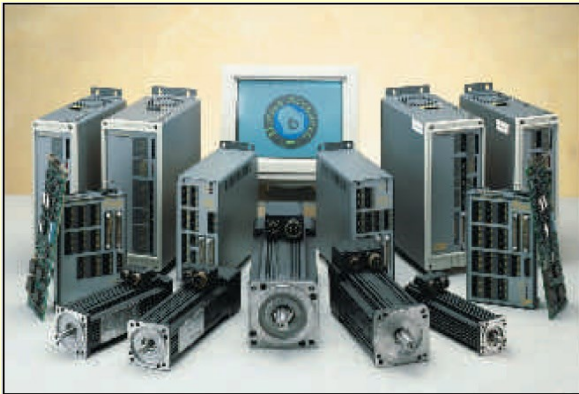
400/460VAC Version

		145ST2M		145ST4M		145ST6M	
Rated speed	rpm	500	1 500	500	1 500	500	1 500
Continuous torque at stall <sup>(4)</sup>	Nm	14.6		26.4		37.3	
Current at continuous torque <sup>(1)</sup>	A	2.3	5.2	3.7	9.2	5.0	12.7
Peak torque <sup>(2)(3)</sup>	Nm	55		110		165	
Current at peak torque <sup>(2)</sup>	A	10.2	23.1	17.8	45.5	27.3	68.3
Rated Power <sup>(1)</sup>	W	735	2 032	1 247	3 134	1 775	3 480
Thermal time constant <sup>(1)(6)</sup>	s	1 012		1 399		1 667	
Thermal resistance <sup>(1)(6)</sup>	°C/W	0.394		0.324		0.275	
Resistance (phase-to-phase) at 20°C <sup>(2)</sup>	Ω	22.34	4.42	10.74	1.65	5.99	0.95
Inductance (phase-to-phase) at I continuous	mH	115.53	21.48	77.08	11.78	48.84	7.79
Electrical time constant <sup>(2)</sup>	ms	5.1		7.2		8.2	
Motor Voltage Constant (phase-to-phase)	V/1000rpm	427	189	479	193	501	197
Number of Poles		12					

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 复 习



永磁同步伺服电机  
配套以矢量控制型  
驱动器，构成永磁  
同步电机伺服系统  
，具备完备的控制  
与保护功能、灵活  
的接口形式，实现  
力矩、速度、位置  
等伺服功能。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



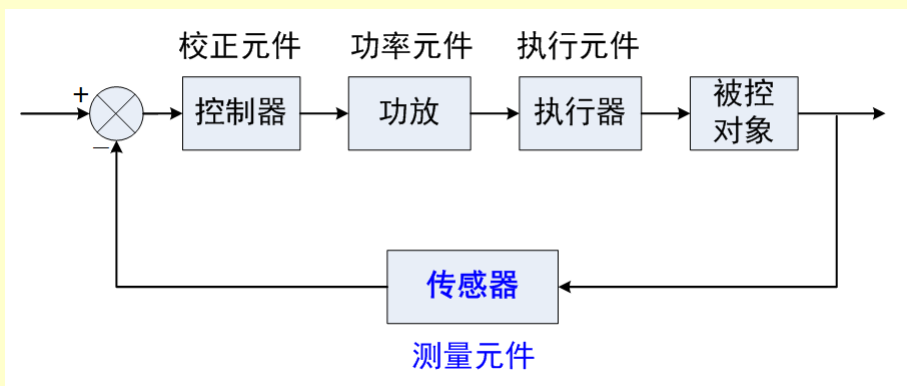
## 目 录

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. 要求与小结

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 测量元件的作用



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



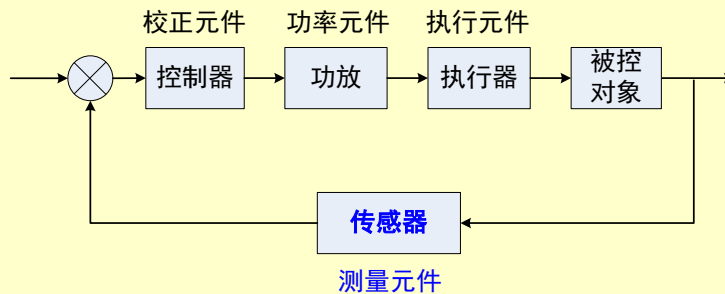
## 1. 测量元件的作用

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. 放大元件：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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 1. 测量元件的作用



• 控制系统中为什么需要反馈（测量元件）？

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 1. 测量元件的作用

• 控制系统中存在各种不确定性

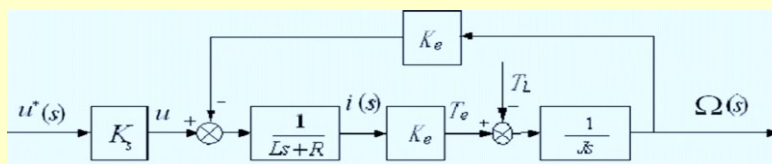
- 1. 模型结构不确定性（假设、降阶、近似）

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

- 2. 模型参数不确定性（老化、温度、工况、工艺）

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

- 3. 各种外部扰动

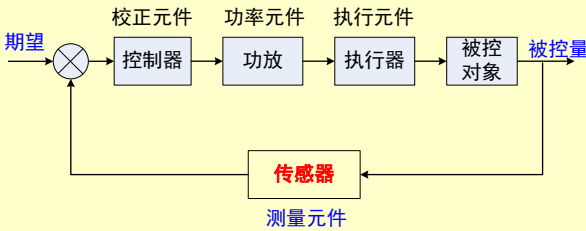


00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 1. 测量元件的作用

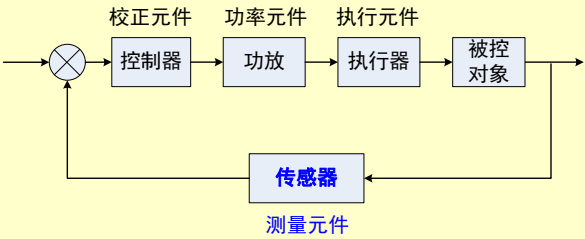
所有不确定性的影响，在输出上都有体现，我们可以通过测量元件获取被控量的信息，采取相应的控制方法对不确定性的影响进行有效的抑制。



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



•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



- 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。

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

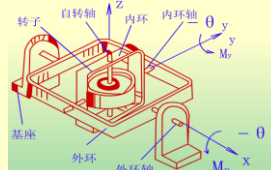


## 1. 测量元件的作用

- 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



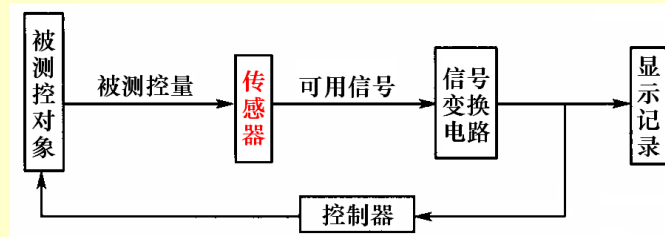
00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 测量元件的作用

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”。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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. 要求与小结

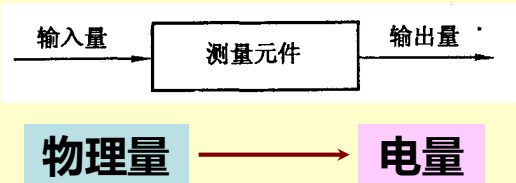
00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2 测量元件的定义、组成、分类

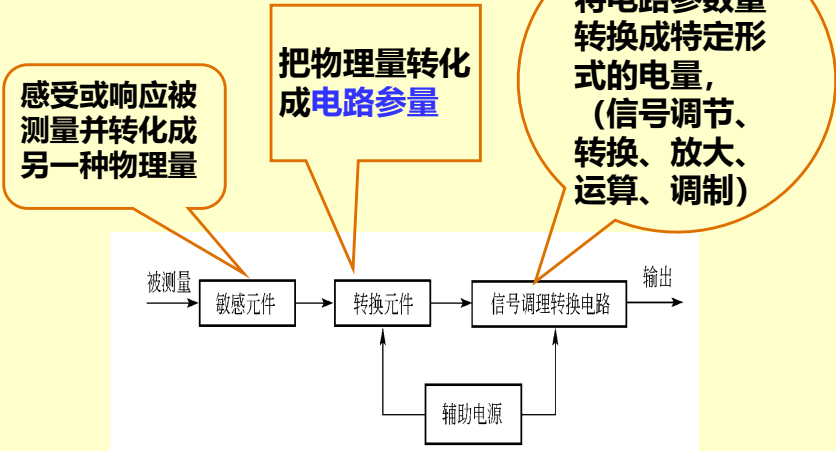
**测量元件:** 检测一种物理量，（按照一定的对应关系/精确度）转换成容易处理的另一种物理量。

- **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



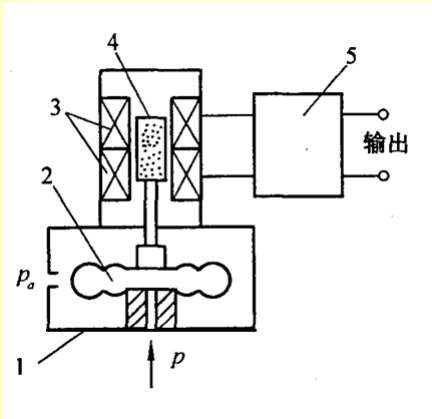
## 2 测量元件的定义、组成、分类

例：气体压力传感器

**敏感元件**—膜盒，把气压转换成位移

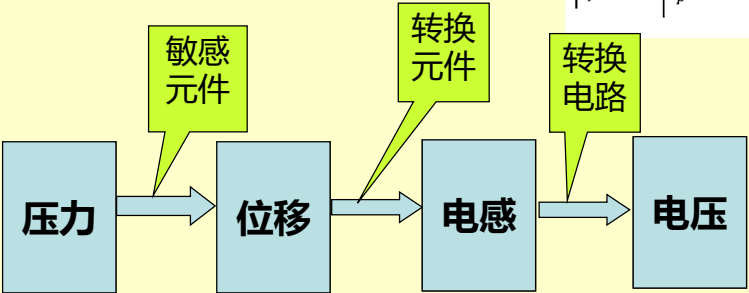
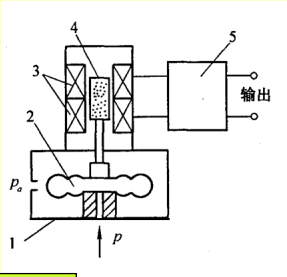
**转换元件**—可变电感3，把位移量转换成电感

**转换电路**—将电感转换成电压



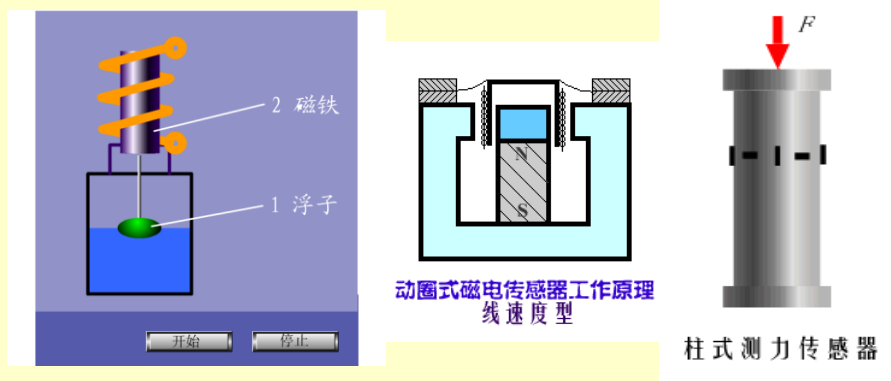
## 2 测量元件的定义、组成、分类

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



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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 ~ +10V, 0 ~ 10V; 电流：4 ~ 20mA、 0 ~ 10mA; 气压 20 ~ 100kPa

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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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。

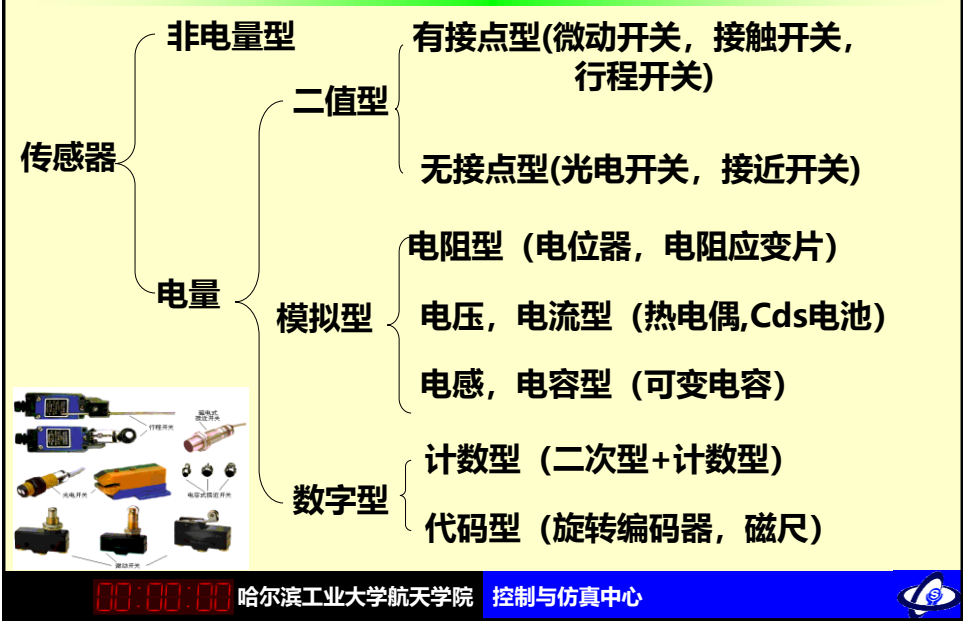
结构型传感器是依靠传感器结构参数的变化实现信号变换，如：电容式、电感式传感器。

- 根据输出信号形式 见下页。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2 测量元件的定义、组成、分类

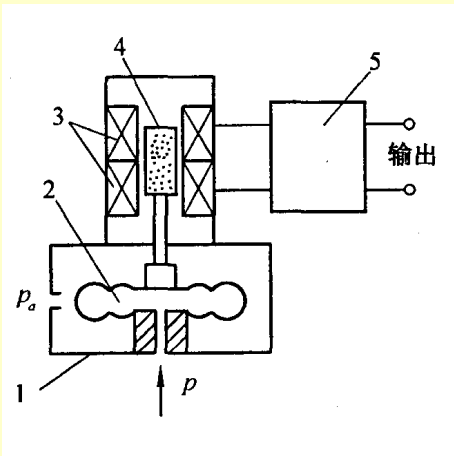


## 2 测量元件的定义、组成、分类

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. 要求与小结

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 3 测量元件的特性

- **理想特性**：输入和输出——线性对应。
- **静态特性**：输入量和输出量都为常量，或变化极缓慢，输出和输入之间的关系，其数学关系式中无变量对时间的微分项。
- **动态特性**：输入量和输出量都随时间变化的关系，其数学关系式中有变量对时间的微分。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

32





### 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

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

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。

大多数测量元件的理想静特性： $y = kx$

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 测量元件的静特性—变换函数

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

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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

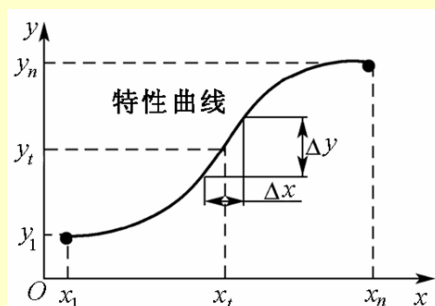


### 3 测量元件的静特性—灵敏度

#### 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。

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



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

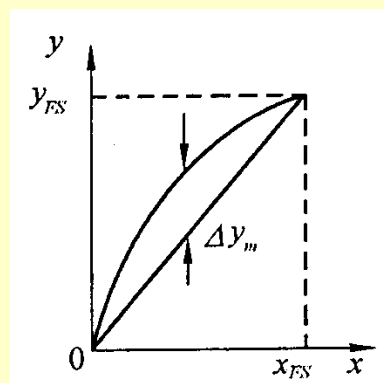


### 3 测量元件的静特性—线性度

#### 2. 灵敏度和线性度 (非线性误差)

- 线性度或非线形误差**：静特性曲线偏离某种拟合直线或规定直线的程度。

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

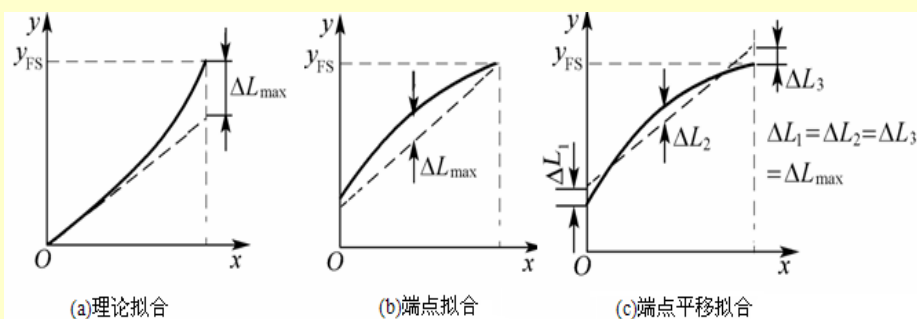


00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 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。采取不同的方法选取拟合直线，可以得到不同的线性度。



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



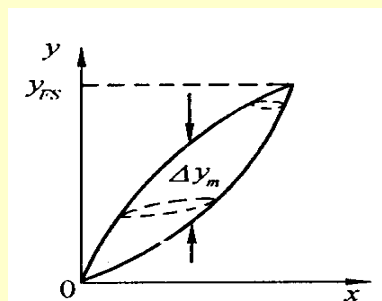
### 3 测量元件的静特性—滞环

#### 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。

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

机械部分摩擦和间隙，  
敏感材料结构缺陷，  
磁性材料磁滞



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

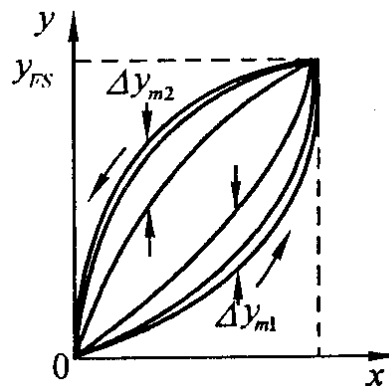


### 3 测量元件的静特性—重复性误差

#### 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。

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



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 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 $2\sigma$ 或 $3\sigma$ 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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 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。

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 测量元件的静特性—其它性能参数

#### • 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，上述二者可以不做区分，如力矩、速度等。

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 测量元件的静特性—其它性能参数

#### • 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阈值。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



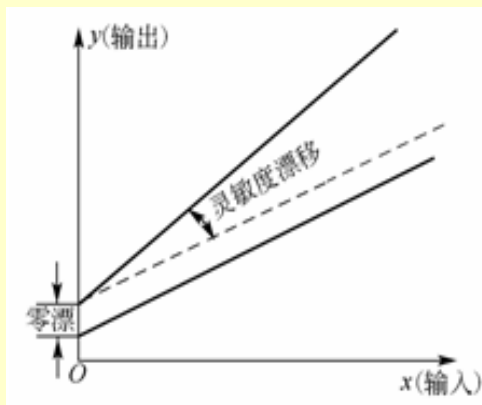
### 3 测量元件的静特性—其它性能参数

#### • 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。



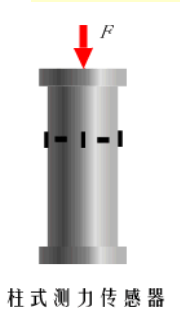
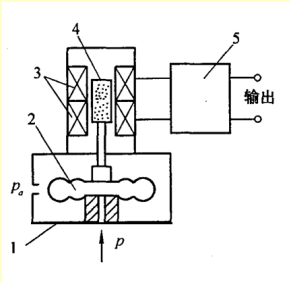
00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 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

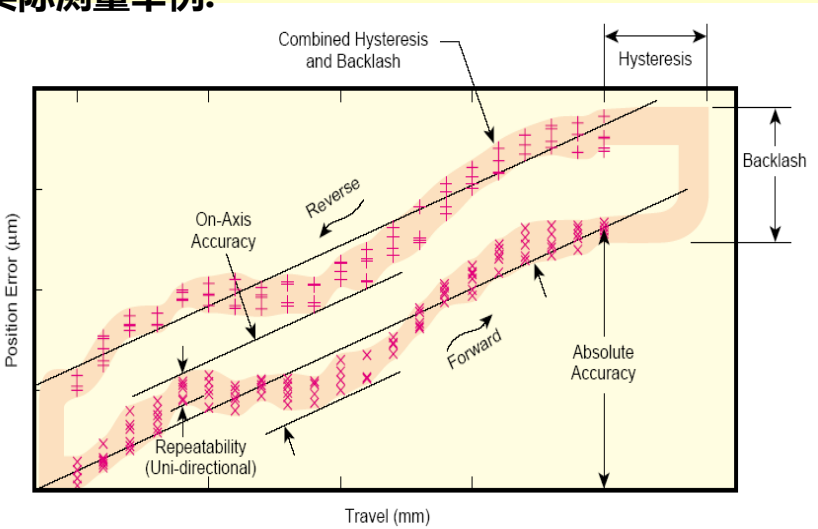
00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 测量元件的静特性

实际测量举例:



00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 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。

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3 测量元件的动特性

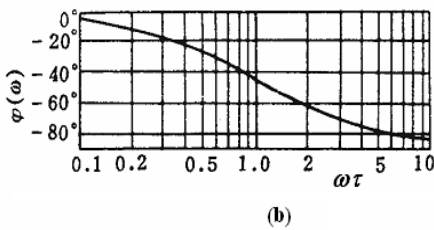
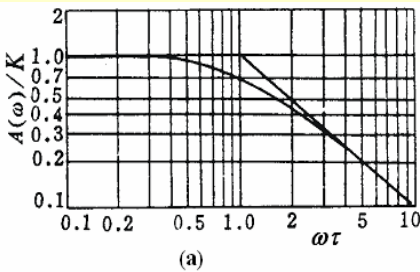
- 一阶测量元件（惯性环节）

$T$ 为时间常数， $T$ 越小，响应速度越快。

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t)$$

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T}$$



00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



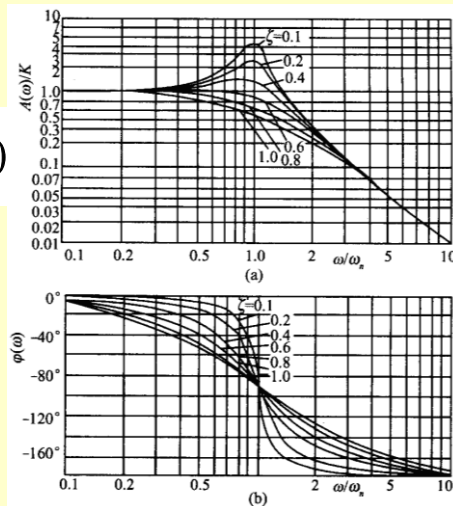


### 3 测量元件的动特性

#### • 二阶测量元件

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

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



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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. 要求与小结

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4 选择测量元件时的注意事项

### 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。**

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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. 要求与小结

00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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

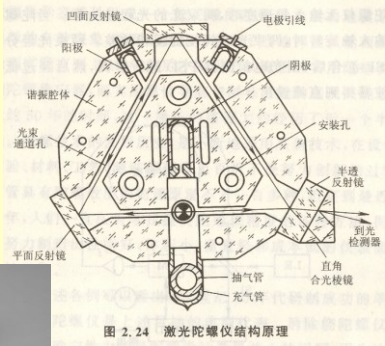
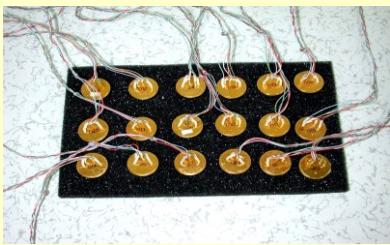
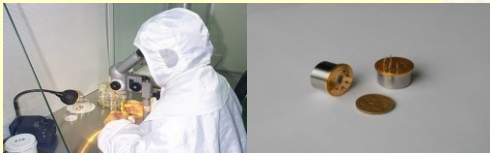


图 2.24 激光陀螺仪结构原理



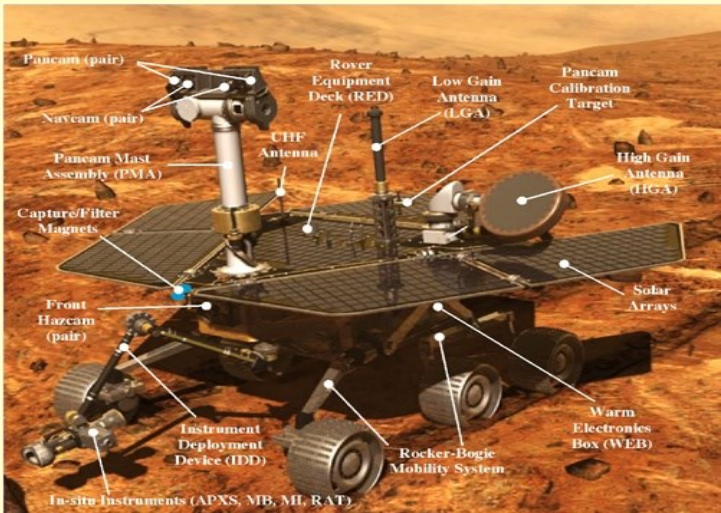
00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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



00:00:00

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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



00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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. 要求与小结

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 6 要求与小结

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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 6 要求与小结

测量元件环节学习内容：

- 电压电流传感器
- 旋转变压器
- 感应同步器
- 光电编码器及测速
- 阻容感传感器
- 热电/温度传感器

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 6 要求与小结

**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**

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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。

00:00:00 哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

