

《仪器系统设计基础》第二讲

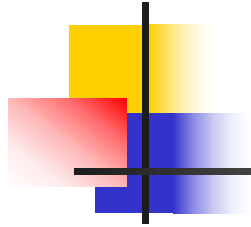
检测技术与传感器

仪器科学与工程系专业必修课

主讲： 宋开臣 教授

kcsong@zju.edu.cn

13600513662



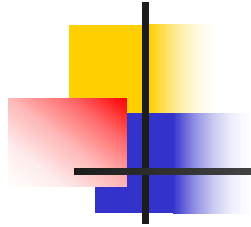
检测技术与传感器讲座内容

1 检测技术概述

- 1、检测的基本概念
- 2、检测系统构成
- 3、检测方法及其分类

二. 传感器技术

- 1、传感器概述
- 2、典型传感器介绍
- 3、各种新型传感器
- 4、现代传感新技术

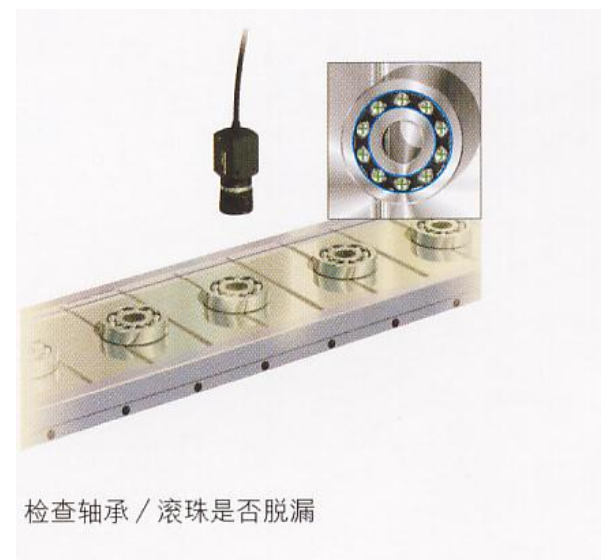
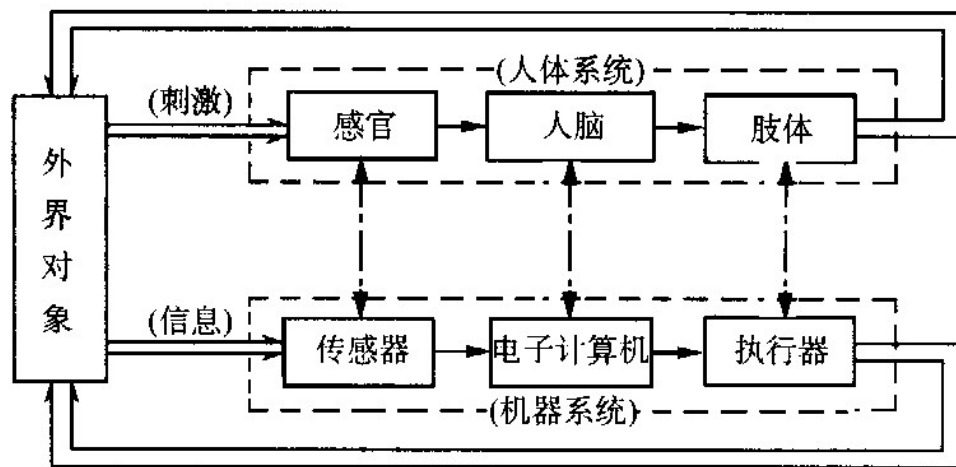


一. 检测技术概述

- 1、检测的基本概念
- 2、检测系统构成
- 3、检测方法及其分类

1. 检测的基本概念

人与机器的机能对应关系:



检查轴承 / 滚珠是否脱漏

1. 检测的基本概念

检测的定义

确定被测对象的属性和量值为目的的全部操作

被测对象：宇宙万物（固液气体、动物、植物、天体）

被测信息：物理量（光、电、力、热、磁、声、...）

化学量（**PH**、成份...）

生物量（酶、葡萄糖、...）

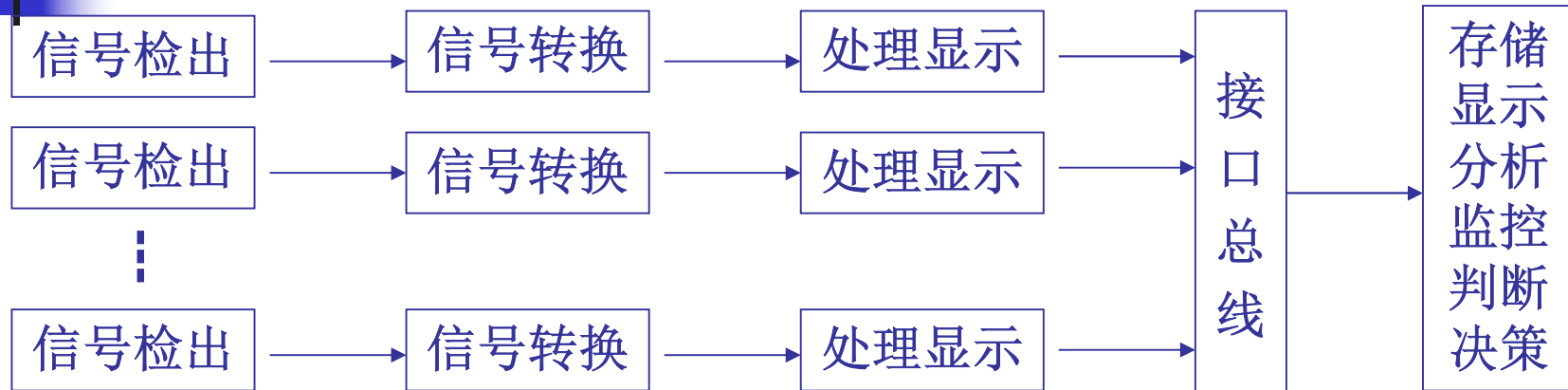
... ..

检测器具：传感器、检测仪器、检测装置、检测系统

检测过程：信号采集、信号处理、信号显示、信号输出



2、检测系统的构成



信号检出：功能 --- 将被测信号的转换为电信号的变化（**detection**）

器件 --- 传感器（**sensor, transducer**）

信号转换：功能 --- 将传感器的输出信号转换为便于处理的形式（**conversion**）

器件 --- 信号调理电路（**signal conditioning circuit**）

处理显示：功能 --- 分析（**analysis**）、处理（**processing**）、显示（**display**）

其它环节： 通讯接口/总线接口（**RS232、RS485、GPIB、PCI、… …**）

存储、监控、决策



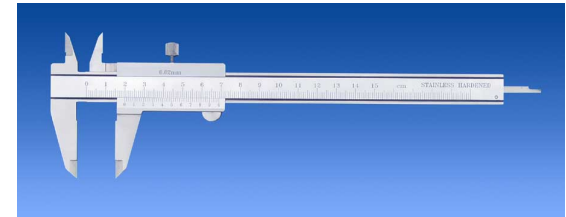
3. 检测方法及其分类

- (1) . 直接测量与间接测量
- (2) . 绝对测量与相对测量
- (3) . 开环测量与闭环测量
- (4) . 偏差法、零位法、微差法

(1) 直接测量与间接测量

直接测量：直接将待测量与标准量进行比较。

包括绝对测量和相对测量。

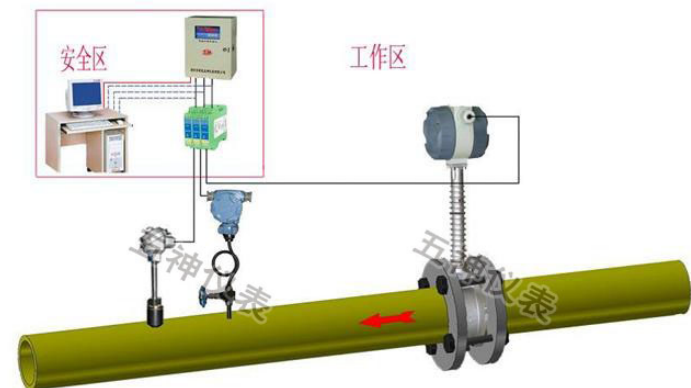


间接测量：测量与待测量有一定函数关系的参量，

待测量由计算获得

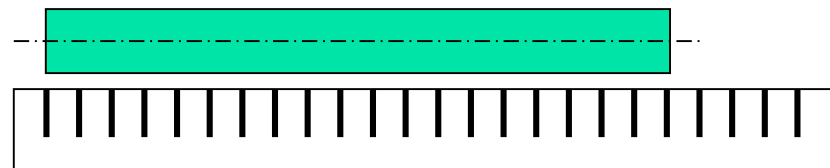
如测导线的导电率 ρ 和气体流量等：

$$\rho = \frac{4l}{\pi d^2 R}$$



(2) 绝对测量与相对测量

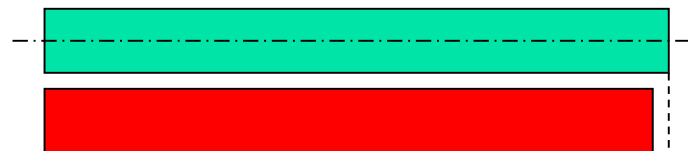
-- **绝对测量：** 采用仪器、设备、手段测量被测量，直接得到测量值



测量结果：20.1 mm

特点：简单、直观、明了；测量精度不高

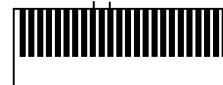
-- **相对测量：** 将被测量直接与基准量比较，并放大微差，得到偏差值



基准量：20.00 mm

测量值：+0.08 mm

结 果：20.08 mm



特点：精度高；复杂、成本高、要求高

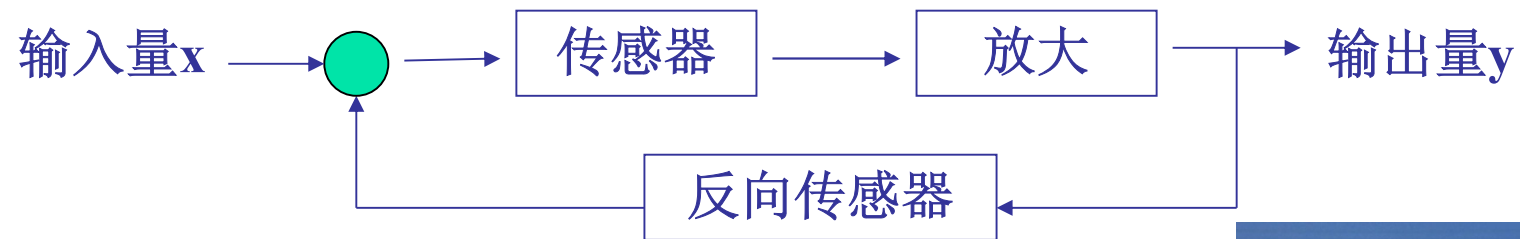
(3) 开环测量与闭环测量

开环测量： 输入量 x \longrightarrow 传感器 \longrightarrow 输出量 y

特点：简单、直观、明了； 测量精度不高



闭环测量：

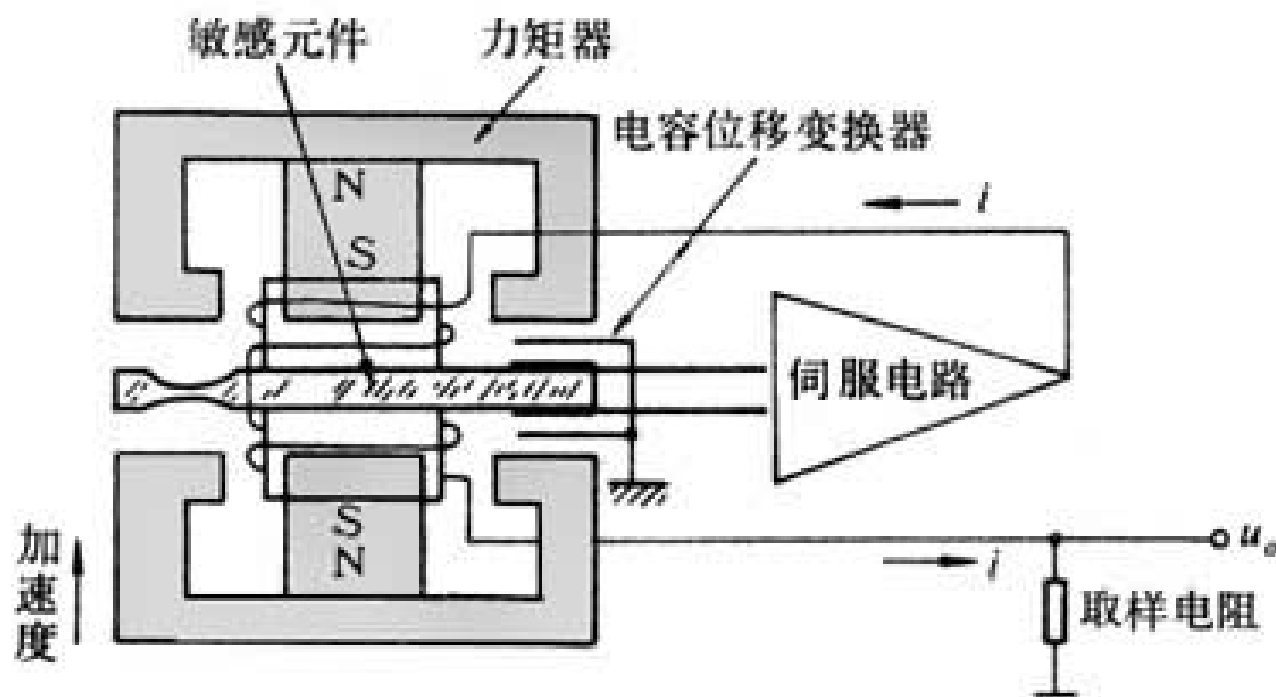


特点：精度高；复杂、成本高、要求高



(3) 开环测量与闭环测量

闭环测量实例：石英挠性加速度计



伺服加速度传感器原理图

(4) 偏差法、零位法、微差法

偏差法:

台秤

利用测量仪表的指针相对于刻度的偏差位移
直接表示测量的数值



零位法:

利用指零机构的作用, 使用被测量和已知标准量两者达到
平衡, 根据指零机构示值为零来确定被测量等于标准量值

微差法:

偏差法和零位法的结合

托盘天平

测量被测量余数

被测量大值与标准量大体平衡

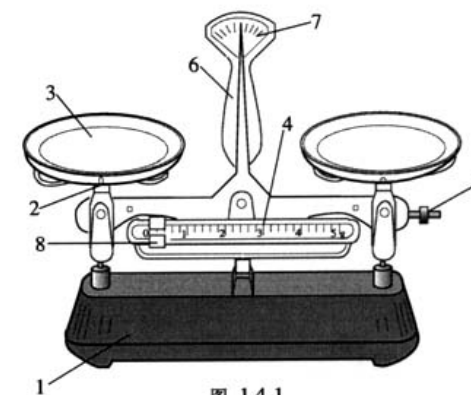
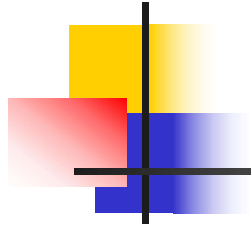


图 1.4-1
1.底座 2.托盘架 3.托盘 4.标尺 5.平衡螺母 6.指针
7.分度盘 8.游码



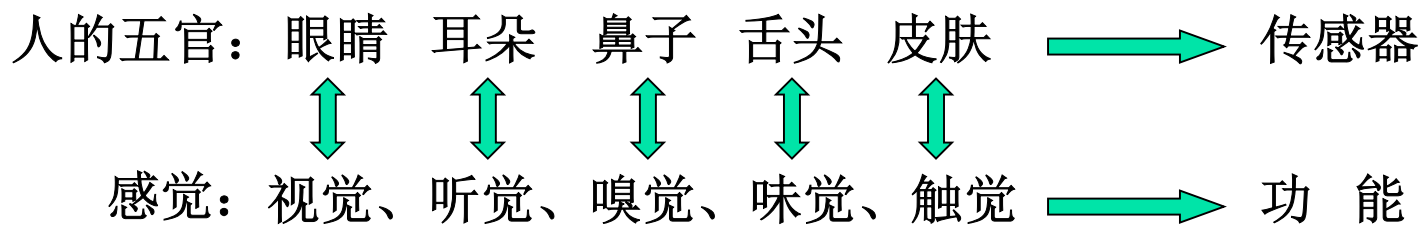
二. 传感器技术

- 1、传感器概述
- 2、典型传感器介绍
- 3、各种新型传感器
- 4、现代传感新技术



1、传感器概述

传感器的基本概念



定义： 传感器是一种把特定的被测信息量按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。

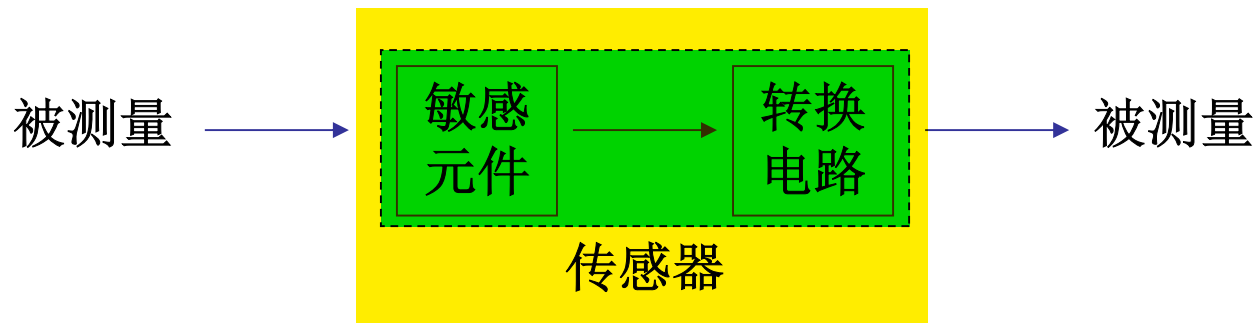
被测量：物理量、化学量、生物量

可用信号：便于处理和传输的非噪声信号（电信号、光信号.....）

规律：确定规律，可以重复（线性、非线性、周期）

1、传感器概述

传感器的构成型式



敏感元件：感受被测量变化，并输出相对应的电信号

又称“转换元件” 或 “变换元件”

例：电阻应变片（应变—电阻）

转换电路：把转换元件输出的电信号变换成为便于记录、显示、处理和控制的可用信号的电路，

又称“信号调理电路” 或 “测量电路”

例：电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器、脉冲调宽电路等。

1、传感器概述

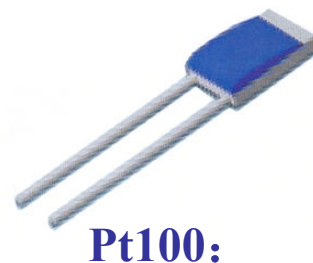
传感器的分类:

按照有无能量产生: 无源传感器

有源传感器

如热敏电阻

如热电偶

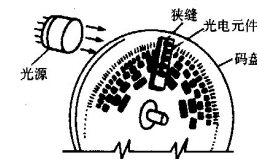


按照输出信号方式: 模拟传感器

数字传感器

如电位器

如编码器



按照工作方式:

偏转传感器

如偏转加速度计

零示传感器

如伺服加速度计

1、传感器概述

传感器的分类:

按照用途:

位移传感器

力传感器

速度传感器

温度传感器

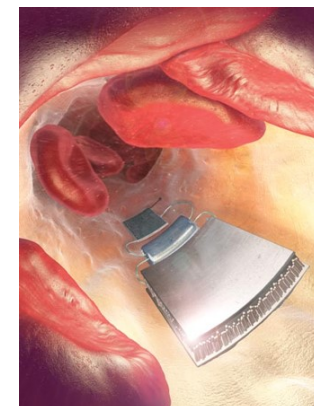
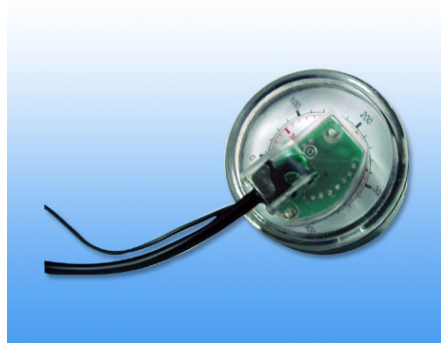
压力传感器

流量传感器

PH值传感器

血压传感器

.....



1、传感器概述

传感器的分类:

按照转换原理:

电阻式传感器 (热敏、光敏、压敏等)

电容式传感器 (变面积式、变距式等)

电感式传感器 (自感、互感、涡流等)

热电式传感器

光电式传感器

压电式传感器

磁电式传感器

.....

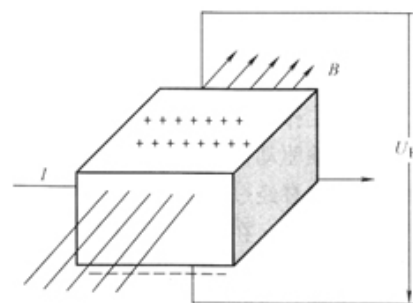
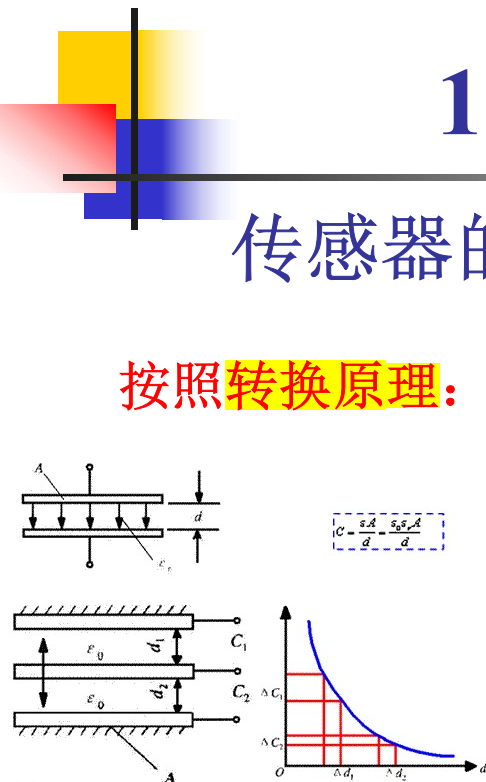
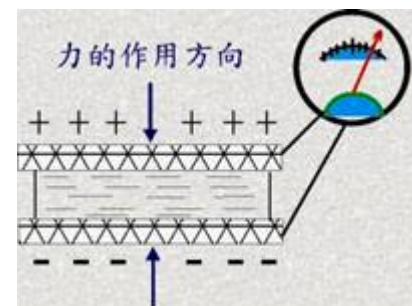
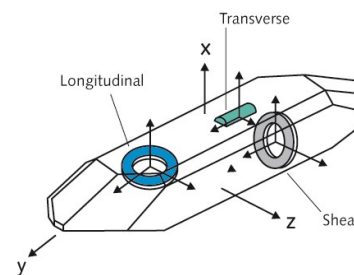
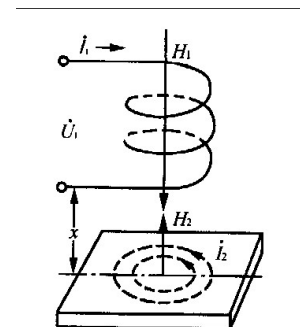
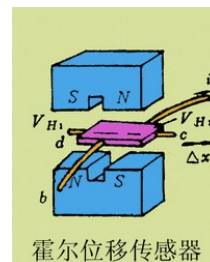


图 2-27 霍尔效应原理图





2、传感器的选择

传感器的选择原则：

1、选择正确的测量原理

环境、精度、成本

2、选择合适的性能参数

量程、灵敏度、精度、稳定性、带宽

3、选择允许的安装形式

空间、接线

4、选择匹配的输出接口

模拟、数字、通信协议、连接线



2、传感器的选择

选择正确的测量原理：

1. 环境条件允许的传感器转换效应
2. 测量原理决定了精度水平
3. 不同的测量原理实现成本不同



2、传感器的选择

选择合适的性能参数：

1. 测量范围（量程）
2. 灵敏度
3. 精度（零点稳定性、线性度）
4. 长期稳定性（日、月、年重复性）
5. 频率响应（测量带宽）



2、传感器的选择

选择允许的安装形式:

1. 安装空间
2. 连接方式



2、传感器的选择

选择匹配的输出接口：

1. 模拟输出（电压、电流、电荷）
2. 数字输出（频率、数字）
3. 通讯标准协议（RS232、USB）
4. 连接方式（双绞线、屏蔽线、光缆）



3、典型传感器介绍

电感式位移传感器原理

$$L = \frac{W^2}{R_m} \qquad R_m = \sum \frac{l_i}{u_i A_i}$$

W ---线圈匝数

R_m ---磁路总磁阻

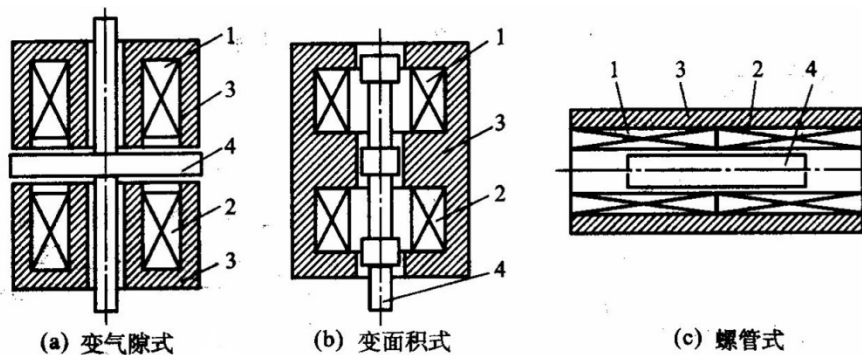
l_i ---各段导磁体的长度

u_i ---各段导磁体的磁导率

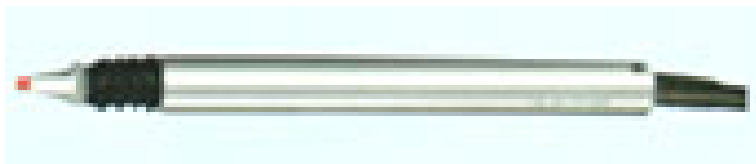
A_i ---各段导磁体的截面积

3、典型传感器介绍

电感式位移传感器



1. 2. 线圈 3. 铁心或磁性套筒 4. 衔铁

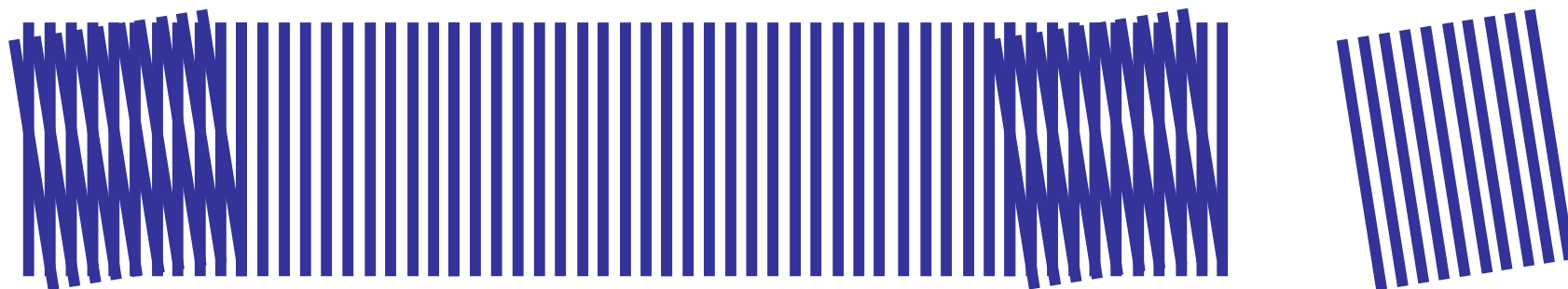


3、典型传感器介绍

光栅位移传感器 (**Grating**)

(1) 光栅传感器原理 (莫尔条纹)

构成：主光栅---标尺光栅，定光栅； 指示光栅---动光栅



现象：一组短光栅以一定倾斜角度沿着一组长光栅移动，出现一排上下滑动的菱形条纹

主光栅
指示光栅 $\begin{matrix} \searrow \\ \nearrow \end{matrix}$ 叠合 \longrightarrow 夹角 \longrightarrow 移动 \longrightarrow 明暗相间条纹 \longrightarrow 莫尔条纹

条纹宽度：

$$B = \frac{W}{2 \sin(\theta/2)} \approx \frac{W}{\theta}$$

W -栅距， a -线宽， b -缝宽

$$W=a+b, \quad a=b=W/2$$

用途：条纹每发生一周期的滑动，即等效为短光栅沿长光栅移动一个光栅的距离，由此可以分辨出短光栅的微小位移



3、典型传感器介绍

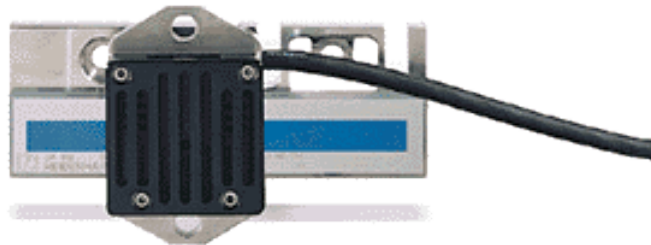
(2) 光栅传感器特点

- ①精度高：测长 $\pm(0.2+2\times 10^{-6}L)\mu\text{m}$ ，测角 $\pm 0.1''$
- ②量程大：透射式---光栅尺长（<1米），反射式--->几十米
- ③响应快：可用于动态测量
- ④增量式：增量码测量 \rightarrow 计数 断电 \rightarrow 数据消失
- ⑤要求高：对环境要求高 \rightarrow 温度、湿度、灰尘、振动
- ⑥成本高：电路复杂

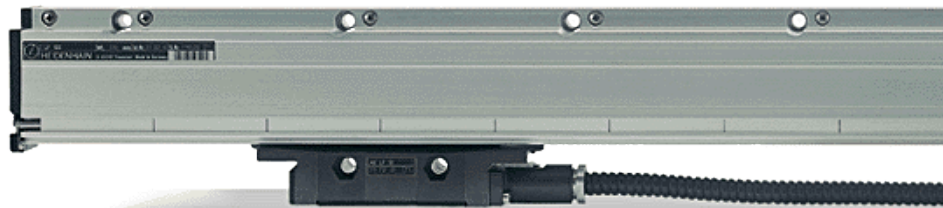
3、典型传感器介绍

(3) 代表性产品:

德国Heidenhain（海德汉）：



开放式：量程270mm
分辨率1nm



封闭式：量程3000mm，分辨率0.1 μm



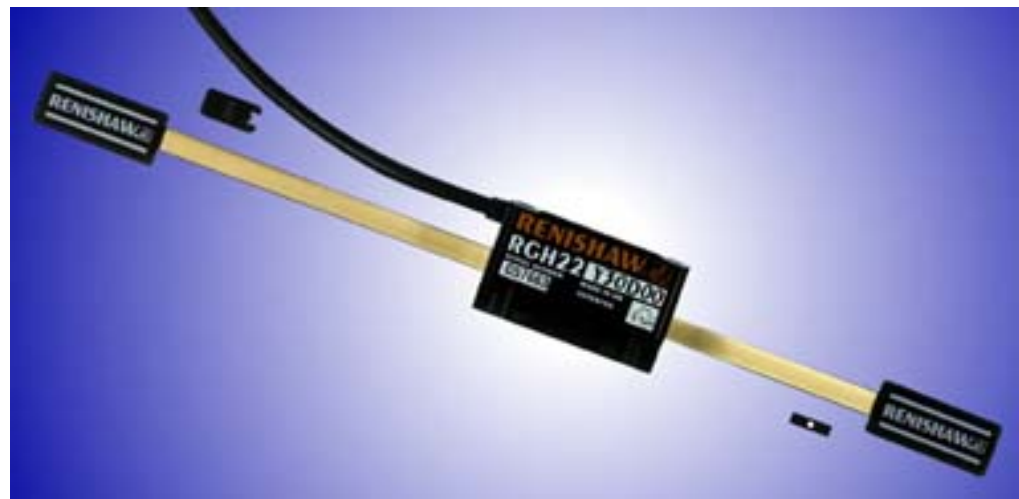
开放式：量程1440mm，分辨率0.01 μm

3、典型传感器介绍

英国Renishaw（雷尼绍）：

量程：任意

分辨力：0.1 μm 0.01 μm

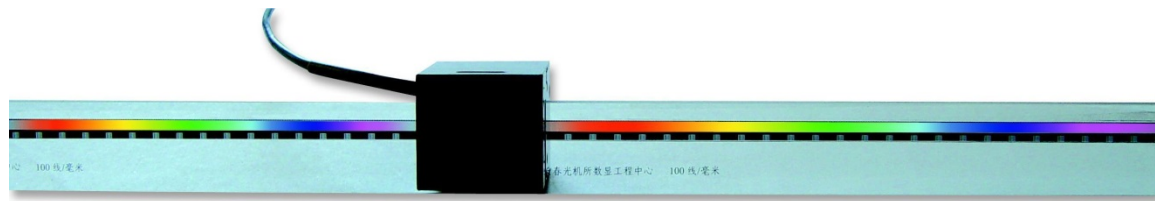


中国长春光机所：

量 程：1000mm

分辨力：0.01 μm

精 度：2 μm





3、典型传感器介绍

光学干涉仪 (**Interference**)

干涉原理:

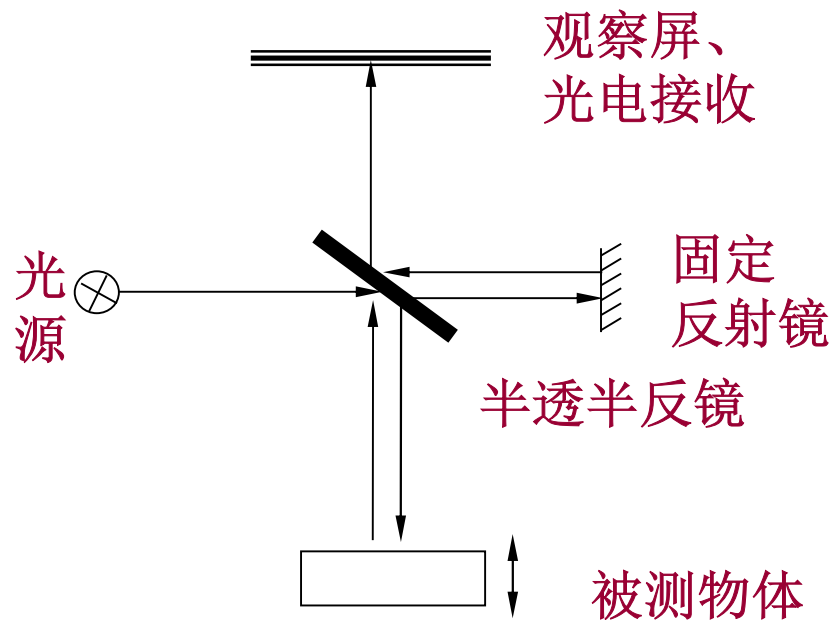
两束同频光束在空间相遇会发生干涉条纹, 其亮暗程度取决于两束光间的相位差 $\Delta \phi$

亮条: $\Delta \phi = 2k\pi, k=0, 1, 1, 2, \dots$
相长干涉

暗条: $\Delta \phi = 2k\pi, k=0, 1, 1, 2, \dots$
相消干涉

3、典型传感器介绍

结构：



实现要点：（1）单一光源 （2）被测物体 （3）光电接收
（4）分光镜（半透半反）（5）固定参考反射镜

3、典型传感器介绍

HP5528A Laser interferometer:

双频激光干涉位移传感器

量程: 100m 分辨力: $0.01\ \mu\text{m}$



3、典型传感器介绍

角度及角位移检测

绝对码光电编码器

原理：平行光源→码盘→光电元件→电信号输出

码盘：光学玻璃，透光/不透光→照相腐蚀

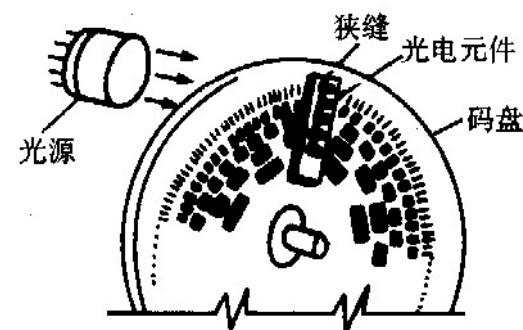
要求：分度准确（工艺）、阴暗交替边缘陡峭（工艺、材质）

光源：LED → 光学系统 → 平行光 → 投影精确

光电元件：硅光电池，光电晶体管 滞后 → 响应速度

码道：位数→每个码道对应一个光电元件→分辨率

角度分辨率： $\alpha = 360^\circ / 2^n$ n -码道数（位数）



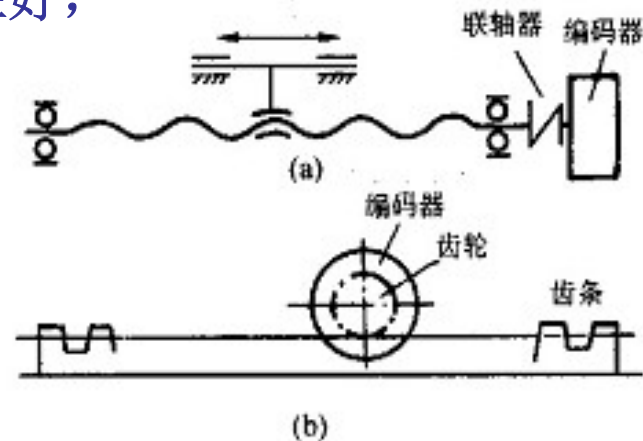
3、典型传感器介绍

增量码光电编码器

码道：最外 --- 增量码道：透光扇形区→分辨率
中间 --- 辨向码道：错开半个扇形区
最内 --- 零位码道：透光狭缝→基准脉冲

特点：结构简单、精度高、分辨率高，可靠性好，
脉冲数字输出，测量范围无限
速度不高（最高几千转/分）
怕振动 --- 丢数

应用：相对位置测量—角度、直线位置，
位移、速度测量



3、典型传感器介绍

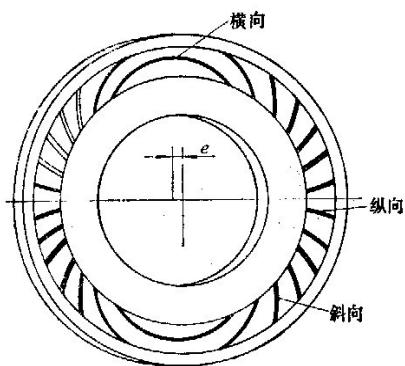
圆光栅传感器

类型：(1) 直线莫尔条纹：条纹 --- 直线

RENISHAW 圆光栅：角度分辨率为0.01"

系统精度为 $\pm 0.7''$

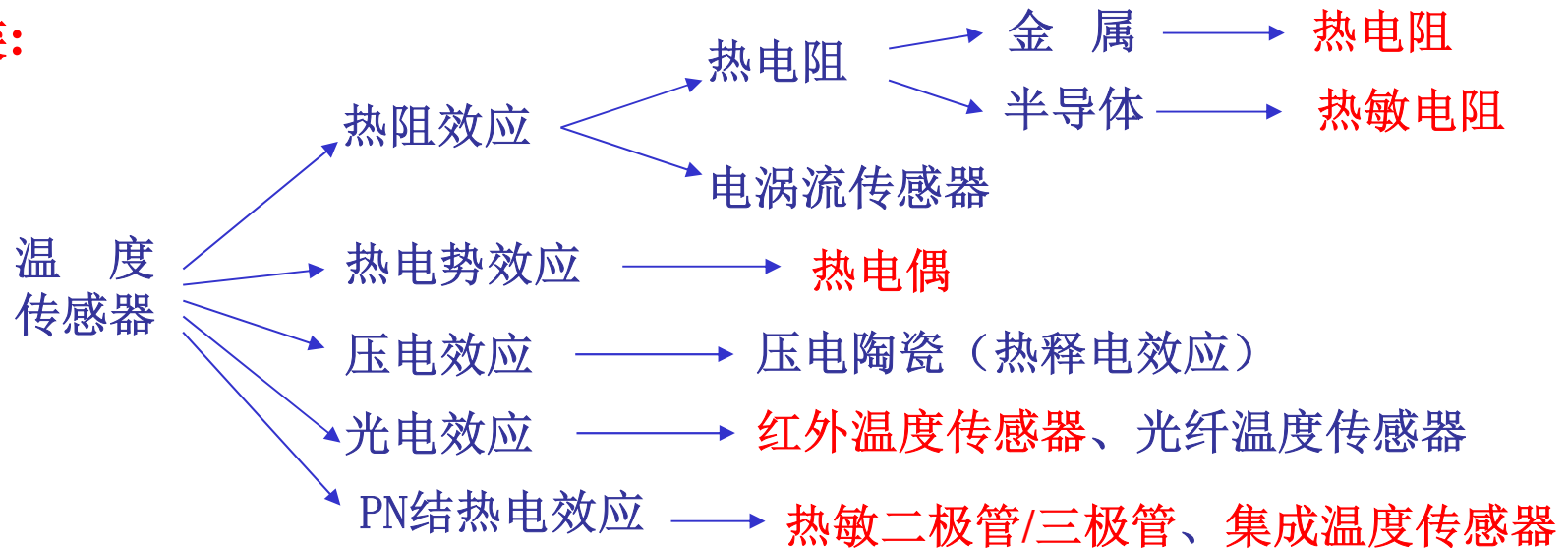
(2) 圆型莫尔条纹：条纹 --- 圆型



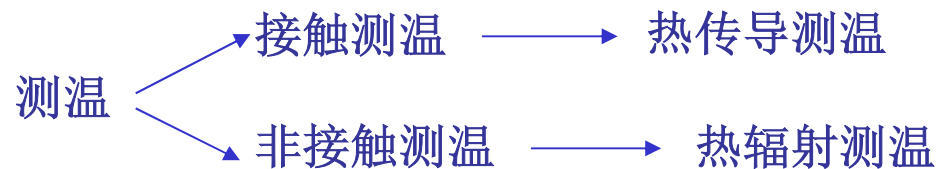
3、典型传感器介绍

温度检测

分类:



应用:



3、典型传感器介绍

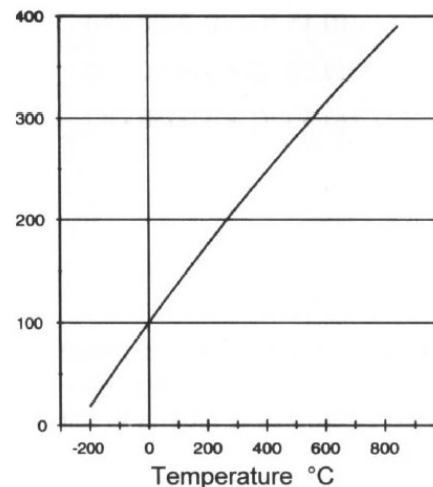
热电阻

(1) 热电阻原理与特性:

原理: 热能 \rightarrow 热电阻 \rightarrow 电阻值

温度 \uparrow \rightarrow 热电阻 阻值 \uparrow

材料: 纯金属 --- 铂、铜、镍、铁



- 要求:
- (1) 温度系数、电阻率较高 \rightarrow 提高灵敏度, 体积小, 反应快
 - (2) 理化性能稳定 \rightarrow 提高稳定性和准确性, 复现性好
 - (3) 良好的输入-输出特性 \rightarrow 线性/接近线性, 测量精度高
 - (4) 良好的工艺性 \rightarrow 批量生产, 降低成本
 - (5) 较大的测温范围 \rightarrow 特别是在低温范围

3、典型传感器介绍

(2) 铂电阻(Pt)

PT100铂电阻

构成：金属铂丝(0.02~0.07mm)绕制成线圈

特点：(1) 在高温和氧化介质中性能极为稳定，易于提纯，工艺性好

(2) 输入输出特性接近线性

$$0 \sim +850^{\circ}\text{C}: R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

$$0 \sim -200^{\circ}\text{C}: R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

R_0 : 0°C时的温度 - 标准值(Pt100, Pt500)

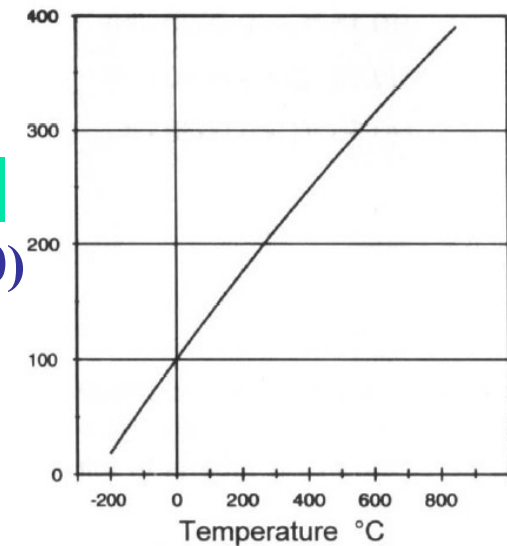
(3) 测量精度高: <0°C: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、
0~100°C: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、
100~650°C: $\pm 0.5\%$

(4) 贵金属，成本较高

应用：标准温度计，高精度工业测温，高低温测试



Pt100:



3、典型传感器介绍

热电偶

(1) 工作原理:

两种不同导体构成闭合回路

两个节点 (A、B) 温度不同

热电势

热电势 (电动势) 大小与温差有关, 若已知其中一端的温度, 即可通过热电势大小算出另一端温度

接触电势: 不同导体 → 自由电子密度不同 → 扩散 → 电势 (帕尔帖)

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

k-波尔兹曼常数 e-电子电荷

N_A, N_B -导体AB的自由电子密度 → 材料

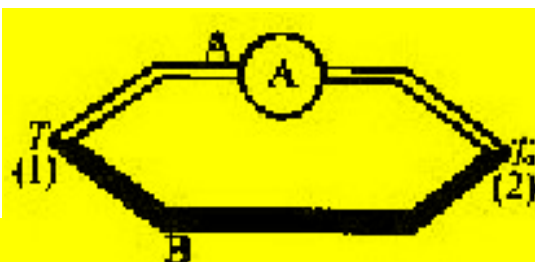
T-节点绝对温度

温差电势: 同一导体 → 两端温度不同 → 电子迁移 (高 → 低) → 电势

$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

σ_A -温差系数

T_A, T_B -A、B两节点绝对温度



冷端补偿:

1. 冰点槽法, 冷端放入冰水混合物
2. 计算修正法, 测量冷端实际温度对结果进行补偿
3. 修正系数法, 选取适当系数给予结果修正
4. 零点迁移法, 若工作环境温度已知且稳定, 可使零点作出一定的偏移作为补偿
5. 补偿器法, 利用不平衡电桥产生的热电势补偿冷端温度变化引起的电动势变化



3、典型传感器介绍

热敏晶体管与集成温度传感器

原理与特点:

PN结温度特性:

热量 → 半导体PN结 → 分子热运动

电子 → N
空穴 → P

热电流

温度越高 → 热电流愈大

特点: 分辨力高 ($0.1\%^\circ\text{C}$), 精度高;

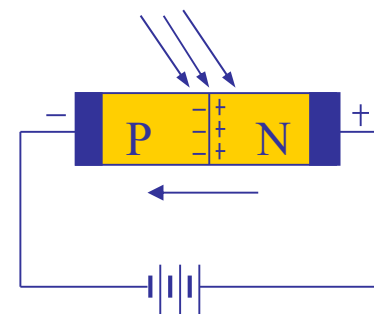
体积小, 重量轻

具有多种输出形式, 便于使用,

批量生产, 价格便宜

集成化、智能化、微型化

应用: 电气元件内置测温、集成测温传感器



3、典型传感器介绍

集成温度传感器

典型：AD590

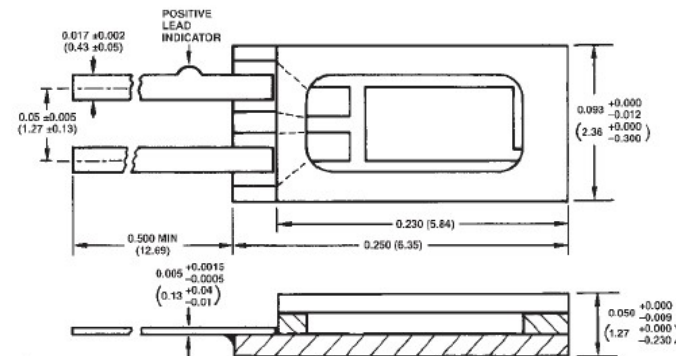
生产商：AD公司

封装：双端器件

测温：-55~150 °C

灵敏度：1 μ A/ K

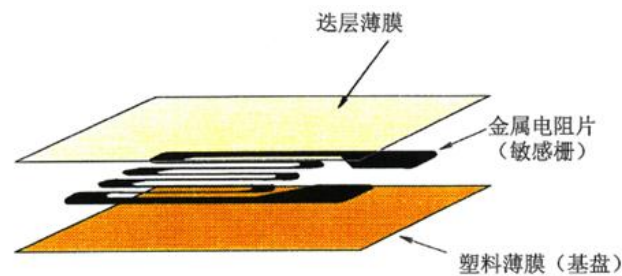
非线性：0.3 °C(F.S.)



3、典型传感器介绍

应变式传感器

是测量物体受力变形产生的应变的一种传感器。
一般用电阻应变片作为敏感元件。
一种将应变转化为电阻变化的传感器。

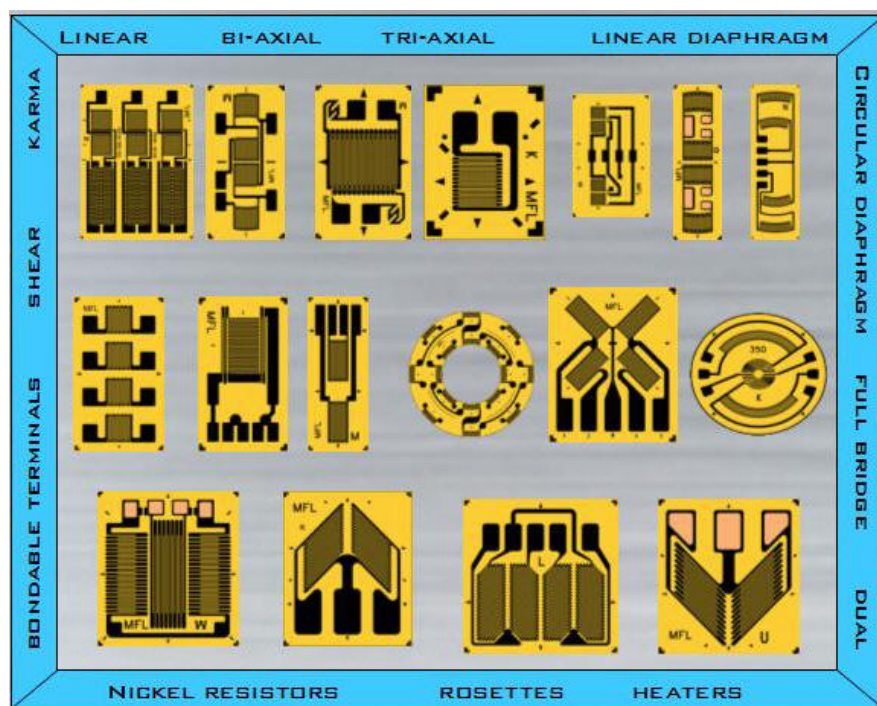


应变片（应变花）结构

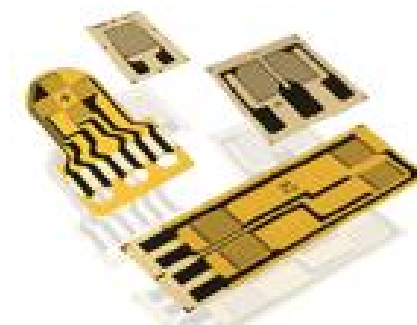
力传感器
加速度传感器
速度传感器
压强传感器
质量传感器
湿度传感器
.....

3、典型传感器介绍

应变式传感器



应变片（应变花）



应变片实物



应变仪

3、典型传感器介绍

应变片粘贴方法

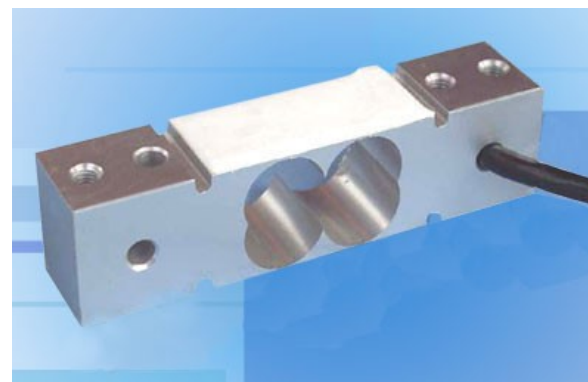


3、典型传感器介绍

应变式传感器



应变式压力传感器



应变式力（称重）传感器

4、各种新型传感器

辐射探测器（红外、射线、微波、电离等）

图像传感器（**CCD**、**CMOS**等）

光纤传感器（温度、应力、陀螺、位移等）

超声波传感器（多普勒效应、速度、距离、探测）

化学传感器（气体、嗅觉、味觉、组分）

生物传感器

.....

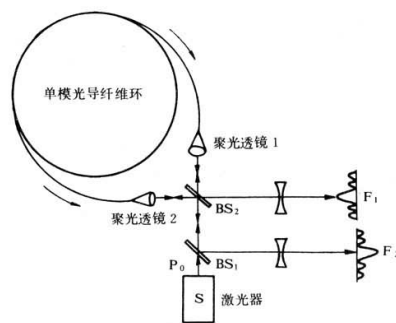
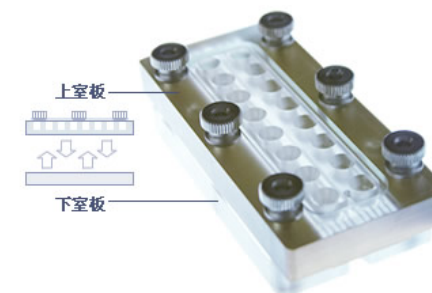


图5 光纤陀螺仪原理图



www.dianzinet.com

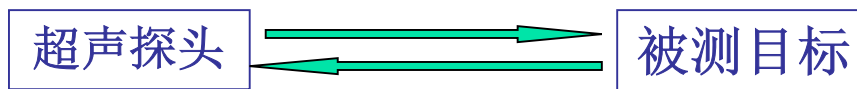


4、各种新型传感器

超声测距传感器

超声波传感器（超声波探头），是实现声电转换的装置（超声换能器）
这种装置能够发射超声波，同时还可以接收超声回波，并转换成电信号。

超声测距原理：



被测距离： $d = ct / 2$ c --- 声速 t --- 往返飞行时间

特点：超声波束发散，测量范围小

波束聚焦困难，测量精度低

测量目标不能太小；

应用：适于大目标、近距离、一般精度测距

手持测距仪 --- 盲人导盲

汽车倒车雷达 --- 汽车安全

工业应用 --- 超声测量液位、物位



4、各种新型传感器

激光测距传感器

(1) 激光测距特点： 测量距离可达几公里甚至几十公里（主要手段）

(2) 激光测距方法： 飞行时间法、相位差法

(a) 飞行时间法：

原理： 激光器发出单个激光脉冲

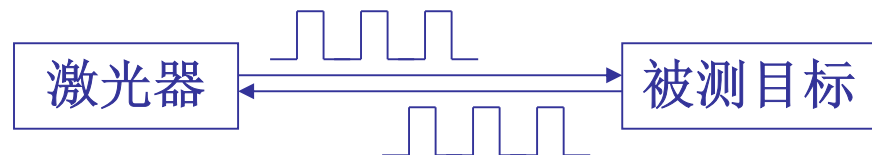


被测距离： $d = ct / 2$ c --- 光速 t --- 往返飞行时间

特点： 对时间测量精度要求高，适于测量超长距离（地球-月球：分辨力达到1m）

(b) 相位差法：

原理： 激光器发出连续激光脉冲



被测距离： $D = \frac{c \phi}{2 \omega_0} = \frac{c \phi}{4 \pi f_0}$ c --- 光速 f_0 --- 脉冲频率 ϕ - 相位差

特点： 测量精度高，测量范围大（短距离 – 超长距离）（相机自动调焦）

4、各种新型传感器



范围：0.2 ~ 300m
分辨力：3mm



德国徕卡手持式：
范围：0.2 ~ 200m
分辨力：0.2mm



美国bushnell 单目军用
范围：1000m
分辨力：1m

4、现代传感器新技术

新原理（新物理效应）

新材料

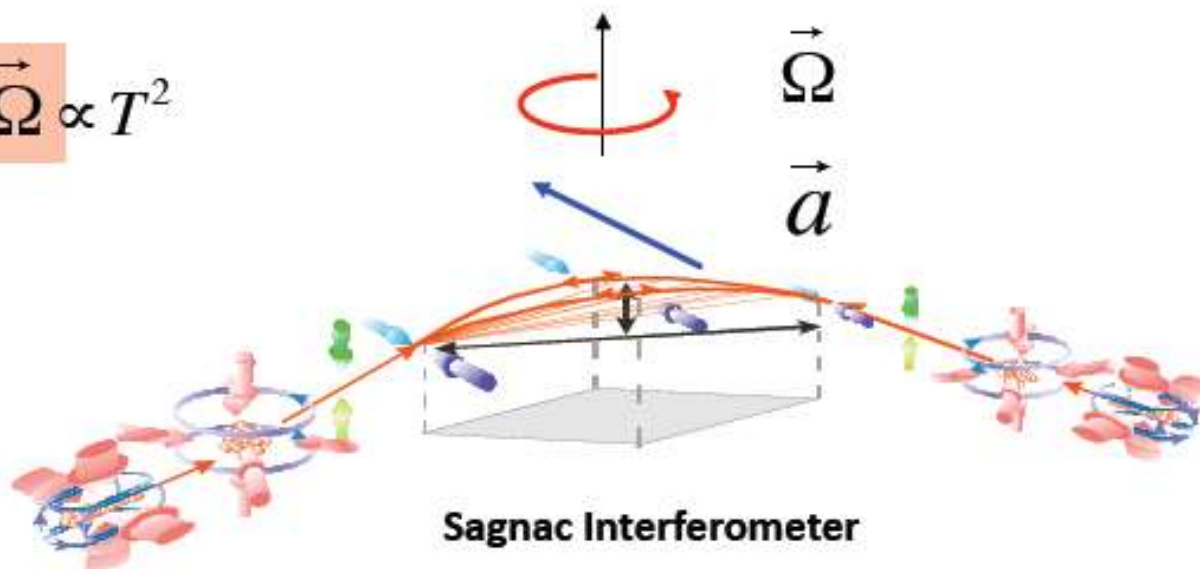
新工艺

Rotational Phase shift

$$\Delta\varphi_{rot} = \frac{2m_{Atom}}{\hbar} \vec{A} \cdot \vec{\Omega} \propto T^2$$

Accellerational Phase shift

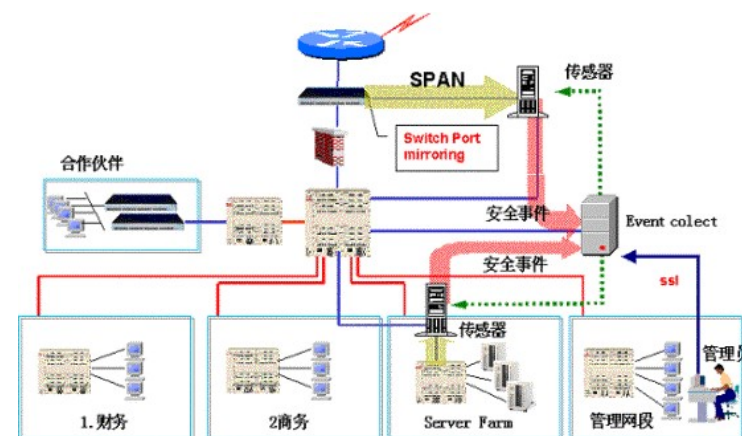
$$\Delta\varphi_{acc} = T^2 \vec{k} \cdot \vec{a}$$



4、现代传感器新技术



微型化
数字化
集成化
智能化
网络化





参考资料

- 1、《传感器和信号调节》张伦译 清华大学出版社
- 2、《现代测控技术及应用》吴国庆等 电子工业出版社
- 3、《传感器与应用电路设计》赵继文等 科学出版社
- 4、《计算机控制技术》 张艳兵等编著 国防工业出版社



课后作业

- 1、简述绝对测量与相对测量、偏差法、零位法、微差法。
- 2、传感器是如何分类的？
- 3、选择传感器的基本原则是什么？
- 4、描述莫尔条纹的现象，说明其用途。
- 5、热电偶测量温度的机理是什么？使用中如何做冷端补偿？
- 6、检索资料并总结出应变片可以做多少种传感器。