

第二章 测试装置的基本特性

本章重点

1. 线性系统的主要性质
2. 测试装置静态特性的定义
3. 测试装置动态特性的定义和应用
4. 测试装置对任意输入的响应、单位阶跃响应、脉冲响应。
5. 不失真测试的定义和实现条件
6. 测试装置动态特性的测试的方法

第三章 常用的传感器

本章学习要求:

1. 了解传感器的分类
2. 掌握常用传感器测量原理
3. 了解传感器测量电路

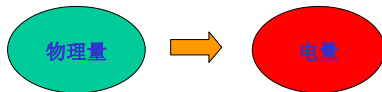
第三章 常用的传感器

传感器定义

传感器是直接作用于被测量，能感受被测量的变化并按一定的规律将其转换成有用信号输出的装置。

目前，传感器转换后的信号大多为电信号(电压、电流)。

因而从狭义上讲，传感器是把外界输入的非电信号转换成电信号的装置。



第三章 常用的传感器

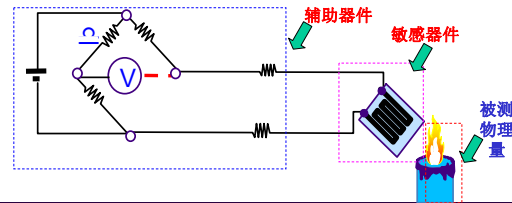
3.1 传感器的分类

1. 传感器的构成

传感器一般由敏感器件与辅助器件组成。

敏感器件是传感器的核心，它的作用是直接感受被测物理量，并对信号进行转换输出。

辅助器件则是对敏感器件输出的(电)信号进行放大、阻抗匹配，以便于后续仪表接入。



3.1 传感器的分类

2. 传感器的分类

传感器的分类方法有很多

- (1) 按被测物理量分类: 位移, 力, 温度等。
- (2) 按工作的物理基础分类: 机械式, 电气式, 光学式, 流体式等。
- (3) 按信号变换特征分类: 物性型, 结构型。
- (4) 按敏感元件与被测对象之间的能量关系分类: 能量转换型和能量控制型。

电气式包括: 电容式、电感式、电阻式、磁电式等

传感器的名称往往采用复合命名法: 电容式位移传感器, 压电式加速度传感器

2. 传感器的分类

A 物性型与结构型传感器

物性型: 依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换。

例如: 水银温度计, 压电测力计。

结构型: 依靠传感器结构参数的变化实现信号转变。

例如: 电容式和电感式传感器。

B 能量转换型和能量控制型传感器

能量转换型: 直接由被测对象输入能量使其工作。

例如: 热电偶温度计, 压电式加速度计。

能量控制型: 从外部供给能量并由被测量控制外部供给能量的变化。

例如: 电阻应变片。

3.1 传感器的分类

3. 常见的被测物理量

- **机械量:** 长度, 厚度, 位移, 速度, 加速度, 旋转角, 转数, 质量, 重量, 力, 压力, 真空度, 力矩, 风速, 流速, 流量;
- **声:** 声压, 噪声.
- **磁:** 磁通, 磁场.
- **温度:** 温度, 热量, 比热.
- **光:** 亮度, 色彩

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

第三章 常用的传感器

3.2 机械式传感器

一. 工作原理

环形测力计
弹簧秤

压力计

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

3.2 机械式传感器

一. 工作原理

温度计

以**弹性元件**为敏感元件, 将被测量先转换成弹性元件的**变形**, 该变形经放大后成为**指针的偏转**, 借助**刻度**指示出被测量的大小。

二. 特点

1. **优点:** 结构简单、可靠、使用方便、价格低廉、读数直观
2. **缺点:** 弹性变形不宜大, 非线性误差; 惯性大、固有频率低; 具有蠕变、弹性后效。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

3.2 机械式传感器

三. 常用的机械式传感器

图 3-4 微型探测开关

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

第三章 常用的传感器

3.3 电阻、电容与电感式传感器

➢ **电阻式传感器**是把被测量转换为电阻变化的一种传感器,

➢ 按工作的原理可分为: **变阻器式、电阻应变式、热敏式、光敏式。**

一. 电阻式传感器

1. 变阻器式传感器

1). 工作原理

电阻的计算公式: $R = \rho \frac{l}{A}$ $\left\{ \begin{array}{l} \rho - \text{电阻率} \\ l - \text{电阻丝长度} \\ A - \text{电阻丝截面积} \end{array} \right.$

如果电阻丝直径和材质一定, 则电阻值随电阻丝长度而变化。

工作原理: 通过改变电位器触头的位置, 把位移的变化转换成电阻丝长度的变化, 从而引起电阻的变化。

有**直线位移型、角位移型、非线性型**等。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

1 变阻器式传感器

1). 工作原理

(1) 直线位移型

触点C移动时, A点和C点之间的电阻

$$R = k_l x$$

k_l — 电阻丝单位长度的电阻值

灵敏度

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta x} = \frac{dR}{dx} = k_l$$

直线位移型

当电阻丝分布均匀时, k_l 为常数, 输入(位移 x) 和输出(电阻 R) 成线性关系。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

1 变阻器式传感器

1). 工作原理

(2). 角位移型

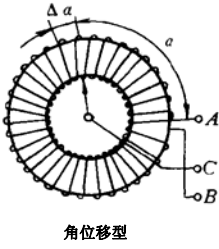
触点C移动时, A点和C点之间的电阻

$$R = k_a \alpha$$

α — 转角 (rad)

k_a — 电阻丝单位长度的电阻值

灵敏度 $S = \frac{\Delta R}{\Delta \alpha} = \frac{dR}{d\alpha} = k_a$



角位移型

当电阻丝分布均匀时, k_a 为常数, 输入(位移 α) 和输出(电阻 R) 成线性关系。

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

1 变阻器式传感器

1). 工作原理

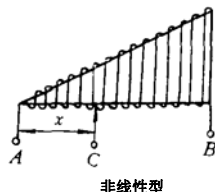
(3) 非线性型

触点C移动时, A点和C点之间的电阻

$$R = k x^2$$

k — 电阻丝单位长度的电阻值

灵敏度 $S = \frac{\Delta R}{\Delta x} = \frac{dR}{dx} = 2k x$



非线性型

当电阻丝分布均匀时, k 为常数, 输入(位移 x) 和输出(电阻 R) 成非线性关系。

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

1 变阻器式传感器

2) 后接电路

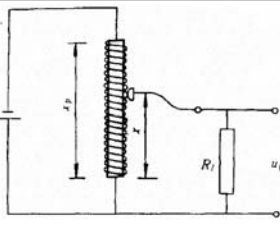
$$u_y = \frac{u_o}{\frac{x_p}{x} + \left(\frac{R_p}{R_L}\right)\left(1 - \frac{x}{x_p}\right)}$$

R_p — 变阻器总电阻

x_p — 变阻器总长度

R_L — 后接电路的输入电阻

后接电阻 R_L 引起负载效应, 当 $R_p \ll R_L$ 时

$$u_y = u_o \frac{x}{x_p}$$


广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

1 变阻器式传感器

3) 特点

(1) 优点: 结构简单, 性能稳定, 使用方便。

(2) 缺点: 分辨力低 ($> 20 \mu m$)、噪声大。

4) 应用

(1) 测线位移、角位移;

(2) 在测量仪器中用于伺服记录仪器或电子电位差计等。

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

1 变阻器式传感器

案例: 玩具机器人 (广州中鸣数码)



原理

直接将关节驱动电机的转动角度变化转换为电阻器阻值变化



广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

一. 电阻式传感器

2 电阻应变式传感器--应变片

1) 分类: 金属电阻应变片、半导体应变片



金属电阻应变片 半导体应变片



图 3-7 电阻丝应变片
1—电阻丝 2—基片 3—覆盖层 4—引出线



图 3-9 半导体应变片
1—硅衬底 2—P-S 3—内引线 4—焊锡板 5—外引线

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

3.3 电阻式传感器

金属电阻应变片有丝式和箔式两种

图 3-8 箔式应变片
a) 单轴 b) 测扭型 c) 多轴(应变花) d) 平行轴多轴 e) 网格多轴

丝式

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

应变片的工作原理为**应变电阻效应**，即应变片发生应变时，其电阻值发生变化的现象。

应变片电阻的计算公式： $R = \rho \frac{l}{A}$ $\left\{ \begin{array}{l} \rho - \text{电阻率} \\ l - \text{电阻长度} \\ A - \text{电阻截面积} \end{array} \right.$

当应变片发生应变时，其电阻率 ρ 、长度 l 和截面积 A 都会发生变化，从而会引起应变片电阻值 R 的变化。

电阻值 R 的变化量 ΔR 与其电阻率 ρ 的变化量 $\Delta \rho$ 、长度 l 的变化量 Δl 和截面积 A 的变化量 ΔA 之间的关系为

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho$$

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho$$

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

$$dR = \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA + \frac{l}{A} d\rho$$

将 $A = \pi r^2$ 代入，可得

$$dR = \frac{\rho}{\pi r^2} dl - \frac{2\rho l}{\pi r^3} dr + \frac{l}{\pi r^2} d\rho$$

$$= \frac{\rho l}{\pi r^2} \frac{dl}{l} - \frac{\rho l}{\pi r^2} \frac{2dr}{r} + \frac{\rho l}{\pi r^2} \frac{d\rho}{\rho}$$

$$= R \left(\frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \right)$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A} \\ \frac{\partial R}{\partial A} = -\frac{\rho l}{A^2} \\ \frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{l}{A} \end{cases}$$

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

电阻的相对变化量

$$dR = R \left(\frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \right) \Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$dl/l = \varepsilon$ —— 应变片的轴向相对变形，即纵向应变。

dr/r —— 应变片的径向相对变形，即横向应变。

$\frac{dr}{r} = -\nu \frac{dl}{l}$ ν —— 应变片材料的泊松比

$d\rho/\rho$ —— 应变片电阻率相对变化

$$\frac{d\rho}{\rho} = \lambda E \varepsilon \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda - \text{压阻系数} \\ E - \text{弹性模量} \end{array} \right.$$

于是有

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \lambda E \varepsilon = \varepsilon(1 + 2\nu + \lambda E)$$

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \lambda E \varepsilon = \varepsilon(1 + 2\nu + \lambda E)$$

机械变形 电阻率的变化

(1) 对金属电阻丝应变片来说， $\lambda E \varepsilon$ 很小，可忽略，则有

$$\frac{dR}{R} \approx (1 + 2\nu)\varepsilon = S_g \varepsilon$$

S_g —— 灵敏度或应变系数，一般为 1.7~2.6。

S_g 与电阻丝的材料有关，几种常用的电阻丝材料的物理性能如表 3-2 所示。

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \lambda E \varepsilon = \varepsilon(1 + 2\nu + \lambda E)$$

机械变形 电阻率的变化

(2) 对半导体应变片来说， $(1 + 2\nu)\varepsilon$ 很小，可忽略，则有

$$\frac{dR}{R} \approx \lambda E \varepsilon = S_g \varepsilon$$

S_g —— 灵敏度，一般为 60~150，远大于电阻丝应变片

工作原理：压阻效应（单晶半导体材料在沿某一轴向受到外力作用时，其电阻率发生变化的现象）。

广东工业大学机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器--应变片

2) 工作原理

(3) 金属丝电阻应变片与半导体应变片工作原理上的区别

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \lambda E\varepsilon = \varepsilon(1 + 2\nu + \lambda E)$$

机械变形 电阻率的变化

金属丝电阻应变片: $\frac{dR}{R} \approx (1 + 2\nu)\varepsilon = S_g\varepsilon$ 机械变形引起的, 属结构型的

半导体应变片: $\frac{dR}{R} \approx \lambda E\varepsilon = S_g\varepsilon$ 电阻率变化引起的, 属物性型的

两者工作原理上的区别

前者利用导体形变引起电阻的变化, 后者利用半导体电阻率变化引起电阻的变化

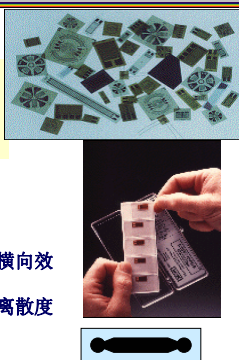
广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器

3). 特点

(1) 金属丝应变片/应变计
优点: 稳定性和温度特性好.
缺点: 灵敏度系数小.

(2) 半导体应变片
优点: 灵敏度高, 机械滞后、横向效应和体积小
缺点: 温度稳定性差, 灵敏度离散度大, 大应变时的非线性误差大



广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器

4) 应变片的主要参数

- (1) 几何参数: 表距L和丝栅宽度b, 制造厂常用b×L表示。
- (2) 电阻值: 应变计的原始电阻值。
- (3) 灵敏度: 表示应变计变换性能的重要参数。
- (4) 其它表示应变计性能的参数(工作温度、滞后、蠕变、零漂以及疲劳寿命、横向灵敏度等)。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

2 电阻应变式传感器

5) 电阻应变片式传感器的应用

(1) 直接用来测定结构的应变或应力



图 3-10 构件应力测定的应用例
a) 齿轮轮齿应力 b) 飞机机身应力
c) 立柱应力 d) 桥梁应力

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

5) 电阻应变片式传感器的应用

(2) 将应变片贴于弹性元件上, 用于测量力、位移、压力、加速度

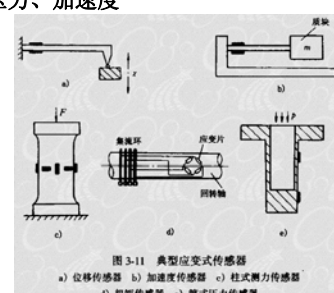


图 3-11 典型应变式传感器
a) 位移传感器 b) 加速度传感器 c) 柱式测力传感器
d) 扭矩传感器 e) 筒式压力传感器

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

5) 电阻应变片式传感器的应用

案例: 电子称



原理
将物品重量通过悬臂梁转化结构变形再通过应变片转化为电量输出。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

5) 电阻应变片式传感器的应用

(3) 注意问题

- (1) 直接测量量为应变，需换算或标定后才能得到相应的力、应力或位移。
- (2) 粘贴要牢固。
- (3) 动态测量时应考虑应变片的动态特性。
- (4) 温度补偿措施。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

一. 电阻式传感器

3 固态压阻式传感器

1) 工作原理：
是利用硅的压阻效应和集成电路技术制成的新型传感器。

2) 特点
灵敏度高、动态响应快、测量精度高、稳定性好、工作温度范围宽、体积小和便于批量生产等特点。
对温度比较敏感，需采用温度补偿措施。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

一. 电阻式传感器

4 典型动态电阻应变仪

图 4-14 动态电阻应变仪方框图

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

3.3 电阻、电容和电感式传感器

二. 电容式传感器

1. 工作原理

电容传感器是以各种类型的电容器作为传感元件，将被测参数微小变化的信息转换成电容量的变化，然后通过测量电路转换成电压输出。

平板电容为 $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta}$

ϵ —— 极板介质相对介电常数
 ϵ_0 —— 真空介电常数
 S —— 极板面积
 δ —— 极板间距

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta}$$

分类

- 极距变化型 —— δ 变，其余不变
- 面积变化型 —— A 变，其余不变
- 介质变化型 —— ϵ 变，其余不变

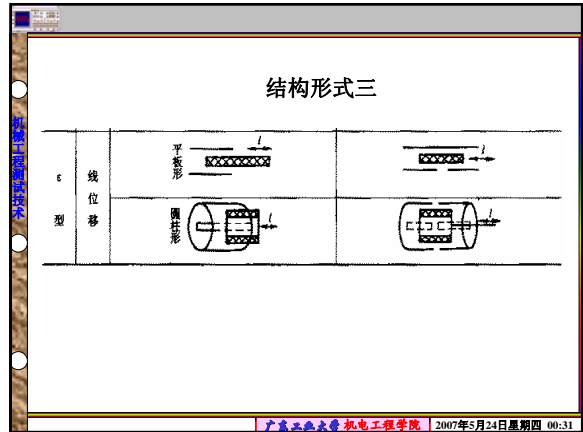
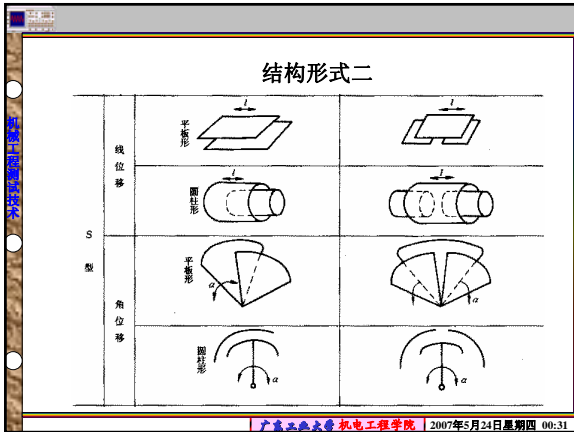
广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

电容式传感器的结构形式

结构形式一

基本类型		单片型	
		单组式	差动式
δ	线位移		
	角位移		

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31



1. 工作原理

1) 极距变化型

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{\delta}$$

灵敏度

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\epsilon\epsilon_0 A \frac{1}{\delta^2}$$

(1) 灵敏度与极距平方成反比，极距越小灵敏度越高
(2) 灵敏度不为常数，引起线性误差

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

1) 极距变化型

灵敏度 $S = \frac{dC}{d\delta} = -\epsilon\epsilon_0 A \frac{1}{\delta^2}$

(3) 减小非线性的措施

- 限定极距变化范围 $\Delta\delta / \delta \leq 0.1$
- 差动连接可提高灵敏度、线性度

(4) 特点:

优点: 动态非接触测量，灵敏度高
缺点: 存在线性误差，测量范围小(0.01~数百微米)
测量电路复杂

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

2) 面积变化型

(1) 角位移型 $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon a r^2}{2\delta}$
 $S = \frac{dC}{da} = \frac{\epsilon_0 \epsilon r^2}{2\delta} = \text{常数}$

(2) 直线位移型 $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon b x}{\delta}$
 $S = \frac{dC}{dx} = \frac{\epsilon_0 \epsilon b}{\delta} = \text{常数}$

面积变化型
优点: 输出与输入成线性关系
缺点: 灵敏度低
 适用于较大直线位移及角位移的测量

(3) 圆: $S = \frac{dC}{dx} = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon}{\ln(D/d)} = \text{常数}$

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

3) 介质变化型

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{\delta}$$

(1) 利用介电常数的变化将被测量转换为电容量的变化

(2) 可用来测量电介质的液位或某些材料的厚度、湿度和温度等变化。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日 星期四 00:31

电容传感器分类比较				
型式	线性	灵敏度	工作范围	应用
极距变化型 	$v \cdot C = \frac{1}{\delta}$ 	$S = \frac{C_0}{\delta_0} = \text{常数}$ δ_0 较小时, S 较大, 但 δ_0 大小受击穿电压、材料介电常数、机械性能等影响。 一般 $\delta_0 = 0.2 \sim 0.5 \text{mm}$	最小 $\frac{\delta}{\delta_0} < 0.1$ 非线性误差 $-\frac{\Delta \delta}{\delta} > 100\%$	广泛应用于高精度小尺寸测量, 且为非接触测量。 线性位移量 0.01mm 以内。
极距差动式 	C 	$S = \frac{2C_0}{\delta_0}$ 比单极的提高一倍	$\delta_0 = 0.2 \sim 0.5 \text{mm}$ 非线性误差 $-\frac{\Delta \delta}{\delta} > 100\%$	《备注: 在实际应用中, 为了提高灵敏度, 减小非线性, 大多采用差动式结构》
面积变化型 	$C = \frac{S}{d}$ 面积式 $C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$	$S = \frac{C_0}{S_0} = \text{常数}$ 一般 $\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta S}{S}$ S 较大, ΔC 解小, 灵敏度较低	比较大	可以在位移和角度测量。
介质变化型 	一般条件下线性良好	$S = \text{常数}$ 一般	比较大	具有非接触测量

二. 电容式传感器

2 测量电路

将电容量的变化转换为电压、电流或频率信号

a) 电桥电路

b) 谐振电路

c) 调频电路

d) 运算放大器电路

二. 电容式传感器

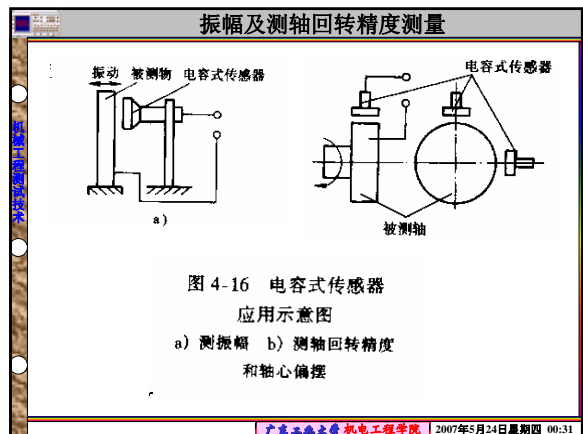
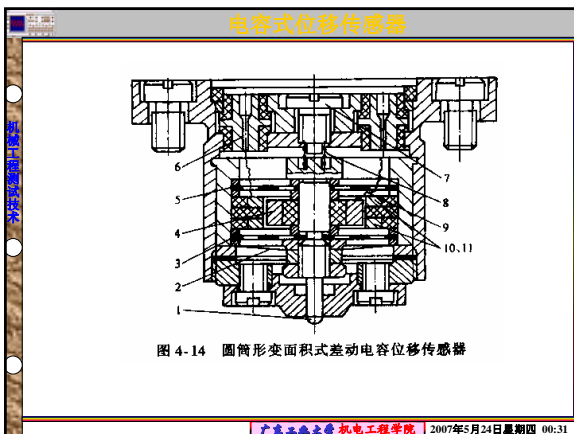
3. 电容集成压力传感器

利用集成电路工艺将电容敏感元件和测量电路制作在一起。

灵敏度高

二. 电容式传感器

4. 电容式传感器的应用



电容式加速度传感器

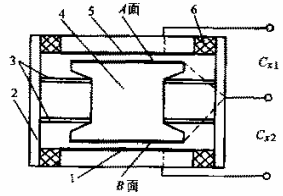
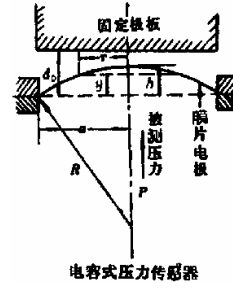


图 4-17 电容式加速度传感器原理结构

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

3、电容式压力传感器



电容式压力传感器

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

电容式差压传感器

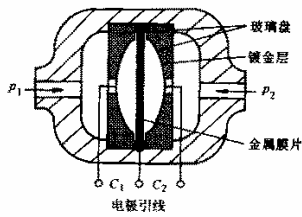
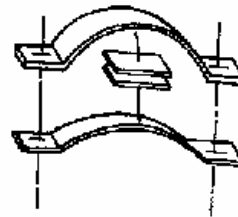


图 4-18 电容式差压传感器原理结构

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

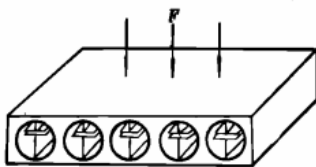
电容式应变计



电容式应变计

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

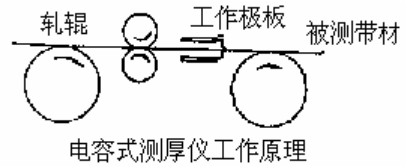
6、电容式荷重传感器



电容式荷重传感器

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

7、电容式测厚仪



电容式测厚仪工作原理

广东工业大学机电工程学院 2007年5月24日星期四 00:31

电容式水分计

在一定范围内，许多吸湿性物质的介电常数随着它的水分含量的增加而成比例的增大，如纤维、木材、谷物、纸张等物质的介电常数，在干燥状态下为2~5%，但由于纯水的介电常数很大（为81），空气的介电常数为1，因此，当物质的含水量有微小的增加时，就会使其介电常数变大。

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

总结

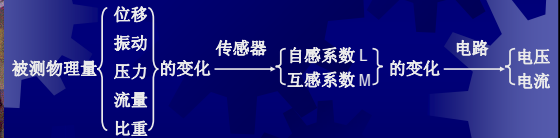
传感元件	原始输入量	变换原理	物理现象	能量关系	输出量
电容式传感器	位移	$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{\delta}$	结构型	控制型	电容

广东工业大学 机电工程学院 | 2007年5月24日星期四 00:31

三. 电感式传感器

原理

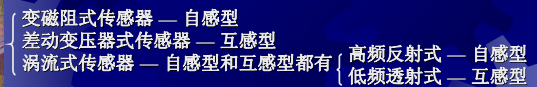
电感式传感器最基本原理是电磁感应原理。



电感传感器优点:

- 灵敏度高, 分辨力高, 位移: $0.1\mu\text{m}$;
- 精度高, 示值误差: 示值范围的 $0.1\%\sim 0.5\%$; 线性特性好, 非线性误差: $0.05\%\sim 0.1\%$;
- 性能稳定, 重复性好 ;
- 结构简单可靠、输出功率大、输出阻抗小、抗干扰能力强、对工作环境要求不高、寿命长。

电感式传感器分类



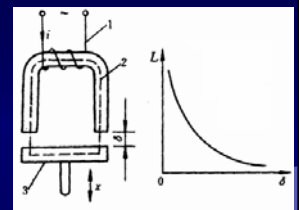
三. 电感式传感器

1. 自感型

1. 自感型

1) 可变磁阻式

(1) 工作原理及分类



将被测对象的微小变化(Δx) \rightarrow 电感的变化 (ΔL)
传感器运动部分与衔铁相连, 测物理量时,
运动部分位移 \rightarrow 衔铁位移 \rightarrow 气隙厚度 δ 变化 \rightarrow
线圈自感系数 L 变化

线圈中的电感量 $L = \frac{N^2}{R_m}$

若 δ 很小，且不考虑磁路铁损，则

$$R_M = R_{\text{铁芯}} + R_{\text{气隙}} + R_{\text{衔铁}}$$

$$R_M = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i A_i} + 2 \frac{\delta}{\mu_0 A}$$

图 3-12 可变磁阻式传感器基本原理
1—线圈 2—铁心 3—衔铁

l_i ——各导磁体长度 δ ——空气隙间隙
 μ_i ——各导磁体相对导磁率 μ_0 ——空气隙导磁系数
 A_i ——各导磁体截面积 A ——空气隙截面积

因为 $\mu_{\text{铁芯}}、\mu_{\text{衔铁}} \gg \mu_{\text{气隙}}$ ，所以， $R_{\text{铁芯}} + R_{\text{衔铁}} \ll R_{\text{气隙}}$

$$R_M \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A}$$

$$L = \frac{N^2}{R_M} = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} = f(\delta, \mu, A) \iff i = \frac{u_0}{L} = \frac{2u_0 \delta}{N^2 \mu_0 A} = f(\delta, \mu, A)$$

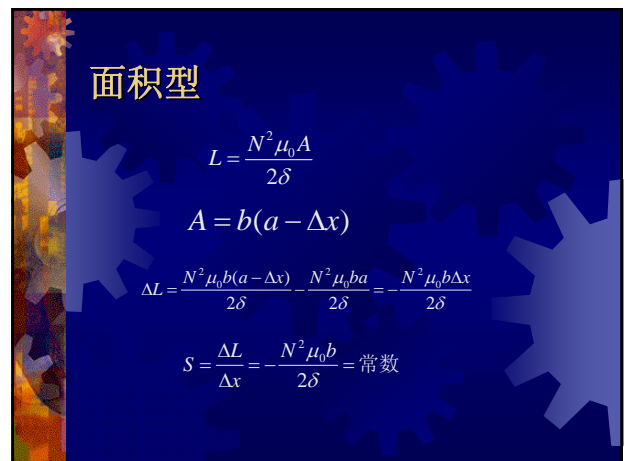
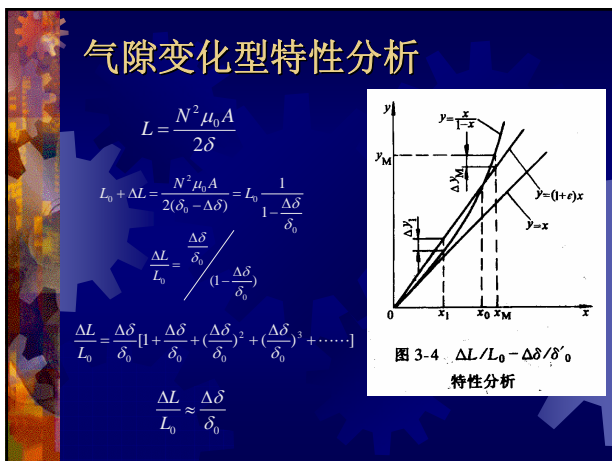
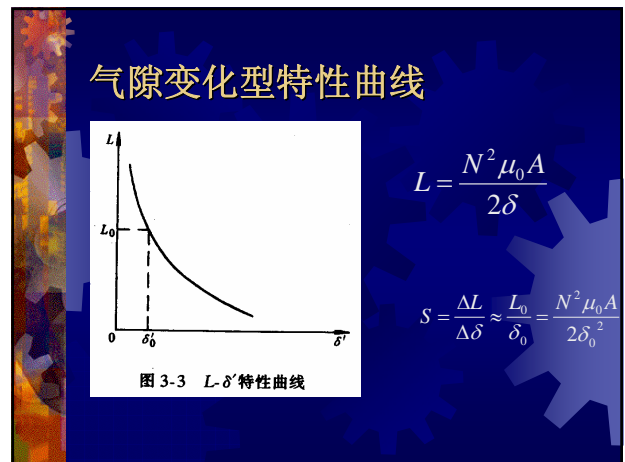
电感传感器的三种型式

- (a) 气隙变化型—变气隙的间隙 δ
- (b) 面积变化型—变气隙的截面积 S
- (c) 螺管型—变衔铁与线圈重合长度

图 3-1 自感式传感器原理图
a) 气隙型 b) 截面型 c) 螺管型
1—线圈 2—铁心 3—衔铁

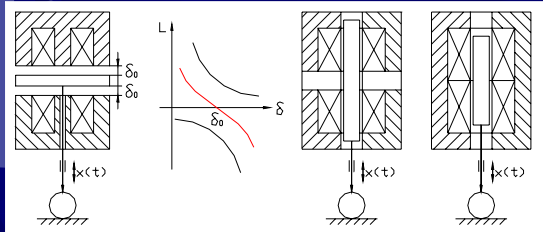
电感传感器的分类比较

型 式	特性曲线	线 性	灵敏度	使用范围	应 用
气隙变化型 	$L = \frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta}$ 	最差 $L \propto \frac{1}{\delta}$	$S = -\frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta^2}$ δ_0 较小时， S 最大，一般 $\delta_0 = 0.2 \sim 0.5 \text{mm}$ 非线性误差 $= \frac{ \Delta S }{S} \times 100\%$	最小 $\frac{\delta}{\delta_0} \leq 0.1$	小尺寸高精度测量，可完成非接触式测量
面积变化型 	$A = b(a-x)$ $L = \frac{W^2 \mu_0 b(a-x)}{2\delta}$ 	良好 $\Delta L \propto \Delta x$	$S = -\frac{W^2 \mu_0 b}{2\delta}$ =常数 一般	一般	较少
螺管型(螺管型) 	精确理论计算 计算复杂 用实验得到 	最好	$S = \text{常数}$ 低	较长	最广泛 灵敏度低的缺点可由后级电路解决



差动型式

为了增加灵敏度，改善线性，往往做成差动式的。



差动优点：(1) .大大的改善了线性，减小非线性误差；
(2) .使灵敏度提高一倍。

(3) 涡流式传感器

涡流

成块的金属物体置于变化着的磁场中，或者在磁场中运动时，在金属导体中会感应出一圈圈自相闭合的电流，这就是涡流。

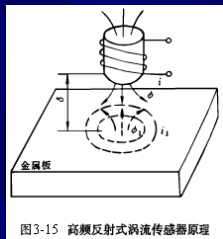


图3-15 高频反射式涡流传感器原理

根据激励频率不同分为 { 高频反射式涡流传感器 — 自感型
低频透射式涡流传感器 — 互感型

高频反射式涡流传感器

1. 工作原理

线圈上通交变高频电流
↓
线圈产生高频交变磁场
↓
产生高频交变涡流
↓
涡流产生反磁场
↓
阻碍线圈电流交换作用
↓
等效于L或阻抗的改变

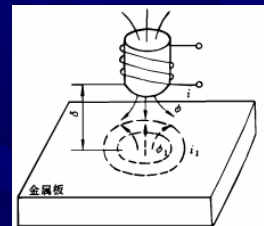


图3-15 高频反射式涡流传感器原理

高频反射式涡流传感器

2. 测量电路

分压式调幅电路原理

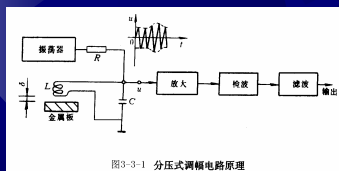


图3-3-1 分压式调幅电路原理

传感器线圈L和电容C组成并联谐振回路，其谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

测量时， δ 变化 \rightarrow L变化 \rightarrow LC回路失谐 \rightarrow 输出信号 $u(t)$ 的幅值随 δ 变化（这时的频率仍为振荡器的工作频率），它相当于一个调幅波。

谐振曲线和输出特性

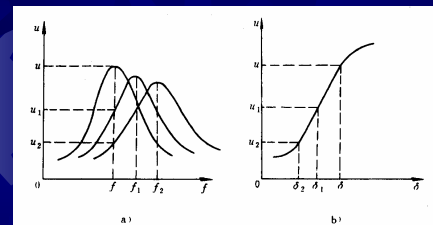


图3-3-2 分压式调幅电路的谐振曲线及输出特性
a) 谐振曲线 b) 输出特性

测量电路(二)

调频电路原理

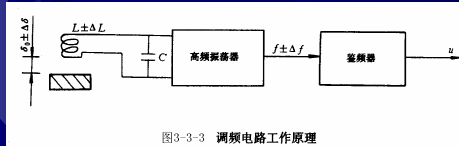
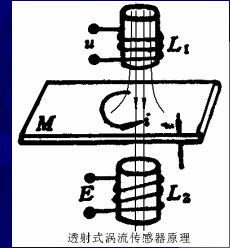


图3-3-3 调频电路工作原理

当 δ 变化 \rightarrow L变化 \rightarrow 振荡器的振荡频率 f 变化 \rightarrow 通过鉴相器进行频率-电压转换 \rightarrow 得到与 δ 成比例的输出电压。

低频透射式涡流传感器

U \rightarrow L₁ \rightarrow 同频交变电流 \rightarrow 产生一交变磁场 \rightarrow 磁力线切割M \rightarrow 产生涡流i \rightarrow 到达L₂的磁力线减少(无M时磁力线直接贯穿L₂) \rightarrow E的下降



透射式涡流传感器原理

磁力线渗透深度与测试频率的关系

$$E \propto e^{-1/Q}$$

$$Q \propto \sqrt{\rho/f}$$

式中 E——感应电压

t——被测金属板厚

Q——涡流的渗透深度

ρ ——电阻率

f——激磁频率

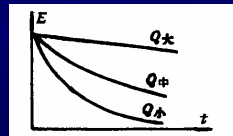


图3-3-4 渗透深度对E=f(t)曲线的影响

- 测量薄板时应选较高频率
- 测量厚板时应选较低频率

涡流传感器的结构及特性

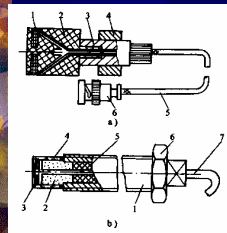


图 3-40 涡流传感器实例

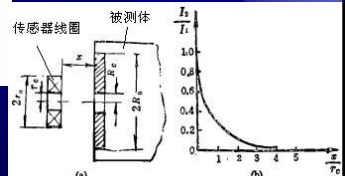


图3-3-5 涡流传感器输出特性

涡流传感器的应用

位移x的变化 \rightarrow 电量的变化

可做成位移、振幅、厚度等传感器

电导率 ρ 的变化 \rightarrow 电量的变化

可做成表面温度、电解质浓度、材质判别等

磁导率 μ 的变化 \rightarrow 电量的变化

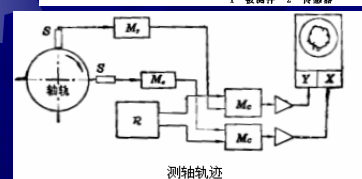
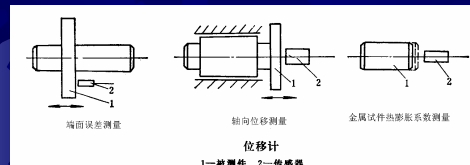
可做成应力、硬度等传感器

x、 ρ 、 μ 的综合影响

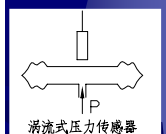
可做成材料探伤装置

涡流传感器的应用

1、位移测量——涡流位移计



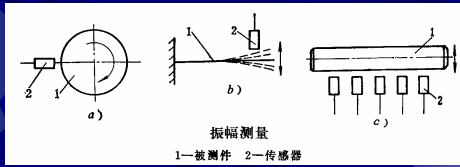
测轴轨迹



涡流式压力传感器

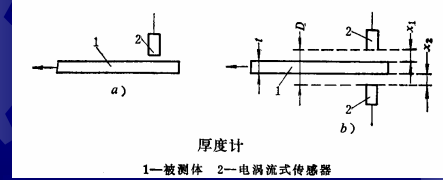
涡流传感器的应用

2、振幅测量——涡流振幅计



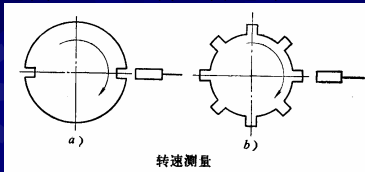
涡流传感器的应用

3、厚度测量



涡流传感器的应用

4、转速测量——涡流转速计



5、涡流探伤仪

探测金属材料的表面裂纹、热处理裂纹及焊缝裂纹

涡流传感器的应用

6、温度测量

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(t - t_0)]$$

保持其它条件不变，则 t 变化 $\rightarrow \rho$ 变化 \rightarrow 输出电压变化

可测钢材压延时压滚温度，液、气态介质温度，且测温时有一个很大的特点是热惯性小（约0.001s），动态响应好，能做快速测温工作。

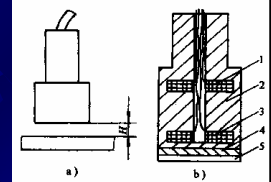
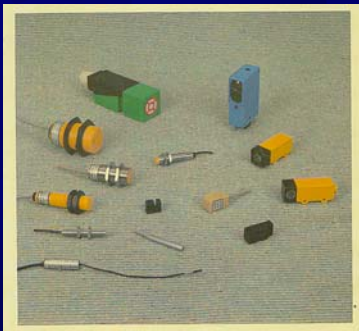


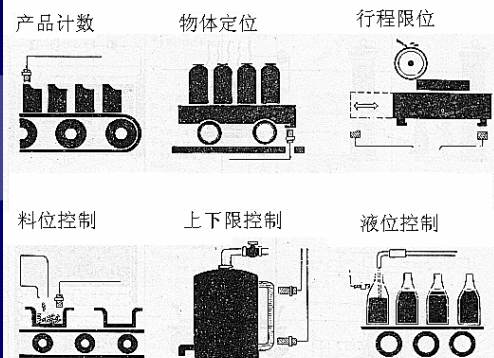
图 3-41 温度测量

涡流传感器的应用

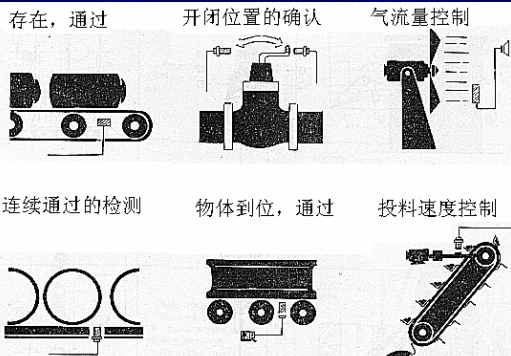
7、自动控制中工件是否到位等的检测——接近开关



接近开关应用实例一



接近开关应用实例二



2.互感型---差动变压器式传感器

互感原理

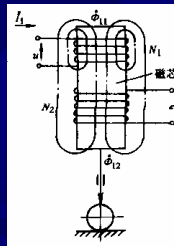
差动变压器本身是变压器，利用互感原理，所以也称互感传感器。

互感现象：

线圈 N_1 输入电流 i_1 ，
 N_2 产生感应电势 e_{12}

$$e_{12} = -M \frac{di_1}{dt}$$

若 $i_1 = \sin \omega t \quad \therefore e_{12} = -j\omega I_1 M$



2.互感型---差动变压器式传感器

1) 差动变压器的工作原理

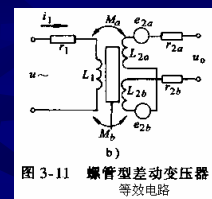
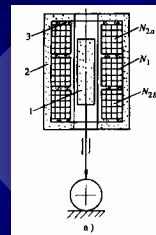


图 3-11 螺管型差动变压器等效电路

图 3-11 螺管型差动变压器

e_1 ——初级线圈的激励电压

L_{2a} 、 L_{2b} ——次级线圈的电感

R 、 L_1 ——初级线圈的电阻和电感

R_{2a} 、 R_{2b} ——次级线圈的电阻

M_a 、 M_b ——初级与次级线圈的互感系数

N_1 ——初级线圈的匝数

N_{2a} 、 N_{2b} ——次级线圈的匝数

2) 输出特性

从理论上讲，在衔铁处于中间位置时输出电压应为零，但实际存在零点残余电压，它由这样一些因素引起：

- 两个次级线圈不对称
- 初级线圈铜耗电阻的存在
- 导磁体靠近的安装位置、铁芯长度等
- 激磁频率的高低
- 铁磁材质不均匀
- 线圈间存在分布电容

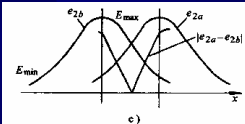


图 3-11 螺管型差动变压器及其输出特性

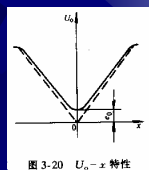


图 3-20 U_o-x 特性

3) 应用

(1) 线位移传感器

精确度高: $0.1\mu m$

线性范围大: $\pm 100mm$

稳定度好, 使用方便

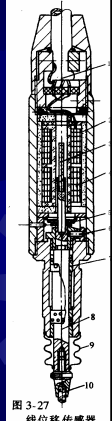


图 3-27 线位移传感器

(2) 压力测量

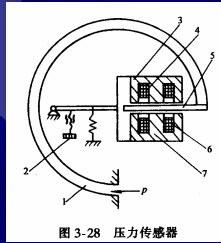
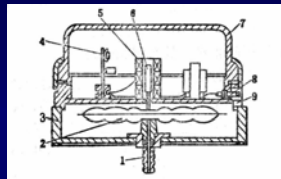
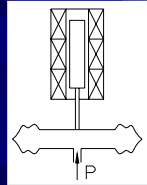


图 3-28 压力传感器

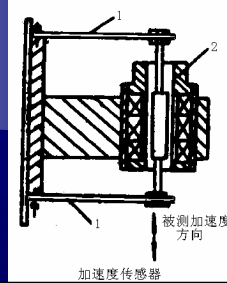


微压力变送器结构示意图
1—接头 2—膜盒 3—底座 4—线圈板 5—差动变压器
6—衔铁 7—罩壳 8—箭头 9—通孔



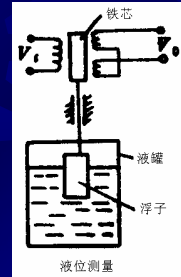
(3) 加速度测量

借助弹性元件将加速度转换为位移变化



加速度传感器

(4) 液面高度测量



液位测量

总结

传感元件或传感器	原始输入量	变换原理	物理现象	能量关系	输出量
变磁阻式	位移	电磁感应	结构型	控制型	自感系数
差动变压器式	位移	电磁感应	结构型	控制型	互感系数
涡流式	位移、厚度、电阻率、磁导率	涡流效应	结构型	控制型	涡流

3.4 磁电、压电与热电式传感器

一. 磁电式传感器

二. 压电式传感器

三. 热电式传感器

一. 磁电式传感器

一、磁电式传感器

磁电式传感器是基于
电磁感应原理的传感器。

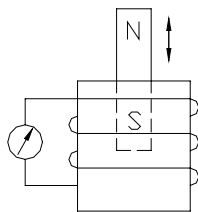
根据电磁感应定律可得：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

即回路中产生的感应电势与磁通量对时间的变化律成正比。

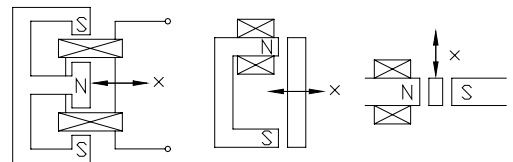
$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \theta \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} \propto (B, R_m, v)$$

磁通的变化率与磁通变化率与磁场强度、磁路磁阻、线圈的运动速度。



分类

线圈-磁铁活动型 { 动圈式—线圈移动
动磁式—磁铁移动
衔铁活动型—磁阻式—衔铁移动，磁阻变化



1、动圈式磁电传感器

对于线速度型

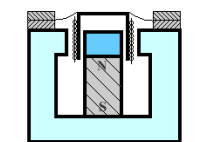
导线在磁场中作切割磁力线运动，导线产生的电动势为

$$e = WBlv \sin \theta$$

$$e = NBl \frac{dx}{dt} \sin \theta$$

W—线圈匝数 B—磁场强度 l—单匝线圈有效长度
dx/dt—线圈与磁场的相对运动速度 θ —运动方向与磁场方向夹角

一般 $\theta=90^\circ$ ，则 $e = NBl \frac{dx}{dt} \quad e \propto \frac{dx}{dt}$



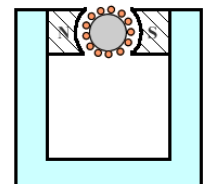
动圈式磁电传感器工作原理
线速度型

角速度型

$$e = kWBA\omega$$

$$e \propto \omega$$

ω —角速度
k—与结构有关的系数 ($k < 1$)
A—单匝线圈的截面积



动圈式磁电传感器工作原理
角速度型

2、磁阻式磁电传感器

线圈和磁铁不动，由运动着的导磁材料的物体改变磁路的磁阻，引起磁力线增加或减弱，使线圈产生感应电势。

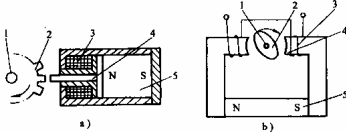


图 5-2 变磁通磁电感应式传感器结构原理图

a) 开磁路 b) 闭磁路

1—被测旋转体 2—测量轮 3—线圈 4—软铁 5—永久磁铁

磁阻式传感器工作原理及应用例

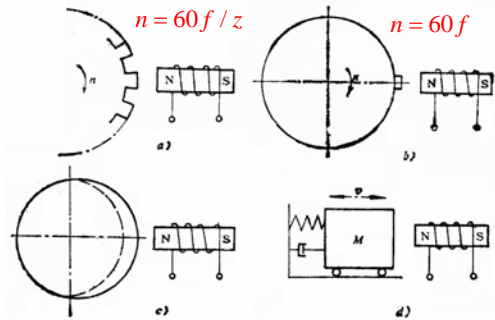
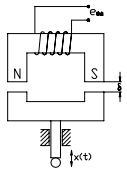


图 3-37 磁阻式传感器工作原理及应用例

a) 测频率 b) 测转速 c) 测心位置 d) 测振动量

测线速度的磁阻式磁电传感器

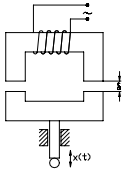
磁阻式磁电传感器也可做成测线速度的，其原理图为：



其变换链：

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{d\delta(t)}{dt} \rightarrow \frac{dR_M}{dt} \rightarrow \frac{d\phi}{dt} \rightarrow e_{出}$$

命名：磁电式速度传感器
分类：结构型、能量转换型



$$x(t) \rightarrow \delta(t) \rightarrow R_M \rightarrow \phi \rightarrow L \xrightarrow{\text{测量电路}} \text{电压或电流}$$

命名：电感（变磁阻）式位移传感器
分类：结构型、能量控制型

3、磁电式传感器的应用

应用一 振动测量

CD-1型是绝对式传感器：

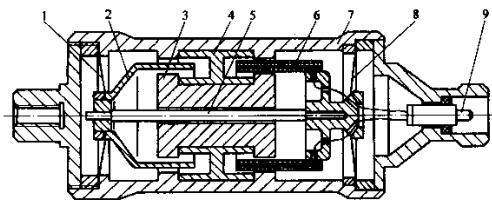
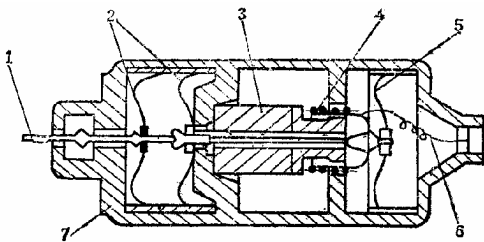


图 5-3 CD-1型振动速度传感器

1、8—圆形弹簧片 2—圆环形阻尼器 3—永久磁铁
4—机架 5—心轴 6—工作线圈 7—壳体 9—引线圈

应用二

CD-2型相对式测振传感器：



磁电式相对速度拾振器

1—顶杆 2—弹簧片 3—磁铁 4—线圈
5—弹簧片 6—引出线 7—壳体

应用三 磁电式数字转速表

测量时，转子每转一周产生脉冲数为P，则在测量时间t内计数共产生的脉冲数为Pt，则转速为：

$$n = \frac{60Z}{Pt}$$

对于低速测量，应增加槽子数目以增加精度。

特点：
精度：±0.05%

转速范围：
30r/min~480kr/min

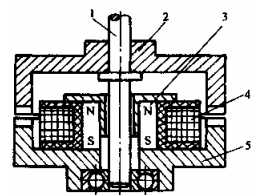


图 5-4 磁电感应式转速传感器

1—转轴 2—转子
3—永久磁铁 4—线圈 5—定子

应用四

扭矩测量

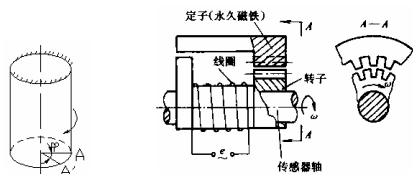


图 5-5 磁电感应式扭矩仪结构示意图

扭矩传感器 —— 变磁阻感应发电式传感器

传感器轴转动 → 传感器转子转动 → 空气隙大小变化 → 传感器磁路磁阻变化

{ 齿顶对齿顶 --- 气隙小, 磁阻也小 }
 { 齿顶对齿根 --- 气隙大, 磁阻也大 } → 磁通变化 → 产生周期性的感应电势

转子 --- 包括线圈
 定子 --- 包括磁钢、磁极

测量原理:

扭矩传感器组成:

磁电式传感器 + 传感器轴 + 磁电式传感器

↓
定子的齿顶与转子的齿顶相对 定子的齿根与转子的齿顶相对

↓
磁阻最小

↓
磁阻最大

输出感应电势相差 180°

无外加扭矩时, $\varphi=0$, 两个幅值、频率均相等, 相位差 $\varphi_0=180^\circ$ 的感应电势

轴上感受扭矩时, 产生扭转角 φ , 设传感器内外齿数均为 n , 则扭转角 φ 与感应电势相位差 φ_0 的关系为:

$$\varphi_0 = n\varphi$$

φ_0 — 测量电路 — 时间差 — 脉冲信号 (宽度 $\propto \varphi_0$) — 指示仪表 — 读出被测扭矩

总结

原始输入量	变换原理	物理现象	能量关系	输出量
磁通量变化率	电磁感应	结构型	转换型	感应电势

二. 压电式传感器

原理

压电式传感器是利用压电材料的压电效应把受力的变化转换成电压或电流的变化信号。

1. 压电效应

对某些材料沿一定方向施力而使其变形，内部产生极化现象，在其两表面将产生极性相反的电荷，当外力去掉后，表面又回到不带电状态。这种现象就是**压电效应**。

压电效应是可逆的，当在电介质的极化方向上施加电场，这些电介质也会变形，这称为**逆压电效应**或**电致伸缩效应**。

- 分类
- 天然物质：石英晶体—压电效应弱，但稳定，可用作标准的加速度计
 - 人工制造：压电陶瓷—压电效应强，但稳定性差，用作工作时的加速度计

石英晶体

结晶形状是六角晶柱，它是一个正六面体，我们用直角坐标三个轴来表示

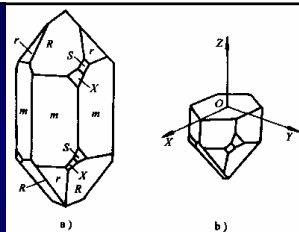
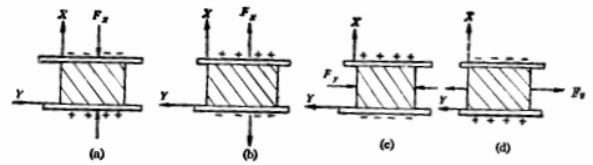


图 6-3 石英晶体
a) 右旋石英晶体 b) 石英晶体的晶轴

- 纵轴线z —— **光轴**
- 穿过棱线且⊥z轴的x轴 —— **电轴**
- ⊥棱面的y轴 —— **力轴（机械轴）**

现象：

- 沿电轴x 方向施力，在⊥x轴表面产生电荷 —— **纵向压电效应**
沿力轴y 方向施力，也在⊥x轴表面产生电荷 —— **横向压电效应**
沿光轴z 方向施力，表面不产生电荷；
- 若改变受力方向，表面极性也相应改变；



晶体切片上电荷符号与受力方向的关系
(a) X 轴方向受压力；(b) X 轴方向受拉力；(c) Y 轴方向受压力；(d) Y 轴方向受拉力

压电陶瓷

原始的压电陶瓷材料是没有压电性的，只有经过极化后才具有压电性。

2. 力与电荷的关系

沿x轴方向加力 F_x ，在垂直于x轴的压电晶体表面上积聚的电荷量为

$$q_x = d_{11} F_x$$

d_{11} —压电常数，与材质和切片方向有关

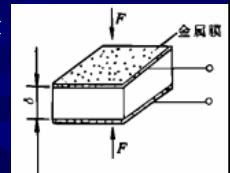
- 若压电体受到多方向的力，各表面都会积聚电荷，每个表面上的电荷量不仅与作用于此面上的垂直力有关，还与压电体其他面上所受的力有关。

3 压电式传感器及其等效电路

压电式传感器实质上是一个具有一定电容的电荷源。

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{\delta}$$

ϵ —晶片相对介电常数
 ϵ_0 —真空介电常数
 A —工作面面积
 δ —晶片厚度



$$u_0 = \frac{q}{C}$$

- 和普通电容器不同的是极板上的电荷是在外力作用下产生的，若力的作用终止，则电荷也随之消失。
- 如果负载不是无穷大，电路将按指数规律放电，
- 适宜做动态测量

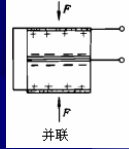
双晶片连接形式

双晶片的总电荷、总电压取决于两片的连接方式：

1) 并联：用于电荷作为输出量场合，有利于准静态测量。

$$U'=U \quad Q'=2Q \quad \text{则} C'=2C$$

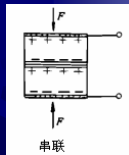
这种联接，输出电荷大，本身电容大，允许被测对象变化频率稍低。



2) 串联：用于电压作为输出量场合。

$$U'=2U \quad Q'=Q \quad \text{则} C'=(1/2)C$$

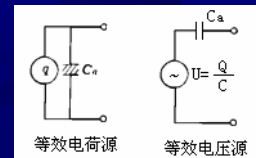
这种联接，输出电压大，本身电容小，要求后续电路有较大的输入阻抗。



两种等效电路：

内部一个电荷源 Q 和一个电容器 C 并联——电荷等效电路

一个电压源 $U=q/C$ 和一个电容器 C 串联——电压等效电路



4 测量电路

压电式传感器产生的电荷量很微弱，本身内阻很大，输出能量很小。



前置放大器的作用 { 阻抗变换作用：高阻抗→低阻抗
放大传感器输出的微弱信号

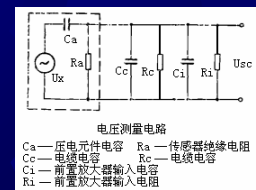
前置放大器 { 电压放大器——高内阻的电压源转换成低内阻的电压源
(阻抗变换器) 输出电压 \propto 输入电压
电荷放大器——高内阻的电荷源转换成低内阻的电压源
输出电压 \propto 输入电荷

(1) 电压测量电路

$$U_{sc} = \frac{\omega R C_a}{\sqrt{1 + [\omega R(C_a + C_c + C_i)]^2}} \cdot U_x$$

$$\omega \gg \frac{1}{R(C_a + C_c + C_i)}$$

$$U_{sc} \approx \frac{C_a}{C_a + C_c + C_i} \cdot U_x$$



电压测量电路
Ca—压电元件电容 Ra—传感器绝缘电阻
Cc—电缆电容 Rc—电缆电阻
Ci—前置放大器输入电容 Ri—前置放大器输入电阻

可近似看作输出电压与作用力频率无关

优点：高频响应相当好
缺点：与电缆电容有关

(2) 电荷测量电路

当工作频率足够高时

$$\omega \gg \frac{1}{ARC_f}$$

$$U_0 = -\frac{AQ}{(1+A)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f}$$

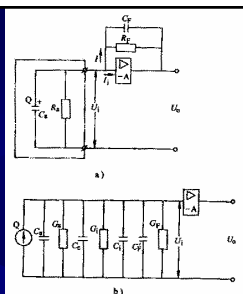


图 6-12 电荷放大器电路原理图
a) 基本电路图 b) 等效电路图

一般 C_f 做成可调的，当 $(1+A)C_f \gg (C_a + C_c + C_i)$ 约10倍以上时，可认为灵敏度与电缆电容无关。

优点：与电缆电容无关

缺点：电路复杂，价格昂贵

5 应用

1) 直接测量作用力

(1) 测量范围： $10^{-3}N \sim 10^4KN$

(2) 动态范围：60dB

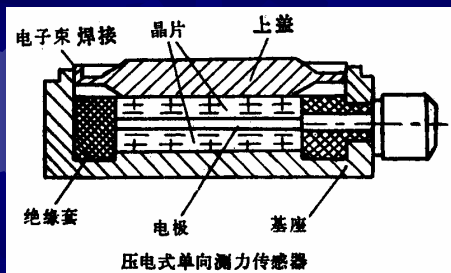
(3) 方向：单向、或多向

(4) 两种结构形式

a. 膜片式弹性元件承压

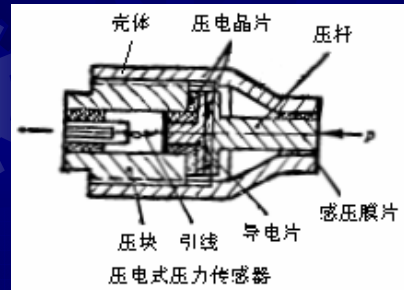
b. 活塞承压

压电式单向测力传感器



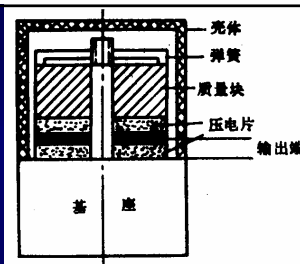
压电式单向测力传感器

2) 压电式压力传感器



压电式压力传感器

3) 压电式加速度传感器



压缩式压电加速度传感器的结构原理图

大型加速度计：灵敏度高，灵敏域可达 $10^{-6}g$ ，测量上限小，智能测弱振动。

小型加速度计：质量小，灵敏度低，可达 10^6g 。

特点：

1. 响应速度快，适合于高频动态测量。
2. 因电荷会泄漏，不宜用作低频信号的测量 ($<1Hz$)
3. 横向效应（横向灵敏度）会产生误差
4. 压电常数在环境温度、湿度等变化时会变化，因此需经常校准。

总结

原始输入量	变换原理	物理现象	能量关系	输出量
力	压电效应	物性型	转换型	电荷

三. 热电式传感器

基于**热电效应**，将温度变化转换成电量变化

1. 热电偶

1) 结构



图 3-39 热电偶回路

- (1) 两种不同的导体或半导体连接成闭合回路
- (2) 两端温度不同，假定 $T > T_0$

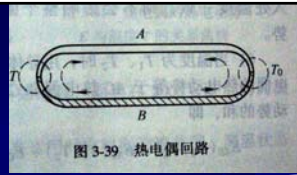
1. 热电偶

2) 工作原理

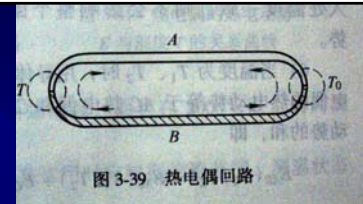
热电效应：闭合回路中产生热电动势

$$E_{AB} \circ \begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= f(T) - f(T_0) \\ &= f(T) - C \\ &= \varphi(T) \end{aligned}$$

E_{AB} 由**温差电动势**和**接触电动势**组成

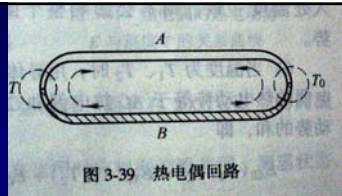


温差电动势



由于温度梯度的存在，改变了电子的能量分布，高温端（T）电子将向低温端（T₀）扩散，致使高温端因失去电子带正电，低温端因获电子而带负电。因而在同一导体两端也产生电位差，并阻止电子从高温端向低温端扩散，于是电子扩散形成动平衡，此时所建立的电位差称为**温差电动势**。

接触电动势



当两种**电子密度不同**的导体A与B接触时，接触面上就会发生电子扩散，**电子从电子密度高的导体流向密度低的导体**。失去电子的导体带正电，得到电子的导体带负电。电子扩散的速率与两导体的电子密度有关并和接触区的温度成正比。在接触面形成电场。这个电场阻碍了电子的扩散，达到动平衡时，在接触区形成一个稳定的电位差，即**接触电动势**。

1. 热电偶

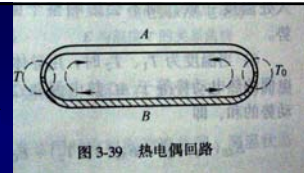
3) 特点

(1) 材料相同或温度相同，则 E_{AB} 为零。

(2) 材料相同或温度相同，则 E_{AB} 为零。

(3) E_{AB} 只与接点温度有关。

(4) **中间导体定律：**在温度相同的两端之间接入第三种导线，不会影响 E_{AB} 。



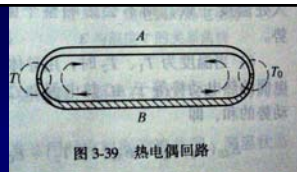
1. 热电偶

4) 分类

1、铂铑-铂热电偶

正极为含铑10%的铂铑合金，负极为纯铂；

- (1) 热电性能稳定、抗氧化性强、宜在氧化性气氛中连续使用、长期使用温度可达1300℃
- (2) 精度高，它是在所有热电偶中，准确度等级最高的，通常用作标准或测量较高的温度；
- (3) 使用范围较广，均匀性及互换性好；
- (4) 主要缺点有：灵敏度较低，热电动势较弱；价格较贵，机械强度低，不适宜在还原性气氛或有金属蒸汽的条件下使用。



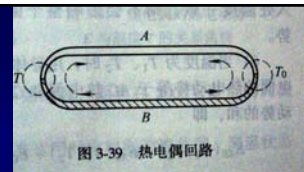
1. 热电偶

4) 分类

1、铂铑-铂热电偶

正极为含铑10%的铂铑合金，负极为纯铂；

- (1) 热电性能稳定、抗氧化性强、宜在氧化性气氛中连续使用、长期使用温度可达1300℃
- (2) 精度高，它是在所有热电偶中，准确度等级最高的，通常用作标准或测量较高的温度；
- (3) 使用范围较广，均匀性及互换性好；
- (4) 主要缺点有：灵敏度较低，热电动势较弱；价格较贵，机械强度低，不适宜在还原性气氛或有金属蒸汽的条件下使用。



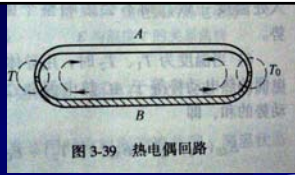
1. 热电偶

4) 分类

(2) 镍铬—镍硅（镍铝）热电偶

正极：镍铬
负极：镍硅

- (1) 化学稳定性好，适宜在氧化性及惰性气体中连续使用，短期使用温度为1200℃，长期使用温度为1000℃。
- (2) 热电动势大，线性好；
- (3) 价格便宜，是目前用量最大的热电偶。



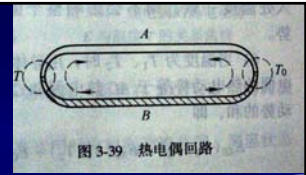
1. 热电偶

4) 分类

(3) 镍铬—考铜热电偶

正极：镍铬
负极：考铜

- (1) 适宜于还原性或中型介质；
- (2) 长期使用温度为600℃以下；
- (3) 灵敏度高、价格便宜



1. 热电偶

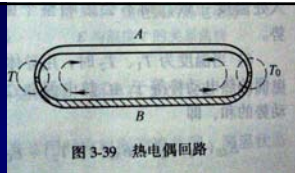
4) 分类

(3) 铂铑₃₀—铂铑₆

正极：铂铑₃₀
负极：铂铑₆

- (1) 性能稳定，精度高，适于氧化性或中型介质
- (2) 长期使用温度为1600℃，短期可测1800℃。
- (3) 热电动势小、价格昂贵

(4) 特殊热电偶



三. 热电式传感器

2. 热电阻传感器

1) 工作原理

利用电阻随温度变化的特点。可分金属热电阻和半导体热电阻（热敏电阻）。

2) 金属热电阻

(1) 铂电阻

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

精度高，稳定性好，性能可靠。

2) 金属热电阻

(2) 铜电阻

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

- a. 线性好、电阻温度系数高、价格便宜
- b. -50~150℃
- c. 电阻率小，低温场合

(3) 其它低温热电阻

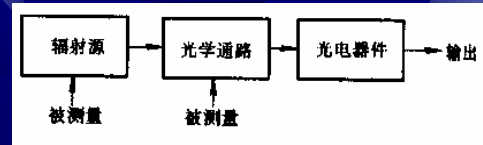
- a. 钢电阻：4.2K~室温，精度±0.001K
- b. 锰电阻：2~63K
- c. 碳电阻：

3.5 光电式传感器

光电传感器的原理与组成

被测量 \rightarrow 光信号的变化 $\xrightarrow{\text{光电元件}}$ 电信号
光电器件或光电元件 — 能够将光量转换为电量的一种器件。

光电传感器一般由辐射源、光学通路和光电器件三部分组成。



光电传感器优点

频谱宽、不受电磁干扰的影响、非接触测量、体积小、重量轻、造价低等。

光源

常用的光源

- 热辐射光源
- 气体放电光源
- 电致发光器件
- 激光器

热辐射光源

热物体都会向空间发出一定的光辐射，基于这种原理的光源称为热辐射光源。物体温度越高，辐射能量越大，辐射光谱的峰值波长也就越短。

- 白炽灯——一种典型的热辐射光源
- 卤钨灯——一种特殊的白炽灯

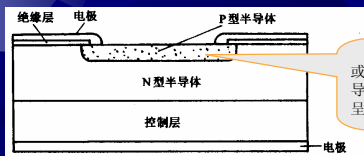
气体放电光源

电流通过气体会产生发光现象，利用这种原理制成的光源称为气体放电光源。

- 光谱灯——是光电检测仪器中常用的单色光源，如低压汞灯、氢灯、钠灯、镉灯、氮灯。
- 光谱灯涂以荧光剂——照明日光灯

电致发光器件——发光二极管

固体发光材料在电场激发下产生的发光现象称为电致发光，利用这种现象制成的器件称为电致发光器件，如发光二极管、半导体激光器和电致发光屏等。



在N型半导体上扩散或者外延生长一层P型半导体，PN结两边掺杂浓度呈递减分布。

图 7-2 典型发光二极管的原理图

激光器

具有光的受激辐射放大功能的器件称为激光器。

激光器的突出优点是单色性好、方向性好和亮度高。

分类

按工作物质分类

- 固体激光器
 - 红宝石激光器——是人类发明的第一种激光器，诞生于1960年。采用强光灯作泵浦。
 - Nd: YAG激光器——与红宝石激光器相比，对光泵的要求较低，可见光甚至近红外都可以作其光泵。
- 气体激光器
 - 氦—氖气体激光器——具有连续输出激光的能力，输出波长从红外到可见光。
 - 二氧化碳激光器
- 半导体激光器——砷化镓激光器，具有体积小、能量高的特点，特别是它对供电电源的要求极其简单，使之在很多科技领域得到了广泛应用。

一. 光电测量原理

光电效应：光子与物体的能量交换过程中产生的电效应。

可分为

- 外光电效应
- 内光电效应/光导效应
- 光生伏打效应

1. 外光电效应

1) **定义：**在光照作用下，物体内的电子从物体表面逸出现象。亦称**光电子发射效应**。

2) **原因：**

- (1) 光子具有能量： $h\nu$ h 为普朗克常数， ν 为光的频率。
- (2) 金属受到照射时，其内部的电子吸收光子的能量。
- (3) 光子的能量 $h\nu$ 大于电子的逸出功 A 时，电子就会离开金属表面而逸出。

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

■ 电子逸出表面的必要条件：

$$h\nu > A$$

由于 h 为常数，对某一种材料，有一个能引起光电子逸出效应的最低频率 ν_0 。

$$\nu_0 = \frac{A}{h}$$

光电器件的“**红限**”：能够导致光电子逸出效应的光子的最大波长 λ_0 。

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{A}$$

■ 单位时间内逸出的光电子数与入射光的强度成正比。

■ 反向截止电压 U_0

$$|U_0| = \frac{mv^2}{2e}$$

U_0 只与入射光频率成正比。

■ 外光电效应器件

➢ 光电管

➢ 光电倍增管

2. 光导效应

1) 定义：在光照作用下，物体的导电性能（如电阻率）发生改变的现象。

2) 原因：半导体材料在光照下禁带中的电子受到能量不低于禁带宽度的光子的激发而跃迁到导带，从而增加电导率的现象。

3) 光导效应器件有光敏电阻和光导管

2. 光生伏打效应

1) 定义：在光照作用下物体产生一定方向的电动势

2) 光生伏打效应器件有光电池。

3) 原理：电子受光子的激发脱离禁带的束缚而产生电子空穴对，在PN结电场的作用下电子移向N区，空穴移向P区，形成光生电动势。

4) 灵敏度： $nAmm^{-2}lx^{-1}$

流明(lu)：光通量的单位，是纯铂在熔化温度（约1770℃）时，其1/60平方米的表面面积在1球面度的立体角内所辐射的光量。

勒克斯(lx)：光照度单位，等于1流明的光通量均匀分布于1m²面积上的光照度。

光电器件按探测原理分类

热探测型—首先将光信号的能量变为自身的温度变化，然后再依赖于器件某种温度敏感特性将温度变化转变为相应的电信号。

探测器对波长没有选择性，只与接收到的总能量有关。

光子探测型—基于光电效应原理，即利用光子本身能量激发载流子。

这类探测器有一定的截止波长，只能探测短于这一波长的光线，但它们响应速度快，灵敏度高，使用最为广泛。

光电器件按光电效应分类

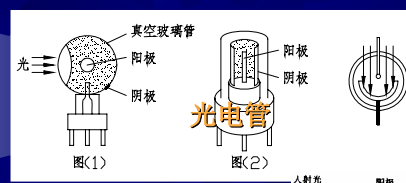
外光电效应—在光线作用下能使物体的电子逸出表面的现象，
如：光电管、光电倍增管

内光电效应—在光线作用下能使物体电阻率改变的现象，
如：光敏电阻、光电二极管

阻挡层光电效应—在光线作用下能使物体产生一定方向的电动势的现象，
也称光生伏特效应
如：光电池

二、光电元件（光敏元件）

1. 光电管——具有外光电效应



当入射光线穿过光窗照到光阴极上时，由于外光电效应，光电子就从极层内发射至真空。在电场的作用下，光电子在极间作加速运动，最后被高电位的阳极接收，在阳极电路内就可测出光电流，其大小取决于光照强度和光阴极的灵敏度等因素。

真空光电管或光电管

1) 光电特性 (图3-46a)

工作压力和入射光频率恒定条件下, 光电管入射光通量与其输出光电流之间的关系。

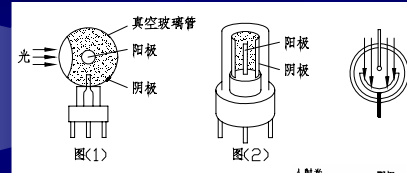
2) 伏安特性 (图3-46b)

入射光频率和强度恒定条件下, 光电管的输出光电流与阳极电压之间的关系。

工作点: 光电流饱和区。

二、光电元件 (光敏元件)

2. 光电倍增管 —— 具有外光电效应



组成 { 光电阴极
阳极 —— 单根金属丝
或环状

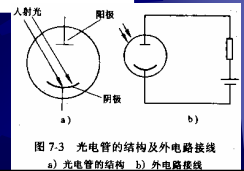
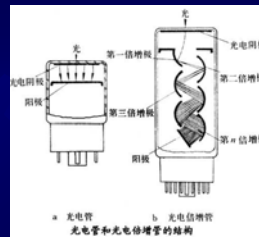


图 7-3 光电管的结构及外电路接线
a) 光电管的结构 b) 外电路接线

2. 光电倍增管

光电倍增管特点: 灵敏度高, 稳定性好, 频响很快, 且线性好, 频率特性好, 但体积大, 需要高压供电。

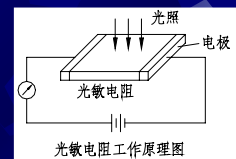


组成 { 光电阴极 —— 半导体光电材料铯-铯制造
若干倍增极 —— 4~14个不等, 并加上一定的电压
阳极 —— 收集电子, 外电路形成电流输出

3. 光敏电阻 —— 具有内光电效应

利用半导体材料的**光导效应**即由于光照强弱而导致半导体阻值变化的现象而工作的, 这种具有光导效应的半导体材料就称为**光敏电阻**。

光敏电阻就像一个电阻元件, 只是阻值随光照变化。
❖ 无光照时, 暗电阻很大, 电流很小。
❖ 受一定范围的光照时, 亮电阻急剧减小, 电流迅速增加。



光敏电阻工作原理图

优点: 具有很高的灵敏度, 很好的光谱特性, 光谱响应从紫外区到红外区, 体积小, 重量轻, 性能稳定, 价格便宜。

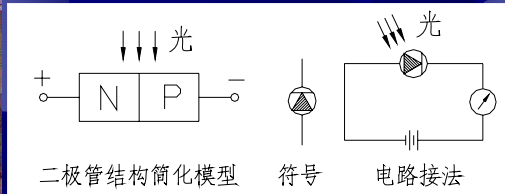
光敏电阻的特征参数

- (1) 暗电阻、亮电阻、暗电流、亮电流、光电流。
- (2) **光照特性:** 电压一定时, 光电流与光通量之间的关系。呈非线性, 与材料有关。
- (3) **伏安特性:** 光照一定时, 电压与光电流之间的关系。无饱和现象。
- (4) **光谱特性:** 对不同波长的入射光, 具有不同的灵敏度。
- (5) **响应时间特性:** 材料不同, 时间常数不同。
- (6) **光谱温度特性:** 温度升高, 暗电流和灵敏度下降; 光谱特性也会变化。

4. 光敏二极管 —— 具有内光电效应

1) PN结光敏二极管

有光照时，二极管导通；无光照时，二极管截止。



2). 雪崩二极管

雪崩二极管是一种具有内部电流倍放大作用的光电二极管，它通常工作在几百伏的反向偏压下，放大原理类似于光电倍增管。

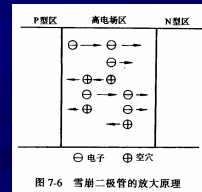


图 7.6 雪崩二极管的放大原理

3). PIN结构光电二极管

特点：具有较高灵敏度和响应速度，且对红外波长有较好的响应。

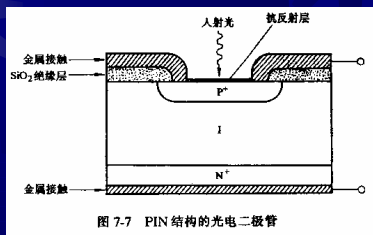


图 7-7 PIN 结构的光电二极管

2). 光敏晶体管/光电三极管

结构与普通三极管没有本质区别，只不过将集电结做成光电二极管的形式，该集电结既是一个光电二极管，又是三极管的一个组成部分。



图 7-8 光电三极管的等效电路

光敏二极管和光敏晶体管的特点：

光敏二极管特点：灵敏度一般，稳定性好，频响快 ($\tau=10^{-7}s$)，体积小，频率特性快。

光敏三极管特点：灵敏度比二极管高，线性度比二极管好；但稳定性差，响应速度较二极管差，其它与二极管相同。

5. 光电池 —— 具有阻挡层光电效应

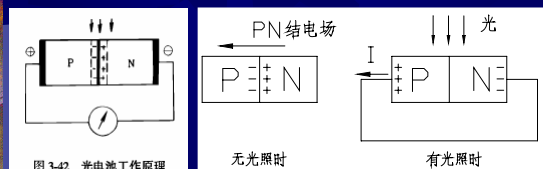


图 3-42 光电池工作原理

特点：灵敏度低，稳定性好，频响较慢，受光面积大，不需外加电源，频率特性差。

二、具有特殊外在形式的探测器

● 电荷耦合器件(CCD)

将MOS光敏单元阵列和读出移位寄存器集成位一体，构成具有自扫描功能的图像传感器。

● 位置敏感器件(PSD)

一种对其感光面上入射点位置敏感的器件，也称为坐标光电池。

1.电荷耦合器件 (CCD)

电荷耦合器件——Charge-Coupled Devices

MOS光敏单元——在半导体基片上生长一种具有介质作用的氧化物(二氧化硅)，又在其上沉积一层金属电极，形成金属-氧化物-半导体结构元(MOS)。

读出移位寄存器——电荷图像的输出电路

MOS光敏单元结构原理

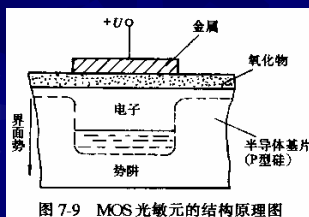


图 7-9 MOS光敏元的结构原理图

人们称这样一个MOS结构元为MOS光敏元或叫做一个象素，把一个势阱所收集的若干光生电荷称为一个电荷包。

读出移位寄存器原理

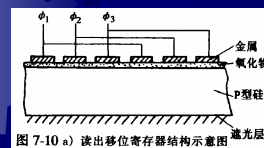


图 7-10 a) 读出移位寄存器结构示意图

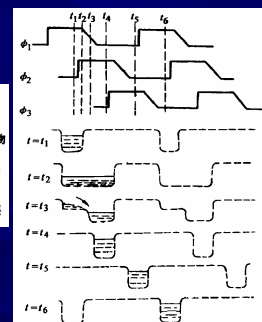


图 7-10 b) 信息电荷传输原理图

2.位置敏感器件 (PSD)

Position Sensitive Detector

位置敏感器件(PSD)——是一种对其感光面上入射点位置敏感的器件，也称为坐标光电池。

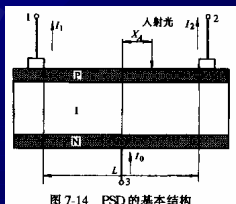


图 7-14 PSD的基本结构

PSD具有高灵敏度、高分辨力、响应速度快和配置电路简单等优点。

三. 光电式传感器的应用

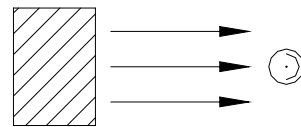
一、分类

模拟式传感器 — 其测量系统是光电流为被测光通量的函数。

开关量传感器 — 其测量系统是使其输出端工作在“通”与“断”的开关状态。

1. 模拟式传感器

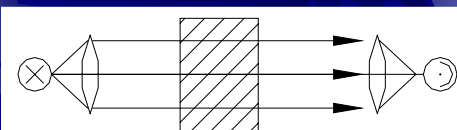
1) 辐射能源本身就是被测对象。



(1) 例：光电高温计和比色高温计的传感器
光通量和光谱密集度分布是温度的函数

1. 模拟式传感器

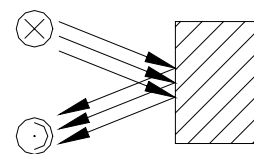
2) 光源光通量通过被测对象部分吸收后到达光电元件。



(2) 例：测液体或者气体的透明度或混浊度的光电比色计或混浊度计的传感器

2. 模拟式光电传感器

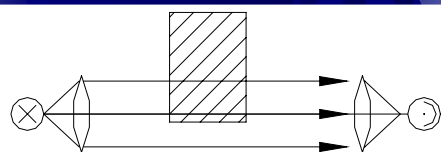
3) 光源光通量先到被测物，然后再反射到光电元件。



(3) 例：测表面粗糙度的传感器

1. 模拟式光电传感器

4) 从光源发射到光电元件的光通量途中被测物体遮蔽了部分光通量，从而改变了到达光电元件的光通量。

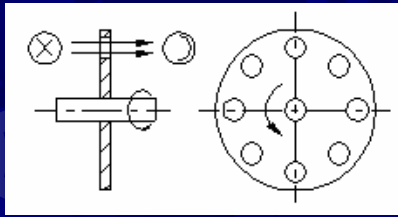


(4) 例：测振动或测尺寸的光电式传感器

2. 开关量传感器

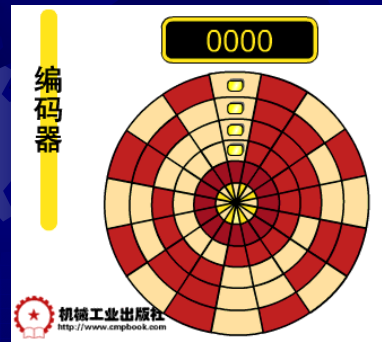
这类传感器其测量系统是使其输出端工作在“通”和“断”的开关状态，大多用于光电继电器式的仪表装置中，如电子计算机的光电输入器，扩散炉的炉温控制，光电转速表以及自动生产流水线中工件到位检测等。

1) 脉冲盘式角度-数字编码器

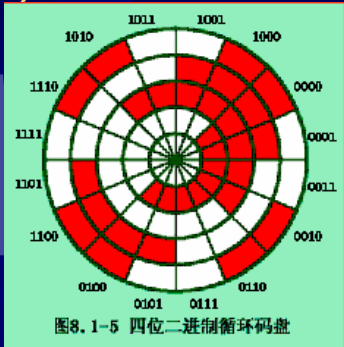


- 1) 每转过一个缝隙或圆孔，光敏元件产生一个电脉冲信号。
- 2) 脉冲数对应圆盘转过的角度。

2) 码盘式角度-数字编码器



3) 光电式角度-数字编码器



存在非单值性误差。

图8.1-5 四位二进制循环码盘

循环码盘

任意相邻的两个代码间只有一位代码有变化。

带判位光电装置的二进制循环码盘

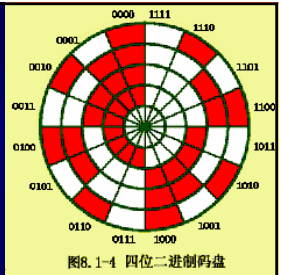


图8.1-4 四位二进制码盘

只有信号位处的光电元件有信号才能读数

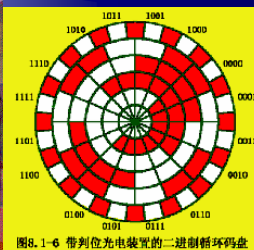
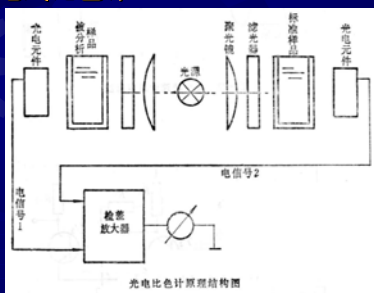


图8.1-6 带判位光电装置的二进制循环码盘

二、应用

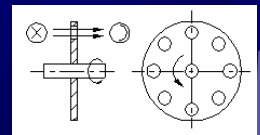
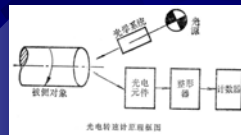
1. 光电式比色计



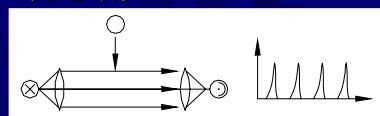
光电比色计原理结构图

应用二

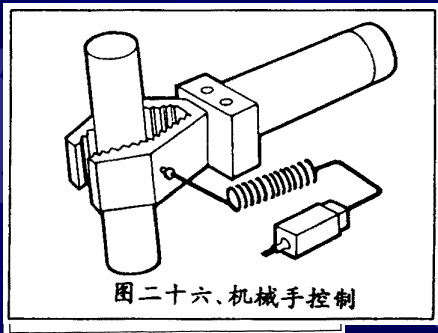
2. 光电式转速传感器



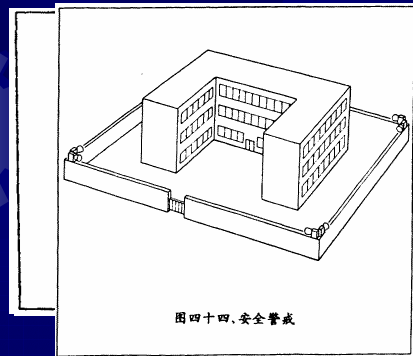
3. 光电计数



4. 自动生产流水线中各类检测



5. 其它应用



3.6 光纤传感器

新型传感器，以光学量为转换基础，以光信号为变换和传输载体，利用光导纤维传输信号。

将被测量的变化转换成光波（的强度、频率、相位和偏振）的变化。

光波的调制：光波随被测量的变化而变化。

光的偏振

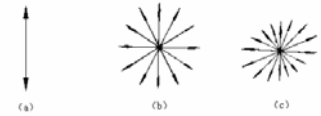


图3-18-1 平面偏振光、自然光及部分偏振光

光波是一种电磁波，它的电矢量 E 和磁矢量 H 相互垂直，并垂直于光的传播方向 C 。通常用电矢量 E 代表光的振动方向，并将电矢量 E 和光的传播方向 C 所构成的平面称为光的振动面。在传播过程中，电矢量的振动方向始终在某一确定方向的光称为平面偏振光或线偏振光，如图3-18-1a所示。振动面的取向和光波电矢量的大小随时间作有规律的变化，光波电矢量末端在垂直于传播方向的平面上的轨迹呈椭圆或圆时，称为椭圆偏振光或圆偏振光。通常光源发出的光波有与光波传播方向相垂直的一切可能的振动方向，没有一个方向的振动比其它方向更占优势。这种光源发射的光对外不显现偏振的性质，称为自然光，如图3-18-1b所示。

一. 分类

1. 按调制方式分
- 强度调制：
 - 频率调制：
 - 相位调制：
 - 偏振调制：

2. 按光纤作用分

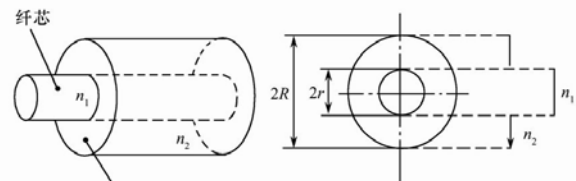
- 功能型 敏感元件、传输光波
- 传光型 传输光波
 - 传输中调制
 - 传输前调制

3.6 光纤传感器

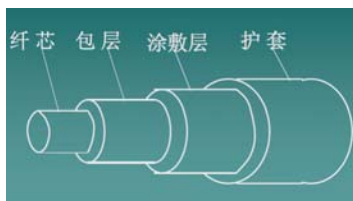
二. 光纤导光原理

1. 光纤的结构

圆柱形内芯和包层组成，而且内芯的折射率 n_1 略大于包层的折射率 n_2

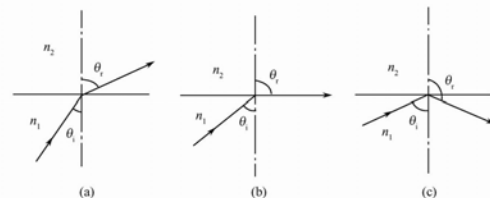


光纤的结构



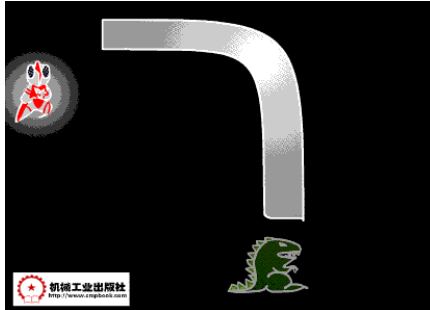
斯乃尔定理

● 当光由光密物质出射至光疏物质时，发生折射

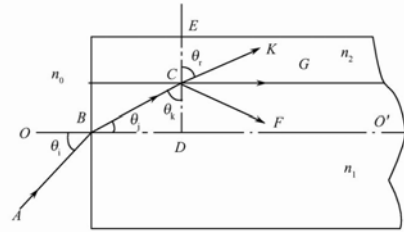


- (a) 折射角大于入射角： $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$
 (b) 临界状态： $\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$
 (c) 全反射： $\theta_i > \theta_c$

光纤的全反射演示

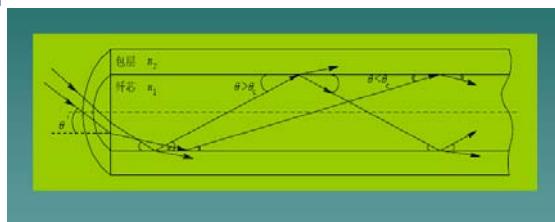


光纤导光



$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_j$$

$$n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin \theta_r$$



当入射角 θ_i 小于某一临界入射角 θ_{ic} 时，则发生全反射。

$$\sin \theta_{ic} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

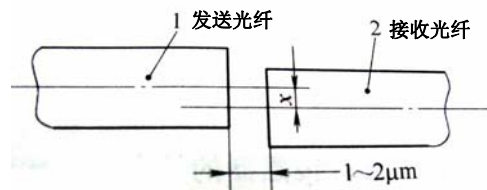
该 θ_{ic} 为数值孔径，NA

3.6 光纤传感器

广东工业大学机电工程学院

三. 光线传感器的应用

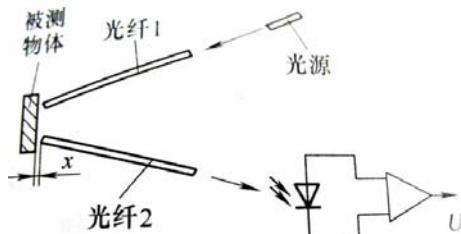
1. 光纤位移传感器



三. 光线传感器的应用

广东工业大学机电工程学院

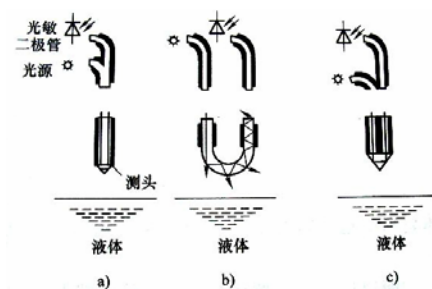
2. 反射式光纤位移传感器



三. 光线传感器的应用

广东工业大学机电工程学院

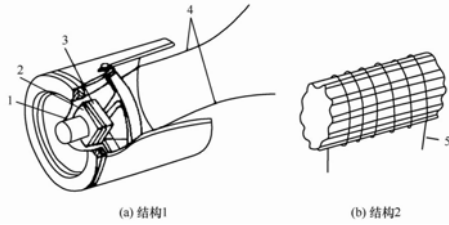
3. 光纤液位计



4. 微弯式光纤压力传感

- 基于光纤的**微弯效应**，即由压力引起变形器产生位移，使光纤弯曲而调制光强度。

微弯式光纤水听器探头



1 聚碳酸酯薄膜 2 可动变形板 3 固定变形板 4、5 光纤

3.6 光纤传感器

广东工业大学机电工程学院

四. 光纤传感器的特点

1. 抗电磁干扰能力强
2. 防爆，耐高温，耐腐蚀
3. 工作性能优良
4. 重量轻、体积小、
5. 可挠性好，具有良好的几何形状适应性
6. 频带宽，动态范围大
7. 易于实现远距离测控

第三章 常用传感器与敏感元件

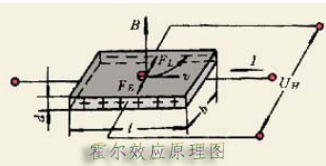
3.7 半导体传感器

一. 磁敏传感器

1. 霍尔元件

金属或半导体薄片置于磁场中，当有电流流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势，这种物理现象称为**霍尔效应**。

$$V_H = K_H I B \sin \alpha$$



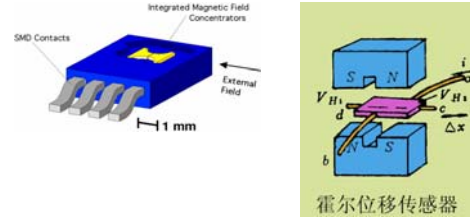
V_H —霍尔电势
 K_H —霍尔常数，
 决定于材质、温度、元件尺寸
 B —磁感应强度
 α —电流与磁场方向的夹角

霍尔效应原理图

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

1) 霍尔元件

霍尔元件由霍尔片、四根引线 and 壳体组成，如图所示。



霍尔位移传感器

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

1) 霍尔元件

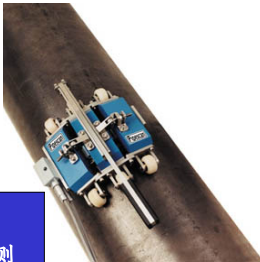
应用

案例：电流传感器



原理
 磁场强度变化检测

案例：管道裂纹检测



广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

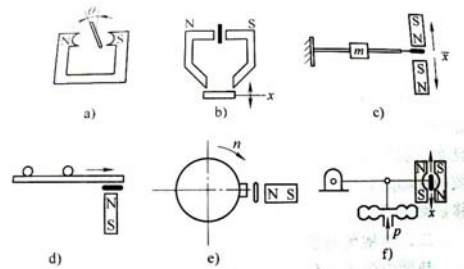


图 3-63 霍尔元件工程应用实例
 a) 测角位移 b) 测线位移 c) 测加速度
 d) 零件计数 e) 测转速 f) 测压力

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

1. 磁敏传感器

2. 磁阻元件

• 磁阻效应

$$R = R_0 / \cos^2 \theta$$

$$\approx R_0 (1 + \theta^2)$$

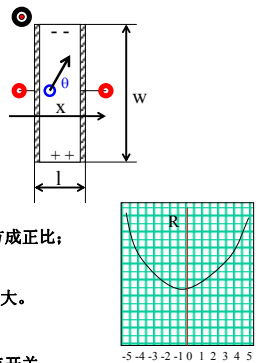
$$= R_0 (1 + \mu^2 B^2)$$

• 特点

- 电阻的增量与磁场的平方成正比；
- 与磁场的正负无关；
- 温度系数影响大；
- 磁感应的范围比霍尔元件大。

• 应用

- 磁头；接近开关和无触点开关。



广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

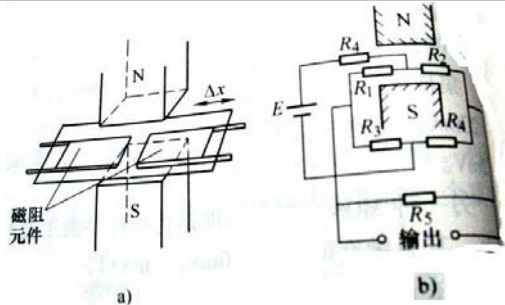


图 3-65 磁阻效应位移传感器

a) 原理图 b) 测量电路

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

1. 磁电转换元件传感器

3. 磁感应半导体元件分类

磁感应半导体元件

体元件

结型元件

霍尔IC

- 霍尔元件
- 磁电阻元件
- 磁敏二极管
- 磁晶体管
- 磁半导体开关
- 其它
- 开关
- 线性

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.7 半导体传感器

二. 热敏电阻传感器

半导体热敏电阻的材料是一种由锰、镍、铜、钴、铁等金属氧化物按一定比例混合烧结而成的半导体，它具有负的电阻温度系数，随温度上升而阻值下降。

典型的热敏电阻元件有圆形、杆形和珠形等，其结构及温度特性如图所示。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

三. 热敏电阻传感器

应用

热敏电阻

温控器

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.7 半导体传感器

三. 气敏电阻传感器

气敏传感器是利用气敏半导体材料，如氧化锡、氧化锰等金属氧化物制成敏感元件，当它们吸收了气体烟雾，如一氧化碳、醇等时，电阻发生变化。

气敏传感器应用较广泛的是用于防灾报警，如煤气、或有毒气体报警，也可用于对大气污染监测、CO气体测量、酒精浓度探测等方面。

烟雾报警器

酒精传感器

二氧化碳传感器

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.7 半导体传感器

四. 湿敏传感器

- 湿敏半导体: 多孔烧结型多金属氧化物。
- 工作原理

水分子吸附在半导体材料的晶粒上，可离解出大量导电离子，从而使半导体材料的电阻下降。

负感湿特性:
阻值随着环境湿度的增加而减小

a) 结构

b) 特性曲线

图 3-68 Fe₃O₄ 湿敏元件结构和特性曲线

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.7 半导体传感器

五. CCD 固态图象传感器

MOS(Metal Oxide Semiconductor)光敏元的结构是在半导体(P型硅)基片上形成一种氧化物(如二氧化硅)，在氧化物上再沉积一层金属电极，以此形成一个金属-氧化物-半导体结构元(MOS)。

在半导体硅片上按线阵或面阵排列MOS单元，如果照射在这些光敏元上的是一幅明暗起伏的图像，则这些光敏元上就会感生出一幅与光照强度相对应的光生电荷图像。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

5. CCD固态图象传感器

光敏管阵列

驱动脉冲

显示电路

运算电路

结束信号

CCD

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

5. CCD固态图象传感器

- 特点:
 - (1) 非接触检测;
 - (2) 响应快;
 - (3) 可靠性高,为修简便;
 - (4) 测量精度高;
 - (5) 体积小,重量轻;容易与计算机连接
 - (6) 对被测物体需要强光照射;
 - (7) 受被测物体以外的光的影响。
- 应用:
 - (1) 宽度测量;
 - (2) 外径测量;
 - (3) 主轴轴向跳动测量。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

第三章 常用传感器

3.9 其它类型的传感器

1、热辐射检测传感器

$$L(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T) - 1}$$

绝对零度以上的物体都有辐射,其强度依赖于物体的温度(K),在此仅考虑黑体也称全辐射体的辐射能和波长的关系。根据普朗克辐射定律有以下表达式:

非接触测温结构

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

1、热辐射检测传感器

应用:
冶金、轧制、磨削加工以及各种热加工过程中都涉及到动态温度场的检测问题。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.9 其它类型的传感器

2、超声波检测传感器

1) 声波及其分类

- (1) 次声波, 振动频率低于16Hz的机械波。
- (2) 声波: 振动频率在16Hz—20KHz之间的机械波。
- (3) 超声波: 高于20KHz的机械波。

2) 超声波的物理性质

超声波与一般声波比较, 振动频率高, 波长短, 因而具有束射特性, 方向性强, 可以定向传播, 其能量远远大于振幅相同的一般声波, 并具有很高的穿透能力。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

2、超声波检测传感器

3) 超声波传感器及应用

(1) 超声波传感器对

超声波传感器结构

(2) 超声波探伤

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

第三章 常用传感器与敏感元件

3.10 传感器选用原则

选择传感器主要考虑灵敏度、响应特性、线性范围、稳定性、精确度、测量方式等六个方面的问题。

1、灵敏度

一般说来，传感器灵敏度越高越好，但在确定灵敏度时，要考虑以下几个问题。

- a) 灵敏度过高引起的干扰问题；
- b) 量程范围。
- c) 交叉灵敏度问题。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.10 传感器选用原则

2. 响应特性

传感器的响应特性是指在所测频率范围内，保持不失真的测量条件。

实际上传感器的响应总不可避免地有一定延迟，但总希望延迟的时间越短越好。

3. 线性范围

任何传感器都有一定的线性工作范围。在线性范围内输出与输入成比例关系，线性范围愈宽，则表明传感器的工作量程愈大。传感器工作在线性区域内，是保证测量精度的基本条件。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12

3.10 传感器选用原则

4. 可靠性

可靠性是指仪器、装置等在规定的条件下，在规定的时间内可完成规定功能的能力。

5. 精确度

传感器的精确度是表示传感器的输出与被测量的对应程度。

6. 测量方式

传感器工作方式，也是选择传感器时应考虑的重要因素。例如，接触与非接触测量、破坏与非破坏性测量、在线与非在线测量等。

广东工业大学 机电工程学院 2007年5月24日星期四 14:12