

续表

项 目	规 格	
传输线纜	同轴电缆 (SC-2V)	2 芯光缆 (H-PCF)
网络节点数	最大 62 个	
连接器	BNC 连接器	全部或半锁定型光缆连接器
网络服务	数据链路及信息服务	
数据字	最大 2966B (在 I/O 区 + DM 区)	
传息长度	最大 542 位 (不含报头)	
传送缓冲区容量	1 个信息	
接收缓冲区容量	2 个信息	
RAS 功能 (可靠性、有效性、安全性)	① 发放单元自动备份 ② 自诊断 (节点间测试) ③ 节点旁路 (光纤系统, 使用电源) ④ 看门狗计时器 ⑤ 错误检测 (CRC-CCITT) ⑥ 故障记录	

第四篇 传感器简介

第一章 传感器的基本概念

传感器是感受被测量，按一定规律将其转换成相应的同种或另一种量输出的器件或装置。

在科学研究、工农业生产和日常生活中，人们得到的信息绝大多数是非电量信息，如机械量（位移、尺寸、力、振动、速度等）、热工量（温度、压力、流量、物位等）、成分量（化学成分、浓度等）和状态量（颜色、透明度、磨损量、裂纹等），通过传感器能将各种非电量变换成便于传输、转换、处理和定量运算的信号。

第一节 传感器的组成及分类

一、传感器的组成

传感器一般是由敏感元件、转换元件和转换电路等三部分组成。如图 4.1.1 的框图所示。

敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的其他量的元件。被测非电量并非都能一次直接变换为电量，往往是将其预先变换为另一种易于变换成电量的非电量，然后再变换为电量。敏感元件又被称为预变换器。例如传感器中各种类型的弹性元件就是敏感元件。

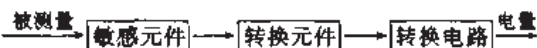


图 4.1.1 传感器组成框图

转换元件：将敏感元件输出的量转换为电参量（电压、电阻、电感、电容等）的元件。例如电阻应变片、霍尔元件等。

转换电路：一般是指将电参量转换成电量（电压、电流、频率等）的电路。转换电路起转换输出信号的作用，常见的有弱信号放大器、电桥、振荡器和阻抗变换器等，常与敏感元件、转换元件组装在一起。

以上划分在实际的传感器中并无严格的界限，最简单的传感器只由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它将感受的被测量直接转换为电量输出，如热电偶传感器。有的传感器其敏感元件和转换元件合为一体，如电容式压力传感器。带转换电路的传感器，其转换电路可以与敏感元件、转换元件组装在一起，也可根据需要将其实装在外部的电路箱中。

二、传感器的分类

传感器本身种类繁多，分类方法也很多，有的传感器可适用于不同参数的测量，而对于同一被测量又可用多种不同类型的传感器进行测量。常见的分类方法有表 4.1.1 所列几种。

表 4.1.1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等	传感器以工作原理命名
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换

第二节 传感器的名词术语

一、传感器的命名

传感器的命名一般按其工作原理和被测量种类综合考虑，称××式××传感器。

前面的××表示转换元件（将非电量转换为电参量）的名称，也是指工作原理的种类，如电阻式、霍尔式等。后面的××表示传感器的用途，即是指传感器感受的被测量的种类，如位移、压力等。常见的压电式压力传感器、电容式液位传感器等属于这类经典传感器的命名方法。

二、传感器的性能术语

传感器的质量优劣，一般通过若干个主要性能指标来表示。

1. 测量范围

测量范围是指测量上限和测量下限之间的区间。例如有一温度传感器的测量下限是 -50°C ，测量上限是 $+100^{\circ}\text{C}$ ，这个传感器的测量范围为 $-50\sim+100^{\circ}\text{C}$ 。

2. 量程

量程是指测量上限和下限的代数差。上例中传感器的量程为 $100 - (-50) = 150(^{\circ}\text{C})$ 。

3. 灵敏度

灵敏度是传感器输出量的变化值与相应的被测量的变化值之比。换言之，它是反映传感器对被测量变化的灵敏程度。

4. 精确度（简称精度）

精确度是指传感器的测量值与被测量（约定真值）的一致程度。

精确度常用精度等级表示，按国家统一规定，精度等级有0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5和5级。数字越小，表示该传感器的基本误差越小。

5. 非线性（线性度）

非线性是指校准曲线对理想拟合直线的接近程度。

6. 迟滞（变差、回差）

迟滞是传感器在正（输入量增加）、反（输入量减小）行程中，输入输出曲线的不重合度。一般它是由于传感器内某些元件因分子内摩擦、间隙及弹性性能等原因造成。

7. 重复性

重复性指传感器按同一方向多次重复输入同一输入量，对应的输出值间的相互一致程度。输出值彼此接近并趋于一致，重复性就好，相反其输出值分散性较大，重复性不好。

8. 稳定度

稳定度是指在规定工作条件内，传感器在较长时间内性能保持不变的程度，常指非线性、迟滞和重复性等指标。

9. 漂移

漂移是指在规定条件下，对应一定的输入，一定时间内输出量的变化量。

零点漂移：当输入量为零时，输出量的漂移。

满量程漂移：当输入量为满量程时，输出量的漂移。

零点温度漂移：在规定的温度范围内，输入量为零时，因温度变化引起的输出量的漂移。

10. 阈值和分辨力

阈值是指输入从零开始增加，能引起传感器输出的最小输入量。

分辨力是指输入从非零的任意值增加，可观察到输出量变化的最小输入增量。

分辨力与阈值的差异在于分辨力说明传感器可测出的最小输入增量，而阈值则说明了传感器可测出的最小输入量。一般来讲，阈值大的传感器，其迟滞必然大，但分辨力未必差。

11. 频率响应

频率响应是指保证传感器能够在规定的性能指标下工作的最高频率。传感器频率响应好，说明其能适应快速变化的被测量的测量。

12. 响应时间

响应时间是指输入量为一阶跃值时，传感器输出值有一个过渡过程，经过一定的时间输出值才稳定下来，这一时间称为响应时间。具有良好频率响应的传感器，其响应时间也短。

第二章 电阻式传感器

电阻式传感器是将被测量转换成电阻变化的一种传感器。

常见的电阻式传感器有三类，即电位器式传感器、电阻应变式传感器和热电阻传感器。

第一节 电位器式传感器

电位器式传感器有线绕式和非线绕式。它可用于测量线位移、角位移、压力和加速度等。

一、线绕式电位器

常见线绕式电位器的结构原理如图 4.2.1 所示。它们是由均匀线绕电阻及电刷两个基本部分组成。通过被测量改变电阻丝的长度，即移动电刷位置，就可实现位移与电阻间的线性转换。在电阻丝 a、b 两端加一稳定电压，则 c、b 端输出电压与电刷滑动位置成对应关系。

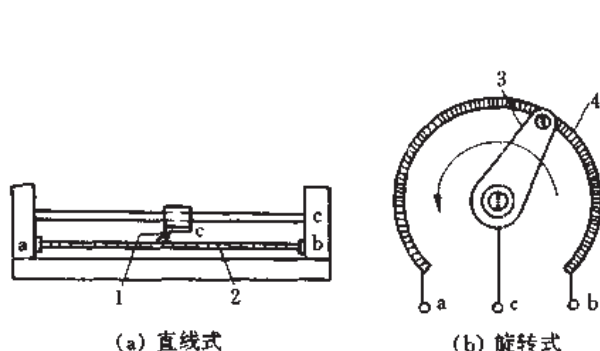


图 4.2.1 线绕式电位器

1、3—电刷；2—电阻丝；4—线绕电阻

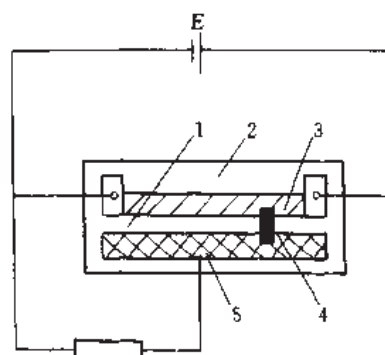


图 4.2.2 光电电位器结构示意图

1—光电导层；2—基体；3—电阻带；4—窄光束；5—集电极

线绕式电位器有如下特点：①工艺结构比较简单，成本低；②稳定性好，线性好；③输出电压信号大，灵敏度高；④分辨力低，存在阶梯误差；⑤存在摩擦，寿命较短，电噪声大。

二、非线绕式电位器

常见的非线绕式电位器有金属膜、导电塑料、导电玻璃釉及光电电位器等。它们具有尺寸小、重量轻、耐磨性好、寿命长、分辨力较高等优点，但它们的缺点是温度稳定性、精确度较差。

光电电位器是以光束代替常规的电刷，是一种无接触式的非线绕式电位器。其结构如图 4.2.2 所示。它以氧化铝作基体，在其上有一条金属膜电阻带和一条高传导金属集电带，在电阻带与集电极间的窄间隙上沉积一层硫化镉或硒化镉光电导体。当窄光束在光电导层上照射时，使电阻带和集电极导通，在负载电阻上便有输出电压，输出电压大小取决于窄光束的位置。

第二节 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是以电阻应变片和弹性元件将应变或应力转换为电阻变化进行测量的传感器。它具有测量精度高、动态响应好等优点，广泛应用于应变、荷重、压力和加速度等机械量的测量中。

一、工作原理和结构形式

电阻应变片的工作原理是基于导体或半导体在承受机械变形时，其电阻值将相应地产生变化，即应变-电阻效应。在测试时，将应变片粘贴在被测试件（弹性材料）的表面，随着试件受力变形引起应变片电阻值的变化，通过测量应变片阻值的变化，即可得知被测机械量的大小。

对于金属丝（电阻丝）材料，其电阻 R 可用下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中 ρ ——电阻丝的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

l ——电阻丝的长度, m ;

S ——电阻丝的截面积, m^2 。

如果沿整条电阻丝长度作用均匀应力, 其几何尺寸和电阻率都将产生变化, 电阻的相对变化可表示为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

电阻丝的应变灵敏度系数 (K) 为:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon}$$

式中 μ ——材料的泊松系数;

ϵ ——应变 ($\Delta l/l$)。

对于半导体材料, 沿其晶轴方向施加应力 σ 时, 其电阻率产生相应的变化, 其变化率为:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma = \pi E \epsilon$$

式中 π ——半导体的压阻系数;

E ——杨氏弹性模数。

半导体的应变灵敏度系数为:

$$K = (1 + 2\mu) + \pi E$$

对于半导体应变片来说, 由于应变引起能带结构发生变化, 电阻率本身的变化比因几何尺寸变化而引起的电阻变化要大得多, 半导体这种电阻率随压力变化的现象也称之为压阻效应。对于电阻丝, 主要依赖几何尺寸变化来产生应变效应, 而电阻率几乎没有变化。

常用的金属电阻应变片结构形式有丝式 (图 4.2.3) 和箔式 (图 4.2.4) 两种。图 4.2.4 为箔式应变片。



(a) 丝绕式



(b) 短接式

图 4.2.3 丝式应变片



图 4.2.4 箔式应变片

半导体应变片最简单的典型结构如图 4.2.5。与金属电阻应变片相比, 它的突出优点是灵敏度高, 动态性能好, 缺点是稳定性差, 非线性误差大。

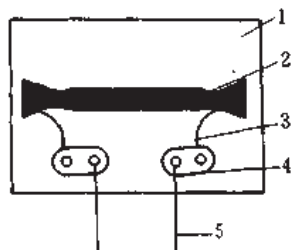
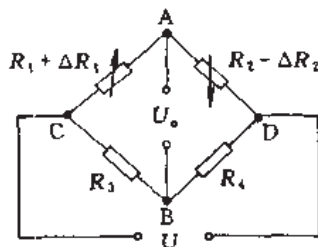


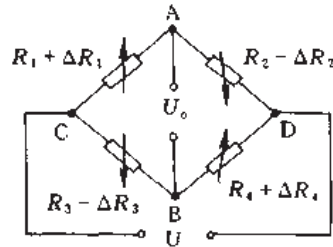
图 4.2.5 半导体应变片

1—胶膜衬底; 2—P-Si; 3—内引线;

4—焊接板; 5—外引线



(a)

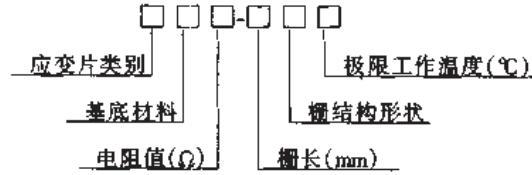


(b)

图 4.2.6 差动电桥电路

电阻应变片的电阻变化通常采用电桥电路转换为电压输出。考虑应变片的非线性及温度变化特性, 一般将电桥接成差动式, 即用相同温度系数的两片或四片应变片组成差动电桥电路 (图 4.2.6), 以有效地进行非线性误差及温度补偿。

二、应变片型号命名规则



应变片类别：S——丝式；B——箔式；D——短接式；T——特殊用途式；A——半导体式。

基底材料：A——聚酰亚胺；H——环氧树脂；E——缩醛类胶；F——酚醛树脂；J——聚酯类胶；Z——纸基；Q——纸浸胶；B——玻璃纤维布浸胶；P——金属薄片；Y——有机硅树脂；L——临时基底。

栅结构形状：AA——水平单轴，测可知主应力方向的应变；AB——45°单轴，测剪切应变；BA——二轴90°，测已知主应力方向的两垂直方向上的应变；等等。

极限工作温度：常温——-30 ~ +60℃（常缺省）；中温——+60 ~ +350℃；高温——>350℃；低温——<-30℃。

例如，BJ 350-10BA150 型应变片表示箔式聚酯树脂基底，中温二轴应变片，栅长 10mm，电阻值 350Ω。

三、电阻应变式传感器的应用

电阻应变式传感器通常由弹性敏感元件和应变片两部分组成。弹性元件在被测量的作用下产生一个与被测量成正比的应变，应变片感受应变将其转换为电阻变化。

图 4.2.7 是应变式力传感器原理图。测力传感器的弹性元件可制成柱式 (a)、环式 (b)、板式 (c) 和梁式 (d) 等，适用于不同载荷量的测量，多个应变片粘贴在弹性体上，便于组成补偿式电桥电路。

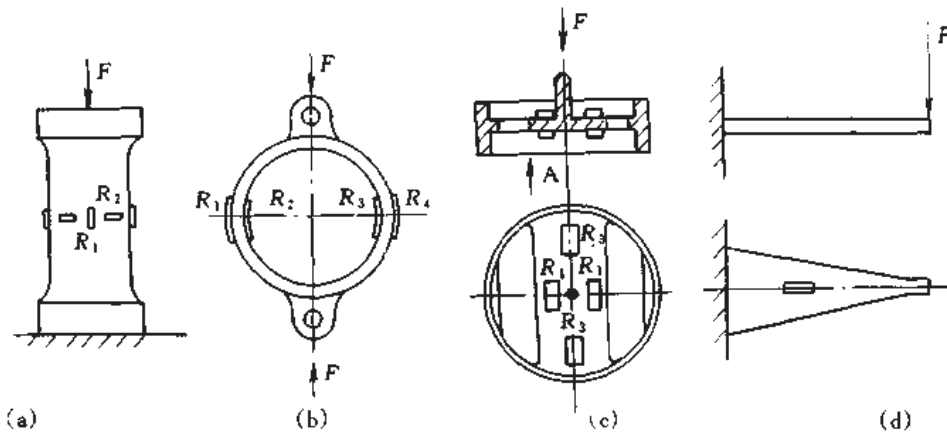


图 4.2.7 应变式力传感器原理图

第三节 热电阻传感器

热电阻传感器是利用导体或半导体电阻随温度变化的特性制成，主要用于温度的测量。按热电阻材料分有金属热电阻（热电阻）和半导体热电阻（热敏电阻）两种类型。

一、常用热电阻和基本技术特性

1. 热电阻

热电阻常用纯金属材料制成，应用最多的为铂和铜。

(1) 铂电阻 铂是一种贵金属，因为它具有稳定的物理化学性能、易提纯、工艺性好等一系列优点，被用作热电阻的材料。

在 0 ~ 630℃ 范围内，铂电阻与温度的关系可用下式表示：

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

在 -190 ~ 0℃ 范围内用下式表示：

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4)$$

式中 R_t ——温度为 t 时的电阻值；

R_0 ——温度为 0℃ 时的电阻值；

A、B、C、D——常数,其中 $A = 3.968 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$; $B = -5.87 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$; $C = 4.22 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}^3$; $D = -4.22 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^4$ 。

根据上述关系,列出电阻-温度关系表格即铂电阻分度表,可供使用时查阅。目前国内工业用标准铂电阻有 100Ω 和 10Ω 两种,分度号分别用 Pt100 和 Pt10 表示。铂的纯度以 R_{100}/R_0 来表示, R_{100} 代表在水的沸点时铂电阻的电阻值, R_0 代表在水的冰点时铂电阻的电阻值。常用热电阻的基本技术特性见表 4.2.1。

表 4.2.1 热电阻的基本技术特性

热电阻名称	分度号	0℃阻值 R_0/Ω	温度测量范围/℃	R_0 允许误差/%	R_{100}/R_0 及允许误差
铂电阻 (WZP)	Pt10	10	0~650	±0.01	1.391±0.001
	Pt100	100	-200~650	±0.1	1.391±0.001
铜电阻 (WZC)	Cu50	50	-50~150	±0.1	1.425±0.002
	Cu100	100	-50~150	±0.1	1.425±0.002

(2) 铜电阻 铂的价格较贵,在一些测量精度要求不高且测温范围较小的场合,常采用铜电阻。在 -50~150℃ 温度范围内,铜的电阻与温度呈线性关系:

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

式中 α 为电阻温度系数($4.25 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)。

铜电阻与温度的关系可制成铜电阻分度表,便于使用时直接查表。由于在高温状况下铜容易被氧化,因此它只能在低温及没有浸蚀性介质中工作,它的工作上限一般不超过 150℃。

一般工业用热电阻的结构如图 4.2.8 所示。

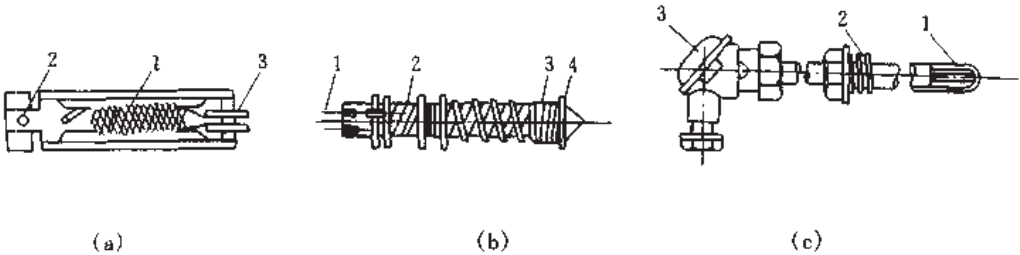


图 4.2.8 热电阻的结构示意图

- (a) 铂热电阻敏感元件: 1—铂热电阻丝; 2—铜铆钉; 3—银导线
(b) 铜热电阻敏感元件: 1—铜导线; 2—补偿绕组或扎线; 3—铜电阻丝; 4—塑料骨架
(c) 普通热电阻外形结构: 1—热敏电阻; 2—固定螺丝; 3—接线盒

2. 热敏电阻

热敏电阻通常采用金属氧化物材料,制成半导体热敏电阻。按其性能可分为三类:负温度系数 NTC 热敏电阻、正温度系数 PTC 热敏电阻和临界温度系数 CTR 热敏电阻。在实际应用中,因 PTC 和 CTR 热敏电阻在一定温度范围内,阻值将随温度而剧烈变化,常用作温度开关元件。在温度测量中,则主要采用 NTC 热敏电阻。

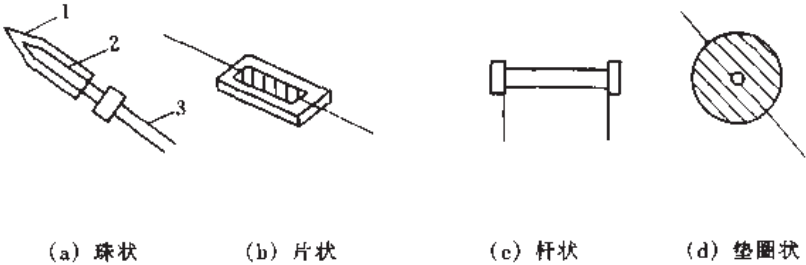


图 4.2.9 热敏电阻的不同形式
1—热敏电阻; 2—玻璃壳; 3—引线

热敏电阻的结构形式可根据使用的要求不同做成如图 4.2.9 所示的各种形状,然后用树脂或玻璃封装。

半导体热敏电阻灵敏度高,体积小,热惯性小,所以非常适宜于快速测量、点温测量及表面温度测量,测温范围可达 -50~1000℃。此外,热敏电阻还具有结构简单、寿命长等优点。但热敏电阻存在着严重的非线性,因此为保证测量精度要求,在测量电路中需考虑非线性补偿。

二、热电阻的校验

校验热电阻的接线如图 4.2.10 所示。

校验时需准备下列设备和装置：标准玻璃温度计一套；加热恒温器一套（ $-50 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ）；标准电阻（10 或 100Ω ）一个；电位差计一台；毫安表一只；分压器和切换开关各一个。

校验步骤如下：

① 将热电阻置于恒温器内，使其达到被校验温度并保持恒温，然后调节分压器使毫安表指示约为 4mA （电流不可过大，否则会引起热电阻过热，影响测量精度）。

② 将切换开关投向标准电阻 R_s 端，读电位差计示值 u_s ；再立即将切换开关投向被校验热电阻 R_t 端，读出电位差计示值 u_t 。

③ 按 $R_t = R_s u_t / u_s$ 公式计算 R_t 。在同一校准点反复测量数次，取平均值，查相应分度表核对，看其是否超差。

④ 再取几点测量（一般取量程的 10%、50% 和 90%），重复①、②、③步骤，则此热电阻校验完成。

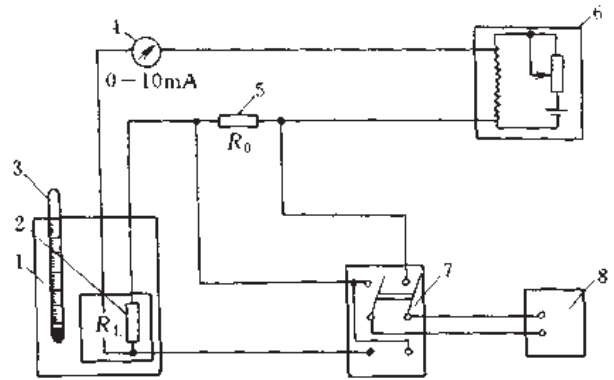


图 4.2.10 校验热电阻的接线

1—加热恒温器；2—被校验电阻体；3—标准温度计；4—毫安表；
5—标准电阻；6—分压器；7—双刀双掷切换开关；8—电位差计

第三章 电容式传感器

电容式传感器是将被测量转换成电容变化的传感器,可用于位移、角度、振动、厚度、压力、物位等参数的测量。

第一节 工作原理及类型

电容式传感器实际上是一个具有可变参数的电容器,其基本工作原理可用平板电容器来说明。在不考虑边缘效应时,其电容量为:

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta}$$

式中 ϵ ——极板间介质的介电常数;

ϵ_r ——极板间介质的相对介电常数;

ϵ_0 ——真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$;

S ——极板间相对有效面积, m^2 ;

δ ——两极板间的距离, m 。

由上式可知,平板电容器的电容量的大小由 ϵ 、 S 、 δ 三个参数确定。在实际应用时,常保持三个参数中的两个不变,而通过被测量改变其中一个参数使电容量发生变化,这就是电容式传感器的工作原理。

根据改变电容量方法的不同,电容式传感器有三种类型:变间隙式(变 δ)、变面积式(变 S)和变介电常数式(变 ϵ)。

常见电容式传感器的原理结构如图 4.3.1 所示。

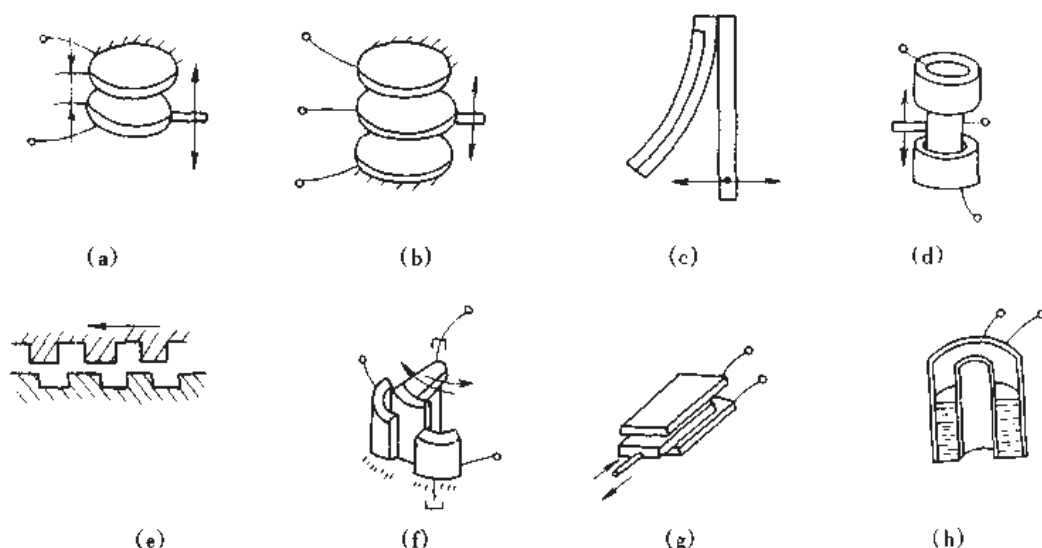


图 4.3.1 几种不同的电容式传感器的原理结构图

第二节 电容式传感器的特点及应用

电容式传感器的主要特点是:①所需的动作能量小而灵敏度高,特别适用于微输入测量;②测量精确度高,因内部几乎不存在摩擦,本身也不消耗能量,因而可减少误差影响;③动态响应特性好,具有较小的可动质量,因而有较高的固有频率;④结构简单,工作环境适应性强。多数采用玻璃、石英或陶瓷作绝缘支架,因而可在高温、低温或辐射等恶劣条件下工作。

图 4.3.2 是一种差动式电容压力传感器的结构原理图。该传感器的金属动膜片与两个镀金的玻璃圆片组成

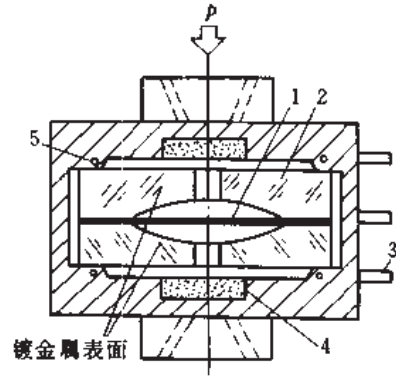


图 4.3.2 差动式电容压力传感器

1—膜片（动电极）；2—凹玻璃圆片（镀金定电极）；3—接线柱；
4—过滤器；5—保护环

差动电容。在压力作用下，膜片向下凹，从而使电容量发生变化。当过载时，膜片受到凹曲的玻璃表面保护而不致损坏。这种传感器有很高的分辨力，可以测量 $0 \sim 0.75\text{Pa}$ 的微小压力，响应时间为 100ms 。

第四章 电感式传感器

电感式传感器是将被测量转换成线圈的自感或互感变化的传感器。按电感变化的方式,可分为两大类,即自感式(常称电感式)和互感式(常称差动变压器)。电感式传感器可以测量位移、振动、压力、应变、流量等参数。其优点是结构简单,工作可靠,测量范围广,灵敏度高。缺点是频率响应较差。

第一节 电感式传感器工作原理

电感式传感器的工作原理是基于铁芯线圈的电感计算公式。铁芯线圈如图4.4.1。

线圈电感为:

$$L = \frac{W^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{2\delta}$$

式中 W ——线圈匝数;

μ_0 ——空气隙的磁导率, H/m;

A_0 ——空气隙的导磁横截面, m^2 ;

δ ——气隙长度, m。

由上式可知, A_0 和 δ 是可变参数, 如通过被测量改变 A_0 和 δ , 则可实现被测量与电感间的转换。

常见的电感式传感器可分为三种类型, 如图4.4.2所示。(a)为变间隙式(δ 变), (b)为变截面式(变 A_0), (c)为螺管式(变 δ 和 A_0)。

上述电感式传感器在实际使用中, 为减小外界干扰影响, 如环境温度变化、外磁场干扰、电源电压和频率波动等, 克服铁芯和衔铁之间存在的较大电磁吸力, 提高灵敏度, 常采用差动形式。如图4.4.3所示。

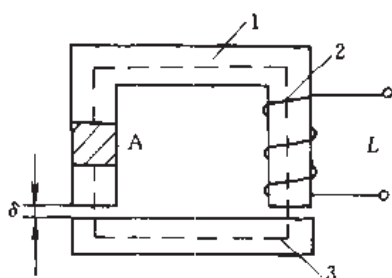
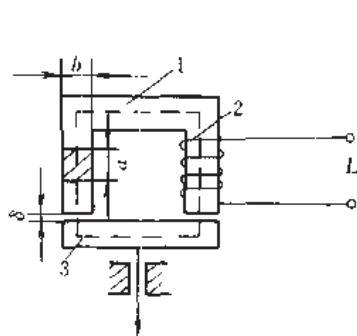
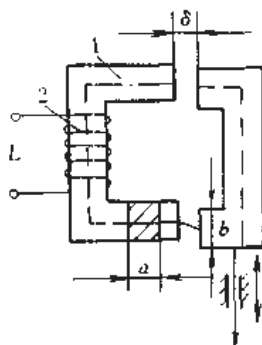


图 4.4.1 铁芯线圈

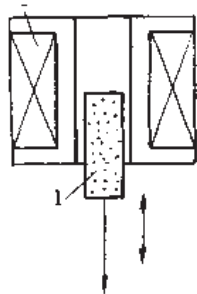
1—铁芯; 2—线圈; 3—衔铁



(a)



(b)



(c)

图 4.4.2 电感式传感器

1—铁芯; 2—线圈; 3—衔铁

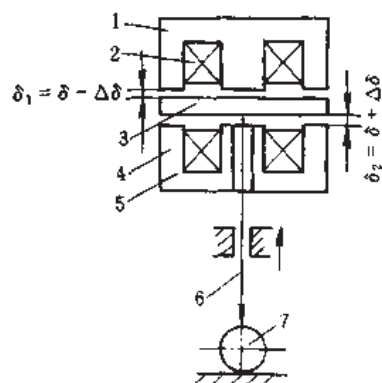


图 4.4.3 差动变间隙式电感传感器

1—上铁芯; 2—上线圈; 3—衔铁; 4—下铁芯;

5—下线圈; 6—测杆; 7—工件

第二节 差动变压器式传感器

在差动电感式传感器的基础上增加一个初级线圈，即构成变压器式电感传感器，常简称差动变压器。如图 4.4.4 所示。

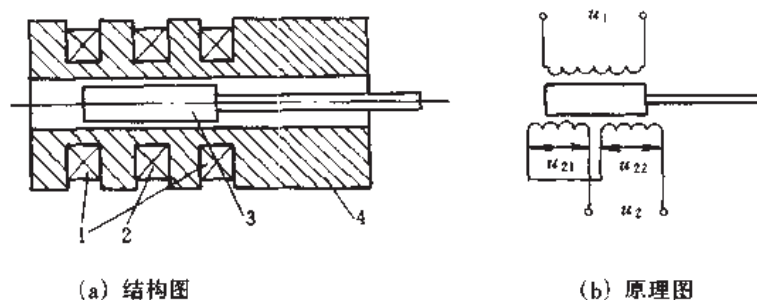


图 4.4.4 差动变压器

1—次级线圈；2—初级线圈；3—铁芯；4—绝缘框架

差动变压器主要由线框和铁芯组成。线框上绕有一初级线圈和两组次级线圈。在初级线圈加以适当频率的电压激励时，两个次级线圈中就会产生感应电势。当铁芯处于线圈中心位置时，两次级线圈感应电势大小相等，方向相反，输出为零。当铁芯偏离中心位置时，引起次级线圈的互感发生变化，两次级线圈感应电势大小不相等，有输出。差动变压器常用的测量范围为 $\pm 0.5 \sim \pm 75\text{mm}$ ，分辨力优于 $1\mu\text{m}$ ，其灵敏度比差动电感式高，可达 $50 \sim 1500 \text{ mV}/(\text{mm} \cdot \text{V})$ 。

图 4.4.5 为带差动变压器的沉筒式液位计的原理示意图。沉筒 1 由浮力段和固定段两部分组成，为适应不同介质和量程，可调换浮力段来实现。由于液位的变化，沉筒所受浮力发生变化，通过测量弹簧 2 线性地转换为衔铁 4 的位移，衔铁位移由差动变压器转换为输出电压的变化。输出电压的大小就反映了液位的变化。

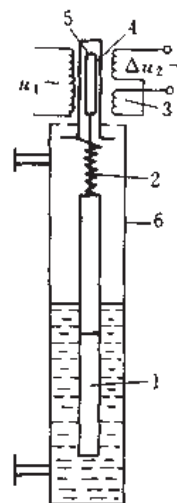


图 4.4.5 带差动变压器的沉筒式液位计示意图

1—沉筒；2—测量弹簧；3—线圈；4—衔铁；
5—密封隔离管；6—沉筒室壳体

第五章 电涡流式传感器

电涡流式传感器是利用电涡流效应将被测量转换为电参量变化的一种传感器。其显著的特点是可以实现非接触测量，同时还具有结构简单、频率响应宽、灵敏度高、测量线性范围大、体积较小等一些特点，它可以测量振动、位移、厚度、转速、温度、硬度等参数，还可进行无损探伤，是一种有发展前途的传感器。

第一节 工作原理

当金属导体中的磁通发生变化时，就会在导体中产生感应电流，此电流的流线在金属导体内是闭合的，称之为电涡流。

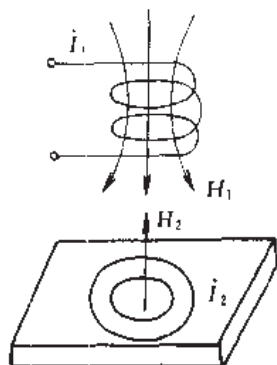


图 4.5.1 电涡流式传感器基本原理示意图

如图 4.5.1 所示，当交变电流输入传感器激磁线圈时，线圈便产生交变磁场，在磁场作用下，靠近线圈的金属板感应出与线圈轴线同心的涡流，而涡流又产生一个新磁场，与线圈产生的磁场方向相反，因而抵消部分原磁场，从而影响传感器线圈的电感量和阻抗，影响的大小显然与电涡流有关。涡流的大小与金属导体的电阻率、磁导率、厚度、线圈与金属导体的距离以及线圈激磁电流的角频率等参量有关。固定其中某些参数，就能按涡流大小测量出另外一些参数。

测量涡流大小变化，需要再进行一次变换，一般有三种方式。第一种是用交流电桥测定传感器等效阻抗的变化；第二种是利用谐振电路测量传感器等效电感量的变化；第三种是测定传感器等效品质因素 Q 值的变化。

第二节 电涡流式传感器的应用

电涡流式转速传感器原理框图如图 4.5.2 所示。在待测轴上开一键槽，靠近轴表面安装电涡流传感器，轴转动时便能检测出传感器与轴表面的间隙变化，从而得到跟转速成正比的脉冲频率信号，来自传感器的脉冲信号经放大和整形后，即由频率计指示频率值。若轴转到图中所示位置，间隙变化 Δd 引起传感器线圈的电感改变 ΔL ，振荡器的电压幅值和振荡频率同时改变。峰值包络检波器检测出电压幅值的改变值 ΔV ，然后通过跟随器和整形电路输出脉冲信号 f_n ， f_n 接至频率计即可指示出频率值，接至转速表即可指示转速。

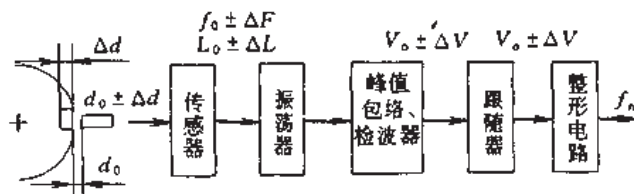


图 4.5.2 电涡流式转速传感器的原理方框图

第六章 磁电式传感器

磁电式传感器是利用电磁感应原理将非电量转换成感应电势输出的传感器。它的工作不需要电源，而是直接从被测物体吸收机械能量并转换成电信号输出，是一种能量变换型（发电型）传感器，也被称为感应式传感器、电动式传感器。磁电式传感器只能用于动态测量，通常用来测量物体的振动速度或转速。

第一节 工作原理

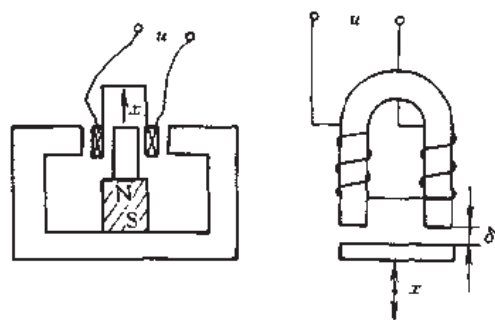
图 4.6.1 所示是磁电式传感器工作原理图。根据电磁感应定律，当穿过 N 匝线圈中的磁通量 Φ 发生变化时，在线圈引出线的两端将产生感应电势 u ，其值为：

$$u = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

在电磁感应中关键的变量是磁通量 Φ ，使 Φ 产生变化通常有两种方式：①磁铁与线圈之间作相对运动，如图 4.6.1 (a)，称动圈式；②磁路中磁阻的变化，如图 4.6.1 (b)，称变气隙式。

对于动圈式，当线圈 x 方向运动时，由于切割永久磁铁形成磁力线，线圈的两输出引线端就会有感应电势，其大小与线圈运动的速度成正比。

变气隙式的工作过程为：当动片沿 x 方向移动时，永久磁铁与动片间的初始间隙 δ_0 将发生变化，引起磁路的磁阻改变，穿过线圈的磁通就会发生变化，线圈的两端就会产生感应电势。当动片的振幅与初始间隙 δ_0 相比很小时，感应电势与动片运动的速度成正比。



(a) 动圈式

(b) 变气隙式

图 4.6.1 磁电式传感器的工作原理

第二节 磁电式传感器的应用

磁电式转速传感器的结构原理如图 4.6.2 所示。在永久磁铁组成的磁路中，若改变磁阻（如空气隙）的大小，则磁通量随之改变。为了使气隙变化，在待测轴上装一个由软磁材料做成的齿盘。当待测轴转动时，齿盘也跟随转动，齿盘中的齿和间隙交替通过永久磁铁的磁场，从而不断改变磁路的磁阻，使线圈中的磁通量发生突变，在线圈内产生一个脉动电势，其频率跟待测转轴的转速成正比。

磁电式转速传感器配上数字测速仪可直接读出转速和频率，检测范围为 $0 \sim 4000 \text{r/min}$ 。这种传感器可检测导磁材料制成的齿轮、叶轮、带孔圆盘的转速。

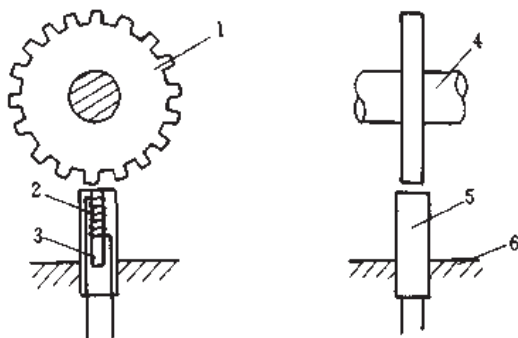


图 4.6.2 磁电式转速传感器的结构原理

1—齿盘；2—线圈；3—永久磁铁；4—输出轴；5—速度传感器；6—支架

第七章 光电式传感器

光电式传感器是一种将光信号转换成电信号的传感器,若用这种传感器测量其他非电量,只要将这些非电量的变化转换成光信号的变化即可。因此光电式传感器一般由光源、光学元件和光电元件三部分组成。在测量时,被测量使光源发射出的光通量发生变化,接收光通量的光电元件的输出电量也作相应的变化,输出电量的大小与被测量有关。

光电式传感器应用领域广泛,是一种常用的传感器,可以用来测量位移、距离、转速、温度、浓度、浊度等参数。随着科学技术的发展,新光源、新的光电器件不断出现,应用范围日趋扩大,如在自动化程度高的数控机床等机电设备中大量运用了光电传感器,它不但能测一维量,而且能测二维量,直接获得图像信息,是一种很有发展前途的传感器。

第一节 光电元件

光电元件在光电传感器中是用来把光量转换成电量的重要器件。常用的有光敏电阻、光电池、光敏晶体管、光电耦合器等。从70年代开始,相继出现了一些新型半导体光电器件,如电荷耦合摄像器件(CCD)、光电位置敏感器件(PSD)等。

一、光敏电阻

光敏电阻又称光导管,它是利用光电效应的原理而制成的。光敏电阻几乎都是用半导体材料制成。有些半导体[如CdS(硫化镉)等]在黑暗的环境下电阻值很高,但当它受到光照射时,光子能量将激发出半导体电子-空穴对,从而加强了半导体的导电性能,使其阻值降低,并且照射的光线愈强,阻值也变得愈低。如果把光敏电阻连接到电路中,如图4.7.1所示,用光照射就可以改变电路中电流的大小。没有光照射时的电流叫“暗电流”,相对应的阻值称“暗电阻”。当有光照射时,电流就会增加,所增加的电流称为“光电流”,这时呈现的阻值称“亮电阻”。我们希望暗电阻愈大愈好,而亮电阻越小越好,这样光电流才可能大,光敏电阻的灵敏度才高。表4.7.1列出了国产光敏电阻的主要参数。

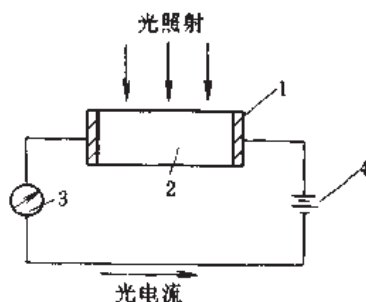


图 4.7.1 光电导电流测量电路

1—电极; 2—光导晶体;
3—电流计; 4—电源

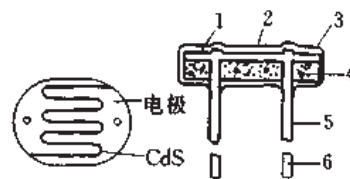


图 4.7.2 CdS 光敏元件的结构

1—树脂涂层; 2—光敏层 (CdS); 3—电极;
4—陶瓷基片; 5—引线; 6—树脂涂层式 CdS 光敏元件

表 4.7.1 国产 MG42 型密封硫化镉光敏电阻主要特性

型 号	额定功率 /mW	亮阻 100Lx /kΩ	暗阻 (无光照) /MΩ	测试电压 /V	最高工 作电压 /V	上升时间 常数 /ms	电阻温 度系数 /℃ ⁻¹	响应峰 值波长 /μm
MG42-5A	5	<2	>0.1	2	20	<50 ^①	< ±1×10 ⁻² 使用环境 温度为 -25~ +55℃	0.52~ 0.59
MG42-5B	5	<5	>0.5	2	20			
MG42-5D	5	<10	>1	5	20			
MG42-10A	10	<50	>10	10	50	<20 ^①		
MG42-10B	10	<100	>50	10	50			

① 此值与照度有关,照度愈强此值愈小。

光敏电阻的结构很简单，如图 4.7.2 所示。CdS 光敏电阻元件是利用光电效应的光传感器的典型元件，很早就商品化了。它是将 CdS 粉末烧结于陶瓷基片上，并于其上做成梳形电极，这样可增加电极和光敏面结合部分的长度，从而可得到大电流。光敏元件一般都怕潮湿，因此采用密封结构。一般可采用金属壳、塑料或防潮涂料等密封。

二、光敏晶体管（见第二篇第七节）

三、光电池

光电池是一种直接将光能转换成电能的元件。光电池的结构原理见图 4.7.3 所示。它有一个大面积的 PN 结，当光照射到 PN 结上时，便在 PN 结两端产生电动势（P 区是正电位，N 区是负电位），这叫做“光生伏打效应”。半导体内原子被光照射后激发而生成了电子-空穴对，它们在 PN 结电场的作用下，电子被推向 N 型区，而空穴被拉进 P 型区，这种推拉作用，使 P 型区带上了正电，N 型区带上了负电，两者之间产生电位差，当用一根导线将两块半导体连起来时，导线上就会有电流流过，电流的大小与光照量有关。

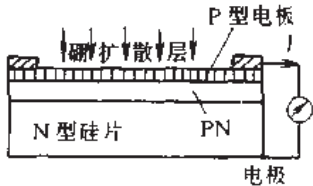


图 4.7.3 硅光电池结构示意图

光电池的种类很多，有硒光电池、硫化镉光电池、硫化镉光电池、硅光电池、砷化镓光电池等。其中应用最广的是硅光电池，它有性能稳定、光谱范围宽、频率特性好、转换效率高、能耐高温辐射等一系列优点。表 4.7.2 列出了硅光电池的特性参数。

表 4.7.2 2CR 硅光电池

型 号	开路电压/mV	短路电流/mA	效率 η /%	面积/mm ²	型 号	开路电压/mV	短路电流/mA	效率 η /%	面积/mm ²
	30℃入射光强 100mW/cm ²								
2CR11	450 ~ 500	2 ~ 4	6 ~ 8	2.5 × 5	2CR41	450 ~ 500	18 ~ 30	6 ~ 8	10 × 10
2CR21	450 ~ 500	4 ~ 8	6 ~ 8	5 × 5	2CR44	580 ~ 600	18 ~ 30	12 以上	10 × 10
2CR31	450 ~ 500	9 ~ 15	6 ~ 8	5 × 10	2CR53	550 ~ 580	36 ~ 60	10 ~ 12	10 × 20

四、光电耦合器

光电耦合器是一种复合光敏器件，是由一发光元件和一光电元件同时封装在一个外壳内组合而成的转换元件，把加到发光元件的电信号作为输入信号。发光元件发出的光由光电元件接收，并转换成电信号输出。实际上光电耦合器是以光为媒介的电信号传输器件，器件的输入与输出之间是电绝缘的。

由于光电耦合器具有输入输出电隔离性质，多作为电信号传递器件和开关器件。作为开关器件时，与继电器相比，它速度快，无触点且耗能少；作为电信号传递器件时，与信号变压器相比，其传递信号可从直流到较高频率的交流信号，不受电磁干扰。详见第二篇第八节。

根据构造和用途分类，光电耦合器可分为两类。一类是光隔离器，以在电路之间传递信息为目的；另一类是光传感器，用以检测物体的位置有或无。

1. 光隔离器

光隔离器的结构有金属密封形和塑料密封形两种，见图 4.7.4 所示。

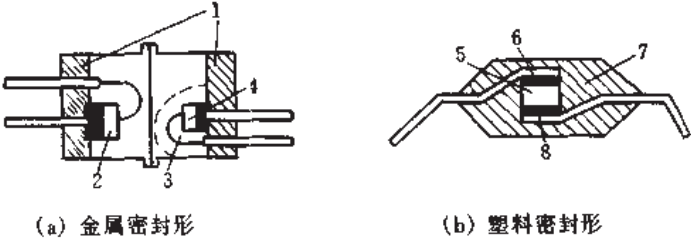


图 4.7.4 光电耦合器的结构

1—玻璃绝缘；2—光敏三极管；3—透明绝缘体；4—砷化镓发光二极管；
5—透明树脂；6—发光二极管；7—黑包塑料；8—光敏二极管

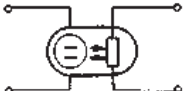



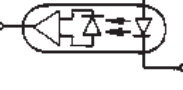

金属密封形是采用金属外壳和玻璃绝缘的结构，在其中心装片，采用环焊以保证发光元件与光敏元件对

准，以此来提高灵敏度。

塑料密封形是采用双直立插式用塑料封装的结构，每排三个引脚，便于在印刷电路板上安装。管心预先装在管脚上，中间采用具有集光作用的透明树脂固定，故它的灵敏度较高。

从使用的角度看，要求光隔离器信号传输的线性度好，效率高，绝缘性好，响应速度快，可靠性高，价格低。因此在选用时要特别注意恰当地选择发光元件和光敏元件的组合方式。光隔离器的组合方式及其特性列于表 4.7.3。

表 4.7.3 光隔离器的组合方式及其特性

种 类	组 合 方 式	电 流 传 输 比 / %	响 应 速 度	特 点
氖灯 + 光敏电阻			几毫秒 ~ 100ms	交直流两用，功耗大，灯寿命短
白炽灯 + 光敏电阻			几毫秒 ~ 100ms	响应慢，有前历现象
可见光 LED + 光敏电阻			几毫秒 ~ 100ms	交直流两用，响应慢，有前历现象
红外 LED + 硅光电二极管		0.2 ~ 0.3	几十毫秒 ~ 几千纳秒	响应快，线性度好，电流传输比小
红外 LED + 硅光电三极管		几 ~ 几百	1 ~ 10μs	响应快，暗电流小
红外 LED + 硅光电三极管		几 ~ 几百	1 ~ 10μs	响应更快，暗电流更小
LED + 结型 FET			十几微秒	具有双向特性，导通电阻与输入电流成正比
红外 LED + LASCR		0.1 ~ 1A 1.10 ~ 25mA		控制功率大，可直接控制交流
LED + 光集成电路		100 ~ 600	几十纳秒 ~ 千纳秒	响应快，电流传输比大
红外 LED + 复合式光电三极管		百 ~ 千	几十微秒 ~ 几百微秒	电流传输比大，饱和压降大，暗电流大
红外 LED + 复合式光电三极管		百 ~ 千	几十微秒 ~ 几百微秒	电流传输比大，饱和压降大，暗电流可小

2. 光传感器

根据结构的不同,光传感器可分为透过型和反射型两种,如图 4.7.5 所示。透过型传感器是将发光元件和光敏元件相对放置并保持相互之间的一定距离,发光元件发出的光束通过封装外壳的透射孔被光敏元件接收,当被检测物体进入两元件之间时,引起光量变化。反射型光传感器则是通过把发光元件和光敏元件按相同方向斜对组装而制成,可测量物体反射光量的变化。

光传感器可用在数字控制系统中组成光编码器;在自动售货机中检测硬币数目;在高速印刷机中作定时控制;在传真、复印机中检测纸张或图像对比度的调整。

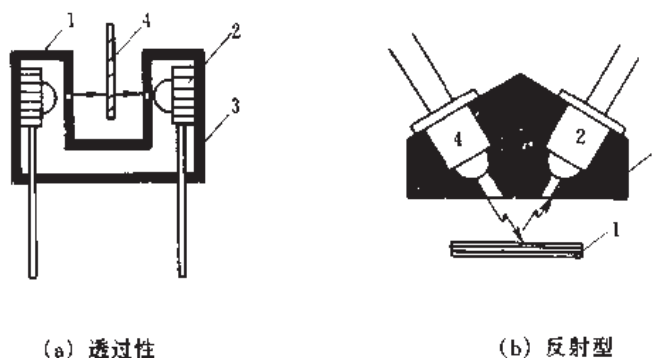


图 4.7.5 光传感器的结构

1—发光器件; 2—光敏器件; 3—基座; 4—被检物体

五、电荷耦合摄像器件 (CCD)

电荷耦合摄像器件是一种大规模集成电路工艺制作的半导体光电元件,简称 CCD。它具有体积小、分辨率高、结构简单、低功耗、成本低等优点,取代早期笨重的电子管摄像器件,被广泛应用于工业检测、电视摄像、遥感及机器人等领域。

1. CCD 的结构及工作原理

电荷耦合器件 (CCD) 是在 MOS 电路基础上发展起来的,电荷的传输是由 MOS 元件来完成。图 4.7.6 是 MOS 结构原理图。

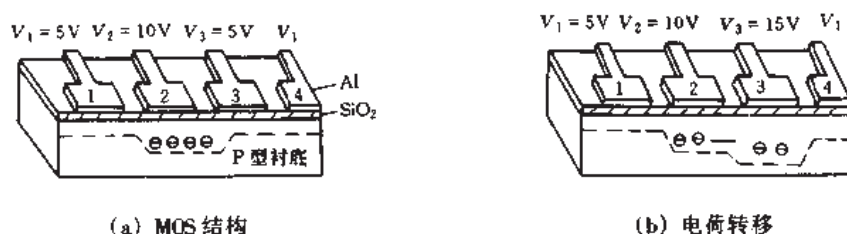


图 4.7.6 MOS 结构原理图

基本的 MOS 结构是金属电极-二氧化硅(绝缘体)-硅(衬底)结构。在 P 型硅单晶的衬底上生长一层很薄的 SiO_2 , 再在 SiO_2 上面淀积具有一定形状的金属 Al 电极。

在电极上施加一正电压时,它形成的电场穿过 SiO_2 薄层排斥 P 型硅中的多数载流子(空穴),于是在 SiO_2 下形成耗尽层。由于它的表面是正电势,就像“阱”一样收集电子,这部分称为“势阱”。如果有光线入射到半导体硅片上,在光子作用下,硅片上就产生了电子和空穴,光生电子被附近的势阱俘获,而空穴则被排斥出耗尽层。势阱内俘获的光生电子数量与入射到势阱附近的光强成正比,称这样一个 MOS 结构元为 MOS 光敏元(或像素)。通常在半导体硅片上制有几百或几千个相互独立的 MOS 光敏元,如果照射在这些光敏元上的是一幅明暗起伏的图像,那么,这些光敏元就感生出一幅光生电荷图像。

在电极上加控制电压可实现电荷的传输,见图 4.7.6(b)所示。电极 2 加偏压 10V,而其邻近的两个电极 1 和 3 加偏压 5V。所以在电极 2 下形成较宽的耗尽层,即在 SiO_2 与 Si 的界面上得到较深的势阱,电子将被储存在这个势阱内。当电极 3 所加偏压增至 15V 时,电极 3 下的势阱将比电极 2 下的势阱更深,于是电极 2 下储存的电荷将移向电极 3 下的势阱。势阱内储存的电荷像一个“包”似地转移,可将势阱储存的电荷称为“电荷包”。

由上所述可知,CCD 具有在势阱中存储信号电荷,并将其转移的能力。这种传输过程,实际上是电荷耦合的过程,称这类器件为“电荷耦合器件”,将担任电荷耦合传输的单元称为“读出移位寄存器”。

2. CCD 摄像器件

CCD 具有光电转换、信号存储以及信号传输(自扫描)的能力,常用的有线阵 CCD 和面阵 CCD 两种。

(1) 线阵 CCD 线阵 CCD 摄像器件只摄取一行图像信息,可用作传真、遥感、文字或图像信息的判别,工件尺寸的自动检测等方面。

图 4.7.7 所示为线阵 CCD 结构示意图。它由光敏区、转移区、移位寄存器、偏置电荷电路、输出栅等几部分组成。

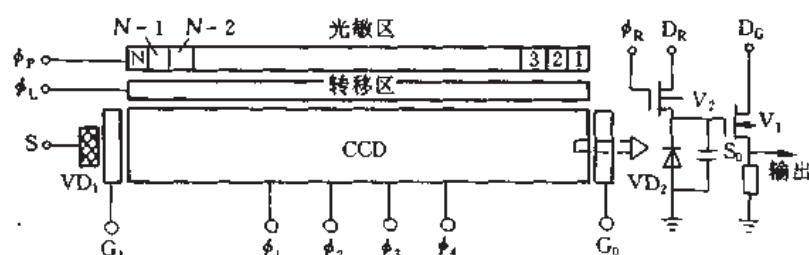


图 4.7.7 线阵 CCD 图像器件

(2) 面阵 CCD 面阵 CCD 器件的光敏单元呈二维矩阵排列，能将一幅图像信息同时摄取，因此它适用于一般电视摄像。由于传输方式的不同，面阵 CCD 器件有许多类型。常见的传输方式有行间传输和帧传输两种。

图 4.7.8 为面阵器件的示意图。图 4.7.8 (a) 为行间传输结构。图 4.7.10 (b) 为帧传输结构。

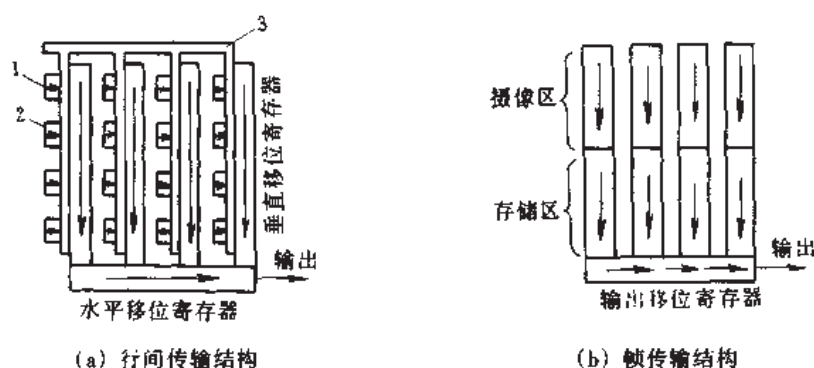


图 4.7.8 面阵 CCD 传输原理

1—光照；2—光敏面；3—转移栅

几种国外 CCD 器件的主要特性参数如表 4.7.4 所示。

表 4.7.4 国外几种常用 CCD 器件的主要特性参数

型 号	主 要 性 能
美国仙童公司 CCD133/143	CCD133 和 CCD143 分别为 1024 和 2048 单元线阵高速驱动，最高 20MHz；低暗电流；高灵敏度；蓝光响应强；动态范围大，其典型值为 2500:1
美国仙童公司 CCD222	488×380 面阵，光敏单元尺寸为 12μm×18μm；相邻光敏单元中心距 30μm×18μm；有效光敏区面积 8.8×11.4mm ² ；无拖影，无几何畸变；动态范围：典型值大于 100:1；最高视频速率 20MHz，帧速 90Hz；低照度，低等效噪声曝光量
日本 NEC 公司	像素 1920×1035，数据传输率 74.25Hz；每个像素面积小至 7.3×7.6μm ² ，图像的水平垂直分辨率为 1000 电视线，场频 60Hz
美国福特航空航天公司	像素 2048×2048 或 4096×4096；像素尺寸 7.5×7.5μm，暗电流 < 25pA/cm ² ，阵列均匀性高 (< 1%)，有源成像面积为 15.36×15.36mm ²
敏通公司 MTV3501	解析度：350TV 线，解像度 542×583，最低照度：3lx

六、光电位置敏感器件 (PSD)

半导体光电位置敏感器件是一种对其光敏面上入射光点位置敏感的半导体器件，即当光点出现在光敏面不同位置时，对应应有不同输出的电信号。它简称 PSD。

1. PSD 的工作原理

PSD 是基于半导体的横向光电效应工作的。如图 4.7.9 所示，当一个确定的人射光点照射在 PN 结时，除了产生结光生电动势外，在与结平行的方向上也将产生光生电动势。如在 PN 结表面的两平行边缘上淀积一对电极，就可在电极上得到一与光点位置相对应的光电流。

实用的 PSD 不是简单的 PN 结，而是做成 PIN 结构，其目的是提高光电转换效率、灵敏度和响应速度。如

图 4.7.10 所示, 表面 P 层为光敏面, 两边各有一信号输出电极, 中间为 I 层, 底层的公共电极是用来加反偏电压的。当入射光照射到光敏面某点 (如 A 点), 由于存在平行于结面的横向电场作用, 使光生载流子形成向两端电极流动的电流 I_1 和 I_2 , 它们之和等于总电流 I_0 。如果 PSD 表面电阻层是均匀的, 且其阻值 R_1 和 R_2 远大于负载电阻 R_L , 则 R_1 和 R_2 的值仅取决于光电的位置:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{L-x}{L+x}$$

将 $I_0 = I_1 + I_2$ 与上式联合得:

$$I_1 = I_0 \frac{L-x}{2L}$$

$$I_2 = I_0 \frac{L+x}{2L}$$

由上两式分析可得, 当入射光强不变时, 单个电极的输出电流与入射光点位置 x 呈线性关系。如将电流值 I_2 和 I_1 进行相加和相减, 然后再相除, 可得到下面的式子:

$$P_x = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{x}{L}$$

如用适当的信号处理线路测出 P_x , 可相应得到反映光点位移的 x 值。由上式可知, P_x 只与光点位置 x 有关, 而和入射光强无关。

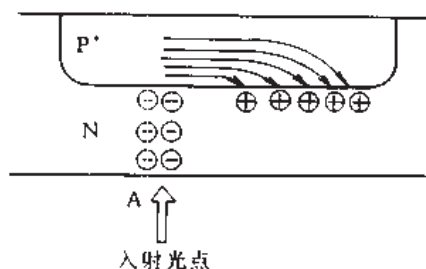


图 4.7.9 PSD 横向光电效应

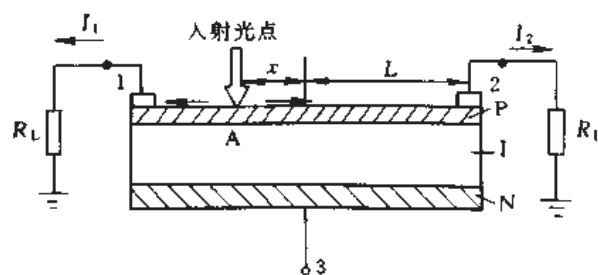


图 4.7.10 PSD 的结构

2. PSD 位置敏感器件

半导体光电位置敏感器件有一维 PSD 和二维 PSD 两大类, 分别可确定光点的一维位置坐标和二维位置坐标。

(1) 一维 PSD 一维 PSD 用于测定光点在直线方向上的运动位置, 图 4.7.11 (a) 是一种一维 PSD 外形图。它有一对信号电极、一个公共电极和一个光敏面, 其中光敏面是细长的矩形。

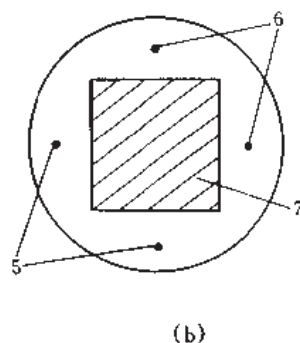
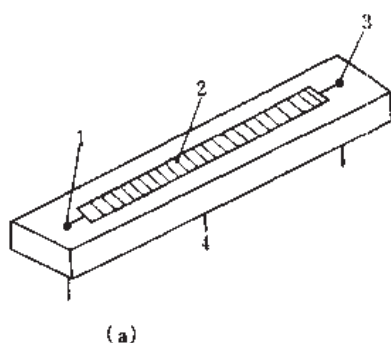


图 4.7.11 一维和二维 PSD 外形图

1, 3, 5, 6—信号电极; 2, 7—感光面; 4—公共端

(2) 二维 PSD 二维 PSD 用于测定光点在平面上的运动位置 (二维坐标)。它与一维 PSD 相比, 光敏面是方形的且共有两对互相垂直的信号电极。如图 4.7.11 (b) 所示。

表 4.7.5 列出了典型 PSD 产品的性能参数。

表 4.7.5 PSD 特性表

参 数	一维 PSD (S1545)	二维 PSD (S1300)	参 数	一维 PSD (S1545)	二维 PSD (S1300)
光谱响应范围/ μm	300 ~ 1100	300 ~ 1100	暗电流/ μA ($U_R = 5\text{V}$)	0.002	0.5
最敏感波长/ μm	900 ± 50	900 ± 50	结电容/pF ($U_R = 5\text{V}$)	30	300
最大反偏电压 U_R/V	20	20	响应速度/ μs ($U_R = 5\text{V}$)	20	10
位置检测误差	0.5%	$\pm 0.8\%, 1.5\%$	位置分辨率/ μm	0.3	6
位置检测范围/mm	± 4.5	$\pm 2.5, \pm 5$	最大光电流/ μA ($U_R = 10\text{V}, R_L = 1\text{k}\Omega$)	20	1000
电极间电阻/k Ω	200	10			

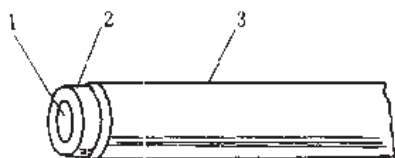


图 4.7.12 光纤的结构
1—纤芯；2—包层；3—护套

2. 光纤的导光原理

光纤工作的基础是光的全内反射。如图 4.7.13 所示，当光线入射一个端面并与轴线成 θ 角时，根据折射定律，在光纤内折射成 θ' ，然后以 φ 角入射至纤芯与包层的界面。当 $\varphi > \varphi_c$ 时 ($\varphi_c = \sin^{-1} n_2/n_1$ ，称纤芯与包层间的临界角)，光线在光纤的界面上产生全内反射，光线以同样的角度反复逐次反射，直至传播到另一端面。工作时若光纤弯曲，只要仍满足全反射定律，光线仍继续前进，可见光线“转弯”实际上是由很多光线的全反射所形成。由折射定律有：

$$n_0 \sin \theta_c = n_1 \sin \theta'_c = n_1 \cos \varphi_c = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_c} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

式中 θ_c 是与 φ_c 相对应的端面入射角，称为光纤波导的孔径角。使用时应使入射光处于 $2\theta_c$ 的光锥角内，光纤才能理想地导光；入射角过大，如 $\theta_r > \theta_c$ ，则会产生漏光。

习惯上定义光纤波导的数值孔径为：

$$NA = n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

数值孔径 NA 反映光纤波导的集光能力。若纤芯和包层的折射率差大， NA 值大，有利于提高光耦合效率。

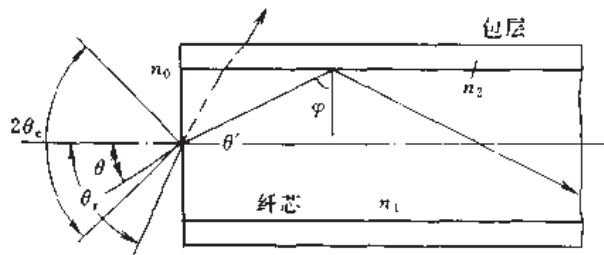


图 4.7.13 基本结构示意图

第二节 光电式传感器的应用

一、测量转速

光电式转速传感器工作在脉冲状态下，它是将轴的转速变换成相应频率的脉冲，然后测出脉冲频率就测得了转速值。这种测速方法具有传感器结构简单、可靠、测量精度高等优点。

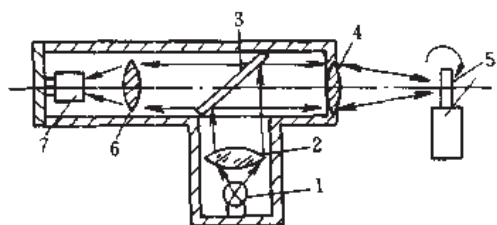


图 4.7.14 反射式光电传感器
1—光源；2—透镜；3—半透膜；4—透镜；
5—旋转体；6—透镜；7—光敏管

图 4.7.14 所示为反射式光电传感器的结构原理图。在旋转体的表面上设有反射记号，一般是粘贴上黑、白分明的条带。黑、白条带的宽度应大于投射光的宽度。由光源 1 发出的光线，经透镜 2 射到半透膜 3 上，一部分光线由半透膜反射经透镜 4 聚集到被测的旋转体 5 上。当旋转体转动时，投射到旋转体上的光点经过反射记号（白条带）处，反射率高，反射光经透镜 4、半透膜 3 和透镜 6 聚集投射到光敏三极管

上,使光敏元件感光,产生光电流;光投射至非反射记号(黑条带)处,反射率低,几乎没有反射光线,光敏三极管就不感光。这样光点每经过一个反射记号,光敏元件感光一次,发出一个电脉冲信号。对脉冲信号计数,就能测出轴的转速。在使用这种传感器测量时,必须要保证入射光的聚焦点正好在旋转体的记号上。这种形式的光电传感器由于反射光线的强度低,因此输出的脉冲信号要经过放大、整形,然后进行脉冲计数测量。

二、非接触尺寸测量

线阵 CCD 摄像技术在工业生产中应用越来越广泛,可用于各种机械产品尺寸测量、分类、产品表面质量评定、文字与图形识别等。下面介绍一种平行光成像尺寸测量仪系统。其系统示意图如图 4.7.15 所示。

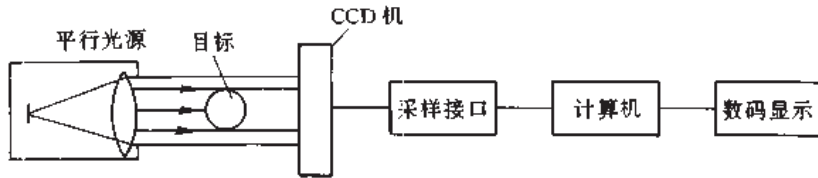


图 4.7.15 平行光成像测量系统

全套系统包括有平行光源、线阵 CCD 传感器、数据采集、计算、显示控制箱。该系统留有打印机接口,可以打印记录测量结果。当一束平行光透过待测物体投射到 CCD 传感器上时,由于待测物的存在,其所形成的阴影将同时投射到 CCD 传感器上,阴影的尺寸就代表了待测物体的尺寸,因此只要采集计数系统计算出阴影部分象素个数(即输出脉冲个数),其脉冲(象元)的个数与象素尺寸的乘积就代表了目标的尺寸。

不难看出,此种测试方法的精确度取决于平行光的准直程度和 CCD 象素尺寸的大小,对 5000 位 CCD 来说,其精度可达 $7\mu\text{m}$,而对 2048 位的 CCD 来说则为 $14\mu\text{m}$ 。平行光源的准直度要十分理想是有一定困难的,如一味追求会大大增加成本。实际使用中是通过计算机处理,对测量结果进行修正,使测量结果更接近于实际值。

该尺寸测量仪主要技术指标为:①测量范围 2~30mm;②采样速率 200~2000 次/s;③测量精度 $\pm 7\mu\text{m}$;④输出显示 6 位数码显示;⑤连续工作时间 $\geq 8\text{h}$;⑥使用温度 0~45℃;⑦使用寿命 $\geq 10000\text{h}$ (除光源外)。

三、光纤传感器

光纤传感器是利用被测量对光纤内传输的光进行调制,使传输光的某一特性如强度、相位、频率或偏振状态等发生改变,这种被调制的光信号经光电转换器变成电信号以后,可以用各种仪表测量其大小。在光纤传感器中光源、光的传输、光电转换和电信号处理是四个基本要素。

光纤传感器按照光纤的使用方式可分为功能性传感器和非功能性传感器。功能性传感器是利用光纤本身的特性随被测量而发生变化。而非功能性传感器是利用其他敏感元件来感受被测量的变化,光纤仅作为光的传输介质,有时也称为传光型传感器或混合型传感器。目前应用较多的是非功能性传感器。

光纤传感器有一系列传统传感器无可比拟的优点,如灵敏度高,响应速度快,抗电磁干扰,耐腐蚀,电绝缘性好,防爆防燃,可柔性挠屈,适于远距离传输,便于与计算机联接以及与光纤传输系统组成遥测网等,从原理上讲光纤传感器可以检测几乎各种物理量,如压力、温度、流量、速度、加速度、位移、转动、电压、电流、磁场、应变及化学量、生物量等。是一种应用很广泛的传感器。

图 4.7.16 所示为光纤温度传感器结构图。在光纤通路中,把敏感元件薄片(如半导体磷化镓 GaP)以“夹层”方式插入其中,并用不锈钢固定,使光纤与半导体成为一体,测温光纤涂有耐热性涂层。

光纤温度传感器是利用半导体敏感元件的透射光强度与温度之间的关系制成的。

以半导体 GaP 来说明传感器的工作机理。当相当于半导体禁带宽度(E_g)的光能($h\nu$)照射到半导体上时,半导体产生本征吸收,此时光波波长 $\lambda_0 = hc/E_g$, h 为普朗克常数, c 为光速。半导体对波长较 λ_0 短的光吸收急剧增加,直至最后光几乎不能透过半导体。与此相反,对波长较 λ_0 长的光,半导体几乎变成透明状态。半导体的禁带宽度 E_g 随温度而

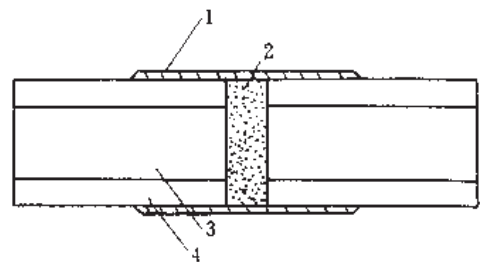


图 4.7.16 光纤温度传感器的构造
1—不锈钢管; 2—敏感元件; 3—纤芯; 4—包层

变，这是由晶格热膨胀和热振动等因素而引起的，因此可利用半导体透射光谱的变化制成光纤温度传感器。

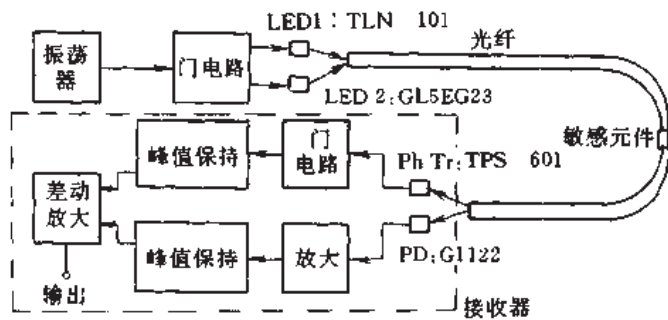


图 4.7.17 用二波长测量法的方框图

管。在光纤和敏感元件 GaP 中传输的近红外光，全部由光电三极管 TPS601 接收，并作光电转换，从 LED2 发出的光在光纤中传输时被 GaP 吸收的程度与温度有关，由光电二极管 G1122 接收透射光。光电三极管的输出由电路进行变换，截掉可见光信号成分，再由峰值保持电路变成直流，输入差分放大器；另一方面，光电二极管对红外光不灵敏，只把可见光成分变成光电流并放大，再由峰值保持电路变成直流，输入差分放大器。差分放大器输出两者之差。

光纤温度传感器的测量电路原理框图如图 4.7.17 所示。此传感器配备了两种不同波长的光源，一个光源的波长比半导体本征吸收限波长长，它作为参比光源；另一个光源发射光谱的峰值在半导体本征吸收限波长附近，它作为测量光源，然后用两者透射光量之差测出温度。

振荡器是接成自激振荡状态的时基电路，振荡信号由门电路分成两路，交替点亮和熄灭 LED1（参比光源）与 LED2（测量光源）两个发光二极管，LED1 使用近红外发光二极管，而 LED2 使用高亮度绿色发光二极管。

第八章 热电式传感器

热电式传感器是一种直接将温度变化转换为电量变化的传感器。热电偶是利用物理学中的塞贝克效应制成的热电式温度传感器。它结构简单,仅由两根不同的导体材料焊接或绞接而成,精确度和灵敏度高、稳定性及复现性较好,可测量4~3070K的温度范围,因此热电偶传感器在工业生产及科学研究中被广泛应用于温度测量。

第一节 热 电 偶

一、热电偶的工作原理

1. 热电效应

将两种不同材料的导体A、B连接起来,组成一个闭合回路,如图4.8.1所示。当A、B相接的两个接点温度不同时,则在回路中产生一个电动势。这个现象称为塞贝克效应式热电效应,这一电动势称为热电势。

将A、B两导体的组合称为热电偶;导体A和B称为热电极;两个接点中一端称为测量端,又称工作端或热端,如 t 端;另一端称为参考端,又称自由端或冷端,如 t_0 端。

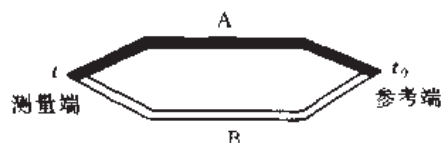


图 4.8.1 热电偶

热电偶的热电势由接触电势与温差电势两部分组成。接触电势是由于两种导体的自由电子密度不同而在接触处作扩散运动形成的电势,其大小取决于两种导体的性质和接触点的温度。温差电势是由于同一导体两端电子的动能不同而产生迁移运动形成的电势,其大小取决于导体的性质和两端的温差。

热电偶的热电势可用下式表示:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) + E_B(t, t_0) - E_A(t, t_0)$$

式中 $E_{AB}(t), E_{AB}(t_0)$ ——接点温度为 t 和 t_0 时的接触电势;

$E_A(t, t_0), E_B(t, t_0)$ ——导体A和B的温差电势。

一般情况下,热电偶的接触电势远大于温差电势,在两个热电极中,电子密度大的导体A总是正极,而电子密度小的导体B总是负极。

对于确定的材料A和B,上式可简写成:

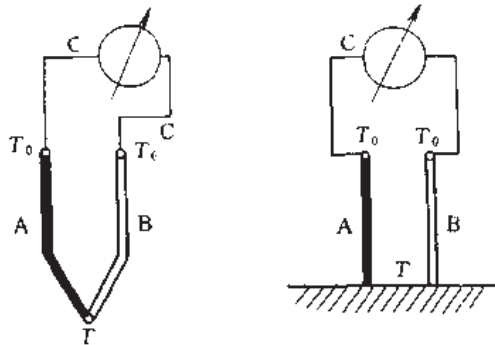
$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - f(t_0)$$

由上式可知,如果参考端温度 t_0 保持恒定,热电偶的热电势将是测量端温度 t 的单一函数。

2. 热电偶的基本定律

在实际温度测量中,热电偶可连接成不同的测量形式,主要是基于它的四个定律。

(1) 均质导体定律 由一种均质导体组成的闭合回路,不论其截面和长度如何,导体各处温度分布如何,均不产生热电势。



(a) 接入导体C的热电偶回路 (b) 测量金属壁面的温度

图 4.8.2 热电偶接入中间导体

(2) 中间导体定律 在热电偶回路中接入第三种材料的导体,只要其两端温度相同,它的引入不会影响热电偶回路的总热电势。

根据这个定律,热电偶回路可接入各种仪表、连接导线,也允许采用任意的焊接方法来焊制热电偶,还可以采用开路热电偶对液态金属和金属壁面进行温度测量。如图4.8.2所示。

(3) 中间温度定律 热电偶在两接点温度为 t 和 t_0 时的热电势,等于该热电偶在接点温度为 t, t_n 和 t_n, t_0 时的热电势代数和,即:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, t_0)$$

各种热电偶的分度表是依据参考端温度为 0℃而制成的。在实际使用分度表时，可根据上式求出参考端为任意温度 t_0 时的热电偶热电势，即：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_0, 0)$$

(4) 标准电极定律 如果两种导体分别与第三种导体组成热电偶的热电势已知，则由这两种导体组合成热电偶的热电势就可知，即：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AL}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$$

在热电偶的选配工作中，只要知道有关热电极与标准电极配对的热电势，就可用上式求出任何两种热电极配对成热电偶的热电势。实际运用中，一般用铂电极作为标准电极。

二、热电偶种类结构及选用

1. 热电偶种类

从理论上讲，任意两种不同性质的导体都可配置成热电偶，但实际并非如此。组成热电偶时还要从实用的角度考虑灵敏度、精确度、线性度、重现性、可靠性和稳定性（热电性能、物理、化学性能）等条件。

适用于制作热电偶的材料很多，常用的就有 40~50 种。我国根据国际电工委员会（IEC）制定的统一标准，定型生产标准化热电偶。常用标准化热电偶技术数据见表 4.8.1。

标准化热电偶有统一的分度表，可满足中、低、高温的测量要求，但在某些超高温、高真空和有核辐射等特殊场合中，不能满足特殊测温需要。有些非标准化热电偶常用于这些测温环境，它们一般尚无统一公认的分度表，如钨铼系热电偶，最高测温可达 3000℃；铱铑系热电偶，可用在真空中测 2000℃左右的温度；镍铬-金铁热电偶，可在 2~273K 温度范围内使用；铂铑₅-铂铑_{0.1}热电偶适合于测原子反应堆中的气气温度等。

表 4.8.1 标准化热电偶的技术数据

热电偶名称	分度号 ^①	代 号	热电极材料			电阻率 (20℃) /(Ω·mm ² /m)
			极性	识 别	化 学 成 分	
铂铑 ₁₀ -铂	S (LB-3)	S (WRP)	正	较硬	90% Pt, 10% Rh	0.24
			负	较软	100% Pt	0.16
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B (LL-2)	B (WRR)	正	较硬	70% Pt, 30% Rh	0.245
			负	稍软	94% Pt, 6% Rh	0.215
镍铬-镍硅	K (EU-2)	K (WRN)	正	不亲磁	9% ~ 10% Cr, 0.4% Si, 其余 Ni	0.68
			负	稍亲磁	2.5% ~ 3% Si, Cr≤0.6%, 其余 Ni	0.25 ~ 0.33
镍铬-考铜	EA-2	WRK	正	色较暗	9% ~ 10% Cr, 0.4% Si, 其余 Ni	0.68
			负	银白色	56% Cu, 44% Ni	0.47
铜-康铜	T (CK)	T (WRC)	正	红色	100% Cu	0.017
			负	银白色	60% Cu, 40% Ni	0.49

热电偶名称	分度号 ^①	代 号	$E(100, 0)$ /mV	测温范围/℃		允许误差	
				长期 ^②	短期	温度/℃	允许误差/℃
铂铑 ₁₀ -铂	S (LB-3)	S (WRP)	0.645	0 ~ 1300	0 ~ 1600	≤600 > 600	±1.5 (Ⅱ级) ±0.25% t
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B (LL-2)	B (WRR)	0.033	0 ~ 1600	0 ~ 1800	≤800 > 800	±4 (Ⅲ级) ±0.5% t
镍铬-镍硅	K (EU-2)	K (WRN)	4.095	-200 ~ 1000	-200 ~ 1300	≤400 > 400	±3.0 (Ⅲ级) ±0.75% t
镍铬-考铜	EA-2	WRK	6.95	-50 ~ 600	-50 ~ 800	≤300 > 300	±3.0 ±1% t
铜-康铜	T (CK)	T (WRC)	4.28	-200 ~ 200	-200 ~ 400	(-200 ~ -50) (-50 ~ 300)	(±1.5% t) (±0.75% t)

① S、B、K、T 为我国已实施的新的分度号，它们与国际电工委员会（IEC）的标准一致，而括号内为我国原来的分度号及代号。

② 长期或短期使用温度上限与热偶丝直径有关。

2. 热电偶的结构

(1) 普通型热电偶 常见的工业用热电偶结构如图 4.8.3 所示。它由四大部分组成，即热电极、绝缘套管、保护套管以及接线盒。这类热电偶常被用于测量气体、蒸气、液体等介质的温度。

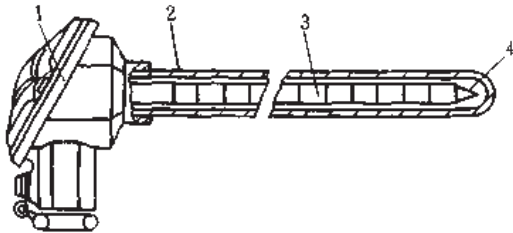


图 4.8.3 普通热电偶结构图
1—接线盒；2—保护管；3—绝缘套管；4—热电极



图 4.8.4 铠装热电偶

(2) 铠装热电偶 铠装热电偶是由热电极、绝缘材料和金属套管组合加工而成的组合体，其结构如图 4.8.4 所示。铠装热电偶在制作工艺上是拉制成型的，因此，它可以做得很长、很细。一般外径 0.25~12mm，长度依需要而定。它的特点是热惯性小，柔性好，耐高压，抗振性能好，适用于测量狭小、结构复杂的对象中的温度。

热电偶还可根据特殊测量需要做成其他的结构形状，如薄膜热电偶、表面热电偶、开路热电偶等。

3. 热电偶的选用

热电偶的正确选用主要应考虑其使用温度范围及使用环境，才能保证测温精度及寿命。表 4.8.2 列出了几种主要热电偶的使用特性。

表 4.8.2 热电偶使用特性

名 称	测温范围/℃	使用气氛	特 点
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	0~1800	氧化、真空或中性	精确度高，稳定性及复现性好（中性气氛中欠稳定），高温下空气中不怕氧化。但易受金属及非金属蒸气（还原性气氛）等的污染变质，热电势小，线性差，价贵
铂铑 ₁₀ -铂	0~1600	氧化、真空或中性	精确度高，稳定性及复现性好（中性气氛中欠稳定），高温下空气中使用不怕氧化。但易受金属及非金属蒸气（还原性气氛）等的污染变质，高温下铑易升华，污染铂极，热电势较小，线性差，价贵
镍铬-镍硅 （镍铬-镍铝）	-200~1300	500℃以下各种气氛； 500℃以上用于氧化及 中性气氛	热电势大，线性好，耐腐蚀，价贱，热导率低。但高温下发脆，真钨中铬易挥发，含碳气氛中先渗碳，不完全氧化气氛中铬先氧化，对应力敏感等
镍铬-考铜	0~800	同镍铬-镍硅	热电势最大，线性好，价贱，测温范围小，其余同镍铬-镍硅
铜-康铜	-200~400	任何气氛	0~200℃范围内精确度最高，灵敏度大，稳定性好，价贱，任何气氛均可使用，低温测量常用之。但高温下发脆，铜具有高的热导率

工业用热电偶，当温度在 1000℃ 以下时，多用金属保护套管，在 1000℃ 以上时，多用陶瓷保护套管。保护套管选择除考虑使用温度因素外，还要考虑气密性、绝缘性、耐腐蚀性、导热性和使用环境等。

三、热电偶冷端温度补偿

由热电偶测温原理可知，为保持热电偶的热电势是被测温度的单值函数，必须使热电偶冷端温度保持恒定。另外，热电偶的标准分度是指冷端处于 0℃ 时的热电势值。为了使实际测温时与标准分度状态一致，要求冷端保持在 0℃，不然将会产生误差。

在工业上使用时，很难保持冷端温度在 0℃，因此，通常的解决办法是进行冷端温度补偿。冷端温度补偿包含两方面内容：延伸热电偶的冷端，保持冷端温度稳定；冷端温度不为 0℃ 时的热电势校正（大多数与热电

偶配套使用的测温仪表内部已考虑这部分热电势校正)。

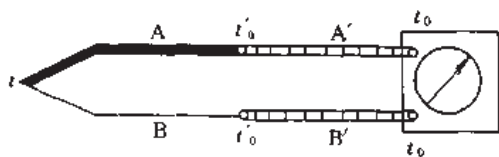


图 4.8.5 补偿导线在测温回路中的连接
A、B—热电偶电极；A'、B'—补偿导线；
 t_0' —热电偶原冷端温度； t_0 —新冷端温度

1. 补偿导线法

由于热电偶的工作端与冷端离得很近，冷端温度较高且波动较大，如用很长的热电偶，使冷端远离工作端且处于温度比较稳定的地方，显然是不经济的。因此，一般用廉价导线（称补偿导线）将热电偶冷端延伸出来（如图 4.8.5）并与测量电路相接。为使接上补偿导线后不影响热电偶热势与被测量温度的单值函数关系，要求补偿导线在一定温度范围内（0~100℃）必须与热电偶的热电极是有相同的热电性能。表 4.8.3 列出了几种常用补偿导线。

表 4.8.3 补偿导线合金丝和绝缘层颜色

补偿导线型号	配用热电偶的分度号	补偿导线合金丝		补偿导线颜色	
		正 极	负 极	正 极	负 极
SC	S (铂铑 ₁₀ -铂)	SPC (铜)	SNC (铜镍)	红	绿
KC	K (镍铬-镍硅)	KPC (铜)	KNC (铜镍)	红	蓝
KX	K (镍铬-镍硅)	KPX (镍铬)	KNX (镍硅)	红	黑
EX	E (镍铬-铜镍)	EPX (镍铬)	ENX (铜镍)	红	棕
JX	J (铁-铜镍)	JPX (铁)	JNX (铜镍)	红	紫
TX	T (铜-铜镍)	TPX (铜)	TNX (铜镍)	红	白

使用时切忌接错极性，必须注意电极的颜色。另外要注意热电偶和补偿导线的两个接点保持同样温度，两者配套使用。

2. 冰点槽法

将热电偶冷端置于 0℃ 的恒温器内，使实际工作与分度状态达到一致。直接测热电势查分度表即可得知被测温度。此法适用于实验室。

3. 计算修正法

当热电偶冷端不是 0℃ 而是恒定在某一常温 t_0 时，热电偶中测得的热电势值为 $E(t, t_0)$ ，根据中间温度定律，有：

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$$

式中 $E(t_0, 0)$ 为冷端不为 0℃ 时的热电势校正值。根据上式计算出 $E(t, 0)$ 值，查分度表便可得被测温度 t 。

4. 补偿电桥法

用图 4.8.6 所示不平衡电桥产生的电势来补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化值。 r_{Cu} 与热电偶冷端同处于 t_0 。常见补偿温度点有两种设计：20℃ 和 0℃，即电桥是在补偿温度点上平衡。

如配动圈表使用应考虑热电势校正，即将仪表的机械零点调到补偿温度点上。

在上述的四种温度补偿方法中，补偿导线是最基本的，它常被单独或与其他几种方法一起使用。在实际测温线路中，只要补偿导线冷端温度不为 0℃，就要注意进行热电势校正。

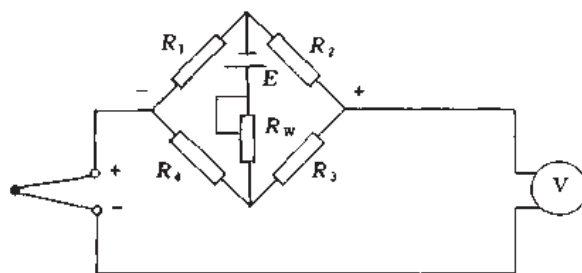


图 4.8.6 电桥补偿法原理图

第二节 热电偶实用测温线路

热电偶基本测温线路由热电偶、补偿导线、连接导线及测量仪表组成。实际测量中，测温对象往往是各种各样的，譬如需要测量某点温度，测两处温度差，多个测温点共用一台测量仪表等，应根据不同的要求选择准确、方便的测量线路。

一、单点温度测量线路

单点温度测量线路如图 4.8.7 所示，(a) 为与动圈表及冷端补偿电桥配套使用的线路，(b) 为与自动电子电位差计配套使用的线路。

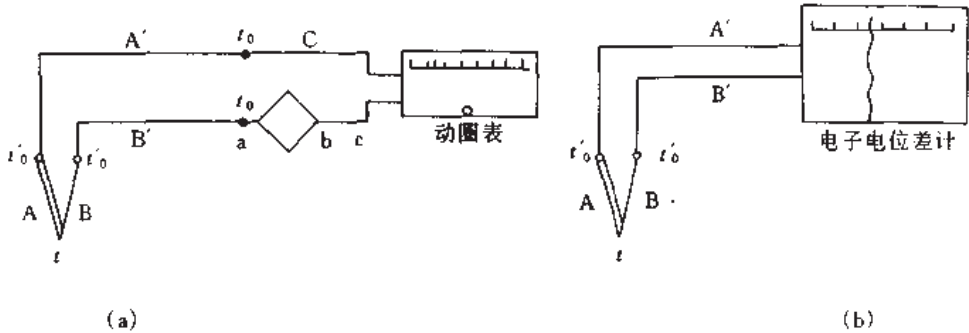


图 4.8.7 热电偶测温典型线路

二、多点温度测量线路

多个热电偶共用一台测量仪表，它们是通过专用的切换开关来进行多点测量的，如图 4.8.8 所示。

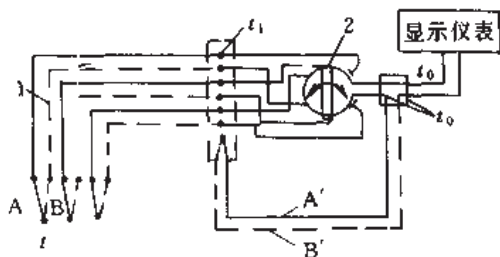


图 4.8.8 多点测温线路
1—补偿导线；2—转换开关

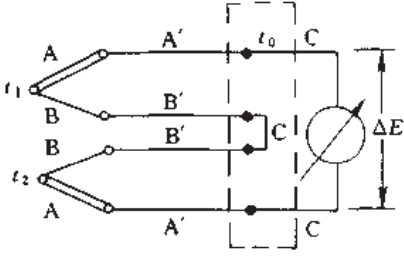


图 4.8.9 热电偶反向串联测温差

需要注意的是多点测温用热电偶必须同型号。

三、温差测量线路

温差测量线路如图 4.8.9 所示。它是将同型号的热电偶反向串联，要选用热电势与温度呈线性关系的热电偶，如镍铬-镍硅热电偶。

第三节 热电偶的校验

热电偶在经过一段时间使用后，热端受氧化、腐蚀介质作用 and 高温下热电极材料再结晶，使热电特性发生变化，从而使测量温差越来越大。为了使温度测量保证一定的精度，热电偶必须定期地进行校验。如其误差超过规定范围，需更换热电偶或将原热电偶热端去除一段，重新焊接处理。新焊制的热电偶，使用前必须重新进行校验。

检定温度在 300~1200℃ 的热电偶校验系统如图 4.8.10 所示。检验装置由管式炉、冰点槽、切换开关、电位差计、标准热电偶等组成。

表 4.8.4 常用热电偶校验温度点

分度号	热电偶材料	校验温度点/℃
S	铂铑 ₁₀ -铂	600、800、1000、1200
K	镍铬-镍硅	400、600、800、1000
E	镍铬-康铜	300、600、900

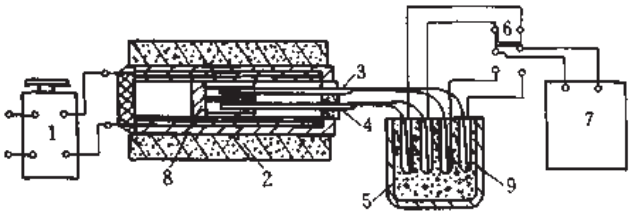


图 4.8.10 热电偶校验装置示意图

1—调压变压器；2—管式电炉；3—标准热电偶；4—被校热电偶；
5—冰点槽；6—切换开关；7—直流电位差计；8—镍块；9—试管

校验时，把被校热电偶与标准铂铑₁₀-铂热电偶（标准热电偶的精度等级根据被校热电偶的精度等级要求选用）的热端放到恒温区中测其温度。根据国家规定的技术条件，各种热电偶必须考虑只有在表 4.8.4 规定的温度点进行校验。每一个校验点温度的读数不得少于 4 次，然后分别取标准热电偶和被校热电偶的热电势读数平均值，最后计算出被校热电偶在各温度点上的误差。

第九章 压电式传感器

压电式传感器是一种典型的有源（发电型）传感器。它是以某些电介质受力后在其表面产生电荷的压电效应为转换原理的传感器。

压电式传感器具有频带宽、结构简单、灵敏度高、工作可靠等优点，适用于动态测量。被测量对象通常是力、振动、脉动压力、加速度等。

第一节 压电效应及压电材料

一、压电效应

某些电介质在受到一定方向外力作用时产生几何变形，其分子内部离子重新排列而极化，在它的某两个表面上便产生符号相反的电荷，当外力去除后，又恢复到不带电状态，上述现象称为压电效应。相反，如对电介质在极化方向上施加一交变电场，这些电介质将产生机械变形，这种现象称为逆压电效应（电致伸缩效应）。

二、压电材料

用于压电式传感器中的压电元件的材料一般有两类，一类是压电晶体，如石英晶体等，另一类是经过极化处理的压电陶瓷，如钛酸钡、锆钛酸铅等。表 4.9.1 列出了常用压电材料性能参数。

表 4.9.1 常用压电材料性能

性 能 \ 压电材料	石 英	钛酸钡	锆钛酸铅 PZT-4	锆钛酸铅 PZT-5	锆钛酸铅 PZT-8
压电常数	$d_{11} = 2.31$ $d_{14} = 0.73$	$d_{15} = 260$ $d_{31} = -78$ $d_{33} = 190$	$d_{15} \approx 410$ $d_{31} = -100$ $d_{33} = 200$	$d_{15} \approx 670$ $d_{31} = -185$ $d_{33} = 415$	$d_{15} = 410$ $d_{31} = -90$ $d_{33} = 200$
相对介电常数/ ϵ_r	4.5	1200	1050	2100	1000
居里点温度/ $^{\circ}\text{C}$	573	115	310	260	300
密度/ (10^3 kg/m^3)	2.65	5.5	7.45	7.5	7.45
弹性模量/ (10^9 N/m^2)	80	110	83.3	117	123
机械品质因素	$10^5 \sim 10^6$		≥ 500	80	≥ 800
最大完全应力/ (10^6 N/m^2)	95 ~ 100	80	76	76	83
体积电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	$> 10^{12}$	$10^{10} (25^{\circ}\text{C})$	$> 10^{10}$	$10^{11} (25^{\circ}\text{C})$	
最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	550	80	250	250	
最高允许温度/ $\%$	100	100	100	100	

第二节 压电式传感器的应用

一、压电式测力传感器

图 4.9.1 所示为压电式测力传感器的结构图，它可用于机床动态切削刀的测量。图中的压电元件由两个石英晶片并联组成；上盖为传力元件，其变形壁的厚度由测力范围决定；绝缘套用聚四氟乙烯材料做成，起绝缘和定位作用；石英晶片间用金属电极连接，插芯用聚四氟乙烯包裹，以便于插头绝缘，插芯与插头构成两个输出电极。传感器安装时，要保持干燥、清洁，要保证 $10^3 \Omega$ 的高绝缘要求。此类传感器的性能指标为：①测力范围 0 ~ 5000N；②最小分辨率 0.001N；③绝缘电阻 $2 \times 10^4 \Omega$ ；④固有频率 50 ~ 60kHz；⑤电荷灵敏度 3.3 ~ 4.0pC/N；⑥非线性温差 $< \pm 1\%$ ；⑦重复性温差 $< 1\%$ 。

二、压电式加速度传感器

图 4.9.2 所示为压电式加速度传感器的结构原理图。压电元件一般由两块压电片（石英晶片或压电陶瓷片）组成，两压电片并联，中间夹一金属薄片，一根引线焊接在金属薄片上，另一根直接与传感器基底相连。质量块放置在压电片的顶端，弹簧对压电元件施加预压缩载荷，减小非线性误差。测量时，将传感器基底与试件固定在一起，传感器向上运动，质量块产生的惯性力使压电元件的压应力增加；反之，当传感器向下运动