

在测控系统中,传感器处于研究对象与测试系统的接口位置,是测控系统的第一个环节。所有科学研究与自动化生产过程要获取的信息,都要通过传感器获得,并通过它转换为容易传输与处理的电信号。因此,传感器是感知、获取与检测信息的窗口,在测控系统中的作用和地位十分重要。

### 3.1 传感器概述

传感器技术所涉及的知识领域非常广泛,它们的共性是利用物理定律和物质的物理、化学或生物特性,将非电量转换成电量。下面对传感器的定义、分类与基本特性分别进行介绍。

#### 3.1.1 传感器的定义与分类

测控系统第一个环节是信号的感知,即将被测量或被观察的量通过一个传感器或敏感元件转换为一个电的、液压的、气动的或其他形式的物理输出量,完成这种转换的装置称为传感器或敏感元件。传感器和敏感元件是密切相关的两个概念。传感器是指“能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”,敏感元件是指“传感器中能直接感受或响应被测量的部分”。本章重点在于介绍信号感知技术,因此不再严格区分,将二者统称为传感器。

传感器位于测控系统的输入端,一般由敏感元件、转换元件和信号调理电路等部分组成,如图 3-1 所示。



图 3-1 传感器组成框图

有些传感器的敏感元件和转换元件是合二为一的,它们将被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节,如半导体气体传感器、温度传感器。信号调理电路包括电桥、放大、滤波等环节,当传感器输出为 4~20mA 的标准信号时,这种设备又称为变送器。

由于被测物理量的内容广泛,传感器的工作原理和结构种类繁多,因此传感器有许多种分类方式。表 3-1 介绍了几种主要的分类。

表 3-1 传感器的分类

分类方式	传感器种类	说明
按输入量分类	位移、压力、温度、流量、湿度、速度、气体等传感器	以被测物理量命名,包括机械量、热工量、光学量、化学量、物理参量等
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式、光电式等	以传感器对信号转换的作用原理命名
按结构分类	结构型传感器	敏感元件的结构在被测量作用下发生形变
	物性型传感器	敏感元件的固有性质在被测量作用下发生变化,包括物理性质、化学性质和生物效应等
按输出信号分类	模拟式传感器、数字式传感器	输出分别为模拟量和数字量
	电参数型和电量型传感器	电参数型指中间参量为电阻、电容、电感、频率等,电量型指中间参量为电势或电荷
按能量关系分类	能量转换型传感器(自源型)	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型传感器(外源型)	传感器输出能量由外源供给,但受被测量的控制

随着智能高新技术的发展,作为感知技术的核心,传感器也在不断地进步。新型传感器将采用更先进的技术、材料和工艺,具有高精度、数字化、智能化、微型化和集成化等特点。

本章重点介绍一些在现代测控系统中广泛应用的新型传感器,包括热敏传感器、光敏传感器、超声波传感器、图像传感器、生物敏传感器和智能传感器等。

### 3.1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输入输出特性,一般分为静态特性和动态特性两大类。静态特性又称为“刻度特性”、“标准曲线”或者“校准曲线”,它是当被测对象处于静态,即输入为不随时间变化的恒定信号时,传感器输入与输出之间的关系。动态特性是指当输入量随时间变化时的输入输出关系。

#### 1. 静态特性

在标准工作条件下,可以由高精度输入量发生器产生输入量,用高精度测量仪器测定输出量,从而得到系统的静态特性曲线。实际的输入输出特性都存在一定的非线性,可用多项式代数方程来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中:  $y$ ——输出量;

$x$ ——输入量;

$a_0$ ——零点输出;

$a_1$ ——理论灵敏度;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项系数。

衡量传感器静态特性的主要指标有量程、分辨率、阈值、灵敏度、重复性、迟滞、线性度、精度和稳定性等。

#### 1) 量程

量程又称满度值,是指系统能够承受的最大输出值与最小输出值之差。如图 3-2 所示,实线表示的系统输出值在  $A$  与  $a_0$  之间,则该系统的量程  $y_{1FS}$  为  $A - a_0$ ,虚线表示的系统输出值在  $A$  与  $0$  之间,则该系统的量程  $y_{2FS}$  为  $A$ 。

## 2) 分辨率与阈值

分辨率是指传感器能够检测到的最小输入增量。对于输出为数字量的传感器,分辨率可以定义为一个量化单位或二分之一一个量化单位所对应的输入增量,如图 3-3 所示。使传感器产生输出变化的最小输入值称为传感器的阈值。

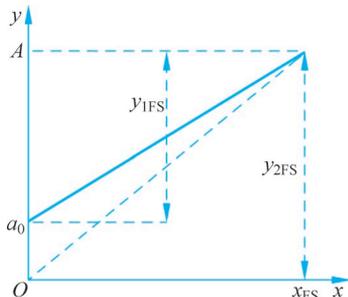


图 3-2 量程

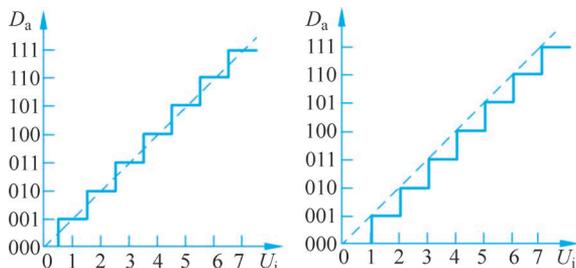


图 3-3 分辨率与阈值

## 3) 灵敏度

传感器输出变化量与输入变化量之比为静态灵敏度,其表达式为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

线性传感器的输入输出特性曲线斜率就是其灵敏度。灵敏度又称为增益或放大倍数。

## 4) 重复性

重复性表示传感器在同一工作条件下,被测输入量按同一方向作全程连续多次重复测量时,所得特性曲线的不一致程度。如图 3-4 所示,正向行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ ,反向行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个最大偏差中的较大者  $\Delta R_{\max}$ ,再用满量程输出的百分数表示,即

$$\delta_R = \frac{|\Delta R_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\%$$

## 5) 迟滞特性

迟滞指传感器输入沿正向行程和反向行程变化时输入输出特性曲线的不一致性,如图 3-5 所示。迟滞特性一般用正反行程间输出值的最大差值与传感器满量程输出值的百分比表示,即

$$\delta_H = \frac{|\Delta H_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\%$$

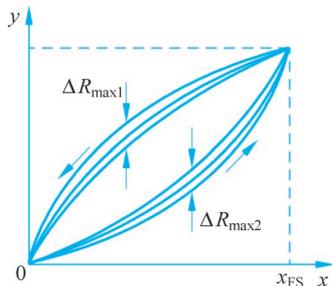


图 3-4 重复性

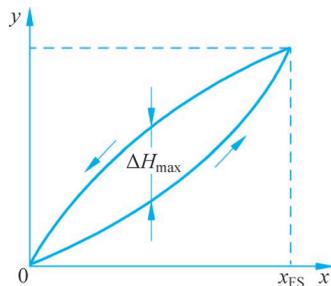


图 3-5 迟滞特性

### 6) 线性度

为了标定和数据处理方便,通常希望传感器的输入输出呈线性关系。在非线形误差不大的情况下,可以采用直线拟合的方法进行线性化。线性度是指传感器标准输入输出特性与拟合直线的不一致程度,也称为非线性误差。用标准特性曲线与拟合直线之间的最大偏差相对满量程的百分比表示:

$$\delta_L = \frac{|\Delta L_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\%$$

常用的直线拟合方法有理论拟合、端点连线拟合、最小二乘拟合等,分别如图 3-6(a)、(b)和(c)所示。相应地有理论线性度、端点连线线性度、最小二乘线性度等。

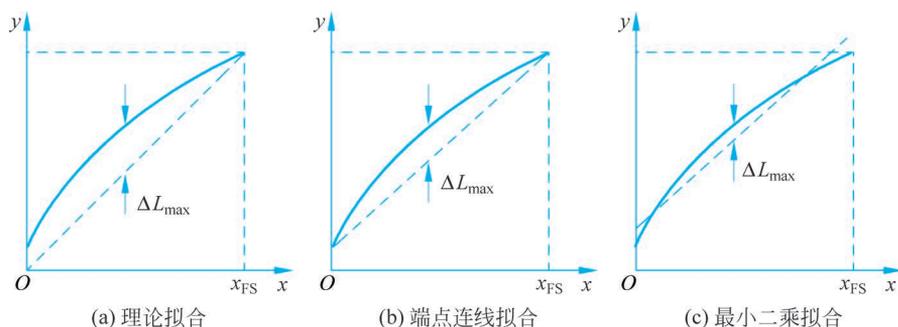


图 3-6 直线拟合方法

理论拟合是以传感器理论特性线为拟合直线,与测量值无关。其优点是简单、方便,但  $\Delta L_{\max}$  较大。

端点连线拟合是以传感器校准曲线两端点间的连线为拟合直线,这种方法简单、直观,但  $\Delta L_{\max}$  也较大。

最小二乘法的拟合精度较高,它首先假定拟合直线方程为

$$y = kx + b$$

校准测试点  $(x_i, y_i)$  同拟合直线上对应点的残差为

$$\Delta L_j = (b + kx_j) - y_j$$

然后按照最小二乘原则确定  $k$  和  $b$ ,使  $\sum_{j=1}^N (\Delta L_j)^2$  取得最小值。令  $\sum_{j=1}^N (\Delta L_j)^2$  对  $k$  和  $b$  的偏导数分别等于零,即可求得  $k$  和  $b$ :

$$k = \frac{N \sum_{j=1}^N x_j y_j - (\sum_{j=1}^N x_j) (\sum_{j=1}^N y_j)}{N \sum_{j=1}^N x_j^2 - (\sum_{j=1}^N x_j)^2}, \quad b = \frac{(\sum_{j=1}^N x_j^2) (\sum_{j=1}^N y_j) - (\sum_{j=1}^N x_j) (\sum_{j=1}^N x_j y_j)}{N \sum_{j=1}^N x_j^2 - (\sum_{j=1}^N x_j)^2}$$

### 7) 精度

精度是反映传感器系统误差和随机误差的综合误差指标。经常用重复性、迟滞和线性度三项的和或者方和根来表示:

$$\delta = \delta_R + \delta_H + \delta_L \quad \text{或者} \quad \delta = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_H^2 + \delta_L^2}$$

## 8) 稳定性

稳定性是指在规定工作条件下和规定时间内,传感器性能保持不变的能力。传感器在长时间工作时会发生零点漂移,温度变化也会引起传感器的零点和灵敏度发生漂移。稳定性误差可以用零点或灵敏度变化前后的绝对差值来表示,也可以表示成相对误差。时间漂移相对误差是单位时间内零点变化量相对于满量程输出的百分比;零点温度漂移是温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时零点变化值相对于满量程初始值的百分比;灵敏度温度漂移是温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时灵敏度变化值相对于灵敏度初始值的百分比。

## 2. 动态特性

动态特性反映传感器感知动态信号的能力。一般来说,传感器输出随时间变化的规律应与输入随时间变化的规律相近,否则输出量就不能反映输入量。

## 1) 动态特性的数学描述

为了分析传感器系统的动态特性,首先要建立数学模型。对于线性定常系统,它的数学模型可以用高阶常系数微分方程表示为

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t)$$

若 $t \leq 0$ 时, $x(t) = 0, y(t) = 0$ ,则线性系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

对于稳定的线性定常系统,它的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0}$$

频率响应函数反映的是系统处于稳态输出阶段的输入输出特性,传递函数则反映了激励所引起的系统固有的瞬态输出特性和对应该激励的稳态输出特性。

## 2) 典型环节的频率特性

## (1) 零阶传感器系统。

在零阶传感器系统的微分方程中,只有 $a_0$ 和 $b_0$ 两个系数不为零,即

$$a_0 y = b_0 x \quad \text{或} \quad y = \frac{b_0}{a_0} x = Kx$$

式中, $K$ 为静态灵敏度。

零阶系统的输入量无论随时间如何变化,其输出量幅值总是与输入量成确定的比例关系。在实际系统中,许多高阶系统在输入变化缓慢、频率不高的情况下,都可以近似地当作零阶系统来处理。

## (2) 一阶传感器系统。

一阶传感器系统的微分方程为

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

或写成

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

式中,  $\tau$  为时间常数 ( $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ ),  $K$  为静态灵敏度 ( $K = \frac{b_0}{a_0}$ )。

一阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{1 + \tau s}$$

一阶系统的频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K}{1 + j\omega\tau}$$

图 3-7 是两个典型的一阶系统, 其中(a)是由弹簧(弹性系数  $k$ )和阻尼器(阻尼系数  $b$ )组成的力学系统, 其输入输出关系为

$$x = ky + b \frac{dy}{dt}$$

令  $\tau = b/k$ ,  $K = 1/k$ , 则有

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

图 3-8(b)是由电容  $C$  和电阻  $R$  组成的电学系统, 请读者自己推导它的微分方程表达式。

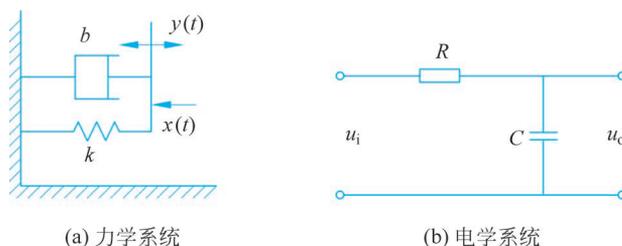


图 3-7 典型的一阶系统

(3) 二阶传感器系统。

二阶传感器系统的微分方程为

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$$

令  $K = \frac{b_0}{a_0}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ ,  $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ , 上式可以改写为

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_0} \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

式中,  $\omega_0$  为系统无阻尼固有角频率,  $\zeta$  为阻尼比系数,  $K$  为静态灵敏度。

图 3-8 所示为两个典型的二阶系统, 对于力学系统有

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = F$$

对于电学系统有

$$LC \frac{d^2 u_o}{dt^2} + RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_s, \quad u_s = \begin{cases} 0, & t \leq 0_- \\ u_i, & t \geq 0_+ \end{cases}$$

可以根据二阶系统的微分方程通式分别求出各自的无阻尼固有角频率和阻尼比系数。

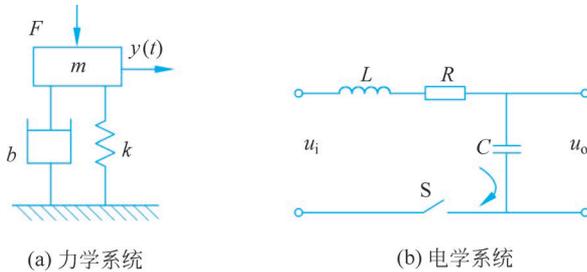


图 3-8 典型的二阶系统

### 3) 时域性能指标

通常在阶跃信号作用下测定传感器动态特性的时域性能指标。因为阶跃输入对于一个传感器系统来说是最严峻的工作状态,如果传感器能够满足阶跃输入的动态指标,那么在其它输入时的动态性能指标也自然满足。图 3-9(a)和(b)分别是一阶系统和二阶系统对单位阶跃信号的响应曲线。

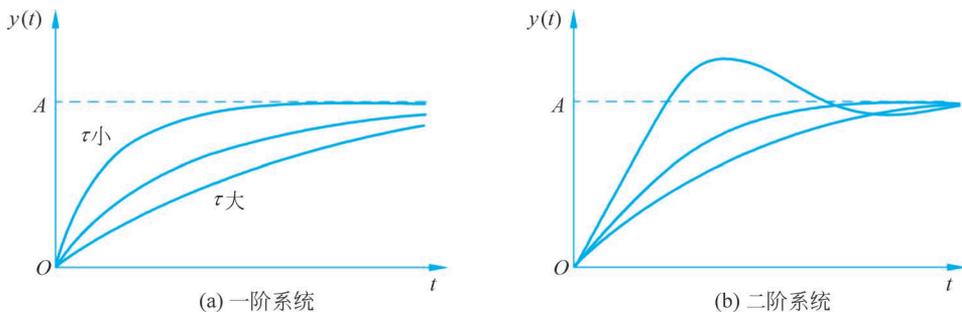


图 3-9 一阶系统和二阶系统对单位阶跃信号的响应曲线

传感器的时域性能指标主要有以下四种。

- (1) 时间常数  $\tau$ : 输出值上升到稳态值的 63% 时所需的时间。
- (2) 上升时间: 输出值从稳态值的 10% 上升到 90% 时所需的时间。
- (3) 响应时间: 输出值达到稳态值的 95% 或 98% 时所需的时间。
- (4) 最大超调量  $\sigma$ : 在二阶系统中, 如果输出量大于稳态值, 则有超调, 最大超调量定义为

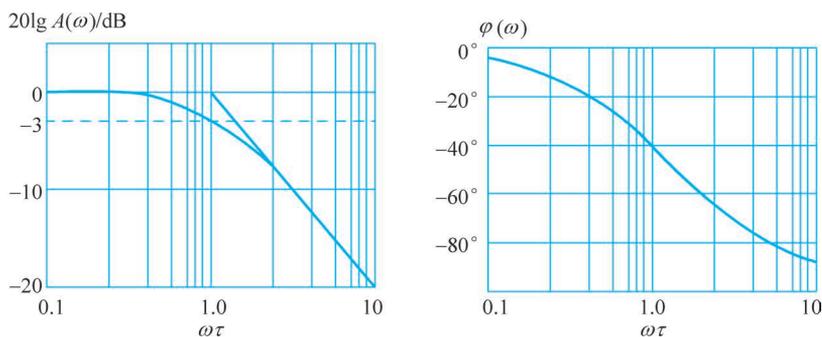
$$\sigma(t_p) = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

### 4) 频域性能指标

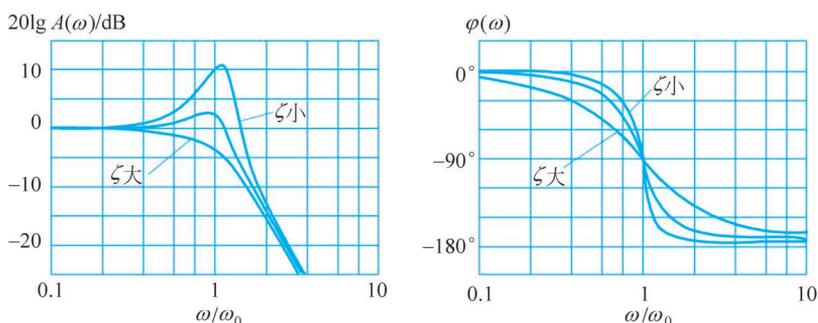
通常利用传感器系统对单位幅度正弦信号的响应曲线测定动态性能的频域指标。图 3-10(a)和(b)分别是一阶系统和二阶系统对单位正弦信号的响应曲线。

传感器的频域性能指标包括:

- (1) 通频带: 对数幅频特性曲线上幅值比从 0 衰减至 -3dB 时所对应的频率范围。



(a) 一阶系统幅频特性和相频特性



(b) 二阶系统幅频特性和相频特性

图 3-10 典型系统的频域性能指标

- (2) 工作频带：幅值误差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ 时所对应的频率范围。  
 (3) 相位误差：在工作频带范围内相角应小于 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 。

## 3.2 热敏传感器

热敏传感器是科学实验和生产活动中非常重要的一类传感器，它是将热量变化转换为电学量变化的装置，用于检测温度和热量。其中将温度变化转换为电阻变化的元件主要有热电阻、热敏电阻和高分子热敏电阻，将温度变化转换为电势的传感器主要有热电偶和 PN 结式传感器，将热辐射转换为电学量的器件有热电探测器、红外探测器等。本节主要介绍热电阻、热敏电阻和热电偶的工作原理、特性及应用。

利用感温材料，将热量变化引起的温度变化转换为敏感元件电阻变化的传感器主要包括金属热电阻和半导体热电阻两大类，前者简称热电阻，后者简称热敏电阻。阻值随温度升高而增加的属于正温度系数热敏电阻，阻值随温度升高而减小的属于负温度系数热敏电阻。

### 3.2.1 热电阻

大多数金属热电阻的阻值随温度升高而增大，其特性方程如下：

$$R_t = R_0 [1 + a(T - T_0)]$$

式中： $R_t$ ——被测温度  $T$  时热电阻的电阻值；

$R_0$ ——基准温度  $T_0$  时的电阻值；

$a$  ——热电阻的电阻温度系数( $1/^\circ\text{C}$ );

$T, T_0$  ——绝对温度,单位 K。

$a$  是有关温度的函数,在一定温度范围内可以近似看成一个常数。若  $a$  保持不变,金属热电阻的灵敏度  $S$  定义为

$$S = \frac{1}{R_0} \times \frac{dR_t}{dt} = \frac{1}{R_0} \times R_0 a = a$$

$a$  越大,  $S$  就越大,热电阻的热响应速度越快。

通常使用的金属热电阻有铂、铜和镍,由于铂具有很好的稳定性和测量精度,常常用于高精度温度测量和标准测温装置。表 3-2 列出了主要金属热电阻传感器的性能。

表 3-2 主要金属热电阻传感器的性能

材 料	铂	铜	镍
适用温度范围/ $^\circ\text{C}$	-200~600	-50~150	-100~300
0~100 $^\circ\text{C}$ 范围电阻温度系数平均值/ $(\times 10^{-3}/^\circ\text{C})$	3.92~3.98	4.25~4.28	6.21~6.34
化学稳定性	在氧化性介质中性能稳定,不宜在还原性介质中使用,尤其是高温下	超过 100 $^\circ\text{C}$ 易氧化	超过 180 $^\circ\text{C}$ 易氧化
温度特性	近于线性,性能稳定,精度高	近于线性	近于线性,性能一致性差,灵敏度高
应用	高精度测量,可作标准	适于低温、无水分、无侵蚀性介质	一般测量

另外,镍和铁的电阻温度系数比铂和铜高,电阻率也比较大,故可做成体积小、灵敏度高的电阻温度计,其缺点是易氧化,不易提纯,且电阻值与温度关系是非线性的,仅适用于测量 -50~100 $^\circ\text{C}$  范围内的温度。为了进行超低温测量,近年来一些新颖的热电阻相继出现。钨电阻适用于 -269~-258 $^\circ\text{C}$  温度范围,测量精度高,灵敏度高,是铂电阻的 10 倍,但重现性差;锰电阻适用于 -271~-210 $^\circ\text{C}$  温度范围,灵敏度高,但脆性高,易损坏;碳电阻适用于 -273~-268.5 $^\circ\text{C}$  温度范围,热容量小,灵敏度高,价格低廉,操作简便,但热稳定性较差。

在热电阻选型方面,应该主要考虑以下参数。

(1) 热电阻的类别、测温范围及允许误差。

(2) 常温绝缘电阻:热电阻常温绝缘电阻的试验电压为直流 10~100V,环境温度为 15~35 $^\circ\text{C}$ ,相对湿度不大于 80%,大气压力为 86~106kPa。铂热电阻的常温绝缘电阻值应不小于 100M $\Omega$ ,铜热电阻的常温绝缘电阻值应不小于 50M $\Omega$ 。

(3) 公称压力:指在室温情况下保护管不破裂所能承受的静态外压。允许工作压力不仅与保护管材质、直径、壁厚有关,还与其结构形式、安装方法、置入深度以及被测介质的种类、浓度、流速有关。

(4) 热响应时间:指在温度出现阶跃变化时,传感器的输出变化相当于该阶跃变化的 50%,所需要的时间称为热响应时间。

(5) 最小置入深度:感温元件长度应不小于其保护管外径的 8~10 倍。部分产品为适应安装条件的限制,长度不符合本项要求,测量精度相应受到影响。

(6) 尺寸规格:包括保护管外径、总长等。

- (7) 接线盒形式：分为防水式和防爆式等。  
 (8) 保护管材料、电气接口、防护等级、安装固定形式等。

### 3.2.2 热敏电阻

热敏电阻是一种半导体温度传感器,按温度特性分为负温度系数(NTC)热敏电阻、正温度系数(PTC)热敏电阻和在某一特定温度下电阻值会发生突变的临界温度(CTR)电阻器。在温度测量中,主要采用 NTC 型热敏电阻,其温度特性为

$$R_t = R_0 \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3-2-1)$$

式中:  $R_t$ ——被测温度  $T$  时热敏电阻值;

$R_0$ ——基准温度  $T_0$  时的热敏电阻值;

$B$ ——热敏电阻的特征常数;

$T, T_0$ ——绝对温度,单位 K。

若定义  $\frac{1}{R_t} \times \frac{dR_t}{dt}$  为热敏电阻温度系数  $a$ ,由式(3-2-1)有

$$a = \frac{1}{R_t} \times \frac{dR_t}{dt} = \frac{1}{R_t} \times R_0 \left[ \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times B \left( -\frac{1}{T^2} \right) = -\frac{B}{T^2}$$

可见,  $a$  随温度降低而迅速增大,因此这种测温电阻的灵敏度高,非常适合于测量微弱的温度变化、温差及温度场分布,其电阻-温度特性曲线如图 3-11 所示。

使用热敏电阻需要注意两个问题,一是自热效应,二是温度特性的非线性。

图 3-12 显示了 NTC 型热敏电阻的伏安特性,当电流很小时,不足以引起自身加热,阻值保持恒定,电压降与电流之间符合欧姆定律,图中  $Oa$  段为线性区。随着电流增加,功耗增大,产生自热,阻值随电流增加而减小,电压降增加速度逐渐减慢,出现非线性区  $ab$ 。当电流继续增大时,阻值随电流增加而减小的速度大于电压降增加的速度,于是出现负阻区  $bc$ 。当电流超过最大允许值时,热敏电阻会被烧坏。因此,当用热敏电阻进行测温、温控时,应使其工作在伏安特性的线性区。

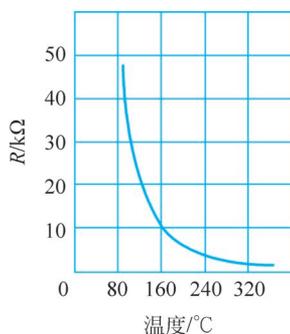


图 3-11 NTC 型热敏电阻温度特性

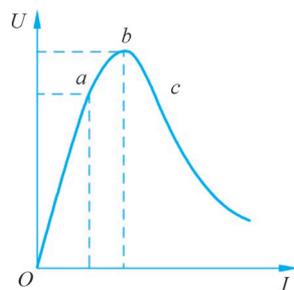


图 3-12 NTC 型热敏电阻伏安特性

热敏电阻值随温度变化呈指数规律,其非线性十分严重。为使测量系统的输入输出呈线性关系,可以采用串联或并联补偿电阻,利用电路中其他部件的非线性修正,以及通过计算机进行修正等方法。

在热敏电阻选型方面,应该主要考虑的参数有:产品的尺寸规格、阻值范围及允许偏差、电阻温度系数、工作温度、耗散系数、额定功率、热时间常数、 $B$  值等。其中耗散系数是物体消耗的电功与相应的温升值之比,在测量温度时,应注意防止热敏电阻由于加热造成的升温; $B$  值是电阻在两个温度之间变化的函数,反映了负温度系数热敏电阻器灵敏度的高低,其量纲为  $K$ 。 $B$  值的大小取决于热敏材料的性能。对于负温度系数热敏电阻器来说, $B$  值越大,温度系数越高。

### 3.2.3 热电偶

热电偶是一种结构简单、性能稳定、测温范围宽的热敏传感器,在冶金、热工仪表领域得到广泛应用,是目前检测温度的主要传感器之一,尤其是在检测  $1000^{\circ}\text{C}$  左右的高温时更有优势。

#### 1. 热电偶工作原理

如图 3-13 所示,将两种不同的导体两端相接,组成一个闭合回路。当两个接触点具有不同温度时,回路中便产生电流,这种物理现象称为塞贝克效应。热电偶回路中产生的热电势,是由不同导体接触产生的接触电势和导体两端温度不同产生的温差电势综合作用的结果。当温度  $T > T_0$  时,由导体  $A$ 、 $B$  组成的热电偶回路总热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)$$

$E_{AB}(T)$  为热端的热电势,  $E_{AB}(T_0)$  为冷端的热电势。只有当  $A$ 、 $B$  材料不同并且热电偶两端温度不同时,总热电势才不为零。

对于不同金属组成的热电偶,温度与热电势之间有着不同的函数关系。一般用实验数据来求这个函数关系。通常令  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ , 在不同的温度下精确测出回路总热电势,并将所测得的结果绘制成曲线或表格(称为热电偶分度表),以供使用者查阅。图 3-14 给出了几种热电偶的温度-热电势关系图。

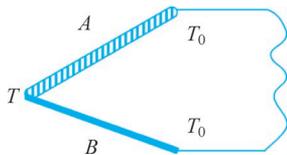


图 3-13 热电偶示意图

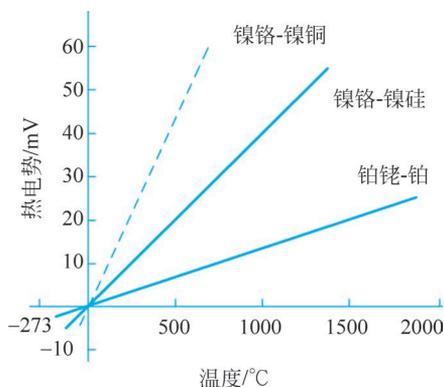


图 3-14 温度与热电势  $E$  的关系

#### 2. 热电偶基本定律

##### 1) 均质导体定律

两种均质导体组成的热电偶的热电势大小与电极的直径、长度及沿长度方向上的温度分布无关,只与热电极材料和温差有关。如果材质不均匀,当热电极上各处温度不同时,将产生附加热电势,造成无法估计的测量误差,因此热电极材料的均匀性是衡量热电偶质量的

重要指标之一。

### 2) 标准电极定律

若导体  $A$ 、 $B$  分别与第三种导体  $C$  组成热电偶,那么由导体  $A$ 、 $B$  组成的热电偶的热电势可以由标准电极定律来确定。标准电极定律指:如果将导体  $C$  (热电极,一般为纯铂丝) 作为标准电极(也称参考电极),并且已知标准电极与任意导体配对时的热电势,那么在相同节点温度  $(T, T_0)$  下,任意两导体  $A$ 、 $B$  组成的热电偶的热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (3-2-2)$$

该定律大大简化了热电偶的选配工作,只要获得有关热电极和标准铂电极配对的热电势,任意两种热电极组成的热电偶的热电势便可由式(3-2-2)求出。

### 3) 中间导体定律

在用热电偶测量温度时,必须在热电偶回路中接入导线和仪表。中间导体定律表明:在热电偶回路中,只要中间导体两端温度相同,对热电偶回路的总热电势没有影响。因此可以用导线将电压表接入热电偶回路,如图 3-15 所示。



图 3-15 热电偶测温电路

### 4) 中间温度定律

在热电偶回路中,当节点温度为  $(T, T_0)$  时,总热电势等于该热电偶在节点温度为  $(T, T_n)$  和  $(T_n, T_0)$  时相应的热电势的代数和,即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (3-2-3)$$

中间温度定律可用于热电偶的串联。在热电偶分度表中,只要列出参考温度为  $0^\circ\text{C}$  时的热电势-温度关系,参考温度不为  $0^\circ\text{C}$  的热电势可由式(3-2-3)求出。

## 3. 热电偶冷端温度补偿

通常热电偶测量的是一个热源的温度或两个热源的温度差,因此需要将冷端的温度保持恒定或采取一定的方法进行处理。热电偶的分度表是在冷端温度  $T_0 = 0^\circ\text{C}$  的条件下热电势与热端温度的关系。当热电偶的冷端温度不为  $0^\circ\text{C}$  时,可以采用下述方法进行补偿。

#### 1) $0^\circ\text{C}$ 恒温法

将热电偶的冷端保持在  $0^\circ\text{C}$  器皿中(如冰水混合物中),如图 3-16 所示。这种方法适用于实验室,它能够完全克服冷端温度误差。

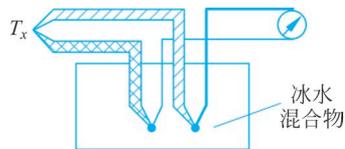


图 3-16  $0^\circ\text{C}$  恒温法

#### 2) 冷端恒温法

将热电偶的冷端置于一恒温器中,若恒定温度为  $T_0^\circ\text{C}$ ,则冷端误差为

$$\Delta = E(T, T_0) - E(T, 0) = -E(T_0, 0)$$

冷端误差是一个定值,只要在回路中加上相应的补偿电压,或调整指示器的起始位置,就可以达到完全补偿的目的。

## 3) 冷端补偿器法

工业上常采用冷端补偿器法,也称电桥补偿法。如图 3-17 所示,四臂电桥中有三个桥

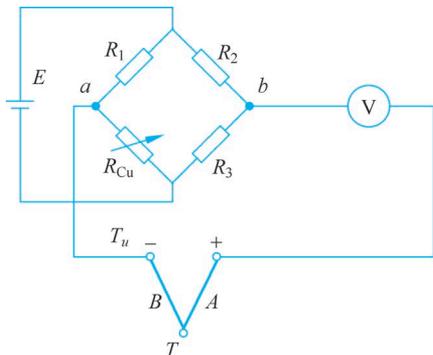


图 3-17 冷端补偿器法

臂电阻的温度系数为零,另一个桥臂采用铜电阻  $R_{Cu}$ ,它的阻值随温度变化。电桥的输出电压特性与配用的热电偶的热电特性相似。当  $T_u = 20^\circ\text{C}$  时,电桥平衡;当  $T_u \neq 20^\circ\text{C}$  时,电桥的输出将不为零。如果电桥的输出  $\Delta u$  满足

$$\Delta u = E_{AB}(T_u, 20)$$

回路总电势为

$$E_{AB}(T, T_u) + \Delta u = E_{AB}(T, 20)$$

若  $T_u$  超过  $20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta u$  与热电偶的热电势方向相同;若低于  $20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta u$  与热电偶的热电势方向相反,从而自动地得到补偿。

## 4) 补偿导线法

当热电偶冷端由于受热端温度影响,在较大范围内变化时,应先用补偿导线将冷端延长到温度比较稳定的环境中,然后再用其他方法进行补偿。这些补偿导线的热电特性与热电偶近似,但用相对廉价的材料制成。

## 5) 计算机智能补偿法

利用单片机或微型计算机,可以实现温度监测、控制、误差修正与冷端温度补偿的一体化、智能化。对于冷端温度恒定的情况,只要在热电势采样值上加上一个常数即可;对于冷端温度变化的情况,可以利用其他传感器实时测量冷端温度并送入微机系统,对热电势采样值进行实时修正。

## 4. 热电偶的主要参数

在选择热电偶产品时,应考虑的主要参数有:

- (1) 热电偶的类型、测温范围及允许误差。
- (2) 时间常数。
- (3) 最小置入深度。
- (4) 常温绝缘电阻及高温下的绝缘电阻。
- (5) 偶丝直径、材料,安装固定形式、尺寸,测量端结构形式等。

## 3.3 光敏传感器

光敏传感器是把光信号转换为电信号的传感器,按照工作原理可以分为光电效应传感器、红外热释电探测器、固态图像传感器、光纤传感器、色敏传感器、光栅传感器等。

光敏传感器具有可靠性高、抗干扰能力强、不受电磁辐射影响以及自身无电磁波辐射等优点。它们可以直接检测光信号,也可以间接测量温度、压力、速度、加速度、位移等。光敏传感器发展速度快,应用范围广。

### 3.3.1 光电效应传感器

光电效应传感器是利用光敏材料在光照射下,会产生光电子逸出、电导率发生变化或产生光生电动势等现象制成的光敏器件。这些因光照引起的材料电学特性改变的现象称为光电效应,分为外光电效应和内光电效应,内光电效应又包括光电导效应和光生伏特效应。与外光电效应相关的器件有光电管和光电倍增管,与光电导效应相关的器件是光敏电阻,与光生伏特效应相关的器件有光电池、光敏二极管、光敏三极管等。

#### 1. 外光电效应

在光照作用下,物体内部的电子从物体表面逸出的现象称为外光电效应,亦称光电子发射效应。

一般在金属内部存在着大量的自由电子,普通条件下,它们在金属内部作无规则的自由运动,不能离开金属表面。但当它们获取外界的能量且该能量大于电子逸出功时,便能离开物体表面。假设一个电子吸收一个光子的能量  $E$ ,一部分能量用于克服材料对电子的束缚(即表面逸出功  $A$ ),另一部分全部转化为电子的动能,根据能量守恒定律有

$$E = h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A \quad (3-3-1)$$

式中:  $h$ ——普朗克常数,  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;

$\nu$ ——入射光频率,  $\text{s}^{-1}$ ;

$m$ ——电子质量;

$v$ ——电子逸出速度;

$A$ ——物体的逸出功。

式(3-3-1)称为爱因斯坦光电效应方程式。由上式可知:

(1) 光电子逸出物体表面的必要条件是  $h\nu > A$ ,如果入射光子的能量小于阴极材料的表面逸出功,无论光强多大,都没有光电子产生。

(2) 在足够外加电压作用下,入射光频率不变时,单位时间内发射的光电子数与入射光强成正比。因为光越强,光子数越多,产生的光电子也相应增多。

(3) 对于外光电效应器件,只要光照射在器件阴极上,即使阳极电压为零,也会产生光电流,因为光电子逸出时具有初始动能。为使光电流为零,必须在阳极上加上反向截止电压,使外加电场对光电子所做的功等于光电子逸出时的动能。

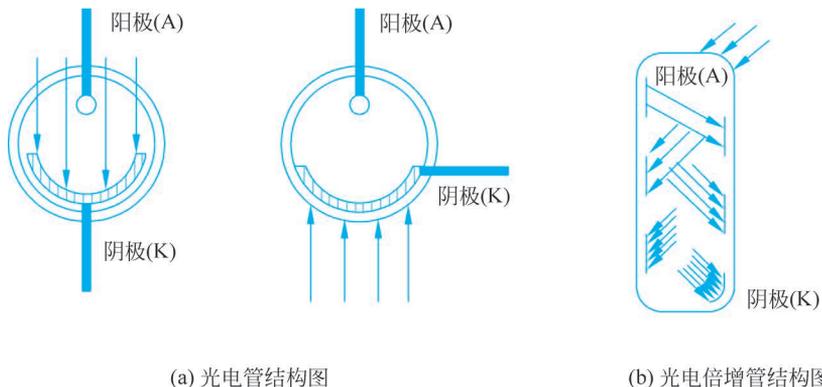
外光电效应器件有光电管和光电倍增管。

#### 1) 光电管

光电管主要有两种结构形式,如图 3-18(a)所示。它是在真空玻璃管内装入两个电极——光电阴极与光电阳极。光电管的阴极受到适当的光线照射后发射电子,这些电子在电压作用下被阳极吸引,形成光电流。除真空光电管外,还有充气光电管,它是在玻璃管内充入氩、氖等惰性气体。当光电子被阳极吸引时会对惰性气体进行轰击,从而产生更多的自由电子,提高了光电转换灵敏度。

#### 2) 光电倍增管

光电倍增管的结构如图 3-18(b)所示,在一个玻璃泡内除装有光电阴极和光电阳极外,还有若干个光电倍增极。倍增极上涂有在电子轰击下能发射更多电子的材料。前一级倍增



(a) 光电管结构图

(b) 光电倍增管结构图

图 3-18 外光电效应器件

极反射的电子恰好轰击后一级倍增极,每个倍增极之间依次增大加速电压。光电倍增管的灵敏度高,适合在微弱光下使用,但不能接受强光刺激,否则容易损坏。

光电倍增管(PMT)是光子技术器件中的一个重要产品,它是一种具有极高灵敏度和超快时间响应的光探测器件,可广泛应用于光子计数、极微弱光探测、化学发光、生物发光、极低能量射线探测等研究,以及分光光度计、旋光仪、色度计、照度计、尘埃计、浊度计、光密度计、热释光量仪、辐射量热计、扫描电镜、生化分析仪等仪器设备中。

在选用光电倍增管时需要考虑以下主要特性参数。

(1) 光谱响应:光电倍增管由阴极吸收入射光子的能量并将其转换为光电子,其转换效率(阴极灵敏度)随入射光的波长而变。阴极灵敏度与入射光波长之间的关系叫做光谱响应特性,波长单位是 nm,阴极辐射灵敏度单位是 mA/W 或 A/W。

(2) 光照灵敏度:阴极光照灵敏度,是指使用钨灯产生的 2856K 色温光测试的每单位通量入射光产生的阴极光电子电流。阳极光照灵敏度是每单位阴极上的入射光能量产生的阳极输出电流。

(3) 电流放大(增益):光阴极发射出来的光电子被电场加速后撞击到第一倍增极上将产生二次电子发射,这些二次发射的电子流又被加速撞击到下一个倍增极,连续地重复这一过程,直到最末倍增极的二次电子发射被阳极收集,这时光电倍增管阴极产生的很小的光电子电流即被放大成较大的阳极输出电流。一般的光电倍增管有 9~12 个倍增极。

(4) 阳极暗电流:光电倍增管在完全黑暗的环境下仍有微小电流输出。这个微小电流叫做阳极暗电流。它是决定光电倍增管对微弱光信号的检出能力的重要因素之一。

(5) 磁场影响:大多数光电倍增管会受到磁场的影响,磁场会使光电倍增管中的发射电子脱离预定轨道而造成增益损失。一般而言,从阴极到第一倍增极的距离越长,光电倍增管就越容易受到磁场的影响。

(6) 环境温度:降低光电倍增管的使用环境温度可以减少热电子发射,从而降低暗电流。另外,光电倍增管的灵敏度也会受到温度的影响。在一些应用中应当严格控制光电倍增管的环境温度。

(7) 滞后特性:由于二次电子偏离预定轨道和电极支撑架、玻壳等的静电荷影响,当工作电压或入射光发生变化后,光电倍增管会有一个几秒钟至几十秒钟的不稳定输出过程,在达到稳定状态之前,输出信号会出现一些微过脉冲或欠脉冲现象。滞后特性在分光光度测

试中应予以重视。

在使用光电倍增管时,还应特别注意以下几点:

- (1) 光电倍增管的工作电压可能造成电击,在仪器设计中应适当地设置保护装置。
- (2) 由于光电倍增管的封装尾管易受外力或振动而损伤,故应尽量保证其安全。特别是对带有过渡封装的合成石英外壳的光电倍增管,应特别注意外力的冲击和机械振动等影响。
- (3) 不要用手触光电倍增管,面板上的灰尘和手印会影响光信号的穿透率,受到污染的管基会产生低压漏光。光电倍增管受到污染后,可用酒精擦拭干净。
- (4) 当阳光或其他强光照射到光电倍增管时,会损伤管中的光阴极。所以光电倍增管存放时,不应暴露在强光中。
- (5) 玻璃管基(芯柱)光电倍增管比塑料管基更缺乏缓冲保护,所以对玻璃管基的管子应更加保护,例如,在管座上焊接分压电阻时,应将光电倍增管先插入管座中。
- (6) 在使用中需要冷却光电倍增管时,应经常将光电倍增管的相关部件也进行冷却。氦气会穿透石英管壳,从而使噪声值升高,因此,在使用和存放中避免将光电倍增管暴露在有氦气存在的环境中。

## 2. 光电导效应

光电导效应是指在光的照射下,材料的电阻率发生改变的现象。光照射到半导体材料上时,价带中的电子吸收光子能量后跃入导带,使材料中的电子-空穴对增加,电导率增大,导电性能增强。

光电导效应器件主要为光敏电阻以及由光敏电阻制成的光导管。光敏电阻是用具有光电导效应的光导材料制成的,为纯电阻元件,其阻值随光照增强而减小。光敏电阻具有灵敏度高、体积小、重量轻、光谱响应范围宽、机械强度高、耐冲击和振动、寿命长等优点。

光敏电阻符号及由光敏电阻制成的光导管结构如图 3-19 所示。当在两极间加上电压时,就会有电流流过。没有光照时测得的电流为暗电流,有光照时电流增大,增大的电流称为光电流,光电流随光强增大而增大。

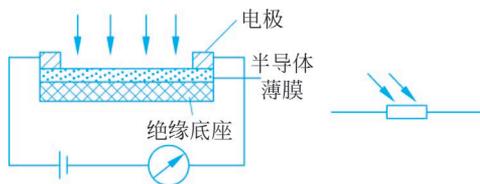


图 3-19 光导管结构及光敏电阻符号

光敏电阻的主要应用有照相机自动测光、室内光线控制、工业光控制、光控小夜灯、报警器、光控开关、光控电子玩具以及光电开关等。

制作光敏电阻的半导体材料有硫化镉、硫化铅、铋化钢等,不同材料做成的光敏电阻适用于光的不同波长范围(可见光、X 射线、红外线等)。

在选用光敏电阻器件时应考虑以下主要参数。

- (1) 亮电阻(一般为  $1\sim 100\text{k}\Omega$ ): 用  $400\sim 600\text{lx}$  光照射 2 小时后,在标准光源 A(色温  $2854\text{K}$ )下,用  $10\text{lx}$  光测量到的电阻值。
- (2) 暗电阻(一般为  $1\sim 100\text{M}\Omega$ ): 关闭  $10\text{lx}$  光照后第 10 秒的电阻值。
- (3) 最大电压: 在黑暗中可连续施加元件的最大电压。
- (4) 最大功率: 环境温度为  $25^\circ\text{C}$  时的功率。
- (5)  $\gamma$  值: 指  $10\text{lx}$  和  $100\text{lx}$  照度下的标准值。 $\gamma = \lg(R_{10}/R_{100})$ ,  $R_{10}$ 、 $R_{100}$  分别为  $10\text{lx}$  和  $100\text{lx}$  照度下的电阻值。

另外还要考虑光谱峰值、环境温度和响应时间等。

### 3. 光生伏特效应

光生伏特效应是指当一定波长的光照射非均质半导体(如PN结)时,由于自建场的作用,半导体内部产生一定方向的电动势,如果将PN结短路,则会出现光生电流。

如图3-20所示,在光照射下,PN结内部产生电子-空穴对,在自建场作用下,光生电子被拉向N区,光生空穴被拉向P区,从而产生光生电动势。

利用光生伏特效应工作的光敏器件主要包括光敏二极管、光敏三极管和光电池。

#### 1) 光敏二极管

光敏二极管的符号及接线法如图3-21所示,光敏二极管在电路中一般处于反向工作状态,在没有光照射时,反向电阻很大,反向电流很小,光敏二极管处于截止状态;当光照射时,PN结附近产生光生电子和光生空穴,形成光电流,光敏二极管导通。

#### 2) 光敏三极管

光敏三极管有PNP型和NPN型两种,如图3-22所示。当光照射到PN结附近时,PN结附近产生电子-空穴对,这些载流子在内电场作用下定向运动形成光电流。由于光照射发射极所产生的光电流相当于三极管的基极电流,因此集电极电流为光电流的 $\beta$ 倍,光敏三极管比光敏二极管具有更高的灵敏度。

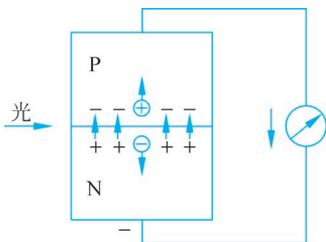


图 3-20 PN 结的光生伏特效应原理图

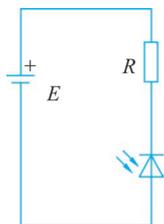


图 3-21 光敏二极管

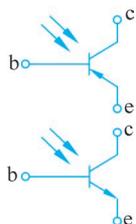


图 3-22 光敏三极管

#### 3) 光电池

光电池是基于光生伏特效应制成的自发电式器件,它有较强的PN结,当光照射在PN结上时,在结的两端出现电动势。

制作光电池的材料有许多种,包括硅、硒、锗、砷化镓、硫化镉、硫化铊等。其中硅光电池因为性能稳定、光谱范围宽、转换效率高、价格低廉等优点被广泛应用,又称为太阳能电池。

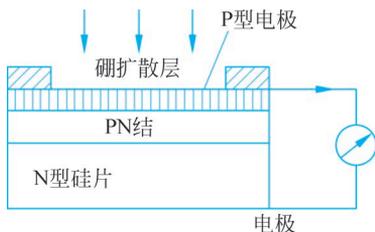


图 3-23 硅光电池结构示意图

常用的硅光电池结构如图3-23所示,它是在N型硅片上用扩散的方式掺入一些P型杂质(如硼)形成一个大面积的PN结,当入射光照射到P型表面时,若光子能量大于半导体材料的禁带宽度,则在P型区每吸收一个光子便激发出一个电子-空穴对。光生电子在PN结电场作用下被拉向N区,光生空穴被拉向P区,从而形成光生电动势。

## 3.3.2 色敏传感器

外界的许多信息是通过人的视觉神经获得的,由于每个人的感觉不同,很难对色彩作出一致的判断,利用半导体色敏传感器,可以实现对颜色的测定。

半导体色敏器件的结构及等效电路如图 3-24 所示。它是由深浅不同的两个 PN 结组成的。靠近表面的 P<sub>1</sub>N 结(PD<sub>1</sub>)对短波长的光比较灵敏,远离表面的 P<sub>2</sub>N 结(PD<sub>2</sub>)对长波长的光比较灵敏。

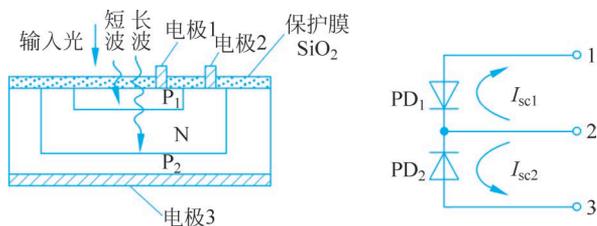


图 3-24 半导体色敏传感器的结构及等效电路

当外部光照射到色敏器件表面时,表面 P<sub>1</sub> 层、N 层以及深处的 P<sub>2</sub> 层分别吸收不同波长的光子,产生光生载流子形成光生电流,其一维模型如图 3-25 所示。表面 P<sub>1</sub> 层吸收短波光光子,产生的光生载流子(电子)扩散到 P<sub>1</sub>N 结区形成光电流 I<sub>1</sub>。N 层吸收较长波长的光子,光生载流子(空穴)分别向 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 层扩散,形成光电流 I<sub>2</sub> 和 I<sub>3</sub>。P<sub>2</sub> 层吸收长波光光子产生的光生载流子(电子)形成光电流 I<sub>4</sub>。

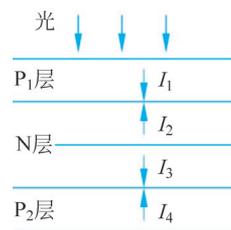


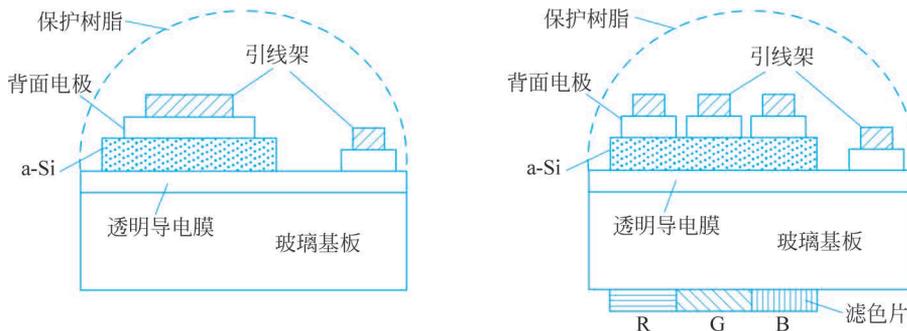
图 3-25 半导体色敏传感器一维模型

光电二极管 PD<sub>1</sub> 和 PD<sub>2</sub> 的短路电流 I<sub>sc1</sub> 和 I<sub>sc2</sub> 分别为

$$I_{sc1} = I_1 + I_2, \quad I_{sc2} = I_3 + I_4$$

为了测定入射光波长,需要预先计算出入射光波长与两个 PN 结短路电流之比(I<sub>sc2</sub>/I<sub>sc1</sub>)之间的关系。这样,当测得 I<sub>sc2</sub>/I<sub>sc1</sub> 后,通过查找波长与 I<sub>sc2</sub>/I<sub>sc1</sub> 的关系曲线,就得到了入射光的波长(或颜色)。

另外还有非晶硅(Amorphous Silicon, a-Si)色敏传感器,它是一种 PIN 型光敏器件,工作原理是光生伏特效应。根据结构的不同可以分为非晶硅可见光传感器、非晶硅单色敏传感器和非晶硅集成型全色敏传感器。非晶硅可见光传感器的光谱响应正好与人类视觉感受的光谱相吻合,是很理想的可见光传感器,它的结构如图 3-26(a)所示。单色敏传感器和全色敏传感器是在可见光传感器的受光面上贴上不同的滤光片形成的,如图 3-26(b)所示。



(a) 可见光传感器

(b) 集成型全色敏传感器

图 3-26 非晶硅光敏传感器的结构

由于工艺技术上可以制作出大面积的 a-Si 感光薄膜,形成大面积光传感器,所以 a-Si 光敏传感器可以用于彩色、光学读出装置,光情报传送,机器人及自动颜色识别等方面。

### 3.3.3 光纤传感器

光纤传感器是一类较新的光敏器件,由于具有极高的灵敏度和精度,以及抗电磁干扰和原子辐射、高绝缘、耐水、耐高温、耐腐蚀和质轻、柔韧、频带宽等优点,在机械、电子、航空航天、化工、生物医学、电力、交通、食品等领域的自动控制、在线检测、故障诊断、安全报警等方面有着广泛应用。

#### 1. 光纤的结构和传光原理

光纤是光纤传感器系统的核心元件。光纤全称为光导纤维,通常由纤芯、包层及护套组成,如图 3-27 所示。纤芯是由玻璃、石英或塑料等材料制成的圆柱体,直径为  $5\sim 150\mu\text{m}$ 。包层的材料也是玻璃或塑料等,但纤芯的折射率  $n_1$  稍大于包层的折射率  $n_2$ 。护套起保护光纤的作用。较长的光纤又称为光缆。

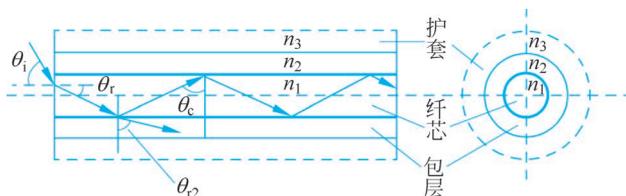


图 3-27 光纤的结构及传光原理示意图

光纤的传光原理如图 3-27 所示。入射光线在光纤入口处发生折射,如果入射角为  $\theta_i$ ,折射角为  $\theta_r$ ,空气的折射率为  $n_0=1.0$ ,根据折射定律有

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (3-3-2)$$

当光线到达纤芯-包层界面时,发生第二次折射,一部分光以折射角  $\theta_{r2}$  进入包层,另一部分以反射角  $\theta_c$  ( $\theta_c=90^\circ-\theta_r$ ) 反射回纤芯,则有

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_{r2}$$

如果  $\theta_{r2}=90^\circ$ ,即发生全反射,则有  $\sin \theta_c = n_2/n_1$ ,式(3-3-2)改写为

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

以入射角小于  $\theta_i$  进入光纤的光线将形成全反射被引导至光纤输出端,并以近似等于入射角的角度射出。 $\theta_c$  称为临界角, $2\theta_i$  为接受角,处于接受角之外的光线均被包层吸收而损失掉。 $\sin \theta_i$  定义为光纤的数值孔径,用 NA 表示,它反映纤芯接收光量的多少,是光纤的一个重要参数。

光纤按照折射变化情况分为:

- (1) 阶跃型。纤芯与包层之间的折射率是突变的。
- (2) 渐变型。纤芯在横截面中心处折射率最大,并由中心向外逐渐变小,到纤芯边界时减小为包层折射率。这类光纤有自聚焦作用,也称自聚焦光纤。

光纤按照传输模式分为:

- (1) 单模光纤。纤芯直径很小,接受角小,传输模式很少。这类光纤传输性能好,频带

宽,具有很好的线性和灵敏度,但制造困难。

(2) 多模光纤。纤芯尺寸较大,传输模式多,容易制造,但性能较差,带宽较窄。

## 2. 光纤传感器的工作原理

按照光纤在传感器中的作用,通常将光纤传感器分为两种类型:功能型(或称传感型、探测型)和非功能型(或称传光型、结构型)。

### 1) 功能型光纤传感器

功能型光纤传感器的结构原理如图 3-28(a)所示。光纤不仅起传光作用,又是敏感元件,即光纤本身同时具有“传”与“感”两种功能。功能型光纤传感器是利用光纤本身的传输特性受被测物的作用而发生变化,使光纤中传导光的属性(光强、相位、偏振态、波长等)被调制这一特点而构成的一类传感器,又分为光强调制型、相位调制型、偏振态调制型和波长调制型等。

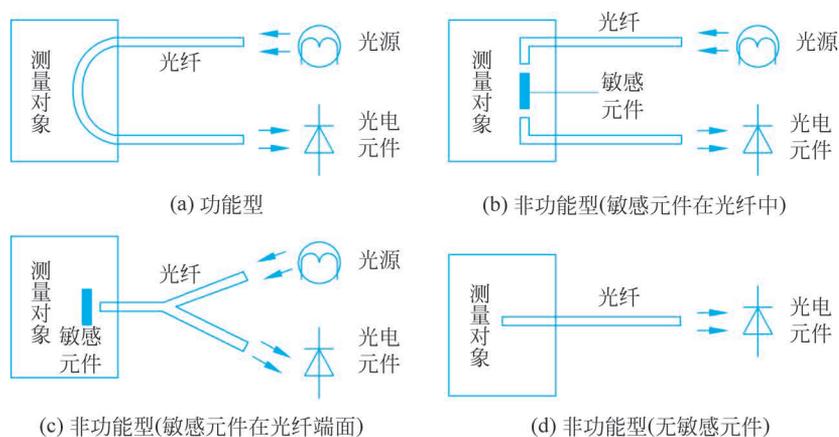


图 3-28 光纤传感器的基本结构原理

### (1) 光强调制型光纤传感器。

光强调制型光纤传感器是基于光纤弯曲时会产生光能损耗原理制成的,主要用于微弯曲位移检测和压力检测。当光线在光纤的直线段传播时,一般以全反射方式传播;当光线到达微弯曲段界面时,入射角将小于临界角,有一部分光透射进入包层,导致光能的损耗。光纤输出光的强度反映了光纤的弯曲程度,对输出光强进行检测可以得到导致光纤形变的位移或压力信号大小。

### (2) 相位调制型光纤传感器。

当一束波长为  $\lambda$  的相干光在光纤中传播时,光波的相位角与光纤的长度  $L$ 、纤芯折射率  $n_1$  及纤芯直径  $d$  有关。光纤受到物理量的作用时,这 3 个参数会发生不同程度的变化,从而引起光相移。由于光纤直径引起的变化相对于另外两个参数要小得多,一般可以忽略。在一段长度为  $L$  的单模光纤(光纤折射率  $n_1$ )中,波长为  $\lambda$  的输出光相对于输入端来说,相角为

$$\varphi = \frac{2\pi n_1 L}{\lambda}$$

当光纤受到物理量作用时,相位角变化量为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 \Delta L + L \Delta n_1) = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_1 \varepsilon_L + \Delta n_1)$$

式中： $\epsilon_L$ ——光纤轴向应变( $\epsilon_L = \Delta L/L$ )；

$\Delta n_1$ ——纤芯折射率变化量。

由于光的频率很高,光电探测器不能检测相位的变化,因此需要用光学干涉技术将相位调制转换为振幅调制。在光纤传感器中常采用马赫-泽德(Mach-Zehnder)干涉仪等仪器完成这一过程。

### (3) 偏振态调制型光纤传感器。

偏振态调制型光纤传感器是利用法拉第旋光效应工作的。根据法拉第旋光效应,由电流所形成的磁场会引起光纤中线偏振光的偏转,这是磁场引起相位改变的结果。通过检测偏转角的大小,就可以得到相应的电流值。偏振态调制型光纤传感器常用于输电线电流的测量。

### 2) 非功能型光纤传感器

非功能型光纤传感器的结构原理如图 3-28(b)和(c)所示。它是在光纤的端面或在光纤中放置光学材料、机械式或光学式的敏感元件来感受被测量的变化,从而使投射光或反射光的强度随之发生变化,光纤只是作为传输光信息的通道,对被测对象的“感觉”功能由其他敏感元件来完成。图 3-28(d)是没有外加敏感元件的情况,光纤把测量对象所辐射、反射的光信号直接传输到光电元件,这种传感器又称为探针型光纤传感器。非功能型光纤传感器适用范围广,使用简便,但是精度比功能型光纤传感器稍低。

非功能型光纤传感器又分为传输光强调制型、反射光强调制型和频率调制型。

#### (1) 传输光强调制型光纤传感器。

传输光强调制型光纤传感器的输入光纤与输出光纤之间设置有机械式或光学式敏感元件。敏感元件在物理量作用下,对传输光的光强进行调制,如吸收光能、遮断光路或改变光纤之间的相对位置等。

#### (2) 反射光强调制型光纤传感器。

反射光强调制型与传输光强调制型的原理类似,只是在结构上有稍许差别。光线是经过物体或光敏元件反射后进入接收光纤的。

#### (3) 频率调制型光纤传感器。

在频率调制型光纤传感器中,光纤仅起到传输光的作用,其工作原理是光学多普勒效应,即由于观察者和目标之间的相对运动,观察者接收到的光波频率将发生变化。采用光学多普勒测量系统,可以方便地在非接触条件下进行对液体流速和流量的测量,如血液流量测量。

## 3. 光纤传感器的应用

利用光纤传感器的各种调制机制,可以制造出各种光纤传感器,如位移传感器、压力传感器、温度传感器、电流传感器、磁传感器、声压传感器、流速传感器和液位传感器等。

### 1) 光纤温度传感器

用光纤测量温度的方法有许多种,按照原理不同可以分为功能型和非功能型两类。对于功能型光纤温度传感器,当温度变化时,光纤的长度、芯径与包层的折射率等会发生变化,从而引起传输光强、相位的变化。对于非功能型光纤温度传感器,主要是利用其他敏感元件在温度变化时引起的传输光强或反射光强的变化。图 3-29 是利用光相位变化的光纤温度传感器原理框图。

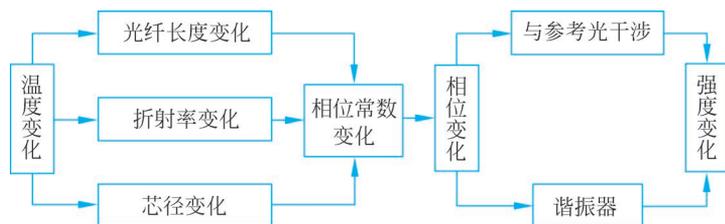


图 3-29 利用光相位变化的光纤温度传感器原理框图

### 2) 光纤微弯曲位移(压力)传感器

根据光纤弯曲时产生的弯曲损耗可以制成光纤微弯曲位移和压力传感器,其原理如图 3-30 所示。这种传感器由两块波形板组成,其中一块是活动的,另一块是固定的。当活动板受到位移或压力干扰作用时,光纤会发生周期性微弯曲,使部分光进入包层。位移或压力增大时,泄漏到包层的光强随之增大,同时纤芯的输出光强减小。通过测量泄漏到包层的散射光强度或纤芯输出光强度就能够测出位移或压力信号。

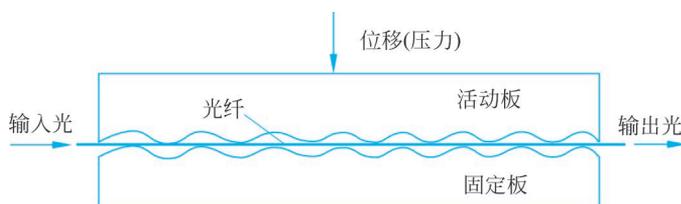


图 3-30 光纤微弯曲位移(压力)传感器原理图

### 3) 光纤线性位移传感器

光纤线性位移传感器是利用光纤传输光信号的功能,根据探测到的反射光强度来测量被测物与反射表面的距离。如图 3-31(a)所示,当光纤探头顶端紧贴被测物时,发射光纤中的光不能反射到接收光纤中去,因而光敏元件输出电信号为零;当被测物逐渐远离光纤探头时,发射光纤的光照亮被测物表面,并有一部分光被反射到接收光纤中。被测物的位移与反射到接收光纤中的光强关系如图 3-31(b)所示。图中 I 段范围窄,但灵敏度高,线性好,适用于测量微小位移和表面粗糙度等。

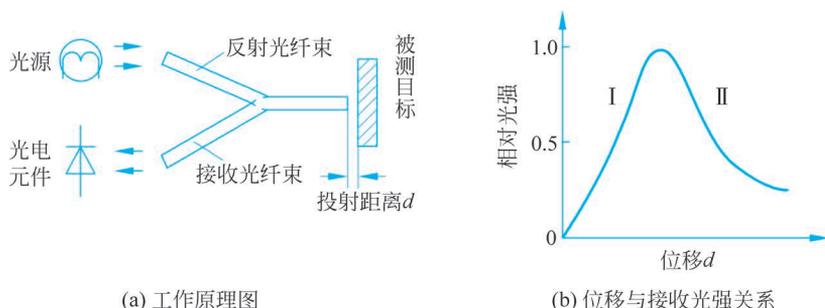


图 3-31 光纤线性位移传感器

实际的光纤位移传感器是由几百根纤芯组成的光缆,发射和接收光纤按照混合式、对半分式、共轴内发射外接收和共轴外发射内接收等几种组合方式分布。其中,混合式的灵敏度最高,而对半分式的 I 段范围最大。

#### 4. 光纤传感器的主要参数

无论对于何种光纤传感器,包括温度、位移、压力、应变等,在选择具体的产品时都需要重点考虑一些参数,具体包括:测量范围、测量精度、响应时间、分辨率、探头尺寸、探头材料、光纤电缆的长度和材料以及工作温度等。这些参数决定了所选传感器的工作性能和性价比是否满足系统设计需求。

### 3.3.4 光栅传感器

早期,人们利用光栅的衍射效应进行光谱分析和光波波长的测量。到 20 世纪 50 年代,开始利用光栅的莫尔条纹现象进行精密测量,从而出现了光栅式传感器。由于其原理简单、测量精度高、具有较强的抗干扰能力,被广泛应用于长度和角度的精密测量。

#### 1. 光栅的结构和分类

##### 1) 光栅的结构

在玻璃尺或玻璃盘上进行长刻线(一般为 10~12mm)的密集刻划,如图 3-32(a)或(b)所示,得到宽度一致、分布均匀、明暗相间的条纹,这就是光栅。

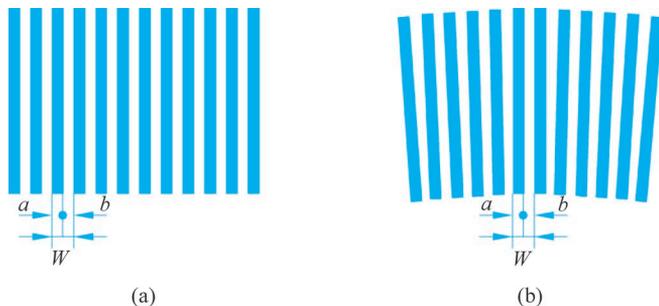


图 3-32 光栅栅线放大图

光栅上的刻线称为栅线,栅线宽度为  $a$ ,缝隙宽度为  $b$ ,一般取  $a=b$ , $W(W=a+b)$ 称为光栅的栅距(也称光栅的节距或光栅常数)。

##### 2) 光栅的分类

光栅种类很多,按工作原理分为物理光栅和计量光栅两种,前者用于光谱仪器,作色散元件,后者用于精密测量和精密机械自动控制等。计量光栅又分为长光栅和圆光栅,具体分类如图 3-33 所示。

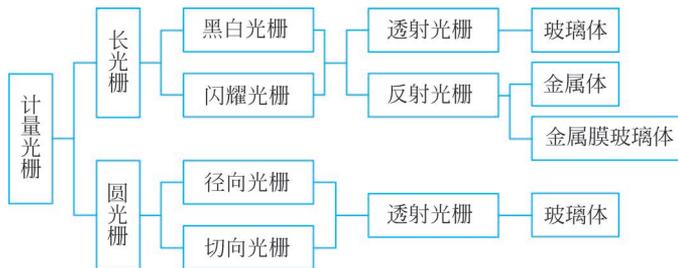


图 3-33 计量光栅的分类

长光栅主要用于测量长度,条纹密度有每毫米 25、50、100、250 条等。根据栅线形式不同,又分为黑白光栅和闪耀光栅。黑白光栅是只对入射光波的振幅或光强进行调制的光栅,

亦称幅值光栅；闪耀光栅是对入射光波的相位进行调制，亦称相位光栅。根据光线的走向，长光栅又分为透射光栅和反射光栅。透射光栅是将栅线刻制在透明材料上，如光学玻璃和制版玻璃；反射光栅则将栅线刻制在具有强反射能力的金属上，如不锈钢或玻璃镀金属膜。

圆光栅也称光栅盘，其刻线刻制在玻璃盘上，用来测量角度或角位移。根据栅线刻划的方向分为径向光栅和切向光栅，如图 3-34 所示。

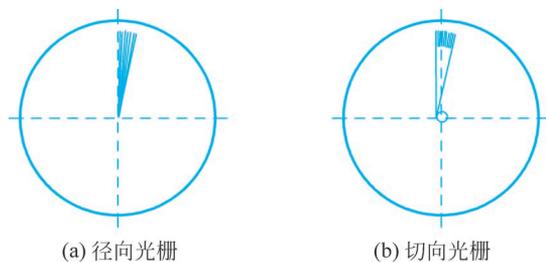


图 3-34 圆光栅

## 2. 光栅传感器的工作原理

光栅传感器由光栅、光路、光电元件及转换电路等组成，利用光栅的莫尔条纹现象进行测量。下面以黑白透射光栅说明它的工作原理。

### 1) 光栅传感器的组成

光栅传感器由光源、透镜、主光栅、指示光栅和光电元件构成，如图 3-35 所示。主光栅与指示光栅之间的距离可以根据光栅的栅距进行选择。光源和透镜组成照明系统，光线经过透镜后成平行光投向光栅。主光栅与指示光栅在平行光照射下，形成莫尔条纹。整个测量系统的精度主要由主光栅的精度决定。光电元件主要有光电池和光敏晶体管，它把莫尔条纹的明暗强弱变化转换为电量输出。

### 2) 莫尔条纹

所谓莫尔条纹是指当指示光栅与主光栅的栅线有一个微小的夹角  $\theta$  时，则在近似垂直于栅线方向上显现出比栅距  $W$  大得多的明暗相间的条纹，相邻的两条明条纹之间的距离（或相邻两条暗条纹之间的距离） $B$  称为莫尔条纹间距，长光栅的横向莫尔条纹如图 3-36 所示。

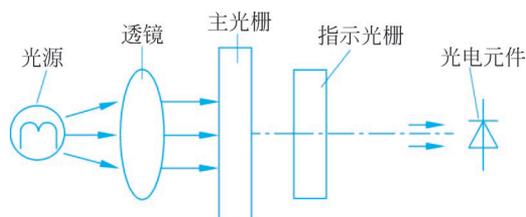


图 3-35 光栅传感器的构成原理图

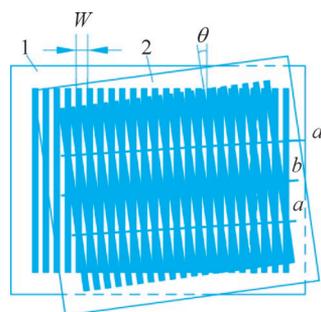


图 3-36 莫尔条纹示意图

当光栅之间的夹角  $\theta$  很小，且两光栅的栅距都为  $W$  时，莫尔条纹间距  $B$  为

$$B = \frac{W}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \approx \frac{W}{\theta} \quad (3-3-3)$$

式中： $B$ ——相邻两条莫尔条纹之间的间距；

$W$ ——光栅栅距；

$\theta$ ——两光栅栅线夹角。

由于 $\theta$ 值很小，条纹近似与栅线方向垂直，因此称为横向莫尔条纹。

横向莫尔条纹有以下几个重要特征。

(1) 运动对应关系：任意一个光栅沿垂直于栅线的方向每移动一个栅距 $W$ ，莫尔条纹近似沿栅线方向移动一个条纹间距；光栅反方向移动时，莫尔条纹也作反方向移动。因此可以通过测量莫尔条纹的移动量和移动方向判断主光栅（或指示光栅）的位移量和位移方向。

(2) 位移放大：从式(3-3-3)可以看出，由于 $\theta$ 值很小，光栅具有位移放大作用，放大系数为

$$k = \frac{B}{W} \approx \frac{1}{\theta}$$

虽然 $W$ 很小，很难观测到，但 $B$ 远大于 $W$ ，莫尔条纹明显可见，便于观测。例如 $W = 0.02\text{mm}$ ， $\theta = 0.1^\circ$ ，则 $B = 11.45692\text{mm}$ ， $k = 573$ 。

(3) 减小误差：莫尔条纹是由光栅的大量栅线共同形成的。对光栅的刻线误差有平均作用。个别栅线的栅距误差或断线等瑕疵对莫尔条纹的影响很小，从而提高了光栅传感器的可靠性和测量精度。

3) 光栅的信号输出(辨向原理和细分电路)

通过前面的分析知道，主光栅每移动一个栅距 $W$ ，莫尔条纹就变化一个周期 $2\pi$ ，通过光电转换元件，可将莫尔条纹的变化变成电信号，电压的大小对应于莫尔条纹的亮度，它的波形近似于一个直流分量和一个正弦波交流分量的叠加：

$$U = U_0 + U_m \sin\left(\frac{x}{W} \cdot 360^\circ\right)$$

式中： $W$ ——栅距；

$x$ ——主光栅与指示光栅间瞬时位移；

$U_0$ ——直流电压分量；

$U_m$ ——交流电压分量幅值；

$U$ ——输出电压。

由上式可知，输出电压反映了瞬时位移的大小，当 $x$ 从0变化到 $W$ 时，相当于电角度变化了 $360^\circ$ 。如采用50线/mm的光栅，若主光栅移动了 $x\text{mm}$ ，即 $50x$ 条，将此条数用计数器记录，就可以知道移动的相对距离。

由于光栅传感器只能产生一个正弦信号，因此不能判断 $x$ 移动的方向。为了能够辨别方向，需要在间距为 $B/4$ 的位置设置两个光电元件，以得到两个相位差为 $90^\circ$ 的正弦信号，然后将信号送到辨向电路中去处理，如图3-37所示。

当主光栅向左移动，莫尔条纹向上运动时，光电元件1和2分别输出如图3-38(a)所示的电压信号 $u_1, u_2$ ，经过放大整形后得到相位相差 $90^\circ$ 的两个方波信号 $u'_1, u'_2$ 。 $u'_1$ 经反相后得到方波 $u''_1$ 。 $u'_1$ 和 $u''_1$ 经RC微分电路后得到两组光脉冲信号 $u'_{1W}$ 和 $u''_{1W}$ ，分别加到与门 $Y_1$ 和 $Y_2$ 的输入端。对与门 $Y_1$ ，由于 $u'_{1W}$ 处于高电平时 $u'_2$ 总是低电平，故脉冲被阻塞， $Y_1$ 无输

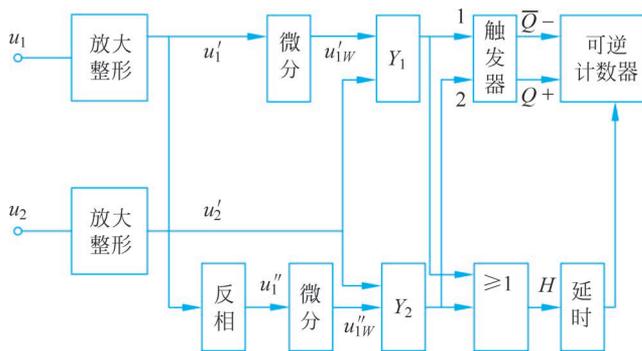


图 3-37 辨向电路原理框图

出。对与门  $Y_2$ ,  $u_{1w}'$  处于高电平时  $u_2'$  也正处于高电平,故允许脉冲通过,并触发加减控制触发器使之置“1”,可逆计数器对与门  $Y_2$  输出的脉冲进行加法计数。同理,当主光栅反向移动时,输出信号波形如图 3-38(b)所示,与门  $Y_2$  阻塞,  $Y_1$  输出脉冲信号使触发器置“0”,可逆计数器对与门  $Y_1$  输出的脉冲进行减法计数。这样每当光栅移动一个栅距时,辨向电路只输出一个脉冲,计数器所计的脉冲数即代表光栅位移。

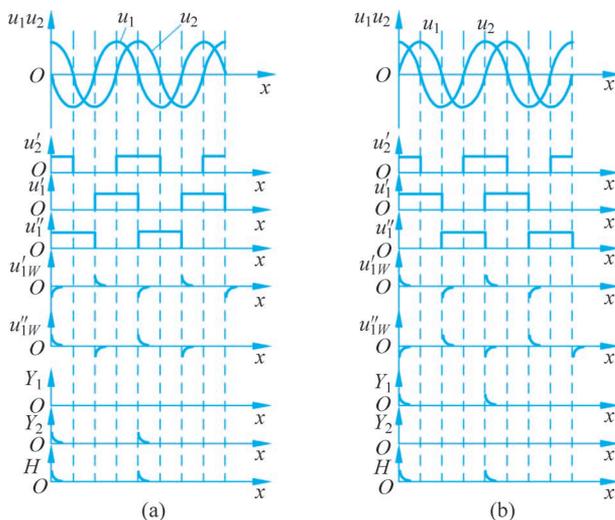


图 3-38 光栅移动时辨向电路各点波形

### 3. 光栅传感器的性能参数

光栅传感器主要用于位移和角度的测量,在选用光栅传感器时应根据具体的测量任务要求选择合适的产品型号,重点考虑传感器的量程、精度、分辨率、工作温度、信号输出形式、外观尺寸以及安装形式等性能参数。

#### 3.3.5 CCD 图像传感器

近年来,随着图像传感技术的突破,以图像传感器为核心的计算机视觉技术蓬勃发展起来。图像传感器以其特有的优势在测控系统中展示了广阔的应用前景和发展潜力。下面对其具有代表性的 CCD 图像传感器和红外传感器分别加以介绍。

CCD 图像传感器是一种集成型半导体光敏传感器,其核心部分是电荷耦合器件

(Charge Coupled Device, CCD)。CCD 是由以阵列形式排列在衬底材料上的金属氧化物半导体(Metal Oxide Semiconductor, MOS)电容器件组成的,具有光生电荷、积蓄和转移电荷的功能。

### 1. CCD 的工作原理

在 N 型或 P 型硅衬底上生长一层很薄的  $\text{SiO}_2$ , 再在  $\text{SiO}_2$  薄层上沉积金属电极, 这种规则排列的 MOS 电容阵列再加上相应的输入及输出就构成了 CCD 芯片。CCD 可以把光信号转换为电脉冲信号。每一个脉冲反映一个光敏单元的受光情况, 脉冲幅度的高低反映该光敏单元受光的强弱, 输出脉冲的顺序可以反映光敏单元的位置, 这就构成了图像传感器。

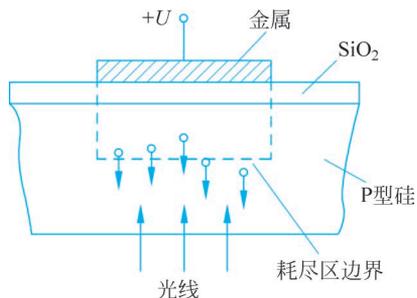


图 3-39 MOS 光敏单元结构

MOS 是 CCD 的基本结构, 如图 3-39 所示。以 P 型衬底 MOS 结构为例, 如果在栅极上施加一个幅值大于该 MOS 结构阈值电压的正脉冲, 半导体表面将处于深耗尽状态。由于这种深耗尽状态, 在半导体表面形成电子势阱。半导体表面相对于体内的电势差称为势阱深度。势阱可以存储少数载流子(在 P 型衬底情况下少数载流子是电子), 势阱越深存储电荷越多。这种电荷会随着 MOS 从非稳态到稳态的过渡逐渐减少, 只要电荷存储时间在数秒以上, CCD 就可以正常工作。

CCD 作为摄像光敏器件时, 其信号电荷由光注入产生。器件受光照射时, 光被半导体吸收, 产生电子-空穴对, 在外加电压作用下, 少数载流子被收集到较深的势阱中。光照越强, 势阱中收集到的电荷越多。

为了将势阱中的电荷转移并输出, 每个光敏单元一般包括 3 个相邻的电极, 电极上的脉冲电压相位依次相差  $120^\circ$ , 波形都是前缘陡峭后缘倾斜, 如图 3-40 所示。

如图 3-41 所示, 电极 1、4、7... 同脉冲  $\phi_1$  相连, 电极 2、5、8... 同脉冲  $\phi_2$  相连, 电极 3、6、9... 同脉冲  $\phi_3$  相连。在  $t_1$  时刻, 电极 1、4、7 下方出现势阱, 并收集到光生电荷, 电荷的多少与光强有关。在  $t_2$  时刻, 电压  $\phi_1$  下降, 电压  $\phi_2$  最高, 电极 2、5、8 下方势阱最深, 原来存储在电极 1、4、7 下方的电荷将在电场作用下转移到 2、5、8 下方。到  $t_3$  时刻, 电荷全部向右转移一步。依次类推, 在  $t_5$  时刻, 电荷将转移到电极 3、6、9 下方。

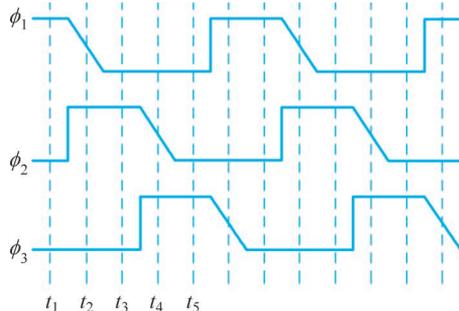


图 3-40 CCD 的转移电压

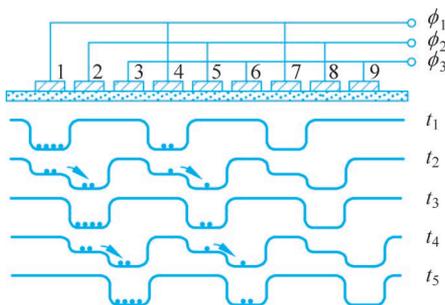


图 3-41 CCD 电荷转移原理

### 2. CCD 图像传感器及其应用

一个简单的三相 CCD 结构加上相应的驱动时钟脉冲, 便可以作为摄像器件使用, 但是

这样做会存在以下问题:

- (1) 多层结构电极系统对入射光吸收、反射和干涉严重,光强损失大,量子效率低。
- (2) 在电荷包转移期间,光积分仍在继续,使输出信号产生拖影。
- (3) 信号输出的占空比很小。

因此实际的摄像器件常将光敏区与转移区彼此分开。

CCD 图像传感器一般分为线型和面型。二者的原理类似,都是通过光学成像系统将景物成像在 CCD 的像敏面上。像敏面将照在每一像敏单元上的图像照度信号转变为少数载流子密度信号存储于像敏单元(MOS 电容)中,然后再转移到 CCD 的移位寄存器(转移电极下的势阱)中,在驱动脉冲作用下顺序地移出器件,成为视频信号。

### 1) 线型 CCD

线型 CCD 可以直接接收一维光信号,主要用于测试、传真和光学文字识别技术等方面。

最简单的线型 CCD 是单通道式的,结构如图 3-42 所示。它包括感光区(光积分单元)和传输区两部分:感光区由一系列光敏单元组成,传输区由转移栅及一系列移位寄存器组成。光照产生的信号电荷存储于感光区的势阱中。在转移脉冲到来时,光敏阵列势阱中的电荷被并行转移到移位寄存器中,最后在时钟脉冲的作用下一位一位地移出,形成视频信号。传输区是遮光的,以防止因光生噪声电荷的干扰造成图像模糊。

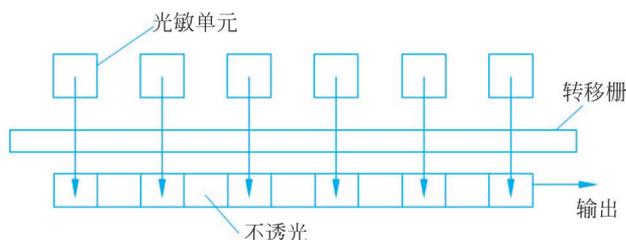


图 3-42 单通道线型 CCD 的结构

为了减少信号电荷在转移过程中的损失,通常采用双通道式结构,如图 3-43 所示。双通道式 CCD 有两列移位寄存器,平行分置在感光区两侧。当转移脉冲到来时,光敏单元中的信号电荷同时按箭头方向转移到对应的移位寄存器中,然后在驱动脉冲作用下,分别向右移出。同样感光区的双通道线型 CCD 比单通道线型 CCD 的转移次数减少一半,降低了传输损耗,同时也缩短了器件尺寸。

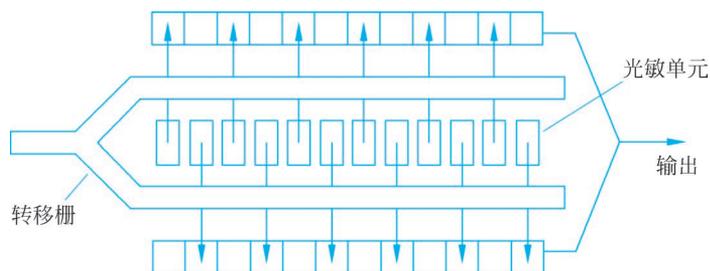


图 3-43 双通道线型 CCD 的结构

### 2) 面型 CCD

按一定的方式将一维线型 CCD 的光敏单元及移位寄存器排列成二维阵列,即可以构成二维面型 CCD。常见的结构有隔列转移结构和帧转移结构。

隔列转移结构如图 3-44(a)所示,光敏单元呈二维排列,每列光敏单元被遮光的垂直移位寄存器隔开,光敏单元与垂直移位寄存器之间又有转移栅。光敏单元中的信号电荷在转移栅电压控制下转移到垂直移位寄存器,然后在读出脉冲作用下逐行转移到水平移位寄存器,再由水平移位寄存器快速输出,得到与光学图像对应的一行行视频信号。

帧转移结构如图 3-44(b)所示,包括成像区(光敏区)、存储区和水平移位寄存器三部分。在这种结构中,当光积分周期结束时,加在成像区和存储区电极上的时钟脉冲使所收集到的信号电荷迅速转移到存储区中。然后在驱动脉冲作用下,存储区中的电荷逐行转移到读出寄存器并输出。在第一帧读出的同时,成像区开始收集第二帧信号电荷。一旦第一帧信号被全部读出,马上传送第二帧信号,实现连续输出。

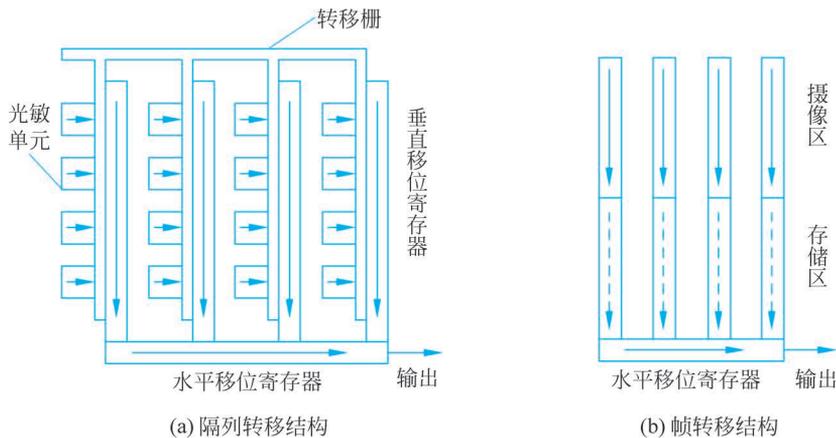


图 3-44 面型 CCD 传输原理

由于 CCD 器件具有体积小、高速、高灵敏度、高稳定性及非接触等众多优点,在测试与检测技术领域具有广泛的应用,例如用于测量物体的形貌、尺寸、位置以及计数等。CCD 图像传感器能实现图像信息传输,还被用于模式识别、自动监控和机器视觉等方面。第 5 章中有基于 CCD 图像传感器的详细应用实例。

### 3. CCD 图像传感器的选型

在构建基于 CCD 图像传感器的测控系统时,需要综合考虑照明(光源)、镜头、摄像机、图像采集卡、处理算法等多个环节的选型与设计。以下简要介绍其中几个环节。

#### 1) 照明设计

不同图像测控系统的照明设计各不相同,影响照明方案的因素非常多,例如光的强度、颜色、均匀性、光源的结构、大小、照射方式以及被测物体的光学特性、距离、物体大小、背景特性等。照明设计主要涉及三个方面:光源的种类和特性、物体的光反射和传输特性、光源的结构。

光源的设计包括光照的方向、光谱、偏振性、强度以及均匀性等。光源的种类非常多:从发光器件本身可分为卤素灯、荧光灯、LED 灯、氙灯等;根据灯的几何形状可分为环形、方形、穹形、长条形等;根据发光的特性可分为点光源、线光源、面光源等;根据照射角度又可分为直射、间接、掠射、同轴、平行等。

物体的光反射和传输特性包括镜面反射和漫反射、颜色、光学密度(光穿透率)、折射、纹理、高度、表面方向等。

具体的照明技术又大致分为正向照明和背向照明两大类,不同的照明方式能够获得不同的拍摄效果,可以根据具体的需求灵活调整。

## 2) 镜头

镜头将被测物体及其周围的环境成像并投影在摄像机的二维图像传感器平面上,一般该平面是长宽比为4:3的矩形,称作像平面。与像平面中的图像对应的物体平面被称作视野(Field of View, FOV)。从被测物体到物镜的距离称为工作距离(Work Distance, WD)。以镜头最佳聚焦WD为中心,前后存在一个范围,在此范围内的景物都能在像平面上获得清晰的图像,这个范围被称为景深(Depth of Field)。

### (1) 摄像物镜的光学参数。

物镜的焦距 $f$ 决定了物体在像平面上成像的大小,焦距越长,所得的像越大。物镜焦距值相差很大,从几毫米到数十米。有的镜头为适应不同的取像要求,设计成焦距可变。

镜头光圈的大小用相对孔径 $F = D/f$ 来表示,其中 $D$ 为镜头中光线能通过的圆孔直径, $f$ 为焦距。若镜头的焦距是50mm,有效孔径 $D$ 为8.9mm,则相对孔径为 $8.9/50 = 1/5.6$ 。在镜头上看到的相对孔径都是以 $1/F$ 表示的,如3.4、5.6、8、11、16等。到达像平面的照度与相对孔径 $F$ 的平方成正比。从8到5.6,光圈每增加一档,光照度增加一倍。

相对孔径 $F$ 越大,即光圈越大,景深越短;光圈越小,景深越长。在机器视觉系统中,有时会加大光照强度,减小光圈来增加景深,以获得较大深浅范围内的清晰图像。

物镜的视场角决定了在像平面上良好成像的空间范围。当像平面尺寸一定时,焦距越长,视场角越小。例如俗称的广角镜头,其焦距就很短。

### (2) 镜头的选择。

镜头的选择主要取决于焦距 $f$ ,下面简要介绍一下焦距的计算和镜头的选择。

因为视野和像平面一般均为4:3的矩形,用 $H_o$ 表示视野的高度, $H_i$ 表示摄像机有效成像面的高度,则镜头的放大倍数PMAG为

$$\text{PMAG} = \frac{H_i}{H_o} = \frac{D_i}{\text{WD}}$$

式中, $D_i$ 为物镜到实际像平面的距离,WD为工作距离。在一般镜头中, $\text{PMAG} < 1$ ,在放大镜中, $\text{PMAG} > 1$ 。

为了实现聚焦,像平面必须有一个可以后移的距离,称为像平面的扩充距离LE:

$$\text{LE} = D_i - f = \text{PMAG} \times f$$

则物距WD、镜头放大倍数PMAG和焦距 $f$ 的关系为

$$f = \frac{\text{WD} \times \text{PMAG}}{1 + \text{PMAG}}$$

根据上式可以计算出所需镜头的焦距 $f$ ,由于所计算出来的焦距可能不能与现有产品准确匹配,所以普通镜头的选择通常按以下步骤进行:

- ① 获得镜头至物体的距离WD,如果是一个距离范围,则取中间值;
- ② 计算图像放大倍数PMAG;
- ③ 选取焦距规格最接近计算值的镜头;
- ④ 根据所选镜头的焦距值重新核算镜头至物体的距离WD。

例如,假设视场的高度为6cm,摄像机传感器的高度为6.6mm,镜头放大倍数为

$$\text{PMAG} = 6.6\text{mm}/6\text{cm} = 6.6\text{mm}/60\text{mm} = 0.11$$

物体至镜头的距离在 10~30cm 范围内,使用中间值 20cm,则焦距计算值为

$$f = \frac{\text{WD} \times \text{PMAG}}{1 + \text{PMAG}} = 20\text{cm} \times 0.11 / (1 + 0.11) = 19.82\text{mm}$$

在镜头的规范焦距 8mm、12.5mm、16mm、25mm 和 50mm 五档内,选择最接近的 16mm 镜头,并用该焦距值重新计算 WD:

$$\text{WD} = f(1 + \text{PMAG}) / \text{PMAG} = 16\text{mm} \times (1 + 0.11) / 0.11 = 16.1\text{cm}$$

镜头的扩充距离为

$$\text{LE} = f \times \text{PMAG} = 16\text{mm} \times 0.11 = 1.76\text{mm}$$

大多数 C 型镜头的工作距离设计为 1m 至 0.5m,因此  $\text{WD} = 16.1\text{cm}$  的距离不能获得正确的聚焦。为了获得清晰的成像,可以购买一套镜头垫圈附件,为镜头的聚焦机构提供所需的扩充距离。

### (3) 镜头的分类。

在视觉测控系统中,常用的光学镜头按接口分为 C 型和 CS 型。C 型接口镜头是目前使用较广泛的镜头,具有重量轻、体积小、价廉及品种多等优点。CS 型与 C 型的区别在于镜头的定位面到图像传感器光敏面的距离不同,C 型是 17.526mm,而 CS 型是 17.2mm。CS 型更适应有效光敏传感器尺寸更小的摄像机。具有 CS 接口的相机可以与 C 型和 CS 型接口的镜头连接,但与 C 接口镜头连接时需要加装一个节圈;具有 C 接口的相机只能与 C 接口镜头连接,而不能与 CS 接口镜头连接,否则不但不能获得良好聚焦,还有可能损坏 CCD 靶面。

镜头根据焦距可以分为 35mm 摄像机镜头、广角镜头、长焦距镜头、中焦距镜头、微距镜头等;另外按镜头所具有的功能可以分为变焦距镜头、变光圈镜头、自动调焦镜头以及自动光圈镜头等。用户需要根据具体的系统设计需求进行选择。

### 3) 摄像机

前面已经介绍了 CCD 的基本结构和工作原理,下面介绍一下选择 CCD 摄像机时需要了解的一些知识。

#### (1) CCD 相机的分类。

按成像色彩划分,可分为彩色相机和黑白相机。

按灵敏度划分,可分为普通型、月光型、星光型和红外型,从普通型到红外型,相机正常工作所需照度依次减小,红外型采用红外灯照明,在没有可见光的情况下也可以成像。

按分辨率划分,像素数在 38 万以下的为普通型,像素数在 38 万以上的为高分辨率型。

按 CCD 光敏面尺寸大小划分,可分为 1/4 英寸、1/3 英寸、1/2 英寸、1 英寸相机。

按扫描方式划分,可分为行扫描和面扫描两种方式,面扫描 CCD 相机又分为隔行扫描和逐行扫描。

按同步方式划分,可分为普通相机(内同步)和具有外同步功能的相机。

#### (2) CCD 相机的主要功能控制。

① 同步方式的选择。对单台 CCD 相机而言,主要的同步方式有内同步、外同步和电源同步等,其具体功能为:内同步利用相机内置的同步信号发生电路产生的同步信号来完成同步信号控制;外同步通过外置同步信号发生器将特定的同步信号送入相机的外同步输入

端,以满足对相机的特殊控制需求;电源同步用相机的 AC 电源完成垂直同步。

对于由多个 CCD 相机构成的图像采集系统,通常希望所有的视频输入信号是垂直同步的,以避免变换相机输出时出现图像失真。此时,可以利用同一个外同步信号发生器产生的同步信号驱动多台相机,以实现多相机的同步图像采集。

② 自动增益控制。CCD 相机通常具有一个对 CCD 的信号进行放大的视频放大器,其放大倍数称为增益。若放大器的增益保持不变,则在高亮度环境下将使视频信号饱和。利用相机的自动增益控制(AGC)电路可以随着环境内外照度的变化自动地调整放大器的增益,从而可以使相机在较大的光照范围内工作。

③ 背光补偿。通常 CCD 相机的 AGC 工作点是以通过对整个视场的信号的平均值来确定的。当视场中包含一个很亮的背景区域和一个很暗的前景目标时,所确定的 AGC 工作点并不完全适合于前景目标,当启动背光补偿时,CCD 相机仅对前景目标所在的子区域求平均来确定其 AGC 工作点,从而提高了成像质量。

④ 电子快门。CCD 相机一般都具有电子快门特性,电子快门不需要任何机械部件。CCD 相机采用电子快门控制 CCD 的累积时间。当开启电子快门时,CCD 相机输出的仅是电子快门开启时的光电荷信号,其余光电荷信号则被释放。目前,CCD 相机的最短快门时间一般为  $1/10000\text{s}$ ;当电子快门关闭时,对 NTSC 制式相机,CCD 累积时间为  $1/60\text{s}$ ;对 PAL 制式相机,则为  $1/50\text{s}$ 。

较高的快门速度能够提高相机的动态分辨率。同时,当电子快门速度增加时,在 CCD 积分时间内,聚集在 CCD 上的光通量减少,将会降低相机的灵敏度。

⑤  $\gamma$ (伽马)校正。在整个视觉系统中需要进行两次信号转换:CCD 传感器将光图像信息转换为电信号,即光电转换;电信号经传输后,在接收端由显示设备将电信号还原为光图像,即电光转换。为了使接收端再现的图像与原图像一致,必须保证两次转换的综合特性具有线性特征。

CCD 传感器上的光( $L$ )和从相机输出的信号电压( $V$ )之间的对应关系为  $V=L^\gamma$ 。在标准的 TV 系统中,相机的  $\gamma$  系数为 0.45;在机器视觉应用中, $\gamma$  应为 1.0。

⑥ 白平衡。白平衡功能仅用于彩色 CCD 相机,其主要功能是实现相机对实际景物的精确反映。一般分为手动白平衡和自动白平衡两种方式。

CCD 相机处于手动白平衡状态时,可通过手动方式改变图像的红色或蓝色状况,有多达 107 个等级供调节。

CCD 相机的自动白平衡一般分为连续方式和按钮方式。处于连续方式时,相机的白平衡设置将随着景物色温的改变而连续地调整,这种方式适用于景物的色彩温度在成像期间不断变化的场合,但对于景物中很少甚至没有白色时,连续的白平衡功能不能产生最佳的彩色效果;处于按钮方式时,可先将相机对准白色目标,然后设置自动开关方式,并保留在该位置几秒钟或至图像呈白色为止。在执行白平衡后,锁定白平衡设置,此时白平衡设置将存储在相机的存储器中。以按钮方式设置白平衡最为精确和可靠,适用于大部分应用场合。

(3) CCD 相机的相关特性参数。

① 最低照度。最低照度是衡量 CCD 相机灵敏度的重要指标,它表示当环境光照度降低到一定程度,而使 CCD 相机所输出的视频信号电平低到某一规定值时,所对应的环境照度。当环境照度低于最低照度时,CCD 相机输出的图像质量将难以保证。CCD 相机的最低

照度与所使用镜头的最大相对孔径有关,因此在提供相机最低照度时,应注明测试时所使用镜头的相对孔径。

② 分辨率。分辨率是 CCD 相机重要的性能参数之一,主要用于衡量相机对物像中明暗细节的分辨能力。CCD 相机的分辨率受多种因素影响,包括光源的光谱、镜头的  $F$  数等。同时还受一定的主观因素影响,其标准并不一致。如果相机分辨率是关键参数,最好是在实际操作环境下对相机进行测试。

③ 扫描方式。扫描方式分为隔行扫描、逐行扫描、异步触发和部分扫描四种类型。

隔行扫描由广播电视系统发展而来,可在相对较低的(30Hz)帧速下提供更为清晰的图像。从一帧图像的顶部开始,相机在前半帧时间内依次读取所有的奇数线,在后半帧时间内依次读取所有的偶数线。隔行扫描可以减少图像的闪烁。在机器视觉中,隔行扫描会影响移动物体的成像质量。

逐行扫描相机从一帧图像的顶部开始以自然次序进行连续扫描,这种方式在机器视觉中的应用越来越广泛。

CCD 相机处于异步触发方式时,不是以固定时钟逐行扫描和输出连续信号,而是在收到一个触发信号后,再开始扫描输出新的一帧信号。此功能适用于对生产线上快速运动目标的瞬间图像采集。

部分扫描是指 CCD 相机所读取的数据小于它的满帧数据。由于读取数据量相对较少,则相应的读取时间要少,从而提高了帧速。此功能对于高速图像采集系统非常重要。

④ 接口。CCD 相机采用的接口形式有 RS-422、Camera Link、LVDS(EIA-64)和 IEEE 1394。

RS-422 是数据信号传输的电气规范,这一标准采用双绞线。当某一信号为高电平时,另一信号必须为低电平。在 RS-422 规范中,高电平为 3V,低电平为 0V。

Camera Link 是适用于视觉应用数字相机与图像采集卡间的通信接口。标准的 Camera Link 电缆提供相机控制信号线、串行通信信号线和视频数据线。

LVDS(Low Voltage Differential Signaling)是一种低摆幅的差分信号技术,它使信号能在差分 PCB 线对或平衡电缆上以 400Mbps 的速率传输,其低电压和低电流驱动输出实现了低噪声和低功耗。

IEEE 1394 接口是 Apple 公司开发的串行接口标准,又称 FireWare 接口。IEEE 1394 接口能够在计算机与外围设备间提供 100Mbps、200Mbps、400Mbps 的传输速率。该接口不要求 PC 端作为接入外设的控制器,不同的外设可以直接在彼此之间传递信息。利用 IEEE 1394 的拓扑结构,不需要集线器就可以连接 63 台设备,并且可由桥网将独立的子网连接起来。该接口不需要强制用计算机控制这些设备。IEEE 1394b 接口规范能够实现 800Mbps 和 1.6Gbps 传输速率的高速通信方式,并可支持较长距离的数据传输。

另外选择 CCD 相机时还需要考虑镜头安装方式、最大线/帧速率、数据格式以及相机的尺寸、重量、工作温度、电源、功耗等因素。

### 3.3.6 红外传感器

能将红外辐射能转换为电能的装置称为红外传感器,按其工作原理可以分为光敏型(或称光子型、量子型)和热敏型两类。

光敏型红外传感器可以直接把红外光能转换为电能,包括光电导式、光生伏特效应式等,其工作原理是光电效应。它们需要在低温下工作,灵敏度很高,响应速度快,但响应红外光的波长范围较窄(见图 3-45 中曲线 2)。

热敏型红外传感器将吸收的红外光转变为热能,使器件自身的温度发生变化,包括热电偶式、电阻式、电容式和热释电式等。热敏型红外传感器响应的红外光谱范围宽,在整个工作范围内灵敏度基本不变(见图 3-45 中的曲线 1),且能在常温下工作,价格便宜。它的响应速度和灵敏度都不如光敏型红外传感器。

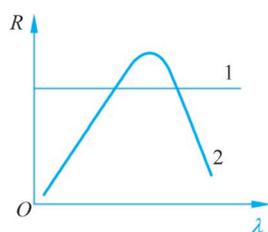


图 3-45 红外传感器光谱响应曲线

### 1. 热释电效应及器件

红外热释电式光敏器件是热敏型红外传感器中最常用的器件。它的工作原理是热释电效应。

某些晶体材料(如铁电晶体)具有自发极化现象,自发极化的大小在温度有稍许变化时就有很大的变化。温度恒定时,由自发极化产生的表面电荷吸附空气中的电荷达到平衡;材料吸收红外光后引起温度升高,极化强度会减小,单位面积的表面电荷相应减少,一部分吸附电荷被释放;若与一个电阻连成回路,电路中就会有电流产生,如图 3-46 所示。这种因温度变化引起自发极化强度变化的现象被称为热释电效应。

当温度变化  $\Delta T$  在材料各处一致时,热释电效应可以借助热释电系数  $p$  表示为

$$\Delta P = p \Delta T$$

式中, $P$  是自发极化。图 3-47 是钛酸钡热释电系数变化规律,由图可见,温度越接近居里温度点( $T_C$ ),热释电系数越大。

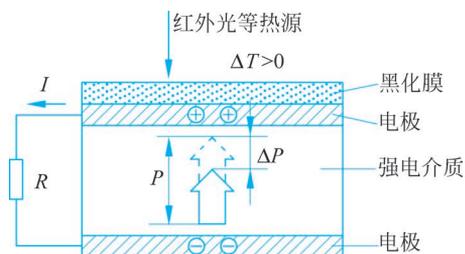


图 3-46 热释电效应示意图

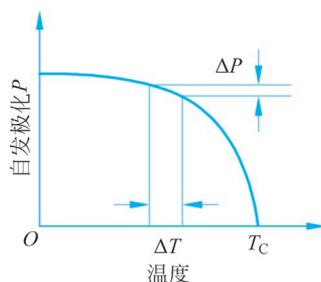


图 3-47 热释电系数的基本变化规律

热释电效应所产生的电荷不是永存的,由于处于器件表面,会与空气中的各种离子复合而使器件仍呈电中性。所以一般要在器件前方加装一个周期性遮断被测红外信号的机械装置,使器件接收红外光能而引起的温度作周期性变化。

利用热释电效应可以制成热释电红外传感器,如车辆计数器、人体探测器,以及探测环境温度的高温计(在高炉、熔化玻璃或热损失评估中使用的非接触式温度计)和辐射计(测量辐射源产生的功率)。另外一些应用包括红外分析仪、火灾检测、高分辨率测温术、医用温度计等。

另外,由于热释电式传感器很薄,所以比其他传感器响应更快,且灵敏度高。因为它检测的是温度梯度,无须与被测物达到热平衡。它适用于通过对被测物表面扫描实现成像,如用于红外热敏成像、无损测试、热点监视等。

## 2. 红外传感系统

红外技术已经在现代科技、国防、医疗、工农业等领域获得了广泛的应用。以红外线为测量介质的系统称为红外传感系统,按照功能可以分成五类:

- (1) 温度计和辐射计,用于温度、辐射和光谱测量。
- (2) 搜索和跟踪系统,用于搜索和跟踪红外目标,确定其空间位置并对它的运动进行跟踪。
- (3) 热成像系统,可产生整个目标红外辐射的分布图像。
- (4) 红外测距和通信系统。
- (5) 混合系统,由以上各类系统中的两个或者多个组合而成。

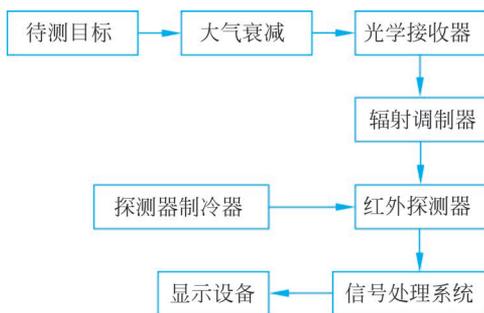


图 3-48 红外传感系统组成

一个典型的红外传感系统如图 3-48 所示。

(1) 待测目标: 根据待测目标的红外辐射特性可进行红外系统的测量。

(2) 大气衰减: 待测目标的红外辐射通过空气层时,由于各种气体分子以及各种溶胶粒的散射和吸收,使待测目标发出的红外辐射发生衰减。

(3) 光学接收器: 接收部分红外辐射并传输给红外传感器,相当于雷达天线,常用的是物镜。

(4) 辐射调制器: 又称调制盘和斩波器,它

将来自待测目标的辐射调制成交变的辐射光,提供目标方位信息,并且可以滤除大面积的干扰信号,具有多种结构。

(5) 红外探测器: 红外传感系统的核心,利用红外辐射与物质相互作用所呈现出来的物理效应探测红外辐射。按照工作原理分为光敏探测器和热敏探测器两类。

(6) 探测器制冷器: 由于某些探测器必须在低温下工作,所以相应的系统必须有制冷设备。经过制冷,探测器可以缩短响应时间,提高灵敏度。

(7) 信号处理系统: 将探测的信号进行放大、滤波,并从中提取出有用的信息。然后将这些信息转化为适当的格式,传送到控制设备或者显示器中。

(8) 显示设备: 红外传感系统的终端设备,常用的有示波器、显像管、红外感光材料、指示仪器和记录仪等。

依照上面的流程,红外传感系统就可以完成相应的物理量的测量。

## 3. 红外图像传感器

由于红外光是人的肉眼看不到的,因此不能采用普通相机摄取红外图像。红外图像传感器可以利用红外热成像技术将红外辐射转换成可见光进行显示,还可以利用计算机系统对红外热图像进行分析处理,完成存储和打印输出。

红外热成像分主动式和被动式两种。主动式红外热成像采用一个红外辐射源照射被测物,然后接收被物体返回的红外辐射;被动式红外热成像利用物体自身的红外辐射来摄取红外图像,这种成像一般称作热像,获取热像的装置称为热像仪。

红外图像传感器及红外热成像技术在许多领域都有广泛应用。在工业上,可以利用红外热成像技术进行各种环境下的温度检测,如对某一部件进行温度分布和热传导性能检测,高速飞行的物体与空气摩擦引起物体表面温度变化的情况等。热像仪还可以用于无损探伤。

由于红外图像传感器能够快速、准确地测量目标物的温度分布情况,在电力、石油、化工、冶金等行业中常用作生产监控装置,它能够及时发现安全隐患并进行报警,为安全生产提供了保障。红外图像传感器还可以帮助消防队员迅速了解火灾中被困人员的伤亡情况,或协助公安人员进行夜间巡逻、监视等。

另外,红外热像仪在临床医学诊断中也具有十分重要的作用。采用医用红外热像仪可以方便地获取病变部位的红外图像,通过对红外图像温度信息的分析,便可对疾病进行诊断。近年来又开发出多幅热图过程诊断技术,对病变区对外部温度刺激的响应进行过程采样和特征分析,从而更精确地揭示病变区温度变化特征,为准确诊断提供可靠依据。

红外热像仪的主要技术参数包括器件类型(如 $320\times 240$ 非制冷非晶硅焦平面阵列)、响应波段、启动时间、稳定时间、工作时间限制、增益、视频输出模式、功耗、外形尺寸、供电要求、重量、工作温度等。镜头的主要参数包括焦距、相对孔径、调焦方式、像敏面尺寸等。

#### 4. 红外测温仪

红外测温技术在产品质量控制和监测、设备在线故障诊断、安全保护以及节约能源等方面发挥着重要作用。近20年来,非接触红外测温仪在技术上得到迅速发展,性能不断提高,适用范围也不断扩大,市场占有率逐年增长。比起接触式测温方法,红外测温有响应时间快、非接触、使用安全及使用寿命长等优点。

选择红外测温仪可分为3个方面:性能指标方面,如温度范围、光斑尺寸、工作波长、测量精度、响应时间等;环境和工作条件方面,如环境温度、窗口、显示和输出、保护附件等;其他方面,如使用方便、维修和校准性能以及价格等。

使用红外测温仪,应注意以下几点:

(1) 确定测温范围。每种型号的测温仪都有自己特定的测温范围。因此,用户的被测温度范围一定要考虑准确、周全,既不要过窄,也不要过宽。根据黑体辐射定律,在光谱的短波段由温度引起的辐射能量的变化将超过由发射率误差引起的辐射能量的变化,因此,测温时应尽量选用短波段。

(2) 确定目标尺寸。红外测温仪根据原理可分为单色测温仪和双色测温仪(又称辐射比色测温仪)。对于单色测温仪,在进行测温时,被测目标面积应充满测温仪视场。建议被测目标尺寸超过视场大小的50%为好。如果目标尺寸小于视场,背景辐射能量就会进入测温仪而干扰测温读数,造成误差。相反,如果目标大于测温仪的视场,测温仪就不会受到测量区域外面的背景影响。

(3) 确定光学分辨率。光学分辨率是测温仪到目标之间的距离 $D$ 与测量光斑直径 $S$ 之比。如果测温仪由于环境条件限制必须安装在远离目标之处,而又要测量小的目标,就应选择高光学分辨率的测温仪。光学分辨率越高,测温仪的成本也越高。

(4) 确定波长范围。目标材料的发射率和表面特性决定测温仪的光谱响应或波长。对于高反射率合金材料,有低的或变化的发射率。在高温区,测量金属材料的最佳波长是近红外,可选用 $0.18\sim 1.0\mu\text{m}$ 波长;在其他温区,可选用 $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ 波长。有些材料在特定波长是透明的,红外能量会穿透这些材料,对这种材料应选择特殊的波长。例如,测量火焰中的 $\text{CO}_2$ 用窄带 $4.24\sim 4.3\mu\text{m}$ 波长,测量火焰中的 $\text{CO}$ 用窄带 $4.64\mu\text{m}$ 波长,测量火焰中的 $\text{NO}_2$ 用 $4.47\mu\text{m}$ 波长。

(5) 确定响应时间。响应时间表示红外测温仪对被测温度变化的反应速度,定义为到

达最终读数的 95% 能量所需要时间,它与光电探测器、信号处理电路及显示系统的时间常数有关。如果目标的运动速度很快或测量快速加热的目标时,要选用快速响应红外测温仪,否则达不到足够的信号响应,会降低测量精度。然而,并不是所有应用都要求快速响应的红外测温仪。对于静止的目标或目标热过程存在热惯性时,测温仪的响应时间就可以放宽要求。因此,红外测温仪响应时间的选择要和被测目标的情况相适应。

(6) 信号处理。测量离散过程(如零件生产)和连续过程不同,要求红外测温仪有信号处理功能(如峰值保持、谷值保持、平均值)。如测温传送带上的玻璃时,就要用峰值保持,其温度的输出信号传送至控制器内。

(7) 考虑环境条件。测温仪所处的环境条件对测量结果有很大影响,应加以考虑并适当解决,否则会影响测温精度甚至引起测温仪的损坏。当环境温度过高,存在灰尘、烟雾和蒸汽的条件下,可选用厂商提供的保护套,水冷却、空气冷却系统,空气吹扫器等附件。这些附件可有效地解决环境影响并保护测温仪,实现准确测温。

### 5. 被动式热释电红外探测器

在电子防盗、人体探测器领域中,被动式热释电红外探测器的应用非常广泛,因其价格低廉、技术性能稳定而受到广大用户和专业人士的欢迎。

#### 1) 工作原理及特性

人体都有恒定的体温,一般在  $37^{\circ}\text{C}$ ,所以会发出特定的波长为  $10\mu\text{m}$  左右的红外线,被动式红外探头就是靠探测这种红外线而进行工作的。人体发射的红外线通过菲泥尔滤光片增强后聚集到红外感应源上。红外感应源通常采用热释电元件,这种元件在接收到人体红外辐射后,温度发生变化,会失去电荷平衡,向外释放电荷,后续电路经检测处理后就能产生报警信号。

这种探测器是以探测人体辐射为目标的。所以热释电元件对波长为  $10\mu\text{m}$  左右的红外辐射必须非常敏感。为了仅仅对人体的红外辐射敏感,在它的辐射照面通常覆盖有特殊的菲泥尔滤光片,使环境的干扰受到明显的控制。

传感器包含两个互相串联或并联的热释元件。而且制成的两个电极化方向正好相反,环境背景辐射对两个热释元件几乎具有相同的作用,使其产生释电效应相互抵消,于是探测器无信号输出。一旦有人侵入探测区域内,人体红外辐射通过部分镜面聚焦,并被热释元件接收,但是两片热释元件接收到的热量不同,产生的电信号也不同,不能抵消,经信号处理而报警。

#### 2) 探测器的优缺点

该探测器的优点是本身不发出任何类型的辐射,器件功耗很小,隐蔽性好,价格低廉。缺点是:

- (1) 容易受各种热源、光源干扰。
- (2) 被动红外穿透力差,人体的红外辐射容易被遮挡,不易被探头接收。
- (3) 易受射频辐射的干扰。
- (4) 当环境温度和人体温度接近时,探测和灵敏度明显下降,有时会造成短时失灵。

#### 3) 探测器的安装要求

热释电红外人体探测器只能安装在室内,其误报率与安装的位置和方式有极大的关系。正确的安装应满足下列条件:

- (1) 探测器应离地面 2.0~2.2m。
- (2) 远离空调,冰箱,火炉等空气温度变化敏感的地方。
- (3) 探测范围内不得隔屏,不得有家具、大型盆景或其他隔离物。
- (4) 探测器不要直对窗口,否则窗外的热气流扰动和人员走动会引起误报。此外,探测器不要安装在有强气流活动的地方。

红外热释电探测器的性能指标包括发射频率、发射电流、发射功率、无线报警距离、探测距离和探测角度等。

### 3.4 声敏传感器

机械振动在介质中的传播称为声波,人耳可以听到的声波频率范围是 16~20kHz,超过 20kHz 的声波称为超声波,如图 3-49 所示。

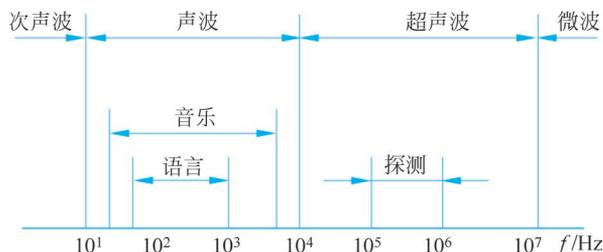


图 3-49 声波频率界限图

由于声源在介质中施力方向与波在介质中传播方向不同,声波的波形也不同,一般分为以下几种。

- (1) 纵波:质点振动方向与传播方向一致的波称为纵波。它能在固体、液体和气体中传播。
- (2) 横波:质点振动方向与传播方向相垂直的波称为横波。它只能在固体中传播。
- (3) 表面波:质点的振动介于纵波和横波之间,沿着表面传播,振幅随着深度的增加而迅速衰减的波称为表面波。它只能在固体的表面传播。

声敏传感器是将在气体、液体或固体介质中传播的机械振动转换为电信号的器件或装置。传统的声敏传感器包括电阻变换型、压电式、电容式等,本节将介绍在探测、遥感、医疗、生物等诸多领域都有广泛应用的超声波传感器和新兴的声波面波(SAW)传感器。

#### 3.4.1 超声波传感器

超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的传感器。超声波是一种振动频率高于人耳听觉范围的机械波,具有频率高、波长短、绕射现象小,特别是方向性好、能够定向传播等特点。超声波对液体、固体的穿透能力很强,尤其是在不透明的固体中,它可穿透几十米的深度。超声波碰到杂质或分界面会产生显著反射形成反射式回波,碰到活动物体能产生多普勒效应。因此超声波检测广泛应用于工业、国防、生物医学等方面。

##### 1. 超声波传感器的基本原理与结构

超声波传感器以超声波为检测手段,因此必须有发射超声波和接收超声波的装置,一般将它们称为超声换能器或超声探头。

超声波传感器按工作原理分为压电式、磁致伸缩式和电磁式等,在检测技术中应用最为广泛的是压电式。

压电式换能器是利用电致伸缩效应制成的。通过在压电材料上施加交变电压,使其产生电致伸缩振动而产生超声波。常用的压电材料为石英晶体、压电陶瓷和锆钛酸铅等。

压电式超声波接收器一般利用超声波发生器的逆效应进行工作,其结构和超声波发生器基本相同,有时就用同一个换能器兼作发生器和接收器两种用途。当超声波作用在压电晶片上时使晶片伸缩,在晶片的两个界面上产生交变电荷。这种电荷被转换成电压,经放大后送到测量电路,最后记录或显示出来。

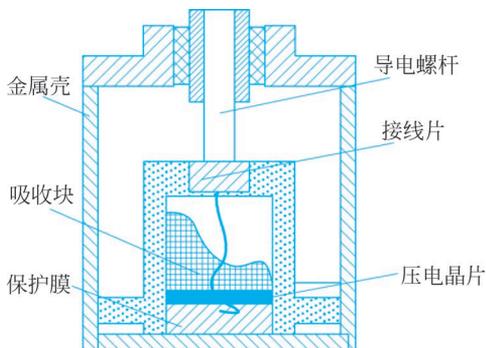


图 3-50 压电式超声波探头结构

由于用途不同,压电式超声波探头有多种结构形式,如直探头(纵波)、斜探头(横波)、表面波探头、双探头(一个发射,一个接收)、聚焦探头(将声波聚集成一细束)等。典型的压电式超声波探头结构如图 3-50 所示。

## 2. 超声波传感器的性能指标

超声探头的核心是其塑料外套或者金属外套中的一块压电晶片。构成晶片的材料可以有许多种。晶片的大小,如直径和厚度也各不相同,因此每个探头的性能是不同的,使用前必须预先了解它的性能。超声波传感器的主要性能指标包括:

(1) 工作频率。工作频率就是压电晶片的共振频率。当加到它两端的交流电压的频率和晶片的共振频率相等时,输出的能量最大,灵敏度也最高。

(2) 工作温度。由于压电材料的居里点(温度超过居里点,压电材料的压电特性将消失)一般比较高,特别是诊断用超声波探头使用功率较小,所以它们的工作温度相对较低,可以长时间地工作而不失效。医疗用的超声探头由于工作温度比较高,需要单独的制冷设备。

(3) 灵敏度。主要取决于制造晶片本身。机电耦合系数大,灵敏度高;反之,灵敏度低。

根据所测量对象的不同,超声波传感器的主要参数还包括测量范围、增益、分辨率、响应时间、电源、保护等级、输出方式以及重量、尺寸等。

## 3. 超声波传感器的应用

超声波传感器主要利用超声波在传播时的反射、折射、衰减等现象进行工作。下面介绍几种它在工业检测和医疗领域的应用。

### 1) 超声波传感器在检测技术中的应用

#### (1) 超声波测厚。

用超声波检测金属零件的厚度,具有测量精度高、测试仪器轻便、操作安全简单、易于读数或实现连续自动检测等优点。但对于声衰减很大的材料以及表面凹凸不平或形状很不规则的零件,用超声波测厚较困难。

超声波测厚常用脉冲回波法,如图 3-51 所示。超声波探头与被测物体表面接触,主控制器产生一定频率的脉冲信号,送往发射电路,经电流放大后激励压电式探头,以产生重复的超声波脉冲,脉冲波传到被测工件的另一面被反射回来,被同一探头接收。如果超声波在

工件中的声速  $v$  是已知的, 设工件厚度为  $d$ , 脉冲波从发射到接收的时间间隔为  $\Delta t$ , 则工件的厚度为

$$d = v\Delta t / 2$$

(2) 超声波测物位。

超声波测物位包括液位测量、固体料位测量、固-液分界面测量以及液-液分界面测量和液体有无测量等。根据使用的特点可分为定点式物位计和连续式物位计两大类。

超声波物位传感器具有测量精度高、安装方便、不受被测介质影响、耐高温、安全防爆等优点, 在物位仪表中使用广泛。

图 3-52 为脉冲回波式测量液位的工作原理图。探头发出的超声波脉冲通过介质到达液面, 经液面反射后又被探头接收。通过测量脉冲发射与接收的时间间隔以及超声波在介质中的传播速度, 即可求出探头与液面之间的距离。如果只需要知道液位是否处于某一高度, 则可以采用定点式液位计, 实现定点报警或液面控制。

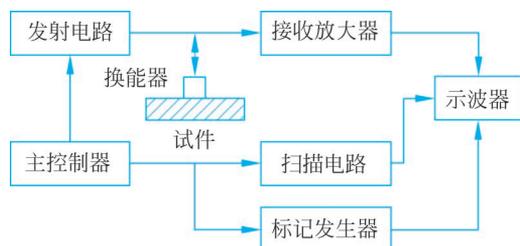


图 3-51 脉冲回波法测厚工作原理

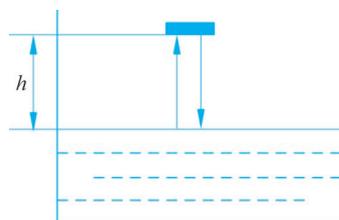


图 3-52 超声波测量液位示意图

(3) 超声波测流量。

超声波流量计对被测液体不产生附加阻力, 同时也不受液体的物理和化学性质影响, 因此可以测量多种冷热流体及泥浆等。按照测量原理可以分为时差测量法、相位差测量法和频率差测量法。

图 3-53 为超声波流量计的安装示意图, 对于时差测量法, 当传感器 1 为发射探头, 传感器 2 为接收探头时, 超声波顺流传播时间  $t_1$  为

$$t_1 = \frac{\frac{D}{\cos\theta}}{c + v \cdot \sin\theta}$$

当传感器 2 为发射探头, 传感器 1 为接收探头, 超声波逆流传播时间  $t_2$  为

$$t_2 = \frac{\frac{D}{\cos\theta}}{c - v \cdot \sin\theta}$$

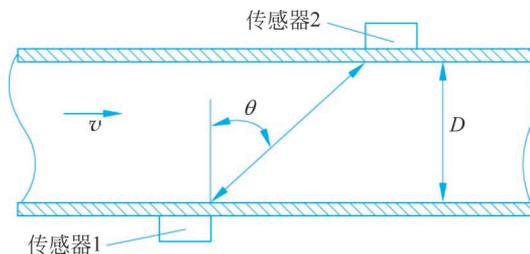


图 3-53 超声波流量计安装示意图

时差为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Dv \tan \theta}{c^2 - v^2 \sin^2 \theta}$$

由于  $c \gg v$ , 于是上式可以改写为

$$\Delta t \approx \frac{2Dv \tan \theta}{c^2}$$

液体的平均流速为

$$v \approx \frac{c^2}{2D \tan \theta} \Delta t$$

该方法的测量精度取决于  $\Delta t$  的测量精度。

#### (4) 超声波无损探伤。

过去许多技术因为无法探测到物体组织内部而受到阻碍, 超声波传感技术的出现改变了这种状况。超声波探伤分为穿透法探伤和反射法探伤。

穿透法探伤是根据超声波穿透工件后能量的变化状况来判断工件内部质量的方法。发射探头和接收探头分别置于工件的相对两面, 其结构如图 3-54 所示。当工件内有缺陷时, 因部分能量被反射, 接收能量将变小, 根据这个变化可以把工件内部的缺陷检测出来。该方法结构简单, 适合探测薄板; 探测灵敏度较低, 不能精确定位; 对两探头的相对距离和位置要求较严格。

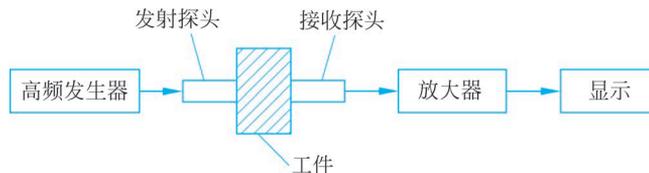


图 3-54 穿透法探伤原理图

反射法是以超声波在工件中反射情况的不同来探测缺陷的方法, 具体又分为一次脉冲反射法和多次脉冲反射法。它的原理如图 3-55 所示, 其中 T 为高频发生器产生的超声波, B 为工件底部反射的超声波, 简称底波, F 为缺陷处反射的超声波。由于超声波在工件上表面和下表面之间多次反射, 可以形成多个底波脉冲。一次脉冲反射法是以一次底波为依据进行探伤的方法。多次脉冲反射法是以多次底波为依据进行探伤的方法。

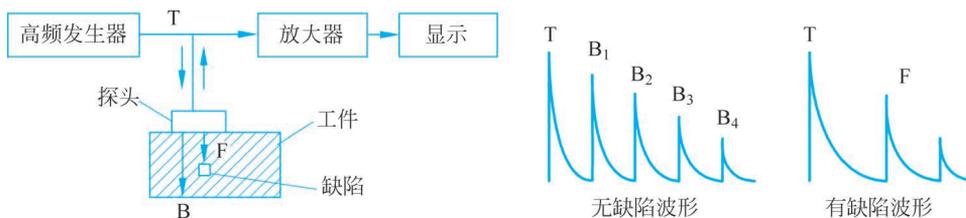


图 3-55 反射法探伤原理图

#### 2) 超声波传感器在医疗上的应用

超声波传感器在医学上的应用主要是诊断疾病, 它已经成为了临床医学中不可缺少的诊断方法。超声波诊断的优点是: 对受检者无痛苦、无损害、方法简便、显像清晰、诊断的准确率高。超声波诊断可以基于不同的医学原理, 其中有代表性的一种是利用超声波的反

射。当超声波在人体组织中传播遇到两层声阻抗不同的介质界面时,在该界面就产生反射回波。每遇到一个反射面时,回波在示波器的屏幕上显示出来,而两个界面的阻抗差值也决定了回波的振幅的高低。

另外,利用超声波的能量改变生物组织的结构、状态或功能,从而治疗某些疾病的研究称为超声治疗。利用较低强度的超声波的“温和”的生物效应来治疗某些疾病的方法称为超声理疗;反之,利用较强的超声波的剧烈作用来切断、破坏某些组织的方法称为超声手术。

### 3.4.2 SAW 传感器

声表面波简称 SAW(Surface Acoustic Wave),是英国物理学家瑞利(Rayleigh)于 19 世纪末期在研究地震波的过程中发现的一种集中在地表面传播的声波。后来发现,任何固体表面都存在这种现象。20 世纪 80 年代后,人们发现某些外界因素(如温度、压力、加速度、磁场、电压等)对 SAW 的传播参数会造成影响,进而研究这些影响与外界因素之间的关系,并根据这些关系研制出测量各种物理、化学参数的 SAW 传感器。

#### 1. SAW 传感器的特点

SAW 传感器之所以能够迅速发展并得到广泛应用,是因为它有许多独特的优点。

(1) 高精度,高灵敏度。SAW 传感器是将被测量转换为电信号频率进行测量,而频率的测量精度很高,有效检测范围线性好,而且抗干扰能力很强,适于远距离传输。例如 SAW 温度传感器的分辨率可以达到千分之一。

(2) 数字化。SAW 传感器将被测量转换为数字化的频率信号进行传输、处理,易于与计算机接口,组成自适应实时处理系统。

(3) 易批量生产。SAW 传感器的制作与集成电路技术兼容,极易集成化、智能化,结构牢固,性能稳定,重复性与可靠性好,适于批量生产。

(4) 体积小、质量轻、功耗低,可获得良好的热性能和机械性能。

#### 2. SAW 传感器的结构和工作原理

SAW 传感器是以 SAW 技术、电路技术、薄膜技术相结合设计的器件,由 SAW 换能器、电子放大器和 SAW 基片及其敏感区构成,采用瑞利波进行工作。

SAW 谐振器结构如图 3-56 所示,它是将一个或两个叉指换能器(IDT)置于一对反射栅阵列组成的腔体中构成的。谐振器结构采用一个 IDT 时称为单端对谐振器,采用两个 IDT 时称为双端对谐振器。反射栅阵列能够将一定频率的入射波能量限制在由栅条组成的谐振腔内。

当在压电基片上设置两个 IDT,一个为发射 IDT,另一个为接收 IDT 时,SAW 在两个 IDT 中心距之间产生时间延迟,称为 SAW 延迟线,如图 3-57 所示。

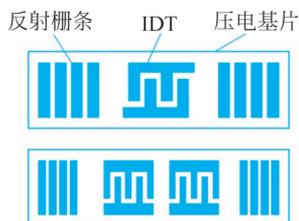


图 3-56 SAW 谐振器结构

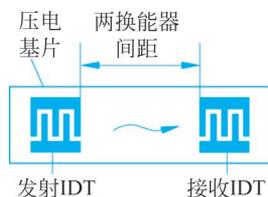


图 3-57 SAW 延迟线结构

采用 SAW 谐振器或 SAW 延迟线结构构成的振荡器分别称为谐振器型振荡器和延迟线型振荡器。

#### 1) SAW 瑞利波

SAW 是一种沿弹性体表面传播的机械波。瑞利波质点的运动是一种椭圆偏振。在各向同性固体中,它是由平行于传播方向的纵振动和垂直于表面及传播方向的横振动合成的,两者的相位差为  $90^\circ$ 。瑞利波的能量只集中在一个波长深的表面层内,频率越高,能量集中的表面层越薄。

#### 2) 敏感基片

敏感基片通常采用石英、铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 等压电单晶材料制成。当敏感基片受到物理、化学或机械量扰动作用时,其振荡频率会发生变化。通过适当的结构设计和理论计算,能使它仅对某一被测量有响应,并将其转换成频率量。

#### 3) 换能器

换能器是用蒸发或溅射等方法在压电基片表面淀积一层金属膜,再用光刻方法形成的叉指状薄膜,它是产生和接收声表面波的装置。当电压加到叉指电极上时,在电极之间建立了周期性空间电场,由于压电效应,在表面产生一个相应的弹性形变。由于电场集中在自由表面,所以产生的声表面波很强烈。由 IDT 激励的声表面波沿基片表面传播。当基片或基片上覆盖的敏感材料薄膜受到被测量调制时,声表面波的频率将改变,并由接收叉指电极测得。

#### 4) SAW 振荡器

SAW 传感器的核心是 SAW 振荡器,有谐振器型(R 型)和延迟线型(DL 型)两种。

延迟线型 SAW 振荡器由声表面波延迟线和放大电路组成,如图 3-58(a)所示。输入换能器  $T_1$  激发出声表面波,传播到换能器  $T_2$  转换成电信号,经放大后反馈到  $T_1$  以保持振荡状态。

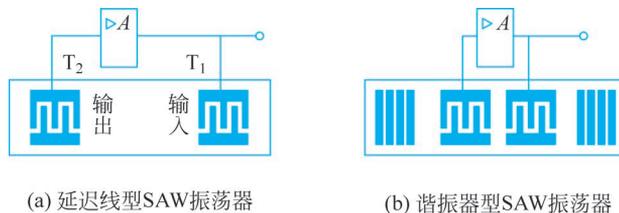


图 3-58 SAW 振荡器

谐振器型 SAW 振荡器由 SAW 谐振器和放大电路组成,如图 3-58(b)所示。单端对谐振器的 IDT 既是发射端,也是接收端;双端对谐振器中一个 IDT 作为发射端,另一个 IDT 作为接收端。将 SAW 谐振器的输出信号经放大后,正反馈到输入端,只要放大器的增益能够补偿谐振器及其导线的损耗,同时又满足一定的相位条件,谐振器就可以起振并维持振荡状态。

SAW 振荡器的基片材料由于外力或温度等物理量的变化而发生形变时,其上传播的 SAW 速度就会改变,从而导致振荡器频率发生变化。频率的变化量可以作为被测物理量的度量。

SAW 化学传感器是利用作为声传输区的衬底材料或其上的某种敏感膜对化学量敏感

而对 SAW 的速度进行调制工作的。当传输区接触到被测气体时,由于敏感膜与被测气体的相互作用,膜层的质量或电导率发生变化,SAW 的传播速度也随之改变。气体浓度不同,振荡器输出的频率变化量也不同。

### 3. SAW 传感器举例

#### 1) SAW 压力传感器

SAW 谐振式力学量传感器包括压力传感器和加速度传感器,它们都是基于 SAW 器件在基底压电材料受到外界作用力时,谐振器的结构尺寸、压电材料的密度、弹性系数等发生变化,从而导致 SAW 的波长、频率和传播速度等发生变化。通过测量 SAW 传感器的频率变化可以确定压力的大小。SAW 压力传感器由 SAW 振荡器、敏感膜片、基底等组成,如图 3-59 所示。

#### 2) SAW 气体传感器

SAW 气体传感器是在 SAW 传播路径上和 IDT 区域淀积一层化学界面膜,当界面膜吸附被测气体后,引起 SAW 传播速度变化,可以通过测量 SAW 频率的变化测量气体浓度。已经开发出来的 SAW 气体传感器有  $\text{SO}_2$ 、水蒸气、丙酮、甲醇、氢气、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NO}_2$  等传感器。延迟线型 SAW 气体传感器的结构如图 3-60 所示。

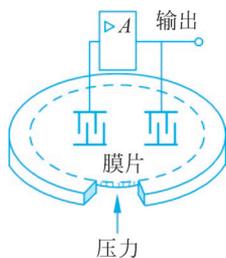


图 3-59 SAW 压力传感器示意图

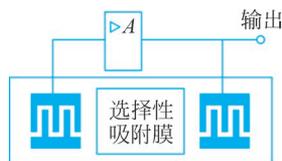


图 3-60 延迟线型 SAW 气体传感器

#### 3) SAW 温度传感器

当温度变化时,SAW 振荡器的振荡频率会发生变化,从而可以制成 SAW 温度传感器。SAW 温度传感器具有长期稳定性,灵敏度很高,可测量出  $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$  的微小温度变化。SAW 温度传感器可以用于气象测温、粮仓测温、火灾报警等。

## 3.5 气敏传感器

随着国民经济的快速发展,及时、准确地对易燃、易爆、有毒、有害气体进行检测、预报和自动控制已成为煤炭、石油、化工、电力等部门亟待解决的重要课题。同时,随着人们生活水平的提高,家用燃料结构的改变,交通运输事业的发展,人们对净化生态环境的要求也越来越高,要求能够使用性能优良、方便耐用、小型多功能的传感器及时、准确地检测、监控易燃、易爆、有毒、有害气体。

### 3.5.1 气敏传感器的分类与特性

对不同气体的检测有多种方法,目前主要有利用半导体气体器件检测的电气法、利用电解质和电极对气体进行检测的电化学法、利用气体对光的折射率或光吸收等特性检测的光

学法。根据构成气体传感器的材料,通常将它们分为干式和湿式两大类。凡利用固体敏感材料检测气体的均为干式气体传感器,利用水溶液或电解液感知气体的均为湿式气体传感器。干式气体传感器包括半导体气敏元件、固体电解质气敏元件、接触燃烧式、电化学式等,如表 3-3 所示。

表 3-3 主要类型的气敏元件

名称	检测原理、现象	代表性气敏元件及材料	检测气体	
半导体气敏元件	电阻型	表面控制型	可燃性气体、 $C_2H_2$ 、 $CO$ 、 $C-Cl_2$ - $F_2$ 、 $NO_2$ 等	
		体控制型	可燃性气体、 $O_2$ 、 $C_nH_{2n}$ 、 $C_nH_{2n-2}$ 、 $C_nH_{2n+2}$ 等	
	非电阻型	二极管整流作用	$Pd/CdS$ 、 $Pd/TiO_2$ 、 $Pd/ZnO$ 等	$H_2$ 、 $CO$ 、 $SiH_4$ 等
		FET 气敏元件	以 $Pd$ 、 $Pt$ 、 $SnO_2$ 为栅极的 MOSFET	$H_2$ 、 $CO$ 、 $H_2S$ 、 $NH_3$
	电容型	$Pd-BaTiO_3$ 、 $CuO-BaSnO_3$ 、 $CuO-BaTiO_3$ 、 $Ag-CuO-BaTiO_3$ 等	$CO_2$	
固体电解质气敏元件	电池电动势	$CaO-ZrO_2$ 、 $Y_2O_3-ZrO_2$ 、 $Y_2O_3-TiO_2$ 等	$O_2$ 、卤素、 $SO_2$ 、 $SO_3$ 等	
	混合电位	$CaO-ZrO_2$ 、有机电解质等	$CO$ 、 $H_2$	
	电解电流	$CaO-ZrO_2$ 、 $YF_6$ 、 $LaF_3$	$O_2$	
	电流	$Sb_2O_3 \cdot nH_2O$	$H_2$	
接触燃烧式	燃烧热(电阻)	$Pt$ 丝+催化剂	可燃性气体	
电化学式	恒电位电解电流	气体透过膜+贵金属阴极+贵金属阳极	$CO$ 、 $NO$ 、 $SO_2$ 、 $O_2$	
	伽伐尼电池式	气体透过膜+贵金属阴极+贱金属阳极	$O_2$ 、 $NH_3$	
其他类型	红外吸收型、石英振荡型、光导纤维型、热传导型、异质结构、气体色谱法、声表面波气体传感器		无机气体和有机气体	

气敏传感器的主要参数与特性如下。

### 1. 灵敏度

灵敏度标志着气敏元件对气体的敏感程度,决定了测量精度。对于电阻型气体传感器,灵敏度  $S$  可以用阻值变化量  $\Delta R$  与气体浓度变化量  $\Delta P$  之比来表示:

$$S = \Delta R / \Delta P$$

或者用气敏元件在洁净空气中的阻值  $R_0$  与在被测气体中的阻值  $R$  之比表示:

$$K = R_0 / R$$

### 2. 响应时间

从气敏元件与被测气体接触,到气敏元件的特性达到新的恒定值所需要的时间称为响应时间。它反映了气敏元件对被测气体浓度的反应速度。

### 3. 选择性

在多种气体共存的条件下,气敏元件区分气体种类的能力称为选择性。对某种气体的选择性好,表明气敏元件对该气体有较高的灵敏度。选择性好的气敏传感器对目标气体的灵敏度应该高于对干扰气体的灵敏度 5 倍以上。

### 4. 稳定性

当气体浓度不变时,若其他条件发生变化,在规定时间内气敏元件输出特性维持不变的能力称为稳定性。稳定性表示气敏元件对气体浓度以外的各种因素的抵抗能力。

### 5. 温度特性

气敏元件的灵敏度随温度变化的特性称为温度特性。温度包括元件自身温度和环境温度。元件自身温度对灵敏度的影响很大,一般用温度补偿法处理。

### 6. 湿度特性

气敏元件灵敏度随环境湿度变化的特性称为湿度特性。一般采用湿度补偿法消除湿度变化对测量数据的影响。

### 7. 抗腐蚀性

抗腐蚀性是指气敏传感器在暴露于高浓度目标气体时仍能正常工作的能力。在气体大量泄漏时,探测器应能够承受气体浓度期望值的10~20倍。在返回正常工作条件时,传感器的漂移和零点校正值应尽可能小。

## 3.5.2 可燃性气体传感器

可燃性气体包括氢气( $H_2$ )、一氧化碳(CO)、甲烷( $CH_4$ )和液化石油气(LPG)等。这些气体如果浓度过高,极易引起爆炸和火灾等危险事故。检测这一类气体的传感器有半导体气敏传感器、接触燃烧式传感器、定电位电解式传感器、原电池式传感器、热传导传感器、红外传感器及纸型传感器等。其中:定电位电解式传感器是一种湿式气体传感器,通过测定气体在某个确定电位电解时所产生的电流来测量气体浓度;原电池式传感器主要用于缺氧检测;热传导传感器利用加热的铂电阻丝在不同气体中的热传导率不同,从而引起电阻值变化情况不同的原理工作;红外传感器利用不同的气体吸收不同的红外光工作;纸型传感器则是利用化学试纸探测目标气体,试纸颜色变化与气体浓度有一定的对应关系。

下面对半导体气敏传感器和接触燃烧式传感器作简要介绍。

### 1. 半导体气敏传感器

半导体气敏传感器包括用氧化物半导体陶瓷材料作为敏感体制作的气敏传感器以及用单晶半导体器件制作的气敏传感器,按传感机理可以分为电阻型和非电阻型。电阻型又包括表面电阻控制型和体电阻控制型。

#### 1) 表面电阻控制型气敏传感器

$SnO_2$ 、 $ZnO$ 、 $WO_3$  等都属于表面电阻控制型半导体气敏元件,它们不论在空气中或惰性气体中,当表面吸附某种气体时都会引起电导率的变化。图3-61给出了N型氧化物半导体吸附气体后阻值的变化情况。

半导体表面态理论认为,当气体分子的亲和能(电势能)大于半导体表面的电子逸出功时,则该气体吸附后从半导体表面夺取电子而形成负离子吸附,如氧气、氧化氮等。若在N型半导体表面形成负离子吸附,则表面多数载流子(导带电子)浓度减小,电阻增大;若在P型半导体表面形成负离子吸附,表面多数载流子(价带空穴)浓度增大,电阻减小。若气体分子的电离能小于半导体表面的电子逸出功,则气体供给半导体表面电子,形成正离

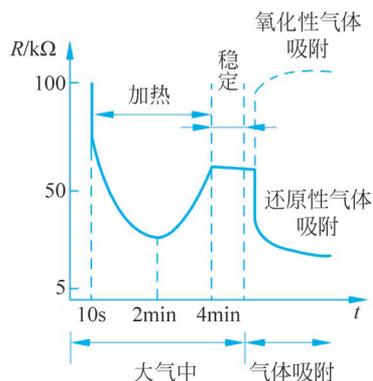


图 3-61 N 型氧化物半导体吸附气体后阻值变化

子吸附,如  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  及各种碳氢化合物。当 N 型半导体表面形成正离子吸附时,多数载流子(导带电子)浓度增加,电阻减小;当 P 型半导体表面形成正离子吸附时,则多数载流子(价带空穴)浓度减小,电阻增大。这种现象就是气敏性。

下面以  $\text{SnO}_2$  系气敏元件为例进行介绍。

$\text{SnO}_2$  气体传感器有烧结型、厚膜型和薄膜型 3 种。它们都包括敏感元件及其基底、加热器和信号引出电极。

烧结型  $\text{SnO}_2$  是一种实用化最早、工艺最成熟的气敏传感器,其气敏元件是以粒度很小的  $\text{SnO}_2$  为基本材料,添加增感剂等物质后采用烧结工艺制成的多孔状  $\text{SnO}_2$  陶瓷,如图 3-62(a)所示。由于添加剂和烧结工艺的不同,可以呈现出不同的气敏特性。对不同的气体,传感器的最佳检测温度不同。图 3-63 显示了某种烧结型气敏元件电阻与气体浓度的关系。

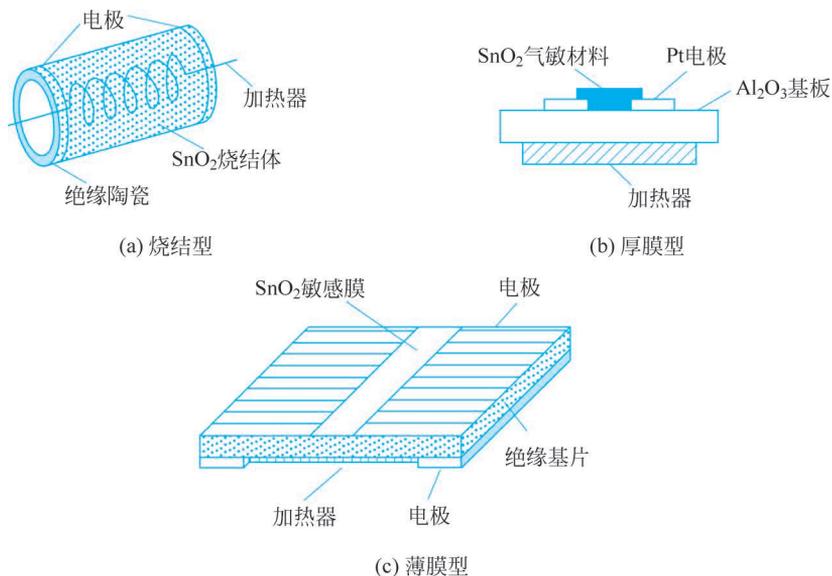


图 3-62  $\text{SnO}_2$  气敏元件结构

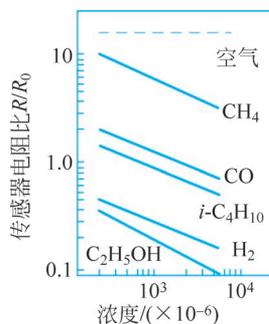


图 3-63 传感器电阻与气体浓度关系( $R_0$  为传感器在浓度为  $1000 \times 10^{-6}$  时的  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  中的电阻(基准))

厚膜型  $\text{SnO}_2$  气敏元件是将粉状  $\text{SnO}_2$  与添加剂混合后制成浆料,采用丝网印刷技术涂在氧化铝基片上烧制而成的,如图 3-62(b)所示。它的性能一致性较好,适于批量生产。

薄膜型  $\text{SnO}_2$  气敏元件是在绝缘衬底上采用蒸发、溅射或化学气相沉积等方法制作

SnO<sub>2</sub> 敏感膜,如图 3-62(c)所示。用这种方法制成的敏感膜颗粒很小,具有极高的灵敏度和相应速度。敏感元件的薄膜化有利于器件降低功耗、小型化,以及与集成电路制造技术兼容,因此是一种很有发展前景的器件。

## 2) 体电阻控制型气敏传感器

材料的体电阻随某种气体的浓度发生变化的传感器统称为体电阻控制型气敏传感器,主要气敏元件包括  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 等。下面以  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为例做以介绍。

$\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是一种 N 型半导体,在高温下如果吸附了还原性气体,部分三价铁离子被还原成二价铁离子,使电阻率很高的  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 转变为电阻率很低的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。随着气敏元件表面吸附的还原性气体增加,二价铁离子相应增多,气敏元件的导电性增强。一旦脱离还原性气体,二价铁离子在空气中被氧化为三价铁离子,重新变为  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,恢复高阻状态。图 3-64 显示了  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 气敏元件对不同气体的响应特性。

$\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对丙烷和异丁烷的灵敏度较高,这两种气体正是液化石油气的主要成分,因此  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 气敏元件又称为“城市煤气传感器”。

### 2. 接触燃烧式气敏传感器

可燃性气体(H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 和 LPG 等)与空气中的氧接触,发生氧化反应,产生反应热(无焰接触燃烧热),使铂丝温度升高。通过测量铂丝的电阻变化,就可以检测空气中可燃性气体的浓度。实际应用中,为了延长铂丝寿命,提高响应特性,需要在铂丝圈外面涂一层氧化物触媒(如氧化铝),其结构图和测量电路如图 3-65 所示。

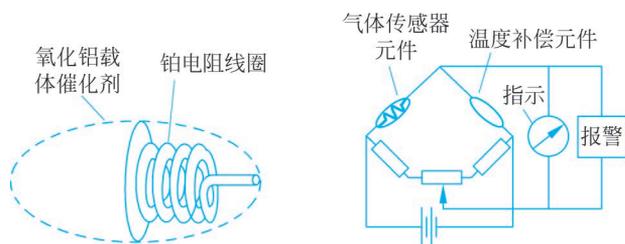


图 3-65 接触燃烧式气敏传感器结构图和测量电路

接触燃烧式传感器可以产生正比于易燃气体浓度的线性输出,测量范围可达 100%LEL(爆炸下限)。在测量时,周围的氧浓度要大于 10%以支持易燃气体的氧化反应。这种传感器可以测量一种或几种混合在一起的可燃性气体,但是不能区分混合气体中的各种成分。

接触燃烧式气敏传感器具有快速的响应时间、优异的重复性和高精度,并且不受温度和湿度影响。但是不宜工作在气体浓度超过 LEL 的情况,另外要避免被硫化物、氯化物等腐蚀,腐蚀会在氧化铝表面造成不易消除的损坏。

### 3. 可燃性气体传感器的主要性能参数

在选择可燃性气体传感器产品时,首先要确定所检测气体的种类和可能的浓度范围,了解传感器的工作环境温度 and 湿度,选择对可燃性气体具有高灵敏度、长期稳定性、良好的抗

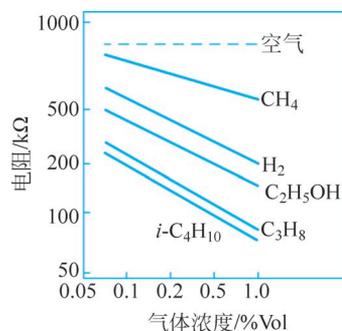


图 3-64  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 气敏元件对不同气体的响应特性

湿性和重复性的产品。另外还需要考虑的一些参数,包括加热电压、测量电压、洁净空气中的电阻、工作寿命、响应时间、恢复时间以及灵敏度等。

### 3.5.3 氧气传感器

作为空气质量中的主要指标,氧浓度越来越受到人们的关注,氧浓度监测和控制成为一项重要的研究课题。根据工作原理不同,氧气传感器大体上可以分为3类:氧化物半导体型,浓差电池型和极限电流型。

#### 1. 氧化物半导体氧传感器

在一定温度下,金属氧化物与环境氧分压之间达到平衡状态时,氧化物电导率与氧分压有关。当氧分压很低时,氧化物中的氧原子向外逸出,氧化物中残留大量氧空位或金属间隙原子等缺陷,氧化物呈现以电子为多数载流子的N型导电性,其电导率随氧分压的降低而增大。相反,在氧分压很高时,氧化物中的氧原子将过剩而形成氧间隙原子或金属原子空位,使氧化物呈现以空穴为多数载流子的P型导电性,其电导率随氧分压的增大而增大。在氧分压处于中间状态时,电子或空穴都很少,导电性为离子导电。所以对于不同的金属氧化物,其导电类型可能是N型半导体,也可能是P型导电体或离子导电体。

氧化物半导体氧传感器属于体电阻控制型传感器,代表性的敏感材料是具有N型导电性的 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 。

$\text{TiO}_2$ 是具有金刚石结构的N型半导体,在常温下难以与空气中的氧发生化学吸附而不显氧敏特性,只有在高温下才有明显的氧敏特性。 $\text{TiO}_2$ 氧传感器有烧结型、厚膜型和薄膜型3种结构。为了获得更高的灵敏度,通常添加铂作为催化剂。

$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 比 $\text{TiO}_2$ 具有更大的氧空位自扩散系数,所以能够更快地进行氧化还原反应,用 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 制作的氧传感器具有更好的响应特性。尤其是薄膜型 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 氧敏元件,具有尺寸小、灵敏度高等优点,越来越受重视。

#### 2. 浓差电池型氧传感器

浓差电池型氧传感器采用具有氧离子导电性的氧化锆( $\text{ZrO}_2$ )固体电解质为工作介质。它是在纯的 $\text{ZrO}_2$ 中添加氧化钙或氧化钇等稳定剂,再经过高温焙烧后制成的。由于一部分四价的锆被二价的钙或三价的钇置换,晶体中产生氧离子空位,因此 $\text{ZrO}_2$ 就变成了氧离子导体。在温度达到 $600^\circ\text{C}$ 以上时,具有良好的导电性。

氧化锆氧敏器件的工作原理可以用浓差电池模型来解释。如图3-66所示,当氧化锆两侧的氧气浓度不同时,高浓度一侧的氧通过晶体中的氧空位以离子形式向低浓度一侧迁移,形成氧离子导电,结果使高浓度一侧的铂电极失去电子显正电,低浓度一侧的铂电极得到电子显负电,在两铂电极之间就产生氧浓差电势。

利用浓差电池型氧传感器可以检测汽车发动机空燃比状态,或用于缺氧报警、环境氧浓度测定等。

氧浓度传感器的性能指标通常包括:测量浓度范围、精度、响应时间、过程气温度、电气部分使用温度、工作电压、外壳防护等级、输出电流以及探头长度等。

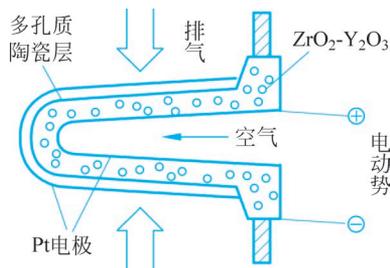


图 3-66  $\text{ZrO}_2$  浓差电池型氧传感器的结构、浓差电池模型

### 3.5.4 电子鼻

电子鼻(Electronic Nose)是一种能够感知和识别气味的电子系统,即电子嗅觉系统。它由一个具有部分专一性的电子化学传感器阵列和一个合适的模式识别系统组成,能够识别单一的或复合的气味,还能够识别单一成分的气体、蒸汽或其他混合物。

#### 1. 电子鼻的结构

电子鼻是感知和识别气味的电子系统。所谓气味通常是指许多在室温下能够以气态存在的有机化合物(统称挥发性有机化合物,缩写为VOC)。根据对人和动物的嗅觉系统的分析,人们设计的电子鼻由3部分组成:即气体传感器阵列、信号处理系统和模式识别系统。气体传感器阵列获取气味的初步信息,信号处理系统完成对信号的处理,模式识别系统将处理过程的待识别气味的信息和已知气味的信息数据库进行对比,从而识别出不同的气味。如图3-67所示。

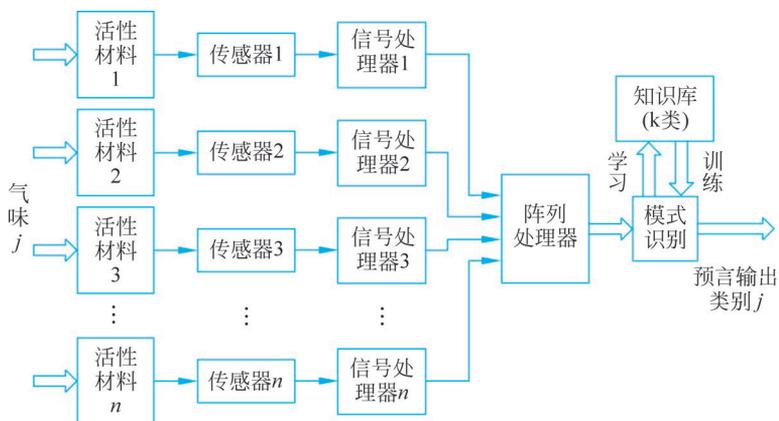


图 3-67 电子鼻的一般结构

#### 2. 气体传感器阵列

在电子鼻的结构中,活性敏感材料接触到某种气味时会发生一些变化,传感器将这种变化转换为电信号。 $n$ 种活性敏感材料和 $n$ 个传感器对一种气体的响应便构成了传感器阵列对该气味的响应谱,每种气味都会有各自的特征响应谱,可以据此区分不同的气味。因此,选择性优良的传感器和合适的传感器组合对电子鼻的性能至关重要。

电子鼻所采用的气体传感器主要有金属氧化物半导体电导型、电导聚合物(CP)电导型、石英晶体微天平(QCM)型、声表面波(SAW)型、MOS场效应晶体管(MOSFET)型等。

包括MOS型和CP电导型气体传感器的工作原理都是基于VOC和敏感材料发生作用,从而改变材料的电导或电阻。金属氧化物半导体电导型所用的材料为掺有贵金属催化剂铂或钨的二氧化锡、二氧化钛、氧化锌、氧化铌等。当探测气体中混有硫化物时,MOS型气体传感器容易中毒。CP型气体传感器需要通过电聚合过程来激活,这既耗费时间,又容易造成各批产品之间的性能差异。

QCM由直径为几微米的石英振动盘和电极构成。当振荡信号加在器件上时,器件会在它的特征频率上发生共振。如果振动盘上淀积了有机聚合物,聚合物吸附VOC后使器件质量增加,从而引起振荡频率降低,通过测定频率变化可以识别VOC。

MOSFET 气体传感器的工作原理是：当 VOC 与催化金属接触发生反应，反应产物扩散到 MOSFET 的栅极，改变了器件的性能，通过分析器件性能的变化可以识别 VOC。

SAW 气敏传感器是在 SAW 的传播途径淀积了能吸附 VOC 的聚合物膜。当 SAW 被接收时，信号发生了相移，相移量与吸附的 VOC 有关。可以通过测定相移(或频率)来识别 VOC。

### 3. 信号处理系统

在电子鼻中，传感器  $i$  对气味  $j$  产生一个与时间相关的电信号输出  $V_{ij}$ ，由  $n$  个传感器组成的阵列对气味  $j$  的响应是  $n$  维状态空间的一个矢量  $V_p$ ，写成分量形式是

$$V_p = \{V_1, V_2, \dots, V_{n_j}\}$$

如果用直方图表示  $n$  个传感器的输出，则构成阵列对气味  $j$  的响应谱。阵列对气味  $j$  的响应灵敏度不仅取决于传感器的质量，测试环境和信号处理方式也有十分重要的作用。迄今为止已经有多种稳态模型用于处理气敏传感器的信号，如表 3-4 所示，传感器信号中的瞬态信息也通过适当的处理加以利用，例如传感器信号的一阶导数可以帮助区分传感器的漂移和样本的检测。同时，还可以利用动态响应测量来校正传感器阵列，以节省相关的神经网络训练时间。

表 3-4 用于气敏传感器的某些传感器信号处理方式

模 型	公 式	传感器类型
差分	$X_{ij} = (V_{ij}^{\max} - V_{ij}^{\min})$	金属氧化物化学电阻, SAW
相对	$X_{ij} = (V_{ij}^{\max} / V_{ij}^{\min})$	金属氧化物化学电阻, SAW
部分差分	$X_{ij} = (V_{ij}^{\max} - V_{ij}^{\min}) / V_{ij}^{\min}$	金属氧化物电阻, 导电聚合物
对数	$X_{ij} = \log(V_{ij}^{\max} - V_{ij}^{\min})$	金属氧化物电阻
传感器归一	$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{ij}^{\min}) / (V_{ij}^{\max} - V_{ij}^{\min})$	金属氧化物化学电阻, 压电晶体

经验表明，相对和部分差分模型有助于补偿传感器的敏感性，而部分差分模式能使金属氧化物化学电阻的浓度依赖关系线性化。对数分析可以使高度非线性的浓度依赖关系线性化。传感器输出的归一化使其输出介于  $[0, 1]$  之间，它不仅可以减少化学计量分类器的计算误差，还可以为人工神经网络分类器的输入准备适当的数据。

### 4. 模式识别系统

常用的模式识别方法分为有监督方法和无监督方法。有监督模式识别方法先用一组已知类别的气味作为训练集，并由该训练集得到判别模型；再用一未知气味测试所得到的数学模型，并给出预测的类别。已应用的有监督识别方法如表 3-5 所示，其中有些是有参数的，有些是无参数的。

表 3-5 电子鼻采用的某些学习识别法

	模式识别方法	线性特性	参 数
有监督方法	主元素分析	线性	无
	判别函数分析	线性	有
	特征权重法	线性	有
	样板匹配	线性	有
	反向传输人工神经网络	非线性	无
	学习矢量定量法	非线性	无

续表

	模式识别方法	线性特性	参 数
无监督方法	欧几里得聚类分析	线性	无
	其他聚类分析	非线性	无
	Kohonen 网络	非线性	无

无监督识别法也需要学习,不过不需要单独的训练阶段,而是自动地在响应矢量间识别和学习,因而更接近人脑的工作方式。其基本思想是同类气味在多维空间中应该靠得更近些,结果相似的样本聚在一起成为一类,从而达到分类的目的。

### 3.6 生物敏传感器

生物敏传感器是分子生物学与微电子学、电化学、光学等结合的产物。它采用固定化的细胞、酶、抗体、抗原、激素等生物活性物质与换能器相配合组成传感器,如图 3-68 所示。这种传感器利用生物特有的生化反应,有针对性地对有机物进行简便而迅速的测定。它有良好的选择性,噪声低,操作简单,重复性好,能以电信号方式直接输出,容易实现检测自动化。

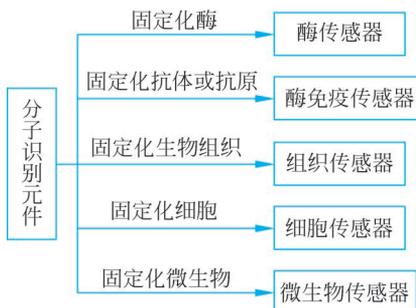


图 3-68 生物敏传感器

#### 1. 生物敏传感器的组成和分类

生物敏传感器由分子识别元件(敏感基元)和与之结合的信号转换器件(换能器)两部分组成。敏感基元是指对目标物进行选择作用的生物活性单元,它可以是生物体成分或生物体本身。敏感基元的主要功能是特异的识别各种被测物并与之反应。换能器是指能捕捉敏感基元与目标物之间的作用过程,并将其表达为物理信号的元件。常用的换能器有电化学电极、离子敏场效应晶体管(ISFET)、热敏电阻及微光管等。

生物敏传感器按所用分子识别元件的不同可以分为酶传感器、微生物敏传感器、组织传感器、细胞传感器、免疫传感器等;按信号转换元件不同可以分为电化学生物敏传感器、半导体生物敏传感器、测热型生物敏传感器、测光型生物敏传感器、测声型生物敏传感器等;按对输出信号的不同测量方式又分为电位型生物敏传感器、电流型生物敏传感器和伏安型生物敏传感器。

#### 2. 生物敏传感器的工作方式

##### 1) 将化学变化转变为电信号

目前大部分生物敏传感器的工作原理均属于这种类型。以酶传感器为例,酶能催化特定的物质发生反应,从而使特定物质的量有所增减。用能把这类物质的量的改变转换为电信号的装置与固定化酶相耦合,即组成酶传感器。常用的信号转换装置有氢离子电极、过氧化氢电极以及其他离子选择性电极、ISFET 等。

##### 2) 将热变化转变为电信号

固定化的生物物质在进行分子识别时经常伴随有热量变化,例如大多数酶反应。借助热敏电阻可以把反应的热转变为电阻值的变化,完成热电转换。

3) 将光效应转变为电信号

有些酶能催化产生化学发光,例如过氧化氢酶能催化过氧化氢产生化学发光。许多酶反应都伴随有过氧化氢产生,如果将过氧化氢酶同其他催化酶一起做成复合酶膜,再与光电流测定装置相连,就可以通过测定光电信号来检测所发生的化学反应。

4) 直接产生电信号方式

分子识别元件对待测物质发生化学反应时伴随的电子转移、微生物细胞氧化等电信号的变化,可以直接或通过电子传递体的作用由电极导出。

### 3.6.1 场效应晶体管(FET)生物敏传感器

场效应晶体管生物敏传感器由分子识别部分(感受器)和信号转换部分(换能器,FET)构成,如图 3-69 所示。感受器部分主要指一种膜,生物敏感物质附着其上或包含在膜中。待测物质与敏感物质接触时,发生物理或化学变化,这种变化通过离子敏场效应晶体管(ISFET)转换成电信号输出。

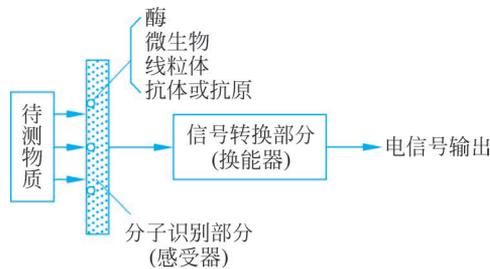


图 3-69 场效应晶体管生物敏传感器的组成

ISFET 是将普通的 MOSFET 的金属铝栅换为对离子有选择性响应的敏感膜,让敏感膜直接与被测离子溶液接触,通过离子与敏感膜的相互作用,调制场效应晶体管漏极与源极之间电流的变化,达到检测溶液中离子浓度的目的。

FET 型生物敏传感器具有体积小,易于实现集成化、多功能等其他类型生物敏传感器所不具备的优点,所以应用前景广阔。

#### 1. 酶场效应晶体管

酶是一种生物催化剂,它来自生物细胞,是由活细胞产生的。酶是生物体进行化学反应的催化剂,具有催化效率高、专一性强的特点,能够在常温、常压条件下进行反应。

酶场效应晶体管(enzyme-based FET, ENFET)是由酶膜和 ISFET 两部分构成的,其中 ISFET 又多为 pH-ISFET,其结构如图 3-70 所示。把酶膜固定在栅极绝缘膜( $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ )上,进行测量时,由于酶的催化作用,使待测的有机分子反应生成 ISFET 能够响应的离子。当  $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面离子浓度变化时,表面电荷将发生变化,场效应晶体管栅极对表面电荷非常敏感,由此引起栅极的电位变化,从而对漏极电流进行调制。

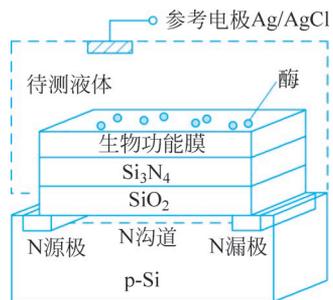


图 3-70 半导体酶传感器结构示意图

1) 尿素酶-FET

临床检查上,定量分析血清和体液中的尿素,对于肾功能衰竭患者的诊断是必不可少

的。尿素在尿素酶的催化作用下,按下式分解



尿素-尿素酶反应时消耗溶液中的  $\text{H}^+$ , 尿素酶-FET 的工作原理就是利用 ISFET 检验尿素-尿素酶反应时溶液中的 pH 值发生的变化。

## 2) 葡萄糖-FET

测定葡萄糖的酶传感器有两种,一种是电流测定法,它是基于在反应过程中产生氧或过氧化氢;另一种是电位测定法,它是基于在反应过程中产生  $\text{H}^+$  或过氧化氢。后一种传感器由对  $\text{H}^+$  敏感的 pH-ISFET 和固定在栅极上的葡萄糖氧化酶膜构成。葡萄糖酶传感器的反应式为



葡萄糖-FET 结构和工作原理如图 3-71 所示。在传感器工作时,栅电压通过参比电极加上去。对应于溶液中的  $\text{H}^+$  浓度变化,离子敏感膜的界面电位发生变化。根据 ISFET 的特性,当其漏极电流  $I_d$ 、漏-源电压  $U_{ds}$  恒定时,栅极电压  $U_g$  的变化量正比于溶液中 pH 值的变化量。因此,采用恒压电路可将栅压  $U_g$  的变化由记录仪描绘下来。既然  $U_g$  正比于 pH 变化量,而 pH 变化量又与葡萄糖含量有关,所以该系统可以用于葡萄糖测定。

## 3) 青霉素-FET

将青霉素酶涂覆在  $\text{H}^+$ -ISFET 栅上,就构成了青霉素酶场效应晶体管,可以用来测定青霉素的效价。青霉素水解为青霉菌酸(Penicilloic acid)放出  $\text{H}^+$ ,使电极表面的 pH 值下降,降低值与待测样品中青霉素含量有关。这种青霉素-FET 检测青霉素浓度的线性范围为  $0.2 \sim 2.5 \text{ mol/L}$ ,响应时间约为 10s。

## 2. 免疫场效应晶体管

抗体或抗原固定于膜(如醋酸纤维膜)上形成具有识别免疫反应的分子功能膜。抗体是蛋白质,属两性电解质(正负电荷随 pH 变化),所以抗体的固定膜具有表面电荷,其电位随电荷变化而变化,可以根据抗体膜的电位变化测定抗原的结合量。免疫场效应晶体管(Immune Sensitive FET, IMFET)是由 FET 和识别免疫反应的分子功能膜构成,其测量电路如图 3-72 所示。基片与源极接地,漏极接电源,相对地的电压为  $V_{DS}$ 。当抗体放入缓冲液中,参比电极 Ag-AgCl 的电位变化使漏电流变化。

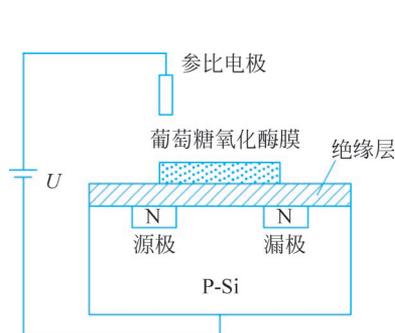


图 3-71 葡萄糖-FET 结构和工作原理示意图

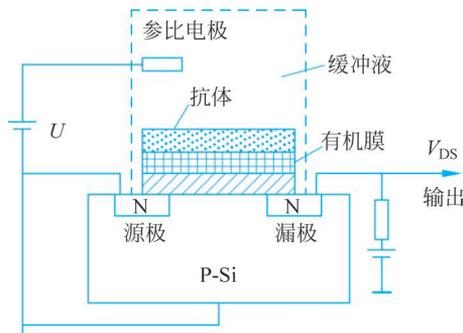


图 3-72 IMFET 的测量电路

### 3.6.2 DNA 生物敏传感器

随着分子生物学研究的深入,对脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid,DNA)的检测越来越重要,DNA 生物敏传感器是获取生物信息的重要手段。除了 DNA 检测外,DNA 传感器还在环境检测、药物研究、法医鉴定及食品检验等方面具有广泛应用。

现代 DNA 检测技术包括 DNA 生物敏传感器、DNA 芯片、DNA 测序技术、混合 DNA 样品池、微芯片实验室等。DNA 生物敏传感器是分子生物学与微电子学、电化学、光学等相结合的产物,是 DNA 信息分析检测最重要的技术之一。

#### 1. DNA 生物敏传感器的基本类型和原理

DNA 生物敏传感器由固定已知核苷酸序列的单链 DNA(也称 ssDNA 探针)的电极(探头)和换能器两部分组成。固定在传感器电极上的 ssDNA 探针与待测样品的目标 DNA 杂交,形成双链 DNA(dsDNA),杂交反应在传感器电极上直接完成,换能器将杂交过程所产生的变化转换成电、光、声等物理信号。根据换能器和 ssDNA 探针结构不同,目前开发出来的 DNA 生物敏传感器主要有电化学式、压电石英晶体式、光学式等。

##### 1) 电化学 DNA 生物敏传感器

电化学生物敏传感器由表面固定 ssDNA 探针的电极和检测用的电化学活性杂交指示剂构成。电化学 DNA 生物敏传感器以电极为换能器,检测时将表面固定有 ssDNA 探针的电极浸入含有被测目标 ssDNA 分子的溶液中,电极上的 ssDNA 单链分子同目标物 DNA 杂交,引起电极上电流值变化,利用微分脉冲或循环伏安法可检测出 dsDNA 的杂交信号。

##### 2) 压电石英晶体 DNA 生物敏传感器

压电石英晶体 DNA 传感器以石英晶体谐振器为换能器。在石英晶体电极区的表面固定 ssDNA 探针,然后浸入含有被测目标 ssDNA 分子的溶液中,在溶液中电极表面的 ssDNA 探针与互补序列的目标 ssDNA 分子杂交,形成 dsDNA。质量的变化会在压电晶体表面产生微小的压力变化,从而引起谐振频率的变化。谐振频率随电极表面上质量的增加而减小,因此可以通过测量谐振频率的变化达到测量的目的。

##### 3) 光学 DNA 生物敏传感器

光学方法具有非破坏性和高灵敏度等优点,在生物敏传感器中获得广泛应用,目前研究的光学 DNA 生物敏传感器有光纤式、光波导式、表面等离子体谐振(SPR)式等类型。

光纤 DNA 生物敏传感器是将 ssDNA 探针固定在微米级光导纤维的末端上,然后将若干条固定有 ssDNA 探针的光导纤维合成一束,形成一个微阵列的传感器装置,光纤的另一端通过一个特制的耦合装置耦合到荧光显微镜中。根据荧光猝灭技术,荧光物质与溶剂分子或溶质分子发生某种反应时会导致荧光强度下降。测量时将光纤固定有 ssDNA 探针的一端浸入到荧光标记的目标 DNA 溶液中与目标 DNA 杂交。通过光导纤维,来自荧光显微镜的激光激发荧光标记物产生荧光,所产生的荧光信号仍经过光纤返回到荧光显微镜中,由 CCD 相机接收,获得 DNA 杂交图谱。

光波导 DNA 生物敏传感器是在光波导载玻片表面制成 ssDNA 探针阵列,将光波导载玻片与另一片载玻片叠放在一起,中间形成具有一定宽度和厚度的通道。与目标 DNA 溶液发生杂交时,透过狭缝照射光波导边缘的光线在波导内以全反射方式传播,并在波导载玻片表面附近产生光散射。利用 CCD 相机记录下散射光信号的图样,可获得 DNA 杂交的图谱。

表面等离子体谐振式 DNA 生物敏传感器的工作原理是：当平行表面的偏置光以表面等离子角入射并在界面上发生全反射时，入射光被耦合到表面等离子体内，由于表面等离子体谐振，将引起界面反射率显著减小。附着在金属表面的电介质材料不同，则其表面等离子角不同。附着的量决定了表面等离子体谐振的响应强度。因此，SPR 式 DNA 生物敏传感器通常将已知的单链 DNA 分子固定在几十纳米厚的金属膜表面，加入与其互补的单链 DNA 分子（目标 DNA），两者杂交将使金属膜与溶液界面的折射率上升，从而导致谐振角改变。如果固定入射角度，就能根据谐振角的改变程度对目标 DNA 分子进行定量检测，如图 3-73 所示。

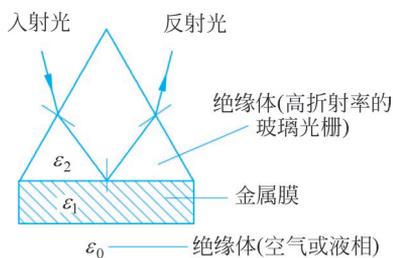


图 3-73 表面等离子体谐振测试原理示意图

## 2. DNA 传感器的应用

### 1) DNA 传感器用于基因诊断

许多传染性疾病都是由病菌或病毒引起的，及时诊断出病原微生物是预防和治疗这些疾病的关键。在传统方法中，细菌感染是通过血液体外培养来诊断的，往往需要几天甚至几十天的时间，这对尽早发现和治疗疾病很不利。利用 DNA 微生物传感器可以在 10~20min 内直接检测到病原微生物的存在，如对结核杆菌的诊断和对乙型肝炎病毒的诊断。将 DNA 传感器与聚合酶反应链（PCR）技术结合，可以实现极低浓度的病原微生物感染的诊断。

### 2) DNA 传感器用于环境检测

当环境中存在病原微生物或基因诱变剂时，就会对人类的健康产生极大的威胁。近年来，利用 DNA 传感器检测环境中的病原微生物和基因诱变剂，因其简便、快捷、准确而受到广泛重视。

DNA 传感器检测环境中的病原微生物与 DNA 传感器进行疾病诊断的原理相似，通过固定检测对象的特异型 DNA 探针，再配合 PCR 技术，进行杂交信号的检测。如对沙眼衣原体的检测。

基因诱变剂主要是指那些直接与基因发生作用的芳香族有机化合物和离子型自由基，它们都可能引发癌症。芳香族化合物对基因序列里的胞嘧啶具有修饰作用，使胞嘧啶碱基的电化学活性降低，这可以通过计时电位计检测到。实验表面 DNA 传感器对废水中芳香族化合物的检测结果是可靠的。离子型自由基对 DNA 链进行攻击，会引起 DNA 链的断裂，从而改变传感器的伏安特性曲线。利用这种原理已制成 DNA 电化学汞传感器，并用于对工业废水中的自由基进行监控。

## 3.7 智能传感器

随着测控系统自动化、智能化的发展，要求传感器准确度高、可靠性高、具有一定的数据处理能力，并能够自检、自校、自补偿。智能传感器的出现满足了这一要求，它是微处理器和传统传感器相结合的产物，国际上称为 Intelligent Sensor 或 Smart Sensor。

### 3.7.1 智能传感器的结构和功能

智能传感器是测量技术、半导体技术、计算技术、信息处理技术、微电子技术、材料科学等的融合,它充分利用计算机的计算和存储能力,对传感器的数据进行处理。智能传感器主要由传感器、微处理器及相关电路组成,其结构框图如图 3-74 所示。

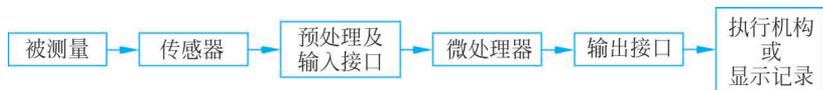


图 3-74 智能传感器的结构

传感器将被测的物理量、化学量转换成相应的电信号,通过滤波、放大、模数转换等环节后送到微处理器中。微处理器既可以对传感器信号进行计算、存储,还可以通过反馈电路对传感器进行调节。微处理器强大的计算功能降低了对传感器的要求,提高了传感器的性能。

智能传感器具有如下功能。

- (1) 自补偿功能:通过软件对传感器的非线性、温度漂移、响应时间等进行自动补偿。
- (2) 自校准功能:操作者输入零或某一标准量值后,自校准软件可以自动地对传感器进行在线校准。
- (3) 自诊断功能:接通电源后,检查传感器各部分是否正常,并可诊断发生故障的部件。
- (4) 数据处理功能:可以根据智能传感器内部的程序,自动处理数据,如进行统计处理、剔除异常值等。
- (5) 双向通信功能:微处理器和基本传感器之间构成闭环,微处理器不但接收、处理传感器的数据,还可将信息反馈至传感器,对测量过程进行调节和控制。
- (6) 信息存储和记忆功能。
- (7) 数字量输出功能:输出数字信号,可方便地同计算机或接口总线相连。
- (8) 除了检测物理量、化学量的变化,智能传感器还具有信号调理(如滤波、放大、A/D 转换等)、数据处理和数据显示等能力。

与传统传感器相比,智能传感器不仅具有精度高、自适应性强、性价比高的优点,而且具有高可靠性、高稳定性、高信噪比和高分辨率,在现代测控系统中的应用日益广泛。

### 3.7.2 硬件结构

由于智能传感器的用途各不相同,其硬件结构也不尽相同,但都具有相似的模块。智能传感器硬件结构图如图 3-75 所示。

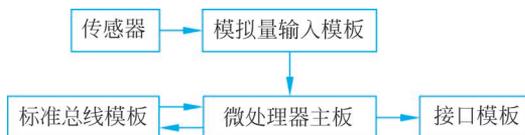


图 3-75 智能传感器硬件结构图

下面对智能传感器的主要模块作以简单介绍。

#### 1. 微处理器主板

微处理器主板主要由 CPU、存储器、串行通信接口、地址译码器、时钟发生器、地址总

线、控制总线等组成。微处理器是智能传感器的神经中枢,其性能决定了传感器的硬件电路、接口设计、模块数目等,在设计智能传感器时,应根据具体任务的要求选择合适的微处理器。

## 2. 模拟量输入模板

传感器输出一般为毫伏数量级的模拟量,要满足 A/D 转换电路的要求,必须经过模拟量输入模板上有关电路的放大、滤波等处理,经过 A/D 转换后传输到微处理器主板上。

## 3. 标准总线模板

智能传感器的外总线通常分为并行和串行两种。并行外总线以 IEEE-488(或称 GP-IB 总线,General Purpose Interface Bus)为代表,串行则为 RS-232。采用标准总线模块,能使智能传感器在机械上、电气上、功能上符合统一的规范,便于将不同功能的仪器连接起来,组成各种自动测试系统。

## 4. 接口模板

接口模板包括数字显示、打印输出、控制系统所需的数模转换等电路。数字显示通常使用七段发光二极管,按十进制计数方式显示测量结果;打印输出可以作为永久性记录保存,或者记录瞬间测量值、累加值、周期、批号等;数模转换电路将数字信号转换为模拟信号后送到后续控制电路进行系统控制。

### 3.7.3 软件设计

软件在智能传感器中起着十分重要的作用。智能传感器通过各种软件对测量过程进行管理和调节,并对传感器传送的数据进行各种处理。利用软件能够实现硬件电路难以实现的功能,以软件代替硬件,降低传感器制造的难度和成本。下面介绍几种常用软件的功能和设计方法。

#### 1. 数字滤波

工业现场存在各种各样的干扰信号,而敏感元件输出的电信号一般都很弱,设计传感器时必须考虑克服干扰信号的影响。智能传感器可以利用数字滤波的方法消除随机噪声的干扰(如尖脉冲),数字滤波器就是计算机执行的各种运算程序,完全用软件方法滤波,削弱或滤除输入信号中的干扰,而不需增加任何硬件设备。它可以对频率很低或很高的信号进行滤波。常用的数字滤波有以下几种。

(1) 算术平均滤波: 计算连续  $N$  个采样值的算术平均值并将其作为滤波器的输出,如果第  $i$  次采样值为  $x_i$ ,则算术平均值  $y(k)$  表示为

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

它适合于一般具有随机干扰的信号滤波。

(2) 递推平均滤波: 递推平均滤波法将测量的  $N$  个数据排成一列,每次测量到的新数据存放在队尾,而扔掉原来队首的一个数据,这样在队列中始终有  $N$  个新数据,然后计算队列中数据的算术平均值,将其作为滤波结果。该方法适用于实时测量系统,每进行一次测量,就可以立即计算出一个算术平均值。

(3) 加权递推平均滤波: 为了提高传感器对当前干扰的抑制能力,增加新数据在递推滤波中的比重,可以采用加权平均滤波算法,对不同时刻的数据加以不同权重。通常越新的

数据权重越大。加权平均递推滤波器的输出为

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i x_i$$

## 2. 非线性校正

大多数传感器的输入与输出呈非线性关系,如图 3-76(a)所示。为使传感器在检测过程中灵敏度保持一致,便于分析处理和直接显示,提高测量精度,需要对非线性进行校正。智能传感器利用软件进行补偿和非线性校正,它按照如图 3-76(b)所示的反非线性特性进行刻度转换,使输出  $y$  与输入  $x$  呈理想直线关系(如图 3-76(c)所示)。

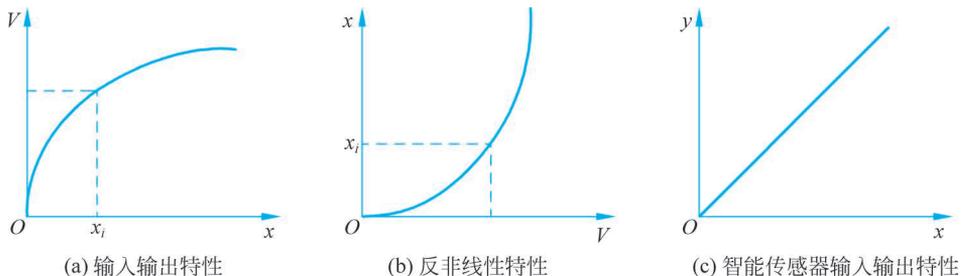


图 3-76 智能传感器系统非线性校正原理

常用的非线性校正方法有:

(1) 查表法。通过计算或实验得到检测值和被测值的关系,然后按一定的规律把数据排成表格,存入内存单元。微处理器根据检测值大小查表。查表法适合于参数计算复杂、编程烦琐、运算耗时的情况,执行速度快,可以完成数据补偿、计算、转换等功能。

(2) 线性插值法。利用一次函数对实验测出的输入/输出数据的反非线性曲线进行插值,用直线段逼近传感器的特性曲线。只要分段合理,插值点恰当,一般可以得到良好的线性度和精度。

(3) 曲线拟合法。若传感器的输入输出特性曲线为严重非线性,采用线性插值法误差较大,可以采用曲线拟合法,即采用  $n$  次多项式来逼近反非线性曲线。具体步骤为:首先对传感器及其调理电路进行静态实验标定,得到反非线性校准曲线;假设曲线拟合方程,并根据最小二乘法原则确定待定系数;将所求得的系数存入内存。此外,还可以采取分段拟合的方法。

## 3. 温度补偿

温度对传感器的性能影响很大,为提高传感器的精度,必须进行温度补偿。智能传感器可以利用软件有效地解决这一问题。首先需要测出传感器的温度,其硬件结构框图如图 3-77 所示。通常在敏感元件附近安装一个测温元件,或者将测温元件和其他敏感元件制作在一起,温度传感器的输出信号经过放大、A/D 转换后送入微处理器中进行处理。

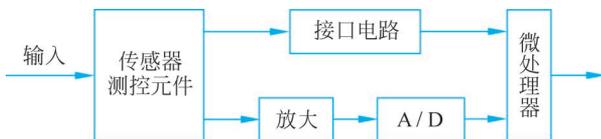


图 3-77 温度补偿原理框图

为了进行温度补偿,需要建立温度误差的数学模型,微处理器根据测得的温度值和数学模型进行补偿。常用的补偿方法有插值法、查表法等。查表法是根据实验数据求得校正曲线,然后把曲线上的各个校正点的数据以表格形式存入智能传感器的内存中去。一个校正点的数据对应一个或几个内存单元,在实时测量中通过查表来修正测量结果。查表法的速度和精度受校正点数目制约。为提高测量精度和测量速度,可以利用线性插值或抛物线插值的方法。

#### 4. 自动校正

假设一传感器系统经标定实验得到的静态输出  $y$  与输入  $x$  的关系为

$$y = a_0 + a_1 x$$

式中  $a_0$  为零位值,  $a_1$  为灵敏度或称转换增益。由于传感器系统受各种内在和外在的干扰,如电源电压、工作温度等变化,传感器系统的性能会发生变化,输入特性为

$$y = (a_0 + \Delta a_0) + (a_1 + \Delta a_1)x \quad (3-7-1)$$

式中  $\Delta a_0$  为零位漂移,  $\Delta a_1$  为灵敏度漂移。

自动校正就是自动实时校正传感器的零位漂移和灵敏度漂移引起的误差。通常有两种方法,一种是三步校正法,另一种是三点校正法。

##### 1) 三步校正法

微处理器在每一个特定周期内发出指令,使自校环节接通不同的输入信号,即

第一步,校零: 输入信号为零点标准值  $x_0$ , 输出值为  $y_0 = a_0 + \Delta a_0$ ;

第二步,标定: 输入信号为标准值  $x_R$ , 输出值为  $y_R = (a_0 + \Delta a_0) + (a_1 + \Delta a_1)x_R$ ;

第三步,测量: 输入信号为被测信号  $x$ , 输出值为  $y$ 。

根据式(3-7-1),并联立以上3步,可以得出被测信号为

$$x = \frac{y - y_0}{y_R - y_0} x_R$$

因此,该方法可以实时测量零点,实时标定灵敏度。

##### 2) 三点校正法

该方法是在测量工作条件下对传感器系统进行实时在线标定,确定出当时的输入输出特性及反非线性拟合方程。具体实现过程是:

首先,对传感器系统进行测量前的实时3点标定,即依次输入3个标准值  $x_{r1}$ 、 $x_{r2}$ 、 $x_{r3}$ , 测得相应的输出值为  $y_{r1}$ 、 $y_{r2}$ 、 $y_{r3}$ , 然后列出反非线性特性拟合方程

$$x = c_0 + c_1 y + c_2 y^2 \quad (3-7-2)$$

并根据标准输入和输出按最小二乘法原则确定式(3-7-2)的系数  $c_0$ 、 $c_1$  和  $c_2$ 。

式(3-7-2)确定后,传感器系统标定完成,可以进行测量工作。只要传感器系统在实时标定和测量期间保持输入输出特性不变,输出值即代表被测输入量。

#### 5. 自动诊断

智能传感器一般均有一定的自诊断功能,它可以通过硬件和软件对测量装置的正常与否进行检验,以便及时发现故障,及时处理。自诊断程序一般有两种:一种是设置独立的“自校”功能,在操作人员按下“自校”按键时,系统将按照事先设计的程序,完成一个循环的自检,并从显示器上观察自校结果是否正确;另一种是在每次测量之前插入一段自校程序,若程序不能往下执行而停止在自校阶段,则说明系统有故障。

### 3.7.4 智能传感器的应用

智能传感器可以输出数字信号,带有标准接口,能接到标准总线上,在工作上有广泛的应用前景。早期的智能传感器有 Honeywell 公司的 ST-3000 系列智能压力传感器、日本横河电机株式会社开发的 EJA 差压变送器等,另外还有美国 Rosemount 公司的 8800A 卡曼旋涡流量变送器、Merritt 公司的智能超声传感器、德国 Strohrmann 制作的智能加速度传感器以及模拟生物眼睛的智能红外传感器和二维自适应图像传感器等,下面简单介绍基于人工神经网络的智能气体传感器和多功能传感器。

#### 1. 智能气体传感器

识别混合气体中的成分是一项重要的研究课题,传统的方法是先将各种气体成分分离出来,然后分别用适用于各种气体的传感器进行检测。由于智能传感技术的发展,已经开发出基于人工神经网络和气体微传感器的智能气体传感器,不用分离气体就可以将混合气体中的各种成分检测出来。

##### 1) 人工神经网络

人工神经网络由大量基本单元——神经元相互连接而成,每个神经元的结构和功能比较简单,但是由大量神经元所组成的神经网络就具有复杂的功能。人工神经网络是一个非线性的并行处理系统,采用分布式存储结构,信息分布在神经元之间的连接权重上,存储区和计算区合在一起,它不是按照给定的程序一步步进行运算,而是通过对样本的学习和训练,改变、调整神经元之间的权重,以适应环境,总结规律,完成运算、识别或控制。它具有初步的自适应和自组织能力,具有学习功能,可以反映人脑功能的若干基本活动,在信息处理、自动控制等领域得到广泛的应用。

##### 2) 气体微传感器

气体微传感器由陶瓷金属复合材料制成,上下两个电极为铂电极。铂电极具有透气性,气体能透过铂电极与电极之间的电解质发生电离反应。不同气体在不同电压条件下与电解质的反应情况不同,产生不同的电流,这样得到的电压-电流曲线就是伏安特性。不同的传感器采用不同的电解质材料制作,可以产生不同的气体反应特征,由此进行复杂气体的识别。

##### 3) 神经网络电子鼻

智能气体传感器利用人工神经网络进行气体识别,采用三层前馈网络,每个神经元是网络中的一个节点。图 3-78 所示网络的输入层有 24 个节点,隐含层有 5 个节点,输出为一个节点,节点之间以一定的权重  $W_{ij}$  相互连接。

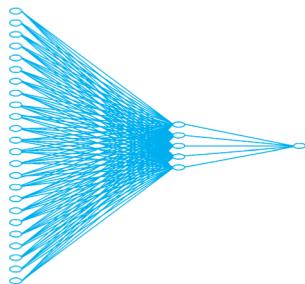


图 3-78 智能传感器中的人工神经网络

神经网络的工作过程分为训练和识别两个阶段。对于气体识别系统,训练时将样本伏安特性数据加在网络的输入端,通过反复训练来修正神经元之间的权重,使神经网络获得合适的映射关系,即得到输入样本下的正确输出,并具有固定的权重。将待识别的伏安特性曲线数据输入神经网络的输入端,就可以得到正确的识别结果。

采用人工神经网络的电子鼻可以解决传统电子鼻存在的非线性和重现性差等问题,还可以对气体进

行分类,例如,一个包含 12 个气体传感器阵列和一个多层神经网络的电子鼻可以对 5 种酒精气味进行分析。此外,智能气体传感器还可以测量气体浓度,并用描述词表示出来。

## 2. 多功能智能传感器

多功能传感器是传感器技术中的一个新的发展方向,它体积小、功能强、采集信号集中,便于进行信息处理,同微处理器和信号处理电路结合起来,就成为多功能智能传感器。

多功能智能传感器有以下几种组成形式:

(1) 几种不同的敏感元件组合在一起形成一个传感器,可以同时测量几个参数。各敏感元件是独立的。例如把测量温度和测量湿度的敏感元件组合在一起,做成温湿度传感器。

(2) 几种不同的敏感元件制作在同一硅片上,制成集成化多功能传感器。这种传感器体积小,各种敏感元件工作条件相同,容易实现补偿和校正。

(3) 利用同一敏感元件的不同效应,得到不同的信息。如用线圈作为敏感元件,在具有不同磁导率或介电常数物质的作用下,表现出不同的电容和电感。

(4) 同一敏感元件在不同的激励下表现出不同的特性。例如在所加电压、电流或工作温度发生变化时,传感器的特性不同,以此来进行多种参数的测量。

下面简单介绍一下多功能触觉传感器及人工皮肤。

人的皮肤可以感觉到物体的温度、硬度、粗糙度等,具有多种检测功能。智能机器人为了获取周围的信息,需要具有触觉、热觉、滑觉和压觉等多种功能的传感器,已经开发出来的多功能触觉传感器有:

(1) 利用聚偏氟乙烯(PVDF)材料制成的人工皮肤触觉传感器。它具有触觉、压觉、滑觉和热觉功能,其结构如图 3-79 所示。传感器表面是柔软的带有小齿的橡胶包封表皮,柔性隔热层的上层完成热觉测试,下层完成触觉测试。

(2) 非接触式皮肤传感系统。美国 MERRITT 系统公司(MSI)研制了用于机器人的非接触式皮肤传感系统,可以在探测物体的同时,避免不必要的接触和碰撞。它由超声波传感器、红外辐射接近传感器、薄膜电容接近传感器、温度和气体传感器等多个智能传感器组成,并用柔性电路集成在一起。

(3) 压感导电橡胶触觉传感器。压感导电橡胶柔软,韧性好,易加工,可以做成大面积的传感器。利用压感导电橡胶研制的触觉传感器,可以检测温度、硬度、热传导特性等,并能够根据检测的数据识别物体。其结构如图 3-80 所示。印刷电路板上刻蚀 1mm 宽的 3 个电极,分别相距 2mm 和 16mm。电极上覆盖加热线圈,维持 30℃ 恒温。电极间电阻分别为  $R_1$ 、 $R_2$ ,当传感器接触物体后,被接触物体的温度和压力信息同时作用于导电橡胶,改变橡胶的导电率,从而引起电极间电阻的变化,通过对电阻值的测量和处理,可以检测物体的硬度和热传导性。



图 3-79 人工皮肤结构图

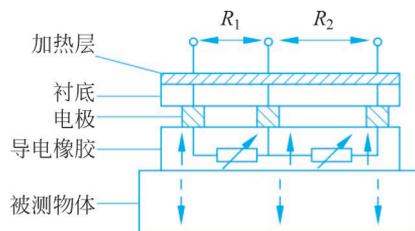


图 3-80 压感导电橡胶触觉传感器结构图

## 习题与思考题

1. 传感器在检测系统中有什么作用和地位?
2. 什么是传感器的静态特性? 有哪些主要指标?
3. 试述热电偶测温的基本原理和基本定律, 热电偶冷端温度补偿措施有哪些?
4. 什么是光电效应?
5. 光纤传感器的优点有哪些? 光纤传感器可以测量的物理量有哪些?
6. 论述 CCD 的工作原理。
7. 在图像测量系统中, 在选择镜头时需要知道哪些参数? 请描述选择镜头的具体步骤。
8. 气体传感器可以分为哪几种类型? 氧敏传感器有哪些?
9. 超声波传感器的工作原理是什么? 有哪些应用?
10. 声表面波的工作原理是什么?
11. 智能传感器的数据处理包括哪些内容?

## 参考文献

- 1 Ramon Pallas-Areny, John G Webster. 传感器和信号调节[M]. 张伦, 译. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 2 王雪文, 张志勇. 传感器原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- 3 彭军. 传感器与检测技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- 4 宋文绪, 杨帆. 传感器与检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- 5 陈杰, 黄鸿. 传感器与检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 6 王伯雄. 测试技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 7 刘亮. 先进传感器及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 8 图像和机器视觉产品手册[Z]. 北京: 凌云光视数字图像公司, 2006.