

第3章

传感与检测技术

传感与检测技术是实现物联网系统的基础。传感技术是把各种物理量转变成可识别的信号量的过程,检测是指对物理量进行识别和处理的过程。例如,我们用湿敏电容把湿度信号转变成电信号,这就是传感;我们对从传感器得来的信号进行处理的过程就是检测。本章重点介绍传感器的功能特性、分类、技术原理以及常见传感器类别,并重点讲述一款智能温度传感器的基本原理和关键技术。

3.1 传感检测模型

随着物联网、云计算等新兴技术的出现,人类已进入了科学技术空前发展的信息社会。在这个瞬息万变的信息世界里,传感器可检测出满足不同需求的感知信息,充当着电子计算机、智能机器人、自动化设备、自动控制装置的“感觉器官”。如果没有传感器将形态各异、功能各异的数据转换为能够直接检测并能够处理的信息,物联网等技术的发展将是困难的。显而易见,传感器在物联网技术领域占有极其重要的地位。

在人们的生产和生活中,我们经常要与各种物理量和化学量打交道,例如经常要检测长度、重量、压力、流量、温度、化学成分等。在生产过程中,生产人员往往依靠仪器、仪表来完成检测任务。这些检测仪表都包含有或者本身就是敏感元件,能很敏锐地反映待测参数的大小。在为数众多的敏感元件中,我们把那些能将非电量形式的参量转换成电参量的元件叫作传感器。从狭义角度来看,传感器是一种将测量信号转换成电信号的变换器。从广义角度看,传感器是指在电子检测控制设备输入部分中起检测信号作用的器件。

通常,传感器输出的电信号(如电压和电流)不能在计算机中直接使用和显示,还要借助模数转换器(A/D 变换器)将这些信号转换为计算机能够识别和处理的信号。只有经过变换的电信号,才容易显示、存储、传输和处理。为此,把能够感受规定的被测量并按照一定的规律将其转换成可用输出信号的元器件或装置,称为传感检测装置。

传感检测模型的功能结构如图 3-1 所示。它包括传感器和信号变换电路(如模数转换器)两大部分。其中,传感器输出电量有很多种形式,如电压、电流、电容、电阻等,输出信号的形式由传感器的原理确定。通常,传感器由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。由于传感器输出信号一般都很微弱,需要有信号调理与转换电路进行放大、运算调制等,此外信号调理转换电路以及传感器

的工作必须有辅助的电源,因此信号调理转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。

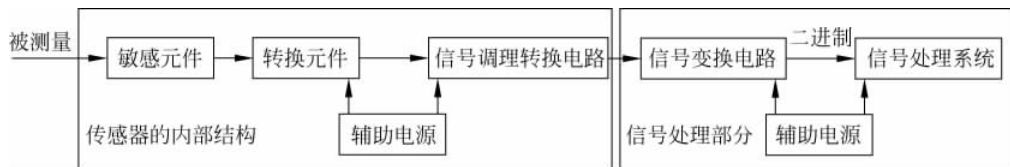


图 3-1 传感检测模型的功能结构

随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的信号调理转换电路与敏感元件通常会集成在同一芯片上,安装在传感器的壳体里。

3.2 传感器的特性与分类

传感器在检测物理世界的信息量时,会存在误差。这些误差是由传感器的特性决定的。不同类型的传感器,有不同的特性。本节介绍传感器的特性、传感器的分类和传感器的典型应用。

3.2.1 传感器的特性

在科学试验和生产、生活过程中,需要对各种各样的物理参数进行检测和控制。这就要求传感器能感受被测非电量并将其转换成与被测量有一定函数关系的电量。传感器所测量的非电量是处在不断变动之中的,传感器能否将这些非电量的变化不失真地变换成相应的电量,取决于传感器的输出/输入特性。传感器这一基本特性可用其静态特性和动态特性来描述。

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出/输入关系。只考虑传感器的静态特性时,输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看,希望具有线性关系,即具有理想的输出/输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变等因素,传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (3-1)$$

式中: a_0 表示输入量 x 为 0 时的输出量; $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 为非线性项系数。

静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中,为了标定和数据处理的方便,希望得到线性关系,因此引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。如果传感器非线性项的次方不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,

如图 3-2 所示,使传感器输出/输入特性线性化。所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度),通常用相对误差 γ_L 表示,即:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-2)$$

式中: $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

Y_{FS} ——满量程输出。

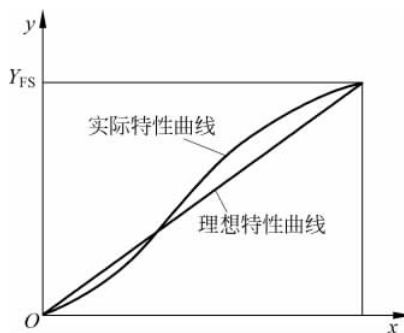


图 3-2 线性度

2. 灵敏度

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标,其定义是输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量的增量 Δx 之比。用 S 表示灵敏度,即:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3-3)$$

它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化,如图 3-3 所示。很显然,灵敏度 S 值越大,表示传感器越灵敏。

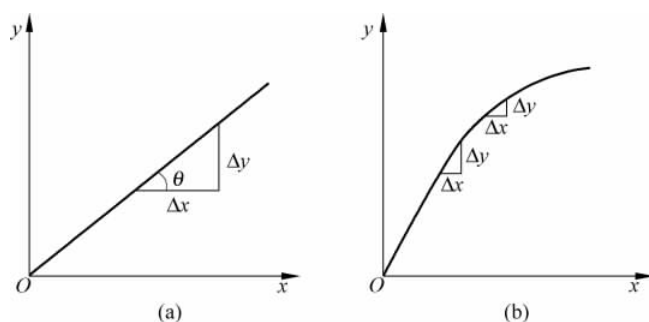


图 3-3 传感器的灵敏度

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程期间其输出/输入特性曲线不重合的现象称为迟滞,如图 3-4 所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器的正反行程输出信号大小不相等。产生这种现象的主要原因是传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的,例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

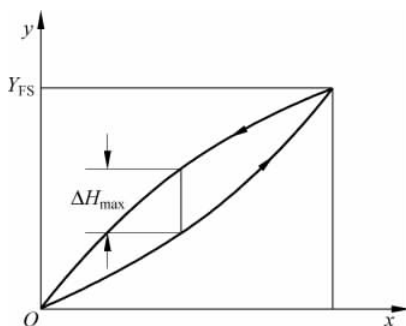


图 3-4 迟滞特性

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差可由下式计算:

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-4)$$

式中: $\Delta H_{\max}$ 为正反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度(见图 3-5)。重复性误差属于随机误差,常用标准差 σ 计算,也可用正反行程中最大重复差值 $\Delta R_{\max}$ 计算,即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-5)$$

或

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-6)$$

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量随时间变化,是时间的函数时,则传感器的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

传感器的动态特性往往可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多样的,在时域内研究传感器的动态响应特性,通常只能研究几种特定的输入时间函数,如跃阶函数、脉冲函数和斜坡函数等响应特性。在频域内研究动态特性一般则采用正弦函数。动态特性良好的传感器暂态响应时间很短且频率响应范围很宽。这两种分析方法内部存在必然的联系,在不同的场合、根据不同的应用需求,通常采用正弦变化和跃阶变化的输入信号来分析和评价。

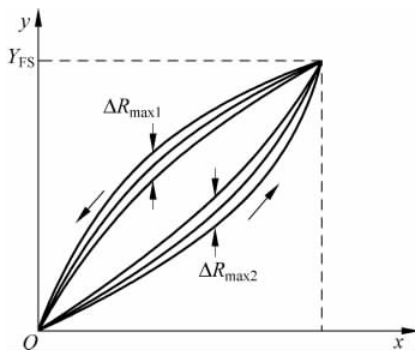


图 3-5 重复特性

3.2.2 传感器的分类

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节,如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量,那么无论是信号转换或信息处理,获取、显示最优化数据,进而实现精确控制都是不可能实现的。传感器一般是根据物理学、化学、生物学等特性、规律和效应设计而成的,其种类繁多,往往同一种被测量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器又可测量多种物理量,因此传感器有许多种分类方法。

1. 按照测试对象分类

按照被测对象,可以将传感器分为温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器和加速度传感器。

(1) 温度传感器：它是利用物质各种物理性质随温度变化的规律将温度转换为电量的传感器。温度传感器是温度测量仪表的核心部分，品种繁多。按测量方式可分为接触式和非接触式两大类，按照传感器材料及电子元件特性可分为热电阻和热电偶两类。

(2) 湿度传感器：它是能感受气体中水蒸气含量，并将其转换成电信号的传感器。湿度传感器的核心器件是湿敏元件，它主要有电阻式、电容式两大类。湿敏电阻的特点是在基片上覆盖一层用感湿材料制成的膜，当空气中的水蒸气吸附在感湿膜上时，元件的电阻率和电阻值都发生变化，利用这一特性即可测量湿度。湿敏电容则是用高分子薄膜电容制成的。常用的高分子材料有聚苯乙烯、聚酰亚胺、酪酸醋酸纤维等。

(3) 压力传感器：它是能感受压力并将其转换成可用输出信号的传感器，主要是利用压电效应制成的。压力传感器是工业实践中最为常用的一种传感器，广泛应用于各种工业自控环境，涉及水利水电、铁路交通、智能建筑、航空航天、石化、电力、船舶、机械制造等众多行业。

(4) 位移传感器：又称为线性传感器，它分为电感式位移传感器、电容式位移传感器、光电式位移传感器、超声波式位移传感器、霍尔式位移传感器。电感式位移传感器是属于金属感应的线性器件，接通电源后，在开关的感应面将产生一个交变磁场，当金属物体接近此感应面时，金属中产生涡流而吸收了振荡器的能量，使振荡器输出幅度线性衰减，然后根据衰减量的变化来完成无接触检测物体。

(5) 加速度传感器：它是一种能够测量加速度的电子设备。加速度计有两种：一种是角加速度计，是由陀螺仪(角速度传感器)改进的。另一种就是线加速度计。

除上述介绍的传感器外，还有流量传感器、液位传感器、力传感器、转矩传感器等。按测试对象命名的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据用途选用。但是这种分类方法将原理互不相同的传感器归为一类，很难找出每种传感器在转换机理上有什么共性和差异。

2. 按照原理分类

按照工作原理，可以将传感器分为以下几种。

(1) 电学式传感器：它是非电量电测技术中应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

电阻式传感器是利用变阻器将被测非电量转换为电阻信号的原理制成的。电阻式传感器一般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式传感器等。电阻式传感器主要用于位移、压力、力、应变、力矩、气流流速、液位和液体流量等参数的测量。电容式传感器是利用改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，从而使电容量发生变化的原理制成的，主要用于压力、位移、液位、厚度、水分含量等参数的测量。电感式传感器是利用电磁感应把被测的物理量，如位移、压力、流量、振动等转换成线圈的自感系数和互感系数的变化，再由电路转换为电压或电流的变化量输出，实现非电量到电量的转换。磁电式传感器是利用电磁感应原理，把被测非电量转换成电量制成的，主要用于流量、转速和位移等参数的测量。电涡流式传感器是利用金属在磁场中运动切割磁力线，在金属内形成涡流的原理制成的，主要用于位移及厚度等参数的测量。

(2) 磁学式传感器：它是利用铁磁物质的一些物理效应而制成的，主要用于位移、转矩

等参数的测量。

(3) 光电式传感器:它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的,主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。光电式传感器在非电量电测及自动控制技术中占有重要的地位。

(4) 电势型传感器:它是利用热电效应、光电效应、霍尔效应等原理制成的,主要用于温度、磁通、电流、速度、光强、热辐射等参数的测量。

(5) 电荷传感器:它是利用压电效应原理制成的,主要用于力及加速度的测量。

(6) 半导体传感器:它是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应、半导体与气体接触产生物质变化等原理制成的,主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

(7) 谐振式传感器:它是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理制成的,主要用来测量压力。

(8) 电化学式传感器:它是以离子导电为基础制成的。根据其电特性的形成不同,电化学传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体、液体或溶于液体的固体成分,液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等参数的测量。

上述分类方法是以传感器的工作原理为基础的,将物理和化学等学科的原理、规律和效应作为分类依据,如电压式、热电式、电阻式、光电式、电感式等。这种分类方法的优点是对于传感器的工作原理比较清楚,类别少,利于对传感器进行深入的分析 and 研究。

3. 按照输出信号分类

按照输出信号的性质,可以将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器。模拟式传感器输出模拟信号,数字式传感器输出数字信号。

模拟式传感器发出的是连续信号,用电压、电流、电阻等表示被测参数的大小。例如温度传感器、压力传感器等都是常见的模拟式传感器。

数字式传感器是指将传统的模拟式传感器经过加装 A/D 转换模块,使其输出信号为数字量(或数字编码)的传感器,主要包括放大器、A/D 转换器、微处理器(CPU)、存储器、通信接口电路等。

与早期传统的模拟式传感器比较,数字式传感器具有以下优点:

(1) 先进的 A/D 转换技术和智能滤波算法,在满量程的情况下仍可保证输出的稳定。

(2) 可靠的数据存储技术和良好的电磁兼容性能。

(3) 采用高度集成的电子元件和数字误差补偿技术,用软件实现传感器的线性、零点、额定输出温漂、蠕变等性能参数的综合补偿,消除了人为因素对补偿的影响,大大提高了传感器综合精度和可靠性。

(4) 传感器的输出一致性误差可以达到 0.02% 以内甚至更小;传感器的特性参数可基本相同,因而具有良好的互换性。

(5) 采用 A/D 转换电路、数字化信号传输和数字滤波技术,增加了传感器的抗干扰能力和信号的传输距离,提高了传感器的稳定性。

(6) 数字传感器能自动采集数据并可预处理、存储和记忆,具有唯一的标记,便于故障

诊断。

(7) 采用标准的数字通信接口,可直接连入计算机,也可与标准工业控制总线连接,方便灵活。

4. 按照能量分类

按照工作时能量转换原理,可以将传感器分为有源传感器和无源传感器。有源传感器将非电量转换为电能量,如电动势、电荷式传感器等;无源程序传感器不起能量转换作用,只是将被测非电量转换为电参数的量,如电阻式、电感式及电容式传感器等,如表 3-1 所示。

表 3-1 传感器分类表

传感器分类		转 换 原 理	传感器名称	典 型 应 用
转换形式	中间参量			
电 参 数	电 阻	移动电位器角点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片尺寸	电阻丝应变传感器、 半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
	电 容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电 感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、含水量
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	
			旋转变压器	
	频 率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计 数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用拾磁信号	磁栅	
	数 字	利用数字编号	角度编码器	大角位移
电 能 量	电 动 势	温差电动势	热电偶	温度、电流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光照度
	电 荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

5. 其他分类方法

除了上述常见的分类方法外,传感器还可以按照其材料进行分类。在外界因素的作用下,所有材料都会做出相应的、具有特征性的反应,其中对外界作用最敏感的材料,即那些具有功能特性的材料,被用来制作传感器的敏感元件。从所应用的材料的观点出发可将传感器分成下列几类:

- (1) 按照所用材料的类别,可分为金属、聚合物、陶瓷、混合物;
- (2) 按照材料的物理性质,可分为导体、绝缘体、半导体、磁性材料;
- (3) 按照材料的晶体结构,可分为单晶、多晶、非晶材料。

按照其制造工艺,可以将传感器分为以下几种。

(1) 集成传感器:它是用生产硅基半导体集成电路的标准工艺技术制造的,通常还将用于初步处理被测信号的部分电路也集成在同一芯片上。

(2) 薄膜传感器:它是通过沉积在介质衬底(基板)上的相应敏感材料的薄膜制成的。使用混合工艺时,同样可将部分电路制造在此基板上。

(3) 厚膜传感器:它是利用相应材料的浆料涂覆在陶瓷基片上制成的。基片通常是由 Al_2O_3 制成的,然后进行热处理,使厚膜成形。

(4) 陶瓷传感器:它是采用标准的陶瓷工艺或其某种变种工艺(溶胶—凝胶等)来生产。此外,根据测量目的不同,传感器可分为以下几种。

(1) 物理型传感器:它是利用被测量物质的某些物理性质发生明显变化的特性制成的。

(2) 化学型传感器:它是利用能把化学物质的成分、浓度等化学量转化成电学量的敏感元件制成的。

(3) 生物型传感器:它是利用各种生物或生物物质的特性制成的,用以检测与识别生物体内化学成分。

3.2.3 传感器的发展趋势与应用

传感器技术是当今世界迅猛发展的高新技术之一,它与计算机技术、通信技术共同构成21世纪产业的三大支柱技术,受到世界各发达国家的高度重视。

1. 传感器的发展趋势

当前传感器技术的发展趋势主要是微型化、智能化、多样化等,主要形式有微型传感器、光纤传感器、纳米传感器和智能传感器等。

(1) 微型化。随着微电子工艺、微机械加工和超精密加工等先进制造技术在各类传感器的开发和生产中的不断普及,使传感器向以微机械加工技术为基础、仿真程序为工具的微结构技术方向发展。如采用微机械加工技术制作的微型机电系统(MEMS)、微型光电系统(MEOMS)、片上系统(SOC)等,具有划时代的微小体积、低成本、高可靠性等独特的优点。图3-6给出了各种集成度较高的微



图 3-6 微型传感器

型传感器。

(2) 智能化。智能传感器的概念是在 1980 年提出的。智能传感器具有一定的智能,可以将纯粹的原始传感器信号转化成一种更便于人们理解和使用的方式。它还具有数值优化功能,从而可以优化信号的质量而不再是简单地将信号传出。智能化传感器的发展开始与人工智能相结合,创造出各种基于模糊推理、人工神经网络、专家系统等人工智能技术的高智能传感器,并且已经在家用电器方面得到利用。图 3-7 列出了含有智能传感器的主要家用电器,如空调、洗衣机、电饭煲、微波炉和血压测试仪等。



图 3-7 包含智能传感器的家用电器

(3) 多样化。多样化体现在传感器能测量不同性质的参数,实现综合检测。例如,集成有压力、温度、湿度、流量、加速度、化学等不同功能敏感元件的传感器,能同时检测外界环境的物理特性或化学特性,进而实现对环境的多参数综合监测。未来的传感器将突破零维、瞬间的单一量检测方式,在时间上实现广延,空间上实现扩张,检测测量实现多元,检测方式实现模糊识别。图 3-8 给出了包含光线、距离、温度、压力、方向和加速度等智能传感器的智能手机。



图 3-8 具有多功能感知能力的智能手机

(4) 网络化。传感器的网络化是传感器领域近些年发展起来的一项新兴技术,它利用 TCP/IP 协议,使现场测量数据就近通过网络与网络上有通信能力的节点直接进行通信,实现了数据的实时发布和共享。传感器网络化的目标就是采用标准的网络协议,同时采用模块化结构将传感器和网络技术有机地结合起来,实现信息交流和技术维护。

(5) 集成化。它是指将信息提取、放大、变换、传输以及信息处理和存储等功能都制作在同一基片上,实现一体化。与一般传感器相比,它具有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好及成本低等优点。目前随着半导体集成技术与厚、薄膜技术的不断发展,传感器的集成化已成为传感器技术发展的一种趋势。

(6) 开发新型材料。陶瓷、高分子、生物、纳米等新型材料的开发与应用,不仅扩充了传感器种类,而且改善了传感器的性能,拓宽了传感器的应用领域。例如新一代光纤传感器、

超导传感器、焦平面阵列红外探测器、生物传感器、诊断传感器、智能传感器、基因传感器及模糊传感器等。图 3-9 所示为一种诊断型传感器。



图 3-9 诊断型传感器

(7) 高精度、高可靠性。随着自动化生产程度的不断提高,要求研制出具有灵敏度高、精确度高、响应速度快、互换性好的新型传感器以确保生产自动化的可靠性。同时,需要进一步开发高可靠性、宽温范围的传感器。大部分传感器的工作范围都在 $-20\sim 70^{\circ}\text{C}$,在军用系统中要求工作温度在 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$,汽车、锅炉等场合对传感器的温度要求更高,而航天飞机和空间机器人甚至要求工作温度在 -80°C 以下, 200°C 以上。

2. 传感器的应用

随着电子计算机、生产自动化、现代信息技术的不断发展,传感器在军事、交通、化学、环保、能源、海洋开发、遥感、宇航等不同领域的需求与日俱增,其应用的领域已渗入到国民经济的各个部门以及人们的日常文化生活之中。可以说,从太空到海洋,从各种复杂的工程系统到人们日常生活的衣食住行,都离不开各种各样的传感器,它是实现物理世界与数字世界融合的桥梁。传感技术对物联网发展的成败起到关键性作用。下面我们就传感器在一些主要领域中的应用进行简要介绍。

(1) 工业检测和自动化控制系统。传感器在工业自动化生产中占有极其重要的地位。在石油、化工、电力、钢铁、机械等工业中,传感器在各自的工作岗位上担负着相当于人们感觉器官的作用,它们每时每刻地按需要完成对各种信息的检测,再把大量测得的信息通过自动控制、计算机等处理后进行反馈,用以进行生产过程、质量、工艺管理与安全方面的控制。在自动控制系统中,电子计算机与传感器的有机结合在实现控制的高度自动化方面起到了关键的作用。

(2) 智能家居。现代智能家居中普遍应用着传感器。传感器在电子炉灶、自动电饭锅、吸尘器、空调、电子热水器、热风取暖器、风干器、报警器、电熨斗、电风扇、游戏机、电子驱蚊器、洗衣机、洗碗机、照相机、电冰箱、彩色电视机、录像机、录音机、收音机、电唱机及家庭影

院等方面得到了广泛的应用。

随着人们生活水平的不断提高,对提高家用电器产品的功能及自动化程度的要求极为强烈。为满足这些要求,首先要使用能检测模拟量的高精度传感器,以获取正确的控制信息,再由微型计算机进行控制,使家用电器的使用更加方便、安全、可靠,并减少能源消耗,为更多的家庭创造一个舒适、智能化的生活环境。

目前,家庭智能化的蓝图正在设计之中。未来的家庭将通过各种传感器代替人监视家庭的各种状态,并由作为中央控制装置的微型计算机通过控制设备进行各种控制。家庭自动化的主要内容包括:安全监视与报警、空调及照明控制、耗能控制、太阳光自动跟踪、家务劳动自动化及人身健康管理等。家庭自动化的实现,可使人们有更多的时间用于学习、教育或休闲娱乐。

(3) 环境保护及遥感技术。目前,大气污染、水质污浊及噪声已严重地破坏了地球的生态平衡和我们赖以生存的环境,这一现状已引起了世界各国的重视。为保护环境,利用传感器制成的各种环境监测仪器正在发挥着积极的作用。

此外,传感器在遥感技术上也有着广泛的应用。所谓遥感技术,简单地讲就是从飞机、人造卫星、宇宙飞船及船舶上对远距离的广大区域的被测物体及其状态进行大规模探测的一种技术。在飞机及航天飞行器上装载的是近紫外线、可见光、远红外线及微波等传感器,在船舶上向水下观测时多采用超声波传感器。例如,要探测一些矿产资源埋藏在什么地区,就可以利用人造卫星上的红外接收传感器测量地面发出的红外线的量,然后由人造卫星通过微波再发送到地面站,经地面站计算机处理后,便可根据红外线分布的差异判断出埋有矿藏的地区。

(4) 医疗及人体医学。随着医用电子学的发展,仅凭医生的经验和感觉进行诊断的时代将会结束。现在,应用医用传感器可以对人体的表面和内部温度、血压及腔内压力、血液及呼吸流量、肿瘤、血液的分析、脉波及心音、心脑电波等进行高准确度的诊断。显然,传感器对促进医疗技术的高度发展起着非常重要的作用。

为提高人民的健康水平,我国医疗制度的改革将把医疗服务对象扩大到全民。以往的医疗工作仅局限于以治疗疾病为中心,今后,医疗工作将在疾病的早期诊断、早期治疗、远距离诊断及人工器官的研制等广泛的范围内发挥作用,而传感器在这些方面将会得到越来越多的应用。

(5) 航空航天。在航空及航天的飞行器上也广泛地应用着各种各样的传感器。要了解飞机或火箭的飞行轨迹,并把它们控制在预定的轨道上,就要使用传感器进行速度、加速度和飞行距离的测量;要了解飞行器飞行的方向,就必须掌握它的飞行姿态,飞行姿态可以使用陀螺仪传感器、阳光传感器、星光传感器及地磁传感器等进行测量;此外,对飞行器周围的环境、飞行器本身的状态及内部设备的监控也都要通过传感器进行检测。

(6) 智能机器人。目前,在劳动强度大或作业危险的场所,已逐步使用机器人取代人的工作。一些高速度、高精度的工作,由机器人来承担也是非常合适的。这些机器人多数是用来进行加工、组装、检验等工作,属于生产用的自动机械式的单能机器人。在这些机器人身上便采用了检测臂的位置和角度的传感器。

要使机器人和人的功能更为接近,以便从事更高级的工作,要求机器人具有判断能力,这就要给机器人安装物体检测传感器,特别是视觉传感器和触觉传感器,使机器人通过视觉

对物体进行识别和检测,通过触觉产生压觉、力觉、滑动和重量的感觉。这类机器人被称为智能机器人,它不仅可以从事特殊的作业,而且一般的生产、事务和家务,全部可由智能机器人去处理。

3.3 传感器技术原理

传感器技术是一门知识密集型技术,涉及多种学科,其技术原理各种各样。本节将根据传感器的技术原理来介绍各种类型的传感器,即从工作原理出发,了解各种传感器。

3.3.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是目前应用最广泛的传感器之一。它的原理是将电阻应变片粘贴到各种弹性材料上,通过电阻应变片将应变转换为电阻变化。当被测物理量作用在弹性材料上,弹性材料的变形会引起由金属丝、箔、薄膜制成的电阻应变片的电阻值相应变化,通过转换电路转变成电量输出,电量值的大小反映了被测物理量的大小,如图 3-10 所示。电阻应变传感器可用来测量位移、加速度、力、力矩、压力等物理量。

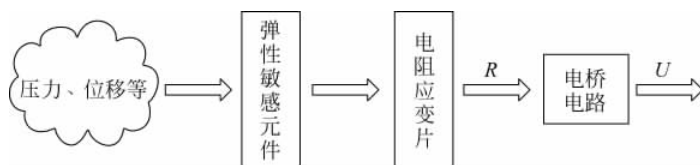


图 3-10 电阻应变式传感器原理

电阻应变式传感器具有结构简单、使用方便、可多点同步及远距离测量、灵敏度高、测量速度快等优点,且易于实现自动化,目前已经应用于机械、航空、电力、化学等许多领域,如图 3-11 所示。



图 3-11 电阻应变式传感器的应用

电阻应变式传感器的工作原理是基于电阻应变效应的,金属丝的电阻随着它所受的机械变形的大小而发生相应的变化的现象称为金属丝的电阻应变效应,如图 3-12 所示。金属丝在未受力情况下,其原始电阻为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3-7)$$

式中： ρ 为金属丝的电阻率； L 为金属丝的长度； S 为金属丝的截面积。

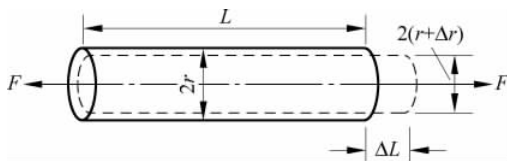


图 3-12 金属丝的电阻应变效应

当金属丝受到外力 F 的作用时,将伸长 ΔL (用 dl 表示),横截面积减少 ΔS (用 ds 表示),电阻率将改变 $\Delta \rho$ (用 $d\rho$ 表示),因此电阻值 R 的变化量为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-8)$$

令 $\epsilon = \frac{dl}{l}$, $\epsilon_s = \frac{ds}{s}$ 。其中 ϵ 为金属丝的轴向应变, ϵ_s 为金属丝的径向应变,由材料力学可知,当金属丝受力时,沿轴向 L 将伸长,沿径向 r 将缩短,那么轴向和径向的关系可表示为:

$$\epsilon_s = -\mu \epsilon \quad (3-9)$$

其中 μ 为泊松分布。将式(3-9)代入式(3-8)中可得出:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-10)$$

$$K_s = \left(\frac{dR}{R} \right) / \epsilon = (1 + 2\mu) + \left(\frac{d\rho}{\rho} \right) / \epsilon \quad (3-11)$$

我们称 K_s 为金属丝的灵敏系数。灵敏系数受两个方面影响:一是受力后材料几何尺寸的变化,即 $(1 + 2\mu)$;另一个是受力后材料电阻率发生的改变,即 $\left(\frac{d\rho}{\rho} \right) / \epsilon$ 。大量实验证明,在金属拉伸极限内,电阻的相对变化与应变成正比,即 K_s 为常数。

电阻应变片的种类很多,但常用的应变片可以分为:金属电阻应变片和半导体电阻应变片。金属电阻应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线组成;半导体应变片是用半导体材料制成的,其工作原理是基于半导体的压阻效应,即半导体材料在某一轴向受外力后,其电阻率将发生改变。为了正确使用电阻应变片,应该对其主要影响参数有所了解。

(1) 应变片电阻值(R_0)。电阻应变片的电阻值有 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 500Ω 和 1000Ω 等多种规格,以 120Ω 最为常用。应变片的电阻值越大,允许的工作电压就大,传感器的输出电压也大,相应地应变片的尺寸也要增大。在条件许可的情况下,应尽量选用高阻值应变片。

(2) 绝缘电阻。即敏感栅与基底间的电阻值,要求大于 $10^{10}\Omega$ 。

(3) 应变片的灵敏系数(K_s)。金属应变丝的电阻相对变化与它所承受的应变之间具有线性关系,用灵敏度系数 K_s 表示。当金属丝做成应变片后,其电阻应变特性与金属单丝情况不同。因此,须用实验方法对应变片的电阻应变特性重新测定。实验表明,金属应变片的电阻相对变化与应变 ϵ 在很宽的范围内均为线性关系。

(4) 机械滞后。应变片粘贴在被测试件上,当温度恒定时,其加载特性与卸载特性不重合,即为机械滞后。产生的原因主要是应变片在承受机械应变后,其内部会产生残余变形,使敏感栅电阻发生少量不可逆变化。

(5) 零点漂移和蠕变。对于粘贴好的应变片,当温度恒定、不承受应变时,其电阻值随时间增加而变化的特性,称为应变片的零点漂移(简称“零漂”)。产生原因是敏感栅通电后的温度效应,应变片的内应力逐渐变化,黏结剂固化不充分等。

如果在一定温度下,使应变片承受恒定的机械应变,其电阻值随时间增加而变化的特性称为蠕变。一般蠕变的方向与原应变量的方向相反。产生原因是胶层之间发生“滑动”,使力传到敏感栅的应变量逐渐减少。

(6) 应变极限、疲劳寿命。应变极限指在一定温度下,应变片的指示应变对测试值的真实应变的相对误差不超过规定范围(一般为 10%)时的最大真实应变值。真实应变是由于工作温度变化或承受机械载荷,在被测试件内产生应力(包括机械应力和热应力)时所引起的表面应变。而疲劳寿命指对已粘贴好的应变片,在恒定幅值的交变力作用下,可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数。

(7) 横向效应。由大量实验表明,将直的金属丝绕成敏感栅后,虽然长度相同,但应变状态不同,应变片敏感栅的电阻变化较直的金属丝小,因此灵敏系数有所降低,这种现象称为应变片的横向效应。应变片的横向效应表明,当实际使用应变片的条件与标定灵敏度系

数 K_s 时的条件不同时,由于横向效应的影响,实际 K_s 值会改变,由此可能产生较大测量误差。为了减小横向效应的影响,一般多采用箔式应变片。

应变片将应变的变化量转换成电阻相对变化量 $\Delta R/R$,还要把电阻的变化转换成电压或电流的变化,才能用电路测量仪表进行测量。电阻应变片的测量线路多采用交流电桥(配交流放大器)。图 3-13 为交流电桥的工作原理图,它利用电桥平衡原理,调节电路使其达到平衡,即电桥输出电压 $U=0$ (图中伏特表 V 示数为“0”)。当其中某一个电阻($R_1 \sim R_4$)发生变化时,电桥平衡被破坏,此时输出电压 U 不为零。利用电压变化可反映电阻阻值的变化。

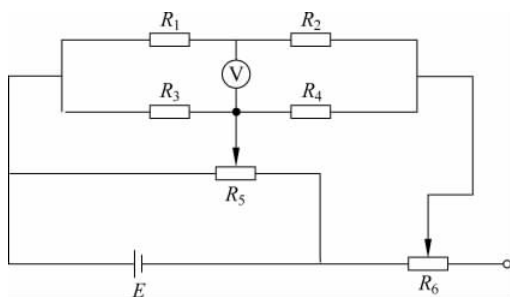


图 3-13 交流电桥的工作原理

电阻应变式传感器根据其应用领域和测量对象的不同可以分为应变式力传感器、应变式压力传感器、应变式容器内液体重量传感器以及应变式加速度传感器四类。下面我们分别介绍这几类应变式传感器。

(1) 应变式力传感器。被测物理量为荷重或力的应变传感器,统称为应变式力传感器,主要用于制作各种电子秤及用作材料试验机的测力元件,以及发动机的推力测试、水坝承载测试等。它要求具有较高的灵敏度和稳定性。常见的应变式力传感器有柱式力传感器、梁式力传感器等,如图 3-14 所示。



图 3-14 应变式力传感器种类

(2) 应变式压力传感器。应变式压力传感器主要用来测量流动介质的动态或静态压力,如动力管道设备的进出口气体或液体压力、发动机内部的压力变化、枪管及炮管内的压力、内燃机的管道压力等。应变式压力传感器大多采用膜片式或筒式弹性元件。

(3) 应变式容器内液体重量传感器。如图 3-15 所示,应变式容器内液体重量传感器的原理是利用感压膜感受液体的压力,当容器中溶液增多时,感压膜感受的压力就增大。通过将其上两个传感器 R_L 的电桥接成正向串接的双电桥电路,此时电桥输出电压与柱式容器内感压膜上面溶液的重量呈线性关系,由此可以测量容器内贮存的溶液重量。

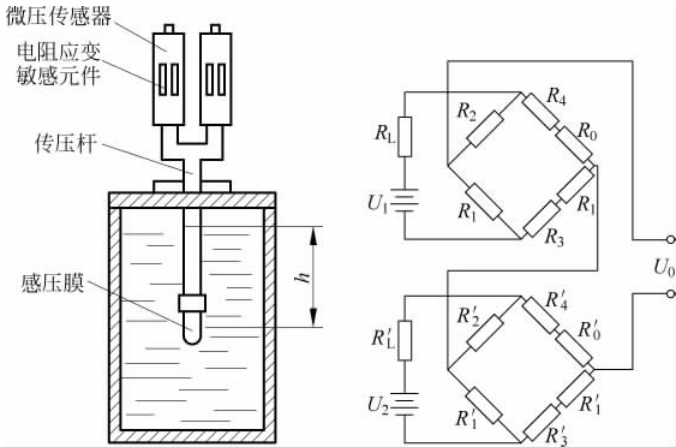


图 3-15 应变式容器内液体重量传感器原理图

(4) 应变式加速度传感器。应变式加速度传感器用于物体加速度的测量。如图 3-16 所示,其测量原理是将传感器壳体与被测对象(图中的质量块)刚性连接,当被测物体沿某一方向以加速度 a 运动时,质量块受到一个与加速度方向相反的惯性力作用,使等强度梁变形,该变形被粘贴在等强度梁上的应变片感受到并随之产生应变,从而使应变片的电阻发生变化。电阻的变化引起应变片组成的桥路出现不平衡,从而输出电压,即可得出加速度 a 值的大小。

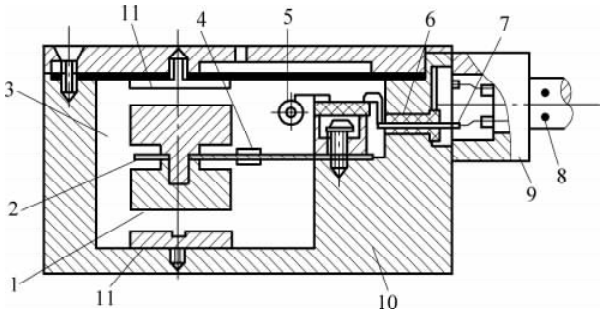


图 3-16 应变式加速度传感器原理图

1—质量块; 2—应变梁; 3—硅油(阻尼液); 4—应变计; 5—温度补偿电阻;
6—绝缘套管; 7—接线柱; 8—电缆; 9—压线柱; 10—壳体; 11—保护块

3.3.2 电感式传感器

电感式传感器是利用线圈自感或互感系数的变化来实现非电量测量的一种装置。利用电感式传感器,能对位移、压力、振动、应变、流量等参数进行测量,它具有结构简单、灵敏度高、输出功率大、输出阻抗小、抗干扰能力强及测量精度高等一系列优点,因此在机电控制系统中得到广泛的应用。它的主要缺点是响应较慢,不宜于快速动态测量,而且传感器的分辨率与测量范围有关,测量范围大,分辨率低,反之则高。

电感式传感器的核心部分是可变的自感或互感,在将被测量转换成线圈自感或互感的变化时,一般要利用磁场作为媒介或利用铁磁体的某些现象。这类传感器的主要特征是具有电感绕组。

电感式传感器种类很多,根据感知原理可分为自感式、互感式和电涡流式等。通常讲的电感式传感器是指自感式传感器,而互感式传感器由于是利用变压器原理,又往往做成差动形式,所以常被称为差动变压器式传感器。

1. 自感式(变磁阻式)传感器工作原理

变磁阻式传感器的结构如图 3-17 所示,它是由线圈、定铁芯和衔铁三部分组成。铁芯和衔铁通常由导磁材料制成,在铁芯和衔铁之间存在一定距离的气隙,厚度为 δ 。传感器的运动部分与衔铁相连,当衔铁移动时,气隙厚度发生变化,引起磁铁中的磁阻变化,从而导致电感线圈的电感值发生变化,因此只要能够测出电感量的变化,就能确定衔铁位移量的大小和方向。

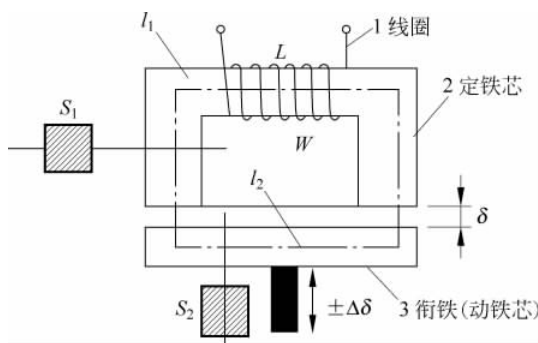


图 3-17 变磁阻式传感器

根据电感定义,线圈中电感量可由下式得出:

$$L = \frac{N^2}{R_M} \quad (3-12)$$

式中: N 为线圈的匝数, R_M 为总磁阻。对于变隙式传感器,因为气隙很小,所以可以认为气隙中的磁场是均匀的。若忽略磁场的磁路磁损,则磁路总磁阻为:

$$R_M = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (3-13)$$

式中: μ_0 、 δ 、 S 分别为气隙的磁导率、气隙的厚度和截面积; μ_1 、 l_1 、 S_1 为铁芯的磁导率、

长度和截面积; μ_2 、 l_2 、 S_2 分别为衔铁的磁导率、长度和截面积。

因为铁芯磁导率远大于空气的磁导率,因此铁芯磁阻远较气隙磁阻小,所以式(3-13)进一步可变换为:

$$R_M = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (3-14)$$

由式(3-12)和式(3-14),可得出线圈自感 L 为:

$$L = \frac{N^2}{R_M} \approx \frac{N^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 S}} = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta} \quad (3-15)$$

自感式传感器是把被测量的变化转换成自感 L 的变化,通过一定的转换电路转换成电压或电流输出。按磁路几何参数变化形式的不同,目前常用的自感式传感器有变气隙式、变截面积式和螺线管式三种,如图 3-18 所示。

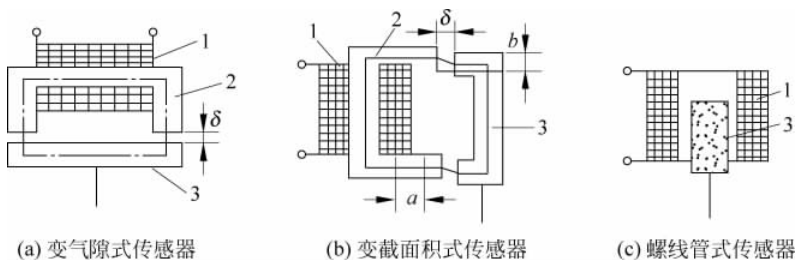


图 3-18 自感式传感器的常见种类

2. 差动变压器式传感器工作原理

通常我们把被测的非电量变化转换为线圈互感量变化的传感器称为互感式传感器。这种传感器是根据变压器的基本原理制成的,并且次级绕组都用差动形式连接,故称差动变压器式传感器。差动变压器结构形式较多,有变隙式、变面积式和螺线管式等,但其工作原理基本一样。非电量测量中,应用最多的是螺线管式差动变压器,它可以测量 1~100mm 范围内的机械位移,并具有测量精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠等优点。

如图 3-19(a)所示,螺线管的基本元件有衔铁、初级线圈、次级线圈和线圈框架等。初级线圈作为差动变压器激励用,相当于变压器的原边,而次级线圈由结构尺寸和参数相同的两个线圈反相串接而成,相当于变压器的副边。螺线管式差动变压器根据初、次级排列不同有二节式、三节式、四节式和五节式等形式。

螺线管式传感器的工作原理是,当传感器工作时,被测量的变化将使衔铁产生位移,引起磁链和互感系数的变化,最终使输出电压变化。差动变压器等效电路如图 3-19(b)所示,初级线圈的复数电流值为:

$$\dot{I}_P = \frac{\dot{E}_P}{R_P + j\omega L_P} \quad (3-16)$$

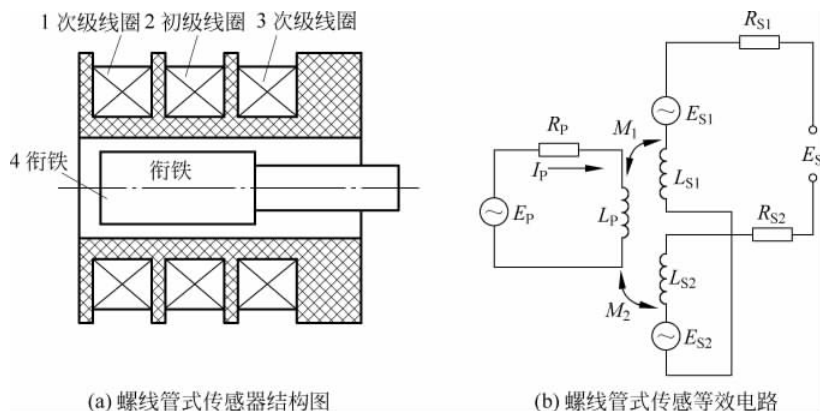


图 3-19 螺线管式传感器

输出电压为：

$$\dot{E}_S = \dot{E}_{S1} - \dot{E}_{S2} = M_1 \frac{d\dot{I}_P}{dt} - M_2 \frac{d\dot{I}_P}{dt} \quad (3-17)$$

将电流 $\dot{I}_P$ 写成复指数形式：

$$\dot{I}_P = I_{PM} e^{-j\omega t} \quad (3-18)$$

则：

$$\frac{d\dot{I}_P}{dt} = -j\omega I_{PM} e^{-j\omega t} = -j\omega \dot{I}_P \quad (3-19)$$

所以输出电压为：

$$\dot{E}_S = -j\omega(M_1 - M_2)\dot{I}_P = \frac{-j\omega(M_1 - M_2)\dot{E}_P}{R_P + j\omega L_P} \quad (3-20)$$

通过以上公式可得出结论(相对螺旋管)：

(1) 衔铁处于中间平衡位置时,互感 $M_1 = M_2 = M$, 则 $E_S = 0$;

(2) 磁芯上升时, $M_1 = M + \Delta M$, $M_2 = M - \Delta M$, 则：

$$E_S = 2\omega\Delta M E_P / \sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2} \quad (3-21)$$

(3) 磁芯下降时, $M_1 = M - \Delta M$, $M_2 = M + \Delta M$, 则：

$$E_S = -2\omega\Delta M E_P / \sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2} \quad (3-22)$$

差动变压式传感器应用广泛,它可以直接用于位移测量,也可测量与位移有关的任何机械量,如振动、加速度、应变、比重、张力和厚度等。

3. 电涡流式传感器工作原理

根据法拉第电磁感应定律,金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时,导体内将产生呈旋涡状流动的感应电流,称为电涡流,这种现象称为电涡流效应。涡流的大小 Z 与金属的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、几何尺寸 d 、产生磁场的线圈与金属的距离 b 、线圈的激磁电流 I 及其角频率 ω 等参数有关。当已知其中的若干参数时,就能按涡流的大小测量出另外某一参数。

电涡流式传感器是建立在涡流效应原理上的,它能实现非接触测量,如测量位移、振动、厚度、转速、应力、硬度等参数。这种传感器还可用于无损探伤,其原理如图 3-20 所示。

传感器线圈和被测导体组成线圈—导体系统,工作时线圈的电感和电阻均发生变化,进而使有效阻抗发生变化。线圈的阻抗变化与涡流效应的强弱有关,即与金属导体的电阻率、磁导率、线圈与金属导体之间的距离、激磁电流和电流角频率以及线圈的尺寸参数有关。即:

$$Z = F(\rho, \mu, d, I, \omega, b) \quad (3-23)$$

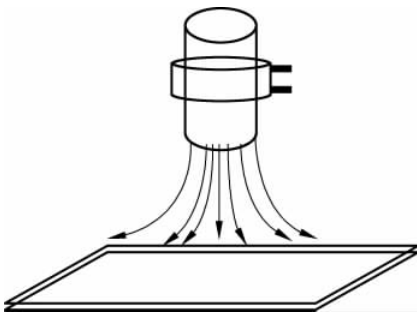


图 3-20 电涡流式传感器示意图

3.3.3 电容式传感器

电容式传感器以各种类型的电容器作为敏感元件,将被测物理量的变化转换为电容量的变化,再由转换电路(测量电路)转换为电压、电流或频率,以达到检测的目的(如图 3-21 所示)。因此,凡是能引起电容量变化的有关非电量,均可用电容式传感器进行电测变换。

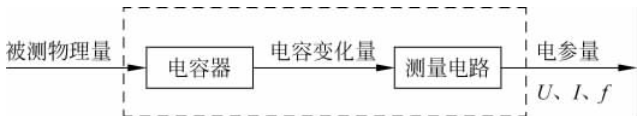


图 3-21 电容式传感器原理图

电容式传感器不仅能测量荷重、位移、振动、角度、加速度等机械量,还能测量压力、液面、料面、成分含量等热工量。这种传感器具有结构简单、灵敏度高、动态特性好等一系列优点,在机电控制系统中占有十分重要的地位。

由物理学可知,当忽略电容器边缘效应时,由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平行板电容器(如图 3-22 所示)其电容量为:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (3-24)$$

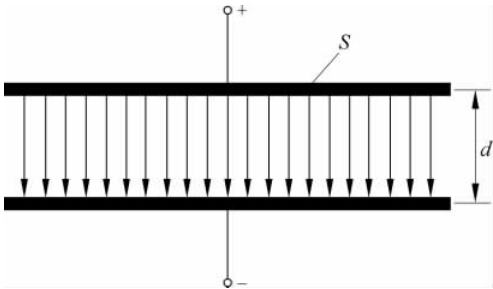


图 3-22 平行板电容器

式中: ϵ 为电容极板间介质的介电常数($\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为极板间介质相对介电常数), S 是两平行板所覆盖的面积, d 为两平行板之间的距离。

由式(3-24)可知,在 S 、 d 、 ϵ 三个参量中,改变其中任意一个量,均可使电容量 C 改变。也就是说,如果被检测参数(如位移、压力、液位等)的变化引起 S 、 d 、 ϵ 三个参量之一发生变化,就可利用相应的电容量的改变实现参数测量。据此,电容式传感器可分为变极距型、变面积型和变介质型三种类型。

1. 变极距型电容传感器原理

变极距型电容传感器的原理如图 3-23 所示。

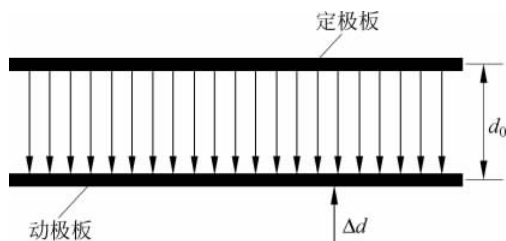


图 3-23 变极距型电容传感器

由式(3-24)可知,电容传感器的初始电容为:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_0} \approx \frac{\epsilon_0 S}{d_0} \quad (3-25)$$

当平行电容板之间的间隙减小 Δd 时,则电容量将增大 ΔC :

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_0} \cdot \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} = C_0 \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (3-26)$$

所以电容的变化为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \approx \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3-27)$$

可见,在误差允许范围内,电容 C 的相对变化与位移之间呈现的是一种近似线性的关系。一般情况下,变极距型电容传感器的初始电容 $C_0 = 20 \sim 100 \text{ pF}$; 最大位移应小于间距的 $1/10$,通常 $\Delta d = (0.01 \sim 0.1) d_0$; 极板间距离为 $25 \sim 200 \mu\text{m}$ 。

变极距型电容式传感器的优点是灵敏度高,可以进行非接触式测量,并且对被测量影响较小,所以适宜于微位移的测量。它的缺点是近似线性特性,所以测量范围受到一定的限制,另外传感器的寄生电容效应对测量精度也有一定的影响。

2. 变面积型电容传感器原理

变面积型电容传感器的测量是通过改变电容器极板的面积来实现的。通常采用线位移动和角位移动两种形式,如图 3-24 所示。

当采用线位移动时,电容的相对变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta C = C - C_0 &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b(a - \Delta x)}{d} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r ab}{d} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r b}{d} \Delta x = -C_0 \frac{\Delta x}{a} \\ \frac{\Delta C}{C_0} &= -\frac{\Delta x}{a} \end{aligned} \quad (3-28)$$

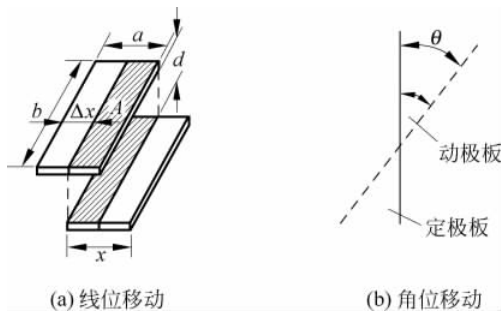


图 3-24 变面积型电容传感器

当采用角位移动时,电容的相对变化量:

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)}{d_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi}$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 1 - \frac{\theta}{\pi} \quad (3-29)$$

变面积型电容传感器的优点是输入与输出之间呈线性关系,但灵敏度较低,所以适宜于测量较大的直线位移和角位移。

3. 变介质型电容传感器原理

变介质型电容传感器的结构形式较多。变介质型电容式传感器常用于对容器中液面的高度、溶液的浓度以及某些材料的厚度、湿度、温度等的检测。如用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度;测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体介质的湿度等。

如图 3-25 所示,当无介质插入时,初始电容为:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0}{d_0} \quad (3-30)$$

当有介质插入时,两个极板间由于包括不同介质 ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} , 因此实际上构成两个并联式电容传感器,其电容变化量为:

$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1} (L_0 - L) + \epsilon_{r2} L}{d_0}$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{d_0} \quad (3-31)$$

可见,电容的变化与电介质 ϵ_{r2} 的移动量 L 呈线性关系。

4. 电容式传感器的优缺点及其应用

电容式传感器也存在很多不足,例如寄生电容影响大,不仅降低传感器的灵敏度和精度,而且会使仪器工作不稳定;变极距型电容传感器输出呈非线性,其他类型的电容传感器由于边缘效应的存在,也会出现非线性等。但随着材料、工艺、电子技术尤其是集成技术的

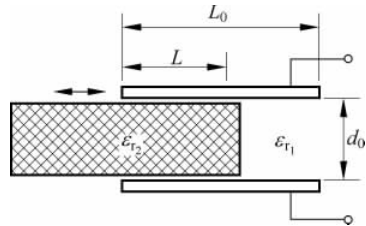


图 3-25 变介质型电容传感器

高速发展,成功地解决了电容传感器在使用中存在的问题,使之成为一种高灵敏度、高精度,在动态、低压及一些特殊测量方面大有前途的传感器。

常见的电容传感器的应用有电容式位移传感器、电容式物位传感器、电容式指纹传感器等。例如,电容式物位传感器主要由两个导电板组成,由于电极间是气体、液体或固体而导致静电容发生变化,因而可以感受物位并转换成可用的输出信号。它的敏感元件通常有棒状、板状和线状三种形式,其工作温度、压力主要受绝缘材料的限制。电容式物位传感器可以采取微机控制,实现自动调整灵敏度,并具有自诊断功能,同时能够检测敏感元件的破损、绝缘性的降低、电缆和电路的故障等,并可以自动报警,实现高可靠性的信息传递。由于电容式传感器无可动的机械部件,且敏感元件简单,操作方便,是目前应用最广的一种物位传感器。

3.3.4 压电式传感器

压电式传感器是一种自发电式传感器,它以某些电介质的压电效应为基础,在外力作用下,在电介质表面产生电荷,从而实现非电量电测的目的。压电传感元件是力敏感元件,它可以测量最终能变换为力的那些非电物理量,例如动态力、动态压力、振动、加速度等,但不能用于静态参数的测量。压电式传感器具有体积小、质量小、频响高、信噪比大等特点。由于它没有运动部件,因此结构牢固,可靠性和稳定性高。

如图 3-26 所示,压电效应分为正向压电效应和逆向压电效应。某些电介质,当沿着一定方向施加外力而使它变形时,它的内部就产生极化现象,相应地会在它的两个表面上产生符号相反的电荷;当外力去掉后,又重新恢复到不带电状态,这种现象称压电效应。当外力方向改变时,电荷的极性也随之改变。这种将机械能转换为电能的现象,称为正压电效应。相反,当在电介质极化方向施加电场,这些电介质也会产生一定的机械变形或机械应力,这种现象称为逆向压电效应,也称为电致伸缩效应。

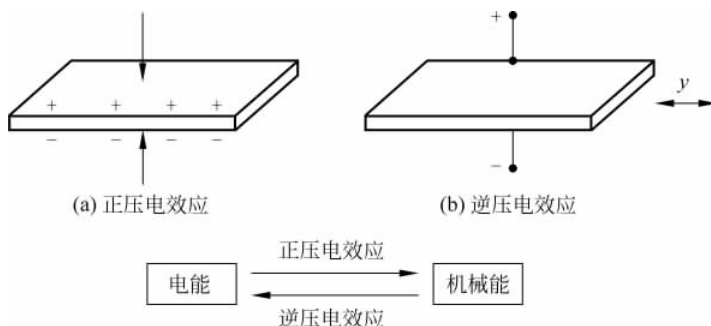


图 3-26 压电效应

压电材料在外力作用下产生的表面电荷常用压电方程描述,具体为:

$$Q_i = d_{ij} F_j \quad (3-32)$$

式中, Q_i 为 i 面上的总电荷量, F_j 为 j 方向的作用力, $d_{i,j}$ 为压电常数(其中, $i=1,2,3$; $j=1,2,3,4,5,6$)。压电方程中两个下标的含义为:下标 i 表示晶体的极化方向,当产生电荷的表面垂直于 x 轴(y 轴或 z 轴)时,记 $i=1$ 或 $2,3$ 。下标 $j=1$ 或 $2,3,4,5,6$,分别表示沿

x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单向应力,和在垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面(即 yz 平面、 zx 平面、 xy 平面)内作用的剪应力。

具有压电效应的材料称为压电材料,如图 3-26 所示。压电材料能实现机—电能量的相互转换,具有一定的可逆性。压电材料常用晶体材料,但自然界中多数晶体压电效应非常微弱,很难满足实际检测的需要,因而没有实用价值。目前能够广泛使用的压电材料只有石英晶体和人工制造的压电陶瓷、钛酸钡、锆钛酸铅等材料,这些材料都具有良好的压电效应。压电材料是压电式传感器的敏感材料,主要特性参数有以下几种。

(1) 压电系数:它是衡量材料压电效应强弱的参数,一般应具有较大的压电常数。

(2) 机械性能:作为力敏元件,通常希望其具有较高的机械强度和较大的刚度,以获得较宽的线性范围和较大的固有频率。

(3) 电性能:良好的压电材料应该具有大的介电常数和较高的电阻率,以减小电荷的泄漏,从而获得良好的低频特性。对于一定形状、尺寸的压电元件,其固有电容与介电常数有关,而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。

(4) 机械耦合系数:是指在压电效应中,转换输出能量(如电能)与输入能量(如机械能)之比的平方根,这是衡量压电材料机—电能量转换效率的一个重要参数。

(5) 居里点温度:它是指压电材料开始丧失压电特性的温度。

(6) 时间稳定性:压电特性不应随时间改变。

常见的压电材料可以分为三类:石英晶体、压电陶瓷和高分子压电材料。下面我们分别介绍这三种材料及其特性。

1. 石英晶体

如图 3-27 所示,天然结构石英晶体的理想外形是一个横截面为正六边形的棱柱,在晶体学中它可用三根互相垂直的轴来表示,其中纵向轴 z - z 称为光轴;经过正六面体棱线并垂直于光轴的 x - x 轴称为电轴;与 x - x 轴和 z - z 轴同时垂直的 y - y 轴(垂直于正六面体的棱面)称为机械轴。通常把沿电轴 x - x 方向的作用力下产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”,而把沿机械轴 y - y 方向的作用力下产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”,沿光轴 z - z 方向受力则不产生压电效应。

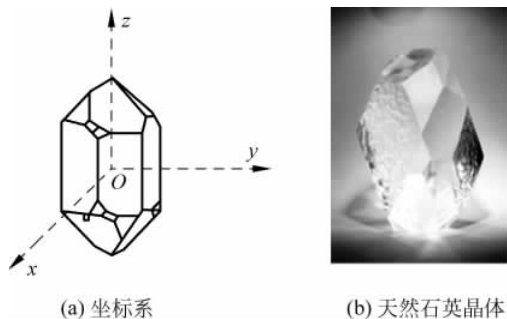


图 3-27 石英晶体及其坐标系

当晶片受到沿 x 轴方向的压缩应力 σ_x 作用时,晶片将产生厚度变形,即纵向压电效应,并发生极化现象。在晶体线性弹性范围内,极化强度 P_x 与应力 σ_x 成正比,即:

$$P_x = d_{11}\sigma_x = d_{11} \frac{F_x}{lb} \quad (3-33)$$

式中, F_x 为 x 轴方向的作用力; l, b 为石英晶片的长度和宽度; d_{11} 为压电常数, 当受力方向和变形不同时, 压电常数也不同; 在 0° x 切型的纵向石英晶体的压电常数 $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} \text{C/N}$ 。极化强度 P_x 在数值上等于晶面上的电荷密度, 若 q_x 为垂直于 x 轴平面上的电荷, 则有

$$P_x = \frac{q_x}{lb} \quad (3-34)$$

将式(3-33)与式(3-34)联立可得, 当沿电轴方向施加作用力 F_x 时, 在与电轴 x 垂直的平面上将产生电荷, 其大小为:

$$q_x = d_{11}F_x \quad (3-35)$$

当在同一切片上, 沿机械轴 y 方向施加作用力 F_y , 则仍在与 x 轴垂直的平面上产生电荷, 其大小为:

$$q_y = d_{12} \frac{a}{b} F_y \quad (3-36)$$

式中, d_{12} 为 y 轴方向受力的压电常数。根据石英晶体的对称性, 有 $d_{12} = -d_{11}$, a, b 则为晶体切片的长度和厚度。

纵向压电效应产生的电荷与几何尺寸无关; 横向压电效应产生的电荷与几何尺寸有关。

石英晶体最明显的优点是它的介电常数和压电常数的温度稳定性好, 适于做工作温度范围很宽的传感器, 同时, 石英晶体的机械强度很高, 可用来测量大量程的力和加速度。但是由于石英晶体资源稀少且大多存在一些缺陷, 故一般只用在校准用的标准传感器或精度很高的传感器中。

2. 压电陶瓷

压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料, 材料内部的晶粒有许多自发极化的电畴, 电畴在晶体中是杂乱分布的, 各电畴的极化效应相互抵消, 压电陶瓷内极化强度为零。因此原始的压电陶瓷呈中性, 不具有压电性质。

当在陶瓷上施加一定的外电场时, 电畴的极化方向发生转动, 趋向于按外电场方向的排列, 从而使材料得到极化。极化后的压电陶瓷才具有压电效应, 如图 3-28 所示。

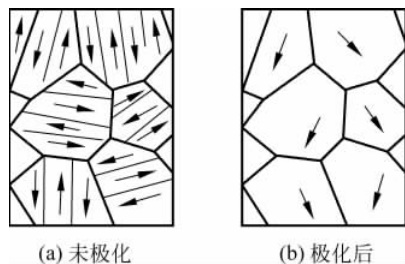


图 3-28 压电陶瓷极化图

极化处理后陶瓷材料内部存在很强的剩余极化, 当陶瓷材料受到外力作用时, 电畴的界限发生移动, 电畴发生偏转, 从而引起剩余极化强度的变化, 因而在垂直于极化方向的平面

上将出现极化电荷的变化。所以通常将压电陶瓷的极化方向定义为 z 轴,在垂直于 z 轴的平面上的任何直线都可以取作 x 轴或 y 轴。对于 x 轴或 y 轴,其压电效应是等效的,这是压电陶瓷与石英晶体不同的地方。这种因受力而产生的由机械效应转变为电效应,将机械能转变为电能的现象,就是压电陶瓷的正向压电效应。电荷量的大小与外力成如下的正比关系:

$$q = d_{33}F \quad (3-37)$$

式中, d_{33} 为压电陶瓷的压电系数。

压电陶瓷的压电系数比石英晶体大得多,所以采用压电陶瓷制作的压电式传感器的灵敏度较高。极化处理后的压电陶瓷材料的剩余极化强度和特性与温度有关,它的参数也随时间变化,从而使其压电特性减弱。

最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡(BaTiO_3)。它是由碳酸钡和二氧化钛按 1:1 摩尔分子比例混合后烧结而成的。它的压电系数约为石英的 50 倍,但居里点温度只有 115°C ,使用温度不超过 70°C ,温度稳定性和机械强度都不如石英。

目前使用较多的压电陶瓷材料是锆钛酸铅系列,它是 20 世纪 60 年代发展起来的压电陶瓷。它由铈镁酸铅、锆酸铅和钛酸铅按不同比例配出不同性能的压电陶瓷,具有极高的压电系数和较高的工作温度,而且能承受较高的压力。

3. 高分子压电材料

高分子压电材料是 20 世纪 80 年代发展起来的,常见的某些高分子材料如聚二氟乙烯和聚氯乙烯等都可以作为制作压电元件的材料。这些材料不易破碎而且质地柔软,频率响应范围宽,性能稳定。

压电式传感器根据其特性可以应用到不同领域中去。常见的压电式传感器主要有压电式测力传感器、压电式加速度传感器、压电式玻璃碎报警器等,这里就不再逐一详述。

3.3.5 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器又称电动势式传感器,是利用电磁感应原理将被测量(如振动、位移、转速等)转换成电信号的一种传感器。它是一种机—电能量变换型传感器,利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势,不需要供电电源,电路简单,性能稳定,输出阻抗小,又具有一定的频率响应范围(一般为 $10\sim 1000\text{Hz}$),所以有着广泛的应用,例如转速测量、振动测量以及扭矩测量等。

磁电感应式传感器是以电磁感应原理为基础的。由法拉第电磁感应定律可知, N 匝线圈在磁场中运动切割磁力线或线圈所在磁场的磁通变化时,线圈中所产生的感应电动势 $E(\text{V})$ 的大小取决于穿过线圈的磁通 $\Phi(\text{Wb})$ 的变化率,即:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-38)$$

磁通量的变化可以通过不同的方法来实现,如磁铁与线圈之间的相对运动;磁路中磁阻的变化;恒定磁场中线圈面积的变化等。根据磁通量变化原理的不同,一般可将磁电感应式传感器分为恒磁通式和变磁通式两类。

1. 恒磁通式磁电传感器

在恒磁通式磁电传感器中,工作气隙中的磁通恒定,感应电动势由永久磁铁与线圈之间的相对运动——线圈切割磁力线而产生。这类结构可以分为动圈式和动铁式两种,如图 3-29 所示。

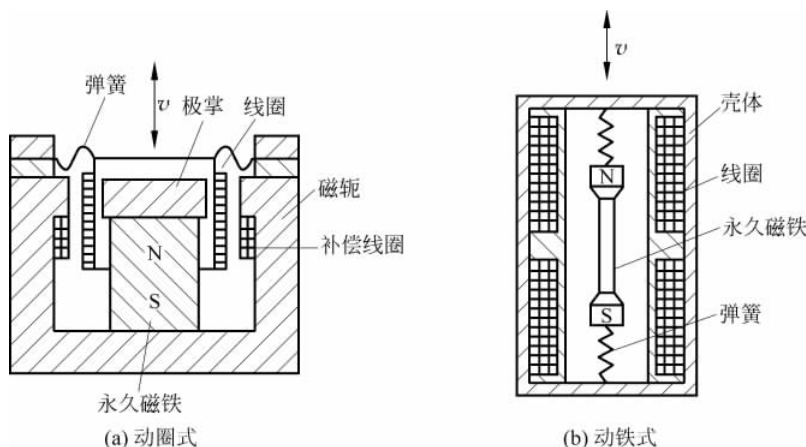


图 3-29 恒磁通式磁电传感器结构图

动圈式和动铁式的工作原理是完全相同的。恒磁通式磁电传感器由永久磁铁、线圈、弹簧、金属骨架等组成。当恒磁通式磁电传感器工作时,传感器与被测物体紧固在一起,当物体振动时,传感器外壳也随之振动。由于弹簧非常软、轻,而运动部件质量相对较大,当物体振动频率足够高时,运动部件惯性很大,来不及随振动体一起振动,近乎静止不动,振动能量几乎全部被弹簧吸收,永久磁铁与线圈之间的相对运动速度就接近于振动体的振动速度。

磁铁与线圈相对运动而切割磁力线,从而产生与运动速度 dx/dt 成正比的感应电动势 E ,其大小为:

$$E = -NBl \frac{dx}{dt} \quad (3-39)$$

式中: N 为线圈在工作气隙磁场中的匝数; B 为工作气隙磁感应强度; l 为每匝线圈平均长度。

当传感器结构参数确定后, N 、 B 和 l 均为恒定值, E 与 dx/dt 成正比,根据感应电动势 E 的大小就可以知道被测速度的大小。由理论推导可得,当振动频率低于传感器的固有频率时,这种传感器的灵敏度是随振动频率而变化的。当振动频率远大于固有频率时,传感器的灵敏度基本上不随振动频率而变化,而近似为常数;当振动频率更高时,线圈磁阻增大,传感器灵敏度随振动频率增加而下降。不同结构的恒磁通磁电感应式传感器的频率响应特性是有差异的,但一般频响范围为几十赫兹至几百赫兹。低的可到 10Hz 左右,高的可达 2kHz 左右。

2. 变磁通式磁电传感器

变磁通式磁电传感器的线圈和磁铁部分静止不动,与被测物连接而运动的部分是用导

磁材料制成的。在运动中,它们改变磁路的磁阻,因而改变穿过线圈的磁通量,于是在线圈中就会产生感应电动势。变磁通式磁电传感器结构简单、牢固、价格便宜,被广泛用于车辆上作为检测车轮转速的轮速传感器。图 3-30 为变磁通式磁电传感器的结构原理。其中传感器线圈、磁铁和外壳均固定不动,齿轮安装在被测的旋转体上。

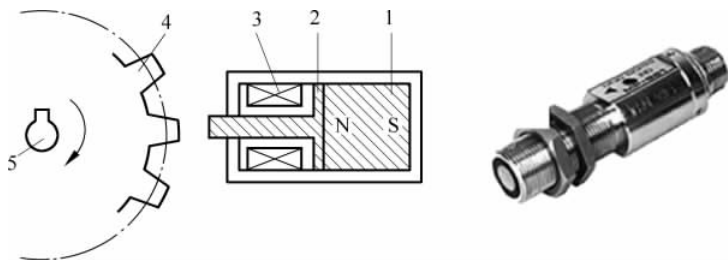


图 3-30 变磁通式磁电传感器结构图

1—永久磁铁；2—软铁；3—感应线圈；4—齿轮；5—被测转轴

变磁通式传感器一般做成转速传感器,产生感应电动势的频率作为输出,而电动势的频率取决于磁通变化的频率。变磁通式转速传感器的结构有开磁路和闭磁路两种。

如图 3-30 所示为开磁路变磁通式转速传感器。测量齿轮 4 安装在被测转轴上与其一起旋转。当齿轮旋转时,齿的凹凸引起磁阻的变化,从而使磁通发生变化,因而在线圈 3 中感应出交变的电势,其频率等于齿轮的齿数 Z 和转速 n 的乘积,即:

$$f = Zn/60 \quad (3-40)$$

式中, Z 为齿轮齿数; n 为被测轴转速(r/min); f 为感应电动势频率(Hz)。这样当已知 Z ,测得 f 就知道 n 了。开磁路式转速传感器结构比较简单,但输出信号小,另外当被测轴振动比较大时,传感器输出波形失真较大。所以在振动强的场合往往采用闭磁路式转速传感器。

闭磁路式转速传感器由装在转轴上的内齿轮、外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成,内外齿轮齿数相同。当转轴连接到被测转轴上时,外齿轮不动,内齿轮随被测轴而转动,内、外齿轮的相对转动使气隙磁阻产生周期性变化,从而引起磁路中磁通的变化,使线圈内产生周期性变化的感应电动势。显然,感应电势的频率也与被测转速成正比。

变磁通式传感器对环境条件要求不高,能在 $-150 \sim +90^{\circ}\text{C}$ 的温度下工作,不影响测量精度,也能在油、水雾、灰尘等条件下工作。但它的工作频率下限较高,约为 50Hz,上限可达 100kHz。

除上面介绍的磁电传感器外,还有一类基于霍尔效应的霍尔传感器。如图 3-31 所示,半导体薄片置于磁感应强度为 B 的磁场中,磁场方向垂直于薄片。当有电流 I 流过薄片时,在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势 E_H ,这种现象称为霍尔效应,该电动势称为霍尔电势,上述半导体薄片称为霍尔元件。

其工作原理简述如下:激励电流 I 从 a 、 b 端流入,磁场 B 由正上方作用于薄片,这时电子 e 的运动方向与电流方向相反,将受到洛伦兹力的作用,向内侧偏移,该侧形成电子的堆

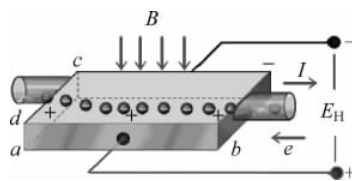


图 3-31 霍尔效应

积,从而在薄片的 c 、 d 方向产生电场。电子积累得越多,电磁场也越大,在半导体薄片 c 、 d 方向的端面之间建立的电动势 E_H 就是霍尔电势。

由实验可知,流入激励电流端的电流 I 越大,作用在薄片上的磁场强度 B 越强,霍尔电势也就越高。磁场方向相反,霍尔电势的方向也随之改变,因此霍尔传感器能用于测量静态磁场或交变磁场。

霍尔传感器是基于霍尔效应将被测量转换成电动势输出的一种传感器。霍尔器件是一种磁传感器,用它们可以检测磁场及其变化,可在各种与磁场有关的场合中使用。霍尔器件具有许多优点,它们的结构牢固,体积小、重量轻、寿命长、安装方便、功耗小、频率高(可达 1MHz)、耐振动,不怕灰尘、油污、水汽及盐雾等的污染或腐蚀。

通常按照霍尔器件的功能可将它们分为霍尔线性器件和霍尔开关器件,前者输出模拟量,后者输出数字量。霍尔线性器件的精度高、线性度好;霍尔开关器件无触点、无磨损,输出波形清晰、无抖动、无回跳、位置重复精度高(可达微米级)。采用了各种补偿和保护措施的霍尔器件的工作温度范围较宽,可达 $-55\sim+150^{\circ}\text{C}$ 。

霍尔传感器最普遍的应用是汽车上的转速测量。在待测转速的转轴上安装一个齿盘,也可选取机械系统中的一个齿轮,将线性型霍尔器件及磁路系统靠近齿盘,齿盘的转动使磁路的磁阻随气隙的改变而周期性地变化,霍尔器件输出的微小脉冲信号经隔直、放大、整形后可以确定被测物的转速。

3.3.6 其他类型的传感器

前面介绍的电阻应变式、电感式、电容式等传感器统称为传统传感器。随着科学技术的不断发展以及应用领域的不断扩张,各种新型传感器越来越多地出现在人们的生产和生活当中。与传统传感器技术相比,现代的新型传感器是指近十几年来研发成功的,通过不断发现新的物理、化学等现象,以新材料、新工艺手段研发出来的集成多功能的、智能传感器。

新型传感器主要种类包括温度传感器、气敏传感器、光电式传感器、光纤传感器和超声波传感器等。在下一节中,我们将分别介绍几类有代表性的、常见的传感器及其原理。

3.4 常见传感器介绍

3.4.1 温度传感器

温度传感器是一种能够将温度变化转换为电信号的装置。它是利用某些材料或元件的性能随温度变化的特性进行测温的,如将温度变化转换为电阻、热电动势、磁导率变化以及热膨胀的变化等,然后再通过测量电路来达到检测温度的目的。温度传感器广泛应用于工农业生产、家用电器、医疗仪器、火灾报警以及海洋气象等诸多领域。温度传感器是温度测量仪表的核心部分,品种繁多,可按测量方式和按照传感器材料及电子元件特性进行分类。

1. 按测量方式分类

按测量方式温度传感器可分为接触式和非接触式两大类。

接触式温度传感器的检测部分与被测对象有良好的接触,又称温度计,如图 3-32(a)所示。温度计通过传导或对流达到热平衡,从而使温度计的指示值能直接表示被测对象的温度,一般测量精度较高。在一定的测温范围内,温度计也可测量物体内部的温度分布。但对于运动体、小目标或热容量很小的对象则会产生较大的测量误差。常用的温度计有双金属温度计、玻璃液体温度计、压力式温度计、电阻温度计、热敏电阻和温差电偶等。

非接触式温度传感器的敏感元件与被测对象互不接触,又称非接触式测温仪表,如图 3-32(b)所示。这种仪表可用来测量运动物体、小目标和热容量小或温度变化迅速(瞬变)对象的表面温度,也可用于测量温度场的温度分布。非接触式温度传感器的感温元件没有耐温程度的限制,因而对最高可测温度原则上没有限制。对于 1800°C 以上的高温,主要采用非接触测温方法。随着红外技术的发展,辐射测温逐渐由可见光向红外线扩展, 700°C 以下直至常温都已采用,且分辨率很高。

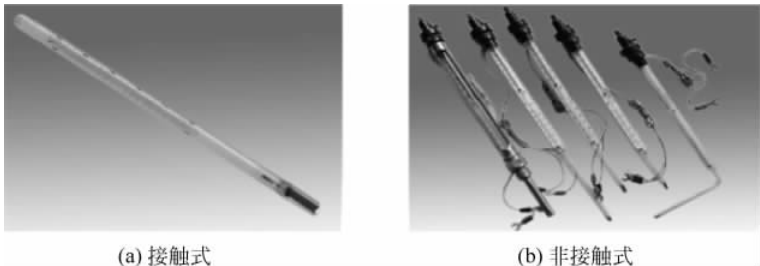


图 3-32 各种类型的温度传感器

2. 按材料分类

按材料分类,温度传感器可分为热电偶和热电阻两类。

热电偶是工程上应用最广泛的温度传感器(如图 3-33 所示),它构造简单,使用方便,具有较高的准确度、稳定性及复现性,温度测量范围宽,在温度测量中占有重要的地位。热电偶是根据热电效应工作的:将两种不同材料的导体或半导体连成闭合回路,两个接点分别置于温度为 T 和 T_0 的热源中,该回路内会产生热电势,热电势的大小反映两个接点的温度差。保持 T_0 不变,热电势随着温度 T 变化而变化。所以测得热电势的值,即可知道温度 T 的大小。

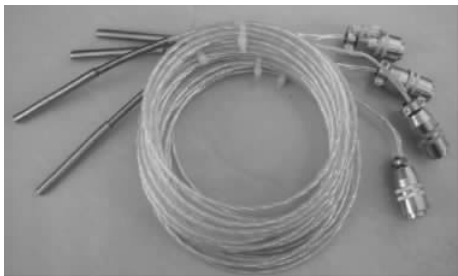


图 3-33 热电偶传感器

热电偶传感器产生的热电势是由温差电势和接触电势构成的。接触电势产生的原因是由于两种不同导体的自由电子密度不同而在接触处形成的电动势。当两种导体接触时,自由电子密度大的向自由电子密度小的导体扩散,在接触处失去电子的一侧带正电,得到电子的一侧带负电,形成稳定的接触电势。接触电势的数值取决于两种不同导体的性质和接触点的温度。而温差电势的产生是当同一导体的两端温度不同时,高温端的电子能量要比低温端的电子能量大,因而从高温端跑到低温端的电子数比从低温端跑到高温端的要多,结果高温端因失去电子而带正电,低温端因获得多余的电子而带负电,形成一个静电场,该静电场阻止电子继续向低温端迁移,最后达到动态平衡。

理论上讲,任何两种不同材料的导体都可以组成热电偶,但为了准确、可靠地测量温度,对组成热电偶的材料必须经过严格的选择。工程上用于热电偶的材料应满足以下条件:热电势变化尽量大,热电势与温度关系尽量接近线性关系,物理、化学性能稳定,易加工,复现性好,便于成批生产,有良好的互换性。实际上并非所有材料都能满足上述要求。目前在国际上被公认比较好的热电材料只有几种。国际电工委员会(IEC)向世界各国推荐了6种标准化热电偶。所谓标准化热电偶(如表3-2所示),是指它已列入工业标准化文件中,具有统一的分度表。我国从1988年开始采用IEC标准生产热电偶。

表 3-2 IEC 标准化热电偶

热电偶名称	正热电极	负热电极	分度号	测温范围	特 点
30%铂铑 60%铂铑	30%铂铑	60%铂铑	B	0~+1700℃ (超高温)	适用于氧化性气氛中测温,测温上限高,稳定性好,在冶金等高温领域得到广泛应用
10%铂铑 铂	10%铂铑	纯铂	S	0~+1600℃ (超高温)	适用于氧化性、惰性气氛中测温,热电性能稳定,抗氧化性强,精度高,但价格高,热电动势较小。常用作标准热电偶和用于高温测量
镍铬 镍硅	镍铬合金	镍硅合金	K	-200~+1200℃ (高温)	适用于氧化和中性气氛中测温,测温范围很宽,热电动势与温度关系近似线性,热电动势大,价格低。稳定性不如B、S型电偶,但是非贵金属热电偶中性能最稳定的一种
镍铬 康铜	镍铬合金	铜镍合金	E	-200~+900℃ (中温)	适用于还原性或惰性气氛中测温,热电动势较大,稳定性好,灵敏度高,价格低
铁 康铜	铁	铜镍合金	J	-200~+750℃ (中温)	适用于还原性气氛中测温,价格低,热电动势较大,仅次于E型热电偶。缺点是铁极易氧化
铜 康铜	铜	铜镍合金	T	-200~+350℃ (低温)	适用于还原性气氛中测温,精度高,价格低。在-200~0℃可制成标准热电偶。缺点是铜极易氧化

热电阻传感器是利用导体或半导体的电阻值随温度变化而变化的原理进行测温的。热电阻传感器具有测量精度高,测量范围大,易于使用等优点,广泛应用于自动测量和远距离测量中。热电阻传感器分为金属热电阻和半导体热电阻两大类,如图3-34所示。一般把金

属热电阻称为热电阻,常见的有铂热电阻、铜热电阻等;而把半导体热电阻称为热敏电阻,主要由热敏探头、引线 and 壳体构成。

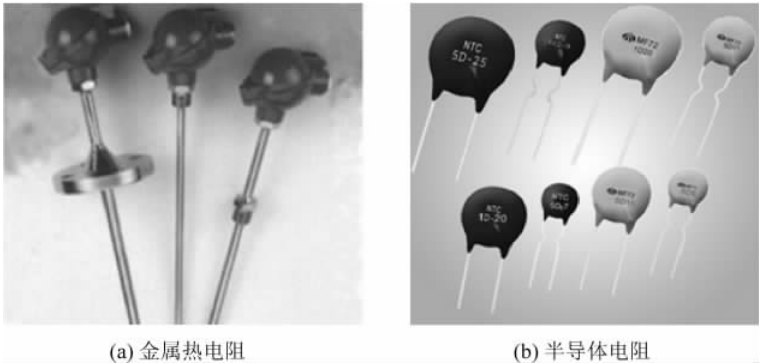


图 3-34 热电阻传感器

3.4.2 湿敏传感器

湿度是指大气中的水蒸气含量,通常采用绝对湿度和相对湿度两种方法表示。绝对湿度是指在一定温度和压力条件下,每单位体积的混合气体中所含水蒸气的质量,单位为 g/m^3 ,一般用符号 AH 表示;相对湿度是指气体的绝对湿度与同一温度下达到饱和状态的绝对湿度之比,一般用符号 $\%RH$ 表示。相对湿度给出大气的潮湿程度,它是一个无量纲的量,在实际使用中也多使用相对湿度。

湿敏传感器是能够感受外界湿度变化,并通过器件材料的物理或化学性质变化,将湿度转化成有用信号的器件。湿度检测较之其他物理量的检测显得困难,这首先是因为空气中水蒸气含量要比空气少得多;另外,液态水会使一些高分子材料和电解质材料溶解,一部分水分子电离后与溶入水中的空气中的杂质结合成酸或碱,使湿敏材料不同程度地受到腐蚀并加速老化,从而丧失其原有的性质;再者,湿信息的传递必须靠水对湿敏器件直接接触来完成,因此湿敏器件只能直接暴露于待测环境中,不能密封。通常,对湿敏器件有下列要求:在各种气体环境下稳定性好、响应时间短、寿命长、有互换性、耐污染和受温度影响小等。微型化、集成化及廉价是湿敏器件的发展方向。下面我们分别介绍一些现已发展得比较成熟的几类湿敏传感器。

1. 氯化锂湿敏电阻

如图 3-35 所示,氯化锂湿敏电阻是利用吸湿性盐类潮解,离子电导率发生变化而制成的测湿元件。它由引线、基片、感湿层与电极组成。氯化锂通常与聚乙烯醇组成混合物,在氯化锂的溶液中, Li 和 Cl 均以正负离子的形式存在,而 Li^+ 对水分子的吸引力强,离子水合程度高,其溶液中的离子导电能力与溶液浓度成正比。当溶液置于一定湿度场中,若环境相对湿度高,溶液将吸收水分,使溶液浓度降低,因此,其溶液电阻



图 3-35 氯化锂湿敏电阻

率增高;反之,环境相对湿度变低时,则溶液浓度升高,其电阻率下降,从而实现对湿度的测量。

氯化锂湿敏元件的优点是滞后小、不受测试环境风速影响、检测精度高,但其耐热性差,不能用于露点以下测量,器件的重复性不理想,使用寿命短。

2. 半导体陶瓷湿敏电阻

通常,湿敏半导体陶瓷是用两种以上的金属氧化物半导体材料混合烧结而成的多孔陶瓷,这些材料有 $\text{ZnO-LiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{Si-Na}_2\text{O-V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{TiO}_2\text{-MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 系和 Fe_3O_4 等,前三种材料的电阻率随湿度增加而下降,故称为负特性湿敏半导体陶瓷,最后一种材料的电阻率随湿度增加而增大,故称为正特性湿敏半导体陶瓷(以下简称半导瓷)。半导体陶瓷湿敏电阻如图 3-36 所示。



图 3-36 半导体陶瓷湿敏电阻

典型的半导体陶瓷湿敏元件有以下几种。

(1) 氧化镁复合氧化物二氧化钛湿敏电阻($\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$): 它通常被制成多孔陶瓷型“湿—电”转换器件,它是负特性半导瓷, MgCr_2O_4 为 P 型半导体,它的电阻率低,电阻—湿度特性好。

(2) $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$ 湿敏元件: $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$ 湿敏元件的结构是将多孔材料的金电极烧结在多孔陶瓷圆片的两表面上,并焊上铂引线,然后将敏感元件装入有网眼过滤的方形塑料盒中,用树脂固定。 $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$ 传感器能连续稳定地测量湿度,而无须加热除污装置,功耗低于 0.5W,体积小、成本低,是一种常用测湿传感器。

(3) 四氧化三铁(Fe_3O_4)湿敏器件: Fe_3O_4 湿敏器件由基片、电极和感湿膜组成。 Fe_3O_4 湿敏器件在常温、常湿下性能比较稳定,有较强的抗结露能力,测湿范围广,有较为一致的湿敏特性和较好的温度—湿度特性,但器件有较明显的湿滞现象,响应时间长,吸湿过程比较缓慢。

3.4.3 光电式传感器

光电式传感器就是将光信号转化成电信号的一种器件,简称光电器件。要将光信号转化成电信号,必须经过两个步骤:一是先将非电量的变化转化成光量的变化;二是通过光电器件的作用,将光量的变化转化成电量的变化,这样就实现了将非电量的变化转化成电量的变化,如图 3-37 所示。由于光电器件的物理基础是光电效应,且光电器件具有响应速度快、可靠性较高、精度高、非接触式、结构简单等特点,因此光电式传感器在现代测量与控制系统中,应用非常广泛。



图 3-37 光电传感器的工作原理

1. 光电效应

光电效应是指一束光线照射到物质上时,物质中的电子吸收了光子的能量而发生了相应的电效应的现象。根据光电效应现象的不同特征,可将光电效应分为三类。

外光电效应:在光线照射下,使电子从物体表面逸出的现象。如光电管、光电倍增管等。

内光电效应:在光线照射下,使物体的电阻率发生改变的现象。如光敏电阻等。

光生伏特效应:在光线照射下,使物体产生一定方向的电动势的现象。如光敏二极管、光敏三极管、光电池等。

2. 光电器件

根据光电效应制作的器件称为光电器件,也称光敏器件。光电器件的种类很多,但其工作原理都是建立在光电效应这一物理基础上的。如图 3-38 所示,光电器件的种类主要有光电管、光电倍增管、光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光电耦合器件、光电池等。

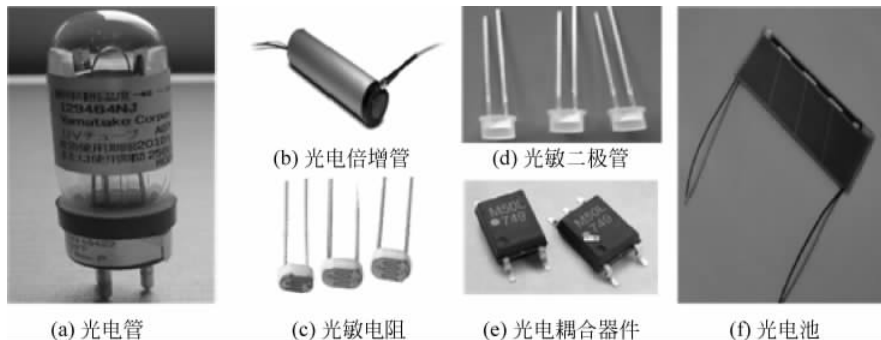


图 3-38 光电器件的种类

光电管:它是由玻璃壳、两个电极(光电阴极 K 和阳极 A)、引出插脚等组成的。将球形玻璃壳抽成真空,在内半球面上涂上一层光电材料作为阴极 K,球心放置小球形或小环形金属作为阳极 A,当阴极 K 受到光线照射时便发射电子,电子被带正电位的阳极 A 吸引,朝阳极 A 方向移动,这样就在光电管内产生了电子流。

光电倍增管:光电倍增管是一种常用的灵敏度很高的光探测器,顾名思义,它是把微弱光信号转变成电信号且进行放大的器件。

光敏电阻:在光敏电阻的两端加上直流或交流工作电压,当无光照射时,光敏电阻的电阻率呈高阻值状态,光敏电阻值很大;当有光照射时,由于光敏材料吸收了光能,光敏电阻率变小,光敏电阻呈低阻状态。光照越强,阻值越小。当光照停止时,光敏电阻又逐渐恢复高电阻值状态。

光敏二极管和光敏三极管:光敏二极管的结构与一般的二极管相似,其 PN 结对光敏感。将其 PN 结装在管的顶部,上面有一个透镜制成的窗口,以便使光线集中在 PN 结上。光敏二极管是基于半导体光生伏特效应的原理制成的光电器件。光敏三极管有 NPN 和 PNP 型两种,是一种相当于在基极和集电极之间接有光电二极管的普通晶体三极管,外形

与光电二极管相似。

光电耦合器件：光电耦合器件是将发光元件(如发光二极管)和光电接收元件合并使用,以光作为媒介传递信号的光电器件。光电耦合器件中的发光元件通常是半导体的发光二极管,光电接收元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管或光耦合器等。根据其结构和用途不同,又可分为用于实现电隔离的光电耦合器和用于检测有无物体的光电开关。

光电池：光电池是一种直接将光能转换为电能的光电器件,光电池在有光线的情况下其实质就是电源,电路中有了这种器件就不再需要外加电源。

3. 光纤式光电传感器

光纤维作为光纤通信的传输媒介,已得到了广泛的应用。利用光纤维制作的光纤传感器(图 3-39)发展非常迅速,目前已有光纤压力传感器、光纤磁场传感器、光纤温度传感器、光纤应变传感器、光纤电场传感器等用于非电量的电测上。

光纤传感器有两种类型,一种是传光型光纤传感器,光纤在传感器中起光的传输作用,又称为光纤式光电传感器。另一种是功能性光纤传感器,光在光纤内部传输过程中,受到外界物理因素(如温度、压力、电场、磁场等)的影响,会引起光纤中光的强度、相位、波

长或偏振态等的变化,只要测出这些参量随外界物理因素的变化关系,就可以用它作为传感器来测量一些物理量的变化。

光纤的构造有许多种,常见的有单芯光纤和双芯光纤,在它们的外部都包覆有金属外皮。光纤的直径很细,仅有几十微米,加上外皮也只有 1~2.2mm,其长度可根据需要任意切割,光纤式光电传感器的光纤长度为 2m。光纤用的材料早期有塑料、玻璃等,随着光纤制造技术的进步,现大多已采用透明度很好的石英玻璃作为光纤的主要原料。



图 3-39 光纤式光电传感器

4. CCD/CMOS 图像传感器

图像传感器是采用光电转换原理,用于摄取平面光学图像并使其转换为电子图像信号的器件。图像传感器必须具有两个作用,一是把光信号转换为电信号的作用;二是将平面图像上的像素进行点阵取样,并把这些像素按时间取出的扫描作用。图像传感器用于摄像的目的较多,因此又称它为摄像管。摄像管的发展很迅速,它经历了光电摄像管、超光电摄像管、正析摄像管、光导摄像管、二次电子导电硅靶管以及目前新发展起来的 CCD/CMOS 图像传感器等,如图 3-40 所示。

光电式传感器在自动化技术中应用十分广泛,如利用光电导元件制成光电探测器,在工业自动化中起着“眼睛”作用。这种功能使它可以用于大量的自动监视、控制、警戒等场合。光电探测器另外一个重要应用是,它能“看”到目标的热或温度特征,比较它们的冷热,测量其温度,进行无接触测量。光电探测技术在遥感中的应用也十分广泛,利用光电探测和扫描成像原理制成的行扫描仪在卫星和航空遥感技术中已得到广泛应用。

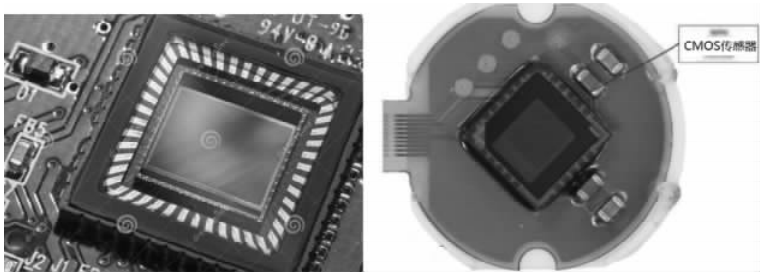


图 3-40 CCD 图形传感器和 CMOS 传感器

3.4.4 气敏传感器

气敏传感器是用来检测气体浓度或成分的传感器,它对于环境保护和安全监督方面起着极重要的作用。一般对气敏传感器有下列要求:能够检测报警气体的允许浓度和其他标准数值的气体浓度,能长期稳定工作,重复性好,响应速度快,共存物质所产生的影响小等。

由于被测气体的种类繁多,性质各不相同,不可能用一种传感器来检测所有气体,所以气敏传感器的种类也有很多。实际使用最多的是半导体气敏传感器,这类传感器一般多用于气体的粗略鉴别和定性分析,具有结构简单、使用方便等优点。

如图 3-41 所示,气敏传感器大体上可分为两种,一种是电阻式气敏传感器,另一种是非电阻式气敏传感器,目前使用的大多为电阻式气敏传感器。电阻式气敏传感器是用氧化锡、氧化锌等金属氧化物材料制作,利用其阻值随被测气体浓度改变而变化的特性来检测气体浓度。非电阻气敏传感器是一种半导体器件,它们与气体接触后,如二极管的伏安特性或场效应管的电容—电压特性等将会发生变化,根据这些特性的变化来测定气体的成分或浓度。除此之外,还可以利用原电池对一些气体进行检测。

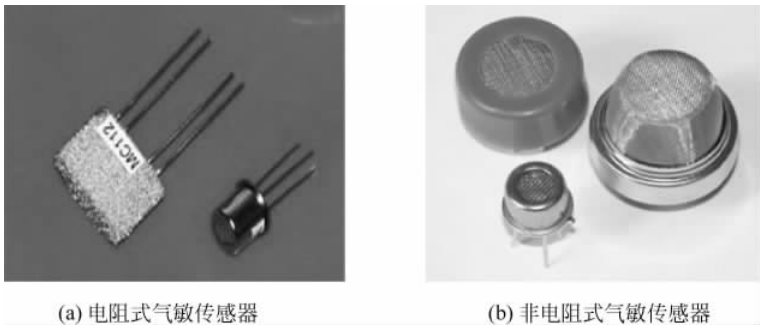


图 3-41 气敏电阻种类

半导体气敏元件通常采用金属氧化物半导体材料,它们也分为 N 型半导体(如 SnO_2 、 Fe_2O_3 、 ZnO 等)和 P 型半导体(如 CoO 、 PbO 、 Cu_2O 、 NiO 等)。常见的已实用化的半导体气敏元件是 SnO_2 金属氧化物半导体气敏元件和 Fe_2O_3 系列半导体气体传感器。

半导体气敏元件的敏感部分是金属氧化物半导体微结晶粒子烧结体,当它的表面吸附有被检测气体时,半导体微结晶粒子接触界面的导电电子比例就会发生变化,从而使气敏元件的电阻值随被测气体的浓度改变而变化。这种反应是可逆的,因而是可重复使用的。电

阻值的变化是伴随着金属氧化物半导体表面对气体的吸附和释放而发生的。为了加速这种反应,通常要用加热器对气敏元件加热。

气敏传感器主要用于工业上天然气、煤气、石油化工等部门的易燃、易爆、有毒、有害气体的检测,并可进行预报和自动控制;在防治公害方面检测污染气体;在家庭中用于煤气报警和火灾报警等。

3.4.5 压力传感器

压力传感器是工业实践中最为常用的一种传感器。我们通常使用的压力传感器主要是利用压电效应制成的,这样的传感器称为压电传感器。

晶体是各向异性的,非晶体是各向同性的。某些晶体介质,当沿着一定方向受到机械力作用发生变形时,就产生了极化效应;当机械力撤掉之后,又会重新回到不带电的状态,也就是受到压力的时候,某些晶体可能产生出电效应,这就是所谓的极化效应。研究人员就是根据这个效应研制出了压力传感器。

压电传感器主要应用在加速度、压力和力等的测量中。压电式加速度传感器是一种常用的加速度计,它具有结构简单、体积小、重量轻、使用寿命长等优异的特点,在飞机、汽车、船舶、桥梁和建筑的振动和冲击测量中已经得到了广泛的应用,特别是航空和宇航领域中更有它的特殊地位。压电式传感器也可以用来测量发动机内部的燃烧压力与真空度,例如用它来测量枪炮子弹在膛中击发的一瞬间膛压的变化和炮口冲击波的压力。它既可以用来测量比较大的压力,也可以用来测量微小的压力。压电式传感器也广泛应用在生物医学测量中,比如说心室导管式微音器就是由压电传感器制成的。因为测量动态压力是如此普遍,所以压电传感器的应用就非常的广泛。如图 3-42 所示是几种典型的压力传感器应用场景。

例如应用在玻璃防碎报警中,是将高分子压电测振薄膜粘贴在玻璃上,以感受玻璃破碎时会发出的振动。当玻璃遭暴力打碎的瞬间,压电薄膜感受到剧烈振动,表面产生电荷 Q ,在两个输出引脚之间产生窄脉冲报警信号,并将电压信号传送给集中报警系统。此外,通过将高分子压电电缆埋在公路上,可用来获取车型分类信息(包括轴数、轴距、轮距、单双轮胎)、车速监测、收费站地磅、闯红灯拍照、停车区域监控、交通数据信息采集(道路监控)及机场跑道监测等。

3.4.6 加速度传感器

加速度传感器是一种能够测量加速度的电子设备。加速度可以是常量,比如 g ,也可以是变量。通过前面分析可知,加速度计主要有两种:一种是角加速度计,是由陀螺仪(角速度传感器)改进的;另一种就是线加速度计。通过加速度的测量,可以了解物体的运动状态。可以应用在控制系统、报警系统、仪器仪表、地震监测、振动分析等领域。

加速度传感器是根据牛顿第二定律得到的。当测量时,只需知道外力大小和被测物体质量就可获得物体加速度。其本质是通过作用力造成传感器敏感元件发生变形,通过测量变形量并由相关电路转化成电压输出,最终得到加速度信号。通常加速度传感器的主要技术指标包括量程、灵敏度和带宽。

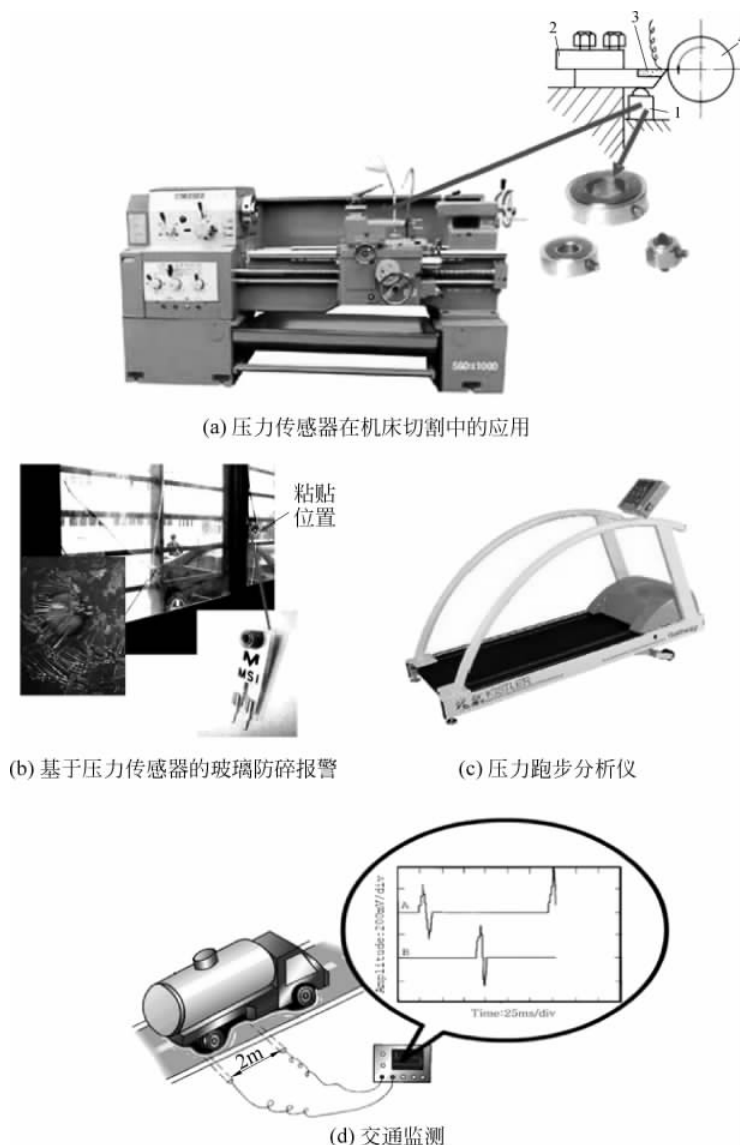


图 3-42 压力传感器的不同应用

目前,常见加速度传感器都是压电式、压阻式、电容式和谐振式(如图 3-43 所示)的,其相关技术原理在 3.3 节内容中已经做了介绍。压阻式加速度传感器具有加工工艺简单,测量方法易行等优点,但是温度效应严重,工作范围温度狭窄,并且灵敏度低,一般只有 1mg 左右;压电式加速计具有信噪比高、灵敏度高、结构简单的优点,但是信号处理电路过于复杂,且零漂现象不可避免,回零慢,不适宜连续测试;电容式加速度传感器结构简单,灵敏度高,动态特性好,抗过载能力大,易于集成,不易受温度影响,功耗低,但是,存在输出非线性、寄生电容以及信号处理电路复杂等问题。近些年,谐振式微机械加速度传感器越来越得到各国重视,其数字化输出、高可靠性、高重复性等特点,不仅能大幅降低微弱信号的监测难度,简化处理电路,而且具有优良的低频特性。

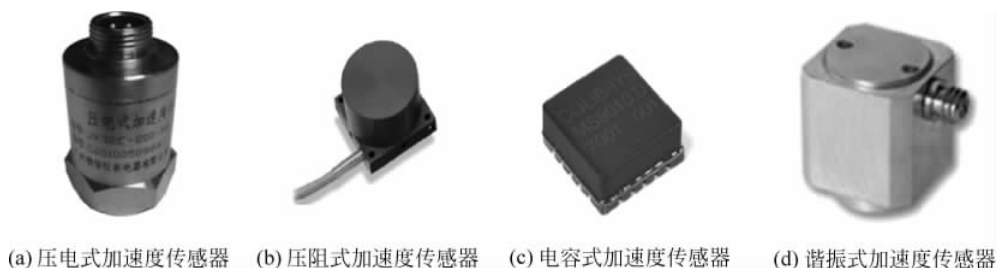


图 3-43 常见的加速度传感器

3.4.7 智能传感器

智能传感器(Intelligent Sensor 或 Smart Sensor)自 20 世纪 70 年代初出现以来,要求传感器准确度高、可靠性高、稳定性好,而且具备一定的数据处理能力,并能够自检、自校、自补偿。近年来,随着微处理器技术、信息技术、检测技术和控制技术的迅速发展,对传感器提出了更高的要求,不仅要具有传统的检测功能,而且要具有存储、判断和信息处理功能,促使传统传感器产生了一个质的飞跃。所谓智能传感器,就是一种带有微处理机,兼有信息检测、信号处理、信息记忆、逻辑思维与判断功能的传感器,即智能传感器就是将传统的传感器和微处理器及相关电路组成的一体化结构。

智能传感器系统一般构成框图如图 3-44 所示。其中作为系统“大脑”的微型计算机,可以是单片机、单板机,也可以是微型计算机系统。智能传感器按其结构分为模块式智能传感器、混合式智能传感器和集成式智能传感器三种。

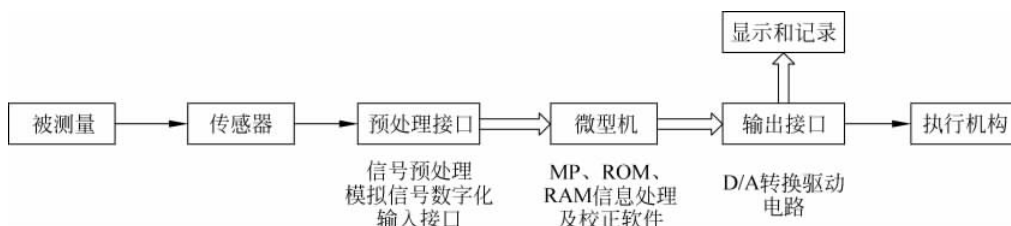


图 3-44 智能传感器构成框图

1. 模块式智能传感器

如图 3-45 所示,模块式智能传感器是初级的智能传感器,它由许多互相独立的模块组成。将微处理器、信号处理电路模块、输出电路模块、显示电路模块和传感器装配在同一壳体内,就组成了模块式智能传感器。这种传感器的集成度不高、体积较大,但它是一种比较实用的智能传感器。在模块式传感器中,A/D 转换器负责将模拟信号转换为计算机能够识别的数字信号,然后由微处理器进行处理,处理结果通过 D/A 变换器进行转换,生产模拟信号作用于物理世界。

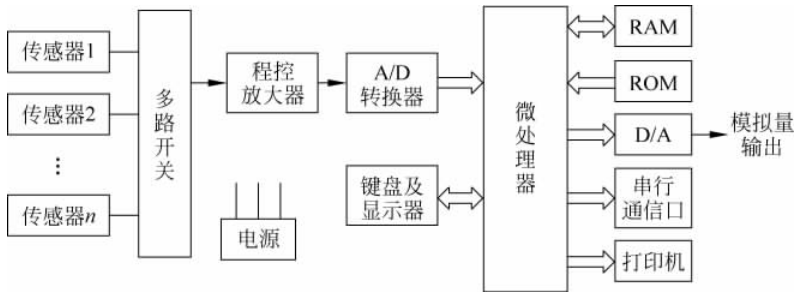


图 3-45 模块式智能传感器

2. 混合式智能传感器

混合式智能传感器是将传感器、微处理器(CPU)和信号处理电路等各个部分以不同的组合方式集成在几个芯片上,然后装配在同一壳体内组成的,如图 3-46 所示。目前,混合式智能传感器作为智能传感器的主要类型而被广泛应用。

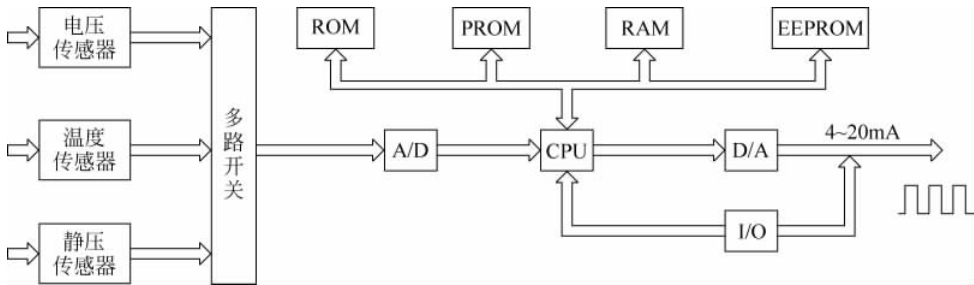


图 3-46 混合式智能传感器

3. 集成式智能传感器

集成式智能传感器是将一个或多个敏感元件与微处理器、信号处理电路集成在同一芯片上。它的结构一般是三维器件,即立体器件。这种结构是在平面集成电路的基础上,一层一层地制作多层的立体电路。这种传感器具有类似于人的五官与大脑相结合的功能,它的智能化程度是随着集成化程度提高而不断提高的。目前,集成式智能传感器技术正在迅速发展,势必在未来的传感器技术中发挥重要的作用。高端的智能传感器一般内部集成有微处理器,具有数据存储、双向通信、自动校准、错误判断甚至自主学习能力。

3.5 智能温度传感器 DS18B20

DS18B20 是一款单总线的智能型数字温度传感器,具有体积小,硬件开销低,抗干扰能力强,精度高的特点。DS18B20 数字温度传感器接线方便,只需要一条数据线和一条地线即可与处理器进行数据传输,并提供 9~12 位摄氏温度测量数据。

DS18B20 在出厂时已配置为按 12 位测量温度数据。在实际读取温度时,共读取 16

位,其中前5位为符号位。当前5位为1时,读取的温度为负数;当前5位为0时,读取的温度为正数。

温度为正时读取方法为:将十六进制数转换成十进制即可;温度为负时读取方法为:将十六进制取反后加1,再转换成十进制即可。例如, $0550H = +85(^{\circ}C)$, $FC90H = -55(^{\circ}C)$ 。

3.5.1 DS18B20 概述

DS18B20 的封装形式多样,如图 3-47 所示,可适用于各种狭小空间设备的数字测温和控制领域。DS18B20 的硬件接口非常简单,供电方式可为寄生电源供电或外部供电。

在图 3-47 左侧的 TQ-92 封装中,1 号引脚为 GND,接地;2 号引脚为 DQ,作为数字信号输入/输出端;3 号引脚为 V_{DD} ,外接供电电源(供电电压为 $3.0 \sim 5.5V$,但在寄生电源接线方式时,该引脚接地)。在图 3-47 右侧的 SOIC 封装中,5 号引脚为 GND,接地;4 号引脚为 VQ,作为数字信号输入/输出端;3 号引脚为 V_{DD} ,外接供电电源(供电电压为 $3.0 \sim 5.5V$,但在寄生电源接线方式时,该引脚接地)。当 DS18B20 采用外部供电时,只需将其数据线 with 单片机的一位双向端口相连就可以实现数据的传递。

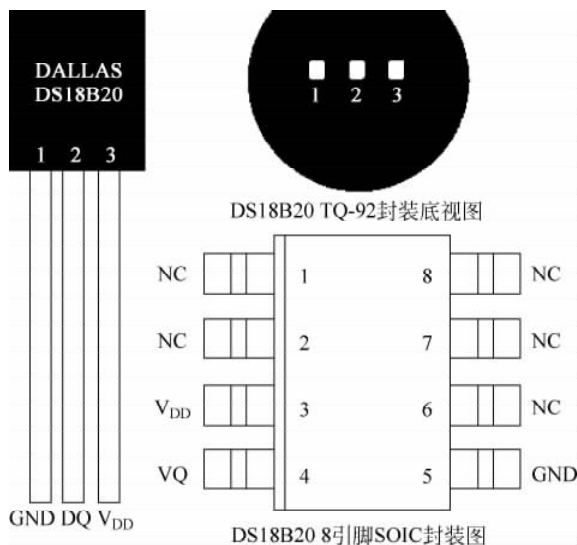


图 3-47 DS18B20 的封装图

采用寄生电源供电时,在远程温度测量和测量空间受限的情况下特别有实用价值。寄生电源供电的原理是在数据线为高电平的时候“窃取”数据线的电源,电荷被存储在寄生供电电容上,用于在数据线为低电平的时候为设备提供电源。需要注意的是,DS18B20 在进行温度转换或者将高速缓存中的数据复制到 EEPROM 时,所需的电流会达到 $1.5mA$,超出了电容所能提供的电流,此时可采用一个 MOSFET 三极管来供电,如图 3-48 所示。值得注意的是,当温度高于 $100^{\circ}C$ 时,不能使用寄生电源,因为此时器件中较大的漏电流会使总线不能可靠地检测高低电平,从而导致数据传输误码率的增大。

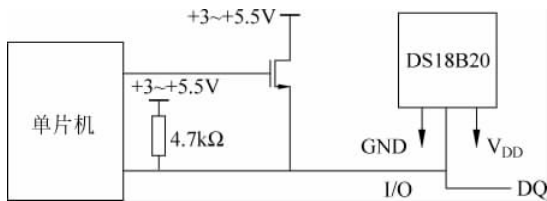


图 3-48 寄生电源的供电原理

DS18B20 主要技术性能描述如下：

- (1) DS18B20 在与微处理器连接时，除了电源线外，仅需要一根线即可实现微处理器与 DS18B20 的双向通信。
- (2) DS18B20 的测温范围是 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ ，测温误差为 1°C 。
- (3) 多个 DS18B20 可以通过 GND、DQ、 V_{DD} 三个引脚进行并联，最多能并联 8 个，实现多点测温。如果数量过多，会使供电电源电压过低，从而造成信号传输的不稳定。
- (4) DS18B20 的工作电源为 $3.0\sim5.5\text{V}/\text{DC}$ ，也可以使用寄生电源，从而实现两线连接。
- (5) 在使用中不需要任何外围元件，测量结果以 9~12 位数字量方式串行传送。

3.5.2 DS18B20 的测温原理

DS18B20 测温原理如图 3-49 所示。其中，低温度系数晶振的振荡频率受温度影响很小，用于产生固定频率的脉冲信号送给计数器 1。高温度系数晶振的振荡频率随温度变化改变明显，所产生的信号作为计数器 2 的脉冲输入。计数器 1 和温度寄存器被预置在 -55°C 所对应的一个基数值。计数器 1 对低温度系数晶振产生的脉冲信号进行减法计数，当计数器 1 的预置值减到 0 时，温度寄存器的值将加 1，计数器 1 将重新被装入预置，并重新开始对低温度系数晶振产生的脉冲信号进行计数……如此循环，直到计数器 2 计数到 0 时停止温度寄存器值的累加。此时，温度寄存器中的数值即为所测温度。图 3-49 中的斜率累加器用于补偿和修正测温过程中的非线性，其输出用于修正计数器 1 的预置值。

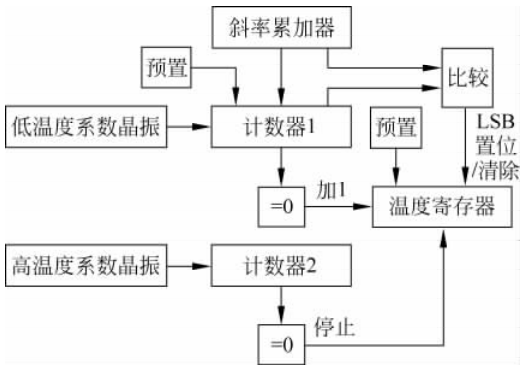


图 3-49 DS18B20 的内部测温电路框图

3.5.3 DS18B20 的内部结构

每个 DS18B20 具有唯一的 64 位序列号,可以方便地通过一个微处理器控制分布在较大区域内的多个 DS18B20 温度传感器。该功能非常适合大规模环境控制、楼宇自动化、大型设备和机器的过程监测系统的温度测量等应用。

DS18B20 内部结构如图 3-50 所示,主要由以下部件组成:64 位 ROM 和单总线接口、温度传感器、高温触发器 TH 和低温触发器 TL、配置寄存器、8 位 CRC 发生器。

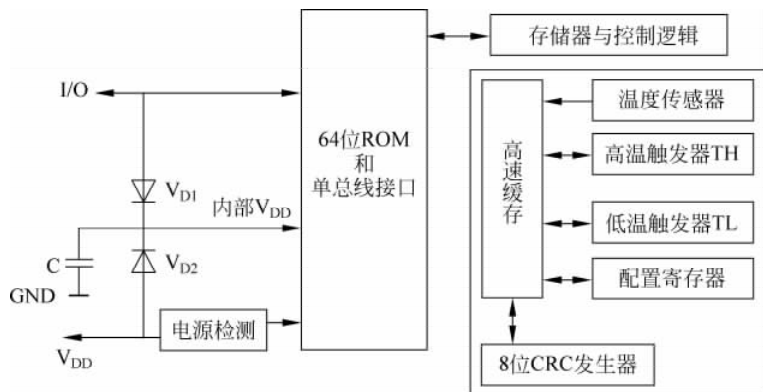


图 3-50 DS18B20 内部结构

1. 64 位 ROM 和单总线接口

64 位 ROM 又称为光刻 ROM,其中的 64 位序列号是出厂前被光刻好的,它可以看作该 DS18B20 的地址序列码。其结构如图 3-51 所示。



图 3-51 64 位 ROM 的结构

64 位光刻 ROM 的排列是:低字节的 8 位是产品类型标号(DS18B20 的代号为 28H),接着的 48 位是该 DS18B20 自身的序列号,并且每个 DS18B20 的序列号都不相同,因此它可以看作该 DS18B20 的地址序列码;最后 8 位则是前面 56 位的循环冗余校验码。由于每一个 DS18B20 的 ROM 数据各不相同,因此,微控制器就可以通过单总线接口对多个 DS18B20 进行寻址,从而实现一根总线上挂接多个 DS18B20 的目的。

2. 高速缓存

高速缓存由 9 字节组成。其中,前两字节是测得的温度信息,第 1 字节的内容是温度的低八位(低温触发器 TL),第 2 字节是温度的高八位(高温触发器 TH)。第 3 和第 4 字节是 TH、TL 的易失性拷贝,第 5 字节是结构寄存器的易失性拷贝,这三字节的内容在每一次上电复位时均被刷新。第 6、7、8 字节用于内部计算。第 9 字节是冗余检验字节,可用来保证通信正确。

DS18B20 中的温度传感器用于完成对温度的测量,它的测量精度可以配置成 9 位、

10 位、11 位或 12 位四种状态。温度传感器在测量完成后将测量的结果存储在 DS18B20 的两个 8 位的 RAM 中,单片机可通过单总线接口读到该数据。读取时低位在前,高位在后,数据的存储格式如图 3-52 所示(以 12 位转化为例)。

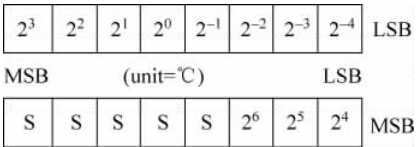


图 3-52 温度信号寄存器格式

图 3-52 是 12 位转化后得到的 12 位数据,存储在 DS18B20 的两个 8 位的 RAM 中,二进制中的前面 5 位是符号位,如果测得的温度大于 0,这 5 位为 0,只要将测到的数值乘以 0.0625 即可得到实际温度;如果温度小于 0,这 5 位为 1,测到的数值需要取反加 1 再乘以 0.0625 即可得到实际温度。

例如: +125℃的数字输出为 07D0H, +25.0625℃的数字输出为 0191H, -25.0625℃的数字输出为 FF6FH, -55℃的数字输出为 FC90H。

DS18B20 完成温度转换后,就把测得的温度值与 TH 和 TL 作比较,若 T>TH 或 T<TL,则将该器件内的告警标志置位,并对主机发出的告警搜索命令作出响应。因此,可用多只 DS18B20 同时测量温度并进行告警搜索。

3. 配置寄存器

如表 3-3 所示,配置寄存器的低五位始终为 1; TM 是测试模式位,用于设置 DS18B20 在工作模式(为 0)还是在测试模式(为 1),在 DS18B20 出厂时该位被设置为 0,用户不要改动; R1 和 R0 用来设置分辨率(注意: DS18B20 在出厂时被设置为 12 位),如表 3-4 所示。

表 3-3 配置寄存器各位的意义

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
TM	R1	R0	1	1	1	1	1

由表 3-4 可知,设定的分辨率越高,所需要的温度数据转换时间就越长。因此,在实际应用中要在分辨率和转换时间之间权衡考虑。

表 3-4 R1 和 R0 的分辨率设置及最大转换时间

R1	R0	分辨率/位	温度最大转换时间/ms
0	0	9	93.75
0	1	10	187.5
1	0	11	375
1	1	12	750

3.5.4 DS18B20 的编程结构

图 3-53 给出了多个 DS18B20 采用一线连接的应用结构。该结构在主机端将数据线接

一个上拉电阻。为了保证为设备提供足够的电源,需要一个 MOSFET 管将数据线上拉至+5V电源。

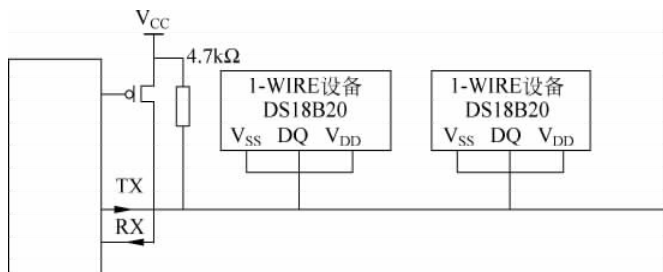


图 3-53 多个 DS18B20 组成的一线连接结构

DS18B20 单线通信功能是分时完成的,它必须遵循严格的时隙概念,如果出现序列混乱,图 3-53 中的 1-WIRE 设备将不响应主机,因此读写时序很重要。系统对 DS18B20 的各种操作必须按协议进行。DS18B20 的协议规定,微控制器控制 DS18B20 完成温度的转换必须经过以下 4 个步骤。

(1) 每次读写前都对 DS18B20 进行复位初始化。复位要求主 CPU 将数据线下拉 $500\mu\text{s}$,然后释放。DS18B20 收到信号后约等待 $16\sim 60\mu\text{s}$,然后发出 $60\sim 240\mu\text{s}$ 的存在低脉冲,主 CPU 收到此信号后表示复位成功。

(2) 发送一条 ROM 指令。DS18B20 的 ROM 指令包括:读指令(33H)、选择定位指令(55H)、跳过 ROM 检测指令(CCH)、查询指令(F0H)和报警查询指令(ECH)。各个指令的功能描述如下:

- 读指令(33H):通过该指令可以读出 ROM 中 8 位系列产品代码、48 位产品序列号和 8 位 CRC 码。
- 选择定位指令(55H):多片 DS18B20 在线时,主机发出该指令和一个 64 位数列,DS18B20 内部 ROM 与主机序列一致者,才能响应主机发送的寄存器操作指令,其他的 DS18B20 则等待复位。该指令也可用于单片 DS18B20 的情况。
- 跳过 ROM 检测指令(CCH):若系统只用了一片 DS18B20,该指令允许主机跳过 ROM 序列号检测而直接对寄存器操作,从而节省了时间。对于多片 DS18B20 测温系统,该指令将引起数据冲突。
- 查询指令(F0H):该指令可以使主机查询到总线上有多少片 DS18B20,以及各自的 64 位序列号。
- 报警查询指令(ECH):该指令的操作过程同查询指令,但是仅当上次温度测量值已置为报警标志时,DS18B20 才响应该指令。

(3) 发送存储器指令。DS18B20 的发送存储器指令包括:写入指令(4EH)、写出指令(BEH)、复制指令(48H)、开始转换指令(44H)、回调指令(B8H)和读电源标志指令(B4H)。

各个指令的功能描述如下:

- 写入指令(4EH):该指令把数据依次写入高温报警触发器 TH、低温报警触发器 TL 和配置寄存器。命令复位信号发出之前必须把这三个字节写完。
- 写出指令(BEH):该指令可以读出寄存器中的内容,从第 1 字节开始,直到读完第 9

字节。如果仅需要读取寄存器中的部分内容,主机可以在合适的时候发出复位指令以结束该过程。

- ▶ 复制指令(48H):该指令把高速缓存器中第2~4字节转存到DS18B20的EEPROM中。指令发出后,主机发出读指令来读总线。如果转存正在进行时主机读总线结果为0,而转存结束则为1。
- ▶ 开始转换指令(44H):DS18B20收到该指令后立即开始温度转换,不需要其他数据。此时DS18B20处于空闲状态。当温度转换正在进行时主机读总线结果为0,转换结束则为1。
- ▶ 回调指令(B8H):该指令把EEPROM中的内容回调至寄存器TH、TL和配置寄存器单元中。指令发出后如果主机接着读总线,则读结果为0表示忙,为1表示回调结束。
- ▶ 读电源标志指令(B4H):主机发出该指令后读总线,DS18B20将发送电源标志。0表示数据线供电,1表示外接电源。

(4) 进行数据通信。DS18B20的数据通信过程包括读操作和写操作两部分。根据不同应用,启动不同的读、写顺序。

DS18B20的写操作包括如下步骤:首先,数据线先置低电平0,延时 $15\mu\text{s}$;按从低位到高位顺序发送字节(一次只发送一位),每次延时时间为 $45\mu\text{s}$;将数据线拉到高电平;然后重复上述操作直到所有的字节全部发送完为止;最后,将数据线拉高。

DS18B20的读操作包括如下步骤:首先,将数据线拉高至“1”,延时 $2\mu\text{s}$;将数据线拉低至“0”,延时 $15\mu\text{s}$,再将数据线拉高至“1”,延时 $15\mu\text{s}$;读数据线的状态得到1个状态位,并进行数据处理,延时 $30\mu\text{s}$ 。重复以上操作,读取全部结果。

3.6 本章小结

本章首先详细介绍了传感器的基本概念、相关特性和发展趋势;然后根据传感器的工作原理将传感器分为应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器和磁电式传感器等,并对这些传统传感器的工作原理、技术特点等进行了介绍;最后,介绍了一些常用的温度、湿度、光照传感器和智能传感器,并对智能集成传感器的原理进行详细介绍。

习题

1. 什么叫传感器?它由哪几部分组成?它们的相互关系如何?
2. 什么是传感器的静态特性?它有哪些性能指标?如何用公式表征这些性能指标?
3. 根据工作原理,可以将传感器分为哪几类?
4. 什么是应变效应?利用应变效应解释金属电阻应变片的工作原理。
5. 电感式传感器有几种结构形式?各有什么特点?
6. 已知变面积型电容传感器的两极板间距为 10mm , $\epsilon = 50\mu\text{F/m}$,两极板的几何尺寸一样,为 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm}$,在外力作用下,其中动极板在原位置上向外移动了 10mm ,

试求 $\Delta C = ?$

7. 石英晶体的 x 、 y 、 z 轴的名称及特点是什么?
8. 简述变磁通式和恒磁通式磁电传感器的工作原理。
9. 测量位移的传感器有哪些? 简述其工作原理。
10. 智能传感器可分为哪几类? 其特点是什么?
11. 简述智能集成温度传感器 DS18B20 的原理和功能。
12. 有一只压电晶体, 其面积 $S=3\text{cm}^2$, 厚度 $t=0.3\text{mm}$, 在 0 度 x 切型的纵向石英晶体压电系数 $d_{11}=2.31\times 10^{-12}\text{C/N}$ 。求压电晶体受到 $p=10\text{MPa}$ 的压力作用时产生的电荷量 q 及输出电压 U_o 。