

第3章

传感器技术

本章主要介绍物联网核心感知设备——传感器的相关基础知识,包括传感器的功能特性、分类、技术原理以及常见传感器类别,旨在对传感器的基本原理和关键技术做出全面且综合的描述。

3.1 传感器概述

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被人类理解的信息,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。

3.1.1 传感器的功能

在人们的生产和生活中,经常要和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,人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。这是因为传感器信号大部分是以电信号形式存在的,原因在于电信号容易显示、存储、传输、变换和处理。

例如,温度计等机械仪表要想得到更快、更准确的测量结果,总希望把这些被测参量转换成电量形式,用热电偶或热敏电阻作为传感器,配以毫伏表、记录仪和简单的电路来测量和记录温度。若还想把温度控制在预定的值上,则配上自动调整电路即可实现这一任务。若要对一个复杂的生产过程进行全面控制,可采用以工业控制计算机为中心的全套控制系统。不论是简单的显示和记录,还是很复杂的调整和控制,都是在用各种电技术手段对电信号进行加工和处理,因此都需要传感器这种敏感元件预先把非电量形式的物理、化学等参量转化成电参量。如果没有传感器,这一过程就无法实现。

通过上述对传感器场景的分析可得出,传感器是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,其实质是在两个物理系统之间将信号从一种能量形式转换成另一种能量形式。所以,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。

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，如图 3-1 所示。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。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。

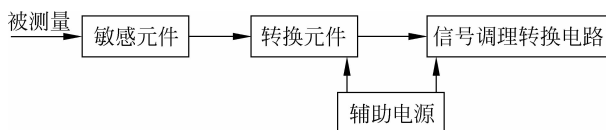


图 3-1 传感器结构

3.1.2 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：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad \text{公式 3-1}$$

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:

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

式中, $\Delta L_{\max}$ 表示最大非线性绝对误差; Y_{FS} 表示满量程输出。

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:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{公式 3-3}$$

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。

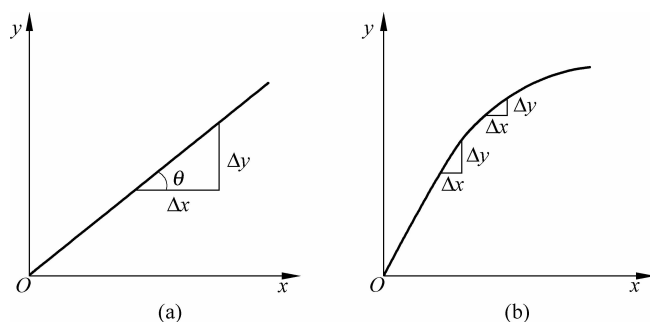


图 3-3 传感器的灵敏度

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,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。

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差可由下式计算:

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

式中, $\Delta H_{\max}$ 为正反行程输出值间的最大差值。

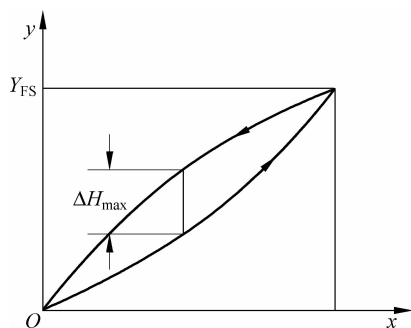


图 3-4 迟滞特性

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度,如

见图 3-5 所示。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

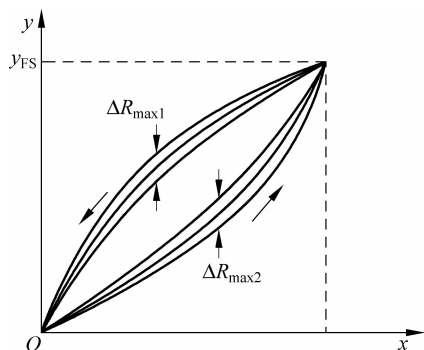


图 3-5 重复特性

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

或

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

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则一般采用正弦函数。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。

3.1.3 传感器的发展趋势

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、通信技术共同构成本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。当前传感器技术的发展趋势主要是微型化、智能化、多样化、网络化、集成化、新材料化、高精度和高可靠性等,主要形式有微型传感器、智能传感器、纳米传感器等。如图 3-6 所示,它是一种只有 $43\mu\text{m}$ 的 CCD 图像传感器。

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,可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。

智能化: 智能传感器概念是在 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

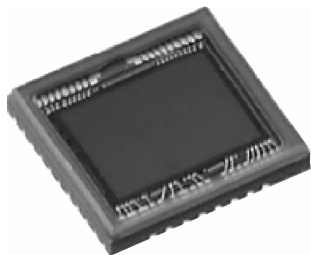


图 3-6 微型传感器

方面得到利用(如图 3-7 所示),相信未来将会更加成熟。



图 3-7 各种家用智能传感器

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,检测量实现多元,检测方式实现模糊识别。图 3-8 所示是具有多功能感知能力的手机。

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。

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。

新材料化: 陶瓷、高分子、生物、智能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,比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。

高精度、高可靠性: 随着自动化生产程度的不断提高,须研制出具有灵敏度高、精确度



图 3-8 具有多功能感知能力的手机

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 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$,在军用系统中要求工作温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$,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。

3.1.4 传感器的应用领域

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。可以说传感技术对物联网发展的成败起到关键性作用。下面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、机械等加工工业中,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、空调器、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。



图 3-9 诊断型传感器

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,简单地说就是从飞机、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、脉搏及心音、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。

为增进人民的健康水平,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,通过触觉对物体产生压觉、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。

3.2 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,往往同一种检测对象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。

3.2.1 按照测试对象分类

根据被测对象进行划分,常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、加速度传感器。

(1) 温度传感器:它是利用物质的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、生产自控、航空航天、军工、石化、油井、电力、船舶、机床、管道等众多行业。

(4) 位移传感器: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:加速度传感器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何共性和差异。

3.2.2 按照工作原理分类

传感器按照工作原理可以分为以下几种。

(1) 电学式传感器：电学式传感器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：磁学式传感器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：光电式传感器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：电势型传感器是利用热电效应、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：电荷传感器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：半导体传感器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：谐振式传感器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：电化学式传感器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和研究。

3.2.3 按照输出信号分类

根据输出信号的性质可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。比如温度传感器、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。同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码的稳定。
- (2) 可靠的数据存储技术,保证模块参数不会丢失。
- (3) 良好的电磁兼容性能。
- (4) 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。
- (5) 传感器的输出一致性误差可以达到 0.02% 以内甚至更高;传感器的特性参数可基本相同,因而具有良好的互换性。
- (6) 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。
- (7) 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。
- (8) 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。

3.2.4 按照能量分类

根据传感器工作时能量转换原理可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,如电动势、电荷式传感器等;无源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
	电容		热敏电阻传感器	温度
			电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的几何尺寸		液位、厚度、含水量
		改变电容的介电常数		