



“十三五”普通高等教育本科规划教材

智能电网信息工程专业规划教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材

智能传感器技术

吴盘龙 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

智能电网信息工程专业规划教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材（编号：2015-2-032）

智能传感器技术

主编 吴盘龙

编写 朱岩 孔建寿 李星秀

主审 姚恩涛



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材，也是智能电网信息工程专业规划教材。

全书共分为9章，主要内容包括概述、传感器的一般工作特性及其校准、常用传感器的工作原理、传感器信号调理与处理、参数检测、传感器智能化的实现、智能技术在传感器中的应用、通信功能与总线接口、智能传感器的设计与应用。

本书可作为高等院校智能电网信息工程、自动化、测控技术与仪器、电子信息工程等专业本科生教材，也可供有关工程技术人员使用参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能传感器技术/吴盘龙主编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

“十三五”普通高等教育本科规划教材·智能电网信息工程专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 8660 - 0

I. ①智… II. ①吴… III. ①智能传感器-高等学校-教材
IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 302587 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 14.25印张 344千字
定价 30.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“智能传感器技术”是一门涉及传感器、自动控制、光电检测、计算机、数据处理等众多基础理论和学科的综合性的技术。目前，智能传感器技术取得了令人瞩目的发展，已成为许多国家高新技术竞争的核心。

全书共分为9章，主要内容包括概述、传感器的一般工作特性及其校准、常用传感器的工作原理、传感器信号调理与处理、参数检测、传感器智能化的实现、智能技术在传感器中的应用、通信功能与总线接口、智能传感器的设计与应用。

本书由吴盘龙、朱岩、孔建寿、李星秀编写。刘佳乐、李少华、周洋、杨涛等研究生参与了部分书稿的资料搜集、整理和图表绘制等工作；吴盘龙负责全书的统稿。南京航空航天大学自动化学院的姚恩涛教授担任本书主审，为本书提出了很多宝贵意见和建议。另外，本书在编写过程中参考并引用了许多文献，在此一并表示感谢。

本书可作为高等院校智能电网信息工程、自动化、测控技术与仪器、电子信息工程等专业本科生教材，也可供有关工程技术人员使用参考。

由于智能传感器技术内容丰富、应用广泛，且技术本身处于不断的发展进步中，限于编者的知识和经验，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2015年12月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
§ 1.1 传感器概述	1
§ 1.2 智能传感器技术	6
§ 1.3 智能传感器的主要功能与特点	7
§ 1.4 智能传感器的实现	11
§ 思考题	12
第 2 章 传感器的一般工作特性及其校准	13
§ 2.1 传感器系统的基本特性	13
§ 2.2 传感器的标定与校准	21
§ 2.3 传感器性能改善措施与传感器的选用原则	22
§ 思考题	26
第 3 章 常用传感器的工作原理	27
§ 3.1 电阻应变式传感器	27
§ 3.2 电感式传感器	33
§ 3.3 电容式传感器	44
§ 3.4 磁敏式传感器	52
§ 3.5 半导体传感器	60
§ 3.6 光纤传感器	70
§ 思考题	74
第 4 章 传感器信号调理与处理	76
§ 4.1 电桥	76
§ 4.2 调制与解调	80
§ 4.3 滤波器	86
§ 4.4 数字信号初步处理	96
§ 4.5 相关性分析与应用	101
§ 4.6 功率谱分析与应用	104
§ 思考题	107
第 5 章 参数检测	108
§ 5.1 参数测量的基本原理	108
§ 5.2 电量测量	111
§ 5.3 位移测量	116
§ 思考题	120

第 6 章 传感器智能化的实现	121
§ 6.1 非线性自校正技术.....	121
§ 6.2 自校零与自校准技术.....	125
§ 6.3 噪声抑制技术.....	128
§ 6.4 自补偿.....	132
§ 6.5 增益的自适应控制.....	143
§ 6.6 自诊断.....	144
§ 6.7 多传感器信息融合.....	145
§ 思考题.....	150
第 7 章 智能技术在传感器中的应用	151
§ 7.1 智能算法概述.....	151
§ 7.2 智能算法的特点及发展.....	151
§ 7.3 模糊技术及其应用.....	152
§ 7.4 神经网络技术及其在智能传感器中的应用.....	159
§ 7.5 小波分析及其在智能传感器系统中的应用.....	164
§ 思考题.....	172
第 8 章 通信功能与总线接口	173
§ 8.1 智能传感器与现场总线技术.....	173
§ 8.2 现场总线网络协议模式.....	181
§ 8.3 IEEE 1451 标准.....	185
§ 8.4 工业以太网.....	190
§ 8.5 无线传感器网络.....	195
§ 思考题.....	205
第 9 章 智能传感器的设计与应用	206
§ 9.1 智能传感器设计概述.....	206
§ 9.2 智能传感器设计实例——分布式光纤温度传感系统的研究与设计.....	213
§ 思考题.....	218
参考文献	219

第 1 章 概 述

§ 1.1 传感器概述

1.1.1 传感器的定义

关于传感器的定义目前国内外尚未统一，英国称 Sensor 为传感器、敏感元件，将 Transducer 称为变换器、换能器；在美国，Sensor 或 Transducer 是通用的，均称为传感器；我国学者将传感器（Sensor）定义为接收信号或激励并以电信号进行响应的装置，而把变换器（Transducer）作为一种能量转换成另一种能量的转换装置。根据我国现有规定，传感器（Transducer/Sensor）是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器通常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用于传输或测量的电信号的部分。

为将传感器和变送器的概念明确区分开，当传感器（Transducer/Sensor）的输出为“规定的标准信号”时，则称为变送器（Transmitter）。“规定的标准信号”是指新的国家标准规定的信号，若以电流形式输出，标准信号应为 4~20mA；若以电压形式输出，标准信号应为 1~5V。

一般来讲，传感器由敏感元件和转换元件两部分组成，分别完成信息的检测和转换。需要指出的是，并不是所有传感器都能明显区分敏感单元和转换单元这两个部分，例如半导体气敏或湿度传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等，它们一般将被测量直接转换为电信号输出，将敏感单元和转换单元的功能合二为一。通常只由敏感单元和转换单元组成的传感器输出信号较弱，还需要信号调理电路与转换电路将输出的信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换电路可能安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上，因此，信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器组成的一部分。

1.1.2 传感器的组成与分类

1.1.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和信号调理与转换电路三部分组成，如图 1-1 所示。

根据前面介绍传感器的概念，传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分，它们分别完成检测和转换两个基本功能。但是，随着传感器集成化技术的发展，传感器的信号调理与转换电路也会安装在传感器的壳体内或者与敏感元件集成在同一芯片上，因此，信号调理电路以及所需要辅助电源都应作为传感器组成的一部分。

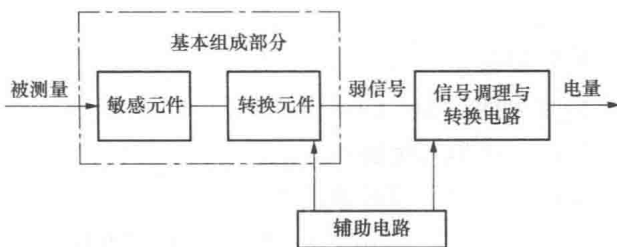


图 1-1 传感器的组成

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。常见的敏感元件有热敏电阻器、压敏电阻器、光敏电阻器、力敏元件、气敏元件、湿敏元件等；还有一些新型传感器，如谐振式压力传感器、差动变压器式位移传感器等，其敏感元件和传感器是完全融为一体的。

转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。它可以直接感受被测量（一般为非电量），输出与被测量成确定关系的电量，如热电偶和热敏电阻；也可以不直接感受被测量，而只感受与被测量成确定关系的其他非电量，例如差动变压器式压力传感器，并不直接感受压力，而只是感受与被测压力成确定关系的衔铁位移量，然后输出电量。一般情况下使用的都是后面这种传感器。

信号调理与转换电路，它的作用是把来自传感器的信号进行转移和放大，使其更适合于作进一步处理和传输，多数情况下是将各种电信号转换为电压、电流、频率等便于测量的电信号，对其进行信号处理，即对经过调理的信号，进行滤波、调制和解调、衰减、运算、数字化处理等。常见的信号调理与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器、滤波器等。另外，传感器的基本部分和信号调理电路，还需要辅助电源提供工作能量。

1.1.2.2 传感器的分类

传感器的种类繁多，往往同一种被测量可以用不同类型的传感器来测量，如压力可用电容式、电阻式、光纤式等传感器来测量；而同一原理的传感器又可以测量多种物理量，如电阻式传感器可以测量位移、温度、压力及加速度等。因此，对传感器的分类方法各不相同，目前尚没有统一的分类方法，一般常见分类方法有以下几种。

1. 按传感器的工作原理分类

按照传感器对信号转换作用的原理可将传感器分为以下几种：

(1) 电路参量式传感器。包括电阻式、电感式、电容式三种基本形式，以及由此衍生出来的差动变压器式、涡流式、感应同步器式、容栅式等。

(2) 电光式传感器。包括光电式、光栅式、光电码盘式、光纤式、激光式、红外式、固态图像式等。

(3) 压电式传感器。

(4) 磁电式传感器。包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等。

(5) 热电式传感器。

(6) 半导体式传感器。

2. 按传感器的输入量分类

按输入量分类的传感器以被测物理量命名，如位移传感器、速度传感器、温度传感器、湿度传感器、压力传感器等。这种分类方法通常在讨论传感器的用途时使用。

3. 按传感器的输出量分类

传感器按输出量可分为模拟式传感器和数字式传感器两类。模拟式传感器是指传感器的输出信号为连续形式的模拟量；数字式传感器是指传感器的输出信号为离散形式的数字量。

目前，模拟式传感器占绝大多数，现在设计的测控系统往往要用到微处理器，因此，通常需要将模拟式传感器输出的模拟信号通过 ADC（模/数转换器）转换成数字信号。数字式传感器输出的数字信号便于传输，具有重复性好、可靠性高的优点。虽然数字式传感器的种类目前还不太多，但是这是一个重要的发展方向。

4. 按被测量分类

- (1) 机械量。位移、力、力矩、转矩、速度、加速度、振动、噪声等。
- (2) 热量。温度、热量、流量、风速、压力、液压等。
- (3) 物性参量。浓度、黏度、密度、酸度等。
- (4) 状态参量。裂纹、缺陷、泄漏、磨损、表面质量等。

5. 按能量关系分类

根据传感器的能量转换情况，可分为能量转换型传感器和能量控制型传感器。

能量转换型是由传感器输入量的变化直接引起能量的变化。例如电效应中的热电偶，当温度变化时，直接引起输出的电动势改变。基于压电效应、热电效应、光电效应等的传感器都属于这类传感器。能量转换型传感器一般不需要外部电源提供能量或者外部电源只起到辅助作用。

能量控制型传感器从外部获得能量使其工作，由被测量的变化控制外部供给能量的变化。例如电阻式、电感式等传感器，这种类型的传感器必须由外部提供激励源，因此也称为无源传感器，如用电桥测量电阻温度的变化时，温度的变化引起热敏电阻阻值的变化，热敏电阻阻值的变化使电桥的输出发生变化，这时电桥输出的变化是由电源供给的。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器都属于此类传感器。

1.1.3 传感器技术的发展现状与趋势

1. 传感器发展现状

当今世界特别是发达国家对传感器技术的发展极为重视，视为涉及国家安全、经济发展和科技进步的关键技术之一，将其列入国家科技发展战略计划之中。因此近年来传感器技术发展迅速，传感器新原理、新材料和新科技的研究更加深入广泛，传感器新品种、新结构、新应用不断涌现、层出不穷。

(1) 现代自动化系统对传感器最基本和最急切的要求是提高现有传感器的性能价格比。2000年和2010年传感器、计算机及执行机构的性能价格比如图1-2所示。可以看出，若2000年的性能价格比为1，则2010年的性能价格比中执行机构为10，计算机为1000，传感器为3，其中，计算机的性能价格比提高幅度最大。这是由于半导体集成电路工艺的迅速发展，使大规模集成电路芯片制作成本大幅度降低。相对而言，近30年来计算机性能价格比的提高更是遥遥领先，而传感器的性能价格比仍偏低，与其他两个功能模块的发展形势极不相适应。

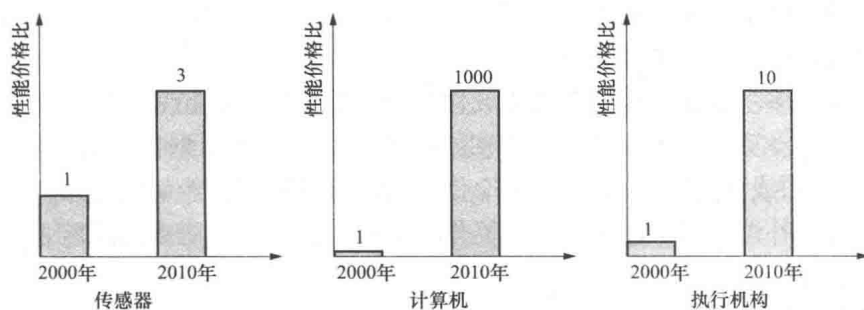


图 1-2 2000 年和 2010 年传感器、计算机及执行机构的性能价格比

(2) 新技术在传感器中的普遍应用。目前普遍采用电子设计自动化 (EDA)、计算机辅助制造 (CAM)、计算机辅助测试 (CAT)、数字信号处理 (DSP)、专用集成电路 (ASIC) 及表面贴装 (SMT) 等技术。

(3) 功能日渐完善。随着集成微光、机、电系统技术的迅速发展以及光导、光纤、超导、纳米技术、智能材料等新技术的应用,进一步实现信息的采集与传输、处理集成化、智能化,更多的新型传感器将具有自检自校、量程转换、定标和数据处理等功能,传感器功能得到进一步增强和完善,性能进一步提高,更加灵敏、可靠。

(4) 创新性更加突出。新型传感器的研究和开发由于开展时间短,往往尚不成熟,因此蕴藏着更多的创新机会,竞争也很激烈,成果也具有更多的知识产权,所以加速新型传感器的研究、开发、应用具有更大意义。

(5) 商品化、产业化前景广阔。在新型传感器的研究开发同时,注意新型材料、设计方法、生产工艺、测试技术和配套仪表等基础技术的同步发展,更加注重实用化,从而保证了成果转化,产业化的速度更快。

2. 传感器发展趋势

传感器技术在科学研究、工农业生产、日常生活等方面发挥着越来越重要的作用;应用需求对传感器技术又提出了越来越高的要求,这推动着传感器技术不断的向前发展。同时,传感器技术是一门涉及多种学科、多个领域的高新技术。随着当前科技技术的不断提高,传感器技术的发展趋势主要表现为以下几个方面:

(1) 开发新材料、研究新型传感器。材料是传感器技术的重要基础。随着传感器技术的发展,除半导体材料、陶瓷材料以外,光导纤维、纳米材料、超导材料等相继问世。随着研究的不断深入,人们将进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并通过微电子、光电子、生物化学、信息处理等各种学科、各种新技术的互相渗透和综合利用,从而研制开发具有新原理、新功能的新型传感器。

传感器的应用中,半导体材料应用的最为普遍,用量居首位,且在今后的一段时期内仍将占主导地位。半导体材料可制作成力敏、光敏、磁敏、红外敏等多种传感器。展望未来的产业,随着机械加工技术、P-N 结的技术、离子注入技术、激光退火等表面处理技术的成熟,半导体材料在传感器技术发展中将会得到更广泛的应用。

有机聚合物,即高分子材料,是一种新兴的传感器功能材料,除了具有介电性能外,还有半导体、导体、电光、电导等多种功能。有机聚合物可以制作成热敏、力敏、声敏、导电敏、光敏、湿敏、气敏、离子敏等多种传感器,有着广泛的应用领域。目前而言,此类传感器尚在研制阶段,将来一定会成为热门方向。

(2) 集成化、多功能化。传感器的集成化是一个重要的发展趋势。所谓集成化,有双层的含义:①将同一类型的单个传感器排列在同一平面上,构成线型传感器或者面型传感器,如现在 2048 像素的线型传感器和 492×660 像素的面型传感器已经研制应用;②将传感器和运放、放大及温度补偿等部分组装成一个器件,形成一体化,如集成固态压力传感器或组合式固态压力传感器。

传感器的多功能化是指传感器能感知与转换两种以上的不同物理量。例如,使用特殊的陶瓷把温度和湿度敏感元件集成在一起,做成温湿度传感器;将检测不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上,制成检测氧、氨、乙醇、乙烯四种气体的多功能传感器;

在同一硅片上制作应变计和温度敏感元件，制成同时测量压力和温度的多功能传感器，该传感器还可以实现温度补偿。

(3) 多传感器的融合。由于多传感器不可避免地存在不确定或偶然不确定性，缺乏全面性和鲁棒性，因此偶然的故障就会导致系统失效。多传感器集成与融合技术正好可以解决这方面的问题。多传感器不但可以表述同一环境特征的多个冗余的信息，而且可以描述不同的环境特征，它的特点是冗余性和互补性、及时性和低成本性。

多传感器的集成与融合技术已经成为智能传感器与系统领域的一个重要的研究方向。它涉及信息科学的多个领域，是新一代智能信息技术的核心基础之一。20世纪80年代初，以军事领域的研究为开端，多传感器的集成与融合技术迅速扩展到军事和非军事的各个应用领域，如目标的自动识别、自主车辆导航、遥感、生产过程监控、机器人及医疗应用等。

(4) 学科的交叉融合，实现无线网络化。无线传感器网络是由大量无处不在的、有无线通信与计算能力的微小传感器节点构成的自组织分布式网络系统，能根据环境自主完成指定任务的“智能”系统。它是涉及微传感器与微机械、通信、自动控制及人工智能等多学科的综合技术，大量传感器通过网络构成分布式、智能化信息处理系统，以协同的方式工作，能够从多种视角、以多种感知模式对事件、现象和环境进行观察和分析，获得丰富的、高分辨率的信息，极大地增强了传感器的探测能力，是近年来新的发展方向。其应用已由军事领域扩展到反恐、防爆、环境监测、医疗保健、家居、商业、工业等众多领域，有着广泛的应用前景。

(5) 向低功耗及无源化发展。传感器一般都是非电量向电量的转化，工作时离不开电源，在野外现场或远离电网的地方，往往是用电池或太阳能等供电，开发低功耗的传感器及无源传感器是必然的发展方向，这样既可以节省能源又可以提高系统寿命。

(6) 网络化和物联网。传感器网络化是传感器领域发展的一项新兴技术，它是利用TCP/IP协议，使传感器成为监控网络中一个独立的节点。这样，现场测控数据就直接采集传输到网络上，并与网络上有通信能力的节点直接进行通信，实现数据的实时发布和共享。由于传感器的自动化、智能化水平的提高，多台传感器联网已推广应用，虚拟仪器、三维多媒体等新技术开始实用化，因此通过Internet，传感器与用户之间可异地交换信息和浏览，厂商能够直接与异地用户交流，能及时完成传感器故障诊断、指导用户维修或交换新仪器改进的数据、软件升级等工作，使传感器操作过程更加简化，功能更换和扩展更加方便。

物联网是通过智能感知、识别技术与普适计算、泛在网络的融合应用，被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮。物联网的英文为“The Internet of Things”，简称IOT。由物联网的名称可以知道，物联网就是“物物相连的互联网”。这里有两层含义：①物联网的核心和基础仍然是互联网，是在互联网基础之上延伸和扩展的一种网络；②其用户端延伸和扩展到了任何物品与物品之间进行信息交换和通信。因此，物联网的定义是通过射频识别（RFID）装置、红外传感器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物品与互联网相连接，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。

另外，传感器技术还呈现出的发展趋势包括：强调传感技术的系统性和传感器信息处理与识别的协调性发展，突破传感器信息处理与识别技术及系统的研发、开发、应用和改进分离体制，按照信息理论与系统论，应用过程的方法，同计算机技术和通信技术系统发展；利

用新的理论、新的效应研究开发工程和科技发展迫切需求的多种新型传感器和传感器系统；研究与开发特殊环境（高温、高压、水下、强腐蚀和高辐射等环境）下的传感器与传感器技术系统；彻底改变重研究开发、轻应用与改进的局面，实行需求驱动的全过程、全寿命研究开发、生产、使用和改进的系统工程等。

§ 1.2 智能传感器技术

1.2.1 智能传感器概念

智能传感器系统是一门现代综合技术，是当今世界正在迅速发展的高新技术，至今还没有形成统一确切的定义。智能传感器概念最初是在美国宇航局开发宇宙飞船过程中提出的。因为人们不仅需要知道宇宙飞船在太空中飞行的速度、位置、气压、空气成分等，因而需要安装各式各样的传感器，而且宇航员在太空中进行各种实验也需要大量的传感器。这样一来，需要处理众多从传感器获得的信息，即便使用一台大型计算机也很难同时处理如此庞大的数据，并且这在宇宙飞船上显然是行不通的。因此，宇航局的专家们就希望传感器本身具有信息处理的功能，于是把传感器和微处理器结合在一起，这样在 20 世纪 70 年代末就出现了智能传感器。

早期，人们简单、机械地强调在工艺上将传感器与微处理器两者紧密结合，认为“传感器的敏感元件及其信号调理电路与微处理器集成在一块芯片上就是智能传感器”。

关于智能传感器的中、英文称谓，目前也尚未统一。“Intelligent Sensor”是英国人对智能传感器的称谓，而“Smart Sensor”是美国人对智能传感器的俗称。另外，1992 年荷兰代尔夫特理工大学 Johan H. Huijsing 教授在“Integrated Smart Sensor”一文中按集成化程度的不同，将智能传感器分别称为“Smart Sensor”、“Integrated Smart Sensor”。对“Smart Sensor”的中文译名有译为“灵巧传感器”的，也有译为“智能传感器”的。

国内众多学者广泛认可这种概念，“传感器与微处理器赋予智能的结合，兼有信息检测与信息处理功能的传感器就是智能传感器（系统）”；模糊传感器也是一种智能传感器（系统），将传感器与微处理器集成在一块芯片上是构成智能传感器（系统）的一种方式。

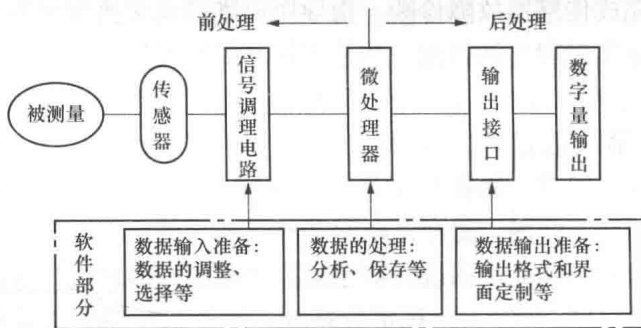


图 1-3 智能传感器基本结构

1.2.2 智能传感器的结构

智能传感器主要由传感器、微处理器（或微计算机）及相关电路组成，其基本结构如图 1-3 所示。

传感器将被测量转化成相应的电信号，送到信号调理电路中，经过滤波、放大、模/数转换后送到微处理器中，微处理器对接收到的信号进行计算、存储、数据分析和处理后，一

方面通过反馈回路对传感器与信号调理电路进行调节以实现测量过程的调节和控制，另一方面将处理后的结果传送到输出接口，经过接口电路的处理后按照输出格式和界面定制输出数字化测量结果。智能传感器中，微处理器是智能化的核心，软件部分的运算及相关的调节与控制只有通过它才能实现。

智能传感器的实现结构形式既可以是分离的,也可以是集成化的。按实现结构形式的不同,智能传感器可以划分为模块式、混合式和集成式三种形式。模块式智能传感器为初级的智能传感器,它由许多相互独立的模块组成(如将微计算机、信号调理电路模块、输出电路模块、显示电路模块和传感器装配在同一壳体内),由于集成度不高而导致体积较大,但是在目前的技术水平下,仍不失为一种实用的结构形式。混合智能传感器将传感器、微处理器和信号处理电路做在不同的芯片上,是目前智能传感器采用较多的结构形式。集成智能传感器将一个或多个敏感器件与微处理器、信号处理电路集成在同一硅片上。

1.2.3 智能传感器的作用

智能传感器与传统传感器相比,在作用上更加全面,几乎包括仪器仪表的全部作用,主要表现为以下几点:

(1) 提高测量精度。利用微型计算机进行多次测量和求平均值的办法可削弱随机误差的影响;利用微型计算机进行系统误差补偿;利用辅助温度传感器和微型计算机进行温度补偿;利用微型计算机实现线性化,可以减少非线性误差;利用微型计算机进行测量前的零点调整、放大系数调整 and 工作中周期调整零点、放大系数。

(2) 增加功能。利用记忆功能获取被测量的最大值和最小值;利用计算功能对原始信号进行数据处理,可获得新的量值;用软件的办法完成硬件功能,经济并减小体积;对数字显示可有译码功能;可用微型计算机对周期信号特征参数进行测量;对诸多被测量可有记忆存储功能。

(3) 提高自动化程度。可实现误差自动补偿;可实现检测程序自动化操作;可实现超限自动报警和故障自动诊断;可实现量程自动变换;可实现自动巡回检测。

(4) 高信噪比与高分辨力。由于智能传感器具有数据存储、记忆与信息处理的特点,通过软件进行数字滤波、相关分析等处理,可以去除输入数据中的噪声,将有用信号提取出来;通过数据融合、神经网络技术,可以消除多参数状态下交叉灵敏度的影响,从而保证在多参数状态下对特定参数测量的分辨能力,所以智能传感器具有很高的信噪比与高分辨能力。

§ 1.3 智能传感器的主要功能与特点

随着计算机和仪器仪表技术的快速发展,智能传感器作为一种新型传感器发展起来。智能传感器是基于人工智能、信息处理技术实现的具有分析、判断、量程自动转换、漂移、非线性和频域响应等自动的补偿,对环境响应的自适应、自学习以及超限报警、故障诊断等功能的传感器。与传统传感器相比,智能传感器将传感器检测信息的功能与微处理器的信息处理功能有机地结合在一起,充分利用微处理器进行数据分析和处理,并对内部工作过程进行调节和控制,从而具有了一定的人工智能,弥补了传统传感器的缺陷与不足,使得采集的数据质量得以提高。就目前而言,智能传感器的智能化技术尚处于初级阶段,即数据处理层次的低智能化,已经具备自诊断、自补偿、自校准、自学习、数据处理、存储记忆、双向通道、数字输出等功能。智能传感器的最终目标是接近或达到人类的智能水平,能够像人一样通过在实践中不断地改进和完善,实现最佳测量方案,得到最好的测量结果。

通常而言,智能传感器由传感器单元、微处理器和信号电路等封装在同一壳体内组成,

输出方式通常采用 RS-232、RS-485 等串行输出，或采用 IEEE-288 标准总线并行输出。智能传感器实际上是最小的微机系统，其中作为控制核心的微处理器通常采用单片机或 ARM 等芯片控制，其基本结构框图如图 1-4 所示。

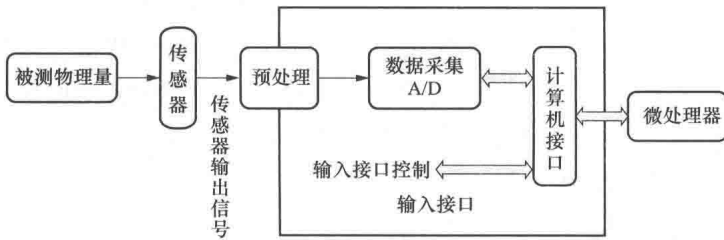


图 1-4 智能传感器基本结构框图

1.3.1 智能传感器的主要功能

智能传感器比传统传感器在功能上有极大拓展，几乎包括仪器仪表的全部功能，概括而言主要表现为以下几点：

(1) 逻辑判断、统计处理功能。智能传感器能对检测数据进行分析、统计和修正，能进行非线性、温度、噪声、响应时间、交叉感应以及缓慢漂移等误差补偿，还能根据工作情况调整系统状态，使系统工作在低功耗状态和传送效率优化的状态。

(2) 自校零（消除零漂）、自标定（输出值对应的输入值）、自校正（输出特性的变化）功能。智能传感器可以通过对环境的判断和自诊断进行零位和增益参数的调整，可以借助其内部检测线路对异常现象或故障进行诊断。操作者输入零值或某一标准值后，自校准模块可以自动地进行在线校正。

(3) 软件组合，设置多模块化的硬件和软件。用户可以通过操作指令，改变智能传感器的硬件模块和软件模块的组合方式，以达到不同的应用目的，完成不同的功能，实现多传感器、多参数的复合测量。

(4) 人机对话功能。智能传感器与仪表等组合在一起，配备各种显示装置和输入键盘，使系统具有灵活的人机对话功能。

(5) 数据存储、记忆与信息处理功能。可以存储各种信息，例如装载历史信息、数据的校正、参数的测量、状态参数的预估。对检测到的数据随时存取，大大地加快了信息的处理速度。

(6) 双向通信和标准化数字输出功能。智能传感器系统具有数字标准化数据通信接口，通过 RS-232、RS-485、USB、I²C 等标准总线接口，能与计算机接口总线相连，相互交换信息。

根据不同的应用场合，智能传感器可选择性地具有上述功能或者全部功能。智能传感器具有高的标准性、灵活性和可靠性，同时采用廉价的集成电路工艺和芯片以及强大的软件来实现，具有高的性价比优势。

1.3.2 智能传感器的特点

智能传感器的功能是通过模拟人的感官和大脑的协调动作，结合长期以来测试技术的研究和实际经验而提出来的。它是一个相对独立的智能单元，它的出现对原来硬件性能苛刻要求有所减轻，而靠软件帮助可以使传感器的性能大幅度提高，同时采用廉价的集成电路工艺

和芯片以及强大的软件来实现,大大降低了传感器本身的价格。

智能传感器的特点如下:

(1) 信息存储和传输。随着全智能集散控制系统 (Smart Distributed System) 的飞速发展,对智能单元要求具备通信功能,用通信网络以数字形式进行双向通信,这也是智能传感器关键标志之一。智能传感器通过测试数据传输和接收指令来实现各项功能,如增益的设置、补偿参数的设置、内检参数的设置、测试数据输出等。

(2) 自补偿和计算功能。多年来从事传感器研制的工程技术人员一直为传感器的温度漂移和输出非线性做大量的补偿工作,但都没有从根本上解决问题,而智能传感器的自补偿和计算功能为传感器的温度漂移和非线性补偿开辟了新的道路。这样,放宽传感器加工精密度要求,只要能保证传感器的重复性好,利用微处理器对测试的信号通过软件计算,采用多次拟合和差值计算方法对漂移和非线性进行补偿,从而能获得较精确的测量结果。如美国凯斯西储大学制造出的一个含有 10 个敏感元件、带有信号处理电路的 PH 传感器芯片,可计算其平均值、方差和系统的标准差。若某一敏感元件输出的误差大于 ± 3 倍标准差,输出数据就将它舍弃,但输出这些数据的敏感元件仍然是有效的,只是因为某些原因使所标定的值发生了漂移。另外,智能传感器的计算能够重新标定单个敏感元件,使它重新有效。

(3) 自检、自校、自诊断功能。普通传感器需要定期检验和标定,以保证它在正常使用时有足够的准确度,这些工作一般要求将传感器从使用现场拆卸送到实验室或检验部门进行,而对于在线测量传感器出现异常则不能及时诊断。采用智能传感器情况则大有改观,首先自诊断功能在电源接通时进行自检、诊断测试以确定组件有无故障;其次,根据使用时间可以在线进行校正,微处理器利用存在 EPROM 内的计量特性数据进行对比校对。

(4) 复合敏感功能。我们观察周围的自然现象,常见的信号有声、光、电、热、力、化学等。智能传感器具有复合功能,能够同时测量多种物理量和化学量,给出较全面反映物质运动规律的信息。如美国加州大学伯克利分校传感器和执行器中心研制的复合液体传感器,可同时测量介质的温度、流速、压力和密度;美国 EG&G SCSensors 公司研制的复合力学传感器,可同时测量物体某一点的三维振动加速度、速度和位移等。

(5) 智能传感器的集成化。由于大规模集成电路的发展使得传感器与相应的电路都集成到同一芯片上,而这种具有某些智能功能的传感器叫作集成智能传感器。集成智能传感器的功能有以下三个方面的优点:

1) 较高信噪比:传感器的弱信号先经集成电路信号放大后再远距离传送,就可大大地改进信噪比。

2) 改善性能:由于传感器与电路集成于同一芯片上,对于传感器的零漂、温漂和零位可以通过自校单元定期自动校准,又可以采用适当的反馈方式改善传感器的频响。

3) 信号规一化:传感器的模拟信号通过程控放大器进行归一化,又通过模数转换成数字信号,微处理器按数字传输的几种形式进行数字归一化,如串行、并行、频率、相位和脉冲等。

1.3.3 我国在这方面的现状与差距

传感器在工业、汽车电子产品、通信电子产品、消费电子产品、专用设备等领域有广泛的应用,其中,在工业和汽车电子产品的应用最为突出,其市场份额达到 33%。工业领域的传感器,例如工业控制、工艺机械以及传统的自动传感器;各种测量工艺变量(温度、压

力、流量等参数)传感器;测量电子特性(电流、电压等)和物理量(运动、负载、压力、强度)的传感器,以及传统的接近或定位传感器发展迅速。同时,近年来我国汽车产业呈现持续增长态势,2005年我国汽车工业产量再创新高,累计生产汽车444.37万辆,同比增长35.2%。我国汽车工业的快速发展正在迅速推动我国汽车电子产品市场的发展,汽车电子产品在我国整车中的应用比例有了明显的提升。现代高级轿车的电子化控制系统水平的关键就在于采用传感器的数量和水平。目前,一辆普通家用型轿车上大约安装几十到近百只传感器,而豪华型轿车上的传感器数量可达二百余只,涉及30~100种,对温度、压力、位置、距离、加速度、流量、湿度、电磁、电光、气体及振动等各种信息进行实时准确的测量和控制。

我国传感器产业经过30年的引进、消化和吸收,现已取得了长足的进步,形成了一定的产业基础和发展规模,建立了“传感技术国家重点实验室”“微米/纳米国家重点实验室”“国家传感技术工程中心”等研究开发基地,初步建立了敏感元件与传感器产业。2000年,传感器产量超过13亿只,品种规模在6000种左右,并已在国民经济各部门和国防建设中取得了一定的应用。但是,与发达国家相比还有很大差距,主要表现在:①缺少有自主知识产权的创新成果,科研成果向产业转化速度慢,取得显著社会效益的项目少;②缺乏大规模生产企业,高端产品种类少,市场满足率低;③生产工艺装备离国际水平有较大差距;④整体还处于跟随的状态,国外在传感器网络、无线传感器网络技术、协议标准及产品生产等方面已经逐渐成熟,而我国在这方面还大多处于实验室阶段。

2015年国务院正式印发《中国制造2025》,使中国制造迈出“由大变强”的第一步。其中,智能制造被定位为中国制造的主攻方向,与德国工业4.0,美国工业互联网遥相呼应。如今,传统机械设备已不足以支撑智能制造的进行,传统设备多数没有智能接口和智能传感器,不能加入到物物相联的系统当中。相对于传统制造业,以智能工厂为代表的未来制造业是一种理想的生产系统,能够智能地编辑产品特性、成本、物流管理、安全、信赖性、时间以及可持续性等要素。作为现代信息技术的重要支柱之一的智能传感器技术,就成为工业领域在高新技术发展方面争夺的一个制高点,智能制造时代必将是智能传感器的天下。

电子自动化产业的迅速发展进步促使传感器技术,特别是集成智能传感器技术,发展日趋活跃。近年来,随着半导体技术、大规模集成电路技术和微机械加工技术的迅猛发展,国外一些著名的公司、高校和科研院所正在大力开展有关集成智能传感器的研制;国内一些著名的高校和研究所以及公司也积极跟进,为传感器向集成化、智能化方向发展奠定了基础,集成智能传感器技术取得了令人瞩目的发展,国产智能传感器逐渐在智能传感器领域迈开步伐,与国外的差距逐渐缩短。虽然,我国智能传感器的研究进入了国际行列,但是与国外的先进技术相比,我们还有较大差距,主要表现在以下几个方面:

- (1) 先进的计算、模拟和设计方法。
- (2) 先进的微机械加工技术与设备。
- (3) 先进的封装技术与设备。
- (4) 可靠性技术研究等方面。

所以加强技术的研究、引进先进设备、提高整体水平是我们今后努力的方向。今后几年中,智能传感器将扩展到化学、电磁、光学和核物理等领域,可以预见,越来越多的智能传感器将会在各个领域发挥作用。

§ 1.4 智能传感器的实现

1.4.1 非集成化实现

非集成化智能传感器是将传统传感器（采用非集成化工艺制作的传感器，仅具有获取信号的功能）、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器合为一体而构成的一个智能传感器系统，如图 1-5 所示。其中，信号调理电路是用来调理传感器输出信号的，即将传感器输出信号进行放大并转换为数字信号送入微处理器，再由微处理器通过数字总线接口挂接在现场数字总线上。这是一种实现智能传感器系统最快捷的途径与方式。

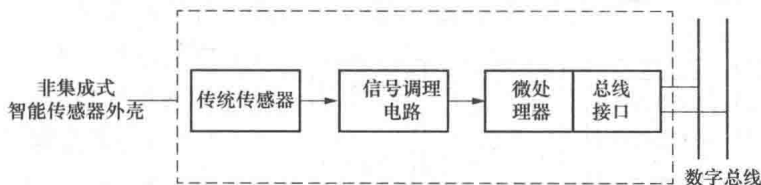


图 1-5 非集成式智能传感器系统

这种非集成化智能传感器是在现场总线控制系统发展形势的推动下迅速发展起来的。因为这种控制系统要求挂接的传感器/变送器必须是智能型的，对于自动化仪表生产厂家来说，原有的一套生产工艺设备基本不变，所以，对于这些厂家而言，非集成化实现是一种建立智能化传感器系统最经济、最快捷的途径与方式。

1.4.2 集成化实现

这种智能传感器系统是采用微机械加工技术和大规模集成电路工艺，利用半导体硅作为敏感元件的制作材料，将信号的调理电路、微处理器单元等集成在一块芯片上所构成的传感器，所以又称为集成智能传感器。它是将智能传感器的各个部分通过一定的工艺，分层集成在一块半导体硅片上。

随着微电子技术和微米、纳米技术的快速发展，大规模集成电路工艺日益完善，集成电路器件的集成度越来越高。它已成功地使各种数字电路芯片、模拟电路芯片、微处理器芯片、存储器电路芯片的价格性能比大幅度降低。同时，它又促进了微机械加工技术的发展，形成了传统传感器制作工艺完全不同的现代智能检测传感器。

集成智能传感器可实现自适应性、高精度、高可靠性与高稳定性。按照传感器的集成度不同分成三种形式：初级形式、中级形式和高级形式。

(1) 初级形式。将没有微处理器单元，只有敏感单元与信号调理电路被封装在一个外壳的形式称为智能传感器的初级形式，也称为“初级智能传感器”。它只具有比较简单的自动校零、非线性的自动校正和温度补偿功能。这些功能常常由硬件智能信号调理电路实现，并且这类智能传感器的精度和性能与传统传感器相比得到了一定的改善。

(2) 中级形式。中级形式是在初级形式的基础上增加了微处理器和硬件接口电路，扩展功能有自诊断（例如：故障、超量程）、自校正（进一步消除测量误差）、数据通信，这些功能主要以软件形式来实现，因此它们的适用性更强。

(3) 高级形式。在中级形式的基础上，高级形式实现了硬件上的多维化和列阵化，软件上结合神经网络技术、人工智能技术（遗传算法、专家系统、蚁群算法、粒子群算法等）和