

光机电一体化丛书

# 智能传感器及其应用

高国富 罗均 谢少荣 李小鸥 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

智能传感器及其应用/高国富等编著. —北京: 化学

工业出版社, 2005. 5

(光机电一体化丛书)

ISBN 7-5025-7080-2

I. 智… II. 高… III. 传感器 IV. TP212. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 050569 号

---

光机电一体化丛书  
智能传感器及其应用

高国富 罗均 谢少荣 李小鸥 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市昌平振南印刷厂印刷  
三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$  字数 344 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7080-2

定 价: 30.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

智能传感器是由美国宇航局于 1978 年在宇航工业发展中首先提出来的，它的核心思想是利用微计算机技术使传统传感技术智能化。智能传感器具有一种或多种敏感功能，能够完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通信，内部可实现自检、自校、自补偿、自诊断等，具备双向通信、信息储存、数字量输出等功能。随着计算智能的发展，智能传感器将利用人工神经网络、模糊理论、遗传算法等，使传感器具有更高的智能。智能传感器系统越来越受到高度重视，尤其在分布式实时探测、网络探测和多信号探测方面一直颇受欢迎，产生的影响较大。智能传感器正逐步应用于各学科和工程领域，例如工业自动化、航天技术、军事、机器人、环境监测、安全保卫、医疗、家用电器、农业现代化等。因此，作为现代移动装备四大共性技术之一的智能传感技术将会对现代装备在工程领域的应用产生深远影响。

本书的思路是首先介绍智能传感器基础之一的智能材料，然后介绍了多智能传感器的融合技术、智能传感器的通信技术，接着介绍了各种智能传感器，最后给出了智能传感器的应用。全书共分 9 章，分别介绍智能传感器和传统传感器的区别，可以用作智能传感器的现代智能材料，智能传感器的信息融合和通信技术，智能仿生感觉传感器、智能惯性传感器、智能磁场传感器、网络化智能压力传感器，并且结合编者的科研实践详细给出了智能传感器在天线伺服跟踪系统中的应用实例。

本书第 1 章、第 3 章、第 8 章由高国富博士编写；第 6 章、第 9 章由罗均博士编写；第 5 章、第 7 章由谢少荣博士编写；第 2 章、第 4 章由李小鸥副教授编写。全书由罗均博士统稿。博士后陈丽、吴安德，博士生高同耀、饶进军，硕士生乔开军、崔坤征、胡崮峰、王东红、邢兰兴等为本书做了大量的协助工作。

本书的编写得到了国家 863 计划、上海市科技启明星计划、国家自然科学基金和上海市教委青年基金的支持，同时，在本书的编写过程中，我们参阅和引用了国内外同行们的一些学术论文和著作，编者在此表示深深的感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正和讨论。

编 者

2005 年 2 月于上海

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器与智能传感器	1
1.1.1 传感器的基础知识	1
1.1.2 智能传感器	3
1.2 智能传感器的体系结构	5
1.2.1 智能传感器的层次结构	5
1.2.2 智能传感器的设计结构	6
1.2.3 智能传感器的实现结构	6
1.2.4 集成化智能传感器的形式	10
1.3 智能传感器的基本性能	11
1.4 智能传感器的发展趋势	13
第 2 章 智能材料	16
2.1 概述	16
2.1.1 智能材料的发展概况	16
2.1.2 智能材料的特征、构成和分类	17
2.2 压电智能材料	19
2.2.1 压电效应	19
2.2.2 压电智能材料的应用	19
2.3 电流变体和磁流变体	21
2.3.1 电流变体	21
2.3.2 电致变体材料及应用	21
2.3.3 磁流变体及磁致变体材料的应用	22
2.3.4 电流变液与磁流变液的比较研究	23
2.4 磁致伸缩材料	23
2.4.1 磁致伸缩效应	23
2.4.2 磁致伸缩材料及应用	24
2.5 形状记忆合金	27
2.5.1 形状记忆效应	27
2.5.2 形状记忆合金的特性和分类	27
2.5.3 形状记忆合金的应用	28
2.6 新型智能材料	29
2.6.1 智能塑料	29
2.6.2 智能皮肤	29

2.6.3	智能纤维	30
2.6.4	主动式智能材料	30
<b>第3章</b>	<b>多传感器信息融合</b>	<b>31</b>
3.1	多传感器信息融合概述	31
3.1.1	多传感器信息融合的定义	31
3.1.2	多传感器数据融合的特点	32
3.1.3	多传感器信息融合的关键问题	32
3.1.4	多传感器信息融合的应用	33
3.2	多传感器数据融合的功能模型	34
3.2.1	White 功能模型	34
3.2.2	JDL 模型	36
3.2.3	多传感器信息融合过程	37
3.3	多传感器信息融合的层次与结构模型	39
3.3.1	像素级数据融合	40
3.3.2	特征级数据融合	41
3.3.3	决策级数据融合	42
3.3.4	分布式数据融合	43
3.3.5	集中式数据融合	43
3.3.6	混合式数据融合	44
3.4	多传感器信息融合算法	45
3.4.1	算法分类	45
3.4.2	卡尔曼滤波	45
3.4.3	贝叶斯推理	49
3.4.4	Dempster-Shafer 算法	51
3.4.5	基于信息论的数据融合	55
3.4.6	基于感知的数据融合	59
3.4.7	智能数据融合	61
<b>第4章</b>	<b>智能传感器的通信技术</b>	<b>65</b>
4.1	概述	65
4.1.1	定义	65
4.1.2	网络概念	65
4.1.3	网络协议标准	66
4.2	汽车协议	67
4.2.1	SAE J1850	68
4.2.2	CAN 协议	68
4.2.3	SAE J1939	70
4.3	工业网络	70
4.3.1	工业网络化设备体系	70
4.3.2	现场总线控制系统	70
4.3.3	以太网	74

4.4	楼宇与家庭自动化	75
4.4.1	楼宇自动化	75
4.4.2	家居网络自动化	77
4.5	智能传感器的 IEEE1451 标准	78
4.5.1	IEEE1451 标准产生的背景	78
4.5.2	IEEE1451 内容	78
4.5.3	IEEE1451 标准在智能传感器中的应用	79
第 5 章	智能仿生感觉传感器	81
5.1	概述	81
5.1.1	视觉仿生传感技术	81
5.1.2	听觉仿生传感技术	82
5.1.3	嗅觉仿生传感技术	83
5.1.4	味觉仿生传感技术	84
5.1.5	触觉仿生传感技术	84
5.2	智能立体视觉传感器	85
5.2.1	双目立体视觉原理	85
5.2.2	智能化视觉传感器基本结构	86
5.2.3	固态图像传感器	87
5.2.4	数字信号处理器	90
5.3	智能声觉传感器	92
5.4	智能嗅觉传感器	98
5.4.1	半导体式气体传感器	98
5.4.2	电化学式气体传感器	98
5.4.3	固体电解质气体传感器	99
5.4.4	接触燃烧式气体传感器	99
5.4.5	光学式气体传感器	99
5.4.6	高分子气体传感器	99
5.5	智能触觉传感器	100
5.5.1	智能接触觉传感器	100
5.5.2	智能压觉传感器	104
5.5.3	智能力觉传感器	105
5.5.4	智能滑觉传感器	108
5.5.5	仿生皮肤	109
第 6 章	智能惯性传感器	111
6.1	概述	111
6.1.1	微机械加工加速度传感器	111
6.1.2	陀螺仪	114
6.2	智能光纤陀螺	117
6.2.1	DSP-3000 系列智能光纤陀螺	117
6.2.2	VG700CA 智能垂直光纤陀螺	122

6.2.3	VG991 (D) 光纤陀螺	125
6.3	ADXRS401 iMEMS 陀螺仪	127
6.3.1	ADXRS401 的性能特点	127
6.3.2	ADXRS401 的工作原理	128
6.3.3	ADXRS401 的典型应用及电路设计	130
6.4	智能加速度传感器	132
6.4.1	MXD7210/7020 系列智能加速度传感器	132
6.4.2	ADXL210/210E 系列智能加速度传感器	137
6.4.3	MMA6260Q 系列单片加速度传感器	141
6.5	惯性测量组合	145
6.5.1	平台式惯性测量组合	145
6.5.2	捷联式惯性测量组合	147
<b>第 7 章 智能磁场传感器</b>		149
7.1	概述	149
7.1.1	磁传感器的分类	149
7.1.2	磁传感器的发展	150
7.1.3	磁传感器的应用	151
7.2	HMC/HMR 系列磁传感器	152
7.2.1	性能和结构特点	152
7.2.2	工作原理	153
7.2.3	HMC 系列磁场传感器的应用	156
7.2.4	HMR2300 三轴智能数字磁场计	161
7.3	霍尔传感器	164
7.3.1	霍尔传感器	164
7.3.2	霍尔集成传感器	170
<b>第 8 章 网络化智能压力传感器的原理与应用</b>		177
8.1	PPT/PPTR 系列智能压力传感器的工作原理	177
8.1.1	性能特点	177
8.1.2	功能简介	178
8.2	PPT/PPTR 系列智能压力传感器指令系统简介	187
8.2.1	指令使用格式	187
8.2.2	指令系统简介	187
8.3	PPT 系列智能压力传感器的应用	192
8.3.1	PPT 模拟输出	192
8.3.2	PPT 远程模拟压力信号的传输与控制	193
8.3.3	PPT/PPTR 的 4~20mA 回路电流电路	195
<b>第 9 章 智能传感器在天线伺服跟踪系统中的应用</b>		197
9.1	概述	197
9.2	天线伺服跟踪系统	198
9.2.1	天线伺服跟踪系统的系统要求	198

9.2.2	天线伺服跟踪系统的硬件结构 .....	198
9.2.3	天线伺服跟踪系统的控制原理 .....	198
9.3	天线伺服跟踪系统的硬件设计 .....	200
9.3.1	电源功能模块设计 .....	200
9.3.2	倾角传感器模块设计 .....	203
9.4	天线伺服跟踪系统的软件设计 .....	208
9.4.1	上位机软件结构设计 .....	208
9.4.2	下位机软件结构设计 .....	209
9.5	上位机信号采集系统设计 .....	209
9.5.1	上位机信号采集的原理 .....	209
9.5.2	上位机的方位角信号采集 .....	209
9.5.3	上位机倾角信号采集 .....	210
9.5.4	上位机信号处理 .....	211
9.6	利用 I <sup>2</sup> C 采集方位角信号 .....	213
参考文献 .....		215

# 第 1 章 绪 论

智能化传感器 (smart sensor 或 intelligent sensor) 是 20 世纪 80 年代末出现的一种涉及多种学科的新型传感器系统。智能传感器系统越来越得到高度重视,尤其在探测器应用领域,如分布式实时探测、网络探测和多信号探测方面一直颇受欢迎,产生的影响较大。传感器现在已广泛应用于各学科和工程领域,例如工业自动化、航天技术、军事、机器人、环境监测、安全保卫、医疗、家用电器、农业现代化等。其发展与传感技术有密切关系,并且传感器技术的发展会对其他学科的发展产生相互影响。

## 1.1 传感器与智能传感器

### 1.1.1 传感器的基础知识

现代科技的发展使人类社会进入信息时代,人类社会活动的拓展主要依赖于对信息资源的获取、传输与处理。传感器处于自动检测与控制系统之首,是感知、获取与检测信息的窗口;作为研究对象与测控系统的接口,一切科学研究和生产过程要获取的信息,都要通过传感器转换为易传输与处理的电信号。系统的自动化程度、智能化程度越高,系统对传感器的依赖性越大,因此,国内外都将传感器技术列为尖端技术进行研究。

#### (1) 概念和机理

国家标准 GB 7665—87 对传感器 (transducer/sensor) 定义为: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。通常传感器包括两部分:敏感元件和转换元件。敏感元件 (sensing element) 是指传感器中能直接感受被测量的部分,如弹性敏感元件将力信号转换为电流信号或电压信号输出;转换元件 (transduction element) 指传感器中能将敏感元件输出量转换为适于传输和测量的电信号部分,如信号调理器、放大器。但并不是所有传感器都能明显区分敏感元件和转换元件两部分,两者往往是合二为一的。传感器也称为变换器、探测器或检测器等,广义上,凡能把外界的各种信息和能量变成其他信息和能量的器件均可称为传感器。

传感器的机理是基于各种物理的、化学的和生物的效应,并受相应的定律和法则所支配,进行能量和信息的转换,主要有以下四种基本定律。

① 守恒定律 包括能量、动量、电荷量等守恒定律。这些定律是研究、开发、分析、综合现有传感器必须严格遵守的基本法则。

② 场的定律 包括动力场的运动定律、电磁场的感应定律等,其作用与物体在空间的位置及分布状态有关,场的定律一般可由物理方程给出,作为许多传感器工作的数学模型。

③ 物质定律 它是表示各种物质本身内在性质的定律(如虎克定律等),通常以这种物质所固有的物理常数加以描述,因此,这些常数的大小决定着传感器的主要性能。

④ 统计法则 它是把微观系统与宏观系统联系起来的物理法则,这些法则常常与传感器的工作状态有关,它是分析某些传感器的理论基础。

#### (2) 性能参数

传感器的特性参数除了灵敏度、线性度、迟滞、重复性、零点、分辨率、准确度、频率

特性、阶跃特性外，还常用阈值、漂移、过载能力、稳定性、可靠性以及与环境相关的参数、使用条件等。不同的传感器根据实际应用来确定其主要性能指标。

① 阈值 指能使传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，即零位附近的分辨率。

② 漂移 指一定时间间隔内传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移主要指传感器的零点漂移与灵敏度漂移。漂移又可分为时漂和温漂。时漂指在规定条件下零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温漂指周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

③ 过载能力 指传感器在不引起规定性能指标永久改变的情况下，允许超过测量范围的能力。一般用允许超过测量上限（或下限）的被测量值与量程的百分比表示。

④ 稳定性 传感器在工作时间内保持其性能的能力。稳定性一般以室温条件下经过一规定时间间隔后，传感器的输出与起始标定时输出之间的相对误差和绝对误差来表示，有时也用标定的有效期表示。

⑤ 可靠性 包括工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压等性能指标。

### (3) 分类

传感器种类繁多，原理各异，不同角度有不同的分类方法，主要的分类方法有以下几种。

① 按工作机理分类 以物理、化学和生物等学科的原理、规律、效应作为依据，分为结构型、物性型和复合型三类。

结构型传感器利用物理学中场的定律和运动定律等构成，其性能与构成材料关系不大。被测参数变化引起传感器的结构变化，使输出电量变化，如位移、压力、电感式、电容式等传感器属于结构型传感器。

物性型传感器利用物质的某种性质随被测参数变化的原理构成，传感器的性能与材料密切相关，如压电传感器、各种半导体传感器等。

复合型传感器指将中间转换环节与物性型敏感元件复合而成的传感器。大量被测非电量中，只有少数信号（如光、磁、热等）可直接利用某些敏感材料的物性转换为电信号。复合型传感器通过中间环节，将不能直接检测的非电量首先转换为敏感材料可以检测的物理量，再利用物性敏感材料转换为电信号。

② 按能量转换分类 可分为有源传感器和无源传感器。有源传感器又称能量转换型传感器、换能器，不需外加电源就能将被测能量转换成电能输出。这类传感器有压电式传感器、热电偶、光电池等。无源传感器又称能量控制型传感器，需外加电源才能输出电能。这类传感器有电阻、电感、霍尔式等传感器以及热敏电阻、光敏电阻、湿敏电阻等。

③ 按被测物理量分类 按被测量的性质不同进行划分，有物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器。这种方法明确表明了传感器的用途，便于使用者选择，如位移传感器用于测位移等。

④ 按输出信号分类 分为模拟传感器和数字传感器。模拟传感器输出模拟信号，如电流、电压等信号；数字传感器输出为数字信号，如编码器式传感器。

习惯上，常把工作原理和用途结合起来命名传感器，如电感式位移传感器、压电式加速度传感器等。

### (4) 改善传感器性能的主要技术途径

传感器的性能决定系统应用的场合，越是复杂的系统对传感器的性能要求越高。提高传感器的性能是传感器技术发展的必经途径。

① 稳定性技术 传感器作为长期测量或反复使用的元件，其稳定性尤为重要，甚至超过精度指标。因为后者可以根据误差的规律进行补偿或修正。造成不稳定的原因是随时间推移或环境条件变化，构成传感器的各种材料与元器件性能发生变化。为提高传感器性能的稳定性，应对材料、元器件或传感器整体进行稳定性处理，如结构材料的时效处理、永磁材料的时间老化、温度老化、电气元件的老化及筛选等。

② 补偿校正技术 针对传感器的系统误差，找出误差的方向和数值，采用修正的方法加以补偿或校正。

③ 抗干扰技术 传感器可看成一个复杂的输入系统，输入信号除有被测量外，还有外界干扰信号。为减小测量误差，应设法削弱或消除外界干扰，减少影响传感器灵敏度的因素和降低干扰因素对传感器的实际作用功率，如采用屏蔽、隔离措施等。

④ 合理选择传感器材料、结构与参数 应根据要求，合理选择传感器基本参数、环境参数，并根据使用条件选择合适的种类、结构和材质等。

### 1.1.2 智能传感器

#### (1) 智能传感器的概念

从使用的角度，传感器的准确度、稳定性和可靠性是至关重要的。长期以来研究工作大都集中在硬件方面，虽然人们不断利用新材料研制敏感器件，改进传感器芯片的制造工艺方法来提高芯片的质量，以及通过外电路补偿方法来改善传感器的线性度、稳定性和输出漂移，但都没有根本性的突破。

20世纪70年代，微处理器的出现带来了数字化的革命，对仪器仪表的发展起了巨大的推动作用，如20世纪90年代虚拟仪器(VXI)的飞速发展，使以微型计算机为基础的测控系统都需要传感器来提供赖以作出实时决策的数据。随着系统自动化程度的提高和复杂性的增加，对传感器的综合精度、稳定可靠性和响应要求越来越高。传统传感器功能单一、性能不稳定、不能满足多种测试要求，为此微处理器智能技术被用于传感器研发。20世纪80年代末期，人们又将微机械加工技术应用到传感器，从而产生新概念传感器——智能传感器。

智能传感器利用微计算机技术使传感器智能化。它是一个或多个敏感元件与信号处理电路集成在同一硅片或GaAs片上的器件，英文名称为intelligent sensor，美国俗称为smart sensor。目前，国际传感器领域已对“smart sensor”定义形成了基本共识，但中文译法尚未形成定论。智能传感器是具有一种或多种敏感功能，能够完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通信，内部可实现自检、自校、自补偿、自诊断的器件。

智能传感器是由美国宇航局于1978年在宇航工业发展中首先开发出来。宇宙飞船中有大量传感器不断向地面发送温度、位置、速度和姿态等数据。由于一台大型计算机很难同时处理这么多的数据，于是提出把CPU分散化的解决方案，这样就产生出智能化传感器。随着微电子技术的发展，1983年，美国Honeywell公司首次推出过程工业中应用的智能压力传感器，其他公司效法，纷纷推出自己的智能传感器产品。智能传感器虽然在传感器的远地整定和精度提高上取得了很大进步，但由于在传感信号的变送方式上采用的主要技术路线是在原4~20mA电流环基础上加载数字载波信号，没有从根本上突破原有的工业控制现场结构。近几年来，新一代智能传感器的研究领域是将目光集中于建立一种以工业现场总线为基础的、以CPU为处理核心、以数字通信为变送方式的传感器和变送器的统一体，这就是现

场总线式智能传感器，也称为网络化传感器。

新一代智能传感器的研究领域是将计算机技术与各种敏感元件相结合应用的边缘学科。虽然，关于智能传感器目前还未有明确的定义，但一致认为智能传感器具有数据处理、自诊断、信息存储和数字通信功能，能实现自动调零、自动平衡、自动补偿、自选量程和远程通信。

智能传感器一般具有以下特点。

① 高精度 由于智能传感器采用自动调零、自动补偿、自动校准等多项新技术，因此其测量精度及分辨力得到大幅度提高。

② 宽量程 智能传感器的测量范围很宽，并具有很强的过载能力。

③ 多功能 能进行多参数、多功能测量。例如，瑞士 Sensirion 公司最新研制的 SHT11/15 型高精度、自校准、多功能智能传感器，能同时测量相对湿度、温度和露点等参数，兼有数字温度计、湿度计和露点计这三种仪表的功能，可广泛用于工农业生产、环境监测、医疗仪器、通风及空调设备等领域。

④ 自适应能力强 智能传感器具有较强的自适应 (self-adaptive) 能力。美国 Microsemi 公司最近相继推出能实现人眼仿真的集成化可见光亮度传感器，能代替人眼去感受环境亮度的明暗程度，自动控制 LCD 显示器背光源的亮度，以充分满足用户在不同时间、不同环境中对显示器亮度的需要。

⑤ 高可靠性。

⑥ 超小型化、微型化、微功耗 能由传感器本身消除异常值和例外值，提供比传统传感器更全面、更真实的信息；能随机整定；具有一定程度的存储、识别和自诊断功能；内含特定算法并可根据需要改变。

智能传感器系统的主要特点是把计算机技术和现代通信技术融入传感器系统中，其目的是为了适应计算机测控系统的发展，满足系统对传感器提出的更高要求，因此认为智能传感器是指传感器与微处理器赋予智能的结合，兼有信息检测、信息处理及通信功能的传感器系统。

在结构上，智能传感器系统将传感器、信号调理电路、微控制器及数字信号接口组合为一整体，其框图如图 1-1 所示。传感元件将被测非电量转换为电信号，信号调理电路对传感器输出的电信号进行调理并转换为数字信号后送入微控制器，由微控制器处理后的测量结果经数字信号接口输出。在智能传感器系统中不仅有硬件作为实现测量的基础，还有强大的软件支持来保证测量结果的正确性和高精度。以数字信号形式作为输出易于和计算机测控系统接口，并具有很好的传输特性和很强的抗干扰能力。

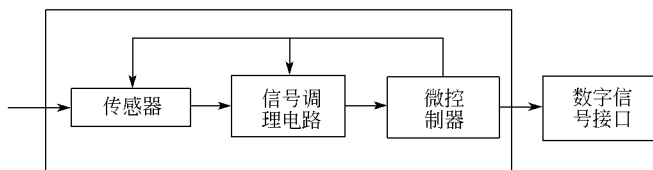


图 1-1 智能传感器系统功能框图

## (2) 智能传感器的基本技术

① 功能集成化 是实现智能传感器的主要技术途径。利用大规模集成电路技术将敏感元件、信号处理器和微处理器集成在一块硅片上，形成一个“单片智能传感器”，是一个对

外界信息具有检测、数据处理、判断、识别、自诊断和自适应能力的多功能传感器，还能实现与主机远距离、高速度、高精度的传输。例如，将多个具有不同特性的气敏元件集成在一个芯片上，利用图像识别技术处理，可得到不同灵敏度模式，然后将这些模式所获取的数据进行计算，与被测气体的模式类比推理或模糊推理，可识别出气体的种类和各自的浓度，这类传感器具有小型化、性能可靠、能批量生产、价格低廉的优点。

② 人工智能材料的应用 人工智能材料 (Artificial Intelligent Materials, AIM) 是一种结构灵敏性材料。它具有三个基本特征：感知环境条件变化 (传统传感器) 的功能；识别、判断 (处理器) 功能；发出指令和自行采取行动 (执行器) 功能。人工智能材料按电子结构和化学键分为金属、陶瓷、聚合物和复合材料等几类；按功能又分为半导体、压电体、电流变体等几种。例如，具有热阻效应、湿阻效应、电化学反应、气阻效应和具有自诊断、自调节、自修复功能，可用于快速检测环境温度、湿度，取代温控线路和保护线路；利用电致变色效应和光记忆效应的氧化物薄膜，可制作成自动调光窗口材料，既可减轻空调负荷又可节约能源，在智能建筑物窗玻璃上有广泛应用前景；利用热电效应和热记忆效应的高聚物薄膜可用于智能多功能自动报警和智能红外摄像，取代复杂的检测线路；利用有光电效应的光导纤维制作光纤混凝土，当结构构件出现超过允许宽度裂缝时，光路被切断而自动报警。人工智能材料是继天然材料、人造材料、精细材料后的第四代功能材料。显然，它除了具有功能材料的一般属性 (如电、磁、声、光、热、力等)，能对周围环境进行检测的硬件功能外，还能依据反馈的信息，具有进行自调节、自诊断、自修复、自学习的软调节和转换的软件功能。

③ 微机械加工技术 采用微机械精细加工技术，在硅片上制作出极其精细的新型结构，可以构成完整的多振动信号感知和处理的智能传感器。目前，已生产出谐振频率为 4~14kHz 的多振动智能传感器，以及各种智能惯性传感器和惯性单元。

④ 三维集成电路 将各集成电路层叠放置，相互隔离，每层之间由导体构成连接，不仅成倍提高芯片的集成度，而且缩短了各集成电路间的导线长度，提高了芯片工作效率。新开发的技术应用包括三维逻辑阵列、三维门阵列、三维动态存储器、三维图像传感器及处理器、三维共享存储器等三维芯片。

⑤ 图像处理及 DSP 智能传感技术需要图像处理器来处理阵列传感信号。数字信号处理器 (DSP) 以数字并行和串行的信号处理方法来进行图像处理，可以实现高性能的图像传感。

⑥ 数据融合理论 数据融合是一种数据综合处理技术，是许多传统学科和新技术的集成和应用，如通信、模式识别、决策论、不确定性理论、信号处理、估计理论、最优化技术、计算机科学、人工智能和神经网络等。对多个传感器或多源信息进行综合处理，从而得到更为准确、可靠的结论。对于多个传感器组成的阵列，数据融合技术能够充分发挥各个传感器的特点，利用其互补性、冗余性，提高测量信息的精度和可靠性，延长系统的使用寿命。

## 1.2 智能传感器的体系结构

### 1.2.1 智能传感器的层次结构

在整个系统结构中，智能传感器作为基本元件，其灵活性和适应性是最基本的要求。对比来看，人类传感系统就可看作一个高度先进的智能传感系统的范例。它的敏感性和可选择

性是根据目标和环境来调整的。

人类传感系统具有先进的传感功能和分级结构。对于能激发先进功能的复杂系统来说,这种分级结构是一种非常合适的结构,图 1-2 所示即为一多层结构示意。

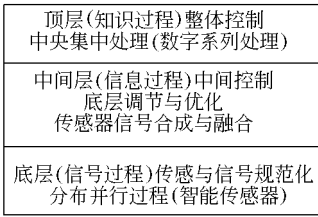


图 1-2 智能传感器的层次结构

最高级的智能信息处理过程发生在顶层,而处理的功能是中央化的,如同人的大脑,处理的信息是抽象的且与操作原理、传感器的物理结构无关。

另一方面,处于底层的各类传感器组从外部目标收集信息,很像人类的分布传感器官。这些传感器的信号处理是以分布和并行的方式进行的。处理的信息强烈地依赖于传感器的原理和结构。

传感器与期望的信号处理功能协调一致地结合可称为智能传感器。期望信号处理的主要规则是增加设计灵活性和实现新的传感功能。附加规则通过在系统底层的分布信息处理来减小中央处理单元的负载和传输。

在中间层实现信号的中间处理功能。中间处理功能之一是对来自于底层的多重传感器信号的合成。当信号来自不同类型的传感器时,该功能又被称为传感器信号的融合。而另一种中间功能是调整传感器的参数,以优化整个系统的性能。

一般地说,中间层所完成的信息处理的属性更直接地面向位于底层的硬件结构,而在顶层则很少考虑硬件问题。出于同样的原因,信息处理的算法越灵活,在顶层就需要越多的知识。

因此,对于各层所完成的处理功能,底层实现信号处理,中间层实现信息处理,顶层实现知识处理。

### 1.2.2 智能传感器的设计结构

从处理的信号类型上来看,智能传感器有两种主要设计结构(见图 1-3):一种是数字传感器信号处理(DSSP);另一种是数字控制的模拟信号处理(DCASP)。

精密智能传感器一般采用 DSSP 结构,通常至少包括两个传感器:被测量传感器(如压力传感器)和补偿(温度)传感器。在智能传感器中,温度信号可直接从被测量传感器提取出来。传感器信号经多路调制器送到 A/D 转换器,然后再送到微处理器进行信号的补偿和校正。测量的稳定性只由 A/D 转换器的稳定性决定。可采用传感器输出算法趋近或多表面逼近法进行信号处理。每个给定传感器的校正系数都单独存储在永久寄存器(EEPROM)中,如果需要模拟输出,可附加一个 D/A 转换器。

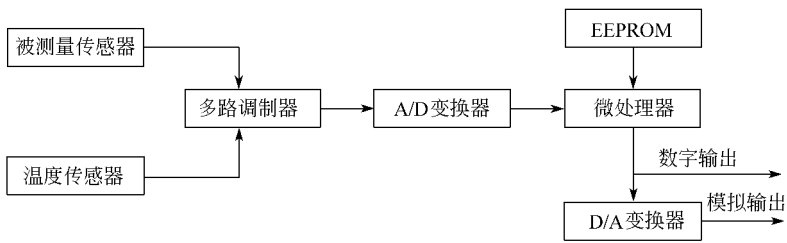
DSSP 结构的分辨率受输入 A/D 转换器的分辨率和补偿/校正处理分辨率的限制。响应时间受 A/D 变换时间和补偿处理时间限制。

基本的 DCASP 结构在传感器和模拟输出之间直接提供了一个模拟通道。因此,被测量分辨率和响应时间不受影响。温度补偿和校正是在并联回路实现,并联回路能改变信号放大器的失调和增益,要获得数字输出信号,可加一个 A/D 转换器。

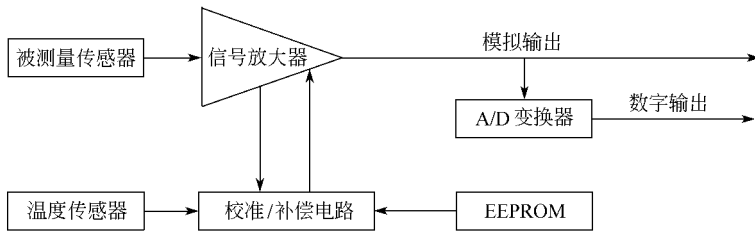
### 1.2.3 智能传感器的实现结构

#### (1) 非集成化实现

非集成化智能传感器是将传统的经典传感器(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组合为一整体而构成的一个智能传感器系统。其框图如图 1-4 所示。



(a) DSSP



(b) DCASP

图 1-3 DSSP 和 DCASP 智能传感器结构

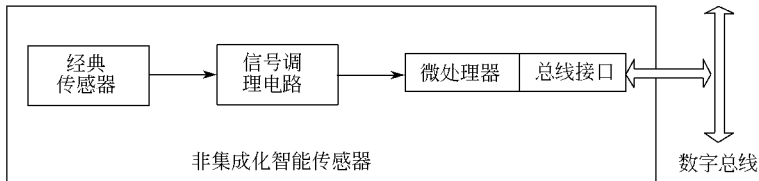


图 1-4 非集成化智能传感器框图

图 1-4 中的信号调理电路用来调理传感器的输出信号，即将传感器输出信号进行放大并转换为数字信号后送入微处理器，再由微处理器通过数字总线接口挂接在现场数字总线上，是一种实现智能传感器系统的最快途径与方式。例如美国罗斯蒙特公司、SMAR 公司生产的电容式智能压力（差）变送器系列产品，就是在原有传统式非集成化电容式变送器基础上附加一块带数字总线接口的微处理器插板后组装而成。同时，开发配备可进行通信、控制、自校正、自补偿、自诊断等智能化软件，从而形成智能传感器。

另外，近 10 年来发展极为迅速的模糊传感器也是一种非集成化的新型智能传感器。模糊传感器是在经典数值测量的基础上，通过模糊推理和知识合成，以模拟人类自然语言符号描述的形式输出测量结果。显然，模糊传感器的核心部分就是模拟人类自然语言符号的产生及其处理。模糊传感器的“智能”之处在于它可以模拟人类感知的全过程，不仅具有智能传感器的一般优点和功能，而且具有学习推理的能力，具有适应测量环境变化的能力，并且能够根据测量任务的要求进行学习推理。另外，模糊传感器还具有与上级系统交换信息的能力，以及自我管理和调节的能力。通俗地说，模糊传感器等同于一个具有丰富经验的测量工人，甚至更好。

图 1-5 是模糊传感器的简单结构和功能示意。其中，经典数值测量单元不仅提取传感信号，而且对其进行数值预处理，如滤波、恢复信号等。符号产生和处理单元是模糊传感器的核心部分，它利用已有的知识或经验（通常存放在知识库中），对已恢复的传感信号进一步处理，得到符合客观对象的拟人类自然语言符号的描述信息。其实现方法是利用数值模糊化

方法，得到符号测量结果。符号处理则是采用模糊信息处理技术，对模糊化后得到的符号形式的传感信号，结合知识库内的知识（主要有模糊判断规则、传感信号特征、传感器特性及测量任务要求等信息），经过模糊推理和运算，得到被测量的符号描述结果及其相关知识。当然，模糊传感器可以经过学习新的变化情况（如任务发生改变、环境变化等）来修正和更新知识库内的信息。

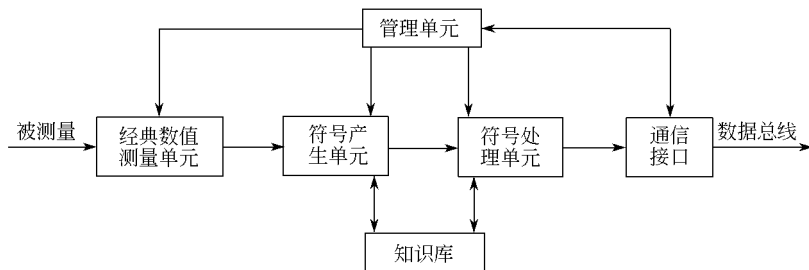


图 1-5 模糊传感器功能框图

模糊传感器由硬件层和软件层构成，突出特点是其具有丰富强大的软件功能。模糊传感器与一般的基于计算机的智能传感器的根本区别在于模糊传感器具有实现学习功能的单元和符号产生、处理单元。它能够实现专家指导下的学习和符号推理及合成，从而使模糊传感器具有可训练性。经过学习与训练，使得模糊传感器能适合不同测量环境和测量任务的要求。因此，实现模糊传感器的关键就在于软件功能的设计。

## (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技术，利用硅作为基本材料来制作敏感元件、信号调理电路、微处理器单元，并把它们集成在一块芯片上而构成，故又可称为集成智能传感器（integrated smart/intelligent sensor）。其外形如图 1-6 所示。

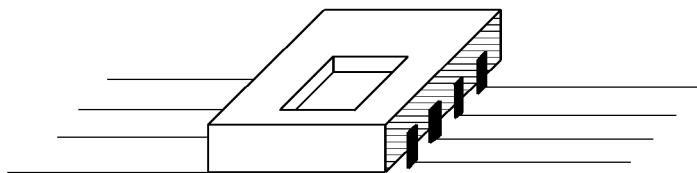


图 1-6 集成智能传感器结构示意图

随着微电子技术的飞速发展、微米/纳米技术的问世，大规模集成电路工艺技术的日臻完善，集成电路器件的密集度越来越高，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下降。反过来，它又促进了微机械加工技术的发展，形成了与传统的经典传感器制作工艺完全不同的现代传感器技术。

现代传感器技术是指以硅材料为基础（因为硅既有优良的电性能，又有极好的力学性能），采用微米级（ $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ ）的微机械加工技术和大规模集成电路工艺来实现各种仪表传感器系统的微米级尺寸化。国外也称它为专用集成微型传感技术（ASIM）。由此制作的智能传感器具有以下特点。

① 微型化 微型压力传感器已经可以小到放在注射针头内送进血管，测量血液流动情况，或安装在飞机发动机叶片表面，测量气体的流速和压力。美国最近研究成功的微型加速

度计可以使火箭或飞船的制导系统质量从几千克下降至几克。

② 结构一体化 压阻式压力（差）传感器最早实现一体化结构。传统的作法是先分别宏观机械加工金属圆膜片与圆柱状环，然后把二者粘贴形成周边固支结构的“金属杯”，再在圆膜片上粘贴电阻变换器（应变片）而构成压力（差）传感器。因此，不可避免地存在蠕变、迟滞、非线性特性。采用微机械加工和集成化工艺，不仅“硅杯”一次整体成型，而且电阻变换器与硅杯完全一体化，进而可在硅杯非受力区制作调理电路、微处理器单元，甚至微执行器，从而实现不同程度的、乃至整个系统的一体化。

③ 精度高 比起分体结构，结构一体化后的传感器迟滞、重复性指标将大大改善，时间漂移大大减小，精度提高。后续的信号调理电路与敏感元件一体化后可以大大减小由引线长度带来的寄生变量的影响，这对电容式传感器更有特别重要的意义。

④ 多功能 微米级敏感元件结构的实现特别有利于在同一硅片上制作不同功能的多个传感器，如美国霍尼韦尔公司 20 世纪 80 年代初期生产的 ST-3000 型智能压力（差）和温度变送器，就是在一块硅片上制作感受压力、压差及温度三个参量的具有三种功能（可测压力、压差、温度）的敏感元件结构的传感器，不仅增加了传感器的功能，而且可以通过采用数据融合技术消除交叉灵敏度的影响，提高传感器的稳定性与精度。

⑤ 阵列式 微米技术已经可以在  $1\text{cm}^2$  大小的硅芯片上制作含有几千个压力传感器的阵列。例如，丰田中央研究所半导体研究室用微机械加工技术制作的集成化应变计式面阵触觉传感器，在  $8\text{mm}\times 8\text{mm}$  的硅片上制作了 1024 个（ $32\times 32$ ）敏感触点（桥），基片四周还制作了信号处理电路，其元件总数约 16000 个。

敏感元件构成阵列后，配合相应图像处理软件，可以实现图形成像，构成多维图像传感器。这时的智能传感器就达到了它的最高级形式。

敏感元件组成阵列后，通过计算机或微处理器解耦运算、模式识别、神经网络技术的应用，有利于消除传感器的时变误差和交叉灵敏度的不利影响，提高传感器的可靠性、稳定性与分辨能力。如目前对于气敏传感器阵列的研究，期望实现气体种类判别和混合气体成分分析与浓度测量。

⑥ 全数字化 通过微机械加工技术可以制作各种形式的微结构。其固有谐振频率可以设计成某种物理参量（如温度或压力）的单值函数。因此，可以通过检测其谐振频率来检测被测物理量。这是一种谐振式传感器，直接输出数字量（频率）。它的性能极为稳定、精度高、不需 A/D 转换器便能与微处理器方便地接口，免去了 A/D 转换器，对于节省芯片面积、简化集成化工艺均十分有利。

⑦ 使用极其方便，操作极其简单 没有外部连接元件，外接连线数量极少，包括电源、通信线可以少至四条，因此，接线极其简便。它还可以自动进行整体自校准，无需用户长时间地反复多环节调节与校验。“智能”含量越高的智能传感器，它的操作使用越简便，用户只需编制简单的使用主程序。

根据以上特点可以看出，通过集成化实现的智能传感器，为达到高自适应性、高精度、高可靠性与高稳定性，其发展主要有以下两种趋势：其一是多功能化与阵列化，加上强大的软件信息处理功能；其二是发展谐振式传感器，加上软件信息处理功能。

例如，压阻式压差传感器是采用微机械加工技术最先实用化的集成传感器，但是它受主温度与静压影响，总精度只能达到 0.1%。温度性能改善方面的研究长时间无重大进展，因而有的厂家改为研制谐振式压力传感器，而美国霍尼韦尔公司刚发展多功能敏感元件（如