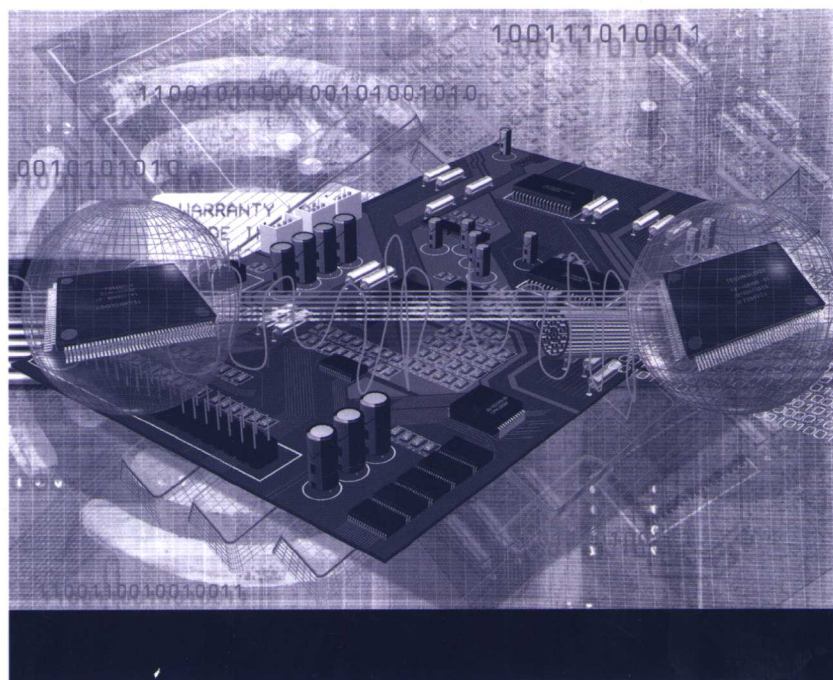


倪星元 张志华 编著

传感器敏感功能材料及应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

传感器敏感功能材料及应用/倪星元, 张志华编著.
北京: 化学工业出版社, 2005. 3
ISBN 7-5025-6744-5

I. 传… II. ①倪…②张… III. 传感器-功能材料
IV. TP212.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018072 号

传感器敏感功能材料及应用

倪星元 张志华 编著
责任编辑: 丁尚林
文字编辑: 李玉峰
责任校对: 边 涛
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心
(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
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市前程装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14¼ 字数 350 千字
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6744-5/TB·125
定 价: 38.00 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

传感器是构成信息系统、自动化系统、通信系统的基础器件。无论是在我们的日常生活、学习、医疗,还是所有的工业、农业、商业、交通运输等生产活动以及科学研究中,甚至在军事斗争中,传感器或者是对传感器的需求几乎无所不在。21世纪科学界的支柱研究领域是信息技术、新材料和生命科学,这三方面的研究和发展无一不与传感器有着密切的联系。近年来随着技术的发展,众多新的传感器迅速涌现,展示着新的技术革命的美好前景。

传感器技术应该包括敏感功能材料、传感(元)器件和传感器应用三个方面。毫无疑问,材料是传感器发展的基础和支柱,特别是具有对各种物理、化学量敏感的功能材料是优良的传感器所必不可少的。我们可以看到新型的敏感功能材料的发展,特别是半导体、特种陶瓷、特种聚合物、光纤、生物膜等新型功能材料的开发,不仅为改善传感器的性能及拓宽应用领域创造了条件,也为新型传感器的诞生奠定了基础。

传感器所用的功能材料种类有很多,结构也各不相同。材料存在有晶体、非晶体、多晶体和薄膜等不同的状态。材料涉及的敏感特性有电学性质、磁学性质、力学性质、热学性质、光学性质、声学性质及其他众多的化学特性和生物特性。因此非常有必要拓展和加深对于传感材料相关知识的认知。

本书从材料的基本结构出发介绍了传感器所用材料的敏感机理和功能转变的特性,力图使读者能从本质上对传感器材料及其应用有比较深刻的理解并应用于各自的工作和学习上。

本书可以作为应用电子工程、材料工程、电气工程、自动控制、机电一体化、计算机及应用等专业学生的教材,或相关专业工程技术人员的参考资料。

本书参考和引用了不少相关的文献和资料,谨向这些著者表示感谢。由于水平有限,书中难免存有谬误,敬请读者指正。

编 者
2005年1月

内 容 提 要

本书从材料的基本结构出发,较详细地介绍了作为敏感材料的特殊的电学、磁学、力学、热学、光学、声学及其他化学和生物功能特性,并根据相关的特性分别介绍了热敏、光敏、光导纤维、磁敏、气敏、湿敏、力敏、离子选择和生物传感器的材料选择、传感特性以及主要的应用。

本书系统性强,技术内容先进,可作为应用电子工程、材料工程、电气工程、自动控制、机电一体化、计算机及应用等专业学生的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考资料。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的定义和分类	1
1.2 信息传感与能量转换	7
1.3 传感和换能材料	9
参考文献	14
第 2 章 材料的基本结构	15
2.1 基本粒子	15
2.2 元素的电子层结构	16
2.3 晶体及空间点阵	17
2.4 元素的晶体结构和密堆积	18
2.5 化合物的晶体结构	21
2.6 高分子材料的链结构	23
2.7 高分子结晶的形态和结构	28
参考文献	30
第 3 章 键力和电子能带	31
3.1 键力	31
3.2 键的类型	32
3.3 离子键	34
3.4 共价键	35
3.5 极性共价键	37
3.6 金属键和范德瓦耳键	38
3.7 固体的能带	38
3.8 导体和非导体的能带	39
参考文献	40
第 4 章 敏感材料的力学和热学性能	41
4.1 弹性模量	41
4.2 脆性	43
4.3 塑性	45
4.4 韧性	46
4.5 抗力强度	46
4.6 材料的一般热性质	50
4.7 热传递	52
4.8 热应力	54
4.9 热稳定性	56

参考文献	57
第 5 章 敏感材料的电导和介电特性	58
5.1 导电能力和电导 (或电阻) 率	58
5.2 霍尔效应	59
5.3 半导体特性	60
5.4 电介质的电导	62
5.5 介质的极化、损耗和击穿特性	65
参考文献	71
第 6 章 敏感材料的铁磁性和铁电性	72
6.1 铁磁性	72
6.2 各向异性与磁致伸缩	74
6.3 磁化曲线和磁滞回线	76
6.4 磁性材料的宏观表象和参数	77
6.5 铁电体和电滞回线	80
6.6 铁电特性与晶体结构	82
6.7 反铁电特性	83
参考文献	84
第 7 章 敏感材料的光、声波动及传感特性	85
7.1 光的折射和反射	85
7.2 光的吸收	86
7.3 光的色散与散射	87
7.4 材料的透光性和颜色	87
7.5 发光和激光	88
7.6 声波的产生和传播	89
7.7 声波的反射和吸收	91
7.8 水中声学	93
7.9 超声、微声、次声	94
参考文献	95
第 8 章 敏感材料的功能转换特性	96
8.1 热-电转换特性	96
8.2 光-电转换特性	102
8.3 机-电转换特性	106
8.4 磁-电转换特性	113
8.5 与化学现象有关的功能转换特性	116
8.6 与生物效应有关的功能转换特性	116
参考文献	118
第 9 章 热敏功能材料及传感器	119
9.1 金属热敏传感器	119
9.2 半导体热敏传感器	124
9.3 其他热敏传感器	128

参考文献	131
第 10 章 光敏功能材料及传感器	132
10.1 概述	132
10.2 光电导传感器 (光敏电阻)	132
10.3 光敏二极管	134
10.4 光敏三极管	136
10.5 光电耦合器	137
10.6 光电池	138
10.7 热电型光传感器	139
10.8 半导体色敏传感器	140
参考文献	141
第 11 章 光导纤维及传感器	142
11.1 概述	142
11.2 FF 型光导纤维传感器	145
11.3 NFF 型光导纤维传感器	150
参考文献	156
第 12 章 磁敏功能材料及传感器	157
12.1 半导体霍尔元件	158
12.2 半导体磁阻元件	160
12.3 磁敏二极管和晶体管	162
12.4 铁磁性金属薄膜磁阻元件	164
参考文献	165
第 13 章 气敏功能材料及传感器	166
13.1 半导体气敏传感器	167
13.2 电解质气敏传感器	170
13.3 其他气敏传感器	171
参考文献	172
第 14 章 湿敏功能材料及传感器	173
14.1 金属氧化物陶瓷湿敏传感器	173
14.2 有机高分子湿敏传感器	175
14.3 压电湿敏传感器	176
14.4 其他湿敏传感器	177
参考文献	178
第 15 章 力 (声) 敏功能材料及传感器	179
15.1 压力、应变传感器	179
15.2 运动量力敏传感器	182
15.3 普通电声传感器	187
15.4 次声 (水声) 传感器	192
15.5 超声传感器	197
参考文献	204

第 16 章 离子选择电化学功能材料及传感器	205
16.1 离子选择敏感元件概况	205
16.2 玻璃电极	207
16.3 晶体膜电极	208
16.4 离子选择性场效应管	209
参考文献	210
第 17 章 生物功能材料及传感器	211
17.1 生物传感器概述	211
17.2 酶传感器	212
17.3 免疫传感器	214
17.4 光导管生物传感器	217
17.5 生物电子学传感器	218
参考文献	219

第 1 章 绪 论

1.1 传感器的定义和分类

人类为了从外界获取信息，最初只是借助于自身的感觉器官（眼睛、鼻子、耳朵、舌头、皮肤）。人体的五官是极好的传感器，例如，人的手指的触觉是极其灵敏的，并且具有众多功能，它可以感受物体的温度（冷热）、软硬、干湿、轻重及外力的大小等；此外，它还有特殊的手感，如对织物的手感、对液体黏度的手感等。

但人体五官也有不足之处。例如，它没有察觉磁性的功能；人的眼睛虽然能看见众多的景物和绚丽灿烂的光线，但看不见可见光波段以外的红外线及紫外线；耳朵虽然能听到各种声音，但听不到超声波和次声波；仅凭感官也很难确定化学溶液中物质的种类和含量。另外，人体虽能感受温度，但只能在一个较小的温度范围内，较为粗略地区别温度的高低。相对而言，许多温度传感器却可以“感受”从负温百多度到正温数千度的温度，可检出这样宽范围的温度变化并做出相应的反应。一些温度传感器可以精确地分辨出 $1/10$ 度或 $1/100$ 度，甚至更小的温度差别，并且可以非常快地显现出来。

显然，为了更深入和广泛研究自然现象和加速发展生产，仅靠人体感觉器官是很不够的。随着需求的发展，人们对自然现象不仅需要定性的认识，还需要有一个定量的认识。人体感觉器官尽管常常是很有效的，但无法准确地定量。毫无疑问，只有量化的信息才有助于我们较为确切地推论和了解自然现象的本质。于是，人们寻找和发展了能代替或者补充人体感觉器官功能的工具——传感器。传感器可以显现检测到的定量信息，因此是一种不可缺少的定量检测工具。我们可以通过传感器取得关于检测对象较为准确的量化的信息（一次信息），了解被检测对象的情况，也可以再根据对这些信息处理的结果（二次信息），了解被检测对象的情况。

传感器的历史悠久，比我们公认的近代科学史的历史更长。如我们沿用到现在的木制的杆秤、天平及特别令我们中华民族骄傲的指南针等工具，自古代起就被广泛使用，一直沿用到现在。利用液体受热膨胀的特性进行温度的测量在 16 世纪前后就已出现。电磁学的基础建于 19 世纪，法拉第所完成的各种巧妙的实验为人类认识物质世界做出了极大贡献，对传感器的发展开辟了新的天地，直到现在他所发现的物理法则作为各种传感器的基本工作原理仍被广泛地应用着。

工业革命以来，各种大型机器和多功能设备的发明和广泛使用，给社会生产和人们生活带来了巨大的变革，传感器对开拓和提高这些机器设备的性能及促进生产力发展，起到了极大的推动作用。例如，当年瓦特发明了一种把旋转速度参量变换为直线位移参量的传感器——离心调速机，以此控制蒸汽机车的速度。

近一个世纪来，以电参量作为输出形式的传感器得到了特别的青睐。由于真空管和半导体等有源元件的可靠性提高，使得以电参量作为输出形式的传感器得到飞速发展。目前，日

常所说的传感器一般都是指以电参量作为输出形式的传感器。近四十多年来电子集成电路技术和半导体应用技术的高速发展,带动了传感器的发展,研究开发了许多性能更好的传感器,现在已经有许多新型的传感器可以与计算机联合进行信号处理和实施控制。

正是由于以电参量作为输出形式的传感器出现,使自动控制得以实现和蓬勃发展。在一个自动控制系统中,一般首先由传感器将检测到的非电量信息转换成电量参数,然后进行自动控制。例如,家用电冰箱和空调器就具备这样的一个温度自动控制系统,由温度传感器将温度变化的信息转换成电量参数传输到温控器,由温控器来控制压缩机的开关达到控制的目的。又例如,在化工产品自动生产过程中,首先需要按确定的配方中的不同混合比例对所用原料进行自动称重以及对成分或浓度进行分析。为监控在反应容器中的反应过程,又必须测定容器中的压力或体积。若有半成品在生产线(管道)中传输,需要检测传输速度或流量。最后的成品需要分级、分类、自动分装,还要称重。所有这些环节均需要使用各种传感器对整个过程中的所有非电量信息(压力、压强、黏度、酸碱度等)进行检测和控制,使设备或系统自动地在预先设定的最佳状态下正常地运行,保证生产的高效率和高质量。

使用了传感器使得各类生产及加工设备朝着半自动、全自动、智能化方向快速发展,各种全自动生产流水线、多功能机器人相继出现。传感器可有效地帮助实现生产合理化,自动化,提高产品质量,降低生产成本,减轻工人的劳动强度,避免有害作业的直接操作。不仅在生产领域,在日常生活中传感器也施展出了其巨大的魅力。传感器大力促进了家用电器的发展,带有传感器的新颖的家用电器层出不穷。不仅在家务劳动的自动化、省力化方面起到极大的作用,如全自动洗衣机、洗碗机,还极大地提高了人们的生活质量,如能自动控温的电冰箱,空调机。在医疗器械方面,新型的带有传感器的设备和产品更是不胜枚举,如电子血压计、脉搏计、电子体温计等。无论是飞机、人造卫星、太空飞船的起降或是巡航都离不开传感器,在航空、航天方面,传感器是不可缺少的“灵魂”部件。在自然资源调查、海洋勘探开发、生命奥秘探索等众多领域,传感器都正在发挥着无可替代的重要作用。正因为如此,传感器技术已受到世界各国普遍关注,并已发展成为一种专门的技术学科。

当今世界已经进入一个高度发达的信息化时代,面临着一场新的技术革命。这场革命以极大地提高劳动生产率和工作效率为主要特征,而技术革命的主要基础就是信息技术。信息技术的关键在于信息的采集和信息处理,而信息采集主要依靠各种类型的传感器。传感器能够将各种信息的感知、采集、转换、传输和处理等多种功能集于一身,是实现现代化测量和自动控制(包括遥感、遥测、遥控)的主要环节,可以看作是现代信息产业的源头,又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。现在,传感技术与信息技术、计算机技术已被并列成为支撑整个现代信息产业的三大支柱。不难设想,如果没有高度保真和性能可靠的传感器,没有先进的传感器技术,那么信息的准确获取将成为一句空话,信息技术和计算机技术就成了无源之水。目前,从宇宙探索、海洋开发、环境保护、灾情预报到包括生命科学在内的每一项现代科学技术的研究以及人民群众的日常生活,几乎无一不与传感器和传感器技术紧密联系着。传感器技术是信息时代的必然要求。因此,毫不夸张地说,没有传感器及其技术将没有现代科学技术的迅速发展。表 1-1 表明了传感器在我们现代生活和生产中的地位和作用。

根据我国相关的国家标准,对于传感器(Transducer)的定义是:能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用的输出信号的器件或装置。通常传感器内由敏感元件和转换元件两部分组成,也可能是二者合一的。其中,敏感元件(Sensitive Element)是指传感器中能

表 1-1 传感器应用领域

应用领域	功能要求	传感器类型
交通工具	速度与方位监控,节能与安全排放,流量集中管理等	温度、压力、转数、速度、位移、流量等传感器
工业生产	提高产品质量、生产效率与减轻劳动强度,科学管理,节约能耗,安全生产等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、湿度、液位、状态等传感器
医疗器械	治疗、检验自动化和智能化等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、同位素等传感器
建筑设施	设计定位,施工监控,防灾、防盗报警等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、气体等传感器
勘探测量	资源调查,地矿钻探,气象预报,海洋探测,太阳能利用等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、磁力等传感器
农业生产	农业工业化,农产品加工,病虫害防治等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、湿度、成分等传感器
污染治理	污染物探测、报警和治理等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、气体、成分等传感器
制造加工	材料选择,过程监控,成品检验等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、尺寸、成分等传感器
科学研究	标准信息传递,高精度测量,特殊参数测试等	温度、压力、转数、速度、位移、流量、位置、成分等传感器
信息处理	信息传输,信息管理,广播通信,图像传播等	光、磁、色、图像、频率、光纤等传感器
其他	商业流通,教育手段等	温度、压力、转数、速度、位移、流量等传感器

直接感受被测对象的非电量信息的部分,而转换元件(Transducer Element)是指传感器中能将敏感元件输出量转换为适合传输的电参量的部分。在许多情况下,并不是所有的传感器都能明显分清敏感元件和转换元件两个部分,常常是两者合二为一的。例如半导体气体传感器、半导体光电传感器等,它们通常都是在一个元件中将感受到的被测量信号直接转换成电信号输出,没有中间变换的元件和过程。

与传感器相类似的术语有“换能器”,按日本工业标准(JIS),换能器定义为“对应于被测量,能给出易于处理的输出信号的变换器”。国际标准协会(ISA)也是这样定义的。但是从更广泛的意义来说,不一定对应于被测量,有时也把能将某个量变换为其他形式的量的变换器叫做换能器。例如,把电能变换为声能的变换器(喇叭、超声波振荡器等),多称为换能器。因此从检测的功能出发,传感器似乎比换能器更为贴切。

其实,传感器这个词作为一个学术上的专用术语,常常并不是狭义的。有时候,传感器即指构成换能器的元件,即变换元件(Transducer或Sensor),直接被称为换能器、变换器、变送器或探测器,其主要特征是能感知和检测某一形态的信息,并将其转换成另一形态的信息。因此,传感器是指那些对被测对象的某一个确定的信息具有感受(或响应)与检出功能,并能按照一定规律转换成与之对应的、有效的输出信号的元器件或装置。当然这里的信息应包括电量或非电量,而输出信号一般为电量信号。因此,也不妨将传感器定义为敏感于待测非电量,并可将它转换成与之对应的电信号的元件、器件或装置。

当然,将非电量转换为电信号并不是惟一的形式。例如,可将某种形式的非电量转换成另一种形式的非电量(如将位移的量转换成磁、应力转换成应变、热量转换成光信号等)。随着技术的发展,现在许多领域已经由电波传导发展为光波导,因此,将被测的非电量转换成光信号或许更为有利。

传感器是根据一些元件和材料的物理、化学及生物的特性或某些特殊效应设计加工制造出来的。一般来说，传感器应由敏感元件、转换元件和其他辅助部件组成。但也并不是所有的传感器都必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，它就同时兼为转换元件，因此，敏感元件和转换元件二者合一的传感器是很多的。例如，压电振子、热电偶、热敏电阻、光电器件等都是这种形式的传感器。

图 1-1 中的信号调节电路是能把转换元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的，有效的电信号的电路。辅助电路通常包括电源，即交、直流供电系统，这方面有许多的专著和论文可供参考。从图 1-1 中可以看到传感器中的核心是敏感元件和转换元件及相应材料，而这些将是本书讨论的主题。

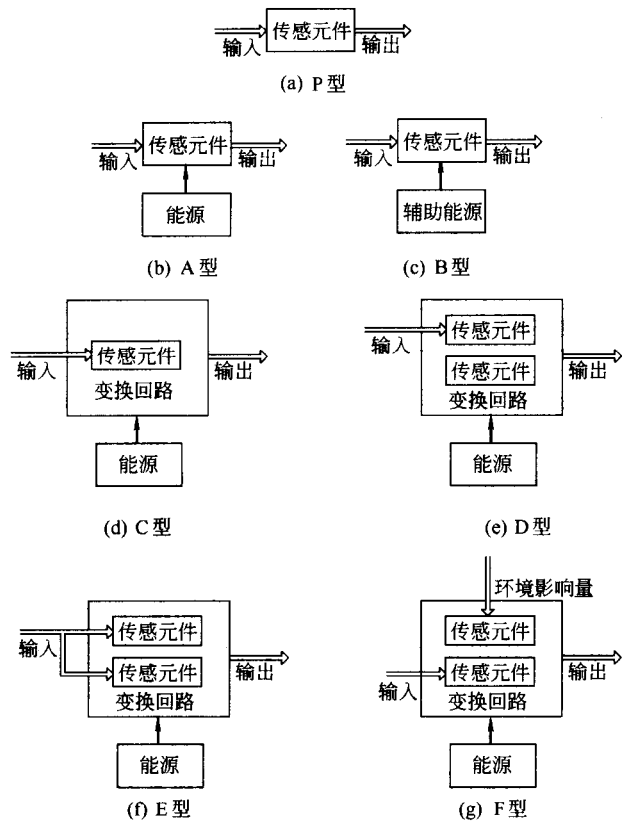


图 1-1 传感器组成框图

传感器的品种很多，原理各异。若按工作机理的不同，可分为结构型、物性型、复合型 and 智能型四大类。

结构型传感器是利用基本的物理定律构成，传感性能首先取决于材料本身的状态。在测量过程中敏感元器件或装置的与结构相关的几何尺寸（如厚度、角度、位置等）在被测量作用下会发生变化，由此获得与被测物体非电量成一定比例的电信号。例如，用于测量压力、位移、流量、温度的力平衡式、电容式、电感式等传感器都属于这一类。这类传感器开发得最早，至今仍然广泛应用于工业流程检测设备。

物性型传感器是由其构成材料的物理特性、化学特性或生物特性直接敏感于被测非电量，并可将被测得的非电量转换成电信号的敏感元器件。由于它的敏感特性取决于材料本身

的物性，一般不怎么关心结构上存在的几何尺寸的变化，而更关注的是这类传感器固有特性对被测量的响应情况。物性型传感器多以半导体为敏感材料，故易于集成化、小型化、智能化。显然，这对于与计算机连接，并实现联动监控是有利的。所有的半导体传感器，以及凡是利用因环境发生变化而导致本身性能发生变化的金属、半导体、陶瓷、合金等制成的传感器都可归于物性型传感器。由于人们对材料科学的不断深入的研究，新的敏感功能材料不断被开发，物性型传感器无论是应用的范围和应用的数量都呈现出高速发展的趋势。

复合型传感器实质上主要还是物性型传感器，只是复合型传感器增加了一些中间转换环节，并将其与其他物性型敏感元件组合而成。采用中间环节是必要的，这是因为在实际工作中大量被测对象中只有一部分非电量（如压力、应变、光、磁、热、水分和某些气体）可直接利用某些敏感材料的物质特性转换成电信号，而有许多被测得的非电量不能直接转化成电信号。所以，为了适应被测对象，利用这样一个中间转换环节，将不能直接转换成电信号的非电量变换成能够转化的非电量中的一种，然后再利用相应的物性型敏感元件将其转换成电信号。可见，复合型传感器实际上是将一般的待测信号转换成一个适宜与上述物性型传感器相匹配的中间信号，随即再转换成电信号之功能的一类敏感元器件。显然，通过这类传感器大大扩展了适用范围。当然由于这类传感器将对信号进行两次或多次转换，因此对所使用的具有信号转换的敏感功能材料提出了更高的要求。

智能型传感器是一种带有微处理器，兼有信息检测与信息处理功能的传感器。通常按照半导体工艺采用微加工技术在基片上把传感器的功能与微处理器的逻辑功能、存储功能集中在一起，使传感器在原有功能的基础上同时具有自动校正、自动补偿并能进行数字处理、图像识别、存储和记忆等多项功能。

为了叙述和实际应用的方便，人们也将传感器按被测量进行分类。这种分类方法是按被测量的性质不同即按检测功能对传感器进行分类，优点是传感机制划分得比较清晰，有利于传感器使用者从原理与设计上进行归纳性的分析和研究。按不同检测功能，传感器可分为物理变量传感器、化学变量传感器和生物变量传感器三大类。各类传感器又分为若干个族，每一族又分为若干组。按此种方法分类的传感器体系见表 1-2。

表 1-2 按不同检测功能区分的各类传感器

变量	变换功能	传感原理及效应	变量	变换功能	传感原理及效应
物理变量	热电变换	热电势效应,热阻抗效应	化学变量	氧化还原反应	化学吸附引起阻抗变化
	光电变换	光电势效应,光电子效应,光电效应		光化学反应	离子导电引起阻抗变化
	压电变换	压电效应,压电阻效应		离子交换反应	
	磁电变换	霍尔效应,磁阻抗效应		催化剂反应	
	热磁变换	居里点磁特性变化		电化学反应	化学电池效应
	光磁变换	法拉第效应		其他	
	力磁变换	应变引起磁导率变化	生物变量	免疫反应	抗原体反应
	热光变换	热辐射		酶反应	脱碳酸反应
	压光变换	光弹性效应		微生物组织	呼吸功能
	热压变换	热膨胀引起流量变化		其他	
	其他	应变、共振频率变化			

由于这种分类方法是按被测量命名传感器的，其优点是能明确地指出传感器的用途，便于使用者根据其用途选用；缺点是这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类，较难找出每种传感器在转换机制上有何共性和差异，因此，对按传感器的一些基本原理进行电路

设计和分析是不利的。

从传感器制造者的角度出发最合适的分类方法是按敏感功能材料来进行分类，特别是材料研究工作者十分喜欢这种分类的方法。这种分类对传感器使用者选用合适的传感器也很方便。

这种分类方法按照材料科学对一般材料的定义来划分制造传感器。从大的类别可分为金属材料传感器、无机材料传感器、有机材料传感器、生物材料传感器等几个大的类别。加以细分又可以列出如无机半导体传感器、单晶体传感器、陶瓷传感器、薄膜传感器、光导纤维传感器、高分子材料传感器、生化酶传感器等。这种分类方法比上述两种分类方法更加直接地指明了传感器的工作原理和传感机制。

除以上几种常用的分类法外，还有按其用途分类、科目分类、功能分类、输出信号的性质分类等方法。笔者认为按材料对传感器进行分类对偏重于材料分析的使用者、设计者或制造者都具有最明确的指导意义。

传感器以材料的电、磁、光、声、热、力等功能效应和功能形态变换原理为基础，并综合了物理学、化学、生物工程、微电子学、材料科学、精密机械、微细加工、试验测量等多方面的知识，从而形成的一门新兴的学科。从制造业的角度看，一些复合型的、智能型的传感器制造要求很高，工艺难度很大，涉及了许多高新技术，如集成技术、薄膜技术、超导技术、微细或纳米加工技术、黏合技术、高密封技术、特种加工技术以及多功能化、智能化技术等。因此不难看出传感器技术学科交错，知识密集度高，与许多基础科学和专业工程学有着极为密切的联系。

特别是随着技术的发展，对传感器也提出了更高的标准和要求。传感器的研发的方向大致分为如下四个方面。

① 向检测范围挑战——发掘敏感材料的量子化效应 随着技术的发展，传感器的极限检测范围不断在扩大。我们知道物性型传感器效应大多取决于微电子学、量子力学等效应，为继续扩大这个范围需要从敏感材料的量子效应上着眼。从扩展传感器极限监测范围的角度看，其比较典型的例子是利用核磁共振吸收的磁传感器以及利用约瑟夫逊效应的磁传感器(SQUID)。用核磁共振吸收式磁传感器能测量 $1/10^7$ 的地球磁场强度，用 SQUID 能测量 $1/10^{11}$ 的极弱的磁场强度。如使用约瑟夫逊效应式热噪声温度计，则可测量 $0.000001\text{K}(10^{-6}\text{K})$ 的超低温。具有能够检测出这种极其微弱的信号的技术，就可以促使新技术的进一步发展，甚至一些新学科的诞生。

② 多功能化和集成化发展 在许多场合需要对多个不同类型的非电量检测，由此提出了传感器的多功能化。这方面的目标是一个传感器装置同时能将数个被检测的非电量转化成相应的电信号。

在小型化和多功能化的基础上采用了半导体集成电路技术及其开发思想，实现传感器的集成化。逐步从单点向多点发展，由一维向多维空间发展。

③ 开发化学和生物传感器，向未开发领域挑战 到目前为止，传感器能够检测的非电量的种类还不全面，未开发的领域还很多。例如，气敏传感器目前还很有限，生物传感器则更少，但需求却十分强烈。现在，实际使用的传感器大多为物理传感器。今后会有越来越多的化学传感器和生物传感器面世。

④ 开发智能传感器 前面我们已经简单定义了智能传感器，我们希望智能传感器兼有学习能力、记忆能力、判断能力和创造能力，使传感器成为部分取代“人脑”的敏感装置。

1.2 信息传感与能量转换

按照前述关于传感器和换能器的关系，我们看到传感器在接触到被测量对象的原始信息后，由于传感材料的性质，经过按照一定的规律和比例转化，然后再以电的形式输出信号。不同的传感器材料和环境，其转换的规律和比例是不一样的。

我们知道，信息的形成与能量有关，当然也有许多情况下我们想了解的信息本身与能量没有直接关系，例如一些社会科学部门的信息统计。当我们使用传感器检测被测对象时就会与能量发生关系，特别是表现在自然科学的研究和产业部门，经常发生对诸多物理量进行定量测量。这时候，被测量对象的物理状态及能量都和测量结果有关。我们通过传感器从物体的状态中获取信息，据此找出与被测物体有关的能量输出输入关系。

为了达到测量的目的有时也会预先向被测物体赋予一定的能量，通过对这部分能量的响应来获取有关对象物体的信息。也就是说，传感器和被测物体之间信息的授受关系，也伴随着能量的授受关系。

想要了解物体的温度，我们用热敏传感器去测量其温度。测量开始，热能从被测物体传导到热敏传感器，按照一定的比例热敏传感器将接受的热能的一部分变换成电能信息输出，就可以进行测量了。超声波是一种机械波，超声波传感器工作时需要先向被测物体发射具有一定能量的超声波，许多物体能够反射超声波。反射回来的超声波被超声波传感器接收，经过对发射和返还回来超声波的能量的比对，转换成测量电能信号。像这种热能-电能、机械能-电能相互转换的关系可以由图 1-2 表示，其他类型的能量转换也能画出类似的转换示意图。

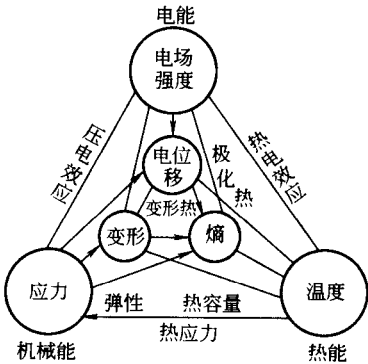


图 1-2 电能、热能、机械能间的物质效应

热敏传感器把热能转换成电信号，光敏传感器把光能转换成电信号，流量、流速传感器把流体动能变换成电信号，因此从这个意义上说，传感器实际上就是一个换能器。与普通的换能器不同的是传感器进行能量的变换是以传达信息为目的，因此能量变换的比率常常不是最重要的，首要的是要灵敏地响应和有效地实现转换。有时为了减少干扰和其他副作用，会希望转换的那一部分能量被控制在最低极限。

传感器把检测到的非电量信号变换成电信号，这一功能受到相关的物理规律制约。这些物理规律主要是以下四种类型。

① 守恒定理 守恒定律是最基本的物理法则。这里所说的守恒定律包括能量守恒、动量守恒、电荷守恒等。通过对大量的压电传感器观测可以非常直观地证明能量守恒定律在传感器中的存在。压电传感器将检测到的应力或应变这样的非电量机械能转化成电能形式的电信号，转换的能量必定等于或小于原来的机械能，小于的情况出现主要是不可避免的材料及传输的损耗。

② 场与波动的规律 传感器检测的大多数的非电量如声、光、热、磁、应力等都是波动和场的形式存在，它们分别是声波、光波、红外波动、热振波动、磁场、应力场。同时，传感器检出的电信号是以电场的形式存在。因此，传感器的工作原理服从相关的场与波

动的规律。

利用波动现象来设计的传感器有很多优点。特别像测量光的波动，它的强度（光量）具有调整方便、非接触检测的优点而被广泛应用。

不仅局限于可见光，其他形式的信号都遵循场和波动的规律实现传输和能量交换。一般说来，包括多种电磁波动现象都存在着多普勒效应。其规律是，静止的传感器检测到从运动物体发射波的频率取决于波源与检测点的相对运动速度；运动着的传感器向静止物体发射波时，反射回来的波的频率也同样取决于相对的运动速度。利用这个效应可以制作各种速度传感器、流速传感器。

③ 统计规律 传感器进行能量和信号的转换和传输是由组成传感器的物质完成的。我们知道物质是由极其微小的粒子构成，所以用统计规律来理解和应用这些粒子所体现的物质性质是合理的和必要的。例如，常用热释电材料来进行红外遥感和遥测，其传感效应可以通过相应的统计规律进行评估。通常由于物体的粒子数极其庞大，所以偏离平均值是很小的，以至在实际使用时可以忽略，但在设计和结果分析时还是十分有必要考虑其统计规律。

④ 相关物质特性的规律 传感器在运行中受到组成物质各自固有特性的约束。这些特性规定了该物质所具有的各种变化规律和特性。例如力学特性中的虎克定律、电学特性中的欧姆定律、热力学中的理想气体方程定律等，这些定律都包含着物质所固有的物性常数和定义各种物性常数的公式。一般来说，这些定律严格界定了传感器的工作对象、工作环境和性质，无论我们是在使用还是在设计时都必须全面考虑这些物质的固有特性。

我们称之为物性型的传感器实际上也可称之为材料型传感器，其主要是利用了不同种类能量之间相互联系的物质特性而设计和制作的，这种联系大可归结为三种现象，即热平衡现象、传输现象和量子现象。

① 热平衡现象 处于热平衡状态的基本物理量可分为两种：一种是被称之为强度性状态量（示强变量），其性质是由其量的大小来决定的；另一种是与占据系统的大小（体积、面积等）成正比性质的状态量，被称之为容量性状态量（示容变量）。温度、压力、电场或磁场的强度等是强度性状态量；能量、熵、位移、电极化作用等是容量性状态量。传感器可连接这两类变量，其热平衡基本效应如表 1-3 所示。

表 1-3 热平衡基本效应

输出 输入	位移(体积)	热(熵)	电极化作用	磁极化作用
应力	—	应力发热	压电效应	磁致伸缩现象
温度	热膨胀	—	热释电效应	退磁
电压	压电效应	热电效应	—	电磁效应
外加磁场	磁致伸缩效应	磁热效应	电磁效应	—

② 传输现象 电荷及热、质量等容量性状态量随时间在空间发生变化形成流动的现象，称作传输现象。产生流动的原因是因为在系统中存在着强度性状态量的差值或梯度，可以把这看作是一种趋向力，叫做亲和力。电流的产生因为有电位差，当然也可能是因为温度差而产生。于是，就可以利用这种势能差的流动而产生的传输现象来制作传感器。不同种类的亲和力和物质流动之间的效应称作传输的基本效应，传感器所应用的传输现象的基本效应如表 1-4 所示。

表 1-4 传输现象的基本效应

输出 输入	力	热	电	物质
力 热 电 物质	流动 电动势	热传导 珀耳帖效应	塞贝克效应 霍尔效应 浓差电池	电解 化学反应

③ 量子现象 构成物质的原子、分子在受到外界能量作用下，内部电子从原来的能态位置发生转移和变迁，这就是量子现象。最具代表性的是光电效应，材料中的电子接受光量子的冲击从表面释放，在新的能量的作用下，形成电位移或电位差，这是一种称之为外部光电效应的量子现象。由于光的照射使得材料内部的电子受到不同程度的激励，结果产生电子-空穴对，这是一种称之为内部光电效应的量子现象。量子现象不仅发生于光电传感器材料，在磁电、热电等各种传感器材料中也比比皆是。对原子、分子施加磁场影响就会加剧材料内部电子的热振，改变了材料原来的能量状态。所以如果使磁场以某一特定频率变化，使之产生共振现象，这种现象称作磁共振，是调整材料内部能量状态的一种重要手段。由于共振频率取决于磁场强度，所以这种量子效应也能用于磁场传感器，也可用于温度传感器。

1.3 传感和换能材料

传感器的基础是构成传感器的材料其本身的各种基础功能效应，以及这些效应的传输和功能形态的变换。传感器技术综合了物理学、化学、生物工程学、微电子学、材料科学、精密机械、微细加工、试验测量等多方面的知识和技术，并逐步形成了一个专门的学科领域。但无论是设计或制造传感器都会涉及以新型材料科学为核心的相关的高新技术，如大规模集成电路技术、新材料合成技术、薄膜和超晶格技术、超导技术、介观或纳米技术、黏合技术、高密封技术、特种加工技术以及多功能化、智能化技术等。所有这些高新技术的应用的目标指向是开发传感器材料的高效传感和换能。

传感器材料的主要功能是从被测对象接收其所能反应的声、光、电、热、磁、机械、化学等形式的能量信号，并转换成电信号。具有这样功能的材料有压电、热电、光电、电化学、电磁等功能转换材料。就材料构成来说，一般可分为金属材料、无机和有机三大类。金属材料包括单质金属和合金。无机材料大多指的是陶瓷材料，这是由于随着半导体技术的兴起，特别是氧化物或其他化合物半导体在传感器材料中日益显现的重要作用，故常被从无机材料中划出专门一类。同样由于生物传感器的崛起，也被从有机材料中划出，另立一类。表 1-5 给出了各类材料在传感器中的应用情况。

目前各类传感器材料的研究和发展趋势如下。

(1) 金属传感器材料

金属向来是材料领域中不可或缺的。在传感器所使用的材料中金属可以说是最早使用的材料，早期的结构型的传感器大多使用的是金属材料。这主要得益于金属材料具有良好的导电特性、磁学特性和热传导特性，其次还由于其具有明显的热胀冷缩的特性。这些特性与电子在材料中的运动状态有关，图 1-3 显示了这种状态。在金属材料中存在着自由电子，当将作为传感器的金属材料放到被测环境里，自由电子运动受到影响，于是导致了电量的输出和