

现代传感器技术



陈裕泉 李光 著

浙江大学出版社

现代传感器技术

陈裕泉 李 光 著

浙江大学出版社

内容简介

本书系统地论述了传感器(物理、化学和生物传感器)的基本原理、效应和典型的器件,特别注重微电子技术和新型功能材料所支撑的新型传感器的技术及发展。

全书共分为九章,第一章、第二章为绪论和传感器基本概念的特性指标及其评价的基本知识。第三章主要论述了现代传感器的技术的支撑和相关技术,即微电子技术和功能材料基础知识以使读者能对新型传感器和固态传感原理和发展有更为深入的理解。第四、第五、第六、第七章分别介绍了物理传感器、新传感器原理以及化学传感器和生物传感器的原理和发展。第八章介绍传感器智能和集成技术。其中传感器中运用人工智能、人工神经网络及微系统等新发展都有一定的介绍。第九章介绍了各种传感器在现代科技几大领域中的应用。第一、二、四、五、六、七、八章为陈裕泉选写,第三、九章为李光选写。张武明、潘敏、吴坚、刘伟庭、束焱等同志为本书资料收集和图例描绘做了大量工作。

本书可供仪器、仪表、生物医学工程、检测技术、自动化、计算机应用等有关专业的研究生,本科生和工程技术人员使用。特别是从事传感器研究、开发和应用的科技人员以及高等院校师生参考。

现代传感器技术

陈裕泉 李 光 著

责任编辑 楼纪放

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

德清第二印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

850×1168 32开 13.75印张 370千字

1995年2月第1版 1995年8月第2次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-308-01505-X/TP·113 定价: 14.00 元

序

人类已进入信息时代,如何真实而迅速地认识和处理各类信息以满足社会发展的需要是十分重要的,这其中捕捉和转换信息的器件就是传感器。作为信息时代的三大标志(即传感器、通讯和计算机技术),传感器首当其冲。但其发展相对较落后,已成为现代科技发展的瓶颈,引起了世界各国科技界的关注。因而 80 年代国际上掀起的传感器热至今方兴未艾。

传感器的种类繁多,涉及的学科非常广泛。它不但包括在信息电子技术领域内,而且和物理、化学、生物、医学、材料、机械、微细加工等许多学科密切相关。因而可以说传感器技术是科学技术的集成。因此人们常说“征服了传感器,就几乎等于征服了现代科技”。

“现代传感器技术”一书较系统地论述了当代传感器技术,内容很丰富。它包括了传感器的基本概念、特性评价和物理、化学、生物传感器的几大方面,作者在内容章节的编排上也作了精心考虑。本书既注重传感器的基本概念、原理、效应和典型器件的阐述,又引入了传感器的新发展的内容。特别是新型固态传感器、微系统和智能传感器的发展。本书还增设了和传感器密切相关的微电子、微细加工和功能材料的一些基本概念和内容,以加深读者对固态传感器的理解。本书最后还从应用系统的角度阐述了传感器几大领域中的应用,使原来多种不相干的传感器能在应用系统中获得关联,也有利于读者对本书内容的理解。

“现代传感器技术”一书不仅可作为相关专业的研究生、本科生的教学用书,同时也是研究、开发和应用传感器的科技人员的一本有用的参考书。

吕维雪

1994 年

目 录

第一章 绪论

- § 1.1 传感器和现代科技 (1)
- § 1.2 传感器的定义和分类 (3)
- § 1.3 传感器的构成 (5)
- § 1.4 传感器技术的发展趋势和方向 (11)

第二章 传感器特性与评价

- § 2.1 传感器的总特性 (14)
- § 2.2 传感器的静态特性 (16)
- § 2.3 传感器的动态特性 (19)
- § 2.4 传感器的误差和信噪比 (26)
- § 2.5 传感器的可靠性 (28)
- § 2.6 传感器的选择标准 (33)

第三章 现代传感器支撑技术

- § 3.1 光刻技术 (35)
- § 3.2 刻蚀 (41)
- § 3.3 半导体掺杂 (46)
- § 3.4 薄膜技术 (54)
- § 3.5 厚膜技术 (70)
- § 3.6 微电子焊接和封装技术 (85)
- § 3.7 功能材料 (96)

第四章 传感器的基本物理原理、效应和物理传感器元件

- § 4.1 概述 (108)

§ 4.2	光电效应和光电元件	(113)
§ 4.3	压电效应及压电材料	(140)
§ 4.4	压阻效应和压阻器件	(167)
§ 4.5	电磁效应和元件	(181)
§ 4.6	基本电参量,电阻,电容,电感传感原理	(202)
§ 4.7	弹性效应和弹性元件	(218)
第五章 新传感原理		
§ 5.1	光纤传感器	(239)
§ 5.2	声表面传感原理	(264)
第六章 化学传感器		
§ 6.1	气敏传感器	(282)
§ 6.2	电化学传感器	(302)
§ 6.3	固体电解质气体传感器	(331)
§ 6.4	湿敏传感器	(350)
第七章 生物传感器		
§ 7.1	生物体的分子识别能力和生物传感器分类	(360)
§ 7.2	固定化技术	(363)
§ 7.3	酶电极	(367)
§ 7.4	微生物传感器	(370)
§ 7.5	组织传感器	(374)
§ 7.6	免疫传感器	(378)
§ 7.7	利用生物反应光、热的传感器	(383)
第八章 传感器的集成化和智能化		
§ 8.1	智能化仪器系统	(388)
§ 8.2	智能化仪器典型功能	(390)
§ 8.3	传感器智能化的新进展	(407)
§ 8.4	集成微系统	(415)
第九章 传感器系统及应用		
§ 9.1	传感器系统的构成	(418)

§ 9.2	传感器在家用电器中的应用	(420)
§ 9.3	传感器在过程工业控制中的应用	(422)
§ 9.4	传感器在机器人的方面的应用	(423)
§ 9.5	传感器在汽车电子学中的应用	(426)
§ 9.6	传感器在医学中的应用	(429)
§ 9.7	传感器在其它方面的应用	(430)

第一章 绪 论

§ 1.1 传感器和现代科技

人类社会已进入了信息时代,传感器在信息技术系统中的地位十分重要。

信息技术是对外界(自然和社会的)信息进行采集、传输和处理来控制人们所需要的过程的技术。它所涉及的技术领域非常宽,其中包括微电子技术,传感器技术,通信技术,计算机技术,软件技术,材料技术等。但作为一个系统,其构成单元只有三个:

传感器,通信系统和计算机。

它们相当于人的“感官”、“神经”和“大脑”。

在一个自动化系统中,首先要能检测到信息,才能去进行自动控制,因此传感器首当其冲。如果传感器不能获得信息,或者获得的信息不确切,那么要把这些信息显示、处理就困难了,甚至没有意义了。没有感受信息的传感器,计算机就得不到任何信号,计算机的各种功能均无法发挥。为此传感器关系到一个测量系统的成败。

目前,传感器的应用领域已十分宽广,在国防、航空、航天、交通运输、能源、电力、机械、石油化工、轻工、纺织、……等工业部门 and 环境保护,生物医学工程方面都已采用了大量传感器,而且也已逐渐把传感器应用到办公用和家庭用的电器设备上了,如电饭锅、洗衣机、吸尘器、现金出纳机、自动门等等。这些都是借助传感器而实现自动化的。所以有人把传感器比作为“支撑现代文明的科学技术”,这就可以看出研究传感器的意义。

但传感器技术的重要性并不是一下子为人们所普遍认识。相应于计算机的发展已显得非常落后,其原因是多方面的。

从计算机发展的历史看,1945年第一台计算机研制成功后,计

计算机主要用于复杂的计算,对传感器没有什么要求。而当1975年第一代集成电路计算机问世以后,计算机开始在工业控制等领域显示出卓越的功能。此时作为检测信息用的传感器并没有经历计算机这样的发展过程。计算机处理信息的能力经过30多年的发展已日趋完善,因此到了80年代,国际上一时出现了“信息处理能力过剩,信息获取能力不足”的问题。为了解决这一问题,世界各国几乎在同一时期掀起了一股“传感器热”。美国学术界及产业界把传感器作为“80年代的技术”。在日本,把传感器技术列为六大核心技术之一(六大核心技术为:计算机、半导体、通信、激光、超导和传感器技术)。在美国的“空军2000年”报告中列举的15项有助于提高21世纪空军能力的关键技术项目,其中第2项重点项目就是传感器。我国在“八五”规划中也把发展传感器技术列为一级学科项目。因此开发各种新型的传感器已成为当前发展科学技术的主要课题之一。

传感器本身很小,但涉及面很广。传感器利用的原理包括了各种物理效应、化学反应、生物功能等等。传感器采用的材料可包括黑色金属、有色金属、稀土金属、工程塑料、半导体材料、陶瓷材料、高分子材料以及各种特殊材料(如压电材料、热电材料、恒弹性材料、高磁导率材料等)。从传感器工艺看又涉及到机械加工、电加工、化学加工、光学加工以及微细加工技术等。目前国际上如出现一种新材料、新元件或新工艺就会很快地应用于传感器,并研制出一种新的传感器。例如:半导体材料与工艺的发展,就出现了一批能测很多参数的半导体传感器,甚至包括放大器和执行器在内的微系统。大规模集成电路的成功,发展了有测量、运算、补偿、有用信号抽取等功能的智能传感器;生物技术的发展出现了利用生物功能的生物传感器。因此各学科的技术的发展,促进了传感器技术的不断发展,而各种新型传感器的问世又不断为各学科服务,促进了现代科技的发展。有的专家曾预言“人类征服了传感器技术就几乎等于征服了现代科学技术”。可见传感器技术在现代科技中的地位和作用是何等重要。

§ 1.2 传感器的定义和分类

传感器是获得信息的一种装置。其定义历来分广义和狭义两种提法。

广义：凡能感受外界信息并按一定规律转换成便于测量和控制的信息的装置。

狭义：只有将外界信息按一定规律转换成电量的装置才叫传感器。

传感器获取的信息可以为各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也可以有各种形式。从发展眼光看有些信息的测量和控制并不是一定要用电量的，而用其它形式如光可能更为方便。当然目前大部分传感器还是把外部信息转换为电量的。因为它与目前发展较成熟的电子信息技术和计算机技术更易配套，符合方便使用的原则。

以前有称传感器为“敏感元器件”，“传感元件”等，现在已明确提出“敏感元件”等是传感器的一部分，不能代替传感器的称呼。关于组成传感器的转换部分，历来称为“转换元件”，现也因考虑到技术的不断发展，该部分除转换功能外，还可以具有多一些的功能。因此称为“预处理单元”更为适宜，该定义更具有先进性。

传感器技术的范畴也有广义和狭义之分。

广义：既包括了传感器本身的制造与测试技术，又包括了为制造传感器而需要的相关技术及应用技术。

狭义：仅包括传感器本身的制造和测试技术。

传感器技术属于高技术范畴，又是一项新型技术，所涉及到的技术领域都较新，均有一定难度。为了有利于传感器技术的发展，我国对传感器技术的范畴定义是从广义着眼的。

传感器的种类繁多，所涉及的面非常广，几乎包括了现代所有的学科。其分类方法也有很多种。如按其变换原理分有电容式传感器，电感式传感器，压电式传感器等等。从传感器技术来分又有所谓结构型传感器和新型传感器两大类。结构型传感器是以构体（如金属膜

片)的变形或位移来检测被测量的,它们是60年代的先进技术。但随着技术的发展和新型传感器的出现,结构型传感器面临着新的挑战,将逐步被淘汰。新型传感器是相对于传统结构型传感器而言的,是指近些年出现的半导体类、陶瓷类、光纤类及其它新型材料的传感器。有时称为物性传感器。

新型传感器的基本特点为其基本特性与构成其敏感元件的核心材料的性能不可分割,即利用材料固有特性来实现对外界信息的检测。例如,利用材料在光照下改变特性可以制成光敏传感器;利用材料在磁场作用下改变其特性可以制成磁敏传感器等。材料在外界条件下改变其特性的现象,通常被描述为各种效应。从理论上说,各种效应均可能作为传感器的基础效应。由于直接利用了材料的各种效应,节省了各种转换环节,使敏感元件和转换元件结合为一体,因而实现了传感器的固体化,减小了体积,取消了可动部分,提高了可靠性。新型传感器又往往用微电子技术进行生产的,使之易于批量生产,一致性好,降低了生产成本。

通常又把传感器按其外界信息及变换效应分为三大类即物理传感器、化学传感器和生物传感器。

物理传感器是利用物理效应,处理光、声、磁等物理量,开发较早,因而也较成熟。其起导电作用的是电子,相对开发较容易。

化学传感器主要检测化学物质的种类和浓度,利用化学效应。其起导电作用的是离子。离子的种类很多,故化学传感器变化极多,较为复杂,相对开发难度也较大。

生物传感器是利用生物活性物质如分子、细胞甚至某些生物机体组织对某些物质特性的选择能力构成的传感器。如葡萄糖酶和氧电极结合形成的葡萄糖传感器。它的研究历史较短,但发展非常迅速,随着半导体技术,微电子技术和生物技术的发展,生物传感器的性能将进一步改善,多功能、集成化和智能化的生物传感器也将成为现实,前景十分美好。

§ 1.3 传感器的构成

传感器是把外界不同的物理量、化学量和生物量变换成容易处理的电量输出。传感器的构成形式有多种,有在变换中不需要加入能量的无源变换和需要加入能量的有源变换。其基本形式如图 1-1 所示,共分为六种。(a) 图是传感器最基本的构成,是仅有传感元件的最简单的一种,这种形式称为 P 型。如热电偶,可直接把被测热源变成电量,压电元件可把压力变成电荷;(b) 图是使用电源等动力源对传感器进行激励,从而得到输出信号,这种形式称为 A 型,如话筒把声音变成电量,差动变压器可把位移变成电量,它们都需要电源激励。有时采用磁铁来作为辅助能源的传感器称为 B 型,如磁电式转速传感器;(c) 图中传感元件随输入的信号而改变本身的阻抗特性,不加以改造是得不到输出信号的,必须设计包括传感元件在内的变换回路,并与动力源提供能源才能得到输出信号,这种形式称作 C 型传感器。如热敏电阻测量温度。

在大多数情况下,传感器特性受周围环境的影响,在这些影响不能忽略时,必须采取措施以消除这些影响。(d)(e),(f) 是一些有效的组成方法。在(d) 图中,使用两个原理和特性完全一样的传感元件,其中一个接受输入信号,另一个不接受输入信号,两个传感元件对环境特性变化是相同的。虚设一个传感元件目的在于抵消环境条件对接受输入信号的传感元件的影响,这种形式称为 D 型,大多需要动力源。如双延迟线的 SAW 传感器,两个延迟线特性完全一样,一条作为接受被测量的传感器,一条作为温度环境的补偿,从而消除测量中的温度影响。在(e) 图中是对输入信号都加到在原理和特性完全一样的两个传感器上,但在变换回路中,使传感元件的参数对输入信号进行反相变换,而对环境条件变化进行同相变换,从而抵消环境变化带来的影响,又增加了测量灵敏度,这种形式称为 E 型。如应变全桥电路测量力和应变。(f) 图中也使用两个传感元件,对其中一个传感元件加入输入信号,并预先了解环境条件对它的影响,对另一个传感

元件则加上能抵消环境对前者影响的补偿信号,这种称为 F 型传感器。如 pH 电极中设计有热敏电阻测温元件来补偿 pH 测量中的温度影响。此外还有一些混合型的,如利用霍尔效应制成的传感器,内部有功率源和辅助源,可以看成是 B 型和 A 型,或 B 型和 C 型的混合。

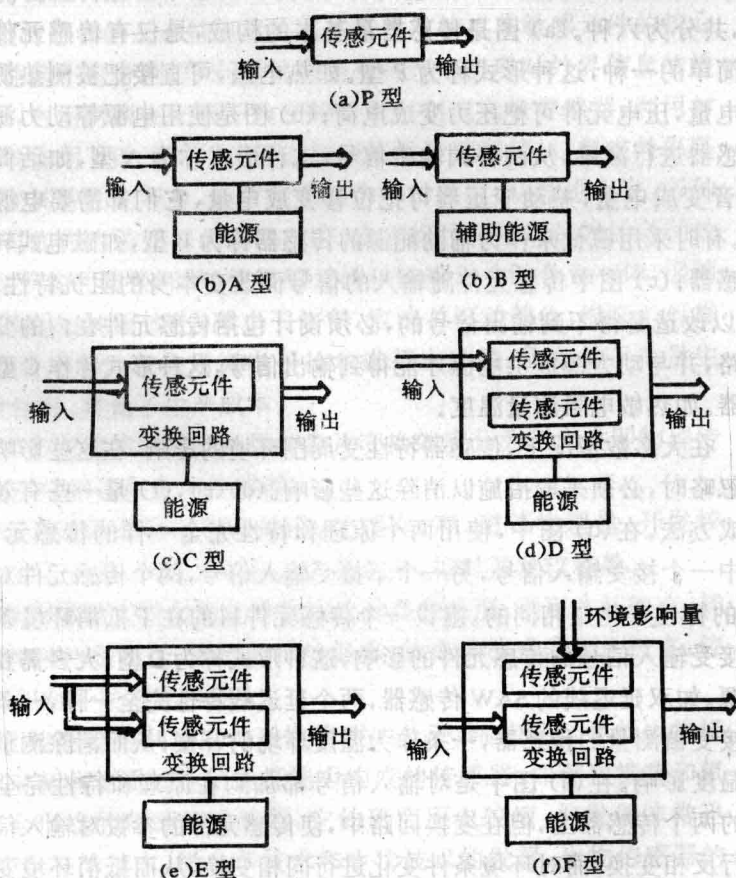


图 1-1 传感器的组成方法

在大多数情况下,传感器的输出为电量,但要把一些外界信息直接变换成为电量不是非常容易的,常要采取两级或两级以上的变换。这就增加了传感器设计的自由度以适应各种条件。容易变换成电量的量有位移、光、热(温度)等。由于位移测量用途很广,因此人们早就对位移传感器进行了种种研究,包括接触式和非接触式。光电器件和热电偶等也较成熟,运用方便。因此常常用作中间变换量。表 1.1 列举了利用位移,光,热等传感器所能测的物理量。

表 1.1 能用于中间变换的物理量

中间变换量	被测量
位移	力,压力,热
光	位移,转速,浓度
热	温度,电功率,真空度

其实,仅由一个传感元件构成的传感器是少有的,通常是把具有不同性能的元件结合起来构成传感器。另外被测量的种类很多,测量条件也是各种各样的,所以有的被测量用现有的传感元件不能直接检测,或虽然能检测,但由于经济条件或其它原因,实际检测比较困难。为此多数情况下所采取的方法是先把被测量变换为其它物理量,再选用能把这个物理量进行变换的传感元件进行再变换。例如压力传感器,虽然有压电元件能把压力直接变换为电压信号,但是由于绝缘电阻有限,在测量稳态或接近稳态的缓慢变化压力时,必须用到电荷放大器,而电荷放大器存在工作稳定性和S/N等问题变换较困难。往往选用弹性膜片先把压力变换为膜片位移,然后再用位移传感元件获得输出信号,也就是通过压力→弹性位移→电量的两级变换来进压力测量的,从广义上讲弹性膜片也是一种传感元件。这种起中间作用的变换元件叫作一次变换元件。

为了了解一次变换元件的有关性能,比较方便的办法是把可能进行变换的量与一次变换元件能输出的量和不能输出的量进行分

类。表 1.2 就是这种分类方法的一个例子。在表 1.2 中,纵向和横向分别按顺序列出各种被测量,两个量交叉的地方用类似矩阵元素 ij 来表示。如量 i 能变换为量 j ,则用 o 来表示;多数变换元件都能进行变换的用 $\odot$ 来表示;在原理上根本不可能进行变换的用 $\times$ 来表示;变换虽然可能但目前对该变换元件尚未开发出来,用空白表示。

表 1.2(a) 一次变换

输出 输入	位移形变	角位移	速度	角速度	加速度	质量	密度	力	力矩	压力	粘度	流速
位移,形变	$\odot$	$\odot$								o		
角位移	$\odot$	o										
速度			o						o			
角速度				o					o			
加速度	o		o									
质量		o		o		$\times$		o				
密度							$\times$			o		
力	o							o				
力矩	o							o	o			
压力	o							o	o	o		
粘度									o		$\times$	
流速	o									o		
流量				o						o		
体积						o						
浓度												
温度	o											
湿度	o											

表 1.2(a)(续)

输入 \ 输出	位移形变	角位移	速度	角速度	加速度	质量	密度	力	力矩	压力	粘度	流速
热	o											
电流								o				
电荷	o											
电压	o							o				
电极化												
电功率												
频率												
磁场强度												
磁通												
磁化												
光, 放射线												
光振幅												

表 1.2(b) 一次变换

输入 \ 输出	流量	体积	浓度	温度	湿度	热	电流	电荷	电压	电极化	电功率	频率	磁场强度	磁通	磁化	光, 放射线	光振幅
位移, 形变								o	o					o	o	o	
角位移																	
速度									o								
角速度																	
加速度																	

表 1.2(b)(续)

输入 \ 输出	流量	体积	浓度	温度	湿度	热	电流	电荷	电压	电极化	电功率	频率	磁场强度	磁通	磁化	光, 放射线	光振幅
质量																	
密度													o				
力									o			o					
力矩																	
压力																	
流速				o					o								
流量		o							o								
体积																	
浓度			×						o								
温度				×					o								
湿度				o	×												
热				o		×			o								
电流					o	o			o		o						
电荷								×	o								
电压					o			o	o			o					
电极化																	
电功率					o						×						
频率									o			o					
磁场强度														o			
磁通									o								
磁化															×		