



普通高等教育“十一五”规划教材

# 现代传感器原理及应用

陈裕泉 [美] 葛文勋 编著



科学出版社  
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

# 现代传感器原理及应用

陈裕泉 [美] 葛文勋 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书既注重传感器的基本原理和效应,又兼顾传感器的新发展,阐述了和传感器密切相关的传感器的主要支撑技术,如微纳技术、微细加工和传感器功能材料的一些基本概念和内容。主要内容包括:传感器特性与评价,传感器功能材料,微细加工技术,传感器的基本物理原理、效应和器件,物理传感器及主要物理量检测,化学传感器,生物传感器,传感器的集成化、智能化和网络化,传感器的系统集成,微机电系统发展的动向。

本书可供电子信息、仪器仪表、生物医学工程、测控技术、机电一体化、计算机应用等专业的本科生、研究生作为教材,也可供从事传感器研究、开发和应用的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代传感器原理及应用/陈裕泉,〔美〕葛文勋编著.——北京:科学出版社,2007

普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-03-019245-5

I. 现… II. ①陈…②葛… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 093310 号

责任编辑:马长芳 杨 然 / 责任校对:包志虹  
责任印制:张克忠 / 封面设计:卢秋红

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 8 月第一次印刷 印张: 29

印数: 1—3 000 字数: 550 000

定价: 37.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(明辉))

## 前 言

现代科技的发展日新月异，如集成电路、计算机、自动化控制、无线通信及国际互联网技术等，给我们带来了前所未有的生产的高效率、工作的便利和生活的享受。其中有一项技术对过去几十年的科技现代化发展起到了举足轻重的作用，这就是包括微传感器、微执行器和微细加工技术的微米科技。此项科技在美国和中国通常被称为“微电子机械系统”（MEMS），在日本被称作“微机械加工”，在欧洲被称作“微系统”或“微系统技术”。某些刊物中也称其为“微加工技术”。

打个比方，如果将集成电路和计算机比作人或动物的神经系统，具有逻辑分析和决策的功能，那么微电子机械系统的传感器和执行器就像身体的感觉器官和运动机构，可以摄取信息，传递意愿，对环境作出反应，从而协调身体机能，进行日常活动。集成化的计算和控制电路与微电子机械系统的结合，可以发展成为微型高效的自动控制 and 自动加工系统，以及智慧型的机器。它们可以成为有智慧的机器人、全自动的工厂；可以实现在耐用消费品、电子商务、环境保护和社会安全等领域所需要的功能，从而为我们的生活带来更多的便利和乐趣。

伴随着电子工程、机械工程、物理学及生物医学的发展和需求，传感器微电子机械系统技术将逐步地成熟起来，成为一个独立的，涉及生物、物理、化学、材料、工程学等领域的新学科。它们的应用也将延伸到自然科学、医疗、度量、通信、传媒、制造、管理、商务以及环保等众多领域。微电子机械系统技术的发展需要并依靠未来大量的工程技术和研究人员。现在的大专院校也急需训练这些未来的微机电工程师和研究人员。因此，本书的出版不但及时地为大专院校提供了教材，而且有助于微机电系统在中国的发展。

本书描述了传感器微电子机械系统的全貌，对传感器技术进行了全面的介绍，涵盖了传感器原理、材料、微加工技术、微传感器、微执行器、微系统集成及其重要的应用等内容。本书既注重传感器的基本概念、原理和效应以及典型器件的阐述，又引入了传感器新发展的内容。特别是引入了传感器微系统、智能传感器和网络传感器的新发展，以加深读者对传感器技术的理解，并为读者开拓了

此领域的新视野。它不仅是相关专业的研究生和本科生的良好的教材，也是从事传感器研究、开发和应用的科技人员的高质量的参考书。

对于一个高科技工程学科，微机电系统的工程人员必须对其有更深入的了解、更专精的知识和更丰富的实用经验。工程人员可以将此书作为微机电系统的基础学习材料，在选择具体方向后，更要勤奋研读更专业的书籍和大量文献资料，从实验和设计实践中培养微机电系统的专精知识、技能和经验，从而成为优秀的专业人才，以促进中国传感器微电子机械系统未来的发展和繁荣。

本书在编写过程中，方向生、朱丹华、惠国华、吴莉莉、杨昊、陈大竞、杨笑鹤等同志为本书材料的收集、整理和编写做了大量工作，特此感谢。

苗文勤  
2006.12.6.

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 传感器和现代科技 .....	1
1.2 传感器的定义和分类 .....	2
1.3 传感器的构成 .....	4
1.4 传感器技术的发展趋势和方向 .....	8
<b>第 2 章 传感器特性与评价</b> .....	10
2.1 传感器的总特性 .....	10
2.2 传感器的静态特性 .....	11
2.3 传感器的动态特性 .....	14
2.3.1 频率特性及其动态品质之间的关系 .....	14
2.3.2 时域响应特性和动态品质指标 .....	17
2.4 传感器的误差和信噪比 .....	19
2.5 传感器的可靠性 .....	21
2.6 传感器的选择标准 .....	25
<b>第 3 章 传感器功能材料</b> .....	27
3.1 功能材料的特点与分类及其和传感器的关系 .....	27
3.1.1 功能材料的发展 .....	27
3.1.2 功能材料的特点与分类 .....	28
3.1.3 功能材料与传感器的关系 .....	28
3.2 半导体材料 .....	29
3.2.1 半导体材料的特性 .....	29
3.2.2 半导体材料的分类 .....	30
3.2.3 半导体硅材料 .....	32
3.2.4 半导体材料在传感器中的应用 .....	35
3.3 功能陶瓷材料 .....	36
3.3.1 压电陶瓷 .....	37
3.3.2 热释电陶瓷 .....	39
3.3.3 固体电解质陶瓷材料 .....	40

3.3.4	半导体陶瓷材料	40
3.3.5	功能陶瓷材料在传感器中的应用	43
3.4	功能高分子材料	43
3.4.1	导电高分子材料	44
3.4.2	压电和热电高分子材料	45
3.4.3	高分子化学敏感材料	45
3.4.4	反应型高分子材料	45
3.4.5	光敏高分子材料	46
3.4.6	生物医用高分子材料	47
3.4.7	功能高分子材料在传感器中的应用	48
3.5	功能材料纳米结构和纳米碳管	49
3.5.1	纳米材料的结构	50
3.5.2	纳米材料的特性	50
3.5.3	纳米材料的制备	52
3.5.4	纳米碳管	53
3.5.5	纳米材料在传感器中的应用	56
<b>第4章</b>	<b>微细加工技术</b>	<b>58</b>
4.1	微细加工技术和传感器的发展	58
4.2	光刻技术	58
4.2.1	光刻工艺流程	59
4.2.2	光学光刻技术	60
4.2.3	电子束光刻技术	63
4.2.4	X射线光刻技术	64
4.2.5	离子束光刻技术	65
4.3	蚀刻技术	66
4.3.1	湿法蚀刻	66
4.3.2	干法蚀刻	74
4.4	半导体掺杂	83
4.4.1	扩散	83
4.4.2	离子注入	86
4.5	薄膜技术	88
4.5.1	化学气相淀积技术	88
4.5.2	硅的热氧化制膜技术	91
4.5.3	真空蒸发镀膜技术	93

4.5.4 离子溅射镀膜技术 .....	94
4.6 厚膜技术 .....	95
4.6.1 概述 .....	95
4.6.2 厚膜材料 .....	97
4.6.3 丝网印刷及其他成膜技术 .....	100
4.6.4 厚膜烧结 .....	104
4.6.5 厚膜元件的参数微调 .....	105
4.7 软光刻技术 .....	106
4.7.1 概述 .....	106
4.7.2 软光刻应用领域 .....	108
4.7.3 软光刻的关键技术 .....	109
4.7.4 应用举例 .....	113
4.7.5 展望 .....	116
4.8 传感器封装技术 .....	116
4.8.1 微电子连接技术 .....	117
4.8.2 黏接技术 .....	120
4.8.3 新连接技术 .....	121
4.8.4 封接技术 .....	124
<b>第5章 传感器的基本物理原理、效应和器件 .....</b>	<b>127</b>
5.1 基本型传感器 .....	127
5.2 组合型传感器 .....	130
5.3 光传感器 .....	130
5.3.1 光电效应 .....	130
5.3.2 几种主要的光传感器 .....	133
5.3.3 光电器件的基本特性 .....	140
5.4 压电效应及压电材料 .....	144
5.4.1 压电效应 .....	144
5.4.2 压电材料 .....	144
5.4.3 压电传感器的等效电路和测量电路 .....	153
5.4.4 压电式传感器的应用 .....	155
5.5 压阻效应和压阻器件 .....	156
5.5.1 压阻效应 .....	156
5.5.2 晶面晶向的表示方法 .....	157
5.5.3 压阻系数 .....	159



5.5.4	固态压阻器件 .....	163
5.6	电磁效应和电磁元件 .....	166
5.6.1	霍尔效应和元件 .....	166
5.6.2	磁阻效应和元件 .....	169
5.6.3	磁敏晶体管 .....	172
5.7	基本电参量——电阻、电容、电感传感原理 .....	176
5.7.1	电阻传感器 .....	176
5.7.2	电容传感原理 .....	179
5.8	弹性效应和弹性元件 .....	180
5.8.1	弹性敏感元件的基本特性 .....	181
5.8.2	弹性敏感元件的材料 .....	186
<b>第6章</b>	<b>物理传感器及主要物理量检测</b> .....	<b>189</b>
6.1	温度传感器 .....	189
6.2	压力传感器 .....	190
6.3	流量传感器 .....	191
6.4	位移传感器 .....	192
6.5	速度传感器 .....	194
6.6	加速度传感器 .....	194
6.6.1	硅微电容式加速度传感器 .....	195
6.6.2	硅微光波导加速度传感器 .....	195
6.6.3	硅微压阻式加速度传感器 .....	196
6.7	新型传感器 .....	196
6.7.1	光纤传感器 .....	196
6.7.2	表面声波传感器原理 .....	208
<b>第7章</b>	<b>化学传感器</b> .....	<b>215</b>
7.1	电化学基本原理 .....	215
7.1.1	电解质溶液 .....	215
7.1.2	电极电位和原电池电动势 .....	218
7.2	离子选择性电极 .....	225
7.2.1	离子选择性电极的响应机理 .....	225
7.2.2	离子选择电极 .....	227
7.2.3	离子敏感场效应晶体管 .....	231
7.2.4	电化学气体传感器 .....	232
7.3	气敏传感器 .....	239

---

7.3.1	氧化物半导体特性	239
7.3.2	半导体气敏原理	244
7.3.3	典型气敏传感器	248
7.4	固态电解质传感器	262
7.4.1	无机固态电解质气体传感器	262
7.4.2	高聚物固体电解质气体传感器	272
7.5	湿敏传感器	277
7.5.1	湿度及其表示方法	277
7.5.2	陶瓷湿敏传感器	279
7.5.3	电解质湿敏传感器	281
7.5.4	高分子湿敏传感器	282
7.5.5	纳米多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 湿度传感器	283
7.6	电化学联用传感器	284
7.6.1	液相色谱/毛细管电泳-电化学传感器	284
7.6.2	光谱电化学联用传感器	285
7.6.3	石英晶体微天平——电化学系统	286
7.6.4	扫描电化学显微镜	287
7.6.5	电化学扫描隧道显微镜	288
7.6.6	电化学原子力显微镜	290
<b>第8章</b>	<b>生物传感器</b>	<b>292</b>
8.1	生物体分子识别能力和生物传感器机理	292
8.2	生物组分固定化技术	294
8.3	酶电极生物传感器	299
8.4	免疫传感器	304
8.4.1	抗原抗体的分子识别	304
8.4.2	电化学免疫传感器	304
8.4.3	光学免疫传感器	310
8.4.4	压电晶体免疫传感器	314
8.4.5	光酶免疫传感器和热免疫传感器	315
8.5	其他生物传感器	318
8.5.1	微生物传感器	318
8.5.2	组织传感器	321
8.5.3	磁性生物传感器	324
8.5.4	水溶性导电高分子生物传感器	324

8.6	生物芯片 .....	327
8.6.1	概述 .....	327
8.6.2	生物芯片的分类 .....	328
8.6.3	核酸芯片 .....	329
8.6.4	蛋白质芯片 .....	334
8.6.5	组织芯片 .....	337
<b>第9章</b>	<b>传感器的集成化、智能化和网络化</b> .....	<b>339</b>
9.1	智能传感器仪器系统概述 .....	339
9.1.1	传感器智能化发展 .....	339
9.1.2	智能化仪器系统 .....	340
9.2	传感器信号采集和传输 .....	342
9.2.1	信号采集 .....	342
9.2.2	信号传输 .....	342
9.3	传感器信号处理 .....	348
9.3.1	传感器数据融合 .....	349
9.3.2	传感器故障诊断 .....	351
9.4	传感器特征抽取辨识和智能化新进展 .....	352
9.4.1	小波变换 .....	352
9.4.2	人工神经网络 .....	354
9.4.3	随机共振 .....	358
9.4.4	盲源分离 .....	363
9.5	集成微系统和智能传感器 .....	368
9.5.1	集成微系统概念 .....	368
9.5.2	智能传感器 .....	369
9.6	传感器网络 .....	373
9.6.1	概念 .....	373
9.6.2	基本要素 .....	373
9.6.3	传感器网络的发展历史 .....	373
9.6.4	传感器网络的意义 .....	374
9.6.5	无线传感器网络的结构、特点及性能评价 .....	375
9.6.6	智能尘埃 (smart dust) .....	385
<b>第10章</b>	<b>传感器的系统集成</b> .....	<b>394</b>
10.1	传感器信号的标准化处理 .....	394
10.1.1	传感器信号调理 .....	395

---

10.1.2	传感器信号预处理	397
10.1.3	抗干扰设计	399
10.1.4	微弱信号提取	401
10.2	模-数转换器	403
10.3	嵌入式系统	409
10.3.1	嵌入式系统定义	409
10.3.2	嵌入式系统软件平台	415
10.3.3	嵌入式系统硬件平台	418
10.4	传感器的应用	424
10.4.1	传感器在汽车电子方面的应用	424
10.4.2	传感器在现代工厂化农业中的应用	425
10.4.3	传感器在过程工业控制中的应用	428
10.4.4	传感器在生物医学中的应用	429
10.4.5	传感器在机器人方面的应用	430
<b>第 11 章</b>	<b>微机电系统发展的动向</b>	<b>439</b>
11.1	历史回顾	439
11.2	发展趋势	443
	<b>参考文献</b>	<b>449</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 传感器和现代科技

人通过眼（视觉）、耳（听觉）、鼻（嗅觉）、舌（味觉）、皮肤（触觉）五种器官来感知与接收外界信号，并将这些信号通过神经传递给大脑，从而感知外界事物与信息。大脑处理信号后将执行命令通过神经传给大脑以指挥人的行为。人的五官就是人类感知外界的器官，是一种特殊的传感器。人类在认识和改造自然的过程中意识到仅靠天然的五官获取信息还远不够，便不断创造劳动工具，传感器及测量系统的产生就是这种发展中的一环。

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。

信息技术是通过人们对外界（自然和社会的）信息进行采集、传输和处理来反映控制所需的过程的技术。它涉及的技术领域非常宽广，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。但作为一个信息技术系统，其构成单元只有三个，即传感器、通信系统和计算机，它们相当于人的“感官”、“神经”和“大脑”，已被人们称为信息技术的三大支柱。

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。如果传感器不能获取信息，或者获得的信息不确切，那么要显示这些信息并对其进行处理就十分困难，甚至没有意义。如果没有感受信息的传感器，计算机就得不到任何信号，计算机的各种功能也就无法发挥。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、纺织等工业部门和环境保护、生物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。在现代农业发展和工厂化农业的实现过程中也运用了大量传感器技术，所以有人把传感器比作“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便为人们所普遍认识的，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来看，1945 年第一台计算机研制成功后，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20世纪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”风潮。美国学术界及产业界把传感器作为“80年代的技术”。日本把传感器技术列为六大核心技术计算机、半导体、通信、激光、超导和传感器技术之一。美国“空军2000”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中,第二项重点项目就是传感器。我国在多个五年规划中都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。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、高分子材料及各种特殊材料(如压电材料、热电材料、半导体材料、恒弹性材料、高磁导率材料,甚至到DNA和生物材料等)。从传感器工艺来看,又涉及机械加工、电加工、化学加工、光学加工及微细加工技术等。目前国际上出现的新功能敏感材料、新元件或新工艺会很快地应用于传感器,并研制出相应的新的传感器。例如,随着半导体材料与工艺的发展,就出现了一批能检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。

随着大规模集成电路的成功发展,出现了有测量、运算、补偿、有用信号抽取等功能的智能传感器;随着生物技术的发展,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,又促进了现代科技的发展。有专家预言,“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 and 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,其定义可分为广义和狭义两种。广义定义的传感器指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;狭义定义的传感器指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。从发展的眼光看,有些信息的测量和控制并不是一定要用电量的,而用其他形式,如光可能更为方便。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。

以前曾称传感器为“敏感元器件”、“传感元件”等，现在已明确提出“敏感元件”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”，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，因此称其为预处理单元更为适宜，该定义更具有先进性。对于英语中“transducer”和“sensor”两个词汇，在中文中均应译为“传感器”。

传感器技术的范畴也有广义和狭义之分。广义既包括传感器本身的制造与测试技术，又包括为制作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，几乎包括现代所有的学科，其分类方法也有很多种。按传感器变换原理分为电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器等；按传感器技术来分又有结构型传感器和新型传感器两大类。结构型传感器是以结构体（如金属膜片）的变形或位移来检测被测量的，它们是20世纪60年代发展起来的先进技术。但随着技术的发展和新型传感器的不断出现，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、光纤类及其他新型材料的传感器。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其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，利于实现传感器的固化，减小了体积，取消了可动部分，提高了可靠性。新型传感器又往往采用微电子技术进行生产，易于批量生产，一致性好，生产成本低。

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。其中起导电作用的是电子，相对开发较容易。

化学传感器主要利用化学效应检测化学物质的种类和浓度。其中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，如葡萄糖和微电极结合形成的葡萄糖传感器。生物传感器的研究历史较短，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，它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并输出。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，共分为七种。图 1-1 (a) 是传感器最基本的构成形式，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。图 1-1 (b)

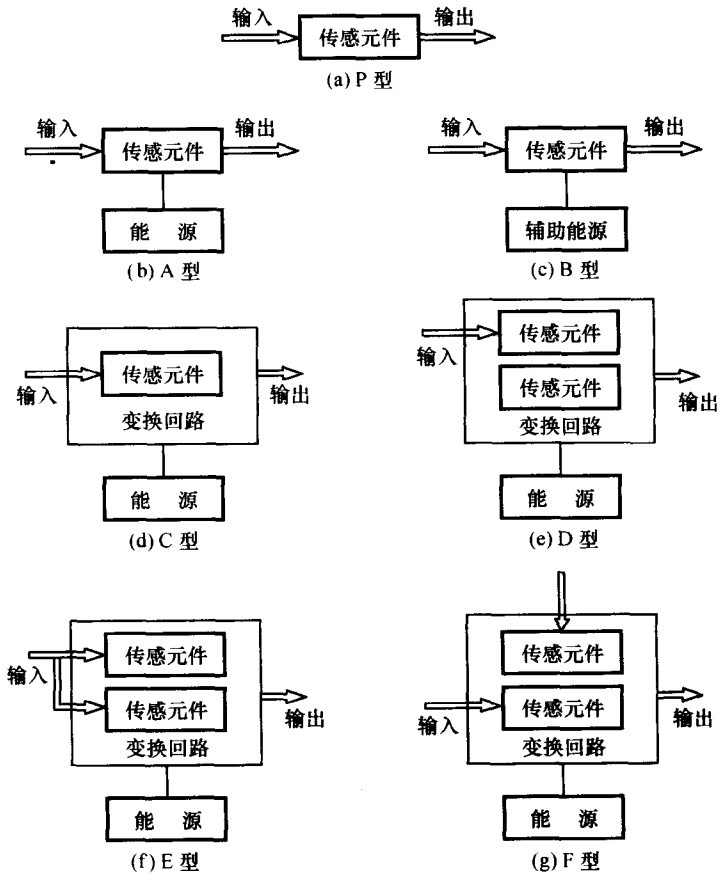


图 1-1 传感器的组成方法



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 型传感器，如话筒中驻极体可把声音变成电量，差动变压器可把位移变成电量，它们都需要电源激励。有时采用磁铁作为辅助能源，将这种传感器称为 B 型传感器 [图 1-1 (c)]，如磁电式转速传感器。图 1-1 (d) 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，并将动力源提高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需把热敏电阻设计成桥路检测。

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。图 1-1 (e)、(f)、(g) 是一些有效的组成方法。在图 1-1 (e) 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的特性变化是不同的。虚设一个传感元件的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 型传感器，大多需要动力源。如双延迟线的声表面波 (SAW) 传感器，两条延迟线特性完全一样，一条作为接受被测量的传感器，另一条作为温度环境的补偿，从而消除测量中的温度影响。在图 1-1 (f) 中将输入信号都加到在原理和特性完全一样的两个传感器上，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 型传感器，如应变全桥电路测量力和应变。图 1-1 (g) 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，这种形式称为 F 型传感器，如 pH 电极中用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。

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是很不容易的，常要采取两级或两级以上的变化，这就增加了传感器涉及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各种研究，包括接触式和非接触式。光电器件和热电偶等也较为成熟，因此常常用作中间变换量。表 1-1 列举了利用位移、光、热等传感器所能测量的物理量。

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、真空管