



普通高等教育“十二五”规划教材

传感器 敏感材料及器件

SENSITIVE MATERIALS AND SENSING DEVICES

赵勇 王琦 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

传感器敏感材料与器件

赵勇 王琦 编著



机械工业出版社

前 言

自 20 世纪末人类进入信息社会以来,人们的一切活动都是以信息获取与信息交换为中心,作为信息技术的基础与两大支柱之一的传感器技术也进入高速发展的新时期。传感器是构成信息系统、自动化系统、通信系统的基础,在人们的日常生活、学习、医疗、科研、工业、农业、商业、交通运输,甚至在军事斗争中,传感器的应用已经无所不在。

在传感器技术领域,毫无疑问,敏感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。可以看到,新型的敏感材料的发展,特别是半导体、特种陶瓷、特种聚合物、光纤、生物膜等敏感材料的开发,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。

目前,传感器的应用越来越广泛,所涉及的敏感材料与器件越来越多,但系统、全面、深入地介绍敏感材料与器件的书籍较少,远不能满足教学与科研发展的需要。为此,作者将多年来从事敏感材料与器件的科研和教学成果进行整理,并参考大量国内外传感器技术的新成果与新技术,撰写了本书,以奉献给广大读者,满足大家学习现代传感器技术的愿望。

本书共 10 章,各章的内容如下:第 1 章绪论,介绍敏感材料的定义与类别、信息感测,以及传感器的定义与分类;第 2 章温度敏感材料与器件,论述温度敏感材料的分类、热学性能与换能特性,以及各种温度敏感器件的工作原理与应用;第 3 章湿度敏感材料与器件,论述湿度敏感材料的换能特性与分类,以及各种湿敏传感器的工作原理与应用;第 4 章力(声)敏材料与器件,论述力(声)学性能与换能特性,以及压力、应变传感器、运动量力敏传感器及其应用等内容;第 5 章生物敏感材料与器件,论述生物化学敏感材料换能特性与分类,以及酶敏感材料及传感器、免疫敏感材料及传感器、微生物和细胞组织传感器、离子选择电化学敏感材料及传感器;第 6 章磁场敏感材料与器件,论述磁场敏感材料的换能特性与分类、霍尔传感材料及传感器、半导体磁阻材料及传感器、铁磁性金属薄膜磁阻材料及传感器、巨磁阻材料及传感器、磁敏二极管和晶体管、磁致伸缩材料及传感器等;第 7 章光学敏感材料与器件,论述光学敏感材料的换能特性与分类、IV 族光敏材料、III-V 族化合物光敏材料、II-VI 族化合物光敏材料、IV-VI 族化合物光敏材料等;第 8 章气体敏感材料与器件,论述几种常见气体敏感材料、器件及其在气敏传感器中的应用情况;第 9 章几种新型的敏感材料与器件,论述光纤、光子晶体、光子晶体光纤、聚合物光纤以及磁流体等新型传感器的敏感材料与器件的特性与应用;第 10 章传感器敏感材料发展展望,论述敏感材料与器件的未来发展与展望。

在本书出版之际,感谢东北大学信息科学与工程学院自动化仪表研究所各位老师及研究生为本书做的工作。感谢沈阳师范大学物理学院高朋老师、沈阳工程学院张玉艳老师为本书编写了部分章节内容。本书在编写过程中,参考了兄弟院校、院所的教材及文献资料,收集了大量有关敏感材料与传感器方面的专著,在此表示衷心的感谢。由于水平有限,书中难

免存有谬误，敬请读者指正。

本书可以作为高等院校精密仪器、传感器技术、测控技术及仪器、检测技术、敏感材料等专业学生的教材，也可作为相关专业工程技术人员的参考资料。

作 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 敏感材料的定义与类别	2
1.2.1 敏感材料的定义	2
1.2.2 敏感材料的类别	3
1.3 传感器敏感材料与信息感测	5
1.3.1 信息传感与能量转换	5
1.3.2 敏感材料的信息感测	6
1.4 传感器的定义与分类	6
1.4.1 传感器的定义	6
1.4.2 传感器的构成	7
1.4.3 传感器的分类	8
参考文献	10
第2章 温度敏感材料与器件	11
2.1 温度敏感材料的分类及热学性能与换能特性	11
2.2 电阻式温度传感器	12
2.2.1 金属电阻式温度传感器的工作原理	13
2.2.2 铂电阻温度计	15
2.2.3 铜电阻温度计	16
2.2.4 镍、钨、锰、碳等热电阻	16
2.2.5 热敏电阻	16
2.2.6 热电阻的测量电路	17
2.2.7 电阻式温度传感器的典型应用	18
2.3 半导体热敏传感器	18
2.3.1 热敏二极管	19
2.3.2 热敏晶体管	20
2.3.3 集成温度传感器	21
2.4 红外温度传感器	21
2.4.1 红外探测器	22
2.4.2 红外探测器的主要性能参数	23
2.4.3 红外探测器使用中应注意的问题	24
2.4.4 红外测温原理及测温仪	25
2.5 热电敏感材料及传感器	26
2.5.1 热电偶的工作原理	26
2.5.2 热电极材料及常用热电偶	28
2.5.3 热电偶的结构	28

2.5.4 热电偶的连接及温度补偿	28
2.5.5 热电偶的应用举例	31
2.6 双金属片式温度传感器	31
2.7 压力式温度传感器	32
2.8 示温涂料温度传感器	32
2.9 石英热敏传感器	33
小结	34
参考文献	34
第3章 湿度敏感材料与器件	35
3.1 湿度敏感材料的换能特性与分类	35
3.1.1 湿度的定义	35
3.1.2 传感器感湿特性参数	36
3.1.3 湿度测定原理	37
3.1.4 叉指换能器	38
3.1.5 湿敏材料的分类	40
3.2 电解质湿敏传感器	41
3.2.1 电解质感湿机理	41
3.2.2 氯化锂电解质	42
3.2.3 氯化锂电解质湿敏传感器	43
3.2.4 电解质湿敏传感器的典型应用	44
3.3 金属氧化物陶瓷湿敏传感器	45
3.3.1 氧化铁湿敏传感器	45
3.3.2 氧化锡和氧化钛湿敏传感器	45
3.3.3 多孔氧化物薄膜和陶瓷湿敏传感器	46
3.3.4 金属氧化物陶瓷湿敏传感器的典型应用	48
3.4 有机高分子湿敏传感器	49
3.4.1 电容式湿敏传感器	49
3.4.2 电阻式湿敏传感器	50
3.4.3 有机高分子湿敏传感器举例	50
3.5 压电湿敏传感器	51
3.6 光纤湿敏传感器	52
3.6.1 法布里-珀罗腔湿敏传感器	53
3.6.2 渐逝波光纤耦合器湿敏传感器	54
3.6.3 长周期光纤光栅湿敏传感器	55
3.6.4 光纤布喇格光栅湿敏传感器	56
小结	57
参考文献	58
第4章 力(声)敏材料与器件	59
4.1 力(声)学性能与换能特性	59
4.1.1 力学性能	59
4.1.2 换能特性	60
4.1.3 声学性能与换能特性	62
4.1.4 力(声)敏传感器分类	64

4.2 压力、应变传感器	66
4.2.1 压力的定义	66
4.2.2 应变片式力敏传感器	67
4.2.3 电容式力敏传感器	70
4.2.4 压电式力敏传感器	74
4.2.5 霍尔式力敏传感器	77
4.3 运动量力敏传感器	78
4.3.1 流量传感器	78
4.3.2 加速度传感器	80
4.3.3 位置、位移传感器	84
4.4 普通声敏传感器	85
4.4.1 炭粒送话器	86
4.4.2 动圈式送话器	86
4.4.3 电容式送话器	86
4.4.4 压电陶瓷送话器	87
4.4.5 压电陶瓷受话器	88
4.5 次声传感器和水声换能器	89
4.5.1 次声传感器	89
4.5.2 水声换能器	90
4.6 超声传感器	93
小结	98
参考文献	98
第5章 生物敏感材料与器件	99
5.1 生物化学敏感材料的换能特性与分类	99
5.1.1 生物敏感材料的换能特性及其分类	99
5.1.2 化学敏感材料的换能特性及其分类	105
5.2 酶敏感材料及传感器	106
5.2.1 酶电极传感器的工作原理及分类	107
5.2.2 酶传感器的典型应用	108
5.3 免疫敏感材料及传感器	110
5.3.1 免疫传感器的结构与分类	110
5.3.2 免疫传感器的典型应用	113
5.3.3 免疫传感器的发展趋势	115
5.4 微生物和细胞组织传感器	115
5.4.1 微生物传感器	115
5.4.2 细胞传感器	117
5.4.3 组织传感器	118
5.4.4 基因传感器	119
5.4.5 光导管生物传感器和生物电子学传感器	121
5.4.6 微生物和细胞组织传感器的典型应用	124
5.5 离子选择电化学敏感材料及传感器	125
5.5.1 电极反应与电极电位	125
5.5.2 离子选择电化学敏感材料的分类	126

5.5.3 原电极	127
5.5.4 敏化电极	136
5.5.5 离子敏感性场效应晶体管	139
小结	142
参考文献	143
第6章 磁场敏感材料与器件	145
6.1 磁场敏感材料的换能特性与分类	145
6.1.1 磁场敏感材料的换能特性	145
6.1.2 磁场敏感材料的分类	145
6.2 霍尔敏感材料及传感器	145
6.2.1 霍尔效应	146
6.2.2 半导体霍尔敏感材料与器件	147
6.2.3 霍尔器件的主要参数	150
6.2.4 霍尔敏感材料传感器	151
6.3 半导体磁阻材料及传感器	152
6.3.1 半导体的磁阻效应	152
6.3.2 半导体磁阻材料与器件	154
6.3.3 半导体磁阻器件的基本特性与性能参数	157
6.3.4 半导体磁阻器件传感器	159
6.4 铁磁性金属薄膜磁阻材料及传感器	160
6.4.1 铁磁性金属薄膜材料的各向异性磁阻效应	160
6.4.2 铁磁性金属薄膜材料及磁阻器件制造工艺	160
6.4.3 铁磁性金属薄膜磁阻器件的结构与工作原理	161
6.4.4 铁磁性金属薄膜磁阻器件的技术参数及特点	162
6.4.5 铁磁性金属薄膜磁阻器件传感器	163
6.5 巨磁阻材料及传感器	163
6.5.1 巨磁阻效应及相关材料	163
6.5.2 巨磁阻效应器件传感器	166
6.6 磁敏二极管和磁敏晶体管	167
6.6.1 磁敏二极管	167
6.6.2 磁敏晶体管	172
6.6.3 磁敏晶体管传感器	178
6.7 磁致伸缩材料及传感器	179
6.7.1 磁致伸缩效应	179
6.7.2 磁致伸缩材料	179
6.7.3 磁致伸缩材料传感器	182
6.8 其他磁敏器件	183
6.8.1 韦根德磁敏器件	183
6.8.2 磁敏 Z 元件	185
6.8.3 超导量子干涉器件	187
6.8.4 磁通门磁敏传感器	189
小结	190
参考文献	190

第7章 光学敏感材料与器件	192
7.1 光学敏感材料的换能特性与分类	192
7.1.1 光学敏感材料的换能特性	192
7.1.2 光学敏感材料的分类	194
7.2 IV族光敏材料	195
7.2.1 锗光敏材料	195
7.2.2 硅光敏材料	198
7.3 III-V族化合物光敏材料	201
7.3.1 III-V族化合物的结构与性质	202
7.3.2 砷化镓光敏材料	204
7.4 II-VI族化合物光敏材料	206
7.4.1 硫化锌光敏材料	207
7.4.2 硫化镉光敏材料	210
7.5 IV-VI族化合物光敏材料	214
7.5.1 铅的硫属化合物	214
7.5.2 铅锡硫属化合物合金	217
7.6 有机光折变材料	218
7.6.1 光折变材料的分类	218
7.6.2 有机光折变材料的分类及特点	219
7.7 结型光敏器件	222
7.7.1 结型光敏器件的工作原理	222
7.7.2 硅光电池	224
7.7.3 硅光敏二极管和硅光敏晶体管	227
7.7.4 结型光敏器件的放大电路	232
7.7.5 特殊结型光敏二极管	233
7.7.6 结型光敏器件的典型应用——光耦合器件	237
7.8 光电导器件	239
7.8.1 光敏电阻的工作原理	239
7.8.2 光敏电阻的主要特性参数	241
7.8.3 光敏电阻的偏置电路和噪声	247
7.8.4 光敏电阻的特点和典型应用	248
7.9 真空光敏器件	250
7.9.1 光电阴极	250
7.9.2 光电管与光电倍增管	252
7.9.3 光电倍增管的主要特性参数	255
7.9.4 光电倍增管的供电和信号输出电路	258
7.9.5 光电倍增管的典型应用	262
小结	264
参考文献	264
第8章 气体敏感材料与器件	265
8.1 气体敏感材料的换能特性与分类	265
8.2 半导体气敏材料、器件及典型应用	266
8.2.1 半导体气敏材料的敏感机理	267

8.2.2 半导体气敏材料的合成方法·····	268
8.2.3 半导体气敏材料的表征技术·····	270
8.2.4 提高半导体气敏器件检测能力的有效途径·····	271
8.2.5 半导体气敏器件的测量方法·····	273
8.2.6 半导体气敏器件应用中的关键问题·····	273
8.2.7 半导体气敏材料在气敏传感器中的典型应用·····	274
8.2.8 半导体气敏材料的研究趋势·····	276
8.3 电解质气敏材料、器件及典型应用·····	277
8.3.1 定电位电解式气敏传感器·····	278
8.3.2 伽伐尼电池式传感器·····	278
8.3.3 固体电解质气敏传感器·····	278
8.4 压电材料、器件及典型应用·····	282
8.4.1 压电石英晶体的传感特性·····	283
8.4.2 化学涂层物质的选择·····	284
8.4.3 外界干扰的影响及消除方法·····	285
8.4.4 压电材料在气敏传感器中的典型应用·····	285
8.4.5 压电式气敏传感器的研究趋势·····	288
8.5 碳纳米管气敏材料、器件及典型应用·····	288
8.5.1 碳纳米管的结构·····	289
8.5.2 吸附原理·····	290
8.5.3 单壁碳纳米管气敏传感器·····	292
8.5.4 多壁碳纳米管气敏传感器·····	293
8.5.5 碳纳米管气敏传感器的功能化修饰·····	294
8.5.6 碳纳米管在气敏传感器中的典型应用·····	296
8.6 其他气敏器件·····	297
8.6.1 红外线气敏器件·····	297
8.6.2 电阻式气敏器件·····	297
8.6.3 接触燃烧式气敏器件·····	298
8.6.4 热导率变化式气敏器件·····	298
8.6.5 MOS 场效应晶体管气敏器件·····	299
小结·····	299
参考文献·····	300
第9章 几种新型的敏感材料与器件 ·····	305
9.1 引言·····	305
9.2 光纤及传感器·····	305
9.2.1 光纤·····	305
9.2.2 光纤传感器·····	310
9.2.3 光纤光栅传感器·····	314
9.2.4 光纤传感器的典型应用·····	319
9.3 光子晶体及传感器·····	325
9.3.1 光子晶体及其特性·····	325
9.3.2 光子晶体传感器·····	329
9.3.3 光子晶体传感器的典型应用·····	330

9.4 光子晶体光纤及传感器	332
9.4.1 光子晶体光纤	333
9.4.2 光子晶体光纤传感器	337
9.4.3 光子晶体光纤传感器的典型应用	339
9.5 聚合物光纤及传感器	341
9.5.1 聚合物光纤	342
9.5.2 聚合物光纤传感器	344
9.5.3 聚合物光纤传感器的典型应用	349
9.6 磁流体及传感器	351
9.6.1 磁流体的特性	351
9.6.2 磁流体传感器	359
9.6.3 磁流体传感器的典型应用	364
9.7 液晶及传感器	366
9.7.1 液晶	366
9.7.2 液晶传感器	372
9.7.3 液晶传感器的典型应用	374
小结	376
参考文献	378
第10章 传感器敏感材料发展展望	381
10.1 敏感材料发展概述	381
10.2 敏感材料发展展望	382
10.3 基于敏感材料的器件发展展望	387
参考文献	389

第1章 绪论

1.1 引言

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）。然而，为了更深入和广泛地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。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。因此可以说，传感器是人类五官的延长，是电子五官。

一个失去五官的人难以生存，更不能正常工作，高性能的“电子五官”对于信息技术乃至整个工业技术也同样的重要。随着新技术革命的到来，世界开始进入信息时代，信息技术已成为当代科技的四大支柱之一。在利用信息的过程中，首先要解决的问题就是获取准确可靠的信息，而传感器则是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

传感器的历史悠久。自工业革命以来，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，当年瓦特发明的把旋转速度参量变换为直线位移参量的离心调速机，就是一种控制蒸汽机车速度的传感器。传感器的使用，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，促进了生产合理化，提高了产品质量，降低了生产成本，减轻了工人的劳动强度，避免了有害作业。

目前，传感器涉及的领域主要有现代工业生产、基础学科研究、宇宙开发、海洋探测、军事国防、环境保护、医学诊断、智能建筑、汽车、家用电器、生物工程等。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，如力、压力、流量、速度、温度、湿度以及生物体成分等，以使得设备工作在正常状态或最佳状态，保证产品的产量和质量。

在基础学科研究中，传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展进入了许多新领域：在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙，在微观上要观察小到纳米级的粒子世界，在时间上要观察长达数十万年的天体演化，也要观察物体短到微秒的瞬间反应。此外，还出现了对于深化物质认识、开拓新能源和新材料等具有重要作用的极端技术研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然，要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有相适应的传感器是不可能的。实践表明，许多基础学科研究的障碍，首先就在于对象信息的获取存在困难，而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现，则必然会导致该领域内的突破。可以说，传感器的发展，往往是一些边缘学科开发的先驱。

在军事国防领域，各种侦测设备，以及雷达跟踪、武器精确制导等，没有传感器是难以实现的；在航空领域，飞机的飞行管理和自动驾驶、仪表着陆盲降系统等，都需要传感器；在航天领域，人造卫星的遥感、遥测都与传感器紧密相关；在家用电器领域，全自动洗衣机、电饭煲和微波炉等都离不开传感器；在医疗卫生领域，电子脉搏仪、血压仪、医用呼吸

机、超声波诊断仪、断层扫描（CT）及核磁共振诊断设备等，都大量地使用了传感器。此外，在矿产资源、海洋开发、生命科学、生物工程等领域，传感器都有着广泛的用途。

由此可见，传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的。

1.2 敏感材料的定义与类别

1.2.1 敏感材料的定义

敏感材料（Sensing Materials）是制造敏感元件的主体材料，是一种能敏锐地感受被测物体的某种物理量的大小和变化，并将其转换成电信号或者光信号的材料。利用敏感材料制备的各种传感器，在自动控制、自动测量、机器人、汽车工业、计算机外部设备等方面有着广泛应用。通常，传感器由敏感器件和转换器件两部分组成（也可能是二者合一的）。其中，敏感器件（Sensing Element）是指“能直接感受被测量的部分”，转换器件（Transduction Element）则是指传感器中将敏感器件输出量转换为适于传输和测量电信号的部分。不言而喻，敏感材料是构成传感器的核心部分，对于“敏感材料”的研究，包括敏感材料的基础研究（即其物理现象、化学反应和生物效应）、新现象新原理的发现和采用、新工艺和新材料的研发及其新功能和扩展等。

一种气体压力传感器如图 1-1 所示。其中，膜盒 2 的下半部与壳体 1 固定连接，上半部通过连杆与磁心 4 相连，磁心 4 置于两个电感线圈 3 中，电感线圈 3 接入转换电路 5。膜盒 2 就是敏感器件。膜盒 2 外部与大气压力相通，内部感受被测压力 P ，当 P 变化时，其上半部移动，即输出相应的位移量。在此例中，转换器件不止一个，由电感线圈 3 和磁心 4 共同组成。

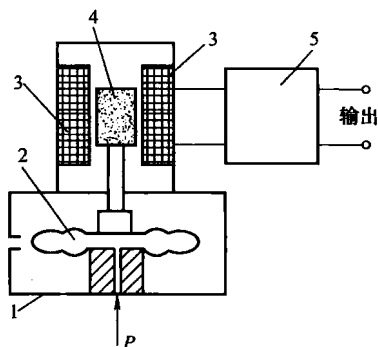


图 1-1 气体压力传感器
1—壳体 2—膜盒 3—电感线圈
4—磁心 5—转换电路

一般而言，敏感材料应具有以下基本特性：

1) 有较高的敏感性。灵敏度高、响应速度快、检测范围宽、检测精度高。对于某种特定被测量（物理、化学、生物等被测量）具有较高的敏感性，能迅速将指定被测量微小的变化准确地、可重复地变换为相应的电信号输出。

2) 具有良好的选择性。在一定条件下，除了对所指定的一种被测量敏感外，对其余变量都不敏感，在环境中同时存在有多种变量的复杂情况下，能准确摄取所指定的被测量信息，也就是具有良好的选择性，且响应速度要快。

3) 具有良好的可靠性。耐热、耐磨损、耐腐蚀、耐振动、耐过载。

4) 具有良好的可加工性。易成形、尺寸稳定、互换性好。

5) 具有良好的经济性。成本低、成品率高、性价比高。

在选择敏感材料时，敏感性是第一位的。其次，再根据条件考虑其他特性。

1.2.2 敏感材料的类别

敏感材料的主要功能是接收光、声、电、热、磁、机械、化学等形式的能量信号，并转换成电信号。具有这样功能的敏感材料有光电、压电、热电、电化学、电磁等功能转换材料。敏感材料种类繁多，性能各异，从不同角度出發，有着不同的分类方法，其间又是相互交叉和关联的。

1. 按照工作原理分类

按工作原理，敏感材料可分为结构型、物性型和复合型三类。

结构型敏感材料的敏感原理是利用基本的物理定律，其换能（传感）特性首先取决于材料本身的结构。在测量过程中，敏感材料与结构相关的几何尺寸（如厚度、角度、位置等）在被测量的作用下会发生变化，由此获得与该变化成一定比例的电信号。例如，测量压力、位移、流量、温度的力平衡式、电容式、电感式等传感器的敏感材料都属于这一类。

物性型敏感材料的敏感原理是利用材料的某种宏观属性的变化，这种属性主要包括物理特性、化学特性和生物特性。其中，物理特性敏感材料是根据物理特性变化实现信息转换的敏感材料，如热敏电阻、光敏电阻、巨磁阻效应等。若根据能量形成方式和能量转换特点不同来划分，则物理特性敏感材料又可分为能量转换型和能量控制型两类。能量控制型敏感材料本身并不能进行能量的转换，被测的非电量只是被调节和控制，在信息的变换过程中，能量需由外电源提供，故又称为“有源敏感材料”，如电阻式、电容式、电感式等电路参量的敏感材料，以及基于应变电阻效应、热阻效应、磁阻效应、光电效应、霍尔效应等达到传感目的的敏感材料均属此类；能量转换型敏感材料则可将非电能量直接转换为电能量，无需外加电源，故又称为“无源敏感材料”，如热电偶、超声压电片等。化学特性敏感材料是利用电化学反应原理，将物质的组成含量、浓度、pH 值等的变化转换成电信号。生物特性敏感材料则是利用生物活性物质被选择性地识别和测定生物体或化学物质成分及特性而达到目的的，由于敏感器件即为敏感材料自身，因此无所谓“结构”的变化，其通常具有响应速度快，有利于集成化、智能化发展的特征。

复合型敏感材料实际上主要还是物性型材料，只是复合型敏感材料增加了一些中间转换环节，并将其与其他物性型敏感材料组合而成。采用中间环节是必要的，这是因为在大量的待测非电量中，只有少数能够直接利用敏感材料的物质特性被转换成为电信号，如应变、光、磁、热、水分和某些气体等。对于大多数情况，需要将那些不能直接转换成电信号的非电量，先转换成上述少数中的一种，然后，再利用相应的物性型敏感特征，将其转换成可用电信号。可见，复合型敏感材料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敏感材料相匹配的中间信号，随即再转换成电信号的一类敏感器件。

2. 按功能类型分类

实际应用中，人们常常根据被测量的功能类型来划分敏感材料，例如温度敏感材料、湿度敏感材料、压力敏感材料、位移敏感材料、照度敏感材料、半导体敏感材料、声敏材料、气敏材料、磁敏材料、电化学敏感材料、生物敏感材料等。表 1-1 列举了按功能类型的分类。

3. 按检测功能的不同分类

敏感材料按感知外界信息的原理分类，分为物理类、化学类及生物类。其中，物理类是

基于力、热、光、电、磁和声等物理效应，化学类是基于化学反应，生物类是基于酶、抗体和激素等分子识别功能等。

表 1-1 敏感材料功能类型分类

被测量类别	被测量参数值
几何特性	长度、角度、位移、形状、表面状态、粘度
力学特性	力、力矩、转矩、振幅、加速度、流量、硬度、脆性
温度、湿度特性	温度、热量、热容、热分布、湿度、含水量
电特性	电流、电压、电阻、电容、电感、频率、相位、霍尔效应
磁特性	磁通、磁感应、磁矩、磁场强度、磁阻
声、光特性	噪声、声压、频率、照度、颜色、透明度、图像
射线特性	剂量、剂量率、波长
生物、化学特性	浓度、浊度、含量、pH 值、血压、脉搏、体温、心电、脑电、血氧饱和度、酶及抗体识别

4. 其他分类

此外，根据需要还可从其他不同角度对敏感材料进行分类。敏感材料按结晶状态可分为单晶、多晶、非晶和微晶类；按电子结构和化学键可分为金属、陶瓷和聚合物三大类；按形态可分为掺杂、微粉、薄膜、块状（带、片）、纤维等形态。敏感材料按物理原理可分为以下几类：电参量式敏感材料，如电阻式、电容式、电感式等；磁电式敏感材料，如电磁感应式、霍尔效应式、磁阻式等；压电式敏感材料；光电（热电）式敏感材料；高频率敏感材料，如红外、超声、微波敏感材料。也可以按照不同工作方式来对敏感材料分类：如差动式、电能式、涡流式、同步感应式、容栅式等。敏感材料按成分一般可分为金属材料、无机材料和有机材料三大类。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。由于半导体技术的发展，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，故半导体材料被从无机材料中划出，成为专门的一类。同样，由于生物传感器的崛起，其也被从有机材料中划出，另立一类。

表 1-2 给出了各类敏感材料在传感器中的应用情况。

采用上述各种分类法，将有利于传感器专业工作者及使用者在原理与设计工作的需要上对敏感材料进行归纳性的分析和研究，乃至选择应用。

表 1-2 各类敏感材料在传感器中的应用情况

分类	举 例
半导体	单晶硅，InSb，GaAs，InP，GaAsP，Hg，Cd，Te，II-VI 族及 III-V 族化合物，Ta ₂ O ₅ 氧化物，金属硫化物等
无机材料	石英晶体，BaTiO ₃ ，NaSO ₄ ，LiTaO ₃ ，BiGe ₃ O ₂ ，PbZrO ₅ -PbTiO ₃ ，金属氧化物等
金属材料	W-Ni 合金，Pt-Mo 合金，Ta、Dy、Bi 合金以及 Fe-Si、Al 合金等合金；Pt，Mo，Ni，Au 等单质金属
金属化合物	Nb ₃ Ge，SbCs 等

(续)

分类	举 例
有机高分子材料	PVDF (聚二氟乙烯), 多阴离子树脂, 多阳离子树脂, 聚苯乙烯, 向列相液晶等
生化酶	葡萄糖氧化酶, 脲基氧化酶, 尿酸酶等
复合材料	导电微粒与氨基酸树脂合成等
其他	微生物等

1.3 传感器敏感材料与信息感测

1.3.1 信息传感与能量转换

信息的形成与能量有关, 人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入输出关系。获得传感器在接触到被测量对象的原始信息后, 由于敏感材料的性质, 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。不同的敏感材料和环境, 其转换的规律和比例是不一样的。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, 通过被测物体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。

图 1-2 所示为电能、热能、机械能间的物质效应。

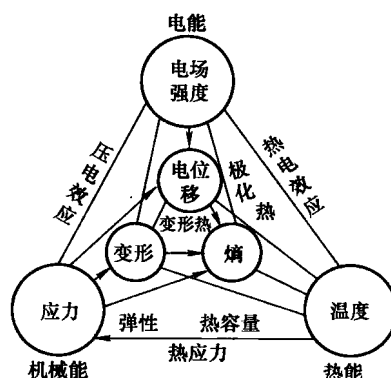


图 1-2 电能、热能、机械能间的物质效应

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。这里所说的守恒定理包括能量守恒、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。

2) 场与波动的规律。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, 例如测量光的波动, 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。

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, 而物质是由极其微小的粒子构成的, 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。

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。例如力学特性中的胡克定律、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。

1.3.2 敏感材料的信息感测

传感器的敏感材料可将被测非电量直接转换为与之有确定关系的电信号。当然,将非电量转换为电信号并不是唯一的形式。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。

传感器的基础是构成传感器的敏感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。敏感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。具有这样功能的敏感材料有压电、热电、光电、电化学、电磁等功能转换材料。

简单的传感器可能只由一个敏感器件构成。复杂的传感器不仅包括敏感器件,还包括与传感器匹配的信号转换电路,有些智能传感器还包括微处理器。传感器是将非电量转换为与之有确定对应关系电信号输出的器件或装置。例如热敏电阻,当温度变化时,热敏电阻的阻值变化,从而根据读取输出电路电流值显示出温度。为了扩大传感器的应用范围,这种转换关系常常不是直接的,而是首先通过“敏感器件”将被测非电量转换为另一种便于处理的非电量,再在此基础上根据上述原理,通过“转换器件”获得可读取的电信号。例如电阻应变片,是一种“转换器件”,可以通过材料受力后产生应变,再由应变引起电阻值的变化而读取最终测量值,通常的电子秤即根据这一原理构成。再例如超声波,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对比,转换成测量电能信号。因此从这个意义上说,传感器实际上就是一个换能器。

1.4 传感器的定义与分类

1.4.1 传感器的定义

根据国家标准 GB 7665—2005,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。这一定义包含了以下几方面的意思:

- 1) 传感器是测量装置,能完成检测任务。
- 2) 它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- 3) 它的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电等物理量,但主要是电量。
- 4) 输出和输入有对应关系,且应有一定的精确度。

美国测量协会对传感器的定义是:对于特定被测量提供有效电信号输出的器件。

传感器的基本原理如图 1-3 所示。

传感器的工作方式与人体的机能相仿,并且正按照人的模式向着自动化、智能化的方向发展。图 1-4 是传感系统的工作模式与人体机能相对应关系的框图。

传感器的工作模式框图如图 1-5 所示。