

高等学校电子信息类专业
“十二五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

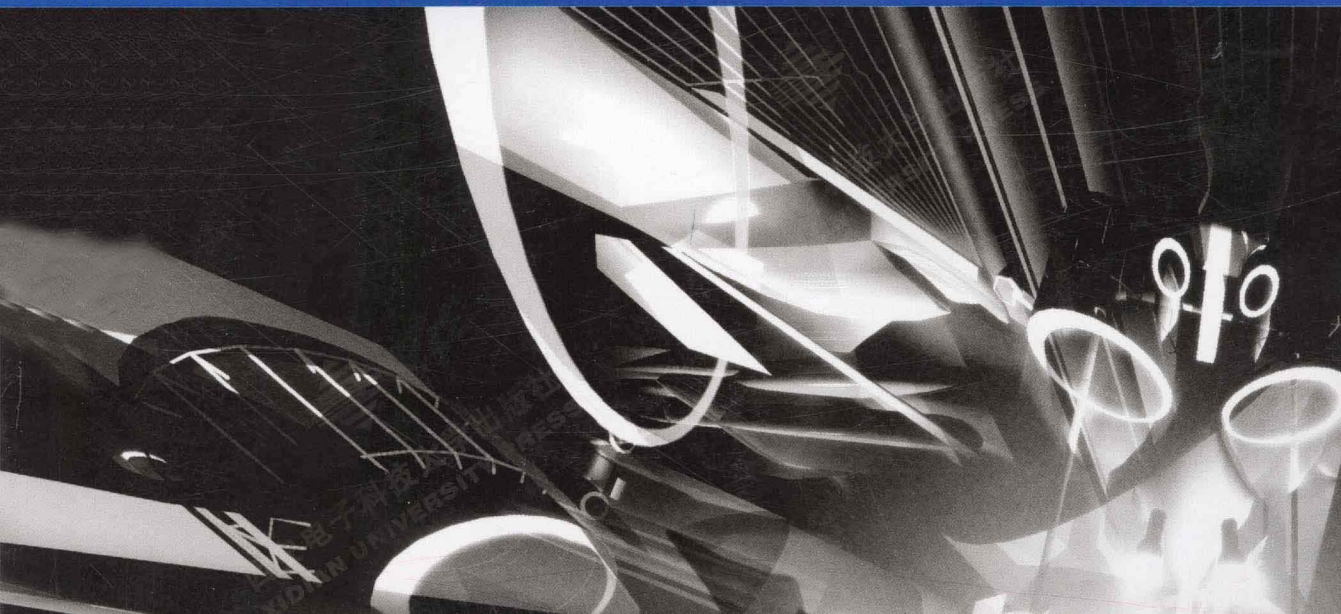
传感器原理及 应用技术

(第三版)

刘靳 刘笃仁 韩保君 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

传感器原理及应用技术

(第三版)

刘新 刘笃仁 韩保君 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在第二版的基础上修订而成的。

全书共 12 章,较详细地介绍了各类常用传感器的基本概念、基本原理和基本特性,分析了传感器的测量电路、外围电路及应用电路,讨论了传感器应用的共性技术与传感器的选择和使用。

本书继续保持了上版内容全面系统、简明易懂、循序渐进、原理与应用紧密结合的特色,修改了部分章节,并增加了一些新的内容。例如,第 3 章增加了电阻应变传感器应用;第 8 章增加了光电传感器应用;第 10 章增加了物联网及物联网传感器简介等。

本书可作为高等学校电子类各专业的教材和教学参考书,也可作为相关工程技术人员的学习参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用技术/刘新,刘笃仁,韩保君编著.

—3 版. 西安:西安电子科技大学出版社,2013.8

高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3109-7

I. ① 传… II. ① 刘… ② 刘… ③ 韩… III. ① 传感器—高等学校—教材 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 160693 号

策 划 云立实

责任编辑 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2013 年 8 月第 3 版 2013 年 8 月第 11 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18

字 数 423 千字

印 数 40001~43000 册

定 价 31.00 元

ISBN 978-7-5606-3109-7/TP

XDUP 3401003-11

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

第三版前言

本书第二版自2009年4月由西安电子科技大学出版社出版以来,受到国内多所高校老师、同行、同学及读者的关心与支持。为了适应新技术的发展,我们对其进行了修订。

本次修订在第二版的基础上对内容重新进行了梳理,继续保持了上版内容全面系统、简明易懂、循序渐进、原理与应用紧密结合的特色,修改了部分章节,并增加了一些新的内容。例如,第3章增加了电阻应变传感器应用;第8章增加了光电传感器应用;第10章增加了物联网及物联网传感器简介等。

本书第7、8章由韩保君编写,第3、10、11、12章由刘笃仁编写,其余部分由刘靳编写。

本次再版得到了西安电子科技大学电子工程学院、机电工程学院、西安培华学院电气信息工程学院等单位领导、老师及同事们的大力支持和帮助。西安电子科技大学出版社领导和编辑云立实为该书的再版做了大量的工作。对于这一切,作者表示衷心的感谢。同时,作者对学习、写作、教学、科研过程中参考过的文献资料的作者也表示深深的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年3月

第二版前言

本书第一版自2003年由西安电子科技大学出版社出版以来，受到国内多所高校同行、同学及读者的关心与支持。近年来，传感器技术飞速发展，这对本书提出了更高的要求，为此，我们推出了本书的第二版。新版在原版的基础上修改了部分内容，增加了一些新的内容。例如，尽量多给出一些传感器的实物图；第2章增加了可编程集成数字温度传感器；第10章增加了无线传感网络的简介，并精减了部分程序，增加了智能有害气体传感器设计；第12章增加了传感器应用中的电磁兼容问题等。

韩保君编写了本书的第3章、第7章和第8章，其余部分由刘笃仁、刘靳编写，刘笃仁负责全书的统稿和修改工作。

本书第二版的出版得到了西安电子科技大学教材基金资助。

本书第二版的出版还得到了西安电子科技大学教务处、电子工程学院、机电工程学院等单位领导及同事们的大力支持。西安电子科技大学出版社编辑云立实、许青青为该书的出版做了大量的工作。对于这一切，作者表示衷心的感谢。作者对学习、写作过程中参考过的文献资料的作者也深表感谢。

由于作者水平有限，书中难免有欠妥和疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2008年12月

于西安电子科技大学

第一版前言

本书是作者结合多年来从事传感器技术教学和科研的实践与体会，学习、吸收了国内外文献资料的精华撰写而成的。

全书共 12 章，较详细地叙述了各类常用传感器的基本概念、基本原理和基本特性；分析了传感器的测量电路、外围电路及应用电路；讨论了传感器应用的共性技术及传感器的选择与使用。

刘笃仁编写了本书绪论、第 1~2 章、第 4~6 章、第 9~12 章及附录，韩保君编写了第 3 章、第 7~8 章。

本书取材新颖，叙述由浅入深，循序渐进，将传感器原理与应用技术紧密结合，内容全面、系统。

本书既可作为高等院校电子类各专业的教学用书，也可作为有关工程技术人员的参考及自学用书。

在本书的编写过程中，西安电子科技大学博士生导师杨银堂教授给予了热情的指导和帮助。本书的出版得到西安电子科技大学电子工程学院、机电工程学院等学院领导及同事们的大力支持。西安电子科技大学出版社编辑云立实同志为该书的出版做了大量的工作。对于这一切，作者表示衷心的感谢。

作者对学习、写作过程中参考过的文献资料的作者深表感谢。

由于作者水平有限，书中难免有欠妥和疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者
2003 年 5 月 1 日
于西安电子科技大学

目 录

绪论	1	3.1.1 应变片的结构和类型	65
第 1 章 传感器的特性	5	3.1.2 常用的应变片	66
1.1 传感器的组成与分类	5	3.2 薄膜应变电阻及传感器	67
1.1.1 传感器的组成	5	3.2.1 薄膜分类	67
1.1.2 传感器的分类	6	3.2.2 薄膜的工作原理	68
1.2 传感器的基本特性	7	3.2.3 薄膜应变传感器的特点	69
1.2.1 静态特性	7	3.3 电阻应变传感器使用中应注意的 一些	71
1.2.2 动态特性	14	3.4 电阻应变传感器应用——起重 限制器	73
思考题与习题	16	思考题与习题	75
第 2 章 热电传感器	17	第 4 章 磁敏传感器	76
2.1 热电势式测温传感器	17	4.1 磁敏传感器的物理基础——霍 尔、磁阻、形状效应	76
2.1.1 工作原理	17	4.1.1 基础知识	76
2.1.2 热电偶中引入第三导体	19	4.1.2 霍尔效应	77
2.1.3 标准热电极	20	4.1.3 磁阻效应	77
2.1.4 热电偶冷端温度误差及其 补偿	21	4.1.4 形状效应	77
2.1.5 常用热电偶的特性	23	4.2 霍尔元件	78
2.1.6 热电偶的测量电路	29	4.2.1 霍尔元件的工作原理	78
2.2 热电阻式温度传感器	33	4.2.2 霍尔元件的结构	79
2.2.1 金属测温电阻器	33	4.2.3 基本电路	79
2.2.2 半导体热敏电阻器	37	4.2.4 电磁特性	82
2.3 PN 结型测温传感器	43	4.2.5 误差分析及误差补偿	83
2.3.1 温敏二极管及其应用	43	4.3 磁阻元件	86
2.3.2 温敏晶体管及其应用	46	4.3.1 长方形磁阻元件	86
2.4 集成电路温度传感器	48	4.3.2 科尔宾元件	87
2.4.1 基本原理及 PTAT 核心电 路	49	4.3.3 平面电极元件	87
2.4.2 电压输出型	51	4.3.4 InSb - NiSb 共晶磁阻元 件	88
2.4.3 电流输出型	54	4.3.5 曲折形磁阻元件	88
2.4.4 可编程集成数字温度传 感器	55	4.3.6 磁阻元件的温度补偿	89
2.5 热释电式传感器	56	4.4 磁敏二极管	89
2.5.1 热释电效应及其机理	56	4.4.1 磁敏二极管的结构	89
2.5.2 热释电红外传感器	57	4.4.2 磁敏二极管的工作原理	90
2.5.3 热释电探测模块	59	4.4.3 磁敏二极管的特性	91
2.5.4 典型应用	61	4.4.4 磁敏二极管的补偿技术	93
2.6 热电传感器应用实例	62	4.5 磁敏三极管	94
思考题与习题	64	4.5.1 磁敏三极管的结构	94
第 3 章 应变传感器	65		
3.1 电阻应变传感器	65		

4.5.2 磁敏三极管的工作原理	95	6.4.2 反射光强调制型光纤传感器	154
4.5.3 磁敏三极管的特性	95	6.4.3 频率调制型光纤传感器	155
4.5.4 温度补偿技术	97	6.4.4 光纤液位传感器	157
4.6 磁敏传感器的应用	99	思考题与习题	159
4.6.1 霍尔元件的应用	99	第7章 光栅传感器	161
4.6.2 磁阻元件的应用	106	7.1 光栅基础	161
思考题与习题	112	7.1.1 光栅的分类及结构	161
第5章 压电传感器	113	7.1.2 莫尔条纹的原理	162
5.1 压电效应	113	7.1.3 莫尔条纹的特点	163
5.1.1 石英晶体的压电效应	113	7.2 光栅传感器的工作原理	164
5.1.2 压电常数	115	7.2.1 光电转换原理	164
5.1.3 压电陶瓷的压电效应	116	7.2.2 莫尔条纹测量位移的原理	164
5.2 压电材料	117	7.2.3 辨向原理	165
5.2.1 压电晶体	117	7.3 莫尔条纹细分技术	166
5.2.2 压电陶瓷	118	7.3.1 细分方法	166
5.2.3 新型压电材料	118	7.3.2 光电元件直接细分	166
5.3 等效电路与测量电路	119	7.3.3 CCD直接细分	167
5.3.1 等效电路	119	7.3.4 光栅传感器的误差	168
5.3.2 测量电路	120	7.4 常用光学系统	169
5.4 压电传感器及其应用	124	7.4.1 透射直读式光路	169
5.4.1 压电传感器中压电片的连接	124	7.4.2 反射直读式光路	169
5.4.2 压电式力传感器	125	7.4.3 反射积分式光路	170
5.4.3 压电式压力传感器	127	思考题与习题	170
5.4.4 压电式加速度传感器	128	第8章 光电传感器	171
5.4.5 应用实例	133	8.1 光电传感器的基本效应	171
思考题与习题	136	8.1.1 半导体的粒子特性	171
第6章 光纤传感器	137	8.1.2 半导体光电效应	172
6.1 基础知识	137	8.2 外光电效应光电器件	172
6.1.1 光纤的结构	137	8.2.1 光电管	172
6.1.2 光纤的种类	137	8.2.2 光电倍增管	173
6.1.3 光纤的传光原理	138	8.3 光电导效应及光电元件	174
6.1.4 光纤的特性	140	8.3.1 光敏电阻的结构及原理	174
6.1.5 光纤的耦合	142	8.3.2 光敏电阻的特性	175
6.2 光纤传感器的分类及构成	143	8.4 光伏特效应及光电元件	177
6.2.1 分类	143	8.4.1 光电导结型光电元件	177
6.2.2 构成部件	145	8.4.2 光伏特型光电元件	178
6.3 功能型光纤传感器举例	148	8.5 CCD图像传感器	180
6.3.1 相位调制型光纤传感器	148	8.6 应用光路	183
6.3.2 光强调制型光纤传感器	150	8.6.1 反射式	184
6.3.3 偏振态调制型光纤传感器	151	8.6.2 透射式	184
6.4 非功能型光纤传感器举例	152	8.6.3 线纹瞄准用光电传感器	184
6.4.1 传输光强调制型光纤传感器	152	8.6.4 脉冲式光电传感器	185

8.7 光电传感器应用	187	10.6.1 智能压力传感器的设计思路	227
思考题与习题	189	10.6.2 简单智能温度传感器 设计实例	230
第9章 气、湿敏传感器	190	10.6.3 智能有害气体传感器设计	235
9.1 气敏传感器	190	思考题与习题	239
9.1.1 半导体气敏元件的分类及 必备条件	190	第11章 传感器应用技术	240
9.1.2 表面控制型电阻式半导体 气敏元件	191	11.1 信号变换	240
9.1.3 基于 MEMS 的新型微结构 气敏传感器	195	11.1.1 电流-电压($I-U$)变换器	240
9.1.4 应用举例	198	11.1.2 电压-电流($U-I$)变换器	242
9.2 湿敏传感器	199	11.1.3 交流电压-直流电压($u-U$) 变换器和交流电流-直流电压 ($i-U$)变换器	244
9.2.1 湿度及其表示	199	11.1.4 电阻-电压($R-U$ 或 $\Omega-U$) 变换器	245
9.2.2 对湿敏传感器的基本要求	200	11.1.5 电容-电压($C-U$)变换器	246
9.2.3 电阻式湿敏传感器	200	11.1.6 电压-频率($U-f$)变换器(简称 VFC)和频率-电压($f-U$)变换 器(简称 FVC)	247
9.2.4 陶瓷湿敏传感器	201	11.1.7 电压-脉宽($U-H$)变换器	250
9.2.5 电容式湿敏传感器	202	11.2 驱动电路分析及外围电路 器件选择	252
9.2.6 电解质式湿度传感器	204	11.2.1 驱动电路分析	252
9.2.7 应用范围及应用实例	204	11.2.2 外围电路器件选择	259
思考题与习题	208	思考题与习题	260
第10章 智能传感器	209	第12章 传感器的选择与使用	261
10.1 智能传感器及无线传感器网络	209	12.1 传感器的正确选择	261
10.2 物联网及物联网传感器	211	12.2 传感器的合理使用	262
10.3 智能传感器的结构框图	212	12.2.1 线性化及补偿	262
10.3.1 μP 主机模板	213	12.2.2 传感器的定标	264
10.3.2 模拟量输入模板	214	12.2.3 电磁兼容问题	265
10.3.3 IEEE-488 标准总线模板	214	12.2.4 抗干扰技术	267
10.3.4 接口模板	215	思考题与习题	271
10.4 信号处理与 μP 接口技术	216	附录 国际单位制(SI)的主要单位 及其换算	272
10.4.1 传感器输出信号的类型	216	参考文献	277
10.4.2 传感器输出的模拟信号的处理	216		
10.5 智能传感器中的数据处理	224		
10.5.1 查表与搜索	224		
10.5.2 分段插值法	225		
10.5.3 曲线拟合修正法	226		
10.5.4 数字滤波	227		
10.6 智能传感器的设计	227		

绪 论

传感器(Sensor 或 Transducer)是一种装置或器件。国家标准 GB 7665—87 给传感器下的定义是：“能够感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。”

应当指出，这里所说的“可用输出信号”是指便于加工处理、便于传输利用的信号。现在电信号是最易于处理和便于传输的信号，因此，可以把传感器狭义地定义为：能把外界非电信息转换成电信号输出的器件。目前，光信息技术已经异军突起，可以预料，当人类跨入光子时代，光信息成为便于快速、高效处理与传输的可用信号时，传感器的概念也许将随之发展成为能把外界信息转换成光信号输出的器件。

当今的社会是信息化的社会。信息化的社会离不开科技的发展。高科技的发展伴随着电脑、各类智能仪器、机器人的越来越广泛的应用。但是，智能仪器、电脑、机器人并不能直接感受及识别外界的信息，它们都需要必不可少的“感觉器官”，而充当它们的“感觉器官”的就是传感器。传感器很像人体的五官，能感受外界的各种“刺激”，并做出及时的反应。因此，传感器又被人们称做“电五官”。实际上，目前一些传感器已经具有感知超出人类五官所能感知信息的功能。

1. 传感器的重要性

(1) 传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始的各种参数进行精确可靠的测量，则无论是信息转换、信息处理，还是最佳数据的显示与控制，都将成一句空话。可以毫不夸张地说，没有精确可靠的传感器，就没有精确可靠的自动检测和控制系统。近代微电子技术和计算机技术为信息的转换与处理提供了极其完善的手段，现代检测与控制系统正经历着重大的变革。但是，如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息，那么，计算机也无法充分发挥其应有的作用。

(2) 传感器是航天、航海事业中不可缺少的器件。随着科学技术的发展，人类在不断探索宇宙空间的奥秘，不断进行海洋资源的开发利用。在现代飞行器上，装备着繁多的显示与控制系统，以确保各种飞行任务的顺利完成。在这些系统中，传感器首当其冲地对反映飞行器的参数、姿态、工作状态的各个物理量加以检测，并显示在各类显示设备上，以便控制者及时控制和正确操纵。比如，航天飞机的机翼上仅温度传感器就多达几十个。

(3) 传感器是机器人的重要组成部件。在工业机器人的控制系统中，要完成检测功能、操作与驱动功能、比较与判断功能，就必须借助于两大类传感器：一类是检测机器人内部各部分状态的传感器，另一类是检测机器人与所操作的对象物体的关系和检测机器人与工作现场之间的状态的传感器。为了使机器人能从事更高级的作业，必须为机器人开发更精良的“电五官”——传感器。

(4) 能源开发和能源合理利用离不开传感器。科学的进步和生产的发展使能源的消耗在不断增加,解决能源危机将成为当务之急。解决能源危机所采取的对策是开发新能源与合理利用能源。太阳能、风能、海洋能等是取之不尽、用之不竭的能源,要开发它们,就少不了传感器。例如,日本仁尾町建立的一个 1000 kW 集光式太阳能发电站就用了几百个传感器。合理利用能源就是指如何节约能源。节能技术是最佳运行、最佳控制技术,当然也是靠传感器来实现的。汽车以汽油为动力,是世界上能源的最大消耗者之一。为了节能、防止污染、安全行驶而掀起的汽车电子化运动,其实也是靠传感器来实现的。日本一辆高档汽车需要 40~60 个传感器,美国则需要 90 多个。

(5) 传感器在环境保护中发挥着重要作用。随着社会的进步,环境保护越来越受到人们的高度重视。近年来,我国出台了多种法规和标准,大力加强对环境的保护。防治大气污染,保护和改善生活环境与生态环境,保障人体健康,促进经济和社会的可持续发展,是我们的战略目标。例如,在空气质量检测、污染防治、工业污水排放检测、室内装饰环境(甲醛等)检测、环境噪声检测、环境电磁波检测中,传感器都发挥着重要作用。

(6) 传感器是产品定型、汽车试车、飞机试飞等的必要器件。某些产品定型、汽车试车、飞机试飞等都需要大量的传感器。例如,飞机试飞就要用到静压传感器、总压传感器、俯仰角传感器、滚转角传感器、偏航角传感器、三向角速度传感器、三向过载传感器、振动加速度传感器、大气总温传感器、环控压力传感器、环控温度传感器、液冷流量传感器、液冷温度传感器、压差传感器、环境温度传感器、表面温度传感器、大气露点温度传感器、操纵力传感器、发动机压力传感器、油门杆角度传感器、滑油温度传感器、发动机振动速度传感器、刹车压力传感器、脚踏力传感器、油耗传感器、线位移传感器等几十种传感器。

(7) 传感器在生物医学和医疗器械工程等方面的应用前景广阔。传感器将人体各种生理信息转换成工程上容易测定的量(一般都是将非电量转换成易于测量、处理的电量),从而正确地显示出人体生理信息。例如,体温的测量与控制、癌症的诊治与控制都可借助传感器来完成。

(8) 传感器是物联网的重要组成部分,传感器已渗透到人们的日常生活之中。家用电器化将人们从繁重的家务劳动中解放出来。诸如电磁炉、电冰箱、洗衣机、空调、电视机、电风扇、电熨斗等都是靠传感器来实现自动化的,煤气、液化气泄漏报警装置等都离不开传感器。

传感器在整个科学技术及人类生活中的重要性已越来越被更多的人所认识。瑞士巴塞 PROGNOSAG 公司对日本、美国、西欧一些国家和地区的传感器发展情况进行调查之后发表的报告表明,目前非军用传感器的世界市场发展迅速,每年将以 9.1% 的速度增长。对某些发达国家的调查说明,今后几年最引人注目的几项技术发展中,传感器技术名列前茅。

在我国,传感器的发展已有了一个良好的势头。目前研制传感器的企业、研究所、大专院校有上千家,遍及全国各个省、自治区、直辖市。但系列品种发展不均衡,推广应用的深度和广度还不够。可以相信,只要我们进一步统筹规划,突出重点,加强基础,扩大应用,我国的传感器技术必将获得迅猛发展,在不久的将来我国会有大量的传感器产品赶上和超过世界先进水平。

2. 传感器的发展方向

1) 新材料不断开发、新效应不断发现

一种新效应的发现，一种新材料的开发，伴随着新的传感器的设计和诞生。今后开发传感器的最有希望的材料是陶瓷材料、有机材料、纳米材料等。近年来，功能型陶瓷材料发展很快，在气敏、热敏、光敏传感器中得到了广泛的应用。有机材料是制造力敏、气敏、湿敏、光敏、离子敏等传感器的重要材料；光纤被制成压力、温度等传感器，这类传感器以光信号传输代替电信号传输，具有耐高温、防爆、抗干扰等优点，这是由其它材料制成的传感器所不能比拟的。纳米技术是在纳米空间(0.1~100 nm)内研究电子、原子和分子运动规律及特性，通过操作单原子、分子和原子团、分子团，以制造具有特定功能的材料或器件为最终目的的一门技术。纳米材料有两大效应：一是粒子尺寸降到小于电子平均自由程时，能级分裂显著，这就是量子尺寸效应；另一显著效应是表面效应。颗粒细化到一定程度(100 nm 以内)后，粒子表面上的原子所占的比例急剧增大，也即表面积比增大。当这些表面原子数量增加到一定程度后，材料的性能更多地由表面原子而不是由材料的内部晶格中的原子决定，使其氧化还原能力增强，自身的催化活性更加活泼。大量存在的晶粒界面缺陷对材料性质有决定性作用，而且粒子进一步细化会使粒子内部发生位错和滑移，所以纳米材料的性能多由晶粒界面和位错等表面缺陷所控制，从而产生材料表面异常活性。因此，纳米材料是研制某些半导体传感器的良好材料。

另外，引人注目的生物传感器是由生物材料构成的。

今后人们将注重新效应材料的研究和开发，因为它们是制造新型传感器的基础。

2) 集成化、多功能

利用先进的 IC 技术和工艺，可将敏感元件和放大电路、运算电路、温度补偿电路、线性补偿电路等制作在同一芯片上或制成混合式、阵列式的传感器。图像的检出经历了从一维到二维、三维空间的发展过程，目前正向着包含时间序列的四维空间发展。同一个传感器具有几种功能，不仅能检测一种信号，而且可以检测两种以上的信号，如压力-温度、温度-气体、温度-湿度等。

3) 智能化

智能化传感器使信息采集与信息的记忆、存储、综合、处理一体化。简言之，是传感器与外围电路、微机一体化。把微处理机技术引入传感器，可以使传感器实现过去实现不了的功能，具有智能本领，这就是新一代的传感器——智能传感器。以硅为核心的集成技术正在加速发展，把传感器、微处理机集成在同一芯片上，就可实现单片智能传感器。

4) 充分利用微加工技术和新工艺

除利用机械加工法使传感器的制造精密化外，这个方向的发展主要是将半导体的精密加工技术和新工艺应用到传感器制造上。传感器的基体采用单晶硅时，利用单晶硅具有各向异性的特性，用不同的刻蚀液去刻蚀不同的晶向材料，便形成了各种各样适于敏感元件要求的穴槽。

微机电系统(MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems)技术的应用为传感器注入了新的活力。在微电子技术基础上发展起来的硅和硅基 MEMS 技术，由于得到强大的集成电路工业的有力支持以及微电子技术本身具有的强大生命力，近年来发展十分迅速，它们在 MEMS 压力传感器、加速度计等领域已显示出强大的威力。用它们来制作气敏传感器

容易满足人们对气敏传感器的集成化、智能化、多功能等要求。我们知道,许多气敏传感器的敏感性能和工作温度密切相关,因而一般要同时制作加热元件和温度探测元件,以探测和监控温度。利用 MEMS 技术很容易将气敏元件和加热元件、温度探测元件制作在一起,保证了气敏传感器的优良性能。

此外,把静电封接、全固态封接技术应用到传感器中,可以使传感器体积减小、性能增强。

5) 不断向高稳定性、高可靠性、高精度发展

传感器处于信息系统的输入端,其性能和质量往往决定着整个信息系统的性能和质量。另外,传感器又工作在自然环境和工业现场,受温度、湿度、腐蚀、振动、电磁场等的影响和干扰,因此要求传感器具有良好的环境适应性。高稳定性、高可靠性是今后传感器发展的核心。

此外,高精度也是传感器发展的重要方面。对于一般的常规检测来说,传感器的精度为 0.1%~1%,但对于那些高精度测量的场合,测量精度则需要达到 10^{-6} 以上。要想达到这样高的精度,就必须寻找其固有性质不随各种环境条件变化的物质。利用 MEMS 技术及量子效应等制作的传感器能达到高精度的要求。这一方面传感器的开发将随之兴起。

本书较详细地叙述了各类常用传感器的基本原理、特性,分析了传感器测量电路,讨论了传感器的一些典型应用。作者希望读者通过对本书的阅读和有关资料的学习,能受到一些启发,对科学研究或工程设计中有关传感器技术的问题,提出合理的探讨和解决方案,对各类传感器能够进行合理选择和正确使用。

传感器技术属于交叉学科,涉及的知识面较广,其原理主要基于各种物理、化学现象和物理、化学效应,而测量电路、信号处理电路是以模拟电路、数字电路为基础的。智能传感器还需要微机和汇编程序设计方面的知识。如果要进行一些传感器的设计与制造,则还应掌握仪电材料、工艺、误差理论等方面的知识。因此,扎实的理论基础和多学科的综合知识是学习和研究传感器的保证。

第 1 章 传感器的特性

1.1 传感器的组成与分类

1.1.1 传感器的组成

传感器的作用主要是感受和响应规定的被测量，并按一定规律将其转换成有用输出，特别是完成非电量到电量的转换。传感器的组成并无严格的规定。一般来说，可以把传感器看做由敏感元件(有时又称为预变换器)和变换元件(有时又称为变换器)两部分组成，见图 1.1。



图 1.1 传感器的一般组成

1. 敏感元件

在具体实现非电量到电量的变换时，并非所有的非电量都能利用现有的技术手段直接变换为电量，有些必须进行预变换，即先将待测的非电量变为易于转换成电量的另一种非电量。这种能完成预变换的器件称为敏感元件。

2. 变换器

能将感受到的非电量变换为电量的器件称为变换器。例如，可以将位移量直接变换为电容、电阻及电感的电容变换器、电阻变换器及电感变换器，能直接把温度变换为电势的热电偶变换器。显然，变换器是传感器不可缺少的重要组成部分。

在实际情况下，由于有一些敏感元件直接就可以输出变换后的电信号，而一些传感器又不包括敏感元件在内，因此常常无法将敏感元件与变换器加以严格区别。

如果把传感器看做一个二端口网络，则其输入信号主要是被测的物理量(如长度、力等)时，必然还会有一些难以避免的干扰信号(如温度、电磁信号等)混入。严格地说，传感器的输出信号可能为上述各种输入信号的复杂函数。就传感器设计来说，希望尽可能做到输出信号仅仅是(或分别是)某一被测信号的确定性单值函数，且最好呈线性关系。对使用者来说，则要选择合适的传感器及相应的电路，以保证整个测量设备的输出信号能唯一、正确地反映某一被测量的大小，而对其它干扰信号能加以抑制或对不良影响能设法加以

修正。

传感器可以做得很简单，也可以做得很复杂；它可以是无源的网络，也可以是有源的系统；它可以是带反馈的闭环系统，也可以是不带反馈的开环系统。一般情况下传感器只具有变换功能，但也可能包含变换后信号的处理及传输电路甚至微处理器 CPU。因此，传感器的组成随不同情况而异。

1.1.2 传感器的分类

传感器的分类方法虽然很多，但是国内外尚无统一的分类方法。人们一般习惯上按如下几种方法进行分类。

1. 按输入被测量分类

这种方法是根据输入物理量的性质进行分类的。表 1.1 给出了传感器输入的基本被测量和由此派生的其它量。

表 1.1 传感器输入被测量

基本被测量	派生的被测量	基本被测量	派生的被测量
热工量	温度、热量、比热、压力、压差、流量、流速、风速、真空度	物理量 /化学量	气体(液体)化学成分、浓度、盐度、黏度、湿度、密度、比重
机械量	位移、尺寸、形状、力、应力、力矩、振动、加速度、噪声	生物量 /医学量	心音、血压、体温、气流量、心电流、眼压、脑电波

这种分类方法的优点是明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据不同的用途加以选用。

2. 按工作原理分类

这种分类方法以传感器的工作原理作为分类依据，见表 1.2。

表 1.2 传感器按工作原理的分类

工作原理	传感器举例
变电阻	电位器式传感器、应变式传感器、压阻式传感器等
变磁阻	电感式传感器、差动变压器式传感器、涡流式传感器等
变电容	电容式传感器、温敏式传感器等
变谐振频率	振动膜(筒、弦、梁)式传感器等
变电荷	压电式传感器
变电势	霍尔式传感器、热电偶式传感器

这种分类方法的优点是清楚地表达了传感器的工作原理。

3. 按输出信号形式分类

这种分类方法是根据传感器输出信号的不同来进行分类的，见图 1.2。

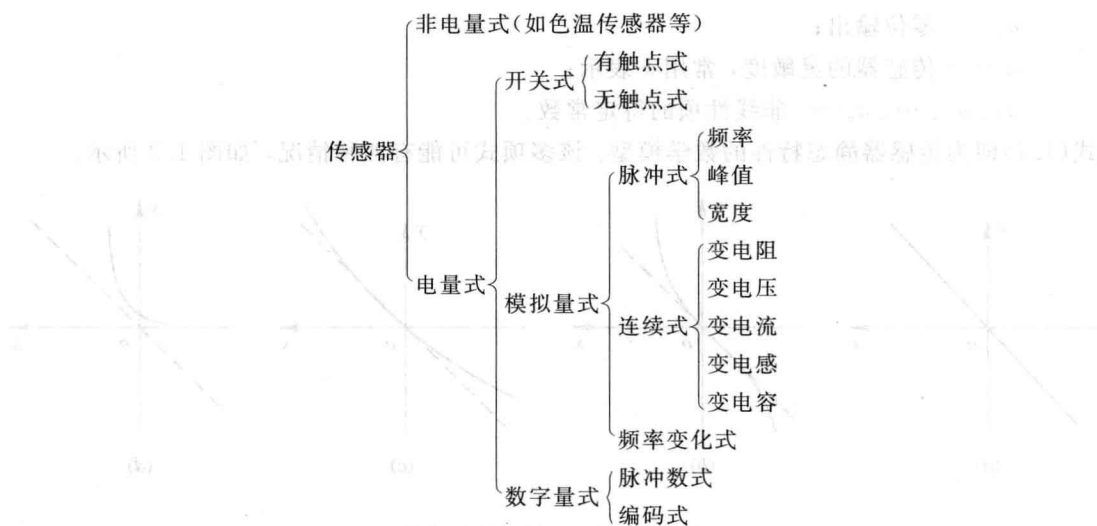


图 1.2 传感器按输出信号形式的分类

1.2 传感器的基本特性

可通过两个基本特性即传感器的静态特性和动态特性来表征一个传感器性能的优劣。

所谓静态特性，是指当被测量的各个值处于稳定状态(静态测量之下)时，传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当一个传感器制成后，可用实际特性反映它在当时使用条件下实际具有的静态特性。借助实验的方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准。校准得到的静态特性称为校准特性。在校准使用了规范的程序和仪器后，工程上常将获得的校准曲线看做该传感器的实际特性。

所谓动态特性，是指当被测量随时间变化时，传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。

当测量某些随时间变化的参数时，只考虑传感器的静态性能指标是不够的，还要注意其动态性能指标。只有这样，才能使我们的检测和控制比较正确、可靠。

1.2.1 静态特性

任何实际传感器的输出与输入关系不会完全符合所要求的线性或非线性关系。衡量传感器静态特性的重要指标有：线性度、重复性、迟滞、精度、灵敏度、阈值与分辨力以及漂移等。

1. 线性度

人们为了标定和数据处理的方便，总是希望传感器的输出与输入关系呈线性，并能准确无误地反映被测量的真值，但实际上这往往是不可能的。

假设传感器没有迟滞和蠕变效应，其静态特性可用下列多项式来描述：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_ix^i \quad (1.1)$$

式中： x ——输入量；

y ——输出量；

- a_0 ——零位输出；
- a_1 ——传感器的灵敏度，常用 k 表示；
- a_2, a_3, \dots, a_n ——非线性项的待定常数。

式(1.1)即为传感器静态特性的数学模型。该多项式可能有四种情况，如图 1.3 所示。

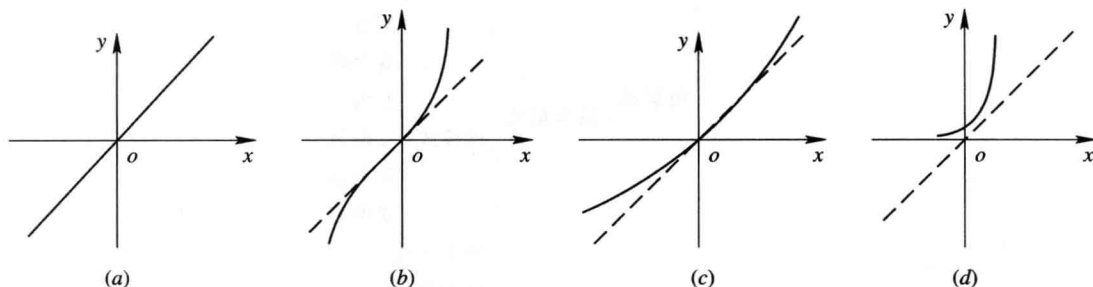


图 1.3 传感器静态特性曲线

设 $a_i \geq 0 (i=0, 1, 2, \dots, n), a_0 \geq 0$ 。

1) 理想线性

这种情况见图 1.3(a)。此时

$$a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$$

于是

$$y = a_1 x \tag{1.2}$$

因为直线上任意点的斜率都相等，所以传感器的灵敏度为

$$a_1 = \frac{y}{x} = k = \text{常数} \tag{1.3}$$

2) 输出-输入特性曲线关于原点对称

这种情况见图 1.3(b)。此时，在原点附近相当范围内曲线基本呈线性，式(1.1)只存在奇次项：

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \tag{1.4}$$

3) 输出-输入特性曲线不对称

这时，式(1.1)中非线性项只是偶次项，即

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \tag{1.5}$$

对应曲线如图 1.3(c)所示。

4) 普遍情况

普遍情况下的表达式就是式(1.1)，对应的曲线如图 1.3(d)所示。

当传感器特性出现如图 1.3 中(b)、(c)、(d)所示的非线性情况时，就必须采取线性化补偿措施。

实际运用时，传感器数学模型的建立究竟应取几阶多项式，是一个数据处理问题。建立数学模型的古典方法是分析法。该法太复杂，有时甚至难以进行。利用校准数据来建立数学模型是目前普遍采用的一种方法，很受人们重视，并得到了发展。

传感器的静态特性是在静态标准条件下利用校准数据确立的。静态标准条件是指没有加速度、振动和冲击（除非这些参数本身就是被测物理量），环境温度一般为室温