

传感器和探测器的 物理原理和应用

李政道题

赵天池 著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书总体上按照传感器和探测器的应用类别展开论述,共分28章。第1章概述;第2章至第4章分别讨论光、磁场和时间这三种最基本的物理量的传感和探测技术;第5章至第19章介绍各种力学量、环境量和电磁辐射的传感和探测技术;第20章介绍计算机输入用的传感器;第21章至第28章分别讨论高能带电粒子、高能光子和中子探测器,并介绍它们在诊断医学成像、工程技术和大型科学实验中的应用。

本书各章的讨论从回顾历史发展开始,重点介绍决定着传感器和探测器性能的敏感元件的物理原理,对它们的设计、材料和工艺作简要的讨论,并涵盖传感器和探测器技术的最新进展。

本书的读者对象为专业涉及传感器和探测器技术的大学高年级学生、研究生以及在工作中应用它们的工程技术和科学研究人员;对各类工程学科、各类实验物理学科,以及化学、生物、医学等学科的学生和从业人员都有重要的参考价值。本书涉及大量日常生活中的传感和探测技术,应用性强、叙述简明、图解详尽,亦可供对科学技术感兴趣的受过高中或中专以上教育的普通读者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

传感器和探测器的物理原理和应用/赵天池著.—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021250-4

I. 传… II. 赵… III. ①传感器-研究②探测器-研究 IV. ①TP212
②TH89

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第028900号

责任编辑:郑德平 顾英利/特邀编辑:张邦固/责任校对:刘小梅
责任印制:赵德静/封面设计:王浩

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年5月第一次印刷 印张:52

印数:1--2 500 字数:1 400 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

前 言

传感器和探测器是人的感觉器官的延伸,在现代社会中起着对各种信息的定性感知和定量测量的作用,是人类日常生活、生产过程、科学实验、军事活动等必不可少的组成部分。在以高科技为主导的信息社会中,如果没有传感器和探测器来获取信息,则一切都无从谈起。新型传感器和探测器的不断出现推动着信息技术的快速发展,对于社会的进步起着越来越重要的作用。

传感器和探测器技术与数百年来物理学的发展紧密相关。本书涉及的物理效应涵盖物理学中的力学、声学、电磁学、光学、半导体、低温超导原子和原子核等学科,以及功能性特殊材料、薄膜和微加工等技术。与大多数按照传感器和探测器所使用的技术种类为线索的教科书不同,本书为了加强实用性,将每一种被测物理量或应用领域单独列为一章。这种讨论方法便于读者做更有针对性的查询。传感器和探测器技术的特点之一是:对同一个物理量会有基于多种多样的物理原理的传感探测手段,而同一种物理效应又会被用来测量不同物理量。在本书的讨论中,同一类型的传感探测技术会在不同的章节中反复出现。我们所采取的叙述方法是:当某一物理效应第一次出现时对它进行较为详尽的介绍,当该效应在以后章节中再次出现时再循序渐进地做一些补充。这样的安排不仅方便读者,减少在阅读过程中查询其他参考书或教科书的繁琐,更可以训练学生的科学及工程学的头脑,学会把基础科学原理应用于解决实际问题的思维能力及方法。这种论述方法也可以使没有很深的物理学及工程学基础的大学生或仅仅是对传感器及其应用感兴趣的非专业人士读懂本书的大部分内容,并从中获益。

近几十年来随着半导体、新材料、微加工、激光、超导、薄膜、纳米、微处理机和计算机等技术的飞速发展,传感器和探测器技术突飞猛进、日新月异。本书将尽可能涵盖有关技术的最新进展。本书的另一个特点是附有大量的说明传感器工作原理的图解,以减少枯燥的文字叙述,使读者的认识更为直观。

在第1章概述之后,第2、第3、第4章将分别讨论光、磁场和时间这三种最基本物理领域的传感器。它们不仅本身有重要的应用价值,而且又是很多其他物理量探测的技术基础。第5章至第19章将分别讨论包括位移、速度、加速度、载荷、压强、声波、真空度、流量、物位等和力学相关的物理量传感器,包括温度、湿度、化学分子在内的环境量的传感器,以及频率比可见光波低的红外线和电磁波的传感器,并将介绍这些类别的传感器和探测器的主要实际应用。考虑到计算机在现代社会中的重要性,第20章将专门介绍用于计算机输入的传感器。

从第21章开始的本书的后半部分将用大量的篇幅讨论高能带电粒子、高能光子和中子的探测原理和相关的探测器。大多数读者对这些起源于实验高能粒子物理和核物理的探测器的原理和实用价值很少了解。其实各类辐射探测器与每个人的生活都是息息相关的。本书将详细介绍它们在日常生活、诊断医学成像、工业过程以及大型物理科学实验中的应用,所涉及的医学成像技术包括各种X射线投影成像、断层扫描立体成像和伽马射线分子成像,工业应用则包括辐射计量、微量放射性物质探测、工业无损探伤、机场和口岸安全检查等等。

本书对各类传感器和探测器的讨论将从回顾历史发展开始,重点介绍决定其性能的敏感元件的基本物理原理和最新进展,对所涉及的物理概念和所用到的物理效应将做尽可能接近

的介绍,并对敏感元件的材料、结构、制造工艺和性能特点做适当的讨论。传感器和探测器的生产厂家虽然一般都会在说明书中对如何应用其产品做详细介绍,但由于商业和技术上的原因,对产品的物理原理和具体设计往往极少涉及。本书将试图解决使用者常常因此而产生的困惑,帮助使用者理解各类传感器和探测器技术的特点和区别,适当地选择适用的传感器和探测器,并正确地使用它们。本书对于和敏感元件配套的电子放大器以及信号处理的电子线路将不做重点讨论。

本书的读者对象主要为专业涉及传感器和探测器技术的大学高年级学生、研究生以及在工作中应用各类传感器和探测器的工程技术和科学研究人员;对于各类工程学科、各类实验物理学科,以及化学、生物、医学等学科的学生和从业人员都有重要的参考价值。任何对于无处不在的传感和探测技术好奇,并想通过简单的阅读来了解它们的原理的非专业读者也会发现,此书是一本内容全面、叙述深入浅出、图解详尽、实用性强的参考书。

笔者从事工程技术和物理实验研究多年,在解决科研中遇到的传感和探测技术问题时常常苦于找不到实用性和针对性强的参考书籍。本书是本人对传感器和探测器这一课题进行系统的调查研究,在科研和教学经验的基础上撰写的,在前后四年的撰写过程中参阅了世界上大量公开发表的文献和传感器生产厂家的资料,在此无法一一注明出处,只能一并表示诚挚的谢意。本书所覆盖的范围广泛,涉及许多学科的现代科学和工程技术专业知识。希望读者和有关的行业的专家能指出著者的错误和本书的不足之处,以便再版时订正改进。

赵天池

2008年3月18日

李政道先生于2007年8月15日为本书题写书名。并特别题写《老子》名言：
道冲，而用之或不盈；渊兮，似万物之宗。

道冲
用之或不盈
渊兮
似万物之宗

李政道题
2007.8.15

目 录

前言	39
第1章 物理量的传感和探测技术	1
1.1 概述	1
1.1.1 传感器和探测器的基本概念	1
1.1.2 传感器和探测器的演变	2
1.1.3 传感器和探测器的分类方法	3
1.1.4 传感器和探测器的技术参数	4
1.1.5 传感器和探测器的发展趋势	6
1.2 传感器和探测器世界	7
1.2.1 家用传感器和探测器	7
1.2.2 汽车传感器和探测器	8
1.2.3 医学诊断传感器和探测器	10
1.2.4 工业传感器和探测器	11
1.2.5 物理科学实验中的大型传感器和探测器 系统	11
第2章 可见光和紫外光传感器	13
2.1 可见光和紫外光	13
2.1.1 可见光和紫外光的频谱	13
2.1.2 人眼作为可见光传感器	14
2.1.3 原子轨道电子的光电效应	15
2.2 半导体基本知识	16
2.2.1 半导体材料	16
2.2.2 半导体 pn 结及特性	19
2.2.3 半导体和金属的光电效应	21
2.2.4 半导体对光量子的吸收和光量子效率	23
2.3 半导体量子型传感器	24
2.3.1 光导型光传感器:光敏电阻	24
2.3.2 光敏二极管	26
2.3.3 光电池	28
2.3.4 雪崩光二极管	31
2.3.5 半导体单光子计数器	32
2.3.6 光敏三极管	35
2.4 半导体光图像传感器	36
2.4.1 电荷耦合器件	37
2.4.2 CMOS 图像传感器	39
2.4.3 光敏二极管和 CCD 线阵列及微型光谱传 感器	41
2.4.4 微透镜耦合图像传感器	42
2.5 真空管光传感器	43
2.5.1 光阴极	43
2.5.2 真空光二极管	46
2.5.3 真空光电倍增管	46
2.5.4 网栅倍增极光电倍增管	49
2.5.5 多阳极光电倍增管	49
2.5.6 微通道板光电倍增管	49
2.5.7 微通道板图像增强器	51
2.5.8 复合式光电倍增管	53
2.6 弱光探测和单个光子计数	54
2.6.1 外触发单光子计数	54
2.6.2 内触发单光子计数	55
2.7 紫外光传感器	56
2.7.1 紫外光的直接和间接探测	56
2.7.2 透紫外窗口材料	56
2.7.3 硅 CCD 紫外图像传感器	56
2.7.4 紫外光半导体二极管	57
2.7.5 紫外真空光电管	58
第3章 磁场传感器	59
3.1 概述	59
3.1.1 磁场的测量的历史	59
3.1.2 磁场强度测量范围	60
3.1.3 磁场传感器的应用	61
3.2 电磁感应磁场传感器	61
3.2.1 软磁性材料和硬铁磁材料	61
3.2.2 电磁线圈磁场传感器	63
3.2.3 磁通门磁场传感器	64
3.2.4 磁阻抗磁场传感器	66
3.3 洛伦兹力磁场传感器	67
3.3.1 霍尔效应和磁场测量	67
3.3.2 霍尔效应材料	69

3.3.3 霍尔效应磁场传感器	70	4.3.4 原子钟的微型化	104
3.3.4 半导体霍尔效应磁敏电阻	71	4.3.5 原子钟信号的无线电发射	105
3.3.5 磁敏二极管和磁敏三极管	73	第5章 位置传感器	106
3.4 铁磁性材料磁敏电阻	73	5.1 概述	106
3.4.1 各向异性磁致电阻效应	74	5.2 飞行时间法测距离传感器	107
3.4.2 AMR 磁敏电阻	74	5.2.1 飞行时间法距离测量原理	107
3.4.3 惠斯通电桥式磁敏电阻	75	5.2.2 激光飞行时间法测距	108
3.5 巨磁电阻:载流子自旋相互作用磁场 传感器	77	5.2.3 超声波飞行时间法测距	109
3.5.1 巨磁致电阻效应和器件	77	5.2.4 电磁波测距	111
3.5.2 GMR 的结构类型	79	5.3 全球定位卫星系统 GPS	111
3.5.3 自旋阀三极管磁场传感器	81	5.3.1 全球定位卫星系统的部署	111
3.5.4 隧道磁致电阻效应磁敏电阻	81	5.3.2 使用全球卫星定位信号定位的原理	112
3.6 超导量子干涉磁场传感器	82	5.3.3 差分 GPS	113
3.6.1 超导体中的量子干涉	82	5.4 电磁型非接触位置传感器	114
3.6.2 超导量子干涉器件(SQUID)原理	83	5.4.1 电磁感应位移传感器	114
3.6.3 DC SQUID 磁场传感器	85	5.4.2 涡流微位移传感器	115
3.7 光泵磁场传感器	87	5.4.3 电容微位移传感器	116
3.7.1 碱金属的反常塞曼能级和磁场测量	87	5.4.4 磁致伸缩位置传感器	117
3.7.2 光泵磁场传感器	88	5.4.5 基于磁场强度传感器的微位移传感器	118
3.8 质子磁进动磁场传感器	89	5.5 光学位置传感器	119
3.8.1 质子磁进动磁场传感器的原理	89	5.5.1 光学三角距离传感器	119
3.8.2 质子磁进动磁场传感器的设计	90	5.5.2 光学位移编码尺	120
3.9 光导纤维磁场传感器	91	5.5.3 光束遮挡精密尺寸测量	121
3.9.1 磁光效应磁场传感器	91	5.5.4 光学干涉法测位移	122
3.9.2 磁致伸缩光纤磁场传感器	92	5.5.5 光学法检测物体的存在	123
3.10 磁场传感器小结	93	5.6 接触型位移传感器	124
第4章 时间传感器	94	5.6.1 电势差计式位移传感器	124
4.1 概述	94	5.6.2 钢索位置传感器	124
4.1.1 时间的测量和应用	94	5.6.3 线性差分变压器微位移传感器	125
4.1.2 传统的时间传感器	95	5.7 角位移传感器	126
4.2 压电石英晶体振荡器和石英钟	95	5.7.1 电势差计式角位移传感器	126
4.2.1 压电效应	96	5.7.2 电容式角位移传感器	127
4.2.2 压电石英晶体	98	5.7.3 光学编码盘	127
4.2.3 压电石英晶体振荡器	98	5.7.4 电磁线圈型角位移传感器	127
4.2.4 石英晶体振荡器的频率精确度	100	5.7.5 基于永磁铁和磁场传感器的角位移传 感器	128
4.3 原子钟	102	第6章 线速度和角速度的测量	130
4.3.1 引言	102	6.1 概述	130
4.3.2 原子能级超精细结构	102	6.1.1 线速度和角速度	130
4.3.3 原子钟原理和结构	103		

6.1.2 速度传感器的分类	130	7.5.6 光纤传感器的大规模部署	166
6.2 多普勒效应速度传感器	131	7.5.7 OTDR 光纤应变传感器	166
6.2.1 多普勒效应	131	7.5.8 光纤传感器的特点和应用小结	167
6.2.2 超声波多普勒测速	132	第8章 力和扭矩传感器	169
6.2.3 微波多普勒测速及应用举例	134	8.1 概述	169
6.2.4 激光多普勒效应测速	135	8.2 传统测力传感器	169
6.2.5 遥远天体多普勒频移测速	137	8.2.1 天平和杆秤	169
6.3 基于位置和时间传感器的速度测量	137	8.2.2 弹簧秤	170
6.3.1 激光测速枪	138	8.2.3 液压和气压式测力传感器	170
6.3.2 GPS 测速	138	8.3 基于弹性元件的测力传感器	171
6.4 振动速度传感器	139	8.3.1 利用弹性元件测力的原理	171
6.4.1 基于微位移传感器的振动速度测量	139	8.3.2 基于应变片的测力传感器	172
6.4.2 激光多普勒振动仪	139	8.3.3 基于微位移传感器的测力传感器	175
6.5 角速度传感器	141	8.4 压电效应测力传感器	176
6.5.1 光学计数器角速度传感器	141	8.4.1 压电效应	176
6.5.2 旋转发电机角速度传感器	141	8.4.2 压电效应材料	177
6.5.3 基于磁场传感器的角速度传感器	142	8.4.3 压电材料的性能比较	179
第7章 应变传感器	143	8.4.4 压电测力元件的电荷信号	180
7.1 概述	143	8.4.5 压电测力元件电荷读出模式	181
7.2 利用压阻效应测量应变	144	8.4.6 PVDF 测力传感器的结构 and 应用	183
7.2.1 压阻应变传感器的历史演变	144	8.5 高灵敏度力的测量	184
7.2.2 压阻效应及导电材料的应变系数	145	8.5.1 微天平	184
7.2.3 压阻应变片	146	8.5.2 压电石英晶体振荡式微测力传感器	185
7.3 金属合金压阻应变片的设计和使用	147	8.5.3 原子力显微镜	187
7.3.1 金属材料的压阻效应	147	8.6 扭矩传感器	188
7.3.2 绕线式应变片	149	8.6.1 概述	188
7.3.3 金属膜应变片	150	8.6.2 扭转相位差扭矩传感器	189
7.3.4 自补偿型金属合金薄膜应变片	153	8.6.3 应变片式扭矩传感器	190
7.3.5 应变传感器测量电路及仪表	153	8.6.4 磁弹性扭矩传感器	191
7.4 半导体压阻应变传感器	154	第9章 加速度、倾斜度和振动传感器	193
7.4.1 半导体硅单晶应变片	154	9.1 概述	193
7.4.2 半导体薄膜和厚膜压阻应变片	156	9.1.1 加速度的定义	193
7.5 光导纤维应变传感器	157	9.1.2 加速度测量的要求	193
7.5.1 光导纤维的原理、结构和特性	157	9.1.3 加速度传感器的基本原理	194
7.5.2 光纤传感器概述	159	9.1.4 加速度传感器的发展历史和应用	195
7.5.3 基于光强度调制的光纤应变传感器	160	9.2 主动式加速度传感器	196
7.5.4 基于干涉原理的光纤应变传感器	160	9.2.1 三种模式的压电加速度传感器	196
7.5.5 布拉格光栅光纤应变传感器	164	9.2.2 压电加速度传感器的设计	197
		9.2.3 压电加速度传感器的指标	198
		9.3 被动式加速度传感器	200

9.3.1 被动式加速度传感器的原理	200	10.5 压电式压强传感器	229
9.3.2 电磁型被动式加速度传感器	201	10.5.1 基于压电测力的动态压强传感器 ...	229
9.3.3 电容型被动式加速度传感器	202	10.5.2 与弹性膜片配合的压电石英晶体振荡 型压强传感器	229
9.3.4 采用应变片的被动式加速度传感器 ...	204	10.5.3 以压电石英晶体为弹性元件的压强传 感器	230
9.3.5 弦振动式加速度传感器	205	10.6 光学效应压强传感器	230
9.3.6 力平衡加速度传感器	206	10.6.1 光强度调制压强传感器	231
9.4 光纤加速度传感器	207	10.6.2 基于光弹性效应的光导纤维压强传感 器	232
9.4.1 干涉式光纤加速度传感器	207	10.6.3 基于干涉效应的光纤压强传感器 ...	232
9.4.2 基于光强度测量的加速度传感器	208	10.7 压敏发光漆	233
9.5 倾斜度传感器和陀螺仪	209	10.7.1 受激发光和氧气的淬灭效应	233
9.5.1 电解式倾斜度传感器	209	10.7.2 受激发光压敏漆的应用	234
9.5.2 传统的惯性陀螺仪	211	第11章 声波传感器与声波成像	235
9.5.3 微加工陀螺仪	211	11.1 声波的基本知识	235
9.6 加速度传感器在振动测量中的应用	213	11.1.1 声波	235
9.6.1 振动的测量	213	11.1.2 声波的传播	236
9.6.2 振动测量中的频谱分析	214	11.1.3 声波的强度尺度和衰减系数	238
9.6.3 冲击的传感	215	11.1.4 声波的反射和折射定律	239
第10章 压强传感器	216	11.1.5 声波传感器与传播介质的耦合	240
10.1 概述	216	11.2 语音传感器	241
10.1.1 流体的压强和测量	216	11.2.1 语音传感器概述	241
10.1.2 压强传感器的分类和应用	217	11.2.2 碳粉传声器	242
10.2 机械式压强传感器	217	11.2.3 电磁感应传声器	242
10.2.1 液柱压强计	217	11.2.4 金属带式传声器	243
10.2.2 螺旋管压敏元件和机械读出法	218	11.2.5 外偏置电容传声器	243
10.2.3 弹性膜片压敏元件和压强计	219	11.2.6 静电驻极体电容传声器	245
10.2.4 波纹鼓压强敏感元件	220	11.2.7 压电陶瓷传声器	245
10.3 采用位移传感器测量压强的方法 ...	220	11.2.8 磁阻式微型传声器	246
10.3.1 可变电势差计压强传感器	221	11.2.9 光反射式传声器	246
10.3.2 线性差分变压器压强传感器	221	11.3 超声波传感器	247
10.3.3 电容式压强传感器	222	11.3.1 无机压电超声波传感器	247
10.3.4 电容式硅微加工压强传感器	223	11.3.2 阵列型压电超声波传感器	248
10.3.5 石英丝共振压强传感器	223	11.3.3 电容型微加工超声波传感器	249
10.4 基于压阻应变片的压强传感器 ...	224	11.3.4 薄膜激光干涉超声波传感器	250
10.4.1 电阻丝压强传感器	224	11.4 超声波成像和相控阵列	251
10.4.2 利用压阻应变片测量弹性膜片受压后 的应变	225	11.4.1 超声波成像原理	251
10.4.3 贴片式应变压强传感器	226	11.4.2 超声波束的聚焦和导向	252
10.4.4 薄膜式应变压强传感器	227	11.4.3 超声波传感器线阵列和束流扫描 ...	253
10.4.5 压阻式硅微加工压强传感器	227		

11.4.4 超声波二维相控阵列和成像原理	255	12.5.3 RTD 电阻值和温度关系的数学描述	294
11.5 用声波探测物体内部结构	256	12.5.4 实用的金属 RTD 器件	295
11.5.1 超声波传感器与传播介质的耦合	256	12.5.5 电阻温度探测器 RTD 信号的读出	296
11.5.2 用超声波测量距离和厚度	257	12.6 热敏电阻	298
11.5.3 超声波飞行时间法探伤及应用	258	12.6.1 热敏电阻概述	298
11.5.4 超声波显微镜	259	12.6.2 热敏电阻材料	299
11.5.5 地下地质结构探测	260	12.6.3 热敏电阻制造工艺和封装形式	300
11.6 水声传感器和声呐	262	12.6.4 负温度系数热敏电阻	301
11.6.1 水声传感器	262	12.6.5 硅锗半导体热敏电阻	303
11.6.2 声呐	262	12.6.6 正温度系数热敏电阻	304
11.6.3 水下地质调查	264	12.6.7 热敏电阻在机械和电器控制保护中的应用	304
11.7 医学超声波成像	264	12.6.8 热敏电阻在行业中的应用	305
11.7.1 医学超声波成像历史	265	12.7 半导体硅 pn 结温敏元件	306
11.7.2 现代医学超声波成像原理	265	12.7.1 二极管 pn 结温敏元件的原理	306
11.7.3 扫描和显示方式	266	12.7.2 二极管温敏元件的特性和应用	307
11.7.4 超声波医学成像使用的频率和图像分辨率	267	12.7.3 集成电路温敏器件	308
第 12 章 温度传感器	269	12.8 石英振荡器温度传感器	310
12.1 温度测量概述	269	12.9 光纤温度传感器	310
12.1.1 温标和温度计的历史演变	269	12.9.1 基于热膨胀的光纤温度传感器	310
12.1.2 温度传感器的类别	270	12.9.2 基于受激发光的光纤温度传感器	312
12.2 传统的温度计	271	12.9.3 半导体吸收边界温度传感器	313
12.2.1 气体热膨胀温度计	271	12.10 温度传感器小结	314
12.2.2 液体热膨胀温度计	271	第 13 章 红外线传感器和温度遥测	316
12.2.3 固体热膨胀温度计	274	13.1 红外线探测概述	316
12.3 相变温度计	276	13.1.1 红外电磁辐射的频谱	316
12.3.1 液晶相变温度计	276	13.1.2 红外辐射透镜的材料	317
12.3.2 金属相变温度控制器	277	13.1.3 红外线传感器分类	319
12.4 热电偶温度传感器	277	13.2 非接触温度测量	320
12.4.1 热电效应的物理原理和材料	277	13.2.1 黑体辐射和有关的物理定律	320
12.4.2 热电偶温度计的基本设计	281	13.2.2 红外线非接触式温度测量	322
12.4.3 热电偶的国际标准	282	13.2.3 温度遥测应用举例	323
12.4.4 应用热电偶测量温度的基本原理	284	13.3 半导体量子效应红外传感器	324
12.4.5 热电偶热电系数的拟合	286	13.3.1 红外半导体材料	324
12.4.6 热电偶测温系统	288	13.3.2 半导体红外光敏电阻	326
12.4.7 有关热电效应机理的讨论	290	13.3.3 pn 结光伏型红外光敏二极管	327
12.5 电阻性温度传感器	291	13.3.4 肖特基势垒光伏型红外辐射传感器	328
12.5.1 固体材料的电阻及电阻的温度系数	291	13.3.5 半导体量子阱红外光传感器	329
12.5.2 金属电阻温度探测器的材料	292		

13.3.6 半导体红外辐射量子效应图像传感器	331	15.1 概述	374
13.4 辐射热效应红外传感器	333	15.1.1 湿度与含水量测量及其重要性	374
13.4.1 辐射热效应红外传感器的基本特点	333	15.1.2 绝对湿度和相对湿度	374
13.4.2 热敏电阻红外传感器	334	15.1.3 湿度传感器的等级	376
13.4.3 热电偶堆型红外辐射传感器	336	15.1.4 湿度敏感材料	376
13.4.4 戈莱盒	338	15.2 绝对湿度标准	377
13.5 热释电和铁电效应红外传感器	338	15.3 可转移湿度标准传感器	377
13.5.1 热释电效应和材料	338	15.3.1 压电石英晶体振荡器湿度传感器	377
13.5.2 热释电红外探测器	340	15.3.2 镜面露点湿度传感器	378
13.5.3 热释电和铁电效应热象图成像阵列	342	15.3.3 电解式湿度传感器	380
第14章 电磁波传感器	343	15.4 建立在吸湿材料物理性质与湿度 相关性上的湿度传感器	381
14.1 电磁波探测概述	343	15.4.1 机械变形湿度传感器	381
14.1.1 电磁波频谱	343	15.4.2 电容性相对湿度传感器	382
14.1.2 电磁波的性质	344	15.4.3 电阻性湿度传感器	384
14.1.3 电磁波传感器的应用	344	15.4.4 表面超声波湿度传感器	386
14.2 射频和微波无线电传感器	345	15.5 热效应湿度传感器	387
14.2.1 无线电波能量的收集	345	15.5.1 干湿球湿度传感器	387
14.2.2 电磁波信号放大器	350	15.5.2 氯化锂饱和盐湿度传感器	388
14.3 太赫兹电磁波和探测	353	15.5.3 热传导绝对湿度传感器	389
14.3.1 概述	353	15.6 光辐射湿度传感器	390
14.3.2 电子学太赫兹传感器	354	15.6.1 红外线吸收式绝对湿度传感器	390
14.3.3 辐射热计太赫兹传感器	355	15.6.2 光纤湿度传感器	392
14.3.4 采用半导体热敏电阻的辐射热计	355	15.6.3 湿度显示标签	393
14.3.5 跳变边界型敏感型辐射热计	356	15.7 固体液体含水量的测量	394
14.3.6 热电子辐射热计	357	15.7.1 固体液体含水量的测量原理	394
14.3.7 超导体隧道结太赫兹传感器	358	15.7.2 通过测量固体液体的电性质测含水量	395
14.3.8 外差混频电光晶体太赫兹传感器	358	15.7.3 微波含水量传感器原理	396
14.4 电磁波的应用举例	359	15.7.4 微波强度法含水量测量	397
14.4.1 无线音像数据传播	359	15.7.5 微波频谱法含水量测量	398
14.4.2 射频身份认证系统	361	15.7.6 微波时域反射法测含水量	398
14.4.3 涡流探伤	363	15.7.7 核磁共振法含水量测量	399
14.4.4 金属探测器	364	15.8 利用中子测量含水量	399
14.4.5 零售商品电磁防盗标签	365	第16章 化学分子传感器	400
14.4.6 雷达	367	16.1 概述	400
14.4.7 探地雷达	368	16.1.1 探测化学分子的目的	400
14.4.8 工业电磁波成像	369	16.1.2 化学分子传感器的探测原理及分类	401
14.4.9 电磁波安全检查	370	16.2 电阻型和电容型化学分子传感器	402
14.4.10 医学核磁共振电磁波成像	372		
第15章 湿度和含水量传感器	374		

16.2.1 对化学分子敏感的金属氧化物	402	17.2.3 麦克劳德真空规	441
16.2.2 无机半导体化学电阻	405	17.2.4 气体阻尼式真空传感器	441
16.2.3 有机高分子化学电阻	407	17.3 基于热传导的真空传感器	442
16.2.4 化学电容	408	17.3.1 利用热传导效应测量真空度	442
16.2.5 热效应化学分子传感器	408	17.3.2 热传导式真空传感器设计上的考虑	443
16.3 电解型化学分子传感器	410	17.3.3 分子直接导热电热丝真空计	445
16.3.1 电解型化学分子传感的基本原理	410	17.3.4 对流导热电热丝真空计	446
16.3.2 液体电解质电势型化学分子传感器	411	17.3.5 微皮拉尼热传导真空传感器	447
16.3.3 液体电解质电流型化学分子传感器	413	17.3.6 热电偶真空传感器	448
16.3.4 固体电解质化学分子传感器	415	17.3.7 热传导真空传感器的测量模式	448
16.4 化学晶体管	417	17.4 电离式真空传感器	449
16.4.1 化学二极管	418	17.4.1 热阴极离子真空传感器	449
16.4.2 化学三极管	419	17.4.2 冷阴极离子真空传感器	453
16.5 超声波振动型化学分子传感器	421	17.4.3 加磁场的热阴极真空传感器	456
16.5.1 厚度剪切模式压电石英分子质量传 感器	422	17.4.4 质谱仪真空测量	457
16.5.2 表面超声波分子传感器	423	第18章 流量传感器	461
16.5.3 体声波分子传感器	424	18.1 概述	461
16.5.4 超声波振动型分子传感器信号的形 成和读出	424	18.1.1 流量的测量	461
16.5.5 微悬臂式化学传感器	426	18.1.2 层流、紊流和雷诺数	462
16.6 红外光学分子传感器	427	18.2 压差式流量传感器	463
16.6.1 概述	427	18.2.1 变截面压差式流量传感器	463
16.6.2 非色散红外光谱气体分子传感器	428	18.2.2 微型压差式流量传感器	464
16.6.3 光声气体分子传感器	431	18.3 转轮式流量传感器	465
16.6.4 血氧传感器	431	18.3.1 旋转叶轮流量传感器	465
16.6.5 红外光谱分析分子传感器	432	18.3.2 双转轮式流量传感器	466
16.6.6 光电离子传感器	433	18.4 障碍阻尼式流量传感器	467
16.7 基于其他物理效应的分子传感器	433	18.4.1 变截面浮子流量传感器	467
16.7.1 热传导式分子传感器	433	18.4.2 阻尼靶式流量传感器	467
16.7.2 光纤分子传感器	434	18.4.3 静态叶轮式流量传感器	468
第17章 真空传感器	436	18.5 复合向心力质量流传感器	469
17.1 概述	436	18.6 电磁式质量流传感器	470
17.1.1 真空度	436	18.7 超声波流量传感器	471
17.1.2 真空度传感器的三种类型	437	18.7.1 超声波多普勒流量传感器	471
17.1.3 气体分子的平均自由程和真空测量	438	18.7.2 超声波飞行时间质量流传感器	472
17.2 基于机械效应的真空传感器	439	18.7.3 超声波质量流传感器的应用说明	473
17.2.1 液柱式压强差传感器	440	18.8 激光多普勒干涉流量传感器	473
17.2.2 基于弹性压敏元件的真空传感器	440	18.9 热效应质量流传感器	474
		18.9.1 热线质量流传感器	475
		18.9.2 电热丝和热敏电阻结合的质量流传 感器	476

18.9.3 热电偶质量流传感器	477	20.3 触摸屏	503
18.9.4 热管质量流传感器	477	20.3.1 电阻性触摸屏	504
18.9.5 微加工硅微型质量流传感器	478	20.3.2 电容性触摸屏	505
18.10 卡门涡街质量流传感器	479	20.3.3 表面超声波触摸屏	506
第19章 料位液位传感器	480	20.3.4 光触摸屏	507
19.1 概述	480	20.4 指纹识别	508
19.2 压强法液位传感器	481	20.4.1 光学摄像指纹扫描器	509
19.2.1 玻璃管液位传感器	481	20.4.2 电磁感应指纹识别	510
19.2.2 利用压强差测量液位	481	20.4.3 热图像指纹传感器	511
19.3 浮子法液位传感器	482	20.4.4 压力型指纹传感器	512
19.3.1 用浮子配合位移传感器测量液位	482	20.4.5 超声波阵列指纹传感器	512
19.3.2 浮子和磁耦合液位传感器	483	20.5 磁盘和磁头	513
19.3.3 测力法液位测量	484	20.5.1 硬磁盘数据存储	513
19.4 利用物料的物理性质测料位液位	485	20.5.2 磁盘的读写	514
19.4.1 电容法	485	20.6 光盘	515
19.4.2 电导法	486	20.6.1 只读光盘	516
19.4.3 热效应料位液位传感器	487	20.6.2 可写入光盘和可擦写光盘	517
19.4.4 调谐音叉式料位液位传感器	488	第21章 高能带电粒子探测器	520
19.4.5 磁致伸缩液位传感器	488	21.1 概述	520
19.4.6 接触式微波反射料位液位传感器	489	21.1.1 高能粒子及探测	520
19.5 非接触料位液位传感器	490	21.1.2 高能带电粒子的产生	521
19.5.1 超声波料位液位传感器	490	21.2 高能带电粒子探测原理	525
19.5.2 光学料位液位传感器	490	21.2.1 高能带电粒子与物质的碰撞反应	525
19.5.3 非接触式微波反射料位液位传感器	493	21.2.2 高能带电粒子的能量损耗	526
19.5.4 射线料位液位传感器	493	21.2.3 气体探测器介质	529
第20章 计算机输入传感器	495	21.2.4 强电场中的电子增殖原理	529
20.1 手指触摸传感器单元	495	21.2.5 气体带电粒子探测器的工作模式	532
20.1.1 机械式压敏电开关	495	21.3 记录带电粒子电离径迹的探测器	533
20.1.2 压敏电阻触摸传感器	496	21.3.1 照相底板与核乳胶板	533
20.1.3 压阻和压电式触摸传感器	497	21.3.2 云雾室	534
20.1.4 电容式触摸传感器	497	21.3.3 气泡室	534
20.1.5 磁效应触摸传感器	498	21.3.4 火花室和流光室	536
20.1.6 光学触摸传感器	498	21.4 电离室	537
20.2 计算机输入鼠标	500	21.4.1 电离室的原型金箔验电器	537
20.2.1 滚球式鼠标	500	21.4.2 电离室的基本结构和工作原理	538
20.2.2 光学鼠标	500	21.4.3 电离室介质的基本要求	538
20.2.3 其他鼠标类的计算机输入装置	501	21.4.4 气体和液体电离室的设计	540
20.2.4 摇杆	502	21.4.5 电离室的工作模式	541
		21.4.6 位置敏感电离室	545

21.5 气体丝室	545	22.3 半导体 X 射线探测器	597
21.5.1 气体单丝管	546	22.3.1 平面型硅二极管 X 射线探测器	598
21.5.2 平面多丝正比室	550	22.3.2 超纯硅和超纯锗探测器	598
21.5.3 平面漂移室	552	22.3.3 重元素复合半导体探测器	601
21.5.4 气体探测器的阴极读出	553	22.4 X 射线微量能器	602
21.6 微结构气体室	554	22.5 固体无机闪烁体	604
21.6.1 气体电子增殖器	554	22.5.1 概述	604
21.6.2 微网格气体电子放大器	556	22.5.2 无机闪烁体按化学成分分类	604
21.7 平板电极气体室	557	22.5.3 固体无机闪烁体的发光机制	609
21.7.1 电阻性电极板气体室	557	22.5.4 闪烁玻璃和陶瓷	611
21.7.2 多气隙阻性电极板气体室	558	22.5.5 无机闪烁单晶体的制备	612
21.8 三维气体粒子径迹室	559	22.5.6 闪烁晶体的读出	613
21.8.1 圆柱形多丝漂移室	559	22.5.7 选择无机闪烁体时的考虑	615
21.8.2 时间投影室	561	22.6 液化惰性气体闪烁体	616
21.9 半导体粒子探测器	563	第 23 章 X 射线医学成像	618
21.9.1 硅半导体高能带电粒子探测器概述	563	23.1 概述	618
21.9.2 半导体二极管高能带电粒子探测器	566	23.1.1 X 射线医学成像的历史发展	618
21.9.3 硅微条阵列径迹探测器	569	23.1.2 医学 X 射线发生器	619
21.9.4 二维阵列硅粒子径迹探测器	570	23.1.3 医学 X 射线成像技术分类	621
21.10 有机闪烁探测器	573	23.1.4 积分模式和脉冲模式	623
21.10.1 闪烁探测器的基本要求	573	23.1.5 X 射线透射投影成像方法	624
21.10.2 有机闪烁体发光的机理和效率	573	23.1.6 X 射线透射投影成像数学表达	625
21.10.3 有机单晶闪烁体	576	23.2 传统的 X 射线投影成像探测器	626
21.10.4 有机塑料闪烁体	577	23.2.1 X 射线胶片	626
21.10.5 有机液体闪烁体	581	23.2.2 直视 X 射线荧光屏	626
21.11 瓦维洛夫-切连科夫光的探测器	583	23.2.3 X 射线胶片暗盒	627
21.11.1 瓦维洛夫-切连科夫光机理和性质	583	23.3 间接数字式 X 射线平面投影成像	629
21.11.2 切连科夫光辐射体和应用	585	23.3.1 X 射线荧光储存增感屏成像技术	629
21.11.3 切连科夫探测器粒子种类鉴别	585	23.3.2 X 射线图像增强管摄影检测	630
第 22 章 高能光子探测器	588	23.4 直接数字式 X 射线平面投影成像	632
22.1 高能光子探测的基本知识	588	23.4.1 CCD 对闪烁荧光屏直接拍照	633
22.1.1 高能电磁辐射和高能光子	588	23.4.2 CCD 与荧光屏直接耦合成像	634
22.1.2 高能光子与探测器介质的相互作用	590	23.4.3 大面积硅 CCD 图像板	634
22.1.3 高能光子在介质中的衰减及辐射长度	593	23.4.4 机械式线扫描成像	636
22.1.4 高能光子的测量模式和量能器	594	23.4.5 荧光屏与非晶硅光二极管阵列耦合的图像板	637
22.2 气体 X 射线探测器	594	23.4.6 半导体电离型直接数字化图像板	640
22.2.1 气体电离室	595	23.4.7 两种 X 射线图像板技术的比较	641
22.2.2 气体盖革计数管和正比管	596		

23.5 X射线计算机辅助断层扫描立体成像	642	25.1.4 设置在塑料慢化球体中的中子探测器	693
23.5.1 CT成像原理	642	25.1.5 中子的核反应和中子敏感同位素	693
23.5.2 CT技术的历史演变	643	25.1.6 中子的吸收长度	697
23.5.3 CT所使用的闪烁探测器	648	25.1.7 中子探测器分类	700
23.5.4 高压气体电离室阵列	651	25.2 气体中子探测器	700
23.6 X射线骨密度测量	653	25.2.1 氦3和三氟化硼气体管	701
23.6.1 概述	653	25.2.2 裂变室	702
23.6.2 双能X射线骨密度测量原理	654	25.2.3 内表面涂其他中子转换剂薄膜的气体探测器	704
23.6.3 平面投影骨密度扫描成像	655	25.2.4 位置敏感气体中子探测器	704
23.6.4 双能X射线源和探测器	656	25.2.5 无电源中子探测器	708
第24章 伽马射线探测器在诊断核医学中的应用	659	25.3 闪烁中子探测器	709
24.1 诊断核医学和伽马射线探测器	659	25.3.1 有机闪烁体中子探测器	709
24.1.1 伽马射线成像概述	659	25.3.2 无机闪烁热中子探测器	711
24.1.2 伽马射线成像的基本手续	660	25.3.3 中子胶片暗盒和磷光存储增感屏	714
24.1.3 伽马射线成像所用的放射性同位素	661	25.3.4 用光电倍增管阵列读出的中子闪烁屏	715
24.1.4 核医学放射性同位素的制备	663	25.3.5 用CCD读出的中子闪烁屏	716
24.1.5 伽马射线和X射线成像比较	665	25.3.6 中子荧光屏和半导体带电粒子探测器阵列	717
24.2 伽马射线闪烁照相机和SPECT	665	25.3.7 中子荧光屏和微通道板	718
24.2.1 单光子伽马射线投影成像方法	666	25.3.8 用波长转换纤维读出的中子荧光屏	719
24.2.2 早期的甲状腺同位素扫描仪	667	25.4 半导体中子探测器	719
24.2.3 针孔单光子伽马射线成像	668	25.4.1 半导体中子探测原理	719
24.2.4 采用准直板的单光子伽马射线照相机	670	25.4.2 位置敏感半导体中子探测器	722
24.2.5 单光子发射计算机断层照相机	671	25.5 其他类型的中子探测器	723
24.3 正电子发射断层扫描成像	672	25.5.1 超低温中子微量能器	723
24.3.1 正电子发射断层扫描成像原理	672	25.5.2 中子辐射剂量计	724
24.3.2 PET的历史发展和探测器技术	676	第26章 辐射探测器的工业应用	726
24.4 伽马射线成像探测器	680	26.1 概述	726
24.4.1 用于伽马射线成像的闪烁晶体	680	26.1.1 工业放射源	726
24.4.2 PET探测器的设计	682	26.1.2 工业用辐射探测器	727
24.4.3 闪烁晶体的读出	685	26.1.3 辐射强度和能谱测量	728
24.5 其他类型的伽马射线成像探测器	686	26.2 辐射探测器在工业计量和控制中的应用	730
第25章 中子探测器	688	26.2.1 核秤和辐射厚度计	730
25.1 概述	688	26.2.2 辐射密度计	733
25.1.1 中子及其探测	688	26.2.3 辐射料位计	734
25.1.2 中子源	689	26.2.4 烟雾报警器	734
25.1.3 中子的弹性散射和慢化	691		

26.2.5 中子湿度计	735	27.4 高能粒子量能器	771
26.3 微量放射性监测	736	27.4.1 高能粒子量能器基本知识	771
26.3.1 氦气探测	736	27.4.2 全吸收电磁量能器原理	773
26.3.2 放射性物质的检测	737	27.4.3 闪烁晶体电磁量能器	774
26.3.3 放射性同位素示踪技术	737	27.4.4 切连科夫光全吸收电磁量能器	778
26.3.4 放射性考古和地质断代	739	27.4.5 取样电磁量能器	779
26.4 射线无损检测	740	27.4.6 强子簇射和能量测量	780
26.4.1 概述	740	27.4.7 强子量能器的主动探测器	783
26.4.2 伽马射线和 X 射线照相无损检测	741	27.5 μ 子探测器	784
26.4.3 微聚焦 X 射线显微镜	743	27.5.1 塑料闪烁体 μ 子探测器	784
26.4.4 X 射线工业 CT 无损损伤	744	27.5.2 气体漂移管 μ 子径迹探测器	785
26.5 X 射线和伽马射线口岸安全检查 设备	745	27.5.3 阻性板 μ 子探测器	785
26.5.1 概述	745	27.6 高能对撞机物理实验探测器举例	786
26.5.2 机场行李 X 射线透视检查	746	第 28 章 高能天体物理学探测器	787
26.5.3 大型集装箱安检	747	28.1 概述	787
26.5.4 笔形束流扫描成像安检技术	749	28.1.1 宇宙射线分类	787
26.5.5 安检用 X 射线 CT	752	28.1.2 高能宇宙射线及其探测	788
26.5.6 低能 X 射线表面散射成像人体安检	753	28.2 地面高能宇宙射线粒子探测器	789
26.6 中子安全检查设备	753	28.2.1 高能宇宙射线的能谱	789
26.6.1 热中子活化分析安检设备	754	28.2.2 广延大气簇射及探测	790
26.6.2 脉冲快中子散射成像和能谱分析	755	28.2.3 羊八井高山宇宙射线观测站	792
26.7 辐射石油测井	756	28.2.4 Pierre Auger 超高能大气簇射探测器	793
26.7.1 伽马射线测井	756	28.2.5 大气切连科夫光成像望远镜	794
26.7.2 中子测井	757	28.2.6 大气荧光成像望远镜	795
第 27 章 基本粒子实验探测器系统	759	28.3 中微子天文学探测器	796
27.1 概述	759	28.3.1 来自宇宙空间的中微子	796
27.1.1 基本粒子实验的探测对象	759	28.3.2 中微子的探测原理	797
27.1.2 高能粒子加速器和对撞机	761	28.3.3 日本超神冈地下中微子探测器	798
27.1.3 高能粒子探测器系统	762	28.3.4 深海水下中微子探测器	800
27.2 顶点探测器	764	28.3.5 南极冰下中微子探测器	801
27.2.1 顶点探测器的功能	764	28.4 卫星发射的太空宇宙射线望远镜	801
27.2.2 硅微条顶点探测器	765	28.4.1 软 X 射线天文学望远镜	802
27.2.3 CCD 顶点探测器	766	28.4.2 硬 X 射线和伽马射线的编码屏成像	804
27.2.4 像素顶点探测器	767	28.4.3 X 射线爆发报警望远镜 SWIFT	805
27.3 带电粒子动量磁谱仪	767	28.4.4 国际伽马射线天体物理实验室 INTEGRAL	806
27.3.1 带电粒子动量测量的原理	768	28.4.5 高能伽马射线空间观测站 GLAST	808
27.3.2 多丝漂移室带电粒子径迹探测器	769	后记	811
27.3.3 飞行时间投影室	769		
27.3.4 大型硅微条径迹探测器	770		

第 1 章 物理量的传感和探测技术

人类的生存和繁衍离不开感官从环境中获取各种信息。在现代以高科技主导的信息社会中，日常生活、工业生产、科学实验、军事等活动中需要的各种信息远远超出了人的感官的能力。为此科学家开发出了各种各样五花八门的传感器和探测器。传感器和探测器可以看作是人类的感官的延伸，其技术的进步直接推动着科学和工程技术的发展。

人类需要定性地感知和定量地测量的量大致上可归为物理量、化学量和生物量三大类。这三类量最终都要通过特定的物理过程，才能转换成可以被显示、记录和利用的信号。从这个意义上说，它们都离不开物理量的探测。本书将主要讨论基于物理原理的物理量的传感器和探测器，只在第 16 章有关化学分子探测的讨论中会涉及以化学吸附、电化学反应等为基础的化学量传感技术。本书将不直接涉及探测具有生物活性的有机分子、生物膜、蛋白质抗体、蛋白质受体、DNA、RNA、基因等的生物传感器。生物传感器技术同样也需要采用本书所讨论的温度、应变和应力、化学分子、光学等传感技术，才能最终得到可用的电信号。本书用了相当大的篇幅对辐射探测器以及它们在日常生活、工业生产过程、医学诊断成像和科学实验中的应用进行了深入的讨论。这在已出版的有关传感器和探测器的专著中并不多见。有限的关于辐射量探测和应用的参考书往往过于专业化，并非针对普通读者，将传感器和辐射探测器结合在一起论述的著作则更为少见。普通的读者往往会认为辐射探测器是与自己无关的神秘遥远的专题，通过阅读本书相信将会改变这种观念。

1.1 概 述

1.1.1 传感器和探测器的基本概念

如图 1-1 所示，传感器和探测器的功能是将被测的量按照确定的规律转换成可以被人所认知的输出信号。我们这里所说的输出信号在绝大多数情形下是由仪表显示和记录的电压、电荷或电流，但有时也可以被人的感官直接感知，并不需要转换成电信号。其形式包括敏感元件的长度、体积或颜色等的改变，传感器发出的声音、振动、指针的位置变化等等。

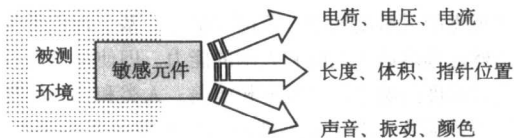


图 1-1 传感器的原理

传感器这个中文词所直接对应的英文词有 sensor、transducer、gauge、probe、detector 等。其中 sensor 的中文直译应是敏感元件，transducer 则含有把敏感元件的输出信号转换成可用的电信号的意思。中文的传感器一词的直接含义更接近于 transducer，即包括敏感元件以及与其配套的可把输出信号转换为电信号的电子线路的更为完整的系统。gauge 可翻译成量规、表、计、器、尺等，probe 可直译为探头。detector 可译为探测器。这几个英文词