

光机电一体化丛书

光电传感器 及其应用

何勇 王生泽 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

光电传感器及其应用

何 勇 王生泽 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

光电传感器及其应用/何勇, 王生泽编著. —北京:
化学工业出版社, 2004. 4

(光机电一体化丛书)

ISBN 7-5025-5494-7

I. 光… II. ①何… ②王… III. 光电传感器
IV. TP212. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043167 号

光机电一体化丛书
光电传感器及其应用

何勇 王生泽 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话 (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 454 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5494-7/TH·201

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合，是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面：光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通讯技术于一体的高科技产品，具有很高的功能和附加值；光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。

目前，国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业，光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性，受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注，它将在提升传统产业的过程中，带来高度的创新性、渗透性和增值性，成为未来制造业的支柱，被誉为 21 世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新科技发展项目，北京市政府也于 2001 年 7 月 23 日批准正式成立了北京市光机电一体化产业基地，预计到 2010 年，北京市光机电一体化产业总产值将达到 336 亿元。

随着光机电一体化技术的不断发展，各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。但到目前为止，国内还鲜有将光机电一体化技术作为一个整体技术门类来介绍和论述的书籍，这与其方兴未艾的发展势头形成了巨大反差。有鉴于此，由北方工业大学、东华大学、华中科技大学和上海交通大学联合编写光机电一体化丛书，旨在适时推出一套光机电一体化技术基本知识和应用实例的科技丛书，满足科研设计单位、企业及高等院校的科研和教学的需求，为有关技术人员在开发光机电一体化产品时，提供从产品造型、功能、结构、材料、传感测量到控制等诸方面有价值的参考素材。

本丛书共十本，包括《光机电一体化实用技术》、《现代数控机床》、《光机电一体化系统设计》、《智能机器人》、《光机电一体化技术产品实例》、《楼宇设备自动化技术》、《关节型机器人》、《微机电系统设计与制造》、《激光在加工和检测中的应用》、《光电传感器及其应用》。自 2003 年 8 月起陆续出版发行。

丛书的基本特点，一是内容新颖，力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果；二是系统全面，丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例，重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法，许多内容，如楼宇自动门的专门论述，尚属国内首次；三是深入浅出，每本书重点突出，注重理论联系实际。既有一定的理论深度，又偏重实用性，力求满足不同层次读者的需求，适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛，相关技术发展迅速，加之作者水平有限，时间紧迫，书中错误和不妥在所难免，恳请专家、学者和读者不吝指教为盼！

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2003 年 5 月于北京

前 言

没有传感器技术就没有“现代科学技术”的观点已为全世界所公认。传感器技术是关于传感器及其敏感元件与材料的一门综合型技术。随着光机电一体化技术的发展,作为各种信息的感知、采集、转换、测试中不可缺少的重要技术工具,传感器技术的应用已遍及国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、轻工、纺织等工业部门和环境保护、生物医学工程等和日常生活的各个领域。现代社会已步入信息时代,传感器技术、计算机技术与信息技术一起已成为支撑整个现代信息产业的三大支柱。如果没有高度保真和性能可靠的传感器及其应用技术,那么信息的准确获取就成了一句空话,信息技术和计算机技术也就成了无源之水。本书论述了光电传感器的原理、特点和作用,介绍了传感器的研究状态以及应用情况,并给出了其在许多领域的应用实例。

本书是《光机电一体化丛书》的一册,全书共分14章,第1章对传感器的定义、构成、分类、作用以及发展趋势进行了阐述;第2章较为详细地讨论了电阻应变式传感器的原理、测量电路及其应用;第3章对电容式传感器原理以及应用进行阐述;第4章介绍了电感式传感器原理、等效电路的分析和应用实例;第5章对压电式传感器原理和应用进行了阐述;第6章对磁敏传感器的原理和应用范围进行了讨论;第7章简要地介绍了磁电式传感的原理以及应用;第8章主要介绍了温度传感器的原理、特点以及应用;第9章讨论了光学传感器原理、性能与特点;第10章扼要介绍了光栅传感器性能、特点以及应用;第11章重点论述了光电式传感器原理、特点和应用;第12章对光纤传感器的原理、基本构成和主要调制技术进行了系统介绍,并列举了应用实例;第13章主要介绍了红外传感器原理以及在工业和军事上的应用;第14章阐述了固态图像传感器的原理、特点以及在工业上的应用。

本书的特色是较全面地论述了光电传感器的原理和实际应用,可供希望了解或使用光电传感器的工程技术人员阅读,也可供高等工科院校有关专业的研究生和本科学生作为教材和参考书使用。

本书的编写过程中,作者参阅和引用了大量书籍、期刊以及技术资料,可以说没有这些论著及文献,本书是不可能完成的。在此对有关作者表示衷心的感谢,对他们的辛勤工作表示崇高的敬意。对于有些遗漏、未能列出的文献和资料,编者向其作者表示诚挚的感谢。

本书编写过程中,刁岩斌、董毅、肖强、成玲、胡佳豪、滕兵、张良春、范岩、任华建参与了资料收集、绘图、制表和文字校对工作;李恩光副教授、马小健副教授、丁彩红副教授、陈家新博士、诸龙根老师和徐青老师给予大力协助,在此,编者一一向他们表示感谢。

由于编者学识水平有限,成书时间仓促,书中肯定存在一些错误和不恰当之处,恳请广大读者给予批评指正。

编 者
2004年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 传感器在科学技术领域中的重要性	2
1.3 传感器的分类	2
1.4 传感器的基本性能	3
1.5 传感器技术的发展趋势	4
第 2 章 电阻应变式传感器	6
2.1 电阻应变式传感器的工作原理	6
2.1.1 基本原理	6
2.1.2 金属材料与半导体材料的应变效应	7
2.2 电阻应变片的结构与分类	9
2.3 电阻应变片的特性	10
2.3.1 静态特性	10
2.3.2 动态特性	12
2.4 电阻应变片的变换电路	14
2.4.1 直流电桥的原理与平衡条件	14
2.4.2 电压灵敏度与对称电桥	15
2.4.3 电桥的分析	16
2.4.4 非线性误差及其补偿	18
2.4.5 交流电桥平衡的原理与条件	19
2.4.5.1 输出电压及平衡条件	19
2.4.5.2 交流电桥的输出特性及零位平衡	20
2.5 电阻应变式传感器	22
2.5.1 电阻应变式力传感器	22
2.5.1.1 柱式力传感器	22
2.5.1.2 梁式力传感器	24
2.5.2 电阻应变式压力传感器	25
2.5.3 电阻应变式加速度传感器	29
2.6 电阻应变式传感器的应用	29
2.6.1 平面膜片式压力传感器应用	29
2.6.2 电阻应变片在轧制力检测中的应用	30
2.6.3 应变传感器在衡器中的应用	31
第 3 章 电容式传感器	34
3.1 电容式传感器的工作原理	34

3.1.1	工作原理	34
3.1.2	平行板电容式传感器的工作方式	34
3.2	电容式传感器的信号变换电路	39
3.2.1	交流不平衡电桥	40
3.2.2	二极管环形检波电路	42
3.2.3	差动脉冲宽度调制电路	43
3.2.4	运算放大器测量电路	45
3.3	电容式传感器的应用	47
3.3.1	电容式差压变送器	47
3.3.2	膜片电极式压力传感器	48
3.3.3	电容式测微仪	50
3.3.4	电容式液位计	50
3.3.5	电容测厚仪	53
3.3.6	利用电容量变化效应的温度传感器	54
第4章	电感式传感器	55
4.1	变气隙自感式传感器的工作原理	55
4.2	变气隙自感式传感器的等效电路	57
4.2.1	等效电路	57
4.2.2	等效电路的分析	57
4.3	开磁路螺线管式电感传感器	59
4.4	开磁路差动式电感传感器	61
4.5	电感式传感器的信号变换电路	62
4.6	互感式电感传感器	65
4.7	电涡流式传感器	67
4.7.1	高频反射式涡流传感器	67
4.7.2	低频透射式电涡流传感器	69
4.7.3	电涡流式传感器的测量电路	71
4.8	电感式传感器的应用	73
4.8.1	变磁阻式传感器的应用	73
4.8.2	电涡流式传感器的应用	77
第5章	压电式传感器	80
5.1	压电式传感器的工作原理	80
5.1.1	压电效应	80
5.1.2	压电常数和表面电荷的计算	82
5.2	压电材料	84
5.2.1	压电晶体	84
5.2.2	压电陶瓷	84
5.3	压电式传感器的等效电路	85
5.4	压电式传感器的信号调节电路	87
5.4.1	电压放大器(阻抗变换器)	87

5.4.2	电荷放大器	90
5.5	压电式加速度传感器	91
5.5.1	工作原理	91
5.5.2	灵敏度	92
5.5.3	频率特性	92
5.5.4	压电式加速度传感器的结构	94
5.6	压电式测力传感器	95
5.7	压电式传感器的应用	96
第6章	磁敏传感器	98
6.1	霍尔传感器	98
6.1.1	霍尔效应	98
6.1.2	霍尔元件	99
6.1.3	霍尔元件的应用	100
6.2	集成霍尔传感器	104
6.3	磁敏电阻	106
6.3.1	磁敏电阻的工作原理与特性	106
6.3.2	磁敏电阻基本应用电路	107
6.4	磁敏二极管和磁敏三极管	109
6.4.1	磁敏二极管的结构和工作原理	109
6.4.2	磁敏三极管的结构和工作原理	112
6.5	磁敏式传感器应用	114
第7章	磁电式传感器	119
7.1	磁电式传感器的工作原理	119
7.2	动圈式磁电传感器	119
7.2.1	动圈式磁电传感器工作原理	119
7.2.2	动圈式磁电传感器结构	120
7.2.3	信号变换电路	121
7.3	磁阻式磁电传感器	121
7.3.1	工作原理	121
7.3.2	转速脉冲变换电路	122
7.4	磁电式传感器的频率响应特性	123
7.5	磁电式传感器的应用	124
7.5.1	磁电式振动速度传感器	124
7.5.2	磁电式转速传感器	125
7.5.3	磁电式扭矩仪	125
7.5.4	机载振动检测系统	125
第8章	温度传感器	127
8.1	热电偶	127
8.1.1	热电偶的基本原理	127
8.1.2	热电偶的结构与类型	131

8.1.3	热电偶的冷端温度补偿	132
8.1.4	热电偶实用测温电路	134
8.2	热电阻传感器	136
8.2.1	金属热电阻	136
8.2.2	热电阻的测量电路	137
8.3	半导体热敏电阻	137
8.3.1	热敏电阻的主要特性	138
8.3.2	热敏电阻的应用	140
8.4	晶体管和集成温度传感器	144
8.4.1	晶体管温度传感器	144
8.4.2	集成温度传感器	145
第9章	光学传感器	149
9.1	光学传感器类型以及特性参数	149
9.1.1	光学传感器类型	149
9.1.2	光学传感器的特性参数	149
9.2	光学传感器用光源	150
9.2.1	激光光源	151
9.2.1.1	半导体激光器	151
9.2.1.2	气体激光器	153
9.2.2	发光二极管(LED)	153
9.2.3	普通光源	155
9.3	半导体色敏光学传感器	155
9.3.1	色敏传感系统与色度学基础	155
9.3.2	半导体色敏传感器	157
9.4	集成光学传感器	159
9.4.1	光波导原理	159
9.4.2	平面波导传感器	163
9.4.2.1	致密型波导集成光学传感器	163
9.4.2.2	多微孔波导集成光学传感器	166
9.4.3	马赫-泽德干涉型集成光学传感器	167
9.4.4	迈克耳逊干涉型集成光学传感器	168
第10章	光栅传感器	169
10.1	计量光栅的基本原理	169
10.1.1	光栅	169
10.1.2	光栅的种类	169
10.1.3	莫尔条纹	170
10.2	光栅传感器的工作原理	174
10.2.1	莫尔条纹测量位移原理	174
10.2.2	辨向原理	176
10.3	莫尔条纹细分原理	177

10.3.1	光栅细分的方法	177
10.3.2	直接细分	177
10.3.3	细分电桥基本原理	179
10.4	光栅传感器的应用	181
第11章	光电式传感器	183
11.1	光电导传感器	183
11.1.1	光敏电阻的特性	183
11.1.2	光敏电阻的偏置电路	187
11.2	光生伏特传感器	188
11.2.1	光电池	189
11.2.2	硅光电二极管	190
11.2.3	硅光电三极管	193
11.2.4	光电场效应管	194
11.3	光电发射器件	195
11.3.1	光电管	195
11.3.2	真空光电倍增管的基本工作原理	196
11.3.3	光电倍增管的倍增极	197
11.3.4	光电倍增管的基本特性	198
11.4	光电式传感器的应用	201
11.4.1	模拟式光电传感器的应用	201
11.4.2	脉冲式光电传感器的应用	203
第12章	光纤传感器	204
12.1	光学纤维的结构和基本原理	204
12.2	光强度调制型光纤传感器	206
12.2.1	微弯效应的光强度调制技术	207
12.2.2	光强度的外调制技术	211
12.2.3	强度调制型光纤传感器	214
12.3	相位调制型光纤传感器	222
12.3.1	光纤光波干涉技术	222
12.3.2	光纤干涉仪	224
12.3.3	光波相位调制型光纤传感器	226
12.4	光波偏振调制型光纤传感器	229
12.4.1	光波偏振调制型光纤传感器的工作原理	229
12.4.2	光纤电磁参量传感器	231
第13章	红外传感器	235
13.1	红外传感系统和光学系统	236
13.1.1	红外传感系统	236
13.1.2	红外光学系统	236
13.2	红外传感器	237
13.2.1	热传感器	237

13.2.2 光子红外传感器	247
13.3 红外测温	249
13.3.1 红外测温的特点	249
13.3.2 红外测温原理	249
13.3.3 红外测温仪	249
13.4 红外成像	250
13.4.1 红外成像原理	250
13.4.2 红外成像仪	252
13.5 红外分析仪	253
13.6 红外无损检测	254
13.6.1 焊接缺陷的无损检测	254
13.6.2 铸件内部缺陷探测	255
13.6.3 疲劳裂纹探测	255
13.7 红外探测技术在军事上的应用	255
13.7.1 红外侦察	256
13.7.2 红外雷达	256
第 14 章 固态图像传感器	257
14.1 CCD 的基本结构和工作原理	258
14.1.1 CCD 的基本结构	258
14.1.2 MOS 的工作原理	258
14.1.3 CCD 电荷的产生和输出	260
14.2 CCD 图像传感器	262
14.2.1 线型固态图像传感器	262
14.2.2 面型固态图像传感器	265
14.3 CCD 图像传感器的主要特性	271
14.4 红外固态图像传感器	275
14.4.1 引言	275
14.4.2 混合式 IR-CCD 传感器	275
14.4.3 单片集成式 IR-CCD 传感器	276
14.5 微光 CCD 像传感器	277
14.6 固态图像传感器的应用	278
14.6.1 固态图像传感器输出的特点	278
14.6.2 尺寸测量	278
14.6.3 图像处理装置	280
参考文献	282

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

(1) 传感器的定义

关于传感器，至今尚无一个比较全面的定义，不过，对以下提法大家似乎不持异议，传感器有时也被称为换能器、变换器、变送器或探测器，其主要特征是能感知和检测某一形态的信息，并将这一信息转换成另一形态的信息。

传感器 (Transducer 或 Sensor) 是将感受到的外界信息，按照一定的规律转换成所需的有用信息的装置。它获取的信息可以是各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也有各种形式。例如，电、光、温度、声、位移、压力等物理量可以通过传感器相互转换。

从信息技术的角度来看，传感器是获取和转换信息的一种工具，这些信息包括电、磁、光、声、热、力、位移、振动、流量、湿度、浓度、成分等。传感器的核心部件是敏感元件，它是传感器中用来感知外界信息和转换成有用信息的元件。传感器技术是传感器与敏感元件、材料、制造加工的一门综合性技术。

传统的传感器有：由纯机械结构组成的，例如金属弹性元件在压力变化时引起形变制成的压力计；金属片因温度变化引起形变制成的温度计；差动变压器、电感线圈、可变电容器、电位器因被测物位置变化而引起电量变化制作成的位移、力、加速度等力学量传感器。这种直接以机械量输出或电量输出的传统式传感器称之为机电型传感器。

随着半导体微电子技术的飞速发展，在半导体材料基础上，运用微电子加工技术，发展起各种门类的敏感元件。光敏元件就是利用光子能量激发半导体载流子引起电导率变化和反向电流变化，形成光电效应，制成光敏二极管、光敏三极管、光电池、光控晶闸管和图像传感器等。随着光导纤维技术进入敏感技术领域，利用光纤可以制作不同功能的光纤传感器，例如光纤位移传感器、光纤压力传感器、光纤磁传感器、光纤光电开关等。光纤传感器具有抗电磁干扰、安全、耐恶劣环境和高灵敏度等突出优点。

微米和纳米技术的发展，近年产生了微传感器与微执行器系统 (Micromachined Transducers System)。微传感器与微执行器系统是在微米量级内设计和制造基础上发展起来的，它集成了多种元件，包括传感器、信息单元、执行器和通信/接口单元等而组成的一个系统。微米和纳米技术的发展将对传感器技术的发展起到巨大推动作用。

(2) 传感器的组成

一般来讲传感器是由敏感元件和转换元件组成。但是由于传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换电路可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件集成在一起。进而，伴随着微米和纳米技术以及光、机、电一体化技术的发展，信号调节与转换电路以及所需电源都可以作为传感器组成的一部分。

1.2 传感器在科学技术领域中的重要性

(1) 传感器的作用与地位

目前,在国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、轻工、纺织等工业部门和环境保护、生物医学工程等方面都需要使用各种各样的传感器。例如,在航空、航天方面,大型飞机在云层中的自动驾驶,在恶劣的气候条件下安全着陆,人造卫星在太空中遥感、遥测等都大量地安装着各种各样的传感器;在工业生产方面,自动化生产流水线离不开传感器;即使在日常生活中的家用电器,如全自动洗衣机、洗碗机也都安装着传感器。

众所周知,电子计算机只能接收数字信号,对非电量式模拟信号是无能为力的。它需要传感器把非电量转换成电量,再把模拟信号转换成数字信号,然后送入计算机进行处理,再由计算机发出各种控制命令。由此可知在现代化的测控系统中,传感器和计算机都是不可缺少的环节。

若以人作比喻,人的“感觉”来自五官,视觉可以感觉到物体的形状、大小和颜色,听觉可以感觉到声音,嗅觉可以感觉到气味,味觉可以感觉到酸、甜、苦、辣,触觉可以感觉到冷、热等。当外界刺激通过五官及神经传到人的大脑,由大脑进行处理,并指挥四肢作出相应的反映。在一个测控系统中,输入计算机的信号是由传感器送给的,计算机输出信号发送给执行机构。若把这个测控系统与人作比较,计算机就相当于人的大脑,传感器就相当于人的五官,执行机构就相当于人的四肢。它们是一一对应的。因此可知,传感器和电子计算机的结合对信息和自动化技术起着重要的作用。

(2) 传感器技术是信息技术的基础与支柱

传感器是信息采集系统的关键元件,是实现现代测量和自动控制(包括遥感、遥测、运控)的主要环节,是现代信息产业的源头,又是信息社会赖以存在和发展的技术基础。现在,传感器技术与信息技术、计算机技术并列成为支撑整个现代信息产业的三大支柱。可以设想,如果没有高度保真与性能可靠的传感器,没有先进的传感器技术,那么信息的准确获取就成为一句空话,信息技术和计算机技术就成了无源之水。

(3) 科学技术的发展与传感器技术有密切关系

从宇宙探索、海洋开发、环境保护、灾情预报到生命科学等每一项现代科学技术的研究以及人们的日常生活,几乎无一不与传感器和传感器技术紧密联系着。在国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、轻工、纺织等工业部门和环境保护、生物医学工程等方面都大量使用各种各样的传感器。由此可见,传感器和传感器技术的应用、研究以及开发是信息时代的必然要求,因为没有传感器和传感器技术将没有现代科学技术的迅速发展。

1.3 传感器的分类

传感器的品种很多,原理各异,检测对象门类繁多,因此其分类方法甚繁,至今尚无统一规定。人们通常是站在不同角度,以突出某一侧面来分类的。归纳起来大致有如下几种分类法。

(1) 按工作原理分类

这种分类方法是以其工作原理划分,将物理、化学和生物等学科的原理、规律、效应作为分类的依据。按传感器的工作原理的不同,可分为结构型、物性型和复合型三大类。

结构型传感器是利用物理学的定律等构成的，其性能与构成材料关系不大。这是一类其结构的几何尺寸（如厚度、角度、位置等）在被测量作用下会发生变化，并可获得被测非电量的电信号的敏感元器件或装置。如压力、位移、流量、温度、力平衡式、电容式、电感式等传感器均属于结构型传感器。

物性型传感器是利用物质的某种或某些客观同性构成的，其性能因构成材料的不同而有明显区别。这是一类由其构成材料的物理特性、化学特性或生物特性直接敏感于被测非电量，并可将被测非电量转换成电信号的敏感元器件或装置。如金属、半导体、陶瓷、合金等制成的传感器都属于物性型传感器。

复合型传感器是指将中间转换环节与物性型敏感元件复合而成的传感器。因为在大量被测非电量中，只有少数（如应变、光、磁、热、水分和某些气体）可直接利用某些敏感材料的物质特性转换成电信号。为了增加非电量的测量种类，需要将不能直接转换成电信号的非电量变换成能够被测量的敏感材料，然后再利用相应的物性型敏感元件将其转换成电信号。

按工作机理分类的优点是对于传感器的工作原理分析得比较清楚，类别少，有利于传感器工作者从原理与设计上进行归纳性的分析和研究。

(2) 按被测量分类

这种分类方法是按被测量的性质不同而进行划分。目前把不同的被测量的传感器分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。

由于这种分类方法是按被测量命名传感器的，其优点是能明确地指出传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。但是，这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类，很难找出每种传感器在转换机理上有何共性和差异，因此，对掌握传感器的一些基本原理及分析是不利的。

(3) 按敏感材料分类

这种分类方法是按制造传感器的材料分类。这也可分出很多类，如半导体传感器、陶瓷传感器、光导纤维传感器、高分子材料传感器、金属传感器等。

(4) 按能量关系分类

按能量关系分类，可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。有源传感器一般是将非电能量转换为电能量，称之为能量转换型传感器，也称为换能器。通常它们配有电压测量和放大电路，如压电式、热电式、压阻式等。无源传感器又称为能量控制型传感器。它本身不是一个换能装置，被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用。所以，它们必须具有辅助能源（电源）。这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路测量。

(5) 其他分类法

除以上几种常用的分类法外，还有按其用途分类、科目分类、功能分类、输出信号的性质分类等方法。

实际上传感器是人为进行分类的，目的是可以分类地研究其共性，以利于应用、研究和发展。

1.4 传感器的基本性能

(1) 传感器的静态特性

① 精确度 是精密度和准确度二者意义的总和。精确度指标中精度等级的概念非常

重要。

② 稳定性 传感器在室温条件下,经过规定的时间间隔后,其输出与起始标定时的输出之间的差异。

③ 线性度 传感器的输入-输出关系曲线与某一选定的拟合直线之间的偏差。

④ 灵敏度 传感器输出的变化值与相应的被测量的变化值之比。

⑤ 量程范围 是指传感器测量上限和下限的范围。

⑥ 分辨率 传感器在规定测量范围内,可能检测出的被测信号的最小增量。

⑦ 重复性 传感器在同一工作条件下,输入量按同一方向作全量程连续多次测试时,所得特性曲线间的一致程度。

⑧ 滞环 传感器在正向(输入量增大)和反向(输入量减少)行程过程中,其输入-输出特性的不重合程度。

⑨ 静态误差 传感器在满量程内,任一点输出值相对理论值的偏离程度。

⑩ 漂移 在一定时间间隔内,传感器在外界干扰下,输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移。

(2) 传感器的动态特性

① 频响 是指传感器在能保持其各项性能指标的情况下,能工作的最高频率。

② 稳定时间 是指从输入信号阶跃变化起,到输出信号进入并不再超过最终稳态值规定的允差区时的时间间隔。

(3) 科学技术的发展对传感器性能的要求

随着科学技术的发展,人们要求获得的信息不断地增加,因而对传感器也提出了越来越高的要求。概括起来有以下几个方面。

① 高性能 如高灵敏度,高精度,线性,再现性,高速响应,互换性,无滞后现象等。

② 高可靠性 如长寿命,耐恶劣环境,遇到破坏时具有失效保险功能。

③ 小型化集成传感器 将敏感元件与信号测量及处理电路都集成在同一芯片上,使检测与信号处理一体化,从而使得整个传感器体积小型化。

④ 多维化传感器 利用电子扫描方法,把多个传感器单元制造在一起,使其可以识别空间和复杂物体的状态,即所谓多维化传感器。

⑤ 智能化 是传感器的一个极为重要的发展方向。

⑥ 利用最新原理开发新型传感器 由于科学技术的发展,人们获取的信息范围越来越大,对于测量的要求越来越高。因而要求利用新原理(新的物理、化学、生物效应)开发、研制新型传感器。例如在机器人工业中极需仿人五官功能的新传感器,又如在宇宙、地球科学和海洋开发等领域也需要大量的新型传感器。

1.5 传感器技术的发展趋势

传感器技术所涉及的知识非常广泛,渗透到各个学科领域。但是它们的共性是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性,将非电量转换成电量。所以如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论,以达到高质量的转换效能,是传感器技术发展的总趋势。

当前,传感器技术的主要发展趋势,一是开展基础研究,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化与智能化。

(1) 发现新现象

物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理，发现新现象与新效应是发展传感技术的重要的工作，是研制新型传感器的重要基础。例如，日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器，是传感器技术的重大突破。其灵敏度比霍尔器件高，仅次于超导量子干涉器件，而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单。它可用于磁成像技术，具有广泛推广价值。

(2) 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础。由于材料科学的进步，人们在制造时，可任意控制它们的成分，从而可以设计制造出用于各种传感器的功能材料。

(3) 采用微细加工技术

半导体技术中的加工方法（如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺）都可应用于传感器制造，从而制造出各式各样新型传感器。

(4) 研究多功能集成传感器

日本丰田研究所开发出同时检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 等多种离子的传感器。这种传感器的芯片尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ，仅用一滴液体，如一滴血液，即可同时快速检测出其中 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 的浓度，对医院临床非常方便实用。

(5) 智能化传感器

智能传感器是一种带微处理器的传感器，它兼有检测、判断和信息处理功能。其典型产品，如美国图尼尔公司的 ST-3000 型智能传感器，采用半导体工艺，在同一芯片上制作 CPU、EPROM 和静压、压差、温度等三种敏感元件。另外还有 MEMS，MEMS 通常是由传感器、信息单元、执行器和通信/接口单元等组成。它可从需要观测与控制的对象中获取光、声、压力、温度等信息，转换成电信号并按要求处理、提取信息，通过执行器对目标实施控制或显示；同时，系统通过通信/接口单元以光、电或磁的形式与其他微系统保持信息联系。

(6) 新一代航天传感器研究

众所周知，在航天器的各大系统中，传感器对各种信息参数的检测，确保航天器按预定程序正常工作，起着极为重要的作用。随着航天技术的发展，航天器上需要的传感器越来越多，对其指标性能都有严格要求。为了满足这些要求，必须采用新原理、新技术研制出新型的航天传感器。

(7) 仿生传感器

传感器发展的新趋势是仿生传感器的研究，特别是在机器人技术向智能化高级机器人发展的今天。仿生传感器就是模仿人的感觉器官的传感器，即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、触觉传感器等。目前只有视觉传感器与触觉传感器得到了比较好的解决。

第 2 章 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是利用电阻应变效应制成的传感器。它是由电阻应变片和弹性敏感元件组合起来的,将应变片粘贴在各种弹性敏感元件上,当弹性敏感元件受到外部作用力、力矩、压力、位移、加速度等各种参数作用时,弹性敏感元件将产生位移、应力和应变,电阻应变片再将这些变化转换成电阻的变化。将电阻应变片粘贴到各种不同的弹性敏感元件上,可构成检测各种参数的电阻应变式传感器,是目前应用最广泛的传感器之一。

随着微电子技术、新材料技术以及新的加工工艺的发展,新型传感器不断出现,为测试技术开拓了新的领域。而电阻应变测试技术具有其独特的优点,仍将是一种重要的测试手段。电阻应变式传感器具有以下主要的优点。

- ① 结构简单,使用方便,性能稳定、可靠。
- ② 易于实现检测过程自动化和多点同步测量、远距离测量和遥测。
- ③ 灵敏度高,测量速度快,适合静态、动态测量。
- ④ 可以测量多种物理量。

电阻应变式传感器广泛应用于航空、机械、电力、化工、建筑、医学等领域。

2.1 电阻应变式传感器的工作原理

2.1.1 基本原理

电阻应变式传感器的工作原理是基于金属的应变效应。金属丝的电阻是随着其所受机械变形(拉伸或压缩)的大小而发生相应的变化,这种现象称为金属的电阻应变效应。

(1) 金属导线的电阻定律

金属导线的电阻值与导线长度 l 成正比,与导线截面积 S 成反比,即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——金属导线电阻率。

(2) 金属材料的应变电阻效应

金属材料的电阻率的相对变化与体积的相对变化成正比,即

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \quad (2-2)$$

式中 c ——由一定材料和加工方式决定的系数;

V ——体积。

(3) 材料的泊松比定律

在弹性范围内金属丝沿长度方向伸长时,径向尺寸缩小;反之亦然。即轴向应变 ϵ 与径向应变 ϵ_r 有下面关系成立

$$\epsilon_r = -\mu\epsilon \quad (2-3)$$

(4) 半导体材料的压阻效应

对于半导体材料施加应力(外力)时,除了产生变形外,材料的电阻率也随着变化。这