



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器技术

◎ 陈建元 主编



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器技术

主 编 陈建元

参 编 (以姓氏笔画为序)

刘 璟 李武森 吴 涓

况迎辉 崔建伟

主 审 贾伯年 黄维一



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可作为仪器仪表专业以及其他相关专业本科生的选修课教材。传感器技术的内容很多,本书优先选择理论上具有代表性、有使用背景、有实用化前景的传感器内容进行分析 and 列举。考虑到启发学生对知识比较、联想与发散思维的教学要求,在内容安排上进行了大类合并。各章末思考题加入了一些发展性问题,不一定有精确解答,只求拓宽读者思维。强调共性,鼓励比较思考是本教材的主要特点。

为方便教师教学,本书配有电子教案,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件索取,索取邮箱: wx2677@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术/陈建元主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-24778-4

I. 传… II. 陈… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 118775 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王小东 版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

保定市中国美凯印刷有限公司印刷

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23 印张 · 569 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-24778-4

定价: 39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379728

封面无防伪标均为盗版

前言

传感技术在现代化事业中的重要性已被人们所认识。传感器技术是实现传感的关键。随着“信息时代”的到来,国内外已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内高校许多专业都开设了相应课程,传感器方面的教材陆续问世。这些著作,在原理性与实用性、传统性与新型性,以及广度与深度上各有侧重。随着高、新技术的发展,为专业面的拓宽和适应传感器开发、应用的需要,更希望有两者兼顾的教材。为此,作者从教学实践要求出发撰写了本书。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状以及教学思想的发展,本书通过精选内容,归类编排的方法增强传感器教学的系统性,这就有利于读者对传感器的现状和发展有一个完整的概念。鉴于传感器种类繁多,涉及的学科广泛,不可能也没有必要对各种具体传感器逐一剖析。本书在编写中力求突出共性基础,对各类传感器则注重机理分析与应用介绍,并择要编入设计内容。

本书的编排采用按原理大分类的方法。把近代发展的传感技术分散到几个分类中,并把几个共性技术在概论后,分散到几个分类中详讲。这样编排的目的是为了增强学生发散思维的能力。在原理分类讲述之后安排了具有交叉内容的应用性篇幅(第7章过程参数检测中的常用传感器技术),以求提高学生的归纳类比能力。考虑到有些教学安排,在传感器课程之后未设综合应用课程,本书在最后一章增强了信息处理内容。具体思路如下:

经典的结构型传感器:电阻、电容、电感传感器合为一章。当今新发展的硅微传感器与结构相关,也合于此章。在这一章中还主要强调了差动信号检测的概念。

压电传感器、表面声波传感器与超声波传感器合为一章,有利于讲解机电转换的概念。在这一章中强调了传感器的动态特性问题。在调理电路中讨论了高阻抗信号源所带来的问题。本章还提出了传感器中普遍存在的“横向干扰”问题。

人类对光的认识自古至今不断深化。我们把可见光、红外光、激光和光纤传感器合并为光电传感器一章讨论,以求突出共性问题,便于比较。这一章讨论了信噪比问题以及弱信号检测问题。

在光电传感器之后,单独开设了磁敏传感器一章,希望加深学生非接触检测的思想。光和磁更多地涉及到近代物理学概念,也涉及到固态传感器诸多内容。

数字式传感器中强调“栅”空间划分的共性思想。电路细分的共性也是调

理电路中要强调的内容。

为了使读者进一步了解传感器的应用背景,本书开设了过程检测问题的讨论。也补讲了温度传感器和力平衡传感器内容。

最后两章:化学与生物传感器、智能传感器,简介了近代传感技术的两个大方向。许多其他近代传感技术问题已经分散到其他章节中。

全书共9章,可作为高等学校检测技术、仪器仪表及自动控制等专业的教材。也可作为跨专业选修课教材。除概论外,传感器各篇均具有一定的独立性。可供有关专业本科生、大专生和研究生选用。同时,也可作为有关工程技术人员参考书。

本书由东南大学陈建元主编。参加编写的有东南大学陈建元(第1、3、4、8章)、崔建伟(第2章)、南京理工大学李武森(第5章)、东南大学刘璟(第6章)、况迎辉(第7章)、吴涓(第9章)。全书由陈建元负责统稿,并由东南大学贾伯年和黄维一教授主审。

本教材引用了许多文献与教材资料,在此向相关作者一并致谢。

传感器技术涉及的学科众多,而编者学识有限,书中错误与缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 传感器的概念与发展	1
1.1.1 传感器基本概念	1
1.1.2 传感器的构成与分类	2
1.1.3 传感器技术的发展趋势	3
1.2 传感器技术基础	5
1.2.1 传感器的特性与指标	5
1.2.2 传感器设计中的共性技术	12
第2章 阻抗式结构型传感器	17
2.1 阻抗式结构型传感器的敏感元件	17
2.1.1 弹性敏感元件的主要性能	17
2.1.2 常用弹性元件的结构和性能	18
2.1.3 弹性敏感元件的材料	22
2.2 电阻应变式传感器	23
2.2.1 电阻应变计的基本原理与结构	23
2.2.2 电阻应变计的主要特性	26
2.2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿	27
2.3 电容式传感器	29
2.3.1 电容式传感器的原理与结构	29
2.3.2 应用中存在的问题及其改进措施	32
2.4 电感式传感器	36
2.4.1 电感式传感器的原理	36
2.4.2 自感式传感器的原理与结构	36
2.4.3 互感式传感器的原理与结构	38
2.4.4 自感式和互感式传感器的误差	42
2.4.5 电涡流式传感器	43
2.5 调理电路	47
2.5.1 电桥式测量电路	47
2.5.2 阻抗式传感器的差动结构	53
2.5.3 电流电压积分差动电路	55
2.5.4 直接放大	57
2.6 微机械传感器	58
2.6.1 微机电系统的分类和特点	59
2.6.2 微机械传感器的制造技术	60

2.6.3 微机械传感器的结构与原理	61
2.7 结构型阻抗式传感器应用与设计示例	64
2.7.1 电阻应变式传感器	64
2.7.2 电容式传感器	66
2.7.3 电感式传感器	68
2.7.4 微机械传感器	70
思考题	72
第3章 压电式传感器	75
3.1 压电效应及材料	75
3.1.1 压电效应	75
3.1.2 压电材料	77
3.1.3 压电振子	81
3.2 压电传感器等效电路和测量电路	82
3.2.1 等效电路	82
3.2.2 测量电路	83
3.3 压电式传感器及其应用	88
3.3.1 压电式加速度传感器	88
3.3.2 压电式力传感器	92
3.3.3 压电角速度陀螺	92
3.4 声波传感技术	94
3.4.1 SAW 传感器	94
3.4.2 超声检测	100
思考题	106
第4章 光电式传感器	108
4.1 光源与光辐射体概述	108
4.1.1 光的特性	108
4.1.2 光源与光辐射体	109
4.2 光电效应及器件	115
4.2.1 外光电效应	115
4.2.2 内光电效应	116
4.2.3 热探测器	118
4.3 光电器件的特性	121
4.3.1 光照特性	121
4.3.2 光谱特性	122
4.3.3 响应时间	122
4.3.4 峰值探测率	123

4.3.5 温度特性	123	5.4 机械式、感应式与磁通门式磁敏 传感器	195
4.4 探测器噪声和低噪声电子设计	123	5.4.1 机械式磁敏传感器	195
4.4.1 噪声	123	5.4.2 感应式磁敏传感器	196
4.4.2 探测器噪声的类型	124	5.4.3 磁通门式磁敏传感器	200
4.4.3 低噪声电子设计	125	5.5 磁共振式及超导式磁敏传感器	204
4.5 新型光电探测器	130	5.5.1 光泵式磁敏传感器	204
4.5.1 光位置传感器	130	5.5.2 质子旋进式磁敏传感器	208
4.5.2 量子阱探测器	130	5.5.3 超导磁敏传感器	209
4.5.3 光电磁探测器	132	5.6 光纤磁敏传感器	217
4.5.4 固态图像传感器	132	5.6.1 法拉第效应光纤磁敏传感器	217
4.6 激光传感技术	137	5.6.2 磁致伸缩效应光纤磁场传感器	217
4.6.1 干涉测试技术	138	5.6.3 光纤磁场传感器的应用	218
4.6.2 衍射测试技术	140	5.7 微波传感器	219
4.6.3 激光多普勒测速技术	142	5.7.1 微波的概念、特点及应用	219
4.7 光纤传感器	145	5.7.2 微波传感系统的原理、特点及 关键部件	220
4.7.1 光纤传感器基础	145	5.7.3 典型微波传感系统及其应用	223
4.7.2 光纤传感器中几种常用的光强 调制技术	149	思考题	234
4.7.3 光纤干涉传感器原理	153	第6章 数字式传感器	236
4.8 光电式传感器	154	6.1 感应同步器	236
4.8.1 光电式传感器的类型	154	6.1.1 感应同步器的结构与类型	236
4.8.2 光电尺寸测量举例	156	6.1.2 感应同步器的工作原理	238
4.8.3 激光传感技术实例	157	6.1.3 数字测量系统	241
4.8.4 光纤传感器实例	162	6.1.4 感应同步器的接长使用	243
4.8.5 机器人视觉传感器	166	6.2 编码器	244
思考题	170	6.2.1 光电编码器的基本结构与原理	244
第5章 磁敏传感器	172	6.2.2 测量电路	248
5.1 霍尔式磁敏传感器	172	6.3 光栅	249
5.1.1 霍尔效应	172	6.3.1 光栅的结构与测量原理	250
5.1.2 霍尔元件的主要技术参数	176	6.3.2 数字转换原理	251
5.1.3 霍尔元件的等效电路及不等位 电势补偿原理	177	6.4 容栅式传感器	254
5.1.4 霍尔磁传感器电路分析与设计	177	6.4.1 容栅传感器的工作原理	254
5.1.5 霍尔集成电路	178	6.4.2 数字测量原理	255
5.1.6 霍尔式磁敏传感器的应用	179	6.5 磁栅传感器	257
5.2 结型磁敏器件	181	6.5.1 磁栅的结构与工作原理	257
5.2.1 磁敏二极管	181	6.5.2 数字测量原理	259
5.2.2 磁敏晶体管	184	6.6 频率式传感器	260
5.3 磁阻式磁敏传感器	187	6.6.1 振弦式频率传感器	261
5.3.1 半导体磁阻传感器	187	6.6.2 振筒式频率传感器	263
5.3.2 韦根德器件	190	6.7 数字传感器信号远传时的两个技术 问题	264
5.3.3 铁磁性金属薄膜磁敏电阻	193	6.7.1 传输线路引起的数字信号畸变	
5.3.4 巨磁阻效应器件	195		

与抑制	264	思考题	301
6.7.2 远距离供电的稳压方法	265	第8章 化学与生物传感器	302
思考题	266	8.1 化学传感器	302
第7章 过程参数检测中的常用传感器		8.1.1 电位型电化学传感器原理	302
技术	267	8.1.2 离子敏感器件	303
7.1 概述	267	8.1.3 气敏传感器	306
7.1.1 过程参数检测的意义	267	8.2 生物传感器	310
7.1.2 参数检测应考虑的问题	267	8.2.1 酶传感器	311
7.1.3 过程检测技术的分类	267	8.2.2 微生物传感器	313
7.2 温度检测	268	8.2.3 免疫传感器	316
7.2.1 温度和温标	268	8.2.4 生物组织传感器	318
7.2.2 测温方法分类	268	8.2.5 光生物传感器	319
7.2.3 典型测温方法和传感器	269	思考题	320
7.3 压力检测	277	第9章 智能传感器	321
7.3.1 压力的概念和表示方法	277	9.1 智能传感器概述	321
7.3.2 常用压力检测方法	278	9.2 智能传感器的构成、功能与特点	321
7.3.3 常用压力传感器和压力检测		9.2.1 智能传感器的实现结构	322
仪表	278	9.2.2 智能传感器的功能与特点	323
7.3.4 压力检测仪表的校准	283	9.3 智能传感器的实现途径	325
7.4 流量检测	283	9.3.1 集成化	326
7.4.1 流量的概念	284	9.3.2 软件化	328
7.4.2 流量计与流量检测方法分类	284	9.3.3 多传感器信息融合	341
7.4.3 典型流量计	284	9.3.4 网络化	352
7.5 物位检测	292	9.4 典型智能传感器简介	355
7.5.1 液位检测	292	思考题	358
7.5.2 料位检测	299	参考文献	359
7.5.3 相界面检测	301		

第1章 概 论

1.1 传感器的概念与发展

1.1.1 传感器基本概念

传感器 (Transducer/Sensor) 的定义是: 能感受规定的被测量并按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。其中, 敏感元件 (Sensing Element) 是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分; 转换元件 (Transducer Element) 是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号以及其他某种可用信号的部分。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。可以预料, 当人类跨入光子时代, 光信息成为更便于快速、高效地处理与传输的可用信号时, 传感器的概念将随之发展成为: 能把外界信息转换成光信号输出的器件。

传感器的作用就是感知与测量。在人类文明史的历次产业革命中, 感受、处理外部信息的传感技术一直扮演着一个重要的角色。在 18 世纪产业革命以前, 传感技术由人的感官实现: 人观天象而仕农耕, 察火色以冶铜铁。从 18 世纪产业革命以来, 特别是在 20 世纪信息革命中, 传感技术越来越多地由人造感官, 即工程传感器来实现。目前, 工程传感器应用如此广泛, 以至可以说任何机械、电气系统都离不开它。现代工业、现代科学探索、特别是现代军事都要依靠传感器技术。一个大国如果没有自身传感技术的不断进步, 必将处处被动。

现代技术的发展, 创造了多种多样的工程传感器。工程传感器可以轻而易举地测量人体所无法感知的量, 如紫外线、红外线、超声波、磁场等。从这个意义上讲, 工程传感器超过人的感官能力。有些量虽然人的感官和工程传感器都能检测, 但工程传感器测量得更快、更精确。例如虽然人眼和光传感器都能检测可见光, 进行物体识别与测距, 但是人眼的视觉残留约为 0.1s, 而光晶体管的响应时间可短到纳秒以下; 人眼的角分辨率为 $1'$, 而光栅测距的精确度可达 $1''$; 激光定位的精度在 $3 \times 10^4 \text{ km}$ 范围内可达 10cm 以下; 工程传感器可以把人所不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像。CT 技术就是一个例子, 它把人体的内部形貌用断层图像显示出来, 其他的例子还有遥感技术。

但是, 目前工程传感器在以下几方面还远比不上人类的感官: 多维信息感知、多方面功能信息的感知功能、对信息变化的微分功能、信息的选择功能、学习功能、对信息的联想功能、对模糊量的处理能力以及处理全局和局部关系的能力。这正是今后传感器智能化的一些发展方向。随着信息科学与微电子技术, 特别是微型计算机与通信技术的迅猛发展, 近期传感器的发展走上了与微处理器内微型计算机相结合的必由之路, 智能 (化) 传感器的概念应运而生。

传感器技术, 则是涉及传感 (检测) 原理、传感器件设计、传感器开发和应用的综合技术, 因此传感器技术涉及多学科交叉研究。

1.1.2 传感器的构成与分类

传感器一般由敏感元件、转换元件、调理电路组成。

敏感元件是指能直接感受或响应被测量的部件，是构成传感器的核心。

转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成可用的输出信号的部件，通常这种输出信号以电量的形式出现。

调理电路是把传感元件输出的电信号转换成便于处理、控制、记录和显示的有用电信号所涉及的有关电路。图 1-1 为传感器组成框图。

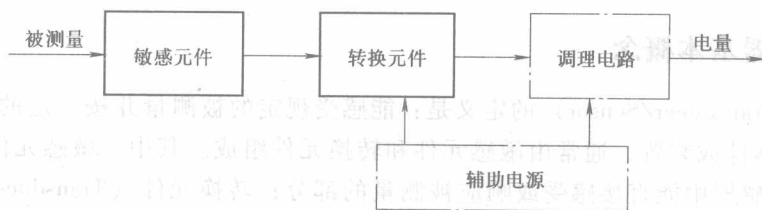


图 1-1 传感器组成框图

传感器主要按其工作原理和被测量来分类。传感器按其工作原理，一般可分为物理型、化学型和生物型三大类；按被测量——输入信号分类，一般可以分为温度、压力、流量、物位、加速度、速度、位移、转速、力矩、湿度、粘度、浓度等传感器。传感器按其工作原理分类便于学习研究，把握本质与共性；按被测量来分类，能很方便地表示传感器的功能，便于选用。本书的编排主要是按其工作原理分类，最后安排一章参数检测内容从被测量角度讨论传感器原理应用。

物理型传感器又可分为结构型传感器和物性型传感器。物性型传感器是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应感受被测量，并转换成电信号的传感器。在物性型传感器中，敏感元件与转换元件合为一体，一次完成“被测非电量→有用电量”的直接转换。结构型传感器是以结构为基础，利用某些物理规律来感受被测量，并将其转换成电信号的传感器。这里需要加入转换元件，实现“被测非电量→有用非电量→有用电量”的间接转换。

按照敏感元件输出能量的来源又可以把传感器分成如下三类：

(1) 自源型 为仅含有转换元件的最简单、最基本的传感器构成型式。此型式的特点是：不需外能源；其转换元件具有从被测对象直接吸取能量，并转换成电量的电效应；输出能量较弱，如热电偶、压电器件等。

(2) 带激励源型 它是转换元件外加辅助能源的构成型式。这里的辅助能源起激励作用，它可以是电源，也可以是磁源。如某些磁电式和霍尔等电磁感应式传感器即属此型。特点是：不需要变换（测量）电路即可有较大的电量输出。

(3) 外源型 由利用被测量实现阻抗变化的转换元件构成，它必须通过外电源经过测量电路在转换元件上加入电压或电流，才能获得电量输出。这些电路又称“信号调理与转换电路”。常用的如电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器和脉冲调宽电路等。

对于自源型和带激励源型传感器，由于其转换元件起着能量转换的作用，故谓“能量转换型传感器”，外源型又称能量控制型。

能量转换型传感器中用到的物理效应有：压电效应、磁致伸缩效应、热释电效应、光电

动势效应、光电放射效应、热电效应、光子滞后效应、热磁效应、热电磁效应、电离效应等。

能量控制型传感器中用到的物理效应有：应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电阻效应、霍尔效应、约瑟夫逊效应以及阻抗（电阻、电容、电感）几何尺寸的控制等。

对传感器的基本要求如下：

- 1) 足够的容量——传感器的工作范围或量程足够大；具有一定过载能力。
- 2) 灵敏度高，精度适当——即要求其输出信号与被测输入信号成确定关系（通常为线性），且比值要大；传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。
- 3) 响应速度快，工作稳定，可靠性好。
- 4) 适用性和适应性强——体积小，重量轻，动作能量小，对被测对象的状态影响小；内部噪声小而又不易受外界干扰的影响；其输出力求采用通用或标准形式，以便与系统对接。
- 5) 使用经济——成本低，寿命长，且便于使用、维修和校准。

传感器的分类见表 1-1。

表 1-1 传感器的分类

分 类 法	型 式	说 明
按 构 成 基 本 效 应 分	物理型、化学型、生物型	分别以转换中的物理效应、化学效应等命名
按 构 成 原 理 分	结构型	以其转换元件结构参数特性变化实现信号转换
	物性型	以其转换元件物理特性变化实现信号转换
按 能 量 关 系 分	能量转换型	传感器输出量直接由被测量能量转换而得
	能量控制型	传感器输出量能量由外源供给,但受被测输入量控制
按 作 用 原 理 分	应变式、电容式、压电式、热电式等	以传感器对信号转换的作用原理命名
按 输 入 量 分	位移、压力、温度、流址、气体等	以被测量命名(即按用途分类法)
按 输 出 量 分	模拟式	输出量为模拟信号
	数字式	输出量为数字信号

1.1.3 传感器技术的发展趋势

1. 传感器的集成化和微型化

所谓集成化，就是在同一芯片上，将众多同类型的单个传感器件集成为一维、二维阵列型传感器，或将传感器件与调理、补偿等处理电路集成一体化。前一种集成化使传感器在可见光图像传感器、电容指纹传感器中已经实现，并正在向更高密度发展。目前，在红外成像信号检测领域，世界各国都热衷于二维混合红外焦平面阵列（Infrared Focal-Plane Arrays, IRFPAs），结构如图 1-2 所示。后一种集成化传感器将处理电路集成一体化，极大地方便了使用。目前市场上已有多种中、低精度的产品，但高精度集成化传感器仍有待研发。

2. 传感器的数字化与智能化

为了使传感器与计算机直接相连接，发展数字化传感器是很重要的。数字技术是信息技

术的基础,数字化又是智能化的前提,智能式传感器离不开传感器的数字化。

所谓智能化传感器(Smart Sensors)是以专用微处理器控制的、具有双向通信功能的传感器系统。它不仅具有信号检测、转换和处理功能,同时还具有存储、记忆、自补偿、自诊断等多种功能。按构成模式,智能式传感器有分立模块式和集成一体式之分。

预计未来的10年,传感器智能化将首先发展成由硅微传感器、微处理器、微执行器和接口电路等多片模块组成的闭环传感器系统。如果通过集成技术进一步将上述多片相关模块全部制作在一个芯片上形成单片集成,就可形成更高级的智能传感器了。

还有两点要特别指出:

第一,固态功能材料(如半导体、电介质、超导体等)的进一步开发,以及集成技术、微机械加工技术的不断完善,为传感器的集成化、微型化和智能化开辟了广阔的前景。如今,传感器的发展有一股强劲的势头,这就是正在摆脱传统的结构与生产,而转向优先选用硅材料,以微机械加工技术为基础,以仿真程序为工具的微结构设计,来研制各种敏感机理的集成化、阵列化、智能化的硅微传感器。这一现代传感器技术国外称之为“专用集成微型传感器技术”(Application Specific Integrated Microtransducer, ASIM)。这种硅微传感器一旦付诸实用,将对众多高科技领域——特别是航空航天、遥感遥测、环境保护、生物医学和工业自动化领域有着重大的影响。

第二,微传感器网络正在研究。随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现。由这些微型传感器构成的传感器网络引起了人们的极大关注。这种传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和通信技术,能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,获得详尽而准确的信息,传送到需要这些信息的用户。传感器网络是信息感知和采集的一场革命。传感器网络作为一个全新的研究领域,在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题。

3. 开发新型传感器

鉴于传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。其中利用量子力学诸效应研制的高灵敏阈传感器,用来检测极微弱信号,是传感器技术发展的新趋势之一。例如:利用核磁共振吸收效应的磁敏传感器,可将检测限扩展到地磁强度的 10^{-2} ;利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器,可测量 10^{-6} K的超低温;由于光子滞后效应的利用,出现了响应速度极快的红外传感器,等。

利用化学效应和生物效应开发的可供实用的生物传感器正在引起关注。生物传感器对信

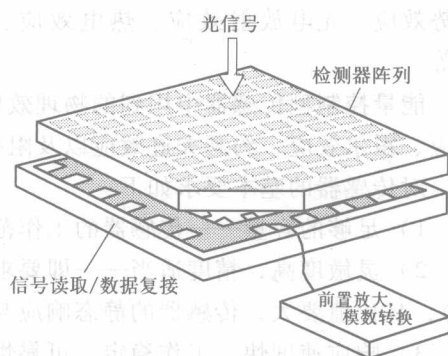


图 1-2 二维混合红外焦平面阵列

息的高选择性和灵敏度吸引了众多科学人员从多方面开展研究。

传感器今后的研发工作主要在开展基础研究、扩大传感器的功能与应用范围两个方面。

1.2 传感器技术基础

1.2.1 传感器的特性与指标

1. 传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测输入量各个值处于稳定状态时的输出-输入关系,研究静态特性主要考虑其非线性、滞后、重复、灵敏度、分辨力等方面。

(1) 线性度 线性度又称非线性误差,是表征传感器输出-输入校准曲线与所选定的拟合直线(作为工作直线)之间的吻合(或偏离)程度的指标。通常用相对误差来表示线性度或非线性误差,即

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 为输出平均值与拟合直线间的最大偏差; $y_{F.S.}$ 为理论满量程输出值。

传感器的输出-输入关系或多或少地存在非线性问题,在不考虑迟滞、蠕变、不稳定性等因素的情况下,其静特性可用下列多项式代数方程表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-2)$$

式中, y 为输出量; x 为输入量; a_0 为零点输出; a_1 为理论灵敏度; a_2 、 a_3 、 $\cdots$ 、 a_n 分别为非线性项系数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形式。静态特性曲线可实际测试获得,在非线性误差不太大的情况下,总是采用直线拟合的方法来线性化。显然,选定的拟合直线不同,计算所得的线性度数值也就不同。选择拟合直线应保证获得尽量小的非线性误差,并考虑使用与计算方便。下面介绍几种目前常用的拟合方法:

1) 理论直线法:以传感器的理论特性线作为拟合直线,它与实际测试值无关。优点是简单、方便,但通常 $\Delta L_{\max}$ 很大。

2) 端点线法:以传感器校准曲线两端点间的连线作为拟合直线。其方程式为

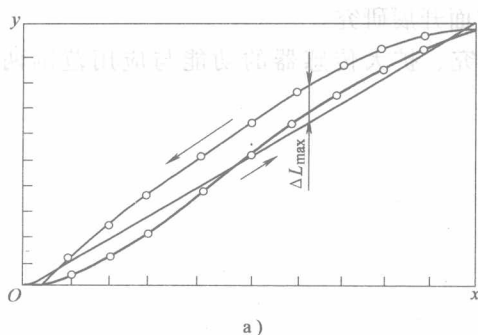
$$y = b + kx \quad (1-3)$$

式中, b 和 k 分别为截距和斜率。这种方法也很简便,但通常 $\Delta L_{\max}$ 也很大。

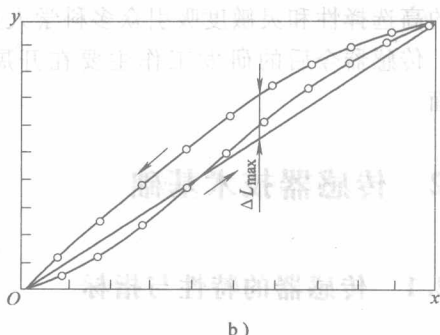
3) 最佳直线法:这种方法以“最佳直线”作为拟合直线,该直线能保证传感器正反行程校准曲线对它的正、负偏差相等并且最小,由此所得的线性度称为“独立线性度”。显然,这种方法的拟合精度最高。通常情况下,“最佳直线”只能用图解法或通过计算机解算来获得。

4) 最小二乘法:这种方法按最小二乘原理求取拟合直线,该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。最小二乘法的拟合精度很高,但校准曲线相对拟合直线的最大偏差绝对值并不一定最小,最大正、负偏差的绝对值也不一定相等。

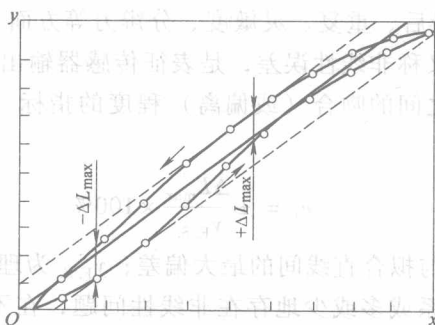
几种不同的拟合方法如图 1-3 所示。



a)



b)



c)

图 1-3 几种不同的拟合方法

a) 理论直线法 b) 端点线法 c) 最佳直线法

(2) 回差 (滞后) 回差 (Hysteresis) 是反映传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程过程中输出-输入曲线的不重合程度的指标。通常用正反行程输出的最大差值 $\Delta H_{\max}$ 计算, 并以相对值表示 (如图 1-4 所示)。

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 重复性 重复性 (Repeatability) 是衡量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变动时, 所得特性曲线间一致程度的指标。各条特性曲线越靠近, 重复性越好。

重复性误差反映的是校准数据的离散程度, 属随机误差, 因此应根据标准偏差计算, 即

$$e_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为各校准点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值; a 为置信系数, 通常取 2 或 3。 $a=2$ 时, 置信概率为 95.4%; $a=3$ 时, 置信概率为 99.73%。

标准偏差按贝塞尔公式法计算:

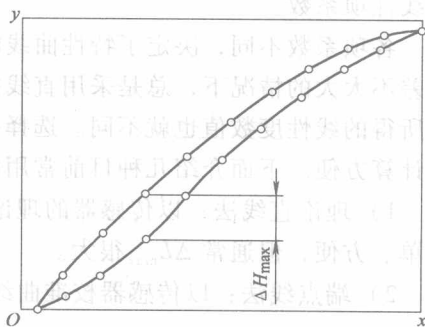


图 1-4 回差 (滞后) 特性

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-6)$$

式中, y_i 为某校准点之输出值; $\bar{y}$ 为输出值的算术平均值; n 为测量次数。

按上述方法计算所得重复性误差不仅反映了某一传感器输出的一致程度, 而且还代表了在一定置信概率下的随机误差极限值。

(4) 灵敏度 灵敏度 (Sensitivity) 是传感器输出量增量与被测输入量增量之比, 线性传感器的灵敏度就是拟合直线的斜率, 即 $K = \Delta y / \Delta x$, 非线性传感器的灵敏度不是常数, 应以 dy/dx 表示。

实用上由于外源传感器的输出量与供给传感器的电源电压有关, 其灵敏度的表达往往需要包含电源电压的因素。例如某位移传感器, 当电源电压为 1V 时, 每 1mm 位移变化引起输出电压变化 100mV, 其灵敏度可表示为 100mV/(mm · V)。

(5) 分辨力 分辨力 (Resolution) 是传感器在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化量。有时用该值相对满量程输入值之百分数表示, 则称为分辨率。

(6) 阈值 阈值 (Threshold) 是能使传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量值, 即零位附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性, 形成所谓“死区”, 则将死区的大小作为阈值; 更多情况下阈值主要取决于传感器的噪声大小, 因而有的传感器只给出噪声电平。

(7) 稳定性 稳定性 (Stability) 又称长期稳定性, 即传感器在相当长时间内仍保持其性能的能力。稳定性一般以室温条件下经过一规定的时间间隔后, 传感器的输出与起始标定时输出之间的差异来表示, 有时也用标定的有效期来表示。

(8) 漂移 漂移 (Drift) 指在一定时间间隔内, 传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移 (时漂) 和温度漂移 (温漂)。时漂是指在规定条件下, 零点或灵敏度随时间的缓慢变化; 温漂为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

(9) 静态误差 (精度) (Precision) 这是评价传感器静态性能的综合性指标, 指传感器在满量程内任一点输出值相对其理论值的可能偏离 (逼近) 程度。它表示采用该传感器进行静态测量时所得数值的不确定度。静态误差的计算是将非线性误差、回差、重复性误差按几何法综合, 即

$$e_s = \pm \sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_R^2} \quad (1-7)$$

若仍用相对误差表示静态误差, 则有

$$e_s = \pm \frac{(2 \sim 3) \sigma}{Y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-8)$$

2. 传感器的动态特性

动态特性是反映传感器随时间变化的输入量的响应特性。用传感器测试动态量时, 希望它的输出量随时间变化的关系与输入量随时间变化的关系尽可能一致, 但实际并不尽然, 因此需要研究它的动态特性——分析其动态误差。它包括两部分: ①输出量达到稳定状态以后与理想输出量之间的差别; ②当输入量发生跃变时, 输出量由一个稳态到另一个稳态之间的

过渡状态中的误差,由于实际测试时输入量是千变万化的,且往往事先并不知道,故工程上通常采用输入“标准”信号函数的方法进行分析,并据此确立若干评定动态特性的指标。常用的“标准”信号函数是正弦函数与阶跃函数。本节将分析传感器对正弦输入的响应(频率响应)和阶跃输入的响应(阶跃响应)特性及性能指标。

在不考虑各种静态误差的条件下,可以用常系数线性微分方程描述单输入 x 、单输出 y 传感器的动态特性,以下为其动态数学模型:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-9)$$

设 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的初始条件为零,对上式两边逐项进行拉普拉斯变换,可得

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \quad (1-10)$$

由此得传递函数

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-11)$$

传递函数是拉普拉斯变换算子 s 的有理分式,所有系数都是实数,这是由传感器的结构参数决定的。分子的阶次 m 不能大于分母的阶次 n ,这是由物理条件决定的。分母的阶次用来代表传感器的特征:

$n=0$ 时,称为零阶;

$n=1$ 时,称一阶;

$n=2$ 时,为二阶;

n 更大时,为高阶。

分析方法完全借鉴于电路分析课程或控制原理课程中的相应内容,只不过输入量为非电量。

(1) 传感器的频率响应特性 将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入传感器,其输出信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应特性。

设输入幅值为 x 、角频率为 ω 的正弦量

$$x = X \sin \omega t$$

则获得的输出量为

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi)$$

式中, Y 、 φ 分别为输出量的幅值和初相角。

在传递函数式(1-11)中令 $s = j\omega$,代入得

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (1-12)$$

式(1-12)将传感器的动态响应从时域转换到频域,表示输出信号与输入信号之间的关系随着信号频率而变化的特性,故称之为传感器的频率响应特性,简称频率特性或频响特性。其物理意义是:当正弦信号作用于传感器时,在稳定状态下的输出量与输入量之复数比。在形式上它相当于将传递函数式(1-11)中之 s 替换成 $(j\omega)$ 而得,因而又称为频率传递函数,其指数形式为

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y e^{j(\omega t + \varphi)}}{X e^{j\omega t}} = \frac{Y}{X} e^{j\varphi} \quad (1-13)$$

由此可得频率特性的模

$$A(\omega) = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| = \frac{Y}{X} \quad (1-14)$$

称为传感器的动态灵敏度（或称增益）。 $A(\omega)$ 表示输出输入的幅值比随 ω 而变，故又称为幅频特性。以 $\operatorname{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$ 和 $\operatorname{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$ 分别表示 $A(\omega)$ 的实部和虚部，得到频率特性的相位角

$$\varphi(\omega) = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]}{\operatorname{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]} \right\} \quad (1-15)$$

称之为相频特性。对传感器而言，通常为负值，即输出滞后于输入。

(2) 传感器的阶跃响应特性 当给静止的传感器输入一个单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-16)$$

时，其输出信号称为阶跃响应，可参见图 1-5。

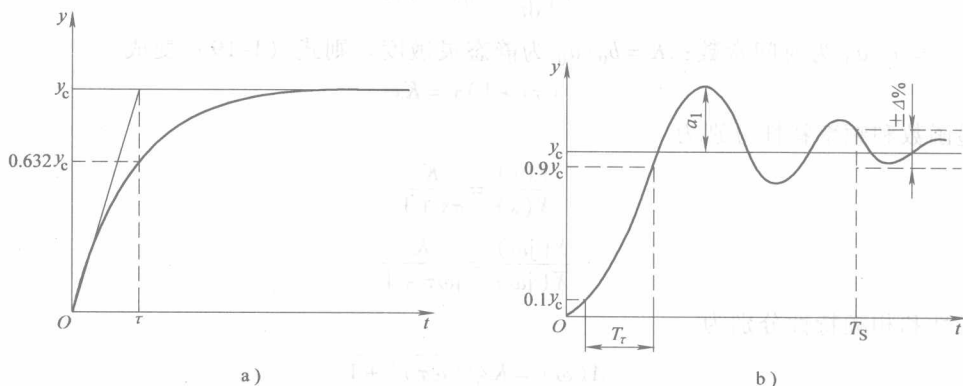


图 1-5 阶跃响应曲线

a) 一阶系统 b) 二阶系统

衡量阶跃响应的指标有：

- 1) 时间常数 τ ：传感器输出值上升到稳态值 y_c 的 63.2% 所需的时间。
- 2) 上升时间 T_r ：传感器输出值由稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间，但有时也规定其他百分数。
- 3) 响应时间 T_s ：输出值达到允许误差范围 2% 所经历的时间，或明确为“百分之二响应时间”。
- 4) 超调量 a_1 ：响应曲线第一次超过稳态值之峰高，即 $a_1 = y_{\max} - y_c$ ，或用相对值 $a = [(y_{\max} - y_c) / y_c] \times 100\%$ 表示。
- 5) 衰减率 φ ：指相邻两个波峰（或波谷）高度下降的百分数： $\varphi = [(a_n - a_{n+2}) / a_n] \times 100\%$ 。