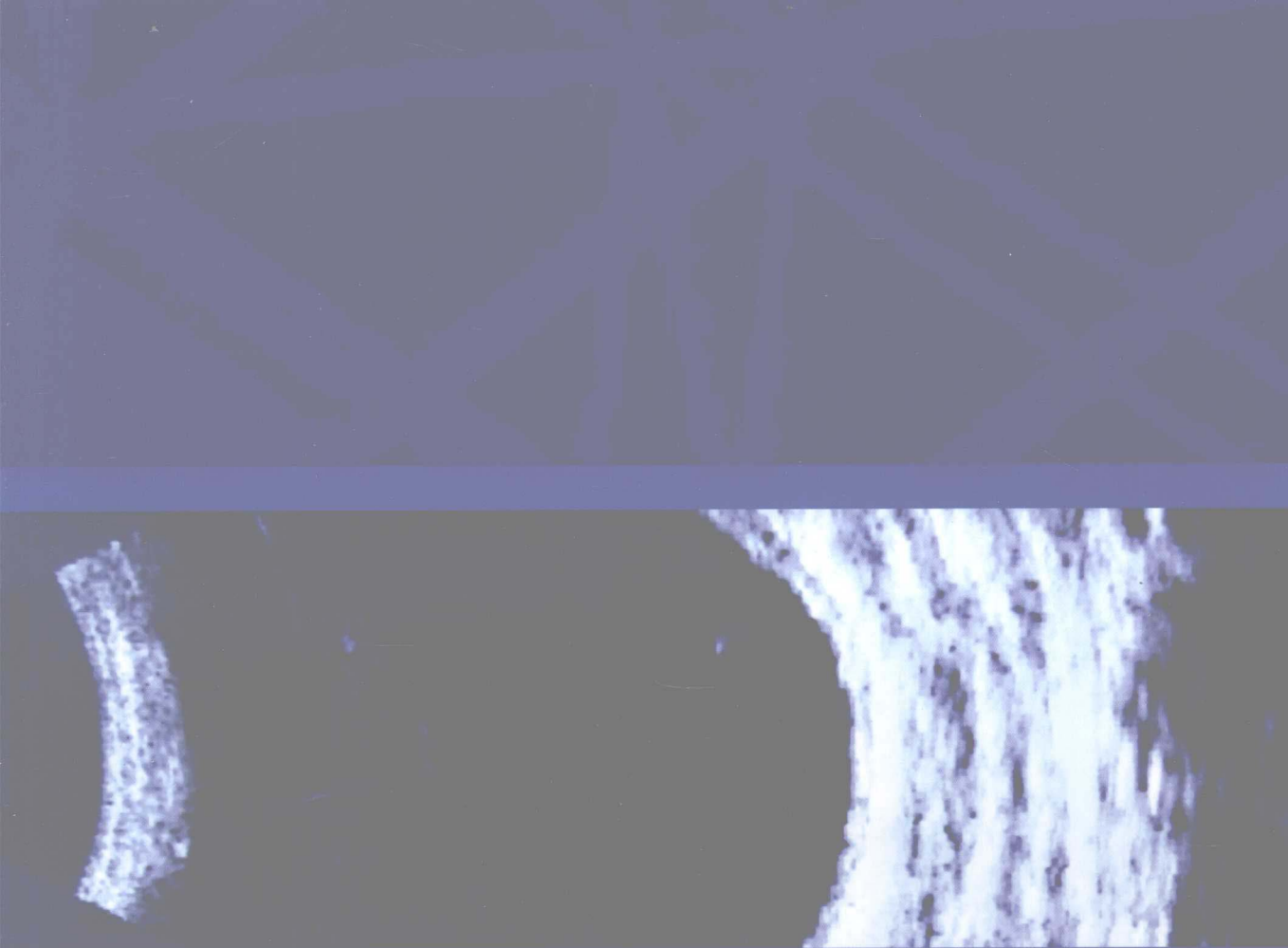




现代传感器技术 及应用

狄长安 王芳 江剑 陈捷 编著

兵器工业出版社

现代传感器技术及应用

狄长安 王芳 江剑 陈捷 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了传感器的作用与定义、组成、分类及选用依据；介绍了光纤传感器、固态图像传感器、超声波传感器、磁敏传感器、MEMS 技术及其应用、生物传感器、智能传感器等传感器的工作原理、性能、测量电路及应用；介绍了多传感器技术的基础知识及相关应用；探讨了改善传感器性能的技术途径。

本书可作为测控技术及仪器、精密仪器与机械、工业自动化、计算机应用、机械电子工程、应用电子等专业的教科书或参考书，亦可供相关专业的研究生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代传感器技术及应用/狄长安等编著. —北京：兵器工业出版社，2007. 11

ISBN 978 - 7 - 80172 - 868 - 5

I. 现… II. 狄… III. 传感器—高等学校—教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 070260 号

出版发行：兵器工业出版社

发行电话：010 - 68962596, 68962591

邮 编：100089

社 址：北京市海淀区车道沟 10 号

经 销：各地新华书店

印 刷：北京市登峰印刷厂

版 次：2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

印 数：1—550

责任编辑：范小伊

封面设计：李 晖

责任校对：郭 芳

责任印制：赵春云

开 本：787 × 1092 1/16

印 张：16

字 数：407 千字

定 价：30.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

传感器技术的发展水平是衡量一个国家科学技术现代化程度、生产水平高低及国家综合实力的重要标志。自 20 世纪 80 年代,世界各国都将其列为重点发展的关键技术。随着科学技术的飞速发展,融合各种先进技术的新型传感器技术也进入到一个飞速发展的阶段。要及时正确地获取各种信息,解决工程、生产及科研中遇到的各种具体问题,必须合理选择和善于应用各种新型传感器及传感技术。

全书共 10 章。第 1 章介绍了传感器的作用与定义、组成、分类及选用依据;第 2 章至第 8 章从传感器的工作原理分类出发,分别介绍了光纤传感器、固态图像传感器、超声波传感器、磁敏传感器、MEMS 技术及其应用、生物传感器、智能传感器等传感器的工作原理、性能、测量电路及应用;第 9 章介绍了多传感器技术的基础知识及相关应用;第 10 章探讨了改善传感器性能的技术途径。全书由狄长安、王芳、江剑、陈捷编写,其中狄长安、江剑编写了第 1、3、5、8、9、10 章,王芳、陈捷编写了第 2、4、6 章。全书由狄长安统稿,孔德仁教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。姜海洋、姜海卫、刘素洁、刘宏璇也为本书的完成付出了很多劳动,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中参阅了许多参考文献,谨向参考文献作者致谢。

本书可作为测控技术及仪器、精密仪器与机械、工业自动化、计算机应用、机械电子工程、应用电子等专业的教材,也可供其他专业师生和有关工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 8 月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 传感器的概念及内涵	(1)
1.1.1 传感器的概念及内涵	(1)
1.1.2 传感器的组成及作用	(1)
1.2 传感器分类	(2)
1.3 传感器的选用依据	(3)
1.3.1 选用注意事项	(3)
1.3.2 传感器的性能和评价指标	(4)
1.4 传感器技术的发展趋势	(21)
1.5 本书的特点及主要内容	(22)
思考题	(22)
第2章 光纤传感器	(23)
2.1 光纤传感器基础	(23)
2.1.1 光纤的结构	(23)
2.1.2 光纤波导原理	(24)
2.1.3 光纤的主要技术参数	(25)
2.1.4 光纤的分类	(28)
2.1.5 光纤传感器的基本原理及类型	(29)
2.2 光纤传感器的调制技术	(31)
2.2.1 强度调制	(31)
2.2.2 相位调制	(33)
2.2.3 频率调制	(35)
2.2.4 偏振调制	(36)
2.3 光纤传感器实例	(39)
2.3.1 光纤温度传感器	(39)
2.3.2 光纤位移传感器	(41)
2.3.3 光纤电流传感器	(43)
2.3.4 光纤电压传感器	(44)
2.3.5 光纤气体传感器	(46)
2.3.6 光纤压力传感器	(47)
2.3.7 光纤图像传感器	(51)
2.4 光纤传感器的发展趋势	(52)

思考题	(52)
第3章 固态图像传感器	(54)
3.1 概述	(54)
3.2 电荷耦合器件 (CCD)	(54)
3.2.1 CCD 的结构及工作原理	(54)
3.2.2 CCD 固态图像传感器	(56)
3.2.3 CCD 固态图像传感器的特性参数	(58)
3.3 CMOS 图像传感器	(60)
3.4 CCD 器件的应用	(64)
思考题	(69)
第4章 超声波传感器	(70)
4.1 超声检测的物理基础	(70)
4.1.1 机械振动和超声波	(70)
4.1.2 超声波的波形	(71)
4.1.3 超声波的传播特性	(71)
4.1.4 超声波的反射和折射	(72)
4.1.5 超声波在传播过程中的衰减	(74)
4.1.6 温度效应	(74)
4.2 超声波传感器原理	(75)
4.2.1 压电式超声波传感器	(75)
4.2.2 磁致伸缩式超声波传感器	(77)
4.3 超声波传感器基本应用电路	(79)
4.4 超声波传感器的应用	(83)
4.4.1 超声波测距	(83)
4.4.2 超声波流量传感器	(83)
4.4.3 超声波清洗	(86)
4.4.4 超声波诊断	(87)
4.4.5 超声波探伤	(90)
思考题	(91)
第5章 磁敏传感器	(92)
5.1 概述	(92)
5.2 磁敏传感器原理	(92)
5.2.1 霍尔效应	(92)
5.2.2 磁阻效应	(94)
5.2.3 形状效应	(94)
5.3 霍尔式传感器	(94)
5.3.1 霍尔元件	(95)
5.3.2 霍尔元件的不等位电势和温度误差的补偿	(95)
5.3.3 集成霍尔传感器	(97)

5.4 磁阻元件	(98)
5.4.1 InSb 磁阻元件的工作原理	(98)
5.4.2 结构分类及特性	(99)
5.5 结型磁敏器件	(101)
5.5.1 磁敏二极管	(102)
5.5.2 磁敏三极管	(103)
5.6 应用	(106)
5.6.1 微位移的测量	(106)
5.6.2 转速测量	(107)
5.6.3 角度测量	(107)
5.6.4 磁场测量	(108)
5.6.5 电流测量	(110)
5.6.6 事例分析——基于霍尔传感器的发电机保护系统	(111)
思考题	(113)
第6章 MEMS 技术及其应用	(114)
6.1 概述	(114)
6.1.1 MEMS 出现的背景	(114)
6.1.2 关于 MEMS 的基本概念	(114)
6.1.3 MEMS 特点	(116)
6.1.4 MEMS 结构	(117)
6.1.5 MEMS 发展趋势	(119)
6.2 MEMS 基础研究	(120)
6.2.1 尺度效应和表面效应	(120)
6.2.2 微流体力学	(121)
6.2.3 力学和热力学基础	(121)
6.2.4 微机械学	(122)
6.2.5 微摩擦学	(122)
6.3 MEMS 设计技术	(123)
6.3.1 MEMS 设计原则	(123)
6.3.2 MEMS 设计方法	(124)
6.3.3 MEMS 的中间融合设计方法	(124)
6.3.4 MEMS CAD 设计	(126)
6.4 MEMS 加工技术	(128)
6.4.1 MEMS 加工技术综述	(128)
6.4.2 微细机械加工	(129)
6.4.3 微型放电加工	(131)
6.4.4 硅加工工艺	(133)
6.4.5 大深宽比加工技术	(133)
6.4.6 快速成型制造技术	(136)

6.4.7 微细加工技术的发展	(137)
6.5 MEMS 装配技术	(137)
6.5.1 微封装	(138)
6.5.2 微操作	(138)
6.5.3 微测试	(139)
6.5.4 微驱动	(140)
6.6 MEMS 应用领域及其典型系统	(141)
6.6.1 MEMS 应用领域	(141)
6.6.2 MEMS 典型系统	(144)
思考题	(146)
第7章 生物传感器	(147)
7.1 概述	(147)
7.2 生物传感器的工作原理、分类与特点	(147)
7.2.1 生物传感器的工作原理	(147)
7.2.2 生物传感器的分类	(149)
7.2.3 生物传感器的特点	(150)
7.2.4 生物传感器基础知识	(150)
7.3 常用的生物传感器	(152)
7.3.1 酶传感器	(152)
7.3.2 微生物传感器	(156)
7.3.3 生物组织传感器	(159)
7.3.4 半导体生物传感器	(160)
7.4 国内外生物传感器的研究方向	(161)
思考题	(162)
第8章 智能传感器	(163)
8.1 概述	(163)
8.2 智能传感器的构成及其功能	(163)
8.2.1 智能传感器的结构	(163)
8.2.2 智能传感器的功能	(164)
8.2.3 智能传感器的特点	(165)
8.3 传感器的智能化	(166)
8.3.1 数据处理功能	(166)
8.3.2 控制功能	(172)
8.4 常用智能传感器集成电路芯片	(174)
8.4.1 数据输出接口	(174)
8.4.2 微处理器	(175)
8.4.3 智能传感器的接口芯片	(175)
8.5 智能传感器的应用	(176)
8.5.1 智能压力传感器	(176)

8.5.2 智能红外传感器	(180)
8.5.3 人工神经网络智能传感器	(182)
8.5.4 其他智能传感器	(196)
思考题	(197)
第9章 多传感器技术	(198)
9.1 概述	(198)
9.1.1 多传感器信息融合	(198)
9.1.2 多传感器技术的优势	(199)
9.2 多传感器技术基础	(200)
9.2.1 多传感器模型	(200)
9.2.2 多传感器的多元素实验优化技术	(201)
9.2.3 实验优化方法	(202)
9.2.4 建模方法	(203)
9.2.5 实验设计	(203)
9.2.6 实验系数的确定	(204)
9.2.7 实验设计	(205)
9.2.8 标准化优化问题及多元素优化算法	(211)
9.3 多传感器技术在工业故障检测中的应用	(212)
9.3.1 概述	(212)
9.3.2 系统组成及原理	(212)
9.3.3 分析	(213)
9.4 多传感器技术在水文检测中的应用	(216)
9.4.1 概述	(216)
9.4.2 系统组成及工作原理	(216)
9.5 多传感器技术在低温燃烧报警中的应用	(218)
9.5.1 概述	(218)
9.5.2 系统组成及工作原理	(219)
9.5.3 燃烧识别	(220)
思考题	(224)
第10章 改善传感器性能的技术途径	(225)
10.1 材料、结构与参数的合理选择	(225)
10.2 差动技术	(225)
10.3 平均技术	(231)
10.3.1 误差平均效应	(231)
10.3.2 数据平均处理	(232)
10.4 干扰抑制技术	(232)
10.4.1 屏蔽	(233)
10.4.2 屏蔽线与地线(屏蔽与接地)	(235)
10.4.3 电缆和接插件的屏蔽	(236)

10.4.4 隔离	(236)
10.4.5 噪声滤波器	(236)
10.5 补偿与校正技术	(238)
10.5.1 非线性校正	(238)
10.5.2 动态误差补偿	(239)
10.6 稳定性处理技术	(240)
10.7 零示法、微差法	(240)
10.8 闭环技术	(241)
10.9 集成化与智能化	(242)
思考题	(243)
参考文献	(245)

第1章 绪 论

通信技术、计算机技术、传感器技术被称为现代信息产业的三大支柱，它们分别构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器作为信息采集系统的首要部件，计算机的“五官”，如果没有高度保真、性能可靠的传感器，没有先进的传感器技术，那么信息的准确获得与精密检测就成了一句空话，与之相关的通信技术和计算机技术也就成了无本之木，现代测量与自动化技术随之也会变成镜中之花。因此传感器技术既是现代信息产业的源头，又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。

传感器技术的发展水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志，也是判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据，鉴于其重要性，世界各国自 20 世纪 80 年代开始都将其列为重点发展的关键技术。如日本科学技术厅把传感器技术列为六大核心技术（计算机、通信、激光、半导体、超导和传感器）之一；美国白宫将“传感器及信号处理”列为对国家安全和经济发展有重要影响的关键技术之一；西欧各国在制订“尤里卡”发展计划中，把传感器技术作为优先发展的重点技术；我国政府在“863 计划”及重点科技攻关项目中，均把传感器列在了重要位置。

1.1 传感器的概念及内涵

1.1.1 传感器的概念及内涵

根据 GB7665 规定，传感器的定义为“能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。从传感器的定义可以看出这样几层含义：

（1）“测量器件或装置”。表明传感器是一种测量器件或装置，不属于算法或意识形态的范畴。

（2）“可用输出信号”。传感器的输出信号可方便进行采集及传输。

（3）“按照一定规律转换”。必须按照一定的规律对被测量进行转换，也就是传感器的输出量能够真实反应被测量的变化。

（4）“能感受规定的被测量”。测试时存在环境等其他因素的影响以及传感器交叉灵敏度，传感器必须能对被测量有很好的响应，而对干扰量的反应尽可能的低。

1.1.2 传感器的组成及作用

传感器的组成如图 1-1 所示，一般由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成，有时还需要加辅助电源。当传感器的输出转换为标准化信号（如 $1 \sim 5\text{ V}$ 或 $4 \sim 20\text{ mA}$ ）时，则称为变送器。

敏感元件：传感器中能直接感受或响应被测量的部分。它往往将被测量转变成另一种易于转换成电量的非电量。如应变式传感器中的弹性敏感元件。

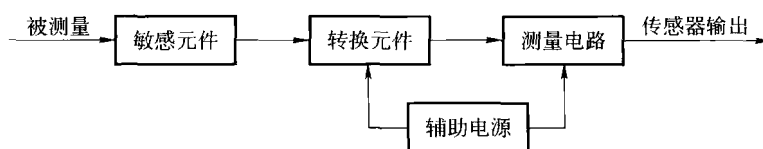


图 1-1 传感器的组成

转换元件：将感受到的非电量直接转换为电量的器件。例如压电晶体、热电偶等。

测量电路：将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制处理的有用电信号的电路。测量电路的类型视转换元件的类型而定，常采用的电路有电桥电路、高阻抗输入电路、振荡回路等。

传感器的作用主要包括以下几个方面：

(1) 信息的获取

传感器作为获取信息的手段，是实现测试和自动控制的首要环节。科学研究中的计量测试，产品制造与销售中所需要的计量以及在航空、航天技术领域，都要由测量获得准确的定量数据。如阿波罗 10 号飞船有三千多个参量需要监测。传感器获取信息的正确与否，关系到整个测试系统或控制系统的准确度，如果传感器的误差很大，后面的测量电路、显示仪表、信息处理设备再好，也难以实现准确的测试和控制。

(2) 信号的转换

把以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据，或者读出记录在各种媒体介质上的信息并进行转换。

1.2 传感器分类

传感器种类繁多，常用的分类方法有：

(1) 按工作原理分 { 电阻式传感器
压电式传感器
电容式传感器
.....

这种分类方法以传感器的工作原理为依据。避免了传感器的名目过于繁多，有利于专业工作者对传感器进行归纳性的研究，适用于专业人士的学习应用中。

(2) 按被测量范畴分 { 物理量传感器
化学量传感器
生物量传感器

按照我国国标制定的传感器分类体系表，传感器分为物理量传感器、化学量传感器以及生物量传感器三大门类，下含 12 小类：力学量传感器、热学量传感器、光学量传感器、磁学量传感器、电学量传感器、声学量传感器、射线传感器（以上归属物理量传感器）、气体传感器、离子传感器、湿度传感器（以上归属化学传感器）以及生化量传感器与生理量传

感器（属生物量传感器）。

- (3) 按工作机理分
- ┌ 结构型传感器
 - ├ 物性型传感器
 - └ 复合型传感器

所谓结构型传感器，主要是通过机械结构的几何形状或尺寸的变化，将外界被测参数转换成相应的电量（如电阻、电感、电容等），从而检测出被测信号，这种传感器目前应用最为普遍。如应变式压力传感器。

物性型传感器则是利用某些材料本身物理性质的变化而实现测量，它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件，它对应力、温度、电场、磁场等有一定依赖关系，并能进行转换。如压电式加速度传感器。

复合型传感器是结构型与物性型传感器组合而成的一种传感器。如压阻式压力传感器。

- (4) 按能源分
- ┌ 有源传感器
 - └ 无源传感器

有源传感器如一台微型发电机，它能将非电功率转换为电功率，传感器起能量变换作用，故又称发电型传感器。如磁电式、压电式、热电式等传感器。

无源传感器本身不是一个信号源，所以配合的测量电路常常是电桥或谐振电路。如电感式、电容式传感器。这种分类方法有利于对传感器的内在联系作统一概括的分析和深入的研究。

由于传感器门类繁多，涉及的学科面广，还有不少其他的分类方法。如按输出信号把传感器分为模拟式和数字式传感器，按功能分把传感器分成单功能、多功能和智能传感器。

1.3 传感器的选用依据

传感器产品日新月异，应用也越来越广泛。因此，在研究传感器的基本原理、基本特性的同时，有必要探讨传感器的合理使用和正确选择等问题。

1.3.1 选用注意事项

为选择最适合于测试的传感器，一般来说，应注意如下事项。

(1) 测试的对象、目的和要求

包括测量的对象、目的、被测试量的选择、测量范围、输入信号的最大值、频带宽度、测试精度要求、测量所需要的时间等。

(2) 传感器的特性

其中有静态特性指标、动态特性指标、输出量的类型、被测物体产生的负载效应、校正周期、过载信号保护、配套仪器等。

(3) 测试条件

包括传感器的设置场所、环境（温度、湿度、振动等）、测量时间、与其他设备的连接距离、所需功率等。

(4) 与购买和维护有关的事项

包括性价比、零配件的储备、售后服务与维修制度、保修时间、交货日期等。

以上是选择传感器主要注意事项。虽然选择传感器时要考虑的事项很多，但无需满足所有的事项要求，应根据实际使用的目的、指标、环境等，有不同的侧重点。例如，长时间连续使用的传感器，就必须重视经得起时间考验等长期稳定性问题；而对机械加工或化学分析等时间比较短的工序过程，则需要灵敏度和动态特性较好的传感器。为了提高测量精度，应注意平常使用时的显示值要在满刻度的 50% 左右来选择测定范围或刻度范围。选择传感器的响应速度，目的是适应输入信号的频带宽度，从而提高信噪比。此外，还要合理选择设置场所，注意安装方法，了解传感器的外形尺寸、质量等。

选用传感器需要注意的几点注意事项中，比较重要的一点就是必须对所选传感器的性能特点有足够的了解。如果仅仅是简单的应用，则可以通过对传感器性能指标的了解来选择传感器，若应用要求较高，环境复杂，则还需要从传感器的原理等方面对传感器的性能进行考察，如从传感器的工作原理出发，分析被测物体中可能会产生的负载效应等问题，以确定选择哪一种传感器最合适。

1.3.2 传感器的性能和评价指标

传感器的各种特性一般是根据输入和输出的对应关系来描述的。传感器在稳态（静态或准静态）信号作用下，输入和输出的对应关系称为静态特性；在动态（周期或暂态）信号作用下，输入和输出的对应关系称为动态特性。一个高质量的传感器，应具有良好的静态特性与动态特性，这样才能不失真地完成信号的转换。图 1-2 为描述传感器的功能方框图。图中 $x(t)$ 表示被测物理量， $y(t)$ 表示与其对应的输出量， $h(t)$ 表示由此组件的物理性能决定的数学运算法则。这时需要关心的是它的输入量和输出量之间的数学关系，而对其内部物理结构并无兴趣。

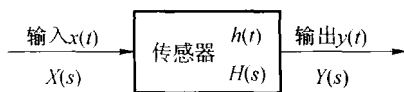


图 1-2 传感器的功能方框图

一般的工程测试问题总是处理测物理量 $x(t)$ 、传感器系统的传输转换特性和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系。工程测试中最常见的问题 $h(t)$ 已知， $y(t)$ 可测，则可通过 $h(t)$ 、 $y(t)$ 推断导致该输出的相应被测物理量 $x(t)$ 。

被测物理量可能是常量，也可能是变化的量，对上述两类信号传感器的反应也是各不相同的。在测量过程中，传感器及相关调理电路也会产生固有运动进行能量变换，例如，膜盒或波纹管的变形，水银的膨胀收缩，电路中电容器的充、放电，继电器的开闭，测振仪的固有频率，乃至模数转换器的转换及 CPU 的数据处理时间等，这些运动都会使被测信号在幅值和相位两方面发生变化。根据仪器固有运动的速度和被测信号的变化速度之间相对大小，测量过程可分为静态测量与动态测量。

理想的传感器或测量系统应该具有单值的、确定的输入—输出关系。其中以输出和输入呈线性关系为最佳（其优越性在于可简化理论分析和设计计算；便于标定和数据处理；便于制作、定度，提高精度水平；无需非线性补偿等）。在静态测量中，传感器的这种线性关系虽说总是所希望的，但不是必须的，因为在静态测量中可用曲线校正或输出补偿技术作非线性校正；在动态测量中，传感器及后续仪器本身应该力求是线性系统，这不仅因为目前只有对线性系统才能作比较完善的数学处理与分析，而且也因为在动态测试中作非线性校正目前还相当困难。严格地说，实际测量用传感器总是存在非线性因素，如许多电子器件都是非线性的。但在工程中常把传感器或测量系统在一定的工作范围内

和在一定的误差允许范围内作为线性处理,这样,既能使问题得到简化,又能在足够精度的条件下获得实用的结果。

传感器的静态特性可用其激励与响应的稳定值之间的相互关系来表示,其数学模型为代数方程,不含有时间变量 t 。常用的静态特性参数有灵敏度、量程、测量范围、线性度、准确度、分辨率与重复性,还有漂移、死区和迟滞等。

传感器的动态特性是指对激励(输入)的响应(输出)特性。一个动态特性好的传感器,其输出随时间变化的规律(变化曲线),将能同时再现输入随时间变化的规律(变化曲线),即具有相同的时间函数,这是动态测量中对传感器提出的新要求。但实际上除了具有理想的比例特性的环节外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。

在动态测试中,线性系统常用线性微分方程来描述。设传感器系统的输入为 $x(t)$ 、输出为 $y(t)$,则高阶线性测量系统可用高阶、齐次、常系数微分方程来描述:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 是常数,与测量系统或传感器的结构特性、输入状况和测试点的分布等因素有关。这种系统就称为时不变(或称定常)系统,其内部参数不随时间变化而变化。信号的输出与输入和信号加入的时间无关。即若系统的输入延迟某一段时间 t_p ,则其输出也延迟相同的时间 t_p 。

1. 静态特性

静态标定就是将原始基准器,或比被标定传感器准确度高的各级标准器或已知输入源作用于被校传感器,得出传感器的激励—响应关系的实验操作。对传感器进行标定时,一般应在全量程范围内均匀地取定5个或5个以上的标定点(包括零点),从零点开始,由低至高逐次输入预定的标定值——此称标定的正行程,然后再倒序由高至低依次输入预定的标定值,直至返回零点——此称标定的反行程,并按要求将以上操作重复若干次,记录下相应的响应—激励关系。

通过标定,可得到传感器的响应值 y_i 和激励值 x_i 之间的一一对应关系的静态数学模型,如

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots \quad (1.3.2)$$

称为传感器的静态特性。静态特性也可用一条曲线来表示,该曲线称为传感器的静态特性曲线,有时也称为静态校准曲线或静态标定曲线。从标定过程可知,传感器的静态特性曲线也可相应地分为正行程特性曲线、反行程特性曲线和平均特性曲线(正行程特性曲线、反行程特性曲线之平均),一般都以平均特性曲线作为传感器的静态特性。

理想的情况是传感器的响应和激励之间有线性关系,这时数据处理最简单,并且可与动态测量原理相衔接,因为线性系统遵守叠加原理和频率不变性原理,在动态测量中不会改变响应信号的频率结构,造成波形失真。然而,由于原理、材料、制作上的种种客观原因,传感器的静态特性不可能是严格线性的。如果在传感器的特性方程中,非线性项的影响不大,

实际静态特性接近直线关系, 则常用一条参考直线来代替实际的静态特性曲线, 近似地表示响应—激励关系, 有时也将此参考直线称为传感器的工作直线。选用参考直线有多种方案, 常用的几种有:

① 端点连线。将静态特性曲线上的对应于量程上、下限的两点的连线作为工作直线。

② 端点平移线。平行于端点连线, 且与实际静态特性 (常取平均特性为准) 的最大正偏差和最大负偏差的绝对值相等的直线。

③ 最小二乘直线。直线方程的形式为 $\hat{y} = a + bx$, 且对于各个标定点 (x_i, y_i) 偏差的平方和 $\sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$ 最小的直线; 式中, a 、 b 为回归系数, 且 a 、 b 两系数具有物理意义。

④ 过零最小二乘直线。直线方程的形式为 $\hat{y} = bx$ 且对各标定点 (x_i, y_i) 偏差的平方和 $\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2$ 最小的直线。

其中最小二乘直线为最常用之方法。

(1) 灵敏度

灵敏度 S 是传感器在静态条件下输出量的变化 Δy 和与之相对应的输入量变化 Δx 的比值。如果激励和响应都是不随时间变化的常量 (或变化极慢, 在所观察的时间间隔内可近似为常量), 则式 (1.3.1) 中各个微分项均为零, 方程式可简化为

$$y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1.3.3)$$

理想的静态量测量传感器应具有单调、线性的输入输出特性, 其斜率为常数。在这种情况下, 传感器的灵敏度 k 就等于特性曲线的斜率, 见图 1-3 (a), 即

$$k = \Delta y / \Delta x = y / x = b_0 / a_0 = \text{常数} \quad (1.3.4)$$

当特性曲线非线性关系时, 灵敏度的表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y / \Delta x = dy / dx \quad (1.3.5)$$

见图 1-3(b), 它表示单位被测量的变化引起的传感器输出值的变化。

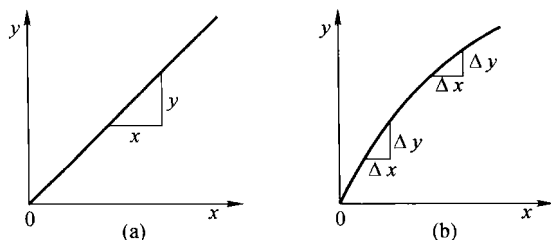


图 1-3 静态灵敏度的确定

(a) 理想传感器的输入—输出曲线;

(b) 一般传感器的输入—输出曲线

灵敏度是一个有因次的量, 因此在讨论传感器的灵敏度时, 必须确切地说明它的因次。例如, 位移传感器的被测位移的单位是 mm, 输出量的单位是 mV, 故位移传感器的灵敏度单位是 mV/mm。有些仪器的灵敏度表示方法和定义相反, 例如记录仪及示波器的灵敏度常表示为 V/cm, 而不是 cm/V。假如测量仪器的激励与响应为同一形式的物理量 (例如电压放大器), 则常用“增益”这个名词来取代灵敏度的概念。上述定义与表示方法都是指绝对灵敏度。

另一种实用的灵敏度表示方法是用相对灵敏度，相对灵敏度 k_r 的定义为

$$k_r = \Delta y / (\Delta x / x) \quad (1.3.6)$$

式中： Δy ——输出量的变化；

$\Delta x / x$ ——输入量的相对变化。

相对灵敏度表示传感器的输出变化量对于被测输入量的相对变化量的变化率。在实际测量中，被测量的变化有大有小，在要求相同的测量精度条件下，被测量越小，则所要求的绝对灵敏度越高。但如果用相对灵敏度表示，则不管被测量的大小如何，只要相对灵敏度相同，测量精度也相同。

传感器除了敏感有效被测量之外，还可能对各种干扰量有反应，从而影响测量精度。这种对干扰量或影响量敏感的灵敏度称为有害灵敏度，在设计传感器时，应尽可能使有害灵敏度降到最低限度。

许多测量单元的灵敏度是由其物理属性或结构所决定。人们常常追求高灵敏度，但灵敏度和传感器的量程及固有频率等是相互制约的，应引起注意。

(2) 线性度

线性度通常也称为非线性，是指传感器的实际输入输出特性曲线对于理想线性输入输出特性的接近或偏离程度。它用实际输入输出特性曲线对理想线性输入输出特性曲线的最大偏差量与满量程输出值的百分率来表示，如图 1-4 所示。即

$$\delta_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

式中： δ_L ——线性度；

Y_{FS} ——量程输出；

$\Delta L_{\max}$ ——最大偏差。

由式 (1.3.7) 可知， δ_L 越小，传感器的线性越好，实际工作中经常会遇到非线性较为严重的系统，此时，可以采取限制测量范围、非线性拟合或非线性放大器等技术措施来提高传感器的线性。

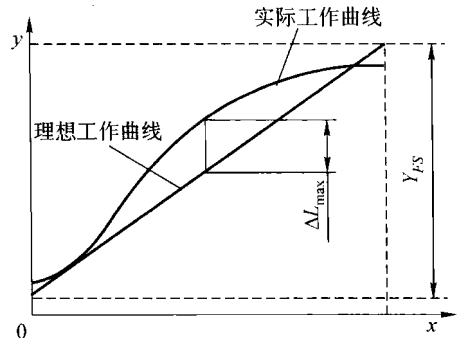


图 1-4 线性度示意图

(3) 迟滞

亦称滞后量、滞后或回程误差，表征传感器在全量程范围内，输入量由小到大（正行程）或由大到小（反行程）两者静态特性不一致的程度，如图 1-5 所示。迟滞误差在数值上是用正、反行程输出平均值之间的最大迟滞偏差 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比的百分率表示的，即

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.3.8)$$

式中： $\Delta H_{\max}$ ——正、反行程输出平均值之间的最大迟滞偏差。

(4) 重复性

重复性表示传感器在同一工作条件下，按同一方向作全量程多次（三次以上）测量时，