

高等学校教材

传感器

原理
及
技术

孟凡
郑宾

主 编

兵器工业出版社

高等学校教材

传感器原理及技术

孟立凡 郑宾 主编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书共分十七章。第一章至第四章介绍传感器的一般特性、分析方法及常用的新型敏感材料；第五章至第九章论述常见的、应用广泛的传感器，如电阻应变式、电容式、电感式、压电式、压阻式传感器等，分析了它们的基本原理、静态特性和测量电路，并介绍了有关的设计知识及应用；第十章至第十六章介绍光电式、固态图像、固态磁敏、热敏、湿敏、气敏、射线、微波、光导纤维等新型传感器的原理和应用；第十七章介绍传感器接口技术基础知识。

本书可作为检测技术、仪器仪表、自动控制及各机电类专业的专科生、本科生和研究生的教材，也可供其它专业学生或有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

传感器原理及技术/孟立凡，郑宾主编. —北京：兵器工业出版社，2000.2
ISBN 7-80132-743-8

I. 传… II. ①孟… ②郑… III. ①传感器-理论 ②传感器-技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 11763 号

出版发行：兵器工业出版社

责任编辑：郭 佳 李翠兰

社 址：100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销：各地新华书店

印 刷：华北工学院印刷厂印刷

版 次：2000 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印 数：1—1000 册

封面设计：韩 冲

责任校对：侯 文

责任印制：王京华

开 本：787×1092 1/16

印 张：16.375

字 数：410 千字

定 价：22.00 元

（ 版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换 ）

出版说明

在 21 世纪即将来临之际,根据兵器工业科技与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规划》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向 21 世纪军工专业课程体系 and 教学内容改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

作者殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

1997-08-17

前 言

传感器技术作为一门课程，具有原理多样，应用广泛，发展更新快，与计算机等相关技术结合日益紧密等特点。这些特点正是本书编写当中着重注意处理的地方。

本书首先介绍传感器的一般性原理，然后根据传感器的不同种类分别论述。一般性原理作为贯穿后续各部分的基础内容，叙述力求系统、详备。传感器分论则按照工作原理、设计计算、应用介绍的次序编写。工作原理部分：叙述清晰、充分。设计计算部分：给出方法和过程，培养学生独立思考和解决问题的能力。传感器应用介绍注意其选择的多样性，以开阔眼界，为将来的应用作准备。

本书内容丰富、系统性强、具有一定的深度和广度。通过精选内容，以有限的篇幅取得较大的覆盖面。在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的同时，新型传感器技术的内容占到 35% 以上，较全面地反映了近年来传感器技术的新成就。

全书共分十七章。第一章至第四章介绍传感器的一般特性、分析方法及常用的新型敏感材料。第五章至第九章论述常见的、应用广泛的传感器，如电阻应变式、电容式、电感式、压电式、压阻式传感器等，分析了它们的基本原理、静动态特性、测量电路和有关设计知识及应用。第十章至第十七章介绍了数字式、光电式、固态图像、固态磁敏、热敏、湿敏、气敏、射线、微波、光导纤维等新型传感器的原理及应用和智能传感器、传感器接口技术基础知识。

本书第一、二、六、七、九、十三、十四、十五章由孟立凡同志编写，第五、八、十、十一、十二、十七章由郑宾同志编写，第三、四章由侯文同志编写，第十六章和第十五章的红外辐射传感器部分由姚爱琴同志编写。北京航空航天大学路宏年教授和太原理工大学熊诗波教授审阅了文稿，对本书的编写提出了十分宝贵的意见，编者在此致以衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有缺点、疏漏之处，我们诚恳地盼望读者的批评指正。

编 者

1999 年 12 月

目 录

第一章	传感器概述	1
1.1	传感器的定义及分类	1
1.2	传感器的作用与地位	2
1.3	传感器技术的发展动向	2
第二章	传感器的特性及标定	4
2.1	传感器的静态特性	4
2.2	传感器的动态特性	9
2.3	传感器的标定	17
第三章	传感器中的弹性敏感元件设计	24
3.1	弹性敏感元件的基本特性	24
3.2	弹性敏感元件的材料	26
3.3	弹性敏感元件的特性参数计算	26
3.4	有限单元法简介	34
第四章	敏感元件材料	36
4.1	敏感材料的转换功能	36
4.2	半导体敏感材料	39
4.3	陶瓷敏感材料	40
4.4	有机敏感材料	42
4.5	形状记忆合金	44
4.6	微细加工技术	45
第五章	电阻应变式传感器	47
5.1	电阻应变片的工作原理(应变效应)	47
5.2	电阻应变片的结构、类型及参数	48
5.3	应变片的动态响应特性	52
5.4	测量电路	55
5.5	电阻应变式传感器的温度误差及其补偿	59
5.6	应变式传感器的结构设计及应用	62
第六章	电容式传感器	66
6.1	电容式传感器	66
6.2	电容式传感器的输出电路及等效电路	72
6.3	影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施	77
6.4	电容式传感器的应用	79
第七章	压电式传感器	81
7.1	压电式传感器的工作原理	81
7.2	压电元件常用结构形式	84

7.3	压电元件的等效电路及测量电路	85
7.4	压电式加速度传感器	90
7.5	压电式压力传感器	95
第八章	电感式传感器	98
8.1	电感式传感器	98
8.2	差动变压器式电感传感器	105
8.3	电涡流式传感器	107
8.4	电感式传感器的应用	111
第九章	压阻式传感器	113
9.1	压阻式传感器的工作原理	113
9.2	晶向的表示方法	114
9.3	压阻系数	115
9.4	影响压阻系数的因素	116
9.5	压阻式传感器的结构与设计	117
9.6	压阻式传感器的测量电路及补偿	121
9.7	压阻式传感器的应用	123
第十章	热电式传感器	125
10.1	热电偶	125
10.2	热电阻	127
10.3	热敏电阻	128
10.4	热释电型温度传感器	131
10.5	半导体集成温度传感器	132
第十一章	光电式传感器	133
11.1	光电式传感器的工作原理及基本组成	133
11.2	光电式传感器中的敏感元件	133
11.3	光电式传感器的类型及设计	144
11.4	光电式传感器的应用	146
第十二章	固态图像传感器	148
12.1	电荷耦合图像传感器	148
12.2	其它类型的图像传感器	157
12.3	固态图像传感器的应用	159
第十三章	固态磁敏传感器	162
13.1	固态磁敏传感器	162
13.2	磁敏二极管和磁敏三极管	170
第十四章	化学传感器	175
14.1	湿敏传感器	175
14.2	气敏传感器	180
第十五章	射线及微波检测传感器	189
15.1	核辐射传感器	189
15.2	超声检测	193

15.3 红外辐射传感器 197

15.4 微波传感器 202

第十六章 光导纤维传感器 206

16.1 光导纤维 206

16.2 光纤传感器 209

16.3 光纤传感器的应用 210

第十七章 传感器接口技术基础知识 220

17.1 检测信号的放大与变换 220

17.2 调制与解调 226

17.3 滤波器 233

17.4 多路模拟开关及采样保持器 238

17.5 A/D、D/A 转换技术 242

17.6 传感器数据采集技术 251

参考文献 254

第一章 传感器概述

1.1 传感器的定义及分类

1.1.1 传感器的定义

为了研究自然现象和制造劳动工具，人类必须了解外界各类信息。了解外界信息的最初通道是大自然赋予人体的生物体感官，如五官、皮肤等。随着人类实践的发展，仅靠感官获取外界信息是远远不够了，人们必须利用已掌握的知识和技术制造一类器件或装置，以补充或替代人体感官的功能，于是出现了传感器。

能够把特定的被测量信息（如物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成某种可用信号的器件或装置，称为传感器。传感器是生物体感官的工程模拟物；反过来，生物体的感官则可以看作是天然的传感器。

所谓“可用信号”，是指便于传输、便于处理的信号。就目前而言，电信号最为满足便于传输、便于处理的要求。因此，也可以把传感器狭义地定义为：能把外界非电量信息转换成电信号输出的器件或装置。目前只要谈到传感器，指的几乎都是以电为输出的传感器。除电信号以外，人们在不断探索和利用新的信号媒介。可以预料，当人类跨入光子时代，光信号能够更为快速、高效传输与处理时，一大批以光信号为输出的器件和装置将加入到传感器的家族里来。

1.1.2 传感器的分类

现已发展起来的传感器用途纷繁、原理各异、形式多样，就其分类方法也有多种，其中有两种分类法最为常用。一是按外界输入信号变换至电信号过程中所利用的效应来分类。如利用物理效应进行变换的为物理传感器；利用化学反应进行变换的为化学传感器；利用生物效应进行变换的为生物传感器等。表 1-1 列出了与五官对应的几种传感器及其效应。二是按输出量分类。比如，输出信号是用来表征压力大小的，就称为压力传感器。这种分类法可将传感器分为位移（线位移和角位移）、速度、角速度、力、力矩、压力、流速、液面、温度、湿度、光、热、电压、电流、气体成分、浓度和粘度传感器等。用户和生产厂家所关心的各种待测信息的种类，正好与这种分类方法相对应。

表 1-1 传感器按效应分类

感觉	传感器	效应
视觉（眼）	光敏传感器	物理效应
听觉（耳）	压力敏、磁敏传感器	物理效应
触觉（皮肤）	压力敏、热敏传感器	物理效应
嗅觉（鼻）	气敏、热敏传感器	化学效应、生物效应
味觉（舌）	味敏传感器	化学效应、生物效应

1.2 传感器的作用与地位

今天, 信息技术对社会发展、科学进步起到了决定性的作用。现代信息技术的基础包括信息采集、信息传输与信息处理。信息采集离不开传感器技术。传感器位于信息采集系统之首、检测与控制之前, 是感知、获取与检测的最前端。科学研究与自动化生产过程中所要获取的各类信息, 都须通过传感器获取并转换成为电信号。没有传感器技术的发展, 整个信息技术的发展就成为一句空话。若将计算机比喻为大脑, 那么传感器则可比喻为感觉器官。可以设想, 没有功能正常而完善的感觉器官来迅速、准确地采集与转换外界信息, 纵有再好的大脑也无法发挥其应有的效能。科学技术越发达, 自动化程度越高, 工业生产和科学研究对传感器的依赖性越大。80 年代以来, 世界各国相继将传感器技术列为重点发展的技术领域。

传感器广泛应用于各个学科领域。在基础学科和尖端技术的研究中, 大到上千光年的茫茫宇宙, 小到 10^{-13}cm 的粒子世界; 长到数十亿年的天体演化, 短到 10^{-24}s 的瞬间反应; 高达 $5\times 10^4\sim 1\times 10^8^\circ\text{C}$ 的超高温, 低到 0.01K 的超低温; 从 25T 超强磁场, 到 10^{-11}T 的超弱磁场……, 要完成如此极巨和极微信息的测量, 单靠人的感官和一般电子设备早已无能为力, 必须凭借配备有专门传感器的高精度测试仪器或大型测试系统的帮助。传感器技术的发展, 正在把人类感知、认识物质世界的能力推向一个新的高度。

在工业与国防领域, 高度自动化的装置、系统、工厂和设备是传感器的大集合地。从工业自动化中的柔性制造系统 (FMS)、计算机集成制造系统 (CIMS)、几十万千瓦的大型发电机组、连续生产的轧钢生产线、无人驾驶汽车、多功能武器指挥系统, 直至宇宙飞船或星际、海洋探测器等等, 无不装置数以千计的传感器, 昼夜发送各种各样的工况参数, 以达到监控运行的目的, 成为运行精度、生产速度、产品质量和设备安全的重要保障。

在生物工程、医疗卫生、环境保护、安全防范、家用电器等与人们生活密切相关的方面, 传感器的应用也已层出不穷。可以肯定地说, 未来的社会将是充满传感器的世界。

1.3 传感器技术的发展动向

传感器技术所涉及的知识非常广泛, 涵盖各个学科领域。但是它们的共性是利用物质的物理、化学和生物等特性, 将非电量转换成电量。所以, 采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论, 以达高质量的转换效能, 是总的发展途径。当前, 传感器技术的主要发展动向, 一是传感器本身的基础研究, 二是跟微处理器组合在一起的传感器系统的研究。前者是研究新的传感器材料和工艺, 发现新现象; 后者是研究如何将检测功能与信号处理技术相结合, 向传感器的智能化、集成化发展。

1.3.1 发现新现象

传感器的工作机理是基于各种效应、反应和物理现象的。重新认识如压电效应、热释电现象、磁阻效应等已发现的物理现象以及各种化学反应和生物效应, 并充分利用这些现象与效应设计制造各种用途的传感器, 是传感器技术领域的重要工作。同时还要开展基础研究, 以求发现新的物理现象、化学反应和生物效应。各种新现象、反应和效应的发现可

极大地扩大传感器的检测极限和应用领域。例如，利用核磁共振吸收的磁传感器能检测 10^{-7}T 的地球磁场强度，利用约瑟夫逊效应的磁传感器（SQUID）能检测 10^{-11}T 的极弱磁场强度；又如利用约瑟夫逊效应热噪声温度计，能检测 10^{-6}K 的超低温。值得一提的是，检测极微弱信号传感器技术的开发，不仅能促进传感器技术本身的发展，甚至能导致一些新的学科的诞生，意义十分重大。

1.3.2 开发新材料

随着物理学和材料科学的发展，人们已经在很大程度上能够根据对材料功能的要求来设计材料的组分，并通过对生产过程的控制，制造出各种所需材料。目前最为成熟、先进的材料技术是以硅加工为主的半导体制造技术。例如，人们利用该项技术设计制造的多功能精密陶瓷气敏传感器有很高的工作温度，弥补了硅（或锗）半导体传感器温度上限低的缺点，可用于汽车发动机空燃比控制系统，大大地扩展了传统陶瓷传感器的使用范围。有机材料、光纤纤维等材料在传感器上的应用，也已成为传感器材料领域的重大突破，引起国内外学者的极大关注。

1.3.3 采用微细加工技术

将硅集成电路技术加以移植并发展，形成了传感器的微细加工技术。这种技术能将电路尺寸加工到光波长数量级，并能形成低成本超小型传感器的批量生产。

微细加工技术除全面继承氧化、光刻、扩散、淀积等微电子技术外，还发展了平面电子工艺技术、各向异性腐蚀、固相键合工艺和机械切断技术。利用这些技术对硅材料进行三维形状的加工，能制造出各式各样的新型传感器。例如，利用光刻、扩散工艺已制造出压阻式传感器，利用薄膜工艺已制造出快速响应的气敏、湿敏传感器等。日本横河公司综合利用微细加工技术，在硅片上构成孔、沟、棱锥、半球等各种形状的微型机械元件，并制作出了全硅谐振式压力传感器。

1.3.4 传感器的智能化

“电五官”与“电脑”的结合，就是传感器的智能化。智能化传感器不仅具有信号检测、转换功能，同时还具有记忆、存储、解拆、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。

1.3.5 仿生传感器

传感器相当于人的五官，且在许多方面超过人体，但在检测多维复合量方面，传感器的水平则远不如人体。尤其是那些与人体生物酶反应相当的嗅觉、味觉等化学传感器，还远未达到人体感觉器官那样高的选择性。实际上，人体感觉器官由非常复杂的细胞组成并与人脑联接紧密，配合协调。工程传感器要完全替代人的五官，则须具备相应复杂细密的结构和相应高度的智能化，这一点目前看来还是不可能的事。但是，研究人体感觉器官，开发能够模仿人体嗅觉、味觉、触觉等感觉的仿生传感器，使其功能尽量向人自身的功能逼近，已成为传感器发展的重要课题。

第二章 传感器的特性及标定

传感器所测量的物理量基本上有两种形式：一种是稳态（静态或准静态）的形式，这种形式的信号不随时间变化（或变化很缓慢）；另一种是动态（周期变化或瞬态）的形式，这种形式的信号是随时间而变化的。由于输入物理量形式不同，传感器所表现出来的输出—输入特性也不同，因此存在所谓静态特性和动态特性。不同传感器有着不同的内部参数，它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点，对测量结果的影响也就各不相同。一个高精度传感器，必须同时具有良好的静态特性和动态特性，这样它才能完成对信号的（或能量）无失真的转换。

以一定等级的仪器设备为依据，对传感器的动、静态特性进行实验检测，这个过程称为传感器的动、静态标定。本章讨论传感器的特性及标定。

2.1 传感器的静态特性

2.1.1 线性度

如果理想的输出（ y ）—输入（ x ）关系是一条直线，即 $y = a_0x$ ，那么称这种关系为线性输出—输入特性。显然，在理想的线性关系之下，只要知道输出—输入直线上的两个点，即可确定其余各点，故输出量的计算和处理十分简便。

一、非线性输出—输入特性

实际上，许多传感器的输出—输入特性是非线性的，在静态情况下，如果不考虑滞后和蠕变效应，输出—输入特性总可以用如下多项式来逼近

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (2-1)$$

式中 x ——输入信号；

y ——输出信号；

a_0 ——零位输出；

a_1 ——传感器线性灵敏度；

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性系数。对于已知的输出—输入特性曲线，非线性系数可由待定系数法求得。

该多项式代数方程有图 2-1 所示的四种情况。

①. 理想线性特性见图 2-1 (a)。当式 (2-1) 中 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = \cdots = 0$ 时，

$$y = a_1x \quad (2-2)$$

因为直线上所有点的斜率相等，故传感器的灵敏度为

$$a = \frac{y}{x} = k = \text{常数} \quad (2-3)$$

②. 输出-输入特性方程仅有奇次非线性项如图 2-1 (b) 所示, 即

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (2-4)$$

具有这种特性的传感器, 在靠近原点的相当大范围内, 输出-输入特性基本上呈线性关系。并且, 当大小相等而符号相反时, y 也大小相等而符号相反, 相对坐标原点对称, 即

$$f(x) = -f(-x)$$

③. 输出-输入特性非线性项仅有偶次项, 见图 2-1 (c), 即

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (2-5)$$

具有这种特性的传感器, 其线性范围窄, 且对称性差, 即 $f(x) \neq -f(-x)$ 。但用两个特性相同的传感器差动工作, 即能有效地消除非线性误差。

④. 输出-输入特性有奇次项, 也有偶次项, 见图 2-1 (d)。

具有这种特性的传感器, 其输出-输入特性的表示式即式 (2-1)。

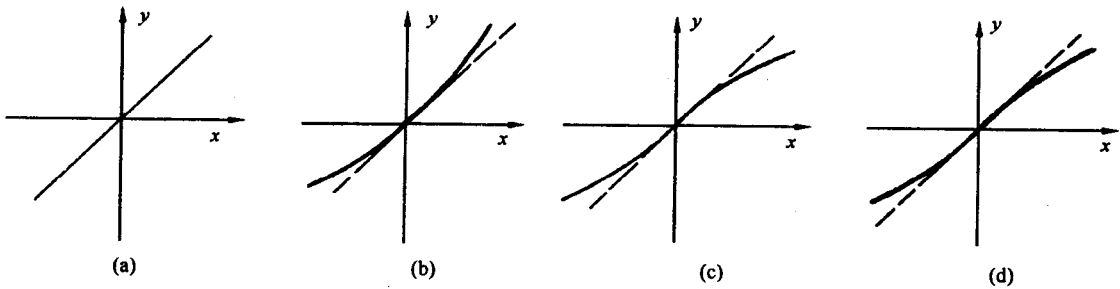


图 2-1 传感器的静态特性

二、非线性特性的“线性化”

在实际使用非线性特性传感器时, 如果非线性项次不高, 在输入量不大的条件下, 可以用实际特性曲线的切线或割线等直线来近似地代表实际特性曲线的一段, 如图 2-2 所示, 这种方法称为传感器的非线性特性的线性化。所采用的直线称为拟合直线。传感器的实际特性曲线与拟合直线不吻合的程度, 在线性传感器中称“非线性误差”或“线性度”。常用相对误差的概念表示“线性度”的大小, 即传感器的实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差的绝对值对满量程输出之比为

$$e_1 = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100 \% \quad (2-6)$$

式中 e_1 ——非线性误差 (线性度);

$\Delta_{\max}$ ——实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值;

y_{FS} ——满量程输出。

传感器的输出-输入特性曲线的静态特性实验是在静态标准条件下进行的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击 (除非这些本身就是被测物理量), 环境温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 相对湿度小于 85%, 气压为 $101 \pm 8\text{kPa}$ 的情况。在这种标准状态下, 利用一定等级的标准设备, 对传感器进行往复循环测试, 得到的输出-输入数据一般用表列出或绘成曲线, 这

个线称为实际特性曲线。

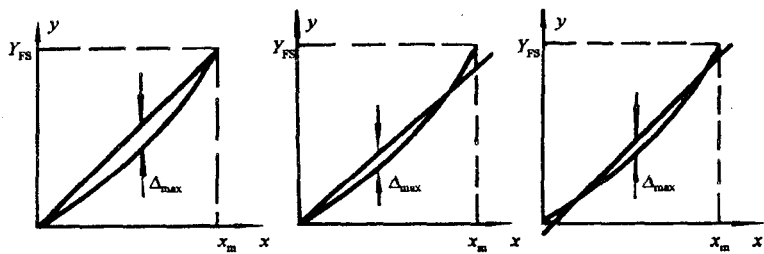


图 2-2 输入—输出特性的非线性

显然，非线性误差是以拟合直线作基准直线计算出来的，基准线不同，计算出来的线性度也不相同。因此，在提到线性度或非线性误差时，必须说明其依据了怎样的基本直线。

1. 最佳平均直线与独立线性度

找出一条直线，使该直线与实际输出特性的最大正偏差等于最大负偏差。然而这样的直线不止一条，其中最大偏差为最小的直线，称为最佳平均直线。根据该直线确定的线性度称为独立线性度，如图 2-3 所示。在考虑独立线性度的情况下，式 (2-6) 应改为

$$e_1 = \pm \frac{|\Delta_{\max}| + |-\Delta_{\max}|}{2y_{FS}} \times 100\% \quad (2-7)$$

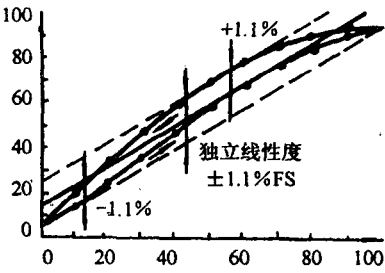


图 2-3 独立线性度的理论曲线

2. 端点直线和端点线性度

取零点为直线的起始点，满量程输出的 100% 作为终止点，通过这两个端点作一直线为基准直线（端点直线），根据该拟合直线确定的线性度称为端点线性度。用端点直线作拟合直线，优点是简单便于应用，缺点是没有考虑所有校准数据的分布。故其拟合精度低。端点直线如图 2-4 所示，其方程

$$y = b + kx \quad (2-8)$$

$$k = \frac{y_m - y_1}{x_m - x_1} \quad (2-9)$$

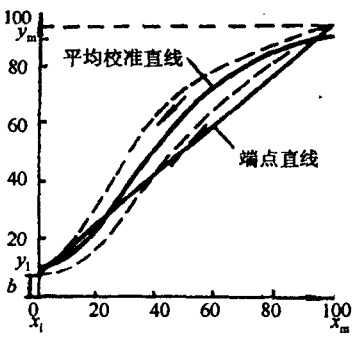


图 2-4 端点直线

式中 x_1 ——传感器检测下限；
 x_m ——传感器检测上限；
 y_1 ——对应检测下限的输出算术平均值；
 y_m ——对应检测上限的输出算术平均值。

端点直线的截距为

$$b = \frac{y_1 x_m - y_m x_1}{x_m - x_1} \quad (2-10)$$

当检测下限 $x = x_1 = 0$ 时, 端点直线方程为

$$y = y_1 + \frac{y_m - y_1}{x_m - x_1} x \quad (2-11)$$

3. 端点直线平移线

端点直线平移线如图 2-5 所示, 它是与端点直线 AB 平行、并使在整个检测范围内最大正误差与最大负误差的绝对值相等的那根直线, 即 CD 直线。若在各校准点中相对端点直线的最大正、负误差为 $+\Delta_{\max}$ 和 $-\Delta_{\max}$ 则端点直线平移线的截距为

$$b = \frac{y_1 x_m - y_m x_1}{x_m - x_1} + \frac{|\Delta_{\max}| - |-\Delta_{\max}|}{2} \quad (2-12)$$

其斜率与式 (2-9) 相同。显然, 端点直线平移线的方程为

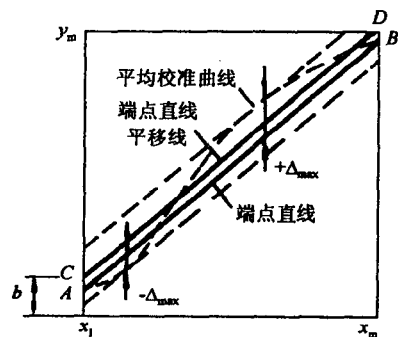


图 2-5 端点直线平移

$$y = \frac{y_1 x_m - y_m x_1}{x_m - x_1} + \frac{|\Delta_{\max}| - |-\Delta_{\max}|}{2} + \frac{y_m - y_1}{x_m - x_1} x \quad (2-13)$$

当检测下限 $x = x_1 = 0$ 时

$$y = y_1 + \frac{|\Delta_{\max}| - |-\Delta_{\max}|}{2} + \frac{y_m - y_1}{x_m} x \quad (2-14)$$

因此, 以端点直线平移线作为理论特性时的最大误差为

$$\Delta_{\max} = \frac{|\Delta_{\max}| + |-\Delta_{\max}|}{2} \quad (2-15)$$

端点直线平移线可看作是最佳平均直线的一种近似。

4. 最小二乘法直线和最小二乘法线性度

找出一条直线, 使该直线各点与相应的实际输出的偏差的平方和最小, 这条直线称为最小二乘法直线。如有 n 个检测点, 其中第 i 个检测点与该直线上相应值之间的偏差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (2-16)$$

最小二乘法理论直线的拟合原则是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 最小, 即使其对 k 和 b 的一阶偏导数等于零,

故可得到 b 和 k 的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0$$

从而得到

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{2-17}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{2-18}$$

式中 $\sum x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$;
 $\sum y_i = y_1 + y_2 + \cdots + y_n$;
 $\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n$;
 $\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2$;
 n ——校准点数。

将求得的 k 和 b 代入 $y=b+kx$ 中，即可得到最小二乘法拟合直线方程。这种拟合方法的缺点是计算繁琐，但线性的拟合精度高。

2.1.2 灵敏度

线性传感器的校准线的斜率就是静态灵敏度，它是传感器的输出量变化和输入量变化之比，即

$$k_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2-19}$$

式中 k_n ——静态灵敏度。

如位移传感器，当位移量 Δx 为 $1\mu\text{m}$ ，输出量 Δy 为 0.2mV 时，灵敏度 k_n 为 $0.2\text{mV}/\mu\text{m}$ 。非线性传感器的灵敏度通常用拟合直线的斜率表示。非线性特别明显的传感器，其灵敏度可用 dy/dx 表示，也可用某一小区域内拟合直线的斜率表示。

2.1.3 迟滞

迟滞表示传感器在输入值增长的过程中(正行程)和减少的过程中(反行程)，同一输入量输入时，输出值的差别，如图 2-6 所示，它是传感器的一个性能指标。该指标反映了传感器的机械部件和结构材料等存在的问题，如轴承摩擦、灰尘积塞、间隙不适当、螺钉松动、元件磨损(或碎裂)以及材料的内部摩擦等。迟滞的大小通常由整个检测范围内的最大迟滞值 Δ_{max} 与理论满量程输出之比的百分数表示，即

$$e_t = \frac{\Delta_{\text{max}}}{Y_{\text{FS}}} \times 100 \% \tag{2-20}$$

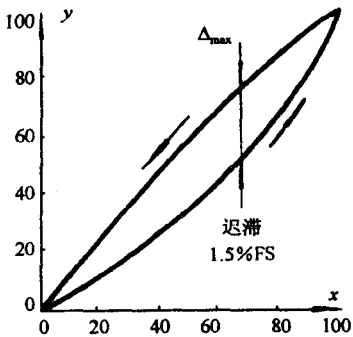


图 2-6 迟滞特性

2.1.4 重复性

传感器的输入量按同一方向作多次变化时,我们发现,各次检测所得的输出-输入特性曲线往往不重复,如图 2-7 所示。产生不重复的原因和产生迟滞的原因相同。重复性误差 e_R 通常用输出最大不重复误差 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出 y_{FS} 之比的百分数表示,即

$$e_R = \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100 \% \quad (2-21)$$

式中 $\Delta_{\max}$ —— $\Delta_{1\max}$ 与 $\Delta_{2\max}$ 两数值之中的最大者;
 $\Delta_{1\max}$ ——正行程多次测量的各个测试点输出值之间的最大偏差;
 $\Delta_{2\max}$ ——反行程多次测量的各个测试点输出值之间的最大偏差。

不重复误差是属于随机误差性质的,校准数据的离散程度是与随机误差的精度相关的,应根据标准偏差来计算重复性指标。重复性误差 e_R 又可按下式来表示

$$e_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{FS}} \times 100 \%$$

式中 σ ——标准偏差。

服从正态分布误差,其 σ 可以根据贝赛尔公式来计算

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

式中 y_i ——测量值;
 $\bar{y}$ ——测量值的算术平均值;
 n ——测量次数。

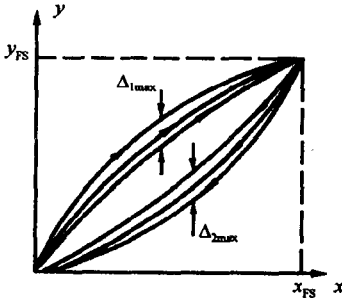


图 2-7 重复性

2.2 传感器的动态特性

即使静态性能很好的传感器,当被检测物理量随时间变化时,如果传感器的输出量不能很好地追随输入量的变化而变化,也有可能产生高达百分之几十甚至百分之百的误差。因此,在研究、生产和应用传感器时,要特别注意其动态特性的研究。动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。动态特性好的传感器,其输出量随时间变化的曲线与被测量随同一时间变化的曲线一致或者相近。实际被测量随时间变化的形式可能是各种各样的,根据哪种变化的形式来判断一个传感器动态特性的好坏呢?实际研究中,通常根据“标准”输入特性来考虑传感器的响应特性。标准输入有两种:正弦变化和阶跃变化。传感器的动态特性分析和动态标定都以这两种标准状态输入为依据。对任一传感器,只要输入量是时间的函数,则其输出量也应是时间的函数。

2.2.1 传感器动态特性的数学模型

传感器的动态特性比静态特性要复杂得多,我们必须根据传感器结构与特性,建立与