

传感器技术

(上册)

何金田 成连庆 李伟锋 编著

哈尔滨工业大学出版社

传感器技术

第 1 卷 第 1 期

2023 年 1 月 15 日出版



ISSN 1674-2202

传感器技术

(上册)

何金田 成连庆 李伟锋 编著

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 简 介

本书重点阐述常用(包括电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式、光电式、光纤式、谐振式、热电式、波式、射线式以及气体、湿度、离子敏和生物等)传感器的原理、结构、特点和应用,并将反映当代传感器技术的发展和成就的新型传感器专列一章介绍。在介绍基本原理的同时,注意介绍应用实例。每章都有例题、思考题和习题供学习者选用。

本书具有内容丰富、条理清晰、结构严谨、突出应用等特点,可作为高等院校测控技术及仪器仪表、工业自动化、化工等专业的本科生教材,也可作为相关专业研究生的选修课教材,还可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术/何金田等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.9

ISBN 7-5603-2083-X

I.传… II.何… III.传感器 IV.TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 093980 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 哈尔滨市龙华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 9.25 字数 214 千字
版 次 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-2083-X/TB·47
印 数 1~3 000
定 价 25.00 元(上下册)

前 言

传感器是能够感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器作为获取信息的工具,处于被测对象和测控系统的接口位置,为各类系统提供赖以处理的原始信息。传感器技术是现代科学技术中的一个重要领域,它和通信技术、计算机技术是当今信息社会的三大支柱。传感器技术在现代科学技术发展中的作用越来越为世人瞩目。世界上许多国家都把传感器技术作为优先发展的科学领域之一。传感器的基本原理和应用已成为现代科学技术人员必备的基础知识,传感器原理是许多理工科专业必修的基础课程。

为适应课程建设和教学改革的需要,作者总结多年的科研和教学经验,广取国内外兄弟院校有关著作和文献之长,编著了《传感器技术》一书。本书重点阐述常用传感器的原理、概念和应用,并将反映当代传感器技术的发展和成就的新型传感器专列一章做了适当的介绍。在撰写时力求在讲清基本原理的同时,注意介绍应用实例。每章都有例题、思考题和习题供学习者选用。

本书由郑州大学何金田(绪论、第13章)、郑州大学张全法(第1、5、9、15、16章)、郑州轻工业学院徐甲强(第12章)、中原工学院李伟锋(第6、7章)、河南工业大学成连庆(第2、3章)、中原工学院范福玲(第10、11章)、解放军防空兵指挥学院李赞(第8章)、郑州大学杨全玖(第4章)、河南师范大学娄向东(第14章)等编著,全书由何金田教授负责统稿,郑州大学赵书俊教授主审。全书分上下册,上册为1~6章。

本书在编写的过程中参考了有关教材和文献,在此一并向这些教材和文献的作者表示感谢。

本书可作为高等院校测控技术及仪器仪表、工业自动化、化工等专业或相近专业的本科生教材,也可供有关专业的研究生作为选修课教材,还可以作为有关工程技术人员的参考书。

传感器技术涉及的学科众多,由于作者学识水平有限,书中存在的疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编著者
2004年7月

目 录

绪 论	1
0.1 传感器及其在科技发展中的地位与作用	1
0.2 传感器的组成和分类	2
0.3 传感器技术的发展趋势	4
0.4 本书的特点和任务	5
思考题和习题	5
第 1 章 传感器的一般特性	6
1.1 传感器的静态特性	6
1.2 传感器的动态特性	11
思考题和习题	20
第 2 章 电阻式传感器	21
2.1 电阻应变式传感器	21
2.2 压阻式传感器	39
思考题和习题	44
第 3 章 电感式传感器	47
3.1 电感式传感器	47
3.2 差动变压器式传感器	55
3.3 电涡流式传感器	59
3.4 压磁式传感器	64
3.5 应用举例	66
思考题和习题	69
第 4 章 电容式传感器	72
4.1 电容式传感器	72
4.2 电容式传感器的主要特性	73
4.3 电容式传感器的测量电路	77
4.4 影响精度的因素及提高的措施	81
4.5 容栅式传感器	83
4.6 应用举例	87
思考题和习题	90
第 5 章 磁电式传感器	92
5.1 磁电感应式传感器	92
5.2 磁栅式传感器	100
5.3 霍尔式传感器	106
5.4 磁敏元件	113

思考题和习题	120
第 6 章 压电式传感器	122
6.1 压电效应及压电材料	122
6.2 压电元件的常用结构形式	127
6.3 压电式传感器的等效电路和测量电路	128
6.4 压电式传感器的结构组成	132
6.5 应用举例	136
思考题和习题	138
参考文献	140

绪 论

0.1 传感器及其在科技发展中的地位与作用

0.1.1 传感器的定义

在 GB7665—87《传感器通用术语》中对传感器的定义是：“能感受规定的被测量并按照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。”

这一定义包含了几个方面的含意：①能感受(或响应)表示传感器要对被测量敏感，能灵敏地反映被测量的变化；②传感器的输出输入之间满足一定的规律，且具有一定的精度；③可用输出信号通常是指便于传输、转换、处理和显示的信号。目前主要是电信号，电信号有很多形式，如电压、电流、电容、电阻、频率等，输出信号的形式由传感器的原理确定。随着科学的发展，输出信号将来也可能是光信号或其他的信号；④被测量可以是物理量，也可以是化学量、生物量或其他量。

图 0.1 为一变气隙型电感式压力传感器的示意图。它由波纹管、铁心、衔铁及线圈等组成，衔铁与波纹管的顶端连在一起。这里被测量是气体的压力 p 。当气体进入波纹管时，衔铁和波纹管的顶端在压力 p 的作用下产生与压力 p 大小成正比的位移，从而使衔铁和铁心之间的空气间隙发生变化，改变磁路的磁阻使线圈的电感改变，流过线圈的电流也发生相应的变化，电流表指示值反映了被测压力的大小。

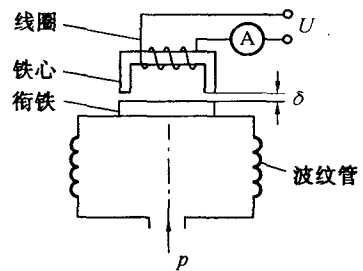


图 0.1 变气隙型电感式压力传感器

0.1.2 传感器在科技发展中的地位和作用

人类为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。人类依靠这些器官接受来自外界的刺激，再通过大脑分析判断，发出命令和动作。随着科学技术的发展和社会的进步，人类为了进一步认识自然和改造自然，只靠这些感觉器官显然是不行的。于是，一系列代替、补充、延伸人的感觉器官功能的各种手段就应运而生，从而出现了各种用途的传感器。传感器的历史可以追溯到远古时代，公元前1 000年左右，中国的指南针、记里鼓车已开始使用；埃及王朝时代开始使用的天平，一直延用到现在；利用液体膨胀进行温度测量在 16 世纪前后就已出现；19 世纪建立的物理法则直到现在作为各种传感器的工作原理仍在应用着。

目前，传感器技术早已渗透到诸如工农业生产、交通运输、环境保护、海洋探测、资源

调查、健康管理、生物工程、宇宙开发、文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从宏观的茫茫宇宙探索到研究微观粒子的世界,从各种复杂的工程系统到日常生活的衣食住行,几乎每一个现代化项目都离不开各种各样的传感器。

在现代化工业生产中,尤其是自动化生产过程中,要用各种不同的传感器来监视或控制生产过程中的各个参数,使设备处在最佳工作状态,保证产品有最好的质量。因此,在一个自动控制系统中,计算机技术是核心,传感器技术是基础。

在家用电器和医疗卫生方面由于采用了新颖的传感器,使自动洗衣机、洗碗机、电冰箱和电子血压计、电子体温计、脉搏计等家用电器和电子医疗保健产品进入千家万户,对家务劳动自动化的普及和人们健康水平的提高起到了非常重要的作用。

许多基础科学研究的障碍首先就在于研究对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度的检测传感器往往会导致该领域的突破,一些传感器的发展往往是一些边缘学科开发的先驱。例如超导体的约瑟夫森效应被发现不久,很快地用于制造高灵敏度的超导量子型磁力传感器,可以用它来测量生物体内极微弱的磁场变化。

随着世界进入信息时代,由于传感器技术是获取各个领域信息的主要途径和手段,传感器的重要性显得更为突出,因此,世界上各个国家都十分重视发展传感器技术,相信不久的将来,传感器技术将会有新的飞跃,对科学技术的发展也将会起到更大的促进作用。

0.2 传感器的组成和分类

0.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路和其他辅助元件组成。图 0.2 表示传感器组成的框图。

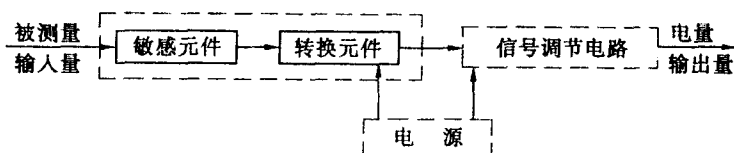


图 0.2 传感器组成的框图

敏感元件是直接感受规定的被测量(一般为非电量)并按照一定的规律转换成与被测量有确定关系的其他量(一般仍为非电量)的元件。当然这里的其他量是比被测量更易转换成可用信号的量,故敏感元件又称为预变换器。在图 0.1 中,波纹管就是敏感元件,它把被测气体的压力转换成衔铁的位移。

转换元件是将敏感元件的输出量转换成可用信号的元件,又称变换器。在图 0.1 中,衔铁的位移使线圈的电感改变,衔铁、铁心和线圈组成转换元件。

转换电路是将转换元件输出的可用信号作为输入,将其进行放大、显示和记录的电路。转换电路的类型和被测量、测量原理以及转换元件有关,常用的电子器件有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器等。

这里应说明的是敏感元件和转换元件之间并无严格的界限。以热电偶传感器为例,如图 0.3 所示。两种不同的金属材料 A 和 B 串接成一封闭回路,一端直接感知被测温度 T 的变化,另一端为参考端,温度为 T_0 ,则在回路中将产生一个与温度 T 、 T_0 有关的热电动势。若固定 T_0 ,则热电动势仅与温度 T 有关,那么测得热电动势即可确定温度 T 。这里热电偶既是敏感元件,又是转换元件,直接把温度变成电动势输出。

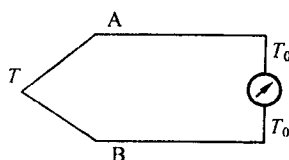


图 0.3 热电偶

有些传感器不只一个转换元件,要经过多次转换。例如图 0.4 所示的密度传感器。当被测液体的密度变化时,浮子受到的浮力变化,作用在梁上的力随之改变,使悬臂梁变形,贴在悬臂梁上的应变片随着悬臂梁的变形其电阻也相应改变,这样经过几次转换把被测液体的密度变成电阻变化输出。

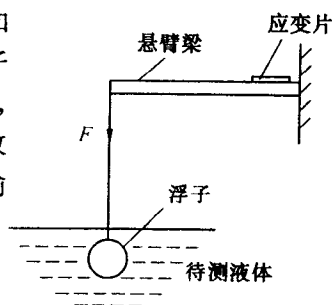


图 0.4 密度传感器

0.2.2 传感器的命名和分类

1. 命名

根据 GB766—87《传感器命名法及代号》的规定,对任何一种传感器的名称应由主题词及四级修饰语组成。具体为:①主题词——传感器;②第一级修饰语——被测量,包括修饰被测量的定语;③第二级修饰语——转换原理,一般可后续以“式”字;④第三级修饰语——特征描述,指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征,一般可后续以“型”字;⑤第四级修饰语——主要技术指标(量程、精确度、灵敏度等)。例如,某一应变式位移传感器的正序排列名称为“传感器,位移,应变式,100 mm”。在实际应用中,修饰语的顺序可以改变,而且可以使用简称,省略四级修饰语中的任一级,但在作为商品出售时不能省略第一级修饰语。

2. 分类

传感器一般是利用物理学、化学、生物学等学科的某些原理和效应设计而成的。利用一种原理设计的传感器可以测量多种物理量,对同一个被测量也可用不同原理的传感器来测量。因此,传感器种类繁多,而且目前尚无统一的分类方法。这里给出传感器常见的几种分类方法(见表 0.1)。

结构型传感器是利用物理学场的定律构成的。它包括动力场的运动定律、电磁场的感应定律等,其作用与物体在空间的位置及分布状态有关。这些定律一般是以方程式给出的,对于传感器来说,这些方程式就是传感器工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的性能主要决定于其结构,而与它的材料没有多大关系。以差动变压器为例,无论是使用坡莫合金还是铁淦氧做铁心,都是作为差动变压器工作的。虽然结构型传感器多是早期开发的,但近年来由于新材料、新工艺、新原理的应用,在精度、灵敏度、可靠性和稳定性等方面都有了很大的提高。所以,目前仍广泛应用于工业自动化和过程控制的检测中。

物性型传感器是利用物质定律构成的。物质定律是表示物质本身某种客观性质的法则,这些法则大多数是以物质本身所固有的物理常数形式给出,这些常数的大小决定了传

传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随敏感材料的性质而异。例如,光电管就是一种物性型传感器,它是根据物质定律中的外光电效应构成的。尽管物性型传感器发展较晚,但它具有结构简单、体积小、重量轻、反应灵敏、易于集成化和微型化等优点,已引起人们越来越大的兴趣和重视,半导体材料和有机高分子功能材料的发展,进一步为物性型传感器的发展打下了坚实的基础。

表 0.1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等	传感器以工作原理命名
按构成原理分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	主要由能量变换元件构成,不需要外界供给能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量,而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式传感器	输出为模拟量
	数字式传感器	输出为数字量

0.3 传感器技术的发展趋势

传感器技术的发展动向主要有两个方面:一是传感器本身的基础研究,二是和电子技术以及计算机技术组合在一起的传感器系统的研究。前者是研究新型传感器,后者是研究新材料、新工艺以及将检测功能与信号处理技术相结合,向集成化、智能化方向发展。

1. 发现新现象

目前的传感器物理型居多,而化学型和生物型较少。即使是物理型也有许多方面有待深入研究开发。根据物理学家们列出的“效应周期表”,仅在热、磁、电三者之间就存在 54 种有关效应,到目前为止实际发现并被利用的不足 20 种,这说明大量未发现的效应需要发现、开发、利用。而发现新现象与新效应则可扩大传感器的检测极限和应用领域,其意义极为深远。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,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

随着材料科学的迅猛发展,人们已设计制造出各种用于传感器的功能材料,而新材料又是开发新传感器的基础。近年来半导体材料发展很快,在气敏、热敏、光敏传感器中得到广泛应用。有机材料也是制造力敏、气敏、湿敏、光敏和离子敏传感器的重要材料。光

导纤维的应用是传感器材料的重大突破,它被制成多种传感器,以光信号传输代替电信号传输,具有耐高温、防爆、抗电磁干扰、远传等优点,这是由其他材料制成的传感器所不能比拟的。格外引人注目的生物传感器,是由生物敏感材料构成,有的生物传感器的某些性能已超过人的感官,受到各国学者的高度重视。

3. 集成化、多功能化

将敏感元件和放大电路、运算电路、温度和线性补偿电路等利用 IC 技术制作在同一芯片上或制成混合式的传感器。从点到一维、二维、三维空间图像的检出,而且正向着包含时间系列的四维空间发展。这样同一个传感器不仅能检测一种信号,而且可以检测多种信号。

4. 智能化传感器

20 多年前,美国 Honeywell 公司推出了第一个智能传感器。它将硅敏感元件与微处理器的计算、控制能力结合在一起,建立起一种新的传感器概念,从而使传感器技术进入一个新的阶段。智能传感器是一种带微处理器的传感器,具有信息的采集、记忆、诊断、综合和处理等功能。现在符合要求的智能传感器的数量虽然很少,但随着今后的科技发展,将会出现更多更好的智能传感器。

0.4 本书的特点和任务

《传感器技术》一书主要讲述常用传感器的基本结构,工作原理,性能特点及应用,也介绍反映传感器技术发展前沿的新型传感器。传感器技术是正在迅速发展的一门学科,传感器的工作原理涉及到物理学、化学、生物学等多门学科的原理和效应。传感器作为获得信息的工具,其应用与生产实际和科学技术密不可分,本书不仅具有很强的综合性和理论性,而且还具有很强的实践性。

本书的主要任务是使读者掌握常用传感器的基本结构、工作原理、性能特点及应用,能合理选择和使用传感器,对传感器技术的发展有初步的了解。

思考题和习题

1. 什么叫传感器? 它由哪几部分组成? 试述它们的作用及相互关系。
2. 传感器分类有哪几种?
3. 物性型传感器和结构型传感器各有什么特点?
4. 传感器发展的趋势主要有哪些?

第1章 传感器的一般特性

传感器的特性主要是指其输出与输入的关系。传感器的输入量可分为静态量和动态量,静态量是指常量或变化缓慢的量,动态量是指周期变化、瞬态变化或随机变化的量。输入量为静态量时,其输出输入关系称为静态特性;输入量为动态量时,则称为动态特性。静态特性和动态特性是传感器的两种基本特性,可表征其性能的优劣。

然而,传感器的静态特性和动态特性并不能完全描述传感器的性能,在设计和选用传感器时,还应该考虑传感器的其他特性,如输入阻抗、输出阻抗、可靠性、功耗、尺寸、重量、价格,等等。在以后各章中将根据具体的传感器对这些特性进行介绍,本章只讨论传感器的一般特性——静态特性和动态特性。

理论上,传感器的静态特性只是动态特性的特例,完全可用一套统一的方法描述。但是,若想将传感器的静态特性指标和动态特性指标统一地考虑进去,就必须建立带有随机变量的非线性微分方程来描述传感器输出信号与输入信号的关系,这将是非常复杂的。为避免数学上的困难,需将静态特性和动态特性分开考虑。而且,研究动态特性时,通常将系统简化为线性定常系统。

1.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指输入量为静态量时,其输出与输入的关系可用数学表达式、曲线或数据表格等形式来表示。通过理论分析可得到用数学表达式表示的传感器静态特性,进而可绘制成曲线或制成数据表格。但理论分析时一般需做一些近似,使得理论特性和实际特性差别较大。因此,往往采用实验方法获取传感器的静态特性。

借助实验方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准,所得特性称为校准特性。当满足静态标准条件的要求,且使用的仪器设备具有足够高的精度时,测得的校准特性即为传感器的静态特性。静态标准条件是指无加速度、振动与冲击(除非这些参数本身就是被测量),环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$,相对湿度小于85%,气压为 $(101.32 \pm 7.999)\text{kPa}$ 。

校准特性往往首先表现为数据表格,可据此绘制成特性曲线,也可通过数据处理得到数学表达式形式的特性。

1.1.1 传感器的静态数学模型

在静态条件下,若不考虑迟滞及蠕变,则传感器的输出量 y 与输入量 x 的关系可由一个代数方程表示,称为传感器的静态数学模型,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1.1)$$

式中 a_0 ——无输入时的输出,即零位输出;

a_1 ——传感器的线性灵敏度;

a_2, a_3, \dots, a_n ——非线性项的待定常数。

设 $a_0 = 0$, 即不考虑零位输出, 则静态特性过原点。此时静态特性由线性项和非线性项叠加而成。一般可分为以下几种典型情况, 如图 1.1 所示。

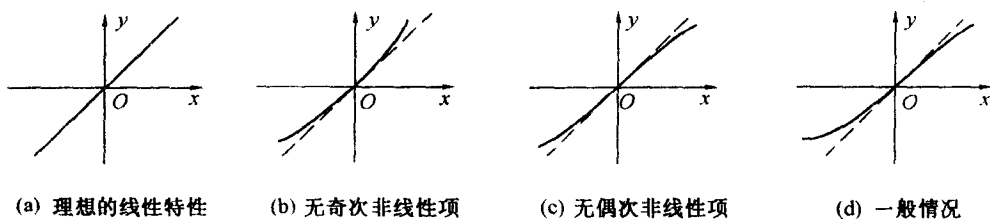


图 1.1 传感器静态特性曲线

1. 理想的线性特性

当 $a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$ 时, 具有这种特性, 如图 1.1(a) 所示。此时传感器的静态特性为

$$y = a_1 x \quad (1.2)$$

静态特性曲线是一条直线, 传感器的灵敏度为

$$S_n = y/x = a_1 = \text{常数} \quad (1.3)$$

2. 非线性项仅有偶次项

当 $a_3 = a_5 = \dots = 0$ 时, 具有这种特性, 如图 1.1(b) 所示。此时传感器的静态特性为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \quad (1.4)$$

因不具有对称性, 其线性范围较窄, 所以传感器设计时一般很少采用这种特性。

3. 非线性项仅有奇次项

当 $a_2 = a_4 = \dots = 0$ 时, 具有这种特性, 如图 1.1(c) 所示。此时传感器的静态特性为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \quad (1.5)$$

特性曲线关于原点对称, 在原点附近有较宽的线性区, 不少差动式传感器具有这种特性。

4. 一般情况

特性曲线过原点, 不具有对称性, 如图 1.1(d) 所示。

通过理论分析建立传感器的数学模型往往非常复杂, 有时甚至难以实现。实际应用时, 往往利用校准数据绘制传感器的校准曲线, 并根据校准曲线的特征, 用一些技术指标来描述传感器的特性。

1.1.2 描述传感器静态特性的主要指标

衡量传感器静态特性优劣的主要指标有: 线性度、灵敏度、迟滞、重复性、阈值、分辨率、稳定性、漂移和静态误差等。

1. 线性度

在静态标准条件下, 利用一定精度等级的校准设备, 测得的特性曲线称为传感器的静态校准曲线。传感器的校准曲线与选定的拟合直线的偏离程度称为传感器的线性度, 又称非线性误差。如图 1.2 所示, 用 Δy_{\max} 表示校准曲线与拟合直线的最大偏差, 用 $y_{F.S.}$ 表示传感器的满量程输出值 (F.S. 是 full scale 的缩写), 则线性度 e_L 可表示为

$$e_L = \pm \Delta y_{\max} / y_{F.S.} \times 100\% \quad (1.6)$$

显然,线性度的值与所选的拟合直线有关。选择拟合直线的原则是获得尽量小的非线性误差,同时还要方便使用和计算。下面介绍确定拟合直线的几种常用方法。

(1) **端点直线法** 端点是指与量程的上下极限值对应的点。通常取零点作为端点直线的起点,满量程输出作为终点。通过这两个端点的直线称为端点直线。以端点直线作为拟合直线得到的线性度称为端点线性度,如图 1.3 所示。这种拟合方法简单直观,但未考虑其他校准点的分布,拟合精度较低,一般用于特性曲线非线性较小的情况。

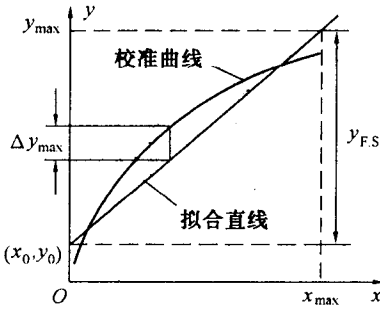


图 1.2 传感器的线性度

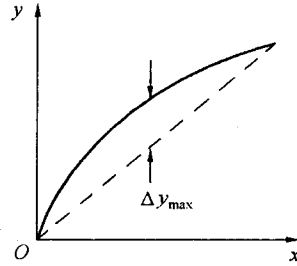


图 1.3 端点线性度

(2) **端点平移直线法** 做两条与端点直线平行的直线,使之恰好包围所有的校准点,然后在这一对平行直线之间做一条等距线,作为拟合直线。这条拟合直线即端点平移直线,由此得到的线性度称为独立线性度,如图 1.4 所示。

(3) **最小二乘直线法** 按最小二乘法原理求拟合直线,使传感器校准数据残差的平方和最小,所得拟合直线称为最小二乘直线。以最小二乘直线为拟合直线得到的线性度称为最小二乘线性度,如图 1.5 所示。设拟合直线方程为 $y = b + kx$, 校准点有 n 个。任一个校准数据 y_i 与拟合直线上对应值之间的残差为 $\delta_i = y_i - (b + kx_i)$, 按最小二乘法原理, 应使 $\sum \delta_i^2$ 最小。为此, 将 $\sum \delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数, 并令其等于零, 即可求得

$$k = (n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i) / [n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \quad (1.7)$$

$$b = (\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i) / [n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \quad (1.8)$$

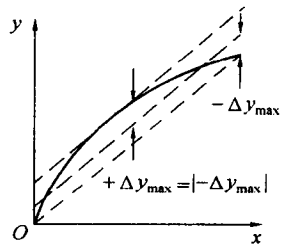


图 1.4 独立线性度

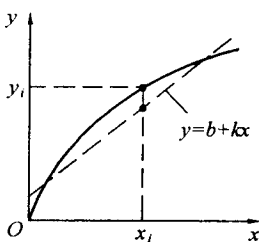
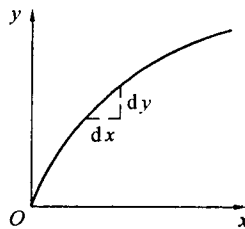
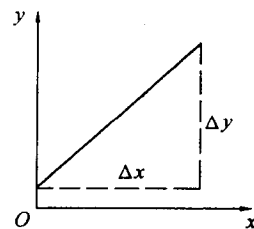


图 1.5 最小二乘线性度



(a) 非线性特性



(b) 线性特性

图 1.6 灵敏度定义

有的传感器采用过零点的最小二乘直线,即 $y = kx$,这时 k 为

$$k = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \quad (1.9)$$

虽然这种方法拟合精度很高,但校准曲线对拟合直线最大偏差的绝对值未必最小,最大正负偏差的绝对值也未必相等。

2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出改变量与引起此变化的输入改变量之比。常用 S_n 表示灵敏度,其表达式为

$$S_n = dy/dx \quad (1.10)$$

显然,非线性传感器的灵敏度各处不一样,如图 1.6(a) 所示。只有线性传感器的灵敏度才为常数,如图 1.6(b) 所示,这时

$$S_n = \Delta y/\Delta x \quad (1.11)$$

实际中,由于有源传感器的输出与电源有关,故其灵敏度表达式中还需考虑电源的影响。例如,某位移传感器的电源电压为 1 V 时,每 1 mm 位移变化引起输出电压的变化为 100 mV,则其灵敏度可表示为 100 mV/(mm·V)。

3. 迟滞(迟环)

在相同工作条件下做全量程范围校准时,正行程(输入量由小到大)和反行程(输入量由大到小)所得输出输入特性曲线往往不重合。也就是说,对应于同一大小的输入信号,传感器正反行程的输出信号大小不相等,此即迟滞现象。迟滞(或称迟环)正是用来描述传感器在正反行程期间特性曲线不重合程度的,如图 1.7 所示。迟滞的大小常用正反行程最大输出差值 Δy_{\max} 对满量程输出 $y_{F.S.}$ 的百分比来表示,其表达式为

$$e_h = \pm \Delta y_{\max}/y_{F.S.} \times 100\% \quad (1.12)$$

产生迟滞的主要原因是传感器的机械部分存在各种缺陷,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。

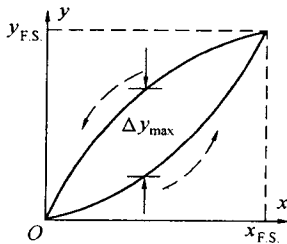


图 1.7 迟滞

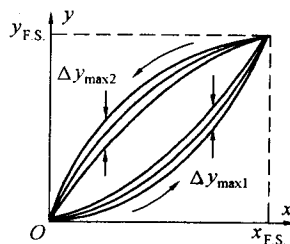


图 1.8 重复性

4. 重复性

重复性是指在相同工作条件下,输入量按同一方向作全量程多次测试时,所得传感器特性曲线不一致性的程度,如图 1.8 所示。重复性的计算方法有多种。比较简单的方法是先求出正行程的最大偏差 $\Delta y_{\max 1}$ 和反行程的最大偏差 $\Delta y_{\max 2}$,再取这两个偏差中的较大者为 Δy_{\max} ,然后用 Δy_{\max} 与满量程输出 $y_{F.S.}$ 的百分比表示,即

$$e_r = \pm \Delta y_{\max}/y_{F.S.} \times 100\% \quad (1.13)$$

因重复性误差属随机误差,故按标准偏差来计算重复性指标更合适,用 σ_{\max} 表示各校准点标准偏差中的最大值,则

$$e_r = \pm \alpha \sigma_{\max} / y_{F.S.} \times 100\% \quad (1.14)$$

式中, α 为置信概率系数,通常取2~3。取2时,置信概率为95.4%,取3时,为99.7%。

考虑到传感器具有迟滞现象,应在每个校准点上分别计算正行程和反行程的 n 次测量值的标准偏差 σ ,并从 $2m$ 个 σ 中选取最大值作为 σ_{\max} (m 为校准点数)。标准偏差可按贝塞尔公式计算,设正(反)行程时在第 i 个校准点上第 j 次测量值为 y_{ij} ,测量值的算术平均值为 $\bar{y}_i = \sum_j y_{ij} / n$,则在此校准点上正(反)行程标准偏差 σ_i 为

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 / (n - 1)} \quad (1.15)$$

标准偏差也可用极差法计算,即先计算各校准点正(反)行程测量值中最大值与最小值之差 W_i ,并根据测量次数 n 在表1.1中选取极差系数 α_n ,然后按下式计算

$$\sigma_i = W_i / \alpha_n \quad (1.16)$$

表 1.1 极差系数与测量次数的关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α_n	1.41	1.91	2.24	2.48	2.67	2.83	2.96	3.08	3.18	3.26	3.33

5. 阈值和分辨率

当传感器的输入从零开始缓慢增加时,只有在达到了某一值后,输出才发生可观测的变化,这个值说明了传感器可测出的最小输入量,称为传感器的阈值。

当传感器的输入从非零的任意值缓慢增加时,只有在超过某一输入增量后,输出才发生可观测的变化,这个输入增量称为传感器的分辨率。有时用该值相对于满量程输入值的百分数表示,则称为分辨率。分辨率说明了传感器可测出的最小输入改变量。

对数字式传感器,分辨率指能引起输出数字的末位数发生改变所对应的输入增量。

6. 稳定性

稳定性表示传感器在较长时间内保持其性能参数的能力,故又称长期稳定性。一般在室温条件下经过一个规定的时间后,传感器的输出与标定时输出的差异程度来表示其稳定性。稳定性可用相对误差或绝对误差表示。表示方式如:_____个月不超过_____ % 满量程输出。有时也采用给出标定的有效期来表示其稳定性。

7. 漂移

漂移是指传感器的被测量不变,而其输出量却发生了不希望有的改变。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。如图1.9所示,特性曲线2相对于特性曲线1,既发生了零点漂移,又发生了灵敏度漂移。

零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移(时漂)和温度漂移(温漂)。时漂指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间缓慢变化。温漂则是周围温度变化引起的零点漂移或灵敏度漂移。

8. 静态误差

当单独计算非线性、迟滞、重复性时,常称为传感器的单项性能指标。评价传感器静态