

高等学校教学用书

传感器

原理与应用

主 编 何金田 苏运东
副主编 李晋尧 禹延光 徐甲强

河南科学技术出版社

中国轻工业出版社

传感器

原理

应用

主编 王耀球 副主编 王耀球 王耀球
副主编 王耀球 王耀球 王耀球



中国轻工业出版社

传感器原理与应用

主 编 何金田 苏运东
副主编 李晋尧 禹延光 徐甲强

河南科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍常用传感器的工作原理、基本结构、误差分析、相应的测量电路和应用实例。对反映当代传感器技术的发展与新成就的新型传感器也作适量的介绍。全书共分为四编十九章。第一编是传感器的基本知识,简要介绍传感器的基本概念、特性和发展趋势;第二、三、四编分别为结构型传感器、物性型传感器和其它传感器,介绍各类传感器的原理、特点、应用和发展。每章后均附有思考题和习题,可供学习者选用。

本书具有内容丰富、条理清晰、编排新颖、结构严谨、突出应用等特点。本书可作为高等学校检测技术及仪器仪表、工业自动化、自动控制等专业及相近专业的教材,也可供有关专业本科生、大专生和研究生选用,同时还可作为有关工程技术人员的参考书。

传感器原理与应用

主 编 何金田 苏运东

副主编 李晋尧 禹延光 徐甲强

责任编辑 韩家显 王广照

*

河南科学技术出版社出版发行

河南农业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 23 印张 592 千字

1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1600

ISBN7-5349-1930-4/T·400 定 价: 23.00 元

传感器原理与应用 教材编委会

主 编	何金田	苏运东	
副主编	李晋尧	禹延光	徐甲强
编 委	李晋尧	杨 雷	何金田
	苏运东	汪现中	禹延光
	徐甲强		

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。传感器作为测控系统与信息传输的窗口,处于被测控对象与系统的接口位置,传感器为各类系统提供赖以进行处理和决策的原始信息。传感器技术和通信技术、计算机技术是信息技术的三大支柱,在当今的信息时代中,传感器技术在现代科学技术发展中的作用愈来愈为世人所瞩目,世界上各个国家都把传感器技术列为优先发展的科学领域之一。鉴于以上原因,有关传感器的基本原理和应用,已成为当代科学技术人员必备的基础知识。

在多年教学经验的基础上,结合我们的科研实践,广取国内各兄弟院校有关教材之长,我们撰写了本书。本书主要介绍常用传感器的工作原理、基本结构、误差分析、相应的测量电路和应用实例,对反映当代传感器技术的发展与新成就的新型传感器也作了适当的介绍。全书共分为四编计十九章,第一编是传感器的基本知识,简要介绍传感器的基本概念,一般特性和发展趋势;第二编为结构型传感器;第三编为物性型传感器;第四编为其它传感器。作为教材,本书力求在讲清基本而常用的传感器的同时,注意传感器类型的覆盖面,尽量多介绍不同类型的传感器;力求在讲清基本原理的同时,注意突出应用实例,加强实用性。每章后都附有思考题和习题,以供学习者选用。

本书可作为高等学校检测技术及仪器仪表、工业自动化、自动控制等专业及相近专业的教材,也可供有关专业的本科生、大专生和研究生选用,还可作为有关工程技术人员的参考书。

本书由郑州大学何金田与郑州轻工业学院苏运东主编。参加编写的有郑州大学何金田(第1、2、3、9章),郑州轻工业学院苏运东(第18、19章),郑州大学李晋尧(第4、11、16、17章)、禹延光(第5、6、14章)、杨雷(第8、13章)、汪现中(第7、10章),郑州轻工业学院徐甲强(第12、15章)。全书由何金田负责统稿,并由郑州大学徐振业教授主审。

传感器技术涉及的学科众多,由于作者学识水平有限,书中存在的缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

1996年5月

目 录

第一编 传感器基本知识

第一章 绪论	(1)
1.1 传感器及其在科技发展中的地位和作用	(1)
1.2 传感器的组成和分类	(2)
1.3 传感器技术和发展趋势	(4)
思考题与习题	(4)
第二章 传感器的一般特性	(5)
2.1 传感器的静态特性	(5)
2.2 传感器的动态特性.....	(10)
2.3 传感器的动态响应.....	(14)
2.4 机电模拟.....	(20)
2.5 机械阻抗.....	(24)
2.6 双向传感器的统一理论.....	(27)
思考题与习题	(34)
第三章 传感器的标定	(35)
3.1 传感器的静态标定.....	(35)
3.2 传感器的动态标定.....	(38)
3.3 提高标定精度的措施.....	(44)
思考题与习题	(44)

第二编 结构型传感器

第四章 电阻应变式传感器	(45)
4.1 电阻应变片的基本原理与结构.....	(45)
4.2 电阻应变片的分类及特点.....	(49)
4.3 电阻应变片的主要参数及工作特性.....	(51)
4.4 电阻应变片的选用及粘贴.....	(61)
4.5 电阻应变片的测量电路.....	(64)
4.6 电阻应变式传感器.....	(67)
4.7 应用举例.....	(72)

思考题与习题	(75)
第五章 电感式传感器	(77)
5.1 自感式传感器	(77)
5.2 差动变压器式传感器	(87)
5.3 电涡流式传感器	(97)
5.4 应用举例	(102)
思考题与习题	(106)
第六章 电容式传感器	(107)
6.1 工作原理及结构形式	(107)
6.2 电容式传感器的主要特性	(108)
6.3 测量电路	(111)
6.4 影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施	(117)
6.5 电容式传感器应用举例	(118)
6.6 容栅式传感器	(121)
思考题与习题	(126)
第七章 磁电感应式传感器	(127)
7.1 磁电感应式传感器的工作原理和结构形式	(127)
7.2 磁电感应式传感器的动态特性	(129)
7.3 磁电感应式传感器设计要点	(132)
7.4 磁电感应式传感器的误差及补偿	(137)
7.5 磁电感应式传感器的测量电路	(141)
7.6 磁电感应式传感器的应用举例	(141)
思考题与习题	(143)

第三编 物性型传感器

第八章 光电式传感器	(144)
8.1 光电效应	(144)
8.2 光电器件	(146)
8.3 光电器件的特性	(149)
8.4 新型光电传感器	(154)
8.5 光电传感器的应用	(159)
思考题与习题	(164)
第九章 光纤传感器	(165)
9.1 光纤及其传光原理	(165)
9.2 光纤传感器原理	(168)
9.3 光纤传感器的应用实例	(174)

思考题与习题·····	(183)
第十章 压电式传感器 ·····	(184)
10.1 压电效应与压电材料·····	(184)
10.2 压电方程和压电常数·····	(187)
10.3 压电式传感器的等效电路和测量电路·····	(190)
10.4 压电式传感器·····	(193)
10.5 压电式传感器应用举例·····	(198)
思考题与习题·····	(201)
第十一章 霍尔式传感器 ·····	(202)
11.1 霍尔效应与霍尔元件·····	(202)
11.2 霍尔元件的基本测量电路·····	(203)
11.3 霍尔元件的主要特性参数·····	(204)
11.4 霍尔元件的温度补偿与不等位电势补偿·····	(205)
11.5 霍尔元件应用举例·····	(208)
思考题与习题·····	(210)
第十二章 化学传感器 ·····	(211)
12.1 离子敏传感器·····	(211)
12.2 气敏传感器·····	(215)
12.3 湿度传感器·····	(225)
12.4 化学传感器的应用·····	(235)
思考题与习题·····	(244)

第四编 其它传感器

第十三章 超声波和微波传感器 ·····	(245)
13.1 超声波的基本性质及检测原理·····	(245)
13.2 超声波传感器·····	(246)
13.3 超声检测技术的应用·····	(246)
13.4 微波检测的基本知识·····	(249)
13.5 微波传感器及其应用·····	(249)
思考题与习题·····	(251)
第十四章 核辐射与红外传感器 ·····	(252)
14.1 核辐射式传感器·····	(252)
14.2 红外辐射传感器·····	(256)
14.3 核辐射与红外传感器应用举例·····	(262)
思考题与习题·····	(266)
第十五章 生物传感器 ·····	(267)

15.1	生物传感器的结构类型与特点	(267)
15.2	酶传感器	(268)
15.3	微生物传感器	(269)
15.4	免疫传感器	(272)
15.5	生物电子学传感器	(275)
15.6	生物传感器的应用	(276)
	思考题与习题	(277)
第十六章	热电式传感器	(278)
16.1	热电偶传感器	(278)
16.2	热电阻传感器	(287)
16.3	PN 结温度传感器	(292)
16.4	热电式传感器应用举例	(296)
	思考题与习题	(299)
第十七章	磁敏二极管和磁敏三极管	(300)
17.1	磁敏二极管	(300)
17.2	磁敏三极管	(303)
17.3	磁敏二极管和磁敏三极管应用举例	(305)
	思考题与习题	(307)
第十八章	智能传感器	(308)
18.1	智能传感器的概念与功能	(308)
18.2	传感器智能化的技术途径	(308)
18.3	智能传感器的构成与特点	(310)
18.4	智能传感器的发展前景	(311)
18.5	智能传感器举例	(312)
	思考题与习题	(314)
第十九章	传感器与微机组成的测控系统	(315)
19.1	概述	(315)
19.2	信号采集与处理	(315)
19.3	接口设计的总体考虑	(342)
	思考题与习题	(358)
	参考文献	(359)

第一编 传感器的基本知识

第一章 绪论

在日新月异的信息时代,作为获取信息手段的传感器技术无疑是现代科学技术中一个引人瞩目的重要领域。传感器技术涉及传感器原理、传感器器件设计、传感器开发与应用等项综合技术。本书主要介绍常用传感器的原理、结构及应用,对反映当代传感器技术的新发展与成就的新型传感器也作了适当介绍。

1.1 传感器及其在科技发展中的地位 and 作用

1.1.1 传感器的定义

在 GB7665—87《传感器通用术语》中对传感器下的定义是:“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意思: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,随着科学的发展,将来也可能是光信号或其它的信号;④被测量可以是物理量,也可以是化学量、生物量或其它的量。

这里所示为一气体压力传感器的示意图。这里被测量是气体的压力 p 。膜盒的下半部与壳体固接,上半部通过连杆与磁芯相连,磁芯置于两个电感线圈中,后者接入转换电路。当 p 变化时,引起膜盒上半部移动,连杆带动磁芯在电感线圈中运动,线圈电感发生变化,这个量即是可用输出信号。

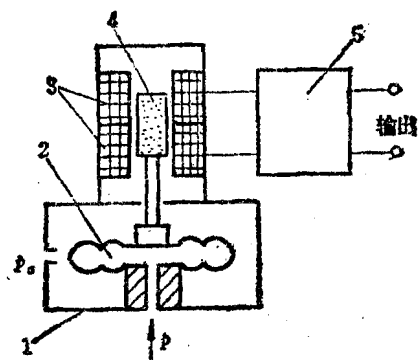


图 1.1 气体压力传感器的示意图

1—壳体; 2—膜盒; 3—电感线圈;
4—磁芯; 5—转换电路。

1.1.2 传感器在科技发展中的地位 and 作用。

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,从宏观上的茫茫宇宙探索到微观粒子世界的研究,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,使设备处在最佳状态工作,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提高人们的健康水平起了非常重要的作用。

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,就很快地用于制造高灵敏度的超导量子型磁力传感器,它已可以用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,对科学技术的发展起更大的促进作用。

1.2 传感器的组成和分类

1.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路和其它辅助元件组成。图 1.2 示出了传感器组成的框图。

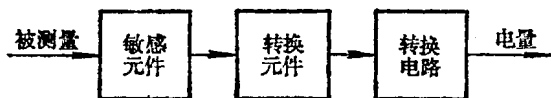


图 1.2 传感器的组成

敏感元件是直接感受被测的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它量(一般仍为非电量)的元件。当

然这里的其它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 1.1 中,膜盒即是敏感元件,它把被测气体的压力转换成膜盒的变形,即推杆的位移。

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 1.1 中,推杆的位移使磁芯在电感线圈中移动,从而使电感线圈的电感量产生变化。电感量变化是可用信号,电感线圈和磁芯即是转换元件。

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,常用的电路有电桥、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,热电偶是直接感知温度变化的敏感元件,但它又直接将温度转换为电量,因而又同时是转换元件。许多光电传感器都是敏感元件和转换元件合为一体的传感器。

1.2.2 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,对任一种传感器的名称应由主题词传感器,后面加四级修饰词(①被测量;②变换原理;③特征描述;④主要技术指标)组成。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,100mm”。在实际应用中可使用简称,省略四级修饰词中的任一级,但第一级不能省略。

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1.1)。

表 1.1 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	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量
	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 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量

本书在介绍传感器时按结构型传感器和物性型传感器分类。

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或是铁淦氧做铁芯,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,引起了人们越来越大的兴趣和重视,随着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。

当然还有一些传感器,如光纤传感器,它既有结构型的又有物性型的,我们将它放在物性型传感器中。也有一些传感器不太好按上述方法分类,我们将其作为其它传感器做专门介绍。

1.3 传感器技术的发展趋势

传感器的技术发展动向主要有两个方面,一是传感器本身的基础研究,二是和半导体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。根据物理学家们列出的“效应周期表”,在热、磁、电三者之间存在着 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,其灵敏度比霍耳器件高,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。近年来功能陶瓷材料发展很快,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,具有耐高温、防爆、抗电磁干扰、远传等优点,这是由其它材料制成的传感器不能比拟的。格外引人注目的生物传感器,是由生物体材料构成,有的传感器的某些性能已超过人,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

十多年前,美国 Honeywell 公司推出了第一个智能传感。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。

思考题与习题

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?

第二章 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极其缓慢的量,而动态量通常是指周期变化、瞬态变化或随机变化的量。当输入量为静态量时,传感器的特性为其静态特性,当输入量为动态量时,传感器的特性为其动态特性。在理论上,传感器的静态特性只是动态特性的一个特例,因此完全可以用一套统一的特性指标来描述。但是,传感器输出输入信号之间的关系要依靠微分方程来描述,而传感器的静态特性主要考虑其非线性和随机变化特性,由于非线性并带有随机变量的微分方程非常复杂,为了避免数学上的困难,不得不把静态特性和动态特性分开考虑。在研究动态特性时,通常将系统简化为线性定常系统。

2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是在静态标准条件下测定的。静态标准条件是指没有加速度、振动、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 $101.32 \pm 7.999\text{kPa}$ 的情况。衡量传感器静态特性的主要指标有:线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨率、阈值、稳定性和静态误差等。

2.1.1 传感器的输出输入特性

在静态条件下,若不考虑迟滞及蠕变,传感器的输出量和输入量之间的关系可由下面的代数方程表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.1)$$

式中, y —— 输出量;

x —— 输入量;

a_0 —— 没有输入时的输出,即零位输出;

a_1 —— 传感器的线性灵敏度;

a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项的待定常数。

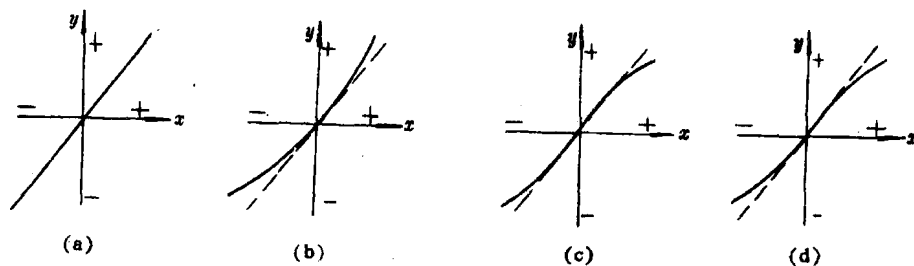


图 2.1 传感器的静态特性

(a) 理想的线性特性; (b) 仅有偶次非线性项; (c) 仅有奇次非线性项; (d) 一般情况

若不考虑零位输出,由式(2.1)表示的特性曲线有以下几种典型情况,如图 2.1 所示。

1. 理想的线性特性(图 2.1(a))

$a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$, $y = a_1x$, 这时特性曲线为一直线, 传感器的灵敏度为

$$S = a_1 = \frac{y}{x} \quad (2.2)$$

2. 仅有偶次非线性项(图 2.1(b))

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (2.3)$$

因为不具有对称性, 其线性范围较窄, 所以一般传感器设计时很少采用这种特性。

3. 仅有奇次非线性项(图 2.1(c))

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (2.4)$$

特性曲线对原点对称, 在原点附近相当宽的范围
内具有线性, 这时 $y(x) = -y(-x)$ 。不少差动
传感器具有这种特性。

4. 一般情况(图 2.1(d))

特性曲线过原点, 不具有对称性。

2.1.2 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。

传感器的线性度即是其校准曲线与所选定的
拟合直线的偏离程度, 又称为非线性误差。用 e_L
代表线性度, 其表示式为

$$e_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (2.5)$$

式中, Δ_{\max} ——校准曲线与拟合直线之间的最大偏差;

$Y_{F.S}$ ——传感器满量程时的输出值。

显然, 线性度的数值随所选定的拟合直线而改变。选择拟合直线的原则应是获得尽量小
的非线性误差, 并且使用与计算都比较方便。下面介绍几种常用的确定拟合直线的方法。

1. 端点直线和端点线性度

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始点, 满量程输出作为终
止点。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 2.3 所示。这种拟合方法简单直观, 但未考
虑到所有的校准点的分布, 拟合精度较低, 一般用在
特性曲线非线性较小的情况。

2. 端点平移直线和独立线性度

作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作一条平行的直线, 并使实际校准曲线对所拟合直

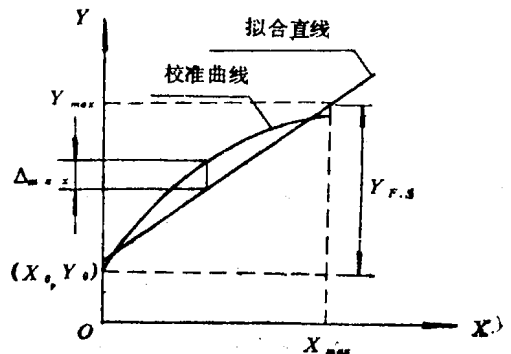


图 2.2 传感器的线性度

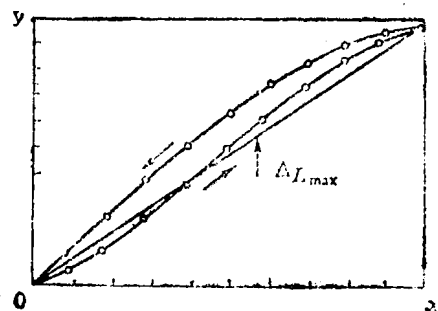


图 2.3 端点线性度

线的最大正偏差等于最大负偏差。这条拟合直线即端点平移直线，相应得到的线性度为独立线性度，如图 2.4 所示。

3. 最小二乘直线和最小二乘线性度

按最小二乘法原理求拟合直线，即使传感器校准数据的残差平方和为最小。以最小二乘直线为拟合直线得到的线性度即最小二乘线性度，如图 2.5 所示。设拟合直线方程为

$$y = b + kx \quad (2.6)$$

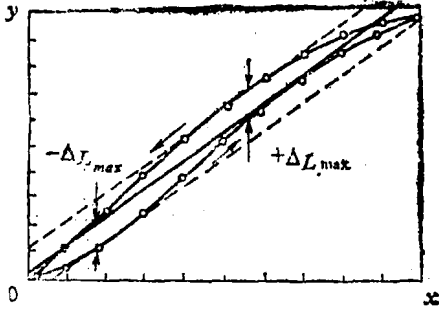


图 2.4 独立线性度

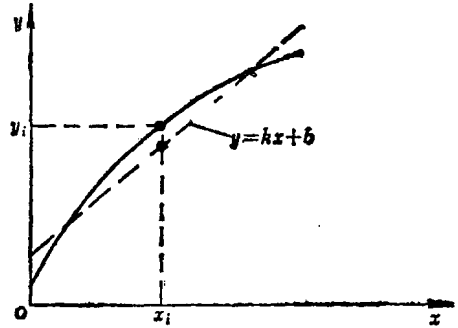


图 2.5 最小二乘线性度

假定校准点有 n 个，在 n 个校准数据中，任一个校准数据 y_i 与拟合直线上对应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (2.7)$$

按最小二乘法原理，应使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 最小。故将 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于零，即可求得

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.8)$$

$$b = \frac{n \sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.9)$$

式中， $\sum x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ ；

$\sum y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n$ ；

$\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n$ ；

$\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$ 。

由此得到拟合直线。

有的传感器采用过零点的最小二乘直线，即 $y = kx$ ，则这时 k 为

$$k = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \quad (2.10)$$

虽然最小二乘法的拟合精度很高，但要注意这时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。