

高等职业教育电子信息类贯通制教材(机电技术专业)

传感器原理及实用技术

(第2版)

■ 主编 刘伟 ■

本书配有电子教学参考资料包



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等职业教育电子信息类贯通制教材（机电技术专业）

传感器原理及实用技术

（第2版）

刘伟 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述传感器的工作原理、特性、测量电路以及应用举例。主要介绍传感器的有关概念、特性、分类及其发展趋势,应变式电阻传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、霍尔传感器、热电阻式传感器、光电式传感器、数字式传感器和其他新型传感器的工作原理、结构及其应用。本书共分 11 章,每章后均附有小结与习题。

本书采用简明的语言,减少了复杂公式的推导过程,增强实用性,添加了大量的传感器在实际生产、生活以及科研中的应用实例。读者通过学习本书,能够迅速掌握传感器的工作原理、特性,并能在实际中进行应用。

本书在第 1 版的基础上做了适当修订,详见前言。

本书可作为高职、中职电子技术应用专业、数控及自动化专业、仪器仪表专业、机电一体化专业等课程的教材,也可作为机电工程技术人员的参考和自学用书。

本书还配有电子教学参考资料包(包括:教学指南、电子教案、习题答案),详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及实用技术 / 刘伟主编. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2009.9

高等职业教育电子信息类贯通制教材. 机电技术专业

ISBN 978-7-121-09354-8

I. 传… II. 刘… III. 传感器—高等学校:技术学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 132203 号

策划编辑:施玉新

责任编辑:李 影

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:320 千字

印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:19.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言



本书克服了以往教材讲述原理过于繁多、实用技术内容少且单一的缺点,在内容上做了认真的选择,以适应目前职业教育的特点以及传感器技术发展的需求。

全书共分 11 章,参考学时 60 学时(含实验)。第 1 章介绍传感器的基本概念及特性等。第 2~9 章分别介绍应变式电阻传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、霍尔传感器、热电式传感器、光电式传感器和数字式传感器的工作原理、测量电路及实际应用。第 10 章主要介绍气敏、湿敏、磁敏以及生物传感器的工作原理及应用。第 11 章主要介绍传感器的接口技术,重点介绍与微机的接口技术。

本书采用简明的语言,减少复杂公式的推导,增强实用性,添加大量的传感器在实际生产、生活以及科研中的应用实例,使读者通过学习本书能够迅速掌握传感器的工作原理、特性,并能在实际中进行应用。

本书第 1, 6, 10, 11 章由本溪市机电工程学校刘伟编写,第 8, 9 章由江苏信息职业技术学院王建锋编写;第 3, 4 章由北京电子工业学校蒋鸣雷编写;第 7 章由山东信息职业技术学院王茹香编写;第 2, 5 章由湖北交通职业技术学院上官兵编写。全书由刘伟主编。

本次修订增加了传感器在实际应用中的一些实例,尤其是在车辆上的应用,同时也对书中的原理陈述做了适当删减,不妥之处做了修改。

本书在编写过程中,得到同行的关心和热情帮助,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,书中难免有些错误与不足,恳请广大读者批评指正。

为了方便教师教学,本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),请有此需要的教师登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后进行下载,有问题时请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系(E-mail:hxedu@phei.com.cn)。

编者

2009 年 7 月





第 1 章 传感器概述	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 传感器的作用、组成及分类	(2)
1.2.1 传感器的作用	(2)
1.2.2 传感器的组成	(2)
1.2.3 传感器的分类	(2)
1.3 传感器的基本特性	(4)
1.3.1 传感器的静态特性参数	(4)
1.3.2 传感器的动态特性	(6)
1.4 传感器的发展方向	(6)
本章小结	(7)
习题 1	(7)
第 2 章 应变式电阻传感器	(8)
2.1 弹性敏感元件	(8)
2.1.1 弹性敏感元件的特性参数	(8)
2.1.2 弹性敏感元件的分类	(9)
2.2 应变式电阻传感器原理及测量电路	(10)
2.2.1 电阻应变片的结构及工作原理	(10)
2.2.2 测量电路	(12)
2.3 应变式电阻传感器的使用注意事项	(13)
2.3.1 应变片的粘贴	(13)
2.3.2 实际应用中电桥的调零电路	(14)
2.3.3 传感器的温度补偿	(14)
2.4 应变式电阻荷重传感器	(14)
2.4.1 应变式电阻荷重传感器的工作原理	(14)
2.4.2 电阻应变式荷重传感器在电子衡器中的应用	(16)
2.5 应变式电阻加速度传感器	(21)
2.6 扩散硅压力传感器	(23)
本章小结	(25)
习题 2	(26)
第 3 章 电感式传感器	(27)
3.1 自感式电感传感器及其应用	(27)
3.1.1 自感式电感传感器工作原理	(27)
3.1.2 自感式电感传感器的测量电路	(31)
3.1.3 自感式电感传感器的应用	(34)

3.2	差动变压器及其应用	(36)
3.2.1	差动变压器的工作原理和结构形式	(36)
3.2.2	差动变压器的测量电路	(38)
3.2.3	差动变压器的应用	(39)
3.3	电涡流式传感器及其应用	(41)
3.3.1	电涡流式传感器工作原理和结构形式	(41)
3.3.2	电涡流式传感器的测量电路	(43)
3.3.3	电涡流式传感器的应用	(44)
	本章小结	(51)
	习题 3	(52)
第 4 章	电容式传感器	(53)
4.1	电容式传感器的工作原理与结构形式	(53)
4.1.1	电容传感器的工作原理	(53)
4.1.2	电容式传感器的结构形式	(54)
4.2	电容传感器的测量电路	(57)
4.2.1	桥式电路	(57)
4.2.2	调频电路	(57)
4.2.3	脉冲宽度调制电路	(58)
4.3	电容式传感器的应用	(59)
4.3.1	电容式压力传感器	(59)
4.3.2	电容式加速度传感器	(61)
4.3.3	电容式料位计	(62)
4.3.4	电容测厚仪	(62)
4.3.5	电容式气体浓度仪	(63)
4.3.6	电容式油量表	(63)
4.3.7	电容式湿度传感器	(64)
4.3.8	电容式接近开关	(64)
	本章小结	(65)
	习题 4	(65)
第 5 章	压电式传感器及其应用	(67)
5.1	压电式传感器工作原理、结构及测量电路	(67)
5.1.1	压电式传感器的工作原理	(67)
5.1.2	压电式传感器的测量电路	(68)
5.2	压电式加速度传感器	(69)
5.3	超声波传感器及其应用	(72)
5.3.1	超声波特性	(72)
5.3.2	超声波传感器的应用	(73)
	本章小结	(78)
	习题 5	(78)
第 6 章	霍尔传感器	(79)
6.1	霍尔传感器及其集成电路	(79)

6.1.1	霍尔传感器的工作原理	(79)
6.1.2	霍尔集成电路	(80)
6.2	霍尔传感器的应用	(83)
6.2.1	霍尔计数与霍尔转速表	(83)
6.2.2	霍尔电流、电压传感器	(83)
6.2.3	霍尔电机与霍尔汽车无触点电子点火器	(83)
6.2.4	液位探测与报警	(85)
6.2.5	位置传感器	(85)
6.2.6	霍尔式曲轴位置传感器	(85)
	本章小结	(88)
	习题 6	(89)
第 7 章	热电式传感器及其应用	(90)
7.1	热电偶的原理、结构及其应用	(90)
7.1.1	热电偶测温的基本原理	(90)
7.1.2	热电偶的结构和种类	(91)
7.1.3	热电偶的冷端温度补偿	(93)
7.1.4	热电偶的测量线路	(96)
7.2	热电阻传感器及其应用	(97)
7.2.1	常用的热电阻传感器及其性能	(97)
7.2.2	热电阻传感器的结构形式	(98)
7.2.3	热电阻传感器的测量线路	(99)
7.3	热敏电阻及其应用	(100)
7.3.1	热敏电阻的分类	(100)
7.3.2	热敏电阻的应用	(102)
	本章小结	(105)
	习题 7	(105)
第 8 章	光电式传感器及其应用	(108)
8.1	光敏电阻及其应用	(108)
8.1.1	光敏电阻的工作原理与特性	(108)
8.1.2	光敏电阻的应用	(111)
8.2	光敏晶体管及其应用	(112)
8.2.1	光敏二极管	(112)
8.2.2	光敏三极管	(114)
8.3	CCD 摄像传感器及其应用	(117)
8.3.1	CCD 的基本结构及原理	(117)
8.3.2	CCD 图像传感器的应用	(118)
8.4	光纤传感器在通信中的应用	(119)
8.4.1	光纤的结构及传光原理	(119)
8.4.2	光纤传感器的原理和分类	(120)
8.4.3	功能型光纤传感器举例	(121)

8.4.4 非功能型光纤传感器举例	(122)
本章小结	(124)
习题 8	(124)
第 9 章 数字式传感器	(125)
9.1 光栅传感器及其应用	(125)
9.1.1 光栅传感器的工作原理	(125)
9.1.2 光栅传感器的结构	(127)
9.1.3 光栅传感器的应用	(129)
9.2 感应同步器及其应用	(130)
9.2.1 感应同步器的种类和结构	(130)
9.2.2 感应同步器的工作原理	(131)
9.2.3 感应同步器在数控机床中的应用	(137)
9.3 旋转变压器及其应用	(138)
9.3.1 旋转变压器的结构与工作原理	(138)
9.3.2 旋转变压器的应用	(140)
本章小结	(140)
习题 9	(141)
第 10 章 其他传感器及其应用	(142)
10.1 湿敏传感器及其应用	(142)
10.2 磁敏传感器及其应用	(146)
10.2.1 磁敏电阻	(146)
10.2.2 磁敏晶体管	(148)
10.2.3 磁敏传感器的应用	(149)
10.3 气敏传感器及其应用	(151)
10.4 生物传感器及其应用	(156)
10.4.1 生物传感器的工作原理及结构	(156)
10.4.2 生物传感器应用	(158)
本章小结	(159)
习题 10	(159)
第 11 章 传感器与微机接口技术	(160)
11.1 概述	(160)
11.2 信号采集与处理	(161)
11.2.1 信号的采集	(162)
11.2.2 数据采集系统中的主要功能电路	(164)
11.3 通用(标准)接口	(183)
11.4 传感器与微机接口实例	(186)
本章小结	(188)
习题 11	(189)
参考文献	(190)

第1章 传感器概述



1.1 引言

在高度发展的现代社会中,科学技术的突飞猛进和生产过程的高度自动化已成为人所共知的必然趋势,而它们的共同要求是必须建立在不断发展与提高的信息工业基础上。人们从外界获取大量准确、可靠的信息后,经过一系列的科学分析、处理与判断,进而认识和掌握自然界和科学技术中的各种现象及其相关的变化规律。工业生产过程现代化面临的第一个问题是必须采用各种传感器(Sensor)来检测、监视和控制各种静态、动态参数,使设备或系统能正常运行并处于最佳状态,从而保证生产的高效率、高质量;可见,进行信息采集的传感器技术是重要基础,此后才有后期的信息分析、处理、加工和控制等技术问题。

人们通过自身感觉器官与外界保持接触,获得的信息有意义但却有限。例如,人耳能感受到音频段的声波,却听不到超低频段或超高频段的声音。又如,人的眼睛能分辨出自然光或白光中主要光波的颜色,但却无法辨别出红外光或紫外光。为了克服人体感官的局限性,人们不仅研究出具备人体感觉器官感觉功能的检测元件(传感器),还进一步完善了传感器的功能,使其更灵活,功能更完备。

近30年来快速发展的IC技术与电子计算机技术,为传感器的快速发展提供了非常良好与可靠的科学技术基础,同时也提出了更高的要求。所以,在近20年中,世界各国都将传感器技术列为尖端技术,尤其是在经济发达的美、英、德、俄、日等国,对传感器及其技术的发展更是倍加重视。现代信息技术的三大基础是信息采集、传输和处理技术(即传感器技术)、通信技术与计算机技术,这些技术分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。信息采集系统的最前端是传感器。人们常说:“征服了传感器,就等于征服了科学技术”。美国把20世纪80年代称为传感器的时代;日本把十大技术之首定位于传感器技术;俄罗斯国防发展中的“军事航天”计划把传感器技术列为重点;英、德、法等国拨出专款来发展传感器技术;中国在“八五”规划中也把传感器技术列为重点发展技术和21世纪发展的高科技项目之一。传感器是探索、测量自然界各种参数必不可少的检测元件。国际标准协会ISO和日本工业标准“JIS-Z130”将传感器定义为“对应于被测量,能给出易于处理的输出信号的变换器”。实际上,能够完成两种量(光、热、电、力学量和机械量等)之间的变换或转换关系,都符合传感器的定义范围。从目前实际应用情况看,由于电学及其器件与系统的高度发展,传感器配测量电路后,输出量往往都是电学量,所以在一些资料与参考书中,把电量作为输出量的传感器称为电子传感器。

严格地说,传感器是一种接收或激励被测信号,并以电信号作为输出的器件;而换能器(Transducer)则是将一种类型的能量转换成另一种类型的能量的转换器。在实际应用中,这



两个术语常常混用。

1.2 传感器的作用、组成及分类

1.2.1 传感器的作用

以传感器—微机为核心的现代测试与控制系统,正在越来越广泛地应用于航天、航空、兵器、舰船、交通运输、电力、冶金、机械制造、动力机械、化工、轻工和生物医学工程等领域。可以说,现代测试与控制系统已覆盖了国民经济中的第一、二、三产业的各个领域。日益发展的载人航天飞机、卫星以及现代化的多功能信息家用电器,无一不是使用传感器—微处理器或微机组成的测试与控制系统。以电阻应变式的负荷传感器组成的电子秤计量测试系统是国内外公认的高精度、高可靠性室内外的标准计量器具,已成为科学研究、工业生产自动化以及商品交换与流通领域中的有力的计量工具。科学技术中很多新的发现与突破以及新兴交叉边缘学科的发展,都离不开传感器。传感器在工业控制中的重要作用被人们所公认。

传感器相当于人体的感觉器官,它可将各种非电量(如机械量、化学量、生物量及光学量等)转换成电量,从而实现非电量的电测技术。在自动控制系统中,检测是实现自动控制的首要环节,没有对被控对象的精确检测,就不可能实现精确控制。如数控机床中的位移测量装置就是利用高精度位移传感器(光栅传感器或感应同步器)进行位移测量,从而实现对零部件的精密加工。

在工业生产中,传感器的大量使用,实现了生产的自动化或半自动化,大大减轻了工人的劳动强度,提高了产品的质量,降低了产品成本。在家用电器和医疗卫生方面,新颖的智能化传感器不断涌现,使人们的生活越来越轻松舒适。总而言之,在信息技术不断发展的今天,传感器将会在信息的采集和处理过程中发挥出巨大的作用。

1.2.2 传感器的组成

传感器一般由两个基本元件组成:敏感元件与转换元件。相对于传感器的转换作用而言,常称敏感元件为预变换元件。在完成非电量到电量的变换过程中,并非所有的非电量参数都能一次直接变换为电量,往往先变换成一种易于变换成电量的非电量(如位移、应变等),然后,再通过适当的方法变换成电量,因此,把能够完成预变换的元件称为敏感元件。在传感器中,建立在力学结构分析上的各种类型的弹性元件(如梁、板等)称为敏感元件,统称为弹性敏感元件。而转换元件是能将感觉到的被测非电量参数转换为电量的器件,如应变计、压电晶体、热电偶等。转换元件是传感器的核心部分,是利用各种物理、化学、生物效应等原理制成的。新的物理、化学、生物效应的发现,常被用到新型传感器上,使其品种与功能日益增多,应用领域更加广阔。

应该指出的是,并不是所有的传感器都包括敏感元件与转换元件,有一部分传感器不需要起预变换作用的敏感元件,如热敏电阻、光电器件等。

1.2.3 传感器的分类

传感器的输出量 y 与输入量 x 的函数关系 $y = f(x)$ 称为变换函数。它表示传感器的输



入—输出特性,但传感器在实际测量应用中,其输入量除了被测量 x 以外,还有许多干扰量,如温度、湿度、噪声、振动和电磁感应等。所以,虽然传感器的变换函数是一元函数,但这仅是一种理想状态,严格地说,它应该是多元函数 $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 。为此,选用传感器时,传感器要近似满足 $y=f(x)$ 的单值对应关系。这就要求人们必须考虑到具有选择性能的转换元件,配用相应的传感器电路,使各种干扰量对传感器输出量的影响降到最低水平,保证传感器有足够的测量精度和良好的稳定性。

转换元件物理特性的内在规律,即它所依据的物理、化学、生物效应是设计传感器的理论基础。按不同的方法对传感器进行分类,将有助于从总体上认识和掌握传感器的原理、性能与应用。

以下是传感器的几种分类方法。

1. 根据被测量分类

传感器根据被测量分为加速度传感器、速度传感器、位移传感器、压力传感器、负荷传感器、扭矩传感器、温度传感器等。这种分类方法对于用户与生产单位的商业专用产品来说是一目了然的,但是,这种分类方法造成传感器名目繁多,又把原理互不相同的、同一用途的传感器归为一类,这就很难找出各种传感器在转换原理上的共性与差异,难于建立起传感器的基本概念,不利于掌握传感器的原理与性能。

2. 依据传感器的工作原理分类

以传感器的工作原理为依据,可分为电阻应变式、压电式、电容式、涡流式、动圈式、电磁式、差动变压器式等。这种分类方法的优点是可以避免传感器名目繁多,使传感器的划分类别较少,有利于传感器专业工作者对传感器的工作原理与设计进行归纳性分析研究,使设计与应用更具有合理性与灵活性;缺点是会使对传感器不够了解的用户感到不便。

3. 按能量的传递方式分类

从能量观点看,所有的传感器可分为有源传感器与无源传感器两大类。前者可把传感器视为一台微型发电机,能将非电功率转换为电功率,它所配用的测量电路通常是信号放大器。可见,有源传感器是一种能量变换器,如压电式、热电式(热电偶)、电磁式、电动式传感器等。在有源传感器中,有些传感器的能量转换是可逆的,有些是不可逆的,还有些有源传感器附有力学系统,只能用在接触式测量中,如压电式加速度传感器。这类传感器不具有直流响应,只能用于动态测量中。例如温度传感器中的热电偶,它是利用两种不同金属的温差产生的电势进行测量的。无源传感器不进行能量转换,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用,因此,它必须具有辅助能源(电源)。电阻、电容、电感传感器等即是无源传感器。遥感技术中的微波、激光等传感器也可以归为此类。无源传感器本身并不是一个信号源,它所配用的测量放大器和有源传感器不一样,通常是电桥电路或谐振电路,并且无源传感器具有直流响应,一般不配力学系统,适用于静态、动态测量,有时还可以用在非接触的测量场合。

4. 根据输出信号的性质分类

根据输出信号的性质,传感器分为模拟传感器与数字传感器两大类。模拟传感器要先通过A/D变换器将信号数字化,然后才能通过计算机进行信号的分析、加工与处理;数字式传感器则可将信号直接送入计算机进行处理。



1.3 传感器的基本特性

传感器的种类繁多, 测量参数、用途各异, 性能参数也各不相同。一般传感器产品给出的性能参数主要是静态特性和动态特性。所谓静态特性是指被测量不随时间变化或变化缓慢的情况下, 传感器输出值与输入值之间的关系, 一般用数学表达式、特性曲线或表格表示。动态特性反映传感器随时间变化的响应特性。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时间变化的曲线相近。实际中一般传感器产品只给出响应时间。

1.3.1 传感器的静态特性参数

(1) 测量范围和量程。测量范围是在允许误差内被测量值的范围。量程是指在正常工作条件下, 传感器能够测量的被测量的总范围, 为上限值与下限值之差。如某温度传感器的测量范围为 $-50\sim+300^{\circ}\text{C}$, 则该传感器的量程为 350°C 。

(2) 灵敏度。传感器的灵敏度是指传感器在稳态时, 输出量变化量与输入量变化量的比值, 用 S 表示。对于线性传感器, 传感器的校准直线的斜率就是灵敏度, 是一个常量; 而非线性传感器的灵敏度则随输入量的不同而变化。在实际应用中, 非线性传感器的灵敏度是指输入量在一定范围内输出量与输入量之比的近似值。传感器的灵敏度越高, 信号处理就越简单。

(3) 线性度。在稳态条件下, 传感器的实际输入、输出特性曲线与理想直线之间的不吻合程度称为线性度或非线性误差。线性度通常用实际特性曲线与理想直线之间的最大偏差 $\Delta L_{\max}$ 与满量程输出值 $y_{\max}$ 之比的百分数来表示。如图 1.1 所示系统的线性度 γ_L 为

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-1)$$

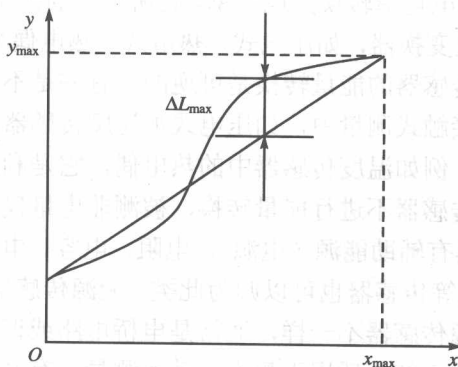


图 1.1 传感器的线性度 (非线性误差)

(4) 不重复性。不重复性是指在相同条件下, 传感器的输入量按同一方向做全量程多次重复测量, 输出曲线的不一致程度。通常用 3 次测量输出曲线之间的最大偏差 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出值 $y_{\max}$ 之比的百分数表示, 如图 1.2 所示, 图中曲线 1、2、3 分别表示 3 次所得到的输出曲线。不重复性是传感器总误差中的一项。

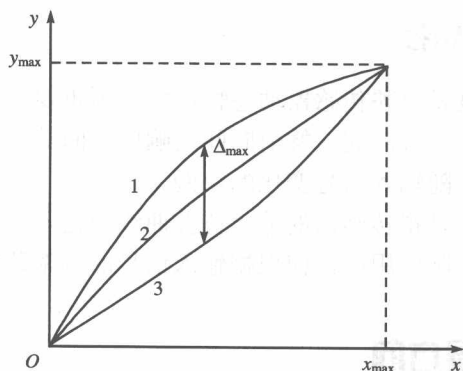


图 1.2 传感器的不重复性

(5) 迟滞。迟滞现象是传感器正向特性曲线（输入量增大）和反向特性曲线（输入量减小）的不一致程度，用 γ_H 表示。传感器的迟滞现象如图 1.3 所示。

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-2)$$

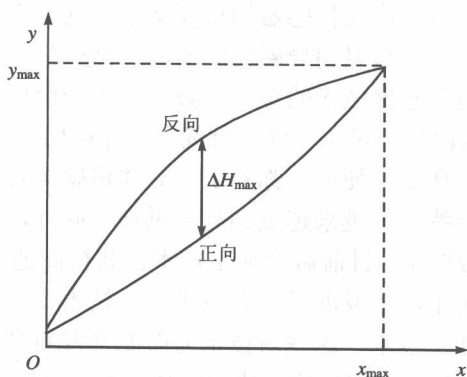


图 1.3 传感器的迟滞现象

(6) 精确度。精确度也称为精度，它是线性度、不重复性及迟滞三项指标的综合指数，反映了系统误差和随机误差的综合指标。如果线性度、不重复性及迟滞已知，可通过误差合成的方法求出精确度。

(7) 零点时间漂移。传感器在恒定温度环境中，当输入信号不变或为零时，输出信号随时间变化的特性，称为传感器零点时间漂移，简称为零漂。零漂一般按 8 小时内输出信号的变化来度量。

(8) 零点温度漂移。当输入信号不变或为零时，传感器的输出信号随温度变化的特性，称为传感器零点温度漂移，简称为温漂。一般常用环境温度变化 10°C 引起的输出变化量与传感器最大输出量的百分比来表示。在实际应用中，一定要考虑环境温度对传感器的影响。由于温漂的影响，传感器的灵敏度也会随温度的变化而变化。

(9) 工作环境条件。在实际应用中，传感器对环境温度和湿度都有一定要求。在规定的温度和湿度条件下，传感器能够正常工作；否则，就会异常。因此，在使用传感器时，一定要考虑环境条件。



1.3.2 传感器的动态特性

(1) 响应速度。响应速度是反映传感器动态特性的一项重要参数,是传感器在阶跃信号作用下的输出特性,主要包括上升时间、峰值时间及响应时间等。它反映了传感器的稳定输出信号(在规定误差范围内)随输入信号变化的快慢。

(2) 频率响应。频率响应是指传感器的输出特性曲线与输入信号的频率之间的关系,包括幅频特性和相频特性。在实际应用中,应根据输入信号的频率范围来确定适合的传感器。

1.4 传感器的发展方向

传感器的发展方向主要有以下几个方面。

1. 采用新技术、新材料的传感器

传感器工作的基本原理是建立在人们不断探索与发现各种新的物理现象、化学效应和生物效应,以及具有特殊物理、化学特性的功能材料的基础上的。因而,发现新现象、反应、材料,研制新特性、功能材料是现代传感器的重要基础,其意义也极为深远。例如,日本夏普公司利用超导技术研制成功了高温超导磁传感器,该传感器在温度为80K时呈超导状态。可以说超导磁传感器的出现是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔传感器高,仅低于超导量子干涉器件,制造工艺远比超导量子干涉器件简单,并可用于磁成像技术等领域。又如,人造陶瓷传感器材料可在高温环境中使用,弥补了半导体传感器材料难于承受高温的不足。另有不少有机材料的特殊功能特性,越来越受到高度重视。此外,人们在工程、生活和医学领域中,越来越要求传感器微型化。目前微型加工技术已获得高速发展,不仅有氧化、光刻、扩散、沉积等传统的微电子技术,还发展了平面电子工艺技术、各相异性腐蚀、固相键合工艺和机械分断技术等新型微加工技术,这些新技术为研制开发新型微型传感器提供了良好的条件。例如,采用平面电子工艺技术制作的快速响应传感器,已用于检测 NH_3 和 H_2S 的快速响应变化。又如,利用各相异性腐蚀技术进行的高精度三维加工,在细小的硅片上构成孔、沟、棱锥、半球等各种形状的微机械元件。再如,固相键合工艺将两个硅片直接键合在一起,不用中间黏合剂,也不加电场,只需要表面活化处理,在室温下将两个热氧化硅片面对面接触,经过一定温变退火,就可以使两个硅片键合在一起。美国诺瓦公司(NOVA Corp)利用这种工艺研制的 $0.40\text{mm}\times 0.90\text{mm}\times 0.15\text{mm}$ 微型压力传感器,能够承受高达 400°C 的温度。

2. 集成传感器

集成传感器是新型传感器的重要发展方向之一。微加工技术可将敏感元件、测量电路、放大器及温度补偿元件等集成在一个芯片上,这样不仅具有体积小、重量轻、可靠性高、响应速度快、稳定等特点,而且便于批量生产,成本较低。

在各种半导体材料中,以硅为基底材料的集成传感器发展最快。硅集成传感器是硅物理效应与平面技术相结合的产品,例如,集成温度传感器、霍尔集成电路及扩散硅压力传感器等。

采用集成传感器可简化电路设计,减小产品体积,便于安装调试,提高可靠性并降低成本,因此,很多传感器都向集成方向发展。集成传感器已广泛应用于汽车、家用电器、医疗卫生及航空航天技术中。



3. 智能传感器

智能传感器有以下显著特点。

(1) 自补偿功能。对信号检测过程中的非线性误差、温度变化、信号零点漂移和灵敏度漂移、响应时间延迟、噪声与交叉感应等效应的补偿功能。

(2) 自诊断功能。包括接通电源时系统自检，系统工作时实现运行自检，系统发生故障时自诊断，确定故障的位置与部件等。

(3) 自校正功能。包括系统中标准参数的设置与检查，量程在测试中的自动转换、被测参数的单位自动运算等。

(4) 数据自动存储、分析、处理与传输。

(5) 微处理器、微机和基本传感器之间具有双向通信功能，构成一个闭环工作系统。

由于智能传感器具有上述一系列显著特点，从而使智能传感器大大提高了精度。不需要采用精加工、新材料与补偿电路等，使其成本较低。此外，智能传感器可靠性高、实时性强，功能多而强，性能价格比高等特点是传感器发展的主要方向。



本章小结

非电量电测技术已经成为各个领域，特别是自动测量和自动控制系统中必不可少的组成部分，使非电量电测技术得以实现的传感器技术无疑是这些系统的关键。传感器是根据物理、化学、生物的某些效应或原理研制出来的。某一原理设计的传感器可以测量多种参量，某一参量也可以用不同的传感器测量。因此，传感器可以按不同的方法分类，可以按被测量分，也可按工作原理分，这些分类方法各有所长。在实际应用中，传感器的命名通常用工作原理与被测量合成命名，如扩散硅压力传感器。传感器的特性有静态特性和动态特性之分，静态特性主要有线性度、灵敏度、不重复性、温漂及零漂等；动态特性主要考虑它的幅频特性和相频特性，通常只给出响应时间。



习题 1

1. 什么是传感器？它由哪几部分组成？它在自动控制系统中起什么作用？
2. 传感器有哪几种分类方法？实际应用中，传感器如何命名？
3. 传感器的静态特性参数有哪些？
4. 传感器的动态特性参数有哪些？
5. 某传感器的输入、输出特性为 $f(x) = 2x^3 + 3x + 5$ ，试求出该传感器的灵敏度。
6. 集成传感器有何优点？
7. 什么是智能传感器？

第2章 应变式电阻传感器

应变式电阻传感器是根据电阻的应变效应工作的，主要用来测量力、气体（液体）压力。在力的测量过程中，要借助于力敏元件（也称为弹性元件），将力变换成易于测量的位移或应变（变形），然后利用转换元件将力变换成电参量。图 2.1 为力传感器的测量示意图。

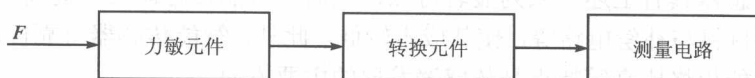


图 2.1 力传感器的测量示意图

2.1 弹性敏感元件

所谓弹性敏感元件，是一种在力的作用下产生变形，当力消失后能够恢复原来状态的元件。弹性敏感元件是一种非常重要的传感器部件，应具有良好的弹性、足够的精度，以及良好的稳定性和抗腐蚀性。常用的材料有弹性钢、合金等。

2.1.1 弹性敏感元件的特性参数

(1) 刚度。刚度是弹性敏感元件在外力作用下变形大小的量度，一般用 K 表示，即

$$K = \frac{dF}{dx} \quad (2-1)$$

式中， F 为作用在弹性敏感元件上的外力； x 为弹性敏感元件的变形量。

(2) 柔度。柔度是指弹性敏感元件在单位力的作用下产生变形的大小，它为刚度的倒数，用 W 表示，即

$$W = \frac{dx}{dF} \quad (2-2)$$

(3) 弹性滞后。弹性元件的加载特性曲线与卸载特性曲线的不重合程度，称为弹性滞后。它是应变传感器测量误差之一，这主要是由于弹性元件分子间存在内摩擦造成的。

(4) 弹性后效。当荷载从某一数值变化到另一数值时，弹性元件的变形不是立即完成的，而是经一定的时间间隔后逐渐完成变形的，这种现象称为弹性后效。由于弹性后效的存在，弹性敏感元件的变形始终不能迅速地跟上力的变化，在动态测量时将引起测量误差。造成这一现象的原因是弹性敏感元件的分子间存在内摩擦。

(5) 固有频率弹性敏感元件都有自己的固有振荡频率, 它将影响传感器的动态特性。传感器的工作频率应避开弹性敏感元件的固有振荡频率, 一般希望固有振荡频率越高越好。

实际选用或设计弹性敏感元件时, 若遇到上述特性矛盾的情况, 应根据测量的对象和要求综合考虑。

2.1.2 弹性敏感元件的分类

弹性敏感元件在形式上可分为两大类: 将力转换为应变或位移的弹性敏感元件, 将压力转换为应变或位移的弹性敏感元件。

1. 变换力的弹性敏感元件

变换力的弹性敏感元件大都采用等截面柱式、等截面薄板、悬臂梁及轴状等结构。如图 2.2 所示为几种常见的变换力的弹性敏感元件结构。

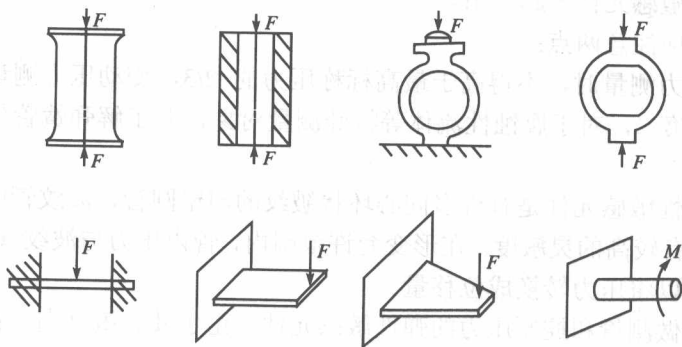


图 2.2 常见的变换力的弹性敏感元件

(1) 等截面圆柱式弹性敏感元件, 根据截面形状可分为实心圆截面形状及空心圆截面形状等。它们结构简单, 可承受较大的载荷, 便于加工。实心圆柱形可测量大于 10kN 的力, 而空心圆柱形的只能测量小于 10kN 的力。

(2) 圆环式弹性敏感元件比圆柱式弹性敏感元件输出的位移量大, 因而具有较高的灵敏度, 适用于测量较小的力。但它的制作工艺较差, 加工时不易得到较高的精度。由于圆环式弹性敏感元件各变形部位应力不均匀, 采用应变片测力时, 应将应变片贴在其应变最大的位置上。

(3) 等截面薄板式弹性敏感元件厚度比较小, 故又称为膜片。当膜片边缘固定, 膜片的一面受力时, 膜片产生弯曲变形, 因而产生径向和切向应变。在应变处贴上应变片, 就可以测出应变量, 从而可测得作用力的大小, 也可利用它变形产生的挠度组成电容式或电感式力或压力传感器。

(4) 悬臂梁式弹性敏感元件一端固定、一端自由, 结构简单, 加工方便, 应变和位移较大, 适用于测量 1kN 到 5kN 的力。悬臂梁分为截面悬臂梁和变截面等强度悬臂梁。等截面悬臂梁在受力时, 上表面受拉伸, 下面受压缩, 由于表面各部位的应变不同, 所以应变片要贴在合适的部位, 否则将影响测量的精度。由于变截面等强度悬臂梁厚度相同, 但横截面不相等, 因而沿梁长度方向任一点的应变能力都相等, 这给贴放应变片带来了方便, 也提高了测量精度。