

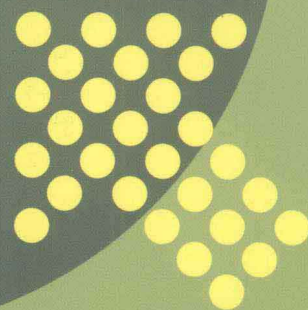
21世纪高等学校规划教材



CHUANGAN JIANCE JISHU

传感检测技术

王晓敏 主 编
黄 俊 刘建新 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

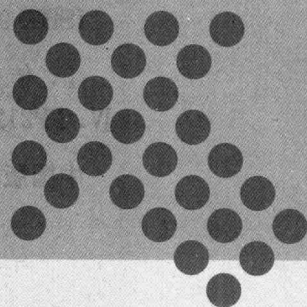
21世纪高等学校规划教材



CHUANGAN JIANCE JISHU

传感检测技术

主 编	王晓敏	
副主编	黄 俊	刘建新
编 写	陈经文	何朝阳 叶林勇
	李章云	丁志伟
主 审	付家才	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书介绍了传感器的组成与分类、材料及特性、传感器标定与校准、传感检测技术的作用和发展,重点讲解了位移、力、视觉、触觉、温度、气敏及湿度、光电、智能、生物、微波、超声波传感器和机器人等各种传感器的工作原理与应用方法,对传感器检测的输出信号处理、传感器与微机的接口、传感器网络进行了详细叙述。书中列举了传感器在工农业生产、科学研究、医疗卫生、家用电器等许多方面的应用实例,特别是介绍了传感器在机电一体化系统中的具体应用。全书共 10 章,每章前附有重点难点提示,章后附思考与练习。

本书选材广泛,图文并茂,层次分明,条理清晰,结构合理,重点突出,深入浅出,通俗易懂,通过大量的传感器实例分析来帮助读者理解传感器的工作原理。

本书可作为高职高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校相关专业的教学用书,也可作为培训教材或相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

传感检测技术/王晓敏主编. —北京:中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978—7—5083—8073—5

I. 传… II. 王… III. 传感器—检测—高等学校—教材
IV. TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 169204 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 366 千字

定价 24.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

我国的高等职业技术教育目前进入了新的发展时期,各高职高专院校把培养适应生产、管理、服务第一线需要的高级职业技术应用型人才作为办校的根本目标,因此,编写适用于职业技术教育特点,突出科学性、实用性、综合性的高职教材已成为一项极具重要意义的工作。本书是 21 世纪高等学校规划教材,为适应高职高专机电类专业教学改革实际需要而编写。

当前,计算机应用技术、通信技术和传感技术可以说是电子信息技术的三大主要组成部分,电子计算机、机器人、自动控制技术、机电一体化技术以及单片机嵌入系统的迅速发展,迫切需要形形色色的传感器。而且传感器的应用也极其广泛,从家用电器到工业设备到处都要用到传感器,现在计算机为信息转换与处理提供了十分完善的手段,但如果没有各种精确可靠的传感器去检测原始数据并提供真实的信息,各个系统的计算机也无法发挥其应有的作用。显而易见,传感器在现代科学技术领域中占有极其重要的地位,我国和世界各国都视传感技术为现代电子信息技术的关键技术之一,了解、掌握和应用传感器成了许多专业工程技术人员的必需。传感检测技术已成为机电一体化、应用电子、自动控制、自动信号技术、测量技术、机器人技术、计算机应用、机械制造及数控加工模具技术等专业的必修课。

本书力求内容新颖、叙述简练、灵活应用,全书参考学时 72 学时,调整部分章节内容也可适用于 42~64 学时。本书的特点是实用性较强,从实践和应用角度出发,主要介绍常用传感器的原理、特性和使用原则,并提供较多的传感器基本应用电路及接口电路。书中除介绍温度、力、光、磁、位移、湿度及气体、生物、微波、超声波传感器和机器人等各种传感器的原理、结构、性能与应用外,还介绍了传感器输出信号的处理以及与微机的连接。读者可从本书中直接选用适用的传感器应用电路,还可对本书提供的电路稍加修改应用到自己设计的系统中。

本书在编写过程中,力求做到以培养能力为主线。在保证讲解基本概念、基本原理和基本分析方法的基础上,力求避免繁琐的数学推导。在教材的编排方面,力求做到由浅入深、由易到难,循序渐进。在教材内容的阐述方面,努力贯彻理论与实践相结合,以应用为目的,以必需够用为度的原则,力求简明扼要、通俗易懂。

本书第 1、2 章由三峡电力职业学院王晓敏副教授编写,第 3、4 章由葛洲坝集团三峡实业有限公司黄俊工程师编写,第 5 章由湖北第二师范学院刘建新副教授编写,第 6 章由三峡电力职业学院何朝阳讲师编写,第 7 章由三峡电力职业学院叶林勇高级讲师编写,第 8 章由三峡电力职业学院丁志伟工程师编写,第 9 章由三峡电力职业学院陈经文讲师编写,第 10 章由三峡电力职业学院李章云高级讲师编写。全书由王晓敏副教授担任主编,黄俊、刘建新担任副主编。哈尔滨电信学院的付家才教授担任主审。在本书编写过程中,付家才教授提出

了许多宝贵的意见和建议。本书还参考了一些感测技术、传感器应用和机电一体化控制等文献材料，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不妥及疏漏之处在所难免，恳切希望专家学者和读者不吝指教。

编 者

2008 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 传感器的组成与分类	1
1.2 传感器的性能指标	8
1.3 传感器的标定	13
1.4 传感检测技术的作用和发展	15
思考与练习	20
第 2 章 位移、速度、流量传感器	21
2.1 参量型位移传感器	21
2.2 光栅磁栅位移传感器	31
2.3 速度、加速度传感器	34
2.4 物位流量流速传感器	42
2.5 位移传感器的应用	46
思考与练习	47
第 3 章 力传感器	48
3.1 测力传感器	48
3.2 扭矩传感器	57
3.3 压力传感器	60
3.4 力传感器应用实例	67
思考与练习	69
第 4 章 温度传感器	71
4.1 热电式温度传感器	72
4.2 电阻式温度传感器	78
4.3 非接触式温度传感器	82
4.4 半导体集成温度传感器	85
4.5 温度传感器应用实例	88
思考与练习	93
第 5 章 气敏、湿度传感器	94
5.1 气敏传感器	94
5.2 湿度传感器	102
5.3 水分传感器	109
5.4 气敏和湿度传感器应用实例	113

思考与练习·····	117
第 6 章 光电传感器 ·····	118
6.1 光电效应及光电器件·····	119
6.2 红外传感器·····	126
6.3 激光传感器·····	130
6.4 光纤传感器·····	134
6.5 光电传感器应用实例·····	138
思考与练习·····	141
第 7 章 视觉传感器 ·····	142
7.1 光导视觉传感器·····	143
7.2 CCD 视觉传感器·····	144
7.3 CMOS 视觉传感器·····	151
7.4 人工视觉·····	155
7.5 视觉传感器应用实例·····	160
思考与练习·····	166
第 8 章 新型传感器 ·····	167
8.1 机器人传感器·····	167
8.2 生物传感器·····	183
8.3 微波传感器·····	188
8.4 超声波传感器·····	190
8.5 新型传感器应用实例·····	192
思考与练习·····	194
第 9 章 传感检测系统 ·····	195
9.1 传感检测系统的组成·····	195
9.2 传感器检测信号处理·····	196
9.3 传感器的微机接口·····	198
9.4 传感器网络·····	203
9.5 传感器接口电路应用实例·····	206
思考与练习·····	215
第 10 章 传感器在机电一体化系统中的应用 ·····	216
10.1 传感器在工业机器人中的应用·····	216
10.2 传感器在 CNC 机床与加工中心中的应用·····	219
10.3 传感器在汽车机电一体化中的应用·····	221
10.4 传感器在家用电器中的应用·····	230
思考与练习·····	232
参考文献 ·····	233

第1章 概述

【本章重点难点提示】

本章的重点在于了解传感器的组成与分类,掌握传感器的定义及人与机器的机能对应关系。熟悉传感器的命名代号,合理选择和使用传感器。掌握传感器的性能指标,分析传感器的静态特性和动态特性。了解传感器标定的基本方法,了解传感器的应用现状和发展趋势。

本章的难点在于传感器的静态特性和动态特性分析,以及对传感器性能指标的定义和理解。

在人类已进入信息时代的今天,人们的一切社会活动都是以信息获取与信息转换为中心,传感检测技术作为信息获取与信息转换的重要手段,是信息科学最前端的一个阵地,是实现信息化的基础技术之一。传感器作为整个检测系统的前哨,它提取信息的准确与否直接决定着整个检测系统的精度。

当代社会被称为信息社会,传感检测技术作为信息科学的一个重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术等一起构成了信息技术的完整学科。包含有传感检测与自动控制的信息技术成为当代工业技术中的一个重要组成部分,近代科学技术的发展对传感检测与控制技术提出了更高的要求。在机械制造、电力、石油、化工、轻工、国防等领域中非电量电测技术的应用也愈加广泛,例如,要使工业中自动化生产设备与系统运行在最佳状态,实现生产低能耗、高效率、产品高质量都离不开包括传感检测和自动控制在内的信息技术。

传感检测技术的特点与学习方法:

(1) 传感检测技术属交叉学科,涉及知识面广,原理与过去学过的数学、物理(物理现象、定律、效应)、电路理论(测量电路)都有联系。学习本课程需要复习巩固已学电路、电子技术等方面的知识,多看一些相关参考书及相关的技术期刊杂志。

(2) 传感检测技术学习并不难,没有高深的新理论,但要求综合运用各方面的理论知识。

(3) 传感检测技术实践性强,针对工程实际问题,解决检测手段与方法,要注意通过检测技术实验巩固加深理论知识,训练实验研究能力与动手能力。许多传感器的静态特性与动态特性实际上都是通过实测来校准获取的。所以平时要多留心观察几乎到处可见的传感器,了解其作用、原理、结构。

1.1 传感器的组成与分类

1.1.1 传感检测技术的重要性

在当代社会被称为信息社会时,信息技术成为当代工业技术中的一个重要组成部分。信息技术包含以下几部分:

(1) 信息采集——要依赖各类传感器（电五官）代替人的触觉、嗅觉、味觉、视觉、听觉；

(2) 信息传输——神经网络、通信技术等；

(3) 信息控制——利用各类计算机、微处理器等。

可见，传感器及检测技术是信息技术的关键与首要环节。

没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那么，对信号的传输、转换、处理、记录、显示都失去了意义。传感器的质量优劣、检测技术的先进与否，直接决定了测试和自控过程的成败。然而信息技术的这两个关键问题，长期以来并未随之协调发展，因而形成了“头脑发达、四肢简单”的状态。

信息技术这种状态的内在原因是：计算机输入、输出都是电信号，从其发明到现在短短几十年，经历了电子管→晶体管（分立元件）→集成电路的发展阶段，尤其近一二十年对大规模、超大规模集成电路的发明引起了计算机技术突飞猛进的突破性发展，如体积逐渐变小、速度逐渐变高、功能越来越多、应用越来越广。

传感器的问题就不那么简单，它与计算机的最大区别在于：

(1) 传感器直接与五花八门的被测对象打交道，工作环境差，包括压力、湿度、粉尘、辐射、振动等；

(2) 传感器输入、输出的往往是不同种类的信息，造成了传感器的工作机理、材料和结构上的千差万别。虽然传感器的历史很长，但与计算机技术相比，明显处于落后的地位，成为许多检测与控制系统的难点或者说是薄弱环节，在信息技术的发展中已经拖了后腿。

随着科学技术发展的需要，人们越来越认识到传感器的重要地位，国内外各高新技术产业都十分重视研制开发与生产各种用途的传感器。日本于20世纪80年代就将传感器列为近来应大力发展的五项（后为十项）重要技术之首，美国、欧洲及俄罗斯等国都以巨额投资进行传感器的技术开发。美国近年来进行火星研究的“勇气号”、“机遇号”、“凤凰号”等探测器，就使用了大量的传感器。传感检测技术在我国也被列为重点科技发展项目，先后成立了许多科研机构与学术团体，在许多学校设立了有关专业，近年来连续召开了许多全国及国际性的学术会议、展览会。

随着社会文明的进步，传感器的使用将无处不在，传感检测技术已逐步发展成为一个独立的学科，在未来的国民经济发展中将越来越发挥其重要作用。

1.1.2 传感器的定义

传感器就是一种传递感觉的器件或装置，如冰箱中的温度传感器、监视煤气溢出浓度（一氧化碳）的气敏传感器、防止火灾的烟雾传感器、测试物体质量的电子秤等。

传感器能感受规定的被测量（输入信号），并按照一定规律转换成可用输出信号（以电量为主），以满足信息的传输、处理、存储、记录、显示和控制等要求。国际电工委员会（International Electrotechnical Committee, IEC）对传感器的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号。”我国的国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》对传感器的定义为：“传感器是能够感受规定的被测量并按一定规律和精度转换成可用输出信号的器件或装置。”

以上定义说明，传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。广义地说，传感器是一种能把物理量或化学量等转变成

便于利用的电信号的器件。它是传感检测系统的一个组成部分，是被测量信号输入的第一道关口。

传感器由于应用场合（领域）的不同，称呼也有所不同。如在过程控制中传感器被称为变送器，在射线检测中传感器被称为发送器、接收器、探头，在有些场合它又被称为换能器、检测器、一次仪表、探测器等。

传感器的输入信号包括以下几种：

- (1) 物理量：力、温度、湿度、压力、流量、位移、速度、加速度、物位、振动等；
- (2) 化学量：各种气体、pH 值等；
- (3) 状态量：颜色、表面粗糙度、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、表面质量等；
- (4) 生物量：血压、颅压、体温等；
- (5) 社会量：人口流动情况等。

传感器的输出信号有很多形式，如电压、电流、频率、脉冲等。输出信号的形式由传感器的原理确定，但基本是电量。输出信号基本是电量的原因在于电量最便于传输、转换、处理及显示。输出信号与输入信号之间有对应关系，且应有一定的精确程度。

1.1.3 传感器的组成

传感器的组成框图见图 1-1。传感器的一般组成包括：

- (1) 敏感元件：直接感受被测量，输出信号量。
- (2) 转换元件：一般不感受被测量，将敏感元件的输出变为电量输出，有时也直接感受被测量，如热电偶传感器。

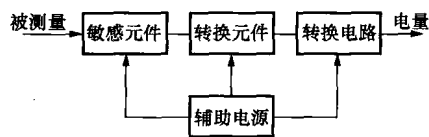


图 1-1 传感器的组成框图

(3) 转换电路：将传感元件输出的电量转变为便于显示、记录、处理、控制的有用电信号，也叫信号调节与转换电路，如电桥、放大器、振荡器、电荷放大器等（因传感器种类而异）。由于空间的限制或者其他原因，转换电路常装入后续设备中。然而，因为不少传感器要在通过转换电路后才能输出电信号，从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。

(4) 辅助电源：为传感器各元件和电路提供工作能源。有的传感器需要外加电源才能工作，如应变片组成的电桥、差动变压器等；有的传感器则不需要外加电源便能工作，例如压电晶体等。

进入传感器的被测量信号幅度是很小的，而且混杂有干扰信号和噪声。为了方便随后的处理过程，首先要将信号整形成具有最佳特性的波形，有时还需要将信号线性化，该工作是由放大器、滤波器以及其他一些模拟电路完成的。在某些情况下，这些电路的一部分是和传感器部件直接相邻的。成形后的信号随后转换成数字信号，并输入到微处理器。

应该说明的是，并不是所有传感器的敏感元件与转换元件都有明确分界，也有二者合为一体的。例如半导体气体、湿度传感器等，它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号，而没有中间转换环节。实际上，有些传感器很简单，有些则较复杂，大多数传感器是开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有转换电路，如压电式加速度传感器，其中质量块 m 是敏感元件，压电片（块）是转换元件。有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。

传感检测系统的性能主要取决于传感器。传感器分为两类：有源的和无源的。有源传感器能将一种能量形式直接转变成另一种形式，不需要外接的能源或激励源。无源传感器不能直接转换能量形式，但能控制从另一输入端输入的能量或激励能。

传感器承担将某个对象或过程的特定特性转换成数量的工作。其“对象”可以是固体、液体或气体，而它们的状态可以是静态的，也可以是动态（即过程）的。对象特性被转换量化后可以通过多种方式检测。对象的特性可以是物理性质的，也可以是化学性质的。按照其工作原理，传感器将对象特性或状态参数转换成可测定的电学量，然后将此电信号分离出来，送入传感器系统加以评测或标示。

各种物理效应和工作机理被用于制作不同功能的传感器。传感器可以直接接触被测量对象，也可以不接触。用于传感器的工作机制和效应类型不断增加，其包含的处理过程日益完善。

1.1.4 人与机器的机能对应关系

人们常将传感器的功能与人类5大感觉器官相比拟，例如：

光敏传感器——自然人的视觉；

声敏传感器——自然人的听觉；

气敏传感器——自然人的嗅觉；

化学传感器——自然人的味觉；

压敏、温敏、流体传感器——自然人的触觉。

自然人通过感官感觉外界对象的刺激，通过大脑对感受的信息进行判断、处理，肢体作出相应的反应。在机器系统中，传感器相当于人的感官，常被称为“电五官”，外界信息由它提取，并转换为系统易于处理的电信号，微机对电信号进行处理，发出控制信号

给执行器，执行器对外界对象进行控制。人与机器的机能对应关系可见图1-2。

与当代的传感器相比，人类的感知能力好得多，但也有一些传感器比人的感觉功能优越，例如人类没有能力感知紫外线或红外线辐射，感觉不到电磁场、无色无味的气体等。

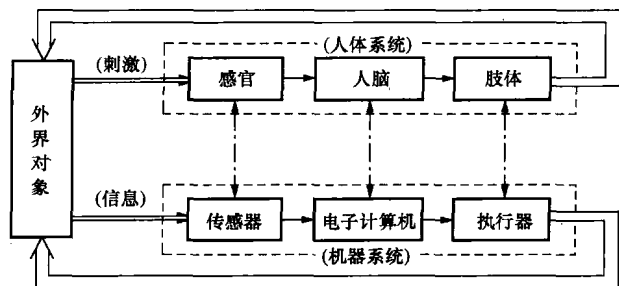


图 1-2 人与机器的机能对应关系图

1.1.5 传感器的分类

传感器的种类繁多，可以根据它们的转换原理（传感器工作的基本物理或化学效应），或者根据它们的用途、它们的输出信号类型以及制作它们的材料和工艺等进行分类。

1. 按传感器的输入输出量分类

(1) 按输入量分类。常用的有机械、光、电、化学等传感器。例如，位移、速度、加速度、力、温度和流量传感器等。

(2) 按输出量分类。常用的有参数式，如电阻、电感、电容、频率和离子传感器；发电式，如压电式、霍尔式、光电和热电式传感器等。

2. 按传感器的工作原理分类

根据传感器工作原理，可将其分为物理传感器和化学传感器两大类。

(1) 物理传感器应用的是物理效应, 诸如压电效应, 磁致伸缩现象, 离化、极化、热电、光电、磁电等效应, 被测信号量的微小变化都将转换成电信号。物理传感器按物理效应可分为以下两类:

1) 结构型(构造型): 依赖结构参数变化, 实现信息转换, 如应变式、电压式、电容式、磁电式传感器。

结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的, 包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。物理学中的定律一般是以方程式给出的。对于传感器, 这些方程式就是许多传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的工作原理以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础, 而不以材料特性变化为基础。其特点是原理明确、不受环境影响、易研制、构造复杂、价格高、可靠性高。

2) 物性型(材料型): 依赖敏感元件物理特性变化, 实现信息转换, 如光电、霍尔、压电式传感器。利用功能材料的压电、压阻、热敏、湿敏、光敏、磁敏、气敏等效应可把压力、温度、湿度、光量、磁场、气体成分等物理量转换成电量。

物性型传感器是利用物质定律构成的, 如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则, 大多数是以物质本身的常数形式给出。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材料的不同而异。如光电管, 它利用了物质法则中的外光电效应, 显然, 其特性与涂覆在电极上的材料有着密切的关系。又如, 所有半导体传感器, 以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷、合金等的性能变化的传感器, 都属于物性型传感器。其特点是简单、小型、价廉, 但工艺要求高, 稳定性差, 在一些要求高可靠、高稳定的场合及恶劣环境下不能普遍应用, 目前正在这方面加速研制、发现、改进, 有广泛的发展前途。

(2) 化学传感器包括那些以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系的传感器, 被测信号量的微小变化也将转换成电信号。化学传感器技术问题较多, 例如可靠性问题、规模生产的可能性、价格问题等, 解决了这类难题, 化学传感器的应用将会有巨大增长。

如果按被测物理量来分类, 可分为温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器、加速度传感器及转矩传感器等。其优点是较明确地表达了传感器的用途, 便于使用者根据其用途选用; 但缺点是没有区分每种传感器在转换机理上的共性和差异, 不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

如果按传感器工作原理来分类, 将物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类的依据, 又可分为电学式传感器、磁学式传感器、光电式传感器、电势型传感器、电荷型传感器、半导体型传感器、谐振式传感器、电化学式传感器等。其优点是对传感器的工作原理表达比较清楚, 而且类别少, 有利于对传感器进行深入研究、分析; 但缺点是不便于使用者根据用途选用。

有些传感器既不能划分到物理类, 也不能划分为化学类。但是大多数传感器是以物理原理为基础运作的。有些传感器的工作原理具有两种以上原理的复合形式, 如不少半导体式传感器, 也可看成电参量式传感器。

3. 按传感器的能量关系分类

按传感器的能量关系情况分类, 可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

(1) 能量控制型传感器。在信息变化过程中, 传感器将从被测对象获取的信息能量用

于调制或控制外部激励源,使外部激励源的部分能量载运信息而形成输出信号,这类传感器必须由外部提供激励源,如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。

(2) 能量转换型传感器,又称有源型或发生型。传感器将从被测对象获取的信息能量直接转换成输出信号能量,主要由能量变换元件构成,不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属于此类传感器。

4. 按传感器输出信号的性质分类

按传感器输出信号的性质不同,可分为模拟传感器、数字传感器和开关传感器。模拟传感器将被测量的非电学量转换成模拟电信号。数字传感器将被测量的非电学量转换成数字输出信号(包括直接和间接转换)。开关传感器在一个被测量的信号达到某个特定的阈值时,相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

5. 按传感器的用途分类

按传感器的用途不同,可分为压敏和力敏传感器、位置传感器、液面传感器、能耗传感器、速度传感器、热敏传感器、加速度传感器、射线辐射传感器、振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器、生物传感器等。

6. 按传感器的材料分类

在外界因素的作用下,所有材料都会作出相应的、具有特征性的反应。它们中的那些对外界作用最敏感的材料,即那些具有功能特性的材料,被用来制作成传感器的敏感元件。传感器是利用材料的固有特性或开发的二次功能特性,再经过精细加工而成的。从所应用的材料观点出发可将传感器分成下列几类:

(1) 按照其所用材料的类别有金属、聚合物、陶瓷、混合物传感器等。

(2) 按材料的物理性质有导体、绝缘体、半导体、磁性材料传感器等。

(3) 按材料的晶体结构有单晶、多晶、非晶材料传感器等。

7. 按传感器的制造工艺分类

按传感器的制造工艺可分为集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器、陶瓷传感器等。

集成传感器是用标准的生产硅基半导体集成电路的工艺技术制造的。通常还将用于初步处理被测信号的部分电路也集成在同一芯片上。

薄膜传感器则是通过沉积在介质衬底(基板)上的、相应敏感材料的薄膜制成的。使用混合工艺时,同样可将部分电路制造在此基板上。

厚膜传感器是利用相应材料的浆料,涂覆在基片上制成的,基片通常是由陶瓷制成,然后进行热处理,使厚膜成形。

陶瓷传感器采用标准的陶瓷工艺或其某种变种工艺(溶胶-凝胶等)生产的。完成适当的预备性操作之后,已成形的元件在高温中进行烧结。

厚膜和陶瓷传感器这两种工艺之间有许多共同特性,在某些方面,可以认为厚膜工艺是陶瓷工艺的一种变型。每种工艺技术都有自己的优点和不足。由于研究、开发和生产所需的资本投入较低,以及传感器参数的高稳定性等原因,采用陶瓷和厚膜传感器比较合理。

传感器的部分分类情况见表 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、热电式传感器等	传感器以工作原理命名
按物理效应分类	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	传感器直接将被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	模拟传感器 数字传感器 开关传感器	输出为模拟量 输出为数字量 输出为电平的高低

1.1.6 传感器的命名代号

传感器的命名代号由四部分构成：

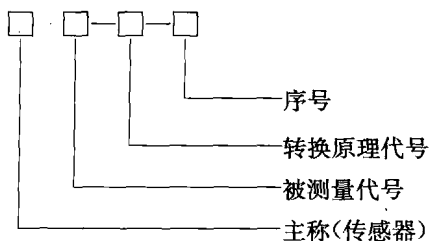
第一部分：主称（传感器），用传感器汉语拼音的第一个大写字母“C”标记。

第二部分：被测量代号——被测量的物理、化学、生物学原理规定的符号，用一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记。当这组代号与该部分的另一个代号重复时，则取汉语拼音的第二个大写字母作代号，依此类推。当被测量为离子、粒子或气体时，可用其元素符号、粒子符号或分子式加括号表示。

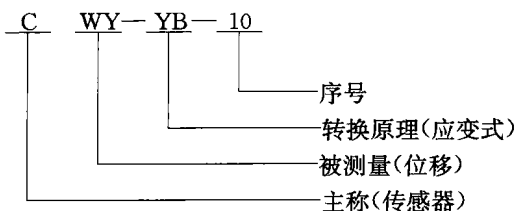
第三部分：转换原理代号——被测量转换机理的规定符号，用其一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记。当这组代号与该部分的另一个代号重复时，则用其汉语拼音的第二个大写字母代替，以此类推。

第四部分：序号，用阿拉伯数字代替。序号可表征产品设计特性、性能参数、产品系列等。

四部分代号表述格式应为：



传感器命名代号的标记示例（应变式位移传感器）如下：



1.2 传感器的性能指标

传感器的一般特性主要是指传感器输出与输入之间的关系，一般用曲线、图表、数学表达式等方式表达。传感器的一般特性是指与其内部结构、参数有密切关系的外部特性。

传感器的一般特性又因输入量（又称被测量）的状态不同而分为静态特性和动态特性。当输入量为常量或变化极慢时，称为静态特性。当输入量随时间较快地变化时，称为动态特性。

传感器的输出与输入关系可用微分方程来描述。理论上，将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时，即得到静态特性。因此，传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。

传感器的输出与输入应具有确定的对应关系，两者间最好呈线性关系。但一般情况下，输出、输入不会符合所要求的线性关系，同时由于存在迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素以及外界条件的影响，使输出、输入对应关系的唯一确定性也不能实现。对传感器的纯理论分析往往很复杂，因为实际应用的传感器，影响其特性的因素很多，有些是不确定的、随机变化的，难以反映客观规律，所以传感器的特性多用实验方法获得。经过一定的理论计算、处理，一般用校准数据来建立数学模型，在一定条件下实测得到的校准特性作为传感器的实际特性。

1.2.1 传感器的静态特性

1. 静态特性的定义

传感器在稳态（静态、缓变）信号作用下，其输入与输出的关系称为传感器的静态特性。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性等，它们也是衡量传感器优劣的指标。

2. 静态特性的数学模型

传感器如没有迟滞或蠕变效应时，静态特性的数学模型为多次多项式，即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中：\$y\$ 为输出量；\$a_0\$ 为零位输出；\$a_1, \cdots, a_n\$ 为线性灵敏度；\$x\$ 为输入量。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式。

3. 静态特性的有关指标

(1) 线性度。传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。线性度又称非线性误差，指实际特性曲线与拟合曲线之间的最大偏差（绝对值）与传感器满量程输出值之比。图 1-3 所示线性度可表示为

$$E = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中：\$\Delta L_{\max}\$ 为实际曲线与拟合直线之间的最大偏差；\$y_{fs}\$ 为输出满量程值。

线性传感器是指取线性特征为理论特征的传感器。线性度的大小是以拟合直线或理想直线作为基础直线算出来的,因此,基准直线不同,所得出的线性精度就不一样。当传感器的非线性项方次不高,输入量变化范围不大时,可用切线或割线等直线(此直线为拟合直线、理论直线、参考直线)来近似代表实际曲线的一段求线性度,此方法称为传感器非线性特征的“线性化”。一般并不要求拟合直线必须经过所有的检测点,而是要找到一条能反映校准数据的一般趋势,同时又使误差绝对值最小就可以了。

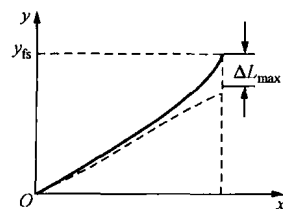


图 1-3 传感器的线性度

静态特性曲线可通过实际测试获得。首先在标准工作状态下,用标准仪器设备对传感器进行标定(测试),得到其输入、输出实测曲线,即校准曲线,然后作一条理想直线,即拟合直线。在获得静态特性曲线之后,可以说问题已经得到解决。但是为了标定和数据处理方便,希望得到线性关系,这时可采用各种方法,其中也包括硬件或软件补偿,进行线性化处理。

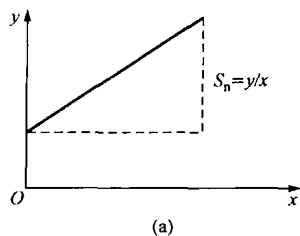
(2) 灵敏度。灵敏度是传感器在稳态下输出增量与输入增量的比值。

对于线性传感器,其灵敏度就是它的静态特性的斜率,其特性曲线的斜率处处相同,灵敏度是一常数,与输入量大小无关,如图 1-4 (a) 所示。其灵敏度表达式为

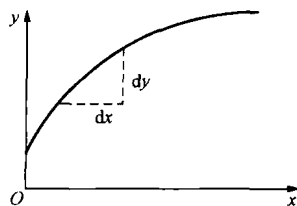
$$S_n = \frac{y}{x} \quad (1-3)$$

非线性传感器的灵敏度是一个随工作点而变的变量,如图 1-4 (b) 所示。其灵敏度表达式为

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} = \frac{df(x)}{dx} \quad (1-4)$$



(a)



(b)

图 1-4 传感器的灵敏度

(a) 线性传感器; (b) 非线性传感器

传感器静态数学模型有以下三种特殊形式来描述线性度和灵敏度:

1) 理想的线性特性。其线性度最好,通常是所希望的传感器应具有的特性,只有具备这样的特性才能正确无误地反映被测量的真值。其数学模型为

$$y = a_1 x \quad (1-5)$$

具有该特性的传感器的灵敏度为直线 $y = a_1 x$ 的斜率,其中 a_1 为常数。

2) 仅有偶次非线性项。其线性范围较窄,线性度较差,灵敏度为相应曲线的斜率,一般传感器设计很少采用这种特性。其数学模型为

$$y = a_0 + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots + a_{2n} x^{2n}, n = 1, 2, \cdots \quad (1-6)$$

3) 仅有奇次非线性项。其线性范围较宽,且相对坐标原点对称的,线性度较好,灵敏度为该曲线的斜率。其数学模型为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots + a_{2n+1} x^{2n+1}, n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-7)$$

这种特性传感器使用时应采取线性补偿措施。

根据式 (1-1)、式 (1-5)~式 (1-7) 的静态数学模型画出的关系曲线如图 1-5 所示。

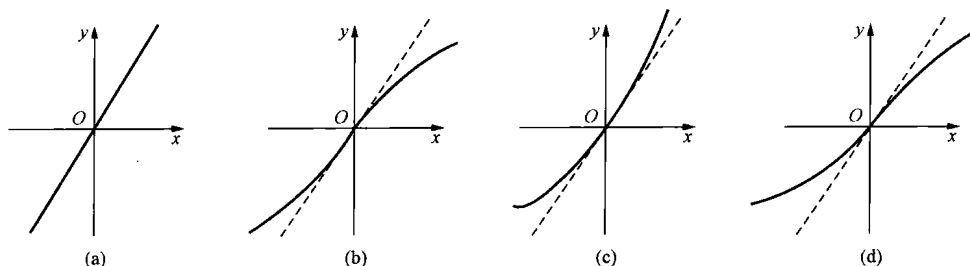


图 1-5 静态数学模型描述线性度和灵敏度的三种特殊形式

由图 1-5 可见, 除图 1-5 (a) 为理想特性外, 其他都存在非线性, 都应进行线性处理。常用的线性处理方法有理论直线法、端点线法、割线法、最小二乘法和计算程序法等。

(3) 滞后量 (迟滞误差)。传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程中输出、输入曲线不重合称为迟滞。它一般是由实验方法测得。对于同一输入 x_i 有不同的输出 y_i ($y_{正} \neq y_{反}$), 对于这种传感器在正反行程期间 (输入、输出) 特性曲线不重合的程度称为迟滞误差, 又称滞差。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示。

传感器的迟滞误差见图 1-6, 它反映了传感器机械结构和制造工艺上的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、积尘、材料内摩擦等, 而且不稳定。迟滞误差由实验方法确定。

(4) 重复性 (重复性误差)。重复性是指传感器在同一工作条件下, 输入量按同一方向在全测量范围内连续变动多次所得特性曲线的不一致性, 见图 1-7。

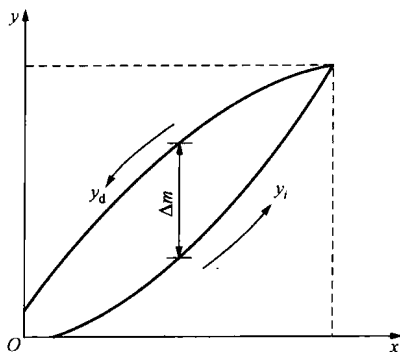


图 1-6 传感器的迟滞误差

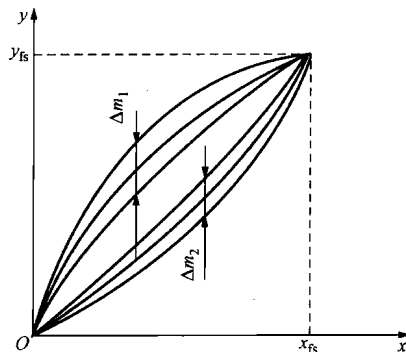


图 1-7 传感器的重复性

重复性误差属于随机误差, 常用绝对误差表示, 也可用正反行程中的最大偏差表示, 它是反映传感器精密度的一个指标, 属随机误差。

(5) 稳定性。抗干扰稳定性是指传感器对外界干扰的抵抗能力。温度稳定性又称温漂, 表示温度变化时传感器输出值的偏离程度, 一般以温度变化 1°C 输出最大偏差与满量程的百分比表示。

(6) 精确度。与精确度 (精度) 有关的指标是精密度和准确度。精确度是精密度与准确度两者的总和, 精确度高表示精密度和准确度都比较高。在最简单的情况下, 可取两者的代数之和。精确度常以测量误差的相对值表示。在测量中我们希望得到精确度高的结果。