



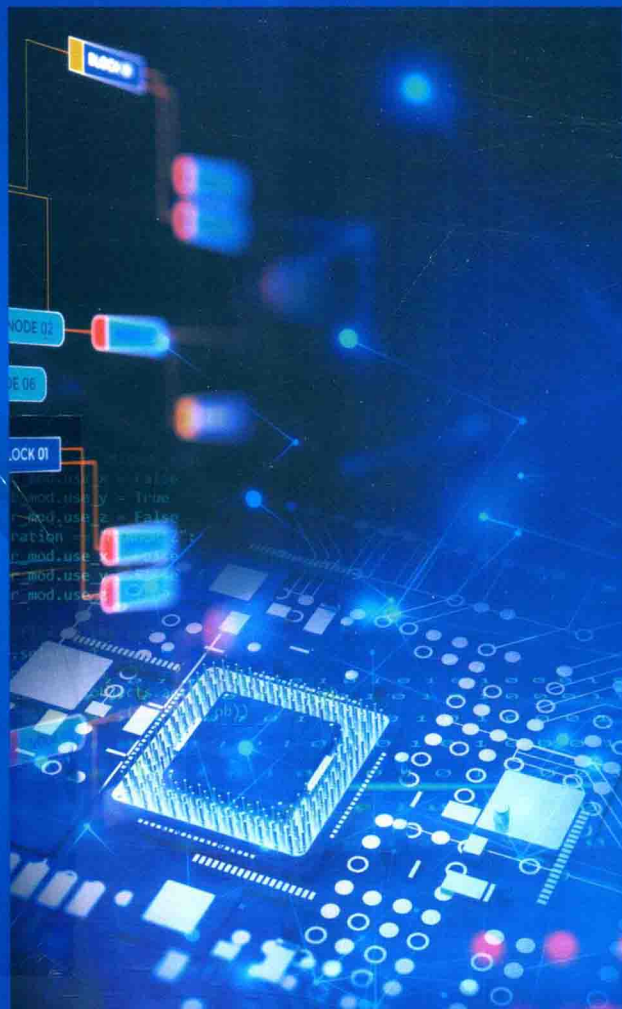
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器原理及应用

PRINCIPLE AND APPLICATION
OF SENSORS

第2版

程德福 凌振宝 赵 静 王言章 © 编
施文康 刘希芳 © 主审



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书配套资源为：电子课件、电子教案、网络课程、实验、自测题

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器原理及应用

第2版

程德福 凌振宝 编
赵 静 王言章
施文康 刘希芳 主审



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书以被测量为物理量并转换为可用电信号的传感器为主体,以传感器的工作原理、结构、主要参数及典型应用为主要内容,包括:概述、力传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器、其他类型传感器及智能化网络化传感器技术七章,每章都附有思考题与习题。

本书参考借鉴了许多国内外专家学者的教材和论著,反映了国内外传感器的新发展以及有特色的科研成果,适应不同层次和不同学时的教学要求。本书的电子教案、多媒体课件、网络课程、实验、自我测试等资源可通过 www.cmpedu.com 注册下载,或发邮件(注明姓名,学校,院系等信息)至 [jinacmp@163.com](mailto:jnacmp@163.com) 索取。

本书可作为本科测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程等专业的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用/程德福等编. —2版. —北京:机械工业出版社,2019.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-62875-0

I. ①传… II. ①程… III. ①传感器-高等学校-教材
IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第105969号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 刘丽敏

责任校对:朱继文 封面设计:张静

责任印制:郜敏

北京华创印务有限公司印刷

2019年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·480千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62875-0

定价:49.80元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

本书第1版于2011年出版,入选了普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是省级精品课“传感器原理及检测技术”的配套教材。课程组根据国家对高等教育教学改革与人才培养提出的新要求,结合传感器技术的新发展,征求了部分读者的意见及建议,提出了本书第2版的修订方案,并列入吉林大学“十三五”教材建设规划。

传感器在当代科学技术中占有十分重要的地位。传感器是测量系统、自动控制系统中信息获取的首要环节和关键技术,可以说所有的测控系统都依赖于传感器提供的信息。随着科技的高速发展,传感器技术已经成为重要的基础性技术,掌握传感器原理与技术,合理应用传感器,几乎是所有工程技术人员必须具备的基本素养。传感器类课程已成为高等学校中仪器类、电子信息类、自动化类等学科专业的主干课。“传感器原理及检测技术”作为省级精品课程,将长期持续建设。

近年来,以原子钟、原子磁力仪、超导量子干涉器等为代表的量子计量与量子传感成为高精度仪器发展的前沿领域。在互联网与无线通信等信息技术带动下,传感器广泛应用于航天、航海、国防、工农业、医疗、交通和机器人等各个领域。“万物互联与智能化”成为时代的显著标志,传感器的网络化与智能化受到高度关注。以此为背景,课程组参考借鉴了国内外专家学者的教材和论著,在第1版的基础上,讲解了国内外传感器的新发展以及有特色的科研成果中的相关内容。

全书保留了原七章顺序结构,坚持以被测物理量(力、温度、磁、光等)转化为电信号的传感器为分类体系,以传感器的工作原理、结构、主要参数及典型应用为主要内容,更正了原书的文字和图形错误,增减了每章所附思考题与习题,重点编写了第四章和第七章的内容。

第一章是绪论。论述了传感器的定义、作用和组成等基本概念;介绍了传感器的分类;重点对传感器的特性进行了分析并给出了主要技术指标;新增了传感器标定方法,归纳总结了应用传感器需遵循的原则与考虑的主要因素;概括性地介绍了传感器技术的发展历程及其趋势。

第二章是力传感器。力学量敏感的器件或装置应用广泛,种类很多。本章选择了具有代表性的应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器等四种力传感器,分析它们的工作原理、组成结构、特点,并给出了应用实例。

第三章是温度传感器。自然界中几乎所有的物理与化学过程都紧密地与温度相联系。温度传感器是种类繁多和应用最广泛的传感器。本章首先概述了温度传感器的标准、分类,以热电偶温度传感器、热敏电阻温度传感器、集成温度传感器为重点,介绍材料特性,分析工作原理和主要应用;概括性地介绍了其他类型的温度传感器。

第四章是磁传感器。测量磁场的方法很多,各种方法的测量原理、测量范围、测

量精度均不相同。本章中前四节分别对应霍尔磁传感器、磁阻传感器、感应式磁传感器、磁通门式传感器，比较详细地论述了它们的工作原理、结构和典型应用；本章第五节为质子旋进式磁传感器，针对微弱磁测量，介绍了质子旋进式、光泵式、铯原子等高灵敏度磁传感器和超导量子干涉器（SQUID），以简明方式讨论了量子磁测的原理、结构、检测方法及仪器组成等。

第五章是光传感器。光传感器是将光信号（红外、可见及紫外光辐射）的参量（强度、波长、相位、偏振等）转换为电信号的一类元器件。在本章中介绍了常用光敏传感器和光纤传感器的工作原理、技术指标及应用。

第六章是其他类型传感器。本章主要讲述气敏传感器、湿度传感器和生物传感器的工作原理及应用。

第七章是智能化网络化传感器技术。本章介绍了智能传感器的概念与发展、构成与功能以及主要应用领域；重点论述了科研成果“IEEE1451标准网络化智能传感器及其应用”和IEEE802.15.4/ZigBee无线传感器网络，对模糊传感器也做了必要的讨论。

本教材的主要特点：

- 1) 注重教材内容更新。增加了数字式和网络化智能化传感器及其应用的新内容。
- 2) 便于组织教学（可教性）、便于引导自学、富有启发性，主要章节列举了典型实例，使学生能够较好地结合例题理解和掌握原理，能够举一反三。难点和重点分布合理。
- 3) 传感器的机理研究分析和设计研制与传感器应用并重，适用于研究型学校，兼顾应用型学校选用。
- 4) 传感器的物理模型体现机理、结构模型中体现工艺结构、数学模型体现函数关系，把三者有机结合起来，建立传感器模型化研究方法。

本书在编写过程中参考并引用了有关文献，在此对文献中的作者表示衷心感谢。

本书承蒙上海交通大学博士生导师施文康教授、吉林大学刘希芳教授审阅了全稿并提出了很多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意。

传感器种类多、技术发展快、应用领域广。限于编者的学识水平，书中存在不当之处甚至错误在所难免，恳切希望读者指正。

编者

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第一节 传感器的基本概念	1
第二节 传感器的分类	3
第三节 传感器的特性与主要性能指标	6
第四节 应用传感器需遵循的原则与考虑的主要因素	19
第五节 传感器技术的发展	22
思考题与习题	28
第二章 力传感器	30
第一节 应变式传感器	30
第二节 电感式传感器	52
第三节 电容式传感器	73
第四节 压电式传感器	89
思考题与习题	105
第三章 温度传感器	107
第一节 概述	107
第二节 热电偶温度传感器	111
第三节 热敏电阻温度传感器	122
第四节 集成温度传感器	131
第五节 其他温度传感器	141
思考题与习题	148
第四章 磁传感器	150
第一节 霍尔磁传感器	150
第二节 磁阻传感器	161
第三节 感应式磁传感器	166
第四节 磁通门式磁传感器	174
第五节 质子旋进式磁传感器	183
第六节 光泵式磁传感器	188
第七节 SQUID 磁传感器	196
第八节 SERF 原子磁传感器	206
思考题与习题	210
第五章 光传感器	212
第一节 概述	212
第二节 外光电效应器件	220
第三节 内光电效应器件	224
第四节 其他光传感器	235
第五节 光电传感器的应用举例	241
第六节 光纤传感器	247
思考题与习题	260
第六章 其他类型传感器	262
第一节 气敏传感器	262
第二节 湿度传感器	272
第三节 生物传感器	285
思考题与习题	292
第七章 智能化网络化传感器技术	293
第一节 智能传感器	293
第二节 IEEE 1451 标准网络化智能传感器	297
第三节 基于 ZigBee 技术的无线传感器网络	305
第四节 模糊传感器	315
思考题与习题	319
参考文献	321

第一章 绪 论

我们的生活中到处都能遇到测量。工业、商业、医学和科学研究工作都离不开测量或检测。由于传感器能够提供包含被测对象信息的电信号而使测量成为可能，通过电子系统（硬件和软件）对信号进行处理，以提取所包含的信息。因此，传感器是测量或检测系统的首要环节。传感器技术是信息时代的关键技术之一，它是获取准确、可靠信息的重要手段。本章将介绍传感器的基本概念、特性指标、应用中考虑的主要因素和技术发展。

第一节 传感器的基本概念

一、传感器的地位和作用

人类的日常生活、生产活动和科学实验都离不开测量。人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。而单靠人们自身的感觉器官，在研究自然现象和规律以及生产活动中它们的功能就远远不够了。为适应这种情况，就需要传感器。可以说，传感器是人类五官的延长，因此又称之为电五官。

在当今高新技术迅速发展的信息时代，获取准确、可靠的信息成为做好一切的前提。传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来检测、监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多种类的优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。

在科学研究中，传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展，进入了许多新领域。例如，在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙，微观上要观察小到 10^{-13} cm的粒子世界，纵深上要观察长达数十万年的天体演化，也需观察短到 10^{-24} s的瞬间反应。此外，还出现了对深化物质认识，开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然，要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍，首先就在于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的出现，往往会引发该领域的突破。一些传感器的发展，往往是一些边缘学科或交叉学科发展的先驱。

传感器早已渗透到诸如工业生产、航空航天、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程，甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目都离不开各种各样的传感器。

总之，传感器是科学仪器等测量系统、自动控制系统中信息获取的首要环节和关键技术。如果没有传感器对原始参数进行准确、可靠、在线、实时的测量，那么无论信息

分析处理和传输的功能多么强大，都没有任何实际意义。传感器的作用就是测量，在自动化技术领域，就是通过传感器来实现测量的。没有测量，就没有科学，就没有技术。在世界范围内，一个国家的重大工程（如三峡工程）中所用的传感器的数量和水平直接标志着其技术的先进程度。因此，传感器技术成为信息时代的焦点，大力发展传感器技术在任何时候都是十分重要的。

二、传感器的定义

GB/T 7665—2005 对传感器（Transducer/Sensor）的定义是：“能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。它是一种以一定的精确度把被测量（包含被测对象信息）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或器件。

这一定义包含了以下几方面的意思：①传感器是测量装置，能完成检测任务；②它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电物理量，但主要是电信号；④输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

关于传感器，我国曾出现过多种名称，如发送器、传送器、变送器、检测器、探头等，它们的内涵相同或相似，所以近来已逐渐趋向统一，大都使用传感器这一名称了。从字面上可以作如下解释：传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。上述传感器的定义是20年前的产物，随着科学技术的快速发展，出现了智能传感器、网络传感器、模糊传感器等新的传感技术产品，人们对传感器的认识不断深入和扩展。传感器的基本作用体现在测量或检测上，是应用传感器的目的，也是学习本课程的目的。

三、传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路三部分组成，其组成框图如图1-1所示。

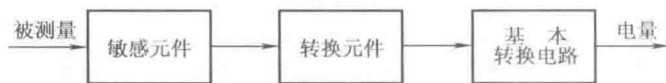


图 1-1 传感器组成框图

敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。传感器的工作机理体现在敏感元件上。敏感元件是传感器技术的核心，也是研究、设计和制作传感器的关键，更是我们学习的重点。图1-2是一种气体压力传感器的示意图。膜盒2的下半部与壳体1固接，上半部通过连杆与磁心4相连，磁心4置于电感线圈3中，后者接入转换电路5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 p_0 相通，内部感受被测压力 p 。当 p 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参量。在图1-2中，转换元件是电感线圈3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

基本转换电路：上述电路参数接入基本转换电路（简称转换电路），便可转换成电量输出。传感器只完成被测参数至电量的基本转换，然后输入到测控电路，进行放大、运算、处理等进一步转换，以获得被测值或进行过程控制。

实际上，有些传感器很简单，有些则较复杂，大多数是开环系统，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，如热电偶就是这样。如图 1-3 所示，两种不同的金属材料 A 和 B，一端连接在一起，放在被测温度为 T 的环境中，另一端为参考，温度为 T_0 ，则在回路中将产生一个与温度 T 、 T_0 有关的电动势，从而进行温度测量。

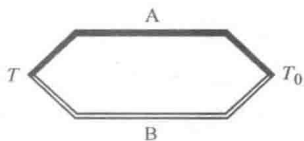


图 1-3 热电偶

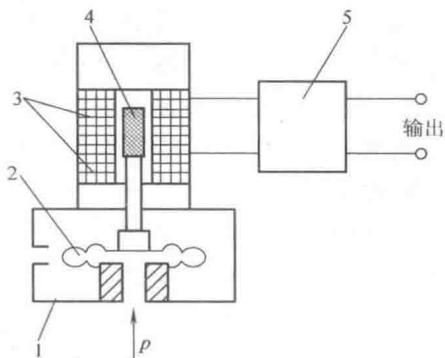


图 1-2 气体压力传感器

1—壳体 2—膜盒 3—电感线圈
4—磁心 5—转换电路

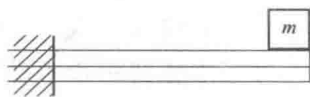


图 1-4 压电式加速度传感器

有些传感器由敏感元件和转换元件组成。如图 1-4 所示的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。因转换元件的输出已是电量，故无需转换电路。

有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。敏感元件与转换元件在结构上常常是组装在一起的，而为了减小外界的影响也需将转换电路和它们装在一起。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。

第二节 传感器的分类

为了更好地学习研究和应用传感器，需要有一个科学的分类方法。由于传感器知识技术密集，涉及许多学科，应用领域广泛，种类繁多，并且随着科技进步，传感器也在不断发展变化，所以到目前，国内外尚没有形成完整统一的分类方法，只是按不同准则形成不同的分类方法。经典传感器主要按其工作原理和被测量来分类。

一、按工作原理分类

传感器按其敏感的工作原理，一般可分为物理型、化学型、生物型三大类。

(1) 物理型传感器 物理型传感器是利用某些敏感元件的物理性质或某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器。例如，利用金属材料在被测量作用下引起电阻值变化的

应变效应制成的应变式传感器；利用半导体材料在被测量作用下引起电阻值变化的压阻效应制成的压阻式传感器；利用电容器在被测量作用下引起电容值的变化制成的电容式传感器；利用磁阻随被测量变化制成的简单电感式、差动变压器式传感器；利用压电材料在被测力作用下产生的压电效应制成的压电式传感器等。

物理型传感器又可以分为结构型传感器和物性型传感器。

1) 结构型传感器。结构型传感器是以结构（如形状、尺寸等）为基础，利用某些物理规律来感受（敏感）被测量，并将其转换为电信号实现测量的。例如，电容式压力传感器必须有按规定参数设计制成的电容式敏感元件，当被测压力作用在电容式敏感元件的动极板上时，引起极板间隙的变化导致电容值的变化，从而实现对压力的测量。又如，谐振式压力传感器必须设计制作一个合适的感受被测压力的谐振敏感元件，当被测压力变化时，改变谐振敏感结构的等效刚度，导致谐振敏感元件的固有频率发生变化，从而实现压力的测量。

2) 物性型传感器。物性型传感器就是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应感受（敏感）被测量，并转换成可用电信号的传感器。例如，压电式压力传感器就是利用石英晶体材料本身具有的正压电效应而实现对压力测量的；压阻式传感器是利用半导体材料的压阻效应而实现对压力测量的。

一般而言，物理型传感器对物理效应和敏感结构都有一定要求，但侧重点不同。结构型传感器强调要依靠精密设计制作的结构的动作或变形来保证其正常工作，而物性型传感器则主要依靠材料本身的物理特性、物理效应来实现对被测量的敏感。近年来，由于材料科学技术的飞速发展，物性型传感器应用越来越广泛，这与该类传感器便于批量生产、成本较低及易于小型化等特点密切相关。

(2) 化学传感器 化学传感器一般是利用电化学反应原理，把无机或有机化学的物质成分、含量等转换为电信号的传感器。最常用的是离子敏传感器，即利用离子选择性电极，测量溶液的 pH 值或某些离子的活度，如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等。其测量原理基本相同，主要是利用电极界面（固相）和被测溶液（液相）之间的电化学反应，即利用电极对溶液中离子的选择性响应而产生的电位差，所产生的电位差与被测离子活度对数呈线性关系，故检测出其反应过程中的电位差或由其影响的电流值，即可给出被测离子的活度。化学传感器的核心部分是离子选择性敏感膜。膜可以分为固体膜和液体膜。玻璃膜、单晶膜和多晶膜属固体膜；而带正、负电荷的载体膜和中性载体膜则为液体膜。化学传感器广泛应用于化学分析、化学工业的在线检测及环保检测中。

(3) 生物传感器 生物传感器是近年来发展很快的一类传感器。它是利用生物活性物质选择性来识别和测定生物化学物质的传感器。生物活性物质对某种物质具有选择性亲和力，也称其为功能识别能力；利用这种单一的识别能力来判定某种物质是否存在，其含量是多少，进而利用电化学的方法进行电信号的转换。生物传感器主要由两大部分组成：其一是功能识别物质，其作用是对被测物质进行特定识别。这些功能识别物有酶、抗原、抗体、微生物及细胞等。用特殊方法把这些识别物固化在特制的有机膜上，从而形成具有对特定的从小分子到大分子化合物进行识别功能的功能膜。其二是电、光信号转换装置。此装置的作用是把功能膜上进行的识别被测物所产生的生物反应转换成便

于传输的电信号或光信号。其中最常应用的是电极，如氧电极和过氧化氢电极。近来有把功能膜固定在场效应晶体管上代替栅—漏极的生物传感器，使得传感器整个体积做得非常小。如果采用光学方法来识别在功能膜上的反应，则要靠光强的变化来测量被测物质，如荧光生物传感器等。变换装置直接关系着传感器的灵敏度及线性度。生物传感器的最大特点是能在分子水平上识别被测物质。按标准 CMOS 工艺实现的阵列式细胞电生理信号传感芯片，不仅在化学工业的监测上，而且在医学诊断、环保监测等方面都有着广泛的应用前景。

二、按被测量分类

按传感器的输入信号——被测量分类，能够很方便地表示传感器的功能，也便于用户使用。按这种分类方法，传感器可以分为力学量、温度、磁学量、光学量、流量、湿度、气体成分等传感器。生产厂家和用户都习惯于这种分类方法。

上面所述仍很概括，仅温度传感器中就包括有用不同材料和方法制成的各种传感器，如热电偶温度传感器、热敏电阻温度传感器、金属热电阻温度传感器、PN 结二极管温度传感器、红外温度传感器等。通常对传感器的命名就是将其工作原理和被测参数结合在一起，先说工作机理，后说被测参数，如硅压阻式压力传感器、电容式加速度传感器、压电式振动传感器、谐振式流量传感器等。

针对传感器的分类，不同的被测量可以采用相同的测量原理，同一个被测量可以采用不同的测量原理。因此，要注重掌握不同的测量原理之间测量不同的被测量时，各自具有的特点。

三、其他分类

按传感器的输出信号分类，可分为模拟传感器和数字传感器。对于模拟传感器，输出信号在宏观上以连续方式改变，信息一般由幅度获得，很多传感器属于此类。我们在设计测控系统时，要把传感器输出的模拟信号通过 ADC 转换成数字信号。而数字传感器的输出不需要 ADC，便于传输，不但重复性好、可靠性高而且往往更精确。目前数字传感器种类不是很多，但此类传感器是发展的方向。通常把输出可变频率的传感器称为准数字传感器。

电子工程师们更喜欢依据可变电参量进行分类，如按阻抗形式分类就有电阻型、电感型或电容型传感器，如按产生变化量纲分类就有电压型、电荷型或电流型传感器。这种分类方法能减少传感器的类别数并能直接研究设计相关的信号转换调节器。

按传感器的能量来源分类，可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。能量控制型传感器携带信息量的变化信号，其能量需要外加电源供给，如电阻、电感、电容等电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、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器，如热敏电阻。能量转换型传感器主要由能量变换元件构成，它不需要外电源。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，如热电偶。

按传感器技术发展分类，传感器从诞生到现在，已经经历了聋哑传感器（Dumb Sen-

6

sor)、智能传感器 (Smart Sensor)、网络化传感器 (Networked Sensor) 的发展历程。传统的传感器是把被测信息转换成模拟电压或电流信号。这类传感器的输出幅值小, 灵敏度低, 而且功能单一, 因而被称为“聋哑传感器”。随着时代的进步, 在高新技术的渗透下, 使微处理器和传感器得以结合, 产生了具有一定数据处理能力, 并能自检、自校、自补偿的新一代传感器——智能传感器。智能传感器的出现是传感技术的一次革命, 对传感器的发展产生了深远的影响。传感器智能化的发展, 输出量是非数值符号的模糊传感器的产生, 拓展和延伸了智能传感器。网络通信技术逐步走向成熟并渗透到各行各业, 当网络接口芯片与智能传感器集成起来并嵌入通信协议, 就产生了网络传感器。网络传感器继承了智能传感器的全部功能, 并且能够和计算机网络进行通信, 因而在现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS) 中得到了广泛的应用, 成为 FCS 中现场级数字化传感器。为解决现场总线的多样性问题, IEEE 1451.2 工作组制定了智能传感器接口标准。该标准描述了传感器网络适配器或微处理器之间的硬件和软件接口, 是 IEEE 1451 网络传感器标准的重要组成部分, 为传感器与各种网络连接提供了条件和方便。网络化传感器的发展, 大大提高了人类信息获取能力。

在军事领域、生态环境检测、交通管理等迫切需求刺激下, 随着无线通信技术、嵌入式计算技术以及传感器技术的飞速发展和日益成熟, 具有感知能力、计算能力和无线通信能力的传感器开始在世界范围内出现。这些集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息, 如军事战场状况信息、温度、湿度、土壤成分甚至放射或化学元素的存在等。采用飞行器、直升机或炮弹携带等方式将微型传感器“投放”在监测区域, 然后通过自组织无线网络 (网络的布设或展开不依赖任何网络设施) 以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端, 使人们能够实时准确地获取监测区域的详细信息。由于其广泛的应用前景, 国内外众多的大学、科研机构都从不同的方向开始了对无线传感器网络的研究。2000 年 12 月, 国际电子电气工程师协会成立 IEEE 802.15.4 工作组, 致力于定义一种供廉价的固定、便携或移动设备使用的极低复杂度、低成本和低功耗的低速率无线连接技术。2002 年 8 月, 由英国 Invensys 公司、日本三菱电气公司、美国摩托罗拉公司以及荷兰飞利浦半导体公司成立了 Zigbee 联盟。IEEE 802.15.4 标准一出现就引起了业界的广泛重视, 短短一年多的时间内, 便有上百家集成电路制造商、运营商等宣布支持 IEEE 802.15.4/Zigbee, 并且很快在全球自发成立了若干联盟。现在大多数无线传感器网络标准都是建立在该标准的基础之上。

第三节 传感器的特性与主要性能指标

由于传感器特性和性能指标会影响甚至决定了整个测量系统的特性, 无论是传感器的选用, 还是设计研制传感器, 学习理解并掌握传感器的基本特性都是必要的。传感器的特性主要是指输入 x (被测量) 与输出 y 之间的量化关系。当输入量为常量, 或变化极慢时, 这一关系就称为静态特性; 当输入量随时间较快地变化时, 这一关系就称为动态特性。

有很多传感器在一定条件下可以认为是线性系统, 其输出与输入关系能够用微分方程来描述。理论上, 将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时, 便可得到静态特性。

因此,传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。

一、传感器的静态特性与主要性能指标

传感器的静态特性表示输入量(被测量) x 不随时间变化,输出量 y 与输入量 x 之间的函数关系,通常表示为

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

式中 a_n ——传感器的标定系数,反映了传感器静态特性曲线的形态。

通过静态测得 n 个数据对,利用有关方法拟合而成的曲线,称为传感器的静态特性曲线,如图 1-5 所示。

1. 测量范围和量程

传感器所能测量到的最小被测量(输入) x_{\min} 与最大被测量(输入) x_{\max} 之间的范围称为传感器的测量范围(Measuring Range),表示为 (x_{\min}, x_{\max}) 。传感器测量范围的上限值与下限值的差 $x_{\max} - x_{\min}$ 称为量程(Span)。例如,某温度传感器的测量范围是 $-30 \sim +120^\circ\text{C}$,那么该传感器的量程为 150°C 。

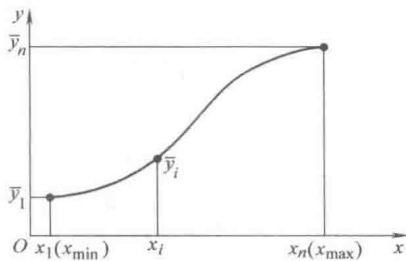


图 1-5 传感器的静态特性曲线示意图

2. 静态灵敏度与灵敏度误差

传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比即为其静态灵敏度(Sensitivity),表达式为

$$k = \Delta y / \Delta x \quad (1-2)$$

由此可见,传感器静态特性曲线的斜率就是其静态灵敏度,反映了传感器输入(被测量)单位变化引起的输出变化的大小。对具有线性特性的传感器,其特性曲线的斜率处处相同,灵敏度 k 是一常数,与输入量大小无关。而非线性传感器的静态灵敏度为变量。静态灵敏度是重要的性能指标,可以根据传感器的测量范围、抗干扰能力等进行选择。特别是传感器中的敏感元件灵敏度尤为关键。在选择或设计敏感元件结构及其参数时,输出对被测量的灵敏度尽可能地大,而对于干扰量的灵敏度尽可能地小。

由于某种原因,会引起静态灵敏度变化,产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示,即

$$\gamma_s = (\Delta k / k) \times 100\% \quad (1-3)$$

3. 分辨力与分辨率

传感器的输入与输出关系在整个测量范围内不可能做到处处连续。输入量变化太小时,输出量不会发生变化;只有当输入量变化到一定程度时,输出量才发生变化,即输出呈现“阶梯型”。传感器能检测到的最小的输入增量 Δx_{\min} 的绝对值称为分辨力(Resolution)。分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。分辨力反映了传感器检测输入微小变化的能力。影响传感器分辨力的因素很多,如机械运动部件的干摩擦和卡塞、电路中的储能元件和 A-D 的位数等。在传感器的测量范围内,由于其输入/输出之间呈非线性关系,所以在不同输入时分辨力不同,用 $\max |\Delta x_{i,\min}|$ 表示传感器的分辨力。

用满量程的百分数表示时称为分辨率，即

$$\gamma = \frac{\max |\Delta x_{i,\min}|}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

在传感器输入最小测点（或零点）处的分辨力称为阈值（Threshold）或死区（Dead Bend）。

4. 线性度

理想的传感器静态特性是一条直线。而实际传感器的输出输入关系或多或少地存在非线性问题。因此，传感器实际的静态特性校准曲线与某一参考直线不吻合程度的最大值称为线性度（Linearity）。在不考虑迟滞、蠕变、不稳定性等因素的情况下，其静态特性可用下列多项式代数方程表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1-5)$$

式中 a_0 ——零点输出；
 a_1 ——理论灵敏度；
 a_2, a_3, \dots, a_n ——非线性项系数。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式。

静态特性曲线可由实际标定测试获得。在获得特性曲线之后，可以说问题已经得到解决。但是为了数据处理的方便，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。一般来说，这些办法都比较复杂。所以在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时，输出输入的校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差，就称为非线性误差，通常用相对误差 γ_L 来表示，即

$$\gamma_L = \pm (\Delta L_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 ΔL_{\max} ——最大非线性误差；
 y_{FS} ——满量程输出。

由此可见，非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同。所以，选择拟合直线的主要出发点，应是获得最小的非线性误差。另外，还应考虑使用是否方便，计算是否简便。

目前常用的拟合方法有：①理论拟合；②过零旋转拟合；③端点连线拟合；④端点连线平移拟合；⑤最小二乘拟合；⑥最小包容拟合等。前四种方法如图 1-6 所示。图中实线为实际输出曲线，虚线为拟合直线。

图 1-6a 中，拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关。该方法十分简

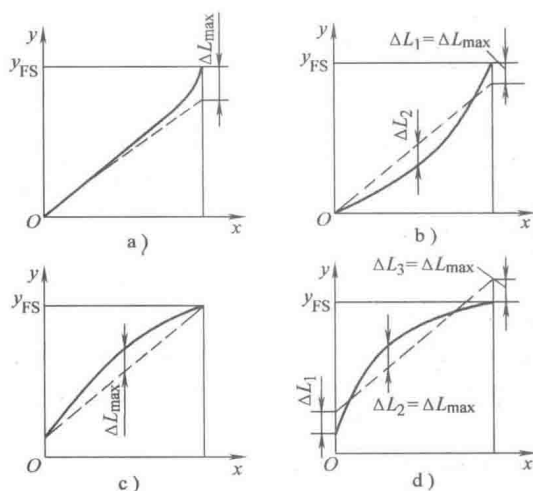


图 1-6 各种直线拟合方法

- a) 理论拟合 b) 过零旋转拟合
 c) 端点连线拟合 d) 端点连线平移拟合

单,但一般来说 ΔL_{\max} 较大。图 1-6b 为过零旋转拟合,常用于曲线过零的传感器。拟合时,使 $\Delta L_1 = |\Delta L_2| = \Delta L_{\max}$ 。这种方法也比较简单,非线性误差比前一种小很多。图 1-6c 中,把输出曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便,但 ΔL_{\max} 也较大。图 1-6d 是在图 1-6c 的基础上使直线平移,移动距离为原先 ΔL_{\max} 的一半,这样输出曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$,与图 1-6c 相比,非线性误差减小一半,提高了精度。

采用最小二乘法拟合时,如图 1-7 所示。设拟合直线方程为

$$y = kx + b \quad (1-7)$$

若实际校准测试点有 n 个,则第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1-8)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使残差二次方和为最小值,即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 \Rightarrow \min \quad (1-9)$$

也就是 $\sum \Delta_i^2$ 对 k 和 b 一阶偏导数等于零,即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-10)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-11)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-12)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-13)$$

在获得 k 和 b 之后代入式 (1-7) 即可得到拟合直线,然后按式 (1-8) 求出残差的最大值 ΔL_{\max} 即为非线性误差。

顺便指出,大多数传感器的输出曲线是通过零点的,或者使用“零点调节”使它通过零点。某些量程下限不为零的传感器,也应将量程下限作为零点处理。

5. 迟滞

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的现象称为迟滞(Hysteresis)。迟滞特性如图 1-8 所示,它一般是由实验方法测得的。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示,即

$$\gamma_H = \pm (1/2) (\Delta H_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-14)$$

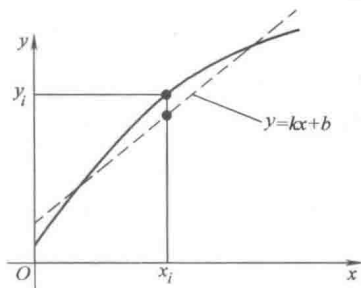


图 1-7 最小二乘拟合法

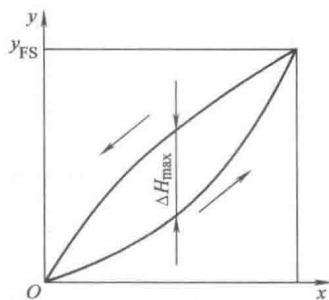


图 1-8 迟滞特性

式中 ΔH_{\max} ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时,可选择几个测试点。对应于每一输入信号,传感器正行程及反行程中输出信号差值的最大者即为回程误差。

6. 稳定性

传感器的稳定性有两个指标:一是测量传感器输出值在一段时间中的变化,以稳定度表示;二是传感器外部环境和工作条件变化引起输出值的不稳定,用影响量表示。

稳定度指在规定时间内,测量条件不变的情况下,由传感器中随机性变动、周期性变动、漂移等引起输出值的变化,一般用精密度和观测时间长短表示。例如,某传感器输出电压值每小时变化 1.3mV ,则其稳定度可表示为 1.3mV/h 。

影响量指传感器由外界环境或工作条件变化引起输出值变化的量。它是由温度、湿度、气压、振动、电源电压及电源频率等一些外加环境影响所引起的。说明影响量时,必须将影响因素与输出值偏差同时表示。例如,某传感器由于电源变化 10% 而引起其输出值变化 0.02mA ,则应写成 $0.02\text{mA}/(U \pm 10\% U)$ 。

7. 重复性

传感器的输入在按同一方向变化时,在全量程内连续进行多次重复测试时所得特性曲线不一致,同一测点,每一次的输出值都不一样,其大小是随机的。为反映这一现象,引入重复性 (Repeatability) 指标。图 1-9 所示为输出曲线的重复特性,正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$,反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个偏差之中较大者为 ΔR_{\max} ,再以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示,即

$$\gamma_{\text{R}} = \pm (\Delta R_{\max} / y_{\text{FS}}) \times 100\% \quad (1-15)$$

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取几个测试点,对应每一点多次从同一方向趋近,获得输出值系列 $y_{11}, y_{12}, y_{13}, \dots, y_{in}$,算出最大值与最小值之差或 3σ 作为重复性偏差 ΔR_i ,在几个 ΔR_i 中取出最大值 ΔR_{\max} 作为重复性误差。

8. 静态误差与精确度

静态误差是指传感器在其测量范围内任一点的输出值与其理论值的偏离程度,反映了传感器的精度,而精度是十分重要的性能指标。

静态误差的求取方法:把全部输出数据与拟合直线上对应值的残差视为随机分布,求出其标准偏差 σ ,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2} \quad (1-16)$$

式中 Δy_i ——各测试点的残差;

n ——测试点数。

取 3σ 值即为传感器的静态误差。静态误差也可用相对误差表示,即

$$\gamma = \pm (3\sigma / y_{\text{FS}}) \times 100\% \quad (1-17)$$

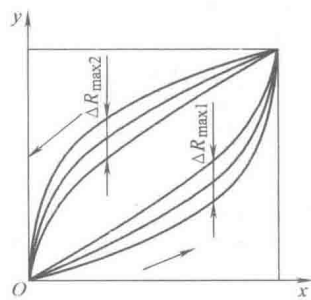


图 1-9 重复特性

式(1-17)中的 γ_{FS} 表示传感器量程,因此,有时把静态误差称为满量程误差。在选择传感器时,要注意的是当量程一定时,满量程误差大小反映了静态误差大小。当 σ 一定时,量程越大,相对误差越小。

静态误差是一项综合性指标,它基本上包括了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差、灵敏度误差等,若这几项误差是随机的、独立的、正态分布的,也可以把这几个单项误差综合而得,即

$$\gamma = \pm \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \gamma_S^2} \quad (1-18)$$

与精度有关的指标有三个:精密度、准确度和精确度。

1) 精密度。它说明传感器输出值的分散性,即对某一稳定的被测量,由同一个测量者,用同一个传感器,在相当短的时间内连续重复测量多次,其测量结果的分散程度。例如,某测温传感器的精密度为 0.5°C ,即表示多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。精密度是随机误差大小的标志,精密度高意味着随机误差小。但必须注意,精密度与准确度是两个概念,精密度高不一定准确度高。

2) 准确度。它说明传感器输出值与真值的偏离程度。例如,某流量传感器的准确度为 $0.2\text{m}^3/\text{s}$,表示该传感器的输出值与真值偏离 $0.2\text{m}^3/\text{s}$ 。准确度是系统误差大小的标志,准确度高意味着系统误差小。同样,准确度高不一定精密度高。

3) 精确度。它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,可取两者的代数和。精确度常以测量误差的相对值表示。

图1-10所示的射击例子有助于加深对精密度、准确度和精确度三个概念的理解。图1-10a表示准确度与精密度都低,图1-10b

表示准确度低而精密度高,图1-10c表示精确度高。在测量中我们希望得到精确度高的结果。

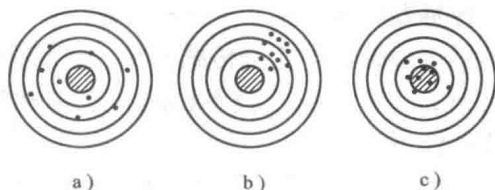


图1-10 射击举例

二、传感器的动态特性与动态指标

动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。被测量可能以各种形式随时间变化。只要传感器输入量 $x(t)$ 是时间的函数,则其输出量 $y(t)$ 也将是时间的函数,其间的关系要用动态特性方程来描述。设计传感器时,要根据其动态性能要求及使用条件选择合理的方案,确定合适的参数;使用传感器时,要根据其动态特性及使用条件确定合适的使用方法,同时对给定条件下的传感器动态误差、响应速度(延时)和动态灵敏度作出估计。

传感器动态特性方程就是指在动态测量时,传感器的输出量与输入被测量之间随时间变化的函数关系。它依赖于传感器本身的测量原理、结构,取决于系统内部机械参数、电气参数、磁性参数、光学参数等,而且这个特性本身不因输入量、时间和环境条件的不同而变化。为了便于分析、讨论问题,本书只能够将传感器等效为线性时不变系统,就假定了传感器输入和输出由常系数线性微分方程相联系。传感器输出与输入之间的关