



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

传感器技术

沈燕卿 主编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

传感器技术

主编 沈燕卿

编写 马玉利 邱 宇

主审 俞志根



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。本书主要介绍在工业、生活、科研等领域用于检测热工量、机械量、物性和成分量以及状态量等的典型传感器的工作原理、特性参数、选型、安装使用、调试等方面的知识，对传感技术的基本概念、测量数据分析处理等也作了介绍。

本书突出了传感器应用方面的内容，反映了新技术、新材料、新工艺在自动检测领域的应用；以传感器用途为主线，注重工学结合，以实际工程应用为载体建立本课程的知识与技能体系，有较强的实用性和参考性；每章节均有相应习题和参考题，题型形式多样，帮助读者进一步理解和掌握传感器的基本概念、选型和典型应用等知识，提高理论联系实际的能力。

本书可作为高职高专电气工程类、自动控制类、电子信息类、机电自动化类及计算机类等专业的教材，也可供各有关工业生产部门作为对技术人员的培训教材及有关人员的自学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

传感器技术/沈燕卿主编. —北京：中国电力出版社，2013.8
普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育
ISBN 978-7-5123-4681-9

I. ①传… II. ①沈… III. ①传感器—高等教育—教材
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 155788 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 326 千字

定价 24.50 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

本书是根据高职高专教学基本要求,参照电气类、机电类、电子类等专业的传感器技术课程教学大纲,结合编者多年的教学和工程实践经验编写而成,为中国电力教育协会组织编写的普通高等教育“十二五”规划教材(高职高专教育)。

作为人体感觉器官的延伸,传感器已广泛应用于工业、科研、生活等各个领域,是各种信息检测系统、自动报警系统和自动控制系统必不可少的信息采集的“感觉器官”,在工程领域和现代科学技术中占有极其重要的地位。随着传感技术的不断发展,传感器相关知识和技术成为相关技术人员的必备知识。

本书通过精选内容、归类编排的方法增强传感器教学的系统性,有利于读者对传感器的现状和发展有一个完整的概念。鉴于传感器种类繁多,涉及的学科广泛,不可能也没有必要对各种具体传感器逐一剖析,本书在编写中力求突出共性基础,以传感器用途为主线,着重介绍常用传感器的工作原理、测量转换电路及其典型应用,着眼于传感器的选型、调试、测量数据分析等解决实际问题的基本技能。

全书共分6章,分别介绍了传感技术基础,常见物理量的检测用传感器,如温度、力及压力、位移、气体浓度及湿度、磁场、光照等的检测,最后以传感器在火灾自动报警器和智能机器人中的实际工程应用为例,引导学生思考、自学、讨论,使学生在掌握常用传感器的设计、制作、调试、维护等工程应用技能的同时,学习掌握利用传感器技术解决工程实际问题的思路及方法。本书内容选材力求通俗、简明、实用、操作性强,每章均配有习题。

本书可作为高职高专院校电气类、机电类、电子类等专业的教材,也可供计算机、机械、汽车等专业的师生及相关工程技术人员参考,参考学时为60~80学时。

本书主编为重庆工业职业技术学院沈燕卿(第1~5章及统稿),马玉利、邱宇(第6章)参编。

湖州职业技术学院的俞志根教授担任本书的主审,对书稿进行了认真、负责、全面审阅,提出了许多宝贵的建议和意见。在本书的编写过程中,还得到了重庆工业职业技术学院易谷教授、毛臣健教授、张晓琴教授和中国四联仪器仪表集团的刘祥明高级工程师、刘裴工程师等的大力支持,也得到了编者所在院校领导的关心和支持,在此一并表示感谢。

传感器技术涉及的学科众多,而编者学识有限,书中难免存在不足之处,敬请读者予以批评指正。

编者

2013年6月

目 录

前言

1 传感技术基础	1
1.1 传感技术概论	1
1.2 传感器特性与技术指标	6
1.3 测量误差与精度	13
1.4 测量结果的数据处理	16
习题	32
2 温度传感器	35
2.1 温标及测温方法	35
2.2 膨胀式温度计	38
2.3 电阻式温度传感器	43
2.4 热电偶传感器	49
2.5 辐射式温度传感器	57
2.6 其他测温传感器	65
习题	68
3 位移传感器	71
3.1 电感式位移传感器	71
3.2 电容式位移传感器	104
3.3 超声波位移传感器	121
3.4 其他位移传感器	132
习题	142
4 力敏传感器	145
4.1 电阻应变式力传感器	145
4.2 压电式传感器	161
习题	171
5 气、湿、磁、光敏传感器	173
5.1 气敏传感器	173
5.2 湿敏传感器	176
5.3 磁敏传感器	179
5.4 光敏传感器	182

习题.....	187
6 传感器综合应用实例	189
6.1 火灾自动报警系统	189
6.2 智能机器人	196
习题.....	202
附录 热电偶分度表.....	205
参考文献.....	208

1 传感技术基础

1.1 传感技术概论

GB 7665—2005《传感器通用术语》中,传感器(Transducer/Sensor)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。

无论是在现代生活、生产活动中,还是在工业监控和科学研究等领域,都离不开检测与传感器这个重要环节。若没有传感器对原始的各种参数进行精确而可靠的自动检测,那么信号转换、信息处理、正确显示、控制器的最佳控制等都是无法进行和实现的。

1.1.1 传感技术在现代科技中的地位及应用

传感技术是现代科技的前沿技术,是现代信息技术的三大支柱之一。传感技术水平的高低是衡量一个国家科技发展水平的重要标准之一。传感器产业也是国内外公认的具有发展前途的高技术产业之一,它以技术含量高、经济效益好、渗透能力强、市场前景广等特点为世人瞩目。

随着现代科学技术的高速发展,人们生活水平的迅速提高,传感技术越来越受到普遍的重视,它的应用已渗透到国民经济的各个领域。

1. 在环境监测方面的应用

随着经济的迅速发展,环境污染问题日益凸显,保护环境并实现可持续发展逐渐成为当今的热门话题。人们迫切希望拥有一种能对大气、水质等进行连续、快速、在线监测的仪器,环境质量传感技术满足了人们的需求。目前,已有相当一部分生物传感器应用于环境监测中,如对海岛鸟类生活规律的观测、气象现象的观测、天气预报、森林火警、洪灾预警等。

2. 在家用电器方面的应用

20 世纪 80 年代以来,随着以微电子为中心的技术革命的兴起,家用电器正向自动化、智能化、节能、无环境污染的方向发展。自动化和智能化的核心就是研制由微电脑和各种传感器组成的控制系统。例如一台空调器采用微电脑控制配合传感技术,可以实现压缩机的启动、停机、风扇摇头、风门调节、换气等,从而对温度、湿度和空气浊度进行控制。随着人们对家用电器方便、舒适、安全、节能等性能要求的提高,传感器将得到越来越多的应用。

3. 在工业检测和自动控制系统的应用

在工业生产过程中,必须对温度、压力、流量、液位和气体成分等参数进行检测,实现对工作状态的监控;诊断生产设备的各种情况,使生产系统处于最佳状态,从而保证产品质量,提高效益。目前传感器与微机、通信等技术的结合渗透,使工业监测自动化具有准确、效率高等诸多优点。如果没有传感器,现代工业自动化程度将会大大降低。

4. 传感技术在汽车工业中的应用

随着人们生活水平的提高,汽车已逐渐走进千家万户,汽车的安全、舒适、节能、环保和高自动化是其发展趋势。普通汽车上装有 10~20 只传感器,而高级豪华车更是多达几十只。传感器在汽车中充当其感官和触角,主要分布在发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统,通过对车辆行驶距离、发动机转速、燃料剩余量等汽车工作状态信息的检测,形

成了气囊系统、防盗系统、防滑控制系统、防抱死装置、电子变速装置等,为车辆的正常运行和人员安全提供了保障。

5. 在现代医学领域的应用

医学传感器作为拾取生命体征信息的五官,需要测取人体的温度、血压、呼吸信号、心脑电波等来辅助医生或系统判断人体状态,它的作用日益显著,并得到广泛应用。例如,在图像处理、临床化学检验、生命体征参数的监护监测和呼吸、神经、心血管疾病的诊断与治疗等方面,传感器的使用十分普遍。传感器在现代医学仪器设备中已无所不在。

6. 在智能建筑领域中的应用

智能建筑是未来建筑的一种必然趋势,它涵盖智能自动化、信息化、生态化等多方面的内容。例如,通过布置于房间内的温度、湿度、光照、空气成分等无线传感器,感知居室不同部分的微观状况,从而对空调、门窗及其他家电进行自动控制,提供给人们智能、舒适的居住环境;通过布置于建筑物内的图像、声音、气体、温度、压力、辐射等传感器,发现异常事件及时报警,自动启动应急措施。

7. 在军事领域的应用

传感技术在军用电子系统的运用促进了武器、作战指挥、控制、监视和通信方面的智能化发展。传感器在远方战场监视系统、防空系统、雷达系统、导弹系统等方面都有广泛的应用,是提高军队战斗力的重要技术。

科学技术的不断发展,蕴生了许多新的学科领域,无论从宏观的宇宙,还是到微观的粒子世界,许多未知的现象和规律要获取大量人类感官无法获得的信息,没有相应的传感器是不可能的。

1.1.2 传感器的作用

传感技术是一门综合性很强的学科,集成了机械、电子、电路、控制、光学、电磁学等知识,它以研究传感器的材料、传感器的设计、制作和应用为主要内容,利用传感器敏感材料的力、热、声、电、光、磁等物理“效应”和“现象”,并综合了物理学、微电子学、化学、材料科学、生物工程等各方面的知识,涉及知识面广,且与生产、科研实践联系紧密。传感器的种类很多,如压力传感器、温度传感器、湿度传感器,以及近年来兴起的智能传感器、图像传感器等。

如图 1.1.1 所示,传感器的作用就相当于人的感官,用于感受有关外界环境及自身状态的各种物理量(如力、位移、速度、位置等)及其变化,并将这些信号转换成电信号,然后再通过相应的变换、放大、调制与解调、滤波、运算等电路将有用的信号检测出来,用于显示或控制。

具体而言,传感器的作用主要有以下三个方面:

(1) 信息的收集。科学研究中的计量测试、产品制造与销售中所需的计量都要由测量来获得准确的定量数据。对于某种特定的要求,需要测量目标物的存在状态,将某状态信息转换为数据。

对系统或装置的运行状态进行检测,也由传感器来实现,在发现异常情况时,发出警告信号并启动保护电路工作,这样可以对系统或装置进行正常运行与安全管理。判断产品是否合格,或人体各部位的异常诊断都需由传感器的测量来完成。

(2) 信息数据的交换。将以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信

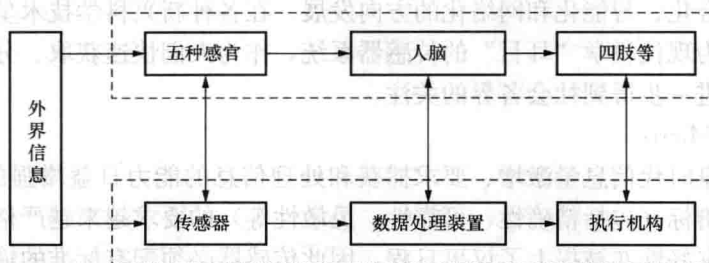


图 1.1.1 人体与传感装置信息处理对比

号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据，或者读出在各种媒体上的信息并进行转换。例如，磁盘与光盘的信息读取，磁头就是一种传感器。

(3) 控制信息的采集。利用传感器检测控制系统处于某种状态的信息，并由此控制系统的状态，或者跟踪系统变化的目标值。

1.1.3 自动检测/控制系统

可实现上述三种功能的传感器、相应的信号处理电路以及显示装置、数据处理装置和执行机构，就构成了自动检测/控制系统。典型的单闭环负反馈控制系统框图如图 1.1.2 所示。



图 1.1.2 典型单闭环负反馈控制系统框图

图 1.1.2 中， $r(t)$ — 给定信号。

$z(t)$ — 反馈信号，来自传感器的被控参数 $y(t)$ 的测量变送值。

$e(t)$ — 绝对误差， $e(t) = r(t) - z(t)$ 。

$u(t)$ — 控制信号。

$q(t)$ — 控制参数。

$y(t)$ — 被控参数。

过程—即被控过程，又称系统或对象，指从被控参数检测点至调节阀之间的管道或设备。

$f(t)$ — 外部扰动，即外部干扰，它会使控制值偏离给定值，作用于过程且使被控参数变化。根据扰动的来源，扰动可分为内部扰动和外部扰动。内部扰动来自于控制参数的作用。

“→” — 信号作用方向或介质流量的流向。

以空调温度控制系统为例，其主要由温度控制器、装在回风管内温度传感器、冷热电动调节二通阀门、温度调节阀及驱动器等组成。装在回风管内温度传感器检测获得环境温度 $z(t)$ ，控制器将环境温度 $z(t)$ 与设定的温度 $r(t)$ 相比较，并根据比较的结果 $e(t)$ 输出相应的控制信号 $u(t)$ 来控制电动阀的动作，从而使送风温度保持在所需要的范围内。

1.1.4 传感技术的发展趋势

随着 CAD 技术、MEMS 技术、信息理论及数据分析算法等的不断发展，传感器系统正

向着微型化、综合化、智能化和网络化的方向发展。在各种新兴科学技术呈辐射状广泛渗透的当今社会,作为现代科学“耳目”的传感器系统,作为人们快速获取、分析和利用有效信息的基础,必将进一步得到社会各界的关注。

1. 微型化 (Micro)

为了顺应信息时代信息量激增、要求捕获和处理信息的能力日益增强的技术发展趋势,对于传感器性能指标(包括精确性、可靠性、灵敏性等)的要求越来越严格。与此同时,传感器系统的操作友好性亦被提上了议事日程,因此传感器必须配有标准的输出模式;越来越多的功能要求各个部件体积能占位置越小越好,因而传感器本身体积也是越小越好。而传统的大体积、弱功能传感器往往很难满足上述要求,已逐步被各种不同类型的高性能微型传感器所取代。后者主要由硅等半导体材料构成,具有体积小、质量轻、反应快、灵敏度高、成本低等优点。

微电子机械系统(MEMS)的研究工作始于20世纪60年代,其研究范畴涉及材料科学、机械控制、加工与封装工艺、电子技术以及传感器和执行器等多种学科,是一个极具前景的新兴研究领域。MEMS的核心技术是研究微电子与微机械加工与封装技术的巧妙结合,期望能够由此而制造出体积小但功能强大的新型系统。经过几十年的发展,尤其最近十多年的研究与发展,MEMS技术已经显示出了巨大的生命力,此项技术的有效采用将信息系统的微型化、智能化、多功能化和可靠性水平提高到了一个新的高度。在当前技术水平下,利用微切削加工技术已经可以生产出来具有不同层次的3D微型结构,从而可以生产出体积非常微小的微型传感器敏感元件。如毒气传感器、离子传感器、光电探测器这样的以硅为主要构成材料的传感/探测器都配备有敏感元件。目前,这一类微型传感器的主要敏感元件被广泛应用于不同的研究领域。

2. 智能化 (Smart)

智能传感器是指装有微处理器的,不但能够执行信息处理和信息存储,而且还能够进行逻辑思考和结论判断的传感器系统。例如对非线性信号进行线性化处理,借助于软件滤波器滤波数字信号,通过对环境等的检测实施自诊断和自校正等。

智能传感器以微机为核心,其主要组成部分包括主传感器、辅助传感器及微型机的硬件设备等。例如智能化压力传感器的主传感器为压力传感器,用来探测压力参数;其辅助传感器通常为温度传感器和环境压力传感器,用来测量环境的温度和压力变化。硬件系统除了能够对传感器的弱输出信号进行放大、处理和存储外,还执行与计算机之间的通信联络。采用智能化技术后,可以方便地调节和校正由温度、压力的变化导致的测量误差。

借助于半导体集成化技术将传感器与信号预处理电路、输入输出接口、微处理器等制作在同一块芯片上,即成为大规模集成智能传感器。可以说智能传感器是传感器技术与大规模集成电路技术相结合的产物,它的实现取决于传感技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展。智能传感器具有多能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点,是传感器重要的发展方向之一。

3. 综合化 (Multifunction)

通常情况下一个传感器只能用来探测一种物理量,但在许多应用领域中,如前面提到的智能化压力传感器,为了能够完美而准确地反映客观事物和环境,往往需要同时测量多个的物理量。由若干种敏感元件组成的多功能传感器是一种体积小且兼备多种功能的新一代探

测系统,它可以借助于敏感元件中不同的物理结构或化学物质及其各不相同的表征方式,用单独一个传感器系统来同时实现多种传感器的功能,同时还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价,反映出被测系统的整体状态。

随着传感器技术和微机技术的飞速发展,目前人们已经生产出将若干种敏感元件综装在同一种材料或单独一块芯片上的一体化多功能传感器。

多功能传感器无疑是当前传感器技术发展中一个全新的研究方向,目前有许多学者正在积极开展该领域的研究工作。比如,将某些类型的传感器进行适当组合而使之成为新的传感器,像用来测量流体压力和互异压力的组合传感器。又如,为了能够以较高的灵敏度和较小的粒度同时探测多种信号,微型数字式三端口传感器可以同时采用热敏元件、光敏元件和磁敏元件;这种组配方式的传感器不但能够输出模拟信号,而且还能够输出频率信号和数字信号。

从目前的发展现状来看,仿生传感器是最热门的研究领域之一,并且在感触、刺激及视听辨别等方面已有最新研究成果问世。从实用的角度考虑,多功能传感器中应用较多的是各种类型的多功能触觉传感器,例如人造皮肤触觉传感器。这种传感器系统由 PVDF 材料、无触点皮肤敏感系统及具有压力敏感传导功能的橡胶触觉传感器等组成。例如,美国 MER-RITT 公司研制开发的无触点皮肤敏感系统,其无触点超声波传感器、红外辐射引导传感器、薄膜式电容传感器以及温度、气体传感器等,在美国本土应用甚广。

4. 网络化 (Networked)

传感器网络是当前国际上备受关注的、多学科高度交叉的新兴前沿研究热点领域。传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等。其能够通过各类集成化的微型传感器协作,实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,通过嵌入式系统对信息进行处理,并通过随机自组织无线网络以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端,从而真正实现“无处不在的计算”理念。

传感器网络具有十分广阔的应用前景,在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多领域都有重要的科研价值和巨大实用价值,已经引起了世界许多国家军界、学术界和工业界的高度重视,并成为 20 世纪以来公认的新兴前沿热点研究领域,被认为是将对 21 世纪产生巨大影响的技术之一。

5. 新效应、新材料和新工艺 (New effect, new material and new technology)

新物理/化学效应、新材料、新工艺等的发现和发展,也将进一步促进传感器的微型化、智能化、综合化和网络化的发展趋势,实现降低传感器的能耗,提高传感器敏感性、选择性、响应速度、动态范围、准确度、稳定性以及在恶劣环境条件下工作的能力。

传感器本来就是基于一系列物理、化学效应制造而成的,目前应用的效应很多,比如压电效应、压阻效应等。还有一些效应是未知的,等着人们去认识。新效应的发现,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件,是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。

传感器材料是传感器技术的重要基础,是传感器技术升级的重要支撑。随着材料科学的进步,传感器技术日臻成熟,传感器材料种类越来越多,除了早期使用的半导体材料、陶瓷材料以外,光导纤维及超导材料的开发为传感器的发展提供了物质基础。例如,根据以硅为基体的许多半导体材料易于微型化、集成化、多功能化、智能化的特点,以及半导体光热探测器具有灵敏度高、精度高、非接触性等特点,发展红外传感器、激光传感器、光纤传感器

等现代传感器。在敏感材料中,陶瓷材料、有机材料发展很快,可采用不同的配方混合原料,在精密调配化学成分的基础上,经过高精度成型烧结,得到对某一种或某几种气体具有识别功能的敏感材料,用于制成新型气体传感器。此外,高分子有机敏感材料是近几年人们极为关注的、具有应用潜力的新型敏感材料,可制成热敏、光敏、气敏、湿敏、力敏、离子敏和生物敏等传感器。传感器技术的不断发展,也促进了更新型材料的开发,如纳米材料等。美国 NRC 公司已开发出纳米 ZrO_2 气体传感器,控制机动车辆尾气的排放,对净化环境效果很好,应用前景广阔。由于采用纳米材料制作的传感器具有庞大的界面,能提供大量的气体通道,而且导通电阻很小,有利于传感器向微型化发展。随着科学技术的不断进步,将有更多的新型材料诞生。

发展新型传感器,离不开新工艺的采用。新工艺的含义很广,这里主要指与发展新兴传感器联系特别密切的微细加工技术,又称为微机械加工技术。该技术是近年来随着集成电路工艺发展起来的,它是离子束、电子束、分子束、激光束和化学刻蚀等用于微电子加工的技术,目前已越来越多地用于传感器领域,如溅射、蒸镀、等离子体刻蚀、化学气体淀积(CVD)、外延、扩散、腐蚀、光刻等。

除此之外,随着社会经济、技术等的发展,传感器应用也在不断拓展,比如在物联网中的应用。近些年,地震灾害、海啸灾害、食品危机不断,开发出各种传感器检测这些现象的发生,及早预警,也是传感器技术今后的发展方向之一。

1.2 传感器特性与技术指标

1.2.1 传感器的定义

传感器是一种以测量为目的,以一定精度将被测量转换为与之有确定关系的、便于处理的另一种物理量的测量装置、器件或元件。因此,传感器直接与被测对象发生联系,采集并获取被测对象的信息。由于一般的被测对象是非电信号,如位移、速度、温度、压力、流量等,所以传感器还必须将上述信号转换成便于传输和处理的电信号,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。

1.2.2 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、传感元件和测量转换电路三部分组成,其组成框图如图 1.2.1 所示。

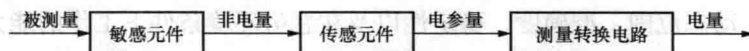


图 1.2.1 传感器组成框图

敏感元件(sensing element)——感受被测参数变化量(一般为非电量,如物理量、化学量、生物量等),并输出与被测量成确定关系的其他更易于转换的非电量的元件。

传感元件(transduction element)——也称转换元件,通常它不直接感受被测量,而是将敏感元件的输出量转换为电阻、电容、电感等电参量再输出。

测量转换电路——将传感元件输出的电参量转换成电压、电流或频率量等易于处理的电信号。若转换元件输出的已经是上述电量,则不需要基本转换电路。

1.2.3 传感器的分类

传感器目前最常见的分类方法有两种：按被测物理量或用途分类和按传感器的工作原理分类。

按传感器被测物理量或用途的不同可分为位移、速度、加速度、力、压力、扭矩、时间、温度传感器等。

按传感器工作原理的不同可以分为物理型、化学型及生物型三大类。其中，物理型传感器是利用被测量物质的某些物理性质发生明显变化的特性制成的，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。化学型传感器是以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系，利用能将化学物质的成分、浓度等化学量转化成电量的敏感元件制成。生物型传感器是利用各种生物或生物物质的特性制成的，用以检测与识别生物体内化学成分。大多数传感器是以物理原理为基础运作的。化学传感器技术问题较多，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更为广泛。常见物理型传感器的工作原理和应用领域见表 1.2.1。

表 1.2.1 常见物理型传感器的工作原理及应用领域

转换形式	中间参量	工作原理	传感器名称	典型应用
电 参 数	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应（电阻的温度系数）	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
		利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、含水量
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用拾磁信号	磁栅	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移

续表

转换形式	中间参量	工作原理	传感器名称	典型应用
电 能 量	电动势	温差电动势	热电偶	温度热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

此外，传感器也有其他的一些分类方法，如根据输出信号类型、制作材料和工艺等。

按输出信号类型的不同传感器可分为：

模拟型传感器——将被测量的非电量转换成模拟电信号。

数字型传感器——将被测量的非电量转换成频率、代码等数字输出信号（包括直接和间接转换）。

——开关传感器——当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时，传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

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。通常利用对外界作用最敏感的材料，即具有功能特性的材料来制作传感器的敏感元件。从所应用的材料观点出发可将传感器分成下列几类：比如按照所用材料可分为金属、聚合物、陶瓷、混合物传感器等；按材料的物理性质分为导体、绝缘体、半导体、磁性材料传感器等；按材料的晶体结构分为单晶、多晶、非晶材料传感器等。

按照制造工艺不同，可将传感器分为：集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器、陶瓷传感器等。其中，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，涂覆在陶瓷基片上制成的。其基片通常由 Al_2O_3 制成的，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，完成适当的预备性操作之后，将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。

1.2.4 传感器技术指标

传感器技术指标通常包括静态特性指标、动态特性指标、可靠性指标等。

传感器的静态特性是指，对静态的输入信号传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都与时间无关，所以传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程描述；或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有灵敏度、线性度、迟滞、重复性、漂移等。

1. 静态特性指标

(1) 灵敏度 (Sensitivity) 与信噪比 (S/N)。选用传感器时首先要考虑的是其灵敏度，

如果达不到测量时所必需的灵敏度,传感器的采用将失去意义。

灵敏度是指仪表对被测参数变化的灵敏程度,或者说是对被测的量变化的反应能力,是在稳态下输出变化增量对输入变化增量的比值,即

$$S = dy/dx \approx \Delta y/\Delta x \quad (1.2.1)$$

图 1.2.2 所示为传感器实际特性曲线和理论直线图。特性曲线以输入量 x 为横坐标,输出量 y 为纵坐标,其输出量和输入量与时间无关。

理想的线性检测系统的特性曲线的斜率 k 为常数,即 $y=kx$ 。 $k(=S)$ 为常数时,表明不同输入值对应的灵敏度不变,是线性检测装置,特性曲线是直线; S 不为常数,表明不同输入值对应的灵敏度大小不同,特性曲线是一条曲线。

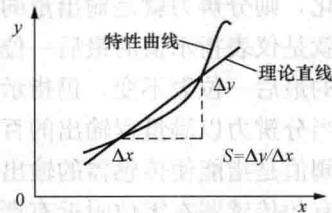


图 1.2.2 传感器的实际特性曲线和理论直线图

仪器灵敏度(平均灵敏度),即一般意义上的灵敏度,通常采用理论直线代替实际特性曲线,理论直线的斜率作为检测装置的平均灵敏度。输出与输入量纲相同时,灵敏度为无量纲数,称放大倍数。

灵敏度高的传感器不一定是最好的传感器,灵敏度越高(放大倍数越大),越易受噪声的影响(如环境噪声、传感器本身的噪声等),测量范围相对越窄,稳定性越差。因此要合理选择灵敏度,必须用信号与噪声的相互关系全面来衡量传感器使用性能。

传感器输出信号中的信号分量与噪声分量的平方平均值之比,称为信噪比(signal to noise ratio, SNR),其表达式为

$$\text{SNR} = 10\lg(P_S/P_N) = 20\lg(U_S/U_N) \quad (1.2.2)$$

式中 P_S 、 P_N ——信号和噪声的平均功率;

U_S 、 U_N ——信号和噪声的平均电压。

SNR 小,信号与噪声就难以分清,若 $\text{SNR}=0\text{db}$,就完全分辨不出信号与噪声。一般情况下,SNR 要求大于 10。

总体而言,一般是灵敏度越高越好,即被测量微小变化则输出量就有较大变化。但灵敏度很高时,与被测量无关的噪声也会同时被检测到,并通过传感器输出,从而干扰被测信号。因此传感器的信噪比越大越好,其值越大越不易受外界干扰。

(2) 线性度(Linearity)。通常用线性度来表示检测装置的实际特性曲线与理论直线靠近或偏离的程度。

线性度是指实际特性曲线与理论直线之间的最大偏差 $\Delta L_{\max}$ 和满量程输出值之比。即

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

输入与输出之间呈直线性比例关系,称为线性关系。然而实际上极少有理想线性关系,大都为非线性关系。采用电子电路也不能使传感器的特性曲线完全线性化。此外,还有补偿电路、放大器、运算电路等引起的非线性。

理论直线确定方法采用端点连线法和最小二乘法。

由于传感器的实际静态特性曲线不是直线,在应用中将其当作直线进行线性化,由此产生的误差称之为线性误差。线性误差应尽可能减小。

传感器都有一定的线性工作范围,输出与输入呈比例关系,范围越宽,量程越大。让传感器工作在线性区域内是保证测量精度的基本条件。在许可限度内,可以取其近似线性区域。

(3) 分辨率和阈值 (resolution and threshold)。传感器能检测到输入量最小变化量的能力称为分辨力。对于某些传感器,如电位器式传感器,当输入量连续变化时,输出量只做阶梯变化,则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。对于数字式仪表,分辨力就是仪表指示值的最后一位数字所代表的值。当被测量的变化量小于分辨力时,数字式仪表的最后一位数不变,仍指示原值。

当分辨力以满量程输出的百分数表示时则称为分辨率。

阈值是指能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性,形成所谓“死区”(dead band),则将死区的大小作为阈值;更多情况下,阈值主要取决于传感器噪声的大小,因而有的传感器只给出噪声电平。

(4) 精度 (Accuracy)。精度用于评价系统的优良程度。精度可分为准确度和精密度。准确度就是测量值与真实值偏离程度。为修正这种偏差需要进行校正,完全校正是很复杂的,因此应尽可能地减小误差。

精度,即最大满度相对误差,是反映检测装置系统误差和随机误差的综合评定指标,用来表示检测装置给出接近于被测量真值的示值能力。其计算式为

$$\gamma_A = \left| \frac{e_{\max}}{A_{\max} - A_{\min}} \right| \times 100\% \quad (1.2.4)$$

式中: γ_A 为精度; $e_{\max}$ 为最大测量误差; $A_{\max} - A_{\min}$ 为仪表量程。

精度等级 (δ) 是指检测装置在符合一定的计量要求情况下,保持其误差在规定的极限范围内的精确度。其计算式为

$$\delta = \left| \frac{e_{\max}}{A_{\max} - A_{\min}} \right| \times 100 \quad (1.2.5)$$

我国工业仪表精度等级分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 七个等级,通常标示在仪表刻度标尺或铭牌上。

(5) 迟滞 (Hysteresis)。迟滞用于描述传感器正向特性和反向特性的不一致程度。当输入量在增加或减少时,对同一输出量会得到大小不等的输出量。比如,当输入量增加到 x_1 ,此时输出量为 y_1 ,再继续增加输入量,然后减少到 y_1 ,这时其输出量为 y_2 ,此时输出量 y_1 和 y_2 不相等,有一定的差值,即为迟滞(回差)。如式 (1.2.6) 所示,迟滞可表示为在全部测量范围内的差值 e_H 的最大值和量程之百分比,即

$$\gamma_H = \frac{\max(e_H)}{2(y_{\max} - y_{\min})} \times 100\% \quad (1.2.6)$$

迟滞产生的主要原因包括仪表传动机构的间隙,运动部件的摩擦,弹性元件滞后或电滞后等。应尽量选用迟滞小的传感器。在实际工程应用中,随着仪表制造技术的不断改进,特别是微电子技术的引入,许多仪表已全电子化,无可动部件,所以迟滞这个指标在智能型仪表中显得不那么重要和突出了。

(6) 稳定性 (Stability)。稳定性表示传感器经长期使用后输出特性不发生变化的能力。理想的情况是任何时候,传感器的特性参数都不随时间变化。但实际上,随着时间的推移,大多数传感器的特性会发生改变。这是因为敏感元件或构成传感器的部件,其特性参数会随

时间发生变化,影响了传感器的稳定性。

影响稳定性的因素主要是时间和工作环境。温度、气压、湿度、振动、电源电压及频率等都会影响传感器的特性参数。

理想特性的传感器是输入量相同时,输出量大小也相同。然而,实际上传感器特性随时间而变化,因此,对于相同大小输入量,其输出量是变化的。连续工作时,即使输入量恒定,传感器输出量也会朝着一个方向偏移,这种现象称为漂移。漂移主要由于仪器自身结构参数的变化、周围环境(温度、湿度)变化等原因产生。其又可分为零飘、动飘、温飘等。零漂指当输入量 $x=0$ 时产生的漂移。动漂指当输入量 x 为一定值时产生的漂移。

环境影响中对传感器影响最大的是温度。目前,很多传感材料采用灵敏度高,且信号易处理的半导体。然而,半导体对温度变化最为敏感,实际应用时要特别注意。除传感器本身的温漂外,还有传感器安装机构的温漂,以及电子电路的温漂。

以化工企业用仪表为例,其工作环境相对比较恶劣,被测量的介质温度、压力变化也相对比较大,在这种环境中仪表的某些部件随时间保持不变的能力会降低,仪表的稳定性会下降。化工企业通常用仪表零漂移来衡量仪表的稳定性。例如,有的仪表投入运行一年之中零位没有漂移;相反有的仪表投入运行不到3个月,仪表零位就变了,说明仪表稳定性不好。仪表稳定性的好坏直接关系到仪表的使用范围,有时直接影响化工生产。仪表稳定性差造成的影响往往比仪表精度下降对化工生产的影响还要大。稳定性差,仪表维护量也大,这是仪表工最不希望看到的事情。

在实际使用中,要根据环境条件选择合适的传感器;同时要创造和保持良好工作环境,使传感器工作在不需要经常更换和校正的情况下。

(7) 测量范围 (Measuring range)。传感器所能测量到的最小输入量与最大输入量之间的范围,称为传感器的测量范围。

(8) 量程 (Span)。传感器测量范围的上限值与下限值的代数差,称为量程。

(9) 重复性 (Repeatability)。重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度。

2. 动态特性指标

动态特性反映传感器对随时间变化的激励(输入)的响应(输出)特性,如图 1.2.3 和图 1.2.4 所示。

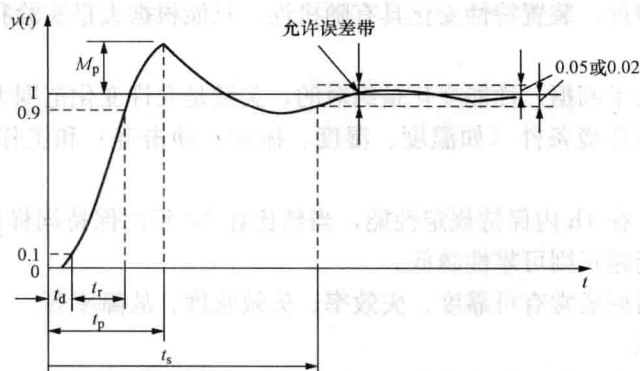


图 1.2.3 传感器典型阶跃响应曲线