

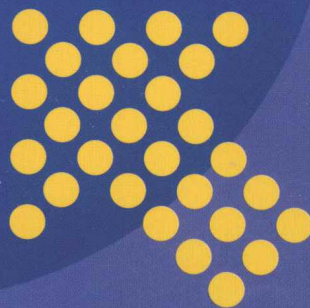
21世纪高等学校规划教材



CHUANGANQI YUANLI JI YINGYONG

传感器原理及应用

王桂荣 李宪芝 主 编
刘玉波 张洪鑫 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

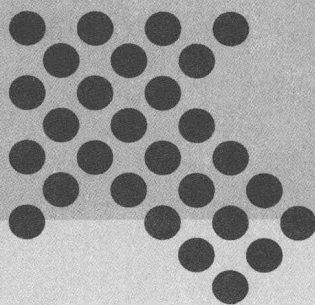
21世纪高等学校规划教材



CHUANGANQI YUANLI JI YINGYONG

传感器原理及应用

主 编 王桂荣 李宪芝
副主编 刘玉波 张洪鑫
编 写 马玉梅 李志刚 靳庆贵 禹永植
主 审 赵庆志



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书共 11 章。主要内容包括：传感器及其基本特性、电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光电传感器、常用其他新型传感器、智能传感器、传感器的标定与选用。

本书可作为高等学校相关专业传感器原理及应用课程的本科教材，也可供高职高专院校师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器原理及应用/王桂荣, 李宪芝主编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 5

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0410 - 9

I. ①传… II. ①王… ②李… 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 (2010) 第 082343 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](http://jc.cepp.com.cn))

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 500 千字

定价 33.00 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

随着现代科学技术的迅速发展,传感技术已经成为现代信息产业的三大支柱之一。传感器通过采集各种各样的信息,充当电子计算机、智能机器人及自动控制设备的五官,起着智能系统的感官作用。传感技术的空前发展,使得其应用领域不断深入,并带动了相关行业的技术进步。现在,传感技术广泛地应用于工业、农业、国防、航天、航海、医疗卫生行业。同时,随着大量新型传感器的问世,有必要在高等院校教材中加入传感器原理及应用的相关内容。

本书既保留了一些常用传感器的内容,又增加了新型传感器的原理和应用部分的内容。本书实用性强,从实践和应用角度出发,主要介绍了传感器及其基本特性、电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光电传感器、常用其他新型传感器、智能传感器、传感器的标定与选用。

本书编写分工如下:绪论、第一、四、十章由哈尔滨工程大学靳庆贵、李志刚编写,第二、三章由佳木斯大学李宪芝编写,第五、六章由黑龙江科技学院刘玉波编写,第七、八、九章由哈尔滨工程大学禹永植、马玉梅编写,第十一章由黑龙江科技学院王桂荣编写。初期校稿由哈尔滨理工大学张洪鑫担任。本书由王桂荣、李宪芝任主编,刘玉波、张洪鑫任副主编。

本书由山东理工大学机械工程学院赵庆志主审。审稿老师提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不妥或错漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2010年3月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 传感器及其基本特性	5
第一节 传感器的定义、组成及分类	5
第二节 传感器的基本特性	6
本章小结	21
习题与思考题	21
第二章 电阻应变式传感器	22
第一节 应变式传感器	22
第二节 应变式传感器的测量电路	29
第三节 压阻式传感器	36
第四节 应变式传感器的应用	42
本章小结	51
习题与思考题	51
第三章 电容式传感器	52
第一节 电容式传感器的工作原理与类型	52
第二节 电容式传感器的测量电路	61
第三节 电容式传感器的误差分析及补偿	66
第四节 电容式传感器的应用	70
本章小结	80
习题与思考题	80
第四章 电感式传感器	82
第一节 自感式传感器	82
第二节 差动变压器式传感器	92
第三节 电涡流式传感器	102
本章小结	111
习题与思考题	111
第五章 压电式传感器	113
第一节 压电效应与压电材料	113
第二节 压电传感器的等效电路和测量电路	122
第三节 引起压电式传感器测量误差的因素	127
第四节 压电传感器的应用	129
本章小结	134

习题与思考题	134
第六章 磁电式传感器	135
第一节 磁电感应式传感器	135
第二节 霍尔传感器	137
第三节 磁敏电阻器	145
第四节 磁敏二极管和磁敏三极管	148
第五节 磁电传感器的应用	153
本章小结	158
习题与思考题	158
第七章 热电式传感器	159
第一节 热电偶传感器	159
第二节 热电阻式传感器	177
第三节 半导体式热敏电阻	181
第四节 热电式传感器的应用	185
本章小结	188
习题与思考题	189
第八章 光电传感器	190
第一节 光电效应	190
第二节 光电器件及其特性	191
第三节 红外传感器	200
第四节 光纤传感器	208
本章小结	216
习题与思考题	217
第九章 常用其他新型传感器	218
第一节 气体传感器	218
第二节 湿敏传感器	226
第三节 超声传感器	235
第四节 超导传感器	246
第五节 仿生传感器	248
本章小结	251
习题与思考题	251
第十章 智能传感器	252
第一节 智能传感器概述	252
第二节 智能传感器的实现方式	254
第三节 智能传感器的应用	284
第四节 智能传感器的发展方向	286
本章小结	288
习题与思考题	288

第十一章 传感器的标定与选用	289
第一节 传感器的静态特性标定	289
第二节 传感器的动态特性标定	290
第三节 压力传感器的标定	294
第四节 传感器不失真测量的条件	307
第五节 传感器的选用	308
本章小结	318
习题与思考题	318
参考文献	319

绪 论

传感技术是以传感器敏感材料的电、磁、光、声、热、力等物理“效应”、化学“反应”以及生物“机理”作为理论基础,以研究传感器的材料、设计、制作、应用为主要内容,综合了物理学、微电子学、光学、化学、仿生学、材料学等方面的知识和技术而形成的一门综合性学科,是现代信息产业(传感技术、通信技术和计算机技术)的三大支柱之一。

传感器是一种能把特定的检测量信息(包括物理量、化学量、生物量等)按照一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。当今的“可用信号”是指便于处理和传输的电信号,因此,可把传感器定义为:能把外界非电信息按一定规律转换成与之有确定对应关系的电信号的输出器件或装置。

应当指出,这里所说的“可用输出信号”是指便于加工处理、便于传输利用的信号。现在电信号是最易于处理和便于传输的信号,因此,可以把传感器定义为:能把外界非电信息转换成电信号输出的器件。目前,光信息技术已经异军突起,可以预料,当人类跨入光子时代,光信息成为便于快速、高效地处理与传输的可用信号时,传感器的概念也许将随之发展成能把外界信息转换成光信号输出的器件。

当今社会是信息化社会,信息化社会离不开科技的发展。高科技的发展伴随着电脑、各类智能仪器、机器人的越来越广泛的应用。然而,智能仪器、电脑、机器人并不能直接感受及识别外界的信息,它们都需要必不可少的感觉器官,而充当它们感觉器官的就是传感器。传感器很像人体的五官,能感受外界的各种“刺激”,并做出及时的反应。因此,传感器又被人们称为“电五官”。实际上,目前一些传感器已经具有超出人类五官所能感知信息的功能。

一、传感器的重要性

1. 传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节

如果没有传感器对原始的各种参数进行准确可靠的测量,无论是信息转换与处理,还是最佳数据的显示与控制,都将成为一句空话。如果没有精确可靠的传感器,就没有精确可靠的自动检测和控制系统。近代微电子技术和计算机技术为信息的转换与处理提供了极其完善的手段,现代检测与控制系统正经历着重大的变革。但是,如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息,那么,电子计算机也无法充分发挥其应有的作用。

2. 传感器是航天、航海事业中不可缺少的器件

随着科学技术的发展,人类在不断探索宇宙空间的奥秘,不断进行海洋资源的开发利用。在现代飞行器上,装备着繁多的显示与控制系统,以确保各种飞行任务的顺利完成。然而在这些系统中,传感器首当其冲地对反映飞行器的参数、空间姿态、工作状态的各个物理量加以检测,并显示在显示设备上,以便操作者及时控制和正确操纵。航天飞机的机翼上仅温度传感器就多达几十个。

3. 传感器是机器人的重要组成部件

在工业机器人的控制系统中,要完成检测功能、操作与驱动功能、比较与判断功能,就

必须借助于两大类传感器：一类是检测机器人内部各部分状态的传感器，另一类是检测机器人与所操作的对象的关系和检测机器人与工作现场之间的状态的传感器。为了使机器人能从事更高级的作业，必须为机器人开发更精良的“电五官”——传感器。

4. 能源开发和能源合理利用离不开传感器

科学的进步、生产的发展，使能源的消耗总量不断增加，解决能源危机将成为当务之急。解决能源危机所采取的对策是开发新能源与合理利用能源。太阳能、风能、海洋能等是取之不尽、用之不竭的能源，要开发这些能源，就离不开传感器。合理利用能源就在于如何节约能源。节能技术是最佳运行、最佳控制技术。当然，这也是由传感器来实现的。汽车以汽油为动力，是世界上最大的能源消耗者之一。为了节能、防止污染、安全行驶掀起的汽车电子化运动，其实也是靠传感器来实现的。日本一辆高档汽车需要 40~60 个传感器，美国则更多达 90 多个传感器。

5. 传感器是产品定型、汽车试车、飞机试飞等的必要器件

某些产品的定型、汽车试车、飞机试飞等都需要大量的传感器。例如，飞机试飞就要用到静压传感器、总压传感器、俯仰角传感器、滚转角传感器、偏航角传感器、三相角速度传感器、三相过载传感器、振动加速度传感器、大气总温传感器、环控压力传感器、环控温度传感器、液冷流量传感器、液冷温度传感器、压差传感器、环境温度传感器、表面温度传感器、大气露点温度传感器、操纵力传感器、发动机压力传感器、油门杆角度传感器、润滑油温度传感器、发动机振动速度传感器、刹车压力传感器、脚蹬力传感器、油耗传感器、线位移传感器等几十种传感器。

6. 传感器在生物医学和医疗器械工程等方面的应用前景广泛

传感器将人体各种生理信息转换成工程上容易测定的量（一般都是将非电量转换成易于测量、处理的电量），从而正确地显示出人体生理信息。例如，体温的测量、癌症的诊治与控制都可借助传感器来完成。

7. 传感器已渗透到人类的日常生活之中

家用电器将把人们从繁忙的家务劳动中解放出来。例如，电子灶、电冰箱、洗衣机、电风扇、电熨斗等都是靠敏感器件来实现自动化的，煤气、液化气泄漏报警装置等都离不开传感器。

传感器在整个科学技术及人类生活中的重要性已越来越被更多的人所认识。对某些发达国家的调查说明，今后几年最引人注目的几项技术发展中，传感技术名列前茅。

目前，我国研制传感器的企业、研究所、大专院校有近千家，遍及全国各个省、市、自治区，但系列品种发展不均衡，推广应用的深度和广度还不够。可以相信，只要进一步统筹规划、突出重点、加强基础、扩大应用，我国的传感器技术必将获得迅猛发展，在不久的将来我国会有大量的传感器产品赶上和超过世界先进水平。

二、传感器的发展方向

1. 新材料将不断被开发

一种新效应的发现、一种新材料的开发，都将伴随着新传感器的设计和诞生。今后最有希望开发传感器的材料是陶瓷材料、有机材料、纳米材料等。近年来，功能型陶瓷材料发展迅速，在气敏、热敏、光敏传感器中得到广泛应用；有机材料是制造力敏、气敏、湿敏、光敏、离子敏等传感器的重要材料；光纤被制成压力、温度等传感器，这类传感器以光信号传

输代替电信号传输,具有耐高温、防爆、抗干扰等优点,这是由其他材料制成的传感器所不能比拟的。纳米技术是一门在纳米空间($0.1\sim 100\text{nm}$)内研究电子、原子和分子运动规律及特性,通过操作单原子、分子和原子团、分子团,以制造具有特定功能的材料或器件为最终目的的一门技术。纳米材料有两大效应:一个是粒子尺寸降到小于电子平均自由程时,能级分裂显著,这就是量子尺寸效应;另一个显著效应是表面效应,颗粒细化到一定的程度(100nm 以内)后,粒子表面上的原子所占的比例急剧增大,即表面体积比增大,当这些表面原子数量增加到一定程度后,材料的性能更多地由表面原子决定,而不是由材料的内部晶格中的原子决定,使之氧化还原能力增强,自身的催化活性更加活泼。大量存在晶粒界面缺陷,对材料性质有决定性作用。而且,粒子进一步细化,而使粒子内部发生位错和滑移,所以纳米材料的性能多由晶粒界面和位错等表面缺陷所控制,从而产生材料表面异常活性。因此,纳米材料是研制某些半导体传感器的良好材料。

另外,还有由生物材料构成的生物传感器。今后,人们将注重新效应材料的研究和开发,因为它们是制造新型传感器的基础。

2. 集成化、多功能

利用先进的 IC 技术和工艺,将敏感元件和放大电路、运算电路、温度补偿电路、线性补偿电路等制作在同一芯片上或制成混合式的传感器、阵列式的传感器。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。同一个传感器具有几种功能,不仅能检测一种信号,而且可以检测两种以上的信号,如压力—温度、温度—湿度等。

3. 智能化

智能化传感器使信息采集与信息的记忆、存储、综合、处理一体化。简言之,是传感器与外围电路、微机一体化。把微处理机技术引入传感器,可以使传感器实现过去实现不了的功能,具有智能本领,这就是新一代的传感器——智能传感器。以 Si 为中心的集成技术正在加速发展,把传感器、微处理机集成在同一芯片上就可实现单片智能传感器。

4. 充分利用微加工技术和新工艺

除利用机械加工法使传感器的制造精密化外,主要是将半导体的精密加工技术和新工艺应用到传感器制造上。传感器的基体若采用单晶硅,利用单晶硅具有各向异性的特性,使用不同的刻蚀液,去刻蚀不同的晶向材料,便形成了各种各样满足敏感元件要求的穴槽。

微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的应用为传感器注入了新的活力。在微电子技术基础上发展起来的硅和硅基 MEMS 技术,由于受到强大的集成电路工业的有力支持,以及微电子技术本身的强大生命力,近年来发展十分迅速。它们在 MEMS 压力传感器、加速度计等领域已显示了强大的威力。用它们来制作气敏传感器容易满足人们对气敏传感器集成化、智能化、多功能等的要求。许多气敏传感器的敏感性能和工作温度密切相关,因而,一般要同时制作加热元件和温度探测元件,以探测和监控温度。利用 MEMS 技术很容易将气敏元件和加热元件、温度探测元件制作在一起,保证了气敏传感器的优良性能。

此外,把静电封装、全固态封装技术应用到传感器中,可以使传感器体积减小,性能增强。

5. 不断向高稳定性、高可靠性、高精度发展

传感器处于信息系统的输入端,其性能和质量往往决定着整个信息系统的性能和质量。另外,传感器又工作在自然环境和工业现场,受温度、湿度、腐蚀、振动、电磁场等的影响和干扰,因此要求传感器只有良好的环境适应性。高稳定性、高可靠性是今后传感器发展的核心。

此外,高精度也是传感器发展的重要方面。对于一般常规的检测来说,传感器的精度为 $0.1\%\sim 1\%$,但对于那些高精度测量的场合,则需要测量精度达到 10^{-6} 以上。若想达到这样高的精度,就必须寻找其固有性质不随各种环境条件变化的物质。利用 MEMS 技术及量子效应等制作的传感器能达到高精度的要求。这一方面传感器的开发将随之兴起。

三、本课程的任务

本课程具有涉及学科范围广、综合性强的特点,通过对本课程的学习,要求达到以下几点。

- (1) 对传感技术有一个整体的认识。
- (2) 对各类传感器的机理、优缺点和应用有一定的了解。
- (3) 具有正确选择传感器的能力。
- (4) 对传感器和由传感器组成的检测系统有一定的分析能力。
- (5) 具备传感器实用电路的自学能力。

本书较详细地叙述了各类常用传感器的基本原理、特性,分析了传感器测量电路,讨论了传感器的一些典型应用。作者希望读者通过对本书的阅读和有关资料的学习,能受到一些启发,对科学研究中或工程设计中有关传感器技术的问题,提出合理的探讨和解决方案;对各类传感器,能够进行合理的选择;对传感器进行正确的使用。

由于传感器属于交叉学科,涉及的知识面较广,其原理主要基于各种物理、化学现象和物理、化学效应,而测量电路、信号处理电路是以模拟电路、数字电路为基础的。智能传感器还需要微机 and 程序设计的知识。如果要进行一些传感器的设计与制造,还应掌握电材料、工艺、误差理论等方面的知识。因此,扎实的理论基础和多学科的综合知识,是学习和研究传感器的保证。

第一章 传感器及其基本特性

第一节 传感器的定义、组成及分类

为了研究自然现象和制造劳动工具,人类仅靠五官获取外界信息已经远远不够,所以发明了能够代替或者补充五官功能的传感器。传感器的历史远比近代科学悠久,利用液体膨胀特性检测问题始于16世纪,19世纪奠定电磁学基础的法拉第物理法则仍是当今磁传感器的工作原理。对自然现象的定量认识,先要通过传感器获取信息,然后处理所获取的信息,弄清自然现象的本质。以电量为输出的传感器虽然历史不长,但是发展迅速,目前只要谈到传感器,几乎都是指有电输出的传感器。集成电路技术和半导体应用技术的发展使得传感器性能大大提高。

一、传感器的定义

关于传感器,至今尚无一个比较全面的定义。不过,对于以下提法,学者们似乎不持异议。传感器(transducer或sensor)有时也称为换能器、变换器、变送器或者探测器,主要特征是能感知和检测某一形态的信息,并将其转换成另一形态的信息。因此,传感器是指那些对被测对象某一确定的信息具有感受(或者响应)与检测功能,并且使之按照一定规律转换成与之对应的有用输出信号的元器件或者装置。这里的信息应该包括电量或者非电量。在很多场合,人们将传感器定义为敏感于待测非电量并可将其转换成与之对应的电信号的元件、器件或装置的总称。当然,将非电量转换为电信号并不是唯一的形式。例如,可以将一种形式的非电量转换成另一种形式的非电量(如将力转换成位移等);另外,从发展的眼光看,将非电量转换成光信号或许更为有利。

二、传感器的组成

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或机理,按照一定的工艺和结构研制出来的,因此传感器的组成细节有较大的差异。但是,总的来说,传感器应该由敏感元件、转换元件和其他辅助部件组成,如图1-1所示。

敏感元件是指传感器中能直接感受或者响应与检出被测对象的待测信息或非电量的部分,转换元件是指传感器中能将敏感元件所感受或者响应出的信息直接转换成电信号的部分。例如,应变式压力传感器由弹性膜片和电阻应变片组成,其中的弹性膜片就是敏感元件,它能够将压力转换成弹性膜片的应变变形;弹性膜片的应变施加在电阻应变片上,能将应变量转换成电阻的变化量,电阻应变片就是转换元件。

应该指出,并不是所有的传感器都必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量,它就同时兼为转换元件。因此,敏感元件和转换元件两者合一的传感器是很多的。例如,压电晶体、热电偶、热敏电阻、光电器件等都是这种形式的传感器。

信号调节电路是能把转换元件输出的电信号转换为便于实现、记录、处理

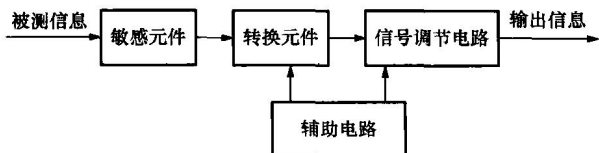


图 1-1 传感器组成框图

和控制的有用信号的电路。辅助电路通常包括电源，即交、直流供电系统。

三、传感器的分类

传感器的品种很多，原理各异，分类方法也不相同，归纳起来有以下几种。

(1) 按照传感器输出量的性质不同，分为模拟传感器和数字传感器。其中，数字传感器便于与计算机联用，并且抗干扰性强，如脉冲盘式角度数字传感器、光栅传感器等。传感器数字化是今后的发展趋势。

(2) 按照敏感材料不同，分为半导体传感器、陶瓷传感器、石英传感器、光导纤维传感器、金属传感器、有机材料传感器、高分子材料传感器等，按照这种方法可以分出很多类。

(3) 按照应用场合不同，分为工业用、农用、军用、科研用、环保用和家庭用传感器等。若按照具体使用场合不同，还可以分为汽车用、舰艇用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。此外，根据使用目的的不同，又可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

(4) 按照工作原理不同，分为电阻式、电容式、电感式、光栅式、热电式、压电式、红外、光纤、超声波、激光传感器等。这种分类有助于对传感器工作原理的阐述。

(5) 按照被测量不同，分为力学量、光学量、磁学量、几何学量、运动学量、流速与流量、液面、热学量、化学量、生物量传感器等。这种分类有助于人们选择和应用传感器。

第二节 传感器的基本特性

可通过两个基本特性，即传感器的静态特性和动态特性，来表征传感器性能的优劣。

所谓静态特性，是指当被测量的各个值处于稳定状态（静态测量之下）时，传感器的输出与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当一个传感器制成后，可用实际特性反映它在当时使用条件下具有的静态特性。借助实验的方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准。校准得到的静态特性称为校准特性。在校准使用了规范的程序和仪器后，工程上常将获得的校准曲线看做该传感器的实际特性。

所谓动态特性，是指当被测量随时间变化时，传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。

当测量某些随时间变化的参数时，只考虑传感器的静态性能指标是不够的，还要注意其动态性能指标。只有这样，才能使我们的检测和控制比较正确和可靠。

一个高质量的传感器，应具有良好的静态特性与动态特性，这样才能不失真地完成信号的转换。在选择合适而有效的传感器组建测量系统时，除了需要了解被测信号的特点外，还需要了解传感器的技术特性。本章针对工程测试的特点，研究传感器或测量系统的基本特性，并对动态误差的修正方法做初步探讨。

下面用图 1-2 所示方框图来描述传感器或测量系统的功能。图 1-2 中， $x(t)$ 表示输入量或称为激励， $y(t)$ 表示与其对应的输出量或称为响应， $h(t)$ 表示由此组件的物理性能决定的数学运算法则。图 1-2 表示输入量送入此组件后经过规定的传输特性 $h(t)$ 转变为输出

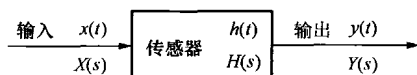


图 1-2 传感器的功能方块图

量。在有些书中将此方框图称为“黑盒子”，后者比前者具有更明显的哲学含义。它意味着，当把任一传感器表示成图 1-2 所示的方框时，关心的是其输入量和

输出量之间的数学关系，而不注重内部物理结构。基于此，本章首先假定传感器具有某种确定的数学功能，在此基础上研究给定的输入信号通过它转换成何种输出信号，进而研究传感器或测量系统应具有什么样的特征，输出信号才能如实地反映输入信号，实现不失真测量。

一般的工程测试问题总是处理输入量 $x(t)$ 、系统的传输转换特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系。若 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是可以观察的量，则通过 $x(t)$ 、 $y(t)$ 可推断传感器系统的传输特性或转换特性；若 $h(t)$ 已知， $y(t)$ 可测，则可通过 $h(t)$ 、 $y(t)$ 推断导致该输出的相应输入量 $x(t)$ ，这是工程测试中最常见的问题；若 $x(t)$ 、 $h(t)$ 已知，则可推断或估计系统的输出量 $y(t)$ 。

这里所说的系统，是指从测量输入量的环节到测量输出量的环节之间的整个系统，既包括测量对象，又包括测试仪器。

理想的传感器或测量系统应该具有单值的、确定的输入输出关系。其中，以输出和输入呈线性关系为最佳。在静态测量中，虽然传感器的这种线性关系是人们所希望的，但不是必需的，因为在静态测量中可用曲线校正或输出补偿技术做非线性校正；在动态测量中，传感器及后续仪器本身应该力求是线性系统，这不仅因为目前只有对线性系统才能做出比较完善的数学处理与分析，而且也因为目前在动态测试中，做非线性校正还相当困难。一些实际测试系统不可能在较大的工作范围内完全保持线性，因此，只能在一定的工作范围和在一一定的误差允许范围内作为线性处理。

严格地说，实际测量用传感器总是存在非线性因素，如许多电子器件都是非线性的。但在工程中常把传感器或测量系统作为线性系统来处理，这样，既能使问题得到简化，又能在足够精度的条件下获得实用的结果。

在动态测试系统中，线性系统常用线性微分方程来描述。设系统的输入为 $x(t)$ 、输出为 $y(t)$ ，则高阶线性测量系统可用高阶齐次常系数微分方程来描述：

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中： $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 为常数，与测量系统或传感器的结构特性、输入状况和测试点的分布等因素有关。

这种系统就称为时不变（或称定常）系统，其内部参数不随时间的变化而变化。信号的输出与输入和信号加入的时间无关，即若系统的输入延迟某一段时间 t_p ，则其输出也延迟相同的时间 t_p 。

一、传感器的静态特性

传感器的激励信号可能是常量，也可能是变量，对上述两类信号传感器的反应也各不相同。在测量过程中，传感器及相关调理电路也会产生固有运动，进行能量交换。例如，膜盒或波纹管的变形、水银的膨胀收缩、电路中电容器的充放电、继电器的开闭、测振仪的固有频率、模数转换器的转换及 CPU 的数据处理时间等，这些运动都会使被测信号在幅值和相位两方面发生变化。根据仪器固有运动的速度和被测信号的变化速度之间的相对大小，测量过程可分为静态测量与动态测量。

传感器的静态特性可用其激励与响应的稳定值之间的相互关系来表示，其数学模型为代

数方程、不含有时间变量 t 。常用的静态特性参数有灵敏度、量程、测量范围、线性度、准确度、分辨力与重复性, 还有漂移、死区、迟滞等。

1. 静态特性曲线

传感器的静态特性可以用一个多项式方程表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots \quad (1-2)$$

式 (1-2) 称为传感器的静态数学模型, 静态特性也可用一条曲线来表示, 该曲线称为传感器的静态特性曲线, 有时也称为静态校准曲线或静态标定曲线。传感器的静态特性曲线可分为正行程特性曲线、反行程特性曲线和平均特性曲线 (正行程、反行程特性曲线的平均), 一般都以平均特性曲线作为传感器的静态特性。

理想的情况是传感器响应和激励之间有线性关系, 这时数据处理最简单, 并且可与动态测量原理相衔接, 因为线性系统遵守叠加原理和频率不变性原理, 在动态测量中不会改变响应信号的频率结构, 造成波形失真。然而, 由于原理、材料、制作上的种种客观原因, 传感器的静态特性不可能是严格线性的。如果在传感器的特性方程中, 非线性的影响不大, 实际静态特性接近直线关系, 则常用一条参考直线来代替实际的静态特性曲线, 近似地表示响应—激励关系, 有时也将此参考直线称为传感器的工作直线。如果传感器的实际特性和工作直线关系相去甚远, 则常采取限制被测量的量程, 以确保传感器工作在线性范围内, 或者在仪器的结构或电路上采取线性化补偿措施, 如设计非线性放大器或采取软非线性修正等补偿措施。

选用参考直线有多种方案, 常用的有以下几种。

(1) 端点连线: 将静态特性曲线上对应于量程上、下限两点的边线作为工作直线。

(2) 端点平移线: 平行于端点连线, 且与实际静态特性 (常取平均特性为准) 的最大正偏差和最大负偏差的绝对值相等的直线。

(3) 最小二乘直线: 直线方程的形式为 $\hat{y} = a + bx$, 且对于各个标定点 (x_i, y_i) 偏差的平方和 $\sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$ 最小的直线。其中, a 、 b 为回归系数, 且 a 、 b 两系数具有物理意义。

(4) 过零最小二乘直线: 直线方程的形式为 $\hat{y} = bx$, 且对各标定点 (x_i, y_i) 偏差的平方和 $\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2$ 最小的直线。

2. 静态特性参数

(1) 灵敏度。灵敏度 k 是传感器在静态条件下输出量变化 Δy 和对应的输入量变化 Δx 的比值。如果激励和响应都是不随时间变化的常量 (或变化极慢, 在所观察的时间间隔内可近似为常量), 则式 (1-2) 中各个微分项均为零, 方程式可简化为

$$y = \frac{b_0}{a_0}x \quad (1-3)$$

理想的静态量测量传感器应具有单调、线性的输入输出特性, 其斜率为常数。在这种情况下, 传感器的灵敏度 k 就等于特性曲线的斜率, 即

$$k = \Delta y / \Delta x = y/x = b_0/a_0 = \text{const} \quad (1-4)$$

当特性曲线无线性关系时, 灵敏度的表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y / \Delta x = dy/dx \quad (1-5)$$

它表示单位被测量的变化引起的传感器输出值变化。

灵敏度是一个有因次的量，因此在讨论传感器的灵敏度时，必须确切地说明它的因次。例如，位移传感器被测位移的单位是 mm，输出量的单位是 mV，故位移传感器的灵敏度单位是 mV/mm。有些仪器的灵敏度表示方法和定义相反，例如记录仪及示波器的灵敏度常表示为 V/cm，而不是 cm/V。假如测量仪器的激励与响应为同一形式的物理量（如电压放大器），则常用“增益”这个名词来取代灵敏度的概念。上述定义与表示方法都是指绝对灵敏度。另一种实用的灵敏度表示方法是相对灵敏度，相对灵敏度 k_r 的定义为

$$k_r = \Delta y / (\Delta x / x) \quad (1-6)$$

式中 Δy ——输出量的变化；

$\Delta x / x$ ——输入量的相对变化。

相对灵敏度表示传感器输出变化量对于被测输入量相对变化量的变化率。在实际测量中，被测量的变化有大有小，在要求相同测量精度的条件下，被测量越小，则所要求的绝对灵敏度越高。但如果用相对灵敏度表示，则不管被测量的大小如何，只要相对灵敏度相同，测量精度也就相同。

传感器除了对有效被测量敏感之外，还可能对各种干扰量有反应，从而影响测量精度。这种对干扰量或影响量敏感的灵敏度称为有害灵敏度，在设计传感器时，应尽可能使有害灵敏度降到最低限度。

许多测量单元的灵敏度是由其物理属性或结构决定的。人们常常追求高灵敏度，但灵敏度和传感器的量程及固有频率等是相互制约的，应引起注意。

(2) 非线性。非线性通常也称为线性度，是指传感器的实际输入输出特性曲线对于理想线性输入输出特性的接近或偏离程度（见图 1-3）。它用实际输入输出特性曲线对理想线性输入输出特性曲线的最大偏差量与满量程输出值的百分比来表示，即

$$\delta_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 δ_L ——线性度；

Y_{FS} ——满量程输出；

$\Delta L_{\max}$ ——最大偏差。

由式 (1-7) 可知， δ_L 越小，传感器的线性越好。实际工作中经常会遇到非线性较为严重的系统，此时，可以限制测量范围、采用非线性拟合或非线性放大器等技术措施来提高传感器的线性。

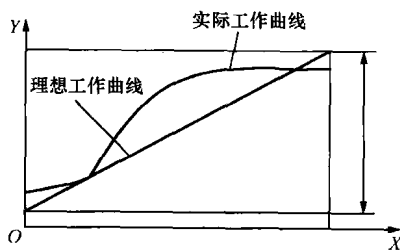


图 1-3 线性度示意图

(3) 迟滞性。亦称滞后量、滞后或回程误差，表征传感器在全量程范围内，输入量由小到大（正行程）或由大到小（反行程）两者静态特性不一致的程度，如图 1-4 所示。迟滞误差在数值上是用各标定点中的最大迟滞偏差 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比的百分率表示，即

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——各标定点上正、反行程输出平均值之间的最大偏差。

(4) 重复性。重复性表示传感器在同一工作条件下, 按同一方向作全量程多次 (3 次以上) 测量时, 对于同一个激励量其测量结果的不一致程度, 如图 1-5 所示。重复性误差为随机误差, 引用误差表示形式为

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 ΔR ——同一激励量对应多次循环的同向行程响应量的绝对误差。

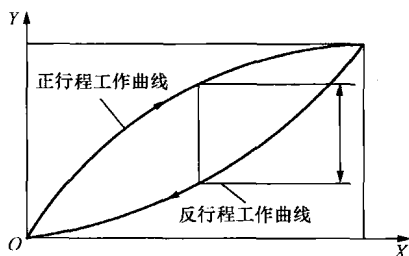


图 1-4 迟滞示意图

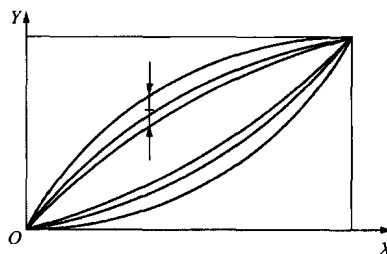


图 1-5 重复性示意图

重复性是指标定值的分散性, 是一种随机误差, 可以根据标准偏差来计算 ΔR :

$$\Delta R = K\sigma \quad (1-10)$$

式中 σ ——标准偏差;

K ——置信因子, $K=2$ 时置信度为 95%, $K=3$ 时置信度为 99.73%。

标准偏差 σ 的计算可按下述方法进行。

按贝塞尔公式计算各标定点的标准偏差:

$$\sigma_{jD} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiD} - \bar{y}_{jD})^2} \quad (1-11)$$

$$\sigma_{jI} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiI} - \bar{y}_{jI})^2} \quad (1-12)$$

式中 σ_{jD} 、 σ_{jI} ——正、反行程各标定点响应量的标准偏差;

j ——标定点序号, $j=1, 2, 3, \dots, n$;

i ——标定的循环次数, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

$\bar{y}_{jD}$ 、 $\bar{y}_{jI}$ ——正、反行程各标定点响应量的平均值;

y_{jiD} 、 y_{jiI} ——正、反行程各标定点输出值。

若假设整个测量范围内, 正、反行程的测量过程是等精度的, 即正行程的子样标准偏差和反行程的子样标准偏差具有相等的数学期望, 则可以用式 (1-13) 来计算整个测试过程的标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^m \sigma_{jI}^2 + \sum_{j=1}^m \sigma_{jD}^2 \right) \frac{1}{2m}} \quad (1-13)$$

也可以利用 m 个标定点的正、反行程子样标准偏差中的最大值, 即式 (1-14) 来计算整个测试过程的标准偏差:

$$\sigma = \max(\sigma_{jD}, \sigma_{jI}) (j=1, 2, 3, \dots, m) \quad (1-14)$$

(5) 分辨力。分辨力 (又称为分辨率) 是指传感器能测量到输入量最小变化的能力, 即能引起响应量发生变化的最小激励变化量, 用 Δx 表示。由于传感器或测量系统在全量程范