

CHUANGANQIYUANLITUDIANCEJISHU

传感器原理及检测技术

● 王 君 凌振宝 编



吉林大学
出版社

传感器原理及检测技术

王 君 凌振宝 编

吉林大学出版社

内 容 简 介

本教材主要讲述物理量检测中所使用的传感器,主要内容为各种传感器的工作原理、传感器的结构、主要参数、检测电路及其典型应用。

本教材共分为九章:第一章绪论,论述了传感器的地位和作用、定义、分类、发展趋势、选用原则、一般特性等一些基础知识。第二章至第六章分别介绍了磁敏传感器、温度传感器、光电传感器、力敏传感器和一些其他类型的传感器。第七章介绍了多传感器信息融合技术。第八章介绍了传感器与处理电路接口所需的检测电路,讨论了各种放大器电路。第九章介绍了现代检测系统。本教材适用于本科测控技术与仪器、电子信息工程、电气工程及其自动化等专业使用。也可供相关专业的教师、学生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及检测技术/凌振宝编著. —长春:吉林大学出版社, 2003. 9
ISBN 7—5601—2925—0

I . 传… II . 凌… III . 传感器—高等学校—教材
IV . TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 077156 号

传感器原理及检测技术

王 君 凌振宝编

责任编辑、责任校对: 唐万新

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市明德路 3 号)

吉林大学出版社发行
吉林农业大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16

2003 年 9 月第 1 版

印张: 23.375

2003 年 9 月第 1 次印刷

字数: 490 千字

印数: 1—3000 册

ISBN 7—5601—2925—0/TN·17

定价: 36.00 元

前 言

本教材是根据吉林大学“十五”教材规划立项而编写的。

随着科学技术的发展,传感器技术越来越备受重视,广泛应用在日常生活、航空、航天、交通运输、机械制造、化工、轻工、生物医学工程、自动化检测工程及计量等各领域。未来社会是信息社会,而信息技术的三大基础是信息的采集、传输和信息的处理,也就是传感器技术、通讯技术和计算机技术。传感器技术已成为信息技术发展的瓶颈问题,因此,目前传感器技术在日、美、俄等发达国家及我国都被列为重点发展技术。

考虑到专业课程设置的安排和传感器的特殊性,在本教材中加入了检测技术方面的内容,所以将其定名为《传感器原理及检测技术》。

本课程的前身《传感器原理》曾被学校评为一类课,获长春科技大学教学一等奖,1993年和1996年分别由地质出版社出版了“八五”规划教材和配套的音像教材。本教材是在2002年校内教材的基础上整理编写的。

本教材主要讲述物理量检测中所使用的传感器,主要内容为各传感器的工作原理、传感器的结构、主要参数、检测电路、典型应用及检测技术。

本教材共分为九章:第一章绪论,论述了传感器的地位和作用、定义、分类、发展趋势、选用原则、一般特性等一些基础知识;第二章至第六章分别介绍了磁敏传感器、温度传感器、光电传感器、力敏传感器和其他类型的传感器;第七章介绍了多传感器融合信息技术;第八章介绍了传感器处理电路接口所需的检测电路,讨论了各种放大器电路;第九章介绍了现代检测系统,使读者对传感器技术与检测技术的现状和未来发展有全面的了解。

本教材的特色在于:第一,将传感器及检测技术有机地结合在一起,使学生能够更全面地学习和掌握传感器工作原理、信号采集、信号变换、信号处理及信号传输的整个过程;第二,在所介绍的传感器中,对不同种类的磁敏传感器结合其应用做了较为详细的介绍;第三,与本教材配套有《传感器原理及检测技术——实验指导书与习题集》一书,使学生更容易学习和掌握本课程的内容。

本教材适用于本科测控技术与仪器、电子信息工程、电气工程与自动化等专业使用。也可供相关专业的教师、学生及工程技术人员参考。

参加本教材编写工作的有吉林大学的王君、凌振宝;长春理工大学的刘智参与第四章的部分内容编写。刘希芳教授对本教材的整体结构和内容进行了深入细致的审阅,并提出了宝贵的修改意见。本教材在编写过程中参阅和引用了大量有关文献和教材。在此,谨向这些参考资料的作者和所有给予本教材以帮助的人表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者予以指正并提出修改意见。

编 者

于吉林大学科学仪器系

2002年12月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 传感器的地位和作用	(1)
第二节 传感器的定义	(1)
第三节 传感器的组成	(2)
第四节 传感器的分类	(3)
第五节 传感器的发展趋势	(4)
第六节 传感器的选用原则	(9)
第七节 传感器的一般特性	(10)
第二章 磁敏传感器	(20)
第一节 质子旋进式磁敏传感器	(20)
第二节 光泵式磁敏传感器	(29)
第三节 SQUID 磁敏传感器	(42)
第四节 磁通门式磁敏传感器	(55)
第五节 感应式磁敏传感器	(64)
第六节 半导体磁敏传感器	(70)
第七节 机械式磁敏传感器	(94)
第三章 温度传感器	(97)
第一节 概论	(97)
第二节 热电偶温度传感器	(102)
第三节 热敏电阻温度传感器	(113)
第四节 IC 温度传感器	(123)
第五节 其他温度传感器	(130)
第四章 光电传感器	(136)
第一节 概述	(136)
第二节 外光电效应器件	(144)
第三节 内光电效应器件	(147)
第四节 其他光电传感器	(160)
第五节 光电传感器的应用举例	(165)
第五章 力敏传感器	(171)
第一节 应变式传感器	(171)
第二节 电感式传感器	(195)
第三节 电容式传感器	(223)
第四节 压电式传感器	(234)
第六章 其他种类的传感器	(251)
第一节 光纤传感器	(251)
第二节 气敏传感器	(267)

第三节 湿度传感器.....	(278)
第七章 多传感器信息融合技术.....	(291)
第一节 概述.....	(291)
第二节 传感器信息融合的分类和结构.....	(292)
第三节 传感器信息融合的一般方法.....	(295)
第四节 传感器信息融合的实例.....	(298)
第八章 检测电路.....	(302)
第一节 电压和电流放大电路.....	(302)
第二节 测量电桥及其放大电路.....	(310)
第三节 低漂移直流放大器.....	(312)
第四节 高输入阻抗放大器.....	(328)
第五节 低噪声放大电路.....	(336)
第九章 现代检测系统.....	(346)
第一节 计算机检测系统的基本组成.....	(346)
第二节 总线技术.....	(351)
第三节 虚拟仪器.....	(359)
第四节 网络化检测仪器.....	(363)
参考文献.....	(367)

第一章 绪 论

第一节 传感器的地位和作用

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.因此可以说,传感器是人类五官的延长,又称之为电五官.

新技术革命的到来,世界开始进入信息时代.在利用信息的过程中,首先要解决的就是要获取准确可靠的信息,而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.

在基础学科研究中,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,纵向上要观察长达数十万年的天体演化,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,往往会导致该领域内的突破.一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱.

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、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.由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用,是十分明显的.世界各国都十分重视这一领域的发展.相信不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平.

第二节 传感器的定义

我国国家标准(GB7665-87)中对传感器(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(被测信息)转换为与它有确定对应关系的、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、显示等等,这种量可以是气、光、电物理量,但主要是

电物理量；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出去。

第三节 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，组成框图见图 1.3-1。

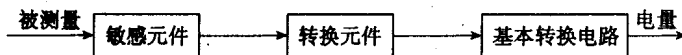


图 1.3-1 传感器组成框图

敏感元件：它是直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。图 1.3-2 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芯 4 相连，磁芯 4 置于两个电感线圈 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 1.3-2 中，转换元件是可变电感线圈 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。

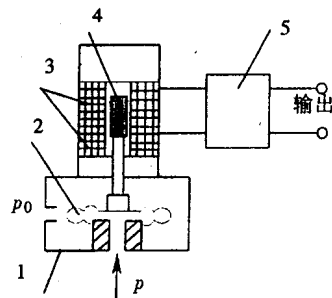


图 1.3-2 气体压力传感器

1——壳体，2——膜盒，3——电感线圈，
4——磁芯，5——转换电路

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 1.3-3 所示，两种不同的金属材料 A 和 B，一端联接在一起，放在被测温度为 T 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。

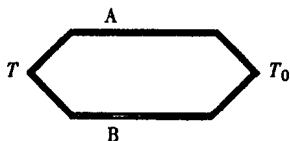


图 1.3-3 热电偶

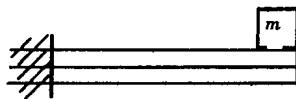


图 1.3-4 压电式加速度传感器

有些传感器由敏感元件和转换元件组成。如图 1.3-4 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是组装在一起的,而转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起,不过由于空间的限制或者其他原因,转换电路常装入电箱中.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.

第四节 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的行业,它与许多学科有关,它的种类十分繁多.为了很好地掌握它、应用它,需要有一个科学的分类方法.

下面将目前广泛采用的分类方法作一简单介绍.

首先,按传感器的工作机理,可分为物理型、化学型、生物型等.

本课程主要讲授物理型传感器.在物理型传感器中,作为传感器工作物理基础的基本定律有场的定律、物质定律、守恒定律和统计定律等.

其次,按构成原理,可分为结构型与物性型两大类.

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.对于传感器来说,这些方程式也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是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础.

物性型传感器是利用物质定律构成的,如虎克定律、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.例如,光电管就是物性型传感器,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、合金等性能变化的传感器,都属于物性型传感器.

此外,也有基于守恒定律和统计定律的传感器,但为数较少.

第三,根据传感器的能量转换情况,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,在信息变化过程中,其能量需要外电源供给.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.

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.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.

第四,按照物理原理分类,可分为

- (1) 电参量式传感器.包括电阻式、电感式、电容式等三个基本型式.
- (2) 磁电式传感器.包括磁电感应式、霍耳式、磁栅式等.
- (3) 压电式传感器.
- (4) 光电式传感器.包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式、摄像式等.
- (5) 气电式传感器.
- (6) 热电式传感器.

- (7) 波式传感器. 包括超声波式、微波式等.
- (8) 射线式传感器.
- (9) 半导体式传感器.
- (10) 其他原理的传感器等.

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.

第五, 可以按照传感器的用途来分类, 例如位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等.

另外, 根据传感器输出是模拟信号还是数字信号, 可分为模拟传感器和数字传感器; 根据转换过程可逆与否, 可分为双向传感器和单向传感器.

第五节 传感器的发展趋势

传感器在科学技术领域、工农业生产以及日常生活中发挥着越来越重要的作用. 人类社会对传感器提出的越来越高的要求是传感器技术发展的强大动力. 而现代科学技术突飞猛进则提供了坚强的后盾.

纵观几十年来的传感技术领域的发展, 不外乎分为两个方面: 一是提高与改善传感器的技术性能; 二是寻找新原理、新材料、新工艺及新功能等.

一、改善传感器的性能采取的技术途径

1. 差动技术

差动技术是传感器中普遍采用的技术. 它的应用可显著地减小温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响, 抵消了共模误差, 减小非线性误差等. 不少传感器由于采用了差动技术, 还可使灵敏度增大.

2. 平均技术

在传感器中普遍采用平均技术用以产生平均效应, 其原理是利用若干个传感单元同时感受被测量, 其输出则是这些单元输出的平均值, 若将每个单元可能带来的误差均可看作随机误差且服从正态分布, 根据误差理论, 总的误差将减小为

$$\delta_z = \pm \delta / \sqrt{n}$$

式中: n 为传感单元数.

可见, 在传感器中利用平均技术不仅可使传感器误差减小, 且可增大信号量, 即增大传感器灵敏度.

光栅、磁栅、容栅、感应同步器等传感器, 由于其本身的工作原理决定有多个传感单元参与工作, 可取得明显的误差平均效应的效果. 这也是这一类传感器固有的优点. 另外, 误差平均效应对某些工艺性缺陷造成的误差同样起到弥补作用. 在懂得这种道理之后, 设计时在结构允许情况下, 适当增多传感单元数, 可收到很好的效果. 例如圆光栅传感器, 若让全部栅线都同时参与工作, 设计成“全接收”形式, 误差平均效应就可较充分地发挥出来.

3. 补偿与修正技术

补偿与修正技术在传感器中得到了广泛的应用. 这种技术的运用大致是针对下列两种情况. 一种是针对传感器本身特性, 另一种是针对传感器的工作条件或外界环境.

对于传感器特性,可以找出误差的变化规律,或者测出其大小和方向,采用适当的方法加以补偿或修正。

针对传感器工作条件或外界环境进行误差补偿,也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感,由于温度变化引起的误差十分可观。为了解决这个问题,必要时可以控制温度,搞恒温装置,但往往费用太高,或使用现场不允许。而在传感器内引入温度误差补偿又常常是可行的。这时应找出温度对测量值影响的规律,然后引入温度补偿措施。

在激光式传感器中,常常把激光波长作为标准尺度,而波长受温度、气压、湿度的影响,在精度要求较高的情况下,就需要根据这些外界环境情况进行误差修正才能满足要求。

补偿与修正,可以利用电子线路(硬件)来解决,也可以采用微型计算机通过软件来实现。

4. 屏蔽、隔离与干扰抑制

传感器大都要在现场工作,现场的条件往往是难以充分预料的,有时是极其恶劣的。各种外界因素要影响传感器的精度与各有关性能。为了减小测量误差,保证其原有性能,就应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。其方法归纳起来有二:一是减小传感器对影响因素的灵敏度;二是降低外界因素对传感器实际作用的程度。

对于电磁干扰,可以采用屏蔽、隔离措施,也可用滤波等方法抑制。对于如温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射、甚至气流等,可采用相应的隔离措施,如隔热、密封、隔振等,或者在变换成为电量后对干扰信号进行分离或抑制,减小其影响。

5. 稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的器件,其稳定性显得特别重要,其重要性甚至胜过精度指标,尤其是对那些很难或无法定期标定的场合。

造成传感器性能不稳定的原因是:随着时间的推移和环境条件的变化,构成传感器的各种材料与元器件性能将发生变化。

为了提高传感器性能的稳定性,应该对材料、元器件或传感器整体进行必要的稳定性处理。如永磁材料的时间老化、温度老化、机械老化及交流稳磁处理、电气元件的老化筛选等。

在使用传感器时,若测量要求较高,必要时也应对附加的调整元件、后续电路的关键元器件进行老化处理。

二、传感器的发展动向

1. 开发新型传感器

新型传感器,大致应包括:①采用新原理;②填补传感器空白;③仿生传感器等诸方面。它们之间是互相联系的。

传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。结构型传感器发展得较早,目前日趋成熟。结构型传感器,一般说它的结构复杂,体积偏大,价格偏高。物性型传感器大致与之相反,具有不少诱人的优点,加之过去发展也不够。世界各国都在物性型传感器方面投入大量人力、物力加强研究,从而使它成为一个值得注意的发展动向。其中利用量子力学诸效应研制的低灵敏阈传感器,用来检测微弱的信号,是发展新动向之一。例如:利用核磁共振吸收效应的磁敏传感器,可将灵敏阈提高到地磁强度的 10^{-7} ;利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器,可测 10^{-6}K 的超低温;利用光子滞后效应,做出了响应速度极快的红外传感器等。此外,利用化学效应和生

物效应开发的、可供实用的化学传感器和生物传感器,更是有待开拓的新领域。

大自然是生物传感器的优秀设计师和工艺师。它通过漫长的岁月,不仅造就了集多种感官于一身的人类,而且还构造了许多功能奇特、性能高超的生物感官。例如狗的嗅觉(灵敏阈为人的 10^{-6})、鸟的视觉(视力为人的8~50倍),蝙蝠飞蛾海豚的听觉(主动型生物雷达——超声波传感器)等等。这些动物的感官功能,超过了当今传感器技术所能实现的范围。研究它们的机理,开发仿生传感器,也是引人瞩目的方向。

2. 开发新材料

近年来对传感器材料的开发研究有较大进展,用复杂材料来制造性能更加良好的传感器是今后的发展方向之一。

(1) 半导体敏感材料。半导体敏感材料在传感器技术中具有较大的技术优势,在今后相当长时间内仍占主导地位。半导体硅是制作力敏、热敏、光敏、磁敏、气敏、离子敏及其他敏感元件的主要材料。

硅材料可分为单晶硅、多晶硅和非晶硅。单晶硅最简单,非晶硅最复杂。单晶硅内的原子处处规则排列,整个晶体内有1个固定晶向;多晶硅是由许多单晶颗粒构成,每一单晶颗粒内的原子处处规则排列,单晶颗粒之间以界面相分离,且各单晶颗粒晶向不同,故整个多晶硅并无固定的晶向。

用这三种材料都可制成压力传感器,这些压力传感器大致可分为4种形式,即压阻式、电容式、MOS式和薄膜式。目前压力传感器仍以单晶硅为主,但有向多晶和非晶硅的薄膜方向发展的趋势。

蓝宝石上外延生长单晶硅膜是单晶硅用于敏感元件的典型应用。由于绝缘衬底蓝宝石是良好的弹性材料,而在其上异质结外延生长的单晶硅是制作敏感元件的半导体材料,故用这种材料研制的传感器具有无需P-N结隔离、耐高温、高频响、长寿命、可靠性好等优点,可以制作磁敏、热敏、离子敏、力敏等敏感元件。

多晶硅压力传感器的发展十分引人注目。这是由于这种传感器具有一系列优点,如温度特性好、制造容易、易小型化、成本低等。

非晶硅应用于传感器,主要有应变传感器、压力传感器、热电传感器、光传感器(如图像传感器和颜色传感器)等。非晶硅由于具有光吸收系数大,可用作薄膜光电器件,对整个可见光区域都敏感,薄膜形成温度低($200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)等极为诱人的特性而获得迅速发展。

用金属材料和非金属材料结合成化合物半导体是另一个思路。目前不仅用金属Ga和非金属As合成了GaAs,而且制成了许多化合物半导体,形成了一个庞大的家族。GaAs发光效率高、耐高温、抗辐射、电子迁移率比Si大5~6倍,故可制成高频率器件。GaAs在光敏、磁敏中得到越来越多的应用。例如采用炉内合成生长GaAs单晶,重复性均匀性有较大提高,再采用离子注入技术,可制成性能优良的霍尔器件,线性误差为0.2%,霍尔电势温度系数为 $3\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。

在半导体传感器中,场效应晶体管FET的应用令人瞩目。FET是一种电压控制器件。若在栅极上加一反向偏压,偏压的大小可控制漏极电流的大小。若能用某种敏感材料将所要测量的参量以偏压的方式加到栅极上,就可以从漏极电流或电压的数值来确定该参量的大小。FET很容易系列化、集成化。可做成各种敏感场效应晶体管,如离子敏场效应晶体管(ISFET)、PH-FET、温度-FET、湿度-FET、气敏-FET等。

(2) 陶瓷材料。陶瓷敏感材料在敏感技术中具有较大的技术潜力。陶瓷材料可分为很多

种.具有电功能的陶瓷又叫电子陶瓷.电子陶瓷可分为绝缘陶瓷、压电陶瓷、介电陶瓷、热电陶瓷、光电陶瓷和半导体陶瓷.这些陶瓷在工业测量方面都有广泛的应用.其中以压电陶瓷、半导体陶瓷应用最为广泛.陶瓷敏感材料的发展趋势是继续探索新材料,发展新品种,向高稳定性、高精度、长寿命和小型化、薄膜化、集成化和多功能化方向发展.

半导体陶瓷是传感器应用常用材料,尤其以热敏、湿敏、气敏、电压敏最为突出.热敏陶瓷的主要发展方向是高温陶瓷,如添加不同成分的 BaTiO_3 、 ZrO_2 、 $\text{Mg}(\text{AlCrFe})_2\text{O}_4$ 和 $\text{ZnO-TiO}_2\text{-NiO}_2$ 等,湿敏材料的主要发展方向是不需要加热清洗的材料,气敏陶瓷的主要发展方向是不使用催化剂的低温材料和高温材料,电压敏陶瓷材料的发展方向是低压用材料 and 高压用材料,如 ZnO-TiO_2 为低压用材料,而 $\text{ZnO-Sb}_2\text{O}_3$ 为高压用材料.

陶瓷敏感材料在使用时的结构形式也是各种各样的.以陶瓷湿敏传感器为例,可以是体型结构、厚膜型结构、薄膜结构或涂覆型结构等.

(3) 磁性材料.不少传感器采用磁性材料.目前磁性材料正向非晶化、薄膜化方向发展.非晶磁性材料具有磁导率高、矫顽力小、电阻率高、耐腐蚀、硬度大等特点,因而将获得越来越广泛的应用.

由于非晶体不具有磁的各向同性,因而是一种高磁导率和低损耗的材料,很容易获得旋转磁场,而且在各个方向都可得到高灵敏度的磁场,故可用来制作磁力计或磁通敏感元件,也可利用应力-磁效应制得高灵敏度的应力传感器,基于磁致伸缩效应的力敏元件也得到发展.

由于这类材料灵敏度比坡莫合金高几倍,这就可大大降低涡流损耗,从而获得优良的磁特性,这对高频更为可贵.利用这一特点,可以制造出用磁性晶体很难获得的快速响应型传感器.

(4) 智能材料.智能材料是指设计和控制材料的物理、化学、机械、电学等参数,研制出生物体材料所具有的特性或者优于生物体材料性能的人造材料.

有人认为,具有下述功能的材料可称之为智能材料:具备对环境的判断可自适应功能;具备自诊断功能;具备自修复功能;具备自增强功能(或称时基功能).

生物体材料的最突出特点是具有时基功能,因此这种传感器特性是微分型的,它对变化部分比较敏感.反之,长期处于某一环境并习惯了此环境,则灵敏度下降.一般说来,它能适应环境调节其灵敏度.除了生物体材料外,最引人注目的智能材料是形状记忆合金、形状记忆陶瓷和形状记忆聚合物.

智能材料的探索工作刚刚开始,相信不久的将来会有很大的发展.

3. 新工艺的采用

在发展新型传感器中,离不开新工艺的采用.新工艺的含义范围很广,这里主要指与发展新型传感器联系特别密切的微细加工技术.该技术又称微机械加工技术,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,例如溅射、蒸镀、等离子体刻蚀、化学气体淀积(CVD)、外延、扩散、腐蚀、光刻等,迄今已有大量采用上述工艺制成的传感器的国内外报道.

以应变式传感器为例.应变片可分为体型应变片、金属箔式应变片、扩散型应变片和薄膜应变片,而薄膜应变片则是今后的发展趋势,这主要是由于近年来薄膜工艺发展迅速,除采用真空淀积、高频溅射外,还发展了磁控溅射.等离子体增强化学汽相淀积、金属有机化

合物化学汽相淀积、分子束外延、光 CVD 技术, 这些对传感器的发展起了很大推动作用。如目前常见的溅射型应变计, 是采用溅射技术直接在应变体(即产生应变的柱梁、振动片等弹性体)上形成的。这种应变计厚度很薄, 大约为传统的箔式应变计的 1/10 以下, 故又称薄膜应变计。溅射型应变计的主要优点是: 可靠性好, 精度高, 容易做成高阻抗的小型应变计, 无迟滞和蠕变现象, 具有良好的耐热性和耐冲击性能等。

用化学气相淀积法制备薄膜, 以其成膜温度低($50 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)、可靠性好、系统简单等优点而发展很快, 在制备多晶硅微晶硅传感器方面有许多报道。

硅杯是力敏元件中非常重要的结构。目前已极少采用机械方法加工硅杯, 而改为可控的化学腐蚀方法。化学腐蚀方法可做到工艺稳定, 硅杯尺寸很小, 膜片均匀度很高, 结构从 C 形、E 形发展到梁膜式, 性能和生产率都有很大提高。

4. 集成化、多功能化与智能化

传感器集成化包括两种含义: 一是同一功能的多元件并列化, 即将同一类型的单个传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来, CCD 图像传感器就属于这种情况; 集成化的另一个含义是多功能一体化, 即将传感器与放大、运算以及温度补偿等环节一体化, 组装成一个器件。

目前, 各类集成化传感器已有许多系列产品, 有些已得到广泛应用。集成化已经成为传感器技术发展的一个重要方向。

随着集成化技术的发展, 各类混合集成和单片集成式压力传感器相继出现, 有的已经成为商品。集成化压力传感器有压阻式、电容式、MOSFET 等类型, 其中压阻式集成化传感器发展快、应用广。自从压阻效应发现后, 有人把 4 个力敏电阻构成的全桥做在硅膜上, 就成为一个集成化压力传感器。国内在 80 年代就研制出了把压敏电阻、电桥、电压放大器和温度补偿电路集成在一起的单块压力传感器, 其性能与国外同类产品相当。由于采用了集成工艺, 将压敏部分和集成电路分为几个芯片, 然后混合集成为一体。提高了输出性能及可靠性, 有较强的抗干扰能力, 完全消除了二次仪表带来的误差。

70 年代国外就出现了集成温度传感器, 它基本上是利用晶体管作为温度敏感元件的集成电路。其性能稳定, 使用方便, 温度范围在 $-40 \sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。国内在这方面也有不少进展, 例如近年来研制集成热电堆红外传感器等。集成化温度传感器具有远距离测量和抗干扰能力强等优点, 具有很大的实用价值。

传感器的多功能化也是其发展方向之一。所谓多功能化的典型实例, 美国某大学传感器研究发展中心研制的单片硅多维力传感器可以同时测量 3 个线速度, 3 个离心加速度(角速度)和 3 个角加速度。主要元件是由 4 个正确设计安装在一个基板上的悬臂梁组成的单片硅结构, 9 个正确布置在各个悬臂梁上的压阻敏感元件。多功能化不仅可以降低生产成本, 减小体积, 而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等性能指标。

为同时测量几种不同被测参数, 可将几种不同的传感器元件复合在一起, 作成集成块。例如一种温、气、湿三功能陶瓷传感器已经研制成功。

把多个功能不同的传感元件集成在一起, 除可同时进行多种参数的测量外, 还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价, 可反映出被测系统的整体状态。由上还可以看出, 集成化给固态传感器带来了许多新的机会, 同时它也是多功能化的基础。

传感器与微处理机相结合, 使之不仅具有检测功能, 还具有信息处理、逻辑判断、自诊断以及“思维”等人工智能, 就称之为传感器的智能化。借助于半导体集成化技术把传感器部

分与信号预处理电路、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,它的实现将取决于传感技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展.这类传感器具有多功能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点,可以肯定地说,是传感器重要的发展方向之一.

智能传感器又叫灵巧(Smart)传感器.这一概念最早是由美国宇航局在开发宇宙飞船过程中提出来的.飞船上天后需要知道其速度、位置、姿态等数据.为使宇航员能正常生活,需要控制舱内的温度、湿度、气压、加速度、空气成分等.为了进行科学考察,需要进行各种测试工作.所有这些都需要大量的传感器.众多传感器获得的大量数据需要处理,显然在飞船上安放大型电子计算机是不合适的.为了不丢失数据,又要降低费用,提出了分散处理这些数据的方法.即传感器获得的数据自行处理,只送出必要的少量数据.由此可见,智能传感器是电五官与微电脑的统一体,对外界信息具有检测、数据处理、逻辑判断、自诊断和自适应能力的集成一体化多功能传感器,这种传感器还具有与主机互相对话的功能,也可以自行选择最佳方案.它还能将已获得的大量数据进行分割处理,实现远距离、高速度、高精度传输等.

第六节 传感器的选用原则

由于传感器技术的研究和发展非常迅速,各种各样的传感器应运而生,这对选用传感器带来了很大的灵活性.根据前面的介绍,对于同种被测物理量,可以用各种不同的传感器测量,为了选择适合于测定目的的传感器,有必要讨论传感器的正确选择,并定出几条选用传感器的准则.虽然,在传感器选择时应考虑的事项很多,但不必都要一一加以考虑,根据传感器实现使用的目的、指标、环境条件和成本等限制条件,从不同的侧重点,优先考虑几个重要的条件就可以了.例如,测量某一对象的温度适应性,要求适应 $0 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度范围,测量精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,且要多点(128点)测量,那么选用何种温度传感器呢?能胜任这一要求的温度传感器有:各种热电偶、热敏电阻、半导体 PN 结温度传感器、IC 温度传感器等,它们都能满足测量范围、精度等条件.在这种情况下,我们侧重考虑成本低,测量电路、相配设备是否简单等因素进行取舍.相比之下选用半导体结(PN)温度传感器最为恰当.倘若上述测量范围为 $0 \sim 400^{\circ}\text{C}$,其他条件不变,此时只能选用热电偶中的镍铬-考铜或铁-康铜等热电偶.又如,需要长时间连续使用传感器时,就必须重点考虑那些经得起时间变化等方面长期稳定性好的传感器;而对化学分析等时间比较短的测量过程,则需要考虑灵敏度和动态特性均好的传感器.总之,选择使用传感器时,应根据几项基本标准,具体情况具体分析,选择性能价格比高的传感器.选择传感器时应从如下几方面的条件考虑:

1. 与测量条件有关的因素

①测量的目的;②被测试量的选择;③测量范围;④输入信号的幅值,频带宽度;⑤精度要求;⑥测量所需要的时间.

2. 与传感器有关的技术指标

①精度;②稳定度;③响应特性;④模拟量与数字量;⑤输出幅值;⑥对被测物体产生的负载效应;⑦校正周期;⑧超标准过大的输入信号保护.

3. 与使用环境条件有关的因素

①安装现场条件及情况；②环境条件(湿度、温度、振动等)；③信号传输距离；④所需现场提供的功率容量。

4. 与购买和维修有关的因素

①价格；②零配件的储备；③服务与维修制度，保修时间；④交货日期。

以上是有关选择传感器时主要考虑的因素。为了提高测量精度，应注意平常使用时的显示值应在满量程的50%左右来选择测量范围或刻度范围。选择传感器的响应速度，目的是适应输入信号的频带宽度，从而得到高信噪比、高精度的传感器。此外，还要合理选择使用现场条件，注意安装方法，了解传感器的安装尺寸和重量等，还要注意从传感器的工作原理出发，联系被测对象中可能会产生的负载效应问题，从而选择最合适的传感器。

第七节 传感器的一般特性

传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系。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。

一般说来，传感器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下的微分项取为零时，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。实际上传感器的静态特性要包括非线性和随机性等因素，如果把这些因素都引入微分方程，将使问题复杂化，为避免这种情况，总是把静态特性和动态特性分开考虑。

传感器除了描述输出输入关系的特性之外，还有与使用条件、使用环境、使用要求等有关特性。

一、传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测量时处于稳定状态下的输出、输入关系。

人们总是希望传感器的输出与输入具有确定的对应关系，而且最好呈线性关系。但一般情况下，输出输入不会符合所要求的线性关系，同时由于存在着迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素的影响，以及外界条件的影响，使输出输入对应关系的惟一确定性也不能实现。考虑了这些情况之后，传感器的输出输入作用图大致如图1.7-1所示。图中的外界影响不可忽视，影响程度取决于传感器本身，可通过传感器本身的改善来加以抑制，有时也可以对外界条件加以限制。图中的误差因素就是衡量传感器特性的主要技术指标。

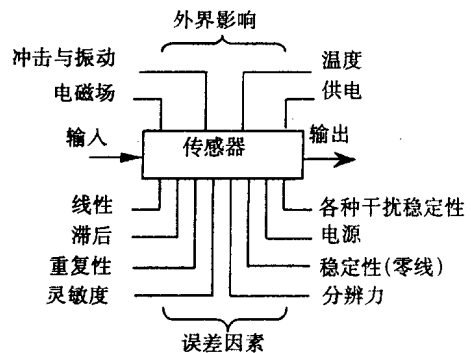


图 1.7-1 传感器输出输入作用图

1. 线性度

传感器的输出输入关系或多或少地存在非线性问题。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：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (1.7-1)$$

式中：y——输出量；x——输入量； a_0 ——零点输出； a_1 ——理论灵敏度； a_2, a_3, 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. 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曲线之间的最大偏差, 就称为非线性误差或线性度, 通常用相对误差 γ_L 来表示, 即

$$\gamma_L = \pm (\Delta L_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1.7-2)$$

式中: $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性误差; y_{FS} ——满量程输出.

由此可见, 非线性偏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; ⑤最小二乘拟合; ⑥最小包容拟合等. 前四种方法如图 1.7-2 所示. 图中实线为实际输出曲线, 虚线为拟合直线.

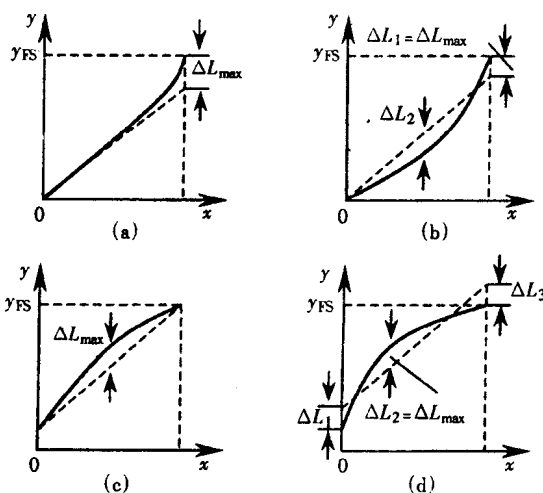


图 1.7-2 传感器输出输入作用图

- (a) 理论拟合 (b) 过零点拟合
(c) 端点连线拟合 (d) 端点连线平移拟合

图(a)中, 拟合直线为传感器的理论特性, 与实际测试值无关. 该方法十分简单, 但一般说 $\Delta L_{\max}$ 较大. 图(b)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(c)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 $\Delta L_{\max}$ 也较大. 图(d)是在图(c)基础上使直线平移, 移动距离为原先 $\Delta L_{\max}$ 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 c 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 1.7-3 所示. 设拟合直线方程为

$$y = kx + b \quad (1.7-3)$$

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