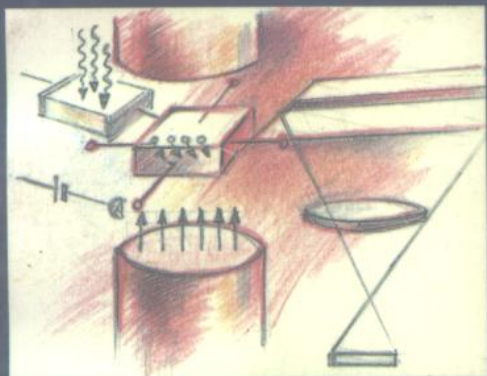


贺安之 阎大鹏 编著

现代传感器 原理及应用

XIAN DAI CHUAN GAN QI
YUAN LI JI YING YONG



宇航出版社

77.8121
107

现代传感器原理及应用

贺安之 阎大鹏 编著

宇航出版社

(京)新登字 181 号

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述了现代传感器的原理及各类新型传感器的应用。主要内容有:机电传感器概述;光电探测器与 CCD, PSD, 热成像等二维图像传感器的原理与应用;光纤传感器原理及应用;半导体陶瓷传感器及气敏, 色敏, 湿敏传感器的原理及应用;三维传感器与仿生传感器等。还论述了传感器信号处理与智能测试, 控制技术。

本书可供从事测试, 计量, 控制和光电技术的专业人员参考; 也可作为高等学校有关专业教师、学生的教学参考书。

现代传感器原理及应用

贺安之 阎大鹏 编著

责任编辑: 张家新 邱光纯

*

宇航出版社出版发行

北京和平里滨河路 1 号(100013)

发行部地址: 北京阜成路 8 号(100830)

各地新华书店经销

北京市建新印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.875 字数: 283 千字

1995 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1~3000 册

ISBN 7-80034-770-2/TP·050 定价: 15.0 元

2110104

前 言

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工作(包括工程设计、行为决策等科学研究、信息处理)的前提,而传感器就是获取自然科学领域中各种信息的“五官”感知系统,计算机技术则是处理信息的大脑。因此,传感器和计算机技术构成现代科学技术重要内容,尤其是测试计量与工业自动化、智能化的关键技术。一个国家,一项工程设计中传感器应用的数量和水平直接标志着其技术的先进程度,如“阿波罗 10”的运载火箭部分,用于实时检测运行中的加速度、声学参量、温度、压力、振动、流量及应变等动力学与环境参量的变化的传感器多达 2077 个,宇宙飞船部分的传感器达 1218 个。这些传感器像神经系统一样分布全机,时刻敏感监测着各种信息,传给中心处理控制计算机处理,以实时修正飞行参数。在工业生产和产品检验中,传感器的应用水平更直接反映着产品质量的高低。因此随着现代高新技术的发展,传感器技术愈来愈受到重视,成为信息时代的关键技术。

传感器原理与技术知识将成为科技人员的必备基础知识。相应的教材和著作也愈来愈多。但一般传感器著作,皆以经典传感器(这里指以经典电磁原理、热力学原理为主要依据的传感器,如电阻、电容、电感、磁电、压电、热电传感器等)为主要内容。但随着高新技术发展和现代科学新发现,以现代物理等现代科技新原理为基础的现代传感器迅速发展,并以高灵敏度、高精度、非接触测量为特点,逐渐成为现代传感器的主流,并有力推动着高新技术的发展。

本书较系统阐述了现代传感器原理和应用。这里所指的现代传感器主要是指以现代固体物理原理为基础而发展起来的各类光

电探测器(如光电、热电、磁光探测器与图像传感器)、以光纤物理特性与导波特性和应用非常广泛的光纤传感器、以半导体陶瓷器件为主的各类特殊传感器(如色敏传感器、湿敏和气敏传感器等)、以激光与现代光学原理为基础的各类光学传感器(即光波参数传感器,如激光散射,透射的振幅变化型传感器、干涉(相位)传感器、多普勒速度传感器、飞行时间与相位距离传感器、三维图像传感器等)、以及超导、仿生传感器等。现代光学传感器的另一重要范畴是指以微电子、计算机、光电与光电集成技术为基础发展起来的将敏感元件,信息处理元件合为一体的功能块型传感器,它具有更高的智能水平。

本书是在贺安之教授多年教学的讲稿基础上,进一步搜集国内外各种现代传感器新资料,并溶入著作者多年科研成果编著而成,着重阐述现代传感器原理与技术应用。随着科学技术研究不断获得新进展,科学新发现不断增多,新型传感器的技术水平还将迅速提高。鉴于著作者水平有限,遗漏和不足之处在所难免,敬请读者指正。

著者 1994年8月

目 录

第一章 现代传感器概论	(1)
第一节 传感器的基本概念	(1)
一、传感器发展概述	(1)
二、传感器的物理含义	(2)
三、传感器的组成与分类	(2)
第二节 传感器的一般特性	(5)
一、传感器的静态特性	(5)
二、传感器动态特性的数学模型与响应函数	(9)
第三节 机电类传感器简述	(12)
一、电阻式传感器	(12)
二、电感式传感器	(19)
三、电容式传感器	(23)
四、涡流式传感器	(27)
五、压电式传感器	(29)
六、磁电式传感器	(36)
七、霍尔传感器	(38)
第四节 现代传感器的发展	(40)
一、现代传感器的性能要求	(40)
二、传感器的发展过程	(41)
三、现代光学传感器	(43)
第二章 特殊的光学传感器——光探测器	(47)
第一节 外光电效应型光电探测器	(47)
一、光电管	(47)
二、光电倍增管	(49)
第二节 内光电效应型光电探测器	(51)
一、半导体器件的物理基础	(52)
二、光电导型光传感器	(55)

三、光伏效应型光探测器	(58)
四、半导体光磁电红外探测器	(69)
第三节 热电型辐射探测器	(69)
一、热电偶辐射探测器	(70)
二、热敏电阻	(71)
三、热释电效应探测器	(72)
第四节 一维与二维光电探测器	(75)
一、光电二极管及光电三极管阵列探测器	(75)
二、电荷耦合器件及图像传感器	(80)
三、红外区的二维传感器(红外热像传感器)	(91)
四、光电位置敏感器件	(93)
第三章 现代光学传感器的信号检测技术	(107)
第一节 光波强度信号的直接检测技术	(108)
一、光波(场)的参量与特性	(108)
二、光探测器的性能参数	(109)
三、光源的稳定性及背景光等的消除	(115)
四、相关检测和锁相放大技术	(124)
五、差动技术	(128)
第二节 强度调制探测光束的位相检测	(129)
第三节 光外差探测技术	(132)
一、光外差的基本原理	(132)
二、信噪比	(134)
第四节 光波的相位检测技术	(136)
一、光波相位的检测原理	(136)
二、位相型光学传感器——光学干涉仪	(139)
第四章 光束(或光波)传感器	(147)
第一节 光强型传感器	(147)
一、透射光强传感器	(147)
二、散射型光学传感器	(148)
第二节 多普勒速度传感原理与技术	(161)
一、多普勒测速原理	(161)
二、多普勒频移的外差检测	(163)

三、多普勒测速传感原理的应用·····	(167)
第三节 目标跟踪识别传感器——激光雷达 ·····	(169)
一、光学定位系统的构成原理和应用·····	(169)
二、激光定位系统的核心单元——激光测距仪·····	(171)
三、激光测距仪和二维图像传感器的信息融合·····	(179)
四、激光扫描三维成像雷达·····	(179)
第五章 光纤传感原理与技术 ·····	(189)
第一节 光纤的特性及基本理论 ·····	(190)
一、光纤的特性及传感器设计对光纤的要求·····	(190)
二、光纤波导的导光原理·····	(192)
三、光纤波导的传输特性·····	(200)
四、几种主要光纤波导·····	(201)
五、光纤的激励·····	(204)
六、光纤元件的连接·····	(206)
七、光纤耦合器·····	(207)
第二节 光纤传感器工作原理与分类 ·····	(211)
一、光纤传感器的分类与特点·····	(211)
二、强度调制光纤传感器·····	(212)
三、调相光纤传感器·····	(216)
第三节 光纤传感器的应用 ·····	(227)
一、光纤压力(声压)传感器·····	(227)
二、光纤磁传感器·····	(229)
三、光纤电流电压传感器·····	(232)
四、光纤电磁传感器·····	(234)
五、光纤分光(光谱)传感器·····	(235)
六、光纤温度传感器·····	(238)
七、光纤图像传感器·····	(240)
第六章 传感器的应用 ·····	(243)
第一节 位移传感器的应用 ·····	(243)
一、电阻式传感器的应用·····	(243)
二、电容式位移传感器的应用·····	(244)
三、电感式位移传感器的应用·····	(246)

四、光栅数字式传感器的应用	(257)
五、激光干涉数字传感器	(263)
第二节 温度传感器的应用	(265)
一、热电阻	(266)
二、热敏电阻	(267)
三、热电偶	(269)
四、PN 结温度传感器	(272)
五、其它温度传感器	(274)
第三节 激光光谱测温技术	(276)
一、拉曼散射测温技术	(276)
二、激光感生荧光测温技术	(282)
三、光声光偏转测温技术	(285)
四、相干反斯托克斯拉曼光谱(CARS)测温技术	(288)
第四节 半导体气敏传感器及应用	(299)
一、半导体气敏传感器的机理	(299)
二、半导体气敏传感器的结构	(300)
三、半导体气敏传感器的应用	(302)
第五节 半导体湿敏传感器及应用	(306)
一、 $\text{MgCr}_2\text{O}_4-\text{TiO}_2$ 陶瓷湿敏传感器器件	(307)
二、四氧化三铁(Fe_3O_4)湿敏传感器	(307)
三、半导体湿敏传感器的应用	(308)
第六节 半导体色敏器件及应用	(310)
一、测色原理	(310)
二、半导体色敏器件的工作原理	(312)
三、半导体色敏器件的应用	(313)
第七节 新型传感器及应用	(315)
一、仿生传感器及应用	(316)
二、超导传感器及应用	(323)
三、生物分子传感器及应用	(330)
参考文献	(337)

第 一 章

现代传感器概论

第一节 传感器的基本概念

一、传感器发展概述

人是通过眼(视觉)、耳(听觉)、鼻(嗅觉)、舌(味觉)、身(触觉)五种器官而感知与接收外界信号,并将这些信号传送给大脑而感知外界事物与信息。大脑处理信号后,将执行命令传给肌体以指挥人的行为。人的五官就是人类传递与感知外界信息的器官,是一种高级特殊的传感器。人类在认识和改造自然中认识到仅靠天然的五官获取信息还不够,便不断创造劳动工具,创造发明了能代替并补充、扩展五官功能的仪器——传感器,如 X 光机,微音器、温度计、光电探测器、雷达等仪器。

现代高新技术,特别是能模拟人的大脑某些功能的计算机技术的迅速发展,极大地推动了能模拟五官功能的传感器技术的发展,而传感器技术直接制约和影响自动化技术的发展。因此许多发达的国家把传感器技术的发展放在现代高技术的关键位置。80年代日本就将传感器技术列为该国优先发展的十大技术之首,美

国认为 80 年代是传感器的时代。各种高技术的智能武器、机器及家用电器的水平高低的分界就在于其传感器的数量与水平不同，就是一台普通的家用电器也都装备有控温、控时等传感器。一架现代波音飞机的传感器竟达千只以上。传感器是智能化高技术的前驱和标志，有其独特重要的地位。

二、传感器的物理含义

国家标准 GB7665—87 对传感器下的定义是：“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，通常由敏感元件和转换元件组成”。敏感元件指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件指传感器中能将敏感元件感受的或响应的被探测量转换成适于传输和(或)测量的电信号部分。

显然，对传感器的含义有广义和狭义之分，广义的传感器是指能感知某一物理量(或化学量、生物量……)的信息，并能将该信息转化为有用(或人们或仪器可直接感知或显示)的信息装置。人的五官眼耳鼻舌身是一种广义的传感器。望远镜、显微镜、雷达是视觉的延伸。微音器、水听器是听觉的延伸。温度计是舌、身感觉器官的延伸。气敏传感器是鼻的延伸。测量仪器就是将被测量变为人们可感知或定量认识的有用信号的传感器。然而，在教科书中人们通常狭义地定义传感器为：能将各种非电量转换为电信号的部件。这是因为现代技术中电信号是最适合于传输转换、处理和定量运算的物理量。特别是在电子计算机——电脑作为处理信号的基本工具的时代，人们总是力图把各种被测量通过传感器最终转换成电信号进行处理。

三、传感器的组成与分类

传感器一般是由敏感元件、转换元件和其它辅助元件组成。有时也将信号调节与转换电路及辅助电源做为传感器的组成部分。如图 1-1 的方框图所示。

敏感元件：直接感受被测量(一般为非电量)，并输出与被测量成确定关系的其它量(一般为电量)的元件。如应变式压力传感器

的弹性膜片就是敏感元件，它的作用是将压力转换成膜片的变形。

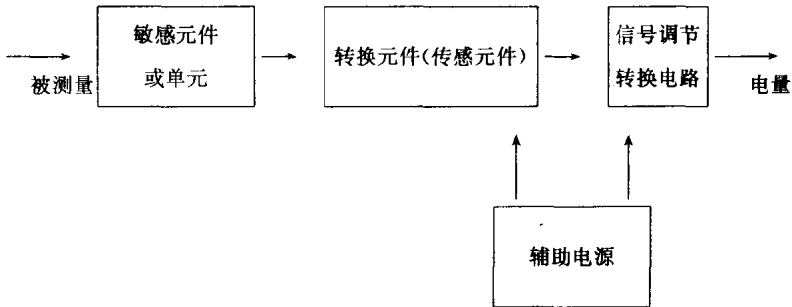


图 1-1 传感器组成方框图

转换元件：又称变换器，一般情况下它不直接感受被测量，而是将敏感元件输出的量转换为电量输出的元件。如应变式压力传感器的应变片，它的作用是将弹性膜片的变形转换为电阻值的变化。

这种划分并无严格的界限，如热电偶是直接感知温度变化的敏感元件，但它又直接将温度转换为电量，因而它同时又兼为转换元件了。压阻式传感器就是将敏感元件热敏电阻与转换元件合为一体的传感器。许多光电转换器都是这种敏感、传感合为一体的传感器。

信号调节与转换电路：一般是指能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。信号调节与转换的电路选择要视传感元件的类型而定，常用电路有弱信号放大器，电桥，振荡器，阻抗变换器等。

对传感器的分类方法很多，可以从不同特点来分，有的传感器可以同时测量多种参数，而对同一物理量又可用多种不同类型的传感器来进行测量。因此同一传感器可分为不同类，有不同的名称。

(1)按将外界输入信号变换为电信号时采用的效应分类，有物

理传感器、化学传感器、生物传感器。表 1-1 给出了与五官对应的传感器与效应。

(2)按输入量分类(是厂家和用户常用的方法),即按被测量分类,有位移、速度、加速度、角位移、角速度、力、力矩、压力、真空度、温度、电流、射线、气体成分、浓度等传感器。

(3)按传感器工作原理分类,有应变式、电容式、电阻式、电感式、压电式、热电式、马赫干涉仪式、光敏、热释电式、光电式等传感器。

表 1-1 与五官对应的传感器与效应

感 觉	传 感 器	效 应
视觉(眼睛)	光敏传感器	物理效应
听觉(耳)	声(压力)敏传感器	物理效应
触觉(皮肤)	热敏传感器	物理效应
嗅觉(鼻)	气敏传感器、生物热敏传感器	化学效应、生物效应
味觉(舌)	味觉传感器	化学效应、生物效应

(4)按输出信号分类,有模拟式传感器(输出为模拟量),数字式传感器(输出为数字量)。

传感器的命名可按分类方式进行,一般称××式××传感器。前面的××表示变换元件(将非电量直接转换为电量的元件)的名称。如电阻式,压电式。也同时指出了变换原理的种类。后边的××表示传感器的用途,即指出传感器所接收的被测量的种类,如压力、温度等。如电阻式液位传感器,压电式加速度传感器。经典传感器的称呼比较规范,现代许多新型传感器的称呼就不很规范。人们从不同角度来称呼它。如多普勒测速仪,是速度传感器,按使用波段常称超声多普勒测速仪,激光多普勒测速仪及微波多普勒测速仪。

现代传感器的概念和内容与经典传感器相比,尽管有了较大的发展,但是,将被测量按一定规律转换为可用信号(一般是电信

号)这一基本功能并未改变。过去的传感器往往是简单的敏感元件或变换元件,如一个热敏电阻,一只光电管,它们就能直接将被测量转换为电信号。随着现代科学技术的迅速发展,对客观世界认识的深入,为了将某些深层次的待测量,如微形变、超细微粒、微量气体成分探测,运动目标的三维坐标,动态温度等。若用单一的传感器不能将直接的被测量转换成可用的或可定量测量的量,而必须对信号经过一系列变换,微弱信号放大,消除各种噪声干扰才能得到有一定信噪比的可用信号。因此我们完成从获取被测信号到输出可用信号这一整个系统称作为传感器(系统)。一台专用的精密测试仪器,就是一个传感器系统,尽管系统的结构复杂多样,但在功能上都是一种将被测量转换成可用(电)信号的装置,如一台雷达,一台激光多普勒测速仪,一台微位移电子散斑仪,都是专用的传感器。如用于自主式车辆作视觉导引的视觉三维传感器就是一台结构复杂光机电算多种高技术合一的三维激光成像雷达系统。

第二节 传感器的一般特性

传感器(或测量设备)的输出—输入关系特性是传感器的基本特性。一种是稳态(静态或准静态)形式,这种情况下的待测信号是不随时间变化,或变化很缓慢;另一种是动态(周期变化或瞬态变化)的形式,即待测信号是随时间变化的。输入的待测量状态不同,传感器的输入—输出特性也不相同,它和传感器的内部性能与参数有密切的关系。一个优良的传感器必须有良好的静态特性和动态特性,才能不失真地完成信号的转换。

一、传感器的静态特性

传感器的静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性。

(一)传感器的线性度

传感器的一般输出—输入特性可表示为非线性函数,如

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

式中 y ——输出信号;

x ——输入信号;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的线性灵敏度;

a_2, a_3, \dots, a_n ——待定常数。

1. 理想的线性特性

当式(1-1)中的 $a_0 = a_2 = a_3 = a_n = 0$ 时,则

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

这时输出—输入呈理想直线关系,传感器的灵敏度为

$$S_s = a_1 = \frac{y}{x} = \text{常数} \quad (1-3)$$

其特性曲线如图 1-2(a)所示。

2. 仅有偶次非线性项

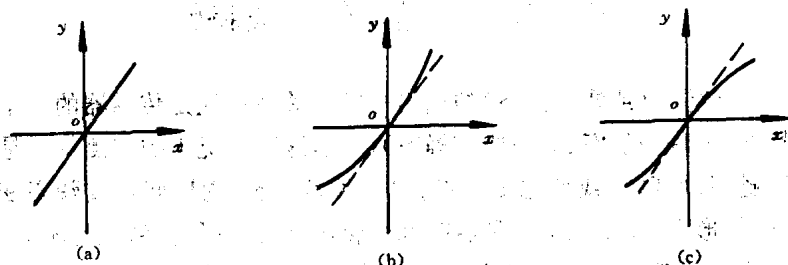


图 1-2 传感器的静态特性

(a)线性; (b)仅有偶次非线性; (c)仅有奇次非线性

如图 1-2(b)所示,其输入—输出特性方程为

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (1-4)$$

因为它没有对称性,所以其线性范围较窄,一般传感器较少采用这

种特性。

3. 仅有奇次非线性项

输出—输入特性方程为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (1-5)$$

特线曲线如图 1-2(c) 所示, 在输入量相当大的范围内有较宽的准线性, 且有对称性。如差动传感器就是用电气元件对称排列, 消除电气元件的偶次分量, 使线性得到改善, 同时也使灵敏度提高一倍。

在使用非线性传感器时, 如果非线性项方次不高, 在输入量变化范围不大的条件下, 可用一条直线近似地代表实际的非线性特性, 常用的方法有端点直线法, 最小二乘法的直线拟合方法等。

(二) 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出变化对输入变化的比值, 用 S_x 来表示, 即特性曲线在某处的斜率

$$S_x = dy/dx \quad (1-6)$$

(三) 迟滞(迟环)

迟滞(或称迟环)特性表明传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间输出—输入特性曲线不重合的程度, 如图 1-3 所示。

这反映了传感器内部由于机械、材料特性而引起的问题。迟滞大小通常由实验决定, 用整个检测范围内的最大迟滞值 Δ_{\max} 与理论满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分比表示

$$e_t = \pm \frac{\Delta_{\max}}{2y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-7)$$

(四) 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得特性曲线的不一致性。如图 1-4 所示, 不重复性指标一般采用输出最大不重复误差 Δ_{\max} 与满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分比表示

$$e_z = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 $y_{F.S} = |y_H - y_L|$ 即检测上限标称值 y_H 与下限标称值 y_L 之差。

不重复误差是属随机误差,按标准偏差来计算重复性指标更合适

$$e_z = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-9)$$

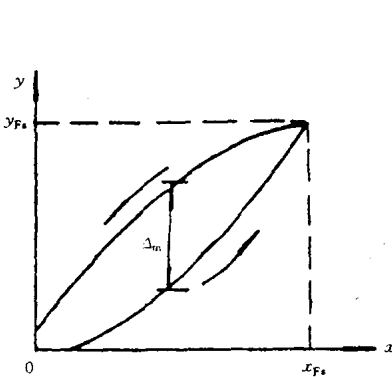


图 1-3 滞环特性示意图

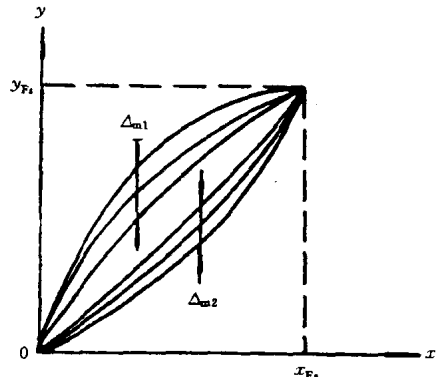


图 1-4 重复性

式中 σ ——标准偏差。

误差服从正态分布,标准偏差 σ 可以根据贝塞尔公式来计算

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

式中 y_i ——测量值;

\bar{y} ——测量值的算术平均值;

n ——测量次数。

(五) 传感器的阈值和分辨率

当输入量变小到某一值时,即观察不到输出量变化,这时的输入量称为传感器的阈值。

分辨率指的是可观察到输出量变化的最小输入量,两者(分辨