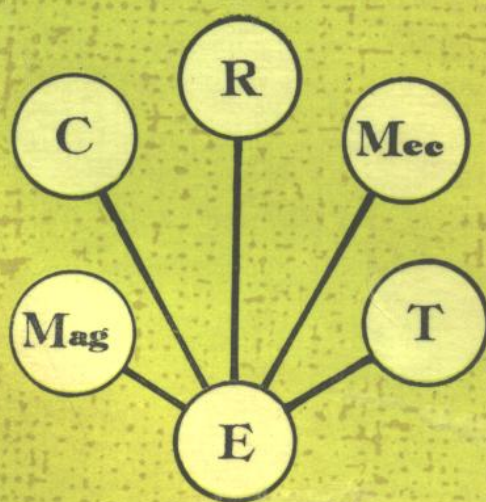


高等学校教学用书

传感器技术

贾伯年 俞 朴 主编



东南大学出版社

传 感 器 技 术

东 南 大 学 贾 伯 年 主 编
上 海 交 通 大 学 俞 朴

东南大学出版社

内 容 简 介

本书综述传感器技术的基本理论,详细介绍各类传感器的工作原理、误差来源与应用场合,择要阐述主要传感器类型的设计原则与方法。全书共15章,可分三个部分:第一部分(绪论与第一章)为共性部分,以新颖的构思与笔法介绍了传感器的概念与构成方法、传感器的数学模型与特性、提高性能的措施与标定技术、机电模拟与网络分析理论等;第二部分(2~8章)为常用传感器的分析与综合;第三部分(9~15章)分别介绍光纤式传感器、数字式传感器、固态及其集成化传感器、智能式传感器、闭环传感器、机器人传感器及近代检测技术。新型传感器技术的内容约占35%。

该书取材新颖,内容丰富、结构严谨,和现有教材相比以有限的篇幅实现更大的覆盖面,既突出教科书那种严密的理论性与系统性,又兼有工具书那种可解决实际问题的实用性。可作为检测技术、仪器仪表、自动控制及各种机电类专业的本科生、大专生及研究生教材,也可供其它专业学生或有关工程技术人员参考。

责任编辑 陈天授

责任校对 王小然

2R30/33
09

传 感 器 技 术

贾伯年 俞 朴 主编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 高淳印刷厂印刷

开本 787×1092毫米 1/16 印张 22.375 字数 530千字

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数: 1—4000册

ISBN 7-81023-428-5

TP·32

定价: 5.85元

前 言

传感器作为测控系统中对象信息的入口,它在现代化事业中的重要性已越益为人们所认识。随着“信息时代”的到来,国内外已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内高校许多专业都开设了相应课程。传感器方面的教材和专著陆续问世。这些著作,在原理性与实用性,传统性与新型性,以及广度与深度上各有侧重。随着高、新技术的发展,专业面的拓宽,同时为了适应传感器开发、应用的需要,更希望有两者兼顾的教材。为此,作者在东南大学和上海交通大学两校讲义的基础上,广取兄弟院校教材之所长,博采国内外文献之精髓,结合多年教学与科研实践的体会,撰写了本书。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状,本书通过精选内容,以有限的篇幅取得比现有教材更大的覆盖面。在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下,以三分之一的篇幅充实了新型传感器的内容,这就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及误差分析;对各类传感器则注重机理分析与应用介绍;并择要编入设计内容。对有限篇幅难于展开的内容则注明源处或参考文献,便于钻研深究者查找。愿读者通过本书的学习能收到举一反三、触类旁通的效果。

全书共15章,可作为高等学校检测技术、仪器仪表及自动控制等专业的教材。除绪论与第1章外,传感器各章均具有一定的独立性。可供有关专业本科生、大专生和研究生选用;同时,也可作为有关工程技术人员的参考书。

本书由东南大学贾伯年与上海交通大学俞朴主编。参加编写的有东南大学贾伯年(绪论、第2、6章)、上海交通大学俞朴(第1、3章)、东南大学王玉生(第4、5章)、上海工程技术大学汪廷杜(第7、15章)、上海交通大学金萃芬(第8、13章)、东南大学陈建元(第9、14章)、刘璟(第10章)、张家慰(第11章)、江潼君(第12章)。全书由贾伯年负责统稿,并由东南大学黄惟一教授主审。

本书特请全国高校《传感技术学报》常务副主编莫纯昌教授审校,在编写过程中曾得到上海交通大学童钧芳教授的鼓励与帮助,也得到许多院、校、厂、所文献资料之启迪,在此一并致谢。

传感器技术涉及的学科众多,而作者学识有限,书中错误与缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

1990年10月

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 传感器基本概念与物理定律	(1)
§ 0-2 传感器的构成法	(2)
§ 0-3 传感器的分类及要求	(3)
§ 0-4 传感器的作用和地位	(4)
§ 0-5 传感器开发的新趋向	(6)
第一章 传感器技术基础	(8)
§ 1-1 传感器的一般数学模型	(8)
静态模型 · 动态模型	
§ 1-2 传感器的特性与指标	(10)
传感器的静态特性 · 传感器的动态特性 · 传感器的性能指标一览	
§ 1-3 改善传感器性能的技术途径	(21)
结构、材料与参数的合理选择 · 差动技术 · 平均技术 · 稳定性处理 · 屏蔽、隔离与干扰抑制 · 零示法、差微法与闭环技术 · 补偿与校正 · 集成化与智能化	
§ 1-4 传感器的标定与校准	(24)
传感器的静态标定 · 传感器的动态标定 · 传感器的互换性	
§ 1-5 系统相似与机电模拟	(28)
机电模拟 · 机械阻抗	
§ 1-6 传感器的网络分析法	(33)
理想传感器的传感矩阵 · 实际传感器的传感矩阵 · 双向机电传感器统一计算公式	
第二章 电阻应变式传感器	(40)
§ 2-1 电阻应变计的基本原理与结构	(40)
导电材料的应变电阻效应 · 电阻应变计的结构与类型	
§ 2-2 电阻应变计的主要特性	(44)
静态特性 · 动态特性 · 评定应变计主要特性的精度指标	
§ 2-3 电阻应变计的温度效应及其补偿	(49)
温度效应及其热输出 · 热输出补偿方法	
§ 2-4 电阻应变计的应用	(52)
应变计的选用 · 应变计的使用	
§ 2-5 测量电路	(55)
电阻应变仪 · 直流电桥及其输出特性 · 交流电桥及其平衡	
§ 2-6 电阻应变计式传感器	(61)
原理和特点 · 应变计式传感器	
第三章 变磁阻式传感器	(66)
§ 3-1 传感器线圈的电气参数分析	(66)
§ 3-2 自感式传感器	(70)
工作原理与输出特性 · 测量电路 · 自感式传感器的误差	

§ 3-3 互感式传感器(差动变压器).....	(82)
工作原理与类型·测量电路·互感式传感器的误差	
§ 3-4 电感式传感器的应用.....	(88)
位移与尺寸测量·压力测量·力和力矩测量·振动测量	
§ 3-5 电涡流式传感器.....	(90)
工作原理·结构类型·测量电路·电涡流式传感器的应用	
§ 3-6 压磁式传感器.....	(99)
压磁效应·压磁式传感器的工作原理·影响压磁式传感器特性的因素·压磁式测力传感器结构·测量电路	
第四章 电容式传感器	(105)
§ 4-1 工作原理、结构及特性.....	(105)
变极矩型电容传感器·变面积型电容传感器·变介质型电容传感器	
§ 4-2 应用中存在的问题及其改进措施.....	(103)
等效电路·边缘效应·静电引力·寄生电容·温度影响	
§ 4-3 测量电路.....	(113)
耦合式电感电桥·双T二极管交流电桥·脉冲调宽电路·运算放大器电路	
§ 4-4 电容式传感器及其应用.....	(117)
电容式位移传感器·电容式加速度传感器(计)·电容式力和压力传感器·电容式物位传感器	
第五章 磁电式传感器	(120)
§ 5-1 基本原理与结构型式.....	(120)
§ 5-2 磁电式传感器的传递矩阵与动态特性.....	(122)
§ 5-3 磁电式传感器的误差及补偿.....	(125)
非线性误差·温度误差·永久磁铁的稳定性	
§ 5-4 磁电式传感器的应用.....	(128)
测振传感器·磁电式力发生器与激振器	
第六章 压电式传感器	(131)
§ 6-1 压电效应及材料.....	(131)
压电效应·压电材料	
§ 6-2 压电方程及压电常数.....	(135)
石英晶片的切型及符号·压电方程及压电常数矩阵	
§ 6-3 等效电路及测量电路.....	(141)
等效电路·测量电路	
§ 6-4 压电式传感器及其应用.....	(145)
应用类型、形式和特点·压电式加速度传感器(计)·压电式力和压力传感器·逆压电效应的应用	
§ 6-5 影响压电传感器工作性能的主要因素.....	(157)
横向灵敏度·环境温、湿度·安装差异及基座应变·噪声	
第七章 热电式传感器	(160)
§ 7-1 热电阻传感器.....	(160)
热电阻·热敏电阻	
§ 7-2 热电偶传感器.....	(164)

热电效应及其工作定律·热电偶	
§ 7-3 热电式传感器的应用	(171)
测量管道流量·热电式继电器·气体成分分析仪·金属材质鉴别仪	
第八章 光电式传感器	(175)
§ 8-1 光源	(175)
光的特性·常用光源及特性	
§ 8-2 光电效应及器件	(177)
外光电效应·内光电效应	
§ 8-3 光电器件的特性	(181)
光照特性·光谱特性·响应时间·峰值探测率·温度特性·伏安特性	
§ 8-4 新型光电检测器	(184)
光位置传感器·集成光敏器件·固态图象传感器·高速光电器件	
§ 8-5 光电式传感器	(190)
光电式传感器的类型·光电式传感器实例	
第九章 光纤传感器	(195)
§ 9-1 光纤传感器基础	(195)
光纤波导原理·光纤的特性·光纤传感器分类	
§ 9-2 光调制与解调技术	(199)
强度调制与解调·偏振调制与解调·相位调制与解调·频率调制与解调	
§ 9-3 光纤传感器实例	(209)
光纤液位传感器·热辐射光纤温度传感器·光纤角速度传感器(光纤陀螺)·光纤电流传感器	
第十章 数字式传感器	(214)
§ 10-1 感应同步器	(214)
感应同步器的结构与类型·感应同步器的工作原理·数字测量系统·感应同步器的接长使用	
§ 10-2 光栅	(223)
光栅的结构与测量原理·数字转换原理	
§ 10-3 磁栅	(228)
磁栅的结构与工作原理·数字测量原理	
§ 10-4 编码器	(231)
基本结构与原理·旋转式光电编码器·测量电路	
§ 10-5 频率式传感器	(239)
RC频率式传感器·石英晶体频率式传感器·弹性振体频率式传感器	
第十一章 固态传感器及其集成化	(247)
§ 11-1 扩散硅压阻式传感器	(247)
压阻式传感器的基本原理·压阻式传感器的基本类型	
§ 11-2 磁敏传感器	(254)
霍尔式传感器·其它磁敏传感器	
§ 11-3 半导体色敏传感器	(261)
半导体色敏传感器的基本原理·半导体色敏传感器的基本特性	
§ 11-4 离子敏感器件	(264)
ISFET的结构与工作原理·ISFET的特点和应用	
§ 11-5 气敏传感器	(268)

	气敏半导体材料的导电机理·电阻型气敏器件·非电阻型气敏器件	
§ 11-6	湿敏传感器 (272)	
	绝对湿度与相对湿度·氯化锂湿敏电阻·半导瓷湿敏电阻	
§ 11-7	集成传感器 (275)	
	集成传感器的概念和特点·集成传感器实例	
§ 11-8	微机械结构传感器 (280)	
第十二章	智能式传感器 (282)	
§ 12-1	概述 (282)	
	智能的概念及途径·功能特点及构成	
§ 12-2	传感器信号的采集 (283)	
	传感器输出信号的类型·传感器输出模拟信号的处理	
§ 12-3	传感器的智能化 (289)	
	控制功能·数据处理功能·数据传输	
§ 12-4	智能传感器 (297)	
第十三章	闭环传感器 (299)	
§ 13-1	工作原理及特点 (300)	
§ 13-2	力(力矩)平衡式传感器 (301)	
	力平衡式加速度传感器·力矩平衡式加速度传感器·力平衡式差压变送器	
§ 13-3	电平衡式传感器 (307)	
第十四章	机器人传感器 (309)	
§ 14-1	机器人传感器的功能与分类 (309)	
§ 14-2	机器人视觉传感器 (312)	
	视觉检测·视觉图象的分析·描绘·识别	
§ 14-3	机器人广义触觉传感器 (317)	
	机器人接触觉传感器·机器人压觉传感器·机器人力觉传感器·机器人接近觉传感器·机器人滑觉传感器	
第十五章	近代检测技术 (326)	
§ 15-1	超声检测 (326)	
	超声检测的物理基础·超声波探头·超声波检测技术的应用	
§ 15-2	红外检测 (331)	
	红外检测的物理基础·红外探测器·红外辐射检测技术的应用	
§ 15-3	核辐射检测 (336)	
	核辐射检测的物理基础·核辐射传感器·核辐射检测技术的应用	
§ 15-4	激光检测 (341)	
	激光检测的物理基础·激光器及其特点·激光检测技术的应用	
§ 15-5	微波检测 (343)	
	微波检测的基本知识·微波传感器·微波检测技术的应用	
参考文献	 (348)	

绪 论

§0-1 传感器基本概念与物理定律

一、传感器的概念

何谓传感器？生物体的感官就是天然的传感器。如人的“五官”——眼、耳、鼻、舌、皮肤分别具有视、听、嗅、味、触觉。人们的大脑通过五官就能感知外界的信息。

在工程科学与技术领域里，可以认为：传感器是人体“五官”的工程模拟物。它是一种能把特定的被测量信息(包括物理量、化学量、生物量等)按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。

应当指出，这里所谓的“可用信号”是指便于处理、传输的信号。当今电信号最易于处理和便于传输，因此，可把传感器狭义地定义为：能把外界非电信息转换成电信号输出的器件。可以预料，当人类跨入光子时代，光信息成为更便于快速、高效地处理与传输的可用信号时，传感器的概念将随之发展成为：能把外界信息转换成光信号输出的器件。

传感器技术，则是涉及传感(检测)原理、传感器件设计、传感器开发和应用的综合技术。传感技术的含义则更为广泛，它是敏感功能材料科学、传感器技术、微细加工技术等多学科技术互相交叉渗透而形成的一门新技术学科——传感器工程学。

二、传感器的物理定律

传感器之所以具有能量信息转换的机能，在于它的工作机理是基于各种物理的、化学的和生物的效应，并受相应的定律和法则所支配。了解这些定律和法则，有助于我们对传感器本质的理解和对新效应传感器的开发。在本书论述的范围内，作为传感器工作物理基础的基本定律有以下四种类型：

1. 守恒定律 包括能量、动量、电荷量等守恒定律。这些定律，是我们探索、研制新型传感器时，或在分析、综合现有传感器时，都必须严格遵守的基本法则。

2. 场的定律 包括动力场的运动定律、电磁场的感应定律等，其作用与物体在空间的位置及分布状态有关。一般可由物理方程给出，这些方程可作为许多传感器工作的数学模型。例如：利用静电场定律研制的电容式传感器(第四章)；利用电磁感应定律研制的电感(自感或互感)式传感器(第三章)；利用运动定律与电磁感应定律研制的电动式传感器(第五章)等等。利用场的定律构成的传感器，可统称为“结构型传感器”。

3. 物质定律 它是表示各种物质本身内在性质的定律(如虎克定律、欧姆定律等)，通常以这种物质所固有的物理常数加以描述。因此，这些常数的大小决定着传感器的主要性能。如：利用半导体物质法则——压阻、热阻、光阻、湿阻等效应，可分别做成压敏、热

敏、光敏、湿敏等传感器件；利用压电晶体物质法则——压电效应，可制成压电传感器等等。这种基于物质定律的传感器，可统称为“物性型传感器”。这是当代传感器技术领域中具有广阔发展前景的传感器。

4. 统计法则 它是把微观系统与宏观系统联系起来的物理法则。这些法则，常常与传感器的工作状态有关，它是分析某些传感器的理论基础。这方面的研究尚待进一步深入。

§0-2 传感器的构成法

由上已知，传感器是一种能把非电输入信息转换成电信号输出的器件或装置，而其中能把非电信息转换成电(不一定直接可用)信号的转换元件，是构成传感器的核心。但必须指出，转换元件的上述转换功能，对物性型传感器而言，一般都可一次完成，即可实现“被测非电量→有用电量”的直接转换；而对结构型传感器来说，通常必须通过前置敏感元件预转换后才能完成，亦即实现“被测非电量→有用非电量→有用电量”的间接转换。此时，传感器就由敏感元件、转换元件和其它辅助器件组成(其组成框图可在图0-1前设置敏感元件即得)。

实际上，传感器的具体构成方法，视被测对象、转换原理、使用环境及性能要求等具体情况的不同而有很大差异。图0-1示出了典型的传感器构成方法。

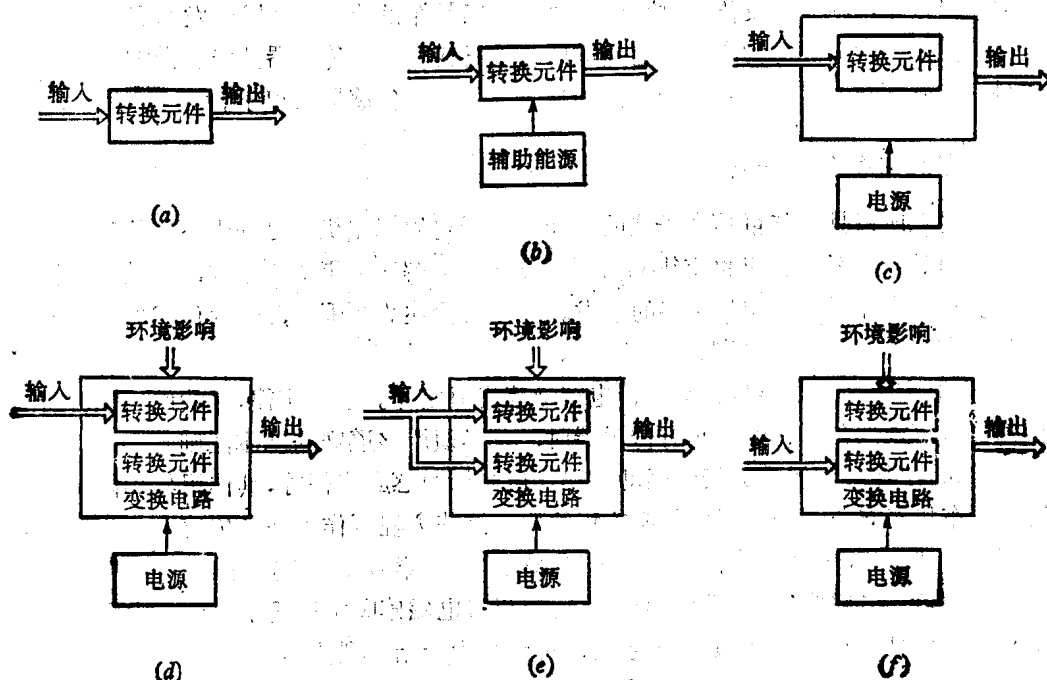


图0-1 传感器的构成型式

(a) 自源型 为仅含有转换元件的最简单、最基本的传感器构成型式。此型式的特点是,不需外能源;其转换元件具有从被测对象直接吸取能量,并转换成电量的电效应;但输出能量较弱,如热电偶、压电器件等。

(b) 带激励源型 它是转换元件外加辅助能源构成的型式。这里的辅助能源起激励作用,它可以是电源,也可以是磁源。如某些磁电式和霍尔等电磁感应式传感器即属此型。特点是,不需要变换(测量)电路即可有较大的电量输出。

以上两种型式,由于其转换元件起着能量转换的作用,故谓“能量转换型传感器”。

(c) 外源型 由利用被测量实现阻抗变换的转换元件构成;它必须通过带外电源的变换(测量)电路,才能获得电量输出。所谓“变换(测量)电路”,是指能把转换元件输出的电信号,调理成便于显示、记录、处理和控制的可用信号的电路,故又称“信号调理与转换电路”。常用的如电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器和脉冲调宽电路等。

实用中,传感器的特性要受到使用环境变化的影响,图0-1中(d)、(e)、(f)是目前消除环境干扰影响而广泛采用的线路补偿法构成型式。

(d) 相同传感器的补偿型 采用两个原理和特性完全相同的转换元件,并置于同一环境中,其中一个接受输入信号和环境影响,另一个只接受环境影响,通过线路,使后者消除前者的环境干扰影响。这种构成法在应变式、固态压阻式等传感器中常被采用。

(e) 差动结构补偿型 它也采用了两个原理和特性完全相同的转换元件,同时接收被测输入量,并置于同一环境中。巧妙的是,两个转换元件对被测输入量作反向转换,对环境干扰量作同向转换;通过变换(测量)电路,使有用输出量增加,干扰量相消。

(f) 不同传感器的补偿型 采用两个原理和性质不相同的转换元件,且不一定置于同一环境处。其中一个接受输入信号,并已知其受环境影响的特性;另一个接受环境影响量,并通过电路向前者提供等效的抵消环境影响的补偿信号。如采用热敏元件的温度补偿,采用压电补偿片的温度和加速度干扰补偿等,即为此例。

此外,还可根据需要将上述各种基本型式的传感器作选择组合,构成各种各样复合型传感器。

§0-3 传感器的分类及要求

用于测量与控制的传感器种类繁多:一种被测量,可以用不同的传感器来测量;而同一原理的传感器,通常又可测量多种非电量。因此,分类的方法也五花八门。了解传感器的分类,旨在加深理解,便于应用。表0-1列出了目前一些流行的分类方法。

除表列分类法外,还有按构成转换元件的功能材料分类的,如半导体传感器和陶瓷传感器(第11章)、光纤传感器(第9章)、高分子薄膜传感器(第6章)等;或与某种高技术、新技术相结合而得名的,如集成传感器(第11章)、智能传感器(第12章)、机器人传感器(第14章)、仿生传感器等等,不胜枚举。

无论何种传感器,作为测量与控制系统的首要环节,通常都必须具有快速、准确、可靠而又经济地实现信息转换的基本要求,即:

(1) 足够的容量——传感器的工作范围或量程足够大;具有一定过载能力。

表0-1 传感器的分类

分 类 法	型 式	说 明
按基本效应分	物理型、化学型、生物型等	分别以转换中的物理效应、化学效应等命名
按构成原理分	结 构 型 物 性 型	以其转换元件结构参数变化实现信号转换 以其转换元件物理特性变化实现信号转换
按能量关系分	能量转换型(自源型) 能量控制型(外源型)	传感器输出量直接由被测量能量转换而得 传感器输出量能量由外源供给, 但受被测输入量控制
按作用原理分	应变式、电容式、压电式、热电式等	以传感器对信号转换的作用原理命名
按输入量分	位移、压力、温度、流量、气体等	以被测量命名(即按用途分类法)
按输出量分	模 拟 式 数 字 式	输出量为模拟信号 输出量为数字信号

(2) 与测量或控制系统匹配性好, 转换灵敏度高——要求其输出信号与被测输入信号成确定关系(通常为线性), 且比值要大。

(3) 精度适当, 且稳定性高——传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求, 并长期稳定。

(4) 反应速度快, 工作可靠性好。

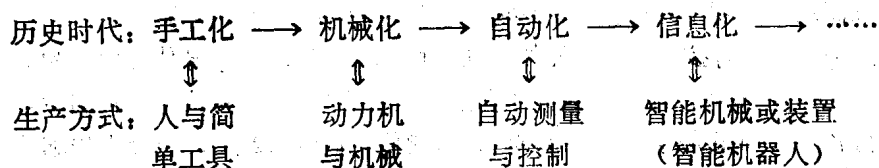
(5) 适用性和适应性强——动作能量小, 对被测对象的状态影响小, 内部噪声小而又不易受外界干扰的影响, 使用安全等。

(6) 使用经济——成本低, 寿命长, 且易于使用、维修和校准。

当然, 能完全满足上述性能要求的传感器是很少有的。我们应根据应用的目的、使用环境、被测对象状况、精度要求和信号处理等具体条件作全面综合考虑, 综合考虑的具体原则、性能及指标要求, 将在第一章中详细讨论。

§0-4 传感器的作用和地位

从生产技术的角度看, 人类社会已经或正在经历着手工化→机械化→自动化→信息化→……的发展历程。在这发展历程中的每一历史时代, 都有其代表性的生产方式作为标志, 这就是:



而每一种生产方式, 又要以相应的科学技术水平作支柱。很显然, 科技进步的重要作用在于, 不断用机(仪)器来代替和扩充人的体力劳动(第一次产业革命)和脑力劳动(第二次产业革命), 以大大提高社会生产力。为此目的, 人们在不懈地探索着机器与人之间的

机能模拟——人工智能，并不断地创制出拟人的装置——自动化机械、以至智能机器人（第三次产业革命的象征）。

由图0-2所示的人与机器的机能对应关系可见，作为模拟人体感官的“电五官”（传感器），是系统对外界猎取信息的“窗口”；如果对象亦视为系统，从广义上讲传感器是系统之间实现信息交流的“接口”，它为系统提供着赖以进行处理和决策所必须的对象信息，它是高度自动化系统乃至现代尖端技术必不可少的关键组成部分。略举数例：

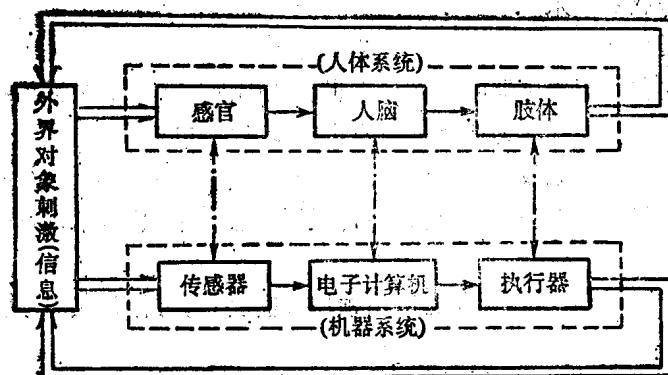


图0-2 人与机器的机能对应关系

仪器仪表是科学研究和工业技术的“耳目”。在基础学科和尖端技术的研究中，大到上千光年的茫茫宇宙，小到 10^{-13}cm 的粒子世界；长到数十亿年的天体演化，短到 10^{-24}s 的瞬间反应；高达 $5 \times 10^4 \sim 10^8\text{℃}$ 的超高温，或 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 的超高压，低到 0.01K 的超低温、或 10^{-13}Pa 的超真空；强到 25T 以上的超强磁场，弱到 10^{-11}T 的超弱磁场……，要测量如此极端巨微的信息，单靠人的感官或一般电子设备远已无能为力，必须借助于配备有相应传感器的高精度测试仪器或大型测试系统才能奏效。因此，某些传感器的发展，是一些边缘科学研究和高、新技术开发的先驱。

在工业与国防领域，传感器更有它用武之地。高度自动化的工厂、设备、装置或系统，可以说是传感器的大集合地。例如：工厂自动化中的柔性制造系统(FMS)，或计算机集成制造系统(CIMS)；几十万千瓦的大型发电机组；连续生产的轧钢生产线；无人驾驶的自动化汽车；多功能武备攻击指挥系统；直至宇宙飞船或星际、海洋探测器等等，均需要配置数以千计的传感器，用以检测各种各样的工况参数，以达到运行监控的目的。

当传感器技术在工业自动化、军事国防和以宇宙开发、海洋开发为代表的尖端科学与工程等重要领域广泛应用的同时，它正以自己的巨大潜力，向着与人们生活密切相关的方面渗透；生物工程、医疗卫生、环境保护、安全防范、家用电器等方面的传感器已层出不穷，并在日新月异地发展。

可见，从茫茫太空，到浩瀚海洋；从各种复杂的工程系统，到日常生活的衣食住行，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器，可以毫不夸张地说，未来的社会，将是充满传感器的世界！

§0-5 传感器开发的新趋向

传感器开发的新趋向包括社会对传感器需求的新动向和传感器新技术的发展趋势这两个方面。

一、社会对传感器需求的新动向

社会需求是传感器技术发展的强大动力。随着现代化科学技术，特别是大规模集成电路技术的飞速发展和“电脑”的普及，传感器在新的技术革命中的地位和作用将更为突出；一股竞相开发和应用传感器的热潮已在世界范围内掀起。这是因为：(1)“电五官”落后于“电脑”的现状，已成为微型计算机进一步开发和应用的一大障碍；(2)许多有竞争力的新产品开发和卓有成效的技术改造，都离不开传感器；(3)传感器的应用直接带来了明显的经济效应和社会效益；(4)传感器普及于社会各个领域，将造成良好的销售前景。

图0-3展示了一些国家对传感器的应用领域及需要量，可作为我们对传感器产业和产品开发的参考。

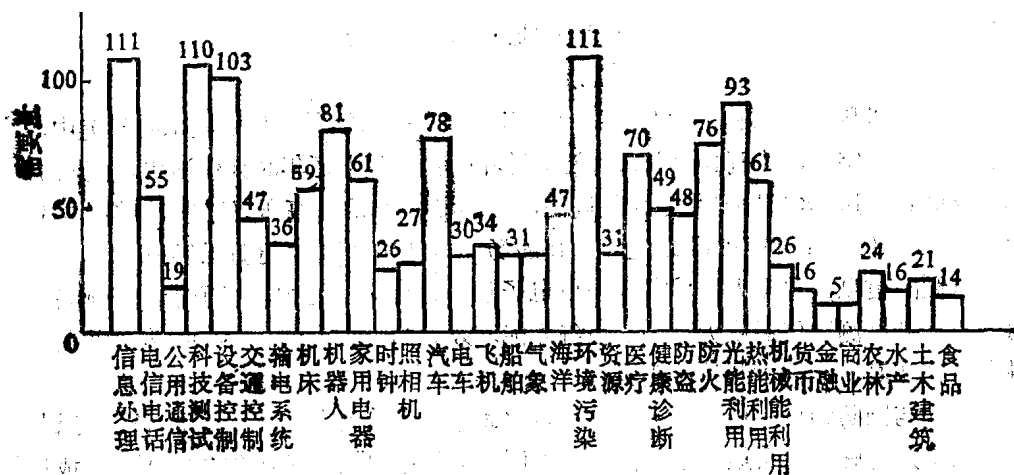


图0-3 传感器的应用领域及需要量

二、传感器技术的发展趋势

目前的传感器，无论在数量上、质量上和功能上，还远不适应社会多方面发展的需要。当前，人们在充分利用先进的电子技术条件，研究和采用合适的外部电路以及最大限度地提高现有传感器的性能价格比的同时，正在寻求传感器技术发展的新途径。

1. 开发新型传感器

鉴于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。其中利用量子力学诸效应研制的高灵敏阈传感

器，用来检测极微弱信号，是传感器技术发展的新趋势之一。例如：利用核磁共振吸收效应的磁敏传感器，可将检测限扩展到地磁强度的 10^{-7} ；利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器，可测量 10^{-6} K的超低温^[2]；以及由于光子滞后效应的利用，出现了响应速度极快的红外传感器，等等。

此外，目前刚刚起步，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。

2. 传感器的集成化和多功能化

固态功能材料——半导体、电介质、强磁体的进一步开发和集成技术的不断发展，为传感器集成化开辟了广阔的前景。

所谓集成化，就是在同一芯片上，或将众多同一类型的单个传感器件集成为一维线型、二维阵列(面)型传感器；或将传感器件与调理、补偿等电路集成一体化。前一种集成化使传感器的检测参数由“点→线→面→体”多维图象化，甚至能加上时序，变单参数检测为多参数检测；后一种集成化使传感器由单一的信号变换功能，扩展为兼有放大、运算、干扰补偿等多功能——实现了横向和纵向的多功能化。

3. 传感器的智能化

“电五官”与“电脑”的结合，就是传感器的智能化。智能化传感器不仅具有信号检测、转换功能，同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。如进一步将传感器与计算机的这些功能集成于同一芯片上，就成为智能传感器。

4. 研究生物感官，开发仿生传感器

大自然是生物传感器的优秀设计师。它通过漫长的岁月，不仅造就了集多种感官于一身的人类本身，而且还设计了许多多功能奇特、性能高超的生物传感器。例如狗的嗅觉(灵敏阈为人的 10^6 倍)；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)；蛇的接近觉(分辨力达 0.001°C 的红外测温传感器)等等。这些动物的感官性能，是当今传感器技术所望尘莫及的。研究它们的机理，开发仿生传感器，也是引人注目的方向。

第一章 传感器技术基础

§1-1 传感器的一般数学模型

传感器作为感受被测量信息的器件,希望它能按照一定的规律输出有用信号。因此,需要研究其输出-输入关系及特性,以使用理论指导其设计、制造、校准与使用。为此,有必要建立传感器的数学模型。由于传感器可能用来检测静态量(即输入量是不随时间变化的常量)、准静态量或动态量(即输入量是随时间而变的变量),应该以带随机变量的非线性微分方程作为数学模型。但这将在数学上造成困难。实际上,传感器在检测静态量时的静态特性与检测动态量时的动态特性可以分开来考虑。于是对应于输入信号的性质,传感器的数学模型常有静态与动态之分。

一、静态模型

静态模型是指在静态条件下(即输入量对时间 t 的各阶导数为零)得到的传感器数学模型。若不考虑滞后及蠕变,传感器的静态模型可用一代数方程表示,即

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度,常用 K 或 S 表示;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项的待定常数。

这种多项式代数方程可能有四种情况,如图1-1所示。这种表示输出量与输入量之间的关系曲线称为特性曲线。通常希望传感器的输出-输入关系呈线性,并能正确无误地反映被测量的真值,即图1-1(a)所示。这时,传感器的数学模型为

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

当传感器特性出现如图1-1中(b)、(c)、(d)所示的非线性情况时,就必须采取线性化补偿措施。

二、动态模型

有的传感器即使静态特性非常好,但由于不能很好反映输入量随时间(尤其快速)变化的状况而导致严重的动态误差。这就要求认真研究传感器的动态响应特性。为此建立的数

学模型字称为动态模型。

1. 微分方程

如前所述，由于数学上的原因，在研究传感器的动态响应特性时，一般都忽略传感器的非线性和随机变化等复杂的因素，将传感器作为线性定常系统考虑。因而其动态模型可以用线性常系数微分方程来表示：

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} \\ + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} \\ + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ ——取决于传感器参数的常数。对于传感器，除 $b_0 \neq 0$ 外，一般 $b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0$ 。

用微分方程作为传感器数学模型的好处是，通过求解微分方程容易分清暂态响应与稳态响应。因为其通解仅与传感器本身的特性及起始条件有关，而特解则不仅与传感器的特性有关，而且与输入量 x 有关。缺点是求解微分方程很麻烦，尤其当需要通过增减环节来改变传感器的性能时显得很不方便。

2. 传递函数

如果运用拉氏变换将时域的数学模型(微分方程)转换成复数域(s 域)的数学模型(传递函数)，上述方法的缺点就得以克服。由控制理论知，对于用式(1-3)表示的传感器，其传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-4)$$

式中 $s = \sigma + j\omega$ ，是个复数，称为拉氏变换的自变量。

可见传递函数是又一种以传感器参数来表示输出量与输入量之间关系的数学表达式，它表示了传感器本身的特性，而与输入量无关。用框图示意如图1-2。

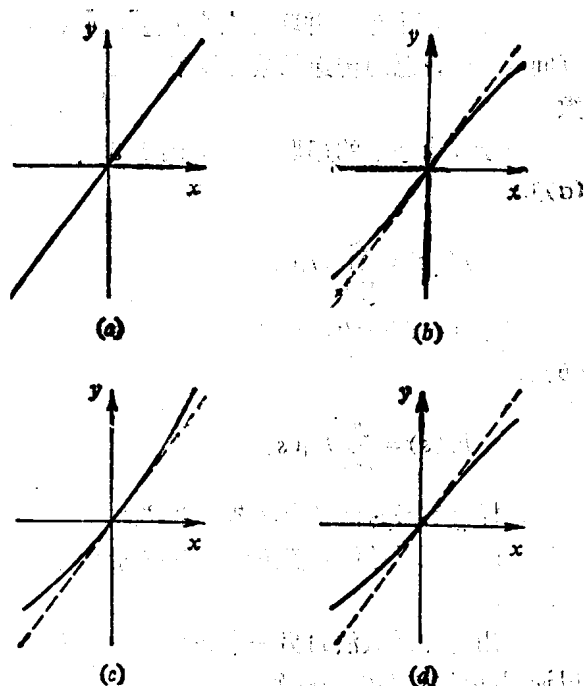


图1-1 传感器的静态特性

- (a) $y = a_1 x$;
- (b) $y = a_1 x + a_2 x^3 + a_3 x^5 + \dots$;
- (c) $y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots$;
- (d) $y = a_1 x + a_2 x^2 + \dots$

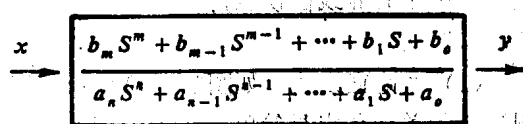


图1-2 框图表示法