

21世纪高等学校电子信息类专业优秀教材

CHUANGANQI JISHU

(第3版)

传感器技术

主编◎贾伯年 俞朴 宋爱国



东南大学出版社

传 感 器 技 术

(第 3 版)

贾伯年 俞 朴 宋爱国 主 编

东南大学出版社

· 南 京 ·

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、测量电路和应用场合,择要阐述主要传感器类型的设计和选用原则与方法。全书共 14 章,可分为四部分:第一部分(绪论与第 1 章)为共性基础部分,以新颖的构思和笔法介绍了传感器的基本概念与构成法、传感器的数学模型与特性、提高性能的措施与标定技术等;第二部分(2~8 章)为常用传感器的分析与综合;第三部分(9~13 章)分别介绍了光纤、数字式、化学、生物等新型传感器及传感检测技术;第四部分(第 14 章)概要介绍了当代传感器技术前沿的、具有广阔发展和应用前景的主要新技术。

该书结构严密,内容丰富,与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谨的理论性与系统性,又兼有工具书那种启示解决问题的实用性。取材传统与新型俱备,广度与深度兼顾,以求适应不同层次对象的需要;可作为测量与控制技术、仪器仪表、自动化及相关机电类专业的本科生、大专生和研究生教材,也可供其他专业师生或有关工程技术人员参考。

本教材的教学课件可在以下网站下载:

[http://ins22web.seu.edu.cn /JPKC/](http://ins22web.seu.edu.cn/JPKC/)

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术 / 贾伯年, 俞朴, 宋爱国主编. 3 版.
南京: 东南大学出版社, 2007. 2
ISBN 978-7-5641-0659-1

I. 传… II. ①贾…②俞…③宋… III. 传感器-
高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 006355 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人: 任 汉

江苏省新华书店经销 丹阳兴华印刷厂印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张 23.5 字数 572 千字

2007 年 2 月第 3 版 2007 年 8 月第 19 次印刷

印数 63001~67000 册

ISBN 978-7-5641-0659-1/TP.106

定价: 30.00 元

第3版 前言

跨入信息科学与技术全新发展的 21 世纪以来,信息技术已成为现代社会发展的一股新的强大推动力。“十五”期间,我国信息技术和产业以令人惊异的速度向前发展,并已成为支撑我国“两个文明”建设的重要物质基础。正因为如此,我国“十一五”规划又把它作为重要战略产业而列入了国家重点发展的科技专项。传感器技术作为信息技术和产业的重要组成部分,也因此而受到国家和社会各行各业前所未有的高度重视,并得到了蓬勃发展。在新的形势下,作为高等学校相关学科和专业的重要课程和教材,《传感器技术》的编者们势必面临着这样的思考:如何适应我国当前创新型社会发展的需求?如何努力为创新型人才的培养尽一份责任?

本着“与时俱进、与时俱新”的指导思想,本书第 3 版较之前版在内容上又作了较多更新,在结构上又作了较大调整:新编了“化学传感器”、“生物传感器”和“传感器新技术”三章,其他各章也不同程度地充实了新内容;为凸显教科书的体系,全书结构由原三部分调整、扩展为四部分,即(1)传感器技术基础,(2)常用传感器,(3)新型传感器,(4)传感器新技术。新编的“传感器新技术”部分,较系统、全面地归纳了当代传感器技术前沿一些主要的新技术内容,引入了一些新概念、新思路和新方法。作上述点滴改革,旨在对学生的创新思维培养有所启迪,也为广大读者对当前传感器技术的现状和未来展示一片较广阔的视野。

本书第 3 版由东南大学贾伯年教授、上海交通大学俞朴教授、东南大学宋爱国教授主编。新编第 11 章“化学传感器”由东南大学崔建伟副教授(博士)编写;第 12 章“生物传感器”和第 14 章“传感器新技术”由宋爱国教授(博士后)编写;第 13 章“传感检测技术”中新编“声表面波检测”由上海交通大学陶卫副教授(博士)编写;第 8 章“光电式传感器”由上海交通大学赵辉教授(博士)在原版基础上作了修改和增补;绪论及其他各章由原版编者作了调整、修改和补充。全书仍由贾伯年教授负责统稿。

传感器技术涉及的学科知识深广,而编者的学识、水平有限;疏误、不当处,诚请广大读者指正。

深切感谢所有为本书付出辛勤劳动和关心、支持本书的人们!

编者

2006 年 12 月

第1版 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,专业面的拓宽和适应传感器开发、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

- 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····· (4)
- 0.4 传感器的地位和作用····· (5)
- 0.5 传感器的发展趋势····· (6)

第1章 传感器技术基础

- 1.1 传感器的一般数学模型····· (10)
静态模型·动态模型
- 1.2 传感器的特性与指标····· (12)
传感器的静态特性·传感器的动态特性·传感器的互换性·传感器的性能指标一览
- 1.3 改善传感器性能的技术途径····· (23)
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、微差法与闭环技术·补偿、校正与“有源化”·集成化、智能化与信息融合
- 1.4 传感器的合理选用····· (26)
合理选择传感器的基本原则与方法·传感器的正确使用·无合适传感器可供选用时的对策(举例)
- 1.5 传感器的标定与校准····· (29)
传感器的静态标定·传感器的动态标定

第2章 电阻式传感器

- 2.1 电阻应变计的基本原理与结构····· (34)
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····· (37)
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····· (42)
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····· (44)
应变计的选用·应变计的使用
- 2.5 测量电路····· (47)
应变电桥概述·直流电桥及其输出特性·交流电桥及其平衡·电阻式

	传感器的综合补偿与调整技术	
2.6	电阻应变计式传感器·····	(55)
	原理和特点·应变计式传感器	
2.7	压阻式传感器·····	(59)
	压阻式传感器基本原理·压阻式传感器应用	
第3章 变磁阻式传感器		
3.1	传感器线圈的电气参数分析·····	(65)
3.2	自感式传感器·····	(69)
	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)·····	(79)
	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·····	(84)
	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·····	(86)
	工作原理·结构类型·测量电路·电涡流式传感器的应用	
3.6	压磁式传感器与磁致伸缩执行器·····	(93)
	磁致伸缩效应与压磁效应·压磁式传感器·磁致伸缩执行器	
第4章 电容式传感器		
4.1	工作原理、结构及特性·····	(99)
	变极距型电容传感器·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·····	(106)
	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·····	(109)
	电容式位移传感器·电容式加速度传感器·电容式力和压力传感器· 电容式物位传感器	
第5章 磁电式传感器		
5.1	基本原理与结构型式·····	(115)
5.2	磁电式传感器的动态特性·····	(117)
5.3	磁电式传感器的误差及补偿·····	(119)
	非线性误差·温度误差·永久磁铁的稳定性	
5.4	两种测振传感器·····	(122)
	动铁式振动传感器·动圈式振动速度传感器	
5.5	霍尔传感器·····	(123)
	霍尔元件及霍尔效应·霍尔元件主要特性参数·不等位电势和温度误差的补偿·霍尔传感器应用	
5.6	其他磁敏传感器·····	(128)
	磁敏电阻器·磁敏二极管	

第6章 压电式传感器

- 6.1 压电效应及材料 (135)
压电效应·压电材料
- 6.2 压电方程及压电常数 (139)
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 (144)
等效电路·测量电路
- 6.4 压电式传感器及其应用 (148)
应用类型、形式和特点·压电式加速度传感器·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 (159)
横向灵敏度·环境温度和湿度·安装差异及基座应变·噪声

第7章 热电式传感器

- 7.1 热电阻传感器 (163)
热电阻·热敏电阻
- 7.2 热电偶传感器 (167)
热电效应及其工作定律·热电偶
- 7.3 热电式传感器的应用 (173)
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8章 光电式传感器

- 8.1 概述 (177)
- 8.2 光源 (178)
对光源的要求·常用光源
- 8.3 常用光电器件 (180)
外光电效应及器件·内光电效应及器件·光电器件的特性
- 8.4 新型光电器件 (186)
位置敏感器件(PSD)·集成光敏器件·固态图像传感器·高速光电器件·半导体色敏器件
- 8.5 光电式传感器 (194)
光电式传感器的类型·光电式传感器的应用

第9章 光纤传感器

- 9.1 光纤传感器基础 (201)
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 (205)
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 (215)
光纤液位传感器·光纤角速度传感器(光纤陀螺)·光纤电流传感器·光纤光栅传感器

第 10 章 数字式传感器

- 10.1 感应同步器····· (221)
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····· (229)
光栅的结构与测量原理·数字转换原理
- 10.3 编码器····· (233)
基本结构与原理·旋转式光电编码器·测量电路
- 10.4 频率式传感器····· (240)
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
- 10.5 集成数字式传感器····· (244)
集成数字温度传感器·集成数字加速度传感器·集成数字图像传感器

第 11 章 化学传感器

- 11.1 概述····· (248)
- 11.2 离子敏传感器····· (249)
离子敏传感器的结构与分类·离子敏传感器离子选择原理·离子敏电
极(ISE)·场效应管型离子敏传感器(ISFET)·离子敏传感器的应用
- 11.3 气体传感器····· (256)
概述·半导体气敏器件·固体电解质气体传感器·其他气体传感器
- 11.4 湿度传感器····· (262)
概述·溶性电解质湿度传感器·固体电解质湿度传感器·陶瓷湿度传
感器·高分子湿度传感器

第 12 章 生物传感器

- 12.1 生物传感器基础····· (269)
- 12.2 酶传感器····· (272)
酶的特性和分类·酶电极的工作原理·酶传感器的应用
- 12.3 免疫传感器····· (276)
免疫概述·免疫传感器工作原理·免疫传感器的应用
- 12.4 细胞传感器····· (282)
概述·细胞传感器的分类及原理·细胞传感器的发展趋势
- 12.5 基因传感器····· (287)
概述·基因传感器的分类及原理·基因传感器的发展趋势

第 13 章 传感检测技术

- 13.1 超声检测····· (293)
超声检测的物理基础·超声波探头·超声波检测技术的应用
- 13.2 声表面波检测····· (298)
声表面波检测的物理基础·声表面波检测的基本原理·声表面波检测
技术的应用
- 13.3 红外检测····· (303)

	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	
13.4	核辐射检测·····	(307)
	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	
13.5	激光检测·····	(312)
	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	
13.6	微波检测·····	(314)
	微波检测的基本知识·微波传感器·微波检测技术的应用	
第14章 传感器新技术		
14.1	传感器集成化技术与集成传感器·····	(319)
	传感器集成化的途径·几种集成传感器原理·典型温度集成传感器实例	
14.2	微电子机械系统(MEMS)技术及MEMS传感器·····	(324)
	概述·典型的MEMS传感器	
14.3	传感器智能化技术与智能式传感器·····	(327)
	智能式传感器的构成与特点·传感器智能化设计·传感器智能化实例·智能传感器	
14.4	机器人传感及临场感技术·····	(333)
	机器人传感器的功能、分类和特点·机器人力觉传感器·机器人广义触觉传感器·机器人临场感技术	
14.5	多传感器信息融合技术·····	(341)
	多传感器信息融合的基本概念和原理·多传感器信息融合的结构模型·多传感器信息融合的一般方法·多传感器信息融合实例	
14.6	智能结构·····	(346)
	智能结构的概念和作用·智能结构的组成·光纤型智能结构实例	
14.7	智能超分子体系(人工薄膜技术)·····	(349)
	概述·生物膜·超分子LB人工膜技术	
14.8	超导传感器技术·····	(353)
	超导现象——约瑟夫逊效应·超导传感器的工作原理·超导传感器的结构·超导传感器的测量系统·超导传感器的应用	
14.9	传感器网络技术·····	(357)
	概述·传感器网络的体系结构·典型传感器网络节点实例·传感器网络的应用	
	综合思考题及习题 ·····	(363)
	参考文献 ·····	(364)

绪 论

0.1 传感器基本概念与物理定律

0.1.1 传感器的概念

何谓传感器(Transducer, Sensor)? 生物体的感官就是天然的传感器。如人的“五官”^①——眼、耳、鼻、舌、皮肤分别具有视、听、嗅、味、触觉。人们的大脑神经中枢通过五官的神经末梢(感受器)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。国家标准(GB/T 7765—87)把它定义为:能感受规定的被测量(包括物理量、化学量、生物量等)并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件(Sensing Element)和转换元件(Transduction Element)组成。

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或装置。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:能把外界信息或能量转换成光信号或能量输出的器件或装置。

在此,我们引入传感器的广义定义:“凡是利用一定的物质(物理、化学、生物)法则、定理、定律、效应等进行能量转换与信息转换,并且输出与输入严格一一对应的器件或装置均可称为传感器。”因此,在不同的技术领域,传感器又被称作检测器、换能器、变换器等等。

随着信息科学与微电子技术,特别是微型计算机与通信技术的迅猛发展,近期传感器的发展走上了与微处理器、微型计算机和通信技术相结合的必由之路,传感器的概念因此而进一步扩充,如智能(化)传感器、传感器网络化等新概念应运而生。

传感器技术,则是以传感器为核心论述其内涵、外延的学科;也是一门涉及测量技术、功能材料、微电子技术、精密与微细加工技术、信息处理技术和计算机技术等相互结合形成的密集型综合技术。

0.1.2 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

① 现代生物医学证明,人类体内尚具有第六感觉——平衡觉,通过它,人们能够感知自身的姿势。

基本定律和法则有以下四种类型:

(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 包括运动场的运动定律,电磁场的感应定律等,其相互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;利用电磁感应定律研制的自感、互感、电涡流式传感器;利用运动定律与电磁感应定律研制的磁电式传感器等。利用场的定律构成的传感器,其形状、尺寸(结构)决定了传感器的量程、灵敏度等主要性能,故此类传感器可统称为“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、磁阻、光阻、湿阻等效应,可分别做成压敏、热敏、磁敏、光敏、湿敏等传感器;利用压电晶体物质法则——压电效应,可制成压电、声表面波、超声传感器等等。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,当今的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,通常由敏感元件和转换元件组成。其典型的组成及功能框图如图 0-1 所示。其中敏感元件是构成传感器的核心。传感器主要敏感元件见表 0-1。

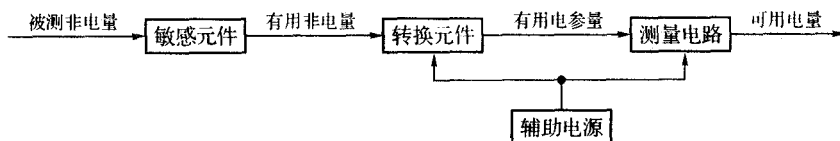


图 0-1 传感器典型组成及功能框图

图 0-1 的功能原理具体体现在结构型传感器中。

对物性型传感器而言,其敏感元件集敏感、转换功能于一身,即可实现“被测非电量→有用电量”的直接转换。

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 0-2 所示为典型的传感器构成方法:

(a)自源型 为仅含有敏感元件的最简单、最基本的传感器构成型式。此型式的特点是无需外能源,故又称无源型;其敏感元件具有从被测对象直接吸取能量,并转换成电量的效应;但输出能量较弱,如热电偶、压电器件等。

(b)辅助能源型 它是敏感元件外加辅助激励能源的构成型式。辅助能源可以是电源,也可以是磁源。传感器输出的能量由被测对象提供,因此是“能量转换型”结构。如光电

管、光敏二极管、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。

表 0-1 传感器的主要敏感元件

功 能	主 要 敏 感 元 件
力(压)一位移转换	弹性元件(环式、梁式、圆柱式、膜片式、波纹膜片式、膜盒、波纹管、弹簧管)
位移敏	电位器、电感、电容、差动变压器、电涡流线圈、容栅、磁栅、感应同步器、霍尔元件、光栅、码盘、应变片、光纤、陀螺
力 敏	半导体压阻元件、压电陶瓷、石英晶体、压电半导体、高分子聚合物压电体、压磁元件
热 敏	金属热电阻、半导体热敏电阻、热电偶、PN 结、热释电器件、热线探针、强磁性体、强电介质
光 敏	光电管、光电倍增管、光电池、光敏二极管、光敏三极管、色敏元件、光导纤维、CCD、热释电器件
磁 敏	霍尔元件、半导体磁阻元件、磁敏二极管、铁磁体金属薄膜磁阻元件(超量子干涉器件 SQUID)
声 敏	压电振子
射线敏	闪烁计数管、电离室、盖格计数管、中子计数管、PN 二极管、表面障壁二极管、PIN 二极管, MIS 二极管、通道型光电倍增管
气 敏	MOS 气敏元件、热传导元件、半导体气敏电阻元件、浓差电池、红外吸收式气敏元件
湿 敏	MOS 湿敏元件、电解质(如 LiCl)湿敏元件、高分子电容式湿敏元件、高分子电阻式湿敏元件、热敏电阻式、CFT 湿敏元件
物质敏	固相化酶膜、固相化微生物膜、动植物组织膜、离子敏场效应晶体管(ISFET)

(c)外源型 它由能对被测量实现阻抗变换的敏感元件和带有外电源的变换(测量)电路构成。其输出能量由外电源提供,是属于“能量控制(调制)型”结构,如电阻应变式、电感、电容式位移传感器及气敏、湿敏、光敏、热敏等传感器均属于此。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”。常用的变换(测量)电路有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器和脉冲调宽电路等。

实用中,这种构成形式的传感器特性要受到使用环境变化的影响,图 0-2 中(d)、(e)、(f)是目前消除环境变化的干扰而广泛采用的线路补偿法构成型式。

(d)相同敏感元件的补偿型 采用两个原理和特性完全相同的敏感元件,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敏感元件,同时接收被测输入量,并置于同一环境中。巧妙的是,两个敏感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,使有用输出量相加,干扰量相消。如差动电阻式、差动电容式、差动电感式传感器等即属此型。

(f)不同敏感元件的补偿型 采用两个原理和性质不相同的敏感元件,两者同样置于同一环境中。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。

(g)反馈型 这种构成法引入了反馈控制技术,用正向、反向两个敏感元件分别作测量和反馈元件,构成闭环系统,使传感器输入处于平衡状态。因此,亦称为闭环式传感器或平

衡式传感器^{[19][43]},如图0-2(g)所示。这种传感器系统具有高精度、高灵敏度、高稳定、高可靠性等特点,例如力平衡式压力、称重、加速度传感器等。

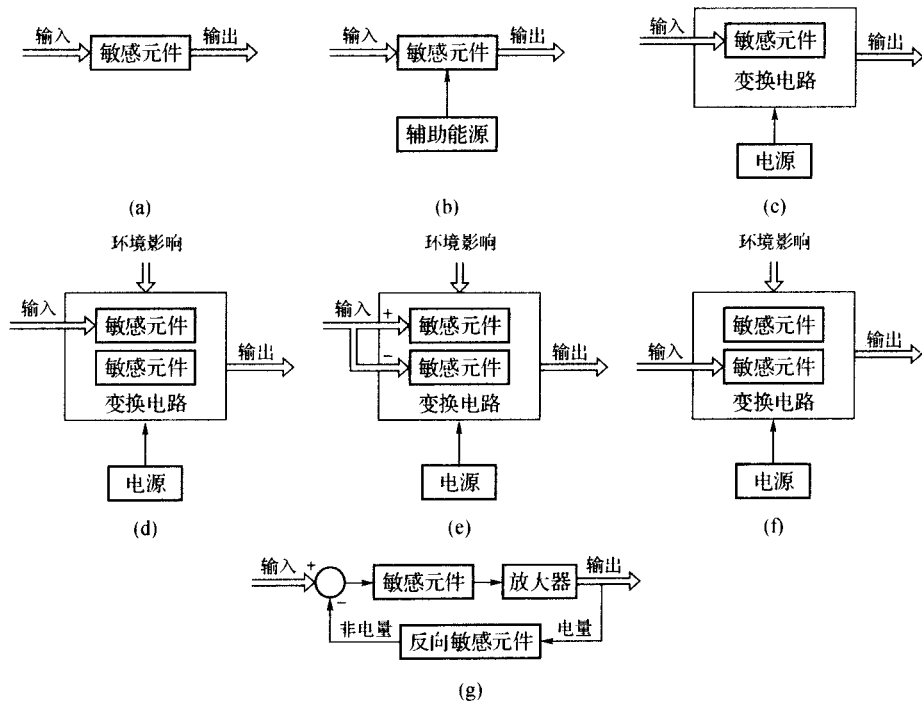


图 0-2 传感器的构成型式^①

在此,我们再引入“传感器系统”的构成概念。

目前,人们已日益重视借助于各种先进技术和技术手段来实现传感器的系统化。例如利用自适应控制技术、微型计算机软硬件技术来实现传统传感器的多功能与高性能。这种由传感器技术和其他先进技术相结合,从结构与功能的扩展上构成了一个传感器系统。或者,可根据复杂对象监控的需要,将上述各种基本型式的传感器作选择组合,构成一个复杂的多传感器系统。由此,近年来也相应出现了多传感器信息融合技术(见 14.5)。很显然,智能传感器(见 14.3)是十分先进的传感器系统。

0.3 传感器的分类及要求

用于不同科技领域或行业的传感器种类繁多: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,通常又可分别测量多种被测量。因此,分类的方法可五花八门。了解传感器的分类,旨在从总体上加深理解,便于应用。表 0-2 列出了目前一些流行的分类方法。

^① 在工程系统的电气简图中,传感器的图形符号可用正三角形(表示敏感元件)和正方形(表示转换元件)的组合图形来表示:(1) x—写入被测量符号; *—写入转换原理。(2) 对对角线表示能量转换; A、B 分别表示输入、输出信号。

表 0-2 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
按传感机理分	结构型(机械式、感应式、电参量式等) 物性型(压电、热电、光电、生物、化学等)	以敏感元件结构参数变化实现信号转换 以敏感元件物性效应实现信号转换
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
按功能性质分	力敏、热敏、磁敏、光敏、气敏等	以对被测量的敏感性性质命名
按功能材料分	固态(半导体、半导瓷、电介质)、光纤、膜、超导等	以敏感功能材料的名称或类别命名
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	输出量为模拟信号或数字信号

除表列分类法外,还有按与某种高技术、新技术相结合而得名的,如集成传感器、智能传感器、机器人传感器、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,通常都必须满足快速、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。

(2)灵敏度高,精度适当——即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;传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。

(3)响应速度快,工作稳定、可靠性好。

(4)适用性和适应性强——体积小,重量轻,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;其输出力求采用通用或标准形式,以便与系统对接。

(5)使用经济——成本低,寿命长,且便于使用、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、精度要求和信息处理等具体条件作全面综合考虑。综合考虑的具体原则、方法、性能及指标要求,将在第 1 章中详细讨论。

0.4 传感器的地位和作用

从科学技术发展的角度看,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。当今的社会信息化靠的是现代信息技术——传感器技术、通信技术和计算机技术三大支柱的支撑,由此可见:传感器技术在国家工业化和社会信息化的进程中有着突出的地位和作用。

众所周知,科技进步是社会发展的强大推动力。科技进步的重要作用在于不断用机(仪)器来代替和扩展人的体力劳动和脑力劳动,以大大提高社会生产力。为此目的,人们不懈地探索着机器与人之间的功能模拟——人工智能,并不断地创制出拟人的装置——自动化机械,乃至智能机器人。

由图 0-3 所示的人与机器的功能对应关系可见,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需的对象信息，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：

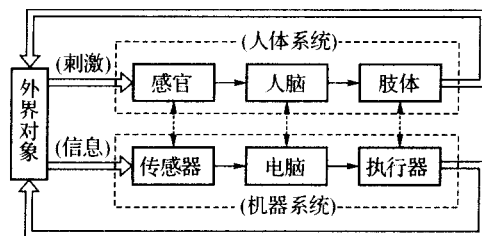


图 0-3 人与机器的功能对应关系

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 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8$ °C 的超高温，或 3×10^8 Pa 的超高压，低到 10^{-6} K 的超低温^[7]，或 10^{-13} Pa 的超真空；强到 25 T 以上的超强磁场，弱到 10^{-13} 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。在以高技术对抗和信息战为主要特征的现代战争中，在高度自动化的工厂、设备、装置或系统中，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，大型基础设施工程(如大桥、隧道、水库、大坝等)，多功能武装攻击指挥系统，直到航天飞机、宇宙飞船或星际、海洋探测器等等，均需要配置大量的、数以千计的传感器，用以检测各种各样的工况参数或对象信息，以达到识别目标和运行监控的目的。

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、网络家居等方面的传感器已层出不穷，并在日新月异地发展。据新近国外有一家技术市场调查公司预测：未来五年，用嵌入大量微传感器的电脑芯片做成的服装、饰物将风行世界市场。

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，几乎每一项现代化内容，都离不开各种各样的传感器。有专家感言：“没有传感器……，支撑现代文明的科学技术就不可能发展。”日本业界更声称：“支配了传感器技术就能够支配新时代！”为此，日本把传感器技术列为国家重点发展的十大技术之首。美国早在 20 世纪 80 年代就宣称：世界已进入传感器时代！在涉及国家经济繁荣和国家安全至关重要的 22 项重大技术中，传感器技术就有 6 项；而涉及保护美国武器系统质量优势至关重要的关键技术中，有 8 项为无源传感器。可以毫不夸张地说，21 世纪的社会，必将是传感器的世界！

0.5 传感器的发展趋势

(1) 发现新效应，开发新材料、新功能

传感器的工作原理是基于各种物理的、化学的、生物的效应和现象;具有这种功能的材料谓之“功能材料”或“敏感材料”。显而易见,新的效应和现象的发现,是新的敏感材料开发的重要途径;而新的敏感材料的开发,是新型传感器问世的重要基础。

例如,约瑟夫逊(Josephson)效应——一种超导体超导电流的量子干涉效应的发现,导致多种超性能敏感器件的开发:利用直流约瑟夫逊效应研制成超导量子干涉器(SQUID),可用于测量诸如人体心脏和脑活动所产生的微磁场变化,分辨力高于 10^{-13} T;利用交流约瑟夫逊效应研制的电压-频率(V-F)变换器,其精确度可达 10^{-8} ,且稳定性极高,不受环境温度、振动干扰,无漂移和老化;利用约瑟夫逊效应的热噪声研制的温度传感器,可测量 10^{-6} K的超低温^[7]。

又如电流变(Electrorheologic, ER)效应——一种电流变材料(常态为液体,ERF)在外电场控制下能瞬间(μ s、ms级)产生可逆性“液态-固态”突变,致使其粘度、阻尼、剪切强度等力学性能快速响应的现象。之后,利用这种ER效应开发的“电-机特性”转换元件,因其具有低能耗、快速响应、可逆性、无级柔性变换、无磨损、低噪声、长寿命等特点,并能将高速计算机的电指令直接转换成机械动作的操作过程,被誉为“有潜力成为电气-机械转换中能效最高的一种产品”。美国科学家称:“ER将会产生一场较当年半导体材料影响更大的技术革命”和“一系列的工业技术革命”。可见,电流变效应的研究和电流变材料的应用,具有十分巨大的发展潜力和十分诱人、令人鼓舞的前景^[49]。

还需指出,探索已知材料的新功能与开发新材料,对研制新型传感器来说同样重要。有些已知材料,在特定的配料组方和制备工艺条件下,会呈现出全新的敏感功能特性。例如,用以研制湿敏传感器的 Al_2O_3 基湿敏陶瓷早已为人们所知;近年来,我国学者又成功地研制出以 Al_2O_3 为基材的氢气敏、酒精敏、甲烷敏三种类型的气敏元件。与同类型的 SnO_2 、 Fe_2O_3 、 ZnO 基气敏器件相比,具有更好的选择性、低工作温度和较强的抗温、抗湿能力。这种开发已知材料新功能或多功能的成果绝非仅有,值得关注。

(2)传感器的多功能集成化和微型化

所谓集成化,就是在同一芯片上,或将众多同类型的单个传感器集成为一维、二维或三维阵列型传感器;或将传感器与调理、补偿等处理电路集成一体化。前一种集成化使传感器的检测参数实现“点→线→面→体”多维图像化,甚至能加上时序控制等软件,变单参数检测为多参数检测,例如将多种气敏元件,用厚膜制造工艺集成制作在同一基片上,制成能检测氧、氨、乙醇、乙烯四种气体浓度的多功能气体传感器;后一种集成化使传感器由单一的信号转换功能,扩展为兼有放大、运算、补偿等多功能。高度集成化的传感器,将是两者有机地融合,以实现多信息与多功能集成一体化的传感器系统(详见第14章)。

微米/纳米技术的问世,微机械加工技术的出现,使三维工艺日趋完善,这为微型传感器的研制铺平了道路。微型传感器的显著特征是体积微小、重量很轻(体积、重量仅为传统传感器的几分之一甚至几百分之一)。其敏感元件的尺寸一般为微米级。它是由微加工技术(光刻、蚀刻、淀积、键合等工艺)制作而成。如今,传感器的发展有一股强劲的势头,这就是正在摆脱传统的结构与生产,而转向优先选用硅材料,以微机械加工技术为基础,以仿真程序为工具的微结构设计,来研制各种敏感机理的集成化、阵列化、智能化硅微传感器。这一现代传感器技术国外称之为“专用集成微型传感器技术”ASIM(Application Specific Integrated Microtransducer)。这种硅微传感器一旦付诸实用,将对众多高科技领域——特