

GAODENG YUANXIAO SHIERWU DIANZI KEXUE JISHULEI CONGSHU  
高等院校“十二五”电子科学技术类丛书



CHUANGANQI JISHU

# 传感器技术

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 ○ 编

(第二版)



西南交通大学出版社

高等院校“十二五”电子科学技术类丛书

# 传感器技术

(第二版)

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书以介绍传感器应用中所必需的基本技术和技能为目标,系统讲解了传感器技术的基本理论,详细阐述了各类传感器的工作原理、基本结构和测量电路,并给出了具体应用实例。全书共分十章,第1章介绍传感器的基本概念、数学模型、提高性能的措施和标定技术;第2章至第4章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器;第5章至第7章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等;第8章和第9章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景;第10章为实验。

作者2003年编写的《传感器技术》第一版出版后,深受广大师生的欢迎,获得西南交通大学优秀教材奖,在全国一直畅销不衰。随着传感器技术的发展以及作者近年在传感器及检测技术方面的科研经历和教学经验的丰富,作者对本书的内容进行了大量的更新和补充,使得该书内容更加新颖和实用。

本书适合作为大专院校电气及电子类专业学生的教材以及教学参考书,也可供传感器专业的相关技术人员阅读和参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术 / 高晓蓉, 李金龙, 彭朝勇编. —2版.  
—成都: 西南交通大学出版社, 2013.2  
高等院校“十二五”电子科学技术类丛书  
ISBN 978-7-5643-2197-0

I. ①传… II. ①高… ②李… ③彭… 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(2013)第030876号

---

高等院校“十二五”电子科学技术类丛书

传感器技术

(第二版)

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 编

\*

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 宋彦博

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 17

字数: 425千字

2003年9月第1版

2013年2月第2版

2013年2月第6次印刷

ISBN 978-7-5643-2197-0

定价(含光盘): 39.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 第二版前言

传感器技术、计算机应用技术和通信技术可以说是电子信息技术的三大主要组成部分。传感器技术是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内外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，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器技术本科教学的基础上，结合自身的科研体会，于2003年编写和出版了这本教材。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状，本书在再版过程中精选内容，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容，特别是增加了各章节中关于传感器具体应用的实例，同时补充了两个半自拟试验的内容，要求学生独立设计和完成，以锻炼学生分析问题和解决问题的实践能力。

鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

本书共分十章，除绪论和第1章外，传感器各章均具有一定的独立性。第1章概述有关传感器的基本概念；第2章至第4章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器；第5章至第7章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第8章和第9章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第10章为实验。

本书是作者结合多年来从事传感器技术教学和科研的实践体会编写而成的。在编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关专著及文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的同事。

由于编者的水平和经验有限，对书中的不妥之处，敬请批评指正。

编者

2012年12月

## 第一版前言

传感器技术（非电量测量技术）是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要的专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的巨大进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都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，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器本科教学的基础上，结合自身的科研体会，编写了这本教材。

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，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容。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，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

为培养、锻炼学生的实践能力，在教材中还引入了实验环节，通过实验加深对基本概念的理解，进一步掌握传感器的检测方法，提高学生分析问题和解决问题的能力。本书共编排了六个实验。为达到开拓学生视野、启发思维的目的，本书设计的实验结合了科研成果（实验二、实验五），有一定的先进性和实用性，同时突出了铁路特色（实验一、实验二）和光电技术的特点（实验五、实验六）。为锻炼学生综合运用所学知识的能力，设计了两个半自拟实验（实验四、实验六），要求学生独立设计和完成，最大限度地锻炼学生的实践能力。

本书共分十章，除绪论和第一章外，传感器各章均具有一定的独立性。第一章概述有关传感器的基本概念；第二章至第四章介绍了传统的电阻、电容和电感类的传感器；第五章至第七章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第八章和第九章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第十章为实验。

本书编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关专著及文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的领导、教师和学生。

由于传感器是多学科知识的综合，涉及内容多、面广，而编者的水平和经验有限，书中的错误、缺点及不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编者

2003年5月

# 目 录

绪 论 .....	1
第 1 章 传感器技术基础 .....	6
1.1 传感器的基本概念 .....	6
1.2 传感器的静态数学模型及其基本特性指标 .....	14
1.3 传感器的动态数学模型及其动态特性指标 .....	22
1.4 改善传感器性能的技术途径 .....	31
1.5 传感器的标定与校准 .....	41
第 2 章 电阻式传感器 .....	45
2.1 电位器式传感器 .....	45
2.2 电阻应变计的原理及特性 .....	53
2.3 测量电路及电阻应变仪 .....	62
2.4 电阻应变式传感器的应用 .....	78
第 3 章 电容式传感器 .....	86
3.1 电容式传感器的工作原理和结构 .....	86
3.2 电容式传感器的测量电路 .....	95
3.3 电容式传感器的应用 .....	105
第 4 章 电感式传感器 .....	111
4.1 自感式传感器 .....	111
4.2 互感式传感器 .....	119
4.3 电涡流式传感器 .....	126
4.4 电感式接近传感器 .....	133
第 5 章 压电式传感器 .....	137
5.1 压电效应和压电材料 .....	137
5.2 压电式传感器的等效电路和测量电路 .....	140
5.3 压电式传感器的应用 .....	146
5.4 超声波传感器 .....	148
第 6 章 热电式传感器 .....	154
6.1 热电阻 .....	154
6.2 热敏电阻 .....	158
6.3 热电偶 .....	162
6.4 PN 结型温度传感器 .....	172



<b>第 7 章 磁敏式传感器</b> .....	176
7.1 霍尔传感器 .....	176
7.2 磁敏电阻器 .....	185
7.3 磁敏二极管和磁敏三极管 .....	187
<b>第 8 章 光电式传感器</b> .....	191
8.1 光电效应 .....	192
8.2 基于外光电效应的光电器件 .....	194
8.3 基于内光电效应的光电器件 .....	196
8.4 新型光电传感器 .....	203
8.5 光电式传感器的应用 .....	205
8.6 光固态图像传感器 .....	212
<b>第 9 章 光纤传感器</b> .....	221
9.1 光纤传感器基础 .....	221
9.2 光纤传感器的调制技术 .....	226
9.3 光纤传感器应用举例 .....	230
<b>第 10 章 实 验</b> .....	235
实验 1 电位器式传感器及对接触线抬升量的测量 .....	235
实验 2 电阻应变式传感器及电阻应变仪的原理和使用 .....	239
实验 3 电涡流位移传感器的原理及其静态标定方法 .....	243
实验 4 热电式传感器的温度自动控制实验 (半自拟) .....	247
实验 5 光纤高低电压隔离信号传输实验 .....	251
实验 6 光电报警实验 (半自拟) .....	255
实验 7 热释电红外传感器探测人体 (半自拟) .....	260
实验 8 光电式传感器测速实验 (半自拟) .....	262
<b>参考文献</b> .....	265

传感器的英文是 Sensor 或 Transducer, Sensor 直译为“感觉”。

## 1. 人与机器系统的机能对应关系

我们知道,人类有五大感觉器官,即眼、耳、鼻、舌、皮肤,人类是通过这些感觉器官感知外界信息的。人脑对这些信息进行分析、处理,最后作出判断和反应,控制人类肢体的动作,这就是人体系统的组成。

对于机器系统而言,它包括传感器、计算机和执行器三部分。传感器是各种机械和电子设备的感觉器官,称为“机电五官”,用于感知外界信息。电子计算机对这些信息进行处理后,作出反应,控制各类执行器(如自动化机械及智能机器人等)。由此可以看到人与机器的机能对应关系,如图 0.1 所示,称为“机电五官”的传感器对应人类的五官,用于感知外界信息;计算机对应人类的大脑,用于分析和处理信息;而各种执行器则对应于人类的肢体,完成各种操作和动作。

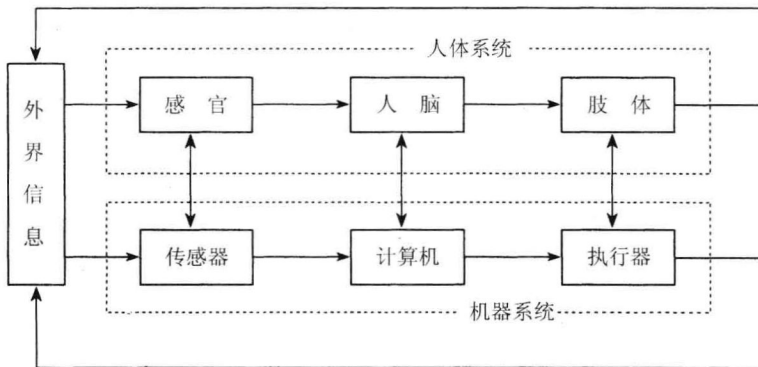


图 0.1 人与机器系统的机能对应关系

传感器作为“机电五官”,同人类的五官一样,能感觉到各种信息,诸如光、色、温度、压力、声音、湿度、气味及辐射等。而且,在很多方面,传感器的性能已经凌驾于人类五官之上。例如,它可以在人类无法忍受的高温、剧毒和放射性等恶劣环境下工作,还可以感知到人类五官所不能感知的量,如紫外线、红外线、超声波、磁场等。从这个意义上说,传感器具有人类梦寐以求的特异功能。其次,有些量虽然人的感官可以感受到,但是传感器的测量范围更宽、精度更高、可靠性更好。例如,在检测可见光方面,人眼的视觉残留约为 0.1 s,而光敏晶体管的响应时间可短到纳秒量级;人眼的角分辨率为 1',而光栅测距的精确度可达



1”；激光定位的精度在月球与地球距离（ $3.8 \times 10^5 \text{ km}$ ）范围内可达 10 cm 以内，这些都是人类五官所远远不能及的。最后，传感器可以把人所不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像，CT 就是一个典型的例子，它能把人体的内部形貌用断层图像显示出来。

## 2. 传感器的主要应用

图 0.2 给出了传感器的主要应用领域及相对需要量。其中，横轴列出传感器的主要应用领域，纵轴是传感器的相对需要量。相对需要量>70 的应用领域有：信息处理、科技测试、设备控制、机器人、汽车、环境污染、医疗、防火、光能利用等。

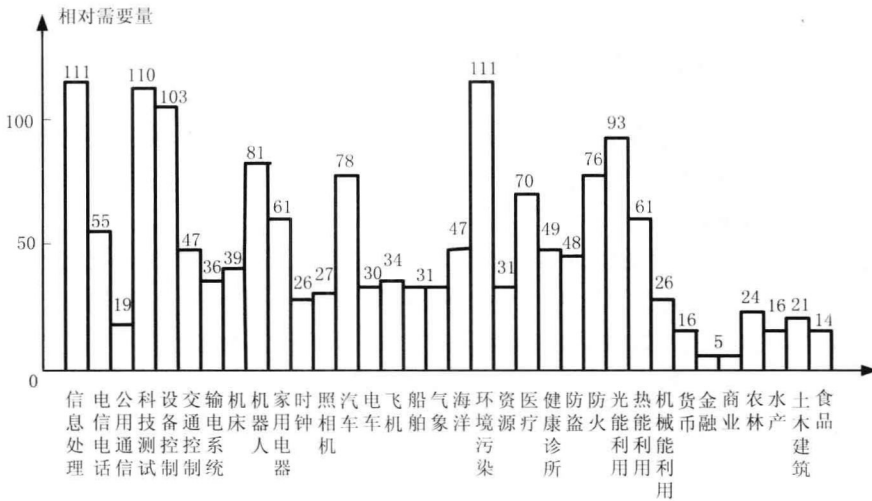


图 0.2 传感器的主要应用领域及相对需要量

由此可见，从太空探测到海洋开发，从各种复杂的工程系统到日常生活的衣食住行，几乎每一个现代化的项目，都离不开各种各样的传感器。可以说，没有传感器就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器就没有现代科学技术的迅速发展。

### 【例 0.1】 化工产品自动化生产过程。

如图 0.3 所示，在化工产品自动化生产过程中，首先在进料时要对大吨位的原料进行自

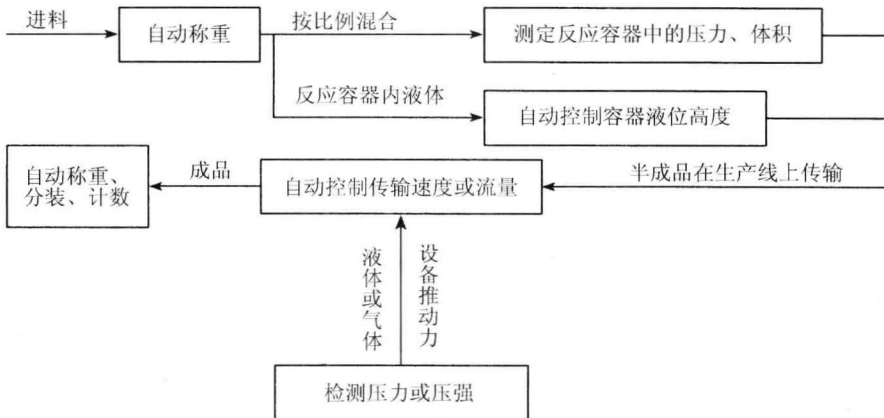


图 0.3 化工产品自动化生产过程

动称重，分析原料成分或浓度，使它们按比例混合。混合后，在反应容器中自动反应，又必须测定反应容器中的压力或体积，以保证和监测反应的顺利和正常进行。如果是液体，则需要自动控制容器液位高度。然后，半成品在生产线（管道）中传输，需要自动控制传输速度或流量，必须使用液动或气动设备以产生推动力，因而要检测压力或压强……最后，成品进行自动分装、称重、计数等。

所有这些环节，都需要使用各种传感器对相应的参数进行检测和控制，使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态，保证生产的高效率和高质量。

### 【例 0.2】 航天器。

为使航天器按预先设计好的轨道正常运行，需控制航天器的飞行参数、姿态，并监测发动机的工作状态，这就需要利用多种传感器进行检测，将传感器获取的各种信号送到各种测量仪表和自动控制系统进行自动调节，使航天器正常运行。

从现代机器系统的组成就可以看到，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信息进行精确、可靠的捕获和转换，那么，一切测量和控制都是不可能实现的。因此，传感器在工业检测与自动控制系统、汽车、家用电器、机器人、医疗及人体医学、环保、航空及航天、遥感技术及军事技术领域等方面都有重要的应用。

## 3. 传感器的地位和重要性

### 1) 现代测量与自动控制的首要环节

传感器是信息采集系统的首要部件，是计算机的“五官”，如果没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换，一切测量和控制都是不可能实现的。

### 2) 衡量国家综合实力的重要标志

传感器与传感器技术的发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志，也是判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据。

### 3) 现代信息产业的三大支柱

现代信息产业的三大支柱为：传感器技术、计算机技术、通信技术。其中，传感器技术既是现代信息产业的源头，又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。

如果没有高度保真和性能可靠的传感器，没有先进的传感器技术，信息的准确获得与精密检测就成了一句空话，通信技术和计算机技术也就成了无源之水、无本之木，现代测量与自动化技术随之变成水中月、镜中之花。

### 4) 各国政府高度重视

日本科学技术厅把传感器技术列为六大核心技术（计算机、通信、激光、半导体、超导和传感器）之一。日本政府还在 21 世纪技术发展中将传感器列在前位。美国将“传感器及信号处理”列为对国家安全和经济发展有重要影响的关键技术之一。西欧各国把传感器技术作为优先发展的重点技术。我国政府在“863”计划及重点科技攻关项目中，均把传感器列在重要位置。

## 4. 传感器的发展方向

21 世纪是人类全面进入信息化的时代，随着人类探知领域和空间的拓展，人们需要获得的信息种类日益增加，要求加快信息传递的速度和增强信息处理的能力，因而要求与此相对应的信息技术中的三大核心技术必须跟上人类信息化飞速发展的需要。

21 世纪，传感器领域的主要技术将在现有基础上延伸和提高，并加速新一代传感器的开发和产业化，主要表现在对新理论的探讨、新技术的应用、新材料和新工艺的研究。

### 1) 努力实现传感器的新特性

努力研制出检测范围宽、灵敏度高、精度高、响应速度快、互换性好的传感器。

### 2) 确保传感器的可靠性，延长其使用寿命

确保传感器可靠性的意义很直观，因为它直接关系到系统的误动作和抗干扰的问题。传感器的可靠性主要体现在：具有较长的使用寿命，且能在恶劣环境下工作。

### 3) 提高集成化和功能化程度

提高集成化与功能化程度就是要在同一芯片上集成传感器、各种电路（温度补偿电路、信号放大电路等），构成集成化传感器。更进一步，将执行机构和多种传感器也集成在单个芯片上，以实现传感器的多功能化以及信息处理一体化。

### 4) 微型化

微机电系统（MEMS）是一种轮廓尺寸在毫米量级、元件尺寸在微米量级的可运动的微型机电装置。微机电系统技术借助集成电路的制造技术来制造机械装置，可制造出微型的执行机构，如齿轮、电机、泵、阀门、悬臂梁、光学镜片等。目前已开发出的微型集成传感器有力、压力、加速度、化学传感器等。微机电系统技术的出现是传统机械加工技术的巨大变革，采用微机电系统制作的微传感器和微系统，具有微体积、低成本、高可靠性等优点。

### 5) 新型功能材料的开发

传感器技术的发展是与新材料的研究开发密切结合在一起的，可以说，各种新型传感器孕育在新材料之中。例如，半导体材料和新工艺的发展，促进了半导体传感器的迅速发展，从而研制和生产出一批新型的半导体传感器；压电半导体材料促进了压电集成传感器的形成；高分子压电薄膜的出现，使机器人触觉传感器更接近人的皮肤。

新型敏感材料将加速开发，纳米材料和技术的发展，微电子、光电子、生物化学、信息处理等各学科、各种新技术的相互渗透和综合利用，可望研制出一批新颖、先进的传感器，如新一代光纤传感器、生物传感器、诊断传感器、超导传感器、焦平面阵列红外探测器、智能传感器以及模糊传感器等。

应该承认，人的感官在许多方面仍然优于传感器，如零维探测与多维感知、单功能与多功能、微分与积分、非智能与智能等。人与传感器之所以具有这些差别，主要是因为人脑的作用。人脑具有学习功能，不仅能学习新知识，还能把过去学到的知识加以组织利用。人脑

的分析判断能力是过去无数经验的综合，人脑可以处理不完全的、模糊的信息。因此，传感器技术发展的总趋势是小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化。传感器将从具有单纯判断功能发展到具有学习功能，最终发展到具有创造能力。其表现如下：

① 传感器的多功能化。传感器的多功能化经历了以下几个阶段：最初是孤立的传感器件，只能检测单一的量；后来把多个不同功能的传感器集成在一起，可以检测多种量；目前传感器的多功能化进展处于把电子线路与传感器集成在一起，能够实现信号处理，以及加上机械结构，使之具有执行功能，甚至把能源也集成在一起，实现有源、智能、多功能传感器系统的阶段。

② 向模糊识别方向发展。从传感器的模式看，微观信息由人工智能完成，感觉信息由神经元完成，宏观信息由模糊识别完成。以往传感器的局限性在于它只见树木不见森林，只见微观不见宏观，未来的神经元加模糊识别传感器将既见树木又见森林。

③ 由经典型向量子型转化。以往的传感器由于尺寸大，可以用经典物理很好地描述。随着传感器尺寸的微型化，量子效应将日渐起到支配作用。从波动理论来看，当尺寸大的时候光波发挥作用，在量子效应起支配作用的范围内，电子波（德布罗意波）将发挥作用。在将来，把两种波统一在一起的统一波（union wave）将用以揭示传感器的工作规律。

④ 由数字传感器向模拟传感器发展。目前传感器的转换原理是数字方式的。数字方式的含义并不是说检测量与输出量是数字编码形式，而是指它的检测方式是检测时间轴上的一点（瞬间），空间轴上的一点（零维），是单一检测量。未来的传感器将在时间上实现广延，空间上实现扩张（多维），检测量实现多元，检测方式实现模糊识别。从这个意义上讲，传感器的识别方式将由数字方式向模拟方式发展。

## 传感器技术基础

在学习各类具体的传感器之前，首先应掌握传感器技术的基础知识。这一章主要包括以下几方面的内容：

- ① 传感器的基本概念；
- ② 传感器的静态数学模型和基本特性指标；
- ③ 传感器的动态数学模型和基本特性指标；
- ④ 改善传感器性能的技术途径；
- ⑤ 传感器的标定与校准。

### 1.1 传感器的基本概念

#### 1. 传感器的定义

何谓传感器？至今国内外尚无统一定义。由绪论中的介绍知道，人类的五官是天然的传感器，而在工程技术领域里，可将传感器看成是人体五官的工程模拟物。于是，可以将传感器定义为：把特定的被测量信息按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。

传感器首先是一种测量器件或装置，它的作用是测量。例如，发电机是不是传感器？我们知道，发电机是将机械能转换为电能的一种装置，它为人类提供电能，但不是用于测量的，所以发电机仅作为发电设备时，不是传感器。但是，当通过发电机发电量的大小来测定调速系统机械转速时，发电机可看作是一种用于测量的传感器，称之为测速发电机，或叫作发电机测速传感器。

传感器定义中所谓的“特定的被测量信息”，一般是指非电量，这样的非电被测量主要包括物理量、化学量和生物量等。

表征物质特性或其运动形式的参数很多，总的可分为电量和非电量两大类。电量一般是指物理学中的电学量，如电压、电流、电阻、电容、电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，如压力、流量、尺寸、位移、质量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度，等等。

人们在科学试验和生产活动中，需要对这些电量和非电量进行测量。采用一般电工仪表

和电子仪器可测量电信号，而在众多的实际测量中，大多数是对非电量的测量，传感器技术就是一种对非电量进行测量的技术。

传感器定义中提到的“可用信号”是指便于处理、传输的信号，就目前的科技发展水平而言，这种便于处理、传输的“可用信号”就是电信号。因此，在有的书上，将传感器狭义地定义为“把外界非电量信息转换成与之有确定对应关系的电量输出的器件或装置”。当然，我们可以想象，随着光技术的不断发展，当人类跨入光子时代，光信号将成为最便于处理和传输的信号。那时，传感器的概念就将随之发展成为：“把外界信息按一定规律转换成光信号输出的器件。”所以，传感器的概念是一个发展的概念，它将随着科学技术的不断进步而发展。这也是传感器没有一个确定、统一定义的原因。

由于传感器起到的的是一个“转换”作用，因此，传感器也叫作变换器、换能器或探测器。一般情况下这些提法不会矛盾，可以等同，但在不同的技术领域中，有着不同的技术术语。在非电量电测技术中，传感器一词是和工业测量联系在一起的，即实现非电量转换成电量的器件称之为传感器。由于传感器起到的的是一个转换作用，因此也叫变换器。当传感器输出的电信号为标准输出信号时，也称为变送器。

在水声和超声波等技术中，强调的是能量的转换，如压电元件可以起到机-电或电-机能量的转换作用，所以把这种可以进行能量转换的器件称之为换能器；对于硅太阳能电池来说，也是一种换能器件，它将光能转换成电能输出，但在这类器件上强调的是转换效率，习惯上叫转换器。

## 2. 传感器的物理定律

这里所说的传感器的物理定律，是指在传感器的设计和使用过程中所必须遵循的物理定律，它们都是物理学的基本定律，可分为四大类：守恒定律、统计法则、场的定律和物质定律。

### (1) 守恒定律

表示物理量随着空间和时间的移动，其总量保持不变的定律，包括能量守恒、动量守恒和电荷守恒等定律。传感器与被测量之间能量转换时必须遵守守恒定律。

### (2) 统计法则

是分子、原子、电子等运动的微观世界与能被直接观察的宏观世界相结合的定律，如热力学第二定律。这些统计法则常和传感器的工作状态有关。

### (3) 场的定律

描述电场、磁场、物质场、重力场等在空间和时间上的变化规律。这些变化规律可由物理方程给出，这些物理方程可作为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电感式传感器等。利用场的定律构成的传感器称为结构型传感器。

### (4) 物质定律

表示各种物质本身内在客观性质的定律，如胡克定律 ( $F = kx$ )、欧姆定律 ( $U = R \cdot I$ )



等。这些客观性质常用表示物质固有性质的物理常数加以描述，常数的大小决定着传感器的主要性能，如胡克定律中的弹性系数  $k$  和欧姆定律中的电阻  $R$ 。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。基于物质定律构成的传感器称为物性型传感器。

【例 1.1】 举例说明结构型传感器和物性型传感器的区别。

结构型传感器是遵循场的定律构成的传感器，而物性型传感器是基于物质定律构成的传感器，如电容式传感器就是利用静电场定律研制的结构型传感器，而压敏传感器则是利用半导体材料的压阻效应制成的物性型传感器。下面对电容式传感器和压敏传感器进行比较。

电容式传感器由固定极板和活动极板组成，如图 1.1 所示。设极板间距为  $d$ ，极板的有效长度为  $l$ ，极板宽度为  $b$ ，则极板面积为  $l \cdot b$ ，这样一个电容器的电容为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l b}{d} \quad (1.1)$$

当电容式传感器的活动极板发生位移  $\Delta l$  时，电容器的极板有效面积将减小为  $(l - \Delta l)b$ ，这时，电容器的电容变为

$$C = C_0 - \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (l - \Delta l) b}{d} \quad (1.2)$$

化简得

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 1 - \frac{l - \Delta l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.3)$$

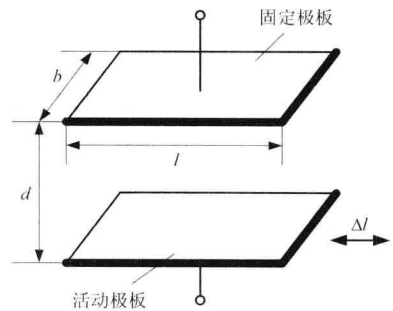


图 1.1 电容式传感器

则输出灵敏度

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{C_0}{l} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b}{d} \quad (1.4)$$

由此我们看到，对于电容式传感器，它的输出灵敏度是由极板的尺寸  $b$ 、极板间距离  $d$ 、极板间介质的性质  $\epsilon_r$  决定的，而与构成传感器的具体物质（极板材料）无关。

压敏传感器是利用半导体材料的压阻效应制成的。所谓的“压阻效应”，是指对半导体材料施加压应力时，材料除产生变形外，其电阻率  $\rho$  也要发生变化，如图 1.2 所示。这里，电阻率  $\rho$  的变化情况除与外加压应力的大小有关外，还与半导体材料的性质有关。例如，在构成压敏传感器的半导体硅片中，掺入不同种类的杂质（硼 B 或磷 P），或者掺入杂质的浓度不同，都会使压敏传感器的特性受到决定性的影响。因此，对于压敏传感器这类物性型传感器来说，其特性与构成传感器的物质的性质有密切关系。

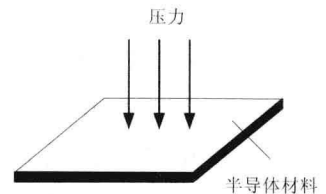


图 1.2 压阻效应

通过比较可以看出，结构型传感器的特性主要由其结构参数决定，与构成传感器的物质的性质无关，而物性型传感器的特性则主要由构成传感器的物质的性质决定。一般来说，结构型传感器的性能由于与物质的性质无关，因此性能稳定，不易受环境温度的影响。目前，结构型传感器在工业测量等方面应用广泛，但制造性能良好的

结构型传感器，要求很高的熟练技术，成本较高。与此对照，物性型传感器却随着半导体技术和物性物理学的飞速发展正迅速地发展起来。这种物性型传感器与集成电路（IC）的生产一样，随着产量的增大，成本显著降低。物性型传感器是今后传感器的发展方向之一，所占的比例将不断增大。

### 3. 传感器的组成

传感器由敏感元件、传感元件和其他辅助部件组成，如图 1.3 所示。

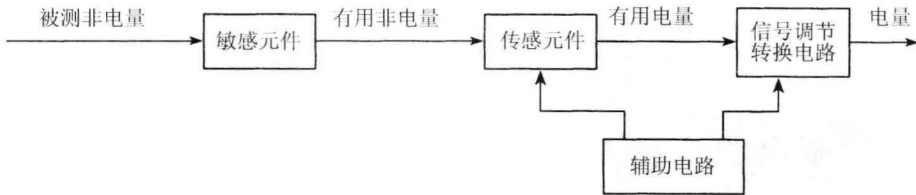


图 1.3 传感器的组成框图

- 敏感元件：直接感受被测非电量，并按一定规律转换成与被测非电量具有确定关系的有用非电量。
- 传感元件：又称变换器，将敏感元件感受到的有用非电量直接转换成电量。
- 信号调节与转换电路：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。
- 辅助电路：包括电源等环节。

对于结构型和物性型传感器而言，其传感器的组成是不同的。对于物性型传感器，其组成环节比较简单，如图 1.4 所示。它没有敏感元件，传感元件能直接感受被测非电量而输出电量。例如，对于半导体压敏传感器，被测非电量“压力”作用在传感元件上时，传感元件直接将它转换为电阻（率）的变化，即直接转换成了有用电量输出。

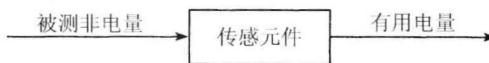


图 1.4 物性型传感器的组成框图

结构型传感器一般则包括敏感元件和传感元件两个环节，即被测非电量通过敏感元件转换为有用非电量，再由传感元件转换为有用电量输出，如图 1.5 所示。

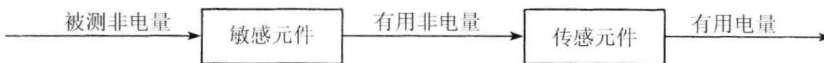


图 1.5 结构型传感器的组成框图

#### 【例 1.2】 大吨位电容式称重传感器。

大吨位电容式称重传感器基于电容式传感器原理，结构如图 1.6 所示，它由定极板、动极板、弹性体、极板绝缘体等部分组成。设极板间距为  $d$ ，则传感器的初始电容为  $C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$ ， $A$  为极板有效面积。这种大吨位称重传感器一般埋于地下，当载重车辆在上面经过时，弹性

体受压力作用而产生形变，反应为动极板的上下位移，导致极板间距离减小为  $d'$ ，电容量也发生相应的变化，变为  $C' = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d'}$ 。

这里，被测非电量为外界压力，弹性体则作为敏感元件，将外界压力转换为电容器极板间距离的变化，这是一个有用非电量，然后，再经电容传感器这个传感元件，将其转换为有用电量（电容量  $C$ ）输出。

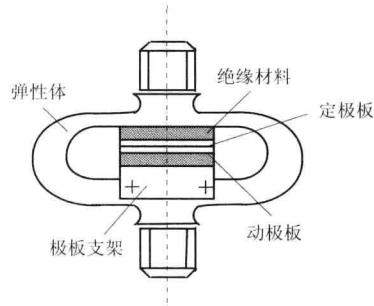


图 1.6 大吨位电容式称重传感器

实际上，传感器的具体构成方法，根据被测对象、转换原理、使用环境及性能要求等具体情况不同，有很大差异。从能量角度分析，典型的传感器构成方法有三种，即自源型、带激励源型和外源型。前二者属于能量转换型传感器，也称为有源型传感器；后者是能量控制型传感器，也称为无源型传感器。

### 1) 自源型

这是最简单、最基本的传感器构成形式，如图 1.7 所示，只含有转换元件。自源型传感器的特点是不需要外能源，其转换元件能从被测对象直接吸取能量，并转换成电量输出，但输出电量较弱。例如，热电偶、压电器件等都属于自源型传感器。

#### 【例 1.3】 热电偶传感器。

图 1.8 是热电偶传感器的原理示意图。热电偶是利用热电效应构成的传感器，即将两种不同性质的导体  $A$ 、 $B$  组成回路，若节点 (1)、(2) 处于不同温度时，即  $T \neq T'$ ，两者间将产生热电势，回路中形成电流，电流的大小与两节点的温度差有关。

这里，被测量是节点温度，热电偶传感器将被测温度场的能量（热量）直接转换为电量的输出，并不需要其他外能源。因此，它是一种自源型传感器，属于能量转换型传感器。

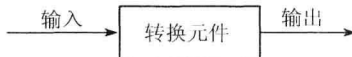


图 1.7 自源型传感器的构成

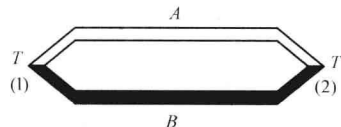


图 1.8 热电偶传感器的原理示意图

### 2) 带激励源型

带激励源型传感器由转换元件和辅助能源两部分组成，如图 1.9 所示。这里的辅助能源