



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 传感器原理

(第三版)

田裕鹏 姚恩涛 李开宇 编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 传 感 器 原 理

(第三版)

田裕鹏 姚恩涛 李开宇 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书详细阐述了各类传感器的基本原理和基本分析方法,主要介绍了多种传感器的设计方案和应用情况。全书共有 15 章,分别讲述传感器工作的物理效应、结构、特性、测量电路、误差补偿及典型应用;并以较多篇幅介绍传感器的现代技术、高精化设计以及实用的抗干扰措施。全书内容具有科学性、先进性和实用性。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、电子信息工程、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供其他相近专业学生及从事传感器、测控技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器原理/田裕鹏,姚恩涛,李开宇编著. — 3 版. — 北京:科学出版社, 2007

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-019847-1

I. 传… II. ①田…②姚…③李… 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 135118 号

责任编辑:巴建芬 于宏丽/责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张: 27 3/4

印数: 1—3 500 字数: 533 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

## 前 言

传感器作为信息获取的工具,在当今信息时代的重要性越来越为人们所认识。随着科学技术的发展,现代工业生产的自动化程度越来越高,对传感器的依赖性也越大,作为自动检测与自动控制系统主要环节的传感器,对系统测控质量具有决定性作用。因此,传感器与传感器技术的研究、发展和应用近年来取得了巨大进步,成为国内外重点支持发展的高技术领域,传感器技术也成为新技术革命的关键因素。

为了适应传感器技术迅猛发展的需要,我们在原《传感器原理》(第二版)的基础上,进行了改编和重新整理,各章内容均有所增删,新增加了传感器标定和微机电传感器两节,新编写了传感器高精化技术一章。考虑到传感器技术的发展及与其他课程内容的衔接,原电位器传感器和光电传感器不再列为本书内容。为方便读者学习掌握传感器知识,在章节中给出有关例题,并在章节后列有习题与思考题。本书继承发扬了第二版深入浅出、理论联系实际等特点,并注意吸收传感器发展的最新成果,内容丰富、新颖,具有一定的广度和深度。本书可作为高等院校测控技术与仪器、电子信息工程、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供其他相近专业学生及从事传感器、测控技术工作的工程技术人员参考。

全书共分为15章,由田裕鹏主编。参加编写的有南京航空航天大学的姚恩涛教授(第3、4、5、11章),李开宇副教授(第9、12、13章及15章的1、2、3节),田裕鹏副教授(第1、2、6、7、8、10、14章及15章的4、5节)。

全书由东南大学黄惟一教授、南京航空航天大学袁慎芳教授审阅。

自从本书的第一版问世以来,得到全国兄弟院校学生、教师的支持,并曾经获得国家颁发的优秀教材奖。在教材重新编写过程中,得到多方面的帮助和支持,王厚枢教授、于盛林教授、吴志鹤教授、陈鸿茂教授给予了许多宝贵的建议,江灵光、徐欣老师提供了很好的素材和热情的帮助。特别是教材原主编余瑞芬教授,为新教材的出版倾注了大量心血和时间。编者在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,恳请读者对书中不当之处给予批评指正。

作 者

2007年3月于南京

# 目 录

## 前言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....       | 1   |
| 1.1 传感器的定义及其作用 .....        | 1   |
| 1.2 传感器的组成与分类 .....         | 3   |
| 1.3 传感器的发展 .....            | 5   |
| 1.4 本教材的主要内容及特点 .....       | 7   |
| 习题与思考题 .....                | 7   |
| <b>第 2 章 传感器的一般特性</b> ..... | 8   |
| 2.1 传感器的静态特性 .....          | 8   |
| 2.2 传感器的动态特性 .....          | 25  |
| 2.3 传感器标定 .....             | 37  |
| 习题与思考题 .....                | 43  |
| <b>第 3 章 弹性敏感元件</b> .....   | 46  |
| 3.1 引言 .....                | 46  |
| 3.2 弹性敏感元件的基本特性 .....       | 46  |
| 3.3 弹性敏感元件所用的材料 .....       | 48  |
| 3.4 常用弹性敏感元件特性参数的计算 .....   | 50  |
| <b>第 4 章 应变式传感器</b> .....   | 58  |
| 4.1 金属的电阻应变效应 .....         | 58  |
| 4.2 电阻应变片 .....             | 59  |
| 4.3 应变片的主要参数 .....          | 70  |
| 4.4 电阻应变片的动态响应特性 .....      | 71  |
| 4.5 应变测量电桥电路 .....          | 75  |
| 4.6 电阻应变片的温度误差及其补偿方法 .....  | 84  |
| 4.7 应变式传感器 .....            | 88  |
| 习题与思考题 .....                | 95  |
| <b>第 5 章 电容式传感器</b> .....   | 98  |
| 5.1 工作原理与分类 .....           | 98  |
| 5.2 主要特性 .....              | 100 |
| 5.3 测量线路 .....              | 105 |

|             |                             |     |
|-------------|-----------------------------|-----|
| 5.4         | 电容式传感器的结构、结构稳定性及抗干扰问题 ..... | 114 |
| 5.5         | 电容式传感器的应用 .....             | 118 |
|             | 习题与思考题 .....                | 122 |
| <b>第6章</b>  | <b>变磁阻式传感器</b> .....        | 125 |
| 6.1         | 电感式传感器 .....                | 126 |
| 6.2         | 差动变压器式传感器 .....             | 140 |
| 6.3         | 电涡流传感器 .....                | 153 |
| 6.4         | 电感传感器和差动变压器的工程设计方法 .....    | 160 |
|             | 习题与思考题 .....                | 168 |
| <b>第7章</b>  | <b>磁电式传感器</b> .....         | 170 |
| 7.1         | 概述 .....                    | 170 |
| 7.2         | 磁电式振动传感器 .....              | 171 |
| 7.3         | 设计基础 .....                  | 178 |
| 7.4         | 应用 .....                    | 184 |
|             | 习题与思考题 .....                | 187 |
| <b>第8章</b>  | <b>压电式传感器</b> .....         | 188 |
| 8.1         | 压电效应与压电式传感器的工作原理 .....      | 188 |
| 8.2         | 压电材料 .....                  | 194 |
| 8.3         | 压电式传感器的等效电路与测量电路 .....      | 198 |
| 8.4         | 压电式传感器的应用 .....             | 204 |
| 8.5         | 压电式传感器的误差与设计要点 .....        | 213 |
|             | 习题与思考题 .....                | 221 |
| <b>第9章</b>  | <b>谐振式传感器</b> .....         | 223 |
| 9.1         | 基本知识 .....                  | 223 |
| 9.2         | 振筒式传感器 .....                | 227 |
| 9.3         | 振弦式传感器 .....                | 234 |
| 9.4         | 石英谐振式传感器 .....              | 239 |
| 9.5         | 振动梁式传感器 .....               | 242 |
|             | 习题与思考题 .....                | 245 |
| <b>第10章</b> | <b>光纤传感器</b> .....          | 246 |
| 10.1        | 光纤与传光原理 .....               | 246 |
| 10.2        | 光强调制光纤传感器 .....             | 252 |
| 10.3        | 相位调制光纤传感器 .....             | 263 |
| 10.4        | 偏振态调制光纤电流传感器 .....          | 270 |
| 10.5        | 频率调制光纤传感器 .....             | 272 |
| 10.6        | 分布式光纤传感器 .....              | 274 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 习题与思考题 .....                 | 276        |
| <b>第 11 章 磁敏传感器 .....</b>    | <b>277</b> |
| 11.1 霍尔传感器 .....             | 277        |
| 11.2 磁阻传感器 .....             | 284        |
| 11.3 磁敏二极管与三极管 .....         | 289        |
| 习题与思考题 .....                 | 293        |
| <b>第 12 章 热电式传感器 .....</b>   | <b>294</b> |
| 12.1 概述 .....                | 294        |
| 12.2 热电偶测温传感器 .....          | 296        |
| 12.3 热电阻式传感器 .....           | 309        |
| 12.4 半导体 P-N 结测温传感器 .....    | 316        |
| 12.5 集成温度传感器 .....           | 317        |
| 12.6 非接触式温度测量系统 .....        | 321        |
| 习题与思考题 .....                 | 324        |
| <b>第 13 章 压阻式传感器 .....</b>   | <b>326</b> |
| 13.1 概述 .....                | 326        |
| 13.2 晶向的表示方法 .....           | 327        |
| 13.3 压阻系数 .....              | 329        |
| 13.4 压阻式传感器 .....            | 337        |
| 13.5 扩散电阻的阻值与几何尺寸的确定 .....   | 347        |
| 13.6 温度漂移的补偿 .....           | 349        |
| 13.7 压阻传感器专用信号调理集成电路 .....   | 352        |
| 13.8 单片集成硅压力传感器 .....        | 356        |
| 习题与思考题 .....                 | 358        |
| <b>第 14 章 其他传感器 .....</b>    | <b>360</b> |
| 14.1 气敏传感器 .....             | 360        |
| 14.2 湿敏传感器 .....             | 367        |
| 14.3 微机电传感器 .....            | 379        |
| 习题与思考题 .....                 | 386        |
| <b>第 15 章 传感器高精化技术 .....</b> | <b>388</b> |
| 15.1 传感器补偿技术 .....           | 389        |
| 15.2 传感器抗干扰措施 .....          | 397        |
| 15.3 传感器的智能化 .....           | 410        |
| 15.4 多传感器信息融合 .....          | 416        |
| 15.5 无线传感器网络 .....           | 421        |
| 习题与思考题 .....                 | 431        |
| 部分习题参考答案 .....               | 432        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 传感器的定义及其作用

### 1.1.1 什么是传感器

当今的社会是信息化的社会，若将信息化社会与人体相比拟就可以看出传感器在信息化社会中的作用，在图 1-1-1 中，电子计算机便相当于人的大脑。大脑是通过人的五种感觉器官（视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉）感受外界刺激并作出反响的，与“感官”这种受刺激的元件相对应的就是传感器，故传感器又称为“电五官”。所以传感器是人机接口（外部真实世界与计算机的接口，另一接口是执行器），它能感受或响应规定的被测量，如各种物理量、化学量、生物量或状态量，并按照一定规律转换成有用信号，便于远距离传输、处理、存储和控制。

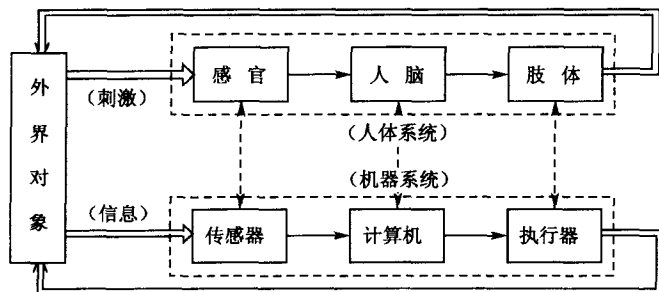


图 1-1-1 传感器的作用

国家标准《传感器通用术语》中，对于传感器的定义作了如下规定：“能感受（或响应）规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成。”

### 1.1.2 传感器的作用

近来传感器引起人们极大的关注。现代信息技术的三大基础是信息的获取、传输和处理，即传感器技术、通信技术和计算机技术，它们分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。现代计算机技术和通信技术由于超大规模集成电路的飞速发展取得了极大进展，以微处理器为中心的信息处理能力及通信



能力已大大提高,成本显著下降,而作为信息获取源头的信息获取装置——传感器的发展相对落后,没有跟上信息技术的发展,成为影响产业发展的瓶颈。

传感器面临着迫切改变信息获取能力落后现状的挑战,同时技术进步又为传感器技术加速发展提供了保证和机遇,从 20 世纪 80 年代起,在世界范围内逐步掀起了一股“传感器热”。在过去的 15 年中传感器技术及其应用取得了巨大的进步,新的技术不断出现,传感器技术成为新技术革命的关键因素。人们不仅对传感器的精度、可靠性、响应速度、获取的信息量要求越来越高,还要求其成本低廉且使用方便。

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参数进行精确可靠的测量,那么无论是信号转换、信息处理或者数据的显示与控制,都将成为一句空话。可以说,没有精确可靠的传感器,就没有精确可靠的自动检测和控制系统。现代微电子技术和计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段,近代检测与控制系统正经历着重大的变革,但是,如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息,那么,电子计算机也无法发挥其应有的作用。

传感器已经广泛应用于生产、生活和科学研究的各个领域,在航空、航天技术领域,传感器应用得最早也应用得最多。在现代飞机上,装备着繁多的显示与控制系统,以保证各种飞行任务的完成。在这些系统中,传感器首先对反映飞行器飞行参数和姿态、发动机工作状态的各个物理参数加以检测,并显示在各类显示器上,提供给驾驶员和领航员去控制和操纵飞行器。如飞机三个轴向的偏转角度有角度传感器和方向传感器敏感,速度有速度传感器敏感,高度或高度偏差也有相应的传感器敏感,以获得飞行器的速度、位置、姿态、航向、航程等参数,并由飞行控制系统以此自动引导飞行器按规定的航向和航线飞行。另外,在新型飞行器的研制过程中,必须进行风洞实验、发动机实验,以及样机的静、动力实验和飞行实验。在各种实验中,自动巡回检测系统通过传感器敏感各种力、压力、应变、位移、温度、流量、转速、速度等物理量,经过计算机处理得到检测结果。现在大型飞机使用的传感器多达上百种,而洲际导弹、宇宙飞船和航天飞机等复杂飞行器需要敏感的飞行参数更多。在美国航天飞机上就安装有超过 2000 个各种各样的传感器,时刻监测航天飞机的工作状态。

在化工、炼油、钢铁冶炼、电力、煤气等现代化工业生产过程中,传感器的应用就更多了。现代化的工业生产自动化程度很高,通常不能直接观察装置中的生产过程,只能通过传感器检测物理、化学和机械参数,从而了解和控制装置的运转状态。因此,传感器在工业控制中极为重要。自动化工业生产工艺复杂、装置庞大,传感器分布在装置内的各个检测点。检测数据由传感器所在地点传送到控制室,自动控制系统发出的控制信号和指令信号又传送到现场,从而实现远距离控制。温度、压力、流量和液面是经常需要检测的参数,被称为生产过程的

“四大参数”。影响产品性能的参数还有许多，如表征产品物理性质的密度、黏度等参数，这些参数的检测和控制更困难。

仪器仪表是科学研究和工业技术的“耳目”，在基础科学和尖端技术的研究中，大到上千光年的茫茫宇宙，小到  $10^{-13}\text{cm}$  的粒子世界；长到数十亿年的天体演变，短到  $10^{-24}\text{s}$  的瞬间反应；高达  $5 \times 10^8\text{℃}$  的超高温，低到  $0.01\text{K}$  的超低温，这些极端量的检测是人的感官或一般检测设备无能为力的，必须有相应的高精度传感器以及大型检测系统才能奏效。因此，传感器的发展，越来越成为一些边缘科学研究和高新技术开发的推动力量。

传感器在生物医学和医疗器械工程方面也显露出广阔的前景，它将人体内各种生理信息转换成工程上容易测定的量（一般是电量），从而正确地显示出人体生理状态。传感器还渗透到人们的日常生活中，如用于家庭电器中温度和湿度的测控、煤气泄漏报警等。一辆现代化小轿车上安装的传感器也多达几十个甚至上百个。

可见，传感器在科学研究、工业自动化、非电量电测仪表、医用仪器、家用电器、航空航天、军事技术等等方面起着极为重要的作用。

## 1.2 传感器的组成与分类

### 1.2.1 传感器的组成

传感器通常由直接响应被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成，如图 1-2-1 所示。

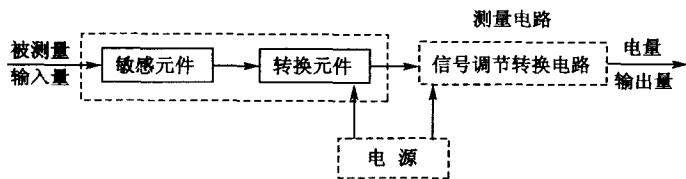


图 1-2-1 传感器的组成

例如，如图 1-2-2 所示膜盒气体压力传感器，敏感元件是膜盒，被测压力  $P$  的变化引起膜盒上半部分移动，带动磁心移动；转换元件是磁心与电感线圈，磁心的位移引起线圈电感量的变化；然后由转换电路将线圈电感的变化转换为变化的电压或电流信号输出，转换元件是传感器的核心。实际上很多传感器并不全包含上述三部分。转换元件也可以直接感受被测量，而输出与被测量成确定关系的电量，这时转换元件本身就可作为一个独立的传感器使用，例如，图 1-2-3 所示的热电偶是由两种不同导体组合而成，将温度差直接转换输出热电势，完成温度测量。

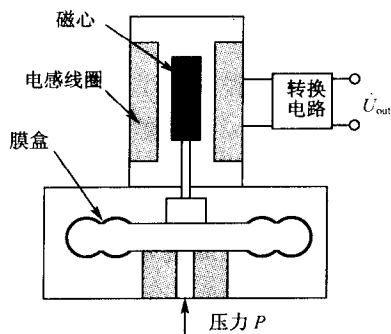


图 1-2-2 气压传感器示意图

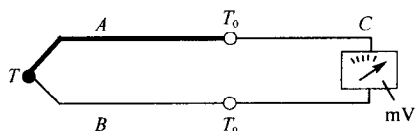


图 1-2-3 热电偶示意图

当传感器输出为规定的标准信号时，则称为变送器。传感器与变送器是两种不同功能的模块，变送器为输出标准信号的传感器。标准信号是物理量的形式和数值范围都符合国际标准的信号，如电流标准  $4 \sim 20\text{mA}$  (DC)，电压标准  $1 \sim 5\text{V}$  (DC)。输出的标准化是技术发展的必然趋势，如目前国际上已出现了多种现场总线的变送器。

### 1.2.2 传感器的分类

传感器的分类方法很多，国内外尚无统一的方法。最常用的分类方法是下面两种：第一种是按工作原理分类，如应变式、压阻式、压电式、光电式等传感器。第二种是按被测量分类，如力、位移、速度、加速度等传感器。这两种分类方法有共同的缺点，都只强调了传感器的一个方面，所以在许多情况下往往将上述两种分类方法综合使用，如应变式压力传感器、压电式加速度传感器等。

#### 1. 按工作原理分类

往往同一机理的传感器可以测量多种物理量，如电阻型传感器可以用来测温度、位移、压力、加速度等物理量。而同一被测物理量又可采用多种不同类型的传感器来测。如位移量，可用电容式、电感式、电涡流式等传感器来测。本书按测量原理来分，这种分类方法列于表 1-2-1。

表 1-2-1 传感器变换原理一览表

| 变换原理  | 传感器举例              |
|-------|--------------------|
| 变电阻   | 电位器式，应变式，压阻式，光敏，热敏 |
| 变磁阻   | 电感式，差动变压器式，涡流式     |
| 变电容   | 电容式，湿敏             |
| 变谐振频率 | 振动膜（筒、弦、梁）式        |
| 变电荷   | 压电式                |
| 变电势   | 霍尔式，感应式，热电偶        |

2. 按被测量分类

这种分类方法列于表 1-2-2，包括了输入的基本被测量和由此派生的其他量。

表 1-2-2 传感器输入被测量一览表

| 基本被测量 | 派生的被测量                              | 基本被测量 | 派生的被测量                      |
|-------|-------------------------------------|-------|-----------------------------|
| 热工量   | 温度，热量，比热，压力，压差，真空度，流量，流速，风速         | 物理量   | 黏度，温度，密度                    |
|       |                                     | 化学量   | 气体（液体）化学成分，浓度，盐度            |
| 机械量   | 位移，尺寸，形状，力，应力，力矩，振动，加速度，噪声，角度，表面粗糙度 | 生物量   | 心音，血压，体温，气流量，心电<br>流，眼压，脑电波 |
|       |                                     | 光学量   | 光强，光通量                      |

其他分类方法还有：按工作效应分有物理传感器、化学传感器、生物传感器；按输出量分有模拟式（输出量为电压、电流等模拟信号）、数字式（输出量为脉冲、编码等数字信号）传感器；按能量关系分有：能量转换型（传感器输出量直接由被测量能量转换而来）、能量控制型（传感器输出的能量由外部能源提供，但受输入量控制）传感器等。

1.3 传感器的发展

传感器的使用已有相当长的历史，过去人们把它叫做变换器或换能器，它既是技术产品中的老成员，又是科技发展中的新秀，其发展方兴未艾，前途无量。

早期以测量物理量为主的传感器，如电位器、应变式和电感式传感器等都是利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的变换。由于新材料、新工艺、新原理的出现，机械结构型传感器在精度、稳定性方面有了很大提高，出现了谐振式、石英电容式这样一些稳定可靠的高精度结构型传感器。迄今为止，结构型传感器在国防、工业自动化、自动检测等许多领域中仍占有相当大的比例。

1.3.1 新材料、新功能的开发与应用

传感器材料是传感器技术的重要基础，随着各种半导体材料、有机高分子功能材料等新材料的发展，人们可制造出各种新型传感器。利用材料的压阻、湿敏、热敏、光敏、磁敏及气敏等效应，可把温度、湿度、光量、气体成分等物理量变换成电量，由此研制出的传感器称为物性传感器。这种传感器具有结构简单、体积小、重量轻、反应灵敏、易于集成化、微型化等优点，引起传感器学术界的重视。而大量的半导体材料、功能陶瓷和有机聚合物的新发展，则为物性传

传感器的发展提供了坚实的基础。更由于宽广的市场需求,刺激了各类廉价物性传感器的发展,促进了传感器的小型化。但是,在要求高可靠性高稳定性的使用场合以及恶劣环境条件下,物性传感器还有不少问题有待解决,但是这类传感器的发展前途很好。

### 1.3.2 微机械加工工艺的发展

在发展新型传感器中,离不开新工艺的采用。各种控制仪器设备的功能越来越强,要求各个部件所占体积越小越好,因而传感器本身体积也是越小越好。这就要求发展新的材料及加工技术,主要是指各种微细加工技术。又称微机械加工技术。微机械加工技术是随着集成电路工艺发展起来的。半导体技术中的氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀及蒸镀、溅射薄膜等加工方法,都已引进到传感器制造过程中,如利用半导体技术制造出硅微型传感器,利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器,利用溅射薄膜工艺制造的压力传感器等。微型传感器是目前最为成功最具有实用性的微机电装置。

传统的加速度传感器是由重力块和弹簧等制成的,体积大、稳定性差、寿命短,而利用激光等各种微细加工技术制成的硅加速度传感器体积非常小,互换性和可靠性都较好。另外还有微型的温度、磁场传感器等,这种微型传感器面积大小都在  $1\text{mm}^2$  以下。目前在  $1\text{cm}^2$  大小的硅芯片上可以制作上千个压力传感器的阵列。

### 1.3.3 传感器的集成化、多功能化发展

各种微机械加工工艺及新材料的发展为传感器集成提供了可能,使传感器从原来的单一元件、单一功能向集成化多功能化方向发展。传感器的集成化一般包含三方面含义。其一是将传感器与其后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等集成在一起,实现一体化。其二是将同一类的传感器集成于同一芯片上,构成二维阵列式传感器。其三是将几个传感器集成在一起,构成一种新的传感器。传感器的“多功能化”是与“集成化”相对应的一个概念,是指传感器能感知与转换两种以上的不同的物理量或化学量。例如,在同一硅片上制作应变计和温度敏感元件,制成能同时测量压力和温度的多功能传感器,将处理电路也制作在同一硅片上,还可实现温度补偿;将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上,制成可监测氧气、氨气、乙醇、乙烯四种气体的多功能传感器;一种温、气、湿三功能陶瓷传感器也已经研制成功。

### 1.3.4 传感器的智能化发展

传感器与微电子技术和微处理器技术相结合,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”等功能，称之为传感器的智能化。传感器与微电脑的“硬件”和“软件”集合于一体，特别是与“软件”的有机结合，可以对获得的信息进行存储、数据处理和控制，从而扩展了功能，提高了精度，而且在对环境条件的适应性，对信息的识别等方面大大优于传统的单功能传感器，此类传感器称为智能传感器。

综上所述，随着自动化生产程度的不断提高，对传感器的要求也在不断提高，人们正竞相发展小型化、集成化、智能化的传感器，并且为不断满足测试技术的各种需要而努力开发新型传感器。同时必须指出，高灵敏度、高精确度、高稳定性、响应速度快、互换性好始终是传感器发展所追求的目标，也是传感器发展的永久方向。

## 1.4 本教材的主要内容及特点

本课程是仪表与测试技术类的专业课之一。要求学生掌握几种常用传感器的工作原理、输出特性、误差补偿、应用以及工程设计方法。对于一些新型传感器，要求掌握其基本原理和误差分析方法。既强调对传感器理论原理的掌握，又要求学生有一定的工程设计实践能力，了解传感器技术的典型应用。内容上包括了传感器基本知识、常用传感器、新型传感器及现代传感器技术，兼顾了一般传感器内容和传感器新技术。本书以结构型传感器为主，对有发展前途的新型传感器也作了较多介绍，如谐振式、光纤式、微机电传感器等。教材紧紧围绕传感器原理，从传感器工作的物理效应、传感器结构与特性分析、测量电路与误差补偿、传感器设计与典型应用几方面展开。传感器各章自成体系，便于讲授时删减。为巩固书本课堂上学习的知识，提高传感器应用及解决实际问题的能力，新教材将有关例题和习题列在相关章节中，并提供了一个与之配套的传感器虚拟实验室光盘，基本包括了课程讲授所涉及的实验内容。

由于传感器属交叉学科，涉及的知识面较广，其原理是基于各种物理、化学现象和物理、化学效应，而测量电路是以模拟-数字电路为基础的，智能传感器还需要微处理机和程序设计的知识。传感器种类繁多，应用非常广泛，作为传感器工程技术人员，必须具有扎实的理论基础和多学科的综合知识。

### 习题与思考题

- 1-1 试述传感器的定义及组成，传感器有哪几种分类方法？各有什么特点？
- 1-2 试述传感器的发展趋势。
- 1-3 列举你身边的传感器。

## 第2章 传感器的一般特性

传感器的输入-输出关系反映了其一般特性。传感器所测量的量（物理量、化学量及生物量等）经常会发生各种各样的变化。例如，在测量某一液压系统的压力时，压力值在一段时间内可能很稳定，而在另一段时间内则可能有缓慢起伏，或者呈周期性的脉动变化，甚至出现突变的尖峰压力。所以传感器的输入可以分为两种基本形式：一种是输入处于稳态形式（静态或准静态），即被测量不随时间变化或变化缓慢；另一种是动态形式，即被测量随时间变化而变化（周期或瞬间变化）。输入状态不同，传感器的输入-输出特性也不同。传感器主要通过两个基本特性——静态特性和动态特性来反映其对被测量的响应。传感器的输入-输出特性可以通过传感器校准过程获得。

### 2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指传感器在静态工作状态下的输入输出特性。所谓静态工作状态是指传感器的输入量恒定或缓慢变化而输出量也达到相应的稳定值时的工作状态，这时输出量为输入量的确定函数。

传感器的静态特性是通过静态性能指标来表示的，静态性能指标是衡量传感器静态性能优劣的重要依据。例如，传感器的总精度就是一个重要的综合的静态性能指标。不过，本章主要讨论的是传感器的各种分项性能指标，并简要地研究它们的综合问题。静态特性是传感器使用的重要依据，传感器的出厂说明书中一般都列有其主要的静态性能指标的额定数值。

#### 2.1.1 传感器静态特性的一般知识

如果不考虑传感器特性中的迟滞及蠕变等性质，或者传感器虽然有迟滞及蠕变等性质但仅考虑其理想的平均特性时，其静态特性在多数情况下可以用如下的代数多项式表示

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (2-1-1)$$

式中： $x$  为传感器的输入量，即被测量； $Y$  为传感器的输出量，即测量值， $Y$  表示传感器的理论输出量，其某一实际输出量则用  $y$  表示； $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$  分别为决定特性曲线形状和位置的系数，一般通过传感器的校准试验数据经曲线拟合求出，它们可正可负。

实际使用中的大多数传感器,其用代数多项式表示的特性方程的次数并不高,一般不超过五次。根据传感器的实际特性所呈现的特点和实际应用场合的具体需要,其静态特性方程并非一定要表示成式(2-1-1)所确定的完整形式。比较常见的情况有:

① 当  $a_2, a_3, \dots, a_n = 0$  时,  $Y = a_0 + a_1x$ , 特性曲线是一条不过零点的直线, 如图 2-1-1 (a) 所示。这就是线性传感器的特性。

② 当  $a_0, a_2, \dots, a_n = 0$  时,  $Y = a_1x$ , 特性曲线是一条过零点的直线, 如图 2-1-1 (b) 所示, 这是线性传感器比较理想的特性。

③ 当  $a_0, a_3, a_5, \dots = 0$  时, 方程只包含一次项和偶次方项,  $Y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots$ , 特性曲线具有零点附近的较小线性段, 但不具有对称性, 如图 2-1-1 (c) 所示。通常, 实际特性也可能不过零。

④ 当  $a_0, a_2, a_4, \dots = 0$  时, 方程仅包含奇次方项,  $Y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots$ , 特性曲线对原点对称, 如图 2-1-1 (d) 所示。不少差动式传感器具有这种特性, 其在原点附近的线性段是比较有利的工作段。通常, 实际特性还可能不过零点。

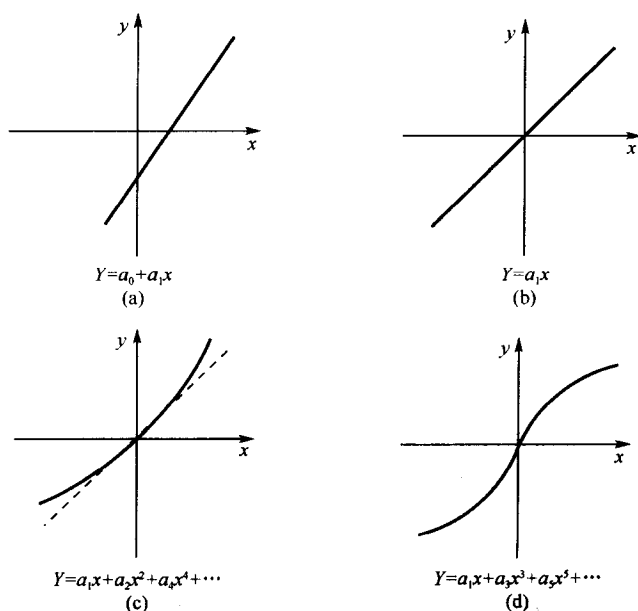


图 2-1-1 传感器的几种典型静态特性示意图

要使传感器和计算机联机使用,传感器的静态特性用数学方程表示是必不可少的,但为了直观地、一目了然地看出传感器的静态特性曲线,使用图线、表格来表示静态特性显然是较优越的方式。图线能表示出传感器特性的变化趋势以及



何处有最大或最小的输出，何处传感器灵敏度高、何处低。当然，也能通过其特性曲线，粗略地判别出是线性或非线性传感器。

列表法就是把传感器的输入-输出数据按一定的方式顺序地排列在一个表格之中。列表的优点是简单易行，各数据易于进行数量上的比较，便于进行其他处理，如绘制曲线、进行曲线拟合、进行插值计算，或求一组数据的差分或差商等。

## 2.1.2 传感器的主要静态性能指标

### 1. 测量范围和量程

传感器所能测量的最大被测量（即输入量）的数值称为测量上限，最小被测量则称为测量下限，而用测量下限和测量上限表示的测量区间，则称为测量范围，简称范围。

测量上限和测量下限的代数差称为量程。今以一力传感器为例来说明。

- ① 测量范围为  $0 \sim +10\text{N}$ ，量程为  $10\text{N}$ ；
- ② 测量范围为  $-10\text{N} \sim +10\text{N}$ ，量程为  $20\text{N}$ ；
- ③ 测量范围为  $-3\text{N} \sim +10\text{N}$ ，量程为  $13\text{N}$ ；
- ④ 测量范围为  $+2\text{N} \sim +10\text{N}$ ，量程为  $8\text{N}$ 。

如果用  $x$  来表示被测量，则量程可用下式表示

$$\text{量程} = x_{\max} - x_{\min} \quad (2-1-2)$$

通过测量范围，可以知道传感器的测量下限和测量上限，以便正确使用传感器。通过量程，可以知道传感器的满量程输入值，而其所对应的满量程输出值，乃是决定传感器性能的一个重要数据。

### 2. 分辨力和阈值

分辨力是指传感器在规定测量范围内所能检测出被测输入量的最小变化量，它表征传感器能检测到的最小输入量变化。实际传感器的输入-输出关系不可能

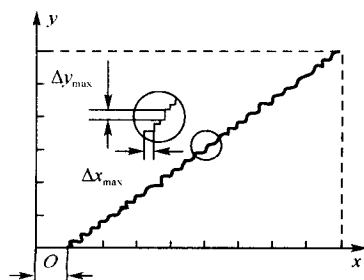


图 2-1-2 分辨力和阈值的概念

都做到绝对连续。有时，输入量开始变化，但输出量并不随之相应变化，而是输入量变化到某一程度时输出才突然产生一小的阶跃变化，这就出现了分辨力和阈值问题。问题的实质应从微观来看，传感器的特性曲线并不是十分平滑的，而是有许多微小的起伏，如图 2-1-2 所示。分辨力用满量程输入值之百分数表示，则称为分辨率。