

# 传感器

孙少文 陆中宏 ◎ 主 编

CHUAN GAN QI



 中央广播电视大学出版社

# 传 感 器

孙少文 陆中宏 主编

中央广播电视大学出版社

北 京

## 内容简介

本书共分 12 章, 前两章介绍了传感器的原理、特性、分类、应用及发展趋势, 测量等基础知识; 第 3 章到第 11 章介绍了几种典型传感器的工作原理、结构及其应用; 最后一章介绍了一些现代的新型传感器。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器 / 孙少文, 陆中宏主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2014.1

ISBN 978-7-304-05244-7

I. ①传… II. ①孙… ②陆… III. ①传感器

IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 197921 号

版权所有, 翻印必究。

## 传感器

孙少文 陆中宏 主编

---

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010-58840200 总编室 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

---

策划编辑: 苏 醒

印刷: 北京雷杰印刷有限公司

版本: 2014 年 1 月第 1 版

开本: 787×1092 1/16

责任编辑: 韩 峰

印数: 0001~3000

2014 年 1 月第 2 次印刷

印张: 15.5 字数: 232 千字

---

书号: ISBN 978-7-304-05244-7

定价: 40.00 元

---

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

# 前 言

当我们在接收信息的时候，首先要考虑到获取信息的准确性，而如果仅仅依靠人们的感觉器官来获得我们想要的信息，在现代的生产活动中是远远不够的。因此，作为一种能够探测、感受外界的信号、物理条件（如光、热）或化学组成（如烟雾），并能把探测到的信息传递给其他装置或器官的器件——传感器也就应运而生了。它是人们获取自然界信息的重要手段和主要途径。随着现代科学技术的发展，传感器在非电量检测与工业生产过程中的应用越来越广泛，从计算机技术、信息处理技术、电子加工技术，到生产过程的自动化等许多领域都渗透着先进的传感技术，利用传感器的检测来获取信息。因此，作为工程技术人员必须掌握或了解传感器的工作原理、特性、结构及测量电路等方面的理论。

《传感器》中不仅包含了传感器的工作原理、特性、分类、测量等基础知识，还注重其实用性和新颖性，介绍了多种传感器在实际生活中的应用和现代新型传感器。

本书共分 12 章，前两章介绍了传感器的原理、特性、分类、应用及发展趋势，测量等基础知识；第 3 章到第 11 章介绍了几种典型传感器的工作原理、结构及其应用；最后一章介绍了一些现代的新型传感器。

由于编者的水平有限，书中难免有缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 传感器的基础知识 .....   | 1  |
| 1.1 传感器的定义与应用 .....    | 1  |
| 1.1.1 传感器的定义 .....     | 1  |
| 1.1.2 传感器的应用 .....     | 2  |
| 1.2 传感器的组成与分类 .....    | 4  |
| 1.2.1 传感器的组成 .....     | 4  |
| 1.2.2 传感器的分类 .....     | 4  |
| 1.3 传感器的特性 .....       | 5  |
| 1.3.1 传感器的静态特性 .....   | 5  |
| 1.3.2 传感器的动态特性 .....   | 10 |
| 1.4 传感器的技术指标 .....     | 15 |
| 1.5 传感器的选用 .....       | 15 |
| 1.6 提高传感器性能的方法 .....   | 17 |
| 1.7 传感器接口电路 .....      | 19 |
| 1.8 传感器的数学模型 .....     | 22 |
| 1.8.1 传感器的静态数学模型 ..... | 22 |
| 1.8.2 传感器的动态数学模型 ..... | 23 |
| 第 2 章 测量的基础知识 .....    | 24 |
| 2.1 测量的定义和方法 .....     | 24 |
| 2.1.1 测量的定义 .....      | 24 |
| 2.1.2 测量的方法 .....      | 25 |
| 2.2 测量系统 .....         | 26 |
| 2.3 测量误差 .....         | 28 |
| 2.3.1 测量误差的概念 .....    | 28 |
| 2.3.2 测量误差的分类 .....    | 28 |
| 2.4 测量的精度与分辨率 .....    | 32 |
| 第 3 章 电阻应变式传感器 .....   | 34 |
| 3.1 弹性敏感元件 .....       | 34 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 3.1.1 弹性敏感元件的特性 .....       | 34        |
| 3.1.2 弹性敏感元件的结构 .....       | 35        |
| 3.2 应变式传感器的组成 .....         | 38        |
| 3.3 电阻应变片的工作原理 .....        | 38        |
| 3.4 电阻应变片的结构类型 .....        | 40        |
| 3.5 电阻应变片的特性 .....          | 41        |
| 3.6 电阻应变片的测量电路 .....        | 44        |
| 3.7 电阻应变片的温度误差与补偿 .....     | 47        |
| 3.7.1 温度误差产生的原因 .....       | 47        |
| 3.7.2 温度补偿方式 .....          | 48        |
| 3.8 应变式传感器的应用 .....         | 49        |
| 3.8.1 应变式加速度传感器 .....       | 49        |
| 3.8.2 应变式压力传感器 .....        | 50        |
| 3.8.3 应变式力传感器 .....         | 51        |
| 3.9 电位器式传感器 .....           | 52        |
| <b>第 4 章 电感式传感器 .....</b>   | <b>53</b> |
| 4.1 自感式传感器 .....            | 53        |
| 4.1.1 自感式传感器的工作原理 .....     | 53        |
| 4.1.2 自感式传感器的测量电路 .....     | 57        |
| 4.1.3 自感式传感器的应用举例 .....     | 59        |
| 4.2 互感式传感器 .....            | 60        |
| 4.2.1 互感式传感器的工作原理 .....     | 61        |
| 4.2.2 互感式传感器的测量电路 .....     | 65        |
| 4.2.3 互感式传感器的应用举例 .....     | 67        |
| 4.3 电涡流式传感器 .....           | 69        |
| 4.3.1 电涡流式传感器的基本结构 .....    | 69        |
| 4.3.2 电涡流式传感器的工作原理 .....    | 70        |
| 4.3.3 电涡流式传感器的特性和注意事项 ..... | 70        |
| 4.3.4 电涡流式传感器的测量电路 .....    | 74        |
| 4.3.5 电涡流式传感器的应用举例 .....    | 76        |
| <b>第 5 章 电容式传感器 .....</b>   | <b>78</b> |
| 5.1 电容式传感器的工作原理 .....       | 78        |
| 5.2 电容式传感器的分类 .....         | 79        |
| 5.3 电容式传感器的特性 .....         | 84        |
| 5.4 电容式传感器的测量电路 .....       | 88        |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| 5.4.1 普通交流电桥           | 88         |
| 5.4.2 耦合式电感电桥          | 88         |
| 5.4.3 二极管双 T 型交流电桥     | 90         |
| 5.4.4 运算放大器式电路         | 91         |
| 5.4.5 差动脉冲宽度调制电路       | 91         |
| 5.4.6 调频电路             | 92         |
| 5.5 电容式传感器的优点及其应用举例    | 93         |
| 5.5.1 电容式传感器的应用优点      | 93         |
| 5.5.2 电容式位移传感器         | 93         |
| 5.5.3 压力传感器            | 94         |
| 5.5.4 电容式测厚传感器         | 96         |
| 5.5.5 电容式加速度传感器        | 96         |
| 5.5.6 电容式接近开关          | 97         |
| <b>第 6 章 磁电式传感器</b>    | <b>98</b>  |
| 6.1 磁电感应式传感器           | 98         |
| 6.1.1 磁阻元件             | 98         |
| 6.1.2 磁电感应式传感器的工作原理及分类 | 99         |
| 6.1.3 磁电感应式传感器的基本特点    | 101        |
| 6.1.4 磁电感应式传感器的结构特点    | 102        |
| 6.1.5 磁电感应式传感器的测量电路    | 103        |
| 6.2 霍尔式传感器             | 103        |
| 6.2.1 工作原理——霍尔效应       | 104        |
| 6.2.2 霍尔元件及其特性         | 105        |
| 6.2.3 集成霍尔元件           | 108        |
| 6.2.4 霍尔传感器的测量电路       | 109        |
| 6.2.5 霍尔传感器的误差及补偿方法    | 111        |
| 6.3 磁电式传感器的应用举例        | 115        |
| 6.3.1 磁电式扭矩传感器         | 115        |
| 6.3.2 电磁流量传感器          | 115        |
| 6.3.3 霍尔式位移传感器         | 116        |
| 6.3.4 霍尔式开关集成传感器       | 117        |
| 6.3.5 霍尔转速传感器          | 118        |
| <b>第 7 章 压电式传感器</b>    | <b>119</b> |
| 7.1 压电效应               | 119        |
| 7.2 压电材料               | 120        |

|              |                 |           |
|--------------|-----------------|-----------|
| 7.3          | 压电式传感器的等效电路     | 12        |
| 7.3.1        | 压电元件的等效电路       | 12        |
| 7.3.2        | 压电式传感器的实际等效电路   | 12        |
| 7.4          | 压电式传感器的测量电路     | 12        |
| 7.4.1        | 电压放大器(阻抗变换器)    | 12        |
| 7.4.2        | 电荷放大器           | 12        |
| 7.5          | 压电式传感器的应用举例     | 12        |
| 7.5.1        | 压电式玻璃破碎报警器      | 12        |
| 7.5.2        | 压电式加速度传感器       | 12        |
| 7.5.3        | 压电式测压传感器        | 12        |
| 7.5.4        | 压电式传感器在管道测漏中的应用 | 12        |
| <b>第 8 章</b> | <b>光电式传感器</b>   | <b>13</b> |
| 8.1          | 光电效应            | 13        |
| 8.2          | 光电器件            | 13        |
| 8.2.1        | 光敏电阻            | 13        |
| 8.2.2        | 光敏晶体管及其基本特性     | 13        |
| 8.2.3        | 光电管和光电倍增管       | 13        |
| 8.2.4        | 光电池             | 13        |
| 8.3          | 光电传感器的组成与分类     | 14        |
| 8.3.1        | 光电传感器的组成        | 14        |
| 8.3.2        | 光电传感器的分类        | 14        |
| 8.4          | 光电式传感器的应用举例     | 14        |
| 8.4.1        | 光电开关            | 14        |
| 8.4.2        | 条形码扫描笔          | 14        |
| 8.4.3        | 光电转速计           | 14        |
| 8.4.4        | 烟尘浊度监测仪         | 14        |
| 8.5          | 光纤传感器           | 14        |
| 8.5.1        | 光纤的结构和种类        | 14        |
| 8.5.2        | 光纤的导光原理         | 14        |
| 8.5.3        | 光纤传感器的组成与分类     | 14        |
| 8.5.4        | 光的调制与解调技术       | 14        |
| 8.5.5        | 光纤传感器的应用举例      | 14        |
| <b>第 9 章</b> | <b>热电式传感器</b>   | <b>15</b> |
| 9.1          | 热电偶传感器          | 15        |
| 9.1.1        | 热电偶的测温原理        | 15        |

|        |             |     |
|--------|-------------|-----|
| 9.1.2  | 热电偶的分类      | 159 |
| 9.1.3  | 热电偶的常用材料    | 162 |
| 9.1.4  | 热电偶的冷端补偿法   | 163 |
| 9.1.5  | 热电偶测量线路     | 165 |
| 9.1.6  | 热电偶的应用举例    | 168 |
| 9.2    | 热电阻传感器      | 168 |
| 9.2.1  | 热电阻测温原理     | 169 |
| 9.2.2  | 常用热电阻温度特性   | 170 |
| 9.2.3  | 热电阻传感器的结构   | 171 |
| 9.2.4  | 热电阻传感器的应用   | 172 |
| 9.3    | 热敏电阻传感器     | 173 |
| 9.3.1  | 热敏电阻的类型和结构  | 173 |
| 9.3.2  | 热敏电阻的参数与特性  | 175 |
| 第 10 章 | 超声波传感器      | 179 |
| 10.1   | 超声波检测原理     | 179 |
| 10.2   | 超声波传感器      | 181 |
| 10.2.1 | 超声波传感器的类型   | 181 |
| 10.2.2 | 超声波传感器的结构   | 182 |
| 10.3   | 超声波探头电路     | 184 |
| 10.4   | 超声波传感器的主要参数 | 186 |
| 10.5   | 超声波传感器的应用举例 | 187 |
| 10.5.1 | 超声波流量计      | 187 |
| 10.5.2 | 超声波物位传感器    | 189 |
| 10.5.3 | 超声波探伤       | 190 |
| 10.5.4 | 超声波诊断仪      | 190 |
| 10.5.5 | 超声波测厚仪      | 192 |
| 10.5.6 | 超声波空化作用     | 194 |
| 第 11 章 | 其他重要传感器     | 196 |
| 11.1   | 微波传感器       | 196 |
| 11.1.1 | 微波传感器的测量原理  | 196 |
| 11.1.2 | 微波传感器的构成及特点 | 197 |
| 11.1.3 | 微波传感器的应用举例  | 198 |
| 11.2   | 湿敏传感器和气敏传感器 | 202 |
| 11.2.1 | 湿敏传感器       | 202 |
| 11.2.2 | 气敏传感器       | 204 |

|        |             |     |
|--------|-------------|-----|
| 11.3   | 感应同步器和磁栅传感器 | 207 |
| 11.3.1 | 感应同步器       | 207 |
| 11.3.2 | 磁栅传感器       | 211 |
| 11.4   | 光栅传感器       | 213 |
| 11.5   | 红外线传感器      | 219 |
| 11.5.1 | 红外辐射        | 219 |
| 11.5.2 | 红外传感器的分类    | 220 |
| 11.5.3 | 红外传感器的组成    | 221 |
| 11.5.4 | 红外传感器的应用    | 222 |
| 11.6   | 激光传感器       | 224 |
| 11.6.1 | 激光的概念       | 224 |
| 11.6.2 | 激光传感器的应用    | 226 |
| 第 12 章 | 新型传感器       | 228 |
| 12.1   | 智能传感器       | 228 |
| 12.1.1 | 智能传感器的实现途径  | 228 |
| 12.1.2 | 集成化智能传感器的形式 | 229 |
| 12.1.3 | 智能传感器的应用    | 230 |
| 12.2   | 谐振式传感器      | 233 |
| 12.2.1 | 谐振式传感器的工作原理 | 233 |
| 12.2.2 | 谐振式传感器的应用举例 | 234 |
| 参考文献   |             | 238 |

# 第1章 传感器的基础知识

伴随着技术革命的到来，人类进入了信息时代。而生活在信息时代的人们，一切社会活动都是以信息获取和信息交换为中心的。在科学技术中，传感器更具有突出地位。20世纪80年代以来，世界各国都将传感器技术列为重点发展的高新技术。例如，在自动化生产过程中，人们为了获取生产流程中的各种相关信息，便利用传感器来进行检测，进而对它们进行分析、判断，以便进行自动控制。所以说，传感器是检测系统与外界环境的信息通道，是获取信息的主要途径和手段，也是被研究对象与测试分析系统之间的接口，处在检测系统最开始的位置。

传感器按输出信号不同有不同的表现形式，能满足信息传输、处理、记录、显示、控制要求，是自动检测与自动控制系统中不可缺少的器件，也是一种能将非电物理量、化学量、生物量等转换成电信号的器件。

那么，究竟传感器的确切定义是什么呢？它由哪几部分组成，具有什么特性及其应用范围等问题，将会在本章一一说明。

## 1.1 传感器的定义与应用

### 1.1.1 传感器的定义

中华人民共和国国家标准 GB7665—87 中明确给出了传感器的定义：传感器是指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。表 1-1 中列出了部分传感器的输入量、输出量及其转换原理。从表 1-1 可以看出，传感器就是利用物理效应、化学效应、生物效应，把被测的物理量、化学量、生物量等非电量转换成电量的器件或装置。

表 1-1 传感器的输入量、输出量及其转换原理

| 输 入 量 |       |      |                                     | 转换原理          | 输出量                      |
|-------|-------|------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|
| 物 理 量 | 机 械 量 | 几何学量 | 长度、位移、应变、厚度、角度、角位移                  | 物理定律或<br>物理效应 | 电量<br>或<br>电压<br>或<br>电流 |
|       |       | 运动学量 | 速度、角速度、加速度、角加速度、振动、频率、时间            |               |                          |
|       |       | 力学量  | 力、力矩、应力、质量、荷重                       |               |                          |
|       | 流量体   |      | 压力真空度、流速、流量、液位、黏度                   |               |                          |
|       | 温度    |      | 温度、热量、比热                            |               |                          |
|       | 湿度    |      | 湿度、露点、水分                            |               |                          |
|       | 电量    |      | 电流、电压、功率、电荷、电阻、电感、电容、电磁波            |               |                          |
|       | 磁场    |      | 磁通、磁场强度、磁感应强度                       |               |                          |
|       | 光     |      | 光度、照度、色、紫外光、红外光、可见光、光位移             |               |                          |
|       | 放射线   |      | X、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线 |               |                          |
| 化学量   |       |      | 气体、液体、固体分析、pH、浓度                    | 化学效应          |                          |
| 生物量   |       |      | 酶、微生物、免疫抗原、抗体                       | 生物效应          |                          |

另外，国际电工委员会（IEC）也为传感器下了定义：传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号。例如歌手在舞台上演唱时要用传声器（话筒），传声器就是把声波（机械波）转换成电信号的传感器。

### 1.1.2 传感器的应用

传感器技术的应用范围十分广泛。传感器技术对现代化科学技术、现代化农业及工业自动化发展起到基础和支柱的作用，对推动社会全面发展更起着十分重要的作用，所以它在世界各国已成为一个重要产业。可以说，没有传感器就没有现代化的科学技术；没有传感器也就没有人类现代化的生活环境和条件。传感器技术已成为科学技术和国民经济发展水平的标志之一。它不仅仅是计算机、机器人、自动化设备的“感觉器官”及机电结合的接口，而且已渗透到军事和生活、人类生命、工业生产、宇宙开发、海洋探测环境保护、资源调查、生物工程，甚至文物保护等多个领域。从太空到海洋，从各种复杂的工程系统到人们日常生活的衣食住行，几乎每一个现代化项目，都已经离不开各种各样的传感器。

① 首先，用压电陶瓷制成的压电引信称为弹丸起爆装置，具有瞬发度高、安全可靠、不用配置电源等特点，常用在破甲弹上；还有红外雷达具有搜索、跟踪、测距等功能，可以搜索几十千米到上千千米内的目标；其他还有红外制导、红外通信、红外夜视、红外对抗等；再如，可以利用红外探测仪发现地物、探测地形及敌方各种军事目标。这是在军事方面的应用。

② 现代家庭中不可或缺的一些用具，如空调、电冰箱、洗衣机、电热水器、电熨斗、照相机、音像设备、安全报警器、电厨具、吸尘器等都用到了传感器。这是在常用电器中的应用。

③ 给人类生命和财产安全带来极大威胁的火灾、盗窃等安全问题的频繁发生,使得安全防范技术在世界各国已经形成产业。防火、防盗系统中就广泛应用了光电、热电、压电、气体、红外、超声波、微波及图像等传感器。这是在安全方面的应用。

④ 在医疗上应用传感器可以对人体温度、血压、心脑电波及肿瘤等进行准确地测量与诊断。这是在人体医学上的应用。

⑤ 在汽车上,各种各样的传感器技术更是得到了广泛的应用。如温度、压力、流量、湿度、气体、位置、速度、加速度、扭矩等传感器。为了保障汽车安全行驶,利用传感器检测的信息,实现了对发动机燃油喷射系统的精确控制。这是在汽车产业中的应用。

⑥ 现代化楼层建设的发展趋势:采用新材料、新信息及通信技术的智能建筑。因此在智能建筑物的各个方面,都应用各种传感器。例如信息和通信系统、个人安全与保障系统、交通管理、加热与通风及空气调节(HAVC)、能源管理、维护管理、灵巧的居室装置以及新的智能建筑结构等。这是在建筑行业中的应用。

⑦ 环境问题已经被世界各国所重视。为了保护环境,各国也将联合起来,共同开发和研制用以监测大气、水质及噪声污染的传感器。这是在环境保护中的应用。

⑧ 在石油、化工、电力、钢铁、机械等工业生产中,需要及时检测各种工艺参数的相关信息,并通过电子计算机或控制器对生产过程进行自动化控制。如图1-1所示,传感器是一个自动控制系统中必不可少的部分。这是在工业生产中的应用。

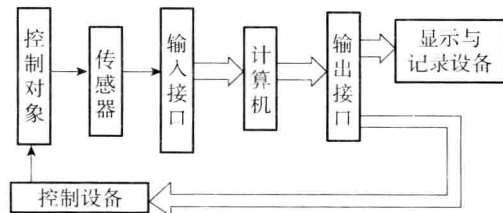


图 1-1 微机化检测与控制系统的基本组成

⑨ 在卫星、探测器等飞行器上利用紫外、红外光电传感器及微波传感器探测气象、地质等;在船舶上利用超声波传感器进行水下探测。这是在遥感技术中的应用。将传感器用在火箭等飞行器上,对飞行距离及飞行方向、飞行速度、加速度、飞行姿态进行检测。这是在航空航天业中的应用。

传感器的应用已在上述领域发展得如火如荼,还有一些新的领域出现了新的传感器,如研究生物感官,开发仿生传感器。大自然是奇妙的,大自然中动物的感官性能更是让人类望尘莫及(蝙蝠的听觉、狗的嗅觉、飞鸟的视觉)。因此,研究它们的机理,开发仿生传感器,是传感器技术未来发展的方向之一。

## 1.2 传感器的组成与分类

### 1.2.1 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、转换元件及转换电路组成,如图 1-2 所示。这主要是从它的功能上来讲的。

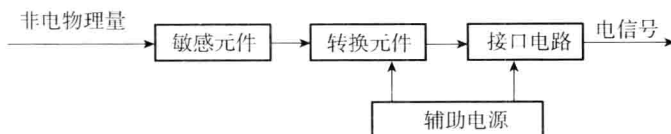


图 1-2 传感器的组成框图

图中,敏感元件是指传感器中能直接感受(或响应)被测量的部分。它是传感器的核心部件,用来感知外界信息和将其转换成有用信息的元件。如传感器中各种类型的弹性元件,常被称为弹性敏感元件。在完成非电量到电信号的变换时,并非所有的非电量都能利用现有手段直接转换成电信号,往往是先变换为另一种易于变成电信号的非电量,然后再转换成电信号。

转换元件是指能将感受到的非电量直接转换成电信号的器件或元件。(应变片将应变转换为电阻量。)它与敏感元件的关系是:敏感元件的输出是它的输入。

接口电路是指将无源型传感器输出的电参数量转换成电能。常用的接口电路有电桥电路、脉冲调宽电路、谐振电路等,它们将电阻、电容、电感等电参数转换成电压、电流或频率等电信号。

事实上,有些传感器的敏感元件可以直接把被测非电量转换成电信号输出,如压电晶体、光电池、热电偶等。通常称它们为有源型传感器。

辅助电源为无源传感器的接口电路提供电能。

### 1.2.2 传感器的分类

传感器的种类名目繁多,分类不尽相同。目前尚没有统一的分类方法,有按被测量的性质分类的,有按传感器的能量转换情况分类的,有按输出量的性质分类的,有按传感器的材料分类的,每一种分类方法都各有所长。常用的分类方法主要有两种:一种是按传感器的工作机理分类,另一种是按传感器的使用分类。

首先,按照传感器的工作机理,以物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应为依据,可分为电阻、电感、电容、光栅、超声波、热电偶、激光、红外等传感器。

① 电阻式、电感式、电容式按其基本形式都属于电学式传感器,以及由此派生出来的

电触式、差动变压器式、涡流式、压磁式、感应同步变压器式、容栅式等，它是应用范围比较广的一种传感器。本教材就是基于此分类，其工作原理后面章节将会一一叙述，在此不作赘述。

② 磁学式传感器是利用铁磁物质的一些物理效应制作而成。磁学式传感器主要用于位移、转矩等参数的测量。

③ 光电式传感器是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的，主要用于光强、光通量的测量，以及利用光线的透射、遮挡、反射、干涉等测量位移、温度等参数。它在非电量监测及自动控制技术中占有重要的地位。

④ 电势型传感器是利用热电效应、光电效应及霍尔效应等原理制成，它主要被用于温度、磁通量、电流、速度、光通量及热辐射等参数的测量。

⑤ 电荷型传感器是利用压电效应原理制作而成，主要用于力和加速度的测量。

这种分类法的优点是对传感器的工作原理的叙述比较严谨，有利于广大工作者对传感器进行深入分析与研究，而且类别较少，有条不紊。缺点是不便于使用者根据用途选用。

其次，按使用范围不同，可将传感器分为位移传感器、加速度传感器、压力传感器、流量传感器、温度传感器、振动传感器等。

这种分类方法明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。但没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

其他传感器的分类方法有：按输入和输出的特性，分为线性传感器和非线性传感器；按输出信号的形式，分为开关式传感器、模拟式传感器和数字式传感器；按能量转换方式，可分为有源型传感器和无源型传感器。

## 1.3 传感器的特性

传感器的特性一般指输入-输出特性，它是有静态、动态之分的。当输入量为常量，或变化极慢时，这一关系称为静态特性；当输入量随时间变化较快，基本上是时间的函数时，这一关系称为动态特性。对传感器的基本要求是其能够感受被测非电量的变化并将其不失真地转换成相应的电信号，如果把传感器看做二端口网络，那么网络的外部特性，即输入-输出特性应该是线性关系。传感器的基本特性用静态特性和动态特性来描述。

### 1.3.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性指被测量的值处于稳定状态时的输入输出关系，也可以说静态特性是指输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。描述传感器静态特性的技术指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性。

### 1. 线性度（非线性误差）

传感器输入-输出关系可能是线性的，也可能是非线性的。描述输入-输出之间的线性程度的参数称为线性度，又称为非线性误差。

传感器的 I/O 关系可用一个多项式表示为：

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \cdots + b_nx^n \quad (1-1)$$

式中， $y$ ， $x$ ——输出和输入量；

$b_0$ ——零点输出；

$b_1$ ——线性灵敏度；

$b_2, b_3, \cdots, b_n$ ——高次项的灵敏度，或称非线性项系数。各项系数不同，决定了特性曲线的形状不同。

#### (1) 非线性项系数均为 0

若非线性项系数  $b_2, b_3, \cdots, b_n$  均为 0，则  $y = b_0 + b_1x$ ，函数中仅含有一次项，输入、输出呈理想的线性特性。二端口网络只有具备这样的特性才能准确无误地反映被测量的值。线性关系曲线见图 1-3。

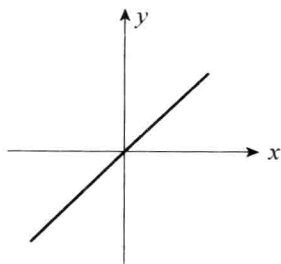


图 1-3 传感器的线性度

#### (2) 仅有偶次非线性项

若仅有偶次非线性项： $y = b_0 + b_2x^2 + b_4x^4 + \cdots$ ，其非线性关系曲线见图 1-4。可以看出，仅有的偶次非线性项的输入-输出关系线性范围较窄，线性度较差，一般传感器设计很少采用这种特性。

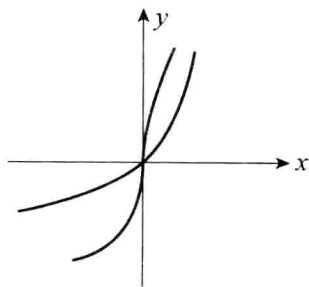


图 1-4 传感器的非线性度

### (3) 仅有奇次非线性项

若仅有奇次非线性项:  $y=b_1x+b_3x^3+b_5x^5+\cdots$ , 由于奇次非线性项中尚有线性项  $b_1x$  存在, 所以通过一定的补偿措施, 可获得较理想的线性特性。

传感器采用差动式结构可实现偶次项和零次项的消除, 使表达式仅含奇次项。除非是理想特性, 否则对非线性特性均应进行线性补偿。

理论直线法、端点线法、割线法、最小二乘法 and 计算程序法等是对传感器非线性大小评定常用的方法。

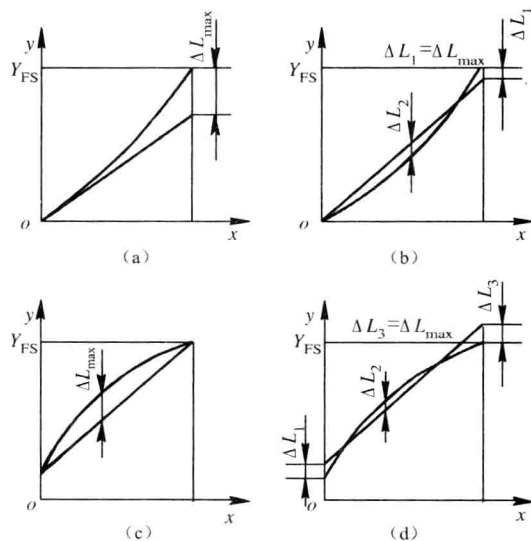


图 1-5 几种直线拟合方法

在标准工作状态下, 用标准仪器设备对传感器进行标定, 得到其输入输出实测曲线, 即校准曲线, 然后作一条理想直线, 称为拟合直线。图 1-5 为常见的几种直线拟合方法。其中, 粗实线为校准曲线, 细实线为拟合直线。校准曲线与拟合直线之间的最大偏差与传感器满量程输出之比, 即为传感器的非线性误差, 通常用相对误差表示为:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中,  $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

$Y_{FS}$ ——满量程输出。

## 2. 迟滞

迟滞现象是指对应同一大小的输入量, 因采用的行程方向不同, 传感器的输出量值不相等 (见图 1-6)。产生迟滞现象的原因主要是因为传感器机械部分存在不可避免的缺陷。迟滞特性是用来说明传感器在正反行程 (输入量从大到小或从小到大) 中输入输出曲线不重合的程度。