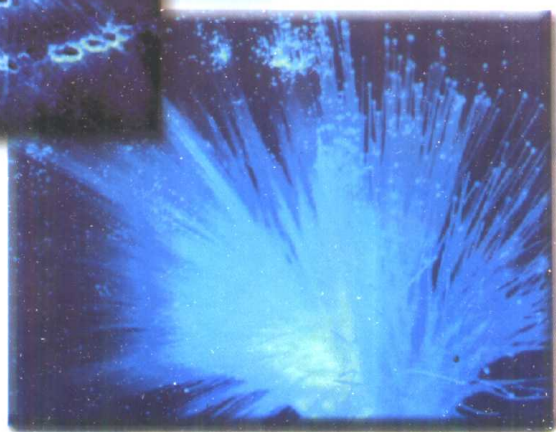
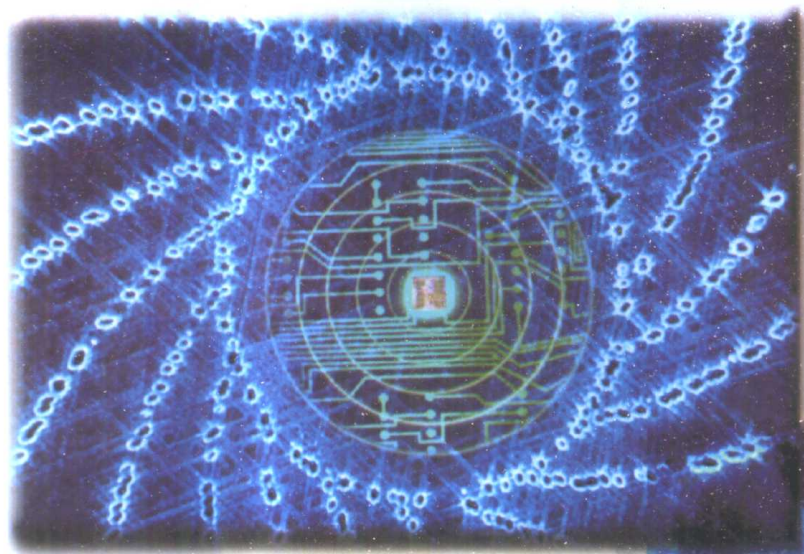


# 传感器原理及应用

唐贤远 刘岐山 编著



电子科技大学出版社

# 传感器原理及应用

唐贤远 刘岐山 编著

电子科技大学出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

传感器原理及应用/唐贤远, 刘岐山编著, 一成都:  
电子科技大学出版社, 2000. 8  
ISBN 7—81065—490—X

I. 传... II. ①唐... ②刘... III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 45039 号

**传感器原理及应用**

唐贤远 刘岐山 编著

---

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号, 邮编: 610054)  
责任编辑: 张勋  
发 行: 新华书店经销  
印 刷: 成都市墨池印刷总厂  
开 本: 1/16 印张 18.75 字数 456 千字  
版 次: 2000 年 8 月第一版  
印 次: 2000 年 8 月第一次印刷  
书 号: ISBN 7—81065—490—X/TN · 283  
印 数: 1—2000 册  
定 价: 21.80 元

---

# 前 言

本书是在唐贤远和刘岐山老师于 1992 年合编的《传感器原理、技术与应用》讲义基础上，经修改、提高而成，基本上保持了原讲义系统讲述传感器的基本原理，突出应用的特色。

在这次编写过程中注意了两个问题：其一是如何更有利于为提高学生素质的课堂教学服务；其二是如何更有利于激发学生的学习激情。所以力求深入浅出，重点突出，理论分析尽可能用学生已学的知识去分析新问题，解决新问题，以获得新知识，提高分析问题的能力。并收集了大量的现代传感器应用的例子，描述了一些很有发展前途的传感器的应用前景，把学生逐步引入传感器应用的广阔空间。

本书分上下两篇，上篇包括传感器的特性，电阻应变式、电容式、电感式、磁电式等结构型传感器，突出传感器原理的理论分析为课堂教学的重点。下篇包括电压、磁敏、热电、光电、气敏、湿敏、离子敏和光纤传感器等物性型传感器，突出传感器工作原理的物理解释、应用知识和应用前景。本篇以学生自学为主，教师讲重点和难点，提高学生的自学能力，扩大知识面。

本书不仅广泛收集了国内外的先进技术资料，作者还结合二十多年的教学和科研实践，理论联系实际，内容新颖、丰富，具有一定的深度和难度。所以它不仅可作“检测技术及仪器”、“应用电子技术”、“无线电技术”、“自动控制”等专业的本科生教材，也可供有关专业的工程技术人员参考。

本书在编写过程中得到了电子科技大学吴正德教授的指导和帮助，在此谨向他表示感谢！

由于这门学科涉及面广，发展迅速，加之编著者水平有限，难免有错误或疏漏之处，请读者提出宝贵意见。

EAA67102

# 目 录

## 上 篇

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 第一章 绪论                      | (1)  |
| 1. 1 传感器的重要作用及定义            | (1)  |
| 1. 2 传感器的组成和分类              | (2)  |
| 1. 3 传感器的应用和发展              | (3)  |
| 思考题                         | (6)  |
| 第二章 传感器的一般特性                | (7)  |
| 2. 1 概述                     | (7)  |
| 2. 2 传感器的静态特性               | (7)  |
| 2. 3 传感器的动态特性               | (15) |
| 2. 4 传感器利用 $\mu\text{p}$ 技术 | (24) |
| 思考题                         | (25) |
| 第三章 电阻应变式传感器                | (27) |
| 3. 1 概述                     | (27) |
| 3. 2 传感器用弹性敏感元件             | (27) |
| 3. 3 电阻应变效应                 | (34) |
| 3. 4 电阻应变片特性参量              | (37) |
| 3. 5 粘合与粘合剂                 | (42) |
| 3. 6 测量电路——电桥               | (43) |
| 3. 7 温度误差                   | (51) |
| 3. 8 电阻应变式传感器的应用            | (56) |
| 3. 9 半导体压阻式传感器              | (61) |
| 思考题                         | (70) |
| 第四章 电容式传感器                  | (73) |
| 4. 1 电容式传感器的工作原理            | (73) |
| 4. 2 电容式传感器的特性分析            | (75) |
| 4. 3 电容式传感器的稳定性问题           | (84) |
| 4. 4 电容式传感器及其应用             | (87) |
| 思考题                         | (92) |
| 第五章 电感式传感器                  | (96) |
| 5. 1 概述                     | (96) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 5. 2 变气隙式电感传感器 .....    | (96)  |
| 5. 3 螺线管式电感传感器 .....    | (104) |
| 5. 4 涡流式电感传感器 .....     | (111) |
| 5. 5 交流电桥中的相敏检波问题 ..... | (120) |
| 思考题 .....               | (125) |

## 第六章 磁电式传感器 .....

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 6. 1 工作原理和结构特点 .....   | (127) |
| 6. 2 磁电式传感器的误差分析 ..... | (132) |
| 6. 3 磁电式传感器的应用 .....   | (133) |
| 思考题 .....              | (134) |

# 下 篇

## 第七章 压电式传感器 .....

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 7. 1 固体压电式传感器 .....          | (136) |
| 7. 2 $PV F_2$ 的工作原理和应用 ..... | (153) |
| 7. 3 传感器在旋转机械故障诊断方面的应用 ..... | (161) |
| 思考题 .....                    | (163) |

## 第八章 磁敏传感器 .....

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 8. 1 霍尔效应 .....   | (164) |
| 8. 2 霍尔传感器 .....  | (164) |
| 8. 3 磁阻式传感器 ..... | (175) |
| 8. 4 结型磁敏器件 ..... | (179) |
| 思考题 .....         | (182) |

## 第九章 热电式传感器 .....

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 9. 1 热电偶温度传感器 .....  | (184) |
| 9. 2 热敏电阻温度传感器 ..... | (188) |
| 9. 3 温敏二极管及其应用 ..... | (193) |
| 9. 4 温敏晶体管及其应用 ..... | (199) |
| 9. 5 集成温度传感器 .....   | (206) |
| 思考题 .....            | (210) |

## 第十章 半导体光敏传感器 .....

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 10. 1 半导体中的光电效应 ..... | (211) |
| 10. 2 光敏电阻 .....      | (212) |
| 10. 3 光敏二极管 .....     | (215) |

|                            |                              |              |
|----------------------------|------------------------------|--------------|
| 10. 4                      | 光敏晶体管 .....                  | (218)        |
| 10. 5                      | 光电转换电路 .....                 | (219)        |
| 10. 6                      | 光电式传感器的应用 .....              | (222)        |
| 10. 7                      | CCD 光电传感器 .....              | (224)        |
|                            | 思考题 .....                    | (230)        |
| <b>第十一章 半导体气敏传感器 .....</b> |                              | <b>(231)</b> |
| 11. 1                      | 利用表面电导控制型气敏传感器 .....         | (231)        |
| 11. 2                      | 利用体电导控制型气敏传感器 .....          | (236)        |
| 11. 3                      | 结型半导体气敏传感器——电压控制型气敏传感器 ..... | (239)        |
| 11. 4                      | 半导体气敏传感器的应用 .....            | (242)        |
| 11. 5                      | 气敏传感器的发展 .....               | (248)        |
|                            | 思考题 .....                    | (249)        |
| <b>第十二章 离子敏传感器 .....</b>   |                              | <b>(250)</b> |
| 12. 1                      | 与离子敏传感器有关的几个概念 .....         | (250)        |
| 12. 2                      | 离子选择电极 .....                 | (253)        |
| 12. 3                      | ISFET 的基本工作原理 .....          | (257)        |
| 12. 4                      | 离子敏感器件的测量电路 .....            | (263)        |
| 12. 5                      | 离子敏感器件的应用 .....              | (271)        |
| 12. 6                      | ISFET 的发展及问题 .....           | (272)        |
|                            | 思考题 .....                    | (273)        |
| <b>第十三章 光纤传感器 .....</b>    |                              | <b>(274)</b> |
| 13. 1                      | 光纤传光原理及其特性 .....             | (274)        |
| 13. 2                      | 光纤传感器的类型 .....               | (281)        |
| 13. 3                      | 光强度调制光纤传感器 .....             | (281)        |
| 13. 4                      | 光相位调制光纤传感器 .....             | (285)        |
| 13. 5                      | 光频率调制光纤传感器 .....             | (290)        |
|                            | 思考题 .....                    | (291)        |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 传感器的重要作用及定义

人们用感觉器官从外界获取信息,感觉器官仅是人们用以维持生命,有选择性地获取重要信息的器官,如果用来研究自然现象和规律,就远远不够用了。

因此,用传感器来代替感觉器官的功能和完成人的感觉器官所不能完成的功能,是人类长期的愿望。所以传感器的历史比近代科学的历史还古老,早在古埃及王朝时就开始使用天平;16 世纪就懂得了用液体膨胀温度计测量温度;19 世纪法拉第用电磁传感器研究物理定律……

传感器是定量认识自然现象不可缺少的工具,用传感器获得大量的被研究的信息,将这些信息经过处理,分析推理,可以描绘出自然界的面貌。所以传感器是认识自然、掌握自然、利用自然的工具。

工业革命以来,各种机器的发明,给社会带来了不可估量的进步,为了更好地提高和改善机器的性能,传感器发挥了巨大的作用。例如,为了对瓦特蒸汽机进行速度调节,发明了离心调速器,使蒸汽机能较匀速的前进。这个离心调速器就是一个将转速变换成线位移的传感器。

具有现代意义的传感器是指将各种被测量变换成电量的传感器。这类传感器在近代发展特别快,在科学研究、工程技术、环境保护、医学部门等各种领域中,获得了特别广泛的应用,为社会进步起到了极大的作用。现在,如果说到传感器,就是指输出电量的传感器。

现在我们可以给传感器下这样一个定义了:传感器就是将被测量按一定规律转换成与之有确定对应关系的电量输出的器件或装置。传感器输出的电量有不同的形式,如电压、电流和频率等,以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

这种定义的传感器是测试和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始信息进行准确可靠的捕获和转换,那么可想而知,一切测试和控制将无法实现。当今的时代,是信息革命时代,信息技术已进入到世界任何一个领域,信息革命的两大支柱是信息的获取和信息处理。现代电子技术和计算机的高度发展为信息处理提供了极其完善的手段,使检测与控制技术发展到了崭新的阶段。可是获取信息的传感技术比计算机的发展落后了一步,已影响到信息革命的进程。如果打个比喻:计算机比喻人的大脑,传感器就是人的五官。而现在还处于大脑发达而五官欠佳的境地。

## § 1.2 传感器的组成和分类

### 1.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、传感元件、变换电路和辅助电源组成,组成方框图如图 1.1 所示。

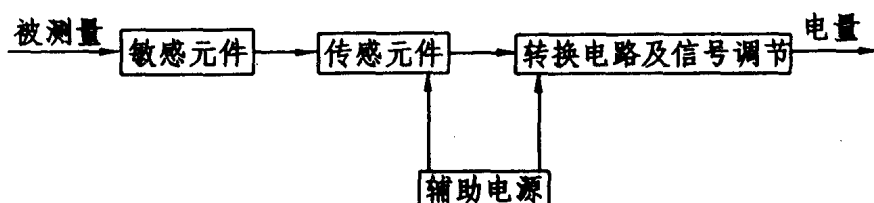


图 1.1 传感器的组成

**敏感元件**——直接感受被测量(非电量)能产生有确定关系的输出量(一般为非电量)。要完成非电量到电量的变换,并不是所有的非电量一次就能直接变换为电量,往往是将被测非电量预先变换为一种易于变换成电量的非电量,这种预先变换的部件叫敏感元件,在传感器中,敏感元件绝大部分是由弹性元件构成,有时又叫弹性敏感元件。如应变压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,它的作用是将压力转换为弹性膜片的形变。敏感元件如果直接输出电量,如热电偶温度传感器,它就同时兼为传感元件了。还有些传感器的敏感元件和传感元件是合为一体,如压电加速度传感器等。

**传感元件**——又称为变换器,一般情况它不直接感受被测量,而是将敏感元件的输出量转换为电量输出的元件。如应变压力传感器中的应变片就是传感元件,它的作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。传感元件有时也直接感受被测量的输出与被测量成确定关系的电量,如热电偶和热敏电阻。

**变换电路**——能把传感元件输出的电量转换为便于处理、传输、记录、显示和控制的有用电信号的电路。不同种类的传感元件有不同种类的变换电路与之适应,在研究传感技术时,应把传感元件和变换电路作为一个统一体来考虑。

### 1.2.2 传感器的分类

在科研、生产和生活中使用的传感器种类繁多,不胜枚举。有的传感器可以同时测量多种参数,而一种物理量又有多种不同种类的传感可测量,所以分类方法很多,主要的分类方法有三种:

#### 1. 按被测物理量分类

这种分类方法直接说明了传感器的用途,它们被分成位移、压力、温度、湿度、速度、加速度等,一目了然。这种分类方法对使用者和生产厂商很方便。

## 2. 按工作原理分类

这种分类方法是以传感器的工作原理作为分类的依据,如应变式、压电式、电容式、电感式等,这种分类方法的分类类别少,以工作原理分类,有利于传感器专业工作者从原理与设计上作归纳性的分析研究,使设计和应用更加灵活。这种分类方法对学习传感技术的人十分有利,所以绝大部分教材编写均按工作原理分类。

## 3. 按能量的传递方式分类

从能量观点分类可分为有源传感器和无源传感器两类,也许这种分类方法对寻找传感器的统一理论的理论工作者有利,对学习传感器知识和传感器使用者没有明显的优点。

另外,还有一种分类方法,也把传感器分为三类:即结构型、物性型和智能型传感器。这种分类方法带有传感器的发展过程和发展方向的信息。

结构型传感器是用结构参数变化实现信息变换,如电感传感器的衔铁位移和电容传感器的电极位移就是结构参数的变化。如电位器传感器、电阻应变片式传感器、电容传感器、电感传感器和磁电式传感器均属此类。它们发展较早,较成熟,过去和现在都较广泛使用的一类传感器。对于初学传感器的人,通过这类传感器的学习,对掌握传感器技术极有帮助。

物性型传感器则依赖敏感元件物理、化学、电特性和生物特性等的变化实现信息变换,如热敏电阻是材料的电阻率随温度变化。这类传感器一般为固体传感器,通常没有可动部件,体积小、寿命长,可用先进的生产工艺实现批量生产,所以是近来发展最快,也最有前途的传感器,它为传感器小型化、集成化和智能化找到了物质基础。

真正意义上的智能型传感器目前还未问世,但初型智能型传感器已被研制出,它是传感器发展的方向。

# 1.3 传感器的应用和发展

传感器技术发展的两大物质基础是:物理现象的深入研究——发现新的检测原理;新材料的开发——制造出高水平的传感器。但是,传感器技术能否高速发展,最终取决于社会对传感器技术的需求,即粮食资源、能源、公害防治、灾害预测、医疗卫生、国防建设等各个领域对传感器技术的需求。图 1.2 示出了传感器技术应用与需求的关系。

图 1.3 和图 1.4 是日本电子工业振兴协会 1975 年通信调查的结果,从图可清楚看到传感器的需求范围是何等广泛。

当今时代,是科学技术发展特别迅猛时代,特别是电子计算机的飞速发展和广泛应用,对传感器技术的需求更为迫切,并且存在着“头脑(计算机)发达,感觉(传感器)迟钝”的严重现象,所以传感器技术的研究和生产受到了全世界普遍重视。为了满足科技高度发展的要求,传感器技术将向以下几个方面发展:

## 1. 高精度度

为了提高测控精度,必须使传感器的精度尽可能地高。例如对于火箭发动机燃烧室的压力测量,希望测试精度能优于 0.1%,对超精加工“在线”检测精度高于 0.1 微米,因此,需要研制出高精度的传感器,以满足测量的需要。我们已研制出精度优于 0.05% 的传感器。

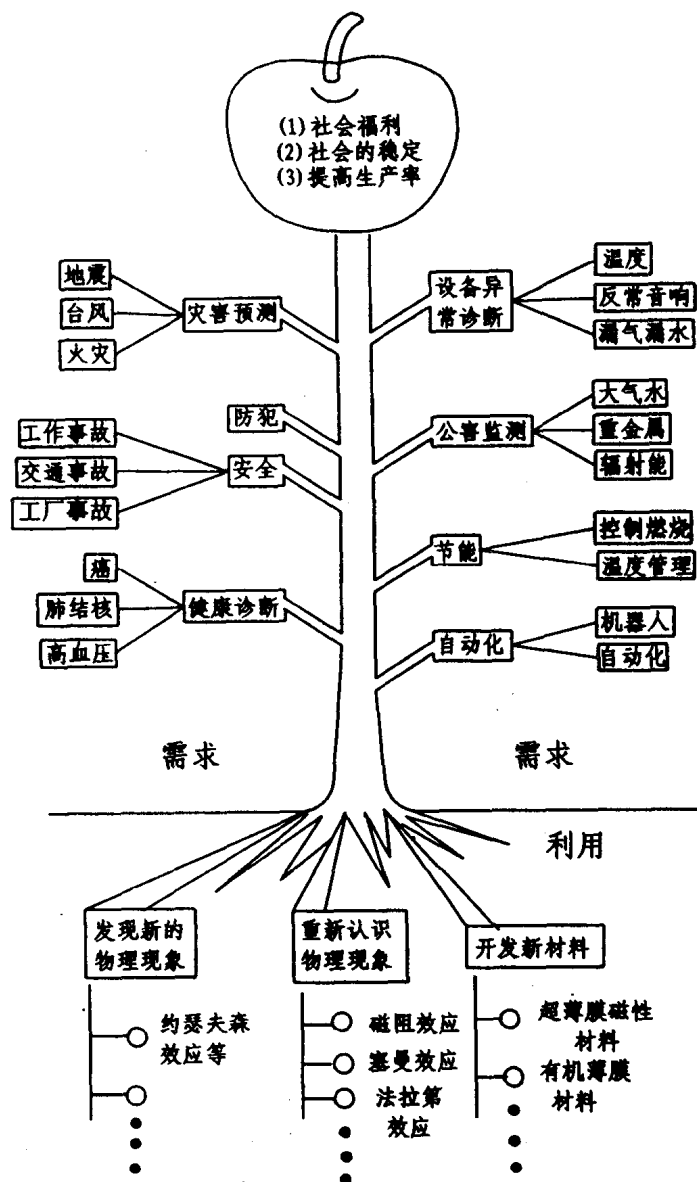


图 1.2 传感器技术的应用与需求的关系

## 2. 小型化

很多测试场合要求传感器具有尽可能小的尺寸。例如生物医学工程中颅压的测量，风洞中压力场分布的测量等等。压阻式压力传感器的出现，使压力传感器的小型化取得了重大进展，我国已有外径为 2.5mm 的压阻式压力传感器。

## 3. 集成化

集成化传感器有两种类型。一种是将传感器、放大器及温度补偿电路等集成在同一芯片上，减小体积，增强了抗干扰能力。另一种是将同一类的传感器集成在同一芯片上构成二维阵列式传感器，或称面型固态图像传感器，它可以测量物体的表面状况。

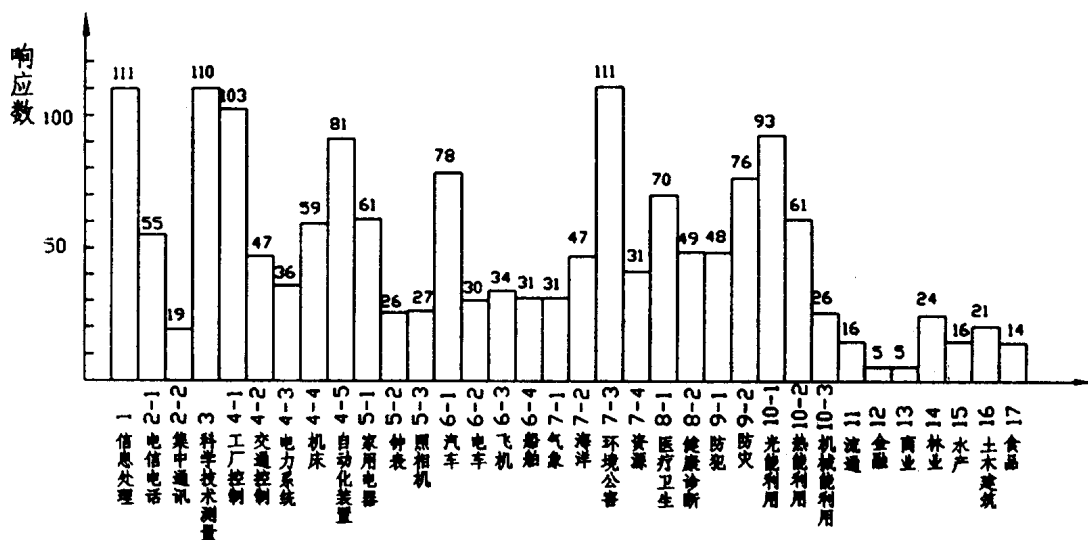


图 1.3 希望应用传感器的领域

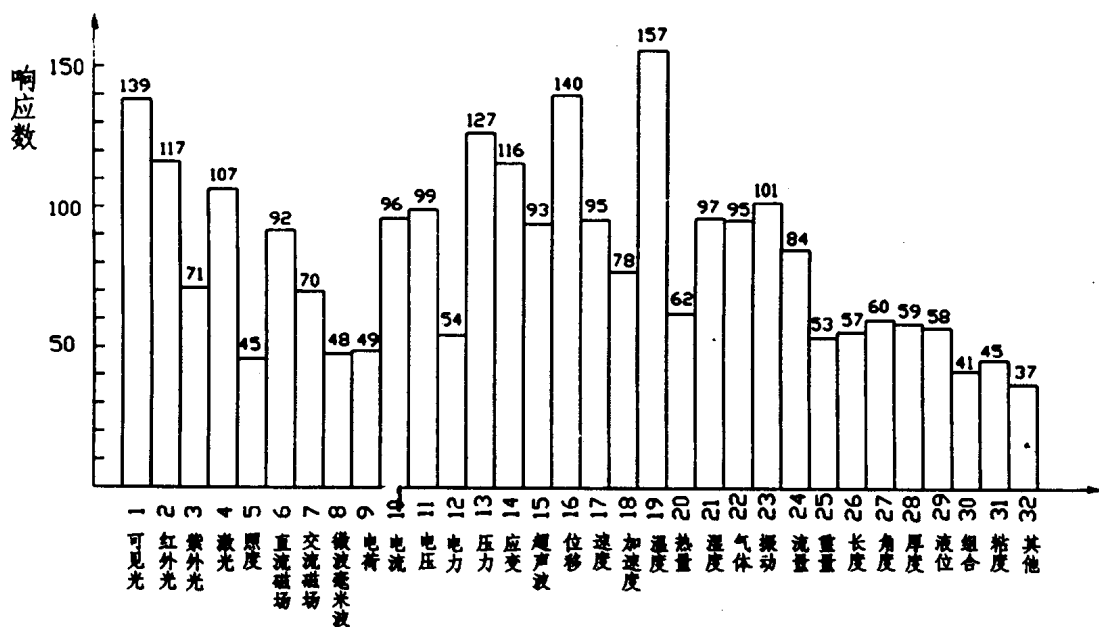


图 1.4 希望用传感器处理的各种物理状态

#### 4. 数字化

为了使传感器与计算机直接接口,致力于数字式传感器研究是很重要的。

#### 5. 智能化

这种传感器一般是计算机与传感器相结合的复杂系统,它兼有检测、信息处理、推理、联想和控制等各种功能,重点是具有逻辑功能,它是大脑与五官紧密结合的机器,是一个智慧的机器,是传统传感器无法比拟的。智能传感器的出现将是传感技术中的一次飞跃。

## 思考题

1. 传感器由哪几部分构成？每个部分起什么作用？
2. 传感器的定义是什么？
3. 传感器利用的信息变换方式有哪一些，试说明其含意？
4. 传感器有哪些分类方式，怎样分类？
5. 传感器发展的方向是什么？
6. 什么是智能传感器？
7. 怎样认识传感器与计算机的结合？

## 第二章 传感器的一般特性

### § 2.1 概 述

传感器一般要变换各种信息为电量,描述此种变换的输入与输出关系表达了传感器的基本特性。但对不同的输入信号,输出特性是不同的,对快变信号与慢变信号,由于受传感器内部储能元件(电感、电容、质量块、弹簧等)的影响,反应大不相同。对快变信号要考虑输出的动态特性,即随时间变化的特性,而对慢变或稳定信号,则要研究静态特性,即不随时间变化的输入与输出特性。对大讯号和小讯号,输入与输出特性也不同,前者有非线性,后者多半可看成是线性的。对输入的方向有时也有关,这时会出现死区或滞环。因此,一般对传感器的特性分为静态特性与动态特性分别研究。

静态特性:被测量处于稳定状态,由实验或分析得到的输入与输出特性。此特性可用数据表格或曲线等方式表示。以  $X$  表示输入量,  $Y$  表示输出量,静态特性可以用函数式表示为

$$Y = f(X)$$

动态特性:被测量是时间的函数,或是频的函数。可以用时域法表示成

$$Y(t) = f[X(t)]$$

其中:  $t$  为时间。以  $\omega$  为角频率,也可用频域法表示为

$$Y(j\omega) = f[X(j\omega)]$$

一个高质量的传感器应有良好的静态特性与动态特性,这样才能无失真的完成信号的转换。

### § 2.2 传感器的静态特性

在稳定信号状态下,测得的传感器输入与输出特性为静态特性,静态特性的主要指标是线性度、灵敏度、迟环与死区、重复性、精确度、分辨率等。

#### 2.2.1 线性度

图 2.1 表示了一个实际热电偶静态特性的例子。虚线表示了实际特性,也称为静态校准曲线,它一般是使用高一级仪表反复多次测量后取得的平均值曲线,一般是一条非线性曲

线,可用一多项式表示。以  $X$  表示输入量,则输出为

$$\begin{aligned} Y &= a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X^i \end{aligned} \quad (2.1)$$

$a_0, a_1, a_2, \dots$  为常数,  $n$  为项数。

图上直线则是曲线拟合直线,用作输出刻度。

传感器的实际特性的非线性为使用带来了许多不便,所以总是希望把实际特性线性化,实际特性线性化处理的好处是:

- (1) 简化了理论分析与设计计算。
- (2) 标定与数据处理方便,如已知零点和满刻度点,则可确定直线上其余各点。
- (3) 使仪表均匀刻度,制作、安装、调试方便,提高了测量精确度。
- (4) 可避免非线性补偿。

因此,实际特性都用一条按一定方式拟合的直线代替,作为输出的刻度。由于拟合直线代替原曲线,因此要求拟合直线应有与原实际特性相同的变化趋势,并与实际特性间具有最小的误差。

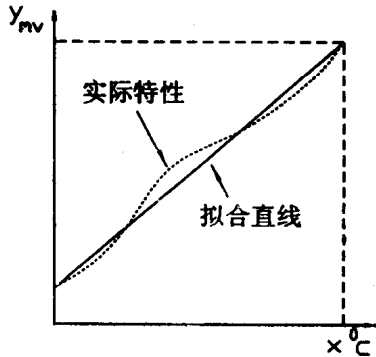


图 2.1 热电偶静态特性

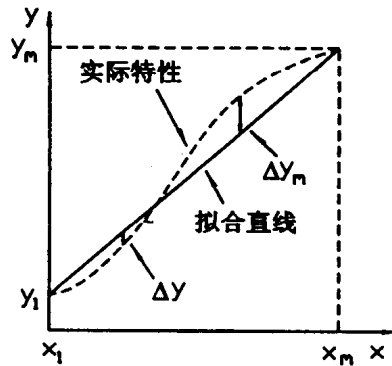


图 2.2  $\Delta Y_m$  与  $Y_F$

由于实际特性与拟合直线不重合,当实际特性的非线性项方次不高时,在小讯号下,可用曲线的切线作为拟合直线,而一般情况下,都要按误差最小原则选择拟合直线。表征实际特征与拟合直线不吻合的参数称为线性度,线性度的定义为(线性度有时也叫非线性度)

$$e_L = \frac{|\Delta Y_m|}{Y_F} \times 100\% \quad (2.2)$$

$\Delta Y_m$  表示实际特性曲线与拟合直线间绝对误差的最大值,  $Y_F$  并不是输出的最大值,而是满刻度值。图 2.2 上示出了  $\Delta Y_m$  与  $Y_F$ 。由图可见,  $\Delta Y_m$  为诸多  $\Delta Y$  中,绝对误差最大的一个,而满刻度值不是最大输出值  $Y_m$ ,而是  $Y_F = Y_m - Y_1$ 。

按照误差最小原则,选择的拟合直线主要有下述三种。

#### 一、端点连线直线

它是一条连接实际特性曲线起点与终点的直线。图 2.2 拟合直线则为端点连线。

端点连线的直线方程是

$$Y = SX + b \quad (2.3)$$

$S$  为直线的斜率,  $b$  为截距。

$$S = \frac{Y_m - Y_1}{X_m - X_1} \quad (2.4)$$

$$b = \frac{Y_1 X_m - Y_m X_1}{X_m - X_1}$$

采用端点连线作为拟合直线的缺点是误差较大, 且分配不均, 最大误差附近误差都较大。故一般较少采用。

## 二、端点连线平行线

这是一条平行于端点连线直线, 并满足在整个量程范围里, 最大正偏差等于最大负偏差的绝对值的直线。见图 2.3。

显然, 端点连线平行线与端点连线斜率  $S$  相同, 只是截距不同, 因此端点连线平行线的方程为

$$Y = SX + b' \quad (2.5)$$

$$b' = b \pm \Delta$$

$$\Delta = \left| \frac{1 + \Delta Y_m}{2} - \frac{-\Delta Y_m}{2} \right| \quad (2.6)$$

由图所示, 端点连线的最大正偏差  $|+\Delta Y_m|$  大于最大负偏差  $|-\Delta Y_m|$ , 要达到此二误差相等时, 端点连线平移线显然应该从端点连线向上平移, 平移量为  $\Delta$  值,  $\Delta$  值的大小, 应为正负偏差绝对值差之半。在另一种情形下, 即  $|-\Delta Y_m| > |+\Delta Y_m|$ , 此时端点连线平移线应该向下平行移动  $\Delta$ , 因此  $b'$  可大于也可小于端点连线截距  $b$ 。而  $\Delta$  值恒取正值。当比较端点连线与端点连线平行线的线性度时, 显然平行线的线性度更小, 这可从图 2.3 与图 2.4 看出。端点连线的最大偏差  $|\Delta Y_m|$ , 要大于端点连线平行线的最大偏差  $|\Delta Y_m|$ , 但它们的满刻度值却是相同的。

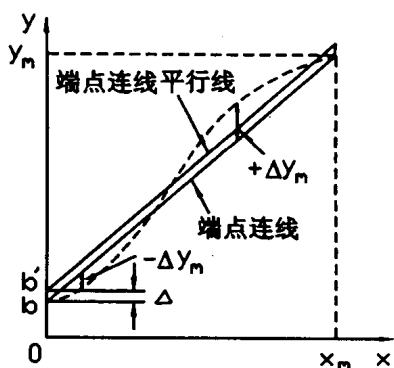


图 2.3 端点连线与端点连线平行线

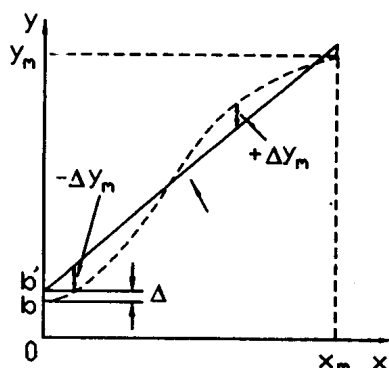


图 2.4 端点连线平行线  
 $|+\Delta Y_m| = |-\Delta Y_m|$

## 三、最小二乘法直线

这是又一条可供选择的拟合直线, 端点连线平行线做到了使最大正偏差等于最大负偏差,  $|+\Delta Y_m| = |-\Delta Y_m|$ , 且使误差分布较均匀, 因此最小二乘法拟合直线要做到实际特性

上的每个校准点的  $Y_i$  值与最小二乘拟合直线每个对应点  $SX_i + b$  间的残差

$$\Delta_i = Y_i - (SX_i + b) \quad (2.7)$$

满足残差的平方和最小。即取以下两个偏微分为零：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial S} \left( \sum \Delta_i^2 \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \left( \sum \Delta_i^2 \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$m$  为校准点数,  $m$  选的愈大, 校准点愈多, 准确度愈高, 但计算会更繁,  $m$  取值不同时, 由式 (2.8) 决定的最小二乘直线的斜率  $S$  与截距  $b$  会不同, 但仅有微小的差别。展开式 (2.8) 可得到两个方程

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m X_i Y_i - S \sum_{i=1}^m X_i^2 - b \sum_{i=1}^m X_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^m Y_i - S \sum_{i=1}^m X_i - mb &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

联解得到斜率与截距表达式

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{m \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{m \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \\ b &= \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{m \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

直线  $Y = SX + b$  表征了最小二乘法拟合直线。此拟合直线与端点连线平移线最为常用。用最小二乘法和端点连线平移线作拟合直线, 它们的线性度都小于端点连线。只是平移线满足正负偏差相等, 从而使误差小而分布均匀。但最小二乘法直线并不满足正负偏差相等, 它由于按照残差平方和最小选择, 因此线性度与端点连线平行线相当, 或稍小, 且误差分布也较均匀。

## 2.2.2 灵敏度

灵敏度表示在稳态条件下, 输出微小增量与输入微小增量的比值。灵敏度

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (2.11)$$

对线性传感器, 灵敏度就是直线的斜率。由于输入量一般为非电量, 输出量一般为电量, 因此灵敏度的单位应是  $\text{mV/mm}$  或  $\text{mV/}^\circ\text{C}$  等。有时灵敏度还与传感器所加电压有关, 因此要把灵敏度除以总电压, 此时的灵敏度的意义是每伏总电压的灵敏度, 单位则是  $\text{mV}/(\text{mm} \cdot \text{V})$ 。

## 2.2.3 迟环与死区

迟环表明了静态特性在正、反行程期间输出与输入特性不重合的程度, 对应同一大小的输入信号, 会出现两个不同大小的输出信号, 此时静态特性出现了迟环, 或有了迟环误差, 表示于图 2.5。

迟环误差