



# 传感技术

李科杰 编著

北京理工大学出版社

73.862  
072

# 传 感 技 术

李 科 杰 编 著

31527/32

北 京 理 工 大 学 出 版 社

## 内 容 提 要

本书阐述了传感技术的基本理论和概念,对常用传感器的工作原理、主要特性、结构类型、测量电路、设计方法、使用技术等方面均作了详细深入的介绍。

全书共分十章,绪论中介绍了传感器的定义和分类、地位和作用、以及发展动向,第一章介绍了传感器的特性及其基本名词术语,其余九章分别介绍了应变式、压阻式、电位器式、电感式、变压器式、电涡流式、电容式、压电式和光传感器。

本书主要用作高校电子精密机械和检测技术专业学生的教科书,也可供其它有关专业学生及工程技术人员参考。

## 传 感 技 术

李科杰 编著

\*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 24.5印张 605千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷

ISBN 7-81013-240-7/TH·27

印数: 1—3500册 定价: 4.85元

## 序

现代科学技术发展的一个重要标志是电子计算机的广泛应用，特别在信息处理与工程控制领域发挥着愈来愈重要的作用。但是如果没有对信源特征量的提取和被控对象执行状态特性的信息反馈，计算机的作用就不能得以发挥，因此，传感技术日益受到人们的重视并正在蓬勃发展，反映了现代科学技术发展的客观规律和必然结果。在我国传感技术已开始成为高等工科院校许多专业学生的一门必修课，同时也正成为工程技术人员必需了解和熟悉的一门技术。

李科杰副教授从事传感技术教学、科学研究和产品开发研究多年，在这一领域多有建树。他曾作为主要编写者之一，参加了我国有关传感器的大型工具书《传感器技术手册》的编写工作，由他研制的电涡流传感器曾先后在国内和国外展出受到好评。由他编著的《传感技术》这本书，涉及到工程技术中常用的主要类型的传感器，不但论述了它们的基本原理，还论述了它们的设计规律和应用要点。在应变传感器、电涡流传感器、压电传感器和光传感器四章中，作者结合自己的研究经验做了较为深入而全面的论述，不仅使初学者宜于入门，对从事传感器研究开发的读者也富于启发。全书内容既有适当的广度又有一定的深度，从结构安排到取材均具特色。

本书不仅对工科院校学生的学习十分适宜，而且对涉及这一领域的工程技术人员也具有重要参考价值，所以我很乐于向广大读者推荐这本书，相信它将对我国传感技术的教学、研究与开发起到积极的作用。

马宝华

1988年9月

## 前 言

本书是根据北京理工大学电子精密机械专业必修课《传感技术》教学大纲编著的。

作者有幸参加《传感器技术手册》编写工作,和《全国传感器及其应用学术讨论会》、《国际传感器技术交流会》等有关传感技术的一些学术会议,从而得以搜集大量资料,并参考兄弟院校有关教材,为满足教学需要而编著此书,由于时间仓促、作者水平所限,谬误之处在所难免,望读者不吝赐教。

本书强调了理论联系实际的原则,总结了国内、外传感器研制、使用的经验。在内容安排上采取“抓住典型、解剖麻雀”的方法,重点地对常用的应变式、压电式和光传感器进行了深入地分析论述,试图通过解剖麻雀来达到举一反三、触类旁通的目的。取材上也尽可能反映先进技术和最新进展

本书由装甲兵技术学院袁希光教授主审,初稿中主要章节还承蒙北京理工大学范德轩、李世义、张秀兰、石庚辰老师予以审阅。国防科工委科技委兼职委员、北京理工大学八系系主任马宝华教授在百忙之中为本书作了序,在此一并表示衷心的感谢!

作 者

1988年9月于北京理工大学

# 目 录

## 绪 论

- 一、传感器的定义和分类 ..... ( 1 )
- 二、传感器的地位和作用 ..... ( 1 )
- 三、传感技术的发展动向 ..... ( 2 )

## 第一章 传感器的特性

- § 1-1 传感器的性能指标 ..... ( 4 )
  - 一、基本特性指标 ..... ( 4 )
  - 二、环境参数指标 ..... ( 5 )
  - 三、稳定性、可靠性指标 ..... ( 6 )
- § 1-2 传感器的静态特性 ..... ( 6 )
  - 一、线性度 ..... ( 6 )
  - 二、迟滞 ..... ( 11 )
  - 三、重复性 ..... ( 11 )
  - 四、精确度 ..... ( 12 )

## 第二章 应变式传感器

- § 2-1 应变片的工作原理 ..... ( 14 )
  - 一、应变效应 ..... ( 14 )
  - 二、变形的传递 ..... ( 16 )
- § 2-2 应变片 ..... ( 16 )
  - 一、应变片的结构和材料 ..... ( 16 )
  - 二、分类 ..... ( 20 )
  - 三、应变片的主要参数和工作特性 ..... ( 30 )
  - 四、应变片的标定 ..... ( 37 )
  - 五、应变片的使用技术 ..... ( 42 )
- § 2-3 应变式传感器的测量电路 ..... ( 46 )
  - 一、电桥电路的最新发展动向 ..... ( 46 )
  - 二、电桥电路 ..... ( 46 )
  - 三、几种实用的新型直流电桥模块电路 ..... ( 50 )
  - 四、应变式传感器的补偿技术 ..... ( 55 )
- § 2-4 应变式传感器的结构与 设计 ..... ( 69 )
  - 一、应变式传感器设计研究的新动向 ..... ( 60 )
  - 二、力与称重传感器 ..... ( 61 )
  - 三、压力传感器 ..... ( 78 )
  - 四、扭矩传感器 ..... ( 88 )
  - 五、位移传感器 ..... ( 89 )
  - 六、加速度传感器 ..... ( 92 )
  - 七、应变式传感器的设计要点 ..... ( 95 )

### 第三章 压阻式传感器

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| §3-1 工作原理 .....           | (100) |
| 一、压阻效应 .....              | (100) |
| 二、晶面、晶向的表示方法 .....        | (101) |
| 三、压阻系数 .....              | (102) |
| §3-2 压阻式传感器的结构与设计 .....   | (110) |
| 一、压阻式压力传感器 .....          | (110) |
| 二、压阻式加速度传感器 .....         | (119) |
| §3-3 半导体应变片 .....         | (128) |
| 一、半导体应变片的工作原理 .....       | (128) |
| 二、半导体应变片的种类和结构 .....      | (130) |
| 三、半导体应变片的规格和特性 .....      | (132) |
| 四、半导体应变片的补偿方法 .....       | (136) |
| 五、半导体应变片使用技术 .....        | (139) |
| §3-4 压阻式传感器的测量电路 .....    | (140) |
| 一、恒压源供电电桥 .....           | (140) |
| 二、恒流源供电电桥 .....           | (140) |
| §3-5 压阻式传感器的温度漂移与补偿 ..... | (141) |
| 一、压阻式传感器的温度漂移 .....       | (141) |
| 二、温度补偿 .....              | (142) |

### 第四章 电位器式传感器

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| §4-1 线性电位器 .....      | (147) |
| 一、空载特性 .....          | (147) |
| 二、阶梯特性、阶梯误差和分辨率 ..... | (148) |
| §4-2 非线性电位器 .....     | (150) |
| 一、变骨架式非线性线绕电位器 .....  | (150) |
| 二、变节距式非线性线绕电位器 .....  | (151) |
| 三、分路电阻式非线性电位器 .....   | (152) |
| 四、电位给定式非线性电位器 .....   | (154) |
| §4-3 负载特性与负载误差 .....  | (154) |
| §4-4 结构与 设计 .....     | (155) |
| 一、导线 .....            | (155) |
| 二、电刷 .....            | (156) |
| 三、骨架 .....            | (157) |
| 四、主要参数计算 .....        | (157) |
| §4-5 非线性绕电 位器 .....   | (160) |
| 一、合成膜电位器 .....        | (160) |
| 二、金属膜电位器 .....        | (160) |
| 三、导电塑料电位器 .....       | (160) |
| 四、导电玻璃釉电位器 .....      | (160) |
| 五、光电电位器 .....         | (160) |
| §4-6 电位器式传感器 .....    | (161) |
| 一、电位器式位移传感器 .....     | (161) |

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| 二、电位器式压力传感器 .....             | ( 162 ) |
| 三、电位器式加速度传感器 .....            | ( 162 ) |
| <b>第五章 电感式传感器</b>             |         |
| § 5-1 工作原理和等效电路 .....         | ( 163 ) |
| § 5-2 类型和主要特性 .....           | ( 166 ) |
| 一、交间隙型电感传感器 .....             | ( 166 ) |
| 二、变面积型电感传感器 .....             | ( 168 ) |
| 三、螺管插铁型电感传感器 .....            | ( 168 ) |
| 四、差动电感传感器 .....               | ( 169 ) |
| 五、齿形电感式传感器 .....              | ( 172 ) |
| § 5-3 电感式传感器的测量电路 .....       | ( 172 ) |
| 一、带相敏整流的交流电桥 .....            | ( 172 ) |
| 二、变压器式电桥电路 .....              | ( 174 ) |
| 三、紧耦合电感比例臂电桥 .....            | ( 175 ) |
| § 5-4 电感式传感器的结构与设计 .....      | ( 177 ) |
| 一、电感式传感器的典型结构 .....           | ( 177 ) |
| 二、带小气隙的铁心线圈的参数设计 .....        | ( 173 ) |
| 三、螺管插铁型电感传感器的设计 .....         | ( 179 ) |
| § 5-5 测试误差分析 .....            | ( 180 ) |
| 一、输出特性的非线性 .....              | ( 180 ) |
| 二、零位误差 .....                  | ( 180 ) |
| 三、温度影响 .....                  | ( 180 ) |
| 四、电源电压和频率的影响 .....            | ( 180 ) |
| <b>第六章 变压器式传感器</b>            |         |
| § 6-1 工作原理和等效电路 .....         | ( 182 ) |
| 一、工作原理 .....                  | ( 182 ) |
| 二、等效电路 .....                  | ( 183 ) |
| § 6-2 变压器式传感器的结构类型和主要特性 ..... | ( 184 ) |
| 一、螺管型差动变压器 .....              | ( 184 ) |
| 二、 $\pi$ 型差动变压器 .....         | ( 193 ) |
| 三、旋转变压器式传感器 .....             | ( 195 ) |
| § 6-3 差动变压器式传感器的测量电路 .....    | ( 199 ) |
| 一、相敏检波电路 .....                | ( 199 ) |
| 二、差动整流电路 .....                | ( 201 ) |
| 三、直流差动变压器电路 .....             | ( 203 ) |
| § 6-4 差动变压器结构与设计 .....        | ( 203 ) |
| 一、典型结构 .....                  | ( 203 ) |
| 二、差动变压器设计 .....               | ( 204 ) |
| <b>第七章 电涡流式传感器</b>            |         |
| § 7-1 电涡流传感器的工作原理 .....       | ( 209 ) |
| 一、电涡流效应和传感器等效电路 .....         | ( 209 ) |
| 二、电涡流的形成范围 .....              | ( 211 ) |
| § 7-2 结构类型 .....              | ( 212 ) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 一、变间隙型电涡流传感器 .....     | (212) |
| 二、变面积型电涡流传感器 .....     | (213) |
| 三、螺管型电涡流传感器 .....      | (215) |
| 四、其它型式电涡流传感器 .....     | (216) |
| §7-3 测量电路 .....        | (221) |
| 一、调幅式测量电路 .....        | (221) |
| 二、调频调幅式测量电路 .....      | (223) |
| 三、调频式测量电路 .....        | (224) |
| 四、电桥电路 .....           | (225) |
| §7-4 电涡流传感器的设计 .....   | (228) |
| 一、量程的设计 .....          | (228) |
| 二、提高灵敏度的措施 .....       | (227) |
| 三、传感器的动特性 .....        | (227) |
| 四、传感器材料的选择 .....       | (223) |
| §7-5 电涡流传感器的使用技术 ..... | (228) |

## 第八章 电容式传感器

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| §8-1 概述 .....         | (230) |
| §8-2 基本工作原理 .....     | (230) |
| §8-3 结构、类型及主要特性 ..... | (231) |
| 一、变间隙型 .....          | (231) |
| 二、变面积型 .....          | (235) |
| 三、变介电常数型 .....        | (236) |
| 四、差动电容式传感器 .....      | (237) |
| §8-4 测量电路 .....       | (239) |
| 一、紧耦合电感比例臂电桥 .....    | (239) |
| 二、二极管式电路 .....        | (241) |
| 三、变压器式电桥电路 .....      | (243) |
| 四、调频电路 .....          | (244) |
| 五、差动脉冲调宽电路 .....      | (246) |
| 六、运算放大器式电路 .....      | (247) |
| §8-5 电容式传感器的特点 .....  | (248) |

## 第九章 压电式传感器

|                        |       |
|------------------------|-------|
| §9-1 压电效应 .....        | (250) |
| 一、石英晶体的压电效应 .....      | (250) |
| 二、压电陶瓷的压电效应 .....      | (252) |
| 三、高分子材料的压电效应 .....     | (254) |
| 四、压电方程与压电常数 .....      | (254) |
| §9-2 压电材料 .....        | (257) |
| 一、石英晶体 .....           | (257) |
| 二、其它压电单晶 .....         | (259) |
| 三、压电陶瓷 .....           | (260) |
| 四、新型压电材料 .....         | (261) |
| §9-3 压电式传感器的测量电路 ..... | (262) |
| 一、压电式传感器的等效电路 .....    | (262) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 二、电压放大器 .....            | ( 264 ) |
| 三、电荷放大器 .....            | ( 266 ) |
| § 9-4 压电式传感器的主要特性 .....  | ( 268 ) |
| 一、灵敏度 .....              | ( 268 ) |
| 二、频率特性 .....             | ( 270 ) |
| 三、横向效应 .....             | ( 272 ) |
| 四、精度 .....               | ( 273 ) |
| 五、绝缘电阻 .....             | ( 274 ) |
| 六、环境特性 .....             | ( 274 ) |
| 七、电缆噪声 .....             | ( 275 ) |
| 八、压电式传感器的零漂 .....        | ( 276 ) |
| § 9-5 压电式传感器的结构与设计 ..... | ( 276 ) |
| 一、压电式力传感器 .....          | ( 276 ) |
| 二、压电式加速变传感器 .....        | ( 284 ) |
| 三、压电式压力传感器 .....         | ( 291 ) |
| 四、其它类型压电式传感器 .....       | ( 300 ) |

## 第十章 光传感器

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| § 10-1 光电效应 .....       | ( 310 ) |
| 一、外光电效应 .....           | ( 310 ) |
| 二、内光电效应 .....           | ( 310 ) |
| § 10-2 光电器件的基本特性 .....  | ( 311 ) |
| § 10-3 光电器件 .....       | ( 314 ) |
| 一、光敏电阻 .....            | ( 314 ) |
| 二、光敏二极管和光敏三极管 .....     | ( 321 ) |
| 三、光电池 .....             | ( 328 ) |
| 四、其它新型光电器件 .....        | ( 332 ) |
| § 10-4 光电传感器 .....      | ( 338 ) |
| 一、光电传感器的典型结构及原理 .....   | ( 338 ) |
| 二、光电传感器的计算 .....        | ( 339 ) |
| 三、光电传感器的使用技术 .....      | ( 345 ) |
| § 10-5 光栅传感器 .....      | ( 347 ) |
| 一、计量光栅的类型 .....         | ( 347 ) |
| 二、光栅传感器的结构和原理 .....     | ( 348 ) |
| 三、辨向原理 .....            | ( 351 ) |
| 四、细分技术 .....            | ( 353 ) |
| § 10-6 固体图象传感器 .....    | ( 358 ) |
| 一、固体图象传感器的特点和种类 .....   | ( 358 ) |
| 二、CCD 图象传感器的工作原理 .....  | ( 359 ) |
| 三、自扫描光电二极管阵列工作原理 .....  | ( 361 ) |
| 四、固体图象传感器的应用 .....      | ( 363 ) |
| § 10-7 光纤传感器 .....      | ( 366 ) |
| 一、光纤传感元件 .....          | ( 366 ) |
| 二、光纤元件之间的连接 .....       | ( 369 ) |
| 三、光纤传感器的工作原理和典型结构 ..... | ( 373 ) |

## 参 考 文 献

# 绪 论

## 一、传感器的定义和分类

“传感器”这一名词日益广泛地为人们所知晓，但其定义，至今尚无统一规定，各国都有不同的解释。在国内，传感器也有许多别名，如变换器、变送器、探测器、敏感元件、换能器及一次仪表等。最近正在制订的国家标准《传感器通用术语》中，对于传感器的定义作了如下的规定：“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。”这一定义同美国仪表学会(ISA)的定义相类似，是比较确切的。传感器实质上就是代替人们的五种感觉(看、听、嗅、味、触)器官的装置，但应比人的五官更胜一筹，又是能够检测出人的五官所不能感知的现象(如红外，小能量超声波等)的装置，而且对于远远超出人的五官所能感知的有用能量(包括各种极端状态)，它也能检测出来。因而国内外一些专家形象地把传感器喻为与“电脑”相配套的“电五官”。

传感器的分类方法较多，按利用场的定律还是利用材料的物质法则可分为结构型传感器和物性型传感器。由结构型和物性型组合而成兼有两者特征的传感器称为复合型传感器；按依靠还是不依靠外加能源工作可分为无源传感器和有源传感器；按输出量是模拟量还是数字量可分为模拟量传感器和数字量传感器；等等。最常用的分类方法是下述两种：第一种是按工作原理分类，如应变式、压阻式、压电式、光电式…。第二种按被测量分类，如力、位移、速度、加速度…。这两种分类方法有共同的缺点，都只强调了一个方面，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等。最近正在制订的国家标准《传感器命名及标记方法》中规定：传感器产品的名称，应由主题词加四级修饰语构成：主题词——传感器；第一级修饰语——被测量，包括修饰被测量的定语；第二级修饰语——转换原理，一般可后续以“式”字；第三级修饰语——特征描述，一般可后续以“型”字；第四级修饰语——主要技术指标。当对传感器的产品名称简化表征时，除第一级修饰语外，其它各级可视具体情况任选或省略。为便于对传感器进行原理及其分类研究，也允许只采用第二级修饰语，省略其它各级修饰语。按上述命名原则，举几个范例如下：10mm电涡流式位移传感器、 $\pm 20g$ 压电式加速度传感器、 $0\sim 3500kPa$ 放大应变式绝压传感器。为便于传感器标记，可采用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字作标记代号，传感器标记由下列四部分构成：主称、被测量、原理、序号。例如CWY-WL-10，是序号为10的电涡流位移传感器；CY-YZ-2A是序号为2A的压阻式压力传感器；CA-YD-5是序号为5的压电式加速度传感器；等等。

## 二、传感器的地位和作用

传感器是现代测控系统中不可缺少的重要组成部分，是连接被测对象和检测系统的接口，它提供给系统赖以进行处理和决策所必需的原始信息，是所有现代技术的起点，在很大程度上影响和决定了系统的功能。不仅工程技术中如此，就是在基础学科中，传感器同样具

有独特的地位。许多基础科学研究的障碍，首先就在于信息的获取存在着困难，而一些新机理和高灵敏度检测传感器的出现，就会导致该领域内技术上的突破。例如，约瑟夫逊效应器件的出现，不仅解决了对于超弱磁场 ( $10^{-9}$  Gs) 的检测，同时还解决了对  $10^{-13}$  W、 $10^{-17}$  V、 $10^{-12}$  A 及  $10^{-23}$  J 等物理量的高精度检测，对于多种基础科学的研究和精密计量产生了巨大的影响。近些年来电子计算机技术的飞速发展，实现了曾是梦想的“电脑”，于是作为电脑的计算机开始要求有类似人的视觉、触觉、听觉、嗅觉、味觉的电五官。电脑、电五官协调地结合才有可能实现人所曾梦想的智能机器人，及其他人工智能仪器设备。所以一些专家评论：“如果没有传感器检测各种信息，那么，支撑现代文明的科学技术，就不可能发展。”

“唯有模仿人脑的计算机和传感器的协调发展，才能决定技术的将来。当务之急，是全力发展传感器电子设备。“如何提高感觉信息的传感器功能，如何适当使用，将成为今后技术研究的起点，可以说八十年代技术革新的主角是传感器。”一些工业发达的国家对传感技术的发展都很重视，例如日本对“今后十年值得注意的技术”调查结果：第一位，传感器；第二位，大规模集成电路；第三位，复合材料；第四位，陶瓷；第五位，光导纤维、超小型电池等。日本 1980 年提出的采用六大核心技术即：计算机、通信、激光、半导体、超导和传感器。1980 年为解决十余项传感器技术问题，日本政府拨出的研究经费共计七十多亿日元。据报道西德政府 1980~1985 年电子工业总投资为 51 亿马克，其中计算机为 17 亿马克，传感器高达 10 亿马克。我国近些年来对传感技术的发展也很重视，目前已有生产研制单位 500 多家，产品达三千余种。随着电子计算机，生产过程自动化、生物医学、环保、能源、海洋开发、遥感、遥测、宇航等科学技术的开发，传感器的品种、数量将与日俱增。例如阿波罗 10 号宇宙飞船使用了大量传感器，对 3295 个测量参数进行监测，国外一些专家说：“整个宇宙飞船就是高性能传感器的集合体。”可以毫不夸张地说，从茫茫的太空到浩瀚的海洋，从各种复杂的工程系统，到生活中的衣食住行，几乎每一项现代化的项目，都离不开各种各样的传感器，传感技术对国民经济各个领域的发展是起着不可估量的巨大作用。

### 三、传感技术的发展动向

传感技术发展是模仿人的五官。作为工程技术的传感器可以把其发展分为三个阶段：第一阶段，低于生物五官的性能；第二阶段与生物有相同水平的性能；第三阶段，超过生物的性能。就人造触觉来看，通过对特定一点的位置进行接触，能够进行高精度的测定，但是，象人一样用手指来触摸，能够识别物体表面状态和形状，或者是什么材料，就有一些困难。因此，从计量观点来看是处于第三阶段，如果以“状态识别为目的”时，则处在第一阶段。就温度传感器测温而言，则可以说达到了第三阶段。但总体来说目前的“电五官”——传感器，大都处在第一阶段，而作为味觉的传感器的开发到目前尚无头绪，因而传感器的迅速发展是重要的课题，否则，传感器的性能根本不可能超过人类的五官，如智能机器人这样一些高技术领域的进展，是不可能取得突破性成果的。

传感技术正沿着两个不同的方向发展。

#### (一) 开发新的敏感元器件

有的专家认为：以前是结构型传感器的年代，现在是物性型传感器（如半导体传感器）

的年代,下一世纪将是分子传感器的年代。到目前为止真正的分子传感器,只有在生物体内能够找到。可见新的传感器的开发是传感技术进步的一个标志。

开发新的传感器,其途径大致分为以下三个方面:

1. 用新材料制作的传感器 由于材料科学的进步,新功能材料的开发将导致新的传感器的出现。半导体材料研究的进展,促进了半导体传感器的迅速发展,使之成为当前传感技术领域中的一个宠儿;压电半导体材料为压电传感器集成化提供了方便;高分子压电薄膜的制作成功,将使得机器人的触觉系统更接近人的触觉器官——皮肤。而且在不久的将来,非晶半导体、精细陶瓷、形状记忆合金等新的敏感材料,将导致新的传感器出现。特别是形状记忆合金,当恢复到原来形状时会发出相当大的力,因此,可以把它看作是集中了敏感元件和执行元件两种功能的新元件,预计在自动化系统中会有独特的应用。

2. 采用新加工法制作的传感器 采用新的加工方法也可以制作出新型传感器,如采用微细机械加工技术,就是采用光刻、扩散及各向异性腐蚀等方法;可以大批量生产微型、集成化传感器,目前已经制成了能够装在注射针尖上的压力传感器、成分传感器等,

3. 采用新原理的传感器 随着光导纤维的出现,利用其传光性和传感性,光纤传感器成了近年来异军突起的一项新技术,对于光测系统的小型化和高可靠性是极为有效的。

根据新原理制作的传感器,约瑟夫逊效应传感器也是一个代表,它给现代科学技术以极大地影响。基于光子滞后效应,出现了响应速度极快的红外探测器,它对光通信的贡献很大。

## (二) 开发由系统化而产生的新功能

所指的系统化就是通过计算机与传感器的有机结合,采用新的检测计算方法,实现传感器的新功能。

用一个敏感器件只能获得一个点的信息,因而在空间的分辨率方面缺少宽范围的信息。此时如果在宽范围内进行扫描,并对获取的信号进行适当处理,就能够掌握广阔空间及复杂物体的状态,这就是检测的多维化,可以说是从“计量”向“状态的识别”靠近了几步。再者,只要把外加信号根据特定的物理法则进行转换,把不具有智能的敏感元件用计算机的智能来加强,从而使传感系统高性能化,就能进行更精确的检测,可实现硬件难以实现的功能,这就是传感器的智能化。敏感元件与微机有机地结合创造出新功能,而且使信号在敏感元件附近就能进行局部处理,从而使CPU和传输线路的负担减轻,效率提高。人眼视网膜的光接收细胞约有几亿个,但是从眼球向大脑传送的神经数只有2~3个位数,可见通过视网膜的处理,信息就被压缩了。作为系统化使传感器产生新功能的典型例子就是日本正在研制的智能化固体图象传感器,这是一种将阵列化的光电探测器,扫描功能与微机结合为一体的器件,总的来看它是具有把二维光学图象转换成有用信号的多维化和智能化传感器。今后传感器的发展将通过传感器的集成化、系统化,不断向着具有二维或三维空间图形,甚至包含有时序的四维功能传感器过渡。

计算机技术是由成熟的电子技术和逻辑学的高度集成。与此不同,传感技术则是由多方面知识的综合所构成,是处于边缘领域的技术。与计算机的开发相比,传感技术的开发必须在更为广阔的领域内打好基础。

# 第一章 传感器的特性

## § 1-1 传感器的性能指标

传感器是一个具有复杂的多变量的输入输出系统，如图 1-1-1 所示。

对于传感器输入输出特性，理论上的分析是复杂的和有限的，在实际中并非特别需要数学描述的形式。为了评价传感器，目前尚无可行的全面衡量传感器质量优劣的质量指标（有人提出过品质因数的概念），对此通常还是罗列出各种基本性能参数和环境参数作为检验、使用和评价传感器的依据。对于具体的一种传感器，并非全部指标都是必需的，设计和使用时，也不必追求各个指标都优良，而针对具体使用的实际需要，只保证其主要参数即可，目前传感器研制的重点已不再是追求各单项性能指标的优异，而主要的是关心其稳定性和变化的规律性。传感器的特性主要有下述几个方面指标。

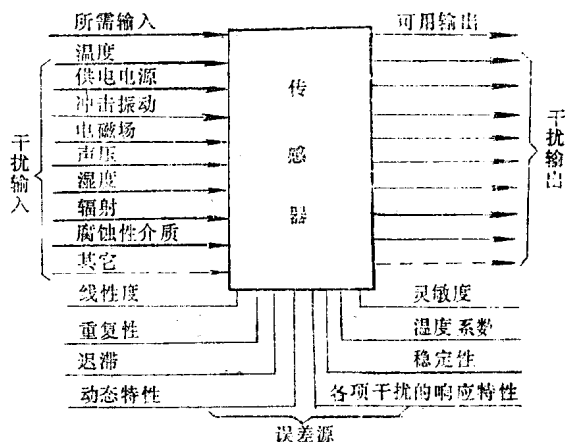


图1-1-1 传感器输入、输出作用图

### 一、基本特性指标

**测量范围** 在允许误差限内，被测量上限与被测量下限所确定的区间。

**量程** 传感器测量范围的上限和下限值的代数差。

**满量程输出** 在规定条件下，传感器测量范围的上限和下限所对应的输出值的代数差。

**过载能力** 在不引起传感器规定的性能指标发生永久变化的条件下，允许超过测量范围的能力。

**分辨力** 传感器在规定的测量范围内可能检测出的被测量的最小变化值。

**灵敏阈** 引起输出信号变化的最小输入值，称为灵敏阈。这个定义缺乏数量上的确定性。事实上由于传感器零位误差 $\Delta_0$ 干扰了对被测量 $x$ 的微值的发现，于是在被测量 $x$ 与零位误差相等的地方成为一个“门坎”，在“门坎”之前，将不能发现被测量，而在“门坎”之后原则上能发现被测量，由此出发，现代测量理论中认为，灵敏阈就是当 $x = \Delta_0$ 时，即相

对误差  $\frac{\Delta_0}{x} = 100\%$  时的被测量值。

**输入阻抗和输出阻抗** 从传感器输入端和输出端看进去的阻抗分别称为输入阻抗和输出阻抗。

**灵敏度** 传感器输出量的变化量与相应的输入量的变化量之比。

**线性度** 校准曲线与规定的代表传感器输入输出特性的拟合直线间的吻合程度。

**重复性** 在同一工作条件下, 对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的不一致程度。

**迟滞** 在同一工作条件下校准时, 对于全量程多次连续变动, 同一测量点上正、反程输出的不一致程度。

**精确度** 有时简称精度, 对被测量的测量结果与真值或约定真值之间的符合程度, 它是测量精密度和正确度的综合。

**精密度** 同一测量条件, 被测量对应的所测数值之间不一致的程度, 它反映了测量中随机误差的大小。

**正确度** 测量结果与真值的偏离程度, 它反映了系统误差的大小。

**不确定度** 表征被测量的真值在某个量值范围的一个评定指标, 也就是由于测量误差的存在而对被测真值不能肯定的程度。

**固有频率** 将传感器视为一个弹性振动系统, 由振动系统的等效质量, 等效刚度决定的自由振动频率。

**谐振频率** 使传感器产生共振时的频率, 通常指最低的共振频率。

**频率响应** 是指随输入信号频率的改变, 增益变化不超出某一规定分贝值的频率范围, 实际上反映了通频带。

**上升时间  $t_r$**  是指传感器阶跃响应时, 从稳定值的  $a\%$  变化到稳定值的  $b\%$  所需的时间, 通常取  $a\%$  为  $10\%$ , 而  $b\%$  取为  $90\%$ 。

**响应时间  $t_s$**  是指传感器阶跃响应时, 输出量从开始变化到进入稳定值的规定百分率时所需的时间。

**过冲量  $c$**  是指阶跃响应时, 输出最大峰值与稳定值之间的差值, 常用对稳定值的百分比表示。

**衰减度  $\psi$**  用来描述阶跃响应时, 振荡峰值的衰减速度, 定义为第一个和第二个峰值之差与第一个峰值之比。

## 二、环境参数指标

**工作温度范围** 保证传感器特性指标的温度范围。

**温度误差** 传感器工作温度偏离校准温度时引起的误差。在传感器测量范围内, 用温度变化引起的输出最大变化值与校准温度下满量程输出的百分比表示。

**热零点漂移** 传感器工作温度偏离校准温度而引起的零点输出的最大变化, 一般以每变化  $1^\circ\text{C}$  时零点输出的相对变化率来表示 ( $\%/^\circ\text{C}$ )。

**热灵敏度漂移** 传感器工作温度偏离校准温度时,引起的灵敏度的变化,一般以每变化1℃时灵敏度的相对变化率来表示(%/℃)。

**振动误差** 传感器因振动带来的附加误差。

**冲击误差** 传感器因冲击带来的附加误差。

**加速度误差** 传感器因承受加速度带来的附加误差。

**环境压力误差** 在规定的范围内,由于环境压力的变化而引起的输出的最大变化。

### 三、稳定性、可靠性指标

**稳定性** 一定时间内,传感器在相同的条件下,维持其原来性能的能力。稳定性是确定校准期的主要依据。

**漂移(时漂)** 在规定的输入和工作条件下,输出量随时间的缓慢变化。

**零漂** 在规定的时间内及室内条件下,输入量为零时的漂移。

**灵敏度漂移** 在规定的条件下,传感器的灵敏度随时间的缓慢变化。

**可靠性** 在规定的条件下,传感器正常工作的可能性(概率)。规定条件是指:规定的时期产品所处的环境条件、维护条件、使用条件等。

**绝缘电阻** 在规定的条件下,施加规定的直流电压时,传感器指定的绝缘部分之间所测得的电阻。

**绝缘强度** 传感器规定的绝缘部分抵抗外加正弦交流电压击穿的能力。

**工作寿命** 在规定的条件下,传感器被施加规定的连续和断续额定值而不改变其性能的最短时间。

**贮存寿命** 在规定的贮存条件下,传感器非工作状态下,不改变其性能的最短时间。

**循环寿命** 按规定使传感器满量程或规定的部分量程偏离,而不改变其性能的最少循环次数,也称为疲劳寿命。

**保险期** 产品出厂后,在规定的条件(运输、使用、贮存)下,保证产品性能合格的期限。

## § 1-2 传感器的静态特性

### 一、线性度

传感器的理想输入-输出特性应是线性的。线性的传感器具有一系列的优点:可以利用迭加定理,将复杂的信号输入变量化为各种单一频率输入变量来分析,然后利用迭加定理来综合,这样可以利用代数方程和微分方程进行精确分析计算,使设计分析大为简化;对于线性传感器,只要知道线性输入-输出特性上的两个点,就可以决定其余各点,这样使输出量的处理方便,刻度均匀,对标定有利,因此设计线性传感器是我们努力的目标。实际上由于种种原因,传感器总是具有不同程度的非线性,这样按线性处理和分析就会带来非线性误差,反映非线性误差的程度即是线性度。线性度是以一定的拟合直线作基准与校准曲线作比较,用其不一致的最大偏差与理论满量程输出值的百分比来进行计算:

$$\delta_L = \pm \frac{|\Delta L_{\max}|}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-2-1)$$

式中  $y_{F.S} = y_{\max} - y_{\min}$  ——满量程输出电压。

确定拟合直线可以有几种不同的方法, 因此线性度也就不同, 所以应特别注意线性度是以什么样的拟合直线作基准而确定的。

### (一) 端点法

实际特性上分别对应于测量下限  $x_{\min}$  和测量上限  $x_{\max}$  的点  $A$  和  $B$  的连线称端点拟合直线, 这种拟合方法称端点法或端基法, 如图 1-2-1 所示。

由于拟合直线的方程形式必为

$$y = a + Kx \quad (1-2-2)$$

将校准数据中两个端点值, 即起点和终点值  $(x_{\min}, y_{\min})$ 、 $(x_{\max}, y_{\max})$  代入式 (1-2-2), 可求得常数  $a$  和  $K$ :

$$y_{\min} = a + Kx_{\min}$$

$$y_{\max} = a + Kx_{\max}$$

上式联立求解得

$$K = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1-2-3)$$

$$a = y_{\min} - Kx_{\min} \quad (1-2-4)$$

其拟合方程为

$$y = y_{\min} + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(x - x_{\min}) \quad (1-2-5)$$

根据拟合方程求出对应校准点的各点差值中的最大差值, 再据式 (1-2-1), 即可求得线性度。

这种方法的特点是十分简单, 长期以来广泛应用, 但由于它没有全面考虑所有校准数据对特性曲线的影响, 数学依据不充分, 而且计算得到的线性度值往往偏大, 因此不能充分发挥传感器的精度潜力。

### (二) 端点平移法 (最佳平移直线法)

作一根直线使其与端点拟合直线平行, 且使该直线两侧的所有校准点与该直线相应点上正的最大偏差与负的最大偏差绝对值相等, 如图 1-2-2 所示。该直线与端点拟合直线的差值为  $\Delta y$

$$\Delta y = \frac{1}{2}(|+\Delta L_{\max}| - |-\Delta L_{\max}|) \quad (1-2-6)$$

因此端点平移法的拟合方程, 是在端点法拟合方程的基础上加一个修正量  $\Delta y$  即可, 这一修正量也就是沿坐标轴平移的距离。假定端点法拟合方程形式为

$$y = a + Kx$$

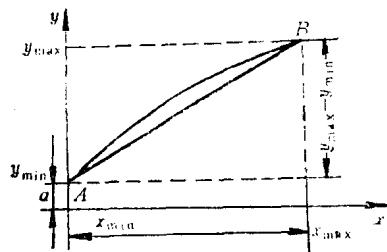


图1-2-1 传感器端基线性度的拟合直线