

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

# 传感器原理及应用

FUNDAMENTAL AND  
APPLICATION OF SENSOR

苑会娟 © 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

# 传感器原理及应用

主 编 苑会娟  
副主编 周 真 吴海滨 李万臣  
参 编 赵文杰 冯侨华 王北一 周宝国 宋起超  
主 审 于晓洋



机械工业出版社

本书系统介绍了传感器的基本概念、基本特性、技术性能指标及改善性能的途径,传感器的标定和校准方法以及传感器的发展和选用原则,并对电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、化学式和波式等各类传感器的工作原理、组成结构、特性、测量电路及其典型应用做了较系统的阐述,并对其他现代新型传感器做了简要介绍。

本书是测控技术与仪器专业研究性教学方法配套系列教材之一,可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机械设计制造及其自动化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,同时也可作为从事电子仪器仪表及测控技术行业的工程技术人员提供参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器原理及应用/苑会娟主编. —北京:机械工业出版社, 2017. 10  
普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材  
ISBN 978-7-111-58175-8

I. ①传… II. ①苑… 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 (2017) 第 243169 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王 康 责任编辑:王 康 王小东

责任校对:刘 娟 封面设计:张 静

责任印制:李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.25 印张·493 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58175-8

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 前 言

按照系統工程的观点，可以将仪器仪表产品的技术结构分为信息流、能量流和材料流，用信息流可以控制能量流和材料流。信息流涵盖信息获取、信息采集与变换、信息转换与处理、信息传输、信息控制、信息输出与显示等全过程。“测控技术与仪器”专业培养的学生应掌握测量系统科学构成的相关理论知识和应用技术，其中信息流传输过程中的信息获取、转换处理、传输和控制已成为测量系统构成的核心技术基础，而传感技术完成对信息的获取、传输和处理，在信息技术中起着相当重要的作用，因此，“传感器原理及应用”是测控技术与仪器专业的主干专业课，同时，本课程也是高等院校电子信息工程、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、电子科学与技术以及物联网工程等专业的一个重要专业课。

随着 2016 年 6 月我国正式加入《华盛顿协议》，培养学生的工程能力已经成为我国工程教育的主流趋势。为适应特色专业建设和工程教育认证，根据中国机械工业教育协会仪器科学与技术学科教学委员会的要求编写了本书。

本书面向普通高等院校测控技术与仪器专业，力求突出专业特色，以案例形式引入每一单元内容，既可增强学生的工程观念，又可增加阅读兴趣。在阐述传感器基本原理的基础上，侧重分析各种传感器性能，并引用较多的传感器应用实例，突出工程应用，使理论更紧密地联系实际。同时，融入学科发展新理论和新技术，如第 11 单元的生物传感器、第 12 单元的微传感器与智能传感器和第 13 单元的无线传感器网络，并通过相关知识链接将国家相关标准以及一些前沿研究成果介绍给学生。

全书共分 14 个单元，由 4 所院校 9 位从事传感器教学的教师编写，苑会娟任主编。第 1、2、14 单元由哈尔滨理工大学苑会娟编写；第 3 单元 3.1~3.3 节、第 11 单元由哈尔滨理工大学周真编写；第 4、5 单元由哈尔滨理工大学吴海滨编写；第 6、13 单元由哈尔滨理工大学王北一编写；第 7 单元由黑龙江科技大学周宝国编写；第 8 单元由哈尔滨理工大学赵文杰编写；第 9 单元由哈尔滨工程大学李万臣编写；第 10、12 单元由哈尔滨理工大学冯侨华编写；第 3 单元 3.4、3.5 节由黑龙江工学院宋起超编写。全书由苑会娟负责统稿，并由哈尔滨理工大学于晓洋主审。

本书适合作为普通高等院校测控技术与仪器专业的教材，也可作为其他相关专业的教材，还可供从事传感器技术的研究、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

在本书编写过程中，作者参阅了相关教材和文献，在此向各位原作者致谢。

由于编者水平有限，尽管有多位老师反复审校，但书中可能还会有疏漏或错误之处，恭请读者不吝赐教。

编 者

# 目 录

前言	参考文献	78
<b>第1单元 传感器概论</b> .....	<b>第4单元 电容式传感器</b> .....	79
学习要点 .....	学习要点 .....	79
相关知识链接 .....	相关知识链接 .....	79
引导案例 .....	引导案例 .....	79
1.1 传感器的定义与组成 .....	4.1 电容式传感器的工作原理 .....	80
1.2 传感器的基本特性 .....	4.2 电容式传感器的特性 .....	82
1.3 传感器的技术指标 .....	4.3 电容式传感器的测量电路 .....	85
1.4 传感器的发展趋势 .....	4.4 电容式传感器的特点及设计要点 .....	90
习题 .....	4.5 电容式传感器的应用 .....	94
参考文献 .....	习题 .....	100
<b>第2单元 电阻式传感器</b> .....	参考文献 .....	100
学习要点 .....	<b>第5单元 压电式传感器</b> .....	101
相关知识链接 .....	学习要点 .....	101
引导案例 .....	相关知识链接 .....	101
2.1 电阻应变式传感器 .....	引导案例 .....	101
2.2 应变片的静态特性 .....	5.1 压电效应 .....	102
2.3 应变片的动态特性 .....	5.2 压电材料 .....	103
2.4 应变片电桥测量电路 .....	5.3 压电元件 .....	108
2.5 应变片的温度效应和补偿 .....	5.4 测量电路 .....	110
2.6 应变片的选用与粘贴 .....	5.5 压电式传感器应用 .....	114
2.7 电阻应变式传感器的应用 .....	习题 .....	117
2.8 压阻式传感器 .....	参考文献 .....	117
2.9 电位器式传感器 .....	<b>第6单元 磁电式传感器</b> .....	118
习题 .....	学习要点 .....	118
参考文献 .....	相关知识链接 .....	118
<b>第3单元 电感式传感器</b> .....	引导案例 .....	118
学习要点 .....	6.1 磁电感应式传感器 .....	118
相关知识链接 .....	6.2 霍尔式传感器 .....	121
引导案例 .....	6.3 磁栅式传感器 .....	126
3.1 自感式传感器 .....	6.4 磁电式传感器应用 .....	129
3.2 差动变压器式传感器 .....	习题 .....	132
3.3 零点残余电压 .....	参考文献 .....	133
3.4 电涡流式传感器 .....	<b>第7单元 热电式传感器</b> .....	134
3.5 压磁式传感器 .....	学习要点 .....	134
习题 .....	相关知识链接 .....	134

引导案例 .....	134	参考文献 .....	258
7.1 热电偶传感器 .....	135	<b>第 11 单元 生物传感器</b> .....	259
7.2 热电阻温度传感器 .....	143	学习要点 .....	259
7.3 PN 结型温度传感器 .....	148	相关知识链接 .....	259
7.4 石英晶体温度传感器 .....	151	引导案例 .....	259
7.5 热电式传感器的应用 .....	152	11.1 生物传感器的结构及工作原理 .....	260
习题 .....	154	11.2 生物功能物质的分子识别机理 .....	261
参考文献 .....	155	11.3 酶传感器 .....	264
<b>第 8 单元 光电式传感器</b> .....	156	11.4 免疫传感器 .....	267
学习要点 .....	156	11.5 半导体生物传感器 .....	270
相关知识链接 .....	156	11.6 生物传感器应用 .....	273
引导案例 .....	156	习题 .....	275
8.1 光电效应 .....	157	参考文献 .....	275
8.2 光电元件 .....	159	<b>第 12 单元 微传感器与智能传感器</b> .....	276
8.3 光源 .....	168	学习要点 .....	276
8.4 光电式传感器的应用 .....	172	相关知识链接 .....	276
8.5 色敏光电传感器 .....	175	引导案例 .....	276
8.6 CCD 传感器 .....	177	12.1 微传感器 .....	277
8.7 光栅传感器 .....	182	12.2 智能传感器 .....	285
8.8 光纤传感器 .....	185	习题 .....	291
8.9 红外光传感器 .....	195	参考文献 .....	291
习题 .....	201	<b>第 13 单元 无线传感器网络</b> .....	292
参考文献 .....	201	学习要点 .....	292
<b>第 9 单元 波传感器</b> .....	202	相关知识链接 .....	292
学习要点 .....	202	引导案例 .....	292
相关知识链接 .....	202	13.1 无线传感器网络的基本	
引导案例 .....	202	概念与体系结构 .....	293
9.1 声传感器 .....	203	13.2 无线传感器网络的特点 .....	295
9.2 声表面波传感器 .....	211	13.3 无线传感器网络的应用 .....	298
9.3 超声波传感器 .....	218	13.4 无线传感器网络的关键技术 .....	301
9.4 次声波传感器 .....	223	习题 .....	306
9.5 微波传感器 .....	226	参考文献 .....	306
习题 .....	230	<b>第 14 单元 传感器的标定</b> .....	307
参考文献 .....	230	学习要点 .....	307
<b>第 10 单元 化学传感器</b> .....	231	相关知识链接 .....	307
学习要点 .....	231	引导案例 .....	307
相关知识链接 .....	231	14.1 标定的概念 .....	307
引导案例 .....	231	14.2 传感器的静态标定 .....	308
10.1 气体传感器 .....	232	14.3 传感器的动态标定 .....	313
10.2 湿度传感器 .....	242	习题 .....	316
10.3 离子传感器 .....	250	参考文献 .....	316
习题 .....	258		



# 第 1 单元

## 传感器概论

### 学习要点

- ◆ 传感器的定义、组成及分类；
- ◆ 传感器的静态特性及动态特性；
- ◆ 传感器的技术性能指标及改善传感器性能的方法。

### 相关知识链接

- ◆ GB/T 7665—2005 传感器通用术语；
- ◆ GB/T 7666—2005 传感器命名法及代码；
- ◆ GB/T 14479—1993 传感器图用图形符号；
- ◆ GB/T 18459—2001 传感器主要静态性能指标计算方法。

### 引导案例

#### 航天飞行器上的传感器

神州十号载人飞船是中国神州号飞船系列之一，于2013年6月11日发射升空。神州十号载人飞船上装有超过千只传感器，用于监测航天员的呼吸、脉搏、体温等生理参数和飞船升空、运行、返回等多项飞行参数，并及时传回指挥控制中心，指挥控制中心再根据这些信息发出指令控制相关设备。所有的航天飞行器均使用了大量传感器，例如美国的航天飞机一次发射飞行过程中所用的传感器总量达到3500只，俄罗斯的“能源”号运载火箭在发射“暴风雪”号飞船时用了39种类型的传感器，箭、船上传感器总用量同样达到了3500只。欧空局发射的“阿里安娜-5”火箭，在全箭试车时用了压力、温度、冲击、振动、位移、液位、扭矩等类型的传感器，总量为620只，其中，监测发动机参数的传感器约为377只。全箭在研制阶段，传感器的选用量达到435只，质量鉴定阶段约为190只，验收试验约为170只。在飞行试验阶段，必需的测量参数大约为260个，其中用于发动机参数测量的传感器达到了100只。在一次飞行试验中，所用各种物理量传感器总量为570~1100只。

这些传感器对保障飞船的安全飞行起到至关重要的作用。

传感器不仅应用于航天航空，还广泛应用于科技、生产和生活的方方面面。传感器是人类五种感觉器官眼（视觉）、耳（听觉）、鼻（嗅觉）、舌（味觉）、皮肤（触觉）的延伸，用于获取外界信息，是人类认识世界的“先行官”，它和通信技术及计算机技术一起，完成对信息的获取、传输和处理，形成了信息技术系统的“感官”“神经”“大脑”三大组成部

分，构成了 Collection、Communication and Computer 即 3C 技术。

传感技术不仅是检测的基础，也是控制的基础，是现代信息技术的源头，又是信息社会得以存在和发展的物质和技术基础。传感器的出现及应用促进了科学技术的发展和社会的进步，丰富了人类的生活。传感器技术在现代科学技术中具有重要的地位和作用。

## 1.1 传感器的定义与组成

### 1.1.1 传感器的定义

根据我国 2005 年 7 月 29 日发布的国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)，传感器 (transducer/sensor) 的定义为：能感受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，通常由敏感元件和转换元件组成。

其中，敏感元件 (sensing element) 指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件 (transducing element) 指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分；当传感器输出为规定的标准信号时，则称为变送器 (transmitter)；传感器的英文 transducer 与 sensor 通用。

这一定义包含了以下几方面的信息：

- 1) 传感器是一种测量“器件”或“装置”，能完成检测任务。
- 2) 它的输入量是“被测量”，可能是物理量，也可能是化学量或生物量等。
- 3) 它的输出量是“可用”的电信号，如电压、电流、频率等，便于传输、转换、处理和显示等。
- 4) 输出输入之间的对应关系应具有“一定的规律”，且应有一定的准确度，可以用确定的数学模型来描述。

注意，其中将传感器和变送器的概念明确区分开来，当传感器的输出为“规定的标准信号”时，则称之为变送器。所谓的“规定的标准信号”，电流输出标准信号为 4 ~ 20mA 或 0 ~ 10mA，电压输出标准信号为 1 ~ 5V、0 ~ 5V、0 ~ 10V 或 -10 ~ 10V。

### 1.1.2 传感器的组成

根据传感器的定义可知，传感器的基本组成通常包括敏感元件和转换元件两部分，它们分别完成检测和转换两个基本功能。而仅由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号较弱，还需要转换电路将输出信号放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。因此，传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成，如图 1-1 所示。

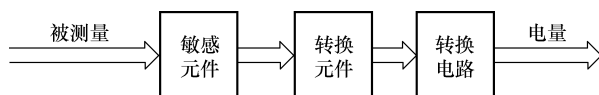


图 1-1 传感器的组成

图中，各组成部分说明如下：

- 1) 敏感元件直接感受被测量，并以确定的关系输出某一物理量。

2) 转换元件将敏感元件输出的非电物理量转换成电参量。

3) 转换电路将电参量转换成便于测量的电量。转换电路的类型又与转换元件类型有关,因此常把转换电路作为传感器的组成环节之一。

图 1-2 所示是一种压力传感器示意图。固定在弹簧管自由端的衔铁,位于电感线圈 A 和线圈 B 对称位置,而两个电感线圈接入后面的转换电路中。当弹簧管内部压力变化时,产生的变形使弹簧管自由端发生位移。这里的弹簧管就是敏感元件,它将被测压力的变化转换为位移量的变化。电感线圈 A 和线圈 B 是转换元件,它们将位移量变化转换成电感量变化,其后的转换电路将电感量转换成电压。

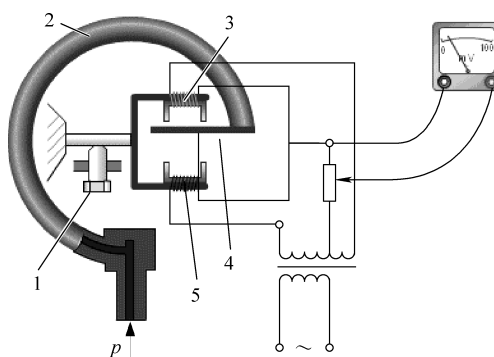


图 1-2 实际的传感器组成

1—调机械零点螺钉 2—C 形螺旋管 3—电感线圈 A  
4—衔铁 5—电感线圈 B

需要指出的是,并非所有传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分,如半导体气敏或湿敏传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等,它们一般能将感受到的被测量直接转换为电信号输出,即敏感元件和转换元件的功能合二为一。

有些传感器,转换元件不止一个。在实际应用中,仅由一个转换元件构成的传感器是很少的,通常把具有不同性能的转换元件结合起来完成转换功能。

### 1.1.3 传感器的分类

从不同角度出发,形成不同的传感器分类方法。一种被测量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器通常又可测量多种被测量,因此,对传感器的分类方法各不相同,目前尚没有统一的分类方法。

#### 1. 按照传感器的工作机理分类

按照感知被测量(外界信息)所依据的基本效应的科学属性,可以将传感器分成物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类。

物理传感器是利用某些元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能,诸如压电效应、磁致伸缩现象、离子、热电、光电、磁电等效应,把被测物理量转化成便于处理的能量形式信号的传感器。被测信号的微小变化被转换成电信号,其中起导电作用的是电子,相对后续开发难度较小。

在物理传感器中又可分为物性型传感器和结构型传感器。结构型传感器是基于物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是,传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。如电容传感器是利用静电场定律制成的结构型传感器,极板的形状、距离等的变化均能改变电容传感器的性能。物性型传感器是基于物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是以物质本身的常数形式给出的,这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而不同。如压电式传感器就是利用材料的压电效应制成的物性型传感器,不同的压电材料,其压电效应是不同的。

化学传感器主要是利用敏感材料与物质间的电化学反应原理，把无机和有机化学成分、浓度等转换为电信号的传感器，如气体传感器、湿度传感器和离子传感器，其中起导电作用的是离子。离子的种类很多，故化学传感器变化极多，较为复杂，相对后续开发难度较大。

生物传感器是利用生物活性物质，如分子、细胞甚至某些生物机体组织等对某些物质特性的选择能力构成的传感器，如葡萄糖和微电极结合形成的葡萄糖传感器、酶传感器、微生物传感器、组织传感器和免疫传感器等。生物传感器的研究历史较短，但发展非常迅速，随着半导体技术、微电子技术和生物技术的发展，它的性能将进一步完善，多功能、集成化和智能化的生物传感器将成为现实，前景十分广阔。

## 2. 按照传感器的工作原理分类

按照传感器对信号转换作用的原理可分为电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、波式传感器等。按照工作原理分类，有利于理解传感器的工作原理。

## 3. 按输入信息（被测量）分类

传感器按输入量（用途）分类有位移传感器、压力传感器、位置传感器、液面传感器、能耗传感器、速度传感器、温度传感器、振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器等。按被测量分类的方法体现了传感器的功能和用途，有利于用户有针对性地选择传感器。在许多情况下，往往将按照工作原理分类和按照被测量分类两种方法综合使用，如应变式压力传感器、压电式加速度传感器、光电码盘式转速传感器等。

## 4. 按应用范围分类

根据传感器的应用范围的不同，通常分为工业用、民用、科研用、医用、军用传感器等。按具体使用场合，还可分为汽车用、舰船用、航空航天用传感器等。如果根据使用目的的不同，还可分为计测用、监测用、检查用、控制用、分析用传感器等。

### 1.1.4 传感器的命名方法

中华人民共和国国家标准 GB/T 7666—2005《传感器命名法及代码》和 GB/T 14479—1993《传感器图用图形符号》规定了传感器的命名方法及图形符号，并将其作为统一传感器命名及图形符号的依据。

#### 1. 传感器命名方法

一种传感器产品的名称，由主题词加四级修饰语构成。

主题词是传感器；第一级修饰语是被测量，包括修饰被测量的定语；第二级修饰语是转换原理，一般可后续以“式”字；第三级修饰语是特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件以及其他必要的性能特征，一般可后续以“型”字；第四级修饰语是主要技术指标（量程、测量范围、精度等）。

当对传感器的产品名称命名时，除第一级修饰语外，其他各级可视产品的具体情况任选或省略。

#### 2. 传感器代号

传感器的完整代号应包括主称、被测量、转换原理及序号四部分，在被测量、转换原理和序号之间需有连字符“-”连接，如图 1-3 所示。

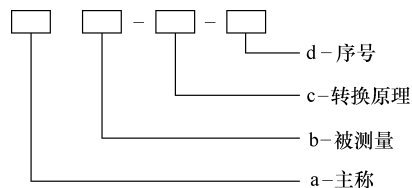


图 1-3 传感器代号表述格式

主称(传感器),用汉语拼音字母“C”标记。

被测量,用其一个或两个汉字汉语拼音的第一个大写字母标记(如压力用Y表示)。当这组代号与该部分的另一个代号重复时,则用其汉语拼音的第二个大写字母作代号(如应力用YL表示,硬度用YD表示)。依此类推。当被测量有国际通用标志时,应采用国际通用标志。当被测量为离子、粒子或气体时,可用其元素符号、粒子符号或分子式加圆括号“( )”表示。如( $\alpha$ )粒子, ( $\beta$ )射线。标准对常用的被测量代号做了相应的规定。

转换原理,用其一个或两个汉字汉语拼音的第一个大写字母标记。当这组代号与该部分的另一个代号重复时,则用其汉语拼音的第二个大写字母作代号(如电容用DR表示,光纤用GX表示)。依此类推。标准对常用的转换原理代号也做了相应的规定。

序号,用阿拉伯数字标记。序号可表征产品设计特征、性能参数、产品系列等。如果传感器产品的主要性能参数不改变,仅在局部有改进或改动时,其序号可在原序号后面顺序地加注大写汉语拼音字母A、B、C…(其中I、O两个字母不用)。序号及其内涵可由传感器生产厂家自行决定。

图1-4所示为传感器代号标记示例。

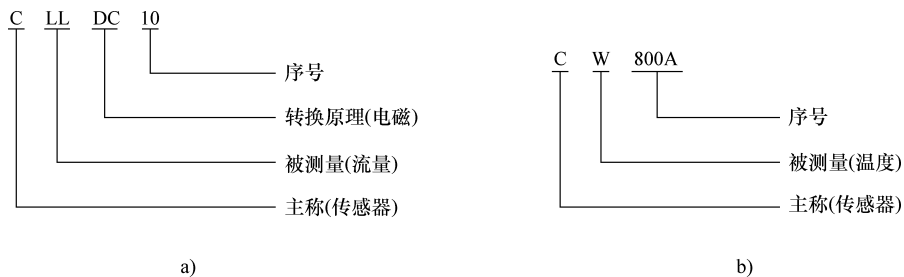


图1-4 传感器代号标记示例  
a) 电磁式流量传感器 b) 温度传感器

### 3. 传感器的图形符号

传感器一般符号由符号要素正方形和等边三角形构成,如图1-5所示。图中的正方形轮廓符号表示转换元件;三角形轮廓符号表示敏感元件。在轮廓符号内,填上或加入适当的限定符号或代号,用以表示传感器的功能。

GB/T 14479—1993给出了43种常用传感器的图形符号示例。图1-6所示为三种典型的传感器图形符号。

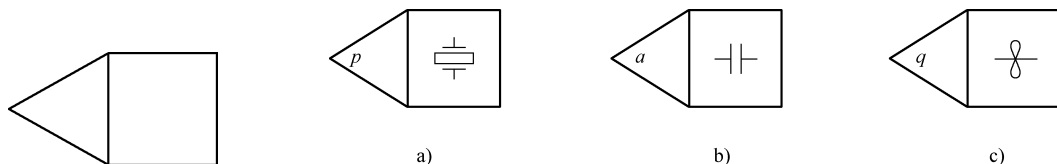


图1-5 传感器图形符号

图1-6 三种典型传感器图形符号

a) 压电式压力传感器 b) 电容式加速度传感器 c) 涡轮式流量传感器

## 1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指其输出与输入之间的关系。

理想情况下,传感器的输出和输入是一一对应的,即传感器能不失真的再现输入信号,

这就是传感器的理想特性。然而，由于在设计、制造以及使用过程中存在很多影响因素，使得传感器不可能呈现理想特性。传感器的特性与被测量的性质有关，当被测量处于不变或缓变情况下，输出与输入之间的关系称为传感器的静态特性；当被测量随时间变化时，输出与输入之间的关系称为传感器的动态特性。

### 1.2.1 静态特性 (static characteristics)

传感器的静态数学模型是指当输入量为静态量时，传感器的输出量与输入量之间的数学模型。在不考虑传感器滞后及蠕变的情况下，传感器的静态数学模型可以用一个代数方程来表示，即

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

式中  $x$ ——输入量；

$y$ ——输出量；

$a_0$ ——零位输出（输入量  $x$  为零时的输出量）；

$a_1$ ——传感器的线性灵敏度，常用  $K$  或  $s$  表示；

$a_2 \cdots a_n$ ——非线性项的待定常数。

它是一个不含时间变量的代数方程，也可用以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标所画出的特性曲线来描述。

在研究传感器的静态特性时，可先不考虑零位输出，根据传感器的内在结构参数不同，式 (1-1) 可能有图 1-7 所示的四种情况。

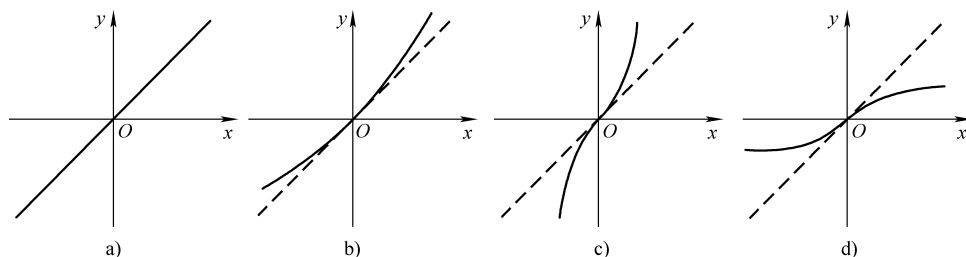


图 1-7 传感器静态特性曲线

图 1-7a 所示为理想的线性特性，通常是所希望的传感器应具有的特性，在这种情况下，有  $a_0 = a_2 = a_3 \cdots a_n = 0$ ，因此得到

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

因为直线上任何点的斜率相等，所以传感器的灵敏度为

$$s = \frac{y}{x} = a_1 \quad (1-3)$$

图 1-7b 所示为仅有偶次非线性项，其输出 - 输入特性方程为

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots \quad (1-4)$$

因为没有对称性，所以线性范围在零点附近较窄，一般传感器设计很少采用这种特性。

图 1-7c 所示为仅有奇次非线性项，其输出 - 输入特性方程为

$$y = a_0 + a_1x + a_3x^3 + \cdots \quad (1-5)$$

这类传感器一般输入量  $x$  在相当大的范围内具有较宽的准线性，这是较接近理想线性的

非线性特性，它相对坐标原点对称的，即  $y(x) = -y(x)$ ，所以它具有相当宽的近似线性范围。

图 1-7d 所示为普遍情况下，传感器的数学模型应包括多项式的所有项数，即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \cdots \quad (1-6)$$

传感器的静态特性包括多种性能指标如线性度、符合度、分辨力、灵敏度、迟滞、重复性、漂移及不确定度等，可通过静态校准来确定。静态校准是指在规定的静态测试条件下，通过一定的试验方法记录相应的输入 - 输出数据，以确定传感器静态特性的过程。通过静态校准获得的静态特性称为传感器的校准曲线，它是各校准点的正、反行程算术平均值的平均值点的连接曲线，又称为正、反行程实际平均特性（曲线）。

### 1. 线性度（linearity）

校准曲线与某一规定直线一致的程度称为传感器的线性度。某一规定直线又称为参比直线，所以传感器的线性度可以表示为校准曲线相对于参比直线的最大偏差，用满量程输出的百分比来表示。满量程输出是指在规定的条件下，传感器测量范围的上限和下限输出值之间的代数差。计算传感器线性度的一般公式

$$\xi_L = \frac{\Delta Y_{L,\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$\Delta Y_{L,\max} = \max(\bar{y}_i - Y_i)$$

式中  $\Delta Y_{L,\max}$ ——传感器的校准曲线对参比直线的最大偏差；

$\bar{y}_i$ ——传感器在第  $i$  个校准点处的总平均特性值（即在该点处全部测量值的平均值）；

$Y_i$ ——传感器在第  $i$  个校准点处的参比特性值；

$Y_{FS}$ ——传感器的满量程输出。

需要说明一点，在有关静态特性的公式中，凡拟合特性（如参比特性或工作特性）、给定特性的输出值用大写  $Y$  表示，实测的输出值用小写  $y$  表示。

随参比直线的不同，有多种线性度。因此在说明线性度时应加以限定，不加限定词的线性度即指独立线性度。

(1) 独立线性度 ( $\xi_{L,lin}$ ) 相对于“最佳直线”的线性度称为独立线性度。“最佳直线”是能保证传感器正反行程校准曲线对它的正、负偏差相等且为最小的一条直线。或者说“最佳直线”是相互最靠近而又能包容传感器正、反行程实际平均特性曲线的两条平行直线的中位线。图 1-8a 为独立线性度的计算方法原理。

(2) 绝对线性度 ( $\xi_{L,ab}$ ) 绝对线性度又称理论线性度，它的参比直线为规定直线，计算公式见式 (1-7)。绝对线性度反映的是线性精度，与其他几种线性度的性质截然不同。参比直线应根据传感器特性的使用要求确定。在几种线性度中，绝对线性度的要求最严，如果需要传感器具有互换性，就必须采用绝对线性度。

(3) 端基线性度 ( $\xi_{L,te}$ ) 端基线性度的参比直线为端基直线。端基直线为实际平均输出特性的首、末两端点的连线。图 1-8b 为端基线性度计算方法原理。端基线性度与其他线性度相比，计算结果一般偏大。

(4) 平移端基线性度 ( $\xi_{L,s,te}$ ) 平移端基线性度的参比直线为平移端基直线。平移端基直线和端基直线具有相同的斜率，但应通过平移把实际特性对它的最大偏差减至最小。当

实际特性曲线呈单调增大或单调减小性质时，平移端基直线即为最佳直线。平移端基线性度可在要求不太高的某些场合近似代替独立线性度。

(5) 零基线性度  $\xi_{L,ze}$  零基线性度的参比直线是零基直线。零基直线为一条经过传感器理论零点的直线，但应通过改变斜率把传感器实际特性对它的最大偏差减至最小。零基直线又称为强制过零的最佳直线。图 1-8c 为零基线性度计算方法原理。

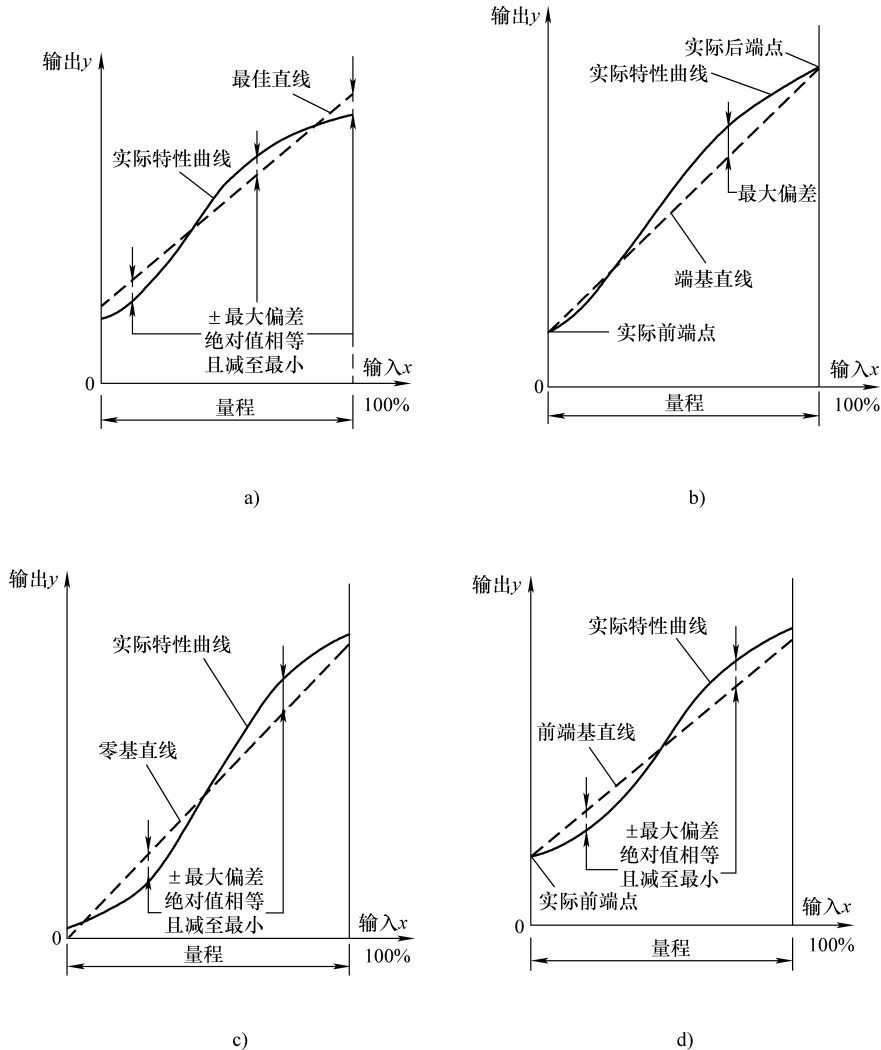


图 1-8 线性度的计算方法原理

- a) 独立线性度计算方法原理    b) 端基线性度计算方法原理  
c) 零基线性度计算方法原理    d) 前端基线性度计算方法原理

(6) 前端基线性度 ( $\xi_{L,f,te}$ ) 前端基线性度的参比直线为前端基直线。前端基直线通过传感器实际特性的前 endpoint，但应通过改变斜率把传感器实际特性对它的最大偏差减至最小。图 1-8d 为前端基线性度计算方法原理。

(7) 最小二乘线性度 ( $\xi_{L,ls}$ ) 最小二乘线性度的参比直线为最小二乘直线。最小二乘直线应保证传感器实际特性对它的偏差的二次方和为最小。

最小二乘直线方程为

$$Y_{ls} = a + bx \quad (1-8)$$

式中  $Y_{ls}$ ——传感器的理论输出；

$a, b$ ——最小二乘直线的截距和斜率；

$x$ ——传感器的实际输入。

最小二乘直线的截距和斜率可通过传感器实际特性的直线拟合求出，计算公式如下

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum \bar{y}_i - \sum x_i \sum x_i \bar{y}_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-9)$$

$$b = \frac{n \sum x_i \bar{y}_i - \sum x_i \sum \bar{y}_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-10)$$

式中  $x_i$ ——传感器在第  $i$  个校准点处的输入值；

$\bar{y}_i$ ——传感器在第  $i$  个校准点处的实际特性值；

$N$ ——校准点数。

最小二乘直线不能保证最大偏差为最小。为减小偏差，可将最小二乘直线平移，使最大正、负偏差绝对值相等。最小二乘直线或平移最小二乘直线可在要求不太高的场合代替最佳直线，以便近似求独立线性度。

用线性度来表征传感器的线性，类似地，用符合度来表征传感器的符合性。传感器的符合性是指传感器的输出-输入特性接近或偏离某一曲线的性质。

符合度 (conformity) 是指校准曲线与规定特性曲线 (例如直线、对数曲线、抛物线等) 之间的符合程度，即为校准曲线相对于参比曲线的最大偏差，用满量程输出的百分比表示。随参比曲线不同，有多种符合度。各种符合度的定义与计算方法与线性度类似，不同的是将线性度中参比直线换成参比曲线。

## 2. 分辨力 (resolution)

分辨力的定义为在规定测量范围内可以检测出的被测量的最小变化量。即指在整个输入量程内都能产生可观测的输出量变化的最小输入量变化。计算公式为

$$R_x = \max |\Delta x_{i,\min}| \quad (1-11)$$

式中  $\Delta x_{i,\min}$ ——在第  $i$  个测量点上可观测输出变化的最小输入变化量；

$\max |\Delta x_{i,\min}|$ ——在整个量程内取最大的  $\Delta x_{i,\min}$ ，即得传感器在整个量程内都能产生可观测输出变化的最小输入变化量。

传感器零点处的分辨力也称为阈值。

## 3. 灵敏度 (sensitivity)

灵敏度是指传感器输出量的变化值与相应的被测量的变化量之比。传感器在第  $i$  测量点处的灵敏度可用式 (1-12) 计算

$$s_i = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta Y_i}{\Delta x_i} \right) \quad (1-12)$$

式中  $\Delta x_i$ ——在第  $i$  个测量点上传感器的输入变化量；

$\Delta Y_i$ ——在第  $i$  个测量点上由  $\Delta x_i$  引起的传感器的输出变化量。

线性传感器的灵敏度为一常数，计算公式为

$$s = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1-13)$$

式中  $Y_{\max}$ ——工作特性所决定的最大输出值；

$Y_{\min}$ ——工作特性所决定的最小输出值；

$x_{\max}$ ——测量范围的上限值；

$x_{\min}$ ——测量范围的下限值。

所谓线性传感器就是工作特性用直线方程表示的传感器。工作特性是用约定真值的输出-输入特性的方程或曲线。

#### 4. 迟滞 (hysteresis)

迟滞 (滞后) 也称为回差, 是在规定的测量范围内, 输入量增大行程期间和输入量减小行程期间任一被测量值处输出量的最大差值。也就是说, 对应同一大小的输入信号, 传感器正反行程的输出信号大小却不相等, 这就是迟滞现象。产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。而迟滞的大小一般用实验方法来确定, 计算公式为

$$\xi_H = \frac{\Delta Y_{H,\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{\max |\bar{y}_{d,i} - \bar{y}_{u,i}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中  $\bar{y}_{d,i}$ ——反行程实际平均特性,  $\bar{y}_{d,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{d,ij}$ 。其中  $y_{d,ij}$  为反行程第  $i$  个校准点处的第  $j$  个测量值 ( $i=1 \sim m; j=1 \sim n$ );

$\bar{y}_{u,i}$ ——正行程实际平均特性,  $\bar{y}_{u,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{u,ij}$ 。其中  $y_{u,ij}$  为正行程第  $i$  个校准点处的第  $j$  个测量值 ( $i=1 \sim m; j=1 \sim n$ ),  $n$  为测量循环数。

#### 5. 重复性 (repeatability)

重复性是指在相同测量条件下, 对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。传感器的重复性是其随机误差的极限值。传感器在某校准点处的重复性可计算为在该校准点处的一组测量值的样本标准偏差在一定置信度下的极限值, 并以其满量程输出的百分比来表示, 而传感器的重复性则取为各校准点处重复性的最大者。计算公式为

$$\xi_R = \frac{cS_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中  $c$ ——包含因子,  $c = t_{0.95}$ ;

$S_{\max}$ ——最大的样本标准差, 可从  $m$  个校准点的  $2m$  个标准偏差的估值  $S$  中选取最大者。

传感器的校准试验, 一般只做  $n = 3 \sim 5$  个循环, 其测量值属于小样本。对于小样本,  $t$  分布比正态分布更符合实际情况。因此, 在国家标准 GB/T 18459—2001 中规定按  $t$  分布取包含因子  $c = t_{0.95}$  (保证 95% 的置信度)。若不取  $c = t_{0.95}$ , 则应事先声明。 $t_{0.95}$  与自由度  $f$ , 或与校准循环数  $n$  (在本情况下,  $f = n - 1$ ) 有关, 如表 1-1 所示。

表 1-1  $t_{0.95}$  与校准循环数  $n$  的关系

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{0.95}$	12.706	4.303	3.182	2.776	2.571	2.447	2.365	2.306	2.262