

# 传感器原理

王厚枢 余瑞芬  
陈行祿 吴志鹤  
编著

航空工业出版社

## 内 容 简 介

本书是在第一版的基础上经总结、修订、提高而成的。全书共有十三章，除了详细阐述各类传感器的基本概念、基本原理和基本分析方法以外，还介绍了几种主要传感器的设计原则和方法。

本书用作仪表与测试专业学生的教科书，也可供测试技术、自动控制、精密仪器等专业学生和有关工程技术人员参考。

## 传 感 器 原 理

王厚枢 余瑞芬 编著  
陈行祿 吴志鹤

航空工业出版社出版  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
南京航空学院印刷厂印刷

开本：787×1092 毫米 1/16      印张：20.5  
1987 年 10 月修订版              1987 年 10 月第一次印刷  
印数：1-6100 册                    字数：517.0 千字  
统一书号：15448·27                定价：3.40 元

ISBN 7-80046-012-6/TH·004

## 前 言

本书是在第一版\*的基础上,经修改、提高而成的。本书保持了原书系统阐述传感器的基本原理和基本概念的特色。第2、6章大部分内容是重写的,第1、3、4、5、7、8、9、13各章经过重新整理,有所增删。近几年来,由于新型传感器的迅速发展,新工艺新材料不断涌现,尤其是微电子技术与微处理机的渗透,传感器技术出现了新的突破,为此新增了第11章智能传感器和第12章光纤传感器。考虑到温度测量的普遍性与重要性,编入了热电式传感器(第10章)。

本书内容比较丰富、新颖,具有一定深度和广度。在叙述方法上,力求做到由浅入深,简明扼要。因此本书既是一本教科书,又是一本可供有关工程技术人员阅读的参考书。

本书共分13章。除绪论外,还附有国际单位制换算表。全书均采用法定计量单位。其中,第2、3、4章及附录为北京航空学院陈行禄副教授编写,第6、7、12、13章由南京航空学院吴志鹤副教授编写,第9、10章为王厚枢教授编写,其余为余瑞芬副教授编写,并由王厚枢教授和余瑞芬副教授负责全书统校工作。

本书由南京工学院黄维一教授主审。

在本书第一版使用期间,编者收到了全国有关兄弟院校、研究所和工厂的师生和技术人员寄来不少宝贵意见、建议和热情鼓励的话语,编者在此深表谢忱。

本版内容虽有所改进,但离广大读者要求尚有差距,加之编者水平有限,不可避免地会存在不少缺点和错误,恳请广大读者予以指正,以便不断提高。

编 者

\*本书第一版获航空工业部优秀教材二等奖。

# 绪 论

## 一、传感器的定义及其重要性

传感器是一种测量装置，它能感受或响应规定的被测量，并按照一定规律转换成可用输出，以满足信息的传输、处理、存储、记录、显示和控制等要求。

在被称为信息化社会的今天，人们对科学技术方面的要求也就更加严格。若将信息化社会与人体相比拟，电子计算机便相当于人的大脑。大脑是要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。“感官”这种受刺激的元件就是传感器，故传感器又称为“电五官”。传感器能把各种物理量、化学量、生物量和状态量变换成有用信号，便于远距离传输、处理、存储和控制。

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，那末，无论是信号转换、信息处理，或者最佳数据的显示与控制，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。近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。

在现代飞行器上，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的飞行参数和姿态、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。

近年来，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信息。传感器还渗透到人们的日常生活中，如家用电器中温度和湿度的测控、煤气泄漏报警等等。

由此看出，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、军事技术等方面起着极为重要的作用。相信在党的领导下，在向四个现代化进军的历程中，我国的传感器技术必将获得迅猛的发展，不久的将来就会赶上世界先进水平。

## 二、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、稳定性等方面有了很大提高，最近出现了谐振式、石英电容式这样一些稳定可靠的高精度传感器。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

领域中仍占有较大的比重。

随着各种半导体材料和功能材料的发展,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,由此研制成的传感器被叫做物性传感器。大量的半导体材料、功能陶瓷和功能有机聚合物,为物性传感器的发展提供了坚实的物质基础。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。但由于物性敏感元件的基础工艺要求高(如半导体大规模集成技术、超净与细微工艺等),稳定性较差,在一些要求高可靠、高稳定的使用场合以及恶劣环境条件下,目前尚不能普遍应用。然而,不可否认,物性传感器肯定会在不断提高性能的进程中蓬勃发展起来。

近年来,微电子技术与微处理机技术进入传感器领域之后,传感器出现了新的突破,测量不再仅仅是实时的处理,而是把测量从时间的限制中解放出来。传感器与微电脑的“硬件”和“软件”集合一体,特别是与“软件”的有机结合,可以把获得的信息进行存储、数据处理、控制及打印,从而扩展了功能,提高了精度,而且对环境条件的自适应性,对信息的识别等方面大大优于传统的单功能传感器,此类传感器称之为智能传感器。目前在世界先进国家中,人们对传感器的智能化极为关注,很花力气研究它。

还有许多利用新原理制作的各种新型传感器在不断涌现出来。如一种响应速度极快的红外探测器,就是根据超导体量子力学的隧道效应即约瑟夫效应制成的传感器,它对光通信的贡献非常大。又如图象装置中的电荷耦合器件(CCD)就是能把光学图象信号转换成电信号的一种功能传感器,十分引人注目。

综上所述,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拓新型传感器。

### 三、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。本书按两种方法即按被测量来分和按测量原理来分。

#### 1. 按被测量分类

这种分类方法列于表1,包括了输入的基本被测量和由此派生的其他量。

表1 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	物理化学量	气体(液体)化学成分,浓度,盐度,粘度,湿度,密度,比重
机械量	位移,尺寸,形状,力,应力,力矩,振动,加速度,噪声	生物量	心音,血压,体温,气流量,心电流,眼压,脑电波

## 2. 按测量原理分类

这种分类方法列于表 2。

表 2 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

## 四、本课程的目的、内容及与其他课程的关系

本课程是仪表与测试技术类专业课之一。要求学生掌握几种常用传感器的原理、输出特性、误差补偿方法以及工程设计方法。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。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、智能式和光纤式传感器等。传感器各章自成体系, 便于讲授时删减。

由于传感器属交叉学科, 涉及的知识面较广, 其原理主要基于各种物理、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机和汇编程序设计知识。如果要进一步学习传感器的设计与制造, 还应掌握仪电材料、工艺、误差理论等方面的知识。因此, 要成为一个优良的传感器工程技术人员, 必需具有扎实的理论基础和多学科的综合知识。

# 目 录

## 绪 论

<b>第一章 传感器的一般特性</b> .....	( 1 )
1.1 概 述 .....	( 1 )
1.2 传感器的静态特性 .....	( 2 )
1.2.1 线性度 .....	( 2 )
1.2.2 重复性 .....	( 7 )
1.2.3 迟 滞 .....	( 8 )
1.2.4 灵敏度 .....	( 9 )
1.2.5 精度(精确度) .....	( 9 )
1.2.6 时间漂移、零点和灵敏度温度漂移 .....	( 10 )
1.2.7 阈值、分辨率和死区 .....	( 11 )
1.2.8 计算实例 .....	( 12 )
1.3 传感器的动态特性 .....	( 16 )
1.3.1 动态特性的一般数学模型 .....	( 16 )
1.3.2 传递函数 .....	( 17 )
1.3.3 动态响应 .....	( 18 )
1.3.4 动态性能指标 .....	( 25 )
<b>第二章 电位器式传感器</b> .....	( 28 )
2.1 基本构造及工作原理 .....	( 28 )
2.2 线性电位器 .....	( 29 )
2.2.1 理想特性、灵敏度、线性度 .....	( 29 )
2.2.2 阶梯特性、阶梯误差、分辨率 .....	( 31 )
2.2.3 工艺误差 .....	( 32 )
2.3 非线性电位器 .....	( 32 )
2.3.1 功用与分类 .....	( 32 )
2.3.2 灵敏度及其与结构参数的关系 .....	( 33 )
2.4 电位器的负载特性和负载误差 .....	( 36 )
2.5 结构及材料 .....	( 39 )
2.5.1 电阻丝 .....	( 39 )
2.5.2 电 刷 .....	( 40 )
2.5.3 骨 架 .....	( 42 )
2.6 非线性绕式电位器 .....	( 42 )
2.7 电位器式传感器实例 .....	( 43 )

<b>第三章 应变式传感器</b> .....	( 45 )
3.1 概 述.....	( 45 )
3.2 电阻应变片工作的物理基础——电阻应变效应.....	( 46 )
3.2.1 金属的电阻应变效应.....	( 46 )
3.2.2 灵敏系数.....	( 47 )
3.3 主要特性.....	( 49 )
3.3.1 应变片的灵敏系数.....	( 49 )
3.3.2 横向效应和横向灵敏度.....	( 50 )
3.3.3 应变片的应变极限.....	( 52 )
3.3.4 机械滞后.....	( 53 )
3.3.5 零漂和蠕变.....	( 53 )
3.3.6 动态响应特性.....	( 53 )
3.3.7 疲劳寿命.....	( 55 )
3.3.8 应变片电阻值 $R$ .....	( 55 )
3.3.9 最大工作电流.....	( 55 )
3.3.10 几何尺寸.....	( 55 )
3.3.11 绝缘电阻.....	( 55 )
3.4 温度误差及其补偿.....	( 56 )
3.4.1 温度误差及产生原因.....	( 56 )
3.4.2 温度补偿方法.....	( 57 )
3.5 金属箔式应变片.....	( 59 )
3.6 半导体应变片.....	( 59 )
3.7 应变片的粘贴及粘合剂.....	( 60 )
3.7.1 粘合剂的种类和性能.....	( 60 )
3.7.2 应变片的粘贴、固化和检查.....	( 62 )
3.8 电桥原理及电阻应变片桥路.....	( 62 )
3.8.1 直流电桥的电压灵敏度.....	( 62 )
3.8.2 电桥的非线性误差及其补偿.....	( 64 )
3.8.3 交流电桥的电压输出及平衡条件.....	( 65 )
3.8.4 交流应变电桥的输出特性及预调平衡.....	( 66 )
3.9 电阻应变仪的工作原理.....	( 68 )
3.10 应变式传感器.....	( 70 )
<b>第四章 电容式传感器</b> .....	( 75 )
4.1 工作原理、分类和应用.....	( 75 )
4.2 主要特性.....	( 77 )
4.2.1 特性曲线、灵敏度、非线性.....	( 77 )
4.2.2 等效电路.....	( 80 )
4.2.3 高阻抗、小功率.....	( 81 )
4.2.4 静电应力.....	( 81 )



4.3 测量线路 .....	( 82 )
4.3.1 电桥线路 .....	( 82 )
4.3.2 二极管式线路 .....	( 85 )
4.3.3 差动脉冲宽度调制线路 .....	( 90 )
4.3.4 调频式线路 .....	( 92 )
4.3.5 运算放大器式线路 .....	( 93 )
4.4 电容式传感器结构稳定性问题 .....	( 94 )
4.4.1 温度变化对结构稳定性的影响 .....	( 94 )
4.4.2 温度变化对介质介电常数的影响 .....	( 95 )
4.4.3 绝缘问题 .....	( 96 )
4.4.4 结构设计实例 .....	( 96 )
4.5 寄生电容的干扰与防止 .....	( 99 )
<b>第五章 变磁阻式传感器</b> .....	( 101 )
5.1 电感式传感器 .....	( 102 )
5.1.1 简单电感传感器 .....	( 102 )
5.1.2 差动式电感传感器 .....	( 107 )
5.1.3 主要误差分析 .....	( 112 )
5.2 差动变压器式传感器 .....	( 113 )
5.2.1 工作原理 .....	( 113 )
5.2.2 $\Pi$ 形差动变压器的输出特性 .....	( 114 )
5.2.3 螺管形差动变压器 .....	( 116 )
5.2.4 角位移式差动变压器——四极微动同步器 .....	( 130 )
5.3 电涡流式传感器 .....	( 132 )
5.3.1 工作原理 .....	( 132 )
5.3.2 等效电路分析 .....	( 133 )
5.3.3 电涡流传感器的设计 .....	( 134 )
5.3.4 测量电路 .....	( 136 )
5.3.5 应用举例 .....	( 137 )
5.4 电感传感器和差动变压器的工程设计方法 .....	( 138 )
5.4.1 设计步骤 .....	( 139 )
5.4.2 设计举例 .....	( 141 )
<b>第六章 磁电式传感器</b> .....	( 144 )
6.1 概 述 .....	( 144 )
6.1.1 工作原理 .....	( 145 )
6.1.2 结构特点 .....	( 148 )
6.2 设计基础 .....	( 149 )
6.2.1 磁路计算 .....	( 149 )
6.2.2 工作气隙设计 .....	( 151 )
6.2.3 线圈组件设计 .....	( 152 )

6.2.4 固有频率的确定和弹簧刚度的计算	( 153 )
6.2.5 阻尼系数的计算	( 154 )
6.3 应用举例	( 155 )
<b>第七章 压电式传感器</b>	( 157 )
7.1 压电效应	( 157 )
7.1.1 石英晶体的压电效应	( 157 )
7.1.2 压电陶瓷的压电效应	( 158 )
7.1.3 压电常数和表面负荷的计算	( 159 )
7.2 压电材料	( 162 )
7.2.1 压电晶体	( 163 )
7.2.2 压电陶瓷	( 165 )
7.3 压电式传感器的等效电路	( 167 )
7.4 压电式传感器的测量线路	( 168 )
7.4.1 电压放大器	( 168 )
7.4.2 电荷放大器	( 171 )
7.5 压电式加速度传感器	( 172 )
7.5.1 工作原理	( 172 )
7.5.2 灵敏度	( 173 )
7.5.3 频响特性	( 174 )
7.5.4 结构与特点	( 176 )
7.6 压电式力和压力传感器	( 179 )
7.6.1 压电式力传感器	( 179 )
7.6.2 压电式压力传感器	( 180 )
7.6.3 压电式力传感器的加速度补偿	( 182 )
7.7 压电式传感器的误差	( 183 )
7.7.1 环境温度的影响	( 183 )
7.7.2 环境湿度的影响	( 184 )
7.7.3 横向灵敏度	( 185 )
7.7.4 基座应变的影响	( 185 )
7.7.5 声噪声	( 186 )
7.7.6 电缆噪声	( 186 )
7.7.7 接地回路噪声	( 186 )
<b>第八章 谐振式传感器</b>	( 187 )
8.1 基本知识	( 187 )
8.1.1 谐振现象的实质和力矢量图	( 187 )
8.1.2 品质因数 $Q$	( 188 )
8.1.3 谐振元件的刚度与谐振频率的关系	( 188 )
8.2 振动筒式传感器	( 189 )
8.2.1 结构特点与工作原理	( 189 )

8.2.2 振动频率与压力的关系	( 192 )
8.2.3 测量线路及线性化处理	( 193 )
8.2.4 误差分析与补偿方法	( 197 )
8.3 振动膜式传感器	( 199 )
8.3.1 工作原理	( 199 )
8.3.2 测量线路	( 200 )
8.4 振动弦式传感器	( 200 )
8.4.1 结构特点与工作原理	( 201 )
8.4.2 振动弦的固有频率与输出特性	( 202 )
8.4.3 测量线路	( 204 )
8.4.4 应用举例——振动弦式压力传感器	( 205 )
8.5 振动梁式传感器	( 205 )
8.5.1 工作原理	( 205 )
8.5.2 输出特性	( 207 )
<b>第九章 压阻式传感器</b>	( 208 )
9.1 概 述	( 208 )
9.2 晶向的表示方法	( 209 )
9.3 压阻系数	( 211 )
9.3.1 单晶硅的压阻系数	( 211 )
9.3.2 影响压阻系数大小的因素	( 215 )
9.4 压阻式传感器	( 217 )
9.4.1 压阻式压力传感器	( 217 )
9.4.2 压阻式加速度传感器	( 220 )
9.4.3 压阻式传感器的输出	( 221 )
9.5 扩散电阻的阻值与几何尺寸的确定	( 222 )
9.6 温度漂移的补偿	( 224 )
9.7 一种解算的输出线路	( 226 )
<b>第十章 热电式传感器</b>	( 228 )
10.1 热电势式测温传感器	( 228 )
10.1.1 热电偶测温原理	( 228 )
10.1.2 热电势的测量	( 229 )
10.1.3 热电偶冷端温度误差及其补偿	( 229 )
10.1.4 常用热电偶的特性	( 231 )
10.2 热电阻式温度传感器	( 231 )
10.2.1 金属测温电阻器	( 231 )
10.2.2 半导体热敏电阻器	( 232 )
10.3 其它测温传感器	( 234 )
10.3.1 磁式温度传感器	( 234 )
10.3.2 电容式温度传感器	( 234 )

10.3.3 利用晶体管特性的测温传感器 .....	( 235 )
10.3.4 光纤温度传感器 .....	( 235 )
10.3.5 色敏温度标记 .....	( 236 )
<b>第十一章 智能传感器</b> .....	( 237 )
11.1 概 述 .....	( 237 )
11.2 设计原则和结构框图 .....	( 238 )
11.2.1 正确选用微处理机( $\mu$ P) .....	( 238 )
11.2.2 智能传感器原理结构框图 .....	( 238 )
11.3 D/A、A/D 转换器与 $\mu$ P 接口技术 .....	( 241 )
11.3.1 D/A 转换器 .....	( 241 )
11.3.2 A/D 转换器与 $\mu$ P 的接口 .....	( 242 )
11.4 数据处理 .....	( 243 )
11.4.1 数据处理包含的内容 .....	( 243 )
11.4.2 数据处理的几个基本问题 .....	( 243 )
11.5 设计举例——智能压力传感器 .....	( 249 )
11.5.1 微处理机的选择 .....	( 249 )
11.5.2 硬件设计 .....	( 249 )
11.5.3 软件设计 .....	( 250 )
<b>第十二章 光纤传感器</b> .....	( 257 )
12.1 光 纤 .....	( 257 )
12.1.1 结构和种类 .....	( 257 )
12.1.2 传光原理 .....	( 258 )
12.1.3 光纤的集光能力 .....	( 260 )
12.1.4 传光损耗 .....	( 260 )
12.2 光纤传感器的分类 .....	( 262 )
12.3 功能型光纤传感器 .....	( 264 )
12.3.1 相位调制型光纤传感器 .....	( 264 )
12.3.2 光强调制型光纤传感器 .....	( 269 )
12.3.3 偏振态调制型光纤传感器 .....	( 271 )
12.4 非功能型光纤传感器 .....	( 272 )
12.4.1 传输光强调制型光纤传感器 .....	( 272 )
12.4.2 反射光强调制型光纤传感器 .....	( 277 )
<b>第十三章 其他传感器</b> .....	( 281 )
13.1 半导体光电传感器 .....	( 281 )
13.1.1 光敏电阻 .....	( 281 )
13.1.2 光敏二极管和光敏三极管 .....	( 285 )
13.1.3 半导体光电元件的应用 .....	( 289 )
13.2 霍耳传感器 .....	( 290 )
13.2.1 霍耳元件的工作原理、材料及结构特点 .....	( 290 )

13.2.2 电磁特性 .....	( 292 )
13.2.3 误差分析及误差补偿方法 .....	( 292 )
13.2.4 应用举例 .....	( 296 )
13.3 半导体气敏传感器 .....	( 297 )
13.3.1 半导体气敏元件分类 .....	( 297 )
13.3.2 表面控制型电阻式半导体气敏元件 .....	( 298 )
13.3.3 应用举例 .....	( 300 )
13.4 湿敏传感器 .....	( 301 )
13.4.1 电阻式湿敏传感器 .....	( 302 )
13.4.2 电容式湿敏传感器 .....	( 304 )
13.4.3 应用举例 .....	( 305 )
附录 国际单位制(SI)的主要单位及换算表 .....	( 306 )
参考文献 .....	( 310 )

# 第一章 传感器的一般特性

## 1.1 概 述

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动,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。传感器主要通过其两个基本特性——静态特性和动态特性来反映被测量的这种变动性。所谓静态特性是指当被测量的各个值处于稳定状态(静态测量下)时,传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当传感器制成后,可用实际特性反映传感器在当时使用条件下实际具有的静态特性。借实验方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准,校准时获得的静态特性称为校准特性。当校准使用的仪器设备有足够高的精度时,工程上常将校准曲线作为传感器的实际特性看待。多数情况下,可根据校准数据来合理地选择理论特性。取线性特性作为理论特性的传感器称为线性传感器。

测量是人类认识和改造客观世界的一种必不可少的重要手段。然而,传感器的实际输出值不可能分毫不差地反映被测量的真值,总存在着一定的误差。因此,需要先扼要讲清楚有关测量和误差的基本概念及定义。

1. **测量值** 从测量器具上直接反映或经过必要的计算所得到的量值。

2. **测量范围** 在允许误差范围内,测量装置测量被测量值的范围,测量范围的最高、最低值分别称为“上限值”和“下限值”。

3. **量程** 测量范围上下限值的代数差。

4. **真值** 被测的量客观存在的真实数值,量的真值是一个理想概念。常用与之接近的实际值来代替真值。

5. **绝对误差** 在当时使用条件下的实际特性(测量值  $M$ )与理论特性(真实值  $T$ )之间的偏差,即  $\Delta = M - T$ 。

6. **相对误差** 绝对误差与被测量的量的真值之比,一般用百分数表示,即

$$\delta = \frac{\Delta}{T} \times 100\%$$

7. **系统误差** 数值固定或按一定规律变化的误差。系统误差是有规律的,原则上可以修正或消除。

8. **随机误差** 这是由某些随机变化因素如机构的摩擦、元件的噪声等引起的误差,它指的是传感器在任一次测量中的输出值与实际特性间的偏差。

9. **不确定度** 这是一个描述尚未确定的误差特征的量,即表示被测量值不能被确定的数值范围,可有系统不确定度,随机不确定度及总不确定度。

10. **精密度** 反映随机误差大小的程度,表示多次重复测量时测得数值的分散程度。

11. **准确度** 反映系统误差大小的程度,表示测量结果与被测量真值之间的偏离程度。

12. **精确度** 反映系统误差和随机误差合成大小的程度，即测量的精密性与准确度的综合反映。

## 1.2 传感器的静态特性

任何实际传感器的输出与输入关系不会完全符合所要求的线性或非线性的关系，衡量传感器静态特性的重要指标有：线性度、迟滞、重复性和灵敏度等。

### 1.2.1 线性度

通常，为了标定和数据处理的方便，要求传感器的输出-输入关系呈线性，并能准确无误地反映被测量的真值。但实际上只有在理想情况下才有线性的静态特性。

传感器如果没有迟滞和蠕变效应，其静态特性可用下列多项式来表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_ix^i \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——输入量；  
 $y$ ——输出量；  
 $a_0$ ——零位输出；  
 $a_1$ ——传感器的灵敏度，常用  $k$  表示；  
 $a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项的待定常数；  
 $i = 1, 2, 3, \dots, n$

(1-1) 式即为传感器静态特性的数学模型。这种多项式可能有四种情况（见图 1-1）：

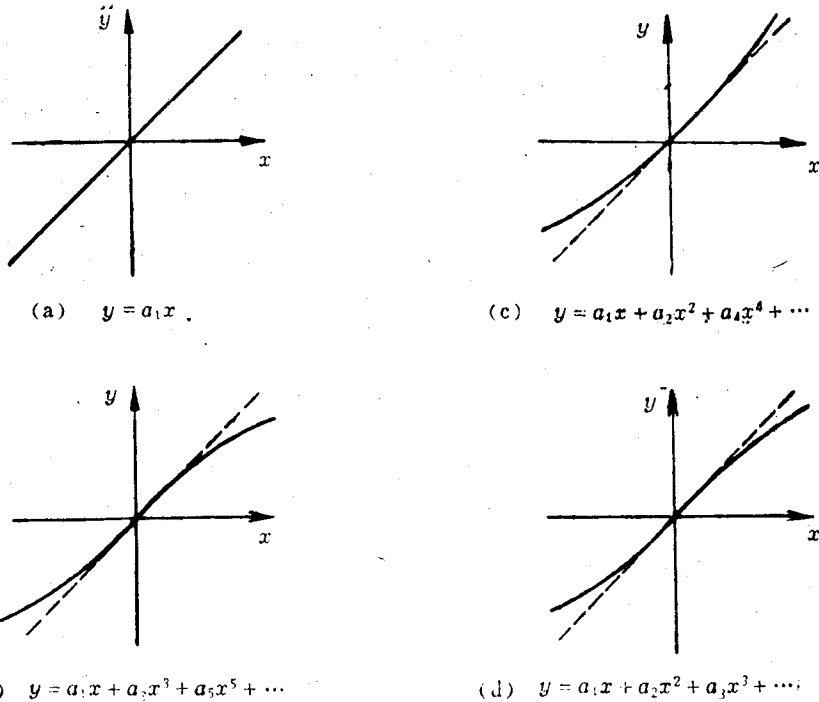


图 1-1 传感器的静态特性

- (a) 理想线性； (b) 只有奇次项的非线性；  
 (c) 只有偶次项的非线性； (d) 普遍情况下的非线性

a. 理想线性 [见图 1-1(a)] 在这种情况下,

$$a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$$

因此得到

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

因为直线上任何点的斜率都相等, 所以传感器的灵敏度为

$$a_1 = \frac{y}{x} = k = \text{常数} \quad (1-3)$$

b. 在原点附近相当范围内输出-输入特性基本成线性 [见图 1-1(b)] 在这种情况下, (1-1) 式只存在奇次项, 即

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \quad (1-4)$$

对应的特性曲线为:

$$y(x) = -y(-x)$$

c. 输出-输入特性曲线不对称, 这时, 在 (1-1) 式中非线性项只是偶次项, 即

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \quad (1-5)$$

对应的曲线如图 1-1(c) 所示。

d. 普遍情况 表达式就是 (1-1) 式, 对应的特性曲线示于图 1-1(d)。

实际运用时, 究竟要用几阶多项式才适合具体传感器的数学模型呢? 这是一个数据处理问题。建立数学模型的古典方法是分析法, 该法太复杂, 有时甚至很难进行。目前常利用校准数据来建立数学模型, 这种方法及理论很受人们重视, 并得到了发展。

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是指没有加速度、振动和冲击 (除非这些参数本身就是被测物理量); 环境温度一般为室温  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ; 相对湿度不大于 85%; 大气压力为 0.1MPa 的情况。在这样的标准工作状态下, 利用一定等级的校准设备, 对传感器进行往复循环测试, 得到的输出-输入数据一般用表格列出或画成曲线。

对于实际的传感器, 测出的输出-输入校准曲线与某一规定 (理论) 直线不吻合的程度, 在线性传感器中就称为该传感器的“非线性误差”, 或称“线性度”。常用相对误差表示其大小, 即传感器的正反行程平均校准曲线与线性理论直线之间的最大偏差绝对值对满量程 (F.S.) 输出之比 (%)

$$\xi_L = \frac{|(\Delta y_L)_{\max}|}{y_{\text{F.S.}}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中  $\xi_L$ ——非线性误差 (线性度);  
 $|(\Delta y_L)_{\max}|$ ——输出平均值与理论值的最大偏差绝对值;  
 $y_{\text{F.S.}}$ ——满量程输出。

满量程输出用测量上限标称值  $y_H$  与测量下限标称值之差的绝对值表示, 即

$$y_{\text{F.S.}} = |y_H - y_L|$$

由此可见, 非线性误差的大小是以一定的规定直线或理论直线作为基准直线而算出来的。因此, 基准直线不同, 得出的线性精度也不一样 (见图 1-2)。传感器校准时所得的数据总包括各种误差在内, 所以, 一般并不要求规定直线必须通过所有的测试点, 而只要找到一条能反映校准数据的一般趋势同时又使误差绝对值为最小的直线就行。

下面介绍几种不同线性度的定义和表示方法。应当指出, 由于采用的规定直线即理论直



线不同，线性度的定义就有差异。因此，在相同条件下对同一传感器作校准试验时，得出的非线性误差大小也就不一样，因而不能笼统地提线性度大小，必须说明其所依据的规定直线。

涉及到传感器的数据处理和精度计算的方法繁多，目前国内外都没有一个统一的方法，限于篇幅，不能一一列出，仅对我国航空工业部和航天工业部规定的线性度标准作些介绍。

### 一、理论线性度

理论线性度又称绝对线性度，表示传感器的实际输出校准曲线与理论直线之间的偏差程度。这里的理论直线与实际测试值无关。通常取零点(0%)作为理论直线的起始点，满量程输出(100%)为终止点，这两点的连线即为理论直线，如图1-3所示。图中，理论线性度为+1.4%F.S.和-0.8%F.S.。

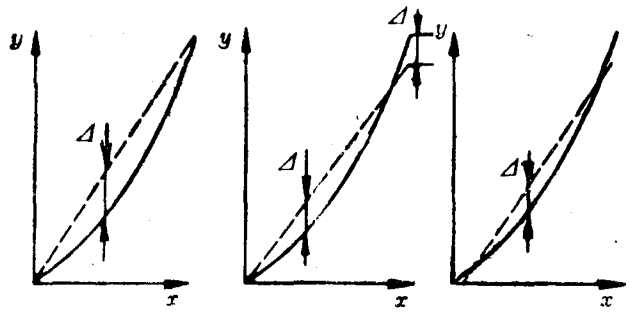


图1-2 不同拟合方法的理论直线

### 二、独立线性度

选择理论直线的一个简便方法是，在校准曲线循环中找出一条最佳平均直线，并使实际输出特性相对于所选理论直线的最大正偏差等于最大负偏差，如图1-4所示。可以看出，独立线性度为±1.1%F.S.。

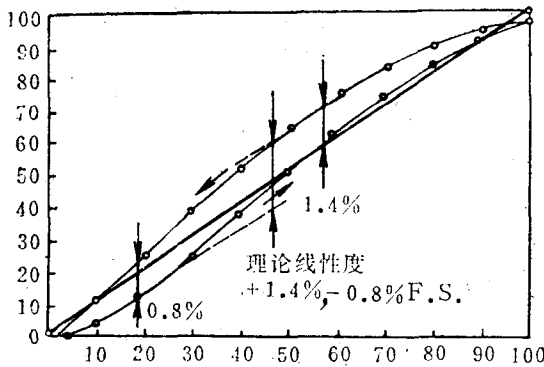


图1-3 理论线性度的理论直线

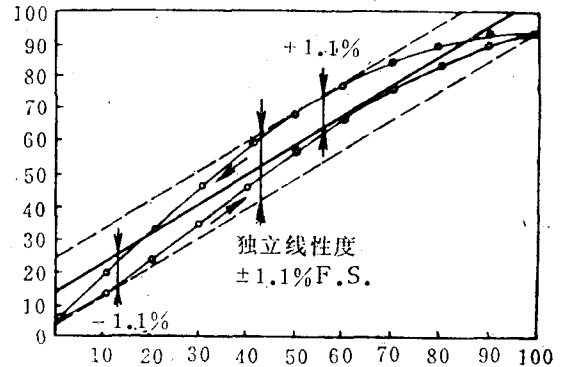


图1-4 独立线性度的理论曲线

在考虑独立线性度的情况下，非线性误差计算公式(1-6)应改写成

$$\xi_L = \pm \frac{|+(\Delta y_L)_{\max}| + |-(\Delta y_L)_{\max}|}{2y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-7)$$

### 三、端点连线平移线性度

端点连线指的是平均校准曲线对应于测量上、下限的两个端点的连接直线，如图1-5所示。端点连线的斜率为：

$$k = \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m - x_1} \quad (1-8)$$

式中  $x_1$ ——传感器测量下限；