

基于工作过程的项目教学法教材

传感器原理与应用

主 编 徐 军 冯 辉

副主编 陈宁宁 孙振伟 丁 琳

江苏财经职业技术学院

二〇一〇年八月

前 言

本书主要介绍在工业、科研等领域常用传感器的工作原理、特性参数、应用等知识，并对测量技术的基本概念、测试数据处理、现代测试技术及计算机接口技术等也作了介绍。

本书围绕“基于工作过程”的教学思路展开，根据传感器的转换原理进行讲解，传感器部分共分为十个项目单元，每个项目单元均以一个典型项目案例开篇，首先突出项目设计要求，然后根据项目要求得出相关知识点，并在相关知识讲解的基础上启发学生进行项目设计制作，并在每章最后给出项目的参考设计，阐明项目的制作和调试步骤，同时在书中插入大量的传感器实物图片，增强学生对传感器的感性认知。这样既可以有目的地讲解各类传感器的理论知识，也便于学生对于传感器应用项目的实践操作，同时方便教师按照传感器在项目中使用的实际工作过程进行教学。

本书项目单元1绪论，介绍了传感器的作用与定义、组成与分类、应用和发展，传感与检测技术的基础知识，传感器的基本特性，测量的基本概念和误差理论等；项目单元2~10分别从传感器的工作原理出发，分别介绍了电阻式、电感式、电容式、霍尔式、压电式、超声波、热电式、数字式、光电式等各类传感器的工作原理、性能、测量电路及应用以及各自典型的项目；项目单元11介绍了一些新型的传感器，以及现代检测系统，包括计算机检测系统的发展等内容。

本书可作为高职院校电类、自动化类、仪器仪表类、机电类等专业的教材，也可供其他专业如计算机、数控、机械、汽车、楼宇等专业的师生和工程技术人员参考。

本书由江苏财经职业技术学院徐军（项目单元4、7、11，统稿），冯辉（项目单元1、2、8），陈宁宁（项目单元5、6），孙振伟（项目单元3、9），丁琳（项目单元10）编著。在本书编写的过程中，还得到了学院和系领导，以及全系老师的大力支持；电子工业出版社的编辑工作认真负责，对本书的出版付出了很多，在此一并表示衷心的感谢。同时，编者对学习、写作过程中参考过的文献资料的作者深表感谢。

由于作者水平有限，以及传感器技术迅速发展，书中难免有欠妥和错误之处，恳请读者批评指正。

目 录

项目单元1 绪论—传感器检测技术基础	1
1.1 项目描述	1
1.2 课题基本知识点	1
1.2.1 测量的基本概念	1
1.2.2 传感器的基本知识	5
1.2.3 传感器信号处理电路	12
1.2.4 测量误差及分类	16
1.3 习题	23
项目单元2 电阻式传感器—酒精浓度检测仪的设计	25
2.1 项目描述	25
2.1.1 任务要求	25
2.1.2 相关知识点分析	26
2.2 相关知识	26
2.2.1 气敏电阻传感器	26
2.2.2 应变式电阻传感器	29
2.2.3 湿敏电阻传感器	37
2.3 电阻式传感器的认知	40
2.3.1 气敏电阻传感器认知	40
2.3.2 应变式电阻传感器认知	44
2.3.3 湿敏电阻传感器认知	45
2.4 项目参考设计方案	47
2.4.1 整体方案设计	47
2.4.2 电路设计	47
2.5 项目实施与考核	50
2.5.1 制作	51
2.5.2 调试	52
2.5.3 评价	53
2.6 习题	54
项目单元3 电感式传感器—金属探测器的设计	56
3.1 项目描述	56
3.1.1 任务要求	56
3.1.2 相关知识点分析	56
3.2 相关知识	57
3.2.1 变磁阻式传感器	57
3.2.2 差动变压器式传感器	62

3.2.3 电涡流式传感器	71
3.3 电感式传感器的认知	77
3.3.1 变磁阻式传感器	77
3.3.2 差动变压器式传感器	78
3.3.3 电涡流式传感器	78
3.4 项目参考设计方案	79
3.4.1 整体方案设计	79
3.4.2 电路设计	79
3.5 项目实施与考核	81
3.5.1 制作	82
3.5.2 调试	84
3.5.3 评价	84
3.6 习题	85
项目单元4 电容式传感器—差压变送器的使用训练	87
4.1 项目描述	87
4.1.1 任务要求	88
4.1.2 相关知识点分析	88
4.2 电容式传感器相关知识	88
4.2.1 电容传感器工作原理及结构形式	88
4.2.2 电容传感器常用测量电路	93
4.2.3 电容式传感器的基本应用	96
4.3 电容式传感器的认知	99
4.4 项目参考实施方案	101
4.5 项目实施与考核	101
4.5.1 差压变送器选型	101
4.5.2 安装训练	104
4.5.3 调试	106
4.5.4 注意事项	107
4.5.5 安装训练	107
4.5.6 评价	107
4.6 习题	108
项目单元5 霍尔传感器—转速检测仪的设计	110
5.1 项目描述	110
5.1.1 任务要求	110
5.1.2 相关知识点分析	110
5.2 相关知识	111
5.2.1 霍尔传感器传感器工作原理及结构形式	111
5.2.2 霍尔集成电路	120

5.2.3 霍尔传感器的应用·····	122
5.3 传感器的认知·····	128
5.4 项目参考设计方案·····	130
5.4.1 整体方案设计·····	130
5.4.2 电路设计·····	131
5.5 项目实施与考核·····	132
5.5.1 制作·····	132
5.5.2 调试·····	134
5.5.3 评价·····	134
5.6 思考与练习·····	135
项目单元6 压电传感器—加速度测量仪设计制作·····	136
6.1 项目描述·····	136
6.1.1 任务要求·····	136
6.1.2 相关知识点分析·····	136
6.2 相关知识·····	137
6.2.1 压电式传感器的理论基础·····	137
6.2.2 压电材料的分类及特性·····	138
6.2.3 等效电路和测量电路·····	148
6.3 传感器的认知·····	155
6.4 项目参考设计方案·····	158
6.4.1 整体方案设计·····	158
6.4.2 电路设计·····	158
6.5 项目实施与考核·····	159
6.5.1 制作·····	159
6.5.2 调试·····	160
6.5.3 评价·····	161
6.6 习题·····	161
项目单元7 超声波传感器—超声波测距仪的设计制作·····	163
7.1 项目描述·····	163
7.1.1 任务要求·····	163
7.1.2 相关知识点分析·····	163
7.2 相关知识·····	163
7.2.1 超声波的基本知识·····	163
7.2.2 超声波传感器材料与结构·····	167
7.2.3 超声波传感器的应用·····	170
7.3 超声波传感器的认知·····	176
7.4 项目参考设计方案·····	178
7.4.1 超声波测距的原理·····	178

7.4.2 超声波测距参考设计方案·····	179
7.5 项目实施与考核·····	184
7.5.1 制作·····	184
7.5.2 调试·····	186
7.5.3 评价·····	186
7.6 习题·····	187
项目单元8 热电式传感器—热水器加热炉温度检测单元设计制作·····	188
8.1 项目描述·····	188
8.1.1 项目要求·····	188
8.1.2 相关知识点分析·····	189
8.2 相关知识·····	189
8.2.1 温度测量的基本概念·····	189
8.2.2 热电偶传感器的工作原理及实用电路·····	192
8.2.3 金属热电阻传感器的工作原理及实用电路·····	207
8.2.4 热敏电阻传感器的工作原理及实用电路·····	212
8.3 热电式传感器认知·····	216
8.3.1 热电偶认知·····	216
8.3.2 金属热电阻传感器认知·····	217
8.3.3 热敏电阻传感器的认知·····	218
8.4 项目参考设计方案·····	221
8.4.1 整体方案设计·····	221
8.4.2 电路设计·····	221
8.5 项目实施·····	223
8.5.1 制作·····	223
8.5.2 调试·····	224
8.5.3 评价·····	225
8.6 习题·····	226
项目单元9 光电传感器—光电开关的应用·····	228
9.1 项目描述·····	228
9.1.1 任务要求·····	228
9.1.2 相关知识点分析·····	228
9.2 相关知识·····	228
9.2.1 外光电效应·····	229
9.2.2 内光电效应·····	229
9.2.3 光敏电阻·····	230
9.2.4 光敏二极管和光敏晶体管·····	234
9.2.5 光电池·····	238
9.2.6 光电耦合器件·····	240

9.3 光电传感器的认知·····	242
9.3.1 光敏电阻认知·····	242
9.3.2 光敏传感器认知·····	243
9.4 项目参考设计方案·····	244
9.4.1 整体方案设计·····	244
9.4.2 电路设计·····	244
9.5 项目实施与考核·····	245
9.5.1 制作·····	245
9.5.2 调试·····	246
9.5.3 评价·····	247
9.6 习题·····	248
项目单元10 数字式传感器—传感器在数控机床中的应用 ·····	249
10.1 项目描述·····	249
10.1.1 任务要求·····	249
10.1.2 相关知识点分析·····	250
10.2 相关知识·····	250
10.2.1 数字式编码器·····	250
10.2.2 光栅传感器·····	254
10.2.3 磁栅传感器·····	259
10.2.4 感应同步器·····	261
10.3 数字传感器的应用实例·····	265
10.3.1 位置及转速测量·····	265
10.3.2 机械位移的测量·····	268
10.4 传感器在数控机床中的综合应用实例·····	272
10.5 习题·····	277
项目单元11 新型传感器—现代检测系统发展简介 ·····	278
11.1 项目描述·····	278
11.2 几种新型传感器·····	278
11.2.1 光纤传感器·····	278
11.2.2 图像传感器·····	286
11.2.3 红外检测·····	294
11.3 现代检测系统组成与发展简介·····	298
11.3.1 传感器的智能化·····	299
11.3.2 传感器的微型化·····	302
11.3.3 传感器的网络化·····	304
11.4 习题·····	309

项目单元 1 绪论--传感器检测技术基础

1.1 项目描述

检测是指在各类生产、科研、试验及服务各个领域，为及时获得被测、被控对象的有关信息而实时或非实时地对一些参量进行定性检查和定量测量。

对工业生产而言，采用各种先进的检测技术对生产全过程进行检查、监测，对确保安全生产，保证产品质量，提高产品合格率，降低能源和原材料消耗，提高企业的劳动生产率和经济效益是必不可少的。在工程实践中经常碰到这样的情况：某个新研制的检测（仪器）系统在实验室调试时测得的精度已达到甚至超过设计指标，但一旦安装到环境比较恶劣、干扰严重的工作现场，其实测精度却往往大大低于实验室能达到的水平，甚至出现严重超差和无法正常运行的情况。设计人员需要根据现场测量获得的数据，结合该检测系统本身的静、动态特性，检测系统与被测对象的现场安装、连接情况及现场存在的各种噪声情况等进行分析。找出影响和造成检测系统实际精度下降的种种原因，然后对症下药，采取相应改进措施，直至该检测系统的实际测量精度和其他性能指标全部达到设计指标，这就是通常所说的现场调试过程。只有现场调试过程完成后，该检测系统才能投入正常运行。可见，“检测”通常是指在生产、实验等现场，利用某种合适的检测仪器或综合测试系统对被测对象的某些重要工艺参数（如温度、压力、流量、物位等）进行在线、连续的测量。

传感器用于非电量的检测，检测的目的不仅是为了获得信息或数据，在一定程度上讲更主要是为了生产和研究的需要。因此检测系统的终端设备应该包括各种指示、显示和记录仪表，以及可能的各种控制用的伺服机构或元件。

测量精度（高、低）从概念上与测量误差（小、大）相对应，目前误差理论已发展成为一门专门学科，涉及内容很多。为适应读者的不同需要和便于后面各章的介绍，下面对测量的定义和过程、测量方法的分类及其特点，测量误差产生的原因、表示方法、性质及处理方法；测量数据的处理及测量结果的评价作一简单介绍。

1.2 课题基本知识点

1.2.1 测量的基本概念

1. 测量的定义

测量就是借助于专门的技术工具或手段，通过实验的方法，把被测量与同性质的标准量进行比较，求取二者比值，从而得到被测量数值大小的过程。其数学表达式为

$$x = A_x A_\theta \quad (1-1)$$

式中， x 为被测量； A_θ 为测量的单位名称； A_x 为被测量的数据。

式 (1-1) 称为测量的基本方程式。它说明被测量值的大小与测量单位有关，单位愈小数值愈大。因此，一个完整的测量结果应包含测量值 A_x 和所选测量单位 A_θ 两部分内容。

测量的目的是为了准确地获取表征被测对象特征的某些参数的定量信息。然而测量过程中难免要存在各种误差，因此测量结果不仅要能确定被测量的大小，或与另一变量的相互关系，而且要说明其误差的大小，给出可信程度。这就需要 对实验结果进行数据处理与误差分析。只有如此，才能掌握被测对象的特性和规律，以控制某一过程，或对某事做出决策。

综上所述，测量技术的含义可包括下述全过程：按照被测对象的特点，选用合适的测量仪器与实验方法；通过测量数据的处理和误差分析，准确得到被测量的数值，为提高测量精度而改进实验方法及测量仪器，从而为生产过程的自动化等提供可靠的依据。

2. 测量的单位

数值为 1 的某量，称之该量的测量单位或计量单位。由于测量单位是人为定义的，它带有任意性、地区性和习惯性。因此，单位的统一既是必要的又是艰巨的；它将给人们的生活、生产和科学技术的发展带来极大的方便。我国早在秦朝就有了“统一度量衡”的创举。1984 年 2 月 27 日国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，并同时颁布了《中华人民共和国法定计量单位》，它以国际单位为基础并保留了一些暂时并用单位。

国际 (SI) 单位制是 1960 年第十一届国际计量大会通过的，它包括 SI 单位、SI 词头和 SI 单位的十进制倍数单位。其中 SI 单位包括基本单位、辅助单位和导出单位。

基本单位有 7 个：长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度，它们都经过严格的定义，是 SI 单位制的基础。辅助单位有 2 个：平面角和立体角，是指尚未规定属于基本单位还是导出单位，可以用来构成导出单位。导出单位是由基本单位根据选定的、联系相应量的代数式组合起来的单位。此外，还有具有专门名称的单位（如牛顿）和用专门名称导出的单位。常见物理量的 SI 单位可查阅相关手册。单位的符号用拉丁字母表示，一般用小写体，但具有专门名称的单位符号用大写体，符号后面都不加标点。

国际单位制规定了 SI 单位的十进倍数单位和分数单位的词冠和符号，可查阅相关手册。

3. 测量方法的分类

测量方法是指被测量与其单位进行比较的实验方法。按不同的分类方法进行分类可得到不同的分类结果。

(1) 按测量过程的特点分类

1) 直接测量法 直接测量是针对被测量选用专用仪表进行测量,直接获取被测量数值的过程。如用温度计测温度、电位差计测电动势等。按照所用仪表和比较过程特点可分为偏差法、零位法和微差法。

① 偏差法 用事先分度(标定)好的测量仪表进行测量,根据被测量引起显示器的偏移值直接读取被测量的值。它是工程上应用最广泛的测量方法。

② 零位法 将被测量 x 与某一已知标准量 s 完全抵消,使作用到测量仪表上的效应等于零。如天平、电位差计等。由此可知 $x=s$,测量精度主要取决于标准量的精度,与测量仪表的精度无关。因而测量精度很高,在计量工作中应用很广。

③ 微差法 将零位法和偏差法结合起来,把被测量的大部分抵消,选用灵敏度较高的仪表测量剩余部分的数值,被测量便等于标准量和仪表偏差值之和。如天平上的游标、电位差计上的毫伏表等。与偏差法相比,它可以得到较高的精度;与零位法相比,它可以省去微进程的标准量。

2) 间接测量法 用直接测量法测得与被测量有确切函数关系的一些物理量,然后通过计算求得被测量值的过程称为间接测量。例如测量电压 U 和电流 I 而求功率 $P=UI$ 的过程。

(2) 按测量仪表的特点分类

按测量仪表特点进行分类,可分为接触测量法和非接触测量法。

1) 接触测量法 传感器直接与被测对象接触,承受被测参数的作用,感受其变化,从而获得信号,并测量其信号大小的方法,称为接触测量法。例如用体温计测体温等。

2) 非接触测量法 传感器不与被测对象直接接触,而是间接承受被测参数的作用,感受其变化,从而获得信号,并测量其信号大小的方法,称为非接触测量法。例如用辐射式温度计测量温度,用光电转速表测量转速等。非接触测量法不干扰被测对象,既可对局部点检测,又可对整体扫描。特别是对于运动对象、腐蚀性介质及危险场合的参数检测,它更方便、安全和准确。

(3) 按测量对象的特点分类

按测量对象特点进行分类,可分为静态测量法和动态测量法。

1) 静态测量法 静态测量是指被测对象处于稳定情况下的测量。此时被测

参数不随时间而变化，故又称稳态测量。

2) 动态测量法 动态测量是在被测对象处于不稳定的情况下进行的测量。此时被测参数随时间而变化。因此，这种测量必须是在瞬时完成，才能得到动态参数的测量结果。

运动是绝对的。被测参数多是随时间变化的，因此过程检测实际上是动态测量。但如果被测参数随时间变化很缓慢，而测量所需时间相对又很短时，可近似为稳态测量。这种近似也是产生测量误差的原因之一。

此外，从被测参数分布来看，还有点参数测量法和场参数测量法。前者是指对被测对象某个局部点的参数进行测量；后者是指测量被测对象某个参数的平面分布或空间分布。

由于动态测量和场参数测量属于专门研究课题，本书仅考虑稳态的点参数的检测。

4. 自动检测系统

现代社会中使用的测量大部分是由自动检测系统来实现的。检测和测量又不同的两个概念。检测 (Detection) 是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。能够自动地完成整个检测处理过程的系统就是自动检测系统。

自动检测系统目前多是针对非电量使用电测量的方法，即首先将各种非电量转变为电量，然后经过一系列的处理，将非电量显示或者按照要求输出执行。其系统框图如图 1.0 所示。

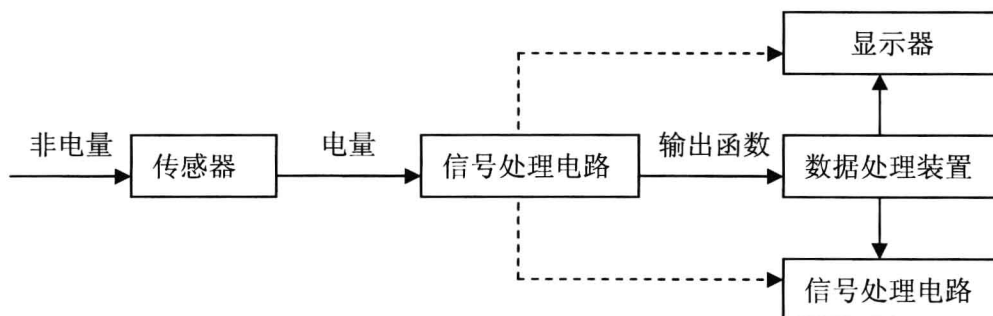


图 1.0 自动检测系统的框图

(1) 传感器

传感器在自动检测系统中就是能把被测的非电量转换成电量的器件。

(2) 信号处理电路

把传感器输出的电量变成具有一定要求的电压或电流信号的推动后读显示电路或执行机构，数据处理电路，以及显示器等。

(3) 显示器

显示器有很多种，也是自动检测系统常见的输出方式。主要有模拟显示，数字显示，图像显示及记录仪。模拟显示就是指针对标尺的相对位置读数；数字显示是指 LED 发光数码管或者 LCD 液晶显示；而图像显示主要是用 CRT 或者 LCD 屏幕显示读数被测量参数曲线图表。最后记录仪是被测量的动态变化过程，笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打字机。

(4) 数字处理装置

数据处理装置是用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换，对动态测试结果做频谱分析、相关分析等，完成这些工作必须采用计算机技术，现在有很多嵌入式设备内部使用大部分是专用的 DSP 芯片。

数据处理的结果通常送到显示器和执行机构中去，以显示运算处理的各种数据或控制各种被控对象。在不带数据处理装置的自动检测系统中，显示器和执行机构也可以由信号处理电路直接驱动，如图 1-0 中虚线所示。

(5) 执行机构

所谓执行机构通常指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电机等，它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号，作为自动控制系统的控制信号，去驱动这些机构。

1.2.2 传感器的基本知识

1. 传感器的定义及组成

传感器是一种以测量为目的，以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系，以便于处理和应用的某种物理量的测量装置。传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。

依照我国国家标准的规定，传感器的定义是：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，通常由敏感元件和转换元件组成。其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；转换元件是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。

传感器的定义包含了几方面的意思：

- ①传感器是一种测量装置，能完成检测任务；
- ②它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量，生物量等；
- ③它的输出量是某种物理量，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量；
- ④输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

从广义角度出发，传感器指的是在电子检测控制设备输入部分中起检测信号

作用的组件。

传感器实现非电量的电测具有以下优点：

- ① 可进行微量检测，精度高，反应速度快。
- ② 可实现远距离遥测及遥控。
- ③ 可实现无损检测。测量安全可靠。
- ④ 能连续进行测量、记录及显示。
- ⑤ 能采用计算机技术对测量数据进行运算，存储及信息处理。

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成，其组成框图如图 1.1 所示。



图 1.1 传感器组成框图

(1) 敏感元件 敏感元件是直接感受被测量，并输出与被测量构成有确定关系、更易于转换为某一物理量的元器件。图 1.2 所示是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 下半部与壳体 1 固定连接，上半部通过连杆与磁心 4 相连，磁心 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 P_a 相通，内部感受被测压力 P 。当 P 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

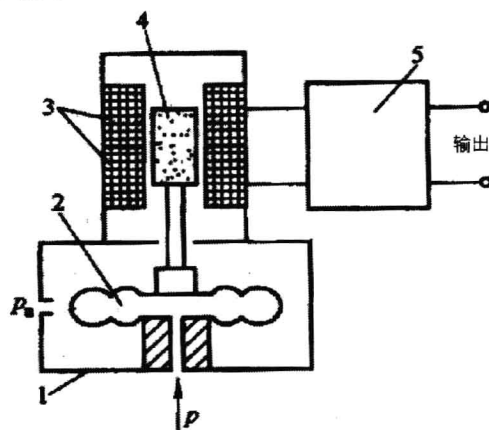


图 1.2 压力传感器示意图

1-固定连接 2-膜盒 3-电感线圈 4-磁心 5-转换电路

(2) 转换元件 敏感元件的输出就是转换元件的输入，它把输入转换成电路参数量。在图 1.2 中，转换元件是可变电感 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

(3) 转换电路 上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

应该指出，不是所有的传感器均由以上三部分组成。最简单的传感器是由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，而没有转换电路，如压电式加速度传感器，其中质量块是敏感元件，压电片（块）是转换元件。有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。另外，一般情况下，转换电路后续电路，如信号放大、处理、显示等电路就不应包括在传感器的组成范围之内。

2. 传感器的分类

目前传感器主要有几种分类方法：根据传感器工作原理分类法；根据传感器能量转换情况分类法；根据传感器转换原理分类法和按照传感器的使用分类法。

常用的分类方法有：

(1) 按被测量分类 可分为位移、力、力矩、转速、振动、加速度、温度、压力、流量、流速等传感器。

(2) 按测量原理分类 可分为电阻、电容、电感、光栅、热电偶、超声波、激光、红外、光导纤维等传感器。

表 1.1 是按传感器转换原理分类给出了各类型的名称及典型应用。各种传感器由于原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，其技术指标也不可能相同。但是有些一般要求却基本上是共同的，例如：①可靠性；②静态精度；③动态性能；④抗干扰能力；⑤通用性；⑥小的轮廓尺寸；⑦低成本；⑧低能耗等，其中传感器的工作可靠性、静态精度和动态性能是最基本的要求。

表 1.1 传感器分类表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参数	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应（电阻温度系数）	热线传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
	利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度	
	电容	改变电路几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移

		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、硬度
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
电参数	电感	改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
改变互感		感应同步器		
利用数字编码		角度编码器		
数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移	
电量	电动势	温差电动势	热电偶	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压力电效应	压电传感器	动态力、加速度

3. 传感器的基本特性

传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系，它有静态、动态之分。静态特性是指当输入量为常量或变化极慢时，即被测量各个值处于稳定状态时的输入输出关系。动态特性是指输入量随时间变化的响应特性。由于动特性的研究方法与控制理论中介绍的研究方法相似，故在本教材中不再重复，这里仅介绍传感器静特性的一些指标。

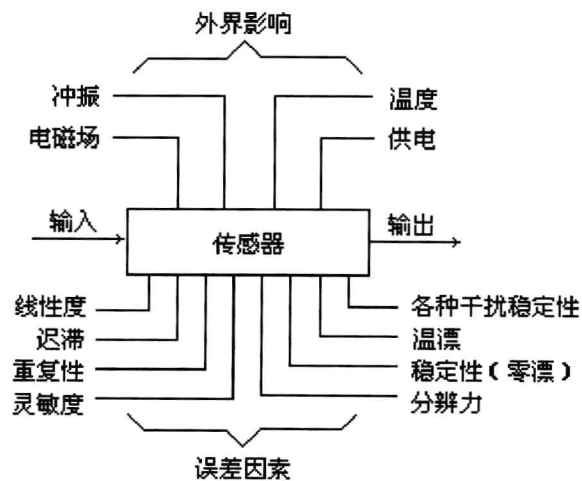


图 1.3 传感器的输入输出作用图

研究传感器总希望输出与输入成线性关系，但由于存在着误差因素、外界影响等，输入输出不会完全符合所要求的线性关系。传感器输入输出作用图如图 1.3 所示。图中的误差因素就是衡量传感器静态特性的主要技术指标。

(1) 灵敏度与灵敏度误差

传感器在稳态标准条件下，输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变量 Δx 的比值称之为灵敏度，用 K 表示，其表达式为：

$$K = \frac{\text{输出的变化量}}{\text{输入的变化量}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

由此可见，线性传感器其特性的斜率处处相同，灵敏度 K 是一常数。以拟合直线作为其特性的传感器，也认为其灵敏度为一常数，与输入量的大小无关。

由于某种原因，会引起灵敏度发生变化，产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示，即：

$$\gamma_s = \frac{\Delta K}{K} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 线性度

静特性曲线可由实际测试获得，在得到特性曲线后，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系。这时可采用各种方法进行线性化处理，一般在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

所谓的线性度也称非线性误差，是指传感器实际特性曲线与拟合直线（也称理论直线）之间的最大偏差与传感器满量程输出的百分比，如图 1.4 所示。它常常用相对误差 γ_L 来表示，即

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 ΔL_{\max} --- 非线性最大偏差

$y_{\max} - y_{\min}$ --- 输出范围

拟合直线的选取有多种方法，常用的拟合方法有：①理论拟合；②过零旋转拟合；③端点拟合；④端点平移拟合；⑤最小二乘拟合等。选择拟合直线的主要出发点应是获得最小的非线性误差，还要考虑使用是否方便，计算是否简便。图 1-4 是选取端点拟合方法，即将传感器输出起始点与满量程点连接起来的直线作为拟合直线，因而得出的线性度称为端点线性度。

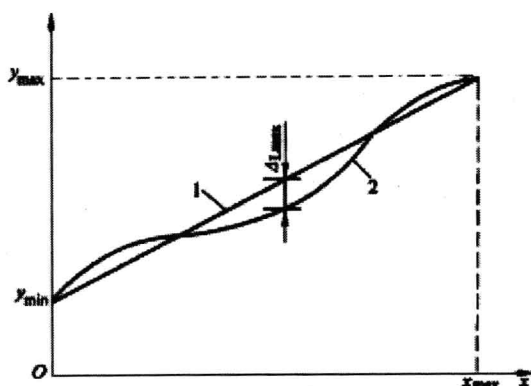


图 1.4 传感器线性度示意图

1—拟合直线 $y = ax + b$ 2—实际输出特性曲线

设计者和使用者总希望非线性误差越小越好，即希望仪表的静态特性近于直线，这是因为线性仪表的分度是均匀的，容易标定，也不容易引起读数误差。检测系统的线性误差多采用计算机来纠正。

(3) 迟滞特性

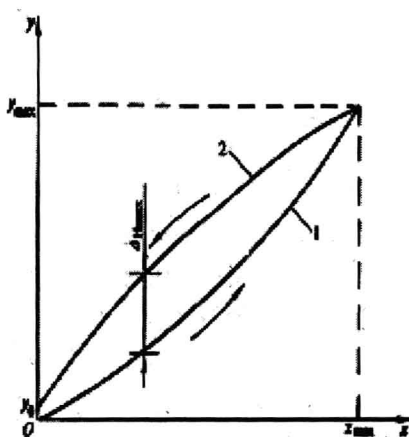


图 1.5 迟滞特性示意图

1—正行程特性 2—反行程特性

传感器在正（输入量增大）、反（输入量减小）行程中输入输出曲线不重合的现象称为迟滞性，如图 1-5 所示，它一般由实验方法获得，表达式为：

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 ΔH_{\max} ---正反行程间输出的最大差值；

y_{\max} ---满量程输出。

必须指出，正反行程的特性曲线是不重合的，且反行程特性曲线的终点与正行程特性曲线的起点也不重合。迟滞会引起分辨变差，或造成测量盲区，故一般希望迟滞越小越好。