

# 项目单元 1 绪 论

## ——传感器与检测技术基础

### 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，其测量精度却往往大大低于实验室能达到的水平，甚至出现严重误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综合分析，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单元的介绍，本单元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等作简单介绍；并引入自动检测系统的概念和传感器定义及其相关参数。

### 1.2 相关知识

#### 1.2.1 测量的基本概念

##### 1. 测量的定义

测量就是借助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； $A_\theta$  为测量的单位名称； $A_x$  为被测量的数值。

式 (1-1) 称为测量的基本方程式。它说明被测量数值的大小与测量单位有关，单位越小，数值越大。因此，一个完整的测量结果应包含测量数值  $A_x$  和所选测量单位  $A_\theta$  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。只有这样，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，测量技术的含义包括下述过程：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。

国际单位制 (SI) 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，但是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。检测和测量又是不同的两个概念。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换为电量，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 1.1 所示。

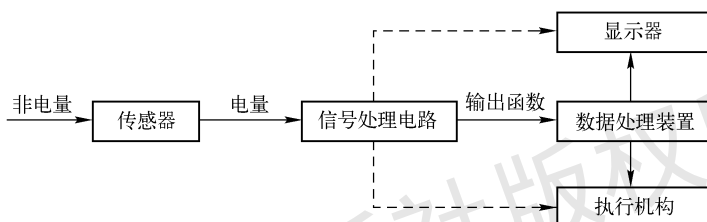


图 1.1 自动检测系统的框图

(1) 传感器。传感器在自动检测系统中就是把被测的非电量转换成电量的器件。

(2) 信号处理电路。它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，再驱动显示电路或执行机构，如数据处理电路、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 屏幕显示被测量参数曲线图表；记录仪是记录被测量的动态变化过程，如笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打字机。

(4) 数据处理装置。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，现在很多嵌入式设备内部多使用专用的 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 1.1 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，它们是电路中起通断、控制、调节、保护等作用的电气设备。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 1.2 所示。

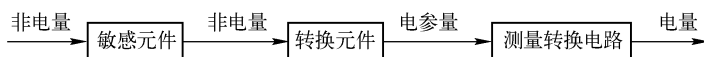


图 1.2 传感器组成框图

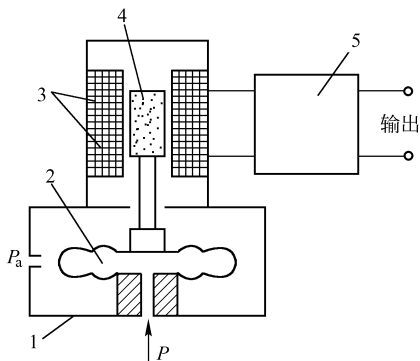
(1) 敏感元件。敏感元件是直接感受被测量，并输出与被测量构成有确定关系、更易于转换为某一物理量的元器件。图 1.3 所示是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 下半部与壳体 1 固定连接，上半部通过连杆与磁芯 4 相连，磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力  $P_0$  相通，内部感受被测压力  $P$ 。当  $P$  变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

(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 1.3 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，转换元件不只是一个，要经过若干次转换。另外，一般情况下，转换电路的后续电路，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。



1—固定连接；2—膜盒；3—电感线圈；4—磁芯；5—转换电路

图 1.3 压力传感器示意图

## 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相同的，如可靠性、静态精度、动态性能、抗干扰能力、通用性、小的轮廓尺寸、低成本、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	移动电感器触点改变电阻	电感器传感器	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

续表

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	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	电势	温差电势	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。

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，输入与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 1.4 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。

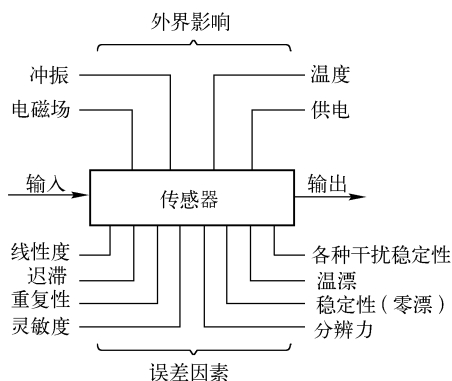


图 1.4 传感器的输入/输出作用图

### 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  $\Delta y$  与引起该变化量的输入变量  $\Delta x$  的比值称之为灵敏度，用  $K$  表示，其表达式为

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

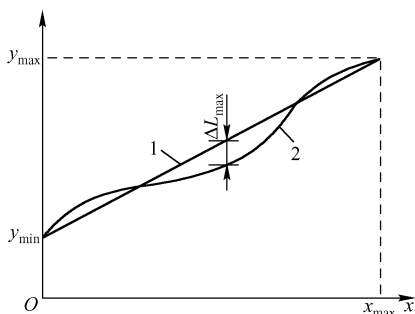
由此可见，线性传感器其特性斜率处处相同，灵敏度  $K$  是一常数。以拟合直线作为其特性的传感器，也认为其灵敏度为一常数，与输入量的大小无关。

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。



1—拟合直线；2—实际输出特性曲线

图 1.5 传感器线性度示意图

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 1.5 所示。它常用相对误差  $\gamma_L$  来表示，即

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

式中： $\Delta L_{\max}$ ——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：理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合、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 1.5 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。

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

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 1.6 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： $\Delta H_{\max}$ ——正反行程间输出的最大差值；

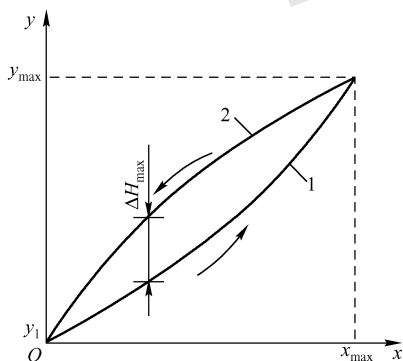
$y_{\max}$ ——满量程输出。

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。迟滞会引起分辨力变差，或造成测量盲区，故一般希望迟滞越小越好。

### 4) 重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向做全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。图 1.7 所示为校曲线的重复特性，正行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ ，反行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个最大偏差中较大的为  $\Delta R_{\max}$ ，再以满量程输出  $y_{\max}$  的百分比表示，即

$$\gamma_R = \frac{\Delta R_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-6)$$



1—正行程特性；2—反行程特性

图 1.6 迟滞特性示意图

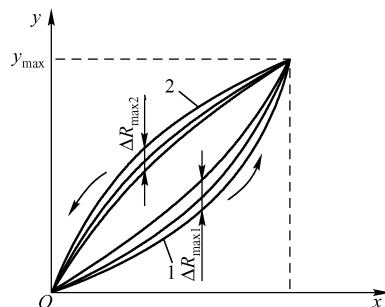


图 1.7 重复特性

### 5) 分辨力与阈值

分辨力是指传感器能检测到被测量的最小增量。分辨力可用绝对值表示，也可用与满量程的百分数表示。当被测量的量的变化小于分辨力时，传感器对输入量的变化无任

何反应。

在传感器输入零点附近的分辨力称为阈值。

对数字仪表而言，如果没有其他附加说明，一般可认为该仪表的最末位的数值就是该仪表的分辨力。

#### 6) 稳定性

稳定性包括稳定度和环境影响量两方面。稳定度是指传感器在所有条件均不变的情况下，能在规定的时间内维持其示值不变的能力。稳定度以示值的变化量与时间长短的比值来表示。例如，某传感器中仪表输出电压在 4h 内的最大值为 1.2mV，则用  $1.2\text{mV}/(4\text{h})$  表示其稳定度。

环境影响量是指由外界环境变化而引起的示值的变化量。示值变化由两个因素组成：零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移是指在受外界环境影响后，已调零的仪表的输出不再为零。一般漂移的现象在测量前是可以发现的，应重新调零，但在不间断测量过程中，零点漂移是附加在读数上的，因而很难发现。带微机的智能化仪表可以定时地自动暂时切断输入信号，测出此时的零点漂移值，恢复测量后从测量值中减去漂移值，相当于重新调零。灵敏度漂移使仪表的输入与输出的曲线斜率发生变化。

造成环境影响量的因素很多，要予以重视，使传感器对外界各种干扰有抵抗能力。

### 1.2.3 传感器信号处理电路

传感器的信号处理与传感器接口电路是相互关联、不可分割的两个部分，往往将传感器的接口电路设计成具有一定的信号处理功能来实现信号处理。

#### 1. 数据采集系统的组成

传感器输出的信号经预处理变为模拟电压信号后，需转换成数字量方能进行数字显示或送入计算机。这种模拟信号数字化的过程称为数据采集。

典型的数据采集系统由传感器、放大器、模拟多路开关 (MUX)、采样保持器、A/D 转换器、计算机或数字逻辑电路组成。根据它们在电路中的位置可分为同时采集、高速采集、分时采集和差动结构四种配置，如图 1.8 所示。图 1.8 (a) 为同时采集系统配置方案，可对各通道传感器输出量进行同时采样保持、分时转换和存储，可保证获得各采样点同一时刻的模拟量。图 1.8 (b) 为分时采集方案，这种系统价格便宜，具有通用性，传感器与仪表放大器匹配灵活，有的已实现集成化，在高精度、高分辨率的系统中，可降低放大器和 A/D 转换器的成本，但对 MUX 的精度要求很高，因为输入的模拟量往往是微伏级的。这种系统每采样一次便进行一次 A/D 转换，送入内存后方才 对下一采样点采样。这样，每个采样点值间存在一个时差 (几十到几百微秒)，使各通道采样值在时间轴上产生扭斜现象。输入通道数越多，扭斜现象越严重，因此不适于采集高速变化的模拟量。图 1.8 (c) 为高速采集配置方案。对多个模拟信号的同时实时测量很有必要。显然，图 1.8 (a)、图 1.8 (b) 两种方案的成本较高，但是在 8 ~ 10 位以下的较低精度系统中，经济上也尚划算。在各输入信号以一个公共点为参考点时，公共点可能与放大器和 A/D 转换器的参考点处于不同电位而引入干扰电压  $U_N$ ，从而造

成测量误差。采用如图 1.8 (d) 所示的差动配置方式可抑制共模干扰，其中 MUX 可采用双输出器件，也可用两个 MUX 并联。

## 2. 传感器输出信号的特点和预处理方法

### 1) 传感器输出信号的特点

传感器输出信号一般比较微弱，所以信号的检测通常都要经过放大器，以增大信号幅值，适应进一步处理的要求。其次在各种仪器仪表和控制系统中，与被测量或被控量有关的参量，往往是一些与时间成连续函数关系的模拟量，如温度、压力、流量、速度、位移等。在数字化测量及数字处理系统中，尤其是采用微机进行实时数据处理和实时控制时，所加工的信息总是数字量，所以都需要将输入的模拟量转换成数字量。另外在实际应用中，有些因素影响测量系统或测量装置的精度和线性度，使传感器输出信号产生误差，为此需要采取相应的措施加以补偿。

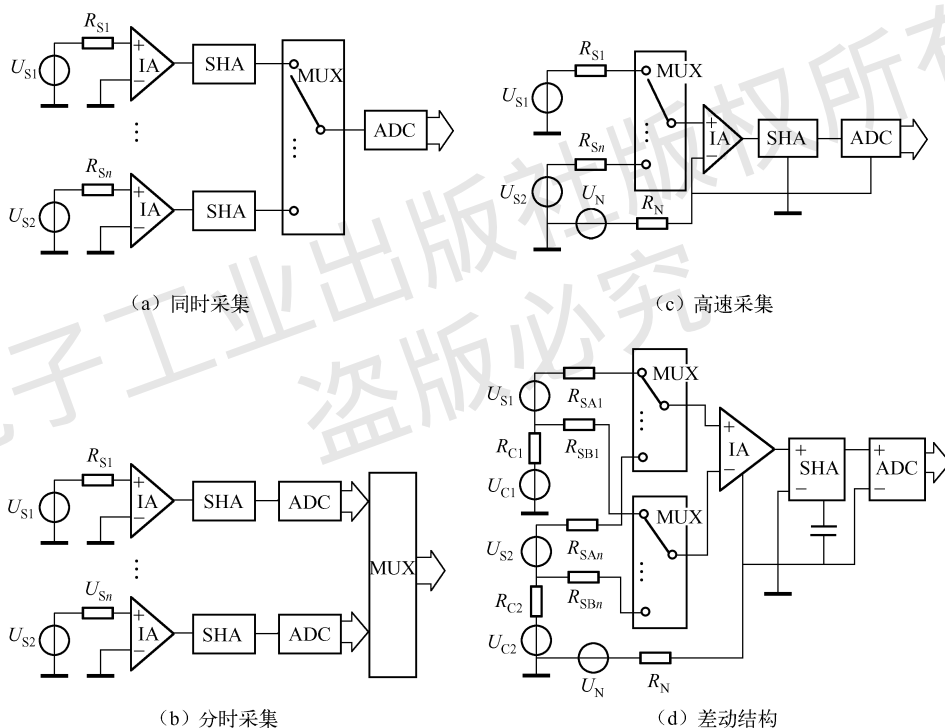


图 1.8 数据采集系统的配置

### 2) 传感器输出信号的预处理方法

由于待检测的非电量种类繁多，传感器的工作原理也各不相同，因此待检测物理量作用于传感器后，传感器输出的相应信号种类亦各式各样。例如，按输出能量形式可分为有源型和无源型；按输出的变化形式可分为模拟式、数字式、开关式等。在诸多种类的传感器输出信号中，绝大多数不能直接作为进行 A/D 转换的输入量，必须先通过各种预处理电路将传感器输出的信号转换成统一的电压信号。我们将信号的这一转换称为

预处理。随着传感器输出信号的形式不同，其预处理的方法也各不相同。

(1) 开关量信号预处理的方法。

在输入传感器的物理量小于某阈值的范围内，传感器处于“关”的状态，而当输入量大于该阈值时，传感器处于“开”的状态，这类传感器称为开/关式传感器。实际上，由于输入信号总存在噪声叠加成分，使传感器不能在阈值点准确地发生跃变。另外，无触点式传感器的输出也不是理想的开关特性，而具有一定的线性过渡。因此，为了消除噪声及改善特性，常接入具有迟滞特性的电路，称为鉴别器，或称脉冲整形电路，多使用施密特触发器。

(2) 模拟脉冲式传感器信号预处理方法。

① 峰值脉冲式传感器信号预处理方法。

不少传感器在受输入冲击时，其输出信号呈指数性衰减，若直接进行 A/D 转换，必将导致错误的结果。因此，在传感器后面接脉冲限幅电路，使输出变成窄脉冲，方可采用脉冲峰值保持电路将脉冲扩展，以便 A/D 转换。如图 1.9 所示， $U_s$  表示峰值脉冲式传感器输出信号波形， $U_c$  为限幅后的波形， $U_H$  为经峰值保持电路后的波形。

② 脉冲宽度式和脉冲间隔式信号的预处理。

脉宽式传感器输出脉冲的宽度受被测物理量调制，与被测量大小成正比，例如，采用脉冲调宽电路的电容传感器的输出信号。脉冲间隔式传感器在受到一次输入作用时，便产生两个脉冲，两个脉冲的时间间隔与被测物理量成正比，例如，应变式扭矩传感器、超声波测距等。这两类信号都是时间间隔信号，在时间间隔大于微秒级时，可将其作为门控信号，用数字计数器计数。另一种方法是利用时间/峰值转换电路（TAC）将时间间隔转换成电压峰值，再进行 A/D 转换，其原理如图 1.10 所示。

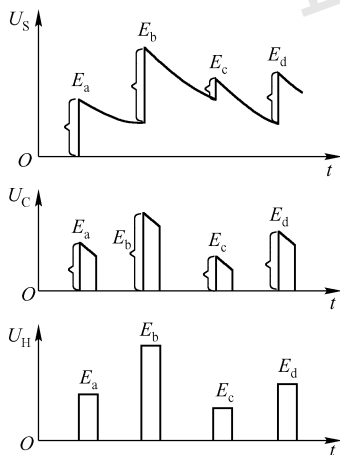


图 1.9 脉冲峰值信号处理

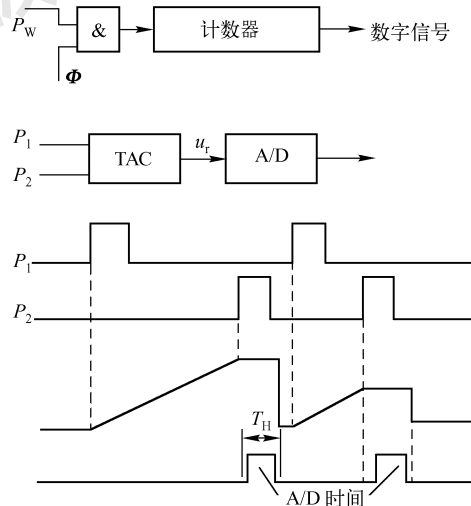


图 1.10 时间间隔预处理

TAC 的工作过程是：第一个脉冲  $P_1$  输入后，产生一个自零点起以一定斜率直线增大（积分）的电压信号；第二个脉冲  $P_2$  到来，电压值停止增大并保持  $T_H$  时间不变，

在此时间完成 A/D 转换。显然，电压峰值正比于时间间隔。

### (3) 模拟连续式传感器的信号预处理。

模拟连续式传感器的输出参量可以归纳为五种形式：电压、电流、电阻、电容和电感。这些参量必须先转换成电压信号，然后进行放大及带宽处理才能进行 A/D 转换。它们的预处理一般体系可用图 1.11 表示。可见，数字万用表已包括预处理、数据采样与 A/D 转换等全部功能电路。

模拟连续传感器分为有源型（能量转换型）和无源型（能量控制型）两大类。有源型传感器将被测物理量转换成电能，以电压或电流形式输出，如热电偶、光电池等。电压量可直接进行放大，电流量则须经电流/电压转换电路之后，再进行放大。无源型传感器则由外电源驱动，在输入物理量控制下输出电能，如电阻式（应变片、光敏电阻、热电阻、热敏电阻）传感器、电容式传感器、电感式传感器、霍尔元件等。

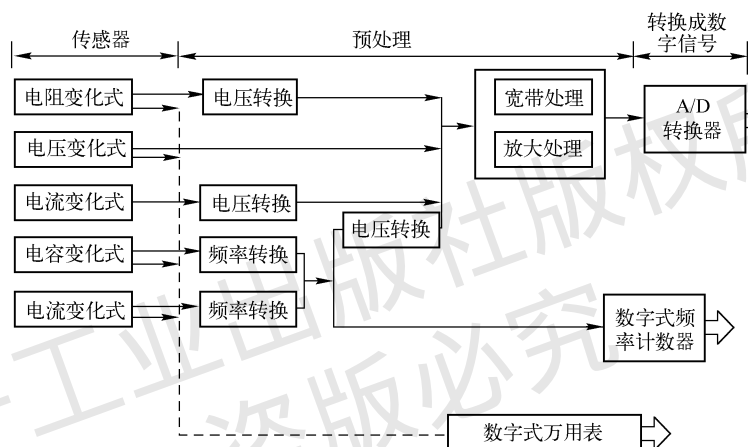


图 1.11 模拟连续输出预处理一般体系

电阻式传感器常用交、直流电桥将电阻变化转换为电压变化。

电感式和电容式传感器信号常用交流电桥或谐振电路进行预处理。交流电桥的输出为调幅信号，谐振电路的输出有调幅和调频两种，差动变压器的输出也是一个调幅信号，它们要经检波或鉴频才能变成直流电压信号，然后进行 A/D 转换。调频信号还可直接用数字频率计计数。

### (4) 频率变化式传感器信号的预处理。

频率变化式包括模拟式（如石英晶体频率式温度传感器）和脉冲重复频率式（如光敏或磁敏非接触式转速计等）传感器，可用鉴频器或数字频率计预处理。

### (5) 数字电量式传感器信号的预处理。

① 数字脉冲式传感器信号的预处理。这类传感器可直接将输出脉冲经整形电路后接至数字计数器，便可得到数字信号。

② 数字编码式传感器信号的预处理。数字编码式传感器又称做代码式传感器。通常采用格雷码而不用二进制（8421）码，以避免在两种码数交界处计数错误。因此，需要将格雷码转换成二进制或二 - 十进制码。

## 1.2.4 测量误差及分类

### 1. 测量误差的分析

#### 1) 测量误差的定义

测量的目的是希望得到被测对象的真值（实际值）。但由于检测系统（仪表）不可能绝对精确、测量原理局限、测量方法不尽完善、环境因素和外界干扰，以及测量过程可能会影响被测对象的原有状态等因素的存在，也使得测量结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差，这个偏差就是测量误差。

#### 2) 真值

一个严格定义的量的理论值通常叫理论真值，如三角形三内角和为  $180^\circ$  等。许多量由于理论真值在实际工作中难以获得，通常用约定真值或相对真值来代替理论真值。

(1) 约定真值。根据国际计量委员会通过并发布的各种物理参量单位的定义，利用当今最先进科学技术复现这些实物单位基准，其值被公认为国际或国家基准，称为约定真值。例如，保存在国际计量局的  $1\text{kg}$  的铂铱合金原器就是  $1\text{kg}$  质量的约定真值。在各地的实践中通常用这些约定真值国际基准或国家基准代替真值进行量值传递，也可对低一等级标准量值（标准器）或标准仪器进行比对、计量和校准。各地可用经过上级法定计量部门按规定定期送检、校验过的标准器或标准仪器及其修正值作为当地相应物理参量单位的约定真值。

(2) 相对真值。如果高级检测仪器（计量器具）的误差仅为低一级检测仪器误差的  $1/3 \sim 1/10$ ，则可认为前者是后者的相对真值。例如，高精度石英钟的计时误差通常比普通机械闹钟的计时误差小  $1 \sim 2$  个数量级以上，因此高精度的石英钟可视为普通机械闹钟的相对真值。

(3) 标称值。计量或测量器具上标注的量值称为标称值。如天平的砝码上标注的  $1\text{g}$ ，精密电阻器上标注的  $100\Omega$  等。由于制造工艺的不完备或环境条件发生变化，使这些计量或测量器具的实际值与其标称值之间存在一定的误差，具有不确定度，通常需要根据精度等级或误差范围进行估计。

(4) 示值。检测仪器（或系统）指示或显示（被测参量）的数值叫示值，也叫测量值或读数。由于传感器不可能绝对精确，信号处理、模/数转换不可避免地存在误差，加上测量时环境因素和外界干扰的存在以及测量过程可能会影响被测对象的原有状态等，都可使得示值与实际值存在偏差。

#### 3) 测量误差的分类

从不同的角度，测量误差可有不同的分类方法。

如按误差的表示方法来分，则可分为以下几类：

① 绝对误差。测量值  $A_x$  与被测量真值  $A_0$  之间的差值称为绝对误差，用  $\Delta x$  表示，即

$$\Delta x = A_x - A_0 \quad (1-7)$$

由式(1-7)可知,绝对误差的单位与被测量的单位相同,且有正、负符号之分。用绝对误差表示仪表的误差大小也比较直观,它被用来说明测量结果接近被测真值的程度。在实际使用中,被测真值 $A_0$ 是得不到的,只能用更精确的测量方法所测得的值 $X_0$ 来代替 $A_0$ ,则式(1-7)可写成

$$\Delta x = A_x - X_0 \quad (1-8)$$

绝对误差不能作为衡量测量精确度的标准,例如,用一个电流表测量200A电流,绝对误差为+1A,而用另一个电流表测量10A电流,绝对误差为+0.5A,前者的绝对误差大于后者,但误差值对测量结果的影响却是后者大于前者,即两者的测量精确度相差很大,由此而引出了相对误差的概念。

② 相对误差。所谓相对误差是指绝对误差 $\Delta x$ 与被测量的约定值的百分比。用它比绝对误差更能确切地说明测量结果的准确程度。在实际测量中,相对误差有三种表示方法。

- 实际相对误差:实际相对误差是指绝对误差 $\Delta x$ 与被测真值 $A_0$ 的百分比,用 $\gamma_A$ 表示,即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

- 示值(标称)相对误差:示值相对误差是指绝对误差 $\Delta x$ 与被测量值 $A_x$ 的百分比,用 $\gamma_x$ 表示,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_x} \times 100\% \quad (1-10)$$

- 引用(满度)相对误差:引用相对误差是指绝对误差 $\Delta x$ 与仪表满度值 $A_m$ 的百分比,用 $\gamma_m$ 表示,即

$$\gamma_m = \left| \frac{\Delta x}{A_m} \right| \times 100\% \quad (1-11)$$

由于 $\gamma_m$ 是用绝对误差 $\Delta x$ 与一个常量 $A_m$ (量程上限)的比值所表示的,所以实际上给出的是绝对误差,这也是应用最多的表示方法。当 $\Delta x$ 取最大值( $\Delta m$ )时,其满度相对误差常用来确定仪表的精度等级 $S$ 。目前我国电工仪表精度分为七级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0级。例如,5.0级表的满度相对误差的最大值不超过仪表量程上限的5%。满度相对误差由于式(1-11)中的分子、分母均由仪表本身性能所决定,所以是衡量仪表性能优劣的一种简便实用的方法。

如按误差的性质来分,则可分为以下几类:

① 系统误差。在相同条件下,多次重复测量同一被测参量时,其测量误差的大小和符号保持不变,或在条件改变时,误差按某一确定的规律变化,这种测量误差称为系统误差。误差值恒定不变的又称为定值系统误差,误差值变化的则称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的,以及按复杂规律变化的三种。

测量结果的准确度由系统误差来表征,系统误差越小,则表明测量准确度越高。

② 随机误差。在相同条件下多次重复测量同一被测参量时,测量误差的大小与符号均无规律变化,这类误差称为随机误差。随机误差主要是由于检测仪器或测量过程中

某些未知或无法控制的随机因素（如仪器的某些元器件性能不稳定，外界温度、湿度变化，空中电磁波扰动，电网的畸变与波动等）综合作用的结果。随机误差的变化通常难以预测，因此也无法通过实验方法确定、修正和消除。但是通过足够多的测量比较可以发现随机误差服从某种统计规律（如正态分布、均匀分布、泊松分布等）。

通常用精密度表征随机误差的大小。精密度越低，随机误差越大；反之，随机误差就越小。

③ 粗大误差。粗大误差是指明显超出规定条件下预期的误差。其特点是误差数值大，明显歪曲了测量结果。粗大误差一般由外界重大干扰或仪器故障或不正确的操作等引起。存在粗大误差的测量值称为异常值或坏值，一般容易发现，发现后应立即剔除。也就是说，正常的测量数据应是剔除了粗大误差的数据。我们通常研究的测量结果误差中仅包含系统和随机两类误差。

按被测参量与时间的关系，测量误差可分为静态误差和动态误差两大类。习惯上，将被测参量不随时间变化时所测得的误差称为静态误差；在被测参量随时间变换过程中进行测量时所产生的附加误差称为动态误差。动态误差是由于检测系统对输入信号变化响应上的滞后或输入信号中不同频率成分通过检测系统时受到不同的衰减和延迟而造成的误差。动态误差的大小为动态时测量和静态时测量所得误差值的差值。

## 2. 系统误差的处理

### 1) 系统误差的分类及产生原因

产生系统误差的原因主要有：检测时所用传感器、仪表本身性能有限；检测系统安装、布置、调整不当；测量者视觉等原因；测量环境条件（如温度、压力等）变化；测量方法不完善；测量依据的理论不完善等。按照系统误差（简称系差）的性质可分为已定系差和未定系差两大类。

(1) 已定系差。是指在测量过程中误差大小和符号都不变的系差。

(2) 未定系差。是指在测量过程中大小和符号变化不定，或按一定规律变化的系差。按其变化规律不同又可分为如下几类：

① 线性变化（或累进变化）系差。它是在测量过程中随着时间或测量次数的增加，按一定比例不断增大或不断减小的误差。

② 周期性变化的系差。它是指系差的数值和符号按周期性规律变化。

③ 复杂规律变化的系差。它不是简单地按线性或周期性变化，而是按较复杂的规律变化。

### 2) 系统误差的发现

(1) 恒定系差的检验。恒定系差不影响剩余误差的计算，即不影响测量结果的精密度，在处理随机误差时不可能发现。因此，一般采用改变测量条件的多次测量结果进行比较以确定其存在与否。

(2) 未定系差的发现。可以使用 剩余误差观察法。观察一系列等精度测量剩余误差的数值符号，若数值有规律地递增或递减，并在开始和末尾的符号相反，则判定有线性系差；若符合有规律地正负交替变化多次，则判定有周期性系差。



### 3) 消除或减弱系统误差的测量方法

#### (1) 已定系差的消除方法。

① 替代法。在测量未知量后，记下读数，再测可调的已知量，使仪表指示与上次相同，此时未知量就等于已知量。

② 相消法及交校法。适当安排测量方法，对同一量做两次测量，使恒定系差在两次测量中方向相反，取两次读数的算术平均值。

#### (2) 未定系差的消除方法。

① 用对称观测法（又称等距观测法）消除线性系差。

② 采用补偿法消除因某个条件变化或仪器的某个环节的非线性引起的变化系差。

③ 对周期性变化的系差，只要对读数相隔半周期的两次测量值，取其算术平均值便可消除。

### 4) 随机误差的处理

#### (1) 随机误差的特性。

实践中常见的随机误差分布是正态分布。如图 1.12 所示，它有以下几点特性：

① 对称性。即绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。

② 单峰性。即只有一个峰值。峰值就是概率密度的极大值。峰值在随机误差的纵轴上。该特性说明绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

③ 互抵性。对一系列等精度的  $n$  次测量，当  $n \rightarrow \infty$  时，各次测量的随机误差  $\delta_i$  的代数和等于零。这是曲线对称、正负误差可以抵消的必然结果。

④ 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。即误差的绝对值实际上不会超过某个限值。

根据正态分布的概率积分可得，当一组测得值的标准误差取  $\sigma$  的  $C$  倍时，其置信概率对应值见表 1.2。 $C$  为置信系数； $C_\sigma$  为置信限； $\pm C_\sigma$  为置信区间； $P$  为置信概率或置信度。

由表 1.2 可以看出，对一组既无系差也无粗差的等精度测量，当置信区间取  $\pm 2\sigma$  或  $\pm 3\sigma$  时，误差值落在该区间外的可能仅有 5% 或 0.3%。因此，人们常把  $\pm 2\sigma$  或  $\pm 3\sigma$  值称为极限误差，又称值随机不确定度，记为  $\Delta = 2\sigma$  或  $3\sigma$ ，它随置信概率取值不同而不同。

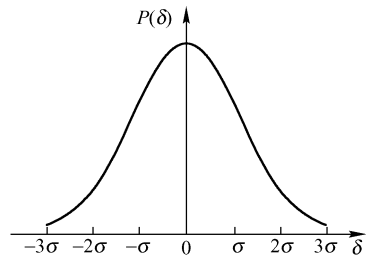


图 1.12 正态分布曲线

表 1.2 置信系数与置信度的关系

$C$	1	1.96	2	2.58	3
$P$	0.6827 (68%)	0.95 (95%)	0.9545 (95%)	0.99 (99%)	0.9973 (99.7%)

#### (2) 标准误差的计算方法。

国内外广泛采用标准误差（均方根误差） $\sigma$  来评定测量列随机误差的大小。其计算方法有以下几种。

① 标准法——贝塞尔公式。设  $n$  次等精度测量的测得值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

a. 计算测得值的算术平均值  $\bar{x}$  为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-12)$$

b. 计算各测得值  $x_i$  的剩余误差 (残差)  $v_i$  为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-13)$$

c. 计算标准误差  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1-14)$$

② 绝对误差法——佩特斯公式，如下。

$$\sigma = 1.2533 \frac{\sum |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \approx \frac{5}{4} \frac{\sum |v_i|}{n(n-1)} \quad (1-15)$$

③ 极差法。极差就是  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中的最大值与最小值之差；用  $R_n$  表示为

$$R_n = x_{\max} - x_{\min} \quad (1-16)$$

然后根据测量次数  $n$  查阅极差系数表 1.3，得极差系数  $d_n$ ，标准误差为

$$\sigma = \frac{R_n}{d_n} \quad (1-17)$$

应用贝塞尔公式精度高，但计算麻烦；佩特斯公式计算速度快，但精度低；极差法计算方便迅速，当测量次数不太多时 ( $n \leq 10$ )，其计算精度与贝赛尔公式相当。

表 1.3  $n$  为 10 以内的极差系数表

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_n$	—	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

④ 算术平均值的标准误差。设有  $m$  组测量数据，每组有  $n$  次等精度测量， $m$  组的算术平均值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_m$ ，其标准误差分别为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ ，且有  $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_m = \sigma$ ，经证明可得算术平均值的标准误差  $\sigma_{\bar{x}}$  为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1-18)$$

### 5) 测量结果的评价

衡量测量结果的好坏通常用精确度来表示，衡量测量精确度的主要指标是精密度和准确度。精确度高意味着系统误差和随机误差都很小。

(1) 精密度。精密度是指在测量过程中所测数据重复一致的程度。它说明了在一个测量过程中，在同一条件下进行重复测量时，所测结果的不一致程度。例如，某温度计的精密度是  $0.5^\circ\text{C}$ ，表明用该温度计测量温度时，不一致程度不会超过  $0.5^\circ\text{C}$ 。不一致程度越小，说明测量结果越精密。随机误差的大小是衡量测量精密度的重要指标，随机误差越小，则精密度越高，但精密不一定准确。

(2) 准确度。准确度是指测量结果与被测真值的偏离程度。例如，某电压的真值为  $10.00\text{mV}$ ，经某电压表多次测量结果是  $10.03\text{mV}$ 、 $10.04\text{mV}$ 、 $10.06\text{mV}$ 、 $10.04\text{mV}$ ，则

该电压表指示值偏离真值的数值为  $0.06\text{mV}$ ，所以该电压表的准确度为  $0.06\text{mV}$ 。系统误差的大小是衡量测量准确度的重要指标，系统误差越小，则准确度越高，但准确不一定精密。

(3) 精确度。精确度是衡量测量结果的最佳指标，精确度高则系统误差和随机误差都小，一切测量都应力求既精密又准确。

## 小 结

本单元主要从传感器与检测技术在日常生活、生产实际和科学研究中的应用讲起，阐述了传感器技术在生产和生活中应用的广泛性。

(1) 详细地讲解了测量的基本概念，测量就是借助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，求取二者的比值，从而得到被测量数值大小的过程。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。

(2) 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。传感器的主要技术参数有灵敏度、线性度、迟滞特性以及分辨力等。

(3) 传感器输出的信号经预处理变为模拟电压信号后，需转换成数字量方能进行数字显示或送入计算机。传感器输出信号一般比较微弱，所以信号的检测通常都要经过放大器，以增大信号幅值，适应进一步处理的要求。在数字化测量及数字处理系统中，尤其是采用微机进行实时数据处理和实时控制时，所加工的信息总是数字量，所以都需要将输入的模拟量转换成数字量。

(4) 测量结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差，这个偏差就是测量误差。测量总是带来误差，按误差的表示方法可分为绝对误差和相对误差。按误差的性质来分，可分为系统误差、随机误差和粗大误差。对误差的产生原因可用不同的方法处理，从而减小测量误差。

本单元是全书的绪论，请读者详细阅读，并积极联想生活中常见的测量、传感器和自动检测系统的实例，联系书本中的知识，主动分析其结构、功能和应用，做到理论联系实际，为后续单元的学习打下基础。

### 1.3 习题

1. 从功能上讲，传感器由哪些部分组成？
2. 传感器是如何分类的？
3. 传感器中弹性敏感元件的作用是什么？
4. 测量误差有哪几种表示方法？分别写出其表达式。
5. 测量方法是如何分类的？它们各有什么特点？
6. 现有精度为  $0.5$  级的电压表，有  $150\text{V}$  和  $300\text{V}$  两个量程，欲测量  $110\text{V}$  的电压，

问采用哪一个量程为宜? 为什么?

7. 产生测量误差的原因有哪些? 测量误差是如何分类的?

8. 测量单位的符号表示是如何规定的?

9. 测量某电压值为 18.00V, 用高一级电压表测量值为 17.95V, 量程为 40V, 求电压值的绝对误差、相对误差和引用误差。

10. 选择题

1) 某压力仪表厂生产的压力表满度相对误差均控制在 0.4% ~ 0.6%, 该压力表的精度等级应定为 \_\_\_\_\_ 级, 另一家仪器厂需要购买压力表, 希望压力表的满度相对误差小于 0.9%, 应购买 \_\_\_\_\_ 级的压力表。

A. 0.2                      B. 0.5                      C. 1.0                      D. 1.5

2) 在选购线性仪表时, 必须在同一系列的仪表中选择适当的量程。这时必须考虑到应尽量使选购的仪表量程为欲测量的 \_\_\_\_\_ 左右为宜。

A. 3 倍                      B. 10 倍                      C. 1.5 倍                      D. 0.75 倍

3) 某采购员分别在三家商店购买 100kg 大米、10kg 苹果、1kg 巧克力, 发现均缺少约 0.5kg, 但该采购员对卖巧克力的商店意见最大, 在这个例子中, 产生此心理作用的主要因素是 \_\_\_\_\_。

A. 绝对误差                      B. 示值相对误差                      C. 满度相对误差                      D. 精度等级

4) 重要场合使用的元器件或仪表, 购入后需进行高、低温循环老化试验, 其目的是为了 \_\_\_\_\_。

A. 提高精度                      B. 加速其衰老  
C. 测试其各项性能指标                      D. 提高可靠

5) 有一温度计, 它的测量范围为 0 ~ 200°C, 精度为 0.5 级, 该表可能出现的最大绝对误差为 \_\_\_\_\_。

A. 1°C                      B. 0.5°C                      C. 10°C                      D. 200°C

6) 欲测 240V 左右的电压, 要求测量示值相对误差的绝对值不大于 0.6%, 若选用量程为 250V 电压表, 其精度应选 \_\_\_\_\_ 级。

A. 0.25                      B. 0.5                      C. 0.2                      D. 1.0