

模块一 传感器与检测技术基础

模块描述

传感器与检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、转换、处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。本模块主要学习检测技术、传感器的基本知识、仪表精度的确定和选择及误差分析等。

单元一 检测技术的认知

知识目标：

- 了解检测的定义、发展趋势；
- 掌握检测系统的组成

【学习知识】

一、检测的定义

检测是利用各种物理、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技术称为自动检测技术，它是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施。

检测技术也是自动化系统中不可缺少的组成部分。检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步。检测技术几乎渗透到人类的一切活动领域，并发挥着愈来愈大的作用。

二、检测的内容

工业检测技术的内容较广泛，常见工业检测内容如表 1-1 所示。

表 1-1 工业检测的内容

被测量类型	被测量	被测量类型	被测量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力（压强）、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量（重量）	状态量	工作机械的运动状态（启停等）、生产设备的异常状态（超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等）
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性性能

三、检测系统的构成

一个完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、测量电路、显示记录装置、调节执行装置和电源等部分组成的，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。自动检测系统的组成框图如图 1-1 所示。

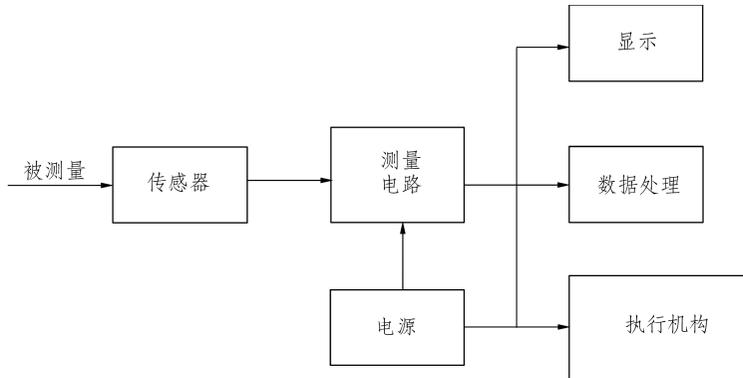


图 1-1 自动检测系统组成框图

（一）传感器

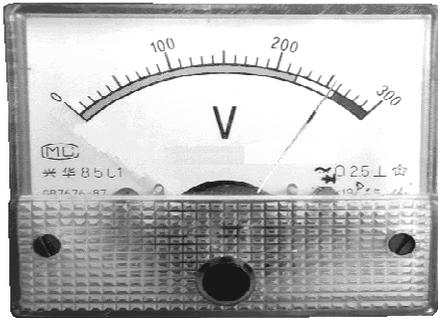
传感器是把被测量转换成电量的装置。从图 1-1 可以看出，传感器是检测系统与被测对象直接发生联系的部件，是检测系统最重要的环节，检测系统获取信息的质量往往是由传感器的性能决定的。

(二) 测量电路

测量电路的作用是将传感器的输出信号转换成易于测量的电压或电流信号。测量电路包括放大(或衰减)电路、滤波电路、隔离电路等,其中,放大电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号等,以推动后级的显示装置、数据处理装置及执行机构。

(三) 显示装置

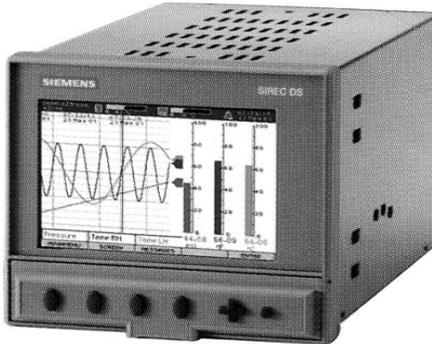
显示装置是检测人员和检测系统联系的主要环节,它的主要作用是使人们了解被测量的大小或变化的过程。常用的显示装置有模拟显示仪表、数字显示仪表、图像显示仪表、记录仪等,如图 1-2 所示。



(a) 模拟显示仪表



(b) 数字显示仪表



(c) 图像显示仪表



(d) 记录仪

图 1-2 各种显示记录装置

模拟显示仪表利用指针对标尺的相对位置来表示被测量的大小。常见的模拟显示仪表有毫伏表、微安表、模拟光柱等,如图 1-2 (a) 所示,其特点是读数方便、直观,结构简单,价格低廉,在检测系统中应用广泛。数字显示仪表则直接以十进制数字形式来显示读数,如

图 1-2 (b) 所示是专用的数字电压表，它还可以附加打印机，打印记录测量数值。如图 1-2 (c)、(d) 所示，图像显示仪表将输出信号送至记录仪，从而描绘出被测量随时间变化的曲线，作为检测结果，供分析使用。

(四) 数据处理装置

数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断和线性变换，对动态测试结果作频谱分析 (幅值谱分析、功率谱分析)、相关分析等，但完成这些工作必须采用计算机技术。

(五) 执行机构

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等，如图 1-3 所示。它们是在电路中起通断、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，以驱动执行机构。



(a) 继电器



(b) 报警灯

图 1-3 各种执行机构

四、检测系统的分类

检测系统按信号在系统中的传递情况可以分为开环检测系统和闭环检测系统。

(一) 开环检测系统

开环检测系统的全部信息变换只沿着一个方向进行，如图 1-4 所示。其中， x 为输入量， y 为输出量， k_1 、 k_2 、 k_3 为各个环节的传递系数。



图 1-4 开环检测系统框图

输入、输出关系表示为

$$y = k_1 k_2 k_3 x$$

由于开环检测系统是由多个环节串联组成的，因此，系统的相对误差等于各环节相对误差之和，即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i + \dots + \delta_n \quad (1-1)$$

式中 δ ——系统的相对误差；

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ——各环节的相对误差。

采用开环方式构成的检测系统结构比较简单，但各环节特性的变化都会造成检测误差。

(二) 闭环检测系统

闭环检测系统有两个通道：一个通道为正向通道，另一个通道为反馈通道，其结构如图 1-5 所示。其中， x_1 为正向通道的输入量， β 为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数为 $k = k_2 k_3$ 。

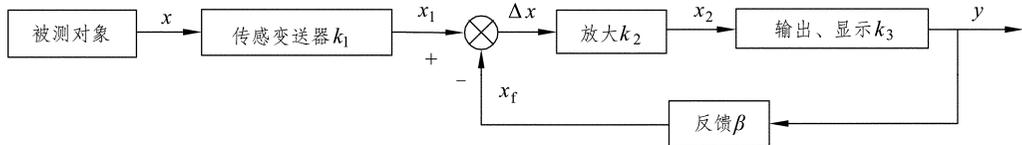


图 1-5 闭环检测系统框图

当 $k = k_2 k_3 \gg 1$ 时，系统的输入、输出关系为

$$y = \frac{k_1 k}{1 + k \beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-2)$$

从式 (1-2) 可以看出，此时整个系统的输入、输出关系由反馈环节的特性决定，放大器等环节特性的变化不会造成检测误差，或造成的误差很小。

五、自动检测系统案例

如图 1-6 所示为液位控制系统原理图，系统由浮子、电位器、减速器、电动机、控制阀门等组成。由于水缸有进水量的扰动，放置浮子作为液位的反馈，并反馈到电位器上。当电位器的电刷位于中点位置时，电动机不动，控制阀门有一定的开度，使水箱中流入水量与流出水量相等，从而液面保持在期望高度上。一旦流入水量或流出水量发生变化，水箱液面高度便作出相应变化。例如，当液面升高时，浮子位置亦相应升高，通过杠杆作用使电位器电刷从中点位置下移，从而给电动机提供一定的控制电压，驱动电动机通过减速器减小阀门开

度，使进入水箱的流量减少，此时，水箱液面下降，浮子位置相应下降，直到电位器电刷回到中点位置时，系统重新处于平衡状态，液面恢复给定高度；反之，若水箱液面下降，则系统会自动增大阀门开度，加大流入的水量，使液面升到给定高度。

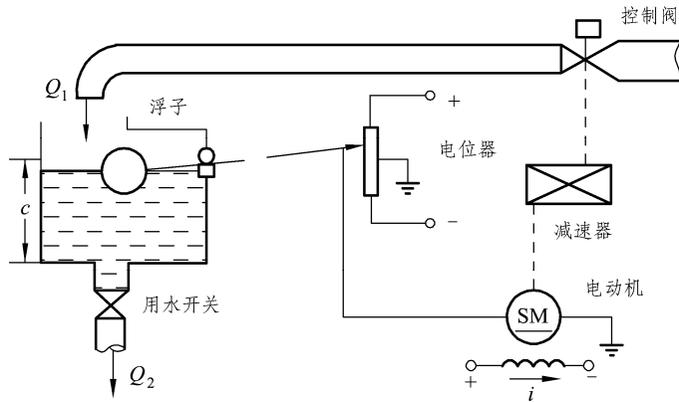


图 1-6 液位控制系统原理图

六、发展与展望

- (1) 不断扩大测量范围。科学技术的发展要求检测量的范围不断扩大。
- (2) 不断提高检测系统的测量精度、延长使用寿命、提高可靠性等。
- (3) 应用新技术和新的物理效应，扩大检测领域。随着人类活动领域的扩大，检测对象范围也在扩大。
- (4) 采用微型计算机技术，使检测技术智能化。
- (5) 发展网络化传感器及检测系统。

【思考与练习】

1. 填空题。

(1) 检测是利用各种物理、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_____，通过检查与_____的方法赋予定性或定量结果的过程。

(2) 自动检测系统包括以下部分：_____、信号处理电路、显示器、数据处理装置、执行机构。

(3) 工业检测中被测量可以分为 6 种类型：_____量、_____量、几何量、物体的性质和分量、状态量和电工量。

2. 简答题。

检测系统由哪几部分组成？说明各部分的作用。

单元二 传感器的认知

知识目标：

- 了解传感器的作用、分类；
- 掌握传感器的基本构成、主要性能指标。

【学习知识】

一、传感器的定义

人类社会已进入信息时代，人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发、获取、传输与处理。传感器处于被测对象的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学研究与自动化生产过程要获取的信息，都要通过传感器获取并通过它转换为易于传输与处理的电信号。因此，传感器的作用与地位特别重要。科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖性就越大。因此，自 20 世纪 80 年代以来，传感器技术被世界各国列为重点发展的高新技术，备受重视。

如图 1-7 所示，传感器就像人的五官，感知外界信息，然后传递信息给大脑，大脑再发出指令给肌体。简单来说，传感器的作用为“一感二传”，即感受被测信息并传送出去。

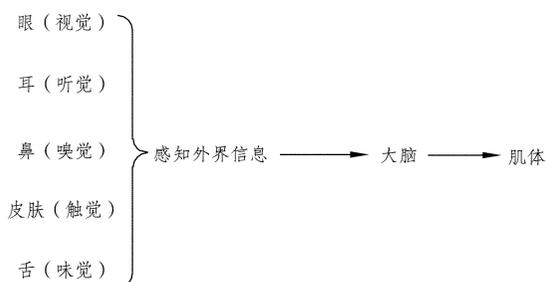


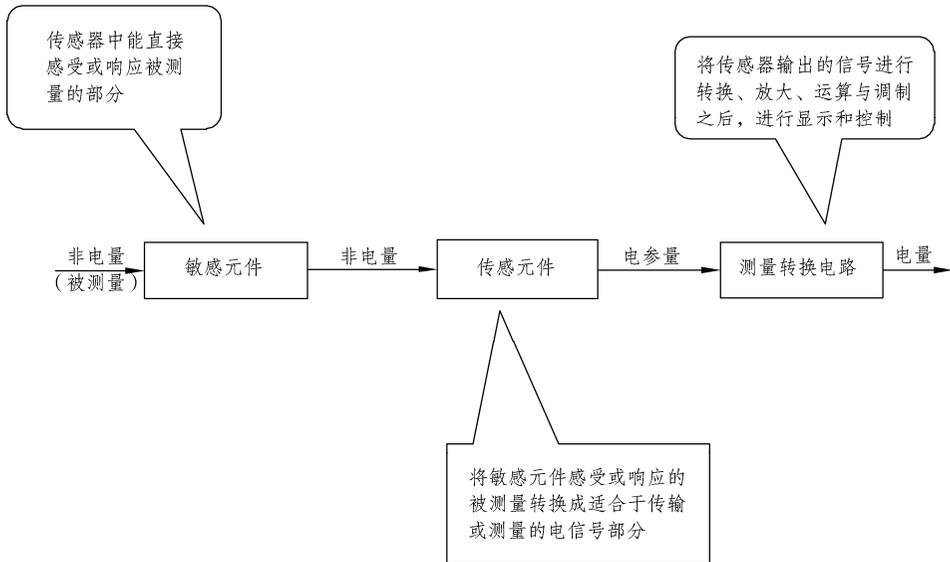
图 1-7 传感器的作用

广义上，传感器是一种能把物理量或化学量转变成便于利用的电信号的器件。国际电工委员会（International Electrotechnical Committee, IEC）的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的电信号。”Gopel 等的说法是：“传感器是包括承载体和电路连接的敏感元件”，而“传感器系统则是组合有某种信息处理能力的传感器”。总之，传感器是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。有些

国家和学科领域将传感器称为发送器、传送器、变送器、检测器、探头等。

二、传感器的组成

如图 1-8 所示，传感器由敏感元件、转换元件及测量电路组成。其中，敏感元件是指传



感器中直接感受被测量的部分；转换元件是指传感器能将敏感元件的输出转换为适于传输或测量的电信号的部分；测量电路是将传感器输出的电参量进行转换、放大、运算与调制的部分。需要注意的是，并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与转换元件两个部分，有些会将二者合为一体。例如，半导体、气体和湿度传感器等都是将其感受的被测量直接转换为电信号，而没有中间转换环节。

由于传感器输出信号一般都很微弱，因此，需要有信号调节与转换电路将其放大或变换为容易传输、处理、记录和显示的信号。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此，信号调节与转换电路及其所需电源都应作为传感器的组成部分。

三、传感器的分类

传感器有许多分类方法，但常用的分类方法主要有两种：一种是按被测量的性质来分；另一种是按传感器的工作原理来分。

（一）按被测量的性质分类

例如，对温度、压力、位移、速度等参数的测量，相应的有温度传感器、压力传感器、

位移传感器、速度传感器等。这种分类方法的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用；其缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有什么共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

（二）按传感器的工作原理分类

例如，应变原理工作方式、电容原理工作方式、压电原理工作方式、磁电原理工作方式、光电效应原理工作方式等，相应的有应变式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器等。这种分类方法的优点是对传感器的工作原理比较清楚，类别少，有利于传感器专业工作者对传感器的深入研究分析；其缺点是不便于使用者根据其用途选用。

（三）其他分类方式

此外，还有一些其他分类方式：按能量的关系分类，分为有源传感器和无源传感器；按输出信号的性质分类，分为模拟式传感器和数字式传感器，数字式传感器的输出为数字量，便于与计算机联用，且抗干扰性较强，如盘式角度数字传感器、光栅传感器等。

四、传感器的命名与代号

中华人民共和国国家标准 GB/T 7666—2005 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的命名及图形符号的依据。

（一）传感器的命名

传感器的命名：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，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征，一般可后续以“型”字。

第四级修饰语——主要技术指标（量程、精确度、灵敏度等）。

（二）传感器的代号

如图 1-9 所示，完整的传感器代号包括主称、被测量、转换原理及序号四部分，在被测量、转换原理和序号三部分之间需用连字符连接。

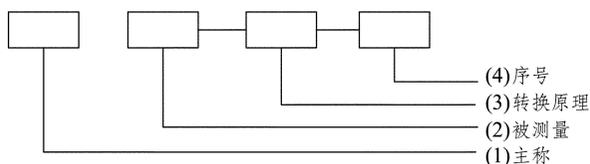


图 1-9 传感器的代号

第一部分——主称（传感器），用汉语拼音字母“C”标记。

第二部分——被测量，用一个或两个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，则取汉语拼音的第二个大写字母作为代号，以此类推。对于有两个或两个以上被测量的多功能传感器，应做同样处理。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。

第三部分——转换原理，用一个或两个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，则用汉语拼音的第二个大写字母作为代号，依此类推。

第四部分——序号，用阿拉伯数字标记。序号可表征产品的设计特性、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，仅在局部有改动或变动，则其序号可在原序号后面加注大写汉语拼音字母 A、B、C...（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。

例如：

- (1) 代号为 C WY-YB-10 的传感器是序号为 10 的应变式位移传感器。
- (2) 代号为 C Y-GQ-1 的传感器是序号为 1 的光纤压力传感器。
- (3) 代号为 C Y-XZ-50 的传感器是序号为 50 的谐振式压力传感器。
- (4) 代号为 C A-DR-2 的传感器是序号为 2 的电容式加速度传感器。

五、传感器的图形符号

传感器的图形符号是电气图用图形符号的一个组成部分。《传感器图用图形符号》(GB/T 14479—93)规定，传感器的图形符号由符号要素正方形和等边三角形组成，如图 1-10 所示，其中，正方形表示转换元件，三角形表示敏感元件。

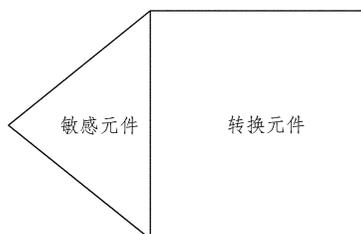


图 1-10 传感器图形符号

如图 1-11 所示为传感器图形符号案例，图 1-11 (a) 为电容式压力传感器，图 1-11 (b)

为电位器压力传感器，图 1-11 (c) 为压电加速度传感器。

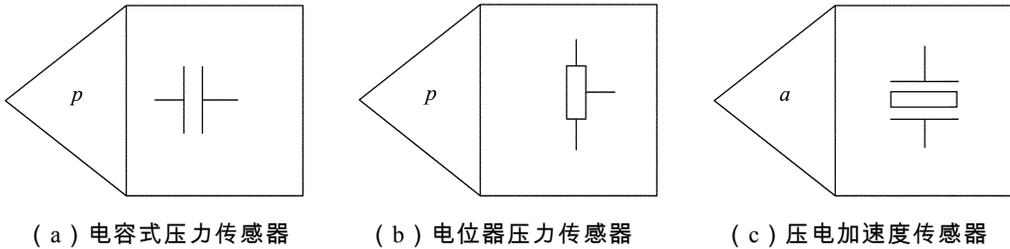


图 1-11 传感器图形符号案例

六、传感器的基本特性

在检测控制系统中，需要对各种参数进行检测和控制，而要达到比较优良的控制性能，则必须要求传感器能够感测被测量的变化并且不失真地将其转换为相应的电量，这种要求主要取决于传感器的基本特性。传感器的基本特性主要分为静态特性和动态特性。

(一) 反映传感器静态特性的性能指标

传感器的静态特性是指传感器在静态工作状态下的输入输出特性。所谓静态工作状态，是指传感器的输入量恒定或缓慢变化且输出量也达到相对稳定时的工作状态。传感器静态特性的性能指标主要包括灵敏度、分辨力、线性度、迟滞、可靠性等。

1. 灵敏度

$$k = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

灵敏度是指传感器或检测系统在稳态下输出量变化与引起此变化的输入量变化的比值。它是输入与输出特性曲线的斜率，对线性传感器而言，灵敏度为一常数；对非线性传感器而言，灵敏度随输入量的变化而变化。

曲线越陡，灵敏度越高。可以通过作图法，作该曲线切线的方法来求得曲线上任意一点传感器的灵敏度，如图 1-12 所示。由切线的斜率可以看出， x_2 点的灵敏度比 x_1 点高。

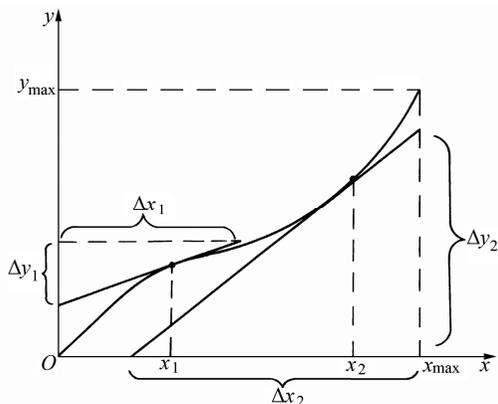


图 1-12 作图法求传感器的灵敏度

【例 1】 某位移传感器，当位移变化 0.5 mm 时，输出电压变化 150 mV，则其灵敏度是多少？

解：灵敏度为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{150 \text{ mV}}{0.5 \text{ mm}} = 300 \text{ mV/mm}$$

2. 分辨力

分辨力是指传感器能检测出的被测信号最小变化量，是有量纲的数。当被测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。

一般模拟式仪表的分辨力规定为最小刻度分度值的一半。数字式仪表一般可以认为该表最后一位所表示的数值就是它的分辨力。一般情况下，不能把仪表的分辨力当作仪表的最大绝对误差。

例如，数字式温度计的分辨力为 0.1°C ，若该仪表的准确度为 1.0 级，则最大绝对误差将达到 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ ，比分辨力大得多。

在仪表或传感器中，还经常用到“分辨率”的概念。将分辨力除以仪表的满量程就是仪表的分辨率，分辨率常以百分比或几分之一的形式表示，是量纲为 1 的数。

3. 线性度

人们总是希望传感器的输入与输出的关系成正比，即呈线性关系。这样可使显示仪表的刻度均匀，在整个测量范围内具有相同的灵敏度，并且不必采用线性化措施。但大多数传感器的输入输出特性总是具有不同程度的非线性，可以用下列多项式代数方程表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1-4)$$

式中， y 为输出量； x 为输入量； a_0 为零点输出； a_1 为理论灵敏度； a_2 、 a_3 、 \dots 、 a_n 为非线性项系数。

各项系数决定了传感器的线性度的大小。如果 $a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$,则该系统为线性系统。

线性度又称非线性误差，是指传感器实际特性曲线与拟合直线（有时也称理论直线）之间的最大偏差与传感器满量程范围内的输出的百分比，如图 1-13 所示。它可用式 (1-5) 表示，且多取正值。

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1-5)$$

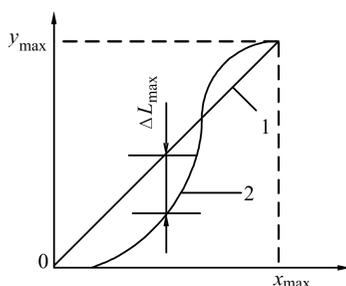


图 1-13 线性度

1—理论直线；2—实际特性曲线

4. 迟滞

迟滞特性表明检测系统在正向和反向行程期间，输入-输出特性曲线不一致的程度。也就是说，对同样大小的输入量，检测系统在正、反行程中，往往对应两个大小不同的输出量，如图 1-14 所示。通过实验，找出输出量的最大差值，并除以满量程输出的百分数来表示迟滞比，即

$$\gamma_H = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-6)$$

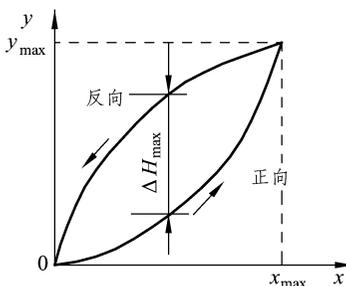


图 1-14 迟滞

5. 稳定性

稳定性包含稳定度（Stability）和环境影响量（Influence Quantity）两个方面。

稳定度指的是仪表在所有条件都恒定不变的情况下，在规定的时间内能维持其指示值不变的能力。稳定度一般用仪表的指示值变化量和时间的长短之比来表示。例如，某仪表电压

指示值每小时变化 1.3 mV，则表示为 1.3 mV/h；某仪表输出电压值在 8 h 内的最大变化量为 1.2 mV，则表示为 1.2 mV/(8 h)。

测量仪表由外界环境变化引起指示值变化的量，称为环境影响量。它是由温度、湿度、气压、振动、电源电压及电源频率等一些外界环境影响所引起的。当说明影响量时，必须将影响因素与指示值偏差同时表示。例如，某仪表由于电源电压发生 10% 变化而引起其指示值变化 0.02 mA，则应写成 $0.02 \text{ mA}/U \times (1 \pm 10) \%$ 。

6. 可靠性

可靠性是反映检测系统在规定的条件下、在规定的时间内是否耐用的一种综合性的质量指标。

常用的可靠性指标如下。

- (1) 可靠度 $R(t)$ ：描述装置在某一时刻 t 以前正常工作的可能性，它与时间有关。
- (2) 失效度 $F(t)$ ：装置在特定条件下，在时间 t 以前失效的（概率）可能性。
- (3) 故障率 $\lambda(t)$ ：指在 t 时刻尚未失效的装置在单位时间内失效的概率。

人们通过实验发现一般元器件及仪表装置的失效率和时间的关系如图 1-15 所示，称为浴盆曲线。

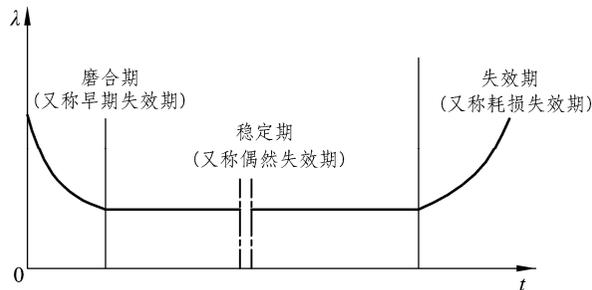


图 1-15 浴盆曲线

曲线分为以下 3 个阶段：

1) 早期失效阶段

早期失效阶段失效率较高，但失效率随时间的增加而下降。对于不同品种、不同工艺的器件，这一阶段延续的时间和失效比例不同。

采取措施：严格操作，加强对原材料、半成品和成品的检验可减少这一阶段的失效。进行合理筛选，尽可能在使用前，把早期失效的器件淘汰掉，可使出厂器件失效率达到或接近偶然失效期的较低水平。

2) 偶然失效阶段

偶然失效阶段失效率较低，是器件的良好使用阶段。

3) 耗损失效阶段

当耗损失效阶段到来时，失效率明显上升，致使大部分器件相继失效。使用期间应尽快

发现耗损期的到来，以便采取预防性措施（如整批更换器件）来保证系统的正常工作。

半导体器件由于它本身的特点，当在没有潮、雾、核辐射等恶劣外界作用条件下正常工作时，早期失效阶段表现明显，偶然失效阶段时间较长，而且失效率常有缓慢下降的趋势，一般难以观察到明显的耗损失效阶段。

（二）传感器的动态特性

动态特性就是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性，通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小，而且还能复现被测量随时间变化的规律，这也是传感器的重要特性之一。有的传感器尽管其静态特性非常好，但由于不能很好地跟随输入量的快速变化而导致严重的误差，这种动态误差甚至可以导致传感器无法正常进行测量。

【实践训练】

传感器的选用

通常，选用传感器应从以下几个方面考虑。

（1）测试条件：主要包括测量目的、被测试物理量特性、测量范围、输入信号最大值、频带宽度、测量精度要求、测量所需时间要求等。

（2）传感器性能：主要包括精度、稳定性、响应速度、输出量（模拟量或数字量）、对被测物体产生的负载效应、校正周期、输入端保护等。

（3）使用条件：主要包括设置场地的环境条件（温度、湿度、振动等）、测量时间、所需功率容量、与其他设备的连接、备件与维修服务等。

具体来讲，可以从以下几个方面考虑。

1. 根据测量对象与测量环境确定传感器的类型

要进行一次具体的测量工作，首先要考虑采用何种原理的传感器，这需要分析多方面的因素之后才能确定。因为即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用，究竟哪一种原理的传感器更为合适，则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑以下一些具体问题：量程的大小、被测位置对传感器体积的要求、测量方式为接触式还是非接触式、信号的引出方法（有线或是非接触测量）、传感器的来源（国产还是进口、价格能否承受、是否为自行研制）。在考虑上述问题之后就能确定选用何种类型的传感器，然后再考虑传感器的具体性能指标。

2. 灵敏度的选择

通常，在传感器的线性范围内，希望传感器的灵敏度越高越好。因为只有灵敏度高时，与被测量变化对应的输出信号的值才比较大，这样有利于信号处理。但需要注意的是，传感

器的灵敏度高，与被测量无关的外界噪声也容易混入，也会被系统放大，影响测量精度。因此，要求传感器本身应具有较高的信噪比，尽量减少从外界引入干扰信号。

传感器的灵敏度是有方向性的。当被测量是单向量，而且对其方向性要求较高时，则应选择其他方向灵敏度小的传感器；如果被测量是多维向量，则要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

3. 频率响应特性

传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围，必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件。实际上传感器的响应总有一定的延迟，希望延迟时间越短越好。

传感器的频率响应高，可测的信号频率范围就宽，而由于受到结构特性的影响，机械系统的惯性较大。因此，频率低的传感器可测信号的频率较低。

在动态测量中，应根据信号的特点（稳态、瞬态、随机等）、响应特性选择传感器，以免产生过大的误差。

4. 线性范围

传感器的线性范围是指输出与输入成直线关系的范围。从理论上讲，在此范围内，灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽，则其量程越大，并且能保证一定的测量精度。在选择传感器时，当传感器的种类确定以后首先要看其量程是否满足要求。

但实际上，任何传感器都不能保证绝对的线性，其线性度也是相对的。当所要求测量精度比较低时，在一定的范围内，可将非线性误差较小的传感器近似看作线性的，便于测量。

5. 稳定性

传感器使用一段时间后，其性能保持不变化的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身结构外，主要是传感器的使用环境。因此，要使传感器具有良好的稳定性，传感器必须要有较强的环境适应能力。

在选择传感器之前，应对其使用环境进行调查，并根据具体的使用环境选择合适的传感器，或采取适当的措施，减小环境的影响。

传感器的稳定性有定量指标，当超过使用期后，在使用前应重新进行标定，以确定传感器的性能是否发生变化。

在某些要求传感器能长期使用而又不能轻易更换或标定的场合，对所选用的传感器的稳定性要求更严格，要能够经受住长时间的考验。

6. 精度

精度是传感器的一个重要的性能指标，它是关系到整个测量系统测量精度的一个重要环节。传感器的精度越高，其价格越昂贵。因此，传感器的精度只要满足整个测量系统的精度要求即可，不必选得过高。这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和简单的传感器。

如果测量的目的是用于定性分析的，选用重复精度高的传感器即可，不宜选用绝对量值精度高的；如果是为了定量分析，必须获得精确的测量值，就需选用精度等级能满足要求的传感器。

总之，应从传感器的基本工作原理出发，注意被测对象可能产生的负载效应。所选择的传感器，应既能适应被测物理量，又能满足量程、测量结果的精度要求，同时还要具有高可靠性、强通用性、尽可能高的静态性能和动态性能、较强的适应环境的能力、较高的性价比和良好的经济性。

【知识拓展】

位数、分辨力、分辨率

1. 位数

数字多用表 (Digital Multimeter , DMM) 的显示位数目前一般为 $3 \sim 8\frac{1}{2}$ 位。具体地说，有 3 位、 $3\frac{1}{2}$ 位、 $3\frac{2}{3}$ 位、 $3\frac{3}{4}$ 位、 $4\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{3}{4}$ 位、 $5\frac{1}{2}$ 位、 $6\frac{1}{2}$ 位、 $7\frac{1}{2}$ 位、 $8\frac{1}{2}$ 位等。数字表位数的提高涉及稳定性、抗干扰等诸多技术问题，A/D 转换器只是其中的一个环节，能否真正达到额定的精确度，取决于使用方法是否正确。

判定数字仪表位数的两条原则。

(1) 能显示 0~9 所有数字的“位”是“整位”；

(2) 分数位的判定：在最大显示值中，以最高位所能显示的数值作为分子，用满量程的最高位作为分母。

例如，当某一数字表最大显示值为 $\pm 1\ 999$ (不考虑小数点)，满量程计数值为 $\pm 2\ 000$ 时，则它共有 3 个整位。最高位只能显示 1，满量程最高位为 2，所以它是 $3\frac{1}{2}$ 位表。

又如，一台数字表最大值为 2 999，满量程为 3 000，则它是 $3\frac{2}{3}$ 位表。

2. 分辨力

分辨力是指传感器能检出被测信号的最小变化值的能力。当被测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。

一般认为数字仪表的最后一位所表示的数值就是它的分辨力。灵敏度愈高，分辨力愈好。

3. 分辨率

将分辨力除以仪表的满量程就是仪表的分辨率，分辨率常以百分比或几分之一的形式表示，是量纲为 1 的数。

【思考与练习】

1. 选择题。

- (1) 传感器能检出被测信号的最小变化量称作()。
- A. 分辨力 B. 分辨率 C. 精度 D. 精密度
- (2) 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. 提高可靠性
- (3) 通常所说的传感器核心组成部分是指()。
- A. 敏感元件和传感元件 B. 敏感元件和转换元件
C. 转换元件和调理电路 D. 敏感元件、调理电路和电源
- (4) 传感器的下列指标全部属于静态特性的是()。
- A. 线性度、灵敏度、阻尼系数 B. 幅频特性、相频特性、稳态误差
C. 迟滞、重复性、漂移 D. 精度、时间常数、重复性
- (5) 以下特性属于传感器动态特性的是()。
- A. 瞬态响应 B. 线性度 C. 灵敏度 D. 稳定性

2. 填空题。

- (1) 传感器由_____、_____、_____三部分组成。
- (2) 迟滞是指传感器正向特性和反向特性的_____程度。
- (3) 反映传感器和检测系统在规定的条件下, 在规定的时间内能否耐用的一种综合性的质量指标, 我们称之为_____性。
- (4) 描述传感器静态特性的参数有____、____、____、____、____和_____。

3. 判断题。

- (1) 传感器的迟滞会引起分辨率变差, 或造成测量盲区, 故一般希望迟滞越小越好。 ()
- (2) 线性度是传感器的静态特性之一。 ()
- (3) 时间响应特性是传感器的静态特性之一。 ()
- (4) 线性度描述是传感器的动态特性之一。 ()
- (5) 在传感器的基本特性中, 瞬态响应特性是其动态特性之一。 ()

4. 简答题。

某电压表的当前读数为 158.4 V, 判断此数字表的位数、分辨力和分辨率各为多少。

单元三 误差的认知

知识目标：

- 了解测量的定义、测量方法的分类；
- 掌握测量误差的计算

【学习知识】

一、测量定义

测量是指人们用实验的方法，借助一定的仪器或设备，将被测量与同性质的单位标准量进行比较，并确定被测量对标准量的倍数，从而获得关于被测量的定量信息，即

$$y = mx \quad (1-7)$$

其中， x 为被测量； y 为标准量； m 为比值。

测量的结果包括数值大小和测量单位两部分。数值的大小可以用数字表示，也可以是曲线或图形。无论表现形式如何，在测量结果中必须注明单位。总之，测量过程的核心是比较。

二、测量方法

测量方法是实现测量过程所采用的具体方法。应当根据被测量的性质、特点和测量任务的要求来选择适当的测量方法。按照测量手段可以将测量方法分为直接测量和间接测量；按照获得测量值的方式可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量；根据被测对象的变化特点又可分为静态测量和动态测量等；另外，根据传感器是否与被测介质接触可分为接触式测量与非接触式测量等。

(一) 直接测量与间接测量

1. 直接测量

用事先分度或标定好的测量仪表，直接读取被测量测量结果的方法称为直接测量。例如，电压表测量某一元件的电压就属于直接测量。

直接测量是工程技术中大量采用的方法，其优点是直观、简便、迅速；其缺点是测量精度一般不是很高。

2. 间接测量

首先，对和被测量有确定函数关系的几个量进行测量，然后，再将测量值代入函数关系式，经过计算得到所需结果。这种测量方法属于间接测量。测量结果 y 和直接测量值 x_i ($i=1, 2, 3, \dots$) 之间的关系式为 $y=f(x_1x_2x_3\dots)$ 。例如，要测量一个三角形的面积，必须先测量出一条边长，再测量出对应的高，然后利用三角形面积公式计算出三角形的面积。

间接测量手续多、花费时间长，当被测量不便于直接测量或没有相应直接测量的仪表时才采用间接测量。

(二) 偏差式测量、零位式测量与微差式测量

1. 偏差式测量

在测量过程中，利用测量仪表指针相对于刻度初始点的位移（即偏差）来决定被测量值的测量方法，称为偏差式测量。它以间接方式实现被测量和标准量的比较。

偏差式测量仪表在进行测量时，一般利用被测量产生的力或力矩，使仪表的弹性元件变形，从而产生一个相反的作用，并一直增大到与被测量所产生的力或力矩相平衡时，弹性元件的变形就停止了，此变形即可通过一定的机构转变成仪表指针相对标尺起点的位移，指针所指示的标尺刻度值就表示了被测量的数值，如图 1-16 (a) 所示的弹簧。偏差式测量简单、迅速，但精度不高，这种测量方法广泛应用于工程测量中。

2. 零位式测量

用已知的标准量去平衡或抵消被测量的作用，从而判定被测量值等于已知标准量的方法称作零位式测量。如图 1-16 (b) 所示，用天平测量物体的质量就是零位式测量的一个简单例子。



(a) 偏差式测量



(b) 零位式测量



(c) 微差式测量

图 1-16 三种获得测量值的方式

零位式测量的特点是精度高，但平衡复杂，多适用于缓慢信号的测量。

3. 微差式测量

微差式测量是综合零位式测量和偏差式测量的优点而提出的一种测量方法，基本思想是将被测量 x 的大部分作用先与已知标准量 N 的作用相抵消，剩余部分即两者的差值 $\Delta = x - N$ ，这个差值再用偏差法测量。微差式测量中，总是设法使差值 Δ 很小，因此，可选用高灵敏度的偏差式仪表，即使差值的测量精度不高，但最终结果仍可达到较高的精度。生活中如图 1-16 (c) 所示的磅秤就是利用微差式的测量方法来实现测量的。

微差式测量的特点是反应快、测量精度高，特别适用于在线控制参数的测量。

(三) 静态测量与动态测量

1. 静态测量

静态测量是指被测量在测量过程中认为是固定不变的，对这种被测量进行测量的测量方法。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

2. 动态测量

动态测量是指被测量在测量过程中是随时间不断变化的，对这种被测量进行测量的测量方法。

三、测量误差

在检测过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种变动因素的影响，从而造成检测结果和被测量的客观真值之间存在一定的差别，这个差值称为测量误差。

真值即真实值，是在一定条件下，被测量客观存在的实际值。真值通常是一个未知量，一般说的真值是指理论真值、规定真值、相对真值。理论真值也称为绝对真值，如三角形内角和为 180° 。约定真值也称为规定真值，是一个接近真值的值，它与真值之差可忽略不计，在实际测量中，在没有系统误差的情况下，将足够多次测量值的平均值作为约定真值。相对真值是指把高一标准器的指示值作为下一等级的真值，此真值被称为相对真值。

按误差的表示方法分类，测量误差可分为绝对误差和相对误差；按误差的性质分类，测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差；按被测量与时间的关系分类，测量误差可分为静态误差和动态误差。

(一) 绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差 Δ ：测量值与被测量的真值之间的代数差。

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-8)$$

绝对误差有符号和单位，它的单位与被测量相同。

绝对误差愈小，说明指示值愈接近真值，测量精度愈高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器，测量 10 mm 的长度，绝对误差为 0.001 mm；另一仪器测量 200 mm 的长度，误差为 0.01 mm。这就很难按绝对误差的大小来判断测量精度的高低了，这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但它相对于被测量的值却显得较小。为此，引入相对误差的概念。

(2) 指示值 (标称) 相对误差 γ_x ：绝对误差 Δ 与指示值 A_x 的比值。

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-9)$$

相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。在上面的例子中很显然，后一种长度测量仪表更精确。

使用相对误差评定测量精度也有局限性。它只能说明不同测量结果的准确程度，不适用于衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是定值，随着被测量的减小相对误差变大，为了更合理地评价仪表质量，采用了满度相对误差的概念。

(3) 满度相对误差 γ_m 。

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

公式 (1-10) 中，当 Δ 取仪表的最大绝对误差值 Δ_m 时，即为满度相对误差。满度相对误差常被用来确定仪表的准确度等级 S ，即

$$S = \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100\% \quad (1-11)$$

根据国家有关精度等级的规定，将精度 S 划分为 7 个等级，从高到低依次是 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级、5.0 级，如表 1-2 所示，准确度等级的数值越小，仪表就越昂贵。

表 1-2 仪表的准确度等级和基本误差

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

例如，在正常情况下，用准确度等级为 0.5 级、量程为 100 °C 的温度表测量温度时，可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta_m = (\pm 0.5\%) \times A_m = \pm (0.5\% \times 100) \text{ } ^\circ\text{C} = \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

【例 1】 某压力表准确度为 2.5 级，量程为 0 ~ 1.5 MPa，求：(1) 可能出现的最大满度

相对误差 γ_m 。(2) 可能出现的最大绝对误差 Δ_m 。(3) 测量结果显示为 0.70 MPa 时, 可能出现的最大示值相对误差 γ_x 。

解:(1) 可能出现的最大满度相对误差可以从准确度等级直接得到, 即 $\gamma_m = \pm 2.5\%$ 。

$$\gamma_x = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{\pm 0.0375}{0.70} \times 100\% = \pm 5.36\%$$

$$(2) \quad \Delta_m = \gamma_m \times A_m = \pm 2.5\% \times 1.5 = \pm 0.0375 \text{ (MPa)} = \pm 37.5 \text{ (kPa)}$$

$$(3) \quad \gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{\pm 0.0375}{0.70} \times 100\% = \pm 5.36\%$$

由例 1 可知, γ_m 的绝对值总是大于 (在满度时等于) γ_x 。

【例 2】 现有准确度为 0.5 级的 0~300 °C 和准确度为 1.0 级的 0~100 °C 的两个温度计, 要测量 80 °C 的温度, 试问采用哪一个温度计好?

解: $\Delta_{m1} = S\% \times A_{m1}$

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{0.5\% \times 300}{80} \times 100\% = 1.88\%$$

$$\gamma_{x2} = \frac{\Delta_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{1.0\% \times 100}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明, 用 1.0 级表比用 0.5 级表的示值的相对误差的绝对值反而小, 所以更合适。

由例 2 得到的结论: 在选用仪表时应兼顾准确度等级和量程, 通常希望指示值落在仪表满度值的 2/3 以上。

(二) 粗大误差、系统误差及随机误差

1. 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称作粗大误差, 又称过失误差, 粗大误差主要是人为因素造成的。例如, 测量人员工作时疏忽大意, 出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外, 测量方法不恰当, 测量条件的突然变化, 也可能造成粗大误差。

在实际测量工作中, 由于粗大误差的误差数值特别大, 容易从测量结果中发现, 一经发现粗大误差, 可以认为该次测量无效, 测量数据应剔除, 从而消除它对测量结果的影响。

2. 系统误差

在相同的条件下, 多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号保持不变, 或按照一定的规律变化, 这种误差称为系统误差。检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对

仪器使用不当、环境条件的变化等原因都可能产生系统误差。例如，某仪表刻度盘分度不准确，就会造成读数偏大或偏小，从而产生恒值系统误差。温度、气压等环境条件的变化和仪表电池电压随使用时间的增长而逐渐下降，则可能产生变值系统误差。

系统误差是有规律性的，因此，可以通过实验的方法或引入修正值的方法计算修正，也可以重新调整测量仪表的有关部件使系统误差尽量减小。

3. 随机误差

在同一条件下，多次测量同一被测量，有时会发现测量值时大时小，误差的绝对值及正、负以不可预见的方式变化，这种误差称为随机误差。随机误差反映了测量值离散性的大小。引起随机误差的因素称为随机效应。随机误差是测量过程中许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

(三) 静态误差和动态误差

(1) 静态误差：被测量不随时间变化时测得的测量误差。

(2) 动态误差：被测量在随时间变化过程中所测得的测量误差。

四、精确度

准确度说明传感器输出值与真值的偏离程度；精密度说明测量传感器输出值的分散性，精密度高说明系统的随机误差和系统误差很小；精确度是精密度与准确度两者的总和，如图 1-17 所示形象地说明了准确度、精密度和精确度的含意。

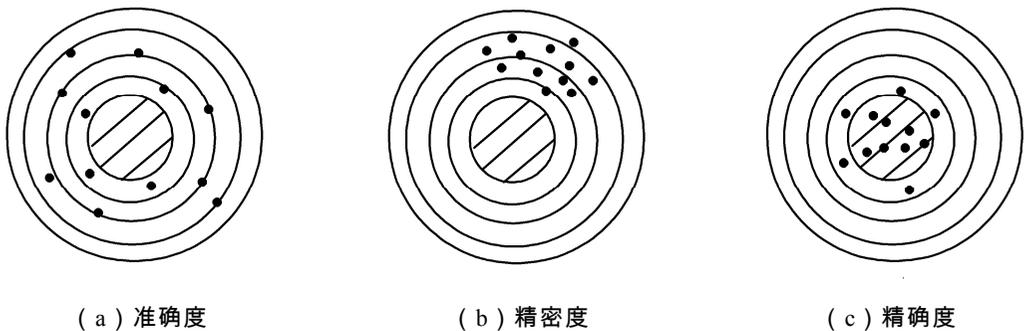


图 1-17 精确度

【实践训练】

误差的处理

(一) 随机误差的处理

自然界中，某一事件或现象出现的客观可能性大小，通常用概率来表示。

客观的必然现象称为必然事件。例如，平面三角形内角和为 180° ，就是一个必然事件，必然事件的概率为 1。违反客观实际的不可能出现的现象称为不可能事件，不可能事件的概率为 0。

客观上可能出现，也可能不出现，而且不能预测的现象称为随机事件或随机现象。它具有一定的概率，且概率为 $0 \sim 1$ 。例如，抛掷硬币，出现正面朝上或反面朝上的现象，即为随机事件。当抛掷次数无限加多时，它们的概率接近 0.5。

在有随机误差的测量结果中，虽然单个测量值误差的出现是随机的，但多数随机误差都服从正态分布规律，如图 1-18 所示，其特点如下。

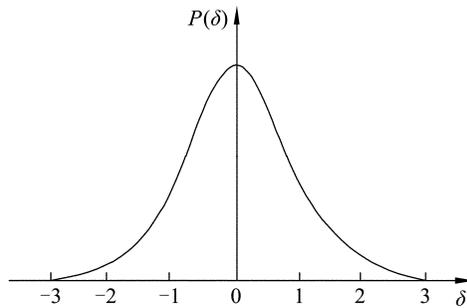


图 1-18 随机误差

1. 对称性

随机误差可正可负，但绝对值相等的正、负误差出现的机会相等。也就是说， $P(\delta)-\delta$ 曲线对称于纵轴。

2. 有界性

在一定测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定的范围，即绝对值很大的随机误差几乎不出现。

3. 抵偿性

在相同条件下，当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，全体随机误差的代数和等于零。

4. 集中性

绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差出现的机会多，即前者比后者的概率密度大，在 $\delta=0$ 处随机误差概率密度有最大值。

【例 3】 用核辐射式测厚仪对钢板的厚度进行 6 次等精度测量，所得数据如表 1-3 所示，请指出哪几个数值为粗大误差。在剔除粗大误差后，请用求算术平均值 \bar{x} 的公式求出钢板厚度。

表 1-3 钢板测量结果的数据列表

n	x_i/mm
1	8.04
2	8.02
3	7.96
4	5.99
5	9.33
6	7.98

解：数据 5.99、9.33 是粗大误差，应剔除。钢板厚度：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} = 8.00 \text{ (mm)}$$

(二) 系统误差的消除

对于系统误差，尽管它的取值固定或按一定规律变化，但往往不易从测量结果中发现它的存在和认识它的规律，也不可能像对待随机误差那样，用统计分析的方法确定，而只能针对具体情况采取不同的处理措施，对此没有普遍适用的处理方法。总之，系统误差虽然是有规律的，但实际处理起来往往比无规则的随机误差困难得多。对系统误差的处理是否得当，很大程度上取决于测量者的知识水平、工作经验和实验技巧。

1. 交换法

在测量中，将引起系统误差的某些条件（如被测量的位置等）相互交换，而保持其他条件不变，使产生系统误差的因素对测量结果起相反的作用，从而抵消系统误差。例如，当用等臂天平称量时，由于天平左右两臂长的微小差别，会引起称量的恒值系统误差。将被称物与砝码在天平左右秤盘上交换，称量两次，取两次测量平均值作为被称物的质量，这时测量结果中就含有因天平不等臂引起的系统误差。

2. 补偿法

在测量过程中，某个条件的变化或仪器某个环节的非线性特性都可能引入变值系统误差。此时，可在测量系统中采取补偿措施，自动消除系统误差。

例如，热电偶测量温度时，冷端温度的变化会引起变值系统误差。在测量系统中采用补偿电桥，就可以起到自动补偿的作用。

3. 替代法

替代法是在测量条件不变的情况下，用已知量替换被测量，从而达到消除系统误差的目的。如图 1-19 所示，为天平称重中的替代法。先使平衡物 T 与被测物 X 相平衡，则 $X = (L_2/L_1)T$ ；然后取下被测物 X ，用砝码 P 与 T 达到平衡，得到 $P = (L_2/L_1)T$ ，取砝码数值作为测量结果。

由此得到的测量结果中，同样不存在因 L_1 、 L_2 不等而带来的系统误差。

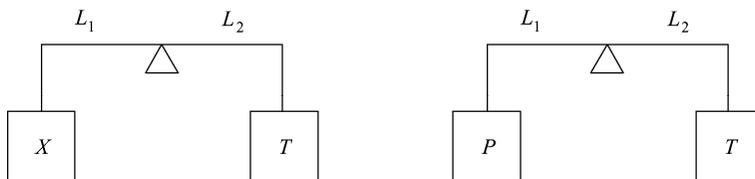


图 1-19 替代法

4. 半周期偶数测量法

对于周期性的系统误差，可以采用半周期偶数观察法，即采用每经过半个周期进行偶数次观察的方法来消除系统误差。

【知识拓展】

测量系统静态误差的合成

由 n 个环节串联组成的开环系统，如图 1-20 所示。输入量为 x ，输出量 $y = f(x)$ 。

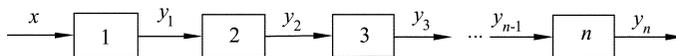


图 1-20 由 n 个环节串联组成的开环系统

当第 i 个环节的满度相对误差为 γ_i 时，则输出端的满度相对误差 γ_m 与 γ_i 之间的关系可用以下两种方法来确定。

1. 绝对值合成法（误差的估计偏大）

$$\gamma_m = \sum_{i=1}^n \gamma_i = \pm(|\gamma_1| + |\gamma_2| + \cdots + |\gamma_n|) \quad (1-12)$$

2. 方均根合成法

$$\gamma_m = \pm\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \cdots + \gamma_n^2} \quad (1-13)$$

【例 4】 用核辐射钢板测厚仪测钢板厚度，已知 PIN 型 γ 射线二极管的测量误差为 $\pm 5\%$ ，微电流放大器测量误差为 $\pm 2\%$ ，指针表测量误差为 $\pm 1\%$ ，求测量的总误差。

解：(1) 用绝对值合成法计算测量误差。

$$\gamma_m = \pm(|\gamma_1| + |\gamma_2| + \cdots + |\gamma_n|) = \pm(5\% + 2\% + 1\%) = \pm 8\%$$

(2) 用方均根合成法计算测量误差。

$$\gamma_m = \pm\sqrt{(5\%)^2 + (2\%)^2 + (1\%)^2} \approx 5.5\%$$

结论：测量系统中的一个或几个环节的精度特别高，对提高整个测量系统总的精度意义不大，反而提高了测量系统的成本，造成了资源浪费。

【思考与练习】

1. 选择题。

(1) 某采购员分别在三家商店购买了 100 kg 大米、10 kg 苹果、1 kg 巧克力，发现均缺少约 0.5 kg，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. 引用误差 D. 准确度等级

(2) 当选购线性仪表时，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) 用万用表交流电压挡 (频率上限为 5 kHz) 测量 100 kHz、10 V 左右的高频电压，发现指示值不到 2 V，该误差属于 ()。用该表直流电压挡测量 5 号干电池电压，发现每次指示值均为 1.8 V，该误差属于 ()。

- A. 系统误差 B. 粗大误差 C. 随机误差 D. 动态误差

2. 填空题。

(1) 测量方法根据测量时是否与被测对象接触，可以分为_____和_____。

(2) 对几个与被测量有确定函数关系的量进行直接测量，将测量值带入函数关系式，经过计算求得被测量，这种方法称为_____测量。

(3) 根据被测量是否随_____变化，测量可分为静态测量和动态测量。

(4) 天平未调水平，测量结果可能会出现_____误差。

(5) _____是指在一定条件下被测量客观存在的实际值。

(6) 明显偏离真值的误差称为_____误差，也称过失误差，主要是由于测量人员的粗心大意及电子仪器受到突然而强大的干扰所引起的。

(7) 在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差称为_____误差。

(8) 正态分布有以下特性：集中性、_____性、有界性。

(9) 满度相对误差用测量仪表的_____与仪器满度值的百分比表示。

(10) 在选用仪表时应兼顾_____和_____。

3. 如图 1-21 所示为一个三位半数字显示电压表，精度等级为 0.2。求：

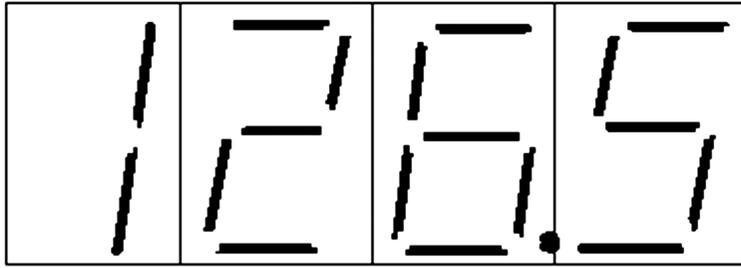


图 1-21 数字式电压表读数

- (1) 量程；
- (2) 分辨力；
- (3) 读数；
- (4) 示值相对误差；
- (5) 满度相对误差。

4. 某温度计测量范围为 $0 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，精度为 0.5 级。求：

- (1) 该表可能出现的最大绝对误差；
- (2) 当指示值分别为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的指示值相对误差。

5. 要测量 240 V 电压，要求测量的指示值相对误差不大于 0.6% ，问若选用 250 V 量程的电压表，其精度应为多少？若选用 500 V 量程的电压表，其精度又应为多少？

6. 市售电子秤多以应变片作为传感元件来测量物体的质量，其原理框图如图 1-22 所示。

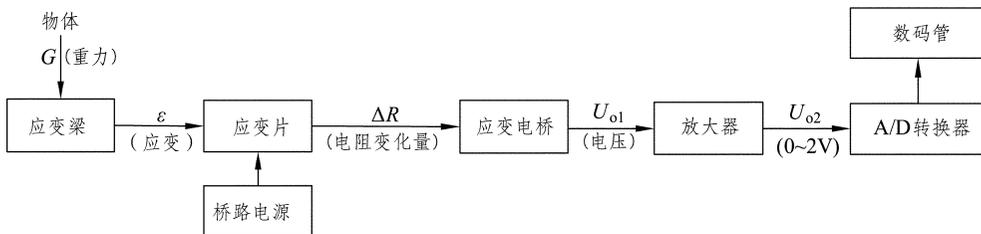


图 1-22 电子秤原理框图

各环节的准确度如下：应变梁的蠕变及迟滞误差为 0.03% ；应变片温漂误差为 0.1% ；应变电桥误差为 0.07% ；放大器误差为 0.08% ；A/D 转换器误差为 0.02% ，桥路电源误差为 0.01% 。求：

- (1) 分别用绝对值合成法和方均根合成法计算系统可能产生的总的最大满度相对误差。
- (2) 哪一个环节引起的误差起主要作用？采取哪些措施才可以提高该电子秤的测量准确度？