1 检测技术的基础知识

1.1 检测技术的基本概念

1.1.1 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换以及信号处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。

广义地讲，检测技术是自动化技术四个支柱之一。从信息科学的角度考察，检测技术任务为：寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号，以及确定二者间的定性、定量关系；从反映某一信息的多种信号表现中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式，以及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存贮、显示等的方法和相应的设备。

信息采集是指从自然界诸多被检查与测量量（物理量、化学量、生物量与社会量）中提取有用的信息。

信息变换是将所提取出的有用信息进行电量形式、幅值、功率等的转换。

信息处理的任务，视输出环节的需要，可将变换后的电信号进行数值运算（求均值、极值等）、模拟量-数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下，经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

1.1.2 自动检测系统

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、自动信号等诸系统的总称，它的组成如图 1.1.1 所示。在上述诸系统中，都包含有被测量、敏感元件和电子测量电路，它们间的区别仅在于输出单元。如果输出单元是显示器或记录器，则该系统叫做自动测量系统；如果输出单元是计数器或累加器，则该系统叫做自动计量系统；如果输出单元是报警器，则该系统是自动保护系统或自动诊断系统；如果输出单元是处理电路，则该系统是部分数据分析系统、自动管理系统或自动控制系统等等。

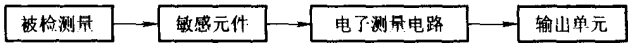


图 1.1.1 自动检测系统框图

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.1.3 传感器

A 传感器

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。这一概念包含以下四个方面的含义：

(1)传感器是测量装置，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，这种量要便于传输、转换、处理、显示等等，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。

B 传感器的组成

传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成。如图 1.1.2 所示。

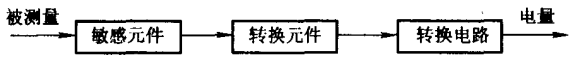


图 1.1.2 传感器组成框图

敏感元件

它是直接感受被测量，并且输出与被测量成确定关系的某一物理元件。

b 转换元件

敏感元件的输出就是转换元件的输入。转换元件把输入转换成电路参数量。

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。实际上，有些传感器很简单，有些则较复杂，也有些是带反馈的闭环系统。

最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，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。

由于传感器空间限制等其他原因，转换电路常装入电箱中。然而，因为不少传感器要在通过转换电路之后才能输出电量信号，从而决定了转换电路是传感器组成部分之一。

C 传感器的分类

目前传感器主要有四种分类方法：根据传感器二作原理分类法、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。

表 1.1.1 给出了按传感器转换原理分类和它们的典型应用。

表 1.1.1　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)	热丝传感器	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	改变电容器的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容器的介电常数		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
		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	
		利用拾磁信号	磁栅	
	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
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

1.2　测量方法

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手续分类

的直接测量、间接测量和联立测量及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1.2.1 直接测量、间接测量与联立测量

A 直接测量

在使用测量仪表进行测量时，对仪表读数不需要经过任何运算，就能直接表示测量的结果，称为直接测量。例如用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速，缺点是测量精度不是很高。这种测量方法是工程上广泛采用的方法。

B 间接测量

在使用仪表进行测量时，首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量，将测量值代入函数关系式，经过计算得到测量所需的结果，这种测量称为间接测量。例如，导线电阻率 ρ 的测量就是间接测量，由于 $\rho=\pi d^2R/4l$，其中 R、l、d 分别表示导线的电阻值、长度和直径。这时，只有先经过直接测量，得到导线的 R、l、d 以后，再代入 ρ 的表达式，经计算得到最后所需要的结果 ρ 值。在这种测量过程中，手续较多，花费时间较长，有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量，工程测量中亦有应用。

C 联立测量

在应用仪表进行测量时，若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果，则称这样的测量为联立测量。在进行联立测量时，一般需要改变测试条件，才能获得一组联立方程所需要的数据。

对联立测量，其操作手续很复杂，花费时间长，是一种特殊的测量方法。它只适用于科学实验或特殊场合。

1.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

A 偏差式测量

在测量过程中，用仪表指针的位移（即偏差）决定被测量的测量方法，称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时，标准量具不装在仪表内，而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准；在测量时，输入被测量，按照仪表指针在标尺上的示值，决定被测量的数值。它是以间接方式实现被测量与标准量具的比较。例如，用磁电式电流表测量电路中某支路的电流，用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等，就属于偏差式测量法。采用这种方法进行测量，测量过程比较简单、迅速，但测量结果的精度低。这种测量方法广泛用于工程测量。

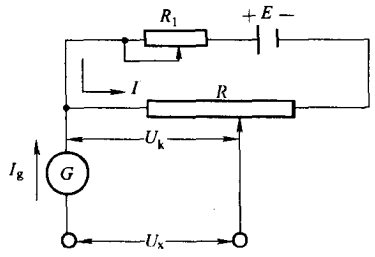


图 1.2.1 电位差计简化等效电路

B 零位式测量

在测量过程中，用指零仪表的零位指示测量系统的平衡状态；在测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定被测未知量的测量方法，称为零位式测量法。 应用这种方法进行测量时，标准量具装在仪表内。 在测量过程中，标准量直接与被测量相比较；调整标准量，一直到被测量与标准量相等，即使指零仪表回零。如图 1.2.1 所示电

路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前，应先调 R_1，将回路工作电流 I 校准 在测量时，要调整 R 的活动触点，使检流计 G 回零，这时 $I_g=0$，即 $U_k=U_x$，这样，标准电压 U_k 的值就表示被测未知电压值 U_x。

采用零位式测量法进行测量，优点是可以获得比较高的测量精度，但是测量过程比较复杂。采用自动平衡操作以后，虽然可以加快测量过程，但由于受工作原理所限，它的反应速度也不会很高。因此，这种测量方法不适用测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。

C 微差式测量

微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较并取得差值后，用偏差法测得此值。应用这种方法测量时，标准量具装在仪表内，并在测量过程中将标准量直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近，因此在测量过程中不需要调整标准量，而只需要测量二者的差值。

微差式测量法的优点是反应快而且测量精度高，特别适用于在线控制参数的检测。

1.3 测量误差

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性，与客观事物的本来面貌存在差异。测量是在一定的物质基础上进行的。因此，人们在进行各种实际测量时，尽管被测量在理论上存在真值，但由于客观实验条件的限制，被测量的真值实际上是测不到的，因而测量结果只能是真值的近似值，这样就不可避免地存在着测量误差。

1.3.1 误差的基本概念及表达方式

A 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 L_0，测量值或示值为 x，则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - L_0 \tag{1.3.1}$$

由于真值 L_0 一般来说是未知的，所以在实际应用时，常用实际值 L 来代表真值 L_0，并采用高一级标准仪器的示值作为实际值。故通常用

$$\Delta x = x - L \tag{1.3.2}$$

来代表绝对误差。

在实际测量中，还经常用到修正值这个名称，它的绝对值与 Δx 相等但符号相反，用符号 C 表示：

$$C = -\Delta x = L - x$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值，也可以是一条曲线、公式或数表。在某些智能化仪表中，修正值预先被编制成有关程序贮存于其中，所得测量结果已自动对误差进行了修正。

B 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处，因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如，测量两个电阻，其中 $R_1=10\Omega$，误差 $\Delta R_1=0.1\Omega$；$R_2=1000\Omega$，误差 $\Delta R_2=1\Omega$，尽管 $\Delta R_1<$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

ΔR_2，但不能由此得出测量电阻 R_1 比测量电阻 R_2 准确程度高的结论。因 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$，相对于 10Ω 来讲是 1%，而 $\Delta R_2 = 1\Omega$，相对于 1000Ω 来讲是 0.1%，所得结论是 R_2 的测量比 R_1 的测量更准。因此，为反映测量质量的高低，需引出相对误差的概念，由绝对误差与真值或实际值之比表示相对误差 δ，即

$$\delta = \frac{\Delta x}{L_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{1.3.3}$$

相对误差通常用于衡量测量的准确程度，相对误差越小，准确程度越高。

C 引用误差

引用误差是一种实用方便的相对误差，常在多档和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表测量范围不是一个点，而是一个量程，这时按式（1.3.3)计算，由于分母是变量，随被测量的变化而变化，所以计算很烦。为了计算和划分仪表的精度等级的方便，通常采用引用误差，它是从相对误差演变过来的，其分母为常数，取仪器仪表中的量程值，因而引用误差 γ 为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \tag{1.3.4}$$

式中 A——仪表的满量程。

我国电工仪表共分七级：0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5 及 5.0。例如，0.1级表的引用误差的最大值不超过 ±0.1%；0.5 级表的引用误差最大值不超过 ±0.5% 等。工业自动化仪表的精度等级一般在 0.2～4.0 级之间。

引用误差从形式上看像相对误差，但是对某一具体仪表来说，由于其分母 A 是一个常数，与被测量大小无关，因此它实质是一个绝对误差的最大值。例如，量限为 1V 的毫伏表，精度等级为 5.0，即 $\gamma = (\Delta x / A) \times 100\% = 5.0\%$。从这个式子可以求出 $\Delta x = 1 \times 5.0\% = 50\text{mV}$ 这说明无论指示在刻度的哪一点，其最大绝对误差不超过 50mV，但各点的相对误差是不同的。在选用仪表时，一般最好能工作在不小于满度值 2/3 的区域。

1.3.2 误差的分类与来源

根据误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

A 系统误差

在相同的条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时，与某一个或几个因素成函数关系的有规律的误差，称为系统误差，简称系差。例如仪表的刻度误差和零位误差，应变片电阻值随温度的变化等等，都属于系统误差。它产生的主要原因是仪表制造、安装或使用方法不正确，也可能是测量人员一些不良的读数习惯造成的。

系统误差是一种有规律的误差，故可以采用修正值或补偿校正的方法来减小或消除。

B 随机误差

服从统计规律的误差称随机误差，简称随差，又称偶然误差。只要测试系统的灵敏度足够高，在相同条件下，重复测量某一量时，每次测量的数据或大或小，或正或负，不能预知。虽然单次测量的随机误差没有规律，但多次测量的总体却服从统计规律，通过对测量数据的统计处理，能在理论上估计其对测量结果的影响。

随机误差是由很多复杂因素,如电磁场的微变,零件的摩擦、间隙,热起伏,空气扰动,气

压及湿度的变化，测量人员感觉器官的生理变化等，对测量值的综合影响所造成的。它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

应该指出，在任何一次测量中，系统误差与随机误差一般都是同时存在的，而且两者之间并不存在绝对的界限。

C 粗大误差

粗大误差是一种显然与实际值不符的误差。如测错、读错、记错以及实验条件未达到预定的要求而匆忙实验等，都会引起粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值，在处理数据时应剔除掉。这样，测量中要估计的误差就只有系统误差和随机误差两类。

误差的来源是多方面的，例如测量用的工具不完善（称工具误差）；测试的设备和电路的安装、布置、调整不完善(称装置误差)测量方法本身的理论根据不完善(称方法误差)测量环境如温度、湿度、气压、电磁场的变化（称环境误差）；甚至测量人员生理上的原因，如反应速度、分辨能力（称人员误差）等。

3.3 系统误差和随机误差的表达式

设对某被测量进行了等精度，独立的 n 次测量，得值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，则测定值的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.3.5}$$

式中，$\bar{x}$ 又可称为取样平均值。

当测量次数 n 趋于无穷大（$n \to \infty$)时,取样平均值的极限称为测定值的总体平均值,用符号 A 表示

$$A = \lim_{n \to \infty} \bar{x} = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.3.6}$$

测定值的总体平均值 A 与测定值真值 L_0 之差被定义为系统误差，用符号 ε 表示

$$\varepsilon = A - L_0 \tag{1.3.7}$$

n 次测量中，各次测定值 x_i（$i = 1 \sim n$）与其总体平均值 A 之差被定义为随机误差，用符号 δ_i 表示

$$\delta_i = x_i - A \qquad (i = 1 \sim n) \tag{1.3.8}$$

将式(1.3.7)和式(1.3.8)等号两边分别相加，得

$$\varepsilon + \delta_i = (A - L_0) + (x_i - A) = x_i - L_0 = \Delta x_i \tag{1.3.9}$$

式中 Δx_i—— 各次测定的绝对误差。

式(1.3.9)表明，各次测量值的绝对误差等于系统误差 ε 和随机误差 δ_i 的代数和。

1.3.4 基本误差和附加误差

按使用条件划分，可将误差分为基本误差和附加误差。

A 基本误差

任何测量仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的。环境条件在变化，测量误差也因环境条件(如温度、气压、湿度、电源电压和频率、振动等)的变化而变化。这样在对传感器和仪器进行检定和刻度时，应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内。

此条件由国家标准或企业标准文件明确规定，称为标准条件。仪器在标准条件下使用所具有的误差称为基本误差，它属于系统误差。

例如，仪表是在电源电压 220V ± 5V、电网频率 50Hz ± 2Hz、环境温度 20℃ ± 5℃，大气压力 101.3kPa ± 1kPa、湿度 65% ± 5%的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作，则仪表所具有的误差就是基本误差。换句话说，基本误差是测量仪表在额定条件下工作所具有的误差。

测量仪表的精度等级就是由其基本误差决定的。不同等级的传感器和仪表的基本误差在国家和企业标准中都有明确规定。

B　附加误差

当使用条件偏离标准条件时，传感器和仪表必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差，称为附加误差。例如，温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

在使用传感器和仪表进行测量时，应根据使用条件在基本误差上再分别加以各项附加误差，例如，在电源电压是 220V ± 10%，温度范围是 0～50℃，仪表可过载运行等条件范围内工作，可以知道测量仪表总误差不超过多少。

1.3.5　测量误差的估计和校正

测量误差中包括有系统误差和随机误差。它们的性质不同，对测量结果的影响及处理方法也不同。

A　随机误差的影响及统计处理

在测量中，当系统误差被尽量消除或减小到可以忽略的程度之后，仍会出现对同一被测量重复进行多次测量时有读数不稳定现象，这说明有随机误差存在。由随机误差性质可知，它服从于统计规律。它对测量结果的影响可用均方根误差来表示。

均方根误差（又称标准误差）σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i^2}{n}} \tag{1.3.10}$$

式中　n——测量次数；

$\Delta x_i = x_i - L$，L 为真值，x_i 为第 i 次测量值。

在实际测量中，测量次数 n 为有限的，真值 L 不易得到，因而用 n 次测量值的算术均值 $\overline{x}$ 代替真值，第 i 次测量误差 $\Delta x_i = x_i - \overline{x}$，这时的均方根误差则为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \tag{1.3.11}$$

用 $\overline{x}$ 代替 L 产生的均方根误差 σ 为

$$\overline{\sigma} = \frac{\delta}{\sqrt{n}}$$

测量结果可表示为

$$x = x \pm \sigma \text{ 或 } x = x \pm 3\sigma \tag{1.3.12}$$

均方根误差 σ 的物理意义是：在测量结果中随机误差出现在 $-\sigma \sim +\sigma$ 范围内的概率是

68.3%，出现在 $-3\sigma\sim+3\sigma$ 范围内的概率是 99.7%。3σ 是置信限，大于 3σ 的随机误差被认为是粗大误差，测量结果无效，此数予以剔除。

B 系统误差的发现与校正

a 系统误差的发现与判别

由于系统误差对测量精度影响比较大，必须消除系统误差的影响，才能有效地提高测量精度。下面介绍的是发现系统误差的常用方法。

(1)实验对比法

这种方法是通过改变产生系统误差的条件从而进行不同条件的测量，以发现系统误差。这种方法适用于发现不变的系统误差。例如，一台测量仪表本身存在固定的系统误差，即使进行多次测量也不能发现。只有用精度更高一级的测量仪表测量，才能发现这台测量仪表的系统误差。

(2)剩余误差观察法

剩余误差为某测量值与测量平均值之差即 $p_i=x_i-\overline{x}$。根据测量数据的各个剩余误差大小和符号的变化规律，可以直接由误差数据或误差曲线图形来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差。如图 1.3.1 所示：(a)若剩余误差大体上是正负相间，且无显著变化规律，则不存在系统误差；(b)若剩余误差有规律地递增或递减，且在测量开始与结果时误差相反，则存在线性系统误差；（c）若剩余误差符号有规律地逐渐由负变正，再由正变负，且循环交替重复变化，则存在周期性系统误差；若剩余误差有图（d)所示的变化规律，且应怀疑同时存在线性系统误差和周期性系统误差。图中 n 为测量次数。

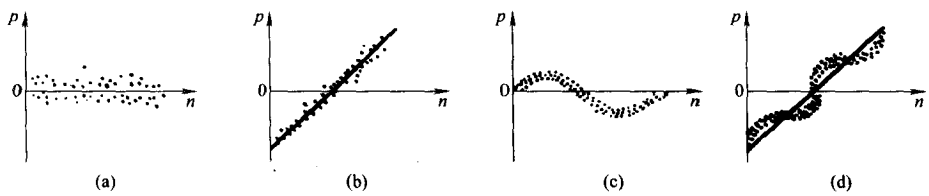


图 1.3.1 $p-n$ 示意图

(3) 不同公式计算标准误差比较法

对等精度测量，可用不同公式计算标准误差，通过比较可以发现系统误差。使用上常采用贝塞尔公式和佩捷斯公式计算比较，即

$$\sigma_1=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}p_i^2}{n-1}}\qquad\sigma_2=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{\sum_{i=1}^{n}|p_i|}{\sqrt{n(n-1)}}$$

令 $\sigma_2/\sigma_1=1+u$

若

$$|u|\geqslant\frac{2}{\sqrt{n}}$$

则怀疑测量中存在系统误差。

(4)计算数据比较法

对同一量测量得到多组数据，通过计算数据比较，判断是否满足随机误差条件，以发现系统误差。例如，对同一量独立测量 m 组结果，并计算求得算术平均值和均方根误差为：

$x_1,\sigma_1;x_2\ \sigma_2;\cdots;x_m,\sigma_m$。任意两数据（$x_i,x_j$）的均方根误差为$\sqrt{\sigma_i^2+\sigma_j^2}$。任意两组数据$\overline{x_i}$和$x_j$间不存在系统误差的条件是

$$|\overline{x_i}-\overline{x_j}|<2\sqrt{\sigma_i^2+\sigma_j^2}$$

b　系统误差的校正

这里阐述的是当存在系统误差时，如何从电路设计、测量方法和测量数据的处理方面对误差进行修正。

(1)补偿法

在电路和传感器结构设计中，常选用在同一有害干扰变量作用下能产生误差相等而符号相反的零部件或元器件作为补偿元件。例如，采用负温度系数的热敏电阻补偿正温度系数电阻的温度误差，采用负温度系数的电容补偿正温度系数的电阻引起的时间常数的变化，采用磁分流器补偿磁路气隙中因温度变化引起的磁感应强度的变化等。

(2)差动法

相同的参数变换器（如电阻、电容、电感变换器）具有相同的温度系数。若将它们接入电桥相邻两个臂时，变换器的参数值输入量作差动变化，即一个臂的参数增加，另一个臂的参数则减小。这时的电桥输出是单个参数变换器输出的两倍。但他们在同一温度场的作用下，由于两臂的参数值相等，温度系数相同，则温度变化引起的参数值相等，尽管参数变化了，然而电桥输出却不受影响。利用信号差动工作而对有害变量是对称作用的差动法，即可提高灵敏度，又能有效地彼此抵消有害因素引起的误差。在检测仪器中，各种参数式变换器几乎都采用差动法接成差动电桥的形式，以降低温度和零位引起的误差。

(3)比值补偿法

测量电路中经常采用分压器及放大器。它们的变换系数总是与所用电阻元件的电阻比值有关。为了保证精确的比值，可以要求每一个电阻具有精确的电阻值，然而这并非绝对需要，且代价很高。当所选用的电阻具有相等的相对误差和相同的电阻温度系数时，温度变化虽使电阻值变化，但它们仍能保证相互比值的精确性，从而可采用低精度的元件实现比值稳定的高精度分压比或放大倍数。

(4)测量数据的修正

测量传感器和仪器经过检定后可以准确知道它的测量误差。当再次测量时，可以将已知的测量误差作为修正值，对测量数据进行修正，从而获得更精确的测量结果。

1.3.6　测量误差的合成与分配

系统误差和随机误差由于其规律和特点不同，它们合成与分配的处理方法也不同，须研究各自的理论和方法。

A　测量误差的合成

一个测量系统或一台测量仪表都是由若干部分组成，而各部分又都存在测量误差，各局部误差对整个测量系统或仪表测量误差的影响就是误差的合成问题。

系统误差的合成

设测量系统或仪表各环节输入参数分别为$x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$，总的输出与输入函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

又令 $dx_1, dx_2, \cdots, dx_n$ 分别为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的绝对误差，则可近似得到各部分系统误差的绝对误差 Δ 的合成表达式为：

$$\Delta = dy = \frac{\partial y}{\partial x_1}dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2}dx_2 + \cdots + \frac{\partial y}{\partial x_n}dx_n \tag{1.3.13}$$

相对误差 δ 合成的表达式为

$$\delta = \frac{dy}{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{dx_1}{y} + \cdots + \frac{\partial y}{\partial x_n}\frac{dx_n}{y} \tag{1.3.14}$$

b 随机误差的合成

设测量系统或仪表有 n 个环节组成，各部分的标准误差分别为 $\sigma_1、\sigma_2、\sigma_3\cdots、\sigma_n$，误差合成的表达式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2 + 2\sum_{i<j<n}^{n}\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j} \tag{1.3.15}$$

式中 ρ_{ij}——第 i 和第 j 个单项随机误差之间的相关函数，ρ 的取值为 $-1 \leqslant \rho \leqslant 1$。

若各环节标准误差相互独立，则误差合成表达式为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \cdots + \sigma_n^2} \tag{1.3.16}$$

总合成误差

设测量系统或仪表的系统误差和随机误差均为相互独立的，总的合成误差的极限值可表示为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n}\Delta_i + \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2} \tag{1.3.17}$$

B 测量误差的分配

若预先对测量系统或仪表总误差提出要求，如何确定各组成环节的单项误差之值，这就是误差合理分配问题。

系统误差的分配

系统误差的分配是指在组成一测量系统或设计一台测量仪表时，应当怎样合理分配各环节或各元件的系统误差。下面以四臂电桥的系统误差分配为例说明系统误差分配方法。

已知四臂电桥的系统综合公式是

$$\delta R_x = \delta R_N + \delta R_2 - \delta R_3$$

式中 δR_N——标准电阻的相对误差。

$\delta R_2、\delta R_3$ 是非标准电阻相对误差，一般数值较大，但 δR_3 前有负号。

若取 $\delta R_2 = \delta R_3$，则 $\delta R_x = \delta R_N$，即 R_x 的测量误差 δR_x 只取决于可变标准电阻 R_N 的误差值。在精密电桥中正是按照这种原则设计的，由于 δR_2 与 δR_3 的相对误差互相抵消，大大提高了测量精度。

b 随机误差的分配

随机误差本身的特点给误差分配带来了困难，在误差分配时采用等分配原则，即认为各环节随机误差均相等，把总的误差平均分配给各环节。

c 最佳测量方案的选择

需要全本请访问 www.ertongbook.com

对于确定的测量任务，为使其测量误差最小，要从多方采取措施，以提高测量精度。

(1)选择合理的测量方法，避免或减小由于测量方法不当引起的误差。

(2)选择合适的测量仪表，避免或减小由于仪表与被测量不匹配所造成的误差。

(3)选择合适的测量点，使其真实地代表被测量或不因测量仪表的引入而改变被测量的状态。

(4)对于间接测量，被测量与直接测量之间有一定的函数关系。首先选择合适的函数关系，再选择合适的测量点，使各直接测量点的误差合成后为最小。

1.4 传感器的基本特性

在讲传感器原理、构造、应用之前，对传感器的基本特性做一些了解是非常必要的。传感器的特性可以通过它的静态和动态特性揭示出来。

1.4.1 传感器的静态特性

A 精确度

与精确度有关的指标有三个：精密度、准确度和精度。

精密度

它说明测量传感器输出值的分散性，即对某一稳定的被测量，由同一个测量者，用同一个传感器，在相当短的时间内连续重复测量多次，以检查测量结果的分散程度。例如，某测温传感器的精密度为 0.5℃，即表示多次测量结果的分散程度不大于 0.5℃。精密度是随机误差大小的标志，精密度高，意味着随机误差小。但必须注意，精密度与准确度是两个概念，精密度高不一定准确度高。

b 准确度

它说明传感器输出值与真值的偏离程度。例如，某流量传感器的准确度为 $0.3m^3/s$,表示该传感器的输出值与真值偏离 $0.3m^3/s$。准确度是系统误差大小的标志，准确度高意味着系统误差小。同样，准确度高不一定精密度高。

c 精度

它是精密度与准确度两者的综合，精度高表示精密度和准确度都比较高。在最简单的情况下，可取两者的代数和。精度常以测量误差的相对值表示，联系上一节所阐述的精度等级概念，理解它的意义就更容易了。

如图 1.4.1 所示的射击例子有助于加深对精密度、准确度和精度三个概念的理解。图 1.4.1(a)表示准确度高而精密度低，图 1.4.1(b)表示准确度低而精密度高；图 1.4.1(c)表

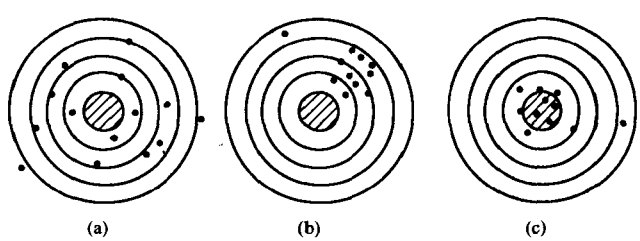


图 1.4.1 射击举例

示精度高。在测量中我们希望得到精度高的结果。

B 稳定性

传感器的稳定性有两个指标，一是传感器测量输出值在一段时间的变化，以稳定度表示；二是传感器外部环境和工作条件变化引起输出值的不稳定，用影响量表示。

a 稳定度

指在规定时间内，测量条件不变的情况下，由于传感器中随机性变动，周期性变动，漂移等引起输出值的变化。一般用精密度和观测时间长短表示。例如，某传感器输出电压值每小时变化 1.3mV 则其稳定度可表示为 1.3mV/h。

b 影响量

测量传感器由外界环境变化引起输出值变化的量，称为影响量。它是由温度、湿度、气压、振动、电源电压及电源频率等一些外加环境影响所引起的。说明影响量时，必须将影响因素与输出值偏差同时表示。例如，某传感器由于电压变化 10% 而引起其输出值变化 0.02mA，则应写成 0.02mA/V ± 10%。

C 传感器的静态输入-输出特性

静态特性是指输入的被测参数不随时间而变化，或随时间变化很缓慢时，传感器的输出量与输入量的关系

a 线性度

人们总是希望传感器的输出与输入关系是有线性特性。这样可使显示仪表刻度均匀，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环节，从而简化了测量电路。但实际上由于传感器存在着迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素，以及外界条件的影响，使其输出输入特性总是具有不同程度的非线性。

线性度（又称非线性误差）说明输出量与输入量的实际关系曲线偏离其拟合直线的程度。

设传感器实际输出输入关系曲线用下列多项式代数方程表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \qquad (1.4.1)$$

式中 y——输出量；

x——输入量；

a_0——零点输出；

a_1——理论灵敏度；

$a_2, a_3, \cdots, a_n$——非线性项系数。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式。

对曲线的线性化处理，可以采用各种方法，其中包括计算机硬件或软件补偿。一般来说，这些办法都比较复杂。所以在曲线的非线性程度不太大的情况下，可以采用拟合直线的办法来线性化。

在采用拟合直线达到线性化时，实际输出输人曲线与其拟合直线之间的最大偏差就称为线性度（或非线性误差），通常用相对误差 δ_L 来表示，即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \qquad (1.4.2)$$

式中 Δ_{max}——输出量与输人量实际关系曲线与拟合直线之间的最大偏差值；

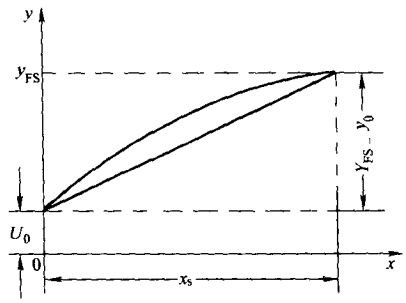


图 1.4.2　端基线性度

y_{FS}——满量程输出。

拟合直线的方法很多。不同的拟合直线，非线性误差也不同。选择拟合直线的主要出发点，应是获得最小的非线性误差。最简单的是端基线性度的拟合直线，如图 1.4.2 所示。只需校正传感器的零点和对应于最大输入量 x_{max} 的最大输出值 y_{max} 点，将这两点连成直线便得到该传感器的拟合直线，此法简单方便，但精度不高。根据误差理论，采用最小二乘法来确定拟合直线，其拟合精度最高。

令输出量 y 与输入量 x 满足下述关系式：

$$y = a + Kx \tag{1.4.3}$$

式中 a 和 K 的确定条件是以使实际测量值 y_i 和由方程(1.4.3)给出的值 y 之间的偏差为极小。假定实际校准测试点有 n 个，则第 i 个校准数据 y_i 与拟合直线相应值之间的差为

$$\Delta_i = y_i - (a + Kx_i) \tag{1.4.4}$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum \Delta_i^2$ 为最小值，也就是使 $\sum \Delta_i^2$ 对 K 和 a 的一阶偏导数等于零，从而求 a 和 K 的表达式，即

$$\frac{\partial}{\partial K}\sum \Delta_i^2 = 2\sum (y_i - Kx_i - a)(-x_i) = 0 \tag{1.4.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial a}\sum \Delta_i^2 = 2\sum (y_i - Kx_i - a)(-1) = 0 \tag{1.4.6}$$

从以上二式求出 K 和 a 为

$$K = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{1.4.7}$$

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{1.4.8}$$

在获得 K 和 a 之值后代入式(1.4.3) 即可得到拟合直线，然后按式(1.4.4)求出差的最大值 Δ_{max} 即为非线性误差。

例题　有一只压力传感器校准数据如下表。要求根据这些数据求得最小二乘法线性度的拟合直线方程。

次数		y_i/V \ $x_i \times 10^5$/Pa	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
校准数据	1	正行程	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995	1.0000
		反行程	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005	
	2	正行程	0.0025	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9995
		反行程	0.0035	0.2030	0.4020	0.6015	0.8005	
	3	正行程	0.0035	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9990
		反行程	0.0040	0.2030	0.4020	0.6010	0.8005	

解：为了求得直线方程式，必须先算出式（1.4.7)和式(1.4.8)中各数值之和。从所给数据知道，校准次数 $n=33$。所求各值如下

$$\sum_{i=1}^{33} x_i = 37.5$$

$$\sum_{i=1}^{33} y_i = 15.0425$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i y_i = 25.5168$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i^2 = 63.75$$

把上述数据代入式(1.4.7)和式(1.4.8),得到

$$K=0.39850 \qquad a=0.00298$$

于是，得到最小二乘法的拟合直线方程为 $y=0.00298+0.39850x$

再将各个输入值 x_i 代入上式，就得到理论拟合直线的各点数值：

x_i	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
y_i	0.00298	0.2022	0.4015	0.6007	0.8000	0.9992

按表中数据和上述数据绘出曲线，可依次找出输出输入校准值与上述理论拟合直线相应点数值之间的最大偏 $\pm\Delta_{max}$。根据式(1.4.2)便可求出该传感器的非线性误差。

b 灵敏度

传感器的输出量 y 与输入量 x 间的关系 $y=f(x)$ 称为该传感器的刻度方程。表示这种输出输入关系的特性叫做刻度特性。一般来说，刻度特性分为线性特性和非线性特性。

灵敏度表示传感器的输入量增量 Δx 与由它引起的输出量增量 Δy 之间的函数关系。更确切地说，灵敏度 k 等于传感器输出增量与被测量增量之比，它是传感器在稳态时输出输入特性曲线上各点的斜率，可用下式表示：

$$k=\frac{dy}{dx}=\frac{df(x)}{dx}=f'(x) \tag{1.4.9}$$

灵敏度表示单位被测量的变化所引起传感器输出值的变化量。很显然，灵敏度 k 值越高表示传感器越灵敏。

图 1.4.3 表示了传感器灵敏度的三种情况：图 1.4.3(a)在整个测量中，灵敏度保持为常数，即灵敏度不随被测量而变化；图 1.4.3(b)灵敏度随被测输入量增加而增加；图 1.4.3

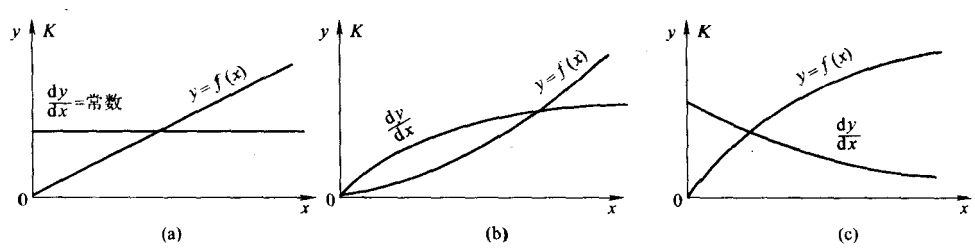


图 1.4.3 传感器的灵敏度

(ζ 灵敏度随被测输入量增加而减小。

从灵敏度的定义可知，灵敏度是刻度特性的导数，因此它是一个有单位的量。当我们讨论某一传感器的灵敏度时，必须确切地说明它的单位。例如某传感器的压力灵敏度用 k_p 表示,单位是 mV/Pa,即每 1Pa 压力引起多少毫伏电压输出；对于电阻应变式传感器，用应变灵敏度 k 表示,其单位是 mA/με(毫安/微应变)，即每一微应变引起多少毫安电流输出。

c 灵敏度阈与分辨力

灵敏度阈是指传感器最小所能够区别的读数变化量。有些传感器，如电位器式传感器，当输入量连续变化时，输出量只做阶梯变化，则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。对于数字式仪表，灵敏度阈转变成分辨力。所谓分辨力就是指数字式仪表指示数字值的最后一位数字所代表的值，当被测量的变化量小于分辨力时，数字式仪表的最后一位数不变，仍指示原值。

灵敏度阈或分辨力都是有单位的量，它的单位与被测量的单位相同，例如某电桥的灵敏度阈是 0.0003Ω,某数字电压表的分辨力是 10μV 等。

对于一般传感器的要求是，灵敏度应该大而灵敏度阈应该小。但也不是灵敏度阈越小越好，因为灵敏度阈越小，干扰的影响越显著，给测量的平衡过程造成困难，而且费时、费钱。因此，选择灵敏度阈只要小于允许测量绝对误差的三分之一即可。

从物理含义看，灵敏度是广义的增益，而灵敏度阈则是死区或不灵敏区。

d 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出-输入特性曲线不重合程度称为迟滞。如图 1.4.4 所示，也就是说，达到同样大小的输入量所采用的行程方向不同时，尽管输入为同一输入量，但输出信号大小却不相等。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、材料内摩擦、积尘等。

迟滞误差大小一般由实验方法确定。用最大输出差值 Δ_{max} 对满量程输出 y_{FS} 的百分比来表示,即

$$\delta_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1.4.10}$$

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时，可选择 n 个测试点，对应于每一点的输入信号，传感器正反行程趋近，输出信号出现差值。差值中最大者即为回程误差。

重复性

重复性是指传感器的输入在按同一方向变化时，在全量程内连续进行重复测试时所得到的各特性曲线的重复程度，如图 1.4.5 所示。多次重复测试的曲线越重合，说明重复性越好，误差也小。重复特性的好坏是与许多随机因素有关的，与产生迟滞现象具有相同的原因。

为了衡量传感器的重复特性，一般采用输出最大重复性偏差 Δ_{max} 与满量程 y_{FS} 的百分比来表示重复性指标

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1.4.11}$$

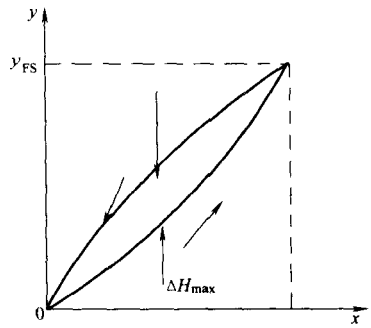


图 1.4.4　迟滞特性

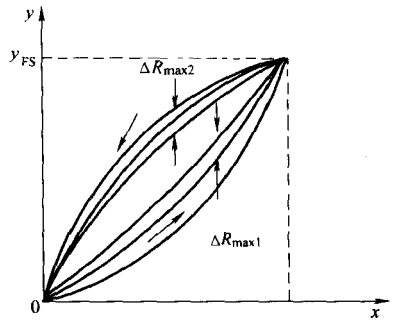


图 1.4.5　重复特性

重复性误差只能用实验方法确定。用实验方法分别测出正反行程内诸测试点在本行程内同一输入量时，输出量的偏差，取其最大值作为重复性误差，然后取其满量程输出 y_{FS} 的比值，比值越大重复性越差。

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取 n 个测试点，对应每一点多次从同一方向趋近，获得输出系列值，算出最大值与最小值之差作为重复性偏差，然后在 n 个重复性偏差中取出最大值 Δ_{max} 作为重复性误差。

1.4.2　传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。实际被测量随时间变化的形式可能是各种各样的，只要输入量是时间的函数，则其输出量也将是时间的函数。通常研究动态特性是根据标准输入特性来考虑传感器的响应特性。标准输入有三种：呈正弦变化、阶跃变化的输入和线性输入，而经常使用的是前两种。

A　动态特性的数学描述

为了便于分析传感器的动态特性，必须建立数学模型。线性系统的数学模型为一常系数线性微分方程。对线性系统动态特性的研究，其方法之一就是分析数学模型的输入量 x 与输出量 y 之间的关系，通过对微分方程求解，就可得到动态性能指标。

对于线性定常（时不变）系统，其数学模型为高阶常系数线性微分方程，即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1}\frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \tag{1.4.12}$$

式中　y——输出量；

x——输入量；

t——时间；

$a_0 、a_1 \cdots a_n$——常数；

$b_0 、b_1 \cdots b_n$——常数；

$\frac{d^n y}{dt^n}$——输出量对时间 t 的 n 阶导数；

需要全本请访问 www.ertongbook.com