普通高等教育“十二五”规划教材

动力工程测试技术

黄素逸 王 献 编著

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

动力工程测试技术

编著　黄素逸　王　献
主审　刘　伟　周怀春

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书以动力工程和动力机械中遇到的测试问题为研究对象，系统地介绍了测量和数据处理方面的基本知识，以及温度、压力、流速、流量、湿度、气体成分、转速、功率、液面、料位、噪声等工程中常见物理量的测试原理和测量方法。同时，针对动力工程中最常见的流动现象，用专门一章介绍相关的流动显示技术。

本书既可作为高等学校能源动力类专业测试课程的教材，也可供从事科学研究及测试工作的科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

动力工程测试技术/黄素逸，王献编著．—北京：中国电力出版社，2011.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1962-2

Ⅰ.①动… Ⅱ.①黄… ②王… Ⅲ.①动力工程—测试技术—高等学校—教材 Ⅳ.①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 150694 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http：//www.cepp.sgcc.com.cn）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 392 千字

定价 **28.00** 元

前　　言

在科学技术迅猛发展的今天，测试技术作为人们认识客观世界的一个重要手段显得越来越重要。工业过程要依靠各种先进的测量方法来实现智能控制，许多复杂的科学实验也需要日益精确的测量技术为其提供可靠的数据，即使在计算机和计算科学迅速发展的今天，各种数学模型和数值计算的结果同样需要通过测量来验证。

动力工程涉及的测试量主要是热物理量。现代动力工程测试技术的发展呈现以下特点。

（1）在测试方法上，由接触测量向非接触测量发展。例如，传统测温、测速方法都是接触式的，而近代的激光测速、激光测温都是非接触式的，这种非接触的测量方法，避免了传感器对被测物理量场的干扰，代表了当今测量技术的发展方向。

（2）在测量的时间域上，由热物理量的静态测量发展为热物理量的动态测量。

（3）在测量的空间域上，由被测物理量个别点的测量发展到整个热物理量场的测量。

（4）在数据处理上，由被测数据的手工采集或仪表记录发展到计算机采集、储存与处理。

（5）在测量功能上，由单纯的测量发展到测量与控制相结合，又进一步发展为测量、控制、诊断及图像显示相结合。

由于计算机、激光、红外技术、系统分析技术、信号处理技术、图像处理技术等大量应用于动力工程测试技术，为测试技术注入了大量新的内容，出现了许多新的测量仪表，因此，动力工程测试技术已经突破了传统热工测试的模式，成为一个集热工测量、光学理论、信号分析、图像处理和计算机可视化等多学科交叉的综合技术。

动力工程测试技术涉及的面很广，除了工程上常常遇到的温度、压力、流速、流量、湿度、气体成分、转速、功率、液面、料位、噪声（即所谓过程量）外，还包括许多物性量，如导热系数、热扩散系数、汽化热、融化热、凝固热、密度、黏度、膨胀系数、润湿角、堆积角、发射率、吸收率、反射率、透射率等。此外，动力工程测试技术还涉及一些过程量（即其数值的大小与进行的过程有关），如传热系数、表面传热系数、阻力系数、空泡份额、滑移比等。

大多数动力工程的学习者在今后的工作中涉及的主要是工程量，因此考虑到本书的篇幅，本书只讨论工程量的测量问题，而且将重点放在动力工程遇到最多的温度、压力、流速、流量的测量技术上。由于流动是动力工程中最基本的物理现象，而且热过程和相关工程计算都与流动现象息息相关，因此在本书中专门用一章介绍流动显示技术。

目前，国内已有若干与动力工程测试技术相关的教材和参考书，为了突出本书的特色，作者根据多年从事测试技术的教学和科研经验，在以下几方面做了若干工作：①更新内容，主要是根据动力工程测试技术的发展，淘汰了部分很少采用的仪表及其相关内容；②尽可能根据上述测量技术的发展方向介绍温度、压力、流速、流量等方面的新测试方法和测试仪表；③在选材上尽可能新颖，叙述上尽可能简洁。

本书作为普通高等教育"十二五"规划教材，得到了中国电力出版社的大力协助，刘伟

教授和周怀春教授对本书进行了认真的审阅，在此表示衷心的感谢。

本书既可作为高等学校动力工程学科测试课程的教材，也可供从事科学研究及测试工作的科技人员参考。

黄素逸、王献　于武汉

2011 年 8 月

目 录

第一章　测量和数据处理概述

第一节　测量的基本知识

一、测量的概念

测量是人们对客观事物取得数量概念的一种认识过程，在这一过程中，人们借助于专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，求得被测量的值，获得对客观事物的定量概念和内在规律的认识。

所谓测量就是用实验的方法，把被测量的物理量与同性质的标准量进行比较，确定二者的比值，从而得到被测量的量值。根据测量的概念，被测量的值可表达为

$$X = aU \tag{1-1}$$

式中　X——被测量；

U——标准量（选用的测量单位）；

a——被测量与标准量的数字比值。

从式（1-1）可知，数字比值 a 的大小与所选用的标准量的大小有关，当所选用的标准量的单位改变时，测得的数字比值也将随之发生相应的变化。

测量方法就是实现被测量与标准量比较的方法，一般可以分为直接测量、间接测量和组合测量几种。使被测量直接与选用的标准量进行比较，或者用预先标定好的测量仪表进行测量，从而直接求得被测量数值的测量方法称为直接测量。通过直接测量与被测量有确定函数关系的其他各个变量，然后将所测得的数值代入函数关系式进行计算，从而求得被测量数值的方法称为间接测量。测量中使各个未知量以不同组合形式出现（或改变测量条件以获得不同组合），根据直接测量或间接测量的数据，通过解联立方程组来求得未知量数值的测量方法称为组合测量。

二、测量系统

一般测量过程都需要通过测量系统来实现。测量设备和被测量对象组合成测量系统。测量系统中的测量设备一般由传感器、变换器（变送器）、传输通道和显示装置组成，如图 1-1 所示。

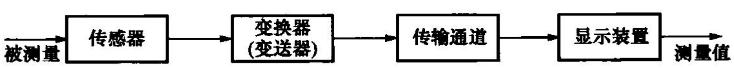

图 1-1　一般测量系统的组成

传感器是与被测量对象直接发生联系的部分，又称为一次仪表。它是将被测量（物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成便于处理和传输的另一物理量（一般多为电量）。

变换器是将传感器输出的信号变换成显示装置易于接受的信号，这种信号变换可能是物理性质的变换，也可能是将同性质的物理量加以放大。

显示装置是与观测者直接发生联系的部分，又称为二次仪表。它将被测量信号变成能为人们感官识别的形式。显示装置通常有三种基本形式，即模拟式、数字式和屏幕式。

传输通道将测量各环节间的输入、输出信号连接起来，通常有电缆连接、光导纤维连接和管道连接等。

三、测量误差

被测量的某个物理量在某一时刻的数值可以分为静态值和动态值。静态值是指在测量过程中其值不随时间变化，或者随时间变化非常小；动态值则与之相反，其值会随时间不断变化，呈非稳态的特性。

对某一物理量（不论是静态值还是动态值）的测量，通过测量手段所获得的测量结果相对于其客观存在的真值而言，都是一种近似。因此，不论测量系统的精度有多高，多么完善，相对真值而言，其测量值总是存在一定的误差。

将某一物理量的测量值与其真值之差定义为绝对误差，记为 δ，它可以是正值也可以是负值，其计算式为

$$\delta = X - X_0 \tag{1-2}$$

式中 X——测量值；

X_0——真值。

定义相对误差是绝对误差与真值之比，记为 η，其表达式为

$$\eta = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% \tag{1-3}$$

在测量时用同一仪器设备，按照同一方法，由同一观测者在同一环境条件下所进行的测量称为等精度测量。在等精度测量过程中，根据误差的来源，可以将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

系统误差是指在同一测量条件下，多次重复测量同一量时，测量误差的绝对值和符号都保持不变，或在测量条件改变时按一定规律变化的误差。

系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素造成的，这些因素主要有以下几方面。

（1）测量仪器方面的因素。仪器机构设计原理的缺点；仪器零件制造偏差和安装不正确；电路的原理误差和电子元器件性能不稳定等。如把运算放大器当作理想运放，忽略输入阻抗、输出阻抗等而引起的误差。

（2）环境方面的因素。测量时的实际环境条件（温度、湿度、大气压、电磁场等）对标准环境条件的偏差，测量过程中温度、湿度等按一定规律变化引起的误差。

（3）测量方法的因素。采用近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。

（4）测量人员方面的因素。由于测量人员的个人特点，在刻度上估计读数时，习惯偏于某一方向；动态测量时，记录快速变化信号有滞后的倾向。

系统误差表明测量结果的正确度，系统误差越小，测量结果越接近被测量的实际值。系统误差是可以根据其产生的原因采取措施减小或消除的。

随机误差是指在等精度测量条件下，由于大量的偶然因素，多次测量同一物理量的测量结果或大或小，而且符号都不固定，具有随机变量的特点。不过测量结果总体上服从一定的统计规律，如服从正态分布，可以通过数理统计的方法处理。随机误差越大，测量精度越差。

粗大误差也称为过失误差，是指测量结果中有非常明显的误差，例如数据读错了、记录错误等。这种误差没有任何规律可循，必须从测量结果中剔除掉。

四、测量误差的计算

1. 测量误差的计算方法

(1) 平均误差 $\bar{\delta}$。平均误差的定义记为

$$\bar{\delta}=\frac{\sum_{i=1}^{n}|\delta_i|}{n}=\frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i-X_0|}{n} \tag{1-4}$$

式中　δ_i——各测点的绝对误差，$i=1,2,3,\cdots,n$。

设测量精度为 h，此时平均误差与测量精度的关系记为

$$\bar{\delta}=\frac{0.5642}{h} \tag{1-5}$$

(2) 均方误差。均方误差也称为标准误差，均方误差的定义为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}{n}} \tag{1-6}$$

此时，均方误差与测量精度的关系为

$$\sigma=\frac{1}{\sqrt{2}h} \tag{1-7}$$

(3) 随机误差的性质。大量的测量实践证明，当测量的次数无限多的时候，测量值的随机误差的概率密度分布服从正态分布，也称为高斯误差分布，它有以下几个特点。

1) 偏析性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的几率大。

2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的几率相等。

3) 极限性。有极大误差的上限。

4) 相消性。各次测量的随机误差的代数和随 $n\to\infty$ 而趋于零，即

$$\lim_{n\to\infty}\sum_{i=1}^{n}\delta_i=0,\quad 或者\sum_{i=1}^{n}\delta_i=0 \tag{1-8}$$

高斯于 1795 年提出随机误差的概率密度分布规律，表达式见 (1-9)，曲线见图 1-2。

$$y=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1-9}$$

式中　δ——测量值的绝对误差；

σ——均方误差或标准误差；

y——随机误差的概率密度。

概率密度分布规律说明，σ 越小，曲线越尖锐，随机误差的离散性越小，或者说小误差出现的几率越多，表明测量的精度越高。反过来，σ 越大，曲线越平坦，随机误差的离散性越大，测量精度越低。这恰恰是常用 σ 作为判断测量精度标准的原因。利用这种分布规律，确定测量值的最可信值，并给出该结果的高概率存在范围。

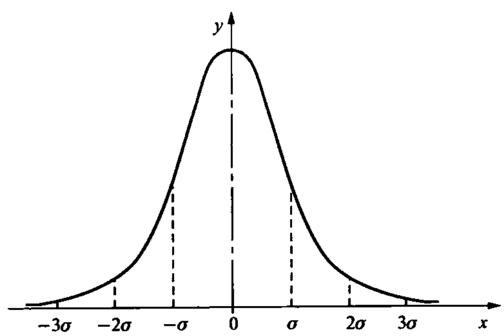

图 1-2　概率密度分布规律

为方便表示，将绝对误差 δ 出现的区间取为标准误差的若干倍，记为

$$|\delta| < k\sigma$$

称 $k\sigma$ 为测量值的随机不确定度，测量结果落在这个不确定度范围的概率称为该不确定度的置信概率。

$|\delta| \leqslant 0.6745\sigma$ 的概率的范围为 50%；

$|\delta| \leqslant \sigma$ 的概率的范围为 68.27%；

$|\delta| \leqslant 2\sigma$ 的概率的范围为 95.45%；

$|\delta| \leqslant 3\sigma$ 的概率的范围为 99.73%。

根据上述关系，绝对误差值介于 $\pm 0.6745\sigma$ 之间的概率是 50%，介于 $\pm 2\sigma$ 和 $\pm 3\sigma$ 之间的概率分别是 95.45% 和 99.73%；而介于 $\pm 3\sigma$ 时，它出现的概率仅为 0.27%。由此可以断定，这是一个不可能的事件，通常将 $\delta = \pm 3\sigma$ 作为极限误差。

2. 标准偏差的计算方法

在实际的测量中，真值无法测量到，除了用高一级精度的仪器测量结果代替以外，还可以取一个与真值最接近的最佳值。这个值就是测量次数无限大时等精度测量下的算术平均值，记为

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{1-10}$$

式中 X_i——各测量值，$i=1, 2, 3, \cdots, n$；

$\overline{X}$——等精度测量算术平均值。

这样，式（1-4）的平均误差就变成

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |X_i - \overline{X}|}{n} \tag{1-11}$$

设 $\nu_i = X_i - \overline{X}$ 为各测量值的残余误差，也称为残差，实际上相当于没有取绝对值的平均误差。当对某个物理量进行 n 次测量，其残差和为

$$\sum_{i=1}^{n} \nu_i = \sum_{i=1}^{n} X_i - n\overline{X}$$

即

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \nu_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i - \overline{X} = \overline{X} - \overline{X} = 0$$

这里，$n \neq 0$，只有 $\sum_{i=1}^{n} \nu_i = 0$，这一点正好符合随机误差的相消性质。各测量值与真值的绝对误差为

$$\delta_i = X_i - X_0 \tag{1-12}$$

对式（1-12）两边求和，则有

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = \sum_{i=1}^{n} X_i - nX_0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \delta_i = \overline{X} - X_0$$

便有绝对误差

$$\delta = \overline{X} - X_0 \tag{1-13}$$

和式（1-2）比较可知，这里的测量值用 $\overline{X}$ 代替，于是对于式（1-12），可以写成

$$\delta_i = X_i - \overline{X} + \overline{X} - X_0$$

即

$$\delta_i = \nu_i + \delta$$

显然对于 n 次测量，存在

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \nu_1 + \delta \\ \delta_2 &= \nu_2 + \delta \\ &\vdots \\ \delta_n &= \delta_n + \delta \end{aligned} \tag{1-14}$$

将式（1-14）两边相加得到

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = \sum_{i}^{n} \nu_i + n\delta$$

根据随机误差的相消性，$\sum\limits_{i=1}^{n} \nu_i = 0$，上式便成为

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = n\delta \tag{1-15}$$

将式（1-15）两边平方得

$$\delta^2 = \frac{1}{n^2}\Big(\sum_{i=1}^{n} \delta_i\Big)^2 \tag{1-16}$$

将式（1-14）两边平方后再相加，则有

$$\begin{aligned} \delta_i^2 &= (\nu_i + \delta)^2 \\ \Rightarrow \delta_1^2 &= (\nu_1 + \delta)^2 \\ \delta_2^2 &= (\nu_2 + \delta)^2 \\ &\vdots \\ \delta_n^2 &= (\nu_n + \delta)^2 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 &= \sum_{i=1}^{n} (\nu_i + \delta)^2 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 &= \sum_{i=1}^{n} \nu_i^2 + 2n^2\delta \sum_{i=1}^{n} \nu_i + n\delta^2 \end{aligned}$$

再由 $\sum\limits_{i=1}^{n} \nu_i = 0$，得到

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \nu_i^2 + n\delta^2 \tag{1-17}$$

将式（1-16）代入式（1-17），可得

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \nu_i^2 + \frac{1}{n}\Big(\sum_{i=1}^{n} \delta_i\Big)^2 \tag{1-18}$$

由随机误差的对称性可知

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 \approx \Big(\sum_{i=1}^{n} \delta_i\Big)^2$$

将其代入式（1-18），有

$$\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2=\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2+\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2 \tag{1-19}$$

由式（1-6）标准偏差的定义，可得 $\sigma^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2$，再将其代入式（1-19），于是有

$$n\sigma^2=\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2+\sigma^2$$

整理得到

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{n-1}} \tag{1-20}$$

式（1-20）就是用来计算标准偏差的贝塞尔公式。

为了快速估算标准偏差可采用最大残差法，即在一系列的残差值中取其最大值，可用式（11-21）表示：

$$\sigma=k_n\left|\nu_i\right|_{\max} \tag{1-21}$$

式中 k_n——极差系数，与测量的次数 n 值有关系，见表1-1。

表1-1　　极　差　系　数

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30
k_n	1.77	1.02	0.83	0.74	0.68	0.64	0.61	0.59	0.57	0.51	0.48	0.46	0.44

还可利用算术平均值计算标准偏差。若用 σ_a 表示算术平均值计算的标准偏差，则其计算公式为

$$\sigma_a=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2}{n(n-1)}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{n(n-1)}} \tag{1-22}$$

它是贝塞尔公式计算的标准偏差的 $1/\sqrt{n}$ 倍。由此可见，增加测量次数，可以提高测量精度，但当测量次数超过10次以上时，提高的作用便不明显了。

3. 异常数据的剔除

剔除测量列中异常数据的标准有 $3\sigma_x$ 准则、肖维准则、格拉布斯准则等。

（1）$3\sigma_x$ 准则。

统计理论表明，测量值的偏差超过 $3\sigma_x$ 的概率已小于1%。因此，可以认为偏差超过 $3\sigma_x$ 的测量值是其他因素或过失造成的，为异常数据，应当剔除。剔除的方法是计算多次测量所得的各测量值的偏差 Δx_i 和标准偏差 σ_x，把其中最大的 Δx_j 与 $3\sigma_x$ 比较，若 $\Delta x_j>3\sigma_x$，则认为第 j 个测量值是异常数据，舍去不计。剔除 x_j 后，对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差，并继续审查，直到各个偏差均小于 $3\sigma_x$ 为止。

（2）肖维准则。

假定对一物理量重复测量了 n 次，其中某一数据在这 n 次测量中出现的几率不到半次，即小于 $1/2n$，则可以肯定这个数据的出现是不合理的，应当予以剔除。

根据肖维准则，应用随机误差的统计理论可以证明，在标准误差为 σ 的测量列中，若某

一个测量值的偏差等于或大于误差的极限值 K_σ，则此值应当剔出。不同测量次数的误差极限值 K_σ 列于表 1-2。

表 1-2　肖维系数表

n	K_σ	n	K_σ	n	K_σ
4	1.53σ	10	1.96σ	16	2.16σ
5	1.65σ	11	2.00σ	17	2.18σ
6	1.73σ	12	2.04σ	18	2.20σ
7	1.79σ	13	2.07σ	19	2.22σ
8	1.86σ	14	2.10σ	20	2.24σ
9	1.92σ	15	2.13σ	30	2.39σ

五、测量结果的置信区间和置信概率

$\overline{X}$ 是与真值接近的最佳值，但是它也是一个随机变量。它究竟与真值近似到何等程度？可以信赖的波动区间是多少？这是令人十分关心的问题。

通常设测量值的算术平均值在一个给定的小量范围内波动，记为 $\overline{X}\pm k_t\sigma$，这就是所谓的置信区间，那么 n 次测量可信赖的结果就可表示为

$$X=\overline{X}\pm k_t\sigma \tag{1-23}$$

它的置信概率可以用 P_a 表示

$$P_a=\{|\overline{X}-X_0|<k_t\sigma\} \tag{1-24a}$$

或者

$$P\{(X_0-k_t\sigma)<\overline{X}<(X_0+k_t\sigma)\} \tag{1-24b}$$

式中　X_0——真值；

$\overline{X}$——n 次测量的平均值；

k_t——置信概率系数，可以由置信概率和测量次数查表 1-3 得到；

σ——标准误差。

表 1-3　置信概率系数 k_t

测量次数	置信概率			测量次数	置信概率		
	90%	95%	99%		90%	95%	99%
2	6.314	12.706	63.657	18	1.740	2.110	2.898
3	2.920	4.303	9.925	20	1.729	2.093	2.864
4	2.353	3.182	5.841	22	1.721	2.080	2.831
5	2.132	2.770	4.604	24	1.714	2.069	2.807
6	2.015	2.571	4.032	26	1.708	2.060	2.787
7	1.943	2.447	3.707	28	1.703	2.052	2.771
8	1.895	2.365	3.499	30	1.699	2.045	2.756
9	1.860	2.306	3.355	40	1.684	2.021	2.704
10	1.833	2.262	3.250	60	1.671	2.000	2.660
12	1.796	2.201	3.106	120	1.658	1.980	2.617
14	1.771	2.160	3.012	∞	1.645	1.960	2.576

六、测量系统的性能指标

测量的质量在很大程度上取决于测量系统的特性，测量系统的特性通常可以分为静态特性和动态特性。在静态测量条件下，测量系统的输入量和输出量之间的对应关系称为系统的静态特性。测量系统的动态特性是在动态条件下，即输入信号为动态信号时，系统的响应特性，它是以测量动力学为基础的动态特性指标来衡量动态测量过程品质的。

实际上测量系统的静态特性也同样影响动态测量条件下的测量品质，然而同时考虑静态特性的影响将使描述测量系统动态关系的微分方程的求解变得非常复杂。因此在讨论测量系统的动态特性时，忽略摩擦、滞后、空隙等影响测量系统静态特性的因素，而测量系统的总的性能则由系统的静态特性和动态特性共同决定。本书主要讨论静态测量问题，有关的动态测量问题请读者参考作者的其他著作[1,2]。因此此处只涉及测量系统的静态特性指标。

描述测量系统在静态测量条件下的测量品质的静态性能指标主要有如下几种。

1. 灵敏度

灵敏度是测量系统静态特性的一个基本参数。其定义为：当输入量变化很小时，测量系统输出量的变化 Δy 与引起这种变化的相应输入量的变化 Δx 之比。若用 S 表示灵敏度，则

$$S = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1-25}$$

对于线性测量系统，其灵敏度是常量；而对于非线性测量系统，其灵敏度将随输入量的变化而变化。因为灵敏度对测量品质影响很大，所以一般测量系统或仪表均给出灵敏度值。

2. 分辨率

分辨率是与灵敏度有关的另一静态性能指标，是指测量系统能够检测出被测量最小变化量的能力。在数字测量系统中，分辨率比灵敏度更为常用。一般仪器的分辨率应小于仪器允许绝对误差的一半。

3. 量程

测量系统所能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围，称为该测量系统的量程。组成测量系统时，正确选择仪表量程是十分重要的。通常使被测量的值落在系统量程的 2/3～3/4 处为最佳。如果量程选择太小，被测量的值有可能超过测量量程而使系统因过载而受损；如果量程选择太大，则又会使测量精度下降。

4. 基本误差

测量系统的基本误差是指在规定的标准条件下，用标准设备进行静态标定时，测量系统在全量程中所产生的最大绝对误差的绝对值与系统量程之比。如果用 R 表示基本误差，则

$$R = \frac{|\delta_{\max}|}{A} \times 100\% \tag{1-26}$$

式中　A——系统量程；

　　δ——绝对误差。

5. 精确度

精确度也叫精度，它由准确度和精密度综合决定。准确度的含义是仪器显示值与被测量物理量真值的偏离程度，它反映了测量装置系统误差的大小。而精密度的含义是仪器测量结果的分散程度。应该指出，一个测量系统准确度高，未必精密度就高；而精密度才能真正反

映仪器的综合性能，这个概念可以借用子弹射击的事件来加深理解，见图 1-3。

图 1-3（a）说明子弹射击中靶准确度高，但是精密度低；图 1-3（b）说明子弹中靶准确度低，但是精密度高；图 1-3（c）说明子弹中靶准确度高，精密度也高，综合起来精度高。

一般的仪器设备都要标出它的精度等级，普通热工仪表将精度分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 共七级。

$$\text{精度等级} = \pm \frac{\text{测量中可能产生的最大绝对误差}}{\text{仪器的满量程值}} \times 100\%$$

显然，精度等级级数越低，档次越高。精度大小反映了该仪器所能允许的误差大小。例如精度等级为 1.0 的仪表，表示了该仪器的允许误差值不超过满量程的 $\pm 1\%$。

在精度相同的条件下，选择仪器的量程不宜过大。因为量程越大，其绝对误差也越大。估计最大测量值在满量程的三分之二左右较合适。

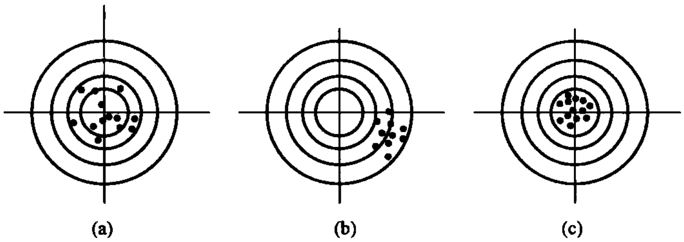

图 1-3　子弹射击中靶的准确度、精密度和精确度示意

（a）准确度；（b）精密度；（c）精确度

6. 迟滞误差

测量系统的输入量从量程下限增至量程上限的测量过程称为正行程；反之，输入量从量程上限减至量程下限的测量过程称为反行程。理想测量系统的正、反行程的输入—输出关系曲线应是完全重合的。但实际测量系统对同一输入量，其正、反行程的输出量往往并不相等，这种现象称为迟滞。正、反行程造成的输出量之间的差值称为迟滞差值。图 1-4 表示了这种迟滞现象和迟滞差值。全量程中的最大迟滞差值 ΔH_{max}与满量程输出值 Y_{max}之比，定义为测量系统的迟滞误差，记作 ξ_H，即

$$\xi_H = \frac{\Delta H_{max}}{Y_{max}} \times 100\% \tag{1-27}$$

迟滞误差通常是由测量系统中的弹性元件、磁性元件等的滞后现象引起的，也可能起因于测量系统中存在的摩擦或间隙。迟滞误差又称为回差或变差。

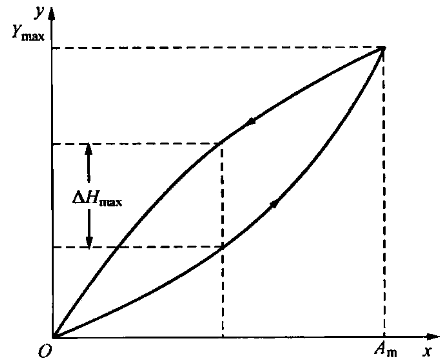

图 1-4　迟滞误差

7. 线性度

理想测量系统的输入一输出关系是线性的，但实际测量系统并非如此（见图 1-4）。测量系统的线性度，是全量程范围内的实际特性曲线与理想特性曲线之间的最大偏差值 ΔL_{max}与满量程输出值 Y_{max}之比，反映实际特性曲线与理想特性曲线

之间的符合程度。线性度也称为非线性误差，记作 ξ_L，即

$$\xi_L = \frac{\Delta L_{max}}{Y_{max}} \times 100\% \tag{1-28}$$

8. 温度漂移

工作环境温度会对测量系统的特性产生影响。因环境温度变化所引起的测量系统输出量的变化称为温度漂移，通常用环境温度偏离标准温度（一般为 20℃）时的输出值与环境温度下的输出值之差与温度变化率之比来表示，记作 ξ_t，即

$$\xi_t = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t} \tag{1-29}$$

式中 Δt——测量系统环境温度 t 与标准温度（20℃）之差值；

y_t——环境温度为 t 时系统的输出；

y_{20}——标准温度（20℃）下系统的输出。

温度漂移对测量系统静态特性的影响主要表现为：①使静态特性曲线平移，但斜率不变，这种影响称为热零点漂移或温度零点漂移；②使静态特性曲线斜率变化，这种影响称为热灵敏度漂移或温度灵敏度漂移。

第二节 测量数据的处理方法

一、有效数字的概念

1. 有效数字的位数

由于存在误差，所以测量资料总是近似值，它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成。例如，由电流表测得电流为 12.6mA，这是个近似数，12 是可靠数字，而末位 6 为欠准数字，即 12.6 为三位有效数字。有效数字对测量结果的科学表述极为重要。

有效数字的位数是由最左面第一个非零数字开始到全部数字的结尾。如 0.013 257 和 1.3257，它们的有效数字都是 5 位。测量记录数据时，通常只保留有效数字，表示误差时，一般取 1～2 位有效数字。0 很特殊，它既是无效数字，又是有效数字。当它在非 0 数据中间时，为有效数字。如 28.05，为 4 位有效数字。

2. 数据舍入规则

为了使正、负舍入误差出现的机会大致相等，现已广泛采用“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 时取偶数”的舍入规则，即①若保留 n 位有效数字，当后面的数值小于第 n 位的 0.5 单位就舍去；②若保留 n 位有效数字，当后面的数值大于第 n 位的 0.5 单位就在第 n 位数字上加 1；③若保留 n 位有效数字，当后面的数值恰为第 n 位的 0.5 单位，则当第 n 位数字为偶数（0，2，4，6，8）时应舍去后面的数字（即末位不变），当第 n 位数字为奇数（1，3，5，7，9）时，第 n 位数字应加 1（即将末位凑成为偶数）。

这样，由于舍入概率相同，当舍入次数足够多时，舍入的误差就会抵消。同时，这种舍入规则，使有效数字的尾数为偶数的机会增多，能被除尽的机会比奇数多，有利于准确计算。

3. 测量结果的有效数字表示

当测量误差已知时，要注意测量结果的有效数字与测量误差保持一致性。如测量某压力