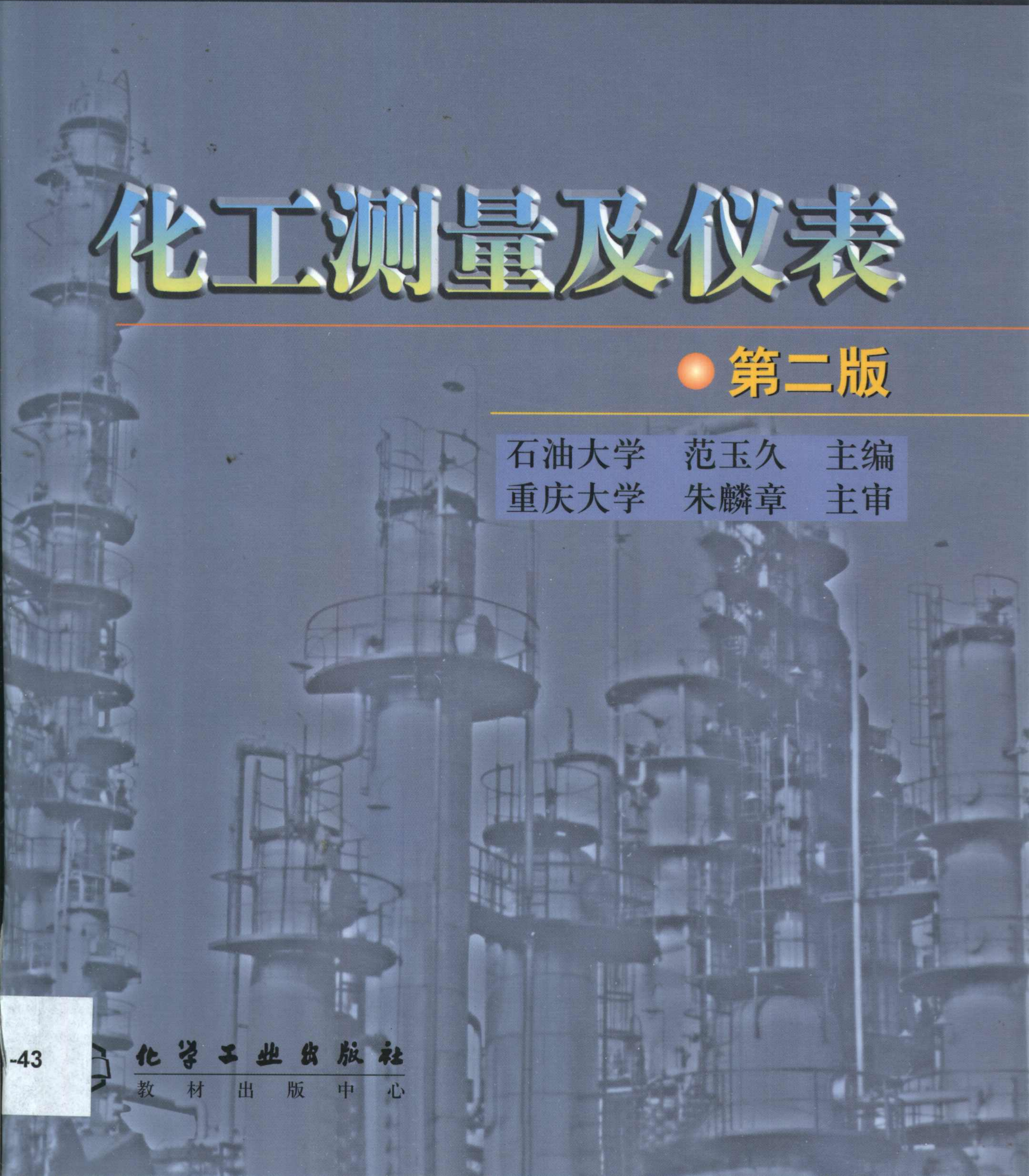
高等学校教材

化工测量及仪表

第二版

石油大学　范玉久　主编
重庆大学　朱麟章　主审



-43

化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

化工测量及仪表

第二版

石油大学　范玉久　主编
重庆大学　朱麟章　主审

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

化工测量及仪表/范玉久主编．—2 版．—北京：化学工业出版社，2001.12
高等学校教材
ISBN 7-5025-3506-3

Ⅰ．化…Ⅱ．范…Ⅲ．①化学工业 - 测量 - 高等学校 - 教材②化工仪表：测量仪表 - 高等学校 - 教材
Ⅳ．TQ056.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 081473 号

高等学校教材

化工测量及仪表

第二版

石油大学　范玉久　主编

重庆大学　朱麟章　主审

责任编辑：王丽娜

责任校对：蒋　宇

封面设计：于　兵

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029）

发行电话：（010）64918013

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16　印张 27.5　字数 691 千字

2002 年 2 月第 2 版　2002 年 2 月北京第 11 次印刷

ISBN 7-5025-3506-3 /G·931

定　价：44.00 元

版权所有　违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

前　　言

《化工测量及仪表》一书自1982年出版以来，被许多院校所采用。随着科学技术的不断发展和与国际接轨，测量技术与仪表都有了很大的发展与变化，国内所接触的仪表品种范围更加扩大，部分标准和规定也发生了变化。为此，本书对第一版教材进行较大的修改和增删，采用了最新的国家标准。希望通过此书能帮助读者掌握化工测量及仪表的基本原理和特性，用好现有仪表，并能温故知新，进行改进和创新。

第一版教材参加编写的人员有：华东石油学院（现石油大学）奚立明、曹文举、范玉久；上海化工学院（现华东理工大学）章先楼、沈关梁；上海纺织工学院［现东华大学（原中国纺织大学）］严隽道。由浙江大学李海青主审、上海化工学院（现华东理工大学）陈彦萼、天津大学张立儒审定。参加本次修订的人员有石油大学（华东）杜鹃（第一、二、四篇），范玉久（概述、第三篇），罗万象（第五篇）；东华大学（原中国纺织大学）陈忧先（第六篇第一、三、四章）、左锋（第六篇第二章）。由重庆大学朱麟章审阅。

在编写过程中得到了长期从事计量和仪表工作的专家们的帮助，特此表示感谢。

由于编者水平有限，书中尚有不足及错误之处，欢迎读者批评、指正。

编　者

2001．5

目　录

第一篇　压力测量

第二篇　物位测量

第三篇　流量测量

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

第四篇　温度测量

第五篇　工业分析仪表

第六篇 显示仪表

概　　论

在工业生产中，为了正确地指导生产操作，确保生产安全，保证产品质量和实现生产过程自动化，一项必不可少的工作是准确、及时地检测出生产过程中各个有关参数的量值。目前，在石油、化工及石化生产中，对于压力、温度、物位、流量等一些重要参数，已经实现了由仪表进行的自动测量，并与计算机（或自动控制装置）、执行机构相配合实现了对生产过程的自动控制。

虽然压力、温度、物位和流量4个参数，对石油、化工及石化生产必不可少而且极其重要，但对保证产品质量来说，还只是间接控制的参数。随着科学技术和生产力的发展，在生产过程中已经采用许多工业分析仪表，可以自动地、连续地给出与产品质量直接有关的物性和品质、成分等参数的量值，并与计算机配合直接地去控制产品质量。

化工参数种类繁多，所处生产条件也各有不同，因而自动检测这些参数的检测仪表（也称测量仪表）也是琳琅满目，多种多样。但是，就检测仪表的组成来讲基本上是检测、放大和信号处理、显示3个部分（见图0-0-1)。检测部分是通过检测元件直接感受和响应被测量，并将它转换成相应的测量信号，然后对此信号进行放大和必要的处理，最后由显示部分进行指示或记录给出被测参数的量值。

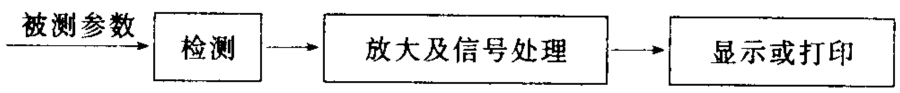


图0-0-1　检测仪表的组成

在检测工作中还经常遇到传感器和变送器等仪表。一般传感器是指借助于检测元件接受物理量形式的信息并按一定规律将它转换成同种或别种物理量形式信息的仪表，变送器是输出为标准信号的传感器。而检测仪表是指能够确定所感受的被测量大小的仪表，它或者是变送器，或者是传感器，或者是兼有检测元件和显示仪表的仪表总称。

一、测量及测量方法

一般所说的测量，其含义是用实验方法去确定一个参数的量值（数值和单位)，即通过实验，把一个被测参数的量值（被测量）和作为比较单位的另一个量值（标准）进行比较，确定出被测量的大小和单位。所以测量是以确定量值为目的的一组操作。通过测量可以掌握被测对象的真实状态，测量是认识客观量值的惟一手段。而计量是实现单位统一、量值准确且可靠的活动。

在测量中，把作为测量对象的特定量，也就是需要确定量值的量，称为被测量，由测量所得到的赋予被测量的值称为测量结果。如果测量结果是一次测量的量值，也称为测得值。

按数据处理形式，可将测量分为直接测量、间接测量和组合测量3种方法。

（1）直接测量　把被测量与作为测量标准的量直接进行比较，直接得到被测量的大小和单位。并可用下式表示

$$Y = X \tag{0-0-1}$$

式中 Y 为被测量的量值；X 为作为标准的器具所给出的量值。

直接测量的特点是简便，例如用米尺量出一根钢管的长度。

(2) 间接测量　被测量不能直接测量出来，要通过与它有一定函数关系的其他量的测量来确定。设被测量为 Y，影响 Y 的测量结果 y 的影响量为 X_i，则可写出测量模型为

$$Y = f(X_1, X_2, \cdots, X_N) \tag{0-0-2}$$

设各影响量 X_i 的估计值为 x_i，则有

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_N) \tag{0-0-3}$$

例如，要确定功率 P 值，则可按 $P = I^2R$ 及 R 与温度 t 的关系，通过对电流 I、电阻 R_0 和温度 t 的测量，确定出功率 P，即

$$P = f(I, R_0, \alpha, t) = I^2R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

(3) 组合测量　在直接测量与间接测量中，测量的目的，也就是最终要求出的那个量（被测量）只有一个。而当测量的目的有数个时，则要通过直接测量的测得值或间接测量的测得值建立联立方程组，再通过求解联立方程得到被测量的量值，这就是组合测量方法。

例如，一个线圈的电阻值与温度变化呈非线性关系，并可用下式表示

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \tag{0-0-4}$$

在不同温度下测量电阻时，可得下列方程组

$$\begin{aligned} R_{t_1} &= R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t_2} &= R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ &\cdots\cdots \\ R_{t_n} &= R_{20} + \alpha(t_n - 20) + \beta(t_n - 20)^2 \end{aligned} \tag{0-0-5}$$

式中 R_{t_i} 和 t_i 是直接进行测量的量值；R_{20}、α、β 是要通过测量确定量值的被测量，要由解方程组求得。

此例是属于方程式不变，即被测量的组合形式不变，通过改变测量条件达到测量目的。此外，也可以通过改变组合形式，达到测量目的。

在测量中经常提到测量结果的重复性和重复条件下这一术语，所谓重复性状是在相同条件下，对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。重复性条件包括以下内容：相同的测量程序；相同的观测人员；在相同条件下使用相同的测量设备；相同的地点；短时间内的重复测量。

直接测量是最基本的。在工厂和实验室都是通过各种测量仪表来实现直接测量的。所采用的基本测量方法有 3 种。

(1) 偏差法　在测量过程中，用仪表指针的位移（即偏差）来表示被测量的大小。这种测量方法，不是把标准量具装在测量仪表内部，而是通过被测量对检测元件的作用，使仪表指针产生位移，仪表的刻度标尺是通过标准器具的标定确定的。这种测量方法的精度受到标尺的精度影响。

(2) 零位法　又称补偿式或平衡式测量方法。在测量过程中，被测量与已知标准量进行比较，并调节标准量使之与被测量相等，通过达到平衡时指零仪表回零来确定被测量与已知的标准量相等。这种测量方法的精度较高，其误差主要受标准量误差的影响。

(3) 微差法　综合了偏差法和零位法的优点，将被测量的标准量与已知的标准量进行比较，得到差值，再用偏差式测量方法测出此差值。因为差值很小，即使差值测量的精度不高，但整体测量结果仍可以达到较高的精度。

二、测量误差

在工程技术及科学研究中，为确定某一参数（被测量）的量值而进行测量时，总是希望测得的数值越准确越好，希望测量结果是被测量的真实状态，是真值。随着人们认识的提高，经验的积累，以及科学技术的发展，被测量的测量结果会愈来愈接近真值，但不会完全相等，因为测量中存在误差。设测量结果为 y，真值为 Y_0，则测量误差 ΔY 为

$$\Delta Y = y - Y_0 \tag{0-0-6}$$

即测量误差是测量结果减去被测量的真值。它是有正、负号并有量纲的。测量误差 ΔY 越小，表明测量结果 y 逼近被测量的真值 Y_0 的程度越高，亦即测量的准确度越高。有时也将 ΔY 称为绝对误差，它的单位和被测量一样，而不是误差的绝对值。测量误差可能由多个误差分量组成。引起测量误差的原因，通常包括：测量装置的基本误差；非标准工作条件下所增加的附加误差；所采用的测量原理以及根据该原理在实施测量中运用和操作的不完善引起的方法误差；标准工作条件下，被测量随时间的变化；影响量（不是被测量，但对测量结果有影响的量）引起的误差；与观测人员有关的误差因素等。

被测量的真值只有通过完善的测量才可能获得，因此，真值按其本性来讲是不确定的，要用约定真值代替，约定真值有时称为指定值、约定值或参考值。常用被测量的多次测量结果来确定约定真值。

测量结果是由测量所得到的赋予被测量的值,仅是被测量的估计值,很多情况下它是在重复观测的情况下确定的。单次测量所得到的量值,它是确定的,此测量结果常称为测得值。

为了能够反映测量工作的精细程度，常用测量误差除以被测量的真值，即用相对误差来表示。相对误差具有正号或负号，无量纲，用%表示。由于真值不能确定，实际上是用约定真值。在测量中，由于所引用的约定真值的不同，相对误差有以下 3 种表示方法。

（1）实际相对误差

$$\delta_{实} = \frac{\Delta Y}{Y_0} \times 100\% \tag{0-0-7}$$

这里的约定真值是用被测量的实际值。

（2）标称相对误差

$$\delta_{标} = \frac{\Delta Y}{y} \times 100\% \tag{0-0-8}$$

y 是被测量的标称值（或示值）。$\delta_{标}$ 也称为示值相对误差。

（3）引用相对误差

$$\delta_{引} = \frac{\Delta Y}{标尺刻度上限 - 标尺刻度下限} \times 100\% = \frac{\Delta Y}{量程} \times 100\% \tag{0-0-9}$$

式中约定真值是仪表刻度上限与仪表刻度下限之差，对于用零作为仪表刻度始点的仪表，其约定真值即为仪表的刻度上限值。对于多挡仪表，引用相对误差需要按每挡的量程计算。

按测量误差本身的性质和出现的特点，可将测量误差分为随机误差、系统误差和粗大误差 3 类。

1. 随机误差

随机误差是指测量结果与在重复条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得测量结果的平均值之差，随机误差的特点是这类误差的数值和符号就其个体而言是没有规律的，以随

机方式出现，但就其总体而言是服从统计规律的。对同--被测量进行无限多次重复性测量时，所出现的随机误差，极大多数是服从正态分布的。设在重复条件下对某一个量 x（真值为 L）进行无限多次测量，得到一系列测得值 x_1，x_2，…，x_n，则各个测得值出现的概率密度分布可由下列正态分布的概率密度函数来表达

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{\frac{-(x-L)^2}{2\sigma^2}} \tag{0-0-10}$$

如果令误差为 $\delta=x-L$，则上式可改写为

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{\frac{-\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{0-0-11}$$

式中的参数 σ 称为标准差，是对一个被测量进行无限多次测量时，所得的随机误差的均方根值，也称均方根误差，即

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{\underset{n\to\infty}{n}}\sum_{i=1}^{n}(x_i-L)^2}=\sqrt{\frac{1}{\underset{n\to\infty}{n}}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2} \tag{0-0-12}$$

函数 $f(x)$ 或 $f(\delta)$ 的曲线（图 0-0-2）称为正态分布曲线的随机误差。

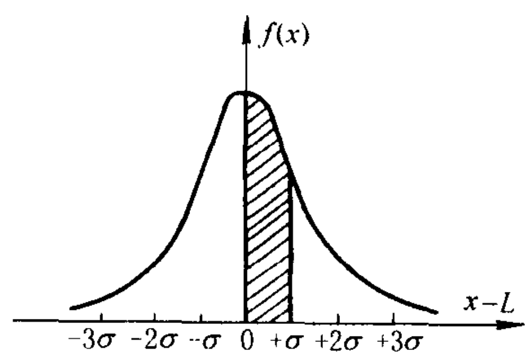


图 0-0-2　正态分布曲线

由图 0-0-2 不难看出，正态分布的随机误差具有 4 个特性：绝对值相等的正、负误差出现的概率相同（对称性）；绝对值很大的误差出现的概率接近于零，即误差的绝对值有一定的实际界限（有界性）；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（单峰性）；由于随机误差具有对称性，在叠加时有正负抵消的作用，即具有抵偿性。即在 $n\to\infty$ 时，有

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i\to 0$$

当测量次数无限多时，误差的算术平均值趋近于零，也就是数学期望为零。这是随机误差最本质的特性。

在实际测量中，只能做到有限次测量，而真值要用约定真值，即用它的最佳估计值，多次测得值的算术平均值 $\bar{x}$ 来代替，则测得值的实验标准差的公式为

$$s=\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}v_i^2} \tag{0-0-13}$$

式（0-0-13）称为贝塞尔公式，是计算标准差估计值的主要公式。式中 $x_i-\bar{x}=v_i$，称为残差，是可以通过实际测量计算出来的。

式中 $n-1=\nu$ 称为自由度，在方差计算中它是和的项数减去对和的限制数。由于在重复性条件下对被测量作 n 次测量时所得到的样本方差为 $(v_1^2+v_2^2+\cdots+v_n^2)/(n-1)$，其残差为 $v_1=x_1-\bar{x}$，…，$v_n=x_n-\bar{x}$，因此，和的项数即为残差的个数 n，而 $\sum v_i=0$ 是一个约束条件，即限制数为 1，所以自由度 $\nu=n-1$。

s 被称为实验标准差或实验标准偏差（以下简称标准差），是把测量列的 n 个测得值 x_i 作为分布的样本时的标准差，是总体标准差 σ 的估计值 $\hat{\sigma}$。s 表征了 x_i 的分散性，确切地说是表征了它们在 $\bar{x}$ 上下的分散性，是通过实验所得测量列中任一个 x_i 的标准差，所以也称为单次测量的标准差。

由方差或标准差的定义可知，测得值变动越大，误差的平方值越大，方差越大，因而标

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

准差的大小是表征着测量误差的分散性。由图 0-0-3 可以看出，σ 越小，分布曲线越尖锐，意味着小误差出现的概率越大，而大误差出现的概率越小，表明测量的精密度高，分散性小。标准差的数值，取决于具体的测量条件。

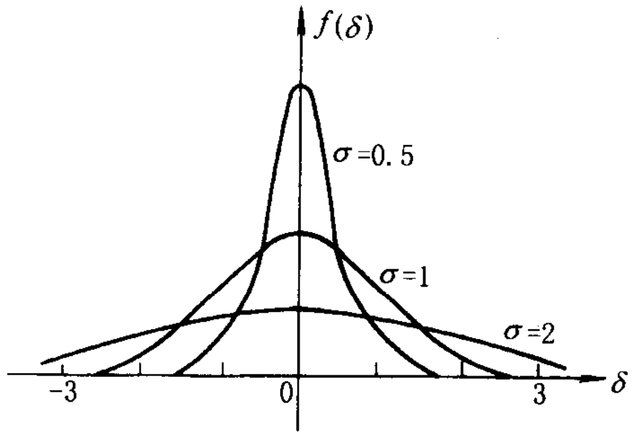


图 0-0-3

在生产过程中，被测参数往往处于经常不停的波动中，仅能实现一次测量，不可能按式（0-0-13）求出标准差，如果这 1 次测量条件和确定测量仪表标准差时的测量条件相近，则测量仪表的标准差 $\hat{\sigma}$，就是这一次测量的标准差。

由于算术平均值 $\bar{x}$ 是真值的估计值，它也存在分散性问题，它的实验标准差可以由下式计算出来，

$$\sigma_{\bar{x}} = \hat{\sigma}/\sqrt{n} = s/\sqrt{n} \tag{0-0-14}$$

$\sigma_{\bar{x}}$称为算术平均值的实验标准差，是 $\bar{x}$ 的分布的标准差估计。

从公式可以看出，测量次数 n 的增加，可以削弱随机误差对测量结果的影响，不过由于 $n > 10 \sim 20$ 以后，$\sigma_{\bar{x}}$下降的很慢，收效并不显著，所以一般测量不宜超过 20 次。

测得值 x 出现在某一区间的概率，亦即误差 δ 出现的概率，可以通过对公式（0-0-11）积分计算出来，在区间［$-a$，a］出现的概率为

$$P\{-a \leqslant \delta \leqslant a\} = 2\int_0^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \tag{0-0-15}$$

由于 δ 在某一区间出现的概率与标准差 σ 大小有关，所以常常把区间范围取为 σ 的倍数，即 $a = k\sigma$，于是式（0-0-15）可改写成

$$P\{|\delta| \leqslant k\sigma\} = P\left\{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) \leqslant k\right\} = 2\int_0^k \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\delta^2}{2\sigma^2}} d(\delta/\sigma) \tag{0-0-16}$$

当已知常数 k 时，便可以求出概率。例如：区间［$-\infty$，∞］的概率为 100%；［$-\sigma$，σ］的概率为 68.26%；［-2σ，2σ］和［-3σ，3σ］的概率分别为 95.44%和 99.73%。由于在区间［-3σ，3σ］的误差出现的概率已经达到 99.73%，只有 0.27%的误差可能超出这个范围，在某些测量中，已经算是微乎其微了，所以习惯上认为 3σ 是极限误差。

2. 系统误差

系统误差是指在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得到测量结果的平均值与被测量真值之差，系统误差是固定的或按一定规律变化的，可以对其进行修正。但是由于系统误差及其原因不能完全获知，因此通过修正值对系统误差只能有限程度的补偿，而不能完全排除。

来源于影响量的已识别的效应称为系统效应。例如某些测量仪表由于结构上存在问题而引起测量误差。系统误差的表现形式大致如下。

（1）恒定的系统误差　也称为不变的系统误差。在测量过程中，误差的符号和大小是固定不变的。例如仪表的零点没校准，在使用时所造成的误差。

（2）线性变化的系统误差　随着某些因素（如测量次数或测量时间）的变化，误差值也成比例增加或减小。例如用尺测量长度，若该尺比规定的长度差 1mm，则在测量过程中每进行一次测量就产生1mm的绝对误差，被测的长度愈长，测量的次数愈多，则产生的误差愈大，

成线性的增加。

(3) 周期性变化的系统误差　误差的符号与数值按周期性变化。例如指针式仪表，指针未能装在刻度盘的中心而产生的误差。这种误差的符号由正变到负，数值也由大到小到零后再变大，重复的变化。

(4) 变化规律复杂的系统误差　这种误差出现的规律，无法用简单的数学解析式表示出来。

为了消除和减弱系统误差的影响，首先要能够发现测量数据中存在的系统误差。检验方法有很多，下面只介绍两种简单的判断方法。

a. 实验对比法　要发现与确定恒定的系统误差的最好方法是用更高一级准确度的标准仪表对其进行检定，也就是用标准仪表和被检验的仪表同测一个恒定的量。设用被检验仪表及用标准表重复测量某一稳定量的次数都是 n 次，则可以得到标准表的一系列示值 T_i 和被检表的一系列示值 x_i，由此可得到系统误差 Q

$$Q=\overline{x}-\overline{T}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n}-\frac{\sum_{i=1}^{n}T_i}{n} \tag{0-0-17}$$

用这种方法,不仅能发现测量中是否存在系统误差,而且能给出系统误差的数值。有时,因测量精度高或被测参数复杂,难以找到高一级准确度的仪表提供标准量。此时,可用相同准确度的其他仪表进行比对,若测量结果有明显差异,表明二者之间存在有系统误差,但还说明不了哪个仪表存在系统误差。有时,也可以通过改变测量方法来判断是否存在系统误差。

b. 残差校核法　如测量列的测量值为 x_1，x_2，…，x_n，将其残差 v_1，v_2，…，v_n 按测量次序的先后进行排列，把残差 v_i 分为前后数目相等的两部分各为 k 次，当 n 为偶数时，$k=\frac{n}{2}$，当 k 为奇数时，令 $k=\frac{n+1}{2}$。求残差 v_i 两部分之和的差值

$$\Delta=\sum_{i=1}^{k}v_i-\sum_{i=n-k+1}^{n}v_i \tag{0-0-18}$$

若 Δ 显著不为零，则测量中含有线性规律变化的系统误差。这一判断是否存在有系统误差的方法，也称为马利科夫判据。在测量中，发现存在系统误差时，除从产生系统误差的根源(测量人员、测量设备、测量方法、测量条件 4 个环节)上进行深入分析研究,找出原因,设法消除外,还可以采用对测量结果修正的方法,或改进测量的方法,以削弱系统误差的影响。

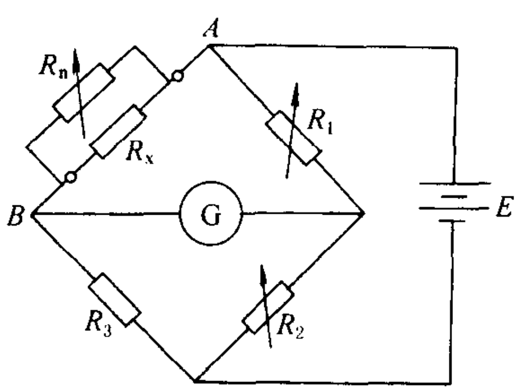


图 0-0-4

(a) 修正值法　对所使用的测量器具和仪表进行检定，确定其示值与计量标准的差异，然后将这个数值给以相反的符号，修正测量结果。对于固定的或变化很小的系统误差，并且被修正的系统误差远大于其随机误差时，采用修正值的方法，可以提高测量准确度。

(b) 改进测量方法　常用的方法有替代法、异号法、补偿法和抵消法等。替代法也称为置换法。例如用电桥测量电阻（图 0-0-4）时，由于各桥臂自身的恒定系差的影响，而使被测电阻 R_x 产生误差。所谓替代法就是完成对被测量 R_x 测量后,不改变测量条件,立即用一个标准电阻 R_n 代替进行同样测量,并使测量仪表的指示不变,则此标准电阻 R_n 值即为 R_x 值,$R_x=R_n$。从而消除了各桥臂误差的影响。

3. 粗大误差

由于实验人员在读取或记录数据时疏忽大意，或者由于不能正确地使用仪表、测量方案错误以及测量失控等原因，测量误差明显地超出正常测量条件下的预期范围，是异常值，称为粗大误差。对于粗大误差应该剔除，否则测量结果会被歪曲。判断粗大误差的依据一般都是以检验数据是否偏离正态分布为基础而建立的。下面只介绍两种方法。

（1）拉依达准则　设被测量的测量列的测得值为 x_1，x_2，…，x_n。计算出其平均值为 $\overline{x}$，残差 $v_i = x_i - \overline{x}$，并按贝塞尔公式(0-0-13)计算出测量列的标准差 σ。如果某个测得值 x_k 的残差 v_k，满足下式

$$|v_k| > 3\sigma \tag{0-0-19}$$

则认为 x_k 是含有粗差的坏值，应剔除，并重新计算标准差 σ，再进行检验，直到判定无粗大误差为止。

拉依达准则比较简便，但当测量次数 $n \leqslant 10$ 时，即使存在粗大误差也可能判别不出来，因此，在测量次数较少时，几乎不适用，当测量次数为 30 次以上时较为适宜。

（2）格拉布斯准则　设被测量的测得系列值为 x_1，x_2，…，x_n，计算出其算术平均值 $\overline{x}$，残差 v_i 及标准差 σ（计算 σ 时，可疑值也一并计算)。当某残差

$$|v_k| > \lambda(\alpha, n)\cdot\sigma \tag{0-0-20}$$

时，则该测得值 x_k 为坏值，应该剔除。再重新计算标准差，进行检验，直到判定无可疑值为止。

$\lambda(\alpha, n)$为格拉布斯系数，由表 0-0-1 给出，表中 n 为测量次数，$\alpha = 1 - p$ 为显著水平。

表 0-0-1　格拉布斯 λ（α，n）数值表

n \ α	0.01	0.05	n \ α	0.01	0.05	n \ α	0.01	0.05
3	1.15	1.15	12	2.55	2.29	21	2.91	2.58
4	1.49	1.46	13	2.61	2.33	22	2.94	2.60
5	1.75	1.67	14	2.66	2.37	23	2.96	2.62
6	1.94	1.82	15	2.70	2.41	24	2.99	2.64
7	2.10	1.94	16	2.74	2.44	25	3.01	2.66
8	2.22	2.03	17	2.78	2.47	30	3.10	2.74
9	2.32	2.11	18	2.82	2.50	35	3.18	2.81
10	2.41	2.18	19	2.85	2.53	40	3.24	2.87
11	2.48	2.24	20	2.88	2.56	50	3.34	2.96

格拉布斯准则理论推导严密，是较好的判别粗大误差的准则，应用比较广泛。

【例 1】　测量某个温度 7 次，其数据见表 0-0-2，试判断有无粗大误差。

表 0-0-2　数据表

i	t/℃	v_i	v_i^2	i	t/℃	v_i	v_i^2	i	t/℃	v_i	v_i^2
1	10.3	-0.2	0.04	4	10.4	-0.1	0.01	7	10.3	-0.2	0.04
2	10.4	-0.1	0.01	5	11.5	1.0	1				
3	10.2	-0.3	0.09	6	10.4	-0.1	0.01				

（1）计算得

$$\overline{x} = 10.5$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2}{n-1}} = 0.45$$

（2）取置信概率 $p=0.95$，则显著水平 $\alpha=0.05$，$n=7$，由表0-0-1中可查出 $\lambda=1.94$，则

$$\lambda\sigma=0.87$$

因 $|v_5|=1.0>\lambda\sigma$，则测得值 $x_5(=11.5)$应剔除。

三、测量不确定度

长期以来，测量数据的处理，测量结果的表达，在不同学科领域和一些国家之间并不完全相同，有关术语也不统一。妨碍了相互间的理解和对测量结果的正确运用。为此，1993年以国际标准化组织（ISO）等七个国际组织的名义发表了《测量不确定度表示指南 ISO 1993（E)》，并于同年公布了《国际通用计量学基本术语》(第二版)。

我国也于1999年发布“测量不确定度评定与表示”的计量技术规范 JJF 1059—1999。并规定同年5月实施。技术规范中关于测量不确定度的定义为“表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数”。

在实际测量中，测量误差总是伴随测量结果存在的，测量误差是测量结果与被测量真值之差。真值是不可知的，测量误差当然也不能确切知道，因此只能估计它所在的一个范围。测量不确定度是对影响产生误差的分散性的估计，是度量测量误差大小的统计特征估计值。

测量不确定度是由一些不确定度分量组成的，这些分量可以分成两类：其中由测量列按统计理论计算得到的称为A类不确定度，它是可测的，是通过测量列确定的；其中由非统计分析方法，即由其他方法估计的称为B类不确定度，它是不能由测量列确定的，只能以某些依据为基础来估计一个适当的不确定度。所以，A、B类不确定度两者之间的区别只在于获得的方法是否来自统计理论的统计分析，与过去所用的“随机”和“系统”不确定度不存在对应关系，不确定度的基本含义是分散性，不能把它划分为随机性和系统性。

以标准差表示的测量不确定度称为标准不确定度，以符号 u 表示。由各不确定度分量，通过方差计算得到的被测量的总的不确定度称为合成标准不确定度，以 u_c 表示。

为了满足工业或其他方面的需要，将合成标准不确定度乘以数字因子，扩展测量结果的置信区间，希望被测量之值的大部分能包含于此区间内，即

$$U=k\,u_c$$

式中 U 称为扩展不确定度，也称为延伸不确定度；k 称为包含因子，也称为覆盖因子，在工业中一般取在 $2\sim3$ 的范围内。如给出置信概率，以 U_p、k_p 表示。

1．标准不确定度的A类评定

A类标准不确定度的评定，是用对测量列进行统计分析的方法来评定的。

设对被测量 x 在重复性条件下进行多次测量，得到测量列 x_1，x_2，…，x_n，各 x_i 为不包含系统误差或已进行了修正后的值，也不包含粗大误差的测量异常值，其算术平均值为

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{0-0-21}$$

其标准不确定度可由贝塞尔公式（0-0-13）得到

$$u(x)=s(x)=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2} \tag{0-0-22}$$

即单次测量的标准差即为A类标准不确度 $u(x)$。

算术平均值 $\overline{x}$，即测量结果的标准不确定度为

$$u(\overline{x})=s(\overline{x})=s(x_i)/\sqrt{n} \tag{0-0-23}$$

在实际测量中，往往需要对被测量进行分组测量，如对被测量 x_i 都进行了重复性条件下或复现性条件下的 n 次测量，测得值为 x_{i1}、x_{i2}、…，x_{in}，其平均值为 $\bar{x}_i$，如有 m 组这样的被测量，则可按下式计算出标准差

$$s(x_i)=\left[\frac{1}{m(n-1)}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(x_{ji}-\bar{x}_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}=u(x_i) \tag{0-0-24}$$

如这 m 组已分别按其重复次数算出了各次实验标准差 s_i，则可按下式计算其标准差

$$s(x_i)=\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}s_i^2\right]^{\frac{1}{2}}=u(x_i) \tag{0-0-25}$$

式(0-0-24)和式(0-0-25)的自由度 ν 为 $m(n-1)$。

如果对于这 m 个被测量 x_i 进行测量所重复的次数并不相等（并不均为同一个 n 次），设各为 n_i，其 $S_i(x_i)$ 的自由度为 $\nu_i=n_i-1$，则计算标准差的公式为

$$S(x_i)=\left[\frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{m}\nu_i}\sum_{i=1}^{m}\nu_i S_i^2\right]^{\frac{1}{2}}=u(x_i)$$

式中自由度为 $\nu=\sum\limits_{i=1}^{m}\nu_i$。

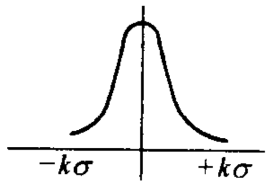
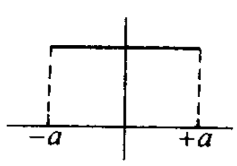
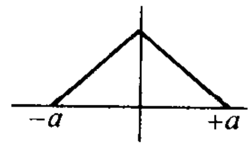
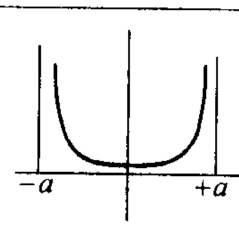
2．标准不确定度的 B 类评定

对于不能够通过多次重复性测量，由测量列确定不确定度的情况，要用有关信息进行评定。这些信息可能来自：以前的测量数据；对有关技术资料和仪器性能的了解；生产部门提供的技术说明文件；校准、检定、书或其他文件提供的数据；手册或某些资料给出的参考数据及其不确定度等。用这类方法评定的标准不确定度称为 B 类标准不确定度。

显然，这类评定要求实验人员了解所依据的信息，判断其可靠性，有时还要求对其分布作出估计。

由于信息来源不同，可能以不同的形式给出估计值 x_i，要根据专业知识和有关规定，弄清其含义，计算出标准不确定度。概率分布、置信概率与覆盖因子之间的关系如表 0-0-3 所示。

表 0-0-3　概率分布、置信概率与覆盖因子之间的关系

		正态分布	均匀分布	三角分布	反正弦分布
概率分布					
方　差		σ^2	$a^2/3$	$a^2/6$	$a^2/2$
覆盖因子 k	$p=1$	∞	$\sqrt{3}$	$\sqrt{6}$	$\sqrt{2}$
	$p=0.997$	3	1.73	2.32	1.41
	$p=0.99$	2.576	1.71	2.20	1.41
	$p=0.95$	1.960	1.65	1.90	1.41

(1) 通过扩展不确定度 U 或 U_P，以及覆盖因子 k 或 k_P 评定标准不确定度。

如果给出的是扩展不确定度 U 和覆盖因子 k 时，则 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)=U/k$。

【例 2】 校准证书上指出标称值为 1kg 的砝码质量 $m=1000.00032\text{g}$，并说明按覆盖因子 $k=3$ 给出的扩展不确定度 $U=0.24\text{mg}$。则该砝码的标准不确定度为 $u(m)=0.24\text{mg}/3=80\mu\text{g}$，估计方差为 $u^2(m)=(80\mu\text{g})^2=6.4\times10^{-9}\text{g}^2$。相应的相对标准不确定度为

$$u_{rel}(m)=u(m)/m=80\times10^{-9}$$

如果给出的是置信概率 p 为 90%、95%或 99%的置信区间的半宽 U_{90}、U_{95}或 U_{99}，除非另有说明，一般按正态分布考虑评定其标准不确定度 $u(x_i)$。

【例 3】 校准证书上给出标称值为 10Ω 的标准电阻的电阻值 R 在 23℃时为

$$R(23℃)=(10.00074\pm0.00013)\Omega$$

同时说明置信概率 $p=99\%$。

由于 $U_{99}=0.13\text{m}\Omega$，$k_p=2.58$（表 0-0-3），则其标准不确度为 $u(R)=0.13\text{m}\Omega/2.58=50\mu\Omega$，相应的相对标准不确定度为

$$u_{rel}(R)=u(R)/R=5\times10^{-6}$$

(2) 根据估计值的上、下限评定标准不确定度。

a. 如资料表明，被测量的值，以置信概率 $p=50\%$ 落入 $a_-\sim a_+$ 构成的区间。如果被测量的最佳估计值 x_i 处于这个区间的中点，将这个区间的半宽 $(a_+\sim a_-)/2$ 用 a 表示，并假设被测量可能值的分布接近正态分布，由于 $p=50\%$ 的覆盖因子 $k_{50}=0.67$，则可取 $u(x_i)=a/0.67=1.49a$。

例如，在测量零件尺寸时，估计其长度以 50%的概率落于 10.07～10.15mm 之间，并给出长度 $l=(10.11\pm0.4)\text{mm}$，这说明 0.04mm 为 $p=50\%$ 的置信区间半宽，在接近正态分布条件下 $k_{50}=0.67$，则长度 l 的标准不确定度为 $u(l)=0.04\text{mm}/0.67=0.06\text{mm}$。

b. 如已知信息表明，被测量之值接近正态分布，并以 68%的概率落于 $(a_+\sim a_-)/2=a$ 的对称范围之内，由于 $k_{68}=1$，则 $u(x_i)=a$。

c. 如已知信息表明被测量估计的上、下限，说明 x_i 落在 $a_-\sim a_+$ 范围的概率为 100%，而落在这个范围之外的概率为零，如果对它们在这个区间内的分布缺乏了解，则只能假设被测量可能值是以等概率落在其中的均匀分布。

例如手册中给出纯铜在 20℃时的线膨胀系数 $\alpha_{20}(\text{Cu})=16.52\times10^{-6}℃^{-1}$，并说明其变化范围的半宽为 $a=0.40\times10^{-6}℃^{-1}$。据此，只能假设 $\alpha_{20}(\text{Cu})$ 之可能值以等概率落在 $(16.52-0.40)\times10^{-6}\sim(16.52+0.40)\times10^{-6}℃^{-1}$ 的区间之内为均匀分布，则标准不确定度

$$u(\alpha_{20})=0.40\times10^{-6}℃^{-1}/\sqrt{3}=0.23\times10^{-6}℃^{-1}$$

再如数字电压表的制造厂说明书说明：仪器校准后 1～2 年内，在 1V 的测量范围内示值最大误差的模不超出 14×10^{-6} 乘以读数加量程的 2×10^{-6} 倍。现该仪器在校准后用了 20 个月，设用此表对 1V 邻近的某电位差多次测量得 $\overline{V}=0.928571\text{V}$，按贝塞尔公式算出实验标准差 $S(V_i)$ 后，得其 $\overline{V}$ 的标准不确定度 $u(\overline{V})=S(V_i)/\sqrt{n}=12\mu\text{V}$。

电压表最大允许误差的模为

$$a=14\times10^{-6}\times0.928571\text{V}+2\times10^{-6}\times1\text{V}=15\mu\text{V}$$

a 即为均匀分布的半宽，按表 0-0-3，则 B 类标准不确定度为

$$u(\Delta\overline{V})=15\mu\text{V}/\sqrt{3}=8.7\mu\text{V}$$

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com