无损检测技术丛书

无损检测自动化与信息处理

国防工业出版社

无损检测技术丛书

无损检测自动化与信息处理

方志成　编著

国防工业出版社

内容简介

本书介绍了测量误差的基本概念及数理统计在无损检测中的应用。并列举实例，阐明无损检测自动化与信息处理的一些主要问题。本书内容丰富，文字简明，适合于从事无损检测专业工作的工人和技术人员阅读，也可供有关专业技术人员参考。

无损检测技术丛书

无损检测自动化与信息处理

方志成　编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

$787 \times 1092^{1}/_{32}$　印张$3^{1}/_{2}$　76千字

1985年10月第一版　1985年10月第一次印刷　印数：0,001—4,200册

统一书号：15034·2925　　定价：0.76元

科技新书目104-143

前　言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学知识，对各种工程材料、零件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性和其它物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域中还实现了由电子计算机控制的自动化。在实现我国四个现代化的进程中，无损检测技术的应用已日益受到重视，并有着广阔的发展前景。为普及、推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十个分册：

超声检测；
射线检验；
磁粉检验；
涡流检测；
渗透检验；
声发射检测；
激光全息检验；
微波与红外检测；
胶接结构与复合材料的无损检测；

无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书所选取的资料，一部分来自生产、科研实践；一部分参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中曾得到编写组各成员所在单位的大力支持；本分册承蒙王怡之同志帮助审阅，在此一并表示感谢。

由于水平所限，书中缺点、错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

目　录

检测技术和测量误差的一些基本概念

无损检测与其它测量技术一样，都是属于测量学的范畴，因此测量学的一些基本概念和原理同样适用于无损检测。这些基本概念是：

一、参考标准

测量是人类对客观事物取得定量情报的一种手段。从计量学意义上说，测量就是拿待测之量直接或间接地与另一同类的已知量相比较，即是求出被测之量与计量单位的比值。因此，测量总得有一个标准做参考，以便拿被测之量去同这个参考标准做比较，这个参考标准在无损检测中就叫做标准试块。从计量学角度来看，要提高无损检测技术的质量，加强标准试块的研制工作是刻不容缓的事情，否则，无损检测就没有参考标准，也就不可能获得精确的测量结果。

举个实际例子来说明，精确测量构件或材料的裂纹深度是无损检测中的一个很重要的课题，譬如对一个很大直径的转轴，如果仅是知道表面有裂纹，而不知道裂纹有多深，无法进行精确定量，那就很难决定该转轴是否应该报废。目前日本、西德以及国内生产的裂纹深度检测仪，较典型的有电导法，即四探针电位法原理，利用试样电阻与裂纹深度有某种关系，测出与电阻有关的电压值，从而获得裂纹的深度，其原理方块图如图1所示。仪器所配的标准试块仅是一块开有3、6、15、30毫米裂纹深度的试块。测量时，用户就是

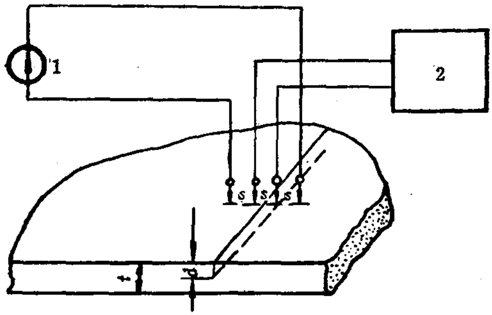

图1　电导法测量裂纹深度原理图

1—恒电流源；2—测量仪器；d—裂纹深度；

t—试件厚度；s—探针间距。

根据这块标准试块来调整仪器刻度，然后再对实际对象进行测量，读出裂纹深度。这里，经常出现很大的误差，其原因之一，是电阻虽然与裂纹深度有某种关系，但它还与试样尺寸（主要是截面积），电阻率、磁导率等等有关。因此，只要被测对象的材质（指电阻率和磁导率）和尺寸与所给的标准试块两样，那么影响电阻的因素也就两样。从计量学的基本概念来看，作为参考标准量必须与被测之量于同一类，否则这种比较就失去意义，这样当然不可避免地出现很大的误差，而且随着各种试样的材质和尺寸的不同，出现误差的大小也不同，规律是很复杂的，也就是说，难于修正。美国一些大学和研究所为配合断裂力学的研究，在这一方面做了近十几年的研究工作。认为如果纯粹采用实验方法来获得刻度曲线，就应该根据被测对象的材质及尺寸（指截面积）做出相应的标准试块。由于被测对象很多，因此相应的标准试块也要很多，这样除了某些研究部门外，一般用户及生产厂是有困难的。但无论如何，这个结论是符合计量学的基本概念的，如

果对标准试块的研制技术已经过关，并且商品化，或有专业厂，专门为用户订制各种标准试块，那么电导法测量裂纹深度将会得到精确和可靠的结果。从这个实际例子，可以看出标准试块的研制工作在无损检测中是占有何等重要的地位。

二、测量误差的种类

测量不可避免地总有误差，这首先表现为在同一条件下对同一对象进行重复测量，就会得到不同的结果，这是因为无限因素在影响着测量过程，而且各种影响还在经常不断地变化着，因此测得之值 x 并非被测之量的实际值 μ。x 与 μ 之差就称为误差或绝对误差 Δx，即

$$\Delta x = x - \mu \tag{1}$$

从不同的角度出发，误差可以有各种分类方法，但按其最基本的性质和特点，可以把误差分成为三大类：系统误差、随机误差、过失误差。

1. 过失误差　是由于测量过程中操作错误而造成的，它体现在对同一测量对象进行多次重复测量时，有异常数据出现。这样，在评定测量结果时，这些异常数据就应弃而不用。在无损检测中如何判别异常数据，与其它测试领域一样，还是采用数据处理的方法。由于这方面要牵涉到数理统计的一些基本知识，因此放到后面专门讨论。

2. 系统误差　在测量过程中所产生的一些误差，假如它们的值是恒定不变的，或是遵循着一定的规律变化的，那么就称这种误差为系统误差或确定性误差。不变的误差又称为定值误差，变化的系统误差则称为变值系统误差，变值系统误差按其变化规律又可分为累进性的，周期性的等等。

系统误差的来源一般有：（1）由于测量所用的仪器不完

善而产生的误差；（2）由于测量设备和电路的安装、布置不当而引起的误差；（3）由于测量者的操作不符合要求而产生的人为误差；（4）由于外界环境，如电磁场干扰、温度、湿度等不符合仪器规定的标准而引起的环境误差；（5）由于测量所依据的基本原理不完善或甚至有错误而形成的方法误差，或称理论误差。

上述系统误差的五种来源，前四种是属于技术性问题，一般可以通过采取技术措施来消除或减小。但是第五种，即理论误差，是系统误差中最关键的一种误差源，因为它对测量结果的影响很大，而且又难于发现，用统计的方法不一定能发现它，尤其是恒值系统误差，用数据处理的方法还是无法消除它的影响。所以，如果一个测量系统存在着系统误差的话，而我们又没有发觉，那么这个测量系统就谈不上能获得可靠或精确的测量结果。

3．随机误差　当在同一条件下对同一对象进行测量时，在极力消除或改正一切明显的系统误差之后，每次测量结果仍然会出现一些无规律的随机性变化，我们将这种随机性变化归咎于随机误差的存在。

在任何一次测量中，随机误差都是不可避免的，在同一条件下对同一个量进行多次重复测量时（即所谓进行一系列等精度测量），可以发现这列测量中出现的随机误差，就其总体来说，具有一定的统计规律，并通过对测量数据的处理，从而尽可能消除随机误差对测量结果的影响。

应该指出，系统误差与随机误差并没有一条不可跨越的鸿沟，实际上我们经常把某些掌握不到具有复杂规律的系统误差看作为随机误差，也往往把某些虽可掌握而过于复杂的系统误差当作随机误差来处理。

这样，当我们遇到一个实际测量问题时，我们的目的就是要求测量结果要尽量接近实际值，也就是说，拟定的测试方案要能达到一定的精确度，为此，如何尽可能减少上述三种误差的影响，就是一个很实际的问题。无损检测所遇到的形形色色有关精确度的问题，也不例外。

三、数 据 特 征

在无损检测中，经常要接触到许多数据，从测量学和数理统计的角度来看，这些数据可以用一定的特征来描述，这样将能对数据处理提供不少方便。

1．平均值　是表示数据位置特征的值，平均值 $\bar{x}$ 的定义为

$$\bar{x}=\frac{x_1+x_2+x_3+\cdots+x_n}{n}=\frac{1}{n}\sum x_i \tag{2}$$

例 1　用电导法测量某构件的裂纹深度，进行一系列等精度测量（即在同等条件下进行 n 次重复测量），得出 10 个数据（$n=10$）为：20.06；20.07；20.06；20.08；20.10；20.12；20.14；20.18；20.18；20.21。求其平均值 $\bar{x}$。

解　根据式（1）求得

$$\bar{x}=\frac{\begin{array}{c}20.06+20.07+20.06+20.08+20.10+20.12\\+20.14+20.18+20.18+20.21\end{array}}{10}$$

$=20.12$ 毫米

2．方差和标准离差　表征数据对中心位置的分布情况。已知 n 个测量值为 $x_1, x_2, \cdots x_n$。其方差 S^2 的定义为

● 在本节和以后各节中，总和符号 Σ 均表示全部可能的测量值之和。

$$S^2=\frac{1}{n-1}\{(x_1-\bar{x})^2+(x_2-\bar{x})^2+\cdots+(x_n+\bar{x})^2\}$$

$$=\frac{1}{n-1}\{\Sigma(x_i-\bar{x})^2\} \qquad (3)$$

方差的平方根S叫做标准离差，它说明数据对平均值的平均散布情况。

例2 以例1的测量数据，试分别求出S^2和S的值。

解 根据式（3）求得

$$S^2=\frac{1}{10-1}\{(20.06-20.12)^2+(20.07-20.12)^2$$
$$+(20.06-20.12)^2+(20.08-20.12)^2$$
$$+(20.10-20.12)^2+(20.12-20.12)^2$$
$$+(20.14-20.12)^2+(20.18-20.12)^2$$
$$+(20.18-20.12)^2+(20.21-20.12)^2\}$$
$$=0.00304$$

标准离差 $S=0.0552$毫米。

3. 剩余误差 表明每个值x_i与平均值$\bar{x}$之差，即

$$v_i=x_i-\bar{x} \quad (i=1,2,3\cdots n) \qquad (4)$$

当数据很多时，可藉助电子计算机进行计算，应该注意，用式(3)进行计算，效率是不高的，因为它要用数据作两次计算，首先用数据去算出$\bar{x}$，然后再用数据去算出S。计算起来比较有效的公式（在数学上是等价的）是：

$$S^2=\frac{1}{n-1}\{x_1^2+x_2^2+\cdots+x_n^2-n\bar{x}^2\}$$

$$=\frac{1}{n-1}\{\Sigma x_i^2-n\bar{x}^2\} \qquad (5)$$

应用式(5)计算，我们只要对数据进行一次处理，记下测量值的总和与测量值平方的总和就行。虽然式(5)与式

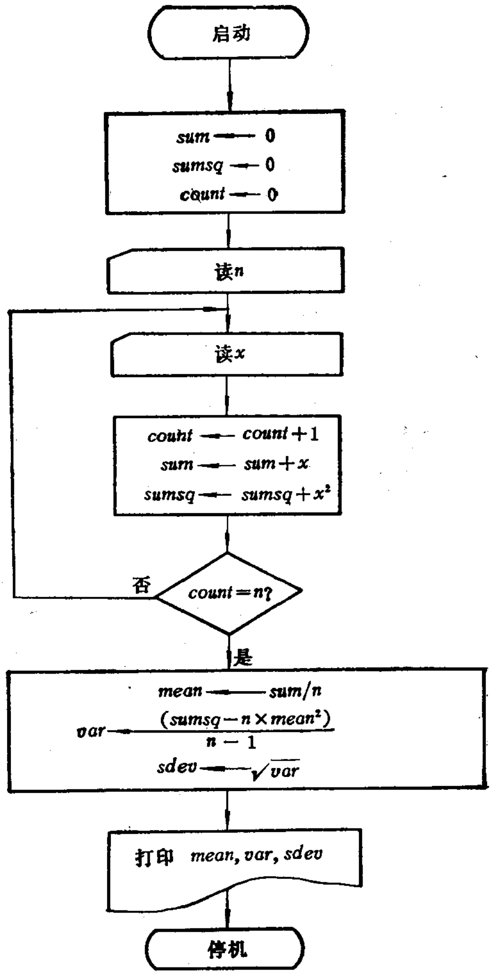

图2　计算平均值、方差、标准离差的程序框图

sum—总和；*sumsq*—平方和；*count*—计数；
mean—平均值；*var*—方差；*sdev*—标准离差。

（3）在数学上是等价的，但在计算机进行计算时，由于有舍入误差，两者的答案可能不同，如果测量值x_i全都靠近平均值$\bar{x}$，那就优先采用式（5）。图2是计算n个测量值的平均值$\bar{x}$，方差S^2，标准离差S的程序框图。

四、随机误差的特点，正态分布

随机误差不能象系统误差那样，逐个进行技术性处理来排除影响，它只有通过仔细地设计测量方案，精密地准备测量系统，以及运用数理统计方法来处理测量数据，才能减弱随机误差对测量结果的影响。

应该指出，对测量数据的随机误差所做的统计处理，是在对可以排除的系统误差已经排除的前提下来进行的。

从大量的实际统计中，可以总结出一个结论：随机误差的出现是遵循正态分布律的。从理论上说，这正是概率论的中心极限定理的一个必然结果。设在一定条件下对某一个量x（其真值为μ）进行多次重复测量，即进行一列n次等精度测量，得到一列结果$x_1, x_2, \cdots, x_n$，则各个测得值出现的概率密度分布可以由下列正态分布函数来表达：

$$p(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad (6)$$

式中　$p(x)$——概率密度；

$e=2.718$——自然对数的底；

σ——正态分布的标准离差。

正态分布也称高斯分布，其对应的分布曲线如图3所示。

$(x-\mu)$的物理意义表明测得值离开真值的偏差，通常称为绝对误差或真误差，用ξ表示，则式（6）可改写为

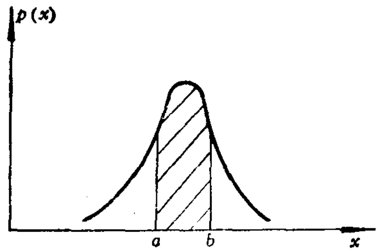

图3　正态分布曲线

$$p(\xi)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

由图3的正态分布曲线测得值x出现在区间[x_a, x_b]内的概率，亦即真误差ξ出现在区间[a, b]内的概率。它等于正态分布曲线区间[a, b]的面积，如图3中的阴影部分。因此由图3不难看出，正态分布总结了随机误差具有下列四种特性：

（1）绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相同；

（2）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）绝对值很大的误差出现的概率近于零，亦即误差值有一定的实际极限；

（4）从特性（1）可以推论出：当$n\to\infty$时，$\Sigma\xi\to 0$，亦即由于正负误差的互相抵消，一列等精度测量中各个误差的代数和有趋于零的趋势。

上述四种特性，有时也称为随机误差的四个公理。

此外，标准离差σ的数值大小表征着测量诸结果的弥散程度，σ值愈小，表示分布曲线愈尖锐，这意味着小误差出

现的概率愈大，而大误差出现的概率愈小。因此，可以用σ来表征测量的精密度，σ愈小，表明测量的精密度愈高。图4示出三种不同σ值的正态分布曲线。

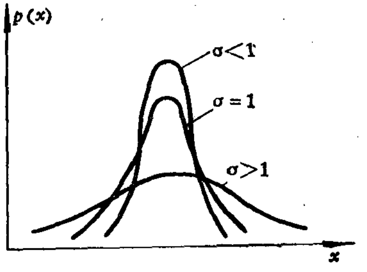

图4　三种不同σ值的正态分布曲线

最后应当指出的，真值μ是无法获得的，但其最佳估计值（也就是与真值μ最接近的数值）乃是平均值$\bar{x}$。所以我们在一列n次等精度测量中，从测得数据所求出的平均值$\bar{x}$就可以认为是代表真值的数据。

例 3　用电导法和涡流法分别测量一个具有3毫米深裂纹的标准试块，在同样条件下重复测量了十次，测得数据分别为：

电导法：2.88；2.90；2.94；2.96；2.98；3.0；
3.02；3.05；3.08；3.10。

涡流法：2.80；2.85；2.90；2.93；2.96；3.0；
3.05；3.08；3.10；3.15。

试通过数据处理，简单判别一下这两种方法那一种比较精确。

解　(1)电导法

$\bar{x}=\Sigma x_i \quad i=1,2,\cdots,10$。将上列数据代入得

$$\bar{x}=2.99$$

样本的标准离差　$S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\{\Sigma x_i^2-n\bar{x}^2\}}$

$$\Sigma x_i^2=(2.88)^2+(2.90)^2+(2.94)^2+(2.96)^2+(2.98)^2$$
$$+(3.0)^2+(3.02)^2+(3.05)^2+(3.08)^2+(3.10)^2$$

得 $$\sum x_i^2 = 89.5093$$

$$n\bar{x} = 10 \times (2.99)^2 = 89.401$$

$$\therefore \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{9}(89.5093 - 89.401)} = 0.1097$$

（2）涡流法

$$\bar{x} = \frac{1}{10}[2.80 + 2.85 + 2.90 + 2.93 + 2.96 + 3.0 + 3.05 + 3.08 + 3.10 + 3.15]$$

$$= 2.982$$

$$\sum x_i^2 = (2.80)^2 + (2.85)^2 + (2.90)^2 + (2.93)^2 + (2.96)^2 + (3.0)^2 + (3.05)^2 + (3.08)^2 + (3.10)^2 + (3.15)^2$$

$$= 89.04$$

$$n\bar{x}^2 = 10 \times (2.982)^2 = 88.923$$

$$\therefore \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{9}(89.04 - 88.923)} = 0.114$$

由上列演算可以看出，电导法的平均值 $\bar{x} = 2.99$ 是比涡流法的 $\bar{x} = 2.982$ 更接近真值 3，而且电导法的标准离差 σ 是比涡流法小($0.1097 < 0.114$)，说明电导法测量的精密度比较高。

五、存在系统误差的判别方法

前面已经指出，存在着系统误差而我们没有发觉，这是会严重影响测量结果的，所以当我们测量一组数据时，应该先判别一下它是否有系统误差存在的可能性，并且用过失误差的判别法，将异常数据舍除掉，然后再用统计方法进行数据处理来减少随机误差的影响。常用系统误差的判别方法有：

（1）阿贝-赫梅特判据