

实验数据处理 与科技绘图

徐云升 黎瑞珍 张铁涛 编著

EXPERIMENTAL DATA PROCESSING AND SCIENTIFIC VISUALIZATION

华南理工大学出版社

www.ty.cn

实验数据处理 与科技绘图

徐云升 黎瑞珍 张铁涛 编著

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 提 要

本书是在借鉴国内有关实验数据处理和科技绘图方面的教材和专著的基础上,结合作者多年从事实验数据处理与教学经验编著而成的。

全书共分四章,全面详细地介绍了实验数据处理和科技绘图的理论知识和具体操作方法。具体内容安排如下:第1章:实验数据的测量及误差;第2章:Excel 在数据处理和科技绘图中的应用;第3章:Origin 在科技绘图中的应用;第4章:SAS 在数据处理中的应用。

本书内容新颖,理论联系实际,不仅可作为高等院校本、专科学教材,也可作为成人教育、电视大学及相关专业的教材或参考书,还可供从事数据分析、处理工作人员做技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

实验数据处理与科技绘图/徐云升,黎瑞珍,张铁涛编著. —广州:华南理工大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5623-3309-8

I. 实… II. ①徐…②黎…③张… III. ①实验数据-数据处理 ②数据处理-应用软件 IV. ①N33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 113231 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail:scutc13@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com.cn

责任编辑:张 颖

印 刷 者: 湛江日报社印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张:11.5 字数:283 千

版 次: 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000 册

定 价:19.00 元

版权所有 盗版必究

前言

数据处理的相关知识属于研究生课程，很多院校本科生并没有开设此类课程，但从多年的教学实践来看，数据处理的基本知识不但本科生需要，专科生也需要，这就是编写本书的初衷。本书编写的指导思想是结合实例，通俗易懂，实用性强。科学实验面对的是大量的实验数据，通过对实验数据的分析处理，获得可信的实验结果。我们用常规的数理统计分析方法是相当繁琐和枯燥的。随着计算机技术的迅速发展，用计算机分析处理实验数据成为可能，数据处理的应用软件也应运而生，利用这类软件在无需编程的情况下，使大量的数据处理变得方便、快捷。实验数据处理和科技绘图是高等院校学生经常要面对的问题，特别是在研究生、本科生进行毕业论文设计时显得尤为重要。实验数据的测量、分析、计算及有效数字取舍等是否科学合理，对实验设计、工艺条件选择和预期目标正确性的判断等方面均起着极其重要的作用。

本书共4章，在编写过程中，结合科研和教学的经验，重点阐述了Excel、Origin及SAS三种统计应用软件在实验数据处理和科技绘图中的应用。第1章主要讲述了实验数据的测量和误差、有效数字的计算和取舍，其目的是让学生掌握对测量精度的分析、计算，进而进行误差的合理分配，以便在最经济的条件下，得到最合理的测量数据和最佳的数据处理结果。第2章介绍常用的应用软件Excel在数据处理中的应用。第3章介绍Origin应用软件在科技绘图中的应用。第4章介绍SAS统计软件在数据处理中的应用。通过对相关统计分析软件的学习，使学生树立用统计学的眼光和思维看待客观事物，能在一定程度上使学生建立起清晰的数量化概念。但要对三种软件的数据处理功能运用自如，还要结合本专业的特点进行实际训练。

本书由徐云升教授提供编写的思路 and 大纲、负责统稿和审稿工作。张铁涛老师编写第1章、第4章；黎瑞珍老师编写第2章、第3章。在本书编著过程中，还得到了许多老师的关心和帮助，在此一并致谢！

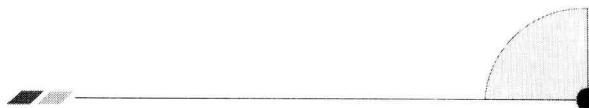
由于编者水平有限，书中难免存在错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者
2010年1月

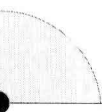
目 录

1	实验数据的测量及误差	1
1.1	数据测量的误差	1
1.1.1	测量的定义	1
1.1.2	测量方法的分类	2
1.2	误差的基本概念	5
1.2.1	误差的定义及表示法	6
1.2.2	误差的来源	9
1.2.3	误差的分类及性质	10
1.3	测量程度及评价	12
1.3.1	准确度、精密度和精确度	12
1.3.2	测量精度的评价	12
1.3.3	可疑数值的舍弃	13
1.4	有效数字及数据的表示	14
1.4.1	有效数字的记法	14
1.4.2	数字舍入规则	15
1.4.3	数据运算规则	15
1.5	误差分析	16
1.5.1	随机误差	17
1.5.2	系统误差	19
1.5.3	粗大误差	23
1.6	回归分析	23
1.6.1	一元线性回归方程	24
1.6.2	可线性化的一元非线性回归	24
1.6.3	多元回归	25
2	Excel 在数据处理和科技绘图中的应用	27
2.1	Excel 2003 概述	27
2.1.1	Excel 2003 的主要功能	27
2.1.2	Excel 2003 的启动	28
2.1.3	Excel 2003 窗口组成及相关概念	28
2.2	Excel 2003 基本操作	31
2.2.1	文件操作	31

2.2.2	工作表操作	32
2.3	建立和编辑表格	33
2.3.1	选定单元格	33
2.3.2	输入数据、序列	34
2.3.3	编辑工作表	36
2.4	常用实验数据的输入与基本操作	39
2.4.1	输入普通数据	39
2.4.2	输入数字长度为12位以上的数据	39
2.4.3	输入以“0”开头的数字	41
2.4.4	输入指定小数位的数值	42
2.4.5	输入分数	43
2.4.6	输入日期和时间	44
2.4.7	输入百分比数据	45
2.5	实验数据设置与编辑	46
2.5.1	让数据自动换行	46
2.5.2	以红色数值显示负值	47
2.5.3	自定义数字格式	48
2.6	数据有效性	50
2.6.1	设置数据有效性	50
2.6.2	数据条件格式	52
2.6.3	数据排序	54
2.6.4	数据筛选	55
2.7	数据表(模拟运算表)	56
2.7.1	单变量数据表运算	56
2.7.2	双变量数据表运算	58
2.7.3	单变量求解示例	59
2.8	回归分析	62
2.8.1	建立投资收益率分析模型	62
2.8.2	计算斜率和截距系数	62
2.9	Excel 在科技绘图中的应用	66
2.9.1	图表向导	67
2.9.2	折线图绘制	69



2.9.3	数据曲线的回归分析	78
2.9.4	其他图表的绘制	84
3	Origin 在科技绘图中的应用	87
3.1	Origin 基础知识	87
3.1.1	Origin 的工作界面简介	87
3.1.2	主要功能介绍	89
3.2	基本操作	98
3.2.1	项目文本操作	98
3.2.2	数据表基本操作	100
3.3	二维图形绘制	104
3.3.1	用已知曲线方程绘制图形	104
3.3.2	用实验数据绘制图形	106
3.3.3	修改图形的外观	108
3.3.4	双 y 轴曲线的绘制	117
3.4	曲线的拟合	119
3.4.1	线性拟合	119
3.4.2	多项式拟合	120
3.5	应用举例	121
3.5.1	直线绘图	121
3.5.2	曲线绘图	123
3.5.3	半对数绘图	125
4	SAS 在数据处理中的应用	128
4.1	SAS 界面简介	128
4.1.1	安装及运行 SAS	128
4.1.2	SAS 启动	128
4.1.3	SAS 图形窗口界面	129
4.1.4	SAS 界面操作入门	132
4.2	SAS 程序	135
4.2.1	数据步 (Data Step)	135
4.2.2	SAS 程序步 (Proc Step)	138



4.2.3	SAS 基本概念	139
4.3	SAS/ASSIST 视窗简介	141
4.3.1	ASSIST 视窗启动	141
4.3.2	ASSIST 视窗使用方法	143
4.4	输入数据	147
4.4.1	运行 Proc Insight	147
4.4.2	输入数据	149
4.5	SAS/Insight 在基本统计分析中的应用	153
4.5.1	统计知识概述	153
4.5.2	SAS/Insight 对一维数据作图	155
4.5.3	SAS/Insight 对二维数据作图	158
4.5.4	SAS/Insight 对三维数据作图	159
4.5.5	SAS/Insight 对数据描述统计方法	160
4.5.6	SAS/Insight 对数据进行单变量检验	161
4.6	SAS 在正交试验设计中的应用	163
4.6.1	正交试验设计基本方法	163
4.6.2	正交表的基本性质	165
4.6.3	正交试验设计的基本程序	166
4.6.4	SAS 统计软件在方差分析中的应用	170
参考文献		176

1

实验数据的测量及误差

在工农业生产、科学实验、国防建设及国民经济各部门,基础数据的获得都离不开各种测量。对这些数据的处理是科研、工程技术和高教等自然科学学术界经常面临的最基本问题,与其他专业学科一样,随着人类科学技术的发展,它也在理论和方法上不断完善和提高。在实验研究工作中,一方面要对实验方案进行分析研究,选择适当的测量方法进行数据的直接测量;另一方面还必须将所得数据加以整理归纳,寻求被研究变量间的规律。无论是数据测量还是数据处理,树立正确的误差概念是很有必要的。误差理论就是科学地、确切地对测量进行评价的理论。一个实验工作者具有正确表达实验结果的能力与做精细的实验工作的本领同等重要。

1.1 数据测量的误差

人类为了认识自然与改造自然,需要不断地对自然界的各种现象进行测量和研究,测量是获取实验数据的主要方法。研究测量误差的目的就是设法评价测量结果的可信程度。可信程度的高低与测量误差的大小直接相关,测量误差越小结果越可信;反之,可信程度就低。

人类对客观事物的正确认识,总是要经历由浅到深、由低级向高级的发展过程。测量实践完全符合这样一个认识过程。从严格意义上讲,很难说测量能够完全准确地反映客观存在,任何测量都带有一定的测量误差,这就是测量误差的普遍存在性。因此,误差理论所研究的只能是测量误差的大小,而绝不是测量误差的有无问题。从理论上讲,提高测量精度(减小测量误差)的极限,就应该是达到被测量的量丧失本身的定义为止。测量一个物体的长度,当所考虑的测量误差比该物体的分子尺寸还小时,则划定物体界限的两个端面就无法确定,从而也就丧失了长度的概念。但是,在实际测量中,这种理论上的测量精度极限是难以达到的,因为测量总要受到当时的技术水平和理论水平的限制,在能够满足需要的同时,应能以误差理论为依据对测量结果做出科学的、合理的评定。下面介绍与误差有关的测量问题。

1.1.1 测量的定义

测量就是人们借助专门设备,通过实验的方法,对客观事物取得测量结果的认识过

程。它是通过物理实验把一个量(被测量)和作为比较单位的另一个量(标准)相比较的过程。

1. 测量结果形式

- (1) 带有单位的数值;
- (2) 在固定坐标系中给出的线;
- (3) 按一定比例给出的图形。

2. 测量结果表示方法

以上任一种形式的测量结果都可用下式表示:

$$\text{测量结果} = \text{数值(被测量与标准的比值)} \times \text{单位(量纲)}$$

从这个测量的基本公式可以看出,测量结果应包括两部分:

(1) 数值

数值是被测量的测得值,它可以是具体数值,也可以用线段的长度或图形的大小来表示。它实质上就是被测量与其计量标准(单位)的比值。在测量中有时还应包括表示测量误差大小的精度参数。

(2) 单位

单位是得到公认的、根据定义得到数值为1的被测量的基本量。目前多数国家都采用国际单位制。它是由国际计量大会批准,由各国计量权力机关执行。我国已颁布计量法,确定了法定单位。同一被测量可用不同的测量单位来表示,但应注意根据单位间的换算关系,相应地改变测得值。

测量单位都有名称,作为测量结果一般都是有名称的数值。所以,给出的测量结果绝对不能忽略测量单位。虽然在一些特殊情况下给出的测量结果,直观看并没带测量单位,如分贝数、光的折射率等,但是,这些物理量本身的定义仍包含与标准量相比的内容,故一般不带单位的数值,不能明确地表示测量结果。

1.1.2 测量方法的分类

由于对测量的不同要求,处理测量误差也有所不同。为了对各种要求的测量进行较系统地了解,现将与处理误差有关的各种测量方法介绍如下。

1. 根据测量结果的精确度划分

(1) 工程测量

工程测量是一般工作中所进行的测量,只要求取得测量值就能满足对测量的要求,不需要考虑测量误差大小或估计测得值的可信程度。用于这种测量的仪器和设备,其灵敏度及精确度都比较低,对测量的环境几乎没有什么特殊要求,给出的测得值比较稳定。经单次测量或多次测量给出的测量结果完全一样,所以这种测量不需要考虑测量误差问题。

另一种工程测量是对测量结果只需要考虑误差的上限值(误差存在的最大变化范围)的测量。对取得的测量结果,不需要对测量误差做精细的分析和考虑,只需给出测量误差的极限值就能满足要求。用于这种测量的仪器和设备,在出厂前或长期使用后经

过标定或校对而得到测量误差极限值,并在铭牌或说明书中标出来。

一般生产现场或科学实验中所进行的测量,多为工程测量。所以,用这种仪器或设备经过单次测量所得值即为测量结果,把标注的测量误差极限值作为测量结果误差。

(2)精密测量

凡是经过测量取得测量结果后,还要求估计测量结果误差确切值的测量,则为精密测量。这种测量是在误差理论指导下,需要经过反复多次的测量过程,所用测量仪器和设备应具有较高的精度和灵敏度,能够反映出测量误差的变化和存在。

在测量完成后把所得数据进行误差处理,计算出最佳测量结果,并估计出表示测量误差的确切值。

进行精密测量的条件(环境)要求比工程测量严格,多是根据测量仪器的使用条件,在实验室内进行,所以也叫实验室测量。

(3)两种测量的选用

在测量之前,首先应明确对测量结果的精度要求,确定属于哪种测量。这对于考虑测量方案、选用测量仪表和设备以及对测得值进行处理,都是很重要的。

精密测量得到的测量结果精度较高,但它所用的测量设备精度也高,测量设备对其工作环境的要求也比较严格,因此所付出的代价也大。工程测量得到的测量结果精度较低,所用的测量设备简单,价格便宜,操作也比较简便,故所付出的代价也比较小。

在实际工作中,不仅要考虑所付出代价大小问题,而且要选择合适的测量仪表和测量方法,否则会得到事与愿违的结果。

如工程测量所用的测量设备(日常用的各种量具)得不到精确的测量结果,据测得值也无法估计测量误差的确切值。采用精密测量所用的测量设备,在进行工程测量的环境下不能正常地进行工作,甚至会造成测量设备的损坏。所以采用精密的测量设备进行测量,若不能保证测量设备对环境提出的要求,则得不到精确的测量结果,因而根据实际的要求和可能,合理地确定采用哪种测量是极为重要的。

2. 根据取得测量结果的方法划分

(1)直接测量

把被测量与作为测量标准的量直接进行比较,或用预先按标准校对好的测量仪器对被测量进行测量,通过测量能直接得到被测量数量大小的测量结果,称此种测量为直接测量。

直接测量可用下面一般公式表示为

$$Y = X \quad (1-1)$$

式中, Y —— 被测量;

X —— 测得值。

在工程测量中,用专用仪表对压力、温度、湿度进行的测量及对时间、长度、质量等进行的测量都是直接测量。

(2)间接测量

被测量不能用直接测量的方法得到,必须通过一个或多个直接测量值,利用一定的函数关系运算才能得到,此种测量称为间接测量。

间接测量可以用下面的一般公式来表示, 即

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1-2)$$

式中, Y —— 被测量;

$x_1, x_2, \dots, x_m$ —— 各直接测量值。

间接测量在科学实验中用得最多, 因为在许多情况下, 用直接测量方法不能得到被测量, 或是测量过程比较复杂, 不如采用间接测量方便、精确, 如天文学方面各种参数的测量, 核子物理研究中对原子内部结构参数的测量等。在工业自动化仪表中, 对流量计的核定也是通过测量质量或容积与测定时间相比而得到流量值的。

(3) 组合测量

被测量不能通过直接测量或间接测量得到, 而必须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, 通过求解联立方程的办法, 才能得到最后的测量结果。这样的测量称为组合测量。它可以用下面的一般公式来表示, 即

$$\begin{cases} F_1(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, x_{11}, x_{21}, x_{31}, \dots, x_{i1}, \dots, x_{n1}) = 0 \\ F_j(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{ij}, \dots, x_{nj}) = 0 \\ F_m(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, x_{1m}, x_{2m}, x_{3m}, \dots, x_{im}, \dots, x_{nm}) = 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中, $F_1, F_2, \dots, F_m$ —— 组合测量中构成的已知函数关系;

$y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ —— 组合测量中的 m 个被测量;

x —— 组合测量中第 j 个直接(或间接)被测量的第 i 次测得值, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

上述联立方程可通过改变测量条件列出, 也可以把被测量 y 用不同的组合参加测量过程而列出, 使方程式的数目 m 与被测量 y 的个数相等, 这样就可以解此联立方程而求得各被测量。

组合测量是只用于实验室里和其他特殊场合作为一种特殊、精密的测量方法。一般用到这种测量方法的机会不多(在大地测量或标准砝码的校对中会用到这种测量方法)。为了熟悉组合测量, 现以实例来说明这种测量方法的应用。

如求一个标准线圈的电阻值, 电阻值与温度变化呈非线性关系, 它们的关系可表示为

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-4)$$

式中, R_t —— 温度为 t 时的电阻值;

R_{20} —— 温度为 20°C 时的电阻值;

α, β —— 线圈的电阻温度系数;

t —— 温度值。

把 α, β 和 R_{20} 作为被测量, 改变测量条件, 取三个不同的温度 t_1, t_2 和 t_3 , 相应测得 R_{t1}, R_{t2} 和 R_{t3} , 则 t 所对应的 R_t 即为直接测量值。这样列出三元联立方程式, 就可求解得到 α, β 和 R_{20} 数值, 同时又可避免测量 20°C 时的准确 R_{20} 值。在 α, β 和 R_{20} 已知的情况下, 即可用间接测量法测量不同 t 时的电阻 R_t 值。而在 α, β 和 R_{20} 为未知时, 则要用组合测量法求取它们的具体值。

某些被测量用一种测量方法就能得出测量结果, 也有些被测量要用上述两种甚至三

种测量方法才能得出测量结果。究竟选用哪种测量方法,需从测量结果要求的差别,所用测量设备造价是否昂贵,进行测量的操作是否简便,测量条件的要求是否苛刻及所付出代价的大小等因素综合考虑决定。

3. 根据测量条件划分

(1) 等精度测量

对某一固定被测量进行重复测量,所取得的测量数据可认为是在相同的测量精度条件下得到的,这种测量称为等精度测量。对一固定被测量作等精度测量,所得测量数据允许有一定范围的大小变化。但对偏大或偏小的数值,不能判定哪种数值更加接近被测量的真实值,只能采取一视同仁的态度,同等对待。对取得数据的信赖程度是相同的,这是判定是否为等精度测量的重要依据。

(2) 不等精度测量

对一被测量进行测量得到的数据,其精确度可判定是不等的,这种测量称为不等精度测量。不等精度测量的精度不等,可能是由于条件的改变、所用测量设备不同或更换,也可能是数据来源不同得到的。对不等精度的数据应当采用特殊的处理方法。

4. 根据被测对象在测量过程中所处状态划分

(1) 静态测量

被测量在测量过程中可以认为是固定不变的,对这种被测量进行的测量称为静态测量。实际上,静态测量就是不需要考虑时间因素对被测量的影响,把被测量或是测量误差作为随机变量来研究。

(2) 动态测量

被测量是处在随时间不断变化的状态,对这种被测量进行的测量称为动态测量。进行这种测量和处理所得到的数据,就要考虑时间因素对被测量的影响,即把测得值或测量误差作为随机过程来研究。

上面介绍的四种测量分类方法,涉及以后研究误差问题首先要弄清楚的基本概念,对各种专业所进行的测量具有特性的问题。有关各种专业的测量学的详细内容,请查阅相关的专著。

1.2 误差的基本概念

由于实验方法和实验设备不完善、周围环境影响,以及受人们认识能力所限等,测量和实验所得数据测量值与真实值之间不可避免地存在差异,这在数值上表现为误差。随着科学技术日益发展和人们认识水平的不断提高,虽可将误差控制得越来越小,但终究不能完全消除它。误差存在的必然性和普遍性,已为大量科学实践所证明,为了充分认识进而减小或消除误差,必须对测量过程和科学实验中始终存在的误差进行研究。

研究误差的意义在于以下三个方面:正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以消除或减小误差;正确处理测量和实验数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下得到更接近于真实值的数据;正确组织实验过程,合理设计方案和选用仪器及测量方法,采用较便捷的方式得到理想的结果。

1.2.1 误差的定义及表示法

所谓误差就是测量值与被测量的真值之间的差,可表示为

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

如在长度计量测试中,测量某一尺寸的误差公式具体形式为

$$\text{误差} = \text{测得尺寸} - \text{真实尺寸}$$

测量误差种类有两种,一种为绝对误差,另一种为相对误差。

1. 绝对误差

某量值的误差定义为该量的给出值(包括测得值、实验值、标称值、示值、计算近似值等要研究和给出的非真值)与其客观真值之差。

什么是真值?自然界中的物质在处于永恒的运动中,而被测量的真值的确定是:假设在一定的时间内,实际上不变的被测量的真正大小。此外,还有一些人为规定。用量块两平行端面的几何长度表征量块的长度,但在精密测量中发现,无论量块的端面研磨得如何精细,也不能保证端面没有起伏或两端面绝对平行。因此,量块两端面间的距离各处就不相等,此时人们规定量块两端面对角线中心的垂直线(或其他规定)之长度表征量块的长度,在某一极短的时间间隔内,量块具有稳定的实际长度,就是该瞬间量块的真值。所以真值具有时间和空间的含义。

真值 在某一时刻和某一位置或状态下,某量本身体现出的客观值或实际值。

对应于某个测得值的真值,则是指这个量在被观测时,该量本身所具有的真实大小。因此,真值是理想的概念,这就得到了一个误差定义。

$$\text{误差} = \text{给出值} - \text{真值}$$

由于误差与给出值具有同量纲(即同单位),故该误差又称为绝对误差。

如果用语言描述上面的公式,则可以说,一个量值给出值的绝对误差等于该量值给出值与其真值之差。误差是正或负,决定了给出值是正或负偏离真值的方向。

如果定义中给出值是用测量方式获得被测量的测量结果,则得到测量误差定义为

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值}$$

如果给出值是指计量仪器的示值,则得到计量仪器示值误差的定义为

$$\text{示值误差} = \text{示值} - \text{真值}$$

由此可见上面公式具有广泛的意义,其中给出值包括测得值、实验值、示值、标准值、计算近似值等,这些值都是我们要研究的对象。

我们要谈的误差不是被测量的误差,因为被测量是一个,有时给出值也可能是猜测值。如果一个客观量没有给出值,就无法谈及它的误差大小。

真值为 100.024 mm 的量块,测得值为 100.030 mm,则测得值误差为 +0.006 mm; π 的近似值取 3.14 时,其误差约为 -0.0016 等。

一般来说,真值是未知的,因此误差也就未知,但绝不意味真值一定不知,有些情况下可以认为真值是可行的。真值可行的情况有如下几种:

(1) 理论真值

平面三角形三内角之和恒为 180° ，同一量值自身之差为零，而自身之比为 1。此外，还有理论设计值和理论公式表达值等等。

(2) 计量学约定真值

国际计量大会决议：

① 长度单位——m 是光在真空中，在 $1/299792458$ s 的时间间隔内行程的长度。

② 质量单位——保存在法国巴黎国际计量局的铂-铱合金圆柱体的质量是 1 kg。

③ 时间单位——铯-133 原子处于特定的状态(原子基态的两个超精细能级之间的跃迁)时，辐射出 9 192 631 770 个周期的电磁波，它所持续的时间为 1 s。凡能满足以上条件的量值是真值。

(3) 标准器相对真值

高一标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比，在 $1/3 \sim 1/20$ 范围内时，可认为前者是后者的相对真值。一个高稳定度晶体振荡器输出的频率，相对于普通频率计的频率而言是真值，由此引出一个实际值概念。

实际值 满足规定准确度用来代替真值使用的量值。实际值是一个现实中可以知道，并且可以应用的一个近似的或相对的真值。

【例 1-1】测得某平面三角块的三内角之和为 $180^\circ 00' 03''$ ，则该内角之和的误差为 $+3''$ 。

【例 1-2】今用一普通压力计测量某压力，得其值为 97.968 MPa。用更准确的方法测得值为 98.168 MPa，则普通压力计测得值的误差为 -0.20 MPa，所以，误差这个量值已成为评定测量过程或计量仪器准确度不可缺少的尺度。

由此引入修正值定义：

$$\text{修正值} = -\text{误差值} = \text{真值} - \text{给出值}$$

则可得

$$\text{真值} = \text{给出值} + \text{修正值} = \text{给出值} - \text{误差值}$$

这说明含有误差的给出值加上修正值后就是可消除误差的影响，而加上修正值的作用如同扣除误差的作用一样，非常符合人们的逻辑思维过程。

值得注意的是：由于修正值的不准或“桥梁”仪器不稳，测得值虽经修正，仍然不是真值，而只是可能得到比直接得到更准一些的给出值罢了，错误的修正(符号或大小弄错)反而会得到更坏的结果，所以修正量值时需谨慎。

【例 1-3】我们需要加工出一个准确值为 1Ω 的标准电阻，由于种种原因，加工后电阻实际值为 1.001Ω ，而电阻的标准值是 1Ω 。如按标准值 1Ω 来用，那它的误差为 -0.001Ω ；如果按照 1.001Ω 来用，就和客观的情况完全相符了。

上例中，对于加工实际值来说，偏离了标准值。为了对这个量的差异有所描述而引入偏差定义：

$$\text{偏差} = \text{实际值} - \text{标准值}$$

虽然该偏差与修正值相符，但偏差是对实际值而言的，而修正值或误差都是对给出值而言的，这是不容忽视的概念。

2. 相对误差

举例说明

【例 1-4】用尺测量 100 m 的准确距离, 得值 101 m, 则误差为 1 m。又用钢尺测量准确距离为 1000 m 的长度, 得值 1 001 m, 则误差亦为 1 m。从误差的绝对值来说, 它们都一样, 但是由于所测距离的不同, 故而它们的准确程度是不一样的, 前者测量 100 m 差了 1 m, 后者是测量 1000 m 差了 1 m。

为了描述测量的准确程度而引出相对误差的定义。

$$\text{相对误差} = \text{误差} / \text{真值}$$

当误差较小时

$$\text{相对误差} = \text{误差} / \text{给出值}$$

上例中相对误差分别为 1 % 和 0.1 %, 相对误差在有些场合下应用是很方便的。

【例 1-5】已知阀门控制的水流量每分钟为 x , 相对误差为 δ_x/x , 那么, 经 k 分钟控制的水流量为 kx , 而相对误差 $k\delta_x/(kx) = \delta_x/x$, k 任意, 而相对误差不变。

相对误差是无因次的, 不同物理量的相对误差可以比较。绝对误差的大小与被测量大小无关, 而相对误差与被测量大小及绝对误差数值都有关系。因此, 不论是比较各种测量的精度, 还是评定测量结果的质量, 采用相对误差都更为合理。

3. 引用误差

引用误差: 仪器示值的绝对误差与测量范围上限值或量程之比, 以百分数表示。

引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差, 常常在多挡和连续分度的仪器中应用, 这类仪器可测范围不是一个点而是一个量程, 各分度点示值和其对应的真值都不一样, 这时若按前面公式计算误差时所用的分母也不一样, 故计算很繁。为了便于计算和划分准确度等级, 一律取该仪器的量程或测量范围上限值为分母, 而量程则指测量范围上限值与下限值之差。由此引出引用误差的定义。

【例 1-6】测量上限为 19 613.3 N 的工作测力计(拉力表), 在标定值(示值)为 14 710 N 的实际作用力为 14 788 N, 则此测力计在一点的引用误差为

$$(14\,710 - 14\,788) / 19\,613.3 = -0.4\%$$

【例 1-7】某待测的电压约为 100 V, 现有 0.5 级 0 ~ 300 V 和 1.0 级 0 ~ 100 V 两个电压表, 问用哪一个电压表测量较好?

解 用 0.5 级电压表测时, 最大相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{x_n(\text{量程})}{x(\text{测量点})} \times s\%(\text{仪表等级}) = \frac{300}{100} \times 0.5\% = 1.5\%$$

用 1.0 级电压表测时, 最大相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{x_n(\text{量程})}{x(\text{测量点})} \times s\%(\text{仪表等级}) = \frac{100}{100} \times 1.0\% = 1.0\%$$

此例说明, 如果量程选择恰当, 用 1.0 级仪表进行测量也会比用 0.5 级仪表测量时的最大相对误差还要小。

因此, 在选用仪表时, 要纠正单纯追求准确度等级“越高越好”的倾向, 而应根据

被测量大小, 兼顾仪表等级和测量上限或量程来合理地选择。

1.2.2 误差的来源

测量过程中误差主要是由以下几方面造成的。

1. 测量装置误差

测量装置是指为确定被测量值所必需的计量器具和辅助设备的总体, 其误差来源于:

(1) 标准量具误差

标准量具是提供量值的器具。如标准量块、标准电池、标准电阻、标准砝码等, 使用它们的量值和它们自身体现出来的客观量值之间有差异。

(2) 仪器误差

凡是用来直接或间接将待测量和已知量进行比较的器具设备, 称为仪器或仪表。如阿贝折光仪、天平等比较仪器, 压力表、温度计、流量计等指示仪表, 它们本身都具有误差。

(3) 附件误差

为测量创造一些必要条件, 使测量方便地进行的各种辅助附件, 均属测量附件。如电测中的转换开关及移动接触点、电源、热源和连接导线等都会引起误差。装置误差的具体表现形式如下: 等臂天平不等臂, 量块的不平行性及不平面度, 螺纹测微仪有空行程, 由于零件联结间隙产生的隙动, 等等。

仪器在使用时没有调整到水平、垂直、平行等理想状态, 应当对中的未能对中、方向不准等, 这些属于使用中的调整性误差。此外, 还有变化性误差, 如提供标准量值本身的准确性及其随时间不稳定性及随空间位置变化的不均匀性, 如硬度、电阻、电池老化等。

2. 环境误差

由于各种环境因素与规定的标准状态不一致, 而引起的测量装置和被测量本身的变化、机构失灵、相互位置改变等产生的误差。这些因素与温度、湿度、气压(引起空气各部分的扰动)、震动(外界条件及测量人员引起的振动)、照明(引起视差)、重力加速度、电磁场、野外工作时的风效应、阳光照射、透明度、空气含尘量有关。

仪器仪表在出厂规定的正常工作条件下使用时产生的示值误差称为基本误差。所谓正常工作条件是指检定规程中对检定所规定的工作条件, 如 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 等。超出此正常工作条件使用时所增加的误差称为附加误差。

计量仪器仪表使用与检定时, 环境因素差异引起的误差, 常常成为新的重要的误差源。科学实验中, 静态分析和检定与动态使用时的差异, 是值得特别注意的误差源。

3. 方法误差

由于测量方法或计算方法不完善所引起的误差。需要瞬时取样测量, 而实际上取样间隔不为零。如用钢卷尺测量大轴的圆周长 L , 再通过计算求出大轴的直径 $d = L/\pi$, 因近似数 π 取值的不同, 将会引起误差。