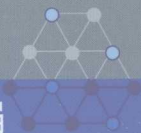
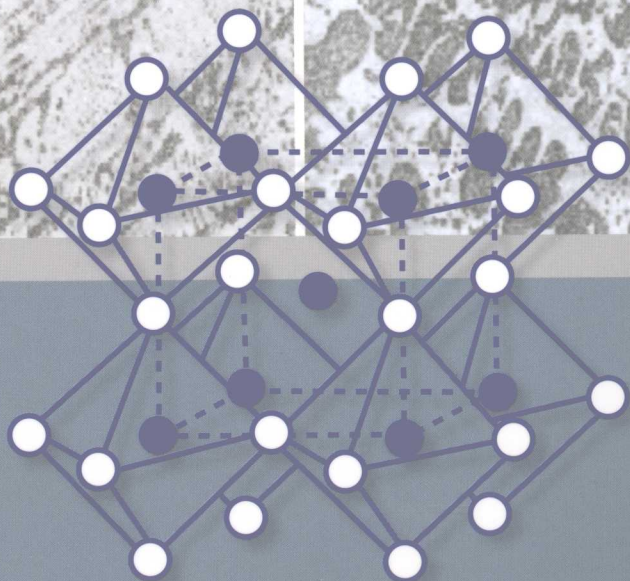
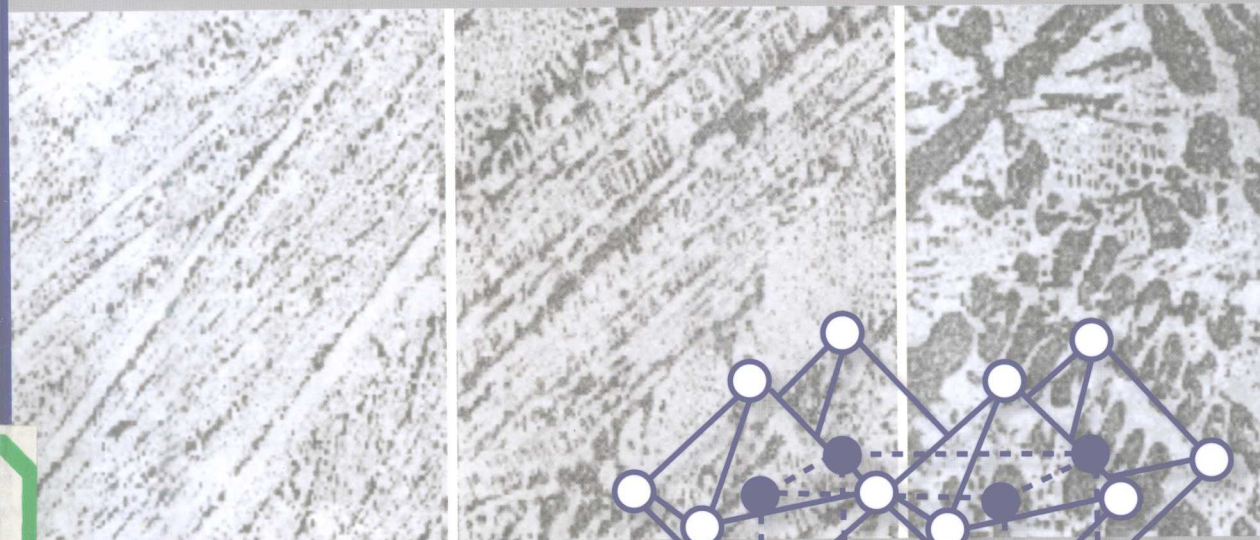


陈泉水 郑举功 刘晓东 编

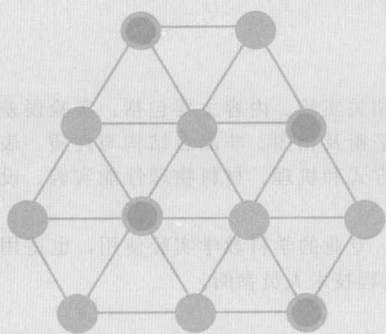


材料科学基础实验

CAILIAO KEXUE JICHU SHIYAN



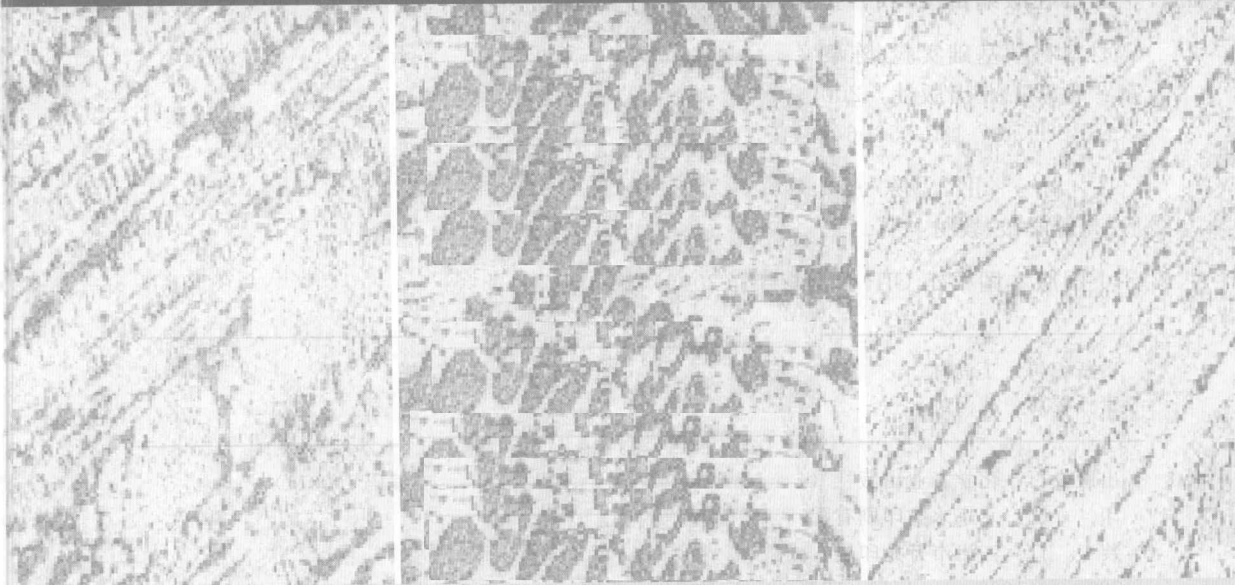
化学工业出版社



陈泉水 郑举功 刘晓东 编

材料科学基础实验

CAILIAO KEXUE JICHU SHIYAN



化学工业出版社

· 北京 ·

本书紧密结合材料组成结构与性能之间的关系，匹配相关实验。内容主要包括：实验误差及数据处理、晶体结构、材料的显微结构与性能分析、相平衡及相图、非晶态结构与性质、表面与分散体系、扩散与固相反应动力学、材料的烧结传质方式和机理、材料物理性能实验、设计型实验和综合型实验等。

本教材可供高等学校材料科学与工程一级学科（本科）专业的学科教学实验使用，也适用于二级学科基础课程教学实验，同时可供材料类相关专业工程技术人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料科学基础实验/陈泉水, 郑举功, 刘晓东编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-122-05306-0

I. 材… II. ①陈…②郑…③刘… III. 材料科学-实验-高等学校-教材 IV. TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 055707 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 战河红

文字编辑: 徐雪华
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 12 字数 244 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料科学基础是高等学校材料科学与工程一级学科专业课程体系中的重要基础课程之一，课程阐述材料的组成-形成（工艺）条件-结构-性能-材料用途之间相互关系及制约规律。

材料科学基础是材料类专业的一门主干课，也是该专业的主要技术基础课。为适应材料类专业的教学内容和课程体系改革的需要，面向二十一世纪材料学科的发展，与国际“材料科学与工程”学科接轨，改革传统的按材料分类的专业理论基础课程就显得很迫切。拓宽后的材料专业基础课，通过授课、实验、课堂讨论和课外实践等各个教学环节，将金属学、陶瓷学和高分子物理的基础理论融合为一体，以研究材料共性规律，指导材料的设计和应用，并为学习后继专业课程、从事材料科学研究和工程技术工作打下理论基础。

材料科学基础课程的一个重要教学环节是实验课，它可帮助学生巩固和加深课堂所学的理论知识，掌握基本实验技能，培养理论联系实际，自己动手分析问题、解决问题的能力，让学生有更多的实践和动手机会，以培养学生实践能力和创新能力。实验课考核成绩由理论、实验技能和实验报告三部分组成。独立开设的课程综合实验，让学生根据所提供材料设计不同的处理以完成取样、金相试样制备、组织观察、显微摄影、结果分析、撰写实验报告等过程，有效地提高学生动手能力和综合分析解决问题的能力。

作为材料科学与工程学科的技术基础课，材料科学基础实验在本科学习阶段以及研究生入学考试中占有重要地位。然而，由于该课程内容繁杂，所涉及的概念抽象、空间复杂、领域广泛，使学习者颇感困难。为了帮助学习该课程的学生能够系统、全面、深刻理解本课程的基础原理，掌握灵活运用基本原理分析问题和解决生产实际问题的能力，特编写此书。

本书以验证、巩固或加深课程的理论教学需要来安排实验内容，从培养目标要加强实验与创新能力，以及从整个材料科学与工程实验自身原理与方法框架出发，阐明实验目的和要求、实验原理、仪器药品、实验步骤、结果讨论、思考题及参考资料等，着重讨论实验原理、重视实验现象的分析与思考，启发创新思维，同时提倡实验技能之间的相互联系与综合应用以及解决实际问题的完整过程训练。本书同

时安排了综合设计实验，这样的实验实为某种材料的研发过程，通过学生对产品合作研究，获得一批完整的、系统的实验数据，每位学生通过对这些数据的分析和讨论得出实验的一些结论，而实验报告则为一篇系统的研究论文。通过此实验，可使学生初步了解材料的研发过程，同时为更好地进行毕业论文研究创造条件。

本书编者皆为多年坚持教学第一线，熟悉读者学习中存在的困难所在，能较为准确地把握实验课程的重点，实践针对性较强。编者在撰写过程中融入了自己十多年的教学和科研体会，多方位阐述了基本原理，灵活介绍了实验操作方法，相信对读者有所启迪和帮助。

本书的出版得到了“江西省重点建设学科——材料学”和“东华理工大学教材出版专项”经费的大力资助，在此谨致谢意。

在编写过程中，编者得到了东华理工大学领导和同事的支持和帮助，在此深表谢意。书中疏漏之处恳求读者批评指正。

编者

2009年3月

实验 13	偏光显微镜下陶瓷材料显微结构分析	68
实验 14	反光显微镜下陶瓷材料显微结构研究	71
实验 15	水泥熟料的岩相分析	73
第四章	相平衡及相图	76
实验 16	差热分析	76
实验 17	淬冷法研究相平衡	80
实验 18	二元系合金的显微组织分析	83
实验 19	铁碳合金相图及平衡组织分析	88
实验 20	三元合金显微组织分析	93
实验 21	热分析法建立二元合金相图	97
第五章	非晶态结构与性质	101
实验 22	玻璃析晶实验	101
第六章	表面与分散体系	103
实验 23	黏土-水系统的双电层实验	103
实验 24	电导法测定表面活性剂临界胶束浓度	106
实验 25	BET 容量法测定固体比表面	108
实验 26	沉降法测定分散体系颗粒的大小和粒度分布	113
实验 27	溶胶的制备及稳定性	117
第七章	扩散与固相反应动力学	123
实验 28	扩散实验	123
实验 29	固相反应动力学	127
第八章	材料的烧结传质方式和机理	130
实验 30	烧结实验	130
第九章	材料物理性能	132
实验 31	弹性模量的测定	132
实验 32	抗弯强度的测定	135
实验 33	介质损耗角正切及介电常数	137
实验 34	压电实验	140
实验 35	单丝强度与模量	143
实验 36	复合材料耐燃烧性	145
实验 37	断裂韧性因子 K_{Ic} 的测定	148

实验 38 线膨胀系数的测定	150
实验 39 绝缘电阻	152
第十章 综合设计实验	155
一、设计型实验与综合型实验	155
二、综合设计实验方法	156
三、综合设计实验的指导思想	158
四、综合设计实验的可行性	159
I 硅胶材料的综合设计实验	160
II 玻璃材料的综合设计实验	164
III 陶瓷材料的综合设计实验	166
IV 普通混凝土配合比的设计实验	167
附录	169
附录 1 真空的获得与测量	169
附录 2 常用物理常数	175
附录 3 不同温度时 KCl 水溶液的电导率	175
附录 4 不同温度时水的密度、黏度及与空气界面上的表面张力	176
附录 5 不同温度时某些液体的黏度	176
附录 6 不同温度时某些液体的密度	177
附录 7 不同温度时某些液体的表面张力	178
附录 8 彼此互相饱和时两种液体的界面张力	178
附录 9 某些表面活性剂的临界胶束浓度	179
附录 10 某些表面活性剂的 HLB 值	181
附录 11 氮和氧的饱和蒸气压 (77~84K)	182
附录 12 N_2 吸附的 P/P_0 - S/V 表 (-195°C)	182
参考文献	183

第一章

实验误差及数据处理

在材料的科学研究中,经常需要对材料的密度、表面积、硬度、强度等物理量进行测量,并对测量数值进行分析研究,从中获得科学的结论。在材料的生产中,也要对温度、压力等工艺参数进行测量,根据所得的测量值,可以间接或直接地控制产品的产量与质量。测量数据是否准确、数据处理方法是否科学,直接影响材料研究与生产。因此,对测量误差与数据处理方法进行研究是十分必要的。

一、测量方法分类

测量的分类方法很多,按未知物理量的获得方式,通常将测量方法分为直接测量和间接测量两种。按测量的状态,可以将测量方法分为静态测量和动态测量等。

1. 直接测量与间接测量

直接测量,是用一定的工具或设备就可以直接地确定未知量的测量。例如,用直尺测量物体的长度、用天平称量物质的质量、用温度计测量物体的温度等。

间接测量,是所测的未知量不仅要由若干个直接测定的数据来确定,而且必须通过某种函数关系式的计算,或者通过图形的计算方能求得测量结果的测量。例如,用膨胀仪测量材料的热膨胀系数 A ,既要测定试体的原始长度 L ,还要测定试体被加热时,对应于温度 T_2 与 T_1 时伸长的长度 ΔL ,再通过公式 $A = A_0 + \Delta L / (T_2 - T_1)$ 来计算出材料的平均线热膨胀系数。此法属于间接测量。

2. 静态测量与动态测量

静态测量是指在测量过程中被测量量是不变的测量。

动态测量也称瞬态测量,是指在测量过程中测量量是变化的测量。材料的某些性质可以用动态法测量,也可以用静态法测量。例如,材料弹性模量的测定方法就有动态法和静态法两种,其性质的定义和测量数值是不同的,因此,在材料测量方法的选择和性质的解释时应当注意。

二、测量误差及其分类

在一定的环境条件下,材料的某些物理量应当具有一个确定的值。但在实际测量中,要准确测定这个值是十分困难的。因为尽管测量环境条件、测量仪器和测量方法都相同,但由于测量仪器计算不精准,测量方法不完善以及操作人员水平等各种因素的影响,多次各人的测量值之间总有不同程度的偏离,不能完全反映材料物理量的真值。测量值 x 与真值 x_0 之间存在的这一差值 y ,称为测量误差,其关系为:

$$x_0 = x \pm y \quad (1-1)$$

大量实践表明,一切试验测量结果都具有这种误差。根据误差产生的原因,按照误差的性质,可以把测量误差分为系统误差、随机误差和过失误差。

1. 系统误差

这种误差是系统产生的误差,是由一定原因引起的,在相同条件下多次重复测量同一物理量时,使测量结果总是朝一个方向偏离,其绝对值大小和符号保持恒定,或按一定规律变化,因此有时称之为恒定误差。系统误差主要有下列原因引起。

(1) 仪器误差 由于测量工具、设备、仪器结构上不完善;电路的安装、布置、调整不当;仪器刻度不准或刻度的零点发生变动;样品不符合要求等原因所引起的误差。

(2) 人为误差 由观察者感官的最小分辨力和某些固有习惯引起的误差。例如,由于观察者感官的最小分辨力不同,在测量玻璃软化点和玻璃内应力消除时,不同人观察就有不同的误差。某些人的固有习惯,例如在读取仪表读数时总是把头偏向一边等,也会引起误差。

(3) 外界误差 外界误差也称环境误差,是由于外界环境(如温度、湿度等)的影响而造成的误差。

(4) 方法误差 由于测量方法的理论根据优缺点,或引用了近似公式,或实验室的条件达不到理论公式所规定的要求等造成的误差。

(5) 试剂误差 在材料的成分分析及某些性质的测定中,有时要用一些试剂,当试剂中含有被测成分或含有干扰杂质时,也会引起测试误差,这种误差称为试剂误差。

一般地说,系统误差的出现是有规律的,其产生原因往往是可知的或可掌握的。只要仔细观察和研究各种系统误差的具体来源,就可设法消除或降低其影响。

2. 随机误差

这类误差是由不能预料、不能控制的原因造成的。例如,实验者对仪器最小分度值的估读,很难每次严格相同;测量仪器的某些活动部件所指示的测量结果,在重复测量是很难每次完全相同,尤其是使用年久的或质量较差的仪器时更为明显。材料的许多物化性能都与温度有关。在实验测定过程中,温度应控制恒定,但温度恒定有一定的限度,在此限度内总有不规则的变动,导致测量结果发生不规则的变

动。此外，测量结果于室温、气压和湿度也有一定的关系。由于上述因素的影响，在完全相同的条件下进行重复测量时，使得测量值或大或小，或正或负，起伏不定。这种误差的出现完全是偶然的，无一定规律性，所以有时称之为偶然误差。

3. 过失误差
过失误差，也叫错误，是一种与事实不符的显然误差。这种误差是由于实验者粗心，不正确地操作或测量条件突然变化所引起的。例如，仪器放置不稳，受外力冲击产生毛病；测量时读错数据、记错数据；数据处理时单位搞错、计算出错等。显然，过失误差在实验过程中是不允许的。

三、误差表示方法

为了表示误差，工程上引入了精密度、准确度和精确度的概念。精密度表示测量结果的重演程度，精密度高表示随机误差小；准确度指测量结果的正确性，准确度高表示系统误差小；精确度（又称精度）包含精密度和准确度两者的含义，精确度高表示测量结果既精密又可靠。根据这些概念，误差的表示方法有三种。

1. 极差

极差是测量最大值与最小值之差，即

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (1-2)$$

式中 R ——极差，表示测量值的分布区间范围；

x_{\max} ——同一物理量的最大测量值；

x_{\min} ——同一物理量的最小测量值。

极差可以粗略地说明数据的离散程度，即可以表征精密度，也可以用来估算标准偏差。

2. 绝对误差

绝对误差指测量值与真值间的差异，即

$$\Delta x_i = x_i - x_0 \quad (1-3)$$

式中 Δx_i ——绝对误差；

x_i ——第 i 次测量值；

x_0 ——真值。

绝对误差反应测量的准确度，同时含有精密度的意思。

3. 相对误差

相对误差指绝对误差与真值的比值，一般用百分数表示，即

$$\epsilon = \frac{\Delta x_i}{x_0} \times 100\% = \frac{|x_i - x_0|}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

相对误差 ϵ 既反映测量的准确度，又反映测量的精密度。

绝对误差和相对误差是误差理论的基础，在测量中已广泛应用，但在具体使用时要注意它们之间的差别与使用范围。在某些实验测量及数据处理中，不能单纯从误差的绝对值来衡量数据的精确程度，因为精确度与测量数据本身的大小也很有关

系。例如，在称量材料的质量时，如果质量接近 10t，准确到 100kg 就够了，这时的绝对误差虽然是 100kg，但相对误差只有 1%；而称量的量总共不过 10kg，即使准确到 0.5kg 也不能算精确，因为这时的绝对误差虽然是 0.5kg，相对误差却有 5%。经对比可见，后者的绝对误差虽然比前者小 200 倍，相对误差却比前者大 5 倍。相对误差是测量单位所产生的误差，因此，不论是比较各测量值的精度或是评定测量结果的质量，采用相对误差更为合理。

在实验测量中应当注意到，虽然用同一仪表对同一物质进行重复测量时，测量的可重复性越高越精密，但不能肯定准确度一定高，还要考虑到是否有系统误差存在，否则虽然测量很精密也可能不准确。因此，在实验测量中要获得很高的精确度，必须有高的精密度和高的准确度来保证。

四、随机误差及其分布

在测量中，即使系统误差很小和不存在过失误差，对同一个物理量进行重复测量时，所得的测量值也是不同的，这是由于存在随机误差而影响测量结果。当对同一个物理量进行足够多次重复测量并计算出误差之后，以横坐标表示随机误差 δ ，纵坐标表示随机误差出现的概率，则可得图 1-1 所示的曲线。

从曲线可以看出以下几点。

① 随机误差分布具有对称性，即绝对误差相等的正负误差出现的概率相等。多次重复测量的算术平均值 \bar{x} 是待测量的最佳代表值。

② 曲线形状是两头低，中间高，说明绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多，分布具有单峰性。

③ 绝对值很大的误差出现的概率极小，此为有界性。

这种曲线称为正态分布曲线。从统计学原理可以说明随机误差服从正态分布。1795 年，高斯 (Gauss) 推导出它的函数形式，所以正态分布又称高斯分布。随机误差的概率密度函数形式为：

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-5)$$

式中 y ——误差 x 出现的概率密度；

x ——随机误差， $x = x_i - x_0$ ；

σ ——标准误差 (总体的标准误差)，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-6)$$

由此可见， σ 愈小，则绝对值小的随机误差出现的概率 (机会) 愈大，误差分布曲线愈尖耸，表现出测量精度愈高。 σ 愈大则情况相反。因此，为了减小随机误

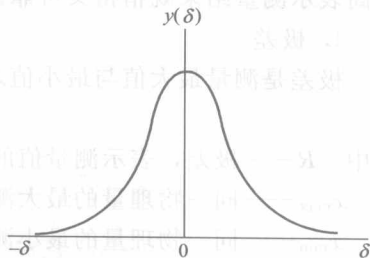


图 1-1 随机误差的正态分布曲线

差的影响,在实际测量中常常对被测的物理量进行多次重复的测量,以提高测量的精密度或重现性。标准误差完全表征测量的精度,在许多测量中都采用它作为评价测量精度的标准。

虽然真值 x_0 是客观存在的,但由于任何测定都有误差,一般难以获得真值。在实验测量中,实际测得值都只能是近似值,真值 x_0 是未知的。所以在实际使用中,真值一般是指载于文献手册上的公认的数值,或用校正过的仪器多次测量所得的算术平均值。通常用一组测量值的算术平均值 \bar{x} 来代表 x_0 ,使之成为可表示的量。即

$$x_0 \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-7)$$

式中, n 为测量次数。

在实际运算中,我们是用有限个测量值与其算术平均值的偏差来代表随机误差的,在这种情况下,标准误差的计算式应为:

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-8)$$

式(1-8)称为贝塞尔(Bessel)标准差,是一个近似值或近似标准差,有时也称为样本的标准差。由于标准差 \bar{y} 在重复测量中的重要性,又能求得,所以将贝氏标准差称为标准差,代表可以求到的测量精度。近似标准差与测量的次数密切相关,当 n 较小时,它存在明显的误差,这一点在测量中应当注意。

标准误差是一个重要的统计量,但它只考虑绝对偏差的大小,没有考虑测量值大小对测量结果的影响。一般测量量较大的物体时,绝对误差就较大。当考虑相对误差的大小时,通常用变异系数(亦称离散系数)作为统计量。即

$$C_v = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-9)$$

变异系数能较好地代表测量的相对精度,所以将此统计量称为相对标准差。我国的一些国家标准也有要求,在测量报告中除了要提供算术平均值和标准误差外,还应有相对标准偏差值。

五、系统误差的发现与消除

前面已讨论过,系统误差可能由仪器误差、装置误差、人为误差、外界误差及方法误差引起,因此要发现系统误差是哪种误差引起的不太容易,而要完全消除系统误差则是更加困难的。

1. 系统误差的检出

在一般情况下,用实验对比法可以发现测量仪器的系统误差的大小并加以校正。实验对比法是用几台仪器对同一试样的同一物理量进行测量,比较其测量结果;或用标准样品、被校准的样品进行测量,检查仪器的工作状况是否正常,然后对被测样品的测量值加以修正。

根据误差理论, 误差 $x-x_0$ 是测不到的, 能测得的只是剩余误差。剩余误差 v_i 定义为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-10)$$

式中 \bar{x} ——一组测量数据(数列)的算术平均值;

x_i ——任一测量值。

用剩余误差观察法可以检出变质系统误差。如果剩余误差大体是正负相间, 而且无明显变化规律时, 则不考虑有系统误差。如果剩余误差有规律地变化时, 则可认为有变质系统误差。

用标准误差也可以判断是否存在系统误差。不存在明显系统误差的判据定义为:

$$\overline{M}_i - \overline{M}_j \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma_i^2}{n_i} + \frac{\sigma_j^2}{n_j}} \quad (1-11)$$

式中 \overline{M} ——被测物理量的算术平均值;

n ——测量次数;

σ ——测量标准差;

i, j ——表示第 i 组和第 j 组测量。

当式中的不等号方向变为相反方向时, 表明表示第 i 次和第 j 次的测量结果之间存在系统误差。

2. 系统误差的消除或减少

要完全消除系统误差比较困难, 但降低系统误差则是可能的。降低系统误差的首选方法是用标准件校准仪器, 做出校正曲线。最好是请计量部门或仪器制造厂家校准仪器。其次是实验时正确地使用仪器, 如调准仪器的零点、选择适当的量程、正确地进行操作等。

六、过失误差的发现与消除

过失误差是实验人员疏忽大意所造成的误差, 这种误差无规律可循。在实验中是否出现过失误差, 可用以下准则进行检测。

1. 拉依达 (Pafiza) 准则

根据误差理论, $|x-x_0| \leq 3\sigma$ 的概率为 99.7%; 反过来说, $|x-x_0| \geq 3\sigma$ 的概率是 0.3%, 可能性很小。所以, 拉依达准则规定: 如果某个观测值的剩余误差 $V_i = x_i - \bar{x}$ 超过 $\pm 3\sigma$, 就有过失误差存在。因此, 这个准则又称为 3σ 法则, 有时也称极限误差法。拉依达方法简单, 无须查表, 当测量次数较多或要求不高时, 使用比较方便。

2. 格鲁布斯 (Grubbs) 准则

在一组测量数据中, 按其从小到大的顺序排列, 最大项 x_{\max} 和最小项 x_{\min} 。最有可能包含过失性, 它们是不是可疑数据, 可由其剩余误差与临界值进行比较来确定, 如果

$$|V_i| = |x_i - \bar{x}| > G_0 \delta \quad (1-12)$$

则 x_i 是可疑数据。为此，先要计算出统计量

$$G_{\max} = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{s} \quad \text{或} \quad G_{\min} = \frac{|x_{\min} - \bar{x}|}{s} \quad (1-13)$$

在 n 次测量中，若给定显著度 σ ，就可从表 1-1 中查出临界值 $G(n, \alpha)$ 。如果 $G_{\max} \geq G(n, \alpha)$ 或 $G_{\min} \geq G(n, \alpha)$ ，则有过失误差存在。

表 1-1 格鲁布斯准则 $G(n, \alpha)$ 数值表

n	α		n	α	
	0.01	0.05		0.01	0.05
3	1.16	1.15	17	2.78	2.48
4	1.49	1.46	18	2.82	2.50
5	1.75	1.67	19	2.85	2.53
6	1.94	1.82	20	2.88	2.56
7	2.10	1.94	21	2.91	2.58
8	2.22	2.03	22	2.94	2.60
9	2.32	2.11	23	2.96	2.62
10	2.41	2.18	24	2.99	2.64
11	2.48	2.23	25	3.01	2.66
12	2.55	2.28	30	3.10	2.74
13	2.61	2.33	35	3.18	2.81
14	2.66	2.37	40	3.24	2.87
15	2.70	2.41	50	3.34	2.96
16	2.75	2.44	100	3.59	3.17

在我国的一些产品标准或检验标准中，对准则的选择已有规定，数据处理时应按其规定进行操作。

消除过失误差的最好办法是提高测量人员对实验的认识，要细心操作，认真读，及实验数据，实验完后，要认真检查数据，发现问题，及时纠正。

七、有效数字的修约与运算规则

在实验过程中，任何测量的准确度都是有限的，我们只能以一定的近似值来表示测量结果。因此，测量结果数值计算的准确度就不应该超过测量的准确度，如果任意地将近似值保留过多的位数，反而会歪曲测量结果的真实性。在测量和数字运算中，确定该用几位数字来代表测量值或计算结果，是一件很重要的事情。关于有效数字和计算规则简单介绍如下。

1. 一次读数的有效数字表示法

任何仪器都有一定的读数分辨率。在读数分辨率以下，测量的数值是不确定的。因此，所有读数都只需读到能分辨的最小单位就行了。最小单位指的是在不变动仪器和实验条件的情况下能够重复读定的单位，它通常是仪器标尺的最小分度或它的十分之一。例如，用米尺去测量一块玻璃试样的长度时，一般最多只需读到十分之一毫米，因为米尺最小分度是毫米的十分之一，这个十分之一毫米，就是分辨

率的最小单位。

为了如实地反映读数情况，记录测量数值时应当不多不少地能够确定读得的全部数字，例如用米尺测量上述玻璃试样的长度为 23.8mm，23 是完全确定的，末位 8 是不确定的或叫做可疑数字，因为“8”是估计值，当不同的人来读取这一测量结果时，可能是 23.9mm，也可能是 23.7mm，这之间可能发生一个单位的出入。又如，用万分之一天平称量某一物体的质量时，称量结果为 $(2.2345 \pm 0.0002)\text{g}$ ，其中 2.234 是完全确定的，末位数字 5 是不确定的。因此，我们把所有确定的数值（不包括表示小数点位置的“0”）和这位有疑问数字在一起称为有效数字。在记录测定数值时，只保留一位可疑数字。在这两个例子中，23.8 和 2.2345 都叫有效数字。其中，23.8 称为三位有效数字；2.2345 称为五位有效数字。

有效数字还能反映测量的精密程度。例如，用外径千分卡去测量上述玻璃试样的长度，读数可能是 23.83mm，它的有效数字为四位。那么，为什么用两种不同的测量仪器去测量同一个试体会得到不同的有效数字位数呢？这是因为外径千分卡的精密程度比米尺高，其最小分辨率为 $1/100\text{mm}$ ，百分位上的数还能读得出来。因此，在记录测量数据时，写有效数值的位数必须符合仪器的实际情况，不能多写，也不可少写。

在确定有效数字时，必须注意“0”这个符号。紧接着小数点后的“0”仅用来确定小数点的位置，不算有效数字。例如，在数字 0.00013 中，小数点后的三个“0”都不是有效数字，而 0.130 中小数点后的“0”是有效数字。但是整数，例如数字 250 中的“0”就难以判断是不是有效数字了。因此，为了明确表明有效数字，常用指数标记法，可将数字 250 写成 2.5×10^2 就清楚了。

有效数字位数确定之后，其余数字一律舍去。舍去数字时按“四舍六入五留双”规则，如果末位数恰好是 5，看最后倒数第二位数字，是奇数者进 1，是偶数者弃而不计。如将数字 27.045 和 27.055 取为四位有效数字时，则分别记作 27.04 和 27.06。

2. 有效数字运算规则

在运算中，经常有不同有效位数的数据参加运算。在这种情况下，需将有关数据进行适当的处理。对数字的首位大于 8 的，可多算一位有效数字，如 9.12 在运算中可看成四位有效数字 9.120 等。

① 加减运算。当几个数据相加或相减时，它们的小数点后的数字位数及其和或差的有效数字的保留，应以小数点后位数最少（即绝对误差最大）的数据为依据。例如：

0.33		0.33
32.212	调整到保留	32.21
+)	两位小数	+)
1.06783		1.07
	?	33.31

如果数据的运算量较大时,为了使误差不影响结果,可以对参加运算的所有数据多保留一位数字进行运算。

② 乘除运算。几个数据相乘相除时,各参加运算数据所保留的位数,以有效数字位数最少的为标准,其积或商的有效数字也依此为准。例如,当 $0.0121 \times 25.64 \times 1.05782$ 时,其中 0.0121 的有效数字位数最少,所以,其余两数应改写成 25.6 和 1.06 与之相乘,即:

$$0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$$

③ 对数运算。应用对数计算时,所取对数的位数(对数首数除外)应与真实有效数字相同。

④ 计算式中的常数为 π 、 e 的数值,以及其他一些取自手册上的常数,可以为无规则,可按需要取有效数字。若算式中有效数字最低是三位,则上面常数取三位或四位均可。

⑤ 计算平均值时,若参加平均的数字有 4 个以上,则平均值的有效数值可多取一位。例如,下面的 5 个数据,其平均值可取 1.56 ,也可取 1.565 。

$$x_1 = 1.58; x_2 = 1.57; x_3 = 1.56; x_4 = 1.55$$

$$\bar{x} = (1.58 + 1.57 + 1.56 + 1.55) / 4 = 1.565$$

⑥ 在整理最后结果时,须按测量结果的误差进行化整,表示误差的有效数字最多用两位。例如 $(22.84 \pm 0.12)\text{cm}$ 等。当误差第一位数为 8 或 9 时,只需保留一位。测量值的末位数应与误差的末位数对应。例如:

测量结果

化整结果

$$x_1 = 1001.77 \pm 0.033$$

$$x_1 = 1001.77 \pm 0.03$$

$$x_2 = 237.464 \pm 0.127$$

$$x_2 = 237.464 \pm 0.13$$

$$x_3 = 123357 \pm 878$$

$$x_3 = (1.23 \pm 0.009) \times 10^5$$

八、实验数据的处理

实验数据要经过处理才能求出未知参数(被测量的量)的数值和评定这个数值所含有的误差。

在测量过程中可能同时存在系统误差、随机误差和过失误差,而且在每种误差中还可能存在多个误差(这些误差称为误差分量),不同的是哪一种误差占优势。因此,测量数据出来之后还要对其进行分析,确定其中含有什么误差,并进行适当的处理,否则就得不到可靠的结果。

不确定度是误差理论发展所提出的概念,是指“误差可能数值的测度”,即由于有测量误差存在而对被测量量不能肯定的程度。近真值、不确定度和单位这三个要素缺一不可,否则不能全面表达测量结果。

合成不确定度 σ 由不确定度的两个分量(A类和B类)求“方和根”而得。A类不确定度用 s_i 表示,是统计不确定度,即指可以采用统计方法计算的不确定度,可以像计算标准误差那样,用贝塞尔(Bessel)公式(1-8)进行计算。B类不确定