



世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

主编 王红岩 张国瑱 林树



04-33/298

2010

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

主编 王红岩 张国瑱 林 树
参编 叶虹南 倪轩昂 徐逸骐 陆颖喆 蒋开明
主审 孙可平

机械工业出版社

本书参照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会 2008 年制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合上海海事大学物理实验教学的教改现状与经验，借鉴吸收国内外近年来物理实验教学研究成果，改编而成。

全书包括 31 个物理实验，内容既涉及力学、热学、光学、声学、电磁学等基础实验，又涵盖了部分综合性、设计性的近代物理实验，提供了较为详尽的实验目的、实验原理、实验步骤、记录与计算等内容。每个实验后均有一定数量的思考题。

本书可作为高等院校工科类各专业的基础物理实验教学用书，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/王红岩, 张国琪, 林树主编. —北京:
机械工业出版社, 2010. 1

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 28909 - 8

I. 大… II. ①王…②张…③林… III. 物理学 - 实验 -
高等学校 - 教材 IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 225045 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 张金奎 责任编辑: 姜 凤 版式设计: 张世琴
封面设计: 陈 沛 责任校对: 程俊巧 责任印制: 乔 宇
北京京丰印刷厂印刷
2010 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷
169mm × 239mm · 13.5 印张 · 257 千字
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 28909 - 8
定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来随着科学技术的迅速发展和教学改革的不深入，大学物理实验课的教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化。新概念、新思路、新方法、新的实验技术和科研成果已逐步在物理实验课中有所体现。本书是我们在多年实验教学的基础上，经过反复实践、不断改革和逐步充实完善编写而成的。

我们依据教育部审定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合本校物理实验教学的教改现状和经验，注重基础、拓宽知识面、新颖实用，在培养学生的创新能力等方面下功夫，重新编写了设计性实验和综合性实验等内容，对于设计性实验的编写也不强制采用统一的格式，而是采用大纲式、讨论式的编写方式，使教师教学与学生进行实验都有较大的发挥余地，有利于开发和培养学生的实践能力和创新能力。

全书共包括了力学、热学、光学、声学、电学、磁学和近代物理实验等 31 个实验。在编写过程中，既注重基础理论和经典实验，对于新技术也予以充分重视。同时，为了使在中学阶段对实验接触较少的学生也能通过本书的学习而掌握基本的实验知识，对一些常用仪器和具有共性的仪器均作了详细的介绍，对实验中一些经常遇到的问题也予以一定篇幅进行描述。

本书由王红岩负责统稿，主要参与编写的有王红岩、张国瑛、林树，叶虹南、徐逸骐、倪轩昂、陆颖喆、蒋开明等也参加了部分编写工作。

本书集中了编者所在的上海海事大学多年来物理实验教学的大量成果，实际上是集体创作的结晶。除了上面提到的几位编写者以外，本书的成书过程也有徐时杰、俞大忠、郑基立、黄赛清、李云生、范莘耕的贡献。

孙可平教授审阅了全书，并提出了不少宝贵意见，谨致谢意。

虽经长期不断的努力，但由于编者的水平有限，错误缺点在所难免，敬请指正。

编者

2009 年 10 月

目 录

前言

绪论	1
实验数据的处理	3
实验一 长度的测量	19
实验二 测定金属丝的弹性模量	24
实验三 扭摆法测定物体转动惯量	30
实验四 空气比热容比测定实验	35
实验五 线膨胀系数测定	37
实验六 常用电学仪器的使用	41
实验七 惠斯登电桥测电阻	48
实验八 电位差计测电动势	53
实验九 电流表改装	57
实验十 示波器的使用	60
实验十一 等厚干涉的应用	68
实验十二 用光栅测定光波的波长	72
实验十三 旋转液体物理特性测量	80
实验十四 玻尔共振——研究受迫振动	84
实验十五 用梁的弯曲测量材料的弹性模量	92
实验十六 仿真实验——偏振光的研究	96
实验十七 光纤传输技术实验	103
实验十八 激光全息照相	109
实验十九 迈克尔逊干涉仪的应用	118
实验二十 光拍法测量光速	123
实验二十一 光电效应	129
实验二十二 霍尔效应及其应用	137
实验二十三 荷质比实验	146
实验二十四 金属电子逸出功实验	152
实验二十五 声速测量	157
实验二十六 夫兰克-赫兹实验	162
实验二十七 密立根油滴实验	171

实验二十八 多量程直流电表的设计.....	177
实验二十九 多功能光学实验.....	182
实验三十 电学设计性实验.....	189
实验三十一 传感器设计性实验.....	197
参考文献.....	207

绪 论

物理实验是一门基础科学，也是进行一系列科学实验训练的必修基础课程。科学技术的发展水平，很大程度上取决于科学实验的结果。因此，为了培养更多的高级航海专门人才和高级管理人才，不仅要让他们学习掌握各种理论知识，而且要培养他们的基本实验能力及良好的实验素养。物理实验课程无疑是海事大学各专业学生必修的重要课程。

一、物理实验课程的任务

物理实验是一门独立设置的课程，主要任务有以下3个方面：

1. 巩固、扩展、加深学生的物理学知识。对学生进行实验基本知识、方法、技能技巧方面的培养和训练，使其加深对物理原理的理解。通过物理实验课的训练，要求学生掌握一些常用物理量的测量方法，了解物理实验中常用仪器的构造原理、主要性能和使用方法，基本上具备从观察现象、测量数据、处理和分析结果到完整地写出实验报告的能力，为今后进行实际工作打下一个牢固的基础。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。包括通过阅读实验教材和查阅参考资料，正确理解实验内容；借助教材或仪器说明书，正确使用仪器；运用物理学理论对实验现象进行合理分析；正确记录、分析和处理实验数据，撰写合格的实验报告；独立完成适当的综合设计性实验任务等能力。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。包括理论联系实际、实事求是的科学作风；严肃认真、一丝不苟的工作态度；勤奋钻研、积极创新的探索精神以及遵守纪律、爱护公物的优良品德。通过物理实验课教学更好地培养学生科学实验的能力与分析问题和解决问题的能力。

二、物理实验课程的主要教学环节

物理实验课程将在基础实验教学中着重对学生进行实验操作和撰写报告训练。在设计性实验教学中，则将适当进行包括科学实验全过程的基本训练。物理实验课程具体分为3个主要教学环节：

1. 实验预习

仔细阅读实验教材或有关资料，明确实验目的、原理和方法，初步了解有关测量仪器的主要性能、使用方法和注意事项。

如果是设计性实验，需制定初步实验方案，提出对仪器设备的要求等。

2. 实验操作

实验时应遵守实验室规章制度，犹如一个科学工作者那样，井井有条地布置

仪器,安全操作,细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作始终一帆风顺,尤其是设计性实验。在遇到问题时,应看做是学习的良机,冷静地分析和处理,直到修改甚至推翻你的实验方案。实验中要正确记录数据(注意单位和有效数字),如发现数据有疑问时,可以重新进行实验,并对原来数据标上特殊符号以备查考。绝不允许修改实验数据。

3. 实验总结

实验报告是实验工作的全面总结。要用简明扼要的形式,将实验结果完整而又真实地表达出来,这也是进行科学实验素质培养的必要内容之一。实验报告要求文字通顺,字迹端正,数据齐全,图表规范,结果表示正确,分析讨论认真。

一份完整的实验报告应该包括预习部分及课后处理部分。

预习部分包括:

(1) 实验名称;(2) 实验目的;(3) 简要原理(计算公式、光路图或电路图并加以简单说明);(4) 实验简要步骤。

课后处理部分包括:

(5) 实验数据记录和数据处理(包括计算、作图等);(6) 仪器设备;(7) 误差分析和问题讨论。

对于设计性实验,则应对实验原理的阐述、实验公式的推导、电路或光路的设计、操作步骤的安排、仪器设备的选择、数据结果的分析等有比较详尽的探讨。

三、学生物理实验课须知

1. 实验前学生必须认真预习,明确实验目的和要求、实验原理、仪器使用的方法,以及实验步骤。教师上课时将检查学生的预习情况,凡未预习或预习不充分的学生,教师可责令其充分预习后再进行实验。

2. 实验课不得无故缺席、迟到、早退。学生因事或病不能参加实验,已经办理请假手续的可在规定时间内补做。未完成实验课的学习者,不得参加考试。

3. 实验时应保持严肃认真的态度,养成严谨求实的工作作风,不得伪造实验数据或相互抄袭实验结果。维持良好的实验秩序,维护实验室整洁。

4. 实验课应注意安全,爱护仪器,如有遗失或损坏仪器等情况发生,请及时向指导老师报告,教师将酌情按有关规章处理。若不按规程操作,发生了仪器损坏情况,则按情节轻重给予处理,直至赔偿损失。做电学实验时,所接线路必须经教师检查无误后,再接通电源。

5. 实验完毕,数据交教师审阅,经认可后,把器材整理好,才能离开实验室。

6. 实验课后一周内完成实验报告。

实验数据的处理

在科学实验的观测中，由于实验方法、实验设备、实验条件等种种因素的影响，测量结果总存在着误差。进行误差分析对科学实验有两方面的指导作用：一是通过分析误差产生的原因、性质，采用合理的方法减少或消除误差的影响，并对结果作出合理的评价；二是优化实验设计，根据实验结果的误差要求，选择测量方法、测量器具和测量条件，获得合理的实验结果。因此，进行数据处理和误差分析是物理实验中必不可少的工作。

进行物理实验，总是使用一定的方法，由实验者选用一定的仪器，在一定的条件下对某个（或几个）物理量进行测量，最后用正确的形式把实验结果表达出来。由于实验方法的不完善，实验仪器有一定的准确度，以及测量时所处条件的改变等因素，由测量的结果是无法获得被测物理量的真值的。

测量与误差

一、测量与分类

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。因此就需要进行测量。物理实验是以测量为基础的，所谓测量，就是由测量者采取某种测量方法，用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较，得出他们之间的倍数关系。一个物理量的大小是客观存在的，选择不同的单位，相应的测量数值就有所不同。所以，测量值应包括数值和单位两个要素，两者缺一不可。

测量可以分为直接测量和间接测量两种。直接测量就是用量具或仪表直接与被测之量比较所得的量。如米尺测量长度，安培表测量电流强度等。间接测量就是先测出与待测量有一定关系的诸量，然后计算出该待测量。如矩形面积的测量，先测长度和宽度再引用矩形面积公式，运用乘法运算后才获得结果。

二、测量误差与误差的分类

一个待测物理量的大小，在客观上应该有一个真实的数值，叫做“真值”。真值是一个理想的概念。测量的目的是得到这个真值。由于仪器的准确度、实验方法、实验者的测量技术等各种因素的限制，通过有限的实验手段所得测量值与真值总有差别，测量值与真值之差称为误差。误差的大小反映了测量结果的准确度。测量方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定、测量数据的处理等等

都应在可能的范围内力求减少误差。

误差按其性质和来源主要可分为系统误差、偶然误差和粗大误差。

(一) 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持恒定; 或在条件改变时, 按某一确定的规律变化的误差, 称为系统误差。

它的来源有以下几个方面:

1. 仪器误差: 如刻度不准, 砝码未检定。

2. 方法误差: 由于实验方法本身或测量所依据的理论公式本身的近似值或实验不能达到理论公式所规定的条件和要求导致的误差 (单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 的成立条件是摆角趋于零, 而测量中又必须具有一定的摆角)。

3. 人员误差: 由于测量者的习惯所造成的。例如, 用肉眼在分度下估读时习惯地偏向一个方向等等。

4. 环境误差: 由于实际环境条件与测量所规定的环境发生不一致引起的, 如温度、气压等环境条件按一定规律发生变化而引起的系统误差。

只要针对上述一些原因采取措施, 系统误差是可以减少或消除的。系统误差的减少和消除是个复杂的问题。只有很好地分析整个实验所依据的原理、方法、测量过程的每一步及所用的各种仪器, 才能找出产生误差的原因。

(二) 偶然误差

在相同条件下多次测量时, 误差的绝对值和符号的变化没有确定的规律, 也不能预定, 这即为偶然误差。偶然误差是由于测量过程中一些偶然的或不确定的因素引起的。

偶然误差主要来源于:

1. 人们视觉、听觉、触觉等感觉能力的限制。例如, 用米尺估计毫米以下的一位读数值就有一定的偶然性, 估读便存在偶然误差。

2. 实验环境等偶然因素干扰, 如温度的起伏、气流的扰动等。

偶然误差大小无定值, 可正可负。但在同样条件下, 在对同一物理量进行多次测量, 可以发现偶然误差服从统计规律, 其中最典型的一种是高斯正态分布规律。标准化的正态分布曲线如图 0-1 所示, 图中 ε 表示测量值 x 的误差, $f(\varepsilon)$ 为与误差出现概率有关的概率密度函数, 误差出现在 $\varepsilon \sim \varepsilon + d\varepsilon$ 范围内的概率为 $f(\varepsilon) d\varepsilon$ 。

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}}$$

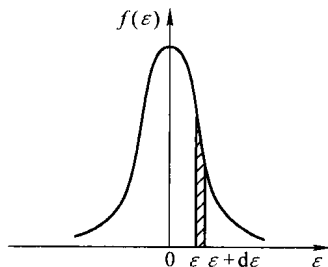


图 0-1 正态分布曲线

被测量值的误差分布处于 $\pm\sigma$ (σ 为标准误差) 之间的概率 $p(\pm\sigma)$ 为

$$p(\pm\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = 68.3\%$$

这说明对任一次测量, 其测量值误差出现在该区间内的可能性(概率)为 68.3%。

服从正态分布的误差具有下面一些特征:

- (1) 单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率很小, 甚至接近于零, 即误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性: 偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加越来越近于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0 \quad (0-1)$$

总之, 系统误差与偶然误差性质不同, 来源不同, 处理方法也不同。测量精密度高是指偶然误差小, 测量数据比较集中; 测量准确度高是指系统误差小, 数据的平均值偏离其真值较小。而精确度是把两者都包括进去了, 有时简称精度。影响测量结果精度的, 有时主要因素是偶然误差, 有时主要因素是系统误差, 因此对每个实验要作具体分析, 但实验结果总是系统误差和偶然误差的结合。

(三) 粗大误差

粗大误差指明显超出规定条件下预期的误差。粗大误差是在测量过程中由某些突然发生的不正常因素, 如比较强的外界干扰、测量条件的意外变化、测量者的疏忽大意等造成。它是统计的异常值, 属于失控或人为的错误, 它已不属于正常的测量工作范畴, 应当尽量避免。如果在测量结果中出现则按一定规则剔除。

实验不确定度的评定

一、不确定度的一些基本概念和分类

即使采用了正确的测量方法, 由于测量仪器和测量者的问题, 测量结果仍不可能是绝对准确的, 它必然有不确定的成分。实际上, 这种不确定的程度是可以利用一种科学的、合理的、公认的方法来表征的, 这就是“不确定度”的评定。

不确定度的评定十分重要, 但以往各国对不确定度的表示和评定却有不同的看法和规定, 这无疑影响了国际间的交流和合作。1992 年, 国际标准化组织 (ISO) 发布了具有指导性的文件《测量不确定度表示指南》(以下简称《指南》), 为世界各国不确定度的统一奠定了基础。1993 年 ISO 和国际纯粹与应用

物理联合会 (IUPAP) 等 7 个国际权威组织又联合发布了《指南》的修订版。从此, 物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。

不确定度是对被测量的真值所处量值范围的评定, 即是对测量误差的一种评定方式。它是一个恒为正值, 它表示由于存在测量误差, 导致被测量的真值不能确定的程度, 具有概率的概念。因此, 测量不确定度是表征被测量的真值以一定的概率落在某一量值范围的不肯定程度的一个估算。不确定度的大小, 反映了测量结果的可信赖度。测量结果的不确定度, 一般来源于测量装置、环境、测量方法、测量人员的技术水平和测量对象变化等。标准不确定度一般可分为以下 3 类:

1. A 类评定不确定度: 在同一条件下多次测量, 即由一系列观测结果的统计分析评定的不确定度, 简称 A 类不确定度, 常记为 U_A 。

2. B 类评定不确定度: 由非统计分析评定的不确定度, 简称 B 类不确定度, 常记为 U_B 。

3. 合成标准不确定度: 某测量值的 A 类与 B 类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度, 简称合成不确定度。

二、测量结果的不确定度 (U) 评定

(一) 直接测量结果的不确定度

1. 多次测量

在直接对某一物理量 x 进行等精度测量之后, 测量值采用测量列的算术平均值 $\bar{x}$ (不含应修正的系统误差) 表示, 而总不确定度则是 A、B 两类分量的方和根, 即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

A 类不确定度分量 U_A 的估计:

测量的标准偏差 σ ——随机误差的离散程度, 由误差理论可推得 σ 的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-2)$$

此式称为贝塞尔公式。它表示测量值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 及其随机误差的离散程度。 σ 大, 测量值分散; σ 小, 测量值密集。

由于 n 是有限次测量, 在置信概率为 p 、测量次数为 n 时, 根据误差理论, 要表示测量平均值的不确定度 U_A , U_A 应等于标准偏差 σ 乘以一个因子 $t/\sqrt{n}$, 其因子 $t/\sqrt{n}$ 的值可以从表 0-1 中查得。(t 对应于 t 分布因子。)

$$U_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma \quad (0-3)$$

当 n 确定后, 概率 $p = 0.95$ 时, $t/\sqrt{n}$ 的值由表 0-1 给出。

表 0-1 置信概率 $p = 0.95$ 时, 因子 t 和 $t/\sqrt{n}$ 的数值表

次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30
因子 t	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	2.05
$\sqrt{n}$	1.41	1.73	2.00	2.24	2.45	2.65	2.83	3.00	3.16			
$t/\sqrt{n}$	8.99	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	0.37
$t/\sqrt{n}$ 近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	$t/\sqrt{n} \approx 1$					$t/\sqrt{n} \approx 2/\sqrt{n}$		

为了处理数据方便, 在置信概率 $p = 0.95$, 物理实验测量次数通常在 (6 ~ 10) 次时, $t/\sqrt{n} \approx 1$, 此时 $U_A = \sigma$ 。

B 类不确定度分量 U_B 的估计:

U_B 是用非统计方法评定的不确定度的分量, 一般情况下应根据经验或其他非统计信息估计。在测量中, 往往采用一些必要的措施, 使得系统误差减到最低的程度, 或对系统误差进行修正, 这样我们可以只考虑测量仪器误差或者测试条件不符合要求而引起的附加误差所带来的 B 类分量。本书对 B 类分量 U_B 的估计作如下简化: 近似地取计量器具的误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 为 U_B , 即 $U_B \approx \Delta_{\text{仪}}$ (表 0-2)。

表 0-2 物理实验常用的测量仪器的 $\Delta_{\text{仪}}$

仪器	量程/mm	分度值/mm	$\Delta_{\text{仪}}/\text{mm}$
米尺	0 ~ 300	1	0.5
钢卷尺	0 ~ 2×10^3	1	1
游标卡尺	0 ~ 125	游标分度值 0.02/0.05	0.02/0.05
外径千分尺	0 ~ 25	0.01	0.004
读数显微镜			约为分度值的 1/2
分光计			分度值
普通温度计		0.1	0.2
电磁仪表			量程 $\times$ 准确度等级 %
电阻箱、直流电桥、 直流电位差计			示值 $\times$ 准确度等级 %
各种数字式仪表			示值 $\times$ 准确度等级 $+n$, n 一般取 (1 ~ 2) 个字

物理实验常用的指针式电表, $\Delta_{\text{仪}}$ 由下式估算

$$\Delta_{\text{仪}} = x_m \times a\%$$

式中, x_m 为量程; a 为准确度等级。我国指针式电表的准确度等级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等 7 级。

由生产厂家按国家标准给出的仪器基本误差或仪器示值误差, 作为仪器误差限, 置信概率一般都在 $p \geq 0.95$ 。故在大学物理实验中, 把仪器误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 简化地等于不确定度 B 类分量 U_B , 其置信概率 $p \geq 0.95$ 。

综上所述, 本书中一般用简化的方法近似计算等精度直接测量的总不确定度

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (0-4)$$

对物理量 x 的多次测量的测量结果写为 $x = \bar{x} \pm U$ 。

为了更直观地检查实验中测量结果的准确程度, 有时还用相对不确定度 E 来评定, 即

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

不确定度 U 及相对不确定度 E , 一般只取 1 位有效数字, 测量值 x 的末位数与不确定度 U 的所在位对齐, x 与 U 的数量级、单位要相同。

2. 单次测量

实际工作中, 有时由于条件的限制不能进行多次测量; 或由于仪器的精度较低, 或被测对象不稳定, 多次测量的结果并不能反映随机性, 此时多次测量已失去意义。在这些情况下, 测量结果也应写为 $x = \bar{x} \pm U$ 形式, 其中的测量不确定度 U 应根据对仪器精度、测量方法和测量对象的分析, 估计它的最大不确定度, 其估计值不得小于仪器误差限值, U 可简单地用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。多次测量时有时会出现几次数据完全相同的情况, 这并不说明不存在偶然误差, 只说明所用仪器的精确度较低而不足以反映微小差异, 这时取 $U = \Delta_{\text{仪}}$ 是合理的。则一次测量结果表示式为

$$\begin{cases} x = (x_{\text{测}} \pm \Delta_{\text{仪}}) \text{单位} \\ E_x = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{x_{\text{测}}} \times 100\% \end{cases}$$

(二) 间接测量结果的不确定度合成

间接测量的测量值是由直接测量的测量值通过公式计算得到的, 由于直接测量有误差, 它们必然通过函数关系传递给间接测量量, 这就是误差的传递。

设 N 为间接测量量, 且有

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (0-5)$$

其中 $x, y, z, \dots$ 是彼此独立的直接测量量, 不确定度都是微小量, 相当于数学中的增量, 因此, 间接测量量的不确定度的计算公式和误差传递基本公式有相似之处, 不同的是: (1) 用不确定度符号 $U_x, U_y, U_z, \dots$ 替代微分符号 $dx, dy, dz, \dots$; (2) 考虑到不确定度合成的统计性质, 用方和根形式合成。于是, 本书中采用式 (0-6)、式 (0-7) 计算间接测量量的不确定度。各直接测量量是互

相独立的变量,各直接测量量的不确定度 U_x 、 U_y 、 U_z 、…为已知时,由误差理论可以证明,间接测量量的不确定度 U_N (或 E_N) 的传递公式为

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-6)$$

或

$$E_N = \frac{U_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-7)$$

间接测量结果的表示式

$$\left. \begin{aligned} N &= (\bar{N} \pm U_N) \text{ 单位} \\ E_N &= \frac{U_N}{\bar{N}} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (0-8)$$

常用函数不确定度传递公式如表 0-3 所示。

表 0-3 常用函数不确定度传递公式

测量关系式	不确定度传递公式	测量关系式	不确定度传递公式
$N = x \pm y$	$U_N = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$	$N = xy$	$E_N = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$
$N = kx + my - nz$	$U_N = \sqrt{k^2 U_x^2 + m^2 U_y^2 + n^2 U_z^2}$	$N = x/y$	$E_N = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$
$N = Ax^k y^m / z^n$	$E_N = \sqrt{k^2 E_x^2 + m^2 E_y^2 + n^2 E_z^2}$	$n = \lg x$	$U_N = U_x / (x \times \ln 10)$
$N = \sin x$	$U_N = \cos x U_x$	$N = \ln x$	$U_N = U_x / x$

例 1 用外径千分尺测量一个小钢球的直径,测得数据如下: d 为 9.345mm、9.346mm、9.347mm、9.346mm、9.347mm。外径千分尺的初始读数为 -0.006mm,试求小钢球的体积。

1. 先求出小钢球的直径的测量结果

d 的平均值 $\bar{d} = 9.346\text{mm}$ 对外径千分尺的初始读数构成的系统误差应予修正,所以

$$\bar{d} = 9.352\text{mm}$$

标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{5 - 1}} = 0.0008\text{mm}$$

测量次数 $n = 5$, 查表得 $t/\sqrt{n} = 1.24$, $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$, 可算出直径的不确定度

$$U_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma = 1.24 \times 0.0008\text{mm} = 0.00099\text{mm}, \quad U_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$$

$$U_d = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(0.000\,99\text{mm})^2 + (0.004\text{mm})^2} = 0.004\text{mm}$$

小钢球的直径的测量结果为

$$\bar{d} \pm U_d = (9.352 \pm 0.004)\text{mm}$$

2. 再求小钢球的体积

$$\bar{V} = \frac{\pi}{6} \bar{d}^3 = \frac{\pi}{6} \times (9.352\text{mm})^3 = 428.3\text{mm}^3$$

3. 再求小钢球的体积的不确定度

$$E = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln V}{\partial d}\right)^2 U_d^2} = 3 \frac{U_d}{\bar{d}} \times 100\% = \frac{3 \times 0.004}{9.352} \times 100\% = 0.13\% \approx 0.1\%$$

$$U_V = E \times \bar{V} = 0.001\,3 \times 428.3\text{mm}^3 = 0.56\text{mm}^3 = 0.6\text{mm}^3$$

所以小钢球的体积为

$$\begin{cases} V = (428.3 \pm 0.6)\text{mm}^3 \\ E = 0.1\% \end{cases}$$

有效数字及其运算

一、有效数字

无论是直接测量或间接测量，都要用数字来进行记录与运算，正确而有效地表示测量和运算结果的数字，称有效数字，它由可靠数和一位估计数构成。例如，用刻有厘米的米尺来测量一根棒的长度，如图 0-2 所示。我们很容易读出这棒的长度是大于 10cm，小于 11cm。虽然上侧的米尺没有刻到毫米，但我们可以估计到毫米（即最小刻度的 1/10），如图 0-2 上棒长可读到 10.2cm。

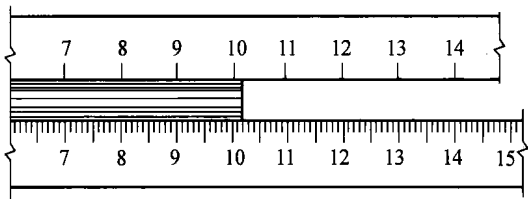


图 0-2 米尺测棒长示意图

至于再想多读一位小数，用这样的米尺是不能测出的。因为在通常情形下，最多只能估计到它的最小刻度的 1/10。如果我们采用刻有毫米的米尺来测量，则可直接读得毫米，而且可以估计到毫米的 1/10，如 10.19cm。假使这棒的末端恰好等于 10.2cm，这时我们应该写做 10.20cm。

在图 0-2 中测得棒长为 10.2cm，其中 10 是确定无误的，称为可靠数字；最后一位数字 2 是估计所得，称为可疑数字。在测量中，我们把记录的各位可靠数字和最后一位估计得的可疑数字都称为有效数字。有效数字不是凭空臆造的，而

是从观测得来的,在记录及计算时必须注意它们的位数不能随便增减。

实验测得的有效数字与数学中的数字有区别,它不仅表示测量值的大小,还表示了测量该量的准确程度。例如,10.20cm 要比 10.2cm 准确,这是说明刻有毫米的米尺要比刻有厘米的米尺准确度高。由此可见,有效数字的多少由所用的测量仪器决定,不能随便增减;测量值的有效数字愈多,表示测量的准确程度愈高。在处理实验数字时应注意以下几点:

1. 凡数字后面的“0”是有效数字。如 10.20cm,不能随便写成 10.200cm,或 10.2cm。

2. 在数字前面的“0”不是有效数字。如 0.001 2m,数字前面 3 个“0”,仅表示单位的大小,不表示测量的准确程度。书写中应尽量避免,应写成 $1.2 \times 10^{-3}\text{m}$ (两位有效数字)。

3. 有效数字与小数点位置无关。因为小数点的位置仅与所用的单位大小有关,当某量的单位改变时,有效数字的位数不能有所增减。例如 10.23cm (4 位有效数字),化成微米时不能写 102 300 μm ,应当写成 $1.023 \times 10^5 \mu\text{m}$,化成千米时,应当写成 $1.023 \times 10^{-4}\text{km}$ (仍是 4 位有效数字)。

使用有效数字的主要目的:

1. 便于选择适当准确程度的仪器,达到实验所需要的结果。
2. 在运算时可以避免不必要的繁复运算,而仍得到需要的准确结果。

二、有效数字的运算

总则:运算结果只保留一位可疑(或欠准)数字。

(一) 尾数的取舍

运算中确定了欠准数所在位后,去掉其余尾数按四舍六入五凑偶法。

尾数 ≤ 4 ——“舍”; 尾数 ≥ 6 ——“入”; 尾数 = 5——

{ 前位为奇数→“入”
前位为偶数→“舍”。

(二) 加减运算规则

诸数相加减时,可先将它们按照加减法的纵式排列起来运算,所得结果中只保留一位可疑数字,而把在这个数字以后的其他可疑数字都按照四舍六入五凑偶的方法略去。即诸数相加减时,其和或差的有效数字末位的量级与参与运算的有效数字中可疑数字量级最大的对齐。

$$\begin{array}{r} \text{例 1:} \quad 10. \underline{1} \\ +) 4. 17 \underline{8} \\ \hline 14. \underline{278} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{例 2:} \quad 10. \underline{1} \\ -) 4. 17 \underline{8} \\ \hline 5. \underline{922} \end{array}$$