物理实验教程

主编　薄永红　罗海东

东南大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书根据《高等学校工程专科物理实验课程教学基本要求》，并结合高等职业院校物理实验教学的具体情况编写而成。全书内容包括绪论，测量误差和数据处理，基本物理实验十八个，物理实验中的基本测量方法，设计性实验两个。内容涉及力学、热学、电磁学、光学和近代物理。书末备有有关附表。

本书可作为高等职业院校工科各专业的物理实验教材，也可作为其他各类高等专科院校工科各专业的物理实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程/薄永红，罗海东主编. —南京：东南大学出版社，2006.8

ISBN 7-5641-0525-9

Ⅰ.物… Ⅱ.薄… Ⅲ.物理学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 093697 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人：宋增民

江苏省新华书店经销 印刷

开本：787mm×1092mm 1/16 印张：7.25 字数：175 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定价：15.00 元

(凡因印装质量问题，可直接向发行部调换。电话：025-83795801)

前　言

本书根据《高等学校工程专科物理实验课程教学基本要求》，并结合高等职业院校物理实验教学的具体情况编写而成。本书既可作为高等职业院校工科各专业的物理实验教材，也可作为其他各类高等专科院校工科各专业的物理实验教材。

编写过程中，笔者考虑到了目前高等职业院校工科开设物理实验的现状，本着健全课程自身体系和突出教学目的的原则，依据由浅入深、由简单到复杂，逐步提高实验技能的原则，精心选择了实验内容。目的是使学生能在有限的学时内，通过对本课程的学习，掌握系统的实验知识、基本实验方法和实验技能，了解科学实验的主要过程，为今后的学习和工作奠定良好的基础。

本书内容包括绪论，测量误差和数据处理，基本物理实验十八个，物理实验中的基本测量方法，设计性实验两个。内容涉及力学、热学、电磁学、光学和近代物理。

实验教学依靠的是集体的力量，无论是实验教材的编写，还是实验课程的开设与准备，无不凝聚着全体实验教师和技术人员的智慧和劳动。参加本书编写的有薄永红、罗海东、邱荒逸、倪忠楚、贡铭基等。本书的编写还参考了一些兄弟院校的教材，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足和错误之处，敬请广大读者给予批评和指正。

编　者

2006 年 2 月

目　　录

第一章　绪论……（1）

第二章　测量误差和数据处理……（4）
　第一节　测量与误差……（4）
　第二节　直接测量误差的估算……（6）
　第三节　间接测量结果误差的计算 ……（10）
　第四节　有效数字及运算规则 ……（11）
　第五节　数据处理的基本方法 ……（15）

第三章　基本物理实验 ……（19）
　实验一　物体密度的测定 ……（19）
　实验二　转动惯量的测定 ……（24）
　实验三　用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量 ……（27）
　实验四　用拉脱法测液体的表面张力系数 ……（31）
　实验五　用电流量热器法测定液体的比热容 ……（34）
　实验六　伏安法测电阻 ……（37）
　实验七　用惠斯通电桥测量电阻 ……（39）
　实验八　电表的改装与校准 ……（45）
　实验九　模拟法描绘静电场 ……（49）
　实验十　电位差计的原理及应用 ……（53）
　实验十一　示波器的使用 ……（56）
　实验十二　霍耳效应及其应用 ……（64）
　实验十三　薄透镜焦距的测定 ……（69）
　实验十四　光的干涉　牛顿环 ……（74）
　实验十五　分光计的调节及使用　用光栅测波长 ……（77）
　实验十六　用分光计测定三棱镜的折射率 ……（83）
　实验十七　弗兰克—赫兹实验 ……（86）
　实验十八　用光电效应法测普朗克常量 ……（91）

第四章　物理实验中的基本测量方法 ……（95）
　第一节　比较法 ……（95）
　第二节　放大法 ……（96）

第三节　补偿法 …… (97)
第四节　模拟法 …… (97)
第五节　干涉法 …… (98)
第六节　转换法 …… (99)

第五章　设计性实验…… (101)
实验十九　用驻波法测振动频率…… (102)
实验二十　利用等厚干涉测透明液体的折射率…… (102)

附表…… (104)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　绪　　论

一、物理实验的作用和地位

物理学是以实验为基础的科学。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要取决于实验。所谓实验就是根据现有的科学理论和一定的目的，通过相应的仪器和设备，在人为的条件下，控制、模拟或再现自然现象，检验某种科学思想并寻求相应规律的过程。

在物理学的发展中，物理实验一直起着重要作用。16 世纪的意大利物理学家伽利略首先把科学的实验方法引入到物理学研究中来，他设计的斜面实验就蕴藏着深刻的科学实验的思想，他用实验否定了亚里士多德“力是维持物体运动的原因”的论断。其他的如杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认；卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密；近代的高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部来探索其规律性。今后在探索和开拓新的科技领域中，物理实验仍然是有力的工具。

物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上，对物理现象进行分析、抽象和概括，建立物理模型，探索物理规律，进而形成物理理论。因此，物理规律是实验事实的总结，而物理理论的正确与否需要实验来验证。

物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位，而且在推动其他自然学科、工程技术的发展中也起着重要的作用。

科学的理论来源于科学的实验，并受到科学实验的检验。科学实验可以凭借实验室的优越条件，走在生产实践的前面，为生产实践开辟出新的道路。

科学实验与生产实践和自然现象有着本质的不同，实验能在一定条件下再现某一自然现象，让人们有时间、有机会去研究现象发生的原因和规律。实验可以对研究对象进行人为控制，并对现象进行比较和分析。

大学物理实验课是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修的重要基础课程，是学生在大学里受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现，乃至研究、解决问题的能力方面，在提高学生科学实验素质方面，都起着重要的作用。可以说，物理实验课是大学生学习或从事科学实验的起步。同时，它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。

二、物理实验课的任务

物理实验是一门重要的基础课程，也是素质教育的重要环节。在实验课上，学生借助于自己动手组建的测量系统，获得被测物理量的具体数值及其变化规律，加深了对被测物理量的认识。它在培养学生运用实验手段观察、分析、发现、研究和解决问题，进行科学实验基本

训练，提高动手能力和科学实验素养等方面都起着重要的作用。物理实验课的主要任务是：

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习有关实验的基本知识、基本方法和基本技能，学习运用理论指导实验、分析解决实际问题的方法，加深对物理学原理的理解。

2. 培养和提高学生的科学实验能力，包括能够通过阅读实验教材或资料，做好实验前的准备工作，能够自己动手组建实验测量系统，能够正确使用仪器，能够运用物理学原理对实验现象进行观察、分析和判断，能够正确记录、处理实验数据，绘制图表，撰写合格的实验报告，能够完成具有设计性内容的实验。

3. 培养学生的探索精神、创新精神和严格、细致、实事求是、一丝不苟的科学态度，培养与提高学生的自主学习能力和创新能力，培养学生善于动手、乐于动手、遵守操作规程、注意安全等良好的科学习惯。

三、怎样上好物理实验课

为了上好物理实验课，学生应重视物理实验课的三个环节。

1. 实验前的预习

学生要在规定的时间内保质保量地完成实验内容，实验前必须做好预习工作。先认真阅读实验教材，了解实验的目的，掌握实验原理，弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项。明确本次实验测什么、怎么测、测几次、哪些物理量是已知的(或由实验室给出的)、哪些物理量是待测的、哪些物理量是待求的，做到心中有数。然后写出预习报告，预习报告内容包括：实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理和实验内容几个部分。在写预习报告时必须注意：实验原理部分要求用自己的语言简述有关物理内容(不要照抄教材)，写清楚测量中依据的主要公式、公式成立要满足的实验条件等，实验内容要求简明扼要，并写明注意事项。学生进入实验室，必须将预习报告交教师检查，经同意后方可进行实验。

2. 课堂实验操作

学生应在课表规定或预约的时间按时进行实验，不得无故缺席或迟到。实验时如需变动，要经过实验室批准。学生进入实验室后应自觉遵守实验室规则，不得喧哗。实验时应携带必要的物品，如文具、计算器、草稿纸和作图纸等。

实验前应检查所需仪器、用具是否齐全、是否损坏，若发现问题，应向指导教师或实验室管理人员提出。然后，进一步熟悉仪器、了解仪器的使用方法，再对所使用的仪器进行合理布置，布置仪器时要尽量做到便于操作、读数和记录，最后进行耐心细致的安装、调试。使用仪器必须按操作规程进行，如不明确操作规程，则不要胡乱动用仪器。仪器如有损坏，应及时报告指导教师。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时，要做到正确读数，实事求是地记录客观现象和数据。在实验记录纸上，写明实验日期、同组人，记录实验所用仪器的名称、型号、规格、编号以及被测量样品的号码。记录还应包括实验时的环境条件，实验中遇到的问题、故障及可疑现象等一切有价值的内容。学生实验结束前应将原始记录交给指导教师审查签字后方可离开实验室。对不合理的或者错误的实验结果，经分析后还要补做或重做。

3. 完成实验报告

写实验报告的目的是为了培养和训练学生用书面形式总结或报告科研成果的能力。实

验报告是实验成果的文字表述，所以，应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。实验报告一般应写在专用的实验报告纸上，其内容应包括：实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容、数据处理、问题讨论等部分，其中前五个部分在课前完成（即预习报告）。数据处理一般包括填写数据表格、计算、作图（必须用坐标纸）、结果表达。问题讨论内容不限，可以是对实验现象的分析，对实验关键问题的研究，实验的收获和改进实验、减小误差的建议。实验报告完成后，应将教师签过字的原始数据粘贴在实验报告的背后，以便教师批阅报告时对数据进行查对。

总之，物理实验课有着自己的特点和规律，要学好这门课不是一件容易的事情。希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣，为将来成为优秀的科学技术人才打好基础。

第二章　测量误差和数据处理

本章介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等初步知识。这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验所必须了解和掌握的。测量误差和数据处理的内容涉及面较广，不可能在一两次的学习中掌握。通过集中讲授，使同学们对这些问题有一个初步的了解，然后结合每一个具体实验再细读有关段落，通过运用加以掌握。

第一节　测量与误差

一、测量和单位

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量就是借助仪器或量具，将待测量与选作计量标准单位的同类量进行比较，其倍数即为该待测量的测量值。显然测量数值的大小与选用的单位有关。根据《中华人民共和国计量法》，规定采用以国际单位制(SI)为基础的中华人民共和国法定计量单位，即以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位，其他量的单位都由这七个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。

测量可分为直接测量和间接测量两大类。直接测量就是用仪器或量具直接测出待测物理量的大小。例如用天平和砝码测物体的质量、用电流计测电路中的电流等都是直接测量。另一类是先经直接测量，然后根据待测量与直接测量所得量之间已知的函数关系，通过计算求得，这一类测量称为间接测量。例如通过测量物体的体积和质量，再用公式计算出物体的密度。

对于同一物理量，有时既可以直接测量，也可以间接测量，这主要取决于使用的仪器和测量方法。例如，用伏安法测量电阻值是间接测量，而用多用表的欧姆挡测量电阻值就是直接测量。

二、误差

在一定条件下，任何一个物理量的大小都是客观存在的，都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观值，称为真值。在测量过程中，我们总希望准确地测得待测量的真值。但任何测量结果都有误差，这是因为测量仪器、方法、环境及实验者等都不可能完美无缺所导致的。分析测量中可能产生的各种误差并尽可能消除其影响，对测量结果中未能消除的误差作出合理估计，是实验的重要内容。

测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差，用 Δx 表示

$$\Delta x = x - X \tag{2-1}$$

误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差常用相对误差 E 表示

$$E = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \tag{2-2}$$

用误差分析的方法来指导实验的全过程，包括以下两个方面：

(1) 为了从测量中正确认识客观规律，必须分析误差的原因和性质，正确地处理测量数据，尽量消除、减少误差，确定误差范围，以便能在一定条件下得到接近真值的结果。

(2) 在设计一项实验时，先对测量结果确定一个误差范围，然后用误差分析方法指导我们合理选择测量方法、仪器和条件，以便能在最有利的条件下，获得恰到好处的预期结果。

三、误差的分类

测量误差根据其性质和产生原因可分为系统误差、随机误差和疏失误差三种。

1. 系统误差

在相同的条件下，对同一物理量进行多次重复测量时，误差的大小和符号均保持不变或按一定的规律变化，这种误差称为系统误差。系统误差的主要来源有以下几个方面：

(1) 实验理论近似性或实验方法不完善。如用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响，用单摆测重力加速度时取 $\sin\theta \approx \theta$ 带来的误差等。

(2) 仪器的固有缺陷。如仪器刻度不准、零点位置不正确、仪器的水平或铅直未调整、天平不等臂等。

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如，标准电池是以 20 ℃时的电动势数值作为标称值的，在 30 ℃条件下使用时，如不加以修正，就引入了系统误差。

(4) 实验者心理或生理特点造成的误差。如计时的滞后，习惯于斜视读数等。

系统误差一般应通过改进实验方案、实验装置，校准测量仪器，对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。发现并减小系统误差通常是一件困难的任务，需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确，往往在于系统误差是否已被发现和是否已尽可能消除，因此对系统误差不能轻易放过。

2. 随机误差

在相同的条件下，对同一物理量进行多次重复测量时，误差的符号时正时负，其绝对值时大时小，没有确定的规律，这种误差称为随机误差。随机误差是由实验中一系列随机因素引起的，主要有：

(1) 实验装置的变动性。如仪器精度不高，稳定性差，测量示值变动等。

(2) 观察者本人在判断和估计读数上的变动性。主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差。

(3) 实验条件和环境因素的变动性。如气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化，电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化，这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一次测量而言是没有规律的，当测量次数足够多时，随机误差服从统计分布规律，可以用统计学方法估算随机误差。

3. 疏失误差

由于观测者使用仪器的方法不正确，实验方法不合理，读错数据，记错数据等原因，使得

测量结果明显地被歪曲，由这些原因引起的误差称为疏失误差。观测者应该具有严肃的科学态度、一丝不苟的工作作风，尽量避免疏失误差。

四、仪器量程、精密度、准确度

测量要通过仪器或量具来完成，所以必须对仪器的量程、精密度、准确度等有一定的了解和认识。

量程是指仪器所能测量的范围。如 TW－1 物理天平的最大称量（量程）是 1 000 g，UJ36 电位差计的量程为 230 mV。对仪器量程的选择要适当，当被测量超过仪器的量程时会损坏仪器，这是不允许的。同时也不应一味选择大量程，因为如果仪器的量程比测量值大很多时，测量误差往往会比较大。

精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值，一般与仪器的最小分度值一致。最小分度值越小，仪器的精密度越高。如螺旋测微计（千分尺）的最小分度值为 0.01 mm，即其分辨率为 0.01 mm/刻度，或仪器的精密度为 100 刻度/mm。

准确度是指仪器本身的准确程度。测量是以仪器为标准进行比较，要求仪器本身要准确。由于测量目的不同，对仪器准确程度的要求也不同。按国家规定，电气测量指示仪表的准确度等级 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共七级，在规定条件下使用时，其示值 x 的最大绝对误差为

$$\Delta = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级}\ \% \tag{2-3}$$

例如，0.5 级电压表量程为 3 V 时

$$\Delta V = \pm 3 \times 0.5\% = \pm 0.015\ \text{V}$$

对仪器准确度的选择要适当，在满足测量要求的前提下尽量选择准确度等级较低的仪器。当待测物理量为间接测量时，各直接测量仪器准确度等级的选择，应根据误差合成和误差均分原理，视直接测量的误差对实验最终结果影响程度的大小而定，影响小的可选择准确度等级较低的仪器，影响大的应选择准确度等级较高的仪器。

第二节　直接测量误差的估算

一、随机误差的正态分布规律

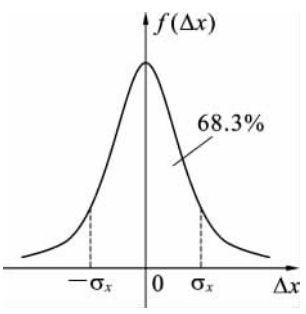


图 2－1　随机误差的正态分布

实践和理论证明，大量的随机误差服从正态分布规律。正态分布的曲线如图 2－1 所示。图中的横坐标表示误差 $\Delta x = x_i - X$，纵坐标为误差分布概率密度函数 $f(\Delta x)$，它的意义是单位误差范围内出现误差的概率。由图可见，服从正态分布的随机误差具有以下特征：

（1）单峰性　绝对值小的误差出现的概率大于绝对值大的误差出现的概率。

（2）对称性　绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(3) **有界性**　在一定的测量条件下，绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

(4) **抵偿性**　随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零。即

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i = 0 \tag{2-4}$$

因此，我们通常采取增加测量次数的方法来减少随机误差。

二、测量结果最佳值——算术平均值

如上所述，增加实验测量次数可以减少随机误差，因此，在可能的情况下，总是采用多次测量。设对某一物理量进行多次直接测量，测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$，各次测量值的随机误差为 $\Delta x_i = x_i - X$，用 $\bar{x}$ 代表测量列的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2-5}$$

当测量次数相当多时，算术平均值是真值的最佳估计值。所以用测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 表示直接测量的结果。

三、测量列的标准误差和标准偏差

在相同的条件下，对某一物理量进行多次测量称为等精度测量。测量列就是等精度测量所得到的一组测量值。当测量次数无限增多时，各测量值 x_i 的误差 $\Delta x_i = x_i - X$ 平方的平均值的平方根，称为标准误差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \cdots + \Delta x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - X)^2}{n}} \qquad (n \to \infty) \tag{2-6}$$

式子中 $\Delta x_1 = x_1 - X, \Delta x_2 = x_2 - X, \cdots, \Delta x_n = x_n - X$，分别为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 的误差。

由于被测物理量的真值 X 是未知的，所以在实际测量中，一般用测量偏差估算测量误差。我们将测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为该次测量的偏差，用 d_i 表示，即

$$d_i = x_i - \bar{x} \tag{2-7}$$

当测量次数 n 为有限时，我们将各测量值的偏差 $d_i = x_i - \bar{x}$ 的平方和与 $n-1$ 之比的平方根，称为标准偏差，用 σ_x 表示，即

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2-8}$$

式子中 $d_1 = x_1 - \bar{x}, d_2 = x_2 - \bar{x}, \cdots, d_n = x_n - \bar{x}$，分别为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 的偏差。

误差与偏差是有区别的，误差表示测量值与真值之差，而偏差表示测量值与算术平均值之差。由于测量次数很多时，测量的算术平均值最接近真值，因此测量值与算术平均值的标准偏差就接近于它们与真值的误差。为此，我们就不去区分偏差和误差的细微区别，而把标准偏差称为标准误差。

标准误差不是一个具体的测量误差值，它反映在相同的条件下进行一组测量后，随机误差概率分布情况，只具有统计的意义。在图 2-1 中，$-\sigma_x \sim \sigma_x$ 范围内，分布曲线所包围的面积占总面积的 68.3%。因此，标准偏差 σ_x 表示的意义为：在相同条件下进行一组测量时，任

一个测量值的误差落在$-\sigma_x \sim \sigma_x$之间的可能性为68.3%。也就是说，如果测量次数很多，则在所测得的数据中，将有占总数68.3%的数据的误差落在$-\sigma_x \sim \sigma_x$之内。在相同条件下，任一单次测量值的随机误差，一般都不等于标准误差，但却认为这一系列测量中所有测量值都属于同一个标准误差的概率分布。

四、平均值的标准误差

当我们通过测量获得一组数据$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$，并把求得的算术平均值$\bar{x}$作为测量结果。如果在完全相同的条件下，我们重复测量上述测量时，由于随机误差的影响，不一定能得到完全相同的$\bar{x}$值。若干组n次测量所获得的平均值之间的差异表明，算术平均值本身具有离散性。为了评定算术平均值的离散性，我们引入算术平均值的标准误差$\sigma_{\bar{x}}$，经理论证明，平均值的标准误差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \tag{2-9}$$

当测量次数增加时，平均值的标准误差$\sigma_{\bar{x}}$会越来越小，也就是说增加测量次数，可以减少随机误差，但也不是测量次数越多越好。因为，n增加只对随机误差的减小有作用，对系统误差则无影响，而测量误差是随机误差与系统误差的综合。所以，增加测量次数对减小误差的价值是有限的。其次，平均值的标准误差与测量次数n的平方根成反比，当$n>10$时，随测量次数n的增加而减小得很缓慢。因此，在进行多次测量时，一般取10次左右就够了。

当被测量本身不稳定时，计算平均值的标准误差就没有意义了，这时只需计算测量值的标准误差。例如，测量一个球的直径d，由于球本身不圆，不同方向测量的平均值只代表球直径的平均效应，这时测量值的标准误差反映测量的波动性。多次测量并不能减小对象本身的波动性，所以不必计算平均值的标准误差。只有当被测对象是稳定的，由于测量误差纯属随机，所以具有抵偿性，这时算术平均值更接近被测对象的真值，这时计算平均值的标准误差才有意义。

目前各种函数计算器都具备误差统计功能，可以直接计算测量列的算术平均值、标准误差等。同学们应熟练使用函数计算器对实验数据进行处理。

五、仪器的标准误差

测量是用仪器进行的，任何仪器都有误差。我们把在规定的使用条件下，正确使用仪器时，仪器的示值和被测量的真值之间可能出现的最大误差称为仪器误差，用$\Delta_{仪}$表示。不同类型仪器的仪器误差取值不同。

仪器误差一般由生产厂家在仪器说明书或仪器铭牌中给出，也可由生产厂家给出仪器准确级别，由所用仪器的量程和级别算出。对于未说明仪器误差，又不知道准确度级别的仪器，可以根据具体情况作出合理的估算。例如取仪器的最小分度值作为仪器误差。

一般仪器误差概率密度函数遵从均匀分布的规律，由数学计算可得仪器的标准误差为

$$\sigma_{仪} = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \tag{2-10}$$

六、单次直接测量的结果表示

在有的实验中，或无法对被测物理量进行多次测量，或不必对被测物理量多次测量，此时，可以只对被测量进行单次测量，用单次测量值作为最佳测量值，用仪器的标准误差表示单次测量的标准误差，我们通常把测量结果表示为

$$x = x_{测} \pm \sigma_{仪} \tag{2-11}$$

七、多次直接测量的结果表示

对于多次直接测量的物理量，我们通常把测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \tag{2-12}$$

相对误差为

$$E_r = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\% \tag{2-13}$$

如果被测物理量有理论值（或公认值）时，则相对误差为

$$E_r = \frac{|\bar{x} - x_0|}{x_0} \times 100\% \tag{2-14}$$

例　使用分光计测量一块三棱镜的顶角 6 次，得到的测量值分别为：

次　数	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
测量值	60°28′	60°26′	60°30′	60°34′	60°35′	60°38′

试表达测量结果。

解　算术平均值公式为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

所以

$$\bar{x} = \frac{60°28' + 60°26' + 60°30' + 60°34' + 60°35' + 60°38'}{6} = 60°32'$$

各次测量值的偏差为

$$d_1 = 60°28' - 60°32' = -4'$$
$$d_2 = 60°26' - 60°32' = -6'$$
$$d_3 = 60°30'' - 60°32' = -2'$$
$$d_4 = 60°34' - 60°32' = 2'$$
$$d_5 = 60°35' - 60°32' = 3'$$
$$d_6 = 60°38' - 60°32' = 6'$$

平均值的标准误差

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$
$$= \sqrt{\frac{(-4)^2 + (-6)^2 + (-2)^2 + (2)^2 + (3)^2 + (6)^2}{6 \times (6-1)}}$$

$$= 1.87' \approx 2'$$

随机误差本身是一个估计值，其结果一般只取一位或两位数字。为了简单起见，在大学物理实验中我们约定误差一律取一位。

测量误差为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x = 60°32' \pm 2'$$

相对误差为

$$E_r = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{2'}{3\,632'} \times 100\% = 0.06\%$$

第三节　间接测量结果误差的计算

一、间接测量的最佳测量值

将各个直接测量值的最佳值（算术平均值）代入测量公式计算，得到的结果称为间接测量值的最佳值。设间接测量值 N 是直接测量值 A，B，C，…的函数，即

$$N = F(A,B,C,\cdots)$$

则间接测量值的最佳值为

$$\bar{N} = F(\bar{A},\bar{B},\bar{C},\cdots) \tag{2-15}$$

二、标准误差的传递公式

由于各个直接测量值的最佳值都有一定的误差，因此，求得的间接测量结果也必然具有误差。表达直接测量误差与间接测量误差之间的关系式，称为误差传递公式。

设间接测量值 $N = F(A,B,C,\cdots)$，式中 A，B，C，…为各个独立的直接测量值，它们分别表示为 $A = \bar{A} \pm \sigma_{\bar{A}}$，$B = \bar{B} \pm \sigma_{\bar{B}}$，$C = \bar{C} \pm \sigma_{\bar{C}}$，…。

则间接测量值 N 表示为

$$N = \bar{N} \pm \sigma_{\bar{N}} \tag{2-16}$$

式中的 $\bar{N}$ 为间接测量值的最佳值，其表达式为式(2-15)。

$\sigma_{\bar{N}}$ 为间接测量值的标准误差。经理论计算可以得到间接测量值的标准误差为

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)^2 \sigma_{\bar{A}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)^2 \sigma_{\bar{B}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 \sigma_{\bar{C}}^2 + \cdots} \tag{2-17}$$

上式称为标准误差的传递公式。

该公式不仅可以用来计算间接测量值误差，而且还可以用来分析各直接测量值的误差对最后结果误差的影响大小，从而为改进实验指明了努力的方向。在设计某一实验时，还能为合理地组织实验、选择仪器提供必要的依据。

下面是常用运算关系的标准误差传递公式。

表 2-1　常用运算关系的标准误差传递公式

运　算　关　系	标准误差传递公式
$N=A\pm B$	$\sigma_{\bar{N}}=\sqrt{\sigma_{\bar{A}}^2+\sigma_{\bar{B}}^2}$
$N=A\cdot B$ 或 $N=\dfrac{A}{B}$	$\dfrac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}}=\sqrt{\left[\dfrac{\sigma_{\bar{A}}}{\bar{A}}\right]^2+\left[\dfrac{\sigma_{\bar{B}}}{\bar{B}}\right]^2}$
$N=A^n$	$\dfrac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}}=n\cdot\dfrac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{A}}$
$N=\sqrt[n]{A}$	$\dfrac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}}=\dfrac{1}{n}\cdot\dfrac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{A}}$
$N=\sin A$	$\sigma_{\bar{N}}=\lvert\cos\bar{A}\rvert\,\sigma_{\bar{A}}$
$N=\cos A$	$\sigma_{\bar{N}}=\lvert\sin\bar{A}\rvert\,\sigma_{\bar{A}}$
$N=\ln A$	$\sigma_{\bar{N}}=\dfrac{\sigma_{\bar{A}}}{\bar{A}}$

第四节　有效数字及运算规则

一、有效数字的基本概念

任何测量仪器总存在仪器误差，在仪器设计中应使仪器标尺和最小分度值与仪器误差的数值相适应，两者基本保持在同一数位上。由于受到仪器误差的制约，在使用仪器对被测量进行测量读数时，就只能读到仪器的最小分度值，然后在最小分度值以下还可再估读一位数字。从仪器刻度读出的最小分度值的整数部分是准确的数字，称为可靠数字；而在最小分度值以下估读的末位数字，一般也就是仪器误差或相应的仪器标准误差所在的那一位数字，它具有不确定性，其估读会因人而异，通常称为可疑数字。据此我们定义：测量结果中所有可靠数字加上末位的可疑数字统称为测量结果的有效数字。

测量值的位数由误差来决定，即测量值的末位数要与误差的末位数对齐。如体积的测量值 $\bar{V}=5.961\ \mathrm{cm}^3$，其标准误差 $\sigma_{\bar{x}}=0.04\ \mathrm{cm}^3$，由标准误差的定义及数值可知，测量值在小数点后的百分位上已经出现误差，因此 $\bar{V}=5.961\ \mathrm{cm}^3$ 中的“6”已是有误差的欠准确数，其后面一位“1”已无保留的意义，所以测量结果应写为 $V=5.96\ \mathrm{cm}^3\pm0.04\ \mathrm{cm}^3$。另外，数据计算都有一定的近似性，计算时既不必超过原有测量准确度而取位过多，也不能降低原测量准确度，即计算的准确性和测量的准确性要相适应。所以在数据记录、计算以及书写测量结果时，必须按有效数字及其运算法则来处理。熟练地掌握这些知识是普通物理实验的基本要求之一，也为将来科学处理数据打下了基础。

一个物理量的数值与数学上的数有着不同的含义。例如，在数学意义上 $4.60=4.600$，但在物理测量中（如长度测量），$4.60\ \mathrm{cm}\neq4.600\ \mathrm{cm}$，因为 $4.60\ \mathrm{cm}$ 中的前两位“4”和“6”是可靠数字，最后一位“0”是可疑数字，共有三位有效数字；而 $4.600\ \mathrm{cm}$ 则有四位有效数字。

实际上这两种写法表示了两种不同精度的测量结果，所以在记录实验测量数据时，有效数字的位数不能随意增减。

二、直接测量的读数原则

直接测量读数应反映出有效数字，一般应估读到测量器具最小分度值的 1/10。对于数字式仪表，所显示的数字均为有效数字，无需估读，误差一般出现在最末一位。例如：用毫米刻度的米尺测量长度，如图 2－2(a)所示，$L=1.67$ cm。“1.6”是从米尺上读出的可靠数字，“7”是从米尺上估读的可疑数字，但是有效的，所以读出的是三位有效数字。若如图 2－2(b)所示时，$L=2.00$ cm，仍是三位有效数字，而不能读写为 $L=2.0$ cm 或 $L=2$ cm，因为这样表示分别只有两位或一位有效数字。

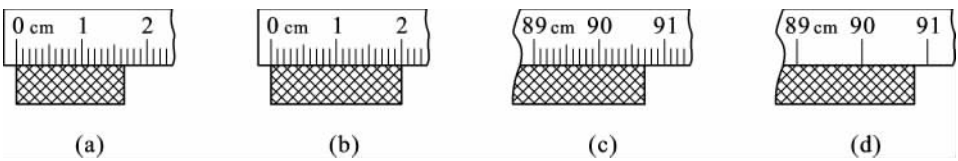


图 2－2　直接测量的有效数字

如图 2－2(c)所示，$L=90.70$ cm 有四位有效数字。若是改用厘米刻度米尺测量该长度时，如图 2－2(d)所示，则 $L=90.7$ cm，只有三位有效数字。所以，有效数字位数的多少既与使用仪器的精度有关，又与被测量本身的大小有关。

在单位换算或小数点位置变化时，不能改变有效数字位数，而是应该运用科学记数法。例如，1.2 m 不能写作 120 cm、1 200 mm 或 1 200 000μm，应记为

$$1.2\ \text{m}=1.2\times10^{2}\ \text{cm}=1.2\times10^{3}\ \text{mm}=1.2\times10^{6}\ \mu\text{m}$$

它们都有两位有效数字。反之，把小单位换成大单位，小数点移位，在数字前出现的“0”不是有效数字，如 2.42 mm＝0.242 cm＝0.002 42 m，它们都是三位有效数字。

三、有效数字运算规则

间接测量的计算过程即为有效数字的运算过程，存在标准误差的传递问题。严格说来，应根据间接测量的标准误差合成结果来确定运算结果的有效数字。但是在标准误差估算之前，可根据下列的有效数字运算法则粗略地算出结果。

有效数字运算的原则是：运算结果只保留一位可疑数字。

1. 加减运算

根据标准误差合成理论，加减运算结果的标准误差等于参与运算的各量标准误差平方和的平方根，其结果大于参与运算各量中的最大标准误差。如：

$$N=A+B$$

$$\sigma_N=\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}>\sigma_x\ (\text{或}\ \sigma_y)$$

因此，加减运算结果的有效数字的末位应与参与运算的各数据中标准误差最大的末位对齐，即计算结果的可疑数字与参与运算的各数值中最先出现的可疑数字对齐。下面例题中在数字上方加一短线的为可疑数字。

例 1　32.1＋3.235 和 116.9－1.652 的计算结果各应保留几位数字？

需要全本请访问 www.ertongbook.com