



高等院校物理系列教材
Textbook Series in Physics for Higher Education

物理实验教程

A Course of Physics Experiments

刘书华 王保柱 主编

Liu Shuhua Wang Baozhu

清华大学出版社



高等院校物理系列教材

Textbook Series in Physics for Higher Education

物理实验教程

A Course of Physics Experiments

主 编 刘书华 王保柱

副主编 宋建民 刘东州 哈 静

参 编 侯志青 王云明 刘立芳
谷延霞 康艳霜 马恒心
付三玲 张彩霞

主 审 高保山

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《高等农业院校农牧类普通物理教学基本要求》,吸收了面向 21 世纪实验教学改革的成果以及多年来物理实验教学实践经验编写而成的。主要内容有测量误差及数据处理基本知识、物理实验基本仪器及基本测量方法、基础性实验、近代与综合性实验、设计性与应用性实验以及选做实验等。

本书可作为理工类非物理专业及农、林、牧、医各专业本专科学生的大学物理实验教材,也可作为其他相关工作者的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程 / 刘书华,王保柱主编. —北京:清华大学出版社,2009.1
ISBN 978-7-302-19038-7

I. 物… II. ①刘… ②王… 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(2008)第 190842 号

责任编辑:邹开颜

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:10

字 数:243 千字

版 次:2009 年 1 月第 1 版

印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:18.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:029610-01

前言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《高等农业院校农牧类普通物理教学基本要求》，吸收了面向 21 世纪实验教学改革成果以及多年来物理实验教学实践经验编写而成的。

遵循循序渐进的规律，本书把物理实验分为基础性实验、近代与综合性实验、设计性与应用性实验以及选做实验四个部分。基础性实验旨在培养学生的基本实验操作和数据处理技能。考虑到实验课学习的初始阶段，学生需要独立阅读教材进行预习，编写时对实验目的、实验仪器、实验原理介绍比较详细，也给出了设计好的数据表格，使学生容易掌握。每个实验后都附了一定的思考题，可以促使学生对实验内容进行积极思考和深入总结。近代与综合性实验目的是培养学生综合利用多种理论和多种实验仪器的能力。设计性与应用性实验培养学生的创新能力和初步进行科学研究的能力。设计性实验只给出实验任务、实验仪器和简单提示，让学生独立设计实验方案并完成操作；应用性实验则精选了与工农业生产联系较紧密的几个实验，并指出了应用方向与途径以起到启发思路、抛砖引玉的作用。选做实验及模拟物理实验部分，主要是拓宽知识面，促进学生个性发挥，培养学生的科研兴趣。

实验课教学是一项集体工作，无论是教材的编写，还是实验项目的开设，都凝结了全体任课教师与实验技术人员的辛勤劳动。具体分工如下：刘书华：前言、绪论、实验 5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.8、5.10、5.11 和第 7 章；王保柱：第 1 章、实验 3.9、3.10、4.2；宋建民：第 2 章、实验 3.3；刘东州：实验 3.1、3.2、3.7、3.13、4.5；侯志青：5.1、5.7、5.9；哈静：3.4、3.5、6.2；康艳霜：3.8、3.12、4.1；谷延霞：3.14、4.3；刘立芳：3.11、6.3；王云明：3.15、4.4；马恒心：3.16、6.1，河南科技大学的付三玲参编了第 1 章、3.6、3.9、3.10、4.6、4.7、5.10、5.11 及附录。最后由刘书华对全书文稿格式进行了统一修订，并对部分内容作了必要的修改和补充。高保山老师仔细审阅了书稿，并提出了许多宝贵意见，石家庄学院的张彩霞老师也提出了许多宝贵意见。

在本书的编写过程中，我们吸收了河北农业大学物理实验室多年来许多同事的工作经验和研究成果，也参考了大量兄弟院校的有关教材，吸取了许多宝贵的经验。本书的出版得到了河北农业大学理学院和教务处及教材科的大

力支持,在此一并表示感谢。

对实验课教学的探索是无止境的,加之时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请同行及广大读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

目 录

绪论	1
1 测量误差及数据处理基本知识	4
1.1 测量误差与不确定度	4
1.2 有效数字	9
1.3 实验数据处理的基本方法	11
习题	14
2 物理实验基本仪器及基本测量方法	15
2.1 物理实验基本仪器	15
2.2 物理实验的基本测量方法	31
2.3 物理实验基本操作规则	35
2.4 基本仪器操作练习	36
3 基础性实验	37
3.1 测定液体的表面张力系数	37
3.2 流体黏滞系数的测量	40
3.3 测定金属材料的杨氏模量	46
3.4 转动惯量实验研究	49
3.5 测定空气的相对压力系数	53
3.6 空气比热容比的测定	56
3.7 电位差计的原理与应用	58
3.8 热敏电阻温度特性的测量	62
3.9 静电场描绘	65
3.10 霍尔效应	68
3.11 利用霍尔效应测定螺线管内部的磁场	73
3.12 磁场的描绘	75
3.13 用箱式电位差计测量温差电动势	78
3.14 单缝衍射实验及光强分布探测	80
3.15 分光计的调整与使用	84

3.16 牛顿环干涉测量平凸透镜的曲率半径	90
4 近代及综合性实验	94
4.1 声速的测量	94
4.2 超声光栅	97
4.3 光电效应实验	101
4.4 迈克耳孙干涉仪测波长	105
4.5 塞曼效应	109
4.6 弗兰克-赫兹实验	113
4.7 密立根油滴实验	116
5 设计性及应用性实验	121
5.1 用旋光法测定溶液的浓度	121
5.2 利用衍射现象测量光的波长	124
5.3 指针式温度计的设计	125
5.4 用电位差计测电阻	125
5.5 马吕斯定律的验证	125
5.6 电子秤的设计	126
5.7 传感器特性研究	126
5.8 温度的自动监控	129
5.9 CO ₂ 浓度的测量	131
5.10 静电场对植物发芽率及生长特性的影响	134
5.11 叶片对光的吸收效应的研究	134
6 选做实验	138
6.1 收音机的组装与调试	138
6.2 计数器及其应用	140
6.3 照相技术	143
7 物理实验数值模拟	145
7.1 同方向、不同频率简谐振动合成的数值模拟	145
7.2 单狭缝衍射数值模拟	148
附录	150
附录 A 国际单位制基本单位	150
附录 B 常用物理数据	150
参考文献	154

绪论

1. 物理实验课程的地位和任务

物理学是研究物质存在的基本形式和物质运动基本规律的科学,它在科技乃至人类思维的发展过程中起着非常重要的作用,是自然科学和工程技术的基础。物理学从本质上讲是一门实验科学,物理规律的发现和物理理论的验证都要以观测或实验的事实为准则。例如,伽利略在比萨斜塔上所做的落体实验否定了亚里士多德“落体的速度与重量成正比”的错误结论,得到了同一地点不同物体具有相同重力加速度的科学论断;麦克斯韦电磁场理论预言了电磁波的存在,但只是德国的物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在后,才被人们所公认;杨振宁、李政道 1956 年提出的基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”理论,也只是在实验物理学家吴健雄实验验证后才得到国际公认。物理学的发展一直是在物理实验和物理理论密切结合、相互推动下进行的。实验在理论指导下进行,而实验的结果又对理论进行验证。

物理实验课是学生进入大学后系统学习科学实验知识的开端,也是后继实验课的基础。实验课和理论课既有联系,又有区别。它是真正以学生为主体、教师为主导的课程,它注重的是过程,而不仅仅是结果本身。在过程中才能真正展现实验的魅力,使学生得到思维的训练和创新能力的开发。因此,实验课在培养学生分析问题、解决问题能力以及创新能力方面起着重要的作用。在科技发展日新月异的今天,作为人类探索科学规律的重要手段,物理实验也将起着越来越重要的作用。物理实验课的任务如下:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深学生对物理概念和物理原理的理解,培养其科学直觉和创新能力。

(2) 使学生获得必要的实验知识和操作技能,培养学生初步的科学研究能力。通过实验,使学生掌握基本仪器的正确使用方法,培养学生遵守操作规程、爱护公物的优良品德和注意安全的科学习惯。使学生通过对实验现象的观测和判断,提高其发现问题、分析问题和解决问题的能力。通过实验数据的处理、实验结果的分析和实验报告的撰写,培养学生的正确论述和表达能力。

(3) 培养学生严谨认真、一丝不苟、实事求是的科学态度。

(4) 培养学生的团队精神和团结协作能力。许多实验并非能够一人单独完成,需要几人合作完成。良好的团队合作精神和协作能力对学生以后步入社会从事实际工作都是大有裨益的。

总之,物理实验课的目的是使学生获取知识能力、运用知识能力、动手实践能力、设计创新能力等方面得到训练与提高。这是物理理论课所不能替代的。

2. 物理实验课的运行程序

1) 课前预习

由于实验课课堂时间有限,而了解实验内容和实验仪器需要较长的时间,因此为了在规定的时间内高质量地完成实验课的任务,避免出现按讲义指定的步骤“照方抓药”的现象,学生必须做好课前预习。通过预习,要把实验讲义上的内容仔细阅读一遍,弄清本次实验的目的、原理、仪器、步骤及注意事项。为保证预习质量,每位学生均应在实验课前写出预习报告。

预习报告包括:实验题目、实验目的、实验仪器、主要实验步骤、实验注意事项和设计好的实验数据表格。对于设计性实验,要求详细写明实验方案以及具体的实验步骤。

实验前,老师要进行检查,必要时进行提问。预习作为实验课成绩评定的一部分,对于没有进行预习的学生,老师有权停止其本次实验。

2) 课堂实验操作

课堂实验操作是物理实验的关键环节。到实验室后,要遵守有关规章制度,爱护仪器设备,注意安全。进入实验室后,首先要对照实物,认识实验仪器的主要构造并记录规格和型号,了解其功能、量程、可调节旋钮和开关的位置、操作方法,然后根据实验要求,合理摆放仪器位置、正确连接线路。连接电路或摆设光路时都必须检查,确认无误,经老师允许后方可开始进行测量。

操作过程中要严肃认真,细致谨慎、确切记录、切不可急于求成、草率从事。实验的重点要放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就以为完成了任务。对实验数据要如实记录,不可人为更改实验数据。如果发现数据错了不要涂改,而应轻轻划上一道,在旁边写上正确测量值。在几人合作一个实验时,要分工协作,不要一人包办代替,以便共同提高实验技能。实验完成后,要将实验数据记录交指导老师审阅,经老师签字允许后,方可整理复原仪器,离开实验室。

3) 撰写实验报告

实验报告是对实验工作的简明总结,是让他人评价自己实验成果的依据。实验报告要用自己的语言表达出所做实验的内容、依据、结果、对结果的分析及自己对实验的见解或收获,而不要写成实验讲义的缩写。实验报告一般应包括以下几方面内容:

(1) 实验目的。

(2) 实验仪器。记录所用仪器的名称、规格和型号、准确度和量程等。

(3) 实验原理。用简短的文字扼要阐述实验原理和依据,写出实验所用的主要公式及适用条件,画出原理图、电路图或光路图。切忌整篇照抄实验讲义。

(4) 实验数据及结果。实验数据一般采用列表法,表格的设计要根据数据特点来确定,力求简单明了,便于计算和复核,在标题栏中要注明单位。实验数据要如实填写在数据表格中,杜绝拼凑或篡改数据。简要写出数据的处理过程。按标准形式写出实验结果,必要时注明实验条件。作图法处理数据时应按作图规则绘制出合格的曲线;进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据,最后得到结果。误差估算也要先写出误差公式,再写出结果。若有观察某现象或验证某些物理规律的内容时,要写出实验结论。

(5) 分析讨论。内容不限,可以是分析误差产生的原因和提出减小误差可采取的措施;也可以是对实验中一些现象进行具体的讨论和分析;也可以是做实验的体会与收获或对实

验提出改进建议等。

实验报告要求用指定的实验报告纸按规定的格式书写,并且字迹工整、文字简练、数据完整、图表规范、结果正确。实验报告和预习报告于下一次实验时一并交指导老师批阅。

3. 实验室规则

(1) 学生应在规定时间内进行实验,不得无故缺课或迟到。

(2) 进行实验时必须严肃认真,不得大声交谈或嬉戏吵闹。

(3) 应按编组在指定仪器处进行实验,未经教师同意,不得任意调换他组仪器。

(4) 实验前清点仪器及用品,如有短缺或损坏,应及时向教师提出。

(5) 实验前,必须认真预习。实验时,首先细心观察仪器构造,了解其使用方法。实验时,应细心谨慎,严格遵守各种仪器、仪表的操作规程及注意事项。尤其是使用电源的实验,线路接好必须经教师检查准许后,方可接通电源,以免发生意外。

(6) 实验时必须爱护仪器,注意节约和安全,免使国家财产遭受损失,影响其他学生实验。如有损坏、遗失情况发生,应及时报告教师,并填写损坏报告单。实验完毕,应将实验数据交教师检查,合格后才能拆除实验装置,并将仪器恢复原状,安置整齐,经教师检查签字后,方可离开实验室。

(7) 为了保持实验室的整洁,室内不准随地吐痰、抽烟、乱扔纸屑。实验结束后,各班要安排值日生扫地,整理好仪器和桌凳。

1 测量误差及数据处理基本知识

物理实验不仅定性地观察实验现象,而且需要定量地测量相关物理量。进行测量不可避免地要产生误差。本章介绍有关误差理论和实验数据处理的基本知识。

1.1 测量误差与不确定度

1.1.1 直接测量与间接测量

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较,并得出其倍数的过程。倍数值称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位。测量可分为直接测量和间接测量。可以由测量仪器或仪表直接读出测量值的测量,称为直接测量。比如用直尺测量长度、温度计测量温度等。有些物理量无法直接测量,但利用待测量与一些能直接测定的物理量间存在的确定的函数关系,把直接测量的量代入函数中计算出待测量的测量方法称为间接测量。比如测量圆柱体的密度时,密度 ρ 可由几个直接测量值(直径 D 、高度 H 、质量 m)通过函数 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 H}$ 计算得到,这属于间接测量。

1.1.2 等精度测量与不等精度测量

测量可分单次测量和多次测量。通过一次测量测出被测物理量称为单次测量。实际测量多数为多次测量,通过重复测量并以平均值来确定一个物理量大小的测量方法称为多次测量。多次测量分为等精度测量与不等精度测量。在测量条件相同的条件下进行的一系列测量是等精度测量。而在不同测量条件下进行的一系列测量称为不等精度测量。

1.1.3 测量的误差

1. 真值、绝对误差、相对误差

被测量的量,在确定条件下,总存在一个真实数值,这就是我们所说的真值 a 。它是一个理想化的概念,是未知的。

实际的测量值 x 总是与真值有差距。我们把测量结果与被测量的真值之间的差值叫绝对误差,用 δ 表示(许多文献中也常用 Δx 表示)。 $\delta = x - a$ 。

测量的绝对误差与被测量的真值之比叫相对误差,用 E_r 表示,一般用百分比表示:
$$E_r = \frac{\delta}{a} \times 100\%。$$

绝对误差与相对误差是测量误差的两种表达方法,反映测量结果的准确程度。

2. 系统误差和随机误差

1) 系统误差:对同一物理量进行多次等精度测量时,测量结果总是偏大或偏小,或随

测量条件改变按某一确定规律变化,这样的误差称为系统误差。

系统误差产生的原因:(1)仪器误差。由仪器本身的缺陷引起,比如天平不等臂、直尺刻度不均、转动轴偏心等。(2)理论误差。由实验所用理论的近似性或实验方法不完善引起。比如伏安法测电阻、单摆测重力加速度等。(3)个人误差。由操作者本人的习惯或偏差引起,比如有人读数总是偏大,有人计时总是偏慢等。

系统误差有其确定的规律性,可以通过适当的测量方法或理论修正去发现和消除。

2) 随机误差:对同一物理量进行多次等精度测量时,每次测量出现的误差的绝对值大小和符号以不可预测的方式发生变化,没有确定的变化规律,这种误差称为随机误差。

随机误差是由于某些偶然的或不确定的因素引起的。单个测量表现出不可预知的随机性;而从总体来看,随机误差服从统计规律,在消除了系统误差且测量次数 $n \rightarrow \infty$ 的条件下,服从正态分布。随机误差所具有的特点:(1)单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小。(2)对称性。大小相等的正误差和负误差出现的概率均等,在真值两侧对称分布。(3)有界性。非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。(4)抵偿性。当测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,于是,误差的代数和趋向于零。

还有一种误差,称为粗差。这是由于某些原因造成实验数据异常所产生的误差,可以通过实验理论、重新测量等方法作出判断,确认为粗差,将其删除。

3. 算术平均值与偏差

设在等精度测量和系统误差消除的条件下,重复测得数据为: $x_1, x_2, \dots, x_n$, 根据随机误差的正态分布规律,测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 接近真值。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x}$ 无限接近真值,算术平均值 $\bar{x}$ 按下列公式计算:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.1.1)$$

算术平均值并非真值,它比任何一次测量值的可靠性更高,因此也称为真值的最佳值。若某个测量值为 x_i , 则 $\epsilon_i = x_i - \bar{x}$ 称为测量值的偏差(残差)。

4. 测量的精密度、准确度、精确度

根据测量的数据,常用精密度、准确度、精确度来评价测量结果。如果测量的数据之间彼此相差不大,也就是重复性好,则称数据精密度高;数据之间相差大,则精密度低。精密度反映了随机误差大小的程度。如果测量的算术平均值偏离真值较少,则称准确度高;测量数据的算术平均值偏离真值较大,则准确度低。准确度反映系统误差大小的程度。如果精密度和准确度都高,则称精确度高,精确度反映随机误差与系统误差综合大小的程度。

1.1.4 测量不确定度的评定与表示

1. 标准误差

设一个被测量的真值为 a , 在等精度条件下重复测量,测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。当测量次数趋于无限大时,定义测量误差的方均根值为标准误差 σ ,

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} \quad (1.1.2)$$

大量的实验和统计理论都证明,在绝大多数物理测量中,当重复测量次数足够多时,随机误差 δ_i 服从或接近正态分布(或称高斯分布)规律。正态分布曲线如图 1.1.1 所示,横坐标为误差 δ ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,此曲线完全对称。

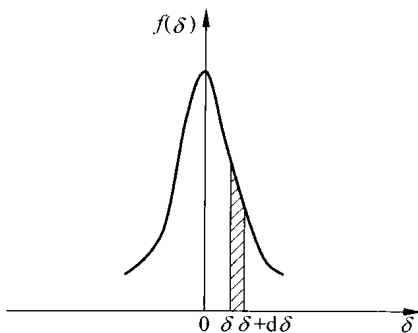


图 1.1.1 随机误差分布特性

根据误差理论可以证明函数 $f(\delta)$ 的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.3)$$

测量值的随机误差出现在 $(\delta, \delta+d\delta)$ 区间内的可能性(概率)为 $f(\delta)d\delta$, 即图 1.1.1 中阴影的面积。

按照概率理论,误差 δ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事件是必然事件, 因此 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta)d\delta = 1$, 即曲线与横轴所包围的面积恒等于 1。当 $\delta=0$ 时, 由式(1.1.3)得

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1.1.4)$$

由式(1.1.4)可见,若测量的标准误差 σ 很小,则必有 $f(0)$ 很大。由于曲线与横轴间围成的面积恒等于 1, 所以如果曲线中间凸起较大,则两侧下降较快,相应的测量必然是绝对值小的随机误差出现较多,即测得值的离散性小,重复测量所得的结果相互接近,测量的精密度高;相反,如果 σ 很大,则 $f(0)$ 就很小,误差分布的范围就较宽,说明测得值的离散性大,测量的精密度低。因此, σ 反映的是一组测量值的离散程度。

可以证明, 概率 $P(|\delta| < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta)d\delta \approx 68.3\%$, 即由 $-\sigma$ 到 σ 之间正态分布曲线下的面积占总面积的 68.3%。这就是说,如果测量次数 n 很大,则在所测得的数据中,将有占总数 68.3% 的数据误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内,即所测得的数据中任一个数据 x_i 的误差 δ_i 落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内的概率(置信概率)为 68.3%。

也可证明, 概率 $P(|\delta| < 3\sigma) = 0.9973 \approx 99.7\%$ 。由此可知,在 1000 次测量中,随机误差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的测得值大约只出现 3 次,在一般的几十次测量中,几乎不可能出现。依据这点,可对多次重复测量中的异常数据加以剔除,这称为剔除异常数据的“ 3σ ”准则。它只能用于测量次数 $n > 10$ 的重复测量中,对于测量次数较少的情况,需要采用另外的判别准则。

2. 标准偏差

我们实际的测量是有限次的测量,真值是不可知的,因此实际上估算标准误差一般采用下式(称为贝塞尔公式)进行估算:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n-1}} \quad (1.1.5)$$

式中, σ_x 称为测量列的标准偏差。

3. 算术平均值的标准偏差

算术平均值也是一个随机变量,在完全相同的条件下,进行不同组的有限次重复测量的

平均值不尽相同,也具有离散性,存在偏差。因此,引入算术平均值的标准偏差,用 σ_x 表示:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.6)$$

4. 不确定度

任何测量都不可避免地产生误差。为了给实验结果一个科学的表述,引入了测量不确定度的概念。测量不确定度反映了对被测量真值不能肯定的程度,是与测量结果相关联的参数,用以表征测量结果的分散性和测量值可信赖程度。不确定度和误差是两个不同的概念,它们有着根本的区别,但又是相互联系的。误差用于定性地描述理论和概念的场合,不确定度则用于给出具体数值或定量运算、分析的场合。

测量不确定度按数值评定方法可分为:采用统计方法评定的 A 类不确定度分量 Δ_A 和采用其他方法评定的 B 类不确定度分量 Δ_B 。

1) 直接测量结果的表示和不确定度的估计

(1) A 类不确定度

进行有限次测量时,测量误差不完全服从正态分布而是服从 t 分布(也叫学生分布),总不确定度的 A 类不确定度分量为

$$\Delta_A = \frac{t_P}{\sqrt{n}} \sigma_x = t_P \sigma_x$$

其中, t_P 的值可从专门的数据表中查得(见表 1.1.1),在 $n > 5$ 和 $P = 68.3\%$ 的条件下,可取 $\Delta_A = \sigma_x$ 。

表 1.1.1

t_P P \ n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1
0.90	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.86	1.83	1.76	1.73	1.71	1.65
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	2.15	2.09	1.96
0.99	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

(2) B 类不确定度

B 类不确定度不能由统计方法评定。在普通实验里, B 类不确定度一般简化为由仪器引起,即 $\Delta_B = \Delta_{ix} / C$ 。 Δ_{ix} 为仪器的最大允差,由生产厂家或由实验室结合具体测量方法和条件给出; C 为置信系数,在普通物理实验中,除游标读数外,一律假设误差在其分散区间内均匀分布,取 $C = \sqrt{3}$ 。

(3) 总不确定度

根据国际标准化组织等 7 个国际组织联合发表的《测量不确定度表示指南 ISO 1993(E)》,总不确定度(简称不确定度)可表示为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1.1.7)$$

(4) 直接测量结果的表示

对于多次测量,直接测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \Delta, \quad \Delta_r = \frac{\Delta}{x}$$

x 为被测量, $\bar{x}$ 为被测量的算术平均值, Δ_r 为相对不确定度。

2) 间接测量结果的表示和不确定度的合成

设 y 为间接测量量, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是直接测量量, 它们的函数关系为 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的不确定度分别为 $\Delta_{x_1}, \Delta_{x_2}, \dots, \Delta_{x_n}$, 则不确定度的合成用下列式子计算:

$$\Delta_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 \Delta_{x_3}^2 + \dots}$$

$$\frac{\Delta_y}{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_3}\right)^2 \Delta_{x_3}^2 + \dots}$$

测量结果为 $y = \bar{y} \pm \Delta_y, \Delta_{yr} = \frac{\Delta_y}{\bar{y}} \times 100\%$ 。

在实际测量中, 有些量只能进行单次测量, 有些量只需单次测量。测量结果的一般表示为

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta_B$$

其中, $x_{\text{测}}$ 为测量值, Δ_B 为不确定度 B 类分量。

对于随机误差较大的情况, 可考虑测量仪器的精度、测量者的实验技巧、测量的条件等, 根据测量的具体情况给出合理的估计。

1.1.5 数据处理实例

例 1 利用游标卡尺和天平测圆柱体的密度, 实验测量值见表 1.1.2。计算圆柱体密度的测量结果及其不确定度。

表 1.1.2

测量次数	直径 D/cm	高度 H/cm	质量 m/g
1	1.948	8.038	213.03
2	1.944	8.036	213.06
3	1.948	8.038	213.05
4	1.946	8.034	213.05
5	1.948	8.036	213.02
6	1.944	8.038	213.05

解:

$$(1) \text{ 由 } \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ 得平均值:}$$

$$\bar{D} = 1.946 \text{ cm}, \quad \bar{H} = 8.037 \text{ cm}, \quad \bar{m} = 213.04 \text{ g}$$

(2) 由 $\epsilon_i = x_i - \bar{x}$ 计算偏差。

$$(3) \text{ 由 } \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n(n-1)}} \text{ 得测量列算术平均值的标准偏差:}$$

$$\sigma_{FD}^2 = 0.67 \times 10^{-6}, \quad \sigma_{FH}^2 = 0.47 \times 10^{-6}, \quad \sigma_{Fm}^2 = 0.4 \times 10^{-4}$$

(4) 由 $\Delta_A = \sigma_x$ 得不确定度 A 分量:

$$\Delta_{AD} = \sigma_{FD}, \quad \Delta_{AH} = \sigma_{FH}, \quad \Delta_{Am} = \sigma_{Fm}$$

(5) 由 $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$ 得不确定度:

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{AD}^2 + \Delta_{BD}^2} = 0.0015$$

$$\Delta_H = \sqrt{\Delta_{AH}^2 + \Delta_{BH}^2} = 0.0014$$

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_{Am}^2 + \Delta_{Bm}^2} = 0.031$$

(6) 圆柱体的密度平均值: $\bar{\rho} = \frac{4\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}} = 8.917 \text{ g/cm}^3$

(7) 由 $\frac{\Delta_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_3}\right)^2 \Delta_{x_3}^2 + \dots}$ 得相对不确定度:

$$\begin{aligned} \Delta_{\rho} &= \frac{\Delta_{\rho}}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial D}\right)^2 \Delta_D^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial H}\right)^2 \Delta_H^2 + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial m}\right)^2 \Delta_m^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{\Delta_D \times 2}{\bar{D}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta_H}{\bar{H}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta_m}{\bar{m}}\right]^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.0015 \times 2}{1.946}\right)^2 + \left(\frac{0.0014}{8.037}\right)^2 + \left(\frac{0.031}{213.04}\right)^2} \\ &= 0.16\% \end{aligned}$$

(8) 不确定度为: $\Delta_{\rho} = \Delta_{\rho} \bar{\rho} = 0.014 \text{ g/cm}^3$

(9) 测量结果为: $\rho = (8.913 \pm 0.014) \text{ g/cm}^3, \Delta_{\rho} = 0.16\%$

1.2 有效数字

1.2.1 有效数字的基本概念

正确而有效地表示直接测量以及运算结果的数字称为有效数字。有效数字由可靠数字和可疑数字构成。有效数字的个数为有效位数,与小数点的位置无关,有效数字位数越多,相对误差越小。例如,用米尺测量某物体的长度为 10.34 cm,米尺的最小分度是 mm,那么最后一位“4”为可疑数字,“10.3”为可靠数字,有 4 位有效数字。

1.2.2 有效数字的读数

实验中测量仪器多种多样,我们必须掌握正确的读数方法。一般读数应该读到最小分度值以下再估读一位,数字式仪表则直接按显示的数据读数。

1.2.3 “0”问题

“0”可处于非“0”数字的前面、中间或后面,例如: 0.0012 m、10.12 cm、12.10 cm 是用最小分度为 mm 的米尺测得的 3 个数据,其中,0.0012 m 前面的“0”为非有效数字;10.12 cm 中间的“0”为有效数字;12.10 cm 后面的“0”,当读数时,测量值恰好为整数,则必须读到“0”

补到“可疑位”，这个“0”为有效数字。尤其需要注意，不能因为单位的变化而改变有效数字的位数。例如，测量值为 50.23 g，不能写成 50 230 mg，而要采用科学记数法，表示为 5.023×10^4 mg。

1.2.4 科学记数法

对于数值很大或很小的数据，借助 10 的方幂来表示，一般使小数点在第一个有效数字后，10 的方幂前面的数字为有效数字。如 2.36×10^6 m, 2.36 为 3 位有效数字。

1.2.5 有效数字的运算规则

有效数字包含可靠数字和可疑数字，有效数字的运算按下列原则进行：可靠数字之间进行四则运算得到的仍为可靠数字，可疑数字与可靠数字、可疑数字与可疑数字之间的运算得到的仍为可疑数字，结果保留一位可疑数字。

1. 加减运算

加减运算结果的有效数字的最后一位与参与运算数据中最高的可疑数字位数对齐。例如（“—”表示可疑数字），

$$\begin{array}{r} 32.\underline{1} \\ + 4.\underline{2}\underline{1} \\ \hline 36.\underline{3}\underline{1} \end{array}$$

有效数字为 36.3

$$\begin{array}{r} 32.\underline{3} \\ - 4.\underline{2}\underline{2} \\ \hline 28.\underline{0}\underline{8} \end{array}$$

有效数字为 28.1

2. 乘除运算

乘除运算结果的有效数字位数和参与运算各量中有效数字位数最少的相同（有时，积可能比此法多一位，商可能少一位）。例如，

$$\begin{array}{r} 32.\underline{3} \\ \times 2.\underline{1} \\ \hline 32\underline{3} \\ 64\underline{6} \\ \hline 67.\underline{8}\underline{3} \end{array}$$

有效数字为 68

$$\begin{array}{r} 0.13 \sqrt{23.7} \\ \underline{26} \\ 49 \\ \underline{33} \\ 100 \\ \underline{91} \\ 9 \end{array}$$

有效数字为 24

3. 乘方、开方运算

乘方、开方运算最后结果的有效数字位数一般取与底数的有效数字位数相同，45.6 有三位有效数字，乘方、开方后还取三位有效数字。

4. 指数、对数、三角函数运算

运算结果的有效位数，可由改变量确定。例如

$$\lg 7.356 = 0.866\ 641\ 7\cdots$$

$$\lg 7.357 = 0.866\ 700\ 76\cdots$$

从两运算结果看，小数点后第四位产生了差别，那么取 $\lg 7.356 = 0.8666$ 。