



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

高等院校基础教育“十二五”规划教材

# 大学物理实验 (上册)

魏健宁 钟健松 主编

*College Physics  
Experiment*

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目  
高等院校基础教育“十二五”规划教材

# 大学物理实验 (上册)

魏健宁 钟健松 主编



*College Physics  
Experiment*

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验. 上册 / 魏健宁, 钟健松主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2014. 9  
高等院校基础教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-115-35469-3

I. ①大… II. ①魏… ②钟… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第195229号

## 内 容 提 要

本书是九江学院物理实验教学中心基于本校物理实验开设实际情况, 在多年的大学物理实验教学实践的基础上编写而成的。本书分上、下两册, 按基础性实验、综合设计性实验组织教学内容, 主要包括误差和数据处理的基本知识, 涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验等, 共 59 个实验。本书在叙述介绍实验基本原理与实验方法、实验内容与步骤时, 力求繁简适当、通俗易懂, 以适应不同层次学校教学的需求, 具有较强的可读性和实用性。

本书可作为高等学校理工科本科生的大学物理实验课程的教材或参考书。

- 
- ◆ 主 编 魏健宁 钟健松  
责任编辑 马小霞  
执行编辑 喻智文  
责任印制 张佳莹 焦志炜
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 18 2014 年 9 月第 1 版  
字数: 460 千字 2014 年 9 月河北第 1 次印刷

---

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316  
反盗版热线: (010) 81055315

# 大学物理实验（上册）

## 编 委 会

主 编 魏健宁 钟健松

副 主 编 余剑敏 谢卫军 江长双

编 者 余剑敏 江长双 刘志强 陈振华 钟健松

陈爱霞

物理实验在物理学的建立和发展中一直起着十分重要的作用，而且它又有自身的特点和一套实验知识、实验方法、实验仪器的使用等独特的内容，所以在高等学校开设大学物理理论课的同时，往往还开设一定量的大学物理实验课。通过“普通物理实验”这门课的学习，学生可以学会一些基本的实验方法、基本仪器的使用和基本的数据处理方法。这门课力求使学生得到规范化的实验方法训练，养成良好的实验习惯，独立完成实验，在实验能力和实验素养等方面得到严格的良好的培养，以期为后续的实验课乃至今后的科学技术工作打下坚实的基础。

本书是九江学院物理实验教学中心基于本校物理实验开设实际情况及多年的大学物理实验教学实践的基础上、吸取了目前高校物理实验的一些新实验、新思想，结合学校实验教学改革的实际情况改编而成的。本书的原讲义是由担任相关课程的余剑敏、钟健松、江长双、刘志强、陈振华等教师完成，在使用过程中又经过了九江学院物理实验教学中心全体任课教师的补充和完善，因此，这是九江学院物理实验教学中心实验任课教师的集体劳动的成果。

实验教学需要由实验教师和实验技术人员组成的一个协作团体共同承担教学任务，它是一项集体事业，是一项需要讲责任、讲精神、讲奉献的事业。本书的编写，是众多教师共同努力的成果，是集体智慧的结晶。本次的参编者有：魏健宁、余剑敏、钟健松、江长双、刘志强、陈振华等老师，由余剑敏、钟健松负责统稿和定稿。本书的完成还要特别感谢卫军、王殿元、罗江龙、刘坚强、潮兴兵、邹俊生、余傲秋、黄天成、胡华、杨锋涛、孙光厚、常章用、周利玲、周雪云、李杰、余里生、张逸等老师，感谢他们在物理实验教学与物理实验室建设中付出了艰辛的劳动和提出了很多宝贵的建议。

在本书的编写过程中，九江学院实验中心的领导和老师给编者提供了很大的便利，在此，我们谨对所有对本书做过贡献的同志表示衷心的感谢；编者也参阅了兄弟院校的大学物理实验教材，在此一并致谢。同时，由于编者知识水平和教学经验所限，再加上本书是由多人参加编写而成，各人风格不尽相同，在整合上难以统一，书中难免存在不妥之处，望使用者加以指正，以便本书得到进一步完善与提高。

编者  
2014年4月

实事求是、一丝不苟、严肃认真的品格才使他认识到了 X 射线的存在；开普勒（Kapler）在其老师弟谷大量的天文观测资料（700 多颗星体）的基础上，经过二十多年的不懈研究、分析计算，才总结出了行星三大定律。在近现代物理学研究中，如果一个物理学工作者没有高度的合作精神，他是很难取得成就的。

## 二、如何上好大学物理实验课

要上好一次物理实验课，同学们应注意做好以下三方面的工作。

1. 做好预习。这是能否顺利进行实验的关键，因此实验前必须做好预习。要求做到以下几点。

(1) 仔细阅读有关实验内容，明确实验目的，弄清实验原理，掌握实验方法。

(2) 对实验仪器的性能和使用方法有初步认识，避免盲目操作，损坏仪器。

(3) 根据实验要求，拟定实验方案和步骤，设计好记录数据的表格，要求学生能写出一份实验预习报告。

2. 做好实验。进入实验室，通过实验操作，对物理现象进行观察和研究，掌握实际知识，加强对理论的理解能力，提高实验技能。要求做到以下几点。

(1) 遵守实验室规则和秩序。

(2) 操作前要检查和认识实验仪器，了解仪器的性能和使用方法，做到正确使用。

(3) 按照实验步骤进行操作，要有条不紊。

(4) 测试、记录实验数据时，要认真、仔细、实事求是，不编造实验数据。将测量数据认真地填写在预习时已准备好的记录表格上，计算出必要的结果；实验完成后，将实验数据交由任课教师检查确认并签字，在得知数据合格有效后，方可拆开线路或整理仪器。

(5) 实验完毕，整理仪器，保持清洁。

3. 写好实验报告。实验报告是进行实验的全面总结。要认真细致地对实验数据做出整理和计算，在对结果加以分析总结的基础上，写出清楚而简明的实验报告。实验报告除了姓名、指导教师姓名和实验时间外，一般要求有如下几方面的内容。

① 实验名称：所做实验的名称。

② 实验目的：完成本实验应达到的基本要求。

③ 实验仪器：所用仪器的名称和型号。

④ 实验原理：简述原理，包括简单的公式推导，原理图或电路图。

⑤ 实验内容和步骤。

⑥ 数据记录及处理：数据要填入表格内，记录实验时的环境条件，如室温、气压等；有必要的计算过程、实验曲线（必须用坐标纸做图）、写出结果的标准形式和误差或不确定度。

⑦ 问题讨论：对结果进行分析、讨论、总结，完成课后讨论题。

这份实验报告应使别人看了以后能了解你的工作成果和达到的水平。另外还需要强调一点，数据处理是分析实验结果的必要手段，而且是判断你的实验是否成功所必须做的一项工作。有许多同学总认为把实验数据测出来就结束了，这是不对的。同时处理数据时一定要注意实验误差和有效数字的问题。

## 三、实验室规则

1. 学生实验前必须认真预习实验内容，明确实验目的、原理、方法和步骤，进入实验室需带上预习实验报告，准备接受指导教师提问，经教师检查同意方可进行实验。没有预习或提问回答不合格者，须重新预习，方可进行实验。

2. 学生必须按规定的时间参加实验课，进入实验室必须遵守课堂纪律，保持安静的实验环境，

遵守实验室各项规章制度，严禁高声喧哗、吸烟、随地吐痰或吃零食，不得随意动用与本实验无关的仪器。

3. 实验准备就绪后，须经指导教师检查同意，方可进行实验。实验中应严格遵守仪器设备操作规程，认真观察和分析现象，如实记录实验数据，独立分析实验结果，认真完成实验报告，不得抄袭他人实验结果。

4. 实验中要爱护实验仪器设备，注意安全，节约水、电、药品、试剂、元件等消耗材料，凡违反操作规程或不听从指挥而造成事故、损坏仪器设备者，必须写出书面检查，并按有关规定赔偿损失。

5. 做完实验后，学生应将仪器整理还原，将桌面和凳子收拾整齐。经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后，方可以离开实验室。

6. 应按实验要求及时、认真完成实验报告。凡实验报告不符合要求者，须重做，实验成绩考核不及格者，不能参加本门课程考核或考试。

绪论 ..... 1

## 第 1 篇 误差和数据处理

### 基本知识

实验 1 常用仪表的使用 ..... 23

## 第 2 篇 力学、热学实验

实验 2 示波器的原理和使用 ..... 43

实验 3 气垫导轨实验 ..... 53

实验 4 拉伸法测金属丝的杨氏模量 ..... 67

实验 5 复摆振动的研究 ..... 73

实验 6 刚体转动惯量的测量 ..... 83

## 第 3 篇 电磁学实验

实验 7 电子和场 ..... 93

实验 8 霍尔效应研究 ..... 104

实验 9 伏安法测量线性和非线性  
电阻的伏安特性 ..... 113

实验 10 磁化曲线与磁滞回线的  
研究 ..... 120

实验 11 PN 结的伏安特性与温度  
特性测量 ..... 125

实验 12 金属线膨胀系数的测量 ..... 132

实验 13 液体表面张力系数的测量 ..... 137

实验 14 空气比热容比的测定 ..... 143

实验 15 不良导体导热系数的测定 ..... 148

实验 16 照度计的设计 ..... 154

## 第 4 篇 光学实验

实验 17 分光计的调整以及用光栅  
测定光波波长 ..... 160

实验 18 等厚干涉及其应用 ..... 172

实验 19 铁磁材料居里温度测试  
实验 ..... 181

实验 20 旋光仪测旋光性溶液的  
旋光率和浓度 ..... 188

实验 21 阿贝折射仪测介质折射率 ..... 195

实验 22 微波光学实验 ..... 202

实验 23 太阳能电池基本特性测定 ..... 223

实验 24 光电效应实验 ..... 228

实验 25 声速测量 ..... 237

实验 26 落球法测不同温度下液体  
的粘滞系数 ..... 242

实验 27 数字温度计的设计 ..... 249

实验 28 电桥原理及其应用 ..... 253

附录 常用物理常数表 ..... 269

参考文献 ..... 280



# 第 1 篇

## 误差和数据处理

### 基本知识

物理实验是以测量为基础的。由于仪器、方法、条件、人员等因素的影响，对一物理量的测量不可能无限准确，测量结果与客观的真值之间总有一定差异。没有测量误差的基本知识，就不能获得规范的测量值；不会计算结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果；不会处理数据或处理数据不当，就难以找到实验数据隐含的规律。在完成复杂的系统实验后，通过误差分析，可以分析出实验结果与目标真值产生偏离的原因、后果及发生在系统的哪一个阶段，以把误差减少到最低限度。

本章从实验教学的角度介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据处理和结果表达等知识。由于这些内容涉及面较广，深入讨论需要丰富的实践经验和一些高等数学和概率论知识，所以不可能通过一两次学习就完全掌握。我们要求实验者首先掌握基本的概念，以后结合每一个具体实验仔细阅读有关内容，处理具体的实验数据，在实践中养成良好的习惯，掌握误差基本理论。

我们进行物理实验时，对物理量的测量是至关重要的。然而由于实验方法、测量条件等因素的限制，测量结果不可能和真值一致。所以需要测量结果的可靠性作出一个评价，对其误差的范围作出一个估计，并能正确地表达实验结果。

本章主要介绍误差的基本概念，实验数据处理，以及实验结果表达等方面的一些基本知识。这些知识不仅在每个实验中都要用到，也是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

## 1.1

## 测量、误差、有效数字

## 1.1.1 测量

测量:按照某种规律,用数据来描述观察到的现象,即对事物作出量化的描述。

测量结果=数值(被测量与标准的比值)+单位(量纲)

## 1.1.2 误差

## 1. 误差的定义

误差存在于一切测量的始终。测量误差就是测量结果与被测量的真值(或约定真值)之间的差值。测量误差可用于绝对误差表示,也可用于相对误差表示。

绝对误差=测量结果-被测量的真值

相对误差=测量的绝对误差/被测量的真值

被测量的真值其实是一个理想的概念。对测量者来说真值一般是不知道的。因此实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。

## 2. 误差的分类

测量误差主要分为系统误差、随机误差和粗大误差。由于系统误差与随机误差的性质和来源不同,因此处理它们的方法不相同。

## (1) 系统误差

在同一条件下(指同一方法、仪器、环境、观察者)多次测量同一量时,绝对值和符号保持不变,或在条件改变时按一定规律变化的误差。

系统误差产生的原因主要有以下几方面。

- ① 仪器误差:由仪器、实验装置引起的误差。如零点不对,仪器未经校准、安装不正确、元件老化等。
- ② 方法(理论)误差:测量所依据公式自身的近似性,或实验条件达不到公式所规定的要求,或测量方法所引起误差。如,单摆周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  成立条件是摆角应趋与零;实验时当摆角超过  $5^\circ$ ,或周期测量的计时不选在小球过平衡位置,而选在振幅处(空气阻尼,摆振幅在不断减少)等。
- ③ 环境误差:由于环境影响而产生的误差。如室温的逐渐升高,外界电磁场的干扰,外界的振动等。
- ④ 观测者误差:在测量过程中由于观测者主观臆断所引起的误差。如量筒测溶液体积时,没有平视读数。又如测时间时,由于实验人员生理或心理特点,停表计时总是超前或滞后。

系统误差的确定性反映在:测量条件一经确定,误差也随之确定;重复测量时,误差的绝对值和符号均保持不变。

因此,在相同实验条件下,多次重复测量不可能发现系统误差。对观测者来说,系统误差的规律及其产生原因可能知道,也可能不知道。已被确切掌握了其大小、规律和符号的系统误

差,称为可定系统误差;对大小、规律和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正;而后者一般难以作出修正,只能估计出它的取值范围。对系统误差我们必须采取一定方法尽力消除它的影响,或对结果进行修正。

### (2) 随机(偶然)误差

在同一条件下,对同一物理量进行重复测量,测量结果一般不完全相同。这是由于测量中存在偶然误差。一个测量值的偶然误差是有多项偶然因素综合作用的结果,即偶然误差的大小和正负无法预计。即偶然误差的特征是随机的,如投掷一硬币之前,你不可能预先知道朝上的是正面还是反面,但是当你投掷很多次后,正面和反面出现的概率各占 50%。这种似乎没有规律的偶然现象,实际服从统计规律。偶然误差的特点是单个具有随机性,而总体服从统计规律,在确定条件下,通过多次重复测量来发现它,而且可以从相应的统计分布规律来讨论它对测量结果的影响。

### (3) 粗大误差

实验中,公式错了、装置安错了、电路接错了、对象观察错了、仪器操作错了、数读错了、计算错了等引起的误差称为粗大误差,此时的测量结果称为坏值,是要剔除的。粗大误差特征是人为性,初学者很容易产生这种误差,但是若采取适当措施完全可以避免,如细心检查、认真操作、重复测量、多人合作等。例如测量人的身高是 1.725cm,这显然是一个坏值,记录时单位用错了。

## 3. 随机(偶然)误差分布规律

当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时,随机误差服从正态分布(高斯分布)规律,如图 0-1 所示。标准化正态分布曲线如图 0-1 所示。图中  $x$  代表某一物理量的实测值, $P(x)$ 为测量值的概率密度,其中

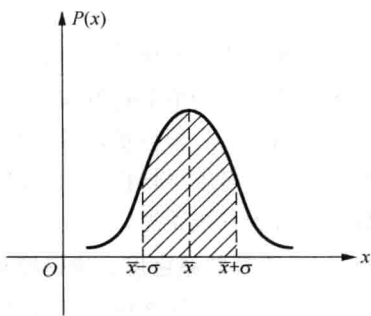


图 0-1 正态分布曲线

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad \sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n}}$$

若取图中曲线与  $x$  轴所围面积为 1,则介于横坐标任意两点间的部分面积的大小可用来表示随机误差在相应区间出现的概率。如图 0-1 所示的阴影部分  $-\sigma$  到  $+\sigma$  之间的面积由给定的定积分可算出其值是 0.683,即测量值落在  $(\bar{x} - \sigma)$  到  $(\bar{x} + \sigma)$  区间的概率为 68.3%。如果将区间扩大到  $(\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma)$ ,则  $x$  值落在该区间概率可提高到 94.5%; $x$  值落在  $(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$  区间概率 99.7%。

$\sigma$  为曲线拐点处的横坐标与  $\bar{x}$  之差,它是表征测量值分散性的重要参数,称为正态分布的标准误差,标准误差越小,数据重复性高精密度高。

从正态分布曲线可看出:测量值在  $\bar{x}$  处出现的概率密度最大;误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率大;绝对误差很大的误差出现的概率几乎等于零。

服从正态分布的随机误差有如下特征。

(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: 绝对值相等的正误差和负误差出现的几率相等。

(3) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率近于零。

(4) 抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。

由于真值未知, 误差也无法求出, 而且实际测量不可能无穷次, 标准误差只有理论意义。

偏差

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}$$

偏差有正有负或 0, 各单次偏差全部相加的和应为 0 或接近 0。

标准偏差

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

$S$  为总体标准误差  $\sigma$  的估计值, 称为实验标准偏差。上式称贝塞尔公式, 标准偏差  $S$  与标准误差  $\sigma$  比较,  $S$  是有限次, 而  $\sigma$  是无穷次,  $S$  的分母是  $n-1$ , 而  $\sigma$  分母是  $n$ 。  $S$  的分母  $n-1$  是自由度, 表明  $n$  次测量中只有  $n-1$  个独立变化的偏差, 因为  $n$  个偏差之和是 0, 知道  $n-1$  个偏差就可以确定第  $n$  个偏差。

平均值的标准偏差

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

算术平均值对单次测量的偶然误差有一定抵消, 故平均值更接近真值, 偶然误差分布离散就更小, 所以平均值的标准偏差比单次测量的标准偏差小得多。

有同学认为根据抵偿性测量次数如果无限次, 那么平均值就无限接近于真值, 这是错误的, 测量次数增多求平均值, 只能减少偶然误差, 对系统误差没有影响, 想减少误差提高精度只能实验创新减少系统误差。

#### 4. 测量的精密度、准确度和精确度

我们经常用精密度、准确度、精确度评价测量结果的好坏。

(1) 精密度: 表示测量结果中偶然误差大小的程度。它是指在规定条件下对被测量进行多次测量时, 各次测量结果之间离散的程度, 精密度越高离散程度越小, 重复性大, 偶然误差小, 但系统误差的大小不明确。

(2) 准确度: 表示测量结果中系统误差大小。它是指在规定条件下, 多次测量数据的平均值与真值符合的程度, 准确度越高则测量值接近真值的程度越高, 系统误差小, 但对测量的偶然误差大小并不明确。

(3) 精确度: 表示测量结果中系统误差与偶然误差的综合大小程度。它是指测量结果的重复性和接近真值的程度。只有精密度和准确度都高时, 精确度才高。精密度和准确度两者中只有一个高, 精确度不一定高。

下面以图 0-2 所示的打靶时弹着点的分布情况, 说明精确度、准确度、精密度的意义。

如图 0-2 (a) 所示子弹比较集中, 数据偶然误差小, 可惜偏离靶心, 靶心即真值, 说明射击精密度高, 但准确度低, 如图 0-2 (b) 所示子弹分布分散但它们的中心位置比较接近靶心, 数据平均值接近于真值, 但子弹分散, 数据的偶然误差大, 数据波动范围大, 说明射击准确度高, 但精密度低。如图 0-2 (c) 所示子弹比较集中且中心位置接近靶心, 数据平均值接近于真值并且偶然误差小, 说明射击精密度和准确度都高, 精确度较高。

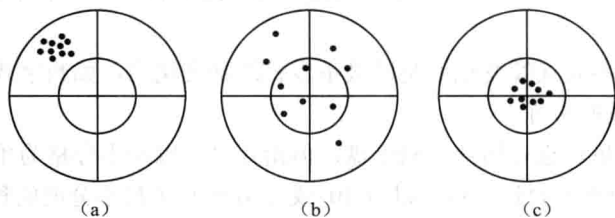


图 0-2 打靶时弹着点的分布情况

### 1.1.3 有效数字

记录数据时，该记几位数字，间接测量，需要运算，运算结果写几位，涉及有效数字的概念。

有效数字：能正确有效地表示测量和运算结果的数字。

可靠的几位数字加上可疑的一位数字称测量结果的有效数字，比如用精度是 mm 的米尺测书本长度 125.3mm，这次测量是标准的 125.3 倍，其中 125 是整数部分（可靠的），3 是最小刻度小数部分，是估计的（可疑的）。如果写成 125.33mm 就是错在可疑位是两位，即 0.33 倍最小刻度，我们计数是十进制，0.1 是 1/10, 0.01 就是 1/100，我们这次估计时就是将最小刻度 10 等分，肉眼感觉是 3/10，若写成“33”，就是将最小刻度 100 等分，感觉是 33/100，尺子最小刻度是 1mm 已经很窄，将其 10 等分已经很困难了，而将其 100 等分然后再估计就已经没有意义了。故读数中最小刻度的小数部分只能写一位。如果写成 12.5cm 也是错的，因最小刻度小数部分 3 被省略了。

（1）有效数字的注意事项

① 有效数字的位数与十进制单位的变换无关，即与小数点的位置无关。如 1.35cm 换成以毫米为单位时为 13.5mm，以米为单位则为 0.0135m。这三种表示法完全等效，均为三位有效数字。

② 当“0”不是用来表示小数点位置时，它与其他 1、2、3…具有相等地位。1.0035cm 有效数字为 5 位；1.0cm 有效数字为 2 位；1.000cm 有效数字四位。即数据后面的零是不能随意加上或去掉。但 0.0125m 却只有 3 位有效数字，因左边两个 0 不算有效数字。数值的有效位数，往往是能反映测量所用仪器以及测量方法。如 1.3500cm 肯定不是米尺测量的，可能是螺旋测微器测量的，而 1.35cm 即可能是用最小刻度 mm 的米尺测量的。

③ 常数，如  $\pi$ 、 $e$  等的有效数字位数可以认为无限。

④ 对较大或较小数值，常采用科学计数法，即写  $\times 10^{\pm n}$  ( $n$  为正整数) 形式。用这种方法计数时，通常在小数点前只写一位数字，例如地球平均半径 6371km，可写成  $6.371 \times 10^6$ m，四位有效数字；而 0.0000623m，写成  $6.23 \times 10^{-5}$ m，三位有效数字。

⑤ 前面已讨论过，有效数字的末位是估读数字，估读位一般只有一位。

（2）正确的读数和记录的一般规则

① 如实记录仪器上显示的数值，作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器，通常在直接测量时，要求估读一位（该位是有效数字的可疑位），估读数一般取最小分度的 1/10~1/2（如最小刻度是 0.5mm，那么估读时将最小刻度 5 等分，估读 3/5 个 0.5mm 即末位是

3, 若最小刻度是 0.2g, 将其 2 等分, 读数 12.1g, 0.1 就是估读的, 即将最小刻度整除, 但除数不能超过 10)。

② 若仪表的示数不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的, 如数字式显示仪表, 则谈不上估读, 只要记录全部数据即可。

③ 有一些仪表, 虽然也有指针和刻度盘, 但指针跳动以最小分格为单位的, 例如常用的钟表, 有以秒作为最小分度的时钟, 也有以 1/10 或 1/100 秒为最小分度的秒表。此类仪表不需要估读。

### (3) 有效数字的运算规则

若带有游标(或角游标)的仪器装置, 是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数时, 这时一般记下对齐线的数值, 不必进行更细的估读。

单摆测重力加速度,  $l=1.012\text{m}$ , 周期是  $T=2.02\text{s}$ , 两个直接量分别是 4 位和 3 位, 那么算得的结果  $g$  应该取几位, 计算器计算多余的位数如何取舍?

#### ① 加减运算后的有效数字

加减运算后的末位应当和运算中最先出现的可疑位一致。

例如:  $15.75+22.6+2.352=40.702=40.7$  (数字下有横线的是可疑位)

#### ② 乘除运算的有效数字

结果的位数与参加运算中有效数字最少的相同。

例如:  $272.32$  (五位)  $\times 0.0352$  (三位)  $\div 851.6$  (四位)  $=0.0113$  (三位)

#### ③ 四则混合运算

按照运算顺序, 先确定括号内结果位数, 然后确定乘除运算结果位数, 最后确定括号外加减运算结果的位数。

#### ④ 三角、对数函数的有效位数

函数值末位增加 1 后的函数值比较确定。

例如:  $\ln 25.32=3.231595$

$\ln 25.33=3.231989$  从小数点后第 4 位出现不同则  $\ln 25.32=3.2316$

### (4) 数值的舍入修约规则

测量值的数字的舍入, 首先要确定需要保留的有效数字和位数, 保留数字的位数确定以后, 后面多余的数字就应予以舍入修约, 其规则如下:

① 拟舍弃数字的最左一位数字小于 5 时, 则舍去, 即保留的各位数字不变。

② 拟舍弃数字的最左一位数字大于 5, 或者是 5 而其后跟有并非为 0 的数字时则进一, 即保留的末位数字加 1。

③ 拟舍弃数字的最左一位数字为 5, 而右面无数字或皆为 0 时, 若所保留的末位数字为奇数则进一, 为偶数或 0 则舍弃, 即“单进双不进”。

上述规则也称数字修约的偶数规则, 即“四舍六入五凑偶”规则。

根据上述规则, 要将下列各数据保留四位有效数字, 舍入后的数据为:

3.14159  $\rightarrow$  3.142      2.71729  $\rightarrow$  2.717

4.51050  $\rightarrow$  4.510      3.21550  $\rightarrow$  3.216

6.3785  $\rightarrow$  6.378      7.691499  $\rightarrow$  7.691

## 1.2

## 不确定度及其测量结果的评价

## 1.2.1 不确定度

## 1. 不确定度的概念

由于真值未知, 误差也不可能知道, 故误差是理想的概念, 实验中又必须知道误差大小以评价实验结果, 解决办法只能根据测量数据和测量条件进行推算, 求误差的估计值。误差的估计值或数值指标有专有名称为不确定度。

不确定度: 表征被测量的真值在某个量值范围的评定。

例如, 重力加速度  $g=9.794\pm 0.005(\text{m/s}^2)$ , 表示测量结果  $g$  在  $(9.789, 9.799)$  范围内的可能性为 68.3%。

物理实验包括大量测量, 测量结果质量如何, 利用不确定度说明。在相同置信概率的条件下, 不确定度越小, 其测量结果质量越高, 使用价值也越高; 反之, 不确定度越大, 则其测量结果质量越低, 使用价值也越低。

不确定度与误差的比较: 误差是测量结果与真值之差, 不确定度是测量结果在平均值波动范围评定; 误差可正可负, 而不确定度只能是正值; 误差是理想的概念, 不知道具体大小; 不确定度是实际实验中具体的数值。

## 2. 不确定度的分类

按不确定度数值的来源和评定方法, 不确定度分为以下两类。

(1) A 类不确定度  $u_A$ 

不确定度 A 类分量是指可以采用统计方法计算的不确定度。在物理实验中, 约定 A 类不确定度取平均值标准偏差

$$u_A = S_{\bar{x}}$$

(2) B 类不确定度  $u_B$ 

用非统计方法估算的不确定度, 与系统误差对应, 由于系统误差可能存在于测量过程中的各个环节, 所以  $u_B$  是估算中的难点,  $u_B$  分量通常也是多项的。在计算  $u_B$  时, 不重复不遗漏, 详尽地分析产生  $u_B$  的来源, 尤其不遗漏对测量结果影响较大或主要的  $u_B$  的来源, 就依靠实验人员的学识经验和分析判断能力。

仪器生产厂家给出的仪器误差限值或最大误差, 实际就是一种不确定的系统误差, 因此仪器误差是引起不确定度的一个基本来源。

$$u_B = k_p \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C}$$

$k_p$  是一定置信率下相应分布置信因子,  $C$  是相应置信系数,  $\Delta_{\text{仪}}$  是仪器允差。

测量次数在 6~10 次, 近似的  $u_B = \Delta_{\text{仪}}$

例如, 米尺, 最小分度为 1mm,  $\Delta_{\text{仪}} = 1 \div 2 = 0.5\text{mm}$ ;

螺旋测微器, 最小分度为 0.01mm,  $\Delta_{\text{仪}} = 0.01 \div 2 = 0.005\text{mm}$ 。

连续可读仪器, 允差  $\Delta_{\text{仪}} = \frac{\text{最小刻度}}{\sqrt{3}}$  (或者  $\frac{\text{最小刻度}}{2}$ )

若一些电表规格是  $K$ ,  $\Delta_{\text{仪}} = \frac{K}{100} \times \text{量程}$

### 3. 不确定度的合成

测量结果的总不确定度为  $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

测量次数是 6~10 次时, 则  $u = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$

## 1.2.2 测量结果的评价

### 1. 直接测量

#### (1) 单次测量的不确定度

由于测量只有一次, 无法用统计分析方法求标准偏差, 但是偶然误差和正态分布特征客观存在, 不随测量次数不同而变化, 约定单次测量不确定度是仪器误差限(允差), 即  $u = \Delta_{\text{仪}}$ 。注意, 这只是近似粗略的估算方法, 不能得到这样结论: 单次测量的不确定度小于多次测量的不确定度。

#### (2) 多次测量的不确定度

步骤: ① 求算术平均值。

② 对数据统计分析求出标准偏差  $S_{\bar{x}}$ ,  $u_A = S_{\bar{x}}$ 。如果出现坏值应剔除, 并不再重新分析(如拉依达准则, 大于 10 次测量某次测量值的偏差大于 3 倍标准偏差, 这个值是坏值。还有很多判断坏值方法, 如肖维涅准则)。

③ 由仪器的最小刻度或规格等参数, 求出  $\Delta_{\text{仪}} = \frac{\text{最小刻度}}{\sqrt{3}}$  或  $\Delta_{\text{仪}} = \frac{K}{100} \times \text{量程}$ , 即  $u_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。

④ 由公式  $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$  求出总的确定度。

⑤ 写出最后的结果  $x = \bar{x} \pm u$  (单位)。

相对不确定度表示  $E = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\%$



注意

(1) 不确定度本身只是一个估计值, 在一般情况下最后结果的不确定度只取一位有效数字, 最多不超过两位。本课程中, 绝对不确定度一般取一位有效数字, 相对不确定度一般取两位有效数字。

(2) 有些情况不要求或不可能明确测量结果不确定度, 这时常有效数字粗略表示测量的不确定度。即测量值有效数字的最后一位表示不确定度的所在位。记录时注意有效数字不能随意增减。

(3) 不确定度舍入修约规则: 只进不舍。例如,  $u=0.043$  舍弃位 3 小于 5 但是按只进不舍规则要求进一位,  $u=0.05$  (为什么不不确定度不遵守平均值的舍入规则? 不确定度舍弃测量值范围缩小, 精度提高, 但这是人为的提高精度预防可能会发生的意外, 如闹市区爆破拆除烟筒, 算出倒塌半径的不确定度, 如果舍弃, 则它半径缩小, 所画安全线范围缩小, 万一有人经过这个减少的范围有可能被砸伤。为了考虑最坏的情况, 不确定度只进不舍)。

例 1 某一长度测量 10 次, 仪器精度是 1mm, 结果如下:

$x_i = 63.57, 63.58, 63.55, 63.56, 63.56, 63.59, 63.55, 63.54, 63.57, 63.57(\text{cm})$ , 求测量结果。



解:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i \\ &= \frac{1}{10} (63.57 + 63.58 + 63.55 + 63.56 + 63.56 + 63.59 + 63.55 + 63.54 + 63.57 + 63.57) \\ &= 63.564 \text{cm} = 63.56 \text{cm}\end{aligned}$$

平均值有效数字与测量值有效数字保持一致。

即使没有说明仪器精度,看数据有效数字最后一位可疑位小数点后第二位 0.01cm,估读时一般将最小刻度 10 等分,那么精度 0.1cm (也有可能是 5 等分,最小刻度就是 0.05cm)。

由标准偏差计算式

$$\begin{aligned}S_{\bar{x}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{2040 \times 10^{-6}}{9 \times 10}} \\ &= 0.00476 \\ &\approx 0.01(\text{cm}) \\ u_A &= S_{\bar{x}} = 0.01 \text{cm}\end{aligned}$$

B 类不确定度: 米尺仪器误差  $\Delta_{\text{仪}}=1\text{mm}$ , 故

$$u_B = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06 \text{cm}$$

测量结果不确定度

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.06^2} = 0.06(\text{cm})$$

按照只进不舍,  $u$  应是 0.07, 但是因为以下规则。两个不确定度当中大的是小的 3 倍及其以上时,较小的不确定度对总的不确定度无作用,小的可忽略不用计算,总的不确定度就是大的不确定度。

测量结果

$$x = \bar{x} \pm u = 63.56 \pm 0.06(\text{cm})$$

平均值最后一位 5 要与不确定度的唯一一位 6 对齐,都是小数点后第二位。

## 2. 间接测量

间接测量结果由直接测量数据依一定的数学公式计算出来。显然直接测量结果的不确定必然影响到间接测量结果,称为不确定度的传递。

设间接测量数学公式  $N=F(x, y, z, \dots)$ ,  $x, y, z, \dots$  是直接测量结果,它们之间相互独立。它们各自总的不确定度为  $u_x, u_y, u_z, \dots$ , 间接影响测量结果  $N$  的不确定度。由于不确定度是微小的量,相当于数学中的增量,因此间接测量的不确定度与数学中的全微分公式类似。不同之处:

- (1) 用不确定度  $u_x$  等代替微分  $dx$  等。
- (2) 要考虑到不确定度合成的统计性质

$$u = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 (u_x)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 (u_y)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 (u_z)^2 + \dots} \quad (0-1)$$

$$\frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (0-2)$$