



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

张奕林 王 怡 金恩姬 郭立群 高德文 编

# 大学物理实验

(第二版)



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大学物理实验

(第二版)

张奕林 王 怡 金恩姬 郭立群 高德文 编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版基础上吸收多年来物理实验教学改革经验,根据教育部制定的“非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求”编写的。全书内容包括:误差、不确定度和有效数字的概念,各种物理仪器的基本知识以及基础性实验、综合性和近代物理实验、设计性实验等内容。本书的特点是:精选基础性实验,大幅度增加综合性实验和设计性实验,并把激光技术、传感技术和计算机技术等现代应用技术引入了物理实验。

本书可作为普通高等院校理工科非物理专业本科生教材,也可作为相关技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张奕林等编. —2 版.  
—北京:中国石化出版社,2014. 1  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5114 - 2607 - 9

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 016487 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

## 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787 × 1092 毫米 16 开本 10 印张 250 千字

2014 年 1 月第 2 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

## 第二版前言

本书是在2008年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《大学物理实验》的基础上删减了部分过时的实验内容，增加了一些新实验项目修订而成。

本书的编写宗旨是全面贯彻落实“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”。教学内容方面，在精选基础实验、加强基本方法、基本技能训练的同时，增加综合性实验和近代物理实验的数目，并把激光技术、传感技术和计算机技术等现代物理技术引入了物理实验；能力培养方面，一是综合性实验和近代物理实验巩固了学生基础性实验的学习成果，开阔了学生的眼界和思路，提高了综合运用各种实验方法和实验技能的能力，二是开设了设计性实验，学生根据实验题目的难度，组成一人或两人小组，自己设计实验方案并独立完成实验全过程，培养了创新能力、独立操作能力和团队合作精神；教学模式和教学方法方面，自行开发并使用了“物理实验计算机网络预习与选课系统”和“物理实验电子课件”，广大学生在校园网上选课、预习、查询课程安排和实验成绩，老师通过网络录入实验成绩，为学生答疑解惑，使物理实验教学实现了全面开放。

本书可作为普通高等院校各专业不同层次的“大学物理实验”课程的教材或教学参考书，也可作为有关实验技术人员和专业人员的参考用书。

参加本书编写的人员有：张奕林、王怡、金恩姬、高德文、郭立群、赵昶、于舸、吕爱君、刘喜莲、赵曼、于春娜、朴星亮、谭恩忠、刘庆军、臧建新。金恩姬、高德文、赵昶、刘喜莲、吕爱君、赵曼对本书所有稿件进行了初审。全书最后由王怡进行统稿、修改。

北京工商大学赵慈副教授在百忙中审阅了全书，并提出了非常宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，始终得到了我校有关领导和同事们热情的关心与帮助，也得到了中国石化出版社许倩同志的细心指导和帮助，借此表达真挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请广大师生批评、指正。

# 目 录

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 第一章 绪论 .....                   | ( 1 )  |
| 第一节 大学物理实验课程简介 .....           | ( 2 )  |
| 第二节 测量误差和不确定度 .....            | ( 4 )  |
| 第三节 有效数字和数据处理 .....            | ( 10 ) |
| 第二章 预备知识 .....                 | ( 17 ) |
| 第一节 物理实验仪器基本知识 .....           | ( 17 ) |
| 第二节 物理实验计算机网络预习与选课系统简介 .....   | ( 24 ) |
| 第三节 设计性实验和综合性实验简介 .....        | ( 27 ) |
| 第三章 基础性实验 .....                | ( 29 ) |
| 实验一 落球法测定液体的黏滞系数 .....         | ( 29 ) |
| 实验二 用扭摆法测定物体的转动惯量 .....        | ( 31 ) |
| 实验三 拉伸法测钢丝的杨氏模量 .....          | ( 36 ) |
| 实验四 气体比热容比 $C_p/C_v$ 的测定 ..... | ( 41 ) |
| 实验五 电表改装及校准 .....              | ( 43 ) |
| 实验六 惠斯通电桥测电阻 .....             | ( 49 ) |
| 实验七 示波器的使用 .....               | ( 54 ) |
| 实验八 分光计的调节和固体折射率的测定 .....      | ( 62 ) |
| 实验九 等厚干涉——牛顿环、劈尖 .....         | ( 68 ) |
| 实验十 用衍射光栅测量单色光的波长 .....        | ( 72 ) |
| 第四章 综合性实验和近代物理实验 .....         | ( 76 ) |
| 实验十一 伏安法测电阻 .....              | ( 76 ) |
| 实验十二 弯梁法测定杨氏模量 .....           | ( 81 ) |

|            |                          |                |
|------------|--------------------------|----------------|
| 实验十三       | RLC 电路稳态特性的研究 .....      | ( 87 )         |
| 实验十四       | 霍尔效应实验 .....             | ( 92 )         |
| 实验十五       | 交流电桥 .....               | ( 101 )        |
| 实验十六       | 偏振光的研究 .....             | ( 104 )        |
| 实验十七       | 迈克尔逊干涉仪的调整与使用 .....      | ( 110 )        |
| 实验十八       | 密立根油滴法测定电子电荷 .....       | ( 117 )        |
| 实验十九       | 光电效应法测定普朗克常数 .....       | ( 122 )        |
| 实验二十       | RC 串联电路暂态特性的研究 .....     | ( 125 )        |
| 实验二十一      | 声速的测定 .....              | ( 128 )        |
| 实验二十二      | 电子束聚焦与电子荷质比的测量 .....     | ( 131 )        |
| 实验二十三      | 全息照相的观察和摄制 .....         | ( 136 )        |
| <b>第五章</b> | <b>设计性实验 .....</b>       | <b>( 142 )</b> |
| 实验二十四      | 密度的测定 .....              | ( 142 )        |
| 实验二十五      | 万用表的设计 .....             | ( 142 )        |
| 实验二十六      | 非平衡电桥的应用 .....           | ( 143 )        |
| 实验二十七      | 低电阻的测定 .....             | ( 144 )        |
| 实验二十八      | 光的衍射 .....               | ( 145 )        |
| 实验二十九      | 固体、液体折射率的测量 .....        | ( 146 )        |
| 实验三十       | RC 及 RLC 电路暂态特性的研究 ..... | ( 146 )        |
| 实验三十一      | 箔式应变传感器性能研究与应用 .....     | ( 147 )        |
| 附表         | .....                    | ( 148 )        |
| 参考文献       | .....                    | ( 154 )        |

# 第一章 绪 论

## 关于“大学物理实验”课的一场师生对话

新学期刚刚开始，校园里阳光明媚，一位大一同学和一位老师恰好相遇，于是开始了下面的对话……

甲(大一同学): 老师, 你好! 听说这学期要开物理实验课, 是吗?

乙(某老师): 你好。没错, 本学期要开物理实验课。

甲: 我们在中学做过一些物理实验, 为什么在大学还要做?

乙: 大学物理实验与中学物理实验有很大的不同。“不同”首先体现在课程设置上, “大学物理实验”是一门独立的课程, 有单独的教学大纲、教学体系和考核方法, 而中学物理实验只是物理课的一部分, 不是独立课程; 其次体现在教学目的上, “大学物理实验”是以让学生受到实验方法和实验技能的系统训练为教学目的, 中学物理实验是以加深对物理课讲的概念和规律的理解为教学目的; 还有, 中学物理实验以观察实验现象为主, 学生动手机会不多, 大学物理实验都需要测量数据, 动手机会相当得多; 中学物理实验集中在力学和电磁学方面, 实验数目不多, 大学物理实验覆盖面广, 除了力学、电磁学实验以外, 还有光学、近代物理实验等等; 中学物理实验仪器也无法和大学物理实验仪器比。所以, 千万不要以为大学物理实验和中学物理实验差不多, 如果开始时轻视它, 问题多了就会陷入被动。

甲: “大学物理实验”都学哪些东西?

乙: 学习误差的基本知识与数据处理的基本方法, 常用物理量的测量, 各种实验仪器的操作和使用, 基本的实验方法, 还有物理实验的设计方法, 培养创新意识。

甲: 这门课有什么特点?

乙: 这门课自始至终贯穿一个理念——理论要经过实践的检验, 才能成为真理。物理实验中有一些验证性实验, 就起到检验理论的作用。物理实验的另一个特点是强调实践, 物理实验除了需要理论以外, 还要需要一定的物质条件, 如实验的环境、所用仪器和方法等, 此外, 如果没有人的精心操作和测量, 同样得不出令人信服的结果。所以, 物理实验是实践性很强的课程。另外, 随着科技的进步, 实验仪器更新换代很快, 过去一个力学实验, 用到的知识就是力学, 现在一个力学实验可能涉及电学、磁学、光学以及计算机等知识, 物理实验的综合性越来越强。这就要求我们一要知识面宽, 二要努力提高自己的动手能力, 不能“重学轻术”, 那样只能“一看就懂, 一做就错”。

甲: 大约要做多少个实验?

乙: 大约要做 20 个实验。内容涵盖力学、热学、电磁学、光学和近代物理。实验分为三个层次: 基础性、综合性和设计性实验, 第一个学期以基础性实验为主, 第二个学期以综合性和设计性实验为主。

甲: 物理实验课怎么上?

乙: 物理实验课是“三部曲”。即: 课前预习并写出本次实验的预习报告; 课上做实验,

测量实验数据；课后完成实验报告。

甲：听说物理实验报告很难写，是这样吗？

乙：不全对。应该说完成不难，写好不易。物理实验报告内容是比较多的，分为预习报告、数据表格与计算、思考题三部分。预习报告包含：实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容及步骤、数据表格；数据表格要经过老师审核并签字，数据处理过程和结果；回答思考题。

甲：这门课怎样考核？

乙：总成绩包括平时成绩和考试成绩，平时成绩占总成绩的70%，考试成绩占30%。平时成绩就是每次实验报告，满分10分；考试分理论考试和操作考试，第一学期进行理论考试，第二学期进行操作考试。

甲：这门课对我们有什么要求？

乙：要求我们在牢牢掌握基本实验理论、基本实验技能和基本实验方法的同时，努力培养独立思考的习惯和创新意识，努力培养实事求是的科学作风和团结协作精神。

甲：怎样才能学好这门课？有什么窍门没有？

乙：同学们对这门课的期望值是不一样的，有的希望通过，有的希望成绩优良。只要按照老师的最低要求做，上课完成实验，按时交报告，考试取得中等成绩，实现第一个希望不难；要想取得好成绩，应在满足最低要求的基础上，努力提高学习质量，做到预习时独立思考不抄袭，实验时认真操作不胡弄，计算时实事求是凑数，实验报告写得整齐、完整，没有缺项，考试取得中等以上成绩。多一份付出就多一份收获。要说窍门就一句话：照老师说的做。

## 第一节 大学物理实验课程简介

### 一、大学物理实验课程的任务和基本要求

大学物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修的通识课程，是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

#### （一）本课程的具体任务

- （1）培养与提高学生进行物理实验的基本能力，掌握进行物理实验所需要的各种知识。
- （2）培养学生独立思考的习惯和创新意识，能够完成一些综合性、设计性较强的实验。
- （3）培养学生实事求是的科学作风，踏实认真的工作态度，遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

#### （二）课程的基本要求

##### 1. 教学内容

- （1）掌握误差的基本知识与数据处理的基本方法（如列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等）；
- （2）学会测量常用物理量（如长度、质量、时间、角度、温度、电流、电压、电阻、电磁场等）；
- （3）了解常用实验仪器的性能，并学会使用（如千分尺、卡尺、读数显微镜、物理天平、秒表、温度计、电表、电阻箱与变阻器、灵敏与冲击电流计、电位差计与电桥、常用电源与光源、分光计等）；

(4) 掌握基本的实验方法(如比较法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法与转换测量法等)和操作技术(如正确地按照电路图接线、光路的共轴调整、仪器的零位调整等);

(5) 学习物理实验的设计方法。

## **2. 能力培养**

(1) 独立实验的能力;

(2) 分析、研究的能力;

(3) 理论联系实际的能力。

## **3. 分层次教学**

物理实验分为三种层次:基础性实验、综合性实验和设计性实验。

# **二、课程进行的三个环节**

## **(一) 课前预习, 写出本次实验的预习报告**

预习时要认真阅读实验教材与实验参考书, 在“实验报告纸”上写出预习报告。

### **1. 预习报告内容**

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理。阐明实验的理论要点, 写出待测量的主要计算公式, 画出有关装置图(如电路图、光路图等)。

(4) 实验仪器。列出主要仪器名称、型号、规格、精度等级等。

(5) 实验内容及步骤。写出主要实验内容、关键步骤和注意事项。

(6) 数据表格。按照实验内容画出数据表格。

(7) 阅读思考题。

### **2. 预习报告的要求**

(1) 在认真阅读实验教材的基础上写预习报告, 不得抄袭别人的预习报告。

(2) 写预习报告要用专用的“实验报告纸”, 不得用不合要求的纸。

(3) 字迹要工整, 画图要用直尺、圆规和曲线板。

注: 每次上课前交任课教师检查, 不合格者不能做实验。

## **(二) 课上实验**

课上实验是最重要的教学环节。对学生的要求是:

(1) 学生要在上课前到达实验室, 不得迟到。因病、因事不能上课的同学, 要有医务室或所在院系出具的假条, 才予准假。

(2) 课上认真听老师讲解, 按照实验步骤操作仪器, 认真读取数据, 把数据写在表格中, 完成实验以后, 一定请老师检查, 老师认为合格予以签字。数据记录不得丢失, 和实验报告订在一起, 下一次上实验课时交给任课老师。

(3) 老师签完字, 学生要拆线路、整理仪器, 拣拾桌面和地面的遗弃物, 经老师同意后, 方可离开实验室。

注: 无任课教师签字的数据无效。

## **(三) 撰写实验报告**

### **1. 实验报告的内容**

(1) 本次实验的预习报告。

- (2) 有老师签字的数据表。
- (3) 数据处理过程和结果(包含计算公式、简单计算过程、作图、不确定度计算、结果表示等)。
- (4) 回答思考题。

## 2. 实验报告的要求

- (1) 实验报告要求独立完成,认真进行数据处理,不得抄袭别人的结果。
- (2) 纸面要整洁,字迹工整,用作图法处理数据时,要用坐标纸。
- (3) 下次上实验课时交实验报告。实验报告不能长期拖延不交,更不能拖到期末一起交。

## 三、实验室规则与学生实验守则

- (1) 做好课前预习,按时、按组上实验课,要独立完成实验和实验报告。
- (2) 遵守实验室制度,注意用电安全。
- (3) 保持实验室安静、清洁,实验完毕后整理好仪器,做好值日。
- (4) 爱护国家财产,因个人原因损坏仪器设备,要按学院规定予以赔偿。
- (5) 严禁弄虚作假,如发现私自涂改数据或抄袭他人报告者,本次实验按零分计。
- (6) 未写预习报告者或迟到 20min 以上者,不准进入实验室。
- (7) 病假需持有医院诊断证书,无故旷课者按零分处理。

## 第二节 测量误差和不确定度

### 一、测量

#### (一) 直接测量和间接测量

- (1) 直接测量:将待测物体与标准量具进行比较,直接得到待测量的大小。
- (2) 间接测量:待测量由若干直接测量的物理量经过一定函数关系运算后获得。

#### (二) 等精度测量与不等精度测量

- (1) 等精度测量:指在相同的条件下进行的多次测量,如同一人,用同一个仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。
- (2) 不等精度测量:若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫不等精度测量。

### 二、误差的基本概念

#### (一) 真值

任何物理量在一定时间内或一定条件下,都存在着一个客观值,这个客观值称为真值。物理量的真值不能通过测量而得知,但是能通过提高仪器的精度和改进测量方法,使测量值不断接近真值。

## (二) 绝对误差和相对误差

### 1. 绝对误差

若某物理量真值为  $a$ ，测量值为  $x$ ，则绝对误差为：

$$\Delta x = x - a \quad (1.2.1)$$

### 2. 相对误差

绝对误差与真值的比值。

$$B = \frac{\Delta x}{a} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

## 三、误差的分类

根据误差产生的原因及其对实验结果的影响，误差主要分为两类：

### (一) 系统误差

#### 1. 定义

在等精度条件下对同一物理量进行多次测量，误差的绝对值和符号或者不变，或者在改变实验条件时，按确定的规律变化，这种误差称为系统误差。如：千分尺零点误差，钟表的快慢等。

#### 2. 系统误差的类别

系统误差就其来源分为仪器误差、理论与方法误差和观测误差。

(1) 仪器误差：由于仪器制造或校准的不精确，以及仪器没有调整到最佳状态所引起的误差。

(2) 理论与方法误差：由于实验理论的不完善，实验公式具有近似性或实验方法不适当而引起的误差。

(3) 观测误差：由于仪器使用不当或不满足仪器的使用条件，致使其零点不对而引起的误差，或某人使用仪器或测量时不注意，使视线不与零刻度面垂直而引起的误差。

### (二) 随机误差

#### 1. 定义

在等精度条件下，对一个物理量进行多次测量时，由于偶然的因素，各次测量的误差时大时小，时正时负，既不可预测又无法控制，这种误差被称为随机误差。

#### 2. 随机误差的统计规律

有关理论和实践都证明，当测量次数足够多时，一组等精度测量数据的随机误差服从一定的统计规律，最典型的一种统计规律是正态分布。若横坐标表示随机误差  $\Delta x$ ，纵坐标表示随机误差出现的概率密度函数  $f(\Delta x)$ ，则正态分布曲线如图 1.2.1 所示，其数学表达式为：

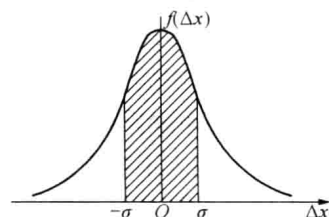


图 1.2.1 正态分布曲线

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2.3)$$

式中， $\sigma$  为测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  总体的标准误差。

图中阴影部分的面积是测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中任一测量值落在  $(a - \sigma, a + \sigma)$  区间中的概率为  $P$ ,  $P = 68.3\%$ 。

从图中可看出, 随机误差具有以下性质:

- (1) 单峰性, 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大;
- (2) 对称性, 大小相等、符号相反的误差出现的概率相等;
- (3) 有界性, 误差的绝对值不会超过某一界限;
- (4) 可抵消性, 在一定的条件下, 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

### 3. 算术平均值的标准误差

设对某一物理量  $x$  进行  $n$  次等精度测量以后, 得到的测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.4)$$

由统计原理可知, 当测量次数趋于无穷大时, 测量值的算术平均值无限接近于该物理量的真值。当然实际的测量次数都是有限的, 我们可以用多次测量的算术平均值代替真值。某次测量值与算术平均值之差称为该次测量的残差。由于真值不可测量, 测量值与真值之差也不知道, 因此我们只能用残差代替误差。

经计算, 物理量  $x$  的算术平均值的标准误差为:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2.5)$$

它表示测量值在  $[\bar{x} - \sigma(\bar{x}), \bar{x} + \sigma(\bar{x})]$  范围内包含真值  $a$  的概率为 68.3%。

## 四、不确定度

长期以来, 人们用误差来表示测量结果可信度的高低。误差是测量值与真值的偏差, 但真值是无法确定的, 它只是一种理想值或约定值。因此, 涉及具体数值的场合, 用不确定度代替误差是一个趋势。

### (一) 概念

不确定度表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。它是被测量的真值在某个量值范围的一个评定。

### (二) 不确定度的意义及其与误差的关系

(1) 引入不确定度可以对测量结果的准确程度作出科学合理的评价。不确定度越小, 表示测量结果与真值越靠近, 可信度越高。比如, 多次直接测量的结果是:

$$x = \bar{x} \pm u \quad (1.2.6)$$

式中,  $\bar{x}$  是算术平均值,  $u$  是不确定度。它表示, 被测量的真值以一定的概率 (例如 68.3%) 落在  $[\bar{x} - u, \bar{x} + u]$  的数值范围内。

(2) 误差是指测量值与真值之差, 由于真值的不可预知性, 一般意义的误差也是未知

的。不确定度与误差概念不同，它表征被测量的真值所处的量值范围，其大小可以计算或估计出来。

(3) 不确定度是在误差理论的基础上发展起来的。误差一般用于定性地描述理论和概念的场所；而不确定度用于给出具体数值或定量计算的场合。以后凡是涉及具体数值，都要用不确定度代替误差。

**(三) 分类**

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)》的精神，不确定度从估计方法上分为两类。

- (1) A 类不确定度：在相同条件下的进行多次测量，用统计方法估算的分量，用  $u_A$  表示。
- (2) B 类不确定度：用非统计方法估算的分量，用  $u_B$  表示。

**(四) 计算**

**1. A 类不确定度的计算**

A 类不确定度用统计方法进行估算，在物理实验教学中，我们约定 A 类不确定度等于算术平均值的标准误差，即

$$u_A = \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1.2.7}$$

**2. B 类不确定度的计算**

B 类不确定度不是用统计方法计算的，它由仪器的误差限和测量误差的分布来决定。常用仪器的仪器误差由生产厂家给出。在物理实验教学中，我们约定误差的概率分布是均匀分布，仪器误差为  $\sigma_{\text{仪}}$ ，由均匀分布理论，B 类不确定度为：

$$u_B = \frac{\sigma_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \tag{1.2.8}$$

**3. 总不确定度和相对不确定度**

**(1) 总不确定度**

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\sigma^2(x) + \sigma_{\text{仪}}^2 / 3} \tag{1.2.9}$$

**(2) 相对不确定度**

相对不确定度等于总不确定度与测量平均值之比，即

$$B = \frac{u}{x} \tag{1.2.10}$$

**五、间接测量的不确定度**

由于不确定度都是微小的量，相当于数学中的“增量”，因此间接测量不确定度的计算公式与全微分公式类似。设间接测量量  $N$  与各直接测量量  $x, y, z, \dots$  的关系为：

$$N = f(x, y, z, \dots) \tag{1.2.11}$$

则间接测量不确定度的计算公式为：

$$u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (1.2.12)$$

$$\frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (1.2.13)$$

一般情况，对于  $N$  为和差形式的函数用式(1.2.12)计算不确定度比较简便，而对于  $N$  为积商形式的函数由式(1.2.13)计算比较简便。

常用函数的不确定度传递公式详见表 1.2.1。

表 1.2.1 常用函数的不确定度传递公式一览表

| 函 数                 | 不 确 定 度                                                                              | 相对不确定度                                                                                 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $N = x + y$         | $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$                                                           | $B = \frac{u}{N} = (\sqrt{u_x^2 + u_y^2})/N$                                           |
| $N = xy$            | $u = \sqrt{y^2 u_x^2 + x^2 u_y^2}$                                                   | $B = \frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$ |
| $N = x/y$           | $u = \frac{x}{y} \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$ | $B = \frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$ |
| $N = kx$ ( $k$ 为常数) | $u = ku_x$                                                                           | $B = \frac{u_x}{x}$                                                                    |
| $N = X^a$           | $u = ax^{a-1}u_x$                                                                    | $B = a \frac{u_x}{x}$                                                                  |
| $N = \ln x$         | $u = \frac{1}{x}u_x$                                                                 | $B = \frac{u_x}{x \ln x}$                                                              |

## 六、测量结果的表示

### (一) 书写形式

直接测量结果的表示

$$x = \bar{x} \pm u \quad (1.2.14)$$

$$B = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1.2.15)$$

间接测量结果的表示

$$N = \bar{N} \pm u$$

$$B = \frac{u}{\bar{N}} \times 100\% \quad (1.2.16)$$

### (二) 结果处理步骤

#### 1. 在同一条件下多次测量时

- (1) 确定系统误差；
- (2) 计算平均值  $\bar{x}$  及其标准误差  $\sigma_{\bar{x}}$ ，尽量利用有统计功能的袖珍计算器；
- (3) 计算 A 类分量  $u_A$  和 B 类分量  $u_B$ ；
- (4) 计算(合)不确定度  $u$ ，只取 1 ~ 2 位有效数字；
- (5) 正确表示测量结果，不要忘写单位。

#### 2. 一次测量时

- (1) 确定系统误差；

(2) 计算 B 类分量  $u_B$ , 将 B 类分量作为一次测量结果的不确定度  $u$ , 只取 1 ~ 2 位有效数字;

(3) 正确表示测量结果, 不要忘写单位。

### 3. 仪器误差的估算

(1) 米尺、螺旋测微计和读数显微镜等其他标有刻度的量、器具: 根据具体情况, 可取最小分度值的 1/10、1/5 或 1/2, 一般取最小分度值的 1/2。

(2) 游标卡尺等标有准确度的仪器: 取其准确度为仪器误差。

(3) 电表等仪器没有直接给出仪器误差, 但给出了准确度等级, 其仪器误差经过计算才能得到。如指针式电表的仪器误差等于其量程值乘以准确度等级; 电桥、电阻箱的仪器误差等于示值乘以准确度等级再加上零值电阻, 由于它们各挡的准确度等级是不同的, 所以要分挡计算, 然后求和。

(4) 电子秒表可以测到 0.01s, 考虑到按表时超前或滞后引起的误差, 可取 0.5s 为仪器误差。

**【例一】** 用螺旋测微计测量小钢珠的直径, 5 次测量值分别是 2.997mm, 2.989mm, 2.998mm, 2.987mm, 2.988mm, 试求平均值、A 类不确定度、B 类不确定度和合不确定度, 并写出测量结果表达式。

解: 由式(1.2.4)

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = 2.9918\text{mm}$$

由式(1.2.7)

$$u_A = \sigma(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \approx 0.0024\text{mm}$$

由式(1.2.8)

$$u_B = \frac{\sigma_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{mm}$$

由式(1.2.9)

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\sigma(d)^2 + \sigma_{\text{仪}}^2/3} = \sqrt{0.0024^2 + 0.0029^2} \approx 0.0038\text{mm}$$

$$d = \bar{d} \pm u = (2.992 \pm 0.004)\text{mm}$$

**【例二】** 用螺旋测微计测量圆柱体的体积, 已知直径  $d = \bar{d} \pm u_d = (20.080 \pm 0.006)\text{mm}$ , 高度  $h = \bar{h} \pm u_h = (35.110 \pm 0.003)\text{mm}$ , 求圆柱体的体积及其不确定度。

$$\text{解: } \bar{V} = \frac{\pi}{4} \bar{d}^2 \bar{h} = 1.1113 \times 10^4 \text{mm}^3$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial d} = \frac{2}{d} \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

由式(1.2.13)

$$\frac{u_{\bar{V}}}{\bar{V}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln V}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial \ln V}{\partial h}\right)^2 u_h^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{\bar{d}}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{\bar{h}}\right)^2 u_h^2} \approx 6.0 \times 10^{-4}$$

$$u_{\bar{V}} = \bar{V} \times \frac{u_{\bar{V}}}{\bar{V}} \approx 6.7 \text{ mm}^3$$

$$V = \bar{V} \pm u_{\bar{V}} = (1.1113 \pm 0.0007) \times 10^4 \text{ mm}^3 \quad (B = 0.0006)$$

### 第三节 有效数字和数据处理

#### 一、有效数字及其运算

##### (一) 有效数字概念

准确数字后面只保留一位欠准数字或可疑数字，称作有效数字。有效数字最后一位存在着误差，因此叫欠准数字或可疑数字。

有效数字的特点是：

(1) 有效数字的位数与测量仪器的精度密切相关。测量同一物理量，所用仪器的精度越高，则有效数字的位数越多。如测量某物体长度，用最小刻度为 1mm 的米尺测量，结果为 18.7mm，3 位有效数字，末位的“7”是估读的；用最小刻度为 0.01mm 的螺旋测微计测量，结果为 18.698mm，5 位有效数字，小数点后第三位的“8”是估读的。

(2) “0”的位置不同，对有效数字位数的影响也不同。如 0.00851 是 3 位有效数字，数字前的“0”对有效数字的位数无影响；3 个测量数据，2.85cm ≠ 2.850cm ≠ 2.8500cm，因为它们有效数字的位数分别是 3、4、5 位，有效数字位数的不同反映了测量精度的高低。

(3) 有效数字的位数与小数点位置和单位换算无关。如 1.20m = 120cm = 0.00120km，但是不能写成 1200mm，因为单位换算时不能改变有效数字的位数。

(4) 采用科学记数法。如 2000 要写成  $2.000 \times 10^3$ ，0.0000352 要写成  $3.52 \times 10^{-5}$ 。

##### (二) 有效数字的运算规则

(1) 加、减法运算

① 计算结果的末位与参加运算的各项中小数点后位数最少的那一项的末位对齐。

② 有效数字尾数的取舍法则是“四舍六入，逢五配双”。如 4.8356 取四位有效数字是 4.836，取 3 位有效数字是 4.84，取两位有效数字是 4.8。

【例三】  $12.34 + 2.3572 = 14.70$

$$\begin{array}{r} 12.34 \\ + 2.3572 \\ \hline 14.6972 \end{array}$$

(2) 乘、除法运算

① 两个数乘积的有效数字位数一般与参加运算各量中有效数字位数最少的相同，但是如果最高位的乘积大于或等于 10 时，结果的有效数字位数应比参加运算各量中有效数字位数最少的多取一位。

② 两个数相除，商的有效数字位数一般与除数、被除数中位数较少者的位数相同，但是如果被除数有效数字的位数小于或等于除数有效数字的位数，并且它的最高位的数小于除数最高位的数，则商的有效数字的位数应比被除数少一位。

【例四】  $3.523 \times 48.6 = 171.2$

$$\begin{array}{r}
 3. \quad 5 \quad 2 \quad \underline{3} \\
 \times \quad 4 \quad 8. \quad \underline{6} \\
 \hline
 2 \quad \underline{1} \quad \underline{1} \quad \underline{3} \quad \underline{8} \\
 2 \quad 8 \quad 1 \quad 8 \quad \underline{4} \\
 1 \quad 4 \quad 0 \quad 9 \quad \underline{2} \\
 \hline
 1 \quad 7 \quad 1. \quad \underline{2} \quad \underline{1} \quad \underline{7} \quad \underline{8}
 \end{array}$$

【例五】  $4.52 \div 5.47 \approx 0.83$

$$\begin{array}{r}
 0. \quad 8 \quad \underline{2} \quad \underline{6} \\
 5. \quad 4 \quad \underline{7} \overline{) 4. \quad 5 \quad \underline{2}} \\
 \underline{4 \quad 3 \quad 7 \quad \underline{6}} \\
 1 \quad \underline{4} \quad \underline{4} \quad 0 \\
 1 \quad \underline{0} \quad \underline{9} \quad \underline{4} \\
 \hline
 3 \quad \underline{4} \quad \underline{6} \quad 0 \\
 3 \quad \underline{2} \quad \underline{8} \quad \underline{2} \\
 \hline
 1 \quad \underline{7} \quad \underline{8}
 \end{array}$$

(3) 乘方和开方的运算规则与乘法的运算规则相同。

(4) 常数(如  $\pi$ 、 $g$  等)和自然数(如纯数 2 等), 由于不是测量得到的, 因此可以认为其有效数字的位数是无限多的, 运算时所取的位数不少于各项中有效数字位数最少的那一位的位数。

(5) 运算的中间过程, 参与运算的量可以取两位欠准数字, 但最后结果仍要按照前面的规则来确定有效数字的位数。

### (三) 测量数据的有效数字

根据有效数字的概念, 一个测量数据只能保留一位欠准数字。在物理实验中, 测量结果的不确定度一般取一位有效数字, 而平均值的最末一位要与不确定度所在的位置对齐。

【例六】  $m = (321.55 \pm 0.6)g$  的写法不正确, 应改为  $m = (321.6 \pm 0.6)g$

【例七】  $I = (0.000256 \pm 0.000004)A$  没有采用科学记数法, 正确写法是:

$$I = (2.56 \pm 0.04) \times 10^{-4}A$$

## 二、数据处理

### (一) 列表法

在记录实验数据时, 将数据排列成表格的形式, 使其能清楚地反映出各物理量之间的对应关系。用列表法记录实验数据是一种良好的工作习惯。

列表要达到以下要求:

- (1) 表格尽量简明, 便于表示物理量的对应关系, 处理数据方便。
- (2) 写明表的名称, 标明表头栏目中的物理量、符号、及单位。
- (3) 表中数据的有效数字与所用仪器的准确度一致。
- (4) 把必须记录的实验条件记在表外。