



高等教育“十二五”规划教材

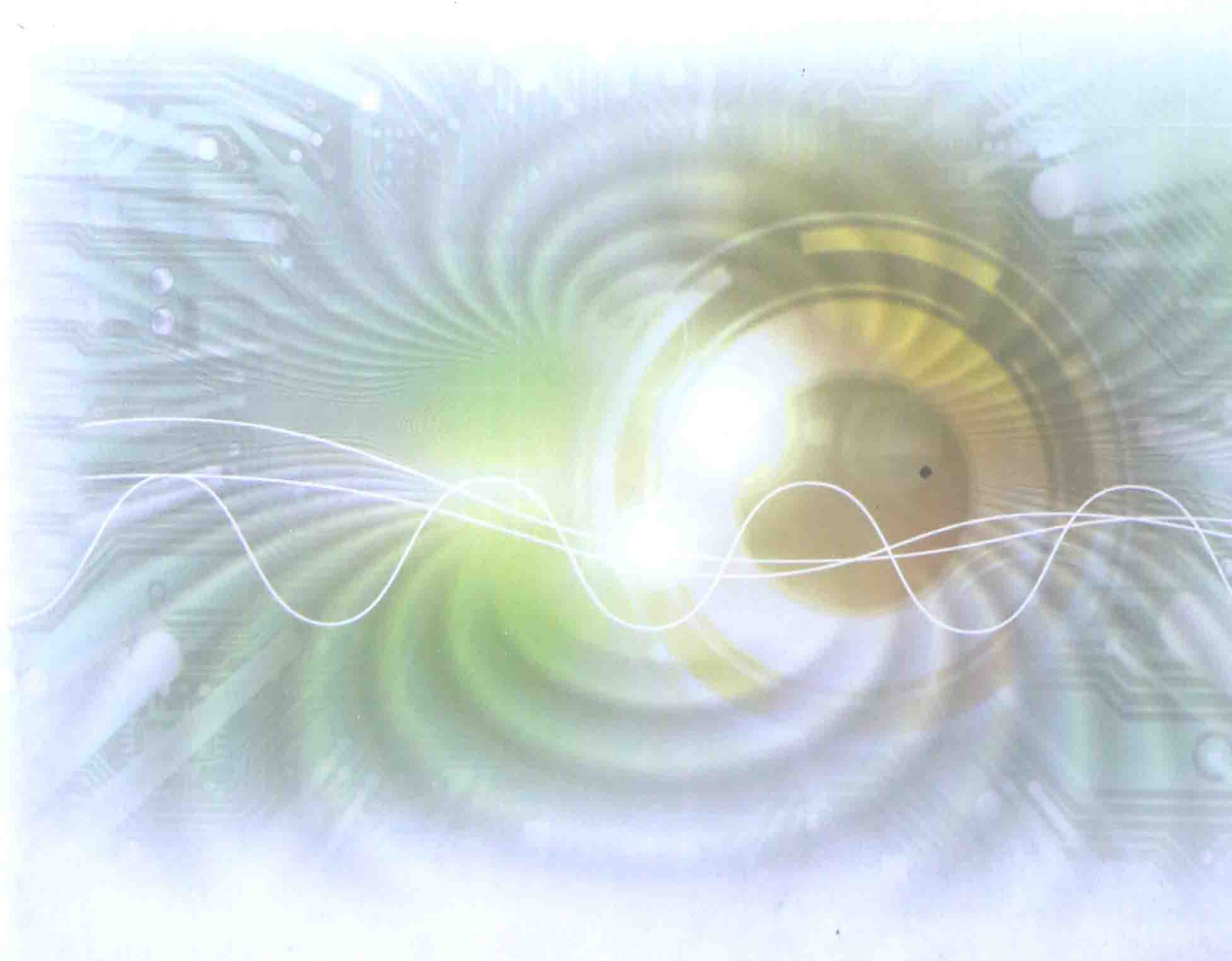
# 新编

# 大学物理实验

*Xinbian Daxue Wuli Shiyan*

主编 解 忧

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

# 新编大学物理实验

主 编 解 忱

副主编 杨华平 庞绍芳

朱华泽 郭长立

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书是按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会于2008年制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,面对21世纪对人才培养的新要求和学分制下学生自由选课的新形势,总结西安科技大学多年来物理实验课的教学改革与实践经验编写而成的。全书分八章,共有实验48个。第一章讲解了误差理论和实验数据处理的基础知识;第二章讲解了物理实验常用测量方法;第三章讲解了物理实验常用仪器;第四章介绍了涵盖力学、热学、光学和电磁学的基础物理实验;第五章介绍了综合物理实验;第六章介绍了设计性物理实验;第七章介绍了创新物理实验;第八章介绍了大学物理仿真实验。书后附录包括了物理常数表、中华人民共和国法定计量单位(摘录)和世界十大经典物理实验。

本书可作为各类高等院校工科各专业和理科非物理类专业的本科或专科物理实验教材,也可作为实验技术人员、相关课程教师及其他科技工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验 / 解忧主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5646-2514-6

I. ①新… II. ①解… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV ①.O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第237762号

书 名 新编大学物理实验  
主 编 解 忧  
责任编辑 黄本斌 褚建萍  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 21.75 字数 543千字  
版次印次 2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷  
定 价 36.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

本书是按照教育部高等学校非物理类专业大学物理实验教学大纲,并参照高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委会于2008年制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,吸取国内同类教材的优点,在编者长期教学经验的基础上,结合西安科技大学的物理实验教学实际情况和一般工科院校专业的特点编写而成的。

在本书的编写过程中,注意了以下几个方面:

1. 在选材内容的处理上,注意起点低、终点高,并注重对学生实验技能的培养和实验方法的训练。

2. 当介绍误差理论时,简明扼要地介绍了测量结果的不确定度及其评价方法。

3. 合理地安排了基础物理实验、综合物理实验、设计性物理实验和创新物理实验。

4. 部分实验介绍了几种不同的实验方法,或选用不同的仪器对同一物理量进行测量。

5. 每个实验均备有一些思考题,以启迪学生的思维。

本书由解忧编写绪论、第一章、第二章、实验31~38、附录和参考文献;杨华平编写第三章和实验1~10;庞绍芳编写实验11~19;朱华泽编写实验20~30;郭长立编写第八章;高峰编写实验39;强蕊编写实验40;乔辉编写实验41;李百宏编写实验42;翟万林编写实验43;张鹏利编写实验44;庞华锋编写实验45;李绍蓉编写实验46;齐兵编写实验47;王素芳编写实验48。最后解忧负责全书统稿工作,郭长立教授对全稿进行了仔细的审阅。

物理实验教材的编写离不开物理实验室的建设,物理实验教学是一项集体事业。本书结合西安科技大学的物理实验教学实际情况,总结多年来物理实验课的教学改革与实践经验,因此本书也凝聚了众多教师的劳动成果。本书是在炎正馨、舒秦、郭长立、王瑞平以及廖少俊等主编的物理实验教材的基础上编写而成的,王亚民教授对本书提出了宝贵建议,在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间所限,书中难免有缺点和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年6月

## 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 绪论                 | 1  |
| 第一章 测量误差、不确定度和数据处理 | 4  |
| 第一节 测量误差基本知识       | 4  |
| 第二节 测量不确定度评定与表示    | 7  |
| 第三节 实验数据修约         | 14 |
| 第四节 实验数据处理基本方法     | 17 |
| 第二章 物理实验常用测量方法     | 25 |
| 第一节 比较法            | 25 |
| 第二节 放大法            | 25 |
| 第三节 转换法            | 26 |
| 第四节 补偿法            | 27 |
| 第五节 平衡法            | 28 |
| 第六节 模拟法            | 28 |
| 第七节 干涉法            | 29 |
| 第三章 物理实验常用仪器       | 30 |
| 第一节 力学、热学常用仪器      | 30 |
| 第二节 电磁学常用仪器        | 40 |
| 第三节 光学常用仪器         | 46 |
| 第四章 基础物理实验         | 49 |
| 实验 1 基本测量          | 49 |
| 实验 2 机械能守恒定律的验证    | 53 |
| 实验 3 波尔共振仪研究受迫振动   | 58 |
| 实验 4 拉伸法测定金属丝的杨氏模量 | 64 |
| 实验 5 声速的测量         | 69 |
| 实验 6 液体黏度的测定       | 77 |
| 实验 7 金属杆线膨胀系数的测定   | 80 |
| 实验 8 模拟法测绘静电场      | 82 |
| 实验 9 伏安法测电阻        | 88 |
| 实验 10 惠斯通电桥测电阻     | 92 |

|            |                           |     |
|------------|---------------------------|-----|
| 实验 11      | 电位差计测量电动势 .....           | 97  |
| 实验 12      | 霍尔效应实验 .....              | 102 |
| 实验 13      | 运用示波器显示李萨如图形 .....        | 108 |
| 实验 14      | 分光仪的调整和玻璃折射率的测定 .....     | 120 |
| 实验 15      | 干涉法测量透镜的曲率半径 .....        | 133 |
| 实验 16      | 汞灯光波波长的测定 .....           | 139 |
| 实验 17      | 单缝衍射的光强分布及测量 .....        | 142 |
| 实验 18      | 偏振法测葡萄糖溶液的浓度 .....        | 148 |
| <b>第五章</b> | <b>综合物理实验</b> .....       | 154 |
| 实验 19      | 弦振动实验 .....               | 154 |
| 实验 20      | 迈克耳逊干涉仪的应用 .....          | 164 |
| 实验 21      | 利用光电效应测量普朗克常量 .....       | 172 |
| 实验 22      | 磁聚焦法测定电子荷质比 .....         | 177 |
| 实验 23      | 电子电荷的测定——密立根油滴仪实验 .....   | 182 |
| 实验 24      | PN 结正向压降与温度关系的研究和应用 ..... | 189 |
| 实验 25      | 用光拍频法测量空气中的光速 .....       | 195 |
| 实验 26      | 音频信号光纤传输技术实验 .....        | 202 |
| 实验 27      | 电子动能分布的实验测定 .....         | 210 |
| 实验 28      | 模拟电冰箱制冷系数的测量 .....        | 214 |
| 实验 29      | 夫兰克-赫兹实验 .....            | 220 |
| 实验 30      | 夫兰克-赫兹实验(计算机控制) .....     | 227 |
| 实验 31      | 红外、光导和全息 .....            | 230 |
| 实验 32      | 动态法测定弹性模量 .....           | 235 |
| 实验 33      | 钨的逸出功的测定 .....            | 242 |
| <b>第六章</b> | <b>设计性物理实验</b> .....      | 247 |
| 实验 34      | 刚体转动惯量的实验测定 .....         | 247 |
| 实验 35      | 电表的改装和校准 .....            | 256 |
| 实验 36      | 简谐振动的研究 .....             | 259 |
| 实验 37      | 硅光电池特性研究 .....            | 260 |
| 实验 38      | 组合干涉仪实验 .....             | 262 |
| 实验 39      | 光纤传感器测量温度 .....           | 265 |
| 实验 40      | 传感器的原理与应用 .....           | 268 |
| <b>第七章</b> | <b>创新物理实验</b> .....       | 277 |
| 实验 41      | 铁磁材料居里温度的测定 .....         | 277 |
| 实验 42      | 直流溅射法制备金属薄膜 .....         | 280 |
| 实验 43      | 干涉法测量薄膜的厚度 .....          | 285 |

---

|                      |                          |     |
|----------------------|--------------------------|-----|
| 实验 44                | 金属薄膜电阻的动态监测 .....        | 288 |
| 实验 45                | 金属薄膜电阻率的测量 .....         | 291 |
| 实验 46                | 用干涉方法测量薄膜应力 .....        | 295 |
| 实验 47                | CCD 光栅光谱仪与光谱分析 .....     | 299 |
| 实验 48                | RLC 串联电路的暂态过程 .....      | 302 |
| 第八章 大学物理仿真实验简介 ..... |                          | 311 |
| 第一节                  | 计算机仿真物理实验简介 .....        | 311 |
| 第二节                  | 大学物理仿真实验使用指南 .....       | 312 |
| 第三节                  | 计算机实验数据处理及实验演示程序示例 ..... | 318 |
| 附录 .....             |                          | 327 |
| 附录 1                 | 物理常数表 .....              | 327 |
| 附录 2                 | 中华人民共和国法定计量单位(摘录) .....  | 331 |
| 附录 3                 | 世界十大经典物理实验 .....         | 334 |
| 参考文献 .....           |                          | 338 |

## 绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科,它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基础,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

在物理学的发展过程中,实验起到了重要的作用,物理理论及学说的提出无一不以实验观测为基础,而又进一步被实验所验证,如开普勒行星运动三定律的提出、牛顿万有引力定律的提出和经典力学体系的建立、能量守恒与转换定律的提出以及麦克斯韦电磁场理论的建立都是实验、观测规律的总结。1846年海王星和1930年冥王星的发现则是牛顿万有引力定律正确性的有力佐证;1887年赫兹关于电磁波的实验则从实验上证明了麦克斯韦的电磁场假设,使之成为举世公认的理论;1887年的迈克耳逊-莫雷实验和19世纪末的黑体辐射实验更促进了20世纪伟大的“相对论”和“量子论”的诞生。这一切都说明了物理学本质是一门实验科学,实验是物理学的基础,物理理论离不开实验,物理理论与物理实验是相辅相成的关系,离开了物理实验,物理理论就成了无源之水、无本之木。

物理实验的重要作用,可简单归结为以下几条:

- (1) 物理实验是提出物理理论及学说的基础,如开普勒行星运动三定律的提出。
- (2) 物理实验是判断物理理论正确与否的依据,如关于光的本质研究的“单缝衍射的光强分布及测量”对光的波动理论的证明,以及后期的光电效应和康普顿效应对光的量子理论的证明。
- (3) 推广应用物理理论,开拓应用新领域。如在电磁场理论建立之后,由各类电磁学实验产生的发明创造,如发电机、电报等推动了电气工业和通信工业的发展。
- (4) 物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,它在实验思想、实验方法和实验手段等方面成为各学科科学实验的基础。

综上所述,我们应该重视物理实验课程,学好物理实验,掌握最基本的实验知识和技能,掌握基本的实验分析方法和数据处理方法,为以后从事自然科学学习和工程技术研究打下良好的基础。

### 一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理实验是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修课程,是大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。物理实验课程覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验思想、实验方法、实验手段,以及综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生创新意识和创新能力、引导学生确立正确的科学思想和科学方法、提高学生科学素质的重要基础,在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综

合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

物理实验课程的任务如下:

(1) 培养与提高学生科学实验基本素质,确立正确的科学思想和科学方法。

通过物理实验课程的教学,使学生掌握误差及测量不确定度分析、数据处理基本理论和方法,学会常用仪器的调整和使用,了解常用的实验方法,能够对常用物理量进行一般测量,具有初步的实验设计能力,同时应有效提高学生的科学实验能力,其中包括:

独立实验的能力——能够通过阅读实验教材,查询有关资料,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备工作;正确使用仪器及辅助设备(如计算机等),独立完成实验内容,撰写合格的实验报告,具有独立实验的能力。

分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行判断、归纳与分析,掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究问题的能力。

理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并尝试解决问题;能够根据物理理论与实验的要求建立合理模型并完成简单的设计性实验,初步具有综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(2) 培养与提高学生的创新思维、创新意识和创新能力。

通过物理实验引导学生深入观察实验现象,建立合理的模型,定量研究物理规律;能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法,激发学生创造性思维;能够完成符合规范要求的设计性内容的实验,进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学素养。

要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究探索的精神以及遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

## 二、物理实验课程的主要教学要求

### 1. 预习

预习是保证实验顺利进行的重要步骤,学生实验前应认真仔细阅读实验教材并查阅相关资料,了解相关仪器的构造和使用方法,对实验步骤、实验原理、实验方法及要测量的相关物理量做到心中有数,在实验前明确实验任务,并写出预习报告。预习报告应包括以下内容:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理(包括相关的实验方法或仪器测量原理、文字叙述及公式)。
- (4) 实验步骤。
- (5) 画好原始实验数据的记录表格。
- (6) 画出与实验相关的原理图、电路图或光路图等。

### 2. 实验

学生进入实验室做实验,必须携带预习报告和实验教材。实验时应根据实验步骤和要求,认真调试仪器,使仪器处于正常工作状态,仔细观察实验现象并测量相关的物理量,正确读取和记录数据,独立完成实验。

测量结束要尽快整理并分析数据,以便发现问题,做出必要的补充测量。实验完毕,将数据送交教师审阅,待教师签字认可后,再拆除实验装置并将仪器及实验台整理好。

### 3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作的总结,撰写实验报告是实验课程的重要任务之一。合格的实验报告就是一篇模拟的科学论文,是以后进行科学实验并撰写科学论文的基础,应学会撰写简明扼要、整洁清晰、数据准确可靠并有简单实验分析的实验报告。实验报告应包括以下内容:

(1) 实验名称和实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器(包括仪器规格及编号)。

(4) 实验原理(包括实验所依据的物理定律、物理公式、电路图、光路图等)。

(5) 数据和图表(包括测量的原始数据及表格、计算结果、测量不确定度计算及结果表达式和用图表对数据的综合表述等)。

(6) 分析讨论(包括实验的心得体会、对实验中出现问题或者误差因素分析、对实验装置和实验方法的改进意见)。

(7) 完成课后思考题。

### 三、实验室规则

(1) 学生进入实验室必须写好预习报告并画好原始实验数据记录表格,经教师检查同意后方可进行实验。

(2) 使用电源时,须经教师检查后方可接通电源。

(3) 爱护实验设备,不得擅自摆弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,损坏仪器要赔偿。

(4) 遵守纪律,保持实验室安静。

(5) 做完实验,学生应将仪器整理复原,并打扫实验室卫生。

(6) 独立完成实验及实验报告,不得伪造或抄袭数据,实验报告在实验完成后一周内交任课教师。

# 第一章 测量误差、不确定度和数据处理

物理是一门实验科学,物理学任何理论的提出最终都离不开实验验证。因此,物理实验是物理学发展的基础,更是工科类高校学生奠定良好专业素质的必经之路。而任何实验都离不开测量,测量结果的表示是测量结果记录和比较的途径,也是本章的主要学习目标。通过本章的学习,学习者应掌握直接测量量的单次测量、多次等精度测量以及间接测量量误差表示的三大方法:平均绝对误差方法、标准误差方法以及目前广泛使用的标准不确定度方法。误差理论及表示方法的使用将贯穿整个物理实验过程,乃至专业课实验,因此本章的学习是整个物理实验教学的重中之重。如果掌握不好误差理论,做得再好的实验,在最终结果表示、分析阶段也会功亏一篑。

## 第一节 测量误差基本知识

### 一、测量

#### 1. 定义:以确定量值为目的的一组操作

测量是物理实验的基本内容之一,其实质是将待测物体的某物理量与相应的标准做定量比较,其目的是要把所研究的量与一个数值联系起来,测量的结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(所选定的特定量)以及结果可信赖的程度(用不确定度表示)。上述三项称为测量结果表达式中的三要素。按照《中华人民共和国计量法》规定,采用国际单位制(SI制)为国家法定计量单位,即以米、千克、秒、安[培]、开[尔文]、摩[尔]、坎[德拉]作为基本单位,其他量都由以上7个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位,中华人民共和国法定计量单位见附录2。

#### 2. 直接测量和间接测量

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。直接测量就是将待测量和标准量直接进行比较,或者从已用标准量校准的仪器上直接读出测量值的方法,其特点是待测量的值和量纲可直接得到。例如,用米尺、游标卡尺测长度,用秒表测时间,用天平称质量,用电流表测电流等均为直接测量,相应的测量结果,长度、时间、质量、电流等称为直接测量量。

间接测量就是通过测量与被测量有函数关系的其他量,计算出被测量值的一种测量方法。例如,当用单摆测重力加速度时,由  $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ , 可以先用米尺直接测出摆线长度  $L$ , 用秒表测出振动周期  $T$ , 再根据公式  $g = \frac{4\pi^2}{T^2} L$  求出重力加速度  $g$ ,  $g$  为间接测量量。

#### 3. 等精度测量和不等精度测量

根据多次测量过程中的测量条件变化与否,将测量又分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在相同实验条件下对同一物理量所做的重复测量,由于各次测量的实验条件相同,各次测量结果的可靠性也是相同的,没有理由认为哪一次测量更精确或更可靠,所以各次测量是等精度的。若在重复测量过程中,实验条件如测量人、仪器、实验方法或环境因素等发生改变,则这样的测量是不等精度测量。

在实际测量过程中,没有绝对不变的人和事物,运动是绝对的,实验条件总是处于变化之中,但只要其变化对实验的影响很小乃至可以忽略,就可以认为是等精度测量。若实验条件部分或全部发生明显变化,显著影响实验结果,则为不等精度测量。本书中若不强调说明,所指测量均为等精度测量。

## 二、误差

### 1. 真值

测量的最终目的是要获得待测物理量的真值,而真值是与给定的待定量的定义一致的值。真值是一个理想的概念,按其本性是不确定的,但可以通过改进待定量的定义、测量方法和条件等,使获得的量值足够地逼近真值,满足实际使用测量值时的需要。在实际测量中使用约定真值来代替真值,约定真值可以是指定值、最佳估计值、约定值、参考值或理论值,实验中常用某量的多次测量结果来确定约定真值,如算术平均值是约定真值,也就是最佳估计值。

### 2. 误差

由于实验方法和测量条件的局限,测量值并非真值,测量值与真值之间必然存在或多或少的差值,这种差值称为测量误差,简称误差,即误差=测量值-真值。

当有必要与相对误差相区别时,误差又称为绝对误差,绝对误差可正可负;注意不要与误差的绝对值相混淆。绝对误差反映了测量值偏离真值的大小和方向。

### 3. 误差分类

由于测量值必然有误差,因此我们需要对测量值的准确程度做出估计,这就需要研究误差的来源、性质以及处理方法,从而完善测量,减小误差。

按照误差的特征,可将测量的误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差  $\delta$ 。在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值  $x_0$  之差,即  $\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) - x_0$ 。系统误差及其产生的原因不能完全获知,但其来源主要有以下三种:

① 方法误差。这是由于实验原理不完善、公式的近似性以及实验方法过于简化等原因产生的误差。如当用单摆测重力加速度时,忽略了空气对摆动的阻力;当用伏安法测电阻时,忽略了电表内阻的影响等。

② 仪器误差。这是由于仪器本身的缺陷或使用不当而产生的误差。如米尺的刻度不均匀;天平的两臂不等长;应水平放置的仪器没有水平放置等。

③ 个人误差。这是由于实验者本人的生理特点或不良习惯产生的误差。如用秒表测时间,有的人习惯早按,有的人习惯迟按;观察仪表指针时,有的人习惯将头偏向一边等。

通过校准仪器、完善实验理论、改善实验条件和测量方法,可以将系统误差减小到允许的程度。但增加测量次数并不能减小系统误差。

(2) 随机误差  $\delta_i$ 。测量结果  $x_i$  与在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所

得结果的平均值之差,即  $\delta_i = x_i - \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)$ 。随机误差来源于影响量的变化,这种变化在时间上和空间上是不可预知的或随机的,它会引起被测量重复观测值的变化。就单个随机误差而言,它没有确定的规律,但就整体而言,随机误差却服从一定的统计规律,故可用统计方法估计其界限或它对测量结果的影响。增加测量次数,可明显减小随机误差。

服从正态分布的随机误差具有以下四大特征:

- 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等。
- ③ 有界性。误差的绝对值不会超过一定的界限,即不会出现绝对值很大的误差。
- 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向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = 0$$

随机误差主要有以下三种来源:

① 判断性误差。实验者在对准目标(刻线等)、确定平衡(如天平)估读数时不一致而产生的误差。

② 实验条件的起伏。例如电源电压的波动、环境温度、湿度的变化等产生的误差。

③ 微小干扰。例如振动、空气流动、外界电磁场的干扰等影响产生的误差。

由于测量次数有限,实验中可确定的系统误差和随机误差分别是系统误差的估计值和随机误差的估计值。

(3) 粗大误差。明显地与事实不符的误差,它是由于测量者粗心大意,或者实验条件突变、仪器在非正常状态下工作、无意识的不正确操作等因素造成的。含有粗大误差的测量值称为可疑值。在没有充分依据的前提下,绝不能随意去除,应按照一定的统计准则予以剔除。

#### 4. 测量的精密度、正确度和精确度

通常系统误差和随机误差是混在一起出现的,有时也难以区分。在科学实验中,常用“精密度”表示随机误差的大小,反映测量结果的分散性,即测量值  $x_i$  偏离均值  $\bar{x}$  的程度;用“正确度”表示系统误差的大小,反映  $\bar{x}$  接近真值  $x_0$  的程度;用“精确度”综合反映随机误差和系统误差的大小。如图 1.1.1(a),(b),(c)所示三张打靶图,圆心为目标,黑点为弹着点,图(a)表示射击的精密度高,即分散性小,但弹着点均值偏离目标较大,即随机误差小而系统误差大;图(b)表示的比图(a)表示的系统误差小,但随机误差大,即精密度低而正确度高;图(c)表示弹着点比较集中且又聚集在靶心,表示精确度高,即精密度高、正确度也高。

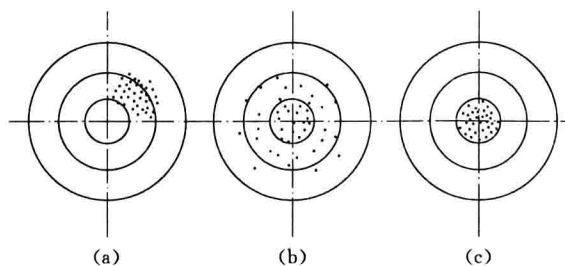


图 1.1.1 三种测量结果分析示意图

## 5. 测量误差的表示

实验中,常用绝对误差、相对误差、百分误差表示测量结果的优劣。由于真值无法得到,常用多次测量的算术平均值  $\bar{x}$  替代真值。测量值与算术平均值之差称为残差,即

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

(1) 绝对误差。它是测量结果减去被测量的真值,即

$$\Delta x = \text{测量值 } x - \text{真值 } x_0$$

(2) 相对误差。它是绝对误差与被测量真值之比,即

$$E = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

(3) 百分误差。它是将测量值与理论值或公认值进行比较,百分误差用  $E_r$  表示,即

$$E_r = \frac{|\text{测量值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}} \times 100\%$$

当两被测量的大小相近时,通常用绝对误差比较测量结果的优劣;当两被测量值相差较大时,用相对误差才能进行有效比较。如测量标称值分别为 9.8 mm 和 99.8 mm 的甲、乙两物体的长度,实测值分别为 10.0 mm 和 100.0 mm,两者的绝对误差都为 +0.2 mm,无法用绝对误差比较两者的测量水平,而用相对误差甲为 2%,乙为 0.2%,所以,乙测量比甲准确,乙比甲的测量水平高一个数量级。

## 第二节 测量不确定度评定与表示

测量的目的是为了得到被测量的真值,但由于客观实际的局限性,真值不是准确可知的,测量结果只能得到一个真值的近似估计值和一个用于表示近似程度的误差范围,导致测量结果不能定量给出,具有不确定性。为了确切表征实验测量结果,我们引入了不确定度的概念。

测量不确定度(Uncertainty of Measurement)是建立在误差理论基础上的新概念,其应用具有广泛性和实用性。正如国际单位制(SI制)一样,目前,测量不确定度评定已在世界各国、各领域采用。本书使用最新的中华人民共和国国家计量技术规范《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012),以替代原技术规范中的测量误差部分。

测量不确定度评定与表示的统一,使不同国家、不同地区、不同学科、不同领域在表示测量结果及评定时具有一致的含义。

### 一、测量不确定度的基本概念

#### 1. 测量不确定度

简称不确定度,是根据所获信息表征赋予被测量值分散性的非负参数。不确定度表征合理地赋予被测量之值的分散性,是与测量结果相联系的参数。不确定度作为实验测量结果接近真实情况的量度,表征了测量结果的分散性和测量值可信程度,也表明了真值出现的范围。在测量方法正确的前提下,不确定度越小,测量结果就越可靠;不确定度越大,测量的可靠程度就越差。

本书根据实际教学和实验的需要,介绍不确定度的一种简化方案——以标准偏差表示的测量不确定度估计值,即标准不确定度。本书中若不另外强调,测量不确定度一律用合成标准不确定度表示。

## 2. 标准不确定度的 A 类评定

简称 A 类评定或 A 类不确定度,记为  $u_A$ 。对被测量进行独立重复测量,通过所得到的一系列测得值,用统计分析方法获得实验标准偏差。当用算术平均值  $\bar{x}$  作为被测量估计值时,物理实验教学中采用平均值的实验标准偏差表示  $u_A$ ,即

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

## 3. 标准不确定度的 B 类评定

简称 B 类评定或 B 类不确定度,记为  $u_B$ 。用不同于 A 类评定的方法进行的测量不确定度分量的评定。获得 B 类标准不确定度的信息来源一般有:

- (1) 以前的观测数据。
- (2) 对有关技术材料和观测仪器特性的了解和经验。
- (3) 生产部门提供的技术说明文件。
- (4) 校准证书、检定证书或其他文件提供的数据、准确度的等级或级别,包括目前暂在使用的极限误差等。
- (5) 手册或某些材料给出的参考数据及其不确定度。
- (6) 检定规程、校准规范或测试标准中给出的数据。
- (7) 其他有用的信息。

本书中主要考虑仪器误差限  $\Delta_{\text{仪}}$ ,指计量器具的示值误差,或是按仪表准确度等级算得的最大基本误差。本书中约定采用测量仪器的误差限折合成 B 类标准不确定度,  $u_B = \Delta_{\text{仪}}/k, k > 1$ ,是与误差分布特性有关的系数。

目前,很多仪器在最大允差范围内的分布性质还不清楚,在这种情况下,一般采取保守性估计,  $k$  取较小值。对于误差分布未知的情况,本书均简化为均匀分布处理,即取  $k = \sqrt{3}$ 。仪器误差限  $\Delta_{\text{仪}}$  由实验室提供,没有标出或提供仪器误差限的仪器,  $\Delta_{\text{仪}}$  一般取最小分度的一半(即区间的半宽度)。常用仪器误差限及误差分布如表 1.2.1 所列。

对于数字显示式测量仪器,若分辨率为  $\delta_x$ ,则由此带来的标准不确定度  $u_B = \frac{\delta_x}{2\sqrt{3}}$ 。

表 1.2.1 常见仪器量具主要技术指标及误差分布

| 仪器量具 | 量程       | 最小分度值   | 误差限                                                  | 误差分布 | 包含因子 $k$   |
|------|----------|---------|------------------------------------------------------|------|------------|
| 钢板尺  | 150 mm   | 1 mm    | $\pm 0.10$ mm                                        | 正态   | 3          |
|      | 500 mm   | 1 mm    | $\pm 0.15$ mm                                        |      |            |
|      | 1 000 mm | 1 mm    | $\pm 0.20$ mm                                        |      |            |
| 钢卷尺  | 1 m      | 1 mm    | $\pm 0.8$ mm                                         |      | $\sqrt{3}$ |
|      | 2 m      | 1 mm    | 1.2 mm                                               |      |            |
| 游标卡尺 | 125 mm   | 0.02 mm | $\pm 0.02$ mm                                        | 均匀   | $\sqrt{3}$ |
|      | 300 mm   | 0.05 mm | 0.05 mm                                              |      |            |
| 千分尺  | 0~25 mm  | 0.01 mm | $\pm 0.004$ mm                                       | 正态   | 3          |
| 物理天平 | 500 g    | 0.05 g  | 0.08 g(近满量程)<br>0.06 g(近 1/2 量程)<br>0.04 g(近 1/3 量程) | 正态   | 3          |

续表 1.2.1

| 仪器量具  | 量程       | 最小分度值 | 误差限         | 误差分布 | 包含因子 $k$   |
|-------|----------|-------|-------------|------|------------|
| 普通温度计 | 0~100 °C | 1 °C  | ±1 °C       |      | $\sqrt{3}$ |
| 指针式电表 |          |       | $AK\%$      | 均匀   | $\sqrt{3}$ |
| 直流电阻箱 |          |       | $(aR+bm)\%$ | 均匀   | $\sqrt{3}$ |
| 秒表    |          | 0.1 s | 0.1 s       | 正态   | 3          |

注:  $A$ ——电表量程;  $K$ ——电表准确度等级;  $a$ ——电阻箱准确度等级;  $R$ ——电阻箱示值;

$b$ ——与等级有关的系数(电阻箱结构常数), 见电阻箱介绍;  $m$ ——电阻箱示值中除“0”外所用的旋钮个数。

#### 4. 合成标准不确定度

简称合成不确定度, 记为  $u_c$ 。在相同条件下, 多次直接测量的合成标准不确定度为 A 类不确定度和 B 类不确定度的“方和根”。

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

#### 5. 相对合成不确定度 $u_{\text{crel}}$

表示合成不确定度的相对大小,  $u_{\text{crel}}(\bar{y}) = u_c(\bar{y})/\bar{y}$ 。

### 二、测量不确定度评定与表示

在将可修正的系统误差修正后, 测量不确定度按照获取方法分别采用 A 类和 B 类不确定度评定。

#### 1. 单次测量的不确定度

作为单次测量, 不存在采用统计方法得到 A 类标准不确定度, 即  $u_A = 0$ 。因此, 单次测量的合成标准不确定度就等于 B 类标准不确定度  $u_B$ 。

例如, 用钢卷尺单次测长度  $L = 25.5 \text{ mm}$ , 则  $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.3 \text{ mm}$ 。结果表示为

$$\begin{cases} L = (25.5 \pm 0.3) \text{ mm} \\ u_{\text{crel}} = 1.2\% \end{cases}$$

#### 2. 多次等精度直接测量的不确定度

首先用贝塞尔公式计算 A 类标准不确定度  $u_A$ , 再计算仪器误差限对应的 B 类标准不确定度  $u_B$ , 由  $u_A$  和  $u_B$  采用“方和根”方法求得合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

步骤如下:

(1) 求测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  算术平均值:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

(2) 求残差:  $v_i = x_i - \bar{x}, i = 1, 2, \dots, n$ 。

(3) 求算术平均值的实验标准偏差  $S(\bar{x})$ :  $S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}}$ , 则  $u_A = S(\bar{x})$ 。

(4) 由仪器误差限  $\Delta_{\text{仪}}$  求 B 类标准不确定度  $u_B$ :  $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{k}$ 。

(5) 求合成标准不确定度  $u_c$ :  $u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 。

$$(6) \text{ 测量结果表示: } \begin{cases} x = \bar{x} \pm u_c \\ u_{\text{crel}} = \frac{u_c}{x} \times 100\% \end{cases}$$

请同学们尝试使用计算机编程实现。

**例 1.2.1** 用千分尺测钢球直径 5 次, 测量值为 3.498 mm, 3.499 mm, 3.500 mm, 3.499 mm, 3.498 mm, 给出测量结果。

**解** (1)  $u_A = S(\bar{d}) = 0.000\ 38\ \text{mm}$ ,  $\bar{d} = 3.498\ 8\ \text{mm}$ ;

$$(2) u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{3} = 0.001\ 3\ \text{mm};$$

$$(3) u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.002\ \text{mm};$$

$$(4) u_{\text{crel}} = \frac{u_c}{\bar{d}} \times 100\% = 0.09\%;$$

(5) 测量结果:

$$\begin{cases} d = (3.499 \pm 0.002)\ \text{mm} \\ u_{\text{crel}} = 0.09\% \end{cases}$$

### 3. 间接测量结果的不确定度

间接测量量  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其中  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为直接测量量, 且相互独立,  $u_c(x_i)$  为各直接测量量的合成标准不确定度。由于

$$x_i = \bar{x}_i \pm u_c(\bar{x}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

则  $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ , 为间接测量量的最佳估计值。

对和差函数先算合成标准不确定度为

$$u_c(\bar{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_c^2(\bar{x}_i)}$$

对乘除、乘方等函数先算相对合成标准不确定度为

$$u_{\text{crel}}(\bar{y}) = \frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right)^2 u_c^2(\bar{x}_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \frac{u_c^2(\bar{x}_i)}{f^2}}$$

测量结果表示为

$$\begin{cases} y = \bar{y} \pm u_c(\bar{y}) \\ u_{\text{crel}} = \frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} \times 100\% \end{cases}$$

表 1.2.2 所列为常用函数不确定度传递公式。

**表 1.2.2** 常用函数不确定度传递公式

| 函数                     | 不确定度                                             | 相对不确定度                                                                                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $N = x \pm y$          | $u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$                     | $u_{\text{crel}} = \frac{u_N}{N}$                                                                                                               |
| $N = kx \pm my \pm nz$ | $u_N = \sqrt{k^2 u_x^2 + m^2 u_y^2 + n^2 u_z^2}$ | $u_{\text{crel}} = \frac{u_N}{N}$                                                                                                               |
| $N = xy$               | $u_N = N u_{\text{crel}}$                        | $u_{\text{crel}} = \sqrt{\left( \frac{u_x}{x} \right)^2 + \left( \frac{u_y}{y} \right)^2} = \sqrt{u_{\text{crel}}^2(x) + u_{\text{crel}}^2(y)}$ |