

高等学校教材

# 物理实验简明教程

主 编 王天会 李昂  
副主编 芦明霞 张玲玲 汪亮

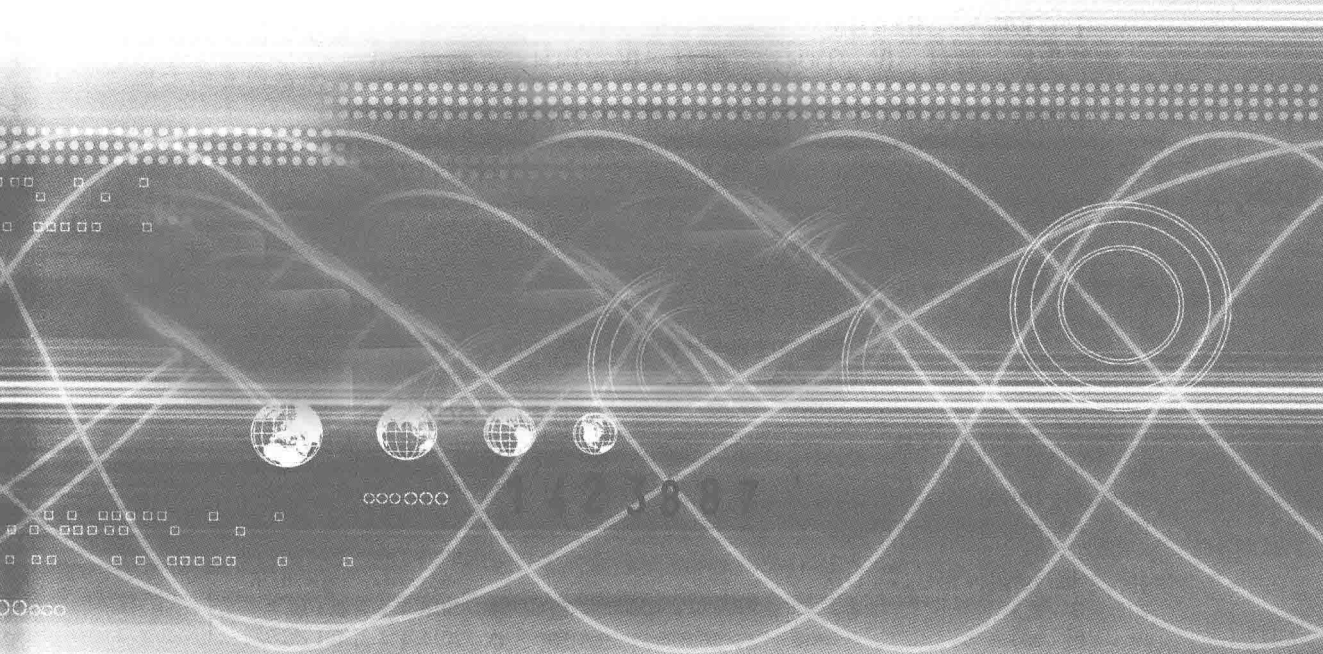
高等教育出版社

高等学校教材

# 物理实验简明教程

Wuli Shiyan Jianming Jiaocheng

主 编 王天会 李昂  
副主编 芦明霞 张玲玲 汪亮



高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。

全书分为绪论,测量、误差和数据处理,基础性实验,综合性实验,设计性实验,共计五章。其中精选了32个实验,内容涉及力学、电磁学、光学、近代物理等相关物理知识。

本书突出基本技能训练的同时,还加大了综合性、设计性、研究性实验的比重;在编写理念上,从简明实用出发,以学生为中心,加强了创新思维、创新方法、创新能力的培养。

本书可作为普通高等学校工科各专业大学物理实验课程的教材或参考书,也可以供教师、实验技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

物理实验简明教程/王天会,李昂主编. --北京:  
高等教育出版社,2016.2  
ISBN 978-7-04-044792-7

I. ①物… II. ①王… ②李… 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(2016)第018756号

策划编辑 李颖 责任编辑 程福平 封面设计 赵阳 版式设计 王艳红  
插图绘制 杜晓丹 责任校对 刘娟娟 责任印制 耿轩

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 大厂益利印刷有限公司  
开本 787mm×1092mm 1/16  
印张 8.5  
字数 200千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版次 2016年2月第1版  
印次 2016年2月第1次印刷  
定价 16.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 44792-00

# 前 言

作为自然科学的基础学科,物理学是工程技术的理论基础。不仅如此,物理学也是一门实验科学。物理实验的理论和方法,也是理工科专业的实验技术课程的先导。因此,大学物理实验在大学理工科课程体系中是较早开设的比较系统和全面的实验课程。通过该课程的学习,可以提高学生的科学素质和实践能力。

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),根据吉林大学珠海学院的人才培养目标和定位,结合多年来大学物理实验课程的教学经验及改革探索,在大学物理实验讲义的基础上经历多次修改而成。

本书内容简明扼要,适用于一般本科院校的大学物理实验教学。每个基础性实验项目教学为2学时,设计性实验项目教学为6学时,本书适用于32~64学时的大学物理实验教学安排。

本书由王天会、李昂任主编。芦明霞、张玲玲、汪亮参与本书部分章节的编写工作,最后由王天会、李昂统稿,彭庶修教授审稿。实验教学是一项集体工作,需要从事实验教学的实验教师和实验技术人员的共同努力和集体协作,因此,本书是实验教师和实验技术人员的共同成果。编者感谢张亚军、王丹、王建锋、刘洋、丁娟等各位同仁的辛勤工作和努力。

在本书的编写中参考了兄弟院校的物理实验教材,在此,一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中存在不足之处在所难免,恳请读者批评指正,以便再版时修正。

编 者

2015年7月

## 物理实验室学生实验守则

1. 学生必须按照课程表规定的时间上实验课,不得无故缺席。迟到十分钟者将被取消相应实验的上课资格。
2. 保持实验室整洁、安静,禁止在实验室内大声喧哗,禁止吸烟、吃零食,上课时禁止接打电话。
3. 服从实验指导教师的指导,未经允许,不得擅自摆弄仪器。严格遵守实验规程,注意人身安全。凡因擅自动用未经允许使用的仪器而造成仪器损坏的,视情节按学校规定赔偿。
4. 上实验课前,应做好实验预习,明确实验目的,理解实验原理,熟悉实验步骤,并写出预习报告。不按要求预习者将被取消相应实验的上课资格。实验中要求正确操作,认真做好原始实验数据记录,当堂上交实验报告。
5. 实验结束后,收拾好实验台上的器材,做到整洁、卫生,并在实验仪器使用记录上签名后方可离开实验室。违反上述要求者实验成绩将被降等。

吉林大学珠海学院物理实验室

# 目 录

第一章 绪论 .....	1	实验 4.4 迈克耳孙干涉仪调节与使用 .....	91
第二章 测量、误差和数据处理 .....	4	实验 4.5 光敏电阻基本特性的测量 .....	94
§ 1. 测量与误差 .....	4	实验 4.6 温度传感器的特性研究 .....	98
§ 2. 测量的不确定度和测量结果的表示 .....	7	第五章 设计性实验 .....	102
§ 3. 实验数据有效数字及其运算规则 .....	12	实验 5.1 单摆法测重力加速度的实验研究 .....	104
§ 4. 实验数据处理 .....	14	.....	104
练习题及答案 .....	17	实验 5.2 变阻器变流和分压电路的设计 .....	105
第三章 基础性实验 .....	20	实验 5.3 误差分配和实验仪器的选择 .....	106
实验 3.1 力学基本量测量 .....	20	实验 5.4 用电压补偿原理“改装”电表实验 .....	107
实验 3.2 单摆测重力加速度 .....	23	.....	107
实验 3.3 三线摆测量刚体转动惯量 .....	26	实验 5.5 测量小灯泡的伏安特性曲线 .....	108
实验 3.4 拉伸法测定金属丝杨氏模量 .....	29	实验 5.6 示波器的扩展应用 .....	108
实验 3.5 弦线驻波 .....	33	实验 5.7 半导体发光二极管基本特性的 .....	109
实验 3.6 空气声速的测量 .....	36	实验研究 .....	109
实验 3.7 电学元件伏安特性的测量 .....	40	实验 5.8 金属细丝直径的测定 .....	110
实验 3.8 模拟示波器的使用 .....	43	实验 5.9 光学实验平台自组实验探究 .....	110
实验 3.9 单臂电桥测量电阻 .....	48	实验 5.10 光敏传感器的基本特性与应用 .....	111
实验 3.10 双臂电桥测量低电阻 .....	52	附录 1 电磁学实验基本知识 .....	113
实验 3.11 电表改装与校准 .....	57	一、电磁学实验操作规程 .....	113
实验 3.12 霍尔效应 .....	60	二、电磁学实验常用仪器简介 .....	113
实验 3.13 分光计测量三棱镜顶角 .....	64	附录 2 辅助工具及软件处理实验数据 .....	117
实验 3.14 双棱镜干涉测波长 .....	69	.....	117
实验 3.15 牛顿环 .....	72	一、计算器的使用 .....	117
实验 3.16 光栅测定光波波长 .....	75	二、Excel 软件的使用 .....	119
第四章 综合性实验 .....	79	三、Origin 软件的使用 .....	119
实验 4.1 密立根油滴法测定电子电荷 .....	79	附录 3 实验报告范例 .....	123
实验 4.2 光电效应测普朗克常量 .....	84	.....	123
实验 4.3 弗兰克 - 赫兹实验 .....	88	.....	126

# 第一章 绪 论

## 一、物理实验课程的地位和作用

物理学是研究物质的基本结构、本质属性及其运动规律的科学。其本质是一门实验科学,物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验事实为基础,并不断受到实验的检验。物理实验不仅是物理学的基础,还在整个科学实验领域占有重要的基础地位。

在大学物理实验过程中,将人为地创造出一定的条件,按着预定的计划,以确定的顺序重现一系列过程和现象,进行探讨和研究(观察、测量并分析)。

大学物理实验课具有基础性和普遍性,是对学生进行科学实验基础训练的一门重要课程。物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,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、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。同时,它也是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的第一门实验课,是高等理工类院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

## 二、大学物理实验课程的任务

1. 培养学生的基本科学实验技能,使学生初步掌握实验科学的思想和方法,提高学生的分析能力和创新能力,培养学生发现问题、提出问题、分析问题并解决问题的科学实验能力。

2. 通过对实验现象的观测和分析,学习运用理论知识解决实验中的问题,加深对物理理论的理解。

3. 培养学生实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结合作、爱护公物的优良品德等。树立科学的辩证唯物主义世界观。

## 三、物理实验课程基本要求

1. 掌握测量误差与不确定度的基本知识,学会使用误差与不确定度来评估测量结果。

2. 学会常用的实验数据处理方法正确处理实验数据。如列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等。

3. 掌握基本物理量的测量方法。如长度、质量、时间、温度、电流、电压、电阻、磁感应强度、折射率、元电荷、普朗克常量等。

4. 掌握常用的物理实验方法。如比较法、转换法、放大法、补偿法、干涉法、衍射法等。

5. 掌握实验常用仪器的性能,并能够正确使用。如长度测量仪器、电学仪器、光学仪器等。

6. 掌握常用的实验操作技术。如零点校正、视差消除、光路共轴调整、简单的电路连接等。



## 四、物理实验课的基本程序

### 1. 实验前的预习

上课前应通过阅读实验教材或相关资料,对所做实验有个全面了解,掌握本次实验的目的,基本清楚实验所用的原理和方法,明确要测量的物理量,整理出主要的实验原理、内容步骤、注意事项。对主要仪器的功能及使用方法形成一个初步印象。真正了解本次实验“做什么、怎么做、为什么这样做”。按要求写好书面的预习报告。

预习报告内容包括:实验题目;实验目的;实验原理(简单叙述有关的物理内容,包括电路图、光路图、实验装置示意图,测量、计算所根据的公式以及公式中的各量的含义和单位);实验的主要内容、步骤;记录原始实验数据的表格;实验的注意事项。

### 2. 进行实验

提前 10 分钟进入实验室。准备好预习报告请教师检查。不要擅自动手,以免造成仪器损坏或意外事故。严格按操作要求进行操作,损坏仪器将按相关规定进行赔偿。

对照教材或预习报告熟悉仪器,了解仪器的原理及使用方法。在教师讲解后开始安装、调试仪器。及时记录观测现象及测量结果,要实事求是。有些实验条件(如温度、仪器规格等)比较重要,不要漏记。实验中遇到问题首先自己分析、处理,解决不了再问老师。数据记录在事先画好的表格中,不能使用铅笔记录原始数据。如果数据错了不要直接涂改,轻划一下,在旁边记录正确数据,留待处理数据时分析结果和误差参考用;也不要记在草稿纸等其他位置后再誊写在表格里,这样容易出错,并且也不是“原始数据”。实验课绝不以“数据完美”评定成绩,不可随意更改数据,禁止抄袭、拼凑和伪造数据。

实验完毕应及时断开电源,主动请教师审核实验数据记录。在数据正常的条件下,先整理仪器恢复到原来的陈列状态,再进行数据处理。在数据不正常的条件下,应分析实验过程,找出不正常的原因并重新进行数据测量。

### 3. 实验总结,撰写实验报告。

实验报告是实验工作的全面总结,要用简练的文字撰写。要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确。对实验中出现的问题和观察到的现象,可以进行适当的讨论,这是提高实验中的观察、分析、解决问题能力的有效方法。

实验报告的形式及内容:

(1) 要用统一的实验报告纸撰写实验报告。在课前预习时,要将实验的基本信息(如实验的名称、时间,实验者的学号、姓名,实验的原理、内容等)填写到实验报告纸上,作为实验的预习报告。

(2) 写明实验中所用的仪器(包括仪器编号、精度、等级等)、材料、工具。

(3) 简单列出实验步骤内容,不用写具体调节过程。

(4) 将实验观测的现象及原始数据记录在实验报告上,尤其当原始数据较多时必须使用表格记录数据。注意实验报告上一定要有原始数据。

(5) 处理数据的过程要包含数据处理所用的公式、数据代入过程、简单的计算过程和计算结果。作图必须使用坐标纸。

(6) 估算测量结果的不确定度。分析构成不确定度的主要因素。对已知待测量准确值的,



可将测量结果与准确值进行对比,如果误差太大(大于估算的不确定度),应分析原因,并做出合理的解释。

(7) 正确表示实验结果,结果应该包括三个部分的内容:测量结果、测量结果的置信区间范围、结果的可靠程度(准确度)。一般表示形式为:

$$N = \bar{N} \pm \Delta N, \quad p = \dots$$

其中, $\bar{N}$ 表示被测量的测量结果, $\Delta N$ 表示测量结果 $\bar{N}$ 的置信区间范围; $p$ 表示测量结果在置信区间( $\bar{N} - \Delta N, \bar{N} + \Delta N$ )的准确度。在本书实验中,置信区间 $\Delta N$ 均用扩展不确定度 $U$ 表示。“ $p = 0.95$ ”可以省略不写。

(8) 实验讨论,主要是回答思考题,对实验中遇到的异常现象给出合理的解释,以及通过本次实验的体会、收获,对实验内容方法的改进建议等。

最后,还要强调的是,准确的实验结果固然很重要,能够反映出你的实验能力,但更主要的是对实验的思想、方法认识和掌握。

本书附录3给出了一份实验报告范例,供读者参考。

## 第二章 测量、误差和数据处理

本章从实验教学的角度出发,介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等内容。所介绍的都是实验的基础知识,这些知识不仅在每一次物理实验中都要用到,而且在未来工科的专业实验中也还要用到。对这部分内容的掌握,只通过对其阅读是不能实现的,需要结合后续每一项具体实验加以运用才能牢固掌握。

### §1 测量与误差

#### 一、测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量,就是用认定为标准的同类物理量(具体体现为相应的工具或仪器),通过一定的方法,直接或间接地与待测物理量进行比较的过程。著名物理学家伽利略有一句名言:“凡是可能测量的,都要进行测量,并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的”。物理测量的对象很多,大至日、月、星辰,小到原子、分子。现在人们能观察和测量到的范围,在空间方面已小到  $10^{-14} \sim 10^{-15}$  cm,大到百亿光年,大小相差在  $10^{40}$  倍以上。在时间方面已小到  $10^{-23} \sim 10^{-24}$  s,大到百亿年,两者相差也在  $10^{40}$  倍以上。在定量地验证理论方面,也需要进行大量的测量工作。因此可以说,测量是进行科学实验必不可少的极其重要的环节。

测量分直接测量和间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的同类物理量(具体体现为相应的工具或仪器)相比较的过程。例如用直尺测量长度和用天平测物体的质量。间接测量是在直接测量的基础上,根据一定的函数关系,由一个或多个直接测量量计算出待测物理量的过程。例如测物体密度时,先测出该物体的体积和质量,再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量,大多属于间接测量。

测量的量值一般是由数字乘以相应的计量单位来表示。在物理实验中,不仅要明确测量对象,选择恰当的测量方法,正确地完成测量操作的各个步骤,还要学习误差理论和实验数据处理的基本方法,对实验测量给出完整的测量结果表述。

例如测某电阻,测量结果最后写成下式:

$$R_x = R_x \pm U = (910.3 \pm 1.6) \Omega \quad (p \approx 0.95) \quad (2.1.1)$$

完整的测量结果表述中必须包括测量所得的待测量的数值(910.3)和测量单位( $\Omega$ ),还包括扩展不确定度数值(1.6)和测量单位( $\Omega$ )及其置信概率( $p \approx 0.95$ )。必要时还要给出对测量结果有影响的相关物理量的数值(如温度、海拔等)。

测量对象、测量单位、测量方法和测量不确定度被称为测量过程的四要素。

## 二、误差

从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量过程中,由于测量仪器、测量方法、测量条件以及测量人员的水平等因素的局限,不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同,我们所测得的只能是某物理量的近似值。也就是说,任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值,将其称为该测量值的测量误差,简称“误差”,误差的大小反映了测量的准确程度。测量误差的大小可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示:

$$\begin{aligned} \text{绝对误差} &= \text{测量值} - \text{真值} \\ \text{相对误差 } E &= \frac{|\text{测量的绝对误差}|}{\text{被测量真值}} \times 100\% \end{aligned}$$

测量总是存在着一定的误差,但实验者应该根据要求制订或选择合理的测量方案和仪器。不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好;环境条件在恒温、恒湿方面越稳定越好;总测量次数越多越好。一个合格的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的实验结果。要做到既保证必要的实验精度,又合理地节省人力与物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中,为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

## 三、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从误差的来源和性质上可分为“系统误差”和“随机误差”两大类。

### (一) 系统误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,这类误差称为系统误差。系统误差的来源大致有以下几种。

(1) 理论公式的近似性:例如单摆的周期公式  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$  成立的条件之一是摆角趋于零,而在实验中,摆角为零的条件是不现实的。

(2) 仪器结构不完善:例如温度计的刻度不准、天平的两臂不等长、示零仪表存在灵敏阈等。

(3) 环境条件的改变:例如在 20℃ 条件下校准的仪器拿到 -20℃ 环境中使用。

(4) 测量者生理心理因素的影响:例如记录某一信号时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特点是恒定性,不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。能否用恰当的方法发现和消除系统误差,是测量者实验水平高低的反映。没有普遍适用的消除系统误差的方法,只能根据实验经验的积累对具体问题作具体的分析与处理。

### (二) 随机误差

#### 1. 随机误差的概念

随机误差是指具有如下性质的测量误差:在相同条件下,多次测量同一物理量,其测量误差

的绝对值和符号以不可预知的方式发生变化。这种误差是由实验中多种因素的微小变动而引起的,这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生涨落性的变化,这些变化量就是各次测量的随机误差(旧称偶然误差)。随机误差的出现,就某一次测量来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对一个量进行足够多次的测量,则会发现随机误差是按一定的统计规律分布的。最常见的规律是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值很大的误差在没有人有失误、错误的情况下通常不出现。并且这一规律在测量次数越多时表现得越明显。这就是一种最典型的统计分布规律——正态分布规律。

## 2. 算术平均值

尽管待测物理量的真值是客观存在的,但由于误差的存在,得到真值的愿望仍不能实现,我们只能估算其真值 $\mu$ 。在不计系统误差的条件下,根据随机误差的特点,可以证明如果对待测物理量测量了相当多次后,其算术平均值就是接近真值 $\mu$ 的最佳值。如对物理量 $x$ 测量 $n$ 次,每一次测量值为 $x_i$ ,则算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \quad (2.1.2)$$

用平均值作为待测物理量的估计值可以一定程度上减小随机误差的影响,但是只有测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,平均值才等于随机变量分布的期望值(即真值)。

## 3. 实验标准偏差

随机误差使测量值 $x_i$ 具有一定的分散性,测量值的分散性用测量值的标准差——实验标准偏差 $s(x)$ 表征,可根据贝塞尔公式算出

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.1.3)$$

$s(x)$ 的值直接反映了随机误差的特征; $s(x)$ 大表示测量值很分散,随机误差分布范围宽,测量的精密度低; $s(x)$ 小表示测量值很密集,随机误差的分布范围窄,测量的精密度高。

由于算术平均值是测量结果的最佳估计值,最接近真值,因此算术平均值 $\bar{x}$ 对真值的离散程度也是一个重要的物理量,称为算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $s(\bar{x})$ 。误差理论可以证明 $s(\bar{x})$ 为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.1.4)$$

上式说明,算术平均值的标准偏差是 $n$ 次测量中测量值标准差——实验标准偏差 $s(x)$ 的 $1/\sqrt{n}$ ,显然 $s(\bar{x})$ 小于 $s(x)$ 。从上式中可以看出,当 $n$ 为无穷大时, $s(\bar{x})=0$ ,即测量次数无穷多时,平均值就是真值。

## (三) 系统误差和随机误差的关系

系统误差和随机误差的区别不是绝对的,在一定条件下,它们可以相互转化。比如物理天平称量的砝码误差,对于制造厂家来说,它是随机误差,对于使用者来说,它又是系统误差。又如测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当作系统误差,又可以当作随机误差。有时系统误差和随机误差混在一起,也难以严格加以区分。例如测量者使用仪器时的估读

误差往往既包含有系统误差,又包含有随机误差。这里的系统误差是指他读数时总是有偏大或偏小的倾向,随机误差是指他每次读数时偏大或偏小的程度又是互不相同的。

## § 2 测量的不确定度和测量结果的表示

### 一、测量不确定度的概念

测量误差存在于一切测量中,由于测量误差的存在而对待测量值不能确定的程度即为测量的不确定度。一个完整的测量结果不仅要标明其测量值大小,还要标出测量值的不确定度。

目前国际上已普遍采用不确定度来表示测量结果的误差。我国从1992年10月开始实施的《测量误差及数据处理技术规范》中,也规定了使用不确定度评定测量结果的误差。

### 二、不确定度的简化评定方法

近年来,在国内工科院校物理实验教学中,普遍采用一种简化的、具有一定近似性的不确定度评定方法。这一方法比较接近于我国的《测量误差及数据处理技术规范》及其规范解说精神,评定方法要点如下:

#### 1. 结果表示中采用扩展不确定度 $U$

扩展不确定度也称报告不确定度、范围不确定度、总不确定度。实验教学中扩展不确定度一词常简称为不确定度。式  $X = X \pm U$  表示待测量值(真值)位于区间  $(X-U, X+U)$  内的可能性(概率)大于或等于95%。

#### 2. 扩展不确定度 $U$ 分为 $U_A$ 和 $U_B$ 两类分量

扩展不确定度  $U$  从评定方法上分为两类分量:A类分量  $U_A$  是多次重复测量时用统计学方法计算的分量;B类分量  $U_B$  是非统计方法评定的分量。这两类分量用方和根法合成,即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.2.1)$$

#### 3. A类分量 $U_A$ 的计算

$U_A$  由实验标准偏差  $s(x)$  乘以因子  $t/\sqrt{n}$  来求得

$$U_A = \frac{t \cdot s(x)}{\sqrt{n}} \quad (2.2.2)$$

式中  $s(x)$  是用贝塞尔公式(2.1.3)算出的实验标准偏差。测量次数  $n$  确定后,因子  $t/\sqrt{n}$  由表2.2.1查出。

表 2.2.1 计算 A 类不确定度的因子表 ( $p=0.95$ )

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	15	$\geq 100$
$\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$	2.480	1.590	1.240	1.050	0.926	0.834	0.770	0.715	0.553	$\leq 0.139$

续表

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	15	$\geq 100$
$\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$ 的近似值	2.5	1.6	1.2	5 < n ≤ 10, 概率 p > 0.95 时, 简化取 ≈ 1					$\approx \frac{2}{\sqrt{n}}$	

表 2.2.1 中的  $p$  表示概率。(2.2.2) 式的导出过程比较复杂, 它本来还要求随机误差满足一定的分布规律。在要求不太高的教学实验和测量中, 一般都可直接运用(2.2.2) 式计算。量值  $x$  取  $n$  次测量的平均值  $\bar{x}$  后, 当系统误差为零时, 真值位于区间  $(X-U, X+U)$  内的可能性即概率约 95%。换句话说, 平均值与真值之差在  $-U$  到  $U$  之间的概率约 95%。

本实验课程中的多数实验, 测量次数  $n$  通常大于 5, 且不大于 10, 因子  $t/\sqrt{n} \approx 1$ , 所以 A 类不确定度  $U_A$  可近似取标准偏差  $s(x)$  的值

$$U_A = \frac{t \cdot s(x)}{\sqrt{n}} \approx s(x), \quad 5 < n \leq 10 \quad (2.2.3)$$

(2.2.3) 式是限定条件下的简化处理。在限定条件不满足的情况下用查表 2.2.1 所得因子计算(2.2.2) 式。

### 三、不确定度的 B 类分量

不确定度的 B 类分量  $U_B$  是用非统计方法计算的分量, 如仪器误差等。不确定度的 B 类分量  $U_B$  在本教程中可简化用仪器标定的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$  来表述, 即不确定度的 B 类分量  $U_B$  取仪器标定的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$ , 某些常用实验仪器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$  见表 2.2.2。

表 2.2.2 某些常用实验仪器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$

仪器名称	量程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150 mm	1 mm	$\pm 0.10$ mm
	500 mm	1 mm	$\pm 0.15$ mm
	1 000 mm	1 mm	$\pm 0.20$ mm
分光计	360°	1'	$\pm 1'$
钢卷尺	1 m	1 mm	$\pm 0.8$ mm
	2 m	1 mm	$\pm 1.2$ mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	$\pm 0.02$ mm
		0.05 mm	$\pm 0.05$ mm
螺旋测微器(千分尺)	0~25 mm	0.01 mm	$\pm 0.004$ mm
电表( $\beta$ 级)			量程 $\times\beta\%$
数字仪表			取变化的最小步长

注:  $\Delta_{\text{仪}}$  的值在具体的实验中因仪器的实际情况可能有所不同。

## 四、测量结果

### (一) 测量结果的表示

若用不确定度表征测量结果,则需写成下列标准形式:

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm U \\ U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} \quad (2.2.4)$$

式中 $\bar{x}$ 为多次测量的平均值, $U$ 为扩展不确定度, $U_r$ 为相对不确定度.扩展不确定度 $U$ 由A类不确定度 $U_A$ 和B类不确定度 $U_B$ 采用“方、和、根”合成方式得到:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.2.5)$$

(2.2.2)式和(2.2.5)式是实验中估算不确定度经常要用到的公式。

### (二) 直接测量的不确定度计算

#### 1. 单次测量

有以下三种情况之一出现时,可以采用单次测量。

- (1) 仪器精度较低,偶然误差很小,多次测量读数相同,不必进行多次测量;
- (2) 对测量的准确程度要求不高,只测一次就够了;
- (3) 因测量条件的限制,不可能多次重复测量。

单次测量时可以简单地取

$$U = \Delta_{\text{仪}}$$

#### 2. 多次测量

多次测量时,不确定度可按下面的过程进行计算。

- (1) 修正已知的系统误差,得到测量值(如螺旋测微器必须消除零误差) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ;

- (2) 求出测量值的算术平均值  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$ ;

- (3) 根据实验标准偏差确定 $U_A$ ,  $5 < n \leq 10$ 时取  $U_A = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$ ;

- (4) 根据仪器标定的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 确定 $U_B$ ,即 $U_B = \Delta_{\text{仪}}$ ;

- (5) 由 $U_A$ 、 $U_B$ 计算合成不确定度 $U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$ ;

- (6) 计算相对不确定度 $U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$ ;

- (7) 给出测量结果:  $\begin{cases} x = \bar{x} \pm U \\ U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$

**例 2.1** 在室温 23 °C 下,用共振干涉法测量超声波在空气中传播时的波长 $\lambda$ ,数据见表 2.2.3,试用不确定度表示测量结果。



表 2.2.3 测声波波波长数据表

$n$	1	2	3	4	5	6
$\lambda/\text{cm}$	0.687 2	0.685 4	0.684 0	0.688 0	0.682 0	0.688 0

解 由(2.1.2)式,波长  $\lambda$  的平均值为

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \lambda_i = 0.6858 \text{ cm}$$

由(2.1.3)式,波长不确定度的 A 类分量

$$U_A(\lambda) = s(\lambda) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{6-1}} = \sqrt{\frac{2.9 \times 10^{-5}}{5}} \text{ cm} = 0.0024 \text{ cm}$$

波长不确定度的 B 类分量

$$U_B(\lambda) = \Delta_{\text{仪}} = 0.002 \text{ cm}$$

由(2.2.1)式则波长的合成不确定度

$$U(\lambda) = \sqrt{U_A^2(\lambda) + U_B^2(\lambda)} = \sqrt{0.0024^2 + 0.002^2} \text{ cm} = 0.0031 \text{ cm} \approx 0.004 \text{ cm}$$

(取 1 位,只进不舍,具体见有效数字位数的确定部分)

波长的相对不确定度

$$U_r(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{\lambda} \times 100\% = \frac{0.0031}{0.6858} \times 100\% = 0.45\%$$

最后测量结果为

$$\begin{cases} \lambda = (0.686 \pm 0.004) \text{ cm} \\ U_r(\lambda) = 0.45\% \end{cases}$$

### (三) 间接测量不确定度的计算

#### 1. 间接测量不确定度的传递

间接测量量是由直接测量量根据相关的数学公式计算出来的。因此,直接测量量的不确定度就必然影响到间接测量量,这种影响的大小也可以由相关的数学公式计算出来。

设间接测量所用的数学表达式

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (2.2.6)$$

式中的  $N$  是间接测量量; $x, y, z, \dots$  是互相独立的直接测量量;设  $x, y, z, \dots$  的不确定度分别为  $U(x), U(y), U(z), \dots$ 。它们必然影响间接测量量,使  $N$  值也有相应的不确定度  $U(N)$ 。

由于不确定度都是微小的量,相当于数学中的“增量”,因此间接测量的不确定度的计算公式与数学中的全微分公式基本相同。不同之处是:① 要用不确定度  $U(x)$  等替代微分  $dx$  等;② 要考虑到不确定度合成的统计性质,一般是用“方、和、根”的方式进行合成。因此,在普通物理实验中用以下两式来计算不确定度

$$U(N) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot U^2(x) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot U^2(y) + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot U^2(z) + \dots} \quad (2.2.7)$$

$$U_r(N) = \frac{U(N)}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 \cdot U^2(x) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 \cdot U^2(y) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 \cdot U^2(z) + \dots} \quad (2.2.8)$$

所有函数都可以用(2.2.7)式来计算,如果函数关系是积商形式,则使用(2.2.8)式计算更便捷。

2. 间接测量不确定度的计算一般按以下过程:

(1) 先求出各直接测量量的不确定度  $U(x), U(y), U(z), \dots$ ;

(2) 依据函数关系  $N=f(x, y, z, \dots)$  通过(2.2.7)式或(2.2.8)式求出  $U(N)$  的表达式;

(3) 代入相应数据计算  $\bar{N}, U(N), U_r(N)$ ; 亦可用表 2.2.4 所列传递公式, 直接计算  $U(N)$  或  $U_r(N)$ ;

(4) 最后实验结果表示为: 
$$\begin{cases} N = \bar{N} \pm U(N) \\ U_r(N) = \frac{U(N)}{\bar{N}} \times 100\% \end{cases}$$

表 2.2.4 常用函数的不确定度传递公式

测量关系	不确定度传递公式
$N = x + y$	$U(N) = \sqrt{U^2(x) + U^2(y)}$
$N = x - y$	$U(N) = \sqrt{U^2(x) + U^2(y)}$
$N = kx$	$U_r(N) = \frac{U(x)}{x}$
$N = \sqrt[k]{x}$	$U_r(N) = \frac{1}{k} \frac{U(x)}{x}$
$N = xy$	$U_r(N) = \sqrt{U_r^2(x) + U_r^2(y)}$
$N = \frac{x}{y}$	$U_r(N) = \sqrt{U_r^2(x) + U_r^2(y)}$
$N = \sin x$	$U(N) =  \cos x  U(x)$
$N = \ln x$	$U(N) = \frac{U(x)}{x}$

从表 2.2.4 可知, 测量函数关系式为加减法时, 用各自不确定度的平方和; 乘除法时, 用各自相对不确定度的平方和。同时请注意都取正号。

**例 2.2** 已知金属环内径  $D_1 = (2.880 \pm 0.004)$  cm, 外径  $D_2 = (3.600 \pm 0.004)$  cm, 高度  $H = (2.575 \pm 0.004)$  cm, 求金属环的体积, 并用不确定度表示实验结果。

**解** 金属环的体积

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) H = \frac{\pi}{4} (3.600^2 - 2.880^2) \times 2.575 \text{ cm}^3 \approx 9.436 \text{ cm}^3$$

金属环的体积的不确定度为

$$U(V) = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D_2}\right)^2 U^2(D_2) + \left(\frac{\partial V}{\partial D_1}\right)^2 U^2(D_1) + \left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)^2 U^2(H)}$$