

DAXUE
WULI
SHIYAN

大学

物理实验

主编 周晓明

参编 於黄忠 贝承训 梁海生 彭健新 谢汇章
马在光 田仁玉 刘雪梅 高亚妮 王朝阳



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书是在倪新蕾主编的《大学物理实验》基础上,结合华南理工大学物理实验中心教师多年来物理实验教学实践经验和改革成果,按照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成的。主要内容包括物理实验的基本方法、基础性实验、综合应用性实验以及设计性实验,涵盖力学与热学实验、电磁学实验、光学实验、现代工程技术与信息处理综合实验等。本书侧重于对学生科学实验素质的培养,注重各实验之间的关联与衔接,突出物理学处理问题的思想精髓,力求在物理实验中渗透现代科研方法,其中许多实验含有“预习提示”和“讲座与拓展”部分,以利于学生自主研究性学习与创新训练,完成由物理实验学习向科研开发设计的过渡。

本书可作为高等学校理工科各专业《大学物理实验》课程的教材和参考书,也可作为学生开展课外科技活动、实验竞赛培训的参考用书,对于相关专业技术人员也具有一定的实用性。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/周晓明主编. —广州:华南理工大学出版社,2012.2
ISBN 978-7-5623-3603-7

I. ①大… II. ①周… 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(2012)第 009991 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail:scutc13@scut.edu.cn <http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑:欧建岸

印刷者:广东省农垦总局印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16 印张:27.75 字数:560 千

版次:2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

印数:1~5 000 册

定价:42.50 元

版权所有 盗版必究

前 言

大学物理实验是一门面向理工类各专业学生开设的公共基础课,是大学生进行系统实验技能训练的开端,它具有知识渗透性强、技术涉及面广、技能可迁移度高等优势,在提高学生科学实验素质、培育学生创新能力方面,具有不可替代的重要作用。

随着教育形势的变化,大学物理实验教学目标必然要进行相应的调整。在近几年的“985”建设中,我校增开了一批运用现代科技新技术、新方法的综合性实验,对很多陈旧过时的仪器设备进行了更新换代。为了适应教学改革发展的需要,依据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),编者在原有2005年版本《大学物理实验》(倪新蕾主编)基础上进行了深化和整合。本书注重各实验间的关联与衔接,避免实验项目的简单罗列,按照物理实验基本方法、基础性实验、提高性实验的教学序列展开,力求形成具有一定逻辑结构的教学体系。其中大多数实验新增了“预习提示”、“讲座与拓展”部分,以利于学生自学与自主创新性训练。为了扩大适用范围,对于一些典型实验给出了多种方法和多种仪器组合,供不同高校视自身情况选择使用。在数据处理方面,采用了现代误差理论以及不确定度表示体系的基本概念,由国际权威组织制定的《测量不确定度指南》为标准来阐述,达到与国际标准表述接轨。

本教材共分七章,由周晓明主编。参加编写的教师及其分工如下:周晓明(前言、绪论、第1章、第2章、实验3.4、5.3、6.2、6.4、6.6、6.8、6.9、6.16、6.17、6.18);於黄忠(实验4.1、6.5、6.7、6.13、6.15、6.21、6.22、6.24);贝承训(实验4.2、4.6、4.7、5.1、5.2、5.4、6.12、6.19);梁海生(第7章);彭健新(实验3.6、4.3、4.4、6.1)、谢汇章(实验3.3、6.10、6.20、6.26);马在光(实验3.2、3.5、4.5);田仁玉(实验6.11、6.25);刘雪梅(实验3.1、6.23);高亚妮(实验6.3、6.14);王朝阳(实验5.5)。

实验教学是一项集体性工作,本教材凝聚了全体任课教师长期教学实践经验成果,多数实验题目都含有许多老一辈教师如倪新蕾、温坤麟、陈明光等老师的贡献。同时,也广泛参阅了兄弟院校的有关资料,从中获益匪浅,在此表示衷心感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不妥之处敬请批评指正。

编 者
2012年1月
于华南理工大学

目 录

绪论	1
第一篇 物理实验方法论	4
第1章 不确定度与实验数据处理	4
第2章 物理实验的基本方法、基本技术和常用仪器	30
第二篇 基础物理实验	61
第3章 力学与热学实验	61
实验 3.1 拉伸法测定杨氏模量	61
实验 3.2 液体粘滞系数的测量及其温度特性研究	66
实验 3.3 拉脱法测定液体表面张力系数	76
实验 3.4 弯曲法测定杨氏模量	82
实验 3.5 线膨胀系数的测定	89
实验 3.6 应用多普勒效应测量声速	95
第4章 电磁学实验	108
实验 4.1 PN 结正向电压温度特性研究	108
实验 4.2 用电流场模拟静电场、温度场	114
实验 4.3 惠斯登电桥测电阻	120
实验 4.4 非平衡电桥电压输出特性研究	130
实验 4.5 用电位差计校准毫安表级别	139
实验 4.6 模拟示波器的使用	145
实验 4.7 数字示波器的使用	157
第5章 光学实验	165
实验 5.1 薄透镜焦距的测定	165
实验 5.2 偏振光特性研究	170
实验 5.3 光的等厚干涉现象	176
实验 5.4 光的衍射	183
实验 5.5 分光计的调整与使用	187

第三篇 提高性物理实验 196

第6章 综合性实验 196

实验 6.1 电脑控制弦音计	196
实验 6.2 磁阻效应	202
实验 6.3 霍尔效应法测磁场	209
实验 6.4 共振法测定材料的杨氏模量	216
实验 6.5 铁磁物质的磁滞回线研究	224
实验 6.6 双光栅测量微弱振动位移	230
实验 6.7 交流电桥的原理和设计	236
实验 6.8 超声波在介质中的传播速度的测量	244
实验 6.9 物质旋光率的测量	250
实验 6.10 物质磁化率的测量	257
实验 6.11 费米—狄拉克分布的实验测量	263
实验 6.12 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	269
实验 6.13 传感器实验	276
实验 6.14 椭偏仪测量薄膜的厚度和折射率	286
实验 6.15 光栅特性及光波波长的测定	294
实验 6.16 光电效应与普朗克常数的测定	300
实验 6.17 弗兰克—赫兹实验	305
实验 6.18 超声光栅及其应用	310
实验 6.19 全息照相	317
实验 6.20 阿贝成像原理与空间滤波	323
实验 6.21 密立根油滴实验	331
实验 6.22 气体等离子体参量的测量	339
实验 6.23 光谱测量与光谱分析	348
实验 6.24 太阳能电池特性测试	358
实验 6.25 磁阻传感器与地磁场	363
实验 6.26 RLC 电路的稳态特性	369

第7章 设计性实验 378

实验 7.1 自组显微镜和望远镜	382
实验 7.2 全息光栅的制作和参数测量	385
实验 7.3 多用电表的改装与调试	388
实验 7.4 非线性元件的特性研究	394

实验 7.5	温差测量装置的设计与调试	397
实验 7.6	物质光谱的定性分析和三棱镜折射率随光谱波长的变化规律 研究	399
实验 7.7	弱电流(电压)的测量	402
实验 7.8	小功率交流电路的功率测量	406
实验 7.9	转动速度的测量	409
实验 7.10	液面位置的测量和控制	411
实验 7.11	示波器在电磁测量中的应用	413
实验 7.12	表头参数的测定	416
实验 7.13	微细线径的测量	418
实验 7.14	钠光 D 双线波长差的测定	421
实验 7.15	里德伯常数的测定	423
实验 7.16	电容、电感量的测量	425
附表 1	中华人民共和国法定计量单位	427
附表 2	基本物理常量数据表	428
参考文献		433

绪 论

物理学从本质上来说是一门实验科学。在物理学的建立过程中,物理实验一直承担着开山斧和试金石的职能,许多重大理论的突破得益于物理实验探索。作为一种常用研究方法,物理实验被广泛应用于自然科学和工程技术的各个领域,发挥着日益重要的作用。

物理实验是高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课,是学生进入大学后系统地学习实验方法和实验技能的开端,同时,在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面也起着潜移默化的作用。因此,学好物理实验对于高等理工院校的学生来说是十分重要的。

一、物理实验课的任务

根据国家教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的规定,物理实验课的具体任务是:

(1)培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的科学实验能力。其中包括:

- ①能够自行阅读实验教材和资料,做好实验前的准备;
- ②能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;
- ③能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;
- ④能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;
- ⑤能够完成简单的设计性实验。

(2)培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度、积极主动的探索精神,具有遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

(3)通过对物理实验现象的观察、分析及对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。其中包括:

- ①掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力;
- ②掌握基本物理量的测量方法;
- ③了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用;
- ④掌握实验室常用仪器的性能,并能正确使用;
- ⑤了解在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术。

二、物理实验课的主要教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验操作和测量的一项实践活动,要完成一个实验,必须遵循以下三个环节。

(一) 课前预习

课前有效的预习是实验能否取得主动的关键。实验前学生必须预习实验教材和仪器说明书等有关资料,明确实验目的,基本弄清实验原理和实验内容,并对测量仪器和测量方法有所了解,在此基础上写出实验预习报告。报告内容包括:实验名称、实验目的、实验仪器、简要实验原理和实验记录表格。设计性实验还要求学生课前自拟实验方案、数据表格等。

(二) 实验过程(调整实验装置,进行测量记录)

操作和测量是实验教学的主要环节。学生进入实验室后应认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解。开始实验时应先检查仪器设备并简单练习操作,待基本熟悉仪器性能和使用方法后才开始进行实验测量。在实验过程中,要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据。要学会分析和排除实验故障,若发现问题又无法解决时,应及时向教师(或实验管理人员)报告,由教师(或实验管理人员)协助处理。仪器设备调整、操作及数据的测量和记录,是科学实验的基本功。实验记录内容一般应包括:

(1) 与实验条件有关的物理量(如室温、气压、相对湿度等)。

(2) 仪器设备型号、精度等级、允许误差及量程等。

(3) 每次测量的物理量数值、有效数字和单位等原始数据,应如实地记录在表格上。不要用铅笔记录原始数据而留有涂抹的余地,若发现记录数据有问题,可以划掉或再测量,但绝不允许抄袭或篡改实验数据。

实验完毕,将记录数据交指导教师审查签名,整理好实验仪器后离开实验室。

(三) 课后总结

实验后要对实验数据及时进行处理,并写出完整的实验报告。实验报告是实验工作的总结,要求用统一印刷的实验报告纸书写,字体工整,文理通顺,数据齐全,图表规范,结论明确,纸面整洁。实验报告的格式和内容如下:

(1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器(注明型号和精度等级)。

(4) 实验原理:简要叙述实验原理、计算公式、实验电路图或光路图。

(5) 实验内容和主要步骤:简要写出实验内容、步骤和实验注意事项。

(6) 数据记录与处理:将原始记录数据转记于实验报告上(签名的原始数据也应附在报告上,以便教师检查),按照实验要求计算测量结果,该作图的要作图,计

算要遵循有效数字的运算规则,用不确定度评估测量结果的可靠性。

(7)结果与讨论:要明确给出实验测量结果,并对结果进行讨论(如实验中观察到的现象分析、实验中存在的问题讨论、回答思考题等)。也可以对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

三、实验室规则

(1)学生进入实验室需带上记录实验数据的表格,课前应完成指定的预习内容,经教师检查同意后方可进行实验。

(2)遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

(3)使用电源时,务必经过教师检查线路后才能接通电源。

(4)爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,如有损坏,照章赔偿。公用工具用完后应立即归还原处。

(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)实验报告应在实验后两周内交实验指导教师批改。

第一篇 物理实验方法论

第1章 不确定度与实验数据处理

物理实验离不开物理量的测量。在测量过程中,由于任何测量方法、测量仪器、测量环境和测量人员的观察力等都不可能做到绝对精确,使得测量不可避免地伴随有误差。分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,这是物理实验中必不可少的一个重要环节。没有测量误差的基本知识,就无法获得正确的测量值,无法正确评价测量结果的可靠性;不会处理实验数据或者处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量误差、不确定度的基本知识和常用的实验数据处理方法。

1.1 测量和测量误差

一、测量及其分类

进行物理实验,最重要的就是把要了解的物理量通过实验方法用仪器测量出来。测量就是在一定条件下使用具有计量标准单位的计量仪器对被测物理量进行比较,从而确定被测量的数值和单位。例如,物体长度的测量,可以用具有标准单位标度的米尺与之进行比较而得到其数值和单位。

按获得测量结果的手段不同,可将测量分为直接测量和间接测量。直接测量是使用仪器或量具,直接测得被测量的量值的测量。由直接测量所得的物理量,称为直接测量量。例如,用米尺测量物体的长度,用天平测量物体的质量,用秒表测量物体运动的时间,等等,都是直接测量。间接测量是通过直接测量量,再根据某一函数关系把待测量计算出来的测量。由于这些待测量还没有直接测量的仪器,需要用间接的方法获得,所以这类测量称为间接测量。例如,用单摆测量某地的重力加速度 g ,是根据直接测得单摆的摆长 l 和周期 T ,再通过单摆公式

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

把重力加速度 g 计算出来。 g 称为间接测量量。

按测量条件的异同,测量还可以分为等精度测量和不等精度测量。若对同一个物理量的多次测量都是在相同条件(包括测量方法、使用的仪器、外界环境条件和观察者都不变)下进行的,称为等精度测量;否则,称为不等精度测量。

二、测量误差及其分类

(一) 真值、约定真值

任何被测量在特定条件下都具有客观存在的确定的真实量值,通常称为该物理量的真值,记作 μ 。测量的任务就是要把真值找出来。但在实际测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件、实验者等种种因素的影响,所有的测量值都不可能是待测量的真值。真值一般是不知道的,也是无法测得的,但在以下情况下可以找到近似真值和理论真值(称为约定真值):

①由国际计量会议约定的值(或公认的值)可以作为近似真值,如基本物理常数、基本单位标准。

②由高一级仪器校验过的计量标准器的量值,也可以作为近似真值。这些高级标准器都是经过逐级校对和各级计量检定系统核准的。

③理论真值是指由理论计算所得的量值,如三角形三个内角和为 180° 、圆周率 π 等。

④在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的算术平均值可作为近似真值,或称为真值的最佳估计值。

(二) 误差的定义

设某物理量 X 的测量值为 x ,真值为 μ ,则测量值 x 和真值 μ 的差定义为测量误差,记为 Δx ,即

$$\Delta x = x - \mu \quad (1-1-1)$$

误差 Δx 有正、负号。 Δx 表示测量值与真值之间的偏离大小和方向,以此衡量测量结果的准确程度。 Δx 又称为绝对误差。

在实际测量条件下,由于待测量的真值不可知,只能取对待测量作多次测量所得的多个测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为待测量的近似真值。测量值 x 的测量误差(又称偏差或残差)定义为

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (1-1-2)$$

深入分析便可发现,误差 Δx 的大小还不能完全地评价测量结果的准确程度。虽然误差绝对值相等,若被测量本身的大小不同,其准确程度显然是不同的。例如,有两个工件,其长度分别为1000mm和10mm,如果测量误差均为0.5mm,显然前者的准确程度远大于后者。为了能更好反映测量的准确程度和评价测量结果的可靠性,引入相对误差概念。相对误差定义为绝对误差与真值之比。当误差较小时,相对误差也可以近似表示为绝对误差与测量值之比。由于相对误差 E 是反映

测量的准确程度,故常用百分数来表示,即

$$E = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

(三) 误差的分类

误差的产生有多方面原因,从误差性质、来源和服从的规律来看,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

1. 系统误差

系统误差是由于实验系统的原因,在测量过程中造成的误差。其特点是误差的大小和符号总是保持恒定,或按一定规律以可约定的方式变化。系统误差来源大致有:

①仪器误差。主要是由于仪器本身的缺陷、灵敏度和分辨能力的限制产生的。

②方法误差。由于测量方法不完善以及理论公式的近似性所产生的。

③个人误差。主要是由于测量人员的分辨能力、感觉器官的不完善和生理变化、固有习惯、反应的快慢等因素引起的误差。例如,有的人在读数时总是偏大或偏小,按动秒表计时总是滞后或提前等。

④环境误差。当测量仪器偏离规定的条件使用时,例如受气压、温度、湿度、电磁场等发生变化的影响,都会使测量产生误差。

处理系统误差比较复杂,它要求实验者既要有较好的理论基础,又要有丰富的实践经验。在物理实验中,主要考虑由于仪器准确度所限和实验方法、原理不完善导致的系统误差的处理,根据系统误差的来源设法消除或减少其影响,对未能消除的未定系统误差可以作为随机误差处理。如何限制或消除系统误差没有一个普遍通用的方法,只能针对每一个具体情况采取不同的具体措施。

系统误差直接影响测量结果接近真值的程度,因此用“正确度”来表示系统误差的大小。测量结果的正确度高,则表示测量的系统误差小;反之,系统误差大。

2. 随机误差

实验时在同一条件下对某物理量进行多次测量,由于环境的起伏变化和各种不稳定因素的干扰,使每次测量值总会略有差异(即误差)。测量仪器精度越高就越能反映出这种差异。这种误差的绝对值和符号变化不定,即具有随机性,因此称为随机误差。

随机误差的来源是多方面的,主要有:

①环境和实验条件的无规则变化。如电源电压的微小波动、温度和湿度的变化、气流扰动、振动,等等。

②观测者的生理分辨能力、感官灵敏度的限制,如读电表的示值有时偏大有时偏小,按停表有时快有时慢等。

随机误差的量值和符号以不可约定的方式变化着,对每次测量值来说,其变化

是无规则的,但对大量测量值,其变化则服从确定的统计分布规律。在多次测量中,由于随机误差具有时大时小、时正时负的特点,因此多次测量值取平均值必然会抵消掉部分影响。

随机误差反映了该实验测量结果的重复性和离散性,因此用“精密度”来反映随机误差的大小。测量结果的精密度高,是指对某物理量的多次测量值重复性好,随机误差小;反之,是指多次测量值之间分散程度大,即重复性差,随机误差大。

把系统误差和随机误差综合起来考虑,我们用“准确度”表示,作为对测量结果的可靠性的总的评价。

3. 粗大误差

粗大误差是由于观测者的粗心大意,或测量条件发生突变,导致明显超出规定条件下预期的误差。粗大误差的特点是误差值很大,且无规律。实验中凡含有粗大误差的测量数据都要按照一定的规则剔除,不能用含有粗大误差的测量数据计算测量结果。显然,只要观测者细心观测,认真读取、记录和处理数据,这种粗大误差是完全可以避免的。

1.2 测量结果的误差估算

本节主要讨论测量量随机误差的估算,并且是在错误数据已经剔除,系统误差已经消除或系统误差相对于随机误差小很多的情况下进行的。

一、随机误差的统计学分布规律

大部分基础实验测量的随机误差服从正态分布(高斯分布)规律,其特点是:

- (1) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小。
- (2) 对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率大致相等。
- (3) 有界性。绝对值非常大的正、负误差出现的概率趋于零。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减少,最后趋于零。

高斯分布曲线如图 1-2-1 所示。该分布曲线的横坐标 Δ 为误差,纵坐标 $f(\Delta)$ 为误差的概率密度分布函数。分布曲线的含义是:在误差 Δ 附近单位误差范围内误差出现的概率,即误差出现在 $\Delta \sim \Delta + d\Delta$ 区间内的概率为 $f(\Delta) \cdot d\Delta$ 。

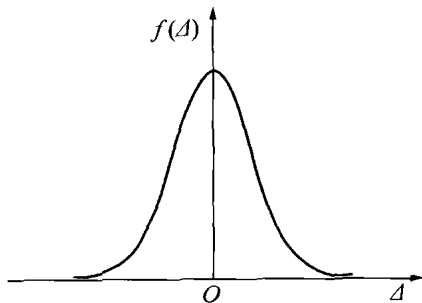


图 1-2-1 正态分布的误差概率密度分布

在某一次测量中,随机误差出现在 $a \sim b$ 内的概率应为:

$$P = \int_a^b f(\Delta) \cdot d\Delta \quad (1-2-1)$$

给定的区间不同, P 也不同。给定的区间越大,误差越过此范围的可能性就越小。显然,在 $-\infty \sim +\infty$ 内, $P = 1$,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta) \cdot d\Delta = 1 \quad (1-2-2)$$

由理论可进一步证明, $\Delta = \pm \sigma$ 是曲线的两个拐点的横坐标值。当 $\Delta \rightarrow 0$ 时, $f(0) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ 。由图 1-2-2 可见, σ 越

小,必有 $f(0)$ 越大,分布曲线中部上升越高,两边下降越快,表示测量的离散性小;与此相反, σ 越大,必有 $f(0)$ 越小,分布曲线中部下降较多,误差的分布范围就较宽,测量的离散性大。因此, σ 这个量在研究和计算随机误差时是一个很重要的特征量。 σ 称为标准误差。

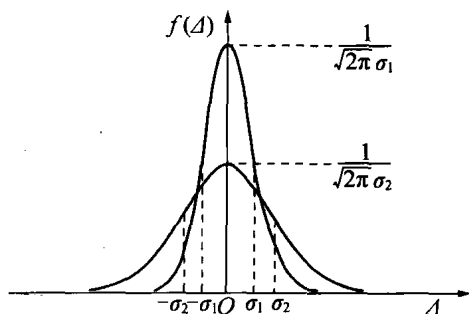


图 1-2-2 标准误差分布

二、标准误差的统计意义

理论上,标准误差由式(1-2-3)表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-2-3)$$

式中, n 为测量次数, x_i 为第 i 次测量的测量值, x_0 为被测量的真值。

该式成立的条件是测量次数 $n \rightarrow \infty$ 。某次测量的随机误差出现在 $-\sigma \sim \sigma$ 内的概率,可以证明为

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = 0.683$$

同理可求,随机误差出现在 $-2\sigma \sim 2\sigma$ 和 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 内的概率分别为:

$$P = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = 0.955$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = 0.997$$

由此可见,标准误差 σ 所表示的统计意义为:对被测量 x 任作一次测量时,误差落在 $-\sigma \sim \sigma$ 内的可能性为 68.3%,误差落在 $-2\sigma \sim 2\sigma$ 内的可能性为 95.5%。

5%, 误差落在 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 内的可能性为 99.7%。因此, 标准误差 σ 可以用来较为合理地估算测量数据列的离散程度和测量结果的可靠性。

三、随机误差的估算

众所周知, 实际测量的次数是不可能达到无穷大的, 且被测量的真值也是不可能得到的, 因此标准误差 σ 的计算只有理论上的意义。物理实验中随机误差的估算方法如下所述。

设对某一真值为 μ 的物理量 X 进行 n 次等精度测量 (无系统误差或系统误差已修正), 得到一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 测量列的标准差 σ 。定义为各测量值误差平方的平均值的正平方根, 即

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1-2-4)$$

理论上要求上式中 $n \rightarrow \infty$ 且已知真值。在实验测量过程中, 真值 μ 是未知值, 只能以测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为待测量 X 的最佳估计值, 而且大学物理实验的测量次数是有限的, 通常 3 ~ 5 次, 因此其随机误差可以用标准偏差 s_x 来处理, 即

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (1-2-5)$$

式中, $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 称为第 i 次测量的偏差或残差。标准偏差与残差的“方和根”成正比。

s_x 为测量列的标准偏差, 其物理意义是表示该测量列中的测量值的离散程度, 即测量列中的各个测量值相对于测量值的算术平均值的分布情况。标准偏差 s_x 可以用来对测量列的可靠性进行评估: s_x 值小, 测量的随机误差小, 测量列中的各个测量值分布比较集中, 测量的可靠性就大些; 反之, s_x 值大, 测量的随机误差大, 测量值分散, 测量的可靠性就差些。

被测量 X 的有限次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量。即对 X 进行不同组的有限次测量, 各组测量结果的算术平均值是不会相同的, 彼此之间有所差异。因此, 有限次测量的算术平均值也存在标准偏差。由标准差求和公式可以推得, 若算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差以 $s_{\bar{x}}$ 表示, 则它与测量列的标准偏差 s_x 之间的关系为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-6)$$

测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $s_{\bar{x}}$, 表示该测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 以一定概率落在真值附近的范围。同样, 算术平均值的标准偏差是对测量结果 $\bar{x}$ 的可靠

性的估计。当平均值的标准偏差为 $s_{\bar{x}}$ 时, 平均值 $\bar{x}$ 的误差 $\Delta\bar{x}$ 落在 $(-s_{\bar{x}}, +s_{\bar{x}})$ 区间内的概率为 68.3%。由于 $s_{\bar{x}} < s_x$, 可见平均值 $\bar{x}$ 的可靠性大于测量列中任一测量值 x_i , 且 $s_{\bar{x}}$ 值随着测量次数 n 的增大而减少(并非无限减少), 而使测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 越来越接近待测量的真值。

四、异常数据的判别和剔除

在一个测量列中, 误差超出极限值的测量数据称为异常数据。它的出现, 往往是由于某种错误或预测不到的环境突变引起的。这些异常数据会歪曲实验或测量结果。为了使测量数据能真实地反映实际情况, 需要有一个鉴别异常数据的科学标准, 用一定的方法去鉴别并把异常数据剔除。

鉴别异常数据的基本思想是以一定置信水平确定一个置信限, 凡是超过该限度的误差就认为它不属于随机误差的范围而予以剔除。剔除一次异常数据之后, 对余下的数据重新检查, 直到测量列的其他数据都在规定的置信限内, 才使用这些数据计算测量结果。

格拉布斯准则是 1960 年以后才提出的, 是公认为可靠性最高的一种异常数据取舍的准则, 简述如下:

设某一服从正态分布的测量列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 将此测量列按其数值大小由小到大重新排列得:

$$x'_1 \leq x'_2 \leq x'_3 \leq \dots \leq x'_n$$

格拉布斯导出了 $g_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x}$ 的分布: 选定一显著水平 α (亦称为危险率), α 是判为异常数据的概率, 一般取 0.05 或 0.01; 对应于某一的测量次数 n 和显著水平 α , 可得一临界值 $g_0(n, \alpha)$, ($g_0(n, \alpha)$ 数值见表 1-2-1)。若测量列中某一测量值 (通常先取最大值或最小值判断) 的 $g_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \geq g_0(n, \alpha)$, 则认为测量值 x_i 为异常数据。

表 1-2-1 $g_0(n, \alpha)$ 数值

$g_0(n, \alpha)$ $\alpha \backslash n$	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.05	1.45	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28
0.01	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55

采用格拉布斯准则判别和剔除异常数据的步骤和方法是:

①计算测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差 s_x 。

- ②根据测量次数 n 和选定的显著水平 α , 选取临界值 $g_0(n, \alpha)$ 。
- ③从测量列中选取数值最大(或最小)的测量值按 $g_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x}$ 计算 g_i 值, 并与 $g_0(n, \alpha)$ 值进行比较。若 $g_i \geq g_0(n, \alpha)$, 则 x_i 为异常数据; 反之, 为正常数据。
- ④重复① ~ ③, 直至测量列中没有异常数据。

1.3 测量不确定度表示

在报告测量的结果时, 由于不同国家和不同学科误差分析方法的不统一, 影响了科学技术成果在国际的交流与发展。因此, 国际标准化组织公布了《测量不确定度表示》1993 (E) 指南文件, 它代表了当前国际上在评定测量结果可靠性方面的约定做法。物理实验课程中正在推行用不确定度来评价测量结果的质量, 以适应国内外形势发展的需要。

本节以《测量不确定度表示》1993 (E) 指南文件为基础, 介绍有关测量不确定度表示的基础知识, 以期在物理实验这门实验技术训练的课程中得到实际的应用。

一、基本概念和专用术语

(一) 测量不确定度的基本概念

“测量不确定度”是指对测量结果不能确定的程度, 它是表征测量结果具有离散性的一个参数, 即提供测量结果的值的范围(或区间), 使被测量的值能以一定的概率位于其中。测量不确定度的大小决定了测量结果的使用价值。测量不确定度越小, 测量值的离散性就越小, 测量结果与真值越接近, 可靠性就越高, 使用价值就越大。反之, 测量不确定度越大, 测量值的离散性就越大, 测量结果与真值差别越大, 可靠性就越低, 使用价值也越小。

测量的目的是确定被测量的值。由于测量的不完善, 测量误差总是客观存在的。传统上, 将误差分为随机误差、系统误差和粗大误差。随机误差不可避免。根据抵偿性, 可适当增加测量次数以减少随机误差。系统误差如已知其来源, 可采取技术措施消除, 或者通过分析其对测量结果的影响而加以修正。显著的粗大误差可以通过科学的检验方法判别并剔除。剩下尚未认识的误差(包括减少后的随机误差、修正不完善的系统误差、不显著的粗大误差以及其他尚未认识的误差等)仍然对测量结果的不确定度有贡献。

(二) 测量不确定度表示的专用术语

(1) 标准不确定度。用标准偏差表示测量结果的不确定度, 称为标准不确定度, 用 $u(x)$ 表示。按数值的估算方法不同可以分为两类标准不确定度, 即 A 类和 B 类。

(2) A 类标准不确定度。在同一条件下多次重复测量时, 由一系列观测结果