

21世纪

大学物理实验丛书
DAXUE WULI SHIYAN CONGSHU

冯笙琴 主编

21SHIJI DAXUE WULI SHIYAN CONGSHU

一级物理实验

辛旭平 周 芹 主编



科学出版社

www.sciencep.com

· 21 世纪大学物理实验丛书 ·

一级物理实验

辛旭平 周 芹 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本套大学物理实验丛书是教学改革的结晶,它打破了传统实验教材的编写模式,按照物理实验的基础普遍性、难易程度、知识的内在联系和学生的认知水平分为四级,是为培养学生综合素质和创新能力所建立的新的教材体系。

一级实验为各专业的普及课程,适用于理、工、医、农、商等各专业;二级实验主要服务于理工类专业的学生;三级实验主要面向理科类学生;四级实验突出了物理实验与信息科学的融合,适用于理科物理类专业、信息类专业,也可作为理工科专业的选修课程。每本书都包括了力学、热学、电磁学、光学、近代物理等领域的实验,实验内容丰富,丛书各册依次逐级提高,适用于不同层次教学需要,各学校也可根据自己的实验条件选择实验项目。

本书为一级物理实验,共分五章,含有 27 个实验。

图书在版编目(CIP)数据

一级物理实验/辛旭平,周芹主编. —北京:科学出版社,2005

(21 世纪大学物理实验丛书/冯笙琴主编)

ISBN 7-03-016349-4

I. 一… II. ①辛…②周… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 117330 号

责任编辑:江 兰

责任印制:高 嵘/封面设计:张 琴

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

湖北北京山德新印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 10 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1~9 000 字数:258 000

定价:17.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪大学物理实验丛书》编委会

主 编：冯笙琴

副主编：王忠龙 匡 健

编 委（按姓氏笔画排序）：

王忠龙 冯笙琴 匡 健

朱世坤 辛旭平 陈 明

陈德彝

序

在上一世纪(20 世纪),物理学的基本概念、思维方式和应用技术被广泛应用于所有的自然科学和技术科学领域,促进了科学技术的飞速发展。物理学已经成为现代高科技的基础。

物理学是一门实验科学。当我们步入 21 世纪时,为了培养适应时代需要的有创新能力的人才,改革物理实验教学十分重要。

传统的物理实验课着重于配合理论课的学习,给学生传授知识和技能。在实验过程中,学生基本上只是完成老师规定的要求,很少有机会发挥自己的创新思维和创造能力。摆在我们面前的这本教材,在克服这一弊端,建立面向新世纪的物理实验体系方面,做出了有益的尝试,取得了可喜的成果。

这一教材新体系,按照实验的基础普遍性、难易程度、知识的内在联系和学生的认知水平分为四级。一级实验定位为基础性实验,二级实验定位为提高性实验,三级实验定位为综合、设计性实验,四级实验则是将所学得的物理知识和各学科之间,特别是和信息科学之间交叉融合的创新性实验。这样一种安排,既符合循序渐进的认知规律,又突出了创新能力的培养,将学生从具有必要的基础,通过综合设计、交叉融合,一步步引向运用所学知识,在广泛的领域开展创造性的工作。这套教材的体系是培养新世纪创新人才的全新教学体系。

承担教材编写的三峡大学是由有几十年历史的理、工、医科大学组合而成,有长期物理实验的教学实践经验,特别是 2003 年省级物理实验示范中心的成立,并把建设目标定位为:建成一流的省级物理实验示范中心,实行了对全校学生和社会的全方位开放,加快了实验教学改革进程。三峡大学物理实验示范中心在本科人才培养和社会服务中的地位日益显著,受到了广泛关注。所有这些为深层次课程体系改革打下了扎实的基础。

由冯笙琴等人编写的这套教材,是三峡大学几十年物理实验教学经验的总结,更是这几年教学改革经验的总结。这套教材是一套具有创新体系的全新实验教材,编者都是在教学第一线工作的、具有丰富经验的教师。新实验教学体系在三峡大学经过教学实践考验,不断完善,形成了符合培养新世纪人才科技素质需要的新特色。

这套教材适用面广泛,有丰富的物理实验内容和使用空间,各级实验都包含大学物理实验的各个知识范畴。不仅适应于三峡大学这样的综合性大学,也适应于广大理工科大学。相信本书的出版将对新世纪大学物理实验的改革和发展起到很好的推动作用。

刘连寿

2005 年 7 月 28 日

前 言

为适应我国科技、经济和社会发展的需要,必须积极探索新世纪高素质人才培养的规律。如何培养具有创新意识、创新精神和创新能力的人才,已成为高等教育的紧迫任务。物理实验是高校理、工科学生必修的、重要的基础课程,它在整个本科教学中培养学生的素质和能力方面占有十分重要的地位。如何面对新的形势,在物理实验教学中创造有利的环境和条件,重视学生的创新意识和创新能力的培养,是进一步深化物理实验教学改革的重要课题。

近年来,我们以三峡大学省级物理实验示范中心成立为契机,努力探索以培养创新人才为目的课程体系,并积极开展教学内容和教学方法的改革,确立了“精选基础,加强提高,理工渗透,探索创新”的课程体系改革原则,重组实验课程结构体系,确立了四级物理实验课程体系。

一级物理实验定位为基础性物理实验,主要是关于仪器的使用、基本量测量、基本实验技能的训练和基本测量方法等,涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验的一些基本实验技能和基本知识点。

二级物理实验定位为提高性实验,分别从物理实验素质提高、工程技术素质提高和物理与技术结合等三方面安排实验项目。

三级物理实验定位为综合设计性实验,涉及的内容广泛,包括物理实验与工程技术、信息科学技术、材料科学、物理前沿科学等相结合的综合设计性实验。

通过以上三级物理实验课程的学习,要求学生学会如何做好实验,掌握研究物理规律和分析实验现象的思想和方法,学会分析和评价实验结果,达到激发学生强烈的学习热情、变被动学习为主动学习的目的。并配套实行全天候开放的运行模式,由以前教师排好实验、准备好仪器、学生来做实验的状态,过渡到学生在教师指导下,自己设计实验,自己准备仪器完成实验,从而培养和提高学生的综合思维和创造能力。

四级物理实验主要安排融合各分支学科和交叉学科的综合创新性实验。特别突出了物理实验与信息科学、物理前沿科学发展的融合。部分实验项目采取项目式管理模式,题目由学生自由选择,实验时间不受限制,实验室对学生实行全方位开放。由学生自己查阅资料、设计实验方案、选择仪器、独立完成实验、撰写总结报告并口头交流,注重创新意识和创新能力的培养,为学生提供发展个性和施展才能的机会。

本套教材共四本,分别为一、二、三、四级物理实验。

在课程安排上,一级实验为各专业的普及课程,适用于理、工、医、农、商等各学科;二级实验主要服务于理工类专业的学生;三级实验主要面向理科类学生;四级实验突出了物理实验与信息科学的融合,可适用于理科物理类专业、信息类专业,也可作为一些理工科专业的选修课程。

本套实验教材在选择实验项目时,注意引入现代科技知识,用新技术和新方法改造传统实验,不断更新教学内容,保证实验项目的先进性和与时俱进的特点。我们将传感器技

术、真空技术、光纤技术、磁共振技术、X 射线技术、光谱技术、电子隧道显微技术等现代技术应用到学生实验中,让学生掌握最新的科学技术成果。

为既保证丛书的科学性、系统性,又能体现各分册的特色性,本丛书采取分层次编辑责任制,设丛书主编,成立了大学物理实验丛书编委会,并由丛书主编担任编委会主任,制定编写原则和编写大纲,全面负责丛书体系的框架结构。丛书的每个分册都设有主编,在编写过程中,各分册采取主编负责制,负责各分册的编辑和统稿工作。各分册完成编辑后,由编委会审阅,最后由丛书主编统稿。

在本丛书出版之际,要特别感谢三峡大学物理实验示范中心的所有老师,这套教材是大家共同智慧和共同辛勤劳动汗水的结晶,是三峡大学几十年物理实验教学经验的总结,更是这几年教学改革成就的体现。这套教材是一套具有创新体系的全新实验教材,编者都是在教学第一线工作的、具有丰富经验的教师。在主编和编委会的参与指导下,大家集体讨论各级教材编写方案,以具体分工、个人执笔方式完成书稿,各部分撰写人的名单附在各自撰写部分之后。尽管一些老师未能直接参加教材的编写,但也有他们多年的劳动和奉献。新实验体系在三峡大学经过多年教学实践的考验,并不断完善,形成了符合培养新世纪人才科技创新素质的新特色。

本丛书在编写过程中,得到了国家级有突出贡献的专家、国家“第一届高等学校教学名师奖”获得者——华中师范大学物理学院刘连寿教授的关心和支持,他对本丛书提出了许多指导性的建议和意见,使我们深受启迪;同时他还欣然为本丛书作序,对本丛书进行评荐,在此对他表示深深谢意!

在本丛书的编写过程中,得到了学校和理学院有关领导石亚非、马克雄、孟庆义、杨斌、王忠龙、匡健、罗从文、于林、余瑞福等同志的大力支持,在此一并感谢!

三峡大学省级物理实验示范中心是国家、湖北省和三峡大学实验教学改革产物,本丛书的出版更是这项改革成果的结晶。本丛书的编写,得到了湖北省 2004 年高等学校教学研究项目“大学物理实验教学示范中心建设的研究与实践”(项目编号:20040193)和三峡大学“新世纪本科教育教学改革工程”第三批立项项目“开放型、创新型、全方位实验教学改革方法研究与实践”(项目编号:B2005005)的资助。

冯莹琴

2005 年 7 月 28 日

目 录

序

前言

第一章 误差与数据处理的基础知识	1
§ 1 物理实验的目的和基本要求	1
§ 2 测量与误差	3
§ 3 测量不确定度	8
§ 4 有效数字	16
§ 5 发现与减小系统误差的一般方法	18
§ 6 实验数据的处理方法	21
第二章 基本物理量的测量	28
§ 1 长度、质量、密度的测量	28
§ 2 常用电学基本仪器介绍	33
§ 3 常用电学量的测量	39
§ 4 速度、加速度的测定	42
第三章 基本测量方法的应用	47
§ 1 模拟法测静电场	48
§ 2 电位差计测电动势	52
§ 3 电表的改装和校正	58
§ 4 拉伸法测定钢丝杨氏模量	65
§ 5 固体线膨胀系数的测定	70
§ 6 液体表面张力系数的测量	76
§ 7 等厚干涉及应用	79
§ 8 迈克耳孙干涉仪的调整及其应用	86
第四章 基本技能训练	92
§ 1 示波器的原理及应用	92
§ 2 分光计的调整及应用	102
§ 3 简谐振动的研究	107
§ 4 RLC 电路的稳态过程研究	112
§ 5 透镜参数的测量	121
§ 6 玻璃折射率与波长的关系	127
§ 7 电子电荷的测定	129
第五章 基本实验知识的综合应用	138
§ 1 转动惯量的测量	138

§ 2 落针法测液体的黏滞系数	143
§ 3 验证动量守恒、能量守恒定理.....	146
§ 4 弦振动的研究	150
§ 5 声速的测定	154
§ 6 气体比热容比的测量	158
§ 7 RC 时间常数的测定	162
§ 8 光电效应	165
参考文献	170
物理学常量表	171
中华人民共和国法定计量单位	172

第一章 误差与数据处理的基础知识

本章主要介绍误差和不确定度的基本概念、实验数据处理和实验结果表示等问题。这些知识不仅贯穿于物理实验的全过程,而且也是今后从事科学实验所必须了解的知识。由于内容涉及面较广,初学者在实验操作之前必须对其重要部分有所了解,在后续实验项目的实践过程中进一步有针对性地阅读本章的内容。通过反复地阅读和思考,初步明确误差和不确定度的基本概念,理解有效数字与不确定度的关系,知道不确定度的估算方法,了解减弱系统误差影响的思路,掌握列表法、作图法、逐差法和一元线性回归等常用数据处理方法,能正确完整地报道实验结果。

§ 1 物理实验的目的和基本要求

一、物理实验的目的和任务

物理学是一门实验科学。物理学发展史表明:实验是物理学发展的基础,又是物理理论的检验标准。物理理论和实验的发展,哺育着近代高新技术和边缘学科领域的成长和发展。物理实验的思想方法、仪器和技术等已经被普遍地应用在自然科学的各个领域。物理实验课程的独立设置也是应用型人才素质培养的迫切要求。

物理实验是高等院校学生进行科学实验基本训练的入门课程,也是后续其他课程实验的基础。

本课程的基本任务:

(1) 通过实验现象的观察、分析和测量,学习实验的基本知识,加深对物理规律、原理的理解,掌握物理实验的思维方式。

(2) 训练和提高学生的科学实验能力,其中包括:能够借助教材和仪器说明书,明白常用仪器的原理和性能,掌握其使用方法;善于观察实验中出现的现象,能够运用物理学理论对实验现象进行分析、判断;能正确记录和处理实验数据,分析误差来源的主要因素,撰写合格的实验报告;掌握一些基本的实验方法和技能技巧;能查阅相关资料,独立完成教学性的设计实验。

(3) 培养实事求是、严肃认真的科学作风,主动研究的探索精神,团结协作和爱护公共财物的优良品德。

二、物理实验课程开放教学的基本要求

1. 预约

根据相关要求由学生自己选择内容和时间,并办妥预约登记手续。对无故违约者,此次成绩以0分记载。特殊的病事假,可根据院学生工作办公室或医院的证明处理违约事宜。

2. 课前预习

课前预习是确保学习主动性的重要措施,也是在规定时间内能否完成实验的关键。学生应善于发挥自己的主观能动性,充分利用实验室的开放时间,进入实验室后按照具体的实验要求对照实物预习,阅读讲义和说明书,了解仪器装置的结构特点、调节或安装方法、操作规程及注意事项,相互讨论,理解实验的原理和方法,明确关键步骤及实验技巧,并认真完成预习报告。

预习报告的内容包括:① 实验名称;② 实验目的;③ 实验仪器及规格(精度等级、量程、最小分度值);④ 实验原理摘要,包括根据什么物理定律、利用何种实验方法、通过什么样的数学演变或转换、得到何种测算公式及原理示意图(电路图或光路图);⑤ 实验步骤,包括仪器装置的安装和调节程序、观察何现象、测量何物理量、何时测量、怎样测量等;⑥ 在记录纸上设计测量数据的记录表格。

3. 课堂操作

学生要有意识地养成良好的实验习惯。进实验室后,自觉遵守实验室规则,按预约的组号入坐;记录实验的时间及相关的条件(室温、相对湿度、大气压等);清点实验仪器用具,如果发现缺损或故障应及时报告老师,不允许自行调换;进一步预习讨论相关问题,并准备老师的提问;待指导老师集中讲解本实验的要求和注意事项后,方能操作。为了仪器装置的安全,有些电路的连接、光路的调节或仪器组装完毕,须经老师检查后才能通电或操作。操作中要较好地控制实验过程,仔细观察和记录实验可能发生的一切物理现象及相关条件,特别是要注意观察异常现象及其发生条件并做好记录(若出现危及仪器人员安全问题的异常,应及时切断源头后报告教师,不宜大喊大叫),与指导老师一起分析讨论其内在本质,对不能理解的问题要做上疑问记号,留待以后进一步讨论。

数据记录不允许用铅笔,不允许涂改,在需涂改处划一笔后,于旁重写。实验完毕,将仪器装置处于安全状态下,数据记录单交教师审阅,经教师认可后,再将仪器装置、座凳复原,方可离开实验室。

若仪器装置出现故障,应逐步学会自己动手排除,或留心观察教师怎样判断仪器的故障原因,以及如何解决或修复。

4. 实验报告

在规定的纸样上认真地书写有确实根据的书面报告,是学生对实验全过程进行总结、巩固、提高和深化的重要环节。

(1) 实验报告中要设计更完善、更恰当的原始数据修正量、中间量相关表格,表旁附修正量、中间量的相关公式。

(2) 要按照实验要求处理数据,处理中所有的公式、数据符号应一致,条件及必要的说明要表达确切。估算误差或不确定度,要说明各误差的来源以及误差范围的估算根据或方法。

(3) 绘制实验图线要用坐标纸。

(4) 要结合实验方法及仪器操作中的实际情况,分析影响实验结果的主要因素,提出

减弱或消除其影响的建议,对实验过程中观察到的异常现象及其物理本质要进行分析讨论。

(5) 要按照要求规范地报道实验结果(国际单位制),并回答老师指定的思考题。

(6) 实验报告要求书写字迹清楚,各部分版面设计合理、整洁,文句通顺确切,并在完成实验操作后一周内上交。

§ 2 测量与误差

一、测量

测量是将未知量与预定的标准量进行定量比较的过程和结果。为了使测量方法、结果具有一定的意义,预定的标准量或用以定量比较的仪器设备必须为人们所公认。测量分为直接测量和间接测量。

直接测量就是将待测量与基准或标准直接进行比对,从而直接读取待测量是标准量的多少倍。国际计量组织对基本物理量的计算单位都有明确规定,人们依据这些规定制成具有一定单位刻度的量具仪器或仪表,以便直接读取待测量的数值。对直接测量不仅要求读记或求得结果,还要说明误差来源,并估算出误差范围(要注明根据或估算的方法)。

二、误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都具有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观量值,称为真值。由于科学技术水平的限制,仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验理论的近似性,实验环境的不稳定性以及操作者的技能技巧和判断能力的影响等等,使测量值 x 与其真值 x_0 之间总存在差异 ϵ ,我们把这个差异 ϵ 称为量 x 的测量误差,其表达式为

$$\epsilon = x - x_0$$

通常真值是不能确知的,所以测量值的误差也不能确切知道。因此,测量的任务就是得到被测量真值的最佳估计值,对真值最佳估计值的可靠程度作出估计。为此,我们必须进一步研究误差的性质和来源,选择恰当的方法,完成这两个“估计”。测量系统和过程的所有误差源的整体效应决定了测量误差的大小。

为了认识研究的方便,根据误差的性质及其产生的原因,将测量误差分为系统误差和随机误差。下面分别讨论的前提条件是另一方对结果的影响小到可以忽略的程度。

1. 系统误差

在一定条件(指测量方法、仪器装置、操作者、环境等)下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的绝对值和符号恒定,或在条件改变时按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。

(1) 系统误差的来源主要有仪器误差、方法理论误差和操作者自身所造成的误差。

① 仪器误差:仪器结构和标准的不完善或未按确定条件使用而引起的误差。如天平的不等臂;分光计度盘的偏心差;量具的零点未对准;米尺刻度不均匀;水银温度计毛细管内径不均匀;放大器的非线性等。当在规格条件下使用时,只有仪器的基本误差;如

果供电的电压和频率等不满足要求,或温度、湿度、气压超出允许范围,即不按规定条件使用仪器就会导致新的测量误差(附加误差)。

② 方法理论误差:理论公式的近似性,或测量条件不能严格满足,或测量方法欠完善引起的误差。例如:单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 成立的条件是摆角趋于零,实际实验中却不能达到。在小角度下该公式也只是一个近似公式,还有悬线的质量不为0,摆球的体积不为0,空气的浮力和阻力等条件也不能满足,因此用该式测求 g 值,必定带来测量误差。

③ 操作者由于缺乏经验或生理心理上的特点所造成的误差。如有的人“灵敏”过度,有的人“迟钝”非凡,有些人习惯侧坐斜视等等。

(2) 系统误差按其掌握程度可分为可定系统误差和未定系统误差。

① 可定系统误差:误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差。此类系统误差一经发现,必须对测量结果加以修正。

② 未定系统误差:不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅仅知道最大误差范围(或极限误差)的系统误差。

2. 随机误差

由于测量过程中一些随机的不能控制的可变因素的起伏或被测对象本身的不稳定性,在同一条件下,对同一物理量重复测量,其测量值分布在一定范围内,每次的误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测,也无法控制,任一个测得值的误差都是随机的,这类误差为随机误差。

如果将测量次数 n 增至无穷,从整体效应上考察,发现随机误差的出现服从某种统计规律分布。随机误差分布有多种,物理实验中的随机误差通常以正态分布(也称高斯分布)来讨论。

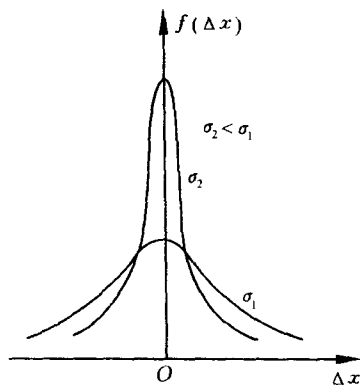


图 1-1 正态分布曲线

(1) 正态分布的特性。正态分布的概率密度函数(高斯方程)为

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中, σ 称为标准差,是随机误差 Δx 的分布函数 $f(\Delta x)$ 的特征量。不同 σ 的正态分布曲

线如图 1-1 所示。正态分布的整体效应体现了三个重要特性：

- ① 单峰性, 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的出现的概率要大。
- 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, 绝对值很大的误差出现的概率非常小。

由特性②可知, 正、负误差具有抵消性, 当 $n \rightarrow \infty$, 则 $\Delta x \rightarrow 0$, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。因此, 对随机误差的处理是采取多次测量, 用算术平均值 $\bar{x}$ 作为结果的最佳估计值, 以抵消性来减弱随机误差的影响。量 x 的最佳估计值

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

利用概率密度函数对不同的区间积分, 可求得随机误差在不同区间的概率值。例如:

$$p(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d(\Delta x) = 1$$

$$p(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = 68.3\%$$

$$p(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = 95.4\%$$

$$p(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = 99.7\%$$

可见, 随机误差落在 $\pm 3\sigma$ 外的可能性仅为 0.3%, 是正常情况下不应该出现的小概率事件, 因此一般将 3σ 称为极限误差, 即说明 $|\Delta x_i| > 3\sigma$ 时的 x_i 为坏值, 应该剔除。

(2) 有限次测量的标准差的估算。高斯方程中的 σ 是测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时的特征参量, 仅用于误差的理论研究。实际测量 n 总是有限的, 而有限次测量的随机误差遵从 t 分布。如何实现两种分布的参量间的转换? 前人的误差理论研究早已解决了这个问题。两种分布曲线如图 1-2 所示。

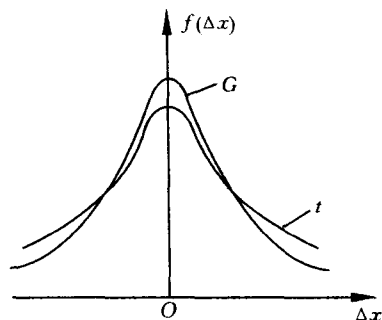


图 1-2 正态曲线与 t 分布曲线的比较

我们可首先用随机误差近似服从的正态分布的贝塞尔(Bessle)公式

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

计算测量列的标准偏差, 然后用 t_p 分布因子对 $s(x)$ 进行修正, 得到测量列的标准差

$$\sigma(x) = t_p s(x) \quad (1-3)$$

$\sigma(x)$, $s(x)$ 为任一个测量值 x_i 的标准偏差, 描述了量 x_i 相对于 $\bar{x}$ 的分散程度。 $s(x)$ 的置信概率 p 接近于高斯方程中的 σ , 因此, $\sigma(x)$, $s(x)$ 的置信概率均可取为 68.3%。

表 1-1 不同测量次数 n 对应不同置信概率下的 t_p

t_p \ p \ n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	...	∞
0.683	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	...	1.00
0.95	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.12	2.08	...	1.00
0.99	63.66	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.92	2.83	...	1.00

由表可见, 在取置信概率 $p=0.683$ 来估算标准差时, 只要等精度的测量次数多于 5 次, 可粗略认为 $t_p \approx 1$ 。

(3) 平均值标准差的估计。平均值 $\bar{x}$ 也是随机变量。若对量 x 做多组多次等精度测量, 可得到不同的 $\bar{x}_k$ ($k=1, 2, 3, \dots$)。可以证明: $\bar{x}_k$ 围绕真值 (假设系统误差为 0) 的分布也是正态分布。由最小二乘法原理可证明: 平均值是真值的最佳估计值, 因此实验中只需进行一组等精度测量, 其平均值的标准差

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} = \frac{t_p s(x)}{\sqrt{n}} = t_p s(\bar{x}) \quad (1-4)$$

式中, $\sigma(\bar{x})$, $s(\bar{x})$ 反映了平均值围绕真值的分散程度, 是平均值不可靠性的评定标准;

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

为平均值的标准偏差, 其置信概率与 $s(x)$ 相同, 均可取为 68.3%。

在计算器的版面符号上的 σ_{n-1} , σ_n 分别对应于 $s(x)$, $s(\bar{x})$ 的公式。

(4) 关于等精度测量次数 n 的选择问题。随机误差自身具有抵消效应, 由式(1-5)可知, n 越大, $s(\bar{x})$ 越小, 平均值的可靠程度将提高。但 n 并非愈大愈好, 增大 n , 测量时间就要延长, 实验条件也难以保持稳定, 很可能引入新的误差, 另外, $n > 10$ 以后, $s(\bar{x})$ 的减小缓慢, 因此一般实验取 6~10 次为佳。

3. 测量中的错误与错误数据

实验测量中出现错误, 在时间上和精神上都是损失, 我们首先要有思想准备, 防止出现错误, 其次要尽早发现错误。

防止出现错误的关键是理解实验原理和条件, 明确所测的量, 何时测? 怎样测? 知道仪器的正常操作方法。有些需要操作者同步进行的两个操作, 如看到温度计降到某一位置时读时间 (或电压)、看到时间为多少时分 (合) 闸刀等等, 应将温度计和时间尽可能放在同一视角范围内, 用眼睛瞄温度读时间的方法。但不少同学是眼看前方的温度计, 温度到某位置后, 低下头去看手中所握的时间, 从而产生了很大的同步差异。

以研究者的态度去处理问题, 就应预先分析讨论, 比较和选择恰当方法, 并认真实施。尽早发现错误, 可避免许多数据作废或重做实验。我们在动手的同时要注意动脑, 应当养

成一边观测一边分析思考的习惯。数据分析是发现错误的重要方法。

例 1.1 在用拉伸法测钢丝杨氏模量的实验中,每次加等量拉力,读取序列 $l_1, l_2, l_3, \dots$, 由于弹性限度内, $\Delta l \propto \Delta F$, 因此逐项求差: $\Delta l_{10} = l_1 - l_0, \Delta l_{21} = l_2 - l_1, \Delta l_{32} = l_3 - l_2, \dots$ 的各 Δl 应该相近, 利用这一点, 我们可判别 l_i 是否正常以及如何确定钢丝刚好拉直时的 l_0 和 m_0 。

将数据点描绘在坐标纸上, 也可直观地分析出错误数据。

对于等精度测量的一系列数据, 若有一二个值与其他值相比相差较大, 首先思考是何原因引起, 若查不出原因或无法判定, 可借助于误差理论来鉴别。这里介绍两种方法:

方法一 3σ 准则。先求出测量列的 $\bar{x}$ 和 $\sigma(x)$, 然后考察各 x_i 的偏差 $|x_i - \bar{x}|$ 是否大于 3σ , 大于 3σ 所对应的 x_i 都是坏值, 应该剔除。这种方法较粗糙, 可靠性较高的常用格罗布斯(Grubbs)判据。

方法二 格罗布斯判据。此判据需用一个与数据个数 n 相联系的系数 G_n 见表 1-2。当已知 n , 平均值 $\bar{x}$ 和标准差 $\sigma(x)$, 则正常的测量值 x_i 应满足

$$[\bar{x} - G_n \sigma(x)] \leq x_i \leq [\bar{x} + G_n \sigma(x)]$$

表 1-2 G_n 系数表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28	2.33	2.37	2.41	2.44

剔除坏值后, 对余下的数据重新求 $\bar{x}$ 和 $\sigma(x)$, 选择 G_n 并用判据再寻找坏值, 剔除后, 仿前重新判别, 直至无坏值时的 $\bar{x}$ 和 $\sigma(x)$ 才是我们需要的结果。

例 1.2 同一条件下重复测某物理量, 数据如下: 7.035, 7.025, 7.058, 7.075, 7.079, 7.070, 7.077, 7.069 (单位: mm)。试用格罗布斯判据鉴别是否有错误数据。

解 利用

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

解得

$$\bar{x} = 7.0561 \text{ mm}$$

$$\sigma(x) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.0142 \text{ mm}$$

又 $n=8$, 查 G_n 系数表, 得 $G_n=2.03$, 故

$$\bar{x} - G_n \sigma(x) = 7.027 \text{ mm}$$

$$\bar{x} + G_n \sigma(x) = 7.085 \text{ mm}$$

数据 7.025 在此范围之外, 属于错误数据, 应舍去。对余下的 7 个数据再计算, 有

$$\bar{x}' = 7.0606 \text{ mm} \quad s(x') = 0.00716 \text{ mm}$$

此时, 查 G_n 系数表有 $G_n=1.94$, 仿前计算可保留的数据范围知, 余下的 7 个数据中无错误数据, 因此 $s(x')=0.008 \text{ mm}$ 和 $\bar{x}'=7.061 \text{ mm}$ 就是我们需要的结果。如果这两个量还要参与后续运算, 则可取 $s(x')=0.0072 \text{ mm}$, $\bar{x}'=7.0606 \text{ mm}$ 。

以上这种判断方法对于非物理专业类的学生, 可以不作要求。

三、思考题

1. 随机误差、系统误差各有什么特征? 引发误差的源头上有什么区别和联系?
2. 下列情况导致的误差属于随机误差还是系统误差:
 - (1) 读数时视线与标尺面不垂直;
 - (2) 天平平衡时指针的停点重复几次都不同;
 - (3) 螺旋测微计每次测读零点值都不一样;
 - (4) 水银温度计的毛细管不均匀;
 - (5) 多次重复测量, 数字表示值的最末一位总有一些不相同。
3. 多次等精度测量的一组数据, 相互差异很小, 由此能说明测量值的误差很小吗?
4. 算术平均值作为真值的最佳估计值是针对什么样的实验条件来讲的?
5. 用 0.1mm 的游标卡尺测量某金属棒的直径多次, 测读结果完全相同, 这说明了什么? 应该如何处理?

§ 3 测量不确定度

自数学家高斯研究误差分布以来的一个世纪中, 经过无数学者的研究, 得出了多种误差表示方法及相应的理论。长期以来各国及不同学科间有不同看法和规定, 有关术语的定义也不统一, 影响了国际间的交流和各种成果的相互利用。因此, 国际标准化组织公布了《测量不确定度表达指南(GUM)》的文件, 我国也明令自 1992 年 10 月 1 日起将其作为技术规范。

一、测量不确定度的基本概念

不确定度是在误差理论的基础上发展和完善起来的。

测量不确定度(uncertainty of measurement)定义为: 表征被测量的真值所处的量值范围的评定, 是用以表述测量结果分散性的参数, 它表示了测量结果有效性的可疑程度或不可靠程度。

不确定度 U 按评定方法分为两类: A 类分量 U_A , B 类分量 U_B 。

(1) A 类分量 U_A 的估算。 U_A 是用统计方法估算的值, 并可用测量列的标准差 $s(\bar{x})$ 来表示其大小, 即

$$U_A(x) = s(\bar{x}) = t_p s(\bar{x}) \quad (1-6)$$

物理实验通常取置信概率 $p=0.683$, 则 $U_A(x) = t_{0.683} s(\bar{x})$ 为 A 类分量的标准不确定度。为简化计算, 常取 $t_{0.683} \approx 1$, 于是 A 类分量的标准不确定度可写为

$$U_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-7)$$

工程应用中通常取 $p \geq 0.95$ 的高置信概率来估算 A 类分量的不确定度, 此时 $U_A(x)$ 为 A 类分量的展伸不确定度。

(2) B 类分量 U_B 的估算。如果误差的影响仅使测量值向某一方向有恒定的偏离或