



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

Physics Experiment Course

物理实验教程

(第4版)

主编 原所佳



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

物理实验教程

(第4版)

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,山东省高等学校精品课程《大学物理实验》的主讲教材,山东省高等教育教学成果二等奖的主要研究成果。该书是在山东省高等学校优秀教材《物理实验教程》(第3版)的基础上,根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010版),总结15年来大学物理实验课程建设的成果,借鉴兄弟院校教学改革的经验编写和改编而成。全书包括绪论、实验误差理论与数据处理、物理实验中的基本测量方法和常用测量仪器的使用、基础性实验、综合性实验、设计性实验五个章节,共编辑52个实验项目。另外,书末附有国际单位制(SI)与基本物理常数等。全书内容的编写力求体现先进性和基础性统一,理论与实践相结合,注重拓宽学生知识面,发展学生个人兴趣,提高学生知识创新能力,突出基本技能和基本素质的培养,以适应时代发展的需要。

本书各章节内容及各个实验项目既相互独立,又循序渐进、承继拓展,构建了一个完整的物理实验体系。本书可作为高等理工科院校、高等职业学校和高等专科学校各专业的大学物理实验课程教学用书或参考书,也可作为实验工作者和其它科技工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程 / 原所佳主编. —4版. —北京:

国防工业出版社, 2015. 7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-118-09983-6

I. ①物… II. ①原… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031782 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 字数 652 千字

2015 年 7 月第 4 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 39.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

编 委 会

主 编 原所佳

副 主 编 王 惠 孙振翠 张 芹 裴 娟

编 者 (按姓氏笔画为序)

王 惠 王立飞 王克彦 刘中波 孙振翠

孙海波 张 芹 吴世亮 岳大光 原所佳

梁 军 裴 娟

前 言

大学物理实验是高等学校理工科各专业必修的一门重要基础实验课程,也是学生进入大学后遇到的第一门系统的实验课程。通过大学物理实验课程的学习,使学生在掌握物理实验基本知识、基本方法和基本技能的基础上,具备一定的科学实验能力和创新能力。

近年来,随着科学技术的发展,很多物理实验仪器不断创新、升级和改造,许多新知识、新技术、新方法被引入到物理实验的教学领域,加之学校新增加很多新兴专业,传统专业研究方向更加多元化。因此,与原有仪器设备和专业背景配套的大学物理实验教材必须进行修改、补充,才能满足物理实验教学实践的需要。结合我校的实际,根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,本书是在2011年出版的《物理实验教程》(第3版,国防工业出版社)的基础上补充改编而成,它集中反映了我校15年来在大学物理实验课程建设和实验室建设所取得的成果。

教材编写充分考虑地方高等院校的教学资源、学生接受能力、教学内容等方面的差异,突出因材施教的教学方法。考虑到基础物理实验的独立性和面向大学低年级学生的特点,采取由浅入深、循序渐进的方式编排教材内容,实验项目的叙述力求做到原理简明扼要,公式推导完整,数据处理规范,内容详细全面,以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导,便于学生阅读和自学。

全书共五章,主要内容为:实验误差理论与数据处理;物理实验中的基本测量方法和常用测量仪器的使用;基础性实验;综合性实验;设计性实验。与第3版相比,本书主要作了以下工作:

(1)第一章第五节“测量结果的不确定度评定”中,增加“不确定度对实验的指导意义”,介绍了不确定度对改进实验方向、合理选择实验仪器、选择测量方法和条件的指导意义。

(2)第二章“第三节力学热学实验常用仪器、第四节电磁学实验常用仪器、第五节光学实验常用仪器及光源”改编为“第三节常用基本仪器介绍”,重点介绍学生经常使用的仪器。

(3)第三章中,增加“气垫导轨上的实验、用波尔共振仪研究受迫振动、拉脱法测量液体的表面张力系数、巨磁电阻效应实验”等实验项目;改编“落球法测定液体的黏滞系数、稳态法测量橡胶板的导热系数、示波器的原理与使用、静电场的描绘、十一线板式电位差计”等实验项目。

(4)第四章中,撤销“摄影技术”等陈旧实验项目;增加“微波光学综合实验、光速的测量”等实验项目;改编“超声声速的测量、核磁共振、全息照相、光电效应及普朗克常数的测量、太阳能电池伏—安特性的测量、音频信号光纤传输实验”等实验项目。

(5)第五章中,将原第三章“用迈克耳逊干涉仪测量空气的折射率”改编成设计性实验;将第五章中“气垫导轨上物体运动的研究”由设计性实验改编成第三章基础性实验。

(6)附录中,更新了“基本物理常数”,由2006年CODATA推荐的物理和化学基本常数更新至2012年推荐的数据。考虑到常用物理实验数据来源的多样性和更新数据的困难,撤销了“密度、物质的导热系数等25个常用物理实验数据”。

本书由原所佳任主编,王惠、孙振翠、张芹、裴娟任副主编。参加本书修订编写的人员及所承担的内容:原所佳编写和改编绪论,第一章,第二章,第三章实验一至实验五及附录;王克彦改编第三章实验六;王惠编写和改编第三章实验七至实验十四;张芹编写和改编第三章实验十五至实验二十;岳大光改编第三章实验二十一;王立飞改编第三章实验二十二;孙振翠编写和改编第四章实验一至实验四;裴娟编写和改编第四章实验五、实验六、实验八、实验九;吴世亮改编第四章实验七;梁军编写和改编第四章实验十、实验十一;刘中波编写第四章实验十二;孙海波编写和改编第五章。全体编者一致认为,实验教学是一项集体工作,从实验内容的确定、实验项目的建设、实验讲义的编写,直到实验教学的完成,都是从事实验教学的教师和实验技术人员共同劳动的结果。此外,在本书编写改编过程中,张冬梅、赵娟、高尚、王帅、贺泉禧、王青等教师提出了很好的修改建议,借本书出版之际,对他们深表谢意,并铭记于心。

本书在编写过程中,参考了国内大量的文献资料,也从网络上收集了部分相关资料。对于后者,由于难以确定资料的原作者,在此先向他们表示感谢,并请原作者尽快与我们联络。正是由于如此广泛丰富的参考内容,才能为我们的学生呈现出这样一本内容充实、教学生动的教材。在此,向所有对本书做出贡献的同仁们致以深切的谢意。

由于编者水平有限,时间紧迫,本书一定有不少疏漏和错误之处,热切希望广大读者批评指正。

编者

2015年1月于济南无影山

目 录

绪论	1
第一章 实验误差理论与数据处理	5
第一节 测量与误差	5
第二节 随机误差的处理	8
第三节 系统误差的处理	14
第四节 测量不确定度的基本概念	20
第五节 测量结果不确定度的评定	24
第六节 有效数字及其运算规则	37
第七节 数据处理方法	41
练习题	50
第二章 物理实验中的基本测量方法和常用测量仪器的使用	52
第一节 物理实验中的基本测量方法	52
第二节 物理实验的基本调整和操作技术	57
第三节 常用基本仪器介绍	61
第三章 基础性实验	86
实验一 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	86
实验二 三线扭摆法测刚体的转动惯量	91
实验三 气垫导轨上的实验	96
实验四 用波尔共振仪研究受迫振动	106
实验五 液体表面张力系数的测量	114
I. 毛细管法测量液体的表面张力系数	114
II. 拉脱法测量液体的表面张力系数	117
实验六 落球法测定液体的黏滞系数	121
实验七 稳态法测量橡胶板的导热系数	124
实验八 弦振动的研究	130
实验九 示波器的原理与使用	134
实验十 静电场的描绘	148
实验十一 惠斯通电桥	154
实验十二 导体电阻率的测量	161
实验十三 十一线板式电位差计	167
实验十四 直流电表的改装与校准	172

实验十五	霍耳效应实验	179
实验十六	巨磁电阻效应实验	186
实验十七	等厚干涉	192
实验十八	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	198
实验十九	光的偏振实验	206
实验二十	光强分布的测量	214
实验二十一	分光计的调节和用光栅测定光波的波长	218
实验二十二	折射率的测量	227
第四章	综合性实验	235
实验一	密立根油滴实验	235
实验二	高温超导体电阻—温度特性的研究	242
实验三	弗兰克—赫兹实验	249
实验四	微波光学综合实验	256
实验五	动态法测量固体材料的杨氏模量	265
实验六	超声波声速的测量	271
实验七	核磁共振	276
实验八	全息照相	283
实验九	光电效应及普朗克常数的测量	288
实验十	太阳能电池伏—安特性的测量	297
实验十一	音频信号光纤传输实验	304
实验十二	光速的测量	312
第五章	设计性实验	320
概述		320
测量型设计性实验		321
实验一	单摆法测重力加速度	321
实验二	密度的测量	321
实验三	固体线胀系数的测量	322
实验四	弹簧有效质量的测量	323
实验五	温差系数的测量	324
实验六	劈尖法测量液体折射率	325
实验七	电容量的测量	325
研究型设计性实验		326
实验八	用迈克尔逊干涉仪研究空气的折射率	326
实验九	伏安特性曲线的测绘	327
实验十	小灯泡特性研究	327
实验十一	分压限流特性研究	328
实验十二	电源特性研究	328
实验十三	电桥测电阻的研究	329

制作型设计性实验.....	329
实验十四 电子温度计的制作.....	329
实验十五 自组显微镜和望远镜.....	330
实验十六 制作简易万用表.....	331
实验十七 设计楼道开关.....	333
实验十八 直流稳压电源的制作.....	334
附录 国际单位制(SI)与基本物理常数	335
参考文献	338

绪 论

物理学是研究物质运动规律及物质基本结构的科学,其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。作为人类追求真理、探索未知世界的工具,物理学是一种哲学观和方法论,它深刻影响着人类对自然的基本认识、人类的思维方式和社会生活,在人的科学素质培养中具有重要的地位。

一、物理实验课的地位和作用

物理学本质上是一门实验科学。无论是物理规律的发现,还是物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并经受物理实验的检验。例如,杨氏双缝实验对于光的波动理论,光电效应实验对于光的粒子性,电子在晶体上的衍射实验对于德布罗意的微观粒子的波粒二像性,卢瑟福的 α 粒子散射实验对于原子的核式模型等,都无不生动地说明了这一点。

科学实验是人们按照一定的研究目的,借助特定的仪器设备,人为地、可控制地模拟自然现象,对自然事物和自然现象进行精密、反复地观察和测试,以探索自然事物内部规律性的一种实践活动。这种对自然事物和自然现象有目的性、有组织性、可控制的探索活动是科学理论的源泉,也是工程技术的基础。

物理实验是科学实验的先驱。在物理学的发展过程中,人类积累了丰富的实验思想、实验方法和实验技能,创造出各种精密巧妙的仪器和设备,这些都是自然科学各学科的科学实验基础。原子能、半导体、激光、超导、空间技术、现代生命科学和技术等最新科技成果,其产生和发展都有赖于物理实验及其相关理论的建立。

大学物理实验是为高等院校理工科各专业学生设置的一门必修基础课程,是学生进入大学后,系统地接受实验方法和实验技能训练的开端。物理实验教学与物理理论教学具有同等重要的地位,二者既有深刻的内在联系和配合,又有各自独立的任务和作用。物理实验课强调实践和动手能力,对于初学者,这是一项非常细致和复杂的工作。物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、实验方法和实验手段,并且能提供综合性很强的基本实验技能训练,因此物理实验课是培养学生科学实验能力的重要基础。同时,物理实验课在培养学生严谨的治学态度、创新意识和创新能力、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它实践类课程不可替代的作用。

二、物理实验课的任务和基本要求

1. 物理实验课的任务

物理实验作为一门重要的基础课程,它包括以下几方面的任务。

(1) 培养与提高学生科学实验基本素质,树立正确的科学思想和科学方法。通过物理实

验课的教学,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。掌握误差分析、数据处理的基本理论和方法,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。

(2) 培养与提高学生创新思维、创新意识、创新能力。通过物理实验课的教学,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。通过物理实验课的教学,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,严谨认真的科学态度,不怕困难、积极主动的探索精神,以及遵守纪律、爱护公共财物、团结协作的良好品德。

2. 物理实验课教学内容的基本要求

(1) 掌握测量误差和不确定度的基本知识,能够用不确定度对直接测量和间接测量的实验结果进行评估。

(2) 掌握处理实验数据的常用方法,包括列表法、作图法、最小二乘法、逐差法等。

(3) 掌握一些基本物理量和常用物理量的测量方法,这些物理量包括长度、质量、时间、热量、温度、电流、电压、电阻、磁感应强度、电子电荷、普朗克常数、里德堡常数等。

(4) 了解常用的物理实验方法并逐步学会使用,这些实验方法包括比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法等。

(5) 掌握实验室常用仪器的性能并能够正确使用,这些仪器包括长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥和交流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光计、光谱仪、激光器、常用电源和光源等。

(6) 掌握常用的实验操作技术,这些操作技术包括零位调整、水平调整和铅直调整、光路的共轴调整、消除视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除等。

3. 物理实验课能力培养的基本要求

(1) 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。正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告。培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的能力。

(2) 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的能力。

(3) 理论联系实际的能力。能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题。能够根据物理理论与教师的要求建立合理模型并完成简单的设计性实验,初步形成综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力。能够完成具有设计性、综合性内容的实验,有条件的还可进行初步的具有研究性或创意性内容的实验。

三、物理实验课程的教学环节

物理实验是一门在教师指导下由学生独立完成的课程。要有效地学习、完成一个实验,必须把握以下4个环节。

1. 选择实验项目、实验时间

物理实验课程采用开放式教学方法。课前在教师指导下学生根据自己的学习时间、学习兴趣,选择自己要做的物理实验项目和实验时间。

2. 课前预习

物理实验课的教学任务比较繁重,且课堂教学的时间有限,因此必须做好课前预习。课前预习包括阅读教材的有关内容及参考资料,弄清实验目的、实验原理,了解所用实验仪器的结构、使用方法,明确测量对象和方法,了解实验的主要步骤及注意事项等。在此基础上写好预习报告(预习报告要求见后面),列出必需的数据记录表格,以便对实验要做什么、怎样做有一个总体的认识。这样,在实验时才能有的放矢地听取指导教师讲解,积极主动地进行操作和测量,高质量地完成实验课的学习任务。

在预习报告中事先列出数据表格是很重要的,通常只有真正理解如何做实验才能画好表格。表格中要留有余地,以便估计不到的情况发生时能够记录。此外,还应根据实验内容准备好实验中所需的绘图工具、计算器等。

3. 实验操作

学生进入实验室上课,必须携带实验教材、预习报告、记录本、有照片的有效证件等。经过教师检查预习报告,学生签字后方能开始实验。

实验开始时,一般指导教师会简单介绍实验内容和仪器使用的注意事项,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意实验中容易发生失误的地方。

动手进行实验操作前,首先要结合仪器实物,对照实验教材或仪器说明书熟悉仪器的结构和用法,再布置、安装(接线)和调试仪器。仪器的布置是否合理,直接影响到操作、读数是否方便,因此要对仪器装置进行调试(水平、垂直、正常的工作电压、光照等),使仪器装置达到最佳工作状态。调试必须细致、耐心、切忌急躁,并要合理选择仪器的量程。实验中应注意观察实验现象,出现问题应及时向指导教师报告。实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则,即先定性观测实验全过程,确认整个实验装置工作正常,对所测内容做到心中有数,再定量测量实验数据。此外,电磁学实验中,连接线路完毕后,自己做一次检查,再请教师检查一次,确认正确无误后才能接通电源。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。实验时应将所测数据及时记入数据记录表格,同时要注意数据的有效数字是否正确。若发现测量数据有错误,可用一直线将其划去,在旁边补上正确数据,不得随便涂改,要保留“错误”数据,供必要时分析、讨论。原始数据记录要交由指导教师审阅签字。

实验时要记录所用仪器的名称、规格、型号和主要技术参数,被测样品的编号,有关的室温、大气压等实验环境条件及实验中出现的故障情况和特殊现象等。

实验者应逐步学会根据实验原理和实验数据来分析实验情况是否正常,测量误差是否合理,测量结果是否正确。逐步学会判断和排除实验中出现的简单故障。不能满足于机械地按

照教材上的实验步骤进行操作、测量数据,而应随时注意对实验进行分析、思考,真正做到既动手又动脑,不断提高进行科学实验的能力。

实验时,应严格遵守实验室的有关规章制度,以保护人身安全和仪器设备的安全。实验完成后,暂不要改变实验条件,将记录的数据请教师审阅签字,如发现错误数据时要重新进行测量。最后,应整理好仪器设备、恢复原状,关好水、电等,经教师批准方可离开实验室。

4. 撰写实验报告

实验报告是实验者对实验工作的全面总结。要用简练的文字、必要的数字和适当的图表将实验过程和完整的实验结果真实地反映出来。因此,实验报告的字迹应清楚、文理通顺、数据要齐全、图表要规范。对于实验原理、实验步骤等内容,应在理解教材内容的基础上,用自己的语言扼要表述。

本课程将预习报告和实验报告合二为一,仍称为实验报告。实验前在预习部分中写过的内容,在实验后的实验报告中不必再写,即实验报告的内容分为两部分,一部分在实验前完成,一部分在实验后完成。

(1) 实验前应完成的内容:

- ① 实验名称、实验者姓名和班级、学号、实验日期、时间代码等。
- ② 实验目的。
- ③ 实验仪器。列出所用主要实验仪器及材料的名称、规格和数量。
- ④ 实验原理。实验原理包括实验设计的思路、实验原理图(电学实验的电路图、光学实验的光路图等)以及实验所依据的主要公式(包括公式中各量的物理意义及适用条件)。实验原理应写得简明扼要。

⑤ 简要的实验步骤。总结重要的或关键的几条,以备实验时按步骤进行。

⑥ 实验注意事项。

⑦ 数据记录表格。仿照教材中的表格或按要求自行设计,以便实验时记录数据用。

(2) 实验后应完成的内容:

① 数据处理及实验结果。包括实验数据的记录、实验结果的计算、所要求的作图、实验误差的分析计算和实验结果的表达、评价等。

② 思考与讨论。包括实验结果的说明、对实验中出现问题的讨论、回答思考题或讨论题以及实验的心得体会等。

实验报告统一用物理实验中心专门的实验报告纸书写。

第一章 实验误差理论与数据处理

物理实验的任务,不仅是定性地观测物理现象,也需要对物理量进行定量测量,并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量原理的局限性或近似性、测量方法的不完善、测量仪器的精度限制、测量环境的不理想以及测量者的实验技能等诸多因素的影响,所有测量都只能做到相对准确。随着科学技术的不断发展,人们的实验知识、手段、经验和技巧不断提高,测量误差被控制得越来越小,但是绝对不可能使误差降为零。因此,作为一个测量结果,不仅应该给出被测对象的量值和单位,而且还必须对量值的可靠性做出评价,一个没有误差评定的测量结果是没有价值的。

本章介绍测量与误差、误差处理、测量结果的不确定度评价、有效数字等基本知识,这些知识不仅在本课程的实验中要经常用到,而且也是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

第一节 测量与误差

一、测量与分类

所谓测量,就是借助一定的实验器具,通过一定的实验方法,直接或间接地把待测量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的全部操作。简而言之,测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作。

按照测量值获得方法的不同,测量分为直接测量和间接测量两种。

(1) 直接测量。直接从仪器或量具上读出待测量的大小,称为直接测量。例如,用米尺测量物体的长度,用秒表测时间间隔,用天平测物体的质量等都是直接测量,相应的被测物理量称为直接测量量。

(2) 间接测量。如果待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数运算后才获得的,则称为间接测量。例如,先直接测出铜圆柱体的质量 m 、直径 D 和高度 h ,再根据公式 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h}$ 计算出铜的密度 ρ ,这就是间接测量, ρ 称为间接测量量。

按照测量条件的不同,测量又可以分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量。在相同的测量条件下进行的一系列测量是等精度测量。例如,同一个人,使用同一个仪器,采用同样的方法,对同一待测量连续进行多次测量,此时应该认为每次测量的可靠程度都相同,故称之为等精度测量,这样的一组测量值称为一个测量列。

(2) 不等精度测量。在不同测量条件下进行的一系列测量,例如,不同的人员,使用不同的仪器,采用不同的方法进行测量,各次测量结果的可靠程度自然也不相同,这样的测量称为不等精度测量。处理不等精度测量的结果时,需要根据每个测量值的“权重”,进行“加权平

均”,因此在一般物理实验中较少采用。

等精度测量的误差分析和数据处理比较容易,本教材所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的。

二、误差与偏差

1. 真值与误差

任何一个物理量,在一定条件下,都具有确定的量值,这是客观存在的,这个客观存在的量值称为该物理量的真值。测量的目的就是力图得到被测量量的真值。我们把测量值与真值之差称为测量的绝对误差。设被测量量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 则绝对误差 δ 为

$$\delta = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

由于误差不可能避免,故真值往往是得不到的,所以绝对误差的概念只有理论上的价值。

2. 最佳值与偏差

在实际测量中,为了减少误差,常常对某一物理量 x 进行多次等精度测量,得到一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则测量结果的算术平均值为

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

算术平均值并非真值,但它比任何一次测量值的可靠性都要高。系统误差忽略不计时的算术平均值可作为最佳值,称为近真值。测量值与算术平均值之差称为偏差(或残差):

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-3)$$

三、误差的分类

正常测量的误差,按产生的原因和性质可以分为系统误差和随机误差两类,它们对测量结果的影响不同,对这两类误差处理的方法也不同。

1. 系统误差

在同样条件下,对同一物理量进行多次测量时,测量结果出现固定的偏差,即误差的大小和符号保持不变,或者按某种确定的规律变化,这类误差称为系统误差。系统误差的特征是具有确定性,它的来源主要有以下几个方面。

(1) 仪器误差。即由于仪器本身的固有缺陷或没有按规定条件调整到位而引起的误差。例如,仪器标尺的刻度不准确,零点没有调准,等臂天平的臂长不等,砝码不准,读数显微镜精密螺杆存在回程差,或仪器没有放水平,偏心、定向不准等。

(2) 理论或条件因素。即由于测量所依据理论本身的近似性或实验条件不能达到理论公式所规定的要求而引起的误差。例如,称物体质量时没有考虑空气浮力的影响,用单摆测量重力加速度时要求摆角小于 5° ,而实际中难以满足这样的条件。

(3) 人员因素。即由于测量人员的主观因素和操作技术而引起的误差。例如,使用停表计时,有的人总是操之过急,计时比真值小;有的人则反应迟缓,计时比真值大。再如,有的人对准目标时,总爱偏左或偏右,致使读数总是偏大或偏小。

对于实验者来说,系统误差的规律及产生原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差;大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定

系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正,而后者一般难以作出修正,只能估计其取值范围。

2. 随机误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,即使已经精心消除了系统误差的影响,也会发现每次测量结果不一样。测量误差时大时小,时正时负,完全是随机的。在测量次数少时,显得毫无规律,但是当测量次数足够多时,可以发现误差的大小以及正负都服从某种统计规律,这种误差称为随机误差。随机误差具有不确定性,它是由测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。例如,人的感受(视觉、听觉、触觉)灵敏度和仪器稳定性有限,实验环境中的温度、湿度、气流变化,电源电压起伏,微小振动以及杂散电磁场等都会导致随机误差的产生。

3. 过失误差

由于实验者操作不当或粗心大意,或测量条件发生突变,导致测量结果明显超出规定条件下预期的误差称为过失误差。例如,看错刻度、读数错误、记错单位或计算错误等。过失误差又称为粗大误差。含有过失误差的测量结果称为异常数据,被判定为异常数据的测量结果应剔除不用。显然,只要观察者细心观察,认真读取、记录和处理数据,过失误差是完全可以避免的。

四、精密性、正确性和准确度

评价测量结果,常用到精密性、正确性和准确度这三个概念。这三者的含义不同,使用时应注意加以区别。

(1) 精密性。即反映随机误差大小的程度,它是对测量结果重复性的评价。精密性高是指测量的重复性好,各次测量值的分布密集,随机误差小。但是,精密性不能确定系统误差的大小。

(2) 正确性。即反映系统误差大小的程度。正确性高是指测量数据的算术平均值偏离真值较少,测量的系统误差小。但是,正确性不能确定数据分散的情况,即不能反映随机误差的大小。

(3) 准确度。又称为精确度,反映测量结果与被测量的真值之间的一致程度。准确度高是指测量结果既精密又正确,即随机误差与系统误差均小。

现以射击打靶的弹着点分布为例,形象地说明以上3个术语的意义。如图1-1-1所示,其中图(a)表示精密度高而正确度低,图(b)表示正确度高而精密性低,图(c)表示精密性和正确度均高,即准确度高。

另外,“精度”这个词还经常出现在各类实验书中,其实它是一个含义不确切的词,通常多指准确度。由于“精度”含义不明确,应尽量避免使用。

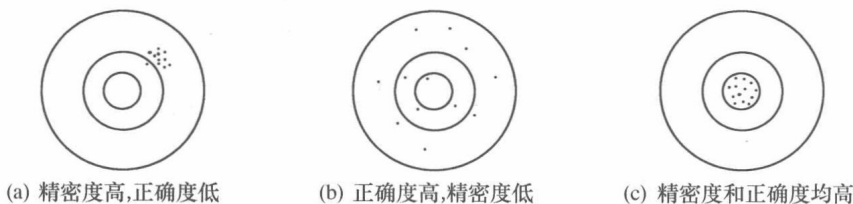


图 1-1-1 测量结果准确程度与射击打靶的类比

第二节 随机误差的处理

随机性是随机误差的特点,也就是说,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量的误差时大时小,对某一次测量值来说,其误差的大小与正负都无法预先知道,纯属偶然。但是,如果测量次数相当多的话,随机误差的出现服从一定的统计规律,因此我们可以用统计方法来估算随机误差对测量结果的影响。

一、随机误差的分布规律——正态分布

设某一物理量 x 在相同条件下进行 n 次测量,得一测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 第 i 次测量值的误差为 $\delta_i = x_i - x_0$ ($i=1, 2, \dots, n$), 式中 x_i 为第 i 个测量值, x_0 为该物理量的真值。显然,各测量值的误差 δ_i 的大小与正负的出现是随机的。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,若测量列的误差 δ_i 服从图 1-2-1 所示的规律,则称该测量列的误差 δ 服从正态分布规律。

图 1-2-1 中,横坐标 δ 为测量值的误差,纵坐标 $f(\delta)$ 为一个与测量列误差有关的概率密度分布函数。

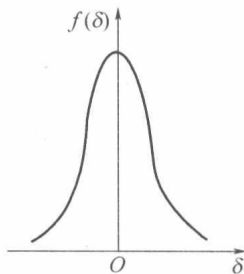


图 1-2-1 随机误差的正态分布曲线

从正态分布曲线中可以看出,服从正态分布规律的随机误差具有以下性质:

- (1) 单峰性。绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,绝对值大的误差出现的可能性小。
- (2) 对称性。大小相等、正误差和负误差出现的机会均等,对称分布于真值两侧。
- (3) 有界性。非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零,误差的绝对值实际上不会超出一定的界限。
- (4) 抵偿性。当测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,于是误差的代数和趋向于零。

1795 年高斯导出服从正态分布规律的随机误差分布函数的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-2-1)$$

式中: δ 为误差; $f(\delta)$ 为随机误差的概率密度分布函数,它的意义是,单位误差范围内出现的误差概率。

如图 1-2-2(a) 中所示,曲线下所包围面积元 $f(\delta)d\delta$ 就是误差出现在 $\delta \sim \delta + d\delta$ 区间内的概率。式(1-2-1)中 σ 是一个与实验条件有关的常数,称为标准误差(或标准差)。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时其值为

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