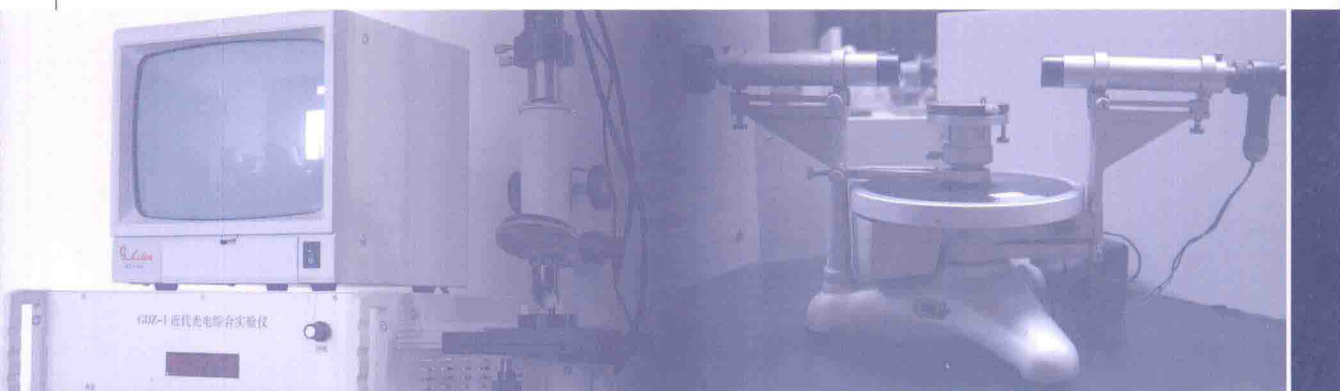


21世纪高等学校规划教材

大学物理 实验

饶益花 编著



注重物理实验基础知识，深入浅出

紧扣理工教学基本要求，详略得当

运用当代科技信息技术，新颖实用

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪高等学校规划教材

大学物理 实验

饶益花 编著

21st Century University
Planned Textbooks

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 饶益花编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2015.2

21世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-115-37477-6

I. ①大… II. ①饶… 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002389号

内 容 提 要

本书是在南华大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会 2008 年发布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写的。全书结构紧凑,内容丰富,实验内容新颖。书中不仅介绍了基本物理实验、综合性物理实验、设计性和研究性物理实验、近代物理实验,还将现代信息技术应用到物理实验,介绍了实验数据的计算机处理方法、仿真物理实验等。整个实验内容与物理实验课程采用的分层次教学方法和开放式教学模式相配套。书中有不少反映新的实验技术和实验仪器的内容,具有较好的可读性和实用性。

本书可以作为高等院校大学物理实验教学用书或教学参考书,也可作为函大、电大、职大等大学物理实验教学用书或教学参考书。

◆ 编 著 饶益花

责任编辑 张孟玮

执行编辑 税梦玲

责任印制 沈 蓉 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 19.75

2015 年 2 月第 1 版

字数: 522 千字

2015 年 2 月河北第 1 次印刷

定价: 44.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言

本书是在南华大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委会 2008 年发布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写的。

在本书的编写中,首先注重了物理实验的基础知识的介绍,如第一章至第五章介绍了误差基础知识及测量不确定度、数据处理方法,基本实验方法与操作技术、常用物理量的测量、基本仪器介绍等,可供不同基础的同学在学习过程中自学;基本实验主要对学生进行实验的基础知识、基本方法、基本技能的训练,综合性、设计和研究性实验及近代物理实验中每个实验基本独立,考虑到我校“核”的特色,在近代物理实验中介绍了《核衰变统计规律》《验证快速电子的动量与动能的相对论关系》等实验;同时我校也有部分医学专业要学习物理实验,故介绍了《液体黏滞系数的测定》《电偶极子电场的描述及描绘模拟心电图》等实验;总之,本书可以用于层次化的开放性物理实验教学。本书还注重将成熟的教研教改成果和现代技术应用在物理实验中,如第二章和第七章就引进了计算机技术在数据处理过程中和仿真实验中的应用;在一些传统的实验中介绍新的实验技术和方法,加强了传感器技术和数字化测量技术在物理实验中的运用,如介绍了应用 CCD 传感器将等厚干涉实验在读数显微镜中观察的牛顿环直接显示在监视器上,并使用数字标尺对干涉暗环进行直接测量等;给传统的学科增添了新鲜血液,彰显物理实验课程的与时俱进。整个实验内容与我校实验室采用的分层次教学方法和开放式教学模式相配套。

南华大学物理实验室的管亮、黎民红、李寰、郝军、肖利军、刘应传、李广、唐益群、邓湘源等老师参与了本书的编写。实验课的教材和教学,离不开实验室的建设和发展,在此,衷心感谢南华大学多年来从事物理实验教学的教师和实验技术人员对本课程的贡献,感谢我校物理实验室全体教师和实验技术人员对本书编写的支持。

在本书的编写过程中,参考了本校曾使用过的教材,也参考了大量我国物理实验教学工作者编著的教材、著作和最新研究成果,有些已在参考文献中列出,有些未能一一列出,在此向他们一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 7 月

目 录

绪论	1	实验 5.3 拉伸法测金属丝杨氏模量	92
第一节 物理实验课程的地位、作用与任务	1	实验 5.4 用波尔共振仪研究受迫振动	99
第二节 物理实验课程教学内容基本要求	2	实验 5.5 电表的改装和校准	104
第三节 物理实验课程的基本程序	3	实验 5.6 电位差计测电源电动势和内阻	111
第四节 物理实验室规则	4	实验 5.7 模拟法测绘静电场	116
第一章 测量、误差及数据处理	6	实验 5.8 伏安法测电阻及电阻元件	120
第一节 测量与误差	6	实验 5.9 示波器的使用	126
第二节 随机误差的估计与仪器误差	11	实验 5.10 分光计的调节及三棱镜折射率的测定	139
第三节 有效数字及其运算法则	16	实验 5.11 光的干涉现象的观测	144
第四节 测量结果的标准偏差评定	19	实验 5.12 光栅衍射	148
第五节 测量结果的不确定度评定	24	实验 5.13 电偶极子电场的描述及描绘模拟心电图	152
第六节 实验数据处理的几种方法	30	实验 5.14 用超声波探测深度和厚度	154
第二章 实验数据的计算机处理	37	第六章 综合性物理实验	158
第一节 Excel 处理实验数据及应用	37	实验 6.1 热电转换技术的观测	158
第二节 Matlab 处理实验数据及应用	45	实验 6.2 多普勒效应综合实验	167
第三节 Origin 处理实验数据及应用	49	实验 6.3 迈克尔逊干涉仪的调节与使用	172
第三章 物理实验基本仪器介绍	54	实验 6.4 金属线膨胀系数的测定	177
第一节 常用长度测量仪器	54	实验 6.5 双光栅微弱振动测量	181
第二节 质量测量及常用仪器	58	实验 6.6 光速测量	185
第三节 时间测量及其仪器	60	实验 6.7 密立根油滴实验	192
第四节 电磁学实验常用仪器	62	实验 6.8 全息照相	201
第五节 热学实验常用仪器	70	实验 6.9 制作全息光栅	206
第六节 光学实验常用仪器	72	实验 6.10 硅光电池特性研究	208
第四章 物理实验的基本测量方法、基本调整与操作规则	77	实验 6.11 探针测量半导体或金属薄膜电阻率	214
第一节 物理实验的基本测量方法	77	第七章 设计性物理实验	218
第二节 物理实验仪器的基本调整方法	83	实验 7.1 设计伏安法测电阻	225
第三节 物理实验操作规则	85	实验 7.2 设计用电位差计校准电表	233
第五章 基本物理实验	87	实验 7.3 设计利用单摆测量重力加速度	236
实验 5.1 基本测量	87	实验 7.4 设计万用电表	238
实验 5.2 液体黏滞系数的测量	89	实验 7.5 电阻温度计的设计与标定	241

实验 7.6 可供选择的设计性实验	244	第九章 计算机仿真物理实验	278
第八章 近代物理实验	245	实验 9.1 电表的改装和校准仿真	280
实验 8.1 光电效应测普朗克常数	245	实验 9.2 光电效应测普朗克常数仿真	290
实验 8.2 夫兰克-赫兹实验	251	附录 A 中华人民共和国法定计 量单位	299
实验 8.3 电子荷质比的测定	259	附录 B 基本物理常量表	302
实验 8.4 核衰变统计规律	262	参考文献	310
实验 8.5 物质对 β 、 γ 射线的吸收	268		
实验 8.6 验证快速电子的动量与动能的 相对论关系	273		

绪论

第一节 物理实验课程的地位、作用与任务

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自然科学。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，是其他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，是人类文明的基石，在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。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，在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

一、课程的地位、作用和任务

物理实验课是高等理工科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。

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，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它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。

本课程的具体任务如下。

(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，提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养，培养学生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，遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

二、本课程对学生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、查询有关资料和思考问题，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基本能力。

(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分析、判断、归纳与综合。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——能够在实验中发现問題、分析問題并学习解决问题的科学方法，逐步提高学生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——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，激发学生的学习主动性，逐步培养学生的创新能力。

第二节 物理实验课程教学内容基本要求

大学物理实验包括普通物理实验（力学、热学、电磁学、光学实验）和近代物理实验，具体的教学内容基本要求如下。

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

(1) 掌握测量误差与不确定度的基本概念，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 掌握处理实验数据的一些常用方法，包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及，应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

2. 掌握基本物理量的测量方法

掌握长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量，注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

3. 了解常用的物理实验方法，并逐步学会使用

了解比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法，以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

4. 掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用

掌握长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

各校应根据条件，在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术，如激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

5. 掌握常用的实验操作技术

掌握零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、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，以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

6. 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识

通过适当介绍一些物理实验史料和物理实验应用知识，对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育，使学生了解科学实验的重要性，明确物理实验课程的地位、作用和任务。

第三节 物理实验课程的基本程序

物理实验的教学方式以实践训练为主,学生应在教师的指导下,充分发挥主观能动性,加强实践能力的训练。物理实验通常分为以下几个环节进行。

一、实验前的预习

学生在课前要仔细阅读实验教材及有关资料,弄清实验目的、实验原理、实验方法、实验仪器、实验内容和主要步骤、实验注意事项等。在此基础上写出预习报告,预习报告应简明扼要地写出:①实验名称;②实验目的;③实验原理;④实验内容和步骤;⑤原始实验数据记录表。做设计性实验前要查阅有关资料,写出实验设计方案。预习的好坏是能否做好实验并取得主动的关键。

实验开始前由任课教师检查预习报告或提问。对于无预习报告或准备不够的学生,教师可以停止其本次实验。

二、实验操作

学生进入实验室要遵守实验室规则,在老师的讲解和指导下熟悉实验原理、实验器材、实验的操作程序;实验仪器的布置要有条理,且要安全操作;细心观察实验现象,认真分析实验中碰到的问题,遇到问题要冷静对待,视为学习良机,做实验不是简单地测量几个数据,不能把这一重要的实践过程看成是只动手不动脑的机械操作。通过仔细操作,有意识地培养自己使用和调节仪器的本领、精密正确的测量技能、善于观察和分析实验现象的科学素养、整洁清楚地做实验记录的良好习惯,并逐步培养自己设计实验的能力。记录实验数据时不能使用铅笔。实验完毕,数据应交教师审查签字,将仪器、凳子归整好以后,才能离开实验室。

三、实验报告

实验报告书写是实验工作的最后环节,也是整个实验工作的重要组成部分。通过撰写实验报告,可以锻炼科学技术报告的写作能力和总结工作能力,这是未来从事任何工作都需要的能力。实验报告要用统一的实验报告纸书写,下面给出实验报告的一种参考格式。

大学物理实验报告

实验名称:

姓名:

班级:

专业:

学号:

同组人姓名:

实验日期:

年 月 日

实验目的:总结本实验项目要达到的目的。

实验仪器:写出主要仪器的名称、规格及编号。

实验原理:用自己的语言,写出实验原理(实验的理论依据)和测量方法要点,说明实验中必须满足的实验条件,写出数据处理时必须用到的一些主要公式,标明公式中物理量的意义,画出必要的实验原理示意图、测量电路图或光路图。

实验内容和步骤:简明扼要地写出实验步骤。

实验原始数据记录:实验中测量出来的数据必须记录在预习时拟好的原始数据记录表格里,

实验结束时原始数据必须由老师签字认可，交上来的实验报告中原始数据记录如无老师签字，则该份报告老师不批阅（或记为0分）。

实验数据处理：每个实验按数据处理的要求进行实验数据的处理，有时数据处理要按被测量最佳估计值的计算、被测量的不确定度（或标准偏差）计算和被测量的结果表示的顺序，正确计算和表示测量结果。一般按先写公式，再代入数据，最后得出结果的程序进行每一步的运算。有时要求按数据处理的一些方法如列表法、作图法、逐差法等进行数据处理，这时要遵守这些数据处理的规则，要求作图的，应按作图规则用坐标纸画出，并写上图名。

结论：要将最终的实验结果写清楚，不要将其湮没在处理数据的过程中。

问题分析与讨论：要善于对实验结果进行总结和分析，看看自己能否提出一些改进的意见，创新能力往往是在平时一点一滴的思考中逐渐形成的；或者回答老师就本次实验提出的问题。

第四节 物理实验室规则

实验课和理论课的重要区别之一就是它不能在宿舍或自习室通过自习完成。学生要在实验室和各种实验仪器打交道。为了保护公共财产，防止出现安全事故，南华大学物理实验室制定了相应的规则，希望同学们能理解并自觉遵守。

大学物理实验室规则

（1）物理实验是理工科大学生必学的一门独立课程，物理实验成绩的好坏，不但影响奖学金评定，而且影响升、留级及退学，故请大家认真学好这门课程。因为物理实验是一切物理理论的基础。物理实验方法、物理实验技能、物理实验仪器几乎被所有学科、所有专业的科学实验广泛采用，任何高、精、尖的科学实验仪器，若把它拆成零部件，则基本上在物理实验中使用过或见过，所以，物理实验在自然科学中的重要地位显而易见，因此我们希望同学们花费一定的时间来学好物理实验这门课，并且相信你们在将来的实际工作中会发现这门课真的有用。

（2）每次实验前必须针对本次实验的内容和目的，进行充分认真的学习，搞清本实验采用的方法、原理、使用的仪器、测量的内容等，并且会推导有关计算公式，掌握和弄清所用主要仪器的工作原理，各仪器的使用方法，实验的调节测量步骤及有关注意事项等，在此基础上，写好预习报告。

（3）认真实验。每次实验必须在规定的时间内（开放式实验按自己选课时间）按时到实验室完成规定的内容，不得迟到、早退和缺席，原则上不补做。凡因公（见教务处证明）或因病（见医务室证明）不能按时实验的，须持有效的证明先到实验室请假，所缺的实验和任课老师协商另行补做。

（4）每次实验必带物理实验课本，补充资料，实验报告和记录用的笔、纸及绘图工具和计算器等。

（5）进入实验室后，按老师安排的座位找好自己的实验台桌。实验时，一般由老师讲解主要实验原理，主要仪器的工作原理、操作步骤及注意事项，每个学生都要认真听取。绝不允许在老师讲解时不听，动手实验时盲目实验，损坏仪器。

（6）动手实验前，首先清点仪器，检查仪器有无问题，发现仪器不够或有问题时，找老师解决，不许自己随意更换仪器，有的易损或易丢失的仪器或材料找老师借领，结束时归还，凡损坏或丢失仪器者，均按学校有关规定，赔偿一定的经济损失。

(7) 实验中要认真对照书和有关资料及仪器,做到心中完全有数后,才开始动手操作或调试仪器。即本实验要测些什么量,各量分别用什么仪器去测,各仪器的测量条件是什么,怎样调节才能满足这些条件,怎样判断这些条件是否已经满足,测到数据后要验算是否合乎要求,不合要求要查出原因或找老师帮助,不能盲目实验,不许违反仪器的操作规程。凡违反规程损坏仪器者,均按学校有关规定处理。

(8) 实验中要如实记录实验数据,严格养成实事求是的科学作风,不许假造数据。物理实验教学的主要目的,不偏重于使学生得到最好的实验结果,而在于通过实验,获得物理实验知识,掌握实验方法,培养实验技能,提高动手能力和独立解决问题、排除实验故障的能力,对所得实验结果较差时,只要能找到原因,同样可得到较好的成绩。

(9) 实验时,不准大声喧哗吵闹,不得随地吐痰、乱丢纸屑,不准在实验室内抽烟、吃东西等,且每学期每个学生打扫一次实验室。

(10) 当实验数据全部测完后,不要急于收拾仪器,应先经自己验收基本合格后,再请老师验收,合格后老师签字,再清理仪器,并把仪器摆放整齐,并交还临时借用的器件后,方可离开实验室。

(11) 实验结束后,要及时严格认真地完成实验报告,写实验报告时,不许马虎了事,字迹要整齐清洁,并按时交老师批改,且由老师签字的原始数据要粘贴在实验报告中一起交给老师,报告上必须写清专业名称、班号、学号和姓名。

第一章

测量、误差及数据处理

物理实验离不开对物理量的测量。由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制，测量结果不可能绝对准确，所以需要对测量结果的可靠性做出评价，对其误差范围做出估计，并正确地表达实验结果。

本章主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。这些知识不仅在每个实验中都要用到，而且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

1. 测量的定义

在进行科学实验时，不仅要定性地观察实验现象，还要找出有关物理量之间的定量关系，因此需要进行定量的测量。测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来的过程。

2. 测量的分类

根据获得测量结果方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量。由仪器或量具可以直接读出测量值的测量称为直接测量，如用米尺测量长度，用天平称质量；另一类需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系通过数学运算获得测量结果，这种测量称为间接测量，如用伏安法测电阻，已知电阻两端的电压和流过电阻的电流，依据欧姆定律求出待测电阻的大小。一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了。比如车速的测量，可以直接用测速仪进行直接测量。物理量的测量，大多数是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件的不同，测量又可分为等精度测量和非等精度测量。在相同条件下（如测量方法、测量仪器、环境条件、实验者等）对同一待测量进行多次测量过程叫等精度测量；在不同条件下（如测量方法、测量仪器、环境条件、实验者等只要有一个或几个发生改变）对同一测量量的进行多次测量的过程叫非等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易，非等精度测量的数据处理非常复杂，故绝大部分实验都用等精度测量，只有在无法采用等精度测量的条件下才用非等精度测量。本书只介绍等精度测量的数据处理方法。

二、误差

1. 真值、误差

在一定条件下,某待测量所具有的客观大小称为真值。真值是个理想概念,测量的目的就是力图得到真值。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件及观测者水平等多种因素的限制,测量结果与真值之间总有一定的差异。

误差就是测量结果与真值之差。误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将误差影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验测量中不可缺少的一项重要工作。

2. 测量误差的主要来源

任何实验和测量都依据一定的方法和原理,选用一定的仪器和设备,在某特定的环境条件下由一定的测量人完成,由于依据的方法和原理可能不尽完善而有近似性,所用仪器设备的精度不可能绝对高,所处的环境条件不可能绝对稳定,测量人的测量技术等因素的影响,测量结果不能无限精确,即测量总会有误差,测量误差主要由以下 5 个方面产生。

(1) 仪器误差。

在正确使用仪器条件下,仪器本身所允许产生的最大误差叫仪器误差,这是由于仪器本身结构的不完善所引起的误差,它又主要由以下 3 个方面产生。

① 读数误差。

这里所指的读数误差与在相同条件下测同一待测量时(我测和他测的读数可能不同,我这次测和下次测的读数可能不同)所测的读数误差具有不同的性质和内容,它主要由仪器结构不完善产生,主要包括以下几种情况。

A. 刻度误差。一般仪器的刻度盘均是按严格的等分格(线性关系)或其他标准(非线性关系)刻度的。但每条刻线的位置与其标准位置会有或多或少的差异,故读数时依据刻线读出的值与其标准值就必有误差,加上刻线总要有一定的宽度才能引起人们的视觉,而标准位置只是一个无穷小量,尽管读数时用刻度宽度的中线去读,但在判断中也总会有误差。

B. 标准误差。仪器的校准误差是指仪器经校准后,按某标准规定所允许产生的误差。

厂家对成批生产的仪器除特殊情况外均采用统一刻度,仪器各零部件虽在生产的每道工序中均有严格的质量检查,但各鉴定值都允许有一定的误差范围,特别是在总装后出厂前都要进行校准,但一般每批产品中按有关规定只任意抽校一定比例的产品,且被抽校的产品中也只对某些量程中的某些刻度进行校准,同时对被校点也允许它与标准仪器有一定的误差,即使被校点与标准仪器完全相同,而标准仪器也是有误差的,至于那些未被抽校刻度、量程和仪器亦同样有误差,所以校准误差是仪器经校准后所允许产生的误差。

C. 仪器读数分辨率所引起的误差。仪器读数分辨率可用其分度值来定义,即它能精确读准的最小计量单位,如米尺分度值为 1mm,10 分游标卡尺、千分尺的分度值分别为 0.1mm 和 0.01mm,显然它们的分辨率越来越高,其测量的误差越来越小。

D. 仪器读数调节装置不完善,如用丝扣或齿轮等读数装置的回程差。由于其齿合间必有一定的间隙(无此间隙则转不动),故正向或反向旋转调节装置测量同一位置时的读数不同,二者之差叫回程差。此时对各点位置测量时,只能按同一方向旋转调节装置严格对正各测点去测量;或对各测点按正、反向各测一次,取其平均值,即可消除回程差。

② 稳定误差。

仪器的稳定误差实际是指仪器在未达稳定状态所产生的额外误差。如电子仪器的稳定误差是由于元件的老化,电气性能对温度的敏感,机械元件的磨损,弹性疲劳的产生等原因产生;又如仪器度数调节机构的松动,某些接线或旋钮接触不良,电路工作不稳定,零点漂移,电气性能受到内部或外部的干扰,寄生阻抗的产生等,都能引起稳定性温差,特别是当被测参数很小或工作频率很高时,可能会产生显著的误差。

③ 动态误差。

有的被测量的大小随实验时间的不同而变化,若要测出某些特定时刻被测量的大小,则这种测量叫动态测量,在快速测量中,由于电路中的过渡过程,电表的阻尼时间及有限的调节速度等,导致所测量结果产生的误差叫动态误差。

(2) 使用误差。

因测量人对仪器使用不当而使测量值产生的额外误差叫使用误差。如许多测量仪器在测量前都必须认真严格地调节读数装置的零点,或读出零点的示值,若未做此工作而其零点不准时,则每个测量值中均含有此零点误差;又如电子仪器使用时,一般均要求预热一定时间后才准调节和测量,但未经预热,仪器还未达稳定的工作状态就测量;再如要求严格调整到水平或垂直状态的仪器,未调整到规定的状态就测等。凡不按仪器的操作规程,没有精心把各仪器设备调定到规定状态所测量的所有的数据中都含有使用误差,实验一定要消除使用误差,所以测量人一定要正确使用仪器,严格按各仪器的规程进行实验,把各仪器都严格调整到它们的最佳工作状态时再进行测量。

(3) 人身误差(又叫个人误差)。

观测者本人因感觉器官或运动器官的某些缺陷或心理上的某些特点和不良习惯使测量结果中产生的额外误差,叫人身误差。特别是靠人眼、耳来判断,或靠手、脚的动作来测得结果时尤为突出。如有的人在测量时,头习惯性的偏向一边或斜视去读取数据会有视差;又如用停表测时间时,有的人有习惯性的超前或滞后等,同时人身误差还与观测者当时的精神状态密切相关,这就是要求实验者全神贯注的理由。

(4) 环境条件误差(又叫影响误差)。

实验时环境的温度、湿度、气压、电磁场、机械振动、声音、光照等因素中的一种或几种发生改变时测量值的大小改变而引起的测量误差叫环境误差。有时其中某些因素甚至会造成仪器的损坏。所以实验时一定要保证实验对环境所提出的条件得到满足,或根据环境条件的变化对测量值进行修正,如水的密度随其温度不同而变化,标准电池的标准电动势随温度不同而变化等,环境温度要随时查表修正它们的值,否则会对结果产生误差。

(5) 理论方法误差。

由于实验中所采用的理论方法不完善,或测量所依据的理论不严密,或理论计算公式的近似性,或理论方法所提出的条件在实验中无法达到等原因使测定值产生的误差叫理论方法误差。

如用伏安法测电阻中,不管是电流表内接还是外接,由于电流表、电压表内阻的存在,无法在单独测出加在待测电阻两端电压 U 的同时,又单独测出流过待测电阻中的电流 I ,若由 $R = U/I$ 去求 R ,则总存在理论方法误差,故必进行系统误差的修正。

又如用混合量热法测物体比热容的实验中,用一已知热容量的系统与一未知热容量的系统(二者温度不同)在同一绝热系统中混合,达热平衡后,高温系统所放出的热量全部被低温系统所吸收,故可建一等式来求出待测物的比热容。但在实际中绝对的绝热系统并不存在,不管绝热条件多好,只要系统与环境有温度差,系统与环境就不可避免地产生热交换,若不对等式进行散热或吸收修正,必然会使测量结果产生误差。

再如用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量实验中,在推导光杠杆放大法测量长度的微小改变量时,假定光杠杆的摆角 θ 很小,即有 $\tan\theta \approx \theta$, $\tan 2\theta \approx 2\theta$ 时才导出了计算公式,实际上不管 θ 怎么小,用 θ 代 $\tan\theta$, 2θ 代 $\tan 2\theta$ 总是有误差的,故用它们代替计算出来的结果必有误差,这就是理论计算公式的近似性结果带来的理论方法误差。

还如用单摆法测重力加速度实验中,推导计算公式时,假定摆角 $\theta \rightarrow 0$, 摆球半径 $r \rightarrow 0$ 。但实验时, $\theta \rightarrow 0$, 单摆不摆动周期无法测定,即 θ 总要有一定的角度 ($\leq 5^\circ$); 当 $r \rightarrow 0$ 时,即摆球没有摆动,故理论方法所规定的条件实验中无法达到而带来理论方法误差。

3. 误差的表示

测量误差既可用绝对误差表示,也可用相对误差来表示。

设测量值为 x , 相应的真值为 x_0 , 测量值与真值之差 $\Delta x'$ 为

$$\Delta x' = x - x_0$$

称为测量误差,又称为绝对误差,简称误差。

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差。用 E 表示为

$$E = \frac{\Delta x'}{x_0} \times 100\%$$

由于真值无法知道,在实验的数据处理中,用按某种规定所求的 $\bar{x}$ 值来代替真值 x_0 ($\bar{x}$ 为代真值或近真值),故测量结果与近真值的差叫近真误差,用 Δx 表示为

$$\Delta x = x - \bar{x}$$

习惯上叫近真误差 Δx 为测量误差。

相对误差用百分数表示,有时它更能表示测量的准确程度。例如测量两个物体的长度,一个是 10.0mm,另一个是 100.0mm,若绝对误差都是 0.1mm,相对误差分别为 1% 和 0.01%,显然后者的测量准确程度要大些。

三、误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,误差可分为 3 类:系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在同一条件(指方法、仪器、环境、人员)下多次测量同一物理量时,结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是测量结果与真值之间发生固定偏离,不服从统计规律,不能靠增加测量次数来减小误差。

系统误差的来源具有以下几个方面。

(1) 仪器原因:它是由于量具、仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用而造成的误差,如螺旋测微器的零点不准,天平不等臂等。造成测量结果相对于真值的固定偏离,这种误差要通过修理仪器提高仪器准确度来消减。

(2) 理论原因:它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法不当等所引起的误差。如实验中忽略了摩擦、散热、电表的内阻不可能无穷大、单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件(摆角小于 5°)等。

(3) 个人原因:它是由于测量者本人生理或心理特点造成的误差。如有人用秒表测时间时,总是使之过快,计时短;有的人总反应迟钝,计时长。有的人看仪表时头总偏向一方等。

(4) 环境原因: 外界环境性质 (如光照、温度、湿度、电磁场等) 的影响而产生的误差。如环境温度升高或降低, 使测量值按固定规律变化。

产生系统误差的原因通常是可以被发现的, 原则上可以通过修正、改进加以排除或减小。分析、排除和修正系统误差要求测量者有丰富的实践经验。这方面的知识和技能在我们以后的实验中会逐步地学习, 并要很好地掌握。

2. 随机误差 (偶然误差)

在相同测量条件下, 多次测量同一物理量时, 大小与符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差, 有时也叫偶然误差。

引起随机误差的原因也很多, 主要是测量过程中一系列随机因素或不可预知的无规则变化因素引起的, 也与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关。如无规则的温度变化, 气压的起伏, 电磁场的干扰, 电源电压的波动等, 引起测量值的变化。这些因素不可控制又无法预测和消除。单次测量随机误差不可知, 当测量次数很多时, 随机误差就显示出明显的规律性。对于随机误差服从的规律, 本书下节将详细讲述。

3. 粗大误差

由于测量者过失, 如实验方法不合理, 用错仪器, 操作不当, 读错数值或记错数据等引起的误差, 是一种人为的过失误差, 不属于测量误差, 只要测量者采用严肃认真的态度, 过失误差是可以避免的。在数据处理中要把含有粗大误差的异常数据加以剔除。剔除的准则一般为 3σ 准则或肖维勒准则。

四、测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是定性评价测量结果的术语, 但目前使用时其涵义并不尽一致, 以下介绍较为普遍采用的说法。

精密度表示的是在同样测量条件下, 对同一物理量进行多次测量, 所得结果彼此间相互接近的程度, 即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度, 因而测量精密度是测量偶然误差的反映。测量精密度高, 偶然误差小, 但系统误差的大小不明确。

准确度表示的是测量结果与真值接近的程度, 因而它是系统误差的反映。测量准确度高, 则测量数据的算术平均值偏离真值较小, 测量的系统误差小, 但数据较分散, 偶然误差的大小不确定。

精确度表示的则是对测量的偶然误差及系统误差的综合评定。精确度高, 测量数据较集中在真值附近, 测量的偶然误差及系统误差都较小。

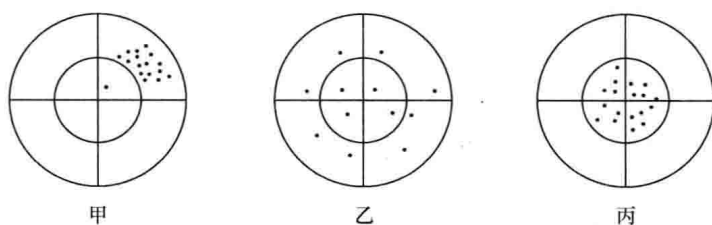


图 1-1-1 精密度、准确度、精确度

这 3 个术语可以用打靶弹着点的分布来形象地理解。图 1-1-1 中甲的弹着点明显偏离靶心, 说明准确度低, 系统误差大; 但弹着点集中, 说明精密度高, 随机误差小。图 1-1-1 中乙则相反, 弹着点分散, 精密度低, 随机误差大; 但固定偏差小, 准确度高, 系统误差小。图 1-1-1 中丙弹着点既集中, 又无固定偏差, 两类误差均小, 即精确度高 (既精密又准确)。

通常把精确度简称为精度。但精度的含义比较粗糙笼统。本书中的精度对实验结果来说,主要是指其相对误差的数量级,若 $E=1.0\%$, 则可笼统地说精度为 10^{-2} 。对仪器来说,精度是指仪器的最小分度值和等级,如游标卡尺最小分度值为 0.02mm , 就说其精度为 0.02mm 。精度的含义有时还要看测量结果的具体情况,当测量结果的误差以随机误差为主时,它表示精密性;以系统误差为主时,又表示准确度;当两种误差同时存在且二者的大小相差不大时,它又表示精确度。

第二节 随机误差的估计与仪器误差

一、随机误差的统计规律

为了单纯地研究随机误差,假设系统误差已经消除或者减小到可忽略不计的状态。在同样条件下,某一物理量进行了多次重复测量,由于随机误差的存在,其结果彼此互有差异。当测量次数足够多时会出现某种规律性。大量事实证明,在大量的、独立的、随机因素影响下,随机误差服从一定的统计规律,也就是正态分布(或高斯分布),如图 1-2-1 所示。设在—组测量值中, n 次测量的值分别为: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

各次测量误差为 $\Delta x_i, x_i - x_0$ ($i=1, 2, \dots, n$; x_0 为真值)

图中 $f(\Delta x)$ 称为概率密度函数,阴影部分面积表示误差 Δx 落在区间 (a, b) 的概率为

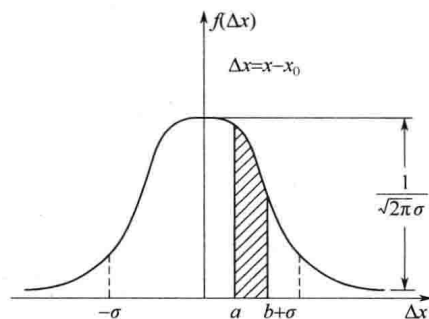


图 1-2-1 随机误差的正态分布

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

显然,误差落在 $(-\infty, +\infty)$ 的概率为百分之百,即

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

由图 1-2-1 可知,随机误差具有下述性质。

- (1) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率趋于零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (2) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (3) 对称性: 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。
- (4) 抵偿性: 由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等,因而随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值将趋于零。

正是因为具有抵偿性,所以用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。由统计理论,正态分布的概率密度函数 $f(\Delta x)$ 应为

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2-2)$$

其中 σ 称为标准误差, σ 的大小取决于具体测量条件。将式 (1-2-2) 式代入式 (1-2-1), 测量误差落在 (a, b) 区间的概率为

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_a^b e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} d(\Delta x) \quad (1-2-3)$$