

普通高等院校精品课程教材

◎ 主编 刘旭辉 韦吉爵

◎ 主审 熊文元

College Physics Experiment

大学物理实验



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

大学物理实验

主 编 刘旭辉 韦吉爵

主 审 熊文元



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

刘旭辉 韦吉爵
2013年12月

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/刘旭辉,韦吉爵主编. —长沙:中南大学出版社,
2013.4

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0856 - 8

I. 大... II. ①刘... ②韦... III. 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 073865 号

大学物理实验

刘旭辉 韦吉爵 主编

☐责任编辑 胡小锋

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙印通印务有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 21 ☐字数 533 千字

☐版 次 2014 年 7 月第 1 版 ☐2014 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0856 - 8

☐定 价 38.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

许多现代高新技术是随着以物理学及物理实验为代表的基础学科的成长而发展起来的,例如 20 世纪 60 年代的电子计算机技术,70 年代到 90 年代迅猛发展的高分子、半导体、激光、光学显微、高温超导、激光生物医学、纳米等技术,无疑在这些基础及应用的互补性中探求科学技术的本质。从中看出,物理学及物理实验是自然科学的重要基础,是培养高素质人才必须具备的自然科学素养之一。物理实验课程是为理工科学生开设的全面系统和独立设置的必修实验课程,是高等院校基础教学的一个重要组成部分,同时又是进入大学之后接受系统实验原理、方法和实验技能训练的一个开端,对后续课程的学习具有重要的启发性、基础性、研究性,尤其是物理实验思想、基本训练的原理及方法、设计性实验及创新性实验的思维能力训练是培养科学实验素质及创新能力的重要基础。因此,人们越来越认识到物理实验技术的重要性和加强对学生进行物理实验训练的必要性,这是物理实验独立设课的时代背景。

本书是根据《普通物理实验课程教学大纲(修订稿)》,结合中央与地方共建高校实验室仪器设备情况,从培养 21 世纪创新人才的目标出发,重视传授知识与提高能力、增强素质、增强创新意识等并重,加强实验技能训练,经过湖南科技学院、河池学院物理实验中心教师反复的实验教学实践,在修改实验讲义的基础上编写而成。为了使学能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法,将测量误差及实验数据处理放在前面集中介绍。测量误差及实验数据处理是物理实验课的重要教学内容,也是学生实验中的难点,直接关系到后续实验的顺利进行。因此,本书用了较多的篇幅进行介绍,并且在不同的实验题目中对测量误差的估计和数据处理方法提出了不同的要求,为学生进一步理解、掌握误差理论提供方便。

本书在编写的过程中,首先注意到了独立设置普通物理实验课程的必要性与教材体系的完整性。主要内容包括测量误差及数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学和光学中的基础实验。其次,遵循实验能力培养的规律性。本书对基本知识、基本仪器和基本方法等部分力求详细地介绍,并按不同层次由易到难,逐步加强对知识的灵活应用,能力的综合训练。第三,注重实验教学的各个环节,每个实验都编写了思考题,促使学生积极思考,加深理解实验目的、原理等内容。

本书的编写得到了校、系领导和各位同事的热情鼓励和帮助,特别感谢熊文元教授、彭金松教授的支持,湖南科技学院和河池学院教务处的支持;编写中参考了许多兄弟院校的有关教材及仪器生产厂家的使用说明书,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验有限,再加上编写时间仓促,书中难免有谬误之处,敬请读者批评指正。

刘旭辉 韦吉爵

2013 年 12 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 物理实验课的目的和任务	(1)
第二节 物理实验课的基本程序和要求	(1)
第三节 物理实验室规则	(3)
第四节 物理实验课考核办法	(3)
第二章 测量误差与数据处理	(5)
第一节 测量	(5)
第二节 误差	(6)
第三节 直接测量结果及其随机误差的估算	(10)
第四节 测量不确定度和测量结果的表示	(15)
第五节 间接测量结果及其合成不确定度	(18)
第六节 有效数字及其运算	(24)
第七节 实验数据的处理方法	(27)
第八节 物理实验的基本测量方法	(34)
第九节 物理实验的基本操作技术	(40)
第三章 物理实验基础知识	(43)
第一节 力、热学实验基础知识	(43)
第二节 光学实验基础知识	(57)
第三节 电磁学实验基础知识	(66)
第四章 基础性、综合性实验项目	(73)
实验一 长度的测量	(73)
实验二 固体和液体的密度测定	(76)
实验三 声速的测定(共振干涉法)	(80)
实验四 弦振动特性的研究	(87)
实验五 牛顿第二定律的验证	(91)
实验六 动量守恒和能量守恒定律的验证	(104)
实验七 重力加速度的测定(单摆法)	(107)
实验八 重力加速度的测定(自由落体法)	(110)

实验九 杨氏弹性模量的测定(拉伸法)	(112)
实验十 刚体转动惯量的测定(三线摆法)	(114)
实验十一 刚体转动惯量的测定(转动惯量仪)	(118)
实验十二 液体表面张力系数的测定(拉脱法)	(122)
实验十三 液体表面张力系数的测定(毛细管法)	(126)
实验十四 液体粘滞系数的测定(落球法)	(128)
实验十五 热电偶定标和测温	(130)
实验十六 金属线胀系数的测定	(134)
实验十七 固体比热容的测定(混合法)	(136)
实验十八 气体比热容比的测定	(140)
实验十九 液体比汽化热的研究	(144)
实验二十 温度传感器的温度特性测量和研究	(147)
实验二十一 不良导体导热系数的测定(稳态法)	(155)
实验二十二 良导体导热系数的测定(稳态法)	(158)
实验二十三 薄透镜成像规律的研究	(162)
实验二十四 杨氏双缝干涉实验	(170)
实验二十五 偏振现象的观测与分析	(176)
实验二十六 等厚干涉现象的研究	(183)
实验二十七 分光计的调整和三棱镜折射率的测定	(190)
实验二十八 用分光计测光栅常数和光波的波长	(199)
实验二十九 光电效应及普朗克常数的测定	(204)
实验三十 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	(213)
实验三十一 用阿贝折射仪测液体的折射率	(220)
实验三十二 平行光管和透镜性能测试	(226)
实验三十三 伏安法测电阻	(232)
实验三十四 用箱式电位差计校准电表	(236)
实验三十五 示波器的使用	(238)
实验三十六 磁场的描绘	(244)
实验三十七 铽化钢磁电阻传感器的测量及应用	(249)
实验三十八 电表的扩程和校准	(254)
实验三十九 灵敏电流计特性研究	(262)
实验四十 霍尔效应及其应用	(268)
实验四十一 静电场的描绘	(274)
实验四十二 电子束的偏转与聚焦	(279)
第五章 设计性、研究性实验项目	(293)
实验一 弹簧振子的研究	(293)
实验二 电位差计的应用研究	(296)
实验三 电桥法测电阻的研究	(301)

实验四 非线性元件伏安特性的测量	(310)
实验五 照度监测器的设计与制作	(312)
附 录	(315)
附表 1 国际单位制[SI]的基本单位和辅助单位	(315)
附表 2 国际单位制[SI]中具有专门名称的导出单位	(315)
附表 3 国家选定的非国际单位制单位	(316)
附表 4 用于构成十进倍数和分数单位的词头	(316)
附表 5 基本物理常量	(317)
附表 6 我国某些城市的重力加速度	(317)
附表 7 在 20℃ 时常见物质的密度 ρ	(318)
附表 8 在标准大气压下不同温度时水的密度 ρ	(318)
附表 9 在海平面上不同纬度处的重力加速度 g	(319)
附表 10 固体的线膨胀系数	(319)
附表 11 在 20℃ 时常用金属的弹性模量(杨氏模量) Y	(319)
附表 12 在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数 σ	(320)
附表 13 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 σ	(320)
附表 14 不同温度时水的粘滞系数	(321)
附表 15 某些液体的粘滞系数	(321)
附表 16 不同温度时干燥空气中的声速 v	(321)
附表 17 固体导热系数 λ	(322)
附表 18 某些固体和液体的比热容	(322)
附表 19 不同温度时水的比热容	(322)
附表 20 某些金属和合金的电阻率及其温度系数	(322)
附表 21 不同金属或合金与铂(化学纯)构成温差电偶的温差电动势	(323)
附表 22 几种标准温差电偶	(323)
附表 23 铜-康铜热电偶的温差电动势(自由端温度 0℃)	(324)
附表 24 常温下某些物质的折射率	(324)
附表 25 常用光源的谱线波长	(324)
附表 26 常用仪器量具的主要技术指标和极限误差	(325)
附表 27 常用电气测量指示仪表和附件的符号	(325)
参考文献	(328)

第二节 物理实验课的基本程序和要求

第一章 绪论

第一节 物理实验课的目的和任务

一、物理实验课的目的

- (1) 通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验、分析和解决实验中的问题和方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解。
- (2) 培养学生从事科学实验的初步能力。通过实验阅读教材和资料,能概括出实验原理和方法的要点;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能;正确记录和处理数据,分析实验结果和撰写实验报告;以及自行设计和完成不太复杂的实验任务等。
- (3) 培养学生实事求是的科学态度、严谨的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的任务

- (1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理概念和规律的认识、对物理学原理的理解,为后继课程打下基础。
- (2) 培养和提高学生的科学实验素养,要求学生具有:
 - ① 信息处理能力:通过自行阅读实验教材或网上资料,正确理解实验内容,在实验前作好实验准备,在实验后运用计算机处理实验数据。
 - ② 动手实践能力:借助教材或仪器说明书,正确调整和使用常用仪器。
 - ③ 思维判断能力:运用物理理论,对实验现象进行分析和判断。
 - ④ 书面表达能力:正确记录和处理数据,撰写合格的实验报告。
 - ⑤ 综合设计能力:根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤。
 - ⑥ 科技创新能力:通过进行研究性实验和设计性实验,了解知识的发现与创新的过程,强化创新意识,促进创新思维。

- (3) 培养学生组织有关中学物理教学、指导中学物理实验的基本能力。
- (4) 培养学生做好实验的能力。

第二节 物理实验课的基本程序和要求

物理实验课与理论课不同,它采用的是开放式教学方式,在教学上使学生具有更大的灵活性和自由度。实验课的基本程序是实验预习、实验操作与数据记录、数据处理与实验报告。

一、实验预习

实验课前应该认真预习,仔细阅读教材和实验中心网站上的实验指导,弄清实验的目的、实验原理和实验方法,了解仪器的结构和调节要求。在充分预习的基础上设计好实验数据记录表格、写好预习报告,为实验课做好准备。

二、实验操作与数据记录

学生在认真预习的基础上,可以进行实验操作。在进入实验室后,首先要接受教师对预习情况的检查。实验开始前要仔细阅读实验指导书和仪器使用说明书,务必牢记实验的注意事项,并在教师的指导下掌握实验仪器的调整方法。实验课是锻炼实践能力,培养创造精神的极好机会。应注重实验过程,认真观察,独立思考,手脑并用,提高运用理论知识和已有的经验分析解决问题的能力,培养严谨、耐心、实事求是的科学态度和探索、求真的科学精神。

在实验操作过程中,要仔细观察物理现象和测量数据,用钢笔如实记录原始数据,原始数据必须是真实的,不允许抄袭和任意涂改。完成实验后全部数据应交指导老师检查,通过检查,教师在预习报告和数据记录草稿上签字后,才能切断电源,整理好实验装置,结束本次实验。

三、数据处理与实验报告

实验课后应及时处理数据,完成报告并在规定的时间内交到相关实验室。实验报告要求清洁整齐,重点突出,语言简练,作图制表规范,字迹端正清晰。

实验报告分两次完成,预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容),应在上实验课前写好,其余部分实验课后再接着完成。要求用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容:

实验名称:表示做什么实验。

实验目的:说明为什么做这个实验,做该实验要达到什么目的。

实验仪器:列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理:阐明实验的理论依据,写出待测量计算公式的简要推导过程,画出有关的图(原理图或装置图),如电路图、光路图等。

数据记录:实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出,正确表示有效数字和单位。

数据处理:根据实验目的对实验结果进行计算或作图表示,并对测量结果进行评定,计算不确定度,计算要写出主要的计算内容。

实验结果:扼要写出实验结论,要体现出测量数据、误差和单位。

问题讨论:讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释,分析实验误差的主要来源,对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议,简述自己做实验的心得体会,回答实验思考问题。

为了保证实验课程的正常进行,现在对实验报告提出以下三点要求:

(1) 课前要求预习实验内容,明确实验目的,了解实验原理,弄清实验步骤,初步了解仪器的使用方法,画好实验数据记录表格。未做好预习者不得动手做实验。

(2)在测量时,应如实、即时做好实验数据记录(数据记录要整洁,字迹清楚,避免错记),不可事后凭回忆“追记”数据,更不可为拼凑数据而将实验数据记录做随心所欲的涂改。

(3)实验报告要认真按时完成。在做物理实验时,我们不是要一个塞满东西的脑袋,而是要一个善于分析问题的头脑,实验的目的和任务不仅要有知识,更重要的是将知识转化为能力!

第三节 物理实验室规则

为了保证实验正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,请同学们遵守以下实验室规则:

(1)实验按实验分组和排定的实验顺序表进行。实验前必须认真预习,按要求写好预习报告。无预习报告者,不得做实验。

(2)实验在规定的时间内完成,不得无故缺席、迟到或早退,迟到时间超过 15 min 按旷旷处理。无故缺旷不补课。因公、因病、因事缺课者,须由所在院系出具证明,由指导教师安排补课。

(3)按实验编组与实验仪器编号对号做实验。实验前按仪器清单检查仪器,明确仪器使用方法和注意事项后方能进行实验。爱护仪器,未经允许不得动用或调换其他仪器。仪器如有损坏,应立即报告指导教师进行登记,按学校有关规定处理。如发现实验仪器丢失,追查当事人责任,并做赔偿。

(4)进入实验室应保持安静,不准抽烟和随地吐痰。保持实验室清洁,做完实验后由轮值同学打扫实验室卫生。

(5)在实验室应服从教师和实验室工作人员的指导,严格按操作规程使用仪器。注意安全,防止损坏仪器或发生人身事故。

(6)实验完毕,整理好仪器,经教师检查认可后,方可离开实验室。按要求在规定时间内完成实验报告。

第四节 物理实验课考核办法

一、学期末总评成绩按等级制计算

其中平时成绩按等级制计算,共分为优、良、中、及格、不及格 5 级,期末考核成绩的评定由考核形式决定,考核成绩可采用百分制或等级制计算方法,期末考核成绩等级制计算方法与平时成绩等级制计算方法一致。最终期末总评成绩按等级制计算。

如果平时成绩或期末考核成绩低于及格(等级制),或期末考核成绩低于 50 分(百分制),则总评成绩为不及格。

二、学期末总评成绩的构成

总评成绩 = 平时成绩 $\times$ 70% + 期末考核成绩 $\times$ 30%

三、平时成绩的构成

平时成绩 = 实验操作成绩 × 50% + 实验报告成绩 × 50%
其中实验课前预习、实验课守纪情况、实验作风与习惯等计入实验操作成绩中。

四、期末考核形式

本课程期末考核有多种形式：笔试(可开卷考试，也可闭卷考试)、操作考试、物理实验设计、物理实验仪器模型制作、撰写物理实验研究论文等。

第二章 测量误差与数据处理

第一节 测量

一、测量

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较的过程。其中倍数称为待测物理量的数值，选作的计量标准称为单位。因此，一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，缺一不可。

作为比较标准的测量单位，其大小是人为科学规定的。按照《中华人民共和国法定计量单位》的规定，物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的，它选定了七个基本物理量，即长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温标(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)。这些物理量的单位是基本单位，其他物理量的单位可由这些基本单位导出，故称为导出单位。

二、测量分类

根据获得数据的方法不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。例如用米尺测长度、用温度计测量温度、用电压表测电压等都是直接测量，所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值。

2. 间接测量

在物理实验中，大多数物理量没有直接测量的量具，无法进行直接测量，而需依据待测物理量与若干个直接测量值的函数关系求出，这样的测量就称为间接测量。如用单摆法测重力加速度 g 时， T (周期)、 L (摆长)是直接测量值，而 g 就是间接测量值。

三、测量过程

为了在实验过程中正确地进行测量我们要按照以下过程进行：

1. 熟悉仪器

熟悉仪器的性能，掌握正确的使用方法和读数是每个学生必备的基本素质。例如：仪器的级别、量程、稳定性以及对环境的要求等等。

2. 选择适当的测量仪器和测量方法

根据对实验测量精度的要求和测量范围，合理地选择仪器和方法。例如：长度、温度测量我们可根据实验对测量精度的要求选取恰当的测量仪器，如表2-1-1所示。

表 2-1-1 根据测量精度选取恰当的测量仪器

长度测量精度要求	1mm	0.02mm	0.005mm	0.0001mm	0.000001mm
仪 器	米尺	卡尺	千分尺	激光干涉仪	电子显微镜
温度测量范围/℃	<300	<600	>1600		
仪 器	半导体或液体温度计	热电偶	红外高温计		

3. 选择实验方法

在实验中不仅要了解仪器的级别、量程、稳定性等技术参数,而且还要学会采用正确的实验方法。

例如用电压表测电路中的电压时如果电表的内阻不变的话,无论使用级别多高的电压表,由测量方法引起的测量误差都不可避免。要减小上述测量方法引入的误差,可采用补偿法进行测量,或改用内阻很大($R_i \geq 200 \text{ M}\Omega$)的数字电压表。

4. 读数与记录

在进行测量时,正确的读数和记录是关键。对于不同仪器有多种读数方法,将在今后的实验中分别介绍。在此仅谈一般规则:

(1)如实记录仪器上显示的数值,作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器,通常在直接测量时,要求估读一位(该位是有效数字的可疑位)。估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$ 。

(2)若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只要记录全部数据即可。

(3)需要指出的是有一些仪表,虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的,例如最常用的钟表,有以秒为最小分度的时钟,也有以 $1/10$ 或 $1/100$ 秒为最小分度的秒表。因此,对此类仪表不需要估读。

(4)对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读。

第二节 误差

一、误差的概念及表示

1. 真值

任何量在一定客观条件下都具有不以人的意志为转移的固定大小,这个客观大小称为该物理量的真值。由于“绝对真值”的不可知性,人们在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种“真值”。

(1)理论真值:理论设计值、公理值、理论公式计算值。

(2)约定真值:国际计量大会规定的各种基本常数、基本单位标准。

(3)算术平均值:指多次测量的平均结果,当测量次数趋于无穷时,算术平均值趋于真值。

2. 误差

测量结果与真值之间总是有一定的差异,这种差异称为误差。

3. 误差公理

误差自始至终贯穿在一切科学实验之中。

4. 误差的表示

(1)绝对误差:是指测量值 x 与被测量的真值 a 的差,即:

$$\varepsilon = x - a \quad (2-2-1)$$

由于真值 a 不可能知道,所以绝对误差 ε 也是不可知的,于是研究分析误差应从“残差”着手。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为某物理量 x 的测量值, $\bar{x}$ 为其算术平均值,则各测量值 x_i 和 $\bar{x}$ 之间的差称为残差。即:

$$\delta_i = x_i - \bar{x} \quad (2-2-2)$$

(2)相对误差:是指绝对误差与被测量的真值的比值。由于真值是一理想量,实验中用测量的平均值来代替真值,即:

$$E = \frac{\varepsilon}{a} \text{ 或 } E = \frac{\varepsilon}{\bar{x}} \quad (2-2-3)$$

二、误差的分类

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小和符号均保持不变,或当条件改变时,按某一确定的已知规律而变化的误差。

系统误差的特征是它的确定性,即实验条件一确定,系统误差就获得了一个客观上的确定值,一旦实验条件改变,系统误差也按一种确定的规律变化。

造成系统误差的原因有以下几个方面:

(1)仪器误差:是指测量时由于所用的测量仪器、仪表不准确所引起的误差。

(2)环境误差:是指因外界环境(如灯光、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。

(3)方法误差:是指由于测量所依据的理论、实验方法不完善或实验条件不符合要求而导致的误差。

(4)个人误差:是指由实验者的分辨能力、感觉器官的不完善和生理变化、反应速度和固有的习惯等引起的误差(如估计读数始终偏大或偏小)。

系统误差的出现一般有较明确的原因,因此只要采取适当的措施对测量值进行修正,就可以使之减至最小。但是,在实验中仅靠增加测量次数并不能减小这种误差。

2. 偶然误差

偶然误差,也叫随机误差,是指在相同条件下多次重复测量同一物理量时,测量结果的误差大小、符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,无法控制。

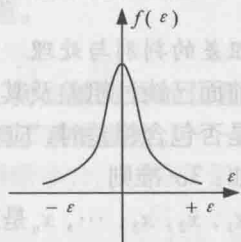


图 2-2-1 随机误差正态分布曲线

偶然误差的特征是随机性,即误差的大小和正负无法预计,但却服从一定的统计规律。在对某一物理量进行大量次数的重复测量时,发现它服从正态分布(高斯分布),如图 2-2-1 纵坐标表示概率,横坐标表示误差。

服从正态分布的偶然误差具有以下一些特性:

- (1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的几率大。
- (2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的几率相等。
- (3) 有界性:在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定的范围。
- (4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。即:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0 \quad (2-2-4)$$

可见,可用多次测量的算术平均值作为直接测量的近真值。

偶然误差的来源主要是:由于人们的感官灵敏程度和仪器精密程度有限,各人的估读能力不一致,外界环境的干扰等,这些因素不尽全知,无法估计。由于偶然误差的出现服从正态分布规律,因此我们可以通过用多次测量求平均值的办法来减小偶然误差。

3. 粗大误差

粗大误差是由于测量者的过失(如使用方法不正确,实验方法不合理,粗心大意等)而引起的误差,粗大误差简称粗差。

粗大误差的特征是人为性,初学者容易产生这种误差,但是若采取适当的措施,这种误差完全可避免。例如,采取细心检查、认真操作、重复测量、多人合作等措施都可有效地避免这类误差。粗大误差一般使实验结果远离物理规律,它的出现必将明显地歪曲测量结果,我们应当努力将其剔除。什么样的数据可以认为是有过失误差的坏数据而必须加以剔除?我们可以依据一些粗差判别准则来鉴别。

系统误差和偶然误差并不存在绝对的界限,其产生的根源均来自测量方法、设备装置、人员素质和环境的不完善。在一定条件下,这两种误差可以相互转化。例如:按一定基本尺寸制造的量块,存在着制造误差,对某一具体量块而言,制造误差是一确定数值,可以认为是系统误差,但对一批量块而言,则制造误差属于偶然误差。掌握了误差转化的特点,可以将系统误差转化为偶然误差,用统计处理方法减小误差的影响,或将偶然误差转化为系统误差,用修正的方法减小其影响。

三、误差的判别与处理

1. 粗差的判别与处理

在前面已谈过粗差及其生成的原因,这里主要谈谈粗差的鉴别和消除的方法。在判别某测量值是否包含粗差时,应作出详细的分析和研究。一般采用粗差判别准则来鉴别。

例如: 3σ 准则

设 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是对某量的一组等精度测量,而且服从正态分布,由正态分布理论可知,真误差落在 $\pm 3\sigma$ 内的概率为 99.73%,即误差 $> \pm 3\sigma$ 的概率是 0.27%,属于小概率事件。如果发现在测量列中有:

$$|\delta_i| \geq 3\sigma \quad (1 \leq i \leq n) \quad (2-2-5)$$

式中 $\delta_i = x_i - \bar{x}$, 为测量值 x_i 的残差,即发现误差的绝对值大于等于 3σ ,则认为该测量值 x_i 包

含粗大误差,通常将它称为异常值,应剔除。

对于粗差除了设法从测量结果中鉴别和剔除外,首先是强化测量者严谨的科学态度和实事求是的工作作风,其次要注意保证实验条件和环境的稳定性,尽可能避免实验环境和条件的突变导致粗差的产生。

2. 系统误差的判别与处理

在测量过程中,发现有系统误差存在时,我们要对产生系统误差的因素作进一步分析比较,找出减小系统误差的方法。

(1)分析产生系统误差的主要原因:从产生误差根源上消除系统误差是最有效的办法。但前提条件是必须预先知道产生误差的因素。如前所述,系统误差具有确定性和有规律性,所以导致系统误差产生的因素也是可确定的或是有规律可循的。我们可从导致系统误差产生的仪器、环境、方法和个人等因素入手,弄清产生系统误差的主要原因。

(2)减小系统误差的常用方法:有的实验测量结果存在很大系统误差,只有找到了导致系统误差产生的主要原因,才有可能寻求减小系统误差的方法。但这些方法和具体的测量对象、测量方法、测量人员的经验有关。因此要找出消除系统误差的通用有效方法较难,下面介绍一些常用的减小系统误差的方法。

①定值系统误差的减小法。定值系统误差的最常用的消除方法有:示零法、替代法、抵偿法和交换法。

• 调零法和校准法

要达到减小或消除系统误差的目的,在实验前就必须要对测量过程中可能产生的系统误差的因素进行分析,最好在测量前将系统误差从产生根源上加以消除。例如:利用电流表测量某电流时,实验前必须检查电流表指针是否指零,如果不在零位,需将指针调整到零位,这样可消除由于指针零位偏移而产生的系统误差。

• 替代法

替代法是进行两次测量,第一次测量达到平衡后,在不改变测量条件情况下,立即用一个已知标准量替代被测量,如果测量装置仍能达到平衡,则被测量就等于已知标准量。如果不能达到平衡,调整使之平衡,这时可得到被测量与标准量间的差值,即

$$\text{被测量} = \text{标准量} + \text{差值}$$

• 抵偿法

抵偿法也是要求进行两次测量,且要求这两次测量得到的系统误差值大小相等、符号相反。取这两次测量的算术平均值作为测量结果,就可消除系统误差。

• 交换法

交换法本质上也是抵消,但形式上是将测量中的某些条件,例如被测物的位置相互交换,使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用,从而抵消了系统误差。

②可变系统误差的消除方法。

• 对称测量法

对称测量法是消除线性系统误差的有效方法,而线性的系统误差有这样的特点:相同的时间间隔内所产生的系统误差增量相等。所求量值之差不受线性系统误差影响。

四、测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果的好坏,我们往往用精密度、准确度和精确度来评价,但这是三个不同的概念,使用时应加以区别。

1. 精密度

精密度表示测量结果中偶然误差大小的程度。它是指在规定条件下对被测量进行多次测量时,各次测量结果之间离散的程度。精密度高则离散程度小,重复性大,偶然误差小,但系统误差的大小不明确。

2. 准确度

准确度表示测量结果中系统误差大小的程度。它是指在规定条件下,多次测量数据的平均值与真值符合的程度。准确度高则测量接近真值的程度高,系统误差小,但对测量的偶然误差的大小并不明确。

3. 精确度

精确度表示测量结果中系统误差与偶然误差的综合大小的程度。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于测量来说,精密度高,准确度不一定高;而准确度高,精密度也不一定高;只有精密度和准确度都高时,精确度才高。

下面我们打靶为例,来形象地说明这三个不同概念之间的区别。

在图 2-2-2(a)中表示子弹比较集中,但都偏离靶心,说明射出的精密度高,但准确度较低;图(b)表示子弹比较分散,但是它们的中心位置比较接近靶心,说明射击的准确度高,但精密度较低;图(c)表示子弹比较集中靶心,说明射击的精密度和准确度都较高,即精确度较高。

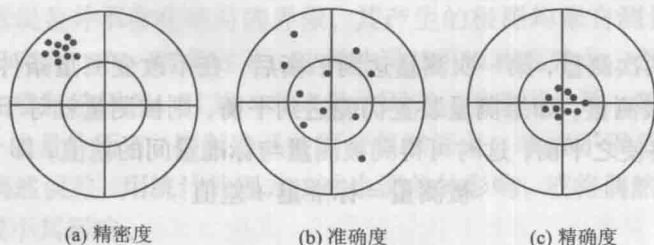


图 2-2-2 测量的精密度、准确度和精确度图示

第三节 直接测量结果及其随机误差的估算

一、随机误差的分布规律及其特点

现在,我们假定在系统误差可以忽略不计的情况下,讨论随机误差的问题。

随机误差的特点是它的随机性。也就是说,在相同的实验条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各测量值有的比真值偏大,有的比真值偏小。换句话说,随机误差无论在数值的大小或符号上都是不固定的,似乎是纯属偶然的。但若测量次数很多的话,随机误差的出现服从