

高等学校教材

大学物理实验

(第二版)

主 编 侯双印



高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验

(第二版)

D a x u e W u l i Sh i x i a n

主 编 侯双印

副主编 (以姓氏笔画为序)

付芳芳 侯 超

参 编 (以姓氏笔画为序)

李向工 李庆明 李俊芳

张逢春 张 磊 魏民云

高等教育出版社·北京

内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),并结合作者多年的物理实验教学实践经验在第一版的基础上修订而成,主要内容为测量不确定度及实验数据处理基础,力学、热学、电磁学、光学、近代物理、综合性及设计性实验等,并配有适当的习题与思考题。

本书的内容既考虑到当前教学的要求,又考虑到未来发展对人才培养的需求,补充了一些先进的、有应用价值的实验内容、实验方法和实验手段,并考虑了实验设备的更新换代。

本书可作为高等理工院校非物理专业及高等农林医药院校各专业的大学生物理实验教材或参考书,也可供相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 侯双印主编. --2 版. --北京:

高等教育出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-04-046024-7

I. ①大… II. ①侯… 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 (2016) 第 173285 号

策划编辑 张海雁
插图绘制 尹文军

责任编辑 张海雁
责任校对 殷 然

封面设计 赵 阳
责任印制 刘思涵

版式设计 马 云

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 山东临沂新华印刷物流集团
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15
字 数 360 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.com.cn>

版 次 2013 年 9 月第 1 版
2016 年 8 月第 2 版
印 次 2016 年 8 月第 1 次印刷
定 价 26.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 46024-00

第二版前言

随着实验仪器设备的更新,相应项目的实验原理、仪器工作原理、实验方法与步骤等均发生了一定的变化。为方便师生使用,对原有的实验内容、仪器介绍及实验方法与步骤等进行了修订。

本次修订还对部分实验增添了阅读材料,以拓展读者的知识面或进一步使实验内容趋于完善。

在教材修订过程中,中国地质大学长城学院、保定市城市设计院、保定市第八中学、石家庄市石门实验学校有关教师和同志参与了编写。本教材修订隶属河北省教育厅教学改革研究与实践项目(2015GJJG302),同时也是省精品课程在建项目内容。教材的再版,得到了中国地质大学长城学院教务处、高等教育出版社物理分社的鼎力支持。在此,我们表示诚挚的感谢!

书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者指正。

编 者

2016年3月

第一版前言

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)及作者多年的物理实验教学实践经验编写而成。它不仅可作为理工科非物理专业学生的大学物理实验教材,也可供农、林、医药各专业的学生使用。

大学物理实验是理工科学生必修的一门课程。它的任务是通过实验教学培养学生的综合能力,这也是在当今高科技时代,为培育大批高素质创新人才对大学物理实验课程提出的必然要求。为此,必须让学生系统地学好并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。只有打好这一基础,才能为培养高质量人才提供保证。

在实验内容的改革方面,结合具体的实验学时数和未来发展,我们对大学物理实验的题目和内容进行了全面、细致的审视。从培养目标出发,重新进行构思和精选实验内容。坚决淘汰陈旧过时的实验内容、实验方法和实验手段,保留了在物理学中有代表性的、有活力的实验项目,补充了一些有应用价值、先进的实验内容、实验方法和实验手段。例如,为加强定量测量,加进了传感器的应用内容;为开拓学生的思维,还加进了部分综合性、设计性实验项目。

为了使学生能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法,本书将实验中有关的必要知识集中在测量不确定度及实验数据处理基础一章中作了叙述。其中测量不确定度及数据处理是物理实验课的重要教学内容,本书在这一章中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不确定度的估计和数据处理方法及测量结果的表示提出了不同的要求。

本书在第五章编入了一些综合性、设计性实验项目。对设计性实验,提出了实验要求并由实验室提供有关仪器用具;而实验原理及具体实验步骤则由学生自己通过查找资料和阅读参考书,并根据已掌握的物理实验基本知识和基本方法独立进行设计。这些实验项目虽然有些难度,但通过教师的指导和学生的努力是可以完成的。设计性实验的实践表明,它对提高学生的实验素质、培养学生独立工作的能力很有帮助,这也是目前高校实验课所提倡的。

我们在编写时做到了每个实验都有明确的实验目的,使学生容易把握重点。对仪器描述、实验原理、测量原理、实验步骤和数据处理等环节作了较详细的叙述,便于学生预习、操作和计算。每一个实验的编写在格式上力求做到一致;在内容上把实验原理与仪器的测量原理分别叙述,更有利于学生理解和掌握。

本书在每个实验内容的后面都给出若干个思考题。其中,有些题目是为促进学生积极思考、加深理解而设计的,而有些题目则是为帮助学生掌握重点内容而提供的。

为了扩充学生的知识面,我们把与实验有关较烦琐的理论推导、师生在实验教学中发表的论文精华、学生参加大学物理实验竞赛获奖项目摘要等内容,以阅读材料形式加在每个实验后面,供学生阅读和教师参考。

提高实验课的质量应从师资建设、实验室的硬件建设和教材建设共同抓起。众所周知,实验室建设(以及教材建设)是一项凝聚集体劳动的工程。在编写本书前,编者对实验仪器和实验设

备的购置计划作了精心的安排,既考虑到学生的实际情况,又考虑到资源的充分利用,做到从硬件上奠定良好的基础。

本书吸收了几十年来在基础物理实验室工作的许多同志的教学成果,同时也参考了兄弟院校的有关教材。河北农业大学、中国地质大学长城学院、河北科技学院、河北大学、保定市城乡规划设计研究院、新疆石河子大学的相关专业的教师和同志参与了本书的编写。书稿完成后,左武魁教授和周惟公教授仔细审阅了书稿并提出了宝贵的意见。本书的出版,得到中国地质大学长城学院教务处、河北农业大学教务处、高等教育出版社物理分社的大力支持。在此,我们表示衷心的感谢!

书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者不吝指正。

编 者

2013 年 2 月

目 录

绪论	1
第一章 测量不确定度及实验数据处理基础	3
§ 1-1 测量误差及其分类	3
§ 1-2 系统误差的发现与消除	9
§ 1-3 直接测量结果及其不确定度	13
§ 1-4 间接测量结果及不确定度的合成	21
§ 1-5 有效数字及其运算	29
§ 1-6 测量数据处理方法	33
习题	42
第二章 力学、热学实验	45
§ 2-1 基本度量	45
§ 2-2 利用扭秤测定水的表面张力系数	53
§ 2-3 利用硅压阻力敏传感器测定液体的表面张力系数	58
§ 2-4 用落球法测定液体的黏度(两种计时方法)	62
§ 2-5 用毛细管法测定液体的黏度	66
§ 2-6 利用智能转动惯量仪做刚体转动实验	70
§ 2-7 用扭摆法做刚体转动实验	76
§ 2-8 空气摩尔热容比 γ 值的测定	82
§ 2-9 用共振法测定材料的杨氏模量	86
§ 2-10 用拉伸法测定钢丝的杨氏模量	90
§ 2-11 利用传感器测定空气的相对压力系数	95
§ 2-12 利用气垫导轨测定加速度	101
§ 2-13 利用气垫导轨研究阻尼振动	105
§ 2-14 利用气垫导轨验证动量守恒定律	108
第三章 电磁学实验	113
§ 3-1 利用滑线式电位差计测量电池的电动势	113
§ 3-2 利用箱式电位差计测量热电偶的电动势	116
§ 3-3 非平衡电桥测温仪实验	120

§ 3-4	用模拟法测绘静电场	122
§ 3-5	利用霍尔器件测磁场	127
§ 3-6	测定亥姆霍兹通电线圈的磁场分布	132
§ 3-7	示波器的工作原理和使用	138
§ 3-8	利用惠斯通电桥测定金属电阻的温度系数	149
§ 3-9	电表改装实验	154
第四章	光学实验	158
§ 4-1	利用单狭缝衍射测定光的波长	158
§ 4-2	利用衍射光栅测定光的波长	161
§ 4-3	利用牛顿环测量透镜的曲率半径	165
§ 4-4	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	169
§ 4-5	照相技术	172
§ 4-6	旋光仪工作原理及使用	176
§ 4-7	利用分光计测定三棱镜介质的折射率	181
§ 4-8	利用混合劈尖测定液体薄膜的折射率	184
第五章	近代物理与综合性、设计性实验	187
§ 5-1	光电效应实验	187
§ 5-2	塞曼效应实验	192
§ 5-3	利用超声波测定声速	197
§ 5-4	计数器实验与应用	201
§ 5-5	压力传感器实验与应用	206
§ 5-6	利用超声光栅测定声速	210
§ 5-7	设计性实验	215
附录 I	常用物理数据表	219
附录 II	国际单位制简介	228
主要参考文献		230

绪 论

一、物理实验课的地位

物理学是自然科学中的一门重要学科。物理规律的研究与形成是以严密的实验事实为基础的,从本质上说物理学是一门实验科学。物理实验不仅在物理学的建立与发展过程中一直起着重要作用,而且在今后进一步探索尤其是在新科技领域的开拓与创新过程中仍然是必需的手段和强有力的工具。物理实验课与理论课之间有着密切的内在联系,但是大学物理实验是并列于理论课而单独开设的一门课程。它具有独立的教学目的、教学内容及教学方法。通过大学物理实验,不仅可加深对物理知识的理解,而且更重要的是使学生掌握一定的实验知识,并在实验方法和实验技能方面得到较为系统、严格的训练。对培养和提高学生的综合素质,树立科学的实验观,物理实验起着潜移默化的作用。因此,对高等学校理、工、农、林、医各专业的学生来说,上好物理实验课是非常重要的。

二、物理实验课的教学目的

在教师的指导下,通过对物理实验现象的观察以及对物理量的测量与分析,使实验者做到:

(1) 理论联系实际,加深对物理概念和物理规律的理解。

(2) 培养和提高科学实验能力。其中包括:① 能够通过阅读实验教材或相关资料,写出预习报告,做好实验前的准备;② 能够通过阅读仪器说明书或者相关资料掌握正确的测量方法和正确使用仪器;③ 能够运用物理的理论分析实验中观察到的现象;④ 能正确记录和处理实验数据,正确表达实验结果并对实验结果进行正确地分析与评价,撰写出合格的实验报告,为以后的科学研究工作或其他科技工作打下良好的实验基础。

(3) 培养严肃认真、实事求是的科学工作态度和坚忍不拔、勇于探索的工作作风,养成遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

三、物理实验课的三个主要环节

要上好一次物理实验课以达到实验课的目的,必须做好下面三个环节的工作。

1. 预习

每次实验前要做好课前预习。即通过仔细阅读实验教材或相关资料,明确本次的实验目的,弄清实验原理和实验方法,知道实验要求和特别注意的事项并写出实验预习报告。对一些设计性实验要在查阅参考资料的基础上,写出自己的实验方案。这一环节是决定实验能否主动、顺利进行的关键一步,必须认真对待。

2. 操作

学生进入实验室后要遵守实验室规则。在教师的指导下认识和熟悉实验所用仪器或用具,

并记录仪器的规格型号。掌握正确使用仪器的方法,牢记实验中应注意的事项。然后有条理地布置安装和调试仪器(或连接好电路等),使之处于最佳工作状态。按实验步骤,在明确每一步操作意义的前提下认真安全地操作,要注意观察实验中出现的一切现象,善于思考和钻研实验中出现的问題,遇到异常情况要主动地请教老师,在老师指导下努力排除出现的故障(不要盲目处理),正确记录实验数据。这一环节重点放在培养和提高自巳的实验能力上,是学习、锻炼的良好机会,千万不要一味追求测量数据,这一点一定要引起同学们的重视。但是,所测实验数据在一定程度上反映客观实际,要严肃对待,不能随意涂改。如确实为笔误,也应轻轻划掉,在旁边记录正确值。实验结束时,实验数据经老师审阅签字,再将仪器还原整理好。

3. 总结

实验结束后,要对测量的数据按要求进行及时处理,写出实验报告。数据处理过程包括对原始数据整理、列表、计算、作图、不确定度分析等。表格设计制作要规范,不仅便于自己分析和查找,又能使别人容易看懂。作图要按照作图规则进行,图像要清晰美观。根据具体要求对测量数据进行不确定度分析,最后写出一份文字简练通顺、字迹清晰、数据齐全、图表正确规范、有见解的实验报告。能客观准确地报告自己的工作成果是对大学生的基本要求也是每一位科技工作者必备的能力。

实验报告的内容包括:

- ① 实验名称。
- ② 实验目的。
- ③ 实验仪器(含型号、名称、规格)。
- ④ 实验原理。简要叙述实验相关内容(含电路图、光路图等)及测量中所依据的主要公式,列出公式成立所满足的实验条件,各量的单位。
- ⑤ 数据列表及数据处理。把记录数据完整地填入设计好的表格中,并完成具体计算,根据要求进行不确定度分析,写出实验结果。对于用图示法表示测量结果的实验要绘制出图像。
- ⑥ 小结或讨论。该项内容不作具体限制,可以是对所发现的具体现象进行分析;对实验方法的见解或者是实验中的收获和体会;也可以是回答思考题等。对一些问题的讨论应有根有据,言语中肯,切忌面面俱到,华而不实。

第一章 测量不确定度及 实验数据处理基础

绪论中已谈到物理学是建立在实验基础上的科学。我们开设大学物理实验课,是在已有的物理学理论的基础上,定性观察一些物理现象或者对某些物理量进行定量测量,以达到实验课教学的目的。

所谓测量,就是将待测量与同类标准量进行比较,以确定待测量是多少。但是,任何测量结果与被测量的真值之间都存在差异,也就是说在任何测量过程中,都不可避免地出现测量误差^①。误差存在的必然性和普遍性,已被长期的科学实验所证明。对误差研究的深入程度反映着人们对客观世界的认识程度。随着科学技术的发展、测量手段的不断更新以及人们认识水平的不断提高,人类对客观世界的揭示越来越深刻,将测量误差控制得越来越小,而完全消除误差却始终没有做到。

将含有误差的测量数据进行数据加工,才能求得被测量的最佳逼近值,并估计其准确程度。

本章将对测量误差与测量不确定度的基本概念和测量数据的处理过程进行讨论与研究。

§ 1-1 测量误差及其分类

一、测量

(一) 直接测量与间接测量

凡是由计量仪器直接读出测量结果的测量,称为直接测量。如用米尺测长度,用天平称质量,用电压表测电压,用特斯拉计测磁感强度等。

凡是不能直接用计量仪器将待测量的大小测出来,而是由几个直接测量值代入某函数关系式后求出待测量,则该待测量的测量称为间接测量。如通过测量圆柱体的高度和直径计算其体积,通过测量电流、电压计算电阻或电功率等。

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,现在变得可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,也可以用电度表直接测量。

物理量的测量,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

^① 测量误差和测量不确定度是两个不同的概念,本教材考虑到过去的习惯,在相关叙述中仍沿用“误差”一词,但在最终表示中使用“不确定度”。

（二）等精度测量与不等精度测量

任何物理量的测量可由某一观察者使用一定的仪器,通过一定的方法,在一定的环境下去完成。如测某物理量 X ,由同一观察者,使用同一仪器,在同一环境下,以同一种测量方法重复测量 n 次,其测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,我们没有理由认为其中的某一个值比其他值更准确或更不准确。因此,在测量条件完全相同(即同一观察者,同一仪器,同一方法,同一环境)情况下的重复测量称为等精度测量。

当测量条件不同(如观察者不同,或仪器不同,或方法不同,或环境不同)的情况下对同一物理量进行测量,各次所得值的准确度是不同的,我们称测量条件不同的多次测量为不等精度测量。比如用千分尺和游标卡尺测同一圆柱体的高度,因为两仪器的精度不同,所测结果为不等精度测量。

需要指出的是:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅为重复读数。比如用游标卡尺重复测量圆柱体高度 5 次,每次测量都必须用卡尺重新卡住圆柱的某一位置,然后读数,而不是卡住同一位置不动,重复读数 5 次。

（三）测量仪器

仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能,掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的知识。

1. 仪器精密度

是指与仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小分度越小,所测物理量的位数越多,仪器精密度越高。如具有毫米分度的米尺,其精密度为 1 mm,千分尺的精密度为 0.01 mm,最小步进为 0.1 Ω 的旋转式标准电阻箱,其精密度为 0.1 Ω 。

2. 仪器准确度

是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在说明书上。如电学仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小分度值的一半。因为制造仪器时,其分度值是受仪器准确度约束的。

3. 量程

是指仪器所能测量的物理量最大值与最小值之差,即仪器的测量范围。在测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,否则易造成仪器的损坏。

关于测量读数最小一位的取值,一般来说应在仪器最小分度内估读一位数字。

二、测量误差的定义

（一）绝对误差

某被测量的测量值 x 与该被测量的真值 X_0 之差 Δx ,称为测量误差(又叫真误差),即

$$\Delta x = x - X_0 \quad (1-1-1)$$

所谓真值,是指在一定的时间及空间(位置或状态)条件下,某被测量所体现的真实数值。一般情况下,理论真值是未知的。人们进行测量时总是希望能得到被测量在测量条件下的真值。然而,这是不可能的。因为进行测量,是根据一定的理论,使用一定的仪器,在一定的环境中通过观察者去完成的,而测量条件总与理论有差距,仪器总与国际规定标准有偏离,环境总不能完全稳定,人的观察能力也总是有限的,所以一切测量值总是偏离真值。在实际工作中,常用高一级

标准仪器的测量值 A_0 来代替真值 X_0 。例如,0.1 级电流表所指示的电流值,相对于 2.5 级电流表的指示而言,即可认为是被测电流的相对真值。通常,高一级标准器的误差与低一级标准器或普通仪器的误差相比,为其 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/10$) 时,即可认为前者的示值是后者的相对真值,这时,公式(1-1-1)可改写为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1-2)$$

式中, x 为普通仪器或低一级标准器的示值, A_0 为高一级标准器的示值(相对真值)。(1-1-1)式和(1-1-2)式所表达的误差是和被测参量具有相同单位(量纲)的,它的大小表示测量值偏离被测参量真值的程度,称此为绝对误差。

(二) 相对误差

对于同等大小的被测量,测量结果的绝对误差愈小,说明其测量精确度愈高。而对于不同等大小的被测量,却不能只凭绝对误差来评定其测量的精确度。在这种情况下,需采用相对误差的形式来说明测量精确度的高低。相对误差没有量纲,通常以百分数表示。

1. 实际相对误差

实际相对误差是指绝对误差 Δx 与被测量的真值 X_0 的百分比,记为

$$E = \frac{\Delta x}{X_0} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

2. 示值相对误差

示值相对误差是指绝对误差 Δx 与仪器的示值 A 的百分比值,记为

$$E_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-1-4)$$

示值相对误差一般用于误差较小时,此时由于仪器的示值 A 与被测量的真值 X_0 很接近,故 E_A 与 E 相差很小。

(三) 归算误差

为便于比较不同示值范围的仪表的测量精度,通常将绝对误差 Δx 折合成仪表示值范围(即量程) B 的百分误差来表示,并称之为归算误差(或称相对百分误差),即

$$E_m = \frac{\Delta x}{B} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

式中,仪表的量程 B 等于仪表的满刻度值与刻度下限值之差。若刻度下限值为零,则上式便可写成绝对误差与仪表满刻度值之比,这便是有的书籍中所定义的引用误差。工业检测仪表的精度等级通常以最大归算误差来评定。

三、测量误差的来源与分类

(一) 误差的来源

在测量过程中,产生误差的原因是多种多样的。一般可归纳为如下几类:

1. 测量装置误差

(1) 标准器件误差 标准器件是提供标准值的量具,如标准量块、标准刻度线尺、标准电阻、标准电池和标准砝码等。它们本身体现的量值并非真值,不可避免地含有误差。因此以它们为基准制造和校准的仪器或仪表也就含有误差。

(2) 仪器误差 是指测量中所用仪器或仪表本身示值所含误差。

测量装置误差一般表现为:结构误差,如等臂天平的不等臂、米尺刻度的不均匀、机械零件连接的间隙等所造成的误差;调整误差,如水平、竖直、同心、零点等没有调整到理想状态所造成的误差;变形误差,如仪器或仪表在长期的使用过程中的磨损、变形、老化等所造成的误差。

2. 环境误差

由于各种环境与规定的标准状态不一致而引起的测量仪器或被测物理量产生变化所造成的误差,如温度、湿度、气压、振动、电磁场、重力场等与规定的测量条件不相符而造成的误差等。

3. 方法误差

由于测量的方法或依据的理论不严密而造成的误差,如伏安法测电阻时采用电流表内接或外接时电表内阻的影响,用高灵敏度的分析天平称衡低密度物体的质量时没有考虑空气浮力的影响,单摆测重力加速度实验中摆球不是质点造成的误差,单缝衍射采用近似公式等给测量造成的误差。

4. 人员误差

这是由于观测者的主观因素,如分辨能力、生理习惯、反应速度、测试经验、精神状态等原因造成的误差。如按停表,有人常常过早或过迟;估计电表读数末位时,习惯性偏大或偏小等。

在评价测量结果的误差时,要对误差的来源作全面的分析,既不遗漏,又不重复,以便找出重要因素,略去次要因素。这样得出的测量结果才是正确可信的。

(二) 误差的分类

根据测量误差的性质,可将其分为以下三类:

1. 系统误差(简称系差)

在等精度条件下,对同一物理量进行多次测量,其测量误差的大小和符号保持恒定,或在条件改变时,误差的大小和符号按某一确定规律变化,这种误差称为系统误差。

系统误差还可以按下列情况细分。

(1) 按掌握的程度分,有:

已定系差:误差的大小和符号均已知,如千分尺的零点读数。

未定系差:误差的大小和符号至少其一为未知,但通常可以估计出误差范围,如测量仪器说明书给出的误差限值。

(2) 按变化规律分,有:

恒定系差:误差的大小和符号不变化,为固定值。

变值系差:误差的大小和符号至少其一是变化的,变化规律可为线性变化、周期性变化和复杂变化。

上面讨论过的几类产生误差的因素,都可能引起系统误差。但系统误差总是由一些确定的因素引起的,它使测量结果具有固定的倾向。在测量中可以修正的系差只有已定系差。对于未定系差可以用改变测量条件或测量方法来减小或消除,如后面要讲的代替法、抵消法、交换法、半周期法等,但不能用多次测量的方法来减小或消除。总体来说,系统误差可以完全消除或减少到人们可以接受的程度。当然实际测量工作中,要发现系统误差的存在,弄清产生的原因,消除或减小它对测量结果的影响,是一项非常复杂的工作。它需要丰富的实践经验和一定的物理知识并付出艰苦细致的劳动,这也是物理实验观测者的一项重要任务。

2. 随机误差(偶然误差)

即使实验中已理想地消除了系统误差,在同样的条件下,由同一观测者,应用同一仪器,以同样的方法(等精度!)重复测量同一物理量,测得数值也总有差异。某一次测量的误差以不可预定的方式变化,有大有小,有正有负。称这种在相同条件下多次测量同一量时,误差的大小和符号均以不可预定的方式发生变化,没有确定的变化规律的误差为随机误差。

(1) 随机误差的来源 随机误差是由于某些偶然的或不确定的因素引起的,具体原因很多,如仪器性能和测量者感官分辨能力的统计涨落、环境条件(如温度、湿度、气压、气流、震动、杂散电磁场、电源电压……)的微小波动、测量对象本身的不确定性等,均可引起测量的变化。

(2) 随机误差的特性 单次测量的随机误差没有规律,不能预料,不可控制,也不能用实验的方法加以消除。但是,若测量次数足够多时,大多数随机误差服从统计规律,呈现正态分布(又称高斯分布)。正态分布是一种很重要的概率分布,可以通过统计学的数学方法来研究这些误差的总体并估计其影响。若以横坐标表示随机误差 ε ,以纵坐标表示误差出现的概率密度 $P(\varepsilon)$,正态分布规律如图 1-1-1 所示。

由统计学理论,正态分布的概率密度函数为

$$P(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\varepsilon^2/2\sigma^2} \quad (1-1-6)$$

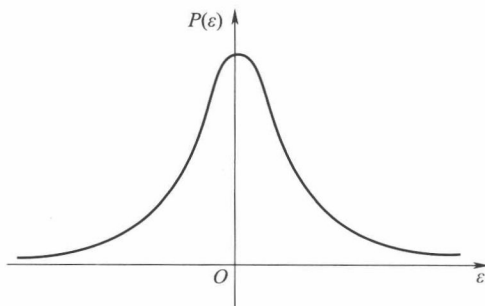


图 1-1-1 正态分布图

且满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(\varepsilon) d\varepsilon = 1 \quad (1-1-7)$$

式中, ε 为测量误差(严格说为偏差或残差,见本章第三节), σ 是决定 ε 离散程度的参量,其定义和物理意义也在本章第三节讨论。 $\sqrt{2\pi}$ 是为了满足归一化条件而引入的常数。

图 1-1-1 表明,对于正态分布的随机误差,在没有系统误差存在的条件下,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,具有以下特点。

- (1) 单峰性:即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。
- (2) 有界性:绝对值很大的误差出现的概率近于零。即误差有一定的实际限度。
- (3) 对称性:绝对值相等的正误差和负误差,出现的概率相等。
- (4) 抵偿性:误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

由随机误差的上述统计特性可知:① 增加重复测量的次数可以减小随机误差;② 多次测量的算术平均值可以作为测量结果的最佳近似值(由概率统计,当重复测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时所得到的数学期望值趋于真值)。

3. 粗差

明显歪曲测量结果的误差称为粗差。产生粗差的主要原因有测量方法不当或实验条件不符合要求;测量人员粗心,不正确使用仪器,测量时读错数据,计算中发生错误等。

从性质上来看,粗差本身并不是单独的类别,它本身既可能具有系统误差的性质,也可能具有随机误差的性质,只不过在一定测量条件下其绝对值特别大而已。含有粗差的测量值称为坏值或异常值,所有的坏值都应剔除不用。所以,在进行误差分析时,要估计的误差只有系统误差

与随机误差两类。

在测量过程中,系统误差与随机误差通常是同时发生的,一般很难把它们从测量结果中严格区分开来。而且,误差的性质是可以在一定条件下相互转化的。有时可以把某些暂时没有完全掌握或分析起来过于复杂的系统误差当作随机误差来处理。对于按随机误差来处理的系统误差,通常只能给出系统误差的可能取值范围。此外,对某些随机误差(如环境温度、电源电压波动所引起的误差),当设法掌握其确定规律后,则可视为系统误差并设法加以修正。

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评价测量结果的术语,但目前使用时其含义并不完全一致,下面介绍的是现在较为普遍采用的观点。

测量精密度表示在同样测量条件下,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,即重复测得值的离散程度。测量精密度是测量随机误差的反映。测量精密度愈高,说明各次测量结果的重复性愈好,随机误差愈小。

测量准确度表示测量结果与真值接近的程度,它是系统误差的反映。测量准确度越高,则测量数据的算术平均值偏离真值越少,测量的系统误差越小。

精密度和准确度是两个不同的概念。精密度高,随机误差小,它不能反映系统误差的大小;而测量准确度高,系统误差小,但数据分散的情况,即随机误差的大小不能确定。图 1-1-2 形象地说明了精密度与准确度的区别。图中,圆心代表被测量的真值,符号“·”表示各次测量结果。图 1-1-2(a)的点比较集中,但都向一侧偏离圆心,反映了随机误差小而系统误差大,为精密而欠准确。图 1-1-2(b)的点比较分散,但平均值较接近圆心,反映了随机误差较大,而系统误差较小,为准确而不精密。图 1-1-2(c)的点集中在圆心,反映了随机误差及系统误差都小,既准

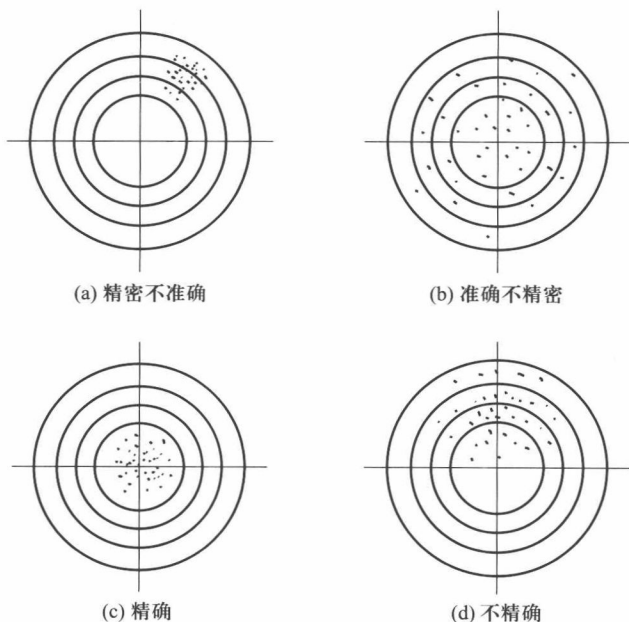


图 1-1-2 精密度与准确度的区别

确又精密,我们称其精确度高。而图 1-1-2(d)的点既分散又偏离圆心,随机误差及系统误差都较大,既不精密又不准确,我们称其精确度低。

精确度反映的是测量的总误差,亦即系统误差与随机误差之综合。精确度高说明系统误差与随机误差都小。

任何测量总希望测量结果有较高的精确度,而测量的精确度是由仪器精密度、测量方式、测量技术等许多因素决定的。应当指出:同一物理量可以用各种不同精密度的仪器来测量,但不应片面强调选用精密度高的仪器。所用仪器精密度高虽然有利于提高测量精确度,但仪器的价格较高,测量方法一般也较复杂。正确的做法是根据测量所要求的精确度来选择仪器,只要精密度合乎要求就可以,用精密度过高或过低的仪器都是不适合的。

§ 1-2 系统误差的发现与消除

如 § 1-1 所述,进行精确测量的条件之一是消除系统误差的影响。现将发现与消除系统误差的基本方法简单介绍如下。

一、系统误差的发现

一般情况下,系统误差是不能由重复多次测量来发现的。针对系统误差的来源,必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导(是否有错误或取了近似),检验或校准每一件仪器(是否有仪器误差),分析测量条件(是否受震动、气温、气压、温度和电磁场的影响等)。这些方面都可能对测量结果造成影响,引起系统误差。查找系统误差的常用方法如下。

(一) 对比法

(1) 测量方法的对比 用不同的方法测同一个量,看结果是否一致。如不一致,就存在系统误差。

(2) 仪器或测量装置的对比 采用不同的仪器或装置测量同一个量,结果不同,说明至少其中之一有系统误差。如其中之一是高一级标准器,可找出修正值,对有系统误差者进行修正。

(3) 改变测量渠道 如用同一装置测同一量时,通过改变测量的行程(如由大到小或由小到大大)将两结果进行比较。

(4) 改变测量中某些参量的数值 如用三线摆测转动惯量,改动摆角测周期来进行比较。

(5) 改变测量条件 如改变电路中某元件的位置,磁测中使磁性物体靠近等,看结果是否一致。

(6) 改变测量者 如换观测者进行测量,看结果是否一致。

(二) 理论分析法

(1) 分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况是否有差异,如无摩擦、单波长、角度很小、温度不变等是否满足。

(2) 分析测量仪器所要求的条件是否达到了,如测试前仪器调竖直、调水平等。

(三) 分析数据法

由概率统计理论可知,随机误差是遵从统计分布规律的,如果测量结果不遵从统计分布律,则存在系统误差。

(1) 将一组测量值按先后次序排列,如发现偏差的大小有规律地向一个方向变化,即前后的