

大学物理 实验教程

主编 聂妍 任广斌 王志林 侯宪春



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

大学物理实验教程

主 编 聂 妍 任广斌
王志林 侯宪春

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书是根据高等学校本科《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,结合实验室的实际情况,在物理实验教师的长期教学实践基础上编写的。内容包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理等 41 个基础实验、8 个设计性实验及 5 个计算机仿真物理实验。实验原理叙述清楚,公式推导完整,实验步骤简明扼要。本书开头介绍了实验规则、有效数字、数据处理、基本实验方法和基本量的测量等。实验开头有提要,介绍了本实验的重要意义;末尾有思考题,供学生预习或小结用。实验内容照顾了目前大多数学校的现有设备。

本书可作为高等学校本科非物理专业学生物理实验课教材,也可供有关教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/聂妍等主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5603-2649-8

I. 大… II. 聂… 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(2008)第 007304 号

策划编辑 王雪婷

责任编辑 张 瑞

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 15.75 字数 358 千字

版 次 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2649-8

定 价 24.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序 言

本书系使用多年的《物理实验》讲义的基础之上,结合物理实验教师多年实践教学的经验,根据高等学校本科《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》编写而成的,结合了当前物理实验课程的建设与改革,同时吸取了很多兄弟院校教师提出的宝贵意见。

在编写的过程中,我们力求做到以下几点:

1.通过完成具体的实验项目使学生获得有关的实验技能,强调了对学生物理实验基础理论和方法的系统教学,使学生获得的知识更为系统。

2.本书就各种误差的估算和数据处理方法在有关的实验项目的数据处理中提出了相应的不同要求,以进一步加强学生的数据处理能力训练。

3.所选的实验项目既照顾了基础物理实验室的基本条件,也注意了学生知识面的开拓和综合应用所学知识解决问题的能力培养。

4.为了开发学生的智力,培养学生分析和解决问题的能力、综合应用理论知识和实验技术的能力,训练学生设计实验的能力,把学生从理论学习的轨道逐渐引向工程实践方面来,使学生的定性分析和定量计算逐步和工程估算及实践手段结合起来,从而逐步掌握工程设计的常规步骤方法,了解科学实验的程序和实施方法,培养创新意识和综合能力,为今后参加工程实践、进行科学研究奠定基础,在几年来实践的基础上,增加了设计性实验内容和计算机仿真实验。

本书由佳木斯大学理学院基础物理教研室的聂妍、任广斌、王志林、侯宪春等同志共同编写的。几年来,很多教师对本书的书稿提出了不少的建议,编者在此敬致谢忱。由于编者水平有限,衷心欢迎读者批评指正。

编 者

2007年10月

目 录

绪 论	1
0-1 物理实验课的地位及任务	1
0-2 物理实验课的基本程序	2
0-3 怎样书写实验报告	2
第一章 测量误差与数据处理	4
1-1 测量与测量误差	4
1-2 系统误差的修正	8
1-3 偶然误差的估计	9
1-4 不确定度	14
1-5 有效数字及其运算	22
1-6 实验数据的表示和处理方法	24
第二章 物理实验方法和基本量的测量	36
2-1 物理实验方法	36
2-2 基本物理量的测量	40
第三章 力学实验	46
实验 1 物体密度的测定	46
实验 2 用光、电控制计时法测量重力加速度	51
实验 3 用单摆测定重力加速度	56
实验 4 利用复摆测定重力加速度	58
实验 5 用三线扭摆测量转动惯量	60
实验 6 用转动惯量仪测物体的转动惯量	63
实验 7 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	66
实验 8 驻波实验(弦振动测量音叉的频率)	70
实验 9 测定声波在空气中的传播速度	72
实验 10 声速的测量(超声)	74
实验 11 超声波的应用——探伤和测厚	75
实验 12 简谐振动特性研究与弹簧劲度系数测量	81
第四章 热学实验	85
实验 13 用传感器测空气的比热容比	85
实验 14 金属线膨胀系数的测定	88
实验 15 液体表面张力系数的测定	91
实验 16 用落球法测液体的黏滞系数	94
实验 17 不良导体导热系数的测量	97

实验 18 冷却法测量金属的比热容	101
第五章 电磁学实验	105
电磁学实验常用基本仪器简述	105
实验 19 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	112
实验 20 电表的改装和校正	115
实验 21 用惠斯登电桥测量电阻	118
实验 22 用双臂电桥测量电阻	121
实验 23 用模拟法研究静电场的分布	126
实验 24 用电位差计测量电动势	130
实验 25 示波器的使用	135
实验 26 用霍尔元件测量磁场	144
实验 27 热敏电阻的特性和应用	148
实验 28 固体液体电介质相对介电常数的测定	149
第六章 光学实验	153
光学实验仪器的使用和注意事项	153
实验 29 薄透镜焦距的测定	154
实验 30 用牛顿环测定透镜的曲率半径	158
实验 31 用分光计调整和测量三棱镜的折射率	162
实验 32 偏振现象的实验研究	169
实验 33 用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	173
实验 34 单缝衍射实验	177
实验 35 望远镜、显微镜及其应用	180
实验 36 用衍射光栅测光波波长	186
实验 37 音频信号光纤传播技术实验	189
第七章 近代物理实验	193
实验 38 迈克耳逊干涉仪	193
实验 39 弗兰克-赫兹实验	198
实验 40 全息照相	204
实验 41 密立根油滴实验	208
第八章 设计性物理实验	216
8-1 设计性物理实验概述	216
8-2 设计性物理实验题目	217
实验 1 简谐振动的研究	217
实验 2 光的衍射法测杨氏模量	218
实验 3 用凸透镜测狭缝宽度	219
实验 4 非线性电阻特性的研究	219
实验 5 用非平衡电桥法测热敏电阻	220
实验 6 用电谐振法测膜层厚度	220

实验 7 用霍尔元件测量地磁水平分量	221
实验 8 光栅特性的研究	222
第九章 计算机仿真物理实验	223
9-1 计算机仿真物理实验基础知识	223
9-2 计算机仿真物理实验举例	227
实验 1 偏振光实验的计算机仿真	227
实验 2 光电效应测定普朗克常量实验的计算机仿真	229
实验 3 弗兰克 - 赫兹实验的计算机仿真	233
实验 4 氢氘光谱拍摄实验的计算机仿真	236
实验 5 氢氘光谱测量及阿贝比长仪实验的计算机仿真	238

绪 论

0-1 物理实验课的地位及任务

一、实验在物理学中的地位

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学科。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,是自然科学和工程技术的基础。物理学的发展不仅在自身的学科体系内生长和发展出新的学科分支,而且它是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长、发展的基础和前导。物理理论和实验的发展,哺育着近代高新技术的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。可以说,现代高技术的发明和突破,无不源于物理学上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着物理实验研究的手段、方法和装备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。

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、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理规律的研究,物理学理论的产生、验证和发展,都必须以实验事实为基础,并不断受到实验的检验。物理实验是在人为条件下再现物理现象,并对现象进行观测,对测量结果进行分析的过程,是人们探索自然现象、发现物理规律、检验物理理论的有效工具,是工程技术的基础。

二、物理实验的任务

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、方法和手段,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。

大学物理实验课的具体任务是:

(1)通过大学物理实验学会对一些物理量的测量方法,掌握基本仪器的性能和使用方法;了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用;掌握常用的实验操作技术;能够正确记录实验数据及其处理;并能分析实验结果,写出比较好的实验报告。

(2)培养学生的基本科学实验技能,提高学生科学实验的基本素质,使学生初步掌握

实验科学思想和方法。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。

(3)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。

0-2 物理实验课的基本程序

物理实验教学过程一般包括预习、课堂操作和完成实验报告三个重要环节。

(1)预习。学生在进行实验之前要在全面阅读实验教材的基础上,重点搞清实验目的、原理(主要原理公式),以及所用仪器的性能和操作规程方法,明确实验方法和步骤及注意事项,并写出预习报告。预习一般在课外进行,也可以到实验室结合仪器装置进行预习。预习报告的内容应简单明了,主要有实验名称、原理公式、实验装置图(如电路图或光路图等),并要画出数据记录表格。预习完成不好者不得进行实验。课前预习的好坏,是能否顺利地进行实验的关键,应认真完成。

(2)课堂操作。学生到实验室后,首先把环境条件和仪器设备情况作好记录,如实验日期、天气、室温、湿度、气压等,同组人员姓名,所用仪器型号、规格等,然后在实验预习和教师讲解的基础上,熟悉仪器的使用方法,进行仪器安装和调试,在教师的许可下方可开始实验。在按实验步骤操作的同时,仔细地观察实验现象,认真记录实验数据。对错误的数据进行删改时,应注明删改的理由,避免随意涂改数据的坏习惯,更不能捏造数据。对实验中观察到的现象、出现的故障以及故障的排除情况都要记录下来。在实验过程中遇到疑难问题及时请教指导教师,实验完毕后将实验数据交教师阅审、签字,并将仪器整理好,方可离开实验室。学生在实验室的全部活动都要遵守实验室的规则和要求。

(3)实验报告。实验报告是对实验的分析、总结,在原始记录的基础上,对测量数据进行处理和分析,从而得出实验结果及对实验结果进行评价。实验报告不仅是实验者对实验的总结,更重要的是要供教师审阅的,因而实验报告的书写有一定的格式要求,整篇实验报告应做到字迹清楚,内容有条理、简明,工整,重点突出,作图规范,表格清晰。

0-3 怎样书写实验报告

实验报告的基本内容包括如下几个方面:

(1)实验名称。

(2)实验目的:记录实验所要达到的目的。

(3)实验原理:扼要阐述实验原理,力争图文并茂,写出原理公式及其适用的条件。

(4)实验仪器:写明仪器名称、型号、规格。

(5)实验内容:主要实验步骤、方法、测量条件的选择。

(6)数据记录及其处理:用表格形式记录出全部测量数据,标明物理量的单位。按实验要求计算待测量的量值和不确定度。报告上的计算过程应包括公式、代入数据、结果三个步骤,其他中间计算过程不写在报告上。最后写出实验结果表达式。作图法处理数据

时要符合制图规则,图线要规矩、美观。

(7)分析讨论:对实验结果进行分析和讨论包括对实验结果可靠性的分析,实验中发现的现象的解释,实验装置和实验方法存在的问题及改进的意见等。

第一章 测量误差与数据处理

1-1 测量与测量误差

一、测量

1. 测量的定义

物理实验离不开对物理量的测量。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,并得出其倍数的过程。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。

2. 单位

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为基础的,其中长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流强度(安培)、热力学温度(开尔文)、物质的量(摩尔)、发光强度(坎德拉)是基本单位,其他物理量的单位可以由这些基本单位导出,故称为导出单位。

3. 测量的分类

在物理实验中,测量可分为直接测量与间接测量两种。

(1) 直接测量:用仪表直接读出测量值的测量,称为直接测量,相应的物理量称直接测量量。例如,用米尺测量物体的长度,用电流表测量电流的大小等。

(2) 间接测量:需直接测量一些相关的量,然后通过一定的函数关系式进行计算从而得出所求的物理量。例如,测量固体圆柱的密度,首先用游标卡尺测出圆柱的高 h ,用螺旋测微计测出圆柱的直径 d ,最后再用天平测出圆柱的质量 M ,通过公式 $\rho = \frac{4M}{\pi d^2 h}$ 即可算出圆柱的密度 ρ 。

从测量条件上看,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量:在对某一物理量进行多次重复测量过程中,每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如,同一个人在同一仪器上采用同样的测量方法对同一待测物理量进行多次重复测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量是等精度测量。

(2) 不等精度测量:在对某一物理量进行多次重复测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如,在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,在实验中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件

的变化对测量结果影响不大时,仍可视这种测量为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,所以绝大多数实验都采用等精度测量。

4. 测量的读数和记录

在进行测量时,正确的读数和记录是测量的关键。对于不同仪器有多种读数方法,将在以后的实验中具体介绍,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一半。

(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。

二、测量值、真值和测量误差

1. 真值

物理量所具有客观的真实数值,称为真值,一切测量的目的就是力图要得到真值。

2. 测量值

用直接测量方法所得到的量值。

3. 测量误差

在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能以及判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差,假设待测物理量的真值为 x_0 ,测量值为 x ,则测量误差 $\Delta x = x - x_0$ 。

一切测量值都毫无例外地存在着测量误差。为了得到最好的测量结果,也就是说尽量减小测量误差,我们必须研究测量误差的性质及来源,并采取适当措施减小测量误差。

三、误差分类

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为系统误差、偶然误差及过失误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量(等精度测量)时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),这类误差称为系统误差,其特点是:确定性、有规律性、可修正性。

(1) 系统误差的来源

① 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装

置的偏心差、电表的示值与实际值不符等都属于仪器的缺陷,在使用时,可采用适当方法加以减小或消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的使用状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

② 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式的近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求而引起的,如单摆测重力加速度时,所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

③ 环境误差。它是由外部环境,如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

④ 实验人员的生理或心理特点所造成的误差。如停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏一方斜视等。

(2) 系统误差的分类

系统误差按对其掌握程度可分为已定系统误差、未定系统误差和变值系统误差。

① 已定系统误差。在一定的条件下,采用一定的方法,对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。一经发现,在测量结果中可以修正。

② 未定系统误差。指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号而仅知最大误差范围(或极值误差)的系统误差。

③ 变值系统误差。这种误差在测量过程中呈规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置而变。又可分为线性系统误差,误差按线性规律变化,误差公式是线性函数;周期系统误差,误差按周期规律变化,误差公式是周期函数;复杂规律变化,误差按非线性、非周期的复杂规律变化,误差公式是非线性函数。系统误差产生的原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,如它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正;若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围。

2. 偶然误差

在测量过程中,即使在系统误差消除以后,在相同条件下,多次重复测量(等精度测量)同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所得误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测,也无法控制,呈现无规则的起伏。即由于偶然的或不确定的因素所造成的测量值的无规则的涨落被称为偶然误差,也称随机误差。例如,观察时目的物对的不准;平衡点确定不准;读数的估计;由于环境温度、电源电压的起伏以及振动、气流、噪声等影响使测量结果产生微小变化等。

由于上述引起偶然误差的因素是无法确定的,偶然误差具有随机性,因而对于偶然误差不能像对待系统误差那样,找出原因尽量排除。偶然误差的存在使某一量的多次测量结果不尽相同,而且每次测量误差的大小和正负无法确定。但是当测量次数足够多时,其偶然误差却服从一定的统计规律——正态分布(也叫高斯分布)规律。其特点是:

- (1) 绝对值相等的正误差和负误差出现机会(概率)相等;
- (2) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会(概率)大;
- (3) 误差不会超出一定的范围;
- (4) 当测量次数无限多时,测量值的算术平均值接近于真值。

偶然误差正态分布规律如图 1-1 曲线所示,该曲线横坐标为误差 x ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(x)$,曲线下阴影部分就是误差出现在 $x \sim x + dx$ 区间内的概率。根据统计理论可以证明

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

式中, σ 为一个取决于具体测量条件的常数,称为标准误差。

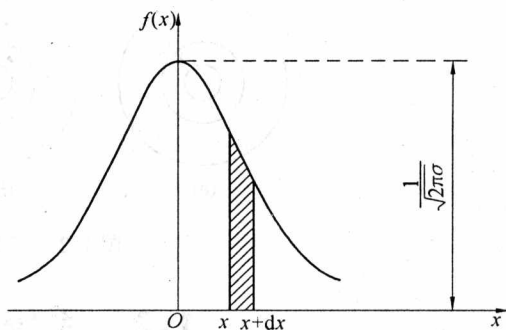


图 1-1

根据偶然误差的性质,通常采用多次测量方法来减小偶然误差,但是偶然误差是不能消除的。

3. 过失误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为过失误差。它是由于实验者使用仪器的方法不正确,读错、记错、标错测量数据或实验条件的突变,以及外部的强突发性干扰等原因造成的。含有过失误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失误差。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

四、对测量结果的评价

在科学实验中,采用精密度、正确度和精确度来评价测量结果,这三个概念的涵义如下:

1. 精密度

表示测量结果偶然误差的大小。精密度高,则指多次测量数据的离散性小(即测量的重复性好),也即偶然误差小,但系统误差大小不明确。

2. 正确度

表示测量结果中系统误差的大小。测量正确度高,就是指测量数据的平均值偏离真值的程度小,测量结果的系统误差小,但偶然误差的大小不明确。

3. 精确度

是测量结果系统误差与偶然误差的综合评定,测量精确度高,说明测量数据比较集中,且逼近于真值,即测量的偶然误差与系统误差都比较小。在实验中总是希望尽量提高测量的精确度。

图 1-2 以打靶时弹着点的分布情况为例,分别说明上述三个概念的意义,图 1-2(a) 表示射击的精密度高,但正确度较差,即偶然误差小,系统误差大;图 1-2(b) 表示射击的正确度高,但精密度较差,即系统误差小,偶然误差大;图 1-2(c) 表示精密度和正确度都较高,即精确度高,也就是说偶然误差和系统误差都小。

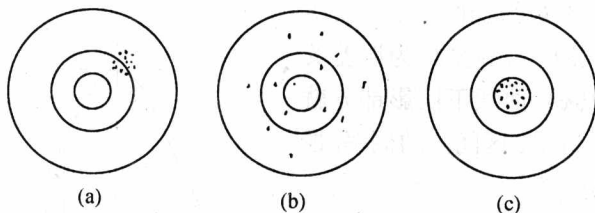


图 1-2 打靶弹着点分布

1-2 系统误差的修正

在许多情况下,系统误差是影响测量结果的主要原因。找出系统误差,设法修正或消除它对测量结果的影响,是误差分析的一个重要内容。

一、如何发现系统误差

下面简单介绍几种发现系统误差的方法:

1. 数据分析法

当随机误差比较小时,待测量的绝对误差不是随机变化而呈规律性变化,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差。

2. 理论分析法

分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。分析实验仪器要求的条件是否得到满足。

3. 对比法

这种方法适合于固定的系统误差。

(1) 实验方法对比。用不同方法测量同一物理量,在随机误差允许的范围内观察结果是否一致。

(2) 仪器对比法。例如,用两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,如果其中一个为标准表,就可得出另一个表的修正值。

(3) 改变测量条件进行对比。例如,电流正向与电流反向读数;在增加砝码过程与减少砝码过程中读数,观察结果是否一致。

二、系统误差的消除与修正

任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能理想到不产生系统误差的程度。对于系统误差:一是进行修正;二是消除其影响。

1. 消除产生系统误差的根源

如果能够找到产生系统误差的根源,无论是理论模型、实验仪器还是实验条件,我们都可以使其更加完善,从而减小系统误差的影响。

2. 用修正值对测量结果进行修正

用标准仪器对测量仪器进行校准,找出修正值或校准曲线,对结果进行修正。对由理

论公式的近似造成的误差,找出修正值进行修正。

3. 选择适当的测量方法,减小和消除系统误差

(1) 交换法。在测量过程中对某些条件进行交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用。例如,为了消除天平不等臂而产生的系统误差,可将被测物作交换测量。

(2) 替换法。保持测量条件不变,选择一个大小适当的已知量替代被测量而不引起测量仪器示值的改变,则被测未知量就等于这个已知量。由于在替代的两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,从而消除了测量过程带来的系统误差。

(3) 抵消法。改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反,取其平均值作为测量结果以消除系统误差。此外,等时距对称观测法可消除按线性规律变化的变值系统误差;半周期偶数测量法可消除按周期性变化的变值系统误差。

1-3 偶然误差的估计

下面介绍在不同测量条件下偶然误差的估计方法(假定不存在系统误差与过失误差)。

一、单次直接测量偶然误差的估计

在物理实验中,常常由于条件不许可或测量精度要求不高等原因,对一个物理量的直接测量只进行一次,这时的测量误差是根据仪器上注明的仪器误差以及测量条件来定的。例如,砝码误差、电阻箱及表头误差。没有注明,可取仪器的最小分度的一半作为单次测量误差。例如,用米尺测量物体的长度,最小分度为 1 mm,误差可取 0.5 mm。

二、多次直接测量偶然误差的估计

在实验中常常存在着偶然因素的影响,有时引起的偶然误差较大,如果只作一次测量,结果并不可靠,为了减小偶然误差,应在相同条件下对同一物理量进行多次测量,然后求其平均值及误差。

1. 算术平均值

设在相同条件下对某物理量进行了 n 次重复测量,其测量结果分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 。这些测量值一般不尽相同,偏大偏小无规则地出现,反映在测量中有偶然因素影响。则 n 次的算术平均值的定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

根据偶然误差的统计理论对一组测量 n 次的数据中,算术平均值最接近真值,也称为测量的最佳值。当测量次数 n 无限增大时, $\bar{x}$ 将趋近于真值。

2. 算术平均偏差

设各测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 的偏差为 $\Delta x_i, i = 1, 2, \dots, n$, 即 $\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|$ (取绝对值) 表示因偶然因素的影响而产生的偏差。则算术平均偏差的定义为

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \cdots + \Delta x_i + \cdots + \Delta x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

式中, $\overline{\Delta x}$ 为算术平均偏差, $\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|$, $\Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|$, $\cdots$, $\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|$, $\cdots$, $\Delta x_n = |x_n - \bar{x}|$ 。

$\overline{\Delta x}$ 表示偶然因素影响测量结果的程度, 反映测量重复性的好坏。

3. 标准偏差

(1) 测量量的标准偏差

具有偶然误差的测量值将是分散的, 对分散情况的定量表示有标准偏差 s , 它的定义式为

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

式中, n 为测量次数; s 为测量值的分散程度。

(2) 算术平均值的标准偏差

测量值有偶然误差, 它们的算术平均值也必然有偶然误差, 由于求和时偶然误差的抵偿效应, 算术平均值的误差绝对值较小, 它的标准偏差 $s(\bar{x})$ 也应小于 s , 可以证明

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

式中, n 为测量次数。

(3) 标准偏差的统计意义

标准偏差小的测量值, 表示分散范围较窄会比较向中间集中, 而这种表现显示测量值偏离真值较小, 即测量值的可靠性较高。

按误差理论的高斯分布可知:

$[\bar{x} - s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 68%;

$[\bar{x} - 1.96s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + 1.96s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 95%;

$[\bar{x} - 2.58s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + 2.58s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 99%。

在上述两种误差计算方法中标准偏差与偶然误差理论的高斯误差理论的高斯误差分布定律的关系更为直接和简明, 因此, 在正式的误差分析和计算中都采用标准偏差作为偶然误差大小的量度。但对于初学者来说, 主要是树立误差概念和对实验进行粗略的简明分析, 因此, 采用算术平均偏差进行误差分析和运算, 这要简单得多。

最后应该指出, 严格来讲, 误差是测量值与真值之差, 而测量值与平均值之差称为偏差, 二者是有差别的。当测量次数很多时, 多次测量值的算术平均值最接近真值, 因此, 各测量值与平均值的偏差也就很接近于它们与真值的误差。这样也就常常不细研究偏差与误差的区别了。分别把标准偏差称为标准误差, 把算术平均偏差称为算术平均误差。最后, 我们把多次测量的结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \text{ 或 } x = \bar{x} \pm s(\bar{x})$$

式中, x 为测定值; $\bar{x}$ 为多次测量数据的算术平均值, 代表最佳测定值; $\overline{\Delta x}$ 为算术平均误差; $s(\bar{x})$ 为标准偏差, 代表多次测量数据的分散程度; “ $\pm$ ” 号表示每次测量值可能比 $\bar{x}$ 大