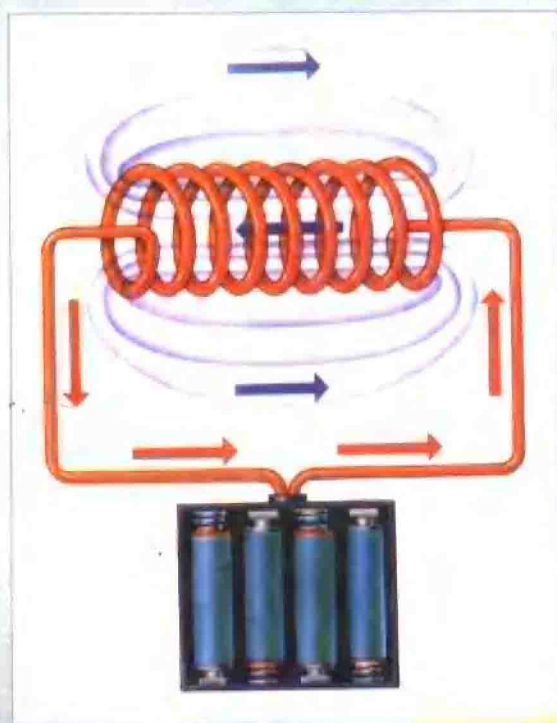


高等院校选用教材系列

大学物理实验

赵家凤 主编



科学出版社

大学物理实验

赵 家 凤 主 编

科 学 出 版 社

1 9 9 9

内 容 简 介

《大学物理实验》是全日制高等院校的普通物理实验教科书。

本书是四川联合大学(西区)应用物理系长期从事实验教学的教师和工程技术人员的教学实践经验的集成。根据课程教学的基本要求,全书分为六章,即测量误差及数据处理、力学和热学实验、电磁测量、光学实验、综合性和近代物理实验、设计性实验。书中列有31个实验项目,每个实验介绍有实验原理、实验仪器装置、实验内容(包括实验方法)以及实验结果的表示,并附有思考题。为教学工作和学生学习提供了方便。

本书可作为高等院校各专业的普通物理实验教科书,电视大学、职工大学也适用,也可作为专科或其他从事物理实验的工作人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵家凤主编. -北京:科学出版社,1999.1

ISBN 7-03-006985-4

I. 大… II. 赵… III. 物理-实验-高等学校 N. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第25794号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1999年1月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1-6 000 字数:345 000

定价:21.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

主 编 赵家凤

编写人员(以姓氏笔画为序)

王广照 王恩宏 陈代平 张志芳

张勋友 张俊峰 饶大庆 钱定平

梁德富

前 言

《大学物理实验》一书,是根据高等工科院校物理实验课程教学基本要求的精神,结合我校现有仪器设备,在历届“物理实验”教材基础上,总结长期的教学实践,反复修改、编写而成.它是我室长期从事实验教学的教师和工程技术人员辛勤劳动的成果,是集体智慧的结晶.

物理实验课是工科学生开设的一门独立的必修技术基础课.本书按课程自身的体系和它所承担的任务,遵照循序渐进的原则,分为“测量误差及数据处理”、“力学和热学实验”、“电磁测量”、“光学实验”、“综合性和近代物理实验”、“设计性实验”六章,内容以加强基础训练为主,让学生在学习物理实验知识,掌握实验方法和实验技能等方面受到系统地基本训练.同时,物理实验教材内容,应当体现学科发展的新动向,使教学更好地适应现代科技的发展,因而本书在“测量误差”中,引入了“不确定度”评定测量结果,改变了用传统的“算术平均误差”,这也是误差理论发展之所需.按物理教学计划,本课为 60 学时,每个实验 3 学时.书中安排有 31 个实验,可满足工科各个专业选择的需要.

教材编写过程中,力求结合学生实际,符合实验教学实际,使《大学物理实验》一书成为读者喜爱的教科书.愿望是好的,但由于水平有限,难免有不妥之处,恳请读者批评指正.

在编写过程中,参考了许多兄弟院校的实验教材和有关著作,在此表示衷心感谢.

编写成员负责部分实验的编写和各个图示,主编除完成部分编写内容外,主要负责全书的审定、统稿和定稿工作.

1995 年 11 月

学生实验守则

一、做实验前要认真预习,没有预习不许做实验,上课不迟到不缺席.听好教师的讲课,服从实验工作安排.按时上交实验报告.

二、实验时严格遵守操作规程.任何仪器,未经许可不得动用.准许使用的仪器,必须严格按规程操作.严禁乱扳硬扭.仪器发生故障要立即报告指导教师.损坏仪器设备要填“仪器设备损坏报审表”,并按规定赔偿.注意安全,避免事故,电学实验联好电路后要经过教师检查同意后,方可接通电源.

三、树立良好学风.做实验一丝不苟,积极思维,仔细操作.原始数据记录务求真实、完整,每次实验结束后要请指导教师审阅签字.

四、讲文明、讲礼貌.不高声喧哗,不打闹、嬉戏,保持实验室安静.不随地吐痰,不乱扔纸屑,不乱涂乱画,严禁吸烟,保持实验室整洁.按指定位置做实验,不乱动别组仪器.做完实验,将仪器恢复原状.实验结束,值日生做好实验室清洁.

目 录

绪论.....	(1)
---------	-----

第一章 测量误差及数据处理

第一节 测量与误差.....	(4)
第二节 测量结果的评定和不确定度.....	(8)
第三节 有效数字及其运算法则	(15)
第四节 数据处理	(17)
* 函数计算器处理实验数据	(25)
附录 I 随机误差的补充知识	(29)
附录 II 标准合成与技术规范合成不确定度	(30)
附录 III 教学中常用仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$	(32)
附录 IV 数字修约的国家标准 GB1 : 1	(33)

第二章 力学和热学实验

实验一 长度测量	(35)
(一) 游标卡尺	(35)
(二) 螺旋测微计	(38)
实验二 物体的密度测定	(42)
实验三 摆的研究	(48)
(一) 单摆	(48)
(二) 复摆测重力加速度	(51)
实验四 气垫导轨实验	(57)
(一) 速度和加速度的测量	(57)
(二) 验证动量守恒定律	(60)
实验五 杨氏弹性模量的测定	(66)
实验六 转动惯量	(71)
(一) 三线摆测刚体转动惯量	(71)
(二) 刚体转动实验仪测转动惯量	(77)
实验七 液体表面张力系数的测定	(80)
(一) 用拉脱法测液体的表面张力系数	(81)
(二) 用毛细管升高法测水的表面张力系数	(84)
实验八 液体粘滞系数的测定	(88)

第三章 电磁测量

实验九 电学实验基础	(95)
实验十 伏安法测非线性电阻	(106)
实验十一 电表的改装与校准	(109)
实验十二 静电场的描绘	(113)
实验十三 惠斯通电桥	(115)
实验十四 电位差计	(122)
实验十五 冲击电流计	(127)
实验十六 双臂电桥	(132)
实验十七 示波器原理及使用	(137)
实验十八 霍尔效应及磁场的测定	(145)

第四章 光学实验

实验十九 薄透镜焦距的测定	(152)
实验二十 望远镜和显微镜的组装	(157)
实验二十一 分光计的调节和使用	(161)
实验二十二 等厚干涉——牛顿环、劈尖	(167)
实验二十三 光栅特性及光波波长的测定	(171)
实验二十四 光的偏振	(176)
实验二十五 照相技术	(181)

第五章 综合性和近代物理实验

实验二十六 弗兰克-赫兹实验	(188)
实验二十七 普朗克常量的测定——光电效应	(196)
实验二十八 用密立根油滴法测电子的电荷	(201)
实验二十九 迈克耳孙干涉仪测 He-Ne 激光的波长	(208)
实验三十 全息照相	(213)
实验三十一 不良导体导热系数的测定	(216)

第六章 设计性实验

实验一 弹簧振子的运动	(220)
实验二 多量程电表	(221)
实验三 热电偶的校准	(221)
实验四 测绘伏安特性曲线	(222)
实验五 单缝衍射的研究	(222)
实验六 全息光栅	(223)

附表	(224)
----------	-------

绪 论

物理实验的地位和作用

用人为的方法让自然现象再现,从而加以观察和研究,这就是实验.实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段.科学技术越进步,科学实验就显得越重要,任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得.由实验观察到的现象和测出的数据,加以总结抽象,找出内在联系和规律,就得到理论,实验是理论的源泉.理论一旦提出,又必须借助实验来检验其是否具有普遍意义,实验是验证理论的手段,是检验理论的裁判.麦克斯韦提出的电磁理论(他预言电磁波的存在)只有当赫兹作出电磁波实验后才被人们公认;杨振宁、李政道提出基本粒子弱相互作用的领域内宇称不守恒理论,只有当吴健雄作出实验验证后,才被同行学者承认,从而才有可能获得诺贝尔奖,然而,人们掌握理论的目的,是在于应用它来指导生产实际,促进科学进步,推动社会前进,当理论付诸于实际的应用时,仍必须通过实验,实验是理论应用的桥梁.任何一门科学的发展都离不开实验.

物理学是一门实验科学,物理学的形成和发展是以实验为基础的.物理实验的重要性,不仅表现在通过实验发现物理定律,而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关.物理学史表明,经典物理学的形成,是伽俐略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象,反复实验,运用抽象思维方法总结出来的.近代物理的发展,是在某些实验基础上提出假设,例如普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”.但还需要在假设基础上再经过大量的实验证实,假设才成为科学理论,实践证明物理实验是物理学发展的动力.在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的,没有理论指导的实验是盲目的,实验必须总结抽象上升为理论,才有其存在的价值,而理论靠实验来检验,同时理论上的需要又促进实验的发展.1752年富兰克林利用风筝把云层的电引入室内,进行室内雷鸣闪电实验,证实了雷电与电火花放电具有同一本质,进而找出了雷电的成因,并且在此基础上发明了避雷针.这个简单的实验事实,足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用.

物理实验在探索和研究新科技领域,在推动其它自然科学和工程技术的发展中,同样起着重要的作用.自然科学迅速发展,新的科学分支层出不穷,但基础学科就是数学和物理两门,物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学,物理实验的特点是在于它具有普遍性:力、热、电、光都有;具有基本性——它是其它一切实验的基础;同时它还具有通用性——实用于一切领域,把高、精、尖的实验拆成“零件”,绝大部分是常见的物理实验.在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物体运动状态的控制,这正是成熟的物理实验的推广和应用.现代高科技发展,设计思想,方法和技术也来源于物理实验,因此,物理实验是工程技术和高科技发展的基础.

物理实验课的目的和任务

物理实验是基础实验学科. 对理工科大学生, 无论专业如何, 物理实验能力的培养必不可少, 物理实验是大学生进入大学后, 受到系统的实验方法、实验技能训练的开始, 是后续实验课入门的响导, 因此“大学物理实验”课是理工科学生必修的一门独立的基础实验课程.

物理实验中有的属于定性实验, 着重于弄清物理现象的成因和规律; 有的属于定量实验, 着重于各物理量、物理规律之间的数量关系的测量; 也有的是验证某些物理现象与定律. 不同种类的物理实验都与测量有关, 但测量不仅限于获得数据, 而应着重于物理思想, 实验技能. 大学物理实验课, 使学生接受一系列科学实验的训练, 学习物理实验知识, 基本方法; 了解科学实验的主要过程与基本技能; 学会如何用实验的方法研究和解决问题.

大学物理实验课的具体任务是:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量, 学习物理知识, 加深对物理学原理的理解.

2. 培养和提高学生的科学实验能力, 其中包括: 能够自行阅读实验教材, 做好实验前的准备; 能够借助教材与说明书, 正确使用常用仪器; 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断; 能够正确记录和处理实验数据, 绘制曲线, 说明实验结果, 撰写合格的实验报告; 能够完成简单的设计性实验.

3. 培养和提高学生的科学实验素养, 要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风; 勤奋工作, 严肃认真的工作态度; 主动研究和坚韧不拔的探索精神; 遵守纪律, 团结协作, 爱护公物的优良品德.

大学物理实验课的三个教学环节及其基本要求:

物理实验课进行程序, 大致分为: 提出任务, 确定方案, 选择仪器设备, 安装调试, 观察测量, 记录数据, 总结分析写出科学论文(实验报告). 每个实验环节都有一定的基本要求, 基本技能训练. 科学实验技能的训练贯穿于实验的全过程中, 实验方法又各自分散在不同类型的实验中. 因此, 实验课有它自身的体系, 要达到学会实验, 掌握基本技能的目的, 就要认真进行每个实验环节的训练, 并且在不同实验内容中学习实验方法.

大学物理实验课的进行, 分课前预习, 课堂操作, 课后写实验报告三个阶段, 每个阶段的基本要求是:

1. 实验前要作好预习. 预习时, 主要阅读实验教材, 了解实验目的, 搞清楚实验内容, 要测试什么量, 使用什么方法, 实验的理论依据(原理)是什么, 使用什么仪器, 其仪器性能是什么, 如何使用, 操作要点及注意事项等, 在此基础上, 回答好“预习思考题”草拟出操作步骤, 设计好数据记录表格, 准备好自备的物品(如坐标纸、三角板、计算器等).

只有在充分了解实验内容的基础上, 才能在实验操作中从容地观察现象, 思考问题, 减少操作中的忙乱现象, 提高学习的主动性, 所以每次实验前, 学生必须完成规定的预习内容; 一般情况下, 教师要检查学生的预习情况, 并评定预习成绩, 没有预习的学生不许做实验.

2. 课堂认真进行实验, 实验课一般先由指导教师作重点讲解, 交待有关注意事项, 扼

要、简短地讲授内容,具有指导性和启发性,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意那些在操作中容易引起失误的地方。

实验进程,首先是布置、安装和调试仪器。桌面上若干仪器的布置是否合理,读数是否方便,做到操作有序,需要动脑筋,使仪器设备尽可能为我所用。为了使仪器装置达到最佳工作状态,必须细致、耐心地进行调试。这样很可能要花去较多的时间,切忌急躁。要合理选择仪器的量程,如果在调试中遇到了困难自己不能解决时,可以请教师指导。

调试准备就绪后,开始进行测量。测量的原始数据要整齐地记录在自己准备好的表格中,读数一定要认真仔细,实验原始数据的优劣,决定实验的成败。记录的数据一定要标明单位。不要忘记记录有关的环境条件,如温度、压强等。如果两个学生同做一个实验,既要分工又要协作,各自记录实验数据,共同完成实验。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变,要注意操作姿势,身体不要靠着桌子,不要使仪器发生移动,或受到振动。如果遇到仪器、装置出现故障,学生应力求自己动手解决,或留意观察教师怎样分析判断仪器的毛病,怎样修复(可能当场修复的仪器)。测完数据后,记录的数据要经指导教师审阅签字。发现错误数据时,要重新进行测量。

3. 写实验报告

实验报告是实验工作的总结,是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会编写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确,讨论认真。实验报告要求在课后独立完成。用学校统一印刷的“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,正确表示有效位数和单位。

数据处理 根据实验目的对测量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,计算要写出主要计算内容。

实验结果 扼要写出实验结论。

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,回答实验思考题。

实验报告必须在做完实验一周之内完成,按时交报告。实验报告是学生实验成绩考核的主要依据,学生必须认真进行实验总结,撰写合格的实验报告,努力提高科学实验的表达能力。

第一章 测量误差及数据处理

误差理论及数据处理,是一切实验结果中不可缺少的基本内容,是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科,随着科技事业的发展,近年来误差理论的基本概念和~~理~~方法也有很大发展,误差理论以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析,其目的是对测量结果作出评定,最大限度地减少测量误差,或指出减少测量误差的方向,提高测量质量,提高测量结果的可信赖程度。对低年级学生,这部分内容难度较大,本课程仅限于介绍误差分析的初步知识,着重几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证。

第一节 测量与误差

物理实验主要是再现物体运动形态,探索物理量之间的关系,从而验证理论或发现规律。

进行物理实验,不仅要进行定性的观察,而且还要进行定量的测量,以取得物理量数量的表征。测量就是将待测量与同类标准量(量具)进行比较,得出结果,这个比较的过程就叫测量,比较的结果记录下来就是实验数据。测量数据应包含测量值的大小和单位,二者缺一不可。

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测物体的长,用天平称衡物体的质量,用电流表测电流等,都是直接测量。间接测量借助函数关系由直接测量的结果计算出所要求的物理量。例如钢球的直径 D 由直接测量测出,则由公式 $V = \frac{\pi}{6} D^3$ 求出钢球的体积就是间接测量。

物理实验中有直接测量,也有间接测量。但大量的是间接测量,这是因为在某些情况实现直接测量比较复杂,或者直接测量精度不高。

此外,根据测量条件来分,有等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一个仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫非等精度测量,非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。

误差与偏差

在任何测量过程中,由于测量仪器、实验条件及其他种种原因,测量是不能无限精确的,测量结果与客观存在的真值之间总有一定差异,测量值 N 与真值 N_0 之差定义为误差,即

$$\Delta N = N - N_0$$

显然误差 ΔN 有正负大小之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差.注意,绝对误差不是误差的绝对值!

误差存在于测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能.

实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制定方案和选用仪器的,不要以为仪器精度越高越好,因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总合,要以最小的代价来取得最好的结果,要合理的设计实验方案,选择仪器,确定采用这种或那种测量方法.如比较法、替代法、天平的复称法等,都是为了减少测量误差;对测量公式进行这种或那种的修正,也是为了减少某些误差的影响;在调节仪器时,如调铅直、水平,要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计;电表接入电路和选择量程都要考虑到引起的误差大小.在测量过程中某些对结果影响大的关键量,就要努力想办法将它测准;有的量测不太准对结果没有什么影响,就不必花太多的时间和精力去对待.处理数据时,某个数据取到多少位,怎样使用近似公式,作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取,如何求直线的斜率等,都要考虑到引入误差的大小.

由于客观条件所限、人的认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能是近似值.设某物理量真值为 x_0 ,进行 n 次等精度测量,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, (测量过程无明显的系统误差). 它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$

.....

$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

求和

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$, 可以证明 $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \rightarrow 0$, 而且 $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$ 是 x_0 的最佳估计值, 称 $\bar{x}$ 为近真值.

为了估计误差, 定义测量值与近真值的差值为偏差: 即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$.

偏差又叫残差. 实验中真值得不到, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道, 实验误差分析中要经常计算这种偏差, 用偏差来描述测量结果的精确程度.

相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫相对误差,用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

由于真值无法知道,所以计算相对误差时常用 N 代替 N_0 . 在这种情况下, N 可能是公认值,或高一级精密仪器的测量值,或测量值的平均值. 相对误差用来表示测量的相对精确度,其值用百分数表示,保留两位数.

系统误差与随机误差

根据误差的性质和产生的原因,可分为系统误差和随机误差.

系统误差 是指在一定条件下多次测量结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化,系统误差的特征是它的规律的确定性. 系统误差的来源有以下几方面:

仪器误差 —— 由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的.

理论误差 —— 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;或测量方法所带来的.

观测误差 —— 由于观测者本人生理或心理特点造成的.

例如,用落球法测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,是测量方法不完善造成的;用停表测运动物体通过某段路程所需的时间,若停表走时太快,即使测量多次,测量的时间 t 总是偏大为一固定值,是仪器不准确造成的;在测量过程中,若环境温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,是由于环境因素变化引起的,…….

在任何一项实验工作和具体测量中,首先必须要想办法,最大限度地消除或减少一切可能存在的系统误差. 消除系统误差,首先要找到引起系统误差的原因,针对性地采取措施才能消除它的影响,或者对测量结果进行修正. 发现系统误差需要改变实验条件和测量方法,反复进行对比,系统误差的减小或消除是比较复杂的问题.

随机误差 实验中即使采取了措施,对系统误差进行修正或消除,并且进行了精心观测,然而每次测量值仍会有差异,其误差值的大小和符号的正负,起伏不定,无确定性,这种误差是由于感官灵敏度和仪器精密度所限,周围环境的干扰以及随着测量而来的其他不可预测的随机因素的影响造成的,因而把它叫做随机误差. 当测量次数很多,随机误差就显示出明显的规律性. 实践和理论都证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点是: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;绝对值相等的正负误差出现的概率相同;绝对值很大的误差出现的概率趋于零. 因此增加测量次数,可以减小随机误差,但不能完全消除.

由于测量者过失,如实验方法不合理,用错仪器,操作不当,读错刻度,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,只要测量者采取严肃认真的态度,过失误差是可以避免的.

实验中,精密度高是指随机误差小,而数据很集中;准确度高是指系统误差小,测量的平均值偏离真值小;精确度高是指测量的精密度和准确度都高,数据集中而且偏离真值

小,即随机误差和系统误差都小.

随机误差的估算

关于随机误差的分布规律和处理方法,涉及较多的概率论和数理统计知识,这里只引用结论,不进行论证.

大量实践证明,对某一观测量进行多次重复测量,其结果服从一定的统计规律,也就是正态分布(或高斯分布)[见附录 I].我们用描述高斯分布的两个参数($\bar{x}$ 和 σ) 来估算随机误差.

设在一组测量值中, n 次测量的观测值分别为: $x_1, x_2, \dots, x_n$

1. 根据最小二乘法原理证明,多次测量的算术平均值:

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

是待测量真值 x_0 的最佳估计值. 称 $\bar{x}$ 为近真值,以后我们将用 $\bar{x}$ 来表示多次测量的近似真实值.

2. 标准偏差

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (1-2)$$

其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 之间的概率为 68.3%.

算术平均值的标准偏差

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-3)$$

其意义表示测量值的平均值的随机误差在 $-\sigma_{\bar{x}} \sim +\sigma_{\bar{x}}$ 之间的概率为 68.3%,或者说待测量的真值在 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 范围内的概率为 68.3%. 因此 $\sigma_{\bar{x}}$ 反映了平均值接近真值的程度.

标准偏差 σ_x

作为随机误差大小的描述, σ_x 小表示测量值密集,即测量的精密度高; σ_x 大表示测量值分散,即测量的精密度低.

估计随机误差还有用 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$ (算术平均误差)、 $2\sigma_x$ 、 $3\sigma_x$ 、或然误差等其他方法,本书采用“贝塞尔公式法”计算标准偏差,同时用它来表述 A 类不确定度 S_x .

异常数据的剔除

统计理论表明,测量值的偏差超过 $3\sigma_x$ 的概率已小于 1%,因而,可以认为偏差超过 $3\sigma_x$ 的测量值是由其他因素或过失造成的,为异常数据,应当剔除.剔除的方法是将多次测量所得的一系列数据,算出各测量值的偏差 Δx_i 和标准偏差 σ_x ,把其中最大的 Δx_j 与 $3\sigma_x$ 比较,若 $\Delta x_j > 3\sigma_x$,则认为第 j 个测量值是异常数据,舍去不计.剔除 x_j 后,对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差,并继续审查,直到各偏差均小于 $3\sigma_x$ 为止.

第二节 测量结果的评定和不确定度

测量的目的不但要得到待测量的近真值,而且要对近真值的可靠性作出评定(即指出误差范围).

(一) 不确定度的含义

不确定度是“误差可能数值的测度”,表征所得测量结果代表被测量的程度,也就是因测量误差存在而对被测量不能肯定的程度,因而是测量质量的表征.

具体说来,不确定度是指测量值(近真值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中.不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低.在实验和测量工作中,不确定度一词近似于不确定,不明确,不可靠,有质疑,是作为估计而言的;误差是未知的.因此,不可能用指出误差的方法去说明可信赖程度,而只能用误差的某种可能值去说明可信赖程度,所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量.此外,用不确定度评定实验结果的误差,其中包含了各种来源不同的误差对结果的影响,而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律.

(二) 测量结果的表示和合成不确定度

科学实验中要求表示出的测量结果,既要包含待测量的近真值 $\bar{x}$,又要包含测量结果的不确定度 σ ,并写成物理含意深刻的标准表达形式,即

$$x = \bar{x} \pm \sigma \quad (\text{单位})$$

式中 x 为待测量, $\bar{x}$ 是测量的近真值, σ 是合成不确定度,一般保留一位有效数.

直接测量时若不需要对被测量进行系统误差的修正,一般就取多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 作为近真值;实验中有时只需测一次或只能测一次,该次测量值就为被测量的近真值.若要求对被测量进行已定系统误差的修正,通常是将已定系统误差(即绝对值和符号都确定的可估计出的误差分量)从算术平均值 $\bar{x}$ 或一次测量值中减去,从而求得被修正后的直接测量结果的近真值.例如,螺旋测微计测长时,从被测量结果中减去螺旋测微计的零差.在间接测量中, $\bar{x}$ 即为被测量的计算值.

测量结果的标准表达式,给出了一个范围 $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$,表示待测量的真值在 $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$ 之间的概率为 68.3%,不要误认为真值一定在 $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$ 之间.认为误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间是错误的.

标准式中,近真值、不确定度、单位三要素缺一不可,否则就不能全面表达测量结果.同时近真值 $\bar{x}$ 的末尾数应与不确定度的所在位数对齐,近真值 $\bar{x}$ 与不确定度 σ 的数量级、单位要相同.

合成不确定度 σ 是由不确定度的两类分量(A类和B类)求“方和根”计算而得.为使问题简化,本书只讨论简单情况下(即A类、B类分量各自独立变化,互不相关)的合成不确定度.

A类不确定度(统计不确定度)用 S_i 表示,B类不确定度(非统计不确定度)用 σ_B 表示,合成不确定度为

$$\sigma = \sqrt{S_i^2 + \sigma_B^2}$$

(三) 合成不确定度的两类分量

实验不确定度,一般来源于测量方法、测量人员、环境波动、测量对象变化……等.计算不确定度是将可修正的系统误差修正后,将各种来源的误差按计算方法分为两类,即用统计方法计算的不确定度(A类)和非统计方法计算的不确定度(B类).

A类 统计不确定度,是指可以采用统计方法(即具有随机误差性质)计算的不确定度,如测量读数具有分散性,测量时温度波动影响……等.这类不确定度被认为它是服从正态分布规律,因此可以像计算标准偏差那样,用贝塞尔公式计算被测量的A类不确定度[见附录 I]. A类不确定度 S_i 为

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

式中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$,表示测量次数.

计算A类不确定度,也可以用最大偏差法、极差法、最小二乘法等,本书只采用贝塞尔公式法,并且着重讨论读数分散对应的不确定度.用贝塞尔公式计算A类不确定度,可以用函数计算器直接读取,十分方便.

B类 非统计不确定度,是指用非统计方法求出或评定的不确定度,如测量仪器不准确,标准不准确,量具量质老化……等.评定B类不确定度常用估计方法,要估计适当,需要确定分布规律,同时要参照标准,更需要估计者的实践经验、学识水平等.因此,往往是意见纷纭,争论颇多.本书对B类不确定度的估计同样只作简化处理,只讨论因仪器不准对应的不确定度.仪器不准的程度主要用仪器误差来表示,所以因仪器不准对应的B类不确定度为

$$\sigma_B = \Delta_{\text{仪}}$$

$\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差或仪器的基本误差,或允许误差,或示值误差.一般的仪器说明书中都以某种方式注明仪器误差,是制造厂或计量检定部门给定.物理实验教学中,由实验室提供[见附录 II].