

PUTONG WULI SHIYAN

普通物理实验

主 编 崔虹云

副主编 吴云飞 庞 芳 张建华

主 审 李 岚



中国人口出版社
China Population Publishing House
全国百佳出版单位



东北大学出版社
Northeastern University Press

普通物理实验

主 编 崔虹云

副主编 吴云飞 庞 芳

张建华

主 审 李 岚

中国人口出版社
东北大学出版社

© 崔虹云 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理实验 / 崔虹云主编. —沈阳: 东北大学
出版社; 北京: 中国人口出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5517-1520-1

I. ①普… II. ①崔… III. ①普通物理学—实验—教
材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 326062 号

出 版 者: 中国人口出版社

北京市西城区广安门南街 80 号
010-83519392, 83519401

东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号
024-83683655, 83687311

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 中国人口出版社 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 20.5

字 数: 445 千字

出版时间: 2016 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 12 月第 1 次印刷

组稿编辑: 郭爱民

责任编辑: 孙德海

责任校对: 辛 思

封面设计: 刘江旸

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1520-1

定 价: 49.00 元

前 言

本书是依照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会最新编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合普通物理实验室的条件和实验教学的特点，根据编者多年的物理实验教学经验编写而成的。本书内容由普通物理实验基础知识及误差理论、力学实验、热学实验和附录组成，涵盖超声波探伤实验、材料切变模量 G 的测定、多普勒效应综合实验、动态平衡法测水的沸点与压强、温度传感器的温度特性测量等综合性、设计性实验项目45个。每个实验项目都给出了实验目的、仪器和用具、实验原理、实验内容、注意事项、数据记录和思考题等多项内容，使得教学目的、教学内容一目了然，并保证了良好的教学效果。本书可作为高等院校物理专业学生的学习教材，也可为教师和实验技术人员提供教学参考，适用于培养高素质应用型人才的普通物理实验教学工作需要。

在编写过程中，我们对实验项目的选择和设计进行了精心的筹划。本书所涵盖的实验项目分为基础实验、综合性实验和设计性与课题型实验三个层次，丰富了教学内容。本书在强化基本原理、基本操作和基本技能的基础上，最大限度地挖掘和激发学生的兴趣并调动其积极性、主动性、创造性，着重培养学生发现问题、分析问题和综合解决问题的能力，培养学生的创新思维能力和科学素养，

形成了一套完整和完善的知识体系框架，凸显了现代高校教材对人才培养的价值和意义。

本书由崔虹云等4名教师共同编写完成。其中，第一章、第三章（实验一至实验十三）由崔虹云编写；第二章（实验一至实验十四）由吴云飞编写；第二章（实验十六至实验二十八）由庞芳编写；第二章（实验十五、实验二十九、实验三十）、第三章（实验十四、实验十五）、附录由张建华编写。全书由崔虹云副教授统稿，李岚教授主审。

实验教学是一项集体合作的教学工作，本书是佳木斯大学物理专业全体教师长期积累的集体劳动成果。在本书的编写过程中参考了近年来出版的优秀大学物理实验教材，并得到佳木斯大学教务处等同人的鼎力支持，在此表示感谢。

鉴于编者水平有限，不当之处恳请读者不吝指正。

编者

2016年7月

目 录

第一章 普通物理实验基础知识及误差理论	1
第一节 物理实验的目的、地位及重要性	1
第二节 普通物理实验的基本过程	5
第三节 数据处理	6
第四节 不确定度	21
第五节 有效数字	40
第六节 实验数据图像的描绘及记录表格	42
第七节 常用数据处理方法	49
第八节 实验报告的写法及要求	61
第二章 力学实验	70
实验一 长度测量	70
实验二 重力加速度的测定	76
实验三 精密称衡	84
实验四 密度的测量	88
实验五 拉伸法测量杨氏模量	96
实验六 倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	104
实验七 牛顿第二定律的验证	109
实验八 气垫导轨验证动量守恒	113
实验九 转动惯量的测定	116
实验十 刚体转动的研究	121
实验十一 惯性秤测物体的惯性质量	125
实验十二 用焦利氏秤测量弹簧的有效质量	131
实验十三 振动系统固有频率的测试	135
实验十四 简谐振动的研究	142
实验十五 复摆实验	147

实验十六 双线摆振动的研究	155
实验十七 凯特摆	159
实验十八 音叉的受迫振动与共振实验	166
实验十九 受迫振动	173
实验二十 弦振动的研究	180
实验二十一 压杆稳定实验	185
实验二十二 声速的测量(超声)	190
实验二十三 碰撞打靶实验	197
实验二十四 照相胶片密度测定的设计	201
实验二十五 单自由度系统强迫振动实验	204
实验二十六 超声波探伤实验	209
实验二十七 材料切变模量 G 的测定	213
实验二十八 多普勒效应综合实验	218
实验二十九 自由度固有频率测试	229
实验三十 主动隔振和被动隔振实验	238
第三章 热学实验	242
实验一 落球法测量液体黏滞系数	242
实验二 毛细管法测定液体的黏滞系数	247
实验三 拉脱法测液体表面的张力系数	249
实验四 稳态法测量不良导体导热系数	256
实验五 振动法测气体的比热容比	261
实验六 绝热膨胀法测气体的比热容比	265
实验七 动态平衡法测水的沸点与压强	269
实验八 热电偶的定标	274
实验九 冷却法测金属的比热容	277
实验十 金属线膨胀系数的测量	281
实验十一 混合量热法测冰的熔解热	286
实验十二 真空的获得与测量	291
实验十三 热波法测量良导体的热导率	295
实验十四 温度传感器的温度特性测量	300
实验十五 混合法测水的比汽化热	305
参考文献	309
附 录	310

第一章 普通物理实验基础知识及误差理论

第一节 物理实验的目的、地位及重要性

物理学 (physics) 是研究物质运动最一般规律和物质基本结构的实验科学。在物理学的建立和发展过程中, 物理实验起到了直接的推动作用。从经典物理到近、现代物理, 物理实验在发现新事物、建立新规律、检验理论、测量物理量等诸多方面发挥了巨大作用。随着现代科学技术水平的高度发展, 物理实验的思想、方法、技术与装置已经广泛地渗透到自然学科和工程技术的各个领域, 解决了一大批生产和科研问题。

一、理论与实践的关系

大家知道, 科学的理论来源于科学的实践, 并指导实践; 在科学发展的历程中, 实践要检验科学理论的正确性, 科学理论在实践中不断地得到修正、补充和完善。科学进步的最重要、最基本的实践活动是严谨的科学实验。通过科学实验推动社会的发展和科学的进步, 科学实验在科学技术进步过程中的作用越来越突出。

在科学实验作用日益突出的今天, 我们要充分熟悉其主要任务。科学实验是根据一定的研究目的, 通过积极的构思, 利用科学仪器、设备等物质手段, 人为地控制和模拟自然现象, 使自然过程或生产过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来, 从而在有利条件下, 探索自然规律的一种研究方法。其主要任务是研究人类尚未认识或尚未充分认识的 natural 过程, 发现未知的自然规律, 创立新学说、新理论, 研制发明新材料、新方法、新工艺, 为生产实践提供科学的理论依据, 促进生产技术的进步和革命, 提高人们改造自然的能力。

作为基础学科的物理学, 其基本理论同样遵循这一过程。一切物理理论都是通过由物理实践到物理理论, 再由物理理论到实践的辩证过程建立和发展起来的。通过对物理学历史地、全面地考察可以发现, 物理学本质上是一门实验科学。首先, 物理概念的建立、物理规律的发现依赖于物理实验, 是以实验为基础的, 物理学作为一门科学的地位是由物理实验予以确立的; 其次, 已有的物理定律、物理假说、物理理论必须接受实验的检验, 如果正确就予以确定, 如果不正确就予以否定, 如果不完全正确就予以修正。例如, 普朗克

在黑体辐射实验基础上提出了能量子概念；爱因斯坦通过分析光电效应现象提出了光量子；伽利略用新发明的望远镜观察到木星有四个卫星后，否定了地心说；杨氏双缝干涉实验证实了光的波动假说的正确性。可以说，物理学的每一次进步都离不开实验。

二、物理综合实践

物理综合实践活动课程的建构立足于促进学生个性自主和谐的发展，所以，改变当前物理教学单纯重视“教”而不重视“学”的不良倾向，教师需要把握“学习理论”的本质，及时转变教育理念。学生通过物理综合实践活动的开展，目的不是改造外部客观世界，而是通过实践活动，学习和掌握人类自身发展的过程及科学结论形成的过程，进而促进认知结构的形成。另外，物理综合实践活动课程是从学生的直接经验出发，建立在学生浓厚的学习兴趣和强烈的内在学习需要基础之上；学生对于学习对象的主动操作、探索、加工、体验和变革伴随着强烈的情绪体验与克服困难的意志活动；学生的学习目的不单纯在于获得物理知识和科学结论，更重要的是通过对知识产生过程的重演、再现、探究和思考，形成正确的价值观，培养认知能力。

在进行物理综合实践的过程中，所涉及的研究对象、实践的目的、采用的研究方法、获得的结论的层次等方面的特征不同。观察和实验是物理学的实践活动的两种基本类型。其主要特征如下。

1. 观察

所谓观察，就是对自然界中发生的某种现象，在不改变其自然条件的情况下，按照原来的样子加以研究的过程。比如，观察天空后可以发现，晴朗无云的天空是蓝色的；通过对气候的观察发现，一年可以分为春、夏、秋、冬四季。观察的特征如下。

(1) 现象是在自然状态下发生的，通常没有人为限制。因此，一般地讲，观察这种实践活动是简便易行的，是一种可以经常进行的实践活动，也是对现象进行深入研究的基础。在科学实践中，养成观察的习惯，掌握观察的方法，对一个科学研究者来说是极其重要的素质之一。

(2) 一般来讲，影响自然现象的因素是众多而复杂的，通过观察一般只需对现象做定性研究，即了解影响现象的主要因素及大致关系。其研究是不够准确、不深刻的。

2. 实验

所谓实验，是在人工控制的条件下，抑制次要因素，突出主要因素，使现象能够朝着更加直接、更加单纯的方向进行，并能反复重演，从而借助仪器设备对影响现象的因素进行测量的研究过程。实验的特征如下。

(1) 可以按照研究的需要和目的人为地简化与控制现象发生及进行的条件。其目的是突出主要因素，排除或减少次要因素的干扰和影响，使过程的进行更直接、

更纯粹,以获得明确的结果。可见,实验也是物理学中一种重要的研究方法,实验对物理学的发展起着十分重要的作用,过去是这样,现在是这样,将来也一定是这样。比如,伽利略用自由落体实验驳倒了亚里士多德“重的物体落得快,轻的物体落得慢”的说法;他在斜面实验的基础上指出:力不是维持运动的原因,物体的运动不需要力来维持。伽利略开创了物理学的实验方法,也正是因为实验方法的引入,物理学才真正成为一门科学。牛顿“最伟大的宇宙定律”的正确性,是因为它计算出了哈雷彗星的运行周期(约76年),解释了潮汐现象,指出了(当时)太阳系中还应有所谓冥王星、海王星的存在。伟大的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦于1864年将电和磁“合”在了一起,把描述电学规律和磁学规律的关系式总结为优美的麦克斯韦方程组,他由此预言了电磁场和电磁波,指出光是一种电磁波。而这一结论的正确性是在24年——也是麦克斯韦逝世(1879年)9年——之后的1888年,通过赫兹实验才得到了验证。

现在的粒子物理学理论是以物质的夸克模型为基础的,就是说,如果找不到这6种组成物质的夸克——上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克,或者说,即使找到了其中的5个,粒子物理学的现行理论也将重建。因此,从1964年提出夸克模型之后,许多著名的物理学家都开始致力于寻找夸克的工作。到1976年,已经找到了前5种夸克,而顶夸克却不见踪迹,但科学家们并不气馁。幸运的是,1993—1994年,科学家们终于找到了顶夸克的踪迹。1995年3月2日,美国科学家正式向世界宣布顶夸克已被捕捉到。此外,值得一提的是,世界科学界最崇高的奖励——诺贝尔奖——一般都授予与实验有关的科学发现。

(2) 实验中,一般都需要对现象进行定量研究。

实验一般都需要对影响现象发生的因素进行测量,以获得较为精确的结论或规律。现在,几乎所有物理问题最终都要被定量化。正因为如此,物理学才成为一门定量的精确的科学。物理学家们在长期的研究实践中,不仅创造了巧妙而丰富的实践方法,而且在进行物理问题的定量化的过程中,创造了许多物理学特有的研究方法。所有这些,不仅对物理学,而且对自然科学的其他学科,以及工程技术和社会科学、社会生活的各个方面都具有重要的作用与意义。

物理实验在探索和研究新科技领域、推动其他自然科学和工程技术的发展过程中,同样起着重要的作用。物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学,物理实验的实验技术和测量方法具有特殊的基本性与普遍性:基本性是指它是其他一切实验的基础;通用性是指它实用于一切领域,很多工程技术问题或研究课题,如果分解开来,实质上就是一些物理问题。在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等过程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。现代高科技发展的设计思想、方法和技术也来源于物理实验,因此,物理实验也是工程技术和现代高科技发展的基础。

因此,对于任何一所理工类高等院校的学生来讲,无论学习专业,物理实验都是一门

重要的基础课程。对于物理专业的学生来讲,它更是必修课程。了解和掌握这些进行实验研究的方法与技巧,不仅对物理学理论的学习是重要的,而且对后续课程的学习,尤其是对将来所从事的实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质,也是十分必要的,这是物理理论课不能做到,也不能取代的。因此,物理实验应该是物理专业学生一门独立的、重要的必修基础课程。

三、普通物理实验课程的任务

随着时代的发展、科技的进步,普通物理实验课作为物理专业的基础课,所应承担的任务被赋予更广泛的内涵,其课程目标在扎实基本实验知识、基本实验技能和基本实验方法的基础上,更注重突出实验过程,深化物理思想,加强信息技术在普通物理实验中的应用。强化理论与实际的结合,培养学生的实践能力和创新意识,具备利用物理实验的思想设计、构造物理过程的能力。1987年,国家教育委员会颁布《高等工业学校物理实验课教学的基本要求》;1995年修订后,颁布了《高等学校工科本科物理实验课程教学基本要求》,明确本课程的教学任务是:使学生在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识和方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。其具体任务如下。

(1) 通过对基本实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生理解和掌握物理实验的基本知识、基本方法、基本技能,并且利用自己掌握的物理学原理和物理实验方法,研究物理规律,从而加深对物理学基本理论的理解。

(2) 培养与提高学生从事科学实验的能力。主要包括以下几方面。

① 培养学生自学能力。通过普通物理实验,使学生能够自行阅读实验教材与参考资料或者网络资源,正确理解实验原理和内容,为实验的准确进行做好准备性工作。

② 培养学生动手能力。物理实验需要严谨、细致、耐心和基本动手能力。实验中,学生能借助教材与仪器说明书,正确调整和使用仪器,制作样品,发现和排除故障。

③ 培养学生思维判断能力。在实验中,随时会出现各种现象,通过对实验现象的捕捉,学生运用学过的物理学理论,对实验现象与结果进行猜想、分析和判断。

④ 培养学生书面表达能力。在实验过程中,为了清晰、准确地表达实验结论,需要正确记录和处理实验数据,绘制图表,从而分析实验现象和结果,撰写规范、合格的实验报告或总结报告。

⑤ 培养学生综合运用能力。物理实验并不是一种孤立的知识体系,它需要运用多种知识和原理,将多种实验方法、实验仪器结合在一起,运用经典与现代测量技术和手段,完成某项实验任务。

⑥ 培养学生初步的实验设计能力。能够根据实验课题要求,准确确定实验方法,并根据现有的实验条件,合理选择、搭配仪器,拟定具体的实施步骤。

(3) 培养和提高学生科学实验的作风与素养。物理实验课, 现在普通高等本科院校由于受到实验条件和器材等多重因素的限制, 多为验证性实验。验证性实验同样需要一丝不苟、严肃认真的工作态度, 积极主动的探索精神, 遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德。比如, 科学家们具有孜孜不倦、刻苦认真、锲而不舍等高贵品质, 正是由于这些品质, 他们才取得了一个又一个的成功。居里夫妇在简陋的棚屋里辛勤工作了4年才提炼出“镭”; 伦琴在研究阴极射线的时候, 偶然观察到阴极射线管附近的荧光板发光, 正是实事求是、一丝不苟、严肃认真的态度才使他认识到X射线的存在; 开普勒在其老师第谷的大量天文观测资料基础上, 经过20多年的不懈研究、分析计算, 才总结出行星三大定律。

第二节 普通物理实验的基本过程

考核学生实验成绩, 需要综合其各方面能力, 主要包括预习实验报告情况, 自学能力、动手能力与理论联系实际能力, 实验报告综合分析、处理数据和书面表达能力。教师在每一堂实验课的教学过程中, 要求学生必须完成以下四个环节。

- (1) 实验前的预习;
- (2) 实验中的观测;
- (3) 实验中的数据记录;
- (4) 实验后的报告。

一、实验前的预习

预习是训练和提高自学能力的极好途径, 为了在规定时间内高质量地完成实验内容, 必须做好预习工作。预习时, 通过阅读实验课本及参考材料, 重点考虑实验的最终目的是什么, 根据什么实验原理和方法去做实验, 采用什么样的实验方案去做, 采用何种条件、步骤和关键去操作。在这些前提下, 写好预习报告, 报告主要内容是: 实验名称、简单实验原理、实验内容、注意事项。

根据这些观点, 学生写出预习报告, 在理解各直接测量值和间接测量值之间关系的基础上, 准备好实验中数据记录所需要的各种表格。

二、实验数据的观测

实验操作与观测是动手能力、思维判断能力和综合运用能力训练的过程, 也是培养学生科学实验素质的主要环节。在教师指导性讲解的基础上, 实验时, 学生要严格按照实验原理、仪器设备的工作环境条件、严格的操作程序安装好仪器。在熟悉仪器的使用方法之后, 按照事先拟好的实验步骤, 进行正式测量(最好在正式测量之前做尝试性测量, 以确

定整个实验装置是否能够正常工作及粗略检验测量的精确度)。将实验中所测得的数据填入记录表中。主要做到以下几方面要求:

- (1) 熟悉实验内容和注意事项;
- (2) 熟悉仪器基本原理和操作程序;
- (3) 科学地、实事求是地记录下实验中观察到的各种现象和测量数据,同时记录与实验结果有关的实验条件。

三、实验数据的整理及分析

每次进行实验,都要及时抓住实验中各个细微的现象和对应的实验参数,如温度、湿度、压力、名称、型号、规格、准确度等。实验完成之后,按照记录的多组数据进行处理,并对实验结果做出可靠性分析。

四、撰写实验报告

实验报告是实验工作全面总结和深入理解的一个环节。一份完整的实验报告,应是在完善预习报告基础上完成的。预习报告应包含如下内容:

- (1) 实验原理;
- (2) 实验器材;
- (3) 实验步骤;
- (4) 记录表格;
- (5) 问题回答。

五、报告的基本内容

一份完整的实验报告应包括如下内容:

- (1) 实验目的;
- (2) 仪器和用具;
- (3) 实验原理;
- (4) 实验内容;
- (5) 注意事项;
- (6) 数据记录;
- (7) 结论、不确定度分析及思考。

第三节 数据处理

在任何一项科学研究和实验过程中,绝对离不开对所涉及物理量的测量。物理实验除

除了定性地观察物理现象外,也需要定量测量所需物理量,并确定各物理量之间的关系。但是由于研究和实验过程中受到实验仪器设备环境等方面诸多因素的影响,测量值和真实值不完全一致,这种差异在数值上表现为误差。随着实验设备的精确度得到提高,误差可以被控制得越来越小,但是始终不能把它消除。因此,对实验中测量获得的数据,要选择合适的方法进行处理,以减小其误差;否则,测量结果的价值会受到影响。由此,误差与数据处理理论便发展为一门很重要的学科,普通物理实验常用到误差学科的一些基本知识。

实验之前,要根据实验结果的要求,设计实验方案。

- (1) 实验结果考虑实验理论的近似对实验的影响;
- (2) 实验过程需要考虑环境因素的影响;
- (3) 实验过程同样要考虑实验仪器、设备的选择问题等。

实验过程中,实验者要随时利用数据处理的原则,对测量数据进行粗略的判断,大致确定其准确度。这样,可以在实验过程中,对实验的对错做出判断。

实验结束后,实验者对实验所得数据进行处理,进而得出实验结果及不准确度,并对实验结果做出总结和评价。总结和评价的方式可以是与其他人对比、讨论或者查阅资料,通过这些分析对比,发现自己实验的优缺点,再回过头来调整实验方案,重新进行实验,直到得出满意结果为止。

因此,要想做好物理实验,无论是验证性实验,还是创新性实验,或者是综合实验,要想在科学实验基础上,准确处理数据,并得到相关结果,必须掌握有关数据处理的知识。

一、测量

测量是按照某种规律,用数据来描述观察到的现象,即对事物做出量化描述。测量是对非量化实物的量化过程,是以确定量值为目的的一组操作,是指用实验的方法确定被测对象量值的过程。测量一般可分为以下四类。

- (1) 定类测量。也被称为类别测量或定名测量,它是测量层次中最低的一种。
- (2) 定序测量。也被称为等级测量或顺序测量。定序测量的取值可以按照某种逻辑顺序将研究对象排列出高低或大小,确定其等级及次序。
- (3) 定距测量。也被称为间距测量或区间测量。它不仅能够将社会现象或事物区分为不同的类别或级别,而且可以确定它们之间的间隔距离和数量差别。
- (4) 定比测量。也被称为等比测量或比例测量。定比测量除了具有上述三种尺度的全部性质之外,还具有一个绝对的0点(有实际意义的0点)。

二、误差

测量值与真实值之间的差异称为误差。物理实验离不开对物理量的测量,测量既有直接的,也有间接的。由于受到仪器、实验条件、环境等因素的限制,测量不可能无限精

确, 物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会存在一定的差异, 这种差异就是测量误差。

误差是不可避免的, 只能减小。实验中各被测量在实验条件下都有不以人的意志转移的真实大小。由于这些原因的存在, 在实验中, 往往采用约定真值来充当真值。

(一) 误差处理中的基本概念

1. 真值与平均值

真值是一个变量本身所具有的真实值, 它是一个理想的概念, 通常, 真值是无法测得的。若在实验中测量的次数无限多, 根据误差的分布定律, 正负误差的出现概率相等。再经过细致地消除系统误差, 将测量值加以平均, 可以获得非常接近于真值的数值。但实际上, 实验测量的次数总是有限的。用有限测量值求得的平均值只能是近似真值。常用的平均值有下列几种。

(1) 算术平均值。对真值为 x_0 的某一量 x 做等精度测量, 得到一测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则该测量列的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-3-1)$$

(2) 几何平均值。

$$\bar{x}_n = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (1-3-2)$$

(3) 均方根平均值。

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-3-3)$$

(4) 在化学反应、热量和质量传递中, 对数平均值经常被使用, 它们的分布曲线多具有对数的特性。在这种情况下, 表征平均值常用对数平均值。

设两个量 x_1, x_2 , 其对数平均值

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-3-4)$$

需要明确的是, 变量的对数平均值总是小于算术平均值。只有当 $\frac{x_1}{x_2} \leq 2$ 时, 算术平均值代替对数平均值才可以应用。

如果 $\frac{x_1}{x_2} = 2$, $\bar{x}_{\text{对}} = 1.443$, $\bar{x} = 1.50$, $\frac{\bar{x}_{\text{对}} - \bar{x}}{\bar{x}_{\text{对}}} = 4.2\%$, 也就是 $\frac{x_1}{x_2} \leq 2$, 实验所引起的误差不超过 4.2%。

根据以上知识, 掌握各种平均值的目的是从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在化工实验和科学研究中, 数据的分布较多属于正态分布, 所以, 通常采用算术平均值。

2. 误差的分类

在实验过程中,由于观测者或者实验者等原因,观测数据并不等于真值,存在的差别特指统计误差,即一个量在测量、计算或观察过程中,由某些错误或通常由某些不可控制的因素的影响而造成的、偏离标准值或规定值的数量。误差是不可避免的。根据误差的性质和产生的原因,一般分为三类。

(1) 系统误差 (systematic error)。它是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差。这些因素影响结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测定中完全相同,实验条件一经确定,系统误差就获得一个客观上的恒定值。系统误差产生的原因是:测量仪器不良,如各种刻度尺的热胀冷缩,温度计、表盘的刻度不准确等;周围环境的改变,如温度、压力、湿度等偏离校准值;实验人员操作的行为和习惯,如读数偏高或偏低等。应根据具体的实验条件、系统误差的特点,找出产生系统误差的主要原因,采取适当措施降低其影响,针对用具和设备的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向,分别加以校正。系统误差是可以极大减小甚至清除的。

(2) 偶然误差 (accidental error)。在相同条件下,对同一物理量进行多次测量,由于各种偶然因素,会出现测量值时而偏大、时而偏小的误差现象,这种类型的误差叫作偶然误差。在已降低或者消除系统误差的一切量值的观测中,观测数据继续存在一定的微小差别,而且它们的绝对值和符号的变化,时大时小,时正时负,没有确定的规律,这就是偶然误差或随机误差的典型特征。偶然误差的产生来源于实验过程中的偶然性,因而无法有效控制和补偿。解决此类误差的方法就是对同一测量值做足够多次的等精度测量,最后由于过多满足实验条件和精度的数据出现,就会导致实验过程中的偶然误差完全服从统计规律,误差的大小或正负的出现完全由概率决定。因此,随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋近于零。所以,多次测量结果的算数平均值更接近于真值。

(3) 粗大误差 (gross error)。又称疏失误差,是由于工作人员疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定条件下预期的误差。含有粗大误差的测量值明显偏离被测量的真值,在数据处理时,应首先检验,并将含有粗大误差的数据剔除。

应当指出,系统误差是测量过程中某一突出因素变化所引起的,随机误差是测量过程中多种因素微小变化综合引起的,两者不存在绝对的界限,变化的系统误差数值较小时与随机误差的界限不明显。随机误差和系统误差有时可以相互转化。

3. 精密度、准确度和精确度

反映测量结果与真实值接近程度的量,称为精度(也称精确度)。它与误差大小相对应,测量的精度越高,其测量误差就越小。精度应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度 (precision)。它是实验准确度的一个重要组成部分。精密度是在规定的条件下,独立测量结果间的一致程度。它反映偶然误差的影响程度,精密度高表示偶然误差小。

(2) 准确度 (validity)。它指在一定实验条件下, 多次测定的平均值与真值相符合的程度, 以误差来表示。它用来表示系统误差的大小。若实验的准确度高, 则表示系统误差小。因此, 在实验过程中, 需要提高实验的准确程度, 如观测、校准、计数、观测的次数等方面要提高准确度。

(3) 精确度 (精度) (accuracy)。它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在实验和研究测量中, 精密度高的准确度不一定高, 准确度高的精密度也不一定高, 但精确度高, 则精密度和准确度都高。

为了说明精密度与准确度的区别, 可用下面例子来说明。如图 1-3-1 所示。

图 1-3-1 (a) 表示精密度和准确度都很好, 那么精确度高; 图 1-3-1 (b) 表示精密度很好, 但准确度却不高; 图 1-3-1 (c) 表示精密度与准确度都不好。在实际测量中, 没有像靶心那样明确的真值, 而是设法测定这个未知的真值。

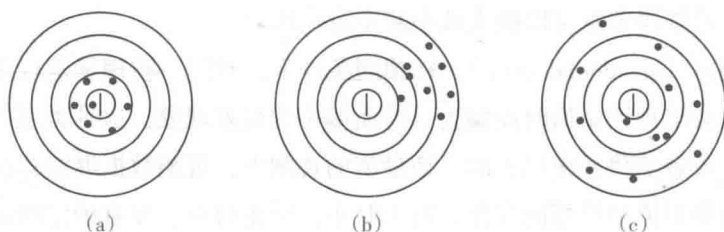


图 1-3-1 精密度和准确度的关系

学生在实验过程中, 甚至在教师指导实验中, 习惯性思维是实验的重复性和实验数据的重现性, 而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是不可知的, 人们只能制定一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识运动的推移和发展, 可以逐步逼近绝对真值。

4. 误差的表示方法

无论利用任何精准的量具或设备进行实验或者科研测量, 误差都无法避免, 测量的结果总不能与测量的真值完全一致, 测量结果只是它的近似值。测量的质量高低以测量精确度作为指标, 根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小, 则认为测量愈精确。

(1) 绝对误差。测量值 X 和真值 A_0 之差为绝对误差, 通常称为误差。记为

$$D = X - A_0 \quad (1-3-5)$$

由于物理量的真值 A_0 一般无法求得, 所以, 式 (1-3-5) 只有理论上的意义。因此, 实验中, 通常用高级标准仪器的示值作为实际值 A , 以代替真值 A_0 。但是高级标准仪器依然存在较小的误差, 因而 A 不完全等于 A_0 , 只是比 X 更接近于 A_0 。 X 与 A 之差称为仪器的示值绝对误差。记为

$$d = X - A \quad (1-3-6)$$