

21世纪高等院校实验与设计系列教材二

内蒙古自治区物理教材编委会 组编

物理实验

刘官元 主编



内蒙古大学出版社

● 21 世纪高等院校实验与设计系列教材二

物 理 实 验

内蒙古自治区物理教材编委会组编

刘官元 主 编

晋 伟

董大明 编 著

毛爱华

内 蒙 古 大 学 出 版 社

21 世纪高等院校实验与设计系列教材二
物 理 实 验
刘官元 主编

内蒙古大学出版社出版发行
内蒙古军区印刷厂印刷

开本:787×1092/16 印张:15.5 字数:377 千字
2004 年 12 月第 1 版第 1 次印刷
印数:1—5000 册

ISBN 7—81074—729—0/O·50
全套 10 册 定价:145 元
(本册定价:20.00)

内蒙古自治区物理教材编委会

主 任 李东升 梁希侠(常务)

副主任 李 和 李前忠 杨 颖 周培勤 赵巨东
浩斯巴雅尔

委 员 王 旭 计晶晶 乔文华 刘官元 李东升
李 和 李前忠 杨体强 杨 颖 张占山
张 伟 阿木古楞 陈志刚 周培勤
林 海 赵凤岐 赵巨东 赵改清 赵春旺
姚 虹 浩斯巴雅尔 晨 阳 梁希侠
温彦生

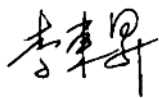
序

内蒙古自治区的高等教育事业起步于 20 世纪 50 年代初。经过近 50 年的发展,我区的高等教育无论从规模上,还是质量上都取得了长足的发展。特别是近些年来,全区高等院校的招生数量成倍增长,部分院校的合并使得一些高校的办学规模迅速壮大,形成了几所万人大学。与此同时,各高校对各自的专业及课程设置都做了较大的调整,以适应当今日益发展变化的高等教育事业。面向 21 世纪,在科学技术日新月异,社会对人才的知识结构、层次要求越来越高的新形势下,我们的高等教育的教学水平,特别是教材建设都应有一个更新更高的要求。

回顾 50 年来的发展,虽然我区高等教育的教学科研水平有了较大的提高,但与之相应的教材建设的现状还不尽如人意,绝大多数主干课程的教材还沿用一些传统教材,有些甚至是 20 世纪七八十年代的版本。有些院校的教材选用则有一定的随机性,在几种版本的教材之中换来换去。其间,虽然部分院校也组织力量编写了一些基础课及专业课教材,但大都是各成体系,缺乏院校间的协作与交流,形不成规模,质量亦无法保证,常常滞后于学科的发展与课程的变化。这都与我区高等教育的发展极不协调。诚然,区外部分地区高校的教学科研水平比我区要高,一些教材的质量好,我们可以直接利用,但这并不能成为我们不搞教材建设的理由。好的教材还需要相应的教育资源条件与之相对应才能取得良好的教学效果,从而达到促进教学质量提高之目的。应当承认,由于经济发展的相对落后,我区高校所招学生的基础和学校的教学条件比起全国重点名牌大学相对要差一些。因而,我们高校的教材也应从实际出发,结合自己学校和学生的特点,逐步探索、建立一套适合自治区教育资源条件的教材体系,促进自治区高校教学科研水平的提高,多出人才,出好人才。

值得欣喜的是,随着自治区教育科学水平的提高,我区高校教育领域的一些有识之士逐渐认识到,面向 21 世纪,未来高校之间的竞争就是学校的产品——学生质量的竞争。要想培养出高水平、高素质的学生,使我区的高校在这种竞争中立于不败之地,除各高校应努力提高自身的教学组织管理水平、提高教师的素质外,还应积极主动地加强与区内外高校的协作、交流,取长补短,走联合发展的道路,使我区高等教育的整体水平能够在较短的时间内得到提高。为此,在有利于规范高校教材体系,促进高校教育质量的提高,加强各高校教学科研人员之间的协作与交流的原则下,由自治区教育厅牵头,内蒙古大学出版社组办、资助,联合全区高等院校的有关专家、学者共同组建成立一些相关专业的教材编委会,以求编写适合我区高等教育特点的教材,逐步建立、完善自治区高等教育的教学、教材体系,并开展一些与教学相关的科研工作。我们希望,通过教材编委会这种工作模式,建设一批高质量的教材,带出一支高水平的师资队伍,培养出大批高素质的人才。

我坚信,在自治区教育厅的指导下,在编委会各位专家、学者的辛勤工作下,在各院校的相互理解、相互协作、相互支持下,我们一定能够克服发展过程中的困难,逐步推出一批高质量、高水平的教材,为推进内蒙古自治区高等教育事业做出重要的贡献。



2002 年 3 月 19 日

前 言

物理实验是高等学校理、工、农、医等各学科最基本的、最重要的实验课之一。该课程的设置对培养学生的实践能力、创造能力、科学素质都发挥着极其重要的作用。特别是跨入 21 世纪后,科技发展更加迅速,物理学在其他学科中的渗透更加广泛。为了适应新形势的发展,从实验内容、实验方法及手段等方面需加强和改进物理实验课。

自 1997 年国家教委对我校评估合格以来,根据国家教委颁发的《高等工科大学物理实验课程教学的基本要求》,在吸取了其他学校的经验,并结合我校十多年来的教学实践,我们编写了本教材,以适应新的形势要求。

本教材主要突出以下特点:

1. 在数据处理方面,删除了传统的误差理论中不科学与不确切的内容,增添了目前国际上普遍采用的以《测量不确定度表示指南》为标准对实验结果评定的内容。但对其作了一些必要的简化,使学生既能掌握不确定度的基本知识,又不至于陷入繁琐的计算之中。从而保证物理实验教学的要求。

2. 为了培养学生独立从事科学实验的能力,本书增添了设计性实验,要求学生根据实验要求,自选仪器,拟定实验方案,列出实验步骤,并取得实验数据,进而完成实验报告。使学生能获得比较系统的科学实验训练。

3. 定性及半定量实验对于引导学生认真观察物理现象是极有意义的。本书把教改经验编入演示实验中,尤其把科研成果引入教学,增添了“传感器知识”,力求使学生将已获得的理论知识能够在应用中更直观、更深入地理解,同时也开拓眼界,培养他们的新思维。

4. 本书对各实验的原理都作了简明扼要的论述,每个实验给出了完整的数据记录表格及具体的数据处理方法。大部分实验中列有预习思考题、实验中思考题、课后问答题。这有利于学生在实验中分析研究问题,并能巩固提高所学的理论知识。

5. 书中还穿插了与实验有关的物理学史方面的小知识。

教材编写的作者分工:绪论、力学、热学实验部分,刘官元;电磁学实验,毛爱华;光学、近代物理实验、备用实验及实验 15、16,董大明、高春;设计性实验及附录部分,晋伟。本教材的编写凝聚了实验物理教研室全体教师智慧和劳动,是一项集体创作。在此,向他们表示诚挚的敬意和衷心的感谢。虽然我们进行了认真的审读、修订工作,但书中难免有疏漏、错误之处,恳请读者批评指正。

刘官元
2005 年元月

目 录

绪 论

第一节 怎样学好物理实验	(1)
第二节 测量与误差的基本知识	(3)
第三节 实验数据处理	(5)
第四节 有效数字及其运算	(7)
第五节 实验结果的不确定度评定	(9)
第六节 实验数据的图示法和图解法	(13)

力学、热学实验

实验 1 用米尺、游标尺、螺旋测径器、读数显微镜测量长度	(17)
实验 2 物体密度的测定	(25)
实验 3 转动惯量的测定	(30)
实验 4 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	(37)
实验 5 液体表面张力系数的测定	(42)
实验 6 测定固体的线胀系数	(46)
实验 7 驻波的测量	(49)

电磁学实验

电磁学实验常用基本仪器简述	(53)
实验 8 欧姆定律的应用	(60)
实验 9 电表的改装和校正	(66)
实验 10 用惠斯登电桥测电阻	(72)
实验 11 用双臂电桥测低电阻	(76)
实验 12 用模拟法测绘静电场	(81)
实验 13 用电位差计测量电动势	(84)
物理学史 奥斯特怎样发现了电流的电磁效应	(90)
实验 14 磁场的测量	(91)
实验 15 设计和组装欧姆表	(99)
实验 16 示波器的原理和使用	(102)
物理学史 霍耳效应的发现	(112)

光学、近代物理实验

光学实验基础知识	(113)
实验 17 分光计调整和测量三棱镜的折射率	(116)
实验 18 光的干涉	(122)
实验 19 光的衍射	(129)

实验 20	夫兰克—赫兹实验	(134)
实验 21	迈克尔逊干涉仪的调节和应用	(141)
实验 22	用光电效应法测定普朗克常数	(144)
物理学史	光的微粒说与波动说之争	(148)
实验 23	演示实验(超声波应用)	(149)
备用实验		
实验 24	灵敏电流计的研究	(155)
实验 25	薄透镜焦距的测定	(159)
实验 26	光的偏振	(164)
实验 27	望远镜和显微镜	(172)
设计性实验		
第一节	设计性实验的基本程序和要求	(177)
第二节	设计性实验中常用的实验方法	(178)
第三节	减小误差的实验设计	(182)
第四节	设计举例	(184)
第五节	小型设计性实验选题	(187)
实验 28	固体密度的测定	(187)
实验 29	重力加速度测定方法的分析与比较	(188)
实验 30	弹簧振子振动规律的研究	(188)
实验 31	伏安法测电阻	(189)
实验 32	电表内阻的测定	(190)
实验 33	高电阻的测量	(191)
实验 34	实验室常用光源的研讨	(192)
实验 35	玻璃折射率测定方法的分析与比较	(193)
实验 36	光栅特性的研究	(194)
实验 37	设计性实验	(195)
附录一	传感器简介	(197)
附录二	复习要求和数据表格	(217)

绪 论

第一节 怎样学好物理实验

一、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,学习实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- ① 自学能力:能够通过阅读实验教材或资料,做好实验的准备;
- ② 动手操作能力:能够借助教材和仪器说明书正确使用常用仪器;
- ③ 综合分析能力:能够运用物理学理论,对实验现象进行初步分析判断;
- ④ 科技写作能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,叙述实验结果,撰写合格的实验报告;

⑤ 设计、实施能力:能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与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,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,以及遵守纪律、团结协作、独立工作和爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的教学程序和要求

(1) 课前预习,做好准备:实验课前必须认真做好预习,预习是高质量完成实验的基础和前提。预习的基本要求是认真阅读教材,必要时还应阅读一定的参考资料。比如:做电学实验应先看一下常用仪器介绍,做光学实验应预习一下基础知识。了解实验目的和要求,搞清实验原理及方法,熟悉仪器,明确实验内容和步骤,还要注意该实验的安全问题,如实验者的安全、仪器的安全。通过预习,应对要做的实验有一个初步的了解,写好预习报告(包括实验目的,仪器用具,原理,电路或光路图,步骤),准备好数据记录草表。若实验室开放,要事先预约实验。

(2) 实验操作,记录数据:学生进入实验室首先要遵守实验室的规章制度,因为这些规章制度是为确保人身安全和仪器设备安全而制定的。违反规章制度就可能酿成事故,这是必须牢记的。其次,在实验中要既动手又动脑,使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节时,应先粗调后微调。做电学实验时,必须经教师检查无误后才可接通电源。应在规定

的仪器上进行实验,未经教师允许不得任意调换其他仪器。实验时应集中精力仔细观察和思考实验中的问题,不要期望实验会一帆风顺。遇到问题,要冷静的分析和处理,仪器出现故障,要在教师的指导下学习排除故障的方法。总之,实验的目的在于实验能力的培养,而不是测出几个数据就以为完成了任务。记录数据,字迹要清楚,要全面反映实验的过程,包括测量条件,观察到的现象和测量的数据。不要用铅笔记,也不要先记在另外的纸上再誊写在数据表格里,给自己留有涂抹和修改的余地,希望同学们在每个实验过程中逐渐培养良好的习惯和科学的工作作风。实验结束时,将实验数据请指导教师检查签字,不合格要重做或补做,不得事后“追记”,更不得为凑拼结果、抄袭或涂改原始数据。

实验完成后要将仪器整理好,清扫教室,经教师允许方可离开教室。

(3) 实验后认真总结、写好报告:不要把取得实验数据当作实验学习的终结,课后应将实验操作阶段遇到的许多关于仪器的结构、实验现象和操作步骤中的问题,结合教材和参考书重新回顾,把感性知识理性化。并在复习的基础上整理好实验数据,按要求写出合格的实验报告。

物理实验报告的内容及要求如下:

实验报告是学生实验成果的书面反映,要用自己的语言,应力求文字简练通顺,不要抄袭教材,数据齐全图表正确,一份完整的报告一般应包括以下内容:

① 实验名称、日期、系、班级、姓名及合作者;

② 实验目的;

③ 实验仪器及用具(需要记录型号和规格);

④ 实验原理:写出扼要的实验原理、公式和附图;

⑤ 实验步骤:简述主要测试内容和顺序;

⑥ 数据记录与数据处理:数据记录表格要全面反映实验条件和实验过程中得到的全部信息(包括正确的作图),数据处理是要给出实验测量结果和对实验结果不确定度的评定,并简要回答课后有关问题;

⑦ 对实验进行分析讨论,在报告的最后简单说明通过实验有哪些收获、体会和提出改进建议或回答课后思考题等。

①—⑤的内容在实验操作前就应写在实验报告纸上(即预习报告),第⑥项中的实验数据在实验室测出后请教师检查签字,无签字其数据无效,不承认完成实验。课后再完成报告的其他内容。

三、物理实验课的学习效果

物理实验课的学习效果可以通过以下七个方面来检查。

(1) 基本实验掌握得如何?是否有自学能力?

(2) 基本仪器的调整、使用方法是否掌握?熟练程度如何?

(3) 基本实验方法能否掌握和运用?

(4) 操作能力有哪些提高?

(5) 有无排除故障的能力?

(6) 对一些实验现象的观察和综合分析能力怎样?

(7) 实验数据记录,实验中的数据处理和实验报告的表达能力如何?

在实验过程中若能自觉地以这几条标准来要求自己,经常总结收获和体会,不但能够学

好本课程,而且对今后的学习和工作将会带来深远的影响。

四、谈谈物理实验

普通物理实验是本科专业一门独立的实验课程。对低年级的学生开设这门课程,不仅因为物理学是一门实验科学,重要的是物理实验本身有一套实验知识、方法、习惯和技能,这是今后进一步学好专业实验、提高动手能力的基础。

学习这门课程有哪些特点呢?

第一,要注意掌握实验中所采用的实验方法,特别是基本的测量方法。基本的测量方法既是经常会用到的,也是复杂测量方法的基础,学习时不但要弄明白它的道理,也要逐步熟悉和记牢。任何实验方法都有它的运用条件、优点和缺点,只有认真做过实验才能对这些条件、优缺点有较深的印象。

第二,要有意识地培养良好的实验习惯,要实事求是地记下原始数据而不加“修饰”,注意记录实验的环境条件(如湿度、温度)、实验仪器和装置的操作要求。这些良好的实验习惯是很多实验后的经验总结,它能保证实验安全,避免差错,迅速提高观察能力,也为日后再现实验、分析实验结果提供条件。

第三,要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障。实验最后一般总有数据结果,数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,它带来多大误差,仪器带来多大的误差,实验环境有多大的影响等等。由于普通物理实验的学习对象是大学低年级学生,他们的实验经验很少,也未掌握分析实验的方法。所以,实验时往往由实验室给出标准数据,或者安排一些已有十分确定的理论结果的实验题目,这都是为了帮助学生判断实验结果而设置的。但是学生千万不要误认为实验的目的是为了做出标准数据结果。往往有些学生,当实验数据和理论计算一致时,就会心满意足,简单地认为做好了这次实验;而一旦数据和计算结果与公认值差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置,甚至拼凑数据,这两种表现都是不正确的。实际上,任何理论公式都是一种理论上的抽象和简化,而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多,实验结果必然会带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小,是否合理。所以,不论数据好坏,主要是要逐步学会分析实验,找出实验结果好坏的原因。实验过程比实验结果更重要。教师对学生实验成绩的评定侧重于实验的态度与作风,以及发现、分析、解决问题的能力。

本书中每个实验都包括有一定的测量内容,通过这些测量,学生体验实验方法和练习操作,并取得必要的实验数据。在完成规定的测量内容以后,如果还有富余的时间,可以根据自己实验时的具体情况分析一下实验可能存在的问题,例如所用的某一个仪器是否可靠?实验条件是否已得到满足?如何予以证实?或者提供对实验内容或仪器的一些小改进建议等。

实验有它自己的特点和规律,要学好实验不是一件容易的事情。希望学生在学习过程中能够不断提高对实验的兴趣,打好学习其他课程的基础。

第二节 测量与误差的基本知识

测量与误差是一门专门的科学,深入研究它需要丰富的实验经验和厚实的数学基础。本

节只介绍测量与误差、误差处理、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识。这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到,而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

一、测量与误差

(1) 测量及其分类

物理实验离不开对物理量进行测量,测量可归纳为直接测量和间接测量两类。

直接测量:凡使用仪器和量具直接测得(读出)被测量的数值,这类测量为直接测量,如用电流表测电流,用温度计测温度等。

间接测量:有些物理量常常需要根据一些理论公式,用直接测量的数据计算出被测物理量,这样的测量为间接测量。如对一段导线上的电阻可以采用直接测出流过它的电流 I 和其两端的电压 V ,根据欧姆定律 $R = \frac{V}{I}$,计算出电阻 R , R 的测量即为间接测量。

测量有时根据需要可分为单次测量和多次测量,不同的测量,误差的估算不一样。

对一个物理量的测量过程就是寻找这个量的客观实际值的过程,理论证明待测量的客观实际值(真值)需经过无穷次测量后取平均值方可找到。考虑到实验仪器、测量方法、环境和测量者等因素的限制,单纯追求增加测量次数去寻找真值是没有意义的,所以使用任何仪器的任何一次测量,其结果都与真值有差异,这种差异就叫误差。

实验总是根据所要求的精确度,来制定方案,选用仪器的。在一定的要求下,还要以最小的代价来取得最好的结果,不能要求仪器越高级越好,环境条件(如恒温、恒湿)越稳定越好,测量次数越多越好等等,这样要求是不切实际或是浪费的。测量结果的误差是各个因素所引起的误差的总和。减少某些因素所引起的误差,可能代价较小;而减小另一些因素所引起的误差,所需的代价可能很大。为了提高测量的精确程度,往往是着力于减小某一两项主要的误差,于是,就要根据要求和误差的考虑进行合理的设计以及选择实验方案和仪器。实验的精华就在于此。

(2) 测量误差的基本知识

前已讲述,在任何测量中,由于各种原因,测量值与客观实际值(称为真值)之间总是存在着差异。我们把测量值 x 与真值 x' 之差就称为测量值的绝对误差(简称误差)。记为 $\Delta x'$

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

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程始终。使用任何一种仪器,进行任何一次测量,都会引起误差。测量所根据的方法和理论越繁多,所用的仪器装置越复杂,经历的时间越长,引进误差的机会可能性就越大。

误差根据其性质分为两类:系统误差和偶然误差。

系统误差:总是使测量结果向一个方向偏离,偏离数值是一定的或按一定规律变化的。它的来源有几个方面。

① 仪器误差:这是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。如仪器零点不准,放大器非线性,照相底板的收缩,在 20°C 标定的标准电阻在 30°C 下使用等。

② 理论(方法)误差:这是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及测量方法所带来的。如理论公式没有把散热考虑在内;没有把接线电阻和接触电阻考虑在内;单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,这在

实际是达不到的;还有用伏安法测电阻时电表内阻的影响是否考虑在内等都属此类。

③ 个人误差:这是由于观测者本人的心理特点及习惯偏向造成的,如使用停表计时,有人停表过长,有人停表过短,并非态度不认真所致。

系统误差是有定值的,如游标尺的零点不准;有些是积累性的,用受热膨胀的钢质米尺进行测量,其指示值就小于真实长度,误差值随着测量长度成比例增加;还有些呈周期性变化,如仪器的转动中心读数与刻度盘的几何中心不重合造成的偏心差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差总是使测量结果偏大或者偏小,其特征是带有确定性。因此,多次测量求平均值并不能消除系统误差。解决的方案是只有找到系统误差产生的原因,才可以采取一定的方法去消除它的影响或对测量结果进行修正。对于实验者来说,系统误差的规律及其产生原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差;对于大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量的过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正。而后者一般难以修正,只能估计其取值范围。

偶然误差:在测量时,即使排除了产生系统误差的因素(实际上不可能也不必绝对排除),进行了精心的观测,仍存在着一定的误差。这种误差是由于人们的感观灵敏度和仪器精密程度有限,周围环境的干扰以及随测量而来的其他不可预测偶然因素造成的。如米尺测量一组振幅,每次判断振幅大小以及用尺去对准它并估计毫米以下的一位读数值,都有一定的偶然性,都会带来误差。又如测量时温度的微小起伏,气流的扰动会造成测量结果的无序变化,不规则的地脉动和杂散电磁场会影响精密测量等。这些由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值的无规则的涨落称为偶然误差,其特征是带有随机性,所以也叫随机误差。

偶然误差的存在使每次测量值较真值偏大或偏小是不定的,是无法控制的。多次测量误差却服从一定的统计规律。其特征是比真值大和比真值小的测量值出现的几率相等;误差较大的数据和误差较小的数据出现的几率相等;绝对值很大的误差出现的几率趋于零。因此,增加测量次数,可以减小偶然误差,这就是我们在实际工作中常常采取重复多次测量的依据,但是,偶然误差是不能消除的。

根据偶然误差的性质,有多种处理偶然误差的理论和方法,后面将作介绍。

总之,系统误差与偶然误差性质不同,来源不同,处理方法也不同,测量精密度高,是指偶然误差小;测量准确度高,是指系统误差小;而精确度(有时简称精度)是把两者都包括进去了。影响测量结果的精确度,有时主要因素是系统误差,有时主要因素是偶然误差,对于每项具体工作需要具体分析。测量结果的总误差是系统误差和偶然误差的总和。

至于因设计错误,操作不当,粗心大意,过度疲劳,记错数据,实验态度不认真等造成的测量错误,不属于测量误差,不在讨论范围之内,有的书上称其为过失误差。

第三节 实验数据处理

一、用算术平均值代替真值

前面讲到增加测量次数对减小偶然误差有利,所以我们常把被测量量重复测量多次(即

多次测量),取多次测量值的算术平均值等于被测量的真值,设被测物理量为 x , x_i 为第 i 次的测量值,共测了 k 次,则

$$x' \approx \bar{x} = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{k} = \frac{1}{k}(x_1 + x_2 + \cdots + x_k) \quad (2)$$

这样做,虽然 $\bar{x}$ 实际上并不真正等于真值 x' ,但根据统计理论可以证明,多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 是这一系列测量中的最佳值,测量值取算术平均值 $\bar{x}$ 是最合理的。

二、用偏差代替误差

按通常的意义,由于真值 x' 不能确定,所以(1)式中的误差 $\Delta x'$ 也不能得到。既然 x' 可以用 $\bar{x}$ 取代,则(1)式可以改为

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (3)$$

Δx 称为偏差。今后误差 $\Delta x'$ 的计算就转化成偏差 Δx 的计算了。由于习惯,某些书上把偏差仍称为误差,偏差的计算也随之称为误差的估算或误差的计算。本书用此种说法。

三、误差的估算

真正的误差估算需用到大量的数学知识和误差的理论知识以及使用仪器的经验,这是个复杂的过程。误差估算及误差表示的全过程,在以后的内容中作介绍。下面讨论系统误差,系统误差属于偶然误差的估算。

(1) 标准误差与标准偏差 若一组测量列中不包含系统误差和过失误差,理论和实践证明,大部分测量误差均服从正态分布的统计规律。这种统计规律具有如下特征。

单峰性: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。

对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

有界性:在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。

其正态分布的概率密度函数为:

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right)$$

正态分布曲线如右图 X-1。

式中 Δ 表示测量的随机误差; σ 是该函数式中的一个参量。它的数值标志着随机误差的离散程度, σ 又称为总体标准误差。它的大小决定曲线的形状。对物理量 x 进行 n 次测量,其标准误差定义为

$$\sigma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (4)$$

在实际测量中,测量次数 n 总是有限的而且真值也不可求。因此标准误差只有理论上的价值。对标准误差 σ 的实际处理只能用标准偏差 $S(x)$ 近似代替标准误差 $\sigma(x)$ 进行估算。常用贝塞尔公式计算 $S(x)$ 值,标准偏差 $S(x)$ 的表达式

$$S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

(2) 置信区间与置信概率 由概率密度函数计算测量结果分布在 $(-\sigma, \pm\sigma)$ 区之间的概率,可得

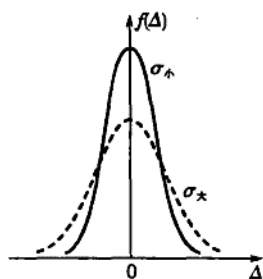


图 X-1

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = 0.683 = 68.3\%$$

结果表明,在所测量的一组数据中平均有 68.3% 的测量值误差出现在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 内。同样也可以认为在所测的一组数据中,任一个测量值的误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 内的概率为 68.3%。我们把 P_1 称做置信概率, $(-\sigma, +\sigma)$ 就是 68.3% 的置信概率所对应的置信区间。

显然,扩大置信区间,置信概率就会提高。对应 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ 的置信区间,置信概率分别为 95.4%、99.7%。

第四节 有效数字及其运算

一、有效数字

如上所述,用实验仪器直接测量的数值都会有一定的误差。因此,测量的数据都只能是近似的。由这些近似数通过计算而求得的间接测量值也是近似数。显然,几个近似数的运算不可能使运算结果更准确些,而只会增大其误差,因此近似数的表示和计算都有一些规则,以便确切地表示记录和运算结果的近似性。

从仪器上读出的数字,通常都要尽可能估计到仪器最小刻度线的下一位。图 X-2 用米尺量钢棒的长度,我们可以读出 4.26cm、4.27cm 或 4.28cm。前二位数“4.2”可以从米尺上直接读出,是确切数字,而第三位数是测量者估读出来的,估读的结果因人而异。因此这一位是有疑问的,称为存疑数字。由于第三位数已存疑,在它以下各位数的估计已无必要。我们把从仪器上直接读出的确切数字和最后一位存疑数字称为有效数字。有效数字必须且只有一位存疑数字。前述钢棒长度的测量值包含三位有效数字,可记成 4.26cm、4.27cm 或 4.28cm。

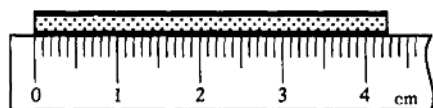


图 X-2 长度的测量

确定一个数据的有效数字数位,应从该数左边第一位不为零的数开始数起,有几位数即为几位有效数字。如某物质质量为 0.80200 千克,数有 5 位数,所以这是 5 位有效数字,中间的零和后面的二个零均算有效位数。

有效数字的位数与小数点的位置无关;数据变换单位时,其有效数位不变。

采用不同单位而引起数值上的不同,可用 $\times 10^{\pm n}$ 表示。这种表示方法叫科学记数法。如 125.2 毫秒可写成 1.252×10^{-1} 秒;0.007050 米可以写成 7.050×10^{-3} 厘米等,有效数字的位数都是 4 位不能变。7.050 和 7.05 在测量中是不相等的,二者有效位数不同。

有效数字的多少能反映出测量用的仪器和测量方法的准确度,在数据后面注意添加(删减)有效数位将会“歪曲”客观实际,是不正确的数据记录。

有些仪器,例如数字式仪器或游标卡尺,是不可能估计出最小刻度下一位数字的,那么我们就不要去估计,直接记录所得数据,最后一位数字仍认为是存疑的。

二、有效数字的运算规则

间接测得量是由直接测得量计算出来的,所以也有一定的有效数字,下面讨论它的运算规则。

(1) 有效数字的加、减 我们通过下面两个例子的运算,了解一下加、减运算中有效数字的取法。

$$\begin{array}{r} 32.1 \\ +) \quad 3.276 \\ \hline 35.376 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 26.65 \\ -) \quad 3.925 \\ \hline 22.725 \end{array}$$

计算时,我们在存疑数字下方加一横线,以便与确切数字相区别,在相加的结果35.376中,由于第三位数“3”已为存疑数字,其后的二位数便无意义,按照“四舍、六入、五凑偶”的原则,本例应向前进位,运算结果写成35.4,有效数字为三位。同理,相减的结果应为22.725,由于5前面是偶数2,故舍弃了尾数“5”,最后结果是22.72,有效数字为四位。

所以,加减法的运算结果最后的取位,应在相加减的诸因子中以最靠前的存疑数为基准,进行取舍,确定有效位数。

(2) 有效数字的乘、除 我们通过下面两个例子的运算,了解一下乘、除运算中有效数字的取法。

$$\begin{array}{r} 5.348 \\ \times \quad 20.5 \\ \hline 26740 \\ 0000 \\ 10696 \\ \hline 109.6340 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 173.4 \dots \\ 217 \overline{) 37643} \\ \underline{217} \\ 1594 \\ \underline{1519} \\ 753 \\ \underline{651} \\ 1020 \end{array}$$

在运算中,存疑数字中只保留最前一位,其后面的存疑数字是没有意义的。上面两个例子的结果分别为110和173,有效数字都是三位。从两个例子中可以看到,两个量相乘(或除)的积(或商),其有效数字与诸因子中有效数字位数最少的相同。这个结论可以推广到多个量相乘除的运算中去。

(3) 其他函数的有效数字 本书约定:乘方、开方的有效数字与其底的有效数字位数相等。三角函数、对数、指数有效数字的取位一般与其变量的位数相同。

(4) 运算数据尾数的取舍规则 通常所用的尾数舍入法则是“四舍五入”,在实验测量中对于大量尾数分布几率相同的数据来说,这样的舍入不合理,因为总的入的几率大于舍的几率。现在通用的规则是:尾数“小于五则舍,大于五则入,等于五时则把尾数前一位数凑成偶数”(简称四舍六入,五凑偶)。

例如:若1.535取三位有效数为1.54,最后的尾数5进凑前一位的3为4。

若725.85取四位有效数为725.8,最后的5舍保前一位为偶数8。

(5) 公式中的已知常数和一些公认值或实验室给出的值,按精确数(常数)对待,不受误差取位的限制,根据需要定之。

以上这些结论,在一般情况下是成立的,但也有例外。如果我们了解有效数字的意义和

存疑数字取舍的原则,是不难处理的。

第五节 实验结果的不确定度评定

一、不确定度评定的意义

如上所述,即使采用了正确的测量方法,由于测量仪器和测量者的问题,测量结果可能存在各种误差。这些误差的存在,使得测量结果具有一定程度的不确定性。事实上,这种不确定的程度是可以用一种科学的、合理的、公认的方法来表述的,这就是“不确定度”。在测量方法正确的情况下,不确定度愈小,表示测量结果愈可靠。反之,不确定度愈大,测量结果的可靠性愈低。

二、不确定度的一些基本概念和分类

测量质量的评定是重要的,但过去各国对不确定度的表示和评定有不同的看法和规定,影响了国际间的交流和合作。1992年,国际标准化组织(ISO)发布了具有指导性的文件“测量不确定度表示指南”,为各国测量不确定度的表达奠定了基础。1993年ISO和国际理论与应用物理联合会(IUPAP)、国际计量局(BIPM)等七个国际组织又联合推出“测量不确定度表示指南”的修订版,从此,物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。

“测量不确定度表示指南”对实验的测量不确定度有详尽的论述,但对于物理实验教学,我们只要求对不确定度的下述基本概念有初步的了解。

不确定度是表达测量结果具有分散性的一个参量,它是被测量的真值在某个量值范围内的一个评定。不确定度反映了可能存在的误差分布范围,即随机误差分量和未定系统误差的联合分布。

由于真值的不可知,误差一般是不能计算的,它可正、可负,也可能十分接近零;而不确定度总是不为零的正值,是可以具体评定的。

由于误差的来源很多,测量结果的不确定度一般包含几个分量。在修正了可定系统误差之后,把余下的全部误差归为A、B两类不确定度分量。

A类不确定度: Δ_A ——多次重复测量时用统计学方法估算的分量。

B类不确定度: Δ_B ——用其他方法(非统计学方法)评定的分量。

测量结果的总不确定度由方和根方法合成:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

三、直接测量结果不确定度的评定

(1) A类不确定度 Δ_A 的估算:在相同的条件下,对物理量X作了n次测量,得到的X值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_4, x_5$,于是平均值 $\bar{x}$ 为

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

平均值 $\bar{x}$ 为测量结果的最佳值,它的不确定度为