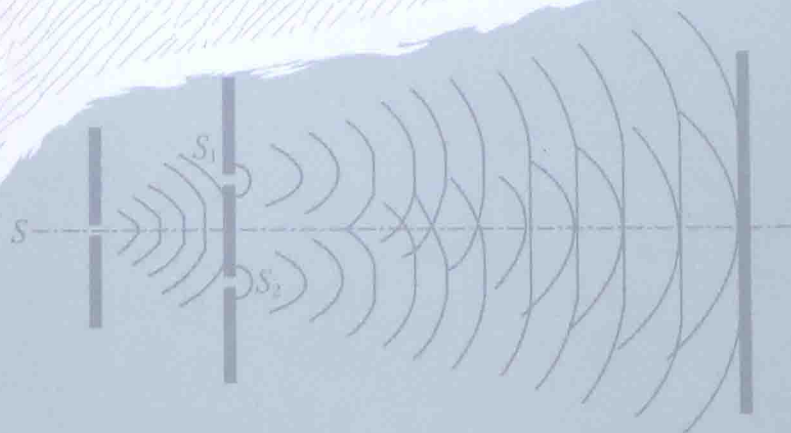


安徽省高等学校省级规划教材

大学物理 实验教程

主 编 郑发农
副主编 郝 霞 华沙咪



中国科学技术大学出版社

安徽省高等学校省级规划教材

大学物理实验教程

主 编 郑发农

副主编 郝 霞 华沙咪

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书遵照全国工科实验物理课程指导委员会制定的教学基本要求,结合普通高校近年来的教学改革实践,为适应新的教育教学发展而编写。

全书共分 8 章,40 个实验项目,由基础实验、综合和应用性实验、近代物理实验、设计性实验和计算机仿真实验 6 个部分组成。每部分相对独立,循序渐进,各成体系,可供不同专业学生选做。

全书内容的编写力求时代性和先进性相结合,注重知识和能力的培养。本书可作为工科高等院校实验物理课程教材和从事实验教学人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/郑发农主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015. 1
ISBN 978-7-312-03634-7

I. 大… II. 郑… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 260917 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽省瑞隆印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 20.5
字数 530 千
版次 2015 年 1 月第 1 版
印次 2015 年 1 月第 1 次印刷
定价 36.00 元

前 言

本书是遵照全国工科实验物理课程指导委员会制定的教学基本要求,在总结安徽工程大学近年来工科物理实验的教学改革实践的基础上,结合学校专业设置的特点,在物理实验中心2004年出版的《物理实验教程》一书的基础上,为适应新的教育教学发展而着力编写的。该书2013年列选“安徽省高等学校省级规划教材”。

本书的体系结构新颖,突破传统的实验划分模式,注重应用性、综合性实验。全书共分8章,40个实验项目,由基础实验、综合和应用性实验、近代物理实验、设计性实验和计算机仿真实验6个部分组成。每部分相对独立,循序渐进,自成体系,可供不同专业学生选做。

本书由郑发农任主编,郝霞、华沙咪任副主编,安徽工程大学物理实验中心部分老师参加了编写。其中,郑发农编写第二章,第八章,实验十九、二十、二十二、二十三、二十六、三十九;郝霞编写实验九、十、十五、十六、十七、二十四、二十五;华沙咪、沈洋编写绪论,第一章,实验五、十八、二十一;陈翠微、葛强编写实验一、二、三、四、七、四十;江安编写实验六、八、十二、十三、十四;章其林编写实验二十七、二十八、二十九、三十;王庆松、王兴林、王明方编写实验十一、三十一、三十二、三十三、三十四、三十五、三十六、三十七、三十八。全书由郑发农统稿。

本书虽然由以上同志共同编写,但实际上是多年来几代实验教学人员辛勤劳动的成果,在本书的编写过程中,得到了安徽工程大学数理学院领导的支持和全体实验室同志的积极参加,同时参阅了兄弟院校的有关教材,从中借鉴了不少宝贵的教学实践经验,在此一并表示谢意!由于时间和业务水平有限,错误和疏漏之处请不吝指正。

编 者

2014年6月

目 录

前言	(I)
绪论	(1)
第一节 物理实验课的地位和作用	(1)
第二节 物理实验课的基本程序	(2)
第一章 测量误差与数据处理	(4)
第一节 测量与误差	(4)
第二节 有效数字及其运算法则	(7)
第三节 随机误差的估算与系统误差的处理	(11)
第四节 测量不确定度的评定	(18)
第五节 实验数据的处理方法	(21)
第二章 物理实验的基本知识与基本测量方法	(33)
第一节 物理实验的基本知识	(33)
第二节 物理实验的基本测量方法	(55)
第三章 基础实验(一)	(73)
实验一 基本力学测量	(73)
实验二 用扭摆法测定物体转动惯量	(76)
实验三 液体粘滞系数的测定	(79)
实验四 空气比热容比测定实验	(83)
实验五 示波器的使用	(86)
实验六 电子在电磁场中运动的研究	(97)
实验七 铁磁性材料居里温度的测量	(107)
实验八 用稳恒电流场模拟静电场	(110)
实验九 薄透镜焦距的测量	(116)
实验十 分光计的调整和三棱镜顶角的测定	(122)
第四章 基础实验(二)	(134)
实验十一 声速的测量	(134)
实验十二 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	(141)
实验十三 电桥法测电阻	(146)
实验十四 电位差计的使用	(152)
实验十五 光的干涉	(159)
实验十六 光栅衍射和光波波长的测定	(164)
实验十七 光的偏振——布儒斯特角法	(169)
实验十八 霍尔效应及其研究	(172)

第五章 综合应用性实验	(182)
实验十九 液晶光电效应综合实验	(182)
实验二十 万用表的使用和基本电路连接、检查练习	(189)
实验二十一 金属杨氏弹性模量的测定——霍尔位置传感器测量法	(193)
实验二十二 非线性电路混沌实验	(198)
实验二十三 灵敏电流计的研究	(202)
实验二十四 多普勒效应综合实验	(208)
实验二十五 迈克耳逊干涉仪的调节与使用	(219)
实验二十六 太阳能电池特性研究与应用	(223)
第六章 近代物理实验	(237)
实验二十七 光电效应实验——普朗克常数的测定	(237)
实验二十八 夫兰克-赫兹实验	(245)
实验二十九 电子电量的测定——密立根油滴实验	(252)
实验三十 氢原子光谱	(260)
实验三十一 核磁共振实验	(261)
实验三十二 巨磁电阻效应及其应用	(268)
第七章 设计性实验	(283)
第一节 设计性实验的特点	(283)
第二节 设计性实验的流程	(283)
第三节 设计性实验项目	(285)
实验三十三 测量小灯泡伏安特性曲线	(286)
实验三十四 研究 RC 、 RL 、 RLC 电路的暂态过程	(286)
实验三十五 充电器的制作	(287)
实验三十六 “打靶”实验	(288)
实验三十七 简易万用表的设计、组装和校正	(289)
实验三十八 光电传输系统设计	(291)
实验三十九 控制电路的初步设计	(292)
实验四十 多用组合电路的设计与开发	(296)
第八章 计算机仿真实验	(307)
附表	(312)
参考文献	(322)

绪 论

第一节 物理实验课的地位和作用

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础。作为培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人员的高等工科学校,不仅要求学生具备比较深广的理论知识,而且要使学生具有从事科学实验的较强能力,以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

物理学从本质上说是一门实验科学。无论是物理规律的发现和理论的建立,还是对于理论的检验,都完全离不开实验。当然,一些实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括也必须用已有的理论知识。历史表明,物理学的发展是在实验与理论两方面相互推动、密切结合下进行的。因此,物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位。它们既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用。此外,实验是学习中的一个重要环节,物理实验本身有自己一整套实验理论、方法和技能,要掌握好这些实验知识并不容易,而是需要由浅入深,由简到繁地逐步提高,并给予系统地学习、培养和训练。

物理实验是对高等工科学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统的实验方法和实验技能训练的开端,是各类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

物理实验将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、方法和技能,使学生了解科学实验的重要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

物理实验课程的具体任务是:

1. 通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,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:
 - (1) 能够自行阅读实验教材和资料,作好实验前的准备。
 - (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器。
 - (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断。
 - (4) 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。
 - (5) 能够完成简单的设计性实验。
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、相互协作的团队精神和遵守纪律,爱护公共财产的优良品德。物理实验有它自己的特点和规律,要想学好实验课就必须坚持严谨的科学态

度,只要认真刻苦地努力学习,就一定能获得成功。

第二节 物理实验课的基本程序

物理实验,多数是测量某一物理量的数值,或是研究某一物理量随另一物理量变化的规律性。不论实验的内容要求或研究对象如何,也不论实验采用哪一种方法,任何实验的基本程序大致相同。着重的是严格的训练,而不是“成果”。一般的实验过程都应包括(1)准备;(2)观测与记录;(3)数据的整理与分析这三个步骤。

一、实验前的准备(预习)

由于实验课的课内时间有限,而熟悉仪器和测量数据的任务一般都是比较繁重的,不允许在实验课内才开始研究实验的原理和内容。因此,上课前应该认真阅读实验教材和有关参考资料,搞懂实验原理,了解实验方法,明确实验目的和要求,了解实验步骤及注意事项。并在此基础上写好预习报告,做到心中有数。为了能及时、迅速、准确地获得待测物理量的数据,并使测量结果眉目清楚,防止漏测数据,预习时应根据实验要求画好数据记录表格,在表格中要标明文字符号所代表的物理量及其单位,计划好测量次数。

预习报告应包括下列内容:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理摘要(要求在理解本实验原理的基础上,用自己的语言简述之,并列出本实验的主要计算公式,画出实验装置草图和电路图等。不要照抄教材)。

(4) 实验内容(根据原理摘要中的计算公式结合本实验的要求,分清已知量、控制量、待测量等,并列出数据记录表格)。

(5) 记录预习中遇到的问题和注意事项等。

(6) 认真完成“预习思考题”。

要知道,预习质量的好坏,将直接影响实验结果,因此,在实验前务必按照要求搞好预习。课前不预习,没有写预习报告者,不准参加本次实验。

二、实验中的观测与记录

学生在认真预习的基础上,可以进行实验操作。在进入实验室后,首先要接受教师对预习情况的检查。实验开始前要熟悉仪器的工作原理并正确掌握其使用方法,务必牢记实验的注意事项,再将各种仪器按照便于观察、测量和读数的原则布置好。安装和调试仪器是实验成败的关键,必须认真细致地完成,要开动脑筋,不要存在侥幸心理,更不能埋怨仪器。仪器完全调好后,进行观测,获得数据就比较容易了。

每次测量时,应立即将实验原始数据(指从仪器上直接读出的、未经任何运算和处理的数

据)记录在预习时准备的实验数据表格内,一般不允许用铅笔记录原始数据,切不可随意记在纸头上或教材上。若发现数据有错时,不要乱涂,可在错误的数字上画一条整齐的直线,将正确的写在旁边或补写在最后。我们保留“错误”数据,不轻易地毁掉它,是因为“错误”数据经比较以后往往是正确的。当实验结果与气压、温度、湿度有关时,还应记下实验进行时的室温、空气湿度和大气压等。

实验数据是以后计算与分析问题的依据,在实验工作中是宝贵的资料。所以记录实验数据一定要实事求是,切不可随意改动,更不能编造数据。

在两人或多人合做一个实验时,不要一个人包办代替,应该分工协作,使每个人都得到训练,以便共同达到预期的要求。

实验操作结束后,不要急于收拾仪器,应该先把实验数据交指导教师审查,经老师认可签字后,方可收拾整理仪器,结束实验。

三、数据的处理和实验报告

测量结束后要尽快整理好数据,计算出结果,并绘出必要的图线。

实验报告是实验工作的书面总结,它以简明扼要的形式将实验的内容和结果完整而真实地表达出来。书写实验报告时,必须文字通顺,字迹端正,图表规范,计算正确,并对实验结果进行认真分析。编写实验报告也是实验能力的一个重要方面,应该养成实验完成后尽快将实验报告写出来的习惯。这样做,可以收到事半功倍的效果。

一个完整的实验报告,除了有预习报告的内容外(为避免重复劳动,这部分内容一般就不要重新再写了),一般还应包括以下几个部分:

(1) 仪器设备的名称、编号、量程、级别等。

(2) 数据处理或作图。

(3) 明确的实验结果表达式。

(4) 实验现象的分析、误差的评定及讨论(讨论中可包括回答问题——布置的作业题、提出建议、心得体会等)。

以上项目是报告中大体上应包括的内容,但是并不要求千篇一律地照此套入,而应该根据不同的具体情况有所取舍。

实验报告要用统一的实验报告纸书写,字体要工整,文句要简明,原始数据要随同报告一并交教师批阅,没有原始数据的实验报告是无效的。

第一章 测量误差与数据处理

第一节 测量与误差

一、测量及其分类

测量是将被测物理量与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,即以确定量值为对象的一组操作,被测量的测量结果用标准量的倍增数和标准量的单位来表示。

作为比较标准的测量单位,其大小是科学地人为规定的。如:国际单位制(简称 SI)是世界唯一公认的科学单位制,它选定了七个基本物理量,即长度(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)和发光强度(坎德拉)的单位为基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称导出单位。

测量按获数据的方式不同,可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

是指将被测量直接与标准量(量具或仪表)进行比较,直接读数获取数据。如:米尺测量长度,天平测量质量等。

2. 间接测量

在物理实验中,大多数物理量没有直接测量的量具,不能直接获取数据,但可以找到它与某些直接测量量的函数关系。这种通过测量某些直接测量量,然后再根据某一函数关系而获取被测量量数据的测量,称之为间接测量,相应的测得量就是间接测量量。如:物质的密度,物体的体积等。

但是,测量的分类具有相对性,随着测量技术的提高,一些间接测量量也可以通过直接测量得到。如密度的测量,如果通过测量物体的体积和质量求得密度,则密度便是间接测量量;如用密度计测量物体的密度,那么,密度就是直接测量量。

对重复的多次测量,可分为等精度测量和不等精度测量两类。如对某一待测物进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一套仪器,同一种实验方法,同一实验环境等),那么就没有理由可以判定某一次测量比另一次测量更准确,对每次测量的精度只能认为是具有相同精度级别的。我们把这样的重量测量称为等精度测量。在诸测量条件中,只要有一个条件发生了变化,这时所进行的重复测量,就难以保证各次测量精度一样,我们把这样的重复测量称为不等精度测量。一般在物理实验中进行重复测量时,要尽量保证为等精度测量。

二、测量误差及其分类

每一个物理量都是客观存在的,在一定的客观条件下具有不以人们的意志为转移的固定大小,这个客观大小称为该物理量的真值。真值包含理论真值(如三角形内角和恒为 180°)和约定真值(如基本常数、基本单位标准)。从测量的要求来说,人们总是希望测量的结果能很好地符合客观实际,测量的目的就是力图得到真值,但在实际测量过程中,由于测量仪器不能无限地精确,测量所依据的理论往往具有某种程度的近似,测量方法的不完善,周围环境的变化,人的感觉器官也有一定的局限性,因此,不可能获得待测量的真值,只能获得其近似值(最佳值)。测量结果与真值之间总是有一定的差异,这种差异就是“误差”。误差存在于一切测量的过程中,这成为一条公理。

设其待测量的客观真值为 x_0 ,测得的值为 x ,则测量的误差 ϵ 可表示为:

$$\epsilon = x - x_0$$

其中 x 可为正,也可为负。根据误差产生的原因和性质,可将误差分为三大类。

1. 粗大误差

这种误差是由于测量者的过失(错误或失误)而产生的。例如,由于缺乏经验,过度疲劳或马虎大意而产生漏读、错记、错算所引起的误差,或者因为仪器不熟悉、理论不理解而发生错误操作、倒读、“张冠李戴”等引起的误差。初学者容易产生这种误差,但是若采取适当的措施,这种误差是完全可以避免的。例如,细心检查,认真操作,重复测量,多人合作等都是避免粗大误差的有效措施。这类误差一般使实验结果远离物理规律,它的出现必将明显地歪曲测量结果,我们应当努力将其剔除。但是什么样的数据可以认为是有过失误差的坏数据而必须剔除,则应该慎重处理。在测量不当时若肯定是测错或测量条件有明显变化的数据,可以在注明原因后废弃。若在测量过后整理数据时发现数据有错误,则必须经过物理规律的分析,认为不合理的异常数据才可以舍弃。

2. 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观测者不变)多次测量同一量时,误差的符号和绝对值保持不变,或按某一确定的规律(如递增、递减或周期性等)变化的误差,称为系统误差。例如天平的零点不准,砝码的标准质量不准,天平臂不等长,电表刻度不均匀,热胀冷缩导致米尺本身长度的变化等引入的误差,都是系统误差。系统误差按其产生的原因又可分为:

(1) 仪器误差:这是所用量具或装置本身的缺陷或未按规定条件使用而产生的误差或与测量环境、条件要求不一致引起的误差。

(2) 方法误差(理论误差):这是由于测量所依据的理论、实验方法不完善或实验条件不符合要求而导致的误差。

(3) 装置误差:这是由于对测量装置和电路布置、安装、调整不当而产生的误差。

(4) 环境误差:这是因外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差或与测量环境条件要求不一致引起的误差。

(5) 人身误差:这是由于观测者生理或心理特点所引入的误差,此种误差因人而异,并和一个人当时的精神状况密切相关。

系统误差的出现一般都有较明确的原因,因此只要采取适当措施对测量值进行修正,就可使之减至最小。但是,在实验中仅靠增加测量次数并不能减小这种误差。

3. 随机误差(偶然误差)

在同一条件下测量同一量时,由于随机的或不确定的因素所造成的每一次测量值的误差大小与正负都不确定,而在大量的重复测量中,它们又遵守一定的统计规律的误差,称为随机误差,也称为“偶然误差”。

这里要注意,我们称其为随机误差,是指在某一次具体测量中,其误差的大小与正负带有很大的随机性,不能事先估计其值的大小、正负而言的。但这并不是说“在测量中误差只是随机出现”或“它没有什么规律可循”的意思。

随机误差的来源主要是:由于人们的感官灵敏程度和仪器精密程度有限,各人的估读能力不一致,外界环境的干扰(如空气流的扰动、温度的微小起伏、风向、风力、杂散电磁场的不规则脉冲等),这些因素不尽全知,无法估量。即使在消除了粗大误差和系统误差之后,随机误差依然存在,它是必然发生的,只能设法减小,而不能彻底消除。随机误差的出现并不是毫无规律,在大量重复测量中,随机误差将遵守一定的统计规律。但其到底遵守什么样的统计规律,则由所研究的问题的性质来决定。根据统计理论和无数实验事实,证明多数物理实验中,随机误差将服从正态分布(或称高斯分布)。如图 1-1-1 所示。

图中横坐标表示随机误差 ϵ ,纵坐标 $f(\epsilon)$ 表示该误差出现的概率。由图可知,随机误差具有如下性质:

- (1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的几率大。
- (2) 对称性:绝对值相等的正和负的误差的出现几率相同。
- (3) 有界性:在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。

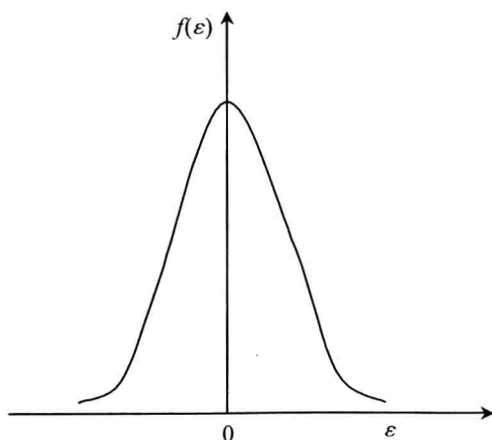


图 1-1-1

- (4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0$$

因此,可用多次测量的算术平均值作为直接测量的近真值(最佳值)。在一定的条件下,增

加测量次数可以减小随机误差,但是,并非测量次数越多越好,在物理实验中一般取 6 至 10 次。

总之,测量结果的误差,是由多种因素所引入的误差的总和。上面我们是根据误差出现的规律,将其分成三类,它们各自反映不同的问题,也各自遵守不同的规律,但是,应当指出它们都是误差的一个方面,彼此是密切相关的。因此,我们在消除粗大误差后,只有综合考虑随机误差和系统误差对实验结果的影响才是全面的。

三、测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是用来评价测量结果好坏的。但这是三个不同的概念,使用时应加以区别。

测量的精密度高,是指测量的数据比较集中,重复性好,随机误差较小,表示测量值之间的离散程度,但是系统误差的大小却不明确。

测量的准确度高,是指测量数据的平均值偏离真值较小,测量结果的系统误差较小。但是数据分散的情况,即随机误差的大小并不明确。

测量的精确度高,是指测量数据都比较集中在真值的附近,即测量结果的系统误差和随机误差都比较小,精确度是对测量结果的随机误差和系统误差的综合评定。因此,测量结果应该用精确度这一概念来描述。

现在我们用打靶时弹着点的情况为例,说明这三个不同概念的意义(见图 1-1-2)。

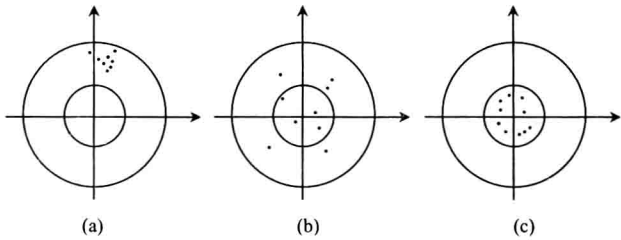


图 1-1-2

在图 1-1-2 中,(a)图表示弹着点比较集中,但都偏离靶心,说明射击的精密度高,但准确度较差;(b)图表示弹着点比较分散,但是它们的中心位置比较接近靶心,说明射击的准确度高,但精密度较差;而(c)图表示弹着点比较集中于靶心,说明射击的精密度和准确度较好,即精确度较高。

第二节 有效数字及其运算法则

实验中总是要记录很多数据,并进行计算,但是,记录时应取几位数,运算后应保留几位数,这是实验数据处理的重要问题,对此,必须有一个明确的认识。

一、有效数字

任何一个物理量,其测量结果总有误差,测量值的最后一位数字就是有误差的数字。我们把最后一位数字叫做“存疑数字”(尽管可疑,但还是有一定根据的,是有意义的),在它前面的所有数字叫做“可靠数字”。这样,可引入有效数字的概念。即测量结果中可靠的几位数字加上一位存疑的数字统称为测量结果的有效数字。例如,我们用毫米尺测量一个物体的长度,如图1-2-1所示,读数为10.24 cm,这个读数的前三位10.2 cm是直接从尺上读出来的,是精确的,是可靠数字。而最末一位0.04 cm则是从尺上的最小刻度之间由测量者估计得来的,是存疑数字。这样10.24 cm一共有四位有效数字。

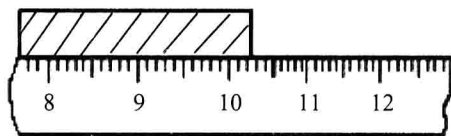


图 1-2-1

关于有效数字的概念,要求掌握下列几点:

(1) 有效数字规定,最末一位数字是存疑数字,这就要求在测量记录时,采取正确的读数方法,即一般是在仪器的最小分格值后可以估读时再估计一位。

(2) 有效数字不仅表示数值的大小,而且还说明了测量仪器的精度(仪器的精度是以其最小分格值来表示)。如上述读数为10.24 cm,有四位有效数字,反映了所用的尺子的精度为1 mm。如果用精度为0.02 mm的游标卡尺来测量该物体的长度读数为10.244 cm,就有五位有效数字。若用厘米尺测量,读数为10.2 cm,就只有三位有效数字。可见有效数字的多少并不是随意决定的,它与所用的测量仪器的精度有关,表示了测量所能达到的精确程度。

(3) 要注意数字中的“0”,它可能是有效数字,也可能不是有效数字。

第一个非零数字前面的“0”不是有效数字,此时“0”是用来表示小数点的位置。如0.0376 cm,前面的“0.0”不是有效数字,而有效数字只有三位。

数字中间出现的“0”和末位的“0”都属于有效数字。如10.50 cm,是四位有效数字,10.5 cm是三位有效数字,但两者是不同的。前者表示测量进行到1/100 cm的地方,而后者表示测量只进行到1/10 cm的地方。这就是说,数字最后面的“0”,即使是在小数点之后,也不能随意加上或者去掉。

如图1-2-2中所示的铜棒的长度必须记作3.60 cm,它表示物体的末端正好是与分度线

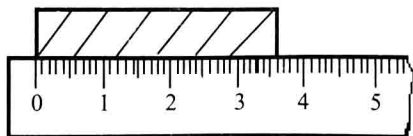


图 1-2-2

“6”对齐,小于1 mm(分度值)的估读数为“0”,这最末一位的“0”必须表示出来,不能省去,这与单纯表示数值大小的算术表示是不同的。如果写成3.6 cm就不能如实地反映测量的精度。

(4) 有效数字的位数不能因为变换单位而增减。如3.94 cm可换算成39.4 mm或0.0394 m,单位变化了,有效数字的位数不变,仍然是三位。又如地球的半径是6371 km,是四位有效数字,换成米为单位时,应当写成 6.371×10^6 m,仍是四位有效数字,如果写成6371000 m,就变成七位有效数字了,这样就会造成测量结果的表达和仪器精密度不符合的现象。为了避免混乱,我们在书写时,常采用10的方幂来表示其数量级,方幂前面的数字是测量的有效数字。例如:

$$0.0523 \text{ m} = 5.23 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$3.8 \text{ km} = 3.8 \times 10^3 \text{ m}$$

$$0.80200 \text{ kg} = 8.0200 \times 10^{-1} \text{ g}$$

这种记数的方法叫做科学记数法,或称“标准形式”。采用标准形式时,有效数字中小数点前一般只取一位数字。

二、有效数字的运算法则

在一切实验中,测量时的读数及运算结果都是用有效数字来表达的。在有效数字的运算过程中,为了防止因运算而引进“误差”或损失有效数字,影响测量结果的精度,并尽量简便,避免繁琐而徒劳的运算,现统一规定有效数字的运算法则如下:

1. 加减法运行(我们用加划的数字代表可疑数字)

$$\begin{array}{r} \text{例 1:} \quad 12.3\bar{4} \\ + \quad 2.35\bar{7} \\ \hline 14.6\bar{9}\bar{7} \end{array}$$

在这个结果中14.6以后的0.097均属可疑数字,没有必要全部保留,因而可采用“舍取法则”只保留一位可疑数字,结果为14.7 $\bar{0}$ 。

$$\begin{array}{r} \text{例 2:} \quad 43.320\bar{6} \\ - 36.2\bar{5} \\ \hline 7.0\bar{7}\bar{0}\bar{6} \end{array}$$

根据上面同样理由,结果应写成7.0 $\bar{7}$ 。

从以上两例可得出如下结论:诸量相加(或相减)时,其和(或差)数在小数点后所保留的位数应与诸数中小数点后位数量少的一个相同。

为了简化运算过程,可以用小数点后位数量最少的那个数作基准,把其他小数点后位数较多的数,按“舍取法则”删去多出的位数,然后再进行运算。如在例2中,

$$43.320\bar{6} - 36.2\bar{5} = 43.3\bar{2} - 36.2\bar{5} = 7.0\bar{7}$$

2. 乘除法运算

例 3:

$$\begin{array}{r}
 4.17\bar{8} \\
 \times 10.\bar{1} \\
 \hline
 417\bar{8} \\
 000\bar{0} \\
 417\bar{8} \\
 \hline
 42.197\bar{8}
 \end{array}$$

根据可疑数字只保留一位的原则,其结果应写成 $42.\bar{2}$ 。

例 4:

$$\begin{array}{r}
 392 \\
 123 \sqrt{48216} \\
 \underline{369} \\
 1131 \\
 \underline{1107} \\
 246 \\
 \underline{246} \\
 0
 \end{array}$$

结果就写成 $39\bar{2}$ 。

从上述两例可得出如下结论:两量相乘(或相除)时,其积(或商)所保留的有效数字,只须和诸因子中有效数字最少的一个相同。

为了简化运算,我们可以用有效数字最少的数作基准,将有效数字多的删至和它相同,然后再进行运算。这样在进行有效数字运算时,我们完全不需要做那些吃力不讨好的事,而且应该尽量使用计算工具(如计算器或数字用表),不仅效率高,而又能满足准确度的要求。

在运算过程中,往往遇到数字的舍和入的问题,究竟如何进行舍和入才是比较合理呢?在数学里我们曾学过“四舍五入”,能否用它来处理实验数据呢?我们说:“四舍五入”的法则对于大量的数据运算来说是不合理的,因为这样入的几率总是大于舍的几率,就会使数据系统偏高,为此,本书采用“四舍六入五凑偶”的方法舍取尾数。这就是说,尾数小于五则舍,大于五则入,等于五时,前一项是偶数(0 算为偶数)则舍,前一项是奇数则入。这样,可使舍入的机会均等。

3. 乘方与开方

在乘方与开方运算中,最后结果的有效数字一般取与其底数的有效数字位数相同。如:

$$4.405^2 = 19.40$$

$$\sqrt{4.405} = 2.099$$

4. 函数运算

一般来说,函数运算的结果位数应以误差分析来确定,在物理实验中,为了简便统一起见,

对常用的对数和三角函数作如下规定:

(1) 对数:对数运算时首数不算有效数字,所取对数结果尾数的有效数字位数应与真数有效数字位相同。如:

$$\lg 1.983 = 0.297322714 \quad \text{取成} \quad 0.2973$$

$$\lg 1983 = 3.297322714 \quad \text{取成} \quad 3.2973$$

自然对数也按上述规定作同样处理。

(2) 三角函数:在 $0 < \theta < 90^\circ$ 时, $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 的值都介于 0 和 1 之间,三角函数的取值应随角度的有效数字而定,一般使用分光计读角度时,应读到 1 分,此时,应取四位有效数字。如:

$$\sin 30^\circ 00' = 0.5 \quad \text{取成} \quad 0.5000$$

$$\cos 20^\circ 16' = 0.9380906 \quad \text{取成} \quad 0.9381$$

5. 其他

在运算过程中,我们可能会碰到一种特殊的数,它们叫做正确数。例如,将半径化成直径时,出现的倍数 2,实验测量次数 n ,物体的个数等。它们总是正整数,不是由测量得来的,没有可疑部分,因此不适用于有效数字的运算法则。

在运算过程中,有时还会遇到一些常数,如 π 、 e 、 g 之类,一般将常数多取一位,结果仍与原来的有效数字位数相同。例如:

$$4.712 \times \pi = 4.712 \times 3.1416 = 14.80$$

应当指出,有效数字的位数多少取决于测量仪器,而不是运算过程。同时,上述有效数字的运算法则在一般情况下是成立的,但并不是十分严格的,常会出现与上述法则不符的情况,所以在确定运算结果的有效数字时,通常是多保留一位,然后根据测量结果对误差的要求来确定哪一个可疑数字,最后再定出有效数字的位数。

第三节 随机误差的估算与系统误差的处理

一、随机误差的估算

任何实验中测量值都包含一定的误差,它们都不是绝对可靠的。那么在实际实验中,如何评价测量的优劣呢?现考虑到系统误差和粗大误差是能够设法消除的。因此,对于一般物理实验,主要是讨论随机误差的问题。

二、多次测量结果与误差计算

1. 多次测量值的算术平均值

在相同的条件下,对某一物理量 x 进行了 n 次的重复测量,测得的值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则其算术平均值 $\bar{x}$ 为