

大学

DA XUE PU TONG
WU LI SHI YAN

普通物理

孟祥省 李冬梅 姜琳 主编

实验

DA XUE PU TONG WU LI SHI YAN

DA XUE PU TONG WU LI SHI YAN

DA XUE PU TONG WU LI SHI YAN



山东大学出版社
Shandong University Press

高等学校教材

大学普通物理实验

(第二版)

孟祥省 李冬梅 姜琳 主编

山东大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学普通物理实验/孟祥省,李冬梅,姜琳主编. — 济南:山东大学出版社,2001.9
ISBN 7-5607-2305-5

I. 大... II. ①孟...②李... III. 普通物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060868 号

山东大学出版社出版发行
(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

曲阜师范大学印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 18 印张 427 千字
2004 年 9 月第 2 版 2004 年 9 月第 2 次印刷

印数:4001—7000 册

定价:26.00 元

版权所有,盗印必究!

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部负责调换

《大学普通物理实验》编委会

主 编	孟祥省	李冬梅	姜 琳	
副主编	李少兰	李爱国	秦文华	樊新岩
编 委	王 涛	李晓明	倪梦莹	刘在国
	杨秀芹	刘 慧		

内容提要

《大学普通物理实验》是“面向二十一世纪教材改革——普通物理实验”教材编写的成果,是在第一版的基础上增订及修改而成的,是结合曲阜师范大学物理工程学院和泰山学院及东营联教学院普通物理实验建设和发展的实际情况而整理编写的,是一本包含力、热、电与磁、光在内的适合新时期由“应试教育”向“素质教育”过渡的《普通物理实验》教材。

本书的修订,保持了原书的通用性和可读性、注重能力的培养的特色,同时,为了更好地适应教学的需要,修改了前版中的绪论及部分实验的论述,改正了原书中的一些错误,增加了部分实验的方法,使在教学过程中更具有灵活性和选择性。

本书的编写符合国家教委高校教材编写的最新要求,总结和吸收了多年来高校物理实验课程建设的实践经验,规范统一了有关名词、单位和符号,从而使本书具有了科学化、规范化的特点。可以作为理工科院校、师范院校、电视大学、函授大学等学校的教材,适应物理专业、电子工程专业及其他专业作为公共课教学的需要。

编者的话

《大学普通物理实验》是“面向二十一世纪教材改革——普通物理实验”教材编写的成果。这是一本包含力、热、电与磁、光在内的适合新时期由“应试教育”向“素质教育”过渡的《普通物理实验》教材。并于 2001 年成功地出版了第一版。

本教材在第一版的基础上,根据我校几年来的使用等情况,就某些内容作了修改和补充,又增添了部分新增实验。

在本教材中,设计了 55 个实验,其中:力、热学实验 24 个、电磁学实验 16 个、光学实验 15 个。绝大部分是我校建校以来教学中采用的实验。本教材的撰写是集体的结晶、是多年从事实验教学的老师们的经验总结。

我们在本教材的编写中,除了借鉴传统实验方法的优点之外,着重强调了对学生的能力培养,突出了实验改革的特点,主要表现在以下几个方面:从实验理论阐述和操作训练上,注重奠定从事实验的思想基础、理论基础和素质基础。从能力的培养上,除强化基础训练外,着意加强实验设计能力。从内容方面,注重研究新方法、新手段;尽力反映新信息、新技术,且兼顾现实与发展、传统与改革,重视实验的实际效果。在教学方法上,实验内容、技能训练等循序渐进,目标要求明确,使学生疑而生趣、趣而解难,有思考的余地。

在实验编排、编写的过程中,考虑到传统实验及教学的要求,在保留一些传统的实验项目的基础上,新增一些自我设计性、综合性强的实验,对该实验项目,只告诉实验的基本要求和实验思路,然后放手让学生自己动手来设计实验,完成该实验。这样既使学生对经典物理范畴内的物理实验的基本原理、方法和技能得到较系统的、较严格的训练,又能培养学生运用所学的理论解决实际问题的能力,养成良好的实验习惯,树立严谨的科学态度,为其在以后走上工作岗位打下良好的素质基础。

在实验选题上,注意起点低、而终点高的特点,同一题目往往提供几种不同的实验方法。授课过程中,可以根据实际情况,选取不同的实验内容进行教学,同时也为开阔学生的视野提供思路。

在教学安排上,建议在实验开始前,用 6 学时的时间,对学生进行“误差理论及其应用”的讲述,初步介绍误差的基本概念、简单的误差计算和有效的数字运算,并逐步介绍实验中遇到的系统误差。然后进一步学习偶然误差和系统误差分析。至于系统误差和回归法处理数据,则完全分散到具体的实验中学习。

为了使学生能掌握好实验和因材施教,多数实验都编有“思考题”,其中各个题目的深浅程度有较大的差别,而且有些还需要动手再做一做实验,这需要教师根据学生的程度和实验室条件挑选并作好安排。

本书可以作为理工科院校、师范院校、电视大学、函授大学等学校的教材。

本教材是集体智慧的结晶,是高校联合的结果,是曲阜师范大学物理工程学院和泰山学院物理系普通物理实验室近年来教学改革成果的体现。参加本书编者分工如下:第一部分“绪论”部分主要由孟祥省、李少兰、李爱国编写,第二部分“力热实验”由李少兰、李爱国、刘慧、姜琳、李晓明编写;第三部分“电磁学实验”由樊新岩、李冬梅、刘在国、秦文华编写;第四部分“光学实验”由孟祥省、杨秀芹、王涛、倪梦莹编写;“附录”部分由孟祥省整理。全书由主编、副主编最后统稿、定稿。

该书在编写过程中,得到了曲阜师范大学付吉孝教授、张爱淑副教授、郭承福副教授、孔祥和副教授的大力支持和帮助,并在书稿完成后对该书作了全面的审查;另外,该书的编写与出版还得到了曲阜师范大学教务处及物理工程学院、泰山学院教务处及物理系的领导的关怀与支持,在此,我们一并表示诚挚的敬意和衷心的感谢!

我们出版本教材的出发点是编写一个适合于我们现代教学手段和方法的实验教材。但由于我们水平所限,经验不足,书中难免有错误和不足之处,望读者批评指正!

编 者
2004年7月

2—6	静电场的描绘	(133)
2—7	用开尔文电桥测低电阻	(135)
2—8	灵敏电流计特性研究	(140)
2—9	电位差计的使用	(143)
2—10	霍尔效应研究	(145)
2—11	示波器的使用	(150)
2—12	电子束的偏转	(155)
2—13	电子束的聚焦	(158)
2—14	磁场的描绘	(161)
2—15	交流电桥	(165)
2—16	RLC 电路谐振研究	(168)
第三单元	光学实验	(172)
3—1	薄透镜焦距的测定	(178)
3—2	光具组基点的测定	(185)
3—3	分光计的调节及棱镜玻璃折射率的测定	(189)
3—4	望远镜、显微镜及其使用	(197)
3—5	平行光管的调整和使用	(203)
3—6	用小棱镜摄谱仪测定光波波长	(208)
3—7	测量单缝衍射的光强分布	(215)
3—8	液体折射率的测定	(219)
3—9	单色仪的定标	(223)
3—10	用牛顿环干涉测透镜曲率半径	(228)
3—11	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	(232)
3—12	利用光电效应测定普朗克常量	(239)
3—13	偏振现象的观测与分析	(244)
3—14	全息照相	(250)
3—15	利用透射光栅测定光波波长	(256)
3—16	阿贝成像原理和空间滤波	(259)
附录	常用物理常数表	(266)

绪 论

一、怎样学好物理实验

普通物理实验是物理专业第一门独立的实验课程,对低年级的学生开设这门课程,不单是物理学的一门实验科学,重要的是物理实验本身有它一套实验知识、方法、习惯和技能,要掌握好这套实验知识、方法、习惯和技能,需要由浅入深,由简到繁地加以培养和锻炼,也就是在低年级应打下良好的基础。

由于中学阶段对实验的训练比较薄弱,要学好这门课不但要花气力下功夫,而且还要有一定的学习方法,那么,怎样才能学好这门课程呢?

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,也是复杂的测量方法的基础,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,只有亲自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。教材中不少地方叙述应如何记录原始数据和处理数据、注意和记录实验的环境条件(如温度、湿度)、安排实验仪器和装置、一般的操作习惯、乃至一些操作的姿势。这些良好习惯是经历很多实验后的总结,它能保证实验安全、避免差错。但是,就单个习惯而言,由于它很易明白,不难掌握,反而容易被学生忽视,认为无关紧要。实际上,要真正养成良好的习惯不但要经过多次实验,还要在每次实验中有意识地锻炼自己。

第三,要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障。实验最后一般总会有数据结果,这些数据是否正确靠什么去判断?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是要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,实验环境会导致多大的影响等等。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,简单地认为已经学好了这次实验;而一旦数据和计算差别较大,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定的理论上的抽象和简化,而客观显示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,主要的是要逐步学会分析实验,

找出好坏的原因。

当出现数据不佳时,应该怎样对待呢?首先,要检查自己的操作和读数,这往往需要重复一下,关键的操作和读数最好请教师当场检查和指导。如果操作和读数都正确,那么,毛病可能出现在仪器和装置上,仪器装置的小毛病和小故障,学生要力求自己动手解决,起码要留意观察教师怎样动手解决。即使是仪器装置失灵,也要观察教师怎样去判断仪器的毛病,怎样修复(可能当场修复的仪器)。应该说,能否发现仪器装置故障以及修复仪器是实验能力强弱的一个重要表现,学生也要逐步有所提高。

第四,每次实验要掌握好重点。实验是一件实际的工作,除了重点的学习内容外,还会遇到很多零散的问题,做一些枝节的工作。这些工作固然需要做好,但要把它完全搞清弄懂,短时间内是不可能的。教材中写上“学习重点”,是为了帮助学生注意在该次实验中把主要精力放在什么地方,以提高学习的效率。

本书中每个实验都包括有一定的测量内容,通过这些测量使学生体验实验方法和练习操作,并取得必要的数据。在完成规定的测量内容以后,如果还有富裕的时间,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?或者提出对实验内容或仪器的一些小改进等。也可以针对问题做进一步实验。除了觉得自己的操作太生疏需要熟悉以外,一般不必简单地重复。

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地提高对实验的兴趣,打好基础,注意培养独立观察问题和解决问题的能力。

二、误差理论及其应用

◎ 物理量的测量和实验误差

对物理量进行测量,是物理实验极其重要的组成部分,而对某物理量的大小进行测定,实际上就是将此物理量与规定作为标准单位的同类物理量或可借以导出的异类物理量进行比较。例如,物体的质量可以通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而测得;物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位相比较而获得。

现在,国际上规定了长度(米)(m),质量(千克)(kg),时间(秒)(s),电流(安培)(A),热力学温度(开尔文)(K),发光强度(坎德拉)(cd)和物质的量(摩尔)(mol)共7个物理量的单位作为基本单位。其他物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的,因此称它们为导出单位。如以上提到的速度及以后经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

对一个被测物理量,除了用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的参数,这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易为人们所忽视。设

想,如果得到一个测量结果的可靠性近乎为零,那么,这种测量结果还有什么价值呢?因此,从表征被测量这个意义上来说,其结果可靠性的定量估计与其数值和单位一样,至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的。这里我们将主要讨论有关测量结果可靠性的定量估计及其表示方法。

按测量结果获得的手段来分,可将测量分为直接测量和间接测量;就测量条件是否相同来分,又有所谓等精度测量和不等精度测量之分。

直接测得量:是指一些物理量可以通过相应的测量仪器直接测得。凡由此获得的物理量统称为直接测得量。

间接测得量:是由一些直接测得量通过一定的数学关系式计算出来的量。

等精度测量:当对某一物理量,在同样的实验条件下(同一实验者,同一实验仪器,同一实验方法,同一实验环境等等)进行多次重复测量时,多次测得的结果又有所不同。对这类测量,没有任何充足的理由说某次测量一定比另一次更精确,这样,只能认为每次测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量。

不等精度测量:在多次重复测量时,只要上述诸实验条件中任何一个发生了变化,那么,在这种情况下进行的测量便是不等精度测量。

严格地说,在实验中,保持实验条件完全相同的多次测量是极其困难的。但是,当某一实验条件的变化对测量结果影响不大,甚至可以忽略不计时,仍可视这种测量为等精度测量。为了简化问题的讨论,这里只限于研究等精度测量的数据处理问题。

测量过程中不可避免地总是存在着误差。这首先表现为,当在同样条件下对同一被测量重复进行测量时,得到的结果一般不会都相同;其次,因受所用仪器准确度及分辨率的限制,获得的结果也不会绝对准确;还有,在测量过程中,被测量往往要对测量仪器施加作用,方能获得测量结果,这便意味着测量过程本身会改变被测量的原来的状态等等。总之,这些都会使测量结果与被测量的真值或实际值之间存在着一定的差异。为此,我们定义测量结果 X 与真值 A_0 (或实际值) 的差为测得量的绝对误差 Δ , 有

$$\Delta = X - A_0 \quad (0-1)$$

其中 X 为被测量的实测值, A_0 为被测量的真值。我们将凡是在一定的时间内,被测量事实上并不发生变化的真正大小称之为真值。鉴于以上所述的种种原因,一般说来,真值是很难确切测定的。当然,用(0-1)式确定被测量的绝对误差也就成为不可能的了。不过,只有以下情况例外。

(1) 理论真值。如平面三角形的三角之和总为 180° ; 直角三角形斜边的平方必等于两直角边的平方和等。

(2) 由国际计量大会约定的值可视为近似真值(可把它们作为真值为已知的情况处理)。如前面介绍的基本物理量的单位标准,以及大会决议约定的基本物理常数值等,都可以视为近似真值。

(3) 因为通常进行测量时,不可能将所使用的测量仪器逐一去直接与国家的或国际的标准相校对,而是经过多级计量鉴定网逐级校对的,因此常用比被校仪器高一级的标准器的量值作为 A_0 近似真值(也称为实际值)。通常认为,若高一级的标准器的误差为被校

准仪器误差的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$, 则可视此标准器的量值为被校仪器的近似真值。

(4) 在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下, 多次测量的平均值, 可作为近似真值, 或称为最佳值。

为了表征测量结果的优劣, 除了用绝对误差外, 还需要引入相对误差的概念。例如, 用螺旋测微计分别测定厚度为 2 mm 和 2 cm 的两平板, 测量结果的绝对误差都为 0.005 mm。显然, 以绝对误差来评价以上两个测量结果, 优劣程度是相同的。但是如果用绝对误差与测量值本身的比值来评价它们时, 则会发现二者有明显的区别, 即

$$\frac{0.005}{2} > \frac{0.005}{20}$$

不难判断, 厚为 2 cm 的测量结果要比厚为 2 mm 的要好。为此, 引入以上比值来表示测量结果的误差, 称为相对误差 δ , 表示为

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

其中 Δ 为测得值的绝对误差, A_0 为其真值(或近似真值)。根据以上的讨论, 只有对于具备能求绝对误差的以上三种条件, 才可由(0-2)式求其相对误差。由(0-2)式, 有时相对误差也称为百分误差。

若从误差自身的特点和服从的规律来考虑, 误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。下面先介绍它们的特点。

(一) 系统误差、正确度

系统误差是指实验系统(测量系统)在测量过程中和在取得其结果的过程中存在恒定的、或按一定规律变化的误差。根据系统误差产生的原因, 大致可分为:

(1) 装置误差。因受仪器本身准确度及分辨率限制而导致的误差或测量设备安装得不尽合理, 如线路布置得不够妥贴, 接线和仪器调整不当而产生的误差。

(2) 方法或理论误差。此乃因使用的实验方法或原理不完备而引起的误差。

(3) 环境误差。由于外界环境如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而造成的误差。

(4) 人员误差。此乃由测量者的感官, 特别是眼睛和其他器官不够完善而导致的习惯性误差, 而且这种误差的产生和它对测量结果的影响往往因人而异。

由于系统误差的存在直接影响着测量结果的准确性, 减弱或消除这类误差才能使测量结果更加接近真值。因此我们用“正确度”来描述测量结果系统误差的大小。所谓某一测量结果的正确度高, 就是说该测量结果的系统误差小; 反之, 若某一测量结果的准确度低, 其系统误差必然大, 它不能靠多次重复测量来减弱或消除。

(二) 随机误差、精密度

在测量过程中, 即使是消除了一切可以消除的系统误差, 或是对一切能够改正的系统误差进行了校正, 也还会存在一些不确定的因素, 如受人们感官灵敏度的限制, 在使用指示仪表重复测同一量时, 很难做到每次的读数都完全一样; 仪器分辨率的制约; 在测量过程中周围环境会有起伏。此外, 还有一些很难避免的随机因素的干扰, 这些都有可能使重复测量的结果不尽相同。一般来说, 彼此总会略有差异。对于上述因随机因素引起的误

差称为随机误差。

随机误差的存在使每次测量结果与真值相比总是有偏离, 偏大偏小都是可能的。但是随着测量次数的增多, 便会发现它们服从一定的统计规律。对此类误差是可以用严格的数学理论和方法——概率论的理论和方法去解决的。

随机误差反映的是一组测量结果的重复性和离散性, 对此, 我们用“精密度”来描述。如果某被测量经过多次重复测量, 其值彼此间很接近, 差异甚小, 说明此组测量结果重复性好, 或者说测量的精密度很高; 反之, 若对同一量进行多次测量, 所得数值极为分散, 彼此相差很大, 则说该组测量重复性差, 也即精密度低。

(三) 粗大误差

这种误差纯属因实验者的粗心而在测量过程或计算过程中发生错误所致。所以, 这类误差称为粗大误差(简称粗差, 有的书中叫做过失误差)。显然, 只要实验者细心测量, 正确记录和处理数据, 这种误差是完全应该避免的。

◎ 测量结果的一般表示、有效数字及其近似运算法则

(一) 测量结果的一般表示

原则上, 测量结果一般可以表示为

$$\text{测量结果值} \pm \text{系统误差} \pm \text{随机误差}$$

对上面表示的三部分简要说明如下。

1. 测量结果值的表示

按单次及多次测量分, 有以下两种不同表述方法:

(1) 单次测量结果即用该次测得值来表示。

(2) 多次测量结果则以多次测量结果的算术平均值来表示。等精度多次测量结果的最可信赖值就是多次测量结果的算术平均值。若用 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示该组测量的 n 次测得结果, 则由上述结论知这组测量的最可信赖值可写成

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (0-3)$$

这里 $\bar{X}$ 为该组测量的算术平均值。可以证明当测量次数趋于无穷多, 且在测量过程中不存在系统误差及粗大误差时, 由(0-3)式表示的算术平均值将趋于被测量的真值。因此, 常以算术平均值作为真值未知的一组测量结果的近似真值。为了说明各次测得值与算术平均值的偏离, 并与(0-1)式给出的绝对误差相区别, 引入绝对偏差(残差)的概念, 以 v_i 表示, 则有

$$v_i = X_i - \bar{X} \quad (0-4)$$

此处 X_i 为某次测量的测得值。同样也可以定义相对偏差 δ_i :

$$\delta_i = \frac{v_i}{\bar{X}} \quad (0-5)$$

上式若以百分数表示, 便称其为百分偏差。

2. 关于随机误差的表述

随机误差的表达方式有多种, 作为初次接触, 这里只介绍其中一种最简单的表达方式

——以平均绝对偏差表示多次测量的随机误差。对一组 n 次测量, 定义平均绝对偏差为各次测量值的绝对偏差绝对值的平均值, 以 η 表示, 即

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{n} \quad (0-6)$$

误差理论指出, 在测量次数 n 不是很小的情况下 ($n \geq 15$), η 相当于算术平均值的随机误差的最大误差。需要指出的是, (0-6) 式给出的平均绝对偏差并不是严格由概率论推出的结果, 引入此式完全是为了初学者便于接受。在测量次数较少时, 如 $n = 5$, 经计算得知它表示结果在此范围内的可信程度为 80%。

3. 系统误差的表达

在最后结果表达式中的系统误差一般应包括以下两部分: 一部分是可以消除的系统误差, 常用一些特定的实验方法对其加以消除 (在今后学习中逐一学习到); 另一部分可以分成两种:

(1) 数值和符号可以确定的系统误差。这类系统误差是可以通过计算或测量得到其数值和符号的, 从而可对测得结果直接加以改正, 因此也将这类系统误差称为改正值。

(2) 误差范围能够确定的系统误差。这类系统误差的具体数值和符号难以确定, 但其误差范围是可以确定的。我们称它为仪器最大系统误差 (系统不确定度), 而这最大系统误差往往可以通过所用仪器的正确度加以确定。

4. 测量结果的精确度

前面已指出, 正确度是表征测量结果中存在的系统误差大小的量度; 精密度则是表征测量结果的随机误差大小的量度。正确度和精密度是从不同的侧面描述测量结果的量, 若要对测量结果作出全面评价, 二者是缺一不可的。因为任一测量结果总会存在系统误差和随机误差, 所以必须将二者结合起来, 方能全面描述测量结果, 故引入准确度来全面评价一组测量结果。

5. 测量结果的数字表示

一个实验结果的数字表示应取决于该结果的误差。计算工具的选择也应以误差的大小来确定。如某一测量结果用 6 位数字显示的计算器求出的值是 21.3204, 如其误差为 ± 1.4 , 由此得该结果的位数不应取 6 位, 而应取 3 位, 即写作 21.3 ± 1.4 。又如另一测量结果为 123, 其误差为 ± 0.05 , 显然, 它应表示成 123.00 ± 0.05 , 而不能写成 123。对前一例, 若以计算器给出的读数作为最终结果的数字表示 (即写成 21.3204), 这无疑是夸大了测量结果的精确度; 而对后例, 把结果写成 123, 而不是以 123.00 表示, 则大大降低了测量结果的精确度。因此必须以结果的误差来确定其数字表示的数位。

(二) 有效数字

由上所述, 当以数字表示测量结果时, 其数位的多寡应由测量值本身的误差来确定。若测量结果从第某位数起开始有误差, 则自第一位非零数位算起, 直到开始有误差的该位为止 (包括该位) 的各数位均称为有效数字。

如上面的例子中, 测量结果表示为 123.00 ± 0.05 , 可以看出, 结果的误差发生在小数点后第二位上, 因此该测量结果应认为有 5 位有效数字。又如某测量结果为 0.002384,

其绝对误差为 ± 0.000012 , 我们认为它有 3 位有效数字。因为根据有效数字的定义, 2 以前的 3 个零都不是有效数字; 另外, 从结果的误差可见, 从小数点后第 5 位就开始有误差, 因此, 结果中小数点后第 6 位的 4 就不应算作有效数字, 所以我们只能认为结果有 3 位有效数字。再如测量结果为 2.3×10^3 , 而其绝对误差为 ± 0.2 , 先将测量结果表示成 $(2.3000 \pm 0.0002) \times 10^3$, (这里需要说明的是, 当将结果用误差形式表示时, 结果的最后一位应与误差的数位对齐。) 根据定义, 该结果的有效数字为 5 位。

在直接测量中, 如何根据使用的测量仪器, 正确地用有效数字表示测得结果呢? 总括以上讨论, 我们得到以下两种结论:

1. 对于一次直接测得量, 一般情况下, 应按仪器或量具的分度值(相邻两刻线间表示的量值)决定该结果的有效数字位数。对于长度量或可化为长度量的测量, 一般要估读到该测量仪器的分度值的下一位。如用米尺进行测量, 则应估读到 $\frac{1}{10}$ mm, 若用分度值为 1°C 的温度计测量, 读数时应估读到 $\frac{1}{10}^\circ\text{C}$ 。至于在使用附有副尺的量具时, 则应视副尺刻线间距离确定如何读数。如使用精度为 $\frac{1}{10}$ mm 的卡尺, 至少还可以估读到 0.05 mm; 而若使用精度为 $\frac{1}{50}$ mm 的卡尺, 因副尺刻度较密, 只可以取刻线对齐作为估读的结果。从对测量结果产生误差的影响来说, 精度为 $\frac{1}{10}$ mm 的卡尺(其误差可认为是 ± 0.05 mm)与精度为 $\frac{1}{50}$ mm 的卡尺(其误差可认为是 ± 0.02 mm)是无甚大的区别的。因为, 用它们去测量同一被测对象时, 所得结果的有效数字位数当然是相同的, 但测量的绝对误差是由量具决定的。

2. 凡是多次测量的直接测得量, 其算术平均值的有效数字位数, 可由该组测量的平均绝对误差来确定。

对于间接测得量的有效数字, 则应根据其误差(包括系统误差和随机误差)来确定, 即取最后结果的数字与其相应的误差对齐。而误差的数字, 一般取 1~2 位就可以了。

(三) 有效数字的近似计算法则

在实验中, 大量遇到的是间接测得量, 这样就不可避免地要对测得量施以各种运算。下面介绍一种近似运算法则, 利用它既可以简化计算, 也能近似地确定出结果的有效数字位数, 而这样做同先计算其误差后再确定有效数字位数的办法相比, 出入并不大。

1. 加、减运算近似计算法则

(1) 先找出参与运算的误差最大的数据, 并用有效数字表示它。

(2) 以该数据的最后一位为标准, 将其他的数据排成竖式进行简化, 即按修约法则(或称舍入奇偶法则)处理, 可多保留一位。

(3) 对简化后的各数进行加、减运算。将误差最大的有效数字的末位作为结果的有效数字的末位, 余数按修约法则处理。

2. 乘、除运算近似计算法则

(1) 先找出参与运算的有效数字位数最少的数据。

(2) 以该数有效数字位数为准, 简化参与运算的其余各数的有效数字位数(包括常数), 可多保留一位, 多余位数按修约法则处理。

(3) 进行乘除运算, 计算结果的有效数字位数和参与乘除的各数据中有效数字位数最少的位数相同。多余位数按修约法则处理。

3. 乘方、开方的有效数字位数与底数的有效数字位数相同。

4. 三角函数的有效数字位数与相应的角度(以弧度为单位)的有效数字位数相同。

5. 自然对数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同; 而以 10 为底的对数, 其尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同。

在结束有效数字及其近似计算法则的讨论时, 仍需强调以下几点:

1. “0”在数字中间或数字后面都是有效数字。例如, 1.005, 125.0, 13.00 这些数字中的“0”都是有效数字。特别要注意数字 1.0 与 1.00 的意义是不同的, 两者误差不同, 所反映的精确程度也不同。

2. 有效数字的位数与单位无关。例如 $L = 1.2 \text{ cm}$, 若以米做单位, 就应表示为 $L = 0.012 \text{ m}$; 而以 km 做单位, 就应表示为 $L = 0.00012 \text{ km}$ 。但这样书写很不方便, 一般写成 $L = 1.2 \times 10^{-5} \text{ km}$, 同样, 若以微米为单位时, 应写成 $L = 1.2 \times 10^4 \mu\text{m}$ 。但决不可写成 $L = 12\,000 \mu\text{m}$ 。由此例可知, 当数字很大或很小, 且有效数字位数又较少时, 用 10 的方幂形式来表示比较方便。例如地球质量 $M = 5.96 \times 10^{24} \text{ kg}$, 电子的电荷 $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ 等等, 其中有效数字的部分是指 10 的方幂的系数部分, 并且一般规定小数点点在第一位数字后面; 而整个数字的数量级则用 10 的方幂体现出来。

3. 有效数字计算中, 多余位数一律按修约法则加以简化。例如 32.1348, 取 4 位时为 32.13, 取 5 位时为 32.135。又如 26.175 和 26.165, 取 4 位时分别为 26.18 和 26.16。

4. 参与计算的常数, 如 $\pi, e, \sqrt{2}, \frac{1}{2}$ 等, 其有效数字位数可认为是无限的, 在计算中需要取几位就取到几位。

5. 为了避免由舍入过多而带来附加误差, 在运算过程中的有效数字位数可多保留一位, 但在最后结果中, 一般只保留一位有误差的数字。(1-0-4)式中所提到的常数, 在运算时可照此处理。

6. 有效数字的第一位数字是 8 或 9, 在参与运算时可多计一位有效数字。

7. 选取运算工具时, 应使其所给出的数字位数不小于测得值的有效数字的位数。否则将因计算工具选择不当而损失有效数字位数, 造成测得结果精确度的降低, 这是不允许的。但随意扩大结果的有效数字位数也是错误的。

习 题

1. 下列各量是几位有效数字?

9.8, 1.0070, 0.0310, 4.90×10^2 , 2.1700×10^{-10} , 2.54 ± 0.06 ,
299792458 m/s

2. 换算下述测得值的单位。

$$23.5 \text{ g} = \text{ } \text{kg} = \text{ } \text{mg}$$

3. 指出下列表示式的不妥之处并加以改正。

$$(18.235 \pm 0.02) \text{ cm}$$

$$(32.1 \pm 0.02) \text{ g}$$

$$(2.250 \pm 0.19) \text{ s}$$

$$g = 980.34 \text{ m/s}^2 \quad \text{且} \quad \delta g = 0.5\%$$

4. 求出下列各式之结果。

$$101.2 + 53.45 - 0.036 = ?$$

$$1234 - 78.06 - 532 - 0.003 = ?$$

$$\sin 30.2^\circ = ?$$

$$\sin 70.5^\circ = ?$$

$$\lg 102.8 = ?$$

$$\frac{125 - 5.0}{40.00} = ?$$

$$\frac{1}{1000} = ? \quad (\text{其中 } 1 \text{ 是常数})$$

$$\frac{(132.2 + 0.005) \times 120.8}{5864 - 4927.0} = ?$$

5. 某长方体长 10.23 cm, 宽 5.41 cm, 高 1.875 cm, 质量为 241.35 g, 求其密度 ρ 。

6. 若一钢球的直径为 1.590 cm, 求其体积为多少? 其中 π 应取几位有效数字?

◎ 图示及图解法

(一) 列表

在记录和处理数据时常常将数据列成表。数据列表可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系, 便于随时检查测量结果是否正确, 及时发现问题和分析问题, 有助于找出有关量之间的规律性的联系, 求出经验公式。

数据列表还可以提高处理数据的效率, 减少和避免错误。根据需要, 把计算的某些中间项列出来, 可以随时从对比中发现运算是否有误, 随时进行有效数字的简化, 避免不必要的重复计算, 利于计算和分析误差, 以后必要时可对数据随时查对。列表时应当注意以下几点:

(1) 简单明了, 便于看出有关量之间的关系, 便于处理数据。

(2) 必须交代清楚表中各符号所代表物理量的意义, 并写明单位。单位写在标题栏中, 一般不要重复地记在各个数字上。

(3) 表中的数据要正确反映测量结果的有效数字。

(4) 备注栏: 加以必要的说明。

(二) 图示法

利用图线表示被测物理量以及它们之间的变化规律, 这种表示实验结果的方法称为图示法。图示法有下列优点: