

大学物理实验

陈早生 任才贵 等 编著

华东理工大学出版社

大学物理实验

陈早生 任才贵等 编 著

华东理工大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写而成的。

本书系统地介绍了大学物理实验中测量误差及数据处理的基本知识,收入了力学、热学、电磁学、光学和近代物理学实验共40个。书后的附表给出了实验中常用的物理常量。

本书适合作为高等工业学校各专业的物理实验教材或教学参考书,也可作为实验技术人员和有关课程教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/陈早生、任才贵等编著. —上海:华东理工大学出版社, 2003. 3

ISBN 7-5628-1357-4

I. 大... II. ①陈... ②任... III. 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(2003)第 003930 号

大学物理实验 陈早生 任才贵等 编 著

出版	华东理工大学出版	开本	787 × 1092 1/16
社址	上海市梅陇路 130 号	印张	17.75
邮编	200237 电话 (021)64250306	字数	440 千字
网址	www.hdlgpress.com.cn	版次	2003 年 3 月第 1 版
发行	新华书店上海发行所	印次	2004 年 1 月第 2 次
印刷	常熟市华通印刷有限公司	印数	3551 - 6580 册
ISBN 7-5628-1357-4/O · 76		定价: 27.00 元	

前 言

本书是在总结了多年的物理实验教学经验和实验改革的基础上,根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,结合一般工科院校专业的特点和实验仪器的现状,由华东交通大学实验物理老师编写而成的。

本书的编写有以下几个特点:

1. 在实验项目的编排上,打破了以往的“力、热、电、光”的编排方式,而是按照由一般实验到综合性实验到设计性实验,这样一个由易到难、循序渐进的原则进行实验项目编排,有利于学生对物理实验课程的学习和实验能力的培养。

2. 每个实验都有预习思考题,有利于学生在做实验前,掌握实验的理论,确定实验的基本过程。也有习题,供学生在实验后进行分析讨论,以巩固所学的知识。

3. 在每个实验的开头都有提要,使学生对本实验的思想、实验的应用有一个简明扼要的了解。

每个操作实验一般按3学时安排,综合性或设计性实验一般按4~6学时安排。

参加本书编写工作的是物理教研室的大部分教师。主要有:陈早生编写了实验1~17、实验27~29、实验31~39以及部分第一章、附表及其它。任才贵编写了实验18、20~22、26、27。邱万英编写了实验19、23、25和30。艾剑锋编写了实验24、第七章和部分第一章。胡石琼编写了第二章第一、二节,石海泉编写了第二章第三节。陈果编写了实验40。另外,曾友华、孙红、陈果、彭婉娟对部分实验稿进行了修改。

本书在编写过程中得到了刘福之、黄世益、蔡彪三位教授的悉心指导与大力支持。艾剑锋、罗燕辉、陈小玲为本书初稿的录入做了大量工作。刘小征对实验的有关内容进行了审阅并提出了许多有益的建议。本书由南方冶金学院教授张流生主审。由陈早生负责全书统稿。

本书在编写过程中参阅了诸多兄弟院校的教材和仪器厂家的说明书,在此谨致以深切的谢意。

由于我们水平有限,书中一定有许多不当,恳请读者批评指正。

编 者

2003年1月

目 录

绪论	(1)
第一章 实验误差与数据处理	(3)
第一节 测量与误差的基本概念	(3)
第二节 有效数字与误差计算	(5)
第三节 数据处理	(17)
第二章 物理实验的基本仪器	(25)
第一节 力学、热学实验仪器	(25)
第二节 电磁学实验仪器	(32)
第三节 光学实验仪器与光源	(44)
第三章 基础实验 I	(56)
实验一 基本测量与物质密度	(56)
实验二 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	(62)
实验三 气垫导轨上的实验	(67)
实验四 自由落体法测定重力加速度	(76)
实验五 电子束的磁聚焦与电聚焦	(82)
实验六 电位差计的原理与使用	(88)
实验七 电表的改装及校正	(93)
实验八 惠斯通电桥测电阻	(97)
实验九 双臂电桥测低电阻	(103)
实验十 伏安特性曲线	(108)
实验十一 灵敏电流计的研究	(113)
实验十二 模拟法测绘静电场	(122)
实验十三 薄透镜焦距的测量	(128)
实验十四 等厚干涉	(136)
实验十五 分光计的调整及三棱镜折射率的测量	(142)
实验十六 转动惯量的测量	(150)
A) 用转动惯量仪测转动惯量	(150)
B) 三线扭摆法测转动惯量	(155)
第四章 基础实验 II	(159)
实验十七 液体表面张力系数的测定	(159)
实验十八 液体粘滞系数的测定	(163)
实验十九 不良导体导热系数的测定	(165)
实验二十 驻波法测波速	(170)
实验二十一 示波器的使用	(176)

实验二十二	光栅常数的测定	(181)
实验二十三	用冲击电流计测量磁场	(185)
实验二十四	用霍尔效应测磁场	(190)
实验二十五	示波器法测绘铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(193)
实验二十六	光的偏振研究	(198)
实验二十七	单缝衍射光强分布的测量	(205)
第五章	近代物理实验与综合物理实验	(210)
实验二十八	被动式(热释电)红外传感实验	(210)
实验二十九	摄影技术	(216)
实验三十	全息照相基础	(220)
实验三十一	迈克尔逊干涉仪	(225)
实验三十二	光电效应测普朗克常数	(231)
实验三十三	金属电子逸出功的测定	(235)
实验三十四	弗兰克-赫兹实验	(242)
第六章	设计性实验	(249)
	实验设计的基本知识、任务与要求	(249)
实验三十五	单摆法测定重力加速度	(250)
实验三十六	简谐振动的研究	(251)
实验三十七	滑线变阻器特性的研究	(252)
实验三十八	欧姆表的制作	(254)
实验三十九	硅光电池特性的研究	(256)
实验四十	折射率的测定	(258)
第七章	CAI与大学物理实验教学	(261)
附录		(266)
参考文献		(277)

绪 论

物理学是一门重要的自然科学。物理学的研究方法包括理论和实验两个方面;由于物理学研究的是自然界物质的基本运动,所以物理学从本质上来说是一门实验科学。理论的建立来源于实验和观测,另一方面又必须通过实验来检验。

物理实验课程是教育部确定的一门主要基础课。是高等学校对学生进行科学实验基础训练的一门重要课程,是一门独立设置的必修课,是大学生系统学习科学实验知识和技能的开端。通过对它的学习可以锻炼学生用实验手段发现、观察、分析物理问题的能力。因此,学好物理实验课程对于高等理工科院校的学生是十分重要的。

一、物理实验课的目的和任务

本课程的具体任务是:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,从理论和实践的结合来加深对物理学理论的理解。

2. 对学生进行系统的实验理论教育,并进行实验方法、实验技能和科学实验能力的培养和训练。这包括:

- (1) 通过阅读实验教材或资料,能够理解其中的内容并做好实验前的准备工作;
- (2) 借助教材或仪器说明书,能够正确调整和使用相关的实验仪器;
- (3) 正确观察实验现象,对实验现象及实验中的问题能够进行初步的分析和判断;
- (4) 正确记录和处理实验数据;
- (5) 根据处理好的数据和相关曲线,能够分析误差并写出规范化的、合格的实验报告;
- (6) 培养简单的设计能力: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素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风;一丝不苟、严肃认真的工作态度;遵章守纪、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的重要环节

为了达到物理实验课的目的,下面三个环节是特别重要的,每个学生必须扎扎实实地学习和训练。现分别介绍这三个环节。

(一) 实验预习

预习主要有两种方式,一是阅读实验教材和相关书籍,另一是在计算机上进行预习实验和仿真实验。通过预习应该达到:

1. 明确实验目的和任务;
2. 看懂实验原理(比如:实验的基本思想、公式、电路图、光路图)和实验条件;
3. 初步了解主要仪器的调节、使用和操作要点;
4. 搞清楚并熟悉实验步骤和注意事项;

5. 在上面四点都明白的基础上写好预习报告和数据记录表格。

(二) 课堂实验

1. 在课堂上教师作指导性讲解,学生应注意听讲,特别要注意教师所**强调**的指导内容、实验要求以及注意事项,必要时应做记录。

2. 进一步熟悉仪器,切实掌握仪器的正确使用。然后依照拟定的实验步骤,独立地实施操作,认真观察物理现象,随时注意仪器设备的工作情况。当发现异常现象或故障,应立即断开电源,终止实验,及时向教师报告,经妥善处理后,方可继续实验。

3. 在记录数据时一定要完整、清晰、准确,要尽可能地反映测量的最高精确程度,不允许无谓地丢失有效数字位数。如有记错或重做测量时,不要将原来记录涂涂改改,而应将记录用“×”号或“方框”表示无效记录,更改后的数据应记录在清晰的空位上,或另画表格记录。

记录要实事求是,不允许弄虚作假,抄袭别人的记录。测试完毕后,将数据记录交指导教师签字认可。然后整理实验仪器,在实验记录本登记后再行离开。

(三) 写好实验报告

实验报告是实验结果的书面总结。这项工作一般包括两部分内容:一是继续完善预习报告;另一个是做好测试报告。测试报告的工作内容有:记录实验设备的型号和编号,填写数据表格,进行数据处理(计算平均值和误差,画图表等等),测试结果的表示以及实验的分析讨论(误差的原因分析、改进建议、心得体会等等)。

第一章 实验误差与数据处理

第一节 测量与误差的基本概念

大学物理实验有一些基本概念是必须掌握的,比如:测量、误差以及有效数字的概念。另外测量结果的评价也是非常重要的。物理实验,主要的内容大致分为三个部分,第一部分是设计或选用合适的实验仪器,为测量做好准备工作,使得物理现象再现。第二部分是测量,一切实验都离不开测量。测量是物理实验的中心工作,测量操作是否合理,决定了测量结果是否有意义。第三部分是数据处理,数据处理的内容包括:实验数据的运算和整理归纳,找出物理量之间的数学关系并估计结果的可靠程度,用正确方式表示实验结果,从而得出物理规律。

一、测量

1. 测量

(1) 测量含义 测量就是借助仪器,将待测量与选作计量标准单位的同类量进行比较,并得出其倍数的过程。这个倍数带上单位就称为测量值,所以,一个物理量的测量值应是由数值和单位两部分组成,如: 273.15 K , $2.988 \times 10^8\text{ m/s}$ 等等。

(2) 物理量单位 按照中华人民共和国法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温标)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称为导出单位。

2. 测量分类

按测量方法,测量可分为直接测量和间接测量。按测量条件,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 直接测量:凡是用计量标准单位和待测量进行比较就可以直接从计量仪器上得到测量值的,这种测量叫做直接测量。相应的物理量称为直接测得量。例如用米尺测物体的长度,用天平和砝码测物体的质量,用温度计测液体的温度,用直流电桥测电阻数值等等。

(2) 间接测量:某些物理量,由于没有或无法提供直接测量的仪器,因此,就必须首先直接测量几个与待测物理量有关的其它量,然后根据待测物理量与某几个其它的直接测量量的函数关系进行运算才能得到结果,这种测量叫做间接测量。相应的物理量称为间接测量量。

例如测某圆柱体的密度, $\rho = \frac{m}{V}$, 而 $V = \frac{\pi}{4} D^2 H$, 必须先测出该圆柱体的直径 D 、高度 H 和质量 m , 再根据公式进行运算,才能得出密度的测量结果,对其它几个量的直接测量,也是对 ρ 这个量的间接测量。要知道,在物理量的测量中,绝大多数是间接测量,但直接测量是间接测量的基础。

在测量条件相同情况下进行的一系列测量称为等精度测量。一般的物理实验均采用等精度测量。在测量条件不同或部分不同的情况下进行的一系列测量是不等精度测量。

本书讨论的测量都是指等精度测量。

二、误差

1. 基本概念

(1) 真值——物质或物质系统本身所具有的客观的(某物理量的)真实数值,该真实数值不随我们的测量方法不同而不同,人们称这数值为这个物理量的真实数值,简称为真值。

(2) 测量值——通过测量所得到的值。

可见真值与测量值不是同一概念。

人们用各种计量仪器进行测量,而且总是希望把真值测量出来。但是由于测量条件的限制,特别是量具、仪表和人的感觉器官的限制,任何一个测量结果,只能是待测量的近似值,它与真值之间总是存在一个理论差数。这种差数称为误差。

(3) 误差——误差是测量值与真值之差。

误差 = 测量值 - 真值 (一般取二者差的绝对值)

即
$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

(4) 偏差——任何一次测量值与多次测量的平均值之差称为偏差。

注意,偏差与误差是不同的两个概念。但在多次测量时,人们都将平均值作为最佳近真值,所以人们实际上很少去区分误差与偏差的细微不同。

2. 误差分类

任何测量都会有误差,误差产生有种种原因。若从误差性质上来看,原则上可将误差分为三类:系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差。其特点是其测量结果总是偏大或偏小,或随测量条件变化而按某一规律变化。这种误差产生的原因是:

① 仪器误差。由于仪器本身的固有缺陷,如天平不等臂;光学仪器转动部分的偏心;标尺刻度不均匀;仪表机械零点不准;该水平放置的仪器没有放水平等;这些都会导致系统误差。

② 理论(方法)误差。由于测量所用理论的近似性或实验条件受局限和实验方法不完善等原因引起的误差。如力学实验中,没有考虑摩擦作用;热学实验时未考虑热量散失;伏安法测电阻时忽略电表本身的内阻的影响等。

③ 个人误差。由个人习惯与感觉偏向产生,如有人读数总是偏高,有人读数却总是偏低。用停表计时时,有人总是操之过急,计时短。有人总是反应迟缓,计时长。这就必然会产生误差。

系统误差的存在有很大的危害,必须研究它的规律并尽量消除它。通常对量具、仪表进行校准;完善实验方法等都是消除系统误差的有效办法。在一个实验中,必须考虑将系统误差消除到可忽略的程度,这项工作在设计实验时应加以考虑,做完实验后应作系统误差估计。

(2) 偶然误差(随机误差)。其特点是它有随机性,故又叫随机误差。其误差的大小、方向总是变化不定,也不可预知。如对同一量重复测量若干次,每次测得的数值一般都不一样,有的偏大,有的偏小,这往往是由于人的感觉器官(听觉、视觉、触觉)分辨度有限,周围微小的干扰以及实验条件的起伏等等不可预测的偶然因素所造成。实验者对仪表的指示值观测不准确,仪器操作不稳定;噪声、外界的振动;电压的波动;温度不均匀等等都能引起测量结果的偶然误差。

偶然误差是无法控制的,也无法从实验中完全消除,但它服从统计规律。如果对一物理

量重复测量多次,求其算术平均值,便可达到减小偶然误差的目的。

(3) 过失误差:属人为误差。由于测量者粗心、缺乏经验、实验方法不当、疲劳等原因,产生的读数、记数错误;随意改变了实验条件或观测记录有遗漏;或在量具、仪表的安装不合要求的情况下测出数据等均属过失误差。这种误差的特点是无一定规律,误差很突出,无法理解。有了这种误差,如果全部数据受到影响,则全部数据作废,需重新测试;个别数据受影响,则剔除不用。去除这种误差的根本办法是实验者应加强责任感,实验时,须认真细致,对所测量数据应经常注意审核。实验完毕交指导教师审查。每次实验都应避免出现过失误差。

三、测量结果的总体评价

实验得到的测量结果常常要进行定性的评价,一般用到的是精密度、准(正)确度和精确度这三个概念,但它们的含义不同,使用时应加以区别。

(1) 精密度 反映随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时,所得结果的相互接近程度,是描述测量重复性高低的。精密度高,即测量数据的重复性好,随机误差较小。

(2) 准确度 反映系统误差大小的程度,它是指测量值或实验所得值与真值符合的程度。即描述测量值接近真值的程度。准确度高,即测量结果接近真值的程度好,系统误差小。

(3) 精确度 反映系统误差和随机误差综合大小的程度,它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,精密度高准确度不一定高;而准确度高精密度也不一定高,只有精密度和准确度都高时,精确度高。

现以打靶弹着点为例来形象说明这三个术语之间的区别。图 1-1-1 中(a)图表示弹着点相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,表示精密度高,准确度较差;(b)图表示弹着点相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高,而精密度较差;(c)图表示弹着点相互之间比较集中,且都接近靶心,表示精密度和准确度都很高,亦即精确度高。

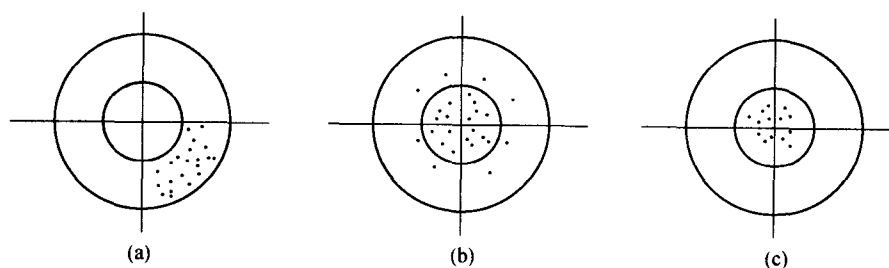


图 1-1-1

第二节 有效数字与误差计算

一、有效数字

1. 有效数字的基本知识

在实验中必须用“有效数字”来正确地表达测量和计算结果。因此必须掌握有效数字

mpg39/06

方面的知识。

(1) 有效数字定义: 由全部的可靠数字加上续后的一位可疑数字合在一起的读数为有效数字。如实验中, 把测量结果中可靠的几位数字加上续后的一位可疑数字就是测量结果的有效数字, 测量的有效数字位数是由仪器精度和被测量量的实际大小而定的, 不能任意增减。例如我们用最小分度为毫米的米尺测量一个物体的长度, 如图 1-2-1 所示, 经过比较读出物体的长度为 13.6 mm, 这读数的前二位是从米尺上直接读出的准确数字称为可靠数字, 而最末一位 0.6 mm 是从最小分度之间估计出来的, 称为可疑数字(尽管可疑, 但还是有一定根据的, 是有价值的)。把可靠数字和一位可疑数字合起来, 称为有效数字, 这里的 0.6 mm, 已经是估计出来的, 因而用这样规格的尺来进行测量已不可能再精确了。但是如果用其它精度高一些的仪器, 如千分尺(最小分度为 0.01 mm)进行测量, 则还能够更准确地加以确定。例如测得的数据为 13.724 mm, 这时有有效数字增加到了五位。这里的 0.004 mm 是估计出来的可疑数字。由此可见, 同一长度用不同精度的尺子量, 有效数字的位数不一样, 这说明一个测量结果的有效数字的多少与测量仪器的最小分度有关, 不是任意的。

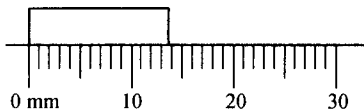


图 1-2-1

(2) 有效数字的位数与小数点的位置无关。例如: 0.213 m、21.3 m、0.002 13 m 都是三位有效数字, 这里的“0”所表示的是小数点的位置, 即表示数量级的大小, 不是有效数字位。在书写时可以写作标准形式: $2.13 \times 10^{-1} \text{ m}$ 、 $2.13 \times 10 \text{ m}$ 、 $2.13 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

(3) 两个非 0 数之间的 0 和数末尾的 0 是有效数字。例如 17.05 cm 和 13.50 cm、18.00 cm 各数中的“0”都是有效数字, 而且各个数都是四位有效数字, 18.00 cm 这个数据和 18 cm 不同。从数学的观点来看它们毫无区别, 但从测量的意义上看, 则是根本不同的, 因为写成 18 cm, 就表示厘米以下的数是无法测量的。它们完全有可能不是“0”; 写成 18.00 cm 就表示厘米以下的两位数都可测量出来, 它们就是“0”, 所以小数点末位的 0 是表示测量的准确度, 不能省去。

(4) 科学记数法 有效数字不能因单位变化而增加, 例如 13.2 m, 有效数字是三位, 化成毫米单位时, 如果写成 13 200 mm, 就变成了五位有效数字。因此在变换单位时, 为了正确表达有效位数, 实验中常采用科学记数法(10 的幂次方形式)。如: $2.10 \text{ cm} = 2.10 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.10 \times 10^{-5} \text{ km} = 2.10 \times 10^1 \text{ mm} = 2.10 \times 10^4 \text{ }\mu\text{m}$ 。

2. 有效数字运算规则

实验中, 由于间接量是通过直接测得量计算出来的, 所以间接量也有一定的有效位数, 其有效数字的运算必须遵从:

(1) 准确数字与准确数字之间的运算, 其结果仍为准确数字。

(2) 可疑数字与可疑数字(或准确数字)之间的四则运算结果为可疑数字, 但运算进位的数字一般是准确数字。

(3) 运算最终只保留一位可疑数字, 去掉第二位可疑数字时用“四舍五入”法。

对于不同的运算方式, 有效数字还有一些各自的规则。如:

① 有效数字的加减:

规则: “和(或差)的有效数字只保留到各数中最大的可疑位”。如:

$$\begin{array}{r} 32.\bar{1} \\ +) 32.7\bar{6} \\ \hline 35.3\bar{7}\bar{6} \end{array}$$

所以有效数字为 35.4

$$\begin{array}{r} 3.0\bar{9} \\ +) 0.13\bar{5} \\ \hline 3.2\bar{2}\bar{5} \end{array}$$

所以有效数字为 3.23

$$\begin{array}{r} 26.6\bar{5} \\ -) 3.92\bar{6} \\ \hline 22.7\bar{2}\bar{4} \end{array}$$

所以有效数字为 22.72

$$\begin{array}{r} 3.0\bar{9} \\ -) 0.13\bar{5} \\ \hline 2.9\bar{5}\bar{5} \end{array}$$

所以有效数字为 2.96

② 有效数字的乘除：

规则：“积(或商)的有效数字位数与相乘(或相除)各量中有效数字位数最少的相同”。
(有时,积可能比此法多一位,商可能少一位)如：

$$\begin{array}{r} 3.09 \\ \times) 0.13 \\ \hline \bar{9}\bar{2}\bar{7} \\ 309 \\ \hline 0.40\bar{1}\bar{7} \end{array}$$

所以有效数字为 0.40

$$\begin{array}{r} 23.7 \\ 0.13\sqrt{3.0\bar{9}} \\ \underline{2\bar{6}} \\ \bar{4}\bar{9} \\ \underline{\bar{3}\bar{9}} \\ 1\bar{0}\bar{0} \\ \underline{\bar{9}\bar{1}} \\ (\text{余})\bar{9} \end{array}$$

所以有效数字为 24

上面的规则,只是有效数字计算的一般原则,由于测量和计算中各种因素的影响,有时会有例外,例如：

$$\begin{array}{r} 31.\bar{1} \\ \times) 4.\bar{1} \\ \hline 3\bar{1}\bar{1} \\ + 12\bar{4}\bar{4} \\ \hline 127.\bar{5}\bar{1} \end{array}$$

所以 $31.\bar{1} \times 4.\bar{1} = 128$

若按规则,最后结果应取两位有效数字(即 12),但这结果就是错的。因为 12 是 3×4 得到的,故 12 的 2 这位数字属准确数字,不是可疑数字。所以首位数字相乘大于 10($3 \times 4 = 12$)的,会向上进一位,因而有效数字应多取一位。又如：

$$\begin{array}{r}
 0.4\bar{1} \\
 31\bar{1} \overline{) 128.0} \\
 \underline{124\bar{4}} \\
 360 \\
 \underline{311} \\
 49
 \end{array}$$

$$\text{所以 } 128 \div 311 = 0.4\bar{1}$$

同样的道理,因首位数字不够除,商的有效数字比规则给出的少取一位。所以这个结果应取两位有效数字。

要想精确地确定间接测量结果的有效数字位数,除原则上按上述方法外,还必须根据间接测量的绝对误差数值,最后确定测量结果的有效数字的位数。

(3) 有效数字乘方(开方)运算结果的有效位数与其底数(被开方数)的位数相同。

$$\text{例如: } \sqrt{23.8} = 4.88 \quad (24.5)^2 \approx 600$$

(4) 指定数式常数。

如果式中有指定或常数的运算,则在确定运算结果的有效数字位数时,不必考虑它的位数。例如,将半径 r 化为直径 d 时, $d = 2r$ 中出现的倍数“2”,它是指定数而不是有效数字;运算中的无理数(如: $\sqrt{2}$, π , e 等)的有效取位数比参加运算的各有效数字中有效位数最少者多取一位,又如,圆周长 $L = 2\pi r$,若 $r = 1.375 \text{ mm}$,应取 $\pi = 3.1416$,则得 $L = 8.640 \text{ cm}$,运算中遇到的其它常数(如 g 、 h 、 e 等)均可按此例取有效数字的位数。

二、误差计算

(一) 直接测量结果的表示

仪器误差是指在规定的使用条件下,正确地使用仪器时,由于仪器的原因可能产生的最大误差。一般用 Δ_x 表示。

各种仪器的误差是国家计量局统一规定的,不同的仪器又有不同的规定,同一种仪器也分为若干个等级,误差各不相同。例如天平,从最精密的到普通的共分9级,而砝码则分五等;又如螺旋测微计(千分尺)也分3级,即0级,1级和2级。1级千分尺示值误差不能超过 $\pm 0.004 \text{ mm}$,示值变动性误差不超过 $\pm 0.001 \text{ mm}$,故总的示值误差不能超过 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。20分度游标卡尺,规定示值误差不能超过 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。

对于电气测量指示仪表(如:电压表、电流表),仪器上标注的都是准确度。根据我国国家标准 GB776-65《电气测量指示仪表通用技术条例》的规定,电气指示仪表的准确度可分为7级,即0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。为了确定其测量误差,这里了解一下仪表的引用误差。

$$\text{引用误差} = \text{示值误差} \div \text{测量量限}$$

$$\text{即} \quad K\% = \frac{\Delta x_{\max}}{A_m} \quad (1-2-1)$$

式中 K ——表示准确度等级,

$\Delta x_{\max}$ ——以绝对值表示的最大示值误差,

A_m ——测量量限(或称测量上限、量程、满刻度值)。

$K\%$ ——表示该仪表在规定的正常工作条件下使用时所允许的最大引用误差。
不同等级引用误差不同,如电压表:

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{量限}}} = 0.1\% \quad (0.1 \text{ 级})$$

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{量限}}} = 0.5\% \quad (0.5 \text{ 级})$$

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{量限}}} = 1.5\% \quad (1.5 \text{ 级})$$

引用误差是说明仪表本身性能好坏的,故上述 7 个准确度等级的仪表,最大引用误差分别不会超过 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.5%, 5.0%。

例如,检定 2.5 级量限为 100 V 的电压表,发现 50 V 刻度点的绝对误差为 2 V,并且较其它各刻度点误差为大,所以该电压最大引用误差为 2%, 2.5 级的含义是给出符合这种规格的仪表最大引用误差不会超过 2.5%, 所以该电压表是合格的。

从上例可以看出,如果仪表为 K 级,说明该级合格仪表最大引用误差不会超过 $K\%$,但不能认为它在各刻度点示值误差都具有 $K\%$ 的准确度。

根据仪表准确度估算测量误差:

(1) 绝对误差:

由式(1-2-1)可知,测量结果的最大绝对误差(即最大示值误差)为:

$$\Delta x_{\max} = K\% \times A_m \quad (1-2-2)$$

(2) 相对误差:

若测得值为 $x_{\text{测}}$,则测量结果的最大相对误差为:

$$E_x = \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\text{测}}} = \frac{K\% \times A_m}{x_{\text{测}}} \quad (1-2-3)$$

式中 $x_{\text{测}}$ 是在 A_m 量限中某测量点的测量值。若测量点愈接近“0”点,即测量值愈小,则相对误差愈大,准确度愈低。一般使 $x_{\text{测}} \rightarrow A_m$,即测量点愈接近量限(满刻度值),则相对误差愈小,故准确度愈高。因此,人们利用这类仪表测量时,应根据被测值的大小选择量限,尽可能选取被测值占量限 2/3 以上的量限进行。从式 1-2-3 还可看出, E_x 一般不等于仪表的引用误差 $K\%$ 。

举例:某待测电压约为 100 V,现有 0.5 级 0~300 V 和 1.0 级 0~100 V 的电压表,问用哪一个电压表测量好?

用 0.5 级 0~300 V 的电压表测量 100 V 时的最大相对误差:

$$E_x = \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\text{测}}} = \frac{K\% \times A_m}{x_{\text{测}}} = \frac{0.5\% \times 300}{100} = 1.5\%$$

而用 1.0 级 0~100 V 的电压表测量 100 V 时的最大相对误差为:

$$E_x = \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\text{测}}} = \frac{K\% \times A_m}{x_{\text{测}}} = \frac{1.0\% \times 100}{100} = 1.0\%$$

所以,用 0~100 V 的电压表测量更准确。

由此可见,量限选择恰当,用 1.0 级仪表进行测量反比用 0.5 级仪表准确,因此,在选用仪表时,要纠正单纯追求准确度等级。应该根据待测物理量的估值,兼顾选择仪表的量限和准确度,才可以使测量的误差减小。

1. 单次直接测量结果的表示

对于偶然误差很小的情况,直接测量可以只进行一次,这称为单次直接测量。其误差可以用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为单次测量的误差。

一般仪器的仪器误差在出厂检定书上或仪器上会直接注明。

对于只标出准确度等级的仪器,其仪器误差由相应的误差公式给出。如:电气测量指示仪表(即电压表、电流表等)的仪器误差,则按 Δx_{max} 作为仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

如果上述两者都没有注明,则可取仪器最小分度的一半作为仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$,对于不可估读的仪器(如:秒表、游标卡尺、数字式仪表)则取其最小分度值作为仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

单次测量的结果可表示为:

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta_{\text{仪}} (\text{单位}) \quad (1-2-4)$$

若用仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}}$,则测量结果可表示为:

$$x = x_{\text{测}} \pm \sigma_{\text{仪}} (\text{单位}) \quad (1-2-5)$$

$$\left(\text{式中: } \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \right)$$

这里 $x_{\text{测}}$ 是单次测量值,也称单次测量最佳值。

举例:

(1) 用最小分度为 0.2°C 的温度计测温,读数为 11.4°C ,测得结果表示为

$$T = (11.4 \pm 0.1)^{\circ}\text{C}$$

(2) 用 20 分度的游标尺测一物体的长度,测得值为 6.123 cm ,故测得结果表示为

$$L = (6.123 \pm 0.003) \text{ cm}$$

(3) 用 0.5 级,量限为 10 A 的电流表测电流,其读数为 8.40 A ,测量结果应表示为

$$I = (8.40 \pm 0.05) \text{ A}$$

2. 多次直接测量结果的表示

(1) 多次测量的平均值及误差计算:

对实验误差估计,首先要估计并设法消除系统误差,只有在系统误差为零或基本消除以后计算偶然误差才有意义。用实验方法消除测量中的偶然误差是不可能的,但是通过多次测量求平均值的方法,可以减少偶然误差对最后结果的影响。

设对某一物理量 x 测量 n 次,测值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,则算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-6)$$

测量次数越多, $\bar{x}$ 就和该物理量的真值越接近,如果 $n \rightarrow \infty$,则 $\bar{x}$ 就和真值无限接近。所以在多次测量的实验中,人们把算术平均值叫做该物理量的最佳值,或称近真值。也即把 $\bar{x}$ 值作为真值 x 的最佳测量结果。

(2) 算术平均绝对误差:

把各次测量值与平均值 $\bar{x}$ 之差,代表各次测量值的偶然误差。因取其绝对值,故也叫各次测量值的绝对误差,即 $\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|$, $\Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|$, $\dots$, $\Delta x_n = |x_n - \bar{x}|$ 。取它们的算术平均值,称为平均绝对误差,又称算术平均误差,以 $\Delta \bar{x}$ 表示。

$$\Delta \bar{x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (1-2-7)$$

(3) 标准误差 σ :

若把各次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 的差值记为 Δx_i ,下式给出的 σ_x 就称为测量列的标准误差。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2-8)$$

(注:理论上的标准误差 σ 由 $n \rightarrow \infty$ 给出,实际上测量次数 n 是有限的。所以,一般取 σ_x 。)

而将

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2-9)$$

称为算术平均值的标准误差。

σ_x 、 $\sigma_{\bar{x}}$ 都可以作为标准误差 σ 使用。

(4) 多次测量结果的表示:

参考国际计量标准,实验中多次测量某一物理量时,测量结果的误差(也可以说是不确定度)要用标准误差 σ_x (或 $\sigma_{\bar{x}}$)、仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}}$ 等各种不确定度进行方和根合来表示,

$$\sigma_{\text{总}} = (\sigma_x^2 + \sigma_{\text{仪}}^2 + \dots)^{1/2} \quad (1-2-10)$$

多次测量的结果表示为:

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\text{总}} \quad (\text{单位}) \quad (1-2-11)$$

注意:一般物理实验教学中,只要取其中一个最大者即可,所以多次测量的结果表示为:

$$x = (\bar{x} \pm \Delta \bar{x}) \quad (\text{单位}) \quad (1-2-12)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}) \quad (\text{单位}) \quad (1-2-13)$$

或

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x \quad (\text{单位}) \quad (\sigma_x > \sigma_{\text{仪}}) \quad (1-2-14)$$

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\text{仪}} \quad (\text{单位}) \quad (\sigma_x < \sigma_{\text{仪}}) \quad (1-2-15)$$

其中 $\bar{x}$ 是测量列的算术平均值(即测量列的最佳值); σ_x 、 $\sigma_{\bar{x}}$ 均称为标准误差,在本书中是采用 $\sigma_{\bar{x}}$ 作为标准误差, $\sigma_{\text{仪}}$ 是仪器的标准误差。一般上述各式均为测量结果的完整表示,测量结果的完整表示应包括测量的物理量平均值 $\bar{x}$ 值,测量误差 $\Delta \bar{x}$ (或 σ)和单位。注意:绝对误差 Δx 或 $\Delta \bar{x}$ 一般只取一位有效数字。 σ_x 、 $\sigma_{\bar{x}}$ 、 $\sigma_{\text{仪}}$ 也是取一位有效数字。 $\bar{x}$ 按其最后一位数应和绝对误差(或标准误差)的有效数字位对齐为原则取值。

需要说明的是:算术平均绝对误差与标准误差都可作为测量误差的量度,它们都表示在一组多次测量的数据中,各个数据之间分散的程度。对于初学者来说,主要是树立误差的概念和对实验进行粗略的、简明的分析。因此,可采用平均绝对误差来进行误差的分析和运算,这样要简明得多。