



21世纪高等学校规划教材

大学物理实验教程

主 编 龚志强 李 水

DaXue WuLi ShiYan JiaoCheng



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21 世纪高等学校规划教材

大学物理实验教程

主 编 龚志强 李 水

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

前 言

在物理学发展进程中,揭示物理规律的定律和原理或者直接来源于实验,或者必须经过实验证明才能成立。物理实验是走进物理殿堂大门的金钥匙。

物理实验不仅是物理学科的重要组成部分,也是深入理解和掌握物理定律和原理必不可少的环节,同时它还是增强学生分析和解决实际问题的能力、提高综合素质的有效途径。

物理实验技术是工程技术的基础,是学生系统地学习实验方法、仪器使用、数据处理等技能的良好训练平台,因此它是理工科学生不可或缺的一门重要基础课程。

本书是根据教育部《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,针对不同专业特点及实验条件,结合多年来物理实验课程的教学实践编写而成。它突出了如下特点:

1. 通俗易懂,便于自学和预习。每个实验都给出了简明扼要的操作要点和注意事项,对初学者易出现的问题,增加了较为详细的解释。此外,还给出了实验报告范例。便于自学和按照实验要求进行预习。

2. 重点突出,便于理解和掌握。每个实验都提出了完成实验项目的具体任务、数据测量及精度要求、实验报告的撰写要求,便于操作和数据处理。

3. 注重归纳总结,便于综合运用。对一些物理量的测量,提出了多种方法,给学生更多的选择余地;对具体的实验内容进行扩展,具有应用性和设计性实验题目。

本书由龚志强、李水主编。各实验编写分工情况如下:

龚志强(第一篇*、实验 5、实验 17*、实验 23*)

李水(实验 2、实验 3、实验 10、实验 33*)

罗勇锋(第一篇*、实验 6*、光学基础知识、实验 23*、实验 22、实验 25*、实验 29*、实验 30、实验 31、附录)

曹建湘(绪论*、实验 1*、电学实验预备知识、实验 12、实验 13、实验 14、实验 37*)

夏灿芳(实验 24、实验 27、实验 29)

盛忠志(第一篇*、实验 1*、实验 4、实验 8、实验 9、实验 32、实验 34)

易德文(实验 7、实验 16、实验 24、实验 33*)

王凯军(实验 15*、实验 18、实验 32*、实验 35)

贺梦冬(实验 6*)

牟群英(实验 21、实验 37*)

杨恶恶(实验 19*)

吴桂红(实验 35*)

刘凌红(实验 6*)

注:带*号的为多人共同合作完成项目,《大学物理实验教程》是编者所在物理教研室全体教师智慧的体现。所有实验最后由龚志强、李水统稿完成。在书稿编写工作中,物理教研室的教师们结合实验教学中出现的问题,对教材提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

编写中虽然对内容进行过反复修改,但仍难免有不妥之处,敬请读者指出,并在下次编写时纠正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 篇 物理实验基础知识	4
第 2 篇 力学实验	25
实验 1 主要力学基本量测量	25
实验 2 气垫导轨测量速度和加速度	32
实验 3 验证动量守恒定律	38
实验 4 用三线摆法测刚体的转动惯量	42
实验 5 弦线上驻波的研究	47
实验 6 动态法测量固体材料的杨氏弹性模量	51
第 3 篇 热学实验	59
实验 7 声速测量	59
实验 8 用落球法测液体的粘度	66
实验 9 液体表面张力系数的测定	69
实验 10 导热系数的测量	72
实验 11 模拟制冷系数的测量	77
第 4 篇 电磁学实验	82
电磁学实验常用仪器设备简介	82
实验 12 万用电表的使用	89
实验 13 模拟示波器的使用	96
实验 14 数字示波器的使用	106
实验 15 用模拟法描绘静电场	118
实验 16 霍尔元件测量磁场	122
实验 17 用双臂电桥测量低电阻	127
实验 18 交流电桥的原理和应用	133
第 5 篇 光学实验	142
实验 19 测三棱镜的折射率	146
实验 20 等厚干涉——牛顿环	155
实验 21 全息光学实验	160
实验 22 视频信号光纤传输系统实验	165

第 6 篇 近代物理实验及应用性物理实验	168
实验 23 迈克尔孙干涉仪测 He-Ne 激光的波长	168
实验 24 夫兰克—赫兹实验	174
实验 25 光电效应测定普朗克常数	178
实验 26 密立根油滴实验	185
实验 27 核磁共振实验	191
实验 28 传感器系列实验之一 ——金属箔式应变片的原理及应用	199
实验 29 黑体辐射实验	208
实验 30 激光拉曼光谱实验	215
实验 31 彩色线阵 CCD 实验	221
实验 32 超导体磁浮力测量	230
实验 33 微波等离子体的应用	235
实验 33-1 金刚石的形核	241
实验 33-2 微波等离子体化学气相沉积制备金刚石薄膜	244
实验 33-3 微波等离子体刻蚀加工实验	248
实验 34 椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率	251
第 7 篇 创新性设计性实验	257
实验 35 RLC 电路特性的研究	257
实验 36 电表的改装和校准	263
实验 37 光栅衍射	268
附录	271
附录 1 物理学常量表	271
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	272

绪 论

科学实验是研究自然规律的基本手段,是检验科学理论的标准。作为一名合格的工程技术人员,不仅应该具备深广的理论知识,而且还应该具备一定的从事科学实验能力和实践经验。物理实验本身有一整套实验理论、方法和技术,必须经过系统地学习和训练,才能掌握物理实验的知识并将其运用于以后的科学研究之中。

大学物理实验是教育部确定的六门主要基础课程之一,是一门理工科学生必修的公共主干基础课程。大学物理实验是理工科院校系统地对对学生进行科学实验能力的培养和训练的开端,是工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

一、物理实验课的任务

根据国家教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的规定,物理实验课程的具体任务是:

(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,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,绘制图线,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)培养和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和遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

物理实验是一门实践性课程,在教学过程中,学生必须通过自己的独立工作来增长实验知识,提高实验技能。因此,在完成本课程的学习任务时,学生应充分发挥主动性、自觉性和创造性,以取得较好的学习效果和成绩。

二、大学物理实验课的基本程序和实验报告

在做物理实验时,我们应着重掌握实验中所采用的方法,特别是基本的实验方法和测

量技术。实验中应有意识地培养自己良好的实验习惯,并逐步学会分析实验中出现的问
题,提高解决问题的能力。

大学物理实验的每一个项目的完成,一般分为预习、课堂实际操作和完成实验报告三
个阶段。

1. 预习

学生在进行实验之前要在全面阅读实验教材的基础上,重点搞清实验目的、原理(主
要原理公式),以及所用仪器的性能和操作规程方法,明确实验方法和步骤及注意事项,并写
出预习报告。预习要求在实验课前完成。预习的好坏是决定实验能否顺利完成的关键环
节,务必引起足够的重视。预习报告的内容有:

【实验目的】

扼要写出本次实验的目的要求。

【实验仪器】

根据实验原理及本次实验的目的,列出将要用到实验仪器的名称。

【实验原理】

简单明确地叙述实验原理,写出本实验的主要公式及公式中各符号的物理意义及必要
条件。画出必要的实验图示(不包括实验仪器原理图)。

【实验内容与步骤】

写出实验中的主要内容与具体操作步骤,指出关键操作和注意事项。

【实验数据】

设计画好记录原始数据的表格。

2. 实验操作

进入实验室后必须交上次的实验报告和本次实验的预习报告,没写预习报告不得进行
实验。实验操作之前学生必须首先把环境条件和仪器设备情况做好记录,如实验日期、天
气、室温、湿度、气压等,所用仪器型号、规格等;然后在实验预习和教师讲解的基础上,熟
悉仪器的使用方法,进行仪器安装和调试,在教师的许可下方可开始测试。发现仪器缺
损等问题应及时报告老师,不允许擅自调换仪器,凡人为损坏、丢失仪器照章赔偿。在
按实验步骤操作的同时,仔细地观察实验现象,认真记录实验数据,测量数据必须用钢
笔或圆珠笔填写表格之中,每个数据都必须符合有效数字要求;对错误的数据进行删
改时,应注明删改的理由,错误数据不得涂改,在重新测定之后,另起行记录,避免随
意涂改数据的坏习惯,更不能捏造数据。对实验中观察到的现象、出现的故障以及故
障的排除情况都要记录下来。在实验过程中遇到疑难问题及时请教指导教师,实验
完毕后将实验数据交教师阅审、签字,将仪器整理好,并在《学生实验登记本》上
签名后方可离开实验室。学生在实验室的全部活动都要遵守实验室的规章制度。

记录数据必须实事求是,切忌伪造、随意修改或抄袭他人数据。在实验报告中
发现有上述问题者(包括提供数据人)其实验报告一律作废。操作考试出现上述问
题作舞弊处理。

3. 撰写实验报告

实验报告是对实验的分析、总结,在原始记录的基础上,对测量数据进行处理和
分析,从而得出实验结果以及对实验结果进行评价。实验报告不仅是实验者对实验
的总结,更重

要的是要供教师审阅,因而实验报告的书写有一定的格式要求,并力求重点突出、书写整洁、文理通顺、数据完备、表格清晰、图表规范,并有科学结论。

一份完整的实验报告应包括如下主要内容:

(1)实验名称。

(2)实验目的:记录实验所要达到的目的。

(3)实验仪器:简要记录实验仪器的名称、型号及精确度等主要性能。

(4)实验原理:扼要阐述实验原理,力争图文并茂,写出原理公式及其适用的条件,画出必要的实验图示(不包括实验仪器原理图)。

(5)实验内容:主要实验步骤、方法、测量条件的选择。

(6)数据处理(计算、作图、误差分析和不确定度计算):用表格形式记录出全部测量数据,标明物理量的单位,按实验要求计算待测量的量值、量值的不确定度。在报告上写出完整的数据处理过程:公式→代入数据→结果,中间计算不写在报告上。

(7)实验结果:写出完整的最后结果的量化表达式,注意有效数字和单位的正确表达。

(8)讨论和建议:对实验结果进行分析和讨论,包括对实验结果可靠性的分析。实验中出现的现象的解释,实验装置和实验方法的改进方案等。

(9)思考题:思考题是检验学生对本次实验结果更高层面的深入分析,一定要认真完成。

第 1 篇 物理实验基础知识

物理实验是以测量为基础的。由于测量条件不能尽善尽美、仪器的分度值不可能无限小,所以测量任何物理量所得结果都不会是绝对精确的。对测量结果精确度的评价是一门专门科学,涉及面非常广泛。对实验数据的处理和测量误差的分析估算能力,是科学实验技能的一个重要方面,在物理实验课中,对其有关知识作初步介绍,并通过具体实验进行最基本的训练。

一、测量与误差

1. 物理量的测量

在科学实验和生产中,所有的物理量都是通过测量得到的。测量是为确定被测对象的数值多少而进行的实验过程。在这个过程中通常借助专门的工具、仪器,把被测对象直接或间接地与同类标准量进行比较,得出用数值和单位共同表示的测量结果。所谓测量就是将被测物理量与作为标准的同类物理量进行比较,从而获得被测物理量的量值为目的的全部操作。

测量各种物理量的具体方法有多种多样。根据获取测量数据的方式不同,可将测量分为直接测量和间接测量;根据测量条件的不同,可分为等精度测量和不等精度测量。

(1)直接测量 待测物理量的数值从量具或仪器上以直接读取的方式而得到的测量叫直接测量,相应的物理量叫直接测量量,所得的测量数值叫测量值。如用米尺测量长度,用天平测量质量,电表测量电压等都是直接测量。

(2)间接测量 待测物理量的数值不能从测量仪器上直接读出,而是需要用一些原理和公式由直接测量得到的各物理量推算出来的方式而得到的测量叫间接测量,相应的物理量叫间接测量量,所得的测量数值也叫做测量值。如测量圆柱体的体积 V ,先要测量圆柱体的高度 h 、直径 D ,然后通过公式:

$$V = \frac{1}{4} \pi h D^2 \quad (0-1)$$

计算求得圆柱体的体积 V ,这就是间接测量。

在工程技术中,能直接测量的物理量是很少的,大部分物理量的测量是采用间接测量。然而,一个物理量的测量需用直接测量还是用间接测量并不是绝对的,通常与仪器的选择有关。如测量液体的密度,选用量筒和天平作为测量工具为间接测量,选用密度计作为测量工具则为直接测量。随着科学技术的进步和发展,将有更多、更精密仪器设备以满足对更多物理量进行直接测量。

(3)等精度测量 在相同测量条件下对某一物理量重复 n 次测量,得出的数值为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$,这几个数值中我们没有理由认为其中某一次测量比另一次测量更准确或不准确,即每次测量的精度是相同的,这种测量称为等精度测量。比如在相同的条件下,用螺旋测微器对钢珠的直径进行 n 次的测量即为等精度测量。

测量条件是指一切能影响测量结果,本质上又可控制的因素。测量条件包括:进行测量的人、测量方法、测量仪器及其调整方法、环境条件等。环境条件是指测量过程中环境的温度、湿度、大气压力、气流、振动、辐射强度等。

(4)不等精度测量 测量条件中只要其中一个发生了变化,就变为不等精度测量。如在不同的环境温度下测量电阻就是不等精度测量,因为电阻是随温度的变化而变化的物理量。

等精度测量与不等精度测量的数据,在处理方法上是不同的,在以下的讨论中所涉及的测量数据均为等精度测量的情况。

2. 测量误差

任何物质都有自身的各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实的数值,称为真值。一切测量的目的就是力图获得真值。但是,由于受仪器灵敏度和分辨率、实验原理的近似性、环境的不稳定性以及测量者自身因素的局限,任何精密的测量都不可能得到真值,测量值只能是真值的不同程度的近似值。测量值与真值之间的差异叫测量误差。如果用 x 表示测量值, a 表示真值,则测量误差(用 Δx 表示)为

$$\Delta x = |x - a| \quad (0-2)$$

因为 Δx 与 x 具有相同的单位,故又称为绝对误差,简称误差。

随着科学技术的进步,测量误差可以被控制得越来越小。但实践证明,任何实验的误差都不能降为零,误差始终存在于一切科学实验中,这个结论称为误差公理。也就是说,从测量的角度来讲,真值不可能确切获得。因此,将测量的实际值、已修正过的算术平均值等认为充分接近了真值,可用来替代真值,用来替代真值的量值称为约定真值。这样一来,绝对误差就是测量结果与约定真值之差。

一切测量值都毫无例外地存在着测量误差。为了得到最好的测量结果,也就是说尽量减小测量误差,我们必须研究测量误差的性质及来源,并采取适当的措施减小测量误差。

1) 误差的分类

根据误差产生的原因及性质,可将误差分为两类。

(1)系统误差 在确定条件下多次测量同一物理量时,测量值总是有规律地朝着某一方向偏离真值,这种误差称为系统误差。系统误差的特点是误差的数值和符号基本保持恒定,或在条件改变时按一定规律而变化。系统误差的主要来源有:

①实验装置误差。即由于仪器本身的缺陷,或者由于测量前没有很好地调节仪器所引起的误差。比如天平两臂不等长,仪表零点不准等。

②方法或理论误差。即由于测量原理、方法不完善而引起的误差。比如测量体积时未考虑到膨胀因素,温度变化对仪器本身影响太大等。

③环境误差。即由于外界影响而引起的误差。比如温度发生变化,电磁场干扰等。

④人员误差。即由于测量者在操作经验、分辨能力、反应速度、读数习惯与偏向引起的误差。比如有的人读数总是偏大或偏小等。

系统误差服从因果规律,任何一种系统误差,都有其确定的发生原因。在一定的测量条件下,只要找出产生系统误差的原因,采取一定的措施都能消除或减小系统误差。发现、减小或消除系统误差,常取决于实验者的经验和素质。学生在学习过程中要积累这方面的感性知识,结合实验具体情况对系统误差进行分析和讨论。

(2)随机误差 在同一物理量的多次测量过程中,以不可预知方式变化的测量误差称为随机误差。随机误差的产生是由许多偶然因素造成的,因而也叫偶然误差。它的特征是误差的大小和符号表面看来没有任何规律性。随机误差起因于一些随时随地都会发生的微小的不可控制的因素,如无规则的温度变化,气压起伏,地基、桌面的振动,电磁场的干扰,光线的闪动,电压、电流的波动,以及观察者感官(听觉、视觉、触觉)分辨能力的微小变化和最小读数的估计产生的误差,等等。这些因素既不可控制,又无法预测和消除。某次测量的随机误差往往是由多种随机因素共同造成的。

随机误差表面上看来似乎毫无规律,纯属偶然。然而对多次等精度测量结果的分析可以发现随机误差具有以下一些内在规律性:

①对某一物理量进行了多次等精度测量,每次测量值的误差的绝对值不会超过某一限度,这个特性称为有界性。

②误差数值越大者出现的次数越少,误差数值越小者出现的次数越多,这个特性称为单峰性。

③绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等,这个特性称为对称性。

④误差的算术平均值随测量的次数的增加而减小。当测量次数无限增加时,随机误差的算术平均值将趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (0-3)$$

这个特性称为抵偿性。将式(0-1)代入式(0-3)得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - a = 0 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i &= a \end{aligned} \quad (0-4)$$

即仅存在随机误差的情形下,测量次数无限多时的算术平均值就是真值。当测量次数为有限次时,算术平均值最接近真值,因此,在本课程中,我们以算术平均值作为最佳测量值。

2)仪器的误差

仪器的误差——即国家计量局规定的该项仪器的出厂公差或允差,是一种系统误差。用合格的仪器或量具进行测量,若操作正确,即使只测一次,其仪器的误差一般不会超过公差。即出厂公差提供了仪器的最大误差。额定值通常都标明在仪器或量具上。例如,游标卡尺的额定误差就是所标明的精度,通用的有 0.02 mm 和 0.05 mm 两种(见表 0-1)。

表 0-1 常用仪器误差

仪器名称	量 程	分度值	仪器误差
钢直尺	0~300 mm	1 mm	±0.1 mm
钢卷尺	0~1 000 mm	1 mm	±0.5 mm

续表

仪器名称	量 程	分度值	仪器误差
游标卡尺	0~300 mm	0.02, 0.05 mm	分度值
螺旋测微计	0~100 mm	0.01 mm	±0.004 mm
物理天平	1 000 g	100 mg	±50 mg
水银温度计	-30~300 °C	1 °C, 0.2 °C, 0.1 °C	分度值
读数显微镜		0.01 mm	±0.004 mm
数字式电表			最末一位的一个单位
指针式电表		0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0	±量程×a%

3. 对测量结果的评价

在科学实验中,常采用精密度、正确度和精确度(准确度)来评价测量结果,这三个概念的含义如下:

(1)精密度 表示测量结果中随机误差大小。精密度高,则指多次测量数据的离散性小(即测量的重复性好),也即随机误差小,但系统误差的大小不明确。

(2)正确度 表示测量结果中系统误差大小。测量正确度高,则指测量数据的平均值偏离真值的程度小,也即系统误差小,但随机误差的大小不明确。

(3)精确度(准确度) 是测量结果随机误差和系统误差的综合评定。测量精确度高,说明测量数据比较集中,且逼近于真值,即测量的随机误差和系统误差都比较小。在实验中总是希望尽量提高测量的精确度(见图 0-1)。

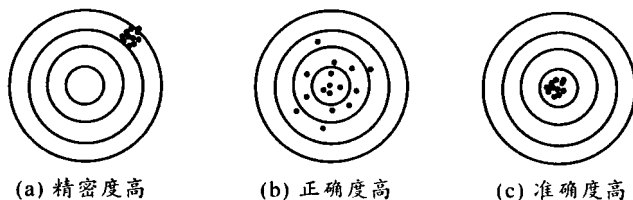


图 0-1 测量结果评价示意图

二、有效数字及其运算规则

1. 有效数字的一般概念

什么是有效数字? 我们从一个实例谈起,例如用米尺测量钢棒 A 的长度(见图 0-2)。A 棒的长度在 3.6~3.7 cm 之间。这棒究竟有多长呢? 我们可估读为 3.67 cm,也可估读为 3.68 cm 或 3.69 cm。这百分位上的 7、8、9 是估计出来的,而且每人估计出的值也可能不同,所以我们把这些估计出来的数称为存疑数字(可疑数字)。存疑数字前的 3.6 cm 是仪器测出的确切数字,称为可靠数字。由于百分位上的数字已存疑,在它以下的各位数的估计已无必要。我们把测量结果中可靠数字加上最后一位可疑数字统称为测量结果的有效数字。测量结果中有几个有效数字,就称为几位有效数字。A 棒长度的测量值都是三位有效数字。有效数字位数的多少标志着测量的准确程度,有效数字位数越多,准确程度超高,

测量结果的相对误差越小。例如,测量一物体的长度,用螺旋测微计测量的结果为2.3513 cm,是五位有效数字,用米尺测量的结果为2.35 cm,是三位有效数字。

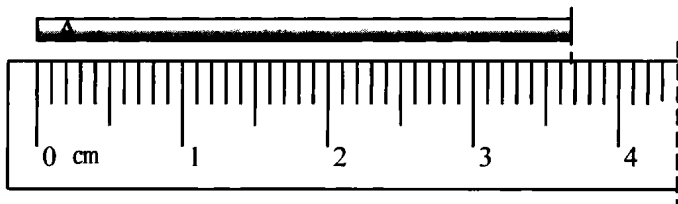


图 0-2 长度的测量

在记录和使用有效数字时应注意以下几点:

①记录测量数据(书写有效数字)时必须注意“0”的位置。数据中第一位非“0”数字前面的“0”不是有效数字,而数据中非“0”数字之间“0”和末位的“0”都是有效数字。例如,用两个分度值不同的测长仪器测得同一物体的长度分别为10.60 cm和10.600 cm,这两个数值在数学上是等价的,在物理上却有着不同的意义,10.60 cm是四位有效数字,而10.600 cm是五位有效数字,后者的相对误差小,准确度高。有效数字是测量结果的客观反映,因此它的位数多少不能随意增减。

②单位的换算不改变有效数字的位数。

③当测量数据中的数字很大或很小时,常用科学记数法来表示。例如,太阳的质量 $M=1.989 \times 10^{30}$ kg,它的有效数字指系数部分,即四位有效数字。电子的电量 $e=1.60 \times 10^{-19}$ C,它的有效数字是三位。

④参与运算的常数,如 π 、 e 等,由于它们不是测量量,其有效数字的位数是无限的,可根据需要来选取。原则是常数的有效数字位数比测量值中有效数字位数最多的还要多一两两位。

⑤电子秒表、电阻箱、便携式电桥等仪器无法进行估读。这些仪器在测量值的最后一位就存在着仪器误差,就是存疑数字,而不必再估读。

2. 确定测量结果的有效数位的方法

根据有效数字的含义,有效数字的最后一位是有误差的,我们还可这样定义有效数字:有效数字的最后一位是绝对误差所在的一位。由于测量误差本身只是一个估读的范围,因此,在一般情况下,绝对误差只取一位有效数字,在特殊情况下,不超过两位,再多就没有意义了。在我们的大学物理实验中,为简单起见,规定绝对误差只取一位有效数字,尾数除零以外,一律进位。相对误差取一至两位有效数字。

将有效数字的定义和绝对误差只取一位有效数字结合起来,就能写出测量结果的数值表达式,即:任何测量结果,其数值的最后一位要与绝对误差所在的一位对齐。例如, $l=(3.54 \pm 0.02)$ cm是正确的,而 $L=(13.54 \pm 0.2)$ cm和 $R=(113 \pm 4.0)$ cm都是错误的。由此可见,测量结果的有效数字位数,完全取决于绝对误差的大小,即由绝对误差决定有效数位。这是确定测量结果的有效数字位数的基本原则和方法。单次直接测量结果的有效数字位数由估计的绝对误差决定;多次直接测量结果的有效数字位数,可先计算出绝对误差的数值,再由绝对误差决定;间接测量结果的有效数字位数,也是先计算出绝对误差的数值,再由绝对误差决定。

3. 有效数字的运算规则

1) 加减运算

例 0-1 已知 $l_1 = (20.4 \pm 0.2) \text{ cm}$, $l_2 = (4.17 \pm 0.03) \text{ cm}$, $l_3 = (6.784 \pm 0.005) \text{ cm}$, 求 $l = l_1 + l_2 + l_3$ 。

解: 写成竖式运算, 在下面加一横表示可疑数字。任一可疑数字与其他数字运算后其结果本位是可疑的, 进位是准确的。

$$\begin{array}{r} 20.4 \\ 4.17 \\ + 6.784 \\ \hline 31.354 \end{array}$$

于是作为最终结果, 我们只保留一位可疑数字, $l = 31.4$; 作为中间结果参加下一步运算, 我们可以多保留一位可疑数字, 即 $l = 31.35$ 。由此可见, 在加减运算中, 运算结果的存疑位以参与运算的各量中存疑位最高的为准。

2) 乘除运算

例 0-2 乘除运算 $4.178 \times 10.1 = ?$

解: 写成竖式表示

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ \times 10.1 \\ \hline 4178 \\ 4178 \\ \hline 42.1978 \end{array}$$

即 $4.178 \times 10.1 = 42.2$, 运算结果的有效数字为三位。由此可见, 在乘除运算中, 运算结果的有效数字位数与参与运算的各数中有效数字位数最少的相同。

3) 几种常用函数

幂和根 幂和根的有效数字位数和它们的底的有效数字位数相同。

三角函数 三角函数的有效数字位数与其角度(用弧度表示)的有效数字位数相同。如 $\sin 2.411 = 0.6673$ 。

对数函数 对数的有效数字位数与真值的有效数字位数相同。如 $\ln 2.823 = 1.038$ 。

4. 数的修约规则(尾数舍入法则)

对于大量尾数分布概率相同的数据来源, “4”舍“5”入不尽合理。现在通用“4”舍“6”入, 对于“5”, 若前面为偶数则舍(“0”作为偶数), 若前面为奇数则入, 即所谓四舍六入五凑偶, 以保证尾数取舍几率相等(根据国家标准《GB 3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则》的《附录 B 数的修约规则》)。

三、不确定度

对一个有价值的测量结果必须进行评价, 无质量评价的测量结果是毫无意义的, 如何评价测量结果呢? 似乎用误差来评价测量质量是最合适的了, 因为根据误差的意义, 误差是测量值与真值之差, 显然误差大的测量质量差。确实我们在过去基本上都用误差来评定测量质量, 但是由于真值通常无法得知而使误差无法计算。如果用这个通常无法知道的量

去评价测量质量,显然有些不合适。因此国际上现在越来越多的地区已不再使用误差来评价测量质量,而是用另一个物理概念——不确定度(σ)来对测量结果进行质量评价,也是对误差进行评价。我国1990年5月经审查通过在作为国家标准颁布实施的《测量误差及数据处理技术规范》中明确规定测量结果的评价用不确定度而不再用误差。

实验不确定又称测量不确定度,简称不确定度。其含义是由于误差的存在而被测量值不确定的程度。它们是被测量值在某一范围内的评价。

“不确定度的程度”是通过“量值范围”和“置信概率”来表达的。如果不确定度为 σ ,则表示误差将被包含在量值范围($-\sigma \sim +\sigma$)中,或者表示测量值的真值以一定的概率落在量值范围($N-\sigma \sim N+\sigma$)中。显然不确定度的大小反映了测量结果与真值之间的靠近程度。不确定度越小,测量结果与真值越靠近,其可靠程度也就越高,即测量质量越高,显然使用价值也就越高。由此可见,用不确定来评价测量结果的质量比误差评价更合适。

1. 不确定度分类

按误差来源不同可以将测量量的不确定度分为A类不确定度和B类不确定度。

1) A类不确定度

凡是可以通过统计方法来计算的不确定度称为A类不确定度,又称统计不确定度,用字母 S 表示。

对某一物理量进行多次测量,由于误差来源不同,可能有若干个A类不确定度 S_1, S_2, \dots, S_m ,我们称之为A类不确定度的分量。如果这些分量之间彼此独立,那么分量的“方和根”就是总的A类不确定度,即

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2} \quad (0-5)$$

我们所做的实验中A类不确定度一般只存在一个分量。

2) B类不确定度

凡是不能用统计方法计算而只能用其他方法估计的不确定度成为B类不确定度,又称为非统计不确定度,用字母 u 表示。

与A类不确定度类似,由于误差源不同,一个测量可能存在多个B类不确定度 u_1, u_2, \dots, u_n ,如果这些分量相互独立,则有

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (0-6)$$

在用A、B两类不确定度来评价测量结果和误差时,无须再把误差分为偶然误差与系统误差。这并不是说A、B两类不确定度与偶然误差和系统误差有着完全对应关系。实际上偶然误差全部可用A类不确定度来评价,但用A类不确定度评价的不都是偶然误差,系统误差中具有随机性质的都可用A类不确定度来评价;系统误差也不能都用B类不确定度来评价,因为在用不确定度进行误差评价时要把已定系统误差修正后再进行,即按A、B类划分不确定度时不包括已定系统误差。

判断A、B两类不确定度比判断偶然误差和系统误差容易得多。这种分类弥补了把误差分为偶然误差和系统误差的不足。

2. 直接测量不确定度的计算

1) 算术平均值表示真值

在相同条件下对某物理量 x 作等精度 n 次测量,其观测值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ,称为测

量列。若用 \bar{x} 的表示测量列的平均值,则

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0-7)$$

由于算术平均值最接近于真值,故称之为近真值,也就是最佳测量值。

2) A 类不确定度

对直接测量量进行多次测量存在 A 类不确定度,其计算方法与随机误差用标准偏差估算来计算的方法完全相同,通常用以测量列平均值为参照系的标准偏差作为标准误差的最佳估算值。其测量值 x_i 的不确定度为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (0-8)$$

式(0-8)也称为贝塞尔(Bessel)公式。

在 n 次测量的情况下,以平均值 \bar{x} 表示测量结果,其不确定度必然要小些,其值仅为测量列单次测量值不确定度的 $1/\sqrt{n}$ 倍。平均值 \bar{x} 的不确定度表示为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (0-9)$$

3) B 类不确定度

(1) 用近似标准差估算。

对于 B 类不确定度,不能采用统计不确定度计算的方法进行计算,必须采用其他方法,一般采用等价标准差(u_j)的计算方法。用这种方法时首先要估计一个“误差极限值”(Δ),然后确定误差的分布规律,一般利用关系式

$$\Delta = C u_j \quad (0-10)$$

上式中 C 为置信系数,其值决定于误差分布规律,利用式(0-10)可以算出近似标准差。对于正态分布, $C=3$, 即 $u_j = \Delta/3$; 对于均匀分布 $C=\sqrt{3}$, 即 $u_j = \Delta/\sqrt{3}$ 。还有许多分布,这里就不一一介绍了。由于实际情况下,实验仪器的误差($\Delta_{仪}$)大多是均匀分布,使用非常广泛。所以以后不管是什么误差分布,为了方便,计算中我们都认为是均匀分布且 B 类不确定度只包括实验仪器误差($\Delta_{仪}$)。所以

$$u = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \quad (0-11)$$

(2) 用仪器误差估计误差极限值 Δ 。

由仪器产生的不确定度一般用仪器误差 $\Delta_{仪}$ 来估计误差极限值 Δ , 即 $\Delta_{仪} = \Delta$ 。

所谓仪器误差,就是在规定的使用条件下正确使用仪器时,仪器示值与被测量的真值之间可能产生的最大误差。通常仪器出厂时要在检定书中注明仪器误差,一般有两种情况。

一是在仪器上直接标出或用准确度表示仪器的仪器误差。如标出准确度为 0.02 mm 的游标卡尺,其仪器误差就是 0.02 mm。

二是给出该仪器的准确度级别,然后算出仪器误差。如电流表的准确度级别是这样规定的:

$$\frac{\text{电流表的最大误差 } \Delta_I}{\text{电流表的量程}} = \text{级别} \% \quad (0-12)$$