

普通高等教育“十二五”规划教材

大学 DAXUE 物理实验 WULI SHIYAN

主 编 孙 磊

副主编 陈绍敏 陈雅珊



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

大学物理实验

主 编 孙 磊

副主编 陈绍敏 陈雅珊



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/孙磊主编. —杭州: 浙江大学出版社,
2012. 2(2013. 12 重印)

ISBN 978-7-308-09581-5

I. ①大… II. ①孙… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 011575 号

大学物理实验

孙 磊 主编

责任编辑 邹小宁

文字编辑 王 蕾

封面设计 王聪聪

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司

印 刷 浙江云广印业有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.5

字 数 256 千

版 次 2013 年 12 月第 2 版 2013 年 12 月第 3 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-09581-5

定 价 25.60 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

前 言

大学物理实验是理工科学生必修的一门重要的基础实验课程。按照高等学校物理实验课程教学基本要求,结合我院实验室的实际情况,我们选编了这本《大学物理实验》教材,该教材收录了具有代表性实验20余个。

基于独立学院培养应用型人才的教学宗旨,本着“以操作实践为主、理论够用为度”的理念,编写适合于工程技术人员使用的物理学实验教材。实验包括实验理论、基础实验、综合性实验和设计性实验。突出应用型实验,并兼顾理论基础,做到实验少而精,并且在每个实验中都强调实验中物理现象的意义、实验方法或实验技能在实际工程中的应用等。

本教材主体分五个章节,其中第三章由孙磊、陈绍敏、吕少珍编写,第四章由孙磊、陈雅姗编写,第五章由孙磊、陈绍敏编写,其他章节由孙磊编写,教材的框架、统稿、定稿由孙磊承担。本教材在编写过程中得到了福州大学陈知前、陈德造、王元洪和张丽华等四位教师的大力支持,也得到本学院物理教研室全体教师以及许多学生的帮助,并参阅了很多兄弟院校的实验教材,在此表示深切的谢意。

编 者

2011年11月

目 录

第 1 章 绪论

§ 1-1 大学物理实验的性质与任务	1
§ 1-2 实验报告的撰写要求	2

第 2 章 测量的不确定度与数据处理

§ 2-1 测量与误差	3
§ 2-2 测量的基本方法	5
§ 2-3 测量的不确定度	7
§ 2-4 有效数字及其运算法则	11
§ 2-5 数据处理的基本方法	13
§ 2-6 用 Excel 进行实验数据处理	18

第 3 章 基础实验

§ 3-1 力学实验中常用仪器的使用	26
§ 3-2 电磁学实验中常用仪器的使用	30
§ 3-3 光学实验中常用仪器的使用	36
§ 3-4 物体密度的测定	40
§ 3-5 气垫技术及应用	43
§ 3-6 金属杨氏弹性模量的测定	50
§ 3-7 静电场的模拟与描绘	54
§ 3-8 万用电表的使用	59
§ 3-9 示波器的使用	64
§ 3-10 电桥法测电阻	70
§ 3-11 薄透镜焦距的测量	80
§ 3-12 分光计的调节与应用	84
§ 3-13 等厚干涉—牛顿环	91

第4章 综合性实验

§ 4-1 金属线胀系数的测量	97
§ 4-2 基本电荷的测定	101
§ 4-3 电表的改装与校准	107
§ 4-4 用电位差计测电动势	113
§ 4-5 光栅衍射特性的分析	119
§ 4-6 测量三棱镜的折射率	123
§ 4-7 用旋光仪观测溶液的旋光性	126
§ 4-8 迈克尔逊干涉仪	129
§ 4-9 用光谱仪测定原子谱线	131
§ 4-10 霍尔效应及应用	135

第5章 设计性实验

§ 5-1 设计性实验的基本要求	139
§ 5-2 电阻伏安特性的研究	141
§ 5-3 超声波的测定	145
§ 5-4 传感器技术	149

附录

附录1 基本物理常量表	153
附录2 大学物理实验的预习报告和实验报告范例	158

第 1 章 绪 论

§ 1-1 大学物理实验的性质与任务

1.1.1 课程性质

物理学是一门实验科学,无论是物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过今后的科学实验来证实。实验物理与理论物理相辅相成。规律、公式是否正确必须经受实践检验。只有经受住实验的检验,由实验所证实,才会得到公认。物理学又是当代技术发展最主要的源泉。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各个自然科学领域和技术部门以及其他学科领域。

本课程是高校各理工科专业开设的一门基础实验课,它与普通物理理论课程既有紧密的联系,又互相独立。它不同于一般的探索性的科学实验研究,每个实验题目都经过精心设计和安排,实验结果也比较有定论。它不仅加深学生对理论的理解,更重要的是可使学生获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能等诸方面得到较为系统、严格的训练,是大学生进行自主学习、创新训练及科学研究的第一步,同时在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,物理实验课程也起着潜移默化的作用。

1.1.2 课程任务

《大学物理实验》作为一门独立设置的基础课程,其目的是对学生进行比较系统的科学实验训练,培养学生良好的科学素质。

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理知识,加深对物理学原理、规律的理解。

2. 培养学生的科学实验能力,提高学生的实验技能,其中包括:

- (1) 能够自行阅读实验教材,做好实验课前的准备。
- (2) 能够借助教材与实验仪器说明书,正确操作使用仪器。
- (3) 能够运用物理学原理对实验现象进行初步分析判断和解释。
- (4) 能够准确地分析实验中出现问题可能的原因,并及时解决问题。
- (5) 能够正确记录并处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。
- (6) 能够完成简单的设计性实验。

3. 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,严肃认真的学习态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财物的优良品德。

§ 1-2 实验报告的撰写要求

大学物理实验课程中,预习报告和实验报告是实验课程评定的重要依据,能够反映出学生数据处理能力和实验完成情况,是培养学生科学素养和严谨态度的一个重要手段。报告要求字迹工整、页面整洁、作图规范、标题清楚,此外对学生撰写预习报告和实验报告作如下要求:

1. 书写预习报告

- (1) 写清预习时间、实验标题及学生姓名、专业、年级、班级、学号等信息。
- (2) 写出实验目的、原理纲要、主要理论公式,并画出主要原理图。
- (3) 弄清仪器的结构及原理,写出主要的实验步骤。
- (4) 回答实验中的思考题,对于实验过程中有疑问的地方,以标题形式列出,以便上课时专心听讲,实验中请教老师。
- (5) 准确记录实验数据并画出规范表格,用于填写数据,原始数据记录要有实验教师的签名才有效。

2. 书写实验报告

- (1) 写清实验时间、实验题目,填写姓名、专业、学号、年级、班级、合作者名字。
- (2) 弄清实验目的,写出具体内容。
- (3) 记录实验中所有仪器,包括各实验仪器的型号、规格。
- (4) 认真撰写实验原理,说明主要依据,简要推导公式及来源,画出原理图。
- (5) 简要阐述实验步骤与内容,并标明操作过程中的注意事项。
- (6) 利用原始的实验数据进行数据处理,计算实验结果及不确定度,如有需要规范画出相应图线(必须画在坐标纸上),分析误差原因得出结论,要求要有详细的计算过程,要注意数据的有效位数保留及注明单位。

具体的预习报告和实验报告范例参见本教材附录。

第 2 章 测量的不确定度与数据处理

§ 2-1 测量与误差

2.1.1 测量

测量是物理实验的基本操作,其结果包括数值、单位以及结果可信赖的程度(用不确定度来表示)。

测量可以分为直接测量与间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与作为标准的同类物理量相比较,从而直接读出待测量的测量值。比如用米尺测长度,用伏特表测电压等都属于直接测量。间接测量是利用待测量与一些能直接测定的物理量间存在的确定的函数关系,把这些直接测量量测定后代入函数关系中计算出待测的物理量。比如测量圆柱体的密度,可以用天平称出其质量,再用游标卡尺和螺旋测微计测出其高度和直径,然后用公式计算出密度。

2.1.2 测量的误差

任何物质都有自身的各种特性,反映这些特性的物理量所具有的客观真实值称为真值。测量的目的就是为了得到真值。然而由于测量仪器的限制、测量方法的不完善、周围环境的变化、人的感官缺陷等因素的影响,测量结果总是与真值之间有一定的差异,这种差异就是误差。测量误差的大小反映了测量结果的准确度。测量误差通常可以用绝对误差 Δx 和相对误差 E_r 来表示。

$$\Delta x = x - X \quad (2-1)$$

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中: x 表示测量值, X 表示真值, 相对误差 E_r 用百分数表示。

误差按其产生的原因与性质一般分为系统误差和随机误差两类。

1. 系统误差

系统误差是指在一定实验条件下多次测量同一物理量时,误差数值的大小和正负保持不变,或在条件改变时,误差数值的大小和正负按一定的规律变化的误差。其主要来源有以下几方面:

(1) 仪器误差。这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定使用仪器而造成的。如仪器零点不准、天平不等臂等。

(2) 理论或者方法误差。这是由于测量方法不完善或者测量所依据的理论公式本身的近似性而产生的。如力学实验中无法消除摩擦力的影响、电学测量中没有把接触电阻和接

线电阻考虑在内等。

(3) 条件误差。这是由于实验条件不能达到理论公式所规定的条件而引起的。如单摆的周期公式成立的条件是摆角趋于零,这在实际实验中很难达到。

(4) 习惯误差。这是由于观测者本人生理或心理特点造成的。如肉眼在刻度上估读时习惯偏向一个方向。

根据系统误差产生原因可以采取一定的方法(比如校正仪器、改变实验方法等)来减少它的影响,或者在测量结果中引入修正量。

2. 随机误差

(1) 随机误差

随机误差是指在同一条件下测量同一物理量时,由于偶然的不确定因素所造成的每一次测量值的无规律变化的误差,也称为偶然误差。比如由于测量条件有无法控制的客观微小差异、人感官的灵敏度限制、测量对象本身的不均匀性等因素造成测量误差时大时小、时正时负,没有确定的规律。但随机误差在测量次数足够多时呈现出一定的统计规律,当测量次数趋于无穷多次时其分布呈正态分布,正态分布曲线如图 2-1 所示。

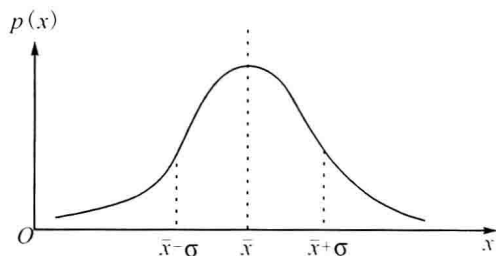


图 2-1 正态分布曲线

图中横坐标代表某一物理量的测量值 x ,纵坐标代表测量值出现的概率密度 $p(x)$,且

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2-3)$$

式(2-3)中 $\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ 为测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的算术平均值, $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$ 为测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的标准误差,它表示测量列中任一测量值 x_i 落在 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 范围内的概率为 68.3%。

可见,随机误差的统计规律具有有界性、单峰性、对称性、抵偿性。有界性是指测得值误差的绝对值不会超过一定的界限,也即不会出现绝对值很大的误差;单峰性是指绝对值小的误差比绝对值大的误差数目多,即测得值是以它们的算术平均值为中心而相对集中地分布;对称性是指绝对值相等而符号相反的误差,出现的次数大致相等,即测得值是以它们的算术平均值为中心而对称分布的;抵偿性是指随测量次数增加所有误差的代数和越趋近于零,所以可以通过多次测量求平均值的方法减少随机误差。

(2) 随机误差的估计

设在一组测量中, n 次测量的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,根据统计原理,可用其算术平



均值 $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ 估计其真实值。我们将各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差求平均值称为算术

平均误差: $\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}$, 其中 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 对于 n 次测量的标准偏差的估计值由贝塞尔公式给出:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (2-4)$$

式(2-4)中 $S(x)$ 称为测量列的标准偏差, 它表示测量列中各个测量值所对应的标准偏差。

由误差理论可以推导出算术平均值的标准偏差 $S(\bar{x})$ 为

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

式(2-5)表示真值包含在 $[\bar{x} - S(\bar{x}), \bar{x} + S(\bar{x})]$ 范围内的概率为 68.3%。

§ 2-2 测量的基本方法

测量方法是指具体测量某一物理量时, 如何根据测量要求, 在给定的条件下尽可能地消除或减小偶然误差, 使获得的测量值更为准确的方法。本节将介绍物理实验中最常用的几种基本测量方法。

2.2.1 比较法

比较法是将待测物理量与选做标准单位的物理量进行比较的方法。它是物理实验中最普通、最基本的实验方法, 使用该方法测量出的结果精度高、稳定性好。比较法可以分为直接比较法和间接比较法。

1. 直接比较法

直接比较法是把待测物理量与已知的同类物理量或者标准量直接比较, 这种比较通常要借助仪器或者标准量具。例如, 用米尺来测量某一物体的长度就是最简单的直接比较法。有时单靠标准量具还不够, 还需要配置比较系统, 将待测量与标准量进行比较。

2. 间接比较法

待测量通过某种函数关系与标准量进行比较从而获得待测量值的方法。比如用伏安法测量电阻等。

2.2.2 替代法

当待测量无法与标准件直接比较时, 可利用它们对某一物理过程具有等效的作用, 而用

标准件替代待测量从而提高测量精度。这种方法实质上是平衡测量法的引申。比如伏安法测未知电阻,可用标准电阻箱进行替代测量。只要改变标准电阻的大小,使加在标准电阻两端的电压及流经标准电阻的电流与测量未知电阻时的数值相同,则标准电阻的数值即等于待测的未知电阻。

2.2.3 控制法

在许多物理实验中,往往存在着多种变化的因素,为了研究它们之间的关系可以先控制一些量不变,依次研究某一个因素的影响。比如通过导体的电流 I 受到导体电阻 R 和它两端电压 U 的影响,在研究电流 I 与电阻 R 的关系时,需要保持电压 U 不变;在研究电流 I 与电压 U 的关系时,需要保持电阻 R 不变。

2.2.4 放大法

放大法是把实验中测量的微小物理量或者待测的物理量进行选择,积累或放大有用的部分,从而提高测量仪器的分辨率,增加了测量的灵敏度。常见的放大法有以下几种:

1. 机械放大法

机械放大是最直观的一种放大方法,它通过机械部件之间的几何关系使标准单位量在测量过程中得到放大。比如螺旋测微计,它将螺距通过螺母上的圆周来进行放大;游标盘的设计中,若盘的半径做得越大,其分辨率会越高。

2. 光学放大法

光学放大法有稳定性好、受环境干扰小的特点,常见的光学放大有两种:一种是视角放大,通过光学装置放大视角使得待测物体形成放大的像,比如放大镜、望远镜、读数显微镜等;另外一种放大是角放大,通过光学装置使得微小转角得以放大,比如许多仪表中应用的光杠杆等。

3. 电磁放大法

在电磁学物理量的测试中,微弱电信号可经过放大器放大后进行观察。电信号的放大可以是电压的放大、电流的放大、功率的放大等。如果要进行非电量的测量,也可以将其转换成电学量经放大后对其进行测量,比如把电学量通过示波器或显像管将信号放大进行测量。

4. 积累放大法

积累放大法又称叠加法,是指将微小量累积后测量求平均的方法,该方法的优点是能减小相对误差,物理实验中经常用到该方法。比如用单摆测定重力加速度,需要测定单摆周期,用秒表测一次全振动的时间误差很大,于是采用测定 $30 \sim 50$ 次全振动的时间 T ,从而求出单摆的周期 $T = t/n$ (n 为全振动次数)。

2.2.5 补偿法

把标准值选择或调节到与待测物理量值相等,用于抵消(或补偿)待测物理量的作用,使系统处于平衡(或补偿)状态,处于平衡状态的测量系统,待测物理量与标准值具有确定的关系,这种测量方法称为补偿法。由于待测量的作用在测量中被抵消(或补偿),所以表示标准量与被测量作用之差的仪表示值为 0,所以又称零示法。



2.2.6 转换法

某些物理量不容易直接测量,或某些现象直接显示有困难,可以采取把所要观测的变量转换成其他变量(力、热、声、光、电等物理量的相互转换)进行间接观察和测量,这就是转换法。

2.2.7 理想化法

影响物理现象的因素往往复杂多变,实验中常可采用忽略某些次要因素或假设一些理想条件的办法,以突出现象的本质因素,便于深入研究,从而取得实际情况下合理的近似结果。比如用单摆测定重力加速度(假设悬线不可伸长)悬点的摩擦和小球在摆动过程的空气阻力不计;在电学实验中把电压表当作是内阻无穷大的理想电压表,电流表当作是内阻等于0的理想电流表。

2.2.8 模拟法

有时受客观条件限制,不能对某些物理现象进行直接实验和测量,于是就人为地创造一定的模型,在模型的条件下进行实验,但要求模型和原型必须具有一定的相似性。比如电场中等势线的描绘,因为直接测量静电场比较困难,所以采用易测量的稳恒电流场来模拟。

§ 2-3 测量的不确定度

2.3.1 测量的不确定度

测量的目的是为了确定被测量的量值。测量结果的品质是量度测量结果可信程度的最重要的依据。测量不确定度就是对测量结果质量的定量表征,测量结果的可用性很大程度上取决于其不确定度的大小。所以,测量结果表述必须同时包含赋予被测量的值及与该值相关的测量不确定度,才是完整并有意义的。表征合理地赋予被测量值的分散性与测量结果相联系的参数,称为测量不确定度。广义上说,测量不确定度意味着对测量结果可信性、有效性的怀疑程度或不肯定程度。任何一个测量结果都存在不确定度,不确定度越小,测量结果可信度程度越高,不确定度越大,则测量结果可信度程度越低。本教材只要求学生了解不确定度的概念,掌握一些常用的估算方法,如需进一步深入学习,可参阅有关资料。

根据国际标准化组织等7个国际组织联合发表的《测量不确定度表示指南 ISO 1993 (E)》的标准,物理实验的测量结果表示中,测量的总不确定度从估计方法上分为两类:不确定度A类分量 u_A 和不确定度B类分量 u_B 。

1. 不确定度A类分量 u_A

不确定度A类分量 u_A 是指可以采用统计方法计算的不确定度。根据统计理论,当测量次数趋于无穷时,测量误差服从正态分布规律,在实际测量中,一般只能进行有限次测量,

这时测量误差不完全服从正态分布规律,而是服从 t 分布(学生分布)。这时在应用贝塞尔公式的基础上要乘上一个因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$,即

$$u_A = \frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}} S(x) = t_p(n-1) S(x) \quad (2-6)$$

式中: $\frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}}$ 是与测量次数 n 、置信概率 p 有关的因子,当测量次数 n 和概率 p 都确定时,

$\frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}}$ 因子的值也就确定了, $\frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}}$ 因子与 n 、 p 的部分数据见表 2-1。

表 2-1 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 因子与 n 、 p 的关系表

	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$	$n=15$	$n=20$
$p=0.683$	0.76	0.60	0.51	0.45	0.41	0.38	0.36	0.34	0.27	0.23
$p=0.90$	1.69	1.18	0.95	0.82	0.73	0.66	0.61	0.56	0.45	0.38
$p=0.95$	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.56	0.47
$p=0.99$	5.74	2.92	2.06	1.64	1.40	1.24	1.12	1.03	0.77	0.64

大学物理实验中次数 n 一般不大于 10 次,从表 2-1 上看出,当 $5 < n \leq 10$,且 p 取 0.683 时, $t_p(n-1)$ 因子可近似取 1,式(2-6)可简化为

$$u_A = S(\bar{x}) \quad (2-7)$$

2. 不确定度 B 类分量 u_B

不确定度 B 类分量 u_B 是指用非统计方法估计出的不确定度。计算该类分量的数值时,先估计极限误差 Δ (如仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 等),再确定该误差服从的分布规律,用下式计算

$$u_B = \frac{\Delta}{k} \quad (2-8)$$

式中: k 为置信系数,其值因分布不同而异,在物理实验中一般取 $\Delta_{\text{仪}} = \Delta$,此类误差多视为均匀分布,而均匀分布的标准偏差为 $\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$,所以不确定度 B 类分量 u_B 为

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2-9)$$

式中: 仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 一般可以通过仪器说明书查询,一些常用仪器的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 列举如下:

(1) 常用的长度测量工具的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

米尺取其最小分度值的一半作为仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。量程在 300mm 以下的游标卡尺取其最小读取值作为仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。螺旋测微计分为一级和零级,通常实验室用的为一级螺旋测微计,量程在 100mm 以下的一级螺旋测微计,仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 取 0.004mm,量程不同其仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 也不同。零级螺旋测微计取相同量程的一级螺旋测微计的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 值的一半作为其 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

(2) 常用电学仪表的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。



电流表、电压表取仪表的量程与电表准确度等级的百分数的乘积作为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。例如,一个量程为 10V 的电压表,其准确度等级为 0.5 级,则该电压表的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}} = 10\text{V} \times 0.5\% = 0.05\text{V}$ 。直流电阻箱取示值与电阻箱等级的百分数的乘积作为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。例如,电阻箱准确度等级为 0.5 级,其示值为 100Ω ,则 $\Delta_{\text{仪}} = 100\Omega \times 0.5\% = 0.5\Omega$ 。

(3) 常用数字式仪表的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

一般取仪表的最小读取值作为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

3. 总不确定度

由不确定度 A 类分量 u_A 和不确定度 B 类分量 u_B 可以计算出总不确定度 u_C

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2-10)$$

当测量次数 n 符合 $5 < n \leq 10$ 条件时,上式可简化为

$$u_C = \sqrt{S(\bar{x})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2 / 3} \quad (2-11)$$

$$\text{相对不确定度 } E_r = \frac{u_C}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-12)$$

2.3.2 直接测量结果的表示

1. 单次测量结果的表示

单次测量不存在统计误差,即不存在不确定度 A 类分量 u_A 。因此,单次测量的总不确定度就等于不确定度 B 类分量 u_B 。单次测量结果表示为

$$x = x \pm u_B \quad (2-13)$$

2. 多次测量结果的表示

多次测量时分别计算出不确定度 A 类分量 u_A 和不确定度 B 类分量 u_B ,从而求出总不确定度 u_C 。对于测量结果表示为

$$\bar{x} = \bar{x} \pm u_C \quad (2-14)$$

对于测量结果中各数值的位数保留做以下规定:

(1) 不确定度用一位或者两位有效数字表示。一般规定在测量结果中,合成不确定度用一位有效数字表示,如果是中间计算结果,不确定度用两位,相对不确定度一律用两位有效数字的百分数表示。

(2) 为保证置信概率不降低,在不确定度截断时,采取“不舍只进”的原则。比如计算出不确定度为 0.421,截取两位有效数字时为 0.43,截取一位有效数字时为 0.5。

(3) 测量结果的末位保留应与不确定度相对齐来确定,测量数据的截断采用“四舍六进五凑偶”的规则,即 4 以下舍去、6 以上进位、等于 5 则把保留数的末位凑成偶数。比如某测量数据为 3.455cm,其不确定度为 0.02cm,则测量结果表示为 $(3.46 \pm 0.02)\text{cm}$ 。

例 2-1 用螺旋测微计测量小钢球的直径,测量 10 次的测量值分别为 2.125mm、2.118mm、2.125mm、2.125mm、2.120mm、2.128mm、2.125mm、2.124mm、2.130mm、2.124mm,要求写出测量结果。

解 小钢球直径 $d = 2.124\text{mm}$

$$u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)n}} = 0.0011(\text{mm})$$

$$u_B = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.0023(\text{mm})$$

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0011^2 + 0.0023^2} = 0.003(\text{mm})$$

$$d = 2.124 \pm 0.003(\text{mm})$$

$$E_r = \frac{u_C}{\bar{d}} \times 100\% = \frac{0.003}{2.124} \times 100\% = 0.14\%$$

2.3.3 间接测量结果的表示

物理实验中大多进行的是间接测量,设间接测量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots)$$

其中: $x = \bar{x} \pm u_C(\bar{x})$, $y = \bar{y} \pm u_C(\bar{y})$, $z = \bar{z} \pm u_C(\bar{z})$, $\dots$, 则间接测量量 N 的最佳估计值

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$$

N 的合成不确定度为

$$u_C(\bar{N}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 u_C^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 u_C^2(\bar{y}) + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 u_C^2(\bar{z}) + \dots} \quad (2-15)$$

N 的相对不确定度为

$$E_r = \frac{u_C(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_C^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_C^2(\bar{y}) + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_C^2(\bar{z}) + \dots} \quad (2-16)$$

常见函数的不确定度传递公式如表 2-2 所示。

表 2-2 常见函数的不确定度传递公式

函数式	不确定度传递公式
$N = ax \pm by \pm cz$	$u_C(\bar{N}) = \sqrt{a^2 u_C^2(\bar{x}) + b^2 u_C^2(\bar{y}) + c^2 u_C^2(\bar{z})}$
$N = x^a y^b z^c$	$u_C(\bar{N})/\bar{N} = \sqrt{a^2 [u_C(\bar{x})/\bar{x}]^2 + b^2 [u_C(\bar{y})/\bar{y}]^2 + c^2 [u_C(\bar{z})/\bar{z}]^2}$
$N = \sin x$	$u_C(\bar{N}) = \cos x u_C(\bar{x})$
$N = \ln x$	$u_C(\bar{N}) = u_C(\bar{x})/\bar{x}$

从表 2-2 中可以看出,当函数为加减形式时,可直接求总不确定度,当函数为乘除法时,先求相对不确定度比较简单。

例 2-2 已知金属环的外径 $d = (1.0080 \pm 0.0006)\text{cm}$, 高度 $h = (1.0110 \pm 0.0004)\text{cm}$, 求金属环的体积及其不确定度。

$$\text{解 } \bar{V} = \frac{\pi}{4} d^2 h = \frac{3.14159}{4} \times (1.0080)^2 \times 1.0110 = 0.80679(\text{cm}^3)$$



$$\begin{aligned}
 E_r &= u_c(\bar{V})/\bar{V} = \sqrt{2^2 [u_c(d)/\bar{d}]^2 + [u_c(h)/\bar{h}]^2} \\
 &= \sqrt{2^2 [0.0006/1.0080]^2 + [0.0004/1.0110]^2} = 0.13\% \\
 u_c(\bar{V}) &= E_r \times \bar{V} = 0.13\% \times 0.80679 = 0.001(\text{cm}^3) \\
 V &= 0.807 \pm 0.001(\text{cm}^3)
 \end{aligned}$$

§ 2-4 有效数字及其运算法则

测量结果都是包含误差的近似数据,在其记录、计算时应以测量可能达到的精度为依据来确定数据的位数和取位。如果参加计算的数据的位数取少了,就会损害测量数据和计算结果的应有精度;如果位数取多了,易使人误认为测量精度很高,且增加了不必要的计算工作量。记录和报告的结果都必须是有有效数字,所谓有效数字是指在分析和测量中所能得到的有实际意义的数字,有效数字的位数反映了测量的精度和准确度,因而对有效数字的位数不能任意增删,在实际测量中必须按需要对测量结果的原始数据进行处理。

2.4.1 有效数字的概念

有效数字是由若干准确数字和一位估读的可疑数字构成的。有效数字中只有末位是估读的(有误差的),但它在一定程度上反映了客观实际,因此它也是有效数字,不能随意删除。比如用米尺测量物体长度为 10.59cm,其中 10.5 是从尺子上直接读出的准确数字,0.09 是尺子最小分度的下一位估读出的可疑数字,测量结果含 4 位有效数字。

有效数字的位数与十进制的单位变换无关,即与小数点的位置无关,因此有效数字应从左边第一个非 0 数字开始算起。比如 57.9mm 可以写成 0.0579m,都是 3 位有效数字。此外,在单位换算时不能随意增加数字 0,比如 8.1km 不能写成 8100m,而应该采用科学记数法,写为 $8.1 \times 10^3 \text{m}$ 。

有效数字的多少与测量所用仪器的精密度有关,因而数字 0 不能随意的增删,比如 57.9mm 不能写成 57.900mm,57.9mm 可能是用米尺测量的,但 57.900mm 一定不是米尺测量的,可能是螺旋测微计测量的。有效数字的多少还与测量方法有关。例如,用秒表测量单摆的周期,其误差主要是由启动秒表和制动停表时手的动作及目测协调的情况决定,一般误差为 0.2s,如果只测一个周期,得到周期为 1.9s,而如果连续测量 100 个周期得到时间 191.2s,则平均周期为 1.912s。可见采用不同的仪器和不同的测量方法,测量结果的有效数字都会变化。

2.4.2 有效数字的运算规则

物理实验最终测量值大多是通过直接测量值之间的函数关系式运算得到的间接测量值,有效数字运算的基本原则是可靠数字与可靠数字运算,结果仍为可靠数字,可疑数字与可靠数字(或可疑数字)运算,结果为可疑数字,但进位的数字为可靠数字;计算的中间过程