

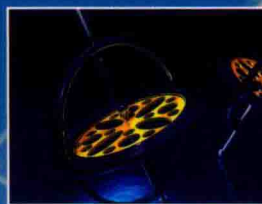
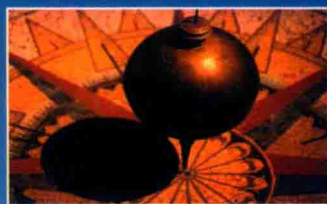


“十三五”普通高等教育规划教材

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主 编 秦梅宝 王 帅 彭荣荣



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

主 编 秦梅宝 王 帅 彭荣荣
副主编 陈博旺 龚 玲

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书依据教育部颁布的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，并结合编者多年的教学实践经验、实验教学改革与研究成果及汲取同类优秀教材的精华编写而成，本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书涵盖基础知识、力学实验、热学实验、光学实验、电(磁)学实验5个部分，共28个实验，涉及很多科学研究和生产所应用的物理原理、测试方法和仪器装置的使用。本书坚持“贯彻因材施教、夯实必备基础、提高实验能力”的指导思想，将教学主体从教师“教”转移到学生“学”，这样有助于学生深入理解物理实验的设计思想和实验方法，培养学生的创新思维和实践能力，达到对接专业、服务专业的目的。

本书可作为高等学校本专科非物理专业、高职高专工科各专业及全国少数民族预科教育基地大学物理实验课程教材，并适用不同层次的教学需求。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 秦梅宝, 王帅, 彭荣荣主编 -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5635-4947-4

I. ①大… II. ①秦… ②王… ③彭… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 264929 号

-
- | | |
|------|--|
| 书 名 | 大学物理实验 |
| 主 编 | 秦梅宝 王 帅 彭荣荣 |
| 责任编辑 | 张保林 |
| 出版发行 | 北京邮电大学出版社 |
| 社 址 | 北京市海淀区西土城路 10 号(100876) |
| 电话传真 | 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真) |
| 网 址 | www.buptpress3.com |
| 电子信箱 | ctrd@buptpress.com |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 印 刷 | 中煤(北京)印务有限公司 |
| 开 本 | 787 mm×1 092 mm 1/16 |
| 印 张 | 10.5 |
| 字 数 | 257 千字 |
| 版 次 | 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷 |

ISBN 978-7-5635-4947-4

定价: 32.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

主 编 简 介

1. 秦梅宝,女,1986年生,汉族,陕西咸阳人,陕西师范大学物理学硕士。主持1项教育类课题,并发表了多篇相关学术论文。

2. 王帅,男,1988年生,汉族,山东济南人,南京理工大学光学硕士。撰有《应用型高校大学物理教学模式》等学术论文。

3. 彭荣荣,男,1987年生,汉族,甘肃庆阳人,燕山大学物理电子学硕士。现任南昌工学院物理教研室主任一职,从事大学物理及大学物理实验教学,主持南昌工学院大学物理教学改革事宜,主持1项江西省教育厅课题和多项校级课题,多次获优秀教师、骨干教师称号,并撰有多篇SCI/EI相关论文。

前 言

本书按照教育部、国家发展改革委、财政部关于引导部分地方普通本科高校向应用型转变的指导意见,结合全国应用型高校的教学实际情况,汲取了国内同类教科书的精华编写而成。在内容的安排上,本书包含基础知识、力学实验、热学实验、光学实验、电(磁)学实验。在内容组织上,本书将一些经典实验与工科专业基础知识有机结合,使学生在做实验的过程中,不仅熟悉物理知识,还可以了解部分专业知识,具有很强的实用性。

本书的编写理念是以学生为中心,突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养,适用于应用型本科院校大学物理实验教学,也可作为相关技术人员的教学参考资料。

本书由秦梅宝、王帅、彭荣荣任主编,陈博旺、龚玲任副主编。秦梅宝、彭荣荣负责全书的统稿、审定,王帅、龚玲负责初审。具体分工为:秦梅宝主要编写测量结果的评定与不确定度、数据处理方法、金属比热容的测定、电表的改装等实验;王帅主要编写棱镜折射率测定、等厚干涉、偏振光的研究等光学实验;彭荣荣主要编写测量与误差、不规则固体密度的测定、电子荷质比的测定、静电场描绘、数字万用表的使用等 10 个实验;龚玲主要编写长度的测量、电风实验、影响电阻大小的因素、有效数字及其运算法则、利用光栅测量光波波长等实验;陈博旺负责本书的外文文献翻译、书稿的校正及审核等工作。

本书的编写得到了南昌工学院基础教学部的大力支持,同时参阅了南京恒立达光电仪器厂、南京慧硕科教仪器有限责任公司的实验说明书,并吸收了一些其他高校物理教师在实验教材编写方面的经验,借此机会表示衷心的感谢。同时对北京邮电大学出版社对本教材提出的很多宝贵意见表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免出现不足之处,恳请读者批评指正。

2016 年 7 月

目 录

第一章 基础知识	1
第一节 测量与误差	1
第二节 有效数字及其运算法则	5
第三节 测量结果的评定及不确定度	9
第四节 数据处理方法	12
第二章 力学实验	18
实验一 长度的测量	18
实验二 不规则固体密度的测定	27
实验三 重力加速度的测定	31
实验四 示波器的使用	35
实验五 声速的测量	40
实验六 杨氏弹性模量的测量	44
实验七 三线摆法测刚体转动惯量	48
第三章 热学实验	53
实验一 金属比热容的测定	53
实验二 热功当量的测定	57
实验三 沸点与压强的关系	61
第四章 光学实验	66
实验一 薄透镜焦距的测定	66
实验二 棱镜折射率的测定	71
实验三 等厚干涉现象的研究	76
实验四 单缝衍射的研究	81
实验五 偏振光的研究	85
实验六 利用光栅测量光波波长	90
实验七 光学仪器的设计	97
实验八 全息照相	101

第五章 电(磁)学实验·····	106
实验一 数字万用表的使用·····	106
实验二 影响电阻大小的因素·····	111
实验三 电阻元件伏安特性测量·····	114
实验四 电表改装与校准·····	120
实验五 惠斯通电桥·····	125
实验六 热电偶定标实验·····	128
实验七 电子荷质比的测定·····	133
实验八 霍尔效应·····	138
实验九 静电场描绘·····	144
实验十 电风实验·····	147
附录·····	150
参考文献·····	158

第一章 基础知识

本章主要介绍了测量与误差、有效数字及其运算法则、测量结果的评定及不确定度、数据处理方法等实验基础知识,为开展后续实验做好基础理论准备。这些实验基础理论知识不仅在本书后续的每个物理实验中可以用到,而且也是以后要从事实验操作的人员必须了解和掌握的。但是由于这部分基础内容涉及面广,若深入、具体地讨论则超出了大学物理实验课程的范围,所以在对本章的编写中只对必须用到的概念、公式、结论做初步的介绍,以满足后续教学的需要。

第一节 测量与误差

进行物理实验时,不仅要定性地观察物理变化的过程,而且要用物理方法定量地研究各种物理规律,因此必须定量地测出有关物理量的大小。测量的目的是获取被测量的真实量值,但因为受到各种不同因素的影响,测量结果总是与被测量的真实量值不一致,即任何测量都不可避免地存在测量误差。为了减小测量误差对测量结果的影响,需要研究和了解测量误差及消除误差的方法。

一、测量分类

实验中,根据测量方法的不同,可以将测量分为直接测量和间接测量;根据测量条件的不同,测量又可以分为等精度测量和不等精度测量。

1. 直接测量

用标准计量仪器直接和待测量进行比较而得到结果的测量叫作直接测量。例如,用米尺测量长度,用电压表测得电路中的电压等。如果按测量次数来分,可将直接测量分为单次测量和多次测量。

2. 间接测量

被测物理量不能直接与标准的单位尺度进行比较,而要根据被测物理量和多个直接测得量的函数关系求出被测物理量的测量称为间接测量。例如,利用单摆测定重力加速度,可在直接测定摆长和周期后,依据相应公式计算出测量结果。在实际生活中,大多数物理量都是通过间接的方法得到的。

3. 等精度测量

同一个测量者,用同样的测量方法和仪器,在相同条件下对同一物理量进行多次测量,称

为等精度测量。在实际的测量过程中,只要测量条件的变化对实验影响很小甚至可以忽略时,就可认为是等精度测量。例如,利用液体称衡法测量不规则固体密度时,水温的微小变化对实验结果影响甚微,可认为是等精度测量。

4. 不等精度测量

在多次重复测量中,当所用的方法、仪器、测量条件、实验环境等有差异时,都会造成实验结果的变化,这样的测量称为不等精度测量。对各次不等精度测量的结果取平均值是没有意义的,因此在物理实验中应尽量采用等精度测量。

二、测量误差、误差分类及其消除方法

(一) 误差的概念

在测量过程中,由于实验原理和实验方法不完善,所采用的测量装置的性能指标具有局限性,在环境中存在着各种干扰因素,以及实验人员操作水平的限制,必然使测量值与被测量的真实量值之间存在着较大的差异。测量结果与被测量的真实量值之间的差异,称为测量误差,简称误差。

误差公理认为:在测量过程中各种各样的测量误差的产生是不可避免的,测量误差自始至终存在于测量过程中,一切测量结果都存在误差。因此,误差的存在具有必然性和普遍性。它的定义为被测量的测量值与真值之差,即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

随着社会科学技术的发展和人类认知水平的不断提高,可以将测量误差控制得越来越小,但是测量误差的存在仍是不可避免的。

(二) 有关量值的几个基本概念

1. 真值

真值是指在一定的时间和空间条件下,能够准确反映某一被测量真实状态和属性的量值,即某一被测量客观存在的、实际具有的量值。

2. 实际值

在满足实际需要的前提下,相对于实际测量所考虑的精确程度,其测量误差可以忽略的测量结果,称为实际值。实际值在满足规定的精确程度时用以代替被测量的真值。例如,在标定测量装置时,把高精度等级的标准器所测得的量值作为实际值。

3. 测量值

通过测量所得到的量值称为测量值。测量值一般是被测量真值的近似值。

(三) 误差的表示方法

误差常用的表示方法有两种:绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

绝对误差 Δ 的定义为被测量的测量值 x 与真值 L 之差,即

$$\Delta = x - L$$

绝对误差具有与被测量相同的单位,其值可正可负。由于被测量的真值 L 往往无法得到,因此常用实际值 A 来代替真值,因此有

$$\Delta = x - A$$

在校准仪表和对测量结果进行修正时,常常使用的是修正值。修正值用来对测量值进行修正。修正值 C 定义为

$$C = A - x = -\Delta$$

修正值的值为绝对误差的负值。测量值加上修正值等于实际值,即

$$x + C = A$$

通过修正使测量结果得到更准确的数值。

采用绝对误差来表示测量误差往往不能很确切地表明测量质量的好坏。例如,温度测量的绝对误差 $\delta = \pm 1^\circ\text{C}$,如果用于人的体温测量,这是不允许的;但如果用于钢铁炼厂中钢炉的钢水温度测量,就是非常理想的情况了。

2. 相对误差

相对误差 δ 的定义为绝对误差 Δ 与真值 L 的比值,用百分数来表示,即

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\%$$

由于在实际测量中真值无法得到,因此可用实际值 A 或测得值 x 代替真值 L 来计算相对误差。

用实际值 A 代替真值 L 来计算的相对误差称为实际相对误差,用 δ_A 来表示,即

$$\delta_A = \frac{\Delta}{A} \times 100\%$$

用测得值 x 代替真值 L 来计算的相对误差称为示值相对误差,用 δ_x 来表示,即

$$\delta_x = \frac{\Delta}{x} \times 100\%$$

在实际应用中,因测得值与实际值相差很小,即 $A \approx x$,故 $\delta_A \approx \delta_x$,一般 δ_A 与 δ_x 不加以区别。采用相对误差来表示测量误差能够较确切地表明测量的精确程度。

(四) 测量误差的来源

实验中,测量误差的来源很多。根据测量误差的来源,测量误差归纳起来有如下几个方面。

1. 测量环境误差

任何测量都有一定环境条件,如温度、湿度、大气压、振动、波动、电磁干扰等。测量时,由于实际的环境条件与所使用的测量装置要求的环境条件不一致,就会产生测量误差,这种测量误差就是测量环境误差。

2. 测量装置误差

实验中,对测量中所使用的测量装置的性能指标有一定的要求。由于实际测量所使用的测量装置的性能指标达不到要求,或安装、调整不符合要求,或因内部噪声、元器件老化等使测量装置的性能劣化等原因,都会引起测量误差,这种测量误差就是测量装置误差。

3. 测量方法误差

由于测量方法的不合理或不完善,测量所依据的理论不严密等原因,也会产生测量误差,

这种测量误差就是测量方法误差。例如,用电压表测量电压时,由于没有正确地估计电压表的内阻而引起的误差;用近似公式、经验公式或简化的电路模型作为测量依据而引起的误差;通过测量圆的半径来计算其周长,因所用圆周率 π 为近似值而引起的误差,都是测量方法误差。

4. 测量人员误差

由于测量操作人员的操作经验、知识水平、素质条件的差异,操作人员的责任感不强、操作不规范和疏忽大意等原因,也会产生测量误差,这种测量误差就是测量人员误差。

(五) 误差分类

1. 系统误差

能够保持恒定不变或按照一定规律变化的测量误差,称为系统误差。系统误差主要是由于测量设备、测量方法的不完善和测量条件的不稳定而引起的。由于系统误差表示测量结果偏离其真实值的程度,即反映了测量结果的准确度,所以在误差理论中,经常用准确度来表示系统误差的大小。系统误差越小,测量结果的准确度就越高。

2. 偶然误差

偶然误差又称随机误差,是一种大小和符号都不确定的误差,即在相同条件下对同一被测测量值重复测量时,各次测量结果服从某种统计分布。这种误差的处理依据概率统计方法。产生偶然误差的原因很多,一方面如温度、磁场、电源频率等的偶然变化等都可能引起这种误差;另一方面观测者本身感官分辨能力的限制,也是偶然误差的一个来源。偶然误差反映了测量的精密度,偶然误差越小,精密度就越高;反之,精密度越低。

系统误差和偶然误差是两类性质完全不同的误差。系统误差反映在一定条件下误差出现的必然性;而偶然误差则反映在一定条件下误差出现的可能性。

3. 疏失误差

疏失误差是测量过程中操作、读数、记录和计算等方面的错误所引起的误差。显然,凡是含有疏失误差的测量结果都是应该去除的。

(六) 误差消除方法

仪表测量误差是不可能绝对消除的,但要尽可能减小误差对测量结果的影响,使其减小到允许的范围内。消除测量误差,应根据误差的来源和性质,采取相应的措施和方法。必须指出,一个测量结果中既存在系统误差,又存在偶然误差,要截然区分两者是不容易的。所以应根据测量的要求和两者对测量结果的影响程度,选择消除方法。一般情况下,在对精密度要求不高的工程测量中,主要考虑对系统误差的消除;而在科研、计量等对测量准确度和精密度要求较高的测量中,必须同时考虑消除上述两种误差。

1. 系统误差的消除方法

(1) 对测量仪表进行校正。在准确度要求较高的测量结果中,引入校正值进行修正。

(2) 消除产生误差的根源。正确选择测量方法和测量仪器,尽量使测量仪表在规定的使用条件下工作,消除各种外界因素造成的影响。

2. 偶然误差的消除方法

消除偶然误差可采用在同一条件下,对被测量进行足够多次的重复测量,取其平均值作为测量结果的方法。根据统计学原理可知,在足够多次的重复测量中,正误差和负误差出现的可能性几乎相同,因此偶然误差的平均值几乎为零。所以,在测量仪器仪表选定后,测量次数是保证测量精密度的前提。

第二节 有效数字及其运算法则

在物理实验过程中,我们需要记录所观察到的实验数据并对这些数据进行运算,而这些记录的数据应取几位数字、运算后应保留几位数字,都由不确定度来决定,这就要求我们掌握有效数字及其运算法则。

一、有效数字

1. 影响有效数字位数的因素

实验中实际测量出的数字称为有效数字。有效数字包括可靠数字和存疑数字。实验测量出来的数据与测量仪器的准确度、测量方法、分析方法有密切关系。

实验测量中所记录的数字都有误差,但这些误差数字不能无限制地写下去。例如, $(1.7684 \cdots \pm 0.02)\text{cm}$ 应写成 $(1.77 \pm 0.02)\text{cm}$ 。由于这组数据的不确定度为 0.02cm , 则该数值在小数点后第二位已有误差。因此,测量结果写到有误差的那一位即可。记录有误差那一位数字时,根据其后一位按“四舍五入”的法则取舍。虽然最后一位为存疑数字,但也是有效数字,所以上述例子中 1.77cm 有三位有效数字。

2. 关于“0”是否为有效数字

当数据的单位进行十进制变换时,变换前后的有效数字位数不变。也就是说,数据的第一个非零数字左面的零不是有效数字,第一个非零数字右面的零是有效数字。例如, 0.0304m 和 3.04cm 及 30.4mm 都是等效的,它们都有三个有效数字; 5.020m 和 5.02m 不是等效的, 5.020m 有四位有效数字,但 5.02m 只有三位有效数字。

为了书写规范,当数值很大或很小时,可用 10 的乘幂来表示数量级。例如, 0.00234m , 可写成 $2.34 \times 10^{-3}\text{m}$ 。在变换单位时,这种方法也会很方便,例如, $5.2\text{km} = 5.2 \times 10^3\text{m}$, 不能写成 5200m ; $2800\Omega = 2.800 \times 10^3\Omega = 2.800\text{k}\Omega$, 不能写成 $2.8\text{k}\Omega$ 。

另外,有效数字的位数反映了测量仪器的最小刻度值。例如, 0.0635m 是以最小刻度为 1.0mm 的尺子测量的,而 6.350m 是以最小刻度为 1.0cm 的尺子测量的。

二、测量时有效数字的确定

(1) 当给出(或求出)不确定度时,测量结果的有效数字由不确定度来确定。不确定度本身也是一个估计值,它的有效数字一般只取一位(若首位为 1 或 2 时,不确定度可取两位)。若数据单位统一,则数据的最后一位要与不确定度的最后一位取齐。

① 直接测量结果的有效数字。一次直接测量结果的有效数字可由仪器最大允许误差或估计的不确定度来确定;多次直接测量结果的有效数字,由计算得到的 A 类不确定度来确定。

② 间接测量结果的有效数字。利用相关公式求解出结果的不确定度,再由不确定度来确定。

(2) 当未给出(或未求出)不确定度时,直接测量还是间接测量结果的有效数字位数也不能任意选取。

① 直接测量结果的有效数字。通常情况下,有效数字的位数由仪器的最小分度值和估读的程度来确定。

② 间接测量结果的有效数字。有效数字位数由参与运算的直接测量数据的有效数字位数和运算方法来确定。

三、有效数字的运算法则

为了使测量的结果达到应有的精度,又尽量简化计算的过程,可根据如下运算法则进行有效数字的计算。

1. 加减法运算规则

运算结果的有效数字在小数点后的位数应与参与运算数据的小数点后位数最少的一个相同。例如:(数字下划线表示存疑数字)

$$\begin{array}{r} 48.\underline{2} \\ +1.\underline{345} \\ \hline 49.\underline{545} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 49.\underline{5} \\ -2.\underline{463} \\ \hline 47.\underline{037} \end{array}$$

加法的结果应写为 49.5,小数点后的位数与“48.2”相同。减法的结果应写为 47.0,小数点后的位数与“49.5”相同。

通过以上计算法则可推出:若干个直接测量值进行加法或减法计算时,选用精度相同的仪器最为合理。

2. 乘除法运算规则

运算结果的有效数字位数一般与运算数据的有效数字位数最少的一个相同。例如:

$$\begin{array}{r} 10.\underline{326} \\ \times 0.\underline{21} \\ \hline 10326 \\ 20652 \\ \hline 2.16846 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 33.\underline{3} \\ \sqrt[0.31]{10.\underline{326}} \\ \hline 93 \\ \hline 102 \\ 93 \\ \hline 96 \\ 93 \\ \hline 3 \end{array}$$

上式乘法的结果应写为 2.2,有效数字的位数与“0.21”相同。上式除法结果应写为 33,有效数字的位数与“0.31”相同。

从以上计算法则可推出:若将多个测量后的实验数据乘、除法运算,可根据有效位数相同的原则来合理选择不同精度的仪器。

3. 乘方、开方运算规则

运算结果的有效数字位数与其底数或被开方的有效数字位数相同。例如:

(1) 乘方: $(4.682)^2 = 21.92$

(2) 开方: $\sqrt{46.8} = 6.84$

4. 三角函数、对数、指数运算规则

三角函数、对数运算结果的有效数字位数一般与变量的位数相同;指数函数运算结果的有效数字位数与指数小数点后的有效数字位数相同。例如:

(1) 三角函数: $\sin 20^{\circ}00' = 0.3420$

(2) 对数: $\lg 1.897 = 0.2781$

(3) 指数: $10^{5.25} = 1.8 \times 10^5$; $10^{0.0035} = 1.008$

5. 无理常数($\pi, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots$)的运算规则

运算结果的有效数字位数可看成很多位有效数字。例如:

$L = 2\pi R$, 若测量值 $R = 2.24 \times 10^{-3}$ m 时, π 应取为 3.142, 则

$$L = 2\pi R = 2 \times 3.142 \times (2.24 \times 10^{-3}) = 1.40 \times 10^{-1} \text{ m}$$

四、有效数字运算结果尾数的取舍规则

为了使舍和入的概率相等,有效数字运算结果尾数的取舍方法可用“四舍六入五凑偶数”规则来确定。“四舍六入五凑偶数”指的是当尾数小于五则舍,大于五则入,等于五时,前一项是偶数则舍,前一项是奇数则入。例如:

1.7689 取三位有效数字,结果为:1.77

3.825 取三位有效数字,结果为:3.82

0.1659 取两位有效数字,结果为:0.16

0.0752 取一位有效数字,结果为:0.08

在物理实验中,为了简化运算的同时也不使精度降低,我们对实验数据进行记录及各种运算时应该学会正确合理地取有效数字。我们把这种取舍原则叫作一种“修约”。数值的修改指的是数值在参与运算前,通过这种取舍原则省略原数值的最后若干位数字,使最后所得到的值最接近原数值的过程。一般情况下,对参与运算的数值采用先修炼、后计算、再修改的方法进行相关运算。

五、例题讲解

例 1: 试确定 $A = 60.9 - 5.342 + 2.41$ 的有效数字。

解: 加减法的运算结果在小数点后的位数应与运算数据小数点后位数最少的一个相同。

先修约: $A = 60.9 - 5.34 + 2.41$

后计算: $A = 60.9 - 5.34 + 2.41 = 57.97$ (保留两位小数)

再修约: $A = 60.9 - 5.34 + 2.41 = 8.0$ (保留一位小数)

例 2: 试确定 $B = \frac{4.2 \times 6.12}{18.823}$ 的有效数字。

解: 乘除法的运算结果的有效数字位数一般与运算数据的有效数字位数最少的一个相同。

先修约: $B = \frac{4.2 \times 6.12}{18.82}$

后计算： $B = \frac{4.2 \times 6.12}{18.82} = 1.36$ （保留三位有效数字）

再修约： $B = \frac{4.2 \times 6.12}{18.82} = 1.4$ （保留两位有效数字）

【思考题】

试计算下列式子中的结果。

(1) $\frac{50.00 \times (18.30 - 16.3)}{(103 - 3.0) \times (1.00 + 0.001)}$

(2) $\frac{10.0^2 \times \lg 100.0}{27.3211 - 27.31}$

第三节 测量结果的评定及不确定度

一、不确定度的基本概念

物理实验在测量过程中,只能测出待测物理量的近似值,不可避免地要出现误差。对于一些未定的系统误差和随机误差就要指出其误差范围,这就要求在物理实验中引入测量不确定度的概念,以便对待测物理量的结果作出科学合理的评价。

二、合成不确定度的两类分量

1. A类不确定度 u_A 的计算

测量物理量的重复次数用 n 表示,测量结果用平均值 \bar{x} 表示,测量结果的 A 类不确定度就可以用平均值的标准偏差表示,则

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

需注意的是标准偏差 S_i 和 A 类不确定度 u_A 是两个不同的概念,在普通大学物理实验中当 $5 < n \leq 10$ 时,取 S_i 值作为 A 类不确定度 u_A 分量的值是最简单的计算方法。

2. B类不确定度 u_B 的计算

对可定系统误差进行消减或修正,并对列出观察值的全部误差因素作出不确定度估计,就属于 B 类不确定度。主要来自于以下几个方面的误差。

(1) 仪器误差。任何测量仪器如量具、指示仪表等,都有一定的准确度等级,也就是说存在一定误差。除此之外,一些仪器、仪表的灵敏程度也有限度,显示的测量值也是在它们的灵敏度以下。

(2) 原理方法误差。测量方法的不完善性,计算公式的近似性,又或者测量公式中被忽略的某些因素都会对测量产生误差。

(3) 环境误差。系由于实际环境条件不满足规定条件而产生的误差。环境条件包括温度、湿度及压强等因素的空间不均匀性及振动、电磁场、光照强度等因素的时间不稳定性。

(4) 个人误差。系测量人员的个人操作引起的误差。

(5) 调整误差。系实验装置的调整(包括水平、垂直、平行等)未达到实验要求所产生的误差。

在全面分析误差因素时,通常只需要重点考虑对测量结果影响比较大的因素,忽略影响较小的因素。

在目前所开设的大学实验项目中测量不确定度的 B 类分量主要是由仪器误差引起。仪器误差一般由生产厂家在铭牌或者说明书中直接给出,或者由已知的仪器准确度等级进行计

算得出。如果既没有仪器误差又没有准确度等级,一般取仪器最小分度值作为仪器误差限。

仪器误差限 Δ 可直接用仪器的示值误差限或允许误差限表示。下面就是几种常见测量仪器的误差限。

(1) 钢卷尺(最小分度值 1 mm)实验中约定误差应符合以下规定:

$$\text{I 级: } \Delta = (0.1 + 0.1L) \text{ mm}$$

$$\text{II 级: } \Delta = (0.3 + 0.2L) \text{ mm}$$

式中, Δ 为示值误差, L 的长度以 m 为单位。

(2) 游标卡尺(最小分度值 0.02 mm、0.05 mm、0.1 mm)由于不区分精度等级,其误差限就可分别规定为 0.02 mm、0.05 mm、0.1 mm。

(3) 螺旋测微计,精度为一级,其仪器误差与测量范围有关,具体如表 1 所示。

表 1 螺旋测微计示值误差

测量范围 /mm	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~400
示值误差 /mm	± 0.004	± 0.005	± 0.006	± 0.007	± 0.008	± 0.009	± 0.011

B 类不确定度分量 u_B 一般与仪器误差分布特性有关,即 $u_B = \Delta/K$ 。对于正态分布 $K=3$,对于均匀分布 $K=\sqrt{3}$,对于其他分布可在有关著作中查到 K 值。确定仪器误差属于何种分布需要有丰富的实验经验。普通大学物理实验约定 K 值为按均匀分布处理:

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

三、测量结果的合成不确定度

A 类不确定度和 B 类不确定度是以标准差和近似标准差给出的,所以,测量结果的合成不确定度 u 可表示为

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

最终的测量结果则表示为

$$\text{测量值} = \text{平均值} \pm \text{不确定度}$$

即

$$x = \bar{x} \pm u \quad (4)$$

相对不确定度可表示为

$$E = \frac{u}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (5)$$

四、测量结果不确定度的表示

1. 单次直接测量不确定度的表示

在部分物理量的测量中,如果测量条件稳定,多次重复测量结果几乎无差别,就不需要进