



# 大学物理实验教程

(第4版)

朱筱玮 李武军◎主编

西北工业大学出版社

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

# 大学物理实验教程

(第4版)

主编 朱筱玮 李武军

编者 朱筱玮 李武军 刘绒侠

王党社 何春娟 李爱云

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书是按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写的,是非物理类专业开设物理实验课程的基本教材。本书打破了以往按力、热、光、电及近代物理实验等分类的编排结构,分五章系统地介绍了实验基础知识、测量的不确定度与数据处理、基础实验、综合实验及开放设计性实验等。本书内容由浅入深,逐步提高,补充完善了物理实验课程的教学体系。

本书可作为高等工科学校各专业物理实验课程的教材,也可作为有关专业物理实验课程的教学参考书。

**图书在版编目(CIP)数据**

大学物理实验教程/朱筱玮,李武军主编. —4版. —西安:西北工业大学出版社,2017.8  
ISBN 978-7-5612-5550-6

I. ①大… II. ①朱… ②李… 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(2017)第202854号

策划编辑:季强

责任编辑:李阿盟

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpu.com

印刷者:陕西金德佳印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:13.75

字数:334千字

版次:2017年8月第4版 2017年8月第1次印刷

定价:29.00元

# 前 言

---

物理实验课是高等学校理工科学生必修的一门独立的基础实验课程。根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，该实验课程既要以学生已有的物理实验知识为起点，又要与后续的实验课程适当配合。因此，本书在实验题目的选择和内容的编写上，一方面注重基本的实验技能训练、基本测量方法的介绍，另一方面适当地选择一些具有普遍意义的综合性、近代物理实验的题目，在保证学生实验能力的基本训练基础上，提高学生对物理实验的兴趣。

本书在实验内容编排上基本按照分层次实验教学的需要编写。第一章简要介绍物理实验的重要性以及如何做好物理实验。第二章全面系统地介绍测量误差、不确定度和数据处理的基础知识。第三章为基础实验，着重于物理实验的基本方法和技能，基本物理实验仪器的工作原理和使用，以及物理实验的基本测量方法。第四章为综合实验，着重于提高学生的物理实验能力和综合分析能力。第五章为开放设计性实验，着重于锻炼学生的独立实验能力和实验技能的综合运用能力。

近几年随着科学技术的进步和教育改革的发展，物理实验无论在教学体系、教学方法、实验技术，还是仪器设备等方面都发生了很大变化，为了适应新的教学要求和条件，我们对《大学物理实验教程》进行了第4版的修订。本次修订由朱筱玮和李武军完成。本次修订中对原实验教材中的实验项目进行删减和修改，增加实验六、七、八、九，并重新编写第五章开放设计性实验的十三个实验项目。结合互联网的普及，教材编入了二维码，提供教材配套的电子资源，以适应实验教学和科技发展，方便及时更新资料。在本次修订过程中，实验室的许多老师给予了大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

本书凝聚了实验室多年的改革经验和众多实验教师的智慧，编写中参阅了许多兄弟院校的物理实验教材和物理教材，在此一并表示感谢！

由于水平有限，书中如有疏漏，恳请读者批评指正。

编 者

2017年6月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第一章 绪论                | 1  |
| 第一节 物理实验的目的           | 1  |
| 第二节 物理实验课的基本程序        | 1  |
| 第三节 物理实验须知和守则         | 2  |
| 第二章 测量的不确定度           | 4  |
| 第一节 测量及误差的基本概念        | 4  |
| 第二节 测量值的有效数字          | 6  |
| 第三节 测量不确定度的评定         | 10 |
| 第四节 数据处理的常用方法         | 16 |
| 第五节 正态分布与标准偏差         | 21 |
| 练习题                   | 23 |
| 第三章 基础实验              | 24 |
| 实验一 固体密度的测量           | 24 |
| 实验二 金属丝杨氏模量的测定        | 29 |
| 实验三 刚体转动惯量的测量         | 34 |
| 实验四 气轨上简谐振动的研究和弹性碰撞   | 39 |
| 实验五 固定均匀弦振动的研究        | 44 |
| 实验六 线膨胀系数的测量          | 47 |
| 实验七 固体比热容的测量          | 51 |
| 实验八 气体比热容比的测定         | 54 |
| 实验九 导热系数的测量           | 58 |
| 实验十 惠斯通电桥测电阻          | 62 |
| 实验十一 电表的扩程和校准         | 68 |
| 实验十二 电位差计及其应用         | 73 |
| 实验十三 电子示波器的使用         | 81 |
| 实验十四 模拟法测绘静电场         | 88 |
| 实验十五 光的等厚干涉           | 92 |
| 第四章 综合实验              | 99 |
| 实验十六 用电位差计测电表的内阻并校准电表 | 99 |

|             |                      |            |
|-------------|----------------------|------------|
| 实验十七        | 用霍尔元件测螺线管磁场          | 101        |
| 实验十八        | 用示波器测绘铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线 | 107        |
| 实验十九        | 用磁聚焦法测定电子荷质比         | 112        |
| 实验二十        | 分光计的调整和棱镜折射率的测量      | 118        |
| 实验二十一       | 用光栅测量光波波长            | 127        |
| 实验二十二       | 迈克尔逊干涉仪的应用           | 132        |
| 实验二十三       | 弗兰克-赫兹实验             | 141        |
| 实验二十四       | 光电效应                 | 147        |
| 实验二十五       | 电子衍射                 | 152        |
| <b>第五章</b>  | <b>开放设计性实验</b>       | <b>162</b> |
| 实验二十六       | 旋转液体综合实验             | 162        |
| 实验二十七       | 简谐振动特性研究与弹簧劲度系数测量    | 165        |
| 实验二十八       | 热学综合设计性实验            | 167        |
| 实验二十九       | 电阻元件特性的研究            | 173        |
| 实验三十        | 载流圆线圈磁场分布的测绘         | 175        |
| 实验三十一       | 双臂电桥测电阻              | 178        |
| 实验三十二       | 金属电子逸出功的测定           | 182        |
| 实验三十三       | 非线性混沌实验              | 185        |
| 实验三十四       | 偏振光的研究               | 189        |
| 实验三十五       | 空气折射率的测量             | 192        |
| 实验三十六       | 介质中声速的测量             | 193        |
| 实验三十七       | 太阳能电池特性的研究           | 196        |
| 实验三十八       | 音频信号光纤传输特性的研究        | 199        |
| <b>附表</b>   |                      | <b>203</b> |
| 附表一         | 基本物理学常量表             | 203        |
| 附表二         | 国际单位制(SI)的基本单位       | 204        |
| 附表三         | 国际单位制中具有专门名称的导出单位    | 204        |
| 附表四         | 可与国际单位制并用的我国法定计量单位   | 205        |
| 附表五         | 20℃时一些物质的密度          | 205        |
| 附表六         | 20℃时某些金属的杨氏模量        | 206        |
| 附表七         | 液体的黏度 $\eta$         | 207        |
| 附表八         | 某些物质的比热容             | 207        |
| 附表九         | 某些物质的折射率(相对空气)       | 209        |
| 附表十         | 可见光波和频率与颜色的对应关系      | 210        |
| 附表十一        | 常用光源的谱线波长            | 210        |
| 附表十二        | 海平面上不同纬度处的重力加速度      | 211        |
| 附表十三        | 铜-康铜热电偶的温差电动势        | 211        |
| <b>参考文献</b> |                      | <b>214</b> |

# 第一章 绪 论

## 第一节 物理实验的目的

大学物理实验是高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是理工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。学生通过物理实验课的学习,不仅可以加深对物理理论的理解,获得基本的实验知识,掌握基本的实验方法,培养基本的实验技能,而且对培养其良好的实验素质和科学世界观等方面,都起着重要的作用。因此,学好物理实验课是非常重要的。

学习物理实验的目的:

(1)通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对基本物理概念和基本物理定律的认识和理解。

(2)培养与提高学生的科学实验能力。这些能力包括通过阅读教材和资料,能概括出实验原理和方法的要点,正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和各种测量技术;正确记录和处理数据,判断和分析实验结果,撰写合格的实验报告,以及完成简单的具有设计性内容的实验等。

(3)培养与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,严谨踏实的工作作风,主动研究的创新探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护实验仪器及其他公共财产的良好品德。

## 第二节 物理实验课的基本程序

物理实验是学生在教师指导下独立进行和完成的。每次实验学生必须主动努力自觉获取知识和实验技能,绝不仅仅是测出一些实验数据。如果还能进一步去领悟实验中的物理思想方法,那将受益更大。

要达到物理实验课的预期目的,就必须做好物理实验课的三个环节。

### 1. 课前预习

每次实验能否顺利进行,并有所收获,很大程度取决于课前的预习是否认真和充分。预习时要仔细阅读教材,明确实验要求,理解实验原理和方法,了解实验内容以及实验仪器的工作原理和使用方法。有条件的话,可到实验室针对所使用的仪器进行预习,并了解注意事项。最后在阅读理解的基础上,写出书面预习报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的和要

求、实验原理和公式(简述)、实验内容、数据记录表格等。对于不清楚的问题也可写上。

## 2. 课堂实验

这是实验课的主要环节。到实验室后要遵守实验室的规章制度,不会用的仪器不要乱动,实验开始前,教师一般会做简要讲解。应认真听,领会重点、难点,对实验中的注意事项以及容易失误的地方要特别仔细。

实验时,首先安排好仪器的位置,以方便操作和读数为原则,合理布局。其次是对仪器要进行必要的调节,如水平调节、垂直调节、零位调节、量程选择等。调节时要细心,切勿急躁。测量中碰到问题,自己先动脑筋,实在解决不了,请老师帮忙解决。对电学实验,连好线路后先自查,再请老师检查,正确无误才能接通电源。

测量时,应将数据整齐地记录在数据表格中,特别注意有效数字。环境条件(如温度、气压、湿度)也要一一记录。实验中遇到异常现象也应记录,以便进行研究和分析。测量结束后暂不动仪器,请老师检查数据,如有错误和遗漏,则需要重做或补做。待老师在原始数据上签字后,再整理好仪器离开实验室。

## 3. 实验报告

实验报告是对实验的文字性总结,也是进行交流的资料。一定要形式规范,清楚工整,简明扼要,图表正确,逐步培养以书面形式分析总结科学实验结果的能力。

实验报告包括以下内容:

- (1)实验名称、实验者姓名和实验日期。
- (2)实验的目的和要求。
- (3)实验原理和公式。简明扼要,注重物理内容的简述,数学推导从简。以自己做完实验之后的理解进行整理,不要照抄教材。
- (4)实验仪器型号、参数。
- (5)实验内容及仪器的主要调节。按实验内容写清实验的主要步骤,以及观察到的物理现象,采用哪些实验方法测量了哪些物理量。
- (6)数据记录。能用表格的尽量用表格记录,注意整洁规范。
- (7)数据处理。用计算或作图的方法求出实验结果,进行不确定度的估算。最后写出规范的实验结果表达式。
- (8)讨论分析。对影响本次实验的主要因素进行讨论,应采取哪些措施以减小测量的不确定度。对实验观察到的现象给予必要的解释。对实验有何建议,有何体会,最后回答必要的思考题等。

## 第三节 物理实验须知和守则

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保障学生的人身安全和实验课的正常秩序,特做以下规定。

- (1)每次做实验的前一周按老师要求的时间,到实验室进行1 h的实验预习,并在下周实验课之前写好实验预习报告。预习报告按教材中的要求完成。没有预习或预习不好的,实验教师可做出处理决定,直至不允许做实验。
- (2)迟到15 min以上或无故旷课的,不能做实验,本次实验以零分计,不再补做。若有事



或生病,要有证明而且要在做实验前与实验课老师取得联系,安排补做。否则,不予安排。

(3)实验时要带预习报告和上次实验的实验报告,缺一不能做实验。

(4)实验的原始数据由教师核查、签名后数据有效。交报告时将原始数据附在报告中。实验完毕要整理好仪器,打扫完卫生,方可离开实验室。

(5)做电学实验时,电源电压先调至“0”,所有开关全部断开,然后按原理图接线,接好线路后先自查,再请老师检查,正确无误后方可通电。

(6)每次实验成绩实行百分制。预习 15 分,实验操作 40 分,实验报告 45 分。

(7)学期末实验课的总成绩为“平时成绩(60%) + 考试成绩(40%)”。

## 第二章 测量的不确定度

由于人们的认识能力和科学技术水平的限制,实验中对物理量的测量很难完全准确,因此误差存在于一切测量之中,在表达测量结果时不仅要有测量数据和单位,而且还应该给出表示测量质量的某些指标。

传统的表示方法是用误差来表示测量质量的。误差按其性质和产生的原因分为三大类:系统误差、随机误差和粗大误差。然而各个国家和不同学科有不同的看法和规定,有关术语的规定也不统一,从而影响了国际间的交流和对各种成果的相互利用。1993年国际计量组织(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际临床化学联合会(IFCC)、国际标准化组织(ISO)、国际理论与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论与应用物理联合会(IUPAP)和国际法制计量组织(OIML)等七个国际组织正式发布了“测量不确定度表示指南”(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement,简称GUM),为计量标准的国际对比和测量不确定度的统一奠定了基础。为了加速与国际惯例接轨,我国制定了一系列技术标准,计量标准部门也已明确指出应采用不确定度作为误差数字指标的名称。因此物理实验课程也引入不确定度来评定测量结果的质量。

### 第一节 测量及误差的基本概念

#### 一、测量的含义

所谓测量,就是用一定的工具和仪器,通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较。测量是物理实验的基本操作,其实质是被测物理量与选做计量标准单位的同类物理量进行比较的过程。被测量的测量结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(标准量的单位)以及结果的可信赖程度(用不确定度表示)。

测量中,选做计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的。例如,真空中的光速是一个不变的量,国际单位制由此规定以光在真空中  $1/299\,792\,458\text{ s}$  的时间间隔内所经路径的长度作为长度单位—— $1\text{ m}$ 。时间的单位是  $\text{s}$ ,  $1\text{ s}$  是铯( $\text{C}^{133}$ )原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射  $9\,192\,631\,770$  个周期的持续时间。质量的单位是千克( $\text{kg}$ ),  $1\text{ kg}$  等于国际千克原器的质量。

#### 二、测量的分类

根据获得数据的方法不同,测量可分为直接测量和间接测量两种。



### 1. 直接测量

将被测量直接与标准量进行比较,或用预先按标准校对好的测量工具或仪表对被测量进行测量,直接读数得到数据,这样的测量就叫直接测量,相应的被测量称为直接测量量。例如,用钢直尺测量钢丝的长度,用秒表测量三线摆的周期等。

### 2. 间接测量

被测量不能用直接测量的方法得到,而是由一些直接测量量通过一定的函数关系计算出来的,这种测量称为间接测量,相应的被测量称为间接测量量。例如,测量一钢丝的半径  $r$  是通过测量其直径  $d$ ,用公式  $r=d/2$  计算出来的。测量一立方体的密度是通过对其质量  $m$ 、长  $l$ 、宽  $b$  及高  $h$  的测量,根据密度的定义式  $\rho=m/(lbh)$  计算出来的。

实际上间接测量远远多于直接测量。实验中的原理、方法、步骤、计算等大都是间接测量的内容;实验方法、实验技术也主要在间接测量的范围内。

此外,测量还可根据测量条件的不同,分为等精度测量与非等精度测量、静态测量与动态测量等。

## 三、测量误差的分类

按测量误差出现的特点不同,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

### 1. 系统误差

在一定条件下对同一被测量进行多次测量时,保持恒定或以预知方式变化的测量误差称为系统误差。它包含两类:一是固定值的系统误差,其值(包括正负号)恒定;二是随条件变化的系统误差,其值以确定的、已知的规律随某些测量条件变化。

系统误差来源于测量装置(标准器、仪器、附件和电源等误差)、环境(温度、湿度、气压、振动和电磁辐射等影响)、方法(理论公式的近似限制或测量方法的不完善),以及人本身(测量者感官的不完善,具有某种习惯和偏向)等方面。其产生原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,若它的符号和大小是确定的,可对测量值加以修正,例如用千分尺测一直径,其零位误差为  $0.003\text{ mm}$ ,测量值为  $0.305\text{ mm}$ ,那么消除系统误差后的测量结果为  $0.305 - 0.003 = 0.302\text{ mm}$ ;若它的符号和大小都不确定,可设法减小其影响并估计出误差范围。

### 2. 随机误差

在一定条件下对被测量进行多次测量时,以不可预知的随机方式变化的测量误差称为随机误差。这种误差值时大时小,时正时负,没有规律性,它引起被测量重复测量的变化。

随机误差来源于许多不可控因素的影响,例如,周围环境的无规则起伏,仪器性能的微小波动,观察者感官分辨本领的限制,以及一些尚未发现的因素等。这种误差对每次测量来说没有必然的规律性,但是进行多次重复测量时会出现统计规律性。虽然无法消除或补偿测量结果的随机误差,但增加观测次数可使它减小,并可用统计方法估算其大小。

随机误差与系统误差虽然不同,但并无本质差别。随机误差本身就是许多微小的、独立的、难以控制和不可分解的系统误差的随机组合。另外,系统误差和随机误差还可以在一定条件下相互转化。例如,尺子的分度误差,从制造产品的角度来说是随机误差,但用户使用有分度误差的尺子引起的测量误差则是系统误差。

在实际测量中,虽然应尽可能地限制和消除系统误差,通过多次测量以减小随机误差,但

两种误差往往还会同时存在,这就需要按其测量结果的影响分别对待。

- (1) 若系统误差经技术处理后已消除,或远小于随机误差,可按纯随机误差处理;
- (2) 若系统误差的影响远远大于随机误差,可按纯系统误差处理;
- (3) 若系统误差和随机误差的影响差别不大,两者均不可忽略,则应按不同的方法分别处理并综合两种误差。

### 3. 粗大误差

明显超出规定条件下预期值的误差称为粗大误差。也就是说,在实验中,由于某种差错使得测量值明显偏离正常测量结果的误差,例如,读错数、计错数、不正确的操作或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等。在实验数据处理中,应按一定的规律来剔除粗大误差。

## 四、测量的精密度、正确度和准确度

为了表达测量误差的大小,常用精密度、正确度和准确度来描述。

- (1) 精密度。用来描述重复测量的离散程度,它反映随机误差的大小,精密度高则离散小,重复性好。
- (2) 正确度。描述测量结果与真值的接近程度,它反映系统误差对测得值的影响,正确度高表示系统误差小,测得值与真值的偏离小,接近真值的程度高。正确度反映了系统误差的大小。
- (3) 准确度。用来描述测量结果与被测量真值之间的一致程度,它反映系统误差与随机误差综合的结果,准确度越高则测量值越接近真值。

图 2.1.1 为射击时的记录图形,图 2.1.1(a) 表示精密度高,正确度低,即随机误差小,系统误差大;图 2.1.1(b) 表示正确度高,但是精密度低,即系统误差小,随机误差大;图 2.1.1(c) 表示准确度高,既精密又正确,系统误差和随机误差都小。

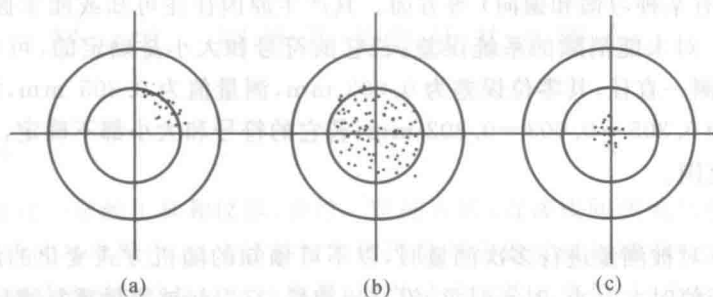


图 2.1.1 射击时的记录图形

(a) 精密度高;(b) 正确度高;(c) 准确度高

## 第二节 测量值的有效数字

### 一、测量值的有效数字

#### 1. 有效数字的定义及其基本性质

任何测量仪器都存在仪器误差,受其制约,在使用仪器对被测量进行测量读数时,就只能

读到仪器的最小分度值,这部分是准确数字,称为可靠数字。在最小分度值以下还可以再估读一位,由于估读位带有一定的误差,因而称为可疑数字。我们把有效数字定义为:测量中所有的可靠数字加上末位的可疑数字统称为有效数字。

例如,用钢板尺测长度(见图 2.2.1),其最小分度值为 1 mm,测量值为 2.75 cm,其中 2.7 cm 为可靠数字,0.05 cm 为可疑数字。

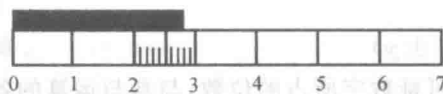


图 2.2.1 米尺的读数

(1) 有效数字的位数。在长度测量中,可以用米尺、游标卡尺、千分尺去测量同一长度,其结果分别为 2.75 cm, 2.752 cm, 2.752 1 cm, 可见,有效数字的位数与测量仪器的精度有关。测量仪器的精度越高,测量值的有效位数就越高。

有效数字的位数还与被测量本身的大小有关。例如,用米尺测得 2.75 cm 与 12.75 cm 两个不同长度,其有效位数也不一样。

此外,有效数字的位数还与测量方法有关。例如用秒表测量三线摆的周期,其误差主要是由启动和制动时手与目协调的程度决定的,一般误差为 0.2 s。若不考虑别的误差,如果只测一个周期,  $T = (1.5 \pm 0.2) \text{ s}$ ; 若连续测 50 个周期,  $50T = 73.5 \text{ s}$ , 有  $T = 1.47 \text{ s}$ ,  $\Delta T = 0.2/50 = 0.004 \text{ s}$ , 误差与测量的有效数字相比可忽略。

(2) 有效数字的位数与小数点的位置无关,单位换算时有效数字的位数不变。对有效数字中的“0”要特别注意,数字前面的“0”不是有效数字,而数字中的“0”和数字后面的“0”均为有效数字。如 0.0270, 2.70, 27.0 均为三位有效数字。要注意的是,2.70 中最后的“0”表示可疑数字,不能省略,为三位有效数字;而 2.7 则为两位有效数字,其中“7”为可疑数字。因此,  $2.70 \text{ cm} \neq 2.7 \text{ cm}$ , 因为它们的内涵是不同的。

### 2. 有效数字与不确定度的关系

测量结果的有效数字的末位是可疑数字,具有不确定性,与此相应,绝对不确定度也只会有一位有效数字。对一次直接测量结果的有效数字,由仪器的不确定度来确定;多次直接测量算术平均值的有效数字由计算得到平均值的不确定度来确定;间接测量结果的有效数字,也是先计算结果的不确定度,再由不确定度来确定。

由于有效数字最后一位是不确定度所在位,因此有效数字在一定程度上反映了测量结果的不确定度。

### 3. 测量值的科学表示法

在进行单位换算时,有时会出现这样的情况,  $2.75 \text{ m} = 275 \text{ cm} \neq 2750 \text{ mm}$ , 因为前者是三位有效数字,而后者是四位有效数字。用科学计数法可避免出现这样的问题,即将测量数据写成  $A \times 10^n$  形式。上式可写成  $2.75 \text{ m} = 2.75 \times 10^2 \text{ cm} = 2.75 \times 10^3 \text{ mm}$ 。

## 二、有效数字的运算规则

有效数字的运算规则如下:

(1) 准确数字与准确数字运算,仍为准确数字。



(2) 准确数字与可疑数字运算,则为可疑数字。

(3) 可疑数字与可疑数字运算后,为可疑数字。

(4) 保留有效数字的原则是:运算后的结果只保留一位可疑数字,其后的数字按“四舍六入五凑偶”的规则处理。

从以上规则出发,可得四则运算的法则。为表述简单明了,一是省略单位,二是在可疑数字下方加一横线。

### 1. 加减运算规则 ( $N = x \pm y$ )

加减运算中,和或差的可疑数字所占的位数,与参与运算的各数据项中可疑数字所占位数最高的相同。即运算前,先以各分量中有效位数最少的分量为准,将其他分量以比最少分量的有效位数多一位进行取舍,再进行运算。

例如:  $32.\underline{1} + 3.27\underline{6} = 32.\underline{1} + 3.28 = 35.\underline{38} = 35.\underline{4} = 3.54 \times 10$

$26.65 - 3.9264 = 26.\underline{65} - 3.926 = 22.7\underline{24} = 2.272 \times 10$

若各分量给出不确定度,则先算出合成绝对不确定度,再把各分量的位数取到和合成不确定度所在位数相同或低一位进行运算。

例如:  $N = x + y + z$

$x = 98.24 \pm 0.02, \quad y = 98.3 \pm 0.1, \quad z = 98.301 \pm 0.001$

则  $u(N) = \sqrt{u^2(x) + u^2(y) + u^2(z)} = \sqrt{0.02^2 + 0.1^2 + 0.001^2} = 0.1$

$N = x + y + z = 98.24 + 98.3 + 98.30 = 294.84$

$N$  的测量结果表示为

$N = 294.8 \pm 0.1$

### 2. 乘除运算法则

(1) 乘除运算中,其结果的有效数字的位数一般与各分量中有效位数最少的相同。运算前,各分量的舍入原则与加减法中相同。

例如:  $53.48 \times 1.05 = 56.1540 = 5.62 \times 10$

$53.48 \div 1.05 = 50.933 = 5.09 \times 10$

(2) 在乘法运算中,如果它们的最高位相乘的积大于或等于 10 时,则其结果的有效数字应比各分量中有效数字位数最少的多一位。

例如:  $53.48 \times 2.05 = 109.6340 = 1.096 \times 10^2$

在除法运算中,若被除数有效数字的位数小于或等于除数有效数字的位数,并且它的最高位的数小于除数最高位的数,则商的有效数字的位数应比被除数少一位。

例如:  $2.05 \div 53.48 = 0.0383 = 3.8 \times 10^{-2}$

(3) 若给出各分量不确定度,先以各分量中有效位数最少的为准,将其他各分量取到比它多一位,计算  $N$ 。再按误差传递公式求出其相对合成不确定度,最后算出绝对不确定度,并根据其有效数字的位数决定结果的有效数字的位数。

例如:  $N = xy/z$

$x = 5.37 \pm 0.05, \quad y = 12.1 \pm 0.1, \quad z = 10.056 \pm 0.003$

则  $N = xy/z = 5.37 \times 12.1 / 10.06 = 6.46$

$$\frac{u(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{u(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{u(y)}{y}\right)^2 + \left(\frac{u(z)}{z}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.05}{5.37}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{12.1}\right)^2 + \left(\frac{0.003}{10.056}\right)^2} = 0.012$$

$$u(N) = 6.46 \times 0.012 = 0.08$$

$N$  的结果表示为

$$N = 6.46 \pm 0.08$$

### 3. 乘方、开方运算规则

遵循乘除法的运算规则。

### 4. 函数的运算规则

函数运算结果的有效数字位数仍是由合成绝对不确定度决定的。若直接测量值没有表明不确定度,则取直接测量值的最后一位作为不确定度代入。在物理实验中,为简便规定如下:

(1) 三角函数:由角度的有效位数,即以仪器的准确度确定,如能读到  $1'$ ,一般取四位有效数字。例如:

$$\sin 30^{\circ} 00' = 0.500 0$$

$$\cos 9^{\circ} 24' = 0.986 6$$

$$\tan 45^{\circ} 05' = 1.003$$

(2) 对数函数:对数尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同。例如:

$$\lg 19.83 = 1.297 3$$

$$\lg 1.983 = 0.297 3$$

$$\lg 0.198 3 = -1.297 3$$

(3) 指数函数:把  $e^x, 10^x$  的运算结果用科学计数法表示,小数点前保留一位,小数点后面保留的位数与  $x$  在小数点后的位数相同,包括紧接小数点后的“0”。例如:

$$e^{9.24} = 1.03 \times 10^4$$

$$e^{52} = 4 \times 10^{22}$$

$$10^{6.25} = 1.78 \times 10^6$$

$$10^{0.003 5} = 1.008 1$$

### 5. 纯数学数和常数的有效位数

如  $2/3, \pi, e$  等的有效数字可以认为是无限的。在计算中一般取与各测量值位数最多的相同或多取一位。

例如:

$$L = 2\pi R, \quad R = 2.074$$

常数“2”的有效位数是无限的,  $\pi$  取 3.1416 或 3.142 均可。

## 三、有效数字尾数的舍入(修约)规则

(1) 为了使舍入的概率相等,使舍入误差具有正负相消的均等机会,以减小最后结果的舍入误差,采用“四舍六入五凑偶”的方法。

例如:将下列数值取到四位有效数字。

$$12.1347 \rightarrow 12.13$$

$$12.1361 \rightarrow 12.14$$

$$12.1350 \rightarrow 12.14$$

$$12.1450 \rightarrow 12.14$$

(2) 不允许连续舍入。在确定有效位数后,应当一次舍入得到结果,不得逐次进行舍入。

例如:将 13.454 6 取到两位有效数字。

正确做法:13.454 6 → 13

错误做法:13.454 6 → 13.455 → 13.46 → 13.5 → 14

#### 四、测量仪器的有效数字

实验原始数据都是通过一定的实验方法,在一定的实验条件下,通过一定的测量仪器获得的。一般来说,数据采集时取到产生误差的那一位,未给出误差或不明确的就读至仪器最小分度的下一位(估读)。物理实验中,常用仪器可分为下列几类:

(1) 直接给出不确定度限值,根据其不确定度的概率分布由公式  $u_{B2}(x) = \frac{a}{c}$  来计算仪器的不确定度。式中, $a$  是仪器说明书上所标明的最大误差或最大允差、公差、不确定度限值等, $c$  是一个与仪器不确定度  $u_{B2}$  的概率分布特性有关的常数,称为置信因子。

(2) 没有给出不确定度的限值,但给出了仪器的不确定度等级,则其不确定度限值  $a =$  量程值  $\times a\%$ ,其中  $a$  为不确定度的等级。例如,一指针式电流表的量程为 1 A,等级为 1 级,则其不确定度限值  $a = 1 \text{ A} \times 1\% = 0.01 \text{ A}$ ;又如,电阻箱的不确定度的限值等于示值乘以等级再加上零值电阻,因为各挡的等级不同,因此计算时应分挡计算。如果用 ZX21 型电阻箱测得一电阻的示值为  $120.3 \Omega$ ,零值电阻为  $0.02 \Omega$ ,则其不确定度限值为  $a = (100 \times 0.1\% + 20 \times 0.2\% + 0 \times 0.5\% + 0.3 \times 5\% + 0.02) \Omega = 0.18 \Omega$ 。

(3) 数字式仪表的不确定度限值通常采取  $a =$  读数  $\times$  某百分数  $+$  最末位的几个单位(具体见说明书)。

### 第三节 测量不确定度的评定

#### 一、测量不确定度的基本概念和分类

由于测量误差不可避免,使得真值也无法确定;而真值不知道,也就无法确定误差的大小,因此,实验数据处理只能求出实验的最佳估计值及其不确定度,通常把结果表示为

$$\text{测量值} = (\text{最佳估计值} \pm \text{不确定度}) \text{单位} \quad (P = )$$

$$\text{或} \quad x = (x_0 \pm u) \text{单位} \quad (P = ) \quad (2.3.1)$$

实验测量中,消除已定的系统误差后仍然存在着随机误差和未定系统误差。设被测量  $x$  的测量值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  则最佳估计值为算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.3.2)$$

测量不确定度是指由于测量误差的存在而对测量值不能肯定的程度。它是表征测量结果具有分散性的一个参数,是被测量的真值在某个量值范围的一个评定。或者说测量不确定度表示测量误差可能出现的范围,表征合理的赋予被测量的分散性。常记为  $u$ 。由此可见,不确定度与误差有区别,误差是一个理想的概念,一般不能准确知道,但不确定度反映误差存在的分布范围,即随机误差分量和未定系统误差分量综合的分布范围。式(2.3.2)测量结果是一



个范围 $[\bar{x}-u, \bar{x}+u]$ , 即待测物理量的真值以一定的概率(称为置信概率) $P$ 落在区间(称置信区间) $[\bar{x}-u, \bar{x}+u]$ 内, 对于正态分布  $P$  取 0.683。

测量不确定度的分类: 与传统的误差计算不同, 不确定度取消了“系统”与“随机”的分类方法, 而将不确定度分为以下三类:

(1) A 类标准不确定度: 在同一条条件下多次测量, 即由一系列观测结果的统计分析方法估算的不确定度, 称为 A 类不确定度。

(2) B 类标准不确定度: 用非统计方法估算的不确定度, 称为 B 类不确定度。

(3) 合成标准不确定度: 某测量值的 A 类与 B 类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度, 称为合成不确定度。

## 二、标准不确定度的评定

### 1. A 类不确定度( $u_A$ )的评定

被测量  $x$  在相同条件下独立测量  $n$  次, 用测量值的算术平均值  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  作为测量结果。它的 A 类不确定度  $u_A$  由标准偏差  $s$  乘以因子  $(t/\sqrt{n})$  来求得, 即

$$u_A(\bar{x}) = (t/\sqrt{n})s = t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3.3)$$

式中,  $t$  称为“ $t$  因子”, 它与测量次数和置信概率有关。  $s$  是由贝塞尔公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.3.4)$$

算出来的标准偏差。这是在随机误差服从或近似服从正态分布的前提下得出的。实际测量时只能进行有限次测量, 这时随机误差不服从正态分布, 而是服从  $t$  分布。  $t$  因子的数值可以根据测量次数和置信概率查表 2.3.1 得到。

表 2.3.1 不同测量次数下  $t$  因子的数值

| $n$         | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | $\infty$ |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $t_{0.683}$ | 1.32 | 1.20 | 1.14 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.00     |
| $t_{0.95}$  | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.36 | 2.31 | 2.26 | 1.96     |

由表 2.3.1 可以看出, 当测量次数较少或置信概率较高时,  $t > 1$ ; 当测量次数  $\geq 10$  且置信概率为 68.3% 时,  $t \approx 1$ 。在普通物理实验中, 为了简便, 一般取  $t = 1$ 。则有

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.3.5)$$

### 2. B 类不确定度( $u_B$ )的评定

若对某物理量  $x$  进行单次测量, 那么 B 类不确定度由测量不确定度  $u_{B1}(x)$  和仪器不确定度  $u_{B2}(x)$  两部分组成。