



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 大学物理实验

陈东生 主 编

熊慧萍 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 大学物理实验

主 编 陈东生

副主编 熊慧萍

编 写 邹乾林 张素才 张 杰 杨春沪

邢利荣 王 莹 刘世建

主 审 陈发堂



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书主要内容包括：概述，基础实验一，基础实验二，选做实验，设计性、研究性物理实验、Qrigin 软件处理实验数据等六个部分。同时，为了便于查阅一些基本的常用数据，在书后附录部分增加了物理实验常用表、高等工业学校物理实验课程教学基本要求等。本书秉承“多层次、模块化、组合式，且相互衔接”的教学原则，建立了较先进的实验教学内容与课程新体系，力求系统地反映出当前主流的实验理论、技术与方法，注重实验教学内容与课程体系的层次化、模块化相结合。同时，为培养学生的创新精神和科研能力，在综合性、设计性实验部分增添了许多新的实验内容。

本书可作为普通高等院校大学物理实验课程的教材，也可作为工程技术人员、实验人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/陈东生主编. —北京：中国电力出版社，  
2016.2

“十三五”普通高等教育本科规划教材  
ISBN 978-7-5123-8561-0

I. ①大… II. ①陈… 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 (2015) 第 277057 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 2 月第一版 2016 年 2 月北京第一次印刷

700 毫米×1000 毫米 16 开本 15 印张 366 千字

定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 目 录

## 前言

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 学生实验须知               | 1   |
| 第1章 概述               | 5   |
| 1.1 物理量的测量与误差        | 5   |
| 1.2 有效数字及其运算         | 7   |
| 1.3 测量结果与不确定度        | 10  |
| 1.4 数据处理的基本方法        | 15  |
| 1.5 习题               | 20  |
| 1.6 讨论题              | 22  |
| 第2章 基础实验一            | 24  |
| 2.1 固体密度的测定          | 24  |
| 2.2 万用表使用            | 29  |
| 2.3 杨氏弹性模量的测定        | 36  |
| 2.4 用电位差计测量电动势       | 41  |
| 2.5 惠斯通电桥            | 47  |
| 2.6 薄透镜焦距的测定         | 52  |
| 2.7 驻波               | 58  |
| 2.8 模拟法测静电场分布        | 62  |
| 第3章 基础实验二            | 70  |
| 3.1 分光计的调节和三棱镜顶角的测量  | 70  |
| 3.2 示波器的使用及音叉固有频率的测定 | 77  |
| 3.3 液体黏滞系数的测定        | 83  |
| 3.4 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线 | 85  |
| 3.5 电子荷质比的测定         | 95  |
| 3.6 霍尔效应             | 99  |
| 3.7 气体比热容比的测定        | 107 |
| 第4章 选做实验             | 113 |
| 4.1 脉冲信号测重力加速度       | 113 |
| 4.2 用三线悬盘摆测定物体的转动惯量  | 115 |
| 4.3 电表的改装和校正         | 120 |
| 4.4 用双臂电桥测低值电阻       | 126 |
| 4.5 测量超声波在空气中的传播速度   | 130 |
| 4.6 非均匀磁场的测定         | 133 |
| 4.7 用光栅测量光波波长        | 136 |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 4.8          | 牛顿环曲率半径的测定 .....             | 139        |
| 4.9          | 受迫振动和共振实验 .....              | 143        |
| 4.10         | 热学实验 .....                   | 146        |
| 4.11         | PN 结正向压降与温度关系的研究 .....       | 155        |
| 4.12         | 非电量电测 .....                  | 160        |
| 4.13         | 多普勒效应的研究和应用 .....            | 164        |
| 4.14         | 用超声光栅测定液体中的声速 .....          | 170        |
| 4.15         | 磁阻尼系数和动摩擦系数的测量 .....         | 173        |
| 4.16         | 液体电导率测量实验 .....              | 176        |
| 4.17         | 太阳能电池基本特性测定实验 .....          | 179        |
| 4.18         | 旋转液体综合实验仪 .....              | 182        |
| 4.19         | 磁悬浮动力实验 .....                | 188        |
| 4.20         | 菲涅尔透镜聚光对电池组件特性参数的影响 .....    | 199        |
| <b>第 5 章</b> | <b>设计性、研究性物理实验 .....</b>     | <b>206</b> |
| 5.1          | 利用旋转液体的形状测量重力加速度 .....       | 207        |
| 5.2          | 硅光电池特性曲线测试 .....             | 208        |
| 5.3          | 电阻温度计与不平衡电桥 .....            | 209        |
| 5.4          | 用机械振动法合成李萨如图形 .....          | 209        |
| 5.5          | 用计算机实测变音钟受击发音频谱 .....        | 210        |
| 5.6          | 利用传感器探测金属铁磁物质 .....          | 211        |
| 5.7          | 乐器(吉他)弦振动的研究 .....           | 212        |
| 5.8          | 悬链线的实验研究 .....               | 212        |
| <b>第 6 章</b> | <b>Origin 软件处理实验数据 .....</b> | <b>214</b> |
| <b>附录</b>    | <b>.....</b>                 | <b>219</b> |
| 附录 A         | 物理实验常用表 .....                | 219        |
| 附录 B         | 高等工业学校物理实验课程教学基本要求 .....     | 226        |
| 附录 C         | 物理实验备忘录 .....                | 228        |
| 附录 D         | 微安表头 .....                   | 229        |
| 附录 E         | 毫米方格纸 .....                  | 230        |
| 附录 F         | 部分习题参考答案 .....               | 231        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>                 | <b>234</b> |

## 学生实验须知

### 一、学生实验守则

为保证教学质量,确保物理实验的正常进行,特作以下规定,要求同学们自觉遵守。

(1) 实验课不得迟到。因故不能参加实验者,需事先向指导教师请假,否则按旷课处理。

(2) 实验前必须认真阅读物理实验讲义,进行充分的预习,并按要求写出预习报告。未进行预习或未按要求完成预习报告者,不得进行实验。

(3) 未经教师同意,不得任意调试、使用仪器设备。尤其是电学实验,须经指导教师检查线路之后才能接通电源,进行实验。

(4) 爱护实验室仪器设备,若有损坏必须及时报告指导教师。离开实验室前,须将实验仪器恢复原状、使之整洁,并将原始数据交给指导教师签字。交实验报告时,必须附上带有指导教师签字的原始数据,否则该实验报告无效。

(5) 实验数据不得篡改,不得互相抄袭,一经发现,该项实验成绩按不及格处理。

(6) 如果实验数据有错误或实验误差过大,实验就必须重做。重做的时间由实验室统一安排。

(7) 进入实验室必须衣冠整洁,并要注意保持实验室的整洁。实验室内不准穿拖鞋、背心,不准喧哗,不准随地吐痰,不准乱扔纸屑,不准吃零食、喝饮料。

### 二、物理实验课的主要环节

#### 1. 实验预习

认真而充分的预习是实验得以顺利进行和高质量完成实验的必要前提。预习要达到的目标是:明确实验目的、掌握实验原理、了解仪器设备及实验装置、记住主要实验步骤及注意事项。

预习分课内和课外两个阶段。在预习课之前必须看完有关的实验讲义。每一项实验讲义中的最后部分都附有预习思考题,能否正确地回答这些思考题是验证预习是否充分的一个重要判别标准,所以在预习中除了要熟悉实验装置、仪器外还必须弄懂思考题中所提出来的问题。

在预习课之前,必须按要求写出预习报告。预习报告实际上是同学们进行实验的一个备忘录。如果依据预习报告可以独立地完成实验而无须再看讲义,则该预习报告才算是合格的。预习报告不能全部照抄讲义,应该根据自己对实验的理解用简洁的语言阐述实验原理和步骤等,但也反对三言两语、草草了事。

预习报告的内容主要包括以下六个方面:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验器材。
- (4) 实验原理(写出主要原理及公式,画出原理图、线路图和光路图)。
- (5) 用简洁的语言写出实验步骤及注意事项。

以上几项写在统一的实验报告纸上,并在修改、补充后可作为实验报告的前半部分。

(6) 精心设计并用直尺画好数据记录表格。此表格用于实验时记录原始数据并在记录后交指导教师签字,要另外用纸书写,不能和预习报告写在一起。

## 2. 课内操作

操作是学习科学实验知识、培养实验技能和完成实验任务的主要环节。进入实验室后要遵守实验室规则。实验前应首先清点量具、仪器及有关器材是否完备,然后进行合理布局,对量具、仪器进行调整或按电路、光路图进行连接。要清楚了解所用仪器的性能和使用方法,牢记注意事项。实验前如有必要应请指导教师检查。实验开始,如果条件允许,可粗略定性地观察一下实验的全过程,了解数据分布情况,看有无异常现象,如果正常就可以从头按步骤进行实验测试。在实验过程中,如出现异常情况,应立即中止实验以防损坏仪器,并认真思考,分析原因,力争独立地寻找、排除故障,当然也可与指导教师讨论解决。通过实验学习探索和研究问题的方法。

不能把物理实验只看成是测量几组数据,完成任务了事。实验过程是知识积累的过程,在实验中多用一份精力,多下一份工夫,就会有多一份的收获。实验时要理论联系实际,理论指导实践。要手脑并用,边做实验边思考,仔细观察实验现象,完整记录所有数据,不可疏漏。记录数据应使用圆珠笔或钢笔,不要用铅笔。所记录的原始数据不可随意修改。若记录的数据确实有误,应在其上画线(不要涂掉)并在其旁写上正确数据。要做到如实记录实验数据及观察到的现象,有些实验还要记录室温、湿度、气压等环境条件。

操作完成后,先止动仪器,或切断电源、光源,并请指导教师审查原始数据。待指导教师签字后,再把仪器等复原,并整理摆放好。

## 3. 课后撰写实验报告

实验报告是实验完成后的书面总结,是把感性认识深化为理性认识的过程。首先应该完整地分析一下整个实验过程,实验依据的理论和物理规律是什么?通过计算、作图等数据处理,得到实验结果。写实验报告不要不动脑筋地去抄教材。因为实验教材是供做实验时阅读的,是用来指导实验的;实验报告则是向别人报告实验的原理、方法、所使用的仪器和所测得的数据等,供别人评价自己的实验结果。认真书写实验报告,不仅可以提高自己写科研报告和科学论文的水平,而且可以提高组织材料、语句表达和文字修饰的能力,这是其他理论课程所无法替代的。

物理实验报告一般应包括以下七项内容:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验器材。
- (4) 实验原理(简要叙述实验的物理思想和依据的物理定律、主要计算公式,电学和光学实验应画出相应的电路图或光路图)。
- (5) 实验步骤及注意事项。

以上几项在实验前的预习时完成。

(6) 数据表格及数据处理(把教师签过字的原始数据如实地誊写在报告的正文中,写出计算结果的主要过程及误差处理过程。进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据,最后得出结果,并要完整地表达实验结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求,画出符合



规定的图线。若上机处理数据,则要有打印结果)。

(7) 实验小结(讨论实验中遇到问题,写出自己的见解、体会和收获,提出对实验的改进意见等)。

实验报告要用统一的实验报告纸书写,字体要工整语句要简明。原始数据要附在实验报告的后面,经装订后一并交教师审阅。没有原始数据或原始数据未经指导教师签字的实验报告是无效的。

### 三、物理实验课的学习方法

#### 1. 重视实验课及其各个环节

实验课有其自身的规律和特点,因此,学习方法也应与之相适应,应与理论课有所不同。大学物理实验课是工科大学生工程教育中一系列实践教育的开端和基础。一个合格的高级工程技术人才应该既懂理论,又能动手解决实际问题。要充分认识实验课的重要性,一开始就要重视它。

物理实验课的各个环节如预习、操作、写报告等是密切相关的有机系统,每一环都要认真对待,一丝不苟。对有效数字、误差分析与估算、作图法、最小二乘法等数据处理方法的学习,要贯彻始终,逐步深入理解和掌握。对各个实验不仅要知其然,而且要知其所以然,这样才能达到举一反三、触类旁通的效果。任何轻视实验、敷衍了事、得过且过的思想和作风都是学习的大敌,都是有害的。如果那样的话,不仅学不到有关实验知识,甚至还会出现损坏仪器、危及安全的各种事故,万万不可掉以轻心。我们衷心希望同学们能创造出适合自己的科学的学习方法,培养对实验的兴趣,能主动积极地、灵活全面地学好物理实验课,提高学习效率,以收到事半功倍的学习效果。

#### 2. 注意掌握基本测量技术和实验方法

基本的测量技术和实验方法是复杂、大型、现代实验的基础,且在实际工作中会经常用到,学习时不仅要搞懂各种方法的原理、适用条件、优点和局限性,还要分析比较,加深印象,逐步熟记和掌握它们,做到能灵活运用。

常用的测量技术和实验方法,如水平、铅直、零位的调整,比较测量,放大测量,零示法,补偿法,模拟法,替代法,非电量电测,光学测量等,只有通过每个具体的实验,亲自动手、仔细观察、认真思考,才会有所体会,在此基础上,要能够设计一些简单的实验。通过这些训练,使自己将来到工作岗位上后,对一个新的实验任务,能够独立地确定实验方案,选定恰当的仪器,并在满足一定误差要求的前提下,得出可信的实验结果。

#### 3. 养成良好的实验习惯,培养科学的实验素质

实验之前,对所做的实验要清楚了解其内容,做到心中有数,有的放矢。实验前的准备工作要充分。实验中要善于观察各种现象,测量数据要细心准确。实验结束后要有一份完整而真实的实验记录,并要养成分析的习惯。

一个成功的实验与正确使用仪器密切相关。必须熟知常用仪器的使用方法和注意事项,对仪器的准确度、读数等都要清楚了解。对实验时仪器的布局、调整、连接甚至操作姿势都要有所考虑。操作时要胆大心细,要敢于动手、善于动手,逐步培养自己独立分析,寻找、排除实验中出现的各种故障的能力。能否迅速发现和排除仪器装置或实验过程中的故障,是实验能力强弱的重要表现。

实验的好坏与成败,实验的收获和能力的增长,不能单纯地看实验结果与理论值的吻合



程度。实验结果与理论值接近当然好，但更重要的是应会判断这个结果是否合理。任何一个实验结果与客观实际或理论公式都会有些差异，实验方法、实验仪器、实验环境等都会引入误差。只要结果在误差范围以内，能找出产生误差的主要因素及改进的途径，实验的收获就很大。

只有认真对待每一个实验，在每次实验中有意识地加强锻炼，才能养成良好的实验习惯，提高自己的实验素质。

#### 4. 培养手脑并用、善于思考、勇于创新的精神

实验自始至终要多动脑筋、多想几个为什么，要经常和学到的理论相联系，要能判定实验结果的可靠性与正确性。对于重点、难点要善于思考，不怕困难和失败。各实验的基本内容和重点要集中精力把它掌握透。学习实验既要踏实细致，又要坚韧不拔。实验结束后，要反思、回顾、归纳、总结。要有创新精神，在前人经验的基础上，鼓励用新的视角、新的方法进行实验研究。

尽管只能做有限的实验，通过本课程的学习，归纳总结、融会贯通、举一反三可以达到触类旁通的目的。相信经过同学们的努力，一定能把实验课上好！

## 第 1 章 概 述

### 1.1 物理量的测量与误差

#### 一、测量与单位

物理学研究物质最基本的运动形式、运动规律,这就需要定量地描述物理量与物理量之间的关系,而要获得这些关系首先必须对物理量进行精确的测量。

测量就是将被测量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的过程,在比较中得到它们之间的倍数关系,这倍数便是物理量的测量值。物理量是客观存在的,选择的单位不同,相应的测量值就有所不同。单位越大,测量值就越小,反之亦然。

1987 年我国计量局规定以国际单位制(SI 制)为国家法定计量单位,即以米(长度)、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉七个物理量作为基本单位。其他物理量单位,如速度、电流、力都可以根据物理学定义、公式、定理来导出,称为导出单位。

#### 二、直接测量与间接测量

根据获得数据的途径不同,测量可分为直接测量和间接测量两种。

##### 1. 直接测量

一些基本物理量,例如,长度、时间、质量等,可以直接和标准量进行比较以获得其量值,这种测量称为直接测量。例如,测量桌子的长度可以直接用米尺,而测量时间则可以用秒表。

##### 2. 间接测量

大多数物理量没有直接测量的量具或仪表,因此不能直接得到它的测量数据,如力、速度、电场强度等。但是这些物理量可以通过几个基本量的测量,并根据物理学的定义或定律间接地得到其量值,这种测量称为间接测量。例如,欲测量一铜制圆柱体的密度时,需要根据密度的定义式

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{1}{4}\pi d^2 h}$$

通过质量  $M$ 、直径  $d$  及高度  $h$  的测量而间接地得到密度  $\rho$  的测量值。

#### 三、测量误差及其分类

我们所测量的物理量在客观上存在一定大小,称为真值,通常用  $a$  表示。由于各种条件所限,如测量仪器的精度不够、测量原理或方法不完善、测量者感觉器官的缺陷、测量者能力不够等,在大多数情况下我们无法得到这个真值,所以每一次的测量值与真值之间总会存在一定差异,我们将测量值  $x$  与真值  $a$  之间的差  $\epsilon$  称为测量误差,即

$$\epsilon = x - a \quad (1-1-1)$$

测量误差是不可避免的,但是我们可以通过改善实验条件,选择适当的实验方案,提高测量者的实验技术、选择精度较高的测量仪器来尽量减少测量误差。实际测量中要根据测量的要求来选择测量仪器。考虑到测量成本,并非精度越高越好,应选尽量择一组精度相差不多的仪器。

由于误差的来源和性质不同,一般可将误差分为系统误差、随机误差。在实验数据中,这两类误差常常是混杂在一起出现的,下面分别讨论。

### 1. 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观测者不变)多次测量同一物理量时,其结果的符号和大小按一定规律变化的误差称为系统误差。其主要来源有以下几个方面:

- (1) 仪器误差:由于仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而造成的误差;
- (2) 方法误差:由于实验方法本身或理论的不完善而导致的误差;
- (3) 环境误差:由于外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差;

- (4) 个人误差:由于观测者的感官或测量习惯所引入的误差。

系统误差的出现一般都有较明确的原因,并且有一定的规律性,由于系统误差的存在,测量值往往总是偏大或偏小。系统误差是不能通过多次测量来消除的,但可以通过对实验过程的分析来找到原因,采取适当措施,如校准仪器、完善测量方法等来减少这种误差。

### 2. 随机误差

在同一条件下多次测量同一物理量时,在极力消除或改正一切明显的系统误差之后,测量结果仍会出现一些无规律的起伏。

这种绝对值和符号随机变化的误差,称为随机误差或偶然误差。随机误差是由于实验中许多难以确定的因素(如温度、湿度,电源、电压的起伏,空气流动、振动等的影响)而引起的。从表面上看似乎杂乱无章,但若测量次数足够多,偶然误差就显示出明显的统计规律。

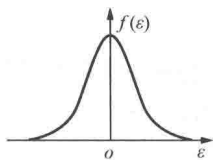


图 1-1-1 正态分布

在多数物理实验中,随机误差呈正态分布(高斯分布),如图 1-1-1 所示。图中横坐标表示随机误差,纵坐标  $f(\epsilon)$  表示该误差出现的概率。由图可知,随机误差有如下的性质:

- (1) 单峰性:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大;
- (2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相同;
- (3) 有界性:在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度;
- (4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0$$

可以证明,多次测量得到的算术平均值是待测物理量的最佳估值(数学期望值),也就是最接近真值。在一定条件下增加测量次数可以减小随机误差。但是在实际测量中,并不是测量次数越多越好。在科学研究中重复测量的次数一般取 10~20 次,而在物理实验中则取 6~10 次。

### 四、测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的量。但这三个词的含义不同,使用时应加以区别。

- (1) 精密度:它表示反复测量所得结果的离散程度。测量结果越接近,精密度越高;反之,离散程度越大,精密度越低。
- (2) 准确度:它是指测量结果与真值的偏离程度。测量结果越接近真值,准确度越高;

反之,准确度越低。

(3) **精确度**: 它是指对测量结果的综合评价。如果测量结果的离散程度小、准确程度高,则精确度较高,数据比较集中在真值附近,测量的系统误差和偶然误差都比较小;反之,如果测量结果的离散程度较大和准确程度低,则精确度较低。下面我们以打靶为例说明三者的意义和区别。

如图 1-1-2 (a) 所示,弹着点比较集中,但都偏离靶心,表示精密度较高而准确度较差;如图 1-1-2 (b) 所示,虽然弹着点比较分散,但平均值较接近中心,表示准确度较高而精密度较差;如图 1-1-2 (c) 所示,则表示精密度和准确度均较好,即精确度较高。

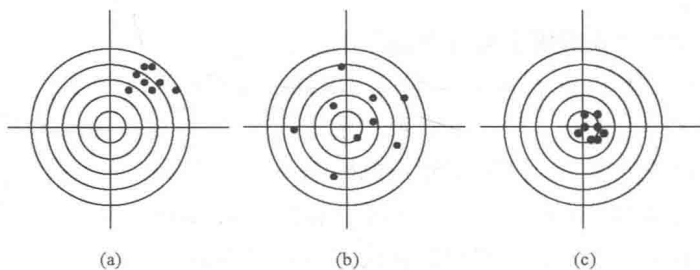


图 1-1-2 测量的精密度、准确度和精确度

(a) 精密度较高而准确度较差; (b) 准确度较高而精密度较差;

(c) 精密度和准确度较好,即精确度较高

## 五、不确定度

实验过程中存在着系统误差和随机误差,除了对实验的精确度需要进行综合评价以外,还需要对实验结果的可靠性进行准确的评价,于是就有了不确定度的概念。

**不确定度**用来表征测量结果可以信赖的程度,也就是置信度。

确定不确定度有很多方法,为寻求统一,1978 年国际计量大会 (CIPM) 委托国际计量局 (BIPM) 联合各国国家计量标准实验室一起共同研究,并制定了一个表述不确定度的指导性文件。1980 年国际计量局召开专家会议,制定出《实验不确定度的规定建议书》,规定了实验不确定度的表述。在此基础上 1992 年国际标准化组织联合其他国际组织制定出《测量不确定度表达指南 1992》,对不确定度给出了一个新的定义和计算方法。1992 年 1 月,我国开始执行国家计量规范 JJG 1027—1991《测量误差及数据处理(试行)》,规定测量结果的最终表示形式用总不确定度或相对不确定度表达。

由于不确定度的表达涉及很多领域,要真正采用不确定度来评价实验还有困难,因此在大学物理实验中我们只要求学生熟悉关于不确定度的一些基本概念,在运算上也尽量简化。

## 1.2 有效数字及其运算

### 1. 有效数字的概念

在实验中我们会遇到两类数字。一类是没有误差的准确数字,例如,公式中出现的幂次、常数(如  $\pi = 3.141\cdots$ )、常数的开方(如  $\sqrt{2} = 1.414\cdots$ )、测量次数等。另一类是测量

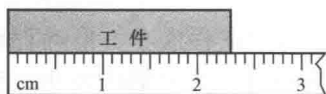


图 1-2-1 用米尺测量工件长度

值, 而测量值总是有误差的。在测量时, 首先遇到的是读数问题。例如, 用精度为 1mm 的米尺测量一个工件的长度, 如图 1-2-1 所示, 其读数可为 2.35cm。在此读数中, “2” 和 “3” 这两位数字是可以完全信赖的, 称为可靠数字。而最后一位 “5” 是估读得来的, 一般应估读到仪器最小刻度的

1/10。但若刻度过小, 则估读到最小刻度的 1/2。这个估读值因人而异, 是否可靠值得怀疑, 称为可疑数字。可疑数字虽然可疑, 但仍有参考价值, 需要保留。由此可见, 读数由可靠数字和可疑数字两部分组成。由可靠数字和一位可疑数字组成的数字称为有效数字。可靠数字的位数再加上一位可疑数字的位数称为有效数字位数。例如: 2.35cm 的有效数字为 3 位, “5” 是可疑数字。

关于有效数字的概念在理解上要注意以下五点。

(1) 有效数字位数和小数点的位置无关。例如, 2.35cm、23.5cm、0.00235cm 虽然数值不等, 但有效数字位数都是 3 位。有效数字前面的 “0” 是定位用的, 不算有效数字。

(2) 有效数字位数的多少, 反映了测量的精确程度。例如, 用不同精度的仪器测量同一量, 所得读数分别为 4.0000cm 及 4.0cm。可以看出, 第一个读数在千分位仍然是可靠的, 而后者在十分位已不可靠了, 前者测量精度要比后者高得多。

在数学上, 4.0000 和 4.0 是相等的, 但两者的物理含义不同! 在这一例子中小数点后的 “0” 都属于有效数字, 这两个读数的有效数字位数分别为 5 和 2。特别要注意的是当被测物的一端和直尺整读数刚好对齐, 或电表指针正好在刻度线位置上时, 读数后面的 “0” 不能任意丢弃, 也不能任意添加, 要由仪器的精度来确定后面应该加几个 “0”。例如, 用最小刻度 (精度) 分别为 1mm 及 1cm 的两把尺子去量同一张桌子的长度, 若桌子的一端正好和两直尺的整读数对齐, 如图 1-2-2 所示, 则两者后面 “0” 的个数不同, 读数也不同, 两者读数分别为 100.00cm 与 100.0cm。

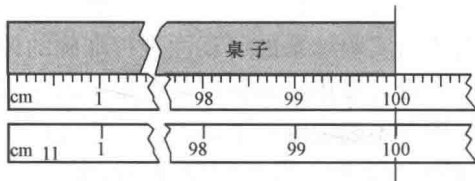


图 1-2-2 用两把尺子量同一张桌子

(3) 改换单位制时, 有效数字位数不变。例如, 3.57kg 的有效数字有三位。若改成以 g (克) 为单位不能写成 3570g, 而应写成  $3.57 \times 10^3$ g, 以 mg 为单位则应写成  $3.57 \times 10^6$ mg。

(4) 有效数字的标准书写形式。习惯上, 对任意一个读数, 在书写时都把小数点的位置放在最前面的一个可靠数字的后面, 而其数量级则用 10 的幂次表示。例如, 读数为 357g, 一般都写成  $3.57 \times 10^2$ g, 而 0.000357g 应写成  $3.57 \times 10^{-4}$ g。

(5) 常数 e、 $\pi$ 、 $\sqrt{2}$ 、1/2 等是准确数字, 其有效数字的位数可以认为是无限的。

## 2. 有效数字的运算规则

(1) 加、减运算。如

$$\begin{array}{r} 12.34\bar{5} \\ +) 1.2\bar{3} \\ \hline 13.57\bar{5} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 12.34\bar{5} \\ -) 1.2\bar{3} \\ \hline 11.11\bar{5} \end{array}$$

注意: 数字上有 “-” 记号的表示那个数字是可疑的。

所以  $12.34\bar{5} + 1.2\bar{3} = 13.5\bar{8}$        $12.34\bar{5} - 1.2\bar{3} = 11.1\bar{2}$

在运算中，同位的可疑数字和可靠数字相加、减，所得的数字也是可疑数字，只有两可靠数字相加、减，结果才是可靠数字。运算的结果只保留一位可疑数字，第二位可疑数字采用四舍五入法确定是否向前进一位。在此例中，运算结果分别写为  $13.5\bar{8}$  及  $11.1\bar{2}$ 。

那么加、减运算后，有效数字位数应如何确定？从上面加法运算例子可以看出，相加量  $12.34\bar{5}$  小数点后有效数字位数为 3 位， $1.2\bar{3}$  小数点后有效数字位数为 2 位，而运算结果  $13.5\bar{8}$ ，小数点后有效数字位数也为 2 位。由此我们得出结论：两数相加（或相减）后，小数点以后保留的位数和两个相加（或相减）量中小数点后位数最少的那个相同。

(2) 乘、除运算。如

$$\begin{array}{r} 12\ 3.\bar{4} \quad \quad \quad 4 \text{ 位有效数字} \\ \times) \quad 1.\bar{2} \quad \quad \quad 2 \text{ 位有效数字} \\ \hline 2\ 4\ 6\ \bar{8} \\ 1\ 2\ 3\ \bar{4} \\ \hline 1\ 4\ 8.\bar{0}\ \bar{8} \end{array}$$

结果为  $1.5 \times 10^2$ ，有效数字位数为 2 位。

$$\begin{array}{r} 1.1\bar{2} \\ \sqrt{1.2\ 3\ \bar{4}} \\ \underline{1\ 1\ \bar{1}} \\ \quad \bar{1}\ 3 \\ \quad \underline{1\ \bar{1}} \\ \quad \quad \bar{2}\ 4 \\ \quad \quad \underline{2\ \bar{2}} \\ \quad \quad \quad 2 \end{array}$$

结果为 1.1，有效数字位数为 2。

从以上两例可以看出，相乘（或相除）量的有效数字，一个为 4 位，另一个为 2 位，但相乘（或相除）结果只有 2 位，由此可见：两数相乘（或相除）后的有效数字位数，和两个相乘（或相除）量中有效数字位数最少的那个相同。

从有效数字的运算规则中，还可看出，如果两个乘数相乘（或相除），其中一个有效数字很少，另一个很多，可以先将有效数字很多的那个数字，用四舍五入法去掉多余的数字进行简化计算，而并不会影响计算的结果，但在简化时要比另一个数字的有效数字多一位。如

$$1.2345\bar{6} \times 1.\bar{1} = 1.2\bar{3} \times 1.\bar{1} = 1.\bar{4}$$

相加（或相减）的运算也同样可以简化，例如

$$\begin{array}{r} 12.3456\bar{7} \\ 1.2311\bar{1} \\ +) 1.\bar{2} \\ \hline 14.7767\bar{8} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{r} 12.3\bar{4} \\ 1.2\bar{3} \\ +) 1.\bar{2} \\ \hline 14.\bar{8} \end{array}$$

简化时，“ $12.3\bar{4}$ ”及“ $1.\bar{2}$ ”小数点后有效数字位数比“ $1.2$ ”小数点后有效数字多保留一位。

如果用计算器进行连续计算，运算过程中，中间数字位数可以不考虑，但最终结果的有效数字位数一定要根据运算规则进行确定，例如

$$\frac{(2.38 - 2.10) \times 5.67}{3.265} = 0.487592137$$

其中 0.487592137 是用计算器得到的结果。根据有效数字运算规则，最后结果只有两位有效数字（为什么？请同学们考虑），其值应为 0.49。

## 1.3 测量结果与不确定度

### 一、真值的估算

在大多数情况下，无法得到物理量的真值。在系统误差已基本消除或在实验过程中系统误差的影响很小的前提下，可以认为系统误差在一般情况下远小于随机误差，随机误差可以作为测量误差的度量。

由于随机误差的存在，对于某一物理量进行多次测量。每次测量值一般都是不同的。对物理量  $x$  进行  $n$  次测量，测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ，对这些测量值进行算术平均便得到物理量  $x$  的算术平均值  $\bar{x}$ ，即

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-3-1)$$

根据随机误差的统计理论，只有在系统误差基本消除的前提下，当测量次数趋于无穷大时，算术平均值才最接近物理量的真值。

### 二、直接测量结果与不确定度的估算

#### 1. A 类不确定度的估算

多次测量的特点是其离散性，A 类不确定度就是对这类离散性作出评价，它包含了随机误差及可以用统计规律估算的系统误差。当 A 类不确定度为正态分布时，测量离散程度可以用标准误差  $\sigma$  来表示，它的定义是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} \quad (1-3-2)$$

式中： $x_i$  为第  $i$  次测量值； $a$  为真值； $n$  为测量次数。

应用式 (1-3-2) 要求  $n \rightarrow \infty$ 。若测量次数是有限的，可以证明式中分母上的  $n$  应改为  $(n-1)$ 。另外，真值  $a$  是无法知道的，在实际测量中用算术平均值  $\bar{x}$  代替真值  $a$ ，于是得到

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-3-3)$$

式中： $s_x$  为  $n$  次测量中任意一次测量的标准偏差。它并不是与平均值的偏差，而是表示测量数值的离散程度，它是对测量离散程度的一种评价。从统计意义上讲，它表示测量值的随机误差落在  $-s_x \sim +s_x$  区间内的概率是  $p=0.683$ ，换句话说就是落到这一区间的可能性是 68.3%。

误差理论证明，当测量次数有限时，其算术平均值的标准偏差为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-3-4)$$



式中:  $s_x$  为平均值接近真值的程度。这说明平均值标准偏差是任意一次测量标准偏差的  $\frac{1}{\sqrt{n}}$  倍。原因是算术平均值比任意一次测量值更接近真值。

A 类不确定度  $\Delta_A$  为

$$\Delta_A = s_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-3-5)$$

## 2. B 类不确定度的估算

用其他非统计方法得到的误差,例如仪器误差、未定系统误差,用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示。所谓仪器误差是指在正确使用的前提下仪器示值的最大误差,仪器误差包括随机误差和系统误差,它是由制造厂家给出的。仪器误差通常表示为

$$\text{仪器误差} = \text{级别} \% \times \text{量程}$$

对于精度级别较低的仪表(0.5级以下),仪器误差主要是系统误差;对于级别较高的仪表(0.2级以上),仪器误差主要表现为随机误差。对于精度级别较低的仪表无法确切地给出仪表误差,常取仪表量具的最小分度值或感量的  $1/2$  作为误差限。

考虑到置信度  $P_a$ ,将仪器误差折算成 B 类不确定度为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C}$$

式中:  $C$  为一个与误差分布、置信度有关的参数。通常选择  $P_a = 0.683$ 。正态分布时选择  $C = 3$ ,均匀分布时选择  $C = \sqrt{3}$ ,在大学物理实验中所接触到的仪器大都呈均匀分布,即在测量范围内各种大小误差出现的机会相等。所以 B 类不确定度为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (P_a = 0.683) \quad (1-3-6)$$

**【例 1-1】** 电压表量程为 1V,精度级别为 0.5 级,求仪器误差。

解

$$\Delta_{\text{仪}} = 1 \times 0.5 \% = 0.005 \text{ (V)}$$

**【例 1-2】** 用螺旋测微器作单次测量,测微器的仪器误差为 0.004mm,求置信度为 0.683 时的 B 类不确定度。

解 B 类不确定度为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ (cm)}$$

## 三、不确定度的合成与测量结果的表示

### 1. 不确定度的合成

将 A 类不确定度和 B 类不确定度合成后作为整个测量的不确定度。合成时,先将两类不确定度各自平方后再求和,然后再开方,也就是按照“方和根”的方法进行。即合成后的不确定度  $\Delta$  为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-3-7)$$

$$\Delta = \sqrt{s_x^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (P_a = 0.683) \quad (1-3-8)$$

如果对置信度要求较高,使真值有较高概率地落在算术平均值所选定的区间内,则合成

不确定度可用计算式表示为

$$\Delta = \sqrt{(t_A s_{\bar{x}})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1-3-9)$$

式中： $t_A$  为和测量次数及置信度有关的一个系数，如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 不同置信度下系数  $t_A$  与测量次数  $n$  的关系

| $P_a \backslash n$ | 3    | 5    | 7    | 9    | 15   | 20   |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0.683              | 1.20 | 1.14 | 1.09 | 1.07 | 1.04 | 1.03 |
| 0.90               | 2.92 | 2.13 | 1.94 | 1.86 | 1.76 | 1.73 |
| 0.95               | 4.30 | 2.78 | 2.46 | 2.31 | 2.15 | 2.09 |
| 0.99               | 9.93 | 4.60 | 3.71 | 3.36 | 2.98 | 2.86 |

应该指出，将误差分为 A 类、B 类不确定度与将误差分为系统误差和随机误差两者不存在简单的对应关系，我们不能因为在这里将问题简化了而产生这种错觉。

从上面的分析可知，总的不确定度不仅取决于所选择的置信度，还和测量次数有关，是一个比较复杂的问题。

大学物理实验课程的主要目的是让同学们熟悉不确定度的基本概念，所以在计算上做一些简化，在以后的实验里，A 类不确定度按式 (1-3-5) 计算，B 类不确定度按式 (1-3-6) 计算，总的不确定度由式 (1-3-8) 进行计算。

## 2. 测量结果的不确定度表达

用不确定度表达的测量结果为

$$x = \bar{x} \pm \Delta \quad (\text{单位}) \quad (1-3-10)$$

式中： $\Delta$  为合成不确定度。式 (1-3-10) 的意义是待测物理量  $x$  的真值以一定的概率落入  $(x - \Delta) \sim (x + \Delta)$  的区间之中，概率的大小和不确定度  $\Delta$  的估算有关，如果  $\Delta$  较大，则真值落入该区间的概率就较高，反之亦然。

一般不确定度只保留一位有效数字，修约时“只进不舍”，测量结果应按照“四舍五入，五凑偶”的规定进行，而平均值的末尾数应和不确定度的所在位数对齐。

**【例 1-3】** 用螺旋测微器测量小钢球的直径，五次测量值分别为

$$d = 11.922, 11.923, 11.922, 11.922, 11.922(\text{mm})$$

螺旋测微器的最小分度值为 0.01mm，试得出测量结果。

解

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 d_i = \frac{1}{5} \times (11.922 + 11.923 + 11.922 + 11.922 + 11.922) = 11.922(\text{mm})$$

螺旋测微器的仪器误差为 0.005mm，所以 B 类不确定度为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003\text{mm} (P_a = 0.683)$$

A 类不确定度为

$$\begin{aligned} \Delta_A = S_d &= \frac{s_d}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(11.922 - 11.922)^2 + (11.923 - 11.922)^2 + (11.922 - 11.922)^2 + \dots}{5 \times (5-1)}} \end{aligned}$$