

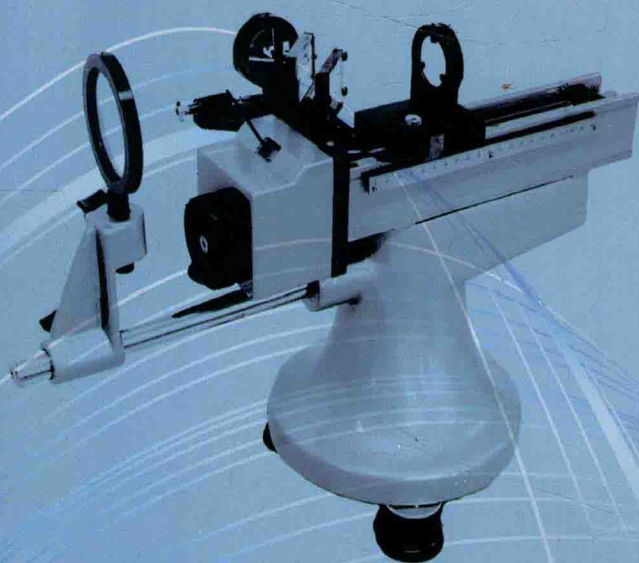


全国高等农林院校“十二五”规划教材

PHYSICS

# 大学物理实验

师文庆 李永强 主编



 中国农业出版社

全国高等农林院校“十二五”规划教材

# 大学物理实验

师文庆 李永强 主编

中国农业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 师文庆, 李永强主编. —北京:  
中国农业出版社, 2015. 3 (2015. 7 重印)

全国高等农林院校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-109-19935-4

I. ①大… II. ①师… 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 (2015) 第 006386 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 薛 波

文字编辑 李兴旺

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行  
2015 年 1 月第 1 版 2015 年 7 月北京第 2 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.5

字数: 445 千字

定价: 35.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

## 内 容 简 介

---

本教材是在各相关院校大学物理实验学时不断被缩减的背景下编写的。该教材的内容主要包括大学物理实验概论（包括误差理论、有效数字的计算、不确定度的评定及常用的数据处理方法等）、基础性实验（包括力、热、光、声、电的一些基础性实验）、提高性与近代物理实验、研究与设计性实验（主要提出一些供学生自己设计的实验内容）、计算机仿真实验（包括前面一些实验的计算机模拟、仿真软件的介绍和简单示例）、附录（包括国际单位制、一些常用的物理常量和科学型计算器的应用等通用性的物理常识）等部分，对一些特定实验的相关仪器、背景知识等在相应实验内容的后面直接以附录的形式给出。另外，还提供了几个实验报告的模板，供实验者参考。全书编写力求简洁、明了、清楚。

该教材主要适用于普通高等学校或职业技术学院的理、工、农、林等专业本、专科的物理实验教材，也可以作为从事相关科学研究、实验学习的工程技术人员或师生的相关参考书。

---

DAXUEWULISHIYAN

## 编写人员

---

主 编 师文庆 李永强

副主编 黄存友 李慎德 李长明

参 编 张海康 陈春雷 王 慧 石友彬

田秀云 谢 钦 殷 红

大学物理实验是理、工、农、林、医等各专业学生进入大学后较早学习到的一门基础实验课程，是接受系统实验方法和实验技能训练的开端。它在培养学生实验动手能力以及严谨的科学态度和工作作风、增强科学创新意识、提高综合应用能力等方面均起着十分重要的作用。本书是根据国家教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008.1)，综合编写院校多年教学经验和实际情况编写而成的。

全书共分六章。第一章为大学物理实验概论，介绍实验误差和不确定度的概念、数据处理方法和常用的实验方法；第二章为基础性实验，包括力学、热学、电磁学和光学的21个基础性实验；第三章为提高性实验；第四章为近代物理实验；第五章为研究和设计性实验；第六章为计算机仿真实验。全书在内容编排、处理和编写中，力图突出以下几点：

1. 为适应当今科学技术的发展，编写中摒弃了传统误差理论的一些概念和内容，以由国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定。考虑到目前大学物理实验的要求和各高校及高职高专大学物理实验的学时不断被缩减的实际情况，我们进行了一些简化，使学生既能理解测量不确定度的概念和掌握评定不确定度的基本方法，又不会陷入过于烦琐的数学计算之中。

2. 按章节编写，打破传统实验教材的编写格式和内容的局限，突出实验教学的特点和规律性。一方面对实验的基本理论和基本实验方法进行了较全面系统的阐述，另一方面注重了对学生实验技能的训练和实验素养的培养。

3. 按照循序渐进的原则，由浅入深，逐步提高。如实验技能训练方面，在基础实验中主要是训练学生基本实验仪器的使用，如何进行实验数据的采集，掌握处理实验数据的方法；在提高实验和近代物理实验专题中则注重实验方法、技能和综合实验能力的培养；研究与设计性专题则是训练学生初步的科学研究能力。最后，还有一部分计算机仿真实验的介绍和示例。

4. 根据不同实验的特点, 该书设计不同的实验要求, 力求体现不同实验的特殊之处, 使学生明确每个实验的核心物理思想。

本书由广东海洋大学师文庆和李永强任主编, 广东海洋大学黄存友、李慎德、李长明任副主编。参加编写的还有广东海洋大学张海康、陈春雷、王慧、石友彬、田秀云、谢钦、殷红。师文庆和李永强对全书进行核对, 并编写了第一章、第六章和附录部分。第二章由黄存友(实验八、实验十五、实验十六、实验十七、实验十八、实验十九)、陈春雷(实验一、实验十、实验十一、实验十二、实验十三)、石友彬(实验二、实验三、实验四、实验五、实验六)、田秀云(实验七、实验九、实验十四、实验二十、实验二十一)共同编写完成, 第三章和第四章由李慎德(实验二十二、实验二十三、实验二十四、实验二十五、实验三十、实验三十二、实验三十六、实验三十八)、王慧(实验二十七、实验二十九、实验三十七、实验三十九、实验四十)、张海康(实验二十六、实验二十八、实验三十一、实验三十三、实验三十四、实验三十五)共同编写完成, 第五章由李长明(实验四十一、实验四十二、实验四十三)、谢钦(实验四十四、实验四十五、实验四十六)和殷红(实验四十七、实验四十八)共同编写完成。

本书在编写过程中参阅和引用了其他一些教材中的有关内容和仪器生产厂家的说明书, 在此向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平, 书中难免有疏漏和不当之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2014年12月

## 前言

|                  |    |
|------------------|----|
| 第一章 大学物理实验概论     | 1  |
| 第一节 绪论           | 1  |
| 一、大学物理实验的地位和任务   | 1  |
| 二、大学物理实验课的基本要求   | 1  |
| 三、大学物理实验课的基本程序   | 2  |
| 四、大学物理实验课规则      | 3  |
| 第二节 物理量的测量       | 3  |
| 一、测量与单位          | 3  |
| 二、有效数字           | 3  |
| 三、有效数字的运算规则      | 4  |
| 四、测量的分类          | 5  |
| 第三节 实验误差与不确定度    | 6  |
| 一、实验误差的概念        | 6  |
| 二、实验误差的分类        | 7  |
| 三、不确定度与置信概率      | 8  |
| 第四节 不确定度的评定      | 8  |
| 一、直接测量的不确定度估算    | 9  |
| 二、间接测量的不确定度估算    | 10 |
| 三、测量结果的表述        | 11 |
| 第五节 常用的数据处理方法    | 13 |
| 一、列表法            | 13 |
| 二、作图法            | 14 |
| 三、逐差法            | 14 |
| 四、回归分析法          | 16 |
| 习题               | 17 |
| 附录 1-1 正态分布与置信概率 | 18 |
| 第二章 基础性实验        | 21 |
| 实验一 固体密度的测量      | 21 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| 附录 2-1-1 游标卡尺 .....                     | 23         |
| 附录 2-1-2 螺旋测微计 .....                    | 25         |
| 附录 2-1-3 物理天平 .....                     | 26         |
| 实验二 落球法测定液体的黏滞系数 .....                  | 28         |
| 附录 2-2-1 实验二相关数据资料 .....                | 31         |
| 实验三 液体表面张力系数的测定 .....                   | 32         |
| 附录 2-3-1 实验系统技术指标 .....                 | 35         |
| 实验四 速度和加速度的测量 .....                     | 36         |
| 附录 2-4-1 气垫导轨 .....                     | 39         |
| 实验五 利用气垫导轨验证牛顿第二定律 .....                | 40         |
| 实验六 刚体转动惯量的测定 .....                     | 43         |
| 附录 2-6-1 转动惯量仪 .....                    | 47         |
| 实验七 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量 .....                | 48         |
| 实验八 准稳态法测导热系数和比热容 .....                 | 52         |
| 实验九 空气比热容比的测量 .....                     | 58         |
| 附录 2-9-1 实验仪器使用说明 .....                 | 61         |
| 实验十 用模拟法测绘静电场 .....                     | 61         |
| 实验十一 示波器的使用 .....                       | 67         |
| 附录 2-11-1 DS1000E-EDU 数字示波器实验操作指导 ..... | 72         |
| 实验十二 铁磁材料动态磁滞回线的观测与研究 .....             | 74         |
| 实验十三 霍尔效应法测量磁感应强度 .....                 | 79         |
| 实验十四 薄透镜焦距的测量 .....                     | 84         |
| 实验十五 平行光管法测量薄透镜的焦距和分辨率 .....            | 88         |
| 实验十六 分光计的调整和棱镜角的测定 .....                | 93         |
| 实验十七 用分光计测量棱镜玻璃的折射率 .....               | 99         |
| 实验十八 光栅常数和角色散率的测量 .....                 | 102        |
| 实验十九 等厚干涉的实验研究 .....                    | 106        |
| 实验二十 用双棱镜干涉测量光波波长 .....                 | 111        |
| 实验二十一 弦线上波的传播规律的研究 .....                | 114        |
| <b>第三章 提高性实验 .....</b>                  | <b>117</b> |
| 实验二十二 声速的测量 .....                       | 117        |
| 实验二十三 多普勒效应 .....                       | 120        |
| 实验二十四 半导体热敏电阻特性的研究 .....                | 126        |
| 实验二十五 用电位差计测量温差电动势 .....                | 129        |
| 附录 3-25-1 SDC 型数字电位差计 .....             | 132        |
| 实验二十六 密立根油滴法测量电子电荷 .....                | 133        |
| 实验二十七 液晶的电光效应 .....                     | 143        |
| 实验二十八 迈克尔孙干涉仪 .....                     | 147        |
| 实验二十九 波尔共振实验 .....                      | 153        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 实验三十 单缝衍射相对光强分布的测定 .....              | 159        |
| 实验三十一 光纤传感特性的实验研究 .....               | 163        |
| <b>第四章 近代物理实验 .....</b>               | <b>174</b> |
| 实验三十二 塞曼效应 .....                      | 174        |
| 实验三十三 法拉第效应实验 .....                   | 178        |
| 实验三十四 夫兰克-赫兹实验 .....                  | 185        |
| 实验三十五 光电效应和普朗克常量的测量 .....             | 195        |
| 实验三十六 光速的测量 .....                     | 202        |
| 实验三十七 小型棱镜摄谱仪的使用 .....                | 207        |
| 实验三十八 光栅光谱仪的调节与使用 .....               | 213        |
| 附录 4-38-1 WDS 系列多功能光栅光谱仪结构与使用说明 ..... | 215        |
| 实验三十九 用超声光栅测量液体中的声速 .....             | 219        |
| 实验四十 全息照片的拍摄 .....                    | 224        |
| <b>第五章 研究、设计性实验 .....</b>             | <b>230</b> |
| 实验四十一 气垫导轨上简谐振动的实验研究 .....            | 230        |
| 实验四十二 测定晶体二极管的伏安特性曲线 .....            | 232        |
| 附录 5-42-1 电表简介 .....                  | 236        |
| 实验四十三 电表的改装 .....                     | 237        |
| 实验四十四 偏振光的研究 .....                    | 240        |
| 实验四十五 全息光栅的设计制作与检测 .....              | 244        |
| 实验四十六 光敏电阻光电特性的研究 .....               | 247        |
| 实验四十七 扫描探针显微镜实验 .....                 | 251        |
| 实验四十八 硅光电池光照伏安特性的测量与研究 .....          | 252        |
| <b>第六章 计算机仿真实验 .....</b>              | <b>253</b> |
| 一、计算机仿真大学物理实验概述 .....                 | 253        |
| 二、计算机仿真大学物理实验举例 .....                 | 257        |
| <b>附录 .....</b>                       | <b>262</b> |
| 附录一 国际单位制 (SI) .....                  | 262        |
| 附录二 常用的物理常量 .....                     | 263        |
| 附录三 科学型计算器统计功能简介 .....                | 267        |
| <b>实验报告示例 .....</b>                   | <b>269</b> |
| 实验七 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量 .....              | 269        |
| 实验九 空气比热容比的测量 .....                   | 273        |
| 实验十四 薄透镜焦距的测量 .....                   | 275        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 实验二十 用双棱镜干涉测量光波波长 .....    | 277 |
| 实验二十一 弦线上波的传播规律的研究 .....   | 279 |
| 实验四十一 气垫导轨上简谐振动的实验研究 ..... | 281 |
| 实验四十二 测定晶体二极管的伏安特性曲线 ..... | 283 |
| 主要参考文献 .....               | 285 |

# 第一章

□□□□□□□□□□□□□□□□

## 大学物理实验概论

### 第一节 绪 论

物理学是一门实验科学，其理论的建立都是以严格的物理实验为基础，并且必须经过实验的验证。物理实验对物理学的重要性是不言而喻的。它不仅对于物理学本身的发展和研究极其重要，同时也是其他学科发展和研究的重要基础。物理实验已经应用到科学技术和研究的各个领域，推动了科学技术突飞猛进的发展，也使其他学科产生了质的飞跃。因此，我们必须重视大学物理实验，学好大学物理实验这门课程。

#### 一、大学物理实验的地位和任务

大学物理实验是理、工、农、林、医等专业技术基础训练的一门必修课，在培养大学生科学实验能力的全过程中，起着重要的基础作用。本课程的任务是：

1. 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。
2. 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，使学生养成认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

#### 二、大学物理实验课的基本要求

通过本课程的学习，应达到以下三个基本要求：

1. 在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面得到严格而系统的训练，这是做好物理实验的基础。

基本知识包括实验的原理、常用仪器的结构与工作原理、实验误差的分析与不确定度的评定、实验结果的表述方法以及对实验结果做出正确的分析与判断。

基本方法包括如何根据实验目的和要求确定实验的思路和方案，如何选择和正确使用仪器，如何减小实验误差，如何采用一些特殊方法来获得较准确的实验结果等。

基本技能包括仪器的正确使用（如仪器的零位调节、水平/铅直调节、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、读数、定标、校准等），根据给定的电路图进行正确接线，检查与排除简单的电路故障，初步设计实验以及查阅文献和自学的能力、总结表达的能力等。

2. 初步培养学生独立进行科学实验研究的能力。学生在完成实验大纲所安排实验内容的同时，不仅要学习其中的理论知识和掌握实验技能，更重要的是要在实验中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。

在实验中往往会遇到一些意想不到的问题，这些问题虽然可能不是实验研究的主要对

象,但也不应轻易放过。这常常是提高分析问题、解决问题能力的好机会。要注意观察,及时记录,认真分析,必要时可以进行深入的研究。

3. 养成实事求是的科学态度和积极创新的科学精神。在物理实验课中严格规定记录实验数据时不准用铅笔,不能用涂改液,误记或与预想结果不一致的数据更改时一定要写明理由,任何弄虚作假、篡改甚至伪造实验数据的行为都是绝对不允许的,这些都是为了培养学生实事求是的良好习惯。实际上,与预想不一致的实验现象和数据不仅不应随便舍弃,还应特别重视,它可能是某个新发现的开端。历史上许多新的理论都是由于旧理论无法解释某些实验现象而建立起来的。因此,实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是相联系的。在实验中,只要认真完成整个过程中的每一个环节,一定会发现许多问题,而在解决这些问题的过程中,不仅可以学会课堂和书本上学不到的知识,更能培养学生求实的态度和积极创新的精神。

### 三、大学物理实验课的基本程序

大学物理实验是在教师的指导下,由学生通过阅读实验教材和相关的参考资料,经过准备、操作、思考而完成的一种教学活动。完成一个大学物理实验一般要经历三个阶段:

#### 1. 课前预习

课前预习是做好实验的前提。通过预习,要求搞清本次实验的目的、要求、原理和实验过程的基本思路。如观察什么现象,测量哪些物理量,用什么仪器,怎样测量,可能得到什么样的结果等。在此基础上写出预习报告(可作为实验报告的前半部分,一定要认真撰写)。预习报告的内容包括实验名称、目的、所用仪器、原理、实验的主要步骤和数据记录表格。实验原理要用自己的语言简明扼要地说明实验所依据的原理和必要的公式以及电路图、光路图等,切不可简单照抄实验讲义。

#### 2. 实验操作与记录

(1) 进入实验室后,要自觉遵守实验室规则,务必注意各种安全守则。

(2) 认真听取教师的讲解和提出的要求。操作前必须先认识和熟悉仪器,了解仪器的使用方法及注意事项,然后再进行正确的调整和使用。

(3) 实验时要按步骤进行,能较好地控制实验的物理过程和物理现象,认真观察现象,正确记录数据。

#### 3. 写实验报告

实验报告是把实验的目的、方法、过程、结果等记录下来,经过整理,写成的书面汇报。实验报告一般包括以下内容:

(1) 实验名称 写出具体的实验名称。

(2) 实验目的 简述实验目的。

(3) 实验器材 仪器的名称、规格和型号,主要材料。

(4) 实验原理 用自己的语言简明扼要地写明实验的原理、一些重要的公式,以及一些基本的原理图、光路图、电路图等。

(5) 实验步骤 根据实验内容和仪器的操作规程,简要写出实验的具体步骤。

(6) 实验数据记录 包括与实验有关的环境条件(如大气压强、环境温度等)和原始数据记录。不同的实验需要用不同的表格,记录实验数据一定要认真、准确,不能随意涂改实验数据。

(7) 实验数据处理 包括对平均值、不确定度的评定(要求写出主要的计算公式和必要

的计算步骤)、实验曲线及实验结果的正确表达。

(8) 误差分析和问题讨论 找出影响实验结果的主要因素,从而获得减小误差的有效措施。问题讨论包括回答思考题、实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释、对实验装置和实验方法的改进意见及实验的心得体会等。

## 四、大学物理实验课规则

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行,特制定以下大学物理实验课规则:

1. 学生在实验课前必须认真预习,明确实验目的和要求,了解实验的基本原理、方法、步骤,熟悉仪器设备的操作规程及注意事项,懂得实验的安全常识。实验预习报告经老师检查合格后,才能进行实验。未预习或预习未达到要求的,不准参加本次实验。
2. 按时上实验课,不得随意缺课,进入实验室要遵守实验室的各项规章制度。
3. 实验时应保持安静,精神要集中,操作要认真,并要如实地做好实验记录。实验中途不得擅自离开实验室。
4. 要爱护仪器设备,不得随意从他组乱搬仪器,不准擅自拆卸仪器,仪器发生故障应立即报告老师。实验过程中必须注意安全。
5. 禁止在实验室吸烟,打闹,随地吐痰,乱扔纸屑,以及做与实验无关的活动,保持室内安静、整洁。
6. 做完实验后,将实验仪器、桌椅还原,实验数据经老师检查合格并签字后方可离开实验室。
7. 实验报告在下次实验前,由班干部收齐后统一交给实验老师。

## 第二节 物理量的测量

### 一、测量与单位

测量,是将待测的物理量直接或间接地与另一个同类的,被选作为标准的量进行比较,其倍数即为该物理量的量值,而被选定的标准量则为该物理量的单位。一个物理量测量的结果由数值和单位组成。

根据《中华人民共和国计量法》,规定采用以国际单位制(SI)为基础的中华人民共和国法定计量单位,即以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)为基本单位,其他物理量的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

### 二、有效数字

为了正确反映测量的精度,引入有效数字的概念,我们把测量结果中可靠的几位数字加上存疑的一位数字统称为测量结果的有效数字。

从仪器上读出的数字,通常都应该尽可能地估计到仪器最小刻度的下一位。如用最小分度是毫米的刻度尺测量某物体的长度,发现物体长度比 123 mm 长约半个刻度,则测量结果可以记为 123.5 mm。在这四位数字中,123 这三位数字是准确读得的,因此是可靠的,称

之为可靠数字。而小数点后的 5 这一位是估计出来的，若换另一人来读数，也可能估计成 4 或 6，我们把末尾的这一位估计的数字称为存疑数字（或估计数字）。可见，测量得到的数值总是由前面几位（或一位）可靠数字和最后一位存疑数字组成，我们把这样的数字称为有效数字，其位数称为有效数字的位数。如上例中有效数字的位数为 4 位。

如果采用最小分度为厘米的刻度尺测量上述物体的长度，发现物体长度比 12 cm 长约三分之一刻度，则测量结果可以记为 12.3 cm。其中最后一位 3 是估读的，此时有效数字的位数为 3 位。

显然，有效数字的位数可反映测量的精确程度，有效数字的位数愈多，测量的精确度愈高。有效数字的位数不能因单位换算而改变。如上例中的读数用毫米、厘米、米的不同单位表示分别为 123.5 mm、12.35 cm、0.123 5 m，它们都是四位有效数字。对于有些物理量，用某一单位表述时可能会由于数据太大或太少，不便于表示。如上述数据如用微米表示，如果直接写成 123 500 μm，123 500 μm 是六位有效数字，这就改变了原物理量的有效数字位数。科学计数法可以解决以上问题。

科学计数法是将一个物理量写成  $\pm a \times 10^n$  的形式，其中的  $a$  是在  $1 \leq a < 10$  范围内的一个数， $a$  的位数就是有效数字的位数， $n$  是整数。通过科学计数法，以上物理量用毫米、厘米、米、微米表示分别为  $1.235 \times 10^2$  mm、 $1.235 \times 10^1$  cm、 $1.235 \times 10^{-1}$  m、 $1.235 \times 10^5$  μm，这四种表示中，其中的  $a$  都相同，所以有效数字的位数不变。可以看出，用科学计数法表示物理量不会改变其有效数字的位数。

对于一般分度式仪表，必须估读到最小刻度的下一位，即使该位的估读值为“0”，也必须读出。有些仪器的分度较窄，而指针较宽，有些仪器的最小分度为 0.5、0.2，这要根据实际情况，估读到最小刻度的五分之一，甚至二分之一即可。对于游标分度的仪表，如游标卡尺、分光仪等，这些仪器读数时判断主副尺的刻线对齐就相当于估读，即估读位就是游标的最小分度值所在的那一位。

三、有效数字的运算规则

在进行实验数据的处理时，有效数字运算的结果仍为有效数字，其有效位数取决于其不确定度（后面介绍），在不要求计算不确定度时，可按可靠数字与存疑数字，或存疑数字与存疑数字运算，其结果为可疑数字的原则，粗略确定结果的有效位数。具体分析如下。

1. 有效数字的舍入问题

有效数字运算时，经常涉及数据尾数的舍入问题。由于“四舍五入”的规则是“见五就入”，这会使 1 到 9 的九个数字中，入的机会大于舍的机会，因而不合理的。现在通用的规则是：对末尾多余的数字，小于 5 则舍，大于 5 则入，等于 5 则把所保留的末位凑成偶数。即“4 舍 6 入 5 凑偶”。表 1-1 中是六个数保留 3 位有效数字的结果及说明。

表 1-1 有效数字“4 舍 6 入 5 凑偶”示例

|                |        |        |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 原数据            | 1.23 4 | 1.23 5 | 1.23 6 | 1.24 4 | 1.24 5 | 1.24 6 |
| 保留 3 位有效数字后的结果 | 1.23   | 1.24   | 1.24   | 1.24   | 1.24   | 1.25   |
| 说明             | 4 舍    | 5 凑偶   | 6 入    | 4 舍    | 5 凑偶   | 6 入    |

## 2. 加、减运算

例如  $82.\underline{6}+4.\underline{567}=87.\underline{167}$ ,  $82.\underline{6}-4.\underline{567}=78.\underline{033}$

运算结果分别为  $87.\underline{2}$  和  $78.\underline{0}$ 。可见，两个或两个以上的有效数字相加、相减时，所得结果的可疑数字位置，与所有参与运算的各量中可疑数字位置最高的一个相同。

## 3. 乘、除运算

例如  $12.\underline{6}\times2.\underline{7}=34.\underline{02}$ ,  $876.\underline{2}\div24.\underline{5}=35.\underline{763}$

运算结果应分别为  $34$  和  $35.\underline{8}$ 。由此可见，有效数字相乘、相除时，其结果的有效位数与参与运算的各数字中有效位数最少者相同。

## 4. 函数运算

诸如乘方、开方、三角函数和自然对数等函数运算结果的有效位数，一般可取与自变量的有效位数相同。如  $\ln 13.24=2.583$ ,  $\sin 20^{\circ}6'=0.3437$  ( $20^{\circ}6'$  可看作  $20^{\circ}06'$ , 4 位有效数字)。

## 5. 混合运算

在进行混合运算时，必须注意以下三点：

(1) 在运算关系中的常数，如  $\pi$ 、 $\sqrt{2}$ 、2、 $1/2$  等都是准确数，不影响结果的有效位数。但对于其中的无理数，如  $\pi$ 、 $\sqrt{2}$  等，在具体运算时，所取位数应足够多（至少应比结果的位数多取一位），以免引入舍入误差。

(2) 在混合运算中，如果是单纯的乘除运算，运算结果的有效位数一般取参加运算的诸数中位数最少者的位数。如果同时含有加减运算，则应特别注意加减运算对结果有效位数的影响。例如算式：

$$(23.\underline{45}-22.\underline{67})\times2345\div123.\underline{4}=0.78\times2345\div123.\underline{4}=(1.83\times10^3)\div123.\underline{4}=15$$

从参加运算的四个数据看，似乎应保留四位有效数字，实际上只能保留两位。如果在上面的式子中以  $(23.\underline{45}-0.67)$  代替因子  $(23.45-22.67)$ ，虽然 0.67 只有两位有效数字，但差值为四位，结果有效数字的位数也发生了变化。计算结果如下：

$$(23.\underline{45}-0.67)\times2345\div123.\underline{4}=22.78\times2345\div123.\underline{4}=(5.342\times10^4)\div123.\underline{4}=433$$

再比如  $\frac{860.\underline{0}-326.\underline{0}}{0.128-0.08360}=\frac{534.\underline{0}}{0.044}=1.2\times10^4$ ，计算结果取两位有效数字。

(3) 运算的中间结果应多保留一至两位可疑数字，以避免舍入误差的积累。

由以上有效数字的运算规律可见，对不同准确度的数字进行运算时，其结果的有效数字位数应取得恰当。取少了会带来附加误差，降低结果的精确程度；取多了，从表面上看似精度很高，实际上毫无意义，反而给人以错误的印象和带来不必要的烦琐。

## 四、测量的分类

测量按照获取数据的方式不同，可分为直接测量和间接测量两种。

**直接测量**是指直接用仪器测量出待测物理量的量值，是将待测物理量直接与标准量（量具或仪表）进行比较而直接读数获取数据。如用米尺测量物体的长度，用秒表测量时间，用电表测量电流、电压等，这些都是直接测量。

但对大多数的物理量来说，是不能用仪器直接测得的，而是需要先直接测量一些与之相关的物理量，然后由待测量与这些量之间的数学关系，经运算后才能得到结果，这种测量叫作**间接测量**。如用单摆法测量重力加速度，可先测出摆长  $L$  和摆的周期  $T$ ，然

后由  $g=4\pi^2 L/T^2$  计算而得到。显然,直接测量是间接测量的基础。

随着实验技术的发展,很多原来只能间接测量的物理量,都可以转化为直接测量。例如速度、磁感应强度等的测量,现代传感技术、CCD 技术和计算机等技术的快速发展使得更多的物理量都能进行直接测量。

测量按照多次重复测量的情况不同,又可分为等精度测量和不等精度测量。

对某一物理量  $x$ ,我们重复测量  $n$  次,它的值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。如果每次测量的条件都是相同的,则我们没有理由认为所测量的值中某一个值更精确些,或不精确些,这就是等精度测量。比如,我们在完全相同的条件下,用米尺测量某物体的长度若干次,这就是等精度测量。

如果每次测量的条件是不同的,如实验者、仪器、方法、环境等不同,那么各次测量值的精确度是不同的,这就是不等精度测量。比如用游标卡尺和螺旋测微计测量同一钢丝的直径,显然两种仪器测量得到的值,其精确度是不同的,这就是不等精度测量。

一般来讲,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某些条件的变化对结果影响不大时,可视为等精度测量。所以绝大部分情况下对同一个物理量的多次测量都可认为是等精度测量。对于不等精度测量,由于数据处理比较繁杂,一般情况下不采用。

### 第三节 实验误差与不确定度

#### 一、实验误差的概念

任何测量都不可能做到绝对准确,这是由于所用的测量器具都不可能做到完美无缺;实验者的操作、调整和读数,不可能做到绝对无偏差;环境条件的变化,诸如温度的波动、机械的振动、电磁辐射的随机变化等,也将不可避免地会造成各种干扰。这就使得测量的结果必然存在一定的误差。

如果我们用  $a$  表示被测量物理量在一定客观条件下的真实大小,称为该物理量的真值。真值是被测量具有的、客观存在的量值,如一个三角形的三个内角之和。如果用  $x$  表示实际测量得到的测量值,那么  $x$  与  $a$  间的差,就称为测量误差。我们把绝对差值

$$\delta_x = |x - a| \quad (1-1)$$

定义为测量的绝对误差,而把相对差值

$$E = \frac{\delta_x}{a} \times 100\% \quad (1-2)$$

定义为测量的相对误差。显然,绝对误差与相对误差的大小,反映了测量结果的准确程度。

在比较两个测量结果的优劣时,不仅要看绝对误差的大小,而且还要看被测量本身的大小,用相对误差来评价测量结果更确切。例如,在测量两个物体的长度时,假设两个物体的真实长度分别为 23.50 cm 和 2.35 cm,测量得到的结果分别为 23.53 cm 和 2.32 cm,两个测量的绝对误差相同,都是 0.03 cm。但两个测量的相对误差不同,分别为  $\frac{|23.53-23.50|}{23.50} \times 100\% = 0.13\%$  和

$\frac{|2.32-2.35|}{2.35} \times 100\% = 1.3\%$ ,说明测量的准确度不相同。第一个测量的相对误差为 0.13%,而第二个测量的相对误差为 1.3%,显然,第一个测量要比第二个测量的准确度高。可见,在表示一个测量结果的准确度时,不仅要写出测量的绝对误差,而且还要写出测量的相对误差。