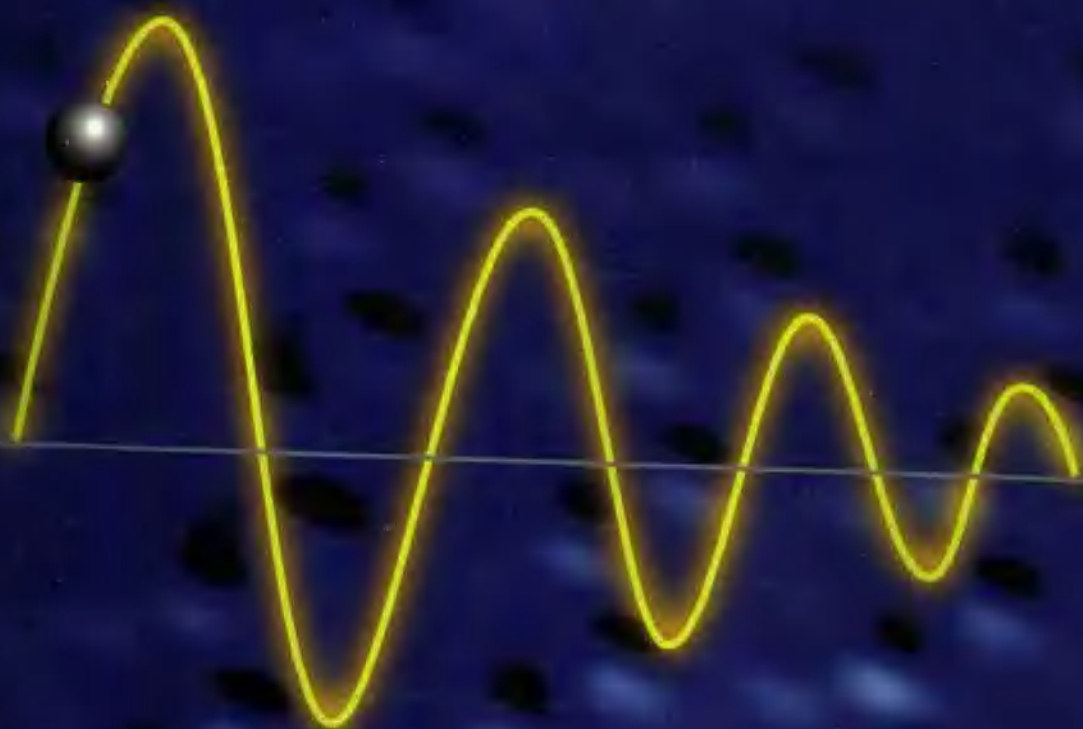


高等学校教材



# 物理实验

张旭峰 王志斌 王秉仁 编



兵器工业出版社

# 物 理 实 验

张旭峰 王志斌 王秉仁 编

兵器工业出版社

## 内 容 简 介

本书是华北工学院物理实验室全体教师多年教学实践经验和教学成果的结晶。全书共分八章:测量误差和数据处理基本知识、力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理及综合性应用性物理实验、设计性实验、基本实验方法与测量方法。每个实验简要介绍了实验原理、实验仪器装置、实验内容并附有思考题,为教学工作和学生学习提供了方便。

本书可作为高等学校工科大学物理实验教材,也可以作为中学物理教师教学和其他读者的自学参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

物理实验/张旭峰,王志斌,王秉仁编. —北京:兵器工业出版社, 2002.8

ISBN 7-80172-069-5

I. 物… II. ①张…②王…③王… III. 物理学—实验 IV. O41-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 063774 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:李翠兰

社 址:100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:兵器工业出版社印刷厂

版 次:2002 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1-3550

封面设计:底晓娟

责任校对:张旭峰

责任印制:莫丽珠

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.25

字 数:371.3 千字

定 价:20.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

## 前 言

本书是按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合华北工学院实际，在以前自编《物理实验讲义》及《物理实验》的基础上改编而成。

近 10 年来，我们根据教学内容改革的需要，研制了多种物理实验仪器，改造了若干实验，增添了几个综合型、应用型实验，在一定程度上更新、充实了本书的内容。

本书对所选各实验的实验原理和实验方法都作了扼要的论述，并介绍了它们在生产、科研和生活实践中的应用概况。

本书是近 20 年来在华北工学院物理实验室工作过的几十位教师和实验技术人员集体智慧的结晶和辛勤劳动的成果。以前自编的《物理实验讲义》已经多次改编，并持续使用了 20 年。参加这次改编工作的有张旭峰(编写第一章、第二章和第三章，并负责全书统稿)、王志斌(编写第四章、第七章和第八章)、王秉仁(编写第五章和第六章)。

在编写本书过程中我们参考了兄弟院校的物理实验教材和教学参考书，在此深表谢意。

本书在教学内容改革方面所作的一些探讨，难免会有不妥之处，请读者批评指正。

编者  
2002. 4

# 目 录

|                     |      |
|---------------------|------|
| 绪论                  | (1)  |
| 第一章 测量误差和数据处理基本知识   | (4)  |
| 1.1 测量误差            | (4)  |
| 1.2 发现和消除系统误差的方法    | (6)  |
| 1.3 对实验随机误差处理的基本知识  | (7)  |
| 1.4 直接测量的实验数据处理     | (9)  |
| 1.5 间接测量的结果和不确定度的综合 | (11) |
| 1.6 作图法处理实验数据       | (13) |
| 1.7 最小二乘法直线拟合       | (14) |
| 1.8 我国的法定计量单位       | (16) |
| 第二章 力学实验            | (20) |
| 2.1 长度测量器具          | (20) |
| 2.2 质量测量仪器          | (27) |
| 2.3 时间测量仪器          | (29) |
| 实验 1 测固体的平均密度       | (32) |
| 实验 2 自由落体运动实验       | (36) |
| 实验 3 单摆法测重力加速度      | (40) |
| 实验 4 三线扭摆法测转动惯量     | (43) |
| 实验 5 拉伸法测弹性模量       | (47) |
| 实验 6 气垫导轨上的实验       | (55) |
| 第三章 热学实验            | (60) |
| 3.1 量热器             | (60) |
| 3.2 温度测量仪器          | (61) |
| 3.3 干湿球温度计          | (64) |
| 3.4 气压计             | (64) |
| 实验 7 测定冰的溶解热        | (66) |
| 实验 8 固体比热容的测定       | (71) |
| 实验 9 落球法测液体的动力粘度    | (74) |
| 第四章 电磁学实验           | (78) |
| 4.1 电源              | (78) |

|            |                            |              |
|------------|----------------------------|--------------|
| 4.2        | 标准电池                       | (79)         |
| 4.3        | 电阻器                        | (80)         |
| 4.4        | 开关                         | (84)         |
| 4.5        | 直流电表                       | (84)         |
| 4.6        | 数字电表                       | (91)         |
| 4.7        | 万用电表                       | (91)         |
| 实验 10      | 改装电表及其校准                   | (98)         |
| 实验 11      | 用惠斯通电桥测电阻                  | (103)        |
| 实验 12      | 用双臂电桥测低电阻                  | (108)        |
| 实验 13      | 用滑线式电位差计测电池电动势及内阻          | (115)        |
| 实验 14      | 用箱式电位差计测量热电偶的温差电动势         | (121)        |
| 实验 15      | 用电子式冲击电流计测互感               | (126)        |
| 实验 16      | 用冲击电流计测量电容和高电阻             | (130)        |
| 实验 17      | 模拟示波器基础实验                  | (133)        |
| 实验 18      | 模拟法测绘静电场分布                 | (142)        |
| 实验 19      | 用霍尔元件测磁场                   | (148)        |
| 实验 20      | 用示波器测软磁材料的磁滞回线             | (151)        |
| <b>第五章</b> | <b>光学实验</b>                | <b>(154)</b> |
| 5.1        | 光学仪器的使用和注意事项               | (154)        |
| 5.2        | 消视差调节                      | (155)        |
| 5.3        | 常用光源                       | (155)        |
| 5.4        | 分光仪的调节和使用                  | (157)        |
| 5.5        | 读数显微镜                      | (163)        |
| 实验 21      | 薄透镜焦距的测量                   | (165)        |
| 实验 22      | 等厚干涉实验                     | (171)        |
| 实验 23      | 测三棱镜材料的折射率                 | (175)        |
| 实验 24      | 光栅实验                       | (180)        |
| 实验 25      | 起偏、检偏及旋光实验                 | (185)        |
| 实验 26      | 迈克尔逊干涉仪                    | (191)        |
| <b>第六章</b> | <b>近代物理及综合性、应用性物理实验</b>    | <b>(198)</b> |
| 实验 27      | 光电效应法测定普朗克常数               | (198)        |
| 实验 28      | 密立根油滴实验                    | (204)        |
| 实验 29      | 光谱的拍摄及谱线波长的确定              | (209)        |
| 实验 30      | 全息照相实验                     | (215)        |
| 实验 31      | 用数字存储示波器观测 $RLC$ 串联电路的暂态过程 | (222)        |
| 实验 32      | 衍射法测双缝间距                   | (227)        |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <b>第七章 设计性实验</b> .....           | (230) |
| 实验 33 将微安表改装为多量程电流表并进行初校 .....   | (230) |
| 实验 34 用 UJ31 型电位差计测量毫安表的内阻 ..... | (230) |
| 实验 35 用 UJ31 型电位差计校准毫安表 .....    | (230) |
| 实验 36 用劈尖膜干涉测量细丝直径 .....         | (231) |
| <b>第八章 基本实验方法与测量方法</b> .....     | (232) |
| 8.1 比较法 .....                    | (232) |
| 8.2 补偿法 .....                    | (233) |
| 8.3 放大法 .....                    | (233) |
| 8.4 模拟法 .....                    | (234) |
| 8.5 转换测量法 .....                  | (234) |

# 绪 论

## 一、物理实验的意义

物理学研究的是自然界物质运动的最基本最普遍的形式。物理学是自然科学和工程技术的基础。物理学本身是一门以实验为基础的科学。物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,找出各物理量之间的数量关系及它们变化的规律,从而建立物理定律,进而形成物理理论,再不断地回到实验中去经受检验。如果出现了新的实验事实与该理论相违背,那么便需要修正原有的物理定律和物理理论。因此我们说,物理实验是物理理论的基础,它是理论正确与否的“试金石”。

实验是人们研究自然规律、改造自然的基本手段之一。科学越进步,科学实验就显得越重要。任何一种新技术、新材料、新工艺和新产品,都必须通过科学实验才能获得。作为研究自然界物质运动最普遍形式的手段的物理实验,在科学实验中充当着“铺路石”的作用。

目前,人类社会已进入高科技时代。高科技是知识与技术的集成,而高科技的竞争最终是人才的竞争。培养高质量的人才,是当今世界共同面临的课题。社会需要既有丰富理论知识,又有扎实的实验技能的全面发展的人才。基于上述原因,人们愈来愈感到在理工科院校加强对学生进行物理实验训练的重要性。于是,物理实验就从原来的物理课程中分离出来,形成了一门独立的课程。《大学物理实验》和《大学物理》两门课程具有同等的重要地位。理论课是进行物理实验必要的基础,在实验课过程中,通过理论的运用与现象的观测分析,又可进一步加深对物理理论的理解。

## 二、物理实验课程的目的与任务

物理实验课是对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的基础课程。它将使学生得到系统实验方法和实验技能的训练,了解科学实验的主要过程和基本方法,为日后的科学实验活动奠定初步基础。同时它的思想方法、数学方法及分析问题与解决问题的方法也将对学生智力发展大有裨益。整个教学活动的进行也将有助于学生的作风、态度及品德的培养和素质的提高。

物理实验课程的具体任务是:

1. 通过对实验现象的观测分析,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。
2. 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:
  - (1) 自行阅读实验教材,做好实验前的准备;
  - (2) 熟悉常用仪器的原理与性能,正确使用常用仪器;
  - (3) 正确测量、记录与处理实验数据,撰写合格的实验报告;
  - (4) 运用物理学理论知识对实验现象和结果进行分析与判断;
  - (5) 能够完成简单的设计性实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具备理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公物的优良品德。

### 三、怎样做好物理实验

#### 1. 物理实验课的三个重要环节

上实验课与听理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手、独立地完成实验任务。通常,一次完整的实验课要经历三个阶段。

(1) 预习 预习是做实验的准备工作。首先应通过阅读实验教材明确本次实验所要达到的目的,以此为出发点,弄明白实验所依据的理论,所采用的实验方法;搞清控制实验过程的关键与必要的实验条件;明确实验内容和步骤;知道应如何选择、安排和调整仪器;预料实验过程中可能出现的问题等。在此基础上写出实验预习报告。

预习的好坏至关重要,它将决定能否主动顺利地进行实验。

(2) 实验 ①认真听讲,进一步明确实验原理和条件,懂得为何如此安排实验、如此规定操作步骤,观察教师如何使用仪器,清楚实验中的注意事项。②认真调节好仪器,仔细观察实验现象,准确测量实验数据。③正确地记录数据:正确地设计出数据表格,正确地判断数据的科学性,如实地清楚地记录下全部原始实验数据和必要的环境条件、仪器的名称、型号与规格、实验现象等。

实验环节是物理实验课的中心,内容丰富而生动。要求学生主动研究、积极探索;充分地发挥主观能动性,才能获得良好的效果。

(3) 实验报告 实验报告是实验结果的文字报道,是实验过程的总结。写好实验报告要求掌握正确的数据处理方法;有根据地进行误差分析;正确地表示出测量结果,并对结果作出合乎实际的说明与讨论并回答思考题等。

书写出一份字迹清楚、版面整洁、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确的实验报告是对学生的基本要求。

#### 2. 严格基本训练,培养实验技能

扎实的基础实验训练是成才的基本功。“冰冻三尺,非一日之寒”,系统严格的训练凝结在每次实验每个环节、每个步骤之中。实验中应多观察、多动手、多分析、多判断,反对机械操作、反对侥幸心理、反对盲目地进行实验。

实验不能仅满足于测几个数据。要充分利用实践机会来培养自己的动手能力,可以通过重复实验、改变实验条件或参量数值、或做对比分析来判断测量结果的正确性;遇到困难或数据超差,不要一味埋怨仪器不好或简单重做一遍或产生急躁心理,而要认真分析,找出原因,纠正错误把实验做好。

物理实验课中要做的实验大都是经典的传统实验,集中了许多科学实验的训练内容,每个实验都包括一些具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。实验以后,应进行必要的归纳总结,提高自己驾驭知识的能力。例如归纳出不同实验中体现出来的基本实验方法——比较法、放大法、补偿法、模拟法及转换测量法,或结合对每个实验的分析、讨论及对思考题的探讨,搞清楚某种实验方法在具体运用时的优点及条件等。

### 四、怎样写实验报告

为更好地达到教学目的,完成教学任务,我们将实验报告分为预习报告、实验记录和课后报告三部分。实验报告一律要求用统一的实验报告纸书写。

## 1. 预习报告的内容

### (1) 实验名称

### (2) 实验目的、要求

(3) 实验原理它包括:简要的实验理论依据,实验方法,主要计算公式及公式中各量的意义,关键的电路图、光路图和实验装置示意图,注意事项。有些实验还要求写出自拟的实验方案,自己设计的实验线路,选择的仪器等。

### (4) 实验步骤 扼要地说明实验的内容,关键步骤及操作要点。

### (5) 数据表格

### (6) 预习思考题

预习报告在上课前交教师审阅,经教师认可后方得做实验。

## 2. 实验记录

这一部分在实验课上完成。内容包括:

(1) 记录实验主要仪器的编号和型号规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于日后必要时对实验进行复查。

(2) 实验内容与观测记录实验现象。

(3) 数据记录,应做到整洁清晰而有条理,最好采用列表法。在标题栏内要注明单位。数据不得任意涂改。确实测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样。不要任意划去。

实验结果出来后要让教师签字认可,方得将仪器整理还原。

## 3. 课后报告

(1) 数据处理 包括计算公式,简单计算过程,作图,不确定度估算,最后测量结果等。

(2) 完成教师指定的思考题。

(3) 附注:对实验中出现的说明和讨论,以及实验心得或建议等。

预习报告、实验记录和课后报告构成一份完整的实验报告。

## 五、遵守实验室规则

为保证实验正常进行,以及培养严肃认真的学习作风和良好的实验工作习惯,学生应遵守以下实验规则:

1. 学生应在课表规定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动,须经实验室同意。

2. 学生在每次实验前对排定要做的实验应进行预习,并作预习报告。

3. 进入实验室后,应检查自己使用的仪器是否有短缺或损坏,若发现问题,应及时向教师或实验员提出。

4. 实验前应细心观察仪器构造,操作时应谨慎细心,严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验,线路接好后先经教师或实验员检查,全部无误后方可接通电源,以免发生意外。

5. 实验不合格或请假缺课的学生,由教师登记,通知学生在规定时间内补做。

6. 实验时应注意保持实验室整洁、干净。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐。

7. 实验课时严禁大声喧哗、随意乱搬仪器等。

8. 如有损坏仪器应及时报告教师或实验员,并填写损坏单,说明损坏原因。赔偿办法根据实验室规定处理。

# 第一章 测量误差和数据处理基本知识

本章介绍测量误差和实验数据处理的一些初步知识,这些知识是进行科学实验时所必需的最基本的。对这些知识的详尽论述需要概率论与数理统计等若干后续课程的基础理论。本书只直接引用所需的一些基本概念、必要的计算公式和有关的结论,希望学生在物理实验过程中通过实际应用逐步理解其物理意义和初步掌握其正确用法。对这门知识的进一步掌握有待后续的有关理论课程和其它实践性课程去逐步解决。

## 1.1 测量误差

### 一、测量

为确定待测量的量值而进行的实验过程称之为测量。可将测量分为以下两大类:

#### 1. 直接测量

不必对与待测量有函数关系的其他量进行测量,而能直接得到该待测量的量值的测量过程,称为直接测量。如用天平称物体的质量、用电桥测电阻器的电阻值等。

#### 2. 间接测量

通过对与待测量有函数关系的其他量的测量,以得到该待测量之量值的测量过程,称之为间接测量。如需测一球的密度,先分别测量该球的质量  $m$  和直径  $d$ ,然后按公式  $\rho = 6m/(\pi d^3)$  算出该球的密度  $\rho$ 。

任何测量结果都难免含有误差。分析测量过程中可能产生哪些误差,如何减少或消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计等,这些工作是在科学实验中必做的。因此,我们必须了解误差的基本概念、主要误差的基本特性和对误差范围进行估计的初步知识。

### 二、误差定义

#### 1. 绝对误差

某量之测量值的绝对误差定义为该量的测量值与其客观真实值之差,即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值} \quad (1-1)$$

上式中的真值,是在测量时该量本身客观存在的真实量值。对此,有两点值得特别注意:

其一,由于任何事物都处在发展变化之中,上述定义式中之真值应是该量被测时它所具有的真值。

其二,在测量过程中,被测量的真值往往因受测量仪器的作用而发生变化,这种变化有时不容忽视,应设法避免。

由于上述定义式中选择了被测量的真值作为客观标准,故该误差是这个测量值的真误差。

在实际工作中需用到“修正值”概念,其定义为:

$$\text{修正值} = \text{真值} - \text{测量值} \quad (1.2)$$

则

$$\text{真值} = \text{测量值} + \text{修正值}$$

## 2. 相对误差

为便于描述和比较不同测量结果的准确程度而引用相对误差概念,其定义为:

$$\text{相对误差} = \text{绝对误差} \div \text{真值} \quad (1.3)$$

## 3. 引用误差

引用误差是一种简化和实用的相对误差,常用于表示计量器具准确程度的等级。其定义为:仪器示值的绝对误差与其测量范围的上限值(或量程)之比值,以百分数形式表示。

## 三、误差的主要来源

误差主要来自以下几个方面:

1. 设备误差 由于所用仪器本身的示值不准而带来的误差。
2. 环境误差 由于测量过程中周围环境状况与要求的标准状态不一致所引起的误差。
3. 调整误差 测量时没有将仪器调整到其正确使用状态所造成的误差。
4. 方法误差 测量方法不完善而导致的误差。

## 四、误差分类

根据误差的性质,人们将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

### 1. 系统误差

在偏离规定的测量条件下多次重复测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定;或在该测量条件改变时按某一确定的规律变化的误差,统称之为系统误差。

(1) 已定系统误差 其符号和绝对值已知或其变化规律已经确定的系统误差,称之为已定系统误差。已定系统误差可以通过修正消除。

(2) 未定系统误差 其符号和绝对值未知的系统误差,称之为未定系统误差。实验时,应设法估计该误差的范围。

### 2. 随机误差

在实际测量条件下,多次重复测量同一被测量时,误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化着的误差,称之为随机误差。

### 3. 粗大误差

超出规定条件下之预期范围的误差,称之为粗大误差,有时简称为粗差。

在处理数据时,含有粗大误差的测量值会显著歪曲测量结果,所以允许剔除少量含有这种粗大误差的异常测值。

应该注意误差的性质可以在一定的条件下相互转化。在实际测量中,人们往往利用这一特性以减小实验结果的误差。例如,当实验条件稳定且系统误差可掌握时,就尽量保持在相同条件下做实验,以便能通过修正消除该系统误差;当系统误差未能掌握时,就可以采取“随机化技术”,如按某种方式改变某一测量条件使系统误差随机化,使其有一部分能被抵偿掉。

## 五、准确度和不确定度概念

(1) 精密度 表示测量结果之随机误差大小的程度。

(2) 正确度 表示测量结果之系统误差大小的程度。

(3) 准确度 表示测量结果与真值的一致程度,是测量结果中的系统误差和随机误差的综合反映。

(4) 不确定度 表征被测量的真值所处量值范围的评定。用测量结果附近的一个范围表示,它表示被测量的真值难以确定的一个大约的数值范围。

测量结果的不确定度一般包含好几个分量,这些分量可以按估计其数值的方法归并成 A、B 两类:

① A 类不确定度分量是用统计方法计算的分量,根据测量结果的统计分布进行估算,可用估计的标准偏差  $s$  表示。

② B 类不确定度分量是用其他方法来估算的分量,可用等效的标准偏差  $u$ , 作为其估计值。

## 1.2 发现和消除系统误差的方法

对仪器进行计量校准是发现其系统误差最行之有效的办法,同时还可以确定其修正值。此外,从改善测量方法和实验数据处理方法入手,也可以找到多种发现和消除系统误差的方法,其中有些方法既简单且行之有效,摘要如下:

### 一、理论分析法

分析实验方法所依据的理论公式是否严密或实验条件与该理论公式所要求的条件是否符合,来检查是否存在系统误差。如根据单摆周期的近似公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$  测重力加速度  $g$ , 则从理论分析可知该结果含有多项系统误差,且从理论上可逐项推导出近似的修正公式。

### 二、替换法

用测量仪器测量某一被测量之后,用标准量代替被测量,在完全相同的测量条件下调节标准量使仪器重新回到刚才测该被测量时相同的状况。此时,和标准量的量值对比可检验仪器是否存在系统误差,并可用来修正测量结果。如用电桥测某一电阻,得到一个测值  $R$ 。使电桥所有旋扭的位置保持不变,用标准电阻箱代替被测电阻,调节电阻箱的阻值使电桥重新达到平衡。此时电阻箱的示值即可作为该被测电阻的准确值,而它与电桥示值  $R$  之差就可作为电桥该测值的修正值。

### 三、异号法

改变某一测量条件使误差在测量过程中一次出现为正值,另一次为负值,取两次测值的平均值以消除或减小该误差。如用冲击电流计测互感时,实验中改变冲击电流的方向进行测量,可以消除测量回路中的温差电动势对测量结果的不良影响。

### 四、交换法

如欲检查天平是否等臂,称量时可将被测物与砝码交换位置称量,可发现并消除天平不等臂误差对该测量结果的影响。

## 五、实验数据分析法

如将实验测量数据按测量的时间顺序排列,观察其数值的变化规律,可发现随时间有规律地变化的系统误差。

## 六、仪器自检法

在测量某一被测量时,有目的地改变实验的某项参数,观察测量结果的变化规律。如用冲击电流计测某一电容时,选取不同的充电电压进行测量,考查测量结果的变化规律,以检查冲击电流计是否存在随电量而变的系统误差。

## 七、半周据观测法

对于周期性变化的误差,可每隔半个周期进行偶数次观测。如分光仪刻度盘偏心带来的测角误差以  $360^\circ$  为周期变化,测量时采用相距  $180^\circ$  的两个游标同时进行测量。则被测的角位移值等于两个游标测出的角位移的平均值。因此,这种测量法又称为对径测量法。

## 八、随机化处理法

如用读数显微镜测微小间距。由于读数显微镜的丝杠在加工时存在随机误差,即有些螺距偏大,有些螺距偏小,而且这种偏差的分布是随机的。对于任一给定的丝杠,在其任一给定位置,螺距的偏差是固定的,但一般是未知的,即属于未定系统误差。采用丝杠的不同部位测量具有不同的系统误差,由于这种系统误差的分布具有随机性,所以取这些测值的平均值时,这些系统误差将彼此抵消一部分。

# 1.3 对实验随机误差处理的基本知识

## 一、随机误差的分布

实验中随机误差的出现对于单次测量而言是没有确定的规律的,误差的符号和绝对值的大小都不能预知。但对同一被测量多次重复测量时,则能发现这些测值的随机误差是按一定的统计规律分布的。在普通物理实验中出现的随机误差,其中有许多近似地服从“正态分布”的规律。这种分布的主要特点是:

1. 绝对值小的误差出现的机会多,绝对值大的误差出现的机会少。在正常情况下绝对值很大的误差几乎不会出现,即分布具有“单峰性”和“有界性”。

2. 正的误差和负的误差出现的机会大致相等,而且显示出分布具有“对称性”,重复测量的次数愈多,这种对称性愈显著。

因此,对一个稳定的被测量多次重复测量取其算术平均值时,这类随机误差将彼此大致抵消。

## 二、标准偏差 $\sigma$

标准偏差  $\sigma$  是描述服从正态分布的误差其数值分布特征的一个重要参数。在科学实验中,

常用标准偏差作为表征测量结果的不确定度的一个评价指标。处理等精度测量的一组实验数据时,可用贝塞尔公式来计算标准偏差的估计值  $s$ 。计算过程如下:

设对某一被测量进行了  $n$  次独立的重复测量,得到  $n$  个测值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

1. 求出这组测值的算术平均值  $\bar{x}$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \sum x_i / n \quad (1-4)$$

在本书的数学表达式中一般省略掉求和号上的求和范围。

2. 本组测值中任一测值与平均值之差称之为残余误差,简称为残差,用  $\Delta x_i$  表示。逐个求出各个残差

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-5)$$

3. 用贝塞尔公式计算标准偏差的估计值  $s$

$$s = \sqrt{\sum (\Delta x_i)^2 / (n-1)} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \quad (1-6)$$

人们往往将  $s$  也称之为标准偏差。从上式可见,若  $s$  值大,则表明这组测值彼此分散的程度大,即精密度低。

注意:若被测量的量值是稳定的,则  $s$  表征的是所用测量仪器的重复性,即仪器的精密度。若所用测量仪器足够精密,而被测量是变动的,则  $s$  表征的是被测量的波动性或稳定性,即反映被测量值波动大小的程度。

### 三、平均值的标准偏差

在上述测量过程中若被测量的量值是稳定的,可以证明上述算术平均值  $\bar{x}$  的标准偏差  $s_{\bar{x}}$  为

$$s_{\bar{x}} = s / \sqrt{n} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / [n(n-1)]} \quad (1-7)$$

由此亦可见,在这种情况下适当增加重复测量的次数  $n$  可以有效地减小所得算术平均值的随机误差。

### 四、粗大误差的发现和剔除

有时在一组测量数据中会出现有一两个测值明显地偏离其他测值。这种“离群值”的出现可能是由于测量本身随机性的客观反映,这应该说是正常的;但也可能是由于某种未被发现的异常干扰或操作失误造成的,这种测值属于异常值,应该剔除。在剔除异常值时难免会有错判的时候,即把并非异常值当作异常值剔除了。应该使这种错判的可能性(概率)减小至某一程度。用  $\alpha$  表示将正常值错判为异常值的概率,一般取  $\alpha = 0.01$ ,它表示错判的可能性小于或等于 1%。判别异常值的方法有多种,本书仅介绍格拉布斯(Grabbs)准则,判断的步骤如下:

在求出全组测值的各个残差和标准偏差  $s$  的基础上,挑选出其中绝对值最大的残差,设为  $\Delta x_i$ ,再根据选定的  $\alpha$  值和这组测值的个数  $n$  (即重复测量的次数  $n$ ) 从表 1-1 中查出相应的  $G_{\alpha}(n)$  的值,若  $|\Delta x_i|$  满足不等式

$$|\Delta x_i| > G_{\alpha}(n) \cdot s \quad (1-8)$$

则与这个  $\Delta x_i$  值对应的测值  $x_i$  为异常值,应予剔除。

表 I-1  $\alpha=0.01$  时的  $G_\alpha(n)$  值表

| $n$ | $G_\alpha(n)$ | $n$ | $G_\alpha(n)$ | $n$ | $G_\alpha(n)$ | $n$ | $G_\alpha(n)$ | $n$ | $G_\alpha(n)$ |
|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
| 3   | 1.15          | 8   | 2.22          | 13  | 2.61          | 18  | 2.82          | 23  | 2.96          |
| 4   | 1.49          | 9   | 2.32          | 14  | 2.66          | 19  | 2.85          | 24  | 2.99          |
| 5   | 1.75          | 10  | 2.41          | 15  | 2.70          | 20  | 2.88          | 25  | 3.01          |
| 6   | 1.91          | 11  | 2.48          | 16  | 2.74          | 21  | 2.91          | 30  | 3.10          |
| 7   | 2.10          | 12  | 2.55          | 17  | 2.78          | 22  | 2.94          | 40  | 3.24          |

## 1.4 直接测量的实验数据处理

测量的直接目的是要确定被测量的量值。由于测量误差难以完全避免,测量值总会含有误差,因此实验数据处理的主要任务之一是要充分利用实测数据和有关参数,尽可能发现并消除已定系统误差,对未能消除的误差进行估计,得出测量结果的不确定度,以确定被测量的量值范围。

### 一、测量仪器的误差 $\Delta_{\text{仪}}$

在普通物理实验中经常用“仪器误差” $\Delta_{\text{仪}}$  来表示仪表器具的示值误差限或基本误差限,这些数据一般由生产厂家参照国家标准规定的计量仪表、器具的准确度等级或允许误差范围给出。直接测量结果的 B 类不确定度分量  $u$  可近似地用下式计算:

$$u = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (1-9)$$

当  $\Delta_{\text{仪}}$  未知时,也可以根据仪表、器具的分度值近似地用下式计算:

$$u = \text{分度值} / \sqrt{12} \quad (1-9')$$

$u$  是估计值, $u$  的有效数字一般只保留一位。直接测量值其读数的有效数字最后一位的数位一般应与  $u$  的有效数字所在的数位相同。例如分度值为 1mm 的米尺。可近似地认为

$$u = 1 / \sqrt{12} \text{mm} \approx 0.3 \text{mm}$$

则用该米尺测量时,读数的最后一位应在毫米的十分位,即读数时若以毫米为单位,则读数应读到小数点后面一位。

### 二、直接测量实验数据处理

设对某一待测量值  $X$  重复测量了  $n$  次,得到  $n$  个测值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 数据处理的简要步骤如下:

1. 按(1-4)式求出这组测值的算术平均值  $\bar{x}$

$$\bar{x} = \sum x_i / n$$

2. 按(1-5)式求出各个测值的残差  $\Delta x_i$

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

3. 按(1-6)式求出标准偏差估计值  $s$

$$s = \sqrt{\sum (\Delta x_i)^2 / (n-1)}$$

$s$  值一般只保留一位有效数字,最多保留两位。

4. 检查是否含有已定系统误差,若有,则找出来并修正测量结果;检查是否含有异常值,若有,则予以剔除,并根据剩下的测值重算  $\bar{x}$ 、 $\Delta x_i$ 、 $s$  等值。

5. 按(1-7)式求出  $\bar{x}$  的标准偏差估计值  $s_{\bar{x}}$

$$s_{\bar{x}} = s / \sqrt{n}$$

$s_{\bar{x}}$  值也只保留一位或两位有效数字,并用  $s_{\bar{x}}$  表征测量结果的 A 类不确定度分量。

6. 按(1-9)式或(1-9')式估计测量结果的 B 类不确定度分量  $u$

$$u = \Delta x / \sqrt{3}$$

或  $u = \text{分度值} / \sqrt{12}$

7. 求出测量结果的总不确定度  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{s_{\bar{x}}^2 + u^2} \quad (1-10)$$

$\sigma$  值也是保留一位或两位有效数字。

8. 写出测量结果的表达式

测量结果 = 平均值  $\pm$  不确定度

或用数学符号式表示

$$(\text{测量结果}) X = \bar{x} \pm \sigma \quad (1-11)$$

式中  $\bar{x}$  与  $\sigma$  其有效数字的末位一般应对齐。这个表达式的物理意义是:该被测量的真值  $X$  处在区间  $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$  内的概率约为 0.68。

### 三、单次测量结果的表达法

在多种情况下对某些待测量往往只需测一次;在某些特殊情况下对某待测量只能测一次,于是就以该次的测量值  $x$  表示该被测量  $X$  的量值,其不确定度  $\sigma$  就用估算出的 B 类不确定度分量  $u$  来粗略地表示

$$\sigma \approx u = \Delta x / \sqrt{3}$$

测量结果仍用下式表示

$$X = x \pm \sigma$$

### 四、用电子计算器求标准偏差

现在很多种电子计算器都具有统计计算的功能,用来计算平均值和标准偏差十分方便。以 SHARP/EL-506H 型计算器为例。

设用千分尺测一钢球直径 6 次,以 cm 为单位,得数据如下:

$$d_1 = 1.2761$$

$$d_4 = 1.2774$$

$$d_2 = 1.2772$$

$$d_5 = 1.2764$$

$$d_3 = 1.2783$$

$$d_6 = 1.2768$$

1. 按计算器的“SD”功能键使它处于统计计算功能状态,SD 功能键是第二功能键,使用时