

面向21世纪高校教材

周 岚 ◆ 主编

# 大学物理实验



苏州大学出版社

面向 21 世纪高校教材

# 大学物理实验

主 编 周 岚  
副主编 陈庆琉 朱路扬

苏州大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/周岚主编. —苏州: 苏州大学出版社,  
2006.2  
面向 21 世纪高校教材  
ISBN 7-81090-600-3

I. 大… II. 周… III. 物理学—实验—高等学校  
—教材 IV. O4—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004858 号

### 大学物理实验

周 岚 主编

责任编辑 周建兰

---

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市干将东路 200 号 邮编: 215021)

宜兴文化印刷厂印装

(地址: 宜兴市南漕镇 邮编: 214217)

---

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 19.75 字数 489 千

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-81090-600-3/O·27(课) 定价: 28.00 元

---

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换  
苏州大学出版社营销部 电话: 0512-67258835

# 前 言

为加强高校教学工作,提高教学质量,教育部和省教育厅分别启动了“高等学校教育质量和教学改革工程”。在这一工程中,对基础课实验教学的改革提出了明确的要求。为此,扬州大学物理教学实验中心对“大学物理实验”课程中原有实验内容进行筛选、改造、整合、更新,减少验证性实验的比例,增加有启发性并能激发学生创造思维的综合性设计性实验,实验教学内容变化较大。本教材是在原来的物理实验、普通物理实验、物理实验(1、2、3级)讲义、2004年和2005年大学物理实验讲义的基础上改编而成的,它集中反映了近五年来我们在大学物理实验课程改革方面所取得的成果。

本教材根据学生的认知规律和我校学生的实际水平,按基础训练实验、基本实验、综合性提高实验和设计性研究实验的顺序来编排。在数据处理方面,对少学时的医、农科的同学,要求用标准偏差分析处理问题;对理、工科的同学,要求采用国际通用的不确定度概念分析问题和进行数据处理;对物理专业的同学,则进一步要求采用格罗布斯判据来判别、剔除坏数据,对测量结果进行分析评定,对非等精度测量值综合处理等,加强了误差理论的教学,提高学生分析、处理数据的能力。在实验内容方面,引进了一些反映科技新成果的实验,有些实验增加了更为灵活的内容,有的引入计算机处理或采集数据,还有要求学生用计算机模拟物理过程的实验。在教材的最后,增加了实验总结一章,系统地将贯穿在各个实验中常用的实验方法、测量方法、测量仪器和测量条件的选择、实验中仪器的基本调整与操作技术、设计性实验的基本要求和实验过程等知识作一介绍和总结,使学生能够将每个实验中零散地获得的知识连成知识网络,从而促进学生创新能力的培养和锻炼,达到培养和提高学生科学实验素质、实验设计思想、实验方法和实验创新意识的目的。

在实验教学的过程中,针对我校是综合性大学,理、工、农、医各学科对人才培养目标不同,设置了不同平台的实验。学生可根据各自学科对物理实验的教学要求和教学课时的不同,选择不同平台的实验。各平台实验均设有必做实验和选做实验,每个实验又有基本必做内容和扩展性的选做内容,以达到因材施教和开阔学生眼界、拓宽学生思路的目的。各平台必做实验按难易程度进行编排,依照认知规律,对学生进行阶梯式的强化训练,在学生的实验能力达到一定要求后,再开设各类综合设计性提高实验,让学生根据自己的专业、能力、兴趣和爱好,上网自由预约选做自己感兴趣的实验。大学物理实行开放式教学和网络化实验教学管理。

本教材是我们长期实验教学的结晶,凝聚了很多教师和实验技术人员的智慧和辛勤劳动。本教材由周岚主编,陈庆琉、朱路扬副主编,参加编写工作的有李锦英、樊莉、朱蜀梅、唐

多权、李俊来、周杭、华宇、朱桂萍、毛翔宇、张金波、杜微、朱新梅、王文秀、韩玖荣、冯宜信、陶玉荣、祝霞、倪静也对教材的修订提出了许多宝贵意见。

本教材编写过程中,我们参考了有关物理实验的教材,在此向有关作者谨致谢意.我们也向我校历年来众多物理实验任课教师和实验技术人员表示衷心的感谢.

十分感谢扬州大学给予的大力支持.

限于我们的水平,加上时间仓促,教材中难免有许多不足乃至错误之处,欢迎广大师生给予批评指正.

编 者

2005 年 11 月于扬州

# 目 录

## 第一章 绪论

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一节 物理实验课的目的和任务          | (1)  |
| 第二节 物理实验课的基本程序           | (2)  |
| 第三节 测量与误差                | (3)  |
| 第四节 测量的不确定度、误差估算和测量结果的表示 | (5)  |
| 第五节 测量的误差估算和结果表示         | (13) |
| 第六节 有效数字及其运算             | (17) |
| 第七节 数据处理的基本方法            | (20) |
| 第八节 用 Excel 软件进行数据处理     | (27) |
| 练习题                      | (30) |

## 第二章 基础训练实验

|                   |      |
|-------------------|------|
| 实验一 物体密度的测定       | (32) |
| 实验二 万用电表的使用       | (38) |
| 实验三 电阻的测量和伏安特性的研究 | (42) |
| 实验四 热电偶温度计定标      | (50) |
| 实验五 电表的改装和校正      | (52) |
| 实验六 薄透镜焦距的测定      | (56) |

## 第三章 基本实验(一)

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 实验七 单摆设计            | (61)  |
| 实验八 用直流电桥测量电阻       | (65)  |
| 实验九 液体粘滞系数的测定       | (69)  |
| 实验十 模拟法描绘静电场        | (72)  |
| 实验十一 液体表面张力系数的测定    | (76)  |
| 实验十二 转动惯量的测定        | (81)  |
| 实验十三 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量 | (84)  |
| 实验十四 冰的熔解热的测定       | (89)  |
| 实验十五 牛顿环和劈尖干涉       | (92)  |
| 实验十六 示波器的使用         | (96)  |
| 实验十七 分光计的使用 用光栅测波长  | (106) |
| 实验十八 弦振动的研究         | (111) |
| 实验十九 光具组基点的测定       | (114) |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 实验二十 棱镜玻璃折射率的测定····· | (116) |
|----------------------|-------|

## 第四章 基本实验(二)

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 实验二十一 多普勒效应的研究与应用·····       | (121) |
| 实验二十二 霍尔效应及磁场的测定·····        | (126) |
| 实验二十三 密立根油滴实验·····           | (130) |
| 实验二十四 导热系数的测定·····           | (136) |
| 实验二十五 磁场的测绘·····             | (140) |
| 实验二十六 单色仪的定标·····            | (143) |
| 实验二十七 动力学共振法测定材料的杨氏弹性模量····· | (148) |
| 实验二十八 迈克耳孙干涉仪的调节与使用·····     | (152) |
| 实验二十九 用旋光仪测糖溶液浓度·····        | (158) |
| 实验三十 偏振现象的观测与研究·····         | (162) |
| 实验三十一 黑白摄影与放大·····           | (169) |
| 实验三十二 用双棱镜干涉测钠光波长·····       | (175) |

## 第五章 综合性提高实验

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 实验三十三 全息照相·····           | (179) |
| 实验三十四 用波尔共振仪研究受迫振动·····   | (182) |
| 实验三十五 非平衡电桥的原理与应用·····    | (189) |
| 实验三十六 音频信号光纤传输技术·····     | (191) |
| 实验三十七 电路故障分析实验·····       | (199) |
| 实验三十八 电阻应变片灵敏度的测定·····    | (204) |
| 实验三十九 等厚干涉的研究与应用·····     | (207) |
| 实验四十 单缝衍射的光强分布和缝宽的测定····· | (212) |
| 实验四十一 光电效应法测普朗克常数·····    | (216) |
| 实验四十二 夫兰克-赫兹实验·····       | (221) |
| 实验四十三 LRC 电路的稳态特性·····    | (227) |
| 实验四十四 LRC 电路的暂态过程研究·····  | (234) |
| 实验四十五 LRC 电路谐振特性的研究·····  | (240) |

## 第六章 设计性及研究性实验

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 实验四十六 万用电表的设计与制作·····  | (247) |
| 实验四十七 碰撞打靶研究抛体运动·····  | (254) |
| 实验四十八 导体电阻温度系数的测量····· | (257) |
| 实验四十九 黑匣子·····         | (263) |
| 实验五十 测量棱镜材料的色散曲线·····  | (264) |
| 实验五十一 电磁测量中的示波法·····   | (265) |
| 实验五十二 物理过程的计算机模拟·····  | (269) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 实验五十三 微波光学实验——布拉格衍射····· | (278) |
| <b>第七章 实验总结</b>          |       |
| 第一节 物理实验的基本方法和测量方法·····  | (283) |
| 第二节 测量仪器和测量条件的选择·····    | (288) |
| 第三节 物理实验中的基本调整与操作技术····· | (292) |
| 第四节 设计性实验简介·····         | (295) |
| 附表·····                  | (299) |
| 参考文献·····                | (307) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 物理实验课的目的和任务

物理实验是对高等院校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础实验课程,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是培养和提高学生科学实验素质,重点突出实验设计思想、方法培养和实验创新意识训练的重要基础。

物理学是一门实验科学,物理实验是物理学的基础。已经建立起来的物理定理,如果和新的实验事实发生矛盾,就必须对原来的定理加以修正或改造,这样,物理学就获得了新的发展。正是因为物理实验如此重要,而且它有自身的特点和一套实验知识、实验方法等,所以在高等院校里开设物理理论课的同时,还开设了物理实验课,这两门课程既有密切的联系,但是也有明显的区别,它们反映了人们研究物理学的两个不同的侧面。因此物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位。

本课程内容在中学物理及实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验思想、原理及方法,得到科学实验素质的训练,从而初步掌握科学实验的主要过程与基本实验技巧和方法,尤其是实验创新思维能力的入门,为后续课程的学习和工作奠定良好的实验基础。

本课程的具体任务是:

(1) 通过对物理实验现象的观测、分析和对物理量的测量,学习物理实验思想、原理及方法,加深对物理实验设计创新思维的理解。

(2) 培养与提高学生科学实验的基本素质,其中包括:

① 能够通过阅读实验教材或资料(含网上资源),基本掌握实验原理及方法,为进行实验作准备。

② 能够借助实验材料和仪器说明书,在老师指导下,正确使用常用仪器及辅助设备,完成各层次的实验内容,尤其是对实验设计思想和实验方法的理解。

③ 能够融合实验原理、思想、方法及相关的物理理论知识对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法。

④ 能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。

⑤ 能够完成符合规范要求的设计性内容的实验。

⑥ 在老师指导下,能够查阅有关方面的科技文献,用实验原理、方法进行基础的具有研究性或创意性内容的实验,并写出相应研究型实验的论文。

(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,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的良好品德。

## 第二节 物理实验课的基本程序

要上好一次物理实验课,同学们要做好以下三个环节的工作。

### 一、实验前的预习

为了在规定的时间内高质量地完成实验,学生实验前必须认真预习。预习时要认真阅读实验教材和相关的参考资料(含网上资源),弄清楚这次实验的目的、要求、原理、操作步骤以及要注意的问题,写出预习报告(预习报告是实验报告的一部分)。预习报告应包含以下内容:实验目的、实验原理、实验仪器、实验步骤、实验中的原始数据记录表格、实验注意事项、预习题及回答等,要有测量公式、电路图、光路图,以备上课时使用。

### 二、实验的观测和记录

1. 进入实验室要遵守有关规章制度,爱护仪器设备,注意安全,动手前要先了解仪器的性能、规格、使用方法和操作规程,不要乱动仪器。

2. 安装和调整仪器要仔细认真,一丝不苟。还要注意满足测量公式所要求的实验条件。在整个实验过程中要手脑并用。一方面,要多动脑筋,头脑中要有明确的物理图像,对实验原理有比较透彻的理解,对实验中的各种现象要仔细观测,想一想是否合乎物理规律,有没有道理。在进行某些操作之前,先想想可能会出现什么结果,然后再看看是否和预期的结果相符合。如果不相符合,要分析原因,找出改进措施,绝不能拼凑数据。

3. 要注意培养和锻炼自己的动手能力,实验操作要做到准确、熟练、快速,如在力学实验中的调水平、调铅垂;电学实验中的接电路;光学实验中的共轴调节,都是一些最基本的操作,应该熟练掌握。动手能力还表现在能否及时发现并排除实验中可能遇到的某些故障。要注意学习教师是如何判断仪器故障,如何修复仪器的(指可能当场修复的情况)。

4. 要认真记录原始数据(就是在测量时直接从仪器上读出的数据),边测量边记录,要记得准确、清楚、有次序。

5. 做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到教师认可签字后,再将仪器归整复原好,并做好清洁工作,填写好实验运行记录本后,方可离开实验室。对不合理的数据,需补做或重做实验。教师对有抄袭嫌疑的数据,要责成学生重做实验。

### 三、实验报告的书写

实验报告是对实验的全面总结。实验报告要求文理通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。准确地、完整而简明地表述实验报告中各部分内容,是实验课训练的重要方面之一。实验报告可直接在预习报告的基础上完成。它包括实验名称、实验目的、实验器材、实验原理(用自己的语言简明扼要地阐述实验原理,写出主要公式,画出装置原理图、电路图或光路图)、实验步骤(用自己的语言写出关键性的实验方法、测量方法及仪器的调整操作技巧)、注意事项、数据记录(以列表形式记录原始数据,注明单位)、数据处理(代入数据,写出完整的计算过程,进行误差分析并用标准形式表达实验结果,需要的话,用坐标纸按作图规则作图)、讨论等。

上述三个环节中,第二个环节虽然是主要的,但是对第一个、第三个环节也绝不应忽视.只有三个环节都做好了,才算是上好了物理实验课.

### 第三节 测量与误差

#### 一、测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的.所谓测量,就是用一定的工具或仪器,通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较.著名物理学家伽利略有一句名言:“凡是可能测量的,都要进行测量,并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的”.物理测量的内容很多,大至日月星辰,小到原子、分子.现在人们能观察和测量到的范围,在空间方面已小到  $10^{-11} \sim 10^{-15} \text{ cm}$ ,大达百亿光年,大小相差  $10^{10}$  倍以上.在时间方面已短到  $10^{-23} \sim 10^{-21} \text{ s}$  的瞬间,长达百亿年,两者相差也在  $10^{10}$  倍以上.在定量地验证理论方面,也需要进行大量的测量工作.因此可以说,测量是进行科学实验必不可少的极其重要的一环.

测量分直接测量和间接测量.直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较.例如,用直尺测量长度和用天平测物体的质量.间接测量是指按一定的函数关系,由一个或多个直接测量量计算出另一个物理量.例如,测物体密度时,先测出该物体的体积和质量,再用公式算出物体的密度.在物理实验中进行的测量,有许多属于间接测量.

一个测量数据不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的.一个数值有了单位,才具有特定的物理意义,这时它才可以称之为一个物理量.因此,测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可.

#### 二、误差

从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际.但在实际测量过程中,由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员水平以及种种因素的局限,测量结果与客观存在的真值不可能完全相同,我们所测得的只能是某物理量的近似值.也就是说,任何一种测量结果的量值和真值之间总会或多或少地存在一定的差值,将其称为该测量值的测量误差,简称“误差”.误差的大小反映了测量的准确程度.测量误差的大小可以用绝对误差  $\delta$  表示,因此,测量值  $x$  与真值  $\mu$  之差称为绝对误差.即

$$\delta = x - \mu \quad (1-3-1)$$

也可用相对误差  $E_r$  表示:

$$E_r = \frac{\delta}{\mu}$$

测量总是存在着一定的误差,但实验者应该根据要求和误差限度来制定或选择合理的测量方案和仪器.不能不切合实际,要求实验仪器的精度越高越好,环境条件总是恒温、恒湿、越稳定越好,测量次数总是越多越好.一个优秀的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的实验结果.要做到既保证必要的实验精度,又合理地节省人力与物力.误差自始至终贯穿于整个测量过程之中,为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出评价.

### 三、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从误差的来源和性质上可分为“偶然误差”和“系统误差”两大类。

#### 1. 系统误差.

在相同条件下,多次测量同一物理量时,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,这类误差称为系统误差.系统误差的来源大致有以下几种:

(1) 理论公式的近似性.例如,单摆的周期公式  $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$  成立的条件之一是摆角趋于零,而在实验中,摆角为零的条件是不现实的.

(2) 仪器结构的不完善.例如,温度计的刻度不准,天平的两臂不等长,示零仪表存在灵敏阈等.

(3) 环境条件的改变.例如,在  $20^{\circ}\text{C}$  条件下校准的仪器拿到  $-20^{\circ}\text{C}$  环境中使用.

(4) 测量者生理、心理因素的影响.例如,记录某一信号时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总有偏左或偏右、偏上或偏下等.

系统误差的特点是它具有恒定性,不能用增加测量次数的方法使它减小.在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素.能否用恰当的方法发现和消除系统误差,是测量者实验水平高低的反映,但是没有一种普遍适用的方法能消除这类误差,主要靠对具体问题作具体的分析与处理,要靠实验经验的积累.

#### 2. 偶然误差.

偶然误差是指在相同条件下,多次测量同一物理量,其测量误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化.这种误差是由实验中多种因素的微小变动而引起的.例如,实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动,测量仪器指示数值的变动,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动等.这些因素的共同影响就是测量值围绕着测量的平均值发生涨落.这一变化量就是各次测量的偶然误差.偶然误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的;但对一个量进行足够多次的测量,则会发现它们的偶然误差是按一定的规律分布的,常见的分布有正态分布、均匀分布、T 分布等.

常见的一种情况是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现.这一规律在测量次数越多时表现得越明显,它就是一种最典型的分布规律——正态分布规律.

#### 3. 系统误差和偶然误差的关系.

系统误差和偶然误差的区别不是绝对的,在一定的条件下,它们可以相互转化.比如物理天平所用到的砝码与标称值的误差,对于制造厂家来说,它是偶然误差,对于使用者来说,它又是系统误差.又如测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当作系统误差,又可以当作偶然误差.有时系统误差和偶然误差混在一起,也难于严格加以区分.例如,测量者使用仪器时的估读误差往往既包含有系统误差,又包含有偶然误差.这里的系统误差是指读数时总是有偏大或偏小的倾向,偶然误差是指每次读数时偏大或偏小的程度互不相同.

#### 4. 疏失误差.

另外,还有一种误差被称之为疏失误差,它是由于观测者使用仪器的方法不正确、实验方法不合理、读错数据、记录错误等原因,使得测量结果被明显地歪曲而引起的误差,又称粗大误差.它实际上是一种测量错误,这种数据应当剔除.只要观察者具有严肃认真的科学态度、一丝不苟的工作作风,疏失误差是完全可以避免的.

## 第四节 测量的不确定度、误差估算和测量结果的表示

### 一、测量的不确定度和测量结果的表示

#### 1. 测量的不确定度.

测量误差存在于一切测量中,由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度即为测量的不确定度,它给出测量结果不能确定的误差范围.一个完整的测量结果不仅要标明其量值大小,还要标出测量的不确定度,以表明该测量结果的可信赖程度.

目前世界上已普遍采用不确定度来表示测量结果的误差.我国从 1992 年 10 月开始实施的《测量误差和数据处理技术规范》中,也规定了适用不确定度评定测量结果的误差.

不确定度表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是对被测量值的真值所处的量值范围的评定.“不确定度”反映了可能存在的误差分布范围,即随机误差分量与未定系统误差分量的联合分布范围.它是一个不为零的正值.通常不确定度按计算方法分为两类,即用统计方法对具有随机误差性质的测量值计算获得的 A 类分量  $\Delta_A$ ,以及用非统计方法计算获得的 B 类分量  $\Delta_B$ .

#### 2. 偶然误差与不确定度的 A 类分量.

##### (1) 偶然误差的分布和标准偏差.

偶然性是偶然误差的特点.但是,在测量次数相当多的情况下,偶然误差仍服从一定的统计规律.在物理实验中,多次独立测量得到的数据一般可近似看做正态分布.正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来,如图 1 所示.

测量值的正态分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2\right] \quad (1-4-1)$$

其中, $\mu$  表示  $x$  出现概率最大的值,在消除系统误差后, $\mu$  为真值. $S$  称为标准偏差,它反映了测量值的离散程度.

定义  $p = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ ,表示变量在  $(x_1, x_2)$  区间内出现的概率,称为置信概率. $x$  出现在  $(\mu - S, \mu + S)$  之间的概率为

$$p = \int_{\mu-S}^{\mu+S} f(x) dx = 0.683 \quad (1-4-2)$$

上式说明对任一次测量,其测量值出现在  $(\mu - S, \mu + S)$  区间的可能性为 0.683.为了给出更高的置信水平,置信区间可扩展为  $(\mu - 2S, \mu + 2S)$  和  $(\mu - 3S, \mu + 3S)$ ,其置信概率分别为

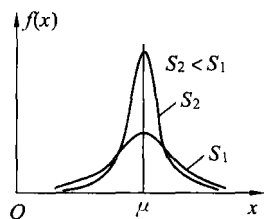


图 1 偶然误差正态分布曲线

$$p = \int_{\mu-2S}^{\mu+2S} f(x) dx = 0.954, p = \int_{\mu-3S}^{\mu+3S} f(x) dx = 0.997 \quad (1-4-3)$$

(2) 多次测量平均值的标准偏差.

尽管一个物理量的真值  $\mu$  是客观存在的,但由于随机误差的存在,我们只能估算  $\mu$  值. 根据偶然误差的特点,可以证明如果对一个物理量测量了相当多次后,分布曲线趋于对称分布,其算术平均值就是接近真值  $\mu$  的最佳值. 如对物理量  $x$  测量  $n$  次,每一次测量值为  $x_i$ , 则算术平均值  $\bar{x}$  为

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

$x$  的标准偏差可用贝塞尔公式估算为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-4-5)$$

其意义为任一次测量的结果落在  $[\bar{x}-S_x]$  到  $[\bar{x}+S_x]$  区间的概率为 0.683, 式中  $(x_i - \bar{x}) = v_i$  称为残差.  $S(x)$  又称为标准差.

值得注意的是,如果测量值中有偏离平均值较大的坏数据,应当加以剔除. 我们可采用格罗布斯判据来判别、剔除坏数据.

当某一测量值  $x_k$  满足下列关系时,可认为是坏数据而将其剔除:

$$x_k < \bar{x} - G_n \cdot S \text{ 或 } x_k > \bar{x} + G_n \cdot S \quad (1-4-6)$$

式中  $G_n$  为格罗布斯判据系数. 各  $n$  值对应的  $G_n$  值如表 1 所示.

剔除坏数据后,再求平均值  $\bar{x}$ 、测量列标准偏差  $S$ .

表 1 格罗布斯判据系数表

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $n$   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| $G_n$ | 1.15 | 1.46 | 1.67 | 1.82 | 1.94 | 2.03 | 2.11 | 2.18 | 2.23 | 2.29 |
| $n$   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 25   | 30   |
| $G_n$ | 2.33 | 2.37 | 2.41 | 2.48 | 2.47 | 2.50 | 2.53 | 2.56 | 2.66 | 2.74 |

一般取剔除坏数据后的算术平均值为真值的最佳估计值,但当测量值中某项系统误差  $\zeta$  的符号与大小已知时,则取其符号相反值  $(-\zeta)$  为修正值,平均值加修正值为被测量值  $X$  的真值的最佳估计值,即

$$X = \bar{x} + (-\zeta) \quad (1-4-7)$$

例如,用螺旋测微器测量一金属丝直径的平均值为  $\bar{d} = 0.5823\text{mm}$ ,螺旋测微器的零点读数  $\zeta = -0.0014\text{mm}$ ,金属丝直径的最佳估计值为

$$d = \bar{d} + (-\zeta) = (0.5823 + 0.0014)\text{mm} = 0.5837\text{mm}$$

由于算术平均值是测量结果的最佳值,最接近真值,因此,我们更希望知道  $\bar{x}$  对真值的离散程度. 利用误差理论可以证明平均值的标准偏差为

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (1-4-8)$$

上式说明,平均值的标准偏差是  $n$  次测量中任意一次测量值标准偏差的  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ,显然  $S_{\bar{x}}$  小于  $S_x$ .  $S_{\bar{x}}$  的物理意义是:待测物理量处于  $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$  区间内的概率为 0.683. 从上式可以看出,当  $n$  为无穷大时,  $S_{\bar{x}} = 0$ ,即测量次数无穷多时,平均值就是真值.

值得注意的是,测量次数相当多时,测量值才近似为正态分布,上述结果才成立. 在测量次数较少的情况下,测量值将呈  $t$  分布(图 2).  $t$  分布曲线与正态分布曲线类似. 其区别是  $t$  分布曲线的上部较窄而且较矮,下部较宽. 测量次数较少时,  $t$  分布偏离正态分布较多;当测量次数较多时(例如,多于 10 次),  $t$  分布趋于正态分布.  $t$  分布时,  $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$  的置信概率不是 0.683. 在这种情况下,  $x = \bar{x} \pm t_p S_{\bar{x}} = \bar{x} \pm \frac{t_p S_x}{\sqrt{n}}$  的置信概率是  $p$ . 在物理实验

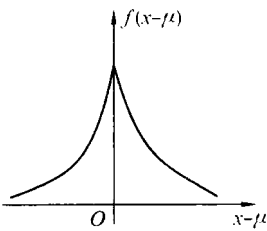


图 2  $t$  分布图线

中,我们建议置信概率采用 0.95. 对应的置信参数  $t_{0.95}$  和  $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$  的值如表 2 所示.

表 2  $t_{0.95}$  和  $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$  的值

| $n$                         | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 15   | 20   | $\geq 100$  |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| $t_{0.95}$                  | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.36 | 2.31 | 2.26 | 2.14 | 2.09 | $\leq 1.97$ |
| $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$ | 2.48 | 1.59 | 1.24 | 1.05 | .926 | .834 | .770 | .715 | .553 | .467 | $\leq .197$ |

### (3) 不确定度的 A 类分量.

不确定度的 A 类分量一般取为多次测量平均值的标准偏差,通常取置信概率为 0.95. 从表 2 中可以看出,当  $n=6$  时,有  $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}} \approx 1$ ,取  $\Delta_A = S_{\bar{x}}$ ,即在置信概率为 0.95 的前提下,A 类不确定度  $\Delta_A$  可用测量值的标准偏差  $S_x$  估算.

## 二、不确定度的 B 类分量

不确定度的 B 类分量是用非统计方法计算的分量,如仪器误差等. 仪器误差是指在正确使用仪器的条件下测量值和被测量值的真值之间可能产生的误差,仪器误差是不会超出某一范围的,其最大值称为仪器的误差限  $\Delta_{ix} = \Delta_{ins}$ . 一般说来,在误差限内各种误差出现的概率相等,即误差概率分布是均匀分布的. 因此,在我们的物理实验中不确定度的 B 类分量  $\Delta_B$  可简化为用仪器标定的最大允差  $\Delta_{ix} = \Delta_{ins}$  除以一个  $\sqrt{3}$  因子来表述,即不确定度的 B 类分量为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{ins}}{\sqrt{3}} \tag{1-4-9}$$

仪器的误差限一般在仪器的说明书中注明,我们在表 3 中列出了一些常用实验仪器的最大允差  $\Delta_{ix}$ .

表 3 常用实验仪器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$ 

| 仪器名称               | 量 程    | 最小分度值  | 最大允差                                               |
|--------------------|--------|--------|----------------------------------------------------|
| 钢板尺                | 150mm  | 1mm    | $\pm 0.10\text{mm}$                                |
|                    | 500mm  | 1mm    | $\pm 0.15\text{mm}$                                |
|                    | 1000mm | 1mm    | $\pm 0.20\text{mm}$                                |
| 钢卷尺                | 1m     | 1mm    | $\pm 0.8\text{mm}$                                 |
|                    | 2m     | 1mm    | $\pm 1.2\text{mm}$                                 |
| 游标卡尺               | 125mm  | 0.02mm | $\pm 0.02\text{mm}$                                |
|                    |        | 0.05mm | $\pm 0.05\text{mm}$                                |
| 螺旋测径尺(千分尺)         | 0~25mm | 0.01mm | $\pm 0.004\text{mm}$                               |
| 读数显微镜              |        | -      | 0.02mm                                             |
| 三级天平<br>(分析天平)     | 200g   | 0.1mg  | 1.3mg(接近满量程)<br>1.0mg(1/2 量程附近)<br>0.7mg(1/3 量程附近) |
| 普通温度计<br>(水银或有机溶剂) | 0~100℃ | 1℃     | $\pm 1^\circ\text{C}$                              |
| 精密温度计<br>(水银)      | 0~100℃ | 0.1℃   | $\pm 0.2^\circ\text{C}$                            |
| 电表(0.5 级)          |        |        | $0.5\% \times \text{量程}$                           |
| 电表(0.1 级)          |        |        | $0.1\% \times \text{量程}$                           |
| 秒表(3 级)            |        | 0.1s   | $\pm 0.5\text{s}$                                  |
| 各类数字仪表             |        |        | 仪器最小读数                                             |

### 三、测量结果的表示

#### 1. 测量结果的表示.

若用不确定度表征测量结果的可靠程度,则测量结果可写成下列标准形式:

$$x = \bar{x} \pm U$$

$$E_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-4-10)$$

式中  $\bar{x}$  为多次测量的平均值,  $U$  为合成不确定度,  $E_r$  为相对不确定度. 合成不确定度  $U$  由 A 类不确定度  $\Delta_A$  和 B 类不确定度  $\Delta_B$  采用方、和、根合成方式得到:

$$U = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

若 A 类分量有  $n$  个, B 类分量有  $m$  个, 那么合成不确定度为

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^m \Delta_{B_i}^2} \quad (1-4-11)$$

#### 2. 直接测量不确定度的计算过程.

(1) 单次测量时, 大体有三种情况:

- (a) 仪器精度较低, 偶然误差很小, 多次测量读数相同, 不必进行多次测量;
- (b) 对测量的准确程度要求不高, 只测一次就够了;

(c) 因测量条件的限制,不可能多次重复测量.

单次测量的结果也应以上式表示测量结果.这时  $U$  常用极限误差  $\Delta$  表示.  $\Delta$  的取法一般有两种:一种是仪器标定的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$ ;另一种是根据不同仪器、测量对象、环境条件、仪器灵敏阈等估计一个极限误差.两者中取数值较大的作为  $\Delta$  值.

(2) 多次测量时,不确定度以下面的过程进行计算:

(a) 求测量数据的算术平均值  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ;

(b) 修正已知的系统误差,得到测量值(如螺旋测微器必须消除零误差);

(c) 用贝塞尔公式计算标准偏差  $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ ;

(d) 标准偏差乘以置信参数  $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$ ,若测量次数  $n=6$ ,取  $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}=1$ ,则  $\Delta_A = S_x$ ;

(e) 根据仪器标定的最大允差  $\Delta_{\text{仪}} = \Delta_{\text{ins}}$  确定  $\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{ins}}}{\sqrt{3}}$ ;

(f) 由  $\Delta_A, \Delta_B$  计算合成不确定度  $U = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$ ;

(g) 计算相对不确定度  $E_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$ ;

(h) 给出测量结果:  $x = \bar{x} \pm U, E_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$ .

**例 1** 在室温  $23^\circ\text{C}$  下,用共振干涉法测量超声波在空气中传播的波长  $\lambda$ ,数据见下表.

| $n$                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\lambda/\text{cm}$ | 0.6872 | 0.6854 | 0.6840 | 0.6880 | 0.6820 | 0.6880 |

试用不确定度表示测量结果.

解: 波长  $\lambda$  的平均值为

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \lambda_i = 0.6858\text{cm}$$

任意一次波长测量值的标准偏差为

$$S_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\bar{\lambda} - \lambda_i)^2}{(6-1)}} = \sqrt{\frac{2.948 \times 10^3 \times 10^{-8}}{5}} \text{cm} \approx 0.0024\text{cm}$$

实验装置的游标示值误差为  $\Delta_{\text{仪}} = 0.002\text{cm}$ . 波长不确定度的 A 类分量为  $\Delta_A = S_\lambda = 0.0024\text{cm}$ . B 类分量为  $\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{ins}}}{\sqrt{3}} = 0.0012\text{cm}$ .

于是,波长的合成不确定度为

$$U_\lambda = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(0.0024)^2 + (0.0012)^2} \text{cm} \approx 0.003\text{cm}$$

相对不确定度为