



二十一世纪全国高等院校规划教材

# 普通物理实验

主编 崔亚量 梁为民



西北工业大学出版社

二十一世纪全国高等院校规划教材

# 普通物理实验

主 编 崔亚量 梁为民

副主编 刘栓江 郑桂梅 王 磊

李建新 张石定

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书是按照《高等工科学学校物理实验课程基本要求》，依据普通工科院校大学物理实验教学的特点编写而成的。本书内容包括：绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理实验、设计性实验及附录等七部分。

本书可作为高等工科学学校本科专业物理实验教学用书，也可供综合大学其他专业作为实验教学参考书。

**图书在版编目(CIP)数据**

普通物理实验 / 崔亚量, 梁为民主编. —西安: 西北工业大学出版社, 2007. 5

ISBN 978-7-5612-2224-9

I. 普… II. ①崔…②梁… III. 普通物理学—实验—高等学校—教学参考资料 IV. 04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 074831 号

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 88491147

网 址: [www.nwpup.com](http://www.nwpup.com)

印 刷 者: 宏达印务有限公司

开 本: 787mm×1 092mm 1/16

印 张: 17.25

字 数: 420 千字

版 次: 2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

# 前 言

本书是按照《高等工科学学校物理实验课程基本要求》,依据普通工科院校物理实验教学的特点编写而成的。本书内容包括:绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理实验、设计性实验和附录等七部分。在本书的编写过程中,我们力求做到以下几点:

1. 突出综合性。将力学、热学、电磁学、光学、近代物理学统一考虑,按知识层次安排;强调基础知识、基本方法、基本测量的训练,注意基本物理设计思想、实验方法及技术的归纳与培养;绪论部分较为全面地阐述测量误差、不确定度以及数据处理的基础知识。在不确定度理论的介绍中,从大学物理实验教学实际出发,由详到简,便于学生学习和具体应用;在每个实验项目后都有精心选择的思考题,供学生进行分析讨论,从而提高其学习的主动性;在本书的后半部分安排了部分设计性、综合性及现代技术应用等方面的实验,这是考虑到学生在做了一定数量的基本实验后具备了一定的实验基础知识和实验技能,通过设计性实验的训练可以提高学生的实验综合素质,使其具备解决实际问题的能力。

2. 内容较新。反映了当代物理学的新水平,实验内容和实验设备比较现代化,有些实验项目用两种以上方法,或者选用不同仪器来测量同一物理量。通过比较,使学生了解不同实验方法的优缺点,使其了解到,在不同的测量范围,需要采用不同的实验仪器、不同的测量方法和技术,从而开阔思路,拓展视野。

3. 本书各章节内容和实验项目既相对独立,又相互配合,且循序渐进。在内容叙述上,注意了实验原理叙述清晰,计算公式推导完整,实验步骤简明扼要,数据处理要求规范。通过实验过程,培养学生良好的实验习惯,严格细致、实事求是、一丝不苟的科学态度和工作作风。总之,通过实验课应使学生获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力等方面得到训练和提高。

4. 在实验技能训练上,采取循序渐进,逐步提高的方式;在选题上,注意了起点低,终点高,可选择性大。在内容的编排上注意启发学生的创造性,鼓励学生独立思考,以增加学生的学习兴趣,在内容中适当加入部分“注意”事项,提醒学生重视安全操作和仪器保护,以养成良好的实验习惯。

本书由崔亚量、梁为民主编,并负责全书统稿,参加编写的还有刘栓江、郑桂梅、王磊、李建新、张石定等人。刘栓江编写绪论、实验九至十、附录6,计约6.9万字;王磊编写实验一至四,计约3.6万字;崔亚量编写实验五至八、附录1至5,计约6.5万字;李建新编写实验十

一至十七,计约6.8万字;郑桂梅编写实验十八至二十六,计约6.2万字;梁为民编写光学实验部分、设计性实验部分,计约6.1万字;张石定编写近代物理实验部分,计约3.3万字。

实验教学是一项集体的事业,本书的编写凝聚了众多教师的智慧与劳动成果,在编写过程中,我们还参阅了许多兄弟院校的教材和资料,在此,我们谨致深切的谢意。

限于我们的水平和教学经验不足,加之编写时间仓促,书中难免会有缺点和错误,诚恳希望读者批评指正。

编者

## 内 容 提 要

本书是按照《高等工科学学校物理实验课程基本要求》,依据普通工科院校大学物理实验教学的特点编写而成的。本书内容包括:绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理实验、设计性实验及附录等七部分。

本书可作为高等工科学学校本科专业物理实验教学用书,也可供综合大学其他专业作为实验教学参考书。

# 目 录

## 绪论

|                     |    |
|---------------------|----|
| 一、物理实验课的任务 .....    | 1  |
| 二、物理实验课的教学环节 .....  | 1  |
| 三、测量与误差 .....       | 2  |
| 四、误差的估算 .....       | 5  |
| 五、有效数字及其运算 .....    | 13 |
| 六、测量结果的不确定度评价 ..... | 16 |
| 七、数据处理的一般方法 .....   | 22 |

## 力学和热学实验

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 实验一 长度的测量 .....          | 27 |
| 实验二 物体密度的测定 .....        | 32 |
| (一) 规则物体密度的测定 .....      | 32 |
| (二) 不规则物体和液体密度的测定 .....  | 35 |
| 实验三 用单摆测重力加速度 .....      | 39 |
| 实验四 牛顿第二定律的验证 .....      | 45 |
| 实验五 气垫导轨上守恒定律的研究 .....   | 51 |
| (一) 动量守恒定律的研究 .....      | 51 |
| (二) 机械能守恒定律的研究 .....     | 54 |
| 实验六 杨氏弹性模量的测定 .....      | 57 |
| (一) 光杠杆法杨氏弹性模量的测定 .....  | 57 |
| (二) CCD 法杨氏弹性模量的测定 ..... | 62 |
| 实验七 转动惯量的测定 .....        | 65 |
| (一) 用光电法测物体的转动惯量 .....   | 66 |
| (二) 用刚体转动实验仪测转动惯量 .....  | 68 |
| (三) 用三线扭摆法测物体的转动惯量 ..... | 72 |
| (四) 用扭摆光电法测定物体转动惯量 ..... | 76 |
| 实验八 用混合法测固体的比热容 .....    | 83 |
| 实验九 用拉脱法测液体的表面张力系数 ..... | 87 |
| 实验十 液体粘滞系数的测定 .....      | 91 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| (一) 用旋转筒法测量液体的粘滞系数 ..... | 92 |
| (二) 用落球法测液体的粘滞系数 .....   | 94 |

## 电磁学实验

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 实验十一 学习使用万用表 .....          | 98  |
| 实验十二 测量二级管的伏安特性 .....       | 106 |
| 实验十三 用惠斯通电桥测电阻 .....        | 111 |
| 实验十四 直流电位差计的原理和使用 .....     | 117 |
| 实验十五 电表的改装及校正 .....         | 122 |
| 实验十六 用电流场模拟静电场 .....        | 129 |
| (一) 导电纸式静电场描绘仪 .....        | 129 |
| (二) 水槽式静电场描绘仪 .....         | 134 |
| 实验十七 用冲击电流计测磁场 .....        | 136 |
| 实验十八 示波器的认识及应用 .....        | 143 |
| 实验十九 磁场的描绘与研究 .....         | 152 |
| 实验二十 用开尔芬电桥测低电阻 .....       | 157 |
| 实验二十一 灵敏电流计的特性研究 .....      | 162 |
| 实验二十二 用电位差计校正电表 .....       | 166 |
| 实验二十三 用交流电桥测电感和电容 .....     | 169 |
| 实验二十四 电子束偏转的研究 .....        | 175 |
| 实验二十五 电子束聚焦的研究 .....        | 179 |
| 实验二十六 $RLC$ 电路谐振特性的研究 ..... | 180 |

## 光学实验

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 实验二十七 薄透镜焦距的测定 .....    | 185 |
| 实验二十八 分光计的调节和使用 .....   | 193 |
| 实验二十九 光的偏振 .....        | 201 |
| 实验三十 用牛顿环测透镜的曲率半径 ..... | 205 |
| 实验三十一 单缝衍射实验 .....      | 210 |

## 近代物理实验

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 实验三十二 迈克尔逊干涉仪 .....  | 215 |
| 实验三十三 密立根油滴实验 .....  | 221 |
| 实验三十四 夫兰克-赫兹实验 ..... | 227 |
| 实验三十五 全息照相 .....     | 233 |

## 设计性实验

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 实验三十六 简谐振动的研究·····    | 237 |
| 实验三十七 变阻器在电路中的应用····· | 238 |
| 实验三十八 硅光电池特性的研究·····  | 244 |

## 附录

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 附录 1 实验室常用直流电源····· | 247 |
| 附录 2 气压计·····       | 248 |
| 附录 3 旋转式电阻箱·····    | 251 |
| 附录 4 测微目镜·····      | 253 |
| 附录 5 实验室常用光源简介····· | 254 |
| 附录 6 物理学常用数表·····   | 256 |
| 参考文献·····           | 265 |

# 绪 论

## 一、物理实验课的任务

物理学是一门建立在实验基础上的学科,无论是物理概念的建立,还是物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础,并通过以后的科学实验来证实。物理实验是物理理论的基础,是理论正确与否的试金石。不可否认,一些实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括及对物理现象进行观测分析都必须应用已有的理论。历史的发展表明,物理学的发展是在实验和理论两方面相结合、相互推动、共同发展的结果,因此在学习物理时,要正确处理好理论课与实验课的关系,要善于动脑、乐于动手,使两者共同发展。

物理实验是理工科大学学生进行科学实验训练的一门基础课程,是各专业后继实验课程的基础之一,是大学生今后从事科学研究工作的启蒙,它的主要任务是:

1. 学习物理实验的基本知识、基本方法,培养实验技能。这其中包括:弄懂实验的基本原理,熟悉一些物理量的测量方法;熟悉常用仪器及测量工具的基本结构原理,掌握使用方法;学会如何记录原始数据和处理数据,并能对实验结果进行正确地分析与判断,写出完整的实验报告;从对结果的分析,进一步分析实验方法是否正确,它带来多大误差,仪器带来多大误差,从而提出自己的看法和意见。对仪器和装置的一些小毛病和小故障力求自己动手解决。

2. 通过实验,加深对物理概念和规律的认识。

3. 通过实验,培养学生良好的实验习惯,以及严格、细致、实事求是、一丝不苟的科学态度和工作作风。总之,通过实验课应达到能提高和培养学生的科学实验素养,使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力等方面得到训练和提高。

## 二、物理实验课的教学环节

物理实验课,每做一个实验都有三个重要的环节。

### 1. 预习

要在规定的时间内高质量地完成实验任务,必须在实验之前作好充分的预习工作,只有这样,才能掌握实验工作的主动性,自觉地、创造性地获得知识,否则,就只能机械地、盲目地照搬实验教材,更谈不上理解物理现象的实质、分析实验中的各种现象了。

预习时应仔细阅读实验教材。了解实验的原理和方法时,应以理解原理为主,搞清实验

内容是什么,要用的方法是什么,所依据的道理是什么,同时写出预习报告。为了防止遗漏测量数据,应根据实验的要求,正确设计好数据记录表格。

## 2. 进行实验

进入实验室,首先要了解实验室的规章制度及注意事项,其次,要熟悉仪器的结构、性能 and 操作方法,一切准备工作就绪后,便可以开始操作并记录数据了。测量的原始数据应整齐地记录在实验笔记本上,原始数据应用钢笔或圆珠笔填写。如果发现错误应用铅笔划掉,而不应毁掉,情况允许时,可以将错误的原因记下来,实验结束后应让实验教师检查,并在原始数据上签字,将原始数据附在实验报告之后。实验记录的内容包括:日期、时间、地点、合作者、仪器编号、名称、规格、原始数据及有关现象。

## 3. 写出实验报告

实验报告一方面是实验的总结,另一方面是实验工作的继续,因此,要养成完成实验后尽早将实验报告写出来的习惯,这样就可以收到事半功倍的效果。通常实验报告包括下列几部分:

(1) 实验名称

(2) 实验目的

(3) 仪器和用具 应注明所用仪器的规格、精度或分度值。

(4) 实验原理 在理解的基础上,用简短的文字简述实验原理(切忌整篇照抄),并列出实验所要用的主要公式、电路或光路图,若讲义与实际情况不相符合,应记录实际情况。

(5) 实验内容及步骤 概括性地、条理分明地把实验步骤写出,不要照搬书上的步骤,怎样完成的测量就怎样写步骤。

(6) 数据记录与处理 (a) 在写预习报告时,就要将所需要测量的数据列出,做到整齐、清晰、条理,尽量采用列表法。注意在标题栏内应注明单位,不要遗漏所需要的数据。(b) 做实验记录时应注意,在进入实验室后,应将上述所需的数据一一填写清楚,如果当时实验室的条件,即当时实验室的温度、气压和空气的相对湿度与实验结果有关时,要记下实验进行时的室温、大气压和空气的相对湿度等。需要测量的数据,要根据仪表的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字位数。各个数据之间、数据与图表之间不要太挤,应留有空隙,以供必要的补充和更正。测量计数时应认真仔细,未经重复测试,不得任意涂改数据。(c) 数据处理与计算应在实验后进行,包括计算实验结果与误差估算及作图。计算结果时应先将文字公式化简,再代入数值运算,误差估算应先写出公式再代入数据,最后按标准形式写出实验结果。

(7) 讨论 对实验进行讨论,包括回答实验的思考题、实验中观察到的异常现象及其可能的解释。讨论的内容一般不受限制,也可以提出对实验装置及实验方法的改进和建设性的意见。

## 三、测量与误差

测量误差是一门专门的科学,深入讨论,需要丰富的实验经验与大量的数学知识,下面

我们仅介绍误差的基本知识,同学们应着重了解其物理内容,学会误差的计算,领会误差分析的思想。

### 1. 测量

物理实验大致可包括两方面内容,定性地观察物理现象和定量地测量物理量的大小。测量的意义就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系。测量又可以分为直接测量和间接测量两类:用量具或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量。例如,用千分尺测量圆柱体的直径;从几个直接测量的结果,按一定的函数关系求出的量称为间接测量量。例如,钢球的体积可由测得球的直径得出  $V = \frac{1}{6}\pi D^3$ , 其中直径  $D$  为直接测量量,体积  $V$  为间接测量量。又如一段电路的电阻  $R$ , 可由这段电路的电流  $I$  和加在这段电路的电压  $U$  而得到

$$R = \frac{U}{I}$$

这里  $U$ 、 $I$  为直接测量量,  $R$  为间接测量量。

### 2. 误差

在一定的条件下,对一定的被测对象,标志其特性的某一物理量的大小都有一客观存在的真实值,称为“真值”。测量的最终目的就是要获得物理量的真值。在进行测量时都必须使用一定的仪器、一定的方法,在一定的环境中,由某一观察者对某一待测量进行测量,而其中必定存在某种不理想的情况,对测量产生某种影响,使一切测量量一般不可能与客观存在的真实值即真值相等,它们之间总是存在差异,我们称为误差,设测量量为  $x$ , 对应的真值为  $a$ , 我们定义误差为

$$\varepsilon = x - a$$

$\varepsilon$  又称为绝对误差,但绝对误差的表示方法往往不能反映测量的优劣,评价一个测量结果的准确程度,不仅要看误差的绝对值大小,还要看被测量本身的大小,于是又引入了相对误差的概念。相对误差的定义为

$$E_r = \frac{\varepsilon}{a} \times 100\%$$

对于大多数测量来讲,被测物的真值是不可知的,严格地说根本无法用以上两个公式计算误差,通常,在等精密测量中,多次测量量的算术平均值

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{k}$$

我们称  $\bar{x}$  为最佳值或近真值,用以代替  $a$ , 其中  $k$  为测量次数。如果设其中某一次测量值为  $x_i$ , 那么我们称

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

为每次测量的偏差。

总之,误差可以说是存在于每个实验步骤中,而且贯穿于整个实验过程的始终。误差理论的任务就是要对测量误差的影响作出正确的估价。另一方面就是要根据误差理论设法减小测量误差,以便获得更好的测量效果。

### 3. 误差的分类

误差的分类方法很多,我们通常将误差分为系统误差、偶然误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差 由于测量仪表的不完善,或实验理论和实验方法的不完善以及环境改变(温度、压强等影响)和个人习惯的偏向引起的误差。系统误差的特征是其确定性,即它的大小与正负是恒定不变的或遵守某一规律(如递增、递减或周期性等)。

(2) 偶然误差(随机误差) 偶然误差是指由于某些偶然的或不确定的因素所造成的误差。它的大小与正负都带有随机性。即在相同的条件下,对同一物理量作多次测量,其测量值有时偏大,有时偏小,当测量次数足够多时,这种偏离引起的误差服从统计规律。当测量次数趋于无限多时,偶然误差的代数和趋近于零。因此,增加测量次数可以减小偶然误差。

(3) 粗大误差(又称过失误差或疏忽误差) 粗大误差是由于实验者不正确地使用实验仪器,粗心大意,观察错误或记录错数据等不正常情况下引起的误差,这种误差是人为的,它的出现必将严重歪曲测量结果,但我们在实验中,只要端正态度,采取一丝不苟的工作作风,粗大误差是可以避免的。

### 4. 精密度、准确度、精确度

当我们剔除了粗大误差、综合系统误差和偶然误差之后,其综合误差通常用精密度、准确度和精确度来评价。

精密度:表示测量数据集中的程度,测量的精密度高,说明测量数据集中,偶然误差小。

准确度:表示测量值与真值的符合程度,测量的准确度高,说明测量结果的最佳值与真值的偏离比较小,系统误差比较小。

精确度:是对测量的精密度与准确度的综合评定。表明测量结果与“真值”的一致程度,精确度高是指测量数据不仅比较集中,而且接近真值,即系统误差与偶然误差都小。

如图0-1中的(a)、(b)、(c)是我们以打靶为例,表示的三种射击的结果。图(a)表示系统的偶然误差大,而系统误差小,即准确度好而精密度差;图(b)表示系统误差大而偶然误差小,即准确度差而精密度好;图(c)表示系统误差和偶然误差都小,即准确度和精密度都好,即结果的精确度好。由此可见,偶然误差和系统误差一般不会单独存在。常常是兼而

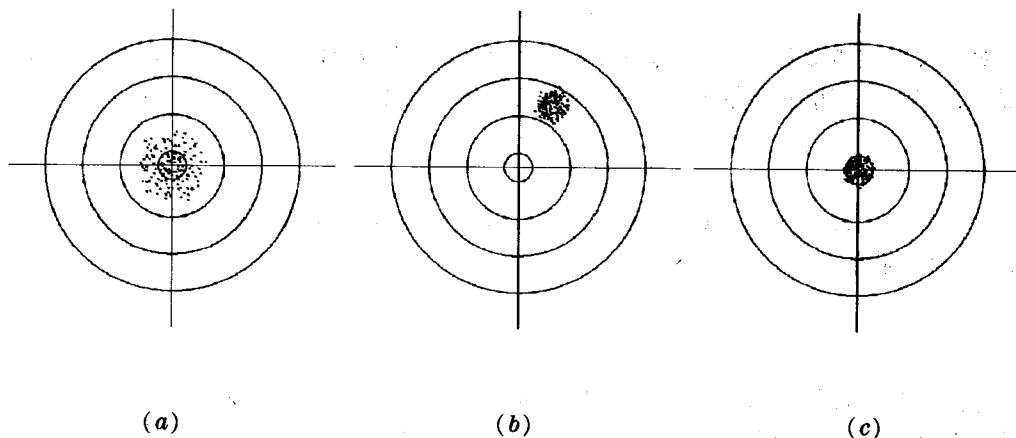


图0-1 射击弹着点试验对精密度、准确度和精确度的说明

有之,甚至在某些实验中,一些误差有时无法准确判断其从属类型,需要我们认真分析。

## 四、误差的估算

### 1. 系统误差的估算与处理

虽然系统误差的出现都具有某种确定的规律性,但这种规律性对不同的实验是不同的,所以,处理系统误差是比较困难的。

系统误差的种类很多,按其来源我们可分为:工具误差、装置误差、环境误差、人员误差、方法误差。按其出现的规律,我们可分为:固定系统误差、线性变化系统误差、按多项式变化的系统误差、周期性变化的系统误差、复杂的规律性的系统误差……虽然形成系统误差的因素多种多样,但是,人们通过长期实践和理论研究总结出了不少发现系统误差的方法。下面,我们只简单介绍几种常用的方法:

(1)理论分析法 理论分析方法是发现、确定系统误差的最基本的方法,是观测者凭借所掌握的有关某项实验测量的物理理论、实验方法、实验经验去对实验所依据的理论公式的近似性、实验方法的完善性进行研究、分析,从中找出系统误差的某些主要根源。

(2)实验对比法 实验对比的方法有许多种,其中包括不同实验方法和不同测量方法的对比、实验仪器的对比、改变实验条件与换人测量等方法的对比,从而对测量结果的量值变化的分析来发现系统误差。

(3)数据分析法 通过分析多次测量的数据分布规律来发现系统误差。

由以上叙述可知,通过对系统误差的分析和研究,我们可以知道系统误差的来源与性质,也就为减小和消除系统误差提供了依据,我们可以:

(1)消除产生系统误差的因素 对可能产生系统误差的原因进行分析,并在测量前采用一些针对性措施,使这些因素得到减弱或消除。

(2)用修正值对测量结果加以修正 可用标准仪器进行校准,除此以外,还可采用理论分析法对实验结果进行修正。

(3)采用适当的测量方法 例如,可采用以下的一些测量方法:

(a)交换法:测量中对某些条件进行交换,以消除该条件对测量结果的不利影响。例如,天平不等臂问题的解决。如果天平的左右两臂不相等,我们可采用交换被测物与砝码位置的方法来进行测量,如果两次测量砝码的质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ,则物体的质量应为

$$m = \sqrt{m_1 m_2}$$

(b)代替法:在测量条件不变的情况下,对被测量进行测量后用一标准量来代替被测量,而不引起指示值的改变,则被测量就等于标准量。

(c)抵消法:改变测量中的某些条件,使两次测量结果中系统误差的符号相反,可部分抵消系统误差。例如,用电位差计及标准电阻测量电阻值,由于电压接头存在热接触电势,因此,测得的电压并非电阻本身的电压,这必然会引起系统误差。为了消除这种系统误差,可用正反两种方向的电流测量两次,以抵消热电动势的影响。

(d) 对称观测法:进行互相对称的两次测量,以此来削弱或消除系统误差。例如,用分光计测量角度时,为了消除由于刻度盘转轴与游标盘转轴不重合所造成的系统误差,我们采用在直径两端各设置一游标,两个游标转过角度的平均值就是载物台实际转过的角度。

(e) 周期性系统误差的消除:可以采用每半个周期进行一次测量,并测量偶数次,此方法也可称为半周期偶数观测法。

上面,我们讨论了如何减小或消除系统误差,在下面的讨论中,我们约定粗大误差以及系统误差都已经消除或得到修正,只有偶然误差。

## 2. 偶然误差的估算

假设系统误差已经消除,而被测量本身又是稳定的,在同样条件下多次重复测量,其结果彼此互有差异,这就是偶然误差引起的。下面,我们来介绍偶然误差的估算。

(1) 单次直接测量的误差估计 在物理实验过程中,有时被测的物理量是随时在变化着的。例如,混合法测固体的比热时,热平衡时的温度的测量是不容许我们进行多次重复测量的。还有一些测量是在整个实验中对它的测量精密度要求不高,没有必要进行重复测量,只要进行单次测量就可以了。这时,可根据实验情况,对测定值的误差进行合理的、具体的估算,不能一概而论,一般情况下,对于偶然误差很小的测定值,可按仪器厂检定书或仪器上直接注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明,也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。例如:用一根最小刻度为毫米的米尺去测量一长度,假设没有其他误差因素存在,这时读数最大绝对误差为:  $\pm 0.5\text{mm}$ , 这样估计而得的误差是一种极限误差,或称为最大误差,但这样却使测量结果有了足够的可靠性。

(2) 多次测量的平均值及误差 我们在可能的情况下,为了减小偶然误差,总是采用多次测量,在等精度的多次测量中,偶然误差遵循统计规律,测量服从正态分布(或称高斯分布)。根据误差理论,在一组  $k$  次测量的数据中,算术平均值  $\bar{x}$  最接近于真值,当测量次数无限增加时,算术平均值将无限接近于真值,这便是在测量中通常以算术平均偏差代替算术平均误差的理由。

估计偶然误差的方法有许多种,但在上述情况下,测定值的误差可用算术平均偏差或均方根偏差(标准偏差)表示出来。设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为  $n$  次等精度测量列,该测量列的平均值为  $\bar{x}$ , 则我们称

$$\Delta x' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (0-1)$$

为该测量列的算术平均偏差。

如果我们设测量列的真值为  $a$ , 则

$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a) \quad (0-2)$$

为该测量列的算术平均误差。

(3) 多次测量的均方根偏差(标准偏差) 上面我们曾指出,偶然误差服从正态分布,如图 0-2 所示,为两条正态分布曲线,其横坐标为误差值,纵坐标  $f(\varepsilon)$  表示误差概率密度函数,大量的事实及统计理论证明,服从正态分布的偶然误差具有以下特点:

(a) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

(b) 有界性:超过一定范围的误差出现的概率趋近于零。

(c) 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

正态分布曲线可由公式

$$f(\varepsilon) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \varepsilon^2} \quad (0-3)$$

表示, 由上式可看出参数  $h$  能反映曲线的特性:  $h$  大, 对应的曲线就高而狭, 这表示数据的离散性小, 精密度高; 反之,  $h$  小, 对应的正态分布曲线便低且矮, 表示测量的精密度低, 所以常称  $h$  为精密度常数。由概率分布的计算, 我们可得出

$$h = \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \sum \varepsilon_i^2}{n}}}$$

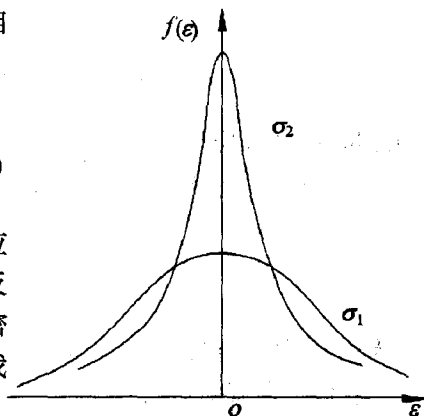


图 0-2 正态分布曲线

设

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n}}$$

则有

$$h = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}}$$

则式(0-3)可写为

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (0-4)$$

其中,  $\sigma$  称为标准误差。

到目前为止, 我们已经知道了, 当有一组等精密度测量的数据时, 可用算术平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

来作为这组测量值的大小, 还可由公式  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n}}$  计算出标准误差, 那么, 我们是否能用

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

来表示测量结果呢? 这是不能的, 因为我们所求得的  $\sigma$  是测量列的误差, 它只能反映测量列数据的离散性, 而不能表示测量列的平均值偏离真值的情况, 而  $\bar{x}$  本身仍具有离散性, 设  $\sigma_{\bar{x}}$  为平均值的标准偏差, 这时实验结果就可以写成

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

由前面介绍我们知

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

为测量列的“标准误差”。

可以证明测量次数  $n$  为有限次时,  $n$  次测量中有  $n-1$  次是独立的, 标准误差可改写成

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

称为测量列的“标准偏差”。上式也称为贝塞尔 (Bessel) 公式。

我们根据概率知识, 凡遵守正态分布的数据, 其平均值也遵守正态分布, 故对平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  也有

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\bar{x}}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{\bar{x}}^2}}$$

其中  $f(\delta)$  为平均值误差的概率密度函数。

通过误差理论可以证明, 平均值的标准偏差与测量列的标准偏差有如下关系

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0-5)$$

对于  $\sigma$  和  $\sigma_{\bar{x}}$  有: 当  $n$  较大时,  $\sigma$  就会有较确定的值, 而随着测量次数的增加,  $\sigma_{\bar{x}} \rightarrow 0$ , 但在实际测量中, 我们并不能随意增大测量次数, 在物理实验中, 我们一般情况下取  $n$  为 5~10 次。

另外, 我们取  $\sigma$  的不同倍数区间对偶然误差分布函数积分得

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = 0.6827$$

$$\int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = 0.9545$$

$$\int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = 0.9973$$

由此, 我们可以看出  $\sigma$  的统计意义: 对于一组测量数据, 误差在  $\pm\sigma$  之内的概率为 68.27%, 而误差在  $\pm 2\sigma$  之内的概率为 95.45%, 误差在  $\pm 3\sigma$  之内的概率为 99.73%。

在物理测量中, 因为误差落在  $\pm 3\sigma$  之内的概率为 99.73%, 所以我们常将  $\pm 3\sigma$  做为粗大偏差的界限, 具体的计算步骤是: 先将所有的测量数据求平均和标准偏差, 然后计算每个数据的偏差值  $v_i$ , 若有哪个  $|v_i| > 3\sigma$ , 便将其剔除, 再把其余数据求平均和标准偏差, 然后再进行检查, 直到没有超过  $3\sigma$  的数据为止。但应指出, 这种方法只有在  $n$  较大时才适用, 测量次数较少时, 应采用其他方法, 例如  $t$  检验方法、肖维涅法、格拉布斯法等等, 具体方法我们不作一一介绍了。