



全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

DAXUE WULI SHIYAN

# 大学物理实验

主 编 张志强 黄忠军

學苑出版社

全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

# 大学物理实验

主编 张志强 黄忠军

参编 李庆福 郑俊娟

學苑出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

大学物理实验 / 张志强, 黄忠军主编. — 北京:  
学苑出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5077-4106-3

I. ①大… II. ①张… ②黄… 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 (2012) 第 219519 号

责任编辑: 郑泽英

封面设计: 陈四雄

出版发行: 学苑出版社

社 址: 北京市丰台区南方庄 2 号院 1 号楼

邮政编码: 100079

网 址: [www. book001. com](http://www.book001.com)

电子邮箱: [xueyuan@public. bta. net. cn](mailto:xueyuan@public.bta.net.cn)

销售电话: 010-67675512、67678944、67601101 (邮购)

经 销: 全国新华书店

印 刷 厂: 北京长阳汇文印刷厂

开本尺寸: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12

字 数: 285 千字

版 次: 2012 年 9 月北京第 1 版

印 次: 2012 年 9 月北京第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

# 内容简介

本书按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，吸收、借鉴国内外物理实验教学内容和课程体系研究与改革的成果，结合编者多年来的教学实践经验编写而成。

全书除附录外，共分 8 章。第 1 章为绪论；第 2 章讲述测量误差与数据处理的基本原理和方法；第 3 章介绍常用仪器的使用并讲述了物理实验的预备知识；第 4 章为 11 个基础实验；第 5 章提供了 6 个提高性实验；第 6 章为 11 个综合性实验；第 7 章为 8 个设计性实验；第 8 章介绍大学物理仿真实验及相关软件的使用方法。

本书可作为普通高等院校工科各专业物理实验课程的教科书，也可作为职工夜大、电大及成人自学考试的参考用书。

## 前 言

本书按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，学习、借鉴国内外物理实验教学内容和课程体系改革与研究的成果，结合多年的教学实践经验，在多次编写、不断修订的原校内《普通物理实验》讲义的基础上立项研讨、再度规划、重新编写而成。

审视高等工业学校大学物理实验教学内容和课程体系改革的趋势，结合几年来普通高校扩招后出现的新情况，本书打破了按力学、热学、电磁学和光学的编排模式，改为按照基础实验、近代物理与综合性实验、设计性实验的体系重新组织。全书除附录外，共分 8 章，既加强了测量误差、不确定度与数据处理的理论基础，也强调常用仪器的使用和物理实验基础知识的掌握，更注重学生综合能力的培养，尤其是学生的创新精神与创新能力的培养。在实验选题上力求典型、丰富，增添了富有新意的实验。本书按由易到难、循序渐进的原则安排实验顺序，以有利于学生逐步提高实验能力。在行文上力求简明扼要、深入浅出、易读易学。

本书是集体智慧与劳动的结晶。由主编张志强提出主导性意见并立项探索，张志强、黄忠军共同策划并统筹安排，参编同志积极参与、充分讨论、分工撰写、反复推敲而完成。其中第 2 章、第 3 章的 3.3、3.4、3.5、3.6，实验 5、6、7、13、15、18、19、20、21、23、24、27、29 由张志强编写；第 1 章、第 3 章的第 3.1、3.2、3.7、3.8 节，实验 1、2、3、4、8、9、10、12、16、22 及附录由黄忠军编写；第 7 章（除实验 29）与实验 11、25、26 由郑俊娟编写；第 8 章与实验 14、17、28 由李庆福编写。

实验课程建设（包括实验课教材的建设与实验室的建设等等）是一项集体的事业，也是一项长期的事业。多年来在实验室工作过的王悦兴、沈照根、马珂、居融融、洪瑞华、牛曼丽、祖淑敏、刘锴、王菊明、于景梅诸同志都

为北京服装学院的大学物理实验课程的建设付出了心血，做出了贡献。值此本书出版之际，谨向他（她）们表示感谢，并致以良好的祝愿。

在本书编写过程中，参考了许多兄弟院校的教材以及教学仪器厂家提供的资料，吸收了国内外物理实验教学改革的成功经验，在此一并向所有给予启迪和帮助的作者表示衷心的感谢。由于我们的学识与水平有限，书中难免存在错误与不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 8 月于北京

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第1章 绪 论                 | 1  |
| 1.1 物理实验课的目的            | 1  |
| 1.2 物理实验课的三个基本环节        | 1  |
| 1.3 实验室规则               | 2  |
| 第2章 测量误差与数据处理           | 3  |
| 2.1 测量与测量误差             | 3  |
| 2.2 随机误差的处理方法           | 7  |
| 2.3 直接测量不确定度的评定与测量结果的表示 | 8  |
| 2.4 间接测量不确定度的评定         | 10 |
| 2.5 有效数字及其运算法则          | 13 |
| 2.6 数据处理的几种方法           | 16 |
| 第3章 常用仪器简介与物理实验预备知识     | 23 |
| 3.1 游标尺                 | 23 |
| 3.2 螺旋测微计               | 25 |
| 3.3 电 表                 | 26 |
| 3.4 电阻箱和滑线电阻            | 28 |
| 3.5 电 源                 | 30 |
| 3.6 数字式万用表              | 31 |
| 3.7 光学实验预备知识            | 36 |
| 3.8 实验室常用光源             | 37 |
| 第4章 基础实验                | 39 |
| 实验1 拉伸法测钢丝的弹性模量         | 39 |
| 实验2 液体表面张力系数的测定         | 42 |
| 实验3 刚体转动惯量的测定           | 45 |
| 实验4 刚体转动的研究             | 48 |
| 实验5 示波器的使用              | 51 |
| 实验6 用惠斯登电桥测电阻           | 62 |
| 实验7 电位差计的使用             | 65 |
| 实验8 用分光计测定玻璃三棱镜的折射率     | 68 |
| 实验9 等厚干涉——牛顿环与劈尖干涉      | 72 |
| 实验10 衍射光栅               | 76 |
| 实验11 薄透镜焦距的测定           | 78 |
| 第5章 提高性实验               | 84 |
| 实验12 液体粘滞系数的测定          | 84 |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 实验 13        | 灵敏电流计的研究 .....            | 86         |
| 实验 14        | 磁化曲线与磁滞回线的测绘 .....        | 91         |
| 实验 15        | 模拟法测静电场分布 .....           | 95         |
| 实验 16        | 偏振光特性的研究 .....            | 98         |
| 实验 17        | 非平衡电桥与应用 .....            | 103        |
| <b>第 6 章</b> | <b>综合性实验 .....</b>        | <b>107</b> |
| 实验 18        | 用霍尔传感器测磁场 .....           | 107        |
| 实验 19        | 空气中声速的测定 .....            | 112        |
| 实验 20        | 光电效应法测定普朗克常数 .....        | 117        |
| 实验 21        | 半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量 ..... | 122        |
| 实验 22        | 迈克耳逊干涉仪的调整和使用 .....       | 129        |
| 实验 23        | 弗兰克-赫兹实验 .....            | 133        |
| 实验 24        | 霍尔位置传感器测杨氏模量 .....        | 137        |
| 实验 25        | 激光全息摄影 .....              | 142        |
| 实验 26        | 静电植绒 .....                | 145        |
| 实验 27        | 摄影和暗室技术 .....             | 148        |
| 实验 28        | 多功能光栅光谱仪的使用 .....         | 153        |
| <b>第 7 章</b> | <b>设计性实验 .....</b>        | <b>160</b> |
| 实验 29        | 线性电阻与非线性电阻的伏安特性研究 .....   | 160        |
| 实验 30        | 电表的改装与校准 .....            | 166        |
| 实验 31        | 透明液体折射率的测定 .....          | 168        |
| 实验 32        | 重力加速度的测定 .....            | 168        |
| 实验 33        | 颜色的合成与分解 .....            | 170        |
| 实验 34        | 热敏温度计的制作 .....            | 171        |
| 实验 35        | 全息光栅的制作及其参数测量 .....       | 172        |
| 实验 36        | 转速的测定 .....               | 173        |
| <b>第 8 章</b> | <b>大学物理仿真实验 .....</b>     | <b>174</b> |
| 8.1          | 大学物理仿真实验简介 .....          | 174        |
| 8.2          | 大学物理仿真实验示例 .....          | 177        |
| <b>附 录</b>   | <b>.....</b>              | <b>180</b> |
| 附录 1         | 国际单位制简介 .....             | 180        |
| 附录 2         | 基本物理常数 .....              | 181        |
| 附录 3         | 不同温度下与空气接触的水的表面张力 .....   | 182        |
| 附录 4         | 20℃时某些材料的弹性模量 .....       | 182        |
| 附录 5         | 某些液体的粘滞系数 .....           | 182        |
| 附录 6         | 实验室常用光源的谱线波长 .....        | 183        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>              | <b>184</b> |



# 第1章 绪 论

物理学本质上是一门实验科学，物理学的概念、定律和理论的建立、发展和形成，都以物理实验为基础并受到实验的检验。物理学的实验方法已广泛应用于其他学科和生产实践之中，成为推动科学技术发展的强有力的工具。

在培养高级技术人才的工科大学里，不仅要使学生获得比较深厚的基础理论和专业理论知识，还应该受到系统的实验方法和实验技能的训练。物理实验课是学生必修的单独开设的一门基础实验课，它不仅可以加深对理论的理解，更重要的是使学生获得基本的实验知识，在实验方法和技能等方面得到较为系统和严格的训练。物理实验是大学里学习或从事科学实验的起步，它覆盖面广，具有丰富的实验思想、实验方法和手段，对培养学生科学实验能力、良好的科学实验素质和科学世界观等方面起着重要的奠基作用。

## 1.1 物理实验课的目的

1.1.1 通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验基本知识，加深对物理原理和规律的理解。

1.1.2 培养与提高学生的科学实验能力，包括：阅读实验教材或资料；正确使用常用仪器；对实验现象进行初步分析和判断；正确记录和处理实验数据；正确绘制实验图线；完整表达实验结果；撰写实验报告；完成简单的实验设计。

1.1.3 培养与提高学生的科学素养和主动研究探索的精神。树立良好学风和严肃认真的工作态度。养成爱护公共财物的优良品德。

## 1.2 物理实验课的三个基本环节

1.2.1 实验预习：课前要认真阅读实验教科书，明确实验目的和原理，弄清实验步骤，初步了解仪器的使用方法，画好记录表格，做到实验前心中有数。有些实验还要求学生课前自拟实验方案，自己设计线路图，自己设计数据表格等。课前必须认真写好实验预习报告（内容包括实验名称、目的、原理和数据表格）。实验预习是否充分是实验中能否取得主动的关键。

1.2.2 实验操作与数据记录：学生进入实验室后应遵守实验室规则。进行实验操作前，首先检查和熟悉仪器，经正确安装和调整之后，才能循序进行实验。

在观测中，应如实及时做好记录，不可事后凭记忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而将记录做随心所欲的涂改。

记录实验所用主要仪器的规格和编号（如准确度级别、量程、最小分度值等）。实验时应养成记录仪器编号的习惯，以便于必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使學生逐步地熟悉它，以培养选用仪器的能力。

实验数据经教师检查签字后，方可结束实验。

实验中要注意爱护仪器。实验结束后应把仪器整理、清点好，关闭电源。注意保持实验室的整洁，严格遵守实验室规则。

### 1.2.3 撰写实验报告

正确撰写实验报告是每个大学生都必须具备的一项基本能力。一份完整的实验报告应包括以下内容：

(1) 课程名称与实验名称

(2) 实验目的

(3) 实验原理 在理解的基础上，简要地叙述实验理论依据，实验方法，实验所用的主要公式，说明式中各物理量的意义。画出关键的电路图、光路图和实验装置示意图。

(4) 实验仪器 写出实验中主要仪器的名称、规格。

(5) 数据表格 在实验报告纸上设计好数据记录表格。

**以上内容需在上实验课以前完成，未写好预习报告的学生不得进行实验。**

(6) 数据处理 实验后要对实验数据及时进行处理。正确计算出被测量的最佳估值、被测量的不确定度和写出完整的结果表达式。要求作图的，应按作图规则用坐标纸绘制图线。

(7) 分析讨论 内容不限，可以是对实验中的现象和实验结果的分析，对实验中关键问题的研究体会，实验的收获和对实验的一些建议讨论，也可解答思考题。

学生在撰写实验报告时应努力做到书写清晰，字迹端正，数据记录整洁。

## 1.3 实验室规则

1.3.1 学生进入实验室后，首先要有安全意识，树立安全第一的观念。

1.3.2 课前认真做好预习工作，上实验课时必须带上写好的实验预习报告，经教师检查同意方可进行实验。

1.3.3 课上遵守实验室的各项规章制度，遵守实验室纪律，保持安静的实验环境。

1.3.4 进入实验室后不得擅自搬弄仪器，要爱护实验仪器设备。由于粗心大意或违反操作规程而损坏仪器者，应按规定进行赔偿。

1.3.5 凡使用电源的实验，必须经教师检查线路并同意后，才可接通电源。

1.3.6 做完实验，应将仪器整理还原，桌面收拾整洁，凳子摆放整齐。记录的实验数据须经任课教师检查签字后方可离开实验室。

1.3.7 实验报告应在实验完成后的规定时间内交给任课教师。

## 第2章 测量误差与数据处理

在物理实验中，我们需要对物理量进行测量。由于实验仪器的精度、灵敏度和测量方法的不完善等因素，使得测量结果与真实值之间总有一定差异。因此在实验中除了获得必要的测量数据外，还必须对测量结果进行评价。对测量结果精确度的评价是一门专门的科学，涉及面非常广泛。本章将介绍测量误差和实验数据处理的一些初步知识，主要包括测量误差的估算，实验数据的处理和实验结果的表示等，这些知识是进行科学实验时所必需的和最基本的，不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广，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。

### 2.1 测量与测量误差

物理实验是以测量为基础的。实践证明，测量结果都存在有误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能做到绝对的严密，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

#### 2.1.1 测量及其分类

研究物理现象，了解物质特性，验证物理原理都需要进行测量。所谓测量，就是将待测量与选作法定标准的同类计量单位进行比较，从而确定待测量是标准单位的若干倍，这一过程称为测量。

测量分直接测量与间接测量。

1. 直接测量：能在仪器（或量具）上直接读出测量结果的这一类测量叫做直接测量。如用米尺测长度，用秒表测时间，用电流计测电路中的电流和用天平测质量等都是直接测量。获得的测量量称为直接测量量。

2. 间接测量：有很多物理量无法通过直接测量得到，例如对圆柱体密度的测量，必须先测量该圆柱体的直径、高度和质量，再利用公式计算出该圆柱体的密度。这类需先由直接测量获得相关数据，再利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量数值的测量方法就是间接测量。在物理实验中进行的测量，有许多是间接测量。

测量方式又可分为等精度测量与非等精度测量。同一测量者，用同样的方法，使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量，称作等精度测量。上述各

项，如有一项发生变化，导致明显影响实验结果，即为非等精度测量。例如，在对某一物理量进行多次测量时，选用的仪器不同，或测量方法不同，或测量人员不同等都属于非等精度测量。本教材中以后说到的多次测量，都是指等精度测量。

## 2.1.2 测量的误差

### 1. 绝对误差

被测物理量所具有的客观真实的数值称为真值。测量误差就是测量结果与被测量真值的差值，测量误差的大小反映了测量结果的准确度。由于测量误差与被测量值有相同的量纲，故又称为绝对误差，即

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值}$$

上式中被测量的真值是一理想概念，一般是不可知的。在实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值，称为**最佳估计值**（也称为**约定值**）。绝对误差可以用来比较不同仪器测量同一被测物理量的测量准确度的高低。

### 2. 相对误差

测量的绝对误差与真值之比称为测量的相对误差，一般用百分比来表示

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

相对误差可以用来比较不同被测物理量准确度的高低。评价测量结果的好坏，主要看相对误差的大小。显然，相对误差是没有单位的。

应该指出，测量所得到的一切数据都包含着一定的误差，因此，误差存在于一切科学实验中，并因测试理论、测试环境、测试技术等不同而有所差异。

## 2.1.3 误差的分类

根据误差的来源和性质，通常将误差分为三大类，即系统误差、随机误差和过失误差。

### 1. 系统误差

同一条件下（方法、仪器、环境和观察者等不变），多次测量同一物理量时，测量误差的大小和符号始终保持恒定或按一定规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差的特点是它确定的规律性，如误差随着待测长度成比例的增加等等。还可表现为其他规律。系统误差的确定性反映在测量条件一经确定，误差也随之确定，重复测量时，误差的绝对值和符号均保持不变，因此在相同实验条件下，多次重复测量不可能消除系统误差。

系统误差按其产生原因可分为以下几类：

#### (1) 仪器误差

由于仪器本身缺陷或没有按规定条件使用造成的误差。如：仪器的刻度不准，零点没有调好；秒表走时较快或较慢，测得的时间就会偏慢或偏快；用受热膨胀的钢尺进行测量时，其指示值将小于实际长度等。

在物理实验中首先要遇到仪器的误差。国家计量局对各类仪器都规定有准确度等级或允许的误差范围。仪器在出厂前都要经过严格的检验，使其误差控制在国家允许的标

准之内。按仪器误差范围的大小,将仪器分级,称为准确度级别。各种仪器的准确度级别一般都由制造厂标注在仪器的铭牌上或使用说明书里,使用时,根据仪器的量程和准确度级别,有些只根据级别就可计算出或查出该仪器的仪器误差。

仪器误差用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示,通常取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于仪表、器具的示值误差限或基本误差限,其符号可正可负。对于一些不明确知道仪器误差的仪器,在测量范围较小时,仪器误差常估计为其分度值的一半。有时也可根据实际情况作合理的估计。

仪器误差的概率密度函数通常遵从均匀分布,均匀分布是指其误差在 $(-\Delta_{\text{仪}}, +\Delta_{\text{仪}})$ 区间范围内,出现的概率都相同,而区间外的概率为零。在物理实验教学中约定,对于一般的精密仪器,根据均匀分布理论,将仪器误差折合成等价的标准偏差,其为

$$\sigma_{\text{仪}} = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

有时为简便起见,可将 $\sigma_{\text{仪}}$ 就取为 $\Delta_{\text{仪}}$ ,即 $\sigma_{\text{仪}} \approx \Delta_{\text{仪}}$ 。

## (2) 理论(方法)误差

由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所要求的条件,或测量方法不当所带来的误差。

## (3) 环境误差

外界环境发生变化,或不满足测量仪器规定的使用条件所造成的误差。外界环境包括温度、湿度、电磁场和光照等。

## (4) 个人误差

由实验者个人心理或生理特点、或某些不良习惯引起的误差。如估计读数时有人总是偏大、有人总是偏小;用手按秒表计时,有人经常早按,有人经常迟按等。

对操作者来说,系统误差的规律及其产生原因可能知道,也可能不知道,已经确切掌握了其大小和符号的系统误差,称为可定系统误差。反之称为未定系统误差。

对实验中的系统误差应怎样处理呢?对可定系统误差一般可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法在实验过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行理论上的修正加以消除或尽可能减小;而未定系统误差一般难以作出修正,只能估计它的范围。

消除或减小系统误差是一个复杂而困难的事情,需要根据具体情况处理,但主要取决于实验者的经验、技巧和分析能力。

常用的消除系统误差的方法有:

### (1) 测量结果引入修正量(可定系统误差消除法)

由于仪器、仪表不准确产生的误差通常可通过与更准确(级别更高)的仪表作比较来得到修正量;由于理论、公式的不完善产生的误差可通过理论分析得出修正量。

### (2) 采用合适的测量方法(未定系统误差补偿和消除法)

1) 交换法:交换被测物与参考物的位置。如用于“不等臂天平”、“电桥比率臂”等;

2) 替代法:用标准参考物替代被测物。如用于“电位差计”、“电桥”等;

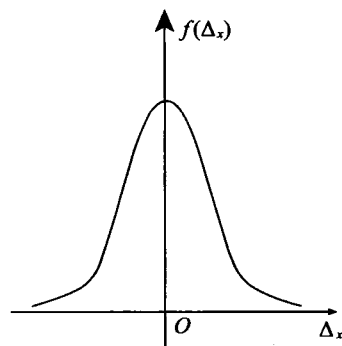


图 2.1—1 高斯分布图

3) 异号抵消法: 改变测量条件使两次测量中系统误差的符号相反从而可在求平均值时被抵消。如用于“霍尔效应”、“载流螺线管测磁场”等;

4) 半周期期间测法: 用相隔半个周期的测量结果取平均, 可有效地消除周期性变值系统误差等。如用于“测角仪器中转轴偏心”、“分光计仪器转轴偏心”等。

## 2. 随机误差

在一定条件下多次测量同一物理量时, 测量值仍会出现一些似乎毫无规律的起伏。这种大小和符号随机变化的误差, 称为随机误差。随机误差是测量误差的一个分量。随机误差是实验中各种随机或不确定因素的微小变动引起的。例如实验装置的测量机构在各次调整操作上的变动性, 测量仪器指示数值的变动性, 测量环境的温度、湿度、电源电压的涨落, 以及测量者本人在判断和估计读数上的变动性等等, 这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生着有涨落的变化, 这变化量就是各次测量的随机误差。

随机误差的特点是它的随机性。在同一条件下对同一物理量进行足够多次测量时, 每个测量结果的误差其符号和绝对值大小都是不能预知的, 没有规律的, 但是随机误差的分布却显示出一定的统计规律。理论和实践都证明, 大多数物理实验中的随机误差分布规律遵守正态分布规律(高斯分布)如图 2.1—1 所示。图中横坐标表示随机误差  $\Delta_x$ , 纵坐标表示随机误差出现的概率密度  $f(\Delta_x)$ 。由图可知服从正态分布规律的随机误差具有以下特征:

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。误差出现的概率分布只有一个极大值。

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 绝对值很大的误差出现的概率趋近于零, 即误差的绝对值不超过一定限度。

4) 抵偿性 由对称性可知, 当测量次数足够多时, 随机误差的算术平均值趋于零。

## 3. 过失误差

过失误差是由于测量者不正确地使用仪器、观察错误或记录数据错误等不正常情况引起的误差。它会明显地歪曲客观现象, 应该将其剔除。所以, 在作误差分析时, 要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

总之, 由于误差的性质不同、来源不同和处理方法不同, 对测量结果的影响也不同。有时系统误差与随机误差可以加以区分, 有时又难以划分, 并且有时两者之间能够互相转化。因此, 有必要对误差进行研究和讨论, 要用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

### 2.1.4 测量结果的评价

对于测量结果作总体评定时, 一般均应把系统误差和随机误差综合起来考虑。**精密度、准确度和精确度**都是评价测量结果好坏的内容, 但是这些概念的含义不同, 使用时应加以区别。

#### 1. 精密度

精密度表示测量结果中随机误差大小。它是指重复测量所得结果相互接近的程度。

精密度高,即测量数据的重复性好,随机误差小。

## 2. 准确度

准确度表示测量结果中系统误差的大小,它是指测量结果接近真值的程度。准确度高,则测量结果接近真值的程度好,系统误差小。

## 3. 精确度

精确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合评定。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,精密度高准确度不一定高;而准确度高精密度不一定高;只有精密度和准确度都高时,精确度高。精确度高,说明测量的数据比较集中而且接近真值,系统误差与随机误差都小。

用打靶时着弹点的分布可以形象地说明上面三个名词,如图 2.1—2 所示:

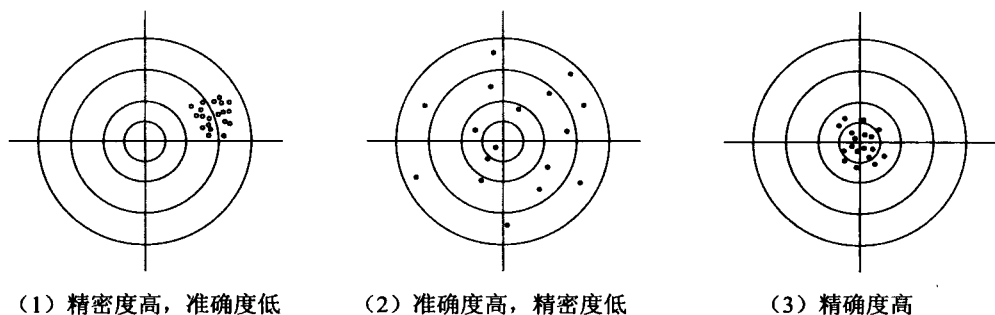


图 2.1—2 测量中的三种情况示意图

## 2.2 随机误差的处理方法

对测量中的随机误差做估计的方法有多种。科学实验中,常用标准偏差来估计测量的随机误差。

### 2.2.1 标准偏差

标准偏差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,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。计算过程如下:

设对某一物理量  $x$  等精度进行了  $n$  次测量,各次测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

#### 1. 求出这组测量值的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.2-1)$$

可以证明:当系统误差已被消除时,测量值的平均值最接近被测量的真值,测量的次数越多,接近的程度越好,因此我们将测量列的算术平均值视为待测物理量真值的最佳估计值。

#### 2. 每一次测量值 $x_i$ 与平均值 $\bar{x}$ 之差称为残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.2-2)$$

3. 用贝塞尔公式计算标准偏差的估计值  $\sigma_x$ 

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2-3)$$

$\sigma_x$  值直接体现了随机误差的分布特性。 $\sigma_x$  值小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高;  $\sigma_x$  值大就表示测量值很分散, 即测量的精密度低。

## 2.3 直接测量不确定度的评定与测量结果的表示

由于测量误差的存在, 作为一个测量结果, 不仅应当提供被测量的量值大小和单位, 还应对量值本身的可靠程度做出判断。

## 2.3.1 测量结果的表示

根据国家计量技术规范, 参考 ISO、IUPAP 等 7 个国际组织 1993 年联合颁布的《不确定的表示指南》, 物理实验教学采用一种简化的、具有一定近似性的不确定度评定方法; 其测量结果表示方法如下:

测量结果应给出被测量的量值  $\bar{x}$ , 并标出总不确定度  $u$ , 可写成

$$x = (\bar{x} \pm u) \text{ 单位} \quad (2.3-1)$$

它表示被测量的真值在区间  $(\bar{x} - u, \bar{x} + u)$  内的可能性 (概率或称置信概率) 约等于或大于 95%。实验教学中总不确定度也简称为不确定度。

## 2.3.2 直接测量不确定度的估算

在式 (2.3-1) 中,  $u$  为不确定度 (也称总不确定度)。不确定度  $u$  的大小表征测量结果的可信程度, 按其数值的来源和评定的方法, 不确定度分为统计不确定度  $u_A$  和非统计不确定度  $u_B$  两类分量; 即

(1)  $A$  类不确定度分量  $u_A$ : 指经多次重复测量后用统计方法计算出的不确定度, 也称为统计不确定度。

(2)  $B$  类不确定度分量  $u_B$ : 指由非统计方法估算出的不确定度, 也称为非统计不确定度。

总不确定度由两类分量用方和根法合成, 即

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.3-2)$$

1.  $A$  类不确定度  $u_A$  的估算

在相同条件下对同一被测量作多次测量时,  $A$  类不确定度分量  $u_A$  等于测量值标准偏差  $\sigma_x$  乘以一因子  $\frac{t}{\sqrt{n}}$ , 即

$$u_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma_x = \frac{t}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (2.3-3)$$



因子  $\frac{t}{\sqrt{n}}$  的大小与测量次数  $n$  有关, 也与置信概率  $p$  有关。在物理实验教学中, 约定取置信概率  $p=95\%$ 。表 2.3—1 给出了  $p=95\%$  时  $n \sim \frac{t}{\sqrt{n}}$  的对应值, 供实验时查用。

表 2.3—1  $p=95\%$  时  $n \sim \frac{t}{\sqrt{n}}$  对应表

| 测量次数<br>$n$                  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6                                                      | 7    | 8    | 9    | 10   | 15                                                               | 20   | $\infty$                |
|------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|
| $\frac{t}{\sqrt{n}}$         | 8.98 | 2.48 | 1.59 | 1.24 | 1.05                                                   | 0.93 | 0.84 | 0.77 | 0.72 | 0.55                                                             | 0.47 | $\frac{1.96}{\sqrt{n}}$ |
| $\frac{t}{\sqrt{n}}$<br>的近似值 | 9.0  | 2.5  | 1.6  | 1.2  | $6 \leq n \leq 10$ , 可取 $\frac{t}{\sqrt{n}} \approx 1$ |      |      |      |      | $n > 10$ 时,<br>取 $\frac{t}{\sqrt{n}} \approx \frac{2}{\sqrt{n}}$ |      |                         |

从上表可知, 一般测量次数满  $5 < n < 10$  时, 可取因子  $\frac{t}{\sqrt{n}} \approx 1$ 。A 类不确定度分量  $u_A$  的估算就可以近似简化为

$$u_A = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.3-4)$$

## 2. B 类不确定度 $u_B$ 的估算

在普通物理实验中, 直接测量结果的 B 类不确定度  $u_B$  可以近似地用仪器误差  $\Delta_{\text{仪}}$  的标准偏差  $\sigma_{\text{仪}}$  来计算, 即

$$u_B = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2.3-5)$$

实验教学中的仪器误差  $\Delta_{\text{仪}}$  一般取仪表、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、器具的准确度登记或允许误差范围给出。

## 3. 总不确定度的估算

在多次直接测量中, 为简便起见, 可将  $\sigma_{\text{仪}}$  就取为  $\Delta_{\text{仪}}$ , 即  $\sigma_{\text{仪}} \approx \Delta_{\text{仪}}$ 。

一般可用下式计算

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)^2 \sigma^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (2.3-6)$$

实验中, 如果因为平均值的标准偏差明显小于  $\frac{1}{2} \Delta_{\text{仪}}$ , 或因估计出的  $u_A$  对实验最后结果的不确定度影响甚小, 或因条件限制只进行了一次测量时,  $u$  可简单地用仪器误差限  $\Delta_{\text{仪}}$  来计算, 即

$$u = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (2.3-7)$$

## 4. 相对不确定度