

西南交通大学“323实验室工程”系列教材



# 大学物理实验教程

DAXUE WULISHIYAN JIAOCHENG

主编 庄建青 莉 黄玉霖

主审 西南交通大学实验室及设备管理处



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

西南交通大学“323 实验室工程”系列

# 大学物理实验教程

主编 庄 建 青 莉 黄玉霖

主审 西南交通大学实验室及设备管理处

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 提 要

本书分 3 篇,第 1 篇介绍误差理论与数据处理,第 2 篇为基础实验与综合实验,第 3 篇为近代技术基础实验。全书共 40 个实验,内容涉及力学、热学、声学、光学、电学、磁学和近代物理。全书是按照教育部颁发的工科物理实验课程教学的基本要求,结合西南交通大学物理实验中心的实际情况编写的。

本书可作为高等工科院校各专业大学物理实验教材,也可供工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 庄建,青莉,黄玉霖主编. —成都:西南交通大学出版社,2010.2  
(西南交通大学“323 实验室工程”系列教材)  
ISBN 978-7-5643-0596-3

I. ①大… II. ①庄…②青…③黄… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 027514 号

---

西南交通大学“323 实验室工程”系列教材

### 大学物理实验教程

主 编 庄 建 青 莉 黄 玉 霖

\*

责任编辑 孟苏成

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸:185 mm×260 mm 印张:17.375

字数:434 千字 印数:1—3 000 册

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0596-3

定价:29.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

# 前 言

大学物理实验课是理工科学生重要的基础实验课程之一，是必修的一门实践性基础实验课，同时也是通过实践学习物理知识的过程。系统地学习大学物理实验课，对学生动手能力和创造性思维能力的培养能起到良好的促进作用，并为学生适应现代科学技术的不断进步打下坚实的基础。

按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，我们以基本实验理论、基本实验技能、综合性设计实验、近代技术实验渐进的方式编写了这本教材，涉及力学、热学、声学、电学、磁学、光学及近代物理的一些内容。本书分为3篇：第1篇2章，阐述了物理实验课的作用和主要教学环节。第2篇2章，围绕物理实验中常见的基本测量方法和基本实验技能，以及实验数据的处理方法，编写了15个基础实验；围绕培养学生创造性思维能力，编排了16个设计性、综合性实验。第3篇编写了9个近代技术基本实验，以丰富学生的知识并拓宽其视野。

本书的编写是在西南交通大学物理实验中心建设和教师实验教学经验积累的基础上进行的，物理实验中心的建设为实验教学提供了物质基础，而教材是实验教学的核心，它是集体智慧和集体劳动的结晶。物理实验中心近年来编写了许多物理实验教材，其中有袁玉辉等编写的《大学物理实验》、温诚忠等编写的《物理实验教程》、吴平等编写的《大学物理实验》、姜向东等编写的《大学物理实验》、吴晓立等编写的《大学物理实验教程》、黄玉霖等编写的《大学物理实验》，本书部分章节选自上述教材。在本书的编写过程中，得到了物理实验中心广大教师的大力支持，并参考了许多兄弟院校的大学物理实验教材和部分仪器生产厂家的资料，编者在此表示诚挚的感谢。

本书是西南交通大学物理基地建设支持项目之一，在编写和出版过程中得到了西南交通大学教务处、实验室及设备管理处的大力支持，并由西南交通大学实验室及设备管理处审核全书，编者在此表示感谢。

本书的编写工作主要由西南交通大学庄建、青莉和黄玉霖老师完成，胡清老师编写了5.5，陈桔老师编写了5.7。在本书的编写过程中，还得到了温诚忠、姜向东、冯振勇、黄整、巴璞、吴晓立、杨仕君、陈汉军、邱春蓉、王家强、韩立唐、龚宁、魏云、朱宏娜、吴文君、常相辉等老师的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2010年1月

# 目 录

## 第 1 篇 误差理论与数据处理

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 .....              | 1  |
| 1.1 物理实验的地位和作用 .....         | 1  |
| 1.2 大学物理实验课的目的和任务 .....      | 1  |
| 1.3 物理实验课的主要教学环节 .....       | 2  |
| 第 2 章 不确定度评定及数据处理 .....      | 4  |
| 2.1 测量的基本概念 .....            | 4  |
| 2.2 测量误差的基本概念及分类 .....       | 5  |
| 2.3 仪器误差 .....               | 10 |
| 2.4 测量结果的评定和不确定度 .....       | 13 |
| 2.5 测量结果的表示 .....            | 17 |
| 2.6 有效数字及运算规则 .....          | 18 |
| 2.7 微小误差原则 .....             | 20 |
| 2.8 不确定度等量分配原则与测量仪器的选择 ..... | 20 |
| 2.9 实验数据处理的常用基本方法 .....      | 21 |
| 思 考 题 .....                  | 27 |

## 第 2 篇 基础实验与综合实验

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 3 章 基础实验 .....         | 29 |
| 3.1 杨氏弹性模量的测量 .....      | 29 |
| 3.2 空气比热容比的测量 .....      | 35 |
| 3.3 转动惯量的测定 .....        | 38 |
| 3.4 电学基础 .....           | 42 |
| 3.5 中、低值电阻的测量 .....      | 53 |
| 3.6 静电场的模拟 .....         | 58 |
| 3.7 霍尔元件基本参量及磁场的测量 ..... | 62 |
| 3.8 电子束聚焦和偏转研究 .....     | 71 |
| 3.9 示波器的调整和使用 .....      | 76 |
| 3.10 光学基础 .....          | 90 |

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| 3.11       | 分光计的调整与使用            | 103        |
| 3.12       | 偏振光的研究               | 111        |
| 3.13       | 光的等厚干涉               | 118        |
| 3.14       | 导热体热导率的测定实验          | 123        |
| 3.15       | 电子荷质比的测量             | 128        |
| <b>第4章</b> | <b>综合性、设计性实验</b>     | <b>133</b> |
| 4.1        | 密立根油滴实验              | 133        |
| 4.2        | 示波器测超声波声速            | 136        |
| 4.3        | 压力传感器的特性及非平衡电桥信号转换技术 | 142        |
| 4.4        | 电位差计的研究              | 149        |
| 4.5        | 迈克耳逊干涉仪的调整与使用        | 156        |
| 4.6        | 光电效应法测普朗克常数          | 164        |
| 4.7        | 全息照相                 | 167        |
| 4.8        | CCD 测量光强分布           | 174        |
| 4.9        | 棱镜摄谱实验               | 180        |
| 4.10       | 重力加速度测量(设计性实验)       | 191        |
| 4.11       | 示波器的组装调试与测量          | 194        |
| 4.12       | 分光计测介质折射率            | 201        |
| 4.13       | 测凹透镜的焦距(自组光路设计实验)    | 202        |
| 4.14       | 自组望远镜(自组光路设计实验)      | 202        |
| 4.15       | 双缝干涉的研究              | 203        |
| 4.16       | 光栅测量(设计性实验)          | 205        |

## 第3篇 近代技术基础实验

|             |                 |            |
|-------------|-----------------|------------|
| <b>第5章</b>  | <b>近代技术基础实验</b> | <b>207</b> |
| 5.1         | 夫兰克-赫兹实验        | 207        |
| 5.2         | 液晶的电光特性         | 214        |
| 5.3         | 声光效应实验          | 218        |
| 5.4         | 光速测量实验          | 226        |
| 5.5         | 磁场的测量           | 235        |
| 5.6         | 机器人物理原理实验       | 242        |
| 5.7         | 硅光电池特性研究实验      | 247        |
| 5.8         | 红外传输实验          | 254        |
| 5.9         | 虚拟仪器实验          | 262        |
| <b>附 表</b>  |                 | <b>267</b> |
| <b>参考文献</b> |                 | <b>272</b> |

# 第 1 篇 误差理论与数据处理

## 第 1 章 绪 论

科学实验在科学技术的发展中起着关键的作用。在人们认识自然、开拓与探索新的科技领域中，实验是一种不可缺少的手段。科学规律都应建立在严格的实验之上。

### 1.1 物理实验的地位和作用

作为研究自然界物质运动最基本、最普遍形式的物理学，其形成和发展是以实验为基础的。物理实验的重要性，不仅表现在通过实验可以发现物理定律，而且表现在物理学的每一项重要发现和突破都与实验密切相关。以伽利略、牛顿、麦克斯韦等人的理论为代表的经典物理学的形成，和以普朗克、爱因斯坦等人的理论为代表的近代物理学的发展，都证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中，物理实验和物理理论始终相互制约、相互促进。没有理论指导的实验是盲目的，实验必须总结抽象上升为理论，才有其存在的价值；而理论必须靠实验来检验，同时理论上的需要又促进实验的发展。

### 1.2 大学物理实验课的目的和任务

大学物理实验课是对理工科学生开设的一门基础必修课程，是对学生进行科学实验基本训练的开端，旨在使学生获得基本的实验知识、方法和技能方面的训练，是后续课程的基础，是提高实验能力和培养科学素质的重要起点。

目前，国内越来越多的高校把大学物理实验课作为独立课程开设。对大学物理实验课的重视也日益增强。无论是教学理念、实验内容还是教学形式、实验手段，都在进行全方位的改革。近年来，由于科学技术进步所带来的实验仪器改进以及教育部开展的精品课程建设、工科基地建设、实验室示范中心建设，我国许多高校的大学物理实验课程的整体水平提高较快，与发达国家大学的差距日益缩小，这为同学们学好大学物理实验创造了有利条件。

大学物理实验按内容分为：研究物理现象的成因和规律的定性实验；测量各物理量、物

理规律之间数量关系的定量实验；以及验证某些物理现象与定律的验证性实验。

根据教育部工科教学委员会物理实验教学大纲要求，大学物理实验的主要目的和任务如下：

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法及基本技能。能运用物理原理、物理实验方法研究物理现象的规律，加深对物理原理的理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力，包括：能够自行阅读实验教材，做好实验前的准备；能够借助教材与说明书，正确使用常用仪器；能够运用物理学理论对实验现象进行分析判断；能够正确记录和处理实验数据，绘制曲线，说明实验结果，写出实验报告；能够完成简单的设计性实验。

(3) 培养和提高学生的科学实验素质，使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，勤奋工作、严肃认真的工作态度，主动研究和坚韧不拔的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品质。

大学物理实验课是选取一些实验基本理论、基本物理量、基本方法和基本操作技能为主要教学内容进行教学的。在每一个实验的过程中，几乎都涉及实验的构思、组织，仪器的选择、安装、调试，数据的测量、读取、记录、处理，结果的分析、表达、推理、论断，报告的撰写，等等。显然，希望仅通过一两个实验来培养实验技能是办不到的。在教学过程中，每个实验只侧重培养实验技能的几个方面，只有通过全面的学习，才能获得完整的实验基本技能。

## 1.3 物理实验课的主要教学环节

大学物理实验课教学分三个环节：实验预习、实验操作和实验报告撰写。

### 1. 实验预习

实验前要做好预习。主要阅读实验教材和指导书，我校大学物理实验已开展了网上预习。通过预习了解实验内容和目的，实验的基本原理和测量方法，实验仪器的使用、操作要点及注意事项等。在此基础上，设计好数据记录表格，并写出预习报告等。经验表明，课前预习是否充分是实验中能否取得主动的关键。只有在充分了解实验内容的基础上，才能在实验操作中从容地观察现象，思考问题，达到预期的目的。

预习报告要求：实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理（包括电路图和光路图以及必要的仪器结构图）、实验内容与主要步骤。

### 2. 实验操作

学生进入实验室后应遵守实验室规则，认真阅读实验指导卡片，经指导教师检查预习报告后方能进行实验。实验正式进行之前，首先要熟悉一下所用仪器设备的性能、正确的操作规程和仪器的正常工作条件，切勿盲目操作，以免损坏仪器。实验中还应注意安全。

仪器连接调试准备就绪后，开始进行测量，测量的原始数据要整齐地记录在准备的表格中，读数一定要认真仔细。记录的数据一定要标明单位，不要忘记记录必要的环境条件，比



如：温度、湿度、气压等。测量完数据后，记录的数据要经指导教师审阅签字，发现错误数据时，要进行分析，重新测量。实验完毕，整理好仪器，经指导教师检查后方可离开实验室。

### 3. 实验报告的撰写

实验报告是实验工作的总结，学会撰写实验报告是培养实验能力的一个方面。要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来，要求文字通顺、字迹端正、图表规范、正确地表示结果、讨论认真。

实验报告通常包括以下内容：

- (1) 实验名称：表明做什么实验。
- (2) 实验目的：说明实验要达到的目的。
- (3) 实验仪器：列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。
- (4) 实验原理：阐明实验的理论依据，写出待测物理量的计算公式和简要推导过程，画出有关实验原理图或示意图。
- (5) 实验内容与步骤：根据实验过程写明内容与实验步骤。
- (6) 数据记录：将实验中所测得的原始数据尽可能用表格的形式列出，正确表示有效数字和单位。
- (7) 数据处理：按每个实验的具体要求对测量结果进行相应的计算、作图、误差处理，并对测量结果进行分析、评定。
- (9) 实验结果：简明写出实验结论。
- (10) 问题讨论：讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议，回答实验思考题。

撰写实验报告一律使用学校统一规定的实验报告用纸，要用坐标纸画实验曲线，不确定度计算要写出主要步骤。

物理实验课培养学生通过实验手段去发现问题、分析问题和解决问题的能力。因此，要求学生在每个实验中必须做到既动手、又动脑，将理论知识与实验技能很好地结合起来。这是学好大学物理实验课的关键。

## 第2章 不确定度评定及数据处理

科学实验离不开测量，测量必然存在误差。因此，必须对误差的来源、性质及规律进行研究，以便能及时发现误差，并采取措施减小误差。随着科学技术的发展及测量方法和手段的不断提高，尽管可将误差控制在越来越小的范围内，但始终不能完全消除。必须正确处理数据，有效地提高测量精度和测量结果的可靠程度。

### 2.1 测量的基本概念

#### 1. 测量及分类

测量是指为确定被测对象量值而进行的实验操作。在测量过程中，通常将被测量与同类标准量进行比较，得到被测量的量值。

测量可以按不同的测量方法进行分类，可分为直接测量、间接测量，也可按不同的条件分为等精度测量与不等精度测量。

直接测量是指将被测量与标准量直接进行比较，从而直接获得被测量的量值。例如，用米尺测量长度，用温度计测量温度，用电流表测量电流等都是直接测量。

间接测量是依据相应的理论函数关系式，由直接测量量根据函数关系式计算出所要求的物理量。例如，单摆法测重力加速度  $g$  时， $g=4\pi^2 l/T^2$ ， $T$  为周期， $l$  为摆长，都是直接测量值，而重力加速度  $g$  是间接测量值。在物理实验中大多数物理量都是间接测量量，但直接测量是间接测量的基础。

等精度测量是指在对某一物理量进行多次重复测量的过程中，每次的测量条件都相同。测量条件包括人员、仪器、方法等。

不等精度测量是指在对某一物理量进行多次测量时，测量条件完全或部分不同。例如，在对某一物理量进行多次测量时，选用的仪器不同、测量方法不同或测量人员不同等都属于不等精度测量。

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。等精度测量的数据处理比较容易，所以大学物理实验中的测量一般认为是等精度测量。

测量的方法和精确度随着科学技术的发展而不断提高。测量的精确度和测量的方法是紧密相关的，对于同一物理量在不同的量值范围内，测量的方法可以不同，即使在同一范围内，若精度要求不同也可以采用不同的测量方法。

## 2. 物理量的单位

物理量是由数值和单位两部分组成的，不同的物理量有各自不同的单位。但由于各物理量之间并不是相互独立的，许多物理量由物理定义和物理定律相联系，因此只需要规定几个基本物理量单位，其他物理量单位就可根据物理定义和物理定律推导出来。独立定义的单位称为基本单位，相应的物理量称为基本物理量。由基本单位导出的单位称为导出单位。

物理量单位基准的建立是随科学技术的发展而不断改进的。在物理学的发展过程中，使用过不同的单位制，各单位制选取的基本物理量和基本单位是不同的。1960年，第十一届国际计量大会规定了用于一切计量领域的国际单位制（简称SI），国际单位制规定了7个基本物理量单位，它们是：长度单位米（m），时间单位秒（s），质量单位千克（kg），绝对温度单位开尔文（K），电流单位安培（A），发光强度单位坎德拉（cd），物质的量单位摩尔（mol）。同时国际单位制还规定了一系列配套的辅助单位和导出单位以及通用名称，形成了一套严密、完整、科学的单位制。

为了确保计量单位的统一和量值的准确可靠，1984年，国务院规定以国际单位制为我国法定计量单位。

## 2.2 测量误差的基本概念及分类

实践证明，测量结果都存在误差。对于一个测量结果，不仅要提供被测对象的量值大小和单位，还要对量值本身的可靠程度作出判断。不知道可靠程度的测量是没有意义的。分析测量中存在的各种误差，尽量消除其影响，对测量结果中不能消除的误差作出判断，是物理实验和科研工作中不可缺少的环节。

### 1. 真 值

真值是指被测量量在其所处的确定条件下实际具有的真实量值。但由于测量误差的存在，真值一般无法得到，它是一个理想的概念。因此通常所说的真值都是约定真值。在实际测量中，上一级标准的示值对下一级标准来说，可视为相对真值。在多次重复测量中，可用修正过的测量值的算术平均值作为相对真值或约定真值。

### 2. 绝对误差

测量值与真值之差定义为测量误差，又称绝对误差。一般表示为

$$\Delta X = X - A \quad (2.2.1)$$

式中  $X$ ——测量得到的值；

$A$ ——被测量量的真值；

$\Delta X$ ——测量误差。

按照定义，误差是测量结果与客观真值之差，它既有大小又有正负，其量纲与被测量的量纲相同。由于真值在绝大多数情况下无法知道，因此误差也是未知的，只能进行估计。

### 3. 相对误差

相对误差是测量值的绝对误差  $\Delta X$  与其真值  $A$  之比，常用百分数表示，即

$$E = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (2.2.2)$$

一般情况下，测量值与真值相差不会太大，故可以把误差与测量值之比作为相对误差，表示为

$$E = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (2.2.3)$$

用相对误差能确切地反映测量效果。例如，测量长度为 1 000 mm 时，其绝对误差为 5 mm；而测量长度为 10 mm 时，其绝对误差为 1 mm。尽管前者的绝对误差为后者的 5 倍，但前者的测量效果却比后者好，用相对误差的概念就能作出评价。

#### 4. 测量误差的分类

根据误差的性质和产生的原因，传统上，把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。随着误差理论不断发展，传统的分类方法将逐渐过渡到新的分类方法。当然，传统的分类方法是新的分类方法的基础。作为教学内容的连续和更新，我们把这两种方法都分别介绍，本节介绍传统的分类方法，本章第 4 节着重介绍新方法的应用。

##### 1) 系统误差

在同一量的多次测量过程中，测量值对真值的恒大（恒小）或以确定的规律变化的测量误差称为系统误差。

系统误差决定测量结果的“正确”程度。系统误差与测量次数无关，因此，不能用增加测量次数的方法使其消除或减小。

许多系统误差可以通过实验确定并加以修正，但有时由于对某些系统误差的认识不足或没有相应的手段予以充分肯定，不能对系统误差进行修正。

产生系统误差的原因是多方面的，主要有测量仪器误差、理论方法误差、环境误差和个人误差等。

测量仪器误差是由于仪器本身的缺陷或没有按规定使用仪器而造成的。例如，仪器零点不准、天平两臂不等长等。

理论方法误差是由于测量所依据的理论公式本身的近似性，实验条件不能达到所规定的要求，或测量方法不适当所带来的误差。例如，单摆的周期公式成立的条件是：摆角趋于零，摆球的体积趋于零。这些条件在实验中是达不到的。另外，用伏安法测电阻时，电表内阻的影响等也会引起误差。

环境误差是由于各种环境因素，如温度、气压、振动、电磁场等与要求的标准状态不一致，引起测量设备的量值变化或机器失灵等产生的误差。

个人误差是由观测者本人生理或心理特点造成的。例如，估计读数时，有些人始终偏大，而有些人始终偏小等。正因为引起系统误差的因素多种多样，没有固定的模式，所以要减小和消除系统误差就要具体情况具体分析。常采用对比法、理论分析法或数据分析法来找出系统误差，提高测量的准确程度。

##### 2) 随机误差

实验中即使采取了措施，对系统误差进行修正或消除，仍存在随机误差。在同一量的多次测量中，各测量数据的误差值或大或小、或正或负。以不可确定的方式变化的误差称为随机误差。

随机误差决定测量结果的“精密”程度。

随机误差的特点是，表面上单个误差值没有确定的规律，但进行足够多次的测量后可以发现，误差在总体上服从一定的统计分布，每一误差的出现都有确定的概率。

随机误差是由许多随机因素综合作用造成的，这些误差因素不是在测量前就已经固有的，而是在测量中随机出现的，其大小和符号的正负各不相同，所以随机误差不能完全消除，只能根据其本身存在的规律用多次测量的方法来减小。

随机误差的分布规律和处理方法由于涉及较多的数理统计和概率论知识，是比较复杂的，在这里只简单介绍正态分布的性质及特征量，详尽的讨论请查阅有关误差理论与数据处理的书籍。

实践表明，绝大多数随机误差分布都服从正态分布。正态分布具有有限性、抵偿性、单峰性和对称性。

作为随机变量，随机误差 $\delta$ 的统计规律可由分布密度 $f(\delta)$ 给出完整的描述。由随机误差的特性，从理论上可得到

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.2.4)$$

式中，参数 $\sigma$ 称为标准差。

其正态分布密度曲线如图 2.2.1 所示。

分布密度 $f(\delta)$ 从 $-\infty$ 到 $\infty$ 的积分等于 1，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (2.2.5)$$

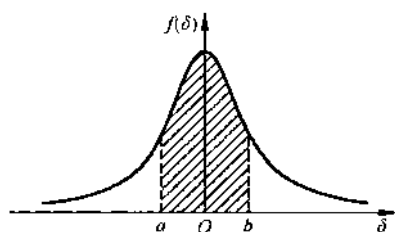


图 2.2.1 正态分布密度曲线

这一积分是整个分布密度曲线下的面积，代表测量的随机误差全部取值的概率。而在任意区间 $[a, b]$ 内的概率为

$$P = \int_a^b f(\delta) d\delta \quad (2.2.6)$$

这一概率是区间 $[a, b]$ 上分布密度曲线下的面积。

分布密度给出了随机误差 $\delta$ 取值的概率分布，这是对随机误差统计性的完整描述。但在一般测量数据处理中，并不需要给出随机误差的分布密度，通常只需给出一个或几个特征参数，即可对随机误差的影响作出评定。

表示测量结果的精度参数，目前常用标准差或极限误差等，下面给出有关标准差的一些基本概念。

### 3) 算术平均值

对同一量的 $n$ 次重复测量中，设测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，根据最小二乘法原理可以证明，其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.2.7)$$

对于多次测量而得到的算术平均值 $\bar{x}$ 是被测量真值的最佳估计值，这正是常用算术平均值作为测量结果的原因。

### 4) 标准差

标准差的计算可由贝塞尔 (Bessel) 公式得到

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2.8)$$

标准差 $\sigma$ 越小,相应的分布曲线越陡峭,说明随机误差取值的分散性小、测量精度高;标准差 $\sigma$ 大,则测量精度低。图 2.2.2 所示为不同 $\sigma$ 值的两条正态分布密度曲线的形状。通过计算还可以得到

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (2.2.9)$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997 \quad (2.2.10)$$

其意义表示,某次测量值的随机误差在 $[-\sigma, \sigma]$ 的概率为 68.3%,在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的概率为 99.7%,如图 2.2.3 所示。

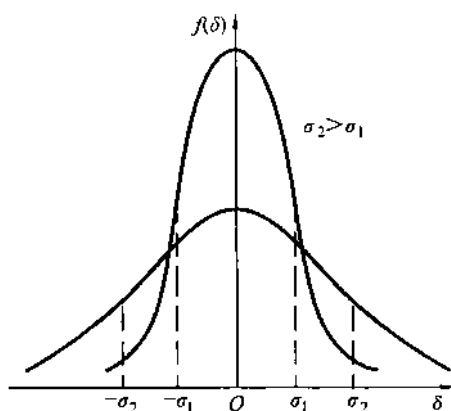


图 2.2.2 不同 $\sigma$ 值的分布密度曲线

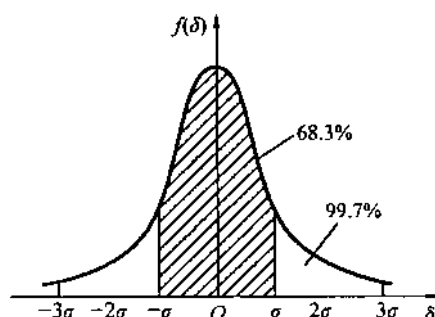


图 2.2.3 分布密度曲线与概率

#### 5) 算术平均值的标准偏差

实际测量中,由于测量次数有限,如果进行多组重复测量,则每一组所得到的算术平均值一般也不会相同,因此,算术平均值也存在误差,用算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.2.11)$$

其意义表示,测量值的平均值的随机误差在 $[-\sigma_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{x}}]$ 的概率为 68.3%;在 $[-3\sigma_{\bar{x}}, 3\sigma_{\bar{x}}]$ 的概率为 99.7%,或者说测量值的真值在 $[(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}), (\bar{x} + \sigma_{\bar{x}})]$ 范围的概率为 68.3%;在 $[(\bar{x} - 3\sigma_{\bar{x}}), (\bar{x} + 3\sigma_{\bar{x}})]$ 范围内的概率为 99.7%。

需要注意, $\sigma$ 与 $\sigma_{\bar{x}}$ 是两个不同的概念,标准差 $\sigma$ 反映了一组测量数据的精密程度,而算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 反映了算术平均值接近真值的程度。

从贝塞尔公式(2.2.8)可以看出,随着测量次数 $n$ 的增加,标准差 $\sigma$ 趋于稳定,而根据式(2.2.11), $\sigma_{\bar{x}}$ 随 $n$ 的增加而减小,所以测量精度随 $n$ 的增加会有所提高。因此,在实际测

量中, 应根据 $\sigma$ 稳定值(由测量仪器的精度所决定)和对结果的精度要求, 合理地选定测量次数。一般情况下, 取 $5 < n \leq 15$ 。

**例 2.1** 用千分尺测一圆柱体的直径 10 次(单位: mm), 数据为 2.474, 2.473, 2.478, 2.471, 2.480, 2.472, 2.477, 2.475, 2.474, 2.476, 试表示出测量结果。

解:

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 2.475 \text{ (mm)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7 \times 10^{-3}}{9}} = 0.028 \text{ (mm)}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.009 \text{ (mm)}$$

所以测量结果

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} = (2.475 \pm 0.009) \text{ (mm)} \quad (P = 68.3\%)$$

或

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} = (2.475 \pm 0.027) \text{ (mm)} \quad (P = 99.7\%)$$

上面分别讨论了系统误差与随机误差, 一般情况下, 两种误差同时存在且相互影响, 这就需要用到误差的合成。

#### 6) 粗大误差

粗大误差又称疏忽误差或过失误差, 它是由于测量者技术不熟练, 测量时不仔细, 或外界严重干扰等原因造成的。粗大误差超出了正常的误差分布范围, 会使测量结果产生明显的歪曲, 因此, 一旦发现含有粗大误差的测量数据(称为异常数据), 应将其剔除不用。

在判别某组测量数据是否含有粗大误差时, 要特别慎重, 仅凭直观判断常难以区别出粗大误差和正常分布的较大误差。若主观地将误差较大但属正常分布的测量数据判定为异常数据而剔除, 尽管看起来精度很高, 然而那是虚假的, 不可靠的。

判别异常数据的方法一般采用  $3\sigma$  准则。我们知道, 按照正态分布, 误差落在  $\pm 3\sigma$  以外的概率只有 0.3%。因而, 可以认为, 在有限次重复测量中误差超过  $\pm 3\sigma$  的测量数据是由于过失或其他因素造成的, 为异常数据, 应当剔除。

#### 7) 精密度、正确度和准确度

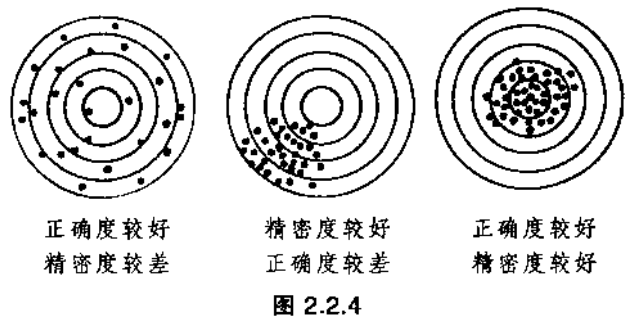
为了对测量结果作出评定, 人们经常用“精度”一类的词来形容测量结果的误差大小。《计量名词术语定义》中规定其含义如下:

**精密度:** 表示多次测量时, 测量值的集中程度, 它是测量值的随机误差大小的量度, 与测量值的系统误差无关。

**正确度:** 表示测量值与真值符合的程度, 它是测量值的系统误差大小的量度, 与测量值的随机误差无关。

**准确度:** 是对测量数据精密度和正确度的综合评定。表示测量值与被测量真值之间的一致程度。准确度又称精确度。

作为一种形象的说明，可以参照图 2.2.4 来帮助理解上述三个概念。



## 2.3 仪器误差

实验中所用仪器不可能是绝对准确的，它会给测量结果带来一定的误差，这种误差称为仪器误差。仪器误差的来源很多，它与仪器的原理、结构和使用环境等有关。一般情况下，仪器误差既包括系统误差，又包括随机误差。究竟以哪种误差为主，对不同仪器是不尽相同的。但实际上，人们通常关心的是仪器提供的测量结果与真值的一致程度，是测量结果中各系统误差与随机误差的综合估计值。在物理实验中，把由国家技术标准规定的仪器和量具的精度等级对应的误差和允许误差范围称为仪器最大允许误差（仪器误差限）。它是指在正确使用仪器的条件下，测量结果和被测量真值之间可能产生的最大误差。在测量中常常可用仪器的最大允许误差的绝对值表示仪器的误差限。下面简要介绍几种常用仪器和量具的最大允许误差。

### 1. 长度测量仪器

物理实验中最基本的长度测量仪器是米尺、钢直尺、钢卷尺、游标卡尺和螺旋测微计（又称千分尺）。这些长度测量仪器的主要技术指标及最大允许误差如表 2.3.1 所示。

表 2.3.1 常用长度测量仪器的技术指标及最大允许误差

| 仪器名称  | 量 程       | 分度值     | 最大允许误差                 |
|-------|-----------|---------|------------------------|
| 钢直尺   | 150 mm    | 1 mm    | $\pm 0.10 \text{ mm}$  |
|       | 500 mm    | 1 mm    | $\pm 0.15 \text{ mm}$  |
|       | 1 000 mm  | 1 mm    | $\pm 0.20 \text{ mm}$  |
| 钢卷尺   | 1 m       | 1 mm    | $\pm 0.8 \text{ mm}$   |
|       | 2 m       | 1 mm    | $\pm 1.2 \text{ mm}$   |
| 游标卡尺  | 125 mm    | 0.02 mm | $\pm 0.02 \text{ mm}$  |
|       |           | 0.05 mm | $\pm 0.05 \text{ mm}$  |
| 外径千分尺 | 0 ~ 25 mm | 0.01 mm | $\pm 0.004 \text{ mm}$ |

### 2. 天 平

天平的感量定义为：天平指针偏转一个最小刻度时，在秤盘上所要增加的砝码。天平的



灵敏度定义为：天平感量的倒数。按天平感量与最大称量之比将天平分为 10 级，如表 2.3.2 所示。天平的技术参数和最大允许误差如表 2.3.3 所示。

表 2.3.2 天平级别的划分

| 精度级别    | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 感量/最大称量 | $1\times10^{-7}$ | $2\times10^{-7}$ | $5\times10^{-7}$ | $1\times10^{-6}$ | $2\times10^{-6}$ | $5\times10^{-6}$ | $1\times10^{-5}$ | $2\times10^{-5}$ | $5\times10^{-5}$ | $1\times10^{-4}$ |

表 2.3.3 天平的技术参数和最大允许误差

| 仪器名称           | 量 程   | 分度值    | 最大允许误差                                                                                                                                          |
|----------------|-------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4~10 级天平（物理天平） | 500 g | 0.05 g | 综合误差 $\begin{cases} \text{满量程 } 0.08 \text{ g} \\ \frac{1}{2} \text{ 量程 } 0.06 \text{ g} \\ \frac{1}{3} \text{ 量程 } 0.04 \text{ g} \end{cases}$ |
| 1~3 级天平（分析天平）  | 200 g | 0.1 mg | 综合误差 $\begin{cases} \text{满量程 } 1.3 \text{ mg} \\ \frac{1}{2} \text{ 量程 } 1.0 \text{ mg} \\ \frac{1}{3} \text{ 量程 } 0.7 \text{ mg} \end{cases}$ |

注：这里认为砝码是精确的，不考虑砝码误差。

3. 时间测量仪器

机械停表、石英电子秒表和数字毫秒表是物理实验中最常用的计时表。在物理实验中，用机械停表对较短时间进行测量，其最大允许误差可取为 0.01 s。

对石英电子秒表，最大允许误差与测量值有关，其关系为

$$\text{最大允许误差} = (5.8 \times 10^{-6}t + 0.01) \text{ (s)}$$

式中  $t$ ——时间的测量值。

对数字毫秒表最大允许误差取它的最小分度值。如：时基值为 1 ms，那么最大允许误差就取为 1 ms。

4. 温度测量仪器

实验室中常用的测温仪器有：水银温度计、热电偶和电阻温度计等。表 2.3.4 给出了常用的温度计和热电偶的测量范围和最大允许误差。

表 2.3.4 常用温度计、热电偶的测量范围和最大允许误差

| 仪器名称         | 测量范围/°C   | 最大允许误差/°C |
|--------------|-----------|-----------|
| 实验室用水银-玻璃温度计 | -30~300   | 0.05      |
| 一等标准水银-玻璃温度计 | 0~100     | 0.01      |
| 工业用水银-玻璃温度计  | 0~150     | 0.5       |
| 标准铂铑-铂热电偶    | 600~1 300 | 0.1       |
| 工作铂铑-铂热电偶    | 600~1 300 | 0.3%×被测温度 |