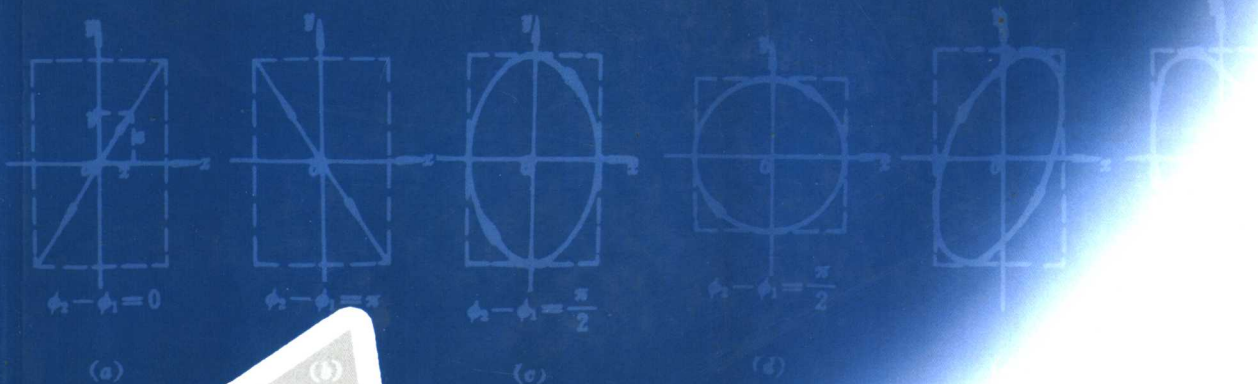
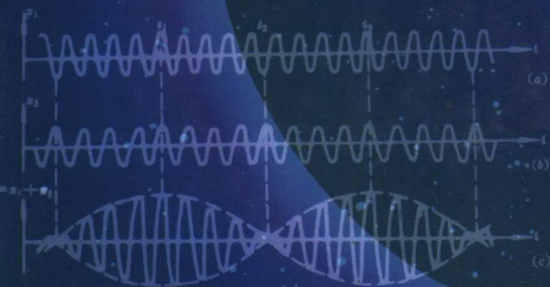


# 大学物理实验

# Physics

徐志东 陈世涛 © 主编 胡军 © 副主编



-33  
40



西南交通大学出版社

# 大学物理实验

徐志东 主 编  
陈世涛  
胡 军 副主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书根据国家教委颁布的《高等工业学校物理实验基本要求》，并结合多年集体教学改革实践编写而成。全书共分七章，收入 40 个实验，不仅有力、热、光、电、磁等传统的基础实验，还有一些近代物理、近代技术和与此相关的自行设计实验，以及将计算机引入实验教学，进行数据处理和计算机模拟实验。

本书可作为高等工科院校物理实验课教材及成人教育理工类专业的物理实验教材，也可供工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 徐志东, 陈世涛主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2003.12  
ISBN 7-81057-784-0

I. 大... II. ①徐...②陈... III. 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 086923 号

---

## 大学物理实验

徐志东 主编  
陈世涛

责任编辑 王 曼

封面设计 何东琳设计工作室

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: 87600564)

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

E-mail: [cbsxx@swjtu.edu.cn](mailto:cbsxx@swjtu.edu.cn)

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 14.625

字数: 341 千字

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-784-0/O · 053

定价: 19.00 元

# 前 言

物理学是一门实验科学，大学物理实验是为高等工业院校学生首次独立开设的一门实验课，该课程曾为培养 20 世纪的优秀人才做出了卓越贡献，但站在 21 世纪培养科技人才素质的角度看，原有物理实验课的体系、教学内容、教学方法已与新的要求不相适应。为此在多年改革探索并积累了一些经验的基础上，编写了这本大学物理实验新教材。

本教材体系结构按难易程度、基础普遍性和强调培养学生的动手能力和综合分析能力，分为基础实验、应用技术实验、自行设计实验和计算机模拟实验四个部分，共引入 40 个实验。

本教材篇幅重点放在基本理论、基本方法和基本手段上。所谓基本理论是指所涉及的有关量、物理规律及物理概念要阐述清楚，实验数据处理要有统一的理论要求，本书参考国家计量技术规范（JJF1059—1999），从不同于传统“误差理论”一种新的角度，引入“不确定度”来评价测量结果；基本方法是指实验方法、测试方法。对同一量的测试方法可能较多，手段也各不相同，这些都应适当讲述清楚，以利于启发学生思路。

本教材是在陈世涛、卢昌颖老师所编物理实验讲义的基础上修改、整合而成。在内容上除了保留基础实验：力、热、光、电、磁等传统实验内容外，还编入了一些近代物理、近代技术实验，如激光技术、光数字传输技术等实验。

本教材由徐志东、陈世涛任主编，胡军任副主编，其他参加编写教材的大多为在实验教学第一线辛勤耕耘多年的教师，其中第二章实验由胡军编写，第六、七、九、二十九实验由邱卫东老师编写，第二十五实验由盛克敏老师编写。全书由陈世涛负责统稿，徐志东教授负责修改和审核。尽管一些老师未能直接参与教材编写，但是在本教材中，也有他们的劳动与奉献。

本书在编写过程中得到有关领导薛正庭、田俐萍等同志的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥或疏漏之处，欢迎读者提出宝贵建议。

编 者

2003 年 6 月

# 目 录

第一章 绪 论 .....	1
第一节 大学物理实验课的作用与任务 .....	1
第二节 物理实验课的要求与规则 .....	2
第二章 测量误差与数据处理的基础知识 .....	4
第一节 测量与误差 .....	4
一、测量及其误差 .....	4
二、误差的分类和特点 .....	5
三、测量中常用到的一些术语及概念 .....	7
第二节 测量的不确定度 .....	7
一、测量不确定度的基本概念与分类 .....	8
二、A 类标准不确定度 $\Delta_A$ .....	8
三、B 类标准不确定度 $\Delta_B$ .....	9
四、合成标准不确定度 $\Delta$ .....	10
五、间接测量量的标准不确定度 .....	11
第三节 测量结果的表示与有效数字 .....	12
一、测量结果的表示 .....	12
二、有效数字 .....	12
第四节 数据处理 .....	14
一、列表法 .....	14
二、作图法 .....	14
三、逐差法 .....	16
四、最小二乘法 .....	17
第三章 常用仪表及器具介绍 .....	19
第一节 基本物理量 $t$ 、 $m$ 、 $l$ 的测量器具 .....	19
一、停表 .....	19
二、物理天平 .....	19
三、游标卡尺 .....	21
四、螺旋测微计 .....	22
五、读数显微镜和测微目镜 .....	23
第二节 电学量测量常用仪表及器具 .....	25
一、直流电流表和电压表 .....	25
二、数学式电压表 .....	26

三、万用电表及数字万用表 .....	27
四、电阻箱 .....	29
五、滑线变阻器 .....	30
六、电源及电源开关 .....	31
七、检流计 .....	32
第三节 光源及光学仪器的使用与注意事项 .....	33
一、光源 .....	33
二、光学仪器的使用与注意事项 .....	34
<b>第四章 基础物理实验 .....</b>	<b>36</b>
实验一 物体密度的测定 .....	36
实验二 单摆测重力加速度 .....	41
实验三 用拉伸法测金属的杨氏模量 .....	44
实验四 刚体转动惯量的测定 .....	49
实验五 液体粘度的测定 .....	54
实验六 电学基础实验 .....	58
实验七 示波器的调整与使用 .....	63
实验八 示波器测声速 .....	72
实验九 惠斯通电桥测电阻 .....	77
实验十 静电场模拟 .....	81
实验十一 电位差计测电源电动势及内阻 .....	86
实验十二 光电效应研究 .....	91
实验十三 用光电效应测定普朗克常量 .....	96
实验十四 热电偶标定 .....	100
实验十五 冷却法测固体的比热 .....	105
实验十六 薄透镜焦距测定 .....	109
实验十七 光栅衍射规律研究 .....	114
实验十八 固体折射率的测定 .....	123
实验十九 牛顿环与劈尖干涉 .....	128
<b>第五章 应用技术物理实验 .....</b>	<b>134</b>
实验二十 迈克尔逊干涉仪测光波波长 .....	134
实验二十一 双棱镜测定激光波长 .....	142
实验二十二 霍尔效应测磁场 .....	146
实验二十三 电子和场 .....	151
实验二十四 偏振光研究 .....	156
实验二十五 数字信号光纤传输技术研究 .....	162
实验二十六 全息照相 .....	177
实验二十七 光电倍增管光谱响应特性曲线测定 .....	181
实验二十八 超声波测声速及超声波探伤 .....	186
实验二十九 激光散斑干涉法测量物体微小位移 .....	196

实验三十	激光散射角测量 .....	201
<b>第六章</b>	<b>设计性实验 .....</b>	<b>205</b>
实验三十一	单摆研究 .....	206
实验三十二	组装望远镜和显微镜 .....	207
实验三十三	测定低电阻 .....	209
实验三十四	非线性电阻特性研究 .....	209
实验三十五	弦共振法测定交流电频率 .....	210
实验三十六	光栅特性研究 .....	211
实验三十七	测量给定物体密度 .....	212
实验三十八	电表改装与校准 .....	212
实验三十九	电源特性研究 .....	213
实验四十	测定微安表内阻 .....	213
<b>第七章</b>	<b>CAI 在物理实验中的应用 .....</b>	<b>215</b>
第一节	数据处理 .....	215
第二节	计算机模拟实验 .....	218
<b>附表</b>	<b>各种物理参数 .....</b>	<b>220</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>226</b>

# 第一章 绪论

## 第一节 大学物理实验课的作用与任务

### 一、物理实验课的作用与地位

物理学是一门实验科学。物理规律的发现、物理概念的确立都来源于对实验的观察和研究，并受到实验的检验。例如，牛顿是在伽利略、开普勒等人的实验及其工作的基础上归纳总结出万有引力定律并完成了经典力学体系；电磁学中的一系列定律：库仑定律、安培定律、毕奥—沙伐定律、法拉第电磁感应定律等，也都是从大量的实验数据中综合、归纳出来的。麦克斯韦在大量实验的基础上总结并建立了电磁场理论，14年后赫兹的电磁波实验才使他的电磁场理论获得普遍承认；卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验揭开了原子的秘密；著名的迈克尔逊—莫雷实验为爱因斯坦的狭义相对论原理提供了强有力的证据，铺平了相对论发展的道路。而引力红移、光线弯曲、水星近日点的进动等实验验证，使广义相对论为人们所接受。黑体辐射、光电效应、原子光谱线系等实验，促使了量子理论的诞生，并为夫兰克—赫兹实验所证实。尤其是现代物理实验技术以及物理测量仪器，已被广泛地运用到大多数现代化科学研究、生产技术领域。根据一些实验物理学的统计，从1947年在物理实验室内创造出第一个晶体三极管以来到现在，许多现代物理实验技术和手段，如光谱分析、质谱、波谱、色谱以及半导体、X射线、电子显微镜、激光、全息、光导纤维、微波、红外、真空、超导、低温、核磁共振、电子衍射、自动控制等正朝气蓬勃地活跃在各种科研实验室及工业生产的前沿阵地上。可见物理实验对于推动科学与技术的发展起到了重要的作用，对于科技工作者来说，物理实验的有关知识与技能是必不可少的。

物理实验是人们借助特定的仪器设备，出于一定目的，人为地控制和模拟自然现象，并反复地观察和测试的一种研究方法。在其中需突出主要因素，忽略次要因素。物理实验的一项重要任务是培养学生以事实为依据，理论与实践相结合的科学态度；一丝不苟的工作作风；严密观察，勤于思考，勇于探索的精神。具有这样的素质，对于从事任何一项工作都是有所裨益的。

大学物理实验课是理工科学生首次进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课，认真学好实验课与学好物理理论课同等重要。

### 二、物理实验的任务与目的

(1) 通过对实验的观察、测量与分析，从理论与实际相结合上加深认识物理原理、物理概念与物理规律，同时也要将已学的理论知识用于指导实验和分析实验



(2) 对学生进行实验方法和实验技能的基本训练, 其中包括:

① 熟悉常用仪器的基本原理和性能, 能够借助教材或仪器说明书正确地安装、调节、操作与读数。

② 熟悉基本物理量常用的测量方法及其减小测量误差的方法。

③ 学会正确做实验记录、处理实验数据、分析判断实验结果、绘制曲线、写出合格的实验报告。

(3) 培养学生严谨的工作作风、实事求是的科学态度、爱护公共财物、团结协作、遵守纪律的优良品德。

## 第二节 物理实验课的要求与规则

### 一、物理实验课的基本程序与要求

#### 1. 实验前的预习

为了顺利、按时完成实验任务, 学生一定要做好实验前的预习。

预习时应理解实验原理, 搞清实验内容和要用的实验方法。为了使测量数据一目了然, 防止遗漏, 应根据实验要求预先画好或设计好数据表格。

不了解实验原理就动手操作, 只能机械地按照教材所规定的步骤进行, 尽管照猫画虎地取得了一些数据, 但不能深入理解物理现象的实质, 也不会注意实验方法中的技巧, 当然更谈不上主动地分析实验中的各种现象了。

#### 2. 实验操作

实验操作是物理实验课程中最重要的一环, 学生要充分利用这个过程认真调节仪器, 仔细观察实验现象, 一丝不苟地记录数据, 以求得到最大的收获。

进入实验室, 首先要了解实验规则及注意事项; 其次就是要熟悉和安装调整仪器, 经教师检查电路后开始测量。测量的原始数据(一定不要加工或修改)应整齐地记录在实验数据表中, 数据的有效位数由仪器的精度或分度值根据需要加以确定, 数据之间要留有间隙, 以便补充。若发现记录的数据有误应用笔划掉, 并将正确数据写在旁边, 不要在原数据上涂改, 因为有时在仔细核对以后常发现它并没有错。不要忘记记录有关的实验环境条件, 仪器的精度、规格及测量的单位。实验原始数据的优劣, 决定着实验的成败, 读数时务必认真仔细, 运算的错误可以修改, 原始数据则不能擅自改动。两人同做一个实验时, 既要分工又要协作, 共同配合完成实验。最后应关闭电源, 整理实验仪器, 清理桌面。

#### 3. 实验报告

实验报告是实验工作的总结, 要用简明的形式将实验情况及结果完整而又准确地表达出来。实验报告要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验结束后尽早写出实验报告的习惯, 因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括的内容：

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理：应简要地说明并列出现实中使用的主要公式、电路或光路图，若实际所用与教材中列出的不符，应以实际采用的为准。

(4) 仪器用具：列出主要仪器的型号、规格，并记录其编号。

(5) 实验记录：全部实验中有用的数据要尽量以表格的形式列出，并正确地表示出有效数字和单位。

(6) 数据处理：根据要求计算出最后的测量结果，可采用列表和作图法等手段，对所得的数据应进行误差分析。

(7) 实验结果：最后的结果应包括测量值、误差和单位，如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律，可只扼要地写出实验结论。

(8) 讨论分析：回答指定的实验思考题；描述实验中观察到的异常现象及可能的解释；分析实验误差的主要来源；对实验仪器和方法的改进建议等，还可以谈谈实验的心得体会。

以上是对报告的一般性要求，不同的实验，可以根据具体情况有所侧重和取舍，不必千篇一律。

## 二、实验室规则

(1) 实验时应严格遵守操作规程，注意安全，爱护仪器，在未弄清楚注意事项和操作方法之前不要乱动仪器。

(2) 细心操作：认真观察，及时记录实验原始数据，绝不允许事后追记。

(3) 实验室要保持肃静和整洁，不得大声喧哗、抽烟和吃东西。

(4) 无故迟到超过 10 分钟或没有预习者不得进入实验室做实验。

(5) 如遇到自己不能处理的问题应及时报告教师，电学实验电路连接完毕要经过教师同意，方可接通电源。

(6) 实验结束后应将仪器、用具整理好。原始数据须经教师过目并签字后才能离开实验室，原始数据一律要附在实验报告后面一起交给教师。

# 第二章 测量误差与数据处理的基础知识

本章将介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等内容。所介绍的都是初步知识，这些知识不仅在每一个实验中都要用到，而且也是今后从事科学实验所必须掌握的。对这些内容的深入讨论是普通计量学和数理统计学的任务，本书只是引用其中的某些结论和公式。

## 第一节 测量与误差

### 一、测量及其误差

#### 1. 测量

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、验证物理原理、了解物质特性等都要进行测量。所谓测量，就是通过各种方法对“被测量”进行赋值。测量通常分为直接测量和间接测量。“直接测量”是指可直接从仪器（或量具）上获知被测量大小的测量。例如，用米尺测量物体的长度，用天平和砝码测量物体的重量，用温度计测量温度，用电压表测量电压等都是直接测量。“间接测量”是指借助于直接测量的量与被测量的量之间已知的函数关系，由直接测量结果计算出被测量的量的数值。例如，直接测量一圆柱体的直径（ $d$ ）和高度（ $h$ ），再根据  $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$  计算出圆柱体的体积。

#### 2. 测量的误差

实践证明，测量结果都存在误差，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能做到绝对严密，这些就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，这些都是物理实验和其他科学实验中必不可少的工作。因此，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。

测量误差定义为测量值与被测量的真值（或约定真值）之差。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示：

绝对误差  $\Delta x = x - x_0$

式中  $\Delta x$  —— 绝对误差；

$x$  —— 测量值；

$x_0$  —— 真值。

相对误差  $E = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right| \times 100\%$

被测量的真值只是一个理想概念，是不可能知道的，在实际测量中常用算术平均值或被测量的公认值或较高准确度仪器测量的值来代替真值，称为约定真值。

## 二、误差的分类和特点

误差主要分为系统误差和随机误差两大类。它们的性质和特点不同，需分别处理。

### 1. 系统误差

系统误差是在对同一被测量量的多次测量过程中，保持恒定的或以可预知的方式变化的测量误差分量。这种误差服从确定性规律。

产生系统误差的原因很多，最常见的有：

(1) 测量仪器没有达到应有的准确度。例如，用秒表测量一匀速运动的物体通过某段路程所需的时间，若秒表走时较快，那么即使进行多次测量，测得的时间也总是偏大，而且总是偏大一个固定的量，这种因仪器不准确造成的误差，可通过修理仪器或标准读数来解决。

(2) 实验装置或实验方法没有（或不可能）完全满足理论上的要求。例如，用伏安法测电阻时，因电压表内阻不可能无穷大，电流表内阻不可能为零，故若用理论计算公式  $R = U/I$  去计算测量结果，则会因电表的接法不同，或者使测量的结果偏大，或者使测量的结果偏小，这种情况下，就要通过改进实验装置，如选用内阻更大的电压表、内阻更小的电流表来测量，或者是对测量结果进行修正，在计算公式中加上与电表内阻有关的修正项。

(3) 温度、湿度等环境因素没有控制在预定的范围内。例如，欲测量导线  $20^\circ\text{C}$  时的电阻值，若环境温度控制不好，偏离  $20^\circ\text{C}$  太多，则会由于导线的热膨胀，使长度随温度改变，从而导致电阻值的测量产生系统性误差分量。

(4) 测量者个人的生理特点或固有习惯带来的系统性误差分量。例如，在估读数据时总是偏大或偏小等。

发现和减小实验中的系统误差是一项困难而又重要的工作。实验者需要对整个实验依据的原理、方法，所用的测量仪器、测量步骤，实验中观察到的实验现象进行仔细分析，动手实验前就尽可能找出引起系统误差的主要因素，采取减少系统误差的措施，并在实验后尽可能对系统误差进行修正，以求得到正确的测量结果。

### 2. 随机误差

随机误差是指在多次测量同一物理量的过程中，误差时大时小，时正时负，以不可预知的方式变化着的测量误差分量。这种误差服从统计性规律。

这种误差是由实验中各种因素的微小变动性引起的。例如，实验装置在各次调整操作上的变动性，测量仪器指示数值的变动性，以及观测者本人在判断和估计读数的变动性等。

随机误差表现为，就某一次测量来说是没有规律的，是随机的，其大小和方向都不能预知，但对同一个量进行足够多次的测量，就会发现随机误差按一定的统计规律分布。在此只讨论一种最常见的分布——正态分布。

### 3. 随机误差的分布及处理

理论和实践表明，在大量、独立、均匀、微小的随机因素影响下，物理量的测量值服从正态分布（即高斯分布）规律。标准化的正态分布曲线如图 2.1 所示。

图中  $x$  —— 某物理量的实验测量值；

$P(x)$  —— 测量值的概率密度，且有

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

其中

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.1)$$

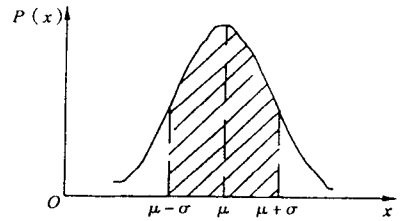


图 2.1 标准化的正态分布曲线

曲线中峰值处的横坐标对应于测量次数  $n \rightarrow \infty$  时被测量的平均值  $\mu$ ，称为总体平均值。 $\sigma$  为曲线上某点处的横坐标与  $\mu$  值之差， $\sigma$  是正态分布函数最重要的参数之一，它表征了测量值的分散程度， $\sigma$  越小，表明测量数据越集中，测量的精密度越高；反之，表明测量数据越分散，测量精密度越低， $\sigma$  称为正态分布的标准偏差。作为一个概率密度函数，曲线和  $x$  轴间的面积表示被测量落在某区间的概率。例如，图 2.1 中阴影部分的面积，就是测量结果落在  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  区间内的概率。经计算证明， $P = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} P(x) dx = 68.3\%$ ；若将区间扩大到  $-2\sigma \sim +2\sigma$ ，则  $x$  落在  $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$  区间内的概率就提高到 95.5%； $x$  落在  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  区间内的概率为 99.7%。

从图 2.1 的分布曲线可知：① 误差较小的数值出现的概率大；② 正、负误差出现的机会均等，在多次测量中，正、负误差可大致抵消，因而常用多次测量的算术平均值  $\bar{x}$  表示测量结果，以减小随机误差的影响。

实际实验中，测量次数  $n$  有限，则 (2.1) 式就变为

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

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

这一公式称为贝塞尔公式。 $\sigma_x$  表示这一测量列中某次测量  $x$  的标准偏差。

在测量同一量时，对于测量次数  $n$  相同的各组量中， $\sigma_x$  小的  $\bar{x}$  较可靠，而  $\sigma_x$  大的  $\bar{x}$  较不可靠。所以又定义算术平均值  $\bar{x}$  的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.4)$$

一般地， $\sigma_x$  大则  $\sigma_{\bar{x}}$  也大，而  $n$  增大时，能使  $\sigma_{\bar{x}}$  减小。

注：有的书上用  $S_{\bar{x}}$  符号表示算术平均值  $\bar{x}$  的标准偏差，用  $S_x$  表示标准偏差  $\sigma_x$ ，即

$$\sigma_{\bar{x}} \equiv S_{\bar{x}}, \quad \sigma_x \equiv S_x$$

(2.3) 式的计算结果在计算器上常用  $S$  或  $\sigma_{n-1}$  键表示，在实验数据处理中要计算  $S_x$  (即  $\sigma_x$ ) 时，只需将几个测量值按规定的操作步骤输入计算器，计算器便可方便地给出平均值  $\bar{x}$  及  $S_x$  (即  $\sigma_x$ )，不必按 (2.3) 式一步步去进行繁琐的计算。

### 三、测量中常用到的一些术语及概念

#### 1. 正确度

表示被测量的整体平均值与其真值符合的程度。它反映了系统误差的大小与随机误差无关。

#### 2. 精密度

表示各次测量值之间彼此接近的程度。它反映了随机误差的大小与系统误差无关。

#### 3. 准确度

表示对测量数据正确度与精密度的综合评定。它包括各测量值间的接近程度及总体平均值对真值的接近程度。

下面图 2.2 所示的打靶情况形象地表示了三者的区别：

图 (a) 表示精密度高而正确度低；(b) 表示正确度高而精密度的低；(c) 表示精密度和正确度都高，即准确度高。

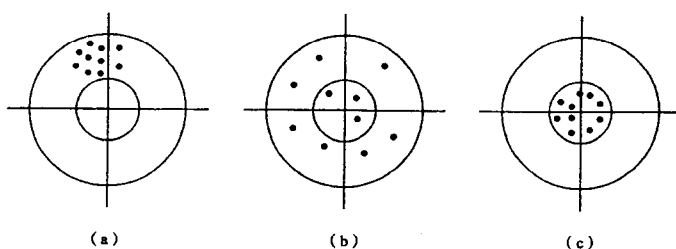


图 2.2 打靶情况分布图

## 第二节 测量的不确定度

在报告物理测量的结果时，不但要写明计量单位、测量结果，而且还有责任给出测量

结果的可信赖程度。然而，对于测量数据的处理，测量结果的表达，长期以来各个国家和不同学科有不同的看法和规定，有关术语的定义也不统一，从而影响了国际间的交流和对成果的相互利用。为此，1993年国际计量局、国际标准化组织等7个国际组织正式发布了“测量不确定度表示指南”，为计量标准的国际比对和测量不确定度的表述奠定了基础。为了与国际接轨，我国于1999年1月11日发布了新的计量技术规范《JJF1059—1999 测量不确定度评定与表示》，对测量结果的评定用“不确定度”表示。

因此，我们必须学习“测量不确定度评定与表示”的有关理论和知识，并掌握它们的计算方法和表示方式。这对于今后的专业学习和工作是非常必要的。

## 一、测量不确定度的基本概念与分类

测量不确定度是与测量结果相联系的参数。表征合理地赋予被测量之值的分散性，用来表示测量结果有效性的可疑程度或肯定程度，即它表示了被测量的真值所处范围的估计值。不确定度小，表示测量结果可信赖程度高；不确定度大，则表示测量结果可信赖程度低。

### 1. 不确定度的分类

按评定方法的不同，不确定度分为：

- (1) A类不确定度：用统计方法计算的不确定度分量。
- (2) B类不确定度：用其他方法估计出的不确定度分量。

测量结果的总不确定度称为合成不确定度，它是A类分量与B类分量按某种原则合成的结果。

### 2. 不确定度的表达方式

测量不确定度有两种表达方式：

- (1) 标准不确定度：用标准偏差给出的不确定度。
- (2) 扩展不确定度：用标准不确定度乘上一个包含因子（置信因子）给出的不确定度。

表2.1所示为正态分布下的包含因子与概率的关系。

表 2.1 正态分布下的包含因子与概率的关系

包含因子	1	2	3
概 率	68.3%	95.5%	99.7%

标准不确定度更便于国际间的交流和比对，本书约定，所有的实验数据处理，均采用标准不确定度。

## 二、A类标准不确定度 $\Delta_A$

这是用统计方法计算获得的不确定度分量。在实际工作中，人们往往关心的不是测量列数据的散布特性，而是测量结果，即算术平均值的离散程度。假设对某物理量进行了 $n$ 次等精度测量，观测值记为 $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。由上一节讨论可知

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

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

此式的物理含义是：在这一测量列中，任意一次测量  $x_i$  落在  $(\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x)$  区间的概率为 68.3%， $\bar{x}$  为最佳值。

如果我们增加测量次数，如  $(n+m)$  次，则可得到另一最佳值  $\bar{x}'$ ，如果继续增加测量次数，就会发现  $\bar{x}$  也是一个随机变量。这样一来，算术平均值  $\bar{x}$  本身的可靠性如何呢？我们用算术平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  来表示这一可靠性， $\bar{x}$  显然比任何一次测量更可靠，由上一节内容可得

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

$\sigma_{\bar{x}}$  就作为 A 类标准不确定度分量，记为  $\Delta_A$ 。注意，测量次数  $n$  要求至少大于 5 次。

例 1 在测量小球的体积实验中，对小球直径测量 10 次，数值如下表所示，试求测定直径  $D$  的 A 类标准不确定度分量。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ (cm)	2.00	2.01	2.02	1.99	1.99	2.00	1.98	1.99	1.97	2.00

解 由 (2.2) 式可知

$$\bar{D} = \frac{2.00 + 2.01 + \cdots + 2.00}{10} = 1.995 \quad (\text{cm})$$

又由 (2.4) 式得直径的标准偏差

$$\sigma_{\bar{D}} = \sqrt{\frac{(2.00 - 1.995)^2 + \cdots + (2.00 - 1.995)^2}{10(10-1)}} = 0.045 \quad (\text{cm})$$

即直径  $D$  的 A 类标准不确定度分量  $\Delta_A = 0.045 \text{ cm}$ 。

### 三、B 类标准不确定度 $\Delta_B$

$\Delta_B$  是用非统计方法评定获得的不确定度分量。B 类不确定度产生的原因较多，一般可分为两种情况：一是由测量仪器的所谓“最大允差”  $\Delta_{\text{仪}}$  来表示；另一种为测量的估计误差  $\Delta_{\text{估}}$ 。但在一般情况中， $\Delta_{\text{估}}$  比  $\Delta_{\text{仪}}$  小得多（有些时候  $\Delta_{\text{估}}$  也大于甚至远大于  $\Delta_{\text{仪}}$ ），所以我们只讨论第一种情况产生的不确定度作为 B 类不确定度  $\Delta_B$ 。

制造厂在制造某种仪器时，在其技术规范中预先设计了允许误差的极限值，终检时误差不超出此极限的产品为合格品，此误差的极限称为测量仪器的“最大允差”，记为  $\Delta_{\text{仪}}$ 。它的物理含义是，用此仪器进行一次测量时，测量值的误差落在  $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$  之内的概率为 1。

实际上，仪器的误差在  $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$  内是按一定几率分布的。若几率分布服从正态分布规律，由正态分布函数的性质可知，误差落在  $[-3\sigma, +3\sigma]$  内的概率为  $0.997 \approx 1$ ，所以质



量指标服从正态分布的产品，一次测量值的 B 类标准不确定度  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}/3$ 。但有些仪器的质量指标在  $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$  内不服从正态分布，而是服从其他的一些分布规律，如均匀分布、三角分布函数等。

因此，一般而言， $\Delta_B$  与  $\Delta_{\text{仪}}$  的关系为

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}/C \quad (2.6)$$

式中  $C$ ——置信系数。

对于均匀分布函数， $C = \sqrt{3}$ ，即  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ ；对于三角分布函数， $C = \sqrt{6}$ ，即  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{6}$ 。对于初学者来说，考虑到估计误差在其分布区间内的分布比较困难，所以本书规定，一律假设为服从均匀分布，即取  $C = \sqrt{3}$ 。

故 
$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

测量仪器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$  一般可在仪器的说明书中或仪表面板中查找。有时，仪器通常给出准确度等级。

则 
$$\Delta_{\text{仪}} = \frac{\text{量程} \times \text{准确度等级}}{100} \quad (2.8)$$

#### 四、合成标准不确定度 $\Delta$

由于 A 类与 B 类不确定度都具有统计特征，由概率统计理论可知，由“方和根”的方法来合成不确定度是最可取的。因此，在科学实验中，合成标准不确定度为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (2.9)$$

例 2 用量程为 25 mm，准确度等级为 0.01 的千分尺测一小球的直径，测量数值如下表所示，求测量结果的合成标准不确定度。

序号	1	2	3	4	5
$d$ (mm)	1.038	1.039	1.033	1.041	1.030

解

① 求  $\Delta_A$ ，由题可知

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{5} (1.038 + \dots + 1.030) = 1.0362 \text{ (mm)}$$

故 
$$\Delta_A = \sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(1.038 - 1.0362)^2 + \dots + (1.030 - 1.0362)^2}{5(5-1)}} = 0.0020 \text{ (mm)}$$

② 求  $\Delta_B$