

# 物理实验教程

温诚忠 郭开惠 魏 云



西南交通大学出版社

04-33  
W57b

# 物理实验教程

温诚忠 郭开惠 魏 云

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

## 内 容 提 要

本书是为配合素质教育的需要,在实验物理教研室、普通物理实验室全体人员的共同努力下编写的。全书共分误差理论与数据处理,常用实验装置、实验方法和测量方法,实验设计基础,物理实验四章。物理实验分为基础实验、计算机仿真实验、设计性实验、提高实验四大类,前三类对所有工科学生开出,提高实验则是对部分优秀学生选开。

本书重点在于培养学生的能力,启发和培养学生的创造力。

本书可作为工科物理实验教材,也可作为实验参考书。

---

### 图书在版编目 (C I P) 数据

物理实验教程/温诚忠,郭开惠,魏云编. —成都:  
西南交通大学出版社, 2002. 2  
ISBN 7-81057-622-4

I. 物... I. ①温... ②郭... ③魏... III. 物理  
—实验—高等学校—教材 IV. 04-33  
中国版本图书馆CIP数据核字 (2002) 第 004159 号

---

## 物 理 实 验 教 程

温诚忠 郭开惠 魏 云

\*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 刘婷婷

封面设计 肖 勤

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 发行科电话:7600564)

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

E-mail: [cbs@center2.swjtu.edu.cn](mailto:cbs@center2.swjtu.edu.cn)

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 11.5

字数: 274 千字 印数: 1~7000 册

2002年2月第1版 2002年2月第1次印刷

ISBN 7-81057-622-4/O·036

定价: 14.00 元

# 目 录

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 绪 论                       | (1)  |
| 第一章 误差概论与数据处理             | (3)  |
| § 1-1 测量与误差               | (3)  |
| 1-1-1 测量                  | (3)  |
| 1-1-2 误差                  | (3)  |
| 1-1-3 分布与随机误差             | (5)  |
| § 1-2 测量结果的表示与最佳估值        | (7)  |
| 1-2-1 测量结果的表示             | (7)  |
| 1-2-2 最佳估值 $\bar{x}$ 的计算  | (8)  |
| § 1-3 测量结果不确定度的计算         | (9)  |
| 1-3-1 直接测量量不确定度的计算        | (9)  |
| 1-3-2 间接测量量不确定度的计算        | (12) |
| 1-3-3 微小误差准则              | (14) |
| 附 1 测量结果表示与不确定度计算小结       | (15) |
| § 1-4 有效数字与测量结果的表示        | (15) |
| 1-4-1 有效数字                | (15) |
| 1-4-2 有效数字的科学表示法          | (17) |
| § 1-5 数据处理                | (17) |
| 1-5-1 列表法                 | (17) |
| 1-5-2 作图法                 | (18) |
| 1-5-3 逐差法                 | (19) |
| 1-5-4 最小二乘法               | (20) |
| 第二章 常用实验装置、实验方法和测量方法      | (23) |
| § 2-1 基本测量仪器              | (23) |
| 2-1-1 长度测量仪器              | (23) |
| 2-1-2 时间测量仪器              | (28) |
| 2-1-3 质量测量仪器              | (32) |
| § 2-2 电源、电磁学测量仪器          | (34) |
| 2-2-1 保护电学仪器基本常识          | (34) |
| 2-2-2 常用电气元件符号与常用电表面板上的标记 | (36) |

|       |                     |      |
|-------|---------------------|------|
| 2-2-3 | 磁电式直流电表与电流的测量 ..... | (37) |
| 2-2-4 | 电压的测量 .....         | (40) |
| 2-2-5 | 滑线变阻器与电阻的测量 .....   | (42) |
| 2-2-6 | 万用表 .....           | (47) |
| 2-2-7 | 示波器 .....           | (49) |
| 2-2-8 | 电源 .....            | (53) |
| 2-2-9 | 信号源(信号发生器) .....    | (56) |
| § 2-3 | 光源、光学测量仪器 .....     | (59) |
| 2-3-1 | 爱护光学实验仪器基本常识 .....  | (59) |
| 2-3-2 | 实验室常用光源 .....       | (59) |
| 2-3-3 | 明视距离 视角 .....       | (61) |
| 2-3-4 | 望远镜 .....           | (61) |
| 2-3-5 | 测微目镜 .....          | (62) |
| 2-3-6 | 读数显微镜 .....         | (63) |
| 2-3-7 | 分光计 .....           | (65) |
| 附 1   | 关于双游标的说明 .....      | (69) |
| § 2-4 | 基本调整技术 .....        | (70) |
| 2-4-1 | 零位调整 .....          | (70) |
| 2-4-2 | 水平或铅直的调整 .....      | (70) |
| 2-4-3 | 共轴调整 .....          | (71) |
| 2-4-4 | 望远镜、显微镜调节 .....     | (71) |
| 2-4-5 | 逐次逼近调节 .....        | (74) |
| § 2-5 | 基本测量方法 .....        | (74) |
| 2-5-1 | 比较法 .....           | (74) |
| 2-5-2 | 放大法 .....           | (75) |
| 2-5-3 | 转换法 .....           | (76) |
| 2-5-4 | 模拟法 .....           | (77) |
| 2-5-5 | 干涉法 .....           | (77) |
| 2-5-6 | 零位测量法 .....         | (77) |
| 第三章   | 实验设计基础 .....        | (79) |
| § 3-1 | 设计性实验的基本阶段 .....    | (79) |
| 3-1-1 | 设计实验 .....          | (79) |
| 3-1-2 | 设计性实验的基本阶段 .....    | (79) |
| § 3-2 | 设计性实验过程 .....       | (80) |
| 3-2-1 | 物理模型的建立 .....       | (80) |
| 3-2-2 | 测量方法选择 .....        | (81) |
| 3-2-3 | 仪器选择 .....          | (82) |
| 3-2-4 | 参数选择 .....          | (82) |

|                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| 3-2-5 实施方案 .....                   | (83)        |
| <b>第四章 物理实验 .....</b>              | <b>(84)</b> |
| § 4-1 基础物理实验 .....                 | (84)        |
| 实验一 电学实验基础 .....                   | (84)        |
| 实验二 拉伸法测杨氏模量 .....                 | (93)        |
| 实验三 示波器的调整和使用 .....                | (96)        |
| 附 1 YB4320 型双踪回迹示波器面板控制键作用说明 ..... | (105)       |
| 附 2 YB1631 函数信号发生器面板操作键作用说明 .....  | (109)       |
| 实验四 迈克耳逊干涉仪及其应用 .....              | (111)       |
| 实验五 全息照相 .....                     | (116)       |
| 实验六 电子和场 .....                     | (122)       |
| 实验七 声速的测定 .....                    | (128)       |
| 实验八 CCD 测光强分布 .....                | (132)       |
| 实验九 冲击电流计测量电容 .....                | (136)       |
| 实验十 霍耳效应及其应用 .....                 | (141)       |
| 附 3 霍耳效应实验中的电流磁效应和热磁效应 .....       | (144)       |
| § 4-2 计算机仿真实验 .....                | (145)       |
| 实验十一 热膨胀系数 .....                   | (145)       |
| 实验十二 空气比热容比测定 .....                | (148)       |
| 实验十三 密立根油滴法测电子电荷 .....             | (150)       |
| 附 4 油滴法测电子电荷上机指导 .....             | (153)       |
| 实验十四 核磁共振实验 .....                  | (157)       |
| § 4-3 设计性实验 .....                  | (160)       |
| 实验十五 单摆测重力加速度研究 .....              | (160)       |
| 实验十六 自组望远镜或显微镜 .....               | (164)       |
| 附 5 光学实验预备知识 .....                 | (166)       |
| 实验十七 测定介质折射率 .....                 | (168)       |
| 实验十八 自组电位差计 .....                  | (171)       |
| § 4-4 提高实验 .....                   | (173)       |
| 实验十九 全息光学透镜的制作 .....               | (173)       |
| 实验二十 一步彩虹全息 .....                  | (175)       |

# 绪 论

## 一、物理实验课程的地位、作用和重要性

物理学是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一,它也是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长、发展的基础和前导。

实验物理的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的新起点。而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和装备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。

物理实验课是对高等理工院校学生,进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是理工科学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是对学生进行科学实验训练的重要基础。

为了适应 21 世纪科学技术更为迅猛发展的需要,高等理工院校培养的跨世纪人才必须具备坚实的物理基础、出色的科学实验能力和勇于开拓的创新精神。物理实验课程在培养学生这些基本素质和能力方面,具有不可替代的重要作用:(1) 物理实验课程内涵丰富,所覆盖的知识面和包含的信息量以及能够对学生完成的基本训练内容,是其他课程的实验环节难以比拟的;(2) 物理实验课程在学生深入观察现象,建立合理物理模型,定量研究变化规律,分析、判断实验结果准确度,激发学生的想像力、创造力,培养和提高学生独立开展科学研究工作的素质和能力方面,具有重要的奠基作用。

## 二、物理实验课程中关于知识、能力、科学素质培养的要求

### 1. 知识与技术方面

基本知识与技术中,使数据处理、测量结果的评定与现代科学和工程技术使用的规范接轨;学习计算机技术在物理实验中的运用;加强近代物理实验知识与技术,例如:激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、真空技术、低温技术、等离子体技术、结构分析波谱技术、红外检测技术以及近代科学研究与工程实际中广泛应用的其他物理技术的运用。

### 2. 能力的培养方面

根据物理概念与科学研究的要求培养建立物理模型的能力;培养深入观察实验现象并运用物理理论进行判断、归纳与分析的能力;培养定量研究物理规律的能力;培养完成简单设计性实验的能力。

### 3. 科学素质的培养方面

培养对未知领域主动探索的进取精神,从观察现象和客观事实中发现问题、提出问题、开拓创新的意识,以及尊重实验事实、严谨踏实、一丝不苟的科学作风。

## 三、教学组织及要求

### 1. 实验课学习的三个阶段

**预习阶段**(实验课前) 阅读教材,写出预习报告,准备好原始数据记录纸。

写出预习报告是指实验前写好实验报告的前面几部分:包括实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理及实验步骤。

原始数据记录纸专门用于记录实验过程中要记录的数据,实验前要画好记录表格。

**操作阶段**(实验课上) 调整仪器,测量、观察、分析现象,记录需要的实验数据。

离开实验室前,教师要检查实验数据、仪器,并在原始数据记录纸上签字。

**书写报告阶段**(实验课后) 整理数据,处理、分析数据,完成实验报告。

## 2. 实验报告

实验报告要求用我校统一规格的“物理实验报告”纸书写。内容应简明扼要,切忌抄书。

实验前写“预习报告”,内容包括:

- (1) 实验名称、日期、教学班、姓名(及合作者)。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验仪器。
- (4) 实验原理(应有必要的电路图、光路图、公式)。
- (5) 实验步骤(指主要步骤)。

做完实验后教师在“原始数据记录纸”上签字,课后完成“实验报告”(“预习报告”是“实验报告”的前半部分)。

- (6) 实验数据(记在原始数据记录纸上,数据处理时作整理)。
- (7) 数据处理(作图时必须用坐标纸)。
- (8) 分析讨论(或作业)。
- (9) 实验结论。

**注意** 每次上课开始时检查“预习报告”与“原始数据记录表格”,未完成者不得做实验。“实验报告”于完成实验后的一周内交给教师(“原始数据记录纸”应附于实验报告内),不按时交者,该次实验报告成绩记为“0”分。

## 3. 实验规则

- (1) 实验时尽量独立完成,遵守课堂纪律,爱护实验装备。
- (2) 实验完毕,整理仪器,桌、凳放回原位,保持室内清洁。
- (3) 期末考试形式为“笔试+操作”,实验成绩占 70%,期末考试占 30%。



# 第一章 误差概论与数据处理

## § 1-1 测量与误差

### 1-1-1 测量

测量是人类认识自然、利用自然必不可少的手段。物理实验是一门定量的科学,它研究物理量的测量原理、测量方法、测量装置以及测量结果的准确度。

**测量** 以确定被测对象量值为目的的一组操作称为测量。粗略地说,测量是把被测量与选作计量单位的同类量进行比较、确定倍数的过程。倍数与选用单位之积即是被测量的量值。

按是否能直接获得测量值,测量分为两类:直接测量与间接测量。

**直接测量** 从仪器上直接读出的值就是被测量值的测量方法。如用米尺或游标卡尺测长,用秒表测时间,用成品惠斯通电桥测电阻,用成品电位差计测电势差……都属于直接测量。直接测量中的被测量称为直接测量量。

**间接测量** 需先由直接测量获得数据,利用已知的函数关系,经过运算才能得到被测量数值的测量方法。间接测量中的被测量称为间接测量量。

例如,用游标卡尺测量球体直径  $d$ ,而后按函数关系

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3$$

算出球体体积  $V$ ,对球体体积的测量就是间接测量,其中  $d$  是直接测量量, $V$  是间接测量量。

测量方法的分类还有很多种。例如,按在测量过程中影响测量的因素是否改变,可分为等精度测量与非等精度测量。本书只限于讨论等精度测量的数据处理方法。

### 1-1-2 误差

#### 一、误差的概念

**误差** 一切科学实验,不论实验方案多么完善,操作者多么细心,测量误差是永远不可能消除的。同一个物理量,即使由同一个人,用同一台仪器,在相同的条件下进行多次测量,各次测量的结果一般也不完全相同,更难说会等于待测量的真值。一切测量结果都含有误差。测量结果的误差  $\Delta$  定义为

$$\Delta = x - a, \quad (1-1)$$

其中, $x$  为测量值, $a$  为真值。

\* “仪器误差”、“示值误差”不是指测量结果的误差,而是仪器显示值中包含的因仪器自身不完善带来的误差极限值。

真值的定义之一是,在有完善定义前提下又无测量缺陷时得到的测量值。可见,真值是一个理想的概念。除了少数定义量(如水三相点的温度等)的真值已知外,其他的量的真值几乎都是不知道的。由于真值一般不知道,测量结果的误差也就不可能知道。所以,报道测量结果准确程度时不能说“测量结果的误差是多少”。

**偏差** 在对测量结果的准确程度进行分析时,经常要计算偏差。偏差  $\Delta x$  定义为测量值与约定真值之差

$$\Delta x = x - x_0, \quad (1-2)$$

其中,  $x$  为测量值,  $x_0$  为约定真值。

约定真值是一个与真值相近的概念,可以是被测量的公认值、较高准确度仪器测量的值或多次测量的平均值。

## 二、误差的分类

误差可分为三类:

$$\text{三类误差} \left\{ \begin{array}{ll} \text{系统误差} & \text{服从确定性规律} \\ \text{随机误差} & \text{服从统计性规律} \\ \text{粗大误差} & \text{出现的次数少,又属偶然} \end{array} \right.$$

**系统误差** 在同一量的多次测量过程中,保持恒定或以可预知方式变化的测量误差叫做系统误差。用伏安法测电阻时,若电流表内接将产生方法误差,其大小等于电流表的内阻。在测量某一物体长度时,由于环境温度上升,将产生环境误差,大小可由温差与线胀系数而定。又如,某游标卡尺有零位误差  $+0.02 \text{ mm}$ ,那么,其读数值将总是大  $0.02 \text{ mm}$ 。

系统误差又可细分为两类:

$$\text{系统误差} \left\{ \begin{array}{ll} \text{已定系统误差} & \text{误差值已经确定} \\ \text{未定系统误差} & \text{误差值尚不知道} \end{array} \right.$$

在设计实验时,要利用恰当的实验方法(如替代法、交换法等),避免出现过大(对预定要求)的未定系统误差。

数据处理时,使用已定系统误差对读数值予以修正。修正式如下

$$\text{已修正的读数值} = \text{未修正的读数值} - \text{已定系统误差}。 \quad (1-3)$$

例如,若上述游标卡尺测物长的读数是  $110.52 \text{ mm}$ ,那么修正值是

$$110.52 - 0.02 = 110.50 \text{ mm}。$$

**随机误差** 在多次测量同一物理量的过程中,误差时大时小,时正时负,以不可预知方式变化的那种误差叫做随机误差。

下面以射击为例说明随机性规律。在射击时,射手力求瞄准,但是即使是最佳射手连续打了几个10环后也不能预言下一枪必中10环。这是因为,射手的心情使肌肉紧张程度不能始终如一,呼吸、心脏搏动使身体不能静止,身体与枪接触的部位及手握的松紧程度的变化对结果均有影响,子弹的弹道还受到多种不定因素的影响:弹头质量、弹头表面形状及光滑程度、弹药量、风力大小与方向都不是恒定的等等。不可预言是随机性的一个侧面。好射手的成绩普遍高,这又表明随机性中有规律,称为统计规律。如何处理随机误差见下节。

**粗大误差** 粗大误差是指由于粗心大意或发生实验条件突变而引起的误差。在科学实验中,应将其剔除以提高测量的可靠性。判断是否剔除的方法很多,如拉依达准则、戈罗贝斯准则、狄克逊标准、肖维勒标准等等,请参阅有关书籍。

### 三、描述测量结果的几个名词

**精密度** 表示测量数据集中的程度。它反映随机误差的大小,与系统误差无关。

**正确度** 表示测量值与真值符合的程度。它反映了系统误差的大小,与随机误差无关。

**准确度** 是对测量数据的精密度与正确度的综合评定。测量的准确度高,说明测量数据比较集中而且接近真值,即系统误差与随机误差都比较小。

用打靶时弹着点的分布可以说明上列的三个名词(图 1-1)。图中(a)表示精密度高而正确度低;(b)表示正确度高而精密度低;(c)表示精密度与正确度都高,即准确度高。

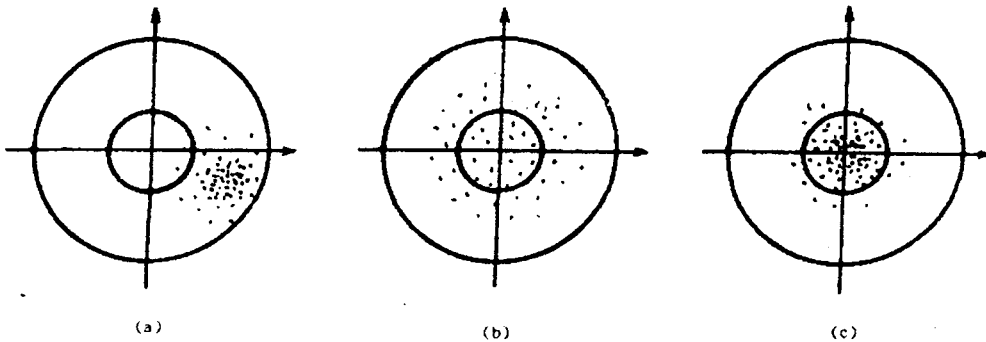


图 1-1 弹着点分布

### 1-1-3 分布与随机误差

#### 一、人口按年龄的分布规律

统计规律可以用分布描述,而分布可以用图形表示。例如,人口按年龄的分布规律用图 1-2(a)或(b)描述。图(a)的纵坐标  $P$  是概率,横坐标  $N$  是年龄。该图给出了人口小于某一年龄的概率。曲线的走势有一显著的特点:随着年龄的增加曲线纵坐标的高度(即概率)不断上升,表示概率逐渐趋近于 1。图(b)的纵坐标  $f$  是概率密度,横坐标  $N$  仍是年龄。曲线给出任一年龄人口的概率密度。该曲线有一个峰,反映某地区当时年龄是 23 岁的人口密度最大;曲线在年龄超过 100 岁后几乎与横轴重合,反映出百岁以上人口的概率密度极小,趋于零。

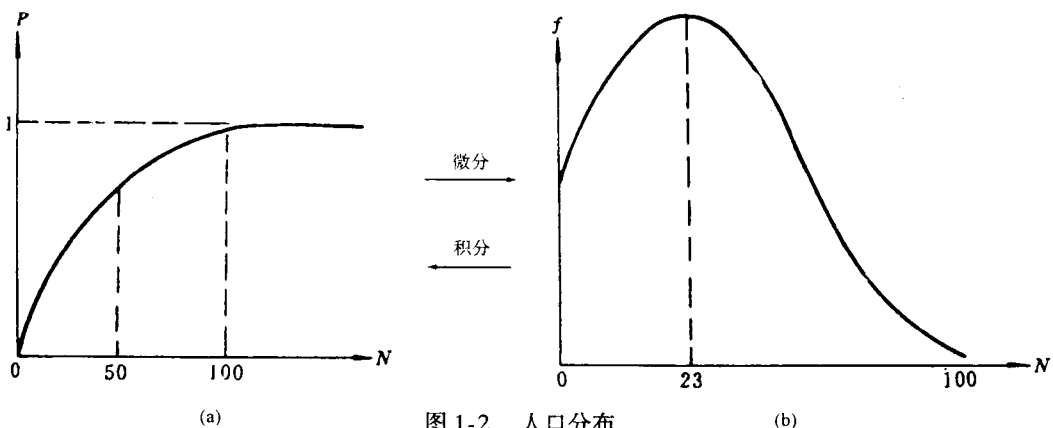


图 1-2 人口分布

曲线(a)与(b)均可描述分布,两者之间的关系是,把概率微分可得概率密度,把概率密度积分得到概率,见图中的箭头指向。

## 二、正态分布(高斯分布)

理论与实践都证明,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。测量中许多种类的误差,工业生产中许多产品的公差都服从正态分布。正态分布是随机现象中研究得最早、使用最广,因而是最重要的一种分布。

### 1. 正态分布

对一物理量进行多次测量,正如弹着点一样,测量值有大有小,很不相同。设想测量总次数为  $N$ 。先对同值者计算次数,再将测量值  $x_i$  由小到大排序,并标出对应值的次数  $n_i$ ,可得下表

|       |       |          |       |          |       |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|
| $x_1$ | $x_2$ | $\cdots$ | $x_i$ | $\cdots$ | $x_M$ |
| $n_1$ | $n_2$ | $\cdots$ | $n_i$ | $\cdots$ | $n_M$ |

今在以  $x_i$  为横轴,以  $n_i/N$  为纵轴的图上标出每一个点  $(x_i, n_i)$ 。当  $N \rightarrow \infty$  (同时有  $M \rightarrow \infty$ ) 时,图中的点将连成一条曲线。若测量值服从正态分布,所得即是正态分布的规一化的概率密度曲线。与曲线对应的函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < +\infty。$$

正态分布的概率密度曲线如图 1-3(a) 与(b) 所示,曲线的特点是单峰对称。在测量中它表现为:

- (1) 小误差的概率大,大误差的概率小;
- (2) 正误差与负误差的机会相等;
- (3) 曲线下的面积对应着测量误差在  $-\infty \sim +\infty$  之间的概率,其值为 1。

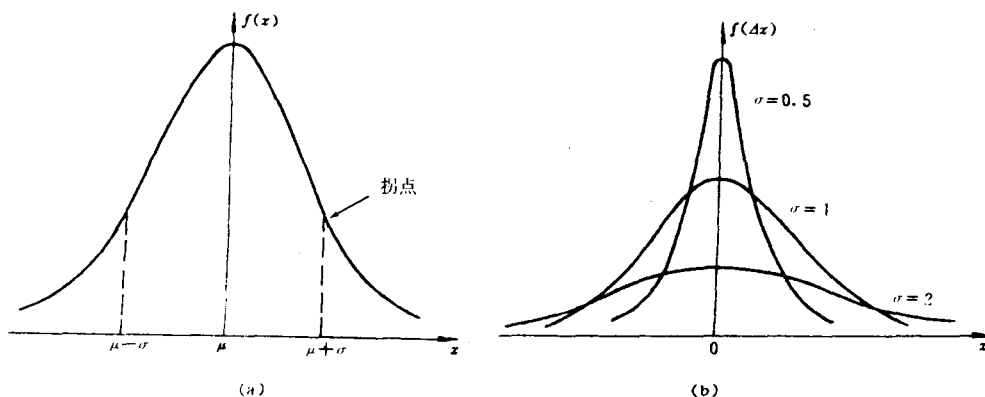


图 1-3 正态分布

### 2. 两个重要的参数

不同的规一化正态分布曲线的区别仅在于峰值的位置  $\mu$  与曲线的半宽  $\sigma$ 。因而,  $\mu$  与  $\sigma$  是描述正态分布的两个重要参数。

$\mu$  是峰值的横坐标,对应着最大概率密度。依正负误差概率相等,峰值的位置  $\mu$  是测量次数  $n \rightarrow \infty$  时的平均值。

曲线的半宽  $\sigma$  是指对称的正态分布概率密度曲线上两个拐点间距离的一半, 见图 1-3(a)。  $\sigma$  称为标准(偏)差。

### 3. 标准差 $\sigma$ 的意义

$\sigma$  的大小标志着测量值的离散程度。图 1-3(b) 的三条曲线分别对应  $\sigma = 0.5, 1.0, 2.0$ 。由图可见, 随  $\sigma$  的增大曲线趋于平坦, 峰值高度降低, 对应着测量值间的差别在增大, 即离散程度增大。

前已说明, 概率密度曲线下的面积是概率。对于正态分布, 计算可得曲线两拐点间的面积约为 68.3%。这一数值的意义是, 在等精度测量的一系列测量值中, 任一次测量值落在  $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$  之间的概率为 68.3%, 或任一次测量值的误差落在  $-\sigma \sim +\sigma$  之间的概率为 68.3%。计算还可得, 曲线在  $-2\sigma \sim +2\sigma$  之间的面积约为 95%, 曲线在  $-3\sigma \sim +3\sigma$  之间的面积约为 99.7%。此两值的概率意义与前相似, 如任一次测量值在  $(\bar{x} - 2\sigma) \sim (\bar{x} + 2\sigma)$  之间的概率为 95%, 或任一次测量值的误差在  $-2\sigma \sim +2\sigma$  之间的概率为 95%。

### 三、均匀分布

测量误差服从均匀分布是指, 在测量值的某一范围  $[a, b]$  内, 任意一次测量结果取该区间中的任一值的概率都相等。均匀分布的概率密度曲线如图 1-4 所示。由均匀二字, 很容易得出概率密度为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a, b], \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

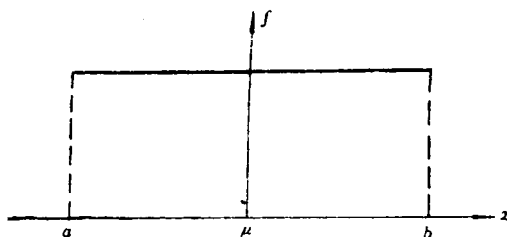


图 1-4 均匀分布

在实验中, 误差服从均匀分布的并非罕见, 数字显示仪表末位的误差, 数据处理时的舍入误差等等都服从均匀分布。

## § 1-2 测量结果的表示与最佳估值

测量与误差形影相随, 一般情况下误差不可能确切知道。为了完善地说明测量结果, 在报道被测量数值的同时还应出示测量结果的可信赖程度。

### 1-2-1 测量结果的表示

通常把测量结果写成简洁形式

$$x = \bar{x} \pm \sigma (\text{单位}). \quad (1-4)$$

式中,  $x$  代表被测量,  $\bar{x}$  是被测量真值的最佳估值,  $\sigma$  是测量结果的不确定度<sup>①</sup>, 用于表示测量结果的准确程度。由式(1-4)可见, 表示测量结果有三个要素: 数值、不确定度与单位。三者缺一不能完善说明测量结果。(在更一般的情况下, 甚至还应说明  $\sigma$  对应的概率!)

① 为了教学上的简便, 本书只用标准不确定度表示测量结果的准确程度, 对应的概率是 0.68。

测量不确定度是衡量测量质量的一个重要指标。测量结果的不确定度划出了最佳估值  $\bar{x}$  附近的一个范围,真值以一定概率落在其中,换句话说,最佳估值与真值之差(即误差)以一定概率落在  $-\sigma \sim +\sigma$  之间。不确定度越小,标志着测量的可信赖程度越高;不确定度越大,标志着测量的可信赖程度越低。

表示式(1-4)的意义是被测量的真值在  $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$  之间的概率约为 68%。也可以说,测量结果的真值落在  $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$  之间的概率约为 68%。

这里要特别强调,不要认为真值一定在  $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$  之间,同样也不能认为误差一定在  $-\sigma \sim +\sigma$  之间。

## 1-2-2 最佳估值 $\bar{x}$ 的计算

### 一、直接测量量的最佳估值

在直接测量中,对同一物理量都应当进行多次测量,以减小随机误差。若进行了  $n$  次测量,多次测量值的平均值就是对真值的最佳估值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1-5)$$

粗略地说,最佳估值是指最可能接近被测量真值的值。但是,不应将其理解为是最接近真值的值,“最佳估值”一词是数理统计的语言。即使第  $i$  次测量出现了如下情况

$$|x_i - \text{真值}| < |\bar{x} - \text{真值}|,$$

$\bar{x}$  是最佳估值的结论仍然是正确的。

实验中,有时也只进行一次测量(如在测钢丝材料杨氏模量实验中,对钢丝长度就只测一次),条件是随机误差远小于未定系统误差。这一条件暗含着多次测量的结果基本相同。在这种情况下,分析测量结果时,尽管只进行一次测量,应认为测量了无穷次,测量值全同。

### 二、间接测量量的最佳估值

设间接测量量为  $N$ ,它有  $k$  个直接测量量  $x_1, x_2, \cdots, x_k$ ,其函数关系为

$$N = N(x_1, x_2, \cdots, x_k),$$

那么,间接测量量的最佳估值就是

$$\bar{N} = N(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_k). \quad (1-6)$$

上式表明,只需把直接测量量的最佳估值代入函数表达式,即可算出间接测量量的最佳估值。例如,用单摆测重力加速度时,重力加速度  $g$  与摆长  $l$  及周期  $T$  之间的函数关系是

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2},$$

其中  $l$  与  $T$  是直接测量量, $g$  是间接测量量。当  $l$  与  $T$  的最佳估值  $\bar{l}$  与  $\bar{T}$  已知时,重力加速度的最佳估值  $\bar{g}$  就是

$$\bar{g} = 4\pi^2 \frac{\bar{l}}{\bar{T}^2}.$$

## § 1-3 测量结果不确定度的计算

计算测量结果的不确定度时需首先分清,被测量是直接测量量还是间接测量量。

### 1-3-1 直接测量量不确定度的计算

测量结果的误差实际上是测量过程中许多误差影响共同结果。“许多误差”中的每一个都是测量结果误差的一个分量。如果(仅仅是如果)每一个分量都知道,那么,将它们合成即可得到测量结果的误差。

测量结果的不确定度属于合成不确定度。合成不确定度含有两类分量(每一类又可能有多个分量)。

合成不确定度  $\left\{ \begin{array}{l} \text{A 类分量, 用统计方法计算, 一般与读数分散对应} \\ \text{B 类分量, 用非统计方法计算, 一般与仪器误差对应} \end{array} \right.$

#### 一、A 类不确定度分量 $S_{\bar{x}}$

用统计方法计算,以多次测量值的平均值的标准(偏)差  $S_{\bar{x}}$  作为 A 类不确定度分量,符号中的下标  $\bar{x}$  意指被测量的平均值。计算表达式为

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1-7)$$

其中

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

[例] 用单摆测重力加速度时,对周期测量 10 次,得下列值

| 序号   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T(s) | 2.00 | 1.99 | 1.99 | 2.00 | 2.01 | 2.02 | 2.00 | 1.98 | 1.97 | 1.99 |

试求测定周期时的 A 类不确定度分量。

[解] 先按式(1-5)算周期的平均值

$$\bar{T} = \frac{2.00 + \cdots + 1.99}{10} = 1.995 \text{ s},$$

按式(1-7)得周期平均值的标准差

$$S_{\bar{T}} = \sqrt{\frac{(2.00 - 1.995)^2 + \cdots + (1.99 - 1.995)^2}{10(10-1)}} = 0.045 \text{ s}。$$

此即要求的 A 类不确定度分量  $S$ 。

#### 二、B 类不确定度分量 $u$

$S_{\bar{x}}$  是用统计方法计算的。与此相反,  $u$  是用非统计方法计算的。

计算步骤大致如下:(1) 定误差极限值、分布及置信系数;(2) 求误差极限与置信系数之商,得标准差。以此标准差作为 B 类不确定度分量。计算表达式为

$$u = \frac{\Delta a}{C}, \quad (1-8)$$

式中  $\Delta a$  为仪器误差限<sup>①</sup>,  $C$  是置信系数,  $C$  值因分布不同而异, 例如

$$\begin{cases} \text{对正态分布,} & C = 3, \\ \text{对均匀分布,} & C = \sqrt{3}. \end{cases}$$

本课程范围内, 一律取  $C = \sqrt{3}$ , <sup>②</sup> 即认为  $\Delta a$  都服从均匀分布。

### 三、 $\Delta a$ 的确定

仪器不是绝对准确的, 正规的产品应符合国家计量技术规范。产品说明中一般都包括使用该仪器的示值误差, 这里所说的“示值误差”是在正常使用仪器的条件下, 仪器显示值的误差极限值, 不是式(1-1)定义的误差。这类数值在本教材中统称为仪器误差限。下面列出一些常用仪器仪表的仪器误差限。

#### 1. 几种常用量具、仪器仪表的仪器误差限

表 1-1 几种量具的  $\Delta a$

| 仪 器     | 量 程(mm)   | 分度值(mm) | $\Delta a$ (mm) | 文 献       |
|---------|-----------|---------|-----------------|-----------|
| 钢直尺     | 150       | 1       | 0.1             | JJG 1-80  |
| 钢卷尺     | 2m        | 1       | 0.7             | JJG 4-89  |
| 游标卡尺    | 0 ~ 150   | 0.1     | 0.1             | JJG 30-84 |
| 游标卡尺    | 300       | 0.02    | 0.02            | JJG 30-92 |
| 游标卡尺    | 300 ~ 500 | 0.02    | 0.04            | JJG 30-92 |
| 一级外径千分尺 | 25        | 0.01    | 0.004           | JJG 21-86 |

表 1-2 几种仪器仪表的  $\Delta a$

| 仪 器 或 仪 表                                                                              | 误差限名称  | $\Delta a$                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------|
| 指针式电表                                                                                  | 允许基本误差 | 量程 $\times$ 准确度等级 $/100$           |
| 直流电阻电桥                                                                                 | 允许基本误差 | $\frac{a}{100}(\frac{R_N}{k} + X)$ |
| 直流电位差计                                                                                 | 允许基本误差 | $\frac{a}{100}(\frac{U_N}{k} + X)$ |
| 停(秒)表                                                                                  | 人体反应误差 | 0.2 s (对一般人)                       |
| 二等 $H_g$ 温度计<br>(量程 $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ , 分度 $0.1^\circ\text{C}$ ) | 示值误差   | $0.2^\circ\text{C}$                |
| HS-10W CASIO 秒表<br>(分度值 $0.01\text{ s}$ )                                              | 示值误差   | $(0.01 + 0.000\ 005\ 8t)\text{ s}$ |

注: 式中  $a$  为准确度等级,  $X$  为度盘示值(读数)。  $R_N$  与  $U_N$  称为基准值, 等于有效量程内最大的 10 的整数幂, 确定基准值的方法如下: 首先找到所选量程的最大值, 然后首位取 1, 其余位取零即得基准值。例如, 一电位差计的最大标度盘示值为  $1.8\text{ V}$ , 量程比有三级, 分别是  $1, 0.1, 0.01$ , 则三个有效量程分别为  $1.8\text{ V}, 0.18\text{ V}, 0.018\text{ V}$ , 则由此可得对应的基准值分别为  $1.0\text{ V}, 0.1\text{ V}, 0.01\text{ V}$ 。

① 本教材只考虑这种误差, 若细致计算还应包括环境变动等其他多项误差。  
② 确定误差分布远远超出了物理实验教学范围。取  $C = \sqrt{3}$  仅仅是一个教学中的简化假设!



【例】 设HS-10W型数字显示的CASIO秒表某次测量中秒表的示值为32.12 s,试计算用此表时的B类不确定度分量。

【解】 由表1-2查出,CASIO秒表的仪器误差限为

$$0.01 + 0.000\ 005\ 8 \times 32.12 = 0.010\ \text{s},$$

于是B类不确定度分量为

$$u = \frac{\Delta a}{C} = \frac{0.010}{\sqrt{3}} = 0.005\ 8\ \text{s}。$$

【例】 今用一量程0~150 mm、分度值为0.02 mm的游标卡尺进行测量,试计算测量时的B类不确定度分量。

【解】 由表1-1查出,该卡尺的示值误差为0.02 mm,按式(1-8)得B类不确定度分量

$$u = \frac{\Delta a}{C} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.12\ \text{mm}。$$

## 2. 指针式电表的仪器误差限

指针式电表的度盘上都刻写有准确度等级,用以反映该电表的示值误差。我国规定,指针式电表的准确度等级分为七级:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5,5.0。由电表的准确度等级与所选用的量程(对精密仪表有时用示值)可以推算出电表的 $\Delta a$ :

$$\Delta a = \frac{\text{量程} \times \text{准确度等级}}{100}。 \quad (1-9)$$

【例】 有一电流值约为2.5 A,今分别用量程为3 A与30 A、准确度等级均为0.5级的电表进行测量,试计算其B类不确定度分量。

【解】 按式(1-9)得电流表的仪器误差限分别为

$$\Delta a' = \frac{3 \times 0.5}{100} = 0.015\ \text{A},$$

$$\Delta a'' = \frac{30 \times 0.5}{100} = 0.15\ \text{A}。$$

按式(1-8)得与电表不准对应的不确定度分量,分别是

$$u' = \frac{0.015}{\sqrt{3}} = 0.008\ 7\ \text{A},$$

$$u'' = \frac{0.15}{\sqrt{3}} = 0.087\ \text{A}。$$

前述各例的计算均表明,B类不确定度分量的值可能与被测量无关。

对指针式电表的计算表明,在同一准确度等级下,量程越大,不确定度越高。在实验中选择电表的量程时,对电压表与电流表,一般应使示值接近量程或大于量程的三分之二;对于欧姆表,选择量程的依据是使表针接近中央,因为欧姆表的量程是以中值电阻为标志的。

## 四、合成不确定度 $\sigma$

在已知直接测量量的各 $S$ 、 $u$ 的条件下,怎样合成不确定度才合理?从数学运算来看,加、减最简单。对实验者而言,如果按相加计算,这是对测量误差的最保守的评价,很可能埋没测量的成绩。如果按相减合成,将是最冒险的报道,极有可能是谎报成绩。

由于A类与B类不确定度都具有统计特征,按概率理论,在 $S$ 与 $u$ 独立的条件下,以“方和根”方法合成最为可取。即

$$\sigma = \sqrt{S^2 + u^2}。 \quad (1-10)$$