21世纪物理学规划课改教材

# 普通物理实验教程

肖明 肖飞 主编

科学出版社

21 世纪物理学规划课改教材

# 普通物理实验教程

肖明　肖飞　主编

科学出版社

北　京

**内 容 简 介**

本教材依据教育部颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008 年版)，结合学院物理实验课程建设多年来的实践经验编写而成的，全教材分 4 章，共 40 个实验项目，分别为物理实验数据处理、基础性实验、提高性实验和综合设计性实验。本教材内容详实，贴近教学实际，清楚叙述实验原理和方法，兼顾教学内容的系统性和先进性，同时知识传授和能力、素质、创新精神培养并重，既保证贯彻教学基本要求，又为学生提供了自主学习的空间。

本教材可作为普通高等学校、成人院校、高职高专理工科各专业的普通物理实验教学用书，也可作为实验技术人员或其他相关课程教师的参考书。

**图书在版编目(CIP)数据**

普通物理实验教程/肖明，肖飞主编. 一北京：科学出版社，2011.3

21 世纪物理学规划课改教材

ISBN 978-7-03-030226-7

Ⅰ.①普… Ⅱ.①肖… ②肖… Ⅲ.①普通物理学一实验一高等学校一教材 Ⅳ.①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 020833 号

责任编辑：张颖兵 程 欣 /责任校对：梅 莹

责任印制：彭 超 /封面设计：苏 波

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

**武汉市新华印刷有限责任公司印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2011 年 1 月第一次印刷 印张：15 1/2

印数：1—3 000 字数：1—301 000

**定价：29.80 元**

(如有印装质量问题，我社负责调换)

# 《普通物理实验教程》
# 丛书编委会


**主　编**　肖　明　肖　飞

**副主编**　李志浩　冯国强　胡　森　王　筠

**编　委**　（按姓氏拼音排序）

邓永菊　冯国强　胡　森　吉紫鹃

李志浩　龙　芸　童爱红　王　筠

王世芳　肖　飞　肖　明　肖　旸

# 前　言

物理学是一门以实验为基础的学科，在物理学的发展历史中，物理实验始终起着重要的作用。不仅如此，物理实验中的研究方法、观察和分析手段，在现代科学技术的发展中具有普遍性、综合性和多样性，它们构成了现代理工科人才必备知识结构的重要组成部分。因此，普通物理实验课是理工科各专业必修的基础课程，对学生基本实验技能、科学实验素养和创新实践能力等方面的培养具有基础的作用。

随着现代科学技术的发展，特别是物理学在其他学科中的广泛应用，普通物理实验的内容日益丰富。同时，近年来不断推进的教育改革，也对普通物理实验的教学模式提出了更高要求。为了适应这种变化，编者以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008 年版)为依据，结合多年实验教学和课程改革的实践经验，编写了本教材。

本教材在编写中力图体现“立足基础、增强能力、探索创新”的教学理念，主要有如下特点。

第一，采用由低到高分层递进的模式，推进基础物理实验的系统训练。本教材打破了传统的按照力、热、电、光为序条块分割的编排方式，将普通物理实验分为基础性实验、提高性实验和综合设计性实验三个层次，每个层次有着各自不同的培养目标。基础性实验的目的是让学生熟悉物理实验的常用仪器和设备，掌握基本实验操作规范，初步掌握常用物理实验方法及进行物理实验数据处理的方法。提高性实验着重培养学生分析问题和解决问题的能力。综合设计性实验则进一步强化学生的实践能力，培养学生的独立思维能力，发挥学生的主动性和创造性，激发学生潜能，挖掘学生创新思想，提升学生的综合科学素质。

第二，实验项目的选择贴近大多数普通高等院校物理实验课的教学实际。编者精选了物理实验中相对比较稳定，能长期起作用的核心知识，同时又适当补充了现代科学技术中较为先进的新内容。

第三，本教程内容详实。编写时力求将实验原理叙述清楚，计算公式推导完整，实验内容与步骤也尽可能具体，以加强对学生基本实验技能和基本实验方法的训练和指导，同时也便于学生预习。每个实验后都附有思考题，引导学生在实验后进一步分析、讨论、巩固和扩展所学知识。

第四，在物理实验数据处理方面，本教程增加了“用 Origin 软件处理实验数据简介”这一小节，期望读者能够掌握利用数据处理软件处理物理实验数据的方法。

本教材凝结了物理系及普通物理实验教研室所有教师的集体智慧和辛勤劳

动。由肖明、肖飞任主编，李志浩、冯国强、胡森、王�任副主编。参加编写的教师有肖飞（实验 3.9、实验 4.10、实验 4.11）；李志浩（第 1 章 1.4、实验 2.14、实验3.4、实验 3.10、实验 4.5、实验 4.7、实验 4.8）；冯国强（第 1 章 1.2、实验 2.7、实验 3.2、实验 3.3、实验 4.6、实验 4.9、实验 4.12）；胡森（第 1 章 1.3、实验 2.3、实验 2.4、实验 2.9、实验 3.1、实验 3.10、实验 4.2）；王�（第 1 章 1.1、实验 2.11、实验 2.12、实验 2.15、实验 2.16、实验 2.17、实验 3.10）；王世芳（实验 2.10、实验 2.13、实验 3.8）；龙芸（实验 2.8、实验 4.1、实验 4.3）；童爱红（实验 3.6、实验 3.7、实验 4.5）；刘丹（实验 2.1、实验 2.2、实验 2.5）；邓永菊（实验 2.6），全书由肖明统稿。肖旸绘制了本教材的大部分插图，吉紫鹃参与了本教材部分内容的修改工作。

对于本教材的出版，物理与电子信息学院理论物理研究所邵长贵教授提出了许多指导性意见。学校实验教学中心也给予了大力支持。本教程在编写过程中，还得到了科学出版社编辑的帮助，编者在此一并表示衷心的感谢。

在编写本教材过程中吸收了兄弟院校的有关资料和经验，参考了大量国内外同行的相关著作和文献，在教程末的参考文献中未能一一列出，在此向文献作者表示诚挚的感谢，并请未能列入参考文献的作者予以谅解。由于编者水平有限，时间仓促，本教程中难免存在疏漏之处，恳请广大读者和同行专家批评指正。

# 目 录

# 第1章　物理实验数据处理

## 1.1　测量及其误差分析

### 1.1.1　测量

测量是通过实验方法对客观事物取得定量信息即数量概念的过程。测量是物理实验的基本操作，其实质是将待测物体的某物理量与相应的标准做定量比较。测量的结果应包括数值（即度量的倍数）、单位（即所选定的物体或物理量），以及结果可信赖的程度（用不确定度来表示）。

目前，物理学上各物理量的单位，都采用中华人民共和国法定计量单位，它是以国际单位制（SI）为基础的单位。国际单位制是在1960年第11届国际计量大会上确定的，它以米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流）、开尔文（热力学温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（发光强度）作为基本单位，这些称为国际单位制的基本单位。其他量（如力、能量、电压、磁感应强度等）的单位均可由这些基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。附录中给出了常用的国际单位制单位。

### 1.1.2　测量的分类

按获得数据的方法，可将测量分为直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较，直接从仪器、量具上读出量值的大小。例如，用米尺测量长度、用天平称质量、用秒表测时间等。

间接测量是待测量由若干直接测量的物理量在一定的函数关系下，运算后获得的。例如，测物体运动的平均速度 $\bar{v}$，可由直接测量物体运动的时间 $\Delta t$ 和在时间 $\Delta t$ 内通过的位移 $\Delta s$，并由平均速度的定义式 $\bar{v}=\Delta s/\Delta t$ 计算出 $\bar{v}$。

组合测量是当某项测量结果需用多个未知参量表达时，可通过改变测量条件进行多次测量，根据测量量与未知参数间的函数关系列出方程组并求解，进而得到未知量，这种测量方法称为组合测量。例如，测电阻器的温度系数，已知电阻器的阻值 $R_t$ 与温度 $t$ 间满足关系 $R_t=R_{20}+\alpha(t-20)+\beta(t-20)^2$，式中 $R_{20}$ 为 $t=20$ ℃ 时的电阻值，一般为已知量。$\alpha$，$\beta$ 为电子的温度系数，$t$ 为环境温度。为了获得 $\alpha$，$\beta$，可以在两个不同的温度 $t_1$，$t_2$ 下测得两个电阻值 $R_{t_1}$，$R_{t_2}$，代入上述方程联立求解可得 $\alpha$，$\beta$。

## 1.1.3 测量误差

被测物理量的大小(即真值)是客观存在的。在测量过程中,我们总希望准确测得被测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等,使测得值与被测量的真值之间不可避免地产生差异。测量值 $x$ 与真值 $X$ 之差称为测量误差 $\delta$,简称绝对误差。

$$绝对误差 = 测量值 - 真值$$

即
$$\delta = x - X \tag{1.1.1}$$

绝对误差与真值之比,称为相对误差,用符号 $E$ 表示:

$$E = \frac{\delta}{X} \times 100\%$$

由测量所得的一切数据都毫无例外地包含有一定数量的测量误差,没有误差的测量是不存在的。那么,怎样的测量值是最接近真值的最佳值?如何估算误差范围呢?这就有必要对误差进行研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

误差分析的指导作用包含下列两个方面。

(1) 为了从测量中正确认识客观规律,必须分析误差的原因和性质,正确处理所测得的数据,尽量消除、减少误差或确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并做出精度评价。

(2) 在设计一项实验时,先对测量结果确定一个精度要求,然后用误差分析指导我们合理地选择测量方法、仪器和条件,以便能在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果。

## 1.1.4 系统误差与随机误差

误差产生有多方面的原因,根据误差的性质和产生的原因,可将误差分为系统误差和随机误差两大类。

**1. 系统误差**

系统误差的特点是,在相同的条件下(即方法、仪器、环境、人员)对同一量进行多次测量时,误差的绝对值和符号保持不变。当测量条件改变时,误差也按一定规律变化。

造成系统误差的原因有以下几个方面。

(1) 仪器的固有缺陷。例如,刻度不准、零点没有调准、仪器水平或铅直未调

整、砝码未经校准等。

(2) 实验方法的不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性。例如，在空气中称重量而没有考虑空气浮力的影响，测长度时没有考虑温度对测量工作的影响，量热时没有考虑热量的散失，测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响等。

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如，标准电池是以 20 ℃ 时的电动势数值作为标准值的，若在 30 ℃ 条件下使用时，不加以修正，就引入了系统误差。

(4) 由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等而引入的误差，如有的人习惯于侧坐斜视读数，有的人眼睛辨色能力较差等，都会使测量值偏大或偏小。

系统误差的消除、减小或修正，可以在实验前、实验中、实验后进行。例如，实验前对测量仪器进行校准，使方法完善，对人员进行专门的训练等；在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿；实验后在结果处理中进行修正等。但是，要找出产生系统误差的原因，寻求其规律绝非轻而易举，这是因为：①实验条件一经确定，系统误差就获得了一个客观上的恒定值，在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差；②在一个具体的测量过程中，系统误差往往会和随机误差同时存在，这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切关系。对于实验初学者来说，应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识，在实验时要分析采用这种实验方法(或理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会给测量结果引入系统误差。

**2. 随机误差**

随机误差的特点是随机性，服从统计规律。即当我们在竭力消除或减小一切明显的系统误差之后，在相同条件下，对同一量进行多次重复测量时，每次测量的误差时大时小，时正时负，既不可预测又无法控制。

随机误差是由于测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。如人的感官灵敏度和仪器的稳定性有限；实验环境中的温度、湿度、电源电压等的起伏而引起变化；不规则的脉动和微小振动，以及杂散电磁场等都会影响精密测量。随机误差的出现是无规则的，不可避免的。但是，在同样条件下，对同一物理量进行大量多次测量，可以发现随机误差服从统计规律，其中最典型的一种是正态分布规律(又称为高斯分布)。我们可以利用这种规律对实验结果做出随机误差的误差估算。

## 1.1.5 测量结果的最佳值与随机误差的估算

**1. 随机误差的统计规律**

实践和理论都证明，大部分测量的随机误差服从统计规律。其中最典型的一

种是正态分布，如图 1.1.1 所示。

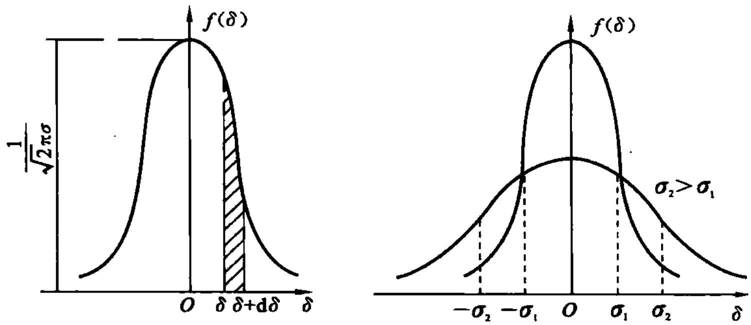


图 1.1.1　正态分布

服从正态分布的随机误差具有下面 4 大特征。

(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。

(2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

(3) 有界性。在一定测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度。

(4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测定次数的增加而越来越趋向于 0。

如图 1.1.1 所示，横坐标表示误差 $\delta=x-X$，纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\delta)$，形式为

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1.1.2}$$

且

$$\int_{-\infty}^{\infty}f(\delta)d\delta=1 \tag{1.1.3}$$

(1.1.2) 式中的特征量

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum\delta_i^2}{n}}\quad(n\to\infty) \tag{1.1.4}$$

是一个与实验条件有关的常数，称为标准误差，其中 $n$ 为测量次数。$\sigma$ 的物理意义是什么？

如图 1.1.1 中左图所示，是不同 $\sigma$ 值时的 $f(\delta)$ 图线。$\sigma$ 值小，曲线陡且峰值高，说明测量值的误差集中，小误差占优势，各测量值的分散性小，重复性好。反之，$\sigma$ 值大，曲线较平坦，每次测量值的分散性大，重复性差。

但应注意，标准误差 $\sigma$ 和各测量值的误差 $\delta_i$ 有着完全不同的含义。$\delta_i$ 是实在的误差值，也称真误差；而 $\sigma$ 并不是一个具体的测量误差值，它反映了在相同条件下进行一组测量后的随机误差出现概率的分布情况，只具有统计性质的意义，是一个统计性的特征值。

$\sigma$ 表示的概率意义可以从 $f(\delta)$ 函数式求出。由概率论可知，随机误差落在

$(\delta,\delta+\mathrm{d}\delta)$ 区间内的概率为

$$f(\delta)\mathrm{d}\delta$$

所以误差出现在$(-\sigma,+\sigma)$ 区间内的概率 $P$ 就是如图 1.1.1 的左图中该区间内 $f(\delta)$ 曲线下的面积

$$P(-\sigma<\delta<\sigma)=\int_{-\sigma}^{\sigma}f(\delta)\mathrm{d}\delta=\int_{-\sigma}^{\sigma}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta=68.3\%$$

这说明对任一次测量，其测量值误差出现在$(-\sigma,+\sigma)$ 区间内的可能性(概率) 为 68.3%。如果对某一物理量在相同条件下进行了 1 000 次测量，则测量值误差可能有 683 次落在此区间内。

因此，标准误差 $\sigma$ 所表示的意义是，任做一次测量，测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的概率为 68.3%。$\sigma$ 并不是一个具体的测量误差值，它提供了一个用概率来表达测量误差的方法。

$(-\sigma,+\sigma)$ 区间称为置信区间，其相应的概率 $P(\sigma)=68.3\%$ 称为置信概率。显然，置信区间扩大，则置信概率提高。置信区间取$(-2\sigma,+2\sigma)$，$(-3\sigma,+3\sigma)$，相应的置信概率 $P(2\sigma)=95.4\%$，$P(3\sigma)=99.7\%$。

1) 平均误差 $\eta$

定义

$$\eta=\frac{\sum|\delta_i|}{n}\tag{1.1.5}$$

它的概率含义是

$$P(-\eta<\delta<+\eta)=\int_{-\eta}^{\eta}f(\delta)\mathrm{d}\delta=57.5\%$$

即任做一次测量，测量误差落在 $-\eta$ 到 $+\eta$ 之间的可能性为 57.5%，它与标准误差 $\sigma$ 的关系为

$$\eta=0.798\sigma\approx\frac{4}{5}\sigma\tag{1.1.6}$$

2) 极限误差 $\Delta$

定义

$$\Delta=3\sigma\tag{1.1.7}$$

它的概率含义是

$$P(-3\sigma<\delta<3\sigma)=\int_{-3\sigma}^{3\sigma}f(\delta)\mathrm{d}\delta=\int_{-3\sigma}^{3\sigma}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta=99.7\%$$

它表示在 1 000 次测量中，可能有三次测量值的误差绝对值会超过 $3\sigma$。在通常的有限次测量中，测量次数很少超过几十次，因此，测量值误差超过 $\pm3\sigma$ 范围的情况几乎不会出现，所以把 $\pm3\sigma$ 称为极限误差。

上述三种随机误差的表示法，其区别在于概率的大小不同。换一个其他概率值又可以有一种随机误差表示法。但是，由于真值 $X$ 是无法测得的，所以 $\delta_i = x_i - X$ 也是无法计算的，$\sigma$，$\eta$ 和 $\Delta$ 均无法算出。那么，如何来估算随机误差的大小呢？

**2. 随机误差的估算**

1）以算术平均值表示真值

设对某一物理量进行了 $n$ 次等精度的测量，所得的一系列测量值分别为 $x_1$，$x_2$，…，$x_i$，…，$x_n$。测量结果的算术平均值

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.1.8}$$

$x_i$ 是随机变量，$\overline{x}$ 也是一个随机变量，随着测量次数 $n$ 的增减而变化。当测量次数 $n$ 无限增多时，算术平均值 $\overline{x}$ 就是接近真值的最佳值。

2）用标准偏差估计误差

当测量次数 $n$ 为有限次的时候，测量值的标准偏差

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \tag{1.1.9}$$

式中，$v_i$ 称为残差，是第 $i$ 次测量值与算术平均值之差，即

$$v_i = x_i - \overline{x} \tag{1.1.10}$$

$S_x$ 表示有限次测量的标准误差，它只是 $n \to \infty$ 时 $\sigma$ 的一个估算值。

3）平均值的标准偏差

在进行了有限次测量后，可得一最佳值 $\overline{x}$，并以 $S_x$ 来估算标准偏差。这时，任一次测量值 $x_i$ 的误差落在（$-S_x$，$+S_x$）范围内的概率为 68.3%。但是，$\overline{x}$ 也是一个随机变量，随 $n$ 的增减而变化，那么平均值 $\overline{x}$ 的可靠性如何？很显然，$\overline{x}$ 比任一次测量值 $x_i$ 更可靠。由误差理论可以证明，平均值 $\overline{x}$ 的标准偏差

$$S_{\overline{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \tag{1.1.11}$$

即平均值的标准偏差 $S_{\overline{x}}$ 是 $n$ 次测量中任一次测量值标准偏差 $S_x$ 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍。它表示在（$\overline{x} - S_{\overline{x}}$，$\overline{x} + S_{\overline{x}}$）范围内包含真值 $X$ 的可能性是 68.3%。称（1.1.11）式为贝塞尔公式。

由（1.1.11）式可知，随着测量次数增加，$S_{\overline{x}}$ 减小，这就是通常所说的增加测量次数可以减小随机误差。但是，因为 $n > 10$ 以后，$S_{\overline{x}}$ 变化极慢，如图 1.1.2 所示，所以在物理实验中测量次数一般不超过 10 次。

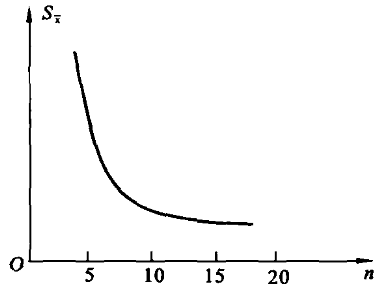


图 1.1.2 随机误差随测量次数的变化曲线

## 1.1.6 仪器误差

**1. 仪器的最大误差**

测量是用仪器或量具进行的。有的仪器比较粗糙或灵敏度较低，有的仪器比较精确或灵敏度较高，但是任何仪器都存在误差。仪器误差就是指在正确使用仪器的前提下，测量所得结果的最大误差，用 $\Delta_{仪}$ 表示。

仪器准确度的级别通常是由制造工厂和计量机构使用更精确的仪器、量具，检定比较后给出的。由所用仪器的量程和级别（或只用级别）就可以算出仪器误差 $\Delta_{仪}$ 的大小。下面列举几种常用器具的仪器误差。

*1）游标卡尺、螺旋测微计（千分尺）的仪器示值误差*

游标卡尺不分精度等级，一般测量范围在 300 mm 以下的卡尺，其分度值就是仪器的示值误差。例如，若测量范围在 0 ～ 300 mm 内，其分度值是 0.02 mm，则其示值误差就是±0.02；当分度值是 0.05 时，其示值误差就是±0.05。而测量范围在 300 ～ 500 mm 内，其分度值是 0.02 mm，则其示值误差是±0.04；当分度值是 0.05 时，其示值误差就是 ±0.05。螺旋测微计分零级和一级两类，通常实验室使用的为一级，其示值误差也根据测量范围不同而不同。例如，测量范围在 0 ～ 100 mm 内，则其示值误差是 ±0.004；测量范围在 100 ～ 150 mm 内，则其示值误差就是 ±0.005。

*2）电表的示值误差*

根据中华人民共和国国家标准 GB 776 − 65《电气测量指示仪表通用技术条例》，规定电表准确度 $S_n$ 分为 0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0 七级。在规定条件下适用电表时，其示值 $x$ 的最大绝对误差为

$$\begin{aligned}\Delta_{仪} &= \pm \text{量程} \times \text{准确度等级}\ \% \\ &= \pm x_m \times S_n\% \end{aligned} \tag{1.1.12}$$

例如，0.5 级电压表量程为 3 V 时

$$\Delta_{仪} = \pm 3 \times \frac{0.5}{100} = \pm 0.015(\mathrm{V})$$

**2. 仪器的标准误差**

仪器误差也同样包含系统误差和随机误差两部分。究竟哪个因素为主，要具体分析。一般级别较高的仪表（如0.2级）主要是随机误差，级别低的或工业用仪表则主要是系统误差。实验室常用仪表（如0.5级），系统误差和随机误差都有，且数值相近。如何确定仪器的标准误差呢？它与上述仪器的最大示值误差又有何关系呢？

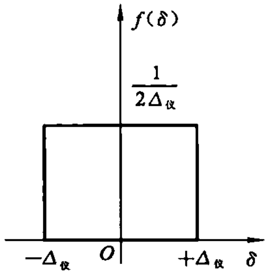


图 1.1.3 概率密度函数的均匀分布图

一般仪器误差的概率密度函数遵从均匀分布，如图1.1.3所示。在$(-\Delta_{仪}, +\Delta_{仪})$区间内，各种误差（不同大小和符号）出现的概率相同，区间外出现的概率为0。例如，游标卡尺的仪器误差、仪器度盘或其他传动齿轮的回差所产生的误差、机械秒表在其分度值内不能分辨引起的误差、级别较高的仪器和仪表的误差等都呈现均匀分布。误差发生在$(-\Delta_{仪}, +\Delta_{仪})$区间内的概率为

$$\int_{-\Delta_{仪}}^{+\Delta_{仪}} f(\delta)\mathrm{d}\delta = 1$$

所以，误差服从的规律为

$$f(\delta) = \frac{1}{2\Delta_{仪}}$$

可算得标准误差为

$$\sigma_{仪} = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \tag{1.1.13a}$$

若仪器误差的概率密度函数遵从正态分布，则

$$\sigma_{仪} = \frac{\Delta_{仪}}{3} \tag{1.1.13b}$$

## 1.1.7 有效数字及其运算规则

实验中总是要记录很多数据，并进行计算。但是，记录时应取几位数，运算后应保留几位数，这是实验数据处理的重要问题。对此，必须有一个明确的认识。

**1. 有效数字**

任何一个物理量，其测量结果总有误差，测量值的最后一位数字就是有误差的数字。我们把测量值最后一位数字称为“存疑数字”，在它前面的所有数字称为“可靠数字”。这样，可引入有效数字的概念，即测量结果中可靠的几位数字加上一位

存疑的数字统称为测量结果的有效数字。例如，用毫米尺测量一个物体的长度，如图 1.1.4 所示，读数为 10.24 cm，这个读数的前三位 10.2 cm 是直接从尺上读出来的，是精确的，是可靠数字；而最末一位 0.04 cm，则是从尺上的最小刻度之间，由测量者估计得来的，是存疑数字。这样，10.24 cm 一共有 4 位有效数字。

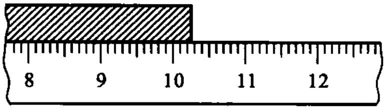


图 1.1.4　毫米尺测量物体

关于有效数字的概念，应掌握以下几点规律。

(1) 有效数字规定，最末一位数字是存疑数字，这就要求在测量记录时，采取正确的读数方法，即一般是在仪器的最小分格值后可以估读时，再估计一位。

(2) 有效数字不仅表示数值的大小，而且还说明了测量仪器的精度（仪器的精度是以其最小分格值来表示）。如上述读数为 10.24 cm，有 4 位有效数字，反映了所用的尺子的精度为 1 mm；如果用精度为 0.02 mm 的游标卡尺来测量该物体的长度读数为 10.244 cm，就有 5 位有效数字；若用厘米尺测量，读数为 10.2 cm，就只有三位有效数字。由此可见，有效数字的多少并不是随意决定的，它与所用的测量仪器的精度有关，表示了测量所能达到的精确程度。

(3) 要注意数字中的“0”。它可能是有效数字，也可能不是有效数字。第一个非零数字前面的“0”不是有效数字，此时“0”是用来表示小数点的位置。例如，0.037 6 cm 前面的“0.0”不是有效数字，而有效数字只有三位。数字中间出现的“0”和末位的“0”都属于有效数字。如 10.50 cm，是 4 位有效数字，10.5 cm 是三位有效数字，两者是不同的。前者表示测量进行到 1/100 cm 的地方，而后者表示测量只进行到 1/10 cm 的地方。这就是说，数字最后面的“0”，即使是在小数点之后，也不能随意加上或者去掉。如图 1.1.5 所示的铜棒的长度必须记作 3.60 cm，它表示物体的末端正好是与分度线“6”对齐，小于1 mm（分度值）的估读数为“0”，这里的最末一位“0”必须表示出来，不能省去。如果写成 3.6 cm 就不能如实地反映测量的精度。

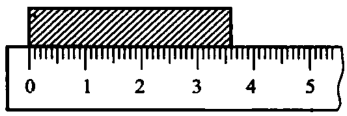


图 1.1.5　铜棒

(4) 有效数字的位数不能因为变换单位而增减。如 3.94 cm 可换算成 39.4 mm 或 0.039 4 m。单位变化了，有效数字的位数不变，仍然是三位。又如地球的半径是 6 371 km，是 4 位数字，换成米为单位时，应当写成 $6.371 \times 10^6$ m，仍是 4 位有效数字；如果写成 6 371 000 m，就变成 7 位有效数字了，这样就会造成测量结果的表达和仪器精密度不符合的现象。为了避免混乱，在书写时常采用 10 的方幂来表示其数量级，方幂前面的数字是测量的有效数字。例如，

$$0.0523\ \text{m} = 5.23 \times 10^{-2}\ \text{m}$$