郭悦韶 廖坤山 主编

大学物理实验

（第2版）

清华大学出版社

郭悦韶 廖坤山 主编

大学物理实验 第2版

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本实验教材根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合高校专业设置特点和实验设备的具体情况，在多年教学实践的基础上编写而成。

本书共分 6 个部分。第 1 部分系统地介绍了误差理论与数据处理的基础知识；第 2～5 部分共有 31 个实验，主要是基础性实验和综合性实验，包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验的内容；第 6 部分共有 10 个实验，主要是设计性物理实验。

本书可作为高等院校工科各专业物理实验课程的教材或参考书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验/郭悦韶，廖坤山主编. --2 版. --北京：清华大学出版社，2012.1
ISBN 978-7-302-27746-0

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①郭… ②廖… 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(2011)第 280157 号

责任编辑：朱红莲
责任校对：刘玉霞
责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社
http://www.tup.com.cn
社 总 机：010-62770175
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
地 址：北京清华大学学研大厦 A 座
邮 编：100084
邮 购：010-62786544
印 装 者：保定市中画美凯印刷有限公司
经 销：全国新华书店
开 本：185×260 **印 张**：14.5 **字 数**：332 千字
版 次：2012 年 1 月第 2 版 **印 次**：2012 年 1 月第 1 次印刷
印 数：1～4500
定 价：26.00 元

产品编号：043298-01

前　言

本实验教材根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，面向21世纪，结合高校专业设置特点和实验设备的具体情况，在多年教学实践的基础上编写而成。

全书共分6个部分。第1部分系统地介绍了误差理论与数据处理的基础知识；第2～5部分共有31个实验，主要是基础性实验和综合性实验，包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验的内容；第6部分共有10个实验，主要是设计性物理实验。实验项目的选择主要参照《新世纪高等教育教改工程》(教高[2000]1号)文件、《基础课实验教学示范中心建设标准》和《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》。实验中增加了物理实验技术与计算机技术相结合的内容，反映了物理实验的新技术手段，以适应多层次物理实验教学新体系的要求。

本书由郭悦韶、廖坤山主编。其中，绪论、误差理论与数据处理的基础知识由郭悦韶编写，电磁学实验的预备知识由廖坤山编写，参加实验项目内容编写的教师有郭悦韶、廖坤山、王光清、陈春玉、翟云、吕蓬、黄毓锰、许辉跃。

本书在编写过程中参阅了其他相关的教材和仪器厂家的说明书，在此表示感谢。由于编者的水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编　者

2011年12月

目　录

绪　论

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。德智体美全面发展的高级工程技术人才，不仅应该具备比较深广的理论知识，而且应具有从事科学实验的较强能力，才能适应科学技术不断进步和社会主义现代化建设迅速发展的需要。

1. 学好物理实验

物理实验是高等学校理工科院校对大学生进行科学实验基础训练的一门独立的必修基础课，是大学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。所以，大学物理实验是作为独立课程列入大学教学计划的。

物理实验是任何工程技术和生产部门进行各种专门实验的基础。各种电子学测量仪器和光学仪器等，都是根据物理原理制作的。通过对实验现象的观察、分析和测量来学习物理实验知识，能够加深对物理学原理的理解。在物理实验中，我们可以学到很多直接有用的知识和技能，学到一些处理和解决实际问题的途径和方法。

物理实验有助于提高学生的科学实验素养。有关误差理论、不确定度分析和数据处理等方面的知识也是从事任何实际工作所不能欠缺的，在物理实验中，我们将在这方面得到初步训练。

在实验中培养学生的设计思想、实验方法、开拓意识、创新思维和动手能力，是物理实验教学的重要目标。

2. 怎样写实验报告

使用实验报告册，分为两部分。

第一部分：预习。

它作为正式实验报告册的前面部分，要求在做实验之前认真阅读实验讲义，写好以下预习内容：

实验目的：说明本实验的目的和实验方法。

实验原理：在理解的基础上，用简短的文字扼要地阐述实验原理，切忌整篇照抄，力求做到图文并茂。图系指原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式，说明式中各物理量的意义、单位和测试手段，以及公式的适用条件或实验的必要条件。

实验仪器：记录实验所用的主要仪器的型号、编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯，便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学逐步地熟悉它，以培养选用仪器的能力。

实验步骤：简明扼要，包含操作过程中的注意事项。

数据记录表：实验的原始数据先记录在作业纸上（预习中完成表格的设计），后再誊抄到报告册上，经教师评分和签字认可后才有效。内容包括实验内容和现象观

测记录。数据记录应做到整洁清晰而有条理，尽量采用列表法。设计表格时，力求简单明了，分类清楚而有条理，便于计算与复核，达到省工省时的目的。在标题栏内要求注明单位。

确实测错而无用的数据，可在上面画“—”，如“~~2.569~~”。不得任意涂改，以便分析出错原因。

第二部分：数据处理与计算。

此部分在实验后进行，包括以下内容：

作图、计算结果与误差估算：图解法要求使用正式的坐标纸并按作图规则进行。计算时，先将文字、公式化简，再代入数值进行运算。不确定度估算要预先写出其公式，并把数据代入。

结果：按标准形式写出实验的结果。必要时要注明结果的实验条件。

讨论：对实验中出现的问题进行说明和讨论，写出实验心得和建议等。

作业题：完成教师指定的作业题，思考题选做。

实验报告要求书写清晰，字迹端正，数据记录整洁，图表合格，文理通顺，内容简明扼要。

实验报告一律用正式的物理实验报告册书写。

3．遵守实验规则

为了保证实验正常进行，以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯，特制定下列规则：

（1）学生应在课表规定时间内进行实验，不得无故缺席或迟到，迟到十分钟不得带入实验室。穿拖鞋者不得进入实验室。雨伞、饮料不得带入实验室。实验时间若要变动，须经教师同意。

（2）学生在每次实验前对排定要做的实验应进行预习，并在预习的基础上，做好预习报告。

（3）进入实验室后，应主动将预习报告放在桌上由教师检查，并回答教师的提问，经过教师检查认为合格后，才可以进行实验。

（4）实验时，应携带必要的物品，如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验应事先准备坐标纸和铅笔。

（5）进入实验室后，根据仪器清单核对自己使用的仪器有无缺少或损坏。若发现有问题，应向教师或实验管理员提出。未列入清单的仪器，另向管理员借用，实验完毕时归还。

（6）实验前应细心观察仪器构造，操作时动作应谨慎细心，严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项，尤其是电学实验，线路接好后，先让教师或实验室工作人员检查，经许可后方可接通电源，以免发生意外。

（7）实验完毕应将实验数据交给教师检查，实验合格者，教师签字通过。未经教师签字的原始数据无效，抄袭实验数据或实验报告或模仿教师签字者，轻则公开检查，重则交学校严肃处理。

(8) 实验时,应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕,学生应切断电源开关,将仪器、桌椅放置整齐,并在学生实验记录本上签字、记录。

(9) 如有损坏仪器,应及时报告教师或实验室工作人员,填写损坏单或书面报告,说明损坏原因,并根据学校赔偿规定处理。

(郭悦韶 编写)

1 误差理论与数据处理的基础知识

1.1 误差的基本概念

1. 测量

物理实验以测量为基础。根据测量方法可分为直接测量与间接测量。可用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量，称为**直接测量**。例如用米尺测得物体的长度是67.35 cm，用毫安表量得电流1.52 mA等。但是，有些物理量无法进行直接测量，需要根据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出，这样的测量称为**间接测量**。例如，测量铜柱体的密度时，需要先测量铜柱的高度 h、直径 d 和质量 m，然后计算出密度 $\rho=4m/\pi d^2h$，像这样的测量称为间接测量。

按测量条件测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量：在对某一物理量进行多次重复测量过程中，每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如，由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测物理量进行多次测量，每次测量的可靠程度都相同，这些测量是等精度测量。

不等精度测量：在对某一物理量进行多次重复测量时，测量条件完全不同或部分不同，各结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如，在对某一物理量进行测量时，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不等精度测量。

绝大多数实验都采用等精度测量，本教材主要讨论等精度测量。

2. 测量误差

反映物质固有属性的物理量所具有的客观的真实数值称为**真值**。由于测量所使用的仪器不可能是尽善尽美，测量所依据的理论公式所要求的条件也是无法绝对地保证的，再加上测量技术、环境条件等各种因素的局限，真值一般无法得到。但是，从统计理论可以证明，在条件不变的情况下进行多次测量时，可以用算术平均值作为相对真值。

测量结果与客观存在的真值之间总有一定的差异。我们把测量结果与真值之间的差值叫做**测量误差**，简称**误差**。误差存在于一切测量之中，而且贯穿于整个测量过程。在确定实验方案、选择测量方法或选用测量仪器时，要考虑测量误差。在数据处理时，要估算和分析误差。总之，必须以误差分析的理论指导实验的全过程。

测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示，还可以用百分误差表示。

绝对误差＝测量值－真值

相对误差＝｜绝对误差/真值｜×100%

百分误差＝｜(测量最佳值－公认值)/公认值｜×100%

3. 误差的分类

测量误差按原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差

系统误差是指在相同条件下，多次测量同一物理量时，测量值对真值的偏离(大小和方向)总是相同。

系统误差的主要来源有：①仪器误差(如刻度不准，米尺弯曲，零点没调好，砝码未校正)；②环境误差(如温度，压强等的影响)；③个人误差(如读数总是偏大或者偏小等)；④理论和公式的近似性(如用单摆测量重力加速度时所用公式的近似性)等。

增加测量次数并不能减小系统误差，为了减小和消除系统误差，必须针对其来源，逐步具体考虑，或者采用一定的测量方法，或者经过理论分析、数据分析和反复对比的方法找出适当的关系对结果进行修正。

(2) 随机误差

随机误差(又称偶然误差)是指在同一条件下多次测量同一物理量，测量结果总是稍许差异且变化不定。

随机误差来源于各种偶然的或不确定的因素：①人们的感官(如听觉、视觉、触觉)的灵敏度的差异和不稳定；②外界环境的干扰(温度的不均匀、振动、气流、噪声等)；③被测对象本身的统计涨落等。

虽然偶然误差的存在使每一次测量偏大或偏小是不确定的，但是，当测量次数增加时，它服从一定的统计规律。在一定的条件下，经过多次测量，测量值落在真值附近的某个范围内的几率是一定的，而且偏离真值较小的数据比偏离真值较大的数据出现的几率大，偏离真值很大的数据出现的几率趋于0。因此，增加测量次数可以减少偶然误差。

系统误差与偶然误差的来源、性质不同，处理方法也不同。但是，它们之间也是有联系的。如对某问题从一个角度来看是系统误差，而从另一个角度来看又是偶然误差。因此在误差分析中，往往把两者联系起来对测量结果作总体评定。

(3) 过失误差

过失误差是由于观测者不正确地使用仪器、操作错误、读数错误、观察错误、记录错误、估算错误等不正常情况下引起的误差。错误已不属于正常的测量工作范围，应将其剔除。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。

4. 测量的精密度、准确度和精确度

对于测量结果做总体评定时，一般把系统误差和随机误差联系起来看。精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的，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的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时，所得结果的相互接近程度，是描述测量重复性高低的。精密度高，即测量数据的重复性好，随机误差较小。

(2) 准确度

准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。它是指测量值或实验所得结果与真

值符合的程度，即描述测量值接近真值的程度。准确度高，即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。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，而准确度高精密度也不一定高；只有精密度和准确度都高时，精确度才高。

现在以打靶结果为例来形象说明三个"度"之间的区别，见图1.1。图(a)表示子弹相互之间比较近，但偏离靶心较远，即精密度高准确度较差。图(b)表示子弹相互之间比较分散，但没有明显的固定偏向，故准确度高而精密度较差；图(c)表示子弹相互之间比较集中，且都接近靶心，精密度和准确度都很好，亦即精确度高。

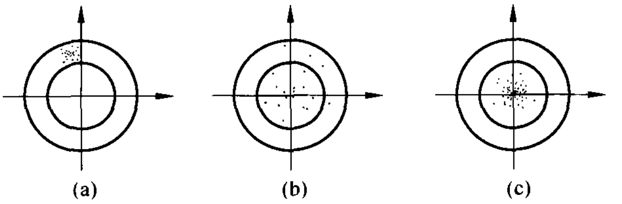

图1.1 精密度、准确度和精确度示意图

5. 随机误差的估算

（1）**算术平均值**的普遍表达式为

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

这里 x_i 是第 i 次测量值，n 是测量次数。

（2）**残差**：每一次测量值与算术平均值的差值，用 Δx_i 表示。

$$\Delta x_i=x_i-\bar{x}$$

因为用残差去估算误差，所得结果为测量值的实验标准偏差，用 σ 表示。

（3）标准偏差

任意一次测量值的实验标准偏差近似为

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{1.1}$$

这个公式又称**贝塞尔公式**，它表示如果在相同条件下进行多次测量，其随机误差遵从高斯分布，那么，任意一次测量值误差出现在 $(-\sigma_x,\sigma_x)$ 区间内的概率为68.3%。

算术平均值的实验标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1.2}$$

它表示如果多次测量的随机误差遵从高斯分布，那么，其值出现在 $(\bar{x}-\sigma_{\bar{x}},\bar{x}+\sigma_{\bar{x}})$ 区域内的概率为68.3%。

(4) 误差取位规则

约定：绝对误差一般取一位有效数字，其尾数只进不舍，以免产生估计不足。相对误差一般取两位有效数字。

测量值的有效数字尾数应与绝对误差的尾数取齐，其尾数采用四舍六入五凑偶法则，这种舍入法则的出发点是使尾数舍与入的概率相等。

(5) 误差的传递公式

间接测量是由各直接测量值通过函数关系计算得到的，既然直接测量有误差存在，那么间接测量也必有误差，这就是误差的传递。由直接测量值及其误差来计算间接测量值的误差之间的关系式称为误差的传递公式。

设间接测量值为 N，它是由各互不相关的直接测量值 $A,B,C,\cdots$ 通过函数关系 f 求得的，即

$$N=f(A,B,C,\cdots)$$

若各个独立的直接测量值的误差分别为 σ_A、σ_B、σ_C、$\cdots$，则间接测量值 N 的误差估算需要用误差的方和根合成。其标准误差

$$\sigma_N=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\sigma_A\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial B}\sigma_B\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial C}\sigma_C\right)^2+\cdots} \tag{1.3}$$

相对误差

$$\frac{\sigma_N}{N}=\frac{1}{f\ (A,B,C,\cdots)}\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\sigma_A\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial B}\sigma_B\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial C}\sigma_C\right)^2+\cdots} \tag{1.4}$$

式中的 $A,B,C,\cdots$ 是直接测量值，$\sigma_A,\sigma_B,\sigma_C,\cdots$ 是各直接测量值的误差。

对于以加减运算为主的函数关系，一般用式(1.3)先计算标准误差，再求出相对误差；而以乘除运算为主的函数关系，一般先计算相对误差，再计算标准误差，步骤如下。

① 对函数取对数

$$\ln N=\ln f(A,B,C,\cdots)$$

② 求相对误差

$$\frac{\sigma_N}{N}=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial A}\sigma_A\right)^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial B}\sigma_B\right)^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial C}\sigma_C\right)^2+\cdots} \tag{1.5}$$

③ 求标准误差

$$\sigma_N=N\cdot\frac{\sigma_N}{N}$$

1.2　常用仪器误差简介

仪器误差是指在仪器规定的使用条件下，正确使用仪器时，仪器的指示数和被测量的真值之间可能产生的最大误差。它的数值通常由制造厂家和计量单位使用更精密的仪器，经过检定比较后给出的，其符号可正可负，用 $\Delta_{仪}$ 表示。通常仪器误差既包含系统误差，又包含随机误差，它在很大程度上取决于仪器的精度。一般级别高的仪器和仪表(如0.2级精密电表)，仪器误差主要是随机误差；级别低的(如1.0以下)则主要是系统误差。

一般所用的0.5级或1.0级仪表，则两种误差都可能存在。根据仪器的级别计算仪器误差的公式为

$$\Delta_{仪} = 量程 \times 级别\ \%$$

如果没有注明仪器级别，在物理实验教学中，对于一些连续刻度（可估读）的仪器，一般用仪器的最小刻度的一半作为$\Delta_{仪}$；而对于非连续刻度（不可估读）的仪器，一般用仪器的最小刻度作为$\Delta_{仪}$。

仪器误差的概率密度函数遵从的是均匀分布，如图1.2所示。均匀分布是指其误差在$[-\Delta_{仪},\Delta_{仪}]$区间范围内，误差（不同大小和符号）出现的概率都相同，而区间外的概率为0，即$\int_{-\Delta_{仪}}^{+\Delta_{仪}} f(\Delta)\mathrm{d}\Delta = 1$。所以误差服从以下规律分布：$f(\Delta)=1/2\Delta_{仪}$。

可以证明，服从均匀分布的仪器的最大误差所对应的标准误差为

$$\sigma_{仪} = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}$$

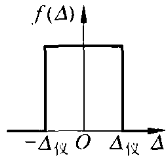

图1.2 均匀分布曲线

在物理实验教学中，正确使用仪器时，我们约定仪器的基本误差（或最大误差）如下：

米尺：仪器误差$\Delta_{仪}=0.5$ mm

五十分游标卡尺：仪器误差$\Delta_{仪}=0.02$ mm

螺旋测微器：仪器误差$\Delta_{仪}=0.005$ mm

分光计：仪器误差$\Delta_{仪}=1'$

读数显微镜：仪器误差$\Delta_{仪}=0.005$ mm

机械秒表：仪器误差$\Delta_{仪}=0.2$ s

电表：仪器误差$\Delta_{仪}=$（量程$M\times\varepsilon\%$）[单位]；ε为仪器精度等级值

电阻箱：仪器误差$\Delta_{仪}=(\varepsilon\%R+0.002m)\ \Omega$，$m$是总转盘数。

1.3 不确定度的基本概念

不确定度和误差是两个不同的概念，它们之间既有联系，又有本质区别。误差是指测量值与真值之差，由于真值一般不可能准确地知道，因此测量误差也不可能确切获知。而不确定度是指误差可能存在的范围，这一范围的大小能够用数值表达。因此，不确定度实质上是误差的估计值。

1. 不确定度的概念

由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度称为**不确定度**。它是表征对被测量的真值所处的量值范围的评定。例如，测得一单摆的周期为

$$T = (2.163 \pm 0.002)\ \mathrm{s} \quad (P = 68.3\%)$$

其中0.002为不确定度，$P=68.3\%$表示置信概率。这样表示的意义为：被测单摆周期的真值，落在$(2.163-0.002, 2.163+0.002)$范围内的可能性有68.3%。因此不确定度是测量结果表述中的一个重要参数，它能合理地说明测量值的分散程度和真值所在范围的

可靠程度。不确定度亦可理解为一定置信概率下误差限的绝对值，记为Δ。

不确定度的定量表述就是给出所需置信概率，用标准误差倍数表示置信区间。例如用“不确定度(σ)”时，则置信概率为68.3%，置信区间为($-\sigma$,σ)；用“不确定度(3σ)”时，则置信概率为99.7%，置信区间为(-3σ,3σ)。因此只要对测量结果给出不确定度，即给出置信区间和置信概率，就表达了测量结果的精确度。

判断异常数据的方法一般采用(3σ)准则。当“不确定度超过(3σ)”时，测量偏差的绝对值大于3σ的置信概率仅为0.3%，这种可能性微乎其微，该测量值视为坏值而将它剔除。

2. 不确定度的分类

测量不确定度由几个分量构成。通常，按不确定度值的计算方法分为A类不确定度和B类不确定度，或A类分量和B类分量。

A类分量是在一系列重复测量中，用统计学方法计算的分量Δ_A，

$$\Delta_A=\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1.6}$$

B类分量是用其他方法(非统计学方法)评定的分量Δ_B，

$$\Delta_B=\sigma_{仪}=\Delta_{仪}/C$$

在物理实验教学中，为简化处理，A类分量Δ_A指标准误差，B类分量Δ_B仅考虑仪器标准误差，并约定式中$C=\sqrt{3}$(假定仪器误差满足均匀分布)。将A类和B类分量采用方和根合成，得到**合成不确定度**表达式为

$$\Delta=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2} \tag{1.7}$$

注：式中忽略置信因子t_P(测量次数n取6～10次)。

测量结果的标准式为

$$x=\bar{x}\pm\Delta\ (单位) \tag{1.8}$$

不确定度取位规则：在物理实验中，绝对不确定度一般取一位有效数字，其尾数采用只进不舍法则。相对不确定度一般取两位有效数字。

测量值有效数字取位规则：测量值的尾数应与绝对不确定度的尾数取齐，其尾数的进位采用四舍六入五凑偶法则。

例1.1 用米尺($\Delta_{仪}=0.5$ mm)测一钢丝长度，六次测量值分别为$x_1=14.0$，$x_2=14.4$，$x_3=14.9$，$x_4=14.2$，$x_5=14.1$，$x_6=14.8$ mm。试写出它的测量结果，并用不确定度$\overline{X}\pm\Delta$表示。

解：① 计算算术平均值

$$\begin{aligned}\overline{X}&=\frac{1}{6}\sum X_i\\&=\frac{14.0+14.4+14.9+14.2+14.1+14.8}{6}\\&=14.4\ (\text{mm})\end{aligned}$$

② 计算 A 类不确定度

$$\Delta_A=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(X_i-\overline{X})^2}{6\times(6-1)}}$$

$$=\sqrt{\frac{1}{5\times 6}(0.4^2+0.0^2+0.5^2+0.2^2+0.3^2+0.4^2)}$$

$$\approx 0.153\approx 0.2\ (\text{mm})$$

③ 计算 B 类不确定度

$$\Delta_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}\approx 0.3\ (\text{mm})$$

④ 合成不确定度

$$\Delta=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}=\sqrt{0.2^2+0.3^2}\approx 0.4\ (\text{mm})$$

⑤ 测量结果

$$X=(14.4\pm 0.4)\ \text{mm},\quad \frac{\Delta}{\overline{x}}=2.8\%$$

3. 不确定度与误差

不确定度是在误差理论的基础上发展起来的，不确定度 A 类分量的估算用到了标准误差计算的公式。

误差用于定性描述实验测量的有关理论和概念，不确定度用于实验结果的定量分析和运算等。用测量不确定度代替误差评定测量结果，具有方便性、合理性和实用性。

我们可讲“误差分析、误差合成、不确定度分析、不确定度合成”和“误差理论”，但却不提倡使用“不确定度理论”这一术语。误差可正可负，而不确定度永远是正的。

误差是不确定度的基础，不确定度是对经典误差理论的一个补充，是现代误差理论的内容之一，它还有待于进一步的研究、完善和发展。

1.4 直接测量结果与不确定度的估算

在物理实验中，直接测量主要有单次测量和多次测量。由于不确定度评定方法的复杂性，只能采用简化的、具有一定近似性的估算方法。

1. 单次测量

单次测量的结果表示式为

$$x=x_{测}\pm\Delta_{仪}\,(单位)$$

其中 $x_{测}$ 是单次测量值，也称为单次测量最佳值。不确定度取仪器基本误差 $\Delta_{仪}$，仪器基本误差可在仪器说明书或某些技术标准中查到，或通过估算获得。

2. 多次测量

多次测量的结果表示为

$$x=\overline{x}\pm\Delta\,(单位)$$

其中 $\bar{x}$ 是一列测量数据(即测量列)的算术平均值(即测量列的最佳值);Δ 是合成不确定度。参考《测量不确定度表示指南 ISO 1993(E)》,物理实验的测量结果表示中,合成不确定度 Δ 从估计方法上分为 A 类分量和 B 类分量,并按"方和根"合成,即

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}\ (\text{单位})$$

例 1.2 用螺旋测微计($\Delta_{\text{仪}} = 0.005$ mm)测量某一铁板的厚度:①单次测量值为 3.779 mm;②8 次测量一列数据为 3.784,3.779,3.786,3.781,3.778,3.782,3.780,3.778 mm。试分别写出它的测量结果。

解:① 单次直接测量结果为

$$d = (3.779 \pm 0.005)\ \text{mm}$$

② 多次直接测量情况

$$\bar{d} = \frac{1}{8}\sum d_i$$

$$= \frac{3.784+3.779+3.786+3.781+3.778+3.782+3.780+3.778}{8}$$

$$= 3.781\ (\text{mm})$$

$$\Delta_A = \sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{8}(d_i - \bar{d})^2}{8\times(8-1)}} \approx 0.002\ (\text{mm})$$

$$\Delta_B = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \approx 0.003\ (\text{mm})$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = 0.004\ \text{mm}$$

则多次直接测量结果表示为

$$d = (3.781 \pm 0.004)\ \text{mm}$$

1.5 间接测量结果与不确定度的估算

1. 不确定度传递公式

设间接测量值为 $N = f(A, B, C, \cdots)$,其中 A、B、C、$\cdots$ 为直接测量值。若各测量值的不确定度分别为 Δ_A、Δ_B、Δ_C、$\cdots$,则间接测量值的不确定度传递公式按方和根合成。函数关系归类为和差、积商两种形式。

以和差形式的函数关系,先求绝对不确定度,再求出相对不确定度,步骤如下:

① 先写出绝对不确定度传递公式

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\Delta_A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\Delta_B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\Delta_C\right)^2 + \cdots} \tag{1.9}$$

式中系数 $\frac{\partial f}{\partial A}$、$\frac{\partial f}{\partial B}$、$\frac{\partial f}{\partial C}$、$\cdots$ 表示直接求偏导数。

② 再求相对不确定度 $\frac{\Delta_N}{N}$,用百分数表示。

以积商形式的函数关系,先求相对不确定度,再求出绝对不确定度,步骤如下: