21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国高等院校实用规划教材

大学物理实验

主　编　刘　跃　张志津
副主编　祝　威　张丽芳

Daxue Wuli Shiyan

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS
中国林业出版社
China Forestry Publishing House

21世纪全国高等院校实用规划教材

大学物理实验

主　编　刘　跃　张志津
副主编　祝　威　张丽芳
参　编　马巧云　周　严
　　　　田雅丽　黄书彬

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS
中国林业出版社
China Forestry Publishing House

内容简介

大学物理实验是为各工科专业和部分理科专业学生独立设置的一门必修课程，是学生进入大学后系统接受科学实验能力培养的开端，是进行科学实验方法和实验技能训练的重要基础。

本书是编者在多年物理实验教学实践的基础上编写而成的。全书内容共分为5篇：第1篇不确定度与数据处理基础，第2篇力学及热学实验，第3篇电磁学实验，第4篇光学实验，第5篇近代物理和综合实验。全书实验项目总计55个。

本书可作为普通高等工科院校、综合大学及师范类院校非物理专业的大学物理实验课程教学用书，也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/刘跃，张志津主编. —北京：中国林业出版社；北京大学出版社，2007.2

(21世纪全国高等院校实用规划教材)

ISBN 978-7-5038-4745-5

Ⅰ. 大… Ⅱ. ①刘… ②张… 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(2007)第021794号

书　　名：大学物理实验

著作责任者：刘　跃　张志津　主编

责任编辑：郭穗娟　郑铁志

标准书号：ISBN 978-7-5038-4745-5

出　版　者：中国林业出版社(地址：北京市西城区德内大街刘海胡同7号　邮编：100009)

网址：http://www.cfph.com.cn　E-mail:cfphz@public.bta.net.cn

电话：编辑部66170109　营销中心66187711

北京大学出版社(地址：北京市海淀区成府路205号　邮编：100871)

网址：http://www.pup.cn　http://www.pup6.com　E-mail: pup_6@163.com

电话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962

印　刷　者：北京昌平百善印刷厂印刷

发　行　者：北京大学出版社　中国林业出版社

经　销　者：新华书店

787mm×1092mm　16开本　21.25印张　498千字

2007年2月第1版　2007年2月第1次印刷

定　　价：29.00元

目　录

绪　论

1. 物理实验的地位和作用

实验是在人工控制的条件下，使现象反复重演，并进行观测研究的过程。科学实验和现代科学发展之间存在着本质的联系。没有严格的科学实验，科学真理便失去了检验的标准，现代科学技术就失去了源泉。实验可以使科学工作者获得最可靠的第一手资料，还可以培养人们的基本科学素养和严肃、认真、实事求是的治学精神。重理论、轻实践的思想倾向，是与科技现代化的需要相背离的。

物理实验在物理学的创立和发展过程中，占有十分重要的地位。物理学中许多概念的确立、物理规律的发现，都以实验为基础，并受到实验检验。例如，早在16世纪末，伽利略就应用实验方法发现了落体运动定律、斜面运动定律和单摆运动定律，从而在力学中引进了速度、加速度的概念，建立了惯性定律。

物理实验对现代物理学各个学科和应用技术的发展也起着决定性的作用。例如，1908年荷兰莱登实验室将氦液化，发现在超低温条件下，物质具有超导性、抗磁性和超流性。近年来，超导体材料和超导体技术的研究进一步蓬勃开展着，为无能耗储电、输电及制造高效能电气元件等创造了极其有利的条件。激光虽然源于爱因斯坦在1916年提出的受激辐射原理，但它主要是在实验中产生和发展起来的。从1960年迈曼首次制成红宝石激光器以后，激光以其方向性强、能量密度大和相干性高等优点，发展十分迅速，各种高效能激光器不断出现。目前，激光技术已广泛应用于测距、机加工、医疗手术和一些新式武器上。

实验—理论—实验，这是一个经过科学史证明的科研准则，至今不失其重大意义。物理实验是现代科学理论持续发展的必要保证。任何物理理论都是相对正确的，每向前发展一步都必须经受新实验的考验。例如，李政道和杨振宁以K介子衰变的实验事实为根据，提出了弱相互作用过程中存在宇称不守恒的假设，他们建议用β放射的实验来验证自己提出的理论。这个实验由吴健雄等完成，在这个基础上才初步建立了弱相互作用的理论。

当然，理论具有重要的指导作用，物理实验问题的提出、设计、分析和概括也必须应用已有的理论。总之，物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切配合下进行的。要学好物理学，不仅要有丰富的理论知识，也必须重视实验课的学习，提高现代实验能力，二者不可偏废，才能适应科技飞速发展的需要，才能作出有创造性的成果。

2. 物理实验课的目的和任务

物理实验课是对高等工业学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，是工科学生进入大学后接受系统实验方法和实验基本训练的开端，是对工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。本课程的具体任务是：

(1) 培养和提高学生的物理实验技术水平，通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，加深对物理学原理的理解。

(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或资料，并正确

理解原理，能够借助于教材或仪器说明书，正确使用常用仪器，熟悉基本实验方法和测量方法，并能测试常用的物理量；能够正确记录和处理实验数据，说明实验结果并撰写合格的实验报告；能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析，并作出判断；能够自行完成简单的设计性实验。

(3) 培养和提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度，主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

3. 物理实验课的程序

(1) 课前预习是做好实验的前提。通过预习要求达到：清楚本次实验的目的、基本原理和实验方案的思路，对实验步骤有个总体观念。如观察什么现象、测量哪些物理量、如何去测量、关键问题何在及如何去解决。在此基础上写出预习报告，其内容包括：实验名称、实验仪器、实验原理(简写)、实验步骤(简写)记录数据的表格。预习报告在做实验前由教师进行检查，不预习者不准进行实验。

(2) 课堂实验。学生进入实验室后，要自觉遵守实验规则，认真听取教师的指导，回答教师的提问。实验前清点所用仪器，弄清仪器的使用方法及注意事项，做到正确使用，防止损坏；未经许可不准自行换用。如仪器损坏或出现故障应立即报告教师处理。

实验过程中，要能较好地控制实验的物理过程或物理现象，有条不紊地操作，仔细地观察，及时而准确地测量并记录数据。

实验完毕，将数据交教师审阅、签字后，再将仪器整理复原。

(3) 写实验报告。写实验报告是学生对该实验进行总结、提高，深化实验收获的过程，要独立完成，不得抄袭或涂改数据。实验报告要求字迹清楚、文理通顺，图表、数据处理正确。

实验报告的内容包括以下几方面：

① 实验名称；

② 实验目的；

③ 实验仪器(必要时应注明仪器规格、型号及仪器编号等)；

④ 实验原理(要用简洁扼要的语言说明实验所依据的原理和公式及原理图)；

⑤ 实验步骤(简写)；

⑥ 数据记录与数据处理(包括原始数据、表格、实验曲线、主要计算步骤、测量结果及其不确定度)；

⑦ 问题讨论(回答思考题，对实验中观察到的异常现象进行记录及对为何出现异常现象进行解释，对实验结果进行分析，对实验装置和方法的改进提出建议及记录心得体会等。

第 1 篇　不确定度与数据处理基础

用实验方法研究物理现象，必须进行大量的观测，获得大量的数据，然后将所得数据进行处理，找出数据之间的相互关系；另一方面，还必须对所测结果进行分析，估算结果的可靠程度，并对所测数据给予合理的解释。为此，必须掌握有关的误差理论、不确定度与实验数据处理的基本知识。

1.1　测量与误差的基本概念

物理学是一门实验科学，进行物理实验时主要是进行各种测量，不仅要定性地观察物理变化的过程，而且还要定量地测定物理量的大小。

1. 测量

测量是把被测量和体现计量单位的标准量作比较的过程。通过比较，确定出被测量是计量单位的若干倍，该倍数值和单位一起表示被测量的测量值(数据)。因此，记录数据时测量值的大小和单位缺一不可。

测量分为直接测量和间接测量两类。

1) 直接测量

用量具或仪表直接读出测量结果的，称为直接测量。直接测量常用的方法有直读法和比较法两种。直读法是使用具有相应分度的量具或仪表直接读取被测量的测量值(如用米尺测量长度、用电流表测量电流等)，比较法是把被测对象直接与体现计量单位的标准器进行比较(如用电桥测电阻、电位差计测电动势、用标准信号源和示波器测频率等)。

2) 间接测量

由直接测量结果经过公式计算才能得出结果的，称为间接测量。对大多数被测物理量来说，没有直接读数用的量具或仪表，只能用间接的方法进行测量，即根据被测物理量与若干可直接测量的物理量的关系，先测出这些可直接测量的物理量的测量值，再通过相关的物理公式进行计算而得出。例如，要测量圆柱体的体积，可先直接测出圆柱体的直径和高的测量值，然后通过相关的公式进行计算后就可得出。其中，圆柱体的直径和高是可直接测量的量。

此外，根据测量条件的不同，测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在测量过程中，影响测量的诸多因素相同的测量，即在测量条件相同的情况下进行的一系列测量。例如，由同一个人在同一地点、用同一台仪器和同样的测量方法对同一被测物理量进行的连续多次测量。不等精度测量是指在测量条件部分相同或完全不同的情况下进行的一系列测量。等精度测量的数据处理比较简单，常为大多数实验采用，本书只讨论等精度测量方面的问题。

2. 测量误差

任何被测对象都具有各种各样的特性，反映这些特性的物理量都有其客观真实的值。被测物理量的客观真实数值，称为被测量的真值。测量的目的就是力图得到该真值。但是，由于测量仪器、实验条件及种种不确定因素伴随在测量过程之中，测量结果具有一定程度的不确定性，因此，被测量的真值是不能通过测量得出的。测量结果只能给出被测量的近真值或最佳值，并给出其不确定度。有关不确定度的概念及其估算将在 1.3 节中介绍，本节和 1.2 节的内容只介绍有关误差的基本知识。

测量值与被测量的真值之差，称为测量误差。

测量误差反映的是测量值偏离被测量真值的大小和方向，因此也常称为绝对误差或真误差。若被测量的测量值为 x，被测量的真值为 x_0，则测量误差

$$\varDelta = x - x_0 \tag{1-1-1}$$

与绝对误差相对应，相对误差的定义为

$$E_{\mathrm{r}} = \frac{\varDelta}{x_0} \times 100\% \tag{1-1-2}$$

3. 误差的种类

根据误差产生的原因和性质的不同，误差可分为两类。

1) 系统误差

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(包括大小和方向)总是相同的，这类误差称为系统误差。

系统误差的主要来源有：

(1) 测量仪器本身的固有缺陷。如刻度不准、砝码未经校正等。

(2) 测量方法或理论公式的近似性，或测量方法有缺陷。如用伏安法测电阻时，若不考虑电表内阻的影响，就会使测量结果产生误差。

(3) 个人习惯与偏向。如用秒表计时时，掐表的反应能力(提前或滞后的倾向)。

(4) 测量过程中，环境条件(温度、气压等)的变化。如尺长随温度的变化。

系统误差使测量结果具有一定的偏向，或者偏大、或者偏小、或者按一定的规律变化，其来源又是多方面的。消减系统误差是个比较复杂的问题。要很好地分析整个实验中依据的原理及测量的每一环节和所用仪器，才能找出产生系统误差的种种原因。系统误差的特点是稳定性，不能用增加测量次数的方法使它减小。学生应该在实验中不断提高对系统误差的分析和处理能力。

消减和修正系统误差的措施如下：

(1) 消减产生系统误差的根源。例如，采用符合实际的理论公式；保证仪器装置良好且满足规定的使用条件等。

(2) 找出修正值对测量结果进行修正。如用标准仪器校准一般仪器，作出校正曲线进行修正；对理论公式进行修正，找出修正项大小；修正千分尺的零点等。

(3) 在系统误差值不易被确切地找出时，可选择适当的测量方法设法抵消它的影响。如替换法、交换法、对称观测法、半周期偶数观测法，等等。这些测量方法后续章节将结合有关实验加以介绍。

(4) 培养实验者的良好习惯。

2) 随机误差

在相同条件下，多次测量同一物理量时，每次出现的误差的大小、正负没有确定的规律，以不可预知的方式变化着，这类误差称为随机误差。

大多数情况下，随机误差是由对测量值影响不大的、相互独立的多种变化因素造成的综合效果。如各种实验条件在控制范围内的波动使测量仪器和测量对象产生的微小起伏变化；重复测量中实验者每次在对准、估读、判断、辨认上产生的微小差异；其他一些未知的偶然因素的影响等。在多次测量中，由于随机误差具有时大时小、时正时负的特点，因此，把多次测量值取平均值，必然会抵消掉部分影响。

在采用多次重复测量的方法取得大量数据以后，需加以分析。分析表明：虽然每一个数据中所含随机误差是不可预知的，但大量数据中所含随机误差是服从统计学分布规律的。随机误差的特点是随机性。如果在相同的宏观条件下，对某一物理量进行多次测量，当测量次数足够多时，便可以发现这些测量值呈现出一定的规律性。

在一个实验中，随机误差和系统误差一般同时存在。除此以外，还可能存在因实验者的粗心大意而造成的错误，如读错数、记错数等。这些错误虽然不属于误差，但是实验者必须避免的。

1.2　随机误差的估算

本节中，假定系统误差已经被减弱到足以被忽略的程度。

1. 随机误差的统计学分布规律

如前所述，随机误差是由一些不确定的因素或无法控制的随机因素引起的。这些因素使得每一次测量中误差的大小和正负没有规律，从表面上看纯属偶然。但是，大量实践证明：当对某个被测量物重复进行测量时，测量结果的随机误差却服从一定的统计学分布规律。

常见的一种是随机误差服从正态分布(高斯分布)规律，其分布曲线如图 1-2-1 所示。该分布曲线的横坐标 Δ 为误差，纵坐标 $f(\Delta)$为误差的概率密度分布函数。分布曲线的含义是：在误差 Δ 附近，单位误差范围内误差出现的概率。即误差出现在 $\Delta \sim \Delta + \mathrm{d}\Delta$ 区间内的概率为 $f(\Delta)\cdot\mathrm{d}\Delta$。

由图 1-2-1 可见，服从正态分布的随机误差具有以下特点。

(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：绝对值相同的正负误差出现的概率相同。

(3) 有界性：绝对值很大的误差出现的概率接近于零。

(4) 抵偿性：随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减少，最后趋于零。

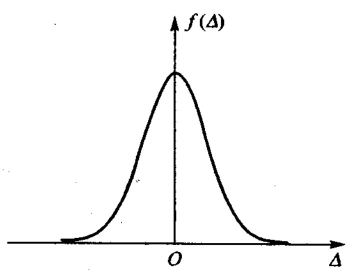

图 1-2-1

由此可见，增加测量次数可以减少随机误差。在实验中

常常采取多次测量方法的原因就在于此。但是，当测量次数有限时，随机误差是不能消除的，测量后必须进行误差估算。为定量估算，下面进一步考查正态分布曲线。

理论研究表明，正态分布的误差概率密度分布函数 $f(\varDelta)$ 可表示为

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

在某一次测量中，随机误差出现在 $a\sim b$ 内的概率应为

$$P=\int_a^b f(\varDelta)\cdot d\varDelta \tag{1-2-2}$$

给定的区间不同，P 也不同。给定的区间越大，误差越过此范围的可能性就越小。显然，在 $-\infty\sim+\infty$ 内，$P=1$，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\varDelta)\cdot d\varDelta=1 \tag{1-2-3}$$

由理论可进一步证明，$\varDelta=\pm\sigma$ 是曲线的两个拐点的横坐标值。当 $\varDelta\to 0$ 时，$f(0)\to\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$。

由图 1-2-2 可见，σ 越小，必有 $f(0)$ 越大，分布曲线中部上升越高，两边下降越快，表示测量的离散性小；与此相反，σ 越大，必有 $f(0)$ 越小，分布曲线中部下降较多，误差的分布范围就较宽，测量的离散性大。因此，σ 这个量在研究和计算随机误差时是一个很重要的特征量。σ 被称为标准误差。

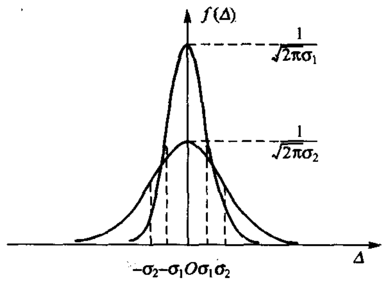

图 1-2-2

2. 标准误差的统计意义

理论上，标准误差由式(1-2-4)表示

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_0)^2}{n}} \tag{1-2-4}$$

式中，n 为测量次数；x_i 为第 i 次测量的测量值；x_0 为被测量的真值。

该式成立的条件是要求测量次数 $n\to\infty$。

某次测量的随机误差出现在 $-\sigma\sim+\sigma$ 内的概率，可以证明为

$$P=\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\varDelta)\cdot d\varDelta=0.683$$

同理可求，随机误差出现在 $-2\sigma\sim+2\sigma$ 和 $-3\sigma\sim3\sigma$ 内的概率分别为

$$P=\int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\varDelta)\cdot d\varDelta=0.955$$

$$P=\int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\varDelta)\cdot d\varDelta=0.997$$

由此可见标准误差 σ 所表示的统计意义为：对被测量 x 任作一次测量时，误差落在 $-\sigma\sim+\sigma$ 内的可能性为 68.3%，误差落在 $-2\sigma\sim+2\sigma$ 内的可能性为 95.5%，误差落在 $-3\sigma\sim+3\sigma$ 内的可能性为 99.7%。因此，近年来标准误差 σ 被广泛地用在随机误差的估算中。

3. 随机误差的估算

众所周知，实际测量的次数是不可能达到无穷大的，且被测量的真值也是不可能得到

的，因此标准误差 σ 的计算只有理论上的意义。物理实验中随机误差的估算方法如下所述。

1) 被测量的算术平均值

在相同条件下，对被测量 x 进行 n 次测量，测量值分别为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，则被测量 x 的算术平均值定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1-2-5}$$

根据随机误差的抵偿性，随着测量次数的增大，算术平均值越接近真值。因此，测量值的算术平均值为近真值或测量结果的最佳值。

2) 偏差

测量值与算术平均值之差，称为偏差。上述某一次测量的偏差可表示为

$$x_i - \bar{x}$$

3) 标准偏差

在有限次数的测量中，可用标准偏差 s 作为标准误差 σ 的估计值。标准偏差 s 的计算公式如下：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{1-2-6}$$

标准偏差 s 有时也称为标准差，它具有与标准误差 σ 相同的概率含义。式(1-2-6)称为贝塞尔公式。

被测量 x 的有限次测量的算术平均值 $\bar{x}$，也是一个随机变量。即，对 x 进行不同组的有限次测量，各组测量结果的算术平均值是不会相同的，彼此之间有所差异。因此，有限次测量的算术平均值也存在标准偏差。如用 $s(\bar{x})$ 表示算术平均值的标准偏差，可以证明，$s(\bar{x})$ 与 $s(x)$ 之间有如下关系：

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{1-2-7}$$

或表示为

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1-2-8}$$

被测量 x 的有限次测量的算术平均值及其标准偏差 $s(\bar{x})$ 被求得以后，意味着被测量 x 的真值 x_0 落在 $\bar{x} - s(\bar{x}) \sim \bar{x} + s(\bar{x})$ 内的可能性为 68.3%；落在 $\bar{x} - 2s(\bar{x}) \sim \bar{x} + 2s(\bar{x})$ 内的可能性为 95.5%，落在 $\bar{x} - 3s(\bar{x}) \sim \bar{x} + 3s(\bar{x})$ 内的可能性为 99.7%。

【例 1-2-1】 对某一长度 l 测量了 10 次，测得数据为 63.57，63.58，63.55，63.56，63.56，63.59，63.55，63.54，63.57，63.57(单位：cm)。求其算术平均值 $\bar{l}$ 及标准偏差 $s(l)$、$s(\bar{l})$。

解：算术平均值为

$$\bar{l} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} l_i = 63.564\text{cm}$$

标准偏差 $s(l)$ 为

$$s(l)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(l_i-\bar{l})^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{2040\times10^{-6}}{9}}\text{cm}=0.015\text{cm}$$

算术平均值$\bar{l}$的标准偏差为

$$s(\bar{l})=\frac{s(l)}{\sqrt{n}}=\frac{0.015}{\sqrt{10}}\text{cm}=0.0048\text{cm}$$

1.3 测量的不确定度

长期以来，在报告测量的结果时，由于不同国家和不同学科有不同的规定，影响了国际的交流和对成果的相互利用。为加速与国际惯例接轨，我国原国家技术监督局(现为国家质量监督检验检疫总局)于 1999 年 1 月 11 日颁布了新的计量技术规范 JJF 1059—1999《测量的不确定度与表示》，代替了 JJF 1027—1991《测量误差及数据处理》中的误差部分，并于 1999 年 5 月 1 日起实行。为了培养面向新世纪的高科技人才，物理实验课程中正在逐步推行用不确定度来评价测量结果的质量，以适应国内外形势发展的需要。

1. 测量的不确定度的基本概念

测量的不确定度(简称为不确定度)是对被测量的真值所处量值范围的评定。它反映了被测量的平均值附近的一个范围，而真值以一定的概率落在其中。不确定度越小，标志着误差的可能值越小，测量值的准确程度越高；不确定度越大，标志着误差的可能值越大，测量值的准确程度越低。

测量结果与很多量有关，所以不确定度来源于许多因素，这些因素对测量结果形成若干不确定度分量。因此，不确定度一般由若干分量组成。

如果这些分量只用标准误差给出，称为标准不确定度，用符号 u(通常带有作为序号的下角标)表示。按照评定方法的不同，标准不确定度可分为两类：一类是用统计的方法评定的不确定度，称为 A 类标准不确定度；另一类由其他方法和其他信息的概率分布(非统计的方法)来估计的不确定度，称为 B 类标准不确定度。

计算 A 类标准不确定度的方法有多种，如贝塞尔法、最大偏差法、极差法等；而 B 类标准不确定度常用估计方法，要估计适当，需要确定分布规律，需要参照标准，更需要估计者的学识水平、实践经验等。因此，在物理实验课的教学中，将计算进行理想化和简单化的处理，以利于教学。

2. A 类标准不确定度的评定

用贝塞尔法计算 A 类标准不确定度时，就是直接对多次测量的数值进行统计计算，求其平均值的标准偏差。因此，在物理实验课的教学中，A 类标准不确定度的计算方法如下：

对被测量 x，在相同条件下，测量 n 次，以其算术平均值 $\bar{x}$ 作为被测量的最佳值。它的 A 类标准不确定度为

$$u_A(x)=s(\bar{x})=\frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{1-3-1}$$

式中的 $s(x)$ 可由贝塞尔公式即式(1-2-6)求出。

在特殊情况下，对被测量 x 只测量一次时，测量结果的 A 类标准不确定度为

$$u_A(x) = s(x) \tag{1-3-2}$$

式中，$s(x)$ 是在本次测量的“先前的多次测量”(实验者本人或其他实验人员完成或生产厂家、检定单位完成)时得到的。当然，本次测量的测量条件与“先前的多次测量”时的测量条件一致。

3. B 类标准不确定度的评定

B 类标准不确定度的评定中往往依据的是计量器具的检定书、标准、技术规范、手册上提供的技术数据及国际上公布的常数与常量等。这些信息也是通过统计方法得出的，但是，给出的信息不完全，依据这些信息进行估算，往往比较复杂。在物理实验课的教学中，B 类标准不确定度主要体现在对测量仪器的最大允许误差的处理上。

1) 测量仪器的最大允许误差

生产厂家在制造某种仪器时，在其技术规范中预先设计、规定了最大允许误差(又称为极限允许误差、误差界限、允差等)，终检时，凡是误差不超过此界限的仪器均为合格品。因此，最大允许误差是生产厂家为一批仪器规定的技术指标(过去常用的仪器误差、示值误差或准确度，实际上都是最大允许误差)。它不是某台仪器实际存在的误差或误差范围，也不是使用该仪器测量某个被测量值时所得到的测量结果的不确定度。在物理实验课的教学中，测量仪器的最大允许误差通常用 $\Delta_{仪}$ 表示。

测量仪器的最大允许误差是一个范围，某种仪器的最大允许误差为 $\Delta_{仪}$，表明凡是合格的该种仪器，其误差必定在 $-\Delta_{仪} \sim +\Delta_{仪}$ 范围之内。它的给出方式有如下两种：

(1) 以绝对误差形式给出；

(2) 以引用误差形式给出，即以绝对误差与特定值之比的百分数来表示，“特定值”指的是量程值或其他值。

如量程为 1mA、1.0 级直流毫安表的 $\Delta_{仪}=\pm(1\text{mA}\times1.0\%)=\pm0.01\text{mA}$。其引用误差为 $0.01\text{mA}/1\text{mA}=1.0\%$，以“1.0”在表盘上表示。

又如数字式电压表的最大允许误差为 $\Delta_{仪}=\pm$(级别%×读数+n×最低位数值)。其中 n 代表仪器固定项误差，相当于最小量化单位的倍数，只取 1，2，3，…例如，某台数字式电压表的级别为 0.02，读数为 1.1666V，n=2，则 $\Delta_{仪}=\pm(0.02\%\times1.1666+2\times0.0001)\text{V}=\pm4.3\times10^{-4}\text{V}$。

2) B 类标准不确定度的估计

在物理实验课的教学中，B 类标准不确定度的估计方法是：

对误差服从正态分布的仪器，B 类标准不确定度为 $u_B=\dfrac{|\Delta_{仪}|}{3}$；

对误差服从均匀分布的仪器，B 类标准不确定度为 $u_B=\dfrac{|\Delta_{仪}|}{\sqrt{3}}$。

所谓均匀分布是指测量值的某一范围内，测量结果取任一可能值的概率相等，而在该范围外的概率为零。若对某类仪器的分布规律一时难以判断，可近似按均匀分布处理。在

物理实验课教学中，一般规定：除非另有说明，均按均匀分布处理。

4. 合成标准不确定度

如上所述，在测量结果的质量评定中，标准不确定度有两类分量。总的标准不确定度是由各标准不确定度分量合成而来。由各标准不确定度分量合成而来的标准不确定度称为合成标准不确定度。在直接测量的情况下，合成标准不确定度的计算比较简单；在间接测量的情况下，间接被测量往往由若干量以一定的方式合成而来，合成标准不确定度的计算则比较复杂。这是因为，不仅仅要考查“若干量”中的每个量，而且要考查“若干量”中的每个量之间的相关性。

在物理实验课的教学中，合成标准不确定度的估计方法简化如下：

(1) 当被测量 y 是直接测量量 x 时，即 $y=x$ 时，合成标准不确定度为

$$u_c(y)=u(x) \tag{1-3-3}$$

$u(x)$ 的来源有 A 类、B 类无数个标准不确定度分量，分别为 $u_1(x)$, $u_2(x)$,$\cdots$ 如果这些分量是相互独立的，即不相关的，则有

$$u(x)=\sqrt{u_1^2(x)+u_2^2(x)+\cdots} \tag{1-3-4}$$

即合成标准不确定度等于各标准不确定度分量的平方和的根(方和根法)。

【例 1-3-1】 用螺旋测微器(测量范围为 0～25mm、$\Delta_{仪}=\pm 0.004$mm)测量钢丝的直径 d，5 次测量的数据为 0.575，0.576，0.574，0.576，0.577(单位：mm)，求钢丝的直径 d 的算术平均值 $\bar{d}$ 及合成标准不确定度 $u_c(d)$。

解：钢丝的直径 d 的算术平均值为

$$\bar{d}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_i=\frac{1}{5}\times(0.575+0.576+0.574+0.576+0.577)\text{mm}=0.5756\text{mm}$$

测量的 A 类标准不确定度分量为

$$u_A(d)=s(\bar{d})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\bar{d})^2}{n(n-1)}}=\sqrt{\frac{[\,(-0.6)^2+0.4^2+(-1.6)^2+0.4^2+1.4^2]\times10^{-6}}{5\times(5-1)}}\text{mm}$$

$$=0.1\times10^{-3}\text{mm}$$

测量的 B 类标准不确定度分量为

$$u_B(d)=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=\frac{0.004}{\sqrt{3}}\text{mm}=2\times10^{-3}\text{mm}$$

测量的合成标准不确定度为

$$u_c(d)=u(d)=\sqrt{u_A^2(d)+u_B^2(d)}=\sqrt{(0.1)^2+(2)^2}\times10^{-3}\text{mm}=2\times10^{-3}\text{mm}$$

(2) 被测量 J 是若干个直接测量量 $x,\ y,\ z,\cdots$ 的函数时，即 $J=f(x,\ y,\ z,\cdots)$。

若 $x,\ y,\ z,\cdots$ 彼此无关，则合成标准不确定度可按方和根法求得，即

$$u_c(J)=\sqrt{c_x^2u^2(x)+c_y^2u^2(y)+c_z^2u^2(z)+\cdots} \tag{1-3-5}$$

式中，$c_x,\ c_y,\ c_z,\cdots$ 称为不确定度的传播系数，且

$$c_x=\left|\frac{\partial J}{\partial x}\right|,\ c_y=\left|\frac{\partial J}{\partial y}\right|,\ c_z=\left|\frac{\partial J}{\partial z}\right|,\cdots \tag{1-3-6}$$

【例 1-3-2】 求例 1-3-1 中钢丝的横截面积 S 的最佳值 $\overline{S}$ 及其合成标准不确定度 $u_c(S)$。

解：钢丝的横截面积 S 的最佳值 $\overline{S}$ 为

$$\overline{S}=\frac{\pi}{4}\overline{d}^2=\frac{\pi}{4}\times(0.5756)^2\,\text{mm}^2=0.065\text{mm}^2$$

其合成标准不确定度为

$$u_c(S)=\sqrt{c_d^2\cdot u^2(d)}=\sqrt{\left|\frac{\partial S}{\partial d}\right|^2\cdot u^2(d)}=\frac{2\pi}{4}\overline{d}\times 2.3\times10^{-3}=\frac{\pi}{2}\times0.5756\times2.3\times10^{-3}\,\text{mm}^2$$
$$=2\times10^{-3}\,\text{mm}^2$$

【例 1-3-3】 已知圆柱体直径 d 的 $\overline{d}$、$u(d)$，圆柱体高 h 的 $\overline{h}$、$u(h)$，求该圆柱体体积 V 的 $\overline{V}$、$u_c(V)$。

解：圆柱体体积 V 的最佳值为

$$\overline{V}=\frac{\pi}{4}\cdot\overline{d}^2\cdot\overline{h}$$

圆柱体体积 V 的合成标准不确定度 $u_c(V)$ 为

$$u_c(V)=\sqrt{c_d^2\cdot u^2(d)+c_h^2\cdot u^2(h)}$$

式中，$c_d=\left|\frac{\partial V}{\partial d}\right|=\frac{\pi}{4}\cdot 2\cdot\overline{d}\cdot\overline{h}=\frac{\pi}{2}\overline{d}\cdot\overline{h}$；$c_h=\left|\frac{\partial V}{\partial h}\right|=\frac{\pi}{4}\cdot\overline{d}^2$。

当 $J=f(x,\ y,\ z,\cdots)$ 为乘除或方幂的函数关系时，采用相对不确定度(不确定度与被测量的最佳值之比)可以大大简化合成标准不确定度的运算。方法是先取对数后再作方和根合成，即

$$\frac{u_c(J)}{\overline{J}}=\sqrt{(\frac{\partial\ln f}{\partial x})^2\cdot u^2(x)+(\frac{\partial\ln f}{\partial y})^2\cdot u^2(y)+\cdots}\tag{1-3-7}$$

【例 1-3-4】 在例 1-3-3 中，如果还测得该圆柱体质量 m 的 $\overline{m}$ 及 $u(m)$，求出该圆柱体密度 ρ 的 $\overline{\rho}$ 及 $u_c(\rho)$。

解：该圆柱体密度的最佳值为

$$\overline{\rho}=\frac{\overline{m}}{\overline{V}}=\frac{\overline{m}}{\frac{\pi}{4}\overline{d}^2\cdot\overline{h}}=\frac{4\overline{m}}{\pi\overline{d}^2\cdot\overline{h}}$$

$$\frac{u_c(\rho)}{\overline{\rho}}=\sqrt{(\frac{\partial\ln\rho}{\partial d})^2\cdot u^2(d)+(\frac{\partial\ln\rho}{\partial m})^2\cdot u^2(m)+(\frac{\partial\ln\rho}{\partial h})^2\cdot u^2(h)}$$

因为 $\ln\rho=\ln\frac{4}{\pi}+\ln m-\ln h-2\ln d$

所以 $\frac{\partial\ln\rho}{\partial d}=-\frac{2}{\overline{d}}$，$\frac{\partial\ln\rho}{\partial m}=\frac{1}{\overline{m}}$，$\frac{\partial\ln\rho}{\partial h}=-\frac{1}{\overline{h}}$

代入式(1-3-7)可得

$$\frac{u_c(\rho)}{\overline{\rho}}=\sqrt{\frac{4}{\overline{d}^2}\cdot u^2(d)+\frac{1}{\overline{m}^2}\cdot u^2(m)+\frac{1}{\overline{h}^2}\cdot u^2(h)}$$

常用函数的合成标准不确定度的计算，见表 1-3-1。