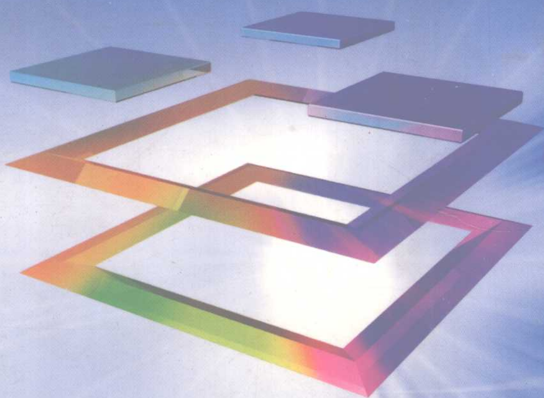
DAXUEWULISHIYAN

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

◎白林峰　张文庆　韩红梅　主编



电子科技大学出版社

大学物理实验

白林峰 张文庆 韩红梅 主编

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是根据《高等工业学校物理实验课程基本要求》和高校基础物理实验的具体教学情况编写而成的。

全书分五个单元，介绍了误差与数据处理（引入了不确定度）的基本知识、常用的物理实验与测量方法以及常规仪器的原理和使用。共编排了包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理在内的实验 34 个，其中综合性实验 21 个，设计性实验 13 个；书末附录部分收编了与物理实验有关的物理常数值和单位共 19 个。

本书可作为高等理工院校与农业院校的基础物理实验课的教材或参考书，也可供其他相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/白林峰，张文庆，韩红梅主编．—成都：电子科技大学出版社，2003.1

ISBN 7-81065-995-2

Ⅰ.大…　Ⅱ.①白…②张…③韩…　Ⅲ.物理学-实验-高等学校-教材　Ⅳ.O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 005069 号

大 学 物 理 实 验

白林峰　张文庆　韩红梅　编著

出　　版：电子科技大学出版社　(成都建设北路二段四号，邮编：610054)
责任编辑：周清芳
发　　行：新华书店经销
印　　刷：成都市墨池教育印刷总厂
开　　本：787×1092　1/16　　印张 15.375　　字数 370 千字
版　　次：2003 年 2 月第一版
印　　次：2003 年 2 月第一次印刷
书　　号：ISBN 7－81065－995－2/O·44
印　　数：1—3000 册
定　　价：18.60 元

前　言

本书是根据全国工科物理课程组制订的《高等工业学校物理课程教学基本要求》，结合河南职业技术师范学院多年来开设物理实验的教学实践，在不断创新和改革近年来新实验仪器、新实验方法的基础上编写而成的。

物理实验是高等院校学生进行科学实验和基本技能训练的一门必修基础课，也是学生系统学习基本实验知识、实验方法和实践技能的开端。作为实验指导教材，在编写时既要考虑到它的系统性和科学性，又要注意到它的现代性和应用性，为此，我们对以往传统的物理实验进行了取舍，同时编入了一些应用性较强的新实验。全书依照大学物理教材共分误差与数据处理、热学力学实验、电磁学实验、光学实验和近代物理实验五个单元。误差与数据处理单元主要介绍物理实验中常见的误差和误差处理方法，并提出用不确定度评定实验数据的真实性，其内容是进行物理实验必须掌握的数据处理工具，其它几个单元共选编了比较经典的基础物理实验和近代物理实验34个，包括一些综合性及应用性较强的提高性实验和设计性实验。在实际的物理实验教学过程中，这些实验可根据实际教学情况选做。

本书适用于高等理、工、农、林、牧等院校的基础物理实验教学，对于高师、高专院校的物理实验教学，此书也是一本很好的实验指导或参考资料。在物理实验教学实践过程中，应注重启迪学生思维，因材施教，激发学生对物理概念的学习兴趣，逐步培养学生的独立分析和解决实际问题的能力。

在编写本书过程中，参阅了兄弟院校的有关教材，借鉴了不少宝贵的物理实验教学实践经验，特此深表谢意。另外，本书引用的名词、术语、概念等均采用或参照最新国际通用的定义或形式，有的内容选用最新公开发表的资料，附录数据真实可靠。

本书由白林峰、张文庆、韩红梅主编。参加编写工作的有：王成、曹永华、王慧君、齐利娟、郭海涛、陈娜、余如军、曲培新、李玉琦。在编写过程中承蒙河南大学王庆国教授、河南师范大学侯新杰副教授指导，提出了许多宝贵的意见，在此对支持、关心和帮助编写本书的所有同仁表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，水平有限，错误、疏漏之处恳请不吝指正！

编　者

2003年2月

目　录

绪论

实验是将事物典型化并抽象出本质的东西进行研究的实践过程。科学的实验是依据科学的理论和科学的方法客观的实践活动。人类在长期改造自然界历史过程中，积累了丰富的实践经验，在总结和发展前人成果的基础上，逐步形成完整的理论科学，利用这些理论指导人们有目的有成效的再实践，以达到改造和征服自然，使其为人类服务。在科学发展过程中，理论和实践相辅相成、相互作用，这种作用引起量的积累和质的飞跃并不断演进，推动了科学事业的不断前进。

物理学是建立在在实践基础上的的一门自然科学。物理学中每一个理论的提出，都以科学、严谨的实验为基础，且还要经受实验的进一步检验和论证。没有理论指导的实验是盲目的；没有以实验结果为依据的理论是令人难以置信的。坚持理论联系实际，理论与实践相结合，是当代科学技术人才必须具备的基本素质之一。

一、物理实验的地位、作用和任务

物理实验是理、工、农、医高等学校各科系的必修基础课。是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，是学生进行科学实验训练的重要基础。物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位。它们既有深刻的内在联系，又有各自的任务和作用。

1. 物理实验的重要作用

(1) 实验可以发现新事实，实验结果可以为物理规律的建立提供依据；

(2) 物理实验又是验证物理理论和假说的唯一方法。

2. 物理实验的具体任务

(1) 通过对实验现象的观察、测量和分析，加深对物理学概念和理论的理解，培养和提高学生观察分析能力及理论联系实际解决物理问题的能力。

(2) 培养与提高学生的科学实验动手能力。能够通过阅读实验教材和资料，作好实验前的准备；能够借助教材和仪器说明书正确使用基本仪器；能够运用物理学理论对实验现象进行分析判断和正确评价；能够正确记录和处理实验数据，撰写合格的实验报告；能完成简单的设计性实验。

(3) 培养和提高学生理论联系实际、一丝不苟的工作作风；严肃认真、实事求是的科学态度；主动研究、积极探索的开拓精神；遵守纪律、爱护公物的优良品德等科学实验素养。

二、怎样学好物理实验课

物理实验课和理论课不同，学生的机动性和灵活性大。实验课遇到的问题不像听课、看书和做习题那样单纯和明确，不少学生又不习惯独立自主的学习方式，所以要学好物理实验课必须做到：

思想重视：要充分理解和认识实验的地位和作用，克服重理论轻实验的思想倾向。

目的明确：本课程有总的教学目的，各实验又有具体的目的，在学习中一定要明确目的，由它指导和检验自己的学习。

手脑并用：动手是实验课的特点之一，但绝不能为动手而动手，盲目动手和试试看的态度都是要不得的。实验的各个环节中都要积极思考和研究实验内容及遇到的问题，随时总结经验教训，以提高自己的实验素质。

严肃认真：学生上实验课时不严肃是学不好实验的主要原因之一，所以必须严格遵守实验室规则，按照实验课的基本程序和要求，认真对待每一个环节。

互相协作：当一套仪器需多人协作做实验时，要互相配合，轮流操作，共同完成实验，使每人都能得到锻炼和提高。

三、物理实验课的基本程序

物理实验的内容，几乎涉及物理学的各个邻域。其原理不同，方法各异。就是同一个实验也有不同的做法，但作为实验课来说，其基本程序是相同的，有以下三个阶段：

实验预习：课前要仔细阅读实验教材，并学会从中整理出实验所用原理、方法、实验条件及实验关键，根据实验任务画好记录数据的表格，有些设计性实验还要求学生课前自拟实验方案，自己设计线路图等。因此，课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。

实验操作：学生进入实验室后应遵守实验室规则，像一个科学工作者那样要求自己，井井有条地布置仪器，安全操作，注意细心观察实验现象，认真钻研和探索实验中的问题。在遇到问题时，应看作是学习的良机，冷静地分析和处理它。仪器发生故障时，也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之，要把重点放在实验能力的培养上，而不是测出几个数据就以为完成了任务，对实验数据要严肃对待，学生要用钢笔或圆珠笔记录原始数据。不要先在另外的纸上记录然后再誊写在数据表格里，这样容易出错，况且，这已不是“原始记录”了。希望同学注意纠正自己的不良习惯，从一开始就不断培养良好的科学作风。实验结束时，将实验数据交教师审阅签字，整理还原仪器后方可离开实验室。

实验总结：实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多，应加以整理，对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式，代入的数据都要有根据，便于别人看懂，也便于自己检查。作图要按作图规则，图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告，这是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。实验报告内容包括：实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容、数据表格与数据处理、总结等。在实验报告中需要简要叙述有关物理实验原理，包括测量原理、使用的电路或实验仪器原理以及测量中依据的主要公式，公式成立所应满足的实验条件等。要完成计算、曲线图、误差分析，最后写明实验结果。总结本次实验时，内容可以是实验中现象的分析，对实验关键问题的研究体会，实验的收获和建议，也可解答思考题。对于设计性实验，还要根据实际的实验过程写明关键步骤和安全注意要点，注明使用仪器、规格和完整的实验所需数据。

通过本课程有限的实验学习，不断提高自身实践动手能力，最终达到利用科学的头脑观察和思考问题、利用科学的方法处理客观事物之目的。

第一单元　误差与数据处理

物理实验的定性和定量测定是不可分割的两个方面。一方面，为了揭示物理量之间的内在数量关系，要动用测量器具对物理量进行测量，在进行测量的时候，总会有误差。这说明由于测量仪器、测量方法、测量环境、人员的观察力等种种因素的局限，测量是不能无限精确的，测量结果与客观存在的真值之间总是存在一定的差异，即存在测量误差。因此分析测量中产生的各种误差，尽量消除或减小其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出估计，给出测量结果的不确定度就是物理实验和科学实验中必不可少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因及测量结果的不确定度的概念与估算方法等的有关知识。另一方面，要确定物理量之间的关系只有通过对数据进行处理才能完成。所以，研究误差与数据处理是物理实验必不可少的。

误差理论是普通计量学和数理统计学的重要组成部分。本课程仅仅应用数理统计的一些有关结论和误差理论的一些思想方法来处理实验中的一些问题，使同学们在误差理论的学习中有个良好的开端。

第一节　测量、误差和不确定度

一、测量和误差的基础知识

1. 物理实验与测量

做物理实验离不开测量。所谓测量，就是将被测量量与规定单位的同类量作比较，求出它是该单位的多少倍。测量可分为直接测量与间接测量。直接测量指无需对被测的量与其它实测的量进行函数关系的辅助计算而可直接得到被测量值的测量，如用米尺测量长度，用量筒测量液体的体积，用电表测量电流强度或电压等都是直接测量；间接测量指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系经过计算从而得到被测量值的测量，如通过测量长度确定矩形的面积，用伏安法测电阻，用单摆测重力加速度等。

在实验的人员、仪器、方法、环境不变的条件下，进行多次重复性的测量称为等精度测量；相反，条件不同的测量就称为不等精度的测量。普通物理实验中的测量，基本上都可以认为是等精度测量。

测量结果的好坏与所用仪器密切相关，所以测量时要合理选择仪器，其原则是：一是根据对测量的精度要求选择仪器的精度；二是根据被测量的大小选择仪器的量程；三是在间接测量中，各种仪器的精度要相互配合，使各直接测的量的精度能互相匹配。

在使用仪器进行测量前，要了解其结构原理、使用方法和注意事项，严格按照仪器使用条件进行安装和使用。读数前要弄清楚刻度的读法和单位，然后视线要正对刻度线读数，并注意应得的有效数字位数。在重复测量时要防止先入为主的主观意识。

2. 误差的定义和分类

测量的目的是要找出客观存在的被测量的真值，但由于所依据的原理和方法上的近似性，又要受仪器的精度、环境的影响以及人的视听能力和操作水平的限制，其测量值与被测量真值之间总存在着一定的差异，这就是测量误差。

误差的表示方法：

误差分绝对误差与相对误差：如一物理量真值为 Yt，测得值为 y，则测量误差为

$$误差\ \mathrm{d}y = 测量结果\ y - 真值\ Yt \tag{1}$$

它是与测得值有相同单位的量，称为绝对误差，简称为误差。其大小反映了测量结果接近真值的程度。对同一量来说，绝对误差越小测量的精度越高；但对不同的量，特别是不同类的量，就不能由绝对误差的大小判断测量精度的高低。所以常用绝对误差与测量结果的比值来评价测量结果的精度，这个比就称为相对误差，它没有单位，一般用 E_r 表示，且通常化为百分数，即

$$E_r = \frac{\mathrm{d}y}{y} \times 100\% \tag{2}$$

这样又称为百分误差。

被测量的真值是一理想概念，一般说来真值是不知道的。在实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值，称为约定真值，又叫近真值，才能计算误差。

误差的分类及其处理方法：

测量中的误差主要分为三种类型，即系统误差和随机误差以及过失误差。它们的性质不同，需要分别处理。

(1) 系统误差：是具有恒定的偏向（如测得值总是偏大）或按一定规律变化（如逐渐增大或周期性变化）的误差，产生系统误差的原因：

a. 器具误差与调整误差：由于测量器具本身具有的误差所引起的，以及由于测量前未能将测量器具或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差。如电表的零点不准，天平不等臂或没调水平等。

b. 理论误差和方法误差：由于测量理论的近似或测量方法的不完善所引起的误差。如用单摆测量重力加速度时忽略了摆角及摆线质量的影响；用伏安法测电阻时没有考虑电表的内阻等。

c. 人的习惯倾向：如某人测时间总是超前或超后。

d. 环境误差：由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。如温度、光照、电磁场等测量时随时间的变化等。

系统误差分类及处理方法：已定系统误差 —— 绝对值和符号已经确定的系统误差分量，如零位误差、大气压强计室温下使用引起的误差、伏安法测电阻时电表内阻引起的误差等；这类误差分量一般都要修正。未定系统误差 —— 绝对值和符号未定的系统误差；对这类误差一般要估计出其分布范围（大致对应于不确定度估计中的）。实验中可以通过方案选择、参数设计、计量器具校准、环境条件控制等环节来减小未定系统误差的限值.

(2) 随机误差：随机误差又叫偶然误差，是在对同一被测量的多次测量过程中，测量结果的误差偏大或偏小以不可预知的方式变化着的测量误差。随机误差是我们研究的主

要对象，这种误差是实验中各种因素的微小变动引起的。例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动，测量仪器指示数值的变动，以及观测者本人在判断和估计读数上的变动……，这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化，这变化量就是各次测量的随机误差。

由于随机误差的存在，实验数据会围绕真值有所起伏，对某一次测量，这种起伏是不可预测的，若进行多次测量，就会发现，实验数据常满足一定的统计分布规律，可用一定的分布函数来描述。物理实验中遇到的典型分布有正态分布和 t 分布。当测量次数无限时，实验数据服从正态分布；而有限次测量，实验数据的分布则服从 t 分布。

(3) 过失误差：由于实验者使用仪器的方法错误或粗心大意等原因导致实验数据与实际值之间严重偏离会形成过失误差，含有过失错误的测量值称之为坏值或异常值，正确的结果中不应包含过失误差。在物理实验过程中要极力避免这一点，数据处理时也尽量剔除含有过失误差的数据。

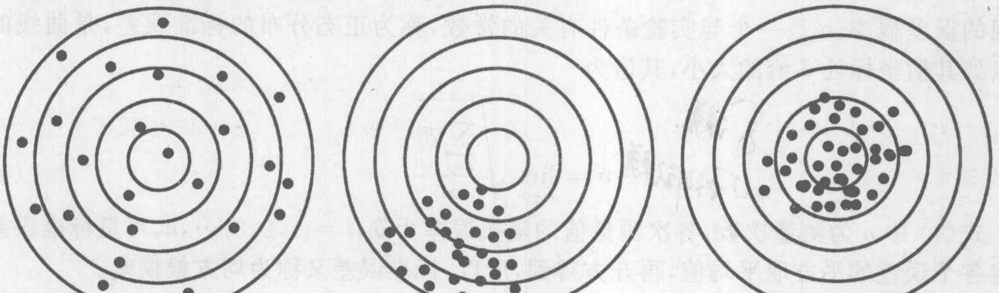
3. 测量的精密度、正确度和准确度

我们通常用精度反映测量结果中误差大小的程度。误差小的精度高，误差大的精度低。但这时精度只是一个笼统的概念，它并不明确表明描写的哪一类误差。为了使精度具体化，精度又可分为：

精密度：表示测量结果中随机误差大小的程度。即是指在规定的条件下对被测量进行多次测量时，所得结果之间符合的程度。简称为精度。

正确度：表示测量结果中系统误差大小的程度。它反映了在规定的条件下，测量结果中所有系统误差的综合。

准确度：表示测量结果与被测量的“真值”之间的一致程度。它反映了测量结果中系统误差与随机误差的综合。准确度又称为精确度。



(a) 正确度高，精密度低　　(b) 精密度高，准确度低　　(c) 精密度、正确度和准确度皆高

图 0-1　测量结果和射击打靶的类比

我们以打靶为例，如图 0-1 所示，靶心为射击目标。

二、随机误差的处理

这里我们讨论系统误差已经被减弱到足以被忽略的情况下，对偶然误差的处理。

1. 随机误差的分布特性

实验和理论证明，大多数实验的测量误差集合，具有如图 0-2 所示的正态分布（高斯分布）特性：

单峰性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的几率大。

对称性：绝对值相等而符号相反的误差出现几率相等，当测量次数非常多时，由于正负误差互相抵消，各误差的代数和趋近于零。

有界性：超过一定限度的误差出现的几率为零。

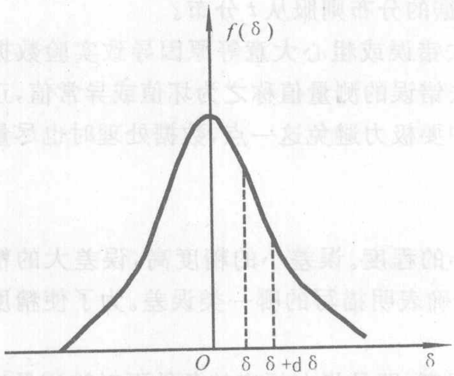


图 0-2　随机误差的正态分布

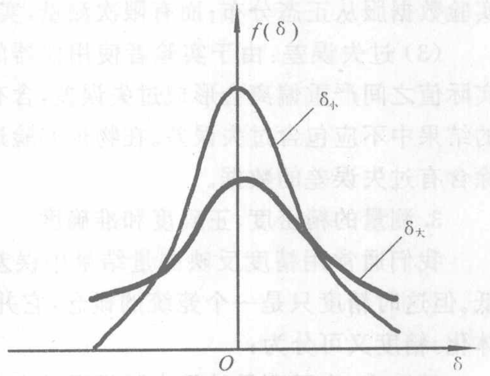


图 0-3　$f(\delta)$ 与 σ 的关系

2. 大量相对独立微小因素共同作用下得到的随机变量服从正态分布

物理实验中多次独立测量得到的数据一般可以近似看作服从正态分布（又称高斯分布），其分布表达式为：

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{3}$$

式(3) 中 δ 为误差，$f(\delta)$ 即为误差的概率分布函数，它的意义是单位误差分布范围内出现的误差概率。σ 是一个与实验条件有关的常数，称为正态分布的标准误差，是曲线的拐点处其横坐标处 δ 值的大小，其值为

δ 误差.

σ 标准误差.

$$\sigma=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\delta_i^2}{n}} \tag{4}$$

式(4) 中 n 为测量次数，各次测量值的随机误差为 δ_i，$i=1,2,3,\cdots,n$。可见标准误差是将各个误差的平方取平均值，再开方得到，所以，标准误差又称为均方根误差。

3. 标准误差的物理意义

从图 0-3 中很容易的看出 σ 是表征测量分散性的一个重要参数，σ 值小，分布曲线愈陡峭，峰值 $f(0)$ 愈高，说明绝对值小的误差占多数，且测量值的重复性好，分散程度小；反之，σ 值大，则分布曲线愈平坦，峰值 $f(0)$ 愈低，说明测量值的重复性差，分散程度大。大多数测量的随机误差服从此分布，它表示测量值的随机误差在介于 $(\delta,\delta+\mathrm{d}\delta)$ 小区间内的概率为 $f(\delta)\mathrm{d}\delta$，所以我们用 p 表示随机误差 δ 在 $(-\sigma,\sigma)$ 区间出现的概率，则

$$P(-\sigma<\delta<\sigma)=\int_{-\sigma}^{\sigma}f(\delta)\mathrm{d}\delta=\int_{-\sigma}^{\sigma}\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta=68.3\% \tag{5}$$

σ小，表示分散程度小.

σ大　表示分散程度大.

而用同样的方法计算可得随机误差介于$(-2\sigma,2\sigma)$和$(-3\sigma,3\sigma)$区间的可能性(概率)分别为

$$P(-2\sigma<\delta<2\sigma)=\int_{-2\sigma}^{2\sigma}f(\delta)\mathrm{d}\delta=95.5\% \tag{6}$$

$$P(-3\sigma<\delta<3\sigma)=\int_{-3\sigma}^{3\sigma}f(\delta)\mathrm{d}\delta=99.7\% \tag{7}$$

以上三式所表示的积分面积如图 0-4 所示。

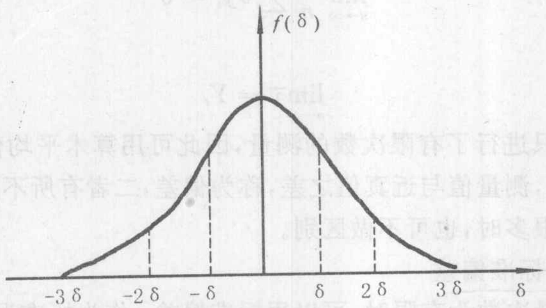


图 0-4

通过以上分析可以得出标准误差σ所表示的概率意义。对某一物理量任做一次测量时,测量误差落在$(-\sigma,\sigma)$之间的可能性为 68.3%,落在$(-2\sigma,2\sigma)$的可能性为 95.5%,落在$(-3\sigma,3\sigma)$的可能性为 99.7%。由于标准误差具有这样明确的概率意义,因此,国内外已普遍采用标准误差作为评价测量质量优劣的指标。显然测量误差绝对值大于3σ的概率仅为 0.3%,因而有3σ极限误差之称。

4. 测量列的平均值

实际测量的次数n是不可能达到无穷大的,而且真值Y_t也是未知的,因此,计算标准误差σ的公式只有理论上的意义而没有实际的应用价值,那么,在对物理量y只进行了有限次测量而真值Y_t又不知道的情况下,如何确定σ呢?为了回答这个问题,先介绍一下测量列的平均值$\bar{y}$。

根据随机误差的分布特性,我们知道,在多次测量时,正负随机误差常可以大致抵消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大,因此,必须对测量的随机误差作出估计才能表示出测量的精密度。

假定在同一测量条件下进行多次测量,得到一组测量值$y_1,y_2,y_3,\cdots,y_n$,被测量的真值为Y_t,各测量值的误差为

$$\delta y_1=y_1-Y_t$$

$$\delta y_2=y_2-Y_t$$

$$\vdots$$

$$\delta y_n=y_n-Y_t$$

则算术平均值为

$$\overline{y} = \frac{y_1 + y_2 + \cdots + y_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{8}$$

平均值并非真值，但比任一测量值更接近真值，因此是测量结果的最佳值。当测量次数无限多时，算术平均值就无限接近于真值。因为

$$\overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_t + \delta y_i) = Y_t + \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta y_i$$

由于随机误差的抵偿性，有

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta y_i = 0$$

所以

$$\lim_{n\to\infty}\overline{y} = Y_t$$

在实际测量中，只进行了有限次数的测量，因此可用算术平均值作为近似真值。误差指测量值与真值之差，测量值与近真值之差，称为偏差，二者有所不同。实际测量中只能得到偏差，当测量次数很多时，也可不做区别。

5. 有限次测量的标准偏差

可以证明，当测量次数为有限时，可以用标准偏差 s 作为标准误差 σ 的估计值。s 按贝塞耳公式求出：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1}} \tag{9}$$

s 大，表示测得值很分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低；

s 小，表示测得值很密集，随机误差分布范围窄，测量的精密度高；

s 可由带统计功能的计算器直接求出。

例 1　用 50 分度的游标卡尺测某一圆棒长度 L，6 次测量结果如下（单位 mm）：

250.08，250.14，250.06，250.10，250.06，250.10

则测得值的最佳估计值为

$$L = \overline{L} = 250.09\text{mm}$$

测量列的标准偏差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \overline{L})^2}{n-1}} = 0.03\text{mm}$$

6. 有限次测量算术平均值的标准偏差

对 y 的有限次测量的算术平均值 $\overline{y}$ 也是一个随机变量，即对 y 进行不同组的有限次测量，各组结果的算术平均值是不会相同的，彼此总会有所差。因此，也存在标准偏差，用 $s_{\overline{y}}$ 来表示。可以证明，对于一组测量数据，其算术平均值的标准偏差 $s_{\overline{y}}$ 是任一次测量值的标准偏差 s 的 $1/\sqrt{n}$ 倍。

$$s_{\overline{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{10}$$

式(10)概率的意义是很清楚的。其表明，测量的真实值 Y_i 落在 $\overline{y}-s_{\overline{y}}$ 到 $\overline{y}+s_{\overline{y}}$ 范围内的可能性为68.3%，落在 $\overline{y}-2s_{\overline{y}}$ 到 $\overline{y}+2s_{\overline{y}}$ 范围内的可能性为95.5%，落在 $\overline{y}-3s_{\overline{y}}$ 到 $\overline{y}+3s_{\overline{y}}$ 范围内的可能性为99.7%。另外，在实际测量中，测量次数 n 不应太少，也没必要太多，一般取5到10次为宜。

三、直接测量结果的表达和不确定度

对一个量的测量后，应给出测量结果并对测量的质量作出评价。根据定义，误差是指测量值与真值之差，由于真值是无法知道的，因此，误差也是无法知道的。而不确定度是表征被测量的真值在某个量值范围的一个评定，因此，用它取代误差来评价测量结果的质量，显得更科学、合理。目前，在国外，不确定度已普遍的被采用，在国内也逐步推行。

实验测量结果的最终表达式，必须具有数值、单位、所表示数值的可信程度。上述三项为测量结果表达式中的三要素。

设对被测量 y 进行等精度测量，$y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n$，则测量结果的最终表达式

$$y=\overline{y}\pm\Delta\ \text{单位} \qquad (p=\qquad) \tag{11}$$

式(11)中 $\overline{y}$ 为测量列的算术平均值，即近真值，Δ 为总不确定度；p 为被测量的真值或测量值在 $(\overline{y}\pm\Delta)$ 范围内的概率，称为置信概率。

测量结果的不确定度是对被测量的真值所处量值范围的评定。不确定度反映测量量的平均值附近的一个范围，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，测量的可信程度越高；不确定度越大，标志着误差的可能值越大，测量的可信程度越低。

例如，当测量次数 $n\to\infty$，设测量数据中不含有系统误差，而只有随机误差，且测量值服从正态分布时，如采用置信概率 $p=0.683$（即68.3%），则式中 $\Delta=\sigma$ 即被测量的真值或测量值在区间 $(\overline{y}\pm\Delta)$ 内存在或出现的概率为68.3%；如采用置信概率 $p=0.955$（即95.5%），则式中 $\Delta=2\sigma$ 即被测量的真值或测量值在区间 $(\overline{y}\pm\Delta)$ 内存在或出现的概率为95.5%；如采用置信概率 $p=0.977$（即97.7%），则式中 $\Delta=3\sigma$ 即被测量的真值或测量值在区间 $(\overline{y}\pm\Delta)$ 内存在或出现的概率为97.7%。

测量结果的最终表达形式亦可用相对不确定度 E 给出，其表达形式有

$$y=\overline{y}(1\pm E)\ \text{单位} \qquad (p=\qquad)$$

式中 E 为相对不确定度，即总不确定度的相对值，按下式计算

$$E=\frac{\Delta}{\overline{y}}\times 100\% \tag{12}$$

按计量规范规定，在测量结果的最终表达式中，若所用置信概率 $p=95\%$，则在测量结果的最终表达式中不必说明 p 值。

测量结果与很多量有关，所以测量结果的不确定度来源于若干因素，这些因素对测量结果形成若干不确定度。按照评定方法，不确定度分量可分为两类：一类是用统计的方法评定的不确定度，称为 A 类不确定度，记作 Δ_A；另一类用非统计的方法评定的不确定度，如仪器不准确，标准不准确，量具量质老化等等，称为 B 类不确定度，记作 Δ_B；这两类分量在相同置信概率下用方和根方法合成总不确定度，当各量彼此独立时，可写作

$$\Delta=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2} \tag{13}$$

本教材物理实验教学中一般用总不确定度，置信概率取为 95%。

在大学物理实验中一般测量次数 $n \leqslant 10$，则测量数据多属于 Student 分布，简称 t 分布，t 分布是从 $\overline{y}, s_{\overline{y}}$ 的性质得到的一种分布。n 小时，t 分布偏离正态分布较多。n 大时趋于正态分布。此时，测量值的置信概率不是 68.3%，需乘以与置信概率 P、自由度等有关的系数 t_p，t_p 查表可得。

下面分三种情况讨论不确定度

1. 系统误差已经消除，或已减小到最低程度，以至可以忽略不计，且测量仪器又比较准确。这时在等精度测量中，主要存在的是随机误差，即可用统计方法计算的 A 类分量 Δ_A，在此条件下总不确定度 Δ 可写作

$$\Delta = \Delta_A = t_p \cdot s_{\overline{y}}$$

式中，t_p 为因子，$s_{\overline{y}}$ 为算术平均值的标准偏差。根据它与标准偏差 s 间的关系，上式可写作

$$\Delta = \frac{t_p}{\sqrt{n}} \cdot s$$

在本教程中用到的 $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$，见表 0-1。

表 0-1

$p = 95\%$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
$t_p/\sqrt{n}$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96\sqrt{n}$

从表 0-1 中可以看出，当 $5 < n \leqslant 10$ 时，可简化认为 $\Delta_A \approx s$（置信概率 95%），则 $\Delta = s$。

这时直接测量结果的表达式为

$$\overline{y} = (\overline{y} \pm s) \quad \text{（单位）}$$

随机误差 → 用统计方法计算

式中，$\overline{y}$ 为测量列的算术平均值，$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1}}$ 为标准偏差（可由计算器读出，有的计算器上用 s 表示，有的用 σ_{n-1} 表示）。

2. 若在多次测量中，仪器精度不高，测量条件比较稳定，多次测量同一物理量结果相近，即仪器精度分辨不出测量值的差异；或者被测量不允许多次测量，即做单次测量时，则我们就把实验使用的仪器、仪表和器具表示的示值误差或基本误差限表示的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 做为合成不确定度的 B 类分量，即 $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$，这时视为 $\Delta_A < \frac{1}{3}\Delta_B$，，即 $\Delta_A < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$，则 Δ_A^2 比 Δ_B^2 的平方小一个数量级，所以有 $y = \overline{y} \pm \Delta_{\text{仪}}$，仪器的示值误差限或基本误差限，就视为该测量的误差限。仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 参照国家标准规定的仪器、仪表和器具的准确度等级或允许误差范围，由生产厂家给出或由实验室结合具体测量方法和条件简化而约定。

3. 当 Δ_A 与 Δ_B 数量级相当时，我们就取

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{仪}^2}$$

四、直接测量量不确定度估算过程(小结)

1. 求测量数据列的平均值 $\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$

2. 若有已定系统误差 y_0,则修正它,得出被测量值:$y = \bar{y} - y_0$;

3. 用贝塞耳公式求标准偏差 s,$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$

4. 标准偏差 s 乘以因子来求得 Δ_A;

5. 当 $5 < n \leqslant 10$,置信概率为 95% 时,可简化认为 $\Delta_A \approx s$;

6. 根据使用仪器得出 Δ_B,$\Delta_B = \Delta_{仪}$;

7. 由 Δ_A、Δ_B 合成总不确定度 Δ,$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{仪}^2}$;

8. 给出直接测量量的最后结果:$y = \bar{y} \pm \Delta$。

例 2 用毫米刻度尺,测量物体长度十次,其测量值 l(cm) 分别为:

53.27,53.25,53.23,53.29,53.24,53.28,53.26,53.20,53.24,53.21,

试计算总不确定度,并写出测量结果。

解 1. 计算 l 的平均值

$$\bar{l} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{10} l_i = \frac{1}{10}(53.27 + 53.25 + 53.23 + \cdots + 53.21) = 53.24(\text{cm})$$

2. 计算 A 类不确定度

$$\Delta_A \approx s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{(53.27 - 53.24)^2 + (53.25 - 53.24)^2 + \cdots + (53.21 - 53.24)^2}{10 - 1}}$$

$$= 0.03(\text{cm})$$

3. 计算 B 类不确定度

米尺的仪器误差

$$\Delta_{仪} = 0.05(\text{cm})$$

$$\Delta_B = \Delta_{仪} = 0.05(\text{cm})$$

4. 总不确定度

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{仪}^2} = \sqrt{0.03^2 + 0.05^2} = 0.04(\text{cm})$$

5. 测量结果的表达式为

$$l = 53.24 \pm 0.04(\text{cm})$$

例 3 感量为 0.1g 的物理天平称衡物体的质量,其读数为 35.41g,求测量结果。

解 用物理天平称衡质量,重复测量读数值往往相同,故一般只须进行单次测量,单次测量的读数值即为近真值,$m = 35.41\text{g}$,物理天平的示值误差通常取感量的 1/2,并且