21 世纪应用型本科规划教材

普通物理实验

（力学、热学部分）

主　编○周小珠　谢　冰　吴兹起
副主编○黄天宇　张　爽

中国工信出版集团
電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

需要全本请访问 www.ertongbook.com

21世纪应用型本科规划教材

普通物理实验
（力学、热学部分）

周小珠　谢　冰　吴兹起　主编

黄天宇　张　爽　副主编

常州大学图书馆
藏书章

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是根据《高等学校应用物理学本科指导性专业规范》中物理实验知识体系而编写的，包含绪论、力学实验和热学实验的内容，属于基础物理实验。本书共有 21 个实验，其中有 13 个力学实验，8 个热学实验。绪论部分主要介绍基本物理实验方法、基本物理量、常用实验数据处理方法等，突出应用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

本书可作为高等院校本科物理学及相近专业第一层次物理实验课和本科非物理学理工类专业大学物理实验课的教材，也可供相关专业的读者学习、参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理实验. 力学、热学部分 / 周小珠，谢冰，吴兹起主编. —北京：电子工业出版社，2018.2
ISBN 978-7-121-33257-9

I. ①普… II. ①周… ②谢… ③吴… III. ①普通物理学－实验－高等学校－教材 ②力学－实验－高等学校－教材 ③热学－实验－高等学校－教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 306166 号

策划编辑：王晓庆
责任编辑：王晓庆
印　　刷：北京京师印务有限公司
装　　订：北京京师印务有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　　邮编：100036
开　　本：787×980　1/16　印张：7.5　　字数：192 千字
版　　次：2018 年 2 月第 1 版
印　　次：2018 年 2 月第 1 次印刷
定　　价：29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010)88254113，wangxq@phei.com.cn。

前　言

2010 年国务院常务会议审议通过的《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020 年）》指出，“要加大教学投入，重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模”。2014 年 2 月 26 日召开的国务院常务会更明确提出要开创新的职业教育模式，要引导一批地方普通本科院校向应用技术型院校转型。同年 3 月，教育部副部长鲁昕在中国发展高层论坛上透露，教育部计划将 600 多所地方本科高校（大部分是新建本科院校）向应用技术、职业教育类型转变。而我国普通高等院校共 1200 所左右，这就意味着有 50%的高校将要转型，它们将更多地承担培养技术应用型人才的任务，特别是培养生产、服务一线技术工程师。可见，应用型人才培养作为我国高等教育人才培养体系中的重要组成部分，已经提上议程。新建本科院校已成为我国高等教育体系的重要组成部分，是我国高等教育大众化的有生力量。

2011 年，广西区政府同意在钦州学院的基础上筹建北部湾大学，被列为自治区重点推进项目。2013 年成为教育部首批应用型大学联盟理事高校，2014 年成为广西新建本科院校整体转型发展试点单位。

钦州学院虽然是应用型大学联盟理事高校，是新建本科院校整体转型发展的试点单位，但应用型教材建设滞后。如大学物理实验或普通物理实验教材，大多借用传统本科教材，这些教材相对而言内容较多，理论较深，在数据记录和处理上不够详细，学生完成实验并上交实验报告的效率不高，在学生理解能力有限的情况下，给教与学带来了一定困难，当然也严重影响了教学质量和教学目标实现，这显然不能适应学校定位特色。

本书包含绪论、力学实验和热学实验，是根据《高等学校应用物理学本科指导性专业规范》中物理实验知识体系而编写的，属于基础物理实验。本书共有 21 个实验，其中有 13 个力学实验，8 个热学实验。绪论部分主要介绍基本物理实验方法、基本物理量、常用实验数据处理方法等，突出应用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。本书可作为高等学校本科物理学及相近专业第一层次物理实验课和本科非物理学理工类专业大学物理实验课的教材。除此之外，本书尽可能简化实验原理、突出实验数据记录和处理上的详细化，让 80%的学生在规定的实验时间内能完成实验，基础较薄弱的少数学生即使在看不明白原理的情况下，按照实验内容和步骤，在本书数据记录、数据处理的“引导”下也能完成实验，减少学生设计实验数据、记录表格等环节所需的时间，同时使数据记录和处理更规范、更准确。

本书主要由钦州学院理学院物理教研室从事物理实验教学的教师编写，具体编写任务如下：周小珠，负责热学实验部分的编写；谢冰，负责统稿、审核和数据处理方法的编写；吴

兹起，负责力学实验部分的编写；黄天宇，负责绪论部分的编写；张爽，负责计算机通用软件处理实验数据部分的编写。

由于作者水平有限，书中难免出现错误与不妥之处，敬请有关专家和读者批评指正。

编　者

2018 年 1 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

绪　论 …… 1
§1　物理实验的基础知识 …… 1
§1-1　物理实验课的任务与教学环节 …… 1
§1-2　测量与误差 …… 3
§1-3　有效数字及其运算规则 …… 5
§1-4　测量的不确定度 …… 8
§1-5　数据处理的一般方法 …… 12
§2　力学、热学实验基本仪器 …… 17
§2-1　游标卡尺 …… 17
§2-2　螺旋测微计 …… 19
§2-3　物理天平 …… 20
力学实验部分 …… 22
实验一　速度、加速度的测定 …… 22
实验二　动量守恒的验证 …… 25
实验三　用三线摆测量刚体转动惯量 …… 28
实验四　拉伸法测定杨氏模量 …… 34
实验五　固体和液体的密度测定 …… 40
实验六　受迫振动 …… 43
实验七　弦振动实验 …… 49
实验八　声速的测量 …… 53
实验九　双孔应变传感器——称重实验 …… 57
实验十　集成霍尔传感器特性与简谐振动实验 …… 58
实验十一　用单摆测重力加速度 …… 65
实验十二　信号的傅里叶分析 …… 67
实验十三　耦合摆的研究 …… 70
热学实验部分 …… 75
实验十四　固体比热容的测定（混合法） …… 75
实验十五　冰熔解热的测量 …… 80
实验十六　水的汽化热的测定 …… 83
实验十七　金属丝的线膨胀系数的测量 …… 85

实验十八　稳态平板法测量非良导体的导热系数 …… 88
实验十九　用落球法测液体的粘度 …… 91
实验二十　中、高真空的获得与测量 …… 93
实验二十一　温度传感器及其标定和应用 …… 99
附录 A　中华人民共和国法定计量单位 …… 103
附录 B　常用物理常数表 …… 105
附录 C　常用物理常量表 …… 106
参考文献 …… 112

预习时应仔细阅读实验教材或有关的资料。在理解本次实验的目的、原理的基础上，弄清楚要观察哪些现象，测量哪些物理量，以及用什么方法和仪器来测定，同时写出预习报告。预习报告应包括：画出实验原理图，列出实验所依据的理论公式，画出数据记录表格。表格上应标明文字符号所代表的物理量及其单位，并确定测量次数。

2. 进行实验

实验是整个教学中最重要的一环，动手能力、分析问题和解决问题的能力的培养，主要在具体实验时完成。因此，必须充分利用课内的有限时间，提高学习效率。

（1）仪器的安装与调节：实验前要熟悉仪器，了解仪器的工作原理和用法，然后耐心地将仪器安装调整好。不注意耐心细致地调整仪器，而忙于进行测量，这是很多同学容易出现的毛病。使用仪器测量时，必须按规程进行操作。在仪器的安装与调整中一般应注意：

① 安排仪器时，应尽量做到便于观察、读数和记录。

② 灵敏度高的仪器（如物理天平、灵敏电流计）都有制动器，不进行测量时，应使仪器处于制动状态。

③ 停表、温度计、放大镜等小件仪器，在用完之后要放到实验台中间的仪器盒中。

④ 拧动仪器上的旋钮或转动部分时，不要用力过猛。

⑤ 注意仪器的零点，必要时需进行调零。

⑥ 砝码、透镜、表面镀膜反射镜等器件，为了保持其测量精确度和光洁，不许用手去摸，也不要随便用布去擦。

⑦ 使用电学仪器要注意电源电压、极性，并需经教师允许后方能接通电源。

⑧ 实验后要将仪器整理、恢复到实验前的状态。

（2）观测：实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁。要在实验所具备的客观条件（如温度、压力、仪器精度等）下，进行认真的实事求是的观察和测量。

（3）记录：每次测量后，应及时将实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内，并注明单位。要根据仪表的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字的位数。记录时要用钢笔或圆珠笔，不要用铅笔。如果发现记错了，也不要涂改，应轻轻画上一道，在旁边写上正确值，使正误数据都能清晰可辨，以供在分析测量结果和误差时参考。此外，还应记录环境温度、湿度、气压等实验条件，仪器型号规格与编号及实验现象等。

总之，测量实验数据时要特别仔细，以保证读数准确，因为实验数据的优劣往往决定了实验结果的成败。

3. 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，要求文字通顺，字迹端正，图表规矩，结论明确，逐步培养以书面形式分析、总结科学实验结果的能力。实验报告内容包括以下几部分。

（1）实验名称、实验者姓名、实验日期、实验地点、指导老师。

（2）实验目的。

（3）仪器和用具：应注明所用仪器的规格、精度或分度值。

（4）实验原理：用自己的语言简要叙述实验原理，列出测量中依据的主要公式、电路图、光路图。

（5）实验内容与步骤：根据实际的实验过程，条理分明地写出实验步骤及安全注意要点，可参考书上的步骤，但不要照抄。

（6）数据记录与处理：对实验中记录的“原始数据”重新列表整理，根据实验要求完成数据计算、图线的绘制等。计算要按照有效数字的运算法则进行，并求出结果的不确定度，正确运用不确定度表示实验结果。在表达实验结果时，一般包括不可分割的两部分，即结果的测量值$\bar{x}$，测量不确定度$u(x)$，结果写为$x=\bar{x}+u(x)$，$E=\dfrac{u(x)}{\bar{x}}\times 100\%$。

（7）结果及讨论：该部分要明确给出实验结果，并对结果进行讨论（如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、回答实验思考题等）。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

§1-2　测量与误差

一、测量

物理实验是以测量为基础的，研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量可以分为两类。

根据测量方法，可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测量物体的长度、用天平称量物体的质量、用电流表测量电流等，都是直接测量。间接测量是借助函数关系由直接测量的结果计算出待测的物理量。例如，测量地球表面的重力加速度时，可以测量单摆的摆长和周期并根据单摆周期的公式计算得出；测量电阻R时，可以通过测量流过被测电阻的电流强度和电阻两端的电压并根据欧姆定律求出该电阻的阻值。这一类测量称为间接测量。

根据测量条件，可分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一（相同）条件下进行的多次重复的测量，如同一个人，用同一台仪器，每次测量时周围环境条件相同，等精度测量每次测量的可靠程度相同，这样的一组数据称为测量列。反之，若每次测量时的条件不同，或测量仪器改变，或测量方法、条件改变，这样所进行的一系列测量称为非等精度测量。非等精度测量的结果，其可靠程度自然也不相同。在物理实验中，凡是要求对待测量进行多次测量的均指等精度测量，本书中有关测量误差与数据处理的讨论，都是以等精度测量为前提的。

测量结果给出被测量的量值，它包括两部分，数值和单位（不标出单位的数值不能是量值）。

二、误差

实践表明，测量结果都存在误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。这是因为测量仪器、方法、环境及实验者等都不可能完美无缺。分析测量中可能产生的各种误差并尽可能消除或减小其影响，对测量结果中未能消除的误差做出合理估计，是实验的重要内容。

1. 常用误差概念

每一个物理量都是客观存在的，在一定的条件下具有不以人的意志为转移的固定大小，这个客观大小称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值，但是测量是依据一定的理论或方法，使用一定的仪器，在一定的环境中，由一定的人进行的，而由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差，这种偏差就称为测量误差。

设被测量的真值为 x_0，测得值为 x，误差为 Δx，则

$$\Delta x = x - x_0 \tag{0-1}$$

此式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小的方向，因此又称 Δx 为绝对误差。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣，但在比较不同测量结果时则不适用，需要用相对误差 E 表示。相对误差定义为测量的绝对误差与真值之比，一般用百分比来表示，即

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \tag{0-2}$$

由于客观条件、人们认识的局限性，测量不可能获得待测量的真值，通常用约定真值（一近似的相对真值）代替真值，也称测量的最佳值。在实际应用中，对单次测量可直接将测量结果当成约定真值，对多次测量将其算术平均值当成约定真值。为了估计误差，定义测量值与约定真值的差值为偏差，偏差又叫做“残差”。实验中真值是得不到的，因此误差也无法知道，而测量的偏差可以准确知道，实验误差分析中要经常计算这种偏差，用偏差来描述测量结果的精确程度。

由于误差存在于一切科学实验和测量过程的始终，因此分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对最后结果中未能消除的误差做出估计，就是物理实验中不可缺少的工作。为此必须研究误差的性质、来源，以便采取适当的措施，以期达到最好结果。

2. 误差的分类

测量误差根据其性质和来源可分为系统误差和随机误差两大类。

（1）系统误差

在同一条件下（测量方法、仪器、环境和观测人不变）多次测量同一量时，符号和绝对值保持不变的误差，或按某一确定的规律变化的误差，称为系统误差。系统误差的来源有以下几个方面：①仪器误差：是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差；②理论误差：是由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或实验条件不能达到理论公式所规定的要求，或测量方法等所带来的误差；③观测误差：是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。

例如，用“落球法”测量重力加速度，由于空气阻力的影响，多次测量的结果总是偏小，这是测量方法不完善造成的误差；用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间，若停表走时太快，即使测量多次，测量的时间 t 总是偏大为一个固定的数值，这是仪器不准确造成的误差；在测量过程中，若环境温度升高或降低，使测量值按一定规律变化，是由于环境因素变化引起的误差。

系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。发现并消除或减小系统误差通常是一件困难的任务，需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确，往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除，因此对系统误差不能轻易放过。

（2）随机误差

在实际测量条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值符号的变化，时大时小、时正时负，以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差，也叫做偶然误差。引起随机误差的原因有很多。仪器精密度与观察者感官灵敏度有关。如仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小；仪器调节平衡时，平衡点确定不准；测量环境扰动变化及其他不能预测、不能控制的因素，如空间电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化等。

在少量测量数据中，它的取值不具有规律性，当测量次数很多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从一定的统计规律（正态分布），其特点是：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（单峰性）；绝对值相等的正负误差出现的概率相同（对称性）；绝对值很大的误差出现的概率趋于零（有界性）；误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零（抵偿性）。因此，增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除。

实验中，精密度高是指随机误差小，而数据很集中；准确度高是指系统误差小，测量的平均值偏离真值小；精确度高是指测量的精密度和准确度都高，数据集中而且偏离真值小，即随机误差和系统误差都小。

由于测量者的过失，如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差，是一种人为的过失误差，不属于测量误差，只要测量者采用严肃认真的态度，过失误差是可以避免的。

§1-3　有效数字及其运算规则

一、有效数字的定义及其基本性质

在实验中所测得的被测量都是含有误差的数值，那么这个数值就不应当无止境地写下去，写多了没有实际意义，写少了又不能比较真实地表达物理量。因此，一个物理量的数值和数学上的某一个数就有不同的意义，这就引入了一个有效数字的概念。从仪器上读出的数字，通常都要尽可能估计到仪器最小刻度线的下一位。这最后一位数是有疑问的，称为可疑数字，

需要全本请访问 www.ertongbook.com

其余的是准确数字，称为可靠数字。由此定义：测量结果中所有可靠数字加上末位的可疑数字统称为测量结果的有效数字。例如，用最小分度值为 1mm 的米尺测量物体的长度，读数值为 7.28cm。其中 7 和 2 这两个数字是从米尺的刻度上准确读出的，即为可靠数字。末尾数字 8 是在米尺最小分度值的下一位上估计出来的，是不准确的，即为可疑数字，测量结果应当而且也只能保留一位可疑数字。有效数字的个数叫做有效数字的位数，如上述的 7.28cm 称为三位有效数字。

书写有效数字时必须注意“0”的位置。仪器上显示的最后一位数是“0”时，此“0”也是有效数字，也要读出并记录。例如，用一毫米分度尺测得一物体的长度为 5.30cm，它表示物体的末端是和分度线“3”刚好对齐，下一位是 0，这时若写成 5.3cm 则不能肯定这一点。所以此“0”是有效数字，必须记录。另外，在记录时，由于选择单位的不同，也会出现一些“0”，例如，5.30cm 也可记为 0.0530m，这是由于单位变换才出现的“0”，没有反映出测量大小的信息，不能认为是有效数字。显然，在有效数字的位数确定时，第一个不为零的数字左面的零不能算有效数字的位数，而第一个不为零的数字右面的零一定要算做有效数字的位数。如 0.0135m 是三位有效数字，1.030m 是四位有效数字。另外，单位换算时有效数字的位数不应发生变化。例如，重力加速度 980cm/s^2、9.80m/s^2 或 0.00980km/s^2 都是三位有效数字。也就是说，采用不同单位时，小数点的位置移动会使测量值的数值大小不同，但测量值的有效数字位数不变。

在物理实验中通常采用科学计数法记录数据，即任何数值都只写出有效数字，且通常在小数点前只保留一位整数，而数量级则用 10 的 n 次幂的形式来表示，如 0.0530m 可写成 $5.30\times10^{-2}\,\text{m}$。

从有效数字的另一面也可以看出测量用具的最小刻度值，如 0.0135m 是用最小刻度为毫米的尺子测量的，而 1.030m 是用最小刻度为厘米的尺子测量的。但是有些仪器，如数字式仪表或游标卡尺，是不可能估计出最小刻度以下一位数字的，那么我们的读数办法是：把直接读出的数字记录下来，仍然认为最后一位是存疑的，因为在数字式仪表中，最后一位总有±1 的误差。游标卡尺的情况也是如此。

二、有效数字的运算规则

由于测量误差的存在，直接测得的数据只能是近似数，通过这些近似数求得的间接测量值也是近似数。几个近似数的运算可能会增大误差。为了不因计算而引进误差，同时为了使运算更简洁，对有效数字的运算做如下规定。

1. 实验后计算误差时，根据误差确定有效数字是正确决定有效数字的基本依据

误差只取一位或二位有效数字，测量值的数值的有效数字是到误差末位为止，即测量值有效数字的末位和误差末位取齐，例如，用单摆测得某地重力加速度为

$$g = (981.2 \pm 0.8)\ \text{cm/s}^2$$

误差只取一位，测量值的有效数字的末位是和误差同一位的 2。

2. 实验后不计算误差时，测量结果有效数字位数只能按以下的规则粗略确定

（1）加减运算

若干数进行加法或减法运算，其和或者差的结果的欠准确数字的位置和参与运算各量中的欠准确数字的位置最高者相同。即加减运算后的末位，应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。例如：

$$32.\underline{1}+3.27\,\underline{6}=35.\underline{3}7\,\underline{6}=35.\underline{4} \qquad 26.6\underline{5}-3.92\underline{6}=22.7\underline{2}\,\underline{4}=22.7\,\underline{2}$$

（2）乘除运算

乘除运算后的有效数字位数，可估计为和参与运算各数中有效数字位数最少的相同。例如：

$$834.\underline{5}\times 23.\underline{9}=19\,\underline{944.55}=1.9\underline{9}\times 10^4 \text{（三位）}$$

（3）其他运算

乘方、开方的有效数字与原数的有效数字位数相同。以 e 为底的自然对数，计算结果的小数点后面的位数与原数的有效数字位数相同，如 $\ln 56.7=4.038$（结果的小数点后取三位）。以 10 为底的常用对数，计算结果的有效数字位数比 $\ln x$ 的结果多取一位。

指数（包括 10^x、e^x）函数运算后的有效数字的位数可取比指数的小数点后的位数多一位，如 $e^{9.24}=1.03\times 10^4$（指数上的小数点后有两位，计算结果的有效数字为三位）。

对三角函数，一般角度的不确定度分别为 1′、10″、1″，有效数字位数分别取四、五、六位。

（4）有效数字的修约

根据有效数字的运算规则，为使计算简化，在不影响最后结果应保留有效数字的位数（或欠准确数字的位置）的前提下，可以在运算前、后对数据进行修约，其修约原则是“四舍六入五看右左”。“五看右左”即为五时则看五后面，若为非零的数则入，若为零则往左看，拟留数的末位数为奇数则入，为偶数则舍，这一说法可以简述为“五看右左”。

例：将下列数保留三位小数

2.143 50→2.144

2.144 50→2.144

2.144 51→2.145

（5）使用有效数字规则时注意

① 对参与运算的一些特殊的准确数或常数，如倍数 2、测量次数 n、常数 π、e 等，2、n 没有可疑成分，不受有效数字运算规则限制；π、e 等常数的有效数字位数可任意取，一般与被测量的有效数字位数相同。

② 有多个数值参加运算时，在运算中途应比按有效数字运算规则规定的多保留一位，以防止由于多次取舍引入计算误差，但运算最后仍应舍去，例如：

$$3.144\times(3.615^2-2.684^2)\times 12.39=3.144\times(13.06\,\underline{8}-7.203\,\underline{9})\times 12.39=3.144\times 5.86\,\underline{4}\times 12.39=228$$

带横线的数字不是有效数字，运算过程中保留它，是为了减少舍入误差，这样的数称为安全数字。

§1-4 测量的不确定度

自从国际计量局（BIPM）在《实验不确定度的规定的建议书 INC（1980）》中提出使用“不确定度”（uncertainty）表示实验结果的误差后，世界各国已普遍采纳，我国在从 1992 年 10 月开始实施的《测量误差和数据处理技术规范》中，也规定了使用不确定度评定测量结果的误差。

一、不确定度的概念

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数，它是被测物理量的真值在某个量值范围内的一个评定。或者说，它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映可能存在的误差范围，即随机误差分量和未定系统误差分量的联合分布范围。

不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念，是误差的数字指标，它表示由于测量误差的存在而对被测值不能肯定的程度，即测量结果不能肯定的误差范围，每个测量结果总存在着不确定度，作为一个完整的测量结果不仅要标明其量值大小，还要标出测量不确定度，以表明该测量结果的可信赖程度。

按误差理论的高斯分布可知：

$(\bar{x}-u(v))$ ～ $(\bar{x}+u(x))$ 范围包含真值的概率为 68%；

$(\bar{x}-1.96u(x))$ ～ $(\bar{x}+1.96u(x))$ 范围包含真值的概率为 95%；

$(\bar{x}-2.58u(x))$ ～ $(\bar{x}+2.58u(x))$ 范围包含真值的概率为 99%。

由于误差来源众多，测量结果不确定度一般包含几个分量，为了估算方便，按估计其数值的不同方法，它可以分为 A、B 两类分量。

1. A 类不确定度 $u_A(x)$

A 类分量等于用统计方法计算出的标准偏差，即 A 类不确定度 $u_A(x)$ 就取为平均值的标准偏差：

$$u_A(x)=s(\bar{x})=\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})/[n(n-1)]} \qquad (0\text{-}3)$$

这一公式称为贝塞尔公式。

2. B 类不确定度 $u_B(x)$

对于不能用统计方法评定，而用非统计方法评定测量结果的不确定度就是 B 类不确定度，用符号 $u_B(x)$ 表示。

标准不确定度的 B 类评定可有几种不同的情况，有的计量器具在说明书上注明，有的可

以从国家有关标准中查出其允许误差，有的则参照仪器的最小分度值去确定其极限误差。一般认为仪器误差服从均匀分布，其极限误差为 Δ，则其标准差为 $\Delta/\sqrt{3}$，故其 B 类不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x)=\Delta/\sqrt{3} \tag{0-4}$$

关于 B 类不确定度 $u_B(x)$ 的评定，还有其他不服从均匀分布的问题，在我们的实验里均用式（0-4）处理。

3. 合成不确定度 $u_c(x)$

对于测量结果的不确定度，应将 A、B 类分量合成，即 $u_c(x)=\sqrt{u_A^2(x)+u_B^2(x)}$。

对直接测量量：设被测量的不确定度来源有 k 项，不论 A 类或 B 类，都是等价的，按方和根去合成，即其合成不确定度 $u_c(x)$ 为

$$u_c(x)=\sqrt{\sum_i^k u^2(x_i)} \tag{0-5}$$

对间接测量量：设 $y=f(x_1,x_2,\cdots,x_m)$，各直接测量结果为：

$\overline{x_1}\pm u_c(\overline{x_1}),\overline{x_2}\pm u_c(\overline{x_2}),\cdots$，则间接测量的结果 $y=\overline{y}\pm u_c(\overline{y})$，其中其合成不确定度 $u_c(\overline{y})$ 为

$$u_c(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^m\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \tag{0-6}$$

假设间接测量量为 $N=f(x,y,\cdots)$，则其合成不确定度 $u_c(\overline{N})$ 可套用标准误差传递公式进行估算，则不确定度传递公式如表 0-1 所示。

表 0-1　不确定度传递公式

函数表达式	测量不确定度传递公式
$N=x\pm y$	$u_c(\overline{N})=\sqrt{u_c^2(\overline{x})+u_c^2(\overline{y})}$
$N=x\cdot y$ 或 $\frac{x}{y}$	$\frac{u_c(\overline{N})}{\overline{N}}=\sqrt{\left[\frac{u_c(\overline{x})}{\overline{x}}\right]^2+\left[\frac{u_c(\overline{y})}{\overline{y}}\right]^2}$
$N=kx$	$u_c(\overline{N})=\lvert k\rvert u_c(\overline{x});\frac{u_c(\overline{N})}{\overline{N}}=\frac{u_c(\overline{x})}{\overline{x}}$
$N=x^n$	$\frac{u_c(\overline{N})}{\overline{N}}=n\cdot\frac{u_c(\overline{x})}{\overline{x}}$
$N=\sqrt[n]{x}$	$\frac{u_c(\overline{N})}{\overline{N}}=\frac{1}{n}\cdot\frac{u_c(\overline{x})}{\overline{x}}$
$N=\frac{x^p y^q}{z^r}$	$\frac{u_c(\overline{N})}{\overline{N}}=\sqrt{p^2\left[\frac{u_c(\overline{x})}{\overline{x}}\right]^2+q^2\left[\frac{u_c(\overline{y})}{\overline{y}}\right]^2+r^2\left[\frac{u_c(\overline{z})}{\overline{z}}\right]^2}$
$N=\sin x$	$u(N)=\lvert\cos x\rvert\cdot u(x)$
$N=\ln x$	$u(N)=\frac{u(x)}{x}$

二、测量结果有效数字取舍原则

不确定度一般保留 1～2 位有效数字，当首位数字等于或大于 3 时，取一位；小于 3 时，取两位，其后面的数字采用进位法舍去。例如，计算结果得到不确定度为 0.2414×10^{-3} m，则应取 $u=0.25\times10^{-3}$ m。

测得值取几位，由不确定度来决定。测得值的保留位数与不确定度的保留位数相同，也就是说，测得值有效数字的末位和不确定度末位取齐。例如，用单摆测得某地重力加速度为

$$g=(979.2\pm0.6)\text{cm/s}^2$$

【例 0-1】 使用 0～25mm 的一级螺旋测微计 $\Delta=0.004$mm 测量钢球的直径 d（同一方位），测得的数据如表 0-2 所示，求测量的结果 $(\bar{d}\pm u_c(\bar{d}))$mm 。

表 0-2 测量钢球直径的实验数据表

测量序号	读数 x_1 / mm	未读数 x_2 / mm	直径 $d=(x_2-x_1)$ / mm
1	0.004	6.002	5.998
2	0.003	6.000	5.997
3	0.004	6.000	5.996
4	0.004	6.001	5.997
5	0.005	6.001	5.996
6	0.004	6.001	5.996
7	0.004	6.001	5.997
8	0.003	6.002	5.999
9	0.005	6.000	5.995
10	0.004	6.000	5.996

解 由实验数据可算出直径的算术平均值 $\bar{d}=5.9967$mm，A 类不确定度为

$$u_A(\bar{d})=\frac{s(d)}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(d_i-\bar{d})^2}{n(n-1)}}=0.0037\text{mm}$$

仪器误差为均匀分布 $\Delta=0.004$mm，故 B 类不确定度为

$$u_B(x)=\Delta/\sqrt{3}=0.00231\text{mm}$$

合成不确定度为

$$u_c(\bar{d})=\sqrt{u_A^2(\bar{d})+u_B^2(d)}=0.00436\text{mm}$$

取0.0044mm，测量结果为

$$d=(\bar{d}\pm u_c(\bar{d}))=(5.997\pm0.005)\text{mm}$$

相对不确定度

$$E=\frac{u_c(\bar{d})}{\bar{d}}\times100\%=\frac{0.005}{5.997}\times100\%=0.083\%$$

【例0-2】在单摆法测定重力加速度实验中，测得周期$T=(2.014\pm0.003)\text{s}$，摆长$L=(1.002\pm0.002)\text{m}$。计算重力加速度$\bar{g}\pm u_c(g)$。

解　$\bar{g}=\dfrac{4\pi^2\bar{L}}{\bar{T}^2}=\dfrac{4\times3.14^2\times1.002}{2.014^2}=9.7424\text{m/s}^2$

$$u_c^2(g)=\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2u_c^2(L)+\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2u_c^2(T)$$

式中，$\dfrac{\partial f}{\partial L}=\dfrac{4\pi^2}{T^2}$，$\dfrac{\partial f}{\partial T}=-\dfrac{8\pi^2L}{T^3}$。

代入各数据得

$$u(\bar{g})=3.50\times10^{-2}\,\text{m/s}^2=0.035\,\text{m/s}^2\approx0.04\,\text{m/s}^2$$

重力加速度测得结果为

$$g=\bar{g}\pm u(\bar{g})=(9.74\pm0.04)\,\text{m/s}^2$$

$$E=\frac{0.04}{9.75}\times100\%=0.4\%$$

【例0-3】在用双棱镜测量光波波长的实验中，d_1、d_2、Δx均由精度为0.01mm的测微目镜测出，D由米尺测量。$\bar{d}_1=2.713\text{mm}$，$s(\bar{d}_1)=0.021\text{mm}$，$D=737.1\text{mm}$，$n=10$，$\bar{d}_2=0.711\text{mm}$，$s(\bar{d}_2)=0.002\text{mm}$，$\overline{\Delta x}=3.168\text{mm}$，$s(\overline{\Delta x})=0.010\text{mm}$。

解　因为$\lambda=\dfrac{\sqrt{d_1d_2}}{D}\dfrac{\Delta x}{n}$

由式（0-6）可得

$$u_c^2(\lambda)=\left(\frac{\partial\lambda}{\partial d_1}\right)^2u_c^2(d_1)+\left(\frac{\partial\lambda}{\partial d_2}\right)^2u_c^2(d_2)+\left(\frac{\partial\lambda}{\partial D}\right)^2u_c^2(D)+\left(\frac{\partial\lambda}{\partial\Delta x}\right)^2u_c^2(\Delta x)$$

整理后得

$$u_c(\lambda)=\lambda\left[\left(\frac{1}{2d_1}\right)^2u_c^2(d)+\left(\frac{1}{2d_2}\right)^2u_c^2(d_2)+\left(\frac{1}{D}\right)^2u_c^2(D)+\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2u_c^2(\Delta x)\right]^{1/2}$$

其中：

需要全本请访问 www.ertongbook.com