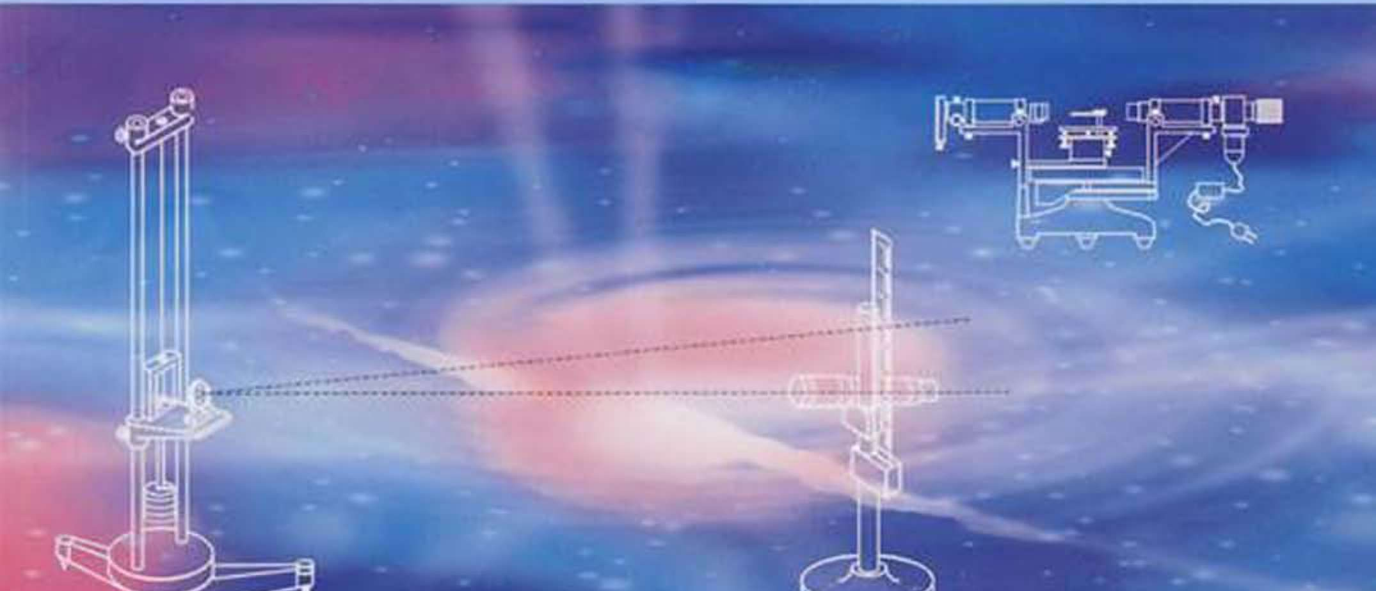
物理实验



主编　康垂令

武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

物 理 实 验

康垂令　主编

武汉理工大学出版社
·武汉·

内容简介

本书是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,并结合长江大学工程技术学院学生的实际状况和实验室现有仪器设备情况编写的。全书共分5章,收录了21个实验。第1章阐述了物理实验的误差理论和数据处理的基本知识。第2、3、5章分别讲述了力学和热学的8个实验,电磁学的6个实验,光学的4个实验,近代物理及综合性设计性的3个实验。每个实验都列出了详细的数据表格,以便实验者借鉴。第2、3、4章的第1节还分别介绍了力学和热学实验的基本测量器具、电磁学实验和光学实验的基本知识。书末附有实验报告范例、法定计量单位及物理数据可供学生写实验报告和查阅数据时参考。

本书适合作为独立学院大学物理实验教材,也可以作为职业技术学院、高职高专物理实验的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验/康垂令主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2011.1重印
ISBN 978-7-5629-2686-3

Ⅰ.物…
Ⅱ.康…
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(2009)第003566号

项目负责人:王兆国　　**责任编辑**:陈　硕
责任校对:周　全　　**装帧设计**:吴　极
出版发行:武汉理工大学出版社
社　　址:武汉市洪山区珞狮路122号
邮　　编:430070
网　　址:http://www.techbook.com.cn
经　　销:各地新华书店
印　　刷:京山德兴印刷有限公司
开　　本:787×1092　1/16
印　　张:15
字　　数:384千字
版　　次:2009年1月第1版
印　　次:2011年1月第3次印刷
印　　数:5001～7500册
定　　价:26.50元
(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

前　言

物理实验是工科学生必修的一门重要的基础课，它通过对学生进行的训练，使学生掌握最基本的科学试验方法和技能，培养学生的科学素养以及用试验方法研究和解决问题的能力。

高等教育在我国已成为大众教育，实验教学也随之不断发展，在此背景下，本书根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合长江大学工程技术学院实验设备的具体情况，并考虑到长江大学工程技术学院物理实验室的发展而编写的。全书共收录了 21 个实验。

本书的对象主要是工科学校的学生，在内容的编写上比较全面。为了让学生能依靠教材顺利地完成实验任务，本书对每个实验的物理思想、实验原理、实验仪器、实验步骤及实验方法，特别是实验公式的推导均作了较为详细的描述。在每个实验的篇尾都给出了适当数量的思考题。其中，预习思考题一般都紧扣实验的要领，可以促进学生认真准备、积极思考，以使实验能顺利地完成；实验后思考题则可以帮助学生比较深入地进行总结，加深对实验的理解。为了使学生初次接触实验时能写出较为规范的实验报告，我们提供了 3 个实验报告的样本（即书末的附录“如何写实验报告”），以供学生参考和借鉴。

本书既是笔者多年从事大学物理理论教学与实验教学的总结，更是近四年在筹建与完善长江大学工程技术学院物理实验室的过程中边建设边教学的结晶，在此，特别要感谢长江大学工程技术学院的领导对笔者编写本书的支持。

笔者还要感谢长江大学工程技术学院物理实验室的几位年轻教师，他们在笔者编写本书的过程中，参与了关于本书内容的有益讨论并提出了宝贵建议。

由于笔者的学识水平有限，加上时间仓促，书中难免有疏漏谬误之处，欢迎使用本书的师生提出宝贵意见。

编　者

2008.9

目　　录

0 绪　论

0.1 物理实验的地位、作用与任务

物理学从本质上讲是一门实验科学。物理实验不仅在物理学发展史上起过重要作用，而且在物理学高度发展的今天，实验仍举足轻重，推动着整个工业技术的发展。如今的实验大都向大型化、精密化发展，而且这些实验技术本身对工程技术的发展起着巨大的推动作用。例如，为研究基本粒子而发展起来的加速器技术，在生物、医学、材料工艺等广泛领域内获得了应用；又如核磁共振技术，不仅在医学、生物、物质结构分析等方面有着重要应用，而且石油工业中也利用这一手段进行产品优化控制、现场岩性分析，甚至在测井方面也有广阔的发展前景。像这样的例子还有很多。因此，对工科院校的学生来说，掌握一定的物理实验技术是非常必要的。

《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》明确指出了物理实验课的作用与地位："物理实验课是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。"

物理实验的具体任务是：

(1)通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理原理的理解。

(2)培养和提高学生的科学实验能力，具体包括：

①能够自行阅读实验教材和资料，做好实验前的准备；

②能够借助教材或仪器说明书正确使用仪器；

③能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断；

④能够正确记录和处理实验数据，绘制曲线，说明实验结果，撰写合格的实验报告；

⑤能够完成简单的设计性实验。

(3)培养和提高学生的科学素质，要求学生具有理论联系实际、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质。

0.2 对学生的基本要求

(1)了解本门课程的主要目的，严格要求自己，做好每一个实验。

(2)预习。预习是做好每一次实验的先决条件，应认真进行。通过预习，应该明确实验目的(即做什么)、原理以及所使用的仪器、方法和步骤(即如何做)，并做好实验前的准备(如设计、绘制数据记录表格)，带好数据记录本等。

(3)实验。包括仪器的调节和操作，观察现象，记录数据等。

首先，要集中精力，细心操作。仪器的安放要科学合理且便于操作，同时也要注意安全。例如，易碎物品(精密光学元件、玻璃器皿等)不应放在桌边，以免失手碰落于地。测量仪器的

安排要便于读数。例如，光学仪器的目镜应放在与眼睛等高的位置，不常用的开关放在左手便于接触到的地方（因为右手大多用来写字）；要求精细调节的部件应放在右手边，以便随时可调。尽量不要在光线不良的情况下工作，这样容易疲劳，影响操作和读数。

其次，最好有一个方便的座位，以便做好原始记录。记录就是如实记下各观察数据、简单过程及实验现象。记录应简洁、清楚，使别人和自己都能看懂所记内容。数据一定要记在表格内，并注明单位。数据记录要及时，不可凭印象事后追记，更不可为了凑结果而涂改原始数据。对于所测得的数据应该有个初步的判断，达不到要求可立即补测，以免事后重做，那样将花费更多的时间。数据的进一步处理依据需要可在课内进行，也可在课外进行。

(4)实验报告。实验报告是对实验工作的全面总结，是培养学生科技写作能力的重要途径，应当高度重视，尽量写好每一份实验报告。考虑到学生可能是初次编写实验报告，本书在附录中专门介绍了实验报告的格式，还提供了3个实验报告的样本，供学生参考和借鉴。

1　不确定度及数据处理的基本知识

本章主要介绍不确定度的概念及计算、实验数据的处理和实验结果的表示等内容，这些知识都是初步知识，不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验所必须了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广，而学时的限制使得教师只能提纲挈领，加上同学们数理统计知识的暂时欠缺，本书只能引用部分结论和计算公式。所以，要求同学们先对本章的内容有一个初步的了解，然后通过教师的简单讲述，特别是以后结合到具体实验再阅读有关段落，最后在运用中加以掌握。

1.1　测量与误差

物理实验离不开测量。测量就是为确定被测物理量的参数而进行的一组操作。测量分为直接测量和间接测量。直接测量是指直接从仪器的读数机构中取得数据的测量。例如，用米尺测物体的长度，用天平测物体的质量，用电流表测电路中的电流等都是直接测量。间接测量是指利用直接测量值及其与被测量之间的函数关系从而算得被测量值的测量。例如，测物体密度时，需先测出该物体的体积与质量，再用公式算出物体的密度，这种测量就是间接测量。间接测量和直接测量是相对的。例如，用伏安法测电阻，可以说是间接测量，但若用万用电表测量电阻就为直接测量了。物理实验中进行的测量多数为间接测量。

测量总是有误差的，因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力都不可能做到绝对严密，加上物理规律的统计性，就使得误差自始至终存在于一切科学实验与测量过程中。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出估计，是科学实验不可缺少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因及其如何估算等有关知识。

1.1.1　真值与误差

真值是指被测物理量在所处的确定条件下，客观上所严格具有的量值。误差是指测量值与真值之差。真值与误差之间的关系可表述为

$$\Delta N = N - A \tag{1-1}$$

式中，N 为测量值；A 为被测量的真值；ΔN 为测量误差，又称绝对误差。

真值是客观存在的，但它是一个理想的概念，在一般情况下不可能被准确获知。在实际测量中可用实际值（即用高一等级的计量标准所复现的量值）或经过修正的算术平均值来代替真值，称之为约定真值。

误差是测量结果与客观真值之差，它既有大小，又有方向（正负）。由于真值无法知道，因此误差也是未知的，只能进行估计。误差与真值之比称为相对误差。考虑到在一般情况下，测量值与真值相差不会太大，故可以把误差与测量值之比作为相对误差。

$$E = \frac{\Delta N}{A} \approx \frac{\Delta N}{N} \tag{1-2}$$

1.1.2 误差的分类

测量中的误差主要分为两种类型，即系统误差和随机误差。

1. 系统误差

系统误差是同一被测量在多次测量过程中保持恒定或以可以预知方式变化的那一部分误差。例如，实验装置和实验方法没有或不可能完全满足理论上的要求，有的仪器没有达到应有的准确程度，环境因素如温度、湿度等没有控制到预计的标准等。只要这些因素与正确的要求有所偏离，在测量结果中就会出现绝对值和符号恒定或以可预知的方式变化的误差分量。因素不变，系统误差也就不变。比如，一根米尺的刻度，其间隔偏大(或偏小)，那么用其测量物体的长度就会偏短(或偏长)；一架天平，砝码的标准质量不准，称量物体质量时也会不准；用伏安法测电阻，如果没有考虑电流表、电压表内阻的影响，则测量结果就会因电路的不同而偏大或偏小；用落球法测重力加速度，由于空气的影响，测得的结果总是偏小等。这些误差都属于系统误差。

实验中的系统误差，可以通过采用标准仪器、改进实验装置和实验方法、对测量结果进行理论上的修正等方法加以消除或尽量减小。发现和减小实验中的系统误差是一个困难的任务，需要对整个实验所依据的原理、采用的方法、测量的步骤、所用的仪器等可能引起的误差因素逐一进行分析，并设法减小或排除。一个实验结果是否正确，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。

系统误差产生的规律及原因，操作者可能知道也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差称为可定系统误差；大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中加以修正，而后者一般难以修正，只能估计它的极限范围。

2. 随机误差

随机误差是在对同一被测量的多次测量过程中，其绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量。这种误差是由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性，测量仪器指示数值的变动性以及观察者本人在判断上和估计读数上的变动性等。这些因素的共同影响使得测量值围绕着测量平均值发生有涨有落的变化，这些变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一测量值而言是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的，但当测量次数足够多时，就会发现它的随机误差是按一定的统计规律分布的。通常的一种情况是，正方向的误差与负方向的误差出现的次数大致相等，数值较小的误差出现的次数较多，很大的误差在没有操作错误的情况下通常不会出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显。

3. 粗大误差

除系统误差和随机误差外，还有一种误差是由于测量系统偏离所规定的测量条件和方法或者在记录、计算数据时出现失误产生的，称为粗大误差，这实际上是一种错误，应予以剔除。需要指出的是，不应当把某些异常观察值都作为粗大误差来处理，因为它可能是某种物理规律在实验条件的随机变动中的瞬时展现。判断一观察值是否为异常时，通常应根据技术上或物理上的理由分析作出决定(该部分内容不作过多要求，因此本书不再介绍)。

1.2 测量结果的标准偏差

1.2.1 正态分布时的随机误差

研究表明，虽然实验中测量值的误差分布是比较复杂的，但是大多数的测量误差分布都接近于正态分布，特别是当测量次数 $n \to \infty$ 时，几乎所有形式的分布都趋于正态分布。为了便于后面标准偏差、置信概率与不确定度的讨论，我们这里对正态分布作简单介绍。

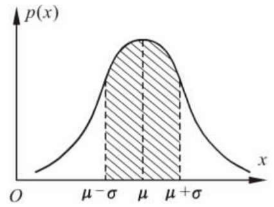


图 1－1 正态分布

标准化的正态分布曲线如图 1－1 所示。x 表示某一物理量的实际测得值，$p(x)$ 为测量值的概率密度，其表达式为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{1-3}$$

其中

$$\mu = \lim_{x\to\infty} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1-4}$$

$$\sigma = \lim_{x\to\infty} \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2} \tag{1-5}$$

μ 位于曲线的尖峰处，它对应于测量次数 $x \to \infty$ 时的测量平均值 $\bar{x}$；横坐标上任一点 x 到 μ 的距离 $(x-\mu)$ 为测量值相应的随机误差分量；σ 为曲线上拐点处横坐标与 μ 值之差，它表征了测量值的分散性，称为正态分布的标准偏差，它具有统计的性质。图中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率，即测量值落在 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 区间的概率 P，由定积分计算其值为 $P=68.3\%$；计算还表明：落在 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 区间中的概率为 95.4%，落在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 区间的概率为 99.7%。

1.2.2 测量平均值是被测量真值的最佳估计

根据最小二乘法原理，在无系统误差存在的情况下，实验中有限次等精度测量的最佳估计值 x_0 是能使各次测量值与该值之差的平方和最小的那个值。设真值的最佳估计值为 x_0，该测量值与最佳估计值 x_0 的平方和为

$$f(x)_{\min} = \sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0)^2 \tag{1-6}$$

min 表示极小值，所以此式应满足

$$\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x_0} = -2\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0) = 0$$

则有

$$x_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \bar{x} \tag{1-7}$$

所以，测量平均值 $\bar{x}$ 是被测量真值 A 的最佳估计值 x_0，测量次数越多，测量平均值 $\bar{x}$ 越接近被测量真值 A。

1.2.3 测量值的标准偏差

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测量的精密度。由于标准偏差具有统计的性质，科学实验中一般用标准偏差来估计测量的随机误差。实际上，由于真值未知，且测量次数 n 有限，测量中的标准偏差不能用式(1-5)计算。

测量中每次测量值 x_i 与平均值 $\overline{x}$ 之差称为残差，即

$$\Delta x_i = x_i - \overline{x} \qquad i = 1,2,\cdots,n \tag{1-8}$$

显然，残差有正有负，有大有小。用“均方根”法对它们进行统计，得到的结果就是测量列的标准偏差 S_x。它表征了在相同条件下对同一量做 n 次测量时测量值的分散性。S_x 用下面不同于式(1-5)的贝塞尔公式计算

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \tag{1-9}$$

我们用它来表示测量值的随机误差，它表示这一测量的精密程度。标准偏差小表明测量值很密集，即测量精密度高；标准偏差大表明测量值很分散，即测量精密度低。现在大多数计算器都有这种统计计算功能，实验者可以直接用计算器求得 S_x 以及其他统计数值。

由于算术平均值是被测量真值的最佳估计，即它最接近被测量真值，所以它对真值的偏离程度要小。表征算术平均值偏离真值程度的算术平均值的标准偏差为

$$S_{\overline{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

即

$$S_{\overline{x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \overline{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1-10}$$

$S_{\overline{x}}$ 比 S_x 小得多，这显然是可以理解的。该公式实际上提出了减小实验结果随机误差的一个途径，即增大实验次数。由于平均值的标准偏差是按 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 规律减小的，当 $n>10$ 以后，减小得并不明显，反而增大了工作量。因此，单靠增加测量次数来减少误差的方法不一定合算。

1.3 直接测量结果的不确定度

测量误差是普遍存在的。随着实验技术和设备的改善以及操作人员水平的提高，误差可以被削弱；但不可能，往往也没有必要对其完全消除。通常人们关心的是误差在什么范围内以及测量结果的置信概率。

我们知道，误差是测量值与真值之差，通常是无法知道的。为了对它所在范围进行定量估计，我们引入一个新的概念：不确定度 Δx。不确定度 Δx 是表征被测量真值所处量值范围的评定，它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。测量不确定度 Δx 应该这样来估计：在修正了可以修正的系统误差以后，把全部余下的误差划分为可以用统计方法计算的不确定度 A 类分量 $\Delta_A x$ 和用其他方法估算的不确定度 B 类分量 $\Delta_B x$。分别对它们进行计算，并按方和根方法合成为总不确定度 Δx。

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta_A x)^2 + (\Delta_B x)^2} \tag{1-11}$$

1.3.1 不确定度 A 类分量

在相同条件下对同一被测量做 n 次测量，若只存在用统计方法计算的不确定度 $\Delta_A x$，它应等于平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 乘以一因子 k，即

$$\Delta_A x = kS_{\bar{x}} \tag{1-12}$$

设这时被测量真值落在 $\bar{x} \pm \Delta_A x$ 范围内的概率，即置信概率为 P。如果 n 值足够大，并且误差分布满足正态分布的情况下，A 类不确定度表达式(1-12)中的 k 分别取 1、2、3 时，测量结果表示式的置信概率 P 分别为 68.3%、95.4% 和 99.73%。然而，实验中的测量次数不可能很多。当测量次数较少时，由贝塞尔公式(1-8)计算出的标准偏差 S_x 与由式(1-5)计算出的正态分布的标准差 σ 有很大的差异。此时应按“学生氏”分布，简称“t”分布来计算。A 类不确定度分量 $\Delta_A x$ 与平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 的关系为

$$\Delta_A x = tS_{\bar{x}} \tag{1-13}$$

对同一置信概率，t 值比 k 值大，而且 t 值与测量次数 n 及置信概率有很大的关系。表 1-1 列出了在不同置信概率 P 的前提下，部分 t 值与测量次数 n（表中列的是 $n-1$，称为测量自由度 ν）之间的关系。

表 1-1 部分 t 值表

t \ $n-1$ / P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	∞
0.683	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.03	1.02	1.00
0.95	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.23	2.09	2.04	1.96
0.99	63.66	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	3.17	2.84	2.75	2.58

需要说明的是，表 1-1 中所列的置信概率是我国计量技术规范推荐的在物理实验和科学研究中使用的值。一般情况下都取置信概率为 $P=0.95$。如果要取其他置信概率值，必须在结果的最后表示式中注明。

1.3.2 不确定度 B 类分量 $\Delta_B x$

对于不确定度的 B 类分量，因情况比较复杂，而且无法用统计方法作出评定，所以只能基于经验或其他信息来加以估算。在物理实验中，不确定度的 B 类分量通常包含以下几种：

(1)根据实际情况估计误差限。例如杨氏模量实验中，光杠杆镜面到标尺的距离的不确定度要由钢卷尺的精度以及实验中位置对准、卷尺弯曲、水平保持的程度等实际条件来估计误差限。一般来说，它将远大于钢卷尺本身的仪器误差。

(2)根据理论公式或实验测定来推算误差限。例如人眼分辨率的误差，长度测量中温度变化造成的误差等，这些都是可以用理论公式和实验测定来推算误差限的。

(3)根据计量部门，生产厂家或有关资料提供仪表鉴定结论中的误差限。如仪表说明书给出的容许误差和示值误差。

但是在物理实验中，在同学们知道了 B 类分量的基本概念以及影响因素以后，为了计算的方便，可以作出如下的简化：假设实验原理正确，环境条件满足要求，观察者能正确测量，那么不确定度中 B 类分量就可以用仪器的误差限 $\Delta_{仪} x$ 来代替，即

$$\Delta_{B}x = \Delta_{仪}x \tag{1-14}$$

这种简化是可行的，因为 $\Delta_{仪}x$ 是在正确使用仪器的条件下，测量结果和被测量真值之间可能产生的最大误差。实际上由仪器提供的测量结果与真值之差比仪器的误差限值小得多。综合考虑其他各种非统计的误差来源，在置信概率 P 为 0.95 的情况下，用仪器误差限值 $\Delta_{仪}x$ 代替不确定度中 B 分量 $\Delta_{B}x$ 就显得比较合理了。

1.3.3 实验中单次测量量的不确定度

由前面的讨论，多次测量量最后结果的总不确定度为

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta_{A}x)^2 + (\Delta_{B}x)^2} = \sqrt{(tS_{\overline{x}})^2 + (\Delta_{仪}\ x)^2} \tag{1-15}$$

然而有些测量往往只能进行一次，这时虽然用统计方法计算的 A 类分量存在，但无法用式(1-10)和式(1-13)算出。此时总不确定度 Δx 就用 $\Delta_{仪} x$ 代替。不过，需要说明的是只做一次测量时的不确定度并不说明它比多次测量时的不确定度小，只是说明作为一种粗略的估计可以放宽，也必须放宽到用 $\Delta_{仪} x$ 代替 Δx 的地步。

1.3.4 测量结果的表达式

在相同的实验条件下进行一系列测量得出一系列测量值以后，用式(1-7)先算出它的平均值，考虑已知的系统误差而对结果进行修正，得出测量结果的最佳估计值 $\overline{x}$，然后用统计方法，即用式(1-10)、式(1-13)和表 1-1 算出不确定度的 A 分量 $\Delta_{A}x$；再用非统计方法，这里用式(1-14)计算出不确定度 B 分量 $\Delta_{B}x$。最后用方和根方法，即用式(1-11)合成得出直接测量结果的总不确定度 Δx。于是直接测量结果就表示为

$$x = \overline{x} \pm \Delta x \tag{1-16}$$

这种表示说明了测量值的置信概率为 0.95。如果不用 0.95 的置信概率，比方用 0.683，设以此为标准算出了 Δx，则测量结果的表达式的后面应说明其置信概率 P，表达式应为

$$x = \overline{x} \pm \Delta x \quad (P = 0.683)$$

其相应的相对不确定度也应如此。相对不确定度是不确定度与修正过系统误差的算术平均值之比，即

$$E_r = \Delta x / \overline{x} \tag{1-17}$$

当置信概率为 0.95 时，相对不确定度表示式后不必注明置信概率；当置信概率为其他值时，相对不确定度表示式后同样要注明置信概率 P。

本书所有关于计算不确定度的实验所取置信概率均为 0.95，所以都不必注明置信概率。

1.4 仪器误差

如前所述，在实验原理正确、环境条件满足要求、观察者能正确测量的情况下，综合考虑各种非统计方法产生的误差后，不确定度中 B 类分量就可以用仪器的误差限 $\Delta_{仪} x$ 来代替。仪器误差来源众多，以最常用的指针式电表为例，仪器误差可能来源于轴承摩擦，转轴倾斜，游丝弹性不均、老化与残余变形，磁场分布不均匀，标尺分度不准，检测标准本身的误差等。逐项进行分析处理并非易事，且在绝大多数情况下也无必要。实际上，我们关心的是仪器提供的测量结果与真值一致的程度。仪器误差（或称仪器的允许误差限）就是指在正确使用仪器的条件下，测量结果和被测量真值之间产生的最大误差。对照通用的国际标准，我国制定了相应计量器

具的检定标准和规程。结合物理实验的特点,以下作简要介绍。

1.4.1 长度测量类

物理实验中最基本的长度测量工具是钢卷尺、钢直尺、游标卡尺和千分尺(螺旋测微器)。钢直尺、钢卷尺、游标卡尺及千分尺的允许误差限分别如表1-2、表1-3和表1-4所示。

在物理实验中,考虑到上述规定的严格性又兼顾教学训练的简化需要,除具体实验中另有说明(如用三线摆测转动惯量和用拉伸法测金属丝的杨氏模量)外,约定:游标卡尺的仪器误差限按其分度值估计;钢直尺、螺旋测微器(千分尺)的仪器误差限按其分度值估计的一半计算;分度值为1 mm的木尺,其仪器误差限为1.0 mm。具体情况见表1-5。

表1-2 钢直尺和钢卷尺的允许误差

钢直尺		钢卷尺	
尺寸范围(mm)	允许误差(mm)	准确度等级 Ⅰ级	示值允许误差(mm) ±(0.1+0.1 L)
1~300	±0.10	Ⅱ级	±(0.3+0.2 L)
300~500	±0.15	注:式中 L 是以米为单位的长度,当长度不是米的整倍数时,取最接近的较大的整“米”数	
500~1000	±0.20		
1000~1500	±0.27		
1500~2000	±0.35		

表1-3 游标卡尺的允许误差

测量长度(mm)	示值误差(mm)		
	分度值0.02 mm	分度值0.05 mm	分度值0.10 mm
0~150	±0.02	±0.05	±0.10
150~200	±0.03	±0.05	
200~300	±0.04	±0.06	
300~500	±0.05	±0.08	
500~1000	±0.07	±0.10	±0.15

表1-4 螺旋测微器的示值误差

测量范围(mm)	0~25,25~50	50~75,75~100	100~125,125~150	150~175,175~200
示值误差(μm)	4	5	6	7

表1-5 物理实验中长度量具仪器误差限值的简化约定

量具名称	木尺	钢直尺	游标卡尺			螺旋测微器
	1 mm分度		0.1 mm分度	0.05 mm分度	0.02 mm分度	
仪器误差限	1 mm	0.5 mm	0.1 mm	0.05 mm	0.02 mm	0.005 mm

1.4.2 质量测量类

物理实验中称衡质量的主要工具是天平。天平的测量误差应当包括示值变动性误差、分度值误差和砝码误差等。单杠杆天平按精度分为十级，砝码的精度分为五等，一定精度级别的天平要配用等级相当的砝码。

在本书的实验中，约定取天平分度值的一半作为仪器误差。

1.4.3 温度测量类

物理实验中常用的测温仪器包括水银温度计、热电偶温度计和电阻温度计。表 1－6 给出了实验常用的工作用温度计的容许误差。

表 1－6　实验常用的工作用温度计的允许误差

温度计类别		测量范围（℃）	示值允许误差（℃） 分度值（℃） 0.1	0.2	0.5	1.0
工作用玻璃水银温度计	全浸式	－30～＋100	±0.2	±0.3	±0.5	±1.0
		100～200	±0.4	±0.4	±1.0	±1.5
	局浸式	－30～＋100	—	—	±1.0	±1.5
		100～200	—	—	±1.5	±2.0
工作用铂铑-铂热电偶（热电偶参考端为 0 ℃）	（Ⅰ级）	0～1100	±1			
		1100～1600	±[1＋(t－1100)×0.003]			
	（Ⅱ级）	0～600	±1.5			
		600～1600	±0.25%t			
工业铂热阻 分度号 Pt10，Pt100	（A 级）	－200～＋850	±(0.15＋0.002|t|)			
	（B 级）		±(0.30＋0.005|t|)			

在本书的实验中，约定水银温度计的仪器误差按最小分度值计算。

1.4.4 时间测量类

秒表是物理实验中最常用的计时仪表。在本书的实验中，对较短时间测量的机械秒表可按 0.05 s 作为秒表的仪器误差。对石英电子秒表，其最大偏差≤$(5.8\times10^{-6}t+0.1)$ s，其中 t 是时间的测量值。在本书的实验中，取 0.01 s 作为石英电子秒表的仪器误差。

1.4.5 电学测量类

电学仪器按国家标准大多是根据准确度大小划分等级，其基本误差可通过准确度等级的有关公式给出。

1. 电磁仪表（指针式电流表、电压表）

$$\Delta_{仪}\ x = a\% \cdot N_m \tag{1－18}$$

式中，N_m 表示电表的量程；a 表示以百分数表示的准确度等级，分为 5.0、2.5、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1七个级别。

2. 电阻箱

$$\Delta_{仪} x = a\% \cdot R + R_0 \tag{1-19}$$

式中，R_0 为残余电阻，是电阻箱各十进盘均置于零位时的电阻；R 为电阻箱的读数值；a 为电阻箱的准确度级别。

对于 ZX21 型 0.1 级电阻箱，可约定 $R_0 = 0.005(N+1)$，其单位为 Ω，N 是实际所用的十进电阻盘个数，如用"0"和"9.9 Ω"两接线柱时 N 值取 3。

3. 直流式电位差计

$$\Delta_{仪} x = a\% \cdot (U_x + U_0/10) \tag{1-20}$$

式中，a 为准确度等级；U_x 为电位差计的读数；U_0 为基准值，定义为量程内最大的 10 的整数幂。

对于 UJ31 型电位差计，准确度等级为 0.05。当倍率取 10 时其 $U_0 = 0.1\text{V}$，当倍率取 1 时，取 $U_0 = 0.01\ \text{V}$。

4. 直流电桥

$$\Delta_{仪} = a\% \cdot (CR_x + CR_0/10) \tag{1-21}$$

式中，a 为准确度等级；R_x 为电桥度盘示值；R_0 为基准值，定义为标度盘最大示值的 10 的整数幂，C 是比率值。

对于 QJ23 型电桥中的 R_0 值，取 5000 Ω 作为一种简化处理。

1.4.6 数字仪表

随着时代的发展，数字仪表已广泛应用到科学实验中，特别是电学数字仪表。数字仪表的仪器误差也与它的精度等级有关。这里假定数字仪表足够准确，故数字仪表的仪器误差限与数字仪表的分度值相同，即与读数的最后一位的一个单位相同。

还有一些测量仪器，其仪器误差限值将在具体实验中提及。

1.5 间接测量结果的不确定度

在绝大多数实验中所进行的测量都是间接测量，间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学式计算出来的。这样一来，直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果，这种影响的大小可由相应的数学式计算出来。

设间接测量所用的数学式（或称测量用公式，或称实验公式）可以表示为如下的函数式：

$$\varphi = \varphi(x, y, z\cdots)$$

式中，φ 为间接测量结果；x，y，$z\cdots$ 为直接测量结果（它们是相互独立的）。设 x，y，$z\cdots$ 的不确定度分别为 Δx，Δy，$\Delta z\cdots$，它们必然影响间接测量结果，使得 φ 值也有相应的不确定度 $\Delta\varphi$。由于不确定度都是微小的量，相当于数学中的"增量"，因此间接测量的不确定度计算公式与数学中全微分公式基本相同。所不同的是：①要用不确定度 Δx，Δy，$\Delta z\cdots$ 代替微分 $\mathrm{d}x$，$\mathrm{d}y$，$\mathrm{d}z\cdots$；②要考虑不确定度合成的统计性质。

对式 $\varphi = \varphi(x, y, z\cdots)$ 全微分，有

$$\mathrm{d}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\mathrm{d}y + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\mathrm{d}z + \cdots$$

考虑到不确定度与全微分的不同点，于是有