



大学 物理实验

**DAXUE
WULI
SHIYAN**

主 编 唐焕芳
副主编 陶 冶 杨晓莉
卢孟春 喻 凌



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

04-33/299

2009

大学物理实验

主 编 唐焕芳

副主编 陶 冶 杨晓莉 卢孟春 喻 凌

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 唐焕芳主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.11
ISBN 978-7-5643-0475-1

I. ①大… II. ①唐… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 190961 号

大学物理实验

主编 唐焕芳

责任编辑	孟苏成
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	西南交通大学印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	11.25
字 数	281 千字
印 数	1—3 000 册
版 次	2009 年 11 月第 1 版
印 次	2009 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0475-1
定 价	19.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大学物理实验是高等院校理工科专业开设的全面系统的必修课程，课程独立设置，其任务是通过实验培养学生发现、分析和解决物理问题的能力，让学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。

本书根据大学物理实验教学的基本要求，以培养 21 世纪创新人才为目的，采取重视传授知识与提高能力素质、增强创新意识并重的方法，加强实验技能训练，培养学生的实际动手能力、对实验数据的处理及综合分析能力，培养学生的科学思维和创新意识。

本书的实验由易到难、循序渐进，在保证基础的前提下，开设一定的设计性实验和研究性实验，以拓展学生的创新意识。其中基础实验训练学生的基本技能，综合性实验训练学生对知识的综合应用能力，设计性实验和研究性实验训练学生的综合设计能力和创新意识。

参与编写本书的都是长时间致力于实验教学的、具有丰富实践教学经验的教师。实验 1~8、17~22、31~35 由唐焕芳编写，第 1 章绪论、实验 36~39 由陶冶编写，实验 9~12、23~27 由杨晓莉编写，实验 13~16、28 由喻凌编写，实验 29、30、40 由卢孟春编写，唐焕芳负责全书的统稿和修订工作。

本书系 2008 年教育部物理学与天文学教学指导委员会、高等学校物理基础课程教学指导分委员会课题《非物理理工科专业大学物理实验教学基本要求的实施和完善研究》的一部分，在编写过程中，得到了长江师范学院重点建设专业建设资金的资助。编写过程中，张可言教授和李泽涛副教授提出了许多指导性建议和意见，使我们深受启迪，同时还参考了许多兄弟院校的相关教材，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 大学物理实验的意义、任务、内容和要求	1
1.2 测量与误差	4
1.3 实验不确定度及测量结果的表示	9
1.4 有效数字及其运算	15
1.5 实验数据处理方法	18
1.6 实验的基本方法及实验设计的原则	25
第 2 章 基础性实验	36
实验 1 长度的测量	36
实验 2 密度的测量	42
实验 3 单摆	46
实验 4 气垫导轨的使用	49
实验 5 惯性秤	53
实验 6 金属比热容的测定	56
实验 7 液体比热容的测定	58
实验 8 水的汽化热的测定	63
实验 9 电子元件伏安特性的测量	64
实验 10 示波器的调节与使用	67
实验 11 电位差计的使用	73
实验 12 惠斯通电桥测电阻	75
实验 13 薄透镜焦距的测定	78
实验 14 分光计的调整与使用	80
实验 15 迈克尔逊干涉仪的调节与使用	89
实验 16 用菲涅耳双棱镜测定光波波长	95
第 3 章 综合性实验	98
实验 17 用拉伸法测定金属材料的杨氏弹性模量	98
实验 18 声速的测量	102
实验 19 弦线驻波的研究	106
实验 20 金属线胀系数的测定	108

实验 21	落球法测定液体的黏度系数	111
实验 22	液体表面张力系数的测定	114
实验 23	用开尔文电桥测低值电阻	122
实验 24	电表的改装与校准	124
实验 25	万用电表的原理与使用	129
实验 26	磁场的描绘	133
实验 27	利用霍尔元件测绘磁场	137
实验 28	等厚干涉现象的研究	144
实验 29	光栅特性的研究	149
实验 30	偏振现象的观察与分析	152
第 4 章	设计性实验	157
实验 31	微小长度的测量	158
实验 32	简谐振动的研究	158
实验 33	冰的溶解热的测定	159
实验 34	伏安法测电阻	159
实验 35	自组显微镜、望远镜	161
第 5 章	研究性实验	162
实验 36	多振子弹簧系统特性研究	162
实验 37	仪器设备的系统误差研究	163
实验 38	环境条件对热学实验中绝热要求的影响	163
实验 39	非接触衍射测微方法研究	164
实验 40	光的空间相干性研究	164
附 录	中华人民共和国法定计量单位及常用物理数据	165
A.	中华人民共和国法定计量单位	165
B.	常用物理数据	167
参考文献		174

第1章 绪论

大学物理实验是对高等理工科院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,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是理工科类各专业学生进行科学实验训练的重要基础。本课程按照循序渐进的原则,通过物理实验知识、方法和技能的训练,使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为以后的学习和工作奠定良好的实验基础。

1.1 大学物理实验的意义、任务、内容和要求

1.1.1 大学物理实验的目的和任务

大学物理实验是大学理工科专业学生的一门专业基础课,是各门实验课的基础。对培养学生在实验中观察、分析与发现问题的能力以及培养学生动手能力和创新精神等方面都起着重要的作用。本课程的主要目的和任务是:

第一,通过观察、测量及分析,加强对物理概念和理论的认识。

将理论课中学到的理论知识再现出来,以加深对物理学的理解;学习运用理论指导实验、分析和解决问题的方法,具备初步的分析、解决实际问题的能力。

第二,掌握大学物理实验的基本知识、方法和技能。

掌握实验的基本方法、基本技能以及数据处理方法。在实验过程中,要注重动手能力、动脑能力的培养,加强对设备的安装、调整、操作等技能的训练,最终达到根据实验要求自行设计实验的目的,具有较强的分析、解决实验中出现的各种问题的能力,并能很好地掌握数据处理的方法。

第三,培养严肃认真、实事求是的工作作风。

大学物理实验是建立完整物理学理论体系的基础,要求在实验过程中严肃认真、实事求是,养成良好的习惯。

1.1.2 大学物理实验的基本环节

为很好地完成大学物理实验,学生应注意大学物理实验的三个基本环节,并做好每个环节的工作。

1. 实验前的预习——实验的基础

课前预习是能否很好地完成实验任务的一个重要环节。在这个环节中,要求在实验课前认真阅读实验教材和相关资料,弄清楚实验原理和实验方法,弄清楚实验条件、实验关键环节以及注意事项,熟悉实验步骤,设计好数据记录表格。对于设计性、研究性实验还应设计

好实验方案。只有这样，才能保证实验的顺利进行。

2. 实验中的操作 —— 实践的过程

此环节是学生实验的具体操作环节。在进入实验室后，学生应遵守实验室规则，根据实验要求和实验仪器的规定布置好仪器设备，按照预习时拟出的实验步骤完成整个实验，并记录好实验的原始数据。

在实验中，应注意以下几个问题：

- (1) 细心观察实验过程中出现的各种实验现象以及出现的问题，并试着用理论进行解释。
- (2) 认真、如实地记录实验数据。
- (3) 仪器设备的操作应按照仪器设备的操作规程进行。一旦仪器设备出现故障，应在指导教师的指导下学习故障排除的方法。
- (4) 注意纠正不良的实验操作习惯。

3. 实验后的报告 —— 实验的总结

实验总结是实验的最后一个环节。在这个环节中，要对实验数据进行整理和处理，应注意以下几个方面：

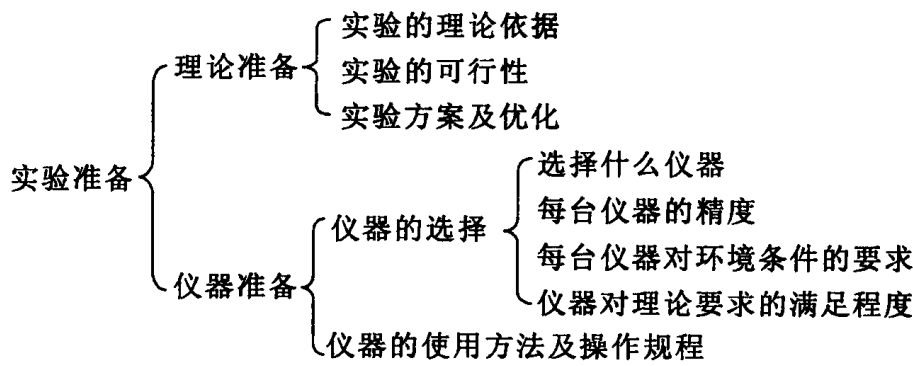
- (1) 保持实验数据的原始性。在数据处理过程中，可能结果不如人愿，但绝不能更改数据。此时应找出原因，有条件时应重新测量。
- (2) 数据处理应具有可信性。数据的处理应按照科学的数据处理原则进行，处理过程应条理清楚，经得起推敲。
- (3) 实验曲线的绘制应严格按照绘制规则进行。实验曲线的绘制可采用手工绘制和计算机软件绘制，但不论哪一种方法，都应严格地遵守曲线绘制规则，特别是手工绘制时，应尽可能地减小人为因素。
- (4) 要求完成实验报告。实验报告是实验的总结，要求简洁、明了、工整、有见解。在报告中应特别注意对实验结果的分析。

1.1.3 大学物理实验的基本要求

大学物理实验的全过程分准备、观测与记录、数据的整理及分析、实验报告四个步骤。

1. 准 备

准备是指实验前所要做的工作。在做一个实验之前，应从理论和仪器两个方面进行准备。



根据上述两点写出预习报告，在理解各直接测量值和间接测量值之间关系的基础上，准备好实验中数据记录所需要的各种表格。

2. 观测与记录

实验时，按照实验原理及仪器的工作条件安装好仪器。在熟悉仪器的使用方法之后，按照事先拟好的实验步骤进行正式测量（最好在正式测量之前作尝试性测量，以确定整个实验装置是否能够正常工作及粗略检验测量的精确度），并将实验中所测得的数据填入记录表中。

对实验进行观测时，要注意实验中的各种现象，并尽可能地消除不正常的因素，确保实验的准确性。

3. 数据的整理及分析

实验完成之后，按照数据处理的原则处理实验数据，对实验结果作出可靠性分析。

4. 实验报告

实验报告是对整个实验过程的全面总结，是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会撰写实验报告是培养学生实验能力的一个方面。实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来，要求结果正确、图表规范、讨论认真、语言通顺、字体端正。实验报告要求在课后独立完成，用学校统一制印的“实验报告纸”来书写，实验报告的基本内容如下：

（1）实验目的，说明本实验的目的。

（2）实验仪器，列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

（3）实验原理，在理解的基础上，用简短的文字扼要阐述实验原理，切忌照抄。力求图文并茂，图是指原理图、电路图或光路图，写出实验所用的主要公式，说明各物理量的意义和单位，以及公式的适用条件等。

（4）实验步骤，重点写出“做什么，怎么做”。

（5）数据记录，数据记录应做到整洁清晰、有条理，尽量采用列表法，表格栏内要注明物理量的单位。要求实事求是地记录客观现象和实验的原始数据，数据不能随意涂改。确定测错而无用的数据，可在旁边注明“作废”字样，不要随意删去。

（6）数据处理，根据实验目的及数据处理的基本原则对实验结果进行计算或作图表示，并对实验结果进行评定。计算时应先写出主要的计算步骤，将公式化简，再代入数据运算。

（7）结论及不确定度分析，按照标准的形式写出实验结果，并对实验结果进行细致的分析和讨论，写出实验心得或建议等。

（8）思考，对实验中出现的说明和讨论，完成教师指定的作业题。

5. 遵守实验室规则

（1）按时上实验课，实验前应认真预习，预习报告交指导教师检查并签字。

（2）进入实验室，必须衣着整洁、保持安静，严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得随意动用与本次实验无关的仪器设备。

（3）遵守实验室规则，服从教师指导，按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现象，如实记录实验数据，不得抄袭他人的实验结果。

（4）注意安全，严格遵守操作规程。爱护仪器设备，节约用水、电和药品、元器件等。

凡违反操作规程或不听从教师指导而造成仪器设备损坏等事故者，必须写出书面检查，并按学校有关规定赔偿损失。

(5) 在实验过程中若仪器设备发生故障，应立即报告指导教师及时处理。

(6) 实验完毕，应主动协助指导教师整理好实验器材，切断水、电、气源，清扫实验场地，并将实验记录的数据交指导教师检查并签字后，方可以离开实验室。

(7) 按指导教师要求，及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格或请假缺课的学生，由指导教师登记，通知在规定时间内补做。

1.2 测量与误差

1.2.1 测量和单位

所谓测量，就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较，确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的单位，这个倍数称为待测量的数值。可见，一个物理量必须由数值和单位组成，两者缺一不可。

选作比较用的标准量必须是国际公认的、唯一的和稳定不变的。各种测量仪器，如米尺、秒表、天平等，都有符合一定标准的单位和与单位成倍数的标度。

国际上规定了七个物理量的单位为基本单位，即长度（米）、质量（千克）、时间（秒）、电流（安培）、热力学温标（开尔文）、物质的量（摩尔）和发光强度（坎德拉）的单位是基本单位，其他物理量的单位则是由基本单位按一定的计算关系导出的。因此，除基本单位之外的其余单位均为导出单位。

1.2.2 测量的分类

按照测量结果获得的方法来分，可将测量分为直接测量和间接测量；而从测量条件是否相同来分，又可将测量分为等精度测量和不等精度测量。

1. 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。如用米尺测量物体长度，用天平测量物体的质量，用秒表测量物体运动的时间，用电流表测量电流等。

间接测量是指借助于函数关系，由直接测量的结果计算出待测的物理量。例如，测量出单摆的周期和摆长，根据简谐振动的周期公式计算出的重力加速度就是间接测量；再如，通过测量物体的质量和体积，根据密度公式计算出的组成这个物体的物质的密度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了。如电能的测量本来是间接测量，现在也可以用电能表来进行直接测量。在物理实验中，大多数物理量是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

2. 等精度测量和不等精度测量

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。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叫做非等精度测量。非等精度测量的结果，其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。

3. 仪 器

仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具，如天平、游标卡尺、停表、惠斯通电桥、光栅摄谱仪等，是进行测量的必要工具。下面简单介绍仪器的精密性、准确度和量程等基本概念。

仪器的精密性是指与仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小的分度越小，所测量的物理量的有效数字的位数就越多，仪器的精密性就越高。对测量读数最小一位的取值，一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。如具有毫米分度的米尺，其精密性为 1 mm，应该估计读出到毫米的十分位；螺旋测微计的精密性为 0.01 mm，应该估计读出到毫米的千分位。

仪器的准确度是指仪器测量读数的可靠程度，它一般标在仪器上或写在说明书上。如电表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器，可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半（一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半，对非连续读数的仪器取最小的分度数值）。在制造仪器时，其最小的分度数值是受仪器的准确度约束的，对不同的仪器准确度是不一样的。如测量长度的常用仪器米尺、游标卡尺、螺旋测微计，它们的仪器准确度依次提高。

仪器的量程是指仪器所能测量的物理量的最大值和最小值之差，即仪器的测量范围（有时也将所能测量的最大值称为量程）。测量过程中，超过仪器量程使用仪器是不允许的，轻则仪器准确度降低，使用寿命缩短，重则损坏仪器。

实验仪器有许多性能指标。但在实验中要注意的最基本的是它的测量范围、准确度等级以及工作条件。

综上所述，在对实验仪器的选择时，对仪器的准确度等级的选择要恰当，一般是在满足测量要求的条件下，尽可能选用准确度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数，可以减少在反复使用时的损耗，延长其使用寿命。

1.2.3 误差及其分类

物理量在客观上存在确定的数值，称为真值。物理测量的目的就是为了得到被测物理量所具有的客观真实数据。然而，实际测量时，由于受实验条件、实验方法、仪器精度以及实验人员操作水平的限制，只能获得该物理量的近似值，这就使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异。为描述测量中这种客观存在的差异性，我们引进测量误差的概念。

误差就是测量值 x 与客观真值 x_0 之差，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.2.1)$$

被测物理量的真值是一个理想概念，一般来说真值是不知道的。为了对测量结果的误差

进行估算，我们用约定真值来代替真值求误差。所谓约定真值就是被认为是非常接近真值的值，一般情况下，多次测量结果的算术平均值、标称值、校准值、理论值、公认值、相对真值等均可作为约定真值来使用。

上面定义的误差称为绝对误差，它所反映的是测量值偏离真值的程度——测量的可靠程度。设测量值的约定真值为 a ，则测量值 x 的绝对误差为

$$\Delta x = x - a \quad (1.2.2)$$

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，需要用相对误差表示。例如，用同一仪器测量长 10 m 相差 1 mm 与测量长 100 m 相差 1 mm，其绝对误差相同。显然，只有绝对误差难以评价这两个测量结果的可靠程度，因此必须引入相对误差的概念。相对误差是绝对误差与真值之比，真值不能确定时，则用约定真值。在近似情况下，相对误差也往往表示为绝对误差与测量值之比。相对误差常用百分数表示，一般保留两位有效数字，即

$$\varepsilon = \frac{|\Delta x|}{a} \times 100\% \approx \frac{|\Delta x|}{x} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

误差处理应视其产生的条件，采用不同的处理方法。这首先需要了解各种不同类型误差的特点、产生的原因、服从的规律，从而有针对性地解决问题，将误差减小甚至消除。

根据误差的性质和产生的原因，可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向同一方向偏离，其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性，可采取一定的措施削减或消除它。系统误差的来源有以下几个方面：

(1) 仪器误差。是由于仪器自身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。如仪器安装不符合要求、环境条件未达到仪器的要求、仪器零点不准确等。

(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，或测量方法等带来的误差。

(3) 人身误差。是由于实验者本人心理或生理特点造成的误差。

除上述几种系统误差来源之外，还有其他的系统误差来源。如实验装置、环境等因素。

在任何一项实验工作和具体测量中，必须要想尽一切办法，最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差，或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和实验方法，反复进行对比。系统误差的消除或减小是一个比较复杂的问题，没有固定不变的方法，要具体问题具体分析，各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个，一般应找出影响测量的主要因素，有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法：

检定修正法：指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

替代法：指同一测量装置测定待测量后，在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。例如，消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

异号法：指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差，采取平均值后消除的一种方法。

例如，在外界磁场下，仪表读数会产生一个附加误差，若将仪表转动 180° 再进行一次测量，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差，将两次测量结果取平均，正负误差可以抵消，从而可以减小系统误差。

2. 随机误差（也称偶然误差）

在实际测量条件下，多次测量同一被测量时，误差的符号时正时负，误差的绝对值时大时小，以不可确定的方式变化着的误差叫做随机误差。当测量次数增多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从正态分布，如图 1.2.1 所示。

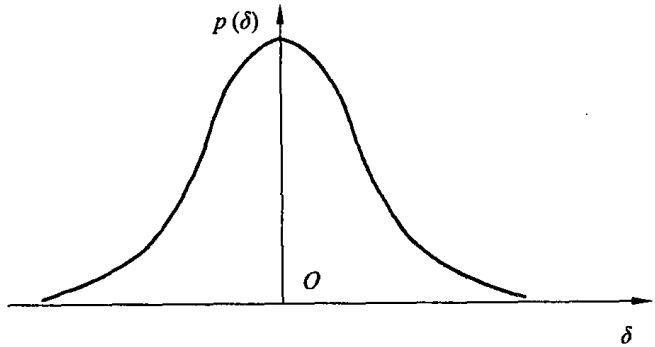


图 1.2.1 随机误差分布图

横坐标表示绝对误差，纵坐标表示某误差出现的概率

(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：绝对值相等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趋于零。

(4) 抵偿性：误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

因此，增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除。在实际测量中，常用多次测量的算术平均值代替真值来减小随机误差。

引起随机误差的原因很多，主要与人的感官的灵敏度、仪器精密度的限制、周围环境因素的干扰等因素有关。例如，仪器显示数值的估计读数位偏大或偏小；仪器调节平衡时，平衡点确定不准；空间电磁场的干扰、电源电压的波动引起测量的变化等。

3. 粗大误差

明显超出规定条件下预期值的误差称为粗大误差。这是在实验过程中，由于某种差错使得测量值明显偏离正常测量结果的误差。例如，实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据，或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等，是一种人为的过失误差，不属于测量误差。只要测量者采取严肃认真的态度，过失误差是可以避免的。在实验数据处理中，应按一定的规则来剔除异常数据，消除粗大误差。

实验中可能会出现错误的的数据，如果这种数据偏离较大，很容易看出，则可直接将其舍去，而有的错误数据不容易被发现，这就要求在实验过程中注意。实验条件对实验原理要求的满足程度，实验装置、电路的正确性，观测方法是否正确，仪器操作是否正确等，在保证这些要求都到达之后，还应按照数据处理原理对测量所得的数据进行检验，以剔除数据中的不合理数据，从而保证实验结果的正确性。

(1) 利用实验原理检验测量数据。在实验中对直接测量的数据可以按照经验进行初步判断数据的合理性和正确性。

【例 1.2.1】 测量单摆摆动 50 个周期的时间，得出 98.4 s、96.7 s、97.7 s。

从数据上可知，单摆的周期接近 2 s。但是，前面两个数据相差 1.7 s，后两个数据相差 1.0 s，都在半个周期以上，这不能由人的反应速度来加以解释，因此，这一组数据属于不合

理的数据。

【例 1.2.2】 用静力称衡法测一块玻璃的密度，所用公式为

$$\rho = \rho_{\text{水}} m_1 / (m_1 - m_2)$$

式中， m_1 为玻璃块质量，测量值为 5.78 g； m_2 为玻璃悬挂在水中的视重，测量值是 4.77 g。由于两个数据相差 1 g，使得计算所得结果约为 6 g/cm³，显然，玻璃的密度不可能有这么大。

(2) 格拉布斯判据。误差理论中提出了一些关于处理错误数据的判据，格拉布斯判据就是其中一种。

该判据的基本思想是：按此判据给出一个和数据个数 n 相联系的系数 G_n ，当已知数据个数为 n 时，如果算术平均值为 $\bar{x}$ ，测量列标准偏差为 s ，则可以保留的测量值 x_i 的范围

$$(\bar{x} - G_n \cdot s) \leq x_i \leq (\bar{x} + G_n \cdot s) \quad (1.2.4)$$

表 1.2.1 G_n 系数表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28	2.33
n	14	15	16	17	18	19	20	22	25	30	
G_n	2.37	2.41	2.44	2.48	2.50	2.53	2.56	2.60	2.66	2.74	

对于实验中直接测量得到的数据，可以先计算其算术平均值和标准偏差 s ，结合测量次数从 G_n 系数表中获取相应的 G_n 值，并代入式 (1.2.4) 中计算得到测量值的取值范围。如果测量的某一数据的值在该范围之外，则该数据为错误数据，应舍去，否则为正确数据予以保留。

此外，也可以用拟合式进行计算。

$n < 30$ 时

$$G_n = \frac{\ln(n - 2.56)}{2.31} + 1.305 \quad (1.2.5)$$

$n > 30$ 时

$$G_n = \frac{\ln(n - 3)}{2.30} + 1.36 - \frac{n}{550} \quad (1.2.6)$$

使用格拉布斯判据处理错误数据时，在剔除错误数据之后，应对剩下的数据重新进行计算和判别，直到所有数据都符合格拉布斯判据的要求为止。

【例 1.2.3】 测得一组长度值：(单位：cm)

98.28	98.26	98.24	98.29	98.21
98.30	98.97	98.25	98.23	98.25

计算可得

$$\bar{x} = 98.328 \text{ cm}, \quad s = 0.227 \text{ cm}, \quad n = 10, \quad G_n = 2.18$$

$$\bar{x} - G_n \cdot s = 97.833 \text{ cm}, \quad \bar{x} + G_n \cdot s = 98.823 \text{ cm}$$

数据 98.97 在此范围之外，所以应该舍去。在舍去这个数据之后，再重新进行计算。并且在重新计算时应再次作此判断。

综上所述，为了保证实验中测量值的正确性，对每一组直接测量所得到的数据都应进行判别，在剔除错误数据之后，重新进行计算，并再作此判别，直到所有数据合理为止。

1.3 实验不确定度及测量结果的表示

测量的最终目的不但是要获得待测量在测量条件下的近真值，而且还要对近真值的可靠性做出评定（即指出误差范围），这就要求我们必须掌握不确定度的有关概念。下面将结合测量结果的评定对不确定度的概念、分类、合成等问题进行讨论。

1993 年，国际标准化组织、国际电工委员会、国际计量局等 7 个国际组织联合发布了《测量不确定度表示指南》，我国也制定了符合《测量不确定度评定与表示指南》的国家技术规范（JJF1059—1999）。这些都是我们评定测量结果的不确定度的理论依据和计算规范。

1.3.1 不确定度的含义

在物理实验中，常常要对测量的结果做出综合的评定，故采用不确定度。不确定度是“误差可能数值的测量程度”，表征所得测量结果接近待测量的程度，也就是因测量误差的存在而对待测量不能肯定的程度，因而是测量质量的表征，用不确定度能够对测量数据做出比较合理的评定。

对一个物理实验的具体数据来说，不确定度是指测量值（近真值）附近的一个范围，测量值与真值之差（误差）可能落于其中。不确定度小，测量结果的可依赖程度高；不确定度大，测量结果的可依赖程度低。

在实验和测量工作中，不确定度一词近似于不确定、不明确、不可靠、有质疑，是作为估计而言的。因为误差是未知的，不可能用指出误差的方法去说明可依赖程度，而只能用误差的某种可能的数值去说明可依赖程度，所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量。用不确定度评定测量结果的误差，其中包含了各种来源不同的误差对测量结果的影响，而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律，这就更准确地表述了测量结果的可靠程度，因而有必要采用不确定度的概念。

对测量不确定度的评定，常以估计标准偏差去表示大小，这时称其为标准不确定度。

1.3.2 不确定度的评定

由于测量有误差，因而才要评定不确定度。误差的来源不同，它对测量的影响也不同。从测量值来看其影响表现可分为两类：一类是偶然效应引起的，使测量值在近真值附近分散开来。例如，用手控停表测量单摆摆动的周期，由于手的控制存在偶然性，每次测量值不会相同。另一类则是测量系统引起的，测量值恒定地向某一方向偏移，重复测量时，此偏移的方向和大小不变。例如，用伏安法测量电阻，如果采用内接法，那每次实验中电阻的测量值都会大于真值，这是由于测量的原理所致。这两类影响都给被测量引入不确定度，都要评定其标准不确定度，但是评定的方法不同。

1. 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然效应，被测量 X 的多次重复测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 将是分散的，从分散的测量值出发，用统计的方法评定标准不确定度，就是标准不确定度的 A 类评定。设 A 类标准不确定度为 $u_A(x)$ ，用统计方法求出平均值的标准偏差为 $s(\bar{x})$ ，A 类评定标准不确定度就取为平均值的标准偏差，即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.3.1)$$

2. 标准不确定度的 B 类评定

当误差的影响向某一方向有恒定的偏离，这时不能用统计的方法评定不确定度，这一类的评定就是 B 类评定。

B 类评定视具体情况而定，有的依据计量仪器说明书或检定书，有的依据仪器的准确度等级，有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 $\Delta_{\text{仪}}$ （或容许误差或示值误差），见表 1.3.1。此类误差一般可视为均匀分布，而 $\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准差，则 B 类评定标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1.3.2)$$

表 1.3.1 约定正确使用仪器时选取 $\Delta_{\text{仪}}$ 值

仪器名称	约定 $\Delta_{\text{仪}}$ 值
米尺（毫米刻度）	$\Delta_{\text{仪}} = 0.5 \text{ mm}$
游标卡尺（20、50 分度）	$\Delta_{\text{仪}} = \text{最小分度值（0.05 mm、0.02 mm）}$
螺旋测微计	$\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm 或 } 0.004 \text{ mm}$
分光计	$\Delta_{\text{仪}} = \text{最小分度值（1' 或 } 30''\text{）}$
各类数字式仪表	$\Delta_{\text{仪}} = \text{仪器最小读数}$
电位差计	$\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot v$ （ K 为准确度或级别， v 为示值）
电表	$\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot M$ （ K 为准确度或级别， M 为示值）
电桥	$\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot R$ （ K 为准确度或级别， R 为示值）
物理天平（0.1g）	$\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ g}$
计时器（1s、0.1s、0.01s）	$\Delta_{\text{仪}} = \text{仪器最小分度（1s、0.1s、0.01s）}$

严格地讲，利用上式求 B 类标准不确定度的变换系数与实际分布有关，但我们都按均匀分布近似处理。

粗略计算时，可取 $u_B(x) = \Delta_{\text{仪}}$ 作为标准不确定度的 B 类评定。在实验时，如果查不到该仪器的容许误差，可取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于分度值或某一估计值（1/2~1/5 倍最小分度值），但要注明。

3. 合成不确定度

对一个物理量测定之后，要计算测量值的不确定度。由于测量值不确定度的来源不止一个，所以要计算合成不确定度。合成不确定度 $u(x)$ 是由不确定度的两类评定（A 类和 B 类）

求“方和根”计算而来。为使问题简化，本书只讨论简单情况下（即 A 类和 B 类分量保持各自独立变化，互不相关）的合成不确定度。

A 类不确定度（统计不确定度）用 $u_A(x)$ 表示， B 类不确定度（非统计不确定度）用 $u_B(x)$ 表示，合成不确定度为

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (1.3.3)$$

1.3.3 不确定度的计算

1. 直接测量的不确定度

在对直接测量的不确定度的合成问题中，对 A 类不确定度主要讨论在多次等精度测量条件下，读数分散对应的不确定度，并且取平均值的标准偏差作为不确定度的 A 类评定；对 B 类不确定度，主要讨论仪器不准确对应的不确定度，并将测量结果写成标准形式。因此，实验结果的获得，应包括待测量近似真实值的确定， A 类、 B 类不确定度以及合成不确定度的计算。从实际测量来看，增加重复测量的次数对于减小平均值的标准偏差、提高测量的精密度很有利。但是当测量次数增大时，平均值的标准偏差的减小渐为缓慢，当次数大于 10 次时平均值的改变便不明显了，通常取测量次数为 5~10 次为宜。下面通过两个具体例子加以说明。

【例 1.3.1】采用感量为 0.1 g 的物理天平称量某一物体的质量，其读数为 25.58 g，求物体质量的测量结果。

解：因为是单次测量，所以单次测量的读数即为近似真实值： $m = 25.58 \text{ g}$ ，且 $u_A(m) = 0$ 。物理天平的“示值误差”通常取感量的一半，并且作为仪器误差，所以 $\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ g}$ ，

$$u_B(m) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ g}$$

合成不确定度为

$$u(m) = \sqrt{u_A^2(m) + u_B^2(m)} = u_B(m) = 0.03 \text{ g}$$

测量结果为

$$m = (25.58 \pm 0.03) \text{ g}$$

【例 1.3.2】用螺旋测微计测量小钢球的直径，5 次的测量值分别为

$$d/\text{mm}: \quad 10.922, 10.923, 10.922, 10.924, 10.922$$

螺旋测微计的最小分度数为 0.01 mm，试求直径的不确定度，并写出测量结果的标准式。

解：（1）求直径的算术平均值

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 d_i = \frac{1}{5} (10.922 + 10.923 + 10.922 + 10.924 + 10.922) = 10.9226 \text{ mm}$$

（2）计算 A 类不确定度

$$\begin{aligned} u_A(d) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{5(5-1)}} = \sqrt{\frac{(10.922 - 10.9226)^2 + (10.923 - 10.9226)^2 + \dots}{20}} \\ &= 0.0004 \text{ mm} \end{aligned}$$