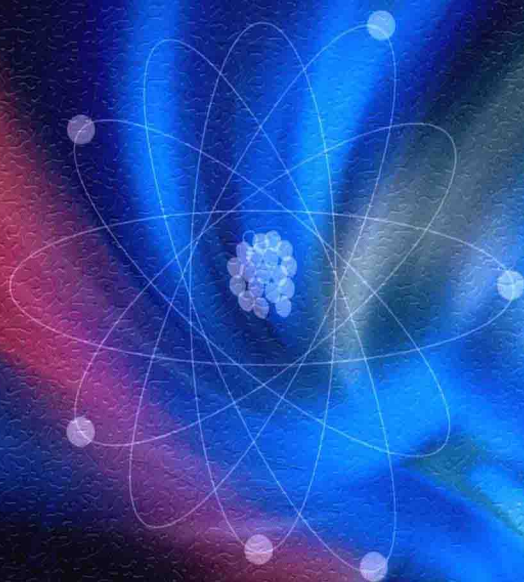


陶 冶 唐焕芳 杨晓莉 喻 凌 / 主编

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

(第二版)



清华大学出版社

大学物理实验

(第二版)

陶冶 唐焕芳 杨晓莉 喻凌 主编

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 / 陶冶等主编. —2 版. —成都:
西南交通大学出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5643-4240-1

I. ①大… II. ①陶… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 204025 号

大学物理实验
(第二版)

陶 冶 唐焕芳 杨晓莉 喻 凌 主编

责 任 编 辑 孟苏成
封 面 设 计 墨创文化

出 版 发 行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533

邮 政 编 码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川森林印务有限责任公司

成 品 尺 寸 185 mm × 260 mm

印 张 12.75

字 数 319 千

版 次 2015 年 8 月第 2 版

印 次 2015 年 8 月第 5 次

书 号 ISBN 978-7-5643-4240-1

定 价 28.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

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

再版前言

大学物理实验是高等院校理工科专业的必修课程，其任务是培养学生发现、分析和解决物理问题的能力，使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。

本书于 2009 年出版了第一版。在第一版的使用过程中，我们大量收集了任课老师和学生的反馈意见。根据大学物理实验教学的基本要求，结合任课教师和学生的反馈意见，为了进一步加强对学生实验技能训练，提升学生对实验数据的处理能力以及综合分析能力，培养学生的科学思维和创新意识，我们在第二版中做了几个方面的改变：首先，加强了数据处理方面内容，使误差理论与数据处理内容更加系统化和实用化；其次，将大学物理实验中的基本仪器的使用独立成章；第三，为了培养学生的综合能力，去掉了第一版各实验项目中给出的实验数据记录表格。通过这 3 个方面的修改，使本书内容更加丰富、实用性更强，也为授课教师留出了更大的空间。

本书由陶冶、唐焕芳、杨晓莉和喻凌编写。陶冶对内容进行了重新梳理和编排，并编写第 1 章、第 2 章、实验 29、实验 30、实验 36~实验 40；唐焕芳编写实验 1~实验 8、实验 17~实验 22、实验 31~实验 35；杨晓莉编写实验 9~实验 12、实验 23~实验 27；喻凌编写实验 13~实验 16、实验 28。

本书的编写，得到了重庆市特色专业物理学建设资金的资助。长江师范学院张可言教授和卢孟春副教授对改版提出了许多建设性的意见，使我们受益匪浅。同时，在改版过程中，参考了许多优秀教材，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 8 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 数据处理基础	4
1.1 测 量	4
1.2 误差的基本概念与精度	5
1.3 有效数字及其运算	7
1.4 误差的分类及处理方法	10
1.5 实验不确定度及测量结果的表示	25
1.6 实验数据处理方法	32
1.7 实验的基本方法及实验设计的原则	40
第 2 章 常用仪器原理及使用方法	52
2.1 长度测量仪器	52
2.2 物理天平	56
2.3 气垫导轨	57
2.4 惯性秤	59
2.5 示波器	60
2.6 UJ24 型高电势直流电位差计	65
2.7 分光计	66
2.8 迈克尔逊干涉仪	68
2.9 焦利氏秤简介	70
第 3 章 基础性实验	71
实验 1 长度测量	71
实验 2 密度的测量	72
实验 3 单 摆	74
实验 4 气垫导轨的使用	76
实验 5 惯性秤	79
实验 6 金属比热容的测定	80
实验 7 液体比热容的测定	83
实验 8 水的汽化热的测定	88
实验 9 制流电路与分压电路及元件伏安特性的测量	90
实验 10 示波器的调节与使用	95
实验 11 电位差计的使用	96
实验 12 惠斯通电桥测电阻	99

实验 13	薄透镜焦距的测定	101
实验 14	分光计的调整与使用	104
实验 15	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	111
实验 16	用菲涅耳双棱镜测定光波波长	117
第 4 章	综合性实验	120
实验 17	用拉伸法测定金属材料的杨氏弹性模量	120
实验 18	声速的测量	123
实验 19	弦线驻波的研究	127
实验 20	金属线胀系数的测定	129
实验 21	落球法测定液体的黏度系数	133
实验 22	液体表面张力系数的测定	136
实验 23	用开尔文电桥测低值电阻	142
实验 24	电表的改装与校准	145
实验 25	万用电表的原理与使用	150
实验 26	磁场的描绘	155
实验 27	利用霍尔元件测绘磁场	159
实验 28	等厚干涉现象的研究	167
实验 29	光栅特性研究	172
实验 30	偏振现象的观察与分析	175
第 5 章	设计性实验	181
实验 31	微小长度的测量	182
实验 32	简谐振动的研究	182
实验 33	冰的熔解热的测定	183
实验 34	伏安法测电阻	184
实验 35	自组显微镜、望远镜	185
第 6 章	研究性实验	186
实验 36	多振子弹簧系统特性研究	186
实验 37	仪器设备的系统误差研究	187
实验 38	环境条件对热学实验中绝热要求的影响	187
实验 39	非接触衍射测微方法研究	188
实验 40	光的空间相干性研究	188
附录	中华人民共和国法定计量单位及常用物理数据	189
参考文献		198

绪 论

物理学是一门实验科学，体现了大多数科学实验的共同特性，其包含的物理实验思想、方法和手段，是其他各学科科学实验的基础。物理学所展现出来的世界观和方法论，深刻影响着人类对自然界的基本认识，影响着人的思维方式和行为习惯，在对人的科学素质的培养中具有十分重要的作用。

大学物理实验是对高等理工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，是理工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。通过本课程的学习和实践，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. 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专业基础课，是专业实践的基础，是接受系统实验方法和实验技能训练的开端。在培养学生实验观察、分析和发现问题的能力，培养学生动手能力和创新能力等方面都起着重要的作用。本课程的主要任务是：

第一，使学生掌握物理实验的基本知识，掌握物理实验的基本实验技能。

第二，培养学生的科学实验基本素质，帮助学生初步掌握物理实验的科学思想和方法；培养学生的科学思维和创新意识。

第三，使学生掌握物理实验研究的基本方法，提升学生分析、解决问题的能力和创新能力。

第四，提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真、严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

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3个基本环节，并做好每个环节应做的工作。

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，要求在实验课前查阅相关资料，弄清楚实验原理、实验方法、实验条件、实验关键环节以及注意事项；熟悉实验方案，设计好数据记录表格。对于设计性、研究性实验，还应做好实验方案的设计。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安装、调试好仪器设备，按照拟定的实验方案完成整个实验，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) 实验仪器设备的使用条件及操作规范。
 - (2) 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。
 - (3) 认真、如实地记录实验数据。
 - (4) 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。
 - (5) 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：

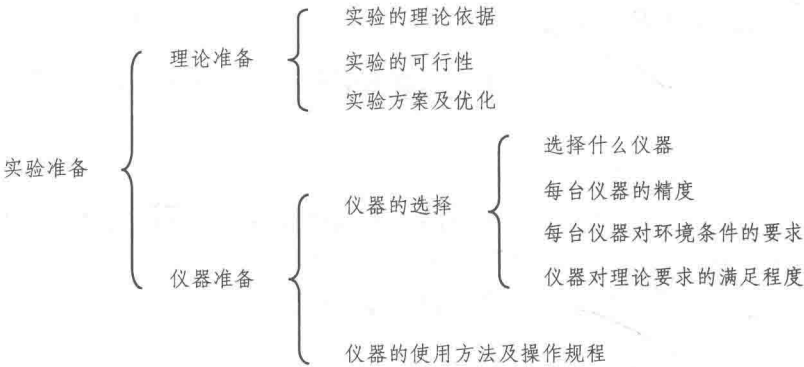
- (1) 保持实验数据的原始性。在数据处理过程中，可能结果不如人愿，但绝不能更改数据，而是要找出原因，有条件时应重新测量。
- (2) 数据处理应具有可信性。数据的处理应按照科学的数据处理原则进行，处理过程应条理清楚，经得起推敲。
- (3) 实验曲线的绘制应严格按照绘制规则进行。实验曲线的绘制可采用手工绘制和计算机软件绘制，但不论哪一种方法，都应严格地遵守曲线绘制规则，特别是手工绘制时，应尽可能地减小人为因素。
- (4) 按要求完成实验报告。实验报告是实验的总结，要求简洁、明了、工整、有见解。在报告中应特别注意对实验结果的分析。

3. 大学物理实验的基本要求

大学物理实验的全过程分为4个步骤：准备、观测与记录、数据的整理及分析、实验报告。

1) 准 备

准备是指实验前所要做的工作。在做一个实验之前，应从两个方面入手进行准备：



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的关系的基础上，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,按照事先拟定的实验方案,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。

在实验观测中,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,对实验结果做出可靠性分析及评价。

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地、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,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,不要任意删去。

(6) 数据处理:根据实验目的、数据处理的基本原则对实验数据进行处理、分析,以得到实验结果,并对其进行评定。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。

(8) 思考:对整个实验进行反思,总结得失。

5) 遵守实验室规则

(1) 实验前应认真预习,按时上实验课。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。

(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。

第 1 章 数据处理基础

1.1 测 量

1.1.1 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。由此可见，一个物理量必须由其数值和单位组成，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 7 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。

1.1.2 测量的分类

测量的分类方法较多，大多数情况下，可以按照测量结果获得的方法、测量条件来分类。

按照测量结果获得的方法，可将测量分为直接测量和间接测量；按照测量条件是否相同，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得出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，根据密度公式得到物体的物质密度就是间接测量。

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。比如，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，既使是对同一物理量的测量，其可靠程度也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。

1.1.3 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、惠斯登电桥、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度、准确度和量程等基本概念。

仪器的精密度是指与仪器的最小分度相当的物理量。仪器的最小分度越小，所测量的物理量的有效数字的位数就越多，仪器的精密度就越高。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，其精密度为 1 mm，应该估计读出到毫米的十分位；螺旋测微计的精密度为 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，如电表仪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 误差的基本概念与精度

1.2.1 误差的基本概念及分类

1. 误差的概念

1) 绝对误差

测量的目的，是获得被测量所具有的客观真实数据。这个物理量在客观上存在的真实数据称为真值。然而，在实际测量过程中，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, 物理量的真值是不可能获得的, 能得到的只是最接近该物理量真值的近似值, 这就使得测量值与客观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

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2-1)$$

根据真值的概念可知, 被测物理量的真值只是一个理想概念, 一般来说真值是不知道的。为了能够得到对测量结果误差的估算, 提出了约定真值的概念, 用以代替真值。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

$$\Delta x = x - a \quad (1-2-2)$$

2) 相对误差

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, 但绝对误差所占比例完全不同。因此, 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

$$\varepsilon = \frac{|\Delta x|}{a} \times 100\% \approx \frac{|\Delta x|}{x} \times 100\% \quad (1-2-3)$$

2. 误差的来源及分类

误差处理应视其产生的条件, 采用不同的处理方法。这就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, 其大小和符号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。它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。例如, 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。它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。它是由于实验者本人心理或生理特点造成的误差。

2) 随机误差 (也称偶然误差)

在实际测量条件中, 对同一被测量进行等精度测量时, 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。

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，这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。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。

对于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。

1.2.2 精 度

精度是仪器的准确度与精密度的总称，反映了测量结果与真值的逼近程度，它是与误差紧密相关的，一般与误差的大小相对应。根据实际情况，精度可以分为准确度、精密度和精确度 3 类，它们分别描述了不同误差对测量结果的影响。

准确度：反映系统误差对测量结果的影响程度。即测量结果偏离真值的情况。

精密度：反映随机误差对测量结果的影响程度。即测量结果的分散情况

精确度：综合反映了系统误差、随机误差对测量结果的影响程度。

准确度、精密度和精确度 3 种情况可以用图 1-2-1 描述。

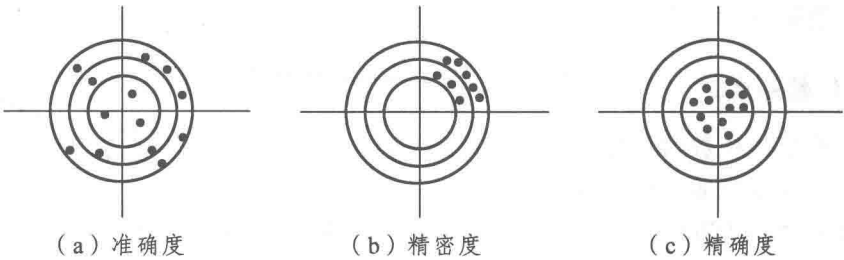


图 1-2-1 准确度、精密度和精确度

由此可见，对于具体的测量，精密度高，准确度不一定高；准确度高，精密度也不一定高；只有精确度高，才能说精密度和准确度都高。

1.3 有效数字及其运算

由于各种客观原因的影响，测量结果包含有误差，则在测量结果和数据的运算过程中，

确定用多少位数字表示测量或运算结果就十分重要。实际上,由于测量结果是一个近似值,精度有限,而这个精度又取决于测量仪器的精度,因此,记录测量结果的数据位数或者进行数据运算过程中取值位数都应以精度为依据,而不是以小数点后面数据位数的多少为标准。实验中总是要记录很多数据,并进行计算,但是记录时应取几位,运算过程中或者运算结果后应保留几位,这是实验数据处理的重要问题,为此我们引入了有效数字的概念。

1.3.1 有效数字与读数规则

1. 有效数字

由测量得到的准确读数,再加上第一位可疑读数,统称为测量结果的有效数字。由此可见,有效数字的最后一位数字是不确定的,有效数字的多少表示了测量所能达到的准确程度,这与所用的测量工具有关。即当被测物理量和测量仪器选定后,测量值的有效数字位数就已经确定了。比如,米尺测量的长度值 132.6 mm,螺旋测微计测量的长度值 5.685 mm,电子秒表测量的时间值 36.24 s,它们的最后一位就是可疑读数,也叫做欠准数。虽然有效位数的最后一位欠准可疑,但不是无中生有,而是有根据、有意义的,显然,有一位欠准数字,就使测量值更接近真实值,更能反映客观实际。因此,测量值应当保留到这一位是合理的,即使估计位是 0,也不能舍去。测量结果一般只能保留一位欠准数字,故测量数据的有效位数定义为几位可靠数字加上一位欠准数字,有效位数数字的个数叫做有效数字的位数。如 132.6 mm 称为 4 位有效位数。

2. 仪器的读数规则

测量就要从仪器上读数,读数包括仪器上指示的全部确定的数字和能够估计出来的数字。在测量中,有一些仪器读数是需估读的,如米尺、螺旋测微计、指针式电表等分度式仪表,读数要根据人眼的分辨能力读到最小分度的 1/10。但有的指针式仪表,它的分度较窄,而指针较宽(大于分度的 1/5),这时要读到最小分度的 1/10 有困难,可以读到分度的 1/5 甚至 1/2。

3. 有效位数的认定

(1) 有效数字的位数与小数点的位置无关。如 4.76 与 0.0476 都是 3 位有效数字,可见由大单位转换为小单位或小单位转换为大单位时,原数的有效位数不变。

(2) 以第一个不为零的数字为标准,它左边的 0 不是有效数字,而它右边的 0 是有效数字。如 0.0157 是 3 位有效数字,0.1570 是 4 位有效数字。可见,作为有效数字的“0”,不可省略不写。例如,不能将 0.1570 cm 写成 0.157 cm,因为它们的准确程度是不同的。

1.3.2 有效数字的运算规则

有效数字在进行运算时,参加运算的分量可能很多。各分量数值的大小和有效数字的位数也不相同,而且在运算过程中,有效数字的位数会越乘越多,除不尽时有效数字的位数也无止境。即便是使用计算器,也会遇到中间数的取位问题以及如何更简洁的问题。测量结果的有效位数,只能允许保留一位欠准确数字,直接测量是如此,间接测量的计算也是如此。

根据这一要求，为了达到：① 不因计算而引进误差，影响结果；② 尽量简洁，不作徒劳的运算，简化有效位数的运算，约定下列规则：

1. 加法或减法运算

$$\begin{aligned} 276.\underline{1} + 2.66\underline{8} &= 278.\underline{768} = 278.\underline{8} \\ 56.72 + 2.238 &= 54.482 = 54.48 \end{aligned}$$

大量计算表明，几个数相加减时，其运算后的末位，应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。即最后运算结果的可疑数字与各数值中最先出现的可疑数字对齐。可见，若干个直接测量值进行加法或减法计算时，选用精度相同的仪器最为合理。

2. 乘法和除法运算

$$\begin{aligned} 683.72 \times 21.6 &= 14\,768.\underline{352} = 1.48 \times 10^4 \\ 2\,569.4 \div 19.5 &= 131.\underline{7641} \cdots = 132 \end{aligned}$$

几个有效数字进行乘法或除法运算时，运算结果的有效数字的位数与参与运算的各个量中有效数字的位数最少者相同。可见，若干个直接测量值进行乘法或除法计算时，应按照有效位数相同的原则选择不同精度的仪器最为合理。

3. 乘方和开方运算

$$\begin{aligned} (4.256)^2 &= 18.113\,536 = 18.11 \\ \sqrt{32.8} &= 5.727\,13 = 5.73 \end{aligned}$$

乘方和开方运算的有效数字的位数与其底数的有效数字的位数相同。

4. 三角函数、对数运算

对于这类运算，可将函数的自变量末位数变化 1，两个运算结果产生差异的最高位就是应保留的有效位的最后一位。

例如，已知 $x = 43^\circ 25'$ ，求 $\sin x = ?$
由计算器运算（或查表）可知

$$\begin{aligned} \sin 43^\circ 26' &= 0.687\,510\,098\,5 \\ \sin 43^\circ 27' &= 0.687\,721\,305\,1 \end{aligned}$$

由此可知应取

$$\sin 43^\circ 26' = 0.687\,5$$

1.3.3 有效位数的修约

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，其修约的原则是“四舍

六入五看右左”。所谓“四舍”，就是在拟舍弃的数字中，若右边第一个数字小于5时，则舍去，即所拟保留的末位数字不变。“六入”，就是在拟舍弃的数字中，若右边第一个数字大于5时，则进一，即所拟保留的末位数字加一。“五看右左”，就是有效数字末位的后面一位为5时，要先看5的后面，若为非零的数则“入”，若为零则往左看，拟保留的末位数为奇数则“入”，为偶数则“舍”。中间运算过程较结果要多保留一位有效数字。下面举例加以说明，要求给出的每个数都保留4位有效数字。

$$\begin{array}{ll} 25.673 \underline{2} \rightarrow 25.67 & 345.67 \rightarrow 345.7 \\ 132.351 \rightarrow 132.4 & 645.85 \rightarrow 645.8 \\ 645.75 \rightarrow 645.8 \end{array}$$

这样处理可使“舍”和“入”的机会均等，避免在处理较多数据时因人多舍少而带来的误差。

值得指出的是，在修约最后结果的不确定度时，为确保结果的可信性，往往根据实际情况执行“宁大勿小”的原则，即对不确定度来说，采取“只入不舍”的原则。比如，对于 $u(x_1) = 0.032 \text{ mm}$ 和 $u(x_2) = 0.038 \text{ mm}$ ，都应收为 $u(x) = 0.04 \text{ mm}$ 。

1.3.4 数字的科学计数法

根据有效位数的规定，在十进制单位换算中，其测量数据的有效位数不变。如以米尺测量某一物体的长度为 2.35 cm ，若以米或毫米为单位，可以表示成 0.0235 m 或 23.5 mm ，这两个数仍然是3位有效数字。为了避免单位换算中位数很多时写一长串，或计数时出现错位，常常采用科学计数法。通常是在小数点前保留1位整数，写成 $a \times 10^n$ 的形式（其中 $1 \leq a < 10$ ）， n 称为该数的数量级。例如：

$$\begin{array}{l} 3.548 \text{ mm} = 3.548 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.548 \times 10^{-6} \text{ km} \\ 6721 \text{ km} = 6.721 \times 10^3 \text{ km} = 6.721 \times 10^6 \text{ m} = 6.721 \times 10^8 \text{ cm} \end{array}$$

实验中，最后结果要求采用科学计数法表示。

1.4 误差的分类及处理方法

误差是客观存在的，在实验中能做到的就是尽可能采取一切办法，将误差降到最低，使测量结果更加接近其客观真实值。为此，在获得测量数据之后，对所得数据根据实际情况进行处理，而这个处理除了进行测量结果的最后计算以外，更多的是通过数据处理，找到误差的来源，尽可能地减小或消除误差对测量结果的影响，以获得最好的测量结果。根据前面对误差的分类，不同的误差在测量中呈现出的规律、特点不同，因此，在实际的数据处理中，也应该根据不同的误差来源，采取不同的数据处理方法。

1.4.1 随机误差的处理

1. 随机误差的产生原因

随机误差是指在同一测量条件下，多次测量同一物理量时，误差绝对值和符号以不可预见的方式变化的误差。实际上就是，在对同一物理量进行测量时，可以得到一个测量列，每个测量值都包含误差，这些误差没有确定的规律，不能从前一个误差预测下一个误差的大小和方向，但就整体而言，却呈现出某种统计规律。

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等。主要有以下几方面：

(1) 测量装置方面的因素。主要涉及仪器的不稳定性，零部件配合得不好，零部件的变形、信号处理电路的随机噪声等。

(2) 环境方面的因素。主要涉及环境温度、湿度、气压的变化，光照强度、电磁场变化等。

(3) 人为方面的因素。主要涉及人在读数时瞄准、读数不稳定，人为操作不当等。

总之，随机误差是由于一系列微小的、不确定的随机因素造成的。

2. 随机误差的特点

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，见图 1-4-1），其特点是：

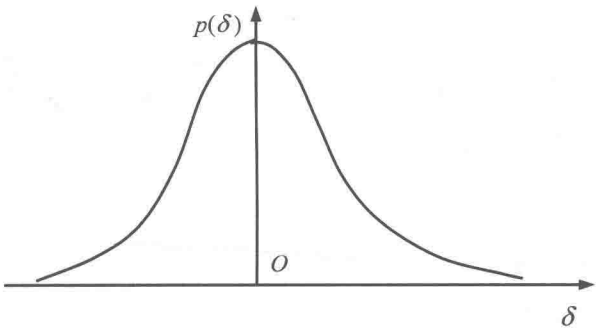


图 1-4-1 随机误差分布图

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。

3. 算术平均值

对某量进行一系列等精度测量时，由于存在随机误差，因此，获得的测量值不完全相同，