

全国高等医药院校药学类实验教材

基础物理学实验

(第二版)

主 编 赵 喆

中国医药科技出版社



全国高等医药院校药类实验教材

基础物理学实验

(第二版)

主编 赵 喆

编者 (以姓氏笔画为序)

马 骄 王晓飞 亓 霞

支壮志 邓岩浩 孙宝良

李 辛 李玉娟 李百芳

苏婷婷 张红艳 赵 耀

中国医药科技出版社

内 容 提 要

《基础物理学实验》采用双语体系编写,将教学实践与教学改革相结合,遵循由浅入深、循序渐进的教学原则,在内容上,精简了原有的基础性实验,增设了提高性、综合性与设计性实验,引进了计算机仿真实验,使之蕴含与医药学科相关的新技术与当代科学技术相关的新成果。本教材适合高等医药院校本专科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理学实验/赵喆主编. —北京:中国医药科技出版社, 2014. 9

全国高等医药院校药学类实验教材

ISBN 978 - 7 - 5067 - 7000 - 2

I. ①基… II. ①赵… III. ①物理学 - 实验 - 医学院校 - 教材 IV. ①O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 202530 号

美术编辑 陈君杞

版式设计 郭小平

出版 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲 22 号

邮编 100082

电话 发行: 010 - 62227427 邮购: 010 - 62236938

网址 [www. cmstp. com](http://www.cmstp.com)

规格 787 × 1092mm¹/₁₆

印张 21³/₄

字数 450 千字

初版 2006 年 3 月第 1 版

版次 2014 年 9 月第 1 版

印次 2014 年 9 月第 1 次印刷

印刷 航远印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 978 - 7 - 5067 - 7000 - 2

定价 45.00 元

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

全国高等医药院校药学类规划教材常务编委会

名誉主任委员	邵明立 林蕙青
主任委员	吴晓明 (中国药科大学)
副主任委员	(按姓氏笔画排序)
	匡海学 (黑龙江中医药大学)
	朱依淳 (复旦大学药学院)
	朱家勇 (广东药学院)
	刘俊义 (北京大学药学院)
	毕开顺 (沈阳药科大学)
	吴少楨 (中国医药科技出版社)
	吴春福 (沈阳药科大学)
	张志荣 (四川大学华西药学院)
	姚文兵 (中国药科大学)
	高思华 (北京中医药大学)
	彭 成 (成都中医药大学)
委 员	(按姓氏笔画排序)
	王应泉 (中国医药科技出版社)
	田景振 (山东中医药大学)
	朱卫丰 (江西中医药大学)
	李 高 (华中科技大学同济药学院)
	李元建 (中南大学药学院)
	李青山 (山西医科大学药学院)
	杨 波 (浙江大学药学院)
	杨世民 (西安交通大学药学院)
	陈思东 (广东药学院)
	侯爱君 (复旦大学药学院)
	官 平 (沈阳药科大学)
	娄红祥 (山东大学)
	祝晨蓀 (广州中医药大学)
	柴逸峰 (第二军医大学药学院)
	黄 园 (四川大学华西药学院)
秘 书	夏焕章 (沈阳药科大学)
	徐晓媛 (中国药科大学)
	沈志滨 (广东药学院)
	浩云涛 (中国医药科技出版社)
	赵燕宜 (中国医药科技出版社)

第二版前言

物理学是一门重要的基础学科，是整个自然科学的基础。物理实验是物理课程的重要组成部分，是学生步入高校接触的第一门实践性基础课程。实验教学是高等药学院校最基本的教学形式之一，在培养学生科学的思维与方法、创新的意识与能力，全面推进素质教育等诸多方面具有不可替代的重要作用。

物理学是药学各专业的重要基础课，药学研究和生产中处处融有物理学的基本理论、基本方法和研究思路，物理量的变化对药物的性质和药物的运动规律有较大影响。随着现代科学与实验技术的迅速发展，对高等医药类院校的物理实验课教学提出了更高的要求，大量先进的物理学实验进入教学课程体系成为必然趋势。因此，在新的形势下，为培养适应 21 世纪的高素质的药学专业人才，加大对实验项目、实验内容、实验手段、实验方法的改革力度势在必行。

本实验教材由工作在教学一线、具有丰富的理论与实验教学经验的教师编写。在编写过程中，力求做到将教学实践与教学改革相结合，将物理理论与医药专业相结合，将经典理论与现代技术相结合，将基本能力的训练与创新能力的培养相结合。遵循由浅入深、循序渐进的教学原则，在结构和内容上都进行了重大改革。在结构上，将实验课题进行了具有层次化的板块设置；在内容上，精简了原有的基础性实验，增设了提高性、综合性与设计性实验，引进了计算机仿真实验，使之蕴含与药学学科相关的新技术与当代科学技术相关的新成果。同时，为提高学生的科技英语水平，本教材采用了双语体系编写，为实验课程改革构建数字化、信息化的教学平台。

本教材可供高等医药院校本科生使用，也可供药学专业专科和函授学生选用。

参加本书编写人员：赵喆、孙宝良、李玉娟、李辛、支壮志、马骄、邓岩浩、张红艳、李百芳、亓霞、赵耀、苏婷婷、王晓飞。

插图绘制：赵喆、支壮志。

本教材在编写过程中得到了学校领导和本学院领导的大力支持，外语部战中亮老师为本书的翻译工作提供了许多帮助，编者在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏谬误之处，我们恳切地希望使用本书的教师和同学提出宝贵意见，以便今后加以修正与完善。

编者
2014 年 8 月

第一章 绪论	(1)
第一节 物理实验课程的基本要求和程序	(1)
Chapter One Exordium	(2)
Section 1 Basic Requirements and Procedures in Physics Experiment	(2)
第二节 误差、有效数字和数据处理	(4)
Section 2 Error, Significant Digits and Data Processing	(21)
第二章 基础性实验	(43)
实验一 基本长度测量	(43)
Chapter Two Basic Experiment	(49)
Experiment 1 Measurement of Length	(49)
实验二 物体密度的测定	(56)
Experiment 2 Determination of Density	(59)
实验三 液体变温黏滞系数的测定	(64)
Experiment 3 Determination of the Coefficient of Viscosity for Liquid of Varied Temperature	(69)
实验四 液体表面张力系数的测量	(74)
Experiment 4 Determination of Surface Tension Coefficient of Liquid	(81)
实验五 万用电表的使用	(89)
Experiment 5 Manipulation of Multimeter	(95)
实验六 示波器的使用	(102)
Experiment 6 Usage of Oscilloscope	(108)
实验七 惠斯通电桥测电阻	(116)
Experiment 7 Measurement of Resistance with Wheatstone Bridge	(123)
实验八 RLC 交流电路	(127)
Experiment 8 RLC Alternating Current Circuit	(130)
实验九 用线式电位差计测电池的电动势	(133)
Experiment 9 Measurement of the Battery EMF with Wire Potentiometer	(137)
实验十 透镜曲率半径的测量	(140)
Experiment 10 Measurement of Radius of the Lens Curvature	(145)
实验十一 利用劈尖干涉测量厚度	(150)
Experiment 11 Determine Thickness by Interference of a Wedge - sharpened Film	(152)
第三章 提高性实验	(155)
实验十二 分光计的调节和使用	(155)
Chapter Three Improving Experiment	(163)
Experiment 12 Adjustment and Use of Spectrometer	(163)
实验十三 用衍射光栅测定光波波长	(170)

Experiment 13	Determination of the Wavelength of Light Using a Diffraction Grating	(174)
实验十四	用阿贝折射计测定液体的折射率	(177)
Experiment 14	Determination of Liquid Index of Refraction by Abbe Refractometer	(181)
实验十五	利用旋光现象测定液体的旋光率和浓度	(185)
Experiment 15	Determine Specific Rotation and Concentration of Liquid Utilizing Optical Phenomena	(191)
实验十六	电表的改装和校准	(196)
Experiment 16	Refitting and Calibration of Electric Meter	(200)
实验十七	静态法测量软磁材料的磁滞回线	(205)
Experiment 17	Measure Hysteresis Loop of Soft Magnetic Materials with Static Method	(208)
实验十八	激光全息照相	(212)
Experiment 18	Laser Hologram Photography	(217)
实验十九	核磁共振	(223)
Experiment 19	Nuclear Magnetic Resonance	(227)
第四章	综合性与设计性实验	(233)
实验二十	血液流变学参数测定	(233)
Chapter Four	Comprehensive and Designing Experiment	(237)
Experiment 20	Determination of Hemorheology Parameter	(237)
实验二十一	利用压力传感器测定人体血压	(243)
Experiment 21	Human Body Blood Pressure Measurement Using a Pressure Sensor	(248)
实验二十二	用箱式电位差计测量温差电动势	(254)
Experiment 22	Measurement of Thermal Electromotive Force with the Box - type Potentiometer	(259)
实验二十三	人耳听觉听阈的测量	(264)
Experiment 23	Determination of the Human Ear Auditory Threshold Curve	(268)
实验二十四	热敏电阻温度计的制作	(272)
Experiment 24	The Fabricate of Thermistor Thermometer	(274)
第五章	计算机仿真实验	(278)
实验二十五	虚拟仪器基础	(278)
Chapter Five	The Computer Simulation Experiment	(289)
Experiment 25	The Basic of Virtual Instrument	(289)
实验二十六	测试二极管并确定其极性	(303)
Experiment 26	Testing Diodes and Determining Their Polarities	(306)
实验二十七	电路仿真实验	(309)
Experiment 27	Simulating Circuits	(316)
实验二十八	使用 myDAQ 捕获声音信号	(323)
Experiment 28	Capturing Sound with myDAQ	(328)
附表		(334)
参考文献		(340)

第一章 绪 论

第一节 物理实验课程的基本要求和程序

物理实验是一门独立设置的实践性极强的课程。物理学概念的建立、原理和定律的发现都是以严格的物理实验为基础，并通过实验加以证明。做好物理实验对学生深入理解物理学基本原理、掌握物理学的实际应用、探寻物质运动规律、培养学生的实验动手能力具有重要意义。

在现代药学中，物理学的理论和实验方法得到了广泛的应用。物理实验是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能的开端，通过物理实验的基本训练，必将为同学们今后的学习和工作奠定良好的基础。

一、教学要求

开设物理实验这门课程的主要目的是培养学生具有良好的实验素养、基本实验技能、理论联系实际和独立工作能力。本课程的基本教学要求如下：

(1) 使学生在物理实验基础知识、基本方法和实验技能诸方面受到系统且严格的训练。

(2) 学习如何根据实验要求确定合理的实验方案，正确选择和使用基本仪器，掌握各种测量技术和实验方法，对实验数据进行处理（包括有效数字计算、误差分析及作图等），判断和分析实验结果等等。

(3) 学习物理实验方法，探求物理规律，观察和分析物理现象，通过实验加深对一些重要的物理规律的认识和理解，并用所学过的理论及实验知识指导实验、分析实验中存在的问题。

(4) 通过实验培养学生严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风。

二、教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动，因此在实验过程中应当发挥学生的主观能动性，有意识地培养学生独立工作的能力和严谨的工作作风。每个实验都有三个教学环节：预习实验、进行实验和撰写实验报告。

1. 预习实验

课前应仔细阅读实验教材，了解实验的原理和方法，并基本了解测量仪器的使用方法，特别是每个实验后所附的仪器介绍部分（最好到实验室看一下实验设备），在此基础上写出实验预习报告。要明确哪些物理量是直接测量量，哪些是间接测量量，用什么方法和测量仪器来测定等等。正确写出实验步骤及画出实验电路图（如电磁学实验）及数据记录表格。

2. 进行实验

实验时应遵守实验室规章制度,仔细阅读有关的仪器使用说明书和仪器的使用注意事项,在教师的指导下正确使用仪器。对电磁学实验,必须由教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。实验进行时,应合理操作,认真思考,仔细观察,把实验数据细心地记录在预习报告的表格内。记录时用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔。如需要删去已记入的数据,可用笔划掉,同时注明原因。此外,还要记下所用仪器的型号、编号、规格,便于以后核对数据时查用。

注:在实验过程中,需特别注意安全。一旦发现异常现象,应立即切断电源、火源、气源,并报告实验指导教师,有必要请拨打“119”火警电话。

3. 撰写实验报告

先对数据进行整理计算,然后用简洁的文字撰写实验报告。报告应字迹清晰,文理通顺,图表正确。实验中的原理图、电路图应用尺规画出,对实验结果的图解表示必须仔细认真,力求准确,并利用尺规或曲线板画在坐标纸上。作图一律用铅笔。

实验报告的内容一般应包括:

- (1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验仪器(型号、编号、规格)及装置。
- (4) 实验原理和方法。要用自己的语言简要地叙述,不要盲目抄书。
- (5) 实验步骤,数据记录(将预习报告所记录的数据仔细地转记于实验报告上)及计算(包括误差计算)。
- (6) 实验结果及讨论(如实验中观察到的现象的分析、改进实验的建议、实验后的体会、实验中存在的问题、回答思考题等等)。

通常,实验报告按上述要求撰写即可,对有特殊要求的实验报告,可参见各实验的具体说明。

Chapter One Exordium

Section 1 Basic Requirements and Procedures in Physics Experiment

Physics experiment is a practical course. The establishment of physics concept, the discoveries of the principle and the law are all based on physical experiments and in turn it serves the experiment. It is vital for students to do physics experiments so that they can understand the physics basic principle thoroughly, as well as to develop their abilities to utilize the physics.

In modern pharmacy, the physics theory and the experimental technique are widely used. Physical experiment is the first step for college students to accept the systematic experimental techniques and the skills. Through the basic training of physics experiment, it will lay a good

foundation for students' study in the future.

Teaching requirements

The main purpose of physics experiment is to develop a good habit for the students in experiments, the basic experimental skills and the ability to apply theory to reality. The requests are as follows:

(1) To give the students a strict training in elementary knowledge, methods and skills.

(2) To learn how to determine a correct experiment plan, choose the basic instruments, grasp different kinds of survey technology and the experimental techniques, process experiment data (including significant digits computation, error analysis and mapping, etc), judge and analyze the experiment results and so on.

(3) To master physics experiments' techniques, observe and analyze physical phenomenon with physics experimental technique, deepen the understanding on the law of important physics, and use the experimental knowledge to instruct and analyze the problems in the experiments.

(4) To develop the students' scientific attitude towards work.

Teaching process

The physical experiment is a practical activity for the students under the teachers' instruction. Thus the teacher should encourage the students' subjective initiative in the experimental process, and consciously develop their abilities to work independently. Each experiment has three steps: preparation, experimenting and experiment report.

1. Preparation

Students should read the experimental teaching materials carefully, and understand the principle of experiment and the basic measuring method of equipment, especially the introduction attached to the instruments (you'd better have a look in the laboratory), as well as the experiment report based on the preparation. You must be clear about which physical quantities are directly measured and which are indirectly measured, and know which one is the best method and equipment and so on. Write down the procedure correctly and draw the experimental circuit diagram (for example electromagnetics experiment) and the data form.

2. Experimenting

You should observe the laboratory rules and regulations while experimenting. Read the instruction carefully and use the equipments under the teachers' instruction. As for the electromagnetics experiment, you can do the experiment after the teacher's check on the circuit connection. When doing the experiment, you should operate correctly, observe carefully and record data in details. When recording, you should use pens or ball pens, do not use pencils. If you want to get rid of the recorded data, you can scratch it with pens and write down the reason. In addition, you must take down the type, serial number, specification of the equipment so that you can check the data later.

Note: In the process of experiment, please keep safety always in your mind. If there is

anything abnormal, cut off the electric power, fire and gas supply, and then report to the experiment instructors. Please dial "119" if it is emergent.

3. Experiment report

Your experiment report should contain correct graphs which are clear and logical. The experimental schematic diagram and the circuit diagram should be drawn with the ruler and compasses, and the graphic solution to the experiment must be drawn carefully with ruler, compasses or French curve on the coordinate paper. Pencils are needed in all the mappings.

Generally, the experiment report should include:

- (1) The experiment title, name and date.
- (2) Experiment objectives.
- (3) Equipments (type, serial number, specification).
- (4) Experimental principle. To narrate briefly in your own words, *do not copy the book*.
- (5) Procedure, data (which has been recorded on the preparation should be rewritten on experiment report carefully) and the computation (including error).
- (6) Experiment results and the discussion (for example the analysis of the phenomenon observed, some suggestions about the improvement of the experiment, the problems in the experiment and the thought on the experiment, etc).

Usually, the experiment report should be written according to the above requests, if there are any other special requirements, your report should base on the request.

第二节 误差、有效数字和数据处理

一、测量与误差

(一) 物理量的测量

测量是人类认识世界和改造世界的基本手段,通过测量,人们对客观事物可以获得定量的概念,总结出它们的规律性,从而建立起相应的物理定律和物理定理。

测量是将待测的物理量与选定的同类单位量进行比较的过程。测量分为直接测量和间接测量。直接测量是用仪器直接将待测量与选定的同类单位量进行比较,即直接在仪器上读出待测量的数值。例如,用秒表测量时间,用米尺测量长度等等。间接测量是由几个直接测量出的物理量通过已知的公式或定律进行计算,间接求出待测量。

例如,直接测量出圆柱体的直径 D 、高度 H 和质量 m , 由公式 $\rho = \frac{m}{\frac{1}{4}\pi D^2 H}$, 即可求出

圆柱体的密度,大多数物理量都是通过间接测量得到的。

(二) 误差的定义及分类

由于测量仪器、实验条件及观察者感官等种种因素的限制,测量值与客观存在的真值之间总有一定的差异,这就是我们所说的测量误差。误差存在于一切测量之中,

贯穿测量过程的始终。测量误差的大小反映出我们的测量与客观真值的接近程度，讨论误差的来源，消除或减小测量的误差是提高测量的准确程度，使测量结果更为可信的关键。

根据误差产生的原因及对实验的影响性质，可将其分为系统误差和偶然误差。

1. 系统误差

系统误差的主要来源为仪器本身制造上的不完善，仪器未经很好地校准，测量的外部条件与仪器要求的环境条件不符，测量方法和技术的完善，以及测量者的不正确的习惯等。系统误差通常在每次测量中都有一定大小，一定符号或按一定规律变化，可以通过校正仪器，改进测量方法、修正公式和定律等手段加以消除或减小。

2. 偶然误差

(1) 偶然误差的定义：这种误差是由许多不稳定的偶然因素引起的。即使在相同条件下，对同一量进行多次重复测量时（甚至在极力消除或改正一切明显的系统误差之后），每次测量结果仍然不同，呈现出无规则的随机变化，由此产生的误差称为偶然误差（或随机误差）。

(2) 产生偶然误差的原因

① 由于观察技术及个人感官的限制，使观察者在调节仪器和估计读数时带来误差，使结果时大时小。

② 在实验过程中周围环境和状态难以控制的不规则的变化。

偶然误差是一种无规则的涨落，看不出它们的规律性，如图 0-1 (a) 所示。当测量的次数足够多时，偶然误差服从一定的统计规律，测量结果总是在真值附近涨落，由于这种误差的偶然性，因此它是不可消除的，但是增加测量的次数，可以减小测量的偶然误差。系统误差的存在使测量值按一定的大小及方向偏离真值，它不能用多次重复测量的办法来发现及克服它的影响。通常情况下，系统误差和偶然误差是同时存在的，如图 0-1 (b) 所示。系统误差小则测量的准确度高，偶然误差小表明测量的可重复性好，或说成是精密度高。精确度高是指偶然误差和系统误差都小。

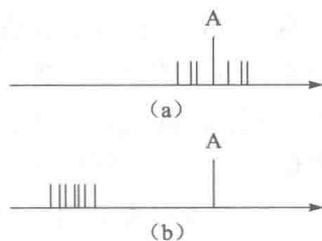


图 0-1

如上所述，误差与错误是两个完全不同的概念，错误是实验者仪器使用不正确，

或实验方法不合理，或违反操作规程或粗心大意读错数据等，学生应加强责任感，避免错误的发生，设法减小误差。

(3) 偶然误差的统计分布规律：大量的实验发现，重复测量次数趋近无穷多时，测量误差 δ 趋近正态分布（图 0-2）， $f(\delta)$ 表示误差 δ 出现的几率。该分布具有如下特点：正负误差出现的几率相等，绝对值较小的误差出现的次数较多，很大的误差通常不出现，随机误差的算术平均值趋于零；若无系统误差，测量的平均值趋于真值。当测量次数较少时将偏离正态分

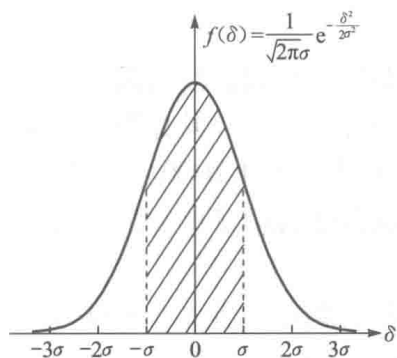


图 0-2 偶然误差的正态分布

布, 增加测量次数, 可以减少测量误差。

二、有效数字

(一) 仪器的精密度

仪器的精密度(又称精度)是指在正确使用测量仪器时, 所能测得的最小的准确值, 它一般由仪器的分度(仪器所标示的最小分划单位)决定。例如, 用 mm 分度尺测量物体的长度, 其精密度就是 1mm。

(二) 有效数字

1. 有效数字

由于仪器的精密度的限制, 测得的任何一个物理量的数值的位数只能是有限的。

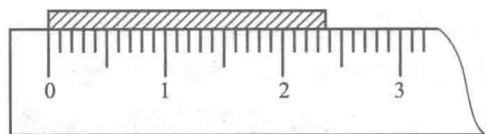


图 0-3

正确而有效地表示测量和计算结果的数字, 称为有效数字。它是由全部准确数字和一位欠准确数字构成的。如图 0-3 所示, 用最小分度是毫米的米尺测量木块的长度, 使木块的一端与

米尺的零刻度线对齐, 在另一端从米尺上读取木块长度的数据, 由图中可以看到 A 比 23mm 长约半个刻度, 则测量结果可以记为 23.6mm。在这三位数字中, 前两位数 23 是从尺上最小分度以上准确读得的, 因此是可靠的, 称之为“准确数字”; 而从尺子的最小刻度中估读出的 0.6mm, 其 6 这一位是从毫米刻度以下估计得来的, 若换另一人来读数, 也可能估计成 5 或 7, 故 6 这一位是欠准确数字, 称这样的数字为“可疑数字”。显然, 可疑数字是包含有误差的数字, 但它还是在一定程度上反映了被测量实际大小的信息, 因此也是有效的, 一般来说, 可疑数字只取一位。在测量中, 全部可靠数字和估读的一位可疑数字一起构成有效数字。

2. 用有效数字表示测量值时应注意的问题

(1) 测量值有效数字的位数不能随便增减, 有效数字的位数与测量的相对误差有关, 有效数字的位数愈多, 测量值的相对误差愈小。

(2) 测量值中的非零数字都是有效数字 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), “0” 不总是有效数字。例如, 测得一物体的长度为 0.0050800m, 它的有效数字位数为五位。“5” 前面的 3 个 “0” 只表示小数点的位置, 不是有效数字, 其它三个 “0” 是有效数字。最后的 “0” 表示测量的估计值, 因此是有效数字, 其它的两个 “0” 均处于有效数字之间, 故均是有效数字。

(3) 有效数字的位数与单位的换算无关。为了突出有效数字位数, 我们采用科学记数法表示有效数字。这一方法规定了小数点前一律取一位非零数字, 其他照写, 所引起的不同数位由 10 的幂次来补充。例如, 0.0010300kg 可表示为 $1.0300 \times 10^{-3} \text{kg}$; 125.20ms 可表示为 $1.2520 \times 10^2 \text{ms}$, 或 $1.2520 \times 10^{-1} \text{s}$ 。这些例子说明了单位的改变不影响有效数字的位数。

(4) 有效数字的进位法。有效数字通常采用四舍五入法, 例如: 将 1.625 取为三位有效数字, 应写作 1.63; 取两位有效数字, 应记为 1.6。还有另一种经常采用的“四舍六入五凑偶”方法, 即尾数小于五则舍, 大于五则入, 等于五则将其尾数凑成偶

数。例如：将 1.625 取为三位有效数字，可记为 1.62；将 1.615 取为三位有效数字，仍记为 1.62；将 1.626 取为三位有效数字，则记为 1.63。本教材采用的是四舍五入法。

(5) 常数（如 π 、 $\sqrt{2}$ 、 e 、 $\frac{1}{4}$ ……）的有效数字位数是无限的，可根据具体问题适当选取，一般情况下，至少比测量值多保留一位。

（三）有效数字的运算规则

1. 加减法运算规则

在有效数字的加减法运算中，计算结果的有效数字的最后一位与各分量中可疑位的最高位置保持一致。

例 0-1 普通算术式

$$X = 71.3 - 0.753 + 6.26 + 271$$

有效数字计算：

$$X = 71.3 - 0.8 + 6.3 + 271 = 348$$

数字下面的“.”表示可疑位的最高位置。

2. 乘除法运算规则

在有效数字的乘除法运算过程中，计算结果的有效数字位数与各分量中有效数字位数最少的分量保持一致。

例 0-2

$$X = \frac{39.50 \times 4.08 \times 0.0013}{868.01} = \frac{39.5 \times 4.08 \times 0.0013}{868} = 2.4 \times 10^{-1}$$

可见，此式分量中有效数字位数最少的为 0.0013，为两位有效数字，故将其作为标准。

3. 乘方、开方等运算中有效数字的取法

在乘方、开方、三角函数等运算中，结果的有效数字位数与底数的有效数字位数保持一致。举例如下。

例 0-3

$$\begin{aligned}\sqrt{625} &= 2.50 \times 10 \\ 25^2 &= 6.3 \times 10^2\end{aligned}$$

例 0-4

$$\cos 32.7^\circ = 0.842$$

例 0-5

$$\lg 19.28 = 1.285$$

注意：在较复杂的多步计算过程中，各中间结果在运算过程中按四舍五入处理后应多保留一位。

另外，对物理公式中不是由实验测出的某些数值，例如，测量圆柱体的直径 D 和长度 H ，求其体积 V 的公式 $V = \frac{1}{4}\pi D^2 H$ 中的 $\frac{1}{4}$ 不是测量值，则在确定 V 的有效数字位

数时不必考虑 $\frac{1}{4}$ 的有效数字位数。

由有效数字的运算规律可见,对不同准确度的数字进行计算时,其结果的有效数字位数应取得恰当。取少了,会带来附加的计算误差,降低结果的精度;取多了,从表面上看似乎精度很高,实际上毫无意义,反而给人以错误的印象和带来不必要的繁复。

在实验中正确运用有效数字,不仅能如实反映测量结果,而且可以简化运算,节省时间,即使用计算器,也应养成合理取有效数字的习惯。

三、直接测量值误差的估计

由于误差的存在,在直接测量中不可能准确地测量出待测量的真值,为使测量更加准确,往往需要进行反复多次的测量,然而各次测量的结果不同,我们该如何表示其测量结果呢?

(一) 单次直接测量的误差估计

有些实验,由于在动态中测量,不容许对被测量做重复测量;也有些实验的精密程度要求不高;或在间接测量中,其中某一物理量的误差对最后的结果影响较小。在这些情况下可以对被测量只测一次,对于单次测量的误差,一般是根据所用仪器、测量对象、实验方法和实验者的经验来估计误差。在一般情况下,对于偶然误差很小的测量值,可按仪器出厂说明书或仪器标牌上注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果查不到仪器误差,也可以取用仪器最小分度的一半作为单次测量的绝对误差。对于偶然误差较大的,应根据情况采用仪器最小刻度或甚至更大的合理数值。

例 0-6 用千分尺测某物体长度(一次)为 3.647mm(尾数 7 是估计值),而千分尺的最小刻度为 0.01mm,那么我们可取 0.005mm 作为一次测量结果的绝对误差。

例 0-7 用一米尺测一摆线长,如果米尺使用得正确,则读数误差是测量误差的主要成分,摆的上下两端读数误差各取 0.5mm,则长度测量误差可取为 1mm。

例 0-8 用秒表测量一物体运动的时间间隔,如果秒表的系统误差不必考虑,则测量的误差主要是由启动和制动秒表时,手的动作和目测协调的情况决定的。一般可估计启动、制动时各有 0.1s 误差,总的误差为 0.2s。

例 0-9 用天平称量物体质量时,空载时天平指针的停点和加砝码后天平指针的停点一般是不一致的,其差异将引起测量误差,当此二停点之差不超过一个分度时,可取测量误差为天平指针停点移动一分度时两侧的质量差额。天平指针停点移动一个分度,天平两侧质量差称为天平的感量(或称感度)。

(二) 多次直接测量的误差估计

为了减少偶然误差,在可能的情况下,总是采用多次测量,将多次测量的算术平均值作为测量的结果。如果对某物理量进行重复测量,每次的测量值分别为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$, 则其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0-1)$$

根据误差理论,多次测量值的算术平均值比各个测量值更可能接近真值。我们可将 $\bar{x}$ 看作该物理量的近似真值。

根据误差的定义式可知,误差不能确定,只能估计。估计偶然误差的方法有平均绝对误差、标准差及相对误差。

1. 平均绝对误差

我们把第 i 次测量值与平均值之差叫做偏差(或残差)

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (0-2)$$

n 次测量的偏差的绝对值的平均值叫做平均绝对偏差,或平均绝对误差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = \frac{1}{n} [|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \cdots + |x_n - \bar{x}|] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (0-3)$$

这样定义的误差不能说明平均值是大于还是小于真值。通常将真值表示为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

意思是,真值在 $\bar{x} + \Delta x$ 与 $\bar{x} - \Delta x$ 之间。此误差是真值与平均值相差的绝对量,它反映测量值偏离真值的范围,故常称为绝对误差,它的单位与测量值的单位相同。绝对误差可以表示测量的优劣,但并不全面,通常还需引进相对误差加以补充。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差与最佳值(算术平均值)的比,它是没有单位的。相对误差是用来比较不同测量对象可靠性程度的指标,常用百分数来表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (0-4)$$

故又称为百分误差。为了说明相对误差的物理意义,下面举例加以说明。例如现测得两个物体的长度为,

$$L_1 = (23.50 \pm 0.03) \text{ cm}, L_2 = (2.35 \pm 0.03) \text{ cm}$$

则其相对误差分别为

$$E_{r1} = \frac{0.03}{23.50} \times 100\% = 0.13\%$$

$$E_{r2} = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1.3\%$$

从绝对误差来看,两者相等,但从相对误差来看,后者比前者大 10 倍。显然,第一个测量比第二个测量更准确些。因此,实验的测量结果,应同时用绝对误差和相对误差表示。用相对误差表示的测量结果表示式为

$$x = \bar{x}(1 \pm E_r)$$

绝对误差和相对误差的关系为:

$$\Delta x = \bar{x} \cdot E_r$$

例 0-10 将某一物体的长度测量 5 次,得到的测量值分别为: $L_1 = 3.41 \text{ cm}$, $L_2 = 3.43 \text{ cm}$, $L_3 = 3.45 \text{ cm}$, $L_4 = 3.44 \text{ cm}$, $L_5 = 3.42 \text{ cm}$, 求最后的测量结果。

解：算术平均值为

$$\bar{L} = (3.41 + 3.43 + 3.45 + 3.44 + 3.42) = 3.43(\text{cm})$$

各次偏差的绝对值（即各次绝对误差）为：

$$\Delta L_1 = |3.41 - 3.43| = 0.02\text{cm}$$

$$\Delta L_2 = |3.43 - 3.43| = 0.00\text{cm}$$

$$\Delta L_3 = |3.45 - 3.43| = 0.02\text{cm}$$

$$\Delta L_4 = |3.44 - 3.43| = 0.01\text{cm}$$

$$\Delta L_5 = |3.42 - 3.43| = 0.01\text{cm}$$

平均绝对误差为

$$\Delta L = \frac{1}{5}(0.02 + 0.00 + 0.02 + 0.01 + 0.01) = 0.012 \approx 0.02(\text{cm})$$

相对误差为

$$E_r = \frac{\Delta L}{\bar{L}} \times 100\% = \frac{0.02}{3.43} \times 100\% = 0.0058 = 0.58\%$$

最后的测量结果表示为

$$L = (3.43 \pm 0.02)\text{cm}$$

或

$$L = 3.43(1 \pm 0.58\%)(\text{cm})$$

从上面几个例子可以看出：

(1) 绝对误差一般只取一位有效数字，且采取只进不舍进位法，即其后的数字不分大小（零除外）一律进位。例如： $\Delta M = 0.013$ 克应写成 $\Delta M = 0.02$ 克

相对误差一般只取两位有效数字，进位方式同上。例如： $E_r = 1.21\%$ 写成 1.3% ； 0.8% 写成 0.80% ； 10.4% 写成 11% 。

(2) 无论直接或间接测量的结果，其主值（单次测量值、平均值或计算结果）位数取舍的最后依据是：它的末位必须与绝对误差所在的位对齐，即测量值的最后一位应与绝对误差同数量级。测量值末位以后的数字，则采取四舍五入。例如：计算得到某物理量的测量值为 18.659 单位，而绝对误差是 0.04 单位，则最后结果写为 (18.66 ± 0.04) 单位。

(3) 当误差参加运算时，为了避免产生附加误差，在运算中应多保留一位有效数字。

3. 标准误差、标准偏差和平均值的标准偏差

(1) 标准误差：在图 0-2 中，式中的 σ 是一个与实验条件有关的常数，称之为正态分布的标准误差。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (0-5)$$

(2) 标准偏差：在实际测量中， n 不可能 $\rightarrow \infty$ ，对一测量列，只要满足 $n \geq 5$ （实验中一般取 $5 \leq n \leq 10$ ），则有一标准误差的代替者标准偏差（偏差 = 测量值 - 算术平均值）。有限次测量中某一次测量的结果的实验标准偏差为