

高等学校实验教材

物理实验

(基础部分)

温坤麟 主编



华南理工大学出版社

04-42
1118

高等学校实验教材

物理实验

(基础部分)

温坤麟 主编

67

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，总结和吸收了历年来教学经验编写而成。全书分三章，共 28 个实验。内容着重于基础实验，包括：实验误差和数据处理；力学、热学、电磁学、光学实验等基础实验；综合性与设计性实验。书后附有常用物理常数表。

本书为高等工业院校本科各专业的物理实验教材的基础部分，可独立作为工科大专物理实验教材或供函授大学、职工大学使用。

【粤】新登字 12 号

高等学校实验教材

物 理 实 验

(基础部分)

温坤麟 主编

责任编辑 江厚祥

*

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮码 510641)

各地新华店经销

江门日报印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 226 千

1994 年 2 月第 1 版 1996 年 12 月第 2 次印刷

印数 5 001—10 000

ISBN 7-5623-0642-7

O·67 定价：13.80 元

前 言

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,参照我们积多年的物理实验教学经验编写而成。针对对物理实验课程的要求和大学专科的特点,本书着重在基础实验,力求使学生通过实验,能掌握物理实验的基本原理、方法和技能,掌握一些常用仪器的调整和使用方法,掌握测量误差的基本知识和实验数据处理的基本方法,为他们今后专业学习和从事工程实验打下一定的基础。

本书第一章为测量误差与实验数据处理,介绍测量误差的概念和常用的测量误差估算方法,以使学生在做实验时能作出正确的测量记录、正确地估算和分析测量误差;介绍实验数据处理的基本方法,如列表法、图示法、逐差法、最小二乘法等。第二章为基础实验,适当选用有关力学、电磁学、光学的基础实验,作为学生进行物理实验的基本训练。基础实验的选择,是按照物理实验的基本原理的运用、常用测量仪器的正确调整和使用、常用的测量误差估算方法及实验数据处理的基本方法运用的原则进行的。第三章为综合性与设计性实验,选用了几个有代表性的实验,使学生能够得到综合性的训练。

考虑到本教材的适用性及各类大专学生的实际,本书在实验原理的叙述方面力求简明扼要,定性分析与定量推导相结合,使之能深入浅出,通俗易懂;在实验方法叙述方面力求明确并易于掌握,使学生能在阅读教材的基础上独立地完成实验仪器的正确调整和实验测量,以达到更好地培养学生的实验技能的目的。每个实验后面附有一定数量的思考题,目的是帮助学生正确地理解实验原理和实验方法,帮助学生开拓思维。

本教材适用教学时数为 40 学时左右,内容的编排大体上为:

误差知识、力学、热学实验	30%
电磁学实验	35%
光学实验	15%
综合性与设计性实验	20%

各个实验内容独立,各校或不同专业可根据自己的实际,选择其中若干个实验进行教学。

实验教学是集体性工作。本教材是我校实验物理教研组同志们长期教学实践的结晶。为适应大专学生的要求,本教材在《物理实验》(华南理工大学出版社 1990 年 12 月版)的基础上进行修订,由陈明光主笔,何三苏副教授审稿。编写过程中,还参阅了许多兄弟院校的教材或讲义,从中得到很多启迪和帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本教材由温坤麟主编。参加编写的有：温坤麟、陈明光、马景才、林万荣、区广连、王秋君、周国民、祝绍慈、梁海生。全书图表由周国民负责整理。

由于我们水平有限和经验不足，书中难免有缺点和错漏，如有不当之处，恳请读者批评指正。

编者

1993 年 11 月

目 录

结 论	(1)
第一章 实验误差与数据处理	(4)
§ 1-1 物理量的测量与基本单位	(4)
§ 1-2 测量误差与误差分类	(5)
§ 1-3 测量结果与有效数字	(7)
§ 1-4 测量结果的误差估算	(11)
§ 1-5 实验数据处理	(18)
* § 1-6 偶然误差的统计理论	(23)
§ 1-7 系统误差的处理	(27)
§ 1-8 电磁学实验的基础知识	(29)
第二章 基础实验	(35)
实验 1 密度的测量	(36)
实验 2 气垫导轨	(41)
实验 3 测定弦振动频率	(47)
实验 4 刚体转动惯量的测定	(51)
实验 5 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	(58)
实验 6 固体比热容的测定	(64)
实验 7 液体粘滞系数的测定	(70)
实验 8 温差电动势的测量	(78)
实验 9 电流场模拟静电场	(81)
实验 10 伏安法测电阻	(86)
实验 11 惠斯登电桥测电阻	(90)
实验 12 电位差计的使用	(97)
实验 13 灵敏电流计参数的测量	(101)
实验 14 电子束的电偏转和磁偏转	(107)
实验 15 示波器的使用	(115)
实验 16 交流电桥与电容、电感的测量	(121)
实验 17 电介质相对介电系数的测量	(127)
实验 18 霍尔效应法测磁场	(129)
实验 19 地磁场的测量	(134)
实验 20 薄透镜焦距的测定	(139)
实验 21 分光计的调整与使用	(143)
实验 22 光的等厚干涉及应用	(148)
第三章 综合性与设计性实验	(152)
实验 23 迈克耳逊干涉仪的调整、使用和测定激光波长	(153)
实验 24 超声波在介质中的传播速度的测量	(156)

实验 25	铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的测绘	(160)
实验 26	简谐振动的研究	(164)
实验 27	多用电表的设计与调试	(167)
实验 28	非线性元件的特性研究	(169)
附录	常用物理常数	(171)

绪 论

一、物理实验课程的任务和教学基本要求

物理学是一门实验科学,实验对物理学的重要性自不必多言。物理实验是人为地创造出一种条件,按照预定计划,以确定的顺序重现一系列物理过程或物理现象,其目的在于培养学生的实验能力。物理实验作为工科院校学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端,是后续课程的实验基础,是提高学生实验能力的重要起点。

本课程的具体任务是:

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,加深对物理学原理的理解。

2. 培养和提高学生的科学实验能力。主要包括:能够通过自行阅读实验教材或参考资料,正确地理解实验原理和实验条件、实验方法,作好实验前的准备;能够借助于教材或仪器说明书,正确地调整实验仪器,并进行正确的操作测量;能够运用物理学理论,对实验现象进行分析判断;能够正确记录和处理实验数据,绘制图表,说明实验结果,撰写合格的实验报告;能够正确地领会实验的设计思想,领会如何按照测量误差的要求确定测量方法和正确选用、配套测量仪器,并由此能完成简单的设计性实验。

3. 培养和提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学态度,严肃认真、主动研究探索的学习精神,遵守纪律、爱护公共财物、维护公共卫生的优良品德。

物理实验课程要培养学生通过实验手段去发现问题、分析问题和解决问题的能力,为此,课程的基本教学要求是:

1. 在教学过程中,要对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育,使学生了解科学实验的重要性,明确物理实验课程的地位、作用和任务,调动学生的学习积极性和自觉性。

2. 在整个实验教学过程中,要着眼于对学生实验能力的培养,教育学生在实验过程中必须做到既动手又动脑,养成勤于思考、探索和实事求是的良好实验习惯,树立良好的学风。

3. 通过本课程的学习,要求学生应能了解测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的初步能力。通过物理实验的基本训练,要求学生应能自行完成预习、实验测量、撰写实验报告的主要实验程序,应能调整常用实验装置并掌握基本的操作技术,熟悉物理实验中基本的实验方法和测量方法并能进行常用物理量的一般测量,应能了解常用仪器的性能,并学会使用方法。

二、物理实验课程的教学基本程序

物理实验主要是依据物理原理、操作仪器和设备进行物理量的测量,观察研究物理现

象、物理量的变化规律。在物理实验教学过程中,要求学生在教师指导下独立进行仪器操作,观测记录和处理实验数据,分析实验结果。所以,物理实验教学程序一般可分为实验前预习、操作测量、写好实验报告三个阶段。

1. 实验前预习

实验前学生必须阅读实验教材中有关实验内容和仪器使用说明等参考资料,明确实验目的,看懂实验原理和实验方法,了解有关测量仪器、设备的性能和操作技术,并在此基础上写出实验预习报告。预习报告内容主要包括:

① 实验名称、实验目的。

② 简要实验原理,有关的测量公式、公式的适用条件、公式中各符号所代表物理量的意义,以及相关的实验电路图或光路图。

③ 实验记录表格。必须强调,根据实验内容、步骤拟定合理的完整的记录表格是做好实验的重要的准备工作。

2. 实验过程

操作和测量是实验教学的主要环节。实验前指导教师应作简要的讲授和提问。学生开始进行实验时应首先检查仪器、设备的完好,并简单练习操作。基本熟悉仪器性能及使用方法后才进行实验。为了加强实验能力的培养,学生在所有实验中都必须从正确调整实验仪器或连接测量电路开始,而不应当是应付式地测量几个实验数据。实验过程要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据。碰到问题要勤于思考,不要一碰到问题就一概归咎于仪器设备,要实事求是分析处理,要养成敢于排除故障的习惯。当发现问题而又无法解决时,应及时向教师报告,由教师处理。仪器设备的正确调整、操作和测量记录,是进行科学实验的基本功。

实验过程要做好实验记录,记录内容包括实验条件有关的物理量(如室温、大气压等),仪器设备的型号、级别和精度,已知物理量和测量的有关物理量以及所观察到的物理现象。记录数据必须如实,不可伪造数据,不可抄袭或随意涂改数据。若发现记录数据有问题,可以删掉或重新测量。实验完毕后,应将记录数据交教师审阅签名,并整理好实验仪器。

3. 写好实验报告

做完一次实验后,应根据实验要求及时处理实验数据,并写出完整的实验报告。实验报告的格式和内容如下:

① 实验名称、实验目的。

② 实验仪器(注明仪器型号和级别)。

③ 实验原理。

④ 实验内容及步骤(写出简要内容、步骤及注意事项)。

⑤ 实验数据记录。

⑥ 数据处理:描绘图线及计算结果。

⑦ 结果报告:计算误差和分析误差原因。

以上内容中,①~④项若预习报告写得认真,则不必重写;第⑤项在实验时完成;第⑥~⑦项在实验课后完成。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,要求书面整洁、字迹清楚、层次分明、文句通顺、数据齐全、作图规范。

三、实验室规则

1. 学生进入实验室做实验必须有预习报告,无预习报告者待完成预习报告后再做实验。
2. 进入实验室后应保持安静,保持清洁。
3. 实验前应先检查仪器设备,了解仪器性能和使用方法,方能开始实验。当对仪器性能和使用方法还不了解时,不得随意扭动开关等部件。
4. 实验过程应遵从指导教师和实验室管理人员的指导,未经许可不得随意调换各组实验仪器。如损坏仪器,应立即报告指导教师并进行登记,并根据具体情况按学校有关规定处理。
5. 注意安全,严禁违反用电规程,防止发生人身事故和损坏仪器。
6. 实验完毕后,应把仪器整理、清点好,经指导教师检查并签名后,方能离开实验室。

第一章 实验误差与数据处理

物理实验的任务,不仅是观察某种物理现象,而更重要的是研究、探索某种物理规律及其实际应用。在物理实验过程中,必须测量一系列物理量,或对某一个物理量作一系列测量。因而,要求我们一方面要根据物理思想选择适当的测量方法,对研究对象进行分析和测量,并估计所测结果的可靠程度;另一方面,必须将所测数据加以整理归纳处理,用一定方式表示它们之间的相互关系,即规律。前者需要误差方面的基础知识(如有效数字运算、误差估算以及误差传递等),后者需要处理数据的基本技术和知识(如列表法、作图法、最小二乘法等)。这两方面的知识为本章讨论的内容。

§ 1-1 物理量的测量与基本单位

一、测量的基本概念

进行物理实验,最重要的就是把你了解的物理量通过实验方法用仪器测量出来。著名物理学家伽利略曾经说过,“凡是能测量的(物理量)都要进行测量,并且把目前无法量度的东西变成可以量度的。”关于测量的重要性,开尔文(Kelvin)概括为一句话,“测量是一门科学最本质部分。”

物理量的测量,实质上就是在一定条件下使用具有计量标准单位的仪器(工具)对被测物理量进行比较,从而确定被测量的数值和单位。例如:物体长度的测量,可以用具有标准单位标度的米尺(测长仪器)进行比较而测得;物体的质量和温度的测量,可以用具有标准单位标度的天平(仪器)和温度计进行比较而测得。标准单位的确立是由国际会议统一规定的。

二、物理量基本单位

物理学发展过程中,国际上曾建立过各种不同的单位制,这些单位制选取的基本量有些不同。1960年国际计量大会正式通过了一种通用的单位制,称为国际单位制,用符号“SI”表示。其基本单位规定如下:

(1) 长度单位——米(m)。1米等于光在真空中 $\frac{1}{299792458}$ 秒时间所经过的距离。

(2) 质量单位——千克(kg)。1千克等于国际千克原器铂铱合金圆柱体的质量。

(3) 时间单位——秒(s)。1秒是铯-133基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间。

(4) 电流单位——安培(A)。1安培是在两根相距1米、无限长、横截面面积极小的平行直导线处于真空中通过恒定电流,当导线之间在每米长度上产生 2×10^{-7} 牛顿(N)的相互作用力时,每根导线中的电流强度。

(5) 温度单位——开尔文(K)。根据热力学温标,水的三相点温度定为273.16K。

(6) 光强单位——坎德拉(cd)。1坎德拉是一光源发出频率为 540×10^{12} Hz的单色辐射,在给定方向上的辐射强度为1/683瓦/球面度(W/sr)。

(7) 物质的量单位——摩尔(mol)。1摩尔(克分子)是一系统物质的量,该系统中所包含的基本单元数(粒子数)与0.012千克(kg)碳-12的原子数目相等。

此外,其它物理量的单位是由以上基本单位按一定的关系式导出的,因此称它们为导出单位。如体积单位为立方米(m^3),密度单位为每立方米千克(kg/m^3)。

三、直接测量与间接测量

按获得待测量结果的手段不同,可将测量分为直接测量和间接测量。

直接测量是使用仪器或量具,直接测得(读出)被测量数值的测量。该物理量称为直接测得量。如用米尺、天平测量物体的长度、质量,用电表测量电流、电压等。

间接测量是依据直接测得量,通过一些原理公式把待测量计算出来。由于这些待测量还没有直接测量的仪器,需要通过间接的方法,所以这类测量称为间接测量。如某地重力加速度的测量,是依据直接测得单摆摆长 L 和摆动周期 T ,通过单摆公式:

$$g = 4\pi^2 L / T^2 \quad (1-1-1)$$

把重力加速度 g 计算出来, g 为间接测得量。随着科学技术的发展,新的仪器出现,将有可能把间接测量变为直接测量。

§ 1-2 测量误差与误差分类

一、测量值与真值

任何被测量对象的物理量在特定条件下都具有客观的确定的真实数值,通常称为该物理量的真值,记作 μ 。测量的任务就是把真值找出来。但在实际测量过程中,由于测量仪器、测量方法、测量条件以及种种其他因素的影响,所有测量值都不可能是客观的真值。绝对真值一般是不知道的,也是无法测得的,但在某种情况下可以找到近似真值和理论真值。

(1) 由国际计量会议约定的值(或公认的值)可以作为近似真值,如基本物理常数、基本单位标准。显然,这些数值是随着科技发展而更加接近它们的真值。

(2) 通常把高一等级仪器校验过的计量标准器的量值,也作为近似真值,又称为实际值。这些高级标准器都是逐级校对,经过各级计量检定系统核准的。

(3) 理论真值是指由理论计算所得的量值,如三角形三个角度总和为 180° ,直角三角形斜边平方为两直角边的平方和,圆周率 π 等。

(4) 在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的平均值,可认为近似真

值，或称为最佳值。

二、误差概念与定义

在一切实验中，由于仪器装置、实验方法、环境条件、测量者本身的局限性，因此所有测量结果与真值之间总有一定差异。这种差异称为该测量结果的测量误差，简称为“误差”，以 Δx 表示。误差定义为测量值与真值之差，即

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

式中： x 为测量值； μ 为真值。

测量误差 Δx 的大小表示测量值与真值接近的程度，以此衡量测量结果的准确程度。 Δx 又称为绝对误差。

深入分析便可发现，误差值 Δx 的大小还不能完全地衡量（评价）测量结果的准确程度。虽然误差绝对值相等，但被测量对象本身大小不同时，其准确程度显然是不同的。把两者综合起来考虑，可定义相对误差为：

$$E_x = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

上式用百分数表示，所以又称为百分差。

例：设某工件长度的真值为5.00厘米（cm），测量值为5.05厘米（cm）。

测量误差 $\Delta x = (5.05 - 5.00) = 0.05 \text{ cm}$

相对误差 $E_x = \frac{\Delta x}{\mu} = \frac{0.05}{5.00} \times 100\% = 1\%$

三、误差分类

误差的产生有多方面原因，从误差性质、来源和服从的规律来看，可将误差分为系统误差、偶然误差和过失误差三种。

1. 系统误差

系统误差是由于实验系统的原因，在测量过程中造成的误差。其特点是误差值的大小和符号总是保持恒定并偏向一个方向，或按一定规律以可约定的方式变化。系统误差来源大致分为：

（1）测量仪器的不准确性。主要由于仪器本身的缺陷、仪器本身的灵敏度和分辨率的限制。

（2）实验理论、方法不完善而引起。如单摆实验公式 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ 是一级近似式。

（3）环境条件变化引起的。如温度、气压和电磁场的变化等。

（4）测量人员生理或心理特点而造成的。

系统误差直接影响测量结果接近真值的程度，因此用“准确度”来表示系统误差的大小。测量结果准确度高，则该测量系统误差小，反之系统误差大。

2. 偶然误差

又称随机误差，意指误差产生是随机的。在测量过程中，在同一条件下对某一物理量进行多次测量，由于环境有起伏变化和偶然因素的干扰，使测量结果略有差异（即误差）。这类误差称为偶然误差。其特点是误差值和符号以不可约定方式变化着，对每项测量值的变化

是无规则的，但对大量测量值的变化则具有确定的统计规律。一般实验测量均符合正态分布规律。即：

- (1) 绝对值小的误差出现机会(概率)多,绝对值大的误差出现机会少,即具有单峰性。
- (2) 绝对值相等的正、负误差出现的机会(概率)相等,即具有对称性。
- (3) 绝对值非常大的正、负误差,出现的机会(概率)趋于零,即具有有界性。

由这种正态统计分布去求误差问题,需要用数学理论去解决。偶然误差反映了该实验测量结果的重复性和弥散性,因此用“精密度”来表示偶然误差的大小。测量结果精密度高,指对某一量的多次测量值之间很接近,即测量重复性好,偶然误差小。反之,测量结果精密度低,则指多次测量值之间极为分散,即测量重复性差,偶然误差大。

若把系统误差和偶然误差综合起来考虑,我们用“精确度”来表示,作为对测量结果总的评价。

3. 过失误差

这种误差是由于观测者的粗心大意,或测量条件发生突变导致测量、计算错误。这类误差称为粗差,其特点是误差值很大。实验中含有过失误差的测量值都是要剔除的,当确认为是过失误差时,应将其舍弃不用。显然,只要观测者细心观测,认真读取、记录和正确处理数据,这种错误(粗差)是完全可以而且必需避免的。

§ 1-3 测量结果与有效数字

一、测量结果一般表示

任何一个物理量的测量结果,一般用数值、单位和测量误差表示,其表示式为

$$N_{\text{测}} \pm \Delta N \quad (1-3-1)$$

其中 $N_{\text{测}}$ 是测量结果值,简称为测量值,它包含具体数值和单位, $\pm \Delta N$ 是综合测量误差,即系统误差与偶然误差的综合。

有关测量值 $N_{\text{测}}$ 的确定分二种情况:

一种是单次测量的,这时直接用该次仪器测量记录表示,则上式写成

$$x_{\text{测}} \pm \Delta x \quad (1-3-2)$$

其中 $x_{\text{测}}$ 为一次测量数据, Δx 为该测量误差,通常为仪器误差。

另一种是多次测量的,这时 $N_{\text{测}}$ 是以多次测量结果的算术平均值来表示,则上式写成

$$\bar{x}_{\text{测}} \pm \Delta \bar{x}$$

其中 $\bar{x}_{\text{测}}$ 为算术平均值, $\Delta \bar{x}$ 为算术平均误差。

设有 n 次测量,测得数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。则算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-3-3)$$

可以证明算术平均值是多次测量值的最佳值。

若测量结果是间接测得量,设 $x, y, z, \dots$ 为各直接测得量的测得值,则间接测得量

的结果为

$$N_{\text{测}} = f(x, y, z, \dots) \quad (1-3-4)$$

显然 $\pm \Delta N$ 为间接测得量的误差。具体计算在下一节讨论。

二、测量结果值的有效数字

测量结果值 $N_{\text{测}}$ 不论是直接从测量仪器上读取记录，还是从多次测得值计算平均值，或是从直接测得值通过函数关系计算间接测量值，都不可避免地要碰到以上这些数值应取多少位的问题。根据测量结果值有效数字由测量结果误差确定的原则，首先必须计算测量结果的误差，然后才能正确地确定测量结果值的位数。但实际上在测量结果误差未计算之前，以及测量数据在运算过程中也要求我们正确取位和运算，因此提出了有效数字及其运算规则问题。

1. 有效数字概念和定义

由上所述，测量结果值 $N_{\text{测}}$ 的位数多少应由测量值本身的误差来确定，我们定义：所有测量结果值都由可靠数和有误差的可疑数组成，则从第1位（可靠）数位开始算起，直到开始有误差的可疑数为止，以上这些数字（包括误差位）称为有效数字。

上述表明，任何测量数据总是存在着一定的误差，因此在记录测量数据和表示计算结果时，不应随意取位，而是用符合有效数字定义的规则和方法来确定该测量数据的位数和计算结果的位数。

例如，用一支最小刻度为1 mm的米尺来测量某一长度 l 。由图1-3-1可见，物长 l 在12.3cm至12.4cm之间，可凭经验将其估计为12.32cm或12.33cm。显然，在这数据中，12.3是准确的可靠数字，而0.02或0.03这最后一位数都是估读出来的，它存在误差，可称为误差数字或可疑数字。可疑数字虽然带有误差，但把它读出来显然比不读出来更为合理。因此，我们规定，在进行测量读数时必须先在仪表最小刻度后再估读一位数。

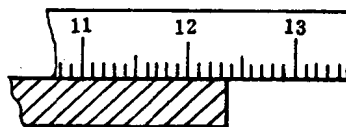


图1-3-1

例如使用感量为10毫克（mg）的矿山天平时，应估计读出几毫克的数值，即是说10毫克以上的读数是准确的，10毫克以下是估计的。

又如使用最小刻度为10毫安（mA）的毫安表时，应估读出几毫安，即是说10毫安以上的读数是准确的，几毫安是估计的。

以上测量若读数恰与刻度相一致时，则估读数为零。又例如用最小刻度为0.1伏特（V）的电压表测量电压时，指针正好在2.2的刻度上（见右图），其读数为2.20伏，即2.2伏是准确的，而“0”是估计的。同理，如上例中若物长恰在12.3刻度上时则读数应记为12.30cm，而不是12.3cm。

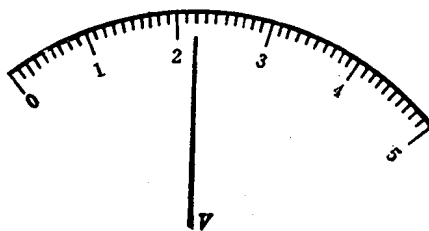


图1-3-2

按照上述读数规则读数（注：在某些情况下——例如使用数字仪表和游标尺时，最末一位读数并不是估计读出来的，即使这样，这最后一位数字仍然是误差数字。）所得的数值总是由两部分数字所组成：准确的数字加上最后一位可疑数字。我们把这些准确数字及一位可疑数字，合称为有效数字。因而，有效数字的最后一位是误差所在的一位。上述读数12.32

cm是四位有效数字，而12.320cm，则是一个五位有效数字。这两个数值，从数字上来看是等价的，但从有效数字的角度来看，它们却代表不同意义：前者“2”是可疑的，“12.3”是准确的，可见所用的尺子其最小刻度是0.1cm；而后者“0”是可疑的，“12.32”是准确的，可见所用的尺子其最小刻度是0.01cm。所以，在记录有效数字时，要特别注意可疑数字，要记录测量仪器的精度、级别、分度值或最小刻度，以便估计仪器误差，确定估读数字，最后将测量结果用有效数字正确表示出来。

2. 有效数字运算规则

有效数字运算规则是一种近似计算法则，用以确定测量结果有效数字大致的位数。其总的要求是计算结果的位数应与测量误差完全一致，若位数不恰当时，则最终由相应误差来确定。有关运算原则如下：

(1) 凡可靠数与可靠数运算，结果为可靠数。

(2) 凡可疑数与任何数运算，结果为可疑数，但进位数为可靠数。

通常在运算过程中的数字可保留二位可疑数，但最后实验结果表示中只保留一位可疑数。

下面介绍有效数字的运算规则：

(1) 加减法运算（为说明方便，在可疑数字下划一横线）

【例1】

$$\begin{array}{r} 71.\underline{3} \\ + \quad 0.\underline{753} \\ \hline 72.\underline{053} \end{array}$$

$$71.\underline{3} + 0.\underline{753} = 72.\underline{1}$$

【例2】

$$\begin{array}{r} 71.\underline{3} \\ - \quad 0.\underline{753} \\ \hline 70.\underline{547} \end{array}$$

$$71.\underline{3} - 0.\underline{753} = 70.\underline{5}$$

结论：诸量相加（或相减）时，其和（或差）数在小数点后所应保留的位数与诸数中小数后位数最少的一个相同。

为了简化运算，可以用小数点后位数最少的数为标准，将小数点后位数多的用四舍五入的方法删去多出的位数，然后再进行运算。上两例中的0.753删去多出的位数后为0.8，然后作如下运算：

$$71.\underline{3} + 0.\underline{8} = 72.\underline{1}$$

$$71.\underline{3} - 0.\underline{8} = 70.\underline{5}$$

(2) 乘除法运算

【例3】

$$\begin{array}{r} 39.\underline{3} \\ \times \quad 4.\underline{084} \\ \hline 157\ \underline{2} \\ 314\ \underline{4} \\ 157\ \underline{2} \\ \hline 160.\underline{501\ 2} \end{array}$$

$$39.\underline{3} \times 4.\underline{084} = 160.\underline{5}$$

【例4】

$$\begin{array}{r} 9.\underline{622} \\ 4.\underline{084} \overline{) 39.\underline{300}} \\ \underline{36\ 756} \\ 2\ 544\ \underline{0} \\ \underline{2\ 4504} \\ 936\ \underline{0} \\ 816\ \underline{8} \\ \underline{11920} \\ 816\ \underline{8} \\ \underline{3752} \end{array}$$

$$39.\underline{3} \div 4.\underline{084} = 9.\underline{62}$$

结论：两量相乘（或除）所保留的有效数字一般和诸因子中有效数字最少的一个相同，有时也可能多一位或少一位。

为了简化运算，可以取有效数字位数最少的为标准，将其它有效数字多的按四舍五入的方法删至和它相同，然后进行运算。即，

$$39.\underline{3} \times 4.\underline{08} = 160.\underline{5}$$

$$39.\underline{3} \div 4.\underline{08} = 9.\underline{63}$$

（3）乘方、开方运算

【例5】 $765^2 = 5.85 \times 10^5$

【例6】 $\sqrt{200} = 14.\underline{1}$

结论：乘方运算规则与乘法同，开方亦然，一般取底的位数相同。

（4）函数运算

一般来说，函数运算应从误差分析来决定，在物理实验中，为了简便统一起见，对常用的对数函数、指数函数和三角函数作以下规定：

对数函数运算后的尾数和真数的位数相同。

【例】 $\lg 1.983 = 0.2973$

指数函数运算后的有效数字和指数的小数点后位数相同。

【例】 $10^{6.25} = 1.8 \times 10^6$

三角函数在 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时， $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$ 都在 0 和 1 之间，三角函数的取位随角度的有效数字而定。

【例】 分光计读角度时，应读到 1 分，此时应取四位有效数字。

$$\sin 30^\circ 00' = 0.5000$$

$$\cos 20^\circ 16' = 0.9387$$

3. 有效数字基本性质

有效数字的定义已反映了有效数字与测量误差之间的本质联系，和有效数字的位数（最后一位数）与误差所在位数的关系，同时表明了误差值决定其有效数字的原则。由此可以引申出有效数字几点性质：

（1）有效数字只能粗略（不能精确）表示测量结果的误差和测量仪器的精度。一般说，有效数字位数越多，相对误差越小；有效数字位数愈多，测量仪器精度愈高。例如：2.50（ $\pm 0.05\text{cm}$ ）为三位数，相对误差为百分之几（2%）；2.500（ $\pm 0.005\text{cm}$ ）为四位数，相对误差为千分之几（0.2%）。

（2）有效数字基本上反映了测量结果的客观实际。因此，有效数字进行单位（十进制单位）变换时，位数不变。即有效数字与小数点的位置无关。例如：物件长度测定为 12.32 cm，可以变换为 0.1232 m，也可以变换为 0.0001232 km，它们都是四位有效数字。

（3）由第 2 点性质可以推出：凡数值中间和末尾的“0”（包括整数小数点后的“0”）均为有效数字，但数值前的“0”则不属有效数字。作十进制单位变换时，用有效数（ $\times 10^n$ 单位）的形式表示是科学的。如地球半径是 6371 公里，科学记数法表示为：

$$6.371 \times 10^3 \text{ km} = 6.371 \times 10^6 \text{ m} = 6.371 \times 10^9 \text{ mm}$$

（4）物理常数如 e （电子）、 c （光速）、 h （普朗克常数）以及常数、倍数、 π 、 $\sqrt{2}$ 、 $1/7$ 等，它们不是由测量产生的，实际上它们的有效数字很多，因此在计算中可以任意取位。