面向21世纪课程教材

Tongyong Wuli Shiyan

通用物理实验

王克强 潘玲珠 编著

中山大学出版社

面向21世纪课程教材

通用物理实验

王克强　潘玲珠　编著

中山大学出版社

·广州·

图书在版编目（CIP）数据

通用物理实验/王克强，潘玲珠编著. —广州：中山大学出版社，2005.2
（面向21世纪课程教材）
ISBN 7-306-02463-9

Ⅰ.通…　Ⅱ.①王…　②潘…　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（2005）第008390号

责任编辑：周建华
封面设计：大　象
责任校对：舟　雨
责任技编：黄少伟
出版发行：中山大学出版社
编辑部电话（020）84111996，84113349
发行部电话（020）84111998，84111160
地　　址：广州市新港西路135号
邮　　编：510275　　传真：（020）84036565
印 刷 者：广州市番禺市桥印刷厂
经 销 者：广东新华发行集团
规　　格：787 mm×960 mm　1/16　12.75印张　271千字
版次印次：2005年2月第1版　2005年2月第1次印刷
定　　价：19.90元

内容简介

本书是为非物理专业的通用物理实验课程编写的基本教材。全书内容广泛，共收入26个实验，包括力学和热学实验、电磁学实验、光学和近代物理实验、设计性和研究性实验。书中对误差的计算和数据的处理给出了较详细的公式以及测量表格，另外还给出了物理常量的数据表。本书对有关的实验方法和原理、操作步骤、数据处理充分考虑了学生的实验操作能力情况，叙述力求深入浅出，易于操作和理解。书中第六章“设计性和研究性实验”为教师多年来的教学总结，对提高学生的动手能力具有一定的促进作用。

本书可用作高等院校本科理、工、农各专业物理实验课程的教材或参考书，也可供涉及物理学的广大科技工作者参考。

前　　言

本教材是依据国家教育部《高等院校非物理专业物理实验课程教学基本要求》，在总结仲恺农业技术学院物理实验教学改革的实践经验基础上编写而成的，可以作为本科理科、工科、农科物理实验教材，或作为实验教学参考资料。

本教材共六章，涉及力学和热学实验、电磁学实验、光学和近代物理实验以及设计性和研究性实验。书中实验在精选经典实验的基础上，充实了一些适合现代社会发展的新的实验内容，以拓宽学生的知识面；精练了实验步骤，以充分发挥学生的主动性；对实验方法和原理、操作步骤、数据处理充分考虑了学生的实验操作能力情况，叙述力求深入浅出，易于操作和理解。每个实验包括实验目的、仪器用具、实验原理、实验装置、实验内容、数据记录、注意事项等部分。大部分实验给出了具体的数据分析公式，以方便学生课后进行数据处理。“设计性和研究性实验”是教师在物理实验教学过程中的经验总结，实验设置有利于学生动手能力与创新能力的培养。

本教材由王克强、潘玲珠担任主要编写任务，陈红斌、于凤梅、周丽萍等教师也参加了部分章节的编写工作。本教材得到了仲恺农学院教务处、中山大学出版社的大力支持与配合。另外，在编写过程中还参考了不少同行的宝贵资料，在这里作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不恰当之处，请读者不吝指正。

编著者
2005 年 1 月

目　　录

第一章 绪 论

第一节 物理实验教学的作用、目的和要求

一、物理实验的地位和作用

物理学是自然科学中最基本的学科之一，又是一门实验科学，无论是物理理论的建立还是对于理论的检验，都离不开实验。物理学史清楚地表明，正是在实验和理论两方面的相互推动和密切结合下，物理学才得以发展。

随着生命科学的发展，物理学的许多新技术，诸如光谱技术、波谱技术、热技术、X射线衍射技术、显微技术等在生命科学和农业科学中得到了日益广泛的应用。目前，物理实验技术和实验仪器已广泛地应用于科学技术和生产部门中。

高等院校的物理实验课是学生进入大学后受到系统实验技能训练的主要基础课之一。通过物理实验，可使学生初步接触误差和数据处理的知识，培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题，开拓学生的智力，培养解决问题的能力，为进一步学习后续实验课程打下良好的基础。

二、物理实验课的教学目的

（1）通过观察分析实验现象和测量物理量，学习物理实验基础知识，加深对物理现象和规律的认识，为后续课程打下基础。

（2）学习物理实验的基本方法，进行实验的基本训练。使学生能够自行阅读实验教材或资料，做好实验准备；能够借助实验教材或仪器说明书，熟悉常用仪器的基本原理和性能，并能正确使用；学习和掌握基本物理量的测量方法并进行具体测试；能够运用物理学理论知识对实验现象进行初步的分析和判断；能够正确记录和处理实验数据，对实验结果的误差作出分析，写出合格的实验报告；初步培养实验设计与实施的能力。

（3）培养实事求是的科学精神，严格操作、严密思维的工作作风以及爱护国家财产、遵守纪律的优良品德。

三、物理实验课的要求

为了保证实验课的正常进行，提出以下要求：

（一）实验前

（1）通过阅读实验教材，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验内容，初步了解仪器的使用方法和注意事项，在此基础上写出预习报告。

（2）预习报告主要包括实验中要观察的物理现象、计算公式、电（光）路图、数据表格等。

（二）实验时

（1）认真听讲和积极思考有关实验原理、实验要求、仪器使用和注意事项等问题。

（2）认识和检查仪器是否完好，如有问题及时向教师报告。

（3）熟悉仪器的使用方法，根据操作规程正确安装和调整仪器，按实验程序进行实验。

（4）认真观察实验现象，如实记录数据。实验中如出现问题，应积极思考并及时请教教师，不能随意处理。

（5）实验完毕要及时整理数据，送教师审阅；并将仪器归整好，经教师同意后才能离开实验室。

（6）严格遵守实验室规则，维护实验室整洁，爱护实验仪器；仪器如有损坏，要及时报告教师，凡属学生责任事故将视情节酌情赔偿。

（三）实验后

认真书写实验报告，字体要端正，文字要简练，数据要齐全，图表要规范。实验报告除填写实验日期、姓名、班级、组别等项外，还应包括以下几个部分：①实验名称；②实验目的；③实验原理：简要原理及计算公式、电路图或光路图；④实验简要步骤；⑤实验结果及数据处理的主要步骤；⑥实验讨论：必要的实验结果分析讨论、回答思考题等。

第二节　实验误差与数据处理

一、物理量的测量

在科学实验中，物理量的值是通过测量得到的。测量是一个比较的过程，利用测量工具（量具或仪器），用一定的方法和技术（技能），通过比较获得物理量的大小和物理量间的关系规律。测量是进行科学实验的基本功，在测量工作中，要熟练地掌握一些基本的实

验技能。

（一）直接测量和间接测量

按获得测量结果的手段来分，可将测量分为直接测量和间接测量。用仪器和量具直接读取物理量的值称为直接测量，相应的物理量称为直接测得量。由几个直接测得量经过物理公式计算得出测量结果的测量称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。一物理量的测量是否为直接测量，完全取决于所用的测量手段和方法。如测定某一电阻，可用电压表和电流表分别测出电阻两端的电压和通过电阻的电流，再利用欧姆定律求出，也可用欧姆表或电桥直接测定，前一测量方法为间接测量，后一测量方法为直接测量。

（二）等精度测量和不等精度测量

按测量条件是否相同来分，将测量分为等精度测量和不等精度测量。在所有的实验条件完全相同的情况下（使用相同的实验仪器和测量方法，由同一观察者在相同环境下）对某物理量进行多次重复测量，每次测量的精度是相同的，这称为等精度测量。不能保证实验条件完全相同的多次重复测量，称为不等精度测量。在实验中，某一条件的变化对测量结果影响不大，或者可以忽略其影响时，可看作是等精度测量。

二、误差的分类及表示形式

（一）误差

任何物理量在客观上总存在着一个确定的真实大小，称为客观真值。测量的目的就是要力图得到真值。由于测量仪器不可能是尽善尽美的，测量所需的条件也是无法绝对保证的，再加上测量技术等因素的局限，任何测量都不可能进行得完全精确。因而，任何测量结果与真值之间总是存在着一个差值，即测量误差。

测量结果总是存在着一定的误差，误差自始至终存在于一切测量过程之中，这称为误差公理。因此，重要的是去理解测量误差的客观存在，即在确定实验方案、选择测量方法、选用实验仪器、考虑实验条件需要保证的程度时，都要考虑测量误差问题。

测量结果应包括数值、单位和误差，三者缺一不可。

（二）误差的分类

误差的产生有多方面的原因，从误差的性质和来源的不同，可分为系统误差和随机误差（偶然误差）两大类。

1．系统误差、准确度

系统误差的特点是：在同样条件下对同一物理量进行多次测量时，误差的大小和符号保持不变，或按一定规律变化，或是有规律地重复。系统误差来源于以下几个方面：

（1）仪器误差。这是由于仪器本身的缺陷或分辨率限制，或没有按规定条件使用而引

起的，如刻度不准确、天平不等臂、仪器未按技术要求调试好等。

(2) 方法误差。这是由于实验理论和方法的不完善带来的误差。如测量重力加速度时，没有考虑空气阻力的影响；用伏安法测电阻时，没有考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。这是由于环境条件（温度、湿度、压强、电磁场等）的变化带来的误差。如米尺是在20℃刻度的，而测量是在0℃进行的。

(4) 个人误差。这是由于实验者的生理或心理导致的习惯性误差。如有人习惯于读数偏高，有人习惯于读数偏低；计时的时候，有人习惯于偏早，有人习惯于偏晚等。

除上述各种系统误差外，很多系统误差的变化是极其复杂的，如刻度盘刻得不准确而引起的测量示值的误差等。对于系统误差，不能用多次测量求平均值的方法去减小或消除，而必须找出系统误差的规律和产生的原因，采取相应的措施去消除或减小。

系统误差的存在直接影响测量结果的准确性，习惯上常用准确度来反映系统误差的大小。测量结果的准确度高，表示测量结果偏离真值的程度小，系统误差小；反之，准确度低，测量结果偏离真值的程度大，系统误差大。

2. 随机误差、精密度

在同一条件下对某一量进行多次测量时，每次的测量值还会有差异，差异的大小和正负没有任何规律性，纯属偶然，但在大量的重复中又服从一定的统计规律，这种误差称为随机误差，也称偶然误差。随机误差来源于如下几个方面：

(1) 判断误差。这是由于实验者在估读仪表最后一位读数时可能不准确而带来的误差。

(2) 外界干扰误差。偶然的外界干扰，如测量时由于人的来往引起气流扰动或温度起伏，周围偶然出现的振动、噪声、电磁场等，使测量结果产生误差。

(3) 其他偶然因素引起的误差、被测对象本身的微小起伏及其他一切不可预测的偶然因素所造成的误差。

随机误差的特点是测量次数增多时服从一定的统计规律。常见的统计规律是：比真值大或比真值小的测量值出现的概率相等；误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率大得多；绝对值相等的正误差与负误差出现的机会相等，因此全部可能的误差总和趋于零。所以，增加测量次数并取平均值，可以减少测量结果的随机误差。

随机误差反映的是一组测量结果的重复性和离散性，习惯上常用精密度来表征。多次重复测量时，测量值间彼此很接近、差异很小，就说明测量重复性好，或测量的精密度高；反之，测量值间很分散，就说明测量重复性差，或测量的精密度低。

精确度是对测量的随机误差与系统误差的综合评定，简称精度。测量的精确度高，是指测量数据比较集中在真值附近，即测量的系统误差和随机误差都比较小。

（三）误差的表示形式

（1）绝对误差。以误差的绝对数值来表示测得的误差，称为绝对误差。绝对误差可以表示同一个测量结果的可靠程度。设测量值为 N，真值为 N_0，则绝对误差表示为：

$$\Delta N = N - N_0 \tag{1-1}$$

它与真值同单位，反映测量值偏离真值的大小。

真值很难准确测定，可以把理论真值、国际计量大会决议约定的值、高一级标准器的量值作为近似真值。在真值无法知道的情况下，一般采用测量平均值代替真值（重复测量10次以上，重复测量次数不很多，则以平均值表示测量结果），以测量值与测量平均值之差（$N-\overline{N}$）即偏差（残差）来估算绝对误差。

（2）相对误差。为了比较不同量的测量结果，或者单位不相同的测量结果时，不仅要考虑绝对误差的大小，还要看被测量本身的大小，为此引入相对误差的概念，即：

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \tag{1-2}$$

绝对误差与真值之比，常用百分比表示，又称百分误差。它是不带单位的纯数，用于衡量和比较测量的准确度。相对误差小，则测量的准确度高。实际上常用名义相对误差即绝对误差与测量平均值之比的百分数$\frac{\Delta N}{\overline{N}} \times 100\%$来估算相对误差。

三、偶然误差的处理

（一）单次直接测量结果与误差估算

在物理实验中，若对某一物理量的测量精确度要求不高，只需进行一次测量时，可按仪器出厂检定书或仪器上注明的仪器误差作为单次直接测量的误差。如果没有注明，也可取仪器最小刻度值的一半作为单次直接测量的绝对误差（一般根据实际情况，对测量值的误差进行合理的估算，取仪器最小刻度的1/10，1/5或1/2均可），取仪器最小刻度的$1/\sqrt{3}$作为测量结果的标准偏差。

（二）多次直接测量结果与误差计算

1. 以算术平均值代表测量结果

在相同条件下对某物理 N 进行了 n 次重复测量，其测量值分别为 N_1，N_2，…，N_n，用 $\overline{N}$ 表示算术平均值，则：

$$\overline{N} = \frac{1}{n}(N_1 + N_2 + \cdots + N_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_i \tag{1-3}$$

根据误差理论，在一组 n 次测量的数据中，算术平均值 $\overline{N}$ 最接近于直值，称为“测

量的最佳值”。当测量次数无限增加时，算术平均值将无限接近于真值。因此，在多次直接重复测量中，以算术平均值表示测量结果。

2．多次直接测量结果的误差计算

（1）算术平均绝对误差。设各次测量值 N_i 与平均值 $\overline{N}$ 的绝对之差为：$|\Delta N_1| = |N_1 - \overline{N}|$，$|\Delta N_2| = |N_2 - \overline{N}|$，…，$|\Delta N_n| = |N_n - \overline{N}|$，则算术平均绝对误差为：

$$|\overline{\Delta N}| = \frac{1}{n}(|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \cdots + |\Delta N \backslash - n|) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta N_i| \qquad (1-4)$$

有时候，测量虽然进行了多次，但读数基本不变，这时不能只记录一个数值，或把误差表示为“0”，而应该把每次的数据都记录下来。当算术平均绝对误差小于仪器误差（仪器刻度或精密度的一半）时，应取仪器误差（仪器最小刻度或精密度的一半）作为测量结果的绝对误差。

（2）标准偏差。为了较科学地估算误差，科研和计量部门多用标准偏差来估算测量结果的误差。有限次（n 次）测量中的某一次测量结果的标准偏差为：

$$S_{(i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_i - \overline{N})^2}{n-1}} \qquad (1-5)$$

而 n 次测量结果的平均值 $\overline{N}$ 的标准偏差为：

$$S_{(\overline{N})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_i - \overline{N})^2}{n(n-1)}} \qquad (1-6)$$

（三）测量结果的表示

对于初学者或误差分析要求比较粗略的实验，可采用算术平均绝对误差估算随机误差，这时测量结果表示为：

$$N = \overline{N} \pm |\overline{\Delta N}|, \qquad E = \left|\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}}\right| \times 100\% \qquad (1-7)$$

比较严密和确切的误差估算可采用标准误差。但因标准误差是在测量次数 n 为无限大时定义的，实际上无法计算。而从理论分析可知，当测量次数 $n \to \infty$ 时，标准偏差的计算值也就趋近于按标准误差定义式的计算值了。所以，在实际的实验中，只要测量的次数足够多，就可用标准偏差来代替标准误差而对随机误差作出相当好的估计，通常说计算标准误差，指的也是这个意思。因此，测量结果应表示成：

$$N = \overline{N} \pm S_{(i)}, \qquad E = \frac{S_{(i)}}{\overline{N}} \times 100\% \qquad (1-8)$$

或：

$$N = \overline{N} \pm S_{(\overline{N})}, \qquad E = \frac{S_{(\overline{N})}}{\overline{N}} \times 100\% \tag{1-9}$$

(四) 间接测量结果与误差计算

不少物理量的测量和大多数物理实验中的最后结果，都属于将一些直接测量的物理量，通过一定的公式，将需要的待测量计算出来的所谓“间接测量”。由于每次直接测量都有误差，因此间接测量也一定会有误差，这就是误差的传递。表示各直接测量值的误差与间接测量值的误差之间的关系式，称为误差传递公式。

1. 等精度多次间接测量的结果

将各直接测得量的平均值代入间接测得量与直接测得量之间的函数关系式，计算出间接测量结果：

$$\overline{N} = f(\overline{X}_1, \overline{X}_2, \cdots, \overline{X}_n) \tag{1-10}$$

2. 间接测得量的标准偏差

设一间接测得量 N 与直接测得量 X_1，X_2，…，X_n 之间的函数关系为：

$$N = f(X_1, X_2, \cdots, X_n) \tag{1-11}$$

各直接测量分别表示为：

$$X_1 = \overline{X}_1 \pm S_{(\overline{X}_1)}, \qquad X_n = \overline{X}_n \pm S_{(\overline{X}_n)} \tag{1-12}$$

若直接测得量彼此独立无关，且各个平均值的标准偏差对最终结果的误差均有贡献，根据误差理论，间接测得量 $\overline{N}$ 的标准偏差为：

$$S_{(\overline{N})} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} S_{(\overline{X}_1)}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} S_{(\overline{X}_2)}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} S_{(\overline{X}_n)}\right)^2} \tag{1-13}$$

相对标准偏差为：

$$E = \frac{S_{(\overline{N})}}{\overline{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \frac{S_{(\overline{X}_1)}}{\overline{N}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \frac{S_{(\overline{X}_2)}}{\overline{N}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \frac{S_{(\overline{X}_n)}}{\overline{N}}\right)^2} \tag{1-14}$$

3. 间接测得量的最大误差

设各直接测得量 X_1，X_2，…，X_n 的最大误差分别为 ΔX_1，ΔX_2，…，ΔX_n，且 $N = f(X_1, X_2, \cdots, X_n)$，则间接测得量的最大误差为：

$$\Delta N = \left|\frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta X_1\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta X_2\right| + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta X_n\right| \tag{1-15}$$

最大相对误差为：

$$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} = \left|\frac{\partial f}{\partial X_1} \frac{\Delta X_1}{\overline{N}}\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial X_2} \frac{\Delta X_2}{\overline{N}}\right| + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial X_n} \frac{\Delta X_n}{\overline{N}}\right| \tag{1-16}$$

常用函数的标准误差传递公式如表 1 – 1 所示。

表 1 – 1　常用函数的标准误差传递公式

测量关系式 $N=f(X_1, X_2, \cdots, X_n)$	标准误差传递公式
$N = X_1 + X_2$	$S_{(N)} = \sqrt{S^2_{(\bar{X}_1)} + S^2_{(\bar{X}_2)}}$
$N = X_1 - X_2$	$S_{(\bar{N})} = \sqrt{S^2_{(\bar{X}_1)} + S^2_{(\bar{X}_2)}}$
$N = X_1 \cdot X_2$	$\dfrac{S_{(N)}}{\bar{N}} = \sqrt{\dfrac{S^2_{(\bar{X}_1)}}{\bar{X}_1^2} + \dfrac{S^2_{(\bar{X}_2)}}{\bar{X}_2^2}}$
$N = \dfrac{X_1}{X_2}$	$\dfrac{S_{(N)}}{\bar{N}} = \sqrt{\dfrac{S^2_{(\bar{X}_1)}}{\bar{X}_1^2} + \dfrac{S^2_{(\bar{X}_2)}}{\bar{X}_2^2}}$
$N = \sqrt[m]{X}$	$\dfrac{S_{(\bar{N})}}{\bar{N}} = \dfrac{1}{m}\dfrac{S_{(\bar{X})}}{\bar{X}}$
$N = \dfrac{X_1^k X_2^m}{X_3^n}$	$\dfrac{S_{(N)}}{\bar{N}} = \sqrt{k^2\dfrac{S^2_{(\bar{X}_1)}}{\bar{X}_1^2} + m^2\dfrac{S^2_{(\bar{X}_2)}}{\bar{X}_2^2} + n^2\dfrac{S^2_{(\bar{X}_3)}}{\bar{X}_3^2}}$
$N = \sin X$	$S_{(N)} = \lvert\cos X\rvert S_{(\bar{X})}$
$N = \ln X$	$S_{(N)} = \dfrac{S_{(\bar{X})}}{\bar{X}}$

4. 误差计算举例

测得圆柱体的直径 $D=(3.608 \pm 0.003\ \text{cm})$，高 $H=(1.703 \pm 0.004\ \text{cm})$，求出圆柱体体积的测量结果。

解：$\bar{V} = \dfrac{1}{4}\pi\bar{D}^2\bar{H} = \dfrac{1}{4} \times 3.1416 \times 3.608^2 \times 1.703$

$= 17.412\ \text{cm}^3$

$$\frac{S_{(\bar{V})}}{\bar{V}} = \sqrt{\frac{2^2 S^2_{(\bar{D}_1)}}{\bar{D}^2} + \frac{S^2_{(\bar{H})}}{\bar{H}^2}} \approx 0.29\%$$

$S_{(\bar{V})} = 17.412 \times 0.29\% = 0.0505 \approx 0.06\ \text{cm}^3$

$\therefore\quad V = (17.41 \pm 0.06)\ \text{cm}^3$

相对偏差 $E = \dfrac{S_{(\bar{V})}}{\bar{V}} = 0.29\%$

四、有效数字及其运算规则

实验数据的记录、运算以及实验结果的表达，都应遵从有效数字的规则。

(一) 有效数字的概念

任何一个物理量，其测量结果总存在误差，数值计算也有一定的近似性，因此实验数据的记录、运算以及实验结果的表达，其位数的多少应由测量值本身的误差来决定。

若测量结果从某位数起开始有误差，则自第一位非零数字算起，直到包含开始有误差的位为止的各数字均称为有效数字，有误差的一位称为可疑数字。从仪器上读取测量数据时，最后一位应该是开始有误差的可疑数字。

第一位非零数字左边的“0”不是有效数字，数字中间的“0”和未位的“0”部是有效数字，例如 0.04010 是四位有效数字。

按照有效数字的定义，可以得出实验数据记录和处理的几项原则：

(1) 实验记录的原始数据最后一位应该是估读的；

(2) 测量误差只产生于测量结果的最后一位；

(3) 测量结果的最后一位应与误差位取齐，多余的尾数应按数字修约规则舍弃。

(二) 科学记数法

用米尺测量某物长度为 15.4 mm，误差发生在$\frac{1}{10}$ mm 位，是 3 位有效数字；如果以微米作单位表示，为 15400 μm，则误差发生$\frac{1}{1000}$ mm 位，改变了原来数据的精确度。为保持有效数字的位数不变，应采用科学记数法，即用 10 的方幂表示数量级。前面的数字是测量结果的有效数字，并写成小数点前取一位非零数字，如 15.4 mm，写成 1.54×10^{-2} m 或 1.54×10^{4} μm。

采用科学记数法表示有效数字，使有效数字的位数与单位无关，既能表示出数字的大小，而且计算时也容易定位。

(三) 有效数字修约规则

有效数字修约规则（截尾规则）概括成一句话是“四舍六入，逢五考虑”。若保留数字末位后面一位数小于 5，则舍去；大于 5，则进 1；等于 5，则考虑：5 后非零进 1，5 后为零把末位凑成偶数。

例如，把下列数据截尾到小数点后 3 位：7.69149，2.1367，3.14159，3.21650，4.51050，5.62350，5.37851。截尾后分别为：7.691，2.137，3.142，3.216，4.510，5.624，5.379。

（四）有效数字的运算规则

1．加减法

运算结果的有效数字的最后一位与参与加减运算各量中误差最大的有效数字的末位对齐，多余尾数按截尾规则舍去。例如，$20.\bar{1}+4.17\bar{8}=24.\bar{3}$，加横线的数字为可疑数字。

2．乘除法

运算结果的有效数字位数与参与乘除运算各量中有效数字位数最少的为准，多余尾数按截尾规则舍去。例如，$3.21\bar{9}\times1.0\bar{4}=3.3\bar{5}$；$5768.\bar{9}\div28\bar{2}=20.\bar{5}$。

3．乘方和开方

运算结果的有效数字位数与其底数（被开方数）的有效数字位数相同。

4．函数运算

三角函数的有效数字位数与相应的角度（以弧度为单位）的有效数字的位数相同。如分光计读角度读到 $1'$，因为 $1'=0.0003$ rad，所以 $\sin30°00'=0.5000$ 应有 4 位有效数字。

自然对数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同；而常用对数其尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同。例如，$\lg1983=3.2973$；$\ln1983=7.592$。

指数函数运算后的有效数字位数与指数小数后的位数相同，如 $10^{0.32}=2.1$。如指数为整数，取一位有效数字。

5．四则混合运算

进行四则混合运算时，应注意下面两点：

（1）参与计算的常数（如 e，π 等）和公式中的自然数的取位，一般与参与运算的各数值中有效数字位数最多的相同。

（2）在混合运算中，有的因子可能包含加减运算，经过加减运算后有效数字的位数可能增减，这时不能以原始数据为准来确定结果的有效数字位数，而应该从整个算式中各个因子的有效数字位数来考虑。例如：

$$22\bar{5}\times(11.3\bar{7}-10.5\bar{2})\div11.8\bar{7}=22\bar{5}\times0.8\bar{5}\div11.8\bar{7}=1\bar{6}$$

（五）测量结果的有效数字

有效数字定义明确地说明，由误差决定有效数字，这是处理一切关于有效数字问题的依据。测量结果的有效数字位数也应由误差来确定，即测量结果的末位要与误差的末位对齐。如某测量值为 0.1785，其误差为 ±0.003，则测量结果写成 0.178 ± 0.003。由于标准偏差是对标准误差的估计，所以误差通常只取一位有效数字。为了不人为地缩小误差范围，对误差截尾时，一般都采用进位的方法。相对偏差一般保留两位有效数字。

五、实验数据处理方法

对实验中所测得的大量数据进行整理分析和归纳计算，得到实验结论的过程称为数据