

YIXUEWULIXUE SHIYAN

医学物理学实验

张鹏程 主编



科学出版社

医学物理学实验

张鹏程 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据医学类各专业的培养目标,在参照理工类非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工类非物理类大学物理课程教学基本要求》,并在总结多年从事医学物理学实验教学及教学改革经验的基础上,本着实用、够用、会用、适用并符合学生学习的特点为原则,结合医学院校医学物理学实验课程的教学实际情况和需要精心编写而成。本书内容主要包括物理实验的实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、数据处理、注意事项及思考题等,能帮助学生强化概念,掌握实验方法,提高实验操作技能,培养学生的实际动手能力。

本书可供高等医学院校本科生、专科生各专业使用或参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验/张鹏程主编. —北京: 科学出版社, 2014.1

ISBN 978-7-03-039428-6

I. ①医… II. ①张… III. ①医用物理学-实验-医学院校-教材
IV. ①R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 310967 号

责任编辑: 高 嵘 焦惠丛 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 高 嵘 / 封面设计: 苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 7

字数: 127 000

定价: 18.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《医学物理学实验》编委会

主 编 张鹏程

副主编 郭 佳 康文斌 朱本超

编 委 蔡兴华 罗 红 王建国 吴 静 王 鑫

前 言

物理学是一门实验科学，在物理学的建立和发展中，物理实验起到了直接的推动作用。从经典物理到近代、现代物理，物理实验在发现新事物、建立新规律、检验理论、测量物理量等诸多方面发挥着巨大作用。随着现代科学技术的高速发展，物理实验的思想、方法、技术与装置已广泛地渗透到了自然学科和工程技术的各个领域，解决了一大批生产和科研问题。

医学物理学实验是一门重要的基础课程，是学生进入大学后系统地接受科学实验方法和实验技能训练的开端。通过学习，可以提高学生用实验手段发现、分析和解决问题的能力，激发学生的创新意识和创造力，培养和增强独立开展科学研究的素质。

根据医药专业物理实验课程的基本要求，在总结了多年从事医学物理学实验教学的基础上，我们对现有的医用物理实验内容进行了较大的调整与改革，突出了与医学结合较紧密的基础物理实验和新开发的仪器。本书包括与医药有关的力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验，还有传感器及电子线路方面的知识，共计 15 个实验项目。可供高等医学院校本科生、专科生各专业使用或参考学习，教学参考学时数为 20~50 学时。

本书由湖北医药学院的张鹏程老师主编，参加本书编写工作的老师有朱本超、康文斌、郭佳、王建国、王鑫、吴静、蔡兴华、罗红。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

前言	
绪论	1
实验一 基本测量	14
实验二 用拉伸法测杨氏模量	19
实验三 液体黏度的测定	25
实验四 温度传感器的特性及人体温度测量	30
实验五 温差电现象实验	40
实验六 多用电表的使用	43
实验七 印相实验	49
实验八 显微镜放大率和数值孔径的测定	52
实验九 用衍射光栅测光波波长	59
实验十 示波器的原理和使用	62
实验十一 二极管单向导电性能验证	69
实验十二 单晶体三极管性能研究	73
实验十三 负反馈放大电路	82
实验十四 A 型超声波的医学应用	87
实验十五 CT 技术原理实验	94
参考文献	101

绪 论

现代医药科学，正是由于广泛应用了物理学的理论、方法和技术，才可能获得高科技设备，迅速发展，并取得一系列重大科研成果。因此，物理实验成为医药院校物理教学必不可少的组成部分。作为未来的高级医药人才，学好物理实验课，在科学实验能力和方法上得到系统的训练和培养，为后续课程的学习和将来从事专业工作打下基础是十分必要的。

一、医学物理学实验课的主要任务

1. 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量，使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能

运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律，加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生从事科学实验的能力

科学实验的能力主要包括：

- 1) 自学能力。能够自行阅读实验教材与参考数据，正确理解实验内容，做好实验前的准备工作。

- 2) 动手能力。能借助教材与仪器说明书，正确调整和使用仪器，制作样品，发现和排除故障。

- 3) 思维判断能力。运用物理学理论，对实验现象与结果进行分析和判断。

- 4) 书面表达能力。能够正确记录和处理实验数据，绘制图表，分析实验结果，撰写规范、合格的实验报告或总结报告。

- 5) 综合运用能力。能够将多种实验方法、实验仪器结合在一起，运用经典与现代测量技术和手段，完成某项实验任务。

- 6) 初步的实验设计能力。根据课题要求，能够确定实验方法和条件，合理选择、搭配仪器，拟定具体的实施步骤。

3. 培养学生从事科学实验的素质

科学实验的素质包括理论联系实际、实事求是的科学作风；严肃认真的工作态度；不怕困难、勇于探索的创新精神；遵章守纪、爱护公物的优良品德；团结

协作、共同进取的作风。

二、医学物理学实验课的基本程序

1. 实验预约

目前,医学物理学实验课程大多采用开放式教学方式,即学生可在实验室提供的上课时间和开设的实验项目内,根据自己的专业特点、兴趣爱好及时间安排,自己选择实验项目和实验时间。因此,做好上课前的预约工作是至关重要的。实验预约主要通过计算机网络实现,学生在预约时应仔细阅读实验室(或中心)关于开放实验的有关管理规定和预约指南,合理地安排好自己的实验课表,保证实验课的顺利进行。

2. 实验前的预习

预习是训练和提高自学能力的极好途径,为了在规定时间内高质量地完成实验内容,必须做好预习工作。预习时,通过阅读实验教材及参考数据,重点考虑三方面问题:做什么(最终目的);根据什么去做(实验原理和方法);怎样做(实验方案、条件、步骤和关键要领)。在此基础上写好预习报告,报告主要内容是:实验名称,简单实验原理(如主要计算公式、线路图等),实验内容(需观察的现象或需测量的物理量,数据记录表格),遇到的问题及注意事项。

每次实验前,教师将检查预习情况。

3. 实验中的观测

实验操作与观测是动手能力、思维判断能力和综合运用能力训练的过程,也是培养学生科学实验素质的主要环节。在教师指导性讲解的基础上,主要做到以下几方面要求:

- 1) 弄清实验内容的具体要求和注意事项。
- 2) 熟悉仪器,并进行调整测试,符合要求后,方可进行正式操作、测量。
- 3) 科学地、实事求是地记录下实验中观察到的各种现象和测量数据,同时记录与实验结果有关的实验条件,如环境(温度、湿度、压力等),主要仪器(名称、型号、规格、准确度等),记录数据要注意有效数字和单位准确。
- 4) 实验完毕,将实验结果记录情况交任课老师审阅签字,确认无误后方可整理仪器结束实验。

4. 实验后的报告

实验报告是实验工作的全面总结和深入理解的一个环节。一份完整的实验报

告,应是在完善预习报告的基础上,增加以下内容:

- 1) 实验现象与数据,获得数据的条件(如仪器、环境等)。
- 2) 数据处理方法,结果表达。
- 3) 实验现象及误差分析,结果讨论、结论,对实验的体会与建议等。
- 4) 教师签字的原始资料。

书写实验报告时,要简明扼要,文字通顺,字迹端正,图表规范;独立完成实验报告并及时上交。

三、误差理论与数据处理基础知识

在科学研究和实验过程中,往往离不开对某个物理量的测量。物理实验除了定性地观察物理现象外,也需要对物理量进行定量测量,并确定各物理量之间的关系。

由于测量设备、环境、人员、方法等方面诸多因素的影响,测量值与真实值并不完全一致,这种差异在数值上表现为误差。随着科技水平的提高和人们的经验、技巧、专业知识的丰富,误差虽然可以被控制得越来越小,却始终不能消除。因此,对实验中测量获得的资料,要选择合适的方法进行处理,并对其可靠性作出评价,否则,测量结果是没有价值的。

误差与数据处理理论已发展为一门学科,它涉及的内容丰富,且较为复杂。在此,将简单介绍医学物理学实验中常用的一些初步和基本知识。

(一) 几个基本概念

1. 测量

(1) 定义

所谓测量(measurement),就是借助于专门设备,通过一定的实验方法,以确定物理量值为目的所进行的操作。它是一个实验比较的过程,即把一个量(待测量)与另外一个量(标准量)相比较。

测量由测量过程与测量结果组成。

测量过程是执行测量所需的一系列操作,包括建立单位、设计工具、设计测量方法、研究分析测量结果、寻找减小误差的途径等方面。

测量结果表示由测量所获得的待测量的值,一般由数值、单位和精度评定三部分组成。

(2) 分类

从不同的角度考虑,测量有不同的分类法。

按照测量结果获得方法的不同, 测量分为直接测量和间接测量。

用预先校对好的测量仪器或量具对被测量进行测量, 直接读取被测量数值的大小, 称为直接测量(direct measurement)。例如, 用米尺测物体的长度, 用秒表测时间, 用天平与砝码测物体的质量, 用电压表(或电流表)测电压(或电流)等都属于直接测量, 相应的被测物理量称为直接测量量。

如果待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数运算获得的, 这种测量称为间接测量(indirect measurement)。例如, 体积、密度等物理量的测量往往采用间接测量, 相应的被测物理量称为间接测量量。

实际测量中多数为间接测量, 但直接测量简单、直观, 是一切间接测量的基础。

按照测量条件的不同, 测量可分为等精度测量和非等精度测量。

在相同的测量条件下(同一测量水平的观测者, 同一精度的仪器, 同样的实验方法和环境等)对某一待测量所作的重复性测量, 称为等精度测量。等精度测量获得的所有数据的可信赖程度是相同的, 在数据处理过程中地位相同, 应一视同仁。

尽管实际测量中, 很难保证所有条件不变, 但由于等精度测量数据处理方法相对简单, 因此只要测量条件变化不大, 一般都可近似为等精度测量。大学物理实验学习阶段, 主要考虑等精度测量。

在不同的测量条件下对某一待测量所作的重复性测量, 称为非等精度测量。非等精度测量获得的所有数据的可信赖程度是不同的, 在数据处理过程中应按精度高低, 区别对待。

按照被观测对象在测量过程中所处的状态, 可分为静态测量和动态测量。

如果待测量在测量过程中是固定不变的, 这时所进行的测量为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量结果的影响, 应把被测量或误差作为随机变量进行处理。

如果待测量在测量过程中随时间不断变化, 这时所进行的测量为动态测量。动态测量需考虑时间因素对测量结果的影响, 应把被测量或误差作为随机过程来处理。

2. 误差

(1) 定义

误差(error)是指测量值与被测量的真值(true value)之差。用式子表示为

$$\text{误差}(\delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0)$$

其中, 误差可正可负, 反映了测量值偏离真值的程度; 测量值是通过测量得到的被测量的值; 真值是某一物理量在一定条件下所具有的客观的、不随测量方法改变的真实数值。一般情况下, 真值是未知的, 所以误差的概念只具有理论意义。

只是在某些特殊情况下，真值可认为是已知的，主要包括以下几类。

A. 理论真值：通过理论方法获得的真值。例如，三角形内角之和为 180° ；理想电容或电感构成的电路，电压与电流的相位差为 90° 等。

B. 计量学的约定真值：国际计量机构内部约定而确定的真值。例如，7个SI基本单位量的确定，即长度单位米(m)、时间单位秒(s)、电流强度单位安培(A)、质量单位千克(kg)、热力学单位开尔文(K)、物质的量单位摩尔(mol)、发光强度单位坎德拉(cd)。

C. 标准器的相对真值：当高一级的标准器的误差小于低一级的标准器或普通计量仪器的误差一定程度后，高级标准器的指示值可以作为级别低的仪器的相对真值。

(2) 误差的分类

根据误差的性质，可将误差分为系统误差、偶然误差两类。

A. 系统误差

在同一测量条件下，多次测量同一物理量时，大小和符号保持恒定或随条件的改变按某一确定规律变化的误差，称为系统误差(systematic error)。一个完整的测量系统，通常由实验源、实验体、观测系统、实验环境四部分组成，因此系统误差来源可以归纳为以下几个方面。

a. 仪器设备、装置误差

1) 标准器误差。标准器是作为与被测量相比较时提供标准值的器具。例如，标准电池、标准量块、标准电阻等。由于使用条件或制作不够完善等原因，标准器本身也会产生附加误差。

2) 仪器误差。测量仪器是指能将被测量转化为可直接观测的指示值或等效信息的计量器具。例如，天平、电桥等比较仪器；温度计、秒表、检流计等指示仪器。仪器设计制造不完善、调节使用不当、老化等原因都会造成测量误差。

3) 附件误差。为使测量方便进行而使用的各种辅助配件，均属测量附件。例如，开关、导线、电源等各种辅助配件也会引起误差。

b. 环境误差

由于各种环境因素，如温度、湿度、压力、振动、电磁场等，与要求的标准状态不一致而引起的测量装置和被测量本身的变化所造成的误差。

c. 方法误差

由于测量方法或计算方法不完善、不合理等原因引起的误差。例如，瞬时测量时取样间隔不为零；用单摆测量重力加速度时，公式 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 的近似性；用伏安法测电阻时，忽略电表内阻的影响等。

d. 人员误差

由于测量人员分辨力有限、感官的生理变化、反应速度及固有习惯等原因引

起的误差。例如，测量滞后与超前、读数倾斜等。

从不同角度，系统误差又可分为不同种类。

按对误差掌握程度，系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差的大小和符号是可以确定的，如千分尺、电表的零位误差，伏安法测电阻电表内阻引起的误差等。这类误差可以修正。未定系统误差的大小和符号不能确定，只能估计出大小变化范围的系统误差，如仪器误差。

按误差的变化规律，系统误差又可分为不变系统误差和变化系统误差。不变系统误差的大小和符号保持恒定不变。变化系统误差的大小和符号按某一确定规律变化，如线性、周期性等规律。

B. 偶然误差

在同一测量条件下，多次测量同一物理量时，误差的绝对值时大时小，符号时正时负，以不可预知的方式变化，这种误差称为偶然误差(random error)。偶然误差是由测量过程中一些偶然的或不确定的因素引起的。例如，人的感官灵敏度及仪器精度有限，实验环境(温度、湿度、气流等)变化，电源电压起伏，微小振动等都会导致偶然误差。由于引起偶然误差的因素复杂，又往往交叉在一起，不能分开，因此，偶然误差是无法控制的，无法从实验中完全消除，一般通过多次测量来达到减小的目的。

从一次测量来看，偶然误差是偶然的。但当测量次数足够多时，偶然误差服从一定的统计规律，可按统计规律对误差进行估计。

(3) 误差的表示形式

A. 绝对误差

用绝对大小给出的误差定义为绝对误差(absolute error)。用式子表示为

$$\text{误差}(\delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0)$$

绝对误差是带有单位的数，可正可负。绝对误差反映测量值偏离真值的大小与方向。

B. 相对误差

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差(relative error)。用式子表示为

$$\text{相对误差}(E) = \text{绝对误差} / \text{真值}$$

由于一般情况下真值未知，通常用测量值代替真值。相对误差是无量纲数，通常用“%”表示。相对误差可以反映测量的精度高低。

例 1 测量两个长度量，测量值分别为 $L_1 = 100.0 \text{ mm}$ ， $L_2 = 80.0 \text{ mm}$ ，其测量误差分别为 $\delta_1 = 0.8 \text{ mm}$ ， $\delta_2 = 0.7 \text{ mm}$ 。试比较两个测量结果精度的高低。

$$\text{解: } E_1 = \frac{\delta_1}{L_1} \times 100\% = \frac{0.8}{100.0} \times 100\% = 0.8\%$$

$$E_2 = \frac{\delta_2}{L_2} \times 100\% = \frac{0.7}{80.0} \times 100\% = 0.9\%$$

从绝对误差的角度看, 第一个量测量值的误差大于第二个量的误差; 但从相对误差的角度来看, 第一个量的测量精度却高于第二个量。

C. 引用误差

引用误差(fiducial error)定义为绝对误差与测量范围上限(或量程)的比值, 即

$$\text{引用误差} = \text{绝对误差} / \text{测量范围上限}$$

引用误差通常用“%”表示, 主要用于仪器误差的表示, 实际是一种简化和使用方便的仪器仪表的相对误差。仪表量程或测量范围内各点的引用误差一般不相同, 其中最大的引用误差称为引用误差限, 去掉引用误差的正负号及“%”后, 称为仪器的准确度等级(accuracy class)。电工仪表的准确度等级分别规定为 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 和 5.0 等 11 级。

例 2 检定 2.5 级, 上限为 100V 的电压表, 发现 50V 分度点的示值误差为 2V, 并且比其他各点的误差大, 试问该电表的最大引用误差为多少? 该表是否合格?

解: 由引用误差定义可知, 该表的最大引用误差为 $\frac{2\text{V}}{100\text{V}} = 2\%$ 。根据准确度等级的含义, $2\% < 2.5\%$, 显然该电表合格。

3. 精度

精度(trueness)又称为精确度, 用来描述测量结果与真值的接近程度。它是一个定性的概念, 不能用数值大小来表示, 只能讲高低。

(1) 精密度

精密度(precision)用来描述测量结果中偶然误差的大小程度, 即在一定条件下, 进行多次重复测量时, 各测量值之间的接近程度。精密度反映偶然误差大小的程度。

(2) 正确度

正确度(validity)用来描述测量结果与真值的偏离程度, 它反映系统误差的大小程度。

(3) 准确度(精确度)

准确度(accuracy)反映系统误差与偶然误差综合大小程度。准确度高说明测量结果既精密又正确。

通过图 0-1 打靶弹着点的分布图, 可以形象地说明上述三个概念。图 0-1(a)

表示精密度高，正确度低；图 0-1(b)表示正确度高，精密度低；图 0-1(c)表示正确度与精密度都高，即准确度高，或精度高。

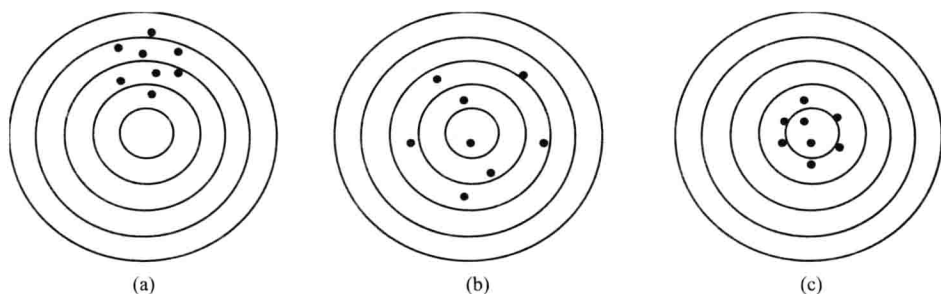


图 0-1 精度示意图

4. 有效数字

有效数字(significant figure)是指能正确表达某物理量数值和精度的一个近似数，由准确数字和可疑数字组成(如果该数值绝对误差界是最末位数据的半个单位，那么从这个近似数左边第一个非零数字起到最后一位数字止，都叫有效数字)。

为了便于理解，举一例子加以说明。如图 0-2 所示，用最小刻度为 1mm 的米尺测量一物体的长度，不同的测量者测得结果不同，可能为 2.55cm, 2.56cm, 2.57cm 等。其中，前两位数字是根据米尺的刻度准确读出的，不随观测者变化，是可靠的，称之为准确数字，最后一位数字是在两个刻度之间估计读出的，随观测者个人情况可能略有不同，显然是不准确的，称为可疑数字。尽管可疑数字不准确，但它能客观、合理地反映出该物体比 2.5cm 长，比 2.6cm 短的事实，是有效的。因此，测量结果的有效数字是由若干位准确数字和一位可疑数字组成的。

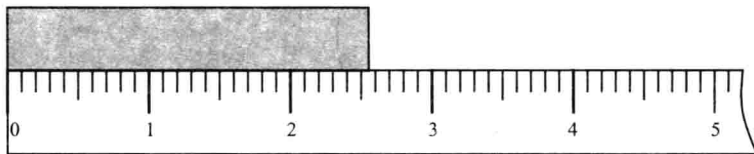


图 0-2 长度测量示意图

学习有效数字应注意以下几个问题：

(1) 有效数字与测量条件密切相关

从上面测量结果可以看出，测量结果的有效数字位数由测量条件和待测量的大小共同决定。对于大小已定的物理量，测量仪器的精度越高，有效数字位数越多，因此，有效数字可以在某种程度上反映出测量仪器的精度。例如，上述物体的长度，用米尺测量是 3 位有效数字，而采用 1/50 游标卡尺测量，可得 4 位有效数字，用千分尺测量，可得 5 位有效数字；当测量条件一定时，待测量越大，有

效数字位数越多。

(2) 数字“0”在有效数字中的作用

“0”在数据中的位置不同，可能是有效数字，也可能不是有效数字。例如，0.03020m 这个数中共有 4 个“0”，其中数字“3”前面的两个“0”只用来表示小数点位置，不是有效数字，而其余两个“0”是有效数字，即数字中间和末尾的“0”是有效的。

既然数字末尾的“0”是有效数字，那么就不能在数字的末尾随意加 0 或去掉 0，否则物理意义将发生变化。要注意，一个物理量的测量值和数学上的一个数意义是不同的。数学上，0.0302m 与 0.03020m 没有区别，但在物理上， $0.0302\text{m} \neq 0.03020\text{m}$ ，因为 0.03020m 中的“2”是准确测量出来的，是可靠的，而 0.0302m 中的“2”则是可疑数字，是不准确的。

由于数字“3”前面的两个“0”只用来表示小数点位置，不是有效数字，那么数字 0.03020m、3.020cm、30.20mm 的有效数字都是 4 位。因此，在十进制单位进行换算时，有效数字的位数不应发生变化。例如，3.5A 的电流值，若用 mA 单位表示，不能写成 3500mA，而应采用科学记数法，写成 $3.5 \times 10^3 \text{mA}$ 。

(3) 不确定度有效数字的确定

一般情况下绝对不确定度只取 1 位有效数字，对重要的、比较精密的测量或其他特殊情况，可取 2 位或 2 位以上有效数字，相对不确定度可取 1~2 位。本教材如无特殊说明，绝对不确定度取 1 位有效数字，相对不确定度取 2 位有效数字。

(4) 有效数字的确定

对于直接测量，有效数字的确定，实际上就是如何读数的问题。

由于测量结果的有效数字应是由若干位准确数字和一位可疑数字组成的，因此，从测量仪器上读取数据时应注意完整性，即除了读取整刻度数值外，还应进行整刻度以下的估读。特别是读取的数据数值恰好为整数时，则需在后面补“0”，一直补到可疑位为止。例如，上述物体的末端恰好与刻度 25mm 对齐时，则测量结果应记为 2.50cm，而不能写为 2.5cm。总之，直接测量读数的原则是：应读到仪器产生误差的那一位。

对于间接测量，间接测量量有效数字的确定，原则上应遵循由不确定度来确定测量量的有效数字，即间接测量量有效数字的末位与不确定度的末位对齐。例如，为得到某一长方形面积 S ，直接测量其长度和宽度后，经计算得到 $S=3.85025\text{cm}^2$ ，绝对不确定度 $\sigma_S=0.02\text{cm}^2$ ，则面积 S 的正确结果 $S=3.85\text{cm}^2$ 。但在中间运算过程中，由于参与运算的量可能很多，有效数字的位数可能不一致，数据计算显得烦琐和复杂。

为了简化运算过程，同时又不会造成过大的计算误差，一般可采用以下规则进行运算：

1) 进行加减运算时, 应以参与运算各数据中末位数数量级最大的数据为准, 其余各数据在中间计算过程中向后可多取一位, 最后结果与末位数数量级最大的那一位对齐。例如, $71.3 - 0.753 + 6.262 + 271 = 71.3 - 0.8 + 6.3 + 271 = 347.8 = 348$ 。

2) 进行乘除法运算时, 以参与运算各数据中有效数字位数最少的为准, 其余数字在中间运算过程中可多取一位有效数字, 最后结果的有效数字与有效数字位数最少的那个数相同。例如, $39.5 \times 4.08437 \times 0.0013 = 39.5 \times 4.08 \times 0.0013 = 0.21$ 。

乘方和开方运算规则与乘除法运算规则相同, 即结果的有效数字与被乘方、开方数的有效数据位数相同。例如, $1.40^2 = 1.96$, $\sqrt{200} = 14.1$ 。

3) 进行函数运算时, 结果有效数字一般可根据间接测量不确定度计算公式进行计算来确定。对常用的函数, 也可按简单规则确定。例如, 对数函数运算结果的有效数字中, 小数点后面的位数与真数的有效数字位数相同。如 $\lg 1.983 = 0.2973$; 指数函数运算结果的有效数字中, 小数点后面的位数与指数中小数点后面的位数相同, 如 $10^{6.25} = 1.79 \times 10^6$ 。

4) 间接测量计算过程中, 计算公式中还会遇到自然数与常量, 例如, 球体的面积 S 与半径 R 有关系式 $S = 4\pi R^2$ 。式中 4 是自然数, π 是常量。自然数不是测量得到的, 不存在误差, 故有效数字是无穷多位, 而不是一位; 常量在运算过程中有效数字位数, 不能少于参与运算的各数据中有效数字位数最少的那个数据, 一般可以多取 1 位。

上述所述有效数字的运算规则, 只是一个基本原则。实际问题中, 为了防止取舍所造成的误差过大, 常常在运算过程中多取几位, 特别是随着计算机和计算器的普及, 这种处理不会带来太多的麻烦, 只是在最后结果根据不确定度所在位进行截断。

有效数字的舍入(修约)规则。当数字元位元数较多而需要取舍时, 应按以下原则:

- 1) 舍入部分的数值, 如果大于保留部分末位元的半个单位, 则舍去后末位加 1。
- 2) 舍入部分的数值, 如果小于保留部分末位元的半个单位, 则舍去后末位不变。
- 3) 舍入部分的数值, 如果等于保留部分末位元的半个单位, 则舍去后末位凑偶, 即当末位为奇数时末位加 1, 末位为偶数时保持不变。

例 3 按照上述舍入规则, 将下面各个数据保留四位有效数字。

解:

原有数据	舍入后数据
3.17152	3.172
5.10150	5.102
5.10250	5.102
4.376501	4.377

4.376499	4.376
2.71729	2.717

5. 算术平均值与标准偏差

对真值为 x_0 的某一量 x 作等精度测量，得到一测量列 $x_1 \sim x_n$ ，则该测量列的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (0-1)$$

若测量数据中无系统误差和偶然误差存在，由正态分布偶然误差的对称性特点和数学期望、标准差含义可知，在测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，有算术平均值

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = x_0 \quad (0-2)$$

测量列标准差

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (0-3)$$

在实际测量中，测量次数总是有限的，且真值不可知。因此，对于等精度测量列，可以用算术平均值作为真值的最佳估计值，而测量列标准差也需通过估计获得。估计标准差的方法很多，最常用的是贝塞尔法，即子样标准差。公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (0-4)$$

(二) 数据处理的几种常用方法

数据处理是实验的重要组成部分，它贯穿于实验的始终，与实验操作、误差分析及评定形成一有机整体，对实验的成败、测量结果精度的高低起着至关重要的作用。

数据处理的能力，往往代表着实验者水平的高低。高明的实验者可以利用精度不高的仪器，通过选择合适巧妙的数据处理方法，如作图法、列表法、逐差法