

全国高等院校医学实验教学规划教材

医用物理学实验

第 2 版

主编 王亚平 王昌军



科学出版社

全国高等院校医学实验教学规划教材

医用物理学实验

第2版

主 编 王亚平 王昌军

副主编 张 岱 张晓槟 李福星 王光昶

编 委 (以姓氏笔画为序)

王亚平 (锦州医科大学)	王光昶 (成都医学院)
王克难 (锦州医科大学)	王昌军 (锦州医科大学)
王艳丽 (锦州医科大学)	田秀娜 (锦州医科大学)
冯 健 (锦州医科大学)	任 超 (锦州教师进修学院)
李子军 (锦州医科大学)	李福星 (锦州医科大学)
张 岱 (锦州医科大学)	张晓槟 (锦州医科大学)
张瑞兰 (北华大学)	赵晓艳 (锦州医科大学)
洪 洋 (中国医科大学)	徐春环 (牡丹江医学院)
黄 河 (锦州医科大学)	商青春 (牡丹江医学院)
盖立平 (大连医科大学)	焦海颖 (锦州医科大学)

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本教材根据医学院校物理课程教学基本要求,结合医用物理实验教学实际,将实验内容分为“物理实验基础知识”“基础实验”“综合性实验”“创新型实验”和“医学物理实验”五部分,共32个实验,通过从物理学实验到医用物理实验到医学物理实验的递进,实现从接受知识型到培养综合能力型的递进式发展教学目标。

本书适用于医药院校本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学实验 / 王亚平, 王昌军主编. —2版. —北京: 科学出版社, 2017.1

全国高等院校医学实验教学规划教材

ISBN 978-7-03-049450-4

I. ①医… II. ①王… ②王… 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 (2016) 第 171710 号

责任编辑: 朱 华 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

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>

大厂书文印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年1月第 二 版 印张: 7 1/2

2017年1月第六次印刷 字数: 169 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是根据医学院校物理课程教学基本要求，结合医用物理实验教学实际，在认真总结、完善和发展医用物理学实验教学的基础上编写而成的，该书凝聚了编者的心血和智慧，是编者多年进行课程建设和教改成果的结晶。

我们编写此书的宗旨是：培养学生的科学实验能力，提高学生科学实验素质，为学生搭建医学与物理学沟通的平台。

为满足不同专业教学的实际需要，构建分层次递进的新型教学模式，本教材将实验内容分为“物理实验基础知识”“基础实验”“综合性实验”“创新型实验”和“医学物理实验”五部分，通过从物理学实验到医用物理实验到医学物理实验的递进，实现从接受知识型到培养综合能力型的递进式发展教学目标。

本书在编写过程中得到了科学出版社和锦州医科大学领导的大力支持，同时也得到了中国医科大学、牡丹江医学院、大连医科大学、北华大学、锦州市教师进修学院同行们的鼎力相助，在此表示诚挚的谢意。

本实验教材在编写中存在的不足和不当之处，敬请各位专家、同行和读者提出宝贵意见和建议，以便再版时补充修正。

编 者

2016年1月

目 录

概述	1
第一篇 物理实验基础知识	3
第二篇 基础实验	9
实验一 长度的测量	9
实验二 测定铜圆柱的密度	12
实验三 液体黏滞系数的测定	15
实验四 液体表面张力系数的测定	19
实验五 万用电表的使用	24
实验六 示波器的使用	27
实验七 整流滤波	32
实验八 用光电比色计测定溶液的浓度	34
实验九 旋光仪的使用	37
第三篇 综合性实验	40
实验十 人耳听阈曲线的测定	40
实验十一 分光计的调节与使用	42
实验十二 用衍射光栅测光波波长	45
实验十三 用分光计观察明线光谱	47
实验十四 用掠入射法测量液体折射率	49
实验十五 用分光计测量棱镜的折射率	51
实验十六 薄透镜焦距的测定	54
实验十七 测自组显微镜和望远镜放大率	58
实验十八 单透镜像差的观察	60
实验十九 霍尔效应及其应用	65
第四篇 创新型实验	70
实验二十 电流计的改装与验证	70
实验二十一 静电场的描绘	72
实验二十二 用热敏电阻测量温度	74
第五篇 医学物理实验	77
实验二十三 数字图像处理技术	77
实验二十四 A 型超声波诊断仪成像原理及使用	80

实验二十五	A 超伪像的声像图观测	84
实验二十六	B 型超声波诊断仪成像原理及使用	87
实验二十七	B 超伪像声像图观察	92
实验二十八	(脉冲) 核磁共振法测量弛豫时间	96
实验二十九	核磁共振化学位移伪像测定	100
实验三十	X-CT 计算机模拟实验	103
实验三十一	医用 A 类超声定位诊断实验	107
实验三十二	超声脉冲反射法探伤	109
附录		112

概 述

一、医用物理学实验特点

现代医学中,物理学的理论和实验方法得到了越来越广泛的应用,新世纪的医用物理学实验教学要求既体现物理实验学科的系统性,又联系医药各专业特点的新课程体系,医用物理实验课程的设立必须脱离单纯验证物理理论结果的教育轨道。由于医用物理理论知识涉及内容广泛,全方位、多角度建立物理学与医学的联系,因此医用物理学实验也涉及力、热、光、电等物理学科,同时扩展到核磁共振成像、超声成像、X-CT 成像等医学物理领域。学生通过课前的预习、课中的实验和讨论、课后的撰写报告和分析等过程,受到严格、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法和技巧,培养理论联系实际、分析问题、解决问题的能力,在提高敏锐的观察力和严谨的思维能力的同时,不断增强综合能力和创新意识。

二、医用物理学实验课要求

(1) 掌握实验的基本知识,具备正确运用误差理论和有效数字运算法则正确处理实验数据的能力。

(2) 熟悉实验过程的主要程序:实验准备(书写预习报告)——实验操作——撰写实验报告。

(3) 掌握基本量的测量方法和手段,掌握现代常用实验仪器的原理、调节和使用方法。

(4) 具有良好的学风和习惯,不随意乱动实验仪器,具有基本的科学实验能力。

(5) 初步具备独立进行实验的设计与独立测试分析和总结的能力。

(6) 进行光学实验中应该注意的问题。

光学仪器是贵重、精密仪器,它的光学元件和机械部件都比较娇气,为了实现准确测量,实验中不但要求仪器完好,而且要十分光亮清洁。因此使用光学仪器要特别注意以下几点:

1) 光学元件的光面不能用手去触摸和随意擦抹。若有污物要在教师指导下用专用的镜头纸轻轻擦拭,若有灰尘可用吹气球吹拂。不要对着光学镜面说话、打喷嚏等。

2) 光学元件易损,使用时要轻拿轻放,切勿挤压、摩擦、碰撞,仪器不用时,要放在专用的盒子里,或盖上防尘罩。

3) 使用光学仪器,要遵守操作规程,正确使用,不要强拉硬扳,不要随意拆卸仪器部件,不要拆卸仪器镜头。

4) 拿取光学元件的正确方法是:手只能接触毛面,不能摸光面。

5) 实验过程中要注意随时关闭电源,特别是在调整仪器时,可暂时将电源关闭,防止长时间通电造成灯泡过热,延长灯泡的使用寿命。实验过程中尽量将电源的亮度放在较低位置,以能看清像为标准。

三、实验室安全

(1) 注意用电安全。医用物理实验配备和使用的电源多为非安全用电电源, 在实验过程中要注意按照实验要求操作, 防止触电事故发生。

(2) 实验中经常使用玻璃器皿和一些化学制剂, 操作过程中注意不损坏玻璃器皿, 避免划伤, 同时不要将化学试剂滴溅到实验台和身上, 引起不必要的伤害。

四、实验报告书写要求

(一) 实验报告

内容包括预习报告和课堂报告两部分。预习报告要求在进行实验前完成并写在实验报告册上, 包括:

1. **实验目的** 本次所做实验要达到的目的。

2. **实验原理** 写出实验所依据的原理和公式, 注明公式成立的条件及其符号的物理含义, 画出相关的实验电路图、光路图或实验装置图。

3. **实验器材** 列出完成实验项目所需仪器的名称、型号、精度(或分度值)及实验所用材料, 若讲义与实际所用不符, 应取实际采用的实验器材。

4. **实验步骤** 实验所采取的操作步骤, 按先后顺序, 逐步写出。

5. **实验数据记录表格** 根据实验内容, 画出实验数据记录表格。

在完成预习报告的基础上, 在课堂实验过程中完成课堂报告, 包括:

6. **实验数据记录** 实验所得的原始数据全部记录在实验数据记录表格中, 同时要正确地表示出有效数字和单位(注意单位不能标在实验数据的后面)。测量的原始数据不允许修改或加工, 如果发现异常数据, 在查找到出现问题的原因后, 可将重新测量的数据替代异常数据。计算上的错误可以修改。

7. **实验数据处理和实验结果分析** 按照要求对所测得的数据进行处理, 并将测量的物理量结果以要求的形式表示出来。如果实验是为了观察某一物理现象或者某一物理规律, 可扼要地写出实验结论。最后应对实验结果进行分析并回答思考题。

(二) 科学素养

(1) 每次实验结束后当堂交实验报告, 教师在下次实验课前完成报告的批改并下发, 每次实验成绩的评定参照以下指标: 预习报告占 20%, 基本操作占 30%, 实验报告(包括报告的完整性、图表的规范性、书写工整、实验数据和数据处理、结论正确等)占 40%, 实验作风(包括安全卫生、仪器破损、实验室规则遵守情况等)和创新意识占 10%。

(2) 实验结束后按照要求摆放仪器, 经教师检查合格后方可离开实验室。

(王亚平)

第一篇 物理实验基础知识

物理学是建立在实验基础上的科学,是各门自然科学技术的基础。现代医药学同样由于广泛应用了物理学的理论、方法和技术,才可能获得高科技装备而迅速发展,并取得一系列重大科研成果。因此医用物理实验是将物理基础理论运用到医学领域的重要桥梁,只有真正掌握医用物理实验的基本功,才能顺利地把物理原理和技术应用到医药学学科而产生质的飞跃。

一、医用物理实验的目的

(1) 通过医用物理实验课程的学习,使学生直接观察和分析重要的物理现象,学习掌握物理量的测量和基本的物理实验方法,加深对物理原理的理解。

(2) 利用物理实验仪器和方法对生理参数进行测量和讨论,使学生对物理和医学的关系有了直观的认识,激发了学生学习物理课的兴趣,进一步证明了医学生学习物理的重要性。

(3) 医用物理实验使学生受到从事科学实验以及进行科学研究的基本训练,着力培养和提高学生的实践能力和创造能力,使学生成长为适应 21 世纪所需要的,具备基础扎实、知识面宽、能力强、素质高的人才,这是物理实验的目标。

二、医用物理实验的任务

1. 加深对理论的理解 通过观察、分析实验现象并对物理量进行测量,学习物理实验方法,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 具体包括:

(1) 能够通过阅读实验教材或资料,作好实验前的预习;

(2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;

(3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断;

(4) 能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

(5) 根据理论知识和实验中提供的器材,能够完成具有设计性内容的实验。

3. 培养和提高学生科学实验的作风和素养 主要是理论联系实际、实事求是的工作作风,一丝不苟、严肃认真的工作态度,积极主动的探索精神,遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德。

三、医用物理实验的方法

物理实验是根据研究的目的,利用科学仪器、设备,人为地控制或模拟自然现象,排除干扰,突出主要因素,在最有利的条件下去研究自然规律的一种认知活动。好的物理实验方法不仅使学生能更深刻地认识自然规律,而且也是学生在今后的学习和工作中可以借

鉴和运用的。以下介绍几种常用的实验方法。

1. 直接比较测量法 将被测量直接与已知其值的同种量相比较,以确定被测量值的测量方法,称为直接比较测量法。例如用线纹尺测长度、用量角器测角度、用等臂天平测质量。这种方法测量的准确度决定于“已知其值的同种量”的准确等级。例如,长度测量的准确度决定于线纹尺的准确度等级、质量测量的准确度决定于砝码的准确度等级。

2. 放大测量法 在实验观测过程中,将被测量放大,或将被测量对观测者的视觉效应放大后再进行测量,以确定其值的测量方法。放大测量法又分为累积放大法、机械放大法、电子学放大法和光学放大法。

3. 转换测量法 把被测对象依据物理规律转换为另一个被测对象的方法,称为转换测量法。转换测量法的物理本质是通过转换测量对象,把看起来不可测量的量转化为可测量的量,或把看起来不可能测准的量准确地测量出来。超声换能器将机械波的测量转换为电压波的测量、霍尔元件将磁感强度的测量转换为电势差的测量、示波器将电信号的测量转换成几何图形的测量等都属于转换测量法。把用以实现转换测量的转换器件称为传感器,传感器的共同特点是,能直接感受被测量的作用,并能按一定规律将被测量转换成同种或别种可测的信号。按传感器能感受的被测量的属性来分,有物理传感器、化学传感器和生物量传感器几大类。

4. 替代测量法 将已知其值的同种量替代被测量,使这个同种量在指示装置上得到相同的效应,以确定被测量值的测量方法,称为替代测量法。在现代的物理测量中使用替代测量法,可以有效地抵偿由于测量仪器不完善而造成的系统误差。例如,使用天平测质量时,天平的不等臂性会造成较大的系统误差,为了抵偿这一系统误差,常使用替代法。替代法测量结果的准确度决定于替代物(天平中的替代物分别是标准砝码)量值的准确度和指示装置的灵敏度。

5. 模拟测量法 根据相似性原理,人为地制造一个类似于被测量的模型,通过测量这个模型来获得测量结果的方法,称为模拟测量法。模拟测量法又分为几何模拟法、替代模拟法和计算机模拟法。

(1) 几何模拟法:有时被研究的对象十分庞大,或造价十分昂贵,为了取得设计参数,事先制作一个按比例缩小的模型,对模型进行测量。

(2) 替代模拟法:利用物理量之间物理性质或物理规律的相似性或等同性进行模拟的方法,称为替代模拟法。例如,为了测绘静电场中的电力线分布,可以用稳恒电流场来模拟静电场,用稳恒电流场的测量替代静电场的测量。采用这种模拟方法有两点理由,一是静电场不易测量,二是两种场中的电势分布具有相同的数学表达式(用模拟法测绘静电场)。

(3) 计算机模拟法:由于计算机仿真技术的迅速发展,用计算机对物理过程做数字模拟,已经成为普遍采用的方法。其大致过程是,通过键盘指令来控制 and 操纵实验过程,屏幕上会按照指令自动显示物理过程和物理现象,并能自动显示测量结果。

6. 科学抽象法 影响物理现象的因素往往复杂多变,实验中常可采用忽略某些次要因素,抓住主要因素或假设一些理想条件的办法,以突出现象的本质因素,便于深入研究,从而取得实际情况下合理的近似结果。例如在电路实验中把电压表变成内阻是无穷大的理想电压表;电流表变成内阻等于零的理想电流表等都采用了科学抽象法。

四、测量值的误差及其估算

1. 单次直接测量的误差 在物理实验中,常常由于条件不许可,或测量准确度要求不

高等原因, 对一个物理量的直接测量只进行一次。这时可根据实际情况对测定值的误差进行合理的具体估算。对于偶然误差很小的测定值, 可按仪器出厂检定书或仪器上直接注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明, 也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。

2. 多次测量的平均值及误差 为了减少偶然误差, 在可能的情况下, 总是采用多次测量, 将各次测量的算术平均值作为测量结果, 设在相同条件下对某物理量 X 进行了 n 次重复测量, 其测量值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 用 $\bar{X}$ 表示平均值, 则

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

由误差的统计的理论可证, $\bar{X}$ 最接近于真值, 称为测量的最佳值或近真值。

3. 测定值的误差的表示

(1) 算术平均偏差: 设 d_i 为各测量值 X_i 与平均值的偏差, 即

$$d_1 = X_1 - \bar{X}, d_2 = X_2 - \bar{X}, \dots, d_n = X_n - \bar{X}$$

则算术平均偏差的定义为:

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{n}(|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i|$$

(2) 方均根偏差 (标准偏差): 设 σ 为方均根偏差, 则其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

误差是测量值与真值之差, 偏差是测量值与平均值之差, 测量次数越多, 它们越接近, 我们不考虑这种细微区别, 上述两种偏差都表示在一组多次测量中, 各数据之间的分散程度。

(3) 多次测量值的结果表达式: 多次测量值的结果用上述两种偏差表示如下:

$$X = \bar{X} \pm \Delta \bar{X} \quad \text{或} \quad X = \bar{X} \pm \sigma$$

4. 绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差是以测定值的绝对值表示的误差, 即

$$\Delta \bar{X} = |X - \bar{X}|$$

(2) 相对误差是测定值的绝对误差与算术平均值之比, 即

$$Er = \Delta \bar{X} / \bar{X} \quad \text{或} \quad Er = \Delta \bar{X} / \bar{X} \times 100\%$$

例 1 测得两个物体的长度为 $L_1 = (23.50 \pm 0.03) \text{ cm}$, $L_2 = (2.35 \pm 0.03) \text{ cm}$, 求其绝对误差与相对误差。

答: 绝对误差为 0.03 cm 。

相对误差为

$$Er_1 = (0.03 / 23.50) \times 100\% = 0.1\%$$

$$Er_2 = (0.03 / 2.35) \times 100\% = 1\%$$

两者的绝对误差相等, 而相对误差 L_2 为 L_1 的 10 倍, 当然是 L_1 的测量更准确些。

5. 间接测量的误差计算 间接测得量是通过一定的公式计算出来的, 既然公式中的直接测得量都有误差, 所以间接测得量也必然有误差。

(1) 加法运算中的误差 (和的误差): 若设 $N = A + B + C + \dots$

则 $\overline{N} \pm \Delta \overline{N} = (\overline{A} \pm \Delta \overline{A}) + (\overline{B} \pm \Delta \overline{B}) + (\overline{C} \pm \Delta \overline{C}) + \dots$

因为 $\overline{N} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \dots$

所以绝对误差为

$$\Delta \overline{N} = |\pm \Delta \overline{A} \pm \Delta \overline{B} \pm \Delta \overline{C}|$$

由于 A 、 B 、 C ... 诸量都是独立的, 它们的绝对误差可正可负, 在最不利的情况下可能出现的最大误差为 $\Delta N = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots$, 规定此最大误差为间接测得量的误差, 这样一来, 相对误差为

$$Er = \frac{\Delta \overline{N}}{\overline{N}} = \frac{\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B} + \Delta \overline{C} + \dots}{\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \dots}$$

(2) 减法运算中的误差 (差的误差): 若设 $N = A - B - C - \dots$

绝对误差为 $\Delta \overline{N} = \Delta \overline{A} + \Delta \overline{B} + \Delta \overline{C} + \dots$

相对误差为 $Er = \frac{\Delta \overline{N}}{\overline{N}} = \frac{\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B} + \Delta \overline{C} + \dots}{\overline{A} - \overline{B} - \overline{C} - \dots}$

由此可见, 和差运算的绝对误差等于各直接测得量的绝对误差之和。其他函数的误差传递公式, 我们不一一证明, 下面仅列出一些常用公式, 以备查阅。

常用误差计算公式

运算公式	绝对误差 $\Delta \overline{N}$	相对误差 $\Delta \overline{N} / \overline{N}$
$N = A + B$	$\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B}$	$(\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B}) / (\overline{A} + \overline{B})$
$N = A - B$	$\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B}$	$(\Delta \overline{A} + \Delta \overline{B}) / (\overline{A} - \overline{B})$
$N = A \cdot B$	$\overline{B} \cdot \Delta \overline{A} + \overline{A} \cdot \Delta \overline{B}$	$\Delta \overline{A} / \overline{A} + \Delta \overline{B} / \overline{B}$
$N = A / B$	$(\overline{B} \cdot \Delta \overline{A} + \overline{A} \cdot \Delta \overline{B}) / \overline{B}^2$	$\Delta \overline{A} / \overline{A} + \Delta \overline{B} / \overline{B}$
$N = A^n$	$n \overline{A}^{n-1} \cdot \Delta \overline{A}$	$n \Delta \overline{A} / \overline{A}$
$N = A^{1/n}$	$\frac{1}{n} \overline{A}^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta \overline{A}$	$n \Delta \overline{A} / \overline{A}$

由此可见, 乘除运算的相对误差等于各直接测得量的相对误差之和。

从以上结论可知, 当间接测得量公式中, 只含加减运算时, 先算绝对误差, 后算相对误差比较方便; 当公式中含有乘除、乘方或开方运算时, 先算相对误差, 后算绝对误差较为方便。

五、有效数字及其运算

用实验仪器直接测量的数值都含有一定的误差, 因此, 测得的数据都只能是近似数。显然由这些近似数计算而得的间接测得值也必然是近似数。

实验时从仪器上读出的数字, 通常都要尽可能估计到仪器最小刻度线的下一位, 如用最小刻度线为毫米的米尺量度物体的长度, 我们可以读出 4.26cm、4.27cm、4.28cm, 前两位可以直接从米尺上读出来, 是确切数字, 而第三位数是测量者估读出来的, 估读的结果是因人而异的。因此这一位数是有疑问的, 称为存疑数字, 我们把仪器上读出的数字包括最后一位存疑的数字, 称为有效数字。

1. 记录有效数字应注意以下几点

(1) 测量物体的末端恰好与仪器的刻度线对齐, 则估计数字应为 “0”。

(2) 表示小数点位置的零不计入有效数字的位数, 它的出现可因单位选择的大小而出现或消失。但数字后面的零是有效数字, 不允许任意增减或抹去。

(3) 不因单位的变换而增减有效数字位数。

(4) 有些仪表, 如数字式仪表或游标卡尺, 是不可能估计出最小刻度以下一位数字的, 就不去估计, 而把直接读出的最后一位数字认为是存疑的, 最后一位总存在 ± 1 的误差。

2. 有效数字的删略和运算规则

(1) 删略多余有效数字的原则是“4 舍 5 入”。

(2) 有效数字的加减: 在加减的运算中, 其结果的可疑位以相加减的各数中的最前可疑位为准。

$$\begin{array}{r} \text{例 2} \qquad 13.78+92.4=106.2 \\ \qquad \qquad 13.78 \\ + \qquad 92.4 \\ \hline \qquad 106.18 \end{array}$$

106.18 中 1 和 8 皆为可疑, 当然最后的 8 就没有必要了。

$$\text{例 3} \qquad 26.65-3.926=22.72$$

(3) 有效数字的乘除: 在乘除法的运算中, 其结果的有效数字的位数是以诸因数中有效数字位数最少者为准。

$$\text{例 4} \qquad 5.348 \times 20.5 = 110$$

$$\text{例 5} \qquad 37643 \div 217 = 173$$

(4) 有效数字的乘方开方: 在乘方开方运算中, 其结果的有效数字与其底的有效数字位数相同。

(5) 参与运算的常数、指定数或自然数。参与运算的常数 π 、 e ……等的有效数字位数, 通常取与各量中有效数字位数最少的相同。指定数或自然数参与运算时不影响结果的有效数字的位数。

最后强调一个问题: 实验数据和计算结果不能用分数表示, 因它不能表明有效数字的位数。

例 6 一个铅圆柱体, 测得其直径 $d = (2.04 \pm 0.01) \text{ cm}$, 高度 $h = (4.12 \pm 0.01) \text{ cm}$, 质量 $m = (149.18 \pm 0.05) \text{ g}$,

计算铅的密度,

计算铅密度 ρ 的相对误差和绝对误差。

解: (1) 因圆柱体体积

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 h$$

所以:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \bar{m} / \bar{V} = 4 \frac{\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 h} \\ &= 4 \times \frac{149.18}{3.14 \times 2.04^2 \times 4.12} \\ &= 11.1 (\text{g/cm}^3) \end{aligned}$$

(2) 相对误差

$$\begin{aligned}
 E_{\rho} &= \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} + \frac{\Delta \bar{V}}{\bar{V}} = \frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} + 2 \frac{\Delta \bar{D}}{\bar{D}} + \frac{\Delta \bar{h}}{\bar{h}} \\
 &= \frac{0.05}{149.18} + 2 \times \frac{0.01}{2.04} + \frac{0.01}{4.12} \\
 &= 3 \times 10^{-4} + 1 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-3} \\
 &= 1 \times 10^{-2} \\
 &= 1\%
 \end{aligned}$$

绝对误差

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{\rho} &= \bar{\rho} \cdot E_{\rho} \\
 &= 11.1 \times 1\% = 0.1 (\text{g/cm}^3)
 \end{aligned}$$

【误差与有效数字练习题】

1. 一个铅圆柱体, 测得其直径 $d = (2.04 \pm 0.01) \text{ cm}$, 高度 $h = (4.12 \pm 0.01) \text{ cm}$, 质量 $m = (149.18 \pm 0.05) \text{ g}$ 。

(1) 计算铅的密度

(2) 计算铅密度 ρ 的相对误差和绝对误差

(3) 写出真值表达式

2. 按照误差理论和有效数字运算规则, 改正以下错误:

(1) $N = (10.8000 \pm 0.2) \text{ cm}$

(2) 有人说 $8 \times 10^{-1} \text{ g}$ 比 8.0 g 测得准确, 试纠正并说明原因

(3) $28 \text{ cm} = 280 \text{ mm}$

(4) $L = (28000 \pm 8000) \text{ mm}$

(5) $0.0221 \times 0.0221 = 0.00048841$

(6) $400 \times 1500 / (12.60 - 11.6) = 600000$

3. 试利用有效数字运算规则计算下列各式的结果:

(1) $98.754 + 1.3$

(2) $107.5 - 2.5$

(3) 111×0.100

(4) $237.5 \div 0.10$

(5) $76.00 / (40.00 - 2.0)$

(6) $50.00 \times (18.30 - 16.3) / [(103 - 3.0)(1.00 + 0.001)]$

(7) $100.0 \times (5.6 - 4.412) / [(78.00 - 77.0) \times 10.000]$

(徐春环 田秀娜)

第二篇 基础实验

实验一 长度的测量

【实验目的】

- (1) 了解游标卡尺、螺旋测微计的原理和构造。
- (2) 掌握游标卡尺和螺旋测微计的使用和读数方法。
- (3) 根据仪器的精度和有效数字的定义，正确记录原始数据。
- (4) 掌握直接测量和间接测量的数据处理方法，按要求写出测量结果。

【实验原理】

(一) 游标卡尺

1. 游标原理 用分度值为1mm的米尺测量物体长度可测准到毫米，毫米以下的读数凭目测估计。为提高估读的精度，在米尺上附加一把可以滑动的副尺，称为游标。图1-1中所示为50分度游标，游标上的50个分格和主尺上的49个分格等长。设游标的分度值为 x ，主尺的分度值 $X=1\text{mm}$ ，则有： $50x=49 \times 1$ ， $x=0.98\text{mm}$ ， $\Delta x=X-x=1-0.98=0.02\text{mm}$ ，即该游标的分度值为0.02mm。它是50分度游标卡尺所能读出的最小数值。同理10分度、20分度的游标，对应游标的的分度值是0.9mm和0.95mm，游标卡尺所能读出的最小读数分别为0.1mm和0.05mm。游标卡尺所能读出的最小值是由主尺与游标尺刻度的差值即游标分度数目决定。

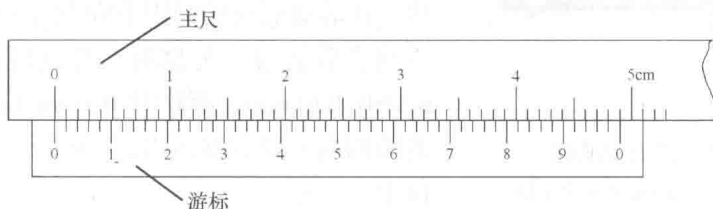


图 1-1 50 分度游标原理图

2. 游标卡尺的构造和使用方法 游标卡尺的构造如图1-2所示，游标卡尺主要由主尺D和游标E两部分构成，主尺D按米尺刻度，游标E紧贴着主尺D滑动，外量爪A、B用来测量物体的外径和高度，内量爪A'、B'测量内径，深度尺C用来测量槽的深度。不测量时，将量爪闭合，游标的零刻线和主尺D的零刻线应当对齐。测量时，一手拿物体，一手持尺，轻轻把物体卡住，旋紧紧固螺钉F，然后再读取数据。

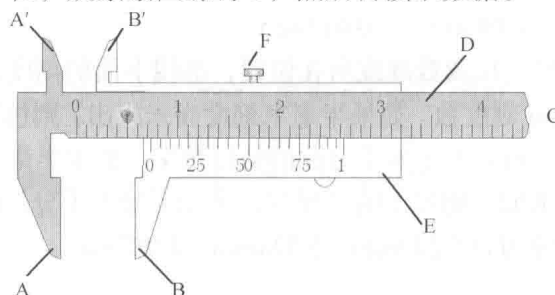


图 1-2 游标卡尺结构图

3. 测量时游标卡尺的读数方法

- (1) 从游标零线的位置读出主尺上的整格数。
 - (2) 根据游标上与主尺对齐的刻线读出不足一分格的小数，二者相加就是测量值。
- 用游标卡尺测量长度 L 的普遍表达式为

$$L = I + \Delta L = I + k \times \Delta x \tag{1-1}$$

如图 1-3 所示，游标卡尺的分度值 $\Delta x = 0.02\text{mm}$ ， $I = 21\text{mm}$ ， $k = 19$ 。故物体长度 $L = 21 + 0.02 \times 19 = 21.38(\text{mm})$ 。

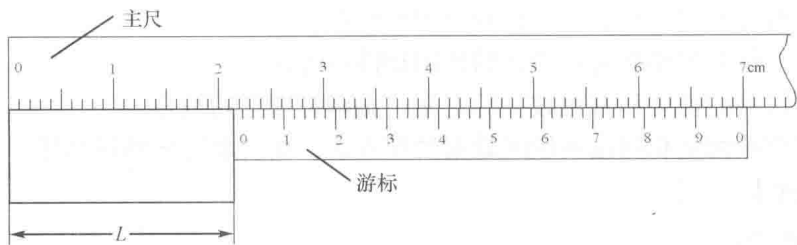


图 1-3 游标卡尺的读数方法

(二) 螺旋测微计 (千分尺)

1. 螺旋测微计的原理 螺旋测微计的构造如图 1-4 所示，量程是 25mm，分度值为 0.01mm。螺旋测微计测量轴上的微动螺旋杆的螺距为 0.5mm。当螺旋杆随活动套筒旋转一周时，沿轴线方向的移动是 0.5mm。螺旋杆转动的整圈数由固定套筒上的直标尺 (间隔为 0.5mm) 读出。在活动套筒的圆周方向刻有 50 分度的圆标尺，活动套管转过一分格时，螺旋杆沿轴线方向移动 $0.5/50 = 0.01\text{mm}$ ，测量时 0.5mm 以下的读数由活动套筒圆周上的刻度读出，并可估读到 0.001mm 这一位上。

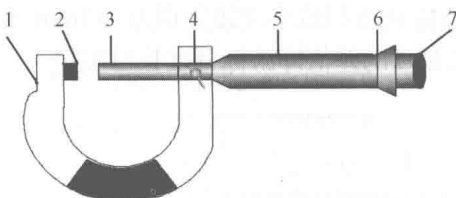


图 1-4 螺旋测微计结构图

- 1. 尺架；2. 砧台；3. 测量轴；4. 锁紧手柄；
- 5. 固定套筒；6. 活动套筒；7. 棘轮

2. 螺旋测微计的使用与读数 测量物体尺寸可旋转活动套筒，使测量轴前进或后退。当测量轴接近被测物体时，转动棘轮旋柄会发出“得”、“得”响声，表示正好接触，应停止旋转棘轮旋柄。此时，固定套筒直标尺上的读数加上活动套筒圆周标尺上的读数，即为被测物体的长度。

(1) 零点检查与初读数：当测量轴与砧台端面接触时，直尺的零线应对准圆标尺上的零线。如两零线不重合，记录下螺旋测微计的初读数，如图 1-5 所示，自左向右的三个零点读数分别是 0.000mm、0.003mm、-0.012mm。

(2) 读数方法：观察主尺读数准线所在位置，准线下面的刻度线为整毫米刻度数，准线上面的刻度线为 0.5mm 刻度数。如果半毫米刻度尚未露出，则读数是：主尺上的整毫米数加上副尺上的整刻度，再加上毫米千分位的估计数字。如果半毫米刻度已经露出，则主尺上的读数应读到半毫米加上副尺上的整刻度，再加上毫米千分位的估计数字。如图 1-6 所示，自左向右的读数分别为 5.249mm、5.524mm、4.987mm。

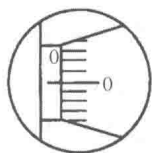


图 1-5 螺旋测微计的零点读数

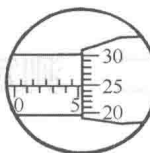
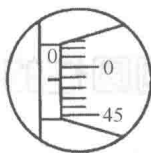
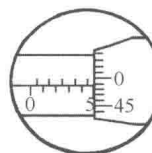
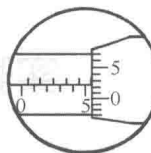


图 1-6 螺旋测微计的零点读数



【实验器材】

游标卡尺、螺旋测微计、金属圆环、钢片、小钢球。

【实验步骤】

- (1) 检查游标卡尺和螺旋测微计的零点数值，记入表 1-1 中，按照“测量值=读数值-零点值”对下述测量结果进行零点误差修正。
- (2) 用游标卡尺测量金属圆环的外径，变换不同位置测量五次，记入表 1-1。
- (3) 用游标卡尺测量金属圆环的内径，变换不同位置测量五次，记入表 1-1。
- (4) 用螺旋测微计测量钢片的厚度，变换不同位置测量五次，记入表 1-1。
- (5) 用螺旋测微计测量小钢球的直径，变换不同位置测量五次，记入表 1-1。

【实验数据记录表格】

表 1-1 测量数据记录表格

测量量 (mm)	测量次数					平均值
	1	2	3	4	5	
圆环外径						
圆环内径						
钢片厚度						
钢球直径						
卡尺零点读数: (mm)			测微计零点读数: (mm)			

【实验数据处理】

- (1) 求金属圆环内、外径的绝对误差和相对误差，并写出测量结果表达式。
- (2) 求小钢球直径的绝对误差和相对误差，并写出测量结果表达式。
- (3) 求小钢球体积的绝对误差和相对误差，并写出测量结果表达式。

【注意事项】

使用完测微计后，应将测量轴后退数毫米，使其与砧台间留出一定间隙，避免因热膨胀而压坏螺纹。

【思考题】

- 1. 一种游标卡尺，主尺上一个分度的长度为 0.5mm，游标上 25 个分度，该游标卡尺的分度值是多少？
- 2. 螺旋测微计上的棘轮有何用处？测量时不用棘轮是否可以？为什么？

(王艳丽)