

医学影像专业特色系列教材

大学物理实验

主 编 仇 惠



科学出版社

医学影像专业特色系列教材

大学物理实验

主 编 仇 惠

副主编 盖立平

编 者 (按姓氏笔画排序)

仇 惠 (牡丹江医学院)

吉 强 (天津医科大学)

刘东华 (新乡医学院)

李明珠 (牡丹江医学院)

杨艳芳 (牡丹江医学院)

张 凡 (牡丹江医学院)

张艳洁 (牡丹江医学院)

周志尊 (牡丹江医学院)

周鸿锁 (牡丹江医学院)

徐春环 (牡丹江医学院)

高 杨 (牡丹江医学院)

商清春 (牡丹江医学院)

盖立平 (大连医科大学)

富 丹 (牡丹江医学院)

科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303 (打假办)

内 容 简 介

本教材是根据全国医学院校大学物理实验课程教学的基本要求, 在多年教学实践及教学改革基础上, 充实完善编写而成的。其编写特点是为扩展现代实验技术手段, 开拓设计性实验, 增加了综合性物理实验和医学物理实验新内容。全书分为测量误差及数据处理、基础物理实验、综合性物理实验和医学物理实验车部分, 总计31个实验。

本书适用于高等医药院校生物医学工程、临床、预防、口腔、影像、药学、检验、麻醉、护理等医院类各专业, 也可供其他专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 仇惠主编. —北京: 科学出版社, 2014.6
医学影像专业特色系列教材

ISBN 978-7-03-041289-8

I. 大… II. 仇… III. 物理学-实验-医学院校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第131742号

责任编辑: 周万灏 李 植 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 范璧合

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

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>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 216 000

定价: 39.80元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

医学影像专业特色系列教材

编委会

主 任 关利新

副主任 王 莞 卜晓波

委 员 (按姓氏笔画排序)

王汝良 仇 惠 邢 健 朱险峰 李方娟 李芳巍

李彩娟 周志尊 周英君 赵德信 徐春环

秘 书 富 丹 李明珠

序

医学影像专业特色系列教材以《中国医学教育改革和发展纲要》为指导思想,强调三基、五性,紧扣医学影像学专业培养目标,紧密联系专业发展特点和改革的要求,由10多所医学院校医学影像专业的教学专家与青年教学翘楚共同参与编写。

本系列教材是在教育部建设特色应用型大学和培养实用型人才背景下编写的,突出了实用性的原则,注重基层医疗单位影像方面的基本知识和基本技能的训练。本系列教材可供医学影像学、医学影像技术、生物医学工程及放射医学等专业的学生使用。

本系列教材第一批由人民卫生出版社出版,包括《医学影像设备学实验》、《影像电工学实验》、《医学图像处理实验》、《医学影像诊断学实验指导》、《医学超声影像学实验与学习指导》、《医学影像检查技术实验指导》、《影像核医学实验与学习指导》七部教材。此次由科学出版社出版,包括《影像电子工艺学及实训教程》、《信号与系统实验》、《大学物理实验》、《临床医学设备学》、《医用常规检验仪器》、《医用传感器》、《AutoCAD中文版基础教程》、《介入放射学实验指导》八部教材。

本系列教材吸收了各参编院校在医学影像专业教学改革方面的经验,使其更具有广泛性。本系列教材各自成册,又互成系统,希望能满足培养医学影像专业高级实用型人才的要求。

医学影像专业特色系列教材编委会

2014年4月

前 言

物理学是一门以实验为基础的自然科学，大学物理实验课教学的目的是培养学生具有良好的实验素养，掌握基本的实验技能，熟悉和了解基本物理仪器的原理和使用方法，增强开展科研工作的能力。为将来的医疗和科研工作打下坚实的基础。

本教材是根据全国医学院校大学物理实验课程教学的基本要求，本着实验教学与理论教学相辅相成的教学特点，结合医学院校的实际情况，在多年教学实践及教学改革基础上，并考虑到近年来物理学教学内容的新进展，充实完善编写而成的。其编写特点是在保证物理实验学科系统不变的同时，强化有关用物理学的方法、技术去解决医学实践问题的实验项目，同时，也适当增加了综合提高实验和医学物理实验内容。本书共编入31个实验项目，分为四章：测量误差及数据处理；基础物理实验；综合性物理实验和医学物理实验。我们尽量选编与医学密切相关的实验内容，力求简明易懂，避开详尽的数学推导，便于学生理解和掌握。

本书适用于高等医药院校生物医学工程、临床、预防、口腔、影像、药学、检验、麻醉、护理等医药类各专业，也可供与生命科学有关的其他专业师生参考使用。

限于编者的水平，书中不当之处难免存在，恳求使用本书的师生给予指正，以便再版时加以改正。

编 者

2014年3月

目 录

序	
前言	
绪论	1
第一章 测量误差及数据处理	3
第二章 基础物理实验	10
实验 1 基本测量	10
实验 2 毛细管法液体黏滞系数的测量	16
实验 3 液体表面张力系数的测量	19
实验 4 万用电表的使用	22
实验 5 示波器的使用	26
实验 6 分光计的调整与使用	35
实验 7 电子束的电偏转与磁偏转	41
实验 8 周期电信号的傅里叶分析	43
实验 9 硅光电池特性的测量	48
第三章 综合性物理实验	52
实验 10 三线摆法测定物体的转动惯量	52
实验 11 音叉的受迫振动与共振实验	55
实验 12 人耳听阈曲线的测量	59
实验 13 模拟法静电场的描绘	61
实验 14 电流计的改装与校正	65
实验 15 霍尔效应及其应用	68
实验 16 毕奥-萨伐尔定律的综合实验研究	71
实验 17 弗兰克-赫兹实验	76
实验 18 法拉第效应塞曼效应综合实验	79
实验 19 干涉衍射综合实验	86
实验 20 几何光学设计性实验——自组望远镜和显微镜	89
实验 21 偏振光旋光实验	93
实验 22 光电效应及普朗克常数测定	95
实验 23 黑体辐射定律及发光体能量曲线的研究	100
第四章 医学物理实验	112
实验 24 温度传感器的特性及人体温度测量实验	112
实验 25 压力传感器的特性及人体心律与血压的测量	114
实验 26 激光全息实验	117
实验 27 超声波声速与声阻抗的测定	121
实验 28 A 型超声诊断仪的原理及使用	126
实验 29 红外热像仪的成像原理及图像分析	129
实验 30 磁共振	133
实验 31 脉冲磁共振法测量弛豫时间常数	137
参考文献	143
附录	144

绪 论

物理学是一门以实验为基础的自然科学，大学物理实验则是理论课教学重要的有机组成部分。通过大学物理学的学习，学生能获得在今后的医疗实践和医学科学研究中所需要的物理学知识；而大学物理实验所传授给学生的技能，增长了他们解决一些实际问题的能力，培养了他们严谨的科学作风。现代医学研究和临床诊断、治疗等方面都广泛应用着物理学的实验手段和物理学理论的指导，因此，医学院校所开设的大学物理实验所包含的一些基础、综合性物理实验之外，还应把侧重点放在与医学、生命科学联系较为密切的医学物理实验上，为今后的学习和工作打下坚实的基础。

一、大学物理实验的教学目的

(1) 培养学生的基本实验技能及动手能力，使学生掌握一些基本物理量的测量方法，学会正确使用物理仪器，对实验数据进行正确判断和处理，并对实验结果进行合理分析。

(2) 通过对实验现象的观察、对物理量的测量和对实验结果的分析，使学生加深对物理学基本理论和定律的理解和掌握，逐步提高观察、分析实验现象和总结实验规律的能力。

(3) 通过实验课的教学使学生在运用理论知识、采取合理的实验方法和实验技术手段解决实际问题方面得到必要的基本训练，同时培养学生严谨认真、实事求是的工作作风。

二、大学物理实验的基本要求

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的课程。因此，在整个实验课过程中要充分发挥学生的主观能动性，通过下面三个实验环节进一步加以明确，并提出基本要求。

1. 课前认真预习 首先要了解实验误差的基本概念，能分析误差发生的原因，能正确按照处理有效数字的规则进行数据记录和运算。

实验必须在理论指导下有目的地进行，课前认真阅读实验教材，充分了解本次实验的目的、原理、方法、内容和注意事项，同时对实验所用的仪器、设备、元件及实验步骤有一个大概的了解，在充分预习的基础上写出预习报告，并设计好数据记录表格。

2. 课中正确操作 实验时要遵守实验室的规章制度，仔细阅读仪器的使用方法和注意事项，在教师指导下正确使用仪器。实验进行时应合理操作，认真思考，仔细观察，及时认真地把原始数据用钢笔记录在预先画好的表格内，如需删去已记入的数据，可用笔划掉，同时注明原因。测量完毕后请教师检查实验数据，合格后方可结束实验并请教师签字。

3. 课后写好报告 先对数据进行整理计算，然后用简洁的文字写好实验报告。实验报告应字迹清楚、文理通顺、图表正确、完整，逐步培养分析、总结问题的能力。实验报告的内容为：

- (1) 实验题目、日期。
- (2) 实验目的；简述实验原理。
- (3) 实验器材及所用元器件（仪器应写出型号、编号、规格）。
- (4) 实验内容及步骤。

(5) 完成实验数据表格及图线、图表等。

(6) 实验结果的表示及讨论：将实验结果用正确的形式表示清楚，并对实验结果进行讨论。回答课后思考题。提出对本次实验的意见及建议。

(7) 原始数据应经教师检查、签字，并附在实验报告中。

(8) 实验教学中要进行严格考查，未完成全部实验或操作未达到要求的学生必须补做或重做。

第一章 测量误差及数据处理

一、测量与误差

物理实验包括两个方面的内容：一是对物理现象的变化过程作定性的观察，二是对物理量进行定量的测量。测量是物理实验的基础，研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。

1. 测量 借助仪器，通过一定的方法，将待测量与一个选作标准单位的同类量进行比较的过程称为测量，其比值即是该被测量的测量值。记录下来的测量结果应该包含测量值的大小和单位，二者缺一不可。根据测量方法可分为直接测量与间接测量。可用测量仪器或仪表直接读出的测量值的测量，称为直接测量。例如用米尺测长度，用毫安表量电流，用温度计测温度等。但是，有些物理量无法进行直接测量，需要根据待测量与若干个直接测量值的函数关系(一般为物理概念和定律)求出，这样的测量称为间接测量。例如，用多普勒血流测量仪测量人体内某处的血流速度时，已知超声探头发射的频率 ν_0 ，超声在该介质中的传播速度 c ，然后测出夹角 θ 以及频移 $\Delta\nu$ ，就可以计算出血流速度 $v = \frac{c \cdot \Delta\nu}{2\nu_0 \cdot \cos \theta}$ 的大小。

按测量条件测量可分为等精度测量和不等精度测量。在对某一物理量进行多次重复测量过程中，每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如，由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测物理量进行多次测量，每次测量的可靠程度都相同，这些测量是等精度测量。在对某一物理量进行多次重复测量过程中，测量条件完全不同或部分不同，各结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如，对某一物理量进行测量时，选用的仪器不同，或测量方法不同，或测量人员不同等都属于不等精度测量。绝大多数实验都采用等精度测量。

2. 误差 反映物质固有属性的物理量所具有的客观的真实数值称为真值。由于测量所使用的仪器不可能是尽善尽美，测量所依据的理论公式所要求的条件也是无法绝对地保证，再加上测量技术、环境条件等各种因素的局限，真值一般无法得到。但是，从统计理论可以证明，在条件不变的情况下进行多次测量时，可以用算术平均值作为相对真值。

实际测得的量值称为测量值。测量结果与客观存在的真值之间总有一定的差异。我们把测量结果与真值之间的差值称为测量误差，简称误差。误差存在于一切测量之中，而且贯穿于整个测量过程。在确定实验方案、选择测量方法或选用测量仪器时，要考虑测量误差。在数据处理时，要估算和分析误差。总之，必须以误差分析的理论指导实验的全过程。

误差的表示法有两种：绝对误差与相对误差，二者存在一定的联系。

$$\text{绝对误差} = |\text{测量值} - \text{真值}|$$

$$\text{相对误差} = |\text{绝对误差} / \text{真值}| \times 100\%$$

绝对误差简称误差，相对误差是用来表示测量的相对精确度，用百分数表示。

3. 误差的分类 测量误差按原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差：系统误差指在相同条件下，多次测量同一物理量时，测量值对真值的偏离(大小和方向)总是相同。

系统误差的主要来源有：①仪器误差(如刻度不准，米尺弯曲，零点没调好，砝码未校正)；

②环境误差(如温度、压强等的影响); ③个人误差(如读数总是偏大或者偏小等); ④理论和公式的近似性(如用单摆测量重力加速度时所用公式的近似性)等。

增加测量次数并不能减小系统误差, 为了减小和消除系统误差, 必须针对其来源逐步具体考虑, 或者采用一定的测量方法, 或者经过理论分析、数据分析和反复对比的方法找出适当的关系对结果进行修正。

(2) 随机误差: 随机误差(又称偶然误差)是指在同一条件下多次测量同一物理量, 测量结果总是稍许差异且变化不定。

随机误差来源于各种偶然的或不确定的因素: ①人们的感官(如听觉、视觉、触觉)的灵敏度的差异和不稳定; ②外界环境的干扰(温度的不均匀、振动、气流、噪声等); ③被测对象本身的统计涨落等。

虽然偶然误差的存在使每一次测量偏大或偏小是不确定的, 但是, 当测量次数增加时, 它服从一定的统计规律。在一定的条件下, 经过多次测量, 测量值落在真值附近的某个范围内的几率是一定的, 而且偏离真值较小的数据比偏离真值较大的数据出现的几率大, 偏离真值很大的数据出现的几率趋于0。因此, 增加测量次数可以减少偶然误差。

系统误差与偶然误差的来源、性质不同, 处理方法也不同。但是, 它们之间也是有联系的。如对某问题从一个角度来看是系统误差, 而从另一个角度来看又是偶然误差。因此在误差分析中, 往往把两者联系起来对测量结果作总体评定。

(3) 过失误差: 过失误差是由于观测者不正确地使用仪器、操作错误、读数错误、观察错误、记录错误、估算错误等不正常情况下引起的误差。错误已不属于正常的测量工作范围, 应将其剔除。所以, 在作误差分析时, 要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

4. 测量的精密度、准确度和精确度 对于测量结果作总体评定时, 一般把系统误差和随机误差联系起来看。精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的, 但是这些概念的涵义不同, 使用时应加以区别。

(1) 精密度: 精密度表示测量结果中的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时, 所得结果的相互接近程度, 是描述测量重复性高低的。精密度高, 即测量数据的重复性好, 随机误差较小。

(2) 准确度: 准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。它是指测量值或实验所得结果与真值符合的程度, 即描述测量值接近真值的程度。准确度高, 即测量结果接近真值的程度好, 系统误差小。

(3) 精确度: 精确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说, 精密度高准确度不一定高, 而准确度高精密度也不一定高; 只有精密度和准确度都高时, 精确度才高。

二、测量误差的计算

1. 直接测量误差的计算 在物理实验中, 直接测量主要有单次测量和多次测量。这时, 测量值的误差可根据实际情况进行合理的具体估算。

为了减小偶然误差, 在可能的情况下, 应采用多次测量, 并将其算术平均值作为被测量的物理量的真值。对某一物理量在相同条件下进行 k 次测量, 各次结果分别为 x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_k , 则它们的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_k}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{k}$$

这个算术平均值 $\bar{x}$ 可认为是被测量的物理量的真值。

测量值的误差常用以下几种方法表示:

(1) 算术平均误差: 各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 的差 Δx_i , 其值分别为: $\Delta x_1 = x_1 - \bar{x}$ 、 $\Delta x_2 = x_2 - \bar{x}$ 、 $\cdots$ 、 $\Delta x_k = x_k - \bar{x}$, 它反映了各次测量的误差, 称为测量值的绝对误差, 绝对误差有正负之分。我们把算术平均误差定义为

$$\overline{\Delta x} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \cdots + |\Delta x_k|}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{|\Delta x_i|}{k}$$

因为它是以绝对误差的绝对值表示测量值的误差, 故 $\overline{\Delta x}$ 又称为平均绝对误差, 它表示被测量的物理量的平均值的误差范围, 也就是说, 被测量物理量值大部分在 $\bar{x} + \overline{\Delta x}$ 和 $\bar{x} - \overline{\Delta x}$ 之间, 因而测量结果应表示为 $\bar{x} \pm \overline{\Delta x}$ 。

(2) 标准误差: 各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 的差 Δx_i , 再取其平方的平均值, 然后开方, 这样得到的结果称为标准误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(\Delta x_i)^2}{k}}$$

标准误差在误差分析和计算中, 常作为偶然误差大小的量度。被测物理量的结果可表示为 $\bar{x} \pm \sigma$ 。

(3) 相对误差: 绝对误差可用来估计测量值的误差范围, 但不能反映测量的准确程度。为此, 我们将平均绝对误差 $\overline{\Delta x}$ 与测量的算术平均值 $\bar{x}$ 的比值, 称为平均相对误差, 用来定量表示测量的准确度。即

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}}$$

相对误差还可以用百分数来表示, 称为百分误差, 即 $E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\%$ 。

此外, 我们还会遇到一些被测量已经有公认值(或理论值)。这时, 求百分误差可用公认值代替 $\bar{x}$, 而 $\overline{\Delta x}$ 则是我们所得到的测量值与公认值之差的平均绝对值。

2. 间接测量误差的计算 在物理实验中, 大多数测量是间接测量, 是由多个直接测量值通过一定的公式计算得出最后结果。因此, 直接测量的误差必然对间接测量的误差有所影响, 这一问题可应用误差传递公式来进行处理。设 x 、 y 为直接测量值, 可表示为 $x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}$, $y = \bar{y} \pm \overline{\Delta y}$, N 为间接测量值, $N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N}$ 。那么, 间接测量误差结果的表示如下:

(1) 和的误差: 若 $N = x + y$, 则

$$\bar{N} \pm \overline{\Delta N} = (\bar{x} \pm \overline{\Delta x}) + (\bar{y} \pm \overline{\Delta y}) = (\bar{x} + \bar{y}) \pm (\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y})$$

得算术平均值为

$$\bar{N} = \bar{x} + \bar{y}$$

考虑到可能产生的最大误差, 则得到和的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta x} + \overline{\Delta y}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y}}{\overline{x} + \overline{y}}$$

(2) 差的误差: 若 $N=x-y$, 则

$$\overline{N} \pm \overline{\Delta N} = (\overline{x} \pm \overline{\Delta x}) - (\overline{y} \pm \overline{\Delta y}) = (\overline{x} - \overline{y}) \pm (\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y})$$

得算术平均值为

$$\overline{N} = \overline{x} - \overline{y}$$

考虑到可能产生的最大误差, 则得到差的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta x} + \overline{\Delta y}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y}}{\overline{x} - \overline{y}}$$

由此可见, 和差运算中的平均绝对误差, 等于各直接测量值的平均绝对误差之和。

(3) 积的误差: 若 $N=x \cdot y$, 则

$$\overline{N} \pm \overline{\Delta N} = (\overline{x} \pm \overline{\Delta x}) \cdot (\overline{y} \pm \overline{\Delta y}) = \overline{x} \cdot \overline{y} \pm \overline{y} \cdot \overline{\Delta x} \pm \overline{x} \cdot \overline{\Delta y} \pm \overline{\Delta x} \cdot \overline{\Delta y}$$

得算术平均值为

$$\overline{N} = \overline{x} \cdot \overline{y}$$

略去 $\overline{\Delta x} \cdot \overline{\Delta y}$, 考虑到可能产生的最大误差, 则得到积的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{y} \cdot \overline{\Delta x} + \overline{x} \cdot \overline{\Delta y}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{x}} + \frac{\overline{\Delta y}}{\overline{y}}$$

(4) 商的误差: 若 $N = \frac{x}{y}$, 则

$$\overline{N} \pm \overline{\Delta N} = \frac{(\overline{x} \pm \overline{\Delta x})}{(\overline{y} \pm \overline{\Delta y})} = \frac{(\overline{x} \pm \overline{\Delta x})(\overline{y} \mp \overline{\Delta y})}{(\overline{y} \pm \overline{\Delta y})(\overline{y} \mp \overline{\Delta y})} = \frac{\overline{x} \cdot \overline{y} \pm \overline{y} \cdot \overline{\Delta x} \mp \overline{x} \cdot \overline{\Delta y} - \overline{\Delta x} \cdot \overline{\Delta y}}{\overline{y}^2 - \overline{\Delta y}^2}$$

略去 $\overline{\Delta x} \cdot \overline{\Delta y}$ 和 $\overline{\Delta y}^2$, 考虑到可能产生的最大误差, 得算术平均值为

$$\overline{N} = \frac{\overline{x}}{\overline{y}}$$

则得到商的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \frac{\overline{y} \cdot \overline{\Delta x} + \overline{x} \cdot \overline{\Delta y}}{\overline{y}^2}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{x}} + \frac{\overline{\Delta y}}{\overline{y}}$$

由此可见, 乘除运算中的相对误差, 等于各直接测量值的相对误差之和。

(5) 方次与根的误差: 由乘除法的相对误差公式, 可证明

$$\text{若 } N=x^n, \text{ 则 } \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = n \cdot \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{x}} \quad \text{若 } N = x^{\frac{1}{n}}, \text{ 则 } \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{x}}$$

上述各种运算,可推广到任意一个直接测量值的情况。从以上结论可看到,当间接测量值的计算式中只含加减运算时,先计算绝对误差,后计算相对误差比较方便;当计算式中含有乘、除、方次与根的运算时,先计算相对误差,后计算绝对误差较为方便。

三、有效数字及其运算

1. 测量仪器的精密度 要对某一物理量进行测量,必须使用各种仪器。但各种仪器由于其结构及生产技术条件等各方面因素的限制,都有一定的精密度。使用不同精密度的仪器,测量结果的精密度也各不相同。

在使用仪器进行测量时,仪器的最小刻度称为该仪器的精密度。例如,一个米尺的最小分格是1mm,其精密度就是1mm,用它进行测量,则可准确读到毫米,并能估计到0.1 mm。有的仪器有特殊标记,如电子仪表的精密度是以级数标记的,例如某电表是2.5级,表示测量误差为2.5%,级数越小,精密度就越高。

2. 有效数字的概念 仪器的精密度限制了测量的精密度。例如,我们用米尺测量某一物体的长度,测得值是在2.3~2.4cm,能否再精确一点呢?那就要估计读数了,比如说,估计得2.36cm,显然,最后一位数“6”是不准确的,对不同的实验者所估计出来的数不一定相同,因而是可疑数字。我们把测量结果的数字记录到开始可疑的那一位为止,因此我们把可靠数字带有一位估计值(可疑数字)的近似数字,称为测量结果的可疑数字。

3. 有效数字的运算法则 在实验中大多数遇到的是求间接测量的物理量,因而不可避免地要加以各种运算,参加运算的分量可能很多,各分量有效数字的位数多少又不相同,那么运算结果的有效数字位数怎样确定呢?下面就介绍一种近似计算方法,利用它不仅可简化计算,而且又不影响结果的准确程度。但应注意:有效数字的运算结果只能知道运算结果的有效数字中可疑数字在哪一位,而不知道其误差的大小。

有效数字中最后一位是可疑数字,可疑数字是有误差的,所以,可疑数字与准确数字(或可疑数字)的和、差、积、商也是可疑数字,故其运算方法与数学上有所不同,如下例(数字下有“-”者为可疑数字):

(1) 加法与减法:几个数相加减时,运算结果的最后一位,应保留到尾数位最高的(绝对误差最大)一位可疑数字,其后一位可疑数字可按“舍入法则”处理。

例1-1

$$\begin{array}{r} 58\bar{4} \\ + \quad 24.3\bar{0} \\ \hline 608.3\bar{0} \end{array}$$

结果取 608

例1-2

$$\begin{array}{r} 87.5\bar{4} \\ - \quad 0.11\bar{2} \\ \hline 87.42\bar{8} \end{array}$$

结果取 87.43

(2) 乘法与除法:几个数相乘除时,运算结果的有效数字一般应以各量中包含有效数字的位数最少者为准(特殊情况可多取或少取一位),其后面一位可疑数字可按“舍入法则”处理。运算过程中,各测量值可多保留一位有效数字。

舍入法则:从第二位可疑数字起,要舍入的数如小于“5”则舍去,如大于“5”则进1。如等于“5”则看前面的一位数,前面一位为奇数,则进1,使其为偶数;若前面一位为偶数(包括零),则舍去后面的可疑数字。

例1-3

$$\begin{array}{r}
 3.210 \\
 \times 2.50 \\
 \hline
 0000 \\
 16050 \\
 6420 \\
 \hline
 8.02500 \\
 \text{结果取 } 8.02
 \end{array}$$

例1-4

$$\begin{array}{r}
 7.792 \\
 12 \overline{) 93.504} \\
 \underline{84} \\
 95 \\
 \underline{84} \\
 110 \\
 \underline{108} \\
 24 \\
 \underline{24} \\
 0 \\
 \text{结果取 } 7.8
 \end{array}$$

(3) 乘方与开方: 其结果的有效数字位数一般与被乘方、开方数的有效数字位数相同。

例 1-5 $(5.25)^2 = 27.6$

例 1-6 $\sqrt{14.6} = 3.82$

(4) 对数: 其结果的有效数字位数与真数的位数相同。

例1-7 $\lg 19.28 = 1.285$

(5) 三角函数: 其结果的有效数字位数与角度的位数相同。

例1-8 $\cos 32.7^\circ = 0.842$

在相同条件下, 用不同精度的仪器测量同一对象时, 仪器的精密度愈高, 测量值的有效数字位数就愈多。因此, 用有效数字记录的测量值, 不仅反映了它的量值的大小, 还反映了它的准确程度, 这就是有效数字的双重性。

根据有效数字的性质, 在记录和处理实验数据时, 应注意以下问题:

(1) 有效数字的位数与小数点的位置无关。例如 $1.504\text{m} = 0.001504\text{km}$ 是同一测量结果, 都是四位有效数字, 数字前表示小数点位置的“0”不是有效数字, 其精密度都相同。亦可推知, 有效数字的位数与单位变换无关。

(2) 有效数字与“0”的关系: “0”在中间或后面都是有效数字, 决不能因为零在最后面而舍去。例如: 10.2cm 和 10.20cm , 从数字上看, 它们是相等的量。但是这两个数的有效数字位数是不一样的, 在物理学上的意义完全不同, 它们有不同的精确度。

(3) 有效数字与自然数或常数的关系: 在运算中常会遇到自然数和常数, 例如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等, 这些数不是测量值, 其有效数字可以认为无穷多, 在计算时需要几位数字就可以取几位, 通常所取位数与测量值的位数一样就可以。

(4) 如果有效数字的数值很大或很小时, 可用科学计数法表示成 $K \times 10^n$ (n 可正可负) 的形式。例如 0.00305m 可写成 $3.05 \times 10^{-3}\text{m}$, 30586m 可写成 $3.0586 \times 10^4\text{m}$ 。

四、实验数据的处理方法

实验的结果, 不但与测量方法的选择、所用仪器的精密度、操作的熟练程度和实验时的细心程度有关, 而且还与实验数据的记录有关。原始数据必须填写在预先绘制的表格中, 不得随意涂改原始数据。

实验中所得的大量数据, 需要进行整理、分析和计算, 并从中得到最后的实验结果和寻找实验的规律, 这个过程称为实验数据的处理。实验数据的处理方法很多, 常用的方法有三种, 即列

表法处理实验数据、图示法处理实验数据、根据实验数据求出经验方程。现分别介绍如下:

1. 列表法

(1) 数据列表可以简单而明确地表示各量之间的关系,便于检查和及时发现问题,有助于找出有关量之间的规律,求出经验公式。

(2) 列表时要简明。要交代清楚表中各符号的意义,并写明单位。表中的数据要正确反映测量结果的有效数字,如为间接测量,还应简要列出公式。

2. 图示法 许多情况下,实验所得数据是表示一个物理量(因变量)随另一个物理量(自变量)而改变的关系。这些对应关系的变化情况,通常用图示法。图示法是将测量的数据标在坐标纸上,形成一组数据点,再把这些点连成光滑的曲线。其优点是能把测量量之间的关系简明地表示出来,并可从曲线中直接求出待测量。它在医学研究中常被使用。要正确绘出一条实验曲线,必须注意以下几点:

(1) 一般以横坐标表示自变量,纵坐标表示因变量。坐标轴的末端要标明所示物理量的名称和单位,在图的下方标出图名。

(2) 作图时要用坐标纸,坐标纸的大小及坐标轴的比例,应根据测量数据的范围需要来确定。尽量使图线占据图纸大部分或全部。在某些情况下,横轴和纵轴的标度可以不同,两轴交点的标度也不一定从零开始,轴上的标度应隔一定间距用整数标出,以便寻找和计算。

(3) 每个实验点要用符号在坐标纸上明确表示出来。常用的符号为 $\times$ 、 $+$ 、 $\cdot$ 等,其中心与实验点相对应。

(4) 曲线不必通过所有点,但要求曲线两侧点的个数近似相等,点到曲线的距离也近似相等。

3. 经验方程法 把实验结果列成或绘成图可以表示物理规律(物理量之间的关系),但图、表往往没有用函数表示的明确和方便,并且理论严格,而函数式在微分、积分上均可给予很大的帮助。在函数形式确定后,结果是唯一的,不会因人而异。如果用作图法处理同样的数据,即使肯定是线性的,不同的工作者给出的直线会不同,这是作图法不如经验方程法的地方。获得经验方程的一般步骤是,首先确定函数形式,然后用实验数据确定经验方程式中的待定常数。

函数形式的确定,一般是根据理论的推断或将实验数据绘成图后,从图的变化趋势推测出来的。如果推断物理量 y 和 x 之间的关系是线性的,则把函数形式写成

$$y=ax+b$$

有了求法有很多种,主要是根据简便或所需的准确度来选择。最常用的有直线图解法、选点法、平均法和最小二乘法。

【思考题】

1. 指出下列有效数字的位数

① $L=0.010\ 2\text{mm}$; ② $L=1.007\ 0\text{m}$; ③ $g=9.806\ 65\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; ④ $c=3.00\times 10^8\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$; ⑤ $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$; ⑥ $p=1.013\times 10^5\text{Pa}$ 。

2. 指出下列各式中关于有效数字的错误

① $m=0.405\ 0\text{kg}$ 是三位有效数字; ② $m=1.405\ 0\text{kg}$ 是四位有效数字; ③ $0.3\text{A}=300\text{mA}$; ④ $t=(10.60\pm 0.4)\text{s}$; ⑤ $L=(15000\pm 200)\text{m}$; ⑥ $33.740+10.28-1.003\ 6=43.016\ 4$; ⑦ $22.30\times 12.3=27.43$; ⑧ $3.212\times 10^3-0.12\times 10^2=32\times 10^2$ 。

3. 按有效数字运算法计算下列各式

① $124.43-12.5+20.10$; ② $4.862\times 6.3\times 0.002$; ③ $0.003/1000$; ④ $\frac{(2.480-2.2)\times 5.898}{2.00}$; ⑤ $\sqrt{625}$; ⑥ $1.321\times 10^{-3}+0.0242$ 。

(仇 惠)

第二章 基础物理实验

实验1 基本测量

【实验目的】

- (1) 了解游标卡尺、外径千分尺的结构及原理。
- (2) 学会并熟练掌握它们的使用方法。
- (3) 进一步熟悉和巩固误差和有效数字概念。

【实验原理】

长度是一个基本物理量,许多其他的物理量也常常化为长度进行测量,许多测量仪器的长度或角度等读数部分也常常用米尺刻度或根据游标、外径千分尺等原理制成。在实验室中常用的长度测量仪器有米尺、游标卡尺和外径千分尺等。通常用量程和分度值表示这些仪器的规格。量程是测量范围,分度值是仪器的精密程度。一般来说,分度值越小,仪器越精密,仪器本身的“允许误差”(尺寸偏差)相应也越小。

1. 游标卡尺的构造和游标原理 游标卡尺的外形如图1-1所示,它是由主尺D和副尺即游标E所组成的。量爪(亦称测脚)A、A'固定在主尺上,B、B'与游标连在一起。尾尺(深度尺)C也与游标连在一起,游标可沿主尺滑动。螺丝F用来固定游标。量爪A、B(称外量爪、外卡或钳口)用来测量物体的外部尺寸;量爪A'、B'(称内量爪、内卡或刀口)用来测量物体的内部长度;尾尺C用来测量深度。它们的读数,都是由游标的0线与主尺的0线之间的距离表示出来的。

根据游标分度数的不同,常用的游标卡尺有50分度、20分度和10分度等规格。

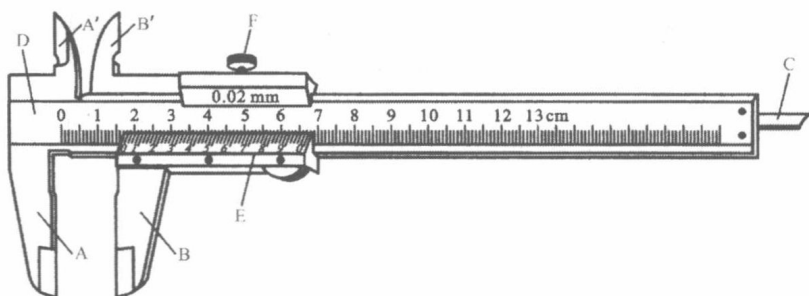


图1-1 游标卡尺

游标原理: 普通米尺最小的刻度是毫米,即它的分度值是1mm。假如用它度量某一物体的长度,我们只能准确读到毫米,毫米以下的数字就要估计。为了能够更准确地读出毫米的十分之几,在米尺旁再附加一个能够滑动的有刻度的副尺,这个副尺称为游标,而原来的米尺称为主尺。

常用的游标卡尺的设计: 游标上 m 个分度的总长,正好与主尺上 $(m-1)$ 个最小分度的总长相等。设主尺上最小分度为 y (1mm),游标上最小分度为 x (小于1mm)则有

$$mx = (m-1)y$$

$$mx = my - y$$

$$m(y-x) = y$$

令 $\Delta x = y - x$,即主尺上最小分度与游标上最小分度相差的毫米数。