

全国高等院校医学实验教学规划教材

医用物理学实验

王亚平 洪 洋 主编



科学出版社

全国高等医药院校医学影像学专业规划教材

医用物理学实验

王德平 袁世强 主编

人民卫生出版社

全国高等院校医学实验教学规划教材

医用物理学实验

主 编 王亚平 洪 洋
副主编 王昌军 王克难 李福星 徐春环
编 委 (以姓氏笔画为序)

王亚平	辽宁医学院
王 琴	辽宁医学院
王克难	辽宁医学院
王昌军	辽宁医学院
王艳丽	辽宁医学院
李福星	辽宁医学院
张晓槟	辽宁医学院
张瑞兰	北华大学
洪 洋	中国医科大学
徐春环	牡丹江医学院
商清春	牡丹江医学院
盖立平	大连医科大学
焦海颖	辽宁医学院

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

本教材分为“物理学实验基础知识”、“基础性实验”、“综合性实验”、“创新型实验”和“医学物理学实验”5部分。全书共分为30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,实现了从接受知识型到培养综合能力型的递进式发展教学目标。

本书可供医学院校临床、口腔、麻醉、影像及预防等专业使用,也可供相近专业学生选用,并可供教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学实验 / 王亚平,洪洋主编. —北京:科学出版社,2011

(全国高等院校医学实验教学规划教材)

ISBN 978-7-03-030448-3

I. 医… II. ①王… ②洪… III. 医用物理学-实验-医学院校-教材
IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 034050 号

责任编辑:周万灏 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘士平 / 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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年3月第一次印刷 印张:7 3/4

印数:1—5 000 字数:184 000

定价:18.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《全国高等院校医学实验教学规划教材》 总编委会

主任 刘学政

副主任 曲 巍 孙洞箫 肖建英 罗俊生 梁宇恒
贾云宏

委员 (按姓氏笔画排序)

万义增	王 冰	王万旗	王云飞	王亚平
王爱梅	艾 浩	朱 艳	刘 丹	刘卫党
严宁生	李 红	李尘远	李华侃	李德华
肖 马	吴学敏	谷京城	闵连秋	张 佩
张 辉	张春阳	张祥林	张筠莉	张蕴莉
金 英	郝春艳	高志安	郭 敏	陶贵周
谢志明	穆殿超			

总策划 曲 巍

秘 书 崔洪雨

总 序

随着生命科学及其实验技术的飞速发展,我国高等医学教育对医学实验教学提出了更高的要求,大量先进医学实验进入实验教学课程体系将成为必然趋势,要全面推进现代医学实验教学的发展,必须加大对实验项目、实验条件、实验教学体系的改革力度,这对培养适应 21 世纪医药卫生事业发展的高素质医学人才具有重要意义。建立以能力培养为主线,分层次、多模块、相互衔接的实验教学体系,与理论教学既联系又相对独立,实现基础与前沿、经典与现代的有机结合是我们编写本系列教材的初衷。依照此要求编写的医学基础课实验系列教材,其基本理念是面向学生未来,立足创新能力教育,体现科学本质,突出科学探索,反映当代科学成果。设计思路突出“整合”和“探究”两大特点。力图从实际应用性出发构建具有自身特点的实验教学内容,进而通过实验结果的分析与思辨,期望在医学基础课实验教学体系和方法上有所继承与突破。

本系列实验教材由长期工作在教学和科研一线的教师编写而成,将实验内容分为基本实验操作及常用仪器使用、经典验证性实验、综合性实验和创新性实验,并将实验报告融入到实验教材中。系列教材共九本,包括《大学计算机基础实践教程》、《医学大体形态学实验》、《医学显微形态学实验》、《医学机能实验学》、《生物化学与分子生物学实验》、《医学免疫学与病原生物学实验》、《医用物理学实验》、《医用化学实验》和《临床技能学》。

本系列教材读者对象以本科、专科临床医学专业为主,兼顾预防、口腔、影像、麻醉、检验、护理、药学等专业需求,涵盖医学生基础医学全部的实验教学内容。

由于水平和时间的限制,缺点和错误在所难免,恳请读者和同行专家提出宝贵意见。

《全国高等院校医学实验教学规划教材》

总编委会

2011. 1

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,是编者多年执行课程建设和教改成果的结晶。

进入 20 世纪末期以来,随着近代科学的迅速发展和相互渗透,出现了许多与物理学相关的边缘学科,如生物物理学、生物医学工程学等。而作为物理学重要分支的医学物理学,是现代物理学与医学相结合形成的交叉学科。物理学所提供的技术和方法广泛地应用于生命科学、基础医学研究和临床实践中,并不断发展和完善。人们愈来愈认识到医用物理实验的重要性以及在高等医学院校中加强对学生进行医用物理实验能力培训的必要性。特别是近十几年来,现代医学影像技术学的发展日新月异,作为医学院校的学生必须学习和掌握医学影像的基础理论知识和基本成像方法。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,在医用物理实验的基础上,开设相关的医学物理实验。

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“物理学实验基础知识”、“基础实验”、“综合性实验”、“创新型实验”和“医学物理学实验”5 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,实现了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辽宁医学院领导的大力支持,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与建议,以便再版时补充修正。

编 者
2011 年 1 月

目 录

总序	
前言	
概述	(1)
第一篇 物理学实验基础知识	(3)
一、医用物理实验的目的	(3)
二、医用物理实验的任务	(3)
三、医用物理实验的方法	(3)
四、实验误差及来源	(5)
五、有效数字及其运算法则	(6)
第二篇 基础性实验	(9)
实验一 长度的测量	(9)
实验二 测定铜圆柱的密度	(13)
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	(17)
实验五 万用电表的使用	(20)
实验六 示波器的使用	(24)
实验七 整流滤波	(29)
实验八 用光电比色计测定溶液的浓度	(32)
实验九 旋光仪的使用	(34)
第三篇 综合性实验	(37)
实验十 人耳听阈曲线的测定	(37)
实验十一 分光计的调节与使用	(40)
实验十二 用衍射光栅测光波波长	(43)
实验十三 用分光计观察明线光谱	(45)
实验十四 用掠入射法测量液体折射率	(47)
实验十五 用分光计测量棱镜的折射率	(49)
实验十六 薄透镜焦距的测定	(52)
实验十七 测自组显微镜和望远镜放大率	(56)
实验十八 单透镜像差的观察	(59)
实验十九 霍尔效应及其应用	(64)
第四篇 创新型实验	(69)
实验二十 电流计的改装与验证	(69)
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	(75)

第五篇 医学物理学实验	(78)
实验二十三 数字图像处理技术	(78)
实验二十四 A型超声波诊断仪成像原理及使用	(82)
实验二十五 A超伪像的声像图观测	(86)
实验二十六 B型超声波诊断仪成像原理及使用	(89)
实验二十七 B超伪像声像图观察	(95)
实验二十八 (脉冲)核磁共振法测量弛豫时间	(99)
实验二十九 核磁共振化学位移伪像测定	(104)
实验三十 X-CT 计算机模拟实验	(108)
附录	(112)
附录一 基本国际单位制	(112)
附录二 基本物理常量(1986年国际推荐值)	(112)
附录三 常用固体和液体密度(20℃)	(113)
附录四 不同温度下纯水的密度(标准大气压)	(113)
附录五 不同温度下乙醇的密度	(113)
附录六 不同温度下水的黏滞系数 η	(114)
附录七 不同温度下乙醇的黏滞系数 η	(114)
附录八 不同温度下水的表面(与空气交界面)张力系数 α	(114)

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,需要全方位、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、课中实验和讨论、课后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,在提高敏锐观察力和严谨思维能力的同时,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,其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,而且要保持十分光亮清洁。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,以能看清图像为标准。

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. 实验中经常使用的玻璃器皿和化学制剂

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

实验报告内容包括预习报告和课堂报告两部分。

1. 预习报告

预习报告要求在进行实验前完成并写在实验报告册上,具体项目应包括:

- (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,若教材内容与实际所用不符,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,并标明相关量值的单位。

2. 课堂报告

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,具体项目应包括:

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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%。

(4) 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 物理学实验基础知识

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学实验的基本功,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,激发学生学习物理课的兴趣,进一步证明医学生学习物理的重要性。

(3) 医用物理实验的教学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、素质高的人才是物理学实验教学的目标。

二、医用物理实验的任务

1. 学习实验方法,加深对原理的理解

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

培养、提高学生科学实验能力的具体内容包括:

- (1) 能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的预习。
- (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、设备等,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、用等臂天平测质量等。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,为了抵消这一系统误差,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、实验误差及来源

物理实验内容包括两个重要方面:一是对物理现象的细致观察;二是对物理量的精确测量,测量是实验的基本任务。下面就讨论一下测量与误差的基本概念,以及误差的来源。

1. 测量与误差的基本概念

(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。按照测量的方式,测量可分为直接测量和间接测量;按照测量的条件,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

1) 直接测量:是指待测物理量的大小可以从测量仪器或仪表上直接读出来的测量。例如,用米尺测长度,用秒表测时间,用温度计测温度等。

2) 间接测量:是指待测量需要根据其他直接测量的物理量的值,通过一定的函数关系(一般为物理概念、定理、定律),才能计算出来的测量过程。例如,在液体表面张力系数的测量中,先测量出水在毛细管中上升的高度 h 和毛细管的直径 d ,再利用公式 $\alpha = \rho gh d / 4$ 计算水的表面张力系数。在这一测量中, d 和 h 是直接测量, α 则是间接测量。

在实验中我们发现,直接测量是间接测量的基础。然而,对一个给定的待测物理量,它属于直接测量还是属于间接测量,与待测量本身没有直接联系,而是取决于实验方法的采用和实验仪器、仪表的选用。比如,用伏安法测电阻时,电阻是间接测量;而当使用欧姆表和电桥作为测量仪器时,电阻为直接测量。

(2) 误差:实验误差就是测量值与真值之间的差值。任何一个待测量在一定条件下都存在着确定的客观真实值,这个值称为真值。实际测得的量值称为测量值。任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不能做到绝对严密,因此测得的结果只能准确到一定程度,不能认为测量的结果就是其真值,真值是不可确切测得的。通常我们将在相同条件下进行多次重复测量的算术平均值称为测量的最佳值或近似值;当测量次数无限增加时,算术平均值将无限接近于真值,然而我们不能对同一物理量进行无限次测量,因此常把有限次测量的算术平均值作为真值。

误差的表示法有两种,一种是绝对误差,一种是相对误差,二者存在一定的联系。

1) 绝对误差:在一定条件下,某一物理量所具有的客观大小称为真值。测量的目的就是力图得到真值。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,测量结果与真值之间总有一定的差异,即总存在测量误差。设测量值为 N ,相应的真值为 N_0 ,测量值与真值之差的绝对值用 ΔN 表示,有

$$\Delta N = |N - N_0|$$

称为绝对误差,简称误差。

误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响

降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验测量中不可缺少的一项重要工作。

2) 相对误差:绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差。用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

由于真值无法知道,所以计算相对误差时常常用 N 代替 N_0 。在这种情况下, N 可能是公认值,或高一级精密仪器的测量值,或多次测量的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度,相对误差用百分数表示。

2. 实验误差的来源

研究测量误差是物理实验的重要内容,由于测量结果不可能与真值完全相同,因此误差总是存在的。根据误差的性质和产生原因,一般可分为系统误差、偶然误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差:在相同的条件下,多次测量同一物理量时,若误差的大小及符号都保持不变或按一定规律变化,这种误差称为系统误差。系统误差具有系统性和方向性,其来源主要有以下三个方面:

1) 仪器误差:由于仪器本身的缺陷或没有按照规定条件使用仪器而造成的,如零点偏离、安装错误、元件老化、外界环境(温度、湿度、气压、电磁场等)对测量仪器的影响所产生的误差。

2) 理论误差(方法误差):这是由于测量所依据的理论公式本身的近似,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或者是实验方法本身不完善所带来的误差。

3) 个人误差:由于观测者本身生理或心理特点造成的误差称个人误差,它因人而异,并与观测者当时的精神状态有关。如动态滞后、读数有偏大或偏小的痼癖等。

由于这些因素的影响,系统误差测得的数值总是朝一个方向偏离,即总是偏大或总是偏小,增加测量次数也不能有所改善。消除系统误差,首先要找到引起系统误差的原因,有针对性地采取措施,或者对测量结果进行修正。

(2) 偶然误差:亦称随机误差,是由一些无法控制的偶然因素引起的误差。其特征是时而偏大,时而偏小,时正时负,方向不定,其发生纯属偶然。减小偶然误差的方法是进行多次重复测量,在同一物理量的多次测量中,随机误差满足一定的统计规律,大多数情况下,它的分布具有抵偿性和分散性。

(3) 过失误差:是人为的误差。实验中,由于实验设计、方法选择、仪器使用、数据读取和记录等错误引起的测量结果的明显歪曲,这种由错误引起的误差叫过失误差。

过失误差是通过实验者的主观努力能够克服的,系统误差和随机误差是客观的、不可避免的,只能通过实验条件的改善和实验方法的改进予以减小,它们是由客观环境和人的感官的局限决定的。

五、有效数字及其运算法则

1. 有效数字的概念

任何一个物理量,既然其测量结果都包含有误差,该物理量的数值就不应该无限制地写下去。例如, $(1.3682 \cdots \pm 0.02)\text{cm}$ 应写成 $(1.37 \pm 0.02)\text{cm}$ 。因为由不确定度 0.02cm 可

知,该数值在百分位上已有误差,在它以后的数字便没有意义了。因此,测量结果只写到有误差的那一位数,并且在位数以后按“四舍五入”的法则取舍。最后一位虽然有误差,但在一定程度上也能反映出被测量的客观大小,也是有效的。所以我们把能反映出被测量实际大小的全部数字,称为有效数字;或者说,我们把测量结果中可靠的几位数字加上有误差的一位数字,统称为测量结果的有效数字。有效数字的个数叫做有效数字的位数,如上述的1.37cm称为三位有效数字。

有效数字的位数与十进制单位的变换无关,即与小数点的位置无关。因此,用以表示小数点位置的0不是有效数字。当0不是用作表示小数点位置时,0和其他数字具有同等地位,都是有效数字。显然,在有效数字的位数确定时,第一个不为零的数字左面的零不能算有效数字的位数,而第一个不为零的数字右面的零一定要算做有效数字的位数。如0.0135m是三位有效数字,0.0135m、1.35cm及13.5mm三者是等效的,只不过分别采用了米、厘米和毫米作为长度的计量单位;1.030m是四位有效数字。从有效数字的另一面也可以看出测量用具的最小刻度值,如0.0135m是用最小刻度为毫米的尺子测量的,而1.030m是用最小刻度为厘米的尺子测量的。因此,正确掌握有效数字的概念对物理实验来说是十分必要的。

有效数字的位数多少大致反映相对不确定度的大小。有效数字位数越多,相对不确定度越小,测量结果的精确度越高。

2. 有效数字的运算法则

当给出(或求出)不确定度时,测量结果的有效数字由不确定度来确定。由于不确定度本身只是一个估计值,一般情况下,不确定度的有效数字只取一位(若首位为1、2时,不确定度可取二位)。测量值的最后一位要与不确定度的最后一位取齐。一次直接测量结果的有效数字可以由仪器允差或估计的不确定度来确定;多次直接测量结果(算术平均值)的有效数字,由计算得到的A类不确定度来确定;对于间接测量结果的有效数字,也是先算出结果的不确定度,再由不确定度来确定。

当未给出(或未求出)不确定度时,直接测量还是间接测量结果的有效数字位数也不能任意选取。

对于直接测量量,在一般情况下,有效数字取决于仪器的最小分度是否估读以及估读的程度。如对于有分度式的仪表,读数要根据人眼的分辨能力读到最小分度的十分之几。

对于间接测量量,其有效数字位数由参与运算的各直接测量量的有效数字位数以及运算方式来估计。

为了达到不因计算而引进误差、影响结果,同时又尽量简洁,不作徒劳的运算这一原则,有效数字的运算约定下列规则:

(1) 加法或减法运算:对于加减类型的运算,由于运算结果的不确定度总是大于或等于各运算分量中最大的不确定度,所以运算结果的有效数字位数应由这个具有最大不确定度的分量来确定,即运算结果的末位应与参与运算的有效数字中最后一位的位数最高的分量相同。例如: $432.3 + 0.1263 - 2 = 430$ 。

推论:若干个直接测量值进行加法或减法计算时,选用精度相同的仪器最合理。

(2) 乘法和除法运算:对于乘除类型的运算,由于运算结果的相对不确定度总是大于或等于有效数字位数最小的分量的相对不确定度,所以运算结果的有效数字位数应与参与运

算有效数字位数最少的分量相同。例如 $45 \times 3.2345 \div (1.73)^2 = 52$

推论:测量的若干个量,若是进行乘法、除法运算,应按照有效位数相同的原则来选择不同精度的仪器。

(3) 乘方和开方运算:乘方和开方运算的有效数字的位数与其底数的有效数字的位数相同。例如: $(7.325)^2 = 53.66$, $\sqrt{32.8} = 5.73$ 。

(4) 三角函数、对数和指数运算:三角函数、对数和指数运算,其结果的有效数字位数一般与变量的位数相同。例如: $y = \sin\theta$, $\theta = 60^\circ 00'$, 则 $y = \sin 60^\circ 00' = 0.866025403$, 结果为 $y = 0.8660$ 。

(5) 无理常数 π 、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$...的位数也可以看成很多位有效数字。例如: $L = 2\pi R$, 若测量值 $R = 2.35 \times 10^{-2}(\text{m})$ 时, π 应取 3.142。则

$$L = 2 \times 3.142 \times 2.35 \times 10^{-2} = 1.48 \times 10^{-1}(\text{m})$$

(6) 运算数据尾数的取舍规则:为了使舍和入的概率相等,现在通用的规则是“四舍六入五凑偶数”。

参 考 文 献

- 李学慧. 2006. 大学物理实验. 北京:高等教育出版社
但汉久,仇惠. 2010. 医用物理学实验指导. 北京:科学出版社

(徐春环)