

院校医学实验教学规划教材

医学物理学实验

冯永振 主编



科学出版社

www.sciencep.com

全国高等院校医学实验教学规划教材

医学物理学实验

主 编 冯永振

副主编 田晓明 陈英华

编 者 (按姓氏笔画排序)

丁晓东(大连医科大学)

王光昶(成都医学院)

王 勇(广东医学院)

田晓明(广东医学院)

叶淑群(广东医学院)

冯永振(广东医学院)

李晓原(中山大学中山医学院)

张 翼(右江民族医学院)

陈英华(广东医学院)

陈鸿鹏(广东医学院)

吴 琴(广东医学院)

钟守昌(江汉大学医学与生命科学学院)

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

本书编写参照了建设国家级实验教学示范中心要求的实验教学模式,将实验项目分成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、设计性实验四个板块,分别介绍了20项实验内容。在实验内容的选取上,既考虑到物理学本身的知识面,又力求贴近医学方面的相关知识,在深度和难度上力求与普通高等医药院校学生的知识结构相适应。实验中既有体现基本训练的实验内容,又有提高的综合性和设计性实验内容。

本书可以作为高等医药院校各专业的物理实验教材,各校可根据学时、专业的不同选择其中实验内容。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验 / 冯永振主编. —北京:科学出版社,2010.8

(全国高等院校医学实验教学规划教材)

ISBN 978-7-03-028635-2

I. 医… II. 冯… 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(2010)第158709号

策划编辑:周万灏 李国红 / 责任编辑:胡治国 周万灏 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:刘士平 / 封面设计:黄超

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>

北京佳艺恒彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2012年8月第三次印刷 印张:7

字数:155 000

定价:15.00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》 编写指导委员会

主任 丁元林
副主任 施建明
委员 刘 仿 唐湘涓 吴 斌 李果明 黄培春
 苏汝好 唐焕文 贾振斌 庄海旗
总策划 刘 仿
秘 书 徐美奕 林华胜 余海波

总 序

随着 21 世纪经济与社会的发展,科学技术既向纵深发展、不断分化,又互相渗透、不断融合;同时,新兴学科与边缘学科的兴起、新技术的应用、信息量的剧增,对医学的发展产生了重大而深远的影响,这些必将促进医学教育的全面改革。实验教学作为高等教育的重要组成部分,是学生实践能力和创新能力培养的重要途径,其重要性已受到越来越广泛的关注。

目前,传统实验教学模式仍占主导地位,存在不少弊端和不足:以学科为基础构建的课程体系,忽略了生命科学的整体性、系统性;学科体系繁多,相互孤立,学科间联系不够;实验室分散,功能单一,设备重复购置,资源浪费,效率低下,调配困难;实验教学内容陈旧,手段落后,方式老化,实验内容以验证理论为主,缺少现代医学实验内容;医学生学习的积极性、主动性不强。这些明显滞后于现代医学的发展,影响教学质量,不利于大学生创新意识和实践能力的培养,难以培养出高素质、创新型的医学人才。如何改革传统的实验教学模式,培养具有创新精神、知识面广、动手能力强的新型医学人才,已成为当务之急。教育部、卫生部《关于加强医学教育工作,提高医学教育质量的若干意见》(教高[2009]4号)明确提出“高等学校要积极创新医学实践教学体系,加强实践能力培养平台的建设。积极推进实验内容和实验模式的改革,提高学生分析问题和解决问题的能力”,进一步明确了医学实验教学的重要性和改革的必要性。根据教育部精神,要对传统医学实验教学模式进行改革,最大限度地整合有限资源,优化重组教学实验室,依托相关学科优势,与学科建设相结合,构建开放共享的实验教学中心,力求突出和贯彻执行教育部提出的“三基”、“五性”和注重实用性的要求,以培养学生的探索精神、科学思维、实践能力和创新能力。构建新型的医学实验教学体系,要求我们从根本上改变实验教学依附于理论教学的观念,理论教学与实验教学要统筹协调,既有机结合又相对独立,建立起以能力培养为主线,分层次、多模块、相互衔接的实验教学体系。

以教学内容和课程体系改革为核心、培养高素质、创新型人才为目标,科学整合实验教学内容,打破既往学科框架,按新构建的科学体系,编写适合创新性实验教学体系的配套实验教材已显非常迫切。在科学出版社的大力支持下,《全国高等院校医学实验教学规划教材》编委会以广东医学院为主体,协同重庆医科大学、中山大学等全国 33 所高等医药院校相关专业的 167 名专家、教授共同编写了这套实验教学系列教材。全系列教材共 26 本,分别是《医学物理学实验》、《医用基础化学实验》、《医用有机化学实验》、《系统解剖学实验》、《医学机能学实验教程》、《病原生物学与医学免疫学实验》、《生物化学与分子生物学实

验指导》、《病理学实习指南》、《计算机应用基础上机与学习指导》、《预防医学实习指导》、《卫生统计学实习指导》、《流行病学实习指导》、《临床营养学实习指导》、《营养与食品卫生学实习指导》、《毒理学基础实习指导》、《环境卫生与职业卫生学实习指导》、《健康评估实验指导》、《护理学基础实验指导》、《内科护理学实验指导》、《外科护理学实验指导》、《妇产科护理学实验指导》、《儿科护理学实验指导》、《药理学实验教程》、《药学实验指导》、《临床免疫学检验实验》、《核医学实验教程》。

本系列实验教学规划教材是按照教育部国家级实验教学示范中心的要求组织策划,根据专业培养要求,结合专家们多年实验教学经验,并在调研当前高校医药实验室建设的实际情况基础上编写而成,充分体现了各学科优势和专业特色,突出创新性。同时借鉴国外同类实验教材的编写模式,力求做到体系创新、理念创新。全套教材贯彻了先进的教育理念和教学指导思想,把握了各学科的总体框架和发展趋势,坚持了理论与实验结合、基础与临床结合、经典与现代结合、教学与科研结合,注重对学生探索精神、科学思维、实践能力的培养,我们深信这套教材必将成为精品。

本系列实验规划教材编写对象以本科、专科临床医学专业为主,兼顾预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、中药学、检验、护理、法医、心理、生物医学工程、卫生管理、医学信息等专业需求,涵盖全部医学生的医学实验教学。各层次学生可按照本专业培养特点和要求,通过对不同板块的必选实验项目和自选实验项目相结合修选实验课程学分。

由于医学实验教学模式尚存在地区和校际间的差异,加上我们的认识深度和编写水平有限,本系列教材在编写过程中难免存在偏颇之处,敬请广大医学教育专家谅解,欢迎同行们提出宝贵意见。

《全国高等院校医学实验教学规划教材》编写指导委员会

2010年6月

前 言

医学物理学是一门建立在实验基础上的自然科学。医学物理学实验是医学物理学的重要组成部分,它与理论课既有关系,又是相对独立的一门课程。物理实验的理论、方法和技术不仅是医学,也是其他自然学科实验的基础。医学物理学实验是高等医药院校绝大多数专业的学生必修的基础课程之一,其任务主要是:一方面,使学生掌握必要的物理实验原理、方法和技能,能正确、合理地使用仪器,为学习医学基础课和专业课打下牢固的基础;另一方面,培养学生的基本科学技能、科学实验素质和科学思维方法,同时培养学生实事求是的科学态度、独立分析问题和解决问题的能力、活跃的创新意识和理论联系实际的工作作风。

本实验教材是参照建设国家级实验教学示范中心要求的实验教学模式而进行编写的。全书共分五章,第一章为绪论,详细介绍了做好物理实验的要求,以及比较系统地介绍了实验误差及数据处理的基本知识。此章内容在本课程中占有重要的地位,它是学生进行实验和数据处理的基础。第二章为基本实验操作及常用仪器使用,主要包括一些基本物理量的测量、基本实验仪器的使用,此章内容是学生实验基本技能训练和基本科学实验素质培养的基础。第三章为经典验证性实验,主要包括经长期教学实践证明对于医学生理解医学物理学理论有很好辅助作用的实验项目,此章内容偏重于基本知识、基本理论和实验方法的学习,对培养学生具有一定的实验技能、科学实验素质和科学思维方法很重要。第四章为综合性实验,主要包括反映学科内或学科间知识与技术的综合与分析的实验项目,此章内容着重提高学生综合实验、分析问题、解决问题的能力,强化学生对实验研究有一个比较全面和立体的概念。第五章为设计性实验,实验项目以基本知识、基本方法和基本技能的灵活运用为目的,使学生进一步深入理解物理实验的设计思想和实验方法,有利于激发学生学习的积极性和主动性,培养学生创新思维能力、独立解决问题能力和基本的科研能力。

本实验教材在实验内容的选取上,既考虑到物理学本身的知识面,又力求贴近医学方面的相关知识,在深度和难度上力求与普通高等医药院校学生的知识结构相适应。因此,它是可以作为高等医药院校各专业的物理实验教材的。但由于医学物理学实验课程的学时较少,没有时间完成书中全部实验,故可根据具体学时、学生的专业、学制选择其中部分实验。

实验教学是一项集体事业,从实验内容的确定、实验教材的编写、实验项目的开设准备,直到实验教学的完成,都凝聚着我们全体教师和技术人员的智慧和劳动成果。同时,在编写本书的过程中,我们广泛参阅了兄弟院校的有关教材,吸取了其中富有启发性的观点和优秀内容,在此表示衷心的感谢。

本书的编写得到了各位编者所在学校领导和各级主管部门的关心和支持,也得到了科学出版社的领导和责任编辑的大力帮助,在此谨致以衷心的感谢。对热情支持本书编写工作的其他人员表示诚挚的谢意。限于编者的学识和水平,加之时间仓促,书中难免有错漏或不足,敬请广大师生给予帮助和指正。谢谢!

编者

2010年5月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 物理实验须知	(1)
第二节 实验误差及数据处理	(3)
第二章 基本实验操作及常用仪器使用	(12)
实验 2-1 基本量度	(12)
实验 2-2 万用表的使用	(16)
实验 2-3 电子示波器的原理及使用	(21)
第三章 经典验证性实验	(29)
实验 3-1 液体黏度系数的测定	(29)
实验 3-2 伏安法测电阻	(32)
实验 3-3 用电桥测热敏电阻的温度特性	(36)
实验 3-4 用光栅测定光波波长	(39)
实验 3-5 偏振光实验	(46)
实验 3-6 透镜成像规律及焦距的测量	(49)
实验 3-7 超声探测	(54)
实验 3-8 电测应变测量原理及骨骼应力测定	(57)
实验 3-9 压力传感器特性及血压、心率测量	(62)
第四章 综合性实验	(66)
实验 4-1 人耳听阈曲线的测定	(66)
实验 4-2 多普勒效应综合实验	(69)
实验 4-3 心电图机的使用及人体心电图的测定	(74)
实验 4-4 光电效应和普朗克常数的测定	(80)
实验 4-5 X-CT 计算机模拟实验——图像重建和窗口技术	(85)
第五章 设计性实验	(91)
设计性实验基础知识	(91)
实验 5-1 简谐振动的研究	(95)
实验 5-2 人体温度的测定	(97)
实验 5-3 光的波动性研究	(100)
参考文献	(102)

第一章 绪 论

科学实验是使用特定的装置有意识地控制实验条件,使研究的自然现象在人工控制的条件下重演,并进行反复精密的观察和测量,从而发现事物的本质,找出被研究现象的规律性。

从自然科学的发展史可以清楚地看出,人们总是从实验中总结规律和理论,然后又通过新的实验来检验这些规律和理论的正确性,借以进一步发展理论。物理学和实验的关系则更加密切,它的所有成果都必须以严格的物理实验为依据,可以说物理学是一门定量的实验科学。

物理实验的理论、方法和技术是其他实验的基础,也为其他学科的发展提供了有力的工具。现代医学和高科技中广泛地应用着物理学的理论和实验方法。对于医学院校的大学生来说,要掌握现代医学科学知识和技术,就必须具备一定的物理实验方法和实验技能。

物理实验是物理课程的重要组成部分,它与理论课既有关系,又是相对独立的。物理实验课的教学任务是:①使学生掌握必要的物理实验原理、方法和技能,能正确、合理地使用仪器,为学习医学基础课和专业课打下牢固的基础。②培养学生严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度和独立分析问题、解决问题的能力。③培养学生观察和分析实验现象的能力,巩固和加深对物理现象和规律的理解。

第一节 物理实验须知

一、物理实验室规则

(1) 为使实验课能达到预期效果,学生在课前要做好预习并接受教师的检查;在规定的时间内进入实验室,不得迟到、早退。

(2) 实验室内要保持肃静,不得喧哗吵闹,不得抽烟,不得乱丢纸屑。

(3) 爱护室内一切仪器、物品,未经教师同意不得携出室外,不得随意搬动和乱用仪器设备,因擅自动用仪器而损坏者要照章赔偿。

(4) 学生进入实验室,应遵守教师指导并按实验规程进行实验。凡电学实验接线自查无误后,须再经教师同意,才能通电操作。

(5) 实验小组应严格按照教师分组进行实验,不得私自调整实验小组成员。

(6) 学生应在规定的时间内完成实验。实验完毕,应将仪器、物品整理还原,填写实验情况记录卡。

(7) 值日生课后负责清洁实验室,关闭水电及门窗。

二、物理实验课的要求

物理实验是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动,每个实验的教学环节可分为

三个部分:实验前预习、实验操作、实验结果的整理。

1. 实验前预习 必须完成指定的预习任务,未完成预习任务者不得进入实验室。预习要求如下。

(1) 认真阅读实验指导书:明确实验目的、测量要求和测量方法,理解实验原理,了解实验仪器的构造原理、使用方法,熟悉实验步骤,弄清注意的事项。

(2) 书面完成实验报告中规定的预习部分:首先(第一页)要画出空白的原始数据记录表格;紧跟着(或第二页)是实验报告,要书写实验题目、实验目的、实验仪器(名称、型号、精度)、实验原理(简述原理、包括简单的公式推导、原理图或实验线路图等)、注意事项、实验数据记录表格(可与首页的原始数据记录表相同)。

2. 实验操作 认真听取教师的讲解和要求再开始实验。实验时必须严格遵守实验室规章制度,具体要求如下。

(1) 按照具体实验操作步骤和注意事项进行实验。了解仪器的使用方法、性能和初调要求,严格遵守仪器的操作规程。对于设计性实验,必须将已设计好的实验方案与教师讨论并经同意后方可进行实验。

(2) 做电学实验时,应认真接线、仔细检查,经教师检查同意后才能通电操作。

(3) 应注意观察实验现象,如发现异常或发生元件、仪器损坏事故,要保持现场并立即报告教师,以便找出原因,吸取教训。

(4) 必须如实、清楚地记录实验数据和现象等原始资料,要特别注意数据的单位和有效数字,不要用铅笔记录数据。确需要修改数据时,可在原数据上画一根删除线,然后在旁边记上更改的数据,再说明原因。

(5) 实验进行过程中应及时对实验数据作初步估算,并与理论分析的结果作比较,以便及时发现并纠正可能出现的错误。如果实验误差太大,应找出原因并重做。

(6) 原始记录须经教师审阅签字后才能结束实验、撤除实验装置或实验线路。

3. 实验结果的整理 实验后要在规定的时间内写出完整的实验报告,包括以下内容。

(1) 整理原始数据记录表格中的测量值,如实填写(末页)实验报告中的实验数据记录表。

(2) 按照实验指导书的要求处理实验数据,计算过程要遵从测量误差和有效数字运算法则对数据进行取舍;对要求作图的实验应按照作图法正确绘制图线。

(3) 实验结果分析与讨论。这部分内容非常重要,必不可少。由学生根据实验情况及个人的体会、认识和思考来自主完成。

实验报告必须每人书写一份,独立完成。

三、物理实验报告的书写格式

实验报告是实验者如实对实验过程及实验结果加工整理后形成的书面报告,也是实验者的实验工作总结。实验报告不仅要求学生计算、归纳和整理实验数据,还要有简洁明晰的表达能力和个人的分析思考,可作为衡量学生实验能力的一个重要评判依据。撰写完整的实验报告是实验课的重要组成部分,必须在规定的时间内独立、认真地完成。完整的物理实验报告由预习报告和数据处理两部分组成,其格式要求如下。

1. 预习报告部分(课前完成) 首先(第一页)用直尺规整画出本次实验记录原始数据

的表格,该表格供实验课堂指导教师审阅签字。在第一页可书写标题“实验×× 预习报告”,其中,“××”代表实验编号。记录原始数据要用签字笔,不得用铅笔记录。

预习报告的第二页(或紧接着第一页)开始书写实验报告,具体内容包括如下几个部分。

(1) 实验题目。可附加实验时间、实验完成人及协助者(姓名、班别)。

(2) 实验目的。完成本次实验应达到的基本要求。

(3) 主要仪器。实验所用主要仪器的名称、型号、精度等。

(4) 简明实验原理。简述原理,包括简单的公式推导、原理图或电路图。

(5) 注意事项。预习实验指导书给出的注意事项,弄清实验中一些重要问题的处理和应对措施。

2. 其余报告部分(课后完成)

(1) 数据记录和处理:先用直尺规整画出本次实验报告记录数据的表格(可与首页的原始数据记录表格相同),再把经指导教师审阅签字后的原始数据用签字笔填写于此,不得用铅笔填写数据。

数据处理一般应有必要的计算过程(符合有效数字的运算法则及误差理论)、实验曲线(坐标纸作图),按要求写出测量结果的标准形式和各种误差(绝对误差、相对误差、百分偏差)。

(2) 分析与讨论:对结果值及其误差进行分析,即分析误差的来源,是否由实验原理的局限性造成,或是实验设计不周全,或实验仪器的掌握、操作不当,或仪器精度所致等,并能令人信服地指出误差产生原因、误差大小是否可以接受。可以讨论实验中体会较深、收获较大的感想。例如,怎样排查实验中出现的故障、如何正确读取数据、在实验操作中存在哪些问题等,无论是总结成功的经验或是吸收失败的教训都是同样重要的。也可以对思考题进行讨论。

总之,一份好的实验报告,应该是文字通顺、字迹端正、结构完整、原始数据齐全、图表规范、计算正确、分析有据、结果明确、讨论严谨。书写正确的实验报告是培养工作能力的一个重要环节。

第二节 实验误差及数据处理

一、测量与测量误差

1. 直接测量和间接测量 在物理实验中,经常要使用仪器或标准计量工具去测量物理量,直接从标定好的仪器或量具上读出待测量的大小,称为**直接测量**。例如,用米尺测量物体的长度,用秒表测量时间间隔,用天平测物体的质量等都是直接测量。相应的被测物理量称为直接测量量。

如果待测的量是由若干个直接测量量经过一定的函数运算后才获得的,则称为**间接测量**。例如,先直接测出铁圆柱体的质量 m 、直径 D 和高度 h ,再根据公式 $\rho = \frac{m}{[\pi(D/2)^2 h]}$ 计算出铁的密度,这就是间接测量, ρ 称为间接测量量。

2. 测量误差 当我们对某一物理量进行测量时,总是假定该量在测量过程中具有一恒

定不变的真实数值,称之为“真值”。但是,任何一种测量都不可能是绝对准确的。不管测量仪器如何精密,测量方法如何完善,所得的测量值与待测量的真值之间都不可避免地存在着一定的差异,我们称此差异为测量的误差。由于误差产生的原因和性质不同,一般将误差分为系统误差和偶然误差两类。

(1) 系统误差:这种误差是恒定的,所以又叫恒定误差。它使测量值总是系统性地偏大或偏小。系统误差产生的原因主要有:①仪器的缺陷,如刻度不准、零点未校准、砝码本身不准等;②实验条件与理论不符,如实验时温度偏高,湿度过大;③实验的理论方法不够完善。增加测量次数取平均值并不能减少系统误差;而改变实验条件或修正实验的理论方法,校正仪器装置,调节仪器的零点等,是可以减少甚至消除系统误差的。

(2) 偶然误差:即使消除了系统误差之后,单次测量的数据,也可能比真值大或比真值小,是带偶然性的,这种误差叫偶然误差,又叫几率误差。由于偶然误差具有偶然的性质,不能预先知道,因而也就无法从单次测量过程中予以修正或把它加以消除。但是偶然误差在多次重复测量中服从统计规律,测量值比真值偏大或偏小的机会是均等的,或者说出现正、负误差的几率相同,所以多次重复测量后取平均值,能减少偶然误差。

在实验测量过程中,系统误差和偶然误差总是同时存在的。

二、误差计算

1. 直接测量的误差计算

(1) 近真值:设 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ 是 n 次重复测量同一物理量所得的数值,其算术平均值就称为近真值,表示方法为:

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (1-2-1)$$

(2) 绝对误差:各次测量值与平均值之间的绝对值 $|N_i - \bar{N}| = \Delta N_i$ 叫做单次测量的绝对误差,各次绝对误差的平均值叫做平均绝对误差。平均绝对误差(简称绝对误差)按照下式计算:

$$\overline{\Delta N} = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i}{n} \quad (1-2-2)$$

多次测量的平均绝对误差越小,表示实验测量结果的精密度越高,我们以平均绝对误差来估计近真值的误差,于是测量结果表示为:

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} (\text{单位}) \quad \text{或} \quad N = (\bar{N} \pm \overline{\Delta N}) \text{单位} \quad (1-2-3)$$

式(1-2-3)称为测量结果的标准表达式,它表明多次重复测量后近真值为 \bar{N} ,近真值的误差超过 $\overline{\Delta N}$ 的可能性较小,真值 N 在 $\bar{N} - \overline{\Delta N}$ 到 $\bar{N} + \overline{\Delta N}$ 范围内的可能性很大。近真值尾数的舍入法则是“小于五则舍、大于五则入、等于五则把尾数凑成偶数”。

(3) 相对误差:一般说来,绝对误差可以大体说明测量结果的好坏,但很不全面。例如,测量人的体重有几克误差无足轻重,但是称量某种药物时几克误差可以导致危险。所以要说明测量值的优劣,不能单从绝对误差的大小去看,还应该从误差与测量值的百分比来判断,平均相对误差(简称相对误差)就是平均绝对误差与近真值(取正值)的百分比,相对误

差总是大于零。

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} \times 100\% \quad (1-2-4)$$

相对误差越小,表示测量结果的精密度相对较高。相对误差一般用百分数来表示。

【例 1】 用最小分度为 1mm 的米尺测量一玻璃管的长度 3 次,测量值及计算结果见表 1-2-1。

表 1-2-1 玻璃管长度的测量值及计算结果

次数	测量值 $L(\text{cm})$	误差 $\Delta L(\text{cm})$	相对误差	测量结果
1	4.98	0.02	$E = (0.01 \div 5.00) \times 100\%$ $= 0.2\%$	$L = 5.00 \pm 0.01(\text{cm})$
2	5.00	0.00		
3	5.01	0.01		
平均值	5.00	0.01	(测量值末位的位次是小数点后两位)	

注意:①绝对误差一般只取一位有效数字(在某些特殊情况下可取两位),尾数只进不退。测量值的有效数字末位要与出现绝对误差的首位位次取齐;但是,如果测量值的有效数字末位的位次高于出现绝对误差的首位位次时,应把绝对误差向前进位(增大)到测量值的有效数字末位的位次来对齐。例如,表达式 $a = 3.022 \pm 0.01(\text{cm})$,应改为 $a = 3.02 \pm 0.01(\text{cm})$;若 $\bar{b} = 4.03\text{cm}$, $\overline{\Delta b} = 0.002\text{cm}$,应写为 $b = 4.03 \pm 0.01(\text{cm})$ 。②相对误差 $E \leq 1\%$ 时,取一位; $E > 1\%$ 时,取两位,尾数也是只进不退。

2. 间接测量的误差计算 间接测量量是由直接测量量通过已知函数关系计算出来的,因此,间接测量的结果中都包含着直接测量的误差。

设 x, y, z 分别为直接测量量, N 是待测的间接测量量,它们之间的函数关系表示为 $N = f(x, y, z)$,则间接测量量的近真值为 $\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$,其绝对误差和相对误差可由误差传递公式算出,见表 1-2-2。

表 1-2-2 间接测量的误差传递公式

类型	函数关系	绝对误差 $\overline{\Delta N}$	相对误差 $E = \overline{\Delta N} / \bar{N}$
1	$N = x + y + z$	$\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y} + \overline{\Delta z}$	$(\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y} + \overline{\Delta z}) / (\bar{x} + \bar{y} + \bar{z})$
2	$N = x - y - z$	$\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y} + \overline{\Delta z}$	$(\overline{\Delta x} + \overline{\Delta y} + \overline{\Delta z}) / (\bar{x} - \bar{y} - \bar{z})$
3	$N = x \cdot y$	$\bar{x} \cdot \overline{\Delta y} + \bar{y} \cdot \overline{\Delta x} *$	$\overline{\Delta x} / \bar{x} + \overline{\Delta y} / \bar{y}$
4	$N = x \cdot y \cdot z$	$\bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \overline{\Delta z} + \bar{x} \cdot \bar{z} \cdot \overline{\Delta y} + \bar{y} \cdot \bar{z} \cdot \overline{\Delta x} *$	$\overline{\Delta x} / \bar{x} + \overline{\Delta y} / \bar{y} + \overline{\Delta z} / \bar{z}$
5	$N = x / y$	$(\bar{x} \cdot \overline{\Delta y} + \bar{y} \cdot \overline{\Delta x}) / \bar{y}^2 *$	$\overline{\Delta x} / \bar{x} + \overline{\Delta y} / \bar{y}$
6	$N = x^n$ (n 为常数)	$n \cdot \bar{x}^{n-1} \cdot \overline{\Delta x} *$	$n \cdot \overline{\Delta x} / \bar{x}$
7	$N = x^{\frac{1}{n}}$ (n 为常数)	$(1/n) \cdot \bar{x}^{(1/n)-1} \cdot \overline{\Delta x} *$	$(1/n) \cdot \overline{\Delta x} / \bar{x}$

注意:①有 * 项的绝对误差公式比较复杂,故一般先通过 $E = \overline{\Delta N} / \bar{N}$ 的关系计算该项误差值。表 1-2-2 相对误差的计算结果要转换成百分数来表示;②通过实际计算,可发现误差合成时,各分误差对总误差的贡献往往是不同的,故应注意提高与主要分误差相关的直接测量量的精度。

【例 2】 有一圆锥体,用最小分度为 1mm 的米尺测得高度 $h = 10.30 \pm 0.01(\text{cm})$,圆锥体底面半径 $r = 4.01 \pm 0.01(\text{cm})$,现根据体积公式 $V = \pi \cdot r^2 h / 3$ 算得圆锥体体积为 $\bar{V} = 173$

(cm^3), 求间接测量量 V 的绝对误差和相对误差。

【解】 圆锥体体积 $V = \pi \cdot r^2 h / 3$, 其中常数 π 和整数 3 都不是直接测量量, 没有相对误差; 根据表 1-2-2 第 6 项和第 3 项先求体积 V 的相对误差为:

$$E = \frac{\Delta \bar{V}}{\bar{V}} = 2 \frac{\Delta \bar{r}}{\bar{r}} + \frac{\Delta \bar{h}}{\bar{h}} = 2 \times \frac{0.01}{4.01} + \frac{0.01}{10.30} = 0.6\%$$

显然 $\Delta \bar{r} / \bar{r}$ 是主要分误差, r 量的测量对最后结果的相对误差影响很大。

体积 V 的绝对误差: (直接利用已求出的相对误差计算)

$$\Delta \bar{V} = \bar{V} \cdot E = 173 \times 0.6\% = 1(\text{cm}^3)$$

故体积 V 的最后测量结果应为:

$$V = 173 \pm 1(\text{cm}^3) \quad \text{或写成: } V = (173 \pm 1)\text{cm}^3$$

在例 2 中, 求间接测量结果的误差顺序是先算相对误差, 后算绝对误差。当函数式只有乘除运算时, 按这样顺序计算较为方便。若函数式中只有加减运算, 则先算绝对误差, 再算相对误差较为方便。

应该指出: 对系统误差, 由于它使测量值总是系统性地偏大或偏小, 故用上述多次重复测量来计算近真值及误差的方法得出的结果, 一般不能反映系统误差对实验结果带来的影响。

3. 百分偏差 有些物理量有国际公认标准值, 它们一般是在较完善、严格的实验室条件下, 按国际确认的原理、方法, 采用公认为先进、精密的仪器测量获得的结果。如果把我们测量该物理量 N 得到的近真值 \bar{N} 与它的公认值量 $N_{\text{公}}$ 比较, 即计算百分偏差之值, 就能大致反映出本次实验的系统误差。百分偏差定义为:

$$B = \frac{\bar{N} - N_{\text{公}}}{N_{\text{公}}} \times 100\% \quad (1-2-5)$$

百分偏差 B 大于零, 表示测量值系统性地偏大; 反之, B 小于零则表示测量值系统性地偏小。百分偏差的有效数字位数的选取规定与相对误差 E 的相同(详见例 1 附注)。

三、有效数字

1. 直接测量的有效数字 在物理实验中, 由仪器获得的测量读数反映了被测物理量的大小, 这是不言而喻的。与此同时, 从读出的数字有多少位, 我们还能大概了解到该次测量的精确程度。物理量的读数必须兼有表达这两方面信息的功能, 方能称为正确的读数。

测量的读数是如何表示测量的精确程度的呢? 例如长度测量, 如果所用米尺的最小分度是 1mm, 测量者根据刻度最多只能准确地读出到“mm”这一位数, 然后再多估读一位, 即估读到 0.1mm 量级。现假设某一物长的读数是“56.2mm”, 这表明前面的 56 是准确数字, 而最后的 2 是估计读出的, 是不可靠的, 是可疑数字。可疑数字虽然是近似的, 但它在表达测量的准确程度上, 有举足轻重的地位, 不可不写。有效数字是由准确数字和可疑数字组成的。测量结果的可疑数字一般只取一位(特殊情况下也可取两位, 这是由测量结果的不确定度来确定的)。数据 56.2 由两个准确数字和一个可疑数字组成, 共有 3 位有效数字。

直接测量的有效数字的位数取决于被测量的大小和仪器的精确度(或仪器的最小分度)。只有一位可疑数字的有效数字, 它的最后一位应该是出现绝对误差的首位位次。显然, 有效数字位数越多, 相对误差就越小。

记录测量数字时不能随意增减有效数字的位数。如果某长度恰好是 5.6cm, 用精确度

为 1mm 的米尺测量时,应记为 5.60cm。用精确度是 0.01mm 的螺旋测微计测量,应记为 5.6000cm。数据末尾的“0”在这里是有意义的,不能删去。

还应特别指出,有效数字的位数与十进制物理量的单位变换无关,即与小数点的位置无关。例如,3.050cm 可写为 0.03050m,依然只有 4 位有效数字,“3”前面的“0”不是有效数字。对于较小或较大的数值,为了便于识别有效数字的位数且易于记录,常用科学记数法——书写形式为 $\times 10^{\pm n}$ (n 为正整数)。例如,把 0.03050m 写成 3.050×10^{-2} m;若改换为 μm 单位时,可写为 $3.050 \times 10^4 \mu\text{m}$,而不可以写为 $30500 \mu\text{m}$ 。“30500 μm ”有 5 位有效数字,它所代表的精确度是 3.050cm 的 10 倍。对于长度 $\bar{L}=5532\text{m}$,若它的相对误差 $E=0.6\%$,采用科学记数法得 $L=(5.53 \pm 0.04) \times 10^3\text{m}$ 。

为了按有效数字记法正确读取并记录原始数据,在测量前必须弄清仪器的最小分度,才能确定读数中可疑数字的位置,通常是估读到仪器最小分度的十分之一量级。如某物理天平对 1g 以下的质量是靠移动横梁上的游码加入的。游码每向右移动一最小分格,就相当于右盘中加入 0.02g 的砝码,这个“等于 0.02g”的一小格,就是该天平的最小分度。在称衡时,如果游码调在第 $n+1$ 格的一半多一点(估计相当于 0.6 格)的位置上天平平衡,则该被称物体的质量就是:右盘中砝码的质量 M 加 $0.02\text{g} \times$ 从零点算起游码移动的小格数,即 $M+0.02\text{g}/\text{格} \times (n+0.6)$ 格,而 0.6 格是在这次测量中估计读出的格数。

2. 间接测量的有效数字 间接测量的结果,牵涉到有效数字的运算问题。为了使测量结果能正确地反映测量的精确度,即不因函数计算而引起“误差”,同时能避免烦琐徒劳的运算,在进行计算时,应遵守两个基本原则和有效数字的运算法则。

两个基本原则为:①近真值 \bar{N} 计算结果的数值只保留一位可疑数字;②近真值 \bar{N} 的有效数字位数确定后,尾数的舍入按“小于五则舍、大于五则入、等于五则把尾数凑成偶数”的法则处理。例如,1.535 取三位有效数字为 1.54;12.405 取四位有效数字为 12.40;2.036 取二位有效数字为 2.0。

下面介绍有效数字的运算法则。

(1) 加减法:在加减运算中,各数之和或差所得结果的可疑位次,应以各数中最高可疑位次为准。在运算前,各数化简到末位比最高可疑位次多一位。(注:下面有一横线的数字表示可疑数字)

【例 3】 $13 \underline{6} + 24.4 \underline{5} + 2.46 \underline{1} = 13 \underline{6} + 24.4 + 2.5 = 16 \underline{3}$ (最高可疑位次是个位)

【例 4】 $145. \underline{2} - 82.08 \underline{1} - 2 \underline{0} = 145. \underline{2} - 82.1 - 2 \underline{0} = 4 \underline{3}$ (最高可疑位次是个位)

(2) 乘法:几个数相乘或相除时,最后结果的有效数字位数和各数中有效数字位数最少的相同。在运算前,各数的有效数字位数取到比有效数字位数最少的多一位。

【例 5】 $12.41 \underline{6} \times 1.8 \underline{2} = 12.42 \times 1.82 = 22. \underline{6}$

【例 6】 $524.9 \underline{7} \div 21 \underline{5} = 525.0 \div 215 = 2.4 \underline{4}$

用计算器计算时可采用“抓两头放中间”的方法,即注重原始测量数据的读数和最后计算结果的有效数字位数的确定,运算过程中的数和中间结果都可适当多保留几位有效数字。

(3) 乘方、开方、三角函数等结果的有效数字,均与测量值的有效数字位数相同。

【例 7】 $\sqrt{39. \underline{2}} = 6.2 \underline{6}$

【例 8】 $7.6^2 = 5 \underline{8}$

(4) 在混合运算中,结果的有效数字位数有时要比按规定多保留一位。例如,在混合运算中含减法运算,使得有效数字位数减少很多时,可考虑多保留一位。

$$\text{【例 9】} \quad \frac{(11.37 - 10.52) \times 275}{11.37} = \frac{0.85 \times 275}{11.4} = \frac{234}{11.4} = 20.5$$

(5) 参与运算的常数(π 、 e ……等)的有效数字的位数,通常取为与各量中有效数字位数最少的相同。准确数(如 $V=4\pi R^3/3$ 中的 $4/3$)和指定数(如测单摆振动周期 100 次的时间来计算周期时,100 就是指定数)的位数不影响结果的有效数字位数。

按照上述法则定出的有效数字,最后结果还要由出现绝对误差的首位位次决定。只要遵守两个基本原则和有效数字的运算法则,一般都能满足由绝对误差确定的有效数字位数的要求,少数例外者待算出误差后再稍加修正即可。

我们再用下面的例子说明一个物理实验从表格设计、数据记录、误差计算到报告结果的基本格式和要求。

【例 10】 用单摆测定重力加速度 g , 实验中对单摆摆长 L 和周期 T 的测定各 3 次, 其值见表 1-2-3。求 g 的值及其相对误差和绝对误差, 并写出测量值的标准式(这里间接测量量 g 的近真值 \bar{g} 、绝对误差 $\Delta\bar{g}$ 、相对误差的计算都是有效数字的运算问题)。

表 1-2-3 单摆的测量(游标卡尺:编号 012 精确度 0.01cm)

次数	$L(\text{cm})$	$\Delta L(\text{cm})$	$T(\text{s})$	$\Delta T(\text{s})$
1	100.39	0.02	2.014	0.003
2	100.36	0.01	2.009	0.002
3	100.35	0.02	2.010	0.001
平均值	100.37	0.02	2.011	0.002

注:直接测量量的近真值和绝对误差直接填入表中,不必另列计算;以下计算必须依次列出公式及有效数字算式

由公式 $T=2\pi\sqrt{L/g}$ 得:

$$\bar{g} = 4\pi^2 \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} = 4 \times 3.142^2 \times \frac{100.37}{(2.011)^2} = 980.1(\text{cm/s}^2)$$

由表 1-2-2 中第 5 式、6 式,可求得重力加速度的平均相对误差为:

$$E = \frac{\Delta\bar{g}}{\bar{g}} = \frac{\Delta\bar{L}}{\bar{L}} + 2 \frac{\Delta\bar{T}}{\bar{T}} = \frac{0.02}{100.37} + 2 \times \frac{0.002}{2.011} = 0.3\%$$

平均绝对误差:

$$\Delta\bar{g} = E \cdot \bar{g} = 0.3\% \times 980.1 = 3(\text{cm/s}^2)$$

实验结果是 $g = \bar{g} \pm \Delta\bar{g} = 980 \pm 3(\text{cm/s}^2)$, 或写成:

$$g = \bar{g} \pm \Delta\bar{g} = (980 \pm 3)\text{cm/s}^2$$

在以上计算过程中,应注意区别直接测量量和常数,计算结果要按照有效数字的有关规定选留数字。本例根据有效数字运算法则, \bar{g} 值原应有 4 位有效数字,但通过误差计算, $\Delta\bar{g}$ 绝对误差在个位出现,故结果 \bar{g} 的可疑数字位次应在个位与 $\Delta\bar{g}$ 取齐。

四、实验数据的图示法

在坐标纸上标出测量的数据,形成一系列的数据点,再把数据点光滑连成表示物理量间相互关系的清晰图像,这种用几何图形表示实验数据的方法就是图示法。作图所得曲线称为实验曲线,如图 1-2-1 所示。