

全国普通高等教育临床医学专业“5+3”十二五规划教材

Experiments of Medical Physics

医学物理学实验

供临床医学、预防医学、口腔医学
医学影像学、医学检验学等专业用

主编 张 翼 罗亚梅

Experiments of Medical Physics

医学物理学实验

供临床医学、预防医学、口腔医学
医学影像学、医学检验学等专业用

主 编 张 翼 罗亚梅

副主编 唐锋意 姜云海 王晓艳

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 强 (右江民族医学院)

王晓艳 (泰山医学院)

许 标 (泸州医学院)

朱 渊 (泸州医学院)

张 翼 (右江民族医学院)

陈淑琼 (泸州医学院)

邹 凯 (川北医学院)

罗亚梅 (泸州医学院)

郑尚彬 (泸州医学院)

周正诚 (右江民族医学院)

贺 兵 (泸州医学院)

赵 瑞 (右江民族医学院)

姜云海 (泸州医学院)

唐锋意 (右江民族医学院)

唐碧华 (泸州医学院)

黄健伟 (右江民族医学院)

图书在版编目 (CIP) 数据

医学物理学实验 / 张翼等主编. -- 南京 : 江苏科学技术出版社, 2013. 6

5+3临床医学本科教材

ISBN 978-7-5537-0449-4

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(2012)第298822号

医学物理学实验

主 编	张 翼 罗亚梅
责任编辑	楼立理 王 云
特约编辑	夏泽民
责任校对	郝慧华
责任监制	曹叶平

出版发行	凤凰出版传媒股份有限公司 江苏科学技术出版社
出版社地址	南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009
出版社网址	http://www.pspress.cn
经 销	凤凰出版传媒股份有限公司
印 刷	江苏苏中印刷有限公司

开 本	880 mm×1 230 mm 1/16
印 张	7
字 数	180 000
版 次	2013年6月第1版
印 次	2013年6月第1次印刷

标准书号	ISBN 978-7-5537-0449-4
定 价	23.00元

图书若有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换。

出版说明

为了全面提高我国普通高等教育医药卫生类专业人才的培养质量,深入落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010~2020)》以及服务于医疗教育体系的改革,深入贯彻教育部、卫生部2011年12月联合召开的“全国医学教育改革工作会议”精神,通过全面实施以“5+3”为重点的临床医学教育综合改革方案,进一步深化和推进医学教育深层次改革和发展,通过全面推进临床医学专业课程体系及教育体系的改革和创新,推动临床医学教育内容及教学方法改革和创新,进一步更好地服务教学、指导教学、规范教学,实现临床医学教学质量全面提高,培养高层次、高水平、应用型的卓越医学人才,从而适应我国医疗卫生体制改革和发展的需要,凤凰出版传媒集团江苏科学技术出版社作为长期从事教育出版的国家一级出版社,于2012年1月组织全国50多家高等医学院校开发了国内第一套临床医学专业“5+3”十二五规划教材。

该套教材包括基础课程、专业课程46种,部分教材还编写了相应的配套教材。其编写特点如下:

1. 突出“5+3”临床医学专业教材特色 这套教材紧扣“5+3”临床医学专业的培养目标和专业认证标准,根据“四证”(本科毕业证、执业医师资格证、住院医师规范化培训证和硕士研究生毕业证)考核要求,紧密结合教、学、临床实践工作编写,由浅入深、知识全面、结构合理、系统完整。全套教材充分突出了“5+3”临床医学专业知识体系,渗透了“5+3”临床医学专业人文精神,注重体现素质教育和创新能力与实践能力的培养,反映了“5+3”临床医学专业教学核心思想和特点。

2. 体现教材的延续性 本套教材仍然坚持“三基”(基础理论、基本知识、基本技能)、“五性”(思想性、科学性、先进性、启发性、实用性)、“三特定”(特定的对象、特定的要求、特定的限制)的原则要求。同时强调内容的合理安排,深浅适宜,适应“5+3”本科教学的需求。

3. 体现当代临床医学先进发展成果的开放性 这套教材汲取了国内外最新版本相关经典教材的新内容,借鉴了国际先进教材的优点,结合了我国现行临床实践的实际情况和要求,并加以创造性地利用,反映了当今医学科学发展的新成果。

4. 强调临床应用性 为加快专业学位教育与住院医师规范化培训的紧密衔接,教材加强了基础与临床的联系,深化学生对所学知识的理解,实现早临床、多临床、反复临床的理念。

5. 强调了全套教材的整体优化 本套教材不仅追求单本教材的系统 and 全面,更是强调了全套教材的整体优化,注意到了不同教材内容的联系和衔接,避免遗漏和重复。

6. 兼顾教学内容的包容性 本套教材的编者来自全国几乎所有省份,教材的编写,兼顾了不同类型学校和地区的教学要求,内容涵盖了临床执业医师资格考试的基本理论大纲的知识点,可供全国不同地区不同层次的学校使用。

7. 突出教材个性 本套教材在保证整体优化的前提下,强调了个教材的个性,技能性课程突出了技能培训;人文课程增加了知识拓展;专业课程则增加了案例导入和案例分析。

8. 各科均根据学校的实际教学时数编写,文字精炼,利于学生对重要知识点的掌握。

9. 在不增加学生负担的前提下,根据学科需要,部分教材采用彩色印刷,以提高教材的成书品质和内容的可读性。

这套教材的编写出版,得到了广大医学院校的大力支持,作者均来自各学科教学一线,具有丰富的临床、教学、科研和写作经验。相信本套教材的出版,必将对我国当下临床医学专业“5+3”教学改革和专业人才培养起到积极的推动作用。

全国普通高等教育临床医学专业“5+3”十二五规划教材

医学导论	眭建	主编	局部解剖学	吴洪海 黄秀峰	主编
基础化学	杨金香	主编	诊断学	魏武 郑文芝	主编
有机化学	周建民 黄祖良	主编	医学影像学	李坤成	主编
生物化学	黄忠仕 翟静	主编	临床麻醉学	晁储璋	主编
医学分子生物学	武军驻	主编	全科医学概论	谢波	主编
医学细胞生物学	苗聪秀	主编	内科学	雷寒 王庸晋	主编
医学物理学	甘平	主编	外科学	康骅 薛昊昱	主编
医学伦理学	陈颢	主编	妇产科学	段涛 胡丽娜	主编
医学心理学	杜玉凤	主编	儿科学	于洁	主编
生理学	白波 杜友爱	主编	中医学	黄岑汉	主编
组织学与胚胎学	苏衍萍 王春艳	主编	皮肤性病学	何黎 金哲虎	主编
病理生理学	商战平 王万铁	主编	康复医学	李雪斌 陈翔	主编
病理学	盖晓东 李伟	主编	神经病学	沈霞	主编
药理学	董志 毛新民	主编	精神病学	王克勤	主编
人体寄生虫学	李士根	主编	眼科学	吕帆	主编
医学微生物学	于爱莲 吕厚东	主编	口腔医学	邓锋	主编
医学免疫学	宋文刚	主编	耳鼻咽喉头颈外科学	龚树生	主编
临床药理学	许小林	主编	传染病学	周智	主编
核医学	段炼	主编	临床流行病学	冯向先	主编
医学统计学	景学安	主编	急诊与灾难医学	廖品琥	主编
卫生法学	蒲川 徐晨	主编	局部解剖学实践指导及习题集	黄秀峰 吴洪海	主编
流行病学	毛淑芳	主编	人体寄生虫学学习指导	李士根	主编
预防医学	喻荣彬	主编	医学物理学学习指导	甘平	主编
法医学	邓世雄	主编	医学物理学实验	张翼 罗亚梅	主编
系统解剖学	李富德 朱永泽	主编	眼科学学习指导	吕帆	主编

前言

本教材是根据教育部、卫生部共同确立的临床医学教育综合改革“5+3”模式的配套教材。教材结合我国的医学物理学教学现状,参照了国家级教育科学研究课题“21世纪中国高等学校农林/医药类专业数理化基础课程的创新与实践”医药类物理子课题医药类专业本科物理实验课程的教学内容和要求,贯彻和体现了素质教育、创新教育、能力培养的教学理念。借鉴众多国内医学院校物理实验教材的长处,在教材内容的选取上,既保证物理实验的学科系统性不变,使学生能接受相关基础知识、基本方法、基本技能的训练,又考虑了医药学各专业的特点和素质教育教学改革的需要,亦适当关注了当今科技发展的趋势,使教材内容植于根本又与时俱进。

教材的编写理念和架构上,积极贴合当前高等教育发展形势和要求深化教学改革,重视对能力和素质的培养,提高学生分析问题、解决问题的能力。教材分为常用测量仪器及基本操作、经典验证性实验、设计性和综合性实验三大专题。每个专题下设有不同类型的实验内容,具有相对独立性。在实验内容的选取上,既保证常用仪器练习和经典验证性实验的基本内容,又适当安排近代物理实验及与医学联系密切的实验,还对网络版仿真物理实验作了介绍。为提高学生预习的效率,有效地利用现代传媒技术和资源,本教材还附有实验演示的光盘供学生课前预习用。在部分实验内容之后,附有延伸知识的介绍,使教材更具实用性、可读性和先进性,利于提高学生的学习兴趣,对于学生今后的学习和临床工作也大有裨益。

本教材适用于普通高等教育的临床医学、医学影像、医学检验、口腔医学、预防医学、药学和护理等本科专业,也可供与医学有关的其他专业的师生参考。

在教材的编写过程中,得到了右江民族医学院、泸州医学院、泰山医学院和川北医学院有关部门和同志的大力支持,在此一并致谢!

由于编者水平所限,书中难免存在错漏或不妥之处,恳请广大师生和读者批评指正。

编者

2013年4月

目 录

绪论	1
一、医学物理学实验教学目的和任务	1
二、测量的误差及误差的计算	2
三、有效数字及其运算法则	5
四、实验数据的记录和处理	7
第 1 章 常用测量仪器及基本操作	9
实验 1.1 基本测量	9
实验 1.2 用毛细管黏度计测液体黏度	14
实验 1.3 万用表的使用	18
实验 1.4 示波器的使用	24
第 2 章 经典验证性实验	32
实验 2.1 驻波法测频率	32
实验 2.2 测量超声波的速度	35
实验 2.3 人体阻抗的测定	40
实验 2.4 人耳听阈曲线的测定	45
实验 2.5 利用显微镜及测微尺测微小长度	49
实验 2.6 用衍射光栅测光波波长	52
实验 2.7 非正常眼的模拟与矫正	58
实验 2.8 用旋光仪测定糖溶液浓度	62
实验 2.9 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	66
第 3 章 设计性和综合性实验	69
实验 3.1 光的波动性研究	69
实验 3.2 光电效应的研究	73
实验 3.3 用毛细管法测液体表面张力系数	78
实验 3.4 模拟 CT 实验	82
实验 3.5 放射性测量	87
实验 3.6 心电图机的使用及其技术指标的测量	92
实验 3.7 仿真物理实验简介	97
附录 常用物理常数各表	99
参考文献	102

一、医学物理学实验教学目的和任务

物理学与实验的关系十分密切,物理学实验是物理学研究的基本方法。物理学规律的发现和理论的建立都必须以实验为基础,从实验中总结出规律和理论,然后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。因此,进行物理实验,对学生掌握物理学知识,培养科学思维能力,提高科学素质等都是极为重要的。

(一) 教学目的

医学物理学是一门为医学服务的物理学科,阐述了现代医学与物理学密不可分的关系。医学物理学是现代医学、药学的基础学科之一,在现代医学、药学中已广泛地应用医学物理学的理论、技术和方法。因此,要掌握现代的医药学知识和技术,就必须具备一定的物理实验理论、方法和技能。高等医学院校所开设的医学物理学实验,包含普通物理实验的一些基本内容、基本实验方法,但侧重点放在了与医学、生命科学联系较为密切的一些实验上。医学物理学实验课与医学物理学理论课相辅相成,既有联系又相对独立。医学物理学实验教学的目的和任务可以归纳为以下几个方面:

通过实验,使学生直接观察到物理现象,进一步地分析和研究物理现象,加深对物理概念和物理规律的认识和理解。

通过实验,对学生进行基本的科学实验方法和技能的训练。学会正确使用基本测量仪器,熟悉仪器的原理和性能;能正确地记录和处理实验数据;能书写合格的实验报告。

通过实验,培养学生严肃认真、细致踏实、实事求是的科学态度,具备主动研究的探索精神和团结协作、爱护公物、遵守纪律的优良品格。

(二) 教学任务

医学物理学实验是在老师指导下由学生独立进行的。要做好实验,必须课前认真预习,实验过程中规范操作,实验之后仔细完成完整、准确的实验报告。下面就实验的预习、操作和提交报告三个环节,提出如下几点要求:

1. 课前预习 为保证实验的顺利进行并取得满意效果,必须进行实验前的预习。预习要求:

① 了解实验内容,明确实验目的要求,看懂实验的设计原理和实验方法;② 对实验所用仪器的构造、性能和使用方法有初步认识;③ 了解实验内容与步骤及有关注意事项,弄清实验各物理量测量的要求和记录方法。完成实验预习所要求的思考题,并在实验专用的记录本上自行设计数据记录表格。

2. 实验操作 实验中的正确操作、仔细观察及如实记录,是做好实验的中心环节。要求做到:

① 遵守实验室规则和程序;② 实验操作前要弄清楚仪器构造、性能和正确的使用方法,了解注意事项,按规程操作;③ 按实验步骤有条不紊地进行操作,要明确每一步操作的意义,实验中出现不正常情况要及时请教老师,不要自己随意处理;④ 从仪器上读出的数据要如实、准确,并及时做好记录,计算必要的结果,不允许杜撰、抄袭实验数据;⑤ 实验完毕,待指导老师检查测量的实验数据及结果是否符合要求,并在数据记录单上签字,须整理好仪器方可离开实验室,并保持实验室的整洁。

3. 整理实验报告 实验报告是整个实验过程的最终总结。通过对实验数据做出整理、计算,对实

验中所观察到的现象加以分析和讨论,写出完整的实验报告。一份完整的实验报告应包括以下内容:
① 实验名称;② 实验目的;③ 实验器材;④ 实验原理(简单概括,写出原理所对应的公式表达式、画出简单原理图等);⑤ 实验步骤(简要明了的概括,尽量保全重要细节,不用全抄课本);⑥ 实验数据记录(数据表格及实验环境条件);⑦ 数据处理及实验结果(计算结果或曲线、结果表达式及误差等);⑧ 实验结果的分析讨论(误差分析、总结);⑨ 回答课后思考题等。

二、测量的误差及误差的计算

(一) 测量

1. 测量及其分类 实验除了定性地观察物理过程外,还要测量有关物理量,以寻找或确定它们之间的定量关系。所谓测量,就是将待测物理量与选定的同类单位量进行比较,其比值(倍数)即为测量值的数值,即为测量结果。显然,数值的大小与所选的单位有关,测量数值必须附以单位。因此,表示一个测量值时必须包括数值和单位。如用直尺测量一物体的长度为 58.5 cm,则说明数值是 58.5,选用的标准单位是 cm。

以某几个选定的基本单位为基础,就能推导出一系列导出单位,这一系列基本单位和导出单位的整体就称为单位制。如国际单位制(简称 SI)是世界唯一公认的科学单位制,它选定了七个基本物理量,即长度(m)、质量(kg)、时间(s)、电流强度(A)、热力学温度(K)、物质的量(mol)和发光强度(cd)的单位为基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,称为导出单位。

2. 直接测量与间接测量 直接测量是用仪器直接将待测量与选定的同类单位量进行比较,即直接在仪器上读出待测量的数值。例如,用米尺测长度,用天平称质量,用伏特表测电压,用秒表测时间等。对大多数的物理量来说,没有可供直接进行测量、读数用的仪器,只能采用间接测量。间接测量是由几个直接测量出的物理量,通过已知的函数关系、物理公式或定律进行计算,从而求出待测量结果。例如,要测量一球体的密度,可先直接测量球的直径 d 和质量 m ,再利用公式 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{6m}{\pi d^3}$ 计算出密度,所以密度测量是间接测量。

在进行物理测量时常遇到两个问题,一是测量读数,二是测量结果的可靠程度。前者属于有效数字问题,后者属于测量误差问题,下面分别介绍:

(二) 测量的误差

1. 误差的定义 每一个物理量都具有客观存在的数值,此值称为该物理量的真值。测量的目的就是力求获得真值。但是,在实际测量过程中,由于受到测量方法、测量仪器、测量条件及测量人员水平的限制,使得测量结果与真值不可能完全相同。也就是说测量得到的只是物理量真值的近似值,此值称为测量值。实际测量中,由于仪器准确度、测量方法、环境等因素的影响,任何测量总得不到真实值,即测量结果和被测量的真值之间,总是或多或少地存在一些差异,这种差异称为误差。

设被测量的真值以 x_0 表示,测量值以 x 表示,则它们的差值

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0-1)$$

Δx 定义为测量误差。 $\Delta x > 0$ 时称为正误差, $\Delta x < 0$ 时称为负误差。测量所得到的所有数据都包含着一定的误差。

2. 误差的分类 根据误差的性质把它们归纳为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差 系统误差也称为恒定误差,是指测量中未确认或未被发觉的因素所引起的误差。例如,仪器的缺陷、环境因素变化、个人习惯、理论及测量方法不严密等所造成的误差。其特征是:在同一条件下(指仪器、方法、环境及观测者一定)对同一量进行多次测量时,测量值总是有规律地朝同一方向偏离,即总是偏大,或总是偏小,或者按照一定的规律(如递增、递减或周期性等)变化。系统误差是带系统性和方向性的误差,消除系统误差的方法主要是校正、改进实验仪器,对实验理论进行完

善,纠正实验者不良习惯等。因此,只要采取适当措施对测量值进行修正,就可以使之减至最小,但实验中仅靠增加测量次数并不能减小系统误差。

(2) 偶然误差 偶然误差又称随机误差,是由一些偶然的、不确定的因素所引起的误差。其特征是:在同一条件下,对同一物理量进行多次测量,多次测量结果会时大时小,时正时负,没有确定的变化规律。但对同一物理量进行多次重复测量时,则发现物理测量中的偶然误差多是服从正态分布规律,减少偶然误差的方法就是进行多次重复测量。

(3) 过失误差 过失误差是人为的误差,也称为粗大误差。由于观测者不正确地使用仪器、观测错误,或数据记录错误等情况均会造成过失误差。其特征是:误差很大,明显超出所预期的误差范围。因此,实验者必须要有严肃认真的态度,按规程记录和处理数据。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的测量结果中不应该含有粗大误差。这类误差歪曲了测量结果,应当将其剔除。但是什么样的数据可以认为是有过失误差的坏数据,则应慎重处理。一般是在测量后整理数据发现有错误时,经过对实验环境、过程及物理规律的分析,不合理的异常数据才可以舍弃,或重新进行测量。

3. 不确定度 由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度称为不确定度。它表征了测量值附近的一个值域范围,包含真值的可能程度。我国在 1992 年颁布的《计算技术规范测量误差与数据处理》中规定,采用不确定度作为基准研究、测量和实验工作中的误差数字指标的名称。在物理实验中,也应使用不确定度来评价实验结果。

不确定度的评定方法分为 A 类和 B 类。A 类不确定度是采用统计方法算出的分量;B 类不确定度是采用其他方法估算的分量。对两类分量进行合成即为总不确定度。在测量要求不高的情况下,对于初学者来说,通常只讨论采用统计方法计算的 A 类不确定度。

4. 直接测量的误差和测量结果的表示

(1) 单次测量结果表示 在物理实验中,常常由于条件不允许或测量精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。对于随机误差很小的测量值,可用仪器误差作为单次测量的误差。这时,设 x' 为测量值, $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差,测量结果可表示为

$$x = x' \pm \Delta_{\text{仪}} \text{ (单位)} \quad (0-2)$$

其中, $\Delta_{\text{仪}}$ 通常按仪器上注明的仪器误差,若没有注明,也可取最小分度值的一半作为单次测量的仪器误差。

上述的测量结果表达式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 只取一位有效数字,测量值 x' 的末位与 $\Delta_{\text{仪}}$ 对齐,其尾数按“四舍六入五凑偶”的规则决定取舍(“四舍六入五凑偶”的舍入规则,意即当尾数小于四时舍去,大于六时进位,等于五时,视前面的数值,奇数可以进位,偶数不进位,使其保留为偶数)。

(2) 多次测量的偶然误差计算和结果表示 由于测量总是存在误差,因而客观真值是永远不能准确知道的。由偶然误差的性质可以证明,多次测量值的算术平均值是真值的最好近似。若在同一条件下对某一物理量进行了 n 次重复测量,其测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (0-3)$$

测量值的误差常用以下几种方式来表示:

1) 算术平均误差(简称平均差):设在同一条件下对某待测量进行 n 次测量,求出其算术平均值为 $\bar{x}$, 则各次测量值与算术平均值的差值的绝对值为 $\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|$, Δx_i 称为各次测量的绝对误差。

算术平均误差定义为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (0-4)$$

算术平均误差是以误差的绝对值表示测量的误差,故又称为平均绝对误差。它表示被测量的值在 $\bar{x} + \overline{\Delta x} \sim \bar{x} - \overline{\Delta x}$ 范围之间,因此测量结果可以表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (0-5)$$

2) 标准误差:标准误差又称均方根误差。可以证明, n 次测量的算术平均值的标准误差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (0-6)$$

标准误差在正式的误差分析和计算中,常作为偶然误差大小的量度,测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (0-7)$$

可见,在直接测量的过程中,多次测量的偶然误差可用算术平均误差 $\overline{\Delta x}$ 或标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 来表示。在写出如式(0-5)和式(0-6)的测量结果表达式时, $\overline{\Delta x}$ 或 $\sigma_{\bar{x}}$ 通常只取一位有效数字(只进不舍),算术平均值 $\bar{x}$ 的末位要与误差对齐,其尾数按“四舍六入五凑偶”的规则取舍。

(3) 直接测量值的相对误差 在很多情况下,绝对误差可用来反映测量的误差范围,但不能反映测量的准确程度。实验的测量误差也可用相对误差 E (或称相对不确定度)来表示,其定义式为

$$E = \frac{\Delta x_0}{x_0} \times 100\% \quad (0-8)$$

式中 x_0 为公认值(或理论值), Δx_0 是测量值与公认值(或理论值)的偏差值(绝对误差)。相对误差反映了测量误差占待测量的百分比,可以表示测量的精确度。若是采用多次测量,用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真实值,用 $\overline{\Delta x}$ 或 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示测量的绝对误差,相对误差的计算式又可以表示为

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{或} \quad E = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (0-9)$$

相对误差也称为百分误差。相对误差通常只保留一位有效数字(只进不舍),若大于1%,可保留两位有效数字。

例1 经过多次测量,两个待测物体的长度为如下的结果表达:

$l_1 = (\bar{l}_1 \pm \overline{\Delta l}_1) = (23.50 \pm 0.03) \text{ cm}$, $l_2 = (\bar{l}_2 \pm \overline{\Delta l}_2) = (2.35 \pm 0.03) \text{ cm}$,求它们的百分误差,并比较测量的精确度。

解:由给出的测量结果表达式,应用式(0-9)可得

$$E_1 = \frac{\overline{\Delta l}_1}{\bar{l}_1} \times 100\% = \frac{0.03}{23.5} \times 100\% = 0.2\%$$

$$E_2 = \frac{\overline{\Delta l}_2}{\bar{l}_2} \times 100\% = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1.3\%$$

可见, $E_1 < E_2$,即 l_1 的测量结果具有更高的精度。 l_2 的数值较小,应该选用精密度更高的测量工具来测量,才能提高测量的精度。

从相对误差的定义公式(0-9)可得绝对误差的计算式

$$\overline{\Delta x} = \bar{x} \cdot E \quad (0-10)$$

在实验中,有的间接测量需要先求出相对误差 E ,然后再由式(0-10)计算绝对误差 $\overline{\Delta x}$,最后写出测量的结果表达式。

(4) 直接测量值的数据处理过程 综上所述,若是采用直接测量的方法来多次测量数据,其数据处理过程主要按以下几个步骤进行:①以有效数字记录各测量值;②计算测量值的平均值 $\bar{x}$;③计算测量误差($\overline{\Delta x}$ 或 $\sigma_{\bar{x}}$);④写出测量结果表达式: $x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}$;⑤计算百分误差 E (视具体要求而定,通常与理论值或标准值进行比较)。

5. 间接测量的误差估算 实际测量中,大多数测量是间接测量,间接测量结果是由直接测量结果通过一定的函数关系式计算出来的。由于直接测量值存在误差,而由直接测量值运算得到的间接测量值也必然存在误差,这就是误差的传递。表达直接测量误差与间接测量误差之间的关系式,称为误

差传递公式。

设间接测量量 N 的函数表达式为

$$N = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为彼此相互独立的直接测量量, 每一直接测量量为只含随机误差的多次等精度测量, 若各直接测量量用算术平均偏差估算误差, 测量结果分别为 $x_1 = \bar{x}_1 + \Delta x_1, x_2 = \bar{x}_2 + \Delta x_2, \dots, x_m = \bar{x}_m + \Delta x_m$, 则间接测量量 N 的最可信赖值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$$

将各直接测量量的算术平均值代入函数式中, 便可求出间接测量量的最可信赖值。在此略去误差传递公式的具体推导过程, 直接给出几种常用函数的间接测量量的误差估算公式(表 0-1)。

表 0-1 常用函数的误差计算公式

函数关系	绝对误差 ΔN	相对误差 $(E = \frac{\Delta N}{N})$
$N = X + Y$	$\Delta X + \Delta Y$	$\frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y}$
$N = X - Y$	$\Delta X + \Delta Y$	$\frac{\Delta X + \Delta Y}{X - Y}$
$N = X \cdot Y$	$X \cdot \Delta Y + Y \cdot \Delta X$	$\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = \frac{X}{Y}$	$\frac{Y\Delta X + X\Delta Y}{Y^2}$	$\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = X^k (k \text{ 为常数})$	$kX^{k-1} \cdot \Delta X$	$k \frac{\Delta X}{X}$
$N = \frac{X^k Y^m}{Z^n}$	$E \cdot N$	$k \frac{\Delta X}{X} + m \frac{\Delta Y}{Y} + n \frac{\Delta Z}{Z}$
$N = kX$	$k \cdot \Delta X$	$\frac{\Delta X}{X}$
$N = \ln X$	$\frac{\Delta X}{X}$	$\frac{\Delta X}{X \ln X}$
$N = \sin X$	$\cos X \cdot \Delta X$	$\cot X \cdot \Delta X$
$N = \cos X$	$\sin X \cdot \Delta X$	$\tan X \cdot \Delta X$

由此可见, 常用函数间接测量值的数据处理过程可按以下步骤进行:

(1) 计算各直接测得量的误差, 若是多次测量, 计算其算术平均值、算术平均误差。写出各直接测量的结果表达式。

(2) 按函数公式计算间接测量量的平均值。

(3) 按常用函数的误差估算公式计算间接测量值的误差。

(4) 写出间接测量值的结果表达式: $N = \bar{N} \pm \Delta N$ (单位)。

若是间接测量值的计算式中只包含加、减运算时, 通常先计算绝对误差, 然后再计算相对误差比较方便。若是间接测量值的计算式中包含乘、除等其他运算时, 则先计算相对误差, 然后计算绝对误差。

三、有效数字及其运算法则

1. 有效数字的一般概念 医学物理学实验不管是直接测量还是间接测量, 都要先记录测量数据,

间接测量还要进行数据的运算。测量数据记录取到哪位数字,运算后保留几位数字,是十分重要的。为了正确地反映测量结果的准确度,需引入有效数字的概念。

有效数字,就是指从仪器上直接准确读出来的几位数字和最后一位可疑数构成的,即有效数字的位数等于全部的准确数位数再加上一位可疑数。

比如,用两把不同的米尺测量同一物体的长度,按照米尺的最小分度值读出的测量结果分别为 $L_1 = 7.4 \text{ cm}$ 和 $L_2 = 7.45 \text{ cm}$ 。可见, L_1 中的“4”和 L_2 中的“5”是估读的,是可疑数。因此,用仪器测量出来的数值中有几位是能准确读出的,而有一位数是估读出来的可疑数。但这个可疑数尽管可疑,读出这一位比不读一定要准确,所以读出的所有这些数字都是有效的。

从上面的例子可以看出,在相同条件下,用不同分度值的仪器测量同一对象时,仪器的精密程度越高,测量值有效数字的位数就越多。因此,用有效数字表示测量值时,不仅反映了测量值的大小,而且能反映出所用仪器的精密程度,这就是有效数字的双重性质。

对于有效数字,在记录和处理实验数据时应注意以下几点:

(1) 有效数字位数的多少,是由被测量的大小及测量仪器的分度值所决定,不能随意增减。例如,用分度值为 1 mm 的尺子测得物体长度为 7.40 cm ,不能写成 7.4 cm 或 7.400 cm ,数学上它们的大小相同,但表示的物理意义不相同。

(2) 有效数字的位数,不因单位的变换而增减。例如, 7.4 cm 可以写成 74 mm ,也可以写成 0.74 m ,都表示有效数字是2位。可见,用于表示小数点位置的“0”不是有效数字。

(3) 有效数字的标准记数法,即科学计数法。对于很大或很小的数,常采用 $\times 10$ 的幂指数来表示有效数字,既准确、科学,又方便不易出错。一般规定小数点在第一位数后面。例如, 7.4 cm 可写成 $7.4 \times 10^{-2} \text{ m}$,也可写成 $7.4 \times 10^4 \mu\text{m}$ 。

(4) 有效数字是对测量值而言,对参与运算的常数如 $1/4$ 、 $\sqrt{2}$ 、 π 等,其有效数字位数可认为是无限,可根据具体情况确定位数,一般情况下比测量值多取1位。

(5) 对不可能估读到最小刻度以下一位的仪器(如游标卡尺、数字式仪表),所读出数值的最后一位即为可疑数。

2. 有效数字的运算法则 一般参与运算的各数值的大小及有效数字的位数不同,经常会遇到有效数字的位数和尾数的取舍问题。有效数字运算的总原则是:①准确数与准确数进行四则运算时,其结果仍是准确数。②可疑数与准确数或可疑数进行四则运算时,其结果仍是可疑数。根据有效数字的定义,运算的结果最终只保留一位可疑数,其后的数字按“四舍六入五凑偶”的舍入规则取舍。

根据上述原则,有效数字具体运算的法则如下(各有效数字的最后一位是可疑数,其数字下面带“ $_$ ”表示):

(1) 加减法 诸数相加减时,所得结果的有效数字应以诸数中可疑位数最靠前的为基准,其次一位按舍入规则处理。例如:

$$124.2\text{ }\underline{1} + 15.\text{ }\underline{2} + 6.00\text{ }\underline{4} = 145.\text{ }\underline{4} \qquad 23.7\text{ }\underline{6} - 2.09\text{ }\underline{5} = 21.6\text{ }\underline{6}$$

(2) 乘除法 诸数相乘除时,所得结果的有效数字位数应以诸数中有效数字最少的为准,其次一位按舍入规则处理。例如:

$$218.\text{ }\underline{4} \times 36.\text{ }\underline{2} = 7.9\text{ }\underline{1} \times 10^3 \qquad 6.42\text{ }\underline{6} \div 0.42\text{ }\underline{5} = 15.\text{ }\underline{1}$$

(3) 乘方与开方 乘方或开方运算时,所得结果的有效数字位数与底数的有效数字位数相同。例如:

$$\sqrt{21.6\text{ }\underline{5}} = 4.6\text{ }\underline{5} \qquad 3.08\text{ }\underline{2}^2 = 9.4\text{ }\underline{9}$$

(4) 三角函数 三角函数的有效数字位数与角度的有效数字位数相同。

例如: $\sin 37.\text{ }\underline{1}^\circ = 0.60\text{ }\underline{3}$ 。上述运算法则一般条件下是成立的,但不能绝对化。对于参与运算的

常数(如 π 、 e 等)的位数,可与运算诸数中有效数字最少的位数相同或多取一位。在混合运算中,为防止多次取舍而引起的计算误差,结果中有效数字的位数比逐次按单一运算的结果多保留一位,待最后再按舍入规则处理。

四、实验数据的记录和处理

实验数据记录及其处理,是对实验结果分析和讨论的依据。相应的数据处理方法有列表法、图示法和最小二乘法(直线拟合)等。在此仅介绍常用的列表法和图示法。

1. 列表法 列表法就是将实验测量所得的数据,依照一定的形式和顺序制成表格。列表的好处,就是可以简明地表示出有关物理量之间的对应关系,便于检查测量结果是否合理。另外,利于及时发现减少和避免错误,并有助于找出有关物理量之间的联系和规律性。

通常,数据记录表格的设计要能明显反映各物理量之间的关系。一般将实验数据按自变量和因变量对应列出,表头上要写上表名,表格应包括序号、物理量(或符号)、数据(注明单位)及相关说明(或实验条件)。表中所填的数据,应该是正确反映测量值的有效数字。若实验为间接测量,还应列出测量值的计算公式。

2. 图示法 在很多时候,实验所测得的数据仅仅是反映某一个物理量(因变量)随另一个物理量(自变量)的函数变化关系,此时就要用到图示法。图示法就是根据几何原理将实验数据用图线表示,图线能简明、直观地揭示物理量之间的函数关系。图示法的具体要求有以下几点:

(1) 选定坐标轴(用坐标纸) 通常以横轴表示自变量,纵轴表示因变量,并标明所代表的物理量及单位。

(2) 选定标尺 选取合适的标尺比例,具体要根据实验数据有效数字的位数来确定。还要注意曲线在整个图中的比例和位置,不要靠在一边或缩在一角。在某些情况下,可以采用横轴和纵轴的比例不同,且标度也不一定从零开始。

(3) 描点 就是将实验数据用符号“ $\cdot$ ”或“ $\times$ ”在坐标纸上标出各点位置,符号要清晰、明显,而且准确地标出各对应点。

(4) 连线 连线是所做函数曲线质量高低的关键。把标出的各数据点用直尺或曲线板连成直线或曲线,所绘出的直线或曲线应平滑、连续,而不是曲折的。曲线可以不一定通过每一个点,但是要求偏差点是较均匀地分布在曲线两侧,能准确反映函数变化规律。图线不宜画得过粗,以致看不清标出的点。

(5) 写图名 在图的下方写上图名,并标明必要的实验条件及图注。

例2 用游标卡尺和千分尺对某圆柱体的高度和直径做多次测量,其结果分别为: $h_1 = 50.02 \text{ mm}$, $h_2 = 50.04 \text{ mm}$, $h_3 = 50.00 \text{ mm}$, $D_1 = 10.018 \text{ mm}$, $D_2 = 10.011 \text{ mm}$, $D_3 = 10.005 \text{ mm}$ 。求圆柱体的体积,写出测量的结果表达式。

解:(1) 先求出直接测量高度和直径的平均值,写出结果表达式

$$\bar{h} = \frac{1}{3}(50.02 + 50.04 + 50.00) = 50.02(\text{mm})$$

$$\bar{D} = \frac{1}{3}(10.018 + 10.011 + 10.005) = 10.011(\text{mm})$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{3}(|50.02 - 50.02| + |50.04 - 50.02| + |50.00 - 50.02|) = 0.02(\text{mm})$$

$$\overline{\Delta D} = \frac{1}{3}(|10.018 - 10.011| + |10.011 - 10.011| + |10.005 - 10.011|) = 0.005(\text{mm})$$

高度和直径的结果表示为

$$h = \bar{h} \pm \Delta h = 50.02 \pm 0.02 (\text{mm})$$

$$D = \bar{D} \pm \Delta D = 10.011 \pm 0.005 (\text{mm})$$

(2) 间接测量的体积平均值为

$$\bar{V} = \frac{1}{4} \pi \bar{D}^2 \bar{h} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 10.011^2 \times 50.02 = 3.935 \times 10^3 (\text{mm}^3)$$

根据间接测量误差传递公式得

$$E = \frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h} = 2 \times \frac{0.005}{10.011} + \frac{0.02}{50.02} = 0.2\%$$

体积的平均绝对误差为

$$\Delta \bar{V} = \bar{V} \cdot E = \bar{V} \frac{\Delta V}{V} = 3.935 \times 10^3 \times 0.2\% = 0.008 \times 10^3 (\text{mm}^3)$$

体积测量结果表示为

$$V = \bar{V} \pm \Delta \bar{V} = (3.935 \pm 0.008) \times 10^3 (\text{mm}^3)$$

【习题】

1. 指出下列测量结果各有几位有效数字?

2. 008 54.030 0.030 10.00 130 2.6×10^3

2. 有效数字尾数的舍入规则是什么? 将下列数字截取为四位有效数字。

(1) 5.0002 (2) 0.026 786 (3) $6.243\ 56 \times 10^4$

3. 应用有效数字的运算法则, 计算下列各式

(1) $435.27 + 68.5 + 0.6436$ (2) $78.25 - 7.160 - 62.45$

(3) $3.1246 \div 0.145$ (4) $5.563 \times 10^{-4} + 63.8 \times 10^{-6}$

4. 改正下列结果表达式中的错误, 并指出错误的原因

(1) $h = (18.56 \pm 0.02)$

(2) $l = (6.825 \pm 0.02) \text{cm}$

(3) $I = (12.27 \pm 0.25) \text{mA}$

5. 用米尺测一物体长度 5 次, 其值分别为 63.54 cm、63.58 cm、63.55 cm、63.56 cm、63.55 cm, 求物体长度的平均值、平均绝对误差及相对误差, 写出测量结果表达式。

6. 测得某金属丝的长度 L_T 和相应温度 T 的数据列于下表中, 已知 $L_T = L_0(1 + \alpha T)$, 用图示法求出 L_0 及 α 。

附表:

$T(^{\circ}\text{C})$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0
$L_T(\text{mm})$	63.6	65.8	71.8	74.1	76.3	78.6	81.5	83.8	85.6

第 1 章

常用测量仪器及基本操作

实验 1.1 基本测量

【实验目的】

1. 了解游标卡尺、螺旋测微器的原理;学会游标卡尺、螺旋测微器的使用方法。
2. 掌握记录实验数据和有效数字的基本方法;学会运用误差理论和有效数字的运算规则处理实验数据。

【实验器材】

游标卡尺、螺旋测微器、圆柱体和小钢球。

【预习要求】

1. 复习有效数字的定义和运算法则。
2. 概括游标卡尺和螺旋测微器的结构和分度设计原理要点有哪些?
3. 如何用游标卡尺和螺旋测微器测量长度?

【实验原理】

1. 游标卡尺

(1) 结构 游标卡尺的构造如图 1.1-1 所示,由主尺和游标两部分组成。主尺 D 是一根具有毫米分度的直尺,主尺头上有钳口 A 和刀口 A'。游标(也称为副尺)是套在 D 上的一个滑框,其上装有钳口 B 和刀口 B'及尾尺 C,滑框上刻有副尺 E。当钳口 A 与 B 靠拢时,游标的 0 线刚好与主尺上的 0 线对齐,这时读数为 0。测量物体的外部尺寸时,可将物体放在 A、B 之间,用钳口夹住物体。同理,测量物体的内径时,可用 A'B'刀口;测孔眼深度和键槽深度时可用尾尺 C。游标零线与主尺零线之间的距离,即为待测物的大小。

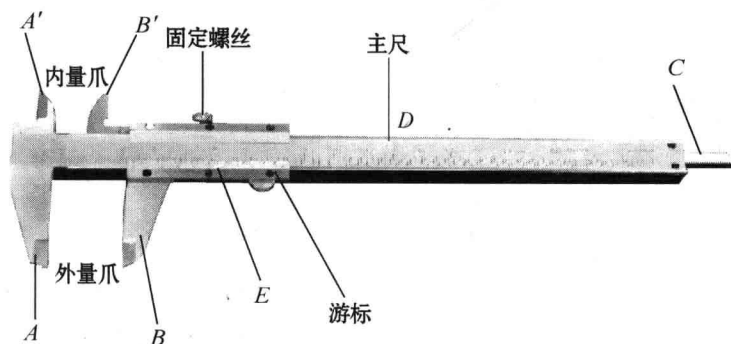


图 1.1-1 游标卡尺图示

(2) 分度原理 游标卡尺的最小刻度都是毫米(mm),包括10分度、20分度和50分度三种类型。在10分度的游标中,10个游标分度的总长度刚好与主尺上9个最小分度的总长度相等,每个游标分度的长是0.9 mm,每个游标分度比主尺的最小分度短0.1 mm,即该游标卡尺的精度为0.1 mm。同理,在20分度的游标中,20个游标分度的总长度刚好与主尺上19个最小分度的总长度相等,每个游标分度的长是0.95 mm,每个游标分度比主尺的最小分度短0.05 mm,即该游标卡尺的精度为0.05 mm。在50分度的游标中,50个游标分度的总长度刚好与主尺上49个最小分度的总长度相等,每个游标分度的长是0.98 mm,每个游标分度比主尺的最小分度短0.02 mm,即该游标卡尺的精度为0.02 mm。

若用 a 表示主尺上最小分度的长度, b 表示游标上最小分度的长度,用 n 表示游标的分度数,并且取 n 个游标分度与主尺 $(n-1)$ 个最小分度的总长相等,则每一个游标分度的长度为:

$$b = \frac{(n-1)a}{n} \quad (1.1-1)$$

可见,主尺最小分度与游标分度的差值,也就是游标卡尺的精度,表示为

$$a - b = \frac{(n-1)a}{n} = \frac{a}{n} \quad (1.1-2)$$

测量时,如果游标上第 k 条刻线与主尺上的某一刻线对齐,那么游标0线与主尺上左边相邻刻线的距离

$$\Delta x = ka - kb = k(a - b) = \frac{ka}{n} \quad (1.1-3)$$

根据上面的关系式,对于任何一种游标,只要弄清它的分度数 n 及主尺最小分度 a ,就可以算出它的精度并正确读数。

读数时,其读数方法可分三步(以精度值为0.02 mm的游标卡尺为例):

- (1) 根据游标零线以左的主尺上的最近刻度读出整毫米数。
- (2) 根据游标零线以右与主尺上的刻度对准的刻线数乘上0.02 读出小数部分。
- (3) 将上面整数和小数两部分加起来,即为总尺寸(以mm为单位)。

如图1.1-2所示,游标0线所对主尺前面的刻度64 mm,游标0线后的第9条线与主尺的某条刻线对齐。游标0线后的第9条线的数值为:0.02 × 9 = 0.18 mm;所以被测工件的尺寸为64 + 0.18 = 64.18 mm。

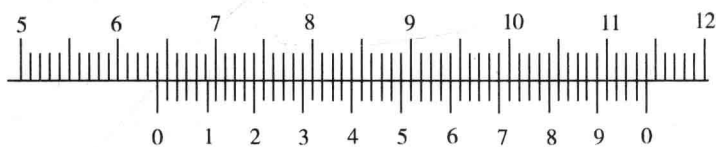


图 1.1-2 0.02 mm 游标卡尺的读数方法

在图1.1-2中,物体的长度为64.18 mm,0.18 mm是比较准确地测出的。测量中有时游标与主尺上的两条线不能完全重合,而只能判定相邻的两条游标线中,哪一条与主尺刻线更接近,因此最后1位可估读数的误差不大于 $\frac{1}{2(a-b)}$ 。当游标为50分度时,它们的估读误差不大于 $\frac{1}{2(a-b)} = \frac{1}{2} \times 0.02 =$

0.01 mm。由误差理论可认为误差在0.01位上。同理,对20分度的游标读数最后1位也只能写到0.01(mm)位上。因此,图1.1-3所示的物体长度50.15 mm后面不再加0。对1/10游标,读数后可加一个“0”。另外,在一些可以相对旋转的仪器部分上附有弯游标

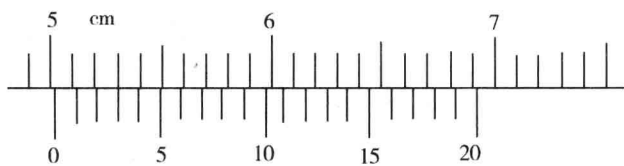


图 1.1-3 游标读数原理