



河南省“十二五”普通高等教育规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

医用物理实验

主编 侯晓强 苏金瑞

副主编 马润香 张建民 郜超军

高等教育出版社



河南省“十二五”普通高等教育规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

医用物理实验

YIYONG WULI SHIYAN

主 编 侯晓强 苏金瑞

副主编 马润香 张建民 郜超军

编 委 (以姓氏笔画为序)

马润香 朱靖玉 刘爱玲 苏金瑞

宋开兰 宋平新 张建民 张 敏

郜超军 侯晓强 饶凤飞 郭 娟

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是根据医学类各专业的培养目标,参照卫生部颁发的高等医学院校医用物理学教学大纲和教育部物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),并在总结了多年“医用物理学”实验教学及教学改革经验的基础上,本着实用并贴近学生的原则,结合医学院校实验课程的教学实际情况和需要精心编写而成。

本书内容主要包括绪论和32个物理实验项目。物理实验项目包括实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、数据处理、注意事项及思考题等,能帮助学生强化概念,掌握实验方法,提高实验操作技能,培养学生的实际动手能力。本书可供高等医学院校本科、专科生各专业使用或参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理实验/侯晓强主编.--北京:高等教育出版社,2015.2

ISBN 978-7-04-041737-1

I. ①医… II. ①侯… III. ①医用物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①R312-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第295726号

策划编辑 缪可可
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 高聚平
责任校对 刘春萍

封面设计 于文燕
责任印制 田甜

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京市联华印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 14.25
字数 300千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版次 2015年2月第1版
印次 2015年2月第1次印刷
定价 25.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 41737-00

《医用物理实验》作者名单

主 编 侯晓强 苏金瑞

副主编 马润香 张建民 郜超军

编委(以姓氏笔画为序)

马润香 朱靖玉 宋平新 宋开兰 刘爱玲 张建民 张 敏 苏金瑞

饶凤飞 侯晓强 郭 娟 郜超军

前言

本教材是为医科学生编写的一本大学物理实验教材,该教材 2013 年入选第一批河南省“十二五”普通高等教育规划教材,目的是为医科学生提供系统的物理实验技能和知识,为学习后继课程和将来从事医疗、卫生、检验、科研工作等打好基础。本书以原有教材为基础,根据现代医学对物理学的基本需求,参考国内外的有关教材,结合我校多年来的教学实践和教学改革的经验编写而成。本书包括绪论和 32 个物理实验项目,内容力求与医学相结合,在编写过程中,充分考虑到目前国内多数医学院校物理实验室现有的设备条件和今后几年医学教育发展的要求,采用多种实验方法和测量项目,尽量使实验内容与理论课内容和医学结合更加密切,更能适应高等医学院校物理实验的实际需要。

本书由郑州大学物理工程学院侯晓强、苏金瑞担任主编,马润香、张建民、郜超军担任副主编。各编委编写的实验内容为:马润香(实验二十二、二十六、二十七)、朱靖玉(实验十、十三、十四)、宋平新(实验二、十五、二十九)、宋开兰(实验三十、三十一、三十二)、刘爱玲(实验十六、十八)、张建民(实验十七、二十)、张敏(实验一、七、八)、苏金瑞(实验五、六、二十五)、饶凤飞(实验三、二十一)、侯晓强(绪论、实验四、二十四)、郭娟(实验九、十一、十二)、郜超军(实验十九、二十三、二十八)。

本书在编写过程中得到了郑州大学物理工程学院的大力支持,并得到许多老教授的指导与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间紧迫,加上编者水平有限,书中难免有不妥之处,祈盼使用本书的教师、学生和各位读者批评指正,以便今后不断完善。

侯晓强

2014 年 10 月 26 日

目 录

绪论	001
一、物理实验课程的地位、作用和任务	002
二、教学内容基本要求	002
三、能力培养基本要求	003
四、实验课的教学环节	003
五、怎样学好物理实验课	004
六、学生实验守则	004
七、物理实验基本知识	005
习题	017
第一部分 力、声学实验	019
实验一 长度测量	020
实验二 液体黏度的测定	025
实验三 液体表面张力系数的测定	030
实验四 杨氏模量测定	034
4.1 杨氏模量的测定	034
4.2 用新型光杠杆放大法测定金属丝的杨氏模量	039
实验五 测量超声波在空气中的传播速度	044
5.1 驻波法测声速	045
5.2 相位法测声速	045
实验六 多普勒效应综合实验	048
第二部分 电磁学实验	055
实验七 万用电表的使用——制流和分压	056
实验八 用惠斯通电桥测电阻	064
实验九 示波器的使用	068
9.1 示波器(模拟)的原理与使用	068
9.2 示波器(数字)的原理与使用	078
实验十 半导体热敏电阻特性研究	084
实验十一 用霍尔元件测量磁场	088
实验十二 磁化水电导率的测量	093
第三部分 光学实验	097
实验十三 薄透镜焦距的测定	098
实验十四 照相	103
14.1 胶片相机	103

14.2 数码照相实验	111
实验十五 显微镜放大率的测定和分辨本领的观察	117
实验十六 用衍射光栅测定光波波长	120
16.1 用光栅及分光仪测光波波长	120
16.2 用光栅及光具座测光波波长	123
实验十七 用分光计测定棱镜的折射率	128
实验十八 用旋光计测量糖溶液的浓度	132
第四部分 近代物理与生物医学实验	137
实验十九 用单色仪测量物质的透射率	138
19.1 用(PMT)单色仪测量物质的透射率	138
19.2 用(CCD)单色仪测量物质的透射率	141
实验二十 物质对 γ 射线吸收规律的研究	151
实验二十一 激光基本参数测量	157
实验二十二 红外热成像实验	161
实验二十三 生物信号采集与处理	165
实验二十四 传感器技术应用实验	171
实验二十五 B超诊断仪的原理和影像实验	183
实验二十六 X-CT图像模拟及图像后处理	186
实验二十七 核磁共振	190
实验二十八 听力曲线的测试	195
28.1 听力曲线的测试1	195
28.2 听力曲线的测试2	198
实验二十九 气体压力传感器特性及人体心率、血压测量实验	200
实验三十 人体阻抗特性的实验研究	205
实验三十一 血液流变学指标测定	209
实验三十二 人眼的屈光不正及光学矫正	213
参考文献	218

然巨的有財源其
吳, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

绪论

預審時真
元審時真
元審時真
元審時真

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

此, 1) 漸是位因本

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理实验课是高等理、工、医科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本课程的具体任务是:

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公共财产的良好品德。

二、教学内容基本要求

大学物理实验包括普通物理实验(力学、热学、电磁学、光学实验)和近代物理实验,具体的教学内容基本要求如下。

(1) 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

① 测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

② 处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德伯常量等常用物理量及物性参数的测量,注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

根据条件,在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如,激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

例如:零位调整、水平/竖直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

三、能力培养基本要求

(1) 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法、做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告;培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

四、实验课的教学环节

物理实验课是在教师指导下,由学生独立进行的运用实验手段、研究问题解决问题的学习过程,其学习过程分为以下三个阶段。

(1) 课前预习:一次实验课的时间有限,为保证实验的顺利进行,课前必须做好预习。课前要认真阅读实验教材或相关资料,明确实验原理、实验目的、测量内容和方法、实验步骤和注意事项,根据实验任务画好数据记录表格,并写出预习报告。预习报告的内容应包括实验名称、目的、原理、数据表格。没有预习报告不准做实验。

(2) 课堂实验:这是实验课的中心环节。做实验前应先认识和清点所用仪器,了解仪器的使用方法和注意事项,将仪器安装调试好,再按照操作规程进行实验。实验时要注意安全,要细心观察实验现象,实事求是地记录实验数据;要做到手脑并用,能够随时判断实验是否在正常进行,出现实验故障尽可能自己排除,若不能排除再找指导教师帮助查明原因并加以解决(发现问题、分析原因、找出解决方案是培养实验能力的重要途径)。实验完成后,要将实验数据交教师审查、签字,然后将仪器整理好才能离开实验室。

(3) 撰写实验报告:要求层次分明,语言简洁通顺,字迹清楚,图表规矩,结果或结论明确,讨论认真。

实验报告内容包括:实验名称、实验目的,实验原理简要叙述实验的理论依据(包括文字简述、公式、原理图),公式中各量的物理含义及单位,公式成立的实验条件等。实验步骤根据实际的实验过程写明关键步骤和操作要点。数据记录通常采用列表法记录数据。要树立“原始数据神圣不可侵犯”的观念,绝不能因误差大而采取随意“修正”数据的自欺欺人的做法,对于错误数据也不要涂掉,可在旁边注明作废。数据处理按实验的要求采用适当的方法(如计算法、作图法、逐差法、最小二乘法等)给出实验结论。小结或讨论内容不限,可以是对实验现象的分析、对实验关键问题的研究体会、实验的收获和建议、解答思考题等。

值得强调的是,撰写实验报告是一份十分细致而艰苦的工作,特别是初学者,经常会出现这样那样的问题或错误。但只要认真对待,及时纠正发生的错误,就一定能掌握实验报告的写作技能,为我们以后的学习打下扎实的基础。

五、怎样学好物理实验课

(1) 思想重视:要充分理解和认识实验的地位和作用,克服重理论轻实验的思想观念。

(2) 目的明确:本课程有总的教学目标,各实验又有具体目的。在学习时一定要明确实验目的,用它指导和检验自己的学习。

(3) 手脑并用:动手是实验课的特点之一,但绝不能为动手而动手、盲目动手,抱有试试看的态度。重视实验的各个环节,遇到问题要积极思考、努力解决、随时总结,才能不断地提高自己的实验素质。

(4) 严肃认真:要认真对待实验的每个环节,养成良好的实验习惯。

六、学生实验守则

(1) 必须按规定的时间上课,不得迟到和无故缺席。

(2) 进实验室后不得喧哗,按序号对号入座,不得随意拨弄仪器。

(3) 使用仪器前,务必看懂说明书或听懂教师的使用指导。

(4) 严格按操作规则使用仪器。仪器发生故障后立即报告教师,不得自行处理或更换。

(5) 认真听取教师讲解,积极参与课堂讨论,主动积极地进行实验。

(6) 实验完毕,将数据表交教师检查,教师签字后,将仪器用具整理好,方可离开实验室。

七、物理实验基本知识

物理实验离不开对物理量的测量,由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员等因素的限制,测量结果不可避免地存在着测量误差,误差的范围由不确定度来评定。本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量与误差和不确定度的基本概念、测量结果的不确定度计算、实验数据处理和实验结果表示等方面的基本知识。这些知识不仅在每个物理实验中要用到,而且对今后从事科学实验也是必须了解和掌握的。

1. 测量

以确定被测对象量值为目的的操作称为测量。测量过程就是把被测物理量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的过程,所以测量值应包括数值和单位。

按测量值获得的途径,测量分为**直接测量**和**间接测量**两类。可以从测量仪器上直接读出测量值的测量称为直接测量,例如用米尺测长度,用天平称质量等。实际的测量工作中,许多物理量值不能从测量仪器直接获得,而是通过与直接测量量间的函数关系计算得到,这类测量称为间接测量。例如测量球的体积是通过测量球的直径,利用球的体积公式计算出球的体积。球体积的测量即为间接测量。

按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和非等精度测量两类。等精度测量是指在相同的测量条件下(同一测量者、同样的方法、同样的仪器、同样的环境条件等)对同一物理量进行的重复测量。用不同精度的仪表或不同的测量方法,或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量,这时所进行的测量就是非等精度测量。本书中的重复测量,除特别说明外,均指等精度测量。

2. 测量误差及其分类

(1) 测量误差

在一定条件下,任何一个物理量都有一个客观存在的量值,称为真值。从测量的要求来说,人们总希望测量值能很好地符合客观实际值即真值。但是在实际的测量过程中,由于受测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员等多种因素的限制,测量值与真值不可能完全相同,测量值与真值之间的差异称为测量误差。测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。若某物理量的测量值为 x ,真值为 x_0 ,则绝对误差 Δx 定义为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0.1)$$

相对误差 E 定义为

$$E = (\Delta x / x_0) \times 100\% \quad (0.2)$$

绝对误差反映了测量值偏离真值的程度,相对误差反映了测量值的优劣。一般来说,真值是不知道的也是不可求的,实际测量中,通常只能根据测量值确定测量的最佳值,我们取多次重复测量的平均值作为最佳值。

测量过程中总存在着误差,而且误差贯穿于测量过程的始终。因此,研究测量误差的性质和产生的原因,研究如何有效地减小测量误差和怎样科学地表达含有误差的测量结果就很重要。而测量误差理论是一门专门的科学,需要有丰富的实验经验和较多的概率统计知识,考虑到物理实验课的特点,这里只能做基本的介绍。我们学习误差理论要着重了解它的物理意义,逐步建立起分析误差、减小误差的思想,这对做好物理实验非常重要。

(2) 误差的分类

误差的产生有多方面的原因,根据误差的特点,可将其分为系统误差和随机误差两类。

① 系统误差

系统误差:重复测量时误差的大小和符号保持恒定或以可预知的方式变化的误差分量。其特点是确定性、规律性、可修正性,不能用增加测量次数的方法使其减小。

系统误差按对其掌握的程度可分为已定系统误差和未定系统误差。

已定系统误差是指大小和符号都能确定的系统误差。对已定系统误差,一经发现要设法将其消除或用它对测量数据进行修正,如千分尺的零点误差。

未定系统误差是指大小或符号不能确定的系统误差。对未定系统误差我们只能估计其限值,如仪器的允差。

a. 系统误差的来源

系统误差的来源主要有以下几个方面:

仪器误差:由于仪器本身的固有缺陷或没有按照规定条件使用引起的误差。如仪器的刻度不准、天平的两个臂长不相等、检流计的零点没有校准等。

方法、理论误差:由于理论、公式本身的近似性,或者实验装置和方法不能满足理论公式成立的条件引起的误差。如单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,而摆角趋于零的实验条件根本不能实现;用落球法测重力加速度时没有考虑空气阻力的影响等。

个人误差:由于实验者个人的心理、生理因素引起的误差。如有些人对准标志线读数时,头总是偏左或偏右,致使读数偏大或偏小;有些人的反应速度相对大多数人总是超前或滞后等。

环境误差:外界环境因素引起的误差。如 20℃ 标定的仪器在高于或低于 20℃ 的温度下使用等。

实验中发现和消除系统误差非常重要,因为系统误差是影响实验结果准确度的主要因素。而消除或减小系统误差是一件复杂而困难的事情,主要靠对具体问题作具体的分析和处理,靠不断地积累丰富的实验经验。对于初学者来说,从一开始就应该注意积累这方面的经验。

b. 系统误差的处理

用任何仪器在任何条件下进行的测量都存在着系统误差。对测量中的已定系

统误差可以考虑从以下几方面进行消除或减小。

消除产生系统误差的根源:从理论模型、实验仪器、实验条件和测量方法等方面考虑,找出产生系统误差的根源,针对产生系统误差的原因使其更完善,从而消除或减小系统误差的影响。例如采用符合实际的理论公式;保证仪器装置良好且满足规定的使用条件等。

修正测量结果:用修正值对测量结果进行修正。例如用标准仪器校准一般仪器,做出校正曲线修正测量结果;用千分尺的零点读数修正测量数据等。

选择合适的测量方法:例如用交换法消除惠斯登电桥实验中由于比率不合适导致的系统误差;用异号抵消法消除霍尔效应实验中由于附加效应产生的系统误差;用半周期偶数测量法消除分光计的偏心差等。

对于未定系统误差,由于其具有不确定性,实验中无法消除,只能估算其范围,评定实验结果必须予以考虑。

② 随机误差

随机误差:重复测量中误差的大小和符号以不可预知的方式变化的误差分量。其特点是随机性,是不可避免的,可通过增加测量次数取平均值的方法减小其影响。

随机误差是由于实验中各种因素的微小波动引起的。例如实验环境条件的波动、测量仪器指示值的波动、被测量本身的不确定性以及实验者本人在判断和估计读数时的随机性等都会造成随机误差。由于实验中随机因素很多,各种因素又相互混杂,不能确定各种因素的影响大小,因此,随机误差不能消除也无法控制。

就一次测量来看,随机误差是随机的,没有确定的规律,也不能预知,但当测量次数足够多时,随机误差的分布符合一定的统计规律,可以用统计的方法研究诸因素的综合作用结果。

当测量次数很多时,随机误差的分布近似服从正态分布规律:数值较小的误差出现的机会较多;数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现;正误差和负误差出现的次数大体相等;测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值趋近于真值。

设对某一物理量 x 进行了 n 次等精度测量,其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0.3)$$

当系统误差被消除时,测量次数越多,算术平均值越接近真值,因此可以用算术平均值表示测量结果,减小随机误差的影响。测量值和平均值的差值称为偏差,可以用标准偏差 S_x 描述各测量值对平均值的离散程度。标准偏差 S_x 为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0.4)$$

(0.4)式称为贝塞尔公式。标准偏差反映了各测量值的离散程度,标准偏差小表示各测量值比较接近,标准偏差大表示各测量值比较分散。

3. 精度

不准确度或不精确度是指给出值偏离真值的程度,它与误差的大小相对应。习惯上称为准确度,其含义乃是不准确之意。

精度一词可细分为精密度、准确度和精确度(图 0.1)。

精密度:表示一组测量值的偏离程度。或者说,多次测量时,表示测得值重复性的高低。如果多次测量的值都互相很接近,即偶然误差小,则称为精密度高。可见精密度与偶然误差相联系。

准确度:表示一组测量值与真值的接近程度。测量值与真值越接近,或者说系统误差越小,其准确度越高。所以准确度与系统误差相联系。

精确度:它反映系统误差与偶然误差合成大小的程度。在实验测量中,精密度高的、准确度不一定高;准确度高的,精密度不一定高;但精确度高的,则精密度和准确度都高。



图 0.1

4. 测量结果不确定度的评定

由于测量误差的存在,使得测量结果具有一定的不确定性,表示测量结果时,除了要给出测量值的大小,还要对测量值的可靠性进行评定。1980年,国际计量局提出了用不确定度评定测量结果。

严格的不确定度估算是比较复杂的,国家计量标准上有明确的计算方法。考虑到我们物理实验课的性质,本教材介绍的估算方法是在保证科学性的前提下,经过简化和约定后的估算方法,并且把公式直接给出来。目的是让学生建立误差和不确定度的概念,学会简单估算测量结果的不确定度,将来在工作中用到不确定度时要按国标上的方法进行计算。

(1) 不确定度及其分类

定义:不确定度是表征被测量的真值所处的量值分布范围的评定。它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度,反映了测量值的误差可能存在的范围,即测量值的误差以一定置信概率存在的范围。

测量时,误差的来源很多,在修正了已定系统误差之后,余下的全部误差按评定方法分为 A、B 两类不确定度。

A 类不确定度:多次测量时,用统计方法评定的不确定度分量,用 U_A 表示。

B类不确定度:用非统计方法评定的不确定度分量,用 U_B 表示。

总不确定度 U 由两类分量的方和根法合成

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (0.5)$$

评定测量结果也可以用相对不确定度表示,相对不确定度用符号 U_r 表示

$$U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (0.6)$$

(2) 直接测量量的不确定度估算

在实际测量中,一般只能进行有限次测量,这时随机误差不服从正态分布规律,而是服从 t 分布规律。

设在相同的实验条件下对某一物理量 x 测量了 $n(n>1)$ 次,它的 A 类不确定度

$$U_A = \frac{t_p}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S_x \quad (0.7)$$

式中, t_p 是与测量次数 n 、置信概率 p 有关的常数,可以从 t 分布数据表中查到。在测量次数一定时, t_p 的取值和置信概率有关。实验中,我们按国家约定的置信概率,

取 $p=0.95$ 。当 $p=0.95$ 时, $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ 的部分数据可以从表 0.1 中查得。

表 0.1 测量次数 n 和 $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ 的对应值

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72

由上表可知,当测量次数 $n=6$ 时, $\frac{t_p}{\sqrt{n}} \approx 1$ 。因此,为计算方便,通常对物理量进

行的多次测量选择 6 次,取 $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ 为 1。

关于 B 类不确定度,按国家计量标准需要考虑测量中多种因素的影响。我们实验课给予简化,主要考虑仪器误差。在置信概率取 0.95 时,简化约定 B 类不确定度等于仪器误差,即

$$U_B = U_{yi} \quad (0.8)$$

仪器误差可以由以下几种方法获得:

① 从仪器说明书或国家标准上查找。大多数常用仪器的误差在国家标准上可以查到,也可以从仪器的说明书上获得,例如,示值误差、最大允差等。

② 根据仪器的级别计算。有的仪器说明书上没有给出仪器误差,但给出仪器的准确度等级,从仪器说明书或国家标准上查找。等级和仪器误差有一定的函数

关系,由此可以计算出仪器误差。不同的仪器,计算公式也不同,例如电表的仪器误差=量程×级别%。

③ 取最小分度值作为仪器误差。有些仪器,根据结构特点规定其仪器误差等于最小分度值,如游标卡尺、数字仪表等。

④ 取约定值作为仪器误差。有些仪器按上面的三种方法获取仪器误差都不合适,需要根据实际情况取约定值作为仪器误差。例如手拿秒表测时间,是实验者主观判断计时,所以按大多数人反应的快慢,约定 0.2 秒作为秒表的仪器误差。

⑤ 根据具体情况合理选取。有些测量不能按上面的方法取仪器误差,需要根据实际情况合理取值。例如要测量空间一段水平距离,长度约 1.8 m,用 2 m 长的普通钢卷尺测量。按国家标准,2 m 长的钢卷尺仪器误差为 1.2 mm。实际测量时,我们不能做到让卷尺绝对水平,卷尺稍微有点倾斜,误差就大于 1.2 mm。如此,仪器误差就应该根据具体情况合理地选取。

由(0.7)、(0.8)式可得直接测量量的不确定度

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_{yi}^2} = \sqrt{\left(\frac{t_p}{\sqrt{n}} S_x\right)^2 + U_{yi}^2} \quad (0.9)$$

实验时,如果我们对测量结果的准确度要求不高,没必要进行多次测量、或者受条件限制不能进行多次测量、或者仪器精度低多次测量的数值很接近,我们只进行了一次测量。我们约定单次测量的不确定度等于 B 类不确定度,即

$$U = U_{yi} \quad (0.10)$$

当对一个物理量只进行一次测量时,不确定度等于仪器误差并不说明只测一次比测多次时的不确定度小,只说明对该物理量不确定度的要求能够放宽或者是必须放宽,或者是单次测量的不确定度和多次测量时计算的不确定度相差很小。

(3) 间接测量量的不确定度估算

在很多实验中,我们进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学公式计算得到的,因此,直接测量结果的不确定度必然影响到间接测量结果。

设间接测量量 N 与直接测量量 $x, y, z, \dots$ 互相独立,它们间的函数关系为

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (0.11)$$

可以证明,间接测量量的平均值是把各直接测量量的算术平均值代入函数关系式计算得到,即

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (0.12)$$

因为不确定度是微小量,所以可借助数学上的微分来研究。

对(0.12)式两边取微分

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots$$

其中 $dN, dx, dy, dz, \dots$ 是微小量,换成对应的不确定度项 $U_N, U_x, U_y, U_z, \dots$, 即

$$U_N = \frac{\partial f}{\partial x} U_x + \frac{\partial f}{\partial y} U_y + \frac{\partial f}{\partial z} U_z + \dots$$