



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

王玉国 门高夫 杜红彦 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

王玉国 门高夫 杜红彦 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为培养 21 世纪人才而精心设计的适应实验室开放教学需要的大学物理实验教材,是根据教育部物理基础课程教学分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版)的精神,结合河北工程大学物理实验中心多年的教学实践经验,在原有教材的基础上重新编写而成.在知识结构编排方面力图展现一个相对完整的实验物理学全貌,在内容选材方面力求充实和实用.

全书在内容编排上考虑到分层次教学的需要,将选编的具有代表性的 43 个实验项目分成基础性实验、综合性实验与近代物理实验、设计性实验三个层次,既注重基础知识和基本技能方面的训练,又介绍近代物理中的一些常用仪器和知识,以便不同专业的师生选择.

本书可作为高等院校理科、工科各专业的物理实验教学用书,也可作为实验技术人员或有关课程教师的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王玉国,门高夫,杜红彦主编. —北京:科学出版社,2014. 5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-040700-9

I. ①大… II. ①王…②门…③杜… III. ①物理学-实验-高等学校-教材
IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 105356 号

责任编辑:昌 盛 王 刚/责任校对:鲁 素
责任印制:阎 磊/封面设计:迷底书装

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

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:17

字数:400 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理实验以独立课程亮相于基础课舞台是从 20 世纪 70 年代末开始的。物理实验不仅是物理专业的基础课程之一,而且成为对理工科、文科学生开设的、独立设置的必修实验课程。学好物理实验的基本知识和方法,掌握物理实验的基本技能,对于学生科学实验能力的培养和分析、解决问题能力的提高有着重要的意义。现在,人们已经认识到实验物理技术的重要性和加强学生进行实验物理知识系统训练的必要性,因此物理实验独立设课是时代的必然产物。本书根据教育部物理基础课程教学分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版)的精神,结合河北工程大学物理实验中心多年来的教学实践、教学改革和课程建设经验,在《大学物理实验》(2006 年,王玉国主编)的基础上重新编写而成。

本书在编写过程中,首先注意到物理实验是系统培养实验物理学知识、方法和技能的独立课程,该课程是以独立设课和开放式的教学为特征,因此教材体系的系统性和完整性显得十分必要。本书在内容编排上打破了传统的力、热、电、光、近代物理实验各自独立的课程体系,考虑到分层次教学的需要,将实验项目分成了基础性实验、综合性和近代物理实验以及设计性与研究性实验三个层次。具体内容安排如下:绪论,介绍物理实验的地位、作用、基本任务和物理实验课程的基本程序;第 1 章为测量误差与数据处理,主要介绍测量误差、不确定度与实验数据处理方面的基础知识;第 2 章为常用基本仪器,介绍力学、热学、电磁学以及光学实验仪器的设计原理、基本构造和使用方法;第 4 章为基础性实验,共编写 18 个实验,所选编的实验项目力求将原理叙述清楚,计算公式推导完整,实验内容和步骤详尽、清晰,数据处理规范,供低年级及实验基础较薄弱的同学选修;第 5 章为综合性实验,共编写 16 个实验,有的在内容上将重点放在新概念、新思路或原理的阐述上,有的则强调实验方法和实验技巧的指导。每个实验要求学生在教师指导下独立完成;第 6 章为设计性实验,共编写 9 个实验,要求学生学会自己查阅相关文献和参考书籍,由教师或学生提出实验任务和目标,自行选择实验仪器、设计实验步骤,观察和记录实验现象,讨论实验过程中发现的各种问题,独立完成实验。

本教材是河北工程大学物理实验中心教师和实验技术人员多年辛苦和劳动的结晶。在此,对为本书编写做出过贡献的所有同志表示衷心的感谢。本书的编写分工如下:门高夫编写第 1 章和实验 4.14、5.2、5.6、5.15,杜红彦编写第 3 章和实验 4.10、4.13、5.7、5.8、5.12;宋修法编写实验 6.3、6.6、6.9;李占峰编写绪论和实验 4.8、5.4、5.9、5.11;杜晓燕编写实验 4.2、4.4、4.9、4.12;张雷编写第 2 章和实验 6.1、6.2、6.3;孙羽编写实验 4.11、4.15、4.18、5.14;徐贺华编写实验 4.5、4.6、4.16、4.17;谢艳编写 4.7、5.3、5.5、5.13;王伟伟编写实验 4.1、4.3、5.1、5.10;汤志伟编写实验 5.16、6.4、6.5 和附录;范隆杰编写实验 6.7、6.8。全书在王玉国教授指导下完成,梁宝社和康山林教授主审。

本书编写过程中参考了许多兄弟院校的教材以及教学仪器厂家提供的资料,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,加之时间仓促,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月

目 录

前言

绪论	1
第 1 章 测量不确定度与数据处理基础	6
1.1 测量与误差的基本概念	6
1.2 随机误差的估算	12
1.3 测量的不确定度与测量结果的表示	16
1.4 有效数字及其运算规则	21
1.5 实验数据处理方法	23
习题	33
第 2 章 物理实验基本测量方法与基本调整、操作技术	35
2.1 物理实验基本测量方法	35
2.2 物理实验中的基本调整与操作技术	37
第 3 章 物理实验基本仪器介绍	40
3.1 力学实验常用仪器介绍	40
3.2 热学实验常用仪器介绍	44
3.3 电磁学实验常用仪器及其预备知识	46
3.4 光学实验常用仪器、光源及其预备知识	52
第 4 章 基础实验	57
实验 4.1 基本物理量的测量	57
实验 4.2 落球法测定液体的黏滞系数	62
实验 4.3 拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量	66
实验 4.4 固定均匀弦振动的研究	71
实验 4.5 碰撞打靶实验的研究	75
实验 4.6 空气比热容比的测定	78
实验 4.7 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	82
实验 4.8 电表的改装与校正	87
实验 4.9 用惠斯通电桥测电阻	90
实验 4.10 电势差计的原理和使用	95
实验 4.11 模拟静电场	100
实验 4.12 示波器的使用	105
实验 4.13 薄透镜焦距的测定	118
实验 4.14 分光计调整及用衍射光栅测光波波长	124

实验 4.15	用分光计测量三棱镜的折射率	133
实验 4.16	用牛顿环测透镜曲率半径	138
实验 4.17	劈尖干涉	142
实验 4.18	光的偏振现象	144
第 5 章	综合性实验与近代物理实验	150
实验 5.1	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	150
实验 5.2	光电效应法测定普朗克常量	155
实验 5.3	密立根油滴法测定电子电荷	161
实验 5.4	弗兰克-赫兹实验	166
实验 5.5	核磁共振(NMR)	171
实验 5.6	动力学法测金属材料的杨氏模量	181
实验 5.7	霍尔效应测磁场	188
实验 5.8	铁磁材料居里温度的测量	194
实验 5.9	声速的测定	199
实验 5.10	声光衍射与液体中声速的测定	205
实验 5.11	pn 结正向压降与温度关系的研究	209
实验 5.12	集成电路温度传感器的特性测量及应用	213
实验 5.13	全息照相技术基础	217
实验 5.14	音频信号光纤传输技术实验	221
实验 5.15	计算机在温度检测系统中的应用	226
实验 5.16	数码摄影与图像处理	231
第 6 章	设计性实验	237
6.1	设计性实验的性质和任务	237
6.2	设计性实验的流程	238
实验 6.1	重力加速度的研究	245
实验 6.2	动量守恒定律的研究	246
实验 6.3	简谐振动的研究	247
实验 6.4	万用电表的设计与组装	247
实验 6.5	数字温度计的设计与制作	248
实验 6.6	变阻器的使用与电路控制	249
实验 6.7	细丝直径测量	250
实验 6.8	望远镜与显微镜的组装	252
实验 6.9	迈克耳孙干涉仪测量空气折射率	253
参考文献		254
附表 1	中华人民共和国法定计量单位	255
附表 2	常用物理数据表	257

绪 论

科学实验是科学理论的源泉,也是工程技术的基础。物理学是一门建立在实验基础上的自然科学。作为培养工程技术人才的高等院校,不仅要使学生学到比较多的理论知识,而且要使学生具备较强的科学实验能力,以适应科学技术不断进步的需要。

随着科学理论与实验装备技术的飞速发展,物理实验的结果越来越精确,实验内容也越来越广泛。因而,它可以启发新的科学思想,提供新的科学方法;可以辨识研究对象的细微差异,拓展研究的范围,挖掘研究的深度;可以更好地检验理论成果,推动理论研究的发展;同时它也在不断推动实验技术本身的发展。

从本质上讲,物理学是一门实验科学。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。大学物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位,它们既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用。

一、大学物理实验课程的地位、作用和任务

1. 大学物理实验课的地位和作用

大学物理实验是一门实践性很强的课程,是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验必修的一门基础课程。通过本课程的学习,将使學生受到系统的关于物理实验方法和实验技能的训练,让学生了解科学实验的主要过程和基本方法,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,为今后的科学实验活动奠定初步基础。物理实验覆盖面广,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、提高科学素养的重要基础。它还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现代科技发展的综合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用,在培养未来的高级工程技术人才的过程中,大学物理实验课发挥着独特的作用。

2. 大学物理实验课的具体任务

1) 学习和掌握物理实验的基本知识

通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法、基本技术;懂得如何运用实验方法去研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解;熟悉常用仪器的基本原理、结构性能、使用方法;学习物理实验中独特而巧妙的思维方法。

2) 培养与提高学生的科学实验能力

①自学能力:能够自行阅读实验教材或资料,正确理解实验内容和实验原理,做好实验前的准备;对实验中出现的基本问题,能通过查阅资料解决它。

②动手能力:能借助现有资料或通过查找相关资料,正确地使用仪器和进行各种基本操作;培养一定的动手操作能力,能够解决实验中的一般技术性问题,排除实验中的简单故障,在一定的仪器设备条件下,通过努力,得出尽可能好的实验结果。

③观察能力:能够通过自身的感觉器官及其延伸物——实验仪器,捕捉实验过程所呈现的各种现象,发觉实验现象的各种特征,通过对现象的观察、研究和比较,获得全面的、本质的实验信息.

④分析能力:能够运用物理学理论和实验原理对实验故障、现象和实验结果进行初步分析、判断和解释;对各种因素可能引起的误差进行初步估计,对结果进行初步评价.

⑤表达能力:通过正确记录和处理实验数据,设计表格,绘制图线,描述实验现象,说明实验结果,撰写合格的实验报告,练习语言文字表达能力.

⑥科学思维 and 创新能力:对于简单问题,能够从研究现象或课题要求出发,查阅资料,依据基本原理,设计实验方案,确定实验参数,选配实验仪器,拟定实验程序,合理地、有效地安排测量方案和实验步骤,完成实验或创新解决工农业生产和日常生活中的其他问题.

3)培养与提高学生的科学实验素养

培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、一丝不苟、不怕困难、艰苦努力的科学态度,不断探索、大胆质疑、勇于创新的科学精神,以及遵守纪律、团结协作、节约资源、爱护公物的优良品德.

在学习这门课程时,希望同学们首先明确它的重要性,在实验过程中要自觉要求,有意识地培养自己的实验技能,提高实验素养,锻炼实验能力,努力使自己成为一名既有深广的理论基础,又有现代科学实验能力的富有开拓与创新意识的新型工程技术或科学研究人才.

二、大学物理实验课的基本程序和要求

为了上好大学物理实验课,学生应认真做好物理实验教学的三个进程:实验前的准备和预习,实验操作,以及实验课后的书写实验报告.现就各教学进程提出如下具体要求.

1. 实验前预习并写出预习实验报告

预习报告成绩约占本次实验成绩的 10%.

物理实验课不同于理论课,实验前一定要认真预习,预习的好坏直接影响实验的成败.预习时首先要仔细阅读教材的有关章节及实验内容,必要时还要阅读相关参考资料,关键是要理解其意.其次,明确实验目的,弄清实验所依据的原理和采用的方法,初步了解所用量具、仪器、装置的主要性能及使用方法,明白如何进行操作,要测量哪些数据,要注意哪些事项.对暂时无法解决的问题应作出记录,以便在实验过程中加倍注意,通过实验来解决.最后,在阅读教材后,要在规定的预习实验报告纸上写出简明扼要的预习报告.预习报告具体内容包括如下:①实验名称;②实验目的;③实验原理:实验所依据的原理、公式及应用条件,画出与实验有关的原理图,如电路图或光路图等;④设计好记录实验数据的表格(课上测试的原始数据要记入到此表格中);⑤实验步骤;⑥实验注意事项;⑦预习检测题(实验名称、目的和原理写在实验报告纸上,其余项目写在预习实验报告纸上).

上课时,教师将通过不同方式检查预习报告,并将其作为评定实验成绩的一项内容.

2. 课内实验操作

课内实验操作成绩约占本次实验成绩的 40%.

操作是学习科学实验知识、培养实验技能、完成实验任务的主要环节.进入实验室要遵守实验室规则,认真听取教师对实验的讲解,侧重于了解实验的重点、难点和注意事项.开始实

验前应首先清点量具、仪器及有关器材是否完备,然后进行合理布局,对量具、仪器进行调整或按电路图、光路图进行连接,同时要清楚所用仪器的性能、使用方法,牢记注意事项。如有必要,应请指导教师检查。实验开始,如果条件允许,可粗略定性地观察一下实验的全过程,了解数据分布情况,看有无异常情况,如正常就可以从头按步进行实验测试。实验过程中如果出现异常情况,应立即中止实验,以防损坏仪器,并认真思考,分析原因,力争独立寻找,排除故障,也可以和指导教师讨论解决。

做实验时要心中有数,根据误差分布,对结果影响较大的关键物理量要努力测准;有的物理量虽然测量不太准,但对实验结果影响很小,就不必花大力气去测量。要在现有的条件下使实验得出好的结果。

实验中用仪器或量具直接测量到的数据是原始数据,要认真观察、细心记录所有数据,不可疏漏。记录数据使用圆珠笔或中性笔,不要用铅笔,所记录的原始数据不得随意修改。若记录的数据确实有误,将其划掉,在其旁边写上正确数据。要做到如实、及时地记录实验数据及观察到的现象,有些实验还需要记录室温、湿度、气压等环境条件。

实验操作完成后,先关闭仪器或切断电源,但是不要破坏光路或电路连接,将原始数据送请指导教师审核,待教师签字认可后,再把仪器整理好。保持实验室的整齐清洁,经教师允许方可离开实验室。

3. 课后撰写实验报告

实验报告成绩约占本次实验成绩的 50%。

实验报告是实验完成后的书面总结,是实验结果的文字报道,应该做到书写整洁、文理通顺、图表规范,数据完备,并有科学的结论。

一份完整的实验报告应包括以下内容:

- (1)实验名称,实验目的。
- (2)实验仪器(仪器名称、规格型号、精度或分度值等)。
- (3)实验原理。在理解的基础上简要概述实验原理,列出主要公式,画出必要的原理图、电路图、光路图等。
- (4)数据记录及数据。把教师签字的原始数据如实地誊写在实验报告的正文中,并把原始数据贴在正式报告上;按实验要求计算直接测量和间接测量量的平均值和误差的估算过程。计算要有过程,要先写出公式,再代入数据,最后得出结果,并要完整地表达实验结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求画出符合规定的图线。若在微机上处理数据,则要有打印结果。
- (5)实验结果。给出完整的量化数学表达式和用文字或图表描述的实验结论。
- (6)误差分析。按系统误差和随机误差分类写出误差来源。
- (7)思考题解答和实验建议。回答课后思考题,找出影响结果的主要因素,减少误差应采取的措施,对实验中观察到的现象(特别是异常现象)的解释,改进实验的建议或心得体会等。
- (8)实验步骤。简明扼要地写出实验进行的主要步骤。

三、大学物理实验课的学习方法

1. 重视实验课及其各个环节

实验课有其自身的规律和特点,因此,学习方法也应与之相适应,应与理论课有所不同。由于大学物理实验课是工科大学生工程教育中一系列实践教育的开端和基础,而一个合格的

高级工程技术人才,应该既懂理论又能动手解决实际问题,所以要充分认识实验课的重要性,并重视它。

物理实验课的各个环节(如预习、操作、写报告等)是密切相关的有机系统,每一环都要认真对待,一丝不苟。对有效数字、误差分析与估算、作图法、最小二乘法等数据处理方法的学习,要贯彻始终,逐步深入的理解和掌握。任何轻视实验、敷衍了事、得过且过的思想和作风都是学习的大敌,都是有害的。这不仅学不到有关实验知识,甚至还会出现损坏仪器、危及安全的各种事故,万不可掉以轻心!我们衷心希望同学们能创造出适合自己的科学的学习方法,培养对实验的兴趣,能积极主动灵活全面地学好物理实验课,提高学习效率,收到事半功倍的学习效果。

2. 注意掌握基本测量技术和实验方法

基本的测量技术和实验方法是复杂、大型、现代实验的基础,且在实际工作中会经常用到。学习时不仅要弄清楚各种方法的原理、适用条件、优点和局限性,还要对其进行分析比较,加深印象,逐步熟记和掌握它们,从而能灵活运用。

常用的测量技术和实验方法有水平、铅直、零位的调整,比较测量,放大测量,零示法,补偿法,模拟法,替代法,非电量电测,光学测量等。只有通过每个具体的实验,亲自动手,仔细观察,认真思考,才能有所体会。在此基础上,要能够设计一些简单的实验。通过这些训练,使学生到工作岗位后,对于一个新的实验任务,能够独立地确定实验方案,选定恰当的仪器,在满足一定精度要求的前提下得出可信的实验结果。

3. 养成良好的实验习惯

实验之前的准备工作要充分对所做的实验要清楚地了解其内容,做到心中有数,实验中要善于观察各种现象,测量数据要细心、准确。实验结束后要有一份完整而充实的实验记录,并要养成分析的习惯。

一个成功的实验与正确使用仪器密切有关,对常用的仪器,必须要熟知它的使用方法和注意事项,对仪器的准确度、读数等要清楚了解。实验时仪器的布局、调整、连接甚至操作姿势都要有所考虑,操作时要胆大心细,要敢于动手,善于动手,要逐步培养独立分析、寻找、排除实验中出现的各种故障的能力。能否迅速发现和排除仪器装置或实验过程中的故障,是实验能力强弱的重要表现。

实验的好坏与成败,实验的收获和能力的增长,不能单纯地看实验结构与理论值的吻合程度。实验结果与理论值接近当然好,但更重要的是会判断这个结果是否合理。任何一个实验结果与客观实际或理论公式都会有些差异,实验方法、实验仪器、实验环境等都会引入误差,只要结果在误差范围以内,且能找出产生误差的主要因素以及改进的途径,实验的收获就很可贵。

只有认真对待每个实验,在每次实验中有意识地加强锻炼,才能养成良好的实验习惯,提高自身的实验素质。

4. 培养手脑并用、善于思考、勇于创新的精神

实验自始至终要多动脑筋,要经常和学到的理论相联系,要能判定实验结果的可靠性与正确性。对各实验的基本内容和重点,要集中精力把它掌握透。实验结果后要归纳、总结。

在本课程的学习中,尽管只能做有限的实验,但要通过归纳、总结,达到融会贯通、举一反三

三、触类旁通的目的。物理实验教材每章都有一段基本知识,应该在做实验前仔细阅读,要自觉地、高标准地进行学习和研读。这样,必能收到意想不到的从量变到质变转化的效果。

四、学生实验守则

为培养学生遵守操作规程、遵守纪律的良好习惯,保证实验教学正常进行,制定物理实验管理制度如下:

(1)课前必须充分做好实验预习,写好预习报告,真正了解本次实验“做什么?怎么做?为什么这样做?”否则,不得进行实验,直到预习合格后方可进行实验。

(2)上课不准迟到,不准无故缺课。迟到 15 分钟以上者取消本次实验资格。因事请假者需有假条,并且及时与任课教师联系补做。

(3)进实验室按顺序号签到,把预习报告交给老师检查。观察实验台上的仪器,了解使用方法与注意事项,未经许可,不得动用,严格遵守操作规程,禁止乱动硬拧。仪器发生故障应立即报告任课老师,仪器如有损坏,需照章赔偿。

(4)做电学实验时,先经教师检查线路,再接通电源,实验完毕先断电后拆线。实验中仪器出现故障,应先断电再找指导教师或自行处理。

(5)文明上课,保持实验室安静,禁止大声喧哗,禁止吸烟、吐痰、乱扔杂物。做完实验填写仪器运行记录,将仪器恢复原状,并由值日生做好清洁卫生。

(6)树立良好学风,认真听讲,细致安排,仔细操作,一丝不苟。原始数据记录要求真实完整,最后请指导教师审查测量数据并打分签字,此数据与写好的实验报告一周内交给指导教师。

第 1 章 测量不确定度与数据处理基础

物理实验的任务不仅是定性地观察物理现象和变化过程,更重要的是对物理量进行定量地测量,并找出各物理量之间的内在联系. 误差分析和数据处理是物理实验的重要组成部分,没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果. 本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量与误差、误差分析、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识,这些知识不仅在本课程的物理实验中要经常用到,而且对于今后从事科学实验也是必须了解和掌握的.

由于这部分内容牵涉面较广,要求同学们首先对基本理论作一初步了解,然后针对每一具体实验细读有关的内容,并通过运用加以掌握. 应当说明的是,数据处理和误差分析的深入讨论是普通计量学以及数理统计学的任务,本书只引用它的某些结论和计算公式,其详细的探讨和证明留待在数理统计课中学习.

1.1 测量与误差的基本概念

1.1.1 测量

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较,得出其倍数的过程. 倍数称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位. 因此,一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,缺一不可.

1. 物理量单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中长度(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)是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称为导出单位.

2. 测量的分类

根据测量方式,测量可分为直接测量和间接测量. 从测量条件上,测量可分为等精度测量和不等精度测量.

1) 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量. 例如,用米尺测长度、用温度计测温度、用电压表测电压等都是直接测量,所得物理量(如长度、温度、电压等)称为直接测量量. 有些物理量无法进行直接测量,而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出,这样的测量称为间接测量. 大多数的物理量都是间接测量量. 例如,用单摆法测重力加速度 g 时,周期 T 、摆长 L 是直接测量值,而 g 就是间接测量值.

2) 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的过程中,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的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, 这些测量就是等精度测量.

在对某一物理量进行多次测量时, 测量条件完全不同或部分不同, 各测量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, 在对某一物理量进行多次测量时, 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.

一般来讲, 在实验中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的. 但当某一条件的变化对结果影响不大时, 仍可视这种测量为等精度测量. 等精度测量的数据处理比较容易, 所以绝大多数实验都采用等精度测量. 除非有特殊情况, 一般情况不采用不等精度测量. 在物理实验中, 以学习等精度测量的数据处理为主.

3. 测量读数和记录

在进行测量时, 正确地读数和记录是关键. 对于不同仪器有多种读数方法, 将在后面的实验中分别介绍, 在此仅介绍一般规则.

(1) 如实记录仪器上显示的数值, 将其作为原始数据. 对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器, 通常在直接测量时, 要求估读一位(该位是有效数字的可疑位). 估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$.

(2) 若仪表的示值不是连续变化的, 而是以最小步长跳跃变化的, 如数字式显示仪表, 则谈不上估读, 只要记录全部数据即可.

(3) 需要指出的是, 有些仪表虽然也有指针和刻度盘, 但指针跳动是以最小分格为单位的. 例如, 最常用的钟表有以秒为最小分度的时钟, 也有以 $1/10\text{s}$ 或 $1/100\text{s}$ 为最小分度的秒表, 因此, 对此类仪表不需要估读.

(4) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置, 是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的, 这时一般记下对齐线的数值, 不必进行更细的估读.

1.1.2 误差

1. 真值与测量误差

在一定条件下, 任何一个物理量的大小都是客观存在的, 都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观量值, 称为真值. 测量的目的就是要力图得到被测量的真值, 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, 只能获得该物理量的近似值, 也就是说, 一个被测量值 x 与真值 x_0 之间总是存在着这种差值, 这种差值称为测量误差, 即

$$\Delta x = x - x_0$$

由测量所得的一切数据, 都毫无例外地包含有一定数量的测量误差. 没有误差的测量结果是不存在的. 测量误差存在于一切测量之中, 贯穿于测量过程的始终. 随着科学技术水平的不断提高, 测量误差可以被控制得越来越小, 但是却永远不会降低到零.

2. 绝对误差与相对误差

从上式还可以看出, 测量误差 Δx 显然有正负之分, 因为它是指测量值与真值的差值, 常称为绝对误差, 也与下面定义的相对误差相区别, 这就是老的术语“绝对误差”的来历. 注意, 不要把绝对误差与测量误差的绝对值相混淆! 绝对误差是一个有量纲的数值, 它表示测量值偏离真值的程度, 一般保留一位有效数字.

一般来讲,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得.但是,严格的完善测量难以做到,故真值在很多情况下都难以得到.所以绝对误差的概念只有理论上的价值.这正是人们放弃难以实际定量操作的“误差”和与绝对误差有关的概念,转而使用不确定度概念的基本原因.

“相对误差”术语也是我们常会听到的,它同样也是一个很难定量操作的词.测量的相对误差定义为测量误差的绝对值与真值的比值,用 E 表示为

$$E = \frac{|\Delta x|}{|x_0|} \times 100\%$$

“相对误差”是一个无量纲量,常用百分比来表示测量准确度的高低,因而相对误差有时也称为百分误差,一般保留 1~2 位有效数字.

3. 误差的分类

正常测量的误差按其产生的原因和性质,一般可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类.

1) 系统误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小恒定,符号总偏向一方或误差按照某一确定的规律变化,称为系统误差.系统误差的来源有以下几个方面.

(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,如温度计零刻度不在冰点、仪器的水平或铅直未调整、天平不等臂等.

(2)理论误差:由于实验方法本身的不完善或测量所依据的理论公式本身的近似性而造成的.例如,推导理论公式时没有把散热和吸热考虑在内,称量轻物体的质量时忽略了空气浮力的影响,单摆周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,但实际做不到.

(3)环境误差:由于环境影响和没有按规定的条件使用仪器引起的.例如,标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的,若在 30°C 条件下使用,如不加以修正,就引入了系统误差.

(4)个人误差:由于观测者本人生理或心理特点造成的,如动态滞后、读数有偏大或偏小的习惯等.

系统误差按掌握程度分类,可分为以下两种.

(1)已定系统误差:是指绝对值和符号已经确定,可以估算出的系统误差分量,一般在实验中通过修正测量数据和采用适当的测量方法(如交换法、补偿法、替换法和异号法等,本节后面会介绍)予以消除,如千分尺的零点修正.

(2)未定系统误差:指符号和绝对值未能确定的系统误差分量,在实验中常用估计误差限的方法得出(这与后面引出的 B 类不确定度有大致的对应关系).例如,仪表出厂时的准确度指标是用符号 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示的,它只给出该类仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 的极限范围,但实验者使用该仪器时并不知道该仪器的误差的确切大小和正负,只知道该仪器的准确程度不会超过 $\Delta_{\text{仪}}$ 的极限.

对于未定系统误差,在物理实验中一般只考虑测量仪器的(最大)允许误差 $\Delta_{\text{仪}}$ (简称“仪器误差”)

系统误差按数值特征或其表现的规律又可分为以下两种.

(1)定值系统误差:这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变,如天平砝码的标称值不准确等.

(2)变值系统误差:这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置变化。例如,分光计的偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差的特征是具有确定性和方向性,或者都偏大,或者都偏小。系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。

系统误差是测量误差的重要组成部分,在任何一项实验工作和具体测量中,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,是实验测量工作的主要任务之一,但发现并减小系统误差通常比较困难,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

一般而言,对于系统误差,可以在实验前对仪器进行校准,对实验方法进行改进;在实验时采取一定的方法对系统误差进行补偿和消除;实验后对实验结果进行修正等。应预见和分析一切可能产生系统误差的因素,并减小它们。一个实验结果的优劣,往往就在于系统误差是否已经被发现或尽可能消除。在以后的实验中,对于已定系统误差,要对测量结果进行修正;对于未定系统误差,则尽可能估算出其误差限值,以掌握它对测量结果的影响。

2) 随机误差

在极力消除或修正一切明显的系统误差之后,在同一条件下多次测量同一物理量时,测量结果仍会出现一些无规律的起伏。这种在同一量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量称为随机误差,随机误差有时也称偶然误差。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,主要有:

(1)实验装置的变动性,如仪器精度不高,稳定性差,测量示值变动等。

(2)观察者在判断和估计读数上的变动性,主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差。

(3)实验条件和环境因素的变动性,如气流、温度、湿度等微小的无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算随机误差。

3) 粗大误差

实验中,由于实验者操作不当或粗心大意,如看错刻度、读错数字、记错数或计算错误等,都会使测量结果明显地被歪曲,这种由于错误引起的误差称为粗大误差或过失误差。

由定义可以看出,严格地讲,粗大误差应叫做错误,它是可以通过实验者的主观努力克服的,错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除。而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。

4. 测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是评价测量结果的术语,但目前使用时其涵义并不尽一致,以下介绍较为普遍采用的意见。

(1) 精密度: 是指对同一被测量作多次重复测量时, 各次测量值之间彼此接近或分散的程度. 是对随机误差的描述, 反映随机误差对测量的影响程度. 随机误差小, 测量的精密度就高.

(2) 准确度: 是指被测量的总体平均值与其真值接近或偏离的程度. 它是对系统误差的描述, 反映系统误差对测量的影响程度. 系统误差小, 测量的准确度就高.

(3) 精确度: 是指各测量值之间的接近程度和其总体平均值对真值的接近程度. 它包括了精密度和准确度两方面的含义, 反映随机误差和系统误差对测量的综合影响程度. 只有随机误差和系统误差都非常小, 才能说测量的精确度高. 图 1.1.1 所示的打靶情况可较形象地理解精密度、准确度和精确度三者的区别.

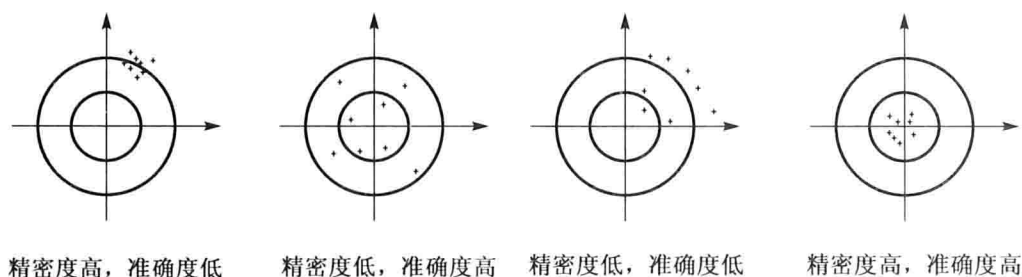


图 1.1.1

1.1.3 系统误差的修正

1. 系统误差的发现方法

要发现系统误差就必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导, 检验或校准每一件仪器, 分析每一个因素对实验的影响等. 人们通过长期实践和理论研究, 总结出一些发现系统误差的常用方法.

(1) 理论分析法: 通过分析实验所依据的理论公式和实验方法是否完善, 检查所要求的实验条件是否得到满足, 与实际情况有无差异; 仪器和量具是否有缺陷, 检查或校正每一件器具; 分析实验环境能否保证仪器正常工作; 考虑实验者心理和技术因素等. 检查影响实验的每一项因素, 看是否造成了系统误差. 例如, 在单摆实验中的公式 $T=2\pi\sqrt{L/g}$, 这是做了 $\theta \approx 0$ 的近似, 公式中把摆球当成质点, 忽略了摆线质量、空气浮力与阻力等. 再如, 测高仪测量物体的高度时, 要求支架垂直, 望远镜镜筒平行, 否则测出的结果不能反应物体实际高度.

(2) 实验对比法: 就是对同一待测量采用不同的实验方法, 使用不同的实验仪器, 在相同的实验条件下, 由不同的实验人员测量等. 对比研究测量值的变化情况, 以便发现存在的误差.

① 实验方法的对比. 用不同方法测同一量, 看结果是否一致. 例如, 用一单摆测重力加速度 $g=(9.800\pm0.003)\text{m/s}^2$, 用复摆测得 $g=(9.8000\pm0.0003)\text{m/s}^2$, 用自由落体法测得 $g=(9.8000\pm0.0005)\text{m/s}^2$, 三者结果不一致, 这说明至少其中两种存在系统误差.

② 仪器的对比. 如用两个电流表串联的同一电路中测量结果不一致, 则说明至少有一个电流表存在误差. 如果其中一个为标准表, 就可以找出另一个表的修正值.

③ 改变测量方法. 例如, 把电流反向进行读数; 在增加与减少砝码过程中读数; 分别用升温或降温读数; 对比读数点是否一致等.

④ 改变某些量的数值. 例如, 改变电路中电流的数值, 如果测量结果不同或有规律性的变化, 则说明存在某些误差.

⑤改变实验条件. 例如, 在电路中将某个元件的位置变动一下.

⑥两人对比观测, 可以发现个人误差.

(3)数据分析法: 这种方法的理论依据是随机误差服从统计分布规律, 分析测量数据, 如果不服从统计规律则说明存在系统误差. 例如, 将测量数据依次排列, 如果偏差大小有规律地向一个方向变化, 则测量中存在线性系统误差; 如果偏差符号作有规律交换变化, 则测量中存在周期性的系统误差.

(4)资料分析法: 根据计量器具的检定证书、出厂说明书等详细资料或检定规程等分析系统误差. 标准砝码、量块、标准电阻等计量器具的说明书上或检定证书上一般都给出了它们的修正值. 例如, 标准电池的产品说明书给出: 由温度 t 计算其电动势 $E_N(t)$ 和其标准值 $E_N(20)$ 之间的修正公式(t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$, 电动势的单位为 V)为

$$E_N(t) - E_N(20) = -[39.9(t - 20) + 0.94(t - 20)^2 - 0.009(t - 20)^3] \times 10^{-6} \text{ V}$$

2. 系统误差的处理方法

由系统误差的来源分析发现了系统误差, 就为处理系统误差提供了依据. 从原则上来说, 处理系统误差的方法, 首先是使它不产生, 如果做不到就修正它, 或在测量中设法抵消它的影响. 下面介绍几种消除或减小系统误差的方法.

(1)减小或消除产生系统误差的根源. 从产生系统误差的根源上消除系统误差是最根本的方法, 它要求测量者对测量过程可能产生系统误差的环节进行仔细分析, 并在测量前就将系统误差从产生根源上加于消除. 例如, 为了防止调整误差, 要正确调整仪器, 选择合理的被测件的定位面和支撑点; 又如, 为了防止测量过程中仪器的零位变动, 测量开始和结束时都要检查零位; 再如, 为了防止长期使用仪器精度降低, 要严格进行周期性的检定和修理. 如果系统误差是由外界条件引起的, 应在外界条件比较稳定时进行测量, 当外界条件急剧变化时停止测量.

(2)用修正方法消除系统误差. 这种方法是预先将测量仪器的系统误差检定出来或计算出来, 作出系统误差表或系统误差曲线, 然后取与系统误差数值大小相同而符号相反的值作为修正值, 将实际测量值加上相应的修正值即可以得到不包含系统误差的测量结果. 例如, 量块的实际尺寸不等于公称尺寸, 如按公称尺寸使用就要产生系统误差, 因此, 按经过检测后的实际尺寸使用就可以避免产生系统误差. 由于修正值本身也有一定误差, 因此用修正值消除系统误差的方法, 不可能将全部系统误差修正掉, 总要残留少量系统误差, 对这种残留的系统误差则应按随机误差进行处理.

(3)消除定值系统误差的方法. 对测得值中存在的固定不变的系统误差, 常用以下几种方法消除.

①替代法: 就是在测量条件不变的情况下, 先对待测量 x 进行测量, 然后立即用一个已知标准量 A 替换待测量 x , 并通过改变 A 的值, 使测量装置恢复到测 x 时的状态, 测出 A 的值, 则待测量等于标准量: $x = A$. 例如, 测量灵敏电流计的线圈内阻, 先使电流计与一个标准电阻箱串联, 并使电阻箱的阻值为零, 调整电流参数, 使电流计光标指示 40 格处, 然后增大电阻箱的阻值, 使电流计光标指示 20 格处, 则电流计线圈的内阻等于标准电阻箱的阻值. 再如, 惠斯通电桥测电阻实验中, 先接入待测电阻 R_x , 把电桥调平衡, 然后再换接标准电阻 R_0 . 替代待测电阻 R_x , 再使电桥平衡, 则待测电阻 R_x 等于标准电阻 R_0 .

②交换法: 在测量中将某些测量条件交换一下再次测量, 造成系统误差变化, 再通过计算