

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

◎主编 杜红彦 王玉国 宋修法

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

◎主编 杜红彦 王玉国 宋修法

高等教育出版社·北京

内容简介

本书根据教育部高等学校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)的精神,结合作者多年来的教学实践经验编写而成。

本书在内容编排上突破了传统的力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验各自独立的课程体系的安排,并考虑到分层次教学的需要,将选编的具有代表性的54个实验项目分成了基础性实验、综合性和近代物理实验、设计性实验三个层次,既注重了基础知识和基本技能方面的训练,又介绍了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。

本书可作为高等学校理工科各专业的大学物理实验教学用书,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/杜红彦,王玉国,宋修法主编.--
北京:高等教育出版社,2015.12
ISBN 978-7-04-044030-0

I. ①大… II. ①杜… ②王… ③宋… 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(2015)第 247049 号

策划编辑 张海雁	责任编辑 张海雁	封面设计 张申申	版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹	责任校对 杨凤玲	责任印制 刘思涵	

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	山东省高唐印刷有限责任公司	网上订购	http://www.landrac.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landrac.com.cn
印 张	21.25	版 次	2015 年 12 月第 1 版
字 数	520 千字	印 次	2015 年 12 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	37.80 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 44030-00

前 言

大学物理实验是高等学校理工科专业学生必修的一门重要基础课。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,对于学生的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。本书根据教育部高等学校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)的精神,结合作者多年来的教学实践、教学改革和课程建设经验编写而成。

本书在内容编排上突破了传统的力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验各自独立的课程体系的安排,并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实验三个层次。本书内容具体安排如下:绪论,介绍了物理实验的地位、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,主要介绍了测量误差、不确定度与实验数据处理方面的基础知识;第2章为物理学常用基本仪器,介绍了力学、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3章为基础性实验,共编写了19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,提供给低年级及实验基础较薄弱的学生选用;第4章为综合性和近代物理实验,共编写了23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;第5章为设计性实验,共编写了12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,研究实验过程中发现的种种问题,独立完成实验。

本书是河北工程大学物理实验中心的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:杜红彦编写绪论、第2章和实验4.3,4.7,4.10,4.14;宋修法编写第1章;李占峰编写实验3.2,3.8,4.4,4.16;孙羽编写实验3.10,3.16,4.9,5.11;杜晓燕编写实验5.2,5.3,5.4,5.5,5.6,5.7,5.8,5.9,5.10及附录部分;徐贺华编写实验3.4,3.5,4.8,4.13,5.12;王伟伟编写实验3.17,3.18,4.2,5.1;刘少鹏编写实验3.12,3.13,4.11,4.15;张雷编写实验4.17和4.18;董昭编写实验3.15和3.19;王淑玲编写实验3.11和4.1;黄艳宾编写实验4.19,4.20,4.21,4.22,4.23;范隆杰编写实验3.1,4.6,4.12;汤志伟编写实验3.9,3.14,4.5;尚小妹编写实验3.3,3.6,3.7。全书在王玉国教授指导下完成,并由梁宝社教授主审。

在编写本书的过程中,编者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,缺点和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2015年1月

目 录

绪论	1
第 1 章 误差与数据处理	5
1.1 测量与误差	5
1.2 误差的性质与处理	7
1.3 测量结果的误差估算	14
1.4 测量不确定度与结果表示	17
1.5 有效数字及其运算规则	20
1.6 常用的数据处理方法	23
第 2 章 物理实验常用的测量方法和基本仪器介绍	31
2.1 物理实验常用的基本测量方法	31
2.2 长度、时间和质量测量仪器的介绍及使用	33
2.3 量热器和温度计的测量原理及使用	38
2.4 常用电磁学仪器及其预备知识	39
2.5 常用光源及光学预备知识	46
第 3 章 基础性实验	48
实验 3.1 物体长度和密度的测量	48
实验 3.2 金属丝杨氏模量的测量	50
实验 3.3 空气比热容比的测定	55
实验 3.4 扭摆法测定物体转动惯量	58
实验 3.5 均匀弦振动实验	63
实验 3.6 测定冰的熔化热	68
实验 3.7 线性电阻和非线性电阻的伏安特性	71
实验 3.8 电表的改装与校正	74
实验 3.9 万用表的使用	78
实验 3.10 微机型模拟静电场	83
实验 3.11 示波器的使用	90
实验 3.12 惠斯通电桥测中值电阻	103
实验 3.13 用双臂电桥测低电阻	107

实验 3.14	电位差计的原理和使用	111
实验 3.15	薄透镜焦距的测定	116
实验 3.16	光的等厚干涉——牛顿环、劈尖	121
实验 3.17	分光计调整及用衍射光栅测光波波长	127
实验 3.18	用分光计测量三棱镜的折射率	135
实验 3.19	光偏振现象的观察和研究	141
第 4 章 综合性和近代物理实验		147
实验 4.1	动力学法测金属材料的杨氏模量	147
实验 4.2	声速的测定	153
实验 4.3	稳态法测不良导体的导热系数	159
实验 4.4	电热法测固体的线胀系数	163
实验 4.5	集成电路温度传感器的特性测量及应用	167
实验 4.6	热敏电阻器的电阻-温度特性测量	171
实验 4.7	霍尔效应测磁场	175
实验 4.8	灵敏电流计特性的研究	181
实验 4.9	铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线测量	186
实验 4.10	PN 结正向压降与温度关系的研究	191
实验 4.11	硅光电池的特性	194
实验 4.12	单缝衍射光强分布的测量	200
实验 4.13	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	203
实验 4.14	光电效应和普朗克常量的测定	208
实验 4.15	密立根油滴实验	214
实验 4.16	弗兰克-赫兹实验	220
实验 4.17	光纤传感器实验	225
实验 4.18	光谱定性分析	232
实验 4.19	单光子计数实验	236
实验 4.20	光栅光谱仪实验	248
实验 4.21	电子自旋共振实验	255
实验 4.22	光拍法测量光速	259
实验 4.23	CCD 单缝衍射仪实验	263
第 5 章 设计性实验		268
5.1	设计性实验的性质和任务	268
5.2	设计性实验的流程	269
实验 5.1	电学设计性实验	276
实验 5.2	碰撞打靶实验的研究	281
实验 5.3	变阻器的使用与电路控制	284

实验 5.4	电位差计校准电流表和测定电阻	289
实验 5.5	万用表的制作与定标	290
实验 5.6	电表内阻的测定	295
实验 5.7	电子温度计的组装	296
实验 5.8	光源的时间相干性研究	298
实验 5.9	望远镜与显微镜的组装	300
实验 5.10	全息光栅的制作	302
实验 5.11	磁悬浮导轨碰撞实验研究	303
实验 5.12	大学物理虚拟仿真实验的研究	311
附表 1	中华人民共和国法定计量单位	316
附表 2	常用物理数据表	319
参考文献		328

绪 论

科学实验是科学理论的源泉,也是工程技术的基础。作为培养工程技术人才的高等学校,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。

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科学,是其他自然科学和工程技术的基础。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,又有各自的任务和作用。

一、大学物理实验课的地位、作用和任务

1. 大学物理实验课的地位和作用

大学物理实验是高等学校理工科类专业学生进行科学实验必修的一门基础课程。它将使学生受到系统的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,能为今后的科学实验活动奠定初步基础。同时,物理实验覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,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能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

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、基本方法和基本技术;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、结构性能和使用方法;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:能借助教材或仪器说明书,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和它们的延伸物——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,练习自己的语言文字表达能力。

⑥ 实验设计和创新能力: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。

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实验报告的书写。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

预习报告成绩约占当次实验成绩的 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、仪器和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。对一时搞不清楚的问题应作出记录,以便在实验过程中加倍注意,通过实验来解决它。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几项:

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。请注意:对于没有完成预习实验报告的同学,教师有权中止其做当次实验。

2. 课内实验操作

课内实验操作成绩约占当次实验成绩的 40%。

做实验时,进实验室就交本次实验项目的预习报告和上次实验项目的实验报告。

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,特别是实验的重点、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。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骤进行实验测试。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,当然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,就不必花大力气去精确测量。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

实验报告成绩约占当次实验成绩的 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、文字工整、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主要内容:

(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) 数据记录及数据处理: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量和间接测量量的平均值和误差。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。若上微机处理数据,则要有打印结果。

(5) 实验结果:应写出完整的实验结果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条来写误差来源。

(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:扼要地写出实验进行的主要步骤。

值日生须到教师处接受值日任务,圆满完成任务,经教师允许后方可离开实验室。

三、学生实验守则

为培养学生严格遵守操作规程和遵守课堂纪律的良好习惯,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。迟到学生须到教师处报到,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教师,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 误差与数据处理

误差估算与数据处理及不确定度评定被广泛应用于自然科学、社会科学、工程技术、日常生活以及物资流通等领域,是物理实验必须掌握的知识和技能,它贯穿于实验前的实验设计、实验中的过程控制、数据采集及实验后的结果分析的全过程。本章内容涉及面较广,运用数学知识较多,深入的学习需要一定的物理学、数学和计量学等方面的知识,这里仅介绍一些基本概念,引用一些结论和公式,有些地方为了教学的需要还做了适当的简化。

1.1 测量与误差

人类为了认识自然和改造自然,需要对自然界的各种现象进行研究。由于研究方法和仪器设备的不完善,周围环境的影响,以及受人们认识能力的限制,测量值与真值之间,不可避免地存在着差异,这在数值上表现为误差。随着科学技术的发展和人们认识水平的提高,误差被控制得越来越小,但始终不能完全消除。误差存在的必然性和普遍性,已为测量实践所证实。为了充分认识并进而减小误差,必须对测量过程及科学实验中始终存在着的误差进行深入研究。

一、测量

科学研究是从测量开始的,所谓测量是指用一定仪器或量具,通过一定的测量方法,直接或间接地找出被测量的数值和单位。或者说把待测量与一个作为标准的同类量进行比较,定出它是标准量的多少倍,这个标准量被称作单位。

1. 直接测量与间接测量

根据测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量。所谓直接测量是指使用仪器或量具直接与被测量进行比较从而得出被测量的值。例如,用米尺、游标卡尺、螺旋测微器测量长度,用天平测量质量,用秒表测量时间,用电流表测电流,电压表测电压等都是直接测量。所谓间接测量是指通过测量与被测量有函数关系的其他量,代入公式得出被测量的量值。例如,固体密度的测量,需要测出物体的体积和质量,再用公式 $\rho = m/V$ 计算得出密度值,因此是间接测量。实验中的测量多数都是间接测量,而间接测量是建立在直接测量基础之上的。

2. 等精度测量和不等精度测量

根据测量条件是否发生变化,测量又可分为等精度测量和不等精度测量。同一观察者,用同样的方法,用同样的仪器在相同的环境下,对同一被测量进行多次测量,称作等精度测量。尽管各次测量值可能不相等,但没有理由认为哪一次或几次的测量值更可靠或更不可靠。实际上,一切物质都在运动中,没有绝对不变的人或事物,只要其变化对实验的影响很小乃至可以忽略,就可以认为是等精度测量。以上各种条件,如有一项或几项发生变化,导致明显影响测量结果,即不等精度测量。处理不等精度测量的结果,需要根据每个测量值的“权重”进行“加权平均”,比

较麻烦,而等精度测量的数据处理相对简单,如无附加说明本课程介绍的数据处理方法只限于等精度测量。

二、误差

在一定条件下,被测量都有一个反映本身属性的客观存在的值,这就是真值。真值是一个理想概念,一般是指:① 理论真值,② 计量学约定值,③ 标准器具的相对真值,④ 公认值。除理论真值外,其他所有真值都是相对的,不可知的。测量的目的是力图准确地得到这个真值。但由于测量仪器、测量方法、测量环境及测量者观察能力的局限,测量结果不可能与真值完全相同,只能得到真值的近似值。

测量结果与被测量真值之差称为测量误差。因为真值一般是不知道的,所以测量误差也是不知道的。我们只能采取一定的方法估计它的限值。测量误差可用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

1. 绝对误差

测量结果 x 与被测量的真值 x_0 之差称为绝对误差,用 Δx 表示:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1.1)$$

上式中的 x 可以是测量值、给出值、示值、预置值,以及近似计算值等,也可以是测量中间得到的数值。对于单次测量值而言 Δx 可正可负。绝对误差可以比较用不同仪器测量同一被测量的准确度的高低。

2. 相对误差

绝对误差 Δx 与被测量的真值 x_0 之比称为相对误差,用 E_r 表示:

$$E_r = \left(\frac{\Delta x}{x_0} \right) \times 100\% \quad (1.1.2)$$

相对误差常用百分数表示,可以比较不同被测量的测量准确度的高低。

由于真值的不可知性,实验中常用估算出的绝对误差与测量值真值的最佳值求得相对误差。当知道被测量的公认值或理论值时,求得的相对误差又称为百分误差。仪器、仪表本身的精度也常用相对误差来表示,称为标称误差或级别误差,它等于仪器仪表某一示值的绝对误差与该示值所在量程的比值(用百分数表示)。引用误差是一种简便实用的相对误差,常用于多挡和连续刻度的仪器仪表的测量中,电工仪表的准确度等级就是根据最大引用误差来划分的。

三、误差分类

根据误差的性质和特点,误差可分为系统误差,随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在同一条件下,对同一被测量的多次测量中,测量误差的数值和符号保持不变,或以可预知的规律变化的误差分量称为系统误差。系统误差简称为系差。保持恒定的系差称为定值系差,包括已定系差和未定系差。变化的系差称为变值系差,按变化的规律又可分为线性系差和周期性系差。

2. 随机误差

在同一条件下,对同一被测量的多次重复测量中,测量误差的数值和符号以不可预知的方式

变化且具有抵偿性的误差分量,称为随机误差。随机误差简称随差,其大小和符号不定,无确定的变化规律,是不可避免、无法控制、也无法消除的误差。这种误差是由于实验中各种影响测量因素的微小变化引起的。例如,实验装置在各次调整操作上的微小差异,测量仪器指示数值的微小变化或者测量者本身在估读和判断时的微小差异,这些因素的共同影响使测量值围绕某一均值上下波动,这些变动就是各次测量的随差。

3. 粗大误差

我们把明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差,简称粗差。产生粗差的主要原因有:采取了错误的理论或方法,仪器安装错误或测量中对错了标志,读错了数据等。具有粗差的测量值称为坏值,实验中发现了具有粗差的数据,在处理数据时应删除。

以上三类误差无严格界限,在一定条件下可以相互转化。例如,指示仪表标尺分度的误差,在制造时,刻度划得可能偏大或偏小,具有随机性质,而当用这个仪表作为标准仪表校定其他仪表时,其刻度误差便传给了被校仪表,致使被校仪表的数值始终偏大或偏小,这就是系差。总之,系差与随差之间无绝对界限,随着对误差性质认识的深入有可能把过去作为随差的某些误差分量分离出来作为系差来处理,或把某些系差当作随差来处理。

四、精密度、准确度、精确度

评价测量结果,常用到精密度、准确度和精确度这三个概念。

1. 精密度

反映随差的大小,指数据本身的离散程度。精密度简称精度,也称为分度值或分辨率。

2. 准确度

反映系差的大小,指数据的均值偏离真值的程度。

3. 精确度

反映系差和随差综合影响的大小,指测量数据偏离真值的离散程度。测量的精确度高,是指测量的系差和随差都比较小。精确度也称为精准度。

如图 1.1.1 所示,以打靶射出的弹着点分布为例,分别说明上述三个概念的意义。图(a)表示精密度高而准确度低;图(b)表示准确度高而精密度低;图(c)表示准确度和精密度都高。

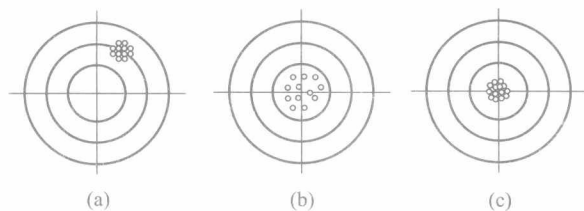


图 1.1.1 弹着点分布图

1.2 误差的性质与处理

在三大误差中,系统误差的分析、发现与处理比随机误差要复杂困难得多。多数仪器的误差限值主要反映系统误差的影响。如何有效地发现、减小或消除系统误差是实验者的一项重要任

务。可以说是否重视对系统误差的分析与处理是衡量大学物理实验教学水平的一个重要环节。我们先从系统误差说起。

一、系统误差产生的原因

产生系统误差的原因很多,常见的有以下四方面。

1. 方法误差

理论和实验方法不完善,实验中采用了近似的计算公式或测量方法中有附加值进入观测而引起误差。例如,伏安法测电阻时未考虑电表的内阻而引起的误差;量热时未考虑热量的散失而引起的误差。这种情况要通过改进实验方法或对实验结果进行修正,在计算公式里加上修正项来消除。

2. 仪器误差

仪器设备没有达到应有的准确度,这是由于仪器在设计、制造、装配等方面引起的误差。如仪器零点不准,刻度偏大或偏小;砝码未校准、天平不等臂、仪器不水平;秒表总是跑快等。这种仪器不准确造成的误差,可以通过修正和校准仪器来解决。

3. 环境误差

外界环境不稳定造成的误差。如温度、湿度、气压等没有控制到预定范围内,周围电磁场的影响等。

4. 人员误差

实验者生理和心理特点,缺乏经验引起的误差。如有人估读总是偏大或偏小,有人习惯侧视或斜视等。

二、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。例如单摆实验中的公式 $T=2\pi\sqrt{L/g}$ 作了 $\theta\approx 0$ 的近似,公式中把摆球当成了质点,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映物体实际高度。

2. 实验对比法

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,用单摆测重力加速度 $g=(9.800\pm 0.003)\text{ m/s}^2$,用复摆测得 $g=(9.800\ 0\pm 0.000\ 3)\text{ m/s}^2$,用自由落体法测得 $g=(9.800\ 0\pm 0.000\ 5)\text{ m/s}^2$,三者结果不一致,这说明了至少其中两种方法存在系统误差。

(2) 仪器的对比:如用两个电流表串联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了。

(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,可以发现个人误差等。

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,如图 1.2.1 所示;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 $E(t)$ 和其标准值 $E(20)$ 之间的修正公式(t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$,电动势的单位为 V)为

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

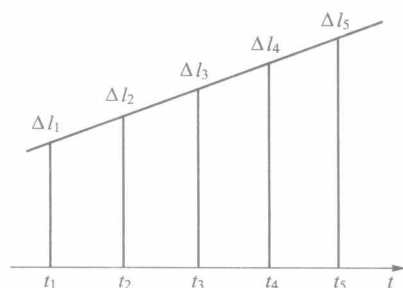


图 1.2.1 线性系统误差示意图

三、系统误差的处理方法

知道了系统误差的来源,分析发现了系统误差,也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作仔细分析,并在测量前就将系统误差从产生根源上加以消除。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,为了防止长期使用时仪器精度降低,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,做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,再通过计算减小或消除系统误差。例如,用线式电桥测电阻时,把待测电阻 R_x 与电阻箱 R_0 交换位置,先后测量两次,取两次测量的平均值,或 $R=\sqrt{R_1 R_2}$,即可以减小电阻丝不均匀引起的系统误差。再如,用天平称质量时,把待测物和砝码交换位置,进行两次测量,取两次平均值,或 $m=\sqrt{m_1 m_2}$,即可以消除天平不等臂引起的系统误差。

(3) 异号法

在测量中改变某些条件,先后进行两次测量,使两次测量中误差出现的符号相反,再取两次测量平均值作为测量结果,以消除系统误差。例如,用霍尔元件测磁场时,同时或分别改变磁场 B 和工作电流 I 的方向,并分别测量电势差 U_H ,取其平均值,以减小或消除温差电势、电压引线焊点不对称、附加效应等引起的系统误差。

(4) 消除线性系统误差的方法

对称法是消除线性系统误差的有效方法,如图 1.2.1 所示,随着时间的变化,被测量做线性增加。若选定某时刻为 midpoint,则对称此点的系统误差算术平均值皆相等。即

$$\frac{\Delta l_1 + \Delta l_5}{2} = \frac{\Delta l_2 + \Delta l_4}{2} = \Delta l_3$$

利用这一点可将系统误差对称安排,取各对称点两次读数的算术平均值作为测量值,即可消除系统误差。例如,电源电动势随时间线性降低,则使用电位差计时,可以隔相等时间轮流测标准量和待测量,如第一、第三次测标准量,将其平均值与第二次所测得的待测量对比,以消除系统误差。

(5) 消除周期性系统误差的方法

消除周期性系统误差用半周期法,相隔半个周期进行两次测量,取两次测量的平均值即可消除周期性系统误差。

周期性系统误差一般表达式为

$$\Delta L = a \sin \varphi$$

设 $\varphi = \varphi_1$ 时,误差为