



高等学校教材

DAXUE

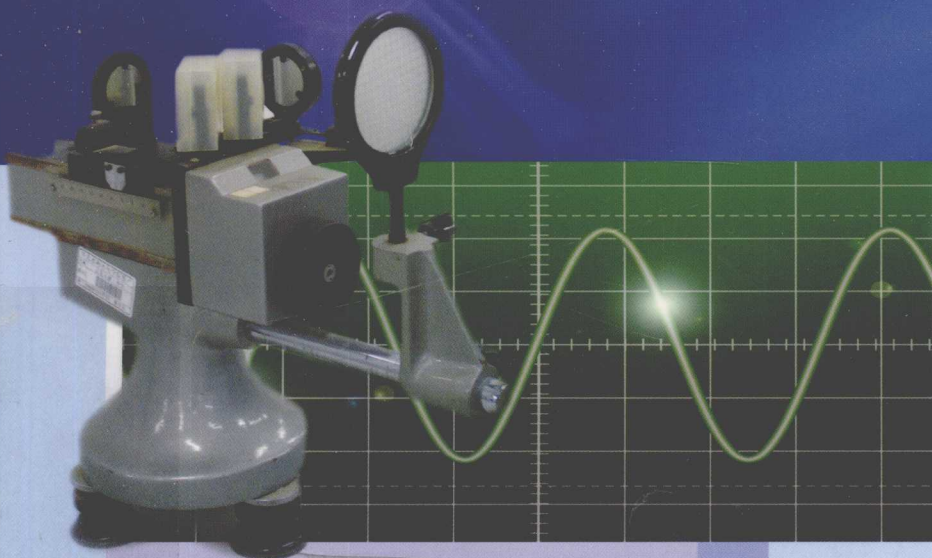
大学

主编 王燕红 宋玲

主审 邱淑荣

物理实验

WULISHIYAN



黄河水利出版社

04-33/271

2009

高等学校教材

大学物理实验

主编 王燕红 宋 玲

主审 邱淑荣

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是根据教育部制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,针对水电类工科院校的专业特色和教学特点,结合并吸收近年的实验教学成果和经验编写而成。全书由绪论、误差理论与数据处理方法、基础性实验、综合应用性实验、设计研究性实验和近代物理实验及附录组成。其中收录的基础性、综合应用性、设计研究性和近代物理等四个层次的实验项目共 56 个。在实验选题上更加注重先进性、应用性和拓展性,以求达到培养具有创新精神和实践能力的应用型人才的培养目标。

本书具有普适性,可作为普通工科院校的大学物理实验教材,适合不同层次的教学需要。也可作为实验教师和技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王燕红,宋玲主编. —郑州:黄河水利出版社,2009.3

ISBN 978 - 7 - 80621 - 751 - 1

I. 大… II. ①王… ②宋… III. 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012428 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsclchs@126.com

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16.25

字数:392 千字

印数:1—7 100

版次:2009 年 3 月第 1 版

印次:2009 年 3 月第 1 次印刷

定价:26.00 元

前 言

本书根据教育部制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》，结合工科院校大学物理实验教学特点，汇集了物理实验教师和实验技术人员多年来的教学经验和教学改革成果，由华北水利水电学院教材建设基金资助出版。

当今科学技术的发展日新月异，由基础物理理论发展而成的新学科、新知识、新技术和新方法不断地融入科研和生产实践中，悄然改变着我们的观念和生活。作为培养复合型、应用型、创新型人才的工科院校，如何改变传统教学模式，更新传统教材和教学内容，以适应现代社会的技术变革，是当务之急、重中之重。随着科技进步、知识交叉、学科渗透，一些老的基础知识、方法和技能已淡出历史舞台，因此我们必须更新观念，打破近代物理实验与普通物理实验的传统界限，将普通物理实验与近代物理实验相互融合，对基础性实验与创新性实验重新界定，对陈旧的实验内容和教学体系进行全面改革。本教材正是基于这种思路，在重新审视以往教学模式，总结近几年教学改革经验，对原有实验项目和内容进行整合的基础上编写而成的。

全书由绪论、第1章误差理论与数据处理方法、第2章基础性实验、第3章综合应用性实验、第4章设计研究性实验、第5章近代物理实验等章节56个实验及附表I、II组成。在实验项目的编排上，遵循由浅入深、循序渐进的原则，按不同层次精选编录了14个基础性实验、22个综合应用性实验、15个设计研究性实验和5个近代物理实验前沿技术介绍，并引入了先进的实验技术——计算机模拟实验及应用实例，对开阔学生思路、提高学习兴趣具有重要意义。实验项目的最后增加了各类实验所用仪器的介绍和使用说明，便于读者参照。部分实验还增添了对不确定度的具体分析与估算，有助于学生加深对误差理论和不确定度概念的理解，以及在实际测量中的分析运用。此外，该书在保留的必修基本实验项目中，对内容进行了大量的更新与补充，并增加了目前广泛使用的数字万用表、数字示波器、数码照相机和计算机数据采集系统等先进仪器设备的基本结构、工作原理和使用说明等内容，充分体现了与时俱进的时代精神和教学服务于社会的教育理念。各院校可根据教学计划选择实验项目，学生在完成规定学时后也可以选修部分实验内容。

本书充分反映了近年来大学物理实验课程教学改革的成果及其发展趋势，注重实验内容的新颖性、综合性和应用性。在训练基本技能的基础上，充实了大量具有强烈现代意识和高新技术色彩、给学生留有较大发挥空间的实验项目。在传授知识的同时，注重培养学生的创新意识和创造能力，加大了设计和研究性实验的比例，在保证基础教学的前提下，既培养学生基本实验能力，又注重个性化发展，为学生提供了一个良好的自主学习空间。

本书汇集了许多实验教师和技术人员的劳动成果。全书由王燕红、宋玲主编，邱淑荣主审。参加编写的有：王燕红（实验10~13、17、26~28、41~44、52~53）、宋玲（实验4~9、37~40）、张永杰（第1章第9节，实验19~24、51）、赵爱清（绪论，第1章第1~8节，实验36）、杨大鹏（实验1~3、18、25、47~50）、袁保合（实验29~35、45~46）、杜晓晗（实验14~

16、54 ~ 56,附表 I、II)。

在本书编写过程中,我们参考了许多国内外院校的优秀教材和讲义,同时得到了华北水利水电学院教务处及有关院系的关心和支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,难免有疏漏及不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 12 月

目 录

绪论	(1)
第1节 物理实验课的任务与地位	(1)
第2节 物理实验课的基本环节	(2)
第3节 学生实验守则	(4)
第1章 误差理论与数据处理方法	(5)
第1节 测量及其分类	(5)
第2节 误差的定义及分类	(6)
第3节 系统误差的修正和限制	(9)
第4节 随机误差及其估算	(10)
第5节 测量结果的表示和合成不确定度的评定	(13)
第6节 有效数字及其运算规则	(18)
第7节 数据处理的基本方法	(20)
第8节 设计性实验的有关要求	(26)
第9节 计算机数据采集系统的应用	(28)
练习题	(30)
第2章 基础性实验	(32)
实验1 速度和加速度的测量	(32)
实验2 物体振动的研究	(37)
实验3 拉伸法测量杨氏模量	(42)
实验4 指针式万用表的原理与使用	(48)
实验5 数字式万用表的原理与使用	(53)
实验6 惠斯通电桥	(61)
实验7 直流双臂电桥(开尔文电桥)	(68)
实验8 示波器的原理与使用	(73)
实验9 电位差计的原理与应用	(88)
实验10 铁磁材料磁滞回线的测量	(94)
实验11 牛顿环与劈尖干涉	(100)
实验12 单缝衍射	(106)
实验13 偏振光的观测与研究	(109)
实验14 分光计的原理及三棱镜顶角的测量	(113)
第3章 综合应用性实验	(121)
实验15 用分光计测量三棱镜的折射率	(121)
实验16 光栅衍射测波长	(124)
实验17 双棱镜干涉	(128)
实验18 用迈克尔逊干涉仪测单色光的波长	(131)
实验19 霍尔位移传感器	(135)

实验 20	霍尔转速传感器	(140)
实验 21	电阻应变式传感器	(142)
实验 22	电容式位移传感器	(146)
实验 23	电涡流式位移传感器	(149)
实验 24	超声波在空气中传播速度的测量	(151)
实验 25	纵向共振法测金属棒的杨氏模量	(156)
实验 26	普通照相	(160)
实验 27	数码照相	(164)
实验 28	全息照相	(169)
实验 29	光电效应法测普朗克常数	(172)
实验 30	多普勒效应综合实验(一) 验证多普勒效应并测声速	(178)
实验 31	多普勒效应综合实验(二) 研究匀变速直线运动	(181)
实验 32	多普勒效应综合实验(三) 研究自由落体运动	(184)
实验 33	多普勒效应综合实验(四) 研究简谐振动	(186)
实验 34	多普勒效应综合实验(五) 研究阻尼振动	(188)
实验 35	密立根油滴实验	(190)
实验 36	计算机模拟实验	(197)
第 4 章	设计研究性实验	(207)
实验 37	滑线变阻器的特性研究	(207)
实验 38	电表的改装	(209)
实验 39	用电位差计校准微安表	(210)
实验 40	热敏电阻的温度测量及改装温度表	(213)
实验 41	莫尔条纹的观测与应用	(218)
实验 42	波片与光的偏振状态的观测研究	(220)
实验 43	自测眼镜屈光度	(223)
实验 44	衍射法测量细丝直径	(226)
实验 45	用光电效应实验仪测薄膜的光吸收系数	(227)
实验 46	利用多普勒效应测量车速	(228)
实验 47	用光杠杆法测量薄纸厚度	(230)
实验 48	用迈克尔逊干涉仪测量钠光和白光光源的相干长度	(230)
实验 49	用迈克尔逊干涉仪测量薄膜厚度	(231)
实验 50	用迈克尔逊干涉仪测量空气折射率	(232)
实验 51	超声波在固体和液体中传播速度的测量	(233)
第 5 章	近代物理实验	(234)
实验 52	微波测量技术	(234)
实验 53	电子衍射	(236)
实验 54	扫描隧道显微镜	(239)
实验 55	核磁共振	(240)
实验 56	高温超导材料特性测试	(243)

附录 (245)

附表 I 中华人民共和国法定计量单位 (245)

附表 II 一些常用的物理数据 (247)

绪 论

第1节 物理实验课的任务与地位

物理学是实验科学,凡物理学的概念、规律及公式等都是以客观实验为基础的。因此,物理学绝不能脱离物理实验结果的验证,实验是物理学的基础。实验是有目的地去尝试,对自然的积极探索。科学家提出某些假设和预见,为对其进行证明,需要选择适当的方法反复进行实验,并根据由此产生的现象来判断假设和预见的真伪。因此,科学实验的重要性是不言而喻的,其中物理实验自然也雄居要位。当代最为人们瞩目的诺贝尔奖的宗旨是奖给有最重要发现或发明的人。因此,诺贝尔物理学奖标志着物理学中划时代的里程碑级的重大发现和发明。从1901年第一次授奖至今已有百年的历史,80%以上的诺贝尔物理学奖授予了实验物理学家,剩下20%的奖中很多是实验和理论物理学家分享的。例如:1901年首届诺贝尔物理学奖得主是德国人伦琴,奖励他于1895年发现X射线;1902年的得主是荷兰人塞曼,奖励他在1894年发现光谱线在磁场中会分裂的现象;1903年的得主是德国人贝可勒尔和居里夫妇等三人,奖励他们发现了天然放射性,他们由此成为核物理学的奠基人。

物理学中每个概念的确立、原理和定律的发现,无不有坚实的实验基础。例如,电磁感应现象就是法拉第于1831年最早在实验室里发现的,而电磁感应定律和其他几个实验定律,又为麦克斯韦电磁场理论奠定了实验基础;英国的托马斯·杨和法国的菲涅尔的干涉实验及衍射实验,为光的波动学说奠定了基础;由于对黑体辐射实验事实的研究,法国物理学家普朗克给出了黑体辐射定律并提出了能量量子化的概念,从而诞生了量子力学;又如1919年,英国的爱丁顿拍出日全蚀照片,用于分析光线在太阳附近的弯曲情况,从而为爱因斯坦在1915年提出的广义相对论提供了有力的证据。

无论是物理学还是整个自然科学的发展,实验和理论的相互作用都是一种内在的根本动力。这种作用引起量的渐进积累和质的突变飞跃的交替前进,推动着科学进程一浪一浪地不断高涨。正如著名物理学家密立根所说:“我仅仅在理论和实验这两个领域里做了微小的贡献,就得到1923年的诺贝尔物理学奖,我感到非常荣幸,这件事很好地说明了,科学是在用理论和实验这两只脚前进的。有时是这只脚先迈出一大步,有时是另一只脚先迈出一大步,但是前进要靠两只脚,先建立理论然后做实验,或者是先在实验中得出了新的关系,然后再迈出理论这只脚,并推动实验前进,如此不断交替进行。”

科学高峰正如一座金字塔,有着广阔的宽厚基础和高耸的塔尖。基础愈宽厚,塔尖可以愈高。学生的任务主要是积累知识、提高能力、培养素质。从某种意义上说,不管学生自己是否意识到,实际都是在建造自己通向高峰的阶梯。每个人建造阶梯的过程和结果取决于诸多主、客观因素,会有所不同。无论如何首先要明确目标。学习阶段要学习多门功课,目标都是积累知识、提高能力、培养素质。物理实验课是一门基础实验课,是知识的底层,这底层的重要性更是不言而喻的。

大学物理实验是以一些基本物理量、基本仪器的基本测量方法与基本操作技能为主要内容进行教学训练的课程,是理工科各专业第一门必修的基础课程。它是学生进入大学后

学习科学实验方法和接受系统实验技能训练的开端,在培养学生用实验手段去发现和观测问题、分析研究问题、最终解决问题等能力方面,起着重要的作用。大学物理实验课程设置的目的是与中学物理实验相比有根本的变化:首先,它是工程教育中一系列实践教育的开端和基础;其次,它肩负着培养学生“进行系统实验方法和实验技能训练”的重任,要求学生通过本课程的学习,了解“从事科学实验的主要过程和基本方法”,并得到“从事科学实验的基本训练”。大学物理实验的具体任务如下。

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、基本方法和基本技能;掌握如何运用实验原理和方法去研究某个物理问题;熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

2 培养和提高学生的科学实验能力

(1)自学能力:通过提前阅读实验教材或说明书、参考资料等,做好实验前的准备,培养学生的自学能力。

(2)动手能力:熟悉一些常用仪器的使用;掌握一些基本的实验技能,如水平、垂直的调节,光路的共轴、视差消除的调节,电路中分压、限流方法的使用以及如何排除实验故障等。

(3)分析能力:能够用物理理论对实验现象进行初步的分析、判断和解释。

(4)表达能力:能够正确合理列出实验数据表格,记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析实验结果,撰写一定水平的实验报告。

(5)设计能力:对于简单问题,能够从研究对象或课题要求出发,自己查阅资料,依据某个原理,设计实验方案,确定实验数据,选配仪器,拟定实验程序。

3 培养和提高学生的科学实验素质

通过实验培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、不怕困难、艰苦努力的科学态度,勇于探索、创新的钻研精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德。

第2节 物理实验课的基本环节

1 预习

由于实验课时间有限,为保证顺利和高质量地完成实验,实验前必须认真阅读实验教材,查阅相关资料,掌握该实验的物理思想,明确实验目的、原理、方法和条件,了解实验步骤,根据实验要求画出数据记录表格,完成实验预习思考题及写出实验预习报告。

预习报告应包括:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理:扼要简述,切忌长篇抄书。写出主要公式,绘出原理图、接线图及必要的示意图。

(4)实验仪器。

(5)实验步骤:写出关键步骤及避免仪器损坏的注意事项。

(6)绘制数据记录表格及推导合成不确定度估算公式。

(7)回答预习思考题。

2 操作

操作是实验课的中心环节,教师用一定的时间讲解有关的实验内容和要求、仪器的使用方法和注意事项,对实验中的难点加以提示。要求学生严格按照仪器设备的操作规程进行实验,掌握正确的仪器调整 and 操作方法。对于陌生的仪器切忌盲目动手,应先阅读仪器使用说明,注意仪器工作电压、量程选择及人身与仪器的安全。实验中要多观察、多分析,反对盲目蛮干。若发现异常现象或仪器故障,应立即向老师报告。

把实验测量的数据和实验现象及时记录下来,如实验的条件,仪器的规格、型号、参数等,注意按有效数字规则记录实验数据并注意标明物理量的单位。如要更改数据,须注明原因,以便实验结束后分析核对。实验完毕后,数据要经老师审阅并签字后,方可整理仪器,离开实验室。

注意遵守实验室的规章制度。非正常操作造成的仪器损坏必须赔偿,有意损坏者按规定给予处罚。

3 实验报告

实验报告是对工作的总结,是实验课学习的足迹,是日后可供参考的资料,而不仅仅是供教师评定成绩的资料。因此,实验报告要对实验过程和结果有分析和评价,要有自己的思考。

实验报告的基本要求是:字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结论明确。

在预习报告的基础上,将实验获得的测量数据整理后工整地填入数据表,然后列出计算公式、代入数据、得出测量结果并估算其合成不确定度,最后对实验进行评价,可分析误差,亦可讨论实验方法,提出改进意见,写出收获体会。

完整实验报告的内容包括:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理:在理解实验原理的基础上做到简明扼要、图文并茂(原理图和装置示意图等),并列出测量和计算所依据的主要公式,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件等。

(4)实验仪器:列出实验中使用的仪器名称、型号、规格等。

(5)实验步骤:扼要写出实验的关键步骤和主要注意事项。

(6)绘制数据记录表格及推导合成不确定度估算公式。

(7)回答预习思考题。

(以上各项均写在预习报告中)

(8)实验数据、表格、作图及计算:表格要简单明了,分类清楚而有条理。数据处理包括结果计算、不确定度评定和曲线图等内容。凡属计算,均应有计算公式、代入数据和计算结果等主要运算步骤。不要漏写单位。

(9)分析误差:分析误差产生的原因及减小误差可采取的措施。

(10)实验结果:测量值 N 、合成不确定度 $u_c(N)$ 和相对不确定度 E 。若有观察某现象或验证某物理规律的内容时,要写出实验结论。

(11)问题讨论:对实验中现象的解释,对实验方法的改进及建议,作业题,实验后的体

会等。

第3节 学生实验守则

为保证实验正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验习惯,特制定下列规则,望同学们遵守执行。

- (1) 学生应在课表规定的时间按时进行实验,不得无故缺席或迟到。
- (2) 学生在每次实验前要认真做好实验预习,并在此基础上写出预习报告。
- (3) 学生应在上课前 10 分钟进入实验室,签到并交预习报告,然后仔细阅读黑板上的内容,勿动仪器。
- (4) 实验时应携带必要的文具,如绘图工具、计算器、草稿纸等。
- (5) 教师讲解后,学生应核对自己使用的仪器有无缺少或损坏,若发现问题,应及时向指导教师或实验室管理人员报告。
- (6) 要细心观察仪器构造,谨慎操作,严格遵守操作规程及注意事项。
- (7) 实验时必须严肃认真,以实事求是的科学态度完成实验。要多动手、勤思考,认真观察实验中的有关现象和规律,仔细测定有关数据,用钢笔或圆珠笔如实记录实验数据和现象。不得抄袭他人的结果或主观修改原始数据,确实需要修改的数据应由教师认可,抄袭和被抄袭者此次实验成绩均按零分处理。实验数据应交教师审阅并签字。
- (8) 不得无故缺席。病假、事假以盖有该学生所在系公章的请假条为准。事先请假的,补做实验的分数照常;事后补假的,补做的实验要酌情减分。请假但未补做的,该实验零分。无故缺席,以旷课论处,该实验零分。
- (9) 要保持实验室整洁、安静。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐,并由值日同学做好实验室卫生清洁工作。
- (10) 如有实验仪器损坏,应及时报告教师或实验室工作人员,说明损坏原因。违反操作规程或故意损坏仪器的,视情节轻重,依照学校有关规定进行赔偿处理。

第 1 章 误差理论与数据处理方法

任何测量和实验都受到误差的影响,估算并分析误差是科学实验过程中极为重要的组成部分。有关误差理论及其应用已发展成为一门专门的学科。

任何测量结果,如果没有标明误差,在科学上是没有意义的,因为人们对它的可靠性会提出质疑,所以误差是评价测量结果必不可少的依据。物理实验课应赋予学生正确的、最基本的误差理论知识,包括误差的成因及分类,减少测量误差的基本方法,以及如何评价、表达和估算误差等。本章虽为物理实验而写,亦适用于其他实验过程,是一切实验的基本知识。

第 1 节 测量及其分类

1 测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的,测量的目的是要获得被测量的定量信息。测量是为了确定被测量的量值,使用专用仪器和量具,通过实验和计算而进行的一组操作过程。

2 测量的分类

根据测量方法的不同,测量可以分为直接测量和间接测量。

2.1 直接测量(又称简单测量)

用待测量与同量纲的标准量直接进行比较,或者从已用标准量校准的仪器、仪表上直接读出测量值,其特点是待测量的值和量纲可直接得到。例如用米尺、游标卡尺、千分尺测长度,用秒表测时间,用天平称质量,用电流表测量电流等均为直接测量,而相应的被测量——长度、时间、质量、电流等称为直接测量量。直接测量简单、直观,是最基本的测量方式,也是间接测量的基础。

2.2 间接测量(又称复合测量)

多数物理量不便或不能直接测量,而是依据待测量与直接测量量的函数关系,先测出直接测量量,代入函数关系计算出待测量,这种测量称为间接测量,相应的被测量称为间接测量量。例如在用单摆测量重力加速度中,用秒表、米尺分别对周期 T 和摆长 L 进行直接测量,则重力加速度 g 可通过 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 计算出来, T 、 L 是直接测量量, g 是间接测量量。

当然,一个物理量是直接测量量还是间接测量量并不是绝对的,要由具体测量的方法和仪器来确定。例如用伏安法测电阻时,电流、电压是直接测量量,电阻是间接测量量;用欧姆表测量时,电阻又成了直接测量量。

3 等精度测量和非等精度测量

根据测量条件的不同,测量又分为等精度测量和非等精度测量。

3.1 等精度测量

等精度测量是指在相同测量条件下对同一物理量所做的重复测量。例如,在相同的条件下,由同一个测量人员,用同样的仪器和方法,对同一个待测量,作重复测量。由于各次测量的条件相同,测量结果的可靠性是相同的,没有理由认为哪次测量更精确或不精确,所以

每次测量的值是等精度的。

应该指出,要使测量条件完全相同是难以做到的,一般测量实践中(包括物理实验),一些条件变化很小,或某些次要条件变化后对测量结果影响甚微,一般可按等精度测量处理。

3.2 非等精度测量

在科学研究和其他高精度测量中,为了得到更精确更可靠的结果,特意要在不同的条件下,用不同的仪器、不同的测量方法,由不同的测量人员对同一个待测量进行测量和研究。此时,由于测量条件全部或部分发生了明显变化,每种测量的可靠性、精确度显然不同,这种测量即为非等精度测量。而最后的测量结果,是通过待测量的各种非等精度测量结果的加权处理来获得的。

第2节 误差的定义及分类

反映物质特性的物理量,在一定的条件下,相应有一个确定的客观真实值,这个值在测量上称为物理量的真值。测量者的主观愿望总是希望十分准确地得出物理量的真值。然而,任何实际测量总是在一定环境下、以一定的方法、用一定的仪器、由一定的人员去完成的。由于测量环境不理想,测量方法不完善,仪器设备不精密,而且受测量人员技术、经验和能力等因素的限制,使得任何测量都不会绝对精确。测量值与真值之间总有一些差别,这种差别称为测量值的误差。任何测量都有误差,误差贯穿于测量的全过程。

1 误差的定义

1.1 绝对误差

测量值 x 与被测量的真值 x_0 之间的差值称为绝对误差,用 Δx 表示。

$$\Delta x = x - x_0$$

Δx 可正可负,反映了测量值偏离真值的程度。绝对误差越小两者越接近。所以,绝对误差的大小标志着测量结果的可靠程度或可信程度的大小。

但是仅以绝对误差来评价测量结果是不全面的。例如,用米尺测量两个物体的长度,得出一个是 5.00cm,一个是 25.00cm,测量的绝对误差为 0.05cm,二者的绝对误差相同,但前者绝对误差占测量值的 $\frac{0.05}{5} = 1\%$,后者占 $\frac{0.05}{25} = 0.2\%$,显然测量误差的严重程度不同。

为了全面评价测量的优劣,引入测量误差的第二种形式,即相对误差。

1.2 相对误差

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差,用 E 表示。

$$E = \frac{\text{绝对误差 } \Delta x}{\text{真值 } x_0} \times 100\%$$

所谓真值,是指在研究某量时,在其所处的条件十分完善时而测定的量值(或称物理量客观存在的量值)。物理量的真值是一个理想概念,一般不可能准确知道。有关真值可以从以下几种情况得出:

(1)理论值:如三角形三个内角和为 180° 等。

(2)公认值:世界公认的一些常数值,如普朗克常数 h 等。

(3)相对真值:用准确度高一个数量级的仪器校准的测量值。

规定:校准仪器的误差应比测量仪器误差小一个数量级,即二者误差的比值应为1:3~1:20。

(4) n 次测量的算术平均值:对一个不变的量进行 n 次测量后,其算术平均值 $\bar{x}$ 可视为真值的最佳近似值(这样的计算方法以等精度测量为前提),在后面第4节中有详细的推导。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

当用算术平均值代替真值时,所求的误差称为偏差。

2 误差分类

根据误差产生的原因和性质不同,将误差分为两大类,即系统误差和随机误差。

2.1 系统误差

在相同的条件下,对同一物理量进行多次测量,测量值总是向一个方向偏离真值,即误差的大小和正负保持恒定,或者误差按一定规律变化,这种误差称为系统误差,前者叫恒定系统误差,后者叫可变系统误差。可变系统误差按其变化规律,又可分为线性系统误差和周期性系统误差等。

系统误差又可分为可修正系统误差(已定系统误差)和不可修正系统误差(未定系统误差)。凡是大小和符号确定的系统误差称为可修正系统误差,如千分尺、电表的零位误差,伏安法测电阻时的接表误差。实验者根据它产生的原因、大小和符号对测量结果进行修正即可消除它的影响。只能估计出大小而不能确定其符号的系统误差称为不可修正系统误差,如某些仪器的仪器误差。

实验中的系统误差主要来源于以下几个方面:

(1)仪器误差。仪器误差是由仪器本身固有的缺陷、校正不完善或使用不当引起的。如天平的不等臂、刻度不均匀、砝码实际质量与标称值不等、电表刻度盘与指针转轴安装偏心等引起的误差属前者,而仪器和量具不在规定的使用状态,如不垂直、不水平、零点不准、电表要求水平放置但却垂直放置测量等引起的误差均属后者。前者是由仪器、量具自身带来的系统误差,使用时应尽量消除或修正,而后者则应当避免。

(2)方法误差。方法误差是由计算公式的近似、没有完全满足理论公式所规定的实验条件,或因测量方法的不完善所带来的误差。例如用单摆测重力加速度时,公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 仅适用于 $\theta = \sin\theta$ 的近似条件,当摆角较大时会产生较大的误差;用伏安法测电阻时,忽略了电表内阻的影响等。

(3)环境误差。由于仪器所处的外界环境如温度、湿度、光照、气压、电磁场等与仪器要求的环境条件不一致引起的误差。

(4)人员误差。这是由于观测者心理、生理条件以及其他个人因素造成的误差,它跟个人的反应速度、分辨能力、固有习惯以及实验技能有关。例如按停秒表时总是超前或滞后,读数时总是偏大或偏小。

从理论上讲,系统误差可以通过分析研究其产生的原因,采取一定的方法减小或消除,或按其规律对测量结果进行修正。但事实上,发现和消除系统误差是一个极其复杂的问题,

常常成为实验结果是否可靠的主要因素。因此,这是实验者应努力去解决的问题。

2.2 随机误差

随机误差是指同一被测量在相同条件下的多次测量过程中,以不可预知方式变化的测量误差的分量。随机误差不可修正。随机误差的产生是由于实验中各种因素的微小变化引起的。例如,实验条件和环境因素无规则的起伏变化,引起测量值围绕真值发生无规律的涨落变化,这个变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量值而言是没有规律的,其大小和方向是不可预知的,但对其进行足够多次测量时,则会发现它们的随机误差服从一定的统计规律。常见的一种情况是,正方向误差和负方向误差出现的概率大体相等,数值小的误差出现的概率较大,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不会出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,这就是随机误差最典型的分布规律——正态分布规律。因此,可以用统计的方法估算其对测量值的影响。

在整个测量过程中,除上述两种性质的误差外,还可能发生读数、记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成的测量上的错误。错误不是误差,它是不允许存在的,这些错误数据在处理时应当剔除。

应该指出,从原则上讲,系统误差可以消除,而随机误差不能消除。一个具体的测量中出现的误差往往既含有随机误差,又含有系统误差。在实验中,当实验条件稳定且系统误差可以掌握时,就应尽量保持在相同条件下做实验,以便修正系统误差。当系统误差不能掌握时,常常想一些办法使系统误差随机化,以便在多次测量取平均时抵消一部分。例如,一只米尺刻度不均匀,可以利用米尺不同刻度部位来测量,然后取平均值。另外,有时只是为了说明误差的限度,两种误差不再加以区别。如许多不太精密的仪表所标的仪器最大允许误差(电表的准确度级别),就是包括两种误差在内的。

2.3 测量结果的质量评价(准确度、精密度、精确度)

(1)准确度:表示测量结果中系统误差大小的程度。它反映了在规定条件下,多次测量数据的平均值或实验所得结果与真值符合的程度。准确度高即测量结果接近真值的程度好,系统误差小,但数据离散程度,即随机误差的大小不明确。

(2)精密度:表示测量结果中随机误差大小的程度,即指在规定条件下对被测量进行多次测量时,各次测量结果之间离散的程度(相互接近程度)。精密度高说明重复性好,随机误差小,但系统误差的大小不明确。

(3)精确度:表示测量结果中系统误差与随机误差综合大小的程度,也就是对测量的准确度和精密度的综合评定。对于实验测量来说,精密度高准确度不一定高;而准确度高精密度也不一定高;只有精密度和准确度都高时,也就是说,只有随机误差和系统误差都小时,精确度才高。

为了更好地理解这些概念,现以打靶(见图 1-1)为例来形象地说明。图 1-1(a)表示弹着点相互之间比较分散,但总体来看没有明显的固定偏向,因而随机误差大,系统误差小,即精密度较低,而准确度较高;图 1-1(b)表示弹着点比较密集,但总体来看偏离靶心较远,因而随机误差小,系统误差大,即精密度较高,而准确度较低;图 1-1(c)表示弹着点比较密集,且总体来看离靶心近,因而随机误差小,系统误差也小,即精密度和准确度都高,这才是精确度高。

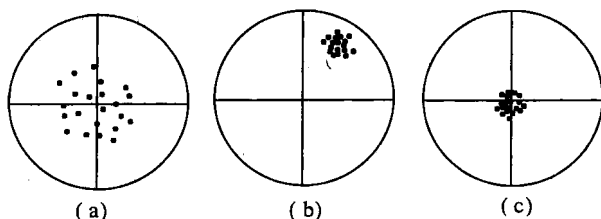


图 1-1 准确度、精密度、精确度示意图

第 3 节 系统误差的修正和限制

系统误差的处理较为复杂,它要求实验者既要有较好的理论基础,又要有丰富的实验经验。在物理实验中,系统误差的处理主要考虑的是由于仪器的准确度所限和实验方法、原理不完善而导致的系统误差。对于未定系统误差,若不能消除,可作为随机误差来处理。

1 发现系统误差的一些简单方法

现将发现系统误差的一些常用方法介绍如下:

(1) 实验对比法:①用不同方法测同一个量,看结果是否一致,若结果不一致,且它们之间的误差又超出了随机误差的范围,则肯定存在系统误差;②仪器的对比,如把两个电流表接入同一个电路,把较高级别的表作为校准表,找出另一表的误差修正值;③改变实验条件,将结果进行对比,如在磁场测量中将带有磁性的物质移近,看对测量结果的影响;④改变实验中某些参量的数值,并进行对比。

(2) 理论分析法:分析实验所依据的理论公式要求的条件与实际情况有无差异;分析仪器所要求的使用条件是否能得到满足等。如用三线摆测量物体的转动惯量所依据的公式 $J = \frac{M_0 g D_0 d}{16 \pi^2 l} T_0^2$ 成立的条件是摆角 $\theta < 5^\circ$ 、三条摆线等长、大小圆盘水平、转动轴线在两盘中心连线上,若不满足其中任何一个条件,就会引入系统误差。

(3) 分析数据法:在相同的条件下对某一物理量进行多次测量,测量结果的误差不服从统计规律(因为随机误差是遵从统计规律的),则说明存在系统误差。

以上只是从普通意义上介绍了几种发现系统误差的方法,在实际中常常会有许多更具体的方法,需要实验者在不断提高实验技能的基础上去发现、总结。

2 系统误差的修正和限制

应当指出,任何“标准”的仪器也有它的不足之处,要绝对消除系统误差是不可能的。系统误差的修正和限制没有一个普遍通用的方法,只能针对每一个具体情况采用不同的具体措施。下面简单介绍几种典型的限制和消除系统误差的方法。

(1) 替换法:在测量时保持其他条件不变,用已知量代替被测量,即可消除系统误差。例如用伏安法测电阻时,当电流表外接时,可用伏特表读数和电流表读数之比作为测量结果,但由于伏特表的内阻不是无限大,因此它必将引起分流。这样实测值必小于真值,从而引入系统误差。要想消除这种系统误差我们可以采用替代法测量,即用一个标准电阻箱替代被测电阻,调节电阻箱阻值使得电压表和电流表读数分别与测量待测电阻时的值相同,则标准电阻箱的阻值就是待测电阻的阻值,这样就可以消除系统误差。