



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

华北水利水电大学物理实验室 编



科学出版社

已有一百多年的历史了。本书是根据教育部《普通高等教育“十二五”规划教材》的要求，由华北水利水电大学物理实验室编撰的。

本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事物理实验工作的工程技术人员参考。

本书由华北水利水电大学物理实验室编撰，由科学出版社出版。

华北水利水电大学物理实验室 编

本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事物理实验工作的工程技术人员参考。

物理实验

1

科学出版社

北京

100071

科学出版社

北京

内 容 简 介

大学物理实验是为各工科专业和部分理科专业学生独立设置的一门必修课程, 是学生进入大学后系统接受科学实验能力培养的开端, 是进行科学实验方法和实验技能训练的重要基础。

本书是编者在多年物理实验教学实践的基础上编写而成的, 全书内容共分为 7 章, 包括第 1 章绪论、第 2 章误差分析和数据处理、第 3 章基础性实验、第 4 章综合性实验、第 5 章设计研究性实验、第 6 章近代物理实验和第 7 章演示实验。

本书可作为普通高等工科院校、综合性大学及师范类院校非物理专业的大学物理实验课程教学用书, 也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 华北水利水电大学物理实验室编. —北京: 科学出版社, 2015.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-045455-3

I. ①大… II. ①华… 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 190396 号

责任编辑: 罗 吉 昌 盛 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 霍 兵 / 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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 462 000

定价: 43.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编写人员名单

(以贡献大小排序)

龙从国 杜晓晗 徐 斌 宋 玲
王红利 秦 臻 师丽捧 马珊珊
闫淑卿 赵爱清 凌 虹

前 言

物理实验是高等院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端.物理实验课程覆盖面广,其中蕴涵丰富独特的实验思想、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,提高学生科学素质的重要基础课程.物理实验课程在培养学生严谨的科学态度、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.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、创新型人才的理工科院校,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,一些旧的基础知识、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.本书正是基于这种思路,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.

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,既培养学生的基本实验能力,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.

教学改革是一项长期复杂的系统工程,实验教学更是一项集体事业.本书的编写汇集了许多实验教师和技术人员的劳动成果.全书由龙从国、杜晓晗、徐斌主审.参加编写的有:龙从国(实验 3.4, 3.8, 3.10, 4.19, 5.1、5.2, 6.1, 6.3, 6.4)、杜晓晗(第 1 章,第 2 章 2.1~2.3 节,实验 3.3, 3.9)、徐斌(第 2 章 2.4~2.6 节,实验 3.1, 3.2, 3.7, 4.4, 4.10, 5.6)、宋玲(实验 4.5, 4.6)、王红利(实验 3.13, 4.1~4.3)、秦臻(实验 4.7~4.9)、师丽捧(实验 3.12, 5.5, 6.5, 6.6, 7.1~7.11)、马珊珊(实验 3.5, 3.6, 3.15, 4.11, 5.3, 5.4, 5.7, 5.9, 5.10, 7.16~7.18, 参考文献,附表 I 和 II)、闫淑卿(实验 3.14, 3.16, 4.12, 4.14, 4.15~4.18, 6.2, 6.7, 6.8)、赵爱清(实验 3.11, 4.13, 5.8)、凌虹(实验 7.12~7.15, 7.19).

在本书编写过程中,参考了许多国内外院校的优秀教材和讲义,同时得到了学校、学院、教务处等有关领导的关心和支持,在此表示衷心感谢.同时也感谢吕建、张愿章和左卫兵老师的帮助和支持.

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正.

编 者

2015 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大学物理实验的地位与作用	1
1.2 实验物理学的形成及其内容	2
1.3 大学物理实验的作用、任务和基本要求	2
1.4 大学物理实验基本教学程序	3
第 2 章 误差分析和数据处理	5
2.1 测量与误差	5
2.2 测量的不确定度和测量结果的表示	13
2.3 有效数字及其运算规则	20
2.4 数据处理的基本方法	22
2.5 设计性实验的有关要求	27
练习题	29
第 3 章 基础性实验	32
实验 3.1 速度和加速度的测量	32
实验 3.2 物体振动的研究	38
实验 3.3 拉伸法测量杨氏模量	43
实验 3.4 数字式万用表的原理与使用	50
实验 3.5 惠斯通电桥测电阻	59
实验 3.6 用直流双臂电桥测电阻	68
实验 3.7 示波器的原理与使用	73
实验 3.8 电位差计的原理与使用	86
实验 3.9 铁磁材料磁滞回线的测量	91
实验 3.10 牛顿环与劈尖干涉	98
实验 3.11 单缝衍射	106
实验 3.12 偏振光的观测与研究	110
实验 3.13 分光计的原理及三棱镜顶角的测量	114
实验 3.14 刚体转动惯量的测量	123
实验 3.15 用单摆测量重力加速度	129
实验 3.16 用三线摆测定物体的转动惯量	131
第 4 章 综合性实验	136
实验 4.1 用分光计测量三棱镜的折射率	136
实验 4.2 光栅衍射测波长	139

实验 4.3 双棱镜干涉测光波波长	144
实验 4.4 用迈克耳孙干涉仪测单色光的波长	149
实验 4.5 霍尔位移传感器	154
实验 4.6 霍尔转速传感器	159
实验 4.7 电涡流式位移传感器	161
实验 4.8 电容式位移传感器	164
实验 4.9 电阻应变式传感器	167
实验 4.10 超声波在空气中传播速度的测量	171
实验 4.11 纵向共振法测金属棒的杨氏模量	176
实验 4.12 全息照相	182
实验 4.13 用光电效应法测普朗克常量	186
实验 4.14 多普勒效应综合实验: 验证多普勒效应	192
实验 4.15 多普勒效应综合实验: 研究匀变速直线运动	196
实验 4.16 多普勒效应综合实验: 研究自由落体运动	198
实验 4.17 多普勒效应综合实验: 研究简谐振动	200
实验 4.18 多普勒效应综合实验: 研究阻尼振动	203
实验 4.19 密立根油滴实验	205
第 5 章 设计研究性实验	213
实验 5.1 电表的改装	213
实验 5.2 用电位差计校准微安表	216
实验 5.3 热敏电阻的温度特性及改装温度表	218
实验 5.4 莫尔条纹的观测与应用	223
实验 5.5 波片与光的偏振状态的观测研究	226
实验 5.6 超声波在固体和液体中传播速度的测量	229
实验 5.7 用迈克耳孙干涉仪测量空气折射率	230
实验 5.8 用光电效应实验仪测薄膜的光吸收系数	231
实验 5.9 用迈克耳孙干涉仪测量薄膜厚度	234
实验 5.10 钠光双黄线波长差与光源相干长度的测量	235
第 6 章 近代物理实验	237
实验 6.1 核磁共振	237
实验 6.2 高温超导材料特性测试	240
实验 6.3 弗兰克-赫兹实验	244
实验 6.4 塞曼效应的观测	247
实验 6.5 单光子稳态光荧光谱的测量	251
实验 6.6 光速的测量	252
实验 6.7 阿贝成像原理与空间滤波	255
实验 6.8 全息光栅	259

第 7 章 演示实验	263
实验 7.1 重心实验演示 锥体上滚	263
实验 7.2 角动量守恒	264
实验 7.3 滚柱式转动惯量实验	266
实验 7.4 飞机升力	267
实验 7.5 伽尔顿板演示	268
实验 7.6 水波实验	269
实验 7.7 共振实验	270
实验 7.8 机械波实验	271
实验 7.9 能量转换机	276
实验 7.10 静电学实验	277
实验 7.11 高压带电实验	281
实验 7.12 雅各布天梯	282
实验 7.13 亥姆霍兹线圈	283
实验 7.14 电磁炮	284
实验 7.15 三相旋转磁场	285
实验 7.16 趣味光学展示	286
实验 7.17 偏振光干涉实验	290
实验 7.18 旋光色散实验	291
实验 7.19 超导磁悬浮实验	293
参考文献	295
附录	296
附表 I 中华人民共和国法定计量单位	296
附表 II 一些常用的物理数据	298

第1章 绪 论

1.1 大学物理实验的地位与作用

无论是经典物理学还是近代物理学的发展都与物理实验息息相关。例如，经典力学起源于伽利略的实验——比萨斜塔实验和理想斜槽实验；热学的发展源于温度计的发明和热机的使用；电磁学进入科学的研究时代源于库仑扭秤和电流的磁效应等实验；物体的投影、小孔成像、平面镜、凸面镜和凹面镜成像铸就了几何光学的辉煌；虽然波动光学的成就源于菲涅耳原理，但是杨氏双缝干涉、泊松亮斑和光的偏振等实验为波动光学的理论提供了有力支持；近代物理的发展理论成果占有较大的比重，但是相对论力学和量子力学的起源分别是迈克耳孙-莫雷实验测量的零结果和黑体辐射理论出现的紫外灾难。另一个重要的方面就是诺贝尔物理学奖，相应的研究成果是近代物理学发展的重要体现。诺贝尔物理学奖从1901年第一次授奖至今已超过百年的历史，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。实验成果可以很快得奖，而理论成果要经过至少两个实验的检验。有些建立在共同实验基础上的成果可以连续几次获奖。因此，物理学发展绝不能脱离物理实验而独立发展。因发现 J/ψ 粒子而获得诺贝尔物理学奖的丁肇中教授在斯德哥尔摩的颁奖仪式上曾语重心长地讲过这样一段震撼人心的话：“我是在旧中国长大的，因此想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性。中国有一句古话——劳心者治人，劳力者治于人，这种落后的思想对发展中国家的青年们有很大的害处。由于这种思想，很多发展中国家的学生都倾向于理论研究，而避免实验工作。事实上，自然科学理论不能离开实验基础，特别是从实践中产生的物理学。我希望由于我这次获奖，能够唤起在发展中国家的学生们对实验科学的兴趣，从而注意到实验工作的重要性”。丁肇中教授的讲话值得大家认真体会。

因此，物理学的形成与发展是以实验为基础的。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上，对物理现象进行分析、抽象概括和总结，从而建立物理定律，进而形成物理理论，再回到实验中去经受检验。实验是物理科学的基础，也是物理知识的源泉，加强物理实验是物理教学的时代特征，又是提高物理教学质量的先决条件。在研究物理现象时，实验的任务不仅是观察物理现象，更重要的是找出各物理量之间的数量关系，找出它们变化的规律。任何一个物理定律的确定，都必须依据大量的实验材料。即使已经确定的物理定律，如果出现了新的实验事实 and 这个定律相违背，那么便需要修正原有的物理定律或物理理论，因此我们说，物理实验是物理理论的基础，它是物理理论正确与否的试金石。物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础，又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。近几十年来，物理学和其他学科一样发展很快，尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展，更反映了物理实验技术发展的新水平。科学技术的发展越来越体现出物理实验技术的重要性，基于这方面的原因，人们逐渐感到理工及师范院校加强对学生进行物理实验训练的重要性。理论课是进行物理实验必要的基础，在实验过程中，通过理论的运用与现象的观测分析，理论与实验相互补充，从而加深和扩大学生的物理知识。

总之,物理学的发展离不开物理实验的支持,而物理实验是有目的地去尝试,是对自然的积极探索.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,并根据产生的现象来判断现有假设和预测的真伪.因此科学实验的重要性是不言而喻的.另外,实验不同于对自然现象的直接观察,也不同于生产过程中的直接经验.其特点是:第一,可以利用实验方法控制实验条件,排除外界因素的干扰,从而能有效地突出被研究诸事物之间某种重要的关系;第二,可以把复杂的自然现象或生产过程分解为若干独立的现象和过程,进行个别和综合的研究;第三,可以对现象和过程进行满足预期准确度要求的定量测量,以揭示现象和过程中的数量关系;第四,可以进行重复实验,或改变条件进行实验,便于对事物的各方面作广泛的比较和分析等.因此对于目前高等理工学院,尤其是以工科为主的院校,物理实验课程是学生进入大学后受到系统实践训练和技能训练的开端,是学生进行专业实践训练乃至进行实验科学研究的重要基础.教育部把物理实验课列为理工学院培养大学生进行科学实验基本训练的一门独立的、重要的必修课程,因此学好物理实验对理工学院的学生来说是十分重要也是必要的.

1.2 实验物理学的形成及其内容

在20世纪50年代以前,世界各国对物理实验课的作用的认识仍然停留在“物理实验课程是物理课程教学的一个环节”上,主要原因是物理实验的科学成果转变为现实生产力的发展还比较缓慢.直到20世纪60年代,人们逐渐认识到了科学实验在尖端技术发展中的地位,实验科学技术的成果也很快地应用于我们生产实践,极大地推动了社会生产力的发展,同时也逐渐形成了自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学.因此,人们这时明确地提出了“加强基础理论教学与加强基础实验教学并重”的观点,自此物理实验教学开始脱离物理理论教学而单独开设.它在内容上包括了许多物理课本所包括不了的理论知识、方法和技能,主要表现在以下几方面.

(1) 实验手段的发展.表现在从简单的测量仪器,发展为以机、电、光为基础的门类齐全并日益扩展的仪器系列,精确度不断提高,适用范围不断开拓,自动化程度不断提高等.遥感、遥控、遥测技术的应用,使仪器已经从简单的物理原理脱胎出来,成为独立体系.

(2) 通过对现象的观测、实验方案的设计、过程控制以及资料分析、结果归纳等一系列方法,在前人积累和现代科学技术的基础上,发展成较完整的系统.

(3) 综合了数学、物理等学科的成就,形成了实验的数据处理、误差分析的严格理论体系,并已有成效地指导着实验的各个环节,使之顺利进行.

(4) 为解决各种精确测量和精密实验中的实际问题,综合利用了多学科和多种专业技术的交叉,形成了实验物理学的独立科学技术体系.

1.3 大学物理实验的作用、任务和基本要求

1. 作用

大学物理实验是对高等理工学院学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是各专业后继实验课程的

重要基础。也就是说,它是大学生从事科学实验工作的入门。物理实验能够培养和提高学生的科学实验能力和科学实验素养。同时,在培养学生良好的科学素质和科学世界观方面,物理实验也起到了潜移默化的作用。

2. 任务

大学物理实验课程的教学任务是使学生在中学物理实验的基础之上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识和方法,在实验技能上得到训练,从而初步了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。其具体任务如下:

(1) 学习物理实验的基础理论,包括一些典型的实验方法及其物理思想。例如,电磁学实验中的模拟法、伏安法、电桥法、补偿法以及冲击法等,有助于思维与创造能力的培养。

(2) 使学生获得必要的实验知识和操作技能,初步培养学生正确使用仪器进行测量、处理数据、分析结果以及编写报告等方面的能力。

(3) 培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度;以及爱护国家财产的良好品质;培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等良好习惯。

3. 基本要求

通过物理实验的基本训练,要求做到:

(1) 能够自行完成预习、进行实验操作和撰写实验报告等主要实验程序。

(2) 能够调整实验装置,并掌握常用的操作技术。例如,零位调整,水平、铅直调整,光路的共轴调整,消视差调节,逐次逼近调节,根据给定的电路图正确接线等。

(3) 了解物理实验中常用的实验方法和测量方法,如比较、放大、模拟、补偿、平衡和干涉方法。

(4) 了解常用仪器的性能,并掌握使用方法,能够进行常用物理量的一般测量。

1.4 大学物理实验基本教学程序

1. 实验前的预习

实验前必须认真阅读教材,阅读时要以实验目的为中心,搞清楚实验原理(包括测量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等,要反复思考如何才能达到实验目的。预习时要尽量精心构思,写出简明的预习报告,内容包括:目的、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等。每次实验前,教师要检查预习情况,未预习者不准做实验。

2. 实验中的观测

(1) 认真听讲。做实验前,教师要做简要的讲解,这对做好实验是很有益的。学生要认真听讲,这样可起到事半功倍的效果。

(2) 实验操作。在操作前,先熟悉主要仪器,了解其使用方法,然后进行仪器的调整并检查仪器是否完好。如有问题要及时向教师提出,切不可盲目从事。待基本符合要求后,方可进行实验操作、测试数据。

(3) 记录数据及实验现象. 应科学地、实事求是地记录下实验中的全部原始数据和出现的各种现象. 有关数据中除了测量得到的数据外, 还应当包括实验条件(与实验结果有关的温度、湿度、气压等)和主要仪器的名称、型号、规格、准确度等. 在记录数据时要特别注意有效数字和单位. 测试结束后, 把原始数据给教师审阅签名后, 方可整理仪器结束实验.

3. 实验后的报告

完整的实验报告应包括以下内容.

(1) 实验的年、月、日、系别、班级、小组、姓名.

(2) 实验名称.

(3) 实验目的.

(4) 实验原理: 在理解的基础上, 简明扼要地阐述实验原理, 切忌整篇照抄, 画出必要的原理图、电路图或者光路图, 力求做到图文并茂. 写出实验涉及的主要公式(不写推导过程), 说明式中各物理量的意义和单位, 以及公式适用条件(或实验必要条件).

(5) 实验仪器: 包括实验用的所有仪器、量具和材料的名称、型号和规格等.

(6) 实验内容及步骤: 扼要写出关键步骤.

(7) 实验数据: 设计好数据记录表格, 把测得的原始数据及必要的中间计算结果认真地填写在实验报告上, 数据不得任意涂改, 按所讲述的数据处理方法处理数据, 写出数据处理过程, 并按结果表达式写出实验结果.

(8) 实验现象、误差分析以及对实验的建议、体会等.

实验报告一律用统一规格的实验报告纸书写, 要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要.

4. 遵守实验规则

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

(1) 学生应在课程表规定时间内进行实验, 不得无故缺席或迟到.

(2) 学生在每次实验前要进行预习, 并写出预习报告.

(3) 进入实验室后, 应将预习报告放在桌上由教师检查, 经过教师检查认为合格后, 才可以进行实验.

(4) 实验时应携带必要的物品, 如文具、计算器和草稿纸等.

(5) 进入实验室后, 若发现仪器缺少或损坏, 应及时向教师或实验室管理员报告.

(6) 实验前应细心观察仪器构造, 操作应谨慎细心, 严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项. 尤其是电学实验, 线路接好后先经教师或实验室管理员检查, 经许可后才可接通电路, 以免发生意外.

(7) 实验完毕前应将实验数据交给教师检查, 实验合格者教师予以签字通过. 余下时间在实验室内进行数据计算, 完成实验报告, 待下课后方可离开. 实验不合格或请假缺课的学生, 由指导教师登记, 通知在规定时间内补做.

(8) 实验时应注意保持实验室整洁、安静. 实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状, 放置整齐.

(9) 仪器仪表如有人为损坏, 赔偿办法根据学校规定处理.

第2章 误差分析和数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量测量相关物理量。而对事物的定量描述又离不开数学方法和实验数据相应的处理,因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差理论和实验数据处理方法的基本知识。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量的概念

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量,就是用合适的工具或仪器,通过科学的方法,将反映被测对象某些特征的物理量(被测物理量)与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,其比较值即为被测物理量的测量值。物理测量的内容很多,大至日、月、星辰,小到原子、分子。现在人们能观察和测量到的范围,在尺度方面已小到 $10^{-16} \sim 10^{-17}\text{m}$,大到百亿光年,大小相差在 10^{40} 倍以上。在时间方面已短到 $10^{-23} \sim 10^{-24}\text{s}$ 的瞬间,长则达百亿年,两者相差也在 10^{40} 倍以上。在定量地验证理论方面,也需要进行大量的测量工作。因此可以说,测量是进行科学实验必不可少且极其重要的一环。

2.1.2 测量的方法

按测量值获得的途径,测量分直接测量和间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较,可以从测量仪器上直接读出测量值的测量。例如,用直尺测量长度和用天平测物体的质量。间接测量是指利用待测物理量与某些可直接测量量之间的已知函数关系,求得该待测物理量的测量值。例如,测物体密度时,先测出该物体的体积和质量,再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量,大多属于间接测量。

按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量(equally accurate measurement)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。相反,在测量过程中全部或部分因素和条件发生改变,称为不等精度测量(unequally accurate measurement)。不同的实验室在相同的条件下对相同的试样进行的多次重复测量,或同一个人在相同的试验条件下,在较长的时间内对同一试样进行的多次重复测量,有可能是等精度测量,亦可能是非等精度测量,是否为等精度测量,需对测量的方差进行等方差性检验,即用统计的方法检验各方差在给定的显著性水平下是否具有齐性(一致性)。

2.1.3 误差的定义

从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量过程

中, 由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平等各种因素的局限, 不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同, 我们所测得的只能是某物理量的近似值. 也就是说, 任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值, 因此任何测量都有误差, 误差贯穿于测量的全过程. 我们将这个差值就称为该测量值的测量误差, 简称“误差”, 误差的大小反映了测量的准确程度. 测量误差的大小可以用绝对误差表示, 也可用相对误差表示.

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.

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2.1.1)$$

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.

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, 如普朗克常量 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 $1:3 \sim 1:20$.

(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 (这样的计算方法是以前等精度测量为前提).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1.2)$$

测量总是存在着一定的误差, 但实验者应该根据要求和误差限度来制订或选择合理的测量方案和仪器. 不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好, 环境条件总是恒温、恒湿、越稳定越好, 测量次数总是越多越好. 一个优秀的实验工作者, 应该是在一定的要求下, 以最低的代价来取得最佳的实验结果. 要做到既保证必要的实验精度, 又合理地节省人力与物

力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中,为此必须分析测量中可能产生误差的各种因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出评价。

2.1.4 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,可以将误差分为以下三类。

1. 系统误差

系统误差是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差,而这些因素影响的结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测定中完全相同,实验条件一经确定,系统误差就获得一个客观上的恒定值。当改变实验条件时,就能发现系统误差的变化规律。系统误差产生的原因一般来自于测量仪器本身以及环境变化和测量人员的操作因素。如刻度不准,仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等;周围环境的改变,如温度、压力、湿度等偏离校准值;实验人员的习惯和偏向,如读数偏高或偏低等引起的误差。因此,系统误差主要源于以下几个方面。

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固有缺陷;而仪器和量具不在规定的使用状态,如温度计零点刻度不在冰点,仪器的垂直和水平未调整,电表要求水平放置但却垂直放置测量等引起的误差均属校正不完善或使用不当。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

方法误差是由于测试方法本身不完善、或使用近似的经验公式、或实验条件不完全满足应用理论公式所要求的条件、基体或其他共存组分的干扰等引起的误差。在进行不同测试方法比对时,不同方法之间的差异也将产生误差。测量方法误差包括三方面:测量原理误差、测量元件误差和测量条件误差。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 $\theta \approx \sin \theta$ 的近似条件,当摆角较大时单摆就不满足简谐运动的条件了;另外,在用伏安法测电阻的基本原理以及测电阻时忽略了电表内阻的影响,导致电阻测量准确程度等。

3) 环境误差

环境误差是由于实际环境条件(温度、湿度、压力等)不完全符合测定所要求的条件而引起的误差,即在测量过程中实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。这种误差通常体现在仪表上,通常指的是由于仪表工作时所处周围环境条件变化所引起的误差,即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。这种误差需要对仪器进行修正,否则就会引入系统误差。

4) 人员误差

人员误差是由于观测者心理、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。一般包括:人员不正确的方法引起的误差、不正确的数据处理导致的误差、思想情绪变化导致的误差、两人或多人相互配合不默契所引起的误差以及生理缺陷引起的误差。如动态滞后、读数有偏大或偏小的癖癖。

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.其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.但发现和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经被发现和尽可能消除,因此系统误差不能轻易放过.

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 and 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.

3. 粗大误差

在整个测量过程中,除了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,通常称之粗大误差.粗大误差又叫做粗误差或寄生误差.在一定的测量条件下,测得值明显地偏离实际值所形成的误差.产生本项误差的主要原因是主观原因,其中包括:使用了有缺陷的量具;操作时疏忽大意;读数、记录、计算的错误等.另外,环境条件的反常突变因素也是产生这些误差的原因.

对于粗大误差,首先应设法判断是否存在,然后将其剔除,不能凭主观意愿对数据任意进行取舍,而是要有一定的根据.取舍的原则就是要看这个可疑值的误差是否仍处于随机误差的范围之内,是则留不是则弃.

2.1.5 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

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; 分析仪器使用时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和总结.

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.

2) 异号法

改变测量中的某些条件 (如测量方向) 使两次测量结果中的系统误差的符号相反, 取其平均值以消除系统误差. 例如, 光点检流计测电流, 当检流计零点不正确时必然带来误差. 在测量时改变一下电流方向, 则检流计的光点两次偏转方向不一致, 取两次偏转的算术平均值作为测量结果就可以消除上述的系统误差.

3) 交换法

将测量中的某些条件相互交换 (如交换被测物位置), 使交换前后产生的系统误差大小相等方向相反, 从而抵消了系统误差. 例如, 用惠斯通电桥测电阻时, 把待测电阻与标准电阻交换位置再次测量, 交换前后电桥平衡时比较臂的值分别为 R_{01} 和 R_{02} , 则被测电阻 $R_x = \sqrt{R_{01} R_{02}}$, 消除了电阻箱 R_1 、 R_2 本身所带来的系统误差.