

普通物理实验

主 编 高允锋 罗 涛 祁金刚
副主编 韩 飞 于立军 石浩辰 郭锦泉

(上册)



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通物理实验

(上册)

主 编 高允锋 罗 涛 祁金刚
副主编 韩 飞 于立军 石浩辰 郭锦泉



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书是在长期教学实践的基础上总结教学经验编写而成的。

本书共分三章,第1章为实验理论,首先系统地介绍了实验基础理论知识,包括误差理论、有效数字及其运算、实验不确定度、常用数据处理方法等,然后介绍了电磁学实验的基础知识;第2章为基础性实验,包括9个实验,主要是介绍实验室常用的仪器、仪表和物理实验的基本操作规程;第3章为提高性实验,收录了共20个实验。

本书可作为高等师范院校各专业学习物理实验的教学用书或实验教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验.上册/高允锋,罗涛,祁金刚主编.--北京:北京邮电大学出版社,2012.4

ISBN 978-7-5635-2947-6

I. ①普… II. ①高…②罗…③祁… III. ①普通物理学—实验—师范大学—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第060674号

书 名: 普通物理实验(上册)
主 编: 高允锋 罗涛 祁金刚
责任编辑: 刘春棠
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京联兴华印刷厂
开 本: 787 mm×960 mm 1/16
印 张: 11.25
字 数: 243千字
印 数: 1—3000册
版 次: 2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-2947-6

定 价: 22.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

普通物理实验是理工科院校的学生进入大学后首先学习的一门实验课程,是学生实验技能训练的开端。进入 21 世纪以来,随着实验教学改革的不断深入,普通物理实验课程在实验技术、实验内容方面都在不断地更新变化。为了提高学生的科学素养,培养学生的创新能力,普通物理实验既要使学生得到基本的实验技能训练,又要使学生在综合能力方面得到提高。这就要求普通物理实验的教学内容必须兼顾基础、综合与设计。

根据国家教委高校教材编写的最新要求,为适应当前对学生能力培养的需求,本书总结和吸收了多年来高校物理实验课程建设的实践经验,体系更加完善和合理。本书绪论对课程的地位、作用和实施过程作了较为详细的阐述;第 1 章为实验理论,首先系统地介绍了实验基础知识,包括误差理论、有效数字及其运算、实验不确定度、常用数据处理方法等,然后介绍了电磁学实验的基础知识;第 2 章是基础性物理实验,包括力热实验、电磁学实验和光学实验,都是一些学生必做的实验题目,多以验证性、结论性题目为主;第 3 章是提高性实验,通过基本知识、实验项目的学习,使学生在具有了一定实验技能的基础上对新实验的设计以及如何运用已有知识设计实验的过程有更加深入的了解,培养学生的创新思维和能力。

本书实验原理的叙述简洁明了,易于理解,特别突出实验内涵。实验步骤与要求紧密结合实验过程,使学生能够独立进行实验操作;结合教学实践,对实验操作中可能出现的问题作了特别强调,对数据处理单独提出了明确的要求;一些常用仪器作为实验拓展在相应的实验中作了专门介绍。

在实验内容的安排上,有的实验增加了必做内容和选做内容部分,由以往的“一刀切”转为分层次教学,以适应不同专业、不同层次学生的要求。

本教材由高允锋、罗涛、祁金刚担任主编,由韩飞、于立军、石浩辰、郭锦泉担任副主编。实验教学是一项集体工作,本书是物理学院全体教师和实验技术人员共同劳动的结晶。从实验内容的确定、实验项目的建设、实验教材的编写直到实验教学的完成,广大教师和技术人员提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 10 月

目 录

绪论	1
第 1 章 实验理论	6
1.1 测量结果的评定及数据处理	6
1.1.1 测量及其分类	6
1.1.2 误差及其分类	7
1.1.3 直接测量结果误差的估计	13
1.1.4 实验不确定度	18
1.1.5 间接测量结果误差的估计	20
1.1.6 有效数字及其运算	27
1.1.7 实验数据处理的常用方法	30
1.2 电磁学实验基础知识	37
1.2.1 电磁测量的方法	38
1.2.2 电磁学实验中常用仪器简介	42
1.2.3 电磁学实验操作规程	49
第 2 章 基础性物理实验	51
实验 2.1 长度测量	51
实验 2.2 固体和液体密度的测量	56
实验 2.3 牛顿第二定律的验证	60
实验 2.4 示波器的使用	64
实验 2.5 磁场的描绘	70
实验 2.6 电表的使用	75
实验 2.7 用牛顿环干涉测透镜曲率半径	77
实验 2.8 平行光管的调整及使用	81
实验 2.9 用掠射法测定透明介质的折射率	85

第 3 章 提高性物理实验	91
实验 3.1 单摆	91
实验 3.2 液体表面张力系数的测量	95
实验 3.3 动量守恒定律的验证	97
实验 3.4 利用转动惯量实验仪测定转动惯量	100
实验 3.5 用电热法测定水的比热容	103
实验 3.6 液体粘滞系数的测定——落球法	106
实验 3.7 杨氏模量的测定——伸长法	109
实验 3.8 二极管伏安特性曲线的研究	113
实验 3.9 电子束线的偏转	118
实验 3.10 磁滞回线和磁化曲线测定	122
实验 3.11 RLC 电路稳态特性的研究	126
实验 3.12 RLC 电路谐振特性的研究	131
实验 3.13 地磁场的测量	133
实验 3.14 霍耳效应	137
实验 3.15 薄透镜焦距的测定	141
实验 3.16 分光计的调整和使用	144
实验 3.17 用双棱镜干涉测钠光波长	152
实验 3.18 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	155
实验 3.19 用旋光仪测定糖溶液的浓度	161
实验 3.20 棱镜玻璃折射率的测定	165
附录 A 物理常数表	170

绪 论

普通物理实验是一门独立开设的实验基础课,是理科各专业实验的重要基础。物理实验过程对培养学生用实验的方法分析问题、解决问题的能力起着重要的作用。教学中应着重在实验思想、实验方法、实验技能和数据处理 4 个方面对学生进行训练,从而能够培养具有独立工作能力和勇于创新的人才。实验是学生在教师指导下独立进行的,学生要主动自觉地在 4 个方面努力,为今后开展工作打下扎实的基础。

1. 物理实验课程的地位、作用和任务

物理学是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一。物理学的发展不仅在自身的学科体系内生长和发展出许多新的学科分支,而且还是许多新兴学科、交叉学科以及新技术产生、成长、发展的基础和前导。物理学是一门实验科学,无论是物理概念的产生还是物理规律的发现都是建立在严格的科学实验基础上的,同时建立起来的理论还必须通过实验来验证是否正确。因此,我们说物理实验在物理学的发展过程中占有重要的地位,起了重要的作用。在古代社会中就已经有了物理实验。我国元代赵友钦根据他所做的光学实验证明了光的直进性,还说明了光源的大小和强度、光源与不同直径小孔的距离、像与大小和亮度这三者的复杂关系。而古阿拉伯人伊本·海赛木则通过大量的光学实验认定光线在不同介质的界面上折射时,入射线、折射线和法线在同一平面上,同时正确指出人能看见物体是由于物体发出的光线进入人眼所致等。他的实验结果和解释为近代光学的研究奠定了基础。

在 15 世纪以前,物理实验基本上是对生产过程和自然过程的直接观察,是记录和整理生产经验和观测到的自然事实,专门以探索为目的的活动不多。真正把科学的实验方法引入物理学研究中来,从而使物理学走上真正科学道路的是 16 世纪意大利物理学家伽利略。为了彻底否定亚里士多德关于速度与外力成正比等错误的运动学理论,伽利略在做了著名的比萨斜塔实验后又做了斜面实验。在设计思想巧妙的斜面实验中,他把难以直接测量的速度和时间的关系转化为路程和时间的关系,并通过实验研究和数学推理得到了反映匀加速直线运动重要特性的时间平方定律,从而断定斜面运动是匀加速直线运动;在改变斜面倾斜度实验时获得同样的定律,推断出自由落体运动也应是匀加速运动,从而揭示出自由落体运动之谜。伽利略卓越的实验思想和实验方法结合数学的分析、归纳和演绎确立科学的定律,是他研究方法的精髓,也是他留给后人的宝贵财富。

在 16 世纪和 17 世纪,科学的实验方法已初步形成,但许多实验主要是以隔离某些因素、排除外部干扰来进行的,而不是以强化和激化自然过程为主,到了 19 世纪这种实验方法才得到充分发展。现举电磁学的发展来说明。实验证明了摩擦能生电、莱顿瓶能储存电。18 世纪 80 年代法国物理学家库仑在卡文迪许等人实验的基础上对静电现象进行定量的测量,确立了静电学的基本定律——库仑定律,奠定了电磁学的基础。1800 年意大利教授伏打用锌片与铜片夹以盐水浸湿的纸片做成电堆进行实验,使人们第一次获得持续电流——伽伐尼电池,为电流研究准备了物质基础。在 19 世纪以前,人们普遍接受吉尔伯特的观点,认为电和磁是两种本质不同的现象。1820 年丹麦物理学家奥斯特在课堂演示时发现了电磁现象,以后通过实验证明了电流与磁之间的相互作用,冲破了电与磁无关的学说。同年法国物理学家安培通过实验证明了电流与电流之间的相互作用,提出了一切磁现象起源于电流的假说。与此同时,法国物理学家毕奥和萨伐尔通过实验总结出直线电流对磁针的作用力正比于电流强度、反比于距离的实验规律。全面研究电与磁的相互转化关系的是英国自学成才的物理学家法拉第。他经过连续 10 年的实验,在 1831 年实现了“磁性发电”的设想,并结合实验进行了定量计算,总结出了电磁感应定律。英国物理学家麦克斯韦发展了法拉第关于场的概念,系统总结了电学和磁学的新成就,提出了著名的电磁场理论。在这个理论中,他预言了电磁波的存在,并预见到光也是一种电磁波。麦克斯韦的电磁场理论把电、磁和光三个领域综合到一起,具有划时代意义。但这个预言一直到 20 年后德国物理学家赫兹在实验中发现了电磁波之后,才真正被人们所接受。

在现代物理学的发展中,物理实验起着更重要的作用。20 世纪物理学的革命首先是电子、X 射线和放射性,它们都是物理学家致力于实验研究的结果。在 19 世纪中叶,不少物理学家在低压气体放电管的实验研究中发现了阴极射线,并认为是一种电磁波。20 世纪末期,英国物理学家汤姆逊用不同的方法,对不同的阴极和气体产生的阴极射线进行荷质比的测量,都得到相近的结果,认为阴极射线是带电的微粒流,而不是一种电磁辐射,这个微粒就是电子。美国物理学家密立根在著名的油滴实验中得到了精确的电子电量,并证明了一个电子的电量 e 是电荷的基本单位。电子是人类认识的第一个基本粒子。

19 世纪末,德国物理学家伦琴在用真空放电管做实验时发现了另一种性质不同于阴极射线的射线——X 射线。X 射线的发现暗示人们在原子内部有着复杂的结构,宣布 20 世纪新的物理学时代即将到来。其实伦琴不是第一个看到 X 射线的人,而它之所以被伦琴发现在于他十分重视实验在科学研究中的作用。伦琴认为,“实验是最有力、最可靠的手段,能使我们揭示自然之谜。实验是判断假说应当保留还是放弃的最后鉴定。”这对我们是很有教益的。

继 X 射线之后,法国的贝克勒尔发现铀盐会自动放出一种新射线,1897 年居里夫妇发现了钷、钋和镭等元素也放出与 X 射线不同的射线,英国的物理学家卢瑟福在 1900 年前后通过实验发现了 α 、 β 和 γ 射线,并通过实验分别被证明为氦为正离子流、电子流和原子核内部的电磁波。这些射线就是放射性。电子、X 射线和放射性的发现以实验动摇了

关于原子不可分的观点,把物理学从经典物理阶段推进到现代物理阶段,科学实验也从只观测宏观现象进入到同时考察微观现象,使物理学进入一个新的领域。理论的正确与否是需要实验进行检验的。正确的就发展,错误的摒弃。在物理学发展史中这类例子很多,仅举光的波动、微粒说之争和爱因斯坦的相对论被人们接受的例子来说明。

在人们探索光的本质的过程中,出现了长达三个世纪的所谓“微粒说”和“波动说”之争。这个争端反映了唯物辩证法对立统一的规律。1666年牛顿提出了光的微粒说,同一时代另一名著名学者荷兰物理学家惠更斯于1678年提出了波动说,由于牛顿的声望和波动说的粗糙,微粒说占上风。1801年英国医生托马斯·杨做了双缝干涉实验,动摇了微粒说的统治地位,以后又通过菲涅耳等人的实验支持了波动说,在19世纪末,波动说占了绝对优势。在20世纪初,光电效应实验又揭示了光的粒子性。1923年康普顿在X射线散射实验中,发现了康普顿效应,证实并使人们认识到光的波粒二象性。

19世纪末到20世纪初,伟大的物理学家、科学巨匠爱因斯坦在物理实验和理论的基础上,天才地创立了具有划时代意义的广义相对论学说。这一学说提出后,当时很难被人们接受,一直到观测到水星近日点的进动、光谱线的红移和引力场会使光线弯曲等事实之后,才被人们广泛接受。

从上面的描述中,物理实验的重要性是显而易见的,当然在强调实验的重要性时,绝不意味着理论不重要。在物理学的发展中,理论和实验有着同样的重要性,任何轻视理论或实验的态度都是不对的。

物理理论和实验的发展哺育着近代高新技术的成长和发展。物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。物理实验课是学生进入大学后接受科学实验方法和实验技能训练的开端,本课程对学生进行物理实验理论、物理实验方法和物理实验技能方面的基本训练,使学生初步了解科学实验的主要过程和基本方法。它重点训练学生深入观察物理现象,建立合理的物理模型,定性定量研究变化规律,分析、判断实验结果,激发学生的想象力、创造力和创新意识,在培养和提高学生独立开展科学研究的素质和能力方面具有重要的奠基作用。

在物理学发展的过程中,实验物理形成了自己的一套理论、方法和技术,成为进行各类科学实验的基础。

本课程的具体任务如下。

(1) 初步培养学生进行科学实验的能力。

① 通过自行阅读实验教材或资料、组织实验,提高阅读和运用资料的能力。

② 通过实验熟悉常用仪器的原理、结构及使用方法,在进行具体测试中,提高获得准确实验结果的能力。

③ 通过对实验现象的观察、判断实验结果的数据处理及误差分析,提高理论联系实际的能力。

④ 通过在实验过程中发现问题、分析解决问题,拓宽学生视野,培养创新能力。

⑤ 通过正确记录及处理实验数据、撰写合格的实验报告,提高正确论述的表达能力。

(2) 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、一丝不苟的工作态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财物的优良品德。

(3) 通过实验加深对物理学理论的理解。

总之,通过每一个实验完成规定的测量任务、获取应有的数据是本课程的教学手段,而目的是培养和锻炼学生进行科学实验的能力并获取实验知识,提高实验技能。

2. 实验课的基本过程

任何实验过程都包括准备、观测与记录、写实验报告这三个步骤。

(1) 准备(预习)

实验前的预习是保证实验顺利进行并能取得最佳结果的重要步骤。

① 阅读实验教材有关内容及参考资料,弄清实验的目的、原理和使用的仪器,全面地了解测量的方法、实验的内容和注意事项,并能回答预习思考题中提出的问题。

② 写好预习报告。预习报告的主要内容是实验名称、目的、简要的实验原理(或主要的计算公式)、实验内容(要弄清哪些是已知量、控制量和待测量)、记录数据表格、遇到的问题及注意事项等。

每次实验前,教师要检查预习情况。

(2) 观测与记录

① 认真听讲:做实验前,教师要作简要的讲解,这对做好实验是很有益处的,要认真听讲。

② 实验操作:在操作前,先熟悉主要仪器,了解使用方法,然后进行安装调试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有关数据和出现的各种现象。有关数据中除了直接的测量数据外,还应当包括实验条件(如与实验结果有关的温度、湿度和气压等),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它的有效数字和单位。

测试结束后,原始数据记录经教师审阅认可后,方可整理仪器结束实验。

(3) 写实验报告

实验报告是对一次实验的总结,是学生巩固、提高和深化实验收获的过程。实验报告一律用统一规定的实验报告纸书写,字体要端正,字句要简练,字迹要清楚,图表要按规定要求格式绘制。

实验报告包括以下内容。

① 实验名称。

② 实验目的:不需写出所有目的,只写实验目的。

③ 实验原理:写出简要的原理及有关的计算公式(不需写出推导过程),如有必要的

图(电路图、光路图等),还要描绘出来。

④ 实验仪器:包括实验用的所有仪器、量具及材料的名称、型号和规格。

⑤ 实验数据:把测得的原始数据及必要的中间计算结果认真地填写在设计好的记录表格之中,不允许用有教师签字的那张原始数据纸代替实验报告的这部分内容。

⑥ 数据处理:按所讲述的数据处理方法处理数据,并按结果表达式写出实验结果。

⑦ 实验现象、误差等的分析、讨论以及对实验的建议、体会等。

⑧ 附上经教师审核签字的原始数据记录。

3. 实验课的基本要求

(1) 课前预习实验讲义,明确实验目的,了解实验原理,弄清实验步骤,初步了解仪器的使用方法,画好记录表格。未预习,不得动手做实验。

(2) 上课时,首先检查和熟悉仪器,根据操作规程正确安装和调整仪器,然后按实验程序进行实验。

(3) 实验时,一定要先观察欲研究的物理现象,在观察的基础上,再对被研究的现象进行定量测量。测量时,应如实、及时做好记录(记录要整洁,字迹清楚,避免错记)。不可事后凭回忆“追记”数据,更不可为拼凑数据而涂改原始记录。

(4) 测量完毕后,要及时整理实验数据,经指导教师检查签字后,方可结束实验。

(5) 实验完毕,应把实验仪器整理清点好,注意保持实验室的整洁,经指导教师同意,方能离开实验室。

(6) 严格遵守实验室规则,爱护实验仪器。仪器如有损坏,应及时报告教师。凡属学生责任事故者根据情节轻重,要赔偿部分或全部损失。

(7) 认真按时完成实验报告。

第 1 章 实验理论

1.1 测量结果的评定及数据处理

1.1.1 测量及其分类

1. 测量

在物理实验中,要用实验的方法研究各种物理规律,因此要定量地测量出有关物理量的大小。例如,测出一摆线长为 0.9867 m ,某物体质量为 6.87 g ,某电路的电流强度为 1.56 A ,某地的重力加速度为 $9.796\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,电子电荷为 $1.6021917\times 10^{-19}\text{ C}$ 等。所谓测量,就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来,即待测量是该计量单位的多少倍。

2. 直接测量和间接测量

按测量方式的不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。

(1) 直接测量

直接测量(direct measurement,又称简单测量)是指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) 间接测量

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(indirect measurement,又称复合测量),相应的被测量称为间接测量量。例如,在用单摆(simple pendulum)测量重力加速度时,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,用伏安法测量电阻时,电流、电压是直接测量量,电阻是间接测量

量;用欧姆表测量电阻时,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。

(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作的重复测量。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进行相同次数的重复测量。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、绝对不变是难以做到的,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。

(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。

1.1.2 误差及其分类

1. 误差的定义

每一个物理量都是客观存在的,在一定的条件下具有不依人的意志为转移的固定大小,这个客观大小称为该物理量的真值(true value)。进行测量是想要获得待测量的真值。但是测量是依据一定的理论或方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的。而由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的,测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差,这种偏差就称为测量值的误差(error)。

设被测量的真值为 x_0 ,测得值为 x ,误差为 ϵ ,则

$$x - x_0 = \epsilon \quad (1-1-1)$$

误差可正,也可负,它反映了测量值偏离真值的程度。误差越小,两者越接近。所以,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。

测量所得的一切数据毫无例外都包含一定量的误差,因而没有误差的测量结果是不存在的。在误差必然存在的情况下,测量的任务是:①设法将测得值中的误差减至最小;②求出在测量的条件下,被测量的最近真值(最佳值);③估计最近真值的可靠程度(接近真值的程度)。为此必须研究误差的性质、来源,以便采取适当的措施,得到最好的结果。

2. 误差的分类

按照对测得值影响的性质,误差可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三类。实验数据中,三类误差是混杂在一起出现的,但必须分别讨论其规律,以便采取相应的措施减少误差。

(1) 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观测人不变)多次测量同一量时,符号和绝对值保持不变的误差,或按某一确定的规律变化的误差,称为系统误差(systematic error)。

例如,用天平称衡物体的质量时,由于砝码的标称质量(或名义质量,即标刻在砝码上的质量数值)不准引入的误差、由于天平臂不等长引入的误差和由于空气浮力的影响引入的误差在多次反复称衡同一物体的质量时是恒定不变的,这就是系统误差。又如,在一电路中电池的电压随放电时间的延长而降低时,将给电路中电流强度的测量引入系统误差。前一类叫恒定系统误差,后一类叫可变系统误差。可变系统误差按其变化规律又可分为线性系统误差、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。实验者根据误差产生的原因、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。

① 系统误差的来源

实验中的系统误差主要来源于以下几个方面。

- 仪器误差:所用量具或装置不完善而产生的误差。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。
- 理论误差(方法误差):由于实验方法本身或理论不完善导致的误差。理论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 $\theta=0^\circ$ 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。
- 装置误差:由于对测量装置和电路布置、安装、调整不当而产生的误差。
- 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。例如 20°C 时标定的标准电池在 30°C 时使用。

- 人身误差: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,读数时头总是偏向一边。

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矛盾。因此这是实验者应努力去解决的问题。

② 系统误差的发现与消除

实际测量中,许多情况下系统误差往往对测量结果起主要影响作用。因此,寻找系统误差并设法消除或减小它的影响是提高测量准确度的关键。从理论上讲,系统误差具有确定的规律,但它可能隐含在测量过程的每一步之中,当测量仪器较复杂时,各测量装置的相互干扰也会产生附加系统误差。所以,系统误差的处理是较困难的,必须对实验过程的每一步进行分析,一般与实验者的经验、学识和技巧有着密切的关系,因此,在物理实验的学习过程中,一定要注意这方面知识的积累。下面就简单介绍常用的发现和消除系统误差的方法。

a. 发现系统误差的方法

- 理论分析的方法

在测量之前,首先对实验原理、测量方法和仪器进行系统、全面的分析。

➤ 注意测量公式成立的条件

测量公式是进行实验的依据,所以测量的每一步必须满足公式的条件。在实验中,往往花费较长的时间调节仪器,通常都是为了达到计算公式的要求。否则,将不满足公式条件时测量的数据带入计算,肯定得不到正确的结果。例如,利用成像法测量透镜焦距的实验中,首先必须进行共轴等高调节,其目的是为了满足不同成像公式成立的条件:旁轴近似;用单摆测重力加速度时,公式 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 只有在摆角 $\theta < 5^\circ$ 时才近似成立,所以测量过程中该条件必须满足。

在伏安法测电阻的实验中,电流表内接和外接均会产生系统误差,通过分析可知,内接产生正的系统误差,外接产生负的系统误差;当待测电阻、电流表内阻、电压表内阻三者满足一定条件时,可使系统误差减小;当电流表内阻和电压表内阻已知时可修正系统误差。

➤ 注意仪器的使用条件

任何仪器都有各自的使用状态和环境条件,必须达到这些条件才能得到正确的结果。使用状态由实验者按照仪器的规定调节,如必须调节天平水平和平衡后才能进行称量。而环境条件应满足仪器的要求,当不满足时,应进行修正,如标准电池标明 20°C 时的电动势,当夏天或冬天使用时,必须测出环境温度,并按公式修正。

在实验教学中,经常发现一些同学只注重结果(测出数据),而忽略了实验过程(仪器

调节等环节),往往得到的数据是非正常状态的产物。这只能说完成了任务,但没达到真正的教学要求。测数据只是手段,而非目的,只有重视全过程,才能真正提高动手能力、分析问题和解决问题的能力。

- 实验对比的方法

对比法是对可能产生系统误差的诸因素进行不同条件的测量,以发现系统误差的存在。

- 实验方法的对比

用不同的方法测量同一个物理量,在随机误差允许的范围内对比两个结果,如不一致,则表明至少一种方法存在系统误差。

- 仪器对比

对同一个待测物理量,用不同精度的仪器测量。例如,用两个电流表同时接入同一电路,若它们的读数不同,则说明一个表存在系统误差。当一个表是标准表时,则可以找到另一个表的修正值。

- 测量条件对比

在测量中,常常使测量过程按正、反两个方向进行。例如,测物体的变形时,通过加砝码和减砝码两个过程,可以发现物体是否是完全的弹性变形。天平调节平衡后,将物和砝码对调,若天平不再平衡,则说明存在不等臂系统误差。同一条件下,使冲击电流计左偏和右偏,则可发现冲击电流计偏转不对称的系统误差。

- 人员对比

其他条件均不变的情况下,不同人员测量可以发现人员误差。

- 数据分析的方法

将同一条件下的多次测量数据按测量顺序排列,观察其变化,当数据呈现规律性的变化时,表明存在系统误差。

b. 系统误差的消除方法

系统误差的消除必须以它的产生原因为依据。首先在实验中必须满足测量公式成立的条件,同时调节仪器达到正确的测量状态,并满足对环境条件的要求。对于一些已定系统误差,可以采用特殊的测量方法或仪器的特殊设计来消除。

- 替代法

在相同的测量条件下,用已知量(可变的标准器)替代待测量,调节已知量使替代前后产生的测量状态完全相同,则已知量的大小为待测量的值。例如,用天平测质量时,在右盘放待测物,左盘放中介物(一般用干净细砂),改变中介物的量使天平平衡。去掉右盘的待测物,用砝码(已知量)替代,增减砝码使天平再次平衡,则砝码质量为待测物的质量。这种测量方法可以消除天平的不等臂系统误差。再如,将待测电阻 R_x 接入电路后使回路有一确定的电流 I ,去掉待测电阻,代之以一电阻箱,在电路状态不变的条件下,调节电

阻箱使回路中的电流再次为 I , 则电阻箱的示值即为待测电阻值 R_x , 该方法也可以消除伏安法测电阻时的接表误差。

• 交换法

交换待测物的测量位置, 使产生的系统误差对两次测量值的影响相反, 从而抵消系统误差。例如, 天平的交换测量可以消除不等臂系统误差; 在电桥实验中, 交换待测电阻和比较电阻的位置, 可以消除由于比例臂电阻不准及接线不对称所产生的系统误差。

• 异号法

在测量中使已定系统误差改变符号, 取平均值即可消除系统误差。例如, 霍耳效应测磁场的实验中, 使通过霍耳片的工作电流大小不变, 方向相反, 将两次测量值平均, 即可消除不等位电势。在冲击电流计实验中, 改变电流方向, 使电流计向左、右两个方向偏转, 将两次测量值平均, 即可消除零位漂移及偏转不对称引起的系统误差。

(2) 偶然误差

在同一条件下多次测量同一物理量时, 测得值总是有稍许差异而且变化不定, 并在消除系统误差之后依然如此, 这部分绝对值和符号经常变化的误差, 称为偶然误差 (stochastic error, 又称随机误差)。

偶然误差是由测量过程中的一些随机的或不确定的因素引起的。产生偶然误差的原因很多, 比如观测时目的物对得不准, 平衡点确定得不准, 读数不准确, 实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压的起伏而引起的微小变化, 振动的影响等。这些因素的影响一般是微小的, 并且是混杂出现的, 因此难以确定某个因素产生的具体影响的大小, 所以对待偶然误差不能像对待系统误差那样找出原因加以排除。

大多数偶然误差的变化是均匀的、微小的和随机的。可以证明, 这种偶然误差服从的统计规律是高斯分布, 如图 1-1-1 所示。其中横坐标 ϵ 表示误差, 纵坐标 $f(\epsilon)$ 表示的误差值为 ϵ 附近单位误差间隔内, 误差值 ϵ 的出现概率。根据这个误差分布图, 可以看出偶然误差具有下列三个性质。

①单峰性: 绝对值小的误差出现的概率大。

②有界性: 在测量条件一定的情况下, 大的误差出现的概率小, 且不超过一定的限度。

③对称性: 绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

设 n 次测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 x_0 , 则

$$(x_1 - x_0) + (x_2 - x_0) + \dots + (x_n - x_0) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

将上式展开整理后, 分别除以 n , 得出

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - x_0 = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

它表示平均值的误差等于各测量值误差的平均, 由于测量值的误差有正有负, 相加后

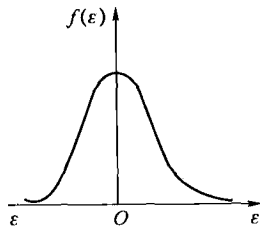


图 1-1-1