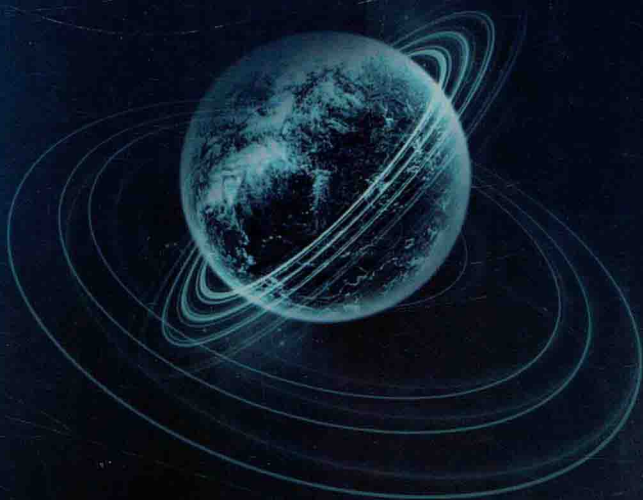


广东省特色专业和教学团队建设丛书

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主 编 李固强 刘贵昂 梁 枫



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

广东省特色专业 and 教学团队建设丛书

大学物理实验

主 编 李固强 刘贵昂 梁 枫

北京邮电大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

全书除了绪论部分以外,还包含四章内容和附录。绪论部分介绍了物理实验的特点和重要性,以及物理实验课程的教学目标、任务和要求;第一章为误差理论和数据处理基本方法;第二至第四章分别为力热学、电磁学和光学实验项目,在第三、第四章的前面部分还分别介绍了一些实验基本知识和方法。为了拓展学生知识、提高学生应对和解决问题的能力,在大部分项目中编入了注意事项、自主学习、实验设计与探究以及思考题等内容,这是本书的特点之一。在部分项目中编入的“知识链接与延伸”则是本书的亮点与特色。书末附录列出了1901—2015年诺贝尔物理学奖目录。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李固强, 刘贵昂, 梁枫主编. --北京: 北京邮电大学出版社, 2016.6(2017.6重印)

ISBN 978-7-5635-4728-9

I. ①大… II. ①李… ②刘… ③梁… 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(2016)第 067738 号

书 名	大学物理实验
主 编	李固强 刘贵昂 梁 枫
责任编辑	韩 霞
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(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×960 mm 1/16
印 张	13
字 数	267 千字
版 次	2016 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-5635-4728-9

定价: 35.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据国家教委颁发的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》，结合物理实验室常用仪器设备的实际情况，在总结多年教学实践的基础上编写而成。

全书除了绪论部分以外，还包含四章内容。绪论部分介绍了物理实验的特点和重要性，以及物理实验课程的目标、任务和要求等。第一章为误差理论和数据处理基本方法。第二至第四章分别为力热学、电磁学和光学实验项目，其中个别项目为综合性实验或仿真实验。在第三、第四章的前面部分还分别介绍了一些实验基本知识和方法。

在编写过程中力求做到：实验目的明确具体，实验原理言简意赅，实验内容和步骤细致详尽，实验图表清晰好用。为了拓展学生知识、提高学生应对和解决问题的能力，在大部分项目中编入了注意事项、自主学习、实验设计与探究以及思考题等内容，这是本书的特点之一；在部分项目中编入的“知识链接与延伸”则是本书的亮点与特色。

本教材由李固强、刘贵昂、梁枫主编。本书编入的实验项目汇聚了岭南师范学院（原湛江师范学院）物理系所有教师和实验员多年的教学经验和体会，也包含着所有曾在物理系和物理实验室工作过的同志的贡献。

编 者

目 录

绪 论	1
第一章 测量与数据处理	7
§ 1 测量	7
§ 2 误差与误差处理	9
§ 3 有效数字及其运算	21
§ 4 数据处理方法	25
§ 5 物理实验方法	30
第二章 力热学实验	41
实验一 长度测量	41
1.1 游标卡尺和螺旋测微计	41
1.2 读数显微镜的使用	47
实验二 物理天平的使用和物体密度的测量	51
实验三 摆动的研究	56
3.1 单摆与重力加速度的测量	56
3.2 复摆与重力加速度的测量	61
3.3 三线摆与转动惯量的测量	64
实验四 拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量	68
实验五 落球法测量液体的黏滞系数	73
实验六 落体运动与重力加速度的测量	76
实验七 碰撞规律的研究	80
第三章 电磁学实验	85
§ 1 电磁测量方法	85
§ 2 电磁学实验中的常用仪器	89
§ 3 电磁学实验操作规程	100
实验一 伏安法和电阻元件伏安特性的研究	102
1.1 纯电阻的测量	102
1.2 二极管伏安特性的研究	105
实验二 电表的改装和多用表的使用	109

2.1 电表的改装与校准	109
2.2 多用电表的使用	115
实验三 惠斯通电桥测量电阻	119
实验四 示波器的使用	123
实验五 霍尔效应的研究与应用	134
实验六 用电位差计测量电池电动势及内阻	139
6.1 滑线式电位差计测量电池电动势和内阻	139
6.2 用箱式电位差计校准电表	142
实验七 螺线管磁场的测量(计算机仿真)	148
第四章 光学实验	152
§1 光学实验的内容和特点	152
§2 光学实验的观测方法	154
§3 光学仪器的使用与维护	156
实验一 薄透镜焦距的测定	158
实验二 透明介质折射率的测定	167
实验三 分光计调节及棱镜折射率的测定	178
实验四 牛顿环干涉测透镜曲率半径	191
附录 1901—2015 年诺贝尔物理学奖目录	197

绪 论

一、物理实验在物理学发展史上的重要性

物理学是自然科学的基础,是当代科学技术的前沿,它的发展与突破总是标志着人类征服自然界的新的里程碑。物理学是建立在实验基础上的实验科学。无论是物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过科学实验来证实。整个物理学的发展过程经历了积累和变革的交替发展过程,不论在哪一个阶段,物理实验都起着重要的作用。16 世纪意大利物理学家伽利略首先把科学实验方法引入到物理学研究中来,从而使物理学走上真正的科学道路。在他所设计的斜面实验中,有意识地忽略了空气阻力,以便抓住主要问题:改变斜面倾角(变更实验条件),观测实验结果的变化。在此基础上,他还运用推理概括的方法,得出了超越实验本身的更为普遍的规律:物体在光滑水平面上的运动是等速直线运动;各种物体沿铅直方向自由下落均作等加速直线运动,且具有相同的加速度。伽利略的这种丰富的实验思想和实验方法对当今的物理实验仍有着重要的启示。17 世纪,牛顿正是在伽利略、开普勒工作的基础上,建立了完整的经典力学理论。电磁学研究的真正开创人是卡文迪许和库仑,他们用自己试制出的各种测量仪器对静电现象进行定量测量,在 1785 年总结出了电磁理论的基础——库仑定律。电与磁之间相互联系的突破性实验是奥斯特在 1820 年发现的,他在一次课堂教学中,观察到通电导线会引起附近小磁针的偏转,这个实验轰动了整个欧洲。接着安培设计研究了通电导线之间的相互作用,并在 1822 年建立了安培定律。既然电能产生磁,磁能否产生电呢?理所当然是当时很多科学家的研究课题。其中法拉第进行了十年之久的实验研究,终于在 1831 年首次发现了电磁感应现象,总结出了电磁感应定律,并建立了场的概念。麦克斯韦将电磁现象统一成完整的电磁场理论,且预言了电磁波的存在,并指出光也是一种电磁波,这是物理学史上一次重大的变革。但这只是一种假说,问题的焦点又回到了实验。1878 年夏季在柏林大学任教的亥姆霍兹向他的学生们提出一个物理竞赛题,希望有人用实验来验证电磁波的存在。这一实验课题终于由他的学生赫兹在九年之后完成了,使电磁场理论的地位得以确立。

物理学中的任何理论都必须由实验来验证,正确的就会得到发展,错误的就会被摒弃。如在对光的本性的认识中,牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说进行了长期争论,最后托马斯·杨在 1800 年发表了双缝干涉实验,才使波动说得以确认。由于光电效应实验揭示了光的粒子性,人们又认识到光具有波粒二象性。19 世纪初,多数物理学家对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的,因此假设宇宙空间存在着一种称之为“以太”的媒质,它具有许多异常而又不合理的特性。正是在这种情况下,1887 年迈克耳孙和莫雷合作,用干涉仪进行了有名的“以太风”实验,从而否定了“以太”的存在。在物理学发展过程中,常常出现由于旧理论不能解释新的实验现象,从而促使新理论的诞生。比如,19 世纪以来,对黑体辐射、电磁波能量的测量,人们就找不到适当理论来解释,直到普朗克提出量子化的观点,圆满地解释了实验结果,这就是量子理论的开端。又如赫兹在电磁波存在的实验中,还发现了光电效应现象,电磁波理论却不能解释它,这就促使爱因斯坦提出了光量子假说。当代获得诺贝尔物理学奖的成果均是物理学中划时代的、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余年的历史,有近 150 名获奖者。其中因物理实验方面的伟大发现或发明而获奖的占三分之二以上。如 1901 年,首届诺贝尔物理学奖得主德国人伦琴因发现 X 射线而获奖。著名的美籍华人杨振宁、李政道于 1956 年发现在弱相互作用下没有任何实验能说明宇称守恒,这一学说当时震惊了世界物理学界。以世界著名的物理大师朗道、泡里为代表的反对派公开反对这一学说,然而另一位美籍华人吴健雄率领的课题组于 1956 年完成的 C^{60} 衰变实验结果显示:弱相互作用下宇称不守恒。从而杨振宁和李政道于第二年即 1957 年获得诺贝尔物理学奖,而爱因斯坦的具有划时代意义的相对论却没有获得这次诺贝尔奖。究其根本原因是当时这一理论缺乏实验支持。随着实验技术的提高和完善,经过 1959 年“光谱线的引力红移”实验及 1964 年“雷达回波延迟”实验的完成,相对论才最终被人们接受。伟大的物理学家爱因斯坦在 1921 年因光电效应定律的发现而获得诺贝尔物理学奖。这些历史事实雄辩地说明了物理实验结果在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中所占的重要地位和所起的关键作用。可以毫不夸张地说,没有物理实验就没有物理学的发展。正是由于实验手段的不断进步、仪器精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等,才使得人类在认识自然界的历程中不断探索、发现,进而攀登上更高的高峰。

现在,物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在从物理学中不断分化出的新分支(如粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子体物理等),以及从物理学和其他学科的交叉中生长出来的众多交叉学科(如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等)和各自然科学领域,是推动科学技术发展的有力工具。计量、激光、半导体、大规模集成电路、电子学、真空等技术无一不与物理实验有着直接或间接的联系。因有赫兹的电磁波实验,才导致了马可尼和波波夫无线电的发明;没有 1909 年卢瑟福的 α 粒子散射实验,就不可能有 40 年后核能的利用;单一波长激光器的

问世带来巨大的技术变革;半导体的实验结果引起大规模集成电路和计算机技术的出现;霍尔效应的实验结果产生大量以此效应为基础的新元件和新产品。当然,强调实验的重要性,绝不意味着轻视理论。特别是物理学发展到现在,用已经确立的理论来指导实验向新的未来领域探索,就显得更加重要。比如,只有1917年爱因斯坦提出了受激发射理论,才可能有1960年第一台激光器的诞生。又如1895年伦琴在实验中发现了新的电磁辐射,被称为X射线,X射线的发现进一步推动了气体中电传导的研究。汤姆孙提出了被X射线照射的气体具有导电性是由于气体因分子电离而带有电荷,这给洛伦兹创立电子论提供了实验基础;而电子理论又给Zeeman效应,即光谱线在磁场中会分裂这一事实以理论解释。这一连串的事实展示了物理实验和理论之间的密切关系和相互激励而共同推进物理学发展的进程。因此任何轻视实验或轻视理论的想法都是错误的。

二、物理实验课的教学目的和任务

普通物理实验是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程,是学生进入大学后受到系统的实验方法和实验技能训练的开端,是理工等各专业学生学习后续实验课程的重要基础。

本课程的教学目的和任务如下。

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对某些物理量的测量,学习和掌握基本的物理实验方法,加深对物理原理的理解。

(2) 培养学生科学实验的能力、分析判断能力和创新能力。

- ① 能够通过阅读教材、对照仪器阅读使用说明书,独立做好实验前的准备工作;
- ② 能够对实验现象作出初步的分析判断;
- ③ 能够正确记录和处理实验数据、绘制图线、说明结果,撰写出有见解的实验报告;
- ④ 能够完成简单的设计性实验。

(3) 培养与提高学生的科学素质,即严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度、遵守纪律及爱护公共财产的优良品德、主动探索和勇于创新的开拓精神。

三、物理实验课的基本教学环节和要求

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动。实验课的教学安排不可能像书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行,教学方式主要是学生自己动手完成实验规定的任务,教师只是在关键的地方给予提示和指导。因此学习物理实验就要求学生花比较多的工夫,作较强的独立工作能力训练。学好物理实验课的关键,在于把握住下列三个基本教学环节。

1. 实验预习

预习至关重要,它决定着实验取得主动和收获的大小。为此,学生在实验前必须了解实验的全貌。要认真阅读实验教材,明确该实验的目的要求、实验原理、待测物理量及其测量方法;并对所用仪器的构造原理、操作方法和注意事项做到心中有数。在此基础上书写预习报告。预习报告的内容主要包括以下几方面:实验名称、实验目的、原理摘要(包括主要原理公式、各物理量的物理含义和有关测量条件,电磁学实验应绘出电路原理图、光学实验应绘出光路图等)、主要仪器设备、实验步骤、数据记录表格。上课时,指导教师检查学生的预习情况,对于没有预习和未完成预习报告的学生,指导教师有权停止该生本次实验。

2. 实验操作

实验操作是实验的主要内容。学生进入实验室后首先对所使用的仪器设备进行检查,看其是否完备、齐全,如有问题,应向指导教师提出解决;并将主要仪器的名称、型号、规格和编号记录下来。实验时应遵守实验室规章制度,仔细阅读仪器说明书或有关仪器使用的注意事项,在教师指导下正确地组装和调试仪器;不要盲目操作、急于求成。实验时要先观察实验现象后进行精确测量。做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时,要做到正确读数,用钢笔或圆珠笔将原始数据如实记录在事先准备好的表格中。原始数据要做到整洁而有条理,以便于计算和复核。如确实记错,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值,使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和不确定度时参考。实验中遇到故障时要积极思考,在教师指导下学习排除故障的方法。实验结束前,将实验数据提交教师审阅、认可签字后,才可整理还原仪器并离开实验室。

3. 实验报告

实验后要对实验数据及时处理并撰写出一份简洁明了、工整、有见解的实验报告。其目的是为了培养和训练学生书面形式总结工作或报告科学成果的能力。撰写实验报告是物理实验基本功训练的重要组成部分。实验报告应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。报告应给人以清晰的思路、见解和新的启迪。一般要用统一的实验报告纸书写,除填写实验名称、日期、姓名等项外,一般还包括以下几个部分:实验目的、实验原理(在理解实验原理的基础上,用自己的语言简要叙述有关物理内容。一般应写出测量中所依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件。必要时画出电路图或光路图)、主要仪器设备、实验步骤(根据实际的实验过程写明关键步骤和安全注意要点)、实验数据与数据处理(以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。数据处理是对原始数据整理的过程,数据处理过程包括计算、作图、不确定度分析等。计算要有计算式,代入的数据都要有根据,既让别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则,图线要规矩、美观。最后给出实验结果)、小结或讨论(内容不限,可以是对实验中观察到的现象进行分析,对结果和误差原因进行分析,对实验中的关键问题或感兴

趣的问题的研究讨论,也可解答思考题,提出收获或建议等)。

四、怎样学好、做好物理实验

物理实验是一门实践性课程,学生通过自己独立的实验实践来增长知识和提高能力。

1. 要注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的实验方法和测量技术在实际工作中会经常遇到,并且是复杂方法和技术的基础。学习时不但要搞清它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和掌握它们,且能运用这些方法和技术设计一些简单的实验。任何实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分,有了积累才能有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

2. 要有意识地培养良好的实验习惯

学生进入实验室要遵守实验室操作规程和安全规则。在开始做实验之前,应当先认真阅读实验教材和有关仪器资料,这样学生才有可能对将要做的实验工作有具体而清楚的了解;在实验过程中要求认真并重视观察实验现象,一丝不苟地记录实验数据。要求记录数据要原始、完整、全面、清楚,要有必要的说明注释等。这样,学生才有可能在需要时随时查阅这些记录,从而在处理数据、分析结果时,有足够的 firsthand 资料。在实验过程中,注意记录实验的环境条件(如室温、气压、湿度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。需要两人合作时,要密切配合。良好的习惯需要经过很多次实验后的总结、反思和回顾以后才能形成。而良好的实验习惯,对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验的过程中有意识地去锻炼自己才行。

3. 要注意养成善于分析的习惯

实验中要善于捕捉和分析实验现象,力争独立排除实验中各种可能出现的故障,并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。例如,实验数据是否合理、正确?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多大误差?实验环境、条件的影响又将如何?为了帮助初学者克服实验经验少、还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况,物理实验课往往在实验教材中安排少数已有十分确切理论结论的实验项目,使初学者便于判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了就高兴,一旦有所差别,就大失所望,抱

怨仪器或装置不好,甚至拼凑数据,这些表现都是不正确的,是违背科学的。事实上,任何理论公式和结论都是经过一定的理论上的抽象并被简化了的,而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多,实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有,问题是差异有多大?是否合理?不论实验结果或数据的好坏,都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先要检查自己的操作和读数,注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误,那么毛病可能出现在仪器和装置本身。小的故障、小的毛病,实验者应力求自己动手去排除。能否发现仪器装置的故障,能否及时迅速修复,正是一个人实验能力强弱的重要表现,初学者应要求自己逐步提高这方面的能力。

4. 要注意创新能力的培养

教学实验虽然是经过安排设计的,但每个实验的内容都是有弹性的,首先应完成基本内容,这既是基础,也是重点。完成基本内容后,如果时间许可,可以根据具体实验条件或创造实验条件,进一步完成其他内容。尝试去分析实验可能存在的一些问题,如使用仪器的精度、可靠性、实验条件是否已被满足?怎样给予证实?或进一步提出改进实验的建议,试做一些新的实验内容等,从而提高创新意识、增强创新能力。

第一章 测量与数据处理

§ 1 测 量

一、测量和单位

一切描述物质状态与物质运动的量都是物理量。这些量都只有通过测量才能确定其结果。物理量的测量是物理实验的基本操作过程,其实质是借助一定的实验器具,通过一定的实验方法,直接或间接地将待测物理量与选作计量标准的同类物理量作定量比较。测量的结果应包括数值(度量的倍数)、单位(计量标准)以及结果可信赖的程度(用不确定度来表示)。物理量的计量标准单位采用中华人民共和国法定计量单位,即国际单位制。国际单位制是 1971 年第十四届国际计量大会确定的,它规定了七个基本单位:长度——米(m)、质量——千克(kg)、时间——秒(s)、电流——安培(A)、热力学温度——开尔文(K)、物质的量——摩尔(mol)和发光强度——坎德拉(cd),还规定了两个辅助单位:平面角——弧度(rad)和立体角——球面度(sr)。其他一切物理量的单位都可以由这些基本单位和辅助单位导出,如体积单位(m^3)、密度单位(kg/m^3)等,统称为国际单位制的导出单位。

二、直接测量和间接测量

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是指将待测物理量直接与计量标准(量具或仪表)进行比较,直接得到数据的方法;相应的物理量称为直接测量量。例如,用米尺测量长度,用天平测量质量,用欧姆表测量电阻等。直接测量是测量的基础。直接测量按测量次数分为单次测量和多次测量。

单次测量:只测量一次的测量称为单次测量。主要用于测量精度要求不高、测量比较困难或测量过程带来的误差远远大于仪器误差的测量中。如在测杨氏弹性模量实验中,测钢丝长度可用单次测量。

多次测量:测量次数超过一次的测量称为多次测量。多次测量分为等精度测量和不等精度测量。

有些物理量不能用仪器或量具直接测得,而需先通过与待测量相关的一个或几个物理量的直接测量,再依据它们之间的函数关系计算出待测物理量,这种测量称为间接测量;相应的物理量就是间接测量量。例如,先直接测得圆柱体的高 H 和直径 D ,再根据 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算出体积,圆柱体体积的测量就是间接测量,圆柱体体积就是间接测量量。

值得注意的是:有的物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于使用的仪器和测量方法。随着测量技术的发展,用于直接测量的仪器越来越多。但在物理实验中,有许多物理量仍需要间接测量。

三、等精度测量与不等精度测量

如果对某物理量进行多次重复测量,而每次的测量条件都相同(同一观测者,用同一组仪器、同一方法、在同一环境下),测得一组数据分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。尽管各测量值可能不相等,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,只能认为每次测量的可靠程度都相同,这些测量称为等精度测量;相应的这组测量值称为等精度测量列(简称测量列)。在所有的测量条件中,只要有一个发生变化,这时所进行的测量即为不等精度测量。实际上,一切物质都在运动中,没有绝对不变的人和事物,只要其变化对实验的影响很小甚至可以忽略,就可以认为是等精度测量。以后说到对一个物理量的多次测量,如无另加说明,都是指等精度测量,应尽可能保持等精度测量条件不变。

§2 误差与误差处理

一、真值与误差

任何一个物理量,在一定的条件下,都具有确定的量值,这是客观存在的,这个客观存在的量值称为该物理量的真值。测量的目的就是要力图得到被测量物理量的真值。我们把测量值与真值之差称为测量的绝对误差。设被测量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 则绝对误差 ϵ 为

$$\epsilon = x - x_0 \quad (1-2-1)$$

由于误差不可避免,所以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。

二、最佳值与偏差

在实际测量中,为了减少误差,常常对物理量 x 作 n 次等精度测量,得到包含 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的一个测量列。由于是等精度测量,我们无法断定哪个值更可靠。上述各测量值的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-2)$$

根据概率论知识可以证明,算术平均值比任一个测量值的可靠性都要高,是最可以信赖的,称为最佳值,也称期望值。我们把测量值与算术平均值之差称为偏差,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-2-3)$$

三、误差分类

测量误差按其产生的原因和性质可分为系统误差和偶然误差两类,它们对测量结果的影响不同,对这两类误差的处理方法也不同。

1. 系统误差

在同样条件下,对同一物理量进行多次测量,其误差的大小和符号保持不变或随着测

量条件的变化而有规律地变化,这类误差称为系统误差。它的来源主要有以下几个方面。

1) 方法误差

这是由于实验方法或理论不完善而导致的。例如,采用伏安法测电阻时,电表的内阻产生的误差。采用单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测量周期时,摆角不能趋于零而引起的误差,这些都是方法误差。

2) 仪器误差

这是由于仪器本身的固有缺陷或没有按规定条件调整到位而引起误差。例如,温度计的刻度不准,天平的两臂不等长,砝码标称质量不准确等。

3) 环境误差

这是由于周围环境(如温度、压力、湿度、电磁场等)与实验要求不一致而引起的误差。例如,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下校准的仪器拿到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中使用。

4) 人身误差

这是由于观测人员生理或心理特点所造成的误差。例如,记录某一信号时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特征是具有确定性。对于实验者来说,系统误差的规律及其产生原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差;对于大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正。而后者一般难以作出修正,只能估计其取值范围。例如,仪器的示值误差(详见第 17 页)就属于未定系统误差。

2. 随机误差(偶然误差)

在同一条件下多次测量某一物理量时,即使消除了一切引起系统误差的因素,测量结果也仍然存在着误差,这种误差称为随机误差。

造成随机误差的因素是多方面的,如仪器性能和测量者感官分辨力的统计涨落,环境条件(温度、湿度、气压、气流、微震……)的微小波动,测量对象本身的不确定性(如气压、放射性物质单位时间内衰变的粒子数、小球直径或金属丝直径……),等等。

随机误差的特点是它的随机性,如果在同一条件下,对某一物理量进行多次测量,当测量次数足够大时,这些测量值将呈现出一定的统计规律性,也就是说随机误差服从一定的统计分布。

除系统误差和随机误差外,还有过失误差。凡是用测量时的客观条件不能解释为合理的那些明显歪曲测量结果的误差,均称为过失误差,也称粗差。过失误差是由于实验者操作不当或粗心大意造成的,如看错刻度、读错数字、记错单位或计算错误等。含有过失误差的测量结果称为“坏值”,被判定为坏值的测量结果应剔除不用。实验中的过失误差不属于正常测量的范畴,应该严格避免。

四、误差处理

1. 发现系统误差的方法

系统误差一般难以发现,并且不能通过多次测量来消除。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方法。

1) 理论分析法

分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方;检查理论公式所要求的条件是否得到了满足;量具和仪器是否存在缺陷;实验环境能否使仪器正常工作以及实验人员的心理和技术素质是否存在造成系统误差的因素等。例如,实际中由于电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于零,实验中就会产生系统误差。

2) 实验对比法

对同一待测物理量可以采用不同实验方法,使用不同实验仪器,以及由不同测量人员进行测量。对比、研究测量值变化的情况,可以发现系统误差的存在。

3) 数据分析法

因为偶然误差是遵从统计分布规律的,所以若测量结果不服从统计规律,则说明存在系统误差。我们可以按照测量列的先后次序,把偏差列表或作图,观察其数值变化的规律。比如,前后偏差的大小是递增或递减的;偏差的数值和符号有规律地变化;在某些测量条件下,偏差均为正号或负号,条件变化以后偏差又都变化为负号或正号等情况,都可以判断存在系统误差。

2. 减少与消除系统误差的方法

实际测量中,为提高测量准确度,可以采用一些有效的测量方法来减小或消除系统误差。

1) 交换法

根据系统误差产生的原因,在一次测量之后,把某些测量条件交换一下再次测量。例如,用天平两次称衡一物体质量时,第二次称衡将被测物与砝码交换。设两次称量结果分别为 m_1 、 m_2 ,则取 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 为最终称量结果,可以克服天平不等臂误差。

2) 替代法

在测量条件不变的情况下,先测得未知量,然后再用一已知标准量取代被测物理量,而不引起指示值的改变,于是被测量就等于这个标准量。例如,在电表改装实验中测量表头内阻时,通过单刀双掷开关分别对表头和电阻箱进行同等测量,调节电阻箱阻值,保持电路总电流相同,此时电阻箱的阻值就是被测表头内阻,这样就避免了测量仪器内阻引入的误差,如图 1-2-1 所示。