



普通高等院校规划教材

★ 李乐霞 张 晋 主编

大学物理实验

COLLEGE PHYSICS
EXPERIMENT

陕西师范大学出版总社有限公司



普通高等院校规划教材

大学物理实验

主 编 李乐霞 张 晋

副主编 邵江华

编 委 (以姓氏笔画为序)

马 磊 马正瑞 朱 琳 李乐霞

张 晋 邵江华 雍晓春 廖红梅



陕西师范大学出版总社有限公司

图书代号 JC13N0617

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李乐霞, 张晋主编. —西安: 陕西师范大学出版总社有限公司, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5613 - 7075 - 9

I. ①大… II. ①李… ②张… 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(2013)第 095035 号

大学物理实验

主 编 / 李乐霞 张 晋

责任编辑 / 田均利

责任校对 / 颜 红

封面设计 / 鼎新设计

出版发行 / 陕西师范大学出版总社有限公司

(西安市长安南路 199 号 邮编 710062)

网 址 / <http://www.snupg.com>

经 销 / 新华书店

印 刷 / 兴平市博闻印务有限公司

开 本 / 787mm × 1092mm 1/16

印 张 / 14.75

字 数 / 306 千

版 次 / 2013 年 7 月第 1 版

印 次 / 2013 年 7 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5613 - 7075 - 9

定 价 / 33.00 元

读者购书、书店添货或发现印刷装订问题, 请与本社高教出版社联系、调换。

电 话: (029) 85303622 (传真) 85307826



前言

大学物理实验是高等院校工科各专业的重要基础课程,它所阐述的基本知识、基本思想和基本方法不仅是学生学习后续专业课程的基础,也是全面培养和提高学生科学素养、科学思维方法和科学研究能力的重要内容。

本教材紧扣国家教委制定的《高等学校物理实验教学基本要求》,集编者多年物理实验教学的实践经验,结合工科院校专业设置的特点和实验设备的具体情况,吸收近年来众多高校大学物理实验教学改革的一些新成果和新思路,由多校教师精心编写而成。本教材编写的宗旨是:以学生为中心,注重基本能力的训练,突出综合能力的培养,激发创新思维;同时又体现了教材的科学性、实用性、完整性和先进性。

在内容和结构上教材共分五章,包括:测量误差和实验数据处理;物理实验的基本知识;基础性实验 16 个;近代与综合性实验 8 个;设计性实验 6 个。第一章中较系统地介绍了误差理论和测量误差评价的方法,引入了不确定度的概念;数据处理辅助工具的学习和使用,将使数据处理的过程更加简便、高效。第二章简单介绍了物理实验中测量的基本方法和常用的基本测量仪器,为后几章的学习打下基础。第三、四、五章中精选了 30 个实验,既注重了课程的系统性和完整性,也兼顾到专业培养方向的具体要

求,同时体现知识的拓展性。在实验项目的选择上有经过长期教学实践、内容比较成熟的基础性实验,也有与教学仪器生产企业合作研发的新的综合性实验,还有来自参编教师教研课题的创新性实验,不仅使学生在实验方法、实验技术方面得到基本的训练,而且给学生创建一个个性发展和创新能力培养的平台。附录中的内容方便学生在学习中查阅、参考。

在教材的撰写中注重对实验方法、实验操作技能和数据处理方法的介绍,预习思考题和课后讨论题前后呼应,不仅便于学生自主学习,而且使学生的总结归纳能力得到初步训练,逐步培养和提升学生的科学研究能力。

参与本教材编写的有李乐霞(1.1、1.2、1.3、3.2、3.9、3.10、3.14、4.3、4.4、4.7、5.1)、张晋(1.4、1.5、3.12、3.13、3.16、4.2、4.6、4.8)、邵江华(2.1、2.2、3.1、3.3、3.4、3.5、4.1)、廖红梅(4.5、5.4、5.5、5.6)、朱琳(3.6、3.7、3.8、5.3)、雍晓春(3.12、3.15、3.16)、马磊(3.11、3.13)、马正瑞(5.2)。

教材编写过程中参考了许多兄弟院校的实验教材和有关著作,在此表示诚挚感谢!同时对陕西师范大学出版社以及中国矿业大学银川学院、宁夏医科大学、宁夏交通技师学院等相关部门的大力支持,表示衷心的感谢!

本教材适合作为高等院校工科各专业和理科非物理专业“大学物理实验”课程的教材或参考书。由于编者学识水平有限,疏漏和错误之处在所难免,敬请老师和同学们提出宝贵意见。

编 者

2013年6月

目录

绪 论	(1)
第一章 测量误差与数据处理	(5)
§ 1-1 测量与误差	(5)
§ 1-2 测量不确定度表示与评定的简化处理体系	(15)
§ 1-3 有效数字及其运算规则	(25)
§ 1-4 实验数据处理的基本方法	(28)
§ 1-5 数据处理的辅助工具	(35)
习题 1	(44)
第二章 物理实验的基本测量方法与测量仪器	(47)
§ 2-1 物理实验的基本测量方法	(47)
§ 2-2 物理实验的基本测量仪器	(52)
第三章 基础性实验	(62)
实验 3-1 用三线摆测量刚体的转动惯量	(62)
实验 3-2 金属线膨胀系数的测定	(67)
实验 3-3 液体表面张力系数的测定	(72)
实验 3-4 落球法测量液体的黏滞系数	(77)
实验 3-5 声速的测量	(80)
实验 3-6 补偿原理与电位差计	(86)
实验 3-7 惠斯通电桥测量中值电阻	(90)
实验 3-8 开尔文电桥测量低值电阻	(93)
实验 3-9 阴极射线示波器	(97)
实验 3-10 霍尔效应与霍尔法测磁场	(110)
实验 3-11 薄凸透镜焦距的测量	(119)
实验 3-12 等厚干涉的实验观测与研究	(123)
实验 3-13 衍射现象的实验观测与研究	(128)

实验 3-14 分光计的调整与棱镜折射率的测定	(133)
实验 3-15 光栅衍射法测量钠光波的波长	(140)
实验 3-16 光的偏振性研究	(142)
第四章 近代与综合性实验	(149)
实验 4-1 霍尔传感器测量材料的杨氏模量 ..	(149)
实验 4-2 不良导体导热系数的测量	(154)
实验 4-3 铁磁性材料磁化特性研究	(160)
实验 4-4 PN 结正向压降的温度特性研究	(168)
实验 4-5 反射式光纤位移传感器	(173)
实验 4-6 光电效应与普朗克常数的测量	(176)
实验 4-7 密立根油滴实验	(180)
实验 4-8 接触式温度传感器	(187)
第五章 设计性实验	(193)
实验 5-1 非平衡电桥与电阻温度计	(193)
实验 5-2 电阻、电容串联电路暂态过程研究	(204)
实验 5-3 非线性元件伏安特性的研究	(206)
实验 5-4 多用电表的设计与校准	(209)
实验 5-5 电阻应变片传感器及应用	(215)
实验 5-6 霍尔传感器及应用	(218)
附录	(221)
1. 国际单位制(SI)	(221)
2. 基本物理常数	(223)
3. 物理实验报告标准格式	(223)
参考文献	(229)

绪 论

物理学是一门实验科学,无论物理概念的建立,还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过科学实验来验证。物理实验在物理学的发展过程中起着重要和直接的作用。而物理实验课程在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,起着潜移默化的作用。

1. 物理实验的重要作用

(1) 物理实验为物理理论的建立提供了依据

实验可以发现新事实,实验结果可以为物理规律的建立提供依据。

例如:伽利略的单摆实验和斜面实验为研究力学规律提供了依据。

奥斯特发现电流的磁效应,揭示了原来认为性质不同的电现象与磁现象之间的联系,拉开了电磁学研究的序幕。

牛顿的色散实验证明了不同颜色的光具有不同的折射性能,这个实验为颜色理论以及光谱学的发展开辟了道路。

X 射线、放射性和电子的发现掀起了物理学研究的新高潮,为原子物理学、原子核物理学的发展奠定了基础。

(2) 物理实验是检验理论正确与否的重要判据

理论物理与实验物理是物理学的两大组成部分,缺少哪一部分都是不可想象的。理论物理通过高度概括与推理达到规律化、公式化,使理性认识更具有普遍性;但规律、公式是否正确又必须经受实践检验。理论只有经受住实践的检验,由实验所证实,才会得到公认。

例如:电磁学相继在实验的基础上建立了库仑定律、高斯定律、安培定律和法拉第定律,并建立了场的概念,最后由麦克斯韦集其大成,统一成了完整的电磁场理论。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。电磁场理论把电、磁、光三个领域综合到一起,具有划时代的意义。但这在当时只能被看作是一种假说,直到二十多年后,德国的物理学家赫兹从实验中发现了电磁波并证实了它的传播速度恰是光速,才使麦克斯韦理论得到广泛认同。

德布罗意的物质波假说也是在电子衍射实验发现以后才得到肯定的。

近代物理方面,1905 年爱因斯坦的光量子假说总结了光的微粒说和波动说之间的争论,能很好地解释勒纳德等人的光电效应实验结果。但是,直到 1916 年,密立根以极其严密的实验证实了爱因斯坦的光电效应方程之后,光的粒子性才为人们所接受。

(3) 实验物理学家在推动科技进步方面功勋卓著

诺贝尔物理学奖从 1901 年第一次授奖至今已有约 150 人获奖,其中以实验物理方面的

成就而获奖者约占 73% 以上,这也从另一方面反映出物理实验在科技发展中的重要作用。

实验物理大师数不胜数,这些实验大师凭借精湛的实验技巧、坚实的理论基础、不懈的探索精神和严谨的科学作风,在经历了长期的试验、探究之后才获得辉煌的成就。比如美国实验物理学家密立根(Robert Andrews Millikan, 1868 ~ 1953),他进行的油滴实验历时 11 年,测量了上千个油滴,最后给出了精确的 e (电子带电量) 值。密立根在光电子发射方面的研究也历时 10 年,通过不断改进实验装置,最终,实验结果精确地验证了爱因斯坦的光电效应方程。

2. 大学物理实验课程的作用和任务

对于理工专业的学生而言,大学物理实验课程是一门独立的、必修的基础课程,是学生进入大学后接受系统实验方法、实验技能训练的开端。

大学物理实验课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、实验方法和实验手段,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、提高科学素质的重要基础。它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。课程的主要任务有以下三个方面:

(1) 学习科学实验的基础知识

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识和基本方法,训练学生的基本实验技能,能运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理概念、物理原理的理解。

(2) 培养科学实验的基本能力

通过系统的实践教学,全面地培养学生科学实验的能力,主要包括:

自学能力——自行阅读实验教材或资料,概括归纳要点,作好实验准备。

动手实践能力——借助教材和仪器说明书正确使用常规仪器。

思维判断能力——运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断。

书写表达能力——正确记录和处理实验数据,绘制实验数据图表,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

简单的设计能力——根据设计要求,确定实验方法,合理选配仪器和器件,拟定具体的实验程序。

交流协作能力——能够处理好公共关系,在团队合作中发挥积极作用;能够把自己的想法或者疑问清晰地表达出来,与合作者进行有效沟通,协同作战。

(3) 提高科学实验的专业素养

通过实验教学培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风;认真严谨的科学态度;主动研究的探索精神和创新意识。

3. 物理实验课程的基本程序

(1) 实验预习

课前预习是积极高效完成实验全过程的前提和基础。通过认真阅读实验教程和相关资料,明确实验目的、掌握实验原理和方法、熟悉实验仪器各部分的作用、了解实验步骤、设计

好实验数据的记录表格,并接受实验指导教师的考查。

(2) 实验操作

实验操作是完成实验全过程的关键。要认真聆听实验指导老师的讲解和要求,严格按照实验操作规程进行实验;在教师指导下正确安装并调试仪器;真实记录实验数据;要求字迹清楚,不乱画不涂改,不抄袭他人的数据,更不许编造数据。

(3) 完成实验报告

实验报告是实验的书面总结,是让别人(或同行)评价自己实验结果的依据,所以实验报告要求用科学的语言准确地表达出实验所包含的基本内容。实验报告可在预习报告的基础上补充完成,亦可重新撰写,但无论如何不能把报告写成教材的缩写。实验报告要求内容完整、字迹清晰、表达明确、图表规范、分析有理,并符合实验指导老师的具体要求。

1) 实验报告的基本内容

①实验者姓名、实验日期、实验地点、实验环境条件(如温度、湿度等)。

②实验名称。

③实验目的。

④实验原理:叙述要求简明扼要,包括简明的文字叙述、计算公式及使用条件、实验原理图以及必要的电路图(或光路图)、实验装置框图。

⑤实验仪器:包括仪器名称、编号、规格型号、主要技术参数等,仪器的使用方法、注意事项等。

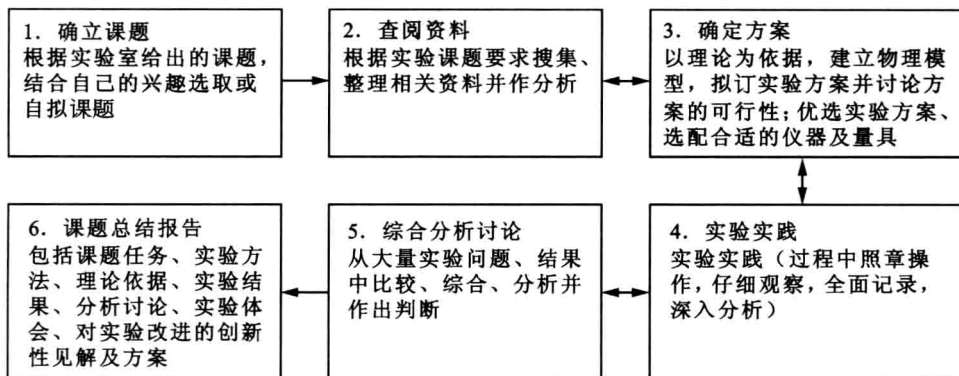
⑥实验数据处理和分析:根据原始数据记录,以图、表形式将实验数据规范地呈现在报告正文中;分析观察到的实验现象,处理和分析实验数据(包括测量结果的计算、测量不确定度的估算、图示或图解、回归分析曲线等),正确表示实验的测量结果。

⑦分析讨论:回答课后讨论题,对实验中观察到的异常现象进行解释,对实验结果进行分析和评价,对实验方法和实验装置的改进提出合理化的建议,撰写心得体会等。

实验报告实例参见附录:物理实验报告标准格式。

2) 设计性实验报告的基本要求

对于设计性实验项目,要求学生根据给定的实验课题、要求和实验条件,自行设计或选择合理的实验方案并基本独立完成实验的全过程。设计性实验的过程可用如下流程图表示,图中单向箭头表示依次进行的各个环节,双向箭头表示反馈和修正,使其更加完善。



设计性实验结题报告包括以下诸多方面:

- ①课题研究的目的地及意义。
- ②课题研究的原理。
- ③记录研究的过程、步骤及观察到的现象。
- ④列表处理数据,对结果进行分析讨论。
- ⑤介绍本课题所涉及的实验方法、技术和仪器等在科研、工程实践中的用途。
- ⑥谈谈对本课题研究的体会及收获。
- ⑦对本课题的研究提出有创新的见解和方案。

4. 学生实验守则

①实验前应认真预习实验内容,明确实验的目的要求、实验原理、实验方法和步骤;了解有关仪器设备的性能及其配置,熟悉仪器的操作规程及安全注意事项;按要求完成预习报告(对设计性实验要完成实验设计方案)。

②按教学计划准时到指定的实验室上课,不得迟到、早退、旷课。

③进入实验室后,要听从指导教师的安排,不得挑选或任意变更实验地点,不得私自调换实验设备;如发现仪器设备或器件有问题,应立即报告指导教师或技术人员及时解决,未经教师允许不得擅自处置。

④做实验时必须严格遵守实验室的规章制度和有关的操作规程;实验仪器、设备组装好后,要经实验指导教师或技术人员检查,确认无误后方可进行实验。对未经检查而进行实验者,指导教师有权暂停或取消该次实验资格。

⑤实验中提倡独立思考、科学操作、细致观察、认真记录(包括仪器名称、技术参数、实验现象、实验数据和所发现的问题等),不得马虎从事,不得涂改原始记录。自觉培养实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度和勇于探索的精神。

⑥在实验过程中,注意保持实验室安静、整洁;不得动用室内与本次实验无关的仪器设备和其他设施。

⑦实验时,必须高度重视人身和设备安全。若有事故或仪器故障发生,应立即切断电源,及时向指导教师或技术人员报告,不得自行处理,待教师查明原因并排除故障后,方可继续实验。对事故或故障隐瞒不报或转嫁他人者,要追究责任并严肃处理。

⑧实验完毕,由指导教师检查实验记录正确与否、仪器设备完好状况,并且签字确认;然后整理仪器、清洁实验室,经指导教师许可后离开实验室。

⑨认真完成实验报告并按时上交。

⑩凡损坏仪器或器件者,应主动说明原因并填写报损单,由指导教师根据学生认识程度和情节轻重等情况酌情处理,按有关规定进行赔偿。

第一章

测量误差与数据处理

§ 1-1 测量与误差

测量是人类对自然界中的物质和现象取得数量概念的一种认知过程,在自然科学、工程技术、物资流通以及生产生活的几乎所有领域,都离不开测量。测量是科学实验的主要组成部分,是产品质量控制的必要保证,是技术监督检验的中心工作,是商品估值定量的必要步骤,是医学检查诊断的重要内容,是气象环境测报的关键任务,是灾害预报预防的首要依据,也是发现新规律、证明新理论、研究新物质材料、发明新器具装置的必不可少的实践基础。

1. 测量及其分类

(1) 测量的概念

所谓测量就是将待测量与一个作为标准(或标准单位)的同类量进行比较,得到比值(或倍数)的过程,该比值(或倍数)称为待测量的测量值,即量值。物理实验通过观测物理量的大小和变化来研究物质结构和物体运动规律,因此测量是物理实验的主要内容之一。物理量,即可测量的量,它是物质或现象可定性区别和定量确定的属性。通常我们讲到的长度、时间、质量、温度、电阻、物质的浓度等这些词语,指的是一般意义(广义)的量;而讲到某根棒的长度、某根导线的电阻、某份酒样中乙醇的浓度等,指的是特定量(狭义的量)。物理实验中所有的被测量和测量结果,都是针对研究对象的特定量。

(2) 测量的分类

①按照获得待测量量值的方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量两种。

直接测量就是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较,直接从仪器、量具上读出量值的过程。例如:用直尺测量长度;用天平测量质量;用秒表测量时间等。

若待测量由若干直接测量量在一定的函数关系下,经过运算后而获得,这就是间接测量。例如:测量物体运动的平均速度 $\bar{v}$,可直接测量物体运动的时间 Δt 和 Δt 时间内物体通过的位移 Δs ,由平均速度的定义 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 式计算出 $\bar{v}$ 。

②按照测量条件是否相同,可将测量分为等精度测量和不等精度测量两类。

生活中不会反复度量同一个量值,科学实验常常在重复性条件下多次测量同一物理量。所谓重复性条件包括:同一测量程序、同一测量仪器、同一测量方法、同一测量环境、同一实

验地点、同一实验者、在短时间内重复测量等。

等精度测量就是在重复性条件下对某一待测量进行的多次测量。不等精度测量就是多次重复测量时精密度不等或不近似相等,它可能是由于上述诸多条件中任一项或多项发生变化而引起的。大学物理实验教学中,一般只限于讨论等精度测量的相关问题。

(3) 测量结果的表示及测量的四要素

在大学物理实验中,不仅要明确测量对象,选择适当的测量方法,正确地完成测量操作的各个环节,还要学习误差理论和实验数据处理的基本知识,对多数实验测量给出完整的测量结果。

完整的测量结果表述中,应包括测量数值(即度量的倍数)、测量量的单位以及测量结果的可信度(用不确定度来表示)。书写时,要使用规范的字母、数字,同时注意计量单位。例如用三个 0.1 级 ZX21 型电阻箱组成自组电桥测量某电阻,其测量结果最后写成以下形式:

$$R = R_x \pm u_R = (910.3 \pm 0.8) \Omega \quad (P = 0.683) \quad (1-1-1)$$

测量对象 = (被测量的值 $\pm$ 不确定度) 单位 (置信概率)

测量对象、计量单位、测量方法和测量不确定度称为测量过程的四要素。

2. 测量误差

(1) 真值与误差

任何被测量在一定的条件下都客观地存在一个唯一的确定值,该值称为被测量的真值。测量的目的就是为了获得真值。但是由于实验条件、实验方法、实验仪器和实验者自身判断等原因,任何测量都不是绝对“准确”,测量者总希望测量结果尽可能准确,甚至幻想获得绝对准确的真值,而真值恰恰是不可能测量到的。随着测量技术的不断进步,测量结果会根据需要有限度地接近真值。实践中,可把相对可靠、准确度足够高的实际测量值作为约定真值,例如国际科学技术数据委员会(CODATA)公布的物理量或常数、标准物质(如砝码)的值、标准器证书上的值,某物理量重复性条件下多次测量的平均值等。

测量值与真值之间总存在差异,测量值与被测量真值之差叫绝对误差,记作 δ ,

$$\delta = x - X_0 \quad (1-1-2)$$

式中 X_0 为被测量的真值, x 为测量值, δ 为该次测量的绝对误差值。误差的符号借用了微分符号,其目的是强调误差是小量,并且可正、可负。

测量结果的相对误差

$$E = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

真值是一个理想的概念,一般无从得知,因此,通常情况下不能计算误差。只有在极少数情况下,相对可靠、准确度足够高的实际测量值被视为约定真值时,才能计算误差。

从误差自身的特点和所服从的规律考虑,误差主要分为系统误差、随机误差两类。它们的性质不同,应予以分别处理。

(2) 系统误差

在对同一被测量的多次测量过程中,实验系统存在恒定的或以可预知方式变化的测量

误差,该误差分量称为系统误差。系统误差具有确定性,测量过程中要对系统误差进行正确的分析,尽量发现和消除系统误差,提高测量结果的可靠程度。

1) 系统误差的主要来源

系统误差主要来源于以下几个方面:

①仪器量具因素:仪器制造上的缺陷;仪器未经校准、使用不当等。

例如,量块的两面不平行;电表刻度线的间隔不等或径向磁场不均匀;数字表输入级线性放大器的零点或增益漂移等。

②理论、方法因素:测量所依据的理论、公式存在近似性;实验条件、测量方法不满足理论要求等。

如伏安法测电阻时电表内阻的影响。

③人员、使用因素:测量者生理或心理特点所导致的误差。

如反应速度的快慢、分辨能力的高低、读数习惯等。

④环境因素:测量过程中温度、湿度、气压、振动、电源电压、磁场等外界条件按一定规律发生变化。

2) 系统误差的发现

系统误差又分为可定系统误差(可修正误差)和未定系统误差(不可修正误差),对于可定系统误差,一般情况下都能找到其原因并事先修正。

发现可定系统误差的常用方法如下:

①资料分析法:根据计量器具的检定证书、出厂说明书以及检定规程等资料进行分析。通常在标准砝码、量块、标准电阻等计量器具的说明书或检定证书上一般都给出了它们的修正值。例如,标准电池产品说明书中给出了电池电动势 E_t 与温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 和标称值 E_{20} 之间的修正公式:

$$E_t - E_{20} = -[39.94(t - 20) - 0.929(t - 20)^2 - 0.009\,0(t - 20)^3 + 0.000\,06(t - 20)^4] \times 10^{-6} \text{ V}$$

②实验对比法:对同一被测量量采用不同的实验方法、用不同的仪器、由不同的人员测量,比较两者平均值之差是否明显大于两者测量不确定度“方和根”的值,若是,说明存在系统误差分量。例如,用单臂电桥和双臂电桥分别测量同一小电阻的阻值,两次测量结果如下:

$$\text{单臂电桥: } R = (0.831 \pm 0.010) \Omega, E_R = \frac{0.010}{0.831} = 1.2\%$$

$$\text{双臂电桥: } R' = (0.800\,5 \pm 0.002\,2) \Omega, E_{R'} = \frac{0.002\,2}{0.800\,5} = 0.27\%$$

$|R - R'| = 0.030 \Omega$, $\sqrt{0.010^2 + 0.002\,2^2} = 0.010 \Omega$, $|R - R'| \geq 3 \times \sqrt{0.010^2 + 0.002\,2^2}$,由此可发现引线电阻、接触电阻等引起的系统误差分量。

③标准器具检定对比法:用已知量值的高准确度的标准量具作测量对象,可定出仪器在该量具示值附近的系统误差。例如,用标准量块检定游标卡尺,可定出在量块示值附近的系统误差。

④偏差图示观察法:按照测量列的先后顺序,得出各次测量值的偏差并作其偏差图,由偏差图可直观地看出系统误差的大致分布规律(偏差递增或偏差递减)。

3) 系统误差的消除

可定系统误差容易被发现,首先应设法避免,如无法避免,可有针对性地采用不同的方法予以消除或减小。

①测量前检查或校正零位。

②引入修正值对测量值进行修正。

③通过仪器的设计和测量方法的选择抵消系统误差的影响。

如仪器读数装置的对称设计;将测量中的某些因素(如被测物体)交换位置(交换法);一定条件下用已知量代替被测量(替代法);改变测量的方向使产生的系统误差等值异号,然后求其平均值作抵消(异号法)等。

未定系统误差一般难以消除,也不能进行修正,只能作为不确定度的一种分量进行合理的估算和评定。

测量实践中,不但不可避免地要产生系统误差,而且系统误差是测量结果误差的主要分量,多数仪器的误差限值主要反映未定系统误差的影响。如何在实践中分析系统误差是自然科学工作者和工程技术人员的一项重要任务。所以,在大学物理实验中,我们不但不能忽视对系统误差的分析,而且要重视对系统误差的分析和处理,尽量减小系统误差对测量结果的影响。

(3) 随机误差

在消除系统误差以后,对同一被测量在等精度条件下进行多次测量,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所得误差时正、时负,绝对值时大、时小,呈现出无规则的涨落,这类误差分量称为随机误差。随机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。如人的感官灵敏度、仪器精确度限制、周围环境的干扰以及随测量而来的其他不可预测的偶然因素等。随机误差的特点是具有随机性,也就是说,在相同条件下,对同一被测量量进行多次重复性测量,每次测量值的误差可大可小,就某一次测量值来说,其误差的大小与正负都无法预知,纯属偶然。但如果测量次数相当多的话,随机误差的出现则服从一定的统计规律。

(4) 随机误差与系统误差的关系

在任何一次测量中,误差既不会是单纯的系统误差,也不会是单纯的随机误差,而是两者兼而有之,各自所占的比例与具体的测量有关,不能一概而论。在以后的讨论中,谈到一种误差时,必须意识到,另一种误差并非没有,而是假定消除或是减小到可忽略的程度。

系统误差与随机误差之间有一定的联系,在一定条件下还会互相转化。例如,外径千分尺不调零位也不做修正时,测量中反映了系统误差性质;一次性调零并做修正,其剩余分量一部分依然反映出未定系统误差性质;多次测量前均调零,相当于将未定系统误差随机化了,因而增加了测量值的随机误差分布范围。由此可见,尽管把误差分为系统误差和随机误差,但这种分法并不完善。

3. 随机误差的高斯分布

在相同条件下,对某一被测量量进行多次重复性(等精度)测量,得到包含 n 个测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的一个测量列,用 X_0 表示该被测量的真值,各次测量值的随机误差分别为

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ 。

根据实验情况的不同,随机误差的分布规律有高斯分布(即正态分布)、均匀分布以及反正弦分布等。作为大学物理实验教学,只简要介绍随机误差的高斯分布。

遵从高斯分布规律的随机误差具有下列四大特征:

- ①单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- ②对称性:大小相等的正、负误差出现的概率均等,测量值对称分布于真值的两侧。
- ③有界性:绝对值很大的误差出现的概率几乎为零,即误差的绝对值不超过一定的限度。
- ④抵偿性:当测量次数非常多时,正、负误差互相抵消,于是,误差的代数和趋向于零。

(1) 高斯分布的概率密度函数

随机误差的高斯分布规律可以用高斯分布曲线形象地表示出来,如图 1-1-1(a),横坐标表示测量误差 δ ,纵坐标表示测量误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。

根据误差理论,可以证明函数的数学表述为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-4)$$

上式表明,测量值的随机误差出现在 $[\delta, \delta + d\delta]$ 区间内的概率为 $f(\delta) \cdot d\delta$,即图 1-1-1(a) 中曲线下的阴影面积。 δ 是一个与实验条件有关的常数叫作标准误差(或者标准差)。

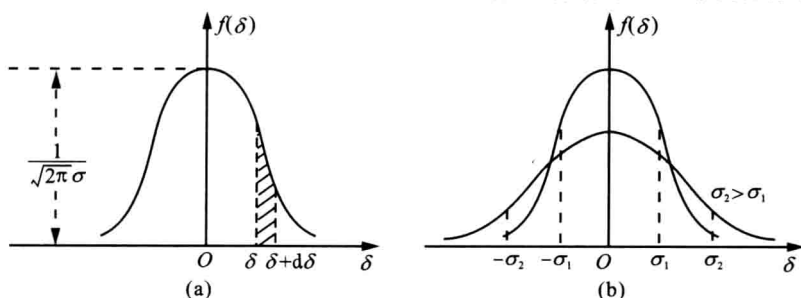


图 1-1-1 随机误差的高斯分布曲线

(2) 标准差 σ

随机误差高斯分布曲线的形状取决于 σ 值的大小,如图 1-1-1(b)所示。 σ 值越小,分布曲线越陡,峰值也越大,说明测量值的误差集中,小误差占优势,各测量值的分散性小,重复性好; σ 值越大,分布曲线越平坦,峰值也越小,说明各测量值的分散性大,重复性差。标准误差反映了测量值的离散程度。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X_0)^2} \quad (1-1-5)$$

测量值的随机误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间内的概率

$$P_{(-\sigma < \delta < \sigma)} = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) \cdot d\delta = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \cdot d\delta = 68.3\%$$

(该值可由拉普拉斯积分表查得)

标准差 σ 所表示的意义是:对任一测量值,其测量误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间内的概率为 68.3%,也就是说,如果对某一被测量量在相同条件下进行了 1000 次重复性测量,那么任

一测量值的误差可能有 683 次出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间内。

应该注意, σ 和 δ_i 相比, 其含义完全不同。 δ_i 是实在的误差, 可正可负, 亦可为零, 但不可知; 而 σ 不是一个具体的测量误差值, 它是一个用以表征测量值离散程度的统计性的特征量, 是一个不等于零的、可以计算的正数。 σ 提供了一个用概率来表达测量误差的方法, 反映了在相同条件下多次重复性测量的随机误差的分布情况, 只具有统计性质的意义。

(3) 置信区间和置信概率

区间 $[-\sigma, +\sigma]$ 称为置信区间, 其相应的概率 $P_{(\sigma)} = 68.3\%$ 称为置信概率。

(4) 极限误差

在相同条件下对某一被测量量进行多次重复性测量, 其任意一次测量值的误差出现在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间内的概率为

$$P_{(-\sigma < \delta < \sigma)} = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\sigma) \cdot d\delta = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \cdot d\delta = 99.7\%$$

这表明, 对任意一测量值, 其测量误差出现在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间内的概率为 99.7%。也就是说, 若对某一物理量在相同条件下进行了 1000 次重复性测量, 那么只有 3 次测量值的误差绝对值可能会超过 3σ 。在大学物理实验中, 测量次数通常都很少 (不超过几十次), 因此, 测量值误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的情况几乎不会出现, 故把 3σ 称为极限误差。

4. 随机误差的估算

(1) 测量的最可信赖值与偏差

对于等精度测量列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 用 $\bar{x}$ 代表测量列的算术平均值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1-6)$$

测量列的算术平均值并非是被测量量的真值, 但其可靠性高于任一次测量值。根据误差的定义, 有

$$\delta_1 = x_1 - X_0, \delta_2 = x_2 - X_0, \dots, \delta_n = x_n - X_0$$

将上述各式相加, 得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - n \cdot X_0$$

或

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - X_0 = \bar{x} - X_0$$

根据随机误差的抵偿性 (不是所有误差都能抵偿) 特征, 当测量次数 n 相当多时, 由于正、负误差相互抵消, 各测量值误差的代数和趋近于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (x_i - X_0) = 0$$

$\bar{x} \rightarrow X_0$

于是有

由此可见, 测量次数 n 越多, 测量列的算术平均值接近被测量真值的可能性就越大。所以将测量列的算术平均值作为被测量量真值的最佳估计值。