

高等院校物理实验教材

物理实验教程

理工科用

主编 张逸民 张 敏



郑州大学出版社

高等院校物理实验教材

物理实验教程

理工科用

主编 张逸民 张 敏

江苏工业学院图书馆
藏书章

 郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程(理工科用)/张逸民,张敏主编. —郑州:郑州大学出版社,2005.8

ISBN 7-81106-196-1

I. 物… II. ①张… ②张… 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 (2005) 第 095211 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

河南第二新华印刷厂印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:18.5

字数:430 千字

版次:2005 年 8 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

1/16

印次:2005 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-81106-196-1/O · 23

定价:28.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

内容简介

本书是高等院校理工科专业的物理实验教材。全书共四章,第1章介绍物理实验基础知识,第2章包括26个基础性物理实验题目,第3章包括23个综合应用性物理实验题目,第4章包括25个设计研究性物理实验题目,书后附有16个有关物理常数及常用物理量的附表。实验题目与层次性实验教学体系相配合。

本书可作为高等院校理工科各专业的物理实验教科书,也可供其他专业选用或工程技术人员参考。

前 言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律性的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,是自然科学和工程技术的基础。从物理学的发展历程可以看到,物理学的理论与学说的发展都是以实验中的新发现为依据,又进一步为实验所验证的,物理学是一门实验科学。

物理实验课是高等院校理工科大学学生的一门重要基础课程,该课程对学生的基本实验技能、科学素质、创新能力的培养起着重要作用。为了培养高素质科学技术人才,郑州大学物理工程学院物理实验中心的教师和工程技术人员在多年的实验课程教学中,在物理实验课的教学理念、课程体系、教学内容、教学方法等方面进行了富有成效的改革探索,树立了以学生为本、知识传授、能力培养、素质提高、协调发展的教育理念和以能力培养为核心的实验教学观念。从1996年开始,在理工科的物理实验课的教学中,打破以往按力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验的顺序安排实验教学的传统做法,探索建立有利于培养学生实践能力和创新能力的层次化实验教学体系,将实验分成基础性物理实验、综合性物理实验、设计性物理实验三个层次,并在1997年出版了与之配套的教材《新编大学物理实验》(河南大学出版社出版)。在以后的几年中,随着物理实验课改革的深入,逐年充实更新实验内容,先后编排了两套物理实验讲义。教学内容的安排上,以“加强基础、重视应用、开拓思维、培养能力、提高素质”为指导思想,精选、更新实验题目,淘汰了一些与中学内容重复、实验手段落后、验证性的实验题目,增添了与现代工程技术有联系的综合性、应用性物理实验题目,同时适当增加了近代物理的内容。实验课教学方法上改变以往以教师教为主的方法,变为以学生学习为主的教学方法,教师起的主要作用是引导学生学习,鼓励学生大胆想象,独立思考,勇于提出自己的见解。经过近十年的探索与实践,实验题目与教学内容得到不断地充实与更新,层次化实验教学体系得到不断地调整与完善。目前,我们已经拥有了一套良好的按照基础性物理实验、综合应用性物理实验、研究设计性物理实验的顺序安排实验课教学的层次化实验教学体系,丰富、科学、先进的实验题目与教学内容。作为这些教学成果的结晶,我们编写了包括物理类、非物理类、医科专业等适合不同专业需要的物理实验课程教材系列。

本书是本系列中的一本,供非物理专业的理工科学生使用。它是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会2004年最新制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,并结合郑州大学多年的物理实验教学改革实践和实验室建设的情况编写的,是与物理实验课层次化教学体系相配套的教材。本书共分四章,内容包括物理实验基础知识,基础性物理实验26个,综合应用性实验23个、设计研究性实验25个,书后附有物理常数及常用物理量参考附表。

第1章为物理实验基础知识,主要讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基本知识,系统介绍了物理实验中基本的实验方法和基本的操作技术,并对物理实验中常用的仪器作了简要介绍。教师可用两学时讲授误差理论、不确定度和数据处理的知识,本章其他内容均要求学生自学,并在以后的实验中加深理解和运用。

第2章为基础性实验。其目的是使学生掌握基本实验方法和技能,学会使用物理实验中常用的基本仪器。本章选入的26个实验题目,大多数是能反应物理学基本内容,又利于培养物理实验基本技能的题目。尽管是传统题目,我们从实验内容方面进行了重组和更新,将反映同一类物理概念的不同实验题目合并,其中物理量的测量尽量采用新技术来实现,并在实验内容上增添了应用性的内容。本轮实验是学生初做的实验,书中对每个基础性实验题目都有详细的实验原理、实验步骤介绍,实验中使用的主要仪器的结构和使用方法也有详细叙述,有些实验还列有记录实验数据的示范性表格,以求学生通过基础性实验的训练,学会观察、分析、判断实验现象,实事求是地记录实验数据,规范地处理实验数据和完整地总结实验报告,培养良好的科学作风。

第3章为综合应用性实验,其目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力,培养学生的创新思维。物理实验内容必须与现代科学技术接轨,使现代科技的成果渗透到物理实验课的教学中,这样才能进一步激发学生的学习积极性和热情。本章选择的实验题目注重了时代性和先进性,结合理工科专业的特点,引入了与现代科学技术和科学研究成果相联系的综合应用性实验题目,如传感技术,虚拟仪器弱电信号检测技术,光纤通信,低温技术,薄膜制备技术等内容。同时结合郑州大学物理工程学院的教学科研实际编排了相应的物理实验题目,如高温超导材料制备和高温超导电性测试;直流溅射法制备金属薄膜及金属薄膜厚度测量和金属薄膜电阻率测量等,这些实验组合可以形成研究性的小课题,学生不仅可以在课堂上完成,还可以利用开放实验在课余时间继续完成。通过综合应用性实验训练,使学生认识物理学对工业技术的促进作用,了解物理学在不同领域的应用前景。拓宽学生对物理实验手段功能和作用的认识,培养学生科学研究的兴趣,提高学生科学实验的综合能力,充分发挥学生的主观能动性。

第4章为设计研究性实验,是在上述层次实验后进行的。这部分实验内容的主要目的是给学生创造更加自主的实验条件,充分发挥学生的主观能动性和创造性,教师可以通过让学生根据实验题目的要求,查阅资料,自行设计方案,选用仪器,完成实验。为了启发学生思考又使学生不至于感到太困难,本书中的设计研究性实验题目都写有明确的实验要求,附有参考资料目录,多数实验有简要的原理提示。我们相信通过实验,能够使学生了解科学实验的全过程,初步掌握科学思想和科学方法,体验研究、探索的乐趣和成就感,提高学生独立实验的能力,分析解决问题能力,培养学生创新精神。

全书实验题目分两学期完成,实验课学时数不少于60学时。本书的内容比较多,使用中可结合学时数、实验室条件及专业特点,按层次选择实验题目,基础性、综合应用性、设计研究性三类层次的实验题目选择比例建议分别为60%,30%,10%(或50%,40%,10%)。

本书紧扣层次性教学体系,实验题目编排由易到难,由基础到应用到科学前沿,内容

丰富,教师和学生可自主选题,体现了先进性、时代性、灵活性、实用性。

本书的编写是在郑州大学物理工程学院副院长贾瑜博士的主持下,成立编写组,经集体讨论原则方案,以具体分工,个人执笔完成书稿。参加本书编写工作的都是郑州大学从事多年物理实验教学工作的有丰富实验教学经验的老师,有姚志亭(第1章,实验3.5,3.8,3.9,3.11,3.12,4.2,4.6),张欢(实验2.1—2.3,2.6,2.7,2.16,2.17,3.1—3.3,4.3,4.4),闫书霞(实验2.4,2.5,2.10,2.11,3.10设计、研究性实验,实验4.1,4.5,4.7—4.14,4.20—4.22),张逸民(前言,实验2.8,2.9,2.14,2.15,2.18,3.20,4.15,4.16),莫炯(实验2.12,2.13,3.6,3.7,3.21—3.23,4.17,4.19),张敏(实验2.19,2.20,2.25,2.26,3.15—3.17,4.18,4.25,附表),侯秀梅(实验2.21—2.24,3.4,3.13,3.14,3.18,3.19,4.23,4.24)。本书统稿由张逸民(第1章,第2章)张敏(第3章,第4章)完成。

郑州大学物理工程学院物理实验中心在实验课的课程体系、教学内容、教学方法等的改革,得到了郑州大学和郑州大学物理工程学院各级领导的关怀与支持。在本书编写过程中,贾瑜老师给予了许多宝贵建议和具体支持,在此表示感谢。物理实验课离不开实验室的建设,它是一门体现集体智慧和劳动结晶的课程。在本书出版之际,感谢几十年来在物理实验教学中和实验室建设中做出贡献的所有老师和实验技术人员。

由于作者水平有限,不足之处恳请批评指正。

编者

2005年8月

目 录

绪论	(1)
第1章 物理实验基础知识	(4)
1 测量误差和不确定度	(4)
2 数据处理	(12)
3 基本实验方法	(17)
4 基本操作技术	(20)
5 基本实验规则	(23)
6 常用实验仪器	(24)
第2章 基础性物理实验	(35)
实验 2.1 物体密度的测定	(35)
实验 2.2 用拉伸法测金属的杨氏弹性模量	(38)
实验 2.3 测定固体的线胀系数	(42)
实验 2.4 物体比热容的测量	(44)
实验 2.5 稳态法测固体的导热系数	(49)
实验 2.6 弦振动的研究	(56)
实验 2.7 用波尔共振仪研究受迫振动	(59)
实验 2.8 直流电桥测电阻	(65)
实验 2.9 交流电桥	(72)
实验 2.10 伏安法测电阻和二极管伏安特性的测量	(75)
实验 2.11 电表的改装和校准	(80)
实验 2.12 电压补偿和电流补偿	(84)
实验 2.13 电位差计的使用	(88)
实验 2.14 电子束在电场和磁场中的运动	(91)
实验 2.15 示波器的使用	(97)
实验 2.16 RLC 电路的暂态过程研究	(107)
实验 2.17 磁滞回线及磁化曲线的观察与测量	(115)
实验 2.18 霍尔效应的研究	(121)
实验 2.19 薄透镜焦距的测量	(128)

实验 2.20	组装望远镜和显微镜	(133)
实验 2.21	分光计的调整和使用	(137)
实验 2.22	光栅特性及光波波长的测定	(144)
实验 2.23	等厚干涉现象的应用	(146)
实验 2.24	双棱镜干涉实验	(151)
实验 2.25	光的偏振实验	(153)
实验 2.26	物质旋光性质的研究	(158)
第 3 章	综合应用性实验	(161)
实验 3.1	小型制冷系统制冷系数的测定	(161)
实验 3.2	声速的测定	(165)
实验 3.3	利用超声波测量厚度	(170)
实验 3.4	由光电效应测定普朗克常数	(173)
实验 3.5	弱电信号的测量及 P-N 结物理特性研究	(176)
实验 3.6	变温霍尔效应实验	(179)
实验 3.7	非平衡电桥电压输出特性研究	(186)
实验 3.8	传感器技术研究	(189)
实验 3.9	虚拟仪器工作原理认识	(193)
实验 3.10	热电偶测温与定标	(197)
实验 3.11	光纤通信	(201)
实验 3.12	CCD 技术基本原理及应用	(206)
实验 3.13	单缝和双缝衍射的光强分布	(209)
实验 3.14	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(213)
实验 3.15	微波光学实验	(217)
实验 3.16	单色仪及其应用	(221)
实验 3.17	全息照相	(225)
实验 3.18	阿贝成像原理和空间滤波	(229)
实验 3.19	θ 调制法与空间假彩色编码	(231)
实验 3.20	高温超导材料样品的制备	(233)
实验 3.21	高温超导材料特性测试	(236)
实验 3.22	直流溅射法制备金属薄膜及薄膜厚度测量	(247)
实验 3.23	金属薄膜电阻率的测量	(253)
第 4 章	设计、研究性实验	(258)
实验 4.1	测定石蜡、食盐的密度	(258)
实验 4.2	单摆周期研究	(259)
实验 4.3	利用声波干涉消除噪音	(259)
实验 4.4	超声波测速	(260)
实验 4.5	滑线变阻器分压、限流特性的研究	(261)
实验 4.6	白炽灯(6.3 V、0.15 A)的伏安特性研究	(262)

实验 4.7	测三极管的输入与输出特性曲线	(262)
实验 4.8	测表头内阻	(263)
实验 4.9	用电位差计校准电表	(263)
实验 4.10	筛选电阻	(264)
实验 4.11	设计制作 P-N 结温度计	(264)
实验 4.12	设计组装简易万用表	(265)
实验 4.13	示波器测绘二极管的伏安特性曲线	(266)
实验 4.14	RLC 电路谐振现象的研究	(267)
实验 4.15	测电子束的出射速度	(267)
实验 4.16	隔离法测电流	(268)
实验 4.17	用霍尔集成元件测转速	(269)
实验 4.18	设计组装简易投影仪	(270)
实验 4.19	用迈克尔逊干涉仪研究压电陶瓷的电致伸缩系数	(271)
实验 4.20	迈克尔逊干涉仪测薄膜介质的折射率	(271)
实验 4.21	自准直法测双棱镜的两锐角	(272)
实验 4.22	测细丝直径	(272)
实验 4.23	利用单缝衍射测量微小位移	(272)
实验 4.24	用分光计测反射光的偏振特性	(273)
实验 4.25	制作全息光栅	(274)
附表		(275)
附表 1	基本物理常数	(275)
附表 2	不同温度下的纯水密度(单位: $\times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)	(276)
附表 3	20 °C 时常用固体和液体的密度(单位: $\times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)	(276)
附表 4	20 °C 时某些金属的杨氏模量	(277)
附表 5	固体物质线胀系数	(277)
附表 6	某些固体的比热容	(278)
附表 7	常用材料的导热系数	(278)
附表 8	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	(279)
附表 9	几种标准温差电偶	(279)
附表 10	某些物质中的声速	(280)
附表 11	某些物质的折射率(对 $\lambda_D = 589.3 \text{ nm}$)	(280)
附表 12	一毫米厚石英片的旋光率(20 °C)	(280)
附表 13	光在有机物中偏振面的旋转	(281)
附表 14	铈镨玻璃吸收光谱波长表	(281)
附表 15	钠灯光谱线波长表	(281)
附表 16	汞灯光谱线波长表	(282)

绪 论

1. 物理实验课的地位和任务

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于自身的学科体系内生长和发展出许多新的学科分支,而且它是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科的基础和先导。

物理学是一门实验科学,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。现代高新技术的发明和突破,无不源于物理学上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和设备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。为了适应科学技术更为迅猛发展的需要,高等院校理、工、农、医等专业培养的人才必须具备坚实的理论基础、出色的科学实验能力和勇于开拓的创新精神。由于物理实验是物理基础教学的一个重要组成部分,同时又是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是学生进行科学实验基本训练的重要基础课,因此,在培养学生这些基本素质和能力方面,物理实验具有不可替代的重要作用。

物理实验课的优势在于:

(1) 物理实验课程内涵丰富,所覆盖的知识面和包含的信息量以及能够对学生完成的基本训练内容是其他课程的实验环节难以比拟的。

(2) 物理实验课程在学生深入观察现象,建立合理的物理模型,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,培养和提高学生独立开展科学研究工作的素质和能力方面具有重要的奠基作用。

通过实验教学要达到的目的是:

(1) 使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面受到较为系统的训练,获得初步的科学实验能力:能够正确地使用仪器设备、准确地采集实验数据,正确地记录和处理实验数据,完备地表达实验结果。

(2) 培养学生通过观察进行分析、判断、逻辑推理,进而作出结论的能力和理论联系实际解决问题的能力。

(3) 了解一些现代工业技术的物理背景和应用前景。

(4) 培养学生养成严肃认真、实事求是的科学态度,百折不挠的工作作风,相互协作的团队精神和遵守纪律、爱护公物的优良品德。

(5)培养学生主动研究、积极探索和勇于开拓的创新精神。

2. 物理实验课的基本环节

本课程可分为以下三个阶段:

(1)课前预习:课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。一次实验课时间有限,从熟悉仪器到测出数据,任务是较重的。若课前不明确要做实验的目的、要求和原理、方法,不了解哪些地方是重点、应特别小心和注意的,到上课时就难以做好实验,充其量就是得到些数据,收获甚微。为此,课前要仔细阅读实验教材或有关的资料,基本看懂实验所用的原理和方法,并学会从中整理出主要实验条件、实验关键及实验注意事项,根据实验任务拟好记录数据的表格,并写出预习报告。

(2)课堂实验:这是实验课的中心环节。进入实验室后应遵守实验室规则,按照一个科学工作者的规范要求:首先认识和清点所用仪器,搞清其使用方法和注意事项。有条理地按照实验条件布置、调试仪器(绝不能急于测量而忽视仪器的调试,因为我们依据的物理规律都是有条件的)。然后按照实验规程往下进行。操作时要注意安全,要细心观察实验现象,认真分析实验中的问题。遇到问题时,应冷静地分析和处理:首先认真检查自己的工作是否有不妥之处,发生的问题或故障自己能否处理,若不能处理则要在教师指导下查明原因并加以解决(发现问题、分析原因、找出解决方案是培养实验能力的重要途径)。要实事求是地记录实验数据,不要随便记在一张纸上以后再誊写,这样会增加出错的概率。要在实践中培养良好的科学作风。实验完成后,要将实验数据交教师审查、签字,然后将仪器整理好才能离开实验室。

(3)撰写实验报告:这是一个实验的系统总结,由学生在课下完成。要求层次分明,文词简洁通顺,字迹清楚,图表规矩,结果或结论明确,讨论认真;要合乎逻辑地说明本实验你作了什么、怎么作的、结果如何等问题。

撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告,是一个大学生必须具备的报告工作成果、进行书面交流的能力。

实验报告内容包括:

实验名称

实验目的

实验原理 简要叙述实验的理论依据(包括电路图、光路图、实验装置示意图及测量中依据的主要公式),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等。

实验步骤 根据实际的实验过程写明关键步骤和操作要点。

原始数据 根据具体的实验内容,列出不同的记录表格,记录测得的原始数据。要树立“原始数据神圣不可侵犯”的观念,绝不能因误差大而采取随意“修正”数据的自欺欺人的作法。对于错误数据也不要涂掉,可在其上划一整齐的细线,并说明不要的原因。

数据处理 数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(函数式),代入的数据要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查;作图要按作图规则,图线要规矩、美观;最后写明实验结果。

小结或讨论 内容不限,可以是实验现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可解答思考题。

3. 怎样作好物理实验

实验课和理论课不同,遇到的问题不像听课、看书或做习题那么单纯、明确。因此,学生发挥主观能动性的空间很大。实验课不能仅靠老师的讲解来传授,更多的需要通过自身的实践来学习。因此,一定要养成主动学习、理论联系实际地思考问题的习惯。为此,必须作到以下几点:

(1)思想重视:要充分理解和认识实验的地位和作用,克服重理论轻实验的思想倾向。

(2)目的明确:本课程有总的教学目的,各实验又有具体目的。在学习过程中一定要明确目的并紧紧掌握它,用它指导和检验自己的学习。

(3)手脑并用:动手是实验课的特点之一,但绝不能为动手而动手,盲目动手和试试看的态度都是要不得的。在实验的各个环节中都要积极思考和研究实验内容及遇到的问题,随时总结,才能提高自己的实验素质。

(4)严肃认真:学生上实验课时不够严肃、认真是作不好实验的原因之一,所以必须严格遵守实验室规则,按照实验课的基本程序和要求,认真对待每一个环节。

4. 怎样写好实验报告

实验报告是对实验过程的总结,又是一种交流的手段,一定要重点处理好以下几点:

(1)实验原理:说明实验的理论依据(包括直接测量量与间接测量量之间的关系)。要习惯用非文字性语言(图、解析式)和索引,要为后面实验步骤的叙述提供支撑(该工作是预习的重要内容)。

(2)实验步骤:用自己的语言叙述所作的工作,说明你如何得到了报告所提到的信息。

(3)数据记录:一个实验一般都有多个直接测量量,而且往往是多次重复测量。所以,列表记录是经常采用的方法。要根据具体情况设计合适的表格,并根据测量内容给每个表格命上名。

一个好的记录表格,往往包含了实验者对实验过程的理解。所以,设计一个合适的记录表格是预习也是实验报告的重要内容。

要养成尊重事实、尊重自己工作成果的好习惯,这是培养“诚信”品质的一部分。否定一个数据一定要有充分的理由。

(4)数据处理:实验过程结束,只是得到了一些信息,只有对数据进行处理,才能得出结果。要明白,同样的材料(信息),处理方法不同,得出的结果也会不同。因此,一定要认真地进行数据处理工作,要用指定的方法,给出完备的结果。

凡是数值计算式一律分三步进行:原始公式→代入全部数据→算出最后结果(注意有效数字位数,不能遗忘单位)。

得出实验结果以后,我们可以对结果作一评价。如果某个结果明显地不合理,就要对实验过程进行分析、讨论、甚至重作。

值得强调的是,撰写实验报告是一份十分细致而艰苦的工作,特别是初学者,经常会出现这样那样的问题和错误。但只要认真对待,及时纠正发生的错误,就一定能掌握实验报告的写作技能,为我们以后的学习打下扎实的基础。

第 1 章 物理实验基础知识

本章所介绍的初步知识不仅在物理实验中要用到,而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。这部分内容牵涉面较广,不可能在一两次学习中掌握。我们要求读者首先阅读一遍,对提到的问题有一个初步的了解,然后结合每一个具体实验再细读有关的段落,通过运用加以掌握。

1 测量误差和不确定度

本节介绍测量误差、不确定度及相关内容。应当说明的是:对这些内容的深入讨论是普通计量学以及数理统计学的任务,本书只能引用其中的某些结论和公式,更详细的探讨和证明由数理统计等课程来完成。

1.1 测量

物理实验是以测量为基础的。不论是研究物理现象、探讨物理规律、研究物质特性,都要进行测量,即用量具或仪器,通过一定的方法直接或间接地用“标准”与被测对象进行比较。测量的结果应包括数值、单位以及对测量可信赖程度的描述。

测量可以分为直接测量和间接测量:如果待测量可以直接从测量仪器或量具上读出,称为直接测量,例如用米尺测量物体的长度,用天平称衡物体的质量等;如果待测量的数值不能直接测出,而只能通过它与直接测得量之间的函数关系计算出来,这种测量称为间接测量,例如测量球的体积,直接测量的是球的直径,将其代入体积公式,即可将球的体积计算出来。

测量中对同一待测量可以只测量一次,称为单次测量;也可以进行多次重复测量。多次重复测量,又分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量指的是用同样的仪器、在相同的条件下对同一物理量进行多次测量;如果在多次测量过程中,测量仪器或条件有一项变化,即为非等精度测量。本书中的多次测量,除特别说明外,均指等精度测量。

1.2 测量误差及其分类

1.2.1 测量误差

任何一个确定的物理量,都有一个客观存在的真实值,称为真值,这只是一个理想的

概念。而每一个测量,都是依据一定的理论或方法、在一定的环境中使用确定的工具、由一定的人来完成的,得到的结果称为测量值。测量值与真值不可能完全相同,其差值称为测量误差。

测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示:

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值}$$

$$\text{相对误差} = (\text{绝对误差} / \text{真值}) \times 100\%$$

对于某些有公称值的量(如光速)还可以求出其百分差:

$$\text{百分差} = (\text{绝对误差} / \text{公称值}) \times 100\%$$

绝对误差反映了测量值偏离真值的程度;相对误差或百分差则表示误差对测量结果的影响程度。

实践证明,误差存在于一切测量之中,而且贯穿于测量过程的始终。因此,分析测量产生的各种误差、尽量减少或消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计、给出测量结果的不确定程度是物理实验和工程测量不可缺少的组成部分。为此,必须了解误差的概念、产生原因、特性以及对其估算和评价方法的相关知识。

1.2.2 误差分类

根据误差的性质,可将其分为两种类型:

系统误差:在等精度条件下对同一被测量进行多次测量时,误差的大小和符号保持恒定或以可预知的方式变化的误差分量。其特征是具有某种确定性。

随机误差:在等精度条件下对同一被测量多次测量时,误差的大小和符号以不可预知、无法控制的方式变化的误差分量。其特征是具有随机性。

对于这两种性质不同的误差,我们将分别来讨论。

1.3 系统误差

1.3.1 系统误差的来源

系统误差的来源主要有以下几个方面:

(1) 仪器误差 由于仪器本身的固有缺陷或没有按照规定条件使用而引起的误差。如仪器的刻度不准、天平臂不等长、零点没有校准等。

(2) 方法、理论误差 由于理论、公式本身的近似性,或实验的装置和方法不能完全满足理论公式所规定的要求而引起的误差。如单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{L/G}$ 的成立条件是摆角趋于零,而测量中又必须具有一定的摆角;又如用落球法测重力加速度时没有考虑空气的阻力影响、用伏安法测元件电阻等等。

(3) 个人误差 由于实验者个人的心理或生理特点而引起的恒定的误差。如有的人对准目标时总是偏左或偏右,致使读数偏大或偏小,有的人反应速度迟缓、固有习惯不正确等。

(4) 环境误差 外界环境因素造成的误差。如在 20℃ 标定的标准电阻、标准电池在较高或较低的温度下使用等。

1.3.2 系统误差的发现

一般情况下,多次测量并不能发现系统误差,必须对整个实验原理、方法、测量步骤、

仪器等可能引起误差的因素进行仔细分析。常用的方法有：

(1)对比分析法 对同一个物理量,采用不同的方法或用不同的仪器,或改变实验中的某些参量,或改变某些测量条件,或不同的实验者进行对比测量,看结果是否一致,如不一致,就可能存在系统误差。

(2)理论分析法 分析测量所依据的理论公式、所要求的条件是否与实际情况相符;分析仪器所要求的条件是否满足等等。

(3)数据分析法 等精度测量的一系列数据应服从统计分布,如果分析发现偏差的大小有规律地变化,则可能有系统误差。

1.3.3 系统误差的消除或减小

系统误差的处理是一个非常重要的问题。一个实验结果的优劣,往往就在于系统误差是否已被发现并被尽可能地消除。实验前应预见和分析一切可能产生系统误差的因素,并设法减小它们。能否及时发现并正确处理系统误差,对实验结果的准确度有着极为重要的影响,也是实验者科学实验素质高低的重要表现。对于初学者来说,从一开始就应注意积累这方面的经验。

消除或减小系统误差是一件复杂而困难的事情,需要根据具体情况处理,但主要取决于实验者的经验、技巧和分析能力。常用的方法有:

(1)测量结果引入修正量(可定系统误差消除法) 由于仪器、仪表不准确产生的误差通常可通过与更准确(级别更高)的仪表作比较来得到修正量;由于理论、公式的不完善产生的误差可通过理论分析得出修正量。

(2)换用更合适的测量方法(未定系统误差补偿和消除法)

①交换法:交换被测物与参考物的位置。如用于“不等臂天平”、“电桥比率臂”等;

②替代法:用标准参考物替代被测物。如用于“电位差计”、“电桥”等;

③异号抵消法:改变测量条件使两次测量中系统误差的符号相反从而可在求平均值时被抵消。如用于“霍尔效应”、“载流螺线管测 B 时抵消地磁场”等;

④半周期期间测法:用相隔半个周期的测量结果取平均,如分光计的设计可消除因转轴偏心所造成的误差”等。

1.4 随机误差

随机误差指的是在多次测量同一被测量的过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。这种误差是实验中各种因素的微小波动引起的。例如实验装置和测量机构在各次调整、操作上的变动,测量仪器指示数值的波动,以及观测者本人在判断和估计读数上的随机性等等,这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,该变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但若对一个量的测量次数进行得足够多,则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。

根据实验情况的不同,随机误差出现的分布规律有高斯分布(又称正态分布)、 t 分布等等。

当测量次数趋于无限,随机误差严格服从正态分布;当次数减少时,概率曲线变得平坦,成为 t 分布。

1.4.1 高斯分布与标准误差 σ

遵从正态分布的随机误差具有下列特征:

单峰性 绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,绝对值大的误差出现的可能性小。

对称性 绝对值大小相等的正误差和负误差出现的机会均等,对称分布于真值的两侧。

有界性 非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。

抵偿性 当测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消。因而误差的代数和趋向于零。

这些特征可以用高斯分布曲线形象地表述出来,见图 1.1.1。横坐标 x 为测量值,纵坐标为测量值的概率密度函数 $p(x)$,它反映了随机变量的概率分布。例如,某随机变量取值落入区间 $[a, b]$ 的概率为 P ,则

$$P = \int_a^b p(x) dx$$

如果区间扩大到 $(-\infty, +\infty)$,则

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$$

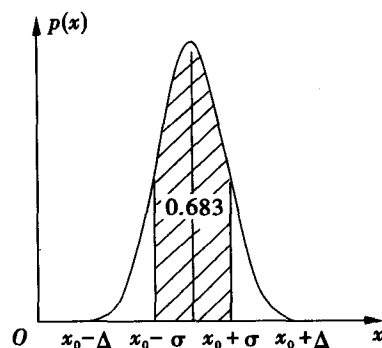


图 1.1.1 正态分布曲线

高斯最先导出了正态分布的概率密度函数 $p(x)$ 的表达式:

$$p(x) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma) \times \exp(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}) \quad (1.1.1)$$

其中

$$x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}}$$

如图 1.1.1,曲线峰值处的横坐标相当于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时测量量的平均值 x_0 ,横坐标上任一点 x_i 到 x_0 处的距离 $(x_i - x_0)$ 即为测量值 x_i 相应的随机误差。可以看出,随机误差小的概率密度大,随机误差大的概率密度小, $x = x_0$ 处的概率密度最大。显然,参数 σ 能够反映曲线的形状,是表征测量值离散性的重要参数: σ 愈小, $p(x)$ 愈大,分布曲线愈陡,测量数据重复性愈好; σ 愈大, $p(x)$ 愈小,分布曲线愈平缓,数据重复性愈差。我们称 σ 为正态分布的标准误差。

如图 1.1.1,曲线下横坐标上任何两点间的某一部分面积可以用来表示随机误差在相应范围内的概率。如图中阴影部分 $x_0 - \sigma$ 到 $x_0 + \sigma$ 之间的面积就是随机误差在 $(x_0 - \sigma, x_0 + \sigma)$ 范围内的概率(又称置信概率),即测量值落在区间 $(x_0 - \sigma, x_0 + \sigma)$ 中的概率,由定积分计算得其值为 $p = 68.3\%$ 。如将区间扩大到 2σ ,则 x 落在区间 $(x_0 - 2\sigma, x_0$