

大学物理实验教程

主编 舒象喜 向绍纯 谌雄文
尹 胜 郑明飞



中南大学出版社

大学物理实验教程

主编	舒象喜	向绍纯	谌雄文
	尹 胜	郑明飞	
参编	赵宇靖	施振刚	李晓帆
	贺菊香	王安平	唐新文
	袁晓玲		



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

内容提要

本书以 2010 年教育部高等教育物理学与天文学教学委员会物理教学分会编写的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》为指导,结合地方院校的人才培养目标定位,由怀化学院机械与光电物理学院历年担任大学物理实验教学的教师组成编写组,总结多年的大学物理实验教学经验,在原教材的基础上集体修改重编。全书共分 5 章,第 1 章为误差理论和数据处理;第 2 章为实验中的基本测量方法和操作技术;第 3 章为基础性实验;第 4 章为综合性实验;第 5 章为设计性及研究性实验。

本书可作为高等院校非物理类各专业的大学物理实验教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/舒象喜等主编.

—长沙:中南大学出版社,2016.7

ISBN 978-7-5487-2370-7

I. 大... II. 舒... 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(2016)第 161673 号

大学物理实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

舒象喜 向绍纯 谌雄文 尹 胜 郑明飞 主编

☐责任编辑 刘 灿

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南地图印制有限责任公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 14 ☐字数 349 千字

☐版 次 2016 年 7 月第 1 版 ☐印次 2016 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2370-7

☐定 价 38.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

大学物理实验是学生进入大学后接触的第一门较为系统、完整的实验课程。它对学生的基本实验技能、科学实验素质和创新思维习惯等诸多方面的培养具有不可替代的作用。学生能够从中领略到物理学家为物理学的发展和社会的进步所作出的杰出贡献,学到他们卓越的物理思想、巧妙的实验设计和科学的分析问题及解决问题的方法,以及锲而不舍、严谨求实的科学精神。这些思想、方法和精神本身已经超越了物理学的范畴,对所有从事科学研究的工作者都具有普遍的指导作用。学习这些思想、方法和精神将会使学生终身受益。

本套教材的重编是在原有教材的基础上进行大幅度地增删和完善。全体任课教师在几年的教学实践中,提出了很多宝贵的意见。集体编写这本教材,是我校几年来大学物理实验教学改革经验的总结,是全体教师和实验技术人员多年辛勤劳动的结晶。本套教材符合和体现了现代教育的特征和要求。根据我校大学物理实验的课时数和大学一、二年级开设大学物理实验课且只开设两个学期等实际情况,本书能做到难易程度与学生知识水平相适应;本套教材以2010年教育部高等教育物理学与天文学教学委员会物理教学分会编写的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》及我校的教学目标人才培养定位要求,建立独立的大学物理实验教学课程体系。

全书分为5章。基础性实验(共14个项目),教学重点是物理实验基本操作技能和操作规程的训练。通过这些基础性项目实验,让学生熟悉物理实验的常用仪器和设备,掌握正确的操作程序和熟悉基本的调试技巧,熟悉数据处理的基本方法和建立不确定度评定的概念。综合性实验(共9个项目),教学重点是培养学生综合运用物理实验方法的能力。通过这些经典实验项目,使学生从中领略精湛的实验设计思想和巧妙的实验技术,学习常用的物理实验方法和测量方法,增强学生将物理实验原理与实际工程应用有机结合的思维和意识,强化学生实践动手能力。设计性及研究性实验(共9个项目),教学重点是让学生了解科学实验的程序和全过程,培养学生独立思考和解决问题的能力。为以后的科学研究打下基础。

教材精选了部分传统经典的物理实验,实验内容选择上注重时代性和先进性,力争做到大学物理学实验与现代科技接轨,与学生的专业学习相对接,实验项目中增加实验背景和应用前景内容,在保留基础和经典传统实验情况下,尽可能选择与学生的专业学习相对接的实验,尽可能地按照国家技术标准编写相关的内容,例如材料专业的可安排动态杨氏模量测定实验,并引入国家技术标准内容,以激发学生的学习积极性和热情,并为学生将来实际应用打下基础;能力培养方面,以基本能力培养为主线,以基础实验和综合性实验为主,适当增加设计性实验,尝试研究性实验。在测量方法上引入了现代的新技术和新器件,如在力学、

热学及电磁学类实验中大量引入了数字式仪表、光电传感器、力敏传感器、热电偶和集成温度传感器。这有利于学生在学习传统的实验方法的同时,又了解了现代的测量技术。

教材突出学生在教学中的主体地位,充分考虑了大学物理实验独立开课和学生物理知识相对薄弱的实际情况,为了便于学生自学,教材对每个实验项目均提出了明确的“实验目的”,对各项实验的原理均力求深入浅出地阐明物理意义,以便学生能理解其中的缘由,减少盲目性。对实验项目涉及的主要仪器与设备的性能和使用方法,教材都给予了简要的说明,大部分实验项目都给出了规范的实验步骤,以便于学生通过阅读,掌握其操作程序。从而形成科学的思维模式和养成良好的实验习惯。每个实验均附有“思考题”,这些“思考题”均是以相关实验的环境变化、条件变化或方法变化后,实验结果或实验现象将如何变化的更深层次的问题,以利于开拓学生思维。

教材在第1章中较详细介绍了用计算机软件处理实验数据的方法,便于学生自学,附录部分给出了国家法定的计量标准和常用的物理数据,供实验时查阅。

由于编者水平有限,本教材不妥之处在所难免,恳请读者和同行专家不吝批评指正。

编 者

2016年5月于怀化学院

目 录

绪 论	(1)
0.1 科学实验在现代科学技术发展中的地位与作用	(1)
0.2 物理实验在科技创新与人才培养中的地位与作用	(1)
0.3 大学物理实验课程的教学目的	(1)
0.4 大学物理实验课程的教学要求	(2)
第1章 误差理论与实验数据处理基础知识	(5)
1.1 测量与误差	(5)
1.2 误差的处理	(8)
1.3 测量不确定度	(13)
1.4 有效数字及其运算	(19)
1.5 实验数据处理的基本方法	(22)
1.6 实验数据的计算机处理	(28)
1.7 常用仪器的仪器误差	(35)
第2章 实验中的基本测量方法和操作技术	(39)
2.1 基本测量方法	(39)
2.2 基本实验操作技术	(42)
第3章 基础性实验	(46)
3.1 实验1 长度和质量的测量	(46)
3.2 实验2 伏安法测电阻	(51)
3.3 实验3 示波器的使用	(58)
3.4 实验4 薄透镜焦距的测量	(70)
3.5 实验5 验证牛顿第二定律	(75)
3.6 实验6 动量守恒和机械能守恒研究	(81)
3.7 实验7 霍尔效应测磁场	(86)
3.8 实验8 牛顿环测透镜的曲率半径	(92)
3.9 实验9 三线摆法测转动惯量	(97)
3.10 实验10 冷却法测金属的比热容	(102)
3.11 实验11 拉脱法测液体的表面张力系数	(106)
3.12 实验12 稳态法测不良导体的导热系数	(110)

3.13	实验 13	分光计的调节与使用	(114)
3.14	实验 14	万用电表的使用	(121)
第 4 章 综合性实验			(128)
4.1	实验 15	迈克尔逊干涉仪的调节与使用	(128)
4.2	实验 16	动态法测定材料的杨氏模量	(133)
4.3	实验 17	RLC 电路暂态特性研究	(138)
4.4	实验 18	温度传感器的特性研究	(143)
4.5	实验 19	杨氏双缝干涉实验	(150)
4.6	实验 20	声速的测定	(154)
4.7	实验 21	光速的测定	(159)
4.8	实验 22	密立根油滴实验	(164)
4.9	实验 23	夫兰克 - 赫兹实验	(171)
第 5 章 设计性实验			(178)
5.1	实验 24	望远镜的设计与组装	(179)
5.2	实验 25	投影仪的设计与组装	(184)
5.3	实验 26	单摆法测重力加速度	(186)
5.4	实验 27	电表的改装与校准	(189)
5.5	实验 28	直流稳压电源的设计与制作	(195)
5.6	实验 29	光敏电阻特性与简单应用	(196)
5.7	实验 30	太阳能电池特性研究	(199)
5.8	实验 31	用钢直尺测激光波长	(200)
5.9	实验 32	用示波器显示二极管的伏安特性曲线	(200)
附 录			(203)
附录 1 中华人民共和国法定计量单位			(203)
附录 2 基本物理常数和部分常用物理量数值			(205)
附录 3 重要物理实验编年史(至 1996 年)			(213)
参考文献			(218)

绪 论

0.1 科学实验在现代科学技术发展中的地位与作用

科学实验,是指人们按照一定的研究目的,借助特定的仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,突出主要因素,对自然事物和现象进行精密、反复的观察和测试,探索其内部的规律性。这种对自然的有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。

原子能、半导体、激光等最新科技成果依靠总结生产技术经验是发现不了的,而是要在科学家的实验室里才会被发现。现代化的企业为了不断地改进生产过程和创新产品,也十分重视实验研究工作,都具有相当规模的研究实验室。

因而,科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工程技术的基础;同时,科学理论对实验起着指导作用。要处理好实验和理论的关系,重视科学实验,重视进行科学实验训练的实验课程的学习。

0.2 物理实验在科技创新与人才培养中的地位与作用

物理学,是一门实验科学,无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都取决于实验。例如,杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立;赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁波理论获得普遍承认;卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密;近代的高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部去探索其规律性。

物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

大学物理实验,是对高等院校理工科专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生在高等院校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着很重要作用;同时,它也将为今后的学习、工作打下良好的基础。

0.3 大学物理实验课程的教学目的

(1) 通过大学物理实验课程的教学活动,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法,增强学生的基本实验技能。

包括做好课前预习,独立完成实验的准备工作,能够编制出“操作程序”;能够对实验现象进行分析和判断;正确记录实验数据;科学地处理实验数据,绘制图线和表格,撰写实验报告;独立完成简单的设计性实验等。

(2) 通过大学物理实验课程的实验学习, 培养与提高学生的科学实验能力。

① 自学能力——能够自行阅读实验教材和参考资料, 做好实验前的准备;

② 动手实践能力——能够借助教材和仪器说明书, 正确调节、使用常用仪器;

③ 思维判断能力——能够运用物理学理论, 对实验现象进行初步的分析和判断;

④ 表达书写能力——能够正确记录和处理实验数据, 绘制图线和表格, 说明实验结果, 撰写合格的实验报告;

⑤ 简单设计能力——能够根据实验要求, 确定实验方法和条件, 合理选择仪器, 拟定具体的实验程序。

(3) 通过实验室管理和学习要求的教育, 培养与提高学生的科学素养。

包括严谨的工作作风, 理论联系实际和实事求是的科学态度; 不怕困难、主动进取的探索精神, 主动探索的创新精神; 遵守操作规程、遵守纪律和爱护国家财产的优良品德; 在实验过程中, 相互协作、共同探索的合作精神等。

(4) 通过课外的自学、竞赛、小发明、科学研究等活动, 培养与提高学生的创新能力。

包括对实验现象的观察、分析; 对物理量的测量; 深刻理解和掌握这些实验方法中蕴含的物理思想等。

0.4 大学物理实验课程的教学要求

大学物理实验是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动。实验课程的教学安排不能像书本教学那样, 使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行。因此, 学习大学物理实验课程就要求同学们投入较多的精力, 并且有较强的独立工作能力。

做一个实验包括三个学习环节: 课前预习、课堂操作、课后撰写报告, 课前预习是课堂操作的必要准备, 课堂操作是最基本的环节, 课后撰写报告是实验成果的书面表达。因此, 学好大学物理实验课程的关键在于把握以下三个基本环节:

1. 课前预习

这一环节是必不可少的, 没有预习或没有完成预习报告是不允许进行实验操作的。课前预习应做好三件事: 一是阅读教材, 二是主动去熟悉仪器, 三是写出预习报告。实验教材是进行实验的指导书, 它对每个实验的目的、要求、原理都做了明确的阐述。因此, 在上实验课前都要认真阅读教材, 必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及的实验仪器, 在预习时可阅读教材中有关该仪器的介绍, 了解其构造原理、工作条件和操作规程等, 必要时可到实验室去观察实物, 并在此基础上写好预习报告。

预习报告内容主要包括以下几个方面: 实验名称, 实验目的, 实验仪器, 实验原理(含绘出力学图、热学图、电路图、光路图、示意图等原理图), 实验内容与步骤, 数据记录表。

2. 课堂操作

(1) 实验中应遵守的原则

① 实验仪器的操作规则。

仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书; 在教师指导下正确使用仪器, 注意爱护仪器, 轻拿轻放, 防止损坏。对于电磁学实验, 必须检查电路的连接正确无误后, 方可接通电源进行实验。仪器的摆放, 以安全和方便为原则。例如, 高压电源的输出端应远离实验

者;经常需要调节或使用的仪器,应放在便于操作的位置上,如砝码盒应放在天平的砝码盘附近;一些电学实验,仪器部件较多,实验者首先要把这些仪器部件一一安排在合适的位置上,然后再连线;这样才能保证实验台上的仪器既安全又方便。实验完成后,应将所有仪器恢复原位。仪器必须都调整到正确的位置和稳定的状态。在安装和调整仪器时,不得用书本、纸片和木块做垫块,因为这些物品本身就不稳定,容易造成测量数据的分散性,影响实验的质量。

②实验仪器的故障排除。

仪器在使用过程中难免发生故障,使仪器不能正常工作或数据失常,这时应立即停止实验,并设法排除故障。如果学生对所用仪器比较熟悉,可以独立地去排除,否则应报告指导教师,待故障排除后,才能继续做实验。

③操作的顺序。

先听课后实验,先观察后操作,先调好后测量,先粗测后细测。

(2) 读数

测量仪器从被测对象获得的信息以各种形式输出,最常见的输出形式是在标尺上按指示器的位置得到读数。读数时要注意以下几点:

①要取位合理,有效数字要读到有误差的那一位。

②要注意消除视差。例如,在读取标尺示值时,眼睛要正对示值刻线的上方;在读取指针式仪表的示值时,眼睛要正对指针的上方;在用助视仪器读取线纹(谱线或条纹)的位置时,要将线纹的像调节到助视仪器的分划板平面上。

③要有足够的耐心,尤其在重复性测量时,不要以为后面的数据一定和前面的数据相同。当指示器再次临近前面的数据时,不要迫不及待地记录数据,因为指示器可能还在缓慢地移动。

④若出现异常,应立即停止测量,然后检查测量仪器是否失调,环境条件是否发生异常或突变。如果一时找不到原因,应及时报告指导教师。

(3) 数据记录

①直接记录原始数据,数据需真实、精确、完整和规范。

②按规定要求处理数据。

③除记录实验数据外,还应记录实验日期、实验题目、仪器编号以及操作过程中出现的异常现象等。

3. 撰写报告

(1) 实验报告的要求

写实验报告的目的是为了培养和训练采用书面形式总结工作或报告科学成果的能力。报告是实验成果的文字报道,最起码应做到字迹清楚、文理通顺、图表规范、数据完备、结论正确,给人以清晰的思路、见解和新的启迪。实验报告一般应写在专用的实验报告纸上,其内容包括实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、数据记录与处理、结果与分析等几个部分。实验报告必须附有教师签字的原始数据记录才有效。

(2) 实验报告的书写

①“实验名称”和“实验目的”,一般应与教材中提法一致。

②“实验仪器”,要注明型号规格、仪器编号,应填写本次实验所用的主体设备和主要

配件。

③“实验原理”，应在理解实验原理的基础上，用自己的语言简要叙述，要求做到简明扼要、图文并茂(含力学图、热学图、电路图、光路图、示意图等原理图)，并列出的测量和计算所依据的公式，注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

④“实验内容与步骤”，只要写出本实验要做的主要内容及部分关键性的调整方法和测量技巧(不是整个过程的详细描述，而是个人理解的简述，可简可详)，且按实验先后顺序书写。

⑤“数据记录与处理”，数据记录一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始数据。数据处理要求写出处理的主要过程、图表、误差分析等。

⑥“结果与分析”，结果是在数据处理完成之后，必须以醒目的方式完整地表示出实验结果或给出实验结论；分析是实验报告中最开放、最灵活的部分，重在说理，所以能反映实验者观察和分析能力的高低，其内容一般不受限制，可以是对实验现象、实验结论和误差原因进行分析，也可以是对实验方案及其改进意见进行讨论或评述，还可对本实验相关问题进行更深层次的探讨分析。

第1章 误差理论与实验数据处理基础知识

科技研究、产品制造、物质生活、物质流通与质量管理都离不开测量,测量涉及人类活动的一切领域,在物理学发展史上,对物理现象、状态或过程的各种量的准确测量,是实验物理的关键工作。由于实验方法和实验设备的不完善,环境的影响,以及受人们认识能力的限制等,测量所得数据与被测量的真值之间,不可避免地存在着差异,这在数据上表现为误差。随着科学技术的不断进步和人们认识水平的不断提高,虽可将误差控制得越来越小,但终究不能完全消除它,因此必须对测量过程和科学实验中的误差进行研究。研究误差的主要意义在于:①正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以减小或消除误差。②正确处理测量数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下得到更接近于真值的数据。③正确组织实验过程,合理设计或选用仪器,采取适当的测量方法,以便在最经济的条件下,得到理想的结果。

在物理实验中,不仅要明确测量对象,选择恰当的测量方法,正确完成测量的各个步骤,还要能够应用误差理论和实验数据处理的基本知识,对实验数据进行处理、分析,得出实验结果或结论。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

1. 测量的含义

测量是用实验方法获得待测量量值的过程。具体地说,测量就是把被测的量和选做标准的(即取作单位的)同类量进行比较,定出它是标准量的多少倍。如测一个人的身高,人的身高是米尺的1.75倍,则身高为1.75 m或175 cm。测量结果的数值大小与选择的单位有密切关系,同样的一个量,选择的单位越小,结果数值就越大,所以测量结果必须标明单位。

由测量获得的被测量的值,称为测量结果,测量结果仅仅是被测量的最佳估计值,并非真值,完整表示测量结果时,还应给出测量不确定度。

2. 测量的分类

从不同角度考虑,测量有不同的分类方法。比如按测量值获得的方法不同可分为直接测量和间接测量,按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量,等等。

用测量仪器或量具与被测量比较,直接读取被测量量值的测量,称为直接测量。直接测量是间接测量的基础。如长度、时间、质量、温度、电压等可分别用直尺、停表、天平、温度计、电压表直接读取被测量量值,都属于直接测量。

依据被测量和直接测量量之间的已知函数关系,通过计算得到被测量值的测量,称为间接测量。如测一立方体的体积、密度可以用间接测量。间接测量的关键是依据相关理论,得到测量模型(测量计算公式)。同一物理量可以依据不同的理论,建立不同的测量模型。如测

重力加速度,你能建立哪些测量模型呢?

直接测量与间接测量并不是绝对的,一个量采用不同的测量方法,可以是直接测量,也可以是间接测量。例如测电阻,可用欧姆表直接测量,也可用伏安法等方法间接测量。

在相同的测量条件(即被测对象、测量仪器设备、测量方法、测量环境和测量人完全保持不变)对某一待测量所做的多次重复测量,称为等精度测量,又称为重复性测量。因测量条件完全相同,不能判断所获得的哪个测量数据更接近真值,或者说各测量值具有相同的精度,或者说具有相同的可信度,没有理由说哪一次测量的精度更高。

若测量条件部分或全部改变,则各测得值的精度或可信度将变得不一样,称为非等精度测量,又称为复现性测量。非等精度测量与等精度测量的性质不同,数据处理比较复杂,一般要考虑权的问题,比如求平均用加权平均。只要测量条件变化不大,一般都可以近似当成等精度测量。大学物理实验中一般只研究等精度测量。

1.1.2 测量误差

1. 误差的含义

国际标准化组织(ISO)将真值定义为:与给定的特定量的定义完全一致的量值。是一个物理量在一定条件下所具有的不以人的意志为转移的客观实际值。真值只是个理想概念。一般情况下,真值是不知道的,只是在某些特殊情况下,真值可认为是已知的,主要包括理论真值和约定真值等。

理论真值:如三角形内角和是 180° ,圆周角是 360° ,理想电容器的电流与电压的相位差为 90° 等。

约定真值:由国际计量大会决议所定的值。如7个SI基本单位是计量学约定真值。

近似真值:高一级计量标准器具的误差与低一级计量标准器具的误差之比小于 $1/3$,则可认为前者是后者的相对真值,是近似真值。在系统误差可忽略时,多次测量的平均值也可以作为近似真值。

误差(error):是指测量值与被测量的真值之差,也称绝对误差(注意不是误差的绝对值或绝对值误差)。若测量结果为 x ,真值为 a ,则:

$$\delta = x - a \quad (1.1.1)$$

误差 δ 可正可负,反映了测量值偏离真值的程度和方向。 x 可分为单次测量结果和平均测量结果。

相对误差(relative error):误差与真值之比称为相对误差。

$$E_r = \frac{x - a}{a} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

2. 误差的分类

根据误差的性质,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差(systematic error)

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号保持不变;或者在条件变化时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),这类误差称为系统误差。

各系统误差的成因不同,所表现出的规律也不同。

①按其变化规律,系统误差可分为定值系统误差和变值系统误差(线性变化、周期变化等)。前者的大小和符号保持不变,如仪器的零点误差。

②按掌握程度,系统误差分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差的变化规律是确知的,如上述的定值系统误差,线性、周期性变化的系统误差,以及可以表示出的复杂规律系统误差,这类误差可以修正。未定系统误差的变化规律是不能确定的。

(2) 随机误差(random error)

在重复性测量过程中,由于存在一系列有关因素微小的随机波动,使得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,这类误差称为随机误差。

随机误差由测量过程中的一些随机的或不确定的因素引起,如人的感官灵敏度及仪器精度有限,温度、湿度、气流等环境因素变化,电源电压波动,微小振动等都会引起随机误差。由于引起的因素复杂,又往往交织在一起,不能分开,因此随机误差是无法控制的,无法从实验中完全消除,一般通过多次测量来达到减小随机误差的目的。

随机误差的主要特征是随机性,在重复性测量条件下,对同一量进行多次测量,某一次测量的误差绝对值和符号,以不可预知的方式变化,是随机的。但对于足够多次的测量,随机误差服从统计规律,可以用统计学方法估计其对测量结果的影响。

(3) 粗大误差(gross error)

粗大误差又称过失误差,它是由于实验者疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定预期的误差。属非正确测量误差,其主要特征是明显歪曲测量结果。在实验测量中要极力避免粗大误差,在处理数据时,应首先按一定方法检验出含有粗大误差的测量值——异常值(或称坏值),并将其剔除。

应当指出,系统误差与随机误差之间并不存在绝对的界限,在一定条件下它们可以相互转化。例如,按一定基本尺寸制造的量块,存在制造误差,对某一具体量块而言,制造误差是一确定数值,是系统误差;但对一批量块而言,制造误差各不相同,又表现为随机误差。又如,测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当作系统误差,又可以当作随机误差。有时系统误差和随机误差混在一起,也难以严格区分。例如,测量者使用仪器时的估读误差往往既包含系统误差,又包含随机误差,前者是指测量者读数时总是有偏大或偏小的倾向,后者是指测量者每次读数时偏大或偏小的程度又互不相同。

3. 测量结果的定性评价

定性评价测量结果,常用精密度、正确度和准确度三个概念,但不能将这三个概念用于定量评价。

精密度反映随机误差大小的程度,是对测量结果重复性的评价,精密度高是指测量的重复性好,各次测量值的分布密集,随机误差小。

正确度反映系统误差大小的程度。正确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较小,测量的系统误差小。

准确度反映随机误差和系统误差综合大小的程度。准确度高是指测量结果既精密又正确,即随机误差和系统误差均小。

通过图1-1-1所示打靶弹着点的分布图,可以形象地说明上述3个概念。图(a)表示精密度高,但正确度低。图(b)表示正确度高,但精密度低。图(c)表示精密度和正确度都高,即准确度高。

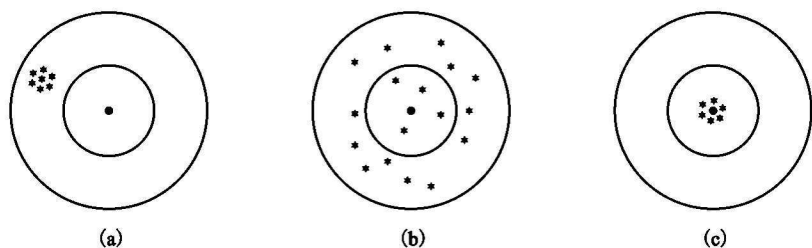


图 1-1-1 精密度、正确度和准确度

1.2 误差的处理

1.2.1 系统误差的处理

1. 如何发现系统误差

系统误差往往隐藏在测量数据中,一般也不能通过多次测量来消除。在许多情况下,系统误差往往是影响测量结果准确度的主要因素,所以在实验中,我们应特别重视系统误差的分析,通过一些方法发现系统误差,设法修正、减小或消除系统误差,或估算它对结果的影响。以下是发现系统误差的一些方法。

(1) 数据分析法

随机误差是服从统计规律的,如果测量结果不符合预想的统计规律,则可怀疑存在系统误差。对于一测量列,可采用列表或作图方法,观察残差随测量顺序的变化规律,如有明确的变化规律(如线性、周期性等),则可判断存在系统误差,否则,无理由怀疑存在系统误差。

(2) 理论分析法

分析实验依据的理论和实验方法是否存在不完善的地方,检查理论公式所要求的条件是否满足,仪器要求的使用条件是否得到满足,所用仪器是否存在缺陷,以及实验者的素质和技术水平是否存在造成误差的因素,从而得到有关系统误差是否存在的信息。例如,气垫导轨实验中,滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层黏滞阻力的作用会引起速度减小。如果实验作无摩擦的理想情况来处理,就会产生与摩擦力有关的系统误差。又如,单摆实验中,利用近似公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 求 g , 测量结果也必然存在系统误差。

(3) 实验对比法

通过改变产生系统误差的条件,如采用更准确的仪器,在不同条件下进行检定性实验,比较测量结果,从而发现系统误差,实验对比法是发现并确定系统误差最有效、最常用的方法。

2. 消除或减小系统误差的方法

(1) 消除误差源

用消除误差源的方法消除系统误差是最理想的方法。测量之前,对采用的原理和方法、测量装置、测量环境条件等做全面检查和分析,确定有无明显能产生系统误差的因素,并采取相应措施,将系统误差从产生的根源上加以消除或减小到可忽略的程度。如仪表使用前的校准,保证测量环境满足测量条件等。

(2) 采用适当测量方法

在测量过程中,有时可以根据系统误差的特点,采用一些专门的测量技术和方法,从而实现减小甚至消除系统误差的目的。下面介绍几种消除系统误差的方法。

①交换法:将测量中被测量与标准量的位置互相交换,使两次产生系统误差的因素对测量结果的影响起相反作用,从而抵消定值系统误差。例如,用天平测物理质量时,可将待测物与砝码交换位置再测一次,通过两次结果的几何平均,以消除天平不等臂产生的系统误差。

②替代法:替代法是在测量条件不变的情况下,用一个标准量去代替被测量,并调整标准量使仪器的示值不变,这样被测量就等于标准量的数值。这样就消除了除标准量本身的定值系统误差以外的其他系统误差。例如,用替代法测电阻。

③抵消法:在实验过程中,可改变测量方法(如测量方向等)使两次测量中的误差符号相反,取平均值以消除系统误差。例如,在霍尔效应实验中,霍尔元件的横向电压中除霍尔电压外,还会有其他4种附加电压,分别改变加在霍尔元件的电流方向 and 外加磁场方向,可以消除其中的3种附加电压对霍尔电压的影响。

④差值法:差值法是通过改变实验参数(如自变量)进行测量,并对测量数据求差值来获取未知量的方法。该方法可以消除某些定值系统误差。例如,伏安法测电阻,改变电压,读电流差值,可以消除电表零位不准带来的系统误差。在差值法基础上的逐差法也具有消除系统误差的作用。

⑤对称测量法:对称测量法是减小或消除系统误差的一种有效方法。如霍尔效应测磁场实验中消除附加电压的影响就采用了对称测量法。

⑥半周期偶数测量法:是指按系统误差变化的半个周期进行一次测量,每个周期内得到两个测量值,取平均值作为测量结果,以此达到消除周期性变化的系统误差的目的。例如,分光计采用在相隔 180° 的直径上设置两个角游标进行读数,可以消除由于刻度盘和转轴中心不重合(偏心差)引起的周期性系统误差。

(3) 采用修正方法对结果进行修正

如果系统误差可以通过实验或计算得到其大小和符号,则在结果中引入修正值加以消除。例如,仪器(如螺旋测微器)存在零点读数而产生系统误差有两个解决方法:一是对仪器进行校正;二是记下零点读数,再用实际读数减零点读数加以修正。

由于系统误差的复杂性,处理系统误差的方法和措施是多样的,这在很大程度上取决于测量人员的经验和知识水平。

1.2.2 随机误差的处理

1. 随机误差的统计分布规律

虽然单次测量时的随机误差大小与正负是不确定的,但对于多次测量来说,随机误差却服从一定的统计规律。分布规律有很多种,如正态分布、t分布、均匀分布等,其中正态分布是最常见的一种。

服从正态分布的随机误差的概率密度函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2.1)$$

该函数首先是由德国数学家和理论物理学家高斯于1795年导出的,因而也称为高斯分布函数。 f 表示误差出现在 $[\delta, \delta + d\delta]$ 区间的概率,即概率密度,如图1-2-1中阴影部分面积。

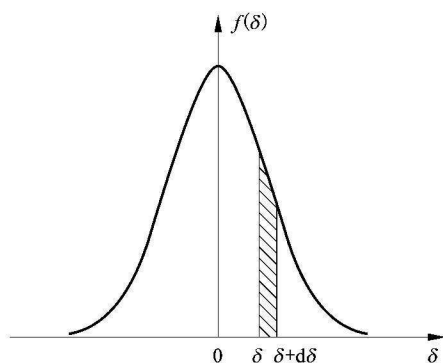


图 1-2-1 正态分布函数图像(1)

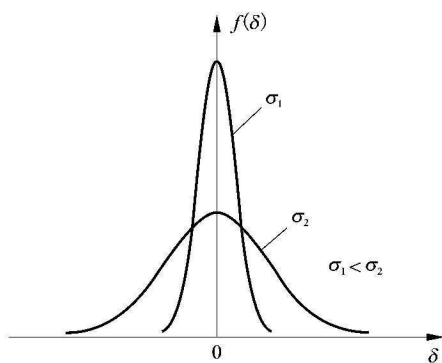


图 1-2-2 正态分布函数图像(2)

在消除了系统误差后, 式(1.2.1)中 $a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum x_i$ 为真值。 $\delta = x - a$ 为误差。 σ 称为标准误差(standard error), 简称标准差。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - a)^2}{n}} \quad (1.2.2)$$

标准误差 σ 不是测量值的实际误差, 也不是误差范围, 它只是对一组测量数据可靠性的估计, 是反映测量值离散程度的参数。如图 1-2-2 所示, σ 值小, 说明随机误差小, 测量值集中, 测量精密度高; σ 值大, 说明测量值精密度低, 随机误差大。

从图 1-2-1 可以看出, 正态分布的随机误差具有以下特点:

- 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有界性: 绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。也就是说, 在一定的测量条件下, 误差的绝对值不超过一定的限度。

③对称性: 绝对值相等、符号相反的正、负误差出现的概率均等。

④抵偿性: 随机误差的算术平均值随测量次数的增加而趋于零。

2. 随机误差的数字特征

满足正态分布的标准差 σ 等于方差 $D(\delta)$ 的正平方根, 即

$$\sigma^2 = D(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta \quad (1.2.3)$$

根据概率密度的含义, 误差出现在 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (1.2.4)$$

式(1.2.4)表示, 在一组重复性测量数据中, 有 68.3% 的测量误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内, 也可认为, 任意一次的测量误差落在 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为 68.3%。 P 称为置信概率, 对应的区间 $[-\sigma, \sigma]$ 称为置信区间。

更一般地, 置信区间可由 $[-k\sigma, k\sigma]$ 表示, k 称为包含因子, 除 $k=1$ 外, 还常取 $k=2$ 或 $k=3$, 对应的包含区间分别为 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, 3\sigma]$, 对应的置信概率为 95.4% 和 99.7%, 如图 1-2-3 所示。