



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

王红理 黄丽清 主编

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

王红理 黄丽清 主 编

王希义 主 审

江苏工业学院图书馆
藏书章

陕 西 出 版 集 团
陕西科学技术出版社

内 容 提 要

本书是高等工科院校物理实验课程的通用教材,它是在汲取西安交通大学几十年实验教材的经验,特别是独立设课后的教改实践经验的基础上,编写的一本具有新意的实用型教材。本书的体系结构新、选题内容新、取材新,重视应用、重视因材施教,便于自学。全书共分4章,编写了39个实验,内容涉及测量误差与数据处理、力学和热学、电磁学、光学、近代物理、综合实验、实验设计基础及物理量测量的应用等,书末附有计量单位及物理数据可供查阅参考。

本书可作为高等理工科院校及师范院校非物理专业类的物理实验课程的教材,也可作为职工大学、函授大学、电视大学、成人教育学院等有关专业的教学参考书,并可供物理专业类的师生、广大实验工作者及一般工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王红理,黄丽清主编. —西安:陕西
科学技术出版社,2009.8
ISBN 978-7-5369-4619-4

I. 大... II. ①王...②黄... 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(2009)第 074535 号

出 版 者	陕西出版集团 陕西科学技术出版社 西安北大街 131 号 邮编 710003 电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236 http://www.snstp.com
发 行 者	陕西出版集团 陕西科学技术出版社 电话 (029) 87212206 87260001
印 刷	陕西丰源印务有限公司
规 格	787mm × 1092mm 16 开本
印 张	19.25
字 数	442 千字
版 次	2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷
定 价	28.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

本书是按照高等工业院校物理实验课程教学基本要求,结合西安交通大学多年来开设工科物理实验的教学实践,特别是独立设课后的教学改革和课程建设的实践经验,参照历年使用的教材编写而成的。

物理实验课是对高等工科院校学生进行科学实验基本训练的一门必修基础课,是工科学生进入大学后系统学习基本实验知识、实验方法和实验技能的开端。交通大学从20世纪20年代成立物理系、建立物理实验室后,历来重视实践性教学环节。建系初期开出的60多个实验,当时在国内已属一流。这种“基础厚,要求严,重实践”的优良传统,一直保持至今。西安交通大学近十几年来为提高物理实验课的教学质量,在教学内容和教学方法各方面进行了一系列的探索和改革。在教材建设方面也做了不少尝试,在总结经验的基础上编写了这本新教材。

本书有以下特点:

1. 体系结构新 书中将测量误差、不确定度、数据处理和各类实验等内容安排为若干章节,分门别类,各自成章。每节前有基本知识或引言,每节后有小结。这样不仅将各个独立的实验有机地联系在一起,而且使学生在做过有限的实验后,通过归纳总结,能举一反三、触类旁通。既方便阅读,又比较系统。

2. 选题内容新 书中各实验项目都做了细心的筛选,既保留了久经实践检验、培养动手能力行之有效的传统实验,又增加了现代科技中具有代表性的著名实验。无论是基础实验还是综合与设计型实验,不拘泥于一种格式,着重灵活运用和能力的培养。

3. 取材新 书中的名词、术语、概念、误差公式均采用或参照最新国际通用的定义或形式,各种数据选用最新发表的资料。力求概念叙述准确清楚,公式推演繁简适当,各种数据真实可靠。

4. 重视应用 不少实验介绍了具有一定应用价值的实例。重视因材施教,专门设置一章编写了延伸拓展内容,介绍物理实验及物理量测量的实际方法,形式多样,启迪学生思维,激发学习兴趣,逐步培养学生的独立分析和解决实际问题的能力。在内容安排上,由详到简,循序渐进,便于自学,适合开放式教学。

全书共分4章,第一章在测量误差与数据处理中,适当地引入了不确定度的概念,以适应发展的需要,并为复习巩固本章内容编入了一些讨论题。第二章和第三章分别为力学和热学、电磁学、光学、近代物理等基础实验和综合实验,选题有较大的更新,对原实验内容也做了充实。第四章专门介绍了与本书实验内容相关的物理量测量的应用,其他相关

的实验方法,实验内容的延伸和拓展,对拓宽学生视野、培养学生创新能力有很好的作用。全书共选编 39 个实验。书末附录收编我国法定计量单位及物理数据,以便读者查阅参考。

实验教学是一项集体的事业,本书凝聚了我校 80 多年来所有从事实验课教学的教师和技术人员的智慧和劳动成果。从初建物理实验室的周铭、赵富鑫先生到解放后的潘耀鲁、顾元壮先生;从迁校西安后的陆兆祥、沈志新先生到改革开放初的李寿岭、宋朝聪同志;还有同时代许多其他同仁,为实验室的建设、实验课的改革、实验教材的编写都付出过辛勤的劳动,他们的无私奉献永远不会被忘记。近些年来,赵军武、李正同志也为实验室的建设和教材编写做了不少工作。在新教材出版之际,谨向他们表示谢意!

本书由王红理、王希义编写绪论、第一章和附录;王红理、黄丽清、肖国宏、武霞、王琪琨、俞晓红、何玉琴、董维、冯宇、贾亚民、程向明、唐勤、王雪冬、朱均、孙明珠、姜芸、张俊武、张玮参加了本书第二、三、四章的编写。张俊武、刘会玲用计算机绘制书中插图。全书由王红理、黄丽清统稿主编,王希义主审。本书在编写过程中,参阅了兄弟院校的有关教材,借鉴了不少宝贵的教学实践经验,在此深表谢意!由于编写时间仓促,业务水平有限,错误、疏漏之处恳请不吝指正!对关心、支持本书编写的所有同仁表示衷心的感谢!

编 者

2009 年 6 月

目 录

绪论	(1)
第一章 测量误差与数据处理	(5)
第一节 测量与误差	(5)
第二节 随机误差的估算	(9)
第三节 系统误差的发现和處理	(17)
第四节 测量不确定度和测量结果的表示	(22)
第五节 有效数字及其运算	(25)
第六节 实验数据处理的常用方法	(28)
习题	(40)
讨论题	(43)
第二章 基础物理实验	(47)
第一节 力学、热学物理量的测量与研究	(47)
基本知识	(47)
实验 1 物体密度的测定	(57)
实验 2 单摆实验	(60)
附 单摆周期与振幅的关系研究	
实验 3 用开特摆测量重力加速度	(66)
实验 4 液体动力黏度的测定	(69)
附 用落球法测定液体黏滞系数	
实验 5 金属杨氏模量的测定	(75)
附 用霍尔位置传感器测量金属的杨氏模量	
实验 6 物体转动惯量的研究	(81)
实验 7 固定均匀弦振动的研究	(87)
实验 8 用混合法测定金属的比热容	(90)
附 用混合法测量不良导体的比热容	
实验 9 测量冰的熔解热	(96)
实验 10 不良导体导热系数的测定	(100)
实验 11 液体表面张力系数的测量	(103)
实验 12 物质的熔点及相变研究	(107)

小结	(110)
第二节 电磁学物理量的测量与研究	(111)
基本知识	(111)
实验 13 非线性电阻特性的研究	(122)
实验 14 中值、低值及高值电阻的测定	(124)
附 非平衡电桥与热敏电阻	
实验 15 直流电势差计及其应用	(137)
实验 16 用电流场模拟静电场	(143)
实验 17 电子示波器及其应用	(147)
实验 18 用示波器测量相位差及频率	(152)
实验 19 用示波器研究 RLC 电路特性	(156)
实验 20 用磁聚焦法测定电子荷质比	(163)
小结	(167)
第三节 光学、声学物理量的测量与研究	(168)
基本知识	(168)
实验 21 透镜成像规律的研究	(171)
实验 22 分光计的调整和折射率的测定	(175)
实验 23 用阿贝折射仪测量折射率	(182)
实验 24 迈克耳孙干涉仪的调整及波长测量	(190)
实验 25 等厚干涉及其应用	(193)
实验 26 用光栅测量光波波长	(197)
实验 27 分波阵面法干涉	(201)
实验 28 光的偏振和旋光	(205)
实验 29 单缝衍射	(210)
实验 30 声速的测定	(212)
小结	(216)
第三章 综合物理实验	(217)
实验 31 光电效应及普朗克常数的测定	(217)
实验 32 霍尔效应	(221)
实验 33 声光效应	(226)
实验 34 铁磁性材料居里温度的测定	(229)
实验 35 金属电子逸出功的测定	(233)
实验 36 测定光源的辐射能谱	(236)
实验 37 密立根油滴法测电子电荷	(241)
实验 38 光学全息照相	(246)

实验 39 PN 结正向压降与温度关系的研究	(250)
小结	(254)
第四章 物理实验方法和物理量测量的实际应用	(256)
第一节 物理实验方法的多样化	(256)
第二节 物理效应及物理量测量的实际应用	(269)
附录一 中华人民共和国法定计量单位	(284)
1. 国际单位制(SI)的基本单位	(284)
2. 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位	(284)
3. 由于人类健康安全防护上的需要而确定的具有专门名称的 SI 导出单位	(285)
4. SI 词头	(285)
5. 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位	(286)
附录二 常用物理数据	(287)
1. 基本物理常量(1986 年国际推荐值)	(287)
2. 20℃时物质的密度	(288)
3. 标准大气压下不同温度时纯水的密度	(289)
4. 水在不同压强下的沸点	(290)
5. 流体的动力黏度	(291)
6. 20℃时常用金属的杨氏模量	(291)
7. 海平面上不同纬度处的重力加速度	(292)
8. 物质中的声速	(292)
9. 物质的比热容	(293)
10. 金属和合金的电阻率及其温度系数	(294)
11. 常用热电偶的温差电动势	(294)
12. 物质的相对电容率	(296)
13. 物质的折射率(相对空气)	(297)
14. 常用光源的谱线波长(nm)	(298)
15. 几种纯金属的“红限”波长及逸出功	(298)

绪 论

物理学是建立在实验基础上的一门自然科学。物理学中每个概念的提出,每个定律的发现,每个理论的建立,都以坚实、严格的实验为基础,且还要经受实验的进一步检验。例如,法拉第于1831年在实验室里发现了电磁感应现象,进而得出电磁感应定律和其他几个实验定律。麦克斯韦系统总结了电磁学的成就,在1864年提出著名的电磁场理论。20多年后,赫兹的电磁波实验又检验和证实了电磁场理论的正确性。麦克斯韦的电磁场理论把电、磁、光三个领域的规律综合到一起,具有划时代的意义。

同时,工程技术的发展也是以物理学和物理实验方法为基础的,例如长度、质量、时间、电、光等物理量的测量以及误差、不确定度的计算,都是工程技术领域常用的方法。纵观科学技术的发展史,可以看出:物理学的每一项新突破都转化为工程技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动社会的发展。就像上面提到的法拉第,由于他发现了电磁感应现象,才有了今天的电力;哈恩发现了原子核裂变,才有了今天的核动力;现代无线电通信,是基于麦克斯韦电磁理论和赫兹的无线电波实验;半导体的研究,导致晶体管的出现,才有今天的超大规模集成电路和高速计算机,使我们进入新的信息时代;激光器的发明,把许多工程技术领域推向完全新的历史阶段,等等。这些令人感慨的例子,数不胜数,但都说明了物理学及物理实验对人类社会发展的的重要性。

物理学的整个发展过程,充分表现出理论和实践的辩证关系。在研究物质世界规律性的过程中,理论研究和实验研究是不可分割的两个方面,它们是相辅相成和相互促进的关系。没有理论指导的实验是盲目的,没有以实验事实为依据的理论是难以置信的。坚持理论联系实际,理论与实践相结合,是科学技术人才必须具备的基本素质之一。

一、大学物理实验课的地位和任务

大学物理实验课是一门实践性的课程,它和理论课具有同等重要的地位。实验研究有自己的一套理论、方法和技能。通过本课程的学习使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定基础。本课程以基本物理量的测量方法,基本物理现象的观察和研究,常用测量仪器的结构原理和使用方法为主要内容进行教学,对学生的基本实验能力、分析能力、表达能力和综合运用设计能力进行严格的培养。本课程是对工科学生进行科学实验基本训练的一门独立设置的必修基础课,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。基本实验能力是科学研究的基本功,只有具备熟练扎实的实验基本知识、方法和技能,才有可能在科学研究中做出成绩。在培养既懂理论又会动手,能解决实际问题的高级工程技术人才的过程中,大学物理实验课具有独特的重要作用。

本课程的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。包括:

- ①能够自行阅读实验教材或资料, 正确理解原理, 做好实验前的准备;
- ②能够借助教材或仪器说明书, 正确使用常用仪器;
- ③能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析, 作出判断;
- ④能够正确记录和处理实验数据, 绘制图线, 说明实验结果, 撰写合格的实验报告;
- ⑤能够完成简单的设计性实验;
- ⑥能够举一反三, 灵活运用, 有所创新。

(3) 培养与提高学生的科学实验素质。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风, 严肃认真的工作态度, 主动研究的探索精神, 遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

二、大学物理实验课的主要环节

1. 课前预习

物理实验课不同于理论课, 做实验前一定要认真预习, 预习的好坏直接影响实验的成败, 因此, 预习是做好实验的基础。预习时首先要仔细阅读教材的有关章节及实验, 不能只将实验内容通读一遍, 关键是要理解其意。明确实验的目的要求, 搞清实验所依据的原理和采用的方法, 初步了解所用量具、仪器、装置的主要性能及使用方法, 明白如何进行操作, 要测量哪些数据, 要注意哪些事项。对一时搞不清楚的问题, 应做出记录, 以便在实验过程中加倍注意, 通过实验来解决。

阅读教材后要在规定的实验报告本或报告纸上写出简明扼要的预习报告, 设计并画好记录原始数据的表格。上课时, 教师将通过不同方式检查预习情况, 并将其作为评定课内成绩的一项内容。对于没有预习的学生, 不允许做本次实验。

2. 课内操作

操作是学习科学实验知识, 培养实验技能, 完成实验任务的主要环节。进入实验室要遵守实验室规则。实验前应首先清点量具、仪器及有关器材是否完备, 然后根据实验内容和测量方法进行合理布局, 对量具、仪器进行调整或按电路、光路图进行连接。清楚了解所用仪器的性能、使用方法, 牢记注意事项。实验前如有必要应请指导教师检查。实验开始时, 如果条件允许, 可先粗略定性地观察一下实验的全过程, 了解数据的分布情况, 看有无异常现象。如果正常就可以从头按步骤进行实验测试。实验过程中如出现异常情况, 应立即中止实验, 以防损坏仪器, 并认真思考, 分析原因, 力求自己动手寻找、排除故障, 当然也可与指导教师讨论解决。通过实验学习探索和研究问题的方法。

不能把物理实验只看成是测量几组数据, 完成任务了事。实验过程是知识积累的过程, 在实验中多用一分精力, 多下一分工夫, 就会有多一分的收获。实验时要理论联系实际, 理论指导实践, 要手脑并用, 边做实验边思考, 仔细观察实验现象, 完整记录所有数据, 注意有效数字和单位。记录数据要使用圆珠笔或钢笔, 不要用铅笔, 所记录的原始数据不可随意修改。若记录的数据确实有误, 将其画掉, 在其旁写上正确数据。要做到如实、及时地记录实验数据及观察到的现象, 有些实验还要记录室温、湿度、气压等环境条件。

操作完成后,先止动仪器,或切断电源,或切断光源,请指导教师审阅原始数据,待教师签字通过后,再把仪器等复原,并整理摆放好。

3. 课后撰写实验报告

实验报告是实验完成后的书面总结,是把感性认识深化为理性认识的过程,是培养表达能力的主要环节。首先应该完整地分析一下整个实验过程,实验依据的理论和物理规律是什么;通过计算、作图等数据处理,得到什么实验结果,有的还要进行科学合理的误差或不确定度估算;通过做实验有哪些提高;存在什么问题。应该注意的是,写实验报告不要不动脑筋地去抄教材。因为实验教材是供做实验的人阅读的,是用来指导别人做实验的;实验报告则是向别人报告实验的原理、方法,使用的仪器,测得的数据,供别人评价自己的实验结果。认真书写实验报告,不仅可以提高自己写科研报告和科学论文的水平,而且可以提高组织材料、语句表达、文字修饰的写作能力,这是其他理论课程无法替代的。

物理实验报告一般应包括以下几项内容:

实验名称。

实验目的(或要求)

实验仪器用具。

实验原理:简要叙述实验的物理思想和依据的物理定律、主要计算公式,电学和光学实验应画出相应的电路图或光路图。

数据表格及数据处理:把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中,写出计算结果的主要过程及误差或不确定度的估算过程。进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据,最后得出结果,并要完整地表达实验结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求,画出符合规定的图线。若上机处理数据,则要有打印结果。

小结:讨论实验中遇到的问题,写出自己的见解、体会和收获,提出对实验的改进意见等。

回答指定的实验思考题。

实验报告要用统一的实验报告本或实验报告纸书写,字体要工整,文句要简明。原始数据要附在报告中一并交教师审阅,没有原始数据的实验报告是无效的。

三、大学物理实验课的学习方法

1. 重视实验课及其各个环节

实验课有其自身的规律和特点,因此,学习方法也应与之相适应,应与理论课有所不同。由于大学物理实验课是工科大学生工程教育中一系列实践教育的开端和基础,一个合格的高级工程技术人才,应该既懂理论,又能动手解决实际问题,所以要充分认识实验课的重要性,一开始就要重视它。

物理实验课的各个环节,如预习、操作、写报告等是密切相关的有机系统,每一环都要认真对待,一丝不苟。对有效数字、误差分析,误差或不确定度的估算,作图法、最小二乘法等数据处理方法的学习,要贯彻始终,逐步深入理解和掌握。对各个实验不仅要知其然,而且要知其所以然,这样才能达到举一反三、触类旁通的效果。任何轻视实验、敷衍

衍了事、得过且过的思想和作风都是学习的大敌，都是有害的。这样不仅学不到有关的实验知识，甚至还会出现损坏仪器、危及安全的各种事故，万万不可掉以轻心！我们衷心希望同学们能创造出适合自己的科学的学习方法，培养对实验的兴趣，能主动积极地、灵活全面地学好物理实验课，提高学习效率，收到事半功倍的学习效果。

2. 注意掌握基本测量技术和实验方法

基本的测量技术和实验方法是复杂、大型、现代高新实验的基础，且在实际工作中会经常用到。学习时不仅要搞懂各种方法的原理、适用条件、优点和局限性，还要分析比较，加深印象，逐步熟悉和掌握它们，且能灵活运用。

常用的测量技术和实验方法，如水平、铅直、零位的调整，比较测量，放大测量，指零法，补偿法，模拟法，替代法，非电量电测，光学测量等，只有通过每个具体的实验亲自动手、仔细观察、认真思考才能有所体会。在此基础上，要能够设计一些简单的实验。通过这些训练，使自己到工作岗位后，对一个新的实验任务，能够独立地确定实验方案，选定恰当的仪器，在满足一定误差或不确定度要求的前提下，得出可信的实验结果。

3. 养成良好的实验习惯，培养科学的实验素质

实验之前，对所做的实验要清楚了解其内容，做到心中有数、有的放矢，实验前的准备工作要做充分。实验中要善于观察各种现象，数据测量要细心准确。实验结束后要有一份完整而真实的实验记录，并要养成分析的习惯。

一个成功的实验与正确使用仪器密切相关，对常用的仪器必须熟知它的使用方法和注意事项，对仪器的准确度、读数方法等都要清楚了解。对实验时仪器的布局、调整、连接，甚至操作姿势都要有所考虑，操作时要胆大心细，要敢于动手、善于动手，要逐步培养自己独立分析、寻找、排除实验中出现的各种故障的能力。能否迅速发现和排除仪器装置或实验过程中的故障，是实验能力强弱的重要表现。

实验的好坏与成败，实验的收获和能力的增长，不能单纯地看实验结果与理论值的吻合程度。实验结果与理论值接近当然好，但更重要的是会判断这个结果是否合理。任何一个实验结果与客观实际或理论公式的计算结果都会有些差异，实验方法、实验仪器、实验环境等都会引入误差，只要结果在所要求的误差范围以内，并能找出产生误差的主要因素及改进的途径，实验的收获就很可贵。

4. 培养手脑并用、善于思考、勇于创新的能力

实验自始至终要多动脑筋，多想几个为什么，要经常与学到的理论相联系，要能判定实验结果的可靠性与正确性。对于重点、难点要善于思考，不怕困难和失败。各实验的基本内容和重点要集中精力把它掌握透。学习实验既要踏实细致，又要坚韧不拔。实验结束后要回顾、比较、归纳、总结。要有创新意识，在前人经验的基础上，鼓励用新的视角、新的方法进行实验研究。

通过本课程的学习，尽管只能做有限的实验，但要通过归纳总结，达到融会贯通、举一反三、触类旁通的目的。物理实验教材每章都有一段基本知识或引言，应该在做实验前认真仔细阅读。每节都有一个小结，它是帮助大家总结提高用的。要自觉地、高标准地进行学习和研读，这样，必能收到意想不到的从量到质转化的效果。

第一章 测量误差与数据处理

物理实验离不开对物理量进行测量,由于人们的认识能力和科学技术水平的限制,使得物理量的测量很难完全准确。也就是说,一个物理量的测量值与其客观存在的值总有一些差异,即测量总存在着误差。由于误差的存在,使得测量结果带有一定的不确定性,因此,对一个测量质量的评估,要给出它的不确定度,不知道可靠程度的测量值是没有意义的。这是本章要介绍的前一部分内容。对物理量的测量结果总是用一组数字来表示,这是物理实验中经常遇到的很重要但又易被忽视的有效数字问题。做完一个实验必定要获得一些测量数据,要对这些原始数据进行处理,得到实验结果,并给出误差或不确定度,就要使用一些科学的方法,本章后一部分内容,就要介绍有效数字及物理实验中常用的几种数据处理方法,如列表算法、作图法、线性回归法等。

第一节 测量与误差

一、测量及其分类

测量是将被测物理量与被选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,即以确定量值为目的的一组操作。其比值即为被测物理量的测量值,被测量的测量结果用标准量的倍数和标准量的单位来表示。因此,测量的必要条件是被测物理量、标准量及操作者。测量结果应是一组数字和单位,必要时还要给出测量所用的量具或仪器、测量的方法及条件等。

作为比较标准的测量单位其大小是科学地人为规定的,以某几个选定的基本单位为基础,就能推导出一系列导出单位,这一系列基本单位和导出单位的整体叫做单位制。物理实验中一律采用国际单位制。

如果被测物理量与作为测量标准的量可以直接进行比较得到结果,或用预先按标准校对好的测量工具或仪表对被测量进行测量,通过测量能直接得到测量值的叫做直接测量,相应的被测量称为直接测量量。例如,用刻度尺测量钢丝的长度,用天平和砝码称衡铜柱的质量,用停表计时,用电流表测量线路中的电流等。但是,更多的物理量不能找到单一的可与其直接比较的标准量,例如,物体的密度,某地的重力加速度等。如果被测物理量不能用直接测量的方法得到,而是通过对与被测量有已知函数关系的其他直接测量量的测量,由函数关系式计算得到被测量量值的叫做间接测量,相应的被测量称为间接测量量。例如某一立方体的密度 ρ 是通过对其质量 m 、长 l 、宽 b 及高 h 的测量,根据密度的定义式

$$\rho = \frac{m}{l \cdot b \cdot h}$$

计算出的。由于材料的密度与温度有关,因此,测量结果还应注明测量过程的环境温度,这才是个完整的间接测量结果。

为了减小测量误差,往往对同一固定被测量进行多次重复测量,如果每次测量的条件都相同(同一观测者,同一套仪器,同一种测量原理和方法,同样的环境等),那就没有任何根据可以判断某次测量一定比另一次测量更准确。所以,每次测量的可靠程度只能认为是相同的,这种重复测量称为等精度测量,测得的一组数据称为测量列。多次重复测量时,只要有一个测量条件发生了变化,如更换了测量所用的量具或仪表,或改变了测量方法等,这种重复测量称为非(不)等精度测量。对这种测量要引入测量“权”的概念,“权”是用来衡量各单次或局部测量结果可靠性的数字,测量的权越大,说明该次测量结果的可靠性越大,它在最后测量结果中所占的比重也应越大。物理实验中应尽量采用等精度测量。

二、真值与测得值

任何一个物理量在确定条件下客观存在的,也就是实际具备的量值称为真值。例如某一物体在常温条件下具有一定的几何形状及质量。真值是一个比较抽象和理想的概念,一般来说不能确切知道这个值。真值包含理论真值,如三角形内角之和恒为 180° 。约定真值,如指定值、标准值、公认值及最佳估计值等。

通过各种实验所得到的量值称为测得值,多是测量仪器或装置的读数或指示值,测得值是被测量真值的近似值。包括:①单次测得值。若只能进行一次测量,如变化过程中的测量,或没有必要进行多次测量;对测量结果的准确度要求不高,或有足够的把握;仪器的准确度不高,多次测量结果相同。这时就用单次测得值近似地表示被测量的真值。②算术平均值。对多次等精度重复测量,用所有测得值的算术平均值来替代真值,由数理统计理论可以证明,算术平均值是被测量真值的最佳估计值。③加权平均值。当每个测得值的可信程度或测量准确度不等时,为了区分每个测得值的可靠性,即重要程度,对每个测得值都给一个“权”数。最后测量结果用带上权数的测得值求出的平均值表示,即谓加权平均值。

三、测量误差及其分类

1. 测量误差的来源

每个测得值都有一定的近似性,它们与真值之间总会有或多或少的差异,这种差异在数值上的表示称为误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中,测量结果都存在误差,这就是误差公理。

(1) 在测量过程中产生的误差。①方法误差:由于所采用的测量原理或测量方法本身的近似或不严格、不完善所产生的测量误差。②仪器误差:在进行测量时所使用的测量工具、仪表、仪器、装置、设备本身固有的各种缺陷的影响而产生的误差。③环境误差:测量系统以外的周围环境因素对测量的影响,而使测量产生的误差。如温度、湿度、气压、震动、灰尘、光照、电场、磁场、电磁波等。④主观误差:由进行测量的操作人员素质条件所引起的误差,如实验者的分辨能力、反应速度以及固有习惯等。

(2) 在处理测量数据时产生的误差。如有效数字的舍入误差,利用各种数学常数或物理常量引入的误差,利用各种近似计算或作图带来的误差等。

2. 测量误差的分类

(1) 系统误差。在相同条件下(指方法、仪器、环境、人员)多次重复测量同一量时,误差的大小和符号(正、负)均保持不变或按某一确定的规律变化,这类误差称为系统误差,它的特征是确定性。前者称为定值系统误差,后者称为变值系统误差。按对系统误差的掌握的程度又可分为已定系统误差和未定系统误差,对不能确定其大小和符号的未定系统误差可按随机误差处理。

例如,称衡质量时,使用的是20g的三等砝码,允许有 $\pm 1\text{mg}$ 的误差。又如停表指针的转动中心与刻度盘的几何中心不重合,会使停表指示值出现周期性误差。用受热膨胀的米尺测量长度,用零点不准的螺旋测微计测量厚度都会引入系统误差。又如伏安法测电阻,电流表不管内接还是外接都会引入误差等。

(2) 随机误差。在测量时,即使消除了系统误差,在相同条件下多次重复测量同一量时,各次测得值仍会有些差异,其误差的大小和符号没有确定的变化规律。但如大量增加测量次数,其总体(多次测量得到的所有测得值)服从一定的统计规律,这类误差称为随机误差,它的特征是偶然性。

随机误差是由于测量过程中存在的许多难以控制的不确定的随机因素引起的。这些随机因素有空气的流动,温度的起伏,电压的波动,不规则的微小振动,杂散电磁场的干扰,以及实验者感觉器官的分辨能力、灵敏程度和仪器的稳定性,等等。某一次测量的随机误差往往是由多种因素的微小变动共同引起的。如用停表测量三线摆的周期,按下按钮的时刻有早有迟,动作迟早的程度有差异,从而产生了不可避免的随机误差。

假设系统误差已经被消除,且被测量本身又是稳定的,在相同条件下,对同一物理量进行大量次数的重复测量,可以发现随机误差服从统计规律,统计规律用分布描述,分布常用图形表示,其中最常见的是正态分布,又称高斯分布,其分布曲线如图1-1所示,它的特征为:

①单峰性:由大量重复测量所获得的测量值,是以它们的算术平均值为中心而相对集中分布的。即绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大(次数多)。

②对称性:绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。

③有界性:误差的绝对值不会超过某一界限,即绝对值很大的误差出现的概率趋于零,随机误差的分布具有有限的范围。

④抵偿性:随着测量次数的增加,随机误差的代数和趋于零,即随机误差的算术平均值将趋于零。实际上,抵偿性可由单峰性及对称性导出。

(3) 粗大误差。明显地歪曲了测量结果的异常误差称为粗大误差。它是由没有觉察到的实验条件的突变,仪器在非正常状态下工作,无意识的不正确的操作等因素造成的。含有粗大误差的测得值称为可疑值,或异常值、坏值。在没有充分依据时,绝不能按主观意愿轻易地去除,应该按照一定的统计准则慎重地予以剔除。

由于实验者的粗心大意,疏忽失误,使观察、读数或记录错误,是应该及时发现,力

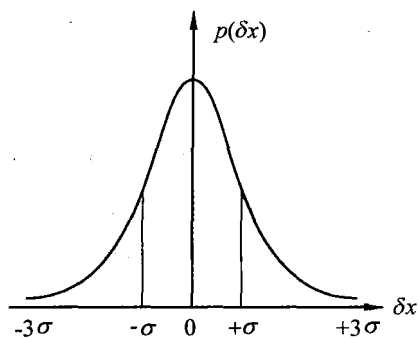


图1-1 正态分布

求避免的。错误不是误差。

在分析误差时，必须根据具体情况，对误差来源进行全面分析，不但要找全产生误差的各种因素，而且要找出影响测量结果的主要因素。首先剔除粗差，消除或减弱系统误差，然后估算随机误差与未定系统误差并进行合成。

3. 测量误差的表示

(1) 绝对误差。误差的定义为

$$\text{测量误差 } \delta x = \text{测得值 } x - \text{真值 } x_0$$

测量误差是测得值与真值的差值，常称为绝对误差，绝对误差可正可负，具有与被测量相同的量纲和单位，它表示测得值偏离真值的程度。但要注意，绝对误差不是误差的绝对值。由于真值一般是得不到的，因此误差也无法计算。实际测量中是用多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 来代替真值，测得值与算术平均值之差称为偏差，又称残差，用 Δx 表示，即

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (1-1)$$

假定一个物体的真实长度为 100.0mm，而测得值为 100.5mm，则测量误差为 0.5mm。另一个物体的真实长度为 10.0mm，测得值为 10.5mm，测量误差也为 0.5mm。从绝对误差看两者相等，但测量结果的准确程度却大不一样。显然，评价一个测量结果的优劣，不仅要绝对误差的大小，还要看被测量本身的大小。

(2) 相对误差。测得值的绝对误差与被测量真值之比。由于真值不能确定，实际上常用约定真值，如公认值、算术平均值。相对误差 E 是一个无单位的无量数，常用百分数表示，如

$$E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

前述第一个测量的相对误差 $E = \frac{0.5}{100.0} = 0.5\%$ ，而第二个测量的相对误差 $E = \frac{0.5}{10.0} = 5\%$ 。第一个测量比第二个测量准确程度高。

百分误差。有时将测得值与理论值或公认值进行比较，则用百分误差 E_r 表示，如

$$E_r = \frac{|\text{测得值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}} \times 100\%$$

4. 误差与测量结果的关系

为了定性地描述各测量值的重复性及测量结果与其真值的接近程度，常用精密度、正确度、准确度来描述。

精密度：表示重复测量各测量值相互接近的程度，即测得值分布的密集程度，它表征随机误差对测得值的影响，精密度高表示随机误差小，测量重复性好，测量数据比较集中。精密度反映随机误差大小的程度。

正确度：表示测得值或实验所得结果与真值的接近程度，它表征系统误差对测得值的影响，正确度高表示系统误差小，测得值与真值的偏离小，接近真值的程度高。正确度反映系统误差大小的程度。

准确度：描述各测得值重复性及测量结果与真值的接近程度，它反映测量中的随机误差和系统误差综合大小的程度。测量准确度高，表示测量结果既精密又正确，数据集中，而且偏离真值小，测量的随机误差和系统误差都比较小。

图 1-2 是以打靶时弹着点的分布为例,说明这三个词的含义。(a) 图表示射击的精密度高但正确度低,即随机误差小系统误差大。(b) 图表示射击的正确度高但精密度低,即系统误差小而随机误差大。(c) 图的弹着点比较集中,又都聚集在靶心附近,表示射击的准确度高,既精密又正确,随机误差和系统误差都小。

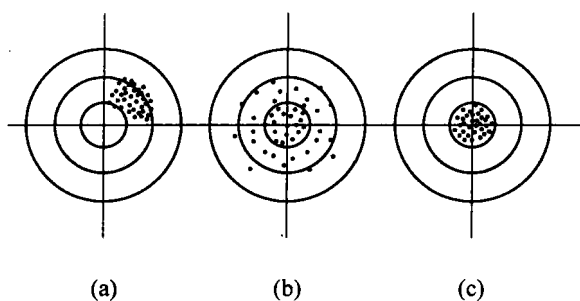


图 1-2 射击时弹着点的分布

必须注意,由于这些名词没有明确的统一规定,容易引起混淆,如有的书中把正确度称为准确度,而把准确度称为精确度。至于精度是一个泛指的概念,一般多指准确度,有的是指精密度。在阅读不同书籍或资料时应予以注意。

第二节 随机误差的估算

一、直接测量结果的误差估算

1. 单次测量结果的表示

有些实验是在变化过程中对被测量进行测量的,只能测量一次;有些实验有多个被测量,其中某个或某几个被测量的相对误差很小,没有必要多次测量,只需测量一次;或仪器的灵敏度较低,多次测量结果相同等。这时就用单次测得值作为测量结果,近似表示被测量的真值。

单次测量结果的误差一般用仪器的额定误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。例如用 0 ~ 25mm 的一级千分尺测量圆柱体的直径 D 为 9.056mm,从国家标准中查出仪器示值误差为 0.004mm,则直径的测量结果表示为

$$D = (9.056 \pm 0.004) \text{ mm}$$

$$E = \frac{0.004}{9.056} \times 100\% = 0.044\%$$

当测量不能在正常状态下进行时,单次测量结果的误差应根据测量的实际情况和仪器误差进行估计。如用米尺测量杨氏模量仪所夹钢丝的长度,因米尺不能紧靠钢丝,上下两端读数误差可各取 0.5mm,则钢丝长度的测量误差可估计为 1mm。又如用停表测量三线摆的周期,误差主要是因为启动和制动按钮时,手的动作和目测位置不完全一致而引起,估计启动和制动各有 0.1s 的误差,则该周期时间的误差可估计为 0.2s。

2. 多次等精度测量结果的表示

(1) 算术平均值

假定在实验中系统误差已被消除或已被消减到可以忽略的程度,通过 n 次等精度的独立测量得到一系列测量值

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$