

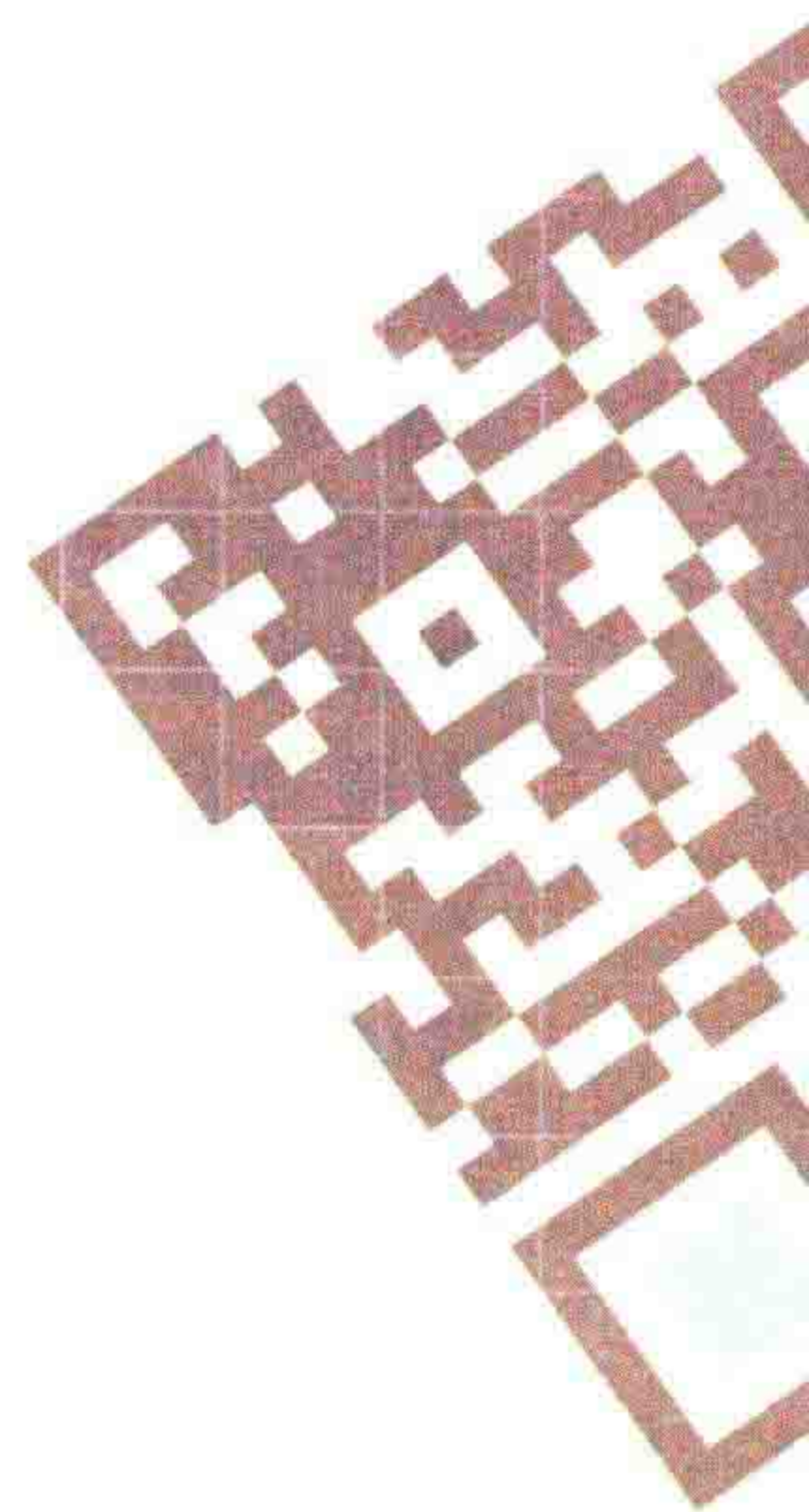
大学物理 实验教程 (第二版)

主 编 孙晶华 李 松 李 昆



DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

大学物理 实验教程 (第二版)



主 编 孙晶华 李 松 李 昆
副主编 王德兴 苏丽萍 董千惠 王金玉



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部2010年《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合哈尔滨工程大学多年来物理实验教学的实践经验，在历年来所用物理实验教材的基础上，吸收了具有现代观点和时代气息的成果及兄弟院校教学改革的经验编写而成的。

本书介绍了测量误差、不确定度及数据处理的基本知识，精选了一系列力学、热学、电磁学、光学、近代物理、综合性和设计性实验等。在每个实验中，以各种物理现象、历史、科学家小传为背景，多角度、多方面地充分展示了各种现象背后蕴含的物理学原理，增加了对应实验在生产实践、生活和科研方面的应用。同时，考虑到各高校所使用的仪器和实验内容不同，还编写了相关的扩展实验，以便为其他高校参考使用。

本书可作为理工科院校的物理实验教材，也可供其他专业学生选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/孙晶华, 李松, 李昆主编. —
2 版. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017. 2
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1464 - 8

I. ①大… II. ①孙… ②李… ③李… 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(2017)第 025553 号

选题策划 卢尚坤
责任编辑 卢尚坤 周一瞳
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 889mm × 1194mm 1/16
印 张 20.5
字 数 705 千字
版 次 2017 年 2 月第 1 版
印 次 2017 年 2 月第 1 次印刷
定 价 45.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

本教材是根据教育部 2010 年《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，面向 21 世纪，结合哈尔滨工程大学物理实验课程建设多年来的实践经验编写而成的。

近年来，国家示范中心建设与国家精品课建设为实验室建设注入了强大的生命力。在新形势下，我们深入开展了教学内容和课程体系的改革，探索全面开放的实验教学模式。本书充分反映了哈尔滨工程大学物理实验课程教学改革成果及其发展趋势，注重教学内容的系统性和实验技能的严格训练。在精选、改造、充实传统实验的同时，纳入了一批与生产实践或科研成果有密切联系的、具有时代气息的、给学生留有较大发展空间的实验项目。在传授基本实验的同时，注重培养学生的实践能力和创新精神。因材施教，既保证教学要求的贯彻，又注重个性发展，为学生提供了一个自主学习空间，力争使物理实验课程更好地适应新世纪人才培养的需要。

绪论中明确提出物理实验课程的教学目的和基本要求；前导知识中介绍测量误差、不确定度的概念和数据处理的基本方法。实验分三部分，实验题目用不同的颜色标出：第一部分是基本实验，介绍了最基础、最基本的实验知识和实验方法；第二部分是综合性实验，涉及物理学中更为广泛的领域，内容丰富多彩，更富时代气息，目的在于巩固学生在基础实验阶段的学习成果，开阔眼界及思路，提高学生对实验方法和技术的综合运用能力；第三部分是设计性实验，目的在于提高学生的设计能力，培养创新精神和科学研究的素质。

参加本书编写工作的有：孙晶华（绪论、物理实验前导知识、光学实验预备知识、电磁学实验预备知识），李松（实验 1, 2, 7, 10, 12, 19, 31, 32），李昆（实验 3, 4, 11, 13, 24, 30），王德兴（实验 5, 8, 15, 22, 27, 35），苏丽萍（实验 6, 14, 16, 28, 34），董千惠（实验 9, 17, 18, 20, 29, 33），王金玉（实验 21, 23, 25, 26），全书由孙晶华负责统稿和定稿。

本教材特点如下。

1. 为了使教材具有更好的可读性，本书采用了彩版印刷。在编排方面，注重版面设计，图文并茂；在内容的叙述上，力求做到生动形象、通俗易懂，避免出现复杂的数学公式，更多地强调物理图像和物理思想，使学生在欣赏和快乐的过程中体验并学习。

2. 本书编者无论在全书的整体安排上还是在某个实验的写法、内容和形式等方面，较以前的教材都有较大的变化。在每个实验中，以各种物理现象、历史、科学家小传为背景，多角度、多方面地充分展示各种现象背后蕴含的物理学原理，增加了对应的实验在生产实践、生活和科研方面的应用。同时，考虑到各高校所使用的仪器和实验内容不同，还编写了相关的扩展实验，以便为其他高校参考使用。全书的编排仍遵循由浅入深、循序渐进的原则。

本书在编写过程中参考了国内大量的文献资料，并在书后逐一标注。此外，我们也从网络上搜集了大量的有关资料和图片。对于部分网络上转引的资料，由于难以确定原作者，在此向原作者表示感谢，并请原作者与我们联络。正是由于如此广泛丰富的参考资料，才能为学生呈献出这样一本内容充实、生动的教材。谨此，向所有对本书做出贡献的同仁致以深切的谢意。

限于编者的学术水平，书中难免存在错误和不妥之处，望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见，我们将会在今后的再版中加以纠正，使我们的教材不断完善。

编者

2017 年 1 月

大学物理实验选课方法及选课记录

哈尔滨工程大学的大学物理实验课程采取网上预约的上课方式,学生可根据自己的时间,灵活安排上课时间。该课程选课方法如下。

- (1)选课网址:登录哈尔滨工程大学主页 <http://www.hrbeu.edu.cn/> →“快速链接”栏中的“实验室管理”。
- (2)用户名为自己完整的学号,初始密码为 88888,用户类型为“学生”。登录后务必重新修改自己的密码。
- (3)在开课周内可以随时进行网上预约和取消预约,但上课前 4 小时内不能预约和取消该实验项目。
- (4)不按时到课,又没有取消预约的,按旷课处理。
- (5)所有的实验要在开课周内完成,逾期不补。
- (6)网上预约实验后,可将预约情况记录于表 0-1 和表 0-2,以便随时查询。

表 0-1 大学物理实验(上)选课表

实验序号	实验名称	实验时间	座位号	实验室	备注
1		月 日 时 分			
2		月 日 时 分			
3		月 日 时 分			
4		月 日 时 分			
5		月 日 时 分			
6		月 日 时 分			
7		月 日 时 分			
8		月 日 时 分			
9		月 日 时 分			
10		月 日 时 分			
11		月 日 时 分			
12		月 日 时 分			
		月 日 时 分			
		月 日 时 分			

表 0-2 大学物理实验(下)选课表

实验 序号	实验名称	实验时间	座位号	实验室	备注
1		月 日 时 分			
2		月 日 时 分			
3		月 日 时 分			
4		月 日 时 分			
5		月 日 时 分			
6		月 日 时 分			
7		月 日 时 分			
8		月 日 时 分			
9		月 日 时 分			
10		月 日 时 分			
11		月 日 时 分			
12		月 日 时 分			
		月 日 时 分			
		月 日 时 分			

目 录

绪论	1
物理实验前导知识	5
实验 1 基本测量与数据处理练习	26
实验 2 物体密度的测定	36
实验 3 运动学实验	41
实验 4 测量物体的转动惯量	50
实验 5 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	60
实验 6 测量液体的表面张力系数	66
实验 7 测量液体的变温黏滞系数	75
实验 8 理想气体定律实验	83
实验 9 热机实验	91
电磁学实验预备知识.....	103
实验 10 用模拟法测绘静电场	111
实验 11 磁场的测量	118
实验 12 动态磁滞回线的测量	137
实验 13 电子束偏转与电子荷质比的测定	142
光学实验预备知识.....	148
实验 14 薄透镜焦距的测定	153
实验 15 分光计实验	160
实验 16 等厚干涉实验	169
实验 17 旋转液体物理特性的测量	176
实验 18 声速的测量	182
实验 19 受迫振动实验	194
实验 20 测定金属电子的逸出功与荷质比	202
实验 21 温度传感技术实验	211
实验 22 迈克尔逊干涉仪实验	218
实验 23 光的偏振实验	227
实验 24 太阳能电池特性的测量	235
实验 25 密立根油滴实验	242
实验 26 弗兰克-赫兹实验	248
实验 27 光电效应实验	255
实验 28 光纤传感器实验	263

目 录

实验 29 光纤通信实验	275
实验 30 碰撞打靶实验	284
实验 31 电表的改装与校准	287
实验 32 自组电桥测电阻	297
实验 33 电位差计实验	303
实验 34 自组望远镜和显微镜	308
实验 35 测量透明薄片的折射率	314
附表 中华人民共和国法定计量	316
参考文献	317

绪 论

一、物理实验在工科院校教学中的地位

物理学是一门实验科学,无论是物理学规律的发现还是物理学理论的验证,都离不开物理实验。正如我们所知,赫兹(Heinrich Rudolph Hertz)所做的电磁波实验使麦克斯韦(James Clerk Maxwell)的电磁理论获得了普遍承认,托马斯·杨(Thomas Young)干涉实验使得光的波动学说得以确立,卢瑟福(Ernest Rutherford)的粒子散射实验则揭开了原子的秘密,密立根(Robert Andrews Millikan)设计的油滴实验证明了电荷的不连续性等。实验是根据所研究的目标,利用科学仪器人为地控制、创造和纯化某种自然过程,使之按照预期的进程发展,同时在尽可能消除或减少干扰的情况下进行观测(定性或定量),探求自然过程变化规律的一种科学行为。物理实验是科学实验的先驱,其实验思想、实验方法和实验手段等是各门学科实验研究的基础,大部分工科专业课程都是以物理学为基础的。因此,物理实验是所有工科院校不可或缺的公共基础课程,是对学生进行科学实验的基本训练,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验的知识、方法和技能是学生进行后续实践训练的基础,也是毕业后从事各项科学实践和工程应用的基础。物理实验课程覆盖面广,它包括力学、热学、电磁学、声学、光学及近代物理学和现代物理技术实验,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时,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课程,在培养学生严谨的学习态度、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。

工科物理实验对于学生的培养所起到的作用是加深学生对所学理论知识的理解,促使学生主动思考,提高学生分析和解决实际问题的能力,通过实验课堂教学使学生掌握各种基本物理量的测量方法、基本测量仪器的使用方法、实验数据处理的基本方法和撰写实验报告的基本方法。学生在实验课上,能够在实验教材(或仪器使用说明书)的指导下独立完成实验,使学生对文字的理解能力得到最好的培养和锻炼。这种能力不仅是大学生后续课程学习必需的,也是工科毕业生走上工作岗位时必须具备的最基本能力。

实验的基本程序可以体现出实验对于工科院校学生的培养的重要性,从预习到完成实验报告的整个过程都蕴含着对学生科学素质的培养和训练。实验前预习并撰写预习报告是读懂文字、凝练知识点能力的培养;实验操作过程是基本测量仪器的使用方法、观察和分析实验现象、合理选择实验方案、分析解决实际问题 and 观察思考能力的培养,使学生养成动脑和动手相结合的良好科学研究习惯,高效率地获取和理解知识的方法;撰写实验报告和实验数据处理是工作总结、实验结果分析处理和撰写科技文章的基本训练,这是一个科学素质养成的重要培养环节,在此基础上才能够进一步培养学生创造性思维 and 创新能力。

二、工科实验的目的和任务

物理的发展史告诉我们,一种科学理论的形成离不开科学思想的指导和科学方法的应用,正确的科学思维和科学方法是我们认识世界的基本手段。只有掌握了它,我们才能透过现象看清事物的本质,从认识科学的必然王国跃进到掌握应用科学的自由王国。科学方法是我们打开科学大门的钥匙,无论是自然科学还是社会科学,掌握了研究的科学方法,我们就有了在未来从事各项工作的“武器”,就能够创新、发明、创造,发挥出聪明才智,成为有益于人类、造福于人类、贡献于科学的有用人才。

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。物理学的研究方法包括实验和理论两方面。物理现象的发现和解释、物理规律的揭示以及物理学理论的验证都依赖于实验。就物理

实验而言,其最基本的方法有定性分析法、定量分析法、因果分析法、比较分析法和过程分析法等。物理实验的目的就是让学生学习和掌握科学研究的基本思想与科学方法。在物理学的发展中,人类积累了丰富的实验思想、实验方法以及实验手段。这些不仅是人类文明的宝贵财富,更是人类探索未来的重要武器。因此,物理实验的目的又是培养学生严肃认真的工作作风、一丝不苟的学习精神、实事求是的科学态度,激发学生不怕困难、勇于探索自然的开拓创新意识和理论联系实际以及综合应用科技知识的能力。

工科物理实验的任务是使学生掌握研究各种不同自然现象的基本实验方法、各种基本测量仪器的使用方法、实验结果的科学处理方法和归纳总结实验结果以及撰写总结报告的基本要领,培养学生自学能力、思维判断能力、综合运用教材和资料的能力、理论联系实际的能力、科学实验能力、表达书写能力、创新和实验设计能力,并提高学生的科学素质。

三、实验的基本环节

1. 实验前的预习

实验预习的目的是全面认识 and 了解所要做的实验项目。因此,要求在预习时,认真领会实验目的、理解实验原理、了解实验仪器的使用方法和实验方法,上网查看该实验的预习指南,根据预习指南确认该实验的具体内容,在明确实验任务的基础上写出简单的预习报告。

与理论课程不同,实验课程的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立完成实验任务,所以实验预习尤其重要。撰写一份预习报告,不是盲目地抄实验教材,而是提炼文字内容和要点的一种基本训练。上课时,教师要检查实验预习情况,评定实验预习成绩。

(1) 实验预习的要点

① 明确实验任务

要明确实验中需要测量哪些物理量,每个待测量又分别需要什么实验仪器和采用什么实验方法测量。

② 清楚实验原理

要理解实验基本原理。

③ 了解实验仪器

根据网上的实验预习指南,初步了解实验仪器,通过预习知道需要使用哪些仪器,并对所使用仪器的相关知识进行初步学习,特别是仪器的结构功能、操作要领及注意事项等。

④ 了解误差来源

要了解引起实验误差的主要因素有哪些,思考在做实验时应当怎样减小误差。

⑤ 总结实验预习

尝试归纳总结实验体现的基本思想,自己在预习过程做了哪些工作,遇到了哪些问题,解决了哪些问题,怎么解决的,还有哪些问题不清楚等。

⑥ 撰写预习报告

撰写预习报告时,要按预习报告的具体要求逐项填写,画出或设计实验数据记录表格。

(2) 设计性实验的预习

针对设计性实验项目,除了做好一般实验项目的预习工作以外,还要做好下列预习工作。

① 设计实验方案

根据教材中的实验原理和实验内容要求与提示,认真查阅有关资料,设计一份详尽的实验方案。

② 选择测量仪器、测量方法和测量条件

根据实验方案的要求,确定使用的实验仪器、采用何种测量方法、在什么条件下进行测量。选择测量方法时还要考虑到选用哪种数据处理方法。

③确定实验过程,拟订实验步骤

明确实验的整体过程,拟订出详细的实验步骤。

(3)预习报告的主要内容

- a. 实验名称;
- b. 实验目的;
- c. 实验内容;
- d. 预习中遇到的问题;
- e. 数据记录表格(设计出所有需要的数据记录表格)。

2. 实验操作

在实验课上,“动手之前先动脑”,也就是说,必须知道自己要做什么,为什么要这样做。只有这样,在实验课上能力才能够得到锻炼和提高。实验课重在实验的过程,这个过程培养主动思考、提高分析和解决实际问题的能力。

实验课最忌讳的是“盲目伸手”。“盲目伸手”至少有两个问题:一是容易损坏仪器,二是可能会危及自身安全。上实验课并不是不让动手,而是一定要做到有目的、有计划地进行实验操作。

很多人都有同样的感受,坐在教室里预习实验课时,对于绝大多数的实验内容看不懂,这就是实验课有别于理论课学习的特点:实验不到实验室里是学不会的。实验的内容,特别是实验仪器的使用,只有当仪器放在你面前的时候,对照着仪器再看教材上的仪器介绍,才能够学会该仪器的使用方法。因此,要上好实验课,须抓住以下几个重要环节:

- ①认真听教师讲解实验的注意事项、实验原理、实验内容、实验操作的要领和实验的基本要求;
 - ②动手实验之前,对照仪器认真阅读教材上的仪器介绍,正确掌握仪器的操作方法;
 - ③在记录数据前,先观察实验所要记录的实验现象,确认无任何异常后,开始记录数据,遇到问题及时请教教师,不得擅自改动数据;
 - ④实验完成后,请教师确认数据,签字后,整理实验仪器。
- 此外,在实验过程中要遵守操作规程,注意安全。

3. 实验报告

(1)撰写实验报告的目的

科学地总结自己的实验工作,通过对实验课题、内容、方法的科学表述,阐明实验的结论,是将来撰写科技文章的基本训练。一份好的完整的实验报告可以扩展成一篇科技论文。因此,认真总结实验报告是将来撰写科技文章的基础。

(2)撰写实验报告的要求

实验报告要字迹工整,具有可读性,逻辑性要强,实验结果分析要切合实际。

实验报告是实验工作的最后环节,是整个实验工作的重要组成部分。通过撰写实验报告,可以锻炼科学技术报告的写作能力和总结工作的能力,这是未来从事任何工作都需要的能力。

(3)实验报告的基本内容

①实验原理

应简明扼要、文理通顺,不要照抄教材,要注意实验原理部分的提炼。一般实验原理包括实验所依据的物理学的原理公式、公式中各个物理量含义以及原理简述,电学实验要有所用的电路图,光学实验要有光路图。

②实验步骤

按实际操作情况简明扼要地写出主要的实验操作步骤。



③实验数据记录

把所记录的原始数据仔细地转记下来,并尽可能地列出表格。

④数据处理

含计算测量结果、不确定度计算、作图等。在此过程中,要时刻想着有效数字的概念,按有效数字的运算规则计算数据,并有数据代入和计算过程,最后用“不确定度”正确表示实验结果。在表示实验结果时,切记写清楚所得物理量的单位,如需要作图表示实验结果时,要写清楚坐标轴名称、坐标轴的分度和单位。

⑤问题讨论

包括影响实验结果的主要因素分析、减小误差应采取的措施、对实验中观察到的现象的解释、改进实验的建议和心得体会、本实验的应用、回答思考题等。

四、实验规则

①在整个实验过程中要树立“安全第一”的观念;

②课前应做好预习,携带必要的文具、预习报告和学生卡进入实验室;

③实验时如缺少仪器、用具、材料等,应向指导教师或实验室人员提出,不得擅自调换;

④爱护仪器设备,如有损坏、丢失,应立即报告教师,由于违反操作规程而损坏仪器者,应按规定赔偿,并提交仪器损坏记录;

⑤凡使用电源的实验,必须经过教师检查线路并同意后,方可接通电源;

⑥做完实验,测量数据要交给教师检查并签字,离开实验室前,应将仪器整理还原,桌面收拾整洁,凳子摆放整齐,保持实验室卫生;

⑦实验报告连同教师签字的原始数据应在做完实验后规定的时间内一起交到任课教师的专有实验报告箱中。

物理实验前导知识

一、测量和误差的基本概念

在人类的生产、生活和科学研究的过程中,经常需要对各种物理量进行测量,更需要找出各种物理量之间的定量关系。人们要想获取其量值大小的相关信息,就需要借助某些工具或仪器,于是就存在所获得测量值的可信度问题。因此,便引入了测量(Measurement)和误差(Error)的概念。

1. 测量的基本概念

所谓测量,就是将待测的物理量与某种作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系,相乘的结果就是待测量的测量值。而用来作为这个标准的同类量称为单位(Unit)。例如,用一个标准米尺测量运动场上跑道的长度,从起点到终点刚好是 100 个标准米尺的长度,于是跑道的长度就等于 $1\text{ m} \times 100 = 100\text{ m}$ 。这里,100 就作为单位 1 m 的倍数。根据需要,测量结果通常有几种表达方式:具有确定单位的数值,在确定的坐标上的曲线按一定比例画出的图形,采集到的波形或图像等。

2. 测量的分类

测量从方法上通常分成两类,即直接测量(Direct Measurement)和间接测量(Indirect Measurement)。直接测量是指使用测量工具或测量仪器直接测得或读出被测量数值的测量过程,如图 A-1 所示,用米尺直接测量儿童的身高,用温度计测量温度,用秒表测量时间,用万用表直接测量电流值、电压值以及电阻值等都是直接测量,直接测量又包括单次直接测量和多次直接测量;而间接测量是指对于有些物理量仅靠直接测量不能完成,必须通过对几个物理量进行直接测量后,利用公式进行计算才能够得到所需测量值的测量过程,如图 A-2 所示,测量一个圆柱体的密度 ρ ,我们可以先直接测量圆柱体的高度 h 、直径 d ,称出它的质量 M ,然后将它们代入公式计算出圆柱体的密度 ρ 。在物理测量中,绝大部分测量都属于间接测量,但直接测量是一切物理测量的基础。



图 A-1 直接测量示意图

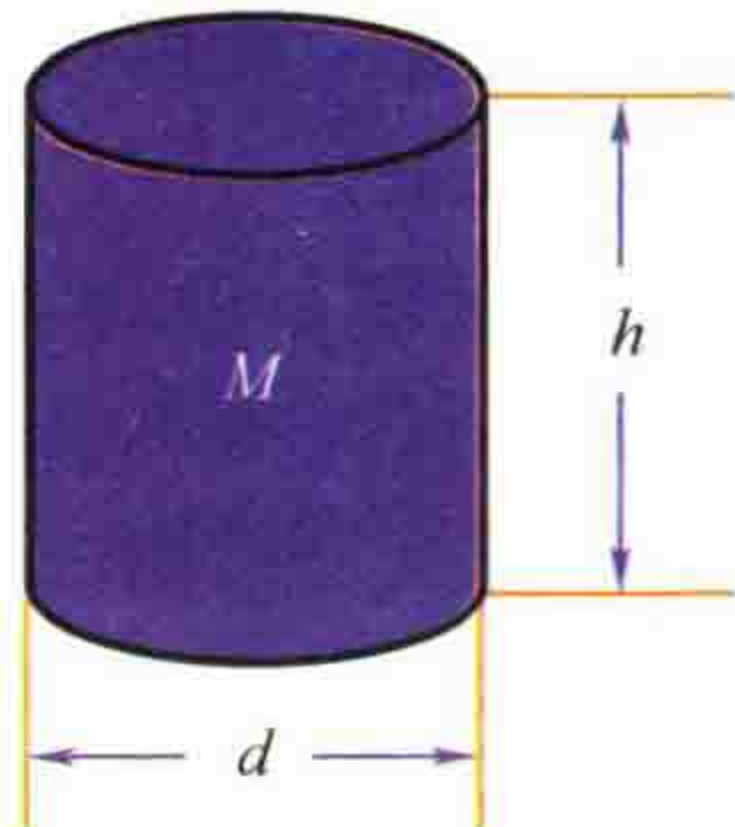


图 A-2 间接测量示意图

根据测量条件的不同,又可将测量分为等精度测量(Equal Observations)和非等精度测量(Unequal Observations)。等精度测量是指在参与测量的五个基本要素,即测量仪器、测量人员、测量方法、测量环境和被测对象均不发生改变的条件下的多次重复测量,又称为重复性测量。

多次重复测量过程中,测量的五个基本要素保持绝对不变是不可能的,所以说等精度测量只是一个理想的概念。对某一固定被测量做等精度测量时,所得测量数据允许有一定范围的大小变化,但对偏大或偏小的数值,不能判定哪个数值更加接近被测量的真实值,只能同等对待,即对测得的数据的可信程度是相同的。

非等精度测量是指参与测量的五个基本要素除被测对象不能改变外,其他四个基本要素全部或任何一

个要素发生改变所进行的测量,又称为复现性测量。

在测量过程中,由于改变测量条件(如由不同的观测者,用不同仪器、不同方法,在不同环境条件下对被测量进行不同次数的测量等),影响和决定测量结果的因素各异,测得的数据的可信程度不相同。非等精度测量常用于高准确度的测量中。

3. 误差的基本概念

任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能做到绝对准确,这就使测量不可避免地伴随着误差产生。分析测量可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,这是物理实验和许多科学实验中都必然会涉及的问题,于是就有了误差理论和数据处理方法。

测量的量值是客观事物的某种特性的定量表征,但不能完全准确地反映客观存在,只能无限趋近地反映客观事物某种量值的特征。而真实值是指某一被测量在一定条件下客观存在的量值,简称真值,记为 x_0 。由于测量误差的普遍存在,要想通过测量得到某些被测量的真值是不可能的。通过测量得到的只能是真值的最佳估计值(或称测量值),记为 x 。

测量值(Measured Value)与真值(True Value)的差称为测量误差(Measurement Error),表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (\text{A}-1)$$

式中, Δx 为测量的绝对误差(Absolute Error)。

由于绝对误差只表示测量误差的大小,当测量不同数量级的被测量时,利用绝对误差就不能确切地表示出所进行测量的精确程度。例如,对两数量级不同的物理量分别进行测量,若得到测量的绝对误差相同,但其测量的精度却不同,则数量级大的测量精度高,数量级小的测量精度低。因此,当对测量的精度或对测量仪器所具有的精度进行比较时,必须用相对误差作为相互比较的技术指标。

为了更准确地评价测量结果的好坏,人们引入了相对误差(Relative Error)的概念,定义为绝对误差与真值的比值,并用百分数表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (\text{A}-2)$$

可见,相对误差是一个无量纲的数值。测量结果的相对误差越小,则表示测量结果越接近真实值。

4. 误差的来源

在测量过程中,误差的来源一般可以概括成以下几种原因。

(1) 方法误差(Method Error)

方法误差是由于所采用的测量原理或测量方法本身所引入的测量误差。这类误差来源的主要原因包括:对被测量对象的有关知识研究得不够充分,不能全面地考虑各种因素的影响;受客观条件及技术水平的限制;所采用的测量原理本身就是近似的,或忽略了一些在测量过程中实际起作用的因素;用接触测量方法破坏了被测量对象的原有状态;用静态的测量方法对动态对象进行测量等。

(2) 仪器误差(Instrumental Error)

仪器误差是指在进行测量时所使用的测量设备或仪器本身固有的各种因素的影响所产生的误差,如准确度、灵敏度、最小分度值及稳定度的好坏等,其取决于测量装置的结构、设计、所用元器件的性能、零部件材料的性能、加工制造和装配的技术水平等因素。在设计制造各种测量装置时,只能满足一定的条件和实际要求,与理想的要求总会有一定的差距,所以在测量过程中测量值总会存在一定的误差。

(3) 环境误差(Environmental Error)

环境误差是由于周围环境对测量产生的影响而使测量产生的误差。这些影响因素始终存在于测量系统之外,但会对测量系统直接或间接地发生作用。例如,温度、湿度、大气压、电场、磁场、机械振动、加速度、地心引力、声响、光照、灰尘、各种射线或电磁波等,这些因素在不同的测量过程中对测量产生的影响程度可能不同,它们不仅能影响测量系统产生的测量误差,有时还能引起被测量的变化,严重时甚至会造成测量设备

的损毁或使测量难以进行。为了区分环境误差和仪器误差,通常采用人为确定所谓标准环境条件(基准条件)的方法,或在产品标牌及使用说明书上规定测量仪器的使用条件。在基准条件下进行测量所产生的测量误差,可以认为是测量仪器的固有误差(仪器误差)。若使用测量仪器在超出基准条件规定的环境下工作,因环境因素的影响,会造成测量误差的增大,这种测量误差的增加量称为仪器的附加误差,也就是环境误差。因此,仪表在满足规定的条件下进行测量所获测量值的误差大小不应超过标牌或说明书中给出的误差值,有些仪表还给出了随环境条件变化而改变的环境误差值。

(4) 主观误差(Subjective Error)

主观误差也称人员误差,是由进行测量操作人员的素质条件所引起的误差。其中,有一类是难以避免的,例如,由于测量人员感觉器官的分辨能力、反应滞后、习惯感觉和操作技术水平因素而引起的观测误差;另一类是应当尽量避免的主观误差,例如,由于测量人员的粗心大意而造成的读数、记录和计算错误,或操作失误所造成的测量误差。

上述四种测量误差的来源是从参加测量的四个环节,即人员、设备、方法和条件中概括出来的。在具体测量过程中,各种因素对测量的影响程度有所不同,甚至某一因素造成的测量误差小到可以被忽略的程度。

5. 误差的分类

为了对测量误差先有个较为系统和概括的了解,现介绍一种普遍采用的测量误差的分类方法,即根据测量误差所具有的性质和特点进行分类,把测量误差分为随机误差、系统误差和过失误差三大类。

(1) 随机误差(Accidental Error)

在测量过程中,由于存在一些随机因素的影响,从而造成具有随机性质的测量误差称为随机误差。随机误差又称为偶然误差(Fortuitous Error),这种测量误差的大小和方向(误差的正负)是无法预测的。即使在尽可能相同的条件下,对某一指定的物理量重复进行测量,在尽量排除和改正一切明显的有规律的偏差后,每次得到的测量值总是在一定范围内呈随机性的波动性变化。

统计理论和实验都证明,在绝大多数物理测量中,当重复测量次数足够多时,随机误差服从正态分布规律。若用 Δx 表示某一物理量测量值的随机误差, $p(\Delta x)$ 则为随机误差概率密度函数(Probability Density Function),其数学表达式为

$$p(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A}-3)$$

式中, σ 是测量的标准误差(Standard Error), $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}$ 。

随机误差对个体来说,是重复测量中的任何一次测量所产生的误差,是没有规律、不能控制的,用实验的办法也是无法消除的。但对总体,即经过多次测量得到的测量值而言,随机误差服从一定的统计规律(正态分布 Normal Distribution 或高斯分布 Gaussian Distribution)。因此,对随机误差,可以采用概率统计的方法进行处理,即用特征量——标准误差 σ 表示,测量次数 n 越大,标准误差 σ 越小,亦即随机误差就越小。可见,随机误差与测量次数有关,增加测量次数可减小随机误差对测量结果的影响。

式(A-3)中,测量的标准误差 σ 是评定随机误差的基本指标,它的数值决定于测量工具、仪器仪表、测量环境、测量人员和被测对象等各项因素。对同一被测对象,测量系统(包括上述诸因素)确定后,标准误差 σ 的数值也随之确定。不同的测量系统(如采用其他标准器和其他仪器仪表,或改变测量环境,或采用其他测量方法等), σ 取值也不同。因此,在测量系统确定后,它的标准误差也就随之为确定的常数。此时,式(A-3)中唯有随机误差 Δx 一个变量,曲线唯一确定。显然, σ 不同,对应的曲线的形状也就不同,图 A-3 分别给出 $\sigma = 0.5$, $\sigma = 1$ 与 $\sigma = 2$ 时的正态分布概率密度函数 $p(\Delta x)$ 的分布曲线。由图 A-3 可见, σ 值越小

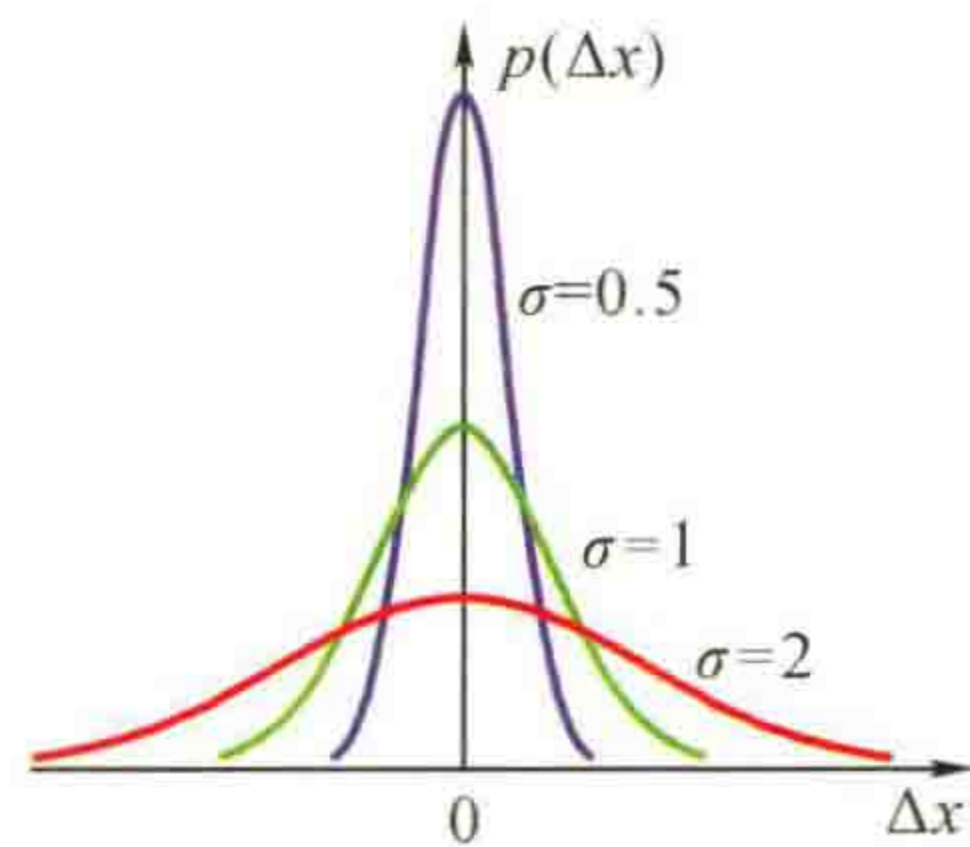


图 A-3 随机误差的正态分布曲线

则正态分布曲线越陡,误差的分布趋于集中; σ 值越大则曲线越平缓,误差的分布趋于分散。

按照概率统计(Probability Statistics)理论,对式(A-3)进行积分,可得

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\Delta x) d(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} d(\Delta x) = 1 \quad (\text{A-4})$$

它表示测量的随机误差落在 $(-\infty, +\infty)$ 区间的概率为1,即概率密度分布曲线下的面积为1。于是,利用概率密度分布函数就可以计算某次测量的随机误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为

$$P_{\sigma} = \int_{-\sigma}^{+\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.683 \quad (\text{A-5})$$

同理,某次测量的随机误差落在 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 和 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间的概率分别为

$$P_{2\sigma} = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.954 \quad (\text{A-6})$$

$$P_{3\sigma} = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} p(\Delta x) d(\Delta x) = 0.997 \quad (\text{A-7})$$

用百分数表示则分别为68.3%,95.4%和99.7%,其所对应曲线下的面积如图A-4所示。

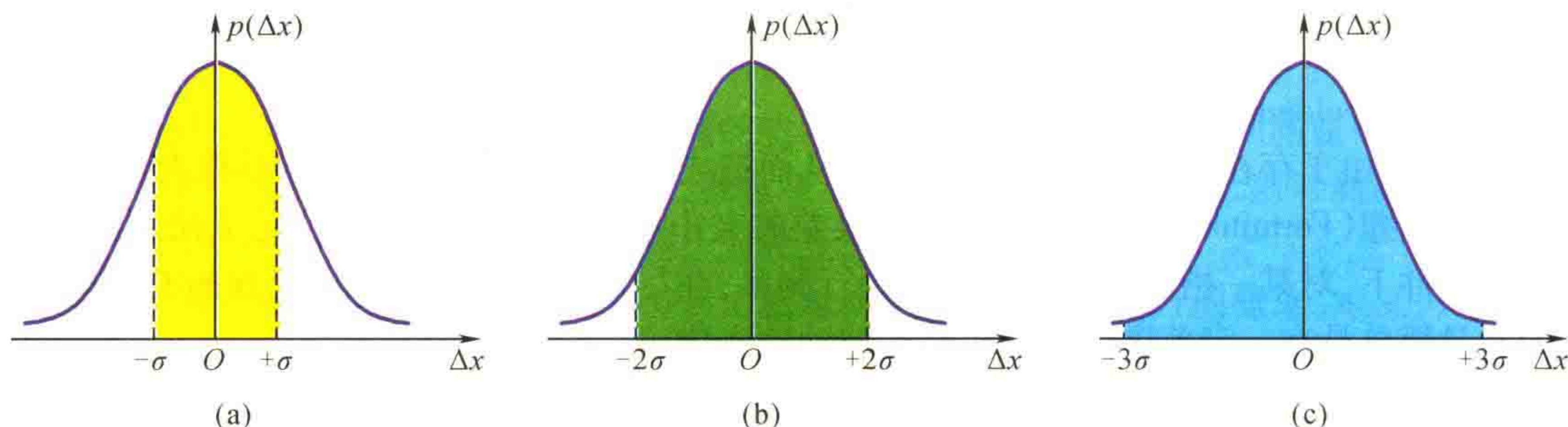


图 A-4 误差落在某区间的概率

(a) $P_{\sigma} = 68.3\%$; (b) $P_{2\sigma} = 95.4\%$; (c) $P_{3\sigma} = 99.7\%$

综上所述,随机误差的特性可归纳为三个方面:具有随机性、产生在测量过程中、与测量次数有关。等精度条件下,增加测量次数可减小随机误差对测量结果的影响。服从正态分布的随机误差具有以下特征:对称性(Symmetry),即绝对值相等的正误差和负误差出现的概率均等;单峰性(Unimodality),即绝对值小的误差出现的概率大,大的误差出现的概率很小;有界性(Boundedness),即非常大的正或负的误差出现的概率几乎为零。

(2) 系统误差(Systematic Error)

大小和方向有一定规律的测量误差称为系统误差,也称为确定误差。根据已知的变化规律,又可分为恒定系统误差和变值系统误差。固定不变的系统误差称为恒定系统误差,按已知规律变化的系统误差称为变值系统误差。因此,系统误差可以设法消除。上述确定误差,从其可知性说是比较典型的系统误差,统称为确定系统误差。与此相对应,若系统误差带有一定的随机性质,则称此系统误差为未定系统误差。

(3) 过失误差(Gross Error)

明显歪曲测量值的误差称为过失误差,这类误差是由于操作错误、读数错误、记录错误等原因造成的,即由于疏忽或失误造成的,所以也称为疏失误差。过失误差从绝对数值上看远远大于在相近条件下一般系统误差值或随机误差值。因此,带有过失误差的测量值与正常测量值相差较大,称之为异常值或可疑值。对过失误差的处理方法,可以直接从测量数据中将它剔除。但对原因不明的可疑值,在处理时应采取慎重的态度,尽管它对测量的影响较大,但在不能判定为不可信时,绝不能按主观意愿轻易把它剔除,应当根据一定的准则判断,最后才能决定是否把该数据剔除。

总之,为了提高测量的精确度,就要设法缩小或排除测量误差。但由于系统误差和随机误差的性质不同,按两类误差进行处理所依据的理论与方法也不同。所以,对测量误差进行处理之前,一定要根据误差的性质区分是系统误差还是随机误差。若按定义区分测量误差是系统误差还是随机误差是非常明确的,但在实际测量工作中,有时这两类误差却不易区别,因为在一定条件下两种误差的性质可以相互转化。例如,原来被看成随机误差的测量误差,随着科学技术水平的提高,可以发现引起这种误差的原因,从而能够掌握这种误差的变化规律,这样就有可能把这种误差当作系统误差来对待。也会有相反的情况,原来被看作系统误差,造成这种误差的原因及变化规律也能掌握,但由于造成误差的已知因素变化比较频繁或十分复杂,同时对测量值的影响又很微弱,若掌握其变化规律所付的代价较大,在能满足实际需要的条件下,可以把这种误差当作随机误差来处理。也就是说,在系统误差与随机误差之间的区分不是绝对的,两者在一定条件下是可以相互转化的。

6. 正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度是三个用来评价测量结果好坏的常用术语。

(1) 正确度

实验测量结果的正确度是指测量值与真值的接近程度。正确度高说明测量值接近真值的程度好,系统误差小,正确度是反映测量结果系统误差大小的术语。

(2) 精密度

实验测量结果的精密度是指重复测量所得测量结果相互接近的程度。精密度高说明实验测量的重复性好,各个测量值的误差的分布密集,随机误差小,精密度是反映测量结果随机误差大小的术语。

(3) 准确度

实验测量的准确度所描述的是综合评定测量结果的重复性和接近真值的程度,准确度高说明精密度和正确度都高,准确度反映的是随机误差和系统误差的综合效果。

如图 A-5 所示,分别用图 A-5(a)(b)(c)(d) 说明实验测量结果的正确度、精密度和准确度的概念。其中,图 A-5(a) 数据测量结果说明重复测量所得测量值正确度高、精密度低;图 A-5(b) 数据测量结果说明测量值正确度低、精密度高;图 A-5(c) 数据测量结果表示测量值正确度高、精密度高,即准确度高;图 A-5(d) 数据测量结果则表示数据测量值正确度低、精密度也低。

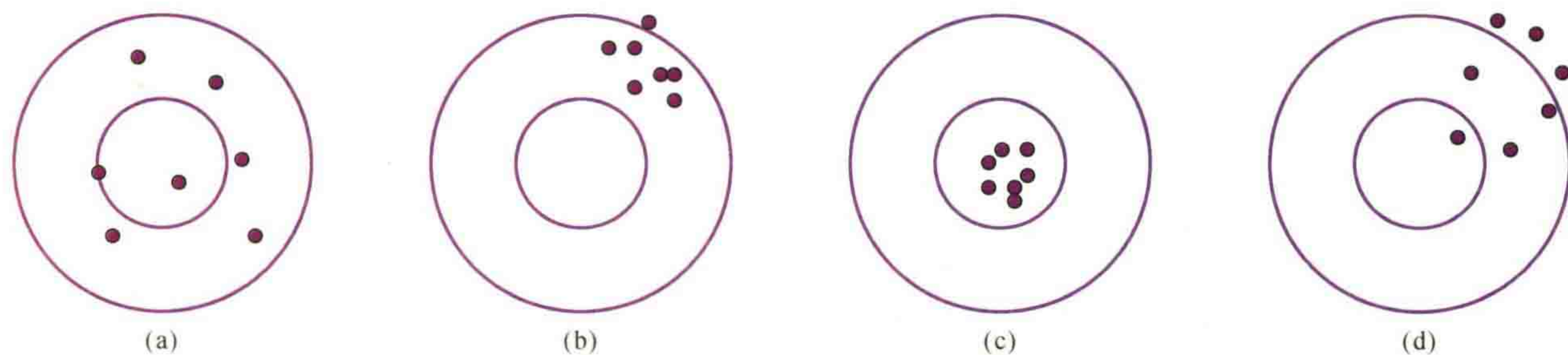


图 A-5 正确度、精密度和准确度的说明

(a) 测量值正确度高、精密度低; (b) 测量值正确度低、精密度高;
(c) 测量值正确度高、精密度高, 即准确度高; (d) 测量值正确度低、精密度低

由于实验中通常要求尽可能地消除或减小系统误差,而所谓误差计算主要是估算随机误差,因此,往往并不严格区分正确度、精密度和准确度,而泛称为测量精度(Certainty of Measurement)。

二、有效数字

在实际测量中,根据数字占有的位数是否有效,可把数分为两大类:一类是有效数位为无限制的数,这类