

应用型本科数理类基础课程系列教材

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

主编 吴庆春 汪连城



科学出版社

应用型本科数理类基础课程系列教材

大学物理实验

主 编 吴庆春 汪连城

副主编 许生慧 伊兆广 周爱平

金远伟 蒋志冬 唐春红

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据《理工科类大学物理实验课程项目教学基本要求》，针对南京工程学院在校本科生需要完成的大学物理实验项目进行编写。全书分为绪论、物理实验数据测量与处理的基本知识、基础实验、演示实验及仿真实验、PASCO 设计性实验五部分，共 36 个实验。

本书可作为工科院校各专业的大学物理实验教材，也可供其他人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/吴庆春, 汪连城主编. —北京: 科学出版社, 2017. 12

应用型本科数理类基础课程系列教材

ISBN 978-7-03-056224-1

I. ①大… II. ①吴… ②汪… 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 323935 号

责任编辑: 昌盛 王刚 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年12月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 378 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

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，它对培养学生的基本实验技能、科学素质和创新思维能力等方面有着重要的作用。学生通过学习和完成大学物理实验，能够从中领略到物理学的发展对社会进步的重要贡献，学习到巧妙的实验设计方法，培养出科学的分析问题及解决问题的能力，以及锲而不舍、追求真理的科学精神。这些都超越了物理学本身，对今后无论是从事经济建设，还是从事科学研究的同学们都具有普遍的指导意义，将会使他们终身受益。

本书的新编是在原有教材的基础上进行了大幅度的增删和完善。全体任课教师在近年来的教学实践中，提出了很多宝贵的意见。集体编写的这本教材，是我校近年来大学物理实验教学经验的总结，是全体任课教师辛勤劳动的结晶。根据我校大学物理课时的安排和学生知识水平的实践情况，本书尽量做到难易适当。针对我校最新制订的人才培养目标，大学物理实验课程建立了独立完整的教学课程体系，竭尽所能地培养对社会有用、对国家有益的工程技术人才。

本书由吴庆春、汪连城主编，许生慧、伊兆广、周爱平、金远伟、蒋志冬、唐春红为副主编，其中吴庆春撰写绪论，第1章，第2章中的实验2.1，实验2.7，实验2.8，实验2.24，实验2.25，实验2.28，第3章中的实验3.2；汪连城撰写第2章中的实验2.21，实验2.26，实验2.27，第4章；许生慧撰写第2章中的实验2.2，实验2.6，实验2.15，实验2.16，实验2.22；伊兆广撰写第2章中的实验2.4，实验2.9，实验2.12，实验2.19；周爱平撰写第2章中的实验2.10，实验2.13，实验2.14，实验2.18；金远伟撰写第2章中的实验2.3，实验2.5，实验2.11，实验2.17；蒋志冬撰写第2章中的实验2.20，实验2.23；唐春红撰写第3章中的实验3.1。全书由吴庆春和汪连城审阅统稿。

本书在编写过程中，参考了我校的原有教材，以及众多兄弟院校的教材和仪器厂家的相关资料，吸取了其中优秀的思想和内容，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中存在的疏漏和不妥之处，恳请广大师生给予批评与建议，以利于我们的进一步修改。

编 者

2017年9月

目 录

前言

绪论	1
一、物理实验在物理学发展史上的重要意义	1
二、大学物理实验课的重要性	2
三、大学物理实验课程的任务	3
四、如何上好大学物理实验课	4
五、实验室规则	5
第 1 章 数据测量与处理	6
1.1 测量与误差及误差处理	6
1.2 测量结果的不确定度评价	12
1.3 有效位数与数值修约	20
1.4 数据处理的常用方法	23
1.5 实验数据的计算机处理方法	31
1.6 常用测量工具	38
第 2 章 实验指导	44
实验 2.1 复摆实验	44
实验 2.2 用三线摆法测刚体的转动惯量	50
实验 2.3 用拉伸法测量金属丝的杨氏(弹性)模量	57
实验 2.4 气体摩尔热容比的测定	64
实验 2.5 弦线上驻波的研究	68
实验 2.6 用电桥法测电阻	74
实验 2.7 模拟法描绘静电场	79
实验 2.8 模拟示波器的调节和使用	85

实验 2.9	电子束的电偏转和磁偏转研究	99
实验 2.10	用数字示波器研究 RC 电路的暂态过程	104
实验 2.11	超声波声速的测定	110
实验 2.12	多普勒效应的实验研究	118
实验 2.13	光的干涉——牛顿环	124
实验 2.14	迈克耳孙干涉仪的使用	127
实验 2.15	用分光计测三棱镜的顶角	132
实验 2.16	衍射光栅实验	140
实验 2.17	磁阻效应实验	143
实验 2.18	铁磁材料磁滞回线的研究	148
实验 2.19	用霍尔元件测螺线管磁场	154
实验 2.20	电子束在径向电场和轴向磁场中的运动(磁控条件)	160
实验 2.21	金属电子逸出功的测定	165
实验 2.22	密立根油滴实验	170
实验 2.23	弗兰克-赫兹实验	176
实验 2.24	光电效应实验	181
实验 2.25	全息摄影实验	187
实验 2.26	液晶的电光特性研究	191
实验 2.27	真空的获得与测量	200
实验 2.28	用拍频法测定光速	203
第 3 章	演示实验及仿真实验	210
实验 3.1	物理演示实验	210
实验 3.2	计算机仿真实验	220
第 4 章	PASCO 设计性实验	227
4.1	PASCO 实验系统介绍	227
4.2	PASCO 力学实验	232
4.3	PASCO 热学实验	245

4.4 PASCO 光学实验	253
4.5 PASCO 电磁学实验	265
4.6 PASCO 综合实验	274
习题答案	280
附录	281
附表一 基本物理常量	281
附表二 国际单位制(SI)	282
附表三 国际单位制所用的词头	283
附表四 20℃时常用固体和液体的密度	283
附表五 常用金属的弹性(杨氏)模量	284
附表六 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	284
附表七 液体的黏滞系数	285
附表八 部分材料的密度与导热系数	285
附表九 某些金属和合金的电阻率及其温度系数	286
附表十 几种常用热电偶的温差电动势系数	286
附表十一 在标准大气压下不同温度的水的密度	287
附表十二 常用光源的谱线波长	288

绪 论

一、物理实验在物理学发展史上的重要意义

物理学是人类认识自然界的基础,它揭示和阐述了物质世界的基本构成及其运动和相互作用的基本规律.如今,物理学已是现代科学的基石,具有旺盛的生命力,是现代前沿技术的先导和源泉,它对社会发展产生着持续和深远的影响.但物理学更是一门实验科学,实验是物理学的基础.物理学发现任何新的物理现象、探索的物理规律、验证的物理理论等都离不开实验,在整个物理学的发展过程中物理实验一直起着重要的作用,离开了实验,物理学理论就变得苍白无力,无法得到发展.

16世纪意大利物理学家伽利略首先把科学实验方法引入物理学的研究中来,从而使物理学走上了真正的科学道路.力学中的许多基本定律,如自由落体定律、惯性定律等都是由伽利略通过实验发现和总结出来的.17世纪,牛顿在伽利略、开普勒长期实验工作的基础上,建立了完整的经典力学理论.

电磁学研究是从卡文迪许和库仑开始的.1772年卡文迪许精密地用实验证明了静电力与距离的平方成反比;1785年库仑用自己发明的扭秤建立了静电学中著名的库仑定律,库仑定律是电学发展史上的第一个定量规律,它使电学的研究从定性阶段进入定量阶段,是电学史中的一个重要的里程碑.电流的磁效应是奥斯特在1820年在一次课堂教学中,观察到通电导线会引起附近小磁针的偏转时发现的,接着安培又设计研究了通电导线之间的相互作用,并在1822年建立了安培定律.既然电能产生磁,磁能否产生电呢?法拉第进行了十年之久的实验研究,终于在1831年首次发现了电磁感应现象,总结出了电磁感应定律,并提出了场的概念.麦克斯韦把法拉第的思想发展统一成完整的电磁场理论,预言了电磁波的存在,并指出光也是一种电磁波,这一预言由德国物理学家赫兹在1886年通过实验证明,从而使电磁场理论的地位得以确立.在对光的本质的认识中,牛顿的微粒说和惠更斯的波动说进行了长期争论,最后托马斯·杨的双缝干涉实验使波动说得以确认,并由光电效应等实验说明了光具有波粒二象性.这些历史事实说明了物理实验结果在物理概念的提出、物理理论的确立及被公认的过程中所起的关键作用.

经典物理学的基本定律几乎都是实验结果的总结与应用.19世纪以前,没有纯粹的理论物理学家,所有的物理学家都亲自从事实验工作.“两朵乌云”(指当时经典物理学无法解释的两个实验,即黑体辐射实验和迈克耳孙-莫雷实验)、“三

大发现”(X 射线、放射性和电子)揭开了近代物理学的序幕,随着物理学的深入发展,研究越来越复杂,因此出现了以理论研究为主和以实验研究为主的分工,即有了“理论物理学家”,但是,即使是理论物理学家也绝对离不开实验研究工作.20 世纪最杰出的理论物理学家爱因斯坦因成功解释光电效应的实验现象在 1921 年获得诺贝尔物理学奖,而爱因斯坦的伟大的相对论理论却没有获得诺贝尔奖,原因是当时这一理论缺乏实验支持,后来得到了实验的证实,相对论才最终被人们接受.

诺贝尔物理学奖从 1901 年第一次授奖至今已有百余年的历史,有近 150 名获奖者,其中因物理实验方面的伟大发现或发明而获奖的占 73%以上.例如 1901 年,首届诺贝尔物理学奖得主德国人伦琴因发现 X 射线而获奖.著名的美籍华人李政道、杨振宁于 1956 年提出在弱相互作用中宇称不守恒理论,这一理论预见被吴健雄小组的实验证实后,李政道和杨振宁获得了 1957 年诺贝尔物理学奖.

纵观物理学的发展历史,可以说没有物理实验就没有物理学的发展.物理实验不仅对物理学的研究极其重要,同时也推动了物理学在其他学科中的应用.各类现代高新技术的不断涌现恰是物理学在各行各业中应用的结果,物理学的发展使我们的世界发生了翻天覆地的变化.在信息技术中,现代传感遥感技术、现代通信技术、计算机技术都与物理学密切相关;在材料科学中,超导材料、磁性材料、纳米材料与纳米加工、先进陶瓷材料、新型金属材料等都与物理学密切相关;在生命科学中,光学显微镜、扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM)等都是物理学的应用;在医学中,X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断以及放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用;在能源科学中,各类内燃机的发明和利用、电能的利用、原子能的利用都和物理学紧密相关,如今,物理学又为新能源电站的发展如太阳能、地热能、海洋能、风能的开发和利用以及可控热核聚变的研究提供了新的途径和方法;在军事科学中,如光学武器、声波武器、电磁武器、核武器等都是物理学最新成就的应用.物理学已经渗透到各类学科领域和社会的方方面面,而物理学的这些发展和应用都和物理实验是分不开的.

二、大学物理实验课的重要性

物理实验在物理学发展中起了重要的作用,今后在探索和开拓新的科技领域中,物理实验仍是强有力的工具.物理实验技术和工程技术是相融相通的,大学物理实验是工程技术的基础.工程技术要不断地探索新理论、新材料、新工艺,为此要进行科学实验,有关实验方法的设计、仪器的选择、数据的记录与处理等在物理实验这门课程中都会涉及.大学物理实验课是工科学生必修的基础课,是学生进入大学后接受系统科学实验知识和技能训练的开端,是今后从事科学研究的基础、它有利于培养学生发现、观察、分析、研究、解决问题的能力,有利于

提高学生的科学素养、培养学生的思维和创造能力、激发学生强烈的求知欲望,有利于培养学生严谨的科学作风和坚韧不拔的刻苦精神,为他们在今后的进一步学习和工作中打下良好的基础。

三、大学物理实验课程的任务

(一) 通过大学物理实验课程,要求学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律,加深对物理学原理的理解

(1) 物理实验的基础知识包括测量与不确定度的基本概念、基本的数据分析与处理方法、测量结果不确定度的评定、实验结果的正确表述等。

(2) 物理实验的基本方法包括科学思维方法和实验研究方法。严谨的逻辑思维、辩证思维,可以保证思维的正确性,是正确思维的基础;而开放的形象思维方式、发散思维和联想思维,才能保证思维的活力,是思维原创性的主要源泉。

在物理实验的学习中应注意科学实验分析方法和测量方法的掌握和积累,例如,最基本的数量级的分析与判断法、比较法、替代法、放大法、转换法和模拟法等。要学会根据实验目的、对测量的范围和测量精度的要求,以及实验设备和环境等具体情况确定实验的思路和方法来达到预期的目的。

(3) 物理实验的基本技能包括实验现象和规律的观测能力、实验仪器或装置简单故障的发现和排除能力,各种测量技术中技巧的掌握和积累等;常规物理实验仪器的调节和使用,常用物理实验测量和相关联的实验技术的掌握;查询文献资料、分析、归纳和总结的能力,发现问题和解决问题的能力,自我学习和提高的能力,组织协调的能力等。

(二) 通过大学物理实验课程,培养与提高学生从事科学实验的能力

(1) 自学能力。能够自行阅读实验教材与参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备工作。

(2) 动手能力。能借助教材与仪器说明书,正确调整和使用仪器,制作样品,发现和排除故障。

(3) 思维判断能力。运用物理学理论,对实验现象与结果进行分析和判断。

(4) 书面表达能力。能够正确记录和处理实验数据,绘制图表,分析实验结果,撰写规范、合格的实验报告或总结报告。

(5) 综合运用能力。能够将多种实验方法、实验仪器结合在一起,运用经典与现代测量技术和手段,完成某项实验任务。

(6) 初步的实验设计、研究能力。根据课题要求,能够确定实验方法和条件,

合理选择、搭配仪器，拟定具体的实施步骤。

(三) 培养学生从事科学实验的素质

从事科学实验的素质包括理论联系实际、实事求是的科学作风；严肃认真的工作态度；不怕困难、勇于探索的创新精神；遵章守纪、爱护公物的优良品德；团结协作、共同进取的理念等。

四、如何上好大学物理实验课

要上好大学物理实验课，要做好以下工作。

(一) 实验前的预习

我们在每个实验开始前都必须认真地进行预习，根据实验内容阅读实验指导书，查找相关资料，理解实验原理，掌握实验的各个环节和实验方法，以及设计的实验步骤。对实验中要使用的仪器设备要做初步的了解。在此基础上写预习报告。预习报告应该写明名称、目的、原理（扼要）、实验步骤和供做实验时记录数据的表格。

(二) 实验中的仪器操作和实验现象的观测与记录

进入实验室后，每个实验人员都必须严格遵守实验室的纪律。在预习的基础上，参考仪器的使用说明，熟悉仪器的操作，注意仪器使用的要点和注意事项，根据事先的计划布置实验仪器和设备并仔细检查线路是否连接正确、各旋钮按键是否调节到位，经确认无误后方可进行实验。对实验的内容进行熟悉和练习，发现问题及时处理。实验中要密切注意观察实验时所发生的一切现象，实验时最重要的任务是观测和记录。观测和记录的内容包括：实验的时间、地点、实验仪器及编号、实验测量的数据和有关的实验条件、参数和出现的现象。对于这些内容，必须如实记录，不得人为编造，还要注意不要漏记错记。实验中，记录数据必须注意有效数字的位数；必须用钢笔、签字笔或圆珠笔将数据记录在预习报告的数据表格中，不要使用铅笔；若记录的数据有错误，可用斜线划掉后，把正确的数据写在其旁，但不允许涂改数据。

(三) 实验后的实验报告撰写

在实验后要及时地完成实验报告。一份完整的实验报告应包括以下几个方面：

- (1) 实验名称；
- (2) 实验目的；

- (3) 简要的实验原理, 包括基本关系式, 必要的电路、光路图等;
- (4) 仪器设备, 包括型号、规格、参数等;
- (5) 实验步骤, 扼要地写出实验进行的主要过程;
- (6) 实验数据表格;
- (7) 数据处理与误差分析;
- (8) 实验结果或结论;
- (9) 问题讨论, 完成该实验的思考题, 包括对实验中的现象解释, 对实验方法的改进与建议, 实验后的体会等。

为避免重复劳动和增加学生的负担, 经指导老师同意, 学生可以将预习报告和实验报告合在一起, 构成一份完整的实验报告。

五、实验室规则

(1) 学生实验前必须认真预习实验内容, 明确实验目的、原理、方法和步骤。预习报告中的实验原理和步骤等切忌全盘抄书, 要按自己的理解, 用自己的语言简明、扼要地撰写。进入实验室须带上该实验的预习报告, 经教师检查并同意后方可进行实验, 没有预习报告者, 不得进行实验。

(2) 学生必须按规定的时间参加实验课, 进入实验室必须遵守课堂纪律, 保持安静的实验环境, 遵守实验室各项规章制度, 严禁高声喧哗, 实验室内及实验室过道、走廊等处均严禁吸烟, 严禁随地吐痰或吃零食, 不得随意动用与本实验无关的仪器。

(3) 实验准备就绪后, 须经指导教师检查并同意后, 方可进行实验。实验中应严格遵守仪器设备操作规程, 认真观察和分析现象, 如实记录实验数据, 独立分析实验结果, 认真完成实验报告。实验的数据记录务必真实, 严禁造假; 不得抄袭他人实验数据或数据分析结果。

(4) 实验中要爱护实验仪器设备, 注意安全, 节约水、电、药品、试剂、元件等消耗材料, 凡违反操作规程或不听从指挥而造成事故、损坏仪器设备者, 必须写出书面检查, 并按有关规定赔偿损失。

(5) 做完实验后学生应将仪器整理还原, 将桌面和凳子收拾整齐。经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字或盖章后, 方可离开实验室。

(6) 按要求在规定时间内认真、及时地完成实验报告, 实验报告由班级课代表或学习委员收齐后统一上交到本班实验报告柜或指导教师本人。严禁单独迟交实验报告。

第 1 章 数据测量与处理

1.1 测量与误差及误差处理

1.1.1 测量与误差

1. 测量

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量，就是用一定的工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地与被测对象进行比较。著名物理学家伽利略有一句名言：“凡是可能测量的，都要进行测量，并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的。”物理测量的内容有很多，大至日、月、星辰，小到原子、分子。现在人们能观察和测量到的范围，在空间方面已小到 $10^{-16} \sim 10^{-17} \text{m}$ ，大到百亿光年，大小相差在 10^{40} 倍以上。在时间方面已短到 $10^{-23} \sim 10^{-24} \text{s}$ ，长达百亿年，两者相差也在 10^{40} 倍以上。在定量地验证理论方面，也需要进行大量的测量工作。因此，测量是进行科学实验必不可少的一个环节。

按取得结果的方法不同，测量可分为如下两类。

(1) 直接测量：直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较，如用米尺测量物体的长度和用天平测物体的质量。

(2) 间接测量：间接测量是指按一定的函数关系，由一个或多个直接测量量计算出另一个物理量，如测物体密度时，先测出该物体的体积和质量，再用公式计算出物体的密度。在物理实验中进行的测量，大多属于间接测量。

根据测量条件的不同，又可把测量分为如下两类。

(1) 等精度测量：对某一固定被测量进行重复测量，所取得的测量数据可以认为是在相同的测量精度条件下得到的。

对一固定被测量作等精度测量，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，不能判定哪种数值更加接近被测量的真值，只能以一视同仁的态度，同等对待，即对取得数据的信赖程度是相同的。这是判定是否为等精度测量的重要依据。

(2) 不等精度测量：对一被测量进行测量得到的数据，其精确度判定是不等的。这种测量是由条件的改变，如测量设备的不同、测量方法的不同等原因产生的。一个测量数据不同于一个数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值

有了单位，才具有特定的物理意义，才可以称之为一个物理量。因此测量所得的值（数据）应包括数值（大小）和单位，两者缺一不可。

2. 误差

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。对物理量而言，是在一定条件下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，真值是很难直接测量得到的，随着测量器具的精密度的提高，在不考虑系统误差的情况下，测量值只是无限接近真值。在某些特殊情况下，真值可以认为是已知的，主要包括理论真值和约定真值等。

理论真值：如平面三角形内角和是 180° ，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。例如，7 个国际单位制基本单位是计量学约定的真值。例如，长度单位：米；质量单位：千克；等等。

近似真值：高一级的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。

在实际测量中，由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员等各种因素不可避免地存在着差异，不可能使测量值与客观存在的真值完全相同，因此测量结果的量值与真值之间总存在一定的差值。此差值称为该测量值的测量误差。

真值(X)：被测量在其所处的确定条件下，客观具有的量值。

误差(Δx)：测量值(x)与真值(X)之差，又称绝对误差，即

$$\Delta x = x - X$$

相对误差(E_r)：绝对误差(Δx)与真值 X 的比值

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\%$$

误差按其特征和表现形式可以分为三类：系统误差、随机误差和粗大误差。

1) 系统误差

在同一条件下多次测量同一被测量时，其误差的大小和方向保持恒定，或在条件改变时，误差的大小和方向按一定规律变化，这种误差称为系统误差。其特点是它的确定规律性。系统误差来源于以下几方面：①由实验原理和实验方法不完善带来的误差。例如，计算公式的近似性所引起的误差；②由仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差；③由环境条件变化所引起的误差；④由观测者生理或心理特点造成的误差等。

系统误差的确定性反映在：测量条件一经确定误差也随之确定；重复测量时误差的绝对值和符号均保持不变。因此，在相同的实验条件下，多次重复测量不可能发现系统误差。对观测者来说，对系统误差的规律及其产生原因可能知道，也可能不知道。已被确切掌握了其大小、规律和符号的系统误差，称为可定系统误差；对大小、规律和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正；而后者一般难以做出修正，只能估计出它的取值范围。

2) 随机误差

在同一条件下多次测量同一个被测量时，每次测量出现的误差时大时小，时正时负，没有确定的规律，但在同一条件下多次测量就总体来说又服从一定的统计规律。这种误差称为随机误差，它的特点是单次测量具有随机性，而在同一条件下多次测量总体服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定条件下，通过多次重复测量来发现它，而且可以从相应的统计分布规律来讨论它对测量结果的影响。

3) 粗大误差

测量时，由观测者不正确地使用仪器、粗心大意观察错误或记错数据而引起的不正确的结果，这种情况出现的误差称为粗大误差。它实际上是一种测量错误，这种数据表现异常，在测量中应当采用一定的方法检验出来，并将其剔除。

3. 测量结果的定性评价

测量结果的定性评价一般使用精密度、准确度和精确度三个概念，来评价测量结果的好坏。

(1) 精密度：表示测量结果中随机误差大小的程度。它是指在规定条件下对被测量进行多次测量时，各次测量结果之间的离散程度。精密度越高，离散程度越小，重复性大，随机误差小，但系统误差的大小不明确。

(2) 准确度：表示测量结果中系统误差的大小。它是指在规定条件下，多次测量数据的平均值与真值符合的程度，准确度越高，测量值接近于真值的程度就越高，系统误差就越小，但对测量的随机误差大小并不明确。

(3) 精确度：表示测量结果中系统误差与随机误差的综合大小程度。它是指测量结果的重复性和接近真值的程度，只有精密度和准确度都高，精确度才高。精密度和准确度两者中只有一个高，精确度不一定高。

图 1-1-1 所示的是用打靶弹着点的分布情况来说明精密度、准确度和精确度含义的示意图。

图 1-1-1 中 (a) 为精密度高，但准确度低；(b) 为准确度高，但精密度低；(c) 为精密度和准确度都高，称之为精确度高。

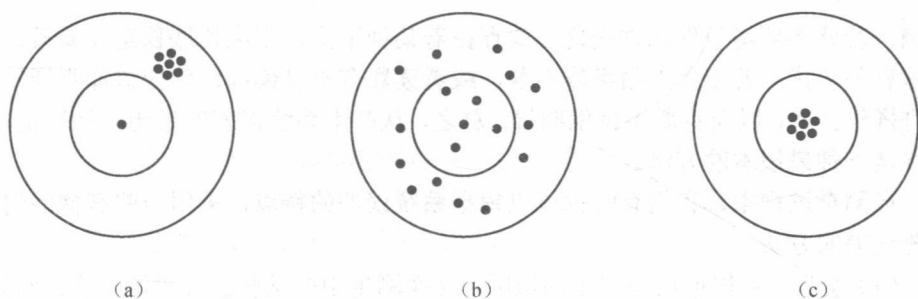


图 1-1-1 精密度、准确度和精确度

1.1.2 系统误差的处理

1. 系统误差的发现

系统误差往往隐藏在测量数据中，一般不能通过多次测量来消除。而很多情况下，系统误差是影响测量结果准确度的主要因素。发现系统误差是消除和修正系统误差的前提，应从系统误差的来源着手分析，主要有以下一些方法。

(1) 理论分析法：分析测量原理和测量公式，看是否满足所要求的条件。例如，用伏安法测量电阻时，电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于零就会产生系统误差；分析实验仪器要求的使用条件是否满足，如用分析天平测质量，要求调平，否则就会产生系统误差。

(2) 对比分析法：通过用不同的实验方法、测量方法和实验仪器等进行测量，或改变实验参数、实验条件和换人等方式进行测量，比较结果差异，从而发现系统误差。例如，测重力加速度，可用单摆、复摆、自由落体等方法测量，比较三者的测量结果是否相同，如不一致说明至少有两种方法存在系统误差。

(3) 数据分析法：在等精度测量中，分析所测数据是否满足统计分布的规律，如有明显不遵守这种规律，则存在系统误差。例如，偏差法，对一组等精度测量数据，通过计算偏差，观察其大小和比较正、负号偏差的数目，如果偏差大小有规则地向一个方向变化，则存在线性系统误差；偏差符号有规律的交替变化，则存在周期性系统误差。

2. 系统误差的减小和修正

消除或减小系统误差的根本方法是消除产生系统误差的根源。在测量之前，要求测量者对可能产生系统误差的环节作仔细的分析，从产生根源上加以消除。例如，若系统误差来自仪器不准确或使用不当，则应该把仪器校准并按规定的使用条件去使用；若理论公式只是近似的，则应在计算时加以修正；若测量方法上存在着某种因素会带来系统误差，则应估计其影响的大小或改变测量方法以消除其

影响：若外界环境条件急剧变化，或存在着某种干扰，则应设法稳定实验条件，排除有关干扰：若测量人员操作不善，或者读数有不良偏向，则应该加强训练以改进操作技术，以及克服不良偏向等。总之，从产生系统误差的根源上加以消除，无疑是一种最根本的方法。

在测量过程中，我们有时也可以根据系统误差的特点，采用一些其他的消除系统误差的方法。

(1) 交换法：根据误差产生的原因，交换测量中的某些条件再测一次。例如，用天平测物体质量时，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。又如在用惠斯通电桥测电阻中，交换两标准电阻再测一次，可以消除标准电阻标称值和实际值的偏差。

(2) 替代法：在对某未知量测量后，马上用一个标准量代替未知量再进行测量，若仪器示值不变，则可肯定被测的未知量即等于标准量的值，从而消除了测量结果中的仪器误差。例如，用标准电阻、标准电容做替代测量检验。

(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上的电流方向和外加磁场方向，可以消除其中 3 种附加电压对霍尔电压的影响。

(4) 对称观测法：线性观测法可抵消某种线性变化的系统误差。例如，电源电动势随时间线性降低，则可使用电势差计隔相等的时间轮流测标准量和待测量，如第一、三次测标准量，将其平均值与第二次所测待测量对应。

对于某些需对两个或两个以上直接测量量进行测量的间接测量，采用等时间间隔对称取值，将各直接测量量各测量值的算术平均值作为直接测量量的测量结果，再通过已定的函数关系式计算被测量的测量结果。对称观察法是一种消除线性系统误差的有效方法。

(5) 半周期偶次测量法：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，采用分光计在相隔 180° 的直径上设置两个角游标进行读数，可以消除由刻度盘和转轴中心不重合（偏心差）引起的周期性系统误差。

(6) 实时反馈修正法：这是消除各种变值系统误差的自动控制方法。当查明某种误差因素（如位移、气压、温度、光强等）的变化时，由传感器将这些因素引起的误差反馈回控制系统，根据其影响测量结果的函数关系通过计算机进行处理，对测量结果作出自动补偿修正。

由于系统误差的复杂性和多样性，处理系统误差的时候要根据系统误差的特点，结合经验和分析，采取合适的方法和措施。