

湖南省示范实验室建设教材 院级精品课程建设教材

大学物理实验

— DAXUE
WULI SHIYAN —

主 编 李 强

副主编 谢常清 黎建辉



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

湖南省示范实验室建设教材、院级精品课程建设教材

大学物理实验

主 编 李 强

副主编 谢常清 黎建辉

参 编 黄雪莲 刘娟仪 赵平华 李韶华 吴学庆
刘长青 刘海力 朱琳翔 刘莲辉

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书是按照教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会最新制定的《大学物理实验课程教学基本要求》而编写的大学物理实验教材。全书共分为绪论、基础实验、提高实验、综合与近代实验、设计与研究实验和附录六个部分。绪论部分主要介绍了测量结果的正确表达方式,常用的实验数据处理方法,力求使学生在实验时能够准确地处理数据。然后提供了 57 个实验项目的基本讲义,既有传统的经典实验项目,又有大量与理工科专业相关的实验项目,还有少量近代物理实验及设计与研究性实验项目。

本书可作为高等学校理工科专业的大学物理实验教材,也可作为物理学专业基础物理实验的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李强主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.1
ISBN 978-7-5643-0532-1

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 242330 号

大 学 物 理 实 验

主 编 李 强

*

责任编辑 牛 君

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川经纬印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 19.125

字数: 501 千字 印数: 1—3 000 册

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0532-1

定价: 32.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导委员会于2008年1月24日正式颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写而成的。以“加强基础,重视应用,开拓思维,培养能力,提高素质”为改革指导思想,以省级示范实验室建设为契机,结合多年的教学实践和我校实验设备的具体情况,广泛吸取国内同类教材的精华,编成此书。

本书以分层次教学基本要求为出发点,结合物理实验教学大纲,在教材体系上进行了新的尝试,力求理论体系完整、实验知识比较系统化、实验项目层次分明。其主要特点为:

(1) 大学物理实验作为独立的必修基础课程,是本科学学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,不再依赖于物理学理论知识体系。因此,教材总体结构不再按传统的方式编排,在实验项目分类上,按实验训练的性质和层次分为基础实验、提高实验、综合与近代实验、设计与研究实验四个层次。由简单到复杂,由基础、提高、综合到设计与研究实验,根据逐步提高的原则进行编排。

(2) 每个实验项目提供一组主题词,方便学生快速了解实验的内容,以便不同专业、不同兴趣、不同要求的学生选择实验项目。

(3) 注重以学生为中心的基本理念,促使学生认真准备,积极思考,加强了实验原理部分的内容,削弱了实验步骤的表述,有利于拓展物理知识面,对大学物理课程起到一个互补的作用。大部分实验编写了思考题,有利于学生进行预习与实验后的反思。

(4) 本教材共选用了57个实验项目,远远超出了实验教学要求规定的基本学时数,学生可根据专业要求与自身的实际情况进行取舍,所有实验项目在一学年度内均会开出。

(5) 将《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》作为附录部分之一;实验数据的基本处理方法单独成章,供理论教学时参考,在相关的实验项目中会进一步加强;将利用计算机进行数据处理的方法与实验项目相结合。

(6) 大部分实验项目中增加了拓展内容,并进行了举例说明,可供学有余力的学生使用。对于必做的实验项目给出了考核的基本要求与实例。

(7) 为学生提供网络资源表,方便学生进行网络学习。同时提供了中国科学技术大学仿真实验项目的清单及上网仿真实验的操作指南。

本书在编写过程中参考了许多院校的相关教材、讲义与精品课程网站资源,从中受益匪浅。湖南人文科技学院物理实验室的全体教师为本书的出版付出了多年的辛勤劳动。湖南人文科技学院领导、教务处领导及物理与信息工程系领导提供了大力支持与帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于编者的水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

1 绪 论

1.1 物理实验课程的地位、作用与任务	1
1.2 物理实验课程的基本要求	2
1.3 测量与误差	3
1.4 随机误差的分布规律与特点	7
1.5 不确定度的评定与表示	10
1.6 有效数字	15
1.7 物理实验中常用的数据处理方法	18

2 基础实验

实验 1 长度的测量	29
实验 2 复摆实验	36
实验 3 弦振动的研究	39
实验 4 气垫导轨上运动定理的研究	43
实验 5 刚体转动的研究	47
实验 6 液体黏滞系数的测定	52
实验 7 固体线膨胀系数的测量	55
实验 8 空气比热容比的测定	58
实验 9 示波器的使用	61
实验 10 电流场模拟静电场	66
实验 11 电子在电磁场中运动规律的研究	71
实验 12 双臂电桥测低值电阻	80
实验 13 磁场的描绘	84
实验 14 伏安法测电阻与电表内阻	87
实验 15 薄透镜成像及其焦距的测量	94
实验 16 用牛顿环测透镜的曲率半径	98
实验 17 分光计的调节与使用	102
实验 18 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	110
实验 19 光栅特性及光波波长测定	114

3 提高实验

实验 20	不同介质中声速的测定	117
实验 21	金属材料杨氏模量的测定	124
实验 22	验证动量和能量守恒定律	132
实验 23	用 CCD 测量杨氏弹性模量	135
实验 24	液体表面张力系数的测定	140
实验 25	用交直流电桥测 RLC	145
实验 26	霍耳效应研究	150
实验 27	RLC 串联电路的特性研究	156
实验 28	铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	159
实验 29	全息照相	167
实验 30	偏振光的产生与检验	173
实验 31	光具组基点的测定	178
实验 32	用阿贝折射仪测定物质的折射率	180

4 综合与近代实验

实验 33	多普勒效应综合实验	186
实验 34	空气热机实验	190
实验 35	温度传感器实验	194
实验 36	晶体的声光效应研究	198
实验 37	晶体的电光效应实验	202
实验 38	法拉第磁光效应实验	205
实验 39	密立根油滴实验	208
实验 40	微波的光学特性研究	215
实验 41	用光电效应测定普朗克常量	220
实验 42	液晶光开关的电光特性实验	226
实验 43	电子秤实验	233
实验 44	非良导体热导率的测定	237
实验 45	太阳能电池基本特性的研究	242
实验 46	高温超导材料特性测试和低温温度计	245
实验 47	卡文迪许扭秤法测量万有引力常量	256
实验 48	透射式电子显微镜	262

5 设计与研究实验

绪论	266
实验 49 旋转液体实验	269

实验 50	黑盒实验	271
实验 51	电表的改装与校准	275
实验 52	差动变压器特性研究与调速系统设计	277
实验 53	测定半波整流电容滤波电路中负载电阻上消耗的平均功率	279
实验 54	单摆法测重力加速度的研究	280
实验 55	光学系列实验研究	281
实验 56	用磁阻尼效应测定气垫导轨的等效电阻	282
实验 57	线阵 CCD 成像研究	283
参考文献		284
附 录		285
附录 A	理工科类大学物理实验课程教学基本要求 (定稿)	285
附录 B	一些常用的物理学量和数值	288
附录 C	物理实验教学网络平台	297

1 绪 论

1.1 物理实验课程的地位、作用与任务

1.1.1 物理实验的地位和作用

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化的自然科学。物理学家杨振宁教授曾题词“物理学是以实验为本的科学”，这是物理学界的共识。物理规律的发现和物理理论的建立都必须以实验为基础，物理学的每一项突破都与实验密切相关。伽利略（Galileo Galilei, 1564—1642）用新发明的望远镜观察到木星有四个卫星后，否定了地心说。普朗克（Max Planck, 1858—1947）在黑体辐射实验的基础上提出了能量子概念。爱因斯坦（Albert Einstein, 1879—1955）通过分析光电效应现象提出了光量子。杨振宁、李政道于 1956 年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”理论，当实验物理学家吴健雄用实验验证后，才被物理学家们承认，从而才有可能获得诺贝尔奖。物理实验与物理理论始终是相互推动、相互制约、相得益彰的。没有理论的实验是具有一定的盲目性的，实验必须经过总结抽象上升为理论，才有其存在的价值；而理论靠实验来检验，同时理论上的需要又促进实验的发展。

物理实验是科学实验的先驱，体现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。物理实验是理工科大学生进校后首先接触的实践性教学环节，是对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是其接受系统实验方法与实验技能训练的开端。了解和掌握物理实验的研究方法和技巧，对后续课程的学习十分重要，尤其是对培养将来从事实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质是十分必要的。

20 世纪 50 年代以前，世界各国对物理实验课作用的认识停留在“物理实验课程是物理学课程教学的一个环节”上。直到 60 年代初，人们才逐渐认识到科学实验在尖端技术发展中的地位，因此，随之而来的以“新物理运动”为出发点的改革浪潮，明确地提出了“加强基础理论教学与加强基础实验教学并重”，于是物理实验教学脱离了物理理论教学而单独开设，并从实验课程的特有规律出发强调实验方法、实验素质的训练。实践证明，物理实验课程在培养学生创新精神和创新能力、独立从事科学技术工作的能力、理论联系实际的分析综合能力与思维和表达能力等方面均具有独特的优势。所以说，“物理实验”这门课程与物理理论课程既有密切的联系，又有很大的区别，它不仅仅向学生传授知识和技能，更重要的是培养学生开拓性研究的能力。在科学研究中，常常是实验中的某些物理现象为我们提供了种种线索，而要从这些线索中作出独特的判断，还需要有丰富的想象力去对蕴藏在所有线索后面令人惊讶的、简单而又非常奇特的图像进行猜测，然后再用实验手段来验证，这个想象过程是很难的，又是最具挑战性的，然而，从想象的产生到猜测的验证都是实验在起着至关重要的作用。因此，同学们从一开始接触实验课就要认识到实验课的意义，认识到从事科学实验，动手能力和创新能力的形成是以实验的基本知识、基本方法、基本技能的熟练掌握为基础的，并在打好基础的前提下，创造性地去进行实验。

1.1.2 物理实验课程的任务

物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、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。它在培养学生严谨的治学态度、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。

具体任务是：

(1) 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新精神，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度、积极主动的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

1.2 物理实验课程的基本要求

为完成好物理实验课程的学习任务，学生应在教师指导下，充分发挥主观能动性，加强实践能力的训练。学生必须重视物理实验的四个重要环节。

1. 预约实验项目

所有实验项目采用预约开放方式，并采用湖南人文科技学院实验综合管理系统进行管理。访问湖南人文科技学院实验综合管理系统，可在地址栏中输入地址，校内网：[HTTP://10.1.1.48/](http://10.1.1.48/)，校外网：<http://www.hnrku.net.cn:8003/>。进入登录界面后，用户名为学生学号（8 位数字），初始密码为空，选择用户类别为学生，单击“登录”按钮，再点击“进入系统”，进入实验预约主界面，可进行实验预约项目等操作。实验预约开放时间一般在每学期第一周末开始。

2. 实验前的预习

学生在课前要认真阅读教材和实验综合管理系统上的实验指导书，必要时上网搜索相关资料，了解实验目的，掌握实验原理、方法、仪器、实验条件、内容步骤、实验关键及注意事项。根据实验设计好实验数据表格，写好预习报告。预习报告的内容和格式如下：

(1) 实验目的：可参考教材并加上自己的理解，多少不限，言简意赅。

(2) 实验仪器：根据实验原理的需要列出本实验所需仪器，在可能的条件下注明仪器型号。

(3) 实验原理：这部分要求比较全面和详细，在充分理解教材内容之后，用自己的语言概括性地叙述该实验的基本原理和测量方法，包括理论依据所用的公式的推导以及结果、图示，如电路图和光路图等，不必照抄教材内容。

(4) 数据记录和处理：首先要列表格，为了课上记录数据可在课前根据教材要求列出数据表格，最好另外用一张纸简略画表，待课上填好数据，经任课教师批改无误签字后再抄在报告上的本栏目内。

实验前必须由教师检查预习报告并提问，给出一个预习报告成绩。对于无预习报告或准备不够的学生，教师可以停止其本次实验。

3. 实验操作

学生要按时到指定地点完成所有预约的实验项目，不得迟到与早退。对无故违约者，将按

实验室相关管理规定处理。学生在操作之前，首先听教师讲解基本原理、仪器使用方法和使用注意事项，然后按要求正确操作，包括调整仪器进入使用状态、进行物理量测量。电学实验的电路和高精密仪器实验必须经指导教师确认以后方可进行正式实验。实验中要认真观察、分析实验中的现象，正确记录数据。在实验过程中要有科学认真的态度，听从指导教师安排，实验数据需经指导教师审查签字。实验结束后要整理仪器设备、打扫卫生，经教师同意后才能离开实验室。

4. 实验报告

实验报告是对实验的全面总结，既全面反映实验成果，又力求简单明了，应该用语确切，字迹工整，图表合乎规范并且美观，数据要实事求是，不随意涂改，发现错误要及时找到原因，并重新测量，修正错误。

实验报告可以接续预习报告来完成，将表格及数据填好，接着进行数据处理，按要求将所列数据进行处理，并表示出测量的正确结果，一定要注意误差和有效数字的处理。

1.3 测量与误差

1.3.1 测量及其分类

在进行科学实验时，不但要获取定性的信息而且还要获取定量的信息，以便深入认识和发现自然规律。对于物理实验，大多数情况下是离不开定量信息的获取的，也就是离不开测量。

所谓测量就是把待测物理量与一个被选做计量标准的同类物理量进行比较，得出其倍数的过程，也可以说是确定被测物理量值的全部操作。倍数称为待测物理量的大小或数值，选做的计量标准称为单位。一般来说，一个被测物理量必须由数值和单位组成，两者缺一不可。例如，12.34 m，15.38 kg，10.38 s 等。

选做比较用的标准量必须是国际公认的、唯一的和稳定不变的。各种测量仪器，如米尺、停表、天平等，都有合乎一定标准的单位和与单位成倍数的标度。本教材采用通用的国际单位制 (SI)。

(1) 按测量方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量。

① 直接测量是指可直接从量具或仪器上读出待测量的大小的测量，相应的物理量称为直接测得量。一般基本量的测量都属于此类，例如，用米尺测物体的长度，用天平和砝码测物体的质量，用电流表测线路中的电流，都是直接测量。

国际计量组织对基本物理量的计算单位都有明确规定，人们依据这些规定制成具有一定单位刻度的量具仪器或仪表，以便直接读取待测量的数值。对直接测量不仅要求读记或求得结果，还要说明误差来源，并估算出误差范围（要注明根据或估算的方法）。

② 间接测量是指待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后才获得的测量。

在物理实验中，能够直接测量的量毕竟是少数，大多数是利用间接测量所得数据。例如，直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ，应用公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 求重力加速度 g ，这种测量称为间接测量， g 为间接测量量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的,采用不同测量仪器或不同的测量方法,会使原来的间接测量变为直接测量。用单摆测重力加速度是间接测量,用重力加速度计可以实现直接测量。液体的密度可以用密度计直接测量,当然也可通过测量体积与质量间接得到。

(2) 按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和不等精度测量。

① 等精度测量是指在相同的测量条件下进行的一系列测量过程。例如,同一个人,使用同一把单位为毫米的尺,对同一书本的长度量 x 进行多次重复测量,得 k 个数值: $x_1, x_2, \dots, x_k$,由于每次测量都是在相同的条件下进行的,没有理由认为所得的 k 个值中,某一个值比另一个值要测得准确些。在这种情况下,所进行的一系列测量就是等精度测量。这样的一组测量值称为一个等精度测量列。这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。应该指出,重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是重复读数。

② 不等精度测量是指不同测量条件进行的一系列测量过程。例如,同一实验者用精度不同的3种天平称量某一物体质量 m ,得到3个值 m_1, m_2, m_3 ,或者用3种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ,得到3个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ,这都是不等精度测量。由于每次测量的条件发生了改变,那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在实验中多次重复测量某物理量时应尽量保持等精度。

处理不等精度测量列的结果一般需要根据每个测量值的“权重”,进行“加权平均”,因此,在一般物理实验中很少采用。

1.3.2 真值与误差

在一定条件下,任何物质都有其自身各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观真实的数值称之为真值。这个值是客观存在的,不以人的意志为转移。测量的目的之一就是力图得到被测量的真值。

实践证明,测量结果都有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。我们称之为误差公理。因此,真值一般不可能测量得到。

任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不能做到绝对严密,这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。

(1) 真值:被测物理量的客观量值称为真值,常记为 a 。真值是一个物理量本身所具有的真实值,它是一个理想的概念,一般无法得到。在计算误差时,一般用约定真值或相对真值来代替。

约定真值是一个接近真值的值,它与真值之差可忽略不计。实际测量中可以在没有系统误差的情况下,足够多次的测量值之平均值作为约定真值。

相对真值是指当高一标准仪器的误差仅为低一级的 $1/3 \sim 1/20$ 时,可认为高一级的标准仪器或仪表所读出的值为低一级的相对真值。

(2) 测量值:用实验手段测量出来的值叫测量值,记为 x 。

(3) 误差:由于不同时期人们的认识能力和技术水平所限,或者测量中存在的主观、客观因素,必定造成这样一种现象,就是对同一物理量,不同的实验者用不同的仪器在不同时期所测得的结果不尽相同;而且,即使同一位实验者用同一个仪器连续测量,每次测得的结果也不尽相同,因为测量中存在着某些随机因素,使得测量结果出现随机涨落。既然如此,就没有理由可以断定哪一次的测量值就是真值,我们把测量值 x_i 与真值 a 之差称为该次测量的误差,记为 Δx_i ,用公式表示为

$$\Delta x_i = x_i - a$$

式中： i 为第 i 次测量。

(4) 误差的表示。

① 测量误差：每次测量值与真值的差值。可正可负，存在于一切测量之中，贯穿于测量过程的始终。随着科学技术的进步，测量误差可以控制得越来越小，但是永远不会变为零。

测量误差有时简称为误差，有时也叫绝对误差，但一定要注意与过去的绝对误差概念相区别，它不是测量误差的绝对值。

测量误差是一个有量纲的数值，它表示测量值与真值的偏离程度，一般保留1~2位有效数字。由于真值难以得到，所以测量误差只有理论上的价值。人们不得不放弃难以实际定量操作的“误差”和与绝对误差有关的概念，现在一般转而使用不确定度概念。

② 测量相对误差：它也是过去常使用的一个很难定量操作的术语。定义为：测量误差与真值的比值，用 E_i 表示：

$$E_i = \frac{\Delta x_i}{a} \times 100\%$$

相对误差是一个无量纲的量，常用百分比来表示测量准确度的高低。因而相对误差有时也称为百分误差，一般保留1~2位有效数字。

相对误差有时能更好地反映测量的准确程度。例如，测量两个物体的长度，一个为10.0 mm，另一个为1 000.0 mm，若绝对误差都是0.1 mm，而相对误差却分别为1%和0.01%。显然，后者测量准确程度要大得多。

过去的测量误差一般用绝对误差或相对误差表示测量的准确度。其中的真值用约定真值或相对真值代替，有时是一种较好的近似表示，但十分不科学，被科学测量结果的表示所放弃，因此，现在在实验中对于测量结果一般要用不确定度来表示。

1.3.3 测量误差的来源与分类

根据误差的产生原因，一般将误差分为三大类：系统误差、随机误差和过失误差（或粗大误差）。

1. 系统误差

系统误差是在相同条件下，多次测量同一物理量时，误差的大小恒定，符号总偏向一方或误差按照某一确定的规律变化的误差分量。它是存在某些确定的不合理因素引起的，若寻找到产生这种偏离的原因和规律，采取相应的措施，便可减小系统误差。

(1) 系统误差按来源可分为以下几类：

① 仪器误差。仪器误差又称工具误差，是由于仪器或测量工具的不完善或缺陷所造成的，比如，米尺刻度失误和磨损，天平不等臂，电子仪器的某些器件性能达不到设计要求等。系统误差修正的方法是隔一定时期就用标准仪器来校验和调节，比如，用复称法来修正天平不等臂造成的系统误差。

② 理论误差。理论误差又称方法误差，它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性或者对测量方法考虑不周造成的误差。例如，光杠杆法测量微小长度变化实验中，使用了 $\tan \theta \approx \theta$ 在小角度时成立的近似条件。

③ 环境误差。由于测量时所处的周围环境，如温度、湿度、气压、震动、电磁场等与设计者所要求的状态不一致而引起的误差叫环境误差。修正的办法是将引起误差的因素排除，若无法排除，可以用某些方式进行补偿，或者想办法估计出环境误差的数值，然后在测量结果中加以校正。

④ 调整误差。设计某些仪器时要求其在使用时，必须事先调整到正确的使用状态，比如，天平在使用时要求调整到水平状态，仪表指针使用前应调至零，螺旋测微器零点错位，气压计要求铅直放置等。如果使用者没有满足这些要求而进行测量，自然就使测量结果产生误差，这就叫调整误差。为减少调整误差，要求实验者养成良好的工作习惯，严格按操作规程执行，将仪器调整到最佳使用状态，再进行测量。

⑤ 人身误差。人身误差又称人差，测量大多是由人去执行的，由于各人的心理和生理等因素，以及不同的人在感觉灵敏程度和反应快慢上均有差异，从而产生了误差。比如，在用停表计时时，有人按表总是操之过早，而有的人却偏于过迟；在读仪表指针时，有人总是偏左，有人总是偏右。

(2) 系统误差按掌握程度分类，可分为：

① 可定系统误差。误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差分量。此类系统误差，一经发现，必须对测量结果加以修正。一般在实验中通过修正测量数据（不是修改）和采用适当的测量方法（如交换法、补偿法、替换法和异号法等）予以消除，如千分尺的零点修正。

② 未定系统误差。指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号，而仅仅知道最大误差范围（或极限误差）的系统误差分量。如仪表出厂时的准确度指标是用符号 Δ_x 表示的，它只给出该仪器误差的极限范围，但使用该仪器时并不知道该仪器误差的确切大小和正负，只知道该仪器的准确程度不会超过 Δ_x 的极限。在物理实验中一般只考虑测量仪器的（最大）允许误差 Δ_x （简称“仪器误差”）。

(3) 系统误差按数值特征或表现的规律又可分为：

① 定值系统误差。

在测量过程中，大小和符号恒定不变的误差。例如，天平砝码的标称值不准确、千分尺的零点误差等。

② 变值系统误差。

误差在测量过程中呈现规律性变化，这种变化，有的可能随时间变化，有的可能随位置变化。例如，分光计的偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差一般应通过校准仪器、改进实验装置和实验方法、将测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减少。系统误差的处理方法与具体的实验有关，在不同的实验中会遇到不同的处理方法。

2. 随机误差

被测量本身是稳定的，在极力消除或修正一切明显的系统误差之后，在同一条件下，多次重复测量同一物理量时，测量结果仍出现一些无规律的起伏，其大小与符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量称为随机误差。

随机误差的特征是在同一条件下多次测量同一量时，每次出现的误差时大时小，时正时负，没有确定的规律，但就总体来说服从一定的统计规律。这种误差来源于多种因素的微小扰动。

例如，环境的温度、气压，电场、磁场的微小扰动；读数时，每次对准标志（刻线、指针等）的不一致，以及估读数的不一致；仪器性能不够稳定；被测对象本身的微小起伏变化；等等。随机误差又叫偶然误差。

3. 粗大误差

简称为粗差，是实验过程中，实验者操作不当或粗心大意、仪器缺陷（损坏）、外部环境和测量条件的突变和干扰等造成测量结果明显被歪曲。如看错刻度、读错数字、计算错误等。粗差一经判明和确定其形成的原因，必须剔除，不得使用。

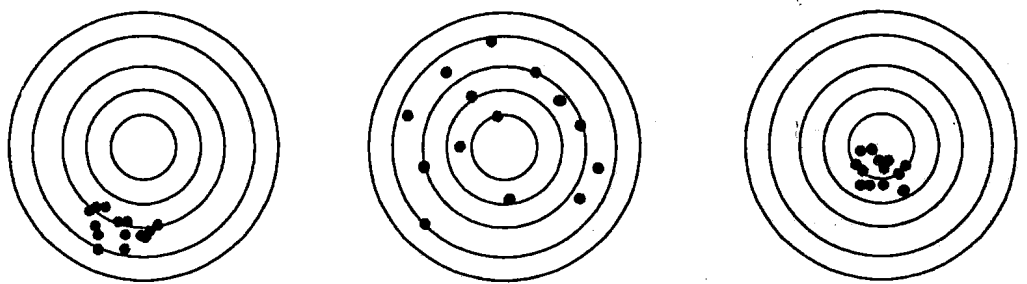
1.3.4 测量的精密度、正确度和准确度

测量的精密度、正确度和准确度是过去一直沿用评价测量结果的三个术语，但是目前使用时的含义在不同教材中不尽一致。比较普遍采用的概念是：

- (1) 测量的精密度：精密度表征测量随机误差的大小。是指对同一被测物理量作等精度测量时，所得到的等精度测量列数据之间彼此接近或分散的程度。偶然误差小，表示测量结果精密度高，测量数据比较集中 [图 0.1 (a)]。
- (2) 测量的正确度：正确度表征测量的系统误差大小。是指被测量的总体平均值与其真值接近或偏离的程度。系统误差小，测量的正确度就高（过去有些教材称为准确度）。
- (3) 测量的准确度：准确度是表征随机误差和系统误差的综合评定。是指各测量值之间的接近程度和其总体平均值对真值的接近程度。只有随机误差和系统误差都非常小，才能说测量的准确度高（过去有些教材称为精确度）。

“准确度”是国际上计量时较常用的标准术语。

图 0.1 所示打靶情况，可形象地表示精密度、正确度和准确度三者的区别。



(a) 精密度高、正确度低 (b) 精密度低、正确度高 (c) 精密度高、正确度高

图 0.1 测量的精密度、正确度和准确度

1.4 随机误差的分布规律与特点

实验测量过程中，随机误差的出现，对于某一测量值而言是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的。但在同一条件下，对同一物理量重复测量，发现随机误差的出现服从某种统计规律分布。随机误差统计分布规律有多种，如高斯分布（又称正态分布，测量次数为无穷）、学生 t -分布（测量次数为有限）、指数分布（电子产品的寿命）、泊松分布、均匀分布、二项分布等，我们可从概率统计的教材中找到相关内容。下面仅就高斯分布和学生 t -分布进行讨论。

1.4.1 高斯分布

1. 高斯分布规律与特点

理论与实践证明,对同一量进行等精度测量,当测量的次数很大时(理论上为无穷大),测量列的随机误差一般接近于高斯分布,标准化的正态分布曲线如图 0.2 所示,误差 $\Delta x = x_i - a$ 为横坐标(其中 x_i 为第 i 次测量的值, a 为真值),对应的误差出现的概率密度为纵坐标 $f(\Delta x)$,其数学表达式可由概率论方法得到:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}}$$

式中:特征参量

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

称为标准误差,其中 n 为测量次数。

服从高斯分布的随机误差符合如下的特点:

- (1) 单峰性: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。
- (2) 对称性:绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。
- (3) 有界性:非常大的正、负误差出现的概率趋于零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (4) 抵偿性:由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等,因而随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值将趋于零。

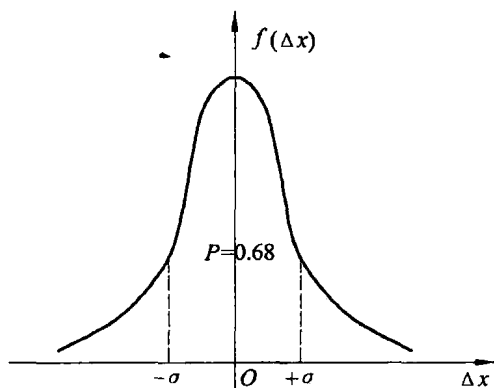


图 0.2 随机误差的正态分布

2. 置信区间、置信概率与置信系数

测量的随机误差出现在置信区间 $(-k\sigma, +k\sigma)$ 内,置信概率为

$$P = \int_{-k\sigma}^{+k\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x)$$

式中: k 为置信系数。

几种置信区间的置信概率如表 0.1 所示。

表 0.1 高斯分布置信区间的置信概率

区间	$(-\sigma, +\sigma)$	$(-2\sigma, +2\sigma)$	$(-3\sigma, +3\sigma)$	$(-1.645\sigma, +1.645\sigma)$	$(-1.960\sigma, +1.960\sigma)$	$(-2.576\sigma, +2.576\sigma)$
概率	0.683	0.954 5	0.997	0.90	0.95	0.99

对于有限次测量,误差超出区间 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 的几率很小,因此,常称 $(\pm 3\sigma)$ 为极限误差或 3σ 判据(准则),用于剔除粗大误差。

1.4.2 学生 t -分布

实验测量的次数总是有限的,特别对于学生实验来说,一般测量的次数 $n < 20$,这时误差的分布会明显偏离高斯分布。如图 0.3 所示。

其中基本的要点是：

- (1) 每次测量的误差是满足高斯分布的。
- (2) 用测量列的算术平均值作为真值的最佳估计值。
- (3) 当测量次数 n 为有限时，测量列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

则有：

算术平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

某次测量的偏差

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

某次测量的标准偏差

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式})$$

算术平均值的标准偏差

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

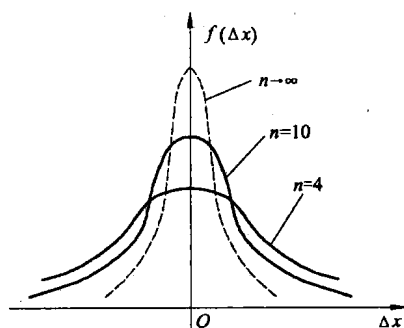


图 0.3 随机误差的学生 t -分布

上式表示算术平均值作为最佳估计值，比任何一次的测量值都更可靠，用算术平均值作为测量结果，相同的置信概率下，置信区间比单次测量的结果要小一些，或者说，相同的置信区间下，置信概率比单次测量的结果要大一些。也就是这个数据可能要更可靠一些。

但是，当 $n > 10$ 以后， S_x 的变化相当缓慢，单纯增加测量次数来提高精密度是没有必要的，并且，精密度主要还取决于仪器的精度。

1.4.3 高斯分布与学生 t -分布的关系

一般的，标准偏差 S_x 不同于标准误差 σ （标准偏差 S_x 有时记为 σ_x ），如果要求有限次测量（学生 t -分布）的置信概率与无限次测量（高斯分布）的置信概率相同，两者之间有一转换关系式：

$$\sigma = t_p \times S_x$$

式中： t_p 称为分布因子，与测量次数和置信概率有关，始终大于 1。表 0.2 给出了三种置信概率下不同测量次数的 t_p 值。

表 0.2 不同测量次数 n 对应不同置信概率下的 t_p 值

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$P=0.683$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.05
$P=0.954$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.12	2.08
$P=0.997$	63.66	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.92	2.83

从表 0.2 中可看出，置信概率为 0.683 时，测量次数大于 5 时， $t_p \approx 1$ 。因此，在物理实验中，为了简便，等精度多次测量时，取 $t_p = 1$ ，这时， $\sigma = S_x$ 。但是一定要分清，标准偏差 S_x 不同于标准误差 σ ，它们是两个不同的概念。

1.5 不确定度的评定与表示

1.5.1 不确定度的引入

不确定度是计量学的基本内容之一,用不确定度一词描述测量结果的准确度最早是在1956年出版的 *Introduction to the Theory of Error* 一书中。1980年,国际计量局(BIPM)起草了一份《实验不确定度的说明》的建议书 INC (1980),国际计量委员会(CIPM)在1981年原则上通过了这一建议。近几年的时间里,不确定度表示体系经历了系统化、完善化和不断推广的经过,例如,1993年,国际标准化组织(ISO)等7个国际组织联名发表《测量不确定度表达指南》等文件。许多工业化国家相继颁布了不确定表达的国家标准,我国也在国家标准文件和计量规范中逐步采用了不确定度的表达方式。1999年,我国计量科学研究院经国家质量技术监督局批准发布了《JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示》(以下简称《评定与表示》)的中国国家计量技术规范,明确提出了测量结果的最终形式要用不确定度来进行评定与表示。由此不确定度在我国开始进入推广使用阶段。高等学校的物理实验中应该率先使用。为什么误差的表示方式还要引入不确定度的概念呢?原因如下:

(1) 根据测量误差的定义,由于真值一般不可能准确知道,因而测量误差也不可能准确获知。一般情况下只能由测量数据和测量条件进行推算,去求一个误差的估计值。当然不能将这个估计值也称为误差,采用一个专门名称,这个名称就是不确定度。

(2) 不确定度的定义具有可系统化和可操作性。它与误差相联系但有区别,内容十分丰富,构成了一个完整的评定体系。我们只能以本课程的特点,采用一定程度的简化处理。

1.5.2 不确定度的定义与分类

1. 测量不确定度(uncertainty of measurement)的定义

是与测量结果相联系的参数。按《评定与表示》被定义为:“表征合理地赋予被测量之值的分散性、与测量结果相联系的参数”。

测量不确定度由多个分量组成,每个分量可用统计方法、概率分布、经验判断等来评定。它是一个正值,其大小与测量有关,同时与给定的置信概率有关。具体地说,不确定度是一种表征被测量值所处范围的评定,真值以一定的置信概率落在测量平均值附近的一个范围内。即 $x = \bar{x} \pm u$ (置信概率 P), u 为测量不确定度,区间 $(\bar{x} - u, \bar{x} + u)$ 称为置信区间,表达式的含义是被测量的真值以一定的置信概率 P 落在区间 $(\bar{x} - u, \bar{x} + u)$ 内。如表达式 $g = 9.803 \pm 0.005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ($P=0.683$) 的含义是当地的重力加速度值介于 $9.798 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 与 $9.808 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间的概率是 0.683。

2. 测量不确定度的分类

标准不确定度:是用标准偏差表示测量结果的不确定度,记为 u 。

扩展不确定度:是以标准偏差的倍数表示的不确定度。或称展伸不确定度,也可称为总不确定度,以 U 表示。

A 类标准不确定度:用对观测列进行统计分析的方法,来评定的标准不确定度。记为 u_A 。

B 类标准不确定度:用不同于对观测列进行统计分析的方法,来评定的标准不确定度,记为 u_B 。