

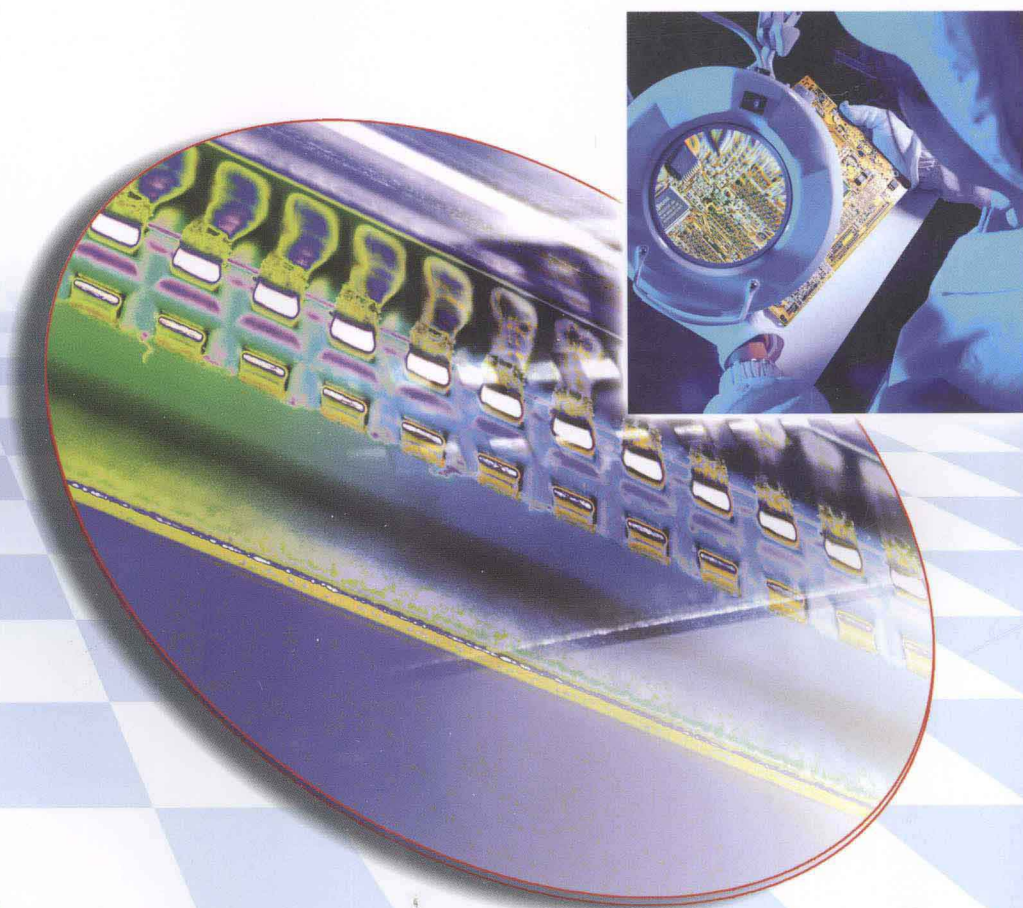


全国高等教育创新型“十二五”重点规划教材
QUANGUO GAODENG JIAOYU CHUANGXINXING SHIERWU ZHONGDIAN GUIHUA JIAOCAI

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

殷志坚 易小杰 邹珊珊 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



全国高等教育创新型“十二五”重点规划教材

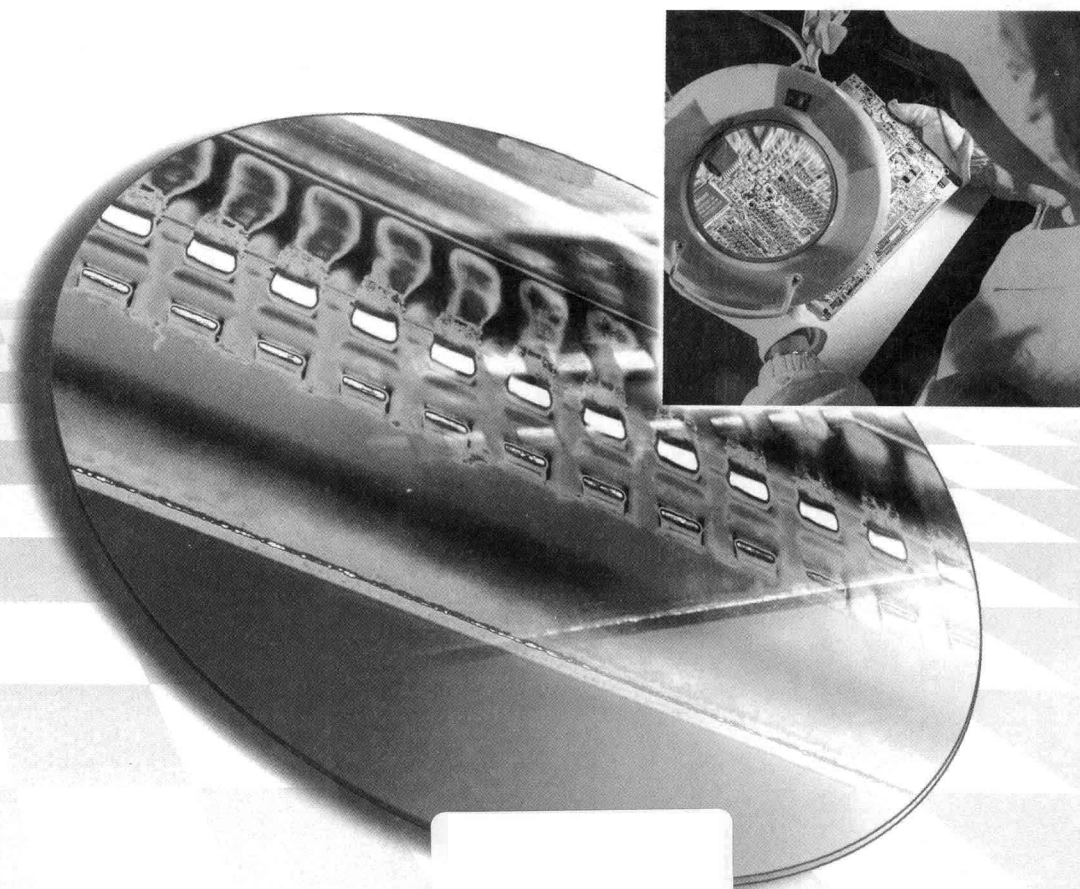
QUANGUO GAODENG JIAOYU CHUANGXINXING SHIERWU ZHONGDIAN GUIHUA JIAOCAI

本书由江西科技师范大学资助

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

殷志坚 易小杰 邹珊珊 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/殷志坚,易小杰,邹珊珊主编.

—长沙:中南大学出版社,2013.10

ISBN 978-7-5487-0992-3

I. 大... II. ①殷... ②易... ③邹... 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(2013)第 242944 号



大学物理实验

殷志坚 易小杰 邹珊珊 主编

☐ 责任编辑 刘石年

☐ 责任印制 文桂武

☐ 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 国防科大印刷厂

☐ 开 本 787×1092 1/16 ☐ 印张 11.5 ☐ 字数 280 千字 ☐ 插页

☐ 版 次 2013 年 10 月第 1 版 ☐ 2013 年 10 月第 1 次印刷

☐ 书 号 ISBN 978-7-5487-0992-3

☐ 定 价 25.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

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分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合当前物理实验教学的新理念、新方法和新技术，总结教学经验编写而成的。

全书共分五章，系统地介绍了与大学物理实验有关的实验误差和数据处理知识以及力学、热学、电磁学、光学、原子物理学等 41 个的实验项目；在实验内容的设计上，力求基础性、实践性和研究性相结合，旨在培养学生的创新精神、创新思维 and 创新能力。

本书可作为高等理工科院校理工科各专业大学物理实验课程的基本教材和相关实验技术人员的教学参考书。

前 言

本书是根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 版),结合当前物理实验教学的新理念、新方法和新技术,借鉴一些高校在物理实验教学内容和课程体系改革方面的成果,总结作者多年来的实验教学实践经验编写而成。

大学物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验的基本技能训练、提高科学实验基本素质的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。为更好地培养学生的科学思维和创新意识,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。本书编写上注重了以下几个方面:

1. 在教材结构体系上:为与理论教学相衔接,还是按力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验的分类设置实验项目,但在每一部分内容上,按基础实验、综合性实验、设计性或研究性实验相结合的方式进行设计,以满足分层次教学的要求。

2. 在实验内容上:对基础性实验,突出基本方法、基本技能和数据处理方面的学习;对综合性实验,注重实验方法和实验技能的综合运用;对设计性或研究性实验,重在独立实验能力、创新思维和创新能力的培养。在部分实验项目后面的“思考与讨论”中设置了该实验项目的拓展性练习,一是培养学生实验设计能力,二是通过拓展该实验的功能,引导学生理解传承与创新的关系,培养创新意识和创新能力。

3. 在数据处理上:专门列出一节详细介绍如何用计算机通用软件——Excel 处理实验数据的基本方法,对部分实验项目要求学生用计算机处理实验数据。让学生了解计算机在物理实验中的作用,提高学生运用现代科技手段进行实验的能力。

本书由江西科技师范大学殷志坚老师、易小杰老师、邹珊珊老师执笔编写,全书由殷志坚老师负责修改和定稿。本书得到了江西科技师范大学资助,在此表示感谢!

本书在编写过程中,参考了许多兄弟院校和仪器厂家的相关教材和资料,吸收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,错误、疏漏、不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2013 年 8 月

目 录

绪论	(1)
第一章 误差理论与数据处理	(4)
第一节 测量	(4)
第二节 误差	(5)
第三节 不确定度的评定和测量结果表示	(10)
第四节 有效数字及其运算	(14)
第五节 实验数据处理方法	(15)
第六节 Excel 在实验数据处理中的应用	(19)
第二章 力学和热学实验	(26)
实验 1 长度的测量	(26)
实验 2 气垫导轨上滑块速度和加速度的测定	(30)
实验 3 牛顿第二定律的验证	(34)
实验 4 碰撞实验研究	(36)
实验 5 简谐振子运动规律的研究	(38)
实验 6 冷却法测量金属的比热容	(41)
实验 7 光杠杆法测杨氏模量	(43)
实验 8 霍尔位置传感器法测杨氏模量	(47)
实验 9 表面张力系数的测定	(50)
实验 10 千分表测量固体线膨胀系数	(53)
实验 11 光杠杆法测量固体线膨胀系数	(54)
实验 12 扭摆法测量物体的转动惯量	(55)
实验 13 金属电阻温度系数的测定	(59)
第三章 电磁学实验	(61)
实验 14 伏安法测电阻	(61)
实验 15 非线性电阻伏安特性的研究	(64)
实验 16 电子示波器的使用	(65)
实验 17 Pt1000 数字温度计的设计与制作	(69)
实验 18 惠斯通电桥测电阻	(70)
实验 19 模拟法描绘静电场	(73)
实验 20 磁场的描绘	(78)

实验 21	电子束的偏转	(81)
实验 22	霍尔效应的研究	(87)
实验 23	霍尔式传感器的原理及应用	(92)
实验 24	金属箔式应变片性能及应用	(94)
实验 25	温差电偶原理及应用	(96)
实验 26	数字电表原理及万用表的设计与制作	(99)
第四章 光学实验		(105)
实验 27	薄透镜焦距的测定	(105)
实验 28	分光计的调整和使用	(111)
实验 29	自组显微镜和望远镜	(117)
实验 30	光的等厚干涉现象及应用	(118)
实验 31	迈克耳逊干涉仪的调节和使用	(122)
实验 32	衍射现象的观察与应用	(126)
实验 33	光的偏振现象的研究	(129)
实验 34	固体介质折射率的测定	(133)
实验 35	太阳能电池基本特性的研究	(136)
第五章 近代物理综合实验		(141)
实验 36	金属电子逸出功的测量	(141)
实验 37	普朗克常数的测定	(145)
实验 38	超声声速的测定	(151)
实验 39	核磁共振	(157)
实验 40	密立根油滴实验	(165)
实验 41	弗兰克 - 赫兹实验	(171)
参考文献		(174)

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用和转化规律的一门自然学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础,对当代及未来高新科技的进步、相关产业的建立和发展提供着巨大的推动力。在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理学本质上是一门实验的科学。物理实验是科学实验的先驱,具有大多数科学实验的共性,在实验思想、方法、手段、仪器和技术等方面是各学科科学实验的基础,是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,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。

本课程的具体任务是:

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,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意识,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。

二、物理实验课的基本要求

通过完成一定数量的基础性实验、综合性实验、设计性实验和研究性实验,使学生对科学实验有一个初步了解,同时在实验的基本知识、基本技术、基本方法等方面接受基本训练,形成初步的科学实验能力。

1. 实验知识、实验方法和实验技术等方面的基本要求

(1) 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法、最小二乘法和用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(3) 掌握一些基本物理量和常用物理量的测量方法。这些物理量包括:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子

电荷、普朗克常量、里德堡常量等。

(4)了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。这些方法包括:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉法、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

(5)掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。这些仪器包括:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源测量等常用仪器。

(6)掌握常用的实验操作技术。这些操作技术包括:零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除等。

(7)了解广泛应用的现代物理技术。这些技术包括:激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

2. 科学实验能力培养的基本要求

(1)独立实验的能力。能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法、做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告;逐步形成自主实验的基本能力。

(2)分析与研究的能力。能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3)理论联系实际的能力。能够在实验中发现問題、分析问题并学习解决问题,初步形成综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4)创新能力。能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验。

三、物理实验课程的过程与要求

实验过程主要分为课前预习、实验操作、实验报告等。

1. 课前预习

物理实验课不仅要掌握与实验项目相关的理论知识,还要了解和熟悉实验仪器的性能和操作方法等,任务重,时间紧,因此必须做好课前预习。课前预习包括阅读实验教材和查阅相关的参考资料,弄清楚实验目的、实验原理,了解所用实验的结构、使用方法,明确实验内容,所使用的实验方法,实验操作步骤及注意事项等。在此基础上写出预习实验报告,对实验要做什么、怎么做有一个整体的认识。

预习报告的内容主要有:实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和步骤、画出实验数据表格。上述内容可参考正式的实验报告要求撰写,可直接写在实验报告册上,实验报告可在此基础上补充完整其余部分即可,不必重写。

2. 实验过程

学生进入实验室时,必须携带实验书,把预习实验报告交指导教师检查合格后方可进行实验。其次,认真听取教师对教学重点和难点、实验仪器使用方法及注意事项的讲解,结合预习逐一领会理解。

动手操作前,首先要结合实验仪器,根据教材或实验说明书熟悉仪器的构造和使用方法,然后再进行安装、调试。经老师检查无误后,按照“先定性,后定量”的原则进行实验。实验过程中注意观察实验现象,发现异常及时报告指导教师,遇到没有搞清楚或不能解决的问题,要举手与教师协商,直到搞清楚每个实验细节问题。实验时要严格遵守实验室的有关规章制度,特别是安全操作方面的制度,确保人身和仪器安全。

实验过程中应及时用实验数据记录本记录所测数据,同时记录相应的实验条件和主要实验仪器的型号、规格和准确度等。记录数据时,要特别注意有效数字和单位。

实验完成后,先不要改变实验条件,将实验数据记录交教师审阅,在没有任何问题后,请教师签字、整理实验仪器,离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对一个实验项目工作的全面总结,也是对自己实验能力的一次总结。必须用简练的文字、合适的图表和必要的数字等将实验过程和实验结果真实完整的反映出来。实验报告具体要求有:

- (1)实验名称:所做实验的名称。
- (2)实验目的:本实验应达到的目的和要求。
- (3)实验原理:简明扼要的写出实验设计思路、实验原理图、所依据的主要公式等。
- (4)实验仪器:所用仪器的名称和型号。
- (5)实验内容和步骤:按实验过程,简要地说明实验中的关键步骤和注意事项。
- (6)数据记录及处理:包括数据记录表格(按照教材中的表格或按要求自行设计表格)、必要的计算过程、所要求的实验作图(必须用坐标纸作图)、写出实验结果(包括测量值、误差、单位;如果实验是观察物理现象或规律,可只写出实验结论)
- (7)误差分析及问题讨论:包括分析误差来源、实验结果说明、对实验的建议和心得体会、回答思考题和讨论题等。

实验报告用学校统一印制的专门实验报告册书写。

第一章 误差理论与数据处理

物理实验作为一门实验课程，不仅要定性地观察物理过程和物理现象，还要定量地测量物理量，并找出物理量之间的关系。由于测量条件、测量原理、测量仪器设备等的非理想化，测量中总存在误差。误差是测量中的不可靠量值，导致测量结果的不可靠量值称为不确定度。这就是测量、误差和不确定度三者之间的因果关系。作为一个测量结果，不仅要给出被测物理量的量值和单位，还要对物理量的量值进行不确定评估，一个没有误差评定的测量结果是没有意义的。

误差和数据处理的理论基础是概率论和数理统计，内容多且复杂，本章仅仅主要介绍测量与误差、测量结果的表示和不确定度的评定、有效数字及其运算、常用的数据处理方法等误差与数据处理的初步知识，重在概念、方法的理解和应用。

第一节 测 量

一、测量的定义

要进行测量，就必须选定一些标准单位，如选定质量的单位为千克，长度的单位为米，时间的单位为秒等。所谓测量，就是借助仪器和实验方法把待测量与选为标准单位的物理量进行比较确定被测对象量值的实验过程。测量数据要写明数值的大小和计量单位。

二、测量的类型

1. 按测量方法不同可分为直接测量和间接测量

(1) 直接测量：能用仪器直接读出被测量量值的测量称为直接测量，相应的被测量称为直接测量量。例如，用游标卡尺测物体的长度、用物理天平称物体的质量、用秒表测时间等就是直接测量。相应的长度、质量、时间等均称为直接测量量。

(2) 间接测量：对于某些物理量，由于没有直接读数的测量仪器，只能通过一个或几个直接测量量与已知函数关系计算出被测量量值的测量成为间接测量。相应的被测量称为间接测量量。例如，利用米尺和秒表直接测量摆长 l 和周期 T ，利用函数关系 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 计算出重力加速度 g 的测量过程称为间接测量，其中 g 是间接测量量， l 、 T 是直接测量量。

2. 按测量条件可分为等精度测量和非等精度测量

(1) 等精度测量：在实验人员、实验方法、实验仪器等影响测量结果的全部因素都相同的条件下进行的多次测量称为等精度测量。由于每次测量的条件都相同，测量结果的可靠性也是相同的，测量精度也是相同的，这样的测量就是等精度测量。

(2) 非等精度测量：用不同的仪器、不同的测量方法、不同的实验人员进行的多次测量叫做非等精度测量。主要用于高精度的测量中。

第二节 误差

一、误差的定义

任何物质都具有自身的各种各样的属性,反映物质这些属性的物理量在一定条件下所具有的客观存在的真实数值,称为被测量的真值,一般用 a 表示。测量的目的是获得被测量的真值,然而,由于测量仪器的灵敏度和分辨能力的局限性、环境条件的不稳定性、实验人员操作和读数不十分确定、理论和方法的近似性等,测量结果和真值之间总可能存在或大或小的差异。把测量值和真值的差值称为测量值的误差,一般用 ε 表示。

测量误差按表达方式不同分为绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差:

$$\text{绝对误差}(\varepsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(a) \quad (1-2-1)$$

绝对误差反映了测量的准确度。由于测量就可能存在误差,真值虽然是客观存在的实际值,但往往无法获得,因此等精度测量中常用测量值和平均值之差估算绝对误差。其表达式为:

$$\text{绝对误差}(\varepsilon) = \text{测量值}(x) - \text{平均值}(\bar{x}) \quad (1-2-2)$$

在估算绝对误差时,有时用被测量的公认值、理论值或更高精度的测量值来代替真值 a ,这些值叫做“约定真值”。

2. 相对误差:

$$E = \frac{|\varepsilon|}{a} \times 100\% \quad (1-2-3)$$

绝对误差反映误差本身的大小,而相对误差反映误差的相对严重程度。两者之间没有必然的联系,绝对误差大,并不表示相对误差大。

二、误差的类型

按误差的性质及产生原因,可将误差分为:系统误差、随机误差和过失误差三类。

1. 系统误差

系统误差是指在相同的测量条件对同一物理量进行多次测量,误差为恒定的或在测量条件改变时误差按照一定规律变化的,此类误差称为系统误差。系统误差包括可定系统误差和未定系统误差。

可定系统误差:是指在测量中误差大小、正负已经确定的系统误差。如螺旋测微器、电压表等没有调零,测量时应先记下零点值,再用测得值的大小减去零点值就可消除它们的可定系统误差;

未定系统误差:是指测量中误差大小或正负未经确定的系统误差。如千分尺的示值误差、数字毫秒计的不确定度、电表的准确度等级等,知道误差大小,正负未经确定。

由于在多次等精度测量中,系统误差具有确定性,因此,在同一测量条件下的多次测量求平均值的方法不能消除或减小系统误差。

2. 随机误差

随机误差是指在同一测量条件下对同一物理量的多次测量中,随机变化的,忽大忽小,

忽正忽负,使测量值变化不定的误差。

随机误差来源于测量人员、实验仪器、环境条件等多种随机因素的综合作用,这些因素就个体而言是随机的,但大量的个体的综合服从一定的统计分布规律。最常见的就是服从正态分布(或称高斯分布),如图 1-2-1 所示。某一测量值 x 的概率密度分布函数 $f(x)$ 满足高斯方程:

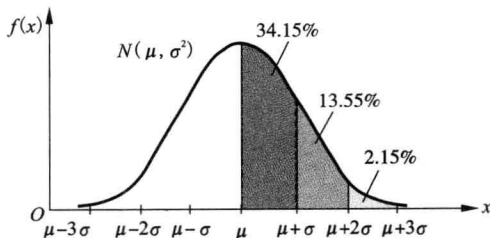


图 1-2-1 正态分布曲线

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2-4)$$

式中 $\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x}{n}$ 是测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时被测量的平均值, $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}}$ 称为正态分布的标准误差。 σ 确定, $f(x)$ 就唯一确定;反之 $f(x)$ 确定, σ 的大小也就唯一确定了。 σ 越小,测量精度高,曲线越陡,峰值越高,测量值越集中在平均值 μ 附近,测量重复性越好; σ 越大则反之。为了计算测量值的概率分布,将概率密度函数在以下区间积分,得到测量值在相应区间的概率值分别为:

$$p_0(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) d(x) = 1$$

$$p_1(\mu - \sigma, \mu + \sigma) = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x) d(x) = 68.3\%$$

$$p_2(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma) = \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x) d(x) = 95.4\%$$

$$p_3(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma) = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) d(x) = 99.7\%$$

由上式可以看出,测量值落在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 之外的概率仅为 0.3%,即测量误差落在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 之外的概率仅为 0.3%,是正常情况下不应该出现的小概率事件,因此将 $\pm 3\sigma$ 定为误差极限,即: $\varepsilon > 3\sigma$ 或 $\varepsilon < -3\sigma$ 时的测量值 x 为坏值。

由正态分布曲线图可看出,随机误差具有以下 4 个重要特性:

单峰性:误差小的多而且集中,形成一个峰值。该值出现在处 $x = \mu$,即真值出现的概率最大。

对称性:偏大值和对应的偏小值出现的概率相同。

有界性:绝对误差大于 $|3\sigma|$ 的概率几乎为零, $|3\sigma|$ 为误差界限。

抵偿性:正负误差具有抵消性。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,随机误差的平均值 $\bar{\varepsilon}$ 趋近于零,平均值 $\bar{x}$ 趋近于真值 a 。这是实际测量中采用多次测量取平均值做为测量结果的原因。

3. 过失误差

过失误差又称粗心误差,是实验者粗心大意、错误读取数据、环境突发性干扰等所造成的,明显超出规定条件下预期的误差,为坏值,在处理数据时应将其剔除,不能计算在内。在数据处理中,可采用 3σ 法则判断并剔除这类误差,具体做法是求出 $\bar{x}$ 和 σ ,作区间 $x = (\bar{x} \pm 3\sigma)$,则测量列中数据不在此区间内的值都是坏值,应剔除掉。

三、系统误差的处理方法

系统误差的处理比较复杂,它不像随机误差一样有一套成熟的误差统计理论可以遵循,更多的依靠实验人员的丰富的经验、娴熟的实验技能、扎实的理论功底去分析误差产生的原因,再针对原因采用一定的实验方法查找并去消除或减少系统误差。

1. 系统误差产生的原因

系统误差的来源主要有仪器固有缺陷造成的误差,如千分尺的零点误差、天平的不等臂等;实验所依据的理论和公式的近似性产生的系统误差,如透镜成像公式 $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$ 成立的条件是近轴光线,用这个近似公式计算焦距时,计算本身就带来了误差,又如用伏安法测量电阻时,忽略了电表内阻的影响等;温度、湿度、电磁等测量环境发生有规律的变化引起的误差;实验人员个人的一些不良习惯或生理、心理等因素造成的误差,如斜视读出温度。

2. 发现系统误差的方法

实验人员在长期的工作中,总结出了一些发现系统误差的方法:

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时,要求调平,否则就会产生系统误差。

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,比较三者测量结果是否相同,不一致说明至少有两种方法存在系统误差。

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规律性,如有明显不遵守这种规律,则存在系统误差。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。

3. 系统误差的消除或减小方法

消除或减小系统误差的根本方法是消除或减小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。

下面介绍一下常用的技巧和方法:

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。如用天平两次称一物体质量时,第二次称将被测物与砝码交换。两次称量结果分别为 m_1 、 m_2 ,则取 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 为最终称量结果,可以克服天平不等臂误差。又如惠斯登电桥测电阻中,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。

替代法：在对某未知量测量后，马上用一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。如用天平称物体质量 m ，先使 m 与砝码 G 平衡，再以标准砝码 P 取代质量为 m 的物体，调节平衡，此时标准砝码的质量就是待测物体的质量，消除了天平不等臂引起的系统误差。

异号法：改变测量条件，使两次测量中误差符号相反，将两次测量结果取平均即可消除该类系统误差。如在霍尔效应实验中改变霍尔片上的电流和磁感应强度的方向进行测量。

对称观测法：被测量的量值随时间作线性变化，如图 1-2-2 所示。定某时刻为中点，则对称于该点的系统误差的算术平均值彼此相等，即有 $(\Delta l_1 + \Delta l_5)/2 = (\Delta l_2 + \Delta l_4)/2 = \Delta l_3$ 。利用此规律，可把测量点对称安排，取每组对称点读数的算术平均值作为测量值，便可消除这类随时间线性变化的系统误差。

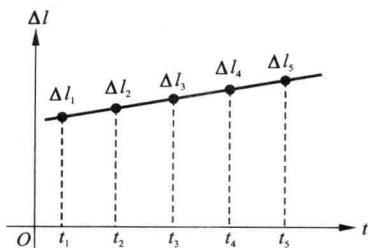


图 1-2-2 线性变化的系统误差

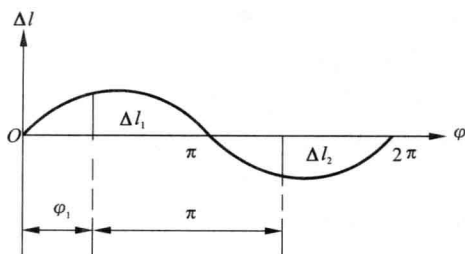


图 1-2-3 周期变化的系统误差

半周期偶次测量法：周期性误差一般出现在有圆周运动的情况(如度盘等)，以 2π 为周期呈正弦变化，如图 1-2-3 所示。因此，在相距半周期(180°)的位置上做两次测量，取两次读数的平均值，便可有效地消除周期性系统误差。如分光计的双游标读数，可用来克服分光计中心轴的偏心误差。

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(例如位移、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。

四、随机误差的处理方法

高斯方程中标准误差 σ 是理论值，是在 $n \rightarrow \infty$ ，真值 a 已知情况下得出的，实际中测量次数是有限的，真值也是未知的，因此，标准误差只有理论上的意义。当测量次数为有限时，常采用贝塞尔法进行处理。

1. 测量结果的最佳值

在其他误差已经消除或可忽略的情况下，对某物理量 x 进行 n 次等精度测量，测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，测量列的算术平均值为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ，真值为 a ，误差 $\varepsilon_i = x_i - a$ ，由于随机误差分别的抵偿性特性，当测量次数趋于无限时，误差的平均值

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - a = \bar{x} - a$$

趋于零,得 $\bar{x} = a$ 。因此,测量次数越多,算术平均值越接近真值 a ,当 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值可认为等于真值。所以,在误差处理中可用算术平均值作为真值的最佳估值。

2. 随机误差的评估

由于随机误差的存在,使得测量值有一定的分散性。这种分散性可用实验标准偏差 S_x 来表征, S_x 可用贝塞尔方法算出:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{1-2-5}$$

当测量次数有限时,可用实验标准偏差 S_x 作为标准误差 σ 的估计值。 S_x 的大小表示测量值的分散程度, S_x 大表示误差分布广、测量值比较分散; S_x 小表示误差分布窄、测量值比较集中。如果随机误差服从正态分布, S_x 表示任意一次测量值 x_i 落在区间 $[\bar{x} - S_x, \bar{x} + S_x]$ 的概率为 68.3% 或任一偏差 $(x_i - \bar{x})$ 落在区间 $[-S_x, S_x]$ 的概率为 68.3%。

在实际测量中,只能进行有限次测量,而有限次测量的随机误差实际遵从 t 分布。 t 分布曲线和高斯分布曲线形状类似, t 分布峰值稍低而宽,下部两边较高。用 t 分布因子对实验标准偏差进行修正,估算出测量列的实验标准差

$$S = S_x \times t_p \tag{1-2-6}$$

表 1-2-1 实验中常用的 t 因子

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	101	∞
$T_{0.683}$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1.01	1
$T_{0.954}$	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.32	2.18	2.03	2
$T_{0.997}$	235.8	19.21	9.22	6.62	5.51	4.90	4.53	4.28	4.09	3.81	3.08	3

在测量次数选择时,要注意 t 因子的修正。由表 1-2-1 可见,当置信概率 $p = 68.3\%$ 时, $n \geq 5$ 以后 t 因子变化小而且缓慢,可近似取:

$$\sigma \approx S(n \geq 5) \tag{1-2-7}$$

因此, $n \geq 5$ 时, t 分布和高斯分布可认为相同,教学中一般用高斯分布即可,不必修正。

3. 平均值的实验标准偏差

由上述分析可知,当测量次数不同或做多组等精度测量值,每次得到的平均值也不尽相同,围绕着真值也有一定的分散性,但随机误差已很小。由最小二乘法可证明,平均值是真值的最佳估计值,因此实验中只需对被测量对象进行 1 组等精度测量。平均值的这种分散性可用平均值的实验标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 表征

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{1-2-8}$$

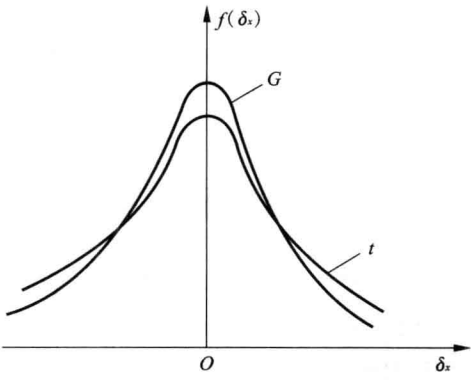


图 1-2-4 t 分布与高斯分布曲线图

当测量次数有限时,可用平均值的实验标准偏差作为平均值的标准误差的估计值。 $S_{\bar{x}}$ 的大小表示平均值的分散程度, $S_{\bar{x}}$ 大表示误差分布广、平均值比较分散; $S_{\bar{x}}$ 小表示误差分布窄、平均值比较集中。如果随机误差服从正态分布, $S_{\bar{x}}$ 表示任意一次测量列的算术平均值落在区间 $[\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}}]$ 的概率为 68.3%。

五、精密度、正确度和准确度

在评价测量结果时,时常用到精密度、正确度和准确度三个概念定性评价测量结果,使用时应加以区别。

1. 正确度

表示测量值偏离真值的程度,反映系统误差对测量结果的影响,与随机误差无关。

2. 精密度

表示测量值的分散程度,反映随机误差对测量结果的影响,与系统误差无关。

3. 准确度

表示测量值与真值之间的一致程度,反映系统误差和随机误差对测量结果的共同影响。

如图 1-2-5 所示用打靶时着弹点的分布情况说明三个概念的含义。

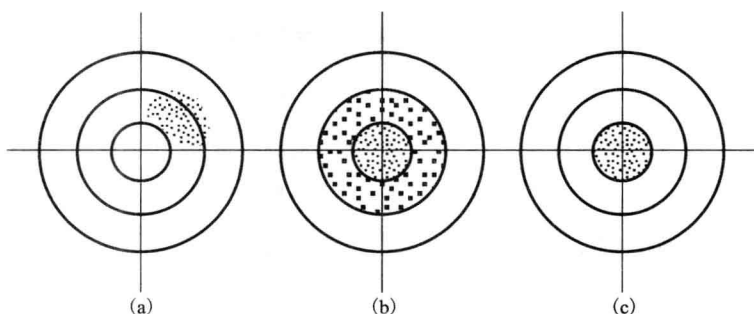


图 1-2-5 准确度、精密度、精确度示意图

(a) 正确度低,精密度高;(b) 正确度高,精密度低;(c) 正确度高,精密度高

第三节 不确定度的评定和测量结果表示

在科学实验中,一般一个测量结果应包括测量值和对测量值质量评价两部分内容。用标准误差评定测量结果的质量,有许多不尽完善的地方,会遗漏一些别的误差。依据 2008 年国际标准化组织等八个国际组织发布的《测量不确定度表示指南》,2010 年国家质检总局发布了《测量不确定度评定与表示》计量技术规范,统一用不确定度来评价测量值的测量质量。

一、不确定度的定义和测量结果的表示

测量不确定度是由于测量误差的存在而造成对被测量值不能确定的程度,它是对被测物理量真值所处范围的评定,是对测量误差的一种评定方式。由于误差的来源很多,测量不确定度有许多分量,按不确定度数值评定方法的不一样,不确定度可分为 A 类和 B 类。常用计