



21世纪高等教育本科规划教材
物理系列

大学物理实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

主 编 方路线

W U L I X I L I E



教育部直属师范大学
华中师范大学出版社

21 世纪高等教育本科规划教材·物理系列

大学物理实验教程

主 编：方路线

副主编：刘璐玲 王向荣 李艳红 陈里

编 委：(以姓氏笔画为序)

丁 锋 王仕仙 王向荣 尤 洋

方路线 卢 霞 李艳红 刘璐玲

陈 里 吴 斌 吴 慰 崔士杰

主 审：黄祝明 张必铭 余兰山

华中师范大学出版社

内 容 简 介

本书遵照教育部颁发的高等工科学校本科物理实验课程教学要求,由从事大学物理实验教学的一线教师,根据教学对象的特点和大学物理实验教育的基本规律,在各校自编的大学物理实验讲义的基础上编写而成。全书共分为四章,第一章介绍物理实验基本操作技术,第二章介绍误差理论与数据处理,第三章和第四章共安排了 29 个实验,既有传统的力学、热学、光学、电磁学实验,又有近代、现代物理实验,还有少数综合性、设计性实验。此外,考虑到双语教学的需要,还安排了 2 个英文实验,供教师和学生选用。书末附有大学物理实验基础理论练习、大学物理实验报告样板、实验室仪器设备使用记录表、大学物理实验课程教学基本要求以及国际单位和常用物理常数。

本书中的各个实验既相互独立又相互配合,且循序渐进,编者力图构建一个比较完整的大学物理实验课程体系,使学生通过大学物理实验课程的学习,能在实验技术、实验方法、实验仪器的操作使用以及实验数据的处理等方面得到全面系统的训练,以培养学生的科学素养和创新意识。

本书可作为本科院校、高职院校和高等专科学校工科类各专业的大学物理实验教材,也可供成人教育、电大、职业大学学生以及实验和工程技术人员参考。

新出图证(鄂)字 10 号

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/方路线主编. —武汉:华中师范大学出版社,2011.8

(21 世纪高等教育本科规划教材·物理系列)

ISBN 978-7-5622-4953-5

I. ①大… II. ①方… 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(2011)第 084106 号

大学物理实验教程

©方路线 主编

责任编辑:刘满元

责任校对:刘克南

封面设计:梦娜

编辑室:第二编辑室

电话:027—67867362

出版发行:华中师范大学出版社

社址:湖北省武汉市珞喻路 152 号

电话:027—67863426(发行部) 027—67861321(邮购)

传真:027-67863291

网址:<http://www.ccnupress.com>

电子信箱:hscbs@public.wh.hb.cn

印刷:华中理工大学印刷厂

督印:章光琼

字数:275 千字

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:10.75

版次:2011 年 8 月第 1 版

印次:2011 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3000

定价:21.50 元

欢迎上网查询、购书

敬告读者:欢迎举报盗版,请拨打举报电话 027—67861321

前 言

大学物理实验是一门重要的基础实验课程。本课程通过物理实验对学生进行科学实验方法和实验技能的基本训练,以培养学生的实践能力和创新精神。随着科学技术的发展,各学科之间相互交叉渗透,物理实验项目和实验内容不断更新,带动实验技术和实验水平不断提高。尤其是近几年来,在本科教学水平评估工作中,加大了实验教学改革和实验室建设的力度,增加了许多智能化、数字化的新设备和新仪器。而大学物理实验教材作为教学内容的载体,是教学水平、教学质量的基本保证,也是课程体系和教学内容改革成果的核心体现。

为了满足广大师生的需要,本书将基础实验、设计性实验和研究性实验相结合,供理工类专业学生必修用。本书共分四章:第一章是物理实验基本操作技术,第二章是误差理论与数据处理,对测量及测量误差等方面的基本知识进行了系统的概述,第三章和第四章是实验项目,精选了29个实验,包括了力学、热学、电磁学、光学、近代物理以及交叉学科在内的实验项目。每个实验的实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验步骤条理分明,同时还配有思考题,供学生在实验后分析讨论,以巩固所学知识。

本书由方路线任主编,刘璐玲、王向荣、李艳红、陈里任副主编。方路线负责绪论、第一章、第二章、附录一至附录十三的内容;刘璐玲负责实验三、实验四、实验十、实验十六、实验二十五的内容;李艳红负责实验十三、实验十四、实验二十六、实验二十七的内容;陈里负责实验十一、实验十五的内容;尤洋负责实验一、实验六、实验八的内容;崔士杰负责实验二十八、实验二十九的内容;王仕仙负责实验二、实验七的内容;丁锋负责实验二十、实验二十三的内容;卢霞负责实验十七、实验二十二的内容;王向荣负责实验十二、实验十九、实验二十一的内容;吴斌负责实验十八、实验二十四的内容;吴慰负责实验五、实验九的内容;尤洋负责校对。黄祝明教授、张必铭教授、余兰山教授主审全书。方路线、刘璐玲、王向荣复核了全书。

实验教学是一项集体事业。从实验内容的确定、实验项目的建设、实验讲义的编写到实验教学的完成都是从事实验教学的教师和实验技术人员共同劳动的成果。本书能顺利出版,要感谢武汉工程大学邮电与信息工程学院各位院领导以及教务处的大力支持,要感谢湖北工业大学商贸学院实验中心张必铭主任等同仁的宝贵建议,感谢武汉工程大学理学院黄祝明教授、华中师范大学物理科学与技术学院余兰山教授的关心和帮助,感谢武汉工程大学邮电与信息工程学院实验中心全体实验教师和王石主任的热情鼓励。在编写过程中还参阅了一些相关教材和仪器厂家的说明书,借此机会,一并致谢。

由于编者的水平有限,教材中难免有缺漏和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2011年7月10日

目 录

绪 论	1
第一章 物理实验基本操作技术	4
一、零位调整	4
二、水平、铅直调整	4
三、消除读数装置的空程误差	4
四、仪器的初态和安全位置	4
五、逐次逼近调整	5
六、消视差调节	5
七、光学仪器的操作规则与维护	5
第二章 误差理论及数据处理	7
一、测量与有效数字	7
二、测量误差与不确定度	7
三、置信概率与不确定度	8
四、不确定度的评定	9
五、直接测量和间接测量不确定度的评估	11
六、有效数字的概念	13
七、数据处理的基本方法	15
第三章 力学、热学、光学实验	18
实验一 密度测量	18
实验二 气垫导轨上的实验	22
实验三 三线摆测量刚体的转动惯量	29
实验四 杨氏模量的测定(CCD法)	33
实验五 杨氏模量的测定(光杠杆法)	37
实验六 波尔共振实验	41
实验七 落球法测量液体的粘滞系数	48
实验八 气体比热容比 c_p/c_v 的测定	52
实验九 金属线膨胀系数测量	55
实验十 薄透镜焦距的测定	58
实验十一 分光计调节及三棱镜折射率测量	62
实验十二 圆孔衍射	68
实验十三 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	70
实验十四 Michelson Interferometer	74
第四章 电磁学实验	78
实验十五 电位差计测干电池电动势及内阻	78
实验十六 静电场的描绘	82

实验十七	铁磁材料磁滞回线的研究	87
实验十八	电子元件伏安特性的测量	91
实验十九	PN 结正向压降与温度关系的研究	97
实验二十	示波器的使用	101
实验二十一	霍尔效应实验	109
实验二十二	声速的测量	115
实验二十三	RLC 串联电路稳态分析	120
实验二十四	电表改装与校准	126
实验二十五	惠斯通电桥测电阻	130
实验二十六	光电效应与普朗克常量的测定	133
实验二十七	Photoelectric Effect	138
实验二十八	密立根油滴实验	143
实验二十九	夫兰克-赫兹实验	147
附录	153
附录一	大学物理实验基础理论练习	153
附录二	大学物理实验报告样板	155
附录三	实验室仪器设备使用记录表	156
附录四	大学物理实验课程教学基本要求(征求意见稿)	156
附录五	国际单位制	159
附录六	物理常量表	160
附录七	物质密度表	161
附录八	海平面上不同纬度处的重力加速度	162
附录九	固体的线膨胀系数	162
附录十	不同温度时部分液体的粘滞系数	163
附录十一	不同温度时干燥空气中的声速	163
附录十二	常温下某些物质相对于空气的光的折射率	164
附录十三	常用光源的谱线波长表	164
参考文献	165

绪 论

物理学是研究物质运动的规律及物质基本结构的科学,它本身以及它与各个自然学科、工程技术部门的相互作用,对人类文明历史的发展,对当代和未来的高新科技的进步和相关产业的建立都提供了巨大的推动力。作为人类追求真理、探索未知世界的工具,物理学是一种哲学观和方法论,它深刻影响着人类对自然的基本认识、人类的思维方式和社会生活,在人的科学素质培养中具有重要的地位。

实验是物理学的基础,它反映了理工科及各个学科科学实验的共性和普遍性的问题。它在培养学生严谨的科学思维和创新能力和培养学生理论联系实际特别是与科学技术发展相适应的综合能力以及培养学生适应科技发展与社会进步对人才的需求等方面有着不可替代的作用。

一、物理实验课的地位、作用和任务

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了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。

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修课程,是大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。物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段以及综合性很强的基本实验技能训练,它是培养学生创新意识和创新能力、引导学生确立正确科学思想和科学方法、提高学生科学素质的重要基础。

本课程的具体任务是:

1. 培养与提高学生的科学实验基本素质,确立正确的科学思想和科学方法

通过物理实验课的教学,使学生掌握误差分析、数据处理的基本理论和方法,学会常用仪器的调整和使用,了解常用的实验方法,能够对常用物理量进行一般测量,具有初步的实验设计能力。

2. 培养与提高学生的创新思维、创新意识、创新能力

通过物理实验引导学生深入观察实验现象,建立合理的模型,定量研究物理规律;能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法,激发学生的创造性思维,能够完成符合规范要求的设计性实验和简单的具有研究性或创意性的实验。

3. 培养与提高学生的科学素养

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产的优良品德。

二、教学内容的基本要求

1. 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力

例如:(1)测量误差的基本概念,采用不确定度方法对直接测量和间接测量的误差进行评估;(2)处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等。随着计

计算机技术的不断发展,应掌握利用计算机通用软件处理实验数据的基本方法等。

2. 掌握常用的物理实验方法

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

3. 了解实验室常用仪器的性能,并学会使用

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交流和直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、激光器、常用电源和光源等常用传统仪器。随着现代技术的发展,应根据条件,在物理实验课中逐步引进在近代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,如激光技术、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。

4. 掌握常用的实验操作技术

例如: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,简单电路的故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的操作技术等。

5. 学习基本物理量的测量

例如:长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、光速、电子电荷、普朗克常数、里德堡常数等常用物理量及物性参数的测量,学习并掌握数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

在教学中要适当地介绍一些物理实验史料和物理实验在工程技术及现代科学技术中应用的知识,对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论教育,培养学生的创新意识、创新思维 and 创新能力。

三、能力培养的基本要求

物理实验课教学,应有效提高学生的科学实验能力,主要包括三个方面能力的培养:

独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料,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;培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的能力。

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判断、归纳与分析;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。

理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并解决问题;能够根据物理理论与教师的要求建立合理的模型并完成简单的设计性实验,初步形成综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

四、分层次教学的基本要求

以上教学基本要求应通过开设一定数量和比例的基础性实验、综合性实验、设计性或研究型实验来实现。上述三类实验的比例为:60%、30%、10%,各校根据本校的实验条件、特点和需要,做适当调整。

基础性实验主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差及数据处理的理论与方法等,涉及力、热、电、光、近代物理等内容。此类实验为理工科各专业的普及性实验。

综合性实验是指在同一实验中涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理中多个领域,综合应用多种实验方法和实验技术的实验。可根据各校的实际情况设置该部分实验内容。此类实验的目的是巩固基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路,提高其对实验方法和实验技术的综合运用能力。

设计性实验是学生根据给定的实验题目、要求和实验条件,自己设计方案并基本独立完成实验全过程的实验。各校可根据本校的实际情况设置该部分实验内容。

研究型实验是组织若干个围绕基础物理实验的课题,以科研方式进行的实验。设计性或研究型实验的目的是使学生了解科学实验的全过程、逐步学习科学思想和科学方法,培养学生独立实验和运用所学知识解决给定问题的能力。

五、教学模式、教学方法和实验学时的基本要求

开设开放实验室,在时间、空间和内容上给学生较大的选择自由。开设预备性实验、提高性实验,提供延伸课内实验内容的条件,满足各层次学生求知的需要,满足学生发展个性的需要。

创造条件,充分利用包括网络技术、多媒体教学软件在内的现代教育技术,丰富教学资源、拓宽教学的时间和空间、提供学生自主学习的平台和师生交互的平台、进行现代化教学信息管理,以满足个性化教育和全面提高学生科学实验素质的需要。

考核是实验教学中的重要环节,应该选取能反映学生综合实验能力的多样化的考核方式。

大学物理实验课程为 54 学时,第二学期 28 学时,第三学期 26 学时。

六、有关说明

本书基本适用于普通高等院校工科和理科非物理专业的物理实验教学。

学校在必修实验课程之外开设预备性实验和 1 到 2 门物理实验选修课,其内容以近代物理实验和综合性、应用性实验为主,面可以宽一些,技术手段应先进一些,以满足各层次学生的需要。学校应积极创造条件,开辟学生创新实践第二课堂,进一步加强对学生创新意识和创新能力的培养,鼓励和支持拔尖学生脱颖而出。

高等教育处于一个不断发展的过程之中,高校教学尤其是实验教学应该是开放的。因此,应积极鼓励教师开展物理实验课程的教学改革研究,在教学内容、课程体系、教学方法和手段等各方面进行新的探索和尝试,将成功的经验应用在教学之中。

第一章 物理实验基本操作技术

在物理实验中调整和操作技术十分重要。合理的调整和正确操作对提高实验结果的准确度有直接影响。对某一实验具体使用的仪器的调整和操作将在以后有关实验中介绍。本章主要介绍一些最基本的且具有普遍意义的调整和操作技术。

一、零位调整

许多仪器由于装配不当或由于长期使用和环境变化等原因,其零位往往已发生偏离。因此在使用前都需校正零位。部分仪器配有零位校准器,如电表等,可直接调整零位;还有一些仪器不能或不易校正零位,如螺旋测微器等,则可在使用前记下零位读数,以便对测量值进行修正。

二、水平、铅直调整

在实验中常需对仪器进行水平和铅直调整,如仪器工作台的水平或立柱需保持铅直等。调整时可利用水平仪和悬锤进行。一般来说需要调整的水平或铅直的实验装置在底座都装有3个调节螺钉。3个螺钉的连线成正三角形或等腰三角形,如图1-1所示。调整时,首先将水平仪放在与螺钉2、3连线平行的AB方向上,调整螺钉2(或3),使螺钉2、3连线方向水平,然后再将水平仪置于与AB垂直的CD方向,调整螺钉1,使工作台大致在一个水平面上。由于调整时3个螺钉的相互影响,故这种调节需反复进行,直至达到满意为止。

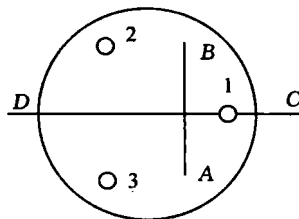


图1-1 水平调整

三、消除读数装置的空程误差

许多仪器(如测微目镜、读数显微镜等)的读数装置都由丝杠——螺母的螺旋机构组成。在刚开始测量或开始反向移测时,丝杠需转动一定的角度才能与螺母啮合,由此引起的虚假读数,称为空程误差(这种空程误差会因空程的累积而加大,如迈克尔逊干涉仪的读数机构)。为了消除空程误差,使用时除了一开始就要注意排除空程外,还需保持整个读数过程沿同一方向行进。

四、仪器的初态和安全位置

许多仪器在正式实验操作前,需要处于正确的“初态”和“安全位置”,以便保证实验顺利进行和仪器使用安全。光学仪器中有许多调节螺钉,如迈克尔逊干涉仪动镜和定镜的调节螺钉以及光学测角仪中望远镜的俯、仰角调节螺钉等,在调整这些仪器前,应先将这些调整螺钉处于适中状态,使其具有足够的调整量。移测显微镜在使用前也应使显微镜处于主尺的中间位置。

在电学实验中则需要考虑一个安全位置。例如:连好线路而未闭合开关接通电源前,应使电源处于最小电压输出位置,使滑动变阻器组成的制流电路处于电路电流最小状态、组成的分

压电路处于电压输出最小状态;电路平衡调节前,要使接入指零仪器的保护电阻处于阻值最大位置等。电路的安全位置不仅保护了仪器的安全,还能使实验顺利进行。

电学实验连线的基本思路:

1. 根据要求设计电路,画出实验电路图。
2. 选择好双量程电表的量程,明确其“+”、“-”接线柱。
3. 找准仪器、仪表的接线柱。
4. 按照先主干后支路,先串联后并联的思路逐个连接。
5. 检查:线是否接在接线柱上;电流是否从电表的正接线柱流入负接线柱流出;滑动变阻器的滑动触头是否处于正确位置,等等。

五、逐次逼近调整

“反向逐次逼近”调节法是使仪器装置较快调整到规定状态的一种方法,可在天平、电桥、电位差计等平衡调节中应用,也可在光路共轴调整、分光计调整中应用。例如,输入量为 x_1 时,指零器左偏若干格,输入第二个量 x_2 时应使指零器右偏若干格,这样就可以判定指零的平衡位置对应的输入量 x 应在 $x_1 < x < x_2$ 范围内。然后输入 x_3 ($x_1 < x_3 < x_2$), x_3 的大小约为 $x_2 - \frac{x_2 - x_1}{3}$,再输入 x_4 ($x_2 < x_4 < x_3$), x_4 的大小约为 $x_2 + \frac{x_3 - x_2}{3}$ 。如此反向逐次逼近很快就会找到平衡点。

六、消视差调节

在光学实验中,像与叉丝(或分划板标尺)不在一个平面上的情况经常出现。此时,若眼睛在观察位置左右或上下移动,即可见像和叉丝的相对位置也随之变动,这就是视差现象。如同日常中用尺量物,尺和物必须贴紧才能测量准确的道理一样,在光路中为了准确定位和测量,必须把像与叉丝或分划板标尺调到一个平面上,即做消视差调节。在比较像与叉丝二者离眼睛的远近时,可据下述实验规律作出判断:把自己左右手的食指伸直,一前一后立在视平线附近,眼睛左右移动时即可看出,离眼近者,其视位置变动与眼睛移动方向相反,而离眼远者,其视位置变动与眼睛移动方向相同。

常用仪表的指针与标尺之间总会有一段小距离,应尽量在正视位置读数。有些表盘上安装有平面镜,用以引导正确的视点位置,从而减小视差,使读数更准确。

七、光学仪器的操作规则与维护

光学仪器是根据光学原理做成的精密仪器,仪器调节一般都比较复杂,使用时除了需要熟悉仪器结构和调节方法,认真细致地进行调节外,实验中的各种现象,操作中的许多步骤,都需要有理论指导,做到事先心中有数,如不经周密思考,只能事倍功半。在光具座上进行的光学实验,必须满足近轴光线条件,应使各光学元件的主光轴重合,而且使该光轴与光具座导轨平行。调节的方法是先靠目视判断,使它们之间大致共轴,然后利用自准法或共轭法进行调节。

为了准确地找到成像最清晰的位置,可采用左右逼近法读数,取其平均值作为最清晰的像位。

光学仪器的核心部件——光学元件极易因破损、磨损、发霉、腐蚀而损坏,在使用和维护时必须遵守以下规则:

1. 必须在了解仪器的使用方法和操作要求后才能调整和使用仪器。
2. 仪器应轻拿、轻放、防尘,勿受震动,不许私自拆卸。
3. 仪器的机械部分要按操作规程操作,动作要轻,精神要集中。
4. 不能用手触摸仪器的光学表面,取用时只能接触非光学表面部分,如磨砂面、边缘等。
5. 不要对着光学元件说话、打哈欠、咳嗽、打喷嚏等。
6. 光学表面如有轻微的污痕,可用擦镜纸轻轻地拂去,若有严重污痕,可用乙醚、丙酮或无水酒精等清洗(镀膜面不宜清洗)。
7. 除实验规定外,不允许任何溶液接触光学元件的表面。
8. 仪器用毕,应放回箱内或加罩,箱内应放置干燥剂,以防仪器受潮和玻璃表面发霉。

第二章 误差理论及数据处理

一、测量与有效数字

物理实验以测量为基础。所谓测量,就是用合适的工具或仪器,通过科学的方法,将反映被测对象某些特征的物理量(被测物理量)与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,其比值即为被测物理量的测量值。

测量可分为直接测量和间接测量。直接测量:直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较得到测量值;间接测量:利用直接测量的物理量与被测物理量之间已知的函数关系,求得该被测物理量。

物理实验测量过程中,测量值=读数值(有效数字)+单位,其中,有效数字=可靠数字+可疑数字。

有效数字的读取,如图 2-1(a)、(b)所示。图 2-1(a)中被测物体的长度为 15.2 mm,图 2-1(b)中被测物体的长度为 15.0 mm。

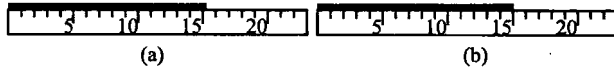


图 2-1 长度测量中有效数字的读取

有效数字不同,其精确度不同,如: $980 \text{ cm/s}^2 = 9.80 \text{ m/s}^2 = 0.00980 \text{ km/s}^2 \neq 9.8 \text{ m/s}^2$ 。如果使用科学记数法,那么有: $632.8 \text{ nm} = 0.6328 \mu\text{m} = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。

二、测量误差与不确定度

1. 误差的基本概念

测量误差存在于一切测量过程中,任何测量都存在误差。

(1)绝对误差=测量结果-真值。

(2)相对误差= $\frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}}$ 。

(3)真值——物理量在一定实验条件下的客观存在值。

2. 误差的分类

(1)系统误差

定义:在等精度测量条件下,对同一被测量的多次测量过程中,误差的绝对值和符号保持恒定或随测量条件的改变而按某一确定的规律变化。

产生原因:由于测量仪器、测量方法的不同以及环境带入。

分类及处理方法:

①已定系统误差:误差的变化规律已确定的系统误差。如:电表、螺旋测微器的零位误差;测电压、电流时由于忽略表内阻引起的误差等。

②未定系统误差:误差的变化规律未确定的系统误差。如:螺旋测微器制造时的螺纹公差等。

(2)随机误差

定义:在等精度条件下,对同一被测量的多次重复测量中,误差的绝对值和符号以不可预

知的方式变化的测量误差。其特点是误差具有随机性,但服从统计规律。

产生原因:实验条件和环境因素无规则的起伏变化,引起测量值围绕真值发生涨落的变化。如:电表轴承的摩擦力变动;螺旋测微器测力在一定范围内的随机变化;操作读数时的视差影响等。

关于随机误差和系统误差可用图 2-2 形象地表示。

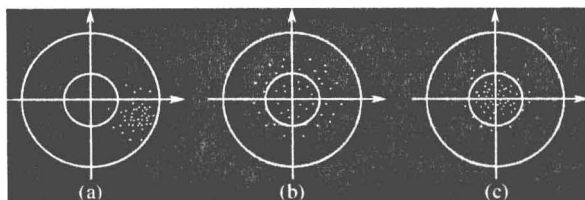
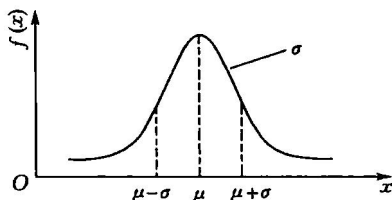


图 2-2 子弹着靶点分布图

由图 2-2 可知:(a)图随机误差小,系统误差大;(b)图随机误差大,系统误差小;(c)图随机误差和系统误差都小。

随机误差的特点:

- ①小误差出现的概率比大误差出现的概率大。
- ②无穷多次测量时服从正态分布,如图 2-3 所示。



μ :真值 σ :标准差 $f(x)$: x 的分布函数

图 2-3 正态分布

$$x \text{ 的分布函数: } f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2-1)$$

$$\text{标准差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-2)$$

标准差表示测量值的离散程度。标准差小,表示测得值很密集,随机误差分布范围窄,测量的精密度高;标准差大,表示测得值很分散,随机误差分布范围宽,测量的精密度低。

- ③具有抵偿性,取多次测量的平均值有利于减小随机误差。
- ④具有有界性,即误差的绝对值不超过一定限度。

三、置信概率与不确定度

假定对一个物理量进行了 n 次测量,测得的值为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$,则算术平均值 \bar{x} 可用式(2-3)定义。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-3)$$

可以用多次测量的算术平均值作为被测量的最佳估计值,当测量次数 n 为无穷大时,算术

平均值等于真值。

在有限次测量中,算术平均值不等于真值,它的标准偏差为:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (2-4)$$

σ_x 的意义可以理解为:真值处于区间 $[\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x]$ 内的概率为 0.683,即任意一次测量值落入区间 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 的概率 $P = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x) dx = 0.683$ 。这个概率叫置信概率,也叫置信度。对应的区间叫置信区间,可表示为:

$$x = \mu \pm \sigma \quad (2-5)$$

扩大置信区间,可增大置信概率:

$$[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma], \quad P = \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x) dx = 0.954;$$

$$[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma], \quad P = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) dx = 0.977.$$

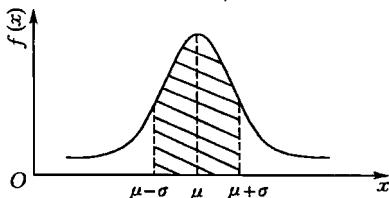


图 2-4 置信概率

测量不确定度(uncertainty of measurement):与测量结果相关联的参数,表征合理地赋予被测量值的分散性。由于测量误差的存在,因而对被测量值不能确定的程度必须通过“量值范围”和“置信概率”来表达,测量不确定度是对被测量真值可能取值范围的评定。

不确定度与误差的区别:误差表示测量结果对真值的偏离,是一个确定的值;不确定度表明测量值的分散性,表示一个区间。由于真值是不知道的,测量误差只是理想的概念,而不确定度则可以根据实验、资料、经验等信息进行定量确定。不确定度实质上就是误差的估计值,表示由于测量误差的存在而对测量值不能确定的程度。

四、不确定度的评定

不确定度的评定方法可归纳为 A、B 两类,用统计方法得出的归为 A 类,用非统计方法得出的归为 B 类,A、B 两类不确定度只是评定方法的不同,不是不确定度性质的不同。有些情况下只需进行 A 类或 B 类评定,更多情况下要综合 A、B 两类评定的结果。

1. 不确定度的 A 类评定

在重复性条件下对被测量 x 进行了 n 次测量,测得 n 个结果 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$,被测量 x 真值的最佳估计值是取 n 次独立测量值的算术平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-6)$$

表征测量值分散性的量——实验标准偏差为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-7)$$

算术平均值的标准偏差:

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

其中算术平均值的标准偏差就是测量结果 \bar{x} 的 A 类标准不确定度。

即 A 类标准不确定度的计算方法:

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

当置信概率取 0.95, $6 \leq n \leq 10$ 时, A 类分量可简化为: $\Delta_A = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ 。

注意:上式的应用是有条件的,那就是测量次数必须在 6~10 次之间,未经特别说明,本书使用上式计算 Δ_A 。

2. 不确定度的 B 类评定

不确定度的 B 类评定的信息来源

(1) 以往的检测数据、有关的技术资料、说明书等。如:钢卷尺说明书上给出,在量程 1 m 内其最大误差为 0.5 mm;在量程 1 m~2 m 内其最大误差为 1.0 mm。

(2) 根据实际情况估计的误差极限值。如:电子秒表的仪器误差限为 2.5×10^{-5} s,但是,由于实验者在计时开始和计时结束时都会有 0.1 s~0.2 s 左右的误差,所以估计时间的测量误差限为 0.2 s。

已知信息表明,被测量的测量值分散区间的半宽为 Δ ,且落在置信区间的概率为 100%。通过对其分布的估计可得出 B 类标准不确定度 Δ_B 为:

$$\Delta_B = \frac{\Delta}{k_i} \quad (2-9)$$

包含因子 k_i 取决于测量值的分布规律(包含因子 k_i 也可表示为置信系数 C)。

常用分布与 k_i 的关系如表 2-1 所示。

表 2-1 常用分布与 k_i 的关系

分布类别	P/%	k_i	$u(x_i)$
矩形	100	$\sqrt{3}$	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
正态	99.7	3	$\frac{a}{3}$
三角	100	$\sqrt{6}$	$\frac{a}{\sqrt{6}}$
梯形	100	2	$\frac{a}{2}$

在实验教学情况下,为简化起见,一般估计为矩形(均匀)分布。其中, Δ 取仪器的误差限或实际测量估计的误差极限值。

$$u(x_i) = \frac{\Delta(x_i)}{\sqrt{3}} \quad (2-10)$$

B 类标准不确定度 Δ_B 为:

$$\Delta_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (2-11)$$

例 1 知道某游标卡尺的仪器最大仪器误差 $U=0.05 \text{ mm}$, 若按矩形分布计算, 则其 B 类标准不确定度为多少?

解:
$$\Delta_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029(\text{mm})$$

若不特别说明, B 类分量可简化为: $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。其中, $\Delta_{\text{仪}}$ 是仪器的最大允差。

3. 两类不确定度的合成

合成方法:

$$\Delta_x = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (2-12)$$

相对不确定度:

$$\Delta_{rx} = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-13)$$

测量的结果表示: $x = \bar{x} \pm \Delta_x$; $\Delta_{rx} = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} \times 100\%$ 。

五、直接测量和间接测量不确定度的评估

1. 原则

- (1) 平均值有效数字位数不要超过测量值的有效数字;
- (2) 不确定度和相对不确定度保留 1~2 位有效数字;
- (3) 平均值的末位数字要与不确定度的末位数字对齐。

2. 直接测量量不确定度估算过程与表示

(1) 求测量数据的平均测值 $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$;

(2) 用已知系统“0”误差修正平均值;

(3) 计算标准差 $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ ($6 \leq n \leq 10$);

(4) $\Delta_A = \sigma_x$, $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$;

(5) 合成不确定度 $\Delta_x = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$;

(6) 表示测量结果 $\begin{cases} x = \bar{x} \pm \Delta_x \\ \Delta_{rx} = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$

例 2 用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺测得圆柱直径 d 分别为:

$d(\text{cm})$	2.594	2.592	2.596	2.592	2.590	2.592
----------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

计算直径的测量结果。

解: 平均值:
$$\bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d_i$$

$$= \frac{2.594 + 2.592 + 2.596 + 2.592 + 2.590 + 2.592}{6} = 2.5927(\text{cm})$$