

新世纪应用型本科精品课程推荐教材
普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

方路线 编著

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成。全书共四章,系统地介绍物理实验基本操作技术、误差理论及数据处理等相关基础知识,全面阐述了物理实验中常用的实验测量方法,安排了实验项目 34 个。本书按照不同层次编入力学、热学、光学、电磁学,以及近代物理实验的设计思想和实验方法,培养学生独立实验的能力、理论联系实际的能力、分析与研究的能力以及创新思维的能力。

本书打破传统实验课教材的编写模式,建立一套能促使实验课独立发展的新教材体系。各章节的内容既相互独立又相互配合,且循序渐进,既可作为高等学校理工科类各专业的大学物理实验课程的基本参考书,也可作为相关科技工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/方路线编著. —上海:同济大学出版社,2018.9

ISBN 978-7-5608-8114-0

I. ①大… II. ①方… 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(2018)第 195951 号

新世纪应用型本科精品课程推荐教材

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

方路线 编著

责任编辑 张 莉 陈佳蔚

责任校对 徐春莲

封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社

www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.25

印 数 1—2 500

字 数 356 000

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8114-0

定 价 38.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

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,带动了实验技术和实验水平的不断提高。尤其是近年来,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比重,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。

为了满足广大学生的需要,本书将基础实验项目与设计性实验和研究性实验项目相结合,供理工类专业学生必修用。全书共分四章:第一章是物理实验基本操作技术;第二章是误差理论及数据处理,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、第四章是实验内容,精选了34个基本实验,主要包括力学、热学、光学、电磁学和近代物理,以及交叉学科在内的实验项目。本书编写时,总结了编者的物理实验教学经验和近年来物理实验创新的内容,并结合专业特点,把物理量的测量以及在工程技术上的应用作为重点突出在本书中。本书选编的实验,既有经过长期教学实践、内容较为成熟的实验,又有物理技术与计算机技术相结合的新实验。各个实验之间既相互独立,又循序渐进、相辅相成,形成一个完整的体系。使学生在实验方法、实验技术和实验仪器使用方面都能够得到全面而系统的训练。本书在编写上力求简明、实用,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,还配有思考题和习题,供学生在实验后进行分析讨论,以巩固所学知识。

本书由方路线编著,黄祝明教授主审。

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,直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。本书在编写过程中,得到了武汉工程大学邮电与信息工程学院领导的大力支持,得到了华中科技大学物理学院熊永红教授,华中师范大学物理科学与技术学院余兰山教授,武汉工程大学理学院黄祝明教授的帮助。在编写过程中参阅了一些相关教材和仪器生产厂家的说明书。借此机会,一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中如有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2018年6月

目 录

前言	80
绪论	1
第一章 物理实验基本操作技术	5
一、零位调整	5
二、水平、铅直调整	5
三、消除读数装置的空程误差	5
四、仪器的初态和安全位置	5
五、逐次逼近调整	6
六、消视差调节	6
七、光学仪器的操作规则与维护	6
第二章 误差理论及数据处理	8
一、测量与有效数字	8
二、测量误差与不确定度	8
三、置信概率与不确定度	10
四、不确定度的评定	11
五、直接测量和间接测量不确定度的评估	13
六、有效数字的概念	16
七、数据处理的基本方法	17
第三章 力学、热学、光学实验	22
实验一 密度测量	22
实验二 气垫导轨上的实验(速度和加速度的测量)	27
实验三 气垫导轨上的实验(简谐运动的验证)	31
实验四 气垫导轨上的实验(动量守恒定律的验证)	34
实验五 三线摆测量刚体的转动惯量	37
实验六 杨氏模量的测定(CCD法)	42
实验七 波尔共振实验	46
实验八 落球法测量液体的黏滞系数	54
实验九 气体比热容比 c_p/c_v 的测定	58
实验十 金属线膨胀系数测量	62
实验十一 薄透镜焦距的测定	66

实验十二	分光计调节及三棱镜折射率测量	70
实验十三	圆孔衍射	77
实验十四	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	80
实验十五	Michelson Interferometer	84
实验十六	光敏电阻特性实验	88
实验十七	热敏电阻特性实验	92
实验十八	导热系数的测定	95
第四章 电磁学实验		101
实验十九	电位差计测干电池电动势及内阻	101
实验二十	静电场的描绘	106
实验二十一	铁磁材料磁滞回线的研究	111
实验二十二	电子元件伏安特性的测量	116
实验二十三	PN 结正向压降与温度关系的研究	123
实验二十四	示波器的使用	129
实验二十五	霍尔效应实验	136
实验二十六	声速的测量	143
实验二十七	RLC 串联电路稳态分析	149
实验二十八	电表改装与校准	155
实验二十九	惠斯通电桥测量电阻	160
实验三十	光电效应与普朗克常量测定	164
实验三十一	Photoelectric Effect	170
实验三十二	密立根油滴实验	175
实验三十三	弗兰克-赫兹实验	180
实验三十四	核磁共振研究	186
阅读材料 古代趣味物理实验十例		192
附录		196
附录一	大学物理实验基础理论练习	196
附录二	大学物理实验报告样板	199
附录三	实验室仪器设备使用记录表	200
附录四	大学物理实验教学大纲	201
附录五	国际单位制	206
附录六	物理常量表	207
附录七	物质密度表	208
附录八	海平面上不同纬度处的重力加速度	209
附录九	固体的线膨胀系数	210
附录十	不同温度时部分液体的黏滞系数	211

绪 论

物理学是研究物质运动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技术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共性和普遍性的问题。它在培养学生严谨的科学思维 and 创新能力,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,以适应科技发展与社会进步对人才的需求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通识课程,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,激发学生创造性思维;能够完成符合规范要求的设计性内容的实验,进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

(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和基本能力。

例如,①掌握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掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算和应用技术的不断普及,应具有用计算机通用软件处理实验数据的基本能力等。

(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和使用方法。

例如,长度测量仪器,计时仪器,测温仪器,变阻器,电表,交、直流电桥,模拟示波器,数字示波器,低、高频信号发生器,分光仪,光谱仪,激光器,电源和光源等常用传统仪器。随着现代技术的发展,学校应根据条件,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,简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

(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,注意加强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的应用知识,对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论教育,培养学生创新意识、创新思维 and 创新能力。

三、能力培养基本要求

物理实验课教学,应有效提高学生的科学实验能力,其中包括:

(1) 自学、撰写预习报告和总结报告、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。

(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。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题;能够根据物理理论与教师的要求建立合理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建议为 50%, 30%, 20%, 各院校可根据本校的特点和需要,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,可涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等各个领域的内容.此类实验为适应各专业的普及性实验.

综合性实验是指在同一个实验中涉及力学、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.可根据本校的实际情况设置该部分实验内容(综合的程度、综合的水平、实验仪器、教学要求等).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.各院校也应根据本校的实际情况设置该部分实验内容(实验选题、教学要求、实验条件、独立的程度等).

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.

设计性实验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,培养学生独立实验的能力,培养学生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,应该进行能反映学生综合实验能力的多样化的考核方式.

通常大学物理实验课程为 54 学时,分别为入校后第二学期 28 学时,第三学期 26 学时.

六、有关说明

上述基本要求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 1~2 门物理实验选修课,其内容以近代物理、综合性、应用性实验为主,涉及面可以宽一些,技术手段应先进一些,以满足各层次学生的需要.各院校应积极创造条件,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.鼓励积极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.

七、实验室规则

(1) 严格遵守实验室的各项规章制度,听从实验教师的安排.

(2) 必须按照要求做好实验预习报告,明确试验目的、原理和方法,熟悉所有仪器的性能和实验操作规程.没有预习报告,不准进实验室.

(3) 必须经老师检查后,方可进行实验.未经允许,不得擅自离岗、串岗.

(4) 实验时必须严肃认真、实事求是,仔细观察实验现象,按规范要求认真记录实验数据。

(5) 严格遵守操作规程,爱护仪器设备,注意节约和安全。若未按实验要求操作而造成仪器设备损坏,则按学校的有关规定处理。

(6) 自觉遵守纪律,不得迟到、早退;不得带雨伞、盒饭、饮料等与实验无关的物品进入实验室;不得在实验室内大声喧哗,必须保持实验室的安静、整洁。

(7) 实验室内的仪器、设备、工具、桌椅等物品,严禁私自拿出室外或借用。非实验的人员不得入内。

(8) 实验结束后,应及时切断电源,认真填写仪器使用记录,清理打扫工作台面,经指导教师检查允许后方可离开实验室。

(9) 必须按时按要求签到,如发现代签现象,则代签者和被代签者该门实验课成绩作不及格论处。

附录 1 实验室守则

一、实验室守则

1. 实验前必须预习,明确实验目的、原理、步骤、仪器使用方法和注意事项。

2. 实验时必须严肃认真,实事求是,仔细观察实验现象,按规范要求认真记录实验数据。

3. 严格遵守操作规程,爱护仪器设备,注意节约和安全。若未按实验要求操作而造成仪器设备损坏,则按学校的有关规定处理。

4. 自觉遵守纪律,不得迟到、早退;不得带雨伞、盒饭、饮料等与实验无关的物品进入实验室;不得在实验室内大声喧哗,必须保持实验室的安静、整洁。

5. 实验室内的仪器、设备、工具、桌椅等物品,严禁私自拿出室外或借用。非实验的人员不得入内。

6. 实验结束后,应及时切断电源,认真填写仪器使用记录,清理打扫工作台面,经指导教师检查允许后方可离开实验室。

7. 必须按时按要求签到,如发现代签现象,则代签者和被代签者该门实验课成绩作不及格论处。

8. 实验过程中,不得擅自离开实验室,有事需离开时,须经指导教师同意。

9. 实验室内严禁吸烟、饮酒、嬉戏打闹,不得大声喧哗。

10. 实验室内应保持整洁,实验结束后,应及时清理实验台面,将仪器归位。

11. 实验室内应配备消防器材,严禁私自使用。

12. 实验室内应配备急救药品,严禁私自使用。

13. 实验室内应配备安全警示标志,严禁私自移动。

14. 实验室内应配备安全操作规程,严禁私自修改。

15. 实验室内应配备安全应急预案,严禁私自更改。

16. 实验室内应配备安全培训教材,严禁私自外借。

17. 实验室内应配备安全考核试卷,严禁私自泄露。

18. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自修改。

19. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自删除。

20. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自复制。

21. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自传播。

22. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自出售。

23. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自出租。

24. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自转让。

25. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自赠与。

26. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自丢弃。

27. 实验室内应配备安全考核题库,严禁私自销毁。

第一章 物理实验基本操作技术

在物理实验中,仪器设备的调整和操作技术十分重要.合理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.本章将介绍一些最基本的且具有普遍意义的调整操作技术.

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.因此在使用前都须校正零位.有一类仪器配有零位校准器,如电表等,可直接调整零位;还有一类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垂进行.一般说来需要调整水平或铅直的实验装置和水平工作台在底座都装有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2—3连线平行的AB方向上,调整螺钉2(或3),使2—3连线方向处于水平方向;然后再将水平仪置于与AB垂直的CD方向,调节螺钉1,使工作台大致在一个水平面上;由于调整时3个螺钉相互影响,故这种调节须反复进行,直至达到满意的程度.

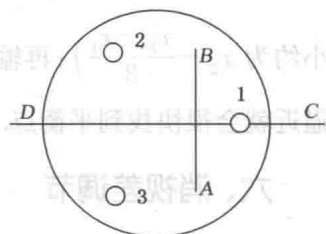


图1-1 水平调整

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,丝杠须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(这种空程误差会由于空程的累积而加大,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”,以便保证实验的顺利进行和仪器的使用安全.光学仪器中有许多调节螺钉,如迈克尔逊干涉仪动镜、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, 使滑线变阻器组成的制流电路处于电路电流最小状态和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: 线是否接在正确的接线柱上, 电流一定要从电表的正极流入负极流出, 滑动变阻器的滑动触头是否处于正确位置.

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 $x_3 - \frac{x_3 - x_2}{3}$). 如此反向逐次逼近就会很快找到平衡点.

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, 即可见像与叉丝的相对位置也随之变动, 这就是视差现象. 如同日常用尺量物, 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, 即作消视差调节.

在比较像与叉丝二者离眼睛的远近时, 可据下述实验规律做出判断: 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. 有些表盘上安装平面镜, 指针物像重合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并认真细心进行调节外, 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来判断, 使它们之间大致共轴, 然后利用自准法或共轭法进行调节.

为了准确地找到像的最清晰位置, 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、污损、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、防损、防尘, 勿受震动, 不得私自拆卸.
- (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) 不得对着光学元件说话、哈气、咳嗽、打喷嚏.
- (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.



图 1-1 游标卡尺的读数

(a) 游标卡尺的读数 (b) 游标卡尺的读数



图 1-2 正态分布曲线

(1) 测量值的平均值 (2) 测量值的标准差

(3) 测量值的方差 (4) 测量值的协方差

(5) 测量值的偏度 (6) 测量值的峰度

(7) 测量值的熵 (8) 测量值的熵熵

(9) 测量值的熵熵熵 (10) 测量值的熵熵熵熵

(11) 测量值的熵熵熵熵熵 (12) 测量值的熵熵熵熵熵熵

(13) 测量值的熵熵熵熵熵熵熵 (14) 测量值的熵熵熵熵熵熵熵熵

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(instrument)或仪器,通过科学的方法,将反映被测对象(object)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。该数值是在一个给定的量纲或尺度系统下,由属性的量和测量单位共同决定的。

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是指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;间接测量是指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系,求得该被测物理量。

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 所示。图 2-1(a)中被测量物体的长度为 15.2 mm,图 2-1(b)中被测量物体的长度为 15.0 mm。

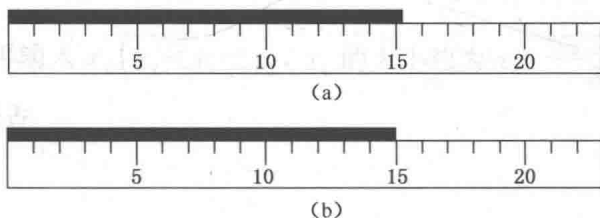


图 2-1 长度测量中有效数字的读取

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

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(单位);
- (2) 相对误差=绝对误差/真值(百分比);
- (3) 真值是指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

系统误差是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确定的规律变化。

系统误差产生的原因是由于测量仪器、测量方法的不同以及环境带入。

系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差。

① 已定系统误差. 是指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. 是指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

随机误差是在等精度条件下, 对同一量的多次重复测量中, 误差的绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差分量. 其特点是误差具有随机性, 但服从统计规律。

随机误差产生的原因是由于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, 螺旋测微计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 形象地表示出来。

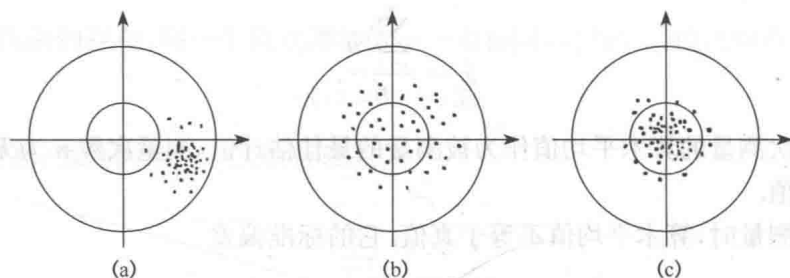


图 2-2 子弹着靶点分布图

由图 2-2 可见, ①图(a)随机误差小, 系统误差大; ②图(b)随机误差大, 系统误差小; ③图(c)随机误差和系统误差都小。

随机误差具有以下特点:

- 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。

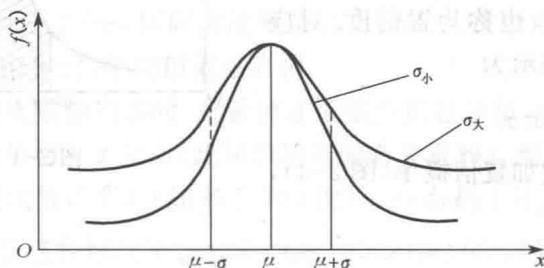


图 2-3 正态分布

图中, μ 为真值; σ 为标准差; $f(x)$ 为 x 的分布函数。

X 的分布函数

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right].$$

标准差

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

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消减随机误差.

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 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 算术平均值 \bar{x} 定义为

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

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

在有限次测量时, 算术平均值不等于真值, 它的标准偏差

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

$\sigma_{\bar{x}}$ 的意义可以理解为: 真值处于区间 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 内的概率为 0.683, 即任意一次测量值落入区间 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 的概率为

$$P = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x) dx = 0.683.$$

这个概率称为置信概率, 也称为置信度. 对应的区间称为置信区间, 表示为

$$x = \mu \pm \sigma.$$

扩大置信区间, 可增加置信概率(图 2-4),

如

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

$$[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma], \quad P = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) dx = 0.997.$$

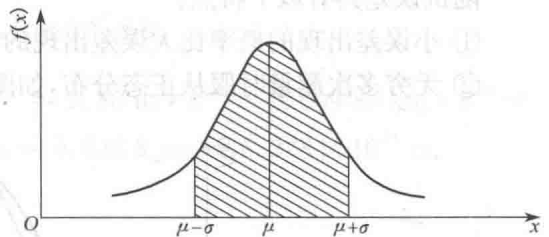


图 2-4 置信概率

测量不确定度(uncertainty of measurement)是由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度, 是通过“量值范围”和“置信概率”来表达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