



“十二五”江苏省高等学校重点教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

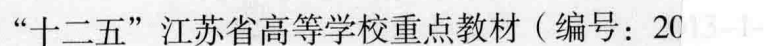
大学物理实验

(第二版)

◎主编 吴泉英 姚庆香 朱爱敏

◎副主编 王帆 樊丽娜 马煜 施积兵

高等教育出版社



高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

(第二版)

Daxue Wuli Shiyan

◎主编 吴泉英 姚庆香 朱爱敏

◎副主编 王帆 樊丽娜 马煜 施积兵

高等教育出版社·北京

内容提要

本书第一版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》(2010年版)编写,第二版根据2013年江苏省启动的“十二五”江苏省高等学校重点教材建设方案的要求修订而成。

本书共分为4章,共计73个实验。第1章为物理实验的基本知识,第2章为基础性实验,第3章为综合性实验,第4章为设计研究性实验。

本书适合作为高等学校理工科各专业的大学物理实验课程的教材或参考书,也可供相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 吴泉英, 姚庆香, 朱爱敏主编. --
2版. -- 北京: 高等教育出版社, 2015.6
ISBN 978-7-04-042460-7

I. ①大… II. ①吴… ②姚… ③朱… 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 (2015) 第 073355 号

策划编辑 高 建
插图绘制 郝 林

责任编辑 张海雁
责任校对 陈旭颖

封面设计 赵 阳
责任印制 刘思涵

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京明月印务有限责任公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 17.25
字 数 420千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年2月第1版
2015年6月第2版
印 次 2015年6月第1次印刷
定 价 30.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 42460-00

第二版前言

本版在第一版的基础上,根据 2013 年江苏省教育厅启动的“十二五”江苏省高等学校重点教材建设方案的要求进行了修订。

教材修订小组经充分研讨,决定以培养学生创新能力、激发学生创造性思维、提升学生对科技发展的适应能力为目的开展修订工作。为此我们在改革思路和特色与创新方面作了提炼。

一、改革思路

(1) 为使学生掌握最新的、国际统一的测量结果质量的评定方法,本教材在物理实验的数据处理中,完善了误差理论,突出了不确定度的分析和计算。

(2) 为培养学生的创新能力,激发学生的创造性思维,在教材中增加了多项设计性实验,让学生自主设计实验方案,规划实验步骤,以有效地锻炼学生的自主创新能力。

(3) 为提升学生对社会和科技发展的适应性,在教材中增加了与科学技术发展息息相关的物理实验项目,如利用霍耳效应法测量半导体材料的电学参量、利用霍耳传感器测量重力加速度等,使学生在物理实验课堂上接触到科技实验问题,培养学生解决实际问题的能力。

(4) 为便于物理专业学生衔接专业课的学习,在教材中增加了与后续课程相关的设计性物理实验,例如利用白光偏振干涉测量光学玻璃内应力、利用泰伯效应测量光栅常量等,通过理论与实验的结合,有效地提高了学生的学习效率。

二、主要特色与创新

(1) 提出“应用导向、服务专业、多方结合、提升素质”的物理实验教学理念。物理实验教学重视学生应用能力的培养,通过多方结合的途径,全面提高学生的综合素质。

(2) 从实验模块、实验层次和应用创新能力培养等三个方面构建立体化的实验教学体系,学生通过物理实验训练,实现从理论思维到工程思维的训练过程,为应用型人才的培养打下扎实的基础。

(3) 结合与本教材配套的物理实验多媒体课件,运用现代化教育技术与多元化的教学手段,提高学生学习的兴趣和效果。

此次教材修订原则是在原有实验内容的基础上,调整实验内容的框架结构,完善相应章节的内容,全书分为 4 章及附录五个部分:

第 1 章为物理实验的基本知识,介绍了测量、误差处理、不确定度评定、有效数字运算以及常用的数据处理方法等知识。

第 2 章为基础性实验,系统地阐述了包含在物理实验中的基本方法和基本技术,编入力学、热学、光学和电磁学等基础性实验项目 21 个。对照大学物理课程中关于振动、波方面的理论知识,第一版中相关实验较少,这次修订时增加了“弦振动的研究”实验。增加和调整了“示波器的使用”实验中实验原理部分,修订后示波器的原理更加清晰,更便于学生理解和掌握。完善了

“分光计的调节和三棱镜折射率的测定”实验,增加了望远镜和平行光管的结构图及介绍,增加了测量顶角的原理。调整“固体密度的测定”和“重力加速度的测定”为设计研究性实验,等等。

第3章为综合性实验,实验内容涉及多学科的物理知识,运用了综合的实验方法和手段,共编入综合性实验18个。增加了“准稳态法测比热容和导热系数”实验中关于导热模型的物理过程的分析,更便于理工科学生掌握该原理。修订了“超声波声速的测量”,对驻波形成和特点的内容进行了更形象的解释。

第4章为设计研究性实验,介绍了设计研究性实验的目的和任务、实验方案的选择和实验仪器的配套、教学方式及基本要求,共编入设计研究性实验项目34个。其中新增“固体密度的测定”“重力加速度的测定”“利用霍耳效应法测量半导体材料的电学参量”“利用霍耳传感器测量重力加速度”“分光计上的综合设计性实验”“利用白光偏振干涉测量光学玻璃内应力”“利用泰伯效应测量光栅常量”等7个实验项目。

本书精选的70多个实验项目,既相互独立,又循序渐进、相互配合,形成了一个完整的体系。本书在内容安排上充分考虑到理工科大学有关专业特点及基础课教学的需要,其内容涉及面广,实用性强,基础性实验和综合性实验为学生提供了较为详尽的基本原理、实验装置、实验过程与操作步骤,以及实验过程中可能会遇到的问题等方面的信息。设计研究性实验中,既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验,又有自行研发的新实验,以加强学生在实验方法、实验技术方面的训练,以及对学生个性发展和创新能力的培养。本书可作为高等学校理工科各专业大学物理实验课程的教材或参考书,也可供相关科技工作者参考。

本书由吴泉英、姚庆香、朱爱敏等主编,参加修订的有:吴泉英、姚庆香、朱爱敏、施积兵、王帆、樊丽娜、马煜、王军、沙金巧、罗宏、范君柳、秦长发等,另有臧涛成、钱先友、刘永奇等老师提出了不少很好的建议,在此特表感谢。

在此次修订工作中获得东南大学杨永宏教授与周雨青教授的指导,在此表示衷心的感谢!

由于时间匆促、经验欠缺和水平有限,书中一定有很多错漏,编者恳切希望任课老师和读者不吝指教,以便更正。

本书的再版由“十二五”江苏省高等学校重点教材(修订)项目资助。

编 者

2014年12月

第一版前言

大学物理实验是理工类高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。本书是在多年使用的物理实验讲义的基础上,经多次修改而成的,这次修改主要根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合苏州科技学院实际情况,并按照江苏省高等学校基础课实验教学示范中心建设要求,对原有实验内容进行了筛选、整合、更新,减少了验证性实验的比例,增加了有启发性并能激发学生创造性思维的综合性、设计性实验。

本教材具有以下特点:

(1) 根据国际上测量不确定度量化表示的进展情况,结合物理实验教学的实际情况,实行用不确定度评定实验结果。

(2) 根据学生的认知规律和一般教学规律,按基础实验、综合性提高实验和设计性研究实验的顺序来编排。

(3) 设计性实验与基础和综合性实验相关性较强,学生可以结合已学的知识和实验来完成设计性实验,从而促进学生创新能力的培养和锻炼。

(4) 在实验内容方面,引进了一些反映科技新成果的实验,有些实验增加了更为丰富的内容,有的实验中采用计算机处理实验数据。

本书充分吸收了苏州科技学院在物理实验方面的多年教学实践的经验,并反映了其教学特色。苏州科技学院是以工为主,工、理、文、管协调发展的多学科性大学,对不同专业人才因培养目标不同,设置了不同平台的实验。可根据各学科对物理实验的教学要求和教学课时的不同,选择不同层次的实验,以达到因材施教和开阔学生眼界、拓宽学生思维的目的。各平台必做实验按难易程度进行编排,依照认知规律,对学生进行阶梯式的强化训练,在学生实验能力达到一定要求后,再开设各个类别的综合设计性提高实验,让学生根据自己的专业、能力、兴趣和爱好,上网自由预约选做自己感兴趣的实验。物理实验逐步实行开放式教学和网络化教学管理。

参加本教材编写的有:苏州科技学院物理实验中心姚庆香(实验2.1、3.8、4.1、4.2、4.3、5.11、5.14、6.9、6.10、6.11)、施积兵(实验4.5、5.4、5.12、5.16、5.17、6.1)、杨伯成(实验3.2、3.3、3.4、4.4、5.2)、朱爱敏(实验2.2、3.1、3.6、3.9、5.13、6.4、6.6、6.18)、樊丽娜(实验2.3、2.4、2.6、2.7、5.1、5.9、6.3)、马煜(实验5.5、5.6、5.7、5.8、6.19)、王帆(实验5.18、5.19、5.20、6.21、6.22、6.23)、高雪萍(实验2.5、3.5、5.3、6.2、6.7)、吴泉英(第1章,实验3.7、5.10、5.15、6.5、6.8、6.12、6.13、6.14、6.15)、秦长发(实验6.24、6.25)、范君柳(实验6.20、6.26)。另有刘永奇、罗宏、沙金巧、钱先友、王军等同志也参与了本书的编写工作,作出了不少贡献。

本书凝聚了苏州科技学院物理实验中心几代人的集体智慧,融入了物理实验中心全体教职员工多年来教学改革的实践经验,参考了许多兄弟院校的相关教材和仪器开发技术人员提供的技术资料,吸收了广大实验教学工作者教学改革的经验 and 做法,在此对所有相关人员表示衷心感

谢!同时,本书在编写过程中得到了苏州科技学院数理学院领导以及朱培庆等老师的关心与帮助,在此也一并表示感谢!

由于编者水平有限,实践经验不足,书中难免存在疏漏,恳请读者批评和指正,提出宝贵的意见和建议。

编 者

2011 年 11 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
第 1 章 物理实验的基本知识	3
1.1 测量与误差	3
1.2 误差的处理	9
1.3 实验结果的不确定度	13
1.4 有效数字及其运算	21
1.5 数据处理的基本方法	24
练习题	29
第 2 章 基础性实验	32
实验 2.1 长度的测量	33
实验 2.2 牛顿第二定律的验证	39
实验 2.3 表面张力系数的测定	42
实验 2.4 刚体转动惯量的测定	46
实验 2.5 弦振动的研究	51
实验 2.6 固体线膨胀系数的测定	56
实验 2.7 液体黏度的测定	59
实验 2.8 用模拟法测绘静电场	62
实验 2.9 用惠斯通电桥测电阻	66
实验 2.10 用双臂电桥测低电阻	69
实验 2.11 用电位差计测电动势	77
实验 2.12 霍耳效应法测量磁场	81
实验 2.13 非均匀磁场的测绘	88
实验 2.14 示波器的使用	91
实验 2.15 电表的改装与校准	98
实验 2.16 电子束的偏转	102
实验 2.17 薄透镜焦距的测量	107
实验 2.18 用牛顿环测透镜的曲率半径	113
实验 2.19 分光计的调节和三棱镜折射率的测定	117
实验 2.20 用极限法测量液体的折射率	126

实验 2.21 用双棱镜测光波波长	129
第 3 章 综合性实验	133
实验 3.1 简谐振动的研究	133
实验 3.2 超声波声速的测量	137
实验 3.3 用 CCD 法测杨氏模量	141
实验 3.4 波尔共振实验	143
实验 3.5 多普勒效应综合实验	151
实验 3.6 温度传感器特性研究	156
实验 3.7 准稳态法测比热容和导热系数	162
实验 3.8 动态磁滞回线的测绘	173
实验 3.9 油滴实验——电子电荷量的测定	178
实验 3.10 光栅衍射	184
实验 3.11 衍射光强分布实验	188
实验 3.12 偏振光与旋光实验	191
实验 3.13 迈克耳孙干涉仪的调节和使用	196
实验 3.14 全息照相	201
实验 3.15 双光栅微弱振动实验	207
实验 3.16 光电效应和普朗克常量的测定	212
实验 3.17 光电器件特性的综合测量	217
实验 3.18 半导体泵浦激光器实验	227
第 4 章 设计研究性实验	234
实验 4.1 固体密度的测定	235
实验 4.2 重力加速度的测定	235
实验 4.3 碰撞和动量守恒定律的研究	236
实验 4.4 超声波频率的测量	236
实验 4.5 液体比热容的测定	237
实验 4.6 电阻表的组装	238
实验 4.7 用电位差计校准电流表	238
实验 4.8 电学元件伏安特性的测量	239
实验 4.9 用霍耳效应法测量通电线圈的匝数	239
实验 4.10 利用霍耳效应法测量半导体材料的电学参量	240
实验 4.11 利用霍耳传感器测量重力加速度	241
实验 4.12 用示波器测量电容	241
实验 4.13 简易永磁风力发电机的设计与制作	242
实验 4.14 简易声控开关的设计与制作	242
实验 4.15 用多种方法测量凹透镜的焦距	243

实验 4.16	自组透射式幻灯机	243
实验 4.17	用劈尖法测量细丝的直径	244
实验 4.18	测定未知光波波长及角色散率	244
实验 4.19	测量空气折射率	245
实验 4.20	分光计上的综合设计性实验	245
实验 4.21	液体折射率的测定	246
实验 4.22	内调焦望远镜的组装及放大倍率的测定	246
实验 4.23	阿贝成像原理和空间滤波	247
实验 4.24	θ 调制和颜色合成	247
实验 4.25	激光散斑干涉计量	248
实验 4.26	全息光栅的制作	249
实验 4.27	自组多种干涉光学系统并测量光波波长	249
实验 4.28	可变焦透镜设计	250
实验 4.29	利用白光偏振干涉测量光学玻璃内应力	250
实验 4.30	利用泰伯效应测量光栅常量	251
实验 4.31	液晶电光效应研究	251
实验 4.32	红外通信特性研究	252
实验 4.33	太阳能电池基本特性测量	253
实验 4.34	太阳能电池的应用	253
附表		255
参考文献		263

绪 论

1. 大学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科学. 物理学的概念、规律和理论的形成、建立与发展, 都以物理实验为基础并受到实验的检验. 物理学在自然科学其他领域的广泛应用也离不开实验. 历史上每次重大技术革命都来源于物理学上的重大突破. 热学、热力学研究 (18 世纪下半叶) 导致蒸汽机的发明和广泛应用, 引发了第一次工业革命, 使人类进入了热机、蒸汽机时代. 电磁感应的研究、电磁学理论的建立 (19 世纪中叶) 导致发电机、电动机的发明及无线电通信的发展, 从而引发了第二次工业革命, 人类从此步入了电气化时代. 相对论、量子力学的建立 (1900—1930 年) 使物理学进入了高速、微观领域; 核物理的研究和发展导致核能的释放和应用成为现实; 原子、分子物理的研究和发展导致了激光的发明和应用; 半导体、固体物理、材料科学的研究和发展导致了晶体管、大规模集成电路、新材料、电子计算机的发明和广泛应用. 人们把新能源、新材料、激光技术、信息技术的发展称为第三次工业革命. 物理实验的思想、方法和技术已广泛应用于其他学科和生产实践中, 成为推动科学技术发展的强有力的工具.

大学物理实验是高等理工科学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.

大学物理实验课程覆盖面广, 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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用.

大学物理实验课程的基本任务是:

(1) 培养学生基本科学实验技能, 提高学生科学实验基本素质, 使学生初步掌握实验科学的思想和方法.

(2) 培养学生科学思维和创新意识, 使学生掌握实验研究的基本方法, 提高学生分析能力和创新能力.

(3) 提高学生科学素养, 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、爱护公共财物的优良品德.

通过大学物理实验课程的学习, 培养与提高学生的科学实验能力, 其中包括:

(1) 通过阅读实验教材或资料, 能概括出实验原理和方法要点, 做好实验前的准备工作.

(2) 借助教材或仪器说明书正确使用常用实验仪器, 掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能.

(3) 学会对实验进行误差分析和不确定度评定的基本方法, 正确记录和处理实验数据, 绘制曲线, 分析实验结果, 撰写合格的实验报告.

(4) 完成设计性实验, 为以后独立设计实验方案和解决新的实验课题奠定基础.

(5) 提高进行科学实验工作的综合能力, 包括实际动手能力、分析判断能力、独立思考能力、革新创造能力、归纳总结能力和口头表达能力等。

2. 大学物理实验课程的教学环节

(1) 实验预习

实验前必须认真阅读教材及有关资料, 着重理解实验原理, 明确实验目的, 了解测量方法和主要实验步骤, 并在上课前写好预习报告。预习报告的内容主要包括: 实验名称、实验目的、实验原理 (画出电路图、光路图或设备示意图) 和实验数据记录表格。

(2) 实验操作

首先应根据教材或仪器说明书熟悉仪器, 在教师指导下了解仪器的正确使用方法, 对照仪器明确要测什么物理量, 弄清先测什么、再测什么、最后测什么、如何测等, 做到心中有数, 不可盲目动手。

实验中应集中精力仔细观察、认真思考观察到的物理现象; 正确读数, 及时将采集到的实验数据和观察到的现象如实地记录下来, 尤其是对所谓反常现象更要仔细观察分析, 不要单纯追求“顺利”, 要养成对观察到的现象和所测得的数据随时进行判断的习惯; 在教师指导下, 对实验过程中出现的故障要学会及时排除。

实验结束后, 要将测得的数据和进行数据处理后的实验结果交给教师检查, 检查合格并整理好仪器, 关闭水、电开关后, 方可离开实验室。

(3) 撰写实验报告内容

写实验报告是为了培养和训练学生以书面形式总结工作或报告科研成果的能力, 一份完整的实验报告一般包括以下内容: ① 实验名称和实验者班级、姓名、学号、日期等; ② 实验目的; ③ 实验仪器及装置 (仪器应标明规格、型号); ④ 实验原理 (包括简要的实验理论依据、实验方法, 应画出实验的原理图、电路图、光路图等, 并列出的测量和计算所依据的公式, 设计性实验要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的仪器等); ⑤ 主要实验步骤 (对实验中关键性的调整方法和测量技巧应着重写出); ⑥ 完整的实验数据; ⑦ 数据处理及结果分析 (要求写出数据处理的主要过程、曲线绘制、误差估算和不确定度评定, 并给出最后结果); ⑧ 误差分析; ⑨ 总结讨论 (包括对实验现象的分析、实验中存在的问题、实验改进建议、回答思考题等)。

实验报告要求努力做到内容简明扼要, 文理通顺, 书写清晰, 字迹端正, 数据记录整洁, 图表合格。实验报告一律用物理实验报告纸书写。

第 1 章 物理实验的基本知识

所谓实验,就是在理论思想指导下,由实验者选用一定的仪器设备,在一定的条件下,人为地控制或模拟自然现象,使它以比较纯粹和典型的形式表现出来,再通过对某些物理量的观察和测量去探索客观规律的过程.在实践中,由于实验方法的不完善,且仪器都有一定的准确度,测量条件并非总能满足理论上假定的或测量仪器所规定的使用条件,因此任何测量都不可能是绝对准确的.进行一项实验,除了要懂得如何正确获取应有的数据外,正确处理实验中得到的数据,正确地表达结果,并给出对测量结果的可靠性评价(合理估计出误差范围或不确定度),也是实验工作者必须掌握的基本知识.

本章将针对上述问题,通过实例,简要地介绍物理实验的基本知识.本章主要内容包括:测量与误差、误差的处理、实验结果的不确定度、有效数字及其运算、数据处理的基本方法等.

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

1. 测量

所谓测量,就是将待测量与选作法定标准的同类计量单位进行比较,从而确定待测量是标准单位的若干倍,这一过程称为测量.显然,测量值(结果)应包含数值和单位两部分,两者缺一不可.我国采用的单位是以国际单位制为基础的法定计量单位.测量得到的数值称为测量值,用“ x ”表示.

2. 测量的分类

(1) 直接测量和间接测量

用测量仪器能直接获得结果的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量,直接测量是实验中最基本、最常见的一种测量方式.例如,用米尺量物体的长度,用天平称物体的质量等.

实际上很多物理量是不能用仪器直接测量的,往往是通过若干可直接测量的物理量经过一定的函数关系运算后获得结果的,这种测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量.如测圆柱体的密度时,可以用游标卡尺或螺旋测微器量出它的高度 h 及直径 d ,用天平称出它的质量 m ,则圆柱体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

值得指出的是,同一物理量由于选用的测量方法不同,它可以是直接测量量,也可以是间接测量量.例如,采用上述方法测出的圆柱体体积为间接测量量,若改用量筒排水法测量,它又成为直接测量量了.

(2) 等精度测量与不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次的条件都相同(同一观察者、同一组仪器、同一种实验方法、同一实验环境等),测得一组数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,尽管各次测得的结果有所不同,我们没有充足的理由可以判断某次测量比另一次测量更精确,这样只能认为每次测量的精确程度是相同的,于是将这种同等精确程度的测量称为等精度测量,测得的一组数据称为测量列。在诸测量条件中,只要有一个条件发生变化,这时所进行的测量就成为不等精度测量。

严格来讲,在物理实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某一条件的变化对测量结果影响不大,甚至可以忽略时,仍可视这种测量为等精度测量。在本章中,我们除了特别指明外,所讨论的测量均为等精度测量。

1.1.2 误差及其分类

1. 真值与误差

(1) 真值

真值:是指在一定的客观条件下,被测量的物理量具有的一个客观的真实数值,用“ X ”表示。

(2) 误差

误差:测量值与真值之差称为测量量的测量误差,简称“误差”。误差的大小反映了测量的准确程度。误差的大小可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

绝对误差为测量值与真值之差,即

$$\Delta x = x - X \quad (1.1-1)$$

相对误差 = $\frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}}$, 即

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (1.1-2)$$

一般表示测量值的误差用绝对误差,评价测量的精确程度则需用相对误差,误差可正可负。

测量的目的就是力图得到真值。在具体测量时,由于各种条件限制(仪器、测量者、环境条件、实验方法等),测量不可能绝对准确。由于真值不能确切地知道,测量误差实际上也不能确切地知道,只能对它进行合理的估算。有关真值,可以从以下几种情况得出。

(1) 理论值。如三角形3个内角的和为 180° 等。

(2) 公认值。世界公认的一些常量值,如普朗克常量等。

(3) 相对真值。用准确度高一个数值级的仪器校准的测定值。规定:校准仪器的误差至少应比测量仪器的误差小一个数量级。

(4) 测量的算术平均值。对一个不变的量进行 n 次测量后,其算术平均值可视为真值的最佳近似值。

2. 误差的分类

为了得到尽可能接近真值的测量结果,测量者必须分析和研究误差的来源和性质,有针对性地采用适当措施,尽可能地减小误差。

误差按其特征和表现形式可以分为系统误差、随机误差(偶然误差)两大类。

(1) 系统误差及其来源

系统误差的特点是,在同一条件下(实验方法、仪器、环境和观察者等不变),每次测量同一物理量时,误差的大小和符号始终保持恒定或按一定的规律变化。

系统误差的来源有以下几个方面:

- a. 仪器的固有缺陷. 如刻度不准, 零点没调准, 仪器水平或竖直未调整好等。
- b. 实验方法不完善, 实验所依据的原理不尽完善, 公式的近似性或实验条件达不到理论公式所要求的条件而引起的误差. 如称重时未考虑空气浮力, 忽略摩擦、接触电阻等。
- c. 环境条件的变化. 外界环境(如温度、湿度、电磁场等)发生变化或不满足测量仪器规定的使用条件所造成的误差. 如标准电池是以 20°C 时的电动势作为标准值的, 若在 5°C 时使用而不加修正就引入了系统误差。

系统误差的数值和符号(正、负)一般来说是定值或按某种规律变化, 因此系统误差是可以被发现、减小、消除或修正的, 但不能通过多次测量来减小或消除. 对操作者来说, 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和符号的系统误差称为可定系统误差; 对大小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; 而后者一般难以作出修正, 只能估计出它的极限范围。

(2) 随机误差(偶然误差)及其特征

在一定条件下, 每次测量同一物理量时, 测量值仍会出现一些似乎毫无规律的起伏, 这种大小和符号随机变化的误差, 称为随机误差, 又称偶然误差. 随机误差可能的来源是: 人们的感官(如听觉、视觉、触觉)的分辨能力不尽相同, 表现为每个人的估读能力不一致; 外界的干扰(如温度不均匀、振动、气流、噪声等)既不能消除又无法精确估算; 所有影响的次要因素不尽全知等, 这种误差是无法控制的. 随机误差的出现, 就某一测量值来说是没有规律的, 其大小和方向都是不能预知的, 但在同一条件下

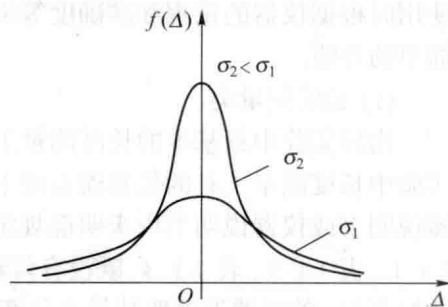


图 1.1-1 随机误差的正态分布

对同一物理量进行多次测量时, 随机误差的分布显示出一定的统计规律, 大多数情况下服从正态分布, 如图 1.1-1 所示. 横坐标表示误差 $\Delta = x - X$, 纵坐标表示与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\Delta)$. 应用概率论的数学方法可导出

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1-3)$$

式 (1.1-3) 中 σ 的数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}} \quad (1.1-4)$$

式 (1.1-4) 表示 σ 值是无穷多次测量所产生的随机误差的方均根值, 称为标准误差. 服从正态分布的随机误差具有下面一些特征:

- a. 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。

- b. 对称性. 绝对值相等的正负误差出现的概率相同.
- c. 有界性. 在一定的测量条件下, 误差的绝对值不超过一定限度.
- d. 抵偿性. 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$$

(1.1-5)

3. 仪器误差

任何测量都需要借助一定的仪器或装置进行, 任何仪器在制造或装配过程中都难免有一些缺陷, 如轴承摩擦、游丝不匀、分度不匀、检测标准本身的误差等, 即使在正确使用情况下, 这种缺陷也会带来误差. 仪器误差或允许误差限是在正确使用仪器的条件下, 测量所得结果和被测量的真值之间可能产生的最大误差, 它包含了在规定条件下可定系统误差、未定系统误差和随机误差的总效果. 如数字仪表是通过对被测信号进行适当放大 (或衰减) 后作量化计数给出数字显示的, 其中由于放大 (或衰减) 系数和量化单位不准造成的误差属于可定系统误差, 来自测量过程中电子系统的信号漂移而产生的误差属于未定系统误差, 而量化过程的尾数截断造成的误差又具有随机误差的性质.

对照通用的国家标准, 按允许出现的误差的大小, 国家计量局将仪器分级称为准确度等级. 使用时根据仪器的量程和准确度等级就可计算出该仪器误差. 结合物理实验的特点, 下面作一简单的介绍.

(1) 长度测量类

物理实验中最基本的长度测量工具是米尺、游标卡尺和螺旋测微器 (又称千分尺). 在物理实验中长度测量工具的仪器误差按下列办法确定: 仪器说明书已规定的取其给定的数值; 无仪器说明书或仪器说明书中未明确规定的, 查有关标准和规定. 本书摘录了其中的一部分, 见表 1.1-1、表 1.1-2、表 1.1-3. 既没有仪器说明书, 又不能查表得出的, 通常约定, 不可估读仪器 (如游标卡尺) 的仪器误差取其最小分度值, 而可估读仪器 (如钢直尺、螺旋测微器) 的仪器误差取其最小分度值的一半.

表 1.1-1 钢直尺和钢卷尺的允许误差

钢直尺		钢卷尺	
测量范围/mm	允许误差/mm	准确度等级	示值允许误差
1 ~ 300	±0.10	I 级	±(0.1mm + 0.2L)
300 ~ 500	±0.15	II 级	±(0.3mm + 0.2L)
500 ~ 1000	±0.20	注: 式中 L 是以米为单位的长度, 当长度不是米的整数倍时, 取最接近的较大的整“米”数	
1000 ~ 1500	±0.27		
1500 ~ 2000	±0.35		

(2) 质量测量类

物理实验中称衡质量的主要工具是天平. 天平的仪器误差应当包括示值变动性误差、分度值误差和砝码误差等. 单杠杆天平按精度分为十级, 砝码的精度分为五等, 一定精度等级的天平要配用等级相当的砝码. 在简单实验中, 通常取天平分度值的一半作为仪器误差. 表 1.1-4 给出了物理实验中常用的几种物理天平的感量及其允许误差.