



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验教程 (第2版)

主 编 竺江峰
副主编 鲁晓东 夏雪琴



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验教程 (第2版)

主 编 竺江峰
副主编 鲁晓东 夏雪琴



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材在编写中着重推广手把手演示实验项目的基础层实验教学；循序渐进地鼓励学生自主实验，积极思考，独立完成实验的提高层实验教学；积极推进培养学生研究、创新性思想学习的设计（研究）层学习的层次化实验教学理念。

本教材共分七章，包括绪论、测量误差与实验数据处理、设计性（研究性）实验基本知识、基础性实验 16 个、综合性实验 16 个、设计性（研究性）实验 29 个、数字化智能探究实验 12 个。

本教材可作为高等理工科院校非物理专业的大学物理实验课程教学用书，也可作为实验工作者和其他科技工作者的参考资料。

图书在版编目（C I P）数据

大学物理实验教程 / 竺江峰主编. -- 2版. -- 北京：
中国水利水电出版社, 2014.8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-2426-2

I. ①大… II. ①竺… 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(2014)第201192号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 大学物理实验教程（第2版）
作 者	主编 竺江峰 副主编 鲁晓东 夏雪琴
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23印张 546千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷 2014年8月第2版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	46.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

第2版前言

自2011年9月本书第1版出版以来,由于实验仪器的更新和换代,同一实验项目的仪器结构和外形有所改变,实验操作过程也随之改变,为了更好地结合实验仪器编写教材,我们在本书第1版的基础上进行修订,并对第1版中出现的缺陷进行了必要的修补和匡正。

本书第2版保持第1版的体系结构,重点改写了第四章实验四、实验十一、实验十二、实验十四、实验十五;第五章实验三、实验六、实验十、实验十一、实验十三;第六章实验六。

参加本教材编写的有:竺江峰(第一章、第二章、第三章、附录、参考文献、第五章实验三至实验七,第六章实验一至实验六);屠华、鲁晓东(第四章实验八、实验九,实验十一,第五章实验八至实验十,第六章实验八至实验十九,实验二十四);夏雪琴(第四章实验一至实验六,第五章实验一、实验二);李金玉、芦立娟(第四章实验十五,第五章实验十二至实验十六,第六章实验七、实验二十至实验二十三、实验二十五至实验二十九);尹会听(第四章实验七、实验十、实验十二,第七章实验一至实验十一),李雪梅、赵仲飏(第四章实验十三、实验十四、实验十六,第五章实验十一,第七章实验十二),教材的体系框架、统稿和定稿由竺江峰完成。

本教材在编写过程中,参考了大量我国物理实验教学工作者编著的教材、著作和最新研究成果,有些已在参考书目或在参考文献中列出,有些未能一一列出,在此向他们一并表示衷心的感谢!

本教材第2版教材比第1版教材有明显的改正和完善,但由于作者水平和条件有限,教材中难免有不足或疏漏之处,期望广大读者提出建议批评,以便本书得以进一步完善。

编者

2014年6月

第1版前言

本教材是根据浙江海洋学院 10 余年大学物理实验教学实践和省级物理实验教学示范中心建设的经验，结合层次化实验教学模式编写而成。本教材可作为高等理工科院校非物理专业的大学物理实验课程教学用书，也可作为实验工作者和其他科技工作者的参考资料。

本教材在编写中着重以手把手，演示实验项目的基础层实验教学；循序渐进地鼓励学生自主实验，积极思考，独立完成实验的提高层实验教学；积极推进培养学生研究、创新性思想学习的设计（研究）层学习的层次化实验教学理念。每一个实验都提供了较为详尽的背景介绍，实验项目中所使用仪器的实物照、实验原理、实验过程及思考题等方面的信息，以便使学生在课前能够比较系统地阅读和预习实验项目，从而达到使学生对要研究的问题、解决问题的思路、实验内容的具体展开等做好充分的准备，这样学生才有可能独立完成实验。

本教材共分七章，第一章“绪论”介绍了大学物理实验课的基本要求和基本程序，实验规则等。第二章“测量误差与实验数据处理”介绍了贯穿在整个实验教学过程所必须掌握的“误差与有效数字”以及“数据处理方法”等的基本知识，并用以指导和贯彻到以后的所有实验项目中去。第三章“设计性（研究性）实验基本知识”介绍了科学实验的基本程序、实验方案的科学制定、科技论文如何撰写等，不但对于设计性（研究性）实验的设计和实验有指导意义，即使对于学生做毕业论文设计、撰写毕业论文、进行科学研究也是有很大帮助的。第四章“基础性实验”共十六个实验，主要是学生在中学时代疏于动手能力而设置的单一验证性实验，通过老师的手把手、示范等系列教学手段，尽快让学生掌握大学物理实验过程、实验数据处理方法和实验报告撰写的基本能力。第五章“综合性实验”共十六个实验，每个实验均涉及两个领域以上的技术，并把个别近代物理实验纳入其中。要求学生在基础层实验学习的基础上，开阔眼界及思路，提高学生独立自主、分析问题和解决问题的能力，发挥学生对实验方法和技术的综合运用水平。第六章“设计性（研究性）实验”共二十九个实验，要求学生自己设计实验方案并基本独立完成实验全过程，对进一步提高学生的综合实验能力与科学研究的素质及加强学生创新能力的培养，提供了充分的材料。第七章“数字化智能探究实验”共十二个实验，由十余种智能传感器、数据采集处理软件及辅助实验装置组成，构成了完善的数字化探究实验系统。主要帮助学生及

时了解现代技术相关的实验内容，掌握对各类传感器的使用及功能的了解。目前国内外把传感器技术列为尖端技术和重点发展技术。传感技术是物理学与经济建设间的桥梁，是检测技术的基础，是仪器仪表及自动化控制的核心。作为当代大学生，学习、掌握、应用传感器技术是解决实际问题的有力工具。

参加本教材编写的有：竺江峰（第一章，第二章，第三章，附录，参考文献，第五章实验三～实验七，第六章实验一～实验六）；鲁晓东（第四章实验八、实验九、实验十一，第五章实验八～实验十，第六章实验八～实验十九，实验二十四）；夏雪琴（第四章实验一～实验六，第五章实验一、实验二）；芦立娟（第四章实验十五，第五章实验十二～实验十六，第六章实验七、实验二十～实验二十三、实验二十五～实验二十九）；尹会听（第四章实验七、实验十、实验十二，第七章实验一～实验十一）；赵仲飏（第四章实验十三、实验十四、实验十六，第五章实验十一，第七章实验十二），教材的实验仪器实物图拍摄由屠华完成，教材的体系框架、统稿和定稿由竺江峰完成。

本教材在编写过程中，参考了大量我国物理实验教学工作者编著的教材、著作和最新研究成果，有些已在参考文献中列出，有些未能一一列出，在此向他们一并表示衷心的感谢！

由于编者水平和条件有限，难免有不妥或疏漏之处，欢迎读者提出批评指正。

编者

2011年7月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第一章 绪论	1
第一节 物理实验课的地位与作用、目的和要求	1
第二节 物理实验课的三个基本环节	2
第三节 物理实验规则	4
第二章 测量误差与实验数据处理	5
第一节 测量与测量误差	5
第二节 误差的分类及处理方法	6
第三节 评价测量结果的“三度”	8
第四节 测量的不确定度	9
第五节 直接测量结果的表示	11
第六节 间接测量结果的表示	12
第七节 有效数字及其运算规则	14
第八节 数据处理的基本方法	16
第九节 练习题及参考答案	21
第三章 设计性（研究性）实验基本知识	30
第一节 科学实验的基本程序	30
第二节 设计性（研究性）实验方案的制订	32
第四章 基础性实验	35
实验一 固体密度的测定	35
实验二 重力加速度的测定	51
实验三 动量守恒定律的实验研究	57
实验四 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	63
实验五 固体线膨胀系数的测定	68

实验六	液体表面张力系数的测量	73
实验七	用线式电位差计测量电动势	77
实验八	电表的改装和校准	81
实验九	二极管伏安特性测量	88
实验十	用惠斯通电桥测电阻	91
实验十一	用模拟法测绘静电场	107
实验十二	示波器的使用	113
实验十三	薄透镜焦距的测定	132
实验十四	等厚干涉——牛顿环	140
实验十五	分光计调整和三棱镜顶角的测量	144
实验十六	光栅的衍射	154
第五章	综合性实验	158
实验一	用三线摆法测定物体的转动惯量	158
实验二	用动态悬挂法测定杨氏模量	163
实验三	固体热导率的测量	168
实验四	气体热导率的测量	174
实验五	空气比热容比 C_p/C_v 的测量	182
实验六	声速的测量	185
实验七	GPS 水下超声定位实验	193
实验八	用非平衡电桥测电阻	199
实验九	霍尔效应实验	211
实验十	密立根油滴仪测油滴电荷	217
实验十一	迈克尔逊干涉仪测氦氖激光的波长	223
实验十二	光电效应及普朗克常数的测定	229
实验十三	光速的测量	238
实验十四	光栅光谱仪测光谱的波长	246
实验十五	偏振光实验	256
实验十六	全息照相	264
第六章	设计性(研究性)实验	269
实验一	测量不规则物体的密度	269
实验二	不同方法重力加速度的测定	269
实验三	机械能守恒定律的实验研究	270
实验四	黏滞性阻尼常数的测定	271
实验五	简谐振动的研究	272
实验六	固体热导率测定的研究	273
实验七	眼镜镜片透射率的测定	274
实验八	电池特性的研究	276

实验九	变阻器的限流和分压特性	277
实验十	多量程电表的研制	279
实验十一	用示波法显示稳压二极管的伏安特性曲线	281
实验十二	电桥灵敏度研究	283
实验十三	半导体温度计的设计与制作	284
实验十四	微小长度变化量的电测法	286
实验十五	交流电桥与电容、电感的测量	287
实验十六	RLC 电路谐振特性的研究	289
实验十七	RLC 串联电路稳态特性的研究	292
实验十八	电学综合设计实验	294
实验十九	E - Blocks 创新应用实验	295
实验二十	自组显微镜或望远镜	297
实验二十一	用分光计测反射光的偏振特性	298
实验二十二	用双棱镜测量光的波长	299
实验二十三	测量金属细丝的直径	300
实验二十四	霍尔效应及其应用	302
实验二十五	用迈克尔逊干涉仪测量白光光源的相干长度	303
实验二十六	测量压电陶瓷的电致伸长系数	304
实验二十七	等厚干涉的研究及应用	305
实验二十八	全息照相的研究	306
实验二十九	光源光谱的研究	307
第七章	数字化智能探究实验	310
实验一	计算机控制受迫振动——玻尔摆实验	310
实验二	计算机控制铁磁滞曲线实验	318
实验三	计算机控制谐振管实验	324
实验四	计算机控制能量转换——发电机实验	327
实验五	计算机控制亥姆霍兹振荡器的共振频率实验	328
实验六	计算机控制转矩和角动量实验	330
实验七	计算机控制亥姆霍兹线圈实验	333
实验八	计算机控制热膨胀实验	335
实验九	计算机控制大振幅摆实验	337
实验十	计算机控制不同物体的转动惯量实验	340
实验十一	计算机控制韦伯福斯摆实验	342
实验十二	计算机控制光强与距离实验	344
附录	国际单位制和某些常用物理数据	346
附表一	单位制和单位	346
附表二	国际单位制中具有专门名称的导出单位	347

附表三	常用物理量常数表.....	348
附表四	在 20℃ 时常用地体和液体的密度	349
附表五	在标准大气压下不同温度的水的密度.....	349
附表六	在海平面上不同纬度处的重力加速度.....	350
附表七	在 20℃ 时某些金属的杨氏模量	350
附表八	固体的线膨胀系数.....	350
附表九	固体的比热容.....	351
附表十	液体的比热容.....	351
附表十一	铜—康铜温差电偶的温差电动势.....	351
附表十二	在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数	352
附表十三	在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数.....	352
附表十四	液体的黏滞系数.....	352
附表十五	蓖麻油在不同温度时的黏滞系数.....	353
附表十六	某些金属和合金的电阻率及其温度系数.....	353
附表十七	不同温度时干燥空气中的声速.....	353
附表十八	常温下某些物质对空气的折射率.....	354
附表十九	常用光谱灯和激光器的可见谱线波长.....	354
参考文献		355

第一章 绪 论

第一节 物理实验课的地位与作用、目的和要求

一、物理实验课的地位与作用

物理学是一门实验科学，无论是物理规律的发现，还是物理理论的建立，都必须以严格的物理实验为基础，并接受实验的检验。例如，杨氏干涉实验使光的波动学说得以确立；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦电磁场理论获得普遍承认；密立根油滴实验验证了电荷的不连续性，并精确测定了基本电荷的电量等。物理学史清楚地表明，正是在实验和理论两方面的相互推动和密切结合下，物理学才得以发展。

当前，物理实验技术和实验仪器广泛地应用于科学技术和生产部门中。现代科学实验工作常与物理学中的基本测量有关，与常用的实验仪器、仪表和量具的使用有关，因此在进行任何复杂的实验工作之前，实验工作者必须具有良好的实验基本功训练。通过物理实验，学生可以初步学到一些物理实验知识、方法和技能，获得实验基本功的良好训练。

科技是第一生产力的观点现在已被广泛接受，但要发展科技、应用科技，首先必须做到按科学规律办事，必须要有科学性，即要有科学的思维、科学的方法、科学的作风和态度，必须要有探索精神。这些恰恰可以通过物理实验得到最基本、最充分的训练。

二、物理实验课的目的和要求

大学物理实验课的要求和中学物理实验课有根本不同，中学物理实验课主要是为了配合课堂教学，起演示和验证理论的作用，实验时学生按规定方法、步骤进行测量，数据填入规定的表格中，不强调现象的观察和误差分析，学生的主动性发挥少。

大学物理实验课是一门独立的课程，着重在实验技能、基本观念和对素质、能力的培养，更强调学生独立性和创造性的发挥，强调对客观现象的观察和对误差、结果的分析。它在培养学生严谨的治学态度、积极活跃的创新意识、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。

物理实验课的基本要求是：

(1) 通过观察、分析实验现象和测量物理量，学习物理实验的基础知识，加深对物理现象和规律的认识，为后续课程打下基础。

(2) 通过学习物理实验的基本方法，进行实验的基本训练，使学生学会基本物理量的测量、实验条件的保证、实验仪器的正确使用、误差因素的估计和消除、实验中现象的观察和分析、数据的处理方法等。

(3) 培养和提高实验素质。

1) 树立三种观念。定量观念 (是解决实际问题的先导), 误差观念 (是提高实验质量的核心), 实践观念 (要求一切通过试验, 不空谈)。

2) 提高六种能力。

独立预习能力: 能够自行预习与钻研实验教材和资料, 必要时自行查阅相关文献资料, 掌握实验原理及方法, 做好实验前的准备。

独立实验操作的能力: 在实验教师的指导下, 能够运用教材或仪器说明书正确使用实验仪器并掌握实验原理及方法, 逐步形成独立自主实验的基本能力。

分析与研究的能力: 能够根据实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验现象和结果进行分析、判断、归纳与综合, 通过实验掌握对物理现象和物理规律进行研究的基本方法, 具有初步的分析与研究的能力。

书写表达能力: 掌握科学与工程实践中普遍使用的数据处理与分析方法, 建立误差与不确定度的概念, 正确记录和处理实验数据, 绘制曲线, 分析异常现象、误差影响因素及说明实验结果, 撰写合格的实验报告和科技小论文, 逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

理论联系实际的能力: 能够在实验中发现问题、分析问题并学习解决问题的科学方法, 逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

创新与实验设计的能力: 能够独立完成综合性实验, 并能进行具有初步的研究设计性或独创性内容的实验, 逐步培养研究、创新能力。

3) 培养严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度。

第二节 物理实验课的三个基本环节

一、实验前预习

(1) 上一个实验结束后, 在离开实验室前, 要把下一个实验的实验仪器设备认识一下, 对之有一感性认识。

(2) 通过阅读实验教材, 明确实验目的和任务, 了解实验原理, 弄清实验内容, 初步了解仪器的使用方法和实验步骤, 重点记住操作注意事项。

(3) 简要地写出预习报告, 主要内容包括: 实验的具体任务; 实验数据处理的简要计算公式及其适用条件, 以及如何在实验过程中得以保证; 合理地设计原始数据记录表格。

(4) 在实验开始前, 在教师的指导下进行讨论, 检查预习情况, 明确应测量的内容、实验步骤及注意事项。

二、实验操作

(1) 认真检查并熟悉测量仪器, 记下主要测量仪器的型号和主要参数 (测量范围和仪器误差), 填写实验仪器使用登记表。

(2) 根据仪器使用说明, 正确安装和调整仪器, 经检查无误后, 按实验程序进行

实验。

(3) 实验时必须思路清楚, 强调规范操作, 注意操作的安全性; 实验数据如实记录在原始数据表中, 一般每个物理量至少测 5 次; 在实验中要有意识地培养自己使用和调节仪器的本领、精密正确的测量技能、善于观察和分析实验现象的科学素养、整洁清楚地做好记录(包括实验中发现的问题、观察到的现象、原始测量数据等)的良好习惯, 并逐步培养自己研究、创新、设计实验的能力。

(4) 实验中和实验完毕要及时分析和整理数据, 如有问题, 应该重测或补测。原始数据(不能用铅笔记录实验数据)最后送教师签字后, 将电源关掉, 将仪器、凳子归整好, 经教师检查同意后离开实验室。

(5) 严格遵守实验室规则, 维护实验室整洁, 爱护实验仪器。仪器如有损坏, 要及时报告教师, 凡属学生责任事故者, 将酌情赔偿。

三、实验报告

实验报告是实验工作的最后环节, 是整个实验工作的重要组成部分, 是对前一段工作的总结和永久的文字保存。通过撰写实验报告, 可以锻炼自己的写作能力和总结工作的能力。

写实验报告字体要端正, 文字要简练, 数据要齐全, 图表要规范, 计算要正确, 分析要充分、具体、定量。

实验报告除填写实验日期、姓名、班级、学号等项外, 还应包括以下几个部分:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的和任务。

(3) 实验原理: 简要计算公式及其适用条件, 电路图或光路图。

(4) 实验仪器: 仪器的名称、型号及主要参数(测量范围和仪器误差)。

(5) 数据及处理。

1) 记录原始数据(实验时经教师签过字的原始数据不得修改, 并随报告一起上交)。

2) 测量的原始数据和多次重复性简单计算的数据尽量一起列成表格, 并注意数据的有效数字位数。

3) 单次测量的数据要同时标出不确定度; 多次测量的数据求出平均值后, 同时求出不确定度, 并标在平均值后面。

4) 较复杂的间接测量的计算要有计算过程, 列出算式, 并同步计算不确定度。

5) 用科学计数法写出最后的实验结果。

6) 数据和不确定度都要有单位, 且单位要统一(原始数据的单位用仪器读数的单位, 计算时统一换成通用的国际单位)。

(6) 结果和误差分析: 结合观察到的现象和得到的实验结果进行结果的可靠性讨论、结果分析、和其他结果比较, 还有误差影响因素讨论、系统误差修正等。分析尽可能具体、定量或半定量, 切忌空谈。

(7) 问题讨论: 实验的改进意见, 创新见解, 问题解答等。

要按时交实验报告, 过时无故不交者无得分。如发现有抄袭报告或修改原始数据现

象，将严肃处理。

第三节 物 理 实 验 规 则

- (1) 进实验室必须带预习实验报告和穿鞋套。
- (2) 课前应做好预习，实验时要独立操作并注意保持实验室安静。
- (3) 实验时，首先检查实验仪器是否正常，如发现实验仪器不正常或缺少实验材料等情况，应及时向指导教师或实验室管理人员提出。
- (4) 爱护仪器设备，如有损坏、丢失等应立即报告带教老师。由于粗心大意或违反操作规程而损坏仪器者，除应按规定赔偿外，严重者还应做出书面检讨。
- (5) 完成实验，必须填写实验仪器使用登记本，测量数据要经指导教师审查并签字。离开实验室前，应将仪器整理还原，桌面收拾整洁，凳子摆放整齐。

第二章 测量误差与实验数据处理

第一节 测量与测量误差

一、测量

用实验的方法找出物理量量值的过程称为测量。量值是指用数和合适的单位表示的量，如 2.0m、2.6kg、 $8.426 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 等。

根据测量方法，测量可分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量。凡使用测量仪或量具直接测得（读出）被测量数值的测量，称为直接测量。如用秒表测量时间、用米尺测量长度、用温度计测量温度等。

(2) 间接测量。许多物理量不能用仪器直接测量，常常需要根据一些物理原理、公式，由直接测量量计算出所要求的物理量，这种用间接的方法得到被测量数值的测量，称为间接测量。如测量铜棒的密度时，由直接测量测出圆柱体铜棒的质量 m 、外径 d 和高度 h ，根据公式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 就可算出其密度 ρ 。铜棒密度的测量即为间接测量。

二、测量误差的客观性和普遍性

(1) 误差存在于一切测量中，而且贯穿测量过程的始终。因此，对每次测量的整个测量过程中都要注意分析各种可能的误差影响因素，注意观察测量过程产生的各种物理现象，分析它们对测量结果的影响，误差的影响也包括对理论计算结果的影响。一方面理论本身有局限性（有其适用条件和范围）；其次，计算的参量本身也是测量量，是有测量误差的，由此计算出来的应变变量自然也是有误差的，如转动惯量的计算。

(2) 误差可以通过各种途径不断减小，但无法绝对避免。为此，要对众多的影响因素至少要进行半定量的估计，以便找出主要误差影响因素，采取措施重点予以减小。

(3) 误差无法确知，但可进行合理的估算（估算的方法将在下面进行介绍）。

三、误差的定义

1. 真值与误差

所谓真值，就是想要获得的、反映事物本身特性的物理量的具有客观真实的数值。但实验测量的结果和客观的真值之间总存在一定的差异，把测量结果与真值之间的偏离称为测量误差，简称误差。测量误差的大小反映认识接近于客观真实的程度。

测量误差定义为测量值 x 与真值 x_0 之差，以 Δ_x 表示，即

$$\Delta_x = x - x_0 \quad (2-1-1)$$

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。

2. 绝对误差与相对误差

式(2-1-1)中的 Δ_x 是以误差的绝对数值(不是绝对值)来表示测定值的误差，称为绝对误差。为了评价测量的精确程度，引入相对误差的概念，即

$$E_r = \frac{\Delta_x}{x_0} 100\% \quad (2-1-2)$$

绝对误差和相对误差的关系是

$$\Delta_x = \frac{\Delta_x}{x_0} x_0 = E_r x_0 \quad (2-1-3)$$

一般表示测定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。

第二节 误差的分类及处理方法

误差按其性质和产生原因的不同，可分为随机误差、系统误差和过失误差三类。不同性质的误差，其处理的方法也不相同，所以，处理误差首先要分清误差的性质。测量结果的总误差，应是这三类误差的总合。

一、随机误差

在相同的条件下，多次测量同一物理量时，如果误差的符号时正时负，其绝对值时大时小，没有确定的规律，这种误差称为随机误差。

随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响。其主要来源有：环境的因素，如温度、湿度、气压的微小变化等；观测者的因素，如瞄准、读数的不稳定等；测量装置的因素，如零件配合的不稳定性，零件间的摩擦等。

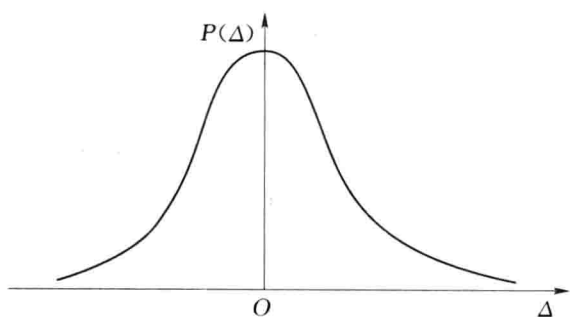


图 2-2-1 随机误差的分布
(横坐标表示绝对误差，纵坐标表示其误差出现的概率)

1. 随机误差的特点

随机误差的特征是误差的随机性。如果对某一物理量只进行一次测量，它的随机误差是没有规律可循的；但如果对它进行足够多次的测量，根据统计理论可知，随机误差的分布服从正态分布(高斯分布)，如图 2-2-1 所示，它有如下特点：

- (1) 小误差比大误差出现的概率大，在 0 处达到极大；极大处两边单调下降，而非常大的正、负误差出现的概率趋于 0。
- (2) 绝对值相等、符号相反的正、负误差出现的概率相等。
- (3) 各种误差出现的总概率等于 1。
- (4) 误差分布离散性的大小，可以用来估算随机误差的大小。

2. 对测量中随机误差的估算

(1) 在多次测量时, 正负随机误差大致可以相互抵消, 因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响, 但不能完全消除。

(2) 测量值的分散程度直接体现随机误差的大小, 测量值越分散, 测量的随机误差就越大。因此, 必须对测量的随机误差作出估计才能表示出测量的精密度。

科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。例如, 在相同条件下, 对某物理量 x 进行 n 次重复测量, 其测量值分别为 x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_n 。根据误差的统计理论, 其算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值, 称为测量的最佳值, 即

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-2-1)$$

因而用 $\bar{x}$ 作为被测量真值的最佳估计。当测量次数无限增多时, $\bar{x}$ 趋近于真值。测量值 x_i 的分散性可用实验标准偏差 S_x 来表征, S_x 用下面的贝塞尔公式来计算

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

S_x 的值直接体现了随机误差的分布特征。 S_x 值小表示测量值很密集, 即测量的精密度高; S_x 值大表示测量值很分散, 即测量的精密度低。

二、系统误差

在相同的条件下, 多次测量同一物理量时, 如果误差的大小和正负号总保持不变或按一定的规律变化, 这种误差称为系统误差。

产生系统误差的主要因素包括: ①测量方法, 如单摆的周期公式是近似公式, 伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等; ②仪器, 如天平的两臂不等长, 千分尺的零点不准等; ③环境, 如测磁体磁场时受到地磁场的影响, 在 30°C 时使用 20°C 时标定的标准电池等; ④观测者, 如有人读数时有偏大 (或偏小) 的痼癖, 有人按秒表时总是滞后等。

系统误差有些是定值的, 如千分尺的零点不准; 有些是积累性的, 如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时, 其测量值就小于真值, 误差随测量长度成比例地增加; 还有些是周期性变化的, 如停表指针的转动中心与表面刻度的几何中心不重合, 造成偏心差, 其读数误差就是一种周期性的系统误差。

系统误差是测量误差的重要组成部分, 发现、估计和消除系统误差, 对一切测量工作都非常重要。这种误差的特征是误差的确定性, 不能通过多次测量来发现、表征和消除。但它有其一定的内在规律性, 消除的方法是找出它的影响规律, 对测量值进行修正, 这正是实验科学的基本任务。为了找出系统误差的影响规律, 往往要做一系列的补充实验。

在物理实验中, 大多数情况下, 很多系统误差的影响规律无法确知, 自然也无法对它们进行修正, 从而无法消除这些误差, 而这些系统误差往往构成实验中的主要误差部分而不能略去。如果可以估计其上限, 在此上限内, 这些误差的存在又尚在实验要求容许范围内, 则不必把它们的影响规律研究得十分清楚, 也不必对此进行系统误差修正, 而是把它