普通高等教育“十一五”国家级规划教材

北京高等教育精品教材

大学物理实验教程

第2版

吴平◎主编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
北京高等教育精品教材

大学物理实验教程

第2版

主　编　吴　平
参　编　张师平　赵雪丹
陈　森　孙明明
丁红胜

机械工业出版社

本书是在北京科技大学物理系多年物理实验教学实践的基础上编写的，融入了大量近年来的物理实验教学研究成果和科学研究成果，集中了物理系实验教师和实验技术人员的集体智慧。

全书共分为7章，包括测量误差与实验数据处理的知识与方法，以层次划分的基础实验、综合性实验、设计性（研究性）实验和应用物理实验。本书所有实验内容都进行了精心编排与反复教学实践的锤炼，注重采用实验手段教授物理，强化学生的自主实验和探索研究。书中设有“预习提示”栏目，提出了学生预习时要思考和搞清楚的基本问题或关键问题；还设有“讨论”栏目，提示学生对实验中观察到的实验现象和结果进行分析、讨论和评价，激励学生展示他们的独特视点、个性化思考和创造性思维；各实验的最后设有教师根据多年的教学实践提出的“研究性题目”栏目，希望由此能逐步地培养学生的研究意识，并给学生更多自主探索科学的自由空间。

本书配套设计与制定了与主、客观评价相结合的网络化实验报告智能评判系统，有力地控制了实验报告的评判质量，促进了教学目标的落实。

本书为高等院校工科类各专业的基础物理实验教学用书或参考书，也可供其他专业参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验教程/吴平主编．—2版．—北京：机械工业出版社，2015.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-51181-6

Ⅰ．①大… Ⅱ．①吴… 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187571号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：李永联 责任编辑：李永联 任正一
责任校对：张 征 刘怡丹 封面设计：马精明
责任印制：刘 岚
北京富生印刷厂印刷
2015年9月第2版第1次印刷
184mm×260mm · 32.75印张 · 736千字
标准书号：ISBN 978-7-111-51181-6
定价：58.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010－88379833
读者购书热线：010－88379649

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden－book.com

封面无防伪标均为盗版

序

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。物理学是一门历史悠久、永远生气勃勃充满魅力的学科，它与各个自然学科、工程技术部门的相互作用不断创造着改变世界的新领域、新思想、新方法、新技术，对人类文明和科学技术发展起着引领和推动作用，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，是人类文明的基石。

物理学本质上是一门实验科学，其中蕴含着丰富的科学思想与实验方法是各学科科学实验的基础，也是现代科学思想、科学技术的基础，正在现代科技前沿发挥着无可替代的重要作用。

开设物理实验课程的目的，就是要引导本科生系统学习物理实验的思想、方法和技术，培养学生的实践能力、探究精神、创新思维与创新能力。在实验教学过程中广泛激发学生学习兴趣，培养学生自主学习能力，尤其是培养学生理论与实践相结合的拓展应用能力是实验教学的关键。

教材是教学思想、教学方法、教学内容的凝练，是引导学生自主学习的重要平台，是引导学生探究、创新的源泉，教材中应蕴含着丰富的物理实验思想、巧妙的实验方法和精湛的实验技术。由北京科技大学吴平教授主编的“大学物理实验教程”正是这样一套教材。十多年来，吴平教授带领的团队坚持不懈地将科学研究与教学研究融为一体，不断将科研中产生的新理念、新思想、新方法、新成果凝练到实验教学中，形成了实验教学的新理念、新体系、新内容、新模式，并不断产生着卓越的教学效果。他们合理地将大学物理实验分为基础实验、综合性实验、设计性（研究性）实验和应用物理实验，形成了基础与现代科技相融合、分层次的的课程体系，每一层次的实验内容涵盖了力学、热学、电磁学、光学以及近代物理的实验。实验选题不断来源于团队从事的科研成果，涉及领域宽广、设计思想新颖、内容丰富，特色性强，既包含训练学生基础物理实验思想、物理实验方法、物理实验技能的基础实验，又包含与现代物理技术结合的拓展应用性课题实验。他们准确给出了供各层次学生进一步拓展、应用、研究的课题，引导学生从一个实验的思想和方法出发拓展到所涉领域知识和应用，卓有成效的激发了学生的学习兴趣、丰富了学生的知识领域，提高了学生的自主学习能力、探究精神和创新能力。

教材教学理念先进，实验内容新颖，所用实验方法巧妙、先进，教材中对于实验的概念阐述清楚、简洁，可操作性强，特别是突出学生设计性、研究性课题实验方面特色鲜明。

为进一步提高学生的自主学习能力，教材还研究制定了一整套主、客观评价相结合的预习、实验报告智能评判方案，运用现代信息技术切实促进教学目标的实现和教学质量的提高。

教材注重对学生实验方法的训练和不确定度处理实验数据的方法，并结合计算机通用软件进行了阐述，思路先进，适应用强。

祝愿该套教材的出版在提高高校物理实验教学水平和教学质量中发挥重要的作用。

翟钊青

2015.7.30.

前　言

本书是在北京科技大学物理系多年物理实验教学实践和历届物理实验教材与讲义的基础上编写的，融入了大量近年来物理系实验教师的物理实验教学研究成果和科学研究成果，集中了历年物理系物理实验教师和实验技术人员的集体智慧。

诺贝尔物理学奖获得者、物理学家丁肇中在一次演讲中谈到实验精神在科学上的重要性时说："科学发展的历史告诉我们，新的知识只能通过实地实验而得到，不是由自我检讨或哲理的清谈就可求到的……我觉得真正的格物致知精神，不但是在研究学术中不可缺少，而且在应付今天的世界环境中也是不可少的。在今天一般的教育里，我们需要培养实验的精神。就是说，不管研究科学，研究人文学，或者在个人行动上，我们都要保留一个怀疑求真的态度，要靠实践来发现事物的真相。"

物理学本质上是一门实验科学。但是学生在学习物理的过程中，常常较多重视理论课，而忽视实验课。但从实际从事相关工作的人数分布来看，从事与实验有关工作的人数要大大多于从事理论工作的人数，许多学生在后来从事实际工作时又不得不回头补相关的实验知识、方法和技能。因此，我们希望本书的编写能够体现一些实验精神，注重对学生运用实验的方法和手段进行研究的基本素养与能力的培养和训练，多多少少担起一些采用实验研究的手段教授物理（即实验物理教学）的重任。

本书在实验项目、实验内容的选择上，不仅注意了重要物理现象与规律的研究，也注意了学生未来发展的需要。在编写上注重了采用实验的手段来教授物理（即实验物理教学）的理念，强化了学生的自主实验和探索研究。每一个实验都提供了较为详尽的相关物理现象介绍、基本研究思路和方法、实验装置、实验过程与操作步骤以及实验过程中可能遇到的问题等方面的信息，以使学生在课前能够通过仔细的阅读和认真的思考，对要研究的问题、解决问题的思路、实验方案的设计、实验的具体展开等做好充分的准备，这样学生才有可能在课堂上尽可能地自主实验，并充分发挥他们的创造性。为了帮助学生在预习时抓住主要问题，书中设立了"预习提示"栏目，提出了学生预习时要思考和搞清楚的基本问题或关键问题，引导学生带着问题预习，提高预习质量。每个实验的最后都设有"研究性题目"栏目，这些研究性题目是教师根据多年的教学实践，在考虑了大学一、二年级学生的知识水平、实验技能和实验室的实验条件的基础上提出的，希望能够逐步地培养学生的研究意识，让学生有更大的自主探索的空间。

本书在编写形式上采用了科学论文通常所用的形式，即主要标题包括"引言"、"实验目的"、"实验仪器"、"实验原理"、"测量及数据处理"、"讨论"、"结论"、"参考文献"等，以使学生在阅读实验教材和撰写实验报告时熟悉科学论文的写作方式。"引言"部分简略介绍了与相关实验有关的应用背景、在物理学发展史中的作用等知识，以提高学生的学习兴趣和探索自然奥秘的积极性，开阔学生的眼界。我们特别设置了"讨论"栏目，提示学生从自己感兴趣的角度，查阅相关文献，对实验现象和实验数据加以分析和讨论。设置这个栏目的目的是希望促进学生自主思考，激励学生展示他们的独特视点，个性

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

化思考和创造性思维，逐步提高他们提出问题、分析问题、解决问题的能力，进而培养他们的创新意识和创新能力。“结论”部分则提示学生对实验现象和数据的分析、讨论进行概括总结，提炼结论。

本书配套设计与制定了与主、客观评价相结合的网络化实验报告智能评判系统，有力地控制了实验报告的评判质量，促进了教学目标的落实。

本书的编写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。

参加本书编写的有：吴平（第1章、第2章、实验4.1~4.5、实验4.14、实验4.15、实验5.4、实验5.5、实验5.7~5.16、实验7.2、实验7.5~7.8、实验7.10）、张师平（实验4.6~4.9、实验4.11、实验4.12、实验5.2、实验5.6、实验7.4、实验7.11、实验7.13）、赵雪丹（第3章、实验5.1、实验5.3、实验7.8、实验7.12）、陈森（实验4.10、实验4.13、实验7.9），孙明明（实验7.1），第6章为丁红胜和赵雪丹共同编写，常用物理学常数表和物理量单位由赵雪丹整理。教材框架、实验项目及内容方案确定、统稿和定稿由吴平完成。实验报告智能评判方案的设计与制定由吴平、张师平完成。实验报告智能评判方案和系统的实施由吴平、陈森、张师平完成。李莉、任菡、刘尚、李亚男、李向龙、李梦茁、高丽娜、李岩、冀冰、杨金光等在网络智能报告系统的测试与试用方面做了大量工作。2012级和2013级材料实验班、理科实验班、黄昆英才班、部分工科专业和2014级应用物理专业的学生参加了新版教材内容的试用。

由于我们的水平有限，教材中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

目　录

序

前言

第1章　绪论 …… 1

1.1　物理实验课程的地位、作用和教学任务 …… 1

1.2　物理实验课程的三个基本环节 …… 2

1.3　物理实验规则 …… 3

第2章　测量误差与实验数据处理基础知识 …… 5

2.1　测量与测量误差 …… 5

2.2　误差分类及其简要处理方法 …… 6

2.3　直接测量结果的表示 …… 11

2.4　间接测量结果的表示和不确定度的合成 …… 12

2.5　实验数据的有效位数 …… 13

2.6　常用实验数据处理方法 …… 16

2.7　实验数据的直线拟合 …… 18

第3章　物理实验的基本测量方法与基本调整、操作技术 …… 27

3.1　物理实验的基本测量方法 …… 27

3.2　物理实验中的基本调整与操作技术 …… 31

第4章　基础实验 …… 35

实验4.1　用静态拉伸法测材料的弹性模量 …… 35

实验4.2　弹簧振子运动规律的实验研究 …… 47

实验4.3　用扭摆法测量物体的转动惯量 …… 55

实验4.4　空气比热容比的测定 …… 63

实验4.5　液体表面张力系数的测量 …… 71

实验4.6　基本电表的使用以及伏安特性的研究 …… 77

实验4.7　用电桥测电阻 …… 91

实验4.8　数字电表的组装及应用 …… 101

实验4.9　用四端法测量 Fe－Cr－Al 丝的电阻率 …… 117

实验4.10　示波器的使用 …… 123

实验4.11　声速的测量 …… 157

实验4.12　多普勒效应 …… 165

实验4.13　几何光学综合实验 …… 175

实验4.14　分光仪的调节及三棱镜折射率的测量 …… 193

实验4.15　光的等厚干涉 …… 205

第5章　综合性实验 …… 213

实验5.1　受迫振动的研究 …… 213

实验5.2　霍尔效应 …… 223

实验5.3　PN 结的特性 …… 233

实验5.4　用落球法测定液体不同温度下的黏度及温度的 PID 调节 …… 241

实验5.5　用热波法测量良导体的热导率 …… 251

实验5.6　迈克耳孙干涉仪 …… 261

实验5.7　全息照相 …… 271

实验5.8　用光栅测量光波波长 …… 279

实验5.9　光栅光谱仪的使用 …… 285

实验5.10　光电效应 …… 295

实验5.11　电子电荷 e 值的测定 …… 305

实验5.12　弗兰克－赫兹实验 …… 317

实验5.13　氢与氘原子光谱 …… 325

实验5.14　微波光学实验 …… 334

实验5.15　核磁共振 …… 344

实验5.16　核蜕变的统计规律和物质对 β 射线的吸收 …… 356

第6章　设计性（研究性）实验 …… 367

实验6.1　利用单摆测量重力加速度 …… 369

实验6.2　弹簧质量对弹簧振子振动周期的影响 …… 372

实验 6.3　橡皮筋测力计的研究 …… 374
实验 6.4　用混合法测量固体的比热容 …… 375
实验 6.5　电阻温度计的设计与标定 …… 377
实验 6.6　磁场测量与磁阻特性的研究 …… 379
实验 6.7　铁磁物质基本磁特性的研究 …… 382
实验 6.8　测量薄钢片的体积 …… 384
实验 6.9　测量固体的密度 …… 384
实验 6.10　测量音叉的固有频率 …… 384
实验 6.11　测量电风扇的转速 …… 384
实验 6.12　用 CCD 测量导线的直径 …… 385
第 7 章　应用物理实验 …… 386
实验 7.1　传感器信号的数据采集 …… 386
实验 7.2　用横振动法测量固体材料在高温下的弹性模量 …… 409
实验 7.3　高温超导电性测量 …… 416
实验 7.4　超声波在物质中的传播与超声成像 …… 425
实验 7.5　$LiNbO_3$ 晶体音频信号横向电光调制 …… 435
实验 7.6　低真空的获得、测量与用直流溅射法制备金属薄膜 …… 445
实验 7.7　用多光束干涉方法测量薄膜厚度 …… 457
实验 7.8　金属薄膜电阻率的测量 …… 465
实验 7.9　金属薄膜生长过程中电阻的动态监测 …… 473
实验 7.10　用干涉方法测量薄膜应力 …… 481
实验 7.11　透明电极材料的研究 …… 486
实验 7.12　磁性薄膜的磁电阻测量 …… 493
实验 7.13　用高阻测量仪测量陶瓷薄膜材料的电阻 …… 500
附录 …… 513
附录 A　常用物理学常数表 …… 513
附录 B　物理量的单位 …… 513

第1章 绪 论

1.1 物理实验课程的地位、作用和教学任务

物理学本质上是一门实验科学。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都离不开物理实验。例如，牛顿运动定律、电磁学的基本定律库仑定律和毕奥－萨伐尔定律都是通过实验总结出来的；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦电磁场理论获得普遍承认；杨氏干涉实验使光的波动学说得以确立；卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密；近代高能粒子对撞实验使人们得以深入到物质的最深层——原子核和基本粒子的内部——来探索其规律等。可以说，没有物理实验，就没有物理学本身。

理论研究和实验研究都是研究物理的手段，但从实际从事物理研究工作的人数分布来看，从事实验研究工作的人数要多于从事理论研究工作的人数，这意味着许多学生在未来的实际工作中要从事实验研究工作，工科学生更是离不开实践，因此，从人才培养的需要来看，物理实验课程是非常必要的。物理实验课程的名称也许容易让人们认为它是一门教授有关物理实验的课程，但它应该承担起一些采用实验的手段教授物理（即实验物理教学）的重任，本书则力图能够体现一些这样的教学意图。

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。

物理实验课程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。物理实验课程所涉及的知识、方法和技能是学生进行后继实践训练的基础，也是毕业后从事各项科学实践和工程实践的基础。物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，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课程。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。

物理实验课程的具体任务是：

1）培养学生的基本科学实验技能，使学生初步掌握实验科学的思想和方法，提高学生的科学实验基本素质。

2）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、解决问题能力和创新能力。

3）提高学生的科学素养，培养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、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

对科学实验能力培养的基本要求包括：

1）独立学习的能力：能够自行阅读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。

2）独立实验操作的能力：能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器及辅助设备，独立完成实验内容，逐步形成自主实验的基本能力。

3）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。

4）书写表达的能力：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概念，正确记录和处理实验数据，绘制曲线，分析说明实验结果，撰写合格的实验报告，逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

5）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。

6）创新与实验设计的能力：能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，能进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，逐步培养创新能力。

在物理实验课程的学习过程中，希望同学们有意识地锻炼、培养自己上述各方面的能力和素质，为未来的学习和工作积聚力量。

1.2 物理实验课程的三个基本环节

1. 实验前的预习

进行任何一个科学实验之前，都需要做充分的准备。具体落实到本门课程，实验前的预习极为重要。每次实验课前，同学们要认真阅读教材和有关参考资料，并在阅读和分析的基础上认真思考：①本次实验要研究的问题是什么？②为了澄清所要研究的问题，实验方案是如何设计的？③弄清实验所涉及的原理和测量方法。④了解实验所要使用的仪器，实验的主要步骤及注意事项。⑤对实验中可能出现的现象、结果等要有大致的预测。⑥记录下来不理解或不清楚的问题，留待实验课课堂上与指导教师讨论。同学们要把自己放在实验工作负责人的位置上，主动思考，在实验课前对整个实验工作尽可能地进行规划、安排，对进入实验室后如何开展实验工作做到心中有数。

在预习的基础上写出预习报告，预习报告要简明扼要地写出：①实验名称；②实验任务；③原理图、线路图或光路图；④测量公式（包括公式中各物理量的含义和单位）；⑤提纲性地列出关键实验步骤；⑥设计原始实验数据记录表格，并单独用一张实验报告纸做好原始实验数据记录表格。

2. 实验操作

在实验过程中要遵守操作规程，注意安全。

做实验不是简单地测量几个数据，计算出结果就行，更不能把这一重要实践过程看成是只动手不动脑的机械操作。通过实验的实践，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、注意观察和分析实验现象的科学素养、整洁清楚地做好实验记录（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，并逐步培养自己设计实验的能力。在实验过程中不仅要动手进行操作和测量，还必须积极地动脑思考。珍惜独立操作的机会。记录实验数据时不能使用字迹可擦除的铅笔。实验完毕，应先

将数据交给教师审查签字，在得到教师同意后，才能关闭仪器。还要特别注意，将仪器整理还原，桌面收拾整洁，凳子摆放整齐以后，才能离开实验室，这也是培养未来良好工作习惯的一个重要细节，请同学们不要忽视。

3. 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。通过撰写实验报告，可以锻炼总结工作的能力和科学技术报告的写作能力，这是未来从事任何工作都需要的能力。实验报告要用实验报告纸书写，下面给出一种参考格式：

物理实验报告

实验名称：

班级：　　实验日期：　年　月　日

姓名：　　学号：　　同组人姓名：

目的要求：

仪器：写出主要仪器的名称、规格和型号。

原理：对实验原理进行高度概括总结，用自己的语言，简明扼要地写出实验原理（实验的理论依据）和测量方法要点，说明实验中必须满足的实验条件。写出数据处理时必须要用的一些主要公式，标明公式中各物理量的意义（不要推导公式）。画出必要的实验原理示意图、测量电路图或光路图。

实验步骤：根据自己的实际实验过程，简明扼要地写出实验步骤。注意文字表述的准确性和各实验步骤间的逻辑关系。

数据和数据处理：首先，根据要研究的问题的需要设计好实验数据表格，在表格中列出原始测量数据，表格必须要有标题。其次，按被测量最佳估值的计算、被测量的不确定度计算和被测量的结果表示的顺序，正确计算和表示测量结果。一般要按先写公式，再代入数据，最后得出结果的次序，进行每一步的运算。要求作图的，应按作图规则画图，图必须有图题。

分析讨论：这里是展示同学们独特视点、个性化思考和创造性思维的地方。要对实验中观察到的现象、实验结果进行分析、讨论和评价，常常需要查阅文献，以使分析讨论更为深入和有说服力。

结论：认真思考本次实验得到了哪些重要的实验事实、规律或测量结果，用高度概括总结的语言把他们明确地写出来，让你的报告的读者一下子就能抓住你的工作的关键要点。

1.3 物理实验规则

在实验室做实验，要遵守实验室规则，注意细节，养成良好的工作习惯。

1）树立安全第一的观念，并落实到整个实验过程中。

2）课前应充分预习，实验时态度认真严肃，注意保持实验室安静。

3）实验时，如缺少仪器、用具、材料等，应向指导教师或实验室人员提出。

4）爱护仪器设备，如有损坏、丢失，应立即报告指导教师。由于粗心大意或违反操

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

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）凡使用电源的实验，必须经过教师检查线路并同意后，才能接通电源。

6）做完实验，测量数据要交指导教师审查签字。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。

7）实验报告连同教师签字的原始数据应在做实验后一周之内一起交给任课教师。

【参考文献】

[1] 教育部高等学校物理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. 理工科类大学物理实验课程教学基本要求［M］. 北京：高等教育出版社，2011.

[2] 葛维昆. 教学的平台，探索的基地，求知的乐园——实验物理教学的追求［J］. 物理与工程，2014，24（3）：3－8.

[3] 王惠棣，柴玉英，邱尔瞻，等. 物理实验［M］. 天津：天津大学出版社，1989.

第2章　测量误差与实验数据处理基础知识

2.1　测量与测量误差

2.1.1　测量

用实验的方法找出物理量量值的过程叫测量。量值是指用数和适宜的单位表示的量，例如：1.5m，17.5℃，3.5kg等。从测量方法出发来分类，可将测量分为直接测量和间接测量。

直接测量　凡使用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。如用米尺测量长度，用温度计测量温度，用秒表测量时间以及用电表测量电流和电压等。

间接测量　很多物理量没有直接测量的仪器，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。如测量钢球的密度时，由直接测量测出钢球的直径 D 和质量 m，然后根据公式

$$\rho = \frac{m}{\frac{\pi}{6}D^3} \tag{2.1-1}$$

计算出密度 ρ。钢球密度的测量即为间接测量。

2.1.2　测量的误差

测量结果都具有误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能做到绝对严密，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能地消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。

首先来了解一下误差的概念。测量误差就是测量结果与被测量的真值（或约定真值）的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确度，测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \tag{2.1-2}$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\% \tag{2.1-3}$$

被测量的真值是一个理想概念，一般说来真值是不知道的，因而在实际测量中常用被测量的实际值或修正过的算术平均值来代替，称为约定真值。由于一般情况下不知道真值，所以也就不能计算误差，只有在少数情况下可以用准确度足够高的实际值作为被测量

的约定真值，这时才能计算误差。

2.2 误差分类及其简要处理方法

测量中的误差主要分为两类：系统误差和随机误差。两类误差的性质不同，处理方法也不同。

2.2.1 系统误差

系统误差是指在每次测量中都具有一定大小、一定符号，或按一定规律变化的测量误差分量。它来源于：仪器构造上的不完善；仪器未经很好校准；测量时外部条件的改变；测量者的固有习惯和测量所依据的理论的近似；测量方法和测量技术的不完善等。系统误差的减少和消除是个复杂的问题，只有很好地分析了整个实验所依据的原理、方法和测量过程的每一步以及所用的各仪器，进而找出产生误差的各个原因，才有可能设法在测量结果中消除或减少它的影响。尽管如此，在某些可能的情况下也存在一些消除系统误差（固定的和变化的）的方法。

1. 对测量结果引入修正值

通常包括两方面内容，一是对仪器或仪表引入修正值，这可通过与准确级别高的仪器或仪表做比较而获得；二是根据理论分析，导出补正公式，例如，精密称衡的空气浮力补正，量热学实验中的热量补正等。

2. 选择适当的测量方法

选择适当的测量方法，使系统误差能够被抵消，从而不将其带入测量结果之中。常用的方法有：

1）交换法：就是将测量中的某些条件（例如，被测物的位置）相互交换，使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用，从而抵消系统误差。如用滑线电桥测量电阻时把被测电阻与标准电阻交换位置进行测量，在天平使用中的复秤法等。

2）补偿法：如量热实验中采用加冰降温的办法使系统的初温低于室温以补偿升温时的散热损失，又如用电阻应变片测量磁致伸缩时的热补偿等。

3）替代法：在一定的条件下，用某一已知量替换被测量以达到消除系统误差目的的方法。例如，用电桥精确测量电阻时，为了消除仪器误差对测量结果的影响，就可以采用替代法，不过这里要求“指零”仪器应有较高的灵敏度。

4）半周期偶数测量法：按正弦曲线变化的周期性系统误差（如测角仪的偏心差）可用半周期偶数测量法予以消除。这种误差在0°、180°、360°处为零，而在任何差半个周期的两个对应点处误差的绝对值相等而符号相反，因此，若每次都在相差半个周期处测两个值，并以平均值作为测量结果就可以消除这种系统误差，在测角仪器（如分光仪，量糖计等）上广泛使用此种方法。

2.2.2 随机误差

一般情况下，在相同条件下对同一物理量进行多次重复测量时，在极力消除或改正一切明显的系统误差之后，每次测量结果仍会出现一些无规律的随机性变化（实际上系统

误差未消除时，这种随机性变化也同样会表现出来）。如果测量的灵敏度或分辨能力足够高，就可以观察到这种变化，我们将这种随机性变化归结于随机误差的存在。和系统误差不同的是，随机误差的出现，从表面上看是毫无规律的，似乎是偶然的，但如果测量次数很多，结果就显现出明显的规律。例如，误差值一定的数值出现的概率是相同的，绝对值小的误差较绝对值大的误差出现的概率大，其算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋近于零等。

综上所述，随机误差是在对同一被测量在重复性条件下进行多次测量的过程中，测量的绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。这里，重复性条件包括：相同的测量程序、相同的观测者、在相同的条件下使用相同的测量仪器、相同的地点、在短时间内重复测量等。这种误差是由实验中各处因素的微小变动性引起的。例如实验装置和测量机构在各次测量调整操作上的变动性、测量仪器指示数值上的变动性、以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生涨落变化，这种变化量就是各次测量的随机误差。

随机误差的出现，就某一次测量值来说是没有规律的，其大小和方向都是不可预知的，但对于同一个量进行足够多次的测量时则会发现，随机误差是按一定的统计规律分布的。常见的统计分布有正态分布、t 分布、平均分布等。

随机误差的分布特性与处理方法：

1）在多次测量时，正负随机误差大致可以抵消，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。

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做出估计才能表示出测量的精密度。

下面简单介绍实验数据与误差处理中最常用的正态分布和 t 分布。

1. 正态分布

正态分布（又称高斯分布）是误差理论中最重要的一种分布。从概率论的“中心极限定理”可知，一个随机变量如果是大量相互独立的、微小因素影响的总效果，这个随机变量就近似地服从正态分布。物理测量中的随机误差，往往是观察者不能控制的大量偶然因素作用的结果，所以大多数物理测量服从正态分布。

正态分布的概率密度函数为

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (-\infty<x<+\infty) \tag{2.2-1}$$

$$\mu=\lim_{n\to\infty}\frac{\sum x_i}{n} \tag{2.2-2}$$

$$\sigma_x=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum(x_i-\mu)^2}{n}} \tag{2.2-3}$$

式中，μ 和 σ_x 为分布参数；n 为测量次数。μ 为正态分布的数学期望，表示出现概率最大的 x 值，消除系统误差后，μ 通常就是 x 的真值。σ_x 为正态分布的均方根差，它决定了分布线型的宽窄。σ_x 直接反映了分布的离散程度，σ_x 愈小，分布曲线愈陡，数据愈集中，重复性愈好。σ_x 大，则正好相反。实际测量的任务就是通过测量数据求得 μ 和 σ_x 的值。图 2.2-1 所示为正态分布曲线。

$P=\int_{x_1}^{x_2} f(x)\,\mathrm{d}x$ 是随机变量 x 出现在 $[x_1, x_2]$ 区间的概率，称为置信概率。与置信概率对应的区间称为置信区间。显然，置信区间扩大，置信概率将提高。对于正态分布，以下三个置信区间及其相应的置信概率在实验误差与数据处理中具有重要意义：

$$\begin{aligned}&[\mu-\sigma_x,\ \mu+\sigma_x] \quad P=0.6826\\ &[\mu-2\sigma_x,\ \mu+2\sigma_x] \quad P=0.9545\\ &[\mu-3\sigma_x,\ \mu+3\sigma_x] \quad P=0.9974\end{aligned} \tag{2.2-4}$$

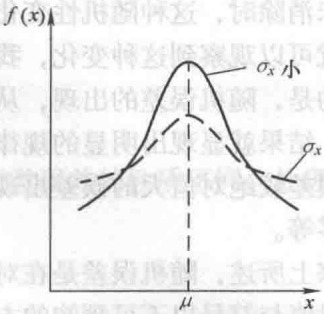

图 2.2-1 正态分布曲线

以上数据的涵义是，对服从正态分布的物理量进行测量时，测量值将有 68.26% 的概率落在 $[\mu-\sigma_x, \mu+\sigma_x]$ 区间，95.45% 的概率落在 $[\mu-2\sigma_x, \mu+2\sigma_x]$ 区间，而当置信区间扩大到 $[\mu-3\sigma_x, \mu+3\sigma_x]$ 时，测量值落在 $[\mu-3\sigma_x, \mu+3\sigma_x]$ 区间的概率将达到 99.74%，而落在该区间以外的概率则不超过 0.26%，可见 $|x-\mu|\geqslant 3\sigma_x$ 的可能性很小，所以 $3\sigma_x$ 通常称为极限误差。

对某一物理量 X 在重复性条件下进行了 n 次独立测量，设已消除了测量的系统误差，得到 n 个测量值 X_1，X_2，…，X_n，可以把 n 个测量值看成随机变量 X 的随机样本。那么，它们的算术平均值是

$$\overline{X}=\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{2.2-5}$$

可以证明，测量值的算术平均值最接近被测量的真值。根据最小二乘法原理，一列等精度测量的最佳估计值是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。设被测量的真值的最佳估计值为 x，可写出差值平方和如下：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{n}(X_i-x)^2 \tag{2.2-6}$$

令 $\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}=0$ 求极值

$$\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}=-2\sum_{i=1}^{n}(X_i-x)=0 \tag{2.2-7}$$

则

$$x=\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}=\overline{X} \tag{2.2-8}$$

因此，我们可以用算术平均值表示测量结果。

显然，算术平均值 $\overline{X}$ 也是一个随机变量。引用“中心极限定理”可以证明，如果物理量 X 服从正态分布，那么算术平均值 $\overline{X}$ 也服从正态分布，且其数学期望为真值 μ，其均方根差 $\sigma_{\overline{X}}=\frac{1}{\sqrt{n}}\sigma_X$。算术平均值 $\overline{X}$ 的均方根差是每个测量值均方根差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍，说明算术平均值的离散程度比单个测量值的离散程度要小，所以增加测量次数可以改善平均值的精密度。图 2.2-2 给出了 $\sigma_{\overline{X}}/\sigma_X$ 与 n 的关系，可以看到，随着测量次数 n 的增加，$\sigma_{\overline{X}}/\sigma_X$ 逐

渐减小，但当 $n>10$ 以后，变化趋于平缓，再增加测量次数的影响变得不明显。测量的精密度是由测量仪器的精度、测量方法、环境和观测人决定的，超出这些条件单纯追求测量次数是不能提高测量精度的，但必要的测量次数还是需要的，n 不必过大，一般重复 10 次即可。

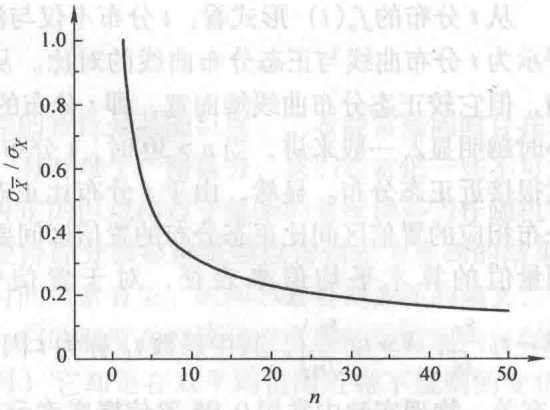

图 2.2-2 $\sigma_{\bar{X}}/\sigma_X$ 与 n 的关系

2. t 分布

当测量次数无穷多或足够多时，测量误差的分布才接近正态分布，但实际测量只能有限次地进行，因而测量结果及其离散程度必须以有限次的测量为基础进行估算。

因为测量值的算术平均值 $\bar{X}$ 是真值的无偏估计，我们用它来作为真值的最佳估值。

每一次测量值 X_i 与平均值 $\bar{X}$ 之差叫作残差，即

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \qquad i=1,\ 2,\ \cdots,\ n \tag{2.2-9}$$

显然，这些残差有正有负，有大有小。

可以证明，σ_X 可用标准偏差 s_X 来估值，即 s_X 是 σ_X 的无偏估计。s_X 用下面的贝塞尔公式来计算

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}{n-1}} \tag{2.2-10}$$

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

测量结果采用测量值的算术平均值来表征，相应地，其离散程度要由 $\sigma_{\bar{X}}$ 来表征。由于 $\sigma_{\bar{X}}=\frac{1}{\sqrt{n}}\sigma_X$，$\sigma_{\bar{X}}$ 可用式（2.2-11）来估值。

$$s_{\bar{X}} = \frac{1}{\sqrt{n}} s_X \tag{2.2-11}$$

至此，测量量的真值和测量的离散程度都能够用有限次测量进行估值了，似乎测量结果的表征问题都解决了。但是我们前面提到，只有当测量次数无穷多时，测量误差的分布才接近正态分布，在测量次数有限，特别是测量次数较小时，随机变量的分布已经偏离正态分布，因此，用式（2.2-10）和式（2.2-11）的估值代入式（2.2-4）来表征置信区间时，对应的置信概率并不是式（2.2-4）中所给出的值，需要进行修正。

令 $t=\frac{\bar{X}-\mu}{s_X/\sqrt{n}}$，可以证明，统计量 t 服从自由度 $\nu=n-1$ 的 t 分布，t 分布又称学生分布。

t 分布的概率密度函数为

$$f_\nu(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi}\,\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}\left(1+\frac{t^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}} \qquad (-\infty<t<+\infty) \tag{2.2-12}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com