

普通高等教育基础课规划教材

北京市精品课程教材

大学物理实验教程

◆ 主 编 吴 平

◆ 副主编 赵雪丹 黄筱玲



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育基础课规划教材
北京市精品课程教材

大学物理实验教程

主 编	吴 平		
副主编	赵雪丹	黄筱玲	
参 编	李书民	邱 宏	陈毅平
	陈 坚	丁红胜	秦良强
	廖 嘉	李 杰	张国华
	刘柏松	张 禹	王凤平
主 审	霍剑青		

机械工业出版社

本教材是参照教育部非物理类课程指导委员会于 2004 年制定的“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”，借鉴国内外近年来物理实验教学内容与课程体系的研究改革成果，结合北京科技大学物理系教师在建设教育部工科物理基础课程教学基地的八年时间当中取得的物理实验教学研究成果和科学研究成果编写而成的。

全书共分为七章，包括物理实验基础知识和以层次划分的基础实验、综合性实验、设计性实验和应用物理实验。教材的编写注重了自主实验和研究性思想，提供了较为详尽的背景介绍、基本原理、实验装置、实验过程与操作步骤、实验过程中可能遇到的问题等方面的信息以及扩充课堂实验内容的研究性题目。

本书可作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. —北京: 机械工业出版社, 2005.9

普通高等教育基础课规划教材

ISBN 7-111-17313-9

I. 大… II. 吴… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 100208 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李永联 版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 饶 薇 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18 印张·433 千字

定价: 27.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

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。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和科学技术的发展起着引领和推动作用。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。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验体现了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基础课程，它的内容、教学方法和教学模式具有鲜明的时代性和社会性。

近十多年来，各高校以培养适应社会发展需要的高素质人才为核心，在物理实验课的课程体系、教学内容、教学方法等方面进行了卓有成效的教学研究和教学改革，一批教育理念、教学思想先进，教学内容、教学方法新颖，反映科研新成果的优秀教材脱颖而出。由北京科技大学吴平教授主编的“大学物理实验教程”就是其中的一套。这套教材既是北京科技大学多年来大学物理实验课教学经验的积累，也是近几年来物理实验教学研究和教学改革成果的提炼。

由吴平教授主编的“大学物理实验教程”结构合理、完整，体系新颖，内容丰富。教材根据各专业、各层次学生的需要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）实验和应用性实验，并且在选题上涵盖了力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验，选题恰当，既包含训练学生基础物理实验思想、物理实验方法、物理实验技能的经典实验，又包含与现代物理技术结合与应用的课题。教材中对于实验的概念阐述清楚、简洁，可操作性强。教材中一些实验所用的实验方法巧妙、先进。教材特别强调了实验的可设计性和研究性，在实验中准确的给出了供学生进一步学习和研究的课题，有些实验注意了从一个实验拓宽到一个领域的知识和应用，拓宽了学生的知识面，给不同层次的学生有很好的发展空间。

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

教材对一些在历史上起过里程碑作用的实验给出了其历史背景和作用，对一些在现代科学技术中有广泛应用意义的实验注意给出了其应用领域和方法，这有利于激发学生的学习兴趣 and 热情。

今年正值世界物理年，本书的出版是主编和作者们给世界物理年的献礼。祝愿本书在北京科技大学及国内相关高校的教学中发挥重大作用，祝愿本书的主编和作者们在此基础上取得更辉煌的成果。

霍剑青

2005.8.9

前言

本教材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讲义的基础上编写的，并融入了物理系教师在建设教育部工科物理基础课程教学基地的八年时间当中取得的物理实验教学研究成果和科学研究成果，集中了物理系历年从事物理实验教学的教师和实验技术人员的集体智慧，虽然他们当中有的人目前已不在物理实验室工作，但本教材中也有他们的心血和劳动成果。

本教材在编写风格上注重了强化研究性思想和学生自主实验的教学理念。每一个实验都提供了较为详尽的背景介绍、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，教材中设立了[预习提示]栏目，提出了学生预习时要搞清楚的基本问题或关键问题。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，并给学生更多的自由、自主的探索空间。

本教材在编写形式上采用了通常科学论文所用的形式，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]部分主要介绍了与相关实验有关的应用背景及其在物理学发展史中的作用等知识，以提高学生的学习兴趣 and 探索自然奥秘的积极性，开阔学生的眼界。[讨论]栏目提示学生从自己感兴趣的角度，对实验现象和实验数据加以分析和讨论，其目的是希望能够促进学生自主思考，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]栏目则提示学生通过对实验现象和数据的分析和讨论给出自己的结论。

在本教材的编写过程中，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！

中国科技大学霍剑青教授审阅了全书，提出了非常宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

参加本书编写的有：吴平（第1章、第2章、实验4.4、5.7、5.10、7.6、7.9、7.10、7.11），赵雪丹（第3章、实验5.1、5.3），黄筱玲（实验4.1、5.2、7.1、7.5），李书民（实验4.10、4.11、4.12、5.11），邱宏（实验7.2、7.3、7.4），陈毅平（实验4.5、4.8、4.9），陈坚（实验4.6、4.7、5.4），丁红胜（第6章），秦良强（实验4.2、5.9），廖嘉（实验5.5、5.6），李杰（实验7.7），张国华（实验7.8），刘柏松（实验5.8），张禹（实验4.3），实验7.12由王凤平和赵雪丹共同编写，常用物理学常数表和物理量单位由赵雪

丹整理。教材的体系框架、统稿和定稿由吴平完成。

由于作者水平有限，教材中难免存在错误和不妥之处，恳请读者提出批评指正。

编 者

2005年6月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 物理实验课的地位、作用 and 教学任务 1
- 1.2 物理实验课的三个基本环节 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 4

- 2.1 测量与测量误差 4
- 2.2 误差的分类及其简要处理方法 5
- 2.3 直接测量结果的表示 7
- 2.4 间接测量结果的表示和不确定度的合成 8
- 2.5 实验数据的有效位数 8
- 2.6 用作图法处理实验数据 11
- 2.7 实验数据的直线拟合 13

第 3 章 物理实验的基本测量方法

与基本调整、操作技术 18

- 3.1 物理实验的基本测量方法 18
- 3.2 物理实验中的基本调整与操作技术 22

第 4 章 基础实验 25

- 实验 4.1 基本测量 25
- 实验 4.2 静态拉伸法测材料的弹性模量 29
- 实验 4.3 弹簧振子运动规律的研究 33
- 实验 4.4 用扭摆法测量物体的转动惯量 37
- 实验 4.5 空气比热容比的测量 43
- 实验 4.6 测量 (非) 线性电阻的伏安特性 48
- 实验 4.7 用电桥测电阻 63
- 实验 4.8 示波器的使用 72

- 实验 4.9 声速的测量 84

- 实验 4.10 分光仪的使用和光栅 89

- 实验 4.11 棱镜分光仪 97

- 实验 4.12 单色仪的使用 101

第 5 章 综合性实验 107

- 实验 5.1 受迫振动的研究 107
- 实验 5.2 霍尔效应 114
- 实验 5.3 PN 结的特性 119
- 实验 5.4 迈克尔逊干涉仪 124
- 实验 5.5 全息照相 132
- 实验 5.6 夫兰克-赫兹实验 136
- 实验 5.7 微波光学实验 141
- 实验 5.8 良导体热导率的测定 148
- 实验 5.9 β 射线在物质中的吸收规律 155
- 实验 5.10 电子电荷 e 值的测定 159
- 实验 5.11 光电效应 165

第 6 章 设计性 (研究性) 实验 173

- 实验 6.1 利用单摆测量重力加速度 175
- 实验 6.2 弹簧质量对弹簧振子振动周期的影响 178
- 实验 6.3 橡皮筋测力计的研究 179
- 实验 6.4 混合法测量固体的比热容 180
- 实验 6.5 电阻温度计的设计与标定 182
- 实验 6.6 测量 Fe-Cr-Al 丝的电阻率 184
- 实验 6.7 电表的改装和校准 185
- 实验 6.8 磁场测量与磁阻特性研究 188
- 实验 6.9 铁磁物质基本磁特性研究 190
- 可供选择的设计性实验 191
- 实验 6.10 测量薄钢片的体积 192
- 实验 6.11 测量固体的密度 192
- 实验 6.12 测量音叉的固有频率 192
- 实验 6.13 测量电风扇的转速 192
- 实验 6.14 测量液体表面的张力系数 192

实验 6.15 利用 CCD 测量导线的直径 ···	193	实验 7.7 力学量和热学量传感器 ·····	223
实验 6.16 高电阻的测量·····	193	实验 7.8 高温超导电性测量 ·····	237
第 7 章 应用物理实验 ·····	194	实验 7.9 氢与氘原子光谱 ·····	243
实验 7.1 真空实验 ·····	194	实验 7.10 核磁共振·····	251
实验 7.2 直流溅射法制备金属薄膜 ·····	197	实验 7.11 LiNbO_3 晶体音频信号 横向电光调制·····	262
实验 7.3 光的干涉——分振幅干涉 ·····	202	实验 7.12 磁性薄膜的磁电阻测量·····	272
实验 7.4 金属薄膜电阻率的测量 ·····	207	常用物理学常数表 ·····	279
实验 7.5 金属薄膜电阻的动态监测 ·····	211	物理量的单位 (国际单位制) ·····	279
实验 7.6 用动态悬挂法测量固体材料 在高温下的弹性模量 ·····	216		

第1章 绪 论

1.1 物理实验课的地位、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，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——来探索其规律性等等。可以说，没有物理实验，就没有物理学本身。

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。

物理实验课的具体任务是：

1) 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，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，提高学生分析问题、解决问题的能力和创新的能力。

3) 提高学生的科学素养，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) 独立进行实验操作的能力：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，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。

4) 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、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。

1.2 物理实验课的三个基本环节

1. 实验前的预习

课前认真预习好教材,通过阅读实验教材和有关的参考资料,弄清实验的目的、原理、所要使用的仪器和测量方法,了解实验的主要步骤及注意事项等。在此基础上写出预习报告,预习报告应简明扼要地写出:①实验名称;②实验任务;③测量公式(包括公式中各物理量的含义和单位);④原理图、线路图或光路图;⑤关键实验步骤(提纲性的)等内容,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

做实验不是简单地测量几个数据,计算出结果就行,也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、善于观察和分析实验现象的科学素养、整洁清楚地做实验记录(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,还必须积极地动脑筋思考,珍惜独立操作的机会。记录实验数据时不能使用铅笔。实验完毕,数据应交教师审查签字,在将仪器、凳子归整好以后,才能离开实验室。

此外,在实验过程中要遵守操作规程,注意安全。

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,可以锻炼科学技术报告的写作能力和总结工作的能力,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:

原理: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,标明公式中的物理量的意义(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,简明扼要地写出实验步骤。

仪器:写出主要仪器的名称、规格及编号。

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，在表格中列出全部原始测量数据，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，再带入数据，最后得出结果的程序进行每一步的运算。要求作图的，应按作图规则用坐标纸画出，图必须有图题。

分析讨论：必要时对实验中观察到的现象、实验结果进行具体分析和讨论，回答教师指定的问题。

结论：一定要将结论写清楚，不要将其湮没在处理数据的过程中。

1.3 物理实验规则

- 1) 在整个实验过程中要注意安全，树立安全第一的观念。
- 2) 课前应做好预习，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，应立即报告教师。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) 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规定的时间内一起交给任课教师。

【参考文献】

- 1 教育部非物理类课程指导委员会．非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求．<http://www.phastro-jzw.edu.cn>，2004
- 2 王惠棣，柴玉英，邱尔瞻，郑永星．物理实验．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，叫做直接测量，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

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

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的过程之中。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，这就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此，分析测量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作出估计，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。

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

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

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真值，称为约定真值。由于真值一般为未知值，所以一般情况下是不能计算误差的，只有在少数情况下可以用准确度足够高的实际值来作为量的约定真值，这时才能计算误差。

2.2 误差的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；仪器未经过很好的校准；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种仪器，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

这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作比较而获得；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

选择适当测量方法的目的是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) 对换法：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，从而抵消了系统误差。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的方法，在天平使用中的复称法等。

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：即在一定的条件下，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

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，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、相同地点、在短时间内重复测量等。

随机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, 但对于一个量进行足够多次的测量, 就会发现随机误差是按一定的统计规律分布的。常见的一种情况是: 正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等, 数值较小的误差出现的次数较多, 很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显, 这就是被称为正态分布律的一种分布规律, 在数理统计中对它有充分的研究。

对测量中的随机误差如何处理? 随机误差具有如下的分布特性:

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作出估计才能表示出测量的精密度。

对测量中的随机误差作估计的方法有多种。科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。例如, 对某一物理量在重复性条件下进行了 K 次测量, 设已消除了测量的系统误差, K 个测量值是 $X_1, X_2, \dots, X_K$, 那么, 它们的算术平均值是

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{K} \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (2.2-1)$$

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, 一系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:

$$f(x) = \sum_{i=1}^K (X_i - x)^2 \quad (2.2-2)$$

令 $\frac{df(x)}{dx} = 0$ 求极值

$$\frac{df(x)}{dx} = -2 \sum_{i=1}^K (X_i - x) = 0 \quad (2.2-3)$$

则

$$x = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{K} = \bar{X} \quad (2.2-4)$$

因此, 可以用算术平均值表示测量结果。每一次测量值 X_i 与平均值 $\bar{X}$ 之差叫做残差, 即

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (2.2-5)$$

显然, 这些残差有正有负, 有大有小。

测量值 X_i 的分散性可用实验标准偏差 s 来表征, s 用下面的贝塞尔公式来计算:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (\Delta X_i)^2}{K-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X})^2}{K-1}} \quad (2.2-6)$$

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

2.3 直接测量结果的表示

根据国家计量技术规范, 参考 ISO、IUPAP 等七个国际组织 1993 年联合颁布的《不确定度表示指南》, 物理实验教学采用一种简化的、具有一定近似性的不确定度评定方法, 其要点如下:

1) 测量结果应给出被测量的量值 $\bar{X}$, 并标出扩展不确定度 U , 写成

$$X = (\bar{X} \pm U) \text{ 单位} \quad (2.3-1)$$

它表示被测量的真值在区间 $(\bar{X} - U, \bar{X} + U)$ 内的可能性 (概率, 或称置信概率) 约等于或大于 95%。注意式 (2.3-1) 中的括号不可省略。实验教学中, 扩展不确定度也简称为不确定度。

2) U 分为两类分量: A 类分量 U_A 用统计学方法计算; B 类分量 U_B 用非统计学方法评定; 两类分量用方和根法合成为总不确定度 U , 即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.3-2)$$

3) U_A 由实验标准偏差 s 乘以因子 $\frac{t}{\sqrt{K}}$ 求得, 即 $U_A = \left(\frac{t}{\sqrt{K}}\right)s$, 式中 s 是用贝塞尔公式

(2.2-6) 计算出的标准偏差, 测量次数 K 确定后, 因子 $\frac{t}{\sqrt{K}}$ 可由表 2.3-1 查出。表 2.3-1 中

的 P 为置信概率, 多数实验中有 $5 < K < 10$, 因子 $\frac{t}{\sqrt{K}} \approx 1$, 则有 $U_A \approx s$ 。

4) 在多数直接测量中, U_B 近似取量具或仪器仪表的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。教学中的仪器误差限一般简单地取计量器具的允许误差限 (或示值误差限, 或基本误差限), 有时也由实验室根据具体情况近似给出。

在物理实验教学中, 一般可用下式计算 U

$$U = \sqrt{\left(\frac{t}{\sqrt{K}}\right)^2 s^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (2.3-3)$$

如果因为 s 显著小于 $\frac{1}{2} \Delta_{\text{仪}}$, 或因估计出的 U_A 对实验最后结果的不确定度影响甚小, 或因条件限制而只进行了一次测量时, U 可简单地用仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。当实验中只要求测量一次时, 根据实验条件, 可由实验室给出 U 的近似值。

表 2.3-1 $P=0.95$ 时的因子 $\left(\frac{t}{\sqrt{K}}\right)$ 表

测量次数 K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	$K \rightarrow \infty$
$\frac{t}{\sqrt{K}}$ 的值	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$\frac{1.96}{\sqrt{K}}$
$\frac{t}{\sqrt{K}}$ 的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	$6 \leq K \leq 10, P > 0.94$ 时 可取 $\frac{t}{\sqrt{K}} \approx 1$					$K > 10, P \approx 0.95$ 时 取 $\frac{t}{\sqrt{K}} \approx \frac{2}{\sqrt{K}}$		

2.4 间接测量结果的表示和不确定度的合成

在很多实验中进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量的结果根据一定的数学公式计算出来的。这样一来，直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果，这种影响的大小可以由相应的数学公式计算出来。

设直接测量量分别为 $x, y, z, \dots$ ，它们都是互相独立的量，其最佳估计值分别为 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$ ，相应的总不确定度分别为 $U_x, U_y, U_z, \dots$ 。间接测量量为 φ ， φ 与各直接测量量之间的关系可以用函数形式（或称测量式）表示

$$\varphi = F(x, y, z, \dots) \quad (2.4-1)$$

间接测量量 φ 的最佳估计值 $\varphi_{\text{最佳}}$ 可由将各直接测量量的最佳估计值代入函数关系式 (2.4-1) 得到

$$\varphi_{\text{最佳}} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (2.4-2)$$

φ 值也有相应的不确定度 U_φ 。由于不确定度都是微小的量，相当于数学中的“增量”，因此间接测量的不确定度的计算公式与数学中的全微分公式基本相同，区别在于要用不确定度 U_x 等替代微分 dx 等，要考虑不确定度合成的统计性质。

在物理实验教学中，可以用以下公式来简化计算间接测量量的不确定度 U_φ ：

$$U_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (2.4-3)$$

$$\frac{U_\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (2.4-4)$$

其中，式 (2.4-3) 适用于和差形式的函数及一般函数的计算，是间接测量量总不确定度传递的公式。式 (2.4-4) 适用于积商形式的函数，是间接测量量的相对不确定度的合成（传递）公式。

应当注意，测量结果不确定度不要与测量误差混淆。不确定度表征的是被测量真值所处的量值范围的评定，或者是由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。

2.5 实验数据的有效位数

在实验中所测的被测量的数值都是含有误差的，对这些数值不能任意取舍，应反映出

测量值的准确度。例如,用 300mm 长的毫米分度钢尺测量某物体的长度,正确的读法是除了确切地读出钢尺上有刻线的位数之外,还应估计一位,即读到 $\frac{1}{10}\text{mm}$ 。比如,测出某物长度是 123.5mm,这表明 123 是确切的数字,而最后的“5”是估计数字,前面的三位是准确数字,后面一位是存疑数字。又如,测出某铜环的体积为 $V \pm U_V = (16.63 \pm 0.20)\text{cm}^3$,这表明 16.63 的前两位是准确数字,后两位是存疑数字。准确数字和 1~2 位存疑数字的全体称为有效数字。

2.5.1 有效位数的概念

国家标准 GB8170—1987 中对有效位数的定义为:对没有小数位且以若干个零结尾的数值,从非零数字最左一位向右数得到的位数减去无效零(即仅为定位用的零)的个数,就是有效位数;对其他十进位数,从非零数字最左一位向右数而得到的位数,就是有效位数。

2.5.2 有效位数的确定规则

实验数据的有效位数的确定是实验数据处理中的一个重要问题。下面分读数、运算和结果表示三个环节来讨论有效位数的确定。

1. 原始数据有效位数的确定

通过仪表、量具读取原始数据时,一定要充分反映计量器具的准确度,通常要把计量器具所能读出或估出的位数全读出来。

1) 游标类量具,如游标卡尺、带游标的千分尺、分光仪角度游标度盘等,一般应读到游标读数值的整数倍。

2) 数显仪表及有十进式标度盘的仪表,如电阻箱,电桥等,一般应直接读取仪表的示值。

3) 指针式仪表一般应估读到最小分度值的 $1/4 \sim 1/10$,或估读到基本误差限的 $1/3 \sim 1/5$ 。

2. 中间运算结果有效位数的确定

通过运算得到的数据的有效位数的确定原则是:可靠数字与可靠数字的运算结果为可靠数字,存疑数字与可靠数字或存疑数字的运算结果为存疑数字,但进位为可靠数字。

下面给出的有效位数的确定规则是根据误差理论总结出来的,它们能够近似地确定运算结果的有效位数。

(1) 加减运算 以参与运算的末位数量级最高的数为准,和、差都比该数末位多取一位。

(2) 乘除运算 以参与运算的有效位数最少的数为准,积、商都比该数多取一位。

(3) 函数值的有效位数 设 x 的有效位数已经确定,取函数(乘方、开方、三角函数、对数等)时应如何确定其有效位数呢?一般来说可由改变 x 末位一个单位,通过函数的误差传递公式计算出函数值的误差,然后根据测量结果与不确定度的末位数字要对齐的原则来决定函数值的有效位数。

【例 2.5-1】 已知 $x = 56.7$, $y = \ln x$, 求 y 。