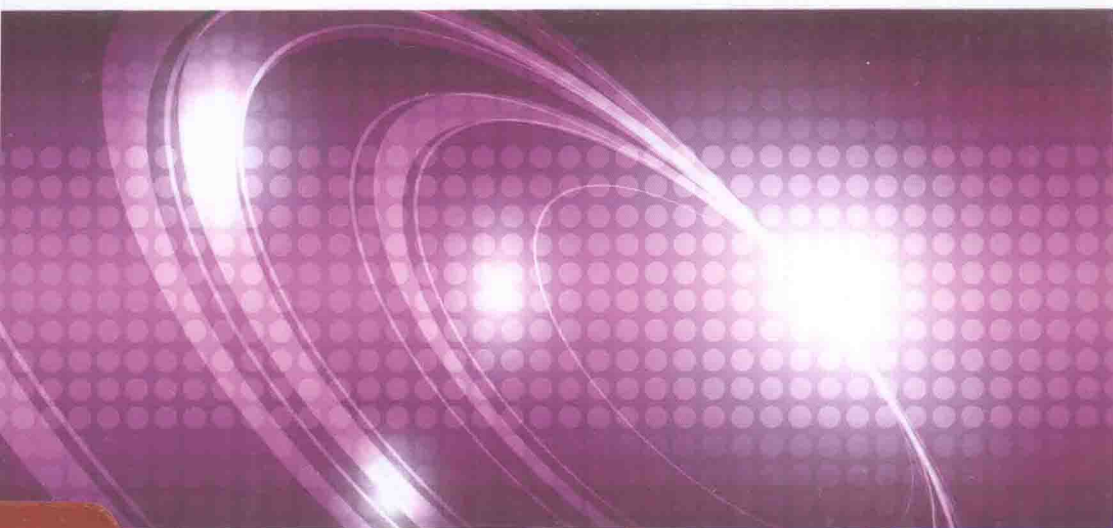


普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN



主 编 毛爱华 武 娥
副主编 邢永强 李永治



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编	毛爱华	武 娥
副主编	邢永强	李永治
参 编	刘艳丽	李丽荣 李 颖
主 审	杨友松	



机械工业出版社

本书内容包括误差理论及数据处理的基本知识、常用实验仪器简介和实验设计方法,以及按照基础必修、专业模块化教学、研究设计型创新划分的实验项目共 57 个,涉及力学、热学、光学和电磁学等方面的知识。

本书强调基础训练和对物理概念的理解。在每项实验中均配有仪器照片,并附有相关物理学史小知识,以提高学生的学习兴趣。

本书可作为高等院校工科学生的大学物理实验教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/毛爱华,武娥主编. —北京:机械工业出版社,2015.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-48942-9

I. ①大… II. ①毛…②武… 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(2014)第 296394 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

版式设计:霍永明 责任校对:张 征

封面设计:马精明 责任印制:李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 19.5 印张 · 471 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48942-9

定价:35.00 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

网络服务

社服 务 中 心:(010) 88361066 教 材 网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

大学物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本能力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。本书按照教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会制订的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,针对内蒙古科技大学培养工科学生“上手快、留得住、后劲足”,具有实践能力、创新意识和创新精神的高级应用型人才的人才培养定位,结合内蒙古科技大学数理基础教学基地建设工作思路和“分专业、分层次、模块化教学”实验教学模式编写而成。本书将所有实验项目分为基础性、综合性和设计性三个层次;针对不同专业类,将实验项目分成多个选做模块,引导学生选做适合本专业特点的实验项目,具有很强的针对性,改善了目前内蒙古科技大学理工科所有专业均做完全相同实验项目的现状。

本书主要突出以下特点:

1) 数据处理方面,继续采用目前国际上通用的不确定度估算误差;新增加了应用 Excel 软件处理实验数据的方法,可以完成实验数据的运算、结果分析、绘图和拟合等工作,具有准确、快捷、直观的优点。

2) 增加了实验方法的介绍。大学物理实验中包含着极其丰富和精彩的物理思想和方法,在教材中将用单独一章加以系统地介绍。这些思想和方法在培养学生创新思维、设计能力和创新能力方面有重要意义。

3) 增加了实验项目,如增加了一些力学、热学基础实验项目,改变了物理实验中力、热、电、光实验项目数不均衡的现状;增加了科技含量较高的综合性新项目,可以使学生学习先进理念、现代实验内容和先进实验技术,提高物理实验教学水平。

4) 为了培养学生独立从事科学实验的能力,本书增添了研究设计型创新实验,要求学生根据实验要求,自选仪器,拟定实验方案,列出实验步骤,并取得实验数据,完成实验报告,进而使学生获得比较系统的科学实验训练。

5) 每个实验都附有实验装置实物照片,方便学生预习时对仪器外观、结构有所了解。

6) 书中对各实验的原理都做了简明扼要的论述,每个实验给出了完整的数据记录表格及具体的数据处理方法以及相对不确定度计算公式,大部分实验中列有课后思考题。这有利于学生在实验中分析研究问题,并能巩固提高所学的理论知识。

7) 针对传感器技术的飞速发展,单列一节介绍常用的传感器及其工作原理。

8) 书中每个实验都介绍了与实验有关的物理学史方面的小知识、相关物理概念、现象的背景知识等,以增加学生学习的趣味性。

本书是集体创作的结晶,每一个实验项目的编写都凝聚着物理实验教师的智慧和心血。在本书成书之前,在内蒙古科技大学已经试用了一年,期间进行了不断的修改。

参加本书编写的人员有:毛爱华(前言、绪论、第1章、第3章)、武娥(实验4.6、实验4.7、实验4.9、实验5.2、实验5.3、实验5.6、实验5.18、实验5.21、实验5.23)、邢永强(实验4.11、实验4.12、实验4.13、实验5.4、实验5.5、实验5.12、实验5.20)、

李永治 (第2章2.1节、2.2节, 实验4.2.1, 实验4.5, 实验4.8, 实验5.1, 实验5.14, 实验5.17)、刘艳丽 (实验4.2.2、实验5.7、实验5.8、实验5.10、实验5.22、实验6.14~6.18)、李丽荣 (实验4.14、实验5.13、实验5.15、实验5.16、实验5.19、实验6.1~6.13)、李颖 (第2章2.3节、2.4节, 实验4.1, 实验4.3, 实验4.4.1, 实验4.4.2, 实验4.10, 实验5.9, 实验5.11)。

杨友松教授审阅了全书, 并提出了许多宝贵意见; 此外, 还得到了董大明、赵存虎、阙耀华、李剑生、李国峰、王月明、李林风、吕晓龙等老师的帮助和指导, 在此一并致谢。本书的编写还参考了兄弟院校的有关教材, 汲取了他们在大学物理实验教学改革中的经验, 特此感谢。

尽管我们进行了认真的审读、修订工作, 但书中难免有疏漏、错误之处, 恳请读者批评指正。

本书的出版得到了学校的大力支持, 获“2012年度内蒙古科技大学教材基金”资助。

编 者

目 录

前言

绪论	1
0.1 大学物理实验课程的地位和作用	1
0.2 大学物理实验课程的任务和目的	1
0.3 大学物理实验课程的学习要点	3
第1章 测量与误差的基本知识	4
1.1 测量与误差	4
1.1.1 测量及其分类	4
1.1.2 误差的基本知识	4
1.2 测量结果的不确定度评定	7
1.2.1 不确定度的概念	7
1.2.2 合成不确定度 Δ 的估算方法	8
1.3 有效数字处理的基本知识	10
1.3.1 有效数字的一般概念	10
1.3.2 中间过程运算结果的有效位数	11
1.3.3 测量结果表达式中的有效数位	12
1.4 几种实验数据的处理方法	12
1.4.1 作图法	12
1.4.2 逐差法	13
1.4.3 最小二乘法	14
习题	14
第2章 常用实验仪器简介	16
2.1 力学实验常用仪器简介	16
2.1.1 长度测量仪	16
2.1.2 质量测量仪	20
2.1.3 时间的测量及常用器具	21
2.2 电磁学实验常用仪器简介	23
2.2.1 电源	23
2.2.2 电阻	23
2.2.3 磁电系仪表	25
2.2.4 数字指示表	28
2.2.5 示波器	29
2.2.6 电学实验中仪器的布线连接	35
2.3 光学实验基础知识	35

2.3.1 光学仪器的使用与维护	35
2.3.2 光学实验的光源	36
2.3.3 光学实验调节中的问题	38
2.4 常用传感器及工作原理	39
2.4.1 力敏传感器	39
2.4.2 热敏传感器	43
2.4.3 光敏传感器	43
2.4.4 磁敏传感器	44
2.4.5 湿敏传感器	44
2.4.6 气敏传感器	45
第3章 物理实验设计的基本方法	46
第4章 理工科基础必修实验项目	51
实验4.1 物体密度的测量	51
实验4.2.1 用拉伸法测金属丝的弹性模量	53
实验4.2.2 用共振法测金属丝的弹性模量	57
实验4.3 用三线摆法测物体的转动惯量	62
实验4.4.1 用焦利秤测液体的表面张力系数	67
实验4.4.2 用传感器测液体的表面张力系数	70
实验4.5 用混合量热法测定固体的比热容	73
实验4.6 线性电阻和非线性电阻的伏安特性	75
实验4.7 用模拟法测绘静电场	81
实验4.8 箱式电位差计的使用	87
实验4.9 圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场的测量	90
实验4.10 空气中声速的测量	95
实验4.11 等厚干涉——牛顿环	100
实验4.12 用迈克耳孙干涉仪测激光波长	105
实验4.13 分光计实验	108
实验4.14 普朗克常量的测定	117
第5章 专业模块化教学实验项目	121
实验5.1 气垫导轨实验	121
实验5.2 固体线胀系数的测定	126
实验5.3 温度传感器的温度特性测量	129
实验5.4 用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	137
实验5.5 单缝衍射的相对光强分布	141
实验5.6 利用霍尔效应测量螺线管磁场	145
实验5.7 用惠斯通电桥测电阻	148
实验5.8 电表的改装与校准	152
实验5.9 用开尔文电桥测低电阻	157
实验5.10 磁化曲线与磁滞回线的测定	162

实验 5.11 金属电子逸出功的测定与磁控条件	166
实验 5.12 不良导体导热系数的测定	177
实验 5.13 弗兰克 - 赫兹实验	183
实验 5.14 硅光电池光照特性的测试	187
实验 5.15 音频信号的光纤传输	191
实验 5.16 超声波探测实验	195
实验 5.17 液晶电光效应的研究	200
实验 5.18 温差电偶的定标和测温	203
实验 5.19 RLC 电路的稳态特性	207
实验 5.20 薄透镜焦距的测定	211
实验 5.21 用双棱镜干涉测量钠光波长	217
实验 5.22 测定液体的黏度	221
实验 5.23 微波的布拉格衍射	224
第 6 章 研究设计型创新实验项目	232
实验 6.1 用焦利氏秤测量弹簧的有效质量	232
实验 6.2 用三线摆研究物体的转动周期规律	232
实验 6.3 弹簧振子周期公式的研究	233
实验 6.4 用热敏电阻改装温度计	233
实验 6.5 用示波器观测电容器的充放电特性	234
实验 6.6 表头参数的测定	235
实验 6.7 简易万用电表的设计制作和定标	235
实验 6.8 内调焦望远镜的组装及放大倍率的测定	236
实验 6.9 用等厚干涉法测量液体的折射率	238
实验 6.10 气体折射率的测量	238
实验 6.11 用迈克耳孙干涉仪测透明介质的折射率	239
实验 6.12 用迈克耳孙干涉仪测量金属丝的弹性模量	240
实验 6.13 用非平衡直流电桥测量铂电阻的温度特性	240
实验 6.14 压力传感器特性的研究	249
实验 6.15 用气敏式传感器测酒精含量	249
实验 6.16 用湿敏式传感器测湿度	250
实验 6.17 用光纤位移传感器测位移特性	251
实验 6.18 用光电传感器测转速、控制电动机转速	252
附录	257
附录 A 常用物理参数	257
附录 B 实验数据表格参考	261
参考文献	302

绪 论

0.1 大学物理实验课程的地位和作用

实验是一门科学。借助于实验，人们可以突破感官的限制，扩展认识的境界，揭示自然事物的内在联系和规律。物理实验是重要的实验科学，大学物理实验教学则是基础实验科学教育的重要体现，是进入大学后的工科学生第一次接触到的系统实验科学教育，其效果将对学生今后的科学素养培育起到至关重要的作用。

物理学是一门自然科学，人类文明史上的每次重大的技术革命都以物理学的进步为先导。物理实验在物理学的发展中一直起着重要的作用。物理概念的确立、物理理论的建立、物理规律的发展等都依赖于物理实验，并受物理实验的检验。例如，法拉第等人对电、磁的实验研究促使电磁学的产生与发展，并导致了电力技术和无线电技术的诞生，形成了电力工业和电子工业；放射性实验的研究和发展导致原子核科学的诞生与核能的运用，使人类进入了原子能时代；固体物理实验的研究和发展导致晶体管与集成电路的问世，进而形成了强大的微电子工业与计算机产业，使人类步入信息时代。

当今科学技术的发展以学科互相渗透、交叉及综合为特征。物理实验作为实验科学基础，其构思、方法和技术与其他学科的相互结合已经取得巨大的成果。毋庸置疑，学生在物理实验教育方面打下良好的实验基础，会对以后探索和开拓新的科技领域发挥巨大的作用。

0.2 大学物理实验课程的任务和目的

大学物理实验课程内容广泛，具有丰富的实验思想、实验原理、实验方法和实现手段的内涵，是对工科学生进行实验科学基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后系统接受科学实验方法和实验技能训练的开端，是理工科类专业对学生进行实验科学训练的重要基础，可以培养学生实事求是的工作作风，并为创新意识的建立打下良好基础。

1. 大学物理实验课程的任务

(1) 加深对物理学原理的理解 通过对实验现象的观察、分析以及对物理量的测量，学生能够了解、掌握实验科学的基础知识，加深对物理学原理的理解。

(2) 培养、提高学生的科学实验能力

1) 自学能力：通过阅读实验教材或资料，做好实验前的预习工作，培养和提高学生的自学能力。

2) 动手操作能力：能够借助教材和仪器说明书正确使用常用仪器，并理解仪器的结构设计及物理原理的实现过程。

3) 综合分析能力：能够运用物理学理论，对实验现象进行初步分析和判断。

4) 初步进行科技写作的能力：能够正确记录数据，能采用多种手段科学处理数据（如

手工与计算机绘制实验曲线), 叙述实验结果、结论, 撰写合格的实验报告。

5) 思考归纳能力: 完成课后精选的注重基础训练的思考题, 提高总结归纳能力。

(3) 培养、提高学生的科学实验素养 大学物理实验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以及遵守纪律、团结协作、独立工作及爱护公共财产的优良品德。

2. 物理实验课的教学程序和基本要求

(1) 进行课前预习, 作好实验准备 实验课前必须认真作好预习, 这是高质量完成实验的基础和前提。

1) 认真阅读教材, 必要时还应阅读一些参考资料, 以便了解实验目的和要求, 搞清实验原理及实验设计方法。

2) 阅读相关常用仪器介绍, 查看仪器照片, 熟悉仪器及工作原理, 明确实验内容和步骤。注意该实验的安全问题, 如实验者的安全、仪器和配件(容易打碎、损坏的配件)的安全等。

3) 撰写实验预习报告(包括实验目的、仪器用具、实验原理, 绘制电路图、光路图或实验结构图, 列出实验操作步骤), 准备好数据记录表(见附录B)。

(2) 实验中认真操作, 做好数据记录

1) 学生进入实验室后, 要遵守为保证实验教学和确保人身安全与仪器设备安全而制定的实验室各项规章制度。违反规章制度不仅会影响实验教学, 还可能酿成事故。

2) 在实验中既要动手又要动脑, 应在认真听实验指导教师的指导后再操作。如在做电学实验时, 学生所连接的线路必须经实验指导教师检查无误后, 才可接通电源进行操作。

3) 学生应按序号就座, 在规定的仪器上进行实验, 未经实验指导教师允许不得任意调换座位或调换仪器。当仪器出现故障时, 要在实验指导教师的指导下排除故障。

4) 对实验操作过程(包括测量条件、观察到的现象和测量的数据)要作数据记录, 测量数据要清楚地记录在数据记录表中。不能用铅笔记录数据, 不得事后“追记”数据, 更不得为拼凑结果而抄袭或涂改原始数据。学生要利用每一个实验过程逐渐培养良好的科学实验习惯和实事求是的作风。

5) 实验完毕, 请指导教师检查、签字, 数据不合格的要重做或补做。没获得教师签字, 该实验无效。学生在实验完成获得教师签字后, 要将仪器整理好, 清扫教室, 经指导教师允许方可离开教室。

(3) 撰写实验报告 实验报告是学生实验成果的书面反映。学生实验完毕, 要用自己的语言撰写实验报告。一份完整的实验报告应包括以下内容:

1) 实验名称、实验日期、座位序号、学院、班级、学生姓名及合作者等信息。

2) 实验目的描述。

3) 实验仪器及配件用具(需要注明型号和规格)。

4) 实验原理: 写出扼要的实验原理、公式和实验附图。

5) 实验步骤: 简述主要实验内容和顺序, 粘贴好数据记录表。

6) 数据记录与数据处理: 数据记录表格要全面反映实验条件和实验过程中得到的全部信息(包括正确的作图), 数据处理要给出实验测量结果和对实验结果的不确定度评定(有些实验, 不要求不确定度评定)。

7) 对实验进行分析讨论, 在报告的最后部分简单说明通过实验有哪些收获、体会和改进建议或回答课后思考题等。

0.3 大学物理实验课程的学习要点

大学物理实验是为大学本科生开设的一门独立实验课程。因为物理学不仅是一门实验科学, 更重要的是物理实验本身有一套实验知识、方法及技能, 可为学生进一步学好后续专业实验课程、提高动手能力打好基础。以下四点, 对深化物理实验的学习极为重要。

(1) 注意掌握实验中所采用的实验设计方法, 特别是基本测量方法 基本测量方法既是常用的方法, 也是复杂测量方法的基础, 在学习时不但要明白其道理, 还要逐步熟记。任何实验方法都有它的运用条件、优点和缺点, 只有认真做过实验才能对这些条件及优缺点有较深的体会。

(2) 有意识地培养良好的实验习惯 要实事求是地记下原始数据而不加“修饰”。注意记录实验的环境条件(如湿度、温度)、实验仪器的操作要求。这些良好的实验习惯是多年、大量实验的经验总结, 它能保证实验安全, 降低差错率, 也能迅速提高观察能力, 为日后再现实验、分析实验结果提供条件保证。

(3) 逐步学会分析实验, 能够排除实验中出现的各种故障 每个实验都有数据、结果, 必须分析实验数据, 判断由这些数据得出的实验结果是否合理, 实验方法是否正确, 它会带来多大误差, 仪器会带来多大的误差, 实验环境有多大影响等问题。由于大学物理实验的学习对象是大学低年级学生, 他们的实验经验很少, 也未掌握分析实验的方法, 所以实验时往往由实验室给出标准数据, 或者安排一些已有十分确定的理论结果的实验题目, 这都是为了帮助学生判断实验结果而设置的。实际上, 任何理论公式都是一种理论上的抽象和简化, 而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多, 实验结果必然与理论结果有差异, 问题在于差异的大小以及是否合理。因而, 无论数据优劣, 只要逐步学会分析实验, 找出实验结果好坏的原因, 这就达到了实验学习的目的。

(4) 实验过程比实验结果更重要 教师对学生实验成绩的评定会侧重于学生对实验的态度与作风, 侧重于学生发现、分析、解决问题的能力是否提高。本书中每个实验都包括有一定的测量内容, 通过这些测量过程, 学生能够学习、体验实验设计方法和实验原理, 发现实验的物理内涵和实验的广义应用引申。通过实验操作练习, 学会主动分析和解决实验问题。对于取得的重要实验数据, 还可以在完成规定的测量内容以后, 具体分析一下实验设计可能存在的问题, 或者对实验内容或仪器的一些改进提出建议等。

实验有它自身的特点和规律, 要学好做实验不是一件容易的事情。希望学生在学习过程中能够不断提高对物理实验的兴趣, 打好物理实验课程的基础。

第1章 测量与误差的基本知识

测量与误差是实验科学的重要组成部分,深入研究它需要丰富的实验经验和坚实的数学基础。本章简单介绍测量与误差、误差处理、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

物理实验操作的核心部分就是对物理量的测量,可归纳为直接测量和间接测量两类。

直接测量:凡使用仪器和量具直接测得(读出)被测量的数值,即为直接测量,如用电流表测电流,用温度计测温度等。

间接测量:有些物理量不能通过直接测量测得,常常需要根据一些理论公式,用直接测量获得的数据计算出这些被测物理量,这样的测量称为间接测量。如对一段导线上的电阻可以采用直接测出流过它的电流 I 和其两端的电压 U ,再根据欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 计算出电阻 R , R 的测量即为间接测量。

有时根据需要,还分为单次测量和多次测量。对不同的测量,误差的估算是不同的。

对一个物理量的测量过程就是寻找这个物理量的客观实际值(又叫真值)的过程。理论表明,被测物理量的真值需经过无穷次的测量取平均后才能找到。考虑到实验仪器、测量方法、环境和测量者等因素的限制,单纯追求增加测量次数去寻找真值是没有意义的,因此,使用任何仪器的任何一次测量,其结果都与真值有差异,这种差异就叫误差。

实验一般根据所要求的精确度来制定、设计实验方案,选用实验仪器。在满足一定要求时,要以最小的实验代价来取得最好的实验结果,不能单纯要求仪器越高级越好、测量次数越多越好。测量结果的误差是诸多因素引起误差的总和。减少某些因素所引起的误差,可能代价较小,而减小另一些因素所引起的误差,所需的代价可能很大。为了提高测量的精确程度,往往是着力于减小某一两项主要误差,根据目标要求和影响测量误差的因素来综合考虑合理的实验设计、实验方案及实验仪器。实验设计的精华就在于此。

1.1.2 误差的基本知识

如前所述,在任何测量中,由于各种原因,测量值与真值之间总是存在着差异。我们把测量值 x 与真值 x_0 之差称为测量值的绝对误差(简称误差),记为 $\Delta x'$

$$\Delta x' = x - x_0 \quad (1-1)$$

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终。使用任何一种测量仪器、进行任何一次测量,都会引起误差。测量所根据的方法和理论越多,所用的仪器装置越复杂,经历的时间越长,引进误差机会的可能性就越大。

误差可分为系统误差和偶然误差两类。

1. 系统误差及其来源

在同一被测物理量的多次测量过程中保持误差恒定或按某一确定规律变化的误差称为系统误差。它的来源有以下几个方面。

(1) 仪器误差 这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。如仪器零点不准、放大器的非线性、照相底板的收缩、在 20℃ 标定的标准电阻在 30℃ 的情况下使用等。

(2) 理论（方法）误差 这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性或实验条件不能达到理论公式所规定的要求而带来的误差。如理论公式没有把散热考虑在内、没有把接触电阻考虑在内、单摆的周期理论公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零，而实际是达不到的等，这些都属理论误差。

(3) 个人误差 这是由观测者的心理特点、反应速度及习惯偏向造成的误差。如使用停表计时，有人反应慢，停表时间过长，并非态度不认真所致。

系统误差有些是有定值的，如游标卡尺的零点不准；有些是积累性的，如用受热膨胀的钢质米尺进行测量，其指示值就小于真实长度，误差值会随着测量长度成比例增加；还有些呈周期性变化，如仪器的转动中心与刻度盘的几何中心不重合造成的偏心差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差使测量结果总是偏大或者偏小，其特征是带有确定性。因此，多次测量求平均值并不能消除系统误差。解决的方案是只有找到系统误差产生的原因，才可以采取一定的方法去消除或减弱它的影响，或者对测量结果进行修正。在某些重要的精密实验中，系统误差的分析处理甚至对整个工作的科学意义和水平起决定性作用。表 1-1 列出了常用仪器的技术条件和仪器误差限，用于对测量的不确定度进行分析时对系统误差作综合考虑参考。

表 1-1 常用仪器的技术条件和仪器误差限

量具（仪器）	最小分度值	仪器误差限
米尺	1 mm	$\Delta_{\text{仪}} = 0.5 \text{ mm}$
游标卡尺 50 分度/20 分度	0.02 mm/0.05 mm	$\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}/\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ mm}$
千分尺（螺旋测微计）	0.01 mm	$\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$
物理天平	0.01 g（天平感量）	$\Delta_{\text{仪}} = 0.01 \text{ g}$ （取天平感量）
普通温度计	1℃	$\Delta_{\text{仪}} = 0.5^\circ\text{C}$
指针式电表	准确度等级和量程	$\Delta_{\text{仪}} = \text{准确度等级}\% \times \text{满量程}$
数字表		$\Delta_{\text{仪}} = \text{最小显示量}$

2. 随机误差（偶然误差）及其分布规律

1) 随机误差：相同条件下重复测量同一物理量，由于各种偶然因素的影响，使得测量值随机变化，这种因随机变化而引起的误差称为随机误差（或偶然误差）。如读数的上下涨落、环境温度的起伏、气流的扰动等因素影响，使得测量结果的量值无规则地弥散在一定范围内。随机误差的存在，使每次测量值可能偏大或偏小，不能确定。随机误差是不能消除的，而数理统计学与计量学的研究表明，当测量次数足够多时，便可以发现这些测量值呈现出一定的规律性，即随机误差的分布服从一定的统计规律。

2) 理论研究表明, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差服从正态分布 (高斯分布) 规律。标准化正态分布曲线如图 1-1 所示。

在图 1-1 中, 随机误差 $x = N_i - N_0$ (N_i 为第 i 次测量值, N_0 为测量量的真值), $p(x)$ 为测量值的概率密度, 正态分布的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2)$$

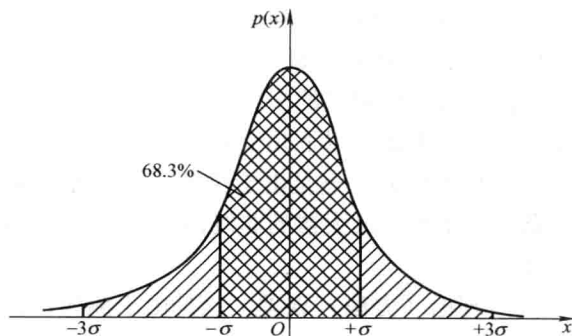


图 1-1 正态分布曲线

若取图 1-1 中曲线与 x 轴所围面积为 1, 概率密度函数 $p(x)$ 满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (1-3)$$

表示全部概率之和为 1。

式 (1-2) 中的 σ 是该函数式中的一个参量。它的数值标志着随机误差的离散程度, 又称为标准误差。它的大小决定曲线的形状。 σ 值越小, 分布曲线越陡峭, 峰值 $p(x)$ 越高; σ 值越大, 分布曲线越平坦, 峰值 $p(x)$ 越低。测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 标准误差定义为

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

从正态分布曲线可看出: 测量值在随机误差 $x=0$ 处出现的概率密度最大; 误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率大; 绝对误差很大的数据出现的概率几乎等于零。

3) 对如图 1-1 中阴影部分可算出置信概率, 作为对实验数据的判别。

$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} p(x) dx = 68.3\%$, 随机误差在 $(-\sigma, +\sigma)$ 置信区间内的置信概率为 68.3%。

$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} p(x) dx = 95.4\%$, 随机误差在 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 置信区间内的置信概率为 95.4%。

$P = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} p(x) dx = 99.7\%$, 随机误差在 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 置信区间内的置信概率为 99.7%。

在测量次数相当多的情况下, 如果出现测量值误差的绝对值大于 $\pm 3\sigma$ 的数据, 则可以认为是由于过失引起的异常数据, 应加以剔除。但是, 对于测量次数较少的情况, 这种方法就不可靠, 而需要采用另外的判别准则。

4) 服从正态分布的随机误差有如下特征:

单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

对称性: 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。

有界性: 绝对值很大的误差出现的概率近于零。

抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 测量值的平均值可作为被测量真值的最佳估计, 平均值趋近于真值。

增加测量次数可以减小随机误差,这是我们在实际操作中常常采取多次重复测量方法的依据。但是,随机误差最终是不能消除的。

3. 标准偏差及其估算

在实际测量中,测量次数 n 总是有限的,而且真值也不可知,因此,标准误差 σ 只有理论价值,实际处理时只能用标准偏差 s_x 近似代替标准误差 σ 进行误差估算。

设某一被测量量的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 实际测量估算时采用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值,常用贝塞尔公式计算 s_x 值,则 s_x 的表达式为

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-5)$$

而 n 次测量的平均值其标准偏差为

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (1-6)$$

即一系列测量量的平均值标准偏差 $s_{\bar{x}}$ 是单次测量标准偏差 s_x 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 用它进行多次测量的误差估算。

误差理论表示体系认为,一个被测量量的测量结果的总误差是系统误差和随机误差的总和。因此,在实际测量中应当尽量限制或消除系统误差,并正确地估算随机误差,最后对总误差给以评价。这样,才能对测量结果给出正确、合理的表示。

1.2 测量结果的不确定度评定

20 世纪 80 年代以来,“不确定度表示”体系经历了建立、完善和不断推广的过程。关于实验不确定度表示的建议书(《Recommendation INC_1 (1980)》)发表后,冲击了以往的误差理论表示体系。1992 年《测量不确定度表示法指南》的发表,使不确定度表示体系进入了一个日臻完善、全面推广的新阶段。1993 年国际理论与应用物理联合会参与颁布了《测量不确定度表示法指南》和《国际通用计量学基本术语》,说明推广不确定度表示是物理学研究和实验教学发展中的必然趋势。本书将采用简化的不确定度表示法来评价测量结果的优劣。

1.2.1 不确定度的概念

不确定度是说明测量结果的一个参数。它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映了可能存在的误差分布范围,即随机误差分量和未定系统误差分量联合分布的范围。不确定度是在误差理论的基础上发展起来的,表征被测量的真值所处的量值范围的评定,因此,不确定度能更准确地表示测量结果。一定置信概率的不确定度是可以估算(或评定)出来的,其值永远为正值。在大学物理实验中,完整的测量结果应给出被测量的量值 x , 同时还要标出测量的合成不确定度 Δ , 将实验结果写成 $x \pm \Delta$ 形式,所以合成不确定度 Δ 的估算就是实验数据处理的重要组成部分。

1.2.2 合成不确定度 Δ 的估算方法

测量结果的误差可能来自几个方面,其合成不确定度 Δ 通常包含几个分量,我们可将这些分量分成 A、B 两类。A 类分量:指的是经多次重复测量用统计方法估算的误差分量 Δ_A ; B 类分量:指的是用其他方法估算的误差分量 Δ_B 。

最后测量结果的合成不确定度 Δ

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-7)$$

1. 直接测量时合成不确定度 Δ 的估算方法

(1) A 类分量 Δ_A 的估算 实际实验操作的测量只可能是有限次,测量误差不完全服从正态分布规律,而是服从所谓的 t 分布。此时, A 类分量不确定度 Δ_A 由实验标准偏差 s 乘以因子 $(t_p/\sqrt{n})$ 来求得

$$\Delta_A = \left(\frac{t_p}{\sqrt{n}} \right) s \quad (1-8)$$

式中, s 为贝塞尔公式算出的标准偏差; t_p 是与测量次数 n 及置信概率 P 有关的量(称 t_p 为分布因子)。当置信概率 P 以及测量次数 n 确定后, t_p 也就确定了。当置信概率 $P = 0.95$ 时, $(t_p/\sqrt{n})$ 的部分数据可以从表 1-2 中查出。

表 1-2 $(t_{0.95}/\sqrt{n})$ 分布值与测量次数的关系

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
$(t_{0.95}/\sqrt{n})$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96/\sqrt{\infty}$

因为物理实验中测量的次数 n 一般不大于 10,从表 1-2 看出,当 $5 < n \leq 10$ 时, $t_p/\sqrt{n} \approx 1$,这时式(1-8)简化成

$$\Delta_A = \left(\frac{t_p}{\sqrt{n}} \right) s \approx s \text{ (可用标准偏差 } s \text{ 代替)} \quad (1-9)$$

(2) B 类分量 Δ_B 的估算 B 类分量的评定,有的依据仪器说明书,有的依据仪器的不确定度等级,有的则粗略依据仪器分度值。大学物理实验中通常取仪器的误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为 B 类分量,即

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-10)$$

(3) 不确定度的合成

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \approx \sqrt{s^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (5 < n \leq 10) \quad (1-11)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-12)$$

(4) 相对不确定度的估算 为了更全面地评定测量结果的优劣,还需考虑不确定度 Δ 对测量值本身大小产生的相对影响。为此,引入相对不确定度概念以便直观地评价测量结果的准确性,其定义是

$$U_r = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \text{ (百分数的形式)} \quad (1-13)$$

式中, Δ 为合成不确定度; $\bar{x}$ 为多次测量的平均值; U_r 为两者的比值, 称为测量结果的相对不确定度, 表示测量的准确性。

(5) 测量结果的完整表示 正确地完成上述各步骤的计算后, 测量结果应写成如下完整的标准形式:

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm \Delta \\ U_r = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$$

2. 单次测量时合成不确定度 Δ 的估算

当实验中被测量的量只测一次, 此时 Δ_A 分量不存在, 可取合成不确定度 $\Delta = \Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ 作为单次测量不确定度的评定。

例 1-1 (直接测量量不确定度估算举例) 用千分尺测某一钢丝的直径, 6 次测量值 x_i 分别为: 0.249, 0.250, 0.247, 0.251, 0.253, 0.250; 同时读得千分尺的零位 x_0 为: 0.004, 单位为 mm, 已知千分尺的仪器误差为 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005\text{mm}$, 请表达出完整的测量结果。

解: 测量值的最佳估计值为

$$\bar{x} = \bar{x} - x_0 = (0.250 - 0.004)\text{mm} = 0.246\text{mm}$$

测量次数 $n=6$, 可近似由贝塞尔公式计算标准偏差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.002\text{mm} \quad (\text{代入数据计算})$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \approx \sqrt{s^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{0.002^2 + 0.005^2}\text{mm} \approx 0.005\text{mm}$$

$$\text{则测量结果为 } \begin{cases} x = \bar{x} \pm \Delta_x = (0.246 \pm 0.005)\text{mm} \\ U_r = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% = 2.0\% \end{cases}$$

3. 间接测量时合成不确定度 Δ 的估算

间接测量结果由直接测量数据依一定的数学公式计算出来。显然, 直接测量结果的不确定性必然影响到间接测量结果, 这种影响也可以由数学公式计算出来, 见表 1-3。

表 1-3 常用函数不确定度传递公式

函数表达式	测量不确定度传递公式
$N = ax \pm by$	$\Delta_N = \sqrt{(a\Delta_x)^2 + (b\Delta_y)^2}$
$N = xy$ 或 $N = \frac{x}{y}$	$U_r = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2}$
$N = ax$	$\Delta_N = a\Delta_x$
$N = x^{\frac{1}{k}}$	$U_r = \frac{\Delta_N}{N} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta_x}{x}$
$N = \frac{x^k y^m}{z^n}$	$U_r = \sqrt{k^2 \left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + m^2 \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2 + n^2 \left(\frac{\Delta_z}{z}\right)^2}$
$N = \sin x$	$\Delta_N = \cos x \Delta_x$
$N = \ln x$	$\Delta_N = \frac{\Delta_x}{x}$