



21世纪高等学校规划教材

DaXue WuLi ShiYan

大学物理实验

(上)



主 编 毛爱华 李剑生



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



中华人民共和国教育部

DaXue WuLi ShiYan

大学物理实验

(上)



主编 王鼎昌 副主编 王鼎昌



21 世纪高等学校规

大学物理实验

(上)

主 编 毛爱华 李剑生
副主编 阙耀华 李林风 李国峰

北京邮电大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

本书内容包括误差和数据处理的基本知识,以及力学、热学、光学、电磁学等相关实验,共计16个实验项目。每个实验后面都插入与本实验有关的生动、有趣的物理学史小知识,以提高学生学习兴趣。每个实验都附有实验仪器实物照片,可以直观地了解测量所用到的实验仪器、量具。本书介绍实验的基本原理与实验方法、实验内容与步骤时,力求繁简适当,通俗易懂。在部分实验后面的附录中增加了使用其他测量方法的实验内容,拓展知识学习,加深学生对物理概念的理解,具有较强的可读性和适用性。

本书可作为高等学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.上/毛爱华,李剑生主编.--北京:北京邮电大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-5635-2512-6

I. ①大… II. ①毛… ②李… 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(2010)第265337号

书 名	大学物理实验(上)
主 编	毛爱华 李剑生
责任编辑	苏文刚
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京市梦宇印务有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	11
字 数	250千字
版 次	2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-2512-6

定价:22.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前言

改革教学方式，在教学中认真思考，勇于探索，不断实践。《大学物理实验》是内蒙古科技大学“理科教学基地建设项目”中大学物理实验中心“分专业模块化教学”教学改革成果之一。

编者从教学和科研的实践中已深刻地认识到物理实验课程已严重地滞后于物理学科和科学技术的现状，到了非改不可的地步。培养满足21世纪有创新能力的人才教育工作者义不容辞的责任，但在物理实验基础课中如何贯彻这一精神是必须认真思考的问题。培养工科学生成为“上手快，留得住，后劲足”和具有实践能力、创新意识和创新精神的高级应用型人才，是我们的目标。为配合各专业课教学，改革大学物理实验课程体系，编者采取了“分专业模块化教学”方式，即必修物理实验课的所有专业分成3类——理科类专业、电学类专业、非电学类专业，为与其专业教学相匹配，将实验项目也分成3个模块，引导学生选做适合本专业模块的特点的实验项目，具有很强的针对性。

教材实验编排为力学与热学、电磁学、光学、近代物理实验这几个项目，每个实验项目在实验内容、实验方法及手段等方面都有新改进。

本教材主要突出以下特点。

(1) 在数据处理方面，继续采用目前国际上通用的不确定度估算误差，但对其作了一些必要的简化，使学生既能掌握不确定度的基本知识，又不至于陷入繁琐的计算之中，从而保证物理实验教学的质量。

(2) 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、结构进行了解。改进了实验原理图，使其更加细致易懂。

(3) 本书对各实验的原理都作了简明扼要的论述，每个实验给出了完整的数据记录表格、具体的数据处理方法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。

(4) 书中大部分实验前、后穿插了与实验有关的物理学史方面的小知识，增加了知识性、趣味性。

(5) 部分实验后面的附录中增加了其他测量方法，起到开拓思维和拓宽知识学习的目的。

教材编写的分工：绪论与第1章，毛爱华；第3章，李剑生；第4章，李林风；第5章，阚耀华；第2章及附录，李国峰。

大学物理实验教材是集体创作的结晶。每部分实验内容的编写都凝聚着物理实验工作者的智慧。同时得到了校领导、学院领导、教务处等职能部门的大力支持。在本教材编写过程中，参考了兄弟院校的有关教材，汲取了他们大学物理实验教学改革的经验，特此感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

编者

目 录

结 论	1
第 1 章 测量与误差的基本知识	5
1.1 测量与误差	5
1.2 测量结果的不确定度评定	9
1.3 有效数字处理的基本知识	12
1.4 几种实验数据处理方法	14
习 题	17
第 2 章 常用实验仪器简介	18
2.1 力学实验常用仪器简介	18
2.2 电磁学实验常用仪器简介	23
2.3 光学实验基础知识	30
第 3 章 力学实验	34
实验一 物体密度的测量	34
附录:用流体静力称衡法和比重瓶法测定固体和液体的密度	38
实验二 气垫导轨实验	43
附录:CS—Z 型智能数字测时器的使用方法	48
实验三 拉伸法测金属丝的杨氏模量	55
实验四 用焦利秤测量液体表面张力系数	63
附录:用硅压阻式力敏传感器张力测定仪测量液体表面张力系数	67
实验五 简谐振动的研究实验	72
实验六 驻波的测量	78
第 4 章 光学实验	84
实验七 分光计的调整与使用	84
附录	91
实验八 等厚干涉——牛顿环	95
附录:光波波长的相对测定	99
实验九 薄透镜焦距的测定	104
实验十 单缝衍射的相对光强分布	112
第 5 章 电磁学实验	118
实验十一 用霍尔效应测量螺线管磁场	118
实验十二 线性电阻和非线性电阻的伏安特性	123
实验十三 惠斯登电桥测电阻	130

附录:用箱式电桥测电阻	134
实验十四 用模拟法测绘静电场	137
实验十五 电表改装与校准	143
附录:多量程电流表、电压表操作指导	150
实验十六 圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场的测量	151
附录:霍尔效应	157
常用物理学附录	160
参考文献	169

绪 论

1. 物理实验课的地位和作用

实验是人们认识自然规律、改造客观世界的基本手段。借助于实验，人们可以突破感官的限制，扩展认识的境界，揭示事物的内在联系。近代科学历史表明，自然科学领域内的所有研究成果都是理论和实验密切结合的结晶。随着科学技术的发展，实验的运用日益广泛和复杂，实验的精确程度越来越高，实验环节在科学技术的重大突破中所起的作用也越来越大。

物理实验是科学实验的重要组成部分。物理实验本质上是一门实验科学，在物理学的发展中一直起着重要的作用。物理概念的确立、物理规律的发展、物理理论的建立都有赖于物理实验，并受物理实验的检验。物理学是一切自然科学的基础，人类文明史上的每次重大的技术革命都是以物理学的进步为先导的，物理实验在其中起着独特的作用。如，法拉第等人进行电磁学的实验研究促使了电磁学的产生与发展，导致了电力技术与无线电技术的诞生，形成了电力与电子工业；放射性实验的研究和发展导致了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了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、交叉与综合为特征。物理实验作为有力的工具，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。不容置疑，今后在探索和开拓新的科技领域中，物理实验仍然是有力的工具。

2. 物理实验课的任务及其完成

物理实验课是对工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端，是对理工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。

物理实验覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段。学习物理实验，对学生进行基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的基础，同时可以培养学生实事求是的作风和创新意识。

1) 物理实验课的任务

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习实验知识，加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力，其中包括以下几项。

① 自学能力：能够通过阅读实验教材或资料，做好实验的准备。

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。

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判断。

④ 科技写作能力：能够正确记录和处理实验数据，绘制实验曲线，叙述实验结果，撰写合格的实验报告。

⑤ 设计、实施能力：能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养，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、独立工作和爱

护公共财产的优良品德。

2) 物理实验课的教学程序和要求

(1) 课前预习, 做好准备。实验课前必须认真做好预习, 预习是高质量完成实验的基础和前提。

预习的基本要求是认真阅读教材, 必要时还应阅读一定的参考资料。比如, 做电学实验应先看一下常用仪器介绍, 做光学实验应预习一下光学基础知识。了解实验目的和要求, 搞清实验原理及方法, 熟悉仪器, 明确实验内容和步骤, 还要注意该实验的安全问题, 如实验者的安全、仪器的安全。通过预习, 应对要做的实验有一个初步的了解, 写好预习报告(包括实验目的, 仪器用具, 原理, 电路或光路图, 步骤), 准备好数据记录草表。若实验室开放, 要事先预约实验。

(2) 实验中认真操作, 记录数据。学生进入实验室首先要遵守实验室的规章制度, 因为这些规章制度是为确保人身安全和仪器设备安全而制定的。违反规章制度就可能酿成事故, 这是必须牢记的。其次, 在实验中要既动手又动脑, 使用任何仪器前, 必须先看注意事项或说明书; 在调节时, 应先粗调后微调。做电学实验时, 必须经教师检查无误后才可接通电源。应在规定的仪器上进行实验, 未经教师允许不得任意调换其他仪器。实验时应集中精力仔细观察和思考实验中的问题, 不要期望实验会一帆风顺。遇到问题, 要冷静地分析和处理。仪器出现故障, 要在教师的指导下学习排除故障的方法。总之, 实验的目的在于实验能力的培养, 而不是测出几个数据就以为完成了任务。记录数据, 字迹要清楚, 要全面反映实验的过程, 包括测量条件、观察到的现象和测量的数据。希望同学们在每个实验过程中逐渐培养良好的习惯和科学的作风。实验结束时, 将实验数据请指导教师检查签字, 不合格要重做或补做, 不得事后“追记”, 更不得为拼凑结果抄袭或涂改原始数据。

实验完成后要将仪器整理好, 清扫教室, 经教师允许方可离开教室。

(3) 实验后认真总结, 写好报告。不要把取得实验数据当作实验学习的终结, 课后应将实验操作阶段遇到的许多关于仪器的结构、实验现象和操作步骤中的问题, 结合教材和参考书重新回顾, 把感性知识理性化, 并在复习的基础上整理好实验数据, 写出合格的实验报告。

实验报告是学生实验成果的书面反映, 要用自己的语言, 应力求文字简练通顺, 不要抄袭教材, 数据齐全, 图表正确。一份完整的报告一般应包括以下内容。

① 实验名称、日期、系、班级、姓名及合作者。

② 实验目的。

③ 实验仪器及用具(需要记录型号和规格)。

④ 实验原理: 写出扼要的实验原理、公式和附图。

⑤ 实验步骤: 简述主要测试内容和顺序, 打好数据记录草表。

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), 数据处理是要给出实验测量结果和对实验结果不确定度的评定, 并简要回答课后有关问题。

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

第①~⑤项的内容在实验操作前就应写在实验报告纸上(预习报告), 第⑥项中的实验数据在实验室测出后请教师检查签字, 无签字其数据无效, 不承认完成实验。课后再完成报

告的其他内容。

3. 物理实验课的学习效果

物理实验课的学习效果可以通过以下 7 个方面来检查。

- (1) 基本实验掌握得如何？是否有自学能力？
- (2) 基本仪器的调整、使用方法是否掌握？熟练程度如何？
- (3) 基本实验方法能否掌握和运用？
- (4) 操作能力有哪些提高？
- (5) 有无排除故障的能力？
- (6) 对一些实验现象的观察和综合分析能力怎样？
- (7) 实验数据记录，实验中的数据处理和实验报告的表达能力如何？

在实验过程中若能自觉地以这几条标准来要求自己，经常总结收获和体会，不但能够学好本课程，而且对今后的学习和工作也会带来深远的影响。

4. 谈谈物理实验

普通物理实验是本科专业一门独立的实验课程。对低年级的学生开设这门课程，不仅因为物理学是一门实验科学，重要的是物理实验本身有一套实验知识、方法、习惯和技能，这是今后进一步学好专业实验、提高动手能力的基础。

学习这门课程有哪些需要注意的呢？

第一，要注意掌握实验中所采用的实验方法，特别是基本的测量方法。基本的测量方法既是经常会用到的，也是复杂测量方法的基础，学习时不但要弄明白它的道理，也要逐步熟悉和记牢。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、优缺点有较深的印象。

第二，要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）、实验仪器和装置的操作要求。这些良好的实验习惯是很多实验后的经验总结，它能保证实验安全，避免差错，迅速提高观察能力，也为日后再现实验、分析实验结果提供条件。

第三，要逐步学会分析实验，排除实验中出现的各种故障。实验最后一般总有数据结果，数据的好坏说明什么？实验结果是否正确？这些问题主要是靠分析实验本身来判断，即必须分析实验方法是否正确，它带来多大误差，仪器带来多大的误差，实验环境有多大的影响，等等。由于普通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。但是学生千万不要误认为实验的目的是为了做出标准数据结果。往往有些学生，当实验数据和理论计算一致时，就会心满意足，简单地认为做好了这次实验；而一旦数据和计算结果与公认值差别较大，又会感到失望，抱怨仪器装置，甚至拼凑数据，这两种表现都是不正确的。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，实验结果必然会带来和理论公式的差异，问题在于差异的大小是否合理。所以，不论数据好坏，主要是要逐步学会分析实验，找出实验结果好坏的原因。实验过程比实验结果更重要。教师对学生实验成绩的评定侧重于实验的态度与作风，以及发现、分析、解决问题的能力。

本书中每个实验都有一定的测量内容，通过这些测量，学生体验实验方法和练习操作，并取得必要的的数据。在完成规定的测量内容以后，如果还有富余的时间，可以根据自己实验

时的具体情况分析一下实验可能存在的问题。例如，所用的某一个仪器是否可靠？实验条件是否已得到满足？如何予以证实？或者提供对实验内容或仪器的一些小改进建议等。

实验有它自己的特点和规律，要做好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实验的兴趣，打好学习其他课程的基础。

第1章 测量与误差的基本知识



测量与误差是一门专门的科学,深入研究它需要丰富的实验经验和厚实的数学基础。本章只介绍测量与误差、误差处理、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识。这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到,而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

物理实验不仅要定性观察各种物理现象,更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。为此就需要进行测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选作计量标准单位的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系。选来作为标准的同类量称之为单位。选作计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的。倍数称为测量数值。由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积。一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同。单位愈大,测量数值愈小;反之,愈大。

物理实验离不开对物理量进行测量,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,这类测量为直接测量,如用电流表测电流,用温度计测温度等。

间接测量:有些物理量常常需要根据一些理论公式,用直接测量的数据计算出被测物理量,这样的测量为间接测量。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 , 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。

测量有时根据需要可分为单次测量和多次测量,不同的测量,误差的估算不一样。

对一个物理量的测量过程就是寻找这个量的客观实际值的过程,理论证明待测量的客观实际值(真值)需经过无穷次测量后取平均值方可找到。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,所以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。

实验总是根据所要求的精确度来制订方案、选用仪器的。在一定的要求下,还要以最小的代价来取得最好的结果,不能要求仪器越高级越好,环境条件(如恒温、恒湿)越稳定越好,测量次数越多越好,等等,这样要求是不切实际或是浪费的。测量结果的误差是各个因素所引起的误差的总和。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的误差,于是,就要根据要求和误差的考虑进行合理的设计以及选择实验方案和仪器。实验的精华就在于此。

1.1.2 误差的基本知识

物理量在客观上有着确定的数值,称为真值。然而在实际测量时,由于实验条件、实验

方法和仪器精度等的限制或者不够完善,以及实验人员技术水平的原因,使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异。我们把测量值 x 与真值 x_0 之差就称为测量值的绝对误差(简称误差),记为 Δx

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

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程始终。使用任何一种仪器,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繁多,所用的仪器装置越复杂,经历的时间越长,引进误差的可能性就越大。

误差根据其性质分为两类:系统误差和偶然误差。

1. 系统误差定义及分类

系统误差是在同一被测量的多次测量过程中保持恒定或可以预知变化的测量误差的分量,例如总是使测量结果向一个方向偏离,偏离数值是一定的或按一定规律变化的。它的来源有几个方面。

(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。如仪器零点不准,放大器非线性,照相底板的收缩,在 20°C 标定的标准电阻在 30°C 下使用,等等。

(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及测量方法所带来的。如理论公式没有把散热考虑在内,没有把接线电阻和接触电阻考虑在内,单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 上的成立条件是摆角趋于零,这在实际是达不到的;还有用伏安法测电阻时电表内阻的影响是否考虑在内,等等都属此类。

(3) 个人误差:这是由于观测者本人的心理特点及习惯偏向造成的。如使用停表计时,有人停表过长,有人停表过短,并非态度不认真所至。

系统误差是有定值的,如游标尺的零点不准;有些是积累性的,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。

系统误差总是使测量结果偏大或者偏小,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它的影响或对测量结果进行修正。在某些重要的精密实验中,对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作用。表 1-1-1 列出了常用仪器的技术条件和仪器误差限,供在测量不确定度时对系统误差作综合考虑。

表 1-1-1 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	$\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$ $\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ mm}$
螺旋测微计 (千分尺)	0.01 mm	$\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$
物理天平	0.01 g(天平感量)	$\Delta_{\text{仪}} = 0.01 \text{ g(取天平感量)}$

续 表

量具(仪器)	最小分度值	仪器误差限
普通温度计	1℃	$\Delta_{\text{仪}} = 0.5^\circ\text{C}$
指针式电表 (准确度等级)		$\Delta_{\text{仪}} = \text{准确度等级}\% \times \text{满量程}$
数字表		$\Delta_{\text{仪}} = a\% \times \text{读数} + ND$ $\Delta_{\text{仪}} = \text{最小显示量(一般情况下)}$

注: 1. a ——误差相对项系数, 如 1, 2, … 数字。 D ——最后一单位读数。 N ——最后一单位读数的 N 倍。

2. 数字式仪表的仪器误差可简单地取所显示的稳定不变的数字最小显示量。 $\Delta_{\text{仪}} = \text{最小显示量}$ 。

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(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。然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) 随机误差的正态分布规律

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

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

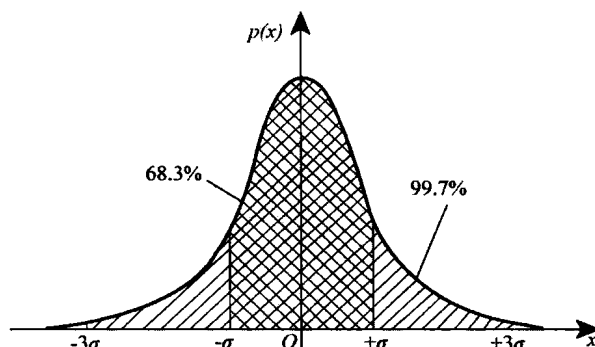


图 1-1-1 正态分布曲线

若取图 1-1-1 中曲线与 x 轴所围面积为 1, 概率密度函数 $p(x)$ 满足归一条件:

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

表示全部概率之和为 1。

其中 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, 又称为总体标准误差。它的大小决定曲线的形状。 σ 值愈小, 分布曲线愈陡峭, 峰值 $p(x)$ 愈高; σ 值愈大, 分布曲线愈平坦, 峰值 $p(x)$ 愈低。测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 标准误差定义为

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

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) 置信区间与置信概率

如图 1-1-1 所示中阴影部分可算出

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} p(x) dx = 68.3\%, \text{ 随机误差在 } (-\sigma, +\sigma) \text{ 区间的概率为 } 68.3\%.$$

$$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} p(x) dx = 95.4\%, \text{ 随机误差在 } (-2\sigma, +2\sigma) \text{ 区间的概率为 } 95.4\%.$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} p(x) dx = 99.7\%, \text{ 随机误差在 } (-3\sigma, +3\sigma) \text{ 区间的概率为 } 99.7\%.$$

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 3σ 的数据可以认为这是由于过失引起的异常数据,应该剔除。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。

说明:物理实验中常将 $3s_x$ (贝赛尔公式计算 s_x , 将在下面介绍) 代替 3σ 作为剔除实验数据中坏值的标准,称为误差极值。可以认为在测量次数 n 有限的情况下,对物理量的任一次测量值,其偏差大于 $3s_x$ 的可能性几乎不存在。如果某测量值 N_i 有 $|N_i - \bar{N}| \geq 3s_x$ 时,则需要考虑测量过程是否存在异常,并将该数据从实验结果中剔除。

4) 服从正态分布的随机误差的特征

(1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

(2) 对称性:绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。

(3) 有界性:绝对值很大的误差出现的概率近于零。

(4) 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,可以减小偶然误差,这就是在实际工作中常常采取重复多次测量的依据,但是,偶然误差是不能消除的。

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。因此标准误差只有理论上的价值。对标准误差 σ 的实际处理只能用标准偏差 s_x 近似代替标准误差 σ 进行估算。

某一测量列的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 实际测量估算时采用算数平均值 $\bar{x}$ 代替真值,常用贝赛尔公式计算 s_x 值, s_x 的表达式

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

而 n 次测量的平均值的标准偏差为

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

即一系列测量量的平均值标准偏差 S_x 是单次测量标准偏差 s_x 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 。

总之,从以上分析误差的来源表明:测量结果的总误差是系统误差和偶然误差的总和。测量中应当限制或消除系统误差,正确地计算随机误差,并估算其范围,对测量结果给出正

确、合适的评价。

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。关于实验不确定度的表示的建议书《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》(以下简称《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《指南》和《国际通用计量学基本术语》(第 2 版), 说明推广不确定度表示是物理学研究和教学中的必然趋势。

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, 表征合理赋予被测量值的分散性。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的联合分布范围。它可近似理解为一定概率的误差限值。不确定度是在误差理论的基础上发展起来的。

1. 误差与不确定度是两个不同的概念

误差是一个理想的概念, 根据传统的误差定义, 由于真值一般是未知的, 则测量误差一般也是未知的, 是不能准确得知的。因此, 一般无法表示测量结果的误差。

不确定度则是表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度, 反映了可能存在的误差分布范围, 表征被测量的真值所处的量值范围的评定, 所以不确定度能更准确地用于测量结果的表示。一定置信概率的不确定度是可以计算出来(或评定)的, 其值永远为正值。而误差可能为正, 可能为负, 也可能十分接近于零, 而且一般是无法计算的。因此, 可以看出误差和不确定度是两个不同的概念。

2. 误差和不确定度是互相联系的

误差和不确定度都是由测量过程的不完善引起的, 而且不确定度概念和体系是在现代误差理论的基础上建立和发展起来的。在估算不确定度时, 用到了描述误差分布的一些特征参量, 因此两者不是割裂的, 也不是对立的。普通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不确定度 Δ , 将实验结果写成 $x \pm \Delta$ 的形式, 这表示被测量的真值在 $(x - \Delta, x + \Delta)$ 的范围以外的可能性很小。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量所处的量值范围的评定。

1.2.2 总不确定度 Δ 的估算方法

测量结果的误差可能来自几个方面, 其不确定度通常包含几个分量, 将这些分量分成 A、B 两类:

A 类分量指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 。

它们在置信概率相同的情况下可用“方和根”法合成

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

1.2.3 直接测量的不确定度 Δ 的估算方法

1. 多次测量不确定度的估算

1) 不确定度 A 类分量 Δ_A 的估算

实际测量,只可能是有限次,此时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

$$\Delta_A = (t_p/\sqrt{n})s \quad (1-2-2)$$

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 分布因子)。当概率 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 1-2-1 查出。

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

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	$1.96/\sqrt{\infty}$

物理实验中测量次数 n 一般不大于 10, 从表 1-2-1 看出, 当 $5 < n \leq 10$ 时, $(t_p/\sqrt{n})$ 近似值可取 $1(t_p/\sqrt{n} \approx 1)$, 这时式 (1-2-2) 简化成

$$\Delta_A = \left(\frac{t_p}{\sqrt{n}}\right)s \approx s \quad (1-2-3)$$

2) 测量的不确定度 B 类分量的估算

B 类分量的评定, 有的依据仪器说明书, 有的依据仪器的确定度等级, 有的则粗略依据仪器分度值。普物实验中通常可取仪器的误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为 B 类分量, 即

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-2-4)$$

3) 不确定度的合成

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

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, 还需考虑不确定度对测量值本身大小产生的相对的影响。为此, 引入相对不确定度概念直观地评价测量结果的准确性, 其定义是

$$U_r = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% \quad (\text{百分数的形式}) \quad (1-2-6)$$

其中, 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。 U_r 越小表示测量的准确度越高, 测量结果准确; U_r 越大表示测量的准确度越低, 则测量结果不准确。

5) 测量结果完整表示

正确地完成上述各步骤的计算, 给出测量结果的完整表达式。完整的测量结果应给出被测量的最佳估计值, 同时还要给出测量的合成不确定度。测量结果应写成如下标准形式:

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

上述结果表示被测量的真值落在区间 $[\bar{x}-\Delta, \bar{x}+\Delta]$ 的概率应在 $p=0.95$ 以上, 也就是说真值落在上述区间以外的概率极小。