

大学物理实验

(第2版)

■ 主编 毕会英



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

大学物理实验

(第2版)

主编 毕会英

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书是根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，借鉴国内物理实验教学和实验研究的最新成果，在《大学物理实验》教材第1版的基础上重新编写而成的。

全书包括绪论和22个实验项目，内容涵盖了力学、热学、电磁学、光学和近代物理等实验内容。既包括一些经典的基础物理实验，比如：静态拉伸法测材料的弹性模量、空气比热容比的测量、示波器的使用、分光仪的使用和光栅等；也包括一些综合性和设计性的实验，比如：受迫振动的研究、光电效应、弗兰克-赫兹实验、电桥测电阻、光的干涉、全息照相、太阳能电池的基本特性研究等。

本书概念阐述简洁明了，实验方法巧妙、先进、可操作性强；实验仪器配有详细的图片和文字介绍，数据记录表格设计合理，便于学生预习和进行实验数据记录，是一本实用的实验教材和实验实习训练用书。

本书可作为高等院校理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 / 毕会英主编. -- 2版. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-5124-2867-6

I. ①大… II. ①毕… 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(2018)第256416号

版权所有，侵权必究。

大学物理实验(第2版)

主编 毕会英

责任编辑 尤力

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:16 字数:410千字

2019年4月第2版 2019年4月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-2867-6 定价:49.80元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题，请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

《大学物理实验(第2版)》编委会

主编 毕会英

参编 徐义爽 蔡桂双 张欣

王刚 穆春燕 黄宇鹏

再版前言

《大学物理实验》自 2013 年 8 月出版以来,得到了广大师生的厚爱。经过 5 年的教学实践,我们再次根据积累的经验,汲取使用本书的读者、同行们所提出的宝贵意见,在保持第 1 版教材的特色、组织结构和内容体系不变的基础上,根据教学需要对教材内容进行了六个方面的修订。修订的主要内容有:

第一,对第 1 版中在排版、编辑、内容等方面存在的纰漏和差错进行了订正。通过修订,力求做到概念准确、表述正确、公式精准。

第二,对实验序号做了重新编排。

第三,根据更新后的新型实验仪器,对实验 3、实验 8、实验 9、实验 13 的内容进行了更新和重新编写,增加了更新后的仪器图片和仪器介绍,保障了实验仪器与实验内容的一致性,便于学生更好地了解仪器的性能和操作方法。

第四,根据教学需要和不同专业学生的专业需求,新增了 6 个实验项目。分别是:实验 6 测量(非)线性电阻的伏安特性、实验 10 动态磁滞回线实验、实验 15 电子电荷 e 值的测定、实验 16 微波光学实验、实验 21 力学量和热学量传感器、实验 22 太阳能电池的基本特性研究。实验项目的增加有助于学生学习更多的经典实验内容和方法,了解更多的新技术和新方法,同时任课教师可根据不同专业学生的专业特点有针对性地选择教学内容进行因材施教。

第五,增加了与实验内容相关的 4 个附录。分别为附录 H 材料相对磁导率表、附录 I 铜电阻 Cu50 的电阻-温度特性、附录 J 铂电阻 Pt100 分度表、附录 K 铜-康铜热电偶分度表。

第六,将所有实验项目的实验数据记录表格作为附录 L,单独列出放在教材最后,以便学生裁剪下来,课上记录数据使用。

本书的修订工作由毕会英负责和执行。参加编写和修订的人员有毕会英(绪论、实验 1、实验 2、实验 4、实验 8、实验 9、实验 14)、徐义爽(实验 3、实验 5、实验 13)、蔡桂双(实验 10、实验 15、实验 16)、张欣(实验 6、实验 21、实验 22)、王刚(实验 12、实验 17、实验 20)、穆春燕(实验 11、实验 18、实验 19)、黄宇鹏(实验 7)。全书的框架体系设计、修订进程安排、统稿校对工作和定稿全部由毕会英完成。

在本书的修订和编写过程中,我们参阅了国内多位专家、学者的《大学物理实验》著作或译著,也参考了同行的相关教材和网络资料,在此对他们表示崇高的敬意和衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在错漏和不妥之处,恳请专家、同行和读者不吝指正。

编者

2019 年 1 月

第1版前言

本书是在北京科技大学天津学院多年物理实验教学实践和历届大学物理实验讲义的基础上编写而成的,凝聚了历年参与物理实验教学教师的集体智慧。

本书旨在通过对学生实验思想、实验方法和实验技能的训练,逐步提高学生发现问题、思考问题、解决问题的能力,进而培养学生的实验思想、科学素养、创新意识和创新能力。本书是在考虑了大学一、二年级学生的知识水平、实验技能和实验条件的基础上,按照力学、热学、电学、光学的学科体系,从基础实验入手,顺次增加难度,逐步过渡到综合实验和设计性实验的思路安排编写内容。希望这种安排能更符合学科的结构体系和学生的认知规律,更有利于教师的教学和学生的自主学习,从而改善物理实验的教学效果,达到在实验教学过程中逐步培养学生的实验思想和研究意识,提高学生的科学素养和解决问题能力的目的。

本书在编写风格上注重强化实验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基本原理、实验仪器、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,使学生在课前能够通过仔细阅读和认真思考,对所要研究的问题、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。同时,每个实验都有设计合理的数据记录表格供学生参考使用,便于学生上课时进行数据记录和数据处理。因此,这本书既是一本教学用书,也是一本很好的实验训练用书。

本书在编写形式上借鉴了科学论文常用的形式,实验项目的主题主要包括[实验目的]、[实验仪器]、[实验原理]、[实验内容与测量]、[数据处理]、[讨论]和[结论]等,以使学生在学习实验教材和撰写实验报告时熟悉科学论文的写作形式。[讨论]部分给出了一些思考题,提示学生对实验现象和实验数据加以分析和讨论,其目的是希望通过学生的自主思考,逐步提高他们提出问题、分析问题和解决问题的能力。[结论]部分提示学生,通过对实验现象和实验数据的分析和讨论得出自己的结论,从而提高其总结问题的能力。希望学生经过一段时间的课程实践训练和书写实验报告的规范化训练,科学论文的写作能力和独立解决问题的能力都会有所提高。

在本书的编写过程中,得到了北京科技大学天津学院实验室管理中心领导和全体教师的关心、帮助和大力支持,许学东教授对本书的编写提出了非常宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

同时,本书的编写参考了很多我国物理实验教学工作者编著的教材、著作和最新的教学科研成果,并通过网络搜集了大量的相关图片和资料,有些已经在参考文献中列出,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:毕会英(绪论、实验一、实验二、实验四、实验十)、王刚(实验三、实验五、实验十一)、黄宇鹏(实验六、实验七、实验八)、穆春燕(实验九、实验十四、实验十五)、徐义爽(实验十二、实验十三、实验十六)。附录部分、正文的体系框架、统稿和定稿由毕会英完成。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2013年3月

目 录

绪 论	1
实验 1 基本测量	15
实验 2 静态拉伸法测材料的弹性模量	23
实验 3 用扭摆法测量物体的转动惯量	31
实验 4 空气比热容比的测定	39
实验 5 受迫振动的研究	45
实验 6 测量(非)线性电阻的伏安特性	55
实验 7 用单臂电桥测电阻	63
实验 8 示波器的使用	69
实验 9 声速的测量	79
实验 10 动态磁滞回线实验	87
实验 11 霍尔效应	95
实验 12 迈克尔逊干涉仪	101
实验 13 光电效应	107
实验 14 弗兰克-赫兹实验	115
实验 15 电子电荷 e 值的测定	123
实验 16 微波光学实验	131
实验 17 光的干涉——分振幅干涉	141
实验 18 分光仪的使用和光栅	147
实验 19 棱镜分光仪	155
实验 20 全息照相	159
实验 21 力学量和热学量传感器	165
实验 22 太阳能电池的基本特性研究	175
附录 A 物理量的单位(国际单位制)	182
附录 B 常用物理学常数表	182
附录 C 20 °C 时金属的弹性模量	183
附录 D 某些物质中的声速	183
附录 E 常用光源的光谱线波长	183

附录 F 汞光谱线的波长(在可见光区域).....	184
附录 G 晶体及光学玻璃折射率.....	184
附录 H 材料相对磁导率表	184
附录 I 铜电阻 Cu50 的电阻-温度特性	185
附录 J 铂电阻 Pt100 分度表(ITS-90)	186
附录 K 铜-康铜热电偶分度表	186
附录 L 实验数据记录表格	189
参考文献.....	245

绪 论

一、物理实验课简介

物理学从本质上说是一门实验科学。在物理学的建立和发展过程中,物理实验起着非常重要的作用。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。在长期的发展过程中,物理实验已形成了自己的一整套理论和方法体系。

对高等理工科院校的学生来说,物理实验是学生进行科学实验基本训练的一门必修课,也是学生进入大学后系统学习基本实验知识、实验方法和实验技能的开端。物理实验的知识、方法和技能对学生进行后续实践训练,以及毕业后从事各项科学实践和工程实践活动起着非常重要的作用。本课程通过对基本物理现象的观察分析,使学生能够掌握基本物理量的测量方法、常用实验仪器的结构原理和使用方法以及典型的实验思想等。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。

(一) 物理实验课程的任务及基本要求

2010年教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,明确了本课程的教学任务是:

(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思想和方法。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和创新能力。

(2) 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、爱护公共财产的优良品德。

同时,对教学内容提出了基本要求:

(1) 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

② 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法以及用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量的测量,注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

例如:零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

(6) 适当了解物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

对科学实验能力培养的基本要求如下:

(1) 独立实验的能力。

能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告;培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 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。

(3) 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,逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力。

能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

(二) 如何学好大学物理实验课

要学好物理实验课,同学们应注意做好以下三方面的工作:

1. 课前预习

课前预习是能否顺利进行实验的关键,因此实验前必须做好预习。预习时,要详细阅读有关实验内容,明确实验目的,弄清实验原理,了解实验方法;对实验仪器的性能和使用方法有初步认识,避免盲目操作,损坏仪器;并根据实验要求,拟定实验方案和步骤,设计好记录数据的表格,写出实验预习报告。预习报告内容包括:实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理(包括主要的测量公式)、主要的实验步骤(包括数据记录表格)等。

2. 实验操作

实验操作是培养同学们科学实验能力重要的手段和过程。通过对物理现象的观察和研究,加深对物理理论的理解,提高理论联系实际的能力,培养科学创新的能力。进入实验室后,首先要遵守实验室规则;操作前要检查和认识实验仪器,了解仪器的性能和使用方法;操作时,要掌握正确的实验方法,按照实验步骤进行规范操作;记录实验数据时,要认真、仔细、实事求是

是,不编造实验数据;并将测量数据认真地填写在预习时已准备好的数据记录表格上。实验完成后,将实验数据交由任课教师检查确认并签字,在得知数据合格有效后,方可整理仪器,离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对实验的全面总结。要认真细致地对实验数据进行整理和计算,在对实验结果加以分析总结的基础上,写出完整的实验报告。实验报告除了姓名、学号、班级和实验日期外,一般要求有如下几方面的内容。

实验名称:所做实验的名称。

实验目的:完成本实验应达到的基本要求。

实验仪器:所用仪器的名称和型号。

实验原理:用自己的语言简述实验原理、实验方法、实验条件、主要的测量公式;画出必要的原理图、电路图或光路图。

实验内容和步骤:简要写出主要的实验步骤。

数据记录及处理:将原始实验数据填入数据记录表格内,包括实验时的环境条件,如室温、气压等;处理数据时,要有必要的计算过程,不但要计算出被测量的最佳值,还应计算出表示实验误差的不确定度,并正确表示出测量结果,画出必要的实验曲线(必须用坐标纸作图)。

分析讨论:对实验现象和实验结果进行认真分析和讨论,完成课后讨论题。

结论:结论是对实验的总结。因此,对最终的实验结果应做最后的总结,并单独表述出来,不要将其湮没在处理数据的过程中。

(三) 实验室规则

(1) 学生实验前必须认真预习实验内容,明确实验目的、原理、方法和步骤,进入实验室需带上实验预习报告,准备接受指导教师提问,经教师检查同意,方可进行实验。没有预习或提问不合格者,须重新预习,方可进行实验。

(2) 学生必须按规定的时间到实验室上实验课,进入实验室必须遵守课堂纪律,保持安静的实验环境,遵守实验室各项规章制度,严禁高声喧哗、吸烟、随地吐痰或吃零食,不得随意动用与本实验无关的仪器。

(3) 实验准备就绪后,须经指导教师检查同意,方可进行实验。实验中应严格遵守仪器设备操作规程,认真观察和分析现象,如实记录实验数据,独立分析实验结果,认真完成实验报告,不得抄袭他人实验结果。

(4) 实验中要爱护实验仪器设备,注意安全,节约水、电、药品、元件等消耗材料;实验时,如缺少仪器、用具、材料等,应立即报告老师;凡违反操作规程或粗心大意而造成事故、损坏仪器设备者,必须写出书面检查,并按有关规定赔偿损失。

(5) 做完实验后学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐。经教师检查测量数据和仪器还原情况并签字后,方可离开实验室。

(6) 应按实验要求及时、认真地完成实验报告。实验报告连同教师签字的原始数据应在规定时间内一起交给任课教师。

二、测量误差与实验数据处理基础知识

(一) 测量与测量误差

1. 测量及其分类

用实验方法找出物理量量值的过程叫测量。按测量方式可将测量分为直接测量和间接测量。

1) 直接测量

凡使用测量仪器能直接测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,相应的长度、温度、时间等称为直接测量量。直接测量按测量次数分为单次测量和多次测量。只测量一次的测量称为单次测量。测量次数超过一次的测量称为多次测量。

2) 间接测量

对于某些物理量的测量,由于没有合适的测量仪器,不便或不能进行直接测量,只能先测出与待测量有一定函数关系的直接测量量,再将直接测量的结果代入函数式进行计算,得到待测物理量的量值,这个过程称为间接测量。相应的被测量称为间接测量量。

例如:测量钢球的密度时,可以先对钢球的直径 D 和质量 m 分别进行直接测量,然后将 D 和 m 代入下面的测量公式中计算出钢球的密度 ρ 。

$$\rho = \frac{m}{\frac{\pi}{6}D^3} \quad (0-1)$$

整个过程称为间接测量,其中 ρ 为间接测量量, D 和 m 为直接测量量。

2. 测量误差

误差存在于一切测量过程中。测量误差就是测量结果与被测量的真值(或约定真值)之间的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确度,测量误差可用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \quad (0-2)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\% \quad (0-3)$$

被测量的真值其实是一个理想的概念。对测量者来说,真值一般是不知道的。因此实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。由于真值一般是未知的,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被测量的约定真值,这时才能计算误差。

(二) 误差的分类及处理方法

测量误差主要分为系统误差和随机误差两类。由于系统误差与随机误差的性质和来源不同,因此处理它们的方法也不相同。

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。系统误差的来源主要有以下几方面:

1) 仪器误差

仪器误差,即由仪器、实验装置引起的误差。如零点不对,仪器未经校准、安装不正确、元件老化等。

2) 方法(理论)误差

方法(理论)误差,即测量所依据公式自身的近似性,或实验条件达不到公式所规定的要求,或测量方法所引起误差。

3) 环境误差

环境误差,即由于环境影响而产生的误差。如室温的逐渐升高,外界电磁场的干扰,外界的振动等。

4) 测量者的固有习惯

测量者因不良习惯或生理、心理等因素造成的误差。例如:用米尺测长度时斜视读数;用秒表测时间时掐表速度较慢等。

对系统误差可针对其来源,采取相应的方法尽力消除它的影响,或对结果进行修正。消除系统误差的方法有以下几方面:

1) 对测量结果引入修正值

由仪器、仪表不准确产生的误差,可以通过与更高级别的仪器、仪表做比较,而得到相应的修正值;由理论上、公式上的不准确而产生的误差,可以通过理论分析,导出修正公式。

2) 采用适当的测量方法

采用适当的测量方法,可以有效地减小或消除实际测量中出现的系统误差。常用的方法有以下几种:

(1) 交换法:就是将测量中的某些条件(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。如电桥测电阻实验中,把被测电阻与标准电阻交换位置进行测量的方法。

(2) 补偿法:如热学实验中采用加冰降温的方法使系统的初温低于室温以补偿升温时的散热损失。

(3) 替代法:即在一定条件下,用某一已知量替换被测量以达到消除系统误差的方法。

(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(如分光仪)中常使用这种方法。

2. 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。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的范围内。随机误差的存在,使每次测量值可能偏大或偏小,不能确定。

随机误差的来源主要是: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;观测者本人在判断和估计读数上的变动性等。

随机误差的出现,就某一次测量值来说没有规律,其大小和方向不可预知,但对于多次测量,随机误差是按统计学上的正态分布规律分布的。其分布特征如下:

(1) 正方向误差和负方向误差出现的次数大体相同,在多次测量时正负随机误差大致可以抵消。

(2) 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。

随机误差不可消除,但可依据其分布特征通过多次测量来减小随机误差。

由于随机误差只能减小,不可消除,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。科学实验中通常用标准偏差表示随机误差。

假设对某一物理量在测量条件相同的情况下,进行 n 次无明显系统误差的独立测量,测得 n 个测量值为:

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$$

测量值的算术平均值最接近被测量的真值,测量次数越多,接近程度越好,因此,用算术平均值表示测量结果的最佳值。

算术平均值的计算式是:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (0-4)$$

每一次测量值 X_i 与 \bar{X} 平均值之差叫做残差,即:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (0-5)$$

测量的随机误差用标准偏差 S 来估算。 S 用下面的贝塞尔公式来计算:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (0-6)$$

S 的值可以反映出测量值 X_i 的离散性。标准偏差小就表示测量值很密集,即测量的精密度高;标准偏差大就表示测量值很分散,即测量精密度低。

(三) 测量结果的不确定度

由于测量误差的不可避免,使得真值也无法确定;而真值不知道,也无法确定误差的大小。1981年 第 70 届国际计量委员会公布了国际计量局提出的《实验不确定度表示的建议书 INC-1》。以测量结果的不确定度表示和评定测量结果的质量。1993 年,ISO 等七个国际组织联合颁布了《不确定度表示指南》,物理实验在表示实验结果时也采用不确定度表示评定结果。

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,或者说它表征被测量的真值在某个量值范围的一个客观的评定。

在完整的测量结果中,不仅要给出被测量的平均值 \bar{X} 代替其真值,还应说明结果的可信赖程度,由于被测量的真值一般是不知道的,不可能用指出误差的方法说明结果的可信赖程度,只能用不确定度 U 来评定测量结果的质量,并将测量结果表示为:

$$X = (\bar{X} \pm U) \text{ 单位} \quad (0-7)$$

不确定度反映的是最佳估计值附近的一个范围 $(\bar{X} - U, \bar{X} + U)$,真值以一定的概率落在其中。不确定度越小,标志着误差的可能值越小,测量的可信赖程度越高;不确定度越大,标志着误差的可能值越大,测量的可信赖程度越低。

1. 不确定度的分类

不确定度按其数值的评定方法可分为两类:A 类分量 U_A 和 B 类分量 U_B 。

A 类不确定度 U_A : 多次重复测量时用统计学方法计算的那些分量。比如估算随机误差的标准偏差 S 就属于 A 类分量。

B 类不确定度 U_B : 用其他非统计学方法估出的那些分量。 U_B 只能基于经验或其他信息作出评定。

总不确定度 U : 当各量相互独立时, 用“方和根法”将上述两类不确定度分量合成, 即得总不确定度, 简称不确定度 U :

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (0-8)$$

2. 不确定度的计算

A 类不确定度 U_A 由实验标准偏差 S 乘以因子 $\frac{t}{\sqrt{k}}$ 求得, 即:

$$U_A = \left(\frac{t}{\sqrt{k}}\right) S \quad (0-9)$$

k 为测量次数, 因子 $\frac{t}{\sqrt{k}}$ 可由表 0-1 查出。

表 0-1 不同测量次数因子 $\frac{t}{\sqrt{k}}$ 查询表

测量次数 k	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	$k \rightarrow \infty$
(t/\sqrt{k})	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96/\sqrt{k}$
(t/\sqrt{k}) 的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	5 < k ≤ 10 时, $(t/\sqrt{k}) \approx 1$					k > 10 时, $(t/\sqrt{k}) \approx 2/\sqrt{k}$		

多次测量时, 当 $5 < k \leq 10$ 时, 因子 $\frac{t}{\sqrt{k}} \approx 1$, 则有 $U_A \approx S$ 。

B 类不确定度 U_B 近似取仪器仪表的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。教学仪器误差限一般简单地取计量器具的允许误差限, 有时也由实验室根据具体情况近似给出。

$$U_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (0-10)$$

总不确定度为 U :

$$U = \sqrt{\left(\frac{t}{\sqrt{k}}\right)^2 S^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (0-11)$$

如果因为 S 显著小于 $\frac{1}{2}\Delta_{\text{仪}}$, 或估计出的 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。

(四) 测量结果的表示方法

1. 直接测量结果的表示方法

测量结果应给出被测量的量值 \bar{X} , 并标出不确定度 U 。即:

$$X = (\bar{X} \pm U) \text{ 单位}$$

对于单次测量,不确定度可直接用 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示, $\Delta_{\text{仪}}$ 由实验室给出。

例题 0-1:

用螺旋测微器($\Delta_{\text{仪}}=0.004 \text{ mm}$)测钢丝的直径,不同方位测 10 次,测量结果如下:

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
d/mm	0.457	0.467	0.472	0.465	0.458	0.462	0.459	0.469	0.460	0.465	0.463
$\Delta d/\text{mm}$	-0.006	0.004	0.009	0.002	-0.005	-0.001	-0.004	0.006	-0.003	0.002	

钢丝直径的测量结果应如何表示?

解:

(1) 先求其最佳值(平均值):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 0.4634 \text{ mm} \approx 0.463 \text{ mm}$$

(2) 求不确定度 U_d :

由于测量次数为 10 次,所以因子 $\frac{t}{\sqrt{k}} \approx 1$, 则 $U_A \approx S$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\Delta X_i)^2}{k-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2}{k-1}} = 0.005 \text{ mm}$$

$$U_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$$

则:

$$U_d = \sqrt{S^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 0.006 \text{ mm}$$

(3) 测量结果表示为:

$$d = \bar{d} \pm U_d = (0.463 \pm 0.006) \text{ mm}$$

2. 间接测量结果的表示方法

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。所以,直接测量结果的不确定度肯定影响间接测量结果,这叫不确定度的传递。不确定度的传递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 , 它们都是相互独立的量,其最佳估计值分别为其平均值,相应的总不确定度分别为 U_x, U_y, U_z, \dots 。间接测量 Φ 与各直接测量量之间的关系可以用函数表示为:

$$\Phi = F(x, y, z, \dots) \quad (0-12)$$

间接测量量 Φ 的不确定度 U_Φ 为各直接测量量不确定度 U_x, U_y, U_z, \dots 的“方和根”,即:

$$U_\Phi = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-13)$$

$$\frac{U_\Phi}{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-14)$$

以上两式是间接测量量总不确定度传递的公式。其中: