

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验(上)

主 编 / 刘立宝

副主编 / 王本阳

李盛凤

焦威严

王新顺

范光华



APETIME
时代出版

时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验(上)

主 编 / 刘立宝

副主编 / 王本阳 李盛凤 焦威严 王新顺 范光华



时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验. 上/刘立宝主编. —合肥:安徽科学技术出版社, 2010. 9
ISBN 978-7-5337-4801-2

I. ①大… II. ①刘… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 167447 号

大学物理实验. 上

刘立宝 主编

出版人: 黄和平 选题策划: 王 勇 责任编辑: 王 勇
责任校对: 程 苗 责任印制: 李伦洲 封面设计: 朱 婧
出版发行: 时代出版传媒股份有限公司 <http://www.press-mart.com>
安徽科学技术出版社 <http://www.ahstp.net>
(合肥市政务文化新区圣泉路 1118 号出版传媒广场, 邮编: 230071)
电话: (0551)3533330

印 制: 合肥杏花印务股份有限公司 电话: (0551)5657639
(如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂商联系调换)

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.5 字数: 380 千
版次: 2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5337-4801-2

定价: 30.00 元

版权所有, 侵权必究

前 言

本书是根据高等院校物理实验课程教学的基本要求,在多年使用的理工科大学物理实验讲义基础上,结合教学经验全面修订、编写而成。编写工作订正了所有实验内容,充实了绪论部分,重点重编了测量不确定度理论和实验预备知识。另外,增编了附录“数值修约国家标准(2008)”“科学常数”和“重要物理实验”。编写中,力求强化教材的可读性与实用性、课程的实践性特色,引导学生学习并了解基础实验知识及其在各专业领域的应用,帮助学生打好科学实验技能训练的基础。

刘立宝负责编写的组织工作,包括全书结构、内容的制定,历次研讨会的组织以及仪器照片的拍摄等,并负责编写了绪论、附录和实验 1、实验 2、实验 4、实验 11、实验 12、实验 13、实验 15,参与编写了实验 8、实验 10。焦威严负责编写了实验 8、实验 14、实验 17;李盛凤负责编写了实验 3、实验 18、实验 20;王新顺负责编写了实验 6、实验 16、实验 19;王本阳、毛晓芹负责编写了实验 5、实验 7;冉玲苓负责编写了实验 9、实验 10;王新顺、范光华参与编写附录。

孙光耀参与了大量研讨并提出意见和建议,于铭靖、李明、崔忠斌、郭建英做了许多有益的工作;本书参考了大量书籍、文献和互联网资料。在此一并致谢。

本书分上、下册,适合理工科类专业本、专科学生使用。

因时间紧迫,且编者水平有限,望使用者针对书中的不妥之处给予指正,以便改进。

编 者

如何使用本书

有了“大学物理”和“高等数学”的基础,“大学物理实验”这门课程应该不难学习,至少理解“实验原理”部分不会有大碍。然而,总有相当一部分学生在走进实验室后感到无措。本书的目的即在于引导、帮助理工科低年级学生掌握科学实验的基本知识,对学生进行循序渐进的科学实验技能训练。

本书由三部分组成。第一部分是“绪论”,主要内容为测量不确定度、学习方法、数据处理与表征;第二部分是以力、热、电为主的 20 个各有特色的实验,内容相对独立,但仪器、方法常有交叉;第三部分“附录”给出一些非常有用的数据和资料。

各种知识渗透在每一个实验中,在某些部分,学习的重点在于出色的实验方案,而在其他部分,重点则在于精巧的仪器或是数据处理方法,等等。书中没有指定实验的顺序,读者可以凭兴趣自由选择。编者建议,一定要首先认真阅读绪论的全部内容,这很重要,它会使你尽快对“自然科学实验”有个相对完整的了解。

建议大家在学习中做到:

- 一、细读教材,包括参考资料和附录,独立完成预习报告;
- 二、认真对待实验的预习问题、注意事项;
- 三、尽量将仪器实物与书中讲述对照起来学习;
- 四、撰写实验报告时,经常查阅绪论。

无论你追求哪种形式的目标——知识和能力的提高? 兴趣与想象力的发展? 一个较好的课程成绩? ——亲自完成实验课的全部环节,这一点意义重大。如果说通过眼、耳所学的知识,能记得其中的 50%,那么动手做了,学习的成效就会达到 90%。

完成一个个实验比较容易,难点是如何尽可能多的掌握解决问题的手段和思路,这也许是本书的最终目的所在。虽然编写的初衷只是提供一本教材,但事实上它应当成为引导你进入科学实验殿堂的钥匙。实验能力的培养需要反复的练习和思考,在日积月累的学习中,你会感受到这本书、这门课程带给你的学习的乐趣、探索的乐趣、收获的乐趣。

关于这本书的任何问题,你可以随时发来邮件,我们乐于了解它带给你的帮助和你对它的意见。你独特的问题和真实的感受将会使本书后续版本的内容更准确、更完整。联系邮箱: lbliu@hit.edu.cn.

目 录

绪 论	1
一、理工科大学生必须做好物理实验	1
二、测量与不确定度	3
三、常用数据处理方法	19
四、修约与运算	31
五、电磁学实验预备知识	36
六、光学实验预备知识	50
七、怎样做好物理实验	56
八、实验报告要求及范例	59
九、习题	63
实验 1 数据处理训练	67
实验 2 光的单缝衍射	75
实验 3 液体的黏度	81
实验 4 自组望远镜显微镜	90
实验 5 集成开关型霍尔传感器	95
实验 6 气浮转动平台	103
实验 7 液体表面张力	110
实验 8 耦合摆	115
实验 9 拉伸法测杨氏模量	123
实验 10 导热系数	129
实验 11 电学实验基本训练(设计性)	136
实验 12 示波器	141
实验 13 惠斯通电桥	155
实验 14 电表的改装与校验(设计性)	160
实验 15 电位差计	165
实验 16 磁阻效应	171
实验 17 热电偶定标与金属凝固冷却曲线	177
实验 18 旋转液体表面特性	182
实验 19 等厚干涉与应用	187
实验 20 薄透镜焦距	193
附录 A 数值修约规则与极限数值的表示和判定	200
附录 B 科学常数	208
一、常用物理基本常数表	208

二、标准波长	209
三、主要的音响单位	209
四、一些物质的电阻	210
五、物质的燃点、火焰	212
六、温度的标准	213
七、常用材料密度	213
八、弹性模量与热物理性质	216
九、法定计量单位	217
十、单位与换算	220
附录 C 重要物理实验	229
一、最美丽的十大物理实验	229
二、诺贝尔物理学奖年鉴	231
三、重要物理实验年表	235

绪 论

一、理工科大学生必须做好物理实验

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。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。物理学展现的一系列科学的世界观和方法论深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活。物理学是人类文明的基石,在人才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。课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、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。

(一) 理工专业学生要重视物理实验的学习

物理实验在物理学自身发展中有着重要的作用,同时在推动其他科学、工程技术的发展中也起着重要的作用。历史上每次重大的技术革命都源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类跨入电气化时代;原子物理学、量子力学的发展,促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展;物理学家在实验室中创造的万维网(WWW)已成为当今时代的重要特征之一。近代各学科相互渗透,物理实验的构思、方法、技术与其他各学科相互结合,取得了丰硕成果,而且将发挥更大的作用。

实验是科学研究的基础,也是科学知识的源泉,加强物理实验是高素质人才培养的时代特征,也是提高实验实践类课程教学质量的先决条件。各专业的学生随着年级的升高,将要接触很多越来越专门化、要求越来越高的实验课、实习课、课程设计、毕业设计等,以及毕业后各自专业领域的工作或攻读研究生学位阶段的学习,这都需要学生具备良好的科学实验素质,在实践能力上具备坚实的功底。

发达国家理工院校无不重视物理实验教学与训练。我国教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会在《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》中指出:大学物理实验课程“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”。

正规院校都将“大学物理实验”指定为理工类专业学生的必修课程。在物理实验室里学到的知识、思想、方法,接触到的仪器,受到的训练等,都将会在同学们的长期学习中发挥重要作用。

(二) 实验物理学的形成及物理实验的意义

物理学新概念、规律的发现和确立主要依赖于实验,物理学的新突破也常常基于新的实验技术和方法。随着物理学的发展,人类积累了丰富的实验思想和实验方法,创造出各种精密巧妙的仪器设备;物理实验的方法、思想、仪器已被应用到各个自然科学领域。

伴随着物理学的发展,实验综合了科技成就,逐渐形成自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学。它在内容上包括了许多在普通物理教学中所包括不了的理论知识、方法和技能,主要表现在:

(1) 实验手段(仪器、设备)的发展。精确度不断提高,适用范围不断开拓,自动化程度不断提高等。遥感、遥控、遥测技术的应用,使仪器已经从简单的物理原理脱胎出来,成为独立体系。

(2) 在前人积累和现代科技的基础上,实验方法从孤立的对现象观测、实验方案设计、过程控制以及资料分析、结果归纳等,发展成较完整的系统方法。

(3) 综合数学、物理等学科的成就,形成了实验的数据处理、误差分析的严格理论体系,并卓有成效地指导着实验的各个环节,使之顺利进行。

(4) 为解决各种精确测量和精密实验中的实际问题,综合利用了多学科和多种专业技术的交叉,形成了实验物理学的独立科学技术体系。

物理实验是物理理论的基础,它是物理理论正确与否的试金石。美妙的假设或推理,要成为被公认的物理规律,必须有实验结果的验证。在物理学的发展中,实验和理论相互促进与完善的例子不胜枚举。

1895年伦琴在实验中发现了新的电磁辐射——X射线,推动了气体中电传导的研究;J.J. 汤姆逊对气体带电引起分子电离做出解释,进而促进洛伦兹创立了电子论;而电子理论又给塞曼效应以理论解释。这一连串的事实表明实验和理论有着密切的关系,而且共同推进物理学发展进程。

另外,如德布罗意、戴维孙和革末关于物质波动性的理论假设与实验证实,法拉第、麦克斯韦、赫兹等人所做的电磁学领域卓越的实验和理论工作,普朗克提出“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念、导出黑体辐射公式、为量子力学的发展开辟道路等,无一不印证着实验和理论相辅相成的规律。

作为高校理工科专业进行科学实验训练的第一门基础课,物理实验是各专业后继实验实践类课程的基础。也就是说,它是学生从事科学实验工作的入门训练。虽然与科学实验有所不同,但物理实验作为教学实验有着特殊的内容和作用。科学实验为了预测、验证或获取新的信息,通过技术性操作来观测由预先安排的方法所产生的现象。它是探索的过程,结果可能符合预期也可能否定预期,还可能有意意外收获而得到成功。例如穆斯堡尔效应的发现。教学实验都经过精心设计准备,排除了次要干扰因素,通常能够成功。它的目标不在于探索,而在于传授知识、培养人才。物理实验课担负着培养学生科学实验素养的任务,它的重要性不言而喻。

(三) 大学物理实验课程的任务

物理实验作为一门独立的基础课程,直接面向物理实验基础较薄弱的理工科低年级学生。它有以下任务:

(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。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) 培养学生严谨细致的科学态度,包括: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和遵守纪律、遵守操作规程、爱护公共财产、团结协作的优良品德,以及善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、注意安全的良好习惯。

学习本课程后,学生应当具备的基本科学实验技能包括:

- (1) 自学能力 自行阅读实验教材或参考资料,理解实验内容,做好实验准备;
- (2) 动手实践能力 根据教材和仪器说明书,调整和使用常见的仪器;
- (3) 思维判断能力 运用已有知识对实验现象和结果进行符合逻辑的分析和判断;
- (4) 表达书写能力 记录和处理数据、绘制曲线、表述实验结果,撰写实验报告;完成简单的设计性实验。

二、测量与不确定度

误差理论及数据处理,是一切实验中不可缺少的基本内容,是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科,随着科技事业的发展,近年来误差理论的基本概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析,其目的是对测量结果作出评定,最大限度地减少测量误差,或指出减少测量误差的方向,提高测量质量,提高测量结果的可信赖程度。对低年级学生,这部分内容难度较大,本课程仅限于介绍误差分析的初步知识,着重介绍几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证。

(一) 测量不确定度及其表述方式

1. 背景

在测量过程中,误差普遍存在,既有随机性误差又有非随机性误差,过去用标准误差评定测量结果的方式具有片面性,为了全面反映测量结果的可信程度,需要引入“不确定度”概念。1980年国际计量局提出了“实验不确定度”的建议书,1981年国际计量大会通过了采纳“建议书”的决议。1986年我国计量科学院发出了用不确定度作为误差指标的通知,国家技术监督局于1991年正式下发文件《JJF102721991 测量误差及数据处理》,决定于1992年10月正式开始采用不确定度评定误差。国际标准化组织(ISO)、国际计量局等七个国际组织于1993年指定了具有国际指导性的《测量不确定表示指南 ISO1993(E)》(简称指南 GUM),为测量不确定度的统一奠定了基础。我国计量科学研究院于1999年经国家质量技术监督局批准,发布了

中国国家计量技术规范《JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示》,明确提出了测量结果的最终形式要用不确定度来进行评定与表示,由此不确定度在我国开始进入推广使用阶段。

在理工科大学物理实验教学中,采用不确定度评定实验结果对推动我国科技测量与国际接轨具有重要意义。近年来国际与国内的科技文献开始采用不确定度概念,我国各个高校也不断开展这方面的讨论,改革教学内容与方法,力求与国际接轨。虽然一些学者对《指南》的有些内容持批评态度,但总的趋势是在贯彻《指南》的同时,不断完善它。

2. 测量不确定度基本概念

按《JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示》中的定义,测量不确定度定义为测量结果带有的一个参数,用以表征合理赋予被测量量的分散性,它是被测量客观值在某一量值范围内的一个评定,意为对测量结果正确性的可疑程度。

真值以一定置信概率落在测量平均值附近的一个范围内。即:

$$x = \bar{x} \pm U \quad (\text{置信概率 } P) \quad (\text{II}-1)$$

U 为测量不确定度。

不确定度是“误差可能数值的测度”,表征所得测量结果代表被测量的程度,也就是因测量误差存在而对被测量不能肯定的程度,因而是测量质量的表征。

对一个物理实验的具体数据来说,不确定度是指测量值(近真值,真值的最佳估计值,一般为实验数据的平均值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中。

不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低。在实验和测量工作中,不确定度一词近似于不确知,不明确,不可靠,有质疑,是作为估计而言的。误差是未知的,因此,不可能用指出误差的方法去说明可信赖程度,而只能用误差的某种可能值去说明可信赖程度,所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量。此外,用不确定度评定实验结果的误差,其中包含了来源不同的各种误差对结果的影响,而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律,这样就更准确地表述了测量结果的可靠程度,因而有必要采用不确定度的概念。

测量不确定度与误差概念有别。误差定义为“测量结果减去被测量的真值”。真值不能确定,实际上用的是约定真值。误差之值只取一个符号,非正即负。对同一被测量的对象不论其测量程序、条件如何,相同测量结果的误差相同;而在重复性条件下,不同结果可有相同的不确定度。测量仪器的特性可以用“示值”误差、最大允许误差(误差限)等术语描述,表示由于测量仪器的不完善而可能产生的测量不确定度分量。

不确定度理论将不确定度按照测量数据的性质分类:符合统计规律的,称为 A 类不确定度,而不符合统计规律的统称为 B 类不确定度。测量不确定度的理论不排除误差的概念,这里的误差指测量值与平均值之差或测量值与标准值(用更高级仪器的测量值)的偏差。

3. 测量结果的表示

科学实验中要求表示出的测量结果,既要包含待测量的近真值 $\bar{x}$,又要包含测量结果的不确定度 U ,并写成物理含意深刻的标准表达形式,即

$$x = \bar{x} \pm U (\text{单位})$$

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (\text{II}-2)$$

式中 x 为待测量, $\bar{x}$ 是测量的近真值, U 是合成不确定度, 一般保留 1 位有效数字, E 是相对不确定度。

在大学物理实验教学中, 不要求刚接触实验课的学生对误差呈何种分布做过多的考虑。此时可将不确定度作简化处理。

实验中, 我们对物理量的测量次数 n 一般规定为 6~10 次。A 类不确定度

$$U_A = S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{II}-3)$$

B 类不确定度近似取仪器误差限

$$U_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (\text{II}-4)$$

测量结果简化不确定度表示为

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (\text{II}-5)$$

最后写出测量结果标准表达式(II-2)式。

在物理实验教学中采用标准合成不确定度和扩展不确定度评定实验结果, 必须对仪器误差的可能分布类型进行确定, 然而这种确定在教学中是困难的, 也无必要。用简化了的不确定度式评定实验结果, 置信概率高。这样虽不太严格, 但在物理实验教学中采用还是较合适的, 不必过分拘泥于误差分布类型的分析。

(二) 测量与误差

1. 测量

物理实验主要是再现物体运动形态, 探索物理量之间的关系, 从而验证理论或发现规律。进行物理实验, 不仅要进行定性的观察, 而且还要进行定量的测量, 以取得物理量数量的表征。测量就是将待测量与同类标准量(量具)进行比较, 得出结果, 这个比较的过程就叫测量, 比较的结果记录下来就是实验数据。测量数据应包含测量值的大小和单位, 二者缺一不可。

测量的目的是, 不仅要得到待测量的近真值, 而且要对近真值的可靠性作出评定(即指出误差范围)。

根据获得结果的方法, 可将测量分为直接测量和间接测量。

直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测物体的长, 用天平称量物体的质量, 用电流表测电流等, 都是直接测量。

间接测量借助函数关系由直接测量的结果计算出所要求的物理量。例如钢球的直径 D 由直接测量测出, 则由公式 $V = \frac{\pi}{6} D^3$ 求出钢球的体积就是间接测量。

物理实验中大量的的是间接测量, 这是因为在某些情况下实现直接测量比较复杂, 或者直接测量精度不高。在间接测量中, 必须找出各直接测量量的不确定度分别对总的的不确定度的影响, 并准确地计算出来。借助于偏导数(在此称为灵敏系数)可以很好地解决这个问题。

此外, 根据测量条件来分, 有等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量, 如同一个人, 用同一个仪器, 每次测量时周围环境条件相同, 这样每次测量的可靠程度相同。反之, 若每次测量时的条件不同, 或测量仪器改变, 或测量方法、条件改变, 这样所进行的一系列测量叫非等精度测量。非等精度测量所得结果的可靠程度自然不相

同。物理实验中大多采用等精度测量。

评价测量结果的术语主要有测量的精密度、准确度和精确度,在使用中含义不尽一致,以下介绍较为普遍采用的意见。

测量精密度表示在同样测量条件下,对同一物理量进行多次测量,所得结果彼此间相互接近的程度,即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度,因而测量精密度是测量随机误差的反映。测量精密度高,随机误差小,但系统误差的大小不明确。

测量准确度表示测量结果与真值接近的程度,因而它是系统误差的反映。测量准确度高,则测量数据的算术平均值偏离真值较小,测量的系统误差小;但数据较分散,随机误差的大小不确定。

测量精确度则是对测量的随机误差及系统误差的综合评定。精确度高,测量数据较集中在真值附近,测量的随机误差及系统误差都比较小。

增加重复测量次数对于减小、抵消随机误差,提高测量的精密度有利。但是实验表明,当次数增加时,这种减小渐渐变慢,当次数大于 10 时这种减小就不明显了。通常取测量次数为 6~10 次为宜。

2. 误差的种类

在测量过程中,由于测量仪器、实验条件及其他种种原因,测量是不能无限精确的。测量结果与客观存在的真值之间总有一定差异。测量值 x 与真值 x_0 之差定义为误差,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (\text{II}-6)$$

根据误差的性质和产生的原因,可分为系统误差和随机误差,另有过失误差。

系统误差是指在一定条件下多次测量结果总是向一个方向偏离,其数值取定值或按一定规律变化,系统误差的特征是它的规律的确定性。系统误差的来源有仪器误差、理论误差、观测误差等。

仪器误差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。

理论误差是由于测量所依据的理论公式本身的近似性造成的;或实验条件不能达到理论公式所规定的要求所造成的;或测量方法的固有不足所造成的。

观测误差是由于观测者本人生理或心理特点造成的。

例如,用落球法测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,这是测量方法不完善造成的;用停表测运动物体通过某段路程所需的时间,若停表走时偏快,无论测量多少次,测量的时间 t 将总是偏大,这是仪器不准确造成的;在测量中,若周围温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,这是由于环境因素变化引起的,等等。

在任何一项实验工作和具体测量中,首先必须要想办法最大限度地消除或减少一切可能存在的系统误差。消除系统误差,首先要找到引起系统误差的原因,针对性地采取措施才能消除它的影响,或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和测量方法,反复进行对比,系统误差的减小或消除是比较复杂的问题。常用的方法有:检定修正法、替代法、异号法等。

检定修正法:指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

替代法:指测量装置测定待测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

异号法:指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差,采取平均值后消除的一种方法。例如,在外界磁场作用下,仪表读数会产生一个附加误差,若将仪表转动 180° 再进行一次测量,外磁场将对读数产生相反的影响,引起负的附加误差。两次测量结果平均,正负误差可以抵消,从中可以减小系统误差。

随机误差是由于感官灵敏度和仪器精密度、周围环境的干扰以及随着测量而来的其他不可预测的随机因素的影响造成的误差。表现为每次测量值会有差异,其误差值的大小和符号的正负起伏不定,无确定性。当测量次数很多,随机误差会显示出明显的规律性。实践和理论都证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布)。其特点是:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大,绝对值相等的正负误差出现的概率相同;绝对值很大的误差出现的概率趋于零。因此,可以通过求算术平均值的办法使正负误差互相抵消,从而使随机误差大大减小,所以算术平均值可以非常接近真值。正态分布是归一化的,曲线下某区间的积分(面积)等于误差落入该区间的概率。

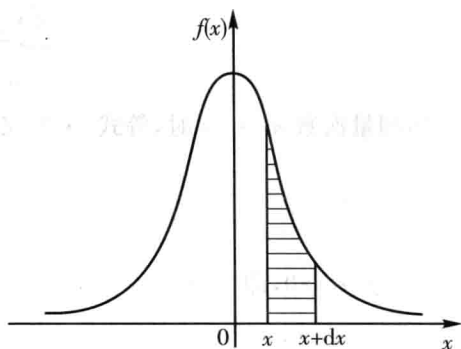


图 II-1 随机误差的正态分布规律

过失误差是由于测量者过失,如实验方法不合理,用错仪器,操作不当,读错刻度,记错数据等引起的误差。它不属于测量误差。只要测量者有严肃认真的态度,过失误差可以避免。

3. 误差与偏差

误差 Δx 有正负大小之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。**注意:**绝对误差不是误差的绝对值。

绝对误差与真值之比的百分数叫相对误差,用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (\text{II} - 7)$$

由于真值无法知道,所以计算相对误差时常常用 x 代替 x_0 。有时, x 取为公认值;有时, x 来自高一级精密仪器的测量值,或者就是测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度,其值用百分数表示,保留两位数。

分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中消除不了的误差作出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。

由于客观条件所限、人的认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能得到近似值。设某物理量真值为 x_0 ,进行 n 次等精度测量,测量过程无明显的系统误差,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 它们的误差记为

$$\Delta x_i = x_i - x_0$$

求和

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} - x_0$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 等式 $\rightarrow 0$ 。又因

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$$

有 $\bar{x} - x_0 \rightarrow 0$, 即

$$\bar{x} \rightarrow x_0$$

所以是 x_0 的最佳估计值, 称 $\bar{x}$ 为近真值。

为了估计误差, 定义测量值与近真值的差值为偏差, 即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

偏差又叫残差。实验中真值得不到, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道, 实验误差分析中要经常计算这种偏差, 并用偏差来描述测量结果的精确程度。

4. 随机误差的估算

关于随机误差的分布规律和处理方法, 涉及较多的概率论和数理统计知识, 这里只引用结论, 不进行论证。

我们用描述高斯分布的两个参数算数平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差来表征随机误差。如前所述, 对测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 而言, $\bar{x}$ 为近真值。S 定义为:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{II}-8)$$

这就是著名的贝塞尔公式, 表示当测量值的随机误差以 68.3% 的概率处于某个区间之内时, 这个区间记为 $-S_x \sim +S_x$, 区间半径 S_x 即为标准偏差。

标准偏差 S_x 可作为随机误差大小的描述, S_x 小表示测量值密集, 即测量的精密度高, 分布曲线形状窄、“尖”; S_x 大表示测量值分散, 即测量的精密度低, 分布曲线形状宽、“圆”。

估计随机误差还有用 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$ (算术平均误差)、 $2S_x$ 、 $3S_x$ 、或然误差等其他方法, 本书采用“贝塞尔公式法”计算标准偏差, 同时用它来表述 A 类不确定度 U_A 。

置信概率可取不同值, 多数工业、商业领域中约定使用 0.955, 大学物理实验中一般取 0.683。它们分别对应于不同的置信区间, 并非表明数据的误差本质有所不同。关于置信概率、置信区间的详细讨论请参考相关书籍。

5. 单次测量的随机误差

单次测量的随机误差一般以最大误差(近似为仪器误差)进行估计, 分以下两种情况处理:

(1) 已知仪器准确度(仪器误差)时, 以其准确度作为不确定度的大小。

$$U \approx \Delta_{\text{仪}}$$

如一个量程 150 mA, 准确度 0.2 级的电流表, 测某一次电流, 读数为 131.2 mA。为估计其误差, 则按准确度 0.2 级可算出最大绝对误差为 0.3 mA, 因而该次测量的结果应写成

$$I = 131.2 \pm 0.3 \text{ mA}$$

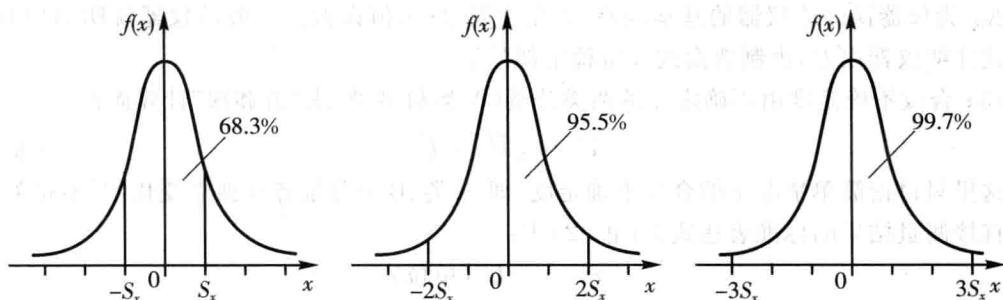


图 II-2 置信区间与置信概率。置信概率: $P = \int_{-t}^{+t} f(x) dx, (t = S_x, 2S_x, 3S_x)$

又如用物理天平称量某个物体的质量,当天平平衡时砝码为 $P = 145.02 \text{ g}$,让游码在平衡横梁上偏离平衡位置一个刻度(相当于 0.05 g),天平指针偏过 1.8 分度,则该天平这时的灵敏度为 $(1.8/0.05)$ 分度/ g ,其 s 感量为 0.03 g/分度 ,就是该天平称衡物体质量时的准确度,测量结果可写成

$$P = 145.02 \pm 0.03 \text{ g}$$

本例中提到的灵敏度为单位质量引起的偏转量,感量为指针从平衡位置偏转到标尺 1 分度所需的最大质量。二者互为倒数。

(2) 未知仪器准确度时,应根据所用仪器的精密度、仪器灵敏度、测试者感觉器官的分辨能力以及观测时的环境条件等因素具体考虑,力求使估计误差的大小尽可能符合实际情况。一般来说,对连续读数的仪器,如米尺、读数显微镜等,最大读数误差可取仪器最小刻度值的一半;而非连续读数的仪器,如数字式仪表、游标卡尺等,则取仪器最小刻度值。

6. 直接测量的不确定度

实验数据的不确定度一般来源于测量方法、测量人员、环境波动、测量对象变化等。计算不确定度是将可修正的系统误差修正后,将各种来源的误差按计算方法分为两类,即用统计方法计算的不确定度(A类)和非统计方法计算的不确定度(B类)。

(1) A类统计不确定度,是指在多次等精度测量条件下,读数分散对应的不确定度,具有随机误差性质。这类不确定度服从正态分布规律,可以采用统计方法(即贝塞尔公式)计算。

由(II-8)式,A类不确定度 U_A 为

$$U_A = S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (\text{II-9})$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 表示测量次数。

计算A类不确定度,也可以用最大偏差法、极差法、最小二乘法等,本书只采用贝塞尔公式法。计算过程可以用函数计算器简单完成,十分方便。

(2) B类非统计不确定度,是指用非统计方法求出或评定的不确定度。评定B类不确定度常用估计方法,要估计适当,需要确定分布规律,同时要参照标准,更需要估计者的实践经验、学识水平等。因此,往往是意见纷纭,争论颇多。本书对B类不确定度的估计作简化处理,只讨论因仪器不准对应的不确定度,亦即仅考虑仪器误差:

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

$\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差或仪器的基本误差,或允许误差、示值误差。一般的仪器说明书中都以某种方式注明仪器误差,由制造商或计量检定部门给定。

(3) 合成不确定度由不确定度的两类分量(A类和B类)求“方和根”计算而得:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (\text{II} - 11)$$

这里只讨论简单情况下的合成不确定度,即A类、B类分量各自独立变化,互不相关。

直接测量结果的标准表达式为(II-2)式:

$$x = \bar{x} \pm U \text{ (单位)}$$

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

标准表达式中,近真值、不确定度、单位三要素缺一不可,否则就不能全面表达测量结果。测量结果的标准表达式,给出了一个范围 $(\bar{x}-U) \sim (\bar{x}+U)$,表示待测量的真值在 $(\bar{x}-U) \sim (\bar{x}+U)$ 时的概率为68.3%,不要误认为真值一定为 $(\bar{x}-U) \sim (\bar{x}+U)$ 。同样,认定误差为 $-U \sim +U$ 也是错误的。

7. 间接测量的不确定度传递

间接测量的近似真实值和合成不确定度是由直接测量结果通过函数式计算出来的,既然直接测量有不确定度,那么间接测量也必有不确定度,这就是不确定度的传递。为此,需要由直接测量值出发来计算间接测量值的不确定度。

设间接测量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots)$$

N 为间接测量的量,它有 k 个直接测量的物理量 $x, y, z, \dots$, 各直接测量量的测量结果分别为

$$x = \bar{x} \pm U_x$$

$$y = \bar{y} \pm U_y$$

$$z = \bar{z} \pm U_z$$

.....

将各个直接测量量的近似真实值 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$ 代入函数表达式中,得到间接测量的近似真实值:

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$$

然后求间接测量的合成不确定度。

将函数式 $N = F(x, y, z, \dots)$ 分别对各变量求偏导数,得 $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}, \dots$, 记为 $\frac{\partial F}{\partial A_k}$, 称作灵敏系数,反映了函数对各自变量的变化率。

将各偏导数分别与各不确定度相乘,得 $\frac{\partial F}{\partial x} U_x, \frac{\partial F}{\partial y} U_y, \frac{\partial F}{\partial z} U_z, \dots$, 这就是每个自变量的不确定度对合成不确定度的实际“贡献”。将它们求“方和根”,即为间接测量的绝对合成不确定度。

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} U_x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} U_y\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z} U_z\right)^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{\partial F}{\partial A_k} U_{A_k}\right)^2} \quad (\text{II} - 12)$$

A 代表 $x, y, z, \dots$ 各个自变量(直接测量量)。