

高等学校教材

大学物理实验教程

主编 葛松华 唐亚明
参编 王泽华 张福奎 朱国全
杨清雷 陈永华 祝卫堃

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

全书共分5章。第1章系统地介绍了测量及测量误差等方面的基本知识;第2章和第3章共有34个基础实验,主要包括力学、热学、电磁学和光学的内容;第4章为近代物理实验和综合实验,共有10个实验;第5章为设计性实验,共有5组,其中包括传感器综合实验。这些实验中,既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验,又有物理技术与计算机技术相结合的新实验。各个实验既相互独立,又循序渐进、相互配合,形成了一个完整的体系,能够使学生在实验方法、实验技术和实验仪器使用方面都得到全面而系统的训练。

本书可作为高等学校理工科专业物理实验课程的教材和参考书,也可作为涉及物理学的实验技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/葛松华,唐亚明主编. —北京:电子工业出版社,2004.3

高等学校教材

ISBN 7-5053-9669-2

. 大... . 葛... 唐... . 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 . 04 - 33

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第010205号

责任编辑:冉哲 王羽佳

印 刷:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:409.6千字

印 次:2004年 月 第1次印刷

印 数:10100册 定价:19.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

根据教育部《高等工业学校物理实验课程基本要求》，结合高校专业设置和实验设备的具体情况，尤其是近几年来，在进行物理实验教学改革中，各高校都更新和增加了许多智能化的新设备、新仪器，为了适应教学的需要，特编写本教材。

全书共分5章。第1章系统地介绍了测量及测量误差等方面的基本知识，尝试用不确定度评定测量结果，并提倡用测量的观点去做物理实验。第2章和第3章共有34个基础实验，主要包括力学、热学、电磁学和光学的内容。第4章为近代物理实验和综合实验，共有10个实验。第5章为设计性实验，共有5组，其中包括传感器综合实验。这些实验中，既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验，又有物理技术与计算机技术相结合的新实验。各个实验既相互独立，又循序渐进、相互配合，形成了一个完整的体系，能够使学生在实验方法、实验技术和实验仪器使用方面都得到全面而系统的训练。

在实验项目的编排上，打破了以往的力、热、电、光实验顺序的编排方式，而是按照由基础实验到综合性实验再到设计性实验，这样一个由浅入深、由易到难的原则进行实验安排，有利于学生逐步适应物理实验课程的学习。每个实验的实验目的明确、实验原理叙述清楚、实验仪器介绍详尽、实验步骤条理分明，还配有思考题和习题，供学生在实验后进行分析讨论，以巩固所学知识。

参加本书编写的有葛松华、唐亚明、王泽华、张福奎、朱国全、杨清雷、陈永华和祝卫堃，全书由葛松华和唐亚明负责统稿。

本书在编写过程中参阅了其他相关的教材和仪器厂家的说明书，在此表示感谢。

由于编者的水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者
2003年

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差与数据处理	3
1.1 测量的基本概念	3
1.2 测量误差的基本概念	4
1.2.1 误差的定义	4
1.2.2 测量误差的分类	6
1.2.3 研究误差的意义	9
1.3 测量结果的评定和不确定度	10
1.4 有效数字及其运算规则	13
1.4.1 有效数字	13
1.4.2 有效数字的运算规则	14
1.5 数据处理的基本方法	15
1.5.1 列表法	15
1.5.2 作图法	15
1.5.3 最小二乘法	18
第 2 章 基础实验(一)	21
实验 1 长度测量	21
实验 2 电磁学实验基本知识	25
实验 3 用拉伸法测金属丝的弹性模量	34
实验 4 液体表面张力的测定	38
实验 5 固体线膨胀系数的测定	41
实验 6 刚体转动实验	44
2.6.1 用刚体转动仪 测转动惯量	44
2.6.2 用刚体转动仪 测转动惯量	48
实验 7 用三线摆测转动惯量	49
实验 8 驻波的研究	53
实验 9 用电位差计测量温差电动势	56
实验 10 示波器的使用()	58
实验 11 示波器的使用()——RC、RL 串联电路的暂态过程研究	70
实验 12 电表的改装和校准	75
实验 13 非线性电阻的伏安特性曲线	78
实验 14 电桥法测电阻	82
2.14.1 用惠斯通电桥测电阻	82
2.14.2 用双臂电桥测低电阻	84

实验 15	薄透镜焦距的测量	89
实验 16	测量显微镜和望远镜的放大率	94
2.16.1	测量显微镜的放大率	94
2.16.2	测量望远镜的放大率	97
实验 17	分光计的结构和仪器的调整	100
实验 18	光栅的特性及光栅常数的测定	103
实验 19	液体粘滞系数的测定	107
实验 20	用模拟法测绘静电场	109
第 3 章	基础实验(二)	117
实验 1	霍耳效应测磁场	117
实验 2	灵敏电流计的研究	120
实验 3	PN 结正向压降与温度关系的研究和应用	122
实验 4	物质导热系数的测定	128
实验 5	扭摆法测定物体转动惯量	131
实验 6	等厚干涉()——牛顿环	137
实验 7	等厚干涉()——劈尖干涉及应用	140
实验 8	双棱镜干涉	143
实验 9	测玻璃折射率	146
实验 10	用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	151
实验 11	偏振光的观察和应用	154
实验 12	声速测定	164
实验 13	霍耳效应法测定螺线管轴向磁感应强度分布	170
实验 14	铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	176
第 4 章	近代物理与综合实验	187
实验 1	混沌实验	187
实验 2	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	192
实验 3	密立根油滴实验	197
实验 4	夫兰克-赫兹实验	201
实验 5	光电效应及普朗克常量的测定	204
实验 6	全息照相	208
实验 7	电子束实验	211
4.7.1	电子束的加速和电偏转	212
4.7.2	电子束的聚焦和辉度控制	214
4.7.3	电子束的磁偏转	215
4.7.4	电子的螺旋运动及电子荷质比测定	216
实验 8	硅光电池特性研究实验	218
实验 9	音频信号光纤传输技术实验	222
实验 10	超声光栅	225
第 5 章	设计性实验	229
实验 1	多量程电表	229

实验 2	测绘伏安特性曲线	229
实验 3	小功率直流稳压电源的设计与制作	230
实验 4	周期函数的傅里叶分析	230
实验 5	传感器的原理与应用	232
5.5.1	金属温度传感器的标定与测温	234
5.5.2	用光纤位移传感器测量位移	235
5.5.3	霍耳式传感器的直流激励特性研究	236
5.5.4	霍耳式传感器的应用——电子称	237
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	238
附录 B	物理学常用数表	240
参考文献	245

绪 论

1. 物理实验的地位和作用

物理学研究自然界物质运动最基本最普遍的形式。物理学所研究的运动,普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式(如化学的、生物的等)之中,因此物理学在自然科学中占有重要地位,成为其他自然科学和工程科学的基础。

物理学是一门实验科学,物理学的形成和发展是以实验为基础的。物理实验的重要性,不仅表现在通过实验发现物理定律,而且表现在物理学中每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明,经典物理学的形成,是伽利略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象,反复实验,运用抽象思维方法总结出来的。近代物理的发展,是在某些实验基础上提出假设的,例如,普朗克根据黑体辐射提出“量子假设”,但还需要在假设基础上再经过大量的实验证实,假设才能成为科学理论,实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终相互制约、相互促进。没有理论指导的实验是盲目的,实验必须总结抽象上升为理论,才有其存在的价值;而理论靠实验来检验,同时理论上的需要又促进实验的发展。例如,麦克斯韦的电磁场理论,是建立在法拉第等科学家长期实验的基础上的;而赫兹的电磁波实验,又使理论得到普遍的承认和广泛的应用。又如,物理学家杨振宁、李政道在1956年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”的理论,是在实验物理学家吴健雄用实验证实以后,才得到了国际上的公认的。

物理实验不仅在物理学自身发展中起着重要作用,而且对推动自然科学和工程技术发展也起着重要作用。特别是近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的构思、实验方法、实验技术与化学、生物学、天体学等学科相互结合已取得了巨大成果。

2. 物理实验课的目的和任务

大学物理实验是教育部规定的理工科大学生必修的基础实验课程,独立设课。作为培养高级工程技术人才的高等学校,不仅要使学生具有比较深广的理论知识,而且要使学生具有较强的从事科学实验的能力。物理实验是学生进入大学后接受系统的实验方法、实验技能训练的开端,是后续实验课的基础。

物理实验分为:着重弄清物理现象的成因和规律的定性实验;着重于各物理量、物理规律之间的数量关系的测量的定量实验;以及验证某些物理现象与定律的验证性实验。不同种类的物理实验都与测量有关。但测量不仅限于获得数据,而应着重于物理思想、测量方法和实验技能。随着数字化技术的发展,测量手段越来越先进,测量准确度也越来越高,用测量的观点去做物理实验,认识可能更深刻。

根据教学大纲要求,物理实验的主要目的和任务如下。

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法及基本技能。能运用物理原理、物理实验方法研究物理现象的规律,加深对物理原理的理解。

培养和提高学生的科学实验能力,包括:能够自行阅读实验教材,做好实验前的准备;能够借助教材与说明书,正确使用常用仪器;能够运用物理学理论对实验现象进行分析判断;

能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,写出实验报告;能够完成简单的设计性实验。

培养和提高学生的科学实验素质,要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,勤奋工作、严肃认真的工作态度,主动研究和坚韧不拔的探索精神,遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品质。

3. 物理实验课的主要教学环节

物理实验课分三个环节:实验预习、实验操作和实验报告。

(1) 实验预习

实验前要做好预习。预习时,主要阅读实验教材,了解实验目的,搞清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的原理是什么,使用什么仪器,性能如何,使用操作要点及注意事项等。在此基础上,设计好数据记录表格等。经验表明,课前预习的是否充分是实验中能否取得主动的关键。只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中从容地观察现象,思考问题,达到预期的目的。

(2) 实验操作

学生进入实验室后应遵守实验室规则,经指导教师检查预习报告后方能进行实验。实验正式进行之前,首先要熟悉一下所用仪器设备的性能、正确的操作规程和仪器的正常工作条件。切勿盲目操作,避免损坏仪器,注意安全。

仪器连接调试准备就绪后,开始进行测量,测量的原始数据要整齐地记录在准备的表格中,读数一定要认真仔细。记录的数据一定要标明单位,不要忘记记录必要的环境条件等。测完数据后,记录的数据要经指导教师审阅签字,发现错误数据时,要重新进行测量。实验完毕,整理好仪器,经指导教师检查后方可离开实验室。

(3) 实验报告

实验报告是实验工作的总结,学会写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真。

实验报告通常包括以下内容:

实验名称 表明做什么实验。

实验目的 说明实验要达到的目的。

实验仪器 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理 阐明实验的理论依据,写出待测量计算公式的简要推导过程,画出有关原理图或示意图。

实验内容与步骤 根据实验过程写明内容与实验步骤。

数据记录 实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出,正确表示有效位数和单位。

数据处理 按要求对测量结果进行计算或作图表示,并对测量结果进行评定,计算不确定度。计算要写出主要步骤。

实验结果 扼要写出实验结论。

问题讨论 讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释,分析实验误差的主要来源,对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议,回答实验思考题。

第 1 章 测量误差与数据处理

物理实验离不开测量,测量必然要存在误差。随着科学技术的发展,测量方法和手段不断提高,尽管可将误差控制在愈来愈小的范围内,但始终不能完全消除。因此,我们必须对误差的来源、性质及规律进行研究,以便能及时发现误差,并采取减小误差的措施;必须正确处理数据,有效地提高测量精度和测量结果的可靠程度。

误差理论与数据处理是以数理统计和概率论为数学基础的专门学科。近年来,误差的基本概念和处理方法也有了较大发展,逐步形成了新的表示方法。本课程仅限于误差分析的初步知识,着重介绍几个重要概念及简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证。

1.1 测量的基本概念

1. 测量

一般地讲,为确定被测对象量值而进行的实验称为测量。在测量过程中,通常将被测量与同类标准量进行比较,得到被测量的量值。例如,用游标卡尺测得一圆柱体的直径为 56.85mm 等。由测量所得到的被测量的量值叫做测量结果,当然,测量结果还应包括误差部分。

2. 计量

计量是利用先进技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。计量具有准确性、一致性、溯源性和法制性。计量与物理学密切相关,历史上三次大的技术革命都是以物理学的成就为理论基础的,促进了计量的发展,同时计量的发展也为物理现象的深入研究和广泛应用提供了重要手段。尽管物理实验并不以计量为目的,但理工科学生掌握一定的计量知识是非常必要的,因为,计量工作涉及到国民经济的各个部门、科学技术的各个领域以及人民生活的各个方面,是国民经济的一项重要技术基础和管理基础。

3. 计量单位和基准

为了确保单位的统一和量值的准确可靠,国家以法律形式规定了允许使用的单位,称为法定计量单位。

我国的法定计量单位包括:国际单位制的基本单位,国际单位制的辅助单位,国际单位制中具有专门名称的导出单位,国家选定的非国际单位制单位,由以上单位构成的组合形式的单位,由词头和以上单位构成的十进制倍数和分数单位。同时还规定了法定计量单位的使用方法。

为了保存或复现基本量的单位量值,由定义建立了相应的基准。基准是测量的最高依据,通过基准将单位量值传递到标准,再通过各级标准传递到普通测量器具。测量器具要根据具体情况定期进行检定。

基准的建立是随科学技术的发展而不断改进的。以长度基准为例,18 世纪末法国科学院提出“米制”建议,1791 年,法国国会批准,决定以通过巴黎的地球子午线长度的 4000 万分之一的定义为“米”。1799 年,按这一定义制成了铂杆“档案尺”,以其两端的距离定义为“米”,这是

第一个米的实物基准。但由于档案尺变形易造成较大误差,1872年在讨论米制的国际会议上决定废弃“档案尺”的米定义,1889年第一次国际计量大会决定采用铂铱合金的X形尺作为国际米原器,以该尺中性面上两端刻线间0时的长度为“米”,其复现精度为 $\pm(1\sim 2)\times 10^{-7}$ 。1960年,第11次国际计量大会决定废弃米原器,并定义“米”为 Kr-86 原子在 $2\text{P}_{10}\sim 5\text{d}_5$ 能级跃迁时,所辐射的谱线在真空中波长的 $1\ 650\ 763.73$ 倍,使长度基准的复现精度提高到 $\pm(0.5\sim 1)\times 10^{-8}$ 。1983年第17届国际计量大会又通过了“米”的新定义,即“米”是光在真空中于 $1/299\ 792\ 458$ 秒时间间隔内所路经的长度,相对不确定度最高为 $\pm 1.3\times 10^{-10}$ 。长度基准由实物基准发展到量子基准。

在计量中,计量检定是一项基本工作,需要评定计量器具的计量性能,确定其是否合格。所有的正式检定,都必须严格按照国家计量检定规程进行。尽管物理实验不是计量,但测量器具都要按期维护、校准或检定,只有这样得到的测量值才能准确可靠。

4. 测量方法的分类

对不同的被测量和不同的测量要求,需要采用不同的测量方法。这里,测量方法是泛指测量中所涉及到的测量原理、测量方式、测量系统及测量环境条件等诸项测量环节的总和。

测量方法可按不同的原则进行分类。按测量结果获得的方法可分为:直接测量与间接测量,等精度测量与不等精度测量,静态测量与动态测量等。按实验数据的处理方法可分为:直接测量、间接测量和组合测量等。当然,上述的分类方法是相对的。

直接测量是指将被测量与标准量直接进行比较,或者用经标准量标定了的仪器对被测量进行测量,从而直接获得被测量的量值。例如,用米尺测量长度,用温度计测量温度,用电流表测量电流都是直接测量。

间接测量则依据函数关系式,由直接测量量计算出所要求的物理量。大多数物理量都是间接测量值。例如,单摆法测重力加速度 g 时, $g=4\pi^2 l/T^2$, T 为周期, l 为摆长,都是直接测量值,而 g 是间接测量值。

等精度测量是指在对某一物理量进行多次重复测量的过程中,每次的测量条件都相同的一系列测量。例如,由同一人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测量进行测量,每次测量的可靠程度都相同,那么这些测量是等精度测量。

不等精度测量是指在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量。例如,在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同、测量方法不同或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某些条件的变化对结果影响不大时,可视为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,所以物理实验中的测量都认为是等精度测量。

1.2 测量误差的基本概念

1.2.1 误差的定义

1. 真值

所谓真值,是指被测量的客观真实值。但由于测量误差的存在,真值一般无法得到,因此,

我们通常所说的真值都是相对真值。在实际测量中,上一级标准的示值对下一级标准来说,可视为相对真值。在多次重复测量中,可用测量值的算术平均值作为相对真值。

2. 绝对误差

绝对误差 Δx 是测量值 x 与其真值 x_0 之差,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2-1)$$

绝对误差可正可负,不要理解成误差的绝对值。

绝对误差是测量结果的实际误差值,其量纲与被测量的量纲相同。

3. 相对误差

相对误差 δx 是测量值的绝对误差 Δx 与其真值 x_0 之比,常用百分数表示,即

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

用相对误差能确切地反映测量效果。例如,测量长度为 1 000mm 时,其绝对误差为 5mm;而测量长度为 10mm 时,其绝对误差为 1mm。尽管前者的绝对误差为后者的 5 倍,但前者的测量效果却比后者好,用相对误差的概念就能做出评价。

4. 引用误差

引用误差也属相对误差,一般用于连续刻度的多挡仪表,特别是电测量仪表。因为各挡、各刻度上示值的绝对误差和相对误差都不可能一样,为了便于仪表精度等级的评定,规定了引用误差。

引用误差是仪表各示值处的绝对误差 Δx 与该仪表测量范围上限值,即量限 A_m 之比。

$$r = \frac{\Delta x}{A_m} \times 100\%$$

可见,计算每一示值处的引用误差要比计算其相对误差方便。

为了能全面地反映仪表误差情况,一般用仪表的最大引用误差表示,它是仪表各示值处的最大绝对误差 $(\Delta x)_m$ 与量限 A_m 之比。

$$r_m = \frac{(\Delta x)_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-2-3)$$

仪表的准确度是用仪表的最大引用误差 r_m 来表示的,并以 r_m 的大小来划分仪表的准确度等级。根据国家规定,目前我国生产的电测量仪表的准确度等级分为 7 级,它们是:0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级和 5.0 级,其对应的最大引用误差不超过 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.5\%$ 和 $\pm 5.0\%$ 。

例 1-1 一量限为 300V 的电压表,其最大绝对误差为 1.2V,求该电压表的最大引用误差和准确度等级。

解:

$$r_m = \frac{1.2}{300} \times 100\% = 0.4\%$$

准确度等级为 0.5 级。

例 1-2 经检定发现,量程为 250V 的 2.5 级电压表在 10V 处的示值误差最大,误差值为 5V,问该电压表是否合格?

解:按电压表准确度等级规定,2.5级表的最大引用误差不超过 $\pm 2.5\%$ 的范围,而该表的最大引用误差为

$$r_m = \frac{5}{250} \times 100\% = 2\%$$

故该电压表检定结果为合格。

应当指出,仪表的准确度等级只是从整体上反映仪表的误差情况,在使用仪表进行测量时,被测量的值的准确度往往低于仪表的准确度,而且如果其值离仪表的量限愈远,其测量的准确度愈低。被测量的值最好大于 $2/3$ 量程。

1.2.2 测量误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,传统上,把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。随着误差理论不断发展,传统的分类方法将逐渐过渡到新的分类方法。当然,传统的分类方法是新的分类方法的基础。作为教学内容的连续和更新,我们把两种方法都分别介绍,着重强调新方法的应用。

1. 系统误差

在同一量的多次测量过程中,符号和绝对值保持恒定或以确定的规律变化的测量误差称为系统误差。

系统误差决定测量结果的“正确”程度。系统误差与测量次数无关,因此,不能用增加测量次数的方法使其消除或减小。

许多系统误差可以通过实验确定并加以修正,但有时由于对某些系统误差的认识不足或没有相应的手段予以充分肯定,而不能修正。

产生系统误差的原因是多方面的,主要有测量仪器误差、理论方法误差、环境误差和个人误差等。

测量仪器误差是由于仪器本身的缺陷或没有按规定使用仪器而造成的。例如,仪器零点不准、天平两臂不等长等。

理论方法误差是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,实验条件不能达到所规定的要求,或测量方法不适当所带来的误差。例如,单摆的周期公式成立的条件是:摆角趋于零,摆球的体积趋于零。这些条件在实验中是达不到的。另外,用伏安法测电阻时,电表内阻的影响等也会引起误差。

环境误差是由于各种环境因素,如温度、气压、振动、电磁场等与要求的标准状态不一致,引起测量设备的量值变化或机构失灵等产生的误差。

个人误差是由观测者本人生理或心理特点造成的。例如,估计读数时,有些人始终偏大,而有些人始终偏小等。

正因为引起系统误差的因素多种多样,没有固定的模式,所以要减小和消除系统误差就要具体情况具体分析。应分别采用对比法、理论分析法或数据分析法来找出系统误差,提高测量的准确程度。

2. 随机误差

实验中即使采取了措施,对系统误差进行修正或消除,但仍存在随机误差。

在同一量的多次测量中,各测量数据的误差值或大或小,或正或负。以不可确定的方式变化的误差称为随机误差。

随机误差决定测量结果的“精密”程度。

随机误差的特点是,表面上单个误差值没有确定的规律,但进行足够多次的测量后可以发现,误差在总体上服从一定的统计分布,每一误差的出现都有确定的概率。

随机误差是由许多随机因素综合作用造成的,这些误差因素不是在测量前就已经固有的,而是在测量中随机出现的。其大小和符号的正负各不相同,又都不很明显,所以随机误差不能完全消除,只能根据其本身存在的规律用多次测量的方法来减小。

应该说,关于随机误差的分布规律和处理方法,涉及了较多的数理统计和概率论知识,是比较复杂的,在这里只简单介绍正态分布的性质及特征量,详尽的讨论请查阅有关误差理论与数据处理的书籍。

实践表明,绝大多数随机误差分布都服从正态分布。正态分布具有有限性、抵偿性、单峰性和对称性。

作为随机变量,随机误差 的统计规律可由分布密度 $f(\delta)$ 给出完整的描述。由随机误差的特性,从理论上可得到

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-2-4)$$

式中参数 σ 称为标准差,其正态分布密度曲线如图 1-2-1 所示。

分布密度 $f(\delta)$ 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的积分等于 1,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (1-2-5)$$

这一积分是整个分布密度曲线下的面积,代表测量的随机误差全部取值的概率。而在任意区间 $[a, b]$ 内的概率为

$$P = \int_a^b f(\delta) d\delta \quad (1-2-6)$$

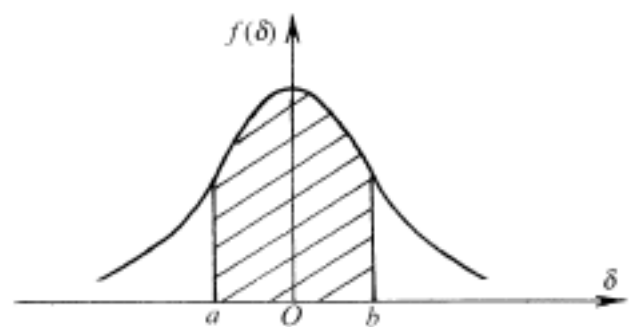


图 1-2-1 正态分布密度曲线

这一概率是区间 $[a, b]$ 上分布密度曲线下的面积。

分布密度给出了随机误差 取值的概率分布。这是对随机误差统计性的完整描述,但在一般测量数据处理中,并不需要给出随机误差的分布密度,通常只需给出一个或几个特征参数,即可对随机误差的影响做出评定。

表示测量结果的精度参数,目前常用标准差或极限误差等,下面给出有关标准差的一些基本概念。

(1) 算术平均值

对同一量的 n 次重复测量中,设测量值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n , 根据最小二乘法原理可以证明,其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-7)$$

是被测量真值的最佳估计值,可视为相对真值,这正是为什么常常用算术平均值作为测量结果的原因。

(2) 标准差

标准差的计算可由贝塞尔(Bessel)公式得到

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

标准差愈小,相应的分布曲线愈陡峭,说明随机误差取值的分散性小、测量精度高;标准差大,则测量精度低。图 1-2-2 所示为不同 σ 值的两条正态分布密度曲线的形状。通过计算还可以得到

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (1-2-9)$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997 \quad (1-2-10)$$

其意义表示,某次测量值的随机误差在 $-\sigma \sim \sigma$ 之间的概率为 68.3%,在 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 之间的概率为 99.7%,如图 1-2-3 所示。

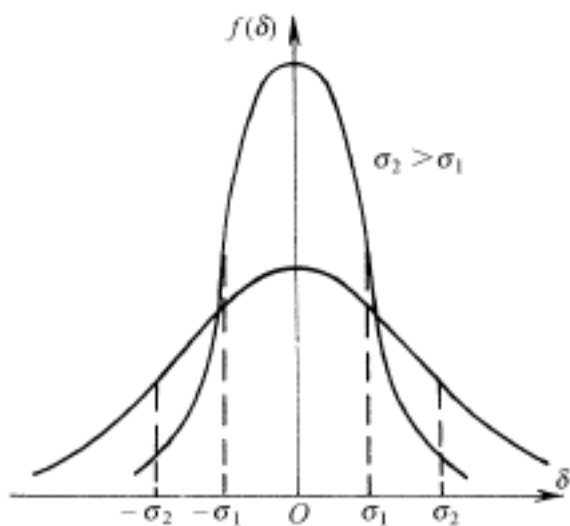


图 1-2-2 不同 σ 值的分布密度曲线

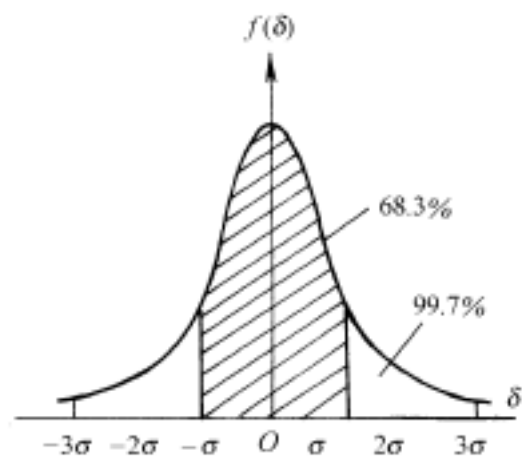


图 1-2-3 分布密度曲线与概率

(3) 算术平均值的标准差

实际测量中,由于测量次数有限,如果进行多组重复测量,则每一组所得到的算术平均值一般也不会相同,因此,算术平均值也存在误差,用算术平均值的标准差 $\bar{\sigma}_x$ 表示

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-11)$$

其意义表示,测量值的平均值的随机误差在 $-\bar{\sigma}_x \sim \bar{\sigma}_x$ 之间的概率为 68.3%;在 $-3\bar{\sigma}_x \sim 3\bar{\sigma}_x$ 之间的概率为 99.7%,或者说测量值的真值在 $(\bar{x} - \bar{\sigma}_x) \sim (\bar{x} + \bar{\sigma}_x)$ 范围的概率为 68.3%;在 $(\bar{x} - 3\bar{\sigma}_x) \sim (\bar{x} + 3\bar{\sigma}_x)$ 范围内的概率为 99.7%。

需要注意, σ 与 $\bar{\sigma}_x$ 是两个不同的概念,标准差 σ 反映了一组测量数据的精密程度,而算术平均值的标准差 $\bar{\sigma}_x$ 反映了算术平均值接近真值的程度。

从贝塞尔公式(1-2-8)可以看出,随着测量次数 n 的增加,标准差 σ 趋于稳定,而根据式(1-2-11), $\bar{\sigma}_x$ 随 n 的增加而减小,所以测量精度随 n 的增加会有所提高。因此,在实际测量中,应根据 σ 稳定值(由测量仪器的精度所决定)和对结果的精度要求,合理地选定测量次数。

例 1-3 用千分尺测一圆柱体的直径 10 次(单位: mm), 数据为 2.474, 2.473, 2.478, 2.471, 2.480, 2.472, 2.477, 2.475, 2.474, 2.476, 表示出测量结果。

解:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 2.475\text{mm} \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7 \times 10^{-3}}{9}} = 0.028\text{mm} \\ \bar{s} &= \frac{\bar{x}}{\sqrt{n}} = 0.009\text{mm}\end{aligned}$$

所以测量结果

$$x = \bar{x} \pm \bar{s} = (2.475 \pm 0.009)\text{mm} \quad (P = 68.3\%)$$

或

$$x = \bar{x} \pm 3\bar{s} = (2.475 \pm 0.027)\text{mm} \quad (P = 99.7\%)$$

上面分别讨论了系统误差与随机误差,一般情况下,两种误差同时存在且相互影响,这就需要用到误差的合成。

为了对测量结果作出评定,许多教材中均有正确度、精密度、准确度等名词术语,《计量名词术语定义》中规定其含义如下。

正确度反映系统误差的影响程度,表示测量结果与真值的接近程度。

精密度简称精度,反映随机误差的影响程度,表示在测量条件不变时对同一量进行多次测量所得结果的一致程度,或测量值之间的接近程度。

准确度也叫精确度,是精密度与正确度的综合表达。它既表示在相同条件下各次测量值的一致性,又表示整个测量结果与真值的一致性。

3. 异常数据的剔除

粗大误差又称疏忽误差或过失误差,它是由于测量者技术不熟练,测量时不仔细,或外界的严重干扰等原因造成的。粗大误差超出了正常的误差分布范围,它会对测量结果产生明显的歪曲,因此,一旦发现含有粗大误差的测量数据(称为异常数据),应将其剔除不用。

对粗大误差,除了设法从测量结果中发现和鉴别而加以剔除外,更重要的是以严格的科学态度来认真做实验,做好每一件事情,不能马马虎虎,应付差事。

在判别某个测量数据是否含有粗大误差时,要特别慎重,仅凭直观判断常难以区别出粗大误差和正常分布的较大误差。若主观地将误差较大但属正常分布的测量数据判定为异常数据而剔除,尽管看起来精度很高,然而那是虚假的,不可靠的。

判别异常数据的方法一般采用 3 准则。我们知道,按照正分布,误差落在 ± 3 以外的概率只有 0.3%。因而,可以认为,在有限次重复测量中误差超过 ± 3 的测量数据是由于过失或其他因素造成的,为异常数据,应当剔除。

1.2.3 研究误差的意义

测量误差是不可避免的,因此,研究测量误差的规律具有普遍意义。研究这一规律的直接目的,一是要减小误差的影响,提高测量准确度;二是要对所得结果的可靠性作出评定,即给出准确度的估计。

只有掌握测量误差的规律性,才能合理地设计测量仪器,拟定最佳的测量方法,正确地处

理测量数据,以便在一定的条件下,尽量减小误差的影响,使所得到的测量结果有较高的可信程度。

随着科学技术的发展和生产水平的提高,对测量技术的要求越来越高。可以说,在一定程度上,测量技术的水平反映了科学技术和生产发展的水平,而测量准确度则是测量技术水平的主要标志之一。在某种意义上,测量技术进步的过程就是克服误差的过程,就是对测量误差规律性认识深化的过程。

当然,无论采取何种措施,测量误差总是存在的,准确度的提高总要受到一定的限制。因而就要求对测量准确度作出评定,任何测量总是对应于一定的准确度的,准确度不同,其使用价值就不同,可以说,未知准确度的测量是没有意义的。为了给出准确度,应掌握测量误差的特征规律,以便对测量的准确度作出可靠的评定。

1.3 测量结果的评定和不确定度

在工程技术方面,对测量结果的评定,目前国际上形成了较为统一的测量不确定度的表达方式,我国也实行了相应的技术规范。近几年来,为适应国民经济发展对人才培养的要求,作为教学内容的改革,物理实验中也逐步尝试用不确定度来评定测量结果。由于不确定度的计算较为复杂,许多教材中采用了不同的简化模式,自然评定结果也不相同。因此,我们认为应尽快统一方法,方法的选择应遵从国家标准,所做的简化处理不应冲淡或模糊对基本概念的理解,以便在教学中施行。

1. 不确定度

在不确定度的新概念产生以前,测量结果的质量评定都用误差大小来表示,但是由于误差的定义及计算方法不完善,世界各国对误差的具体应用和计算规则并不相同,从而影响了国际间的交流和科研成果的推广。为此,国际计量局(BIPM)于1980年提出了实验不确定度建议书 INC—1。

误差的定义是测量值与真值之差,是一个确定值,但真值不能得到,误差也就无法知道。而标准误差、极限误差等是可以估算的,但它们表示的是测量结果的不确定性,与误差定义并不一致。测量不确定度是指由于误差存在而产生的测量结果的不确定性,表征被测量的真值所处的量值范围的评定。显然,从定义上看,不确定度比误差更合理一些。

2. 不确定度的两类分量

传统上把误差分为随机误差和系统误差,但在实际测量中,有相当多情形很难区分误差的性质是随机的还是系统的,况且有的误差还具有随机和系统两重性,例如,电测量仪表的准确度等级误差就是系统和随机误差的综合,一般无法将系统误差和随机误差严格分开计算。而不确定度取消了系统误差和随机误差的分类方法,不确定度按计算方法的不同分为 A 类分量和 B 类分量。

A 类不确定度是指可以用统计方法评定的不确定度分量,如测量读数具有分散性,测量时温度波动影响等。这类不确定度被认为服从正态分布规律。因此,可以用测量列平均值的标准差计算

$$u_A = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-3-1)$$

计算 A 类不确定度,也可以用最大偏差法、极限误差法等。

B 类不确定度是不能由统计方法评定的不确定度分量,在物理实验教学中,作为简化处理,一般只考虑由仪器误差及测试条件不符合要求而引起的附加误差。具体分析 B 类不确定度的概率分布十分困难,而仪器的基本误差、仪器的分辨率引起的误差、仪器的示值误差、仪器的引用误差等仪器误差都满足均匀分布。因此,教学中通常对 B 类不确定度采用均匀分布的假定,则 B 类不确定度为

$$u_B = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (1-3-2)$$

式中, s 为仪器的基本误差或允许误差,或者根据准确度等级确定。一般的仪器说明书中都由制造厂或计量检定部门注明仪器误差。

需要指出的是, A 类不确定度和 B 类不确定度与通常讲的随机误差和系统误差并不存在简单的对应关系,不要受传统的、固有的概念束缚。

总不确定度是由不确定度的两类分量合成的,合成不确定度 u_C 可表示为

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-3-3)$$

确定总不确定度往往要讨论实际合成的概率分布。通常假定合成的分布近似满足正态分布,则总不确定度为

$$= t_p u_C \quad (1-3-4)$$

式中, t_p 称为置信因子。 $t_p = 1$ 时,置信概率为 68.3%; $t_p = 3$ 时,置信概率为 99.7%。

最后测量结果应表示成下面的形式

$$x = \bar{x} \pm \quad (\text{单位}) \quad (1-3-5)$$

注意,这里的 表示总不确定度,而不是前面所提到的标准差。

3. 直接测量的不确定度

直接测量的不确定度计算比较简单,下面通过例子加以说明。

例 1-4 用毫米刻度的米尺,测量物体长度 10 次(单位:cm),其测量值分别为 53.27, 53.25, 53.23, 53.29, 53.24, 53.28, 53.26, 53.20, 53.24, 53.21, 试计算不确定度,并写出测量结果。

解:(1) 计算平均值

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \quad x_i = \frac{1}{10} \times (53.27 + 53.25 + \dots + 53.21) \\ &= 53.24\text{cm} \end{aligned}$$

(2) 计算 A 类不确定度

$$\begin{aligned} u_A &= \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(53.27 - 53.24)^2 + (53.25 - 53.24)^2 + \dots + (53.21 - 53.24)^2}{10 \times (10 - 1)}} \\ &= 0.01\text{cm} \end{aligned}$$