



云南省普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理实验教程

◎杨留方 主编



科学出版社

云南省普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理实验教程

主 编 杨留方

副主编 王玉林 李 佳
王庆辉 李跃勋 陆赫林

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书被列为云南省普通高等学校“十二五”规划教材。本书是作者综合多年来使用的实验讲义和学生的建议和要求,结合现行实验设备和条件编写而成的。全书共6章,54个实验。主要包括:测量误差和数据处理,力学实验基础知识及实验(13个),热学实验基础知识及实验(10个),电磁学实验基础知识及实验(12个),光学实验基础知识及实验(14个),其他实验(5个)。全书实验内容丰富,为不同层次的教学需要提供了一个灵活的平台。

本书可作为普通高等院校各专业的“大学物理实验”课程的教材或教学参考书,也可作为有关实验技术人员和专业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/杨留方主编. —北京:科学出版社,2015

云南省普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-046012-7

I. ①大… II. ①杨… 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(2015)第 246211 号

责任编辑:李淑丽 崔慧娴/ 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博/ 封面设计:华路天然工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:439 000

定价:39.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是针对普通高等学校各专业的大学物理实验教学内容编写而成的,已被列为云南省普通高等学校“十二五”规划教材。

大学物理实验作为一门独立的必修基础课程,对培养学生的科学实验能力、提高学生科学实验素质起着重要的作用。为此,本书写入了必要的实验基础理论部分,包括测量误差和数据处理;针对不同类型的实验内容,分别介绍了力学实验基础知识、热学实验基础知识,电磁学实验基础知识和光学实验基础知识,旨在通过本部分的学习,使学生能够熟悉和掌握不同类型的实验中最基本的共性知识,从而有效培养学生的科学实验能力。

本书的实验分为力学实验(13个),热学实验(10个),电磁学实验(12个),光学实验(14个)和其他实验(5个)。内容有基础性实验、设计性实验和综合性实验。本书在编写过程中力求突出物理思想和实验方法,对部分实验教学内容的实施有较大的灵活性,为不同层次的教学需要提供一个灵活的平台。

本书的出版得到了云南民族大学“十二五”规划教材项目的大力支持。本书是多年来云南民族大学电气信息工程学院实验中心大学物理实验课程教学和建设的总结,它一方面集中了教师和实验技术人员的集体智慧和力量,另一方面继承和包含了曾在物理实验中心工作的教师们辛勤工作的成果。本书的编写得到了云南大学普小云教授、云南师范大学张雄教授和昆明理工大学宫爱玲教授的指导和支持,同时参考了部分兄弟院校的实验教材和仪器生产厂家的资料,甚至引用了部分内容,在此表示衷心的感谢。

参加本书编写的人员包括杨留方、王玉林、李佳、王庆辉、李跃勋、陆赫林、刘涵哲、马雄韬等,最后由杨留方统稿并定稿。

虽然编者为一本书的出版进行了较长时间的酝酿和多次研讨,为保证本书的质量做了许多努力,但由于水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者

于云南民族大学广靖院

2015年6月

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差和数据处理	5
1.1 测量及其分类	5
1.2 误差及其分类	6
1.3 测量不确定度的评定	8
1.4 间接测量不确定度的估算	10
1.5 有效数字及其运算规则	12
1.6 常用的数据处理方法	14
第 2 章 力学实验	18
力学实验基础知识	18
实验 2.1 长度测量	21
实验 2.2 单摆测定重力加速度	28
实验 2.3 固体和液体的密度测定	31
实验 2.4 惯性秤	35
实验 2.5 用分析天平测定空气密度	39
实验 2.6 用伸长法测定金属丝的杨氏模量	42
实验 2.7 用超声波测空气中的声速	46
实验 2.8 用三线摆测量刚体的转动惯量	48
实验 2.9 可倒摆	51
实验 2.10 用气垫导轨测滑块的速度和加速度	53
实验 2.11 牛顿第二定律的验证	56
实验 2.12 用气垫导轨验证动量守恒定律	58
实验 2.13 弦振动的研究	61
第 3 章 热学实验	66
热学实验基础知识	66
实验 3.1 用落球法测定液体的黏滞系数	74
实验 3.2 混合法测固体比热容	77
实验 3.3 用拉脱法测定液体表面的张力系数	80
实验 3.4 不良导体导热系数的测量	85
实验 3.5 固体的线膨胀系数的测量	91
实验 3.6 气体比热容比 C_P/C_V 的测定	94
实验 3.7 热敏电阻和热电偶温差电势的测量	98
实验 3.8 冰的溶解热的测定	105
实验 3.9 冷却法测量金属的比热容	109
实验 3.10 温度传感器的特性及应用设计	113

第4章 电磁学实验	118
电磁学实验基础知识.....	118
实验4.1 伏安法测电阻.....	126
实验4.2 惠斯通电桥测电阻.....	128
实验4.3 学习使用万用电表.....	133
实验4.4 示波器的使用.....	139
实验4.5 用模拟法测绘静电场.....	143
实验4.6 霍尔效应法测定螺线管轴向磁感应强度分布.....	146
实验4.7 箱式电位差计的使用.....	153
实验4.8 电表的改装与校准.....	159
实验4.9 用双臂电桥测量低电阻.....	164
实验4.10 伏安法测二极管或钨丝灯泡的特性.....	169
实验4.11 电子束线的电偏转和磁偏转.....	172
实验4.12 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线的测定.....	176
第5章 光学实验	182
光学实验基础知识.....	182
实验5.1 薄透镜焦距的测定.....	190
实验5.2 光具组基点的测定.....	195
实验5.3 牛顿环实验.....	198
实验5.4 劈尖干涉.....	201
实验5.5 迈克耳孙干涉仪.....	203
实验5.6 单缝衍射的光强分布.....	206
实验5.7 双缝衍射的光强分布.....	212
实验5.8 圆孔衍射的光强分布.....	218
实验5.9 透射光栅的光强分布.....	224
实验5.10 分光计的结构与调节.....	229
实验5.11 三棱镜顶角测量.....	235
实验5.12 三棱镜折射率测量.....	238
实验5.13 偏振现象的观察与分析.....	241
实验5.14 旋光仪测定溶液的浓度及旋光度.....	245
第6章 其他实验	248
实验6.1 密立根油滴实验.....	248
实验6.2 光电效应法测普朗克常量.....	254
实验6.3 光速测定实验.....	260
实验6.4 弗兰克-赫兹实验.....	263
实验6.5 激光全息照相实验.....	267
参考文献	278
附录A 中华人民共和国法定计量单位	279
附录B 基本物理常数	281
附录C 物理常量表	282

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转动规律的学科。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。

一、课程的地位、作用和任务

物理实验课是高等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。

物理实验课覆盖面广,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。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能力等方面,具有其他实践类课程不可替代的作用。本课程的具体任务是:

(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) 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。

二、课程的教学内容

大学物理实验是理工类专业的主要基础课之一,具体的教学内容主要如下。

(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、作图法和最小二乘法等;随着计算机及其应用技术的普及,还应包括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。常用物理量及物性参量的测量,如长度、质量、时间、热量、温度、电流、电压、电阻、光强、折射率、电子电荷等,注意加强数字化技术和计算机技术在物理实验教学中的作用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用,如比较法、放大法、模拟法、转换法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法等。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用,如长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、示波器、分光仪、电源、光源等常用仪器。

(5) 掌握常用的实验操作技能,如零位调整、电路连接、故障排除等。

(6) 了解物理实验在现代科学技术中的应用。

三、能力的培养

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,掌握实验原理和方法,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,具有初步的分析与教育的能力。

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和综合性实验,进行初步的具有研究性质的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

四、实验课各教学环节及其要求

大学物理实验是主要基础课之一。此课程的学习要求学生以认真、严肃的态度,在教师的指导下,充分发挥积极性,主动克服困难,努力学好。为了做好每一个实验,必须做好三个环节的工作。

1. 预习

预习就是在实验前仔细自学实验讲义。其任务是:明确本次实验的目的和要求;弄清实验原理或方法;弄清楚要测量哪些量,用什么仪器测量和怎样测量;了解仪器的规格、工作原理和使用方法;留心注意事项。经验证明,预习的好坏常常关系到做实验的成败、有无收获、是否超时、是否出事故等,因此,充分的预习对做好实验是非常必要的。

2. 做实验

一般说来有以下过程:

(1) 调整仪器:在对所用仪器了解清楚的基础上,根据测量要求和操作方便的原则,将仪器放在合理的位置,并注意整齐美观;然后按操作规程,有目的、有步骤地调节仪器,使其达到能正式测量的要求。如果仪器调整不好,常无法进行测量或得出错误的结果。

实际上操作的困难,往往就在于调整仪器。因为调整仪器,除了必须掌握方法外,还需具备丰富的经验和熟练的技巧。要战胜这个困难,必须在实践中勤学苦练。如果十分仔细地完成了调整工作,那么测量的进行就会很简单,并且就会较快得出正确的结果。

(2) 测量:在考虑好整个实验的测量程序以后(如哪些量先测,哪些量后测),就要有条不紊地顺序测量,并认真读取数据和记录数据。测量的整个过程中都要保持仪器的正常和安全。

(3) 处理数据:根据所测数据,用适当的方法算出测量结果,或者作出所要求的实验曲线;数字计算也应条理分明,便于复查。如果课堂上处理不完,可在课后去处理。

特别指出:实验室的实际操作是锻炼实际工作能力的重要环节。因此,不仅要求完成测量和得出结果,而且要求通过对实际现象的观察、测量和分析,获得实际知识,提高观察能力、操作能力和分析能力;不应该只是机械地执行测量步骤或抱着完成任务的观点,而应该联系和运用理论知识,认真观察,积极思考,加深对物理现象、物理规律的认识。结合实际操作,反复琢磨测量方法和使用仪器的技巧。

3. 写实验报告

写实验报告是对一个实验进行总结,它可起到巩固和深化实验收获,训练概括和表达能力的作用。

实验报告的内容一般应包括:

实验名称 表示做什么实验。

实验目的 说明为什么做这个实验,做该实验要达到什么目的。

实验器材 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理 应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,图文并茂,并列出测量和计算所依据的主要公式,注明公式中各量的物理含义,公式成立所应满足的实验条件。

实验步骤 概括性地写出进行实验的主要过程和步骤,安全注意要点。

数据记录 记录中应该有主要实验仪器编号、规格及完整的实验数据,一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始实验数据。

数据处理 要求写出数据处理的主要过程、曲线图的绘制及误差分析等。在计算完成后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

问题讨论 一般讨论内容不受限制,可以是实验的现象、结果、误差、体会、意见和建议等。

每一次实验的三个教学环节,在做完几个实验或一个阶段的实验后应该进行复习、讨论和小结。

五、遵守实验规则

(1) 实验前必须认真预习,没有预习好的学生,不得进行实验。

(2) 遵守作息時間,不得迟到,不得无故缺席,有事必须事先请假。无故缺席的实验不得补做。

(3) 实验开始前清点好所需的仪器、用具,缺少时向教师报告,不得自己任意拉用,更不能乱拉与自己实验无关的仪器、用具。

(4) 爱护仪器设备,注意人身安全。严格按操作规程使用仪器,使用电气设备要弄清电源要求(如交、直流,电压多少),不要乱插电源。光学仪器的玻璃部件及镀膜面,在任何情况下禁止自己揩擦。用到水、火、电、有毒物品及易燃物品时,应该特别留心。

(5) 损坏仪器,要立即向教师报告,详细说明损坏的经过和原因,并进行登记,听候酌情处理。

(6) 实验中不得喧哗,以免影响其他同学进行实验。

(7) 实验完毕后,应将数据送教师审阅,经教师同意后,方可清理好自己的实验桌,离开实验室。

(8) 实验中的任何仪器、用具等,不得带出实验室。

(9) 每做完一个实验,必须认真做好实验报告,并按规定时间提交。

(10) 自觉保持实验室的清洁,不得随地吐痰和乱丢纸屑。实验室内不得吸烟,每次实验课后,由值日生打扫卫生。

第 1 章 测量误差和数据处理

物理实验,就是在理论指导下,实验者选用一些仪器设备,在一定条件下人为地控制或模拟自然现象,并通过对某些物理量的观察与测量去探索客观规律的过程。由于实验方法的不完善,仪器都有一定的精确度,测量条件并非总是能满足理论上的假定或测量仪器所规定的使用条件,因此任何测量都不可能是绝对准确的。进行物理实验时,需要掌握如何获取实验数据,如何正确处理实验数据,如何正确表达测量结果,并给出对测量结果的可靠性评价。

本章系统介绍物理实验的基本知识,主要包括:测量及其分类,误差及其分类,测量不确定度的评定、间接测量不确定度的估算,有效数字及其运算规则,常用的数据处理方法等。

1.1 测量及其分类

1.1.1 测量

测量就是通过一定的实验方法,借助一定的实验器具,将待测物理量与经人们选定的作标准的同类量进行比较的过程。

测量结果应包括数值、单位以及结果可信赖的程度(不确定度)三部分。我国采用的单位是以 SI 制为基础的法定计量单位。

测量得到的数值称为测量值,通常用“ x ”表示。

1.1.2 测量的分类

测量若按性质划分,则可分为直接测量和间接测量;若按测量次数划分,则可分为单次测量和多次测量;若按测量的精度划分,则可分为多次等精度测量和多次不等精度测量。

1. 直接测量和间接测量

直接测量就是通过仪器把所研究的物理量直接测量出来,如用天平测量物体的质量;用米尺测量单摆的摆长;用秒表测量单摆的周期;用温度计测量物体的温度等。但其他许多物理量是在直接测量某些物理量的数值后,通过一定的函数关系计算出来的,这类测量被称为间接测量。例如,用单摆测量重力加速度,就是在直接测量摆长 L 和周期 T 后,通过公式 $g=4\pi^2 L/T^2$ 计算出重力加速度的。一个物理量究竟是直接测量还是间接测量不是绝对的,通常与测量方法和测量仪器的选择有关。

2. 单次测量和多次测量

有的物理量在同一条件下不可能进行多次重复测量,或者不必进行多次重复测量,在

这两种情况下,取一次测量值为测量结果,这类测量称为单次测量。但另有一类物理量,在同一条件下可对其进行多次重复测量,以便提高测量精度,这类测量就称为多次测量。需要注意的是,对于多次测量来说,并非测量次数越多越好,因为随着测量次数的增加,“同一条件”这一前提无法得到保证。

3. 多次等精度测量和多次不等精度测量

多次测量又可分为多次等精度测量和多次不等精度测量。同一测量者,采用同一种仪器和同一种测量方法,在同一环境和条件下,对同一物理量进行多次重复测量,称为多次等精度测量。通过这样测量得到的一组数据称为等精度测量列。对于多次等精度测量,可以证明,测量列的算术平均值为最佳值,因此常采用算术平均值作为测量结果。如果对同一物理量的多次测量中,所用仪器、测量方法甚至测量者或其他外界条件中有一个或多个因素发生变化,测量精度就会发生变化,因此这样的测量称为多次不等精度测量。

严格说来,在物理实验中,做到保持实验条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某一条件的变化对测量结果影响不大,甚至可以忽略时,仍可视这种测量为等精度测量。以后提到对一个量的多次测量,如无特别说明,都是指等精度测量。

1.2 误差及其分类

1.2.1 误差

任何一个物理量在一定条件下总有一个客观的真正大小,而这个实际值就是该物理量的真实值,用 A 表示。

由于测量中仪器精度的限制、实验原来的近似性、测量环境的不稳定性以及测量者观测能力的有限性,测量值 X 与真实值 A 之间总是存在一定的偏差,这类偏差就称为误差。误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。用 Δ 表示绝对误差,用 E 表示相对误差,即

$$\Delta = |x - A| \quad (1.2.1)$$

$$E = \frac{|x - A|}{A} \quad (1.2.2)$$

由于仪器、环境和测量方法等条件无法达到理想的状态,因而物理量的真实值是无法通过测量来确定的,所以误差不仅不能完全避免,也不能完全确定,只能用各种方法进行估计。

1.2.2 误差的分类

误差按其产生的原因和性质可分为系统误差、偶然误差和粗大误差。

1. 系统误差

在多次测量同一物理量时,符号和绝对值保持不变的误差或按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。系统误差是由实验过程中某些经常发生的原因造成的,对实验结

果的影响比较固定,在同一条件下重复测定时会重复出现,因此误差的大小往往可以估计,并能设法减小或加以校正。系统误差产生的主要原因有方法误差、仪器误差、试剂误差、操作误差等。

2. 偶然误差

在相同条件下多次测量同一个量值时,误差的绝对值和符号均以不可预定方式变化的误差称为偶然误差。它是由某些偶然因素所引起的实验误差。偶然误差难以发现,也难以控制,但在消除系统误差后,在同样条件下进行重复测量,偶然误差的分布服从一般的统计规律,即正态分布,如图 1.2.1 所示。从图中可以看出偶然误差有以下特点:

(1) 大小相等的正、负误差出现的概率相等,曲线具有对称性;

(2) 小误差出现的概率多,大误差出现的概率少,曲线具有单峰性;

(3) 超过一定限度的误差几乎不会出现,曲线具有有界性。

随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值将逐渐接近于零,因此多次测量结果的平均值接近于真值。

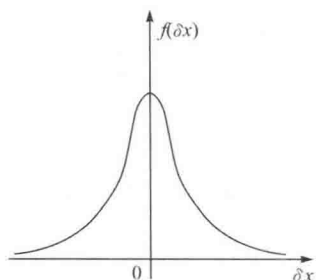


图 1.2.1 正态分布曲线

3. 粗大误差

由于测量者个人原因,如测量者本人不良测量习惯或心理和生理原因所造成的测量偏差称为粗大误差。粗大误差使测量结果总是或大或小偏向一个方向,或按某一规律变化,因此不能通过增加测量次数取多次测量的平均值来加以消除,但可以通过克服不良观测习惯、加强责任感等方法尽可能避免粗大误差。

1.2.3 测量结果的评价

评价测量结果一般用精密度、正确度和准确度三个概念,如图 1.2.2 所示。

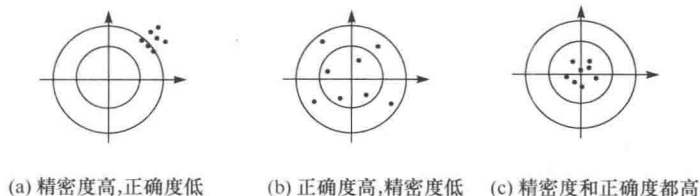


图 1.2.2 精密度、正确度和准确度示意图

(1) 精密度。它是测量结果的离散程度或相互接近的程度。精密度高,测量重复性好,说明偶然误差小,所以用精密度来反映偶然误差的大小,但不能反映测量结果与真值的偏离程度。

(2) 正确度。它是测量结果与真值或理论值相符合的程度。正确度高,测量结果接

近真值的程度好,说明系统误差小,所以用正确度来反映系统误差的大小,但不能反映偶然误差的大小。

(3) 准确度。它是测量结果重复性与接近真值的程度,有时又称精确度。精密度高,正确度不一定高;同样正确度高,精密度不一定高。准确度高就是精密度和正确度都高,所以准确度反映系统误差和偶然误差的综合效果。

实际应用中,精密度和正确度可以用来评定测量结果,也可以用来评定仪器。

1.3 测量不确定度的评定

在所有测量中,测量结果是否有价值取决于测量结果的可信程度。在 1.2 节中介绍了误差的定义,它是测量值与真值的差值。由于真值是未知的,因而误差也是未知的,但是可以根据数据和测量条件按照一定的理论方法对测量可能的误差范围做出估算。测量不确定度就是评定作为测量质量指标的量值范围。设测量值为 x , 其测量的不确定度为 u , 则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 中, 显然此量值范围越窄, 即测量不确定度越小, 用测量值表示真值的可靠性越高。

1993 年, 国际标准化组织等 7 个国际组织联合发布了《测量不确定度表示指南》, 我国也制定了《测量不确定度评定与表示》的国家技术规范, 为评定测量不确定度提供了理论依据和计算规范。

1.3.1 直接测量值的不确定度评定

由于测量有误差, 因此要评定不确定度。误差的来源不同, 对测量结果的影响也不同。由于误差按照其性质和来源主要分为系统误差和偶然误差, 所以将不确定度分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

1. A 类标准不确定度评定

A 类标准不确定度评定是指只考虑偶然误差的影响, 用统计的方法对不确定度进行的一种评定。由于偶然误差的影响, 导致每次观测值 x_i 不一定相同, 对于某一次观测而言, 其结果具有随机性, 对于大量的观测值, 可以发现它们服从统计规律。

设对 x 进行 n 次独立重复测量, 则以其算术平均值作为 x 的测量值的最近真值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.1)$$

用标准偏差 $S(x_i)$ 来表征测量结果的分散性, 即

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.3.2)$$

式(1.3.2)称为贝塞尔公式。 $(x_i - \bar{x})$ 为每次测量值与平均值之差, 称为残差或偏差。根据统计理论, 某物理量的观测值, 若已消除了系统误差, 只存在随机误差, 则观测值分布在其真值附近, 但比单个观测值更接近真值。也就是说, 多次测量的平均值比单次测量更

准确,定义 $S(\bar{x})$ 为平均值的标准偏差。

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.3.3)$$

当测量次数趋近于无穷时, $S(\bar{x})$ 趋近于零,说明增加测量次数可以减少随机误差。

在多次测量的情况下,通常以算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果,以平均值的标准偏差 $S(\bar{x})$ 作为 A 类不确定度 u_A ,称为 A 类标准不确定度,即

$$u_A = S(\bar{x})$$

测量次数 n 应充分多,才能使 A 类不确定度的评定可靠,一般认为 n 应大于 5。

2. B 类标准不确定度评定

B 类标准不确定度的评定是指只考虑系统误差的影响,用非统计的方法对不确定度进行的一种评定。可以从计量仪器说明书、鉴定书、仪器的准确度等级、仪器分度值或经验等信息中获得极限误差 Δ (或容许误差或示值误差),此类误差一般可视为均匀分布,而均匀分布的标准差为 $\Delta/\sqrt{3}$,则 B 类标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3} \quad (1.3.4)$$

要准确地评定 B 类不确定度,是一件复杂的工作,需要具备一定的经验并对相关知识充分了解。

3. 合成标准不确定度评定

若已分别计算出 A、B 两类标准不确定度,且两类分量互不相干,则需要合成标准不确定度。合成时需要注意两点:

- (1) 作为标准不确定度,不论是 A 类评定还是 B 类评定,在合成时是等价的。
- (2) 由于实际上各项误差的符号不一定相同,采用算术求和可能增大合成值,因而采用方和根合成法,即

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (1.3.5)$$

1.3.2 测量结果的表示

测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm u_c(\bar{x}) \quad (1.3.6)$$

表示待测量的真值以一定的置信概率落在区间 $(\bar{x} - u_c(\bar{x}), \bar{x} + u_c(\bar{x}))$ 之内,当 u 为标准不确定度时,这一概率约为 68%。

评价测量结果,有时需引入相对不确定度,认为相对不确定度较小者测量质量较高,其定义为

$$E = \frac{u_c(x)}{x} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

国家标准规定,相对不确定度最多保留两位有效数字。

评价测量结果,有时还将测量结果的最近真值 $\bar{x}$ 与已知的准确度较高的约定真值 x 进行比较,得到结果的百分误差。百分误差较小者测量准确度较高,其定义为

$$B = \frac{|\bar{x} - x|}{x} \times 100\% \quad (1.3.8)$$

其计算结果同样取两位有效数字。约定真值的来源,可以是有关的标准、手册上给定的数据或精度较高的仪器的测量结果,较准确的理论计算值或公认值等。

例 用螺旋测微器测量小钢球的直径,对转动小钢球在不同方向测得的数据见表 1.3.1。已知螺旋测微器的最大允许误差 $\Delta = 0.004\text{mm}$,试给出测量结果。

表 1.3.1 小钢球直径的测量数据

次数	1	2	3	4	5
d/mm	11.932	11.913	11.921	11.914	11.930

解 实验数据处理过程如下:

(1) 利用数据求出算术平均值

$$\bar{d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i = 11.922\text{mm}$$

(2) 计算 A 类不确定度

$$u_A(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = 0.004\text{mm}$$

(3) 计算 B 类不确定度

$$u_B(d) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0.0023\text{mm}$$

(4) 计算合成标准不确定度

$$u_c(d) = \sqrt{u_A^2(\bar{d}) + u_B^2(d)} = 0.005\text{mm}$$

(5) 测量结果可表示为

$$d = (11.922 \pm 0.005)\text{mm}$$

(6) 相对不确定度为

$$E = \frac{u_c(d)}{\bar{d}} \times 100\% = 0.04\%$$

1.4 间接测量不确定度的估算

物理实验中,很多物理量无法进行直接测量,如重力加速度、黏滞系数等,它们必须通过对其他物理量进行直接测量后,再由一定的函数关系求出。既然直接测量存在误差,间接测量也就必然存在误差,这就引入误差传递问题。

设间接测量量 N 是 k 个直接测量量 $x, y, z, \dots$ 的函数,函数关系为

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (1.4.1)$$

设各直接测量的测量结果分别为

$$x = \bar{x} \pm u_x, \quad y = \bar{y} \pm u_y, \quad z = \bar{z} \pm u_z, \quad \dots \quad (1.4.2)$$

若将各直接测量的最近真值代入函数式中,则间接测量量的最佳估计值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1.4.3)$$

由于不确定度都是微小的量,因此间接测量量的不确定度可借鉴数学中的全微分形式来进行计算。

首先对函数式(1.4.1)求全微分,可得

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots \quad (1.4.4)$$

将式中的微分量 $dx, dy, dz, \dots$ 换成不确定度 $u_x, u_y, u_z, \dots$, 并对等式右端进行方和根合成,得到间接测量量的不确定度方和根合成公式为

$$u_c(N) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} u_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} u_y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} u_z\right)^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial a_i}\right)^2} \quad (1.4.5)$$

式中, k 为直接测量量的个数; a_i 代表 $x, y, z, \dots$ 各个自变量。式(1.4.5)称为不确定度传递的基本公式。

当间接测量的函数式为积商形式时,为计算方便,可先对函数取对数,得

$$\ln N = \ln f(x, y, z, \dots) \quad (1.4.6)$$

再对上式求全微分

$$\frac{dN}{N} = \frac{\partial \ln f}{\partial x} dx + \frac{\partial \ln f}{\partial y} dy + \frac{\partial \ln f}{\partial z} dz + \dots \quad (1.4.7)$$

用不确定度替代后,再进行方和根合成,得到间接测量量的相对不确定度的方和根合成公式为

$$E_N = \frac{u_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} u_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} u_y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} u_z\right)^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \ln f}{\partial a_i} u_i\right)^2} \quad (1.4.8)$$

已知 $E_N, \bar{N}$, 由定义式即可求出合成不确定度为

$$u_N = \bar{N} \cdot E_N \quad (1.4.9)$$

表 1.4.1 列出了部分常用函数的标准不确定度表达式。

表 1.4.1 常用函数的标准不确定度表达式

函数表达式	传递(合成)公式
$f = x \pm y$	$u_f = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$
$f = x \cdot y$	$\frac{u_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$
$f = \frac{x}{y}$	$\frac{u_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$