

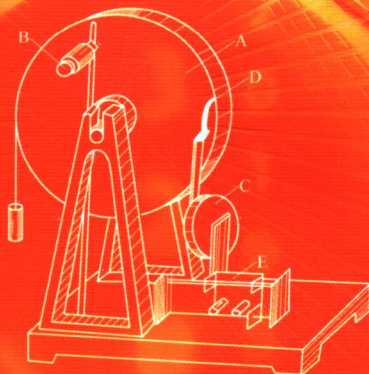
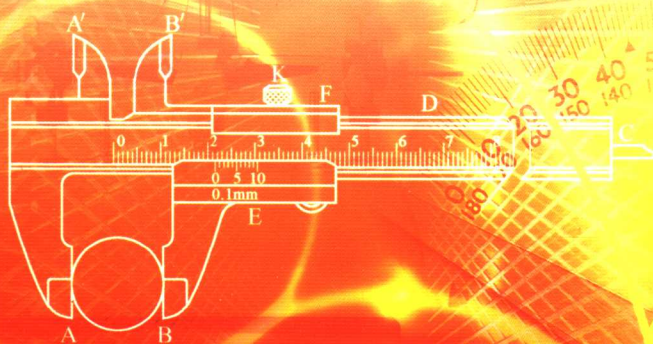


教育部高职高专规划教材

物理实验教程

曲梅丽 主编

李克勇 主审



化学工业出版社
教材出版中心



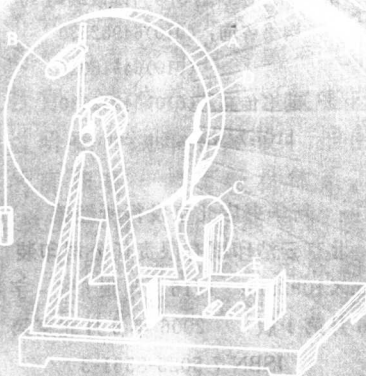
教育部高职高专规划教材

物理实验教程

曲梅丽 主编

齐建春 梅丽 杨鸿 副主编

李克勇 主审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

物理实验教程/曲梅丽主编. —北京: 化学工业出版社,
2006. 4

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8561-3

I. 物… II. 曲… III. 物理学-实验-高等学校: 技术
学院-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 037767 号

教育部高职高专规划教材

物理实验教程

曲梅丽 主编

齐建春 梅丽 杨鸿 副主编

李克勇 主审

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 陶燕华

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 6¼ 字数 149 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8561-3

定 价: 11.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

本书是根据教育部颁布的《高等学校工程专科物理实验课程教学基本要求》，并结合当前高职高专物理实验教学的现状以及学生的特点而编写的。

本书内容包括：绪论、测量误差和数据处理、物理实验基本调整技术与基本操作技术、物理实验的基本方法、设计性实验基础知识和 18 个物理实验项目。编者在编写过程中，力争突破传统的物理实验教学模式，将部分传统的验证性实验改为设计性实验和研究性实验。本书注重提高学生分析问题和解决问题的能力、动手能力以及创新思维等综合素质。实验项目突出了时代性、先进性、适用性，选用了较先进的实验仪器设备。

本书由曲梅丽任主编，李克勇主审，齐建春、梅丽、杨鸿任副主编，并聘请张作春为顾问。参加编写的还有孙靖、刘耀斌、杨威、张峰、边敦明等。

本书在编写过程中，得到了有关学院领导的大力支持和协助，并参阅了同行的有关著作和教材，在此谨向它们的编者表示感谢。

由于编者水平有限，不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2006 年 3 月

目 录

绪论	1
一、物理实验的地位和作用	1
二、物理实验课的教学目的	1
三、物理实验课的基本程序	2
第一章 测量误差和数据处理	3
第一节 测量与误差	3
一、测量	3
二、误差	4
三、标准偏差	6
第二节 测量不确定度	6
一、不确定度分类	7
二、合成不确定度	8
三、不确定度的传递	8
四、不确定度的线性合成法	8
五、不确定度均分原理	9
第三节 有效数字	10
一、有效数字	10
二、有效数字的运算规则	10
第四节 数据处理的基本方法	12
一、列表法	12
二、图示法	13
三、图解法	13
四、逐差法	14
第二章 物理实验基本调整技术与基本操作技术	16
第一节 物理实验基本调整技术	16
一、零位调整	16
二、水平和铅直调整	16
三、光路共轴调整	16
四、消视差调节	16
第二节 物理实验基本操作技术	17
一、电学实验的基本操作	17
二、光学实验的基本操作	18
第三章 物理实验的基本方法	20
第一节 比较法	20
一、直接比较法	20
二、间接比较法	20
第二节 放大法	21

一、累计放大法	21
二、机械放大法	21
三、电磁放大法	21
四、光学放大法	21
第三节 平衡法	21
第四节 补偿法	22
第五节 转换法	22
第六节 模拟法	23
一、物理模拟法	23
二、数学模拟法	23
第七节 干涉法	23
第四章 设计性实验基础知识	25
第一节 设计性实验的性质与任务	25
一、设计性实验的定义	25
二、设计性实验的核心任务	25
第二节 实验方案的选择和实验仪器的配套	25
一、实验方案的选择	25
二、实验仪器的配套	26
三、设计实验方案要求	26
第五章 物理实验项目	27
实验一 规则形状固体密度的测定	27
实验二 气垫导轨上测滑块的速度和加速度	32
实验三 碰撞过程中守恒定律的研究 (研究性实验)	36
实验四 单摆的设计与研究 (设计性实验)	38
实验五 用拉伸法测金属丝的弹性模量	40
实验六 用转动惯量仪测定刚体的转动惯量	44
实验七 液体黏滞系数的测定与研究	46
实验八 导热系数的测定	49
实验九 静电场的描绘	52
实验十 测绘电阻的伏安特性曲线	55
实验十一 测电源的电动势和内阻 (完全设计型实验)	60
实验十二 多用电表的使用	62
实验十三 直流电表的改装和校正	65
实验十四 示波器的使用	68
实验十五 观察阴极射线和洛伦兹力	73
实验十六 分光计的调节和使用	75
实验十七 迈克耳逊干涉仪的调整和使用	81
实验十八 密立根油滴实验	84
附表	90
附表 I 20℃时常用固体和液体的密度	90
附表 II 常用金属的弹性模量	90
附表 III 部分材料的导热系数	90
参考文献	91

绪 论

一、物理实验的地位和作用

物理学是以实验为基础的一门学科。纵观物理学发展史，物理学中带根本性的发现，不是在书桌上，而是在实验室里开始的。

我国战国时期的墨家学派对平面镜、凸面镜、凹面镜和小孔成像等都进行过实验研究，墨经中就记载了很多光学实验。古希腊学者阿基米德用实验方法研究并发现了阿基米德定律。伽利略继承了阿基米德的传统，认为实验可以帮助人们认识自然更新观念，他巧妙地设计过许多实验，并从实验中总结出物理规律。物理学家焦耳从 1843~1878 年，采用了原理各异的方法，做了 400 余次实验，以日益精确的数据为能量守恒定律提供了毋庸置疑的实验证明。19 世纪初，英国科学家托马斯·杨进行的光的干涉实验促成了光的波动学说的确立。德国科学家赫兹在 1888 年做的电磁波实验，则使麦克斯韦的电磁波理论获得普遍承认。其他如原子结构、光的本性、基本粒子研究等，无一不是以物理实验为基础的。可见，物理实验在物理学中的地位是多么重要。

一个重要的物理实验所产生的影响是极为深远的，它不仅推动物理学理论的发展，而且往往能在几个科学领域内引起连锁反应，直接影响科学技术的进步，一旦将其转化为社会生产力，就能产生巨大的作用，促进人类社会的物质文明甚至精神文明建设。例如，对物质导电性能的实验研究，使人们得以利用半导体制成半导体晶体管，并由晶体管发展到集成电路、大规模集成电路，甚至超大规模集成电路，从而使电子技术跨入微电子技术时代。当前，微电子技术和各种高科技的进一步结合，使计算机得到最广泛、最普遍的应用。这意味着从机械设备、交通工具、仪器仪表、医疗器械到办公用品乃至家用电器，都将智能化和具有独立工作能力，这对社会生产力的提高、科技的进步乃至人类社会的发展都有着不容低估的推动作用。

因此，在学习物理学时，要充分认识到物理实验的地位和作用，正确处理理论课和实验课的关系，既要学好理论，又要做好实验，不可有所偏废。

二、物理实验课的教学目的

根据《高等学校工程专科物理实验课程教学基本要求》的规定，物理实验是学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修的实验基础课，是学生进入大学后受到系统的实验方法和技能训练的开端，是学生学习后继课程的实验和进行工程实验的基础。

物理实验课的任务有以下几个方面。

① 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能，并加深对物理学原理的理解。

② 使学生学会常用物理仪器的调整及正确的使用方法。

③ 使学生初步具备处理数据、分析结果、撰写实验报告的能力。

④ 培养学生科学系统的思维方式、一丝不苟的严谨态度、实事求是的工作作风和团结协作的精神。

三、物理实验课的基本程序

1. 实验前的预习

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容, 学生在实验前必须做好预习工作。实验教材是实验的指导书, 它对每一个实验的目的、要求、实验原理都作了明确的阐述, 因此, 在上实验课前必须认真地阅读。在做设计性实验时, 根据实验的要求, 还需查阅有关参考资料。实验中涉及的仪器, 不少是从未见过的, 在预习时就需认真阅读教材中的仪器介绍, 弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等。特别是注意事项, 不仅要仔细看, 还要牢记, 否则会造成仪器损坏, 甚至人身事故。对仪器的构造, 应尽可能地去理解、想象, 必要时还需去实验室观察实物。

在预习的基础上, 写好预习报告, 其内容包括实验名称、实验目的、实验原理和数据记录表格。此外, 根据实验内容, 准备好实验中所需的绘图工具、计算器等。

2. 实验操作

实验时, 应严格遵守实验室的规章制度。在实验正式进行前, 首先结合仪器实物, 对照实验教材或仪器说明书, 认识和熟悉仪器的结构和用法; 其次要全面地想一想实验的操作程序, 怎样做更为合理, 不要急于动手。因为对于操作程序中某些关键步骤而言, 哪怕是微小改变, 都有可能使实验前功尽弃。

仪器的安装和调整是决定实验成败的关键一环。使用仪器进行测量时, 必须满足仪器的正常工作条件(如螺旋测微器的调零、天平调水平 and 平衡、光路调共轴等)。不重视仪器的调整而急于进行测量, 是初学者易犯的毛病, 应予纠正。

实验测量应遵循“先定性后定量”的原则。即先定性地观察实验全过程, 确认整个实验装置工作是否正常, 对所测内容做到心中有数。在可能的情况下, 对数据的数量级和走向做出估计之后, 再定量地读取和记录测量数据。测量时, 观测者应集中精力、细心操作、仔细观察, 并积极发挥主观能动性, 以获得所用仪器可能达到的最佳结果。

原始数据是宝贵的第一手资料, 是实验结束后计算和分析问题的依据, 应按有效数字的规则正确记录。实验记录的内容应包括: 日期、时间、地点、合作者、仪器的编号、名称和规格、原始数据及有关现象。

实验数据是否合理, 学生应首先自查, 然后交给指导教师审查。对不合理的和错误的实验结果, 应分析原因, 及时补测或重做。离开实验室前, 应自觉整理好仪器, 并做好清洁工作。

3. 实验报告的书写

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。实验报告要求文字通顺、字迹工整、数据完整、图表规范、结果正确。

一份完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、实验原理、实验步骤、原始数据、数据处理和讨论等内容。对于实验原理, 应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述, 做到简明扼要。实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧, 不要照抄教材中的操作步骤。原始测量数据一般要求以列表形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程、图表和最后结果的误差分析。对实验过程和结果的讨论要具体深入, 有分析、有见解, 不要泛泛而谈, 其内容一般不受限制, 可以是对观察到的实验现象进行分析, 对结论和误差原因进行分析, 也可以对实验方案提出改进意见。

应当指出, 实事求是的科学态度和严肃认真的工作作风是科学工作者应具备的品德。在处理数据和书写实验报告时, 严禁伪造实验数据。

第一章 测量误差和数据处理

一切物理量的测量都不可能是完全准确的，这是因为在科学技术发展和水平提高的过程中，人们的认识能力和测量仪器的制造精度都受到相应的限制，测量误差的存在是一种不以人们意志为转移的客观事实。当今误差理论及其应用已发展成为一门专门的学科。作为对学生进行科学实验基本训练的物理实验课程，必须给予学生最基本的误差理论知识。为此，本章主要讲述误差的基本理论、测量的不确定度、有效数字以及数据处理的基本方法。

第一节 测量与误差

一、测量

1. 测量与单位

物理实验包括两方面内容，即定性观察物理现象和定量测量物理量的大小，进而研究建立物理规律，因此物理实验离不开对物理量的测量。**测量就是将待测量与一个选作单位的同类量进行比较，其倍数与单位的乘积即为该待测量的量值。**显然数值的大小与选用的单位有关，对同一对象测量时，选用的单位越大，数值就越小，反之亦然。因此，在表示一个被测对象的量值时，就必须包含数值和单位两个部分。

根据《中华人民共和国计量法》，规定采用以国际单位制（SI）为基础的中华人民共和国法定计量单位，即以米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流）、开尔文（热力学温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（发光强度）作为基本单位，其他量的单位都由这七个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。

2. 测量的分类

按获取数据方法的不同，测量可以分为直接测量和间接测量；按测量条件的不同，测量可分为等精度测量和不等精度测量。

（1）直接测量与间接测量

直接测量就是直接用仪器测出待测物理量的量值。例如用米尺测量物体的长度，用天平称量物体的质量等都是直接测量。在物理实验中，还有不少物理量不能或者不便于直接用仪器测出，而要根据可直接测量的物理量量值，通过一定的函数关系计算出来，这种测量称为**间接测量**。例如，用长度测量仪器直接测出圆柱体的直径 d 和高度 h ，然后再根据关系式 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ 计算出圆柱体的体积；用电压表量出电阻两端的电压 U ，用电流表测

出电阻中通过的电流 I ，继而根据欧姆定律计算出电阻 $R = \frac{U}{I}$ 等都是间接测量。

对于同一物理量，有时既可用间接测量测得，亦可用直接测量测得，这在很大程度上取决于实验的方法和选用的仪器。如上所述，用伏安法测量电阻值是间接测量，而用多用

电表的欧姆挡测量电阻值就成为直接测量了。

(2) 等精度测量和不等精度测量

等精度测量是指在相同实验条件下进行的多次重复测量。各次测量的可靠程度是相同的。

不等精度测量是指在某一实验条件发生变化的条件下进行的多次重复测量。

二、误差

1. 绝对误差和相对误差

不论是直接测量或间接测量,其最终目的都是要获得物理量的真值,所谓**真值**就是**被测量所具有的、客观的真实数据**。然而实际测量时,总是由具体的观测者,通过一定的测量方法,使用一定的测量仪器,在一定的测量环境中进行的。由于受到观测者的操作和观察能力、测量方法的近似性、测量仪器的分辨率和准确度、测量环境的波动等因素的影响,其测量结果和客观的真值之间总有一定的差异。测量结果与真值之间的偏离称为**误差**。

测量值 x 与真值 μ 之差称为测量误差,简称**误差**,以 Δ 表示,即

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

由于 Δ 没有考虑测量值本身的大小,所以这种误差称为**绝对误差**。但是衡量测量结果的优劣,还需要参考测量值本身的大小。为此,将**绝对误差 Δ 与被测量真值 μ 之比称为相对误差**,以 E_r 表示,即

$$E_r = \frac{\Delta}{\mu} \quad (1-2a)$$

相对误差用百分数来表示,又称**百分误差**,即

$$E_r = \frac{\Delta}{\mu} \times 100\% \quad (1-2b)$$

如果被测量有理论值(或公认值),则用百分误差来表示测量的优劣,即

$$E_r = \frac{\bar{x} - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-2c)$$

式中, x_0 为被测物理量的理论值(或公认值), $\bar{x}$ 为被测物理量的算术平均值。

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中,虽然随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高,误差可能被控制得越来越小,但始终不可能消除。

2. 误差的分类

误差按其性质和产生原因,可分为**系统误差**、**随机误差**和**疏失误差**。

(1) 系统误差

在相同的条件下,多次测量同一物理量时,若误差的大小和正负总保持不变或按一定的规律变化,这种误差称为**系统误差**。系统误差是带有系统性和方向性的误差。

系统误差的来源主要有:测量方法的因素,如单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 是近似公式,伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等;仪器的因素,如天平的两臂不等长,游标卡尺的零点不准等;环境的因素,如测磁体磁场时受到地磁场的影响,在 30°C 时使用 20°C 时标定的标准电池等;还有观测者的因素,如有人读数时偏大(或偏小),有人按秒表时总是滞后等。

系统误差有些是定值的,如游标卡尺的零点不准;有些是积累性的,如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时,其测量值就小于真值,误差随测量长度成比例地增加;还有些是周期

性变化的,如停表指针的转动中心与表面刻度的几何中心不重合,造成偏心差,其读数的误差就是一种周期性的系统误差。

系统误差是测量误差的重要组成部分,发现、估计和消除系统误差,对一切测量工作都是非常重要的。因此,观测者测量前必须对影响结果的各种因素进行分析研究,预见、发现、估算、检验一切可能产生系统误差的来源,并设法予以消除或修正。

(2) 随机误差

在相同的条件下,多次测量物理量时,各测量值之间总存在差异,且变化不定,在消除系统误差后仍然如此,这种绝对值和符号随机变化的误差称为随机误差。

随机误差的产生,取决于测量过程中一系列随机因素的影响。其来源主要有:环境的因素,如温度、湿度、气压的微小变化等;观测者的因素,如瞄准、读数的不稳定等;测量装置的因素,如零件配合的不稳定性、零件间的摩擦等。

随机误差的存在使得测量值时而偏大,时而偏小,看来似乎没有什么规律。但实际上,随机误差总是服从一定的统计规律的,可以利用这种规律对实验结果做出随机误差的估算。

(3) 疏失误差

由于观测者使用仪器的方法不正确、实验方法不合理、读错数据、记错数据等原因,使得测量结果明显地被歪曲,由这些原因引起的误差称为疏失误差。只要观测者具有严肃认真的科学态度、一丝不苟的工作作风,疏失误差是可以避免的。

3. 精度

(1) 精密度

精密度表示重复测量所得结果相互接近的程度,是反映随机误差的。精密度高,则随机误差小;反之,则随机误差大。它对系统误差没有反映。

(2) 准确度

准确度表示测量结果中系统误差大小的程度。准确度高,则系统误差小;反之,则系统误差大。它不能反映随机误差的大小。

(3) 精确度

精确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合,表示测量结果与真值一致的程度。精确度高,则系统误差和随机误差都小;反之,两种误差中至少有一个较大。

4. 随机误差的统计规律

随机误差的出现从某一次测量来看是出于偶然,当测量次数足够多时,就会显示出明显的规律性。大量的实验事实和统计理论都证明,在大多数情形下,随机误差服从正态分布,如图 1-1 所示。图 1-1 中横坐标为误差 Δ ,纵坐标为误差分布概率密度函数 $f(\Delta)$,它表示在误差 Δ 附近处单位误差间隔内出现的概率。由图 1-1 可见,随机误差具有以下几个特征。

(1) 单峰性

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。

(2) 对称性

绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

(3) 有界性

在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。

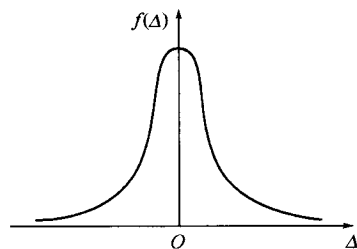


图 1-1 正态分布的误差曲线

(4) 抵偿性

随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (1-3)$$

因此, 增加测量次数可以减少随机误差, 随机误差是一种具有抵偿性的误差。

5. 算术平均值

如上所述, 增加测量的次数可以减少随机误差, 因此, 在可能的情况下, 总是采用多次测量。如果在相同的条件下, 对某物理量 x 进行 n 次测量, 其测量值分别是 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。根据误差的统计理论, 在一组 n 次测量的数据中, 算术平均值 $\bar{x}$ 最接近真值, 称为测量的最佳值或近真值。由于测量的误差总是存在的, 真值总是不能确切地知道, 所以可用算术平均值表示测量的结果, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

三、标准偏差

具有随机误差的测量值是分散的, 对于分散情况的定量表示用标准偏差 s , 它的定义式为

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

式中, n 为测量次数。

测量值有随机误差, 它们的算术平均值也必然有随机误差。由于求和时随机误差的抵偿效应, 算术平均值的误差绝对值较小。可以证明, 算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 为

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

标准偏差小的测量值, 表示分散范围较窄或比较向中间集中, 而这种表现又显示出测量值偏离真值的可能性, 即测量的可靠度较高。

根据误差理论的高斯分布, 在没有其他误差的情况下, 在量值 $\bar{x} - s(\bar{x}) \sim \bar{x} + s(\bar{x})$ 范围内包含真值的可能性为 68%; 在量值 $\bar{x} - 1.96s(\bar{x}) \sim \bar{x} + 1.96s(\bar{x})$ 范围内包含真值的可能性为 96%; 在量值 $\bar{x} - 2.58s(\bar{x}) \sim \bar{x} + 2.58s(\bar{x})$ 范围内包含真值的可能性为 99%。很明显, $s(\bar{x})$ 越小, 用算术平均值 $\bar{x}$ 作为真值就越可靠。

从式 (1-6) 可知, 当增加测量次数时, $s(\bar{x})$ 会越来越小, 这就是通常所说的增加测量次数, 可以减小随机误差, 对提高平均值的价值是有利的。但是, 测量次数也不是越多越好, 因为增加 n , 测量时间就要延长, 实验环境可能出现不稳定, 实验者也要疲劳, 这将引入新的误差, 并且 $s(\bar{x})$ 是按 s 与 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 的比例变化的, 当 $n > 10$ 时, 随着 n 的增大, $s(\bar{x})$ 的减小实际已很不明显, 因此, 在进行多次测量时, 一般取 4~10 次为宜。

第二节 测量不确定度

误差是绝对的, 它贯穿于整个测量过程中, 因此不可能通过测量获得真值, 要准确地

计算出误差是不可能的, 只能对其数值指标进行评定。

不确定度是指由于误差的存在而对被测量值不能肯定的程度, 是对被测量的真值落在某一个量值范围内的一个评定。由此可知, 不确定度的大小就是真值以某一概率出现的量值范围的大小。不确定度小, 该量值范围就小, 测量结果的可信度就高, 反之则低。

一、不确定度分类

测量不确定度一般由若干分量组成。如果评定方法由测量列的测量结果按统计方法估计, 则称为 A 类不确定度; 如果由用统计方法以外的其他方法估计, 则称为 B 类不确定度。

1. A 类不确定度

设有一组等精度测量数据分别是 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

用统计方法求出算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$

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

则 A 类不确定度 $u_A(\bar{x})$ 就取为算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$, 即

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) \quad (1-7)$$

根据误差理论的高斯分布, 如果不存在其他误差, 则量值范围 $[\bar{x} - u_A(\bar{x}), \bar{x} + u_A(\bar{x})]$ 中包含真值的概率为 68%。若扩大量值范围为 $[\bar{x} - 1.96u_A(\bar{x}), \bar{x} + 1.96u_A(\bar{x})]$, 则其中包含真值的概率为 95%。

2. B 类不确定度

当误差的影响仅使测量值向某一方向有恒定的偏离时, 不能用统计的方法评定不确定度。这一类不确定度统称为 B 类不确定度, 记为 $u_B(x)$ 。

B 类不确定度的评定, 有的依据计量仪器说明书或检定书, 有的依据准确度等级, 有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 $\Delta_{\text{仪}}$ (或容许误差或示值误差), 此类误差一般视为均匀分布, 而 $\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准差, 则 B 类不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3} \quad (1-8)$$

为简单起见, 这里仅对由常用仪器或量具本身性能所产生的不确定度问题进行讨论。在相同条件下大批生产的仪器产品, 仪器的误差在 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 范围内是按一定概率分布的。下面介绍 $\Delta_{\text{仪}}$ 的几种取值方法。

① 对能连续读数的仪器, 取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于其分度值的一半。例如, 对毫米分度尺, 取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5\text{mm}$; 对 0.01mm 分度的螺旋测微器, 取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005\text{mm}$ 。

② 对不能连续读数的仪器, 取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于其分度值。例如, 对 0.02mm 分度的游标卡尺, 取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$; 对 0.1s 分度的机械停表, 取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.1\text{s}$ 。

③ 对指针式电表, $\Delta_{\text{仪}}$ 按其准确度级别由下式确定

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{准确度级别} / 100$$

例如, 某电压表的量程为 30V , 准确度级别为 0.5 级, 则 $\Delta_{\text{仪}} = 30 \times 0.5 / 100 = 0.15\text{V}$ 。

④ 停表的 $\Delta_{\text{仪}}$ ，一般取人体反应不确定度，即 $\Delta_{\text{仪}} = 0.2\text{s}$ 。

对于其他各类仪器的 $\Delta_{\text{仪}}$ ，可按照说明书（符合国家标准）中规定的来确定。

二、合成不确定度

如果测量结果里同时含有 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量，则其合成不确定度为

$$\sigma = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-9)$$

相对不确定度定义为合成不确定度与算术平均值的比，即

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (1-10)$$

三、不确定度的传递

设间接测得量 $N = f(X, Y, Z, \dots)$ ，式中 $X, Y, Z, \dots$ 为各独立的直接测得量，将各直接测得量的算术平均值代入公式，即可得到间接测得量 N 的最佳估计值 $\bar{N}$

$$\bar{N} = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \dots) \quad (1-11)$$

间接测得量 N 的合成不确定度为

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 \delta^2(X) + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 \delta^2(Y) + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 \delta^2(Z) + \dots} \quad (1-12)$$

上式中的 $\delta(X)$ ， $\delta(Y)$ ， $\delta(Z)$ ， $\dots$ 分别是各直接测得量 $X, Y, Z, \dots$ 的不确定度。

表 1-1 列出了常用函数的不确定度传递公式，以备查用。

表 1-1 常用函数的不确定度传递公式

运算关系	传递公式	运算关系	传递公式
$N = X + Y$	$\sigma_N = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$	$N = X^n$	$\frac{\sigma_N}{N} = n \frac{\sigma_X}{X}$
$N = X - Y$	$\sigma_N = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$	$N = \sqrt[n]{X}$	$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{n} \times \frac{\sigma_X}{X}$
$N = XY$	$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2}$	$N = \sin X$	$\sigma_N = \cos X \sigma_X$
$N = \frac{X}{Y}$	$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2}$	$N = \cos X$	$\sigma_N = \sin X \sigma_X$
		$N = \ln X$	$\sigma_N = \frac{\sigma_X}{X}$

由上表可总结出两个规律。

① 函数为加减形式时，间接测得量的不确定度的平方，等于各直接测得量的不确定度的平方和。

② 函数为乘除形式时，间接测得量的相对不确定度的平方，等于各直接测得量的相对不确定度的平方和。

测量结果一般表示为

$$N = \bar{N} \pm \sigma_N \quad (1-13)$$

四、不确定度的线性合成法

在很多情况下，往往只需粗略估计不确定度的大小，可采取较为保守的线性（算术合成）法计算。为使用方便，下面将常用函数的最大不确定度算术合成公式列入表 1-2，以供查找使用。

表 1-2 常用函数的最大不确定度算术合成公式

函数表达式	不确定度	相对不确定度
$N = X + Y$	$\Delta X + \Delta Y$	$\frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y}$
$N = X - Y$	$\Delta X + \Delta Y$	$\frac{\Delta X + \Delta Y}{X - Y}$
$N = XY$	$X\Delta Y + Y\Delta X$	$\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = \frac{X}{Y}$	$\frac{X\Delta Y + Y\Delta X}{Y^2}$	$\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = X^n$	$nX^{n-1}\Delta X$	$n \frac{\Delta X}{X}$
$N = \sin X$	$\cos X \Delta X$	$\cot X \Delta X$
$N = \ln X$	$\frac{\Delta X}{X}$	$\frac{\Delta X}{X \ln X}$

由表 1-2 可得出如下结论。

① 几个量相加减后结果的不确定度，等于各量的不确定度之和。

② 几个量相乘除后结果的相对不确定度，等于各量的相对不确定度之和。

应用结论①和②及不确定度传递公式计算间接测得量的不确定度时，应根据函数的具体形式，选择恰当的运算顺序，达到简化推导的目的。

五、不确定度均分原理

在间接测量中，每个独立测得量的不确定度都会对最终结果的不确定度有贡献。如果已知各测得量之间的函数关系，可写出不确定度传递公式，并按均分原理，将测量结果的总不确定度均匀分配到各个分量中，由此分析各物理量的测量方法和使用仪器，指导实验。对测量结果影响较大的物理量，应采用精度较高的仪器，而对结果影响不大的物理量，就不必追求高精度仪器。

【例题 1-1】 用单摆测重力加速度，要求 $\frac{\Delta g}{g} \leq 0.2\%$ 。已知摆长 $l \approx 1\text{m}$ ，周期 $T \approx 2\text{s}$ ，应如何选择测量仪器？

【解】 由单摆的一级近似周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 得

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$$

由函数的最大不确定度算术合成公式得

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T} \leq 0.2\% = 0.002$$

按不确定度均分原理，有

$$\frac{\Delta l}{l} \leq 0.001 \quad 2 \frac{\Delta T}{T} \leq 0.001$$

而 $l \approx 100.00\text{cm}$ ， $T \approx 2.0\text{s}$ ，所以

$$\Delta l \leq 100 \times 0.001 = 0.1\text{cm}$$

$$\Delta T \leq \frac{1}{2} \times 2.0 \times 0.001 = 0.001\text{s}$$

显然，测量 l 用分度为 1mm 的米尺即可满足要求。而 T 的测量必须用数字毫秒计。

注意到单摆连续摆动的周期是固定的,因而可以连续测量 n 个周期求 T 值。若采用停表,一次测量的最大允差为 $\Delta T = 0.2\text{s}$ 应满足 $\frac{0.2\text{s}}{n} \leq 0.001\text{s}$, 所以测量次数 $n \geq 200$, 即用停表连续测 200 个周期可满足要求。

第三节 有效数字

物理实验离不开物理量的测量,直接测量需要记录数据,间接测量不仅需要记录数据,而且要进行数据的计算。由于任何测量都存在误差,那么,在直接测量被测物理量数值时应取几位数字,在按函数关系计算间接测得量数值时又要保留几位数字,这是实验数据处理中一个重要的问题。

一、有效数字

1. 有效数字的定义

在表达测量结果的数据中,从第一位非零数字起到开始有误差的一位止的这个数字段中的每位数字都称为有效数字。在有效数字中,有误差的一位称为可疑数字,其余叫可靠数字。

根据定义知,不确定度只有一位有效数字而且是可疑数字。

2. 数字中的“0”

表示小数点位置的“0”不是有效数字。例如,一物体的长度为 8.62cm ,可写成 86.2mm 或 0.0862m ,虽然单位发生了变换,但有效数字位数都是三位。

在数字中间或后面的“0”都是有效数字。例如, 1.035cm 和 1.350cm 都有四位有效数字; 1.00cm 有三位有效数字。显然,数字后面的“0”既不能随意加上,也不能随意去掉。

3. 仪器的正确读数

对于直接测量,在仪器、仪表上读取数据时的一般规则是读至 Δ 所在的那一位为止。例如,用一只准确度级别为 0.1 级,量程为 100mA 的电流表测电流时,由于该表的 $\Delta_{\text{仪}} = 100 \times 0.1\% = 0.1\text{mA}$,所以应读到 0.1mA 位;用一只显示到 10ms 位的电子停表测时间时,由于人体反应的不确定度 $\Delta_{\text{人}} = 0.2\text{s}$,故利用此表读数时,只读到 0.1s 位即可。

总之,读数前应先搞清楚使用仪器的 Δ 所在位,然后才能正确确定直接测得量的有效数字,做到正确地记录数据。

4. 数字的科学表达法

当一个数很大或很小时,为了能简洁地把它表达出来而又与有效数字的定义相一致,可使用科学记数法。例如,测得某电阻的阻值为 20000Ω ,不确定度为 100Ω ,如果把结果写成 $(20000 \pm 100)\Omega$,显然是不合适的;如果写成 $(20.0 \pm 0.1) \times 10^3\Omega$ 就比较合适了,因为它反映了阻值的大小 20000Ω ,同时满足了不确定度决定结果有效数字位数的规定,这就是科学表达法。

当一个数很小时,例如 $(0.000635 \pm 0.000002)\text{m}$,用科学表达法可表示为 $(6.35 \pm 0.02) \times 10^{-4}\text{m}$,这种写法不仅简洁明了,而且使数字的计算及定位变得非常简便。

二、有效数字的运算规则

有效数字的运算应按照既简洁方便又不引入计算误差的原则进行,其结果通常只保留一位可疑数字。