# 第二版前言

为适应教学改革的新形势，根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会2011年《大学物理和大学物理实验课程教学基本要求》的主要精神，以及我校物理实验中心近几年实验教学的经验总结，我们对《大学物理实验教程》一书进行了修订。

《大学物理实验教程》实现大学物理实验课程四层次教学，适用于高等院校非物理类理工专业学生使用，也可作为实验技术人员和相关教师的参考用书。《大学物理实验教程》第一版于2009年1月出版，得到了广大读者和师生的认可，在此我们向使用本书的读者表示感谢。

与第一版相比，第二版修订主要体现在以下几方面：

（1）删除了部分陈旧实验项目，使本书更为简洁和紧凑。对新增的设备，修订了实验内容，使教材能及时反映仪器的更新；

（2）对部分实验的内容及步骤和数据处理内容进行了适当的调整和补充，使得学生在实验过程中更易掌握操作要领，使其更能适应实际教学的需要。

（3）本书对实验原理图进行了适当调整，使得学生更易领会实验思想。对图、表题注进行了更详细的标注。

本书由李钰、李云宝主编，主持全书修订工作，参加修订工作的主要人员有副主编陈克亮、童明强、董锡杰，另外，王辉、黄刚、徐千山、彭茹等。该书修订工作得到了我校应用物理系及大学物理实验教学示范中心全体老师的大力支持，在此表示诚挚感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，遗漏、不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

2017年8月

# 前　言

本书根据教育部《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求(正式报告稿)》和我校湖北省大学物理实验教学示范中心近几年使用的实验讲义编写的. 本书在物理实验教学内容上进行了较大的调整,采用以人为本的分层次实验教学课程体系,促进物理实验教学内容现代化,以适应现代科技与教育的发展. 具体做法是,依照训练层次,按专业特点和学生能力分成四个层次,进行实验教学.

**一、预备性实验**

预备性实验的任务是缩小来自不同地区和学校的学生对基本物理实验掌握程度的差别,作为"大学物理实验"正规训练前的预备练习. 开设这些实验的目的是培养学生最基本的实验能力,使学生能初步掌握力、热、电、光等各方面基本参数的测量,同时学会最基本仪器的使用方法,掌握最基本的测量和实验数据处理方法. 通过这些实验,使学生在开始大学物理实验时有同一起点,同时培养学生的自学能力和初步的动手操作能力.

**二、基础性实验**

本层次实验训练物理实验方法和实验技能,以"加强基础,重视应用,开拓思维,培养能力,提高素质"为指导思想,开设的实验项目能使学生通过直接观察和分析重要的物理现象,学习掌握物理量的测量和基本的物理实验方法,加深对物理原理的理解. 这部分实验内容相对稳定,有着深厚的物理思想和物理内容;但同时又随时代的发展而有所更新. 开设这些实验使学生掌握进行科学实验以及科学研究的基本方法,着力培养和提高学生的实践能力和创造能力.

**三、提高性实验**

本层次实验以综合和近代物理实验为主,与基础性实验不同的是本层次实验完全打破学科的界限. 在每个实验中,都综合地应用了多学科的物理知识与技术,目的是加强学生对较深层次物理规律的学习与研究,加强对实验现象的观察与分析,着力培养学生的综合思维能力.

**四、综合设计研究性实验**

本层次实验由各分支学科的综合和设计性实验组成. 在教师的指导下,学生根据给定的实验目的和实验条件,自己设计实验方案,选择实验仪器,独立完成实验,并对实验结果进行分析处理. 学生在实验中,积极思考,主动学习,找到自己在实验教学中的主体位置,并从实验教学中获得成就感和满足感. 这类实验着力培养学生综合运用与设计能力、创新意识和创新能力,为学生发展个性和施展才能提供平台.

物理实验课是一门体现集体智慧和劳动结晶的课程,是日积月累、逐步完善发展的结

果.在本书的编写过程中,许多老师做了大量的具体工作.本书由李钰、李云宝主编,陈克亮、熊祖钊、杨守菊、童明强任副主编,参加编写的还有王辉、黄刚、徐千山、卢建夺、彭茹、侯廷平、王玉华、荔静、季玲玲、员美娟等.特此感谢我校应用物理系及大学物理实验教学示范中心全体老师的大力支持!

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评、指正.

编　者

2009年1月

# 目　　录

绪论……（1）
实验误差与数据处理……（5）

**第一篇　预备性实验**

实验一　基本物理量的测量 ……（18）
实验二　用三线摆法测定刚体转动惯量 ……（22）
实验三　拉伸法测杨氏模量 ……（25）
实验四　用毛细管升高法测水的表面张力系数 ……（29）
实验五　线性与非线性电阻伏安特性曲线的测定 ……（31）
实验六　欧姆表设计和电表改装及校正 ……（34）
实验七　电位计的原理和应用 ……（44）
实验八　透镜焦距的测定 ……（48）

**第二篇　基础性实验**

实验九　用复摆测量重力加速度 ……（54）
实验十　气垫导轨实验 ……（57）
实验十一　用双悬扭摆测刚体的转动惯量 ……（62）
实验十二　用拉脱法测水的表面张力系数 ……（65）
实验十三　液体黏度的测定 ……（69）
实验十四　固体线胀系数的测定 ……（74）
实验十五　气体比热容的测定 ……（78）
实验十六　超声声速的测定 ……（82）
实验十七　示波器的使用 ……（84）
实验十八　热电偶定标曲线的测定 ……（90）
实验十九　模拟法描绘静电场 ……（93）
实验二十　霍尔效应实验 ……（98）

实验二十一　用霍尔效应法测量长直螺线管线圈磁场…… (105)
实验二十二　亥姆霍兹线圈磁场分布的测量…… (111)
实验二十三　用直流电桥测电阻…… (117)
实验二十四　牛顿环和劈尖干涉实验…… (121)
实验二十五　光的偏振实验…… (125)
实验二十六　旋光仪的使用…… (128)
实验二十七　分光计的调整和使用…… (130)
实验二十八　用分光计研究光栅光谱…… (135)
实验二十九　双棱镜干涉实验…… (137)
实验三十　迈克耳孙干涉仪的使用…… (141)
实验三十一　对显微摄影术的了解…… (147)

## 第三篇　提高性实验

实验三十二　动态法测金属的杨氏模量…… (151)
实验三十三　阿贝折射仪测液体折射率…… (156)
实验三十四　驻波综合实验…… (160)
实验三十五　电信号的傅里叶分析…… (163)
实验三十六　弗兰克-赫兹实验 …… (166)
实验三十七　磁电阻效应实验…… (171)
实验三十八　普朗克常量的测定…… (173)
实验三十九　金属电子逸出功的测定…… (177)
实验四十　用纵向磁聚焦法测定电子荷质比…… (181)
实验四十一　密立根油滴实验…… (185)
实验四十二　塞曼效应实验…… (190)
实验四十三　箔式应变片传感器的特性实验…… (194)
实验四十四　溶液电导率的测定…… (198)
实验四十五　材料磁化率的测定…… (200)
实验四十六　铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线的测定…… (204)
实验四十七　双光栅测量微弱振动位移量实验…… (209)
实验四十八　全息照相实验…… (214)
实验四十九　电介质介电常数的测量…… (221)
实验五十　氢原子光谱的波长测量…… (225)

## 第四篇　综合、设计与研究性实验

实验五十一　重力加速度的测量……（228）
实验五十二　“碰撞打靶”实验中能量损失的分析……（229）
实验五十三　*RLC* 电路的稳态过程研究　……（230）
实验五十四　迈克耳孙干涉仪的深入研究……（232）
实验五十五　数字式万用表设计……（233）
实验五十六　太阳能电池基本特性测定……（238）
实验五十七　温度传感器的温度特性测量……（241）
实验五十八　光速测定实验……（246）
实验五十九　液晶电光效应实验……（250）
实验六十　法拉第效应实验……（253）
实验六十一　激光拉曼光谱的研究……（256）
实验六十二　了解超声相控阵……（259）
实验六十三　气液相平衡实验……（267）
实验六十四　核磁共振实验……（269）
实验六十五　椭圆偏振测厚仪测量实验……（273）
实验六十六　铁碳平衡组织观察分析……（276）
实验六十七　传感器综合实验……（281）
实验六十八　扫描隧道显微镜实验……（285）

附录……（292）

# 绪　论

## 一、物理实验课的地位和任务

物理学是建立在实验基础上的科学，物理规律的发现和物理理论的建立，都必须以严格的科学实验为基础，并受到科学实验的检验. 从伽利略的斜面实验开始，许多重要的实验都充分说明了这个道理. 例如，杨氏干涉实验确立了光的波动学说；迈克耳孙-莫雷实验证实了“以太”不存在；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍的承认；卢瑟福的α粒子散射实验揭开了原子的秘密；近代的高能粒子对撞实验使人们能深入物质最深层——原子核和基本粒子内部进行研究.

物理学是新兴技术的源头和基础，是自然科学的核心基础学科. 实验物理和理论物理是构成物理学的两大支柱. “没有实验，理论是空洞的；没有理论，实验是盲目的.”理论和实验是相辅相成的，就像人之双足、鸟之双翼，缺一不可. 物理学的基本定律来源于物理实验或者是受到物理实验的检验才得以成立，以实验物理学方面的伟大发明或发现而获得诺贝尔物理学奖的物理学家占总获奖人数的2/3以上，这足以说明物理实验研究在物理学中所处的重要地位.

物理实验中的发现和发明对物理学的发展和新学科的诞生起到巨大的推动作用. 例如：电磁感应定律和无线电的发现、晶体管的发明为当今半导体、电子工程、计算机、信息科学等学科的诞生和发展奠定了坚实的基础；X 射线和放射性的发现为物质结构的研究、现代医学成像、CT 断层扫描、工业无损检测等领域的发展奠定了基础；激光器的发明不仅开辟了激光光谱学这一新的学科，而且为材料制备、光电通信和现代医疗技术等学科和高新技术奠定了基础……物理学与其他学科的“组合”“嫁接”“交汇”都可能产生巨大的能量，成为促进现代高科技发展和新兴学科诞生的催化剂. 一个典型的例子是 DNA 双螺旋结构的发现：沃森（生物学家）-克里克（物理学家）的合作及其在学术上的互补诞生了《核酸的分子结构——DNA 的结构》这篇著名论文，开启了生命遗传之谜的大门，成为 20 世纪生物学上最伟大的成就之一.

物理实验是大学生入校后进行科学实验的入门课程，是大学生进入大学后接受实验训练的开端，是后续实验课程的基础. 其主要任务是：

（1）通过物理实验的学习，掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能. 通过实验能正确地使用和选择基本仪器，掌握一些基本的物理量的测量技术和方法，能正确记录、处理实验数据，判断和分析实验结果，并能写出完整合格的实验报告.

（2）通过物理实验的学习，掌握基本实验方法，包括科学思维方法和实验研究方法. 在物理实验的学习过程中，不仅要强调科学、严谨的逻辑思维，还要学会形象思维，两种思维方式的相互促进才能充分发掘左、右脑的潜在功能，刺激大脑的健康发育，激发创作灵

感,增强创新意识和创作能力,严谨的逻辑思维、辩证思维可保证思维的正确性,是正确思维的基础;而开放的形象思维、发散思维和联想思维,才能保证思维的活力,是思维原创性的主要源泉.

在物理实验的学习中应注意对科学实验分析方法和测量方法的掌握和积累,如数量级的分析与判断法、比较法、替代法、放大法、转换法、模拟法等.要学会根据实验目的、对测量的范围和测量精度的要求、实验设备和环境等具体情况,确定实验的思路和方法,达到预期的目的.

(3) 通过对实验的观察、测量和分析,加深对物理学某些概念、规律和理论的理解,培养并逐步提高分析物理现象的能力及理论联系实际的工作能力,培养严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度和遵守纪律的优良品德.

学好物理实验课程必须注意以下两点.

1) 学习目的要明确

在做物理实验的时候,要有意识地注意自身科学实验素质的培养,要有强烈的求知欲望、严谨的科学态度、勇于探索和刻苦钻研的精神.

多数基础教学实验涉及的理论和定律是成熟的,实验是教师编排并被简化了的.在规定的学时内,经过努力是能够完成的.从表面上看好像没有什么悬念和需要探索的内容,其实不然,因为物理实验是一门独立的科学实验研究课程.首先,它将科学与技术融为一体,肩负物理现象、规律、效应的观测以及物理定律和理论的验证与应用,将理论知识转变为实验研究能力的双重功能.其次,由于物理实验课程的独立性,有的实验内容超前于理论课的讲授内容,对学生而言它是未知的,因而就具有探索性和研究性的内涵.在实验课程学习的过程中要仔细体会物理实验的设计思想和方法的奥秘,要掌握抽象的概念和深奥的理论精髓,将新的实验现象、规律和效应上升为新的理论,真正做到手脑并用,理论与实践交融.

2) 学习方法要正确

进入大学后必须改变被动学习和应试教育的学习方法,逐步养成自主学习的能力.不能只是不动脑筋地盲目抄原理,机械地按实验步骤操作和记录,得到结果就完事;而是理解和掌握实验原理,思考实验方案和步骤,仔细地观测现象和规律,多思、多想,遇到困难要学会独立查找相关的资料和参考书,多与同学和老师进行讨论和交流,有意识地培养自己的观察能力,想象能力、质疑能力、思辨能力和资料的收集整理、分析与归纳的能力以及设计与创新能力.只有学会了正确的思维和学习方法,才能在有限的课时内充分利用实验课提供的实践平台取得最大的收获,迅速提升自身的科学实验综合素质与能力.

## 二、物理实验课的基本程序

### (一) 实验预习

课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键.课前应仔细阅读教材和相关资料

(或参考书),了解实验的目的、原理、方法、条件及关键步骤,在此基础上写出实验预习报告.

预习时要以理解实验原理和实验方法为主,只有真正理解和掌握了实验原理和方法,才能用自己的语言简要描述实验原理与方法.盲目地拷贝原理是消化不良的表现.只有熟悉了实验内容的要求,才能有目的、有计划地进行实验.

### (二)实验操作

实验前先要熟悉仪器的工作原理和操作程序,并将仪器安装调整好,然后,按照规定的要求,有计划、有步骤地进行实验.注意安全操作,细心观察实验现象.

(1)要养成良好的心态,不要期望实验工作会一帆风顺;在遇到问题时,应看成是学习的良机,冷静地分析和处理它.仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法.总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是只测出几个数据.

(2)实验记录应全面客观地反映实验研究的全过程,包括现象的观测记录、实验数据的记录、主要测量步骤的记录以及实验环境和条件的记录等.对实验数据记录要注意有效数字,要有数据表格.如果记错了,也不要涂改,应轻轻画一道,在旁边写正确值,使正误数据都能清晰可见,在分析测量结果和误差处理时可供参考.

(3)要注意自身人格和品德的培养.教学实验的根本目的是科学素质的培养,科学作风的养成,自身研究能力的提高,道德品质的修养.在实验过程中,一定要养成求真务实的科学作风,坚决杜绝为得高分而弄虚作假,伪造或篡改实验数据的歪风邪气.基础教学实验的原理是成熟的,有些实验结果可以通过理论推导求解得到,一些重要的基本常数有公认值或标准值.不要错误地认为测量值与标准值或公认值越接近,就表明实验做得越好.误差公理指明了绝对“真值”的不可知性,任何测量都存在误差.实际上,由于基础实验的条件、环境和实验仪器的精度限定了教学实验的测量精度,学生切勿因片面地追求所谓测量的“准确性”而忽略了教学实验的根本目的.实验结束时,将实验数据交教师审阅签字,整理还原仪器后才能离开实验室.

### (三)处理实验数据,完成实验报告

在实验室得到实验数据后,要对实验数据进行处理.处理实验数据并不是对实验数据进行篡改,而是在原始数据的基础上,根据实验原理和误差理论,对数据进行分析,排除错误数据,通过计算得出实验结果,进行误差分析,在预习报告的基础上完成实验报告.

实验报告由以下几部分组成:

(1)实验名称.

(2)实验目的.

(3)实验原理:用自己的语言简明扼要地叙述原理及测量中依据的主要公式,公式中各物理量的含义,公式成立所应满足的实验条件,实验电路图、光路图或实验装置示意图.

(4)实验仪器.

(5)实验步骤.

(6) 实验数据及处理:详细的实验数据表格;对实验数据进行处理的计算公式及主要的计算流程;由实验结果画出的相应的图表;不确定度的计算公式和计算过程.

(7) 实验结果和结论.

(8) 思考题、小结或讨论:内容不限,可以是对实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可解答思考题.

实验报告是对实验工作的全面总结,要简明扼要地将实验结果完整、真实而又准确地表达出来.写实验报告是进行科学素质教育的内容之一,要求文字通顺、字迹端正、数据齐全、图表规矩、结果或结论表述正确、讨论认真.数据处理过程包括计算结果、作图、不确定度的计算等.计算要有公式,代入的数据要有根据.要按作图规则作图,图线要规范、美观.实验结果的表述必须给出测量结果和不确定度.

## 三、学生实验守则

(1) 做实验前必须写预习报告(实验报告在预习时应完成的部分),若预习报告不合格,须当堂写好后再做实验.以上两种情况要扣分.

(2) 上实验课不得迟到.迟到5分钟以内者扣分,超过5分钟者不得参加本次实验.

(3) 讲究文明礼貌,保持实验室安静、整洁,不得乱扔废弃物,不得高声喧哗、嬉闹、抽烟,不得穿拖鞋、背心进实验室.

(4) 爱护公共财物,严格遵守实验室操作规程,未经同意不得动用其他实验组的仪器,更不能动用备用仪器.

(5) 实验完毕,将填有实验数据的实验报告交老师审查、签字,数据不合要求者重做.实验数据不得伪造、抄袭,否则,该实验成绩按不及格处理.

(6) 实验完毕必须整理好仪器,经老师同意方能离开实验室.

(7) 及时上交上一次的实验报告,报告不合要求者退回重做.

(8) 凡因病、因事缺课者,必须出具有关部门的证明方可补做实验,否则按旷课处理.

# 实验误差与数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象，更重要的是定量地测量相关物理量，而对事物定量地描述又离不开数学方法和对实验数据进行处理，因此，误差分析和处理数据是物理实验课的基础. 本章将从测量及误差的定义开始，逐步介绍有关误差理论和实验数据处理方法的基本知识.

## 一、测量与误差

### （一）测量与误差的基本概念

物理实验的内容大致包括三个部分：第一部分是设计或选用实验仪器，为测量必备条件，使得物理现象再现；第二部分是测量；第三部分是数据处理，找出各物理之间的数学关系，从而得出实验规律. 因此，可以说物理现象的再现是物理实验的基础，进行测量是物理实验的中心，数据处理是物理实验的结果.

**1. 测量**

**测量** 就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较，并得出倍数的过程. 倍数值称为待测物理量的数值，选作的计量标准称为单位，因此，一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，缺一不可.

**单位** 按照中华人民共和国法定计量单位的规定，物理量单位均以国际单位制（SI）为基础. 其中米（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）是基本单位，其他物理量的单位可由这些基本单位导出，故称导出单位.

测量可分为直接测量和间接测量.

（1）直接测量：可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量，称为直接测量. 例如，用米尺测量长度、用温度计测量温度、用电压表测量电压等都是直接测量，所测得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值.

（2）间接测量：有些物理量无法进行直接测量，而需依据待测量量与若干个直接测量值的函数关系求出. 这样的测量称为间接测量. 如钢球的体积 $V=\frac{1}{6}\pi D^3$，即间接测量.

从测量条件上测量可分为等精度测量和不等精度测量.

（1）等精度测量：在对某一物理量进行多次重复测量过程中，每次测量条件都相同的一系列测量. 例如，由同一个人用同一仪器，对同一待测量进行多次测量，每次测量结果的可靠程度相同，即等精度测量.

（2）不等精度测量：对某一物理量进行多次测量时，测量条件、仪器等完全不同或部

分不同,各测量结果的可靠程度也就不同,这样的一系列测量称为不等精度测量.

物理实验中大都采用等精度测量.

**2. 测量与误差**

**真值** 在某一时空状态下,被测物理量所具有的客观实际值称为真值. 一般来说,用数字表示它时,应是一个无穷多位的数.

**测量误差** 测量是在一定的条件下,使用一定的仪器,通过一定的方法,力图获得被测量的真值. 但是由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的. 测量值 $N$ 和真值 $N_0$ 之间总有一定的差异 $\Delta N=N-N_0$,这种差异称为测量值的误差.

### (二)误差的分类

根据误差的性质和产生的原因可为两大类.

**1. 系统误差**

在同一条件下,多次测量同一量时,误差的大小和符号保持恒定,或者按一定规律变化的误差,它主要来源于:

(1) 测量仪器的缺陷. 例如,仪器刻度不准,天平臂不完全等长等.

(2) 实验理论和方法的不完善. 例如,测量公式的近似性,用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响,热学实验没有考虑系统和外界的热交换等.

(3) 外界条件的改变. 例如,温度、湿度、气压的改变,影响测量结果.

(4) 测量者生理或习惯偏向. 例如,对准标志读数时,习惯偏向某一方,记录某一仪器信号时习惯滞后或超前等.

所谓按一定规律变化的误差是:这种误差可归结为一个或几个因素的函数. 例如,钢尺测量长度,其误差是温度的函数,度盘偏心所引起的角度测量误差按正弦规律变化等.

系统误差可以采取一定的方法减小,或对测量结果进行修正. 但增加测量次数不能减小系统误差,应该根据系统误差出现的情况找出产生误差的原因,然后有针对性地采取一定的方法去减小系统误差. 一般可采用如下几种方法.

(1) 加修正项. 如千分尺零点不对,可记下零点读数,对测量结果加以修正;在理论公式中对 1 个或几个物理量进行修正.

(2) 选择适当的测量方法,抵消系统误差的影响. 这些测量方法有:

*交换测量法* 如用线板式电桥测电阻,把被测电阻与标准电阻交换位置测量以消除由于电阻丝不均匀而带来的比率臂倍率的系统误差.

*补偿法* 如热学实验可用加冰方法使系统的初温低于室温,以补偿升温时的热量损失.

*替代法* 就是在测量条件不变的情况下,用已知量替代被测量以达到减小系统误差的目的.

*异号法* 就是使系统误差在测量中出现两次且符号相反,取平均值作为测量结果,即可消除这种系统误差.

*对称测量法* 就是将测量程序对某时刻对称地测量两次以达到减小系统误差的目

的，它适用于在精密测量中减小随时间作线性变化的系统误差.

绕过某些不易确定或不易测量的量　例如，用牛顿环测量透镜的曲率半径时，将测量公式变换成

$$D=\frac{D_m^2-D_n^2}{4(m-n)\lambda}$$

的形式时，可用干涉环的直径的平方差代替直径的平方，绕过了不易确定的干涉级次和由于透镜凸面和玻璃片的非紧密接触所带来的无法测量的附加光程差.

**2. 偶然误差（或称随机误差）**

在同一条件下多次测量同一量时，误差的大小和符号出现无规则变化，这种误差称为随机误差. 它主要来源于：观察者感官判断的起伏，周围环境的干扰以及随测量而来的一些不可预测的偶然因素. 例如，用停表记录振子经过某一标志的时刻时，有时超过或滞后，如测量温度的微小起伏，气流的扰动等，都会给测量造成无规则的变化.

从表面上看，偶然误差似乎毫无规律，但若测量次数很多，就显示出一定的统计规律——正态分布（或称高斯分布）. 它具有如下特点：

（1）有异性：绝对值很大的误差出现的概率为零.

（2）单峰性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大.

（3）对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相同.

（4）抵偿性：正负误差的代数和为零.

因此增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除.

### （三）绝对误差和相对误差

测量值的绝对误差 $\Delta N$ 为测量值 $N$ 与准确值 $N_0$ 之差，即

$$\Delta N=N-N_0$$

绝对误差反映测量值偏离真值的大小.

只用绝对误差还不能评价一个测量结果的优劣，还要看测量值本身的大小，为此有必要引入相对误差，其定义为 $E=\Delta N/N_0$. 相对误差一般用百分数来表示，即 $E=\frac{\Delta N}{N_0}\times 100\%$.

通常，在已知测量数据的理论值时可用相对误差评价一个测量结果的优劣.

### （四）测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果作总体评定时，一般应把系统误差和随机误差联系起来看，精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的，但这些概念的含义是不同的，使用时应加以区别.

（1）精密度：表示测量结果的随机误差大小的程度，它是用来描述测量重复性高低的.

（2）准确度：表示测量中的系统误差大小的程度，它是指测量结果与真值符合的程度，即描述测量值接近真值的程度.

（3）精确度：是测量结果中系统误差和随机误差的综合，它是指测量结果的重复性及

接近真值的程度.

(五)不确定度

在测量的过程中,测量误差是普遍存在的,测量结果中包含有多种误差因素,如仪器误差、环境误差、方法误差、调整误差、观测误差等. 还要考虑到在很多情况下,人们对于各种误差的信息不能全面了解和掌握,特别是在那些多次重复测量中,不能充分反映出来的随机误差因素和未定系统误差. 所有这些因素使得测量结果具有一定程度的不确定性. 为了对测量结果不确定程度进行定量的估计,需要引入一个新的概念——不确定度.

测量不确定度:是指对测量结果不能肯定程度,表示真值在一定的概率下处于它所提供的测量结果的范围. 测量不确定度一般由多个分量组成. 其中一些分量可用统计方法来评定,这类分量称为的 $A$ 类不确定度 $u_A$;另一些分量是基于经验或其他信息假设的概率分布评定,这类分量称为 $B$ 类不确定度 $u_B$. 但要注意 $A$ 类、$B$ 类的差别只是评定方法的不同,并不一定是 $A$ 类不确定度、$B$ 类不确定度分别与随机误差、系统误差存在简单的对应关系.

扩展不确定度:定义测量结果区间的量,合理地赋予被测量值的分布大部分落入该区间,也称总不确定度,记为 $U$.

相对扩展不确定度:扩展不确定度的相对值,即 $U_r=U/y$. 其中 $y$ 为测量结果的最佳值.

## 二、直接测量的不确定度评估

(一)算术平均值

对物理量 $x$ 做 $n$ 次等精度测量,得到包含 $n$ 个测量值 $x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$ 的一个测量列,由于是等精度测量,无法断定哪个值更可靠,概率论可以证明,其平均值为

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

式中,$\overline{x}$ 称为最佳值,也称期望值;$n$ 为测量次数;$x_i$ 为第 $i$ 次测量值.

当 $n\to\infty$ 时,其平均值即为真值. 事实上,只能进行有限次测量,所以算术平均值是真值的最佳近似值.

(二)不确定度的简化评定方法

1970 年以来,国内外许多学者开始用“不确定度”取代“误差”,来表征测量的质量. 1993 年,ISO、IUPAP 等 7 个国际组织联合颁布了《测量不确定度表达指南》(简称《指南》). 1996 年,中国计量科学研究院以《指南》为依据制定我国的《测量不确定度规范》.

**1. A 类不确定度**

**定义** $n$ 次等精度测量列 $x_i$ 的样本标准差为

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

当 $n \to \infty$ 时，物理量 $x$ 将遵循正态分布. 根据正态分布的特点，测量列中任一测量值与平均值的偏离落在$[-\sigma,\sigma]$间的概率为 0.683，上式为贝塞尔公式.

测量次数趋于无穷时，物理量的概率密度服从正态分布，但这只是一种理论情况. 当测量次数减少时，概率密度服从 $t$ 分布或学生分布. 根据数理统计的知识可知，在给定置信概率(如 $p = 0.683$) 条件下，被测值偏离算术平均值的置信区间为$[\overline{x} - u_A, \overline{x} + u_A]$. 其中，

$$u_A = t_p \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n(n-1)}}$$

式中，$p$ 为事先给定的置信概率；$u_A$ 为在置信概率 $p$ 下的 $A$ 类不确定度.

表 1 所示为不同置信概率下因子 $t_p$ 与测量次数 $n$ 的关系(有些资料用自由度 $\nu$ 代替测量次数 $n$；对于一个物理量的测量，$\nu = n - 1$).

**表 1　不同置信概率下因子 $t_p$ 与测量次数 $n$ 的关系**

| $p$ \ $t_p$ \ $n$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 | ∞ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.68 | 1.84 | 1.32 | 1.20 | 1.14 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.04 | 1.03 | 1 |
| 0.90 | 6.31 | 2.92 | 2.53 | 2.13 | 2.02 | 1.94 | 1.89 | 1.86 | 1.86 | 1.83 | 1.73 | 1.65 |
| 0.95 | 12.7 | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.37 | 2.31 | 2.31 | 2.26 | 2.09 | 1.96 |
| 0.99 | 63.7 | 5.84 | 5.84 | 4.60 | 4.03 | 3.17 | 3.50 | 3.36 | 3.36 | 3.25 | 2.86 | 2.58 |

在物理教学实验中一般取置信概率 $p = 0.68$，今后如不做说明，取 $p = 0.68$.

**例 1**　用直尺测量某物体的长度 5 次，其数据如下(单位 cm)：2.32，2.34，2.36，2.30，2.37. 求置信概率为 0.68，0.95，0.99 时，该测量列的平均值、标准差和 $A$ 类不确定度.

**解**　测量列的算术平均值为

$$\overline{l} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i = \frac{1}{5}(2.32 + 2.34 + 2.36 + 2.30 + 2.37)\ \text{cm} = 2.34\ \text{cm}$$

测量列的标准误差为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(l_i - \overline{l})^2}{n-1}} = 0.029\ \text{cm}$$

$n = 5$ 时，查上表 1，得

$p = 0.68$，　$t_p = 1.14$，　$p = 0.95$，　$t_p = 2.78$，　$p = 0.99$，　$t_p = 4.60$

测量列 $A$ 类标准误差为

当 $p = 0.68$ 时，$u_A = t_p \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \frac{1.14 \times 0.029}{\sqrt{5}}\ \text{cm} = 0.015\ \text{cm}$；

当 $p=0.95$ 时,$u_A=t_p\dfrac{\sigma_x}{\sqrt{n}}=\dfrac{2.78\times0.029}{\sqrt{5}}\ \text{cm}=0.036\ \text{cm}$;

当 $p=0.99$ 时,$u_A=t_p\dfrac{\sigma_x}{\sqrt{n}}=\dfrac{4.60\times0.029}{\sqrt{5}}\ \text{cm}=0.060\ \text{cm}$.

**2. *B* 类不确定度**

$B$ 类不确定度的估算,如能确定其分布规律,可按各自分布规律处理. 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一般满足均匀分布. 因此,教学中通常对 $B$ 类不确度采用均匀分布来处理,则此时 $B$ 类不确定度为

$$u_B=\frac{\delta_s}{\sqrt{3}}$$

式中,$\delta_s$ 为仪器的基本误差或允许误差,一般的仪器说明书中都有由制造者或计量检定部门注明的仪器误差.

仪器的最大允许误差与仪器的级别有下列关系:

$$\delta_s=\frac{\text{仪器级别}}{100}\times\text{量程}$$

如果不知道测量仪器的级别,也可以采用示值误差作为测量仪器的误差. 对于指针式仪表或标有刻度的量具,通常取分度的 1/2 作为仪器的示值误差;而对于非连续读数仪器(如数字仪表、游标卡尺),其 $\delta_s$ 通常取分度. 对于 0.1 s 秒表,它不能反映出 0.1 s 内的时间变化,故也应取其最小分度.

对于单次测量,$A$ 类不确定度为 0,所以只需考虑 $B$ 类不确定度.

### (三)扩展不确定度、测量结果的表示

直接测量值的扩展不确定度为两类分量的方和根合成.

$$U=\sqrt{u_A^2+u_B^2}$$

为了把测量结果和测量值的离散程度都表示出来,通常把最后测量结果写成

$$x=\overline{x}\pm U$$

扩展不确定度本身就是估算的,位数取多了没多大意义. 通常在最后结果时只取 1 位有效数字. 在估算过程中为了避免由于运算而过多地影响最后结果,在运算过程中可多取 1 位.

由于影响测量结果的因数很多,所以在估算不确定度时采取宁大勿小的原则,处理最后结果时一般采用进位法,被保留的后面一位为零则舍去,非零则进 1. 在运算过程中为了不致因取舍过多而过分影响最后结果,仍应采用四舍五入法.

## 三、间接测量结果的不确定度的传递

间接测量量是由直接测量量(或用各直接测量量的最佳近似)通过公式计算得来的,因为直接测量量有误差,所以间接测量量也会有误差. 直接测量量的不确定度对间接测量不确定的影响就是不确定度的传递.