



普通高等学校“十三五”规划教材

D A X U E W U L I S H I Y A N

大学物理实验

赵黎 王丰 / 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



普通高等学校“十三五”规划教材

大学物理实验

主 编 赵 黎 王 丰

副主编 郭 斌 李小强 田 勇



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

网络学习平台

<http://www.hnsst.com>

账号:

密码:

内 容 简 介

本教材是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》，结合当前物理实验教学改革的实际和最新要求编写而成的。全书分为5章，即测量误差与不确定度、物理实验的基本测量方法和常用物理量的测量、基础实验、近代与综合性实验、设计性与应用性实验。书中列出了38个实验项目，内容覆盖了力学、热学、声学、光学、电磁学和近代物理等分支学科领域。

本书可以作为高等理工院校各专业不同层次的物理实验教材或教学参考书，也可供其他相关教学、研究和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 赵黎, 王丰主编. —北京: 北京大学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-301-29806-0

I. ①大… II. ①赵… ②王… 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(2018)第192434号

- 书 名** 大学物理实验
DAXUE WULI SHIYAN
- 著作责任者** 赵黎 王丰 主编
- 责任编辑** 王剑飞
- 标准书号** ISBN 978-7-301-29806-0
- 出版发行** 北京大学出版社
- 地 址** 北京市海淀区成府路205号 100871
- 网 址** <http://www.pup.cn>
- 电子信箱** zpup@pup.cn
- 新浪微博** @北京大学出版社
- 电 话** 邮购部 010-62752015 发行部 010-62750672 编辑部 010-62765014
- 印 刷 者** 长沙超峰印刷有限公司
- 经 销 者** 新华书店
- 787毫米×1092毫米 16开本 20.5印张 511千字
- 2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
- 定 价** 49.50元

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，侵权必究

举报电话：010-62752024 电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题，请与出版部联系，电话：010-62756370

前 言

大学物理实验是面向理工科各专业本科生的重要基础课之一,是理工科大学生进入大学后最早接受的对实验方法和实验技能的系统训练,它对人才培养有着不可替代的关键作用.该课程有利于培养学生观察事物,以及发现、分析和解决问题的能力,提升实验技能、科学思维和创新精神.

教材是教学工作中的要素之一,教材建设是课程建设的核心,是教学改革和教学创新的重要举措,高质量的教材是提高教学质量的基本要素.编写和使用合适教材的出发点:一是能够符合时代科技发展和知识更新;二是能够实现课程教学要求;三是能够提高教与学的效果和质量.

本教材是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》,结合当前物理实验教学改革的实际和最新要求编写而成的.全书采用了基础实验、近代与综合性实验、设计性与应用性实验的架构.书中列出了38个实验项目,可根据不同教学对象和不同专业类别的教学需要,选排和选做其中部分实验项目.在内容安排上充分考虑到理工科有关专业特点及基础课教学的需要,其内容涉及面广、实用性强.有些实验是以验证大学物理的公式、理论为目的,有些实验又是以培养能力、开拓思路、提高综合素质为目的.书中的基础实验主要以学习和掌握实验的基本知识和技能为目标,通过实验教学使学生掌握常规仪器、仪表的调整和使用,学会对实验数据进行科学合理的处理及分析,掌握撰写实验报告的规范和技巧,形成基本的科学实验的素质.为反映最新科技成果,跟上时代步伐,瞄准新原理、新技术、新方法、新材料,突出创新思维、创新方法、创新能力的培养,教材特别注重增加近代的、综合性较强的以及具有较强创新理念的设计性和应用性实验内容,使学生在进行基础训练的同时,了解更多的现代测量新技术、新方法,为今后从事科研工作打下基础,同时也有利于开拓学生的眼界.

本书的出版是长年辛勤耕耘在实验教学第一线的、教学经验丰富的教师和实验技术人员共同劳动的成果.参加本教材编写的有:王丰、龙作友、田勇、代青、江德宝、李小强、杨耀辉、吴刚、何长英、余利华、冷春江、宋佩君、张焕德、陈长鹏、陈水波、陈志宏、赵黎、胡昌奎、高明向、郭斌、唐琳、黄勇、彭莉、李鹏、马争争、何小风、里霖、范希智.制作和调试大学物理实验在线考试系统的有:胡锐、袁晓辉、赵子平等.苏文春、陈平提供了版式和装帧设计方案.在此一并表示衷心感谢.

由于编者水平和条件所限,书中难免有不妥或疏漏之处,敬请广大师生提出建议并指正.

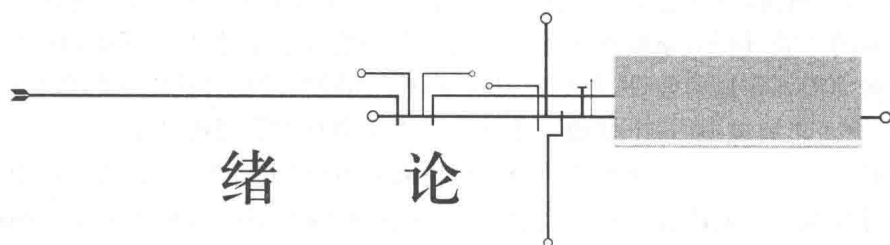
编 者

2018年3月

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差与不确定度	5
1.1 测量	5
1.2 误差	6
1.3 测量的不确定度	11
1.4 测量结果的有效数字	18
1.5 实验数据处理常用方法	21
第 2 章 物理实验的基本测量方法和常用物理量的测量	28
2.1 物理实验中的基本测量方法	28
2.2 常用物理量的测量	31
第 3 章 基础实验	39
3.1 测定刚体的转动惯量	39
3.2 用拉伸法测定金属丝的杨氏模量	56
3.3 热电效应	61
3.4 用牛顿环测定透镜的曲率半径	65
3.5 分光计的调节和应用	69
3.6 旋光现象及应用	76
3.7 模拟静电场	81
3.8 示波器的使用	87
3.9 用电位差计测量温差电动势	98
3.10 电子元件的伏安特性测定与补偿法测电阻	104
3.11 霍尔效应及其应用	113
3.12 用示波器测铁磁材料的磁滞回线	121
第 4 章 近代与综合性实验	126
4.1 声速测量	126
4.2 多普勒效应综合实验	131
4.3 菲涅耳双棱镜干涉实验	138
4.4 迈克耳孙干涉仪	142

4.5	光速测量	148
4.6	全息照相	157
4.7	密立根油滴实验	161
4.8	普朗克常数的测定	166
4.9	弗兰克-赫兹实验	174
4.10	核磁共振	180
4.11	塞曼效应	188
第5章	设计性与应用性实验	196
5.1	用谐振法测电感	196
5.2	热敏电阻特性测量及应用	198
5.3	电磁感应与磁悬浮	199
5.4	巨磁阻效应及其应用	203
5.5	超声定位和形貌成像	213
5.6	液晶的电光效应及其应用	218
5.7	混沌通信	227
5.8	空气热机	238
5.9	太阳能电池和燃料电池的特性测量	243
5.10	电阻式传感器实验	254
5.11	微波光学	260
5.12	热辐射与红外扫描成像	273
5.13	比热和导热系数的测定	280
5.14	LED综合特性实验	289
5.15	用波尔振动仪研究振动	310
附录		318
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	318
附录 B	基本物理常数	320
参考文献		322



一、物理实验的地位和作用

物理学是研究物质的运动规律、物质的结构及其相互作用的科学,是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一.物理学在科学技术的发展中有着独特的作用,历史上每次重大的技术革命都起源于物理学的发展.牛顿力学、热力学、分子物理学的发展,使人类进入了蒸汽机时代;电力的广泛应用和无线电通信的实现,是电、磁现象研究和电磁学理论的重大突破性发展的光辉成果;20世纪初,由于一些重要的实验发现,诞生了相对论和量子力学,奠定了近代物理学的基础,使20世纪成为物理学史上最富有创造性的年代.近代物理所揭示的新的概念和事实令人振奋,完全改变了世界的面貌,促进了原子能、计算机、激光的广泛应用.历史上这3次由物理学发展引导的技术革命,相继延展了人类感觉器官、效应器官、思维器官,使人类逐步从繁重的体力劳动和脑力劳动中解放出来.物理学的成就表明,物理学已成为一切自然科学的基础.物理学的基本原理隐藏于物质世界的方方面面,渗透在自然科学的所有学科,应用于工程技术的各个领域.物理学的发展哺育着近代高新技术的成长和发展,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和装备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度.

从本质上说,物理学是一门实验科学,物理实验是物理学和科学实验的重要部分.所有物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都有赖于实验,并接受实验的检验.因此,物理学绝不能脱离物理实验结果的验证.实验是物理学的基础,实验是有目的地去尝试,是对自然的积极探索.在物理学史上,用实验澄清科学概念以及判断科学假设和预见真伪的事件不胜枚举.16世纪前,人们一直认为物体下落的速度与其重量成正比,伽利略经过多年的潜心研究,在巧妙设计实验的基础上建立了自由落体定律,从而推翻了统治欧洲长达两千年的这一错误观念;在电磁学的发展过程中,如果没有法拉第等实验科学家进行电磁学的实验研究,发现了电磁感应定律等一系列实验规律,麦克斯韦就不可能建立麦克斯韦方程组.在1864年确定了经典电磁学理论后,麦克斯韦预言了电磁波的存在,但在当时并没有得到人们的普遍承认与重视.直到1888年,赫兹通过实验证实了电磁波的存在,麦克斯韦理论才被公认为科学的真理.

物理实验对现代物理学各个学科和应用技术的发展也起着决定性的作用.例如,1908年荷兰莱盾实验室将氦液化,发现在超低温条件下物质有超导性、抗磁性和超流性.近年来,超导体材料和超导体技术的研究得到了蓬勃发展,为无能耗储电、输电及制造高效能电气元件等创造了极其有利的条件.激光虽然源于爱因斯坦在1916年提出的受激辐射原理,但它主要是在实验中产

生和发展起来的,目前,激光技术已广泛应用于测距、机加工、医疗手术和一些新式武器上。

实验—理论—实验,是一个经过科学史证明的科研准则,至今仍不失其重大意义。物理实验是现代科学理论持续发展的必要保证。任何物理理论都是相对正确的,每向前发展一步都必须经受新实验的考验。例如,李政道和杨振宁以 κ 介子衰变实验事实为根据,提出了弱相互作用过程中存在宇称不守恒的假设,他们建议用 β 衰变实验来验证自己提出的理论。这个实验由吴健雄等在1957年完成,在这个基础上才初步建立了弱相互作用的理论。

丁肇中教授在诺贝尔奖颁奖仪式上说:“中国有句古话‘劳心者治人,劳力者治于人’,这种落后的思想对发展中国家的青年有很大害处。由于这种思想的影响,很多学生都倾向于理论研究而避免实验工作,我希望由于我这次得奖能够唤起发展中国家学生们的兴趣,注意实验工作的重要性。”当代最为人们瞩目的诺贝尔奖的宗旨是奖给具有最重要发现或发明的人。因此,诺贝尔物理学奖标志着物理学中划时代的里程碑级的重大发现和发明。从1901年第一次授奖至今,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三分之二以上,这足以说明实验研究在物理学中所处的重要地位。

科学技术的迅猛发展,要求高等工科院校培养的科技人才必须具备坚实的物理基础、出色的科学实验能力和勇于开拓的创新精神。物理理论和实验课程在培养学生这些基本素质和能力方面具有不可替代的重要作用。物理实验是物理基础教学的一个重要组成部分,同时又是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是对学生进行科学实验基本训练的重要基础。这门课程内涵丰富,所覆盖的知识面和包含的信息量及对学生进行的基本训练内容是其他课程的实验环节所不能比拟的;它对培养学生深入观察现象,建立合理的物理模型,定量研究变化规律,分析、判断实验结果准确度的能力,激发学生的想象力、创造力,培养和提高学生独立开展科学研究工作的素质和能力具有重要的奠基作用。学好物理实验课程对于高等工科院校的学生是十分重要的。

二、物理实验课的任务

大学物理实验课是在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,让学生学习物理实验知识和方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。大学物理实验课的具体任务如下。

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

2. 培养和提高学生的科学实验能力,其中包括:

自学能力——能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备。

动手能力——能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器并完成实验操作。

分析能力——能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断。

表达能力——能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

设计能力——能够完成简单的设计性实验。

3. 培养和提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

三、物理实验课的基本程序

物理实验教学过程一般包括预习、课堂操作和完成实验报告三个重要环节。

1. 预习

实验课前认真阅读实验教材或相关资料,明确实验的目的,掌握原理、测试方法及实验步骤,了解仪器性能,在实验报告纸上写出实验预习报告。预习报告主要包括以下栏目:

实验目的——简单明确地写出实验的目的、要求。

实验原理——扼要地叙述实验原理,写出主要公式,画上主要示意图、电路图或光路图。

实验内容——简要地写出实验内容和操作步骤。

另外,在自备的实验数据记录本上画好数据记录表格,有时数据表格需自拟,还要简要地书面回答预习思考题。

课前预习是能否独立顺利地进行实验的关键,应认真完成。

2. 课堂操作

学生进入实验室后应认真遵守实验室规则。先要对照仪器实物,认识并熟悉主要仪器及使用方法,然后井井有条地布置好仪器。在调试正常后,严格按实验步骤进行测试并采集数据。注意细心地观察实验现象,认真研究实验中的问题。如测试中仪器发生故障或发现异常现象,应及时请教老师,不可随意处理。要把重点放在实验能力的培养上,而不是仅仅测出几个数据,完成任务了事。

要严肃地对待测试数据,并将其忠实地记录在事先准备好的表格中,每个数据都应符合有效数字的要求。经老师检查不合格的数据,不得涂抹,应轻轻划上一道,在重新测定之后,另起行记录。要将全部数据交老师检查并在记录纸上签字。离开实验室之前,应先切断电源,再整理好仪器,并将室内收拾整洁。课堂操作至此才全部结束。

3. 撰写报告

课后,在报告纸上,接着之前预习报告的内容继续完成以下栏目:

数据表格——设计合理的表格,将整理后的数据填入表格之中。

数据处理——按实验要求计算待测量的量值和不确定度。报告上的计算过程应包括公式→代入数据→结果三个步骤,其他中间计算过程不写在报告上。最后写出实验结果表达式。作图法处理数据时要符合作图规则,图线要规矩、美观。

小结或讨论——可以解答讨论思考题,也可以写上对实验现象的分析、对实验结果及主要误差因素的简要分析讨论、对实验关键问题的研究体会,以及实验的收获和建议等。

整篇实验报告应做到简明、工整、重点突出、作图规范、表格清晰。

四、实验室规则

为了优质地完成物理实验课的任务,取得良好的学习效果,学生应认真遵守实验室规则:

1. 上课时必须带来课前准备好的预习报告和数据记录表格,经教师检查后方可进行实验,否则不能随堂参加实验。

2. 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

3. 使用电源时,须经教师检查线路并许可后,才能接通电源。

4. 爱护仪器,实验中按仪器说明书使用,违反使用说明造成仪器损坏的应照章赔偿。公用工具用完后立即放归原处。

5. 完成实验后,数据需经教师审查、签字,然后将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,方能离开实验室.

6. 实验报告应在实验后 3 天内集体送交实验室.

7. 只有全部完成教学计划规定的所有实验项目,才能参加实验课期末考核.

五、物理实验教学资源平台

《大学物理实验》在线测试平台

http://www.hnssl.com:8080/test_physics/login.asp



《大学物理实验》
精品资源共享课网站



《大学物理实验》
网络教学平台



武汉理工大学物理实验中心
微信公众号



第 1 章

测量误差与不确定度

测量是人类认识和改造客观世界必不可少的重要手段,研究物理现象、了解物质特性、验证物理规律都要进行测量,测量是物理实验的基础.然而,任何测量过程都会出现不可避免的测量误差,它始终存在于一切科学实验和各种测量活动中.测量误差的分析,以及测量结果的合理表征,是测量必须关注的基本问题,它在科学实验和生产实践中占有极其重要的地位,是提高测量准确度,保证获取信息可靠性的重要手段.因此,了解和掌握误差理论及数据处理的初步知识,是物理实验课程乃至今后进行科学实验的基础.由于这部分包含的内容较多,其理论基础——概率论与数理统计又较复杂,本章仅限于简要介绍这方面的初步知识.

1.1

测 量

1.1.1 测量的定义

测量就是将被测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较并求出其倍数的过程,其中倍数称为待测物理量的数值,而选作计量标准的物理量称为单位.通常,物理量的测量值由数值和单位两部分组成.一个完整的测量过程必须包含测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度等四个要素.

1.1.2 测量的分类

根据测量结果获取的不同方式,测量可以分为直接测量和间接测量两类.

(1) 直接测量:可以从测量仪器(或量具)上直接读出被测量量值的测量称为直接测量.例如,用米尺测物体的长度、用天平称物体的质量、用电压表测电压、用秒表测时间等都属于直接测量.直接测量中的被测量称为直接测量量.

(2) 间接测量:许多被测量不能由测量仪器直接读数,需要先由直接测量获得相关数据,再利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量的量值,这种测量方式就是间接测量.例如,测量矩形的面积,必须先用直接测量方法测出其长和宽,再利用面积公式计算出面积.间接测

量中的被测量称为间接测量量,上例中的矩形面积就是间接测量量。

根据测量条件是否发生变化,测量可以分为等精度测量和不等精度测量两类。

(1) 等精度测量:在相同条件下对某一物理量进行的一系列测量称为等精度测量。例如,同一个人在同样的环境条件下在同一仪器上采用同样的测量方法对同一被测量进行多次测量,没有任何理由认为某个测量值比另一个测量值更为准确,即每次测量的可靠程度都相同,这些测量就是等精度测量。

(2) 不等精度测量:在不同条件下对某一物理量进行的一系列测量称为不等精度测量。例如,在不同的环境中,或由不同人员,或在不同的仪器上,或采用不同的方法等对同一物理量进行多次测量,其测量结果的可靠程度也不会相同,这些测量属于不等精度测量。

不等精度测量的数据处理比较复杂,一般情况下不会采用。在物理实验中,绝大多数实验都采用等精度测量,所以本教材以介绍等精度测量的数据处理为主。

1.2

误差

1.2.1 误差的基本概念

1. 真值

真值是指一个特定的物理量在特定的条件下所具有的客观真实量值。显然,真值是一个理想的概念,一般是无法得到的。

由于“绝对真值”的不可知性,人们在长期的生产实践和科学研究中归纳出以下几种真值的替代值。

(1) 理论真值:理论设计值、公理值、理论公式计算值。

(2) 计量约定值:权威的计量组织和机构规定的各种基本常数值、基本单位标准值。

(3) 标准器件值:高一级的标准器件或仪表的示值可视为低一级器件或仪表的相对标准值。

(4) 算术平均值:指多次测量的平均结果。当测量次数趋于无穷时,修正过的被测量的算术平均值趋于真值。

2. 绝对误差与相对误差

对任一物理量进行测量,其测量值与真值之间总存在一定差异,这种差异称为测量误差,简称误差。误差按其表示形式可分为绝对误差和相对误差,其中

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值},$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%.$$

绝对误差和相对误差均反映单次测量结果与物理量真值之间的差异,它们可用数学式子分别表示为

$$\delta_i = x_i - x_0,$$

$$(1-2-1)$$

$$E_i = \frac{\delta_i}{x_0} \times 100\%, \quad (1-2-2)$$

其中 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示对物理量 x 的第 i 次测量值, x_0 表示被测物理量的真值, δ_i 和 E_i 分别表示对物理量 x 第 i 次测量的绝对误差和相对误差.

1.2.2 误差的分类及处理

误差按其产生的原因和性质特点可分为系统误差和随机误差.

1. 系统误差

在相同的条件下多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号保持恒定; 或者在条件改变时, 误差按某一确定规律变化, 这类误差称为系统误差, 其特点是具有确定性. 系统误差的来源有以下几个方面:

(1) 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. 如仪器的刻度不准, 零点不准, 仪器未调整好, 以及外界环境(光线、温度、湿度、电磁场等)对测量仪器产生了影响而造成的误差.

(2) 理论误差(又称方法误差)是由于测量所依据的理论公式本身的近似性, 或实验条件不能达到理论公式所规定的要求, 再或是实验方法本身不完善所带来的误差. 例如, 伏安法测电阻时没有考虑电表内阻对实验结果的影响.

(3) 个人误差是由于观测者个人感官和运动器官的反应或习惯不同而产生的误差, 它因人而异, 并与观测者当时的精神状态有关.

系统误差按其确定性的程度可分为已定系统误差和未定系统误差. 前者是误差的变化规律已确知的系统误差; 后者则是误差的变化规律未确知的系统误差, 但一般情况下可估计出它存在的大致范围, 仪器误差就属于此类.

分析任何一种系统误差产生的原因, 并设法加以校正, 就能减小系统误差对实验的影响. 但完全发现和减少实际存在的系统误差是比较困难的. 在实际工作中, 需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤、使用的仪器仪表等可能引起系统误差的因素进行详尽分析, 并通过校准仪器, 改进实验装置, 完善实验方法, 或对测量结果进行理论上的修正来尽可能地减少系统误差. 显然, 不论哪一种系统误差, 根据其特点可知, 不可能通过多次测量来减小或消除.

2. 随机误差

(1) 定义

在相同条件下对同一物理量的多次测量过程中, 误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化, 但总体来说又服从一定统计规律的误差, 称为随机误差, 又称偶然误差, 其特点是具有随机性. 这种误差来源于实验中各种偶然因素微小而随机地波动, 例如, 测量过程中环境条件的微小变动, 观察者在操作调整仪器设备和判断、估计读数上的微小变动, 测量仪器指示数值的微小变动和被测对象自身的微小变动等. 显然, 随机误差不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除, 但可通过多次测量使其减小, 并能用统计的方法对其大小进行估算.

(2) 随机误差的分布

在等精度测量中, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差 δ_i 变成连续型随机变量 $\delta = x$ (测量

值) $-x_0$ (真值). 可以证明, 大多数情况下的随机误差 δ 都服从正态分布, 亦称高斯分布. 它满足的概率密度分布函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right], \quad (1-2-3)$$

此时

$$x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1-2-4)$$

即无限多次测量值的算术平均值就是真值.

正态分布曲线如图 1-2-1 所示.

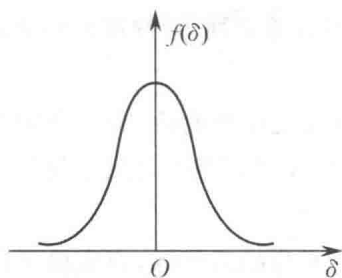


图 1-2-1 正态分布曲线

由图 1-2-1 可以看出, 服从正态分布的随机误差具有如下特性:

- 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: 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等.
- ③ 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率几乎为零, 即误差的绝对值不会超过某一个界限.

按照概率论, 误差出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 内是必然的, 即概率为 100%, 用数学公式表示为

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

即概率密度分布曲线下的总面积等于 1.

(3) 标准误差

(1-2-3) 式中的 σ 为正态分布的特征量, 称为正态分布的标准误差, 亦称方均根误差, 它在数值上等于概率密度分布曲线拐点处的横坐标值, 其数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}}. \quad (1-2-6)$$

由(1-2-3)式可知, $\delta = 0$ 时, $f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$, 因此,

σ 值越小, $f(0)$ 的值越大. 由于概率密度分布曲线下的总面积恒等于 1, 所以正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小, 如图 1-2-2 所示.

σ 值小, 分布曲线又高又陡, 说明绝对值小的误差出现的机会多, 测量值的重复性好, 即随机误差的离散程度小; 反之, σ 值大, 分布曲线则低而平坦, 说明测量值的重复性差, 离散程度大. 由此可见, 标准误差反映了测量值的离散程度. 标准误差 σ 与各测量值的误差 δ 有着完全不同的含义. δ 是实在的误差值, 而 σ 并不是一个具体的误差值, 它只反映在一定的条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况, 只有统计性质的意义, 是一个统计特征值.

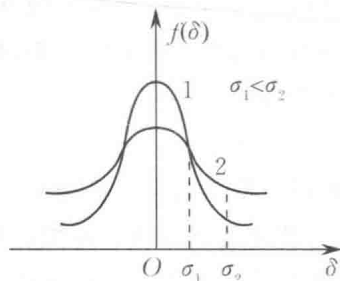


图 1-2-2 不同 σ 值所对应的正态分布曲线

还可以从另一个角度理解 σ 的物理意义. 由概率密度分布函数可知, 测量值的随机误差出现在 δ 至 $\delta + d\delta$ 区域内的概率为 $f(\delta)d\delta$, 而测量值的误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率是

$$P(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right] d\delta = 68.3\%. \quad (1-2-7)$$

换言之, (1-2-7) 式表明, 在所测得的全部数据中, 将有 68.3% 的数据的随机误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 内; 或者说, 其中任一数据 x 的随机误差 δ 落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 的概率为 68.3%. 当然, 区间 $(x_0 - \sigma, x_0 + \sigma)$ 内包含真值的概率也为 68.3%, 这就提供了一个用概率来表达测量误差的方法. 区间 $(x_0 - \sigma, x_0 + \sigma)$ 称为置信区间, 在给定置信区间内包含真值的概率 (68.3%) 称为置信概率. 可见, 标准误差具有统计性质.

扩大置信区间, 同样可以计算, 在相同条件下对同一物理量进行重复测量, 其任意一次测量值的误差出现在 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 和 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 范围概率分别为

$$P(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right] d\delta = 95.4\%, \quad (1-2-8)$$

$$P(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right] d\delta = 99.7\%, \quad (1-2-9)$$

即在置信区间 $(x_0 - 2\sigma, x_0 + 2\sigma)$ 和 $(x_0 - 3\sigma, x_0 + 3\sigma)$ 内包含真值的概率 (置信概率) 分别为 95.4% 和 99.7%.

(1-2-9) 式表明, 绝对值大于 3σ 的误差出现的概率不超过 3%, 所以, $\pm 3\sigma$ 称为极限误差.

(4) 标准偏差

在实际测量中, 测量次数 n 总是有限的, 不可能是无限的, 这时的算术平均值不是真值, 因此标准误差只有理论上的价值, 对标准误差 σ 的实际处理只能进行估算.

对于一组测量值 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, n 为有限值, 其算术平均值 \bar{x} 虽不是真值, 但却是真值 x_0 的最佳近似值, 实际中总是用算术平均值代替真实值. 为了与误差加以区别, 将测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 的差值称为偏差, 用 v_i 表示, 即

$$v_i = x_i - \bar{x}. \quad (1-2-10)$$

利用数理统计理论, 可以得到对偏差进行估计的公式为

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

(1-2-11) 式称为贝塞尔公式, S_x 称为单次测量的标准偏差, 或测量列的标准偏差. 如同值 \bar{x} 是 x_0 的最佳估计值一样, S_x 是 σ 的最佳估计值.

(5) 算术平均值的标准偏差

标准偏差 S_x 表示的是取得 \bar{x} 的一组数据的离散性, 如果在完全相同的条件下再重复测量一组数据, 由于随机误差的影响, 不一定能得到完全相同的 \bar{x} , 这说明算术平均值本身也具有离散性. 为了评定算术平均值的离散性, 需引入算术平均值的标准偏差 (亦称测量列的算术平均值的标准偏差) $S_{\bar{x}}$, 误差理论给出的算术平均值的标准偏差公式为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1-2-12)$$

(6) t 分布

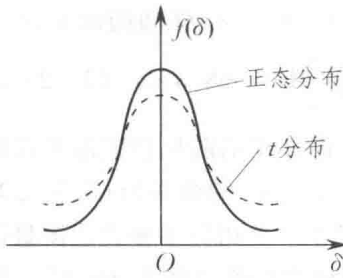


图 1-2-3 t 分布与正态分布的比较

根据误差理论,当测量次数很少时(例如,少于 10 次),随机误差分布将明显偏离正态分布,这时测量值的随机误差将遵从 t 分布,也称学生分布.较之正态分布, t 分布概率密度分布曲线变得平坦,如图 1-2-3 所示.当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, t 分布过渡到正态分布.

在有限次测量的情况下,要保持同样的置信概率,显然要扩大置信区间,即在 S_r 和 S_T 的公式的基础上再乘以一个大于 1 的因子 t_P , t_P 与测量次数 n 有关,也与置信概率 P 有关.

表 1-2-1 给出了 t_P 与测量次数 n 、置信概率 P 的对应关系.

表 1-2-1 t_P 因子与测量次数 n 、置信概率 P 的对应关系

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	∞
$t_P(P = 0.68)$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1.00
$t_P(P = 0.95)$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.09	1.96
$t_P(P = 0.99)$	63.66	9.92	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.86	2.58

由表 1-2-1 可见,当置信概率 $P = 0.68$ 时, t_P 因子随测量次数的增加而趋向于 1,当 $n > 6$ 以后, t_P 与 1 的偏离并不大,故在进行误差估算时,当 $n \geq 6$ 时,若置信概率取 68.3%,可以不加修正.

注意,上面在讨论系统误差和随机误差时是分别进行的,也就是在没有随机误差的情况下研究系统误差,以及在系统误差可以不考虑的情况下研究随机误差.实际上对任何一次实验,既存在着系统误差,又存在着随机误差,只有一种误差的实验是不存在的.当然,也存在一些实验因以系统误差为主(或以随机误差为主),而忽略另一种误差的存在.

1.2.3 测量的精密度、正确度、准确度

对测量结果作总体评定时,一般均应把系统误差和随机误差联系起来看.精密度、正确度和准确度均用于评定测量结果的好坏,但是这些概念的含义不同,使用时应加以区别.

(1) 精密度 (precision) 表示测量数据密集的程度.它反映随机误差的大小,与系统误差无关.若各测量值之间的差异较小,即数据集中,离散程度小,亦即随机误差小,这意味着测量精密度较高;反之,若各次测量值彼此差异较大,精密度也就较低.

(2) 正确度 (correctness) 表示测量值或实验结果接近真值的程度.它反映系统误差的大小,与随机误差无关.测量值越接近真值,系统误差越小,正确度越高;反之,系统误差越大,正确度越低.

(3) 准确度 (accuracy) 又称精确度,是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述,反映了测量值既不偏离真值,又不离散的程度.对于实验和测量来说,精密度高正确度不一定高;而正确度高精密度也不一定高;只有精密度和正确度都高时,准确度才高,两者之一低或两者都低,准确度皆低.

现在以打靶结果为例来形象说明 3 个“度”之间的区别.图 1-2-4 中,(a) 表示子弹着靶点

比较密集,但偏离靶心较远,说明随机误差小而系统误差大,即精密度高而正确度较差;(b)表示子弹着靶点比较分散,但没有明显的固定偏向,说明系统误差小而随机误差大,即正确度高而精密度较差;(c)表示子弹着靶点比较集中,且都接近靶心,说明随机误差和系统误差都小,即精密度和正确度都很高,亦即准确度高。

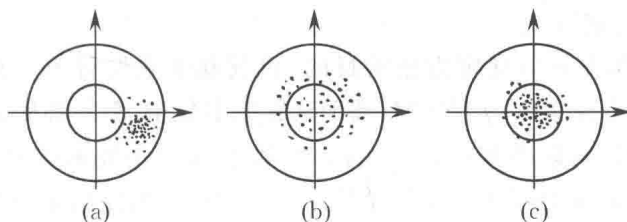


图 1-2-4 子弹着靶点分布图

1.3

测量的不确定度

由于测量误差是普遍存在且不可避免的,因而,对测量结果进行评价,提供测量结果的可靠程度的信息是十分必要的.无质量评价的测量结果是毫无意义的.过去人们习惯于用误差来评定测量质量,而误差是测量结果与被测量真值之差,可是,被测量真值在大多数情况下是未知的,这使得误差概念和误差分析在用于评定测量结果时显得既不完备,也难于操作,因而受到广泛质疑.因此,国际上越来越多的地区现已不用误差来评价测量质量,而是用另一个物理概念——不确定度来对测量结果进行质量评价.

1.3.1 不确定度的概念

实验不确定度,又称测量不确定度(uncertainty of measurement),简称不确定度,是与测量结果相关的一个用于合理地表征测量结果离散性的参数,其含义是,被测量值由于测量误差的存在而不能确定的程度,它是对被测量真值在某一范围内的一个评定.

“不能确定的程度”是通过“置信区间”和“置信概率”来表达的.如果不确定度为 u ,根据其含义可知,误(偏)差将以一定的概率出现在区间 $(-u, +u)$ 之中,或者表示被测量 u 的真值以一定的概率落在置信区间 $(\bar{x} - u, \bar{x} + u)$ 之中.显然,在相同置信概率的条件下,不确定度越小,其测量结果的可靠程度越高,即测量质量和使用价值也越高;反之,不确定度愈大,其测量结果的可靠程度愈低,即测量质量和使用价值也愈低.由此可见,测量结果的可靠性在很大程度上取决于其不确定度的大小,用不确定度来评价测量结果的质量比误差评价更合适.因此,在给出测量结果时,必须附加不确定度的说明,只有这样才是完整和有意义的.

1.3.2 不确定度的分类

测量不确定度表示测量结果的可靠程度.按其数值的来源和评定方法,不确定度可分为A、B两类.

(1) A类不确定度