

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理 实验教程

高永慧 耿小丕 主 编
杨 洋 副主编

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

013031209

04-33

595

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验教程

主 编 高永慧 耿小丕
副主编 杨 洋
参 编 李仁芮 杨瑞臣
冯法军 赵 毅



04-33/595

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



北航

C1636637

013031508

内 容 简 介

本书是根据当前物理实验教学改革的特点和大学物理实验课程的教学要求,吸收国内外同类教材的精华,在总结多年教学改革经验的基础上,按照“模块化”的教学理念组织编写的.全书共分6章,内容涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等领域的28个实验.本书内容丰富,知识涵盖面广,侧重阐述实验的物理思想和测量方法,强化实验的学习过程,突出实验教学与应用技术需求相结合,有较强的启发性和实用性,注重培养学生的独立思考能力、创新能力、实践能力和综合应用能力,从而提高学生的综合素质.

本书适合作为高等院校理工类专业的物理实验教材,也可供成人教育、职工大学等作为物理实验课教材或教学参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/高永慧,耿小丕主编. —北京:
中国铁道出版社, 2013. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-113-15799-9

I. ①大… II. ①高…②耿… 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 (2012) 第 311320 号

书 名: 大学物理实验教程
作 者: 高永慧 耿小丕 主编

策 划: 吴 飞
责任编辑: 吴 飞 徐盼欣
封面设计: 付 巍
封面制作: 刘 颖
责任印制: 李 佳

读者热线: 400-668-0820

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址: <http://www.51eds.com>
印 刷: 三河市华丰印刷厂
版 次: 2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
开 本: 720mm×960mm 1/16 印张: 13.5 字数: 269千
书 号: ISBN 978-7-113-15799-9
定 价: 29.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换.电话:(010)63550836
打击盗版举报电话:(010)63549504

物理实验课是学生进入高校后所接触到的第一门比较完整和系统的实践性课程,它在传授基本实验技能和科学实验基本知识,培养学生实践能力,激发创新精神,掌握科学研究方法,提高素质等方面具有不可替代的作用.为了适应我国高等教育的快速发展,充分发挥物理实验在应用型人才培养过程中的作用,编写一本适合当前人才培养特点的物理实验教材是十分必要的.本书是编者多年教学改革经验的积累和结晶,在编写作过程中,以提高学生科学素质为主线,以培养学生创新、应用能力为重点,以学生掌握物理实验的基本测量方法为核心,构建与大学物理实验教学规律相适应的教学内容,为学生终生学习和在职业生涯中继续发展奠定必要的基础.本书有以下几方面的特点.

1. 在课程结构上,按照“模块化”教学理念,把教学内容分为6章,即实验误差的基础知识、实验数据处理、物理实验的基本方法与技术、基础性实验、综合性实验、提高性实验.实验误差的基础知识一章主要介绍误差来源及分类,误差计算、误差分析、不确定度、有效数字运算等有关内容,培养和提高学生的误差计算与分析能力、有效数字运算能力、正确表达实验结果的能力;实验数据处理一章主要介绍实验数据处理的方法、数据处理软件的正确使用等有关内容,以提高学生实验数据处理的能力与技巧;物理实验的基本方法与技术一章主要介绍实验中采用的各种测量方法,以及实验仪器的调试与操作技术,以便学生能够顺利完成每一个实验项目;基础性实验一章包括10个实验项目,涉及力学、热学、电磁学、光学等内容,学生主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用,掌握基本实验技能和基本测量方法、误差(或不确定度)及数据处理的理论与方法等,强化基本实验知识的学习和基本实验技能的训练;综合性实验一章包括10个实验项目,所涉及的实验内容、测量方法、实验技术、实验仪器以及对物理知识、规律的运用等方面都并不局限于某个分支学科,通过这些实验的学习,以巩固学生在基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路;提高性实验一章包括8个实验项目,主要涉及一些设计与制作性实验,是对学生独立实验技能、知识掌握程度及实验综合素质的一个检验.学生自行设计实验方案,运用所学的实验知识和技能,在实验方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定等方面受到系统的训练.

2. 在实验内容上,突出实验测量方法的重要性,让学生学到实验的本质,达到举一反三的目的,强调从掌握实验方法到掌握测量技术的教学目的,凸显基础实验教学与应用技术需求相结合,突破传统的物理实验以力学、热学、电学、光学、近代物理为顺序编排的框架,施行模块化教学.

3. 在实验项目上,增添了一些能反映现代科学技术发展的应用性实验,如非平衡电桥、

光电效应、声速测量等实验项目,删除了动量守恒定律的验证、透镜焦距的测定、伏安法测电阻等明显落后于现代技术发展的实验项目。

4. 在实验目的上,以正确、熟练地掌握基本仪器、仪表的使用方法及基本的实验手段、测量方法为主要教学目的,突破了传统的以验证物理学基础为主要教学目的的框框,强调为学生职业技能培养奠定良好的基础,凸显了基础物理实验教学为培养应用型人才目标服务的宗旨。

5. 在数据处理方面,专门介绍了数据处理软件 Excel 和科学作图软件 Origin 在物理实验中的应用,增加了用专业软件处理实验数据的训练,以替代手工坐标纸作图方式。

6. 在编写思路上,突出实验背景和设计思路,淡化实验过程与操作步骤,促进学生主动学习、思考与实验,提高学生的创新意识。

7. 在实验预习上,增添了“预习提示”栏目,使学生能够较快理解整个实验内容,并对于一些不朽的著名实验,增添了相关科学家的介绍,从而激发了学生学习热情,提高了学生完成实验的主观能动性。

其中,* 标出内容为选学内容。

本书由高永慧、耿小丕担任主编,杨洋担任副主编。参加本书编写工作的有李仁芮、杨瑞臣、冯法军、赵毅。杨瑞臣绘制了本书的插图。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2013 年 1 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 实验误差的基础知识	4
1.1 测量与误差	4
1.2 直接测量结果随机误差的估算	9
1.3 间接测量结果误差的估算——误差传递公式	13
1.4 测量不确定度	14
1.5 有效数字及其计算	25
第 2 章 实验数据处理	30
2.1 实验数据处理的方法	30
2.2 用 Excel 软件处理实验数据	33
2.3 用 Origin 软件绘制实验图表	35
第 3 章 物理实验的基本方法与技术	39
3.1 物理实验的基本方法	39
3.2 物理实验的基本技术	45
第 4 章 基础性实验	50
4.1 长度和密度的测量实验	50
4.2 钢丝的杨氏模量测定实验	57
4.3 简谐振动的研究实验	63
4.4 测量金属线膨胀系数实验	70
4.5 用模拟法测量静电场实验	76
4.6 用电位差计测量电动势实验	81
4.7 用电桥测量电阻实验	85
4.8 用电磁感应法测量交变磁场实验	91
4.9 牛顿环和劈尖实验	96
4.10 旋光仪的使用实验	101
第 5 章 综合性实验	107
5.1 刚体转动惯量的测定实验	107
5.2 落球法测定液体在不同温度的黏度实验	115
5.3 示波器的使用实验	121

5.4	声速的测量实验	135
5.5	非平衡电桥实验	141
5.6	铁磁材料磁滞回线的测定实验	150
5.7	基本电荷量的测量实验	155
5.8	迈克耳孙干涉仪的调节与使用实验	165
5.9	光电效应与普朗克常数的测定实验	170
5.10	弗兰克-赫兹实验	178
第6章	提高性实验	187
6.1	在气垫导轨上测重力加速度实验	187
6.2	用电位差计测电池内阻实验	189
6.3	非线性电阻伏安特性的研究实验	190
6.4	简易万用表的组装实验	192
6.5	光纤光栅压力传感器的制作实验	193
6.6	超声波物位仪的制作实验	195
6.7	铜电阻温度计的制作实验	196
6.8	电子秤的制作实验	198
附 录		201
参考文献		208



绪 论



科学实验是自然科学研究的主要手段,以探索、预测或验证自然科学新现象、新规律为目的.而以教学为目的的物理实验具有丰富的实验思想、方法、手段,同时又能提供综合性很强的基本实验技能训练,体现了大多数科学实验的共性,是科学实验的基础.因此,几乎所有的高等学校均将物理实验课设置为理工科学生的必修课程,用于训练大学生系统的实验方法和实验技能.物理实验课程内容的的基本要求可概括为以下几个方面:

1. 掌握测量误差的基本知识,学会用误差对测量结果进行评估.掌握处理实验数据的一些常用方法,如列表法、作图法和最小二乘法,以及用科学作图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.例如,长度、质量、时间、电动势、电阻、声速、磁感应强度、光的波长、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物性参数的测量.

3. 了解常用的物理实验方法.例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.

4. 能够正确使用常用的物理实验器材.例如,长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、旋光仪、常用电源和光源等常用仪器.

5. 掌握常用的实验操作技术.例如,零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节.

物理实验是一门实践性很强的课程,是培养和提高学生科学素质和应用能力的重要课程之一.通过对以上内容的训练,学生应逐步实现以下能力的培养:

- (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,掌握实验原理及方法,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.

- (2) 分析实验结果的能力.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.

(3) 理论联系实际的能力. 能够在实验中发现问题的、分析问题并学习解决问题的科学方法.

(4) 制作与创新能力. 能够完成符合规范要求的制作性实验内容, 进行具有创意性、应用性内容的实验.

要实现以上能力的培养, 就需要主动认真地完成好每一个实验. 一般来讲, 每个实验均可分为实验预习、实验过程和撰写实验报告三个环节. 也就是说, 在以上三个环节中均需要主动、严谨和认真的态度. 具体来讲就是:

1. 实验预习. 课前预习是确保学习主动性的措施之一. 学生应善于发挥自己的主观能动性, 充分利用实验室开放时间, 按讲义要求, 对照实物进行预习, 了解装置、仪器或设备的结构特点, 调节或安装方法, 操作步骤或规程及使用注意事项, 在明确实验目的、要求、方法、原理的基础上, 拟定实验步骤提纲, 并拟定数据记录表格, 能力较强的学生, 还应努力去理解某些实验的设计构思. 上述基本要求应在实验报告纸上写出书面预习报告备查.

2. 实验过程. 实验过程是整个实验教学中最核心的环节. 在这个过程中要独立完成实验器材的安装或调整, 按正确步骤完成测量全过程, 并对实验数据完整记录. 在这个过程中应注意以下几点:

(1) 不要急于记录数据. 在实验过程中建议先观察或练习, 之后再行测量, 也可以先粗测再细测, 否则可能在测量进行到一半或快结束时才发现, 某个调节参数因为初始值选择不合理而出现超出量程或无法调节, 导致无法完成整个实验, 只好再重新进行测量.

(2) 要注意掌握实验中所采取的实验方法, 特别是一些基本的测量方法. 因为它是复杂测量的基础, 在今后的学习与工作中可能会经常用到. 我们在学习时不仅要掌握它的原理, 而且要知道它的适用条件及优缺点, 这些知识只有通过亲身实践才能真正体会到.

(3) 要有意识地培养良好的实验习惯. 例如, 正确记录原始数据和处理数据, 注意记录实验的客观条件, 如温度、气压、湿度、日期等. 认真学习操作程序, 培养操作习惯. 良好的实验习惯是科学素质的具体表现, 也是保证实验安全、避免差错的基础.

(4) 不要单纯追求实验数据的正确性. 实验能力的快速提高往往发生在实验过程不顺利时. 要逐步学会分析、排除实验中出现的某些故障. 当实验结果不理想时, 要考虑实验方法是否正确? 仪器可能带来多大误差? 实验环境等因素对实验有多大影响?

(5) 要注意实验室操作规程和安全规则. 随着实验项目的进行, 会逐步接触到各种测量仪器, 它们有不同的使用要求与工作环境, 操作不当可能会损坏仪器, 甚至对身体造成伤害. 因此要求学生遵守实验的具体操作规程, 养成良好的实验习惯.

(6) 在实验结束后由指导教师当场在实验登记卡上打出成绩, 并在原始数据上签字.

3. 撰写实验报告. 撰写实验报告的过程实际上是对学生的综合思维能力和文字表达



能力的训练过程,是今后学生在工作中撰写标书、项目申请书、研究报告、学术论文的基础训练,撰写一份合格的实验报告应注意以下几方面:

(1) 注意实验报告的完整性,一份完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、实验器材、简要的实验原理(用自己的语言扼要说明实验所依据的原理和公式,要有简单的原理图)、实验步骤、数据处理(包括实验原始数据记录,按讲义要求内容计算,公式要有代入数据的过程)、误差分析、实验改进设想、解答教师指定的思考题等9个方面。

(2) 实事求是撰写实验报告的基本要求。在撰写实验报告中不得随意对实验数据及其有效数字进行增删。

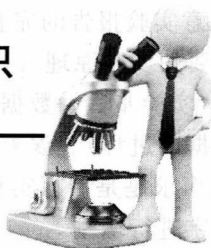
(3) 对实验数据的处理及对实验结果的误差分析是撰写实验报告的重点,也是学生归纳与分析问题的能力具体体现。

(4) 实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁,图表合适、文理通顺、内容简明。

物理实验课程所涉及的实验项目,绝大多数是经过多年的改进与调整,已非常适合锻炼学生对某一实验技术或某一重要物理实验方法的掌握。从统计学的角度来看,学生在进行物理实验的过程中,利用现有实验设备而发现新的物理现象或规律的概率是非常小的。然而,具有批判与怀疑精神,是实验工作者的一个基本素质。我们期望每个学生去探讨最佳实验方案、改装实验装置、分析操作步骤、注意测量方法应用、提出实验改进与设想,提高自己独立分析问题、解决问题的能力。



第1章 实验误差的基础知识



1.1 测量与误差

一、测量

所谓测量，就是利用科学仪器用某一度量单位将待测量的大小表示出来，也就是说测量就是将待测量与选作标准的同类量进行比较，得出倍数值，称该标准量为单位，倍数值为数值。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。按测量方法进行分类，测量可分为直接测量和间接测量两大类。

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，如用米尺测长度，用温度计测温度，用电表测电流、电压等都是直接测量，所得的物理量如长度、温度、电流、电压等称为直接测量值；有些物理量很难进行直接测量，而须依据待测量和某几个直接测量值的函数关系求出，这样的测量称为间接测量，如单摆法测重力加速度 g 时， $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ ， T （周期）、 L （摆长）是直接测量值，而 g 是间接测量值。

随着实验技术的进步，很多原来只能间接测量的物理量，现在也可以直接测量，例如电功率、速度等的测量。

二、误差

1. 真值与误差。物理量在客观上有着确定的数值，称为该物理量的真值。由于实验理论的近似性、实验器材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，测量结果和真值之间总有一定的差异，我们称这种差异为测量误差，测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} (\Delta X) = \text{测量值} (X) - \text{真值} (X_0) \quad (1-1-1)$$

$$\text{相对误差} (E_x) = \frac{\text{绝对误差} (\Delta X)}{\text{真值} (X_0)} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

测量所得的一切数据,都包含着一定的误差,因此误差存在于一切科学实验过程中,并会因主观因素的影响、客观条件的干扰、实验技术及人们认识程度的不同而不同。

注意

绝对误差不同于误差的绝对值,它可正可负。绝对误差不仅反映了测量值偏离真值的大小,也反映了偏离真值的“方向”。数据处理中常用误差的绝对值代替绝对误差,其实两者在物理意义上是不同的。

2. 误差的分类. 根据误差性质和产生原因,可将误差分为以下几类:

(1) 系统误差. 在相同的测量条件下多次测量同一物理量,其误差的绝对值和符号保持不变,或在测量条件改变时,按确定的规律变化的误差称为系统误差。

系统误差的来源有以下几个方面:

① 由于测量仪器不完善、仪器不够精密或安装调试不当,如刻度不准、零点不准、砝码未经校准、天平不等臂等。

② 由于实验理论和实验方法不完善,所引用的理论与实验条件不符,如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测电压时未考虑电表内阻的影响,标准电池的电动势未作温度修正等。

③ 由于实验者缺乏经验,或生理、心理等因素所引入的误差。如每个人的习惯和偏向不同,有的人读数偏高,而有的人读数偏低。

多次测量并不能减少系统误差。系统误差的消除或减少是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将其降到最低。例如,将仪器进行校正,改变实验方法或在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响,纠正不良的实验习惯等。

(2) 随机误差. 随机误差也被称为偶然误差,它是指在极力消除或修正了一切明显的系统误差之后,在相同的测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号的变化时大时小、时正时负,以不可预定的方式变化着的误差。

随机误差是由于人的感观灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰以及一些偶然因素的影响产生的。如用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时,往往将米尺去对准物体的两端并估读到毫米以下一位读数值,这个数值就存在一定的随机性,也就带来了随机误差。由于随机误差的变化不能预先确定,所以对待随机误差不能像对待系统误差那样找出原因排除,只能作出估计。

虽然随机误差的存在使每次测量值偏大或偏小,但是,当在相同的实验条件下,对被测量进行多次测量时,其大小的分布却服从一定的统计规律,可以利用这种规律对实验结果的随机误差作出估算。这就是在实验中往往对某些关键量要进行多次测量的原因。

(3) 粗大误差. 凡是测量时客观条件不能合理解释的那些突出的误差,均可称为粗大误差。

粗大误差是由于观测者不正确地使用仪器、观察错误或记录错数据等不正常情况下



引起的误差。它会明显地歪曲客观现象，这一般不应称为测量误差，在数据处理中应将其作为坏值予以剔除。粗大误差是可以避免的，也是应该避免的，所以，在作误差分析时，要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

三、测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果做总体评定时，一般均应把系统误差和随机误差联系起来看，精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的，但是这些概念的含义不同，使用时应加以区别。

1. 精密度。精密度表示测量结果中的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时，所得结果的相互接近程度，是描述测量重复性的。精密度高，即测量数据的重复性好，随机误差较小。

2. 准确度。准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。用它描述测量值接近真值的程度，准确度高即测量结果接近真值的程度高，系统误差较小。

3. 精确度。精确度是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说，精密度高准确度不一定高；而准确度高精密度也不一定高；只有精密度和准确度都高时，精确度高。

现在以打靶结果为例来形象说明三个“度”之间的区别。图 1-1-1 (a) 表示子弹相互之间的比较靠近，但偏离靶心较远，即精密度高而准确度较差；图 1-1-1 (b) 表示子弹相互之间比较分散，但没有明显的固定偏向，故准确度高而精密度较差；图 1-1-1 (c) 表示子弹相互之间比较集中，且都接近靶心，精密度和准确度都很高，亦即精确度高。

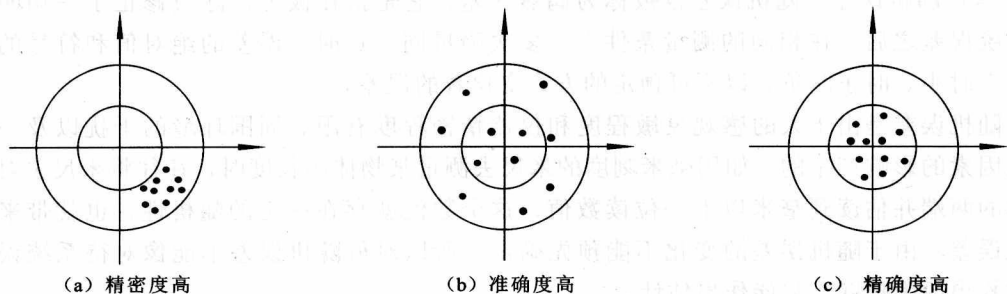


图 1-1-1 测量的精密度、准确度和精确度图示

四、随机误差的正态分布与标准误差

1. 随机误差的正态分布规律。随机性是随机误差的特点。在相同的测量条件下，对同一物理量进行多次重复测量，假设系统误差已被减弱到可以被忽略的程度，由于随机

误差的存在, 测量结果 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 一般存在着一定的差异. 如果该被测量的真值为 x_0 , 则根据误差的定义, 各次测量的随机误差为

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

大量的实验事实和统计理论都证明, 在绝大多数物理测量中, 当重复测量次数足够多时, 随机误差 δ_i 服从或接近正态分布 (或称高斯分布) 规律. 正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来, 如图 1-1-2 (a) 所示, 横坐标为误差 δ , 纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$. 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 此曲线完全对称. 正态分布具有以下性质:

(1) 单峰性. 绝对值小的误差出现的可能性 (概率) 大, 绝对值大的误差出现的可能性小.

(2) 对称性. 绝对值相等的正误差和负误差出现的机会均等, 对称分布于真值的两侧.

(3) 有界性. 非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零.

(4) 抵偿性. 测量次数非常多时, 正误差和负误差相互抵消, 于是, 误差的代数和趋向于零.

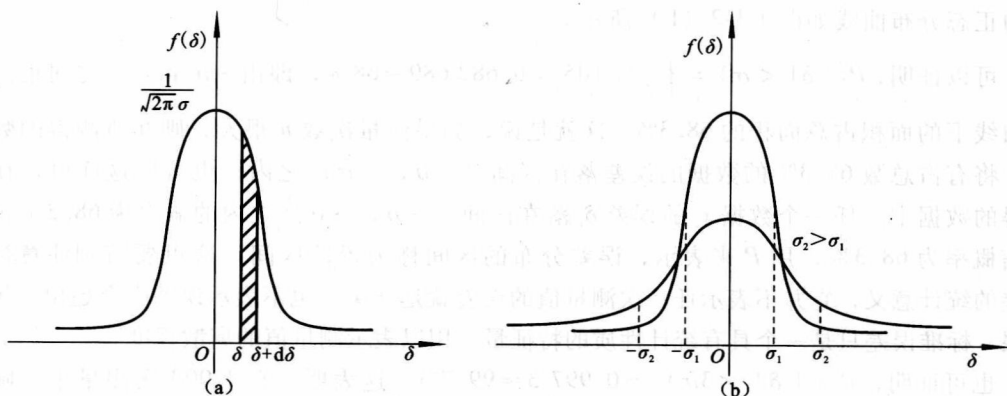


图 1-1-2 随机误差的正态分布曲线

根据误差理论可以证明函数 $f(\delta)$ 的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-3)$$

测量值的随机误差出现在 $(\delta, \delta + d\delta)$ 区间的可能性为 $f(\delta)d\delta$, 即图 1-1-2 (a) 中阴影线所包含的面积元. 上式中的 σ 是一个与实验条件有关的常数, 称为标准误差, 其值为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

式中, n 为测量次数, 各次测量值的随机误差为 $\delta_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$. 可见标准误差是将各个随机误差的平方取平均值, 再开平方而得到, 所以, 标准误差又称均方根误差.

2. 标准误差的物理意义. 按照概率理论, 误差 δ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事件是必然事件, 所以 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1$, 即曲线与横轴所包围面积恒等于 1. 当 $\delta = 0$ 时, 由式 (1-1-3) 得

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-5) 可见, 若测量的标准误差 σ 很小, 则必有 $f(0)$ 很大. 由于曲线与横轴间围成的面积恒等于 1, 所以如果曲线中间凸起较大, 两侧下降较快, 测量的数据比较集中, 即测得值的离散性小, 说明测量的精密度高, 则测量值较为可靠; 相反, 如果 σ 很大, 则 $f(0)$ 就很小, 数据较分散, 说明测得值的离散性大, 测量的精密度低. 这两种情况的正态分布曲线如图 1-1-2 (b) 所示.

可以证明, $P(|\delta| < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.682\,689 \approx 68\%$, 即由 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间正态分布曲线下的面积占总面积的 68.3%. 这就是说, 如果测量次数 n 很大, 则在所测得的数据中, 将有占总数 68.3% 的数据的误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内; 也可以这样讲, 在所测得的数据中, 任一个数据 x_i 的误差 δ_i 落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内的概率为 68.3%, 即置信概率为 68.3%, 用 P 来表示, 误差分布的区间称为置信区间. 这里要特别注意标准误差的统计意义, 它并不表示任一次测量值的误差就是 $\pm\sigma$, 也不表示误差不会超出 $\pm\sigma$ 的界限. 标准误差只是一个具有统计性质的特征量, 用以表示测量值的离散程度.

也可证明, $P(|\delta| < 3\sigma) = 0.997\,3 \approx 99.7\%$. 这表明, 在 1 000 次测量中, 随机误差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的测得值大约只出现三次. 在一般的十几次测量中, 几乎不可能出现, 所以把 3σ 称为极限误差. 在测量次数相当多的情况下, 如果出现测量误差的绝对值大于 3σ 的数据, 可以认为这是由于过失引起的异常数据而加以剔除. 这被称为剔除异常数据的“ 3σ ”准则. 它只能用于测量次数 $n > 10$ 的重复测量中, 对于测量次数较少的情况, 需要采用另外的判别准则.

由概率积分表可得如下一些典型的置信概率

$$P(|\delta| < 1.96\sigma) = 0.950\,0, \quad P(|\delta| < 2\sigma) = 0.954\,5$$

$$P(|\delta| < 2.58\sigma) = 0.990\,1, \quad P(|\delta| < 4\sigma) = 0.999\,9$$

3. 有限次测量与 t 分布. 测量次数趋于无穷只是一种理想情况, 这时物理量的概率密度服从正态分布. 当测量次数减少时, 概率密度曲线变得平坦 (见图 1-1-3), 称为 t 分



布，也叫学生分布。

对有限次测量的结果，要保持与无穷次测量同样的置信概率，即概率分布曲线下相等的面积，显然要扩大置信区间，就需要把随机误差乘以一个大于1的因子 t 。 t 因子与测量次数和置信概率有关。表1-1-1给出了不同置信概率下 t 因子与测量次数的关系。从表中可以看出，对于68%的置信概率，当测量次数 $n > 6$ 以后， t 因子与1的偏离并不大，故在大学物理实验中，测量的次数最好为6~10次。

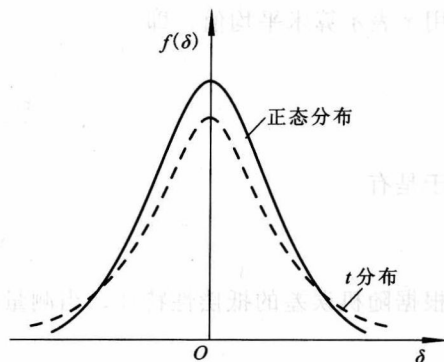


图 1-1-3 t 分布与正态分布比较

表 1-1-1 t 因子与测量次数 n 的关系

P	n										
	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1.00
0.90	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.86	1.83	1.76	1.73	1.71	1.65
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.36	2.31	2.26	2.15	2.09	1.96
0.99	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

1.2 直接测量结果随机误差的估算

一、直接测量结果的最佳值

在一定条件下，对某一物理量 x 进行了 n 次等精度的重复测量，获得了 n 个数据，分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，其该物理量的真值为 x_0 ，则各次测量的误差分别为

$$\delta_1 = x_1 - x_0$$

$$\delta_2 = x_2 - x_0$$

$$\delta_3 = x_3 - x_0$$

$$\vdots$$

$$\delta_n = x_n - x_0$$

将以上各式相加得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)$$

即

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$



用 $\bar{x}$ 表示算术平均值, 即

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

于是有

$$x_0 = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-2-1)$$

根据随机误差的抵偿性特征, 当测量次数无限增大时, 各个误差的代数和趋近于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = x_0 \quad (1-2-2)$$

在实际测量中, 只进行有限次数的测量, 因此可用算术平均值作为真值的最佳近似值, 又称近真值. 误差指测量值与真值之差, 测量值与平均值之差则称为偏差, 又称残余误差, 二者有所不同. 实际测量中只能得到偏差.

二、多次测量误差

1. 标准偏差. 真值一般是无法测得的, 因而按照式 (1-1-4), 标准误差也无从计算. 根据算术平均值是近真值的结论, 在实际计算时用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值, 用偏差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 来代替误差.

误差理论可以证明, 当测量次数 n 有限, 用偏差来估算标准误差时, 可用如下贝塞尔公式去计算

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1-2-3)$$

式中, S_x 称为任一次测量值的标准偏差. 它是测量次数有限多时标准误差的一个估计值. 其代表的物理意义为, 如果多次测量的随机误差遵从高斯分布, 那么, 任意一次测量, 测量值误差落在区间 $(-S_x, +S_x)$ 之内的可能性 (概率) 为 68.3%. 或者说, 它表示这组数据的误差有 68.3% 的概率出现在区间 $(-S_x, +S_x)$ 内.

当测量次数 n 足够大时, 可以用式 (1-2-3) 中的 S_x 的值代替式 (1-1-4) 定义中 σ 的值.

2. 平均值的标准偏差. 我们通过多次重复测量获得了一组数据, 并把求得的算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果. 如果在完全相同的条件下再重复测量该被测量时, 由于随机误差的影响, 不一定能得到完全相同的 $\bar{x}$, 这表明算术平均值本身具有离散性. 为了评定算术平均值的离散性, 引入算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$, 可以证明

