

WULI SHIYAN
DAXUE

大学物理实验

主 编 柳 青
副主编 徐 敏 滑亚文 刘以良



重庆大学出版社

内容提要

本书是高等院校理工科专业的物理实验基本教材。全书内容广泛,共收录 18 个实验项目,主要涉及力学、电磁学、光学和近代物理等方面。全书共 3 章,第 1 章绪论;第 2 章介绍测量误差和不确定度及实验数据处理的基础知识;第 3 章包括 18 个物理实验题目。每个实验包括有实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、注意事项、思考题等内容。附录为物理常数及常用物理量的附表。

本书可作为高等院校理工科各专业的物理实验教科书,也可供其他专业选用或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 柳青主编. --重庆:重庆大学出版社,2020.1

ISBN 978-7-5689-1918-0

I. ①大… II. ①柳… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 267080 号

大学物理实验

主 编 柳 青

副主编 徐 敏 滑亚文 刘以良

策划编辑:范 琪

责任编辑:陈 力 涂 昀 版式设计:范 琪

责任校对:张红梅 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆市正前方彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:11.25 字数:283 千

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—3 500

ISBN 978-7-5689-1918-0 定价:32.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前 言

本书根据《高等学校物理学本科指导性专业规范》，结合多年来的教学实践，在原有大学物理实验讲义的基础上并参考兄弟院校教材编写而成。

全书内容广泛，共收入 18 个实验项目，分布在力学、电磁学、光学和近代物理等方面。

全书共 3 章，第 1 章绪论，介绍物理实验课的作用、目的和地位，物理实验课程的基本要求及物理实验教学的基本环节。第 2 章介绍测量误差和不确定度及实验数据处理的基本方法。第 3 章是实验项目部分，18 个实验项目，包括力学、电磁学、光学实验；每个实验包括有实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容与步骤、注意事项、思考题等内容。最后是附录部分，包含物理常数及常用物理量的附表。

本书是根据“高等院校工科本科物理实验课程教学基本要求”中基础实验部分的要求编写的。本书编写本着从培养新世纪创新人才的目标出发，紧密结合我校学生的实际情况，使实验教学体系更加切合实际，教材内容与现有设备配合更加紧密，使物理实验教学更加富有成效。

本书在实验项目中，以实验原理、实验内容为主，力图让学生在仔细阅读实验原理和仪器介绍后，根据实验内容完成实验，以避免不了解实验原理和仪器，只按照书中的实验步骤去完成实验的现象。同时，为了引导学生实验后进一步分析讨论、巩固提高，每个实验后还安排了思考题。

本书是在多年使用自编教材的基础上，结合教学中的实际情况编写而成的。书中的实验项目包括基础验证性实验、综合设计性实验和拓展创新性实验，其比例设置恰当，并适当增加综合设计性实验内容，以激发学生学习大学物理实验的兴趣，进而培养学生乐于思考、勤于钻研、勇于创新的科学精神。

本教材凝聚着许多教师的智慧和辛勤劳动,参加本书编写工作的有柳青、徐敏、滑亚文、刘以良等,全书由柳青统稿并任主编,徐敏、滑亚文、刘以良任副主编。

本书不仅包含了西南民族大学近 20 年物理实验教学实践的积累,还吸收了兄弟院校的优秀成果,展示了我们对物理实验教学新的尝试。

书中难免会有错漏之处,谨请读者指教,以便改进,我们将不胜感激!

编者
2019 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验课的作用、目的和地位	1
1.2 物理实验课程的基本要求	1
1.3 物理实验教学的基本环节	2
第 2 章 测量误差和不确定度及实验数据处理	4
2.1 测量与误差	4
2.1.1 测量	4
2.1.2 误差	5
2.1.3 误差的分类	6
2.1.4 误差的表示形式	7
2.1.5 描述测量结果的 3 个名词	8
2.1.6 随机误差的分布与特点	9
2.2 测量结果的表示与最佳估值	10
2.2.1 测量结果的表示	10
2.2.2 最佳估值 \bar{x} 的计算	11
2.3 测量结果不确定度的计算	12
2.3.1 不确定度的概念	12
2.3.2 测量不确定度与误差的区别	12
2.3.3 不确定度分量和合成不确定度	13
2.3.4 直接测量量不确定度的计算	13
2.3.5 间接测量量不确定度的计算	16
2.3.6 微小误差准则	18
2.3.7 不确定度计算小结	18
2.3.8 实例	19
2.4 实验数据的有效数字	22
2.4.1 有效数字	22
2.4.2 等概率法进行数字修约	23
2.4.3 有效数字的科学表示法	24

2.5 实验数据的处理方法	24
2.5.1 列表法	24
2.5.2 作图法	24
2.5.3 逐差法	25
2.5.4 最小二乘法	26
第3章 物理实验	29
实验一 长度的测量	29
实验二 扭摆法测定刚体转动惯量	31
实验三 三线摆	37
实验四 声速的测定	43
实验五 多普勒效应综合实验	49
实验六 示波器的使用	60
实验七 霍尔效应及应用	71
实验八 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	80
实验九 半导体热敏电阻特性的研究	88
实验十 光栅衍射实验	93
实验十一 光的偏振	95
实验十二 单缝衍射实验	97
实验十三 迈克尔逊干涉仪实验	102
实验十四 夫兰克-赫兹实验	111
实验十五 密立根油滴仪实验	118
实验十六 光电效应和普朗克常数的测定	129
实验十七 塞曼效应	139
实验十八 专业级边限振荡器核磁共振实验	150
附录 基本物理常量	166
参考文献	174

第 1 章

绪 论

1.1 物理实验课的作用、目的和地位

物理学是研究物质一般运动规律及物质基本结构的科学,它必须以客观事实为基础,必须依靠观察和实验(实践)。归根结底物理学是一门实验科学,无论物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过今后的科学实验来证实。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。物理实验在物理学的发展过程中起着重要和直接的作用。

实验物理的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的新起点。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。

物理实验课是针对高等理工院校学生进行科学实验基本训练而开设的一门独立的必修基础课程,是理工科学生进入大学后受到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训练的重要基础。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,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。这在培养学生严谨治学态度、活跃创新意识、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。

为了适应 21 世纪科学技术更为迅猛发展的需要,高等理工院校培养的新世纪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。

1.2 物理实验课程的基本要求

本课程的基本要求如下:

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。

a.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。

b.学会处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,还应包括用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。

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强、折射率、电子电荷、普朗克常数、里德堡常数等常用物理量及物性参数的测量,注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

③了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

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掌握实验室常用仪器的性能,并能正确使用。

例如:长度测量仪器、计时仪器、通用示波器、分光计、低频信号发生器、常用电源和光源等仪器。

⑤掌握常用的实验操作技术。

例如:零位调整、光路的共轴调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查和排除,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

1.3 物理实验教学的基本环节

物理实验教学一般可分为实验预习、实验操作与数据记录、完成实验报告3个环节。

(1) 实验预习

实验前要做好预习。预习时,主要阅读实验教材,了解实验目的,清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的理论依据(原理)是什么,使用什么仪器,其仪器性能是什么,如何使用,操作要点及注意事项等,在此基础上,回答好思考题,草拟出操作步骤,设计好数据记录表格。

只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中有目的地观察实验现象,思考问题,减少操作中的忙乱现象,提高学习的主动性。因此,每次实验前,学生必须完成规定的预习内容,一般情况下,教师要检查学生的预习情况,并评定预习成绩,没有预习的学生不许做实验。

(2) 实验操作与数据记录

实验操作是整个实验教学中非常重要的环节,动手能力、分析问题和解决问题等能力的培养主要在具体的实验操作中完成。在这个环节中,一般先由指导教师作重点讲解说明有关注意事项,扼要、简单地讲授内容,具有指导性和启发性,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意那些在操作中容易引起失误的地方。

1) 实验操作中的注意事项

①掌握本次实验的基本知识、基本实验方法和基本技能。

- ②先观察后测量、先粗测后精测。
- ③有严肃的工作态度、严格要求自己、严密观测实验动态。
- ④遵守实验室各项规章制度。

2) 实验数据记录中的注意事项

实验数据记录是计算和分析问题的重要依据和宝贵资料,因此实验者应注意:

①测量的原始数据要整齐的记录在自己设计的数据记录表格中。原始数据是指从仪器上直接读出的数据。

②记录的内容应包括日期、时间、地点、合作者、室温、气压、仪器、简图等。

③实验的原始数据必须由实验老师审核签字才能有效。

(3) 实验报告

实验报告是对实验工作的总结,是交流实验经验、推广实验成果的平台。学会写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺,字迹端正,图表规范,结果正确,讨论认真。实验报告要求在课后独立完成。用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容:

- ①实验项目:表示做什么实验。
- ②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。
- ③实验仪器:包括主要仪器名称、规格、编号。
- ④实验原理:实验设计的依据和思路,包含物理规律、公式等。
- ⑤实验内容与步骤:实验过程,要求简明扼要。

⑥实验数据及结果分析:原始数据记录、数据处理、作图、误差分析(有些实验可不做误差分析)。根据实验目的对实验结果进行计算或作图表示,并对测量结果进行评定,计算不确定度,计算要写出主要的计算内容,要保留计算过程,以便检查。最后清楚写出实验结论。

⑦实验心得:讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释,分析实验误差的主要来源,对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议,简述自己做实验的心得体会,回答实验思考问题。

第 2 章

测量误差和不确定度及实验数据处理

科学研究、产品制造、物质生活、物资流通与质量管理等都离不开测量,测量涉及人类活动的一切领域。在物理学发展史上,对物理现象、状态或过程的各种量的准确测量,是实验物理的关键工作。

在物理实验中,不仅要明确测量对象,选择恰当的测量方法,正确完成测量的各个步骤,还要学习误差理论和实验数据处理的基本概念,能够对多数测量表示出完整的测量结果,包括最佳估值和不确定度。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

(1) 测量的含义

测量是以确定被测对象量值为目的的全部操作,是物理实验的基础。量值一般是由一个数乘以计量单位所表示的特定量的大小。或者说,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,得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位。可测量的量是“现象、物体或物质的可以定性区别和定量确定的属性”,在基础物理实验中所测量的基本上都是物理量。

(2) 测量的分类

①根据获得测量结果的不同方法,测量分为直接测量和间接测量。

a.直接测量:指无须对被测的量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算而可直接得到被测量值的测量。例如,用米尺测长度,用温度计测量温度,用电压表测电压,用天平测物体的质量等都属于直接测量。

b.间接测量:指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系经过计算从而得到被测量值的测量。例如,测量物体的密度时先测出物体的体积和质量,再用公式计算出物体的密度。

②根据测量条件的不同,测量分为等精度测量和非等精度测量。

a.等精度测量:指同一个人,用同样的方法,使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量。应注意的是多次测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不仅仅为重复读数。

b.非等精度测量:指在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,则各次测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量。

事实上,在实验中保持测量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结果影响不大时,仍可视这种测量为等精度测量。等精度的误差分析和数据处理比较容易,所以绝大多数物理实验都采用等精度测量。本书所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的。

③根据被测量对象在测量过程中所处的状态,测量分为静态测量和动态测量。

(3) 测量仪器

测量仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能、掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的基础知识。下面简单介绍仪器精密度、准确度和量程等基本概念。

①仪器精密度:指与仪器的最小分度相当的物理量。仪器的最小分度越小,所测量物理量的位数就越多,仪器精密度就越高。对测量读数最小一位的取值,一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。如具有毫米分度的米尺,其精密度为1 mm,应该估计读出到毫米的十分位;螺旋测微器的精密度为0.01 mm,应该估计读出到毫米的千分位。

②仪器准确度:指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电表仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半,一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半,对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时,其最小的分度数值是受仪器准确度约束的,对不同的仪器其准确度是不一样的,对测量长度的常用仪器米尺、游标卡尺和螺旋测微器它们的仪器准确度依次提高。

③量程:指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称为量程)。测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短,重则损坏仪器。

2.1.2 误差

(1) 误差定义

测量结果 x 和被测量真值 a 之差称为误差,记为 Δx 。

$$\Delta x = x - a \quad (2.1)$$

(2) 真值

在物理实验中,真值是一个理想的概念,它是在有完善定义前提下又无测量缺陷时得到的测量值,或者说真值是某一物理量在一定条件下所具有的客观的、不随测量方法改变的真实数值。除了少数定义量(如水三相点的温度等)的真值已知外,其他量真值几乎都是不知道的。所以一般情况下,真值是未知的,因此误差的概念只具有理论意义。报道测量结果准确程度时不能说“测量结果的误差是多少”。

真值主要包括:

①理论真值:通过理论方法获得的真值。例如,三角形内角之和为 180° ,理想电容或电感

构成的电路,电压与电流的相位差为 90° 等。

②计量学的约定真值:国际计量机构内部约定而确定的真值。例如,7个SI基本单位量的确定,即长度单位为米(m)、时间单位为秒(s)、电流单位为安[培](A)、质量单位为千克(kg)、热力学单位为开[尔文](K)、物质的量单位为摩[尔](mol)、发光强度单位为坎[德拉](cd)。或者说约定真值是一个与真值相近的概念,可以是被测量的公认值、较高准确度仪器测量的值或多次测量的平均值。

③标准器的相对真值:当高一级的标准器的误差小于低一级的标准器或普通计量仪器的误差一定程度后,高一级的标准器的指示值可以作为级别低的仪器的相对真值。

(3) 偏差

在对测量结果的准确程度进行分析时,经常要计算偏差。偏差 ΔX 定义为测量值与约定真值(最佳估值)之差。

$$\Delta X = x - x_0 \quad (2.2)$$

2.1.3 误差的分类

正常测量的误差,按其产生的原因和性质,一般可分为系统误差、随机误差、粗大误差和人员误差四类。

(1) 系统误差

系统误差是指在相同条件下,在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差的分量。根据不同的标准,系统误差有不同的分类方式,常见的有:

1) 根据产生原因进行分类

① 仪器设备、装置误差:

a. 标准器误差:标准器是作为与被测量相比较时提供标准值的器具。例如,标准电池、标准量块、标准电阻等。由于使用条件或制作不够完善等原因,标准器本身也会产生附加误差。

b. 仪器误差:测量仪器是指能将测量转化为可直接观测的指示值或等效信息的计量器具。例如,天平、电桥等比较仪器;温度计、秒表、检流计等指示仪器。仪器设计制造不完善、调节使用不当、老化等都会造成测量误差。

c. 附件误差:为使测量方便进行而使用的各种辅助配件,均属测量附件。例如,开关、导线、电源等各种辅助配件也会引起误差。

② 环境误差:由于各种环境,如温度、湿度、压力、震动、电磁场等,与要求的标准状态不一致而引起的测量装置和被测量本身的变化误差。

③ 方法误差:测量方法或计算方法不完善、不合理等引起的误差。例如,瞬时测量时取样间隔不为零;用单摆测量重力加速度时,公式 $g = 4\pi^2 l/T^2$ 的近似性;用伏安法测电阻时,忽略电表内阻的影响等。

④ 人员误差:由测量人员分辨力有限,感官的生理变化,反应速度及固有习惯等引起的误差。例如,测量滞后与超前、读数倾斜等。

2) 根据系统误差是否确定进行分类

系统误差又可分为已定系统误差和未定系统误差。

① 已定系统误差:指绝对值和符号已经确定,可以估算出的系统误差分量,一般在实验中

通过修正测量数据和采用适当的测量方法(如交换法、补偿法、替换法和异号法等)予以消除。如千分尺的零点修正。

数据处理时,使用已定系统误差对读数予以修正。修正式见式(2.3)

$$\text{已修正的读数} = \text{未修正的读数} - \text{已定系统误差} \quad (2.3)$$

例如,用50分度的游标卡尺测物长的读数是110.52 mm,而该游标卡尺得零点误差是+0.02 mm,那么修正值是

$$110.52 \text{ mm} - 0.02 \text{ mm} = 110.50 \text{ mm}$$

②未定系统误差:指符号和绝对值未能确定的系统误差分量,这种误差一般难以修正,只能估计出其取值范围。

(2) 随机误差

随机误差是指在对同一被测量的多次重复测量中绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差分量。

随机误差产生的主要原因有实验条件和环境因素无规则的起伏变化,引起测量值围绕真值发生涨落的变化。例如:电表轴承的摩擦力变动、操作读数时的视差影响。

从一次测量来看,随机误差是随机的。但当测量次数足够多时,随机误差服从一定的统计规律,可按统计规律对误差进行估计。

应当指出,系统误差是测量过程中某一突出因素变化所引起的,随机误差是测量过程中多种因素微小变化综合引起的,两者不存在绝对的界限,变化的系统误差数值较小时与随机误差的界限不明显。随机误差和系统误差有时可以相互转化。

(3) 粗大误差

粗大误差又称过失误差,它是由于工作人员疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定条件下预期的误差。含有粗大误差的测量值明显偏离被测量的真值,在数据处理时,应首先检验,并将含有粗大误差的数据剔除。

(4) 人员误差

由测量人员分辨力有限,感官的生理变化,反应速度及固有习惯等原因引起的误差。例如,测量滞后与超前、读数倾斜等。

2.1.4 误差的表示形式

(1) 绝对误差

用绝对大小给出的误差定义为绝对误差。其公式见式(2.1),即测量值减去真值,绝对误差是带有单位的数,可正可负。绝对误差反映测量值偏离真值的大小与方向。

(2) 相对误差

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差 E 。用式子表示为

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \quad (2.4)$$

由于一般情况下真值未知,通常用测量值的最佳估值代替真值。相对误差是无量纲数,通常用“%”表示。相对误差可以反映测量的精度高低。

例 2.1 测量两个长度量,测量值分别为 $L_1 = 100.0 \text{ mm}$, $L_2 = 80.0 \text{ mm}$,其测量误差分别为 $\Delta L_1 = 0.8 \text{ mm}$, $\Delta L_2 = 0.7 \text{ mm}$ 。试比较两个测量结果精度的高低。

$$\text{解: } E_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1} \times 100\% = \frac{0.8}{100.0} \times 100\% = 0.8\%$$

$$E_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2} \times 100\% = \frac{0.7}{80.0} \times 100\% = 0.9\%$$

从绝对误差的角度看,第1个量测量值的误差大于第2个量的误差;但从相对误差的角度来看,第1个量的测量精度却高于第2个量。

(3) 引用误差

引用误差定义为绝对误差与测量范围上限(或量程)的比值,即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量范围上限}} \quad (2.5)$$

引用误差通常用“%”表示,主要用于仪器误差的表示,实际是一种简化和使用方便的仪器仪表的相对误差。仪表量程或测量范围内各点的引用误差一般不相同,其中最大的引用误差称为引用误差限,去掉引用误差的正负号及“%”后,称为仪器的准确度等级。电工仪表的准确度等级分别规定为0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5,5.0共7级。

例2.2 检定2.5级,上限为100V的电压表,发现50V分度点的示值误差为2V,并且比其他各点的误差大,试问该电表的 最大引用误差 为多少?该表是否合格?

解:由引用误差定义可知,该表的 最大引用误差 为 $\frac{2\text{V}}{100\text{V}} \times 100\% = 2\%$ 。根据准确度等级的含义, $2\% < 2.5\%$,显然该电表合格。

2.1.5 描述测量结果的3个名词

常用的描述测量结果的3个名词有:

- ①精密度:表示测量数据集中的程度。它反映随机误差的大小,与系统误差无关。
- ②准确度:表示测量值与真值符合的程度。它反映了系统误差的大小,与随机误差无关。
- ③精确度:对测量数据的精密度与准确度的综合评定。测量的精确度高,说明测量数据比较集中而且接近真值,即系统误差与随机误差都比较小。

通过图2.1打靶弹着点的分布图,可以形象地说明上述这3个概念。图(a)表示精密度高,准确度低;图(b)表示准确度高,精密度低;图(c)表示准确度与精密度都高,即精确度高,或精度高。

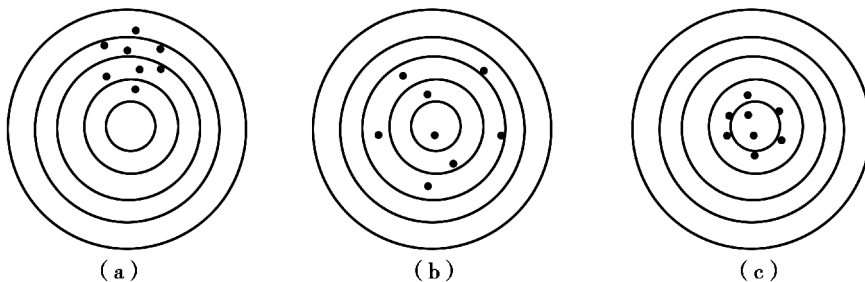


图 2.1 打靶弹着点的分布

2.1.6 随机误差的分布与特点

由于随机误差的存在,实验数据会围绕真值有所起伏,对某一次测量,这种起伏是不可预测的,若进行多次测量,就会发现,实验数据常满足一定的统计分布规律,可用一定的分布函数来描述。物理实验中常遇到的典型分布有正态分布和 t 分布。在实验中若影响测量结果的因素很多很细微且相互独立,则当测量次数无限时,实验数据服从正态分布;当测量次数有限时,实验数据服从 t 分布。

(1) 正态分布(高斯分布)

1) 正态分布的公式

服从正态分布的随机误差的概率密度函数,见式(2.6)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \quad (2.6)$$

正态分布概率密度曲线(图 2.2)具有的特点是:

- 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:绝对值很大的误差出现的概率很小,且不超过一定的界限。 $|3\sigma|$ 为误差界限。
- ④抵偿性:误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

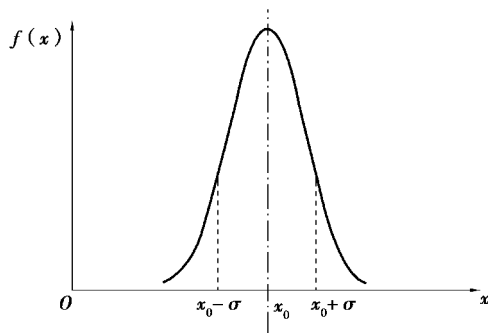


图 2.2 正态分布概率密度曲线

2) 标准差 σ 的意义

标准差 σ 是指对称的正态分布概率密度曲线上两个拐点间距离的一半。 σ 的大小反映了测量值与真值的偏离程度,或各测量值之间的离散程度。由图 2.3 可见,随着 σ 的增大曲线趋于平坦,峰值高度降低,对应着测量值间的差别增大,即离散程度增大。

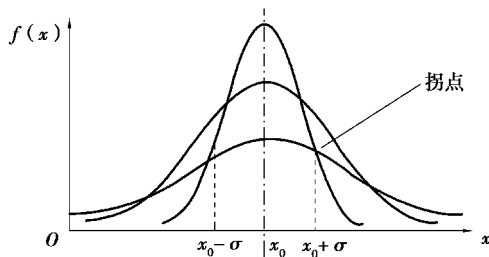


图 2.3 不同标准差的正态分布概率密度曲线

概率密度曲线下的面积是概率。对于正态分布,计算可得曲线下两拐点间的面积约为 68.3%。这一数值的意义是:在等精度测量的一系列测量值中,任何一次测量值落在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 的概率为 68.3%,任何一次测量值的误差落在 $-\sigma \sim +\sigma$ 的概率为 68.3%。通过计算还可得知,曲线下在 $-2\sigma \sim +2\sigma$ 的面积约为 95%,曲线下在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 的面积约为 99.7%。这两个数值的概率意义与前相似,即任一次测量值落在 $(\bar{x}-2\sigma) \sim (\bar{x}+2\sigma)$ 的概率为 95%,或任一次测量值的误差落在 $-2\sigma \sim +2\sigma$ 的概率为 95%。图 2.3 中 x_0 是峰值的横坐标,对应着最大概率密度。峰值的位置 x_0 是测量次数 $n \rightarrow \infty$ 的平均值。很明显,测量偏差大于 3σ 的概率仅为 0.3%,对于有限次的测量,这种可能性微乎其微,因此可以认为是测量失误,该测量值是“坏值”,应予以剔除。这就是很有用的 3σ 判断。

(2) t 分布

测量次数趋于无穷只是一种理论情况,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,称为 t 分布,也称学生分布。正态分布就是 $t \rightarrow \infty$ 时的特例。当测量次数只有几次时,正态分布算出的偏差值比 t 分布算出的结果偏小一些,需要查表修正。本书约定,只要是多次测量,随机误差按 t 分布进行估算。

t 分布有如下特征:

①以 0 为中心,左右对称的单峰分布。

② t 分布是一簇曲线,其形态变化与 n (确切地说与自由度 ν) 大小有关。自由度 ν 越小, t 分布曲线越低平;自由度 ν 越大, t 分布曲线越接近标准正态分布曲线,如图 2.4 所示。

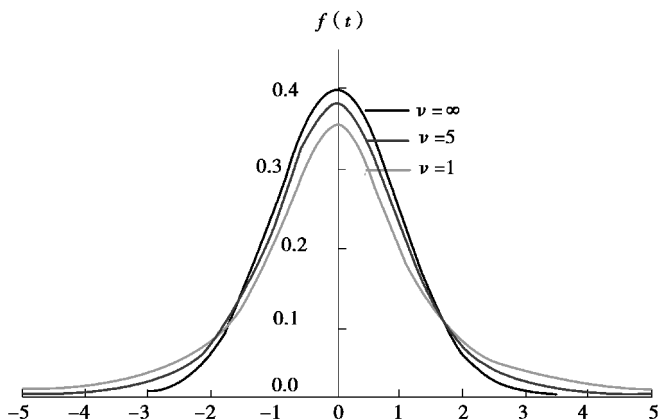


图 2.4 t 分布曲线图

2.2 测量结果的表示与最佳估值

测量与误差形影相随,一般情况下误差不可能确切知道。为了准确地表达测量结果,在报道被测量数值的同时还应标示出测量结果的可信赖程度。

2.2.1 测量结果的表示

通常把测量结果写成简洁形式,见式(2.7)

$$x = \bar{x} \pm \sigma (\text{单位}) \quad (2.7)$$

式中, x 代表被测量, \bar{x} 是被测量真值的最佳估值, σ 是测量结果的不确定度^①, 用于表示测量结果的准确程度。由式(2.7)可知, 表示测量结果有 3 个要素: 最佳估值、不确定度与单位。三者缺一则不能准确地说明测量结果(在通常情况下, 甚至还应说明 σ 对应的概率)。

测量不确定度是衡量测量质量的一个重要指标。测量结果的不确定度划出了最佳估值 \bar{x} 附近的一个范围, 真值以一定概率落在其中, 换句话说, 最佳估值与真值之差(即误差)以一定概率落在 $-\sigma \sim +\sigma$ 。不确定度越小, 标志着测量的可信赖程度越高; 不确定度越大, 标志着测量的可信赖程度越低。

式(2.7)的意义是被测量的真值在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 的概率约为 68%。也可以说, 测量结果的真值落在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 的概率约为 68%。

这里要特别强调, 不要认为真值一定在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 之间, 同样也不能认为误差一定在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间。

2.2.2 最佳估值 \bar{x} 的计算

(1) 直接测量量的最佳估值

在直接测量中, 对同一物理量都应当进行多次测量, 以减小随机误差。若进行了 n 次测量, 多次测量值的平均值就是对真值的最佳估值

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.8)$$

如果已定系统误差 x_0 , 那么最佳估值为

$$x = \bar{x} - x_0 \quad (2.9)$$

粗略地说, 最佳估值是指最可能接近被测量真值的值。但是, 不应将其理解为是最接近真值的值, “最佳估值”一词是数理统计的语言。即使第 i 次测量出现: $|x_i - \text{真值}| < |\bar{x} - \text{真值}|$, \bar{x} 是最佳估值的结论仍然是正确的。

实验中, 有时也只进行 1 次测量(如在测铜丝材料杨氏模量实验中, 对钢丝长度就只测 1 次), 条件是随机误差远小于未定系统误差。这一条件暗含着多次测量的结果基本相同。在这种情况下, 分析测量结果时, 尽管只进行 1 次测量, 应认为测量了无穷次, 测量值全同。

(2) 间接测量量的最佳估值

设间接测量量为 N , 它有 k 个直接测量量 x_1, x_2, \cdots, x_k , 其函数关系见式(2.10)

$$N = N(x_1, x_2, \cdots, x_k) \quad (2.10)$$

那么, 间接测量量的最佳估值为

$$\bar{N} = N(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_k) \quad (2.11)$$

式(2.11)表明, 只需要将直接测量量的最佳估值代入函数表达式, 即可算出间接测量量的最佳估值。

例如, 用单摆测重力加速度时, 重力加速度 g 与摆长 l 及周期 T 之间的函数关系如下

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

^① 为了教学上的简便, 本书只用标准不确定度表示测量结果的准确程度, 对应的概率是 0.68。