



北京市高等教育精品教材立项项目

蒋达娅 肖井华 朱洪波 张雨田 主编

大学物理实验教程

PHYSICS EXPERIMENT

(第3版)



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



北京市高等教育精品教材立项项目

大学物理实验教程

(第3版)

蒋达娅 肖井华 朱洪波 张雨田 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本教材是在北京邮电大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部关于开展高等学校实验教学示范中心建设的有关精神以及教学指导委员会 2008 年发布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》重新修订的。全书结构紧凑,实验内容丰富,有不少来源于大学生自主创新活动的新颖实验内容。教材按照基本物理实验、综合和近代物理实验、设计性与研究性实验组织分层次教学,突出物理实验的综合应用。书中有不少反映新的实验技术和实验仪器的内容,具有较好的可读性和实用性。本书可以作为高等院校普通物理实验教材或教学参考书,也可供高等函授院校选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/蒋达娅等主编.--3 版.--北京:北京邮电大学出版社,2011.7

ISBN 978-7-5635-2679-6

I. ①大… II. ①蒋… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 142019 号

书 名: 大学物理实验教程(第 3 版)

著作责任者: 蒋达娅 肖井华 朱洪波 张雨田 主编

责任编辑: 孔 玥

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京联兴华印刷厂

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 22

字 数: 446 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2007 年 7 月第 2 版 2011 年 7 月第 3 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2679-6

定 价: 38.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 •

前 言

本教材是在北京邮电大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部关于开展高等学校实验教学示范中心建设的有关精神以及教学指导委员会 2008 年发布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》重新修订的。

在本教材的编写中力求反映当前主流的实验理论、新的实验技术和方法,如超声波探伤,核磁共振,电光效应,液晶的物理特性等实验。同时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,在一些传统的老实验中引入了新的测试技术,如利用 CCD 测量光的衍射条纹,利用数字示波器对数据进行采集和处理,利用 LabVIEW 自主构建实验仪器等。而音频信号的光纤传输,LED 的物理特性和电光调制,混沌在通信中的应用等实验内容,则适应了当前社会信息科学技术发展的需要。特别是在这次修订中,我们更新了部分实验内容,同时引入了多个大学生自主创新活动中涌现出来的优秀实验内容。

实验内容和课程教学体系的改革以及新教材的使用均应与使用的教学方法和教学模式相配套。利用本教材可以进行层次化的开放教学。基础物理实验主要对学生进行实验的基本知识,基本方法,基本技能的训练,大部分的实验内容学生可以自学。综合与近代物理、设计性与研究性实验则可以尝试进行不同方式的开放教学。

实验课的教材和教学,离不开实验室的建设和发展,是一项集体性的工作。在此,衷心感谢我校多年来从事物理实验教学的教师和技术人员的支持、帮助与贡献。

在本教材的编写过程中陈以方、李海红、赵晓红、杨胡江、代琼琳、王鑫、程洪艳、尚玉峰、符秀丽、杨江萍、李丽娟等老师参与了部分章节的编写和修改,在此向他们表示特别的感谢。

编 者

目 录

绪 论	1
0.1 物理实验课的地位、作用和任务	1
0.2 如何上好物理实验课	2
0.3 实验内容的安排	3
第 1 章 测量不确定度与数据处理方法	4
1.1 测量误差	4
1.2 测量不确定度和结果的表达	9
1.3 有效数字及其运算法则	14
1.4 常用数据处理方法	17
第 2 章 基本仪器与基本测量方法	22
2.1 物理实验的基本仪器	22
2.2 物理实验中的传感器	32
2.3 物理实验中的基本测量方法	35
第 3 章 基础物理实验	42
实验 3.1 示波器的使用	42
实验 3.2 空气中的声速测定	49
实验 3.3 惠斯通电桥测量中值电阻	54
实验 3.4 开尔文电桥测量低值电阻	59
实验 3.5 霍尔元件测磁场	63
实验 3.6 集成霍尔传感器与简谐振动	69
实验 3.7 灵敏电流计的研究	73
实验 3.8 气体比热容比的测定	80
实验 3.9 导热系数的测定	83
实验 3.10 刚体转动惯量的测定	86

实验 3.11	用玻尔共振仪研究受迫振动	90
实验 3.12	液压拉伸法测量弹性模量	94
实验 3.13	共振法测量弹性模量	98
实验 3.14	组合透镜实验	102
实验 3.15	分光计的调整和使用	108
实验 3.16	光的等厚干涉	116
实验 3.17	衍射光栅	123
实验 3.18	光的偏振	126
实验 3.19	耦合摆的研究	133
实验 3.20	用集成开关型霍尔传感器测量磁阻尼系数和动摩擦系数	137
实验 3.21	旋转液体综合实验	140
第 4 章	综合与近代物理实验	146
实验 4.1	半导体 PN 结的物理特性及玻耳兹曼常数的测定	146
实验 4.2	半导体温度计的研究	150
实验 4.3	硅光电池的光照特性	154
实验 4.4	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	158
实验 4.5	法布里-珀罗干涉仪	166
实验 4.6	用 CCD 光强分布测量仪观测光的夫琅和费衍射	171
实验 4.7	微波的布拉格衍射	179
实验 4.8	用密立根油滴仪测量电子电量	184
实验 4.9	用非线性电路研究混沌现象	189
实验 4.10	光电效应	194
实验 4.11	氢原子光谱	199
实验 4.12	弗兰克-赫兹实验	202
实验 4.13	核磁共振	206
实验 4.14	音频信号光纤传输实验	213
实验 4.15	超声波探测实验	219
实验 4.16	晶体的电光效应与信号传输	228
实验 4.17	法拉第旋光效应	237
实验 4.18	液晶电光特性及应用	242
实验 4.18.1	液晶的物理特性	243
实验 4.18.2	液晶的电光特性及应用	246
第 5 章	设计性与研究性实验	250
实验 5.1	LabVIEW 入门和简单测量	250

实验 5.1.1	LED 伏安特性曲线的自动测量	253
实验 5.1.2	指脉的测量	255
实验 5.2	基于 LabVIEW 的设计性实验	257
实验 5.2.1	磁滞回线的测量	257
实验 5.2.2	静电场描绘	260
实验 5.2.3	基于 LabVIEW 的 RLC 电路频率特性实验	263
实验 5.3	金属比热容的测定	266
实验 5.4	电阻应变片压力传感器特性及应用	269
实验 5.5	光敏电阻的特性与光开关的设计	272
实验 5.6	交流谐振电路和选频电路	276
实验 5.6.1	RC, RL 电路幅频和相频特性	276
实验 5.6.2	RC 电路的充放电特性	278
实验 5.6.3	RLC 串联和并联谐振电路	279
实验 5.6.4	方波的傅里叶级数展开	281
实验 5.7	交流电桥及其应用	283
实验 5.7.1	交流电桥测电感和电容	283
实验 5.7.2	交流电桥的应用——消侧音电路	285
实验 5.7.3	整流滤波电路	286
实验 5.8	利用超声光栅测液体中的声速	288
实验 5.9	超声换能器输出波形的研究	291
实验 5.10	用 LED 研究光的色度	293
实验 5.11	LED 的物理特性和电光调制	298
实验 5.12	扭摆振动现象的研究	303
实验 5.13	对驱动耦合摆的研究	307
实验 5.14	相位差测量声速与超声测距	310
实验 5.15	毛细管的非定域干涉研究	313
实验 5.16	混沌电路及其在加密通信中的应用	316
第 6 章	计算机处理实验数据方法简介	325
6.1	用 Excel 处理实验数据和作图	325
6.2	Matlab 处理实验数据应用	332
6.3	计算机仿真实验	335
附表		338
参考文献		343

绪 论

0.1 物理实验课的地位、作用和任务

1. 前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。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。

2. 课程的地位和作用

物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、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。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、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。

3. 课程的具体任务

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公共财产的优良品德。

4. 能力培养的基本要求

(1) 独立实验的能力——能够阅读实验教材、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;培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——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。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

0.2 如何上好物理实验课

为了达到实验课的教学目的,除了明确物理实验课程的地位、作用和任务外,还要正确处理实验和理论的关系,重视科学实验训练与实验过程,并注意做到以下几点。

(1) 做好预习

在规定的时间内熟悉仪器的使用并完成测量任务,对大多数学生来说不是一件轻松的事。实验预习的好坏是能否做好物理实验的关键。做好预习,一方面可以避免毁坏仪器和出现安全问题,另一方面能够在课上高质量地完成实验,提高学习的效率。

(2) 独立完成实验操作

学生一定要克服依赖心理,尽可能独立地完成实验。发现问题首先要独立地进行思考,实在解决不了再求助教师。教师的指导只是启发式的,我们不提倡“手把手”地“包教包会”。学生通过实验培养出独立工作的能力是本课程的任务之一。

(3) 认真处理数据,高质量地完成实验报告

数据处理的过程是发现物理规律和验证物理定律的过程。学生应本着科学的精神,如实地记录数据,认真地处理数据。对“不理想”的数据,应分析其产生的原因并在报告上特殊注明,不能简单地删除了事。一些奇异的实验结果,其背后很可能隐藏着重要的物理规律。

要善于对实验结果进行总结和分析,看看自己能否提出一些改进的意见。创新能力往往是在平时一点一滴积极的思考中逐渐形成的。

实验报告是对整个实验的记录和总结。一份好的实验报告应简明、完整、准确地给出实验条件(仪器及环境)、原理、过程、现象、实验数据及数据处理等。本课程规定:在没有特殊说明的情况下,均需要列表处理数据。练习写好实验报告的目的就是为今后写好科研报告打下基础。

(4) 理解和遵守实验室的各项规定

实验课和理论课的重要区别之一是它不能在宿舍或自习室通过自学完成。学生要在实验室里和各种实验仪器打交道。为了保护公共财产,防止出现安全事故,实验室做出了相应的规定和要求,希望学生能理解并自觉遵守。

0.3 实验内容的安排

实验内容分为基础物理实验,综合与近代物理实验及设计研究性实验三大部分。

1. 基础物理实验

物理实验是进入大学后的第一门实践课程,对于初次或是接触实验不多的学生,会碰到很多的困难,为了帮助学生尽快地进入角色,我们安排了基础实验内容,它是在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则由浅入深。主要为基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能的训练和基本测量方法与误差分析等,涉及力、热、电、光等各个物理学科,是大学物理实验的入门实验。在教学安排上精选了一些优秀的物理实验,采取组合实验的教学方式,每个组合包括 1~2 个实验。例如,将霍尔效应和集成霍尔传感器与简谐振动这两个实验作为一个组合,通过实验既可以学习霍尔效应这一基本物理原理在磁场测量中的直接应用,同时也学习了利用霍尔效应制作的霍尔器件在其他物理测量中的应用,达到了 1+1 大于 2 的效果。通过基本实验,主要学习物理实验的基本知识、基本实验方法和实验技能。基本物理实验以小班为单位,在教师的指导下,由学生独立进行实验。

2. 综合和近代物理实验

在实验项目的选择上,我们注重物理思想和物理方法的典型性,同时考虑实验内容、测试手段的时代性,贴近现代科学技术的发展,贴近科技研究前沿。例如,核磁共振等获诺贝尔物理学实验;超声波探伤、音频信号的光纤传输等一些应用技术性实验。目的是让学生及时接触物理学发展中的一些具有里程碑意义的进程,同时又了解物理学在实际工程技术中的应用。学生通过对各领域有重要影响的物理实验的学习和实践,提高科技视角。

这部分实验采用开放的教学方式,学生可以根据自己的专业和爱好选择实验内容,并在教师的指导下独立完成。通过这一阶段的学习,对知识的融会贯通、综合能力将上升到一个新的层次。

3. 设计性和研究性实验

设计性和研究性实验注重培养学生提出问题,分析问题和解决问题的能力,对学生开展创新教育。

实验内容包括多个物理学在信息技术中成功应用的典型例子:混沌与保密通信、LED 的色度学研究、LED 的电光调制、超声波测距等。同时引入了许多新的测试手段,像数字示波器、数据采集卡、CCD,以及美国国家仪器公司开发的图形化的虚拟实验开发软件 LabVIEW,为学生自主开展各种实验创新活动创造了一个良好的操作平台,极大地丰富了物理学研究手段,也希望更多的学生能够利用这一平台,充分发挥自己的聪明和才智,创造出更多的具有开创性的工作。

第 1 章 测量不确定度与数据处理方法

本章将具体介绍大学物理实验所必需的基础知识,包括测量误差与不确定度的基本概念,实验数据的基本处理方法。

1.1 测量误差

误差理论是物理实验的重要数学工具。在物理实验中经常要遇到许多综合的实验技术,为了获得准确的测量结果,需要理解实验设计的原理,掌握好误差理论,才能有效地进行实验测量和数据处理,并最终对实验结果做出正确的评价和分析。本节将介绍测量误差和不确定度的一些基本概念。

1. 测量

物理实验离不开各种测量。测量的内容大到日、月、星辰,小到分子、原子、粒子。可以说,测量是进行科学实验必不可少,且极其重要的一环。

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是将待测物理量直接与认定为计量标准的同类量进行比较,如用米尺测量长度、用天平称质量、用万用表测量电压等。而间接测量则是指按照一定的函数关系,由一个或多个直接测量结果计算出另一个物理量。例如,测量电阻,要先测出电阻两端的电压和流过电阻的电流,再用公式计算出电阻,这就属于间接测量。物理实验中的大多数测量都是间接测量。

测量的数据不同于普通的数值,它是由数值和单位两部分组成的。数值有了单位,才具有特定的物理意义,因此测量所得的值应包括数值和单位,缺一不可。

2. 误差

对某一物理量进行测量时,由于受到测量环境、方法、仪器以及不同观测者等诸多因素的影响,测量结果与被观测量的客观真实值(真值)存在一定的偏离,也就是说存在误差(error)。测量误差可以用绝对误差,也可以用相对误差来表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (1.1.1)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \quad (1.1.2)$$

真值(true value)是指被观测的量所具有的真实值的大小。一个量的真值是一个理想的概念,一般情况下是不知道的,但在某些特定的情况下,真值又是可知的。例如,三角

形的三个内角和为 180° ，一个圆周角为 360° 等。为了使用上的需要，在实际测量中，常用被测量的实际值来代替真值。

由于测量总存在一定的误差，为此必须分析测量中可能产生的各种误差因素，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差给予正确的评价。一个优秀的实验者，应该根据实验的具体要求和误差限度来确定合理的测量方案以及合适的测量仪器，能够在实验的要求下，以最经济的方法取得最佳的实验结果。

3. 误差的分类

按照误差的基本性质和特点，可以把它分为 3 大类：系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差(systematic error)

系统误差指的是在重复条件下，多次测量同一物理量时，测量结果对真值的偏离总是相同的，即误差的大小和符号始终保持恒定或按照一定的规律变化。系统误差的特征是它的确性。

(2) 随机误差(random error)

随机误差是指在重复条件下，对同一被测量进行足够多次测量时，误差的大小、符号的正负是随机的。随机误差的特点是单个具有随机性，而总体服从统计分布规律，常见的统计分布有正态分布、 t 分布、均匀分布等。

(3) 粗大误差

粗大误差实际上是一种测量过程中的人为过失，并不属于误差的范畴。对于这种由于测量过程中人为过失而产生的错误数据应当予以删除。

4. 测量结果的评价

评价测量结果，反映测量误差大小，常用到精密度、正确度和准确度 3 个概念。

精密度反映随机误差大小的程度，它是对测量结果的重复性的评价。精密度高是指测量的重复性好，各次测量值的分布密集，随机误差小。但是，精密度不能反映系统误差的大小。

正确度反映系统误差大小的程度。正确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较小，测量的系统误差小。但是正确度不能确定数据分散的情况，即不能反映随机误差的大小。

准确度反映系统误差与随机误差综合大小的程度。准确度高是指测量结果既精密又正确，即随机误差与系统误差均小。

现以射击打靶的结果为例说明以上 3 个术语的意义，如图 1.1.1 所示。

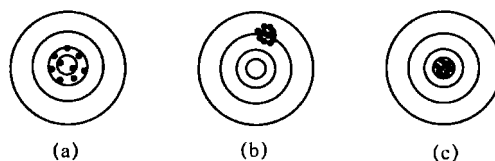


图 1.1.1 正确度、精密度和准确度

(a)正确度好而精密度低,即系统误差小,而随机误差大。(b)精密度高而正确度低,即系统误差大而随机误差小。(c)准确度高,系统误差和随机误差都小。

5. 发现和消除系统误差

(1) 如何发现系统误差

物理实验中的系统误差通常是很难发现的,但通过长期科学实验的实践和经验的总结,我们总结出一些发现系统误差的办法,它们可以归纳如下。

① 理论分析法

分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方,检查理论公式所要求的条件是否满足,所用仪器是否存在缺陷,以及实验人员的素质和技术水平是否存在造成误差的因素,从而得到有关系统误差是否存在的信息。

② 实践对比法

采用不同的方法测量同一物理量,让不同的人员测量同样的物理量或使用不同的仪器测量同一物理量,通过对比测量结果的数值来发现系统误差的存在。

③ 数据分析法

分析测量结果,若结果不服从统计分布,则说明测量存在系统误差。

(2) 消除系统误差的方法

在实验条件稳定,同时系统误差可以掌握时,常用 3 种方法消除已知系统误差,即加修正值、消去误差源或采用适当的测量方法。下面分别介绍这 3 种方法。

① 测量结果加修正值

- 由仪器、仪表不准确产生的误差,可以通过与更高级别的仪器、仪表做比较,而得到相应的修正值;

- 由理论上、公式上的不准确而产生的误差,可以通过理论分析,导出修正公式。

② 消去误差源

包括仪表使用前零点的校准,仪表使用温度的校准,以及保证仪器装置和测量环境满足规定的条件等。

③ 采用适当的测量方法

采用适当的测量方法,对消除实际测量中的系统误差具有重要的现实意义。常用的测量方法有异号法、交换法、替代法、对称法。比如天平悬臂长度不一致的系统误差就可以用交换法来消除;将具有重量 x 的被称量物体放在天平的左、右托盘各称一次,分别称重为 p_1 和 p_2 ,根据力学原理,可以算出物体的实际重量为 $\sqrt{p_1 p_2}$ 。对称法常用来消除线性系统误差。半周期偶数法则可以消除周期性的系统误差。

6. 随机误差的统计处理

随机误差的分布服从统计规律。由误差理论得知,物理实验中相当多的随机误差满

足正态分布,如图 1.1.2 所示。下面讨论正态分布的一些特性。正态分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.3)$$

其中

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n}, \sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - a)^2}{n}}$$

式中, a 和 σ 是反映测量值 x 这个随机变量分布特征的重要参数, a 表示 x 出现几率最大的值, 是测量次数趋向无穷时被测量的算术平均值。在消除了系统误差后, a 为真值。 σ 称为标准差, 是反映测量值离散程度的参数: σ 值小, 测量值精密度高, 随机误差小; σ 值大, 测量值精密度低, 随机误差大。服从正态分布的随机误差具有下列特点:

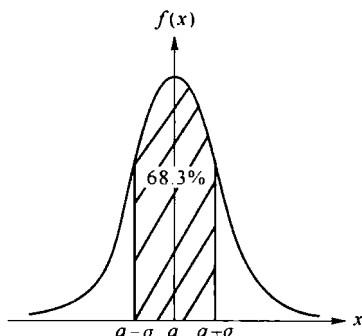


图 1.1.2 正态分布曲线

① 单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大;

② 对称性——大小相等而符号相反的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的限度;

④ 抵偿性——误差的算术平均值随测量次数 n 的增加而趋于零。

由概率密度的定义可知 $p = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ 表示随机变量 x 在区间 $[x_1, x_2]$ 出现的概率, 称为置信概率, 则 x 出现在 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 之间的概率为

$$p = \int_{a-\sigma}^{a+\sigma} f(x) dx = 0.683 \quad (1.1.4)$$

这个结果说明, 对满足正态分布的物理量作任何一次测量, 其结果有 68.3% 的可能性落在区间 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 内。我们把置信概率对应的区间称为置信区间。如果扩大置信区间, 置信概率也将提高。如果置信区间扩大到 $[a - 2\sigma, a + 2\sigma]$ 和 $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$, 可以分别得到:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-2\sigma}^{a+2\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.954, \quad p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-3\sigma}^{a+3\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.997$$

物理实验中常将 3σ 作为判定数据异常的标准, 3σ 称为极限误差。如果某测量值 $|x - a| \geq 3\sigma$, 则需要考虑测量过程是否存在异常, 并将该数据从实验结果中删除。

7. 多次测量的算术平均值

尽管一个物理量的真值是客观存在的, 但要得到真值是不现实的。由随机误差的统计分析可以证明, 当测量次数 n 趋近于无穷时, 算术平均值 $\bar{x}$ 是接近于真值的最佳值。假设对物理量 x 进行一系列等精度测量得到的结果为 $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$, 则 x 的算术平均值可以表示为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1.1.5)$$

由于每次测量的误差为 $\Delta x_i = x_i - a$, 因此误差和可以表示为

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - na \quad (1.1.6)$$

若将式(1.1.6)的两边同除以 n , 则当 $n \rightarrow \infty$ 时, 等号的左边趋近于零(根据正态分布的特点④), 因此有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} x_i = a \quad (1.1.7)$$

该式说明当测量次数无穷多时, 测量结果可以不受随机误差的影响或所受影响很小因此可以忽略。这就是为什么测量结果的算术平均值可以认为是最接近真值的理论依据。在实际测量中, 由于只能进行有限次的测量, 因此将算术平均值作为测量结果的近真值, 即测量结果的最佳估计。

8. 标准偏差

在物理实验中, 测量次数总是有限的, 而且真值也不可知, 因此不能利用式(1.1.3)计算出标准差 σ , 只能用其他方法对 σ 的大小进行估算。假设共进行了 n 次测量, 测量值 $x_1, \dots, x_n$ 称为一个测量列, 每一次测量值与平均值之差称为残差, 即

$$V_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

显然, 这些残差有正有负, 有大有小。通常用“方均根”法对它们进行统计, 得到的结果就是该测量列任一次测量的标准偏差, 用 $s(x)$ 表示为

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.1.8)$$

这个公式又称为贝塞尔公式。标准偏差 $s(x)$ 是反映该测量列离散性的参数, 可以用它表示测量值的精密度。 $s(x)$ 小表示精密度高, 测量值的分布密集, 随机误差小; $s(x)$ 大表示精密度低, 测量值的分布很分散, 随机误差大。注意, $s(x)$ 并不是严格意义下的标准差 σ , 而是它的估计值。其统计意义为: 被测量真值落在区间 $(x - s(x), x + s(x))$ 的概率应小于 68.3%, 只有测量次数较多时, 这一概率才接近 68.3%。

如果在完全相同的条件下, 多次多组进行重复测量, 可以得到许多个测量列, 每个测量列的算术平均值不尽相同, 于是就可以得到一组平均值 $(\bar{x})_1, (\bar{x})_2, \dots, (\bar{x})_j$, 这表明算术平均值也是一个随机变量, 算术平均值本身也具有离散性, 且仍然服从正态分布。由误差理论可以证明: 平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $s(\bar{x})$ 是测量列的 n 次测量中任意一次测量值标准偏差的 $1/\sqrt{n}$ 倍, 即

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.9)$$

由此可见,平均值的标准偏差可以通过 n 次测量中任意一次测量值的标准偏差计算得出,显然 $s(\bar{x})$ 小于 $s(x)$,说明平均值的离散程度要小于单个测量值的离散程度。增加测量次数可以减小平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$,提高测量的精密度,但是单纯凭增加测量次数来提高精密度的作用是有限的。 $s(\bar{x})$ 的统计意义为:被测量真值落在区间 $[\bar{x} - s(\bar{x}), \bar{x} + s(\bar{x})]$ 的概率约为 68.3%。

当测量次数无穷多或足够多时,测量值的误差分布才接近正态分布,但是当测量次数较少时(例如,少于 10 次,物理实验教学中一般取 $n=6\sim 10$ 次),测量值的误差分布将明显偏离正态分布,而遵从 t 分布,又称为学生分布。 t 分布曲线与正态分布曲线的形状类似,但是 t 分布曲线的峰值低于正态分布;而且 t 分布曲线上部较窄,下部较宽,如图 1.1.3 所示。 t 分布时,置信区间 $[\bar{x} - s(\bar{x}), \bar{x} + s(\bar{x})]$ 对应的置信概率达不到 0.683,若保持置信概率不变,则应当扩大置信区间。在这种情况下,如果置信概率是 p ,其对应的置信区间一般为 $[\bar{x} - t_p s(\bar{x}), \bar{x} + t_p s(\bar{x})]$,其中系数 t_p 称为 t 因子,其数值既与测量次数 n 有关,又与置信概率 p 有关。物理实验中,为了方便起见,统一取置信概率为 0.95。表 1.1.1 给出了 $t_{0.95}$ 和 $t_{0.95}/\sqrt{n}$ 的值。

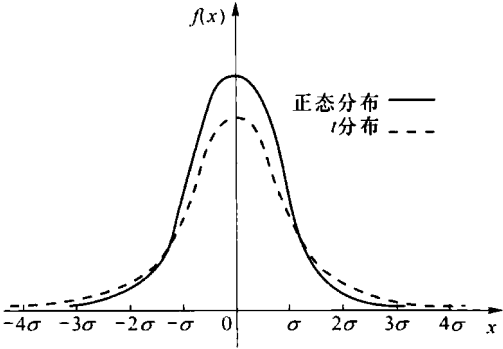


图 1.1.3 t 分布与正态分布曲线

表 1.1.1 t 参数

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	≥ 100
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	≤ 1.97
$t_{0.95}/\sqrt{n}$	2.48	1.59	1.204	1.05	0.926	0.834	0.770	0.715	0.553	0.467	≤ 0.139

1.2 测量不确定度和结果的表达

不确定度是建立在误差理论上,用来定量评定测量结果可信赖程度的一个重要指标。

1. 不确定度的分类

不确定度按照测量者处理数据时采用方式的不同分为 A 类和 B 类不确定度。测量者采用统计方法评定的不确定度称为 A 类不确定度;而测量者采用非统计方法评定的不确定度称为 B 类不确定度。下面分别介绍 A 类和 B 类不确定度。

(1) 采用统计方法评定的 A 类不确定度

不确定度的 A 类分量用 $u_A(x)$ 表示。物理实验中 $u_A(x)$ 一般用多次测量平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 与 t 因子 t_p 的乘积来估算,即

$$u_A(x) = t_p s(\bar{x}) \quad (1.2.1)$$

式中, t 因子 t_p 是与测量次数 n 和对应的置信概率 p 有关,当置信概率为 $p=0.95$,测量次数 $n=6$ 时,从表 1.1.1 中可以查到 $t_{0.95}/\sqrt{n} \approx 1$,则有

$$u_A(x) = s(x) \quad (1.2.2)$$

即在置信概率为 0.95 的前提下,测量次数 $n=6$,A 类不确定度可以直接用测量值的标准偏差 $s(x)$ 估算。为方便起见,本课程规定,在未加说明时,取置信概率 $p=0.95$ 。

(2) 采用非统计方法评定的 B 类不确定度

B 类不确定度的评定不用统计分析法,它可以来自多方面的信息,但在物理实验中,B 类不确定度主要由仪器误差引起,因此 B 类不确定度常采用仪器的最大误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 来估算。 $\Delta_{\text{仪}}$ 是指在正确使用仪器的条件下,仪器示值和被测量的真值之间可能产生的最大误差,某些实验室常用仪器的最大误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 在表 1.2.1 给出。有些测量中,由于条件限制,实际误差远大于铭牌给出的仪器最大误差限,这时应由实验室根据经验给出 $\Delta_{\text{仪}}$ 。不确定度的 B 类分量用 $u_B(x)$ 表示,即

$$u_B(x) = \Delta_{\text{仪}} \quad (1.2.3)$$

表 1.2.1 某些常用仪器的最大误差限

仪器名称	量程	最小分度值	最大误差限
螺旋测微仪	25 mm	0.01 mm	± 0.004 mm
钢卷尺	1 m	1 mm	± 0.8 mm 或由实验室给出
	2 m	1 mm	± 1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	± 0.02 mm
	300 mm	0.05 mm	± 0.05 mm
电表(0.5)级			$0.5\% \times \text{量程}$
电表(0.2)级			$0.2\% \times \text{量程}$
米尺(学生尺)		1 mm	最小刻度的一半 0.5 mm

2. 合成不确定度与测量结果的表达

合成不确定度用 $u(x)$ 表示, $u(x)$ 由 A 类不确定度 $u_A(x)$ 和 B 类不确定度 $u_B(x)$ 采用方和根合成方式得到:

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (1.2.4)$$

完整的测量结果应给出被测量的最佳估计值,同时还要给出测量的合成不确定度,测量结果应写成如下的标准形式:

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm u(x) \\ u_r = \frac{u(x)}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} \quad (1.2.5)$$