

大学物理实验

张怀作 主编



科学出版社

大学物理实验

张怀作 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是四川省精品课程配套教材,是依据教育部物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010版)》,在编者多年教学经验的基础上,结合目前学生特点编写而成的.内容包括测量不确定度与数据处理基础知识、基础实验、近代物理与综合实验,以及设计性实验.

本书适合工科各专业学生学习使用,也可作为相关人员的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张怀作主编. —北京:科学出版社,2011
ISBN 978-7-03-031600-4

I. ①大… II. ①张… 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(2011)第 115061 号

责任编辑:王剑虹 任俊红 唐保军 / 责任校对:刘亚崎
责任印制:张克忠 / 封面设计:华路天然工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—5 000 字数:330 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是参考教育部物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)》,在我们的“物理实验课程改革与人才培养的研究与实践”等系列教学改革项目研究基础上,结合多年教学实践经验,为一般工科院校物理实验教学编写的教材。

按照改革和发展的要求,以及实验课程在人才培养中的重要地位,结合一般高等学校的实际,我们精心选择了实验内容。全书分为4章。第1章为测量不确定度与数据处理基础知识,包括测量与误差、不确定度、有效数字概念、基本的数据处理方法及不确定度评定;第2章为基础实验,内容涉及力学、电学、光学、热学中的基础实验;第3章为近代物理与综合实验;第4章为设计性实验。全书内容精练,篇幅适中,通俗易懂,适合一般高等学校学生使用和自学。

本书由张怀作主编,姚茂林、齐云、伍丽莎、王湘川参编。其中,张怀作编写了第1章、第3章,并负责全书的统稿工作;姚茂林、齐云、伍丽莎编写了第2章;王湘川编写了第4章和附录。齐云、伍丽莎还重新绘制了书稿中的大部分插图。

徐英教授、谭茂森副教授审阅了全书内容,对部分内容的修改提出了宝贵意见和建议,在此表示深深感谢。

由于时间仓促和编者的水平有限,书中难免有错误和不足之处,真诚地欢迎读者批评指导,以便我们改进。

编 者

2011年3月

目 录

前言

绪论	1
物理实验简介	1
物理实验的进程和要求	2
第 1 章 测量不确定度与数据处理基础知识	5
1.1 测量与误差基本概念	5
1.2 不确定度	15
1.3 测量不确定度的评定	16
1.4 测量不确定度的报告与表示	23
1.5 有效数字	27
1.6 数据处理	32
习题	45
第 2 章 基础实验	48
2.1 固体密度的测量	48
2.2 拉伸法测杨氏弹性模量	58
2.3 刚体转动惯量的测定	64
2.4 简谐振动与阻尼振动	69
2.5 电阻伏安特性测定	73
2.6 电势差计的使用	85
2.7 电桥法测电阻	91
2.8 电子示波器的调节和使用	98
2.9 模拟法描绘静电场	109
2.10 霍尔效应与磁场测定	115
2.11 空气中声速的测定	121
2.12 光的干涉	127
2.13 分光仪的调整和使用	136
2.14 光的偏振	148
2.15 液体表面张力系数的测定	153
2.16 金属线膨胀系数的测定	157
2.17 液体比汽化热的测量	160
2.18 物质导热系数测量	163

第 3 章 近代物理与综合实验	168
3.1 光电效应法测普朗克常量	168
3.2 塞曼效应	173
3.3 电子束的磁聚焦与电子比荷的测定	181
3.4 盖革-米勒计数器和放射性探测	185
3.5 光敏电阻的特性测定	191
3.6 微波布拉格衍射	198
3.7 固体中声速测定与探伤	203
3.8 磁阻传感器与地磁场测量	209
3.9 激光全息照相实验	215
3.10 相位法测量光速	220
3.11 燃料电池	225
第 4 章 设计性实验	233
4.1 设计性实验的基本程序	233
4.2 设计实验项目	237
附录 A	244
附录 B	249
参考文献	254

绪 论

物理实验简介

在古希腊时期,亚里士多德通过对自然现象的观察得到一个著名的结论:重的物体落得快,轻的物体落得慢.这一结论被人们所承认达上千年,直到16世纪,培根、伽利略等提出了科学实验的思想并进行实践,才得到了正确的结论,并逐步改变原来的错误认识,使科学的发展走上了坚实的实验之路,从而大大促进了近现代科学技术的发展.毫不夸张地说,我们今天享受的大部分科技成果都起源于实验.

那么什么是实验呢?我们可以不太严格地说,实验就是人为地控制外部条件,使某种自然(物理或化学等)现象重复出现,让人们能够反复观察、分析、对比、研究与测量,从而获得正确结果(结论)的全部过程.因此,科学实验与人们对自然现象的一般观察不同.一是条件的严格控制;二是重复性和复现性,这两点决定了实验结果(结论)的科学性,即它的结果不以人们的意志而转移,具有客观性和合理性.

科学理论和科学实验是一个整体,在科学研究中,二者并重,理论指导着实验,使之有目的地进行,而实验一方面对我们提出的理论进行验证,另一方面也引导着理论的发展,二者相互依存,相互促进.在物理学的发展过程中,这一点得到了充分的体现.

实验不能等同于生产中的技术,实验更多地表现为对自然规律的研究和认识,是对未知世界的求索,而技术是对已知知识的应用.在科学实验中许多技术都具有原创性和领先性,但一般不能直接用于生产.可以说实验是一般科学理论和生产技术间的一座桥梁,是实用技术的发源地,谁拥有先进的实验室和实验科学家、实验技术队伍,拥有更多的原创性技术成果,谁就能在世界技术领域占据主导地位.

“物理实验”是对高等院校学生进行科学实验基本训练的一门独立的、必修的基础课程,它主要对学生进行全面而系统的实验方法和实验技能的基本训练,从而培养学生独立的动手能力、创新能力和提高学生的科学素质.

物理实验的主要任务是:

(1) 培养和提高学生的实践动手能力.包括:

- ① 阅读实验教材及其他有关技术资料,并正确理解实验原理;
- ② 掌握常见物理量的基本测量方法和有关物理实验技术;
- ③ 能够借助教材或仪器说明书,正确使用常规仪器进行测试;
- ④ 能够正确完整地记录和处理实验数据,对结果进行误差分析和数据处理,撰写合格的实验报告;
- ⑤ 能够独立设计完成简单实验,即设计实验.

(2) 通过对现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对物理学理论和思想方法的理解,进而提高学生运用理论知识解决实际问题(理论和工程)的能力和创新能力。

(3) 培养与提高学生的科学实验素质,即理论联系实际的科学作风,注重细节、严肃认真、实事求是的工作态度,积极主动的探索精神,以及遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

物理实验研究的是物质运动的最基本、最普遍的规律,所以物理实验的实验技术和测量方法具有基本性和普遍性。基本性是指物理实验是一切其他实验技术和方法的基础,普遍性是指物理实验技术和方法适用于所有工程领域。事实上,很多工业技术问题或研究课题,如果把它们分解开来,实质上就是一些物理问题。因此,物理实验往往与工程技术直接相联系。综上所述,对一个高等院校的学生来说,不论其专业如何,物理实验都是一门重要的基础课程。

物理实验的进程和要求

物理实验的内容包括四大类,即测量物理量的数值、验证物理规律、定量研究某一物理量随另一或另一些物理量的变化规律和认识性地观察物理现象。然而,无论实验类型怎样,就其进行程序而言,它们可以分成三个阶段。

1) 预习

预习是实验的准备阶段,在课前进行。一方面,实验课的特殊性在于其实践性,课内实际技术问题多,且难以预料,即使有些理论上看似极为简单的问题,如果学生没有充分的课前准备,实验时也可能不知如何动手,或者不能在限定的实验时间(通常为三学时)内完成实验。另一方面,实验课教学以学生自己动脑动手为主,在实际着手实验之前,教师不可能花太多的时间面面俱到地讲解实验内容。与理论课教学截然不同,如果学生未能充分预习,实验就难以很好地完成。有时即使测得了数据,也难以真正理解实验原理或掌握测量方法。因此,实验课前的预习是保证实验顺利进行、取得满意训练效果的不可缺少的学习环节。

预习时通常以实验教材为主,适当参考相关书籍。具体预习要求是:明确实验目的,熟悉实验内容,理解实验原理,初步了解所用仪器的调节使用方法及注意事项,大致弄清实验步骤。未完成所要求的预习任务者,不得动手实验。

2) 实验

当实验课开始时,指导教师一般要作简要的启发性讲解。内容可能包括本次课的学习任务(即实验目的、实验内容)、实验原理提要、关键仪器简介和注意事项以及教材中没有的扩展性知识等。学生在充分预习的基础上,再有效地领会教师的讲解,才会收到事半功倍的学习效果。一般而言,实验可以分四步进行:

(1) 仪器的安装与调整。开始实验的第一步是安装调整仪器,仪器安装应力求科学、方便、安全。这里,科学是指仪器的布置和安装必须满足实验要求和仪器的工作条件,比如要求水平放置的电流表不能竖直放、热电偶定标实验中的热电偶和水银温度

计的水银头应该装在加热器内同一深度等.方便是要求仪器的布置应该便于观察、调节、读数,即需要经常观察调节或读数的仪器应该放置在靠近实验者的地方或方便调节的地方.反之,则可放得稍远些.这里的安全既包括仪器安全又包括实验者自身的安全,换句话说,布置仪器时既要注意避开对实验者有危险的仪器或仪器部位,又要避免稍不留心就有可能损坏仪器设备的危险.仪器的调整旨在使仪器达到正常的工作条件或状态,如天平或气垫导轨的水平调节、各种支架的竖直调节、指零仪器的零位调节、电子仪器的预热和光学仪器的光路调节等.

(2) 观察与测量.在实验时,一般都应该先观察将研究的物理现象,在观察了解了所要研究的物理现象的物理特征和变化过程、确信仪器工作正常后,再对被研究现象进行定量测量.这样做的目的在于减少测量的盲目性,避免因仪器工作范围不正常而前功尽弃的情况.测量时如发现异常,应分析找出其原因,进行重复测量,并检验测量数据的正确性.

(3) 数据记录.实验数据必须记录在《大学物理实验预习记录册》上.数据记录应该注意两点:首先是原始数据,即直接从仪器仪表上读出的、未进行运算处理的数据;其次是数据记录必须根据所用仪器仪表的分度值或准确度等级,记下正确的有效位数.完整的实验数据除了观测数据外,还需要记清实验时间、合作者、实验环境条件、仪器名称及其规格型号(必要时还应记下仪器编号和测量样品标记等)和简要步骤等.记录应该力求简洁清楚,标明每个符号的意义及单位,使自己和别人都能明白.

必须强调指出的是,测量数据必须及时地如实记录,不能事后凭记忆“追记”,更要坚决杜绝拼凑或人为修改数据的现象发生.

(4) 结束实验.实验结束前应将仪器整理归位,记录数据交指导教师签字,填好仪器使用情况登记表,经指导教师签字允许后,方可离开实验室.

3) 撰写实验报告

实验报告在课后完成.实验报告是对实验的全面总结和升华,实验报告撰写能力的培养是物理实验课程的基本训练内容之一.实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,除填写实验者姓名、专业、年级、组别和实验时间外,实验报告通常包括下述几部分内容:

(1) 实验名称.

(2) 实验内容.

(3) 实验原理.一般要求原理概要,即给出简明的文字叙述、画出主要原理图、列出主要测量公式、注明公式中各量的物理意义.应该指出,一份好的实验报告应该在理解的基础上用自己的语言概述实验原理,不要照抄教材内容.

(4) 实验仪器.应记清实验中实际使用仪器的名称、规格、型号,必要时还需要记下仪器编号,或画出仪器面板图等.

(5) 实验步骤.一般情况下,如果教材上已详尽地给出了实验步骤,报告中可以分步扼要叙述实验步骤.但是对某些重点要求操作步骤的实验(如电子示波器的使用、分光仪的调节与使用等)和要求自己设计的实验(如设计性实验),应该详尽地写

清实验的实际进行步骤及注意事项。

(6) 数据记录与处理. 整理并正式制表列出实验数据, 要注意标明表中各量的名称和单位, 正确表示数据的有效数字. 数据处理就是用适当的数据处理方法计算出实验结果, 作出实验曲线, 对结果进行不确定度计算和误差分析等。

(7) 问题讨论或作业. 对实验存在的问题或实验结果进行分析讨论, 提出改进建议, 或完成指定作业. 也可以提出学习中出现的问题, 以便教师在批改实验报告时作出书面回答或在课堂上统一回答。

第 1 章 测量不确定度与数据处理基础知识

1.1 测量与误差基本概念

1.1.1 测量及其分类

实验离不开测量,所谓测量就是指通过一定的实验方法,借助相应的实验仪器,以直接或间接获取被测对象量值为目的的全部操作. 应该注意的是,被测量应有较严格的定义. 依据获得测量结果方法的不同,测量可以分为两大类,即直接测量和间接测量.

1.1.1.1 直接测量

从所用仪器或测量工具上直接读出被测量值的过程称为直接测量. 例如,用米尺测量长度、用天平称衡物体的质量、用停表测量时间、用电流表测量电流、用温度计测量温度等都是直接测量.

1.1.1.2 间接测量

通过测量与被测量有函数关系的可以直接测量的其他量,算出被测量,这类测量称为间接测量. 例如,测量某圆柱体的体积,可以分别测出其直径 D 和高 H ,由 $V = \frac{1}{4}\pi D^2 H$ 计算出体积.

显然,测量属于直接测量还是间接测量与被测量本身没有必然联系,而取决于测量方法或测量器具. 例如,测量电阻可以用伏安法,也可以用欧姆表或电桥. 前者需要先测出电流和电压再由欧姆定律求出电阻,故属于间接测量;后者则可以从欧姆表或电桥上直接读出电阻值,故属于直接测量.

按照测量的条件不同,测量又可分为等精度测量和不等精度测量. 在相同的测量条件下进行的一系列测量是等精度测量. 例如,同一测量者,使用同一仪器,采用同样的方法,对同一待测量连续进行多次测量,此时应该认为每次测量的可靠程度都相同,称其为等精度测量,这样的一组测量值称为一个测量列. 在不同测量条件下进行的一系列测量,如不同的人员,使用不同的仪器,采用不同的方法对同一待测量连续进行多次测量,则各次测量结果的可靠程度是不相同的,这样的测量称为不等精度测量. 处理不等精度测量的结果时,需要根据每个测量值的“权重”,进行“加权平均”,因此在一般物理实验中很少采用.

等精度测量的误差分析和数据处理比较容易,本书所介绍的误差分析和数据处理知识都是针对等精度测量的.

1.1.2 误差

被测物理量在一定条件下总有一个客观实际值,即真值,测量时人们总希望获得这个值.但是,由于各种主客观因素的影响,使人们难以获得被测量的真值.这些影响可能来自某些偶然因素,比如测量环境条件(温度、湿度、振动、电源电压等)的无规律变化,也可能源于所用仪器的限制,还可能由于测量仪器与被测物理量的相互影响导致原有被测物理量的改变等.因此,测量结果与被测量的真值之间总是不完全相同.它们间的差值称为误差.

$$\text{误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \quad (\Delta x = x - x_0)$$

误差有大有小,符号有正有负.根据误差的性质不同,误差可以分为系统误差和随机误差.

1.1.2.1 系统误差

所谓系统误差是指在对同一被测量的多次测量过程中,产生误差的原因较单一,误差数值大小和符号保持恒定或以一定规律变化的误差分量.例如,螺旋测微计(千分尺)、电表的零值误差,天平不等臂或停表指针未对准刻度线等因素产生的测量误差.又例如,在测量电阻的阻值时,由于环境温度变化而导致电阻阻值随温度变化,虽然其变化规律复杂,但它是确定的,所以仍属于系统误差.系统误差的主要来源如下.

(1) 仪器误差.由于测量仪器本身的刻度不准,结构、灵敏度和分辨率等因素的限制而导致误差.例如,米尺刻度不准,移测显微镜内精密螺杆的回程差和惠斯通电桥的检流计的灵敏度偏低等.

(2) 理论和测量方法误差.因测量方法不完善而引起误差.例如,伏安法测电阻实验中电表内阻的影响;又如单摆的周期测定公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 要求摆角 $\theta \rightarrow 0$,实际中难以完全满足该近似条件,必然由此产生方法误差.

(3) 人员误差.由测量人员主观因素和操作而引起误差.例如,测量者在用停表计时总是超前或落后,对准标尺时总是偏左或偏右等.仪器调整误差,与仪器误差不同,调整误差不是仪器本身所具有的误差,而是由于测量时未能将仪器或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差.例如,没有达到仪器的工作条件,如不水平、不铅直、不共轴、不等高、偏心或定向不准确等都会引起调整误差.

(4) 环境误差.由于实际环境条件不一致所引起的误差.例如,温度、湿度、气压、电磁场、振动等环境因素的影响,使测量仪器的机构失灵、参数改变、示值变化等产生的误差.

1.1.2.2 随机误差

随机误差是在一定条件下,对同一物理量的多次测量过程中,以不可预知方式变

化的测量误差分量. 随机误差的“不可预知”表现为具有随机性, 具体就某一次测量来讲, 其误差的数值大小和符号都不能预测, 如果测量次数足够多, 总体服从一定的统计规律. 因此可以用统计方法估计其对测量结果的影响.

随机误差产生于测量过程中随机因素的影响. 例如, 测量条件(温度、湿度、电源电压、气流振动、杂扰电磁波等)的无规则变化的影响, 测量者受感官灵敏度或分辨能力的限制, 在重复测量读数时难以做到每次完全一致等.

必须指出, 这样定义的系统误差和随机误差, 是依据它们特征上的不同, 即系统误差具有确定性, 而随机误差则具有随机性. 但是, 这种特征上的不同并非一成不变. 不确定的系统误差和随机误差之间仍然是相互联系的, 有时甚至难以明确区分. 例如, 用米尺测量某物体的长度, 如果每次测量都从米尺上同一刻线起, 毫无疑问米尺刻度不准产生的误差属于系统误差; 如果每次测量从米尺上不同刻线起, 则米尺刻度不准又表现为随机误差. 这个例子一方面表明系统误差与随机误差的区别与空间因素有关, 另一方面又说明有时也可以把一些规律过于复杂的系统误差转化为随机误差来处理. 在另外一些情况下, 系统误差与随机误差的区别还取决于时间因素. 比如, 在进行某些精密测量时, 在短时间内环境温度可以保持恒定或者缓缓变化, 由此引起的误差为系统误差; 但是在较长时间中温度却在平均值附近无规则地起伏变化, 所以又表现为随机误差. 此外, 随着科学技术的发展, 人们对误差来源及其变化规律的认识不断深入, 过去的随机误差也可能被重新确定为系统误差.

在实验过程中, 往往出现明显超出规定条件下预期结果的异常值, 如测量过程中错误读取取值、使用有缺陷的测量器具、不正确的操作或环境的严重干扰等都可能产生测量的异常值. 引起异常值的原因往往是可以避免的, 故在测量结果的评定中不允许异常值存在.

1.1.3 误差的表示

误差可以表示为绝对误差和相对误差两种形式.

1.1.3.1 绝对误差

绝对误差直接表示误差的绝对大小, 定义为

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

表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1.1)$$

显然, 绝对误差是一个代数量. 由于各种实际因素的影响和客观条件的限制, 被测量的绝对真值往往是不可能获得的. 因此, 在实际的误差计算中, 人们总是以测量值与约定真值之差作为测量结果的误差. 依据不同的情况, 可以把已修正系统误差的算术平均值、标称值、校准值、理论值、公认值等作为被测量的约定真值.

1.1.3.2 相对误差

相对误差定义为绝对误差与被测量的真值之比,即

$$E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

一般把相对误差表示成百分数,故又称为百分误差.绝对误差反映同类测量结果的好坏,而相对误差则可用以比较不同测量结果的优劣.

1.1.4 随机误差

随机误差服从统计分布,不同性质的随机误差所服从的统计分布规律可能不同,如二项分布、泊松分布、 χ^2 分布、 F 分布、均匀分布、 t 分布和正态分布等.但是,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,相当多的分布都趋于正态分布.比如,前述诸多常见统计分布中除均匀分布外,都以正态分布为极限.因此,正态分布是一种典型的随机误差分布形式.为了简便起见,在本节的讨论中,假定系统误差已经消除或修正到可以忽略不计的程度,即只有随机误差存在,并且设随机误差服从正态分布.

1.1.4.1 随机误差的分布

随机误差服从统计规律,下面选用一组测量数据来形象地说明随机误差服从统计规律的具体意义.用数字毫秒计测量单摆的周期,重复测量 60 次,测量数据如表 1.1.1 所示(设数据中只存在随机误差).统计整理出频数分布表(表 1.1.2),并作出相应的直方图,如图 1.1.1 所示.

表 1.1.1 单摆周期测量数据

(单位:s)

2.150	2.168	2.164	2.162	2.158	2.168	2.174	2.166	2.167	2.176
2.171	2.176	2.163	2.160	2.159	2.166	2.164	2.181	2.177	2.162
2.156	2.174	2.164	2.169	2.165	2.159	2.163	2.157	2.167	2.177
2.169	2.158	2.171	2.173	2.153	2.167	2.162	2.170	2.155	2.158
2.152	2.165	2.164	2.166	2.168	2.169	2.161	2.171	2.172	2.165
2.161	2.160	2.165	2.164	2.181	2.173	2.178	2.169	2.172	2.169

表 1.1.2 频数分布表

组 序	分 组	频 数	相对频数/%
1	2.145~2.150	1	2
2	2.150~2.155	3	5
3	2.155~2.160	9	15
4	2.160~2.165	16	27
5	2.165~2.170	15	25
6	2.170~2.175	9	15
7	2.175~2.180	5	8
8	2.180~2.185	2	3

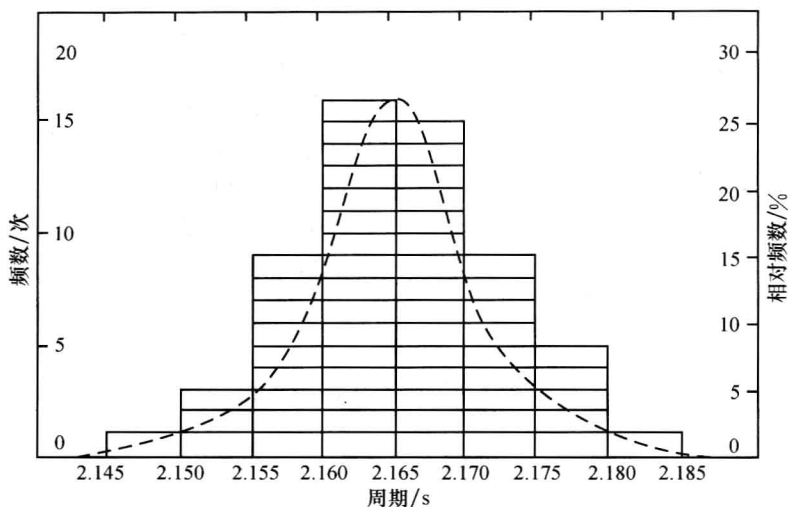


图 1.1.1 周期测量直方图

从直方图可见,图形只有一个峰,偏离该峰值越远的测量值出现的频数或相对频数越低,而且关于峰值图形左右大致对称.当然,如果在相同条件下再做 60 次同样的测量,一般说来测量结果的直方图会略有不同.但是,大量实验事实表明,随着测量次数的增多和分组宽度的变窄,各组的频数增加,而各组的相对频数却趋于定值,不同测量所得的直方图的差别逐渐减小.由此可以推知,当测量次数趋于无穷、分组宽度趋于零时,图 1.1.1 中直方图的上边缘折线就会变成一条光滑的曲线(图 1.1.1 中虚线).这就是随机误差的正态分布曲线.

设在相同条件下对某物理量 x 进行多次测量,共进行了 n 次,获得一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 对应的随机误差分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. 当测量次数 n 充分多时,它们服从正态分布,即测量值中测量误差在 $\Delta x \sim \Delta x + d\Delta x$ 的测量数据(共 dn 次)出现的概率 dn/n 与该误差区间 $d\Delta x$ 的大小如下关系:

$$\frac{dn}{n} = f(\Delta x) d\Delta x \quad (1.1.3)$$

式中, $f(\Delta x)$ 称为随机误差分布函数,其统计意义是:在单位误差间隔内,误差在 Δx 附近的测量值出现的概率.因此 $f(\Delta x)$ 实质上就是随机误差的概率密度函数,正态分布的随机误差的概率密度曲线如图 1.1.2 所示.由(1.1.3)式可知曲线下面积(阴影部分)代表与误差区间 $d\Delta x$ 相对应的测量值出现的概率,任何测量其测量误差必然限制在 $(-\infty, +\infty)$ 区间,用统计术语来说就是各种误差的测量值出现的总概率为 1,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d\Delta x = 1 \quad (1.1.4)$$

这就是误差分布函数的归一化条件,其几何意义是:无论曲线形状如何,曲线下总面积

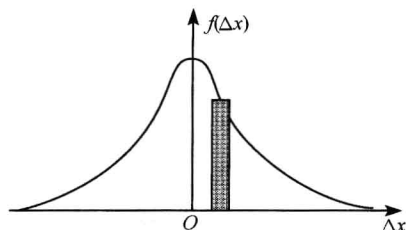


图 1.1.2 随机误差概率分布曲线

积恒等于 1.

从随机误差概率分布曲线图 1.1.2 可以直观地看出,随机误差具有四个特点:

(1) 单峰性. 绝对值小的随机误差出现的概率比绝对值大的随机误差出现的概率大.

(2) 对称性. 绝对值相等但符号相反的随机误差出现的概率相等.

(3) 有界性. 绝对值很大的随机误差出现的

概率趋于零.

(4) 抵偿性. 当测量次数趋于无穷时,各次测量的随机误差的代数和趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1.1.5)$$

事实上,抵偿性可以看成是对称性的一个重要推论. 上述四个基本特点是后面处理随机误差的基本依据.

1.1.4.2 随机误差的估计

随机误差表现为测量数据的分散性. 随机误差的估计就是引入一个量来定量描述数据分散性的大小,这个量就是标准误差.

误差的正态分布的概率密度函数为指数形式:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\Delta x^2 / 2\sigma^2} \quad (1.1.6)$$

其中

$$\sigma = \lim \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \quad (1.1.7)$$

称为标准误差. 由指数函数的性质容易知道,在 $\Delta x \rightarrow 0$ 附近,标准误差 σ 越小,误差分布函数 $f(\Delta x)$ 随 Δx 变化越快,曲线越陡峭. 另外,受到归一化条件的限制,无论曲线形状如何,曲线下的面积恒等于 1. 因此,对不同的标准误差 σ ,其误差分布曲线将呈现出不同的平坦程度,如图 1.1.3 所示. 标准误差 σ 越小,曲线越向纵轴 ($\Delta x = 0$) 收缩,即是说标准误差 σ 越小的测量,其数据越相互接近,分散性越小;反过来, σ 越大,测量数据越分散.

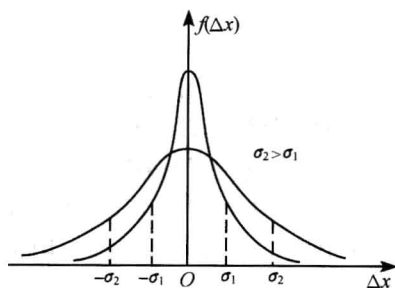


图 1.1.3 标准误差决定数据分散性

在实际测量中,测量次数 n 不可能太大,被测量的真值也往往无法获得. 因此,不

能直接由(1.1.7)式计算出标准误差,而引入标准偏差(为统一起见,以后将此偏差称为测量列的实验标准差) $s(x_i)$ 来表征数据的分散性,其值可以用贝塞尔公式计算,即

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

式中,

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

称为被测量 x 的平均值.

根据随机误差的抵偿性,(1.1.5)式不难证明,当测量次数充分多时,平均值 $\bar{x}$ 就是被测量 x 的最佳近似真值.对于有限次的测量, x_i 不严格服从正态分布,随机误差不能完全抵消,但是,据最小二乘法原理仍可以得到同样的结论,即平均值是被测量的最佳近似真值[见(1.6.4)式].

误差理论表明,平均值的实验标准差 $s(\bar{x})$ 等于测量数据列中任一次被测量 x_i 的实验标准差 $s(x_i)$ 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$,即

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.10)$$

1.1.5 系统误差

系统误差的特点是它具有确定性,它不像随机误差那样服从统计规律,而是保持恒定或服从确定的函数规律.在相同条件下重复测量同一物理量时,系统误差的绝对值和符号都保持不变;当测量条件改变时,系统误差也按一定的非统计规律变化,对不同的测量其非统计规律可以不同.系统误差的确定性的直接影响是难以像发现随机误差那样,直接由测量数据的重复性来发现,也不能找到像处理随机误差那样统一的方法或公式去处理系统误差,而只能是针对不同的测量寻求不同的方法去发现和修正系统误差.系统误差的发现和可能涉及对测量仪器、测量条件和测量原理等的分析研究,并要求实验者有相当的实际经验和实验技能等.因此,一般说来系统误差的发现和比随机误差困难得多,而研究更好地发现和比系统误差的方法是误差理论的重要课题之一.

1.1.5.1 系统误差的分类

根据不同的需要,系统误差有不同的分类方法.按系统误差的来源可以分为仪器误差、方法误差、调整误差、环境误差和人员误差等五类;根据系统误差遵从规律的不同,系统误差可以分为固定、线性、多项式、周期性和复杂规律等形式;依据对系统误