

高 等 学 校 教 材

大学物理实验

主编/王帆 高剑森 赵书安

DAXUEWULISHIYAN



南京师范大学出版社
NANJING NORMAL UNIVERSITY PRESS

高等学校教材

大学物理实验

主编/王帆 高剑森 赵书安



南京师范大学出版社
NANJING NORMAL UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 王帆, 高剑森, 赵书安主编. —南京: 南京师范大学出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-81101-770-0/O · 30

I. 大... II. ①王...②高...③赵... III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 106587 号

-
- | | |
|--------|---|
| 书 名 | 大学物理实验 |
| 主 编 | 王 帆 高剑森 赵书安 |
| 责任编辑 | 邱银虎 周海忠 |
| 出版发行 | 南京师范大学出版社 |
| 地 址 | 江苏省南京市宁海路 122 号(邮编:210097) |
| 电 话 | (025)83598077(传真) 83598412(营销部) 83598297(邮购部) |
| 网 址 | http://press.njnu.edu.cn |
| E-mail | nspzbb@njnu.edu.cn |
| 照 排 | 江苏兰斯印务发展有限公司 |
| 印 刷 | 南京大众新科技印刷有限公司 |
| 开 本 | 787×960 1/16 |
| 印 张 | 13.25 |
| 字 数 | 244 千 |
| 版 次 | 2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷 |
| 书 号 | ISBN 978-7-81101-770-0/O · 30 |
| 定 价 | 24.00 元 |
- 出 版 人 闻玉银
-

南京师大版图书若有印装问题请与销售商调换

版权所有 侵犯必究

前 言

本教材根据高等学校工科本科物理实验课程教学基本要求和物理实验教学大纲编写。

在编写的过程中,结合了目前高等工科院校的教学实际情况与仪器设备现状及发展的趋势,在强化基本实验技能培养的基础上,扩充了综合性实验和设计性实验的内容,以适应创新教育对实验教学的新的和更高的要求. 本教材适用于工科各专业的物理实验教学. 期望通过本书的出版,对提高大学物理实验教学的质量,培养学生的创新能力和动手能力有所贡献.

全书共包括绪论、测量误差与实验数据处理、物理实验常用仪器和测量方法、基础性实验、综合性实验、研究设计性实验等内容,给出了 37 个实验项目(其中基础性实验 16 个,综合性实验 11 个,研究设计性实验 11 个),在使用时可根据不同的专业、不同的教学对象选择其中部分实验进行教学.

本书是在我校多年来用于实验教学的讲义基础上编写出版的,因此它更贴近教学实际,具有很强的可操作性. 在出版时,我们又作了修改,并借鉴和参阅了其他院校的有关教材和经验,在此深表谢意.

本书由王帆、高剑森、赵书安、杨丽娟、曹娟、崔磊、陈志强等教师分工编写,其他教师亦提出了许多宝贵的意见和建议. 由于编者水平有限,加之时间仓促,难免有不当和疏漏之处,热切希望读者批评指正.

编 者

2008 年 5 月

目 录

绪论	(1)
§ 1 物理实验的重要性	(1)
§ 2 物理实验课的要求	(3)
§ 3 物理实验课程基本训练程序	(4)
第一章 测量误差与实验数据处理	(7)
§ 1.1 测量误差	(7)
§ 1.2 数据处理的基本方法	(25)
第二章 物理实验常用仪器和测量方法	(33)
§ 2.1 物理实验常用仪器	(33)
§ 2.2 基本测量方法	(46)
第三章 基础性实验	(56)
§ 3.1 照相胶片密度测定	(56)
§ 3.2 气垫导轨的使用	(58)
§ 3.3 光的偏振现象研究	(66)
§ 3.4 落球法测量液体的粘滞系数	(70)
§ 3.5 导热系数的测定	(73)
§ 3.6 热电偶的定标	(78)
§ 3.7 静电场的描绘	(81)
§ 3.8 示波器的原理和使用	(86)
§ 3.9 惠斯登电桥法测电阻	(92)
§ 3.10 霍尔效应	(96)
§ 3.11 分光计调节和使用——三棱镜顶角及折射率的测量	(101)
§ 3.12 光的干涉——牛顿环、劈尖	(110)
§ 3.13 光栅衍射	(114)
§ 3.14 迈克尔孙干涉	(118)
§ 3.15 理想真空二极管的伏安特性	(123)
§ 3.16 用阿贝折射仪测液体的折射率	(126)

第四章 综合性实验	(130)
§ 4.1 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	(130)
§ 4.2 光电效应	(134)
§ 4.3 夫兰克—赫兹实验	(138)
§ 4.4 数字光纤通讯	(141)
§ 4.5 普朗克常数的测定	(150)
§ 4.6 声速测量	(155)
§ 4.7 金属电子逸出功的测定	(160)
§ 4.8 磁控法测电子荷质比	(166)
§ 4.9 用非线性电路研究混沌现象	(171)
§ 4.10 密立根油滴实验——电子电荷的测量.....	(179)
§ 4.11 费米—狄拉克分布的研究.....	(185)
第五章 研究性、设计性实验	(190)
§ 5.1 实验设计基础知识	(190)
§ 5.2 重力加速度的测定	(195)
§ 5.3 电表的改装	(196)
§ 5.4 数字万用电表设计实验	(196)
§ 5.5 非平衡电桥与电阻温度计的设计	(198)
§ 5.6 测量棱镜材料的色散曲线	(199)
§ 5.7 晶体凝固点的测定研究	(200)
§ 5.8 全息光栅的制作以及光栅特性的研究	(200)
§ 5.9 非线性电阻特性研究	(201)
§ 5.10 硅光电池特性的研究.....	(203)
§ 5.11 原子力显微镜.....	(205)

绪 论

§ 1 物理实验的重要性

物理学是一门实验科学,特别是普通物理,更与实验密不可分.在物理学的发展过程中,实验起着决定性的作用.发现新的物理现象、寻找新的物理规律以及验证物理定律,都只能依靠实验.离开了实验,物理理论就会苍白无力,成为“无源之水,无本之木”而不能得到进一步发展.

正是 16 世纪伟大的实验物理学家伽利略,用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路,使物理学发生了革命性的变化.力学中的许多基本定律,如自由落体、惯性定律等,都是由伽利略通过实验发现和总结出来的;电磁学的研究也是从库仑发明扭秤并用它测量电荷之间的作用力开始的.

牛顿对理论和实验的关系阐述得很明白.他在 1672 年给奥尔登堡的信中说:“探求事物属性的准确方法是从实验中把它们推导出来.……考察我的理论的方法就在于考虑我所提出的实验是否确实证明了这个理论,或者提出新的实验去验证这个理论.”事实上,牛顿提出过许多理论,其中万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实践所证明,而他的关于光的本性的学说却被杨氏干涉实验和许多衍射实验所推翻.

经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结与推广.在 19 世纪以前,没有纯粹的理论物理学家.所有物理学家,包括对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅耳、麦克斯韦等,都亲自从事实验工作.近代物理的发展则是从所谓“两朵乌云”和“三大发现”开始的.前者是指当时经典物理学无法解释的两个实验结果,即黑体辐射实验和迈克尔孙—莫雷实验;后者是指在实验室中发现了 X 光、放射性和电子.由于物理学的发展越来越深入、越来越复杂,而人的精力有限,才有了以理论研究为主和以实验研究为主的分工,出现了“理论物理学家”.然而,即使是理论物理学家也绝对不能离开物理实验.爱因斯坦无疑是最著名的理论物理学家,而他获得诺贝尔奖是因为他正确解释了光电效应的实验;他当初提出的相对论是以“光速不变”的假设为基础的,只是经过长期大量的实验后,相

对论才成为一个被人们普遍接受的理论.

总之,物理学的理论来源于物理实验,又必须最终由物理实验来验证.因此,要从事物理学的研究,必须掌握物理实验的基本功.正因为如此,我国物理学界的前辈们都十分重视物理实验.创办复旦大学物理系的王福山先生亲自从一个弹簧开始筹措物理实验设备,为建立物理教学实验室倾注了大量的心血.创办清华大学物理系的叶企孙先生对李政道这样优秀的学生,仍规定“理论课可以免上,只参加考试;但实验不能免,每个必做”.

物理实验不但对于物理学的研究工作极其重要,而且对于物理学在其他学科的应用也十分重要.当代物理学的发展已使我们的世界发生了惊人的改变,而这些改变正是物理学在各行各业中应用的结果.

电子物理、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科都是以物理学为基础的,当然有大量物理学的应用;在材料科学中,各种材料的物性测试、许多新材料的发现(如 C_{60} 、高温超导材料等)和新材料制备方法的研究(如离子束注入、激光蒸发等),都离不开物理的应用;在化学中,从光谱分析到量子化学,从放射性测量到激光分离同位素,也无不是物理的应用;在生物学的发展史中,离不开各类显微镜(光学显微镜、电子显微镜、X 光显微镜、原子力显微镜)的贡献,近代生命科学更离不开物理学,DNA 的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同建立并为 X 光衍射实验所证实的,而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助;在医学中,从 X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等等都是物理学的应用.物理学已经渗透到各个学科领域,而这种渗透无不与实验密切相关.显然,实验就是从物理基础理论到其他应用学科的桥梁.只有真正掌握了物理实验的基本功,才能顺利地把物理原理应用到其他学科之中.

综上所述,要研究与发展物理学,要把物理理论应用到各行各业的实际中去,都必须重视物理实验,学好物理实验.

然而,中国社会长期以来受到“重理论轻实践”的错误观念的影响,使得物理实验的重要性往往被忽视.1982 年杨振宁先生在《光明日报》上发表了“谈人才培养”的文章,在文中他语重心长地指出:“像我这样有了一点名气的人也有不好的影响:在国内有许多年青人都希望搞我这一行(指搞理论).但是,像我这样的人,中国目前不是急需.要增加中国的社会生产力,需要的是很多会动手的人.”另一位获诺贝尔物理学奖的华裔实验物理学家丁肇中先生则说:“我是一个做实验的工程师.希望通过我的得奖,能提高中国人对实验的认识.没有实验就没有现代科学技术.”据统计,1901 年以来,实验物理学家得诺贝尔奖的人数是理论物理学家人数的两倍;而近 30 年来,前者的人数超过后者的 6 倍以上.由此可

见,物理实验的重要性正在越来越明显地被认识到.我们只有摒弃旧观念,解放思想,面对现实,摆正理论与实践的关系,才能真正造就高素质的有创新精神的一代新人.

§ 2 物理实验课的要求

物理实验既然那么重要,我们怎样才能通过物理实验课的教学使学生掌握物理实验的基本功,达到培养高素质创新人才的目的呢?概括起来,必须达到以下三个基本实验要求.

1. 在物理实验的基本知识、基本方法、基本技能方面(三基)得到严格而系统的训练,这是做好物理实验的基础.

基本知识包括实验的原理、各类仪器的结构与工作机理、实验的误差分析与不确定度评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断等.

基本方法包括如何根据实验目的和要求建立正确的实验思路与方案、正确选择和使用仪器、减少各类误差、采用一些特殊方法来获得通常难以获得的结果等.

基本技能包括各种调节与测试技术(粗调、微调、准直、调零、读数、定标等),真空技术(真空获得、维持、测量、应用等),电工技术(识别元件、焊接、排除故障、安全用电等),电子技术(微电流检测、弱信号放大等),传感技术(力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器等),金工技术(机械制图及基本的车工和钳工技术等)以及查阅文献的能力,自学能力,协作共事的能力,总结归纳能力,口头表达能力等.

“三基”训练有时可能会比较枯燥,但却是完全必要的.它体现了最基本的实际动手能力,因而必须首先保证这一要求的实现.没有这种严格的基本训练,很难成为高素质的人才.

2. 学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力.

研究物理现象和验证物理规律是进行物理实验的根本目的.在学习“三基”的过程中要有意识地培养这种能力.一般的“验证性实验”虽然是教师安排好的,但学生应仔细体会其中的奥妙所在,不应只按所规定的步骤操作、记数据、得结果就算完成;要多问几个为什么,想一想若不按所规定的步骤去做会有什么问题,或者能否想出别的方法达到同样的目的.在一定的条件下,经老师同意,也可以做自己设计的实验.

进行物理实验也是真正理解和掌握物理理论的重要手段.只从书本上得到

的知识往往是不完整、不具体的. 只有通过实验, 才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际的经验, 变为解决实际问题的有力工具. 因此要真正理解和掌握物理理论, 是不能只从课堂上学习的, 还必须到实验室学习, 亲自动手, 亲身体会, 这样才能学到真正有血有肉的活生生的物理.

在实验中我们往往会遇到一些意想不到的问题. 这些问题虽然可能不是实验研究的主要对象, 但也不能轻易放过. 这常常是提高分析问题、解决问题能力的好机会, 要注意观察、及时记录、认真分析, 必要时可以进行深入研究. 实际上, 科学史上不少重要理论都是在意想不到的情况下“偶然”发现的.

3. 养成实事求是的科学态度和积极创新的科学精神.

这是贯穿于整个教学过程的要求, 在物理实验教学中尤其重要. 因为物理学研究“物”之“理”, 就是从“实事”中去求“是”, 所以严肃认真的物理学工作者都坚持“实践是检验真理的唯一标准”. 物理学中的“实践”主要就是物理实验, 在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度. 任何弄虚作假、篡改甚至伪造数据的行为都是绝对不能允许的. 在物理实验课中, 严格规定了记录数据不准用铅笔、不能用涂改液、误记或错记数据的更改要写明理由并经指导老师认可等, 这些都是为了帮助学生养成实事求是的良好习惯. 实际上, 实验结果是什么就是什么, 没有“好”、“坏”之分. 与原来预想不一致的实验结果不仅不应随便舍弃, 还应特别重视, 它可能是某个新发现的开端. 历史上许多新的物理理论的建立都是由于原来的理论无法解释某些实验现象. 因此, 实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是相联系的. 在严谨的实验中才能发现真正的问题, 而解决这些问题往往需要坚忍不拔的毅力和积极创新的思维. 实际上, 只要认真去做实验, 一定会发现许多问题, 其中有些问题是教师也未必能解决的. 所以, 实验室理所当然地成为培养学生求实态度和创新精神的最好场所.

§ 3 物理实验课程基本训练程序

我们通过物理实验课程对实验现象的观察、分析和对物理量的测量, 加深对物理学原理的理解. 因此实验教学的基本思想和程序归结为: 实验思想→实验仪器→实验条件→实验方法→实验测量→实验分析→实验结果数据处理. 根据这一教学思想和程序, 学生遵循的基本学习程序可分为以下三个阶段.

1. 实验前预习阶段.

由于实验课课内时间有限, 因而必须预先熟悉实验内容, 否则要在短短的课内时间完成整个实验无疑是困难的. 在实验之前, 应对实验原理、待测物理量、实验要获得的结果等做到胸有成竹. 若事先不预习, 对实验内容完全不了解, 只是

机械地按照教材中的实验步骤看一步动一步,虽然得到了实验数据,却不了解其物理意义,最终将收获甚微.预习一般以理解教材所述原理为主,并大致了解实验具体步骤.为了使测量结果眉目清楚,防止漏测数据,应按实验要求画好数据表格,注上文字符号代表的物理量和单位,并确定测量次数.

预习时,要写好预习报告.预习报告内容主要包括:

- (1)实验名称.
- (2)实验目的.
- (3)仪器设备.
- (4)基本原理,包括重要的计算公式、电路图、光路图及简要的文字说明.
- (5)数据草表.

其中数据草表是供实验时记录原始数据用的.

2. 实验进行阶段.

实验正式进行前,首先要熟悉一下将要使用的仪器、设备的性能以及正确的操作规程,切忌盲目操作;其次要全面地想一想实验操作程序,不要急于动手,因为程序错一步或调错一次,都有可能使整个实验前功尽弃.

实验中要胆大心细、严肃认真、一丝不苟.对于精密贵重的仪器或元件,特别要拿稳放妥,防止损坏.在电学实验中,必须经过教师检查无误后才可接通电源.在使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节仪器时,应先粗调后微调.要注意对实验现象的观察,尤其对所谓的“反常”现象,更要仔细观察分析,不要单纯地追求“胜利”.要随时对观察到的现象和测得的数据进行判断,以确定正在进行的实验过程是否正常合理.要学会及时排除实验过程中出现的故障.

每次测量后立即将数据记录在数据草表中,并要注意正确确定数据的有效位数.当实验结果与实验条件有关时,还要记下相应的实验条件,例如当时的室温、湿度、大气压强等.

实验结束时,要把测得的数据交给指导老师检查签字.对不合理的或错误的实验结果分析后还要补做或重做.离开实验室前,要整理好使用过的仪器,关好水、电、煤气等,做好清洁工作.这些都是一个实验工作者应具备的基本素质.

3. 书写实验报告阶段.

书写实验报告是实验完成后的全面总结,要以简明扼要的形式将实验结果完整而又真实地表达出来.实验后要及时写好实验报告.写报告要使用统一规格的实验报告纸,要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真.

一份完整的实验报告通常包括下述内容:

- (1)实验名称.
- (2)实验目的.

(3)仪器设备.

(4)基本原理,包括重要的计算公式、电路图、光路图及简要的文字说明.

(5)数据表格及数据处理(包括计算和作图).这里的“数据表格”不同于预习报告中的“数据草表”,应该另行正规画出,并把数据草表记录的原始数据填入数据表格中,按实验要求规范地处理实验数据.

(6)实验结果.认真地分析和解释实验结果,得出实验结论.实验结果不是简单的测量结果,它应包括不确定度的评定,对测量结果和期望值的关系的讨论,分析误差的主要原因和改进方法,还应包括对实验现象的分析与解释,对实验中有关问题的思考和对实验结果的评论等.

(7)问题讨论.

(8)预习报告中的“数据草表”,应作为附件,附于实验报告之后,交实验报告时一并交给指导老师.

以上(1)~(4)部分内容,如无大的变动,可以使用预习报告中的相应内容代替,而不必重写.

最后,实验报告中还可谈谈做本实验的体会和对教师或教材的建议.

第一章 测量误差与实验数据处理

§ 1.1 测量误差

一、测量和误差

(一) 测量

物理量的测量可归纳为两类：直接测量和间接测量。

1. 直接测量及直接测量量。

对于为数不多的物理量，可以直接从仪器上读出其数据。如用米尺测量长度，用温度计测量温度，用秒表测量时间，用电流表测量电流，用电压表测量电压等，都是直接测量，所测的量叫做直接测量量。

2. 间接测量及间接测量量。

对于大多数物理量来说，不能或不便于直接用仪器测出，而要根据可直接测量的物理量的数值，通过一定函数关系计算出来。这样的测量叫做间接测量，相应的物理量叫做间接测量量。如测量长方体的体积，其长、宽和高都可用米尺直接测量出来，而它的体积则是长、宽、高的乘积，体积的测量就是间接测量，体积这个量就是间接测量量。

直接测量是间接测量的基础，但直接测量量和间接测量量之间的界线并不是绝对的，在很大程度上取决于实验的方法和选用的仪器。例如，用万用表的欧姆挡测量电阻时，电阻就是直接测量量，而用伏安法测电阻时，电阻就变成了间接测量量。

(二) 误差

不论是直接测量还是间接测量，其目的都是想得到该物理量的真值。所谓真值，就是被测物理量所具有的客观真实数据。然而进行测量时，都必须使用一定的仪器，在一定的环境下由某一观测者去完成。由于仪器、方法、环境和观测者都不可避免地存在某些不理想的情况，因此人们无法获得真值，只能获得与真值相接近的测量值，即测量值 N 和真值 A 之间总存在一定的差异，我们称这种差异为测量误差 (ΔN) 。

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

$$\Delta N = N - A$$

上式定义的测量误差 ΔN 反映的是测量值 N 偏离真值 A 的大小. 由于真值的不可知, 因此在实际测量实验中, 常以标准值、理论值或平均值代替真值.

误差存在于一切测量之中, 而且贯串测量的全过程. 在实验中, 每使用一种仪器进行一次测量, 都会引起误差. 因此, 明确误差来源, 消除或减小误差, 提高测量精度, 是一切实验工作者的首要任务.

(三) 系统误差和偶然误差

误差产生有多方面的原因, 根据误差的性质及产生原因, 可将误差分为系统误差和偶然误差.

1. 系统误差.

测量值总是有规律地朝着一个方向偏离真值的误差称为系统误差. 它产生的原因如下:

(1) 仪器误差. 如电表刻度不准确、天平不等臂、砝码质量不准确等. 只要设法去改造仪器设计和制造, 或通过标准仪器比较校正, 这种误差就可以尽可能地减小.

(2) 方法误差. 由于理论(定律或公式)本身不够严密或实验方法粗糙等原因都会引起一定的误差. 例如, 单摆的周期计算公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 成立的条件是摆角趋于零, 而在实际测量周期 T 时, 又必然要求有一定的摆角, 再加上公式中没有考虑空气浮力和摆线质量影响等因素, 这就决定了测量结果必然存在误差. 这种误差可以由理论上的修正或改进实验方法加以减小.

(3) 个人误差. 由于实验者技术不够熟练或个人的不良习惯也会产生误差. 如用秒表测量时间, 有的人总是提前或推迟掀秒表的按钮. 这种误差可通过对实验者进行长时间的训练来修正.

(4) 环境误差. 当外界环境因素发生变化或测量仪器规定的使用条件没有得到满足时也会引起误差. 例如, 按规定电表应该水平放置, 若测量时让它直立着, 这样读数时就会造成误差.

由此可见, 系统误差产生的原因往往是可知的, 它的出现一般也都是有规律的. 因此, 在实验前应该对测量中可能产生的系统误差加以充分的分析和估计, 并采取必要的措施尽量消除其影响. 一般来说, 系统误差可以设法减小或部分加以消除.

应该指出, 系统误差经常是一些实验测量的主要误差来源. 依靠多次重复测量, 一般不能发现系统误差是否存在. 系统误差处理不妥往往会对测量结果的精确程度带来重大影响. 因此, 实验工作者必须经常总结, 掌握各种不同原理的测量仪器、各种实验方法、各种环境因素引起的系统误差的规律, 以提高实验技术素养.

2. 偶然误差, 正态分布, 标准偏差.

(1) 偶然误差又称随机误差, 它是由实验中的许多难以确定的因素造成的, 如实验环境温度的起伏、空气的不规则流动、电源电压的随机微扰等. 从表面上看, 偶然误差似乎杂乱无章, 无法预计和控制, 但若测量次数足够多, 结果就会出现明显的统计规律.

(2) 正态分布.

设物理量的真值为 μ , 测量量为 x_i , 根据误差的定义, 各次测量的误差为

$$\delta_i = x_i - \mu, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

在相同的条件下, 对同一物理量 x 进行多次重复测量, 测量结果的值总是在其真值 μ 的附近, 越靠近 μ , 出现的概率越大, 一般服从正态分布 (即高斯分布), 其形状如图 1.1-1 所示. 图中的纵坐标 $\varphi(x)$ 称为概率密度函数, 其值为

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}, \quad x < \infty \quad (1)$$

式中 σ 为曲线拐点处横坐标与 μ 值之差的绝对值, 称为正态分布的标准偏差. 图 1.1-1 称为正态概率分布曲线. 对于一确定的测量列, 如果已知 μ 和 σ 的值, 由 (1) 式可计算出实验观测值 x 落在区间 (a, b) 内的概率为

$$P(a < x < b) = \int_a^b \varphi(x) dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} dx \quad (2)$$

式中 $P(a < x < b)$ 的值可由直线 $x=a$ 及 $x=b$ 、横坐标轴以及曲线 $\varphi(x)$ 所包围的面积得到 (图 1.1-1 中阴影区). 由定积分可知, x 落在区间 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 内的概率为 68.3%, x 落在区间 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 内的概率为 95.4%, x 落在区间 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 内的概率为 99.7%. 从图 1.1-1 可知, 正态分布的概率密度分布曲线具有以下特性.

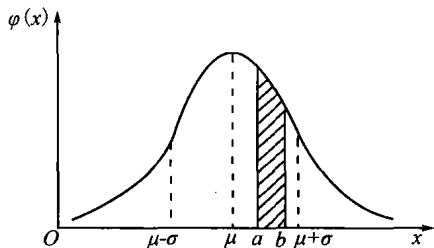


图 1.1-1 正态概率分布曲线

- ① 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率大, 绝对值大的误差出现的概率小;
- ② 对称性: 大小相等, 符号相反的误差出现的概率相等;
- ③ 有界性: 非常大的正、负误差出现的概率都趋近于零;
- ④ 抵偿性: 当测量次数非常多时, 由于正负误差相互抵消, 各个误差的代数和为零.

3. 标准偏差.

设实验已消除了系统因素所引起的影响, 在同一条件下若对某量 x 进行 n 次等精度的独立的测量, 得到的测量值的算术平均值为

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \cdots + x_n)/n \quad (3)$$

其中,每个测量值 x_i 与真值之差为

$$\delta_i = x_i - \mu$$

将各测量值的 δ_i 值相加,并除以 n ,得

$$\sum \delta_i / n = (\sum x_i / n) - \mu = \bar{x} - \mu \quad (4)$$

根据正态分布概率密度分布的对称性,当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\sum \delta_i / n \rightarrow 0, \text{ 即 } \bar{x} \rightarrow \mu,$$

所以,算术平均值是真值 μ 的最佳估计值.

测量值 x_i 与该测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 之间的偏差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 称为“残差”. 因为各残差的平均值 $\frac{\sum v_i}{n} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})}{n} = 0$, 所以各残差的平均值不能反映测量值与真值之差的大小,为此需引进“标准偏差”,其定义为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (5)$$

可以证明,(5)式定义的 σ 就是图 1.1-1 曲线中的拐点,(5)式一般称为贝塞尔公式.

在实际情况中,由于真值无法知道,且测量次数有限,一般用残差 v_i 代替 δ_i . 并且可以证明,在测量次数足够多时,标准偏差的估计值为

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

(6)式称为标准偏差估计值的贝塞尔公式.

(四)精密度、准确度和精确度

系统误差与偶然误差有着不同的产生原因和不同的性质. 因此,他们对测量结果的影响也各有不同的特点. 评价测量结果时,常常使用以下几个概念,但其含义不同,使用时应加以区别.

1. 精密度.

用来表达偶然误差的大小. 精密度高是指测量的数据比较集中,如图 1.1-2 所示.

2. 准确度.

用来表达系统误差的大小. 准确度高是指数据的平均值离真值较近,如图 1.1-3 所示.

3. 精确度.

用来综合评价测量的偶然误差与系统误差的大小,精确度高是指测量的数

据比较集中且其平均值也在真值附近,如图 1.1-4 所示。

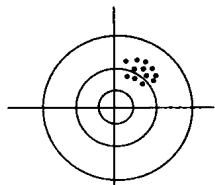


图 1.1-2 偶然误差小,
精密度高

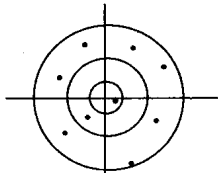


图 1.1-3 系统误差小,
准确度高

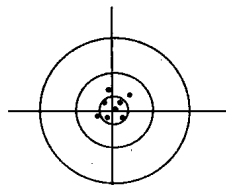


图 1.1-4 系统误差和
偶然误差都小,精确度高

二、偶然误差的平均差估算和结果表示

前面我们讨论误差的产生和分类,下面将考虑误差的估算和结果表示.在下面的讨论中,我们是在假定没有系统误差的前提下,研究偶然误差的问题。

(一) 单次直接测量的误差估算

在物理实验中,常常由于测量准确度要求不高或条件不许可等原因,对一个物理量的直接测量只进行了一次.这时,可根据实际情况,对测定值的误差进行合理的具体的估算.在一般情况下,对于偶然误差很小的测量值,可按仪器出厂检定书或仪器上直接注明的仪器误差作为单次测量的误差.如果没有注明,也可取仪器上的最小刻度的一半作为单次测量的误差.例如,标尺的最小刻度为 1 mm,用它测定金属棒长度为 287.5 mm,测量结果表示为

$$L = L \pm \Delta L = (287.5 \pm 0.5) \text{ mm}$$

(二) 多次测量的平均值及算术平均偏差

为了减少偶然误差,在可能的情况下,总要采用多次测量,将各次测量的算术平均值作为测量的结果.如果在相同的条件下对某物理量 x 进行了 n 次重复测量,其测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 平均值用 $\bar{x}$ 表示,则

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

根据误差统计理论,在一组 n 次测量的数据中,算术平均值最接近于真值,称为测量的最佳值或近真值.在这种情况下,测量的误差可用算术平均偏差表示,其定义的数学表达式为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} (|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

严格来讲,误差是测量值与真值之差,而测量值与平均值之差称为偏差,这两者是有区别的.由于真值的不可知,而平均值又最接近于真值,因此,一般常用平均值与偏差来代替真值与误差.不去区分偏差与误差的细微区别,把算术平均偏差称为平均误差.多次测量值的结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}$$