

/ 高等院校应用型本科教育“十二五”规划教材 /

DAXUE WULI SHIYAN 大学物理实验



主 编 谢国亚 邓凌云 廖其力
副主编 刘显蓉 王代新 何 静



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等院校应用型本科教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 谢国亚 邓凌云 廖其力

副主编 刘显蓉 王代新 何 静



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 谢国亚, 邓凌云, 廖其力主编. —
成都: 西南交通大学出版社, 2013.2
高等院校应用型本科教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5643-2154-3

I. ①大… II. ①谢… ②邓… ③廖… 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 (2013) 第 015933 号

高等院校应用型本科教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主编 谢国亚 邓凌云 廖其力

责任编辑	孟苏成
特邀编辑	罗在伟
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	16.5
字 数	411 千字
版 次	2013 年 2 月第 1 版
印 次	2013 年 2 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2154-3
定 价	29.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

“大学物理实验”是高校理工科各专业学生必修的基础实验课程，它的显著特点是具有基础性和实践性。因此，它在除了传授学生基本实验知识和基本实验技能外，还对学生实践能力和创新精神的培养、科学素养的提高等具有不可替代的作用。

本书是按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，同时根据学校的专业设置特点，并结合作者多年来的物理实验教学实践编写的。本书共 6 章：绪论、误差理论与数据处理基础、基础物理实验、传感器系列实验、近代物理实验、设计性物理实验。为满足基础不同的学生的培养需要，每一部分的内容都按照从低到高、从基础到前沿、从接受知识到培养综合能力的逐级提高的特点布局。因此，本教材内容既能适应低年级学生的接受能力，又能满足较高的教学培养目标的要求。

实验教学是一项集体的事业，实验教材的编写是该校和兄弟院校多个老师多年来工作的总结。本书由谢国亚、邓凌云、廖其力、刘显蓉、王代新、徐巧英、胡春霞、何静、崔海生、钟波、余艳、邓娅、李艳琼等老师编写，谢国亚负责统稿工作。王代新老师对书稿进行了认真审读，提出了宝贵的修改意见，在此表示感谢。

本书的出版得到了西南交通大学出版社的关心和支持，在此表示衷心的感谢。由于编写时间仓促，编者水平有限，疏漏之处难免，恳请同行专家批评指正。

编 者

2012 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 大学物理实验课的目的	1
1.2 学好大学物理实验课的方法	1
1.3 大学物理实验课的要求与规则	3
第2章 测量误差理论与数据处理基础	5
2.1 测量与误差	5
2.2 系统误差和随机误差	7
2.3 粗大误差	11
2.4 测量结果的不确定度评定	11
2.5 数据处理基础	20
第3章 基础物理实验	30
实验 3.1 长度和密度的测量	30
实验 3.2 单 摆	37
实验 3.3 气垫导轨的使用	41
实验 3.4 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	46
实验 3.5 弦线上驻波实验	55
实验 3.6 金属比热容的测定	58
实验 3.7 液体比热容的测定	61
实验 3.8 水的汽化热的测定	67
实验 3.9 电子元件伏安特性的测量	69
实验 3.10 伏安法测电阻与电表内阻	72
实验 3.11 静电场的模拟实验	79
实验 3.12 电子束实验	87
实验 3.13 示波器的调节与使用	99
实验 3.14 电位差计的使用	106
实验 3.15 惠斯通电桥测电阻	109
实验 3.16 RL 、 RC 电路的稳态特性测试	112
实验 3.17 霍尔元件测量磁场	115
实验 3.18 亥姆霍兹线圈磁场的测定	119
实验 3.19 薄透镜焦距的测定	122
实验 3.20 分光计的调整与使用	125

实验 3.21 光栅特性及光波波长的测定	135
实验 3.22 牛顿环与劈尖干涉实验	138
第 4 章 传感器系列实验	143
实验 4.1 金属箔式应变片——半臂、半桥、全桥性能比较	143
实验 4.2 电子秤实验	148
实验 4.3 电容式传感器位移特性实验	150
实验 4.4 霍尔传感器的位移特性实验	153
实验 4.5 差动变压器性能实验	156
实验 4.6 热敏电阻的特性研究	160
实验 4.7 Pt100 热电阻测温实验	162
实验 4.8 光电二极管和光敏电阻的特性研究	164
第 5 章 近代物理实验	166
实验 5.1 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	166
实验 5.2 不同介质中声速的测定	174
实验 5.3 多普勒效应综合实验	181
实验 5.4 光电效应测定普朗克常量	185
实验 5.5 全息照相	189
实验 5.6 塞曼效应	195
实验 5.7 夫兰克-赫兹实验	204
实验 5.8 螺线管轴向磁感应强度分布测定	211
实验 5.9 光敏电阻特性测试实验	219
实验 5.10 偏振光的观测与研究	224
第 6 章 设计性物理实验	230
实验 6.1 关于设计性实验	230
实验 6.2 重力加速度的测量	234
实验 6.3 电表改装与校准	238
实验 6.4 分光计测介质折射率	242
实验 6.5 凹透镜焦距测量	243
实验 6.6 自组望远镜	244
实验 6.7 光栅常数的测量	245
实验 6.8 双棱镜干涉的研究	246
附 表	248
参考文献	257

第1章 绪论

1.1 大学物理实验课的目的

物理学是一门实验科学。物理实验在物理理论的建立中占有极其重要的地位。许多物理学家的理论、规律是直接从大量的实验中总结概括出来的。物理理论的确立又往往依赖于实验来验证。例如杨氏干涉实验使光的波动学得以确立；赫兹电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认。

随着科学技术的发展，物理实验的范围越来越广，精确度越来越高。通过实验可以验证更深层的理论，指出理论的实用范围，推动理论的发展；同时也可以启示新的物理思想，提供新的物理方法。物理实验的成功，往往可以极大地推动生产力的发展，促进人类文明和社会的进步。总之，人类历史表明，物理学的发展是在理论和实验两方面相互推动、相互影响和密切结合下进行的。物理学领域内的所有成果，都是理论和实验结合的结晶。

因此，我们要正确处理好理论课和实验课的关系，动脑又动手，不可偏废一方。

根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的规定，物理实验是对学生进行科学素养基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的基础，也是后续课程实验的基础。因此，我们要充分地重视并做好物理实验。

物理实验课教学的目的和任务：

(1) 通过实验，对学生进行实验方法和实验技能的基本训练，从而具有初步的科学实验能力。通过实验要求学生做到：

- ① 弄懂实验原理，了解一些物理量的测量方法。
- ② 熟悉常用仪器的基本原理和性能，掌握其使用方法。
- ③ 能够正确记录、处理实验数据，分析判断实验结果，写出实验报告。

(2) 培养和逐步提高学生观察和分析实验现象的能力以及理论联系实际的独立工作能力。通过实验的观察、分析和测量，加深对物理学概念、规律的理解。

(3) 培养学生严肃认真的工作作风，理论联系实际和实事求是的科学态度，以及爱护国家财产、遵守纪律的优良品德。

1.2 学好大学物理实验课的方法

通过大学物理实验，学生应该掌握物理实验的有关知识、方法和技能，了解科学实验的重要过程和基本方法，为今后的学习工作奠定良好的基础。

那么，怎样才能学好物理实验这门课程呢？

1. 掌握实验中所采用的基本量的测量方法

基本量的测量方法既是经常要用到的,也是复杂的测量方法的基础。学习时不但要弄清它的原理,还要逐步熟悉并掌握。任何实验方法都有它的运用条件、优点和缺点,只有在亲手认真做的过程中,才能对它有深刻的认识和体会,才能够牢记于心。

2. 有意识地培养良好的实验习惯

本教材对如何正确读数、记数,如何处理实验数据,如何正确操作实验仪器等都作了一定的叙述。这些良好的方法和习惯都是前人在经历了许多实验后所作的总结。它们能保证安全,能较好地避免差错。我们在实验中要有意识地按照实验要求去做,反复地在实验中锻炼自己,养成良好的实验习惯。

3. 逐步学会分析实验以及掌握常见的排除实验故障的方法

实验结束时,一般会取得测量数据的结果,靠什么去判断所获数据是否合理?实验结果是否正确?这就要依靠分析实验来判断。即必须分析:实验方法是否正确,它能带来多大的误差,实验仪器带来多大误差,实验环境对实验结果有多大影响等等。实际上,任何理论公式都是在一定条件下的理论上的抽象和简化,而客观现实和实验所处的环境、条件却要复杂得多,实验结果必然会与理论公式有所差异。重要的是这种差异的大小是否合理,不要当实验数据与理论计算一致时,就简单地认为完成了这次实验。一旦实验数据与理论计算差异较大时,又心生失望,抱怨仪器装置,甚至拼凑数据以应付实验报告。这些表现都是不妥的。所以,无论实验数据好坏,重要的是要逐步学会分析实验,找出原因,得出合理的解释或知道该进行必要的修改。

当出现数据不佳时,应该怎样处理呢?

先要检查自己的操作步骤和读数方法。这时,关键的操作步骤和数据读取最好当场请实验老师检查和指导。如果操作步骤和读数方法都正确,那么问题可能出现在仪器上。

仪器装置的小毛病或小故障,学生要力求自己动手解决或留意观察实验老师是怎样动手解决的。即使是仪器装置失灵,也要观察教师是怎样去判断仪器的毛病所在,怎样去修复(指能当场修复的仪器)。能否发现仪器装置故障,能否修复实验仪器,也是实验能力强弱的一个重要表现,学生应该在实验中逐步提高。但对要求不能随意拆卸移动的实验或有实验规则规定的实验装置,不能随意处理。

4. 充分掌握每次实验的重点

实验是一件实践性较强的工作,除了学习重点内容外,还会遇到很多零散的问题,以及做一些枝节的工作。

本教材中所罗列出的每个实验的实验目的都是该实验的学习重点。在实验时应该把主要精力放在这些地方,以提高做实验的效率。

每个实验都有一定的实验内容,通过这些实验,使学生体验到实验的乐趣并掌握实验操作技能,最后获取必要的实验数据。在完成规定的实验内容后如果还有富余的时间,可以根据实验过程中遇到的具体情况来分析一下实验可能存在的问题。例如,某个实验仪器是否可靠?实验条件是否都得到了满足?如何予以证实?或提出对实验仪器、实验内容、实验

方法的改进意见,使实验更完美。在对这些问题的思考和处理中,每个同学会有更多的收获和提高。

实验课有它自己的规律和特点,要学好实验课不是一件容易的事情。希望同学们在学习的过程中能不断提高对物理实验的兴趣和实验技能,使自己成为一名有工程素养的技术人员。

1.3 大学物理实验课的要求与规则

1.3.1 物理实验的基本程序

物理实验无论内容如何,也无论采用哪一种实验方法,其基本程序大致相同。一般可分为以下3个阶段:

1. 实验前的预习

为了顺利、按时完成实验任务,学生一定要做好实验前的预习。

预习时应理解实验原理,搞清实验内容和要用的实验方法。为了使测量数据一目了然,防止遗漏,应根据实验要求预先画好或设计好数据表格。

不了解实验原理就动手操作,只能机械地按照教材所规定的步骤进行。尽管依葫芦画瓢地取得了一些数据,但不能深入理解物理现象的实质,也不会注意实验方法中的技巧,当然更谈不上主动地分析实验中的各种现象了。

2. 实验操作

实验操作是物理实验课程中最重要的一环,学生要充分利用这个过程认真调节仪器,仔细观察实验现象,认真记录数据,以求得到最大的收获。

进入实验室,首先要了解实验规则及注意事项;其次就是要熟悉和安装调试仪器,经教师检查电路后开始测量。测量的原始数据(一定不要加工或修改)应整齐地记录在实验数据表中,数据的有效位数由仪器的精度或分度值根据需要加以确定,数据之间要留有间隙,以便补充。若发现记录的数据有误应用笔画掉,并将正确的数据写在旁边,不要在原数据上进行涂改,因为有时在仔细核对以后常发现它并没有错。不要忘记记录有关的实验环境条件,仪器的精度、规格及测量的单位。实验原始数据的优劣,决定着实验的成败,读数时务必认真仔细,运算的错误可以修改,原始数据则不能擅自改动。两人同做一个实验时,既要分工又要协作,共同配合完成实验。最后应关闭电源,整理实验仪器,清理桌面。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的总结,要用简明的形式将实验情况及结果完整而又准确地表达出来。实验报告要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验结束后尽早写出实验报告的习惯,因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括的内容:

- (1) 实验名称。
 - (2) 实验目的。
 - (3) 实验原理：应简要地说明实验的原理并列出实验中使用的主要公式、示意图（如电路或光路图），若实际所用与教材中列出的不符，应以实际采用的为准。
 - (4) 实验仪器：列出实验中主要仪器的型号、规格，并记录其编号。
 - (5) 实验记录：全部实验中有用的数据要尽量以表格的形式列出，并正确地表示出有效数字和单位。
 - (6) 数据处理：根据要求计算出最后的测量结果，可采用列表和作图法等手段，对所得的数据应进行误差分析。
 - (7) 实验结果：最后的结果应包括测量值、误差和单位，如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律，可只扼要地写出实验结论。
 - (8) 讨论分析：回答指定的实验思考题；描述实验中观察到的异常现象及可能的解释；分析实验误差的主要来源；对实验仪器和方法的改进建议等，还可以谈谈实验的心得体会。
- 以上是对报告的一般性要求，不同的实验，可以根据具体情况有所侧重和取舍，不必千篇一律。

1.3.2 实验室规则

- (1) 实验时应严格遵守操作规程，注意安全，爱护仪器，在未弄清楚注意事项和操作方法之前不要擅动仪器。
- (2) 细心操作，认真观察，及时记录实验原始数据，决不允许事后追记。
- (3) 实验室要保持肃静和整洁，不得大声喧哗、抽烟和吃东西。
- (4) 无故迟到超过 10 min 或没有实验预习报告者不得进入实验室做实验。
- (5) 如遇到自己不能处理的问题应及时报告实验老师，电学实验电路连接完毕要经过实验老师同意，方可接通电源。
- (6) 实验结束后应将仪器、用具整理好，原始数据需经实验老师过目并签字后才能离开实验室，原始数据一律要附在实验报告后面一起交给实验老师，不得随意涂改。

第2章 测量误差理论与 数据处理基础

本章以测量误差的分析与不确定度评定、实验数据的处理为主要内容。它们属于误差理论的基础知识,这些知识不仅仅在物理实验中会用到,而且将来从事工程实验工作也是必须了解和掌握的。这章内容对低年级学生来说难度较大,不可能在一两次学习中掌握,我们要求学生认真听教师讲一遍,自己至少阅读一遍,做到对有关问题有一个初步的了解,然后再结合每一个具体实验再复习本章内容。通过学习—运用—再学习—再运用的过程,逐步加深理解,直至很好地掌握。需要说明的是,对这些内容的深入讨论是数理统计学以及计量学的任务,本书在材料的取舍上,着重于几个重要概念以及简单情况下的处理方法,不进行严密的论证,并在必要的地方作了一些简化处理。

2.1 测量与误差

本节主要介绍误差理论中常见的若干名词。

2.1.1 测量

物理实验是一门定量的科学,它研究测量原理、测量方法、测量装置以及测量结果的准确程度。测量就是把被测量与规定的标准量,按一定方法进行比较,确定其倍数的过程。

1. 直接测量和间接测量

按是否直接获得测量值,测量可分为直接测量和间接测量。

用仪器直接读出测量值的测量为直接测量。例如,生活中用米尺测量长度,用温度计测量温度,实验室用电流表测量电流等都是直接测量。如果是依据函数关系式,将直接测量的结果代入其中,计算出被测量值,这种测量称为间接测量。在物理实验中较多见的是间接测量。例如,测量某线性电阻的阻值,先用电压表和电流表“直接测量”该电阻两端的电压降 U 和通过电阻的电流 I ,然后代入公式,计算该电阻值,因此对该电阻值的测量是间接测量。

2. 等精度测量和非等精度测量

按测量条件变化与否,测量可分为等精度测量和非等精度测量。

所谓测量条件是指一切能够影响结果并可控制的全部因素,包括进行测量的人、测量方

法、测量仪器及其调整方法、环境条件等。环境条件指测量过程中环境的温度、湿度、大气压力、气流、振动、辐射强度等。

在测量条件相同的情况下进行的一系列测量为等精度测量。例如，同一个人、在同样的环境条件下、在同一仪器上、采用同样测量方法进行多次测量，每次测量值结果的可靠程度是相同的，没有任何理由认为某次测量结果比另一次更为准确，这些测量就是等精度测量。非等精度测量是指在对某一物理量进行多次测量时，测量条件不完全相同，测量结果的可靠程度当然也不同的一系列测量。一般来讲，多次测量中保持每次测量条件完全相同并不容易，所以在重复测量时，要注意尽量保持相同的测量条件。有时测量条件的变化对测量结果的影响可以忽略，这时的测量可视为等精度测量。

3. 测量的精密度、正确度和准确度

物理量的真值，指物理量在确定条件下实际具有的量值。

对于一组测量结果，习惯上常用术语——精密度、正确度和准确度——来作定性描述，三者与测量误差都有联系。

如果对某物理量作等精度的多次测量，得到的一组数据彼此接近，就称该组测量的精密度高。如果某组数据的平均值对于真值的偏差较小，称该组测量的正确度高。如果某组数据集中于真值，则称该组测量的准确度高。精密度和准确度都是定性概念，定量描述需用不确定度（见下文）。图 2.1.1 为打靶留下的弹着点分布图，可形象表示精密度高、正确度高和准确度高三种情形。

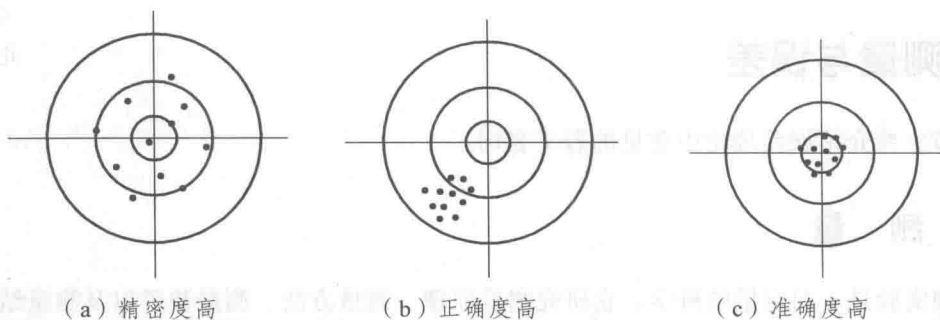


图 2.1.1 精密度、正确度和准确度的关系

另外，我们常用精密度（俗称精度）和准确度衡量仪器的性能。通常，仪器的精密度指仪器的最小分度，分度越细，精密度越高。有的仪器用灵敏度表示精密度，灵敏度指单位被测量使仪器偏转的格数，它等于精密度的倒数。仪器的准确度指按规定条件使用仪器时，能达到的最小误差。由于制造上的原因，一般仪器准确度达不到最小分度。

2.1.2 误差

对被测量真值的认知过程是一个不断深入、接近的过程。测量和误差是一对矛盾，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。随着科学水平的提高和人的经验、技巧、专门知识的丰富，误差可以被控制得越来越小，但是在绝大多数情况下不能使误差为零。我

们把测量值与真值之差定义为(绝对)误差,即

$$\Delta N = N - A \quad (2.1.1)$$

式中 N ——测量值;

A ——真值;

ΔN ——测量误差。

像平面三角形三内角之和恒为 180° 、水三相点温度为 273.16 K , 这样的理论值是事先知道的, 因此用式(2.1.1)可以计算误差。例如, 测得某平面三角形的三个内角值, 相加为 $180^\circ 00' 03''$, 则由式(2.1.1)计算得到该测量值的误差 $\Delta N = 180^\circ 00' 03'' - 180^\circ = 3''$ 。然而, 这只限于极少数情况, 一般情况是真值为未知量, 所以理论上用式(2.1.1)计算误差是行不通的。实际测量中, 为了进行某些计算, 常采用公认值, 或较高准确度仪器的测量值, 或多次测量的平均值替代式(2.1.1)中的真值进行误差计算, 这些替代值称为约定真值(相对真值)。例如, 用一普通压力计测量压力, 结果为 98.086 MPa , 而用更准确的压力计测同一压力值为 98.116 MPa , 代入式(2.1.1), 则用普通压力计测量的误差为

$$\Delta N = 98.086 - 98.116 = -0.030\text{ (MPa)}$$

相对误差定义为绝对误差 ΔN 与真值 A 之比, 实际中, 考虑到测量值与真值相差不大, 所以常把绝对误差 ΔN 与测量值 N 之比作为相对误差, 用百分数表示为

$$E = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (2.1.2)$$

当被测量为两个不同量纲的量时, 用相对误差可以比较这两个量测量的水平高低, 而用绝对误差是无法比较的; 当被测量量纲相同, 相对误差也可用于比较测量的优劣(此处不考虑测量成本等问题)。例如, 设某长度的测量值为 $1\,000\text{ mm}$, 如果绝对误差为 5 mm , 则相对误差为 0.5% ; 而对于另一长度, 如果测量值为 10 mm , 绝对误差为 1 mm , 则相对误差为 10% 。比较前后两个测量, 前者的绝对误差为后者的 5 倍, 但前者的相对误差却小于后者, 应当认为前者的测量效果优于后者。

对于误差, 通过分析它们的起因, 并于测量中采取有效措施, 能降低或基本消除某些误差成分(误差分量)的影响。对于未被消除的“剩余”误差, 则要估计出它们的极限值或特征参量, 以便对测量结果的不确定程度加以评定, 尽可能完善、准确地表示测量结果。

2.2 系统误差和随机误差

即使是一个很简单的测量, 误差的来源也不会是单一的。误差以各种形式出现, 按照性质和特点的不同, 常把误差划分为随机误差、系统误差和粗大误差三类, 下面分别予以介绍。

2.2.1 随机误差

在多次等精度测量中, 如果测量结果不尽相同, 而且以不可预知方式变化, 则测量结果

存在随机误差。大量实验证明, 尽管结果不可预知, 测量的随机误差的分布(散布)则常常满足一定的统计规律(统计规律指对大量测量数据进行统计分析得到的结果)。

随机误差产生的原因是多方面的, 实验者感官感觉以及仪器性能的不稳定可以引起随机误差, 无规则的微小环境干扰因素也可以产生随机误差。

1. 算术平均值

统计规律表明, 随机误差的分布大多是有“抵偿性”的。也就是说, 测量次数足够多时, 正误差和负误差的分布基本对称, 可以大致相抵消。因此, 取多次测量值的算术平均值作为被测量的测量结果。一般说来, 比单次测量结果的误差小(极少数情况除外)。设对同一量在相同条件下作 n 次测量, 各次测量值为 x_i , 则算术平均值为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (2.2.1)$$

$\bar{x}$ 也称为最佳估值。按照统计学, 最佳估值趋近于真值的条件是, 测量次数 $n \rightarrow \infty$ 。当测量次数足够多, $\bar{x}$ 作为真值的最佳估值才具有足够的可信度, 因此, 增加等精度测量次数可以减小随机误差。

2. 标准偏差

实验还表明, 随机误差的分布常呈现“单峰性”, 如图 2.2.1 所示, 不同的随机误差分布会有不同的“峰”形状。峰形窄而高, 说明随机误差较小; 宽而低说明随机误差较大, 因此峰的形状体现了测量值分散的程度。在统计学中, 测量值的分散程度用标准偏差 s 表征, 即

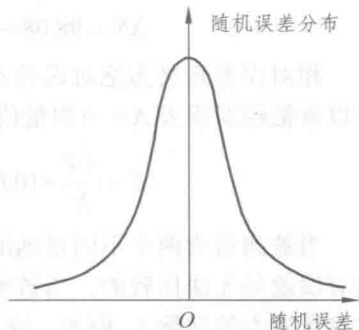


图 2.2.1 随机误差分布

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2.2)$$

式(2.2.2)称为贝塞尔公式, 是 n 次测量值的标准偏差。平均值的标准偏差可用下式估算:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.2.3)$$

标准偏差是一个统计量, 它刻画了随机误差“峰”的特征, 标准偏差大表示随机误差分布范围宽, 测量值相对分散, 测量的精密度低; 标准偏差小表示随机误差的分布范围窄, 测量值集中, 测量精密度高。

注意: 随机误差不是统计量, 并不等于标准偏差。

随机误差导致测量值分散意味着测量值具有不确定性, 现代计量学采用标准偏差表示测量值的这种不确定性(见下文: 测量结果的不确定度评定)。

随机误差的分布规律和处理方法涉及数理统计和计量学理论, 详尽内容请查阅有关理论书籍。

2.2.2 系统误差

在对同一被测量的多次等精度测量过程中,保持恒定或以可预知方式变化的误差分量称为系统误差。系统误差的产生有时是由于测量中存在确定的影响因素,导致测量值发生偏移,偏移的大小保持恒定或者按可预知规律变化。例如,用某物理天平称 100 g 的砝码,在相同测量条件下,总显示 102 g,多出的 2 g 为系统误差。又如,分光计的刻度盘中心偏离游标盘中心,使读数误差按一定规律变化(参考第 3 章基础物理实验 3.20 “分光计的调整与使用”)。测量中,如果能够发现系统误差的来源,就可以采取相应措施,使之基本消除或减小。通常,系统误差包括以下几类。

1. 常见的系统误差

1) 理论或方法误差

当测量所依据的公式是近似式,或者所采用的测量方法不完善时,理论或方法误差就随之产生了。例如,通过测单摆的周期 T 和摆长 l ,代入下面近似公式,计算得到重力加速度 g 为

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.2.4)$$

而准确的理论公式应为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \left[1 + \frac{1}{5} \left(\frac{r}{l} \right)^2 - \frac{1}{12} \cdot \frac{m_0}{m} \left(1 + \frac{r}{l} + \frac{m_0}{m} \right) + \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{1}{16} \alpha^2 \right]} \quad (2.2.5)$$

式中 r ——摆球半径;

m ——摆球质量;

m_0 ——摆线质量;

ρ_0 ——摆球质量密度;

ρ ——空气质量密度;

α ——摆角。

可见,方括号中的后四项是被忽略了的,由此带来的误差为系统误差,简称理论误差。再如,空气折射率以 1 代替;电测量中,由于方法不完善,引起测量装置的绝缘体漏电;引线电阻引起电压降等,均产生系统误差,简称方法误差。

要消除理论或方法误差分量,变更实验方法就可以了。在上面例子中,可选择落球法测重力加速度,消除原有的理论误差。

2) 仪器误差

此种误差是由于仪器或测量工具的不完善,或没有按照规定条件使用仪器造成的。例如,标准电池和标准电阻的标称值与它们本身体现出的量值之间有差异、等臂天平不等臂、电表分度不均匀、螺纹副的螺距不均匀、电子仪器的某些器件性能不能达到设计要求、水银温度计指零时并不对应水的三相点温度等。修正此种误差的方法是更换实验仪器,或隔一定时期就用标准仪器校验使用中的仪器,或采取其他补救措施,例如,用替换法消除不等臂天平的

测量误差：先用替代物（如细沙）与待测物平衡，在不改变替代物质量的条件下，取下物体换上砝码并使天平再度达到平衡，则砝码的质量即为物体的质量。

3) 环境误差

此种误差是由于测量条件与实验设计者所要求的标准条件不一致引起的，如测量时环境温度对要求值的偏离，空气浮力对天平质量称量的影响。修正的方法是改善测量条件，使之达到标准条件，或者设法估计出误差，然后在测量结果中予以修正，或用某些方法进行补偿。例如，在热学实验中，环境的吸热或放热对测量结果有影响，而且由于物体升温（或降温）是一个连续变化的动态过程，物体温度达到某值与人在测温装置上确认达到该温度值之间存在时间差，即有滞后现象。在升温条件下与降温条件下各进行一次测量，取其平均值作为测量结果，能使两次测量中的误差相互抵消，减小了环境影响以及测温滞后引起的系统误差。

4) 调整误差

就一般仪器而言，在使用时要求预先调整到规定的使用状态，如果不这样做，就会产生所谓调整误差。例如，为降低零值误差，测量仪表要预先调零、天平使用时要预先调水平、气压表要求铅直放置等。要减小调整误差，实验者需养成良好的工作习惯，严格按操作规程，把仪器调整到规定的使用状态再进行测量。

5) 人身误差

由于人的心理、生理因素，使得感觉灵敏度和即时反应上存在差异。比如用停表计时，有人总是反应早些或迟些；用仪表指针读数时，有人习惯性地偏左或偏右。

总之，引起系统误差的因素多种多样，要减小系统误差需根据具体情况进行分析。系统误差影响的是测量值的正确度，增加测量次数是不能减小系统误差的，只有靠在实验过程中不断总结分析、累积经验，提高实验素质，增强处理各类系统误差问题的能力。

2. 按照处理方式分类的系统误差

按照处理方式的不同，系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差。

1) 已定系统误差

已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的误差分量，测量中应尽量消除。如果测量结果含有这种误差，则应予以修正，修正公式为

$$\text{已修正的测量结果} = \text{测量值（或多次测量平均值）} - \text{已定系统误差}$$

式中，已定系统误差可以大于、小于 0。

电流表没有通电时，指针不在零位置，测量时读数就会有误差——零值误差（零差）；游标卡尺、螺旋测微计（千分尺）也常有零差，这是一种常见的已定系统误差。如果不能通过调整仪器的方法消除该误差，就要记下零值读数（即零差），然后用上式进行修正。关于零差的修正例子参阅本章【例 2.4.4】。

2) 未定系统误差

未定系统误差是指符号或大小未经确定的系统误差分量。实验中一般只能估计出未定系

统误差的限值,即它的分布范围,例如,在 $21.0 \sim 23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的空调室内,某时刻室温对 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的偏离是已定系统误差,但不同时刻的偏离在 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变动,分布范围已知,但分布规律未知。可见,对于不同时刻的测量,或不同被测量,未定系统误差也具有随机性。由于分布规律未知,处理未定系统误差的方法与上述的用统计方法计算标准偏差不同,具体方法参考下文——B类不确定度。

随着认识水平的提高,原来的未定系统误差可以转化为已定系统误差。

总之,处理系统误差的一般方法是:对已定系统误差进行修正;通过方案选择、计量器具校准、环境条件控制、改进数据处理方法等环节来减小未定系统误差的限值(分布范围);合理评估未定系统误差分量。

大量测量实践表明,测量的系统误差常常显著地大于随机误差,在实验中,分析或找出系统误差是工程技术人员的一项重要课题,也是较困难的工作。因此,在教学中我们要求学生初步了解系统误差的分析方法,学习如何估计和确定未定系统误差的限值,注意积累和总结克服系统误差的方法和经验。

2.3 粗大误差

粗大误差是因测量差错造成的,包括测量或记录时的差错、外界突然的严重干扰等。粗大误差一般超出正常的误差分布范围,对测量结果产生明显的、过大的偏离,因此,测量中应尽量避免。一旦确认含有粗大误差的测量数据(称异常值),应予以剔除。

要避免粗大误差,重要的是以严格的科学态度对待实验,认真完成每一实验步骤,不可马虎,应付差事。

在物理实验教学中,超常值一般是含有粗大误差的。然而在科学实验中,并非一切有过大偏离的测量值一定含有粗大误差,在判断某测量数据是否含有粗大误差时要慎重分析。

2.4 测量结果的不确定度评定

2.4.1 不确定度的含义

对于误差,一方面,可以通过增加测量次数、改善测量方法和测量条件等措施使之减小;另一方面,对于已经测出的结果(仍含误差)应当给出合理的关于测量准确程度的评价。对于初步的、要求不甚高的测量,用式(2.1.1)和式(2.1.2)计算误差和相对误差,进而对测量结果作出大致判断,是简便而有效的。但对于要求较高、较复杂的测量,通常要求给出对测量结果可靠性的评定。对于不同的具体情形,以往人们评定的方法并不一致,而且各有道