

# 大学物理

*DAXUE WULI SHIYAN*

● 主编 徐红

实 验

(第2版)

*DAXUE  
WULI  
SHIYAN*



西北大学出版社  
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

# 大学物理

*DAXUE WULI SHIYAN*

实 验

(第2版)

- 主 编 徐 红
- 副主编 宋 蓓 王海军



西北大学出版社  
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 徐红主编. -- 2 版. -- 西安: 西北大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5604-4234-1

I. ①大… II. ①徐… 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(2018)第 190720 号

### 大学物理实验(第 2 版)

主 编 徐 红  
出版发行 西北大学出版社  
地 址 西安市太白北路 229 号  
邮 编 710069  
电 话 029-88303042  
经 销 全国新华书店  
印 装 西安向阳印务有限公司  
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16  
印 张 16  
字 数 330 千字  
版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5604-4234-1  
定 价 48.00 元

---

本版图书如有印装质量问题,请拨打电话 029-88302966 予以调换

## 第 2 版前言

本书是按照延安大学西安创新学院物理实验课程教学大纲的要求,并结合物理实验室仪器设备的实际情况,在总结多年教学实践经验的基础上编写而成的。

全书的主要内容包括绪论、测量误差的基本知识、实验室常用仪器及实验基本知识、基础性提高性实验、综合性实验、设计性实验、实验报告示例和附录等部分,其中共有 29 个实验。绪论部分主要介绍物理实验的特点、地位和作用,物理实验课程的目的与任务、基本程序与要求以及实验报告的撰写格式等,并且给出了物理实验成绩评定的标准。第一章主要介绍实验误差和不确定度的基本概念和计算方法,以及有效数字的概念和常用实验数据处理的方法。第二章介绍实验室常用仪器的使用和预备性实验(4 个实验供学生自学参考),旨在方便加深学生对常用实验方法的理解和掌握。第三章安排了 16 个有关力学、热学、电磁学和光学的基础性及提高性实验,这些实验按不同层次由易到难,旨在加强学生对实验基础理论知识的掌握和基本实验技能的培养。第四章、第五章为综合性实验和设计性实验项目,旨在提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力,有利于培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力,为今后创造性地开展科研工作打好基础。实验报告示例介绍实验报告的格式和要求,常用数据的处理方法。附录给出常用的物理参数,以便查阅。

本书自第 1 版出版以来,为使其更适合教学的需要,我们结合教学实践过程中遇到的一些问题,同时又征求了学生和同行的意见与建议,为适用于应用型本科人才培养,对第 1 版做了修订。即兼顾各专业需求,精选实验题目;实验原理及操作步骤等内容更丰富详实,便于学生预习和实验操作。在编写过程中力求做到实验目的具体、突出,实验要求明确,实验原理叙述清楚,实验内容和步骤详尽,方便学生学习。

本书第 2 版由徐红担任主编并负责统调、修改和定稿,宋蓓、王海军任副主编。其中绪论,第一章,第二章第二节,第三章实验十一、实验十二由宋蓓编写;第三章实验九、实验十、实验十三、实验十四,第四章实验三、实验四由王海军编写;第三章实验一、实验三、实验八、实验报告示例由刘宇波编写;第三章实验二、实验四、实验五、实验六、实验七由李慧编写;第二章第一节由刘亚红编写;其余由徐红编写。本书插图由乔锐、刘宇波绘制。

本书第 2 版在编写过程中得到所在部门领导、同事的热情帮助,在此表示衷心感谢;特别要感谢宋家整教授和白海涛教授的指导。由于编者水平有限,本书一定存在不少不妥之处,热切希望读者向我们提出建议,以便修正。

编 者

2018 年 3 月

# 前 言

本书是依据延安大学西安创新学院物理实验课程教学大纲的要求,结合学校物理实验教学的实际情况及物理实验室的具体仪器而编写的,也是在这些年使用的物理实验讲义的基础上不断改进、不断完善成果。

本书绪论部分介绍了大学物理实验的性质与任务。第一章介绍了误差理论与数据处理的相关内容,简要介绍了误差以及数据处理方面的知识,供实验过程中参考。第二章介绍了实验室常用仪器的使用和预备性实验(4个供同学自学参考),方便同学们加深对常用实验方法的理解和掌握。第三章安排基础性、提高性实验共16个。按不同层次由易到难,以加强学生对实验基础理论知识的掌握和基本实验技能的培养。第四章、第五章为综合性实验和设计性实验项目,以提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力,有利于培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力,为今后创造性地开展科研工作打好基础。

本书由徐红担任主编并负责统稿、修改和定稿。宋蓓、王海军任副主编。其中绪论、第一章、第二章的第二节、第三章的实验十一和实验十二由宋蓓编写,第三章的实验九、实验十、实验十三、实验十四和第四章的实验二和实验三由王海军编写,第二章的第一节和第三章的实验一、实验三、实验八由刘宇波编写,第三章的实验二、实验四、实验五、实验六和实验七由李慧编写,其余部分由徐红编写。乔税为本书绘制了大量插图。

本书在编写过程中得到所在部门的领导、同事、宋家鳌教授的热情帮助,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,加之时间仓促,本书一定存在不少不妥之处,诚恳希望读者给我们提出宝贵建议,以便修正。

编 者

2016年1月14日

# 目 录

绪 论 .....	(1)
第一章 测量误差的基本知识 .....	(4)
第一节 测量与误差 .....	(4)
一、测量 .....	(4)
二、误差及其分类 .....	(5)
第二节 测量的不确定度 .....	(11)
一、测量的不确定度的基本概念 .....	(12)
二、测量误差与不确定度的区别 .....	(17)
第三节 有效数字及其运算 .....	(18)
一、直接测量示数的读取 .....	(18)
二、直接测量的有效数字 .....	(18)
三、间接测量有效数字的运算法则 .....	(19)
四、注意事项 .....	(22)
第四节 测量结果的评定 .....	(22)
一、直接测量量结果的评定 .....	(22)
二、间接测量量结果的评定 .....	(24)
第五节 实验数据的处理方法 .....	(29)
一、列表法 .....	(29)
二、作图法 .....	(30)
三、逐差法(环差法) .....	(32)
四、最小二乘法 .....	(34)
第六节 用计算机处理实验数据 .....	(37)
一、工作表中内容的输入 .....	(37)
二、图表功能 .....	(40)
三、线性回归分析 .....	(42)
习 题 .....	(43)

第二章 实验室常用仪器及实验基本知识 .....	(45)
第一节 力学、热学常用仪器及使用 .....	(45)
一、常用长度测量仪器 .....	(45)
二、常用质量测量仪器 .....	(51)
三、计时测量仪器 .....	(54)
四、常用温度测量仪器 .....	(55)
实验一 测量物体的几何尺寸 .....	(56)
实验二 冰的熔解热的测定 .....	(58)
第二节 电磁学实验常用仪器及使用 .....	(63)
一、电磁学实验中的常用仪器 .....	(63)
二、电磁学实验操作规程 .....	(73)
实验三 基本电学量的测量 .....	(74)
第三节 光学实验常用仪器及使用 .....	(77)
一、使用光学仪器的注意事项 .....	(77)
二、光学实验常用仪器的结构与调节 .....	(78)
三、常用光源 .....	(80)
四、光学元件 .....	(81)
实验四 薄透镜焦距的测定 .....	(82)
第三章 基础性及提高性实验 .....	(89)
实验一 物体密度的测量 .....	(89)
实验二 单摆实验 .....	(93)
实验三 验证牛顿第二定律 .....	(99)
实验四 用三线摆测定计算出物体的转动惯量 .....	(106)
实验五 用混合法测定固体的比热容 .....	(110)
实验六 用伸长法测定金属丝的杨氏模量 .....	(114)
实验七 验证动量守恒定律 .....	(119)
实验八 用落球法测量液体的黏滞系数 .....	(121)
实验九 用伏安法测量电阻及电路设计 .....	(128)
实验十 非线性元件伏安特性曲线的研究 .....	(135)
实验十一 静电场的描绘 .....	(143)
实验十二 电子示波器的使用 .....	(150)
实验十三 用惠斯登电桥测量电阻 .....	(162)
实验十四 霍尔效应实验 .....	(168)

实验十五 分光计的调整及使用 .....	(174)
实验十六 等厚干涉及应用 .....	(180)
<b>第四章 综合性实验 .....</b>	<b>(186)</b>
实验一 精密称衡 .....	(186)
实验二 简谐振动的研究 .....	(190)
实验三 PN 结正向压降的温度特性实验 .....	(193)
实验四 用霍尔法测量圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场 .....	(197)
实验五 迈克尔逊干涉仪的调整与使用 .....	(201)
实验六 用双棱镜测定光波的波长 .....	(209)
实验七 测定单缝衍射的光强分布 .....	(213)
实验八 用透射光栅测定光波的波长及光栅的参数 .....	(216)
实验九 用光电效应法测定普朗克常量 .....	(219)
<b>第五章 设计性实验 .....</b>	<b>(224)</b>
<b>第一节 怎样做好设计性实验 .....</b>	<b>(224)</b>
一、设计性实验的性质和特点 .....	(224)
二、设计性实验的基本程序 .....	(224)
三、设计性实验实验方案的制订 .....	(224)
<b>第二节 设计实验项目 .....</b>	<b>(230)</b>
一、分析天平振动的研究 .....	(230)
二、测定易溶于水的颗粒物质的密度 .....	(230)
三、重力加速度的测量 .....	(230)
四、多管落球法测量液体的黏滞系数 .....	(231)
五、测量小灯泡的伏安特性曲线 .....	(231)
六、简易万用表的设计及校准 .....	(231)
七、用滑线变阻器简单控制电路的研究 .....	(232)
八、测量给定电阻丝的电阻值和电阻率 .....	(232)
九、电表内阻的测量 .....	(232)
十、用电位差计校准电表和测定干电池的电动势及内阻 .....	(233)
十一、简谐振动的研究 .....	(233)
十二、用混合法测定固体熔解热的研究 .....	(233)
十三、长焦距凸透镜焦距的测量 .....	(234)
十四、自组望远镜 .....	(234)
十五、给定不平整表面的检测 .....	(234)

十六、设计测量细丝直径的方法 .....	(234)
十七、用 Excel 软件分析单摆实验中随机误差的正态分布 .....	(235)
十八、测量 PN 结温度传感器的温度特性 .....	(235)
十九、光栅特性的研究 .....	(235)
二十、光学材料折射率的测定 .....	(236)
二十一、用光电效应法测定普朗克常数 .....	(236)
二十二、用霍尔效应法测定螺线管的轴向磁场分布 .....	(236)
<b>实验报告示例</b> .....	(237)
<b>附 录</b> .....	(244)
附录一 水的密度 .....	(244)
附录二 常用物质的密度 .....	(244)
附录三 常用固体和液体的比热 .....	(245)
附录四 20℃时部分金属的杨氏模量 .....	(245)
附录五 海平面上不同纬度处的重力加速度 .....	(245)
附录六 常用光源的谱线波长表 .....	(245)
<b>参考文献</b> .....	(246)

# 绪论

## 一、物理实验课的目的

物理学是一门实验科学。物理概念的建立及物理规律的发现,都是以严格的科学实验为基础的,并用实验手段及生产实践来检验其正确与否。从物理学史来看,不论过去、现在还是将来,实验都对物理学的发展起着极大的推动作用。随着科学技术的迅猛发展,各学科相互交叉渗透,与物理有关的边缘学科相继建立,而物理实验的基本理论、方法、仪器和技术已经被广泛地应用到各自然学科领域及工程技术部门。

物理实验课是对大学生进行基本科学实验训练的开端,是高等学校理工科专业的学生进入大学后接受实验方法及实验技能系统训练的一门独立开设的必修基础课,与物理理论课具有同等重要的地位。由于实验课自身的任务和特点,其开设目的是:

(1)通过对物理现象的观察、分析及对物理量的测量,加深对物理概念和理论的理解。

(2)学习物理实验的基本知识、基本方法和基本实验技能(其中包括熟悉实验原理、实验程序;正确选择和使用仪器;掌握基本的测量技术和方法;正确记录与处理实验数据;逐步学会对实验现象的分析、判断能力;能够对实验结果做出正确的评估;写出合格的实验报告;对简单的设计性实验拟定实验操作程序等)。

(3)培养学生严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,包括提高学生的科学素质、创新精神和实验能力及主动探索、爱护公物、遵守纪律、勤俭节约等良好习惯。

(4)培养并提高学生的科学实验能力。包括自学的能力——能够自己阅读实验教材及参考资料,正确理解实验内容,做好预习工作;动手实践的能力——能够借助教材和说明书,正确调节和使用常用仪器;观察和分析实验现象的能力——能够准确把握实验现象,运用物理学理论对实验现象进行初步的分析和判断;表达书写的的能力——能够正确记录和处理实验数据、绘制图线、说明实验结果、撰写实验报告;简单设计的能力——能够根据课题要求,设计实验方案,包括确定实验方法和条件、合理选择仪器、拟定具体的实验程序。

## 二、物理实验课的基本环节

物理实验是以学生独立活动为主,在教师的指导下,以实验的方式来研究物理问题的学习过程。物理实验一般可按下面的3个步骤进行:实验的准备与预习、实验的观测与记录、数据的处理及分析。下面就这3个步骤加以说明。

### 1. 实验的准备与预习

实验前的准备与预习是否充分,是在规定学时(3学时)内顺利完成实验并取得预期效果的重要环节。首先,要通读实验讲义,对实验的全过程有一个总体的了解。主要以理解

实验原理为主,明确实验的方法及步骤、主要设备仪器的用法及使用条件、注意事项等,在此基础上写出简要的预习实验报告。内容包括以自己的语言简述实验原理,写出原理公式及实验测量公式,画出实验原理图、光路图或装置简图,并对公式或图做出必要的说明;自行设计数据表格,使得测量数据清晰、明了、无遗漏、无差错,并在表格中标明物理量的符号、单位、测量次数等。对预习中不清楚的问题,应在预习报告中做出记录,以便在实验时请指导教师解答。填写好预习报告于实验操作前交实验指导教师审查,经审查合格后方可进行实验操作。

## 2. 实验的观测与记录

做实际测量前,要先对测量仪器的使用方法、工作电压、水平、铅垂、光照、各按钮开关的次序等做进一步熟悉,并使之处于完全正确的工作状态后方可正式开始观测(必要时可先做检验性测试)。及时记录测量原始数据,不得操作后补记,无明确理由肯定某数据有错误者,所测数据一律如实记录,更不得拼凑数据和任意涂改。关于各种测量仪器的使用方法将在各个实验中具体介绍。认真阅读讲义或听老师讲解。观测与记录是实验是否成功的根本环节。在观测过程中,还要对实验现象随时加以观测、分析,随时解决实验中出现的各种问题。通过逐步培养及实验,应能够了解常用仪器的性能并学会其使用方法,能够进行常用物理量的一般测量,能够调整常用实验装置并掌握基本的操作技术,熟悉物理实验中基本的使用方法和测量方法。

完成实验后全部数据应交指导老师检查,教师在预习报告和原始数据上签字后,才能切断电源。整理好实验装置,结束本次实验。

## 3. 数据的处理及分析

实验观测结束后,应及时做好数据处理工作,按照数据处理方法及误差理论,计算出实验结果并给出必要的图表等,在此基础上完成规范的实验报告。

实验报告应简单明了,书写工整,图表正规,数据完整。每人都要独立完成实验报告(包括两人一组的实验),这是每一个大学生应具备的报告工作成果的能力。

实验报告的具体格式一般为:

- (1)实验名称。
- (2)实验目的。
- (3)实验仪器。主要仪器编号、规格。
- (4)实验原理。用个人的语言简述(可参照预习报告)。
- (5)实验内容及主要步骤。
- (6)实验数据及结果。包括数据表格、误差计算、实验结果、数据处理图线等。
- (7)问题讨论。包括回答思考题,误差原因的分析,对实验的意见、建议和其他心得体会等。实验的原始数据记录,经指导老师签字后随实验报告一并交老师批改。

以上(1)~(5)为预习报告中需要完成的内容。

### 三、学生实验要求

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验的顺利进行,进而提高实验教学质量,特提出以下要求:

(1)实验前要做好预习工作,必须写好预习报告。无预习报告或不带实验指导书者不允许参加实验。

(2)准时上课,必须签到,不准无故缺席。有事必须课前请假,经准许后方可安排补做,否则按缺席处理。

(3)在实验过程中,不得擅自调换实验仪器或实验台位。实验中需要认真操作,仔细观察,如实、详细、完整地记录实验现象和原始数据,切忌抄袭和弄虚作假。

(4)实验完毕,原始数据要经教师签字,整理好仪器后方可离开实验室。实验报告要合格撰写,按时上交,严禁抄袭,一经发现本次实验记为零分。

### 四、大学物理实验成绩的评定

单个实验成绩由课堂成绩和实验报告成绩组成,采用百分制,其中课堂成绩占 50% (含课堂考勤),报告成绩占 50%。

学期实验成绩为实验理论成绩和各个实验成绩的平均值。

# 第一章 测量误差的基本知识

本章主要介绍测量误差理论、实验数据处理、实验结果表述等初步知识,这是进入大学物理实验前必备的基础知识,也是今后从事科学实验工作所要了解和掌握的。这部分内容涉及面广,对它们进行更深入的讨论将超出本课程的范围,如深入讨论测量误差理论,就应属于数理统计学或计量学的范围。因此,本章仅侧重于介绍一些基本概念,引用一些结论和计算公式,以满足本课程教学的需要。在以后的实验过程中,还将适当地安排一些内容,通过实际运用加深理解,逐步掌握。

## 第一节 测量与误差

### 一、测量

#### 1. 测量的含义

物理实验离不开对物理量的测量。所谓测量就是借助仪器,用某一计量单位把待测量的大小表示出来,即待测量是该计量单位的多少倍。具体来说,就是将待测量与作为计量单位的同类量进行比较,并确定其比值的过程。

被测量的物理量必须由数值和单位两部分组成。

任何一个测量过程都包括被测对象、测量设备、测量方法、测量环境和测量工作人员 5 个要素。测量对象确定后,要提高测量质量,应合理选择测量方法和测量设备,确定测量环境和测量人员,严格按照设计的测量程序完成全部操作。

#### 2. 测量的分类

从不同的角度考虑,测量有不同的分类法。

按照测量值获得的方法不同,可分为直接测量与间接测量两类。

直接测量是用计量仪器和待测物进行比较,直接读出测量结果的测量。如用米尺测量摆线的长度,用天平称量质量,用温度计测量温度等。而相应的被测量的长度、质量、温度等称为直接测量量。直接测量的优点是直观、简便,是实验中最基本的测量,也是间接测量的基础。

但多数物理量,由于测量手段、条件的限制,不能进行直接测量,而是先测出与该待测量有一定函数关系的直接测量量,然后代入函数关系(物理公式)求出结果。这种测量方式称为间接测量,相应的待测量称为间接测量量。例如,测一小圆柱形铜棒的密度,我们可以

先用游标卡尺对其直径  $d$  和高度  $h$  进行测量,用物理天平对其质量  $m$  进行测量。然后将各直接测量量的数值代入公式  $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ ,将密度  $\rho$  计算出来。显然,对物理量  $d$ 、 $h$ 、 $m$  的测量为直接测量,对物理量  $\rho$  的测量为间接测量。

根据测量条件的不同,测量又可分为等精度测量和非等精度测量。

在相同的测量条件下(即测量的五要素完全保持不变),对某一待测量所做的多次重复测量称为等精度测量。等精度测量又称为重复性测量。

在改变测量条件的情况下,对同一待测量所进行的测量称为非等精度测量。

等精度测量时,不能判断所获得的哪个测量数据更接近被测量的真实值,在数据处理过程中对所有数据应一视同仁,同等对待,即所有数据的可信赖程度是相同的。非等精度测量获得的所有数据的可信赖程度是不同的,在数据处理的过程中应区别对待。

大学物理实验学习阶段,一般可近似为等精度测量。

## 二、误差及其分类

### 1. 误差的定义

对任何一个被测量,在当时的实验条件下,均有不依人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值,一般用  $x_0$  表示。测量的理想结果是真值,但是它是不能确知的。因为,首先测量仪器只能准确到一定程度,其次有理论的近似性、实验者操作和读数不能十分准确、环境条件的影响等,使得测量值  $x$  与真值  $x_0$  总是有差异。把测量值与真值之差定义为误差,一般用  $\Delta$  表示,即

$$\Delta = x - x_0 \quad (1-1)$$

在式(1-1)中,误差是带有单位的数,可正可负。误差反应测量值偏离真值的大小和方向。真值只是理想概念,一般情况下真值是未知的。只有在某些特殊情况下,真值可认为是已知的,主要包括以下几种情形:

- 1) 理论真值。理论值如三角形的内角和为  $180^\circ$ ,这是公认值;各国公认的一些常数。
- 2) 约定真值。计量学约定的真值,如国际计量机构指定选取的 7 个 SI 基本单位。
- 3) 标准器具的相对真值。用准确度高一个等级的仪器校正的测定值。
- 4) 算术平均值。通常将某已被测量在重复条件或复现条件下的多次测量结果的平均值作为最佳值并视作为约定真值。

任何测量都存在误差。由于真值是不能确知的,所以误差也是不能确知的。在此情况下,测量的任务是设法将测量值中的误差减至最小;求出在测量条件下被测量的最佳估计值;用测量误差对最佳估计值做出可靠性估计。

### 2. 误差的表示形式

#### (1) 绝对误差

绝对误差与测量误差的定义相同,即

$$\Delta = x - x_0$$

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和方向。绝对误差可表示某一测量结果的优劣,但比较不同测量结果则不适用。

### (2) 相对误差

把绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差,可表示为

$$E = \frac{\Delta}{x_0} \quad (1-2)$$

相对误差是无量纲数,通常用“%”表示。

### 3. 误差的分类

任何测量的误差都是多种因素引入误差的总体效果。为了研究如何减小误差及对误差做出评估,我们按照误差产生的原因和性质,将其分类并加以讨论。实验中的误差一般分为系统误差和随机误差两类。

#### (1) 系统误差

在相同条件(方法、仪器、环境、观测人不变)下,对同一物理量做多次测量时,误差的符号和绝对值保持不变,或是按某一确定的规律(线性、周期性等)变化的误差称为系统误差。由定义可知,系统误差的特点是具有方向性和等值性,不服从统计规律,不能靠增加测量次数来减少误差。

1) 系统误差的来源。系统误差是由某些确定的或按确定规律变化的因素造成的。其产生的原因主要有以下几点:

a. 仪器(装置)误差。仪器误差是由于仪器或装置不完善而产生的误差,其误差来源于标准器具误差、仪器仪表误差或辅助设备误差等。

- 标准器具误差。标准器具误差是指以复现量值的计量器具,如标准电池、标准量块、标准电阻等。由于使用条件或加工制作不够完善等原因,标准器具复现的量值是有误差的,它将直接影响被测量的测量结果的准确性。

- 仪器仪表误差。测量仪器仪表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,如天平、电桥等比较仪器,温度计、秒表、电流表、电压表、检流计等指示仪器。由于仪器仪表在加工、装配和调试中,零点不准、示值刻度不准、刻度盘和指针安装偏心、天平两臂不等长、砝码的标称质量不准等,不可避免地存在有误差,以至仪器仪表的指示值不等于被测量的真值,造成测量误差。

- 附件误差。为测量创造必要条件或使测量方便进行而使用的各种辅助配件,均属于测量附件。如开关、导线均为测量附件,且均产生测量误差。

b. 方法(理论)误差。方法误差是由于实验方法本身或理论不完善而产生的误差。

例如,用单摆测定重力加速度  $g$ ,所依据的单摆周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$  是在摆角  $\theta < 5^\circ$ ,以米尺测摆长,以秒表测时间,且视摆球为质点,忽略其浮力和阻力,摆线为轻线等情况下的近似公式。若不满足此条件,或在此条件下提高所用仪器的精度(如改用测长仪、数字毫

秒计等) 都会出现系统误差。

c. 环境误差。在测量过程中, 由于外界环境如温度、湿度、电磁场、气压等环境条件发生的规律性变化而引起的误差称为环境误差。

d. 人身误差。人身误差是由于观测者心理、生理条件以及各人不同的反应速度、分辨力、固有习惯及操作经验等因素引起的。如同时刻按下秒表, 因有人动作迅速、有人动作迟缓而引起的误差。

系统误差的数值和符号(正、负) 一般来说是定值或按某种规律变化。因此系统误差是可以被发现、减小、消除或修正的, 但不能通过多次测量来减小或消除。对实验者来说, 系统误差的规律及其产生的原因可能已知道, 也可能不知道。已经确切掌握了其大小和符号的系统误差称为已定系统误差, 对大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正; 而后者一般难以做出修正, 只能估计出它的极限范围。

要找准产生系统误差的原因, 无一定的规律可循。只有提高实验素养, 逐渐积累经验, 才能分析发现系统误差产生的原因, 从而采取适当的措施对测量结果进行修正或使之降低到可忽略的程度。

2) 系统误差的发现。在许多情况下, 系统误差常常不明显地表现出来, 然而它却是影响测量结果不准确的主要因素, 甚至有些系统误差会给实验结果带来严重影响。因此, 发现系统误差, 设法修正、减小或消除它的影响, 是误差分析的一个重要内容。由于系统误差的处理涉及较深的知识, 这里只做简要介绍。

- 数据分析法。当随机误差比较小时, 将待测量的绝对误差按测量次序排列, 观察其变化。若绝对误差不是呈随机变化而是呈规律性变化的, 如线性增大或减小、周期性变化等, 则测量中一定存在系统误差。

- 理论分析法。分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足; 仪器工作状态是否正常; 实验人员是否有产生系统误差的心理与生理因素。

- 实验对比法。通过改变产生系统误差的条件(通常该用更高准确度的仪器或器具), 在不同条件下进行检定性测量, 比较测量结果, 从而发现系统误差。实验对比法是发现并确定系统误差最有效、最常用的方法。

3) 系统误差的消除与修正。任何实验仪器、理论模型、实验条件, 都不可能理想到不产生系统误差的程度。对于系统误差, 一是要进行修正, 二是要消除其影响。

a. 消除产生系统误差的根源。如果能够找到产生系统误差的根源, 无论实验仪器、理论模型还是实验条件, 我们都可以使其更完善, 从而减小系统误差的影响。

b. 用修正值对测量结果进行修正。用标准仪器对测量仪器进行校准, 找到其修正值或校准曲线, 从而对测量结果进行修正。对由理论公式的近似而造成的误差, 找出修正值进行修正。

c. 选择适当的测量方法, 减小和消除系统误差。

• 交换法。交换法测量就是将测量中的被测量与标准量的位置相互交换,使两次产生系统误差的因素对测量结果的影响起相反作用,从而达到消除系统误差的目的。

• 替代法。在一定条件下,对某一被测量进行测量后,不改变测量条件,再用同一性质的已知标准量代替被测量进行同样的测量,并使仪器的指示保持不变,这时的标准量即为被测量值,这样就消除了标准量本身的定值系统误差以外的其他系统误差。

• 抵消法。抵消法是采用改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反并取其平均值作为测量结果以消除系统误差。

• 对称法。若在测量过程中存在随时间或其他因素成线性规律变化的系统误差,可以选择某一时刻点为中心,取与该时刻对称的任意两个时刻点测量值的平均值作为一个测量值,这样就可把线性变化的系统误差转化为可修正的定值系统误差。当选择中点的系统误差值为零时,测量结果不存在系统误差,从而达到消除系统误差的目的。

• 半周期偶数法。半周期偶数测量法就是按系统误差变化的半个周期进行一次测量,每个周期内得到两个测量值,取其平均值作为测量结果,从而消除周期性变化的系统误差。

## (2) 随机误差(偶然误差)

假如在实验中已消除了系统误差和粗差,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各次测量的误差时大时小、忽正忽负变化不定,这种由于偶然的或不确定的因素所造成的测量值相对于真值的无规则的涨落称为随机误差。随机误差的特点是绝对值和符号随机变化,没有确定的规律。

随机误差是多项无法预料的偶然因素对测量结果的综合影响。如实验台的震动;气压、温度、电源电压的波动;空间杂散电磁波的干扰;仪器、设备在使用过程中的变动等;实验条件和环境因素的微小或无规则的变化;实验者反应快慢不一;个人情绪等造成的精力不集中等。若测量次数足够多,随机误差的分布却是有规律的,它遵从一定的统计规律。这样,我们可以借助严密的数学工具,以一定的统计理论来研究处理它。

本节中,假定系统误差已经被减弱到足以被忽略的程度。

1) 随机误差的统计学分布规律。如前所述,随机误差是由一些不确定的因素或无法控制的随机因素引起的。这些因素使得每一次测量中误差的大小和正负没有规律,从表面上看纯属偶然。但是,大量实践证明:当对某个被测量物重复进行测量时,测量结果的随机误差却服从一定的统计学分布。常见的一种是随机误差服从正态分布(高斯分布)规律,其分布曲线如图1-1所示。该分布曲线的横坐标 $\Delta$ 为误差,纵坐标 $f(\Delta)$ 为误差的概率密度分布函数。分布曲线的含义是:在误差附近,单位误差范围内误差出现的概率。即误差出现在 $\Delta \sim \Delta + d\Delta$ 区间内的概率为 $f(\Delta) \cdot d\Delta$ 。 $\Delta$ 常常采取多次测量方法的原因就在于此。但是,当测量次数有限时,随机误差是不能消除的,测量后必须进行误差估算。为定量估算,下面进一步考查正态分布曲线。理论研究表

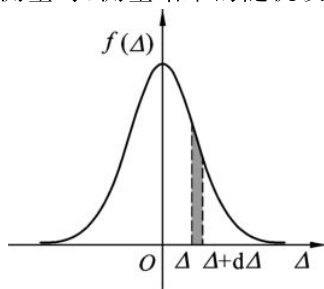


图1-1 随机误差分布特点