

高等学校教材

大学物理实验

主 编 张凤玲 杨秀芹

武汉理工大学出版社

高等学校教材

大学物理实验

主 编 张凤玲 杨秀芹
副主编 牛保成 王建岭

武汉理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张凤玲, 杨秀芹主编. —武汉:武汉理工大学出版社, 2006. 2
ISBN7-5629-2368-X

I. 大… II. ①张… ②杨… 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(2006)第 012080 号

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

印刷者:安陆鼎鑫印务有限公司

发行者:武汉理工大学出版社

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.25

字 数:400 千字

版 次:2006 年 2 月第 1 版

印 次:2006 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3500 册

定 价:24.00 元

(本书如有印装质量问题, 请向承印厂调换)

前 言

按照教育部对高等学校非物理类专业物理实验课程的教学基本要求,结合近两年开设的物理实验仪器的规格型号,在现有实验讲义的基础上,我们编写了这本《大学物理实验》教材。

本教材在汲取了不同版本实验教材之长的同时,具有自己鲜明的特色:(1)打破了力、热、电、光及近代物理传统编写顺序,按照由简到繁的顺序编排实验;(2)为方便学生记录实验数据、规范实验数据的处理,每个实验都编排了实验数据记录表和实验数据处理公式、不确定度计算步骤等;(3)提倡学生用计算机处理实验数据,并在第2章(实验数据的处理方法)中介绍了Excel处理实验数据的基本方法,引导学生用现代化手段处理实验数据;(4)教材配有“Excel处理实验数据模板”光盘,供学生方便地处理实验数据。

全书共分6章,前3章分别详细介绍了误差理论、不确定度评定测量结果;处理实验数据的基本方法;物理实验常用方法及常用仪器的原理和使用方法。第4章和第5章选编了30个实验,每个实验都参考了大量同类教材的内容,结合学生的动手能力和理论知识结构而精心设计。第6章是设计性实验,是本着开发学生智能,培养与提高学生科学实验能力而安排的。全书体系完备、内容翔实、图文并茂、深入浅出,具有较强的可操作性和广泛的适用性。

本书由张凤玲、杨秀芹担任主编,牛保成、王建岭担任副主编。书中第2章和第4章的第15、17、18、19节、第5章的第6节,以及所有实验的数据记录与数据处理部分由张凤玲编写;第1章和第4章的第1、2、3、4、5节及全书的图片整理由杨秀芹完成;第3章和第4章的第20、21、22、23节由王建岭编写;牛保成编写了第4章的第13、14、16、24节,并为全书的编写质量把关;第4章的第6、7、8、9、10、11、12节由裴秋雨编写;第5章的第1、2、3、4、5节由米启伟编写;张秀欣编写了第6章的设计性实验;“Excel处理实验数据模板”由张凤玲、孙清伟设计完成,模板光盘随教材同时出版,需要者请与作者联系。

作者联系方式:发送E-mail到fl_zhang1688@hncj.edu.cn。

由于编者的水平有限,书中难免有不妥之处,希望读者和专家同行不吝指正。

编 者
2005年11月

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 物理实验的地位与作用	(1)
0.2 实验物理学的形成及其内容	(1)
0.3 大学物理实验的作用、任务和基本要求	(2)
0.4 大学物理实验课的基本数学程序	(2)
1 误差理论与有效数字	(5)
1.1 测量与误差	(5)
1.2 实验不确定度及测量结果的表示	(13)
1.3 有效数字及简算方法	(16)
2 实验数据的处理方法	(21)
2.1 数据处理的基本程序	(21)
2.2 数据处理的基本方法	(23)
2.3 Excel 软件处理实验数据的基本方法	(32)
3 物理实验中的基本测量方法和常用仪器	(42)
3.1 物理实验中的基本测量方法	(42)
3.2 物理实验常用仪器	(47)
3.3 实验室常用电源、光源、信号源	(76)
4 基础物理实验	(87)
4.1 长度测量	(87)
4.2 密度的测量	(90)
4.3 用单摆测量重力加速度	(93)
4.4 气垫上物体运动的测量与研究	(96)
4.5 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量	(101)
4.6 刚体转动惯量的测定	(106)
4.7 液体表面张力系数的测定	(111)
4.8 金属线胀系数的测定	(116)
4.9 透镜焦距的测定	(119)
4.10 电桥法测电阻	(124)
4.11 电位差计测电动势	(131)
4.12 电表的改装和校正	(135)
4.13 静电场的测绘	(139)
4.14 示波器的原理和应用	(144)
4.15 霍耳效应及其应用	(152)
4.16 迈克耳逊干涉仪的调整与使用	(157)
4.17 电子束的电偏转	(161)
4.18 电子束的磁偏转	(166)

4.19	声速的测定	(169)
4.20	简谐振动的研究	(174)
4.21	分光计的调整和使用	(178)
4.22	牛顿环装置测量平凸镜的曲面半径	(185)
4.23	杨氏双缝干涉	(190)
4.24	夫琅禾费单缝衍射	(194)
5	近代物理实验	(198)
5.1	光电效应	(198)
5.2	密立根油滴实验	(201)
5.3	弗兰克-赫兹实验	(207)
5.4	光学全息照相	(211)
5.5	核磁共振实验	(215)
5.6	智能型光电效应实验仪测普朗克常数	(219)
6	设计性实验	(226)
6.1	设计性实验的特点	(226)
6.2	设计性实验举例	(226)
6.3	导热系数的测量	(228)
6.4	电位差计校准电表和测定电阻	(230)
6.5	串联电路充电、放电过程研究	(232)
6.6	二极管伏安特性曲线的测绘	(234)
6.7	用光栅测光波波长	(236)
6.8	示波器测绘铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(236)
6.9	偏振光的特性研究	(241)
6.10	黑白照相技术	(243)
6.11	彩色照相技术	(244)
6.12	光栅特性的研究	(244)
附 录		(246)
附表 1	基本物理常数表	(246)
附表 2	空气的相对湿度与干湿球温度计的关系	(247)
附表 3	标准大气压下不同温度时水的密度	(247)
附表 4	在 20℃ 时常用固体和液体的密度	(248)
附表 5	海平面上不同纬度处的重力加速度	(248)
附表 6	在 20℃ 时某些金属的杨氏模量	(248)
附表 7	在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数	(249)
附表 8	不同温度时与空气接触的水的表面张力系数	(249)
附表 9	液体的粘度	(249)
附表 10	不同温度时水的粘度	(250)
附表 11	固体的线膨胀系数	(250)
附表 12	固体的比热	(250)
附表 13	液体的比热	(251)
附表 14	一些金属或合金的电阻率及其温度系数	(251)
附表 15	不同温度时干燥空气中的声速	(252)

0 绪 论

0.1 物理实验的地位与作用

物理学的形成与发展是以实验为基础的。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象概括和总结,从而建立物理定律,进而形成物理理论,再回到实验中去接受检验。实验是物理科学的基础,也是物理知识的源泉,加强物理实验是物理教学的时代特征,又是提高物理教学质量的先决条件。

在研究物理现象时,实验的任务不仅是观察物理现象,更重要的是找出各物理量之间的数量关系,找出它们变化的规律。任何一个物理定律的确定,都必须依据大量的实验材料。即使已经确定的物理定律,如果出现了新的实验事实和这个定律相违背,那么便需要修正原有的物理定律或物理理论,因此我们说,物理实验是物理理论的基础,它是物理理论正确与否的试金石。

物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础,又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。最近数十年来,物理学和其他学科一样发展很快,尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展,更反映了物理实验技术发展的新水平。科学技术的发展越来越体现出物理实验技术的重要性,基于这方面的原因,人们逐渐感到理工科及师范院校加强对学生进行物理实验训练的重要性。理论课是进行物理实验必要的基础,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观测分析,理论与实验相互补充,从而加深和扩大学生的物理知识。

0.2 实验物理学的形成及其内容

与物理学发展的同时,实验综合了科学技术的成就,发展形成了自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学。它在内容上包括了许多物理课本所包括不了的理论知识、方法和技能,主要表现在以下方面:

(1)实验手段的发展。表现在从简单的测量仪器,发展为以机、电、光为基础的门类齐全并日益扩展的仪器系列。精确度不断提高,适用范围不断开拓,自动化程度不断提高等。遥感、遥测技术的应用,使仪器已经从简单的物理原理脱胎出来,成为独立体系。

(2)从对现象的观测、实验方案的设计、过程控制以及资料分析、结果归纳等一系列方法,在前人积累和现代科学技术的基础上,发展成较完整的系统。

(3)综合了数学、物理等学科的成就,形成了实验的数据处理、误差分析的严格理论体系,并已有成效地指导着实验的各个环节,使之顺利进行。

(4)为解决各种精确测量和精密实验中的实际问题,综合利用了多学科和多种专业技术的交叉,形成了实验物理学的独立科学技术体系。

0.3 大学物理实验的作用、任务和基本要求

0.3.1 作用

大学物理实验是对高等工科学学校学生进行科学实验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实验方法和实验技能训练的开端,是各专业后继实验课程的重要基础。也就是说,它是大学生从事科学实验工作的入门课程。

0.3.2 任务

(1)学习物理实验的基础理论,包括一些典型的实验方法及其物理思想。例如,电磁学实验中的模拟法、伏安法、电桥法、补偿法以及冲击法等,有助于思维与创造能力的培养。

(2)使学生获得必要的实验知识和操作技能,培养学生初步具有正确使用仪器进行测量、处理数据、分析结果以及编写报告等方面的能力。

(3)培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度,以及爱护国家财产的良好品质;培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等良好习惯。

0.3.3 基本要求

通过物理实验的基本训练,要求做到:

(1)能够自行完成预习、进行实验和撰写报告等主要实验程序。

(2)能够调整实验装置,并掌握常用的操作技术。例如,零位调整,水平、铅直调整,光路的共轴调整,消视差调节,逐次逼近调节,根据给定的电路图正确接线等。

(3)了解物理实验中常用的实验方法和测量方法,如比较、放大、模拟、补偿、平衡和干涉方法。

(4)了解常用仪器的性能,并学会使用方法;能够进行常用物理量的一般测量。

0.4 大学物理实验课的基本教学程序

0.4.1 实验前的预习

实验前必须认真阅读教材,阅读时要以实验目的为中心,搞清楚实验原理(包括测量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等;要反复思考实验原理、仪器装置及操作、数据处理等方面如何达到实验目的。预习时要尽量精心构思,写出简明的预习报告,内容包括:目的、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等等。

每次实验前,教师要检查预习情况,未预习者不准做实验。

0.4.2 实验中的观测

认真听讲:做实验前,教师要做简要的讲解,这对做好实验是很有益的。学生要认真听讲,这样可起到事半功倍的效果。

实验操作:在操作前,先熟悉主要仪器,了解其使用方法;然后进行仪器的安装与调整并检查仪器是否完好,如有问题要及时向教师提出,切不可盲目从事;待各方面符合要求后,方可进行实验操作、测试数据。

记录数据及实验现象:应科学地、实事求是地记录下实验中的全部有关的原始数据和出现的各种现象。有关数据中除了直接的测量数据外,还应当包括实验条件(如与实验结果有关的温度、湿度、气压等)和主要仪器的名称、型号、规格、准确度等。在记录数据时要特别注意它的有效数字和单位。

测试结束后,把原始数据记录给教师审阅签名认可后,方可整理仪器结束实验。

0.4.3 实验后的报告

实验报告应包括以下内容:

- (1)实验的年、月、日、系别、班级、小组、姓名。
- (2)实验名称。
- (3)实验目的。
- (4)实验原理:在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂,画出原理图、电路图或者光路图,写出实验所用的主要公式(不写推导过程),说明式中各物理量的意义和单位,以及公式适用条件(或实验必要条件)。
- (5)实验仪器:包括实验用的所有仪器、量具和材料的名称、型号和规格等。
- (6)实验内容及步骤。
- (7)实验数据:把测得的原始数据及必要的中间计算结果认真地填写在设计好的记录表格中,数据不得任意涂改,切忌用教师签字的那张原始数据代替实验报告的这部分内容。

按所讲述的数据处理方法处理数据,写出数据处理过程,并按结果表达式写出实验结果。

- (8)实验现象、误差分析、讨论以及对实验的建议、体会等。

实验报告一律用统一规格的实验报告纸书写,要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。

0.4.4 遵守实验规则

为了保证实验正常进行,以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则,望同学们遵守执行。

- (1)学生应在课程表规定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动,须经实验室同意。

- (2)学生在每次实验前对安排要做的实验应进行预习,并在预习的基础上,写出预习报告。

- (3)进入实验室后,应将预习报告放在桌上由教师检查,并回答教师的提问,经过教师检查认为合格后,才可以进行实验。

- (4)实验时应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验应事先准备毫米方格纸和铅笔。

- (5)进入实验室后,根据实验卡片框或仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏。若发现有问題,应向教师或实验室管理员提出。未列入清单的仪器,另向管理员借用,实验完毕后归还。

(6)实验前应细心观察仪器构造,操作应谨慎细心,严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验,线路接好后先经教师或实验室工作人员检查,经许可后才可接通电路,以免发生意外。

(7)实验完毕前应将实验数据交给教师检查,实验合格者教师予以签字通过。余下时间在实验室内进行实验计算与做作业题,待下课后方可离开。实验不合格或请假缺课的学生,由指导教师登记,通知在规定时间内补做。

(8)实验时应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐。

(9)如有仪器损坏应及时报告教师或实验室工作人员,并填写损坏单,注明损坏原因。赔偿办法根据学校规定处理。

1 误差理论与有效数字

1.1 测量与误差

在物理实验中,总要进行大量的测量工作。测量包含两个必要的过程,一是对许多物理量进行检测,二是对测量的数据进行处理。在实验前,必须对所观测的对象进行分析研究,以确定实验方法和选择具有适当精度的测量仪器。在实验后,对测得的数据加以整理、归纳,用一定的方式(列表或图解)表示出它们之间的相互关系,并对实验结果给予合理的解释,做出正确判断。

以上这些过程都与误差理论密切相关。例如,计算中取几位有效数字,作图时选多大的比例值等。若处理数据不当,就会影响测量结果的准确度,因此不能随心所欲。否则,实验中精细的测量都是徒劳的。

1.1.1 测量的基本概念

1.1.1.1 测量的含义

任何实验都离不开测量,没有测量就没有科学。在一定条件下,任何物理量都必然具有某一客观真实的数据。所谓测量就是把待测物理量与作为计量单位的同类已知量相比较,找出待测物理量是单位多少倍的过程。这个倍数叫做测量的读数,读数加上单位记录下来就是数据。任何物理量都是有单位的。因此,在物理实验中测量物理量记录数据时,一定要记录单位。

在完成测量时,必须明确测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度,通常把这四点称为测量的四要素。

1.1.1.2 测量的分类

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和不等精度测量。

(1)直接测量和间接测量

直接测量是把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值。一般基本量的测量都属于此类,如用米尺测量物体的长度,用天平称铁块的质量,用秒表测量单摆的周期等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值。

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数是根据直接测量所得数据在一定的函数关系下,通过运算得出所需要的结果。例如,直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ,用公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$,以求重力加速度 g ,这种测量称为间接测量。

(2)等精度测量和不等精度测量

对某一量 N 进行多次测量,得 n 个数值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$, 如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为所得的 n 个值中,某一个值比另一个值要测得准确些。在这种

情况下,所进行的一系列测量称为等精度测量。所谓相同条件的含义,是指同一个人,用同一台仪器,每次测量的周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动)。这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。对某一量 N ,进行了 n 次测量,得到 n 个值: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$,如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在这种情况下,所进行的一系列测量叫做不等精度测量。例如,同一实验者用精度不同的三种天平称量某一物体质量 m ,得到 3 个值 m_1, m_2, m_3 ,或者用三种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ,得 3 个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ,这都是不等精度测量。大学物理实验中一般都采用等精度测量。

1.1.2 误差的基本概念

1.1.2.1 真值

任何一个物理量在某一时刻和某一位置或某一状态下,都存在着一个客观值,这个客观值称为真值。

1.1.2.2 绝对误差与相对误差

(1)绝对误差

测量当然希望得到真值,但测量总是在一定的环境(温度、湿度等)和仪器条件下进行的,由于测量条件(环境、温度、湿度等)的变化以及仪器精度的不同,因而在任何测量中,测量结果 N_i 与待测量客观存在的真值 N 之间总存在着一定的差异。测量值 N_i 与真值 N 的差值叫做测量误差简称误差 $\Delta'N$ 。即

$$\Delta'N(\text{误差}) = N_i(\text{测量值}) - N(\text{真值}) \quad (1-1)$$

由于是测量值对真值的绝对偏离,通常把它称为绝对误差。显然,绝对误差除大小外,还有正负(方向)。

(2)相对误差

绝对误差的大小能够反映对同一被测量的测量效果的好坏。例如,对一长度为 1m 左右的物体进行测量,绝对误差为 5cm 的就比为 10cm 的测量效果好。但对不同的被测量就很难确定了,如测量长为 1000m 的物体的绝对误差是 1m,测量长为 100cm 的物体的绝对误差为 1cm,用绝对误差就不能确定了。为此,引入相对误差的概念。如果相对误差用 E 来表示。其定义式为

$$E = \frac{\Delta'N}{N} \times 100\% \quad (1-2)$$

由相对误差的大小就可以比较两个测量结果的好与坏,上述例中的第一个测量相对误差是 0.1%,第二个测量相对误差是 1%,显然第一个测量比第二个测量效果好。

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。

1.1.2.3 误差的分类

误差按其性质和产生原因可分为三大类:系统误差、随机误差和粗大误差。

(1)系统误差

系统误差的特征是:在同一条件下,多次测量同一个量时,误差的大小和方向保持恒定,或在条件改变时,误差的大小和方向按一定规律变化。增加测量次数并不能减少这种误差对测量结果的影响。

1) 系统误差的主要来源

①仪器误差。这是由于测量工具或仪器本身的缺陷而产生的,如天平臂不等长,砝码标称质量不准确,尺子刻度偏大,表盘刻度不均匀等。

②方法误差。这是由于实验方法或理论不完善而导致的。如采用伏安法测电阻时,电表的内阻产生的误差,采用单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测量周期时,摆角引起的误差,这些都是方法误差。

③环境误差。这是由于周围环境与实验要求不一致而引起的误差。如测量时实际温度与所要求的温度有偏差,测量过程中温度、湿度、气压等按一定规律变化的因素引起的误差。

④人身误差。这是由于测量者本身的生理特点或固有习惯所引起的误差,例如某些人在进行动态测量记录某一信号时有滞后的倾向等。系统误差一般都有较明显的原因,因此可以采用适当的措施加以限制或消除它对测量结果的影响。系统误差是测量误差的重要组成部分,所以发现系统误差,弄清其产生原因,进而消除它对测量结果的影响则是物理实验的一项重要任务。

2) 发现系统误差的方法

提高测量精度,首要问题是发现系统误差,然而在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的,目前还没有能够适用于发现各种系统误差的普遍方法,只有根据具体测量过程和测量仪器进行全面的仔细分析,针对不同情况合理选择一种或几种方法加以校验,才能最终确定有无系统误差。下面简单介绍几种适用于发现某些系统误差的常用方法。

①实验对比法。这种方法主要适用于发现固定系统误差,其基本思想是改变产生系统误差的条件,进行不同条件的测量。例如,采用不同方法测同一物理量,若其结果不一致,表明至少有一种方法存在系统误差。还可采用仪器对比法、参量改变对比法,改变实验条件对比法、改变实验操作人员对比法等,测量时可根据具体实验情况选用。

②理论分析法。主要进行定性分析来判断是否有系统误差。如分析仪器所要求的工作条件是否满足,实验所依据的理论公式所要求的条件在测量过程中能否满足,如果这些要求没有满足,则实验必有系统误差。

③数据分析法。主要进行定量分析来判断是否有系统误差。一般可采用残余误差观察法、残余误差校验法、不同公式计算标准差比较法、计算数据比较法等方法。

3) 系统误差的减小和消除

在实际测量中,如果判断出有系统误差存在,就必须进一步分析可能产生系统误差的因素,设法减小和消除系统误差。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同,因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。下面简单介绍几种减小和消除系统误差的方法和途径。

①从产生系统误差的根源上消除。从产生系统误差的根源上消除误差是最根本的方法,通过对实验过程中的各个环节进行认真仔细分析,发现产生系统误差的各种因素。可以从下面几个方面采取措施从根源上消除或减小误差:采用近似性较好又比较切合实际的理论公式,尽可能满足理论公式所要求的实验条件;选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置,严格保证仪器设备所要求的测量条件;采用多人合作,重复实验的方法。

②引入修正项消除系统误差。通过预先对仪器设备将要产生的系统误差进行分析计算,找出误差规律,从而找出修正公式或修正值,对测量结果进行修正。

③采用能消除系统误差的方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差,可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除。采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来决定。无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除,只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内,或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计,就可以认为系统误差已被消除。

(2) 随机误差(偶然误差)

在同一条件下多次测量同一物理量时,每次出现的误差时大时小,时正时负,没有确定的规律,但就总体来说服从一定的统计规律,这种误差称为随机误差。

1) 随机误差产生的原因

这种误差是由于人的感官灵敏度和仪器精密程度的限制,周围环境的干扰以及伴随着测量而来的不可预料的随机因素的影响而造成的。

2) 随机误差的特征

随机误差的特征是单个测量具有随机性,不可预知,多次测量呈现一定的统计规律。当测量次数很大时,可以认为近似服从正态分布(高斯分布),如图 1-1 所示。横坐标 ΔN 表示随机误差;纵坐标 $f(\Delta N)$ 表示误差出现的概率密度函数。由图可知,随机误差具有下面的一些特性:

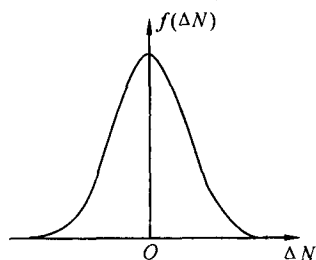


图 1-1 偶然误差的正态分布

①单峰性。测量值与真值相差越小,其可能性越大;与真值相差很大,其可能性较小。

②对称性。测量值与真值相比,大于或小于某量的可能性是相等的。

③有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不会超过一定的限度。

④抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加越来越小。

(3) 粗大误差

由于测量时,观测者不正确的使用仪器、粗心大意观察错误或记错数据而引起的不正确的结果。这种误差称为粗大误差。它实际上是一种测量错误,相应数据应当予以剔除。

1.1.3 直接测量的误差估计

由于在测量过程中不可避免地存在有随机误差,因而对某一物理量进行多次测量的结果不会是完全相同的。设对某一物理量在相同条件下进行重复测量,获得了一组数据: $N_1, N_2, \dots, N_n$ 。一般地讲,这 n 个数据是彼此不同的,如果把它们全部写出来作为测量结果当然是不方便的,用其中任一个测量值作为测量结果显然也是不全面的,那么应该用怎样一个数来表达这一结果才合适呢?

1.1.3.1 用算术平均值表示真值

(1) 算术平均值原理

在相同条件下对某物理量进行 n 次等精度重复测量,每次的测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, 真值为 N , 则任意一次测量的误差 $\Delta N_i = N_i - N$ 。对此式求和得

$$\sum_{i=1}^n \Delta N_i = \sum_{i=1}^n (N_i - N) = \sum_{i=1}^n N_i - nN$$

两边同除以 n , 得

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta' N_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i - N$$

令

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

得

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta' N_i = \bar{N} - N \quad (1-3)$$

又根据随机误差的性质,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta' N_i \rightarrow 0$ 。因而当 n 足够大时,算术平均值 $\bar{N}$ 将趋近于真值 N ,我们可以用算术平均值作为多次测量的最近真值,即多次测量的最佳值。

(2) 算术平均值在实验中的指导意义

根据算术平均值原理,在多次重复测量时,由于偶然误差的抵偿性,使得算术平均值趋近于真值,即算术平均值的误差趋近于零。所以增加测量次数可以减小测量的随机误差,这对于提高测量结果的可靠性是有利的。因此,在实验中如有可能,都应当进行多次测量。但是并不是测量次数越多越好,因为增加测量次数必定要延长测量时间,这将给保持稳定的测量条件增加困难。同时,增加测量次数也会给测量者造成疲劳,这又可能引起较大的观测误差。所以实际测量次数不必过多,一般在科学研究中,取 10~20 次;而在我们的物理实验中由于时间有限可以取 5~10 次。

1.1.3.2 测量列的标准误差(方差)

测量列是指在相同的条件下对同一个物理量进行多次重复测量所得测量值的集合。由于随机误差的存在,测量列中各个测量数据相互稍有差异,标准误差就是对这组数据可靠性的一种评价。

(1) 测量列标准误差(方差)的概念

测量列标准误差的定义为:测量列中各测量值误差的平方和的平均值的平方根。

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N)^2} \quad (1-4)$$

由于被测量的真值 N 是未知数,各测量值的误差也都无法求出,因此不可能按式(1-4)计算标准误差。

(2) 测量列标准误差(方差)的计算公式

根据算术平均值原理,我们知道,测量列中测量值的算术平均值 $\bar{N}$ 是该测量列表示的待测量真值的最佳值。因此,在实验中我们用算术平均值代表真值,这样我们就可以得到测量列中各个测量值与算术平均值的差,称之为偏差。即

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (1-5)$$

如果用偏差 ΔN_i 来计算测量列的方差,理论分析表明,偏差 ΔN_i 与误差 $\Delta' N_i$ 的关系为

$$\sum (\Delta N_i)^2 = \frac{n}{n-1} \sum (\Delta' N_i)^2 \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入式(1-4),就得到用偏差表示的标准误差的计算公式

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (1-7)$$

(3) 测量列标准误差(方差)的统计意义

标准误差不是测量值的实际误差,也不是误差范围,它只是对一组测量数据可靠性的估计。标准误差小,测量的可靠性就大一些。反之,则测量不大可靠。那么,标准误差和各测量值的实际误差之间有什么关系呢?按照随机误差的高斯理论,测量列的标准误差为 S_N 时,此测量列中任一测量值的误差有 68.3% 的可能性落在 $[-S_N, +S_N]$ 区间之内。

我们把区间 $[-S_N, +S_N]$ 称为置信区间,其相应的概率 $P(S_N) = 68.3\%$ 称为置信概率。

(4) 算术平均值的标准误差(方差)

根据算术平均值原理,当测量次数无限增多时,其算术平均值就无限接近真值。然而,实际测量次数总是有限的,因而有限次测量的算术平均值与真值之间总是有一定的偏离的。换句话说,有限次测量的算术平均值也是有误差的。例如我们通过测量获得了一组数据,并得出一个算术平均值作为测量的结果。那么以后别人,甚至我们自己再按完全相同的情况重复这种测量时,由于随机误差的影响,不一定能得出完全相同的平均值。这种现象就是算术平均值误差的具体表现。

理论分析表明,一组 n 个测量值的测量列标准误差 S_N 与其算术平均值标准误差 $S_{\bar{N}}$ 之间的关系是

$$S_{\bar{N}} = \frac{S_N}{\sqrt{n}} \quad (1-8)$$

用偏差表示则为

$$S_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (1-9)$$

它表示在 $[\bar{N} - S_{\bar{N}}, \bar{N} + S_{\bar{N}}]$ 范围内包含真值 N 的概率为 68.3%。

由式(1-8)可知,随着测量次数增加 S_N 减小,这就是通常所说的增加测量次数可以减小随机误差。但由于 $S_{\bar{N}}$ 与 $\sqrt{n}$ 成反比, $S_{\bar{N}}$ 的下降比 n 的增长速率慢得多, $n > 10$ 后 $S_{\bar{N}}$ 变化极慢,所以实际测量次数一般取 5 ~ 20 次。但 $n \leq 10$ 时,要获得 $n > 10$ 时同样的测量置信概率, S_N 应乘一因子。

例 1-1: 用单摆测重力加速度公式为 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$, 对摆长 l 测量 10 次,测得值如下表:

测量次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l(\text{cm})$	100.2	99.8	99.9	100.2	100.0	100.1	99.9	100.0	99.9	100.1

对周期 T 测量 5 次,测得值如下表:

测量次序	1	2	3	4	5
$T(\text{s})$	2.001	2.002	1.998	2.003	1.997

求 l 和 T 的算术平均值 $\bar{l}$ 、 $\bar{T}$, 算术平均偏差 Δl 、 ΔT , 某一次测量结果的 l 、 T 的标准偏差 S_l 、 S_T , 算术平均值 $\bar{l}$ 、 $\bar{T}$ 的标准偏差 $S_{\bar{l}}$ 、 $S_{\bar{T}}$ 。

解:

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \frac{1}{10} (100.2 + 99.8 + 99.9 + 100.2 + 100.0 + 100.1 + 99.9 + 100.0 + 99.9 + 100.1) \text{cm} \\ &\approx 100.01 \text{cm} \end{aligned}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{5}(2.001 + 2.002 + 1.998 + 2.003 + 1.997)\text{s} \approx 2.0002\text{s}$$

$$\Delta l = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |l_i - \bar{l}| = \frac{1}{10}(0.2 + 0.2 + 0.1 + 0.2 + 0.0 + 0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.0 + 0.1 + 0.1)\text{cm} \\ = 0.11\text{cm}$$

$$\Delta T = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |T_i - \bar{T}| = \frac{1}{5}(0.001 + 0.002 + 0.002 + 0.003 + 0.003)\text{s} = 0.0022\text{s}$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (l_i - \bar{l})^2}{10 - 1}} = \sqrt{\frac{0.17}{9}}\text{cm} = 0.14\text{cm}$$

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (T_i - \bar{T})^2}{5 - 1}} = \sqrt{\frac{27 \times 10^{-6}}{4}}\text{s} = 0.0026\text{s}$$

$$S_l = \frac{S_l}{\sqrt{10}} = \frac{0.14}{3.16}\text{cm} = 0.044\text{cm}$$

$$S_T = \frac{S_T}{\sqrt{5}} = \frac{0.0026}{2.24}\text{s} = 0.0011\text{s}$$

1.1.4 仪器误差

1.1.4.1 仪器的最大误差

测量是用仪器或量具进行的。有的仪器比较粗糙或灵敏度较低；有的仪器比较精确或灵敏度较高，但任何仪器都存在误差。仪器误差就是指在正确使用仪器的条件下，测量所得结果的最大误差，用符号 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。

仪器精度的级别通常是由制造工厂和计量机构使用更精确的仪器、量具，检定比较后给出的。下面列出常见仪器的最大误差。

表 1-1 物理实验教学中正确使用仪器时仪器的最大误差

仪器	$\Delta_{\text{仪}}$	备注
米尺	0.5mm	最小刻度 1mm
游标卡尺	取卡尺分度值	
螺旋测微计	0.004mm	量程在 0~50mm
物理天平	0.05g	感量 0.1g
电表	(AK)%	A 量程, K 准确度等级
数字式仪表	仪器最小读数	
直流电阻箱	(aR + bm)%	R 为示值, a 是直流电阻箱准确度等级, b 是与准确度等级有关的系数, m 是所使用的电阻箱的旋钮数
其他仪器	由实验室给出	