

21 世纪高等院校规划教材 · 物理类



DAXUE WULI SHIYAN

物理实验

主编 肖 苏

副主编 任 红



中国科学技术大学出版社

21 世纪高等院校规划教材 · 物理类

大学物理实验

主 编 肖 苏

副主编 任 红

中国科学技术大学出版社

2004 · 合肥

内 容 简 介

本书系统地介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识,一些常用的力学、热学、电磁学和光学仪器设备的原理和使用方法,物理实验经常采用的六种基本测量方法;按不同层次编排了三十二个基础实验,十一个近代物理实验和二十七个设计性实验,,实验内容涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等方面,其中还有一些是综合性实验。本书各章节及各个实验既相互独立,又相互配合,循序渐进、初步形成了一个完整的体系。

本书可作为高等理工院校各专业的实验物理课程的教材或参考书,也可作为涉及物理学的实验技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/肖苏主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2004. 6
ISBN7-312-01675-8

I. 大... II. 肖... 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(2004)第 022130 号

中国科学技术大学出版社 出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号 邮政编码:230026 发行科电话:0551-3602905,3602906)

合肥学苑印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:22 字数:550 千

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—11000 册

ISBN 7-312-01675-8/O·286 定价:25.00 元

前 言

本书是在总结了以往物理实验教学改革经验的基础上,遵照全国工科实验物理课程指导委员会制订的基本要求,结合我校专业设置特点和实验室仪器设备情况,在我室 1998 年出版的《实验物理教程》一书的基础上编写而成。

实验物理课程是教育部确定的六门主要基础课程之一,是学生进入大学后较早遇到的一门系统全面的、独立设置的必修实验课程。它既要以学生做过的中学物理实验为起点,又要与后继的实验课程适当配合,考虑到本课程的这些特点,本书在编写时力求做到以下几点:

1. 作为一门独立设置的必修课,与其相应的教材必须形成完整的体系。本书主要内容包
括:第一章误差与数据处理的基本知识。系统地介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识;
第二章物理实验的基本仪器。详细介绍了力学、热学、电磁学、光学实验中常用的近二十种仪
器设备的原理和使用方法;第三章全面地阐述了物理实验中经常采用的六种实验方法;第四、
五、六、七、八章编排了六个预备实验、二十六个基础实验、十一个近代物理实验和二十七个设
计性实验,内容涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等方面,其中还有一些是综合性实验。

2. 遵循实验能力培养应循序渐进的规律。本书对基本知识、基本仪器、基本方法部分力
求介绍的详细些。考虑到与中学物理实验教学的衔接和各地区之间的不平衡,增设了预备实
验,让学生自行到实验室进行操作训练,以达到做好基础实验所必须具备的知识和实验操作能
力。将二十六个基础实验内容按不同层次不同要求分两个部分编写。第五章基础实验(一)编
排了十四个内容较简单的实验。本章的内容不仅有原理的清楚叙述,公式的完整推导,还有详
尽的实验步骤和数据表格,以便初学者自学和了解规范要求;第六章的十二个实验编写的较简
单,少写实验步骤,少列或不列数据表格,尽量让学生独立完成;第八章设计性实验,则仅提出
任务、条件、要求及少许提示,由学生查阅有关资料,自拟实验方案在教师指导下完成实验。

3. 注重实验教学的各个环节。每个实验都编写了足够数量的预习思考题和讨论题,其中
预习思考题一般都反映了实验的要领,可以促使学生认真准备积极思考,讨论题则可帮助学生
比较深入地进行总结,加深了解。

本书由肖苏任主编,任红任副主编,合肥工业大学理学院实验中心部分老师参加了编写。
其中:吴本科编写实验 5、7、16、18、28、34、42,第一章;肖苏编写实验 11、23、37、38、39、40、43,
绪论,附录 I、II,第二章;黄英编写实验 3、14、26,第三章;谢莉莎编写实验 27、32;张霆编写实
验 6、31;倪菱湖编写实验 8、29;伍红编写实验 1、9、10、12、13、21、22、41,第八章;梅忠义编写
实验 2、4、15、17、25,罗乐编写实验 19、20、24、30、33、35、36。实验 21 的内容吸收了陆正亚教
授的科研成果。

本书虽由以上同志执笔编写,实际上是一项集体创作。经过二十多年的教学实践,多次的
调整、更新、扩充才达到现在的水平。书中的几乎每一个内容都含有五十多位同志先后的贡

献,凝聚了他们的智慧和劳动。本书编写期间,参阅了许多兄弟院校的教材,吸取了宝贵经验,甚至引用了部分内容,在此深表谢意。

编 者

2004 年 3 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 误差和数据处理的基本知识	(3)
第一节 测量与误差	(3)
第二节 有效数字	(16)
第三节 实验数据的处理方法	(19)
第二章 物理实验的基本仪器	(30)
第一节 力学、热学仪器	(30)
第二节 电磁学仪器	(39)
第三节 光学仪器	(49)
第三章 物理实验的基本测量方法	(55)
第一节 比较法	(55)
第二节 放大法	(56)
第三节 补偿法	(56)
第四节 模拟法	(57)
第五节 干涉法	(58)
第六节 非电量电测法	(60)
第四章 预备实验	(72)
实验 1 固体密度的测量	(72)
实验 2 自由落体运动的研究	(76)
实验 3 单摆实验	(80)
实验 4 电阻元件的伏安特性	(84)
实验 5 电位差计的原理和使用	(88)
实验 6 薄透镜焦距的测定	(91)
第五章 基础实验(一)	(98)
实验 7 金属丝杨氏弹性模量的测量	(98)
实验 8 驻波的研究	(101)
实验 9 用三线摆测量转动惯量	(104)
实验 10 液体表面张力系数的测定	(109)
实验 11 气垫导轨的应用	(113)
实验 12 热电偶定标	(123)
实验 14 电桥法测电阻	(132)
实验 15 用模拟法测绘静电场	(138)

实验 16	灵敏电流计的研究	(142)
实验 17	示波器的使用	(148)
实验 18	电表的设计与改装	(155)
实验 19	单缝衍射光强分布的测定	(160)
实验 20	分光计的调整与使用	(163)
第六章	基础实验(二).....	(178)
实验 21	“金割”效应物理摆	(178)
实验 22	液体粘滞系数的测定	(183)
实验 23	声速的测定	(188)
实验 24	霍耳法测螺线管的磁场	(191)
实验 25	电子束的偏转和聚焦与电子荷质比的测定	(197)
实验 26	磁滞回线	(205)
实验 27	周期函数的傅里叶分析	(213)
实验 28	光的干涉	(221)
实验 29	光的偏振	(226)
实验 30	迈克耳逊干涉仪的调整和使用	(232)
实验 31	超声光栅	(237)
实验 32	照相技术	(240)
第七章	近代物理实验.....	(247)
实验 33	光纤通信实验	(247)
实验 34	非线性电路混沌的研究	(256)
实验 35	全息照相	(259)
实验 36	光谱定性分析	(266)
实验 37	霍耳效应	(272)
实验 38	夫兰克-赫兹实验	(275)
实验 39	密立根油滴实验	(283)
实验 40	光电效应法测定普朗克常数	(288)
实验 41	真空的获得与测量	(294)
实验 42	微波的单缝衍射和布拉格衍射	(300)
实验 43	盖革-弥勒计数器的研究	(306)
第八章	设计性实验.....	(312)
第一节	设计性实验的特点与实验方案的制订.....	(312)
第二节	力学、热学设计实验	(316)
实验 44	物体密度值的测定	(316)
实验 45	金属棒的线胀系数测定	(316)
实验 46	气垫上测滑块的瞬时速度	(317)
实验 47	测偏心圆块绕特定轴的转动惯量	(317)
实验 48	用焦利氏秤测量弹簧的有效质量	(319)
实验 49	粘滞阻尼系数的测定	(319)

实验 50	物体在液体中的运动研究	(320)
第三节	电学设计实验	(320)
实验 51	滑线变阻器的限流特性与分压特性的研究	(320)
实验 52	测定灵敏电流计的自由振荡周期	(321)
实验 53	十一线电位差计测量电池内阻	(322)
实验 54	表头参数的测定	(322)
实验 55	测量铜丝的电阻温度系数	(323)
实验 56	自组滑线式电桥测微安表内阻	(324)
实验 57	感应法测螺线管磁场	(324)
实验 58	黑盒子	(325)
第四节	光学设计实验	(326)
实验 59	测透明固体的折射率	(326)
实验 60	等厚干涉法测液体的折射率	(326)
实验 61	光的色散研究	(326)
实验 62	分光计测反射光的偏振特性	(327)
实验 63	原子光谱的研究	(328)
实验 64	光源的时间相干性研究	(328)
实验 65	用迈克尔逊干涉仪测玻璃片厚度	(329)
实验 66	光导纤维数值孔径的测量	(330)
实验 67	测定显微镜的放大率	(331)
第五节	综合设计实验	(332)
实验 68	CCD 成像系统测杨氏模量	(332)
实验 69	微波的迈克尔逊干涉	(332)
实验 70	用惠斯通电桥给光敏二极管定标	(333)
附录 I		(334)
	中华人民共和国法定计量单位	(334)
附录 II		(337)
	物理学常用数表	(337)

绪 论

物理学研究的是自然界物质运动的最基本最普遍的形式。物理学研究的运动,普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式(如生物的、化学的等)之中,因此,物理学所研究的物质运动规律,具有最大的普遍性。原子能、电子计算机、半导体、空间科学等新技术时代的到来,物理学的功绩不可低估。物理学在科学技术,乃至思维的发展中,起着极其重要的作用,对人类文明产生巨大的影响。物理学是自然科学和工程科学的基础。

物理学从本质上说是一门实验科学,物理规律的研究都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。例如,麦克斯韦的电磁场理论,是建立在法拉第等科学家长期实验的基础上。赫兹的电磁波实验,又使理论得到普遍的承认和广泛的应用。又如,物理学家杨振宁、李政道在1956年提出了基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”的理论,只是在实验物理学家吴健雄用实验证实以后,才得到国际上的公认。当实验结果与理论发生矛盾时,还需进行进一步的实验,以便修正理论。所以实验是理论的源泉。

在物理学发展中,人类积累了丰富的实验方法,创造出各种精密巧妙的仪器设备,涉及到广泛的物理现象,这些使得实验物理课程有了充实的教学内容。实验物理课程是教育部确定的六门主要基础课程之一,是独立设置的必修课。是学生进入大学后系统学习科学实验知识和技术的开端,是后继实验课程的基础,它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题、最终解决问题的能力方面将起着至关重要的作用。

一、物理实验课的目的

1. 通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验、分析和解决实验中问题的方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解。

2. 培养学生从事科学实验的初步能力。这些能力是指:通过阅读教材或资料,能概括出实验原理和方法的要点;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能;正确记录和处理数据,分析实验结果和撰写实验报告;以及自行设计和完成不太复杂的实验任务等等。

3. 培养学生实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的,学生应重视物理实验教学的三个重要环节。

1. 实验预习 课前要仔细阅读实验教材或有关的资料,并学会从中整理出实验所用原理、方法、实验条件及实验关键,根据实验任务画好记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,自拟数据表格等。因此,课前预习的好坏是实验

中能否取得主动的关键。

2. 实验操作 学生进入实验室后应遵守实验室规则,像一个科学工作者那样要求自己,井井有条地布置仪器,安全操作,注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺,在遇到问题时,应看作是学习的良机,冷静地分析和处理它。仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之,要把着重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就以为完成了任务。对实验数据要严肃对待,学生要用钢笔或圆珠笔记录原始数据。如确系记错了,也不要涂改,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值(错误多的,须重新记录),使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这已不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯,从一开始就不断培养好的科学作风。实验结束时,将实验数据交教师审阅 签字,整理还原仪器后方可离开实验室。

3. 实验总结 实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则,图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告。这是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。

实验报告内容包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。

(4) 实验原理。简要叙述有关物理内容(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件等。

(5) 实验内容与步骤。根据实验的过程写明内容与关键步骤。

(6) 数据表格与数据处理。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。要完成计算、曲线图、误差分析。最后写明实验结果。

(7) 小结或讨论。内容不限。可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可解答思考题或讨论题。

请记住:我们不是要一个塞满东西的脑袋,而是要一个善于分析的头脑!我们不仅要有知识,更重要的是将知识转化为能力!

第一章 误差和数据处理的 基本知识

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理,因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差理论和实验数据处理方法的基本知识。

第一节 测量与误差

一、测量与误差的基本概念

1. 测量

物理实验的内容大致包括三个部分,第一部分是设计或选用实验仪器,为测量准备条件,使得物理现象再现;第二部分是测量;第三部分是数据处理,找出物理量之间的数学关系,从而得出物理规律。可以说,物理现象的再现是物理实验的基础,进行测量是物理实验的中心,数据处理是物理实验的结果。

(1) 测量 测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较,并得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位。因此,一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,缺一不可。

(2) 单位 按照中华人民共和国法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温标)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称为导出单位。

(3) 分类

从测量手段上测量可分为直接测量和间接测量。

直接测量:可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。如用米尺测长度、用温度计测温度、用电压表测电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值。

间接测量:有些物理量无法进行直接测量,而需依据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出,这样的测量就称为间接测量。大多数的物理量都是间接测量值。如单摆法测重力加速度 g 时, $g=4\pi^2 l/T^2$, T (周期)、 l (摆长)是直接测量值,而 g 就是间接测量值。

从测量条件上测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量:在对某一物理量进行多次重复测量过程中,每次测量条件都相同的一系列测

量称为等精度测量。例如:由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测物理量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量是等精度测量。

不等精度测量:在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如:在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,在实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对结果影响不大时,仍可视为这种测量为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,所以绝大多数实验都采用等精度测量。除非不得已,一般情况不采用不等精度测量。本书只限于等精度测量的数据处理。

2. 测量误差

(1) 真值 在某一时空状态下,被测物理量所具有的客观实际值称为真值。一般来说,用数字表示它时,应是一个无穷多位的数。

(2) 测量误差 在一定条件下,使用的测量仪器和测量方法都是力图获得被测量的真值。但是由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的,测量值 x 和真值 x_0 之间总有一定的差异即

$$\Delta = x - x_0,$$

我们称这种差异为测量值的误差。

测量所得的一切数据,都包含着一定的误差,因此,误差存在于一切科学实验过程中,并因测试理论、测试环境、测试技术等不同而有所差异。

(3) 误差的分类 根据误差性质和产生原因可将误差分为系统误差、随机误差、粗大误差三类。

a. 系统误差

在多次测量同一物理量时,符号和绝对值保持不变的误差;或按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。如仪器的缺陷,或测量理论不完善,或环境变化等对测量结果造成的误差,都可认为是系统误差。

系统误差是有规律的,在测量条件不变时有确定的大小和方向,增加测量次数并不能减小系统误差。在实验之前,对测量中可能产生的系统误差要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。测量后应设法估计未能消除的系统误差之值,对测量结果加以修正。

虽然系统误差的出现一般都有明确的原因,但是发现、减小和消除误差又没有一定的规律可循,只能在实验过程中逐渐积累经验、掌握技术、提高实验素养。分析系统误差应当是实验必须讨论的问题之一。

b. 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号的变化,时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差称随机误差。

在测量中,有时排除了产生系统误差的诸因素,在进行精心观察测量中,仍存在一定的随机误差。这种误差是由于人的感官灵敏程度和仪器精密程度有限,周围环境的干扰以及随测量而产生的偶然因素决定的。如用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时往往将米尺去对准物体两端并估读到毫米下一位读数值,这个数值就存在一定随机性,也就带来了随机误差。由于随机误差的变化不能预先确定,所以对待随机误差不能像对待系统误差那样,找出原因排

除,只能估计。

虽然随机误差的存在使每次测量值偏大或偏小,但是,当在相同的实验条件下,对被测量进行多次测量时,其大小的分布却服从一定的统计规律,可以利用这种规律对实验结果做出随机误差的估算。这就是在实验中往往对某些关键量要进行多次测量的原因。

c. 粗大误差

粗大误差是由于观测者不正确地使用仪器、观察错误或记录错误数据等不正常情况下引起的误差。它会明显地歪曲客观现象,应将其剔除。所以,在作误差分析时,要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

总之,由于误差的性质不同,来源不同,处理方法不同,对测量结果的影响也不同。有时系统误差与偶然误差可以加以区别,有时又难以划分,并且有时两者之间能够互相转化。因此,有必要对误差进行研究和讨论,要用误差分析的方法来指导实验的全过程。

3. 测量的精密度、准确度和精确度

对于测量结果做总体评定时,一般均应把系统误差和随机误差联系起来看。精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的,但是这些概念的涵义不同,使用时应加以区别。

(1) 精密度 表示测量结果中的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时,所得结果的相互接近程度,是描述测量重复性高低的。精密度高,即测量数据的重复性好,随机误差较小。

(2) 准确度 表示测量结果中的系统误差大小的程度。它是指测量值或实验所得结果与真值符合的程度,即描述测量值接近真值的程度。准确度高,即测量结果接近真值的程度好,系统误差较小。

(3) 精确度 是测量结果中系统误差和随机误差的综合。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,精密度高准确度不一定高;而准确度高精密度也不一定高;只有精密度和准确度都高时,精确度才高。

现在以打靶结果为例来形象说明三个“度”之间的区别。图 1-1-1 中,(a)图表示子弹相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高准确度较差。(b)图表示子弹相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高而精密度较差;(c)图表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度和准确度都很好,亦即精确度高。

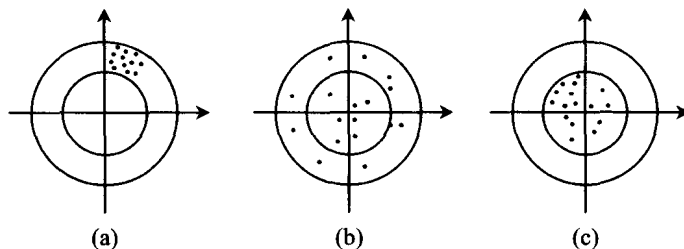


图 1-1-1

二、随机误差

随机误差是指某一次具体的测量其误差的大小与正负都不确定,而在大量的重复测量中却遵守一定的统计规律的误差。处理随机误差问题时,为了方便初学者,尽量避开繁琐的数学

推导,只给出必要的过程和最终结论。另外为了更有效地讨论随机误差,假设不存在系统误差(关于系统误差的处理可见下面小节)。

1. 随机误差的统计分布规律

随机误差的存在使每次测量值涨落不定,但是,它又服从一定的统计分布规律。无数的实验事实与统计理论都证明,大部分测量中的随机误差服从的是正态分布规律。但并不是所有的随机误差都遵守这一分布,在某些情况下也会遵守其他分布,如泊松分布、均匀分布或 t 分布等。

设某物理量的真值为 x_0 ,等精度测量条件下的测量值为 $x_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 。由统计理论可知随机误差 $\Delta_i = x_i - x_0$ 的概率密度函数符合正态分布:

$$f(\Delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-1-1)$$

其中 σ 为标准误差。

式(1-1-1)也可用如图 1-1-2 所示的正态分布曲线表示。

由图可见,随机误差具有以下性质:

- (1) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性 绝对值相同的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率接近零。
- (4) 抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减小,最后趋于零,即

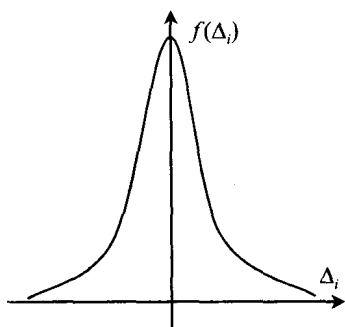


图 1-1-2

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (1-1-2)$$

2. 随机误差的处理

(1) 算术平均值

等精度测量条件下的测量值为 $x_i (i=1,2,3,\dots,n)$,其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1-3)$$

根据随机误差的抵偿性,即式(1-1-2)可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_0$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。

此式说明,减小测量结果随机误差的办法是增加测量次数,且测量次数越多,测量列的算术平均值越接近真值。故也称测量值的算术平均值为近真值,它是测量结果的最佳值。

(2) 测量列的标准误差

根据随机误差理论可以证明对真值 x_0 的标准误差是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

一般情况下真值 x_0 无法得到,即 Δ_i 无法计算,又因实验中测量次数 n 是有限的,且算术

平均值是测量结果的最佳值。因此由误差理论可得, n 次测量中某次测量值的标准误差用下式表示

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (1-1-5)$$

其中 $x_i - \bar{x}$ 称为偏差, 用 Δx_i 表示, 上式称为贝塞尔(Bessel)公式。

由图 1-1-3 可见, $f(\Delta_i)$ 值与 σ 值有关, 当 σ 值较小时, 正态分布曲线高而窄, 表示误差分布在较小的范围之内, 测量数据的离散性小, 重复性好, 即精密度高。当 σ 值较大时, 正态分布曲线低而宽, 则表示误差在较大的范围内变动, 测量数据的离散性大, 重复性差, 即精密度低。因此, 标准误差反映的是一组等精度重复测量数据的离散性。

式(1-1-4)标准误差 σ 是表示测量列的随机误差概率分布特性。按概率理论, 可以算出随机误差出现在 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率, 也称置信概率为:

$$P_r(-\sigma, \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta) d\Delta = 68.3\%$$

这就是说在等精度的重复测量时, 测量值在 $[-\sigma, \sigma]$ 的范围内的概率将有 68.3%。其几何意义如图 1-1-4 所示, 在 $[-\sigma, \sigma]$ 之间曲线下的面积占曲线下总面积的 68.3%。

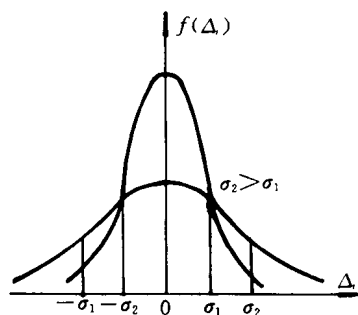


图 1-1-3

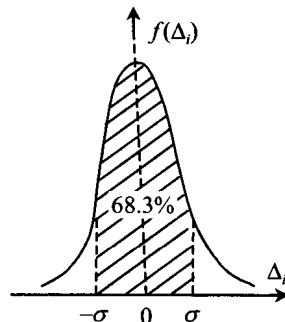


图 1-1-4

由此可见, 标准误差 σ 能较好地反映测量数据的离散程度。但由于式(1-1-4)的标准误差 σ 一般无法计算, 经常用(1-1-5)式的标准误差 σ_x 表示, 只要测量次数不很少, 则测量列中任一测量值的误差落在 $[-\sigma_x, \sigma_x]$ 之间内的概率仍将是 68.3%。

(3) 算术平均值的标准误差

通过多次重复测量获得的一组数据, 并把求得的算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果。如果在完全相同的条件下再重复测量时, 由于随机误差的影响, 不一定得到完全相同的 $\bar{x}$, 这表明算术平均值本身有离散性。为了评定算术平均值的离散性, 引入算术平均值的标准误差 σ_x , 可以证明

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-1-6)$$

用偏差表示, 则为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-7)$$

测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 的标准误差 σ_x 落在区间 $(-\sigma_x, +\sigma_x)$ 之内的概率为 68.3%，算术平均值的标准误差是对测量结果 $\bar{x}$ 的可靠性的估计。由于 $\sigma_x < \sigma_x$ ，可见平均值 $\bar{x}$ 的可靠性大于测量列中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 中任一测量值，且 σ_x 值随着测量次数 n 的增大而减小，而使测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 越来越接近待测量的真值。但并不是说测量次数越多就越好，因为 n 的增大只对随机误差的减小有作用，对系统误差则无影响，测量结果的评定是随机误差和系统误差的综合。所以，增加测量次数对减小误差是有限的。另外测量次数过多，观测者将疲劳，测量条件也可能出现不稳定，因而有可能出现增加随机误差的趋势。实际上，只有改进实验方法和仪器，才能从根本上改善测量结果。

(4) 极限误差

极限误差可定义为：

$$\delta = 3\sigma \quad (1-1-8)$$

根据误差理论，随机误差出现在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 内的概率为：

$$P_r(-3\sigma, 3\sigma) = 99.7\%$$

即测量值的误差落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 内的可能性为 99.7%。可以认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 的概率非常小。若某一误差果真超出此区间，则可舍去其测量值，事实上这是剔除坏值的一种粗略的方法。

同样，因标准误差 σ 无法计算，可用 σ_x 代替，只要测量次数不很少，则测量列中任一测量误差落在 $[-3\sigma_x, 3\sigma_x]$ 之间内的概率仍将有 99.7%。可用下式代替式(1-1-8)：

$$\delta_x = 3\sigma_x \quad (1-1-9)$$

总之，应该了解在进行一系列等精度的重复测量时，由于各种随机因素的影响，各测量值的随机误差大小与正负在不断变化，满足一定的统计分布规律。我们用标准误差 σ_x 和极限误差 δ_x 等来描述它们的离散性或重复性，这些误差值并不是表示测量值与真值之间的差值，而是从某一个方面(如从曲线的高矮或宽窄等方面)，在一定的条件下(如取某一概率水平)，对分布曲线特性的反映。它们是统计上的意义，离开统计的概念就无法理解这些误差的含义了。

三、系统误差

在科学实验中，有时系统误差是影响实验结果准确度的主要因素，然而它又常常不明显地表现出来，有时会给实验结果带来严重的影响。因此，发现系统误差，估算它对结果的影响，设法修正、减少或消除它的影响，是误差分析的一个很重要内容。由于系统误差涉及较深的数学和误差理论知识，更需要具备丰富的科学实验的专门知识和实践经验，本书只作一般性的介绍，供同学们在实验中参考。

为使问题简化，在讨论系统误差时，只考虑系统误差，不考虑随机误差。

1. 系统误差的种类

系统误差按其产生原因分为：

(1) 仪器误差 这是由于仪器本身缺陷造成的。例如：仪器零点不准、天平两臂不等长、在 200°C 标定的标准电阻在 30°C 情况下使用等。

(2) 理论方法误差 这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到所规定的要求,或测量方法不适当所带来的误差。如单摆的周期公式 $T=2\pi(l/g)^{1/2}$ 的成立条件是摆角趋于零,摆球的体积趋于零,这些条件在实验中是达不到的;用伏安法测电阻时电表的内阻影响等都会引起误差。

(3) 环境误差 各种环境因素如温度、气压、振动、照明、电磁场等与要求的标准状态不一致,在空间上梯度随时间的变化,引起测量设备的量值变化、机构失灵、相互位置改变等产生的误差。

(4) 个人误差 这是由于观测者本人生理或心理特点造成的。如停表计时,有人常失之过长,有人常失之过短;估计读数时始终偏大或偏小等。

2. 寻找系统误差的方法

寻找系统误差的根本方法应从系统误差来源去研究,如分析实验条件、考虑每一步调整和测量、注意每一个因素的影响。

(1) 对比法

a. 实验方法对比 用不同方法测同一个物理量,看结果是否一致。如测重力加速度:

用单摆测量结果为 $g=(9.800\pm0.001)\text{m/s}^2$

用自由落体测量结果为 $g=(9.77\pm0.01)\text{m/s}^2$

显然两个测量结果不一致,即它们在随机误差允许范围内不重合,表明至少其中有一个存在系统误差。

b. 仪器对比 用两个以上的仪器测量同一个物理量,进行比较。如用两个电流表接入同一个电路,若读数不一样说明至少有一个不准。若其中一个为标准表,就可以找出另一个表的修正值。

c. 改变测量方法 如把电流反向、增加砝码进行读数等,观察结果是否一致。

d. 改变实验中某些参数的数值 有时为了判断某个因素带来的系统误差,有意改变有关参数进行测量,如改变摆角测周期等。

e. 改变实验条件 如将电路中某个元件的位置变动一下;磁测量中让带有磁性的物体靠近等。

f. 换人测量 换人测量可发现个人误差。

(2) 理论分析法

a. 分析实验理论公式所要求的条件在测量过程中是否得到满足。如用三线摆测量转动惯量实验的转动惯量公式,要求质心不动、摆角趋于0,实际情况不符合要求,必有系统误差。

b. 分析仪器要求的条件是否得到满足。如有的电表要求水平放置,有的要求垂直放置等。不符合条件必有系统误差。

(3) 数据分析法

当随机误差很小时,将测量偏差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$,按测量的先后次序排列,观察 Δx_i 的变化,如呈规律性变化,如 Δx_i 线性增加,或线性减少,或稳定有周期性变化,则必有系统误差存在。

2. 消除系统误差的方法

(1) 消除产生系统误差的根源 采用符合实际的理论公式;实验中严格保证仪器装置和实验测量条件;严格控制环境条件。

(2) 修正测量结果 找出修正公式,对测量结果进行修正。