

大学物理实验

钟读敏 主编



中国科学技术大学出版社

大学物理实验

主 编 钟读敏
副主编 姚兆基 肖树勋
王和庆 任 红

中国科学技术大学出版社

1995 • 合肥

(皖)新登字 08 号

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/钟读敏主编·—合肥:中国科学技术大学出版社·1995年
2月

ISBN7-312-00617-5

I 大学物理实验

I 钟读敏 主编

II ①物理 ②实验 ③大学教学

IV O

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,邮编:230026)

合肥市科委晓星印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:19.5 字数:440千

1995年2月第1版 1995年2月第1次印刷

印数:1—10000册

ISBN7-312-00617-5/O·154

定价:12.00元

0226/3022
内 容 简 介

本书是根据《高等工业学校物理实验课程基本要求》及编者在1989年出版的《大学物理实验》的基础上编写而成的。

全书遵循物理实验自身的特点和规律,共分八章:第一章误差和数据处理的基本知识,着重介绍与大学物理实验有关的数据处理知识;第二章物理实验基本方法,系统地介绍了物理实验的各种方法和手段,特别介绍了各种传感器在物理实验中的应用;第三章基础训练知识,介绍了力学和热学、电磁学、光学实验的基本知识和基本测量仪器;第四章、第五章按不同层次编排了27个实验,供不同专业需要;第六章近代物理实验,供工科偏理专业的学生选用;第七章设计实验,要求同学在完成一定数量的基础实验后,并具备一定的实验技能的情况下,根据题给的任务、条件,在教师指导下,拟出设计方案,完成实验要求;第八章计算机在物理实验中的应用举例,让同学初步了解数据的采集和处理。全书形成完整的体系,使学生在基本知识、基本方法、基本技能方面得到全面的训练。本书共40多个题目,可根据不同教学要求,选择60学时,或多于60学时的内容进行教学。

本书可作为工科院校各专业及工科偏理专业普通物理实验教材,也可供工科各类成人高校选用实验教材。还可作为物理实验技术人员的参考用书。

前 言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合合肥工业大学物理实验课教学改革的情况，及在 1989 年我校出版的《大学物理实验》一书的基础上编写而成的。本书有以下特点：

1. 全书遵循物理实验自身的特点和规律，共编写了八章：第一章误差和数据处理的基本知识，着重介绍与大学物理实验有关的数据处理知识；第二章物理实验基本方法，系统地介绍了物理实验的各种方法和手段；第三章基础训练知识，介绍了力学和热学、电磁学、光学实验的基本知识和基本测量仪器；第四章、第五章基础实验，按照不同专业的需要编排了 27 个实验；第六章近代物理实验，供工科偏理专业的学生选做；第七章设计实验，要求同学在完成一定数量的基础实验后，并具备一定的实验技能的情况下，根据题给的任务、条件，在教师指导下拟出设计方案完成实验要求；第八章计算机在物理实验中的应用举例，让同学初步了解数据的采集和处理。全书形成完整的体系，使学生在基本知识、基本方法、基本技能方面得到全面的训练。本书共 40 多个题目，可根据不同教学要求，选择 60 学时或多于 60 学时的内容进行教学。

2. 本书在第二章中系统地介绍了各种物理实验方法，是对分散在各个实验中所用到的物理实验方法的概括，使实验者思路清晰，目的明确。在实验方法中，还用不少篇幅介绍了传感器的应用，旨在将科学实验的新知识，渗透到物理实验中去，以开阔实验者的知识和视野。

3. 本书遵循由浅入深、循序渐进的学习规律，将实验分成几个层次编排。在实验内容和步骤部分，也按照由详到简，逐步提高的原则。故在基础训练、基础实验(一)中，不但有详尽的原理、公式推导，而且还列出完整的步骤，并附有数据表格，旨在便于初学者自学及了解规范要求。后几章则从简，引导学生独立完成。

4. 每个实验后附有足够数量的预习思考题和讨论题，供学生实验前思考，实验后巩固、提高。

本书由钟读敏任主编。姚兆基、肖树勋、王和庆、任红任副主编。姚建安负责审阅全书。由合工大实验物理教研室全体教师参加编写。其中：王和庆编写第二章，第四章实验 4，第五章实验 25，第六章实验 28、37；王晓茹编写第四章实验 2、11，第五章实验 15；任红编写第一章，第四章实验 7，第五章实验 20；刘业政编写第四章实验 10，第六章实验 29、30、34；肖苏编写第五章实验 18，第六章实验 32、35、36；何于江编写第四章实验 5，第七章中光学设计，第八章；吴本科编写第三章中第一部分，第四章实验 6、9，第七章中综合设计；肖树勋编写第四章实验 8，第七章中电学设计，附录；罗乐编写第四章实验 12、13，第五章实验 24、26；姚兆基编写第五章实验 23，第六章实验 31；姚建安编写第四章实验 3，第七章中力学和热学设计；钟读敏编写第三章中第二部分，第五章实验 21、22；高峰编写第四章实验 1，第五章实验 16、17、19；梁齐编写第三章中第三部分，第五章实验 14、27，第六章实验 33(以上按姓氏笔划排列)。第五章实验 14 的内容

是吸收了陆正亚教授的科研成果。全书插图由冯佩青同志描绘。

本书虽由以上同志执笔编写,但书稿的形成却是我校实验物理教研室全体同志多年工作经验总结,是集体劳动的结晶。郑象鹤同志对本书的出版给予了关心和支持,中国科技大学出版社及于文良同志为本书出版做了大量工作,在编写过程中还参阅了部分兄弟院校的教材,吸取了其中的宝贵经验,在此特致谢意。

由于编者水平有限,书中缺点在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1994年7月

目 次

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)
一、测量与误差的基本概念	(3)
二、随机误差的估计	(5)
三、直接测量的误差表示	(8)
四、间接测量的误差计算	(12)
第二节 有效数字	(17)
一、有效数字的定义	(17)
二、有效数字的性质	(17)
三、有效数字运算规则	(18)
第三节 实验数据的处理方法	(20)
一、列表法	(20)
二、作图法	(21)
三、逐差法	(24)
四、最小二乘法	(25)
第二章 物理实验的基本测量方法	(33)
第一节 比较法	(33)
一、直接比较法	(33)
二、间接比较法	(33)
第二节 放大法	(34)
一、机械放大法	(34)
二、光学放大法	(34)
三、电子放大法	(34)
第三节 补偿法	(34)
第四节 模拟法	(35)
一、物理模拟法	(35)
二、数学模拟法	(35)
第五节 干涉法	(36)
一、应用瑞利干涉仪测定气体折射率	(36)
二、用劈尖干涉法测量玻璃细丝的直径	(37)
第六节 非电量电测法	(37)
一、电阻式传感器及其应用	(38)
二、电容式传感器及其应用	(42)

三、电感式传感器及其应用	(43)
四、压电传感器及其应用	(44)
五、磁电式传感器及其应用	(44)
六、热电偶及其应用	(47)
七、光电式传感器及其应用	(48)
第三章 基础训练知识	(54)
第一节 力学、热学实验基本知识	(54)
一、长度量的测量	(54)
二、质量的测量	(59)
三、时间的测量	(61)
四、温度的测量	(62)
五、压强的测量	(63)
练习一 物体密度的测量	(63)
练习二 单摆法测重力加速度	(68)
第二节 电磁学实验基本知识	(70)
一、电源	(70)
二、电表	(71)
三、电阻	(74)
四、开关	(77)
五、电学实验的操作规程	(77)
练习三 用伏安法测电阻	(79)
第三节 光学实验基本知识	(82)
一、光学实验的教学要求	(82)
二、光学仪器的使用、维护规则	(83)
三、光学实验常用光学仪器	(83)
四、光学仪器的调节	(85)
五、实验室常用的光源	(86)
练习四 薄透镜焦距的测定	(88)
第四章 基础实验(一)	(94)
实验 1 金属丝杨氏弹性模量的测定	(94)
实验 2 气垫上速度和加速度的测定并验证牛顿第二定律	(97)
实验 3 用三线摆测量转动惯量	(104)
实验 4 驻波的研究	(110)
实验 5 液体表面张力系数的测定	(113)
实验 6 液体粘滞系数的测定	(117)
实验 7 测定不良导体的导热系数	(122)
实验 8 用模拟法测绘静电场	(126)
实验 9 电桥法测电阻	(129)
实验 10 示波器的使用	(137)
实验 11 分光计的调整和使用	(144)

实验 12	照相技术(一)——拍摄与冲洗	(151)
实验 13	照相技术(二)——印相与放大	(154)
第五章	基础实验(二)	(158)
实验 14	“金割”效应物理摆	(158)
实验 15	气轨上守恒定律的研究	(162)
实验 16	电位差计的原理和使用	(165)
实验 17	热电偶定标	(168)
实验 18	电表的设计与改装	(171)
实验 19	用冲击法测螺线管磁场	(175)
实验 20	灵敏电流计的研究	(179)
实验 21	电子射线的电偏转与磁偏转	(183)
实验 22	电子射线的电聚焦与磁聚焦	(190)
实验 23	示波器法测定铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(194)
实验 24	单缝衍射光强分布的测定	(199)
实验 25	光的干涉	(201)
实验 26	光的偏振	(206)
实验 27	光栅衍射及光波波长的测定	(212)
第六章	近代物理实验	(217)
实验 28	霍耳效应	(217)
实验 29	夫兰克——赫兹实验	(222)
实验 30	密立根油滴实验	(227)
实验 31	光电效应法测定普朗克常数	(232)
实验 32	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(242)
实验 33	全息照相	(246)
实验 34	微波的单缝衍射和布拉格衍射	(253)
实验 35	光谱定性分析	(257)
实验 36	盖革——弥勒计数器的研究	(263)
实验 37	真空的获得与测量	(267)
第七章	设计实验	(274)
第一节	力学热学设计实验	(275)
第二节	电学设计实验	(278)
第三节	光学设计实验	(280)
第四节	综合设计实验	(281)
第八章	CAI 与大学物理实验教学	(283)
第一节	CAI 引入大学物理实验教学的意义	(283)
第二节	CAI 在大学物理实验教学中的应用类型	(284)
第三节	微机在大学物理实验中应用举例	(285)
附 录		(295)
(1)	中华人民共和国法定计量单位	(295)
(2)	物理学常用数表	(298)

绪 论

物理实验的地位和作用

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,普遍地存在于其它高级的、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。

物理学本身是一门以实验为基础的科学,实验物理学已成为物理学的重要分支。物理学的规律和理论,都是实验事实的总结,必要时还要通过实验来检验和修正理论。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。

实验是在人工控制下,模拟自然现象,使现象重演,从而仔细地观察和探测。借助实验,可以突破感观的局限,扩展认识的境界,大到天体,小到基本粒子,都可以通过各种仪器进行直接或间接地观察和测量。科学技术越进步,科学实验就显得越重要。任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品,都必须通过科学实验才能获得。作为研究自然界物质运动最普遍形式的手段的物理实验,正在科学实验中充当着铺路石的作用。同时,科学实验的新成,又不断向物理实验提供先进的测量手段,使物理实验向高精度方向发展。

现在人类社会已进入到高科技时代。高科技是知识和技术的集成。而高科技的竞争,最终是人才的竞争。培养高质量的人才,是当今世界共同面临的课题。同时,随着社会主义市场经济的建立,社会对人才需求的选择意识日益强化,需要智能型、创造型人才。对于能力的培养已提到应有的高度。四化建设需要的是既有丰富的理论知识,又有扎实的实验技能的全面发展的人才。

物理实验课是学生进入大学后系统学习科学实验知识和技能的开端,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。

现在,全国各高等理工院校几乎都独立设置了一门必修的《大学物理实验》课,这是近几年来高校课程改革深入发展的结果,对提高物理实验课的教学质量起了很大影响。

物理实验课的目的和任务

通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的原理、测量方法,初步培养学生的科学实验能力和良好的素养,它包括

(1) 借助仪器说明书和参考资料,熟悉常规仪器的原理和正确的调试使用方法,并初步学会分析仪器及实验条件对结果的影响,学会简单故障的排除方法。

(2) 初步学会运用物理学理论,观察、分析、判断物理现象。

(3) 学会正确的记录和处理实验数据、绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

(4) 在掌握了一定实验技能的基础上,初步掌握设计实验的能力,即根据选题的目的和要求,学会制定合理的实验方案,选择合适的仪器,拟定切实可行的实验程序。

(5) 培养严肃认真、细致严谨、一丝不苟、实事求是的科学态度。提倡自觉、主动、创造性的获取知识。反对粗枝大叶,不求甚解,甚致敷衍了事、拼凑数据的错误做法。

(6) 实验室是科学实验的重要场所,必须培养遵守纪律、遵守一切规章制度的良好习惯和爱护国家财产的优良品德,反对一切不文明的行为。

怎样学好物理实验课

实验课主要分成三个环节,即实验前预习、实验中操作、实验后写报告,具体要求如下。

课前预习:要认真阅读教材中有关内容(必要时还需查阅参考资料),在理解本次实验的目的、原理的基础上,搞清要观察哪些现象,测量哪些物理量,主要使用什么仪器,利用什么实验方法,进一步拟出实验方案,搞清要注意的问题,并在规定的预习报告纸上,画出实验的原理图(含光路图、电路图),列出实验所依据的理论公式,并画好记录数据的表格,准备回答预习思考题。教师可通过不同方式对预习进行检查,没有预习的同学,不得进入实验室进行实验。

实验操作:教师先作简明扼要的讲解,着重是实验方法,调节要领及技巧,以及指出必须注意的事项,然后每组同学检查实验室所提供的仪器是否完好,并仔细阅读仪器的使用说明书及注意事项,并在借物卡上签字,以示负责。接下去是安装调试仪器(包含联结电路、安置光路等),经指导教师检查认为仪器可正常运转(如电路联结正确),方可正式实验。实验中必需仔细观察,积极思维,认真操作,防止急躁。要在实验所具备的客观条件(如温度、压力等及仪器精度)下,进行认真的实事求是的观察和测量。要初步学会分析实验(如光学实验中的真假象的判断)。在实验中要有意识地培养自己的独立工作能力(如动手排除简单故障,分析实验中出现的异常现象等)。要按有效数字和误差的要求,正确记录数据。实验结果出来后要请指导教师签字认可,方可拆卸仪器,整理还原。

实验报告:实验报告是实验工作的总结,更是为了培养和训练同学以书面形式总结科学实验结果的能力,是交流实验经验的材料,必需认真对待。最起码要求字体工整,文理通顺,图表规矩,结论明确。实验报告包括实验名称,实验目的,实验原理(含主要使用的仪器设备),实验内容和步骤,数据处理,问题讨论。其中实验名称和实验目的必须与教材一致。实验原理中必需对实验所依据的理论有简明扼要的叙述,并附有必要的原理公式和实验装置的原理图,并注明主要使用仪器的型号、规格。实验内容和步骤中,要说明实验所进行的主要程序,观察了哪些物理现象,测量了哪些物理量,调节的要领和技巧,以便他人重复或检验你的实验。不要照抄书本,反对流水帐式的步骤。数据处理中,要将原始数据,按有效数字列成较科学的表格,使阅读者能纵观全局,一目了然。在数据处理和误差运算中,要有主要的过程,做到言之有据,最后要明确地给出实验结果。问题讨论(包括回答讨论题)部分比较灵活,涉及的内容也相当广泛,可以深入探讨实验现象,或进一步进行误差分析等,也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。通过回答讨论题,还可以加深理解物理实验的理论。总之,同学在这部分大可以发挥自己的聪明才智。

以上只是向初学者提供一般的格式,其实一份成功的报告,应该是科学论文的雏形,不必规定太死,只要立论正确,思路清晰,结果明朗也就可以基本肯定了。

总之,物理实验课虽然是一门基础课,但有它的一套实验理论、实验方法和实验技能的知识,要掌握这一套知识是不容易的,需要一个由浅入深,由简及繁的过程,必须认真对待,并要系统地进行学习、培养和训练。

第一章 误差和数据处理的基本知识

物理实验科学的任务不仅是定性地解释各种自然现象,更重要的是定量地测量各个物理量。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,到各种测量的误差表示,有效数字及运算规则、列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等,介绍有关误差理论及实验数据处理方法的基本知识。相信掌握好本章的内容,对学习物理实验课具有重要意义。

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和设备,进行调试,使得物理现象再现;第二部分是进行测量;第三部分是进行数据处理,找出物理量之间的数量关系,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 用实验方法找出物理量的量值叫做测量。就是将待测量与选作标准的同类量进行比较,得出倍数。称该标准的同类量为单位,倍数值为数值。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(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)是基本单位,其它量的单位由于可由基本单位导出,称为导出单位。

(3)分类 测量可分为直接测量和间接测量两大类。

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,用电表测电流、电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电流、电压等称为直接测量值。

间接测量:有些物理量很难进行直接测量,而需依据待测量和某几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, $g=4\pi l/T^2$, T (周期)、 l (摆长),是直接测量值,而 g 就是间接测量值。

2. 测量误差

(1)真值 在某一时刻和某一位置或状态下,某量的效应体现出的客观值或实际值。一般来说它是一个无穷多位数。

(2)测量误差 测量是在一定的条件下,使用一定的仪器,通过一定的方法,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,测量结果和真值之间总有一定的差异,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,并会

因主观因素的影响、客观条件的干扰、实验技术及人们的认识程度不同而不同。

测量结果的表示应由数值、误差和单位三部分组成。

(3)误差的分类 由于误差在测量过程中是必然存在的,误差理论的任务首先是要对测量误差的影响作出正确的定量估价,其次是要设法减少测量误差,以获得较好的测量结果。为此必须研究误差的来源。根据误差性质和产生原因可将误差分为以下几类。

a. 系统误差

在偏离规定的测量条件下多次测量同一量时,符号和绝对值保持不变的误差;或在该测量条件改变时,按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。

系统误差又可按其产生原因分为:

仪器误差:这是由于仪器本身缺陷或没有按规定条件使用造成的。例如:仪器零点不准、天平两臂不等长、在 20°C 标定的标准电阻在 30°C 情况下使用等。

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 $T=2\pi\sqrt{l\cdot g^{-1}}$ 的成立条件是摆角趋于零,这个条件在实验中是达不到的;用伏安法测电阻时内阻影响;称衡重量时没考虑空气浮力等。

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。

系统误差有些是定值,如游标尺的零点不准;有些是积累性的,如用受热膨胀的钢质尺进行测量,其指示值就小于真实长度,误差值随待测长度成比例增加。还有些是周期性变化的,如仪器的转动中心与刻度盘的几何中心不重合而造成的偏心差就是一种周期性变化的系统误差。还有些系统误差是按其它一些特定的规律变化的。

系统误差的特点是它的出现是有规律的,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。

消除和纠正系统误差的方法是对仪器进行校正,改进实验方法或者在计算公式中引入一些修正项。

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以下一位读数值,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象对系统误差那样,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

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作出随机误差的估算。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

凡是用测量时的客观条件不能合理解释的那些突出的误差,可称为粗大误差。

粗大误差是由于观测者不正确的使用仪器、观察错误或记录错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,要用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

3. 测量的精密性、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。精密性、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)精密性 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;而准确度高精密性也不一定高;只有精密性和准确度都高时,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,故准确度高而精密性较差;(c)图表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密性和准确度都很好,亦即精确度高。

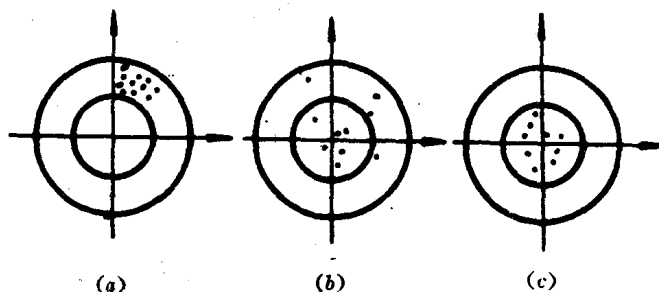


图 1-1-1

二、随机误差的估计

随机误差是一种“就某一次具体的测量来讲其误差的大小与正负都不确定,而在大量的重复测量中又遵守一定的统计规律”的误差。处理随机误差问题主要是对测量数据的离散性或重复性作出定量的描述。这里主要讨论怎样作这种定量的描述。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,并在以后的讨论中,假设不存在系统误差。

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,大部分的测量中随机误差服从的是正态分布规律。在下面的讨论中将主要按正态分布来处理。但并不是说所有的随机误差都只遵守这一种分布,在某些情况下也

会遵守其它分布,如泊松分布、均匀分布和 t 分布等。

设某物理量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 随机误差 $\Delta = x - x_0$, 由统计理论可知遵守正态分布的随机误差概率密度分布函数 $f(\Delta)$ 为:

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

其中 σ 为标准误差(见后)

(1-1-1)式也可用如图 1-1-2 所示的正态分布曲线表示。

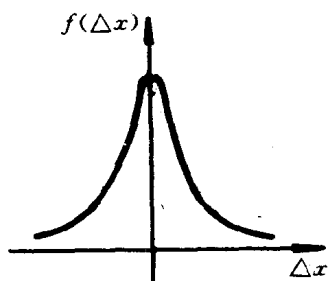


图 (1-1-2)

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为零。
- (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少,最后趋向于零,即:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$$

2. 随机误差的表示

表示随机误差的是标准误差,平均误差和极限误差,下面介绍几种随机误差的常用表示及不确定度的概念。

(1)标准误差 σ 在式(1-1-1)中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数,称之为标准误差。它是当前用得最多也是最基本的一种随机误差的表示方法。其值:

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

由图 1-1-3 可见, $f(\Delta)$ 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密度重复测量数据的离散性。

必须注意的是,标准误差 σ 并不是一个具体的测量误差值,它只是表示测量列的随机误差概率分布特性,是一个统计性的特征值。按概率理论,可以算出随机误差出现在 $-\sigma$ —— σ 内的概率为

$$P_r\{-\sigma, \sigma\} = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta) d\Delta = 68.3\% \quad (1-1-3)$$

如图 1-1-4(a)所示,由 $-\sigma$ 到 σ 之间曲线下的面积占曲线下总面积的 68.3%。这就是说,在进行等精密度的重复测量时,在测量数据的误差中,将有 68.3% 的概率是在 $-\sigma$ —— σ 的范围内。但千万不要认为一组重复测量数据的误差为 σ ,就是在这组测量中每个测量值 x_i 与真值

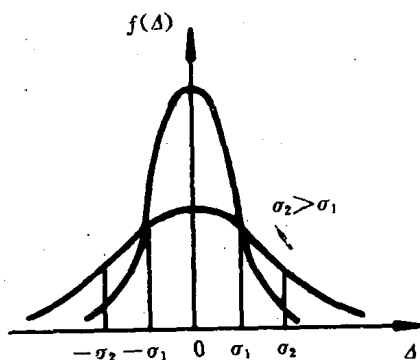


图 1-1-3

之差就是 σ ，也不要认为这组数的误差都在 $[-\sigma, \sigma]$ 这个范围之内，实际上还有 31.7% 的数据的误差其绝对值大于 σ 。

由此可见，标准误差 σ 能较好地反映测量数据的离散程度。因此在一般科学文献报告中更通用的还是标准误差。

(2) 平均误差 η 取各个误差的绝对值的算术平均值，即：

$$\eta = \frac{\sum |\Delta_i|}{n} \quad (1-1-4)$$

称为算术平均误差。可以证明算术平均误差 η 与标准误差 σ 的关系为：

$$\eta = 0.7979\sigma \quad (1-1-5)$$

即两者有确定的比例关系，故平均误差也可用来描述随机误差；且 η 越小表示数据的离散重复性越好。

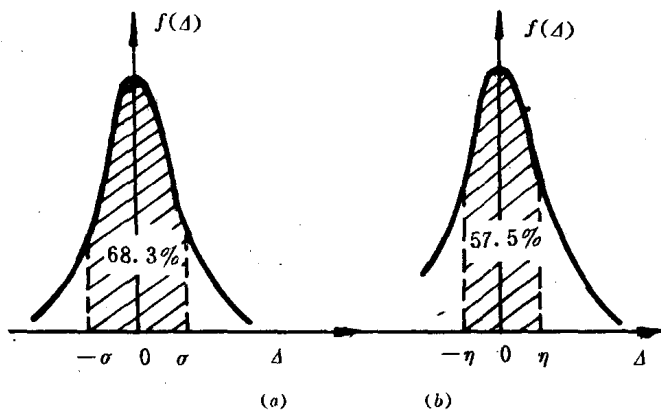


图 1-1-4

同标准误差一样，平均误差反映的也是测量列的随机概率分布特性。按概率理论，随机误差出现在 $-\eta$ —— η 内的概率为：

$$P_r\{-\eta, \eta\} = \int_{-\eta}^{\eta} f(\Delta) d\Delta = 57.5\% \quad (1-1-6)$$

如图 1-1-4(b) 所示，由 $-\eta$ 到 η 之间的曲线下的面积占所示曲线下总面积的 57.5%。由此可知，进行等精密度的重复测量时，在测量数据的误差中，将有 57.5% 的概率是在 $-\eta$ —— η 的范围内。

由于平均误差具有计算比较简单的优点，容易为初学者掌握，因此在物理实验的初期教学中常常采用平均误差。

(3) 极限误差 极限误差的定义为：

$$\delta = 3\sigma \quad (1-1-7)$$

根据误差理论，随机误差出现在 -3σ —— 3σ 内的概率为：

$$P_r(-3\sigma, 3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\Delta) d\Delta = 99.7\% \quad (1-1-8)$$

即测量值的误差落在 -3σ —— 3σ 内的可能性为 99.7%，在此区间外的可能性仅为 0.3%。可见它的误差范围很大，在测量次数不甚大的测量中，实验误差实际上不会超过 -3σ —— 3σ 。若某一误差果真超出此区间，则可认为具有那样大的误差的数据是某种错误造成的，可以舍去。事实上这是剔除坏值的一种粗略方法。因此在工程技术报告中一般使用极限误差。

总之，应该了解在进行一系列精密度的重复测量时，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都在不断变化，但是它们都满足一定的统计分布规律。当我们用标准误差 σ ，平均误差 η 和极限误差 δ 等来描述它们的离散性或重复性时，这些误差值并不是表示测量值与真值之间的差值，而只是从某一个方面（如从曲线的高矮或宽窄等方面），在某一定的条件下（如取某一个概率水平），对分布曲线特性的反映。它们只有统计上的意义，离开统计的概念就无法理解这些误差的含义了。

(4) 不确定度 由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度称之为不确定度。它不是指具体的符号和绝对值已知的误差值。

不确定度的定量表述就是以所需要的置信概率给出用标准误差倍数表示的置信区间。如用“不确定度(1σ)”时,则置信概率为 68.3%,置信区间为 $-\sigma$ —— σ ;用“不确定度(3σ)”时,则置信概率为 99.7%,置信区间为 -3σ —— 3σ 。因此只要对测量结果给出不确定度,即给出置信区间和置信概率 P ,就表达了测量结果的精密程度。

由于不确定度是用标准误差定量描述的,而一般标准误差多在科技文献报告中采用,故希望同学们在今后的实验结果中用标准误差表示随机误差。一般的计算器上也均有计算标准误差的功能、运算很方便。

三、直接测量的误差表示

我们知道了系统误差是按一定规律变化的,可以用适当的方法消除它。而随机误差是满足统计分布规律的,它不能消除。为叙述方便,先假定已消除了系统误差,只对随机误差进行讨论。

1. 几个基本概念

(1) 算术平均值——测量结果的最佳值 由于测量误差的存在,真值实际上是无法测得的,但我们可以利用随机误差的性质,求出测量结果的最佳值——近真值。

根据随机误差的抵偿性可知,在确定的测量条件下,减小测量结果随机误差的办法是增加测量次数。设对某量在等精度测量条件下进行多次测量时,获得下面 n 个数据:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

则其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1-9)$$

又由误差定义: $\Delta_i = x_i - x_0$ 得

$$x_0 = x_i - \Delta_i$$

$$nx_0 = \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \Delta_i$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$$

可见当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow x_0$$

且测量次数越多,测量列的算术平均值越接近真值。故称测量列的算术平均值为近真值,它是测量结果的最佳值。

(2) 偏差 由于真值 x_0 无法知道,因而误差 Δ_i 也无法计算。可以用测量列中各测量值与算术平均值之差来估算误差,称之为偏差:

即:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-10)$$

注意在以后的讨论中,所有的误差都是用偏差表示的。

(3) 标准误差 测量列的标准误差当在相同条件下,对某个被测量进行 n 次测量时,任何一次测量值的标准误差 σ_x 为:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-11)$$