

DAXUEWULISHIYAN



大学物理实验

西安交通大学实验物理教研室

编

7
交通大学出版社

大学物理实验

西安交通大学实验物理教研室 编

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书是为了适应高等工业学校物理实验单独设课的需要,以工科物理实验课程基本要求为依据而编写的一本通用性教材。它改变了分实验编写的程式,把各实验中具有共性的内容,如基本物理量的测量、实验方法、实验设计等单独列章,系统介绍,使读者获得比较系统完整的概念,因此它不仅适用于高等学校教学,而且对一般工程技术人员也有一定参考价值。为了培养学生查阅资料的能力,本书结合生产实践的需要,附有内容丰富的附录。

本书可作为高等院校工科各专业的物理实验教材,也可供一般工程技术人员阅读参考。

大 学 物 理 实 验
西安交通大学实验物理教研室编
责任编辑 刘 影

*

西安交通大学出版社出版
邮政编码 710049
西安交通大学出版社电脑排版
西安电子科技大学出版社印刷厂印装
陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数: 362 千字

1991 年 2 月第 1 版 1991 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—10050

ISBN7-5605-0367-5/O·64 定价: 2.65 元

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,结合西安交通大学实验物理教研室多年来开设工科物理实验的教学实践,并参照历届使用的讲义编写而成的。

物理实验课是对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门重要基础课,也是现代高级工程技术人员必备的基础知识技能。应该特别强调的是:物理实验是工科学生进入大学后接受严格科学训练的开端,它对提高学生的实验技能和掌握科学实验方法,对后续课程的学习,对培养学生独立工作能力和理论联系实际的科学作风都具有重要的先导作用。为提高物理实验课的教学质量和教学效果,近年来西安交通大学在物理实验课程的教学实践中,从教学思想、教学内容到教学方法进行了一系列探索和改革,本书就是在总结这种探索和改革的基础上编写的。

物理实验课作为一门独立设置的必修基础课,应有一本教学思想明确、体系完整的教材。为此,于1985年初,在总结以往多年教学经验、并吸收各方面好的意见和建议基础上,拟定了新的物理实验教材的基本结构和内容安排,并于1986年10月铅印成册,在校内作为讲义试用。本书是在该讲义使用两年多的基础上,又广泛听取了教师和学生的意见,对书的结构、内容进行了修正、充实和提高而成的。

本书内容包括:绪论,测量误差和数据处理,物理量的测量及测量仪器,实验方法与测量技术,实验设计的基础知识,基础实验,设计性实验及附录。编者试图改变过去孤立地单纯写几个实验的传统,将相关部分立章专写,使物理实验从内容到方法构成一个有机的完整体系。为了使学生在纵横两个方面掌握实验的基本要求,书中把基本物理量的测量、基础的实验方法和测量技术分章专门介绍。基础实验部分按两个学期安排编写,前详后略,由浅入深,循序渐进,便于逐步培养学生的实验技能和处理实验数据的能力。在基础实验之后安排设计性实验是为了使学生能独立完成一个实验的全过程而设置的,目的是进一步培养学生综合的实验工作能力。为加强学生使用微机处理和分析实验数据的能力,选出了四个实验,要求每个学生上机处理其实验数据。书末附录篇幅较大,内容丰富,并尽量选用最新发表的数据和资料,不仅对培养学生的自学能力,学会查阅资料 and 正确使用仪器有帮助,也可供广大教师和工程技术人员参考。

实验教学是一项集体的事业,本书内容反映了实验物理教研室全体同志的集体智慧和多年来共同教学实践的劳动成果。具体参加本书编写工作的有梁得山(绪论,第一章)、宋朝聪(第二章)、李寿岭(第三、四、六章)、王希义(第五章部分内容及附录)和刘丽敏(第五章部分内容)等同志,最后由王希义同志统稿。张学恭同志参加了1986年10月铅印讲义的编写工作,并写了其中第二章和第五章,为讲义的形成做出了重要贡献。张国柱、郭桂林等同志对原讲义中部分基础实验进行了认真的审查,提出了宝贵的意见。在本书编写期间,还得到许多兄弟院校同行的鼓励和支持,在此一并致以衷心的感谢。

编写一本密切结合我国实验物理教学实际,适合工科大学各类专业需要而又富有时代感的教材,一直是大家多年来的愿望,然而鲜有成效。但千里之行始于足下,本书作为一个初步的探索和尝试献给广大的实验物理教师和工科大学生,真诚欢迎批评和指正。

吴 百 诗

于1990年6月

目 录

绪 论	
第一节 物理实验课的地位、作用和任务	1
第二节 实验课的基本程序	2
第一章 测量误差和数据处理	
第一节 误差的基本知识	4
第二节 实验结果的误差估算	6
第三节 对仪器误差的处理	15
第四节 有效数字及其运算	16
第五节 用列表法、作图法和逐差法处理数据	18
第六节 线性拟合法(最小二乘法)	22
第二章 物理量的测量及测量仪器	
第一节 单位制	32
第二节 空间和时间量的测量	33
第三节 力学量的测量	47
第四节 温度的测量	54
第五节 电磁学量的测量	60
第六节 光学透明媒质折射率的测量	72
第三章 实验方法与测量技术	
第一节 实验装置的基本调整	77
第二节 比较测量法	80
第三节 放大测量法	83
第四节 补偿法	84
第五节 零位测量法	88
第六节 模拟法	90
第七节 替代法	92
第八节 非电量的电测技术	93
第九节 光测技术简介	97
第四章 实验设计的基础知识	
第一节 物理思想(物理模型)的建立	98
第二节 仪器的选用与配置	100
第三节 实验程序的制定	102
第四节 设计举例	103
第五章 基础实验	
实验 1 用光杠杆测定金属丝的杨氏弹性模量	109
实验 2 三线摆周期的研究	112
实验 3 液体粘滞系数的测定	115
实验 4 用混合法测定比热容	118

实验 5	用电流场模拟静电场	121
实验 6	二极管伏安特性的测量	123
实验 7	用惠斯通电桥测电阻	125
实验 8	电子射线示波器的应用	129
实验 9	用分光计测定玻璃棱镜的折射率	135
实验 10	用迈克耳孙干涉仪测量光波波长	140
实验 11	金属电子逸出功的测定	144
实验 12	铅对 γ 射线的吸收	149
实验 13	固定均匀弦振动的研究	153
实验 14	直流电位差计的应用	158
实验 15	磁场的测量	161
实验 16	电振动的合成	164
实验 17	电子荷质比的测定	167
实验 18	等厚干涉	170
实验 19	用光栅测量光波波长	174
实验 20	光电效应	177
实验 21	霍耳效应及其应用	180
实验 22	密立根法测电子电荷	183
实验 23	光学全息照相	189
实验 24	玻尔理论的验证	193
第六章 设计性实验		
实验 25	测定重力加速度	197
实验 26	测量给定物体的密度	197
实验 27	电源特性的研究	198
实验 28	分压电阻的研究	198
实验 29	非线性电阻特性的研究	199
实验 30	电表改装	200
实验 31	测定透镜的焦距	200
实验 32	研究单缝衍射光强的分布	201
附录一	我国法定计量单位	202
附录二	常用仪器简介	204
附录三	常用物理数据	230

绪 论

第一节 物理实验课的地位、作用和任务^①

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为培养德智体全面发展的高级工程技术人才的高等工业学校，不仅要使学生具备比较深广的理论知识，而且要使学生具有从事科学实验的较强能力，以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

物理实验是对高等工业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，是工科类专业对学生今后进行科学实验训练的重要基础知识。

物理学是一门实验科学，物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位。它们既有深刻的内在联系和配合，又有各自的任务和作用。

本课程应在中学物理实验的基础上，按照循序渐进的原则，学习物理实验知识、方法和技能，使学生了解科学实验的主要过程与基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

本课程的具体任务是：

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解。
2. 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括：
 - (1) 能够自行阅读实验教材或资料，作好实验前的准备；
 - (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器；
 - (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断；
 - (4) 能够正确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；
 - (5) 能够完成简单的设计性实验。
3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的工作态度，主动研究的探索精神和遵守纪律，爱护公共财产的优良品德。

^①本节摘自国家教委物理课程指导委员会制订的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的第一节。对理科类学生同样具有指导意义。

第二节 实验课的基本程序

实验课的基本程序是：课前预习；课内操作；课后撰写实验报告。

一、课前预习

预习是完成实验的基础。预习时首先要认真阅读教材的有关章节及附录，明白实验的目的、要求，正确理解实验所依据的原理和采用的方法，初步了解实验仪器的主要性能、使用方法和注意事项。

用规定的实验记录纸写出简要的预习记录，其内容应包括：实验名称，原理简述(电学实验应画出电路图，光学实验应画出光路图)，主要仪器的名称和使用时的注意事项，画好记录数据的表格。

上课时，教师将首先检查学生的预习情况，把预习的好坏作为评定课内成绩的一项内容。对于没有预习的，教师有权停止本次实验，且课内成绩定为不及格。

二、课内操作

操作是完成实验的主要内容，是培养科学实验能力的主要环节。进入实验室内，必须遵守实验室规则，服从实验室工作人员和教师的指导。对于严重违犯实验室规则者，教师将停止其实验，并按有关规定处理。

实验时，首先了解使用的仪器(名称、量程、级别、主要功能、操作方法和注意事项)。电学实验中，接好线路后，必须请教师检查，得到允许后才能接通电源。实验开始时，可先粗略地观察一下实验过程和数据分布情况，若无异常现象，就可以开始操作、观测和记录；若有异常情况，应认真思考，分析原因，并与教师讨论，待异常情况排除后，再开始进行实验。

记录数据必须用钢笔或圆珠笔，不允许用铅笔。所记录的数据不得随意涂改。若确认记录的数据有错误，用一斜线将其划掉，把正确的数据写在其旁。要做到如实、及时记录数据和有关现象。同时还应记录主要仪器的名称、型号和级别，以及与实验内容有关的环境条件(如室温、气压等)。

操作完成后，请教师审阅记录的数据，待教师签字后，再把仪器复原、整理好。

三、撰写实验报告

实验完成之后应写出一份实验报告。报告是实验的简明总结，应该表达出做了些什么；依据的物理思想和规律是什么；实验的结果是什么；有哪些提高；有什么见解。不应该把报告写成教材的缩写(实验教材是供没有做过实验的人阅读的。而报告则是请教师批阅的或提供给别人评价自己的实验结果)。

实验报告一般应包括下列几项内容：

(1) 实验名称。

(2) 目的和任务。

(3) 原理简述：应简要叙述实验的物理思想和所依据的物理定律及主要公式。电学和光学实验应画出相应的电路图和光路图。

(4) 列出实验数据和数据处理过程：把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中。简要地写出计算过程和误差的估算过程。明确表达出实验结果。若用作图法处理数

据，应严格按作图要求，画出合乎规定的图线。并把原始数据附在报告正文之后。

(5) 小结：写出自己的见解、体会和收获。讨论实验中遇到的问题，提出对实验的改进意见。

以上所述的三个基本环节组成了实验的全过程。预习是做好实验的基础；课内操作是学习实验技能、完成实验任务的主要环节；撰写实验报告是实验的小结，把感性认识深化为理性认识，同时也培养了书写科研报告的能力。认真做好这三个环节，是学好物理实验课的保证。

第一章 测量误差和数据处理

一切物理量的测量都不可能是完全准确的，因为在科学技术发展的一定水平中，人们的认识能力和测量仪器的制造精度都受到相应的限制。物理量的测量值与其真值之间的差异称为误差。误差的存在是客观的事实。任何实验者都不能回避这个事实，只能合理地估算测量误差的大小。为此，本章从误差的定义开始，介绍系统误差和随机误差的基本概念及其特点，接着叙述常用的误差估算方法和实验结果的表达格式，同时还阐明有效数字的概念与运算法则。在数据处理一节中还介绍了列表法、作图法和逐差法。出于加强培养使用计算机处理实验数据能力的考虑，把线性拟合方法专门列为一节，供编写计算程序时使用。认真学习和掌握本章的内容，将为正确处理实验数据打下必要的基础。

第一节 误差的基本知识

一、测量误差

在一切测量中，由于客观上不可避免的种种因素，使得被测量的真值与测量值之间总是存在着差异。用 x 表示被测量的测量值， x_0 表示被测量的真值，测量误差定义为

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

被测量的真值是指在一定时间，一定状态下，被测量客观存在的真实大小。有些情况下真值的大小是可知的。例如，三角形内角之和恒为 180° 。国家标准局规定的计量学中的基本量的标准：米是光在真空中在 $1/299792458$ 秒时间内所传播的路程长度；秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁的辐射周期的 9192631770 倍的持续时间。另外在实验室中还给出所谓“相对真值”，它是指相对于精度低的仪器而言，用精度高的仪器所测得的值，也可作为被测量的真值。多数情况下，特别是在研究性的实验中，被测量的真值都是未知的。实验的目的是采用科学的方法测得其“真值”，而由于误差的存在，只能测得“真值”某种程度的近似值。

在真值已知的情况下，误差是一个意义明确的概念。由定义式(1-1)可知， δ 是一个代数量。 δ 为正时，表明测量值大于真值； δ 为负时，测量值小于真值。 δ 与被测量的量纲相同。

在真值未知的情况下，误差的概念比较模糊，不能直接用式(1-1)计算误差。这时应当首先研究如何估算真值的近似值，然后再用式(1-1)计算测量值的误差。

为了区别上述两种情况，把测量值与真值近似值之差称作偏差。正确理解误差(偏差)的概念，学习其估算方法，在实验中具有重要的实际意义：一是从实验的测量值中给出真值的近似值和偏差的估算方法，从而得到对测量结果好坏的评价；二是根据实验之前对测量结果的精度要求，怎样选择合理的实验方法、配置恰当的仪器，以便使测量结果达到预期的精度要求。本章对第一个问题予以比较仔细的讨论，第二个方面的问题，将在第三章中讨论。

二、误差分类

按照误差产生的原因和对测量结果影响的性质不同,误差可分为系统误差和随机误差两类。

1. 系统误差

在相同的实验条件下,多次测量某个被测量,每次测量所产生的误差中的某一部分的符号和绝对值都保持恒定,或者当实验条件中的某个已知因素变化时,由此引起的误差依据已知的确定规律而变化。这部分误差称系统误差。

例如,千分尺(螺旋测微计)的零点不准,使长度的测量值产生恒定误差。用受热膨胀的钢质米尺测量某长度时,其示值就恒小于该长度的真值,并且这种误差的大小随着长度成正比例地增加。用天平称物体的质量时,因天平两臂长度不相等而引起误差等等。上述种种都是由于仪器的固有原因所造成的系统误差。另外,因为实验所依据的理论和所采用的方法的近似性,而产生的有已知规律的误差,亦属系统误差。例如用落球法测定液体的粘滞系数,理论上要求液体“无限”广延,而实际上是在一个直径有限的圆柱形容器内的液体中测量的,结果粘滞系数的测定值总是偏大。再如把电表接入电路后,由于电表的内阻而引起的测量误差等。

综上所述,系统误差的出现是有规律的,一般都有比较确定的原因。但是发现、减小和消除系统误差却是比较困难的问题。有目的地改变实验条件中的某个因素,或者改变测量方法,分析测量结果的变化规律,才可能发现系统误差。深入研究整个实验所依据的原理和测量过程中每一个步骤,以及所用的仪器,找出产生系统误差的各个原因之后,方能得到减小和消除系统误差的有效方法。

2. 随机误差

在相同的实验条件下,多次测量某个被测量,每次测量所产生的误差中某一部分的绝对值时大时小,符号时正时负,以不可预知的方式变化着。这部分误差叫做随机误差。

产生随机误差的原因是多方面的,观测者的感觉器官(听觉、视觉、触觉等)的分辨能力有限;仪器的精度有限;环境的干扰,如温度的不均匀变化,微弱气流的扰动,无规则的微小振动,杂散电磁场的影响等等。这些因素对测量的影响虽然是微小的,但却不可避免。

随机误差的存在,使得每个测量值或者偏大,或者偏小,纯属偶然。但是,在相同的实验条件下,对被测量进行大量的测量,就误差的总体而言,其大小的分布呈现一定的规律性。常见的一种规律是:绝对值相等的正负误差出现的几率相等;绝对值较小的误差比绝对值较大的误差出现的几率大;绝对值很大的误差出现的几率几乎为零。这种分布规律称作正态分布,或称高斯(Gauss)分布。正态分布在误差理论中有着重要意义。根据分布的统计规律,能够以较高的精度估算出被测量的真值及其误差。对实验中某个关键量之所以增加测量次数,其根据就在于此。应当强调指出,无论采取什么方法,都不可能完全消除随机误差对测量结果的影响。

3. 系统误差与随机误差的关系

系统误差的特征是确定性,随机误差的特征是偶然性,两者是相互联系的而又同时存在,有时难以严格区别,使得一些不可定的系统误差被看作随机误差。两者的区别还和时间因素有关。如校验电表时,环境温度对标准表精度的影响,在短时间内可以保持恒定,

时间过长,因温度的起伏,对精度的影响呈现无规则变化。因此前者被视为系统误差,后者为随机误差。随着科学技术的不断进步,实验水平的日益提高,人们对误差来源及其规律的认识逐步加深,可以把过去曾经认识不清而归于随机误差中的某些误差又重新确定为系统误差。显然,深刻理解实验原理和巧妙的实验方法,以及较强的分析问题的能力,都是构成正确区分两类误差的重要条件。

还应指出,有些书籍中提出第三类误差——过失误差。实验原理不正确、实验方法不合理、操作的失误和记错测量数据等原因引起的实验结果的错误,叫过失误差,这种错误明显的歪曲了实验结果,与系统误差和随机误差有本质的区别。为了避免与误差存在的客观性相混淆,本书不把它列为一类误差。希望实验者务必以严肃认真的态度,一丝不苟的作风从事实验工作,坚决杜绝这类错误发生。

三、仪器误差

测量过程必须使用测量仪器。测量仪器是指单独地或连同其它设备一起用于测量的装置。例如砝码、量块、热电偶、电流表、电位差计等。这些测量仪器或装置在制造过程中,难免有缺陷。各类具有指针的电表,由于轴承的摩擦,游丝的不均匀或老化,磁场和分度盘刻度的不均匀,都会使其指示值含有误差。仪器误差是指在正确使用仪器的条件下,测量值和被测量的真值之间的最大误差,用 Δ 表示。

仪器误差的数值是由制造工厂或计量机关用精度更高的仪器或量具经过严格的校验给出的,一般都标明在仪器的铭牌上或写在说明书中。电表的仪器误差没有直接给出,需要根据其精度级别通过计算得到^①。例如一个量程为2.00V的电压表,经校准它的最大绝对误差为0.02V;那么,电压表的精度为 $\frac{\text{最大绝对误差}}{\text{量程}} = \frac{0.02}{2.00} = 1\%$,精度级别为1级,

仪器误差为 $\Delta = 0.02\text{V}$ 。需要指出,级别一定的电表,其仪器误差是个确定值,不随示值的不同而改变。用上述电压表测量一个电压为2.00V,则相对误差为1%;若测另一个电压,示值为1.00V,因 $\Delta = 0.02\text{V}$,测量结果应为 $1.00 \pm 0.02\text{V}$,仪器误差对测量结果的影响达2%。正是因为仪器误差的存在,当选择电表时,不仅要考虑精度级别,还要考虑该电表的量程,一般应使示值大于量程的三分之二。

造成仪器误差的原因,既有系统误差,也有随机误差。究竟以哪一类为主,不同的仪器,情况不尽相同,在一般的物理实验中,不必细究。

第二节 实验结果的误差估算

由前面的讨论可知,任何测量值都含有误差。那么,如何合理地估算误差的大小,就成为处理实验数据的一项重要内容。本节在介绍有关的基本名词的基础上,将重点讨论直接测得量和间接测得量的误差估算方法。

一、算术平均偏差 标准偏差 不确定度

1. 算术平均偏差 标准偏差

设在相同条件下,用某仪器对被测量进行 n 次无系统误差的测量,测得值为 x_1, x_2

^①参见附录二

... x_n , 则算术平均值为

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

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 误差理论证明, $\bar{x}$ 为被测量的真值。第 i 次测量值的误差是

$$\delta_i = x_i - \bar{x}$$

由于误差存在的客观性, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 不会完全相同。如何评价 n 次测量结果的好坏呢? 可以用 δ_i 中最大的(或最小的)作为代表值。但并不甚好, 因为它只是 n 个误差中的一个, 偶然性太大。也可以把它们的绝对值按大小顺序排列起来, 取中间位置的误差值作为评定测量质量的代表值, 由于把 n 个误差值的作用都考虑到了, 该值就显得比较稳定一些。而最常用的方法是, 取误差绝对值的平均值作为评定测量质量的代表值, 即

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i|$$

δ 叫做算术平均误差。由于它考虑到全体误差的贡献, 显然比前面两种方法更合理一些。物理实验中, 主要使用算术平均误差估算测量值的误差。

还有一种更好的方法: 把 n 个误差 δ_i 平方后, 再取其平均值, 用 σ^2 表示, 即

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2$$

σ 叫做标准误差。与 δ 相比, 用 σ 作为评价测量质量的代表值, 更为合理。除了误差理论上的根据外, 其优点是, 如果某次误差偏大一些, 经过平方后, 它的贡献就得到更明显的反映, 比 δ 的反应更灵敏一些。因此, 在精度要求较高的测量中, 都是用标准误差估算测量结果的误差。

实际工作中, 测量的次数总是有限的(如 k 次), 而且待测量的真值一般并不知道。那么如何根据 k 次测量值 x_i 估算真值呢? 误差理论证明, x_i 的算术平均值是真值的最好近似值, 即

$$x_0 \approx \bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i$$

第 i 次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差, 称为偏差, 即

$$\delta_i = x_i - \bar{x}$$

算术平均偏差为

$$\delta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \delta_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |x_i - \bar{x}| \quad (1-3)$$

同理, 测量值中单次测量结果的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \delta_i^2}{k-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k-1}} \quad (1-4)$$

算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差, 记作 $\sigma_{\bar{x}}$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{k-1}}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k(k-1)}} \quad (1-5)$$

例1 某长度的10次测量结果如下:

$x_i(\text{cm})$: 63.57, 63.58, 63.55, 63.56, 63.56, 63.59, 63.55, 63.54, 63.57, 63.57.

计算: (1) 算术平均偏差;

(2) 单次测量值的标准偏差;

(3) 算术平均值的标准偏差。

解: 算术平均值

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = \frac{1}{10} (63.57 + 63.58 + 63.55 + 63.56 \\ &\quad + 63.56 + 63.59 + 63.55 + 63.54 + 63.57 + 63.57) \\ &= 63.564 = 63.56\text{cm} \end{aligned}$$

(1) 算术平均偏差

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |\delta_i| = \frac{1}{10} (0.006 + 0.016 + 0.014 + 0.004 + 0.004 + 0.026 \\ &\quad + 0.014 + 0.024 + 0.006 + 0.006) \\ &= 0.012 = 0.01\text{cm} \end{aligned}$$

(2) 单次测量值的标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10 - 1}} = \sqrt{\frac{2040 \times 10^{-6}}{9}} = 0.01506 = 0.02\text{cm}$$

(3) 平均值的标准偏差

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} = 0.00476 = 0.005\text{cm}$$

2. 不确定度

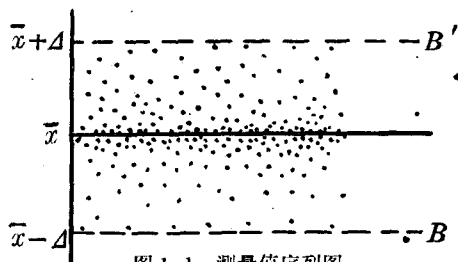


图 1-1 测量值序列图

以往在计量工作和科学实验中, 常常用“精度”、“精密度”、“准确度”和“正确度”等名词对实验数值结果的好坏进行评价。由于这些词语之间仅仅一字之差, 词义含混不清, 致使这种评价缺乏统一的标准。目前, 国际计量局提出用“不确定度”作为这种评价的标准用词。1982年5月17日我国国家计量总局批准了《常用计量名词术语

及定义(JJG1001-82)》的使用。于1983年1月1日起施行。曾经混乱过的主要误差名词将会逐步统一起来。

(1) 不确定度 Δ

不确定度是表征被测量真值在某一个量值范围内的一种数量评定, 用 Δ 表示, 其含

义说明如下。

设在相同条件下,对某量进行独立的无系统误差的测量,得值 $x_1, x_2, \dots, x_k$, 其算术平均值为 $\bar{x}$, 测量值序列图如图 1-1 所示。由图可见, 单个测量值一般都落在 BB' 两条水平线所夹的范围内, 这个范围称为误差带, 误差带两边的界值为 $\bar{x} - \Delta$ 和 $\bar{x} + \Delta$, Δ 称作不确定度(随机不确定度), 数值由式

$$\Delta = C\sigma$$

确定。式中 C 叫作置信系数, 一般可取 $C=3\sim 2$ ^①。 Δ 越小, 说明测得值 x_i 越接近真值, 测得值的质量越高。显然, 标准偏差 σ 是计算 Δ 的基础。在相同的置信系数下, σ 越小, Δ 也越小。

由于历史原因, 精密度、准确度和精确度等不规范的名词仍见于一些书籍中, 但含义不完全相同, 一般的解释是

精密度: 反映随机误差大小的程度。

准确度: 反映系统误差大小的程度。

精确度: 反映系统误差和随机误差合成大小的程度。

图 1-2 所示的是射击试验弹着点的三种典型情况, 其中 (a) 表明系统误差小而随机误差大, 反映射击的精密度低; (b) 表明系统误差大而随机误差小, 反映射击的准确度低; (c) 表明系统误差和随机误差都小, 反映射击的精确度高。对于实验者来说, 精密度高而准确度不一定高; 准确度高而精密度也不一定高; 但精确度高则精密度和准确度都高。

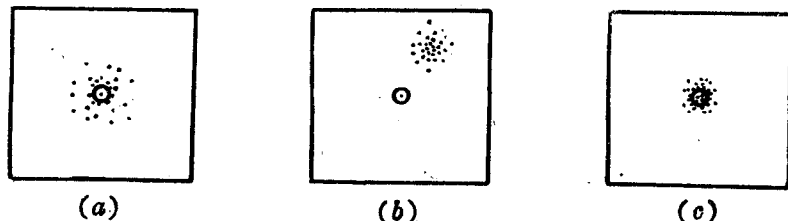


图 1-2 射击试验弹着点的分布

本书使用“精度”一词时, 仅作广义的泛指, 不作为数量大小的标志, 有时是指精确度。考虑到本书是工科基础实验教材, 希望读者掌握算术平均偏差的估算方法, 正确理解标准偏差的概念和学习标准偏差的估算方法, 了解不确定度的含义和来历, 暂不使用它去评价实验结果的好坏。

实际测量有两种情况, 一是用同量纲的仪器与被测量直接进行比较, 得到该被测量的数值, 这种测量结果叫直接测得量。如用米尺测钢丝的长度, 用停表测单摆的周期, 用电流表测电路中的电流等, 都属于直接测得量。二是根据被测量与一个或几个直接测得量之间的已知函数关系, 计算出被测量的数值, 这种测量结果叫间接测得量。如用单摆测重力加速度, 用伏安法测电阻等。虽然多数被测量是间接测量测得, 但直接测得量是它们的基础, 因此, 我们先讨论直接测得量的误差估算方法。

二、直接测得量误差的估算方法

1. 单次测量结果的误差估算方法

^①见《实验误差估计与数据处理》第二章、第六章(肖明耀编), 科学出版社, 1984。

有些实验是在变化过程中对被测量进行测量的, 只能测一次, 有些量测量一次就可以达到精度要求, 则只需测一次即可, 这种单次测量结果的误差应根据测量的实际情况和仪器误差进行估算。例如用米尺测量单摆的摆长时, 上下两端读数误差各取 0.5mm , 则摆长的测量误差为 1mm 。用停表测量某一过程的时间, 误差主要是因为启动和制动按钮时, 手的动作和目测位置不完全一致而引起的。估计启动和制动各有 0.1s 的误差, 该过程时间的总误差应估计为 0.2s 。关于用仪器误差估算测量结果的误差, 请参阅本章第三节。

2. 多次测量结果的误差估算方法

实验中为了提高某个关键量的测量精度, 设法保持实验条件不变, 对该量进行多次重复的测量。这时应当用算术平均值作为被测量真值的估计值。

算术平均值与真值之间误差的大小, 有算术平均偏差和标准偏差两种估算方法。其计算公式分别为式(1-3)和式(1-5)。

例2 用电子秒表测量单摆的周期, 10次的测量结果如下(单位为s):

1.98 1.99 1.97 1.99 1.98 2.01 1.96 1.99 1.98 1.99 试估算周期及其算术平均偏差和标准偏差。

解 周期为 $\bar{T} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} T_i = 1.98\text{s}$

周期的算术平均偏差为

$$\delta = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |\Delta T| = 0.01\text{s}$$

标准偏差为

$$\sigma_{\bar{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} |\Delta T|^2}{10 \cdot 9}} = 0.004\text{s}$$

因误差的数值本身是一种估计值, 所以 δ 和 σ 的数值一般只取一位。

3. 测量结果的表示格式 相对误差

测量结果应当表示为

$$N \pm \Delta N$$

的格式。其中 N 是被测量真值的估计值, ΔN 是被测量误差的估计值。这种表示格式的含义是说明被测量的真值以一定的可能性(几率)出现在 $N - \Delta N$ 至 $N + \Delta N$ 的范围内, 对 ΔN 的估算方法不同, 真值出现的几率不同。例如某长度的测量结果是 $l = 8.05 \pm 0.08\text{cm}$, 表明 l 的真值以某种几率出现在 7.97cm 至 8.13cm 的范围内。当然, 在多次测量值中可能有个别的测量在 $N \pm \Delta N$ 之外, 只是其几率甚小而已。

误差的另一种表示方法叫相对误差, 用 $E = \frac{\Delta N}{N}$ 表示, 也叫百分误差。误差的估计值 ΔN 有时也叫作绝对误差。例2中周期的相对误差 $E = 0.005 = 0.5\%$ 。相对误差与绝对误差的关系是

$$\Delta N = N \times \left(\frac{\Delta N}{N} \right) = N \cdot E$$

对于两个测量结果, 绝对误差大的, 其相对误差不一定大; 相对误差大的, 其绝对误

差也不一定大。如两个测量结果

$$l = 26.3 \pm 0.1 \text{ km}, \quad r = 0.32 \pm 0.02 \text{ cm}$$

其相对误差分别为 $E_l = \frac{0.1}{26.3} = 0.4\%$, $E_r = \frac{0.02}{0.32} = 6\%$ 。可以看出绝对误差大的, 其相对误差却小。在实际工作中, 常用相对误差的大小比较不同的测量结果精度的高低。因此, 在表达被测量的结果时, 应同时写出相对误差的大小。例 1 中用算术平均偏差估算误差时, 测量结果是

$$\begin{cases} N = 63.56 \pm 0.01 \text{ cm} \\ E_N = 0.02\% \end{cases}$$

用标准偏差估算误差时, 测量结果是

$$\begin{cases} N = 63.564 \pm 0.005 \text{ cm} \\ E_N = 0.01\% \end{cases}$$

三、间接测得量的误差估算方法

间接测得量的数值是把直接测得量的数值代入已知函数关系而求出, 由于直接测得量存在误差, 使间接测得量也必然存在误差。这种由直接测得量及其误差去估算间接测得量的误差问题叫误差传递问题。

1. 误差传递基本公式

设间接测得量 N 和彼此相互独立的直接测得量 $x, y, z, \dots$ 的函数关系是

$$N = f(x, y, z, \dots)$$

其中

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad y = \bar{y} \pm \Delta y, \quad z = \bar{z} \pm \Delta z \dots$$

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \dots$ 为各直接测得量的算术平均值(或真值的近似值), $\Delta x, \Delta y, \Delta z \dots$ 是相应的算术平均偏差或标准偏差。该函数的全微分

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots$$

此式表明, 当 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \dots$ 各量有微小变化 $dx, dy, dz \dots$ 时, N 的改变量为 dN 。通常 $\Delta x, \Delta y, \Delta z \dots$ 远小于 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \dots$ 。因此只要把式中 $dx, dy, dz \dots$ 理解为各量相应的误差, 上式就是间接测得量的误差计算公式, 叫做误差的传递公式。式中 $\frac{\partial f}{\partial x} dx, \frac{\partial f}{\partial y} dy, \frac{\partial f}{\partial z} dz \dots$ 各项是直接测得量分别引起的分误差, $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \dots$ 叫分误差的传递系数。

2. 随机误差的合成

由各个直接测得量的分误差组合成间接测得量的总误差的方法, 称误差的合成。因对各直接测得量的随机误差估算方法不同, 间接测得量的总误差也有相应的不同合成方法。常用的有算术合成法与方和根合成法两种。

(1) 算术合成法

把各直接测得量的随机误差用算术平均偏差估算, 误差传递公式中各项分误差取绝对值相加, 得到总误差的方法叫算术合成法。显然, 由于各项分误差的正、负号出现的机会