

高等学校实验教材

物理实验

温坤麟 主编



华南理工大学出版社

412238

高等学校实验教材

物理实验

温坤麟 主编

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，总结和吸收了历年来教学经验编写而成。全书分六章，共54个实验，内容包括：实验误差和数据处理，力学与热学实验，电磁学实验，光学实验，综合性与近代物理实验，设计性实验。书后附有实验数据处理计算机程序和常用物理常数表。

本书为高等工业学校各专业的物理实验教材，也可供函授大学、职工大学使用。

P2-27 36

【粤】新登字12号

高等学校实验教材
物 理 实 验

温坤麟 主编
责任编辑 江厚祥

华南理工大学出版社出版发行

(广州·五山 510641)

各地新华书店经销

广东番禺印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 444 千

1991年12月第1版 1996年1月第2次印刷

印数 10 001—20 000

ISBN 7-5623-0314-2/O·30

定价：16.80元

前 言

自80年代起,我国高等工业学校已将物理实验列为一门独立设置的必修基础课程。1987年国家教委正式颁发了《高等工业学校物理实验教学基本要求》。

实验是物理学的基础。《基本要求》指出:“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。”

根据《基本要求》的精神,并吸收和融合了我们多年的实验教学经验,以近年我校使用的《物理实验讲义》为基础进行补充修改,编写成本“物理实验”教材。

本书分为六章,按三个层次共编写了五十四个实验项目。第一个层次为基础实验部分,内容包括:力学、热学实验;电磁学实验;几何光学实验。每个实验为2学时。这一部分的有关实验原理、方法步骤介绍得较为详细具体,并附有实验记录表格,以便引导学生实验入门。第二个层次为提高性实验部分,内容包括:物理光学实验;综合性与近代物理实验。每个实验为3学时。这一部分的有关实验原理写得较为深入,实验方法步骤则较为简略,实验记录表格由学生自己拟定。第三个层次为设计性实验,这一部分仅提出有关实验的任务和要求以及原理、方法的提示,学生可阅读配套教材及有关参考书,独立思考,自己设计实验方案和步骤等,每个学生选做一个题目,4~6学时完成。这可以使学生在实验能力方面得到更严格的训练。

本教材力求使每个实验思路清晰,但侧重面有所不同,有的偏重于仪器的使用,有的偏重于物理量的测量,有的偏重于实验方法的训练。通过不同类型的实验,可促使学生的实验技能得到多方面的培养。

实验误差和数据处理(包括计算机处理数据),均是实验基础知识,也是实验数据处理的依据。应让低年级学生从物理实验开始就能依照正确的方法去分析实验结果,完成实验报告。其中偶然误差理论基础一节,是给学生深入学习作为参考的。

实验教学是集体性工作。本实验教材是我校物理实验教研组同志们长期教学实践的结晶。麦咏贤、洪书真、林鼎伊等几位副教授在我校物理实验教学园地辛勤耕耘多年,本教材的编写是在他们的工作基础上进行的。编写过程中,还参阅了许多兄弟院校的教材或讲义,从中得到很多启迪和帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本教材由温坤麟主编。参加编写的有:温坤麟、马景才、林万荣、区广连、王秋君、周国民、祝绍慈、梁海生、覃甘明。全书图表由周国民负责整理。

本教材由黄卓璇教授、何三苏副教授审稿。周勇志教授也审阅过部分书稿,并提出许多宝贵意见。由于我们水平有限和经验不足,书中难免有缺点和错漏,如有不当之处恳请读者批评指正。

编者

一九九〇年十月

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 高等工业学校物理实验课程教学基本要求	(1)
§ 0-2 物理实验与物理学	(2)
§ 0-3 物理实验教学程序和规则	(3)
第一章 实验误差与数据处理	(6)
§ 1-1 物理量的测量与基本单位	(6)
§ 1-2 测量误差与误差分类	(7)
§ 1-3 测量结果与有效数字	(9)
§ 1-4 测量结果的误差估算	(13)
§ 1-5 实验数据处理	(20)
§ 1-6 偶然误差的统计理论	(25)
§ 1-7 系统误差的处理	(29)
第二章 力学、热学实验	(34)
实验1 密度的测量	(35)
实验2 气垫导轨(验证动量守恒定律和加速度定律)	(40)
实验3 测定弦振动频率	(47)
实验4 刚体转动惯量的测定	(51)
实验5 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	(58)
实验6 固体比热容的测定	(64)
实验7 液体粘滞系数的测定	(70)
实验8 温差电动势的测量	(78)
第三章 电磁学实验	(81)
实验9 电流场模拟静电场	(84)
实验10 伏安法测电阻	(89)
实验11 惠斯登电桥测电阻	(93)
实验12 电位差计的使用(测量电动势及微小电压)	(100)
实验13 灵敏电流计参数的测量	(104)
实验14 电子束的电偏转和磁偏转	(110)
实验15 示波器的使用	(118)
实验16 交流电桥与电容、电感测量	(124)
实验17 电介质相对介电常数的测量	(130)
实验18 霍耳效应法测磁场	(132)
实验19 地磁场的测量	(137)
第四章 光学实验	(142)
实验20 薄透镜焦距和望远镜放大率的测定	(114)

实验21	分光计的调整与使用	(149)
实验22	光的等厚干涉及应用	(154)
实验23	单缝衍射光强分布的测定	(158)
实验24	偏振光及其检测	(162)
实验25	固体旋光率及液体浓度的测定	(167)
实验26	阿贝折射仪原理及应用	(170)
实验27	迈克耳逊干涉仪的调整、使用和测定激光波长	(173)
第五章	综合性与近代物理实验	(176)
实验28	超声波在介质中的传播速度的测量	(177)
实验29	铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的测绘	(181)
实验30	电子荷质比的测量	(185)
实验31	光电效应与普朗克常数的测定	(190)
实验32	夫兰克-赫兹实验	(194)
实验33	原子光谱	(198)
实验34	迈克耳逊干涉仪测量玻片与空气折射率	(201)
实验35	密立根油滴实验(电子电荷测定)	(205)
实验36	空间滤波与阿贝成像原理	(209)
实验37	摄影技术	(213)
实验38	全息照相技术	(217)
实验39	真空的获得与测量技术	(221)
实验40	椭圆仪测量薄膜的厚度和折射率	(227)
第六章	设计性实验	(233)
实验41	重力加速度的研究	(235)
实验42	简谐振动的研究	(237)
实验43	金属线膨胀系数的测定	(240)
实验44	测定冰的溶解热	(243)
实验45	液体表面张力系数的测量	(246)
实验46	滑线变阻器在控制电路中的应用研究	(248)
实验47	多用电表的设计与调试	(250)
实验48	非线性元件的特性研究	(252)
实验49	电位差计测量电阻及电源内阻	(254)
实验50	热敏电阻温度特性研究	(255)
实验51	RC串联电路充放电过程研究	(257)
实验52	光栅特性的研究	(260)
实验53	制作全息光栅	(262)
实验54	利用光的衍射方法测量微细线径	(264)
附录 I	部分实验数据处理计算程序及说明	(266)
附录 II	常用物理常数	(279)

绪 论

§ 0-1 高等工业学校物理实验课程教学基本要求

高等工业学校的任务是培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人才。为此要求学校不仅要培养学生具备比较深广的理论和工程技术设计能力，而且要培养学生具有从事科学实验的能力，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。

一、物理实验课程的地位、作用 and 任务

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进行科学实验训练的重要基础。通过本课程学习物理实验知识、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。

二、物理实验课程教学基本要求

1. 在教学中要适当地介绍一些物理实验史料，对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育，使学生了解科学实验的重要性，明确物理实验课程的地位、作用 and 任务。

2. 在整个实验教学过程中，要教育学生养成良好的实验习惯，爱护公共财产，遵守安全制度，树立优良的学风。

3. 要求学生了解测量误差的基本知识，具有正确处理实验数据的初步能力。其中包括

下列内容：测量误差的基本概念；直接测量结果的误差表示（可用标准误差、平均绝对误差、仪器误差或估计误差来表示测量结果的误差限值）；间接测量的误差计算；处理实验数据的一些重要方法（例如列表法、作图法和一元线性函数的最小二乘法等）。

在教学中要注意系统误差的分析。

随着微机的普及，可在部分实验项目中对學生进行使用微机的训练。

4. 通过物理实验的基本训练，要求学生做到：

（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）能够调整常用实验装置并掌握基本的操作技术，例如：零位调准，水平、铅直调整，光路的等高共轴调整，视差的消除，逐次逼近调节，根据给定的电路图正确接线等。

（3）熟悉物理实验中基本的实验方法和测量方法，例如：比较法、放大法、转换测量法、模拟法、补偿法和干涉法等。

（4）能够进行常用物理量的一般测量，例如：长度、质量、时间、力、温度、电流强度、电压、电阻、磁感应强度、折射率等。

（5）了解常用仪器的性能，并学会使用方法，例如：测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、直流电表、直流电桥、电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

在进行以上各项基本训练的过程中，要重视对物理现象的观察和分析，引导学生运用理论去指导实践，解决实验中的问题。

5. 开设一定数量的近代和综合性物理实验 以利于学生对近代物理概念的理解，提高进行综合性实验的能力。

6. 开设少量的设计性实验，使学生在实验方法的考虑、测量仪器的选择和配合、测量条件的确定等方面受到初步的训练。

本课程的教学时数为60学时左右。物理实验课以比物理理论课滞后一学期开设为宜。

各部分大体可以参照下列比例分配：

误差概论、力学和热学实验 25%

电磁学实验 35%

光学实验 20%

近代与综合物理实验 20%

§ 0-2 物理实验与物理学

实验是物理学的基础，许多著名物理学家对此均有论述，例如丁肇中教授在获诺贝尔奖时演讲中说“自然科学理论，不能离开实验的基础，特别是物理学是从实验中产生的。”又如张文裕教授也多次提到，“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，也是工程技术的基础。”

物理学的理论定律首先是从大量实验事实中总结出来的，包括人们的经验和推理，再经过严格的实验检验，证明是正确而后才建立起来的。所以说，物理学是一门建立在实验基础

上的学科，或说物理学是实验科学。

一、经典力学的实验基础

整个物理学的发展过程中，力学实验首先起着重要的和直接的推动作用。大家知道，16世纪意大利伽利略（G·Galilei）首先开拓了物理实验方法，他极为巧妙地设计出著名的单摆实验和斜面实验，研究物体周期运动和等加速运动。这种卓越的实验思想和实验方法，使物理学研究从此走上真正科学的道路。后来著名的物理学家爱因斯坦（A·Einstein）评论说：“伽利略的实验发现，以及他所用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”伽利略、开普勒（J·Kepler）、胡克（R·Hooke）等人的实验资料，为后来牛顿（I·Newton）总结归纳出著名的“万有引力定律”、牛顿运动定律，直至最终完成划时代的经典力学体系提供了坚实的实验基础。

二、电磁场理论的实验基础

电磁学理论的建立及其应用是从18世纪库仑（C·A·Coulomb）、卡文迪许（H·Cavendish）开创的电磁现象测量实验开始，直到后来法拉第（M·Faraday）电磁感应实验获得惊人的成就为止。麦克斯韦（J·C·Maxwell）据此集其大成并创造性地提出电力线和场的概念，以数学方法总结出经典的电磁场理论，同时预言电磁波的存在并指出光波也是一种电磁波。1887年赫兹（H·R·Hertz）完成了用莱顿瓶放电发射出电磁波并以特制谐振器作为接收器进行了电磁波反射、折射等实验，测量出电磁波传播速度与光速相同（数量级），从实验上证实了电磁场理论的正确性。

三、近代量子论的实验基础

光学和近代物理发展中的一些争论更是由实验验证才得到解决的。曾长期争论不休的微粒说和波动说直到1800年杨氏干涉实验（T·Youngs），光的波动说才得到确立。20世纪光电效应实验及普朗克（J·Franck）常数测定，揭示出光量子的微观粒子性质，从而确定了光的波粒二象性。

19世纪末，黑体辐射实验的能量测量结果，促使普朗克提出能量量子化概念。光谱线实验观测、F-H实验对原子能级的验证，这些实验事实都给近代量子论的建立提供了实验基础。在近代物理中，爱因斯坦相对论的质量能量转换关系（ $\Delta E = \Delta mc^2$ ），由于当时不能从实验上加以验证而难以接受。只有在铀裂变发现之后，放射线技术充分发展，通过热核反应实验观测射线能量 E 并准确测定光速 c 和质量 m 之后，上述定律的正确性才得到验证和承认。

物理学整个发展过程中，理论始终和实验交织在一起，完全遵循着“实验—理论—实验”相结合的原则，两者相互促进一直推动着物理学发展的进程。实验和理论是物理学的两个不可分割的又是不可缺少的组成部分。

§ 0-3 物理实验教学程序和规则

物理实验内容主要是依据物理思想、操作仪器和设备进行物理量的测量，观察研究物理

现象(效应)、仪器特性和物理量变化规律。在物理实验教学过程中,要求学生在教师指导下独立进行仪器操作,观测记录 and 数据处理,分析结果。所以,物理实验教学程序一般分为三个阶段。

一、实验前预习

实验前学生必须预习实验教材和仪器使用说明等参考资料,明确实验目的,弄清实验原理和实验方法,了解有关测量仪器、设备的性能和操作技术。在此基础上写出实验预习报告(或预习笔记) 内容包括如下几点:

- (1) 实验名称、目的(注意实验误差要求)。
- (2) 实验仪器、设备(注意型号和精度)。
- (3) 简要原理、计算公式及原理图(电路图或光路图)。
- (4) 实验记录表格(根据实验内容步骤拟定)。必须强调,设计合理的完整的记录表格(记录待测物理量)是作好实验的最重要的准备工作。

二、实验过程(仪器操作、测量记录)

操作和测量是实验教学的主要环节。实验前指导教师应作简要讲授和提问。学生开始进行实验时应先检查仪器、设备并简单练习操作,基本熟悉仪器性能及使用方法后才开始进行实验。实验过程要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据,不要一碰到问题就一概归咎于仪器设备,要实事求是分析处理。若发现问题而无法解决时,应及时向教师报告,由教师处理。仪器设备的调整、操作和测量记录,是科学实验的基本功。实验记录内容一般包括如下几个方面:

- (1) 实验条件有关的物理量(室温、气压等)。
- (2) 仪器设备(仪器型号、级别、精度等)。
- (3) 测量有关的物理量。应按实验要求作多次测量、记录。每次测读到的数值、有效数字和单位,应立即如实记录在表格上。若发现记录数据有问题,可以删掉或再测量,但切不可抄袭或涂改数据。实验完毕后,把记录数据交教师审阅签名。最后应按实验前状况整理好仪器设备。

三、写好实验报告

实验结束后,应根据实验要求及时正确处理所记录的数据,并写出完整的实验结果报告。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,其格式和内容一般包括以下几部分:

- (1) 实验题目名称、目的要求。
- (2) 实验原理:写出原理概要及计算公式。
- (3) 仪器设备(注明仪器型号、级别)。
- (4) 实验内容步骤:写出简要内容步骤及注意事项。
- (5) 实验数据记录:测量数据一般采用表格形式记录。
- (6) 数据处理:描绘曲线及计算结果。
- (7) 结果报告:分析误差及计算结果,回答实验思考题以及提出改进实验的建议。

以上内容中(1)~(4)部分应在预习时完成,(6)和(7)在实验课后做好。实验报告要求书面整洁、字迹清楚、层次分明、文句通顺、数据齐全、作图规范。

四、物理实验规则

1. 进入实验室时应保持安静(不得喧哗取闹),保持清洁(不准吸烟和抛弃纸屑等)。
2. 实验前应先检查仪器设备,了解仪器性能和使用方法,然后才能开始实验。如有疑问,应询问指导教师。
3. 实验过程中,应遵从指导教师和实验工作人员的指导,未经许可不得任意调换各组仪器。
4. 爱护仪器设备,对仪器性能不了解时不得随意扭动仪器开关部件。如损坏了仪器,应立即报告指导教师并进行登记,根据具体情况按学校规定处理。
5. 注意安全,严禁违反用电规程,防止发生损坏仪器及人身事故。
6. 实验过程中如有违反实验室规则而又不听从规劝改正者,以及无故迟到15分钟以上者,应停止其实验。
7. 无故缺课者,实验室不予补作。因事因病(持有假单证明)缺做实验者,由实验室和指导教师统一安排补做实验。
8. 实验结束后,应把仪器整理清点好,经指导教师检查并签名后,方能离开实验室。

第一章 实验误差与数据处理

物理实验的任务,不仅是观察某种物理现象,而更重要的是研究、探索某种物理规律及其实际应用。在物理实验过程中,必须测量一系列物理量,或对某一个物理量作一系列测量。因而,要求我们一方面要根据物理思想选择适当的测量方法,对研究对象进行分析和测量,并估计所测结果的可靠程度;另一方面,必须将所测数据加以整理归纳处理,用一定方式表示它们之间的相互关系,即规律。前者需要误差方面的基础知识(如有效数字运算、误差估算以及误差传递等),后者需要处理数据的基本技术和知识(如列表法、作图法、最小二乘法等)。这两方面的知识为本章讨论的内容。

§ 1-1 物理量的测量与基本单位

一、测量的基本概念

进行物理实验,最重要的就是把你要了解的物理量通过实验方法用仪器测量出来。著名物理学家伽利略曾经说过:“凡是能测量的(物理量)都要进行测量,并且把目前无法量度的东西变成可以量度的。”关于测量的重要性,开尔文(Kelvin)概括为一句话:“测量是一门科学最本质部分。”

物理量的测量,实际上就是在一定条件下使用具有计量标准单位的仪器(工具)对被测物理量进行比较,从而确定被测量的数值和单位。例如:物体长度的测量,可以用具有标准单位标度的米尺(测长仪器)进行比较而测得;物体的质量和温度的测量,可以用具有标准单位标度的天平(仪器)和温度计进行比较而测得。标准单位的确立是由国际会议统一规定的。

二、物理量基本单位

物理学发展过程中,国际上曾建立过各种不同的单位制,这些单位制选取的基本量有些不同。1960年国际计量大会正式通过了一种通用的单位制,称为国际单位制,用符号“SI”表示。其基本单位规定如下:

- (1) 长度单位——米(m)。1米等于光在真空中 $\frac{1}{299792458}$ 秒时间所经过的距离。
- (2) 质量单位——千克(kg)。1千克等于国际千克原器铂铱合金圆柱体的质量。
- (3) 时间单位——秒(s)。1秒是铯原子同位素 ^{133}Cs 基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间。

(4) 电流单位——安培(A)。1安培是在两根相距1米、无限长、横截面面积极小的平行直导线处于真空中通过恒定电流,当导线之间在每米长度上产生 2×10^{-7} 牛顿(N)的相互作用力时,每根导线中的电流强度。

(5) 温度单位——开尔文(K)。根据热力学温标,水的三相点温度定为 273.16K。

(6) 光强单位——坎德拉(cd)。1坎德拉是一光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射,在给定方向上的辐射强度为 1/683 瓦/球面度(W/sr)。

(7) 物质的量单位——摩尔(mol)。1摩尔(克分子)是一系统物质的量,该系统中所包含的基本单元数(粒子数)与 0.012 千克(kg)碳-12 的原子数目相等。

此外,其它物理量的单位是由以上基本单位按一定的关系式导出的,因此称它们为导出单位。如体积单位为立方米(m^3),密度单位为每立方米千克(kg/m^3)。

三、直接测量与间接测量

按获得待测量结果的手段不同,可将测量分为直接测量和间接测量。

直接测量是使用仪器或量具,直接测得(读出)被测量数值的测量。该物理量称为直接测得量。如用米尺、天平测量物体的长度、质量,用电表测量电流、电压等。

间接测量是依据直接测得量,通过一些原理公式把待测量计算出来。由于这些待测量还没有直接测量的仪器,需要通过间接的方法,所以这类测量称为间接测量。如某地重力加速度的测量,是依据直接测得单摆摆长 L 和摆动周期 T ,通过单摆公式:

$$g = 4\pi^2 L / T^2 \quad (1-1-1)$$

把重力加速度 g 计算出来, g 为间接测得量。随着科学技术的发展,新的仪器出现,将有可能把间接测量变为直接测量。

§ 1-2 测量误差与误差分类

一、测量值与真值

任何被测量对象的物理量在特定条件下都具有客观的确定的真实数值,通常称为该物理量的真值,记作 μ 。测量的任务就是把真值找出来。但在实际测量过程中,由于测量仪器、测量方法、测量条件以及种种其他因素的影响,所有测量值都不可能是客观的真值。绝对真值一般是不知道的,也是无法测得的,但在某种情况下可以找到近似真值和理论真值。

(1) 由国际计量会议约定的值(或公认的值)可以作为近似真值,如基本物理常数、基本单位标准。显然,这些数值是随着科技发展而更加接近它们的真值。

(2) 通常把高一级仪器校验过的计量标准器的量值,也作为近似真值,又称为实际值。这些高级标准器都是逐级校对,经过各级计量检定系统核准的。

(3) 理论真值是指由理论计算所得的量值,如三角形三个角度总和为 180° ,直角三角形斜边平方为两直角边的平方和,圆周率 π 等。

(4) 在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的平均值可认为近似真值,或称

为最佳值。

二、误差概念与定义

在一切实验中,由于仪器装置、实验方法、环境条件、测量者本身的局限性,因此所有测量结果与真值之间总有一定差异。这种差异称为该测量结果的测量误差,简称为“误差”,以 Δx 表示。误差定义为测量值与真值之差,即

$$\Delta x = x - \mu \quad (1-2-1)$$

式中: x 为测量值; μ 为真值。

测量误差 Δx 的大小表示测量值与真值接近的程度,以此衡量测量结果的准确程度。 Δx 又称为绝对误差。

深入分析便可发现,误差值 Δx 的大小还不能完全地衡量(评价)测量结果的准确程度。虽然误差绝对值相等,但被测量对象本身大小不同时,其准确程度显然是不同的。把两者综合起来考虑,可定义相对误差为:

$$E_r = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

上式用百分数表示,所以又称为百分差。

例:设某工件长度的真值为 5.00 厘米(cm),测量值为 5.05 厘米(cm)。

测量误差 $\Delta x = 5.05 - 5.00 = 0.05 \text{ (cm)}$

相对误差 $E_r = \frac{\Delta x}{\mu} = \frac{0.05}{5.00} \times 100\% = 1\%$

三、误差分类

误差的产生有多方面原因,从误差性质、来源和服从的规律来看,可将误差分为系统误差、偶然误差和过失误差三种。

1. 系统误差

系统误差是由于实验系统的原因,在测量过程中造成的误差。其特点是误差值的大小和符号总是保持恒定并偏向一个方向,或按一定规律以可约定的方式变化。系统误差来源大致分为:

- (1) 测量仪器的不准确性。主要由于仪器本身的缺陷、仪器本身的灵敏度和分辨率的限制。
- (2) 实验理论、方法不完善而引起。如单摆实验公式 $T = 2\pi \sqrt{L/g}$ 是一级近似式。
- (3) 环境条件变化引起的。如温度、气压和电磁场的变化等。
- (4) 测量人员生理或心理特点而造成的。

系统误差直接影响测量结果接近真值的程度,因此用“正确度”来表示系统误差的大小。测量结果正确度高,则该测量系统误差小,反之系统误差大。

2. 偶然误差

又称随机误差,意指误差产生是随机的。在测量过程中,在同一条件下对某一物理量进行多次测量,由于环境有起伏变化和偶然因素的干扰,使测量结果略有差异(即误差)。这类误差称为偶然误差。其特点是误差值和符号以不可约定方式变化着,对每项测量值的变化是无规则的,但对大量测量值的变化则具有确定的统计规律。一般实验测量均符合正态分布规律。即:

(1) 绝对值小的误差出现机会(概率)多,绝对值大的误差出现机会少,即具有单峰性。

(2) 绝对值相等的正、负误差出现的机会(概率)相等,即具有对称性。

(3) 绝对值非常大的正、负误差,出现的机会(概率)趋于零,即具有有界性。

由这种正态统计分布去求误差问题,需要用数学理论去解决。偶然误差反映了该实验测量结果的重复性和弥散性,因此用“精密度”来表示偶然误差的大小。测量结果精密度高,指对某一量的多次测量值之间很接近,即测量重复性好,偶然误差小。反之,测量结果精密度低,则指多次测量值之间极为分散,即测量重复性差,偶然误差大。

把系统误差和偶然误差综合起来考虑,我们用“准确度”表示,作为对测量结果总的评价。

3. 过失误差

这种误差是由于观测者的粗心大意,或测量条件发生突变,导致明显超出规定条件下预期的误差。这类误差又称粗大误差,简称粗差,其特点是误差值很大。实验中含有过失误差的测量值都是要按一定规则剔除的,当确认为是过失误差时,应将其舍弃不用。显然,只要观测者细心观测,认真读取、记录和正确处理数据,这种错误(粗差)是完全可以而且必需避免的。

§ 1-3 测量结果与有效数字

一、测量结果一般表示

任何一个物理量的测量结果,一般用数值、单位和测量误差表示,其表示式为

$$N_{\text{测}} \pm \Delta N \quad (1-3-1)$$

其中: $N_{\text{测}}$ 是测量结果值,简称为测量值,它包含具体数值和单位; $\pm \Delta N$ 是综合测量误差,或称不确定度,即系统误差与偶然误差的综合。

有关测量值 $N_{\text{测}}$ 的确定分二种情况:

一种是单次测量,这时 $N_{\text{测}}$ 直接用该次仪器测量记录表示,则上式写成

$$x_{\text{测}} \pm \Delta x \quad (1-3-2)$$

其中: $x_{\text{测}}$ 为一次测量数据; Δx 为该测量误差,通常为仪器误差。

另一种是多次测量,这时 $N_{\text{测}}$ 是以多次测量结果的算术平均值来表示,则上式写成

$$\bar{x}_{\text{测}} \pm \overline{\Delta x}$$

其中: $\bar{x}_{\text{测}}$ 为算术平均值; $\overline{\Delta x}$ 为算术平均误差。

设有 n 次测量,测得数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。则算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-3-3)$$

可以证明算术平均值是多次测量值的最佳值。

若测量结果是间接测得量,这时 $N_{\text{测}}$ 用直接测得量的函数来表示。设 $x, y, z, \dots$ 为各直接测得量,则间接测得量的结果为

$$N_{\text{测}} = f(x, y, z, \dots) \quad (1-3-4)$$

显然 $\pm \Delta N$ 为间接测得量的误差。具体计算在下一节讨论。

二、测量结果值的有效数字

测量结果值 $N_{\text{测}}$ 不论是直接从测量仪器上读取记录,还是从多次测得值计算平均值,或是从直接测得值通过函数关系计算间接测量值,都不可避免地要碰到以上这些数值应取多少位的问题。根据测量结果值有效数字由测量结果误差确定的原则,首先必须计算测量结果的误差,然后才能正确地确定测量结果值的位数。但实际上在测量结果误差未计算之前,以及测量数据在运算过程中,也要求我们正确取位和运算,因此提出了有效数字及其运算规则问题。

1. 有效数字概念和定义

由上所述,测量结果值 $N_{\text{测}}$ 的位数多少应由测量值本身的误差来确定。我们定义:所有测量结果值都由可靠数和有误差的可疑数组成,即从第1位(可靠)数位开始算起,直到开始有误差的可疑数为止。以上这些数字(包括误差位)称为有效数字。

上述表明,任何测量数据总是存在着一定的误差,因此在记录测量数据和表示计算结果时,不应随意取位,而是用符合有效数字定义的规则和方法来确定该测量数据的位数和计算结果的位数。

例如,用一把最小刻度为1 mm的米尺来测量某一长度 l 。由图1-3-1可见,物长 l 在12.3 cm至12.4 cm之间,可凭经验将其估计为12.32 cm或12.33 cm。显然,在这数据中,12.3是准确的可靠数字,而0.02或0.03这最后一位数都是估读出来的,它存在误差,可称为误差数字或可疑数字。可疑数字虽然带有误差,但把它读出来显然比不读出来更为合理。因此,我们规定,在进行测量读数时必须在仪表最小刻度后再估读一位数。

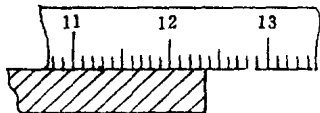


图 1-3-1

例如使用感量为10毫克(mg)的矿山天平时,应估计读出几毫克的数值,即是说10毫克以上的读数是准确的,10毫克以下是估计的。

又如使用最小刻度为10毫安(mA)的毫安表时,应估读出几毫安,即是说10毫安以上的读数是准确的,几毫安是估计的。

以上测量若读数恰与刻度相一致时,则估读数为零。

又例如用最小刻度为0.1伏特(V)的电压表测量电压时,指针正好在2.2的刻度上(见右图),其读数为2.20伏,即2.2伏是准确的,而“0”是估计的。同理,如上例中若物长恰在12.3刻度上时则读数应记为12.30cm,而不是12.3cm。

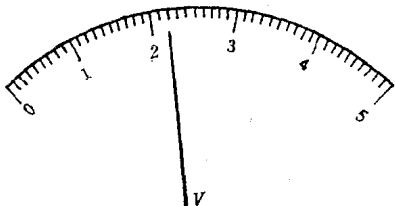


图 1-3-2

按照上述读数规则读数(注:在某些情况下——例如使用数字仪表和游标尺时,最末一位读数并不是估计读出来的,即使这样,这最后一位数字仍然是误差数字。)所得的数值总是由两部分数字所组成:准确的数字加上最后一位可疑数字。我们把这些准确数字及一位可疑数字,合称为有效数字。因而,有效数字的最后一位是误差所在的一位。上述读数12.32

cm是四位有效数字，而12.320cm，则是一个五位有效数字。这两个数值，从数字上来看是等价的，但从有效数字的角度来看，它们却代表不同意义：前者“2”是可疑的，“12.3”是准确的，可见所用的尺子其最小刻度是0.1cm；而后者“0”是可疑的，“12.32”是准确的，可见所用的尺子其最小刻度是0.01cm。所以，在记录有效数字时，要特别注意可疑数字，要记录测量仪器的精度、级别、分度值或最小刻度，以便估计仪器误差，确定估读数字，最后将测量结果用有效数字正确表示出来。

2. 有效数字运算规则

有效数字运算规则是一种近似计算法则，用以确定测量结果有效数字大致的位数。其总的要求是计算结果的位数应与测量误差完全一致，若位数不恰当时，则最终由相应误差来确定。有关运算原则如下：

(1) 凡可靠数与可靠数运算，结果为可靠数。

(2) 凡可疑数与任何数运算，结果为可疑数，但进位数为可靠数。

通常在运算过程中的数字可保留二位可疑数，但最后实验结果表示中只保留一位可疑数。

下面介绍有效数字的运算规则：

(1) 加减法运算（为说明方便，在可疑数字下划一横线）

【例1】

$$\begin{array}{r} 71.\underline{3} \\ + 0.\underline{753} \\ \hline 72.\underline{053} \end{array}$$

$$71.\underline{3} + 0.\underline{753} = 72.\underline{1}$$

【例2】

$$\begin{array}{r} 71.\underline{3} \\ - 0.\underline{753} \\ \hline 70.\underline{547} \end{array}$$

$$71.\underline{3} - 0.\underline{753} = 70.\underline{5}$$

结论：诸量相加（或相减）时，其和（或差）数在小数点后所应保留的位数与诸数中小数后位数最少的一个相同。

为了简化运算，可以用小数点后位数最少的数为标准，将小数点后位数多的用四舍五入的方法删去多出的位数，然后再进行运算。上两例中的0.753删去多出的位数后为0.8，然后作如下运算：

$$71.\underline{3} + 0.\underline{8} = 72.\underline{1}$$

$$71.\underline{3} - 0.\underline{8} = 70.\underline{5}$$

(2) 乘除法运算

【例3】

$$\begin{array}{r} 39.\underline{3} \\ \times 4.\underline{084} \\ \hline 157\ \underline{2} \\ 3144\ \underline{} \\ 1572\ \underline{} \\ \hline 160.\underline{501\ 2} \end{array}$$

$$39.\underline{3} \times 4.\underline{084} = 160.\underline{5}$$

【例4】

$$\begin{array}{r} 9.\underline{622} \\ 4.\underline{084} \overline{) 39.\underline{300}} \\ \underline{36\ 756} \\ 2\ 5440 \\ \underline{2\ 4504} \\ 9360 \\ \underline{8168} \\ 11920 \\ \underline{8168} \\ 3752 \end{array}$$

$$39.\underline{3} \div 4.\underline{084} = 9.\underline{62}$$