

根据《高等学校物理实验课程》编写

大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

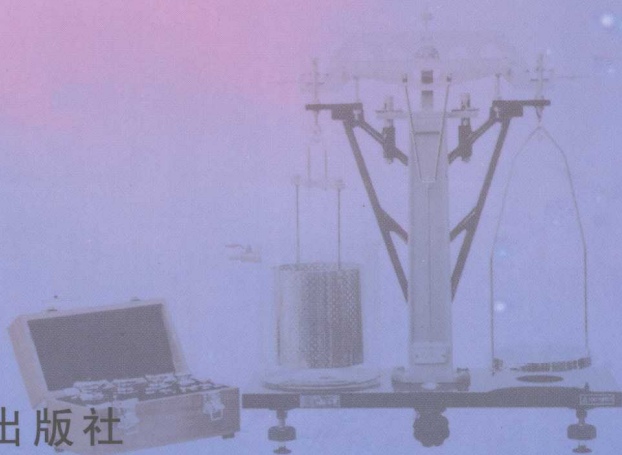
刘延君 褚润通 主 编

王 伟 姚晓菊 副主编



兰州大学出版社

LANZHOU UNIVERSITY PRESS



大学物理实验

刘延君 褚润通 主 编

王 伟 姚晓菊 副主编



兰州大学出版社

LANZHOU UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 刘延君, 褚润通主编. —兰州: 兰州大学出版社, 2007.12

ISBN 978-7-311-03044-5

I. 大… II. ①刘…②褚… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 198521 号

责任编辑 张 仁

封面设计 张旭军

书 名	大学物理实验
主 编	刘延君 褚润通
出版发行	兰州大学出版社 (地址: 兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话	0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心) 0931-8914298(读者服务部)
网 址	http://www.onbook.com.cn
电子信箱	press@onbook.com.cn
印 刷	兰州奥林印刷有限责任公司
开 本	787×1092 1/16
印 张	19.75
字 数	450 千字
印 数	1~1000 册
版 次	2007 年 12 月第 1 版
印 次	2007 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-311-03044-5
定 价	34.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

大学物理实验是学生进入大学后较早接触的一门全面系统的实验课程,是理工科学生必修的一门重要基础课。学好物理实验的基本知识和方法,掌握物理实验的基本技能,对于学生实验能力的培养和分析、解决问题能力的提高有着重要的意义。

本书根据教育部颁发的《高等学校物理实验课程教学基本要求》,结合我们多年大学物理实验的教学实践经验,参考并吸收了各兄弟院校物理实验的相关内容编写而成。

全书共分7章。第1章系统地介绍了误差理论、有效数字和数据处理的基本方法等内容;第2章主要介绍了物理实验的基本测量方法和基本操作技术,第3章为基础型实验,第4章为技能培养型实验,第5章为近代物理学实验,第6章为设计性实验基础知识,第7章为设计性实验。书末附录给出了有关的物理常数和常用数表。

在编写本书的过程中,我们力求做到:从选题、内容叙述到仪器设备的选用等,都立足于当前学校实验室的条件和学生的实际水平;在实验技能的训练上,采取循序渐进、逐步提高的方式,在加强基础的前提下,增大了综合性、设计性实验的比例,建立了基础性实验、综合性实验和设计性实验三个层次的新体系。本书可作为高等院校理工科非物理类专业大学物理实验课程的教科书或参考书,也可供高等师范院校、高等职业技术学院、函授大学的部分专业使用。

本书由刘延君、褚润通任主编,王伟、姚晓菊任副主编。

编写分工为:刘延君编写绪论,第1章,第2章及实验3.1、3.2、3.3、3.4;褚润通编写第6章,第7章及实验4.2、4.6、4.12、4.15、5.6、5.7、5.8、5.11;王伟编写实验4.4、4.5、4.7、4.13、4.14、4.16、5.1、5.2、5.3、5.9、5.10、附表2—1~16;姚晓菊编写实验3.5、4.1、4.3、4.8、4.9、4.10、4.11、5.4、5.5、5.12、附表1—1~5、附表3。教材的框架、统稿、定稿由褚润通承担。

在本书的出版过程中,得到了本书作者所在学校应用物理系、物理实验中心同行们的大力支持。同时,一些兄弟院校的教材也为本书的编写提供了很好的借鉴,对此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2007年8月

目 录

绪论	(1)
第 1 章 测量误差及数据处理	(5)
§ 1.1 测量与误差	(5)
§ 1.2 误差处理	(8)
§ 1.3 仪器误差	(18)
§ 1.4 测量结果的不确定度估计	(21)
§ 1.5 有效数字及其运算法则	(26)
§ 1.6 实验数据处理的基本方法	(29)
第 2 章 物理实验的基本测量方法和基本操作技术	(41)
§ 2.1 物理实验的基本测量方法	(41)
§ 2.2 物理实验的基本操作技术	(48)
第 3 章 基础型实验	(50)
§ 3.1 长度与物体密度的测量	(50)
§ 3.1.1 长度与规则固体密度的测量	(50)
§ 3.1.2 用流体静力称衡法和比重瓶法测不规则固体和液体的密度	(56)
§ 3.2 摆的研究	(59)
§ 3.2.1 用单摆测重力加速度	(59)
§ 3.2.2 用复摆测重力加速度	(64)
§ 3.3 伏安法测电阻	(68)
附录 电磁学实验基本仪器及预备知识	(73)
§ 3.4 薄透镜焦距的测定	(79)
附录 光学仪器的使用和维护规则	(86)
§ 3.5 模拟法测绘静电场	(88)
第 4 章 技能培养型实验	(94)
§ 4.1 气垫导轨上运动规律的研究	(94)
§ 4.1.1 速度、加速度和重力加速度的测量	(94)
§ 4.1.2 碰撞实验——动量守恒定律	(100)
§ 4.2 杨氏弹性模量的测定	(103)
§ 4.2.1 用拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量	(103)
§ 4.2.2 用振动法测金属材料的杨氏弹性模量	(108)
§ 4.2.3 用梁弯曲法测定金属材料的杨氏弹性模量	(113)
§ 4.3 刚体转动惯量的测定	(116)

§ 4.3.1	刚体转动惯量实验仪测转动惯量	(116)
§ 4.3.2	用三线摆测钢体的转动惯量	(121)
§ 4.3.3	用 IM—2 刚体转动实验仪测刚体的转动惯量	(124)
§ 4.4	液体表面张力系数的测定	(129)
§ 4.4.1	用力敏传感器测定液体表面张力系数	(130)
§ 4.4.2	用焦利秤测定液体表面张力系数	(133)
§ 4.5	固体导热系数的测定	(136)
§ 4.6	金属线膨胀系数的测量	(143)
§ 4.7	灵敏电流计特性研究	(145)
§ 4.8	电桥法测量电阻	(150)
§ 4.8.1	惠斯登电桥测中值电阻	(150)
§ 4.8.2	双臂电桥测低值电阻	(155)
§ 4.9	电位差计的原理及应用	(159)
§ 4.10	电表改装与校正	(162)
§ 4.11	示波器原理及使用	(166)
§ 4.12	干涉法测几何量	(178)
§ 4.12.1	用牛顿环测平凸透镜曲率半径	(178)
§ 4.12.2	用劈尖测细丝直径	(183)
§ 4.13	分光仪的调节及应用	(186)
§ 4.14	光栅衍射实验	(195)
§ 4.15	硅光电池特性研究	(199)
§ 4.16	偏振光的研究及应用	(203)
第 5 章	近代物理学实验	(207)
§ 5.1	铁磁材料磁滞回线和磁化曲线的测量	(207)
§ 5.2	霍耳效应及其应用	(212)
§ 5.3	用冲击电流计测量磁场	(219)
§ 5.4	迈克耳逊干涉仪及应用	(225)
§ 5.5	密立根油滴实验	(229)
§ 5.6	光电效应—普朗克常数测定	(233)
§ 5.7	全息照相技术	(241)
§ 5.8	金属电子逸出功的测定	(247)
§ 5.9	夫兰克—赫兹实验	(256)
§ 5.10	电子比荷的测定	(260)
§ 5.11	核磁共振	(265)
§ 5.12	塞曼效应	(273)
第 6 章	设计性实验基础知识	(280)
第 7 章	设计性实验	(285)

§ 7.1 电阻优化测量	(285)
§ 7.2 重力加速度测定	(286)
§ 7.3 组装望远镜(或显微镜)	(287)
§ 7.4 组装投影仪	(287)
§ 7.5 组装欧姆表	(288)
§ 7.6 气垫导轨上简谐振动的研究	(289)
§ 7.7 用电位差计校准电流表	(290)
§ 7.8 用补偿法测量电流	(291)
§ 7.9 用示波器测量电容	(291)
§ 7.10 用自准直法测凹透镜焦距	(292)
总附录	(294)
1. 中华人民共和国法定计量单位	(294)
附表 1-1 国际单位制的基本单位	(294)
附表 1-2 国际单位制的辅助单位	(294)
附表 1-3 可与国际单位并用的我国法定计量单位	(294)
附表 1-4 单位词头	(295)
附表 1-5 国际单位制中具有专门名称的导出单位	(296)
2. 一些常用的物理常数	(297)
附表 2-1 基本的和重要的物理常数表	(297)
附表 2-2 空气的相对湿度与干湿球温度计温差的关系	(298)
附表 2-3 在标准大气压下不同温度的水的密度	(299)
附表 2-4 在 20℃ 时常用固体和液体的密度	(299)
附表 2-5 在海平面上不同纬度处的重力加速度	(300)
附表 2-6 在 20℃ 时某些金属的杨氏模量	(300)
附表 2-7 在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数	(301)
附表 2-8 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	(301)
附表 2-9 液体的粘度	(302)
附表 2-10 不同温度时水的粘度	(302)
附表 2-11 固体的线膨胀率	(303)
附表 2-12 固体的比热容	(303)
附表 2-13 液体的比热容	(304)
附表 2-14 某些金属或合金的电阻率及其温度系数 *	(304)
附表 2-15 几种常用热电偶的赛贝克系数值($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	(305)
附表 2-16 不同温度时干燥空气中的声速	(306)
3. 常用电器仪表板面上的标记符号	(307)
附表 3 常用电器仪表板面上的标记符号	(307)
参考文献	(308)

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学是一门实验性科学,实验在物理学的发展史上有其重要的地位和作用。物理理论建立在实验的基础上,同时又要接受实验的不断检验,而物理实验本身则必须以理论为指导。理论与实验的这一辩证关系是物理学发展的规律。从经典物理学发展到量子物理学,从宏观领域深入到微观领域,物理学中的许多成果都是理论与实验密切结合的产物。

大学物理实验是工科院校的一门基础实验课程,是学生进入大学后接受系统、全面实验技能训练的开端,也是后续实验课程的重要基础。在工科的整个教学过程中,它是一门单独开设的课程。物理实验的基本教学内容,如实验数据处理、误差分析与计算、物理量的测量方法等的基本训练,在理论课教学中是无法学到的。通过实验,还有助于巩固、加深和理解理论课所学的内容。因此,我们在学习物理学时,应当注意理论联系实际,既要重视理论知识的学习,又要培养和提高实验能力。

大学物理实验教学的目的和任务是:

1. 通过实验方法和实验技能的基本训练,要求学生做到:

(1) 能够自行阅读实验教材和资料,概括实验原理和方法的要点,做好实验前的准备。

(2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能。

(3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断。

(4) 能够正确记录和处理实验数据、绘制实验曲线、分析实验结果、撰写合格的实验报告。

(5) 能够完成简单的具有设计性内容的实验。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象的能力,以及理论联系实际的独立工作能力。通过对实验的观察、测量、分析和判断,加深对物理学某些概念和定律的理解。

3. 培养学生文明实验的良好作风,严谨的科学实验素质,理论联系实际和实事求是的科学态度,爱护公物、遵守纪律的良好道德。

随着科学技术的飞速发展,要求现代工程技术人才必须具有深而广的理论和足够的现代科学实验所需要的能力,只有具备了这些能力,才能担负起国家现代化建设的重任。

二、大学物理实验课的教学环节与要求

物理实验是学生在教师指导下进行的。物理实验的教学效果与学生的主观努力密切相关。物理实验教学一般可分为三个环节:实验预习、实验操作、撰写实验报告。为达到物理实验课的教学目的,学生应重视物理实验教学的三个环节。

1. 实验预习

由于实验课的时间有限,不允许在上实验课时才开始研究实验教材。为保证学生在实验过程中胸有成竹,顺利地进行实验,必须做好实验前的预习工作,为此要求:

(1) 实验前仔细阅读实验教材。以理解教材中的实验目的、原理为主,了解实验所用的仪器以及实验内容与要求,明白实验所要观测的物理量。

(2) 写出预习报告。

(3) 为保证实验能及时、迅速、准确地记录实验数据,防止漏测、漏记和记录错误,预习时应根据教材要求,在数据记录本上设计好记录数据的表格。

2. 实验操作

实验操作是物理实验的中心环节,是学生主动研究、积极探索的好时机。学生进入实验室后应遵守实验室规则,多观察、多动手、多分析、多判断,反对侥幸心理、机械操作和盲目实验。实验时要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个实验数据就算完成任务。

(1) 预习报告和上一次的实验报告、数据记录表必须于课前交给教师审批,预习报告合格者方允许进行实验;没有预习或预习不符合要求者,不得进行实验。

(2) 操作前,认真听取教师的简要讲述,了解仪器的性能、规格、使用方法、操作规则和注意事项等。然后安装或调整好仪器,或连接好电路等,做好测量前的准备工作。不要在不清楚操作目的的情况下,乱动仪器。

(3) 实验操作过程中,应做到严格、细致、准确、稳妥、实事求是,注意观察实验现象。如果现象不符,要仔细分析原因,找出改进措施,绝不能拼凑数据。

(4) 在数据记录时,要正确判断数据的科学性,如实地、清楚地记录必要的环境条件、仪器型号与规格,要一边测量,一边及时把原始数据记录在原始数据记录纸上的表格里。记录时要注意:实验记录中的每一个数据的位数都应符合有效数字的表达规范。如发现记录的数据有错误,可在错误的数字上画一直线或打叉。

(5) 完成实验后要将实验数据交给教师审查签字,达到要求后,再将实验仪器整理还原,方可离开实验室。离开实验室后不允许修改记录的数据。

3. 撰写实验报告

实验报告是实验完成后的书面总结,是把感性认识深化为理性认识的过程。应该完整地分析整个实验过程、实验依据的理论和物理规律;通过计算、作图等数据处理,得到实验结果,有的还要进行恰当合理的误差估算;体会有哪些提高,分析存在什么问题。应该注意的是,写实验报告不要不动脑筋地去抄教材。因为实验教材是供做实验的人阅读的,是用来指导别人做实验的。实验报告则是向别人报告实验的原理、方法,使用的仪器,测得的数据,供别人评价自己的实验结果。认真书写实验报告,不仅可以提高自己写科研报告和科学论文的水平,而且可以提高组织材料、语句表达、文字修饰的能力,这是其它理论课程无法替代的。

物理实验报告一般应包括以下几项内容:

(1) 实验名称

(2) 实验目的

(3) 实验仪器

(4) 实验原理

简要叙述实验的物理思想和依据的物理规律、主要计算公式,电学和光学实验应画出相应的电路图或光路图。

(5) 实验内容及步骤

根据实际的实验过程写明实验的关键步骤。

(6) 注意事项

(7) 数据处理及分析

把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中,写出计算结果的主要过程及误差估算过程。进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据(数据单位要统一),最后得出结果,并要完整地表达实验结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求,画出符合规定的图线;若上机处理数据,则要有打印结果。

分析实验中遇到的问题,写出自己的见解、体会和收获,提出对实验的改进意见等。

撰写实验报告时必须注意的三个问题:

(1) 不可把实验报告与实验指导书混为一谈。实验报告与实验指导书从语体到具体内容都是有原则区别的。实验指导书向学生提出实验的任务、目的和要求,阐明实验原理,提供进行实验的思路和方法,告诉学生应该怎么做;而实验报告是在完成实验过程之后写出的总结,以书面形式汇报实验的成果。具体回答如何做,获得了什么结果,意义价值何在。这些必须由实验者根据其实践再用自己的语言来归纳、总结。

(2) 实验报告的核心特征就是实事求是。因此,在撰写的实验报告中,对实验过程中所记录的实验条件、实验现象、实验数据应严格如实地记录,对测量数据的有效位数不得随意增删。

(3) “实验原理”和“数据处理”为写作重点。没弄懂原理就去做实验,不会有好的实验效果,因此要求在报告中写清楚实验原理,这还能促使自己重视实验预习,也符合科研与工程的实际过程。数据处理是指对原始数据进行处理后,代入测量公式,算出测量值。计算各直接测得量的 A 类不确定度、估算 B 类不确定度,利用不确定度传递公式计算测量结果的不确定度。最后应正确地表述测量结果,并评估测量结果(测量是否达到预期目的,效果怎样)。如果测量值误差较大,要分析原因,查明主要误差因素,提出减小或消除误差的措施。

实验报告要用统一的实验报告本或实验报告纸书写,字体要工整,文句要简明。原始数据要附在报告中一并交给教师审阅,没有原始数据的实验报告是无效的。

三、实验室规则

1. 学生进入实验室需带上预习报告和记录实验数据的表格,经教师检查同意后,方可进行实验。

2. 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

3. 使用电源时,务必经过教师检查线路后方能接通电源。

4. 爱护仪器。进入实验室后不能擅自搬弄仪器，在实验中应严格按教材或仪器说明书操作，如有损坏，照章赔偿。公用工具用完后应立即放回原处。
5. 做完实验，经教师审查测量数据并签字后，学生应将仪器整理还原，将桌面和凳子收拾整齐，然后离开实验室。
6. 及时上交实验报告。

第1章 测量误差及数据处理

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。对事物的定量描述离不开数学方法和实验数据的处理。因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识,作为实验前的基础准备。这些知识在每次实验中都要用到,而且是今后从事科学实验工作必须了解和掌握的。误差理论以数理统计的概率论为其数学基础,研究误差的起因、性质、规律和如何减少或消除误差,提高测量结果的可信赖程度。由于这部分内容涉及面很广,深入讨论它已超出了本课程的范围。因此,只能着重介绍一些概念,引用一些结论和计算公式,以满足本课程教学的需要,不进行严密的数学论证。

这一章内容较多,有些部分有一定的难度,不可能在一、两次课中完全掌握,需要在以后的实验过程中通过运用逐步理解和掌握。

§ 1.1 测量与误差

§ 1.1.1 测量

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物理性质、验证物理原理都要进行测量。测量就是要选定一个单位,用它与待测量进行比较,得出倍数,其倍数即为该被测量的测量值。一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同,单位愈大,测量数值愈小,反之亦然。

根据《中华人民共和国计量法》的有关规定,国家计量局于1987年2月1日发布了国家法定计量单位的名称、符号,规定以国际单位制(SI)为国家法定计量单位,即以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)、坎德拉(发光强度)作为基本单位,其它量都由以上七个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位,并规定1991年起实行国家法定计量单位。

一个待测物理量,除了用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的参数,这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数往往容易为人们所忽视。如果得到一个测量结果的可靠性几乎为零,那么这种测量结果还有什么价值呢?因此,从表征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的。

根据取得测量结果的方法不同,可将测量分为直接测量和间接测量两类。用量具或仪表直接读出测量值的,称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量,例如用刻度尺测长度、用电流表测电流等。另外,还有很多物理量,它们不是用仪器直接测量的,而是先直接测量一些其它相关量,再用物理公式计算出结果,这称为间接测量,其相应的物理量称为

间接测量量,例如在测电阻 R 时,可用电压表直接测电阻两端电压 U 值、用电流表直接测电阻上通过的电流 I 值,再用公式 $R = U/I$ 计算出电阻 R 值。电阻的测量就属于间接测量。看来,直接测量是间接测量的基础。但必须指出,一个物理量需要直接测量还是需要间接测量,这通常与选用的仪器有关,例如测液体密度(比重),可选用比重计直接测量,也可以选用天平和量筒间接测量。

根据测量条件的不同,可将测量分为等精度测量和非等精度测量两类。如果对某一物理量重复测量了多次,而且每次测量都是在相同条件下(同一仪器、同一方法、同一环境、同一观察者)进行的,这时我们没有根据指出某一次测量比另一次更准确些,认为每次测量都是在相同精度下测得的,这称为等精度测量。如果在多次测量中,每次测量的条件都有变化,这种在条件改变下的测量就是非等精度测量。等精度测量和非等精度测量的数据处理方法是不同的,在大学物理实验中的重复测量都认为是相同条件下的等精度测量。

§ 1.1.2 误差

任一物理量,在一定条件下都存在一个客观值,这个客观值称为该物理量的真值。用实验手段测出来的值则称为该物理量的测量值。

由于仪器准确度、测量方法、环境影响等条件的限制,任何实验测量都不可能得到真值,测量值与真值总是存在差异的,这种差异称为测量误差,简称误差。

对误差有两种表示方法:

1. 绝对误差

根据误差的定义,如以 x_0 表示某一物理量的真值,以 x 表示该量的测量值,则绝对误差为

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

绝对误差 δ 可正可负,是一个代数值。它只表示测量值偏离真实值的程度,还不能全面表示测量的准确程度。

2. 相对误差

为了更进一步评价测量结果的准确程度,不仅要看绝对误差的大小,还要看待测量本身的大小,于是又定义了相对误差的概念,相对误差为

$$E = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

相对误差 E 小,则表明测量的准确度高。例如,对两个电阻 R_1 和 R_2 的测量,如它们的绝对误差相等,都是 $\delta = 0.1\Omega$,而 $R_1 = 10.0\Omega$ 、 $R_2 = 100.0\Omega$,则相对误差 $E_1 = \frac{0.1}{10.0} \times 100\% = 1.0\%$ 、 $E_2 = \frac{0.1}{100.0} \times 100\% = 0.10\%$ 。显然,对第二个电阻测量的准确度高。

§ 1.1.3 误差的分类

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和符号始终保持恒定,或在条件改

变时,误差的大小和符号按一定规律变化,这种误差叫系统误差。

系统误差是由于在测量过程中,存在某些确定的或按一定规律变化的不合理因素引起的,在相同条件下,这种因素使测量结果向真实值的某一方方向偏移一固定的量或按一定规律偏离真实值。

造成系统误差的原因有以下三个方面。

(1) 仪器误差。是由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥而引起的,如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平不等臂、应该水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 理论误差。是由于实验理论和实验方法的不完善,所引用的理论与实验条件不符而引起的,如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测长度时没有考虑温度对测量工作的影响,量热时没有考虑热量的散失,测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响或标准电池的电动势未做温度修正等。

(3) 观测误差。是由于实验者生理或心理特点,缺乏经验等而引入的误差,例如,有的人习惯于侧坐斜视读数,有的人眼睛辨色能力较差等,都会使测量值偏大或偏小。

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。例如,用停表测运动物体通过某段路程所需的时间,若停表走时较快,那么即便测量多次,测得的时间 t 总会偏大,而且总是偏大一个固定的量,这是因仪器不准确造成的。又如,用落球法测重力加速度时,由于空气阻力的影响,得到的结果总是偏小,这是因测量方法不完善造成的。

2. 随机误差

在测量过程中,除存在某些确定因素影响外,还必然存在一些随机因素的影响。在极力消除或修正了一切明显的系统误差之后,在相同的测量条件下,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,以不可预定的方式变化着的误差称为随机误差。

随机误差是由于人的感观灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰以及一些偶然因素的影响产生的。例如温度、湿度、电源电压的起伏、气流波动以及振动等因素的影响。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的两端并估读到毫米下一位读数值,这个数值就存在一定的随机性,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系统误差那样能找出原因并排除,只能作出估计。

虽然随机误差的存在使每次测量值带有随机性,好像杂乱无章,但是,在相同的实验条件下,对被测量进行多次测量时,就会发现随机误差遵循一定的统计规律,可以用概率理论对实验结果的随机误差作出估算。

3. 粗大误差

测量时,由于观察者不正确使用仪器、粗心大意、观察错误或记错数据,会引起不正确的结果,这种情况出现的误差称为粗大误差。它实际上是一种测量错误,这种数据应当剔除。

§ 1.1.4 测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果作总体评定时,一般均应将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定测量结果好坏的,但是这些概念的含义不同,使用时应加以区别。

精密度:表示测量结果中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,是描述重复性的。精密度高,即测量结果的重复性好,随机误差较小。

准确度:表示测量结果中系统误差大小的程度。用它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高,系统误差小。

精确度:是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述。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) 表示子弹相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高而准确度较差; (b) 表示子弹相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,即准确度高而精密度较差; (c) 表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度高和准确度都很高,亦即精确度高。

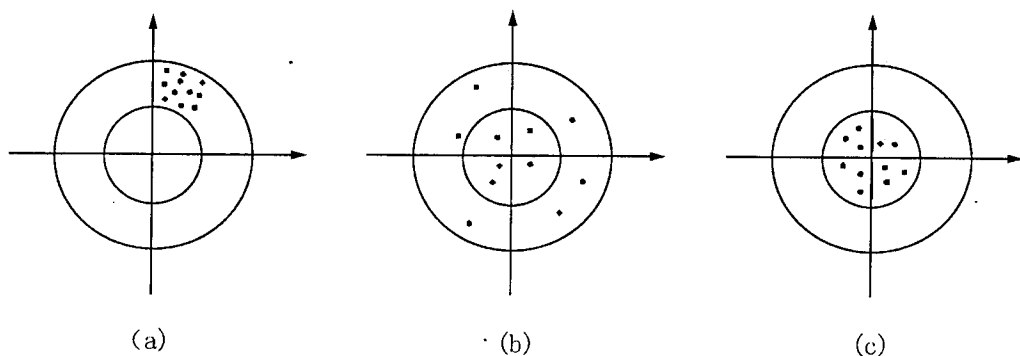


图 1.1-1 测量的精密度、准确度和精确度图示

§ 1.2 误差处理

§ 1.2.1 处理系统误差的一般知识

1. 系统误差的发现

系统误差一般难于发现,并且不能通过多次测量来消除。但因系统误差总是使测量结果向一个方向偏离,因此原则上是能够发现系统误差的。人们通过长期实践和理论研究,总结出了一些发现系统误差的方法。常用的有:

(1) 理论分析法。包括:分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方;检查理论公式所要求的条件是否得到了满足;量具和仪器是否存在缺陷;实验环境能否使仪器正常工作以及实验人员的心里和技术素质是否存在造成系统误差的因素等。理论分析法是

发现、确定系统误差最基本的方法。

(2) 实验对比法。实验对比法就是改变实验的部分条件,乃至全部条件来测量待测量。对比改变前后的测量值是否有明显的不同,从中分析有无系统误差及产生根源。

实验对比法有多种,它包括:

- 1) 实验方法的对比,即用不同实验方法测量同一个量,看结果是否一致。
- 2) 仪器的对比,如改用不同电流表接入同一电路对比。
- 3) 改变测量步骤的对比,如测某物理量与温度的关系,可以升温测量再降温测量,看读数点是否一致。
- 4) 用改变实验条件或换人测量等方法进行对比,如将物体分别放入天平的左盘和右盘称量,可发现天平不等臂引起的误差。

(3) 数据分析法。因为随机误差是遵从统计分布规律的,所以若测量结果不服从统计规律,则说明存在系统误差。我们可以按照测量列的先后次序,把偏差(测量值与测量列的平均值的差值)列表或作图,观察其数值变化的规律。比如前后偏差的大小是递增或递减的;偏差的数值和符号有规律地交替变化;在某些测量条件下,偏差均为正号(或负号),条件变化以后偏差又都变为负号(或正号)等情况,都可以判断存在系统误差。

2. 系统误差的修正和限制

对系统误差的处理可分为两种情况来考虑。① 对于能掌握的系统误差,可取其负值为修正值加到测量结果上,使测量结果得到修正;或者在计算公式上加上修正项去消除某项系统误差;或者用更高一级的标准仪器校准一般仪器,得到修正值或修正曲线等。② 对于在实际工作中难以确切找出的系统误差,要求在测量中想方设法抵消它的影响。从测量方法上抵消系统误差的常用方法是:

(1) 替代法。在测量条件不变的情况下,先测得未知量,然后再用一已知的标准量取代被测量,而不引起指示值的改变,于是被测量就等于这个标准量。例如,用惠斯通电桥测电阻时,先接入被测电阻,使电桥平衡,然后再用标准电阻替代被测量,使电桥仍然达到平衡,则被测电阻值等于标准电阻值。这样可以消除桥臂电阻不准确而造成的系统误差。

(2) 抵消法。这种方法也叫异号法。在对被测量进行两次测量时,使系统误差一次出现正值,另一次为负值,取两次测量结果的平均值作为最后结果,以达到消除系统误差的目的。如磁电式仪表在有较强恒定磁场环境中工作时,可将仪表转 180° 取两次读数,用两个读数的平均值作为最后结果,则可消除外界恒定磁场带来的系统误差。用霍耳元件测磁场的实验中,分别改变磁场和工作电流的方向,依次为 $(+B, +I)$ 、 $(+B, -I)$ 、 $(-B, +I)$ 、 $(-B, -I)$ 。在四种条件下测量电势差 U_H ,再取其平均值,可以减小或消除不等位电势、温差电势等附加效应所产生的系统误差。

(3) 交换法。根据误差产生的原因,在一次测量之后,把某些测量条件交换后再次测量。例如,用天平称质量时,把被测物和砝码交换位置进行两次测量,设 m_1 和 m_2 分别为两次测得的质量,取物体的质量为 $m = \sqrt{m_1 \cdot m_2}$,就可以消除由于天平不等臂而产生的系统误差。

(4) 半周期偶数观测法。它能消除按周期性规律变化的系统误差。具体方法是按系统误

差变化的半个周期间隔取值,每周期内取两个观测值,然后取平均值作为结果。例如,分光仪刻度盘偏心带来的角度测量误差以 360° 为周期,采取相隔 180° 的一对游标,每次测量读两个数,并取此二值的平均数作为测量结果,则可消除系统误差的影响。

(5) 对称观测法。若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记录一次零点值,测量读数后再记录一次零点值,取两次零点值的平均值来修正测量值。由于很多随时间变化的误差在短时间内均可看成是线性变化,因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

总之,消除或减小系统误差的基本原则是,找出产生误差的原因并消除它的影响,如果做不到就采取修正的办法,或者在测量中设法抵消它的影响。

§ 1.2.2 随机误差的统计处理

在测量时即使精心排除产生误差的原因之后,由于人的感官灵敏度、仪器的精度、周围环境的干扰等一些难以控制的随机因素的影响,也会产生随机误差。由于随机误差的产生不能预料、不可控制、无法消除,因此只能按其所服从的统计规律进行合适的数学处理。对于随机误差有比较完整的处理方法,但由于数学上的原因,我们的介绍只限于一些主要特征和结论。

1. 随机误差的正态分布规律

大量实验证明,对某一个物理量进行重复多次测量,其结果服从一定的统计规律。我们用一组测量数据来形象地说明这一点。例如用数字毫秒计测量单摆周期,重复 60 次 ($n = 60$),测量结果统计如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 单摆周期数据记录表

时间区间(s)	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\Delta n/n(\%)$	时间区间(s)	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\Delta n/n(\%)$
2.146 ~ 2.150	1	2	2.166 ~ 2.160	15	25
2.151 ~ 2.155	3	5	2.171 ~ 2.175	9	15
2.156 ~ 2.160	9	15	2.176 ~ 2.180	5	8
2.161 ~ 2.165	16	27	2.181 ~ 2.185	2	3

以时间 T 为横坐标,相对频数 $\Delta n/n$ 为纵坐标,用直方图表示测量结果如图 1.2-1 所示,如果再进行一组测量(如 100 次),做出相应的直方图。仍可以得到与前述图形不完全吻合但轮廓相似的图形。随着次数的增加,曲线的形状基本不变,但对称性越来越明显,曲线也趋向光滑。当测量次数 $n \rightarrow \infty$,测量值区间分得足够小时,直方图的边缘就过渡为一条光滑的连续曲线,如图 1.2-1 虚线所示。这表示测量值 T 与频数 $\Delta n/n$ 的对应关系呈连续变化的函数关系。显然,频数与 T 的取值有关,连续分布时它们之间的关系可以表示为

$$\frac{dn}{n} = f(T) dT \quad (1-2-1)$$