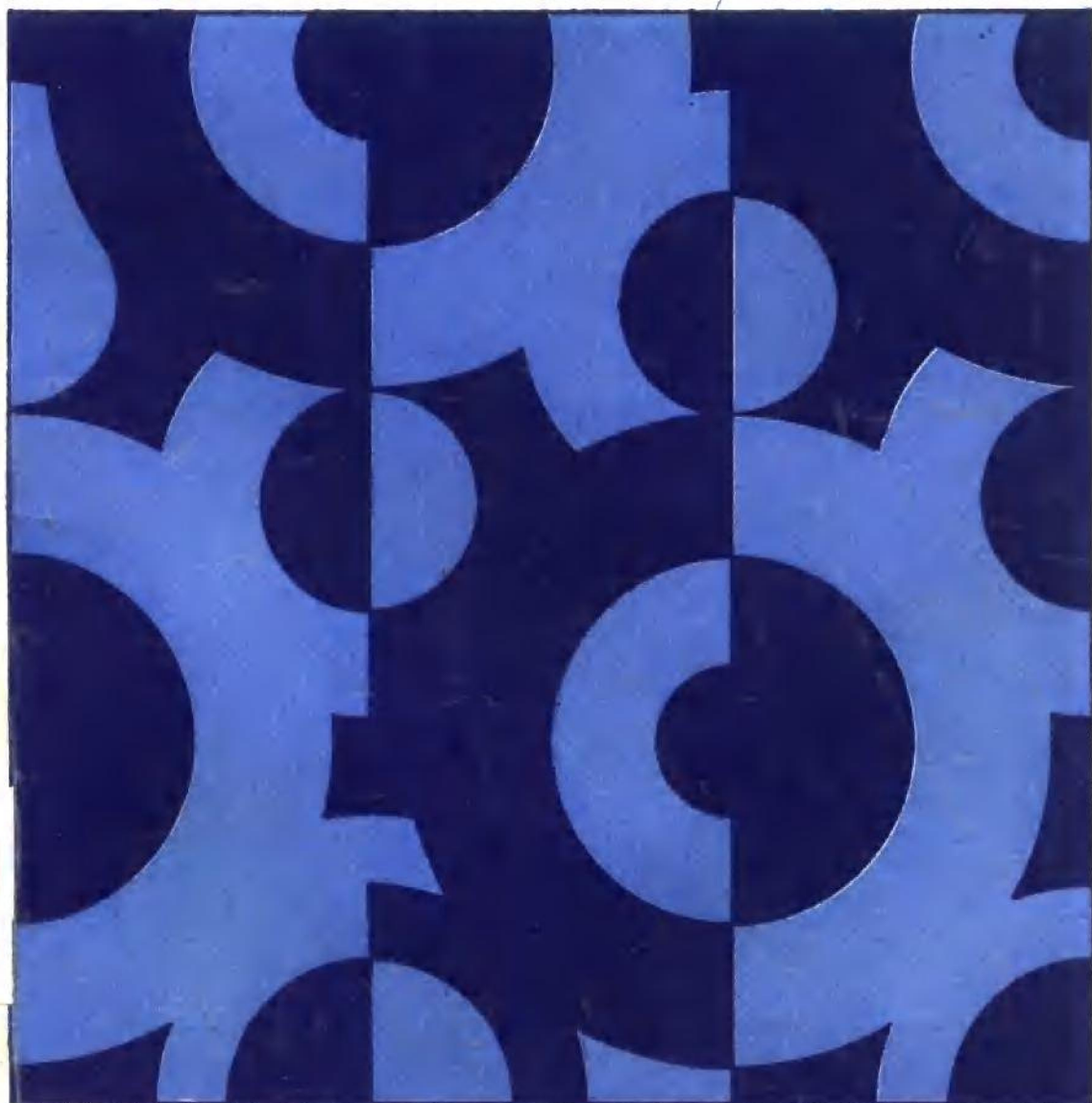


大学物理实验

赵青生 吕卫星 赵学民 编著

● 中国科学技术大学出版社



大学物理实验

赵青生 吕卫星 赵学民 编著

沈志坚 主审

中国科学技术大学出版社

1993·合肥

内 容 简 介

本书是根据国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编著而成的。全书分为四章，所选择的32个实验，按训练的性质、层次进行分类。各个实验既相互独立；又循序渐进，相互配合，组成了一个较为合理的知识结构，能收到较好的总体教学效果。

全书比较系统地阐述了与大学物理实验有关的数据处理知识，详细介绍了物理实验中的基本方法、基本调节技术、常用仪器、常用的检测技术及实验设计的一些基本问题，是一本具有比较完整而独立的新型课程体系的教材。

本书可作为高等工业学校各专业和综合性大学、高等师范院校非物理专业实验教学用书；也可供业余大学、夜大学选用，还可作为实验技术人员和有关课程教师的参考用书。

(皖) 新登字 08 号

大 学 物 理 实 验

赵青生 吕卫星 赵学民 编著

责任编辑：于文良 张善金

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号，邮政编码：230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本：787×1092/16 印张：18.25 字数：433千

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

印数：1—10000册

ISBN7-312-00388-5/O·129

定价：9.00 元

序

物理学是一门以实验为基础的科学。物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于科学实验。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术的发展，从而促成科学技术的革命，形成新的生产力。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各个自然科学领域和技术部门以至其他学科领域。

物理实验是对高等理工学校各专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程。通过本课程使学生对物理实验的基本原理、方法和技能得到较系统的严格的培养和训练。同时将使学生在运用所学理论解决实际问题的能力、正确的实验习惯和严谨的科学作风等方面受到初步而又正确的培养。

随着教学改革不断深入，加强实践性教学环节已受到普遍的重视，大学物理实验课程在教学计划中的地位及作用也越来越突出，然而理工各院校的层次与培养方向的差别，决定了它们的实验要求不尽相同；各校的实验条件又决定了它们实验内容的差异，所以始终没有一本统一的教材。尽管如此，各校的实验教学（非物理专业）无不围绕着统一的“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”而展开，所以，实验内容的“共性”仍为主体。由安徽大学、合肥联合大学、合肥炮兵学院等校联合编著的《大学物理实验》一书，根据“课程基本要求”，结合多年来的教学改革经验，将分散在各实验中的基本实验知识、方法和技能，进行了归纳和总结；改变了传统的以“力、热、电、光”编排内容的方式，采取以一系列典型的物理实验素材，按照训练的层次、性质进行分类，由浅入深、循序渐近地将内容编排为：测量误差与实验数据处理、物理实验的基础训练、物理实验的检测技术和设计性实验的训练等部分，从而按照物理实验课程本身的特点初步建立了一个较为完整而独立的新型课程体系，体现了这几所院校在教学改革过程中所形成的具有特色的教学风格。因此，本书是对大学物理实验教学的一次有意义的探索。

这一教材做为尝试，也难免存在着某些不足之处，还有赖于进行改革实践和长期的研究探索，方能日臻完善。但是我相信这一教材会对高等学校大学物理教学工作起着很好的作用。按照实验教学的根本目的是“培养学生科学实验能力，提高学生科学实验素质”的要求来组织物理实验课程的教学内容，以使获得具有一定系统性的物理实验基本知识、方法和技能，无疑是一个值得倡导的有益的尝试。我也相信，该书的出版对物理实验教学改革必将有很好的启示和参考价值。

刘鸿均

一九九三年三月

前 言

本书是以《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》为原则，并在总结了安徽大学、合肥联合大学、合肥炮兵学院历年来教学改革和教学经验的基础上编著而成的。

物理实验在高等工业学校和理科非物理专业陆续成为一门独立课程以后，如何在有限的学时内使学生通过对物理实验知识、方法和技能的学习与训练，能够了解科学实验的主要过程与基本方法，并能为今后的学习和工作奠定良好的实验基础，这是众所关心的问题。本教材试图改变传统的单纯让学生只是从零散的实验中获取知识和技能的经验式教学方式，代之以一系列典型的物理实验素材，按训练的性质、层次进行分类，由浅入深，循序渐进安排教学内容，从而让学生认识科学实验的基本特点，并从中培养学生进行科学实验所需要的基本能力。所以本教材将按实验自身的特点组成一个完整而独立的新型体系，具体的实验内容则是为该体系而选配的。为此，教材中将分散在各实验中的基本物理实验知识、基本物理实验方法、基本物理实验技能，进行了归纳和总结，并在阐述中注意系统性。全书实验基础理论内容共分四章：第一章为测量误差与实验数据处理，着重阐述了与大学物理实验有关的数据处理知识；第二章为物理实验的基础训练，比较系统地叙述了物理实验中的基本方法、基本调节技术和常用的基本仪器；第三章为物理实验的检测技术，介绍了物理中常用的一些检测技术；第四章为设计性实验的训练，这是在学生做了一定数量的基本实验，在实验方法、仪器使用等方面有了一定的训练后，为了培养学生独立自主地进行科学实验研究工作的能力而设置的。在后三章中都配有一定数量和恰当程度的实验课题。

考虑到物理实验课的独立性和特点，本书在编写过程中力求做到：“目的与要求”精炼突出，使学生明确实验要求，完成预定任务；“原理”部分叙述清楚，计算公式推导完整，使学生在实验预习时掌握理论依据；“实验内容与步骤”按由详到简的顺序编写，旨在逐步提高学生的实验技能和动手能力，部分实验还安排了一些选做内容，以适应不同专业及学有余力的学生之需要。每个实验前都附有一段提要，概述本实验的主要内容以及扩充有关知识面。每个实验后均列有预习思考题和讨论题，前者引导学生的预习，后者供学生实验后分析讨论和巩固提高。本书考虑到目前中学实验的实际基础，以及各高等理工院校的实验条件不尽相同的情况，在实验训练课题的选取上留有一定的余地，供各专业按其要求进行选择，凡标有*的内容均属于此。在涉及仪器介绍时，尽可能突出仪器的基本原理和使用方法。在附录中则适当介绍这类仪器几种常用型号的外形特征和生产厂家，以增强适用性和配置仪器时参考。

本书由赵青生、吕卫星、赵学民负责统稿主编。参加本书编写工作的除上述三人外，还有陶宗明、马书炳、方向正、洪丰、夏传鸿、刘汉阳、李伟。沈志坚审阅了全部书稿，李文英参加了书稿的审阅工作，张宏光担任总策划。实验教学是一件集体的事业，无论是实验教材的编写，还是实验的开设准备都凝聚着各院校实验教师和技术人员的智慧与劳动成果。本书编写期间始终得到安徽大学教材科和中国科学技术大学出版社的热心支持与合作，还参阅了许多兄弟院校的有关教材，借此表示衷心感谢。

编者真诚地欢迎使用和阅读本书的教师、同学、技术人员和读者不吝指正，以便再版时修改。

编著者

一九九二年十二月于合肥

目 次

绪论	(1)
第一章 测量误差与实验数据处理	(4)
1-1 测量及其分类	(4)
1-2 测量误差	(5)
1-3 随机误差的估算	(7)
1-4 仪器误差	(12)
1-5 直接测量结果的表述	(16)
1-6 间接测量结果的误差与表述	(20)
1-7 有效数字	(26)
1-8 物理实验中常用的数据处理方法	(30)
1-9 计算器在数据处理中的应用	(40)
第二章 物理实验的基础训练	(46)
2-1 物理实验的种类	(46)
2-2 物理实验的基本测量方法	(48)
2-3 物理实验的基本仪器	(51)
2-4 物理实验中的基本调整与操作技术	(66)
实验 1 基本测量	(69)
实验 2 单摆实验	(80)
实验 3 金属杨氏模量的测量	(85)
实验 4 气垫技术	(90)
实验 5 液体粘滞系数的测定	(98)
实验 6 用三线摆测定物体的转动惯量	(101)
实验 7 电表的改装与校准	(105)
实验 8 电桥法测量中、低值电阻	(108)
实验 9 模拟静电场	(117)
实验 10 补偿原理与电位差计	(122)
实验 11 电阻元件伏安特性的测定	(128)
实验 12 灵敏电流计的特性研究	(133)
实验 13 光路调整与薄透镜焦距的测量	(139)
实验 14 分光计的调整及棱镜折射率的测定	(145)
第三章 物理实验的检测技术	(153)
3-1 非电量测量技术	(153)
3-2 测磁技术	(160)
3-3 测量结果的动态显示与记录	(164)

3-4 光学测量基本技术	(166)
3-5 照相技术	(169)
实验 15 电子和场	(171)
实验 16 示波器的使用	(180)
实验 17 磁化曲线和磁滞回线	(190)
实验 18 霍耳效应法测磁场	(196)
实验 19 热电偶的定标与测温	(199)
实验 20 物体导热系数的测定	(203)
实验 21 声速的测量	(206)
实验 22 光的干涉—牛顿环	(212)
实验 23 衍射光栅	(217)
实验 24 反射型椭圆偏振仪	(220)
实验 25 光电效应	(232)
实验 26 迈克逊干涉仪	(236)
实验 27 照相技术	(241)
实验 28 全息照相	(246)
实验 29 密立根油滴仪测电子电量	(249)
第四章 设计性实验的训练	(257)
4-1 设计性实验的作用与特点	(257)
4-2 系统误差的一般知识	(259)
4-3 实验方案的制订	(265)
实验 30 简谐振动的研究	(267)
实验 31 分压与制流电路	(268)
实验 32 劈尖测定涤纶薄膜的厚度	(273)
附表	(274)

绪 论

科学实验的地位与作用

人类改造自然的实践活动不外乎两种：一是生产实践，一是科学实验。所谓科学实验，是人们按照一定的研究目的，借助特定的仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，突出主要因素，对自然事物和现象进行精密、反复地观察和测试，探索其内部的规律性。这种对自然的有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。原子能、半导体和激光等最新科技成果仅仅依靠总结生产技术经验是发现不了的，只有在科学家的实验室里才会被发现。现代化的企业为了不断地改进生产过程和创新产品，也十分重视实验研究工作，都有相当规模的研究实验室。因而科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，是工程技术的基础，同时科学理论对实验起着指导作用。我们要处理好实验和理论的关系，重视科学的实验，重视进行科学实验训练的实验课的教学。

物理实验的地位与作用

物理学是一门实验科学。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要取决于实验。例如，杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立，赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认；卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密；近代的高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部来探索其规律性。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，因而使物理实验课有了充实的教学内容。物理实验是对高等理工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，是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面；在提高学生科学实验素质方面，都起着重要的作用。同时，它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。

物理实验课的目的与任务

物理实验作为一门独立的基础课程，有以下三方面的目的和任务。

(1) 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基本知识、基本方法和基本技能，并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理现象和规律，加深对物理原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力，其中包括：

自学能力——能够自行阅读实验教材或参考资料，正确理解实验内容，做好实验前的准备。

动手实践能力——能够借助教材和仪器说明书，正确调整使用常用仪器。

思维判断能力——能够运用物理学理论，对实验现象进行初步的分析和判断。

表达书写能力——能够正确记录和处理实验数据，绘制图线，说明实验结果，撰写合格的实验报告。

简单的设计能力——能够根据课题要求，确定实验方法和条件，合理选择仪器，拟定具体的实验程序。

(3) 培养和提高学生从事科学实验的素质。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；不怕困难，主动进取的探索精神；遵守操作规程，爱护公共财物的优良品德；以及在实验过程中相互协作，共同探索的协同心理。

物理实验课是一门实践性课程，学生是在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。因而上述教学目的能否达到，在很大程度上取决于学生自己的能力。

怎样学好物理实验课

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动，实验课的教学安排不可能象书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行。因此学习物理实验课就要求同学们花比较大的功夫和有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键，在于把握住下列三个基本环节：

(1) 实验前的预习 实验教材是进行实验的指导书。它对每个实验的目的与要求，实验原理都作了明确的阐述。因此，在上实验课前都要认真阅读，必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及的测量仪器，在预习时可阅读教材中有关对仪器的介绍，了解其构造原理、工作条件和操作规程等，必要时可到实验室去观察实物，并在此基础上写好预习报告，回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下几个方面：① 实验名称；② 目的与要求；③ 原理：列出有关测量的计算式及条件和将要被验证的规律。其中要明确哪些物理量是直接测量量；哪些物理量是间接测量量；用什么方法和测量仪器等；④ 绘出电路图、光路图或设备示意图⑤ 在实验记录本上列出数据记录表格；⑥ 回答预习思考题。

(2) 实验的进行 实验时应遵守实验室规章制度；仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书；在教师指导下正确使用仪器，注意爱护，稳拿妥放，防止损坏。对于电磁学实验，必须由指导教师检查电路的连接正确无误后，方可接通电源进行实验。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时，要做到正确读数，实事求是地记录客观现象和数据。在编好页码的实验记录本上，写明实验名称，实验日期，同组人，必要时还应注明天气、室温、大气压、湿度等环境条件。接着要记下实验所用仪器装置的名称型号、规格、编号和性能情况以及被测量样品的号码或者其它标记，以便以后需要时可以用来重复测量和利用仪器的准确度校核实验结果的误差。切勿将数据随意记录在草稿纸上，不可事后凭回忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而将实验记录做随心所欲的涂改。

要逐步学会分析实验，排除实验中出现的各种较简单的故障。实验最后一般总会有数据结果，这些数据是否正确靠什么去判断？数据的好坏又说明什么？实验结果是否正确？这些问题主要是靠分析实验本身来判断，即必须分析实验方法是否正确，它带来多大误差？仪器带来多大的误差？实验环境有多大的影响等等。实验后的讨论是发挥同学们才智，提高学生分析问题和解决问题的能力之重要环节，应努力去做。但要注意，不要空发议论，应力求定量地分析问题，做到言之有据。往往有些同学，当实验数据和理论计算一致时，就会心满意足，简单地认为已经学好了这次实验；而一旦数据和计算差别较大，又会感到失望，抱怨仪器装置甚至拼凑数据，这两种态度都是实验教学和一切科学研究活动所不可取的。实际上，任何理论公式都是一定的理论上的抽象和简单化，而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多，实验结果必然带来和理论公式的差异，问题在于差异的大小是否合理。所以不论数据好坏，都应逐步学会分析实验，找出成败的原因。

误差与数据处理知识是物理实验的特殊语言。实验做得好与差；两种方法测量同一物理量其结果是否一致；实验验证还是没有验证理论等，这不能凭感觉，而必须用实验数据和实验误差来下断言。领悟并运用这种语言，才能真正置身于实验之中，亲身感受到成功的喜悦和失败的困惑。

实验结束，要把测得的数据交给指导教师检验通过，对不合理的或者错误的实验结果，经分析后还要补做或重做。离开实验室前要整理好使用过的仪器，做好清洁工作。

(3) 实验后报告的书写 写实验报告的目的是为了培养和训练学生书面形式总结工作或报告科学成果的能力。报告是实验成果的文字报道，所以最起码应该做到字迹清楚，文理通顺，图表正确，数据完备和结论明确。报告应予同行以清晰的思路、见解和新的启迪才算得上一份成功的报告。一般应写在专用的实验报告纸上，其内容应包括：实验名称、目的与要求、原理简述、实验方法、数据记录、数据处理与结果分析，以及讨论等八个部分。

下面分别对“报告”中各部分的写法提出一些要求：

关于“实验名称”和“目的与要求”，一般应与教材中提法一致。

关于“原理简述”，应该是在对原理解的基础上用自己的语言简要叙述，要求做到简明扼要，图（原理图、光路图、电路图）文并茂，并列测量和计算所依据的公式，注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

关于“实验方法”，只要写出关键性的调整方法和测量技巧（不是具体操作步骤的叙述，而是个人体会和见解的阐述，可简可详）。

关于“数据记录”，一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。

关于“数据处理与结果分析”，要求写出数据处理的主要过程，图线，误差分析等。在计算处理完成以后，必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

关于“讨论”（包括回答讨论题），一般讨论内容不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案及其改进意见进行讨论评述。这是实验报告中最开放、最灵活的部分，重在说理，所以能反映实验者观察和分析能力的高低。

报告无疑应该按照自己的思路来写，特别受赞赏的是自身体会的经验之谈。

总之，物理实验课有着自己的特点和规律，要学好这门课不是一件容易的事情。希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣，打好基础，注意培养自己成为优秀科学技术人材。

第一章 测量误差与实验数据处理

科学实验的任务不仅要定性地观察自然现象，而且要定量测量有关的物理量以及它们之间的数量关系，通过对测量数据的误差分析和数学处理，科学地评价测得的物理量或物理关系接近于客观真实的程度，以求得对自然现象本质的认识。

本章将介绍测量误差和数据处理的基础知识，在第四章中将进一步介绍有关误差分析在确定实验方案过程中的重要指导作用。

1-1 测量及其分类

测量和单位

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系，为此就需要测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选作标准的同类量进行比较，得出它们之间的倍数关系。选作标准的同类量称之为单位。倍数值称之为测量数值。由此可见，一个物理量的测定值等于测量数值与单位的乘积。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。单位越大，测量数值越小，反之亦然。因此一个测量数据不同于一个数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位，便具有了一种特定的物理意义，这时，它方可称之为一个物理量。测量所得的值（数据）应包括数值（大小）和单位，二者缺一不可。

目前，物理学上各物理量的单位，都采用中华人民共和国法定计量单位，它是以国际单位制（SI）为基础的单位。国际单位制是在1971年第十四届国际计量大会上确定的，它是以米（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）作为基本单位，称为国际单位制的基本单位；其它的量（如力、电压、磁感应强度等）的单位均可由这些基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。

测量的分类

测量可分为两大类：直接测量与间接测量。

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，相应的物理量称为直接测量量。例如，用秒表测时间；用米尺测长度等。而更多的物理量是由一些直接测量量通过一定的关系式计算出来的，这样的测量就称为间接测量，相应的物理量称为间接测量量。例如，圆柱的体积是通过直接测量其直径 D 和高度 H ，由公式 $V = \pi D^2 H / 4$ 算得的。值得指出的是同一物理量，由于选用的测量方法不同，它可以是直接测量量，也可以是间接测量量。例如，上面所说的间接测得的圆柱体积，改用量筒排水法，它又成为直接测量量了。

等精度测量与不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量，而且每次的条件都相同（同一观察者，同一组仪

器、同一种实验方法、同一实验环境等），测得一组数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，尽管各次测得结果又有所不同，我们没有任何充足的理由可以判断某次测量比另一次更精确，这样，只能认为每次测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量；这样的一组数据称为测量列。在诸测量条件中，只要有一个发生了变化，这时所进行的测量，就成为不等精度测量。

严格地说，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，甚至可以忽略时，仍可视这种测量为等精度测量。为了简化问题的讨论，本章只限于研究等精度测量的数据处理问题。

误差分析的意义

对被测量物理量进行测量，必须使用一定的仪器、通过一定的方法、在一定的环境下由测量者去完成。测量的目的是希望确定被测物理量的真实数据（简称真值）。但是在观察对象、仪器、方法、环境和观察者存在各种不理想的情况下，我们得不到一个绝对准确的数值，这就使测量所得的值与真值之间有一定的差异。测量值 x 与真值 a 之差称为测量误差 Δ ，简称误差。即

$$\Delta = x - a \quad (01-1)$$

上式定义的误差反映的是测量值偏离真值的大小和方向，因此又称为绝对误差。

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中。所以，作为科学实验的结果不仅要知道测量所得的结果，而且还要知道误差的范围。

事实上，所谓被测量的客观真值是不知道的。人们对客观世界建立起的“量”的概念，只能靠测量，能知道的只是测量值。因而以上关于误差的定义还不能用于实际中去。这就有必要对误差进行研究和讨论，用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

误差分析的指导作用包含下列两个方面：

(1) 为了从测量中正确认识客观规律，就必须分析误差的原因和性质，正确地处理所测得的数据，尽量消除或减少误差或确定误差范围，以便能在一定条件下得到接近于真值的最佳结果。

(2) 在设计一项实验时，先对测量结果确定一个精度要求，然后用误差分析指导合理地选择测量方法、仪器和条件，在最有利的条件下，获得恰到好处的预期结果。

测量结果应包括数值、误差和单位，三者缺一不可。

1—2 测量误差

从研究误差的需要出发，根据误差产生的原因和性质不同，可将误差分为系统误差和随机误差两大类。

系统误差

在相同条件下，多次测量同一物理量，其误差的绝对值和符号保持不变，或按其确定规律变化，这种误差称为系统误差。系统误差的特征是它的确定性。它的来源有多种，其中有一些与仪器有关，为了便于了解，拟分几个方面介绍。

(1) 仪器的示值误差 例如一电压表的示值不准，用它测量某一电压 v 时，得 v

$= 4.00\text{V}$ ；设以一只高一级的电压表校准此读数，得 $v_A = 4.100\text{V}$ (v_A 称为实际值)，则系统误差 $\Delta'v = v - v_A = -0.10\text{V}$ 。对于有示值误差的仪器，一般应对示值进行修正。修正值 $C_x = -\Delta'x$ (设待测量为 x) 在上例中， $C_v = -\Delta'v = 0.10\text{V}$ 。所以：

实际值 = 示值 + 修正值 $= 4.00 + 0.10 = 4.10\text{V}$ 。

(2) 仪器的零值误差 例如电表的指针不指在零位，即产生零值误差。所以在使用电表以前，应先检查指针是否指零，否则须调节零位调节器使指针指零。又如使用千分尺测长度之前，也要先检查零位并记下初读数（即零值误差），以便引进修正值对测量值进行修正。

(3) 仪器机构误差和测量附件误差等 前者如等臂天平的两个臂事实上不完全相等，或者惠斯登电桥两个比例臂示值虽然相等，但实际上有差异等，可用诸如交换法等来除此项误差；后者如电学线路中开关、导线等剩余电阻所引入的误差，有时可用替代法来巧妙地避免这些因素的影响。

(4) 方法误差 实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性所引入的误差。例如，称重量时未考虑空气浮力；采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

此外，还有由于环境的影响或没有按规定的条件使用仪器；实验者生理或心理特点等因素所引入的误差等。

由于系统误差在测量条件不变时有确定的大小和方向，因此，在同一测量条件下多次测量求平均不能减小或消除它。必须找出产生系统误差的原因，针对原因去消除或引入修正值对测量结果加以修正。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切关系。因此对于初学实验者来说，应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识。在实验时要分析：采用这种实验方法（理论）、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会对测量结果引入系统误差。我们将在今后实验中，针对各实验具体情况对系统误差进行分析和讨论（第四章中将作专门介绍）。

随机误差

它的特点是随机性。当竭力消除或减小一切明显的系统误差之后，在相同条件下，对同一量进行多次重复测量时，每次测量的误差时大时小，时正时负，既不可预测又无法控制。随机误差的来源，一方面是由于实验过程中难以控制的因素所引起的，例如空气的流动，温度的起伏、电压的波动等。另一方面是由于人们感觉器官的分辨能力的限制所引起的。同一实验者，在相同条件下重复测量同一物理量时，各次结果常有不同，这是因为调节仪器和估计读数时实验者的判断不可能完全正确所致。

随机误差的出现，从表面上看似乎纯属偶然，但当重复测量的次数很多时，偶然之中仍然会显示出一定的规律性。我们可以利用这种规律性对实验结果作出随机误差的误差估算。

总之，随机误差与系统误差性质不同，来源不同，处理方法也不同。有时随机误差与系统误差是加以区别，分别处理的；有时只是为了说明误差的限度，就不加以区别；许多不太精密的仪器的仪器误差就既包括系统误差又包括随机误差。

需要强调指出的是：在整个测量过程中，除了上述两种性质的误差以外，还可能发生读数、记录上的错误，仪器损坏、操作不当等造成的测量上的错误（亦称粗差）。错误不同于误差，这种因粗心大意造成的错误，实验者是完全可以事先发现和避免的。

1-3 随机误差的估算

随机误差的统计规律

假设系统误差已经消除，而被测量本身又是稳定的（若被测量本身有很大起伏，测量结果将显示出被测量本身的统计规律），在相同条件下，对同一量进行多次重复测量，其结果彼此互有差异，这就是随机误差引起的。实践和理论都证明，大部分测量的随机误差服从统计规律。误差分布如图 01-1 所示。横坐标表示误差 $\Delta = x - c$ ，纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\Delta)$ 。应用概率论的数学方法可以导出：

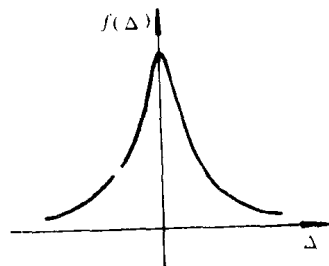


图 01-1

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (01-2)$$

这种分布称为正态分布。式 (01-2) 中的特征量 σ 为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (01-3)$$

称为标准误差。

服从正态分布的随机误差具有下面一些特征：

- (1) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率为零，即误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (2) 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。
- (3) 对称性 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。
- (4) 抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零，即：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (01-4)$$

经典的误差理论便是以正态分布为基础而发展起来的。正如著名数学家李普曼所说的：“每一个人都相信误差的指数律，实验者相信它，因为他们以为它是可以用数学证明的；而数学家相信它，则因为他们相信它是从观测建立起来的规律”。

在测量不可避免地存在随机误差的情况下，每次测量值各有差异，那么怎样的测量值是接近于真值的最佳值？

测量结果的最佳值——测量列的算术平均值

我们可以利用随机误差的上述统计特性来判断实验结果的最佳值——近真值。

设对某一物理量在等精度测量条件下进行多次重复测量，其测量列为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 。测量列的算术平均值为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (01-5)$$

不难理解, 对于有限次测量, 平均值会随着测量次数的不同而有所变动, 也会因不同组测量数据而稍有差别。因而多次测量的算术平均值, 只能称为近真值或最佳值。由随机误差的上述统计特征可以证明, 当测量次数无限增多时, 算术平均值就将无限接近于真值。

根据误差定义有:

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \cdots + (x_n - a) = \Delta_1 + \Delta_2 + \cdots + \Delta_n$$

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

根据随机误差的抵偿性, 当 $n \rightarrow \infty$ 时 $\sum_{i=1}^n \Delta_i / n \rightarrow 0$, 因此: $\bar{x} \rightarrow a$

可见测量次数越多, 测量列的算术平均值越接近真值。所以, 测量结果可用测量列的算术平均值作为真值的最佳值。但是测量结果的随机误差究竟有多大? 如何表示?

随机误差的表示法

随机误差的大小常用标准误差、平均误差和极限误差表示。

1. 测量列的标准误差 σ

随机误差 Δ 为正态分布时, 概率密度函数 $f(\Delta)$ 由式(01-2)表示, 其特征量 σ 由式(01-3)表示。 σ 的物理意义是什么呢?

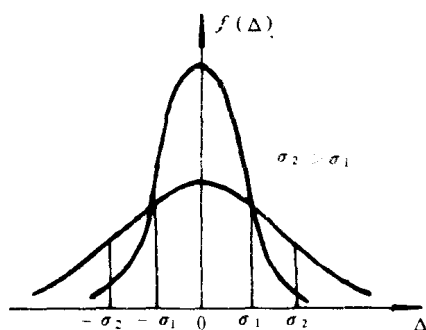


图 01-2

图 01-2 是不同 σ 值时的 $f(\Delta)$ 图线。 σ 值越小, 表示绝对值小的误差越占优势, 正态分布曲线越尖锐, 反映了测量列中各测量值的分散性小, 重复性好。反之, σ 值大, 正态分布曲线较平坦, 测量列中各测量值的分散性大, 重复性差。所以我们说测量列的标准误差 σ 是表征同一待测量的 n 次测量所得结果的离散性的参数。

但应注意, 标准误差 σ 和各测量值的误差 Δ_i 有着完全不同的含意; Δ_i 是实在的误差值, 亦称真误差; 而 σ 并不是一个具体的测量误差值, 它反映的是测量列的随机误差概率分布特性, 只具有统计性质的意义, 是一个统计性的特征值。

图 01-3 (a) 所示曲线下的总面积表示各种大小 (包括正、负) 误差出现的总概率, 当然应该是 100%。由 $\Delta = -\sigma$ 到 $\Delta = \sigma$ 之间的曲线下的面积 (图中画斜线的部分), 可以计算出为总面积的 68.3%, 它表示随机误差落到区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率。这就是说, 在等精度重复测量时, 如测量次数 n 很大, 则所获得的数据中, 将有 68.3% 个数据的误差绝对值 $|\Delta_i|$ 将比 σ 小。

由此可见, 标准误差 σ 所表示的意义是: 测量列中任一测量值的误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的可能性为 68.3%。

2. 平均误差 η

平均误差 η 由测量列中各测量值的误差绝对值的算术平均值表示, 即

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta_i|}{n} \quad (01-6)$$

同样在图 01-3 (b) 由 $-\eta$ 到 η 之间的曲线下的面积 (图中画斜线的部分), 可以计算出来为总面积的 57.5%。它表示随机误差落到区间 $[-\eta, \eta]$ 内的概率。

由此可见, 平均误差 η 所表示的意义是: 测量列中任一测量值的误差落在区间 $[-\eta, \eta]$ 内的可能性为 57.5%。

经过数学推导, 可得出平均误差 η 与标准误差 σ 之间的关系为:

$$\eta = 0.7979\sigma \approx 0.8\sigma \quad (01-7)$$

由式 (01-7) 可见, 平均误差 η 与标准误差 σ 之间有确定的比例关系, 因此它也可以用来描述随机误差, 且 η 值小也表示数据的分散性小, 重复性好。

3. 极限误差 δ

定义:

$$\delta = 3\sigma \quad (01-8)$$

由误差理论可知, 极限误差 δ 所表示的意义是: 测量列中任一

一测量值的误差落在区间 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 内的可能性为 99.7%, 即在 1000 次测量中只有 3 次测量值的误差绝对值会超过 3σ 。由于在一般测量中测量次数很少超过几十次, 因此, 可以认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是极小的, 故称其为极限误差。在工程技术报告中一般使用极限误差。

上述三种随机误差的表示法, 其区别在于概率的大小不同。换一个概率值又可以有一种随机误差表示法。但是, 由于真值 a 是无法得到的, 所以误差 $\Delta_i = x_i - a$ 也是无法计算的, σ 、 η 、 δ 均无法算出。那么如何来计算随机误差的大小?

4. 不确定度

1981 年 10 月召开的第七十届国际计量委员会会议上通过了“实验不确定度的说明、建议书”, 建议用“不确定度 (Uncertainty)”一词取代“误差 (Error)”来评定测量结果的质量, 这一决议已在世界范围内推广。我国国家计量总局给出的不确定度的定义是: 由于测量误差的存在而对被测量不能肯定的程度。实际上, 不确定度的定量表述就是以所需要的置信概率给出以标准误差倍数表示的置信区间, 即 $\pm C\sigma$, 其中 C 值由置信概率确定。例如, 当置信区间为 $\pm \sigma$ 时, 其置信概率为 68.3%; 扩大置信区间, 置信概率就会提高。在区间 $[\pm 2\sigma]$ 内, 置信概率为 95.4%; 在区间 $[\pm 3\sigma]$ 内, 置信概率为 99.7%。因此只要对测量结果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。

目前国内外的科学论文已普遍采用标准误差, 而且不确定度的定量描述与标准误差

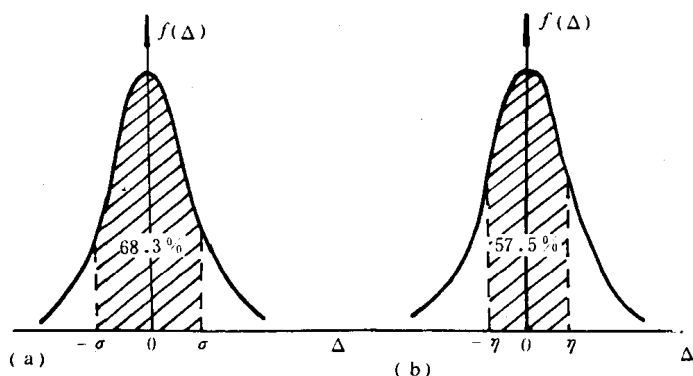


图 01-3