

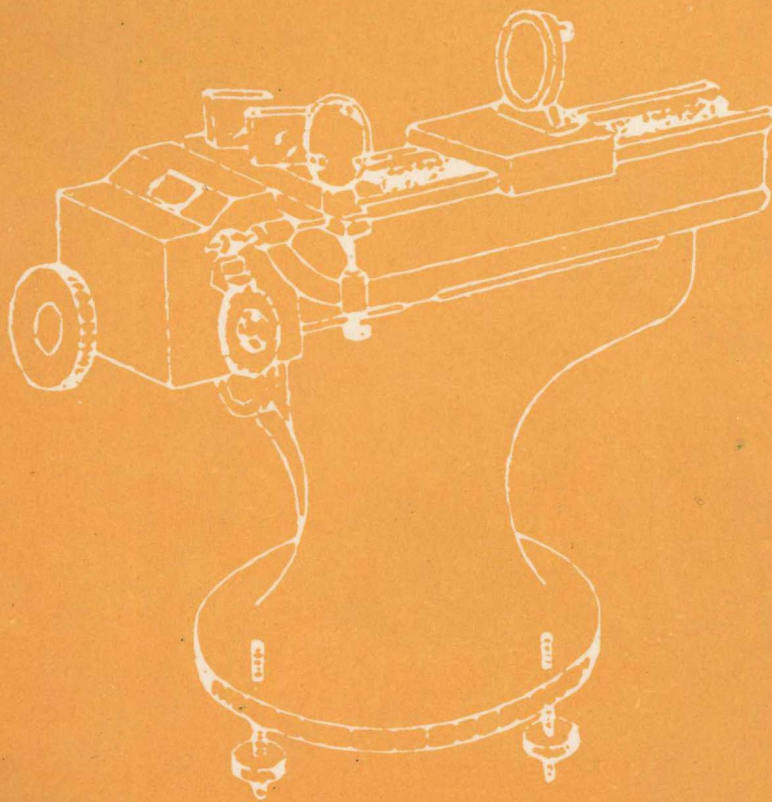
高等学校适用教材

工科

GONGKE DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主编 张铁强 郭山河 冯毅
主审 申铉国 韩日范



吉林科学技术出版社



高等学校适用教材

工科大学物理实验

主编 张铁强 郭山河 冯毅
主审 申铉国 韩日范

吉林科学技术出版社

【吉】新登字 03 号

高等学校适用教材

工科大学物理实验

张铁强 郭山河 冯 毅 主编

责任编辑:王维义

封面设计:王维义

出版 吉林科学技术出版社 787×1092 毫米 16 开本 365 000 字 15 印张

发行 1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月第 1 次印刷

印刷 长春市弘祥印刷厂 ISBN 7-5384-1930-6/O·66 定价:15.00 元

地址 长春市人民大街 124 号 邮编 130021 电话 5635183 传真 5635185

电子信箱 JLKJCPS @ public.cc.jl.cn

前 言

根据《重点高等学校工科物理实验课程教学改革指南》提出的“加强基础，重视应用，开拓思维，培养能力，提高素质”的指导思想，在“保底放花”的方针下，结合我校专业设置的特点和大学物理课程改革的特色，对物理实验内容进行了重新组合与充实，注意吸收科技进步和教学研究的新成果，同时对实验方式进一步完善。在此基础上，重新编写了这本教材。

本书具有以下特点：

1. 开设基本训练实验项目。在学习误差理论的基础上，根据《国际计量局实验不确定度的规定建议书 INC-1》以及我国《国家计量技术规范 JJG 1027-91》的规定，引入不确定度做为实验测量结果的误差评定。同时，设置了基本仪器使用训练和数据处理系统训练，以便让学生较好地掌握误差理论的基础知识，并完成基本技能的训练。这部分内容约占总学时的 25%。

2. 在保证一定数量的工科大学物理基础实验的前提下，设置了综合设计性和应用物理技术性实验。这部分实验中，包含了物理实验室教师和工作人员的多项教学研究成果，主要表现在教学方法的改革和实验装置的研制。设置这类实验，使学生在综合运用所学理论、独立归纳整理实验方案、科学分析和评价实验结果、拓展现代测量技术的视野、开发学生的智力、了解物理实验在工程技术中的运用等方面，得到有益的训练，有助于提高他们的科学研究和解决工程实际问题的能力。这部分内容的实验约占总学时的 30%。

3. 根据“指南”的要求，增设了计算机在物理实验中运用一章。其中包含有：物理实验数据的计算机处理、计算机物理信号采集实验等。

4. 设计的实验题目学时多于物理实验的课程学时数，其目的是：一是要满足开放式物理教学的要求，解决实验仪器套数少、学生人数多的矛盾；二是有选择性地让一部分物理实验技能较好或某些特定专业学生，选做一些技术性和应用性较强的实验项目，实现个性和有针对性的培养，有利于尖子生的能力训练。

本书由张铁强、郭山河、冯毅主编，参加编写工作的还有乔亚力、林晓珑、何月、王荣、李荣福、高春歌等同志。申铉国教授、韩日范高级工程师认真审定了本书的内容，提出了许多宝贵意见；本书得到了吉林工业大学教材建设基金的资助，对吉林工业大学教务处、实验室管理处等部门的大力支持，以及应用物理系一些同志的帮助，在此深表敬意。

比较完整地根据《重点高等学校工科物理实验课程教学指南》的要求，进行实验内容的设置，对于我们来讲，是一项新尝试。由于编者水平有限，加之时间紧迫，书中缺点错误在所难免，欢迎读者不吝批评指正。并愿意同广大同行共同探讨，以期推动工科大学物理实验教学改革的进一步发展。

编 者

1997 年 11 月

目 录

绪论	(1)
第一章 误差理论与数据处理	(4)
§ 1.1 测量和有效数字	(4)
§ 1.2 测量的不确定度	(7)
§ 1.3 数据处理	(11)
习题与思考题	(18)
附录 1 电子计算器在数据处理中的应用	(20)
附录 2 常用物理常数	(21)
附录 3 电学基本仪器简介和电学实验操作规程	(26)
附录 4 光学实验基本知识	(31)
第二章 物理实验基本仪器及训练	(35)
§ 2.1 长度测量基本仪器与训练	(35)
§ 2.2 称衡基本仪器与训练	(40)
§ 2.3 电学基本仪器与训练	(44)
§ 2.4 光学基本仪器与训练	(47)
第三章 工科大学物理基础实验	(52)
实验 3.1 气轨上的力学实验	(52)
实验 3.2 刚体转动实验	(57)
实验 3.3 杨氏模量的测量	(60)
实验 3.4 金属比热测量	(63)
实验 3.5 液体粘滞系数测量	(65)
实验 3.6 电表的改装与校准	(70)
实验 3.7 利用惠斯登电桥测电阻	(73)
实验 3.8 电位差计实验	(78)
实验 3.9 模拟法研究静电场	(82)
实验 3.10 电子示波器的使用	(84)
实验 3.11 灵敏电流计常数的测定	(91)
实验 3.12 利用冲击电流计测量磁感应强度	(95)
实验 3.13 冲击法测电容	(100)
实验 3.14 霍尔效应	(102)
实验 3.15 薄透镜性质研究及应用系统	(104)
实验 3.16 照相技术	(106)
实验 3.17 等厚干涉	(112)
实验 3.18 衍射光栅	(116)

实验 3.19	迈克尔逊干涉仪	(119)
实验 3.20	用旋光仪测溶液的旋光率和浓度	(123)
实验 3.21	光电效应法测定普朗克常数	(126)
实验 3.22	夫兰克-赫兹实验	(130)
实验 3.23	超声光栅测液体声速	(137)
实验 3.24	全息照相	(140)
实验 3.25	摄谱分析实验	(144)
第四章	综合设计性物理实验	(149)
实验 4.1	热敏探测器件研究	(149)
实验 4.2	光辐射探测器件研究	(151)
实验 4.3	测量微小长度的变化	(154)
实验 4.4	透明液体折射率的测定	(156)
实验 4.5	声速的测量	(158)
实验 4.6	利用干涉仪测量微小量	(161)
实验 4.7	溶液浓度的测定	(162)
第五章	现代应用物理技术实验	(165)
实验 5.1	光学滤光片特性参数测定	(165)
实验 5.2	光电器件特性研究实验	(166)
实验 5.3	超声波技术应用	(175)
实验 5.4	光纤传感技术应用研究	(179)
实验 5.5	光栅尺检测物体尺寸	(183)
实验 5.6	CCD 特性研究及应用	(187)
实验 5.7	红外水分检测研究	(195)
实验 5.8	He-Ne 激光器纵横模测量	(198)
实验 5.9	高斯光束参数测量及透镜变换	(202)
实验 5.10	He-Ne 放电管荧光光谱及增益特性分析	(207)
实验 5.11	阿贝成像及空间滤波	(209)
实验 5.12	光学信息处理技术应用	(212)
第六章	计算机在物理实验中的应用	(217)
实验 6.1	物理实验数据计算机处理实验	(217)
实验 6.2	物理信号的计算机采集实验	(228)
参考文献		(234)

绪 论

一、物理实验课的地位、作用和任务

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为培养德智体美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，而且要使学生具有较强的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。

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，是对工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。

物理学从本质上说是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立，都必须以严格的物理实验为基础，并受到实验的检验。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。因此，我们要正确处理好理论课与实验课的关系，要求学生既动脑，又动手，不可偏废于某一方。

本课程是在中学物理实验的基础上，按照循序渐进原则，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。物理实验课的目的和任务是：

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，加深对物理学的某些概念、规律和理论的理解。

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，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；

(3) 能够运用物理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，绘制合格的图表，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、严谨周密的科学作风，严肃认真、实事求是的工作态度，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。

学好物理实验课，既要有正确的学习目的，还要有正确的学习方法。在实验课中，要有意识地锻炼自己，培养良好的实验习惯，克服盲目动手的不良习惯，培养和提高动脑与动手的基本能力。实验过程中遇到的各种问题、困难，要尽可能自己动脑、动手解决，要尽可能搞清楚遇到的各种问题。要培养理论联系实际的能力、细心与耐心的观察能力，积极主动地学习。

二、物理实验课基本程序

1. 实验课前预习

由于实验课课堂时间有限,课前预习显得很重要。预习充分,就会大大提高课堂效率,学习收获大,效果好。反之,不预习或应付了事,在课堂上机械地照教材操作,必然要手忙脚乱,不会有多大收获。预习要求如下:

(1) 要阅读讲义中与本实验相关的全部内容,明确实验目的、原理,了解使用哪些仪器、测量什么物理量、采用什么方法、基本步骤是什么、有什么注意事项。

(2) 要写出预习报告。内容包括:实验题目、实验目的、实验原理、表述要简明扼要,列出主要计算公式,画出原理简图,直接填写在实验报告中。

2. 课堂实验操作

为了使同学们顺利地上好实验课,避免事故发生,造成不应有的损失,同学们进入实验室做实验时,应注意以下几点:

(1) 上课请带实验讲义、笔、尺、计算器等工具。做好预习工作并主动接受教师检查。

(2) 进入实验室后不可盲目动手,必须在了解仪器的工作原理、使用方法和注意事项的基础上,经教师允许后方可进行实验。

(3) 仪器安装调整后经教师检查确认无误后才可以进行实验操作。在电学实验中,必须经教师检查线路后方可接通电源。

(4) 注意观察实验现象,认真记录测量数据并经教师检查认可后,将数据填入发给的实验卡片,在卡片上必须填上本人的学生磁卡号、行政班号及计算机上选课的时间,以便于实验成绩的登记与管理,并将卡片交给教师(卡片带走无效)。

(5) 做完实验后要将仪器整理好,归回原位,课堂上写不完报告可带回去做,但必须在三天之内交实验报告。

(6) 离开实验室前,必须对实验室进行清扫。

(7) 每个实验都有操作规程和注意事项,实验同学必须按照操作规程和注意事项去做,以避免事故发生,否则由此产生的后果自负。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时,要求文字通顺、字迹端正工整、图表规范、结果正确、讨论认真。完整的实验报告包括以下几个部分:

①实验名称

②实验目的

③简要原理

这几部分应在课前预习时完成。

④数据记录

⑤数据处理(包括计算和做图)

⑥讨论

在数据处理中,一般包括三个部分,即:计算公式、代入数据、实验结果。实验的结果包括:①结果的最佳值 $\bar{x}$; ②不确定度 U_x 。综合起来可写为

$$x = \bar{x} \pm U_x$$

或

$$x = \bar{x} \left(1 + \frac{U_x}{\bar{x}} \times 100\% \right)$$

即用不确定度对实验结果加以评价，并扼要写出实验结论。

在最后的讨论中，应通过不确定度分析得出产生误差的主要原因，回答实验的思考题，也可对实验仪器的装置和实验方法提出建议。

4. 预约实验

物理实验分为必做和开放实验两部分，开放实验题目实行预约制，即实验同学通过预约的方式在规定的开放时间内自由地安排实验时间和实验题目。预约时应注意以下几点：

(1) 认真写实验预约卡片，包括预约时间、题目，在背面写上预约同学的姓名。

(2) 每个实验项目可容纳 8 个同学，预约同学尽量排满 8 人，以免仪器闲置。

(3) 预约实验的同学若要改变某实验的时间要提前到预约处取消该预约，重新预约，否则按无故旷课处理。

三、物理实验课的安排

物理实验课分两个学期进行。第一学期由必做（循环）实验和开放实验组成，学生在计算机上选定上实验课时间后，由实验室按选课时间将学生分成大组（最多四组），以组为单位做循环实验。开放实验不受选课时间限制。第二学期全部是开放实验，学生仍需经过在计算机上选课后来做实验。

第一章 误差理论与数据处理

§ 1.1 测量和有效数字

1.1.1 测量与物理实验的关系

物理实验由物理现象的再现、物理量的测量与数据处理三部分组成。测量是物理实验的中心，也是实验课的中心内容。

测量是指用一定的工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地与被测量所进行的比较。由于测量对任何实验都很重要，所以发展成独立的一门学科——测量学。测量所用的原理绝大多数是物理原理，所用方法是物理方法，测量的对象是物理量。但测量学不是实验物理学，两者区别是：测量学最终目的是获得物理量的精确值，物理实验的最终目的是探索物理规律。两者的关系是，测量不能代替物理实验，而物理实验必包含测量。

1.1.2 测量的分类

伽利略有句名言：“凡是可能测量的，都要进行测量，并且要把目前无法度量的东西，变成可以测量的。”从基本粒子的微观世界，到庞大星系的广阔空间；从粒子碰撞、蜕变的瞬间，到宇宙演变的漫长过程，都属于测量的范围。物理实验的测量可分为直接测量、间接测量，组合测量三类。

(1) 直接测量

指可用仪器、仪表直接得到被测量数值的测量，如米尺测长度，秒表计时间，电表测电流、电压等。

(2) 间接测量

指利用直接测出的数值 x ，通过一定函数关系运算，才能得出测量结果 y ，即 $y=f(x)$ ，如立方体体积 V ，是通过长 x ，宽 y ，高 z 的测量由 $V=xyz$ 得到；折射率 n 是通过测折射角 θ 测定，由折射定律求得。

(3) 组合测量

为找出两个量 x ， y 之间在某一区间的函数关系，而在该区间对这两个量进行的逐点测量。如某元件的伏安特性，是通过在一定范围内，对在不同电压 V 下所产生的电流 I 的测定 (V_1, I_1) 、 (V_2, I_2) 、……而得出的。

测量从方法上讲，常见的有六种：

①比较法。是将被测量与相关标准量进行直接或间接比较，得到测量值的方法。如米尺、角规、天平、电表等都是根据比较法设计而成的仪器。

②放大法。在测量中，由于被测量很小，无法被观察者察觉，可通过某种方法将被测量放大后，再进行测量。如用光杠杆可将微米级伸长量放大，而在毫米尺上得到充分的反映。用

螺旋测微计测长,采用的是用螺旋放大微小间距的原理,示波器、望远镜……都是由某种放大原理制成的仪器。

③补偿法。在测量中,若被测精度要求很高,可用在标准量具上产生的精度很高的某种效应,完全补偿(或抵消)由待测量产生的同种效应,从而得到未知量。如电位差计,经校准后,可形成一定范围内可调的高精度电压 E_0 ,去补偿处在该范围的未知电压 E_x ,当检流计 G 指针不偏转时, $E_0 = E_x$,如图 1.1-1 所示。

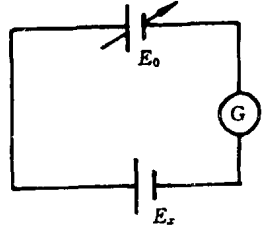


图 1.1-1

④转换法。很多物理量不便或无法直接测量时,可转化为对该量所产生的某种效应进行测量。如玻璃温度计是根据温度对液体的热胀冷缩效应,将温度量转化为长度量进行测量的。其中将非电量转化为电量进行测量的电测法(如热电偶测温度,超声干涉测声速等)以及将非光学量转化为光学量测量的光测法(如干涉仪测长度,折射法测浓度等)是现代精密计量的重要组成部分。

⑤模拟法。有些不易测量的量,还可根据相同的物理或数学模型,有相似结果的特点,用对模型的测量代替对原型的测量。如静电场与稳恒电场有相同的数学模型,所以可用对稳恒电流场等位线的测量,模拟静电场等位线的测量。

⑥干涉测量法。由于光波长很小,我们可利用干涉条纹的分布与变化,使长度、角度、光洁度等量的测量精度大大提高。干涉计量技术是现代精密计量的重要组成部分。

按测量条件测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在测量过程中,影响测量诸因素相同的测量。在测量条件相同的情况下,进行的一系列测量,如由同一个人在同一台仪器上,用同样测量方法,在同一环境下对被测对象进行的一系列测量。每次测量的可靠程度都一样,可看成是等精度测量。

不等精度测量是指在所进行的一系列测量中,由于所用测量仪器、测量方法、测量环境、次数、测量人员完全不同或部分不同,使各测量结果的可靠程度不同,这样一组测量称为不等精度测量。

等精度测量数据处理比较容易,所以绝大多数实验都采用等精度测量。不等精度测量在此不做介绍。

1.1.3 有效数字

实验中得到并处理的数字,应能反映出被测量的实际大小。即:记录、运算后保留的数字,应是能传递出被测量实际大小的全部信息的数字,这样的数字称为有效数字。定义为:一个数字是有效数字,则该数据是左起第一位非零数位起,到第一位欠准数位止的全部数字。

(1) 有效数字

测量过程所得到的数字,可分为准确数字和近似数字两种。准确数字如确切的人数、个数、次数及公式中的常数,这些数字的准确性是不容置疑的。用量具或仪器测得的数由两部分构成,一部分按仪器的刻度读出,可以读到它的最小刻度,这部分以刻度为依据,应视为准确的,称为可靠数字。而最小刻度值以下的那一位,没有刻度为依据,是估读的,不够准确,称为欠准数位。两部分之和构成了测量得到的有效数字。即

$$\text{有效数字} = \text{可靠数字} + \text{欠准数位}$$

如用毫米刻度尺测某一物体长度 x ，从尺上可准确读到 31.6cm，由于真实长度在 31.6~31.7cm 之间，为使测量值更接近于真实值，在 mm 以下我们可估计为 0.06cm（尽管真实位置可能在 0.05cm 或 0.07cm 处），则 31.66cm 为对 x 测量中得到的有效数字。它是四位有效数字，由三位可靠数字 31.6cm，和一位欠准数位 0.06cm 构成，如图 1.1-2 所示。

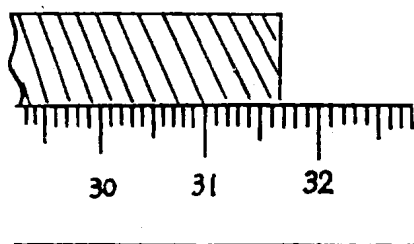


图 1.1-2

如用直流毫安表测电流，最小刻度为 1mA 时可估计到 0.1mA。如 13.2mA，“13”是可靠的，“0.2”是估计的，两者之和构成三位有效数字。

可见，在读仪表示值时，一般都要读到最小刻度的下一位。如果指针正好指在整数处，应加 0 至最小刻度的下一位。如图 1.1-3 所示，此时电压值应记为 2.00V，而不能写成 2.0V，因为真实值有很大可能在 1.99~2.01 之间，而不是在 1.9~2.1 之间。当然，若写成 2.000V 也是错的，因为用这种仪表，没有根据能读到 0.001V。

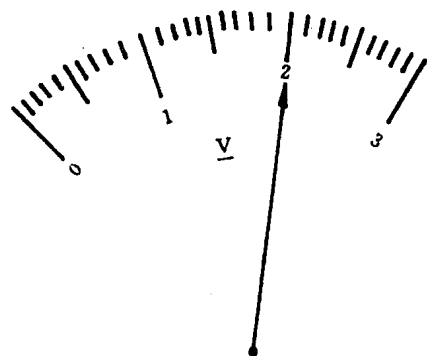


图 1.1-3

在最小刻度为 5 个单位时（如量程为 5V 的直流电压表，有 100 个刻度，每个最小刻度为 0.05V）；由于 5 本身有“四舍五入”功能，将最小刻度分 10 等分进行估计，精确不到 0.001V 这一位，所以应将最小刻度分 5 等份，估读到 0.01V。

因此，欠准数字在最小刻度的下一位或最小刻度所在位。

(2) 关于有效数字的几点说明：

①有效数字位数与小数点的位置无关。如 0.00123、0.123、12.3 等都是三位有效数字，这只是选取不同单位造成的。

②“0”在有效数字中的地位。左起第一位非零数字前面的 0 不是有效数字，该数右边的数字、包括数字中间及末尾的 0 是有效数字。

③有效数字的科学表示法。测量数字特大或特小时，可用 10 的幂指数形式表示。指数前的系数由 1 位整数，其余为小数构成，它的位数表明了有效数字的位数，指数部分不是有效数字。如 250kΩ 若用为 Ω 单位，只能写成 $2.50 \times 10^5 \Omega$ ，而不能写成 250000Ω。因为前者是三位有效数字，后者则是六位有效数字。

1.1.4 有效数字的运算规则

总的原则是：准确数字与准确数字（含常数）之间的运算，得准确数字；准确数字与欠准数字，欠准数字与欠准数字之间的运算，得欠准数字。结果只含 1 位欠准数字。

①欠准数字的进、舍规则

为了使有效数字只含有一位欠准数字，往往要对诸位欠准数字进行进舍。规则是：“四舍、六入、五凑偶（即五左边这位数为奇数则进，为偶数则舍）”。

②加减运算

加减运算的和、差，其最后一位数与参与运算各数中末位数最高的位对齐。如

$$20.33 + 5.221 + 101.3 = 126.8$$

③乘除运算

乘除运算的积、商的有效数字位数，一般与运算各数中位数最少者相同。（特殊情况可多保留1位，或少保留1位。在此对同学不作要求，如有兴趣，可自行验证）如：

$$2.355 \times 13.3 = 31.3 \quad (\text{与位数最少者相同})$$

$$3.357 \times 53.3 = 178.8 \quad (\text{比位数最少者多一位})$$

$$1.01 \div 1.211 = 0.83 \quad (\text{比位数最少者少一位})$$

④幂运算

幂运算结果的有效数字位数，与底数的有效数字位数相同。如

$$3.56^3 = 45.1$$

$$356^3 = 451 \times 10^7$$

⑤对数运算、三角函数运算

对数运算时，对数的尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同，对数的首数对应于乘方，不应计入有效数字位数。如

$$\log 1.997 = 0.3004$$

$$\log 1997 = 3.3004$$

$$(\log 1997 = \log 1.997 \times 10^3 = \log 1.997 + \log 10^3 = 3 + 0.3004)$$

三角函数运算不改变有效数字的位数。如

$$\sin 52^\circ 13' = 0.7903$$

$$\text{证明: } \because y = \sin x, \quad \Delta y \approx \frac{dy}{dx} \Delta x = \cos x \cdot \Delta x$$

$$\therefore \Delta y = \cos 52^\circ 13' \times 1' = 0.6127 \times \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} = 0.0002$$

所以 $\sin 52^\circ 13'$ 等于 0.7903，而不是 0.790 或 0.79033 等。

⑥约简

约简的目的在于简化一些不必要的计算，约简遵从“四舍六入五凑偶”的原则。如将下列各量保留两位有效数字。

$$1.451 = 1.5 \quad (5 \text{ 后面有数时要进位})$$

$$1.45 = 1.4 \quad (5 \text{ 后面没数，又不能凑偶时舍去})$$

$$0.355 = 0.36 \quad (\text{能凑偶时进到上一位})$$

加减运算前，先将各量约简到其中欠准位数最高者的下一位。

$$\text{如: } 11.1 + 1.0025 + 0.3376 = 11.1 + 1.00 + 0.34 = 12.4$$

乘除运算前，将各量约简到比有效数字位数最少者多一位。

$$\text{如: } 2.02 \times 0.3376 \times 1.1 = 2.02 \times 0.338 \times 1.1 = 0.75$$

§ 1.2 测量的不确定度

1.2.1 误差理论

一、误差的基本概念

1. 真值。一个物理量是标准量（单位）的多少倍，是一个客观存在，它不随测量而变化，称之为该物理量的真值，用 μ 表示。

2. 近似值（测量值）。实验测量中由于各种原因，使之无法测得其真实值，只能得到对真实值的近似描述，用 x 表示。

3. 误差。真值与近似值之差称之为误差，它反映了所得到的被测量与真实值之间的偏离程度。用 E 来表示。

$$E = |\mu - x| \quad (\text{绝对误差}) \quad (1.2-1)$$

$$E = \frac{|\mu - x|}{\mu} \times 100\% \quad (\text{相对误差}) \quad (1.2-2)$$

二、误差的种类

1. 系统误差：是指由于仪器不完善、测量理论及方法的近似等引起的，具有一定规律的误差。这类误差单纯增加测量次数不能减小，只能通过仪器的改进、理论及方法上的修正等措施来减小。

2. 偶然误差：是指由于仪器精度限制，人的感官制约，环境（温度、湿度、光照、杂散电磁场等）变化，使测量结果中出现的可大可小、可正可负具有随机性的误差，这类误差是客观存在，无法避免的，多次测量可减小这类随机的干扰。

3. 过失误差：是指操作不当，或读数错误造成的误差。含有这类误差的测量值一般明显偏离正常值，称之为坏值，可按一定标准剔除。由于过失误差属于可避免误差类，不计入所讨论的误差范围之列，故实验中所说的误差是由偶然误差和系统误差两部分构成。

三、偶然误差的数学描述及统计意义

偶然误差一般可认为是由大量的微小的干扰产生，使测量值与真值之间的差别（大小及正负）随机性的变化。这类误差的数学描述，是通过多次测量，在统计意义上得出的。

例如对某一长度 L 测量了 64 次，其数据列表如下：

L (长度值)	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11
n (相同值出现的次数)	1	3	6	10	15	11	8	4	3	2	1

以长度 L 为横坐标，出现的次数 n 为纵坐标，用直方图表示，所得图形如图 1.2-1 (a) 所示。

若再进行一组测量，例如 100 次，作出相应的直方图，仍可得到一近似对称、与前述图形不完全吻合，但轮廓相似的图形。随着测量次数增加，曲线形状基本不变，但对称性越来越好，曲线也趋于光滑。当 $n \rightarrow \infty$ 时，反映 x 值出现次数的值 $n(x)$ 变成连续变化函数，即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\mu-x)^2}{2\sigma^2}}$$

该函数曲线如图 1.2-1 (b) 所示，称为正态分布曲线。式中两个参数 μ 和 σ 是正态分布的数学期望值和均方根差。等精度测量的数据分布一般服从正态分布，或可转化为正态分布进行描述，加之正态分布理论完善，公式计算方便，所以我们将用随机误差理论来估计偶然误差的大小，并了解偶然误差的数学描述及统计意义的有关结论。

1. 偶然误差的分布特性

(1) 单峰性：当 $n \rightarrow \infty$ 时峰值处的位置即真值所在位置，这表明靠近真值的测量值出现的

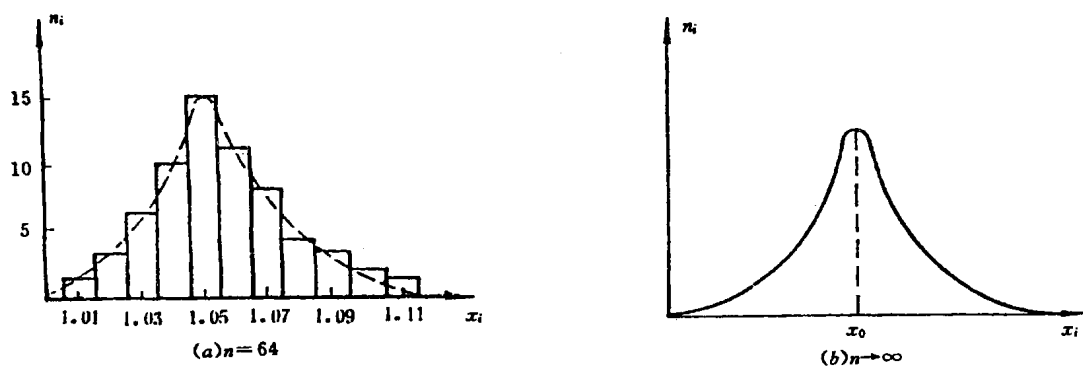


图 1.2-1

机会大，远离真值的测量值出现的机会小。因此，在有限次测量中，其 n 次测量的平均值 $\bar{x}$ （即峰值所在位置）是真值的最佳估计值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2-3)$$

可以证明：当 $n \rightarrow \infty$ 时有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \mu$$

(2) 有界性：各测量值都分布在一定范围内，过大或过小的测量值实际上均不出现，大部分测量值分布在由 $\pm\sigma$ 决定的范围内，因此可由 σ 来描述这类偶然误差的大小，称为测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时的标准误差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\mu - x_i)^2}{n}} \quad (1.2-4)$$

从统计意义上讲，在 $\pm\sigma$ 范围内包含了总数据的 68.3%，或在 $\pm\sigma$ 范围内每个数据存在的可能性为 68.3%；在 $\pm 2\sigma$ 范围内包含了总数据的 95%；在 $\pm 3\sigma$ 范围内包含了总数据的 99.7%。在有限次测量中大于 3σ 的误差的数据存在的概率很小，只有 0.3%，称为小概率事件，也称为不可能发生事件。因此 3σ 也叫极限误差 $\Delta_{\text{极}}$ ，即

$$\Delta_{\text{极}} = 3\sigma \quad (1.2-5)$$

(3) 对称性：它表明在多次测量中，正负误差出现的机会均等，因此多次测量可部分地消除随机干扰带来的偶然误差。

四、偶然误差的估算——标准差（标准偏差）

由于任何物理量的客观描述都是在有限次测量下得到的，可以证明，在对 x 进行的有限次测量得到的一组测量列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中，其偶然误差 σ 可用由测量列决定的标准差来估算。

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (1.2-6)$$

它表明，在这组测量数据中，任何一个值 x_i 偏离平均值 $\bar{x}$ （或真值 μ ）超过 $\pm S_x$ 的范围的概率不会超过 68.3%，或这组数据中的 68.3% 与平均值 $\bar{x}$ （或真值 μ ）产生偏离程度不会超过

$\pm S_x$ 的范围。同样, 测量值超过 $3S_x$ 的概率, 在有限次测量中是不可能发生的, 故 $3S_x$ 可作为所得实验数据中坏值剔除的标准。

反映平均值 $\bar{x}$ 与真值 μ 的偏离程度, 可由测量列平均值的标准差来估算。

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (1.2-7)$$

它表明, 在一测量列中, 用平均值作为真值的最佳估计值时, 平均值 $\bar{x}$ 与真值 μ 之差小于 $\pm S_{\bar{x}}$ 的概率为 68.3%。

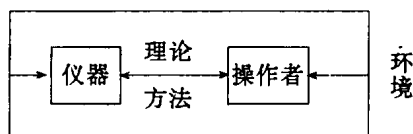
因 $S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_x$, 故增加测量次数可减小偶然误差, 但当 $n \geq 10$ 时, $S_{\bar{x}}$ 减小的程度已很不明显, 故教学中一般 $n \geq 5$ 即可。

1.2.2 测量的不确定度

如何评价测量结果的可靠性? 这是测量和鉴定工作的重要问题。用测量误差来评定测量结果的可靠性是不科学的, 因为测量误差是测量值与真值之差, 由于真值无法确定, 所以测量误差是不能确定的。1980年10月, 国际计量局提出了关于“不确定度”的建议书。为此, 中国计量科学院于1986年发出通知, 规定在基准校准研究和测量、鉴定工作中, 应采用不确定度作为误差数字的名称。不确定度是测量结果附近的一个范围, 是真值以较大概率存在于某个量值范围的评定, 不确定度的范围越小, 测量结果的可靠性越大, 不确定度的大小, 由偶然误差和系统误差两部分构成。

了解不确定度, 对于我们合理安排实验, 减小测量值与真值的差异, 正确评价测量结果, 有着重要意义。

一个实验过程, 可由下面框图表示各个环节之间的联系。



各个环节都会对测量产生或大或小, 或遵从统计规律或不遵从统计规律的不确定度。如: 人为误差: 包括操作者心理因素、生理因素如视觉、色觉、嗅觉、听觉等对测量的影响。

仪器误差: 仪器本身的缺陷, 安装调整不当及仪器老化、磨损等对测量结果的影响。

理论误差: 对真实过程作理想和近似处理后得出的理论, 与实验真实情况之间差异对测量结果的影响。如自由落体物体不计空气阻力, 理想导体, 均匀介质……

方法误差: 如伏安法测电阻中的内接法、外接法等。

环境误差: 温度、湿度、杂散电磁场等对测量的影响。

上述诸多因素, 按性质可分为两种: 一种是在一定实验条件下对测量结果引起的偏差可用非统计量进行评定。如恒偏大、偏小或呈周期性变化等。这类偏差单纯提高测量次数不能减小, 即前面所说的系统误差, 称为 B 类不确定度, 用 U_B 来表示。主要由仪器误差 $U_{\text{仪}}$, 理论误差 $U_{\text{理}}$, 人为误差 $U_{\text{人}}$ 等, 一般情况下可认为它们彼此独立, 构成了 B 类不确定度的 N 个分量, U_{B_i} ($i=1, 2, \dots, N$)

$$U_B = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_{B_i}^2} \quad (1.2-8)$$

了解这类不确定度,是为了通过改进、修正,尽量减小这类因素的干扰,提高测量精度。在物理实验中尽管有多方面的因素存在,作为基本训练,一般情况下,我们只考虑仪器误差这一项,即:

$$U_B = U_{\text{仪}} \quad (1.2-9)$$

另一种可归结为大量的、微小的干扰的合成,使测量结果产生的随机波动,即前面提到的偶然误差。它要用统计的方法来评定,称之为 A 类不确定度,用 S 来表示。主要由仪器精度 $S_{\text{仪}}$, 实验环境 $S_{\text{环}}$ 等因素造成,构成 S 的各个分量,即

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^M S_i^2} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1.2-10)$$

在物理实验中,只用 S_x 作为 S 的主要部分加以考虑,即

$$S = S_x \quad (1.2-11)$$

测量结果的总的不确定度应为

$$U = \sqrt{S^2 + U_B^2} \quad (1.2-12)$$

将 (1.2-9)、(1.2-11) 代入有

$$U = \sqrt{S_x^2 + U_{\text{仪}}^2} \quad (1.2-13)$$

§ 1.3 数据处理

正确地使用仪器,正确地记录有效数字,往往还不能直接反映出所研究的物理运动规律,特别是对实验结果的可靠程度(或不确定度)需作出较客观的评价,这就是数据处理要解决的问题。按测量结果的类型,数据处理分为以下三个部分。

1.3.1 直接测量量的数据处理

直接测量量的特点是,测量值就是实验结果,由于误差的性质,多次测量可以减小实验过程中的偶然误差。所以在多数情况下,对 X 这个待测量的测量,是在相同测量条件下的多次重复等精度测量,得 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 一组数据。这组数据满足统计规律,应进行以下步骤的处理。

1. 平均值计算

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.3-1)$$

从统计意义上讲, $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \mu$ (x 的真实值), 即 $\bar{x}$ 是 μ 的无偏差估计值。所以, 在 n 次测量过程中得到的平均值 $\bar{x}$, 可作为待测量 X 的最佳估计值。

2. 标准差计算

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.3-2)$$