

21世纪高等学校规划教材

WULI SHIYAN
JIAOCHENG

物理实验教程

黄金华 许星光 崔玉广 主编



化学工业出版社

21 世纪高等学校规划教材

物理实验教程

黄金华 许星光 崔玉广 主编
徐铁军 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是辽宁石油化工大学物理实验中心在长期实验教学的基础上结合教学内容和课程体系改革成果编写而成的。

在编写时,根据物理学的发展和教学的需要,结合实验室开放和分层次教学模式,将实验内容分为基础实验、提高型实验、近代及综合实验、设计性与研究性实验五个层次,并编入了一些重要、基本的近代物理实验的内容,突出实验与应用的有机结合。在实验内容的安排上,大多数实验都含有“必做内容”和“选做内容”部分,还有部分实验安排了“拓展实验”的内容,以适应不同专业、不同层次学生的要求,有利于学生个性发展和优秀学生的深造。增加了设计性与研究性实验内容,着重培养学生查阅查找资料能力、实验过程的设计能力以及对实验结果进行分析和研究的能力,激发学生的创新精神。

本书可作为高等工科院校相关专业的普通物理实验教材或教学参考用书,并适合不同层次的教学需要。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程/黄金华,许星光,崔玉广主编.
北京:化学工业出版社,2010.3
21世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-122-07613-7

I. 物… II. ①黄…②许…③崔… III. 物理学-
实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第007250号

责任编辑:唐旭华
责任校对:战河红

文字编辑:宋湘玲 叶晶磊
装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张20 $\frac{3}{4}$ 字数560千字 2010年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:35.00元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编 黄金华 许星光 崔玉广

副 主 编 刘凤智 裴芳芳 郭 红
 赵 杰 陈西园

编写人员（按姓氏笔画排序）

王 莉	任万彬	刘凤智	李向荣	时迎国
许星光	陈西园	张艳华	郭 红	赵 杰
郝久清	崔玉广	黄金华	裴芳芳	

前言

本书是根据石油石化类院校的特点，为培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才，在结合我校多年教学实践的基础上，经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善并吸取其他许多兄弟院校的宝贵经验编写而成的。

在物理学发展过程中，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科院校学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它以其“动脑与动手，理论与实际的有机结合”在人才的素质和能力的培养中发挥着重要作用。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，培育学生的创新精神、创新能力方面，都起着重要的作用。为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。

考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点，对于基础实验，编写时力求将实验原理叙述清楚，计算公式推导完整，使学生在预习时掌握理论依据；实验内容与实验步骤亦尽可能具体，以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导。对于常用仪器安排在多个实验中反复使用，使学生能正确熟练地掌握这些常用仪器的调节和使用方法。大部分实验都含有“必做内容”、“选做内容”和“实验拓展”，鼓励学有余力的优秀学生选做。对于近代及综合实验，有的重点放在新概念、新思路或原理的阐述上；有的则不过分强调理论的完整，而将主要内容放在实验方法和实验技巧的指导上。对于设计性、研究性实验，要求学生学会自己查找和阅读各种参考材料，在此基础上，根据一定的要求，自行选择实验仪器、设计实验步骤、观察和记录实验现象和数据、研究实验过程中发现的种种问题，最后完成实验。虽然这种实验一般要花费较多的时间，而且往往要经历某种失败，甚至多次的失败，但确是培养学生独立从事科学研究工作能力特别是创新能力所必需的。

实验教材离不开实验室的建设和发展，经过几十年的教学实践，做过多次调整、更新和扩充，我们才达到了目前的规模 and 水平。这里面凝聚了教师和实验技术人员的智慧和劳动，是物理教学实验中心近年来教学改革成果的体现，实际上是一项集体创作。

参加本书编写的是辽宁石油化工大学物理实验中心教师和技术人员。参编作者分工如下：陈西园（绪论，误差理论及实验数据处理，2.6、2.7、2.12、3.1、3.12、4.7、5.6、5.7），刘凤智（2.1、2.5、2.13、2.15、3.3、3.7、4.9、4.10、5.11、5.12），赵杰（2.16、4.3、4.11、4.12、4.13、4.14），崔玉广（2.2、2.14、2.17、3.13、4.6、4.19、5.8、5.9），裴芳芳（2.8、2.10、3.4、3.8、3.9、4.2、4.4），黄金华（3.2、3.5、4.5、5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.10、5.13、5.14），许星光（2.9、2.11、4.15、4.16、4.17），郭红（2.3、2.4、3.6、4.8）。王莉、任万彬、李向荣、时迎国、张艳华、郝久清等老师也参加了本书的编写工作。全书由徐铁军主审。

由于水平有限，本书不妥之处在所难免，恳请读者和专家批评指正。

编 者

2009年11月

目 录

0 绪论	1	3.13 三棱镜顶角和最小偏向角的测量	156
0.1 物理实验课及学生的实验修养	1	4 近代及综合实验	163
0.2 怎样进行普通物理实验	2	4.1 光敏传感器的光电特性测量实验	163
0.3 物理实验学生守则	3	4.2 光电效应测定普朗克常数	170
1 误差理论及实验数据处理	5	4.3 夫兰克-赫兹实验	176
1.1 实验误差与不确定度评定	5	4.4 液晶的电光效应	182
1.2 物理实验数据处理的基本方法	20	4.5 太阳能电池的基本特性测定实验	192
1.3 基本测量方法和实验方法及基本实验 操作技术	28	4.6 阿贝成像原理和空间滤波	196
2 基础实验	32	4.7 密立根油滴法测电子电量	201
2.1 电学实验基础知识	32	4.8 冰箱模拟实验	208
2.2 长度和质量的测量	38	4.9 霍尔效应法测磁场	211
2.3 介质介电常数的测定	41	4.10 电子射线和场的研究	213
2.4 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	44	4.11 核磁共振	219
2.5 示波器的使用	47	4.12 光纤转速传感器实验	224
2.6 用拉脱法测液体的表面张力系数	54	4.13 综合传感器实验(一)	227
2.7 用牛顿环测透镜的曲率半径	59	4.14 综合传感器实验(二)	232
2.8 分光计的调节和应用	62	4.15 温度传感技术综合实验	237
2.9 固体线胀系数的测定	67	4.16 数字信号光纤传输技术实验	241
2.10 扭摆法测定物体的转动惯量	69	4.17 音频信号光纤传输技术实验	247
2.11 弦驻波实验	73	4.18 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	252
2.12 落球法测定液体的黏度	75	4.19 高级光学干涉组合实验	257
2.13 惠斯登电桥测电阻	77	5 设计性与研究性实验	266
2.14 透镜焦距的测定	82	5.1 三个探讨性实验	266
2.15 用电位差计测电动势	86	5.2 “碰撞打靶”实验中能量损失的 分析	268
2.16 冷却法测量金属的比热容	90	5.3 奇妙的红汞水——散射光研究	270
2.17 伏安法测电阻及补偿法测电压	93	5.4 “风洞”实验	271
3 提高型实验	97	5.5 太阳能电池基本特性的测量	272
3.1 旋光率的测量	97	5.6 液体黏滞系数与温度关系的研究	274
3.2 音叉的受迫振动与共振实验	100	5.7 迈克尔逊干涉仪的深入研究	277
3.3 电表的改装与校准	105	5.8 设计和组装望远镜	279
3.4 热电偶温差电动势的测量	109	5.9 设计和组装显微镜	281
3.5 碰撞打靶实验	115	5.10 浮水硬币实验——表面张力研究	284
3.6 速度、加速度和重力加速度的测量	119	5.11 RLC 电路稳态特性的研究	286
3.7 霍尔效应实验	126	5.12 RLC 电路暂态特性的研究	289
3.8 声速的测量	131	5.13 数字电表原理及万用表设计与组装 实验	293
3.9 光电管特性的研究	138	5.14 计算机实测物理实验	301
3.10 交流电桥的原理和应用	141	附录	320
3.11 铽化钕磁电阻传感器的测量及应用	148	附录 A 常用物理数据	320
3.12 偏振光现象的研究	152	附录 B 铜-康铜热电偶分度表	325

0 绪 论

0.1 物理实验课及学生的实验修养

0.1.1 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，二是科学实验。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、反复的观察和测试，探索其内部的规律性。这种对自然有目的、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。要处理好实验和理论的关系，重视科学实验，重视进行科学实验训练的实验课教学。

0.1.2 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。在物理学发展过程中，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。

0.1.3 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、提高能力的。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。

0.2 怎样进行普通物理实验

普通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像书本教学那样,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几个基本环节。

(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),在此基础上在实验报告纸上写好预习报告。回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下几个方面:实验者信息;实验名称;目的与要求;实验原理;实验方法(或步骤);列出数据记录表格;回答预习思考题。

关于“实验者信息”,一定要写明学院、系、班级、姓名以及具体实验时间,以便记录成绩。

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”,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。应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,要列出有关测量的计算式及条件和将要被验证的规律,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件;要给出原理图、光路图、电路图(一般不必画实物图)。

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测量数据,表格设计合理、简单明了,重点考虑如何能完整地记录原始数据并揭示相关量之间的函数关系。

(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。在实验报告上应写明实验编号。切勿将数据随意记录在草稿纸上,不可事后凭回忆“追加”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采用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,最起码应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论正确。报告应给予别人以清晰的思路、见解和新的启迪才算得上一份成功的报告。报告除预习已经完成的部分外,还应该包括:数据记录、数据处理与结果讨论等几个部分。

关于“数据处理与结果讨论”,要求给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。

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,实验验证是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。而得到的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。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。往往有些学生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。

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才。

(4) 实验课的网上预订

我校的物理实验中心已经实现了开放,因此每个同学的上课时间和每节课要完成的实验项目,同学们可以自由选择,通过网上预订来实现。同学们要根据物理实验中心在网上公布的实验项目、时间以及实验室,在开课前及时选择预约,并记好自己已经定下的实验时间、实验地点和实验项目,做到及时预习,按时上课,一定不要遗忘。

0.3 物理实验学生守则

① 要爱护实验室一切公物,保持实验室安静、整洁,遵守纪律。

② 上实验课应提前 10min 到实验室。不迟到,不早退,不旷课。迟到超过 20min 的学生,教师有权中止本次实验。

③ 实验前要仔细检查所用实验仪器是否齐全、完好。如果有缺损,要及时报告教师处理,不得擅自搬弄其他组仪器。

④ 做实验时,要严格遵守所用仪器的操作规程和注意事项,不得擅自拆仪器,以防发生人身事故和仪器损坏。对违反操作规程而损坏仪器的学生,教师按学校有关规定处理。

⑤ 因故旷课的实验者,病假凭医院诊断书,事假凭主管学院证明(书记签字),在一周内与教师联系,经确认后,由中心统一安排补选补做实验。

⑥ 课前要认真预习,要写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验。学生做完实

验后，要将实验的原始数据填写到数据表格中（原则上不准用铅笔）交教师审阅，教师签字后，学生应负责将仪器整理还原并安放整齐，搞好周围的环境卫生后方可离开实验室。课后要及时写好实验报告，在一周内交指导教师。

⑦ 在实验过程中，对严重违反实验纪律和伪造实验数据者，实验成绩按 0 分记，教师有权中止本次实验。

1 误差理论及实验数据处理

1.1 实验误差与不确定度评定

1.1.1 有效数字及其运算

(1) 有效数字的读取

物理实验离不开测量。所谓测量，是用合适的工具或仪器，通过科学的方法，将反映被测对象某些特征的物理量（被测物理量）与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程，其比值即为被测物理量的测量值。

测量分为直接测量和间接测量。直接测量就是直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值；而间接测量就是利用直接测量的量与被测量之间的函数关系，求得被测物理量。在进行直接测量时，计量器具直接给出测量结果测量值。测量值应由两部分组成，即读数值（有效数字）+单位，而有效数字也应看作由两部分组成，即可靠数字+可疑数字。

在实验中得到到的被测量值都是含有误差的数值，对这些数值的尾数不能任意取舍，否则影响测量的精确度。在一般情况下，读数值（有效数字）的最后一位为可疑数，在特殊情况下可疑数不超过两位，再多就没有意义了。本门课程规定：在测量结果的最后表述中，可疑数只取一位。定义：由测量结果的第一位非零数起至最后一位可疑数止的全部数字，统称为测量结果的有效数字。正确地书写有效数字可以粗略地反映测量的可靠程度。例如用最小分度为1mm的钢尺测量某物体的长度，正确的读法是除了确切地读出钢尺上该刻线的位数外，还应估计一位数字，即读到0.1mm量级。比如，测出某物的长度是12.4mm，这表明12是确切数字，而最后的4是估计的，是不可靠的，是可疑数字。实验测量数值和纯数学上的数值是有区别的。数学上的数字是不考虑有效数字的，如数学上 $12.3=12.30$ ，而在测量中，12.3与12.30是有差别的，前者是三位有效数字，后者是四位有效数字，它反映了测量的不同精度。

应当指出，测量结果第一个（最高位）非零数字前的“0”不属于有效数字，而非零数字后的“0”都是有效数字。前者只反映了测量单位的换算关系，与有效数字无关。例如，0.0125m是3位有效数字，不应理解为5位有效数字，它与1.25cm实际上是一回事。而非零数字后的“0”则反映了测量的大小和精密度，如1.09cm是3位有效数字，而1.0900cm是5位有效数字；1.09cm说明量具可以精确到0.1cm，0.09cm是估计值；而1.0900cm说明量具可以精确到0.001cm，而估计值为0.0000cm，它的测量精度要高得多。

有效数字与测量条件密切相关，它的位数由测量条件和待测量的大小共同决定。一定大小的量，测量精度越高，有效数字位数越多；而测量条件一定时，被测量越大，有效数字位数越多。

写有效数字要注意以下的要点。

① 测量时，一般必须在仪器的最小分度内再估读一位，若读数正好与某刻度对齐，则应该在相应估读位上记为“0”。但也有例外，如用最小分度为0.02mm的游标卡尺测长度时，只读到0.02mm。然而当被测量过于粗糙时，甚至不应读到分度值所在位。

② 有效数字的位数与小数点位置无关, 单位的 SI 词头改变时, 有效数字的位数不应发生变化。例如, 重力加速度 980cm/s^2 , 改变 SI 词头时可记为 9.80m/s^2 , 若记为 9.8m/s^2 , 则是不同的, 前者是三位有效数字, 后者是两位有效数字。若写为 0.00980km/s^2 , 则有效数字位数仍为三位。数值前表示小数点定位所用的“0”不是有效数字, 有效数字应从非“0”的第一个数字算起, 而数值后面的“0”则是有效数字, 不能去掉。

③ 为表示方便, 特别是对较大或较小的数值, 常用 $\times 10^{\pm n}$ 的形式 (n 为一正整数) 书写, 这样可避免有效数字写错, 也便于识别和记忆, 这种表示方法叫科学记数法。用这种方法记数时, 通常在小数点前只写一位数字。

(2) 有效数字的修约规则

在表述测量结果时, 由于数据截断, 还存在一个尾数的舍入问题。一般规定对测量值尾数的舍入原则是: “四舍、大于五入、逢五凑偶”, 即小于 5 者舍, 大于 5 者入, 等于 5 则把尾数凑成偶数。

① 测量数据中打算舍弃的最左一位数字小于 5 时, 则舍去, 欲保留的各位数字不变。例如数据 3.0649, 取三位有效数字时为 3.06。

② 测量数据中打算舍弃的数字的最左一位数字大于 5 (或等于 5 而其后跟有非全部为 0 的数字时), 则应进一, 即保留数字的末位加 1。如 3.06501 取两位有效数字时为 3.1, 取三位有效数字时为 3.07, 取四位有效数字时为 3.065。

③ 测量数据中打算舍去的最左一位数字为 5, 而它后面无数字或全部为 0 时, 若所保留数字的末位为奇数, 则进一, 为偶数或 0, 则舍弃。如数据 3.1050 取三位有效数字为 3.10。

④ 负数修约时, 先将它的绝对值按上述①、②、③规定进行修约, 然后在修约值前加上负号。

(3) 有效数字的运算法则

由于测量误差的存在, 直接测得的数据只能是近似数, 通过这些近似数求得的间接测量值也是近似数。几个近似数的运算可能会增大误差。为了不因计算而引进误差, 同时为了使运算更简洁, 对有效数字的运算作如下规定。

① 加减运算 先找出各数中的可疑数最靠前的, 以此数的最后一位数的位置为标准, 对其他数进行取舍, 但在运算过程中可多保留一位。

例如, $N=A+B+C-D$, 设 $A=5472.3$, $B=0.7536$, $C=1214$, $D=7.26$, 可疑数最靠前的是 C 。这就是说, 误差发生在个位数上。因此, N 的有效数字取至个位数 (与 C 相同) 即可。为了避免因中间运算造成的“误差”, 上例中的 A 、 B 、 C 、 D 均应保留小数点后面一位, 算出结果后再与 C 看齐, 即:

$$N=5472.3+0.8+1214+7.3=6694$$

② 乘除运算 先找出参与运算的有效数位最少的数据, 以它的有效数字位数为标准, 简化参与运算的其余各数的有效数字, 一般比标准多保留一位, 常数应多保留两位。运算结果的有效数字位数一般与作标准的数据位数相同。

例如 $N=\frac{ABC}{D}$, 设 $A=80.5$, $B=0.0014$, $C=3.08326$, $D=764.9$, 则 B 是其中有效数字最少的 (2 位), 在运算过程中, 所有其他分量保留有效数字比它多一位, 算得结果后再按它的位数来截取。对上例, 结果为:

$$N=\frac{ABC}{D}=\frac{80.5 \times 0.0014 \times 3.08}{765}=4.5 \times 10^{-4}$$

如果考虑到某些特殊情况, 有时还需再多保留一位有效数字比较保险, 因此补充规定:

如最后结果的第一位数是 1、2、3，则在上述原则的基础上可多保留一位。设上例的 A、C、D 不变， $B=0.0070$ ，则应写成：

$$N = \frac{ABC}{D} = \frac{80.5 \times 0.0070 \times 3.08}{765} = 2.27 \times 10^{-3}$$

③ 其他运算 乘方、开方的有效数字与底数的有效数字位数相同。

对数函数计算结果的小数点后面的位数与真数的有效数字位数相同。

指数函数运算后的有效数字的位数与指数的小数点后的位数相同， $10^{6.25} = 1.8 \times 10^6$ ， $10^{0.0035} = 1.008$ 。

三角函数一般角度的末位的单位分别为 $1'$ 、 $10''$ 、 $1''$ ，有效数字位数分别取四、五、六位。例如， $\sin 30^\circ 00' = 0.5000$ 。

对参与运算的一些特殊的准确数或常数，如倍数 2，测量次数 n ，常数 π 、 e 等，2、 n 没有可疑成分，不受有效数字运算规则限制； π 、 e 等常数的有效数字位数可任意取，一般与被测量的有效数字位数相同。

(4) 小结

① 有效数字最后一位为可疑数，并把结果按科学计数法表出。

② 有效数字的运算法则是一种粗略但实用上经常遇到的问题，应当熟练掌握。

第一，加减法运算以参加运算各量中有效数字最后一位位数最高的为准并与之取齐。

第二，乘除法运算以参加运算各量中有效数字最少的为准，所得结果原则上与有效数字最少的相同，当结果第一位数是 1、2、3 时，可多取一位。

第三，混合四则运算按以上原则按部就班执行。

第四，其他函数运算根据上面所述原则处理。

各种运算都可以根据不确定度决定有效数字的原则，通过微分公式按“保险”情况处理。不确定度的概念，请参看下面有关内容。

③ 为了防止数字截断后运算引入新的“误差”，在中间过程，参与运算的物理量应多取一位有效数字（常数也按此处理）。

【练习题】

按照有效数字的定义及运算规则，改正以下错误：

① $28\text{cm} = 280\text{mm}$;

② $2500 = 2.5 \times 10^3$;

③ $0.0221 \times 0.0221 = 0.00048841$;

④ $\frac{400 \times 1500}{12.60 - 11.6} = 600000$;

⑤ $a = 0.0025\text{cm}$ ， $b = 0.12\text{cm}$ ，则 $ab = 3 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ ， $a + b = 0.1225\text{cm}$ 。

1.1.2 测量与误差

物理实验离不开测量。例如，用直（钢板）尺去测量某钢丝的长度，把直尺作为标准的长度量具，使钢丝伸直与之对齐，并记录钢丝两端相应的读数之差就是所需要的结果，但每个从事过测量工作的人几乎都会认识到：由于用作比较标准的直尺本身不准、普通直尺在毫米以下尾数难以读出、钢丝两端不能和直尺严格对齐、环境对测量的影响等原因，钢丝的实际长度和测量结果并不完全一致，即存在误差。作为一个测量结果，不仅应当提供被测对象的量值大小和单位，还应该对量值本身的可靠程度做出判断。不知道可靠程度的测量值是没

有多大意义的。因此分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中可能的误差做出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。为此必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

(1) 真值和误差

为了对测量及误差作进一步的讨论，引入有关真值和误差的一些基本概念。

真值：被测量在其所处的确定条件下，客观上所严格具有的量值。

误差：测量值与真值之差。记为：

$$\Delta N = N - A$$

式中 N ——测量结果（给出值）；

A ——被测量的真值；

ΔN ——测量误差，又称绝对误差。

真值是客观存在的，但它是一个理想的概念，在一般情况下不可能准确知道。通常用多次测量的平均值来表示测量的结果，称为最佳估计值。然而在有些具体问题中，真值实际上可以认为是已知的。例如，为了估计用伏安法测电阻的误差，可以用可靠性更高的电桥测量结果作为真值。这种以给定为目的、能代替真值的量值，常被称为约定真值。

按照定义，误差是测量结果与客观真值之差，它既有大小又有方向（正负）。由于真值在多数情况下无法知道，因此误差也是未知的，只能进行估计。

误差与真值之比称为相对误差。考虑到一般情况下，测量值与真值相差不会太大，故可以把误差与测量值之比作为相对误差。

偏差：在一般情况下真值不可能准确知道，在多次测量中通常用多次测量的平均值（最佳估计值）来表示测量的结果。我们把任意一个测量值与测量最佳估计值的差称为偏差。

(2) 误差的分类

误差按其特征和表现形式可以分为两类：系统误差和随机误差。为便于理解，从两个具体的例子着手讨论。

例如，用天平称量物体的质量。由于制造、调整及其他原因，天平横梁臂长不会绝对相等，因此测量结果与真值会产生定向的偏离。如果左臂比右臂短，当待测物体放在左盘时，称量的结果将偏小；反之则偏大。

再如，用停表测单摆周期。尽管操作者作了精心的测量，但由于人眼对单摆通过平衡位置的判断前后不一，手计时响应的快慢不均匀以及来自环境、仪器等造成周期测量微小涨落的其他因素，测量结果呈现出某种随机起伏的特点。表 1.1.1 给出了测量 50 个周期的 6 组数据。

表 1.1.1 单摆周期测量记录

测量次数	1	2	3	4	5	6
50T	1'49"70	1'50"02	1'49"83	1'50"12	1'49'93	1'49"78

把类似第一个例子的误差称为系统误差，类似第二个例子的误差称为随机误差。

① 系统误差 在同一被测量的多次测量过程中，保持常数或以可以预知的方式变化的那一部分误差为系统误差。系统误差的特点是它的确定规律性。这种规律性可以表现为定值的，如天平的标准砝码不准造成的误差；可以表现为积累的，如用受热膨胀的钢尺进行测量，其指示值将小于真实长度，误差随着待测长度成比例增加；也可以表现为周期性的，如测角仪器中主刻度盘中心不重合造成的偏心差；还可以表现为其他复杂规律。系统误差的确定性反映在：测量条件一经确定，误差也随之确定；重复测量时，误差的绝对值和符号均保

持不变。因此,在相同实验条件下,多次重复测量不可能发现系统误差。

对操作者来说,系统误差的规律及其产生原因可能知道,也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差,称为可定系统误差;对大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以清除或在测量结果中进行修正;而后者在测量过程中也应采取措施尽量予以清除或减小它的影响,并且估计出它的极限范围。

② 随机误差 在实际测量条件下,多次测量同一量时,以不可预知的方式变化的那一部分误差为随机误差。随机误差的特点是它出现的随机性。在相同条件下,每次测量结果的误差其绝对值和符号以不可预定的方式变化,显示出没有确定的规律性;但就总体而言,它服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定条件下,通过多次重复测量来发现它。

随机误差的处理可以从它所服从的统计分布规律来讨论。系统误差和随机误差是两种不同性质的误差,但它们又有着内在的联系。在一定的实验条件下,它们有自己的内涵和界限;但当条件改变时,彼此又可能互相转化。例如,系统误差与随机误差的区别有时与空间和时间的因素有关。测量温度在短时间内可保持恒定或缓慢变化,但在长时间中却是在某个平均值附近作无规律变化,因此,由于温度变化造成的误差在短时间内可以看成是系统误差,而在长时间内则作随机误差处理。技术的发展和设备的改进使有些造成随机误差的因素能够得到控制,某些随机误差就可确定为系统误差,并得到改善或修正,而有些规律复杂的未定系统误差也可以通过改变测量状态使之随机化,这种系统误差又可当作随机误差处理。事实上,对那些微小的未定系统误差,很难做到在测量时保证其确定的状态,因此它们就会像偶然误差那样,呈现出某种随机性。事物的内在统一性使我们有可能用统一的方法对它们进行计算和评定。

还有一种误差是由于测量系统偶然偏离所规定的测量条件和方法或在记录、计算数据时出现失误而产生的,称为粗大误差,简称粗差。它实际上是一种测量错误。对这种数据应当予以剔除。需要指出的是,不应当把有某种异常的观察值都作为粗大误差来处理,因为它可能是数据中固有的随机性的极端情况。判断一个观察值是否为异常值时,通常应根据技术上或物理上的理由直接作出决定;当原因不明确时,可用统计方法处理。对此,本教材没作介绍,必要时可参阅有关误差理论书籍。

1.1.3 正态分布

(1) 正态分布

多数随机误差服从正态分布,它是由于众多的、不可能由测量条件控制的微小因素共同影响所造成的。对这种误差,有比较完整的处理方法。但由于数学上的原因,将只限于介绍它的一些主要特征和结论。

做测定单摆周期的实验,并且次数足够多(例如 $k=64$),得到如表 1.1.2 所示的一组数据,把它画成 $K_i/K-T_i$ 曲线(图 1.1.1)。其中, K 是测量的总次数, K_i 是在 k 次测量中周期为 T_i 的次数(频数)。从图 1.1.1 可以看出,每次测量的周期尽管各不相同,但总是围绕着某个平均值($T_0=2.1983$)而起伏,起伏本身虽具有随机性,但总的趋势是偏离平均值越远的次数越少,而且偏离过远的测量结果实际上不存在。在分布直方图下,总面积为 1 ($\sum K_i/K=1$)。如果再增加测量次数,图形也将发生变化,从细节上看,似乎这种变化是随机的;但从总体上看,却具有某种规律性,即有确定的轮廓(包络)。从理论上讲,对这类实验,无法预言下一次测量结果的确切数值,但从总体上把握结果取某个测量值的可能性(概率)有多大。

表 1.1.2 单摆周期测量数据的统计

周期 T_i/s	2.194	2.195	2.196	2.197	2.198	2.199	2.200	2.201	2.202	2.203	2.204
频数 K_i	1	3	6	10	14	11	8	4	3	2	1
频率 K_i/K	0.0156	0.0469	0.0938	0.1562	0.2188	0.1719	0.1250	0.0625	0.0469	0.0312	0.0156

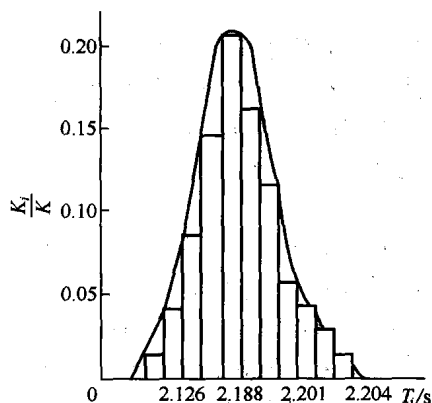


图 1.1.1 周期测量分布

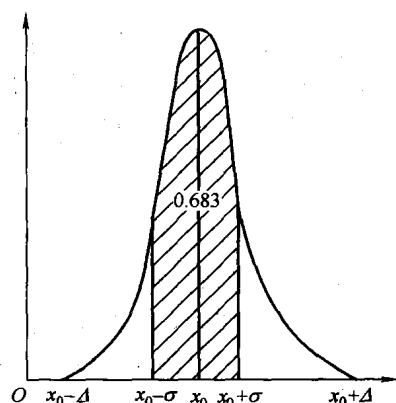


图 1.1.2 正态分布

如果观测量 x 可以连续取值, 当测量次数 $k \rightarrow \infty$ 时, 其极限将是一条光滑的连续曲线 (图 1.1.2)。由误差理论知道, 绝大多数的随机误差满足的概率分布是如图 1.1.2 所示的正态 (高斯) 分布。在消除了系统误差以后, x_0 对应的就是测量真值 A 。服从正态分布的随机误差具有下列特点。

单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大, 当 $x=A$ 时, $P(A)$ 为极大值;

对称性: 大小相等而符号相反的误差出现的概率相同, $P(A - \Delta x) = P(A + \Delta x)$;

有界性: 在一定测量条件下, 误差的绝对值不超过一定限度, $[P(x)]_{x > A + \Delta}$ 和 $[P(x)]_{x < A - \Delta} \approx 0$;

抵偿性: 误差的算术平均值随着测量次数 k 的增加而趋于零, 即:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta x_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - A) = 0 \quad \text{或} \quad \int_{-\infty}^{\infty} (x - A) P(x) dx = 0$$

测量结果的概率分布曲线提供了测量及其误差分布的全部知识。曲线越“瘦”, 说明测量的精密度越高; 曲线越“胖”, 则说明精密度越低。测量结果落在 $x_1 - x_2$ 区间内的可能性 (概率) 是 $\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx$, 把它称为置信概率。如果测量的误差限为 $\pm \Delta$, 则:

$$\int_{x_0 - \Delta}^{x_0 + \Delta} (x - A) P(x) dx \approx 1$$

(2) 标准误差和置信概率

直接测量通常得到的是一组含有误差的数据。如何从这组数据中给出误差的最佳估计值呢? 从误差理论知道, 测量系统随机误差分布的基本特征可以用标准误差的平方 σ_x^2 来描述 (σ_x^2 称为方差):

$$\sigma_x^2 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - A)^2 \quad (1.1.1)$$

式中 A ——真值;