



高职高专“十一五”规划教材



物理学实验

● 葛宇宏 主编
● 徐建中 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

物 理 学 实 验

葛宇宏 主编

毛全宁 刘贤荣 副主编

徐建中 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是和徐建中主编的《物理学》配套发行的物理学实验教材。

本书在简要介绍测量误差和数据处理、物理实验基本设备的使用、实验测量技术与方法等内容的基础上,选编了35个有关力学、热学、电磁学、光学和近代物理学等方面的实验,分为基础性实验、综合性实验和设计性实验。每个实验包括有实验目的、预习思考题、实验原理、实验仪器、实验步骤、注意事项、数据记录与处理、思考题等内容。

本书可作为高职高专化工、机电、工程等工科类专业物理学实验教材,亦可作为职业大学、电视大学专科层次工科类专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理学实验/葛宇宏主编. —北京:化学工业出版社,
2007.8
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-00867-1

I. 物… II. 葛… 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112098号

责任编辑:张建茹 陈有华
责任校对:陈 静

文字编辑:林 媛
装帧设计:郑小红

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:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张11 $\frac{3}{4}$ 字数291千字 2007年8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:19.00元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是根据国家教委 1995 年颁布的《高等学校工程专科物理实验课程教学基本要求》、徐建中主编的《物理学》教材中列出的“大学物理实验目录”，结合高职高专工科专业设置特点和物理实验室基本实验设备的实际情况，在多年教学实践的基础上编写的。

本教材共分五章，第一章介绍了测量误差和数据处理；第二章介绍了物理实验基本设备使用、实验测量技术与方法；第三章至第五章分别为基础性实验、综合性实验和设计性实验。本书共选编了 35 个有关力学、热学、电磁学、光学和近代物理学等方面的实验。书末附录列出了物理量及其单位、有关的物理常数。

本教材内容适合高职高专院校教学特点，以培养学生实践能力、创新能力和提高教学质量为宗旨，在编写过程中，力求做到：对实验仪器的描述注重其结构原理，以提高学生使用仪器的能力，供学生自主学习和练习；基础验证性实验、设计性实验，在注重积累知识的基础上，还引导学生学会运用知识，锻炼学生的动手能力、训练学生的创新思维能力，适应新时期实施素质教育和培养创新人才的需要。在编写体系上，与传统实验教材相比更具有可读性，实验目的具体、突出，实验要求明确，实验原理叙述清楚，实验内容和步骤由详到简，所编入的实验都经过长期教学实践的锤炼。每个实验前有预习思考题、后有思考题，便于学生进一步分析讨论、巩固提高，能够使使学生得到比较全面而系统的训练。

本教材由葛宇宏主编，毛全宁、刘贤荣为副主编。其中，第二章，设计实验的实验技术，实验 9-II、实验 21、实验 27、实验 30、实验 31-I、实验 34、实验 35 由葛宇宏编写，并负责全书的统稿；实验 22-I、实验 25、实验 26、实验 28、实验 29 由郝杰编写；实验 3、实验 4-II、实验 9-I、实验 10、实验 11、实验 12、实验 13、实验 31-II、附录二由刘贤荣编写；绪论，第一章，实验 1、实验 2、实验 4-I、实验 5-I、实验 5-II、实验 16 由毛全宁编写；实验 6、实验 7、实验 8、实验 15、实验 20、实验 24 由魏樱编写；实验 5-III、实验 14、实验 17、实验 18、实验 19、实验 22-II、实验 23、实验 32、实验 33、附录一由曾文梅编写。本教材由《物理学》主编徐建中主审。教材在编写中参考了许多已出版的教材和资料，在此一并致谢。

本教材可作为高职高专工科类各专业物理实验教材，特别是化工、机电、工程类等工科专业，亦可作为职业大学、电视大学专科层次工科类相关专业的参考书。

鉴于编者学识水平所限，加之编写时间较紧，书中难免有不妥之处，敬请同行和读者批评、指正。

编者
2007 年 5 月

目 录

绪论	1
第一章 测量误差和数据处理	4
第一节 测量与误差	4
第二节 误差的分类	5
第三节 直接测量结果误差的估算	6
第四节 间接测量结果误差的计算	7
第五节 有效数字及其运算	8
第六节 数据处理的基本方法	12
第七节 用函数计数器处理数据	15
习题	15
第二章 物理实验基本设备使用	17
第一节 力学实验基本设备使用	17
第二节 热力学实验基本设备使用	22
第三节 电磁学实验基本设备使用	24
第四节 光学实验基本设备使用	30
第三章 基础性实验	35
实验 1 固体密度的测定	35
实验 2 气轨上测滑块的速度和加速度	37
实验 3 气轨上测简谐振动的周期	40
实验 4 测定刚体的转动惯量	42
实验 4-I 用三线摆测定刚体的转动惯量	42
实验 4-II 用扭摆测定刚体的转动惯量	46
实验 5 测金属材料的杨氏弹性模量	50
实验 5-I 用弯曲法测量横梁的杨氏弹性模量	50
实验 5-II 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	54
实验 5-III 用霍尔位置传感器测量金属材料杨氏弹性模量	57
实验 6 液体表面张力系数的测定	61
实验 7 落球法测定液体的黏滞系数	66
实验 8 示波器的使用	68
实验 9 用电桥测低电阻	73
实验 9-I 单臂电桥测电阻	73
实验 9-II 双臂电桥测低电阻	76
实验 10 线性与非线性电阻特性曲线测定	80

实验 11	薄透镜焦距测量	83
实验 12	用模拟法描绘静电场	87
实验 13	电位差计的使用	91
实验 13-I	线式电位差计的使用	91
实验 13-II	箱式电位差计的使用	94
实验 14	多用表的使用	96
实验 15	分光计的使用	99
实验 16	照相与印放技术	102
第四章	综合性实验	108
实验 17	简谐振动运动规律研究与弹簧劲度系数测量	108
实验 18	不良导体热导率的测量	111
实验 19	空气介质中声速的测量	114
实验 20	电表的改装和校正	119
实验 21	电子在电磁场中运动规律的研究	122
实验 22	霍尔效应测磁场的分布	131
实验 22-I	用霍尔元件测量电磁铁极间空隙内磁场分布	131
实验 22-II	用霍尔元件测量通电长直螺线管内的磁场分布	134
实验 23	电磁感应现象的研究	138
实验 24	用分光计测定棱镜的折射率	140
实验 25	光强分布的测定	142
实验 26	牛顿环测平凸透镜的曲率半径	147
实验 27	旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	150
实验 28	光电效应法测普朗克常数	154
实验 29	夫兰克-赫兹实验	159
实验 30	光学全息照相	164
第五章	设计性实验	169
设计实验的实验技术		169
实验 31	测重力加速度	172
实验 31-I	用单摆测重力加速度	172
实验 31-II	气轨上测重力加速度	173
实验 32	传感器原理的简单研究和实践	174
实验 33	简单电路连接训练与测试	175
实验 34	望远镜的组装	176
实验 35	用干涉法测微小量	178
附录		179
一、物理量及其单位		179
二、物理常数		180
参考文献		182

绪 论

一、物理实验的地位和作用

物理学是一门重要的基础科学，而物理实验则是物理学极为重要的组成部分。科学的理论来源于科学的实验，并受到科学实验的检验。物理学新概念、规律的发现和确立主要依赖于实验，物理学上的新突破也常常是基于新的实验技术和方法。许多物理学的理论，都是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法，并通过实验的检验而建立起来的。

在物理学的发展史上，伽利略用实验否定亚里士多德“力是维持物体运动的原因”的论断；麦克斯韦根据电磁学的实验定律建立电磁场理论，并预言了电磁波的存在，但这些也只有在赫兹进行了电磁波的实验后才被人们所公认。实验还是物理理论演变、发展的动力。20世纪初光电效应、黑体辐射等一系列的物理实验事实与经典理论发生了矛盾，导致了相对论和量子力学的产生。实验又是理论付诸于应用的桥梁。热核聚变理论指出，通过热核聚变可以获得巨大的能量，但是要想很好地利用它，还需要通过许多艰苦的实验才能实现。物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位，而且在推动其他自然学科、工程技术的发展中也起着重要的作用。特别在不少交叉学科中，物理实验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果。此外，物理实验还是众多高新技术发展的源泉。原子能、半导体、激光、超导和空间技术等最新的科技成果，都是与物理实验密切相关的。所以，物理实验教学不仅有助于学生真正理解和掌握物理学理论，而且是提高学生分析问题和解决问题能力的不可缺少的教学环节。物理实验教学可使学生在如何应用理论知识、实验方法和实验技术，解决科技问题方面得到必要的、基本的训练，对于培养学生严谨的科学作风、科学态度及辩证唯物主义世界观有着不可忽视的作用，尤其对于高职高专的学生来说，加强与改进物理实验教学是提高教学质量的关键措施之一。

1976年12月10日，丁肇中在斯德哥尔摩获得诺贝尔物理奖时的一段话，给予人们很大的启迪。他说：“我是在旧中国长大的，因此想借此机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性。中国有一句古话：‘劳心者治人，劳力者治于人’，这种落后的思想，对发展中国家的青年们有很大的害处。由于这种思想，很多发展中国家的学生都倾向于理论的研究，而避免实验工作。事实上，自然科学理论不能离开实验，特别是物理学是从实验中产生的”。

二、物理实验课的教学目的

- ① 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能，加深对物理现象和规律的认识。
- ② 学会常用物理仪器的调整及正确的使用方法。
- ③ 初步具备处理数据、分析结果、撰写实验报告的能力，为今后进行工程测量和工程实验打基础。
- ④ 培养学生对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风，以及遵守纪律的优良品德。

三、物理实验教学应注意的事项

1. 注重培养学生运用知识的能力

无论是验证性实验,还是设计性实验,实验目的不仅是积累知识,而且是让学生学会运用知识,锻炼学生的动手能力、训练学生创新思维能力。所以教师在实验教学过程中既要帮助学生解决疑难,又要避免指导过细和规定过死,应使学生逐步摆脱对教师的过分依赖,改变机械地按步骤做试验的学习方法。

2. 循序渐进、逐步提升学生的自主创新能力

高职教育突显的是实践技能教育。对学生实验能力的培养,应循序渐进、逐步提升学生的自主创新能力。开放物理实验室,让学生接触到尽可能多的实验,获得较多的实验知识;指导学生做好设计性实验,让学生充分发挥自己的实验能力,提高实验技能和设计实验的技术水平。安排学生参观一些具有时代科技水平的实验,让学生拓宽眼界、激发兴趣,引导学生对知识进行整合和对技术进行创新,提高学生的综合能力。

3. 因材施教

在实验中教师应该根据每个学生的实验能力,给予相应的指导,使不同程度的学生都能主动地进行学习,不断提高他们的实验能力。

4. 适时、按需更新实验设备

相关专业的实验教学内容应根据专业技术的发展,作相应的调整,在确保物理原理的基础上,尽可能地让学生掌握一些现代化的仪器和设备,以适应时代对人才培养的需求。

四、物理实验课的基本程序

物理实验课通常分下列三个阶段进行。

1. 实验前的预习

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容,学生在实验前必须做好预习工作。

① 认真阅读实验教材。明确实验内容的目的、要求、实验原理、测量对象和要观察的现象。对教材中提出的预习思考题和思考题要积极思考。对设计性实验,要根据实验具体要求,查阅有关参考资料。

② 熟悉实验中的新仪器。到“开放实验室”或在实验室开放时间,对照仪器实物,认真阅读教材中的仪器介绍或仪器使用说明书,弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等。特别是注意事项,不仅要仔细看,还要记住,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故。对仪器的构造,应尽可能地去理解、去想像。

③ 在预习的基础上,写好预习报告。其内容包括实验名称、实验目的、实验原理、实验中要观察的现象、电(光)路图和数据记录表格。此外,根据实验内容,准备好实验中所需的绘图工具、计算器等。

2. 实验操作

① 实验时应严格遵守实验室的规章制度。进入实验室不要急于动手,首先结合仪器实物,检查仪器设备有无缺损。不能擅自调换仪器。对照实验教材或仪器说明书,再次熟悉仪器的结构和使用方法;再次想一想实验的操作程序,怎样做更为合理,因为对于操作程序中某些关键步骤而言,哪怕是作微小改变,都有可能使实验前功尽弃。

② 安装和调整仪器。仪器的安装和调整是决定实验成败的关键一环。实验中应确保所有仪器都满足正常工作条件(如螺旋测微器的调零、天平调水平 and 平衡、光路调共轴等)。不重视仪器的调整而急于进行测量,是初学者易犯的毛病,应予纠正。

③ 实验测量应遵循“先定性,后定量”的原则。即先定性地观察实验全过程,确认整个实验装置工作是否正常,对所测内容做到心中有数。在可能的情况下,对数据的数量级和

走向作出估计之后，再定量地读取和记录测量数据。测量时，观测者应集中精力、细心操作、仔细观察，并积极发挥主观能动性，以获得所用仪器可能达到的最佳结果。

原始数据是宝贵的第一手资料，是以后计算和分析问题的依据，应按有效数字的规则正确记录。实验记录的内容应包括：日期、时间、地点、合作者、仪器的编号、名称和规格、原始数据及有关现象。

实验数据是否合理，学生应首先自查和整理，然后交给指导教师审查。对不合理的和错误的实验结果，应分析原因，及时补测或重做。离开实验室前，应自觉整理好仪器，并做好清洁工作。

3. 实验报告的书写

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。实验报告要求文字通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。

一份完整的实验报告应包括以下几个方面。

- (1) 实验名称 写明实验题目及实验者的姓名、班级、学号等。
- (2) 实验目的 简述实验要达到的目的。
- (3) 实验原理 应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要，必要的计算公式以及线路图、装置图必须写出。
- (4) 实验仪器 记录所用仪器的名称、规格、型号、数量等。
- (5) 实验数据列表及数据处理 原始测量数据一律要求以列表形式出现。数据处理只要写出根据计算公式得出的最后结果及误差并正确写出测量结果。
- (6) 实验结果和问题讨论 对实验过程和结果的讨论要具体深入，有分析、有见解，不要泛泛而谈。其内容一般不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，或是对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案提出改进意见。

应当指出，实事求是的科学态度和严肃认真的工作作风是科技工作者应具备的品德，在处理数据和书写实验报告时，严禁伪造实验数据。

第一章

测量误差和数据处理

一切物理量的测量都不可能是完全准确的,这是因为在科学技术发展和水平提高的过程中,人们的认识能力和测量仪器的制造精度都受到相应的限制,测量误差的存在是一种不以人们意志为转移的客观事实。当今误差理论及其应用已发展成为一门专门的学科。作为对学生进行科学实验基本训练的物理实验课程,必须赋予学生最基本的误差知识。为此,本章主要讲述:误差的基本概念、误差的估算方法、有效数字及其运算、数据处理的基本方法以及测量结果的正确表示。

第一节 测量与误差

一、测量

一切物理量都是通过测量得到的,在进行物理实验时,不仅要定性地观察所发生的物理现象,而且要定量地测量物理量的大小,找出物理量之间的定量关系,因此物理实验离不开对物理量的测量。测量就是将待测量与一个选作标准的同类量进行比较,其倍数即为该待测量的测量值。其数值的大小与选作标准的单位有关,对同一对象测量时,选用的单位越大,数值就越小,反之亦然。因此,在表示一个被测对象的测量值时,就必须包含测量值和单位两个部分。

根据《中华人民共和国计量法》,规定采用以国际单位制(SI)为基础的中华人民共和国法定计量单位,即以 m(米)——长度、kg(千克)——质量、s(秒)——时间、A(安培)——电流强度、K(开尔文)——温度、mol(摩尔)——物质的量、cd(坎德拉)——发光强度作为基本单位,其他量的单位都由这七个基本单位导出。

二、直接测量和间接测量

按照测量方法进行分类,测量可分直接测量与间接测量两大类。直接测量就是直接用仪器测出待测物理量的大小,例如用米尺测量物体的长度,用温度计测温度,用天平称量物体的质量,用电表测电流、电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、质量、电流、电压等称为直接测量值;在物理实验中,还有不少物理量不能或者不便于直接用仪器测出,而要根据可直接测量的物理量的数值,通过一定的函数关系计算出来,这种测量称为间接测量,例如,用千分尺测出钢球的直径 d ,然后根据公式 $V = \frac{1}{6}\pi d^3$,计算出钢球的体积等为间接测值。对于同一物理量,有时既可用间接测量测得,也可用直接测量测得,这在很大程度上取决于实验的方法和选用的仪器。用伏安法测量电阻是间接测量,而用多用电表的欧姆挡测量电阻值就成为直接测量了。

三、误差

1. 真值

不论是直接测量或间接测量,其最终目的都是要获得物理量的真值,所谓真值就是被测

量所具有的、客观的真实数值。然而实际测量时，总是由具体的观测者，通过一定的测量方法，使用一定的测量仪器和在一定的测量环境中进行的。由于受到观测者的操作和观察能力、测量方法的近似性、测量仪器的分辨力和准确性、测量环境等因素的影响，其测量结果和客观的真值之间总有一定的差异。

2. 误差

测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差，用 Δ 表示，即

$$\Delta = x - X \quad (1-1)$$

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中，虽然随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高，误差可能被控制得越来越小，但始终不可能完全消除，也就是说：真值是不可知的。我们测量的目的就是尽可能地接近真值。

第二节 误差的分类

一、误差按其性质和产生原因分类

误差按其性质和产生原因，可分为系统误差、偶然误差和疏失误差三种。

1. 系统误差

在相同的条件下多次测量同一物理量时，若误差的大小和正负总保持不变或按一定规律变化，这种误差称为系统误差，即带有系统性和方向性的误差。

(1) 产生系统误差的主要因素

① 测量系统、测量理论和测量方法的因素 如单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 是近似公式，伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

② 仪器的因素 如天平的两臂不等长，游标卡尺的零点不准确等。

③ 环境的因素 如温度、地磁场对测量的影响。

④ 人为的因素 如有的人读数有偏大（或偏小）的习惯，有的人按秒表时总是滞后。

(2) 系统误差的特点

① 有些是一定值，如游标卡尺的零点不准。

② 有些是积累的，如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时其测量值小于真值。

③ 有些是周期性，如停秒指针的转动中心与表面刻度的几何中心不重合，造成偏心差，其读数的误差是一种周期性的系统误差。

系统误差是测量误差的重要组成部分，发现、估计和消除系统误差，对一切测量工作都是非常重要的。因此观测者必须在测量前对影响结果的各种因素进行分析研究，预见、发现、估算、检验一切可能产生系统误差的来源，并设法予以消除或修正。

2. 偶然误差

在相同的条件下，多次测量物理量时，若误差的符号时正时负，其绝对值时大时小，没有确定的规律，这种误差称为偶然误差。

偶然误差的产生，取决于测量过程中一系列偶然因素的影响。其来源主要有：环境的因素，如温度、湿度、气压的微小变化等；观测者的因素，如瞄准、读数的不稳定等；测量装置的因素，如零件配合的不稳定性，零件间的摩擦等。

偶然误差的存在使得测量值时而偏大，时而偏小，看来似乎没有什么规律。但实际上，

偶然误差总是服从一定的统计规律。可以利用这种规律对实验结果作出偶然误差的误差估算。

3. 疏失误差

由于观测者使用仪器的方法不正确，实验方法不合理，读错数据，记错数据等原因，使得测量结果明显地被歪曲，由这些原因引起的误差称为疏失误差。只要观测者具有严肃认真的科学态度，一丝不苟的工作作风，疏失误差是可以避免的。

二、误差按其计算方法分类

误差按其计算方法分，可以分为绝对误差、相对误差、标准误差（方均根误差）和标准偏差等。

1. 绝对误差

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

2. 相对误差

$$E_r = \frac{|\bar{x} - X|}{X} \times 100\% \quad (1-3)$$

3. 标准误差（方均根误差）

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-4)$$

4. 标准偏差

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-5)$$

三、两类不确定度

误差是测量值与真值之差，而真值是无法知道的，所以误差也是不可能确定的，只能按某种方法估算出误差可能的范围。不确定度就是指由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度，是表征被测量的真值可能存在的范围的评定，是对测量结果可信赖程度的定量描述，一般用 Δ 表示，叫做总不确定度，其大小决定于偶然误差和系统误差的综合。总不确定度 Δ 从估计方法上也可分为两类：A 类不确定度是指多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A ；B 类不确定度是指用其他方法估计出的分量 Δ_B ，它们可用“方”、“和”、“根”的方法合成，即 $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$ 。

不确定度和误差是两个不同的概念，两者有本质的区别，不应混淆。误差是确定的，但又是未知的，所以误差只是一个理论值。不确定度是表示误差可能存在的范围，它的大小可以按一定的方法计算出来，在测量理论中及其误差分析中，都是讨论不确定度，但是对于高职高专的学生来说，只要求了解即可，还是习惯上讨论误差。

第三节 直接测量结果误差的估算

第二节讨论了误差的产生和分类，下面将讨论如何对直接测量结果的误差进行估计和计算。应当指出，在下面的讨论中，是在假定消除或修正了系统误差和没有疏失误差的理想前提下，研究偶然误差的问题。

1. 单次测量的误差估算

对于单次测量,偶然误差一般用仪器的误差来表示:选用仪器最小刻度的一半作为单次测量的偶然误差,因此,增加测量次数可以减小偶然误差,偶然误差是一种具有抵偿性的误差。

2. 多次测量的平均值作为最佳值

如上所述,增加测量的次数可以减少偶然误差,因此,在可能的情况下,总是采用多次测量。如果在相同条件下,对某物理量 x 进行了 n 次测量,其测量值分别是 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 根据误差的统计理论,在一组 n 次测量的数据中,算术平均值 $\bar{x}$ 最接近真实值,称为测量值的最佳值或近真值。由于测量的误差总是存在的,真值总是不能确切地知道,所以用算术平均值表示测量的结果,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-6)$$

3. 仪器的标准误差

测量是用仪器或量具进行的,有的仪器比较粗糙或灵敏度较低,有的仪器比较精密或灵敏度较高,但任何仪器均存在误差。把在规定的使用条件下,正确使用仪器时,仪器的示值和被测量的真值之间可能出现的最大误差称为仪器误差,以 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。

仪器误差一般由生产厂家在仪器铭牌或说明书中给出,也可由生产厂家给出仪器准确度级别,由所用仪器的量程和级别(或只用级别)算出。对于未说明仪器误差、又不知道准确度级别的仪器,可根据具体情况作出合理的估算,例如取仪器最小分度值作为仪器误差。

一般仪器误差遵从均匀分布的规律,由数学计算可得仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}}$ 为

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

第四节 间接测量结果误差的计算

一、间接测量的最佳测量值

前面讨论了直接测量结果及其误差的估算,但在实验中大多数物理量的求得,往往是由一些直接测得量通过一定的公式计算得到的。由直接测得量代入公式计算得到的结果,称为间接测得量。将各个直接测得量的最佳值(算术平均值)代入测量公式计算,得到的结果称为间接测得量的最佳值。当测量次数无限增多时,此最佳值与间接测得量的算术平均值是一致的。设间接测得量 N 是直接测得量 $A, B, C, \dots$ 的函数,即

$$N = F(A, B, C \dots)$$

则间接测得量的最佳值为

$$\bar{N} = F(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots) \quad (1-7)$$

二、标准误差的传递公式

由于各个直接测得量的最佳值都有一定的误差,因此,求得的间接测量结果也必然具有误差。表达直接测量误差与间接测量误差之间的关系式,称为误差传递公式。下面介绍标准误差的传递公式。

设间接测得量 $N = F(A, B, C \dots)$, 式中的 $A, B, C, \dots$ 为各自独立的直接测得量,

它们分别表示为 $A = \bar{A} \pm \sigma_A$, $B = \bar{B} \pm \sigma_B$, $C = \bar{C} \pm \sigma_C$, ..., 则间接测得量 N 表示为

$$N = \bar{N} \pm \sigma_N \tag{1-8}$$

式中, $\bar{N}$ 为间接测得量的最佳值, 即 $\bar{N} = F(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots)$; σ_N 为间接测得量的标准误差。经理论计算可以得到间接测得量的标准误差 σ_N 为

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \dots} \tag{1-9}$$

式(1-9)称为标准误差的传递公式。该式不仅可以用来计算间接测得量 N 的误差, 而且还可以用来分析各直接测得量的误差对最后结果误差的影响大小, 从而为改进实验指明了努力的方向。在设计某项实验时, 还能为合理地组织实验, 选择仪器提供必要的依据。

为使用方便, 将常用的标准误差传递公式列入表 1-1 以供查找。

表 1-1 常用运算关系的标准误差公式

运算关系	标准误差传递公式	运算关系	标准误差传递公式
$N = A + B$	$\sigma_N = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$	$N = A^n$	$\frac{\sigma_N}{\bar{N}} = n \frac{\sigma_A}{\bar{A}}$
$N = A - B$	$\sigma_N = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$	$N = \sqrt[n]{A}$	$\frac{\sigma_N}{\bar{N}} = \frac{1}{n} \times \frac{\sigma_A}{\bar{A}}$
$N = A \cdot B$	$\sigma_N = \sqrt{B^2 \sigma_A^2 + A^2 \sigma_B^2}$	$N = \sin A$	$\sigma_N = \cos \bar{A} \sigma_A$
$N = \frac{A}{B}$	$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{B^2} + \frac{A^2}{B^4} \sigma_B^2}$	$N = \cos A$	$\sigma_N = \sin \bar{A} \sigma_A$
		$N = \ln A$	$\sigma_N = \frac{\sigma_A}{\bar{A}}$

第五节 有效数字及其运算

测量不仅需要记录数据, 而且要进行数据的计算。由于任何测量都存在误差, 那么, 在直接测量被测物理量数值时应取几位数字? 在按函数关系计算间接测得量数值时又要保留几位数字呢? 这是实验数据处理中一个重要问题。

一、有效数字

为了正确地反映测量的精密程度, 引入有效数字的概念。把测量结果中可靠的几位数字加上可疑的一位数字统称为测量结果的有效数字。有效数字的最后一位虽然是可疑的, 但它在一定程度上反映客观实际, 因此它也是有效的。

从仪器上读出的数字, 通常都尽可能地估计到仪器最小刻度线以下一位。例如, 用最小

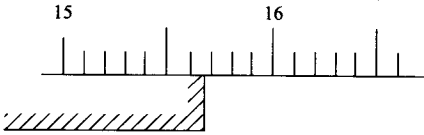


图 1-1 米尺测量物体长度

刻度为毫米的米尺来测量某物体的长度, 如图 1-1, 可以看出该物体的长度大于 15.6cm, 小于 15.7cm。虽然米尺上没有小于毫米的刻度, 但可以

目测估计到 $\frac{1}{10}\text{mm}$ (即最小刻度的 $\frac{1}{10}$) , 因而可以读

出物体的长度为 15.66cm、15.67cm 或 15.68cm,

前三位数字可以从尺上直接读出, 而第四位数字是观察者估读出来的, 读出的结果因人而异, 因而这一位数字是有疑问的, 通常称为存疑数字。

应当指出, 在测量数据中, 1, 2, ..., 9 九个数字, 每个数字都是一位有效数字, 而“0”是特殊的, 需要注意以下几种情况。

- ① 数字间的“0”为有效数字。例如 70.85cm 是四位有效数字。
- ② 数字后的“0”为有效数字。例如，物体的长度为 5.60cm 是三位有效数字。
- ③ 数字前的“0”不是有效数字。例如 0.26、0.026 或 0.0026 都是两位有效数字。这里的“0”表示的是数量级的大小。而实际测量只进行两位，所以这种情况下的“0”是不算作有效数字的。

为了书写规范，常采用科学计数法，即用 10 的方幂来表示其数量级，常使小数点前取一位数字，例如 0.0678cm，写成标准形式为 $6.78 \times 10^{-2} \text{cm}$ ，这样书写不仅整齐规范，而且非有效数字的“0”也自然消失。在进行单位换算时，必须采用标准形式，才不会使有效数字因单位换算有所改变。例如 208.6m 不能写成 208600mm，应写为 $2.086 \times 10^2 \text{m} = 2.086 \times 10^5 \text{mm}$ 。

二、有效数字的运算规则

- ① 加、减运算。有效数字的运算结果通常只保留一位可疑数字，例如

$$\begin{array}{r} 48.6 \\ + 6.243 \\ \hline 54.843 \end{array}$$

式中，在可疑数字下方加一横线以便与可靠数字相区别。因为 48.6 中的 6 是可疑数字，所以 $6+2=8$ 也是可疑的，其后的两位数便无意义了。按照现在通用的“四舍六入五凑偶”法则（即尾数小于五则舍，大于五则入，等于五时，前一项是偶数则舍，前一项是奇数则入），其结果为 54.8。

又如

$$\begin{array}{r} 68.6 \\ - 0.426 \\ \hline 68.174 \end{array}$$

同理，有效数字可以取到小数点后一位，按照“大于五则入”的原则，本例应向前进位，其结果为 68.2，有效数字为三位。

从以上两例可见，两个量相加（或相减）时，应遵照各量中存疑数字所在数位最前的一个为准来进行计算。该方法可以推广到多个量的相加（或相减）的计算中去。

- ② 乘、除运算。几个量相乘（或相除）时，同样根据计算结果只保留一位存疑数字的原则。例如：

$$\begin{array}{r} 1.523 \\ \times 18.6 \\ \hline 9138 \\ 12184 \\ 1523 \\ \hline 28.3278 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 35.35 \\ 261 \overline{)12764} \\ \underline{1083} \\ 1934 \\ \underline{1805} \\ 1290 \\ \underline{1083} \\ 2070 \\ \underline{1805} \\ 265 \end{array}$$

以上两例的结果分别为 28.3 和 35.4，有效数字都是三位，与乘数、被乘数（或除数、被除数）中有效数字少的相同。从以上两例可见，两个量相乘（或相除）的积（或商），其有效数字一般与诸因子中有效数字最少的相同。以上方法可以推广到多个量的相乘（或相除）等

运算中去。

同理可以证明，一个数的乘方、开方的有效数字与该数的有效数字位数相同。对于对数、指数、三角函数等初等函数运算，也可得一些类似的运算规则。例如 $\ln 4.38 = 1.48$ ； $\sin 35.58^\circ = 0.5818$ 等。对于一个数的常用对数，尾数的有效数字与该数的有效数字位数相同。例如 $\lg 19.88 = 1.2984$ 。

③ 在常用公式中的数字是绝对准确数字，计算不能以它为准来考虑计算结果的有效数字的位数。例如 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 中，分母上的 2 是绝对准确的数字，不能因为“2”的存在，计算结果就取一位有效数字，而应与 m 和 v 中有效数字位数最少的相同。

④ 如果常用公式中的某些常数已有很准确的数值，计算时也只需考虑其他量的有效数字位数。例如，运用 $S = \pi r^2$ 计算圆面积时，若 r 有三位有效数字，则 π 可取 3.142，而计算结果取三位有效数字，如 r 有五位有效数字，则 π 可取 3.14159，而计算结果取五位有效数字。

⑤ 如果某一计算中，既有加减，又有乘除，则可逐步按上述有效数字运算法则处理，以决定最后计算结果中的有效数字的位数。例如：

$$\frac{860.0 - 326.0}{0.128 - 0.08360} = \frac{534.0}{0.044} = 1.2 \times 10^4$$

计算结果取两位有效数字。

应当指出，本节讲的是有效数字的实验数据记录和运算规则，它不能代替绝对误差和相对误差的计算。如果由于各项误差的积累，使间接测得量的绝对误差比较大，那么在最后的结果中，使结果的最后一位与绝对误差的位数对齐，而舍去其他多余的存疑数字。此外，因误差本身只是一个估计的范围，因此在一般情况下，误差的有效数字只取一位，在大学物理实验中约定误差一律取一位。

三、测量结果的正确表示

任何测量都要将测量结果正确地表示出来

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x \quad (1-10)$$

其中误差 σ_x 一般取一位。在测量中，有时还要根据实际情况对其进行修正。

(1) 由有效数字修正误差 比如， $\bar{x} = 8.925$ ， $\sigma_x = 0.0002$ ，测量结果应该为 $x = 8.925 \pm 0.001$ ，即不论误差多小，因为测量结果的计算值小数点后的第三位已经是可疑，误差至少在这里，所以必须进上来。

(2) 由误差修正有效数字 比如， $\bar{x} = 8.925$ ， $\sigma_x = 0.01$ ，测量结果应该为 $x = 8.92 \pm 0.01$ ，理由是误差已经在小数点后的第二位了，而测量结果的第三位已经没有必要了，就必须做处理。

修正原则是：误差只可以扩大，不可以缩小（误差扩大了，表示测量结果的可信范围大了）。

【例 1-1】 使用分光计测量一块三棱镜的顶角 6 次，得到的测量值分别为

$$\begin{aligned} x_1 &= 60^\circ 36' & x_4 &= 60^\circ 34' \\ x_2 &= 60^\circ 24' & x_5 &= 60^\circ 20' \\ x_3 &= 60^\circ 32' & x_6 &= 60^\circ 22' \end{aligned}$$

试表达测量结果。

解 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{6}(60^{\circ}36' + 60^{\circ}24' + 60^{\circ}32' + 60^{\circ}34' + 60^{\circ}20' + 60^{\circ}22') = 60^{\circ}28'$$

各次测量偏差的绝对值分别为

$$\begin{aligned} |d_1| &= |60^{\circ}36' - 60^{\circ}28'| = 8' & |d_2| &= |60^{\circ}24' - 60^{\circ}28'| = 4' \\ |d_3| &= |60^{\circ}32' - 60^{\circ}28'| = 4' & |d_4| &= |60^{\circ}34' - 60^{\circ}28'| = 6' \\ |d_5| &= |60^{\circ}20' - 60^{\circ}28'| = 8' & |d_6| &= |60^{\circ}22' - 60^{\circ}28'| = 6' \end{aligned}$$

标准偏差

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{8^2 + 4^2 + 4^2 + 6^2 + 8^2 + 6^2}{6-1}} \approx 6'$$

由于随机误差本身是个估计值。所以其结果只取一位数字。为简单起见，在大学物理实验中约定误差一律取一位。这样测量值便表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x = 60^{\circ}28' \pm 6'$$

$60^{\circ}28' = 3628'$ ，百分误差为

$$E_r = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{6}{3628} \times 100\% = 0.2\%$$

【例 1-2】 某一长度 $L = A - B - C + D$ ，其中：

$$A = 50.00 \pm 0.05 \text{ mm}$$

$$B = 4.05 \pm 0.05 \text{ mm}$$

$$C = 12.63 \pm 0.05 \text{ mm}$$

$$D = 1.00 \pm 0.05 \text{ mm}$$

试计算结果及误差。

解

$$\bar{L} = (50.00 - 4.05 - 12.63 + 1.00) \text{ mm} = 34.32 \text{ mm}$$

$$\sigma_L = \sqrt{(0.05)^2 + (0.05)^2 + (0.05)^2 + (0.05)^2} \text{ mm} = 0.09 \text{ mm}$$

$$L = \bar{L} \pm \sigma_L = (34.32 \pm 0.09) \text{ mm}$$

$$E_r = \frac{\sigma_L}{\bar{L}} = \frac{0.09}{34.32} \times 100\% = 0.3\%$$

【例 1-3】 用螺旋测微器分别测量某圆柱体不同部位的直径 d 8 次和不同部位的高 h 8 次，得到下列数据。

次序	直径 d/cm	高 h/cm	次序	直径 d/cm	高 h/cm
1	1.6499	2.0004	6	1.6482	2.0015
2	1.6491	1.9993	7	1.6492	1.9995
3	1.6476	2.0000	8	1.6489	1.9990
4	1.6486	2.0010	平均	1.6487	2.0002
5	1.6479	2.0010			

试求圆柱体的体积及误差。

解

$$|\Delta d_1| = |1.6499 - 1.6487| \text{ cm} = 0.0012 \text{ cm}$$

$$|\Delta d_2| = |1.6491 - 1.6487| \text{ cm} = 0.0004 \text{ cm}$$

$$|\Delta d_3| = |1.6476 - 1.6487| \text{ cm} = 0.0011 \text{ cm}$$