

21
世纪

21 世纪高等院校创新精品规划教材

大学物理实验

主 编 王克强
副主编 陈红斌 于凤梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21 世纪高等院校创新精品规划教材

大学物理实验

主 编 王 克 强

副主编 陈红斌 于凤梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本实验教材依据国家教育部《高等院校非物理专业物理实验课程教学的基本要求》，在总结编者多年大学物理实验教学实践的基础上，结合最新实验仪器编写而成。

本书共分6章，第1、2章系统介绍了物理实验数据处理与误差计算方法、基本测量方法；第3~6章共有26个实验项目，主要是基础性实验、设计性实验和综合性实验，包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验的内容。

本书可作为高等院校各专业物理实验课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 王克强主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2011.1
21世纪高等院校创新精品规划教材
ISBN 978-7-5084-8080-0

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第225194号

策划编辑: 陈宏华 责任编辑: 杨元泓 加工编辑: 陈洁 封面设计: 李 佳

书 名	21世纪高等院校创新精品规划教材 大学物理实验
作 者	主 编 王克强 副主编 陈红斌 于凤梅
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 248千字
版 次	2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	18.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

大学物理实验课是高等理工科院校独立开设的一门必修基础课程，是对学生进行科学实验基本训练，提高学生分析问题和解决问题能力的重要课程。物理实验课和物理理论课具有同等重要的地位。

随着现代科学技术的迅猛发展和实验教学改革的不断深入，大学物理实验课的教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化。新概念、新方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映。本书是我们在多年教学实践的基础上，经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的。本书结合目前实验仪器生产厂家最新产品特点，图文并茂，大部分实验操作与仪器使用基本一致，极大方便了学生的使用。

本教材系统地介绍了大学物理实验课程教学的基本要求、实验的基本程序、测量的有效数字和运算规则、测量误差和不确定度、实验结果表示和数据处理的基本方法。对于基本实验，考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点，编写时力求将实验原理叙述清楚，计算公式推导完整，使学生在实验预习时掌握理论依据；实验内容与步骤亦尽可能具体，以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导。为了使同学们较快掌握不确定度和数据处理方法，实验项目中都附有实验的数据处理表格与计算公式。对于综合与设计性实验，编写时不局限在统一的格式上。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上的完整，而将主要内容放在实验方法和技巧的指导上；有的设计性实验，只提出实验任务和基本要求，让学生查阅相关资料，自行设计实验方案，选择仪器用具，完成实验测试，以更多地发挥学生的主观能动性和创造性。

实验课教学是一项集体事业，无论是实验教材的编写，还是实验项目的开设准备，都凝聚着全体参与实验教学的教师和技术人员的智慧和成果。同时，在编写的过程中，我们还广泛参阅了兄弟院校的有关教材，吸收了其中富有启发性的观点和优秀内容，在此表示衷心感谢。本书还得到仲恺农业工程学院、中国水利水电出版社的大力支持，在这里编者亦表示衷心感谢。

本书由王克强任主编，陈红斌、于凤梅任副主编。参加本书编写的还有王改田、申朝文、李伟、张麟、周丽萍等。由于编者水平有限，书中难免有不当之处，恳切希望使用本教材的教师、同学提出宝贵意见，以便今后改进。

编 者

2010年10月

目 录

前言

第一章 绪论	1	实验 12 电子束的加速和电偏转	75
第一节 物理实验教学的作用、目的和要求	1	实验 13 电子比荷的测定	77
第二节 实验误差与数据处理	2	实验 14 磁场的描绘与测量	83
第三节 物理实验常用基本技术	11	实验 15 温差电效应与应用	88
第二章 物理实验的基本测量方法	13	实验 16 铈化钢电阻传感器的磁阻特性测量及应用	91
第一节 放大法	13	第五章 光学和近代物理实验	96
第二节 比较法	14	光学实验基础知识	96
第三节 补偿法	14	实验 17 光的等厚干涉现象及其应用	96
第四节 交换法	15	实验 18 分光计的调节与使用	102
第五节 模拟法	15	实验 19 光电效应测普朗克常数	110
第六节 转换测量法	15	实验 20 全息照相技术	114
第三章 力学与热学实验	17	实验 21 密立根油滴实验	118
实验 1 基本量度	17	第六章 设计性和综合性实验	125
实验 2 液体粘度系数随温度变化的研究	22	实验方案选择原则	125
实验 3 液体表面张力系数的测定	26	实验 22 伏安法测量电阻及误差分析	126
实验 4 PN 结正向压降与温度关系的研究	30	实验 23 电表的改装	129
实验 5 霍尔位置传感器及弯曲法杨氏模量的测定	35	实验 24 用电位差计测电阻	132
实验 6 固体热导率的测量	40	实验 25 自组望远镜和显微镜	133
第四章 电磁学实验	45	实验 26 恒温自动控制	138
电磁学实验的预备知识	45	附录 1 ST16B 示波器	141
实验 7 多用电表的使用	48	附录 2 YB1600 函数信号发生器	143
实验 8 用惠斯登电桥测电阻	53	附录 3 NDU-2 型立体式电桥电位差计实验仪	145
实验 9 用电势差计测量电动势	58	附录 4 EF-4S 型电子和场实验仪	147
实验 10 示波器的使用	63	附表 1 国际单位制和某些常用物理数据	149
实验 11 霍尔效应及其应用	69	附表 2 显影液、定影液、漂白液配方	156

第一章 绪论

第一节 物理实验教学的作用、目的和要求

一、物理实验的地位和作用

物理学是自然科学中最基本的学科之一，又是一门实验科学，无论是物理理论的建立还是对于理论的检验，都离不开实验。物理学史清楚地表明，正是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下，物理学才得以发展。

随着生命科学的发展，物理学的许多新技术，诸如光谱技术、波谱技术、热技术、X射线衍射技术、显微技术等，在生命科学和农业科学中得到了日益广泛的应用。目前，物理实验技术和实验仪器已广泛地应用于科学技术和生产部门中。

高等院校的物理实验课是学生进入大学后受到系统实验技能训练的主要基础课之一。通过物理实验，可使学生初步接触误差和数据处理的知识，培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题，开拓学生的智力，培养解决问题的能力，为进一步学习后继的实验课程打下良好的基础。

二、物理实验课的教学目的

(1) 通过观察分析实验现象和测量物理量，学习物理实验基础知识，加深对物理现象和规律的认识，为后续课程打下基础。

(2) 学习物理实验的基本方法，进行实验的基本训练。使学生能够自行阅读实验教材或资料，做好实验准备；能够借助实验教材或仪器说明书，熟悉常用仪器的基本原理和性能，并能正确使用；学习和掌握基本物理量测量方法和进行具体测试；能够运用物理学理论知识对实验现象进行初步分析和判断；能够正确记录和处理实验数据，对实验结果的误差作出分析，写出合格的实验报告；初步培养实验设计与实施的能力。

(3) 培养实事求是的科学精神，规范操作，严密思维的工作作风和爱护国家财产，遵守纪律的优良品德。

三、物理实验课的要求

为了保证实验课的正常进行，提出以下要求：

(一) 实验前

(1) 通过阅读实验教材，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验内容，初步了解仪器使用方法和注意事项，在此基础上写出预习报告。

(2) 预习报告主要包括实验中要观察的物理现象、计算公式、电（光）路图、数据表格等。

(二) 实验时

- (1) 认真听讲和积极思考有关实验原理、实验要求、仪器使用和注意事项等问题。
- (2) 认识和检查仪器是否完好，如有问题及时向教师报告。
- (3) 熟悉仪器的使用方法，根据操作规程正确安装和调整仪器，按实验程序进行实验。
- (4) 认真观察实验现象，如实记录数据。实验中出现问题，应积极思考并及时请教教师，不要随意处理。
- (5) 实验完毕要及时整理数据，送教师审阅。并将仪器归整好，经教师同意后才能离开实验室。

(6) 严格遵守实验室规则，维护实验室整洁，爱护实验仪器、仪器如有损坏，要及时报告教师，凡属学生责任事故将视情节酌情赔偿。

(三) 实验后

认真书写实验报告，字体要端正，文字要简练，数据要齐全，图表要规范。实验报告除填写实验日期、姓名、班级、组别等项外，还应包括以下几个部分：

- (1) 实验名称；
- (2) 实验目的；
- (3) 实验原理：简要原理及计算公式、电路图或光路图；
- (4) 实验简要步骤；
- (5) 实验结果及数据处理的主要步骤；
- (6) 实验讨论：必要的实验结果分析讨论、回答思考题等。

第二节 实验误差与数据处理

一、物理量的测量

在科学实验中，物理量的值是通过测量得到的。测量是一个比较的过程，利用测量工具（量具或仪器）用一定的方法和技术（技能）通过比较获得物理量的大小和物理量间的关系规律。测量是进行科学实验的基本功，在测量工作中，要熟练地掌握一些基本的实验技能。

(一) 直接测量和间接测量

按获得测量结果的手段来分，可将测量分为直接和间接测量。用仪器和量具直接读取物理量的值称为直接测量，相应的物理量称为直接测得量。由几个直接测得量经过物理公式计算得出测量结果的测量称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。一物理量的测量是否为直接测量，完全取决于所用的测量手段和方法。如测定某一电阻，可用电压表和电流表分别测出电阻两端的电压和通过电阻的电流，再利用欧姆定律求出；也可用欧姆表或电桥直接测定，前一测量方法为间接测量，后一测量方法为直接测量。

(二) 等精度测量和不等精度测量

按测量条件是否相同来分，将测量分为等精度和不等精度测量。在所有的实验条件完全相同的情况下（使用相同的实验仪器和测量方法，由同一观察者在相同环境下）对某物理量进行多次重复测量，每次测量的精度是相同的，这称为等精度测量。不能保证实验条件完全相同的多次重复测量，称为不等精密度测量。在实验中，某一条件的变化对测量结果影响不

大，或者可以忽略其影响时，可看作是等精度测量。

二、误差的分类及表示形式

（一）误差

任何物理量在客观上总存在着一个确定的真实大小，称为客观真值。测量的目的就是要力图得到真值。由于测量仪器不可能尽善尽美的，测量所需的条件也是无法绝对保证的，再加上测量技术等因素的局限，任何测量都不可能进行得完全精确。因而，任何测量结果与真值之间总是存在着一个差值，即测量误差。

测量结果总是存在着一定的误差，误差自始至终存在于一切测量过程之中，这称为误差公理。因此，重要的是去理解测量误差的客观存在，即在确定实验方案、选择测量方法、选用实验仪器、考虑实验条件需要保证的程度时，都要考虑测量误差问题。

测量结果应包括数值、单位和误差，三者缺一不可。

（二）误差的分类

误差的产生有多方面的原因，从误差的性质和来源的不同，可分为系统误差和随机误差（偶然误差）两大类。

1. 系统误差、准确度

系统误差的特点是：在同样条件下对同一物理量进行多次测量时，误差的大小和符号保持不变或按一定规律变化，或是有规律的重复。它来源于以下几个方面：

（1）仪器误差。这是由于仪器本身的缺陷或分辨率限制或没有按规定条件使用而引起的。如刻度不准确，天平不等臂，仪器未按技术要求调试好等。

（2）方法误差。这是由于实验理论和方法的不完善带来的误差。如测量重力加速度时，没有考虑空气阻力的影响；用伏安法测电阻时，没有考虑电表内阻的影响等。

（3）环境误差。这是由于环境条件（温度、湿度、压强、电磁场等）的变化带来的误差。如米尺是在 20℃ 刻度的，而测量是在 0℃ 进行的。

（4）个人误差。这是由于实验者的生理或心理导致的习惯性误差。如有人习惯于读数偏高，有人习惯于读数偏低；计时的时候，有人习惯于偏早，有人习惯于偏晚等。

除上述各种系统误差外，很多系统误差的变化是极其复杂的，如刻度盘刻得不准确而引起的测量示值的误差等。对于系统误差，不能用多次测量求平均值的方法去减小或消除，必须找出系统误差的规律和产生的原因，采取相应的措施去消除或减小。

系统误差的存在直接影响测量结果的准确性，习惯上常用准确度来反映系统误差的大小。测量结果的准确度高，表示测量结果偏离真值的程度小，系统误差小；反之。准确率低，测量结果偏离真值的程度大，系统误差大。

2. 随机误差、精密度

在同一条件下对某一量进行多次测量时，每次的测量值还会有差异，差异的大小和正负没有任何规律性，纯属偶然，但在大量的重复中又服从一定的统计规律，这种误差称为随机误差，也称偶然误差。它来源于如下几个方面：

（1）判断误差。这是由于实验者在估读仪表最后一位读数时可能不准确带来的误差。

（2）外界干扰误差。偶然的外界干扰，如测量时由于人的来往引起气流扰动或温度起伏，周围偶然出现的振动、噪声、电磁场等，使测量结果产生误差。

(3) 其他偶然因素引起的误差、被测对象本身的微小起伏及其他一切不可预测的偶然因素所造成的误差。

随机误差的特点是测量次数增多时服从一定的统计规律，常见的统计规律是：比真值大或比真值小的测量值出现概率相等；误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率大得多；绝对值相等的正误差与负误差出现的机会相等，因此全部可能的误差总和趋于零。所以，增加测量次数取平均值，可以减少测量结果的随机误差。

随机误差反映的是一组测量结果的重复性和离散性，习惯上常用精密度来表征。多次重复测量时，结果测量值间彼此很接近，差异很小，就说明测量重复性好，或测量的精密度高；反之，测量值间很分散，就说明测量重复性差，或测量精密度低。

精确度是对测量的偶然误差与系统误差的综合评定，简称精度。测量的精确度高，是指测量数据比较集中在真值附近，即测量的系统误差和偶然差都比较小。

(三) 误差的表示形式

(1) 绝对误差。以误差的绝对数值来表示测得的误差，称为绝对误差。绝对误差可以表示同一个测量结果的可靠程度。设测量值为 N ，真值为 N_0 ，则绝对误差表示为

$$\Delta N = N - N_0 \quad (1)$$

它与真值同单位，反映测量值偏离真值的大小。

真值很难准确测定，可以把理论真值，国际计量大会决议约定的值，高一级标准器的量值作为近似真值。在真值无法知道的情况下，一般采用测量平均值代替真值（重复测量 10 次以上，重复测量次数不很多，则以平均值表示测量结果），以测量值与测量平均值之差（ $N - \bar{N}$ ）即偏差（残差）来估算绝对误差。

(2) 相对误差。为了比较不同量的测量结果，或者单位不相同的测量结果时，不仅要考虑绝对误差的大小，还要看被测量本身的大小，为此引入相对误差的概念，即

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (2)$$

三、偶然误差的处理

(一) 单次直接测量结果与误差估算

在物理实验中，若对某一物理量的测量精确度要求不高，只需进行一次测量时，可按仪器出厂检定书或仪器上注明的仪器误差作为单次直接测量的误差。如果没有注明，也可取仪器最小刻度值的一半作为单次直接测量的绝对误差（一般根据实际情况，对测量值的误差进行合理的估算，取仪器最小刻度的 1/10, 1/5 或 1/2 均可），取仪器最小刻度的 $1/\sqrt{3}$ 作为测量结果的标准偏差。

(二) 多次直接测量结果与误差计算

1. 以算术平均值代表测量结果

在相同条件下对某物理量 N 进行了 n 次重复测量，其测量值分别为 $N_1, N_2 \dots N_n$ ，用 \bar{N} 表示算术平均值，则

$$\bar{N} = \frac{1}{n}(N_1 + N_2 + \dots + N_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (3)$$

根据误差理论，在一组 n 次测量的数据中，算术平均值 \bar{N} 最接近于真值，称为“测量的最佳值”。当测量次数无限增加时，算术平均值将无限接近于真值。因此，在多次直接重复测量中，以算术平均值表示测量结果。

2. 多次直接测量结果的误差计算

(1) 算术平均绝对误差。设各次测量值 N_i 与平均值 \bar{N} 的绝对之差为： $\Delta N_1 = N_1 - \bar{N}$ ， $\Delta N_2 = N_2 - \bar{N}$ ， \dots ， $\Delta N_n = N_n - \bar{N}$ ，则算术平均绝对误差为：

$$|\Delta \bar{N}| = \frac{1}{n} (|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \dots + |\Delta N_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta N_i| \quad (4)$$

有时候，测量虽然进行了多次，但读数基本不变，这时不能只记录一个数值，或把误差表示为“0”，而应该把每次的数据都记录下来。当算术平均绝对误差小于仪器误差（仪器刻度或精密度的一半）时，应取仪器误差（仪器最小刻度或精密度的一半）作为测量结果的绝对误差。

(2) 标准偏差。为了较科学地估算误差，科研和计量部门多用标准偏差来估算测量结果的误差。有限次（ n 次）测量中的某一次测量结果的标准偏差为：

$$S(N_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (5)$$

而 n 次测量结果的平均值 \bar{N} 的标准偏差为：

$$S(\bar{N}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

(三) 测量结果的表示

对于初学者或误差分析要求比较粗略的实验，可采用算术平均绝对误差估算随机误差，这时测量结果表示为

$$N = \bar{N} \pm |\Delta \bar{N}|, \quad E = \frac{|\Delta \bar{N}|}{\bar{N}} \times 100\% \quad (7)$$

比较严密和确切的误差估算可采用标准误差。但因标准误差是在测量次数 n 为无限大时定义的，实际上无法计算。而从理论分析可知，当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，标准偏差的计算值也就趋近于按标准误差定义式的计算值了。所以，在实际的实验中，只要测量的次数足够多，就可用标准偏差来代替标准误差而对随机误差作出相当好的估计，通常说计算标准误差，指的也是这个意思。因此，测量结果应表示成

$$N = \bar{N} \pm S(N_i), \quad E = \frac{S(N_i)}{\bar{N}} \times 100\% \quad (8)$$

或

$$N = \bar{N} \pm S(\bar{N}), \quad E = \frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} \times 100\% \quad (9)$$

(四) 间接测量结果与误差计算

不少物理量的测量和大多数物理实验中的最后结果，都属于将一些直接测量的物理量，通过一定的公式，将需要的待测量计算出来的所谓“间接测量”。由于每次直接测量都有误差，

因此，间接测量也一定会有误差，这就是误差的传递。表示各直接测量值的误差与间接测量值的误差之间的关系式，称为误差传递公式。

1. 等精度多次间接测量的结果

将各直接测得量的平均值代入间接测得量与直接测得量之间的函数关系式计算出间接测量结果

$$\bar{N} = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \quad (10)$$

2. 间接测得量的标准偏差

设一间接测得量 N 与直接测得量 X_1, X_2, \dots, X_n 之间的函数关系为

$$N = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (11)$$

各直接测量分别表示为

$$X_i = \bar{X} \pm S(\bar{X}_i) \quad (12)$$

若直接测得量彼此独立无关，且各个平均值的标准偏差对最终结果的误差均有贡献，根据误差理论，间接测得量 N 的标准偏差为

$$S(\bar{N}) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} S(\bar{X}_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} S(\bar{X}_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} S(\bar{X}_n)\right)^2} \quad (13)$$

相对标准偏差为

$$\frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} S(\bar{X}_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} S(\bar{X}_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} S(\bar{X}_n)\right)^2} / \bar{N} \quad (14)$$

3. 间接测得量的最大误差

设各直接测得量 X_1, X_2, \dots, X_n 的最大误差分别为 $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ ，且 $N = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，则间接测得量的最大误差为

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta X_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta X_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta X_n \right| \quad (15)$$

最大相对误差为

$$E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} = \left| \frac{\partial f}{\partial X_1} \frac{\Delta X_1}{\bar{N}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial X_2} \frac{\Delta X_2}{\bar{N}} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial X_n} \frac{\Delta X_n}{\bar{N}} \right| \quad (16)$$

常用函数的标准误差传递分式如表 1-1 所示。

表 1-1 常用函数的标准误差传递分式

测量关系式 $N = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$	标准误差传递公式
$N = X_1 + X_2$	$S(\bar{N}) = \sqrt{S(\bar{X}_1)^2 + S(\bar{X}_2)^2}$
$N = X_1 - X_2$	$S(\bar{N}) = \sqrt{S(\bar{X}_1)^2 - S(\bar{X}_2)^2}$
$N = X_1 \times X_2$	$\frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\frac{S(\bar{X}_1)^2}{\bar{X}_1^2} + \frac{S(\bar{X}_2)^2}{\bar{X}_2^2}}$

续表

测量关系式 $N = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$	标准误差传递公式
$N = \frac{X_1}{X_2}$	$\frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\frac{S(\bar{X}_1)^2}{\bar{X}_1^2} + \frac{S(\bar{X}_2)^2}{\bar{X}_2^2}}$
$N = \sqrt[m]{X}$	$\frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} = \frac{1}{m} \frac{S(\bar{X})}{\bar{X}}$
$N = \frac{X_1^k X_2^m}{X_3^n}$	$\frac{S(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{k^2 \frac{S(\bar{X}_1)^2}{\bar{X}_1^2} + m^2 \frac{S(\bar{X}_2)^2}{\bar{X}_2^2} + n^2 \frac{S(\bar{X}_3)^2}{\bar{X}_3^2}}$
$N = \sin X$	$S(\bar{N}) = \cos X S(\bar{X})$
$N = \ln X$	$S(\bar{N}) = \frac{S(\bar{X})}{\bar{X}}$

3. 误差计算举例

测得圆柱体的直径 $D = 3.608 \pm 0.003\text{cm}$ ，高 $H = 1.703 \pm 0.004\text{cm}$ ，求出圆柱体的体积的测量结果。

$$\text{解： } \bar{V} = \frac{1}{4} \pi \bar{D}^2 \bar{H} = \frac{1}{4} 3.1416 \times 3.608^2 \times 1.703 = 17.412\text{cm}^3$$

$$\frac{S(\bar{V})}{\bar{V}} = \sqrt{2^2 \frac{S(\bar{D})^2}{\bar{D}^2} + \frac{S(\bar{H})^2}{\bar{H}^2}} \approx 0.29\%$$

$$S(\bar{V}) = 17.412 \times 0.29\% = 0.0505 \approx 0.06\text{cm}^3$$

$$V = (17.41 \pm 0.06)\text{cm}^3$$

$$\text{相对偏差 } E = \frac{S(\bar{V})}{\bar{V}} = 0.29\%$$

四、有效数字及其运算规则

实验的数据记录、数据运算以及实验结果的表达，都应遵从有效数字的规则。

(一) 有效数字的概念

任何一个物理量，其测量结果总存在误差，数值计算也有一定的近似性，因此实验数据记录，数据运算以及实验结果的表达，其位数的多少应由测量值本身的误差来决定。

若测量结果从某位数起开始有误差，则自第一位非零数字算起，直到包含开始有误差的位为止的各数字均称为有效数字，有误差的一位称为可疑数字。从仪器上读取测量数据时，最后一位应该是开始有误差的可疑数字。

第一位非零数字左边的“0”不是有效数字，数字中间的“0”和末位的“0”都是有效数字，例如 0.04010 是四位有效数字。

按照有效数字的定义，可以得出实验数据记录和数据处理的几项原则：

- (1) 实验记录的原始数据最后一位应该是估读的；
- (2) 测量误差只产生于测量结果的最后一位；
- (3) 测量结果的最后一位应与误差位看齐，多余的尾数应按数字修约规则舍弃。

(二) 科学记数法

用毫米尺测量某物长度为 15.4mm，误差发生在 $\frac{1}{10}$ mm 位，是三位有效数字，如果以微米作单位表示，为 15400 μ m，则误差发生 $\frac{1}{1000}$ mm 位，改变了原来数据的精确度。为保持有效数字的位数不变，应采用科学记数法，即用 10 的方幂表示数量级。前面的数字是测量结果的有效数字，并写成小数点前取一位非零数字，如 15.4mm，写成 1.54×10^{-2} m 或 $1.54 \times 10^4 \mu$ m。

采用科学记数法表示有效数字，使有效数字的位数与单位无关，既能表示出数字的大小，而且计算时也容易定位。

(三) 有效数字修约规则

有效数字修约规则（截尾规则）概括成一句话是“四舍六入，逢五考虑”。若保留数字末位后面一位数小于 5，则舍去；大于 5，则进 1；等于 5，则考虑：5 后非零进 1，5 后为零把末位凑成偶数。例如，把下列数据截尾到小数点后 3 位：7.69149，2.1367，3.14159，3.21650，4.51050，5.62350，5.37851。截尾后分别为：7.691，2.137，3.142，3.216，4.510，5.624，5.379。

(四) 有效数字的运算规则

1. 加减法

运算结果的有效数字的最后一位与参与加减运算各量中误差最大的有效数字的末位对齐，多余尾数按截尾规则舍去。

例如， $20.\underline{1} + 4.17\underline{8} = 24.\underline{3}$ ，加下划线的数字为可疑数字。

2. 乘法

运算结果的有效数字的位数与参与乘除运算各量中有效数字位数最少的为准，多余尾数按截尾规则舍去。

例如， $3.21\underline{9} \times 1.04\underline{2} = 3.3\underline{5}$

$5768.\underline{9} \div 28\underline{2} = 20.\underline{5}$

3. 乘方和开方

运算结果的有效数字的位数与其底数（被开方数）的有效数字位数相同。

4. 函数运算

三角函数的有效数字位数与相应的角度（以弧度为单位）的有效数字的位数相同。如分光计读角度读到 1'，因为 $1' = 0.0003\text{rad}$ ，所以 $\sin 30^\circ 00' = 0.5000$ 应有四位有效数字。

自然对数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同；而常用对数其尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同。如 $\lg 1983 = 3.2973$ ； $\ln 1983 = 7.592$ 。

指数函数运算后的有效数字位数与指数小数点后的位数相同。如 $10^{0.32} = 2.1$ 。如指数为整数，取一位有效数字。

5. 四则混合运算

进行四则混合运算时，应注意以下两点：

(1) 参与计算的常数（如 e 、 π 等）和公式中的自然数的取位，一般与参与运算的各数值中有效数字位数最多的相同。

(2) 在混合运算中，有的因子可能包含加减运算，经过加减运算后有效数字的位数可能增减，这时不能以原始数据为准来确定结果的有效数字位数，而应该从整个算式中各个因子

的有效数字的位数来考虑。例如（加下划线的数字为可疑数字）：

$$\begin{aligned} & 22\underline{5} \times (11.3\underline{7} - 10.5\underline{2}) \div 11.8\underline{7} \\ & = 22\underline{5} \times 0.8\underline{5} \div 11.8\underline{7} \\ & = 1\underline{6} \end{aligned}$$

（五）测量结果的有效数字

有效数字定义明确地说明，由误差决定有效数字，这是处理一切关于有效数字问题的依据。测量结果的有效数字位数，也应由误差来确定。即测量结果的末位要与误差的末位对齐。如某测量值为 0.1785，其误差为 ± 0.003 ，则测量结果写成 0.178 ± 0.003 。由于标准偏差是对标准误差的估计，所以误差通常只取一位有效数字。为了不人为地缩小误差范围，对误差截尾时，一般都采用进位的方法。相对偏差一般保留两位有效数字。

五、实验数据处理方法

对实验中所测得的大量数据进行整理分析和归纳计算，得到实验结论的过程称为数据处理。下面介绍两种最常用的数据处理方法。

（一）列表法

列表法就是将实验中测得的数据按一定的形式和顺序列成表格。列表法具有结构紧凑简单明了、便于分析和比较、有助于找出物理量之间相互关系和变化规律的优点。

列表要求：

（1）表格的设计要便于记录、计算和检查。

列入表格中的数据是主要的原始数据，计算过程的一些中间值及处理结果也可列入表中。个别的或与其他量关系不大的数据，不要列入表中，写在表格顶端。

（2）要标明符号所代表物理量的意义和单位，单位和量值的数量级写在标题栏中，不要重复记在各个数值上。

（3）表中数据正确反映测量结果的有效数字。

（二）作图法

作图法就是在一坐标平面内，用图线表示两个物理量之间的变化规律。作图法的优点是，当两个物理量之间的关系不能用函数式表示时，却能容易用作图法表示出来，并且直观形象。

实验作图不是示意图，它不仅表达出实验中得到的物理量之间的关系，而且要反映出测量的精确度，因而必须按一定的要求作图。具体要求如下：

（1）作图一定要用坐标纸。根据有关数据的变化情况选用适当的坐标系。普通物理实验中多用直角坐标。

（2）选定坐标轴。以横轴表示自变量，在轴的末端标以代表正方向的箭头，并在其近旁注明所代表的物理量及其单位。

（3）确定坐标分度。在坐标轴上每隔一定间距（如 5 格或 10 格）标明代表的物理量值。分度的大小，一般应使坐标纸上的最小格对应于数据有效数字最后一位可靠数。坐标轴分度的起点不一定取零值，以充分利用图纸。

（4）描点。把实验数据用“+”、“×”或“⊙”在图上标出，使数据对应的点准确落在所用符号的中心上。

（5）连线。纵观所有数据的变化趋势，用直尺或曲线板，根据不同情况，把数据点连成

直线或光滑曲线。通常曲线不会通过所有点，但要求画出光滑曲线时，曲线两旁的偏差点应有较均匀的分布。对个别偏离较大的点应加以分析，决定取舍。

仪器核准曲线应通过校准点，连成折线。

(6) 写图名和图注。在图纸的上方或下方写出简洁完整的图名，在图的适当空白处注明实验条件等，书写要工整。

习题

1. 绝对误差、相对误差和标准误差各是怎样定义的？它们的作用是什么？

2. 如何计算测量结果和误差？

3. 什么是有效数字？怎样正确表示测量结果？

4. 将下列各量取三位有效数字：

1.0751cm, 0.8624cm, 3.1415S, 0.03.kg, 6.37kg

5. 有甲、乙、丙、丁四人，用螺旋测微器测量一铜球的直径，各人所得的结果的表示式是：甲为 $(1.2832 \pm 0.0005)\text{cm}$ ；乙为 $(1.283 \pm 0.0005)\text{cm}$ ；丙为 $(1.28 \pm 0.0005)\text{cm}$ ；丁为 $(1.3 \pm 0.005)\text{cm}$ ；问哪个人表示得正确？其他人错在哪里？

6. 按照误差理论和有效数字运算方法改正以下错误：

(1) $N = (10.800 \pm 0.2)\text{cm}$

(2) 有人说 0.2870 有五位有效数字，有人说只有三位，请纠正并说明原因。

(3) $28\text{cm} = 28.0\text{cm}$

(4) $L = (28000 \pm 8000)\text{mm}$

(5) $0.0221 \times 0.0221 = 0.00048841$

(6) $\frac{400 \times 1500}{12.6 - 11.6} = 600000$

7. 在长度测量中，得一圆柱体直径数据（单位为厘米）如下：0.1327, 0.1325, 0.1329, 0.1326, 0.1328, 0.1327, 0.1326, 0.1328, 0.1325 已知仪器误差为 0.0005cm，试求其算术平均值、绝对误差和标准误差。

8. 用有效数字运算规则计算下列各式的结果：

(1) $302.1 + 3.12 + 0.385$

(2) $107.50 - 2.5$

(3) 1111×0.100

(4) $237.5 \div 0.10$

(5) $(14.325 + 14.125) \div (14.125 - 14.125)$

9. 计算结果及误差

(1) $N = A + B - C$ ，求 N 。其中 $A = 0.5628 \pm 0.0002$ (cm)， $B = 85.1 \pm 0.2$ (cm)， $C = 3.274 \pm 0.002$ (cm)。

(2) $R = \frac{a}{b} X$ ，求 R 。其中 $a = 10.05 \pm 0.01$ (cm)， $b = 11.003 \pm 0.005$ (cm)， $X = 67.1 \pm 0.8$ (Ω)。

第三节 物理实验常用基本技术

在物理实验中，调整仪器使之处于正确的工作状态，是做好实验、减小误差的前提。各种仪器的调节技术要求不同，需要结合具体的实验进行学习，这里介绍调节仪器的常用基本技术。

一、仪器零位的调整

仪器零位就是仪器未进行测量时测量标志（读数标志）应处的位置。仪器在出厂的时候，零位是调整好的。由于环境变化、使用中磨损等原因造成零位发生变化，影响实验测量结果。实验测量前，要检查并校准仪器的零位。有零位校正装置的仪器如电表和电流计，可旋转机械零位旋钮使指针指“0”。有的仪器由于长时间使用磨损，使得零位改变，如米尺端点或游标尺的测量颚、千分尺的测砧磨损，它们的零位不能进行调整。这时，应该在测量前记下初读数（零点读数），然后在测量结果中加以修正。

二、水平与铅直状态的调整

许多仪器的测量部件需要处于水平或铅直状态才能进行准确的测量，因而测量前要调整有关部件（如天平的底座、测高仪和自由落体仪的立柱等），使之处于水平或铅直状态。这类仪器往往置于有三个螺钉的底座上，而三个螺钉的连线是等边或等腰三角形，底座上装有水准气泡或悬挂重锤线。水平或铅直状态是这样进行调节的：

如图 1-1 所示，当仪器底座上装有水准气泡时，只需调节调整螺钉 1 和 3 或 2 和 3 使气泡准确地停在圆圈中央。仪器底座就处于水平或立柱处于铅直状态（后者是由仪器生产装配时予以保证的）。若仪器底座上没有装水准气泡，则可用水准器进行调节，先将水准器 AB 平放在仪器座平面上，并使它与调整螺钉 1, 2 的连线平行，调节螺钉 1 或 2，使气泡位于玻管中央。然后把水准器水平转过 90° 于 CD 方向，调节螺钉 3，使气泡位于玻管中央。如此分别在 AB、CD 方向上时都使气泡准确地停在玻管中央，则仪器座平面就处于水平状态了，如果仪器立柱是垂直于仪器座平面的，则立柱处于铅直状态。有些仪器测量部件的铅直状态是用重锤线来判断的。调节方法是：重锤线的一端挂在立柱的上端，由于重锤重力的作用把悬线拉成铅直方向。调节底座上的三个调整螺钉使立柱上的某种判断标志达到要求（如图 1-2 中的重锤尖与立柱下端的锥尖对正，自由落体仪立柱上两光电门的光束通过重锤线等）。这时仪器立柱处于铅直状态。值得注意的是，用重锤线判断铅直状态，必须在两个互相垂直的方向上观察到标志的符合。

三、等高共轴调整

光学实验需要通过光学仪器对物理现象进行观察和测量。在实验前光学仪器所处的状态是至关重要的，将直接影响实验的准确度，甚至可能由于仪器没有调整好，致使实验无法进行。在光学仪器的所有基本调节中，光学元件之间的等高共轴调节，又是基本调节的基础。对光学仪器的调节，一般分粗调和细调两步。

粗调：利用目测判断，将光源和各光学元件的中心调成等高。这样，各光学元件的光轴

已大致接近重合。

细调：利用光学系统本身或其他光学仪器进行。一般方法是移动光学元件，使像没有上下左右偏移，而且要反复调节。

四、消除视差

使用光学方法进行测量，例如使用望远镜或移测显微镜测量物体长度，是使物体的像与仪器分划板上的刻度线或准线进行比较的。如果物体的像与刻度线或准线不在同一平面上（即对于观察者的眼睛距离不同，称为有视差。当眼睛稍作左右或上下移动时，将看到物体的像与准线有相对移动），测量结果可能产生较大的误差。为了准确地进行测量，必须消除视差。

消除视差的方法是通过望远镜或移测显微镜的目镜观察物体的像，上下或左右移动眼睛。若此时像亦跟着相对于准线发生移动，且方向与眼睛移动方向相同，则需把目镜往镜筒外拉出一些。仔细观察、判断和调节，直到移动眼睛时，物体的像与准线间不发生相对移动（即消除了视差）。

在力学与电学测量中，不按正确的方法进行读数，则存在视差而使读数不准。只需严格遵照正确的方法去读数，视差便可控制在最小范围内。

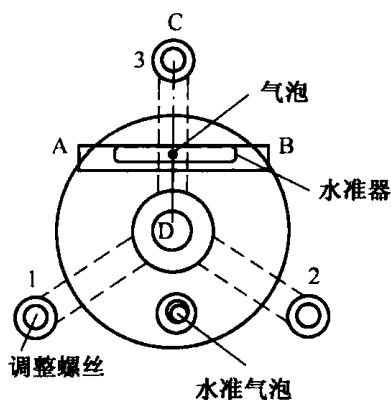


图 1-1 水平与垂直状态调整

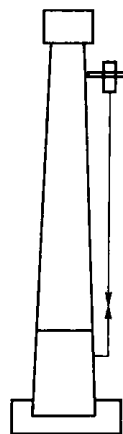


图 1-2 重垂线调铅直