

大学物理实验



类目：公共基础课
书名：大学物理实验
主编：于祥燕 张海燕 姚 静
出版社：湖南大学出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5667-4368-8
使用层次：通用
出版时间：2025 年 12 月
定价：45.00 元
印刷方式：双色
是否有资源：有



公共基础课创新融合系列教材
“互联网+”教育改革新理念教材

公共基础课创新融合系列教材
“互联网+”教育改革新理念教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

大学物理实验



主编 © 于祥燕 张海燕 姚静

湖南大学出版社

责任编辑：黄旺
封面设计：旗语书装



定价：45.00元



主编 © 于祥燕 张海燕 姚静



湖南大学出版社



公共基础课创新融合系列教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



大学物理实验



主 编 © 于祥燕 张海燕 姚 静
副主编 © 程一帆 孙照龙 吴学峰
刘顺彭 任建方

湖南大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/于祥燕,张海燕,姚静主编.

长沙:湖南大学出版社,2025.12.--ISBN 978-7-5667-

4368-8

I.04-33

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20254SD754 号

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编:于祥燕 张海燕 姚 静

责任编辑:黄 旺

印 装:河北龙大印务有限公司

开 本:889 mm×1 194 mm 1/16

印 张:11.5

字 数:316千字

版 次:2025年12月第1版

印 次:2025年12月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5667-4368-8

定 价:45.00元

出 版 人:李文邦

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山

邮 编:410082

电 话:0731-88822559(营销部) 88821174(编辑部) 88821006(出版部)

传 真:0731-88822264(总编室)

网 址:<http://press.hnu.edu.cn>

电子邮箱:xiaoshulianwenhua@163.com

版权所有,盗版必究

图书凡有印装差错,请与营销部联系



前 言

本书是依据《高等学校物理实验教学基本要求》编写而成，符合大学学生的物理概念与实验基础知识水平。重点强调实验的技能与方法训练，同时也兼顾知识的拓展，编入了大学物理课程中不曾讲到的知识点，增加了与各个实验相关的知识，使得学生能够通过此类内容更好地理解教材内容，从而顺利完成各种技能的训练。

本书一共编入了 28 个实验项目，总体编排基本上仍按通行的三层次结构，即分为基本物理实验、综合性实验、设计性实验三部分。在基本物理实验部分，尽量选择与高中物理概念相联系的项目，与物理理论教学体系保持一致，便于学生系统地掌握知识，将主要精力集中在基本实验技能训练、主要实验方法学习和对实验基础理论知识的掌握和运用上。在综合性实验部分，所涉及的知识点内容将有所加深，训练的内容也向综合性过渡。在设计性实验部分，要求学生训练和加强简单的实验设计能力，从而进一步提高综合能力。

本书相较于传统教材的编写有所变化，编写时重点加强了对理论知识理解的要求。为帮助学生在还不具备实验相关物理知识的情况下顺利阅读和理解教材内容，我们在每个实验的开头都介绍了实验中所用到的主要理论和概念，从而帮助学生顺利完成实验。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者提出宝贵意见与建议。

编 者
2025 年 9 月

目 录

第一章 绪论 / 1

- 第一节 物理实验课程的地位、作用与任务 / 2
- 第二节 物理实验课程教学内容的基本要求 / 3
- 第三节 物理实验课程的基本程序 / 3
- 第四节 物理实验室规则 / 5

第二章 实验数据处理 / 7

- 第一节 物理量的测量及结果表达 / 8
- 第二节 有效数字及其运算法则 / 10
- 第三节 测量误差及分析 / 13

第三章 基本物理实验 / 16

- 实验一 规则物体密度的测量 / 17
- 实验二 用拉脱法测量液体表面张力系数 / 23
- 实验三 用复摆测重力加速度 / 30
- 实验四 刚体转动惯量的测量 / 35
- 实验五 液体黏度的测量 / 39
- 实验六 霍尔效应法测量磁感应强度 / 45
- 实验七 固体比热容的测量 / 50
- 实验八 惠斯通电桥测电阻 / 52
- 实验九 电位差计的使用 / 56
- 实验十 电表的改装 / 61
- 实验十一 透镜焦距的测量 / 66
- 实验十二 牛顿环实验 / 70



第四章 综合性实验 / 75


- 实验十三 梁弯曲法测量杨氏弹性模量 / 76
- 实验十四 用双臂电桥测量低电阻 / 86
- 实验十五 电子示波器的调节和应用 / 91
- 实验十六 分光计的调节和使用 / 99
- 实验十七 用光栅测量光波的波长 / 107
- 实验十八 磁阻效应及磁阻传感器的特性研究 / 112
- 实验十九 热电偶温度计的定标与测温 / 118
- 实验二十 声速的测量 / 125
- 实验二十一 固体热导率的测量 / 128
- 实验二十二 电介质介电常数的测量 / 132

第五章 设计性实验 / 137

- 实验二十三 不规则石蜡块密度的测量 / 138
- 实验二十四 伏安法测电阻及电表的选择 / 139
- 实验二十五 万用表电路的设计与组装 / 142
- 实验二十六 交流电桥的设计和应用 / 150
- 实验二十七 迈克尔逊干涉仪的组装、调节和应用 / 158
- 实验二十八 电饭锅温度控制电路的设计 / 164

附录 / 170

- 附录一 电磁学实验基本知识 / 171
- 附录二 光学实验基本知识 / 177



第一章 绪论



第一节 物理实验课程的地位、作用与任务

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域，应用于生产技术的许多部门，是其他自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中，物理学展现了一系列科学的世界观和方法论，深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活，是人类文明的基石，在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

一、课程的地位、作用和任务

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法训练和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本课程的具体任务如下。

(1) 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生分析问题的能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

二、本课程对学生能力培养的基本要求

(1) 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题，掌握实验原理及方法，做好实验前的准备；正确使用仪器及辅助设备，独立完成实验内容，撰写合格的实验报告；培养学生独立实验的能力，逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法，具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法，逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，激发学生的学习主动性，逐步培养学生的创新能力。



第二节 物理实验课程教学内容的的基本要求

大学物理实验包括普通物理实验(力学、热学、电磁学、光学实验)和近代物理实验,具体的教学内容基本要求如下。

1. 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力

(1)掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2)掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

2. 掌握基本物理量的测量方法

掌握长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量,注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

3. 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用

了解比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、干涉法和衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

4. 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用

掌握长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

各校应根据条件,在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,如激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

5. 掌握常用的实验操作技术

掌握零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

6. 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识

通过适当介绍一些物理实验史料和物理实验应用知识,对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育,使学生了解科学实验的重要性,明确物理实验课程的地位、作用和任务。

第三节 物理实验课程的基本程序

物理实验的教学方式以实践训练为主,学生应在教师的指导下,充分发挥主观能动性,加强实践能力的训练。物理实验通常分为以下几个环节。



处理的一些方法如列表法、作图法、逐差法等进行数据处理，这时要遵守这些数据处理的规则，要求作图的，应按作图规则用坐标纸画出，并写上图名。

结论：要将最终的实验结果写清楚，不要将其湮没在处理数据的过程中。

问题分析与讨论：要善于对实验结果进行总结和分析，看看自己能否提出一些改进的意见，创新能力往往是在平时一点一滴的思考中逐渐形成的。

第四节 物理实验室规则

实验课和理论课的重要区别之一就是实验课不能在宿舍或自习室通过自习完成。学生要在实验室和各种实验仪器打交道。为了保护公共财产，防止出现安全事故，某大学物理实验室制定了相应的规则，希望同学们能理解并自觉遵守。

大学物理实验室规则

(1)物理实验是理工科大学生必学的一门独立课程，物理实验成绩的好坏，不但影响奖学金评定，而且影响升级、留级及退学，故请大家认真学好这门课程。因为物理实验是一切物理理论的基础，物理实验方法、物理实验技能、物理实验仪器几乎被所有学科、所有专业的科学实验广泛采用，任何高、精、尖的科学实验仪器，若把它拆成零部件，则基本上在物理实验中使用过或见过，所以，物理实验在自然科学中的重要地位显而易见，因此我们希望同学们花费一定的时间来学好物理实验这门课，并且相信你们在将来的实际工作中会发现这门课真的有用。

(2)每次实验前必须针对本次实验的内容和目的，进行充分认真的学习，搞清本实验采用的方法、原理、使用的仪器、测量的内容等，并且会推导有关计算公式，掌握和弄清所用主要仪器的工作原理，各仪器的使用方法，实验的调节测量步骤及有关注意事项等，在此基础上，写好预习报告。

(3)认真实验。每次实验必须在规定的时间内(开放式实验按自己选课时间)按时到实验室完成规定的内容，不得迟到、早退和缺席，原则上不补做。凡因公(见教务处证明)或因病(见医务室证明)不能按时实验的，须持有效的证明先到实验室请假，所缺的实验和任课老师协商另行补做。

(4)每次实验必带物理实验课本，补充资料，实验报告和记录用的笔、纸及绘图工具和计算器等。

(5)进入实验室后，按老师安排的座位找好自己的实验台桌。实验时，一般由老师讲解主要实验原理，主要仪器的工作原理、操作步骤及注意事项，每个学生都要认真听取。绝不允许在老师讲解时不听，动手实验时盲目实验，损坏仪器。

(6)动手实验前，首先清点仪器，检查仪器有无问题，发现仪器不够或有问题时，找老师解决，不许自己随意更换仪器。有的易损或易丢失的仪器或材料找老师借领，实验结束时归还，凡损坏或丢失仪器者，均按学校有关规定，赔偿一定的经济损失。

(7)实验中要认真对照书和有关资料及仪器，做到心中完全有数后，才开始动手操作或调试仪




器。即本实验要测些什么量，各量分别用什么仪器去测，各仪器的测量条件是什么，怎样调节才能满足这些条件，怎样判断这些条件是否已经满足，测到数据后要验算是否合乎要求，不合要求要查出原因或找老师帮助，不能盲目实验，不许违反仪器的操作规程。凡违反规程损坏仪器者，均按学校有关规定处理。

(8) 实验中要如实记录实验数据，严格养成实事求是的科学作风，不许伪造数据。物理实验教学的主要目的，不偏重于使学生得到最好的实验结果，而在于通过实验，获得物理实验知识，掌握实验方法，培养实验技能，提高动手能力和独立解决问题、排除实验故障的能力，对所得实验结果较差时，只要能找到原因，同样可得到较好的成绩。

(9) 实验时，不准大声喧哗吵闹，不得随地吐痰、乱丢纸屑，不准在实验室内抽烟、吃东西等，且每学期每个学生打扫一次实验室。

(10) 当实验数据全部测完后，不要急于收拾仪器，应先经自己验收基本合格后，再请老师验收，合格后老师签字，再清理仪器，把仪器摆放整齐，并交还临时借用的器件后，方可离开实验室。

(11) 实验结束后，要及时认真地完成实验报告。写实验报告时，字迹要整齐清洁，并按时交老师批改，且由老师签字的原始数据要粘贴在实验报告中一起交给老师，报告上必须写清专业名称、班号、学号和姓名。



第二章 实验数据处理



第一节 物理量的测量及结果表达

为获得被测物理量的量值而实施的一组操作称为测量。这个定义中所说的“一组操作”，是实验的全过程，既包括实验操作，也包括数据处理。

一、测量及其分类

1. 直接测量和间接测量

根据测量方法，可将测量分为直接测量和间接测量两大类。

直接测量是指可直接从测量仪器或量具上读出待测量大小的测量。例如用卡尺测直径，用天平测物体的质量，用电压表测电路中的电压等。间接测量是指利用直接测量量与被测量之间的已知函数关系，通过运算而得到该被测量的量值，例如通过测量电路中的电流和电阻上的电压，再用公式计算出该电阻的阻值。

某物理量能不能直接测量并不是绝对的。随着科学技术的发展、测量仪器的研发，很多原来只能间接测量的物理量，可以实现直接测量了。例如测量密度的基本方法是典型的间接测量，但借助专用传感器也可以实现直接测量。大学物理实验中大多数物理量的测量都是间接测量，但直接测量是间接测量的基础。

2. 单次测量和多次测量

根据具体测量方案，对某物理量可安排单次测量或多次测量。当随机误差远小于系统误差时，或因条件限制只能测量一次时，或对测量结果精度要求不高时，采取单次测量。一般情况下应采取多次测量。

3. 等精度测量和非等精度测量

对多次测量，根据测量条件是否相同，又可分为等精度测量和非等精度测量。

在相同测量条件下进行的多次测量是等精度测量。如同一个人，使用同一仪器，采用同样方法，在同样的操作环境下，对同一测量对象进行反复多次的测量，获得一组测量数据 x_1, x_2, \dots, x_n ，各次测量结果都是独立的，没有任何理由判断某一次测量更为精确，故将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量，这样的一组测量数据称为测量列。

在对某物理量进行多次测量时，测量条件完全不同或部分不同，各次测量结果的可靠程度也不完全一样，这样的测量称为非等精度测量。处理非等精度测量结果时，需根据每个测量值的“权重”进行“加权平均”，因此在一般的物理实验中很少采用。

由于在实验中一般无法保持测量条件完全不变，所以严格的等精度测量是不存在的。当某些条件的变化对测量结果影响不大或可以忽略时，则可将这种测量视为等精度测量。在大学物理实验中，有关测量误差与数据处理的讨论，都是以等精度测量为前提的。

二、测量列实验标准差

实验标准差是表征测量列分散性的量。



对同一物理量重复测量 n 次, 得到测量列 x_1, x_2, \dots, x_n 。由于随机因素的影响, 这些测量值各不相同, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 这个测量列的算术平均值

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

称为总体均值。

而

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

称为总体标准差。在实际工作中 $n \rightarrow \infty$ 是做不到的, 因此 μ 和 σ 只是理论上存在, 所以有时 μ 称为理论均值, σ 称为理论标准差。在实验操作时, n 只能取有限值。当 n 有限时, x_i 的算术平均值

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

称为样本均值, 可作为 μ 的最佳估计值。而理论标准差 σ 的估计值由贝塞尔公式给出:

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

称为测量值的实验标准差, 有时也称为样本标准差。“样本”二字指在无限多个测量值中取有限个测量值为样本。实验标准差 $S(x_i)$ 就是表示测量结果的分散性的量。 $S(x_i)$ 越大, 表明测量结果的分散性越大; $S(x_i)$ 越小, 表明测量结果的分散性越小。当取样本较少, 即 n 较小时, $S(x_i)$ 的值不稳定, 当 n 增大时, $S(x_i)$ 值趋于一个稳定的值。

三、测量不确定度

测量不确定度表示被测量的真值处于某一量值范围的评定, 它表示由于测量误差的存在而对被测量真值不能确定的程度。测量不确定度按字面可理解为对测量结果正确性的可疑程度, 也可理解为表征被测量真值所处范围的一个参数。前者只是定性的说明而难以定量的表述, 后者因涉及真值这一概念而缺乏可操作性。对测量不确定度最新的定义是: “表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数。” 分散性的含义为一个量值区间, 测量结果在这个区间出现, 而不是一个确定的值。

1. 测量列标准不确定度

测量不确定度来源于多个因素, 因而它由多个分量组成。其中一些分量可用测量列的统计分布计算, 称为 A 类不确定度, 用实验标准差表征, 记为 u_A 。另一些分量用不同于统计分布的方法计算, 称为 B 类不确定度, 也用标准差来表征, 记为 u_B 。而

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

称为测量列标准不确定度。

2. 合成标准不确定度

在间接测量的情况下, 测量结果 y 是其他直接测得量 x_i 的函数:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$



当各 x_i 彼此不相关时, 按这些量的标准不确定度算得 y 不确定度, 称为 y 的合成标准不确定度, 以 u_c 表示:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u_2^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u_n^2}$$

式中, u_i 是 x_i 的标准不确定度; $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 是 u_i 的传播系数。

3. 扩展不确定度

有了合成标准不确定度, 可以得到扩展不确定度 U 。扩展不确定度 $U = ku_c$, k 称为置信系数, 通常取 $k=2$ 。

扩展不确定度是确定测量结果存在区间的量, 在这个区间内, 包含了合理赋予被测量量值的大部分。假如测量结果为 \bar{x} , 扩展不确定度为 U , 则这个区间是指 $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$ 。扩展不确定度 U 与合成标准不确定度 u_c 的区别在于: U 所确定的区间比 u_c 所确定的区间有更大的置信概率来包含被测量之值, 因而在量值上前者比后者大。在某些特殊应用场合也可取 $k=1$ 或 $k=3$, 但在表达结果时须注明 k 的大小。

四、测量结果表达式

得到扩展不确定度, 即可得到测量结果表达式

$$y = \bar{y} \pm U$$

下面对结果表达式做几点说明。

- (1) 直接测量结果表达也要用扩展不确定度 $U=2u$, 表达式为 $x = \bar{x} \pm U$ 。
- (2) 表明被测物理量的量值以较大概率包含于 $(\bar{y}-U, \bar{y}+U)$ 或 $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$ 区间之内, 这一概率可达到 95% 以上。
- (3) 测量结果表达式必须附有被测物理量单位, 如测某地区重力加速度 g , 结果表达为

$$g = (9.782 \pm 0.006) \times 10^2 \text{ cm/s}^2$$

第二节 有效数字及其运算法则

一、有效数字的概念

正确而有效地表示测量和实验结果的数字, 称为有效数字。它由可靠的若干位数字加上可疑的一位数字构成。从表达上说, 从左端第一个非零数字到右端最后一位的所有数字均为有效数字。如测量值 2.72cm 和 2.70cm, 都是 3 位有效数字, 2.7 是可靠数字, 尾数“2”和“0”是可疑数字(估读的), 但它们在一定程度上反映了客观实际, 因此也是有效的。

应当指出, 测量结果中第一位(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 说明不确定



度范围是 $0.01\sim 0.09\text{cm}$ ，而 1.0900cm 的不确定度范围只有 $0.0001\sim 0.0009\text{cm}$ ，它的测量精度要高得多。

需要牢记的是有效数字末位数字恒是可疑数字(不确定度所在位)。学生易错的是漏掉可疑位的“0”。如测量值 2.70cm 是 3 位有效数字，可疑位是“0”。如果因为可疑位数字是“0”而漏写(不写)，写成 2.7cm ，则本来是可靠位数字的“7”被认为是可疑数字，变成了 2 位有效数字，严重降低了测量水平，是错误的。

二、有效数字的读取

在物理实验教学中，经常会遇到读数取几位数和运算结果取几位数的问题，其实只要掌握有效数字末位数字恒是可疑数字这一法则，问题就迎刃而解了。下面就测量值有效数字读取一般规律作简要介绍。

1. 十分度标尺

测量仪器的读数装置带有十分度标尺(最小分度值为 1 个单位)时，读数为可靠位(最小分度值整数倍)加上估读位(可疑位)，若读数恰为整数，则估读位记为 0。例如图 2-1 所示，该直尺的分度值是 1mm ，读成 84.6mm ，末位数 6 是可疑的，如果有人估读为 7，读成 84.7mm 也是合理的。

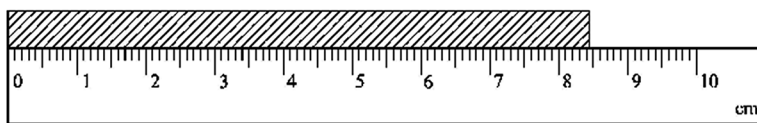


图 2-1 直尺读数示意图

2. 游标卡尺

做物理实验经常用到带有游标卡尺的仪器，如游标卡尺、分光计及电位差计等。此时直接按游标原理正确读数即可。这里需要说明的是游标卡尺读数末位不是估读的，但它仍然是可疑的，因为所谓“两刻线对齐”是相对的(用放大镜看一下也许会发现并不严格对齐)。因此与有效数字末位是可疑位并不矛盾。如图 2-2 所示读数为 21.44mm ， 0.04 是可疑位，如读成 0.02 或 0.06 都是错误的，可见精度比直尺提高了很多。

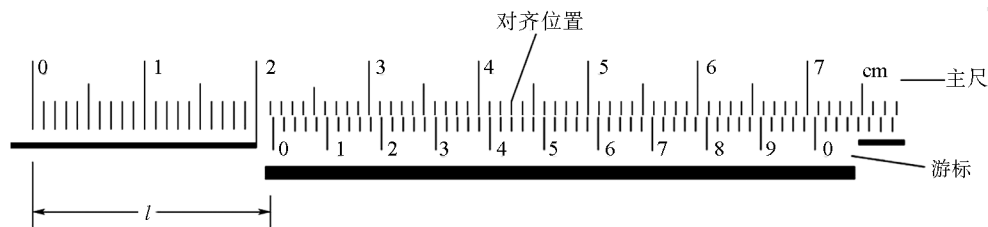


图 2-2 游标卡尺读数示意图

3. 十步进式标度盘

电磁学实验经常用到电阻箱、电容箱、电桥及电位差计等，标度盘上排列多个十步进旋钮，一般将各旋钮示值加起来即为标度盘读数，例如图 2-3 所示的电阻箱，读作 1032.0Ω 。但有时读数的有效数字由实验时的灵敏度决定。



1032.0Ω

图 2-3 6 旋钮电阻箱读数

例如在“灵敏电流计研究”实验中，测临界电阻时，调节电阻箱“×1Ω”旋钮，仪器才刚有反应，则读数有效数字只能记到“×1Ω”，读数为 1032Ω。尽管还有最小步进“×0.1Ω”旋钮，但其示值是无效的。

4. 其他

数显仪表一般直接读取仪表示值，末位仍是可疑的。

非十分度标尺读数要根据具体情况读取有效数字。例如，用量程为 150mA、75 格分度的电流表测电流，最小分度为 2mA，读数误差按 0.2 格即 0.4mA 估计，因此可以取至小数点后一位。

三、有效数字的运算法则

在有效数字的运算过程中，为了不因运算而损失有效数字，影响测量结果的精确度，并尽可能地简化运算过程，归纳以下有效数字运算规则，这些规则简单易记，其合理性是可以证明的。

1. 加减法运算

主要看参与运算各量有效数字的末位，运算结果的末位应与其中末位最高的相同。

例如， $N=A+B+C-D$ ，合成扩展不确定度 $U_N = \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 + U_D^2}$ ， U_N 一定大于 4 个不确定度分量中最大者，因之 N 的末位应与 4 个分量中有效数字末位最高者相同。如 $A=5472.3$ ， $B=0.7536$ ， $C=1214$ ， $D=7.26$ ，则有效数字最后一位位数最高者是 C 。因此， N 的有效数字取至与 C 相同，即

$$N = 5472.3 + 0.7536 + 1214 - 7.26 = 6679.7936 = 6680$$

根据有效数字末位恒是可疑位，我们将可疑位以下划线标记，最后结果只保留一位可疑位，其结果 N 的末位亦应与 C 相同。

2. 乘除法运算

运算结果的有效数字应与参与运算各量中有效数字最少的相同。

例如 $N = \frac{ABC}{D}$ ，合成相对不确定度 $\frac{U_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{U_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{U_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{U_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{U_D}{D}\right)^2}$ ， $\frac{U_N}{N}$ 一定大于 A, B, C, D 中相对不确定度的最大者，相对不确定度最大者一定是有效数字位数最少者。因此，



N 的有效数字应与 A, B, C, D 中有效数字位数最少的位数相同。如 $A=80.5, B=0.0014, C=3.08326, D=764.9$, 则

$$N = \frac{ABC}{D} = \frac{80.5 \times 0.0014 \times 3.08326}{764.9} = 4.5 \times 10^{-4}$$

补充规定: 如最后结果的第一位数是 1、2, 则在上述原则的基础上, 可多保留一位。

3. 混合四则运算

应按前述原则按部就班地进行运算, 并获得最后结果。

4. 其他运算

(1) 对数运算。对数的小数点后的有效数字位数与真数的位数相同。例如 $y = \ln x$, 式中 $x=888$, 经计算器运算得 $\ln 888=6.788971$, 结果为 $\ln 888=6.789$ 。

(2) 指数运算结果有效数字与指数相同。例如 $y = e^x$, $x=9.14$, 计算器给出 $y=9320.7651$, 再取 3 位有效数字, 则 $y=9.32 \times 10^3$ 。

(3) 乘方开方等有效数字位数不变。

(4) 三角函数运算。对 $y = \sin x$, 若 x 的末位是度, 则 y 取 2 位数, 若 x 的末位为分, 则 y 取 4 位数。例如 $\sin 30^\circ=0.50, \sin 30^\circ 0' = 0.5000$ 。

(5) 对于公式中的常数 (π, e 等) 的有效数字位数可以认为是无限制的, 在计算中其有效数字位数取比参与运算的各数中有效数字位数最多的多一位。

以上阐述的有效数字的运算和取位规则, 其合理性是不难证明的。只需用不确定度的传播定律, 根据参与运算各分量的不确定的量值, 就能比较容易地估算出 y 的不确定的数量级。进而确定 y 的末位是在哪一位。

对于各种函数运算, 如指数运算、对数运算、三角函数运算、乘方运算、根式运算等, 不必死记上述规则。如果手头有一台计算器, 只要在 x 的末位 +1 (或 -1), 比较两个运算结果最先出现差异的那一位, 便应是 y 的末位。其实 y 的这个差异是由 x 的差异导致的。例如 $\ln 888=6.788971, \ln 887=6.787845$, 由于 x 末位的差异, 使得 y 在小数点后第 3 位产生差异, 所以应取为 $y=6.789$; 又如 $\sin 30^\circ=0.5000, \sin 31^\circ=0.5150$, 所以 $\sin 30^\circ=0.50$ 。

四、有效数字的标准表示形式

为便于处理过大和过小的数据, 常把有效数字写成小数点前是一位非零整数, 而后乘以 10 的幂形式, 称为有效数字的科学表示法。例如, 中国人口 14 亿 1 千万, 只有 3 位有效数字, 不应写成 1410000000, 而应写成 1.41×10^9 或 14.1 亿。再如 $(0.000635 \pm 0.000007) \text{m}$, 书写起来也很不方便, 应写成 $(6.35 \pm 0.07) \times 10^{-4} \text{m}$ 。

第三节 测量误差及分析

测量结果减去被测量的真值称为测量误差。

对于单次测量, 测量值就是测量结果; 对于重复性测量, 算术平均值就是测量结果。若以 \bar{x} 表



示测量结果，以 x_0 表示真值，则测量误差为

$$\Delta x = \bar{x} - x_0 \quad (2-1)$$

误差与不确定度是两个完全不同的概念，不应混淆和误用。在数轴上，误差是一个点，可正可负，不确定度是一个区间，不能带负号。误差大小不以人的认识程度而改变，但无法准确得到。不确定度的大小与人的认识程度有关，可以通过适当的评定和计算得到。不同的测量结果，其误差必定不同，但不确定度可以相同。同理，测量结果相同，其测量误差必定相同，但测量不确定度可以不相同。测量误差按其产生的原因和性质可分为随机误差和系统误差。

一、随机误差

由随机效应导致的误差称为随机误差。对同一物理量进行重复性测量得到 n 个测量值，这些测量值的误差时大时小、时正时负而不可预知。这些不可预知的变化称为随机效应。正是随机效应导致了重复测量中的分散性。随机误差的量值等于测量结果减去总体均值。若以 \bar{x} 表示测量结果， μ 表示测量列的总体均值，则随机误差可表示为

$$\epsilon = \bar{x} - \mu \quad (2-2)$$

上式中 μ 值不能准确得到，故随机误差的量值也不能准确得到。

当测量次数足够多时，各测得值的随机误差分布服从统计规律，随机误差的主要特性可归纳为有界性和对称性。

有界性是指测量随机误差的绝对值不会超过一定的界限，即不会出现绝对值过大的误差。对称性是指绝对值相等而符号相反的随机误差出现的次数大致相等，即测量值是以它们的算术平均值为中心而对称分布的，这样，所有误差的代数和趋近于零，所以随机误差又具有抵偿性。

当误差分布呈现正态分布、矩形分布和三角分布时，随机误差还具有单峰性，如图 2-4 所示。

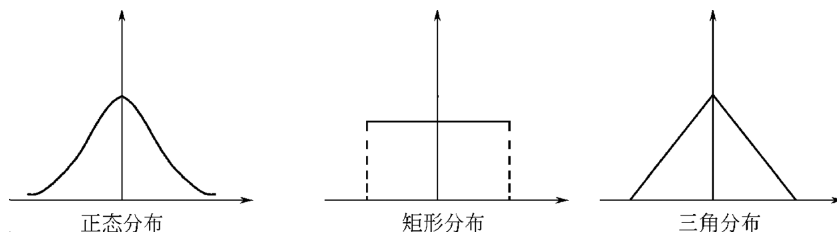


图 2-4 随机误差的单峰性

二、系统误差

由系统效应导致的误差称为系统误差。这里所说的系统效应主要来源于：测量方法不理想，对环境条件的测量和控制不完善，测量仪器性能不完善等。在物理实验教学中，由测量仪器性能不完善而引起的误差常常成为我们重点分析的误差来源。

系统误差的量值等于总体均值减去被测量的真值。若以 μ 表示总体均值， x_0 表示真值，则系统误差为

$$\delta = \mu - x_0 \quad (2-3)$$

由于 μ 与 x_0 都是理想的概念，故系统误差也是无法准确得到的。

由式(2-1)~式(2-3)可得



$$\Delta x = \epsilon + \delta \quad (2-4)$$

式(2-4)表明, 测量误差等于随机误差与系统误差的代数和。由于随机误差和系统误差都是无法准确得到的, 所以用式(2-4)不能将误差计算出来。但它清楚地说明了这样一个事实: 测量误差是由随机效应和系统效应共同影响的结果。所以在分析不确定度来源时, 既要考虑由随机效应引起的不确定度, 又要考虑由系统效应引起的不确定度。

在做实验结果误差分析时, 应重点考虑系统误差。系统误差按其产生的原因可分为仪器误差(由于仪器本身欠缺或安装调整不当而造成的)、理论误差(由于实验原理不够完善或测量所依据的理论的近似性所造成的)和环境误差(由于外界环境偏离标准条件造成的); 按其掌握程度可分为已定系统误差和未定系统误差; 按其处理方法可分为可修正系统误差、可消除系统误差和可估算系统误差, 见表 2-1。系统误差的一部分被修正, 一部分被消除, 余下的部分可以用非统计学方法进行估算。可估算的系统误差分量与随机误差分量按一定的方法合成测量不确定度。

表 2-1 系统误差的分类和处理方法

分类		处理方法	举例
按掌握程度	按处理方法		
已定	可修正	加修正值; 用公式修正	千分尺零点修正; 伏安法测电阻修正公式
未定	可消除	采用适当的测量方法	交换法、替代法、补偿法等
未定	可估算	用非统计学方法估算	凭相关知识和经验; 根据仪器的有关资料

The background features several overlapping blue geometric shapes. A large, light blue shape on the left has a semi-circular cutout on its right side. A smaller, solid blue circle is positioned to the right of this shape. Below the large shape, there is another light blue shape that extends to the right and then curves downwards. The text is centered within the semi-circular cutout of the largest shape.

第三章
基本物理实验



实验一 规则物体密度的测量

密度是表述物质内在特性的物理量，与其组成的物体形状、光泽等外部特性无关。当一个物体分布在空间、面和线上时，各微小部分所包含的质量对其长度、面积和体积之比，统称为密度。需要区别时，可分为线密度、面密度和体密度，体密度常简称为密度。对于均匀物质来说，密度为物质的质量 M 与其体积 V 之比，在国际单位制中，密度的单位为 kg/m^3 。

密度测量不仅在物理、化学研究中是重要的，而且在石油、化工、采矿、冶金及材料工程中都有重要意义。

本实验要求学生用卡尺、螺旋测微器测量规则物体的体积，用物理天平测量规则物体的质量，由定义式求出该物体密度。

实验目的

- (1) 学习游标卡尺和螺旋测微器的原理，掌握游标卡尺和螺旋测微器的正确使用。
- (2) 掌握物理天平的构造和使用方法。
- (3) 学会实验数据的处理方法，正确写出测量结果表达式。

实验原理

待测物体如图 3-1 所示，由大小两个圆柱体组成。该物体的体积 V 为

$$V = \frac{1}{4}\pi(d^2 h_1 + D^2 h_2) \quad (3-1)$$

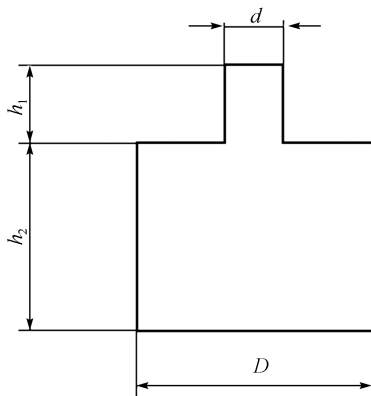


图 3-1 待测物体尺寸示意图

若该物体质量为 M ，则该物体密度 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi(d^2 h_1 + D^2 h_2)} \quad (3-2)$$



仪器介绍

一、游标卡尺

游标卡尺一般由尺身(主尺)、尺框(附游标)、量爪和深度尺等组成(图 3-2)。尺身上刻有间距为 1mm 的刻度,尺框可沿尺身滑动,游标固定在尺框上。外量爪用来测量物体的长度和外径,内量爪用来测量内径,深度尺用来测量深度。

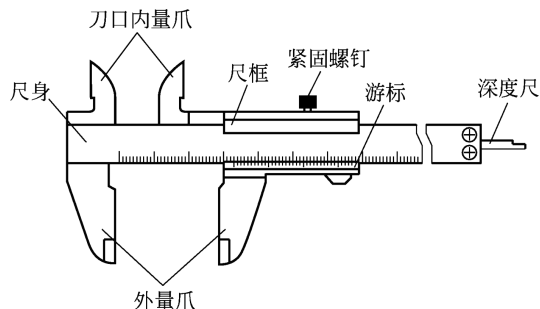


图 3-2 三用游标卡尺

1. 游标原理

主尺上 $(n-1)$ 个分格的长度等于游标上 n 个分格的长度。设主尺每分格长度为 a (1mm), 游标每分格长度为 b , 则有 $nb = (n-1)a$, 于是最小分度值为 $\Delta = a - b = \frac{a}{n}$ 。常见 n 为 10, 20, 50, 对应卡尺最小分度值分别为 0.1mm, 0.05mm, 0.02mm。

2. 读数方法

使用游标卡尺进行测量时,首先要弄清楚分度值是多少,然后看清楚游标的第几根刻线与主尺的某刻线对齐,具体步骤如下:

- (1) 由游标“0”线在主尺上的位置读出整毫米数,图 3-3 所示为 21mm;
- (2) 找到游标刻线与主尺上某刻线对齐位置,从游标读数副尺(0~9)上读出毫米下一位读数,图 3-3 所示为 0.4mm;
- (3) 数出对齐位置到副尺读数“4”的游标分格数,乘以分度值得出毫米百分位,图 3-3 所示为 $2 \times 0.02 = 0.04\text{mm}$;
- (4) 将以上三步读数加起来,即该测量值为 21.44mm。

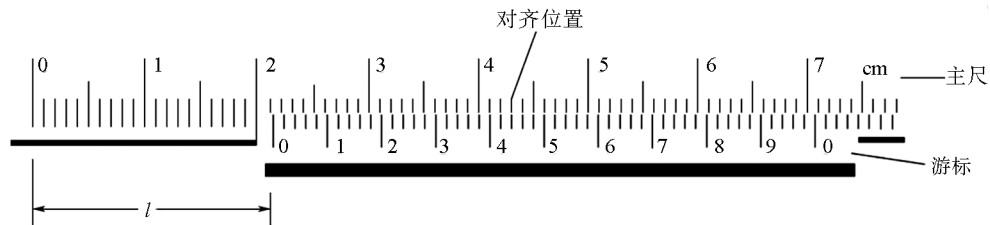


图 3-3 分度值 0.02mm 卡尺读数示例



3. 注意事项

用游标卡尺测量前,应先检查零点,即合拢量爪,检查游标零线和主尺零线是否对齐,如零线未对齐,应记下零点读数,加以修正。不允许在卡紧的状态下移动卡尺或挪动被测物,也不能测量表面粗糙的物体。一旦量爪磨损,游标卡尺就不能作为精密量具使用了。

二、螺旋测微器

螺旋测微器又称千分尺,是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。实验室常用的螺旋测微器外形如图 3-4 所示,其量程为 25mm,分度值为 0.01mm,仪器的示值误差(仪器误差)为 0.004mm。

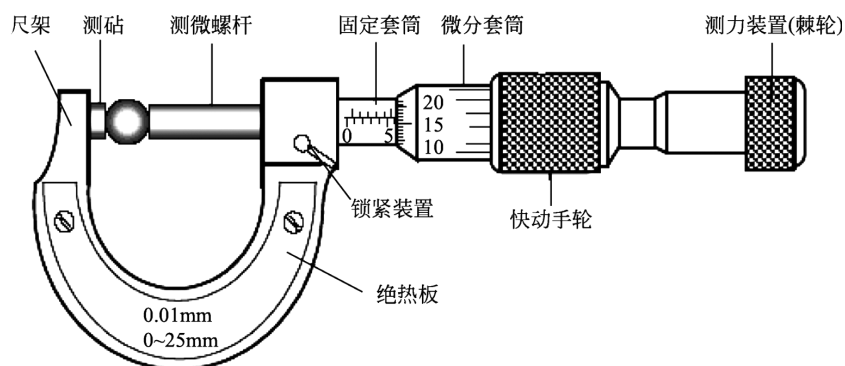


图 3-4 螺旋测微器结构示意图

螺旋测微器的主要部件是精密测微螺杆和套在螺杆上的固定套筒以及紧固在螺杆上的微分套筒。测砧和固定套筒都压合在尺架上,测微螺杆旋在固定套筒内。套筒内有光滑的槽,保证测微螺杆移动方向的准确性。固定套筒上的主尺有两排刻线,毫米刻线和半毫米刻线。微分套筒圆周上刻有 50 个等分格,当它转一周时,测微螺杆前进或后退一个螺距(0.5mm),所以螺旋测微器的分度值为 0.01mm。

1. 螺旋测微器正确使用

(1)快动手轮的作用。测量者转动螺杆时对被测物所加压力的大小会直接影响测量的准确度,为此,螺旋测微器在结构上加一测力装置(棘轮)作为保护装置。转动快动手轮是用来使测微螺杆接近或离开被测物体用的,不可用之夹紧被测物体进行测量,因为它传给测微螺杆的压力不可控制,严重影响测量精度。

(2)测量时必须用测力装置(棘轮)。转动测力装置(棘轮),能将一定大小的扭矩传给测微螺杆,此扭矩能保证测力为 5~9N。当测微螺杆端面将要接触到被测物之前(测零点螺杆将要闭合时),应旋转测力装置(棘轮);匀速旋转棘轮,接触上被测物后,棘轮就自行打滑,并发出“嗒嗒”声响,此时应立即停止旋转棘轮,进行读数。仪器用毕放回盒内之前,记住要将螺杆退回几圈,留出空隙,以免热胀使螺杆变形。

2. 螺旋测微器的读数方法

(1)测量前后应进行零点校正,即要从测量读数中减去零点读数。零点读数时顺刻度序列记为正值,反之为负值。如图 3-5 所示是顺刻度序列,零点读数为 +0.006mm;图 3-6 所示是逆刻度序列,零点读数为 -0.002mm。

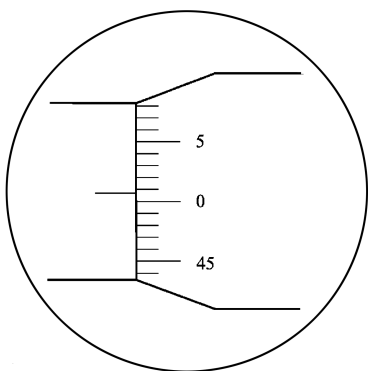


图 3-5 零点读数+0.006mm

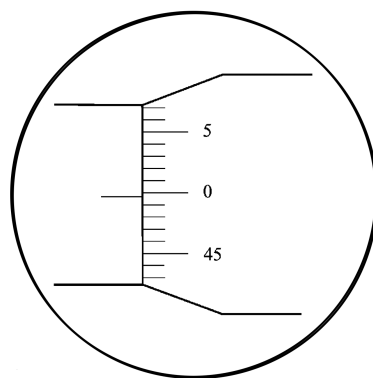


图 3-6 零点读数-0.002mm

(2) 读数时由主尺读整刻度值，0.5mm 以下由微分套筒读出，并估读到 0.001mm 量级。如图 3-7 所示，主尺上的读数为 5mm，微分套筒上的读数为 0.338mm，其中 0.008mm 是估读的数，最后读数为 5.338mm。

要特别注意主尺上半毫米刻线，如果它露出到套筒边缘，主尺上就要读出 0.5mm 的数。如图 3-8 所示，读数为 5.804mm。

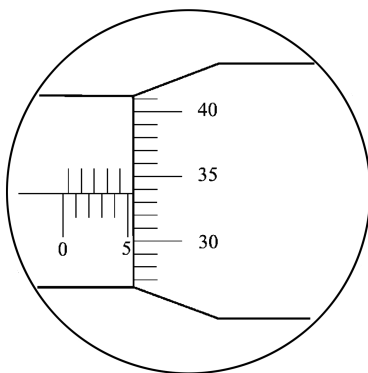


图 3-7 读数 5.338mm

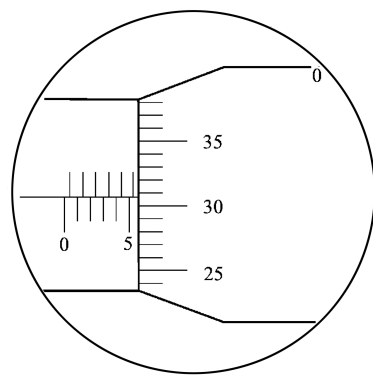


图 3-8 读数 5.804mm

三、物理天平

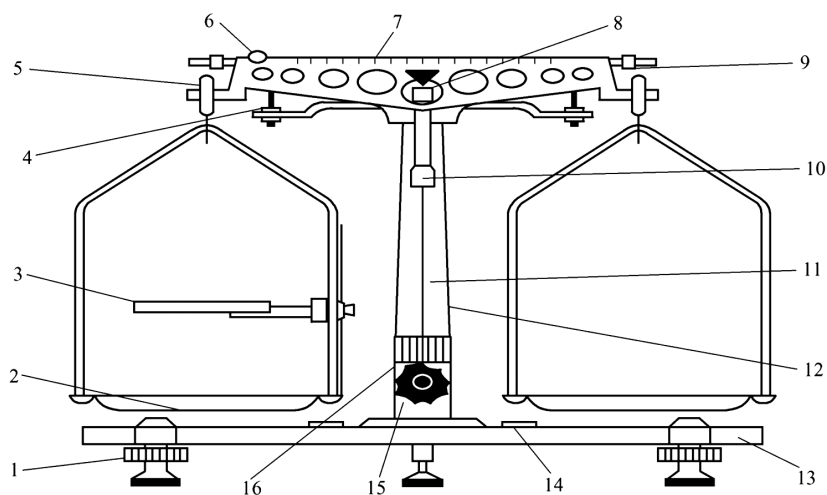
物理天平是常用的测量物体质量的仪器，其结构示意图见图 3-9。天平的横梁上装有三个刀口，中间刀口置于支柱上，两侧刀口各悬挂一个秤盘。横梁下面固定一个指针，当横梁摆动时，指针尖端就在支柱下方的标尺前摆动。扭动旋钮可以使横梁上升或下降，横梁下降时，制动架就会把它托住，以避免磨损刀口。横梁两端的两个平衡螺母是天平空载时调平衡用的。横梁上装有游码，用于 1g 以下的称衡。支柱左边的托盘可以托住不被称衡的物体。

1. 物理天平的规格

(1) 分度值。本实验所用物理天平分度值为 0.1g。根据测量实践，在设法消除不等臂误差的测量条件下，可以粗略地认为，天平的分度值可作为它的最大允许误差，即 $\Delta_{\text{仪}} = \text{分度值}$ 。

(2) 感量。感量是指天平平衡时，为使指针偏转 1 分格在一端需加的质量(克/格)。感量越小，天平的灵敏度越高。天平感量一般应由实际测量确定，若已测得天平感量，可将感量的一半作为仪器误差。

(3) 称量。称量是允许称衡的最大质量。本实验所用天平的称量为 1000g。



1—调节螺母；2—秤盘；3—托架；4—支架；5—挂钩；6—游码；7—游码标尺；
8—刀口、刀垫；9—平衡螺母；10—感量调节器；11—读数指针；12—支柱；
13—底座；14—水准仪；15—启动旋钮；16—指针标尺

图 3-9 物理天平结构示意图

2. 物理天平操作程序

(1)调水平。使用前应调节底座调节螺母，直至水准仪显示水平，以保证支柱铅直。

(2)调零点。将横梁上副刀口调整好并将游码移至零位处，转动启动旋钮升起横梁，观察指针摆动情况。若指针在标尺中线左右对称摆动，说明天平零点已调好。若不对称应立即放下横梁，调节横梁两端平衡螺母，再观察，直至调好为止。

(3)称衡。一般将物体放在左盘，砝码放在右盘。升起横梁观察平衡。若不平衡按操作程序反复增减砝码直至平衡为止。平衡时，砝码与游码读数之和即为物体的质量。

3. 使用物理天平时的事项

(1)应保持天平的干燥、清洁，尽可能放置在固定的实验台上，不宜经常搬动；

(2)称衡中使用启动旋钮要轻升轻放，切勿突然升起和放下，以免刀口撞击，被测物体和砝码应尽量放在托盘中央；

(3)称物体时，被称物体放在左盘，砝码放在右盘，加减砝码必须使用镊子，严禁用手；

(4)取放物体和砝码，移动游码或调节天平时，都应将横梁制动(放下)，以免损坏刀口。

实验内容

(1)用游标卡尺深度尺测 h_1 ，变换位置测 6 次；用游标卡尺外径尺测 h_2 ， D ，变换位置测 6 次，记入表 3-1 中。

表 3-1 游标卡尺测量数据表

$\Delta_{\text{卡尺}} = 0.02\text{mm}$ ，零点 = mm

n	1	2	3	4	5	6	平均值	s_x	$s_{\bar{x}}$	u_x
h_1/mm										
h_2/mm										
D/mm										



(2)用螺旋测微器测 d 。

①熟悉螺旋测微器结构及使用,练习零点测量 3~5 次,试验一下旋转棘轮速度不同,对零点读数有无影响,掌控好你的旋转速度。(绝不可以用快动手轮测试零点)

②正式测量零点读数,取 3 次平均值记入表 3-2 表头中。

③用螺旋测微器测 d ,合理变换位置测 6 次,测量值记入表 3-2 中。

表 3-2 用螺旋测微器测 d 数据记录

$\Delta_{\text{千分尺}} = 0.004\text{mm}$, 零点平均值 = mm(标明正负)

n	1	2	3	4	5	6	\bar{d}	s_x	$s_{\bar{x}}$	u_x
d/mm										

④修正值 $d = \bar{d} - \text{零点读数}(\text{mm})$ 。

(3)用物理天平测物体的质量 M 。

①按操作规范正确使用物理天平,在天平水平、零点调好的基础上,测量 1 次物体质量即可(5 位有效数字),记入表 3-3 中。

②测量该物理天平的灵敏度。在天平平衡基础上,加减 1 克砝码,记录左右偏转格数,记入表 3-3 中。

表 3-3 物理天平测质量数据记录

测量项目	M/g	加减 1g 砝码偏转格数			灵敏度 $s/(\text{格}/\text{g})$	感量 $k/(\text{g}/\text{格})$
		左偏	右偏	平均		
测量值						

(4)数据处理,求出该物体密度测量结果表达式。

①分别计算 h_1, h_2, D, d 平均值、标准偏差、算术平均值标准偏差、标准不确定度,记入表 3-1、表 3-2 中。

②质量测量精度偏高(5 位有效数字),其不确定度可忽略。

③按下面示例计算不确定度,写出测量结果表达式。

数据处理示例

举例测量数据见表 3-4,为使数据处理过程简洁,各物理量平均值、标准偏差、算术平均值标准偏差、标准不确定度亦记录于表 3-4 中(仅供读者参考)。

表 3-4 举例测量数据及直接测量结果

$\Delta_{\text{卡尺}} = 0.02\text{mm}$, $\Delta_{\text{千分尺}} = 0.004\text{mm}$

n	1	2	3	4	5	6	\bar{x}	s_x	$s_{\bar{x}}$	u_x
h_1/mm	14.22	14.18	14.24	14.26	14.20	14.22	14.22	0.027	0.011	0.016
h_2/mm	34.94	34.98	34.98	34.96	34.94	34.96	34.96	0.018	0.0073	0.014
D/mm	40.08	40.06	40.08	40.04	40.06	40.08	0.017	0.0070	0.014	—
d/mm	9.982	9.984	9.960	9.982	9.982	9.984	9.983	0.016	0.0068	0.007
M/g	351.41									



将各测量值平均值代入 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi(d^2 h_1 + D^2 h_2)}$ 中, 得

$$\bar{\rho} = \frac{4 \times 351.41}{\pi \times (9.983^2 \times 14.22 + 40.07^2 \times 34.96)} = 7.774 \times 10^{-3} (\text{g/mm}^3)$$

$$= 7774 (\text{kg/m}^3)$$

根据小误差准则, 质量测量不确定度忽略。先求体积 V 的标准不确定度, 由 $V = \frac{1}{4}\pi(d^2 h_1 + D^2 h_2)$ 可得

$$\bar{V} = \frac{1}{4} \times 3.1416 \times (9.983^2 \times 14.22 + 40.07^2 \times 34.96) = 4.520 \times 10^4 (\text{mm}^3)$$

$$= 4.520 \times 10^{-5} (\text{m}^3)$$

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial h_1} u_{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial d} u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h_2} u_{h_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} u_D\right)^2}$$

$$= \frac{1}{4} \pi \sqrt{d^4 u_{h_1}^2 + 4d^2 h_1^2 u_d^2 + D^4 u_{h_2}^2 + 4D^2 h_2^2 u_D^2}$$

$$= \frac{1}{4} \pi \sqrt{9.834^4 \times 0.016^2 + 4 \times 9.983^2 \times 14.22^2 \times 0.007^2 + 40.07^4 \times 0.014^2 + 4 \times 40.07^2 \times 34.96^2 \times 0.01^2}$$

$$= 23.5 (\text{mm}^3) = 2.4 \times 10^{-8} (\text{m}^3)$$

由 $\rho = M/V$ 可得(公式中各量采用国际单位制):

$$\frac{u_\rho}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{u_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{u_V}{V}\right)^2} = \sqrt{0 + \left(\frac{2.4 \times 10^{-8}}{4.520 \times 10^{-5}}\right)^2} = 5.3 \times 10^{-4}$$

$$u_\rho = \frac{u_\rho}{\bar{\rho}} \cdot \bar{\rho} = 5.3 \times 10^{-4} \times 7774 = 4.1 (\text{kg/m}^3)$$

$$U_\rho = 2u_\rho = 2 \times 4.1 = 8 (\text{kg/m}^3)$$

该物体密度结果表达式:

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\rho = (7774 \pm 8) \text{kg/m}^3$$

思考题

- (1) 怎样快速读出分度值为 0.02mm 游标卡尺的测量值?
- (2) 怎样判断螺旋测微器零点的读数符号? 外径千分尺活动套管每转一格, 测杆移动多少毫米?
- (3) 螺旋测微器的棘轮有什么用处? 怎样正确使用螺旋测微器?
- (4) 最小分度值为 0.1g 的物理天平, 当测量质量为 20g 的物体时, 一次测量的有效数字位数是几位?

实验二 用拉脱法测量液体表面张力系数

凡作用于液体表面, 使液体表面积缩小的力, 称为液体表面张力。它产生的原因是液体跟气体



接触的表面层里的分子比液体内部稀疏，分子间的距离比液体内部大一些，分子间的相互作用表现为引力。正是因为这种张力的存在，使得液体表面就如张紧的弹性薄膜，有收缩的趋势。测定液体表面张力系数常用的方法有毛细管上升法、液滴测重法、最大气泡法、吊环拉脱法等。

实验目的

- (1)用砝码对力敏传感器进行定标，计算该力敏传感器的灵敏度；
- (2)掌握用拉脱法测量液体表面张力系数的实验方法；
- (3)学会对双变量数据的处理方法。

实验原理

一、液体表面张力系数

液体表面由于表层内分子力的作用，存在着一定的张力，称为表面张力，正是这种表面张力的存在使液体的表面犹如张紧的弹性膜一样，有收缩的趋势。假想在液面上有一条直线，表面张力就表现为直线两旁的液面以一定的拉力 f 相互作用，如图 3-10 所示。 f 存在于表层，方向始终与直线垂直，大小与直线的长度 L 成正比，即

$$f = \alpha L \quad (3-3)$$

其中比例系数 α 称为液体表面张力系数，数值等于作用在单位长度上的力，单位 N/m，其大小与液体的性质、纯度以及温度有关(温度升高时， α 值减小)。

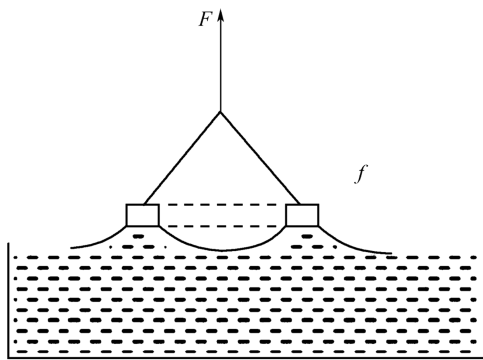


图 3-10 液体表面张力示意图

二、拉脱法测量液体表面张力系数

测量一个已知长度的金属片从待测液体表面脱离时需要的力，从而求得表面张力系数的实验方法称为拉脱法。

若金属片为环状，考虑一级近似，可以认为脱离力(即液体表面张力)为表面张力系数乘以表面的周长。可表示为

$$f = \alpha \pi (D_1 + D_2) \quad (3-4)$$

得出表面张力系数

$$\alpha = \frac{f}{\pi (D_1 + D_2)} \quad (3-5)$$

式中， f 为拉脱力； D_1 ， D_2 分别为圆环的外直径和内直径； α 为待测液体表面张力系数。

三、力敏传感器测量拉力的原理

硅压阻力敏传感器由弹性横梁和贴在该梁上的四个硅扩散电阻组成，如图 3-11(a)所示。

弹性横梁上的四个硅扩散电阻组成一个非平衡电桥，如图 3-11(b)所示。

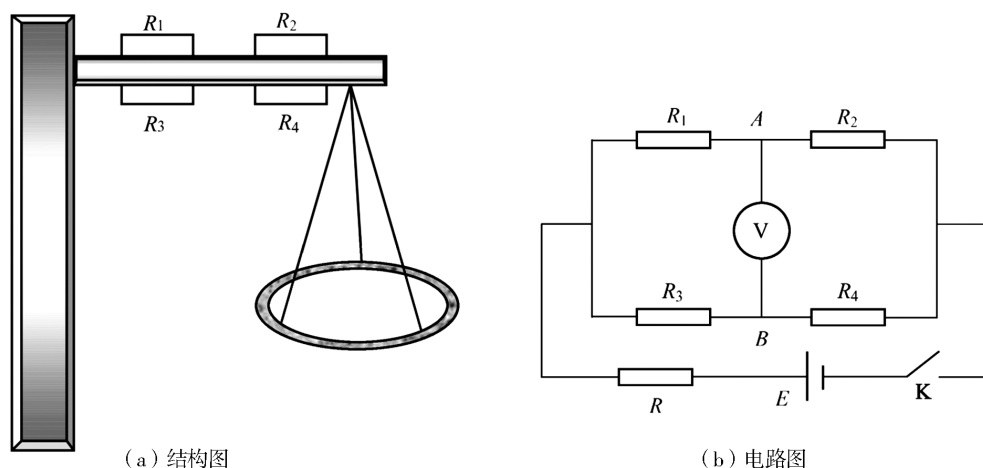


图 3-11 硅压阻力敏传感器示意图

当外界压力 F 为零时, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 调节补偿电压使电桥处于平衡状态, $U = 0$, 有 $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ 。

当有外界压力 F 作用于金属梁上时, 四个硅扩散电阻受力变形引起阻值变化, 电桥失去平衡, A 、 B 两点间产生输出信号 U , 可由图 3-11(b) 中的电压表读出该输出信号 U_0 , 在一定范围内, 四个硅扩散电阻所受合力与输出信号 U 成线性关系, 即

$$U = KF \quad (3-6)$$

式中, K 为力敏传感器的灵敏度 (mV/N), 其大小与输入的工作电压有关; F 为所加的外力; U 为输出的电压。

四、表面张力的测量与公式推导

(1) 液膜被拉断前, 由图 3-12(a) 可得

$$F = mg + f \cos \theta \quad (3-7)$$

拉断前瞬间 [图 3-12(b)], $\cos \theta \approx 1$, 即 $F \approx mg + f$; 此时数字电压表示数为 U_1 , 则

$$F = mg + f \frac{U_1}{K}, \quad f = mg \quad (3-8)$$

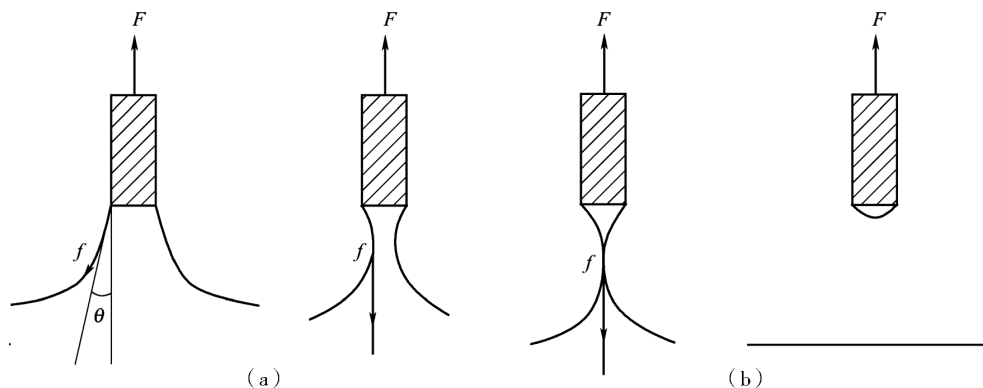


图 3-12 液膜拉动示意图



(2) 液膜被拉断后，此时，数字电压表示数为 U_2 ，则 $F = mg = \frac{U_2}{K}$ 。

(3) 液膜拉断前后拉力变化

$$\Delta F = (mg + f) - mg = f = \frac{U_1 - U_2}{K} = \frac{\Delta U}{K} \quad (3-9)$$

由式(3-4)、式(3-9)可求得

$$\alpha = \frac{\Delta U}{K \cdot \pi(D_1 + D_2)} \quad (3-10)$$

仪器介绍

本实验所用仪器有 DH4607 型液体表面张力系数测定仪、力敏传感器、砝码、镊子、砝码盘、圆形吊环、玻璃皿，如图 3-13 所示。

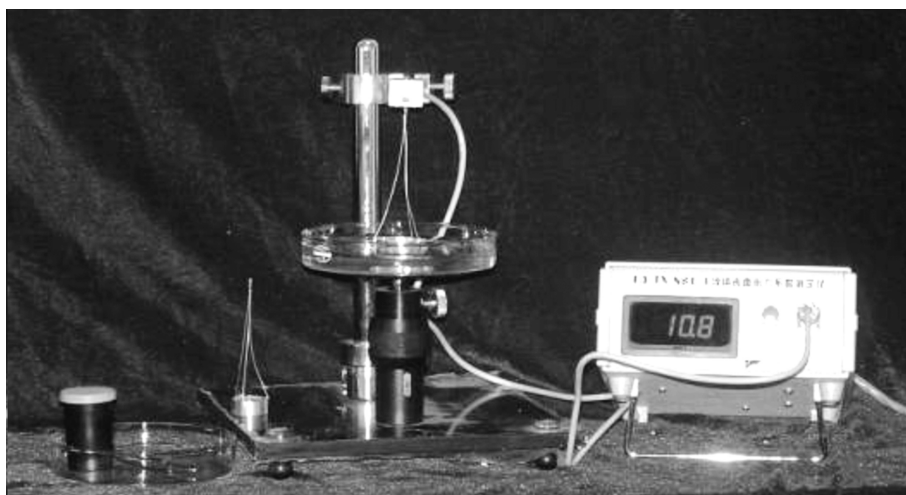


图 3-13 实验装置图

实验结构图如图 3-14 所示。

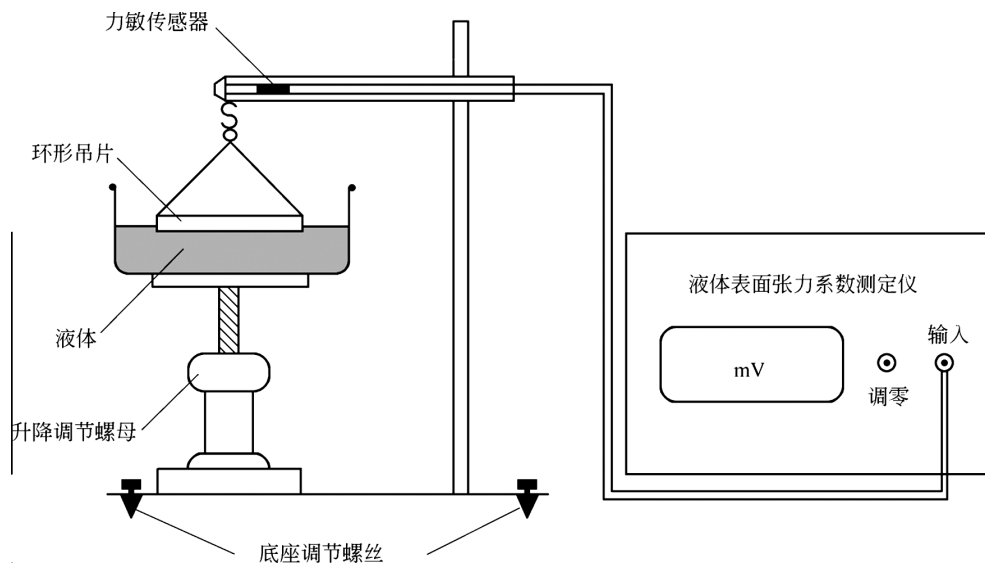


图 3-14 实验结构图



实验内容

一、力敏传感器的定标

- (1) 接通电源，将仪器预热 15min；
- (2) 在传感器横梁端的小钩上挂上砝码盘(注意：传感器挂钩所承受力的范围是 $0\sim 0.098\text{N}$ ，挂钩上不能挂太重的物体，以防损坏仪器)，调节调零旋钮(电子组合仪上的补偿电压旋钮)使数字电压表示数为零(注意：调零后此旋钮不能再动)；
- (3) 在砝码盘中分别加入等质量 m_i (每个砝码 0.5)的砝码，记录对应质量下的电压表读数 U ，填入表 3-5；
- (4) 用作图法做直线拟合，求出传感器灵敏度 K 。

表 3-5 传感器灵敏度 K 数据记录

砝码 m/g	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
电压 U/mV	14.8	29.9	44.7	59.8	74.7	89.7	105.0

二、测量液体表面张力系数

- (1) 将金属吊环片挂在传感器的小钩上，调节升降台将液体升至金属环下沿，观察金属环下沿与待测液面是否平行。若不平行，将金属环取下，调节环片上的细丝，使之与液面平行。
- (2) 调节玻璃皿下的升降台，使环片下沿全部浸入待测液体中，然后反向匀速下降升降台，使金属环片与液面间形成一个环状液膜。继续下降液面，观察电压表读数，测量出液膜拉断前瞬间和拉断后电压值 U_1 ， U_2 ，记录在表 3-7 中。

表 3-6 金属环外、内直径的测量

$$\Delta_{\text{环}} = 0.02\text{mm}$$

次数	1	2	3	4	5	6	平均值
D_1/mm	34.92	34.92	34.94	34.96	34.90	34.90	34.923
D_2/mm	33.10	33.14	33.14	33.08	33.12	33.14	33.120

表 3-7 液膜拉断前瞬间和拉断后电压的测量数据表

次数	1	2	3	4	5	6	平均值
U_1/mV	-7.0	-7.1	-7.1	-7.2	-7.4	-7.5	
U_2/mV	-52.8	-52.9	-52.8	-52.9	-52.9	-53.0	
$\Delta U/\text{mV}$	45.8	45.8	45.7	45.7	45.5	45.5	45.68

- (3) 重复测量 U_1 ， U_2 各 6 次。
- (4) 用卡尺分别测量圆环的外径 D_1 和内径 D_2 ，重复测量 6 次，将数据记录在表 3-6 中。
- (5) 将数据代入液体表面张力系数公式，求出待测液体在某温度下的表面张力系数，并计算测量值与标准值的百分差(表 3-8)。



表 3-8 水在不同温度下的表面张力系数(部分)

温度 $t/^\circ\text{C}$	12	13	14	15	16	17
$\alpha/(10^{-3}\text{N/m})$	73.7	73.6	73.4	73.3	73.1	73.0
温度 $t/^\circ\text{C}$	18	19	20	21	22	23
$\alpha/(10^{-3}\text{N/m})$	72.8	72.7	72.5	72.4	72.2	72.1
温度 $t/^\circ\text{C}$	24	25	26	27	28	29
$\alpha/(10^{-3}\text{N/m})$	71.9	71.8	71.6	71.5	71.3	71.2

三、注意事项

- (1)吊环须严格处理干净。可用 NaOH 溶液洗净油污或杂质后,用清洁水冲洗干净,并用热吹风烘干。
- (2)吊环水平须调节好,注意偏差 1° ,测量结果引入误差为 0.5% ;偏差 2° ,则误差为 1.6% 。
- (3)仪器开机需预热 15min。
- (4)在旋转升降台时,尽量使液体的波动小。
- (5)工作室风力不宜较大,以免吊环摆动致使零点波动,所测系数不正确。
- (6)若液体为纯净水,在使用过程中防止灰尘和油污及其他杂质污染。特别注意手指不要接触被测液体。
- (7)实验结束须将吊环用清洁纸擦干,用清洁纸包好,放入干燥缸内。

数据处理示例

一、力敏传感器的定标(作图法)

- (1)取 $\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_i m_i$, $\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_i U_i$, 过中值点 P 画一条直线,使其他点均匀地分布于直线两侧(图 3-15)。

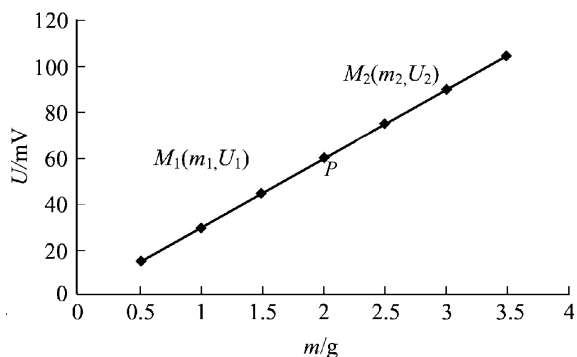


图 3-15 力敏传感器的定标作图法

- (2)在直线上取点: $M_1(m_1, U_1)$, $M_2(m_2, U_2)$ 。

$$\text{斜率 } K' = \frac{\Delta U}{\Delta m} = \frac{U_2 - U_1}{m_2 - m_1} = \frac{90.2}{3} = 30.1(\text{V/kg})$$



$$g = 9.8011 \text{ m/s}^2, U = mgK = mK'$$

$$\text{力敏传感器灵敏度 } K = \frac{K'}{g} = \frac{30.1}{9.8001} = 3.07 (\text{V/N}).$$

①

$$u_A(D_1) = t_6(0.683) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (D_{1i} - \bar{D}_1)^2}{6 \times (6-1)}} = 0.011 (\text{mm})$$

$$u_B(D_1) = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 (\text{mm})$$

$$u_{D_1} = \sqrt{u_A(D_1)^2 + u_B(D_1)^2} = \sqrt{0.011^2 + 0.012^2} = 0.016 (\text{mm})$$

②

$$u_A(D_2) = t_6(0.683) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (D_{2i} - \bar{D}_2)^2}{6 \times (6-1)}} = 0.0113 \text{ mm}, u_B(D_2) = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 (\text{mm})$$

$$u_{D_2} = \sqrt{u_A(D_2)^2 + u_B(D_2)^2} = \sqrt{0.0113^2 + 0.012^2} = 0.017 (\text{mm})$$

$$u_A(\Delta U) = t_6(0.683) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\Delta U_i - \bar{\Delta U})^2}{6 \times (6-1)}} = 0.0634 (\text{mV})$$

$$u_B(\Delta U) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \times 0.05}{\sqrt{3}} = 0.0404 (\text{mV})$$

$$u_{\Delta U} = \sqrt{u_A(\Delta U)^2 + u_B(\Delta U)^2} = \sqrt{0.0634^2 + 0.0404^2} = 0.075 (\text{mV})$$

二、求表面张力系数 α 及其扩展不确定度 U_α

$$\alpha = \frac{\bar{\Delta U}}{\pi K (\bar{D}_1 + \bar{D}_2)} = \frac{45.68}{3.142 \times 3.07 \times (34.92 + 33.12)} = 6.96 \times 10^{-2} (\text{N/m})$$

由公式

$$u_r(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \alpha}{\partial \Delta U} u_{\Delta U}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \alpha}{\partial D_1} u_{D_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \alpha}{\partial D_2} u_{D_2}\right)^2}$$

$$u_r(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta U}}{\bar{\Delta U}}\right)^2 + \frac{u_{D_1}^2 + u_{D_2}^2}{(\bar{D}_1 + \bar{D}_2)^2}} = \sqrt{\left(\frac{0.075}{45.68}\right)^2 + \frac{0.016^2 + 0.017^2}{(34.92 + 33.12)^2}} = 0.17\%$$

得

$$u_\alpha = \alpha u_r(\alpha) = 6.96 \times 10^{-2} \times 0.21\% = 1.2 \times 10^{-4} (\text{N/m})$$

$$U_\alpha = 2 \times u_\alpha = 2.4 \times 10^{-4} (\text{N/m})$$

三、表面张力系数结果表达

$$\alpha = \alpha \pm U_\alpha = (6.96 \pm 0.03) \times 10^{-2} (\text{N/m})$$

或

$$\alpha = \bar{\alpha} \left(1 \pm \frac{U_\alpha}{\bar{\alpha}} \times 100\%\right) = 6.96 \times (1 \pm 0.35\%) (\text{N/m})$$



思考题

- (1) 铝合金吊环有一定高度, 为什么测量液体表面张力时吊环浸入液体中不宜太深?
- (2) 分析在阳光下和在流动的空气中做实验时, 对实验结果有没有影响? 为什么?
- (3) 如何才能使液膜不过早地破裂?
- (4) 在对力敏传感器定标时, 如果初始未清零, 则对仪器灵敏度有何影响?

实验三 用复摆测重力加速度

测定重力加速度的方法很多, 如单摆法、复摆法、开特摆法、落球法等。本实验采用复摆法。

实验目的

- (1) 了解复摆的物理特性;
- (2) 提高学生的实验技能, 培养学生的创新意识。

实验原理

一、复摆的振动周期公式

在重力作用下, 一个绕固定水平转轴在竖直平面内摆动的刚体称为复摆, 也称物理摆。

如图 3-16 所示, 设复摆的质量为 m , 其重心 G 到转轴 O 的距离为 h , g 为重力加速度。在任一时刻 t , OG 与竖直线之间的夹角为 θ , 通常规定偏离平衡位置沿逆时针方向转过的角位移为正。此时, 复摆受到相对于 O 轴的恢复力矩则为 $M = -mgh \sin \theta$, 式中的负号表明力矩 M 的转向与位移 θ 的转向相反。当摆幅甚小时 (摆角不超过 5°), 有 $\sin \theta \approx \theta$, 则

$$M = -mgh\theta \quad (3-11)$$

设复摆绕 O 轴的转动惯量为 J , 根据转动定律有

$$M = J\alpha \quad (3-12)$$

式中, 复摆绕 O 轴转动的角加速度 $\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ 。这样式(3-12)变为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + mgh\theta = 0 \quad \text{或} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{mgh}{J}\theta = -\omega^2\theta$$

即

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (3-13)$$

令 $\omega^2 = \frac{mgh}{J}$, 解微分方程得

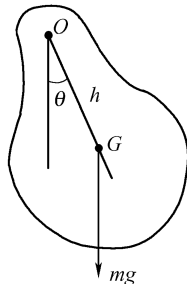


图 3-16 复摆测重力加速度原理图



$$\theta = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3-14)$$

由式(3-14)可知, 摆幅很小时, 复摆在其平衡位置的附近做简谐振动。式(3-14)中 A , φ_0 由初始条件决定, ω 是复摆振动的角频率, $\omega = \sqrt{mgh/J}$, 复摆的振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgh}} \quad (3-15)$$

二、复摆的回转半径 R_G , 等值单摆长 L

设复摆对通过重心 G 并与摆轴 O 平行的转轴(G 轴)之转动惯量为 J_G , 则由平行轴定理知

$$J = J_G + mh^2 \quad (3-16)$$

式(3-16)代入式(3-15)得

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_G + mh^2}{mgh}} \quad (3-17)$$

若设 $J_G = mR_G^2$, 即复摆绕重心轴的回转半径为 R_G , 则由式(3-16)得

$$J = mR_G^2 + mh^2 \quad (3-18)$$

将式(3-18)代入式(3-15)则得

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R_G^2 + h^2}{gh}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_G^2/h + h}{g}} \quad (3-19)$$

显然, 复摆振动周期 T 随悬挂支点 O 与重心 G 之间的距离 h 而改变。若以 h 为横轴、 T 为纵轴, 则 T 与 h 的关系如图 3-17 所示。

从图 3-17 可以看出 T 有极小值。同一曲线上任意两点相应的方程为

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{R_G^2 + h_1^2}{gh_1}}$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{R_G^2 + h_2^2}{gh_2}}$$

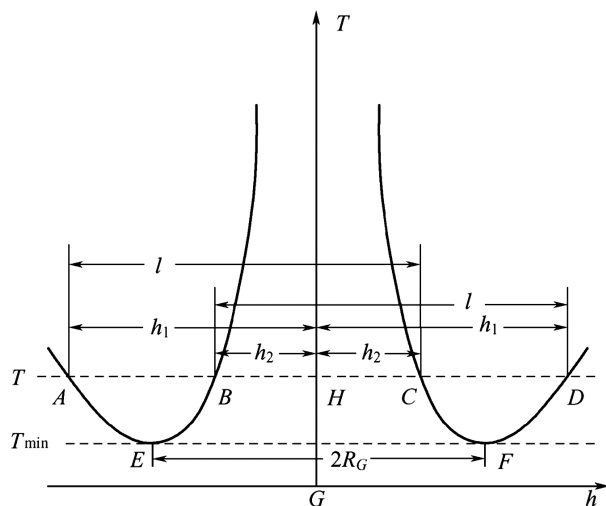


图 3-17 T 与 h 关系图



式中, h_1 、 h_2 分别是复摆的重心到两侧、悬挂支点的距离。将两式中的 R_G 消去, 则有

$$\frac{4\pi^2}{g} = \frac{T_1^2 + T_2^2}{2(h_1 + h_2)} + \frac{T_1^2 - T_2^2}{2(h_1 - h_2)} \quad (3-20)$$

而图 3-17 中 A、B (或 C、D) 为同一曲线上周期相等的点, 即 $T_1 = T_2 = T$, 由此可得 $R_G^2 = h_1 h_2$,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3-21)$$

此式与单摆的周期公式形式相同, 其中 $L = h_1 + h_2$ 。事实上, 总可以找到一个单摆, 它的摆动周期恰等于给定的复摆之周期, 因此称 L 为复摆的等值单摆长, 即图 3-17 中的 AC 之距离或 BD 之距离。

三、利用复摆测重力加速度 g

(1) 由式(3-17)可直接得到复摆的振动周期 T 与转轴到重心距离 h 的关系:

$$mgT^2 h = 4\pi^2 J_G + 4\pi^2 m h^2 \quad (3-22)$$

改变 h , T 随之改变。 $T^2 h$ 与 h^2 成线性关系, 由其相应直线的斜率可求出 g 。

(2) 利用复摆周期与转轴位置的关系图求出 g 。

由式(3-21)知

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} (h_1 + h_2) \quad (3-23)$$

①图 3-17 所表示的复摆周期 T 与转轴位置 h 的关系中, 坐标轴上原点为复摆重心位置, h_1 、 h_2 分别是复摆的重心到两侧悬挂支点的距离, T - h 图是两条对称曲线。由式(3-19)对 h 求微商, 有

$$\frac{dT}{dh} = \pi \left(\frac{R_G^2}{gh} + \frac{h}{g} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{g} - \frac{R_G^2}{gh^2} \right) \quad (3-24)$$

对应极值位置, 有 $R_G = h'$ 。 h' 是极值点到 O 点的距离。图 3-17 中的 E、F 两点为复摆周期的极小点, 两者之间的距离恰为复摆的等值单摆长, 即 $L = h'_1 + h'_2 = 2R_G$, 代入式(3-23), 可求出 g 。

②可从 T - h 图中任取一个周期 T , 找到对应的 h_1 和 h_2 ($h_1 \neq h_2$), 用等值单摆长 $L = h_1 + h_2$ 代入式(3-23), 可求出 g 。

(3) 将式(3-20)改为

$$g = \frac{4\pi^2}{\frac{T_1^2 + T_2^2}{2(h_1 + h_2)} + \frac{T_1^2 - T_2^2}{2(h_1 - h_2)}} \quad (3-25)$$

取异侧支点的两组数据 (h_1, T_1) 和 (h_2, T_2) 代入上式, 可求出 g 。

仪器介绍

复摆, 计时—计数—计频仪 (SSM-5B 型), 米尺, 物理支架。

实验内容

(1) 测定复摆重心 G 的位置 S_G 。将复摆水平放在直立的刀刃上 (图 3-18), 利用杠杆原理寻找 G



点的位置 S_G ，要求 S_G 的误差在 1mm 以内。

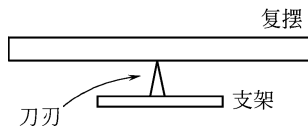


图 3-18 确定 S_G

(2) 测量不同支点的周期 T 。如图 3-19， S 表示从悬挂支点 O 到复摆一端 a 的距离。依次改变支点位置，由靠近 a 端开始，逐渐移向 b 端，测定每个支点对应的周期 T 3~5 次，摆角小于 5° ，支点的位置改变 10~20 次，将数据记录于表 3-9、表 3-10 中。

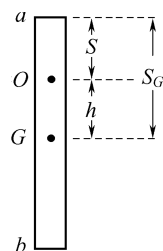


图 3-19 S, S_G 示意图

(3) 求出 S 各值对应的 h 值，计算 g 值，如图 3-19， $h = S_G - S$ ， h 均取正值。

- ①作 $T-h$ 图，从图上求出等值单摆长，计算 g_1 ；
- ②作 $T^2 h - h^2$ 图，考察其线性关系，并用线性回归方法，由直线的斜率计算 g_2 ；
- ③选两组数据 (h_1, T_1) 和 (h_2, T_2) 代入式(3-25)，计算得 g_3 。
- (4)对以上方法得到的结果进行比较。

表 3-9 左侧支点 h, T 数据记录表

内容	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T/s	1.6325	1.5775	1.5427	1.5287	1.5364	1.5678	1.6281	1.7373	1.9344	2.3329
	1.6317	1.5776	1.5410	1.5282	1.5342	1.5682	1.6275	1.7365	1.9322	2.3317
	1.6316	1.5778	1.5419	1.5285	1.5367	1.5683	1.6277	1.7372	1.9350	2.3318
	1.6316	1.5773	1.5418	1.5281	1.5340	1.5682	1.6269	1.7364	1.9348	2.3312
	1.6320	1.5777	1.5420	1.5271	1.5347	1.5664	1.6277	1.7386	1.9366	2.3310
\bar{T}/s	1.6319	1.5776	1.5419	1.5281	1.5352	1.5678	1.6276	1.7372	1.9346	2.3317
h/cm	48.89	41.55	35.30	29.28	24.87	20.88	17.28	13.69	9.97	6.46
S/cm	1.05	8.39	14.64	20.66	25.07	29.06	32.65	36.25	39.97	43.48
h^2/cm^2	2390	1726	1246	857.3	618.5	435.97	298.6	187.4	99.4	41.7
$T^2 h/cm \cdot s^2$	130.2	103.4	83.90	68.37	58.61	51.32	45.78	41.34	37.3	35.2

表 3-10 右侧支点 h, T 数据记录表

内容	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T/s	1.6325	1.5781	1.5427	1.5280	1.5382	1.5695	1.6302	1.7383	1.9374	2.3332
	1.6318	1.5776	1.5430	1.5277	1.5377	1.5684	1.6305	1.7389	1.9377	2.3329
	1.6318	1.5779	1.5429	1.5280	1.5380	1.5689	1.6299	1.7392	1.9381	2.3330
	1.6319	1.5782	1.5432	1.5282	1.5383	1.5692	1.6298	1.7385	1.9379	2.3327
	1.6322	1.5779	1.5428	1.5278	1.5379	1.5691	1.6300	1.7391	1.9382	2.3334



续表

内容	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{T}/s	1.6320	1.5779	1.5429	1.5279	1.5380	1.5690	1.6201	1.7388	1.9379	2.3300
h/cm	48.88	41.54	35.29	28.87	24.91	20.89	17.33	13.67	10.01	6.51
S/cm	1.06	8.40	14.65	20.26	25.03	29.05	32.61	36.27	39.93	43.43
h^2/cm^2	2389	1726	1245	880.9	620.5	436.4	300.3	186.9	100.2	42.4
$T^2h/cm \cdot s^2$	130.2	103.4	84.01	69.39	58.92	51.43	46.05	41.33	37.59	35.4

注意事项

- (1) 在 $T-h$ 图、 T^2h-h^2 图上如有明显偏离曲线的点，应重新测量。
- (2) 计时—计数—计频仪的光电门位置要合适。
- (3) 挂摆于悬挂装置上时，将刀口调整好；倒挂摆时，仍需调整好另一刀口。
- (4) 每次实验完毕，将摆取下，平放在桌上，以防刀口长期受力变钝。

数据处理示例

$$S_G = \frac{1}{4}(49.92 + 49.95 + 49.94 + 49.96) = 49.94(\text{cm})$$

(1) 以 h 为横坐标、 T 为纵坐标，作 $T-h$ 图(见图 3-20)。对应 $T_{\min} = 1.5280\text{s}$ ，有

$$L = h'_1 + h'_2 = 29.28 + 28.87 = 57.95(\text{cm})$$

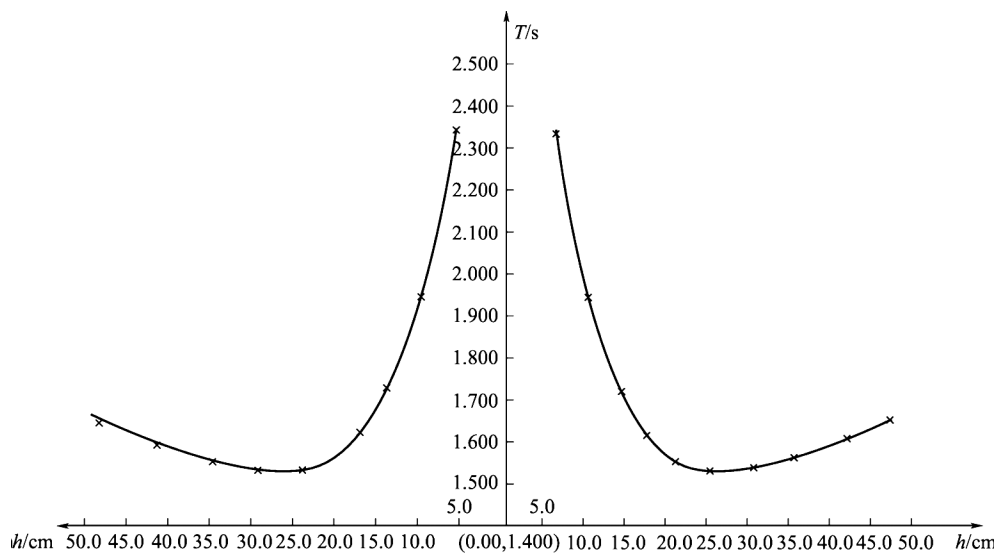


图 3-20 $T-h$ 图线

代入式(3-23)计算，得

$$g_1 = 9.8225(\text{m/s}^2)$$