

大学物理实验教程

主 编 朱绍伟 王 丽 张 健
副主编 张新洋 倪丽君

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书根据新工科背景下《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成。全书共4章，分别为绪论、常用仪器的使用、基础实验和综合实验。全书内容在力求体现实用性和科学性的同时，更注重科学实验基本素质的培养和创新意识的培养。

本书可作为独立学院理工科类专业学生的物理实验教材或教学参考书，也可供其他理工科爱好者阅读。本书在大学物理实验形式的标准化与实验内容的本土化方面做出了改革性的尝试。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验教程 / 朱绍伟, 王丽, 张健主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5682-5238-6

I. ①大… II. ①朱… ②王… ③张… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 010885 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 8.5

字 数 / 205 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前 言

大学物理实验是理工科课程体系中独立开设的一门必修基础课，为后续专业课的实验、实训和实习打下一定基础。它涵盖力学、热学、声学、光学和电磁学及传感器等实验内容。目前普通本科院校本、专科所用大学物理实验教材通常存在课时偏多，难度、深度不太适合培养应用型人才的教學需要，教材的时效性、易读性不够。本书根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合编者多年教学实践，并根据独立学院学生层次与实际认知水平及应用型人才培养的需要，编写成一本适合独立学院学生的实验教材。

本书内容由浅入深、结构严谨，内容紧凑。每个独立实验基本上均包括实验背景介绍、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容、记录与数据处理、注意事项和思考题等部分。

全书共 4 章，具体内容如下。

第 1 章 绪论，主要介绍大学物理实验课的培养任务、基本实验过程和实验数据的处理基本知识，如误差、不确定度等基本概念及常用数据处理方法。

第 2 章 常用仪器的使用，主要介绍常用长度测量仪器和数字万用表的使用。

第 3 章 基础实验，有 14 个实验项目，内容涉及力、热、光、电磁等方面，主要强化基本实验知识的学习和基本实验技能的训练。

第 4 章 综合实验，有 8 个实验项目，主要开阔学生的眼界和思路，提高学生对实验方法和手段的综合运用能力。

“工欲善其事，必先利其器”，一本优秀的实验教材对于实验的开展固然重要，但借助现代化的网络工具来阐述实验原理和演示实验过程更具有表现力。除此之外，本书的部分实验有配套的 PPT 课件，并制作了视频讲解可供学生网上预习。

在本书的编写过程中，参阅了许多本科院校的相关教材，汲取了许多宝贵经验，有些未能在参考文献中逐一列出，在此一并表示诚挚的谢意。


由于编者水平有限，书中难免存在不妥与不足之处，恳请读者和各位同行专家批评指正。

编 者



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验的主要任务和要求	1
1.2 误差理论及其处理	2
1.3 测量结果的不确定度	5
1.4 有效数字及其运算规则	8
1.5 数据处理的常用方法	9
第 2 章 常用仪器的使用	12
2.1 游标卡尺及螺旋测微仪读数	12
2.2 数字万用表的使用	13
第 3 章 基础实验	20
实验 3-1 二踪示波器的使用	20
实验 3-2 声速的测定	25
实验 3-3 单双臂电桥的使用	29
实验 3-4 拉伸法测杨氏模量	35
实验 3-5 扭摆法测转动惯量	40
实验 3-6 模拟法描绘静电场	47
实验 3-7 液体表面张力系数的测量	51
实验 3-8 液体黏滞系数的测定	56
实验 3-9 电表的组装与校准	62
实验 3-10 偏振光现象的研究——验证马吕斯定律	67
实验 3-11 螺线管轴向磁感应强度的测定	69
实验 3-12 铁磁材料磁化特性研究	73
实验 3-13 光纤通信的研究	77
实验 3-14 PN 结伏安特性研究	80
第 4 章 综合实验	83
实验 4-1 非平衡电桥的原理和设计应用	83
实验 4-2 光电效应和普朗克常数	95

2  大学物理实验教程

实验 4-3	光电阻、光电池、光电二极管综合实验	100
实验 4-4	光的等厚干涉——牛顿环	109
实验 4-5	分光计的结构与调整	113
实验 4-6	光栅常数的测定	117
实验 4-7	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	122
实验 4-8	用分光计测定三棱镜的折射率	125
参考文献	128

第 1 章

绪 论

1.1 物理实验的主要任务和要求

物理学从本质上讲是一门实验科学。观察和实验是研究物理规律的重要方法。

可以说“没有实验就没有现代科学技术”。大学物理实验课是机械设计制造及其自动化、电气工程自动化等工科本、专科学生实验入门课程。独立开设的这门必修实验课也体现了现代高等教育重实践、重应用的理念。

1. 大学物理实验课的基本任务

(1) 培养与提高学生的基本科学实验技能。

(2) 培养与提高学生从事科学实验的初步能力。

① 自学能力。能通过阅读实验教材，查阅相关资料，初步掌握实验原理和方法，做好实验前的准备工作。

② 动手能力。能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器及辅助设备，独立完成实验内容，逐步形成自主实验的基本能力。

③ 思维判断能力。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、归纳和综合，通过实验掌握对物理现象和物理规律进行研究的基本方法，具有初步分析和研究的能力。

④ 书面表达能力。能正确记录和处理实验数据，绘制曲线，分析说明实验结果，撰写合格的实验报告，逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

⑤ 初步的实验设计能力。能根据课题要求，确定实验方法和条件，合理选配仪器，拟定具体实验方案。

(3) 提高学生的科学素养。

① 实事求是的科学作风。尊重实验事实，不能随意篡改、捏造实验数据。

② 认真严谨的工作态度。认真观察实验现象，仔细记录实验数据。

③ 积极主动的探索精神和创新意识。使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生分析问题、解决问题的能力 and 创新的能力。

此外，实验过程中，特别是设计性实验，还能培养学生积极主动的探索精神以及遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

2. 大学物理实验课的主要教学环节及要求

1) 实验预习

(1) 认真阅读实验教材和有关资料，从中整理出实验的基本原理和方法。

- (2) 熟悉所用仪器的基本性能、工作原理、工作条件以及操作规程。
- (3) 明确实验任务，掌握实验步骤和实验的注意事项。
- (4) 对设计性实验还要自拟实验方案，自己设计电路图或光路图等。
- (5) 在做好上述准备工作的基础上写出预习报告。

2) 上实验课

- (1) 预习情况检查。
- (2) 听课。
- (3) 完成实验操作、现象观察、物理量测定、实验记录等。
- (4) 最后确定的实验记录必须经教师检查签字。
- (5) 整理仪器、打扫卫生。

3) 完成实验报告

实验报告是对实验过程及其结果的系统而全面的总结，要用简明的形式将实验结果完整而真实地表达出来。实验报告要用统一规格的实验报告纸书写（可加附页），必须各自独立、及时地完成。要做到文字通顺、表述明确、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真。好的实验报告应作为研究资料保存。

一份完整的实验报告应该包括实验题目（包括实验者姓名、学号、同组人姓名、实验日期）、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容及操作步骤、注意事项、实验现象或数据记录表、数据处理、实验结果（或结论）、思考题、原始记录等。

其中，实验报告中的数据一定要与原始记录数据一致，数据处理包括：① 写出公式；② 将数据代入公式；③ 计算结果、误差及不确定度分析、图线等。报告中必须附有指导教师签字的原始记录。结果中应该包含实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、结果的可靠性等。

学生实验守则如下：

- (1) 严格遵守实验室的各项规章制度，不得迟到和旷课。
- (2) 上实验课前必须认真预习并写好预习报告，经指导教师检查合格后方可做实验。
- (3) 如有特殊情况必须在课前向实验指导教师请假，课后补假无效。
- (4) 严格遵守仪器设备使用操作规程，实验仪器准备完毕，需经指导教师允许方可通电启动。
- (5) 仪器发生不正常现象或损坏时，要及时向指导教师报告。凡属违反操作规程导致仪器设备损坏的要照章赔偿。
- (6) 实验中要严肃认真，以科学的态度真实记录实验结果和数据。
- (7) 实验结束时，记录的实验结果和数据要经指导教师检查和签字。要认真搞好实验室的清洁卫生，整理好实验现场，经指导教师同意方可离开实验室。
- (8) 实验课后要认真写好实验报告并按时送交。

1.2 误差理论及其处理

1.2.1 测量误差

由测量者采用某种方法、用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较，从而确定该待测

量是标准量的多少倍的操作过程称为测量。测量结果数值的大小与所选用的单位有关。因此，表示一个被测对象的测量值时必须包括数值和单位。

对物理量的测量按测量方式通常可分为直接测量和间接测量；按测量条件的不同可分为等精度测量和不等精度测量。

被测量在一定条件下的真实大小，称为该量的真值，而把某次对它测得的值称为测量值。由于被测量的真值是无法测得的，不管使用多么精密的仪器，测量出来的结果总是真值的近似值，所以任何测量都存在误差。

测量误差大小反映了测量结果的准确程度。测量误差分为绝对误差和相对误差。若某物理量的测量值为 x ，真值为 a ，则绝对误差 $\delta = x - a$ ，相对误差 $E = \frac{\delta}{a} \times 100\%$ 。

1.2.2 误差的分类

由于实验方法、仪器精度、环境条件的不同，误差存在于一切科学实验和测量过程中。误差按其性质和产生的原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时，测量误差的大小和符号始终保持恒定，或者按某种确定的规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差按产生原因的不同可分为以下几种：

- (1) 仪器误差。
- (2) 方法误差。
- (3) 个人误差。
- (4) 环境条件误差。

国家技术标准或检定规程规定的计量器具最大允许误差或允许基本误差，经适当的简化称为仪器示值误差（限），用 Δ_m 表示。它代表在正确使用仪器的条件下，仪器示值与被测量真值之间可能产生的最大误差的绝对值，是由于仪器本身缺陷或没有按规定条件使用仪器造成的。

常用仪器误差（限）举例如下：

- (1) 游标卡尺，仪器示值误差一律取卡尺分度值。
- (2) 螺旋测微计，量程在 $0 \sim 25 \text{ mm}$ 及 $25 \sim 50 \text{ mm}$ 的一级千分尺的仪器示值误差均为 0.004 mm 。
- (3) 天平的示值误差，本书约定天平标尺分度值的一半为仪器的示值误差。
- (4) 电表的示值误差， $\Delta_m = \text{量程} \times \text{准确度等级}\%$ 。
- (5) 数字式仪表，误差示值取其末位数最小分度的一个单位。
- (6) 仪器示值误差或准确度等级未知，可取其最小分度值的一半为示值误差。
- (7) 电阻箱、电桥等，示值误差用专用公式计算。

理论或方法误差是由于实验所依据的理论公式为近似公式或者实验条件达不到理论要求等而引起的，如单摆测重力加速度时所用公式的近似性、伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。个人误差是由实验人员生理或心理特点所造成的误差，如使用停表计时时，总是超前或滞后、用仪表读数时总是偏向一方斜视等。环境条件误差是由于实验的外部环境，如

温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

系统误差产生的原因往往是可知的，它的出现一般是有规律的。依靠多次重复测量一般不能发现系统误差的存在。

2. 随机误差

由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值无规则的涨落，称为随机误差。随机误差也称为偶然误差。在相同条件下测量同一物理量，测量误差的大小和正负完全是随机变化的。随机误差初看起来显得毫无规律，但当测量次数足够多时，随机误差的大小以及正负误差的出现都是服从某种统计规律的。

随机误差主要是由于测量过程中一些随机的或不确定的因素所引起的。测量过程中随机误差的出现带有某种必然性和不可避免性。实践证明，绝大多数随机误差是服从正态分布（高斯分布）规律的，即对于大多数物理测量，随机误差具有以下性质。

(1) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大，绝对值大的误差出现的概率小。

(2) 对称性。大小相等、符号相反的误差出现的概率相等。

(3) 有界性。绝对值非常大的正、负误差出现的概率趋于 0。

(4) 抵偿性。当测量次数趋近于无限多时，由于正、负误差互相抵消，各误差的代数和趋于零。

3. 粗大误差

这是一种明显超出统计规律预期值的误差。这类误差具有异常值。它是由于实验者使用仪器方法不正确，或粗心大意读错、记错测量数据，或实验条件突变等原因造成的。在实验测量中要极力避免过失错误，在数据处理中应将粗大误差剔除掉。

坏值的剔除可以参考拉依达准则（要求样本 $n > 9$ ），即 $|x_i - \bar{x}| > 3S(x)$ 为粗差， x_i 为坏值应剔除。其中， $S(x)$ 为实验标准差，有

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

例 1-1 对某物体进行 15 次测量，测量值为：

$$\begin{array}{cccccc} x_i = & 11.42 & 11.44 & 11.40 & 11.43 & 11.42 \\ & 11.43 & 11.40 & 11.39 & 11.30 & 11.43 \\ & 11.42 & 11.41 & 11.39 & 11.39 & 11.40 \end{array}$$

检测是否有坏值。

解

$$\bar{x} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} x_i = 11.405$$

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})^2}{15-1}} = 0.034$$

$$3S(x) = 3 \times 0.034 = 0.102$$

$$|11.30 - 11.405| = 0.105 > 0.102$$

所以 11.30 为坏值，应剔除。余下的数据继续检验：

$$\bar{x} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} x_i = 11.412$$

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{14} (x_i - \bar{x})^2}{14-1}} = 0.018$$

14 个测量值均满足 $|x_i - \bar{x}| < 3S(x) = 0.054$ 条件，无坏值。

对测量结果的好坏，往往用准确度、精密度和精确度来评价，但这是 3 个不同的概念，使用时应加以区别。

(1) 准确度。表征测量结果的系统误差的大小，即测量结果对真值的偏离大小。

(2) 精密度。表征测量结果随机误差的大小，即对同一物理量在相同的条件下多次测量所得的各测量值相互接近的程度。

(3) 精确度。表征对准确度和精密度的综合评价。表示测量结果中系统误差与偶然误差的综合大小的程度。

下面以打靶为例，来形象地说明这 3 个概念之间的区别。图 1-1 (a) 表示的子弹比较集中，但都偏离靶心，说明射出的精密度高，但准确度较低；图 1-1 (b) 表示子弹比较分散，但是它们的中心位置比较接近靶心，说明射击的准确度高，但精密度较低；图 1-1 (c) 表示子弹比较集中。

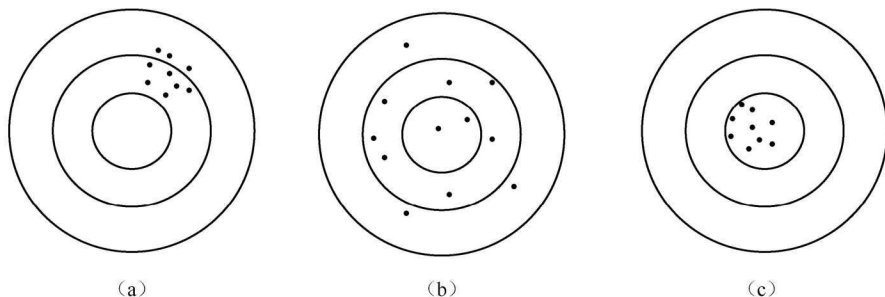


图 1-1 测量的精密度、准确度和精确度图示

(a) 精密度；(b) 准确度；(c) 精确度

1.3 测量结果的不确定度

在物理实验中，对一个物理量进行测量后，应给出测量结果，并要对测量结果的可靠性作出评价。物理实验教学中，采用一种简化的，具有一定近似性的不确定度评定方法。

由于被测量的真值不可测得，测量误差也不可得，只能给出被测量的最佳估计值及其不确定范围做出近似估计。测量不确定度表征被测量值的分散性。测量结果必须有不确定度才是完整的、有意义的。

不确定度给出了在被测量的平均值附近的一个范围，真值以一定的概率落在此范围内。在测量方法正确的情况下，不确定度越小，标志着测量结果与真值的误差可能值越小。

按照《国际计量局实验不确定度的规定建议书》中的评定方法，不确定度可分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。

1.3.1 A 类不确定度分量（简称 A 分量）

它指用统计的方法评定的不确定度分量，用 u_A 表示。在物理实验课中，A 类不确定度分量主要体现在用统计的方法处理随机误差上。

设对某一物理量在相同条件下进行 n 次重复测量，得到一测量列 x_1, x_2, \dots, x_n ，测量列的算术平均值为

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

则物理量 x 的不确定度 A 分量可由下式计算，即

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

1.3.2 B 类不确定度分量（简称 B 分量）

它指用非统计的方法评定的不确定度分量，用 u_B 表示。B 分量在物理实验课中主要体现在对未定系统误差的处理上。

计算 B 类分量时，不是直接对多次测量的数值进行统计计算，而是根据误差来源，先估算出此项的极限误差 Δ ，然后再根据该项误差服从的分布规律确定出置信系数 C ，最后求出所对应的标准偏差作为该项误差的 B 分量，即

$$u_B = \frac{\Delta}{C}$$

仪器误差也服从一定的分布规律，最常见的是正态分布和均匀分布。正态分布取 $C=3$ ；均匀分布取 $C=\sqrt{3}$ 。

1.3.3 合成不确定度

当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差和协方差算得的标准不确定度，称为合成标准不确定度。它是测量结果标准偏差的估计值，用符号 σ 表示，即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_{A_i}^2 + \sum_{j=1}^n u_{B_j}^2}$$

计算合成不确定度时，式中的所有 A 类分量和所有 B 类分量必须是测同一物理量时的不确定度分量；否则，合成不确定度无实际意义。

1.3.4 总不确定度

按照《国际计量局实验不确定度的规定建议书》，求总不确定度，应首先对误差分布形式作出假设和检验。总不确定度 U 为

$$U = c\sigma$$

式中 c ——置信因子，一般取 $c=1, 2, 3$ ，对应的置信概率分别为 68.3%、95.5% 和 99.7%。

一般来说，在测量结果的后面都要标明所对应的置信概率（只有取 2 时可以不标）。

1.3.5 相对不确定度

它指合成标准不确定度的相对值，可以反映测量的优劣。相对不确定度为

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

1.3.6 间接测量量的结果表示与评价

在物理实验中，某些物理量通常只能通过另外一些物理量间接地得到。由于直接测量量存在误差，间接测量量不可避免地存在误差，由直接测量量的误差引起的间接测量量的误差称为误差传递。

设间接测量量 Y 是各直接测量量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数，一般可写为

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

那么间接测量量的平均值为

$$\bar{Y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$$

间接测量量的结果表示为

$$Y = \bar{Y} \pm U, \quad E = \frac{U}{\bar{Y}} \times 100\%$$

由高等数学函数增量和全微分公式，有

$$dY = \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} dx_n$$

如果将 dx_n 视为直接测量量的误差，则 dY 为间接测量量的误差。上式称为误差传递基本公式或不确定度传递函数，则间接测量量 Y 的总不确定度为

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 U_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 U_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 U_n^2}$$

若 Y 与各直接测量量 x_n 主要是乘除关系，则应该先考虑计算 Y 的相对不确定度，根据相对不确定度 E 与总不确定度 U 的关系计算 U 。再根据 $d(\ln \bar{Y}) = \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y}}$ 得

$$E = \frac{U}{\bar{Y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_1}\right)^2 U_1^2 + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_2}\right)^2 U_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_n}\right)^2 U_n^2}$$

例 1-2 测圆柱体积 V 。用最小分度值为 0.02 mm 的游标卡尺单次测量柱高 $h=30.24 \text{ mm}$ ，用 $\Delta_x=0.004 \text{ mm}$ 的螺旋测微计重复测量圆柱的直径 D ，数据为 8.227 mm 、 8.223 mm 、 8.228 mm 、 8.223 mm 、 8.226 mm ，试给出实验结果的正确表示。

解 (1) 求 D 的算术平均值与偏差 (见表 1-1)。

表 1-1 求平均值与偏差

i	D_i / mm	$(D_i - \bar{D}) / (\times 10^{-3} \text{mm})$	$(D_i - \bar{D})^2 / (\times 10^{-6} \text{mm}^2)$
1	8.227	1.6	2.56
2	8.223	-2.4	5.76
3	8.228	2.6	6.76
4	8.223	-2.4	5.76
5	8.226	0.6	0.36
	$\bar{D} = 8.2254$	$\sum (D_i - \bar{D})^2 = 2.12 \times 10^{-5} \text{mm}^2$	

(2) 求圆柱体的体积。

$$\bar{V} = \frac{1}{4} \pi \bar{D}^2 h = \frac{1}{4} \pi \times 8.2254^2 \times 30.24 = 1606.9 \text{ (mm}^3\text{)}$$

(3) 求不确定度。

$$U_D = c \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = c \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)} + \left(\frac{\Delta_{\text{仪}}}{C}\right)^2}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{2.12 \times 10^{-5}}{5(5-1)} + \left(\frac{0.004}{\sqrt{3}}\right)^2} = 5.06 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$$

$$U_h = c \sigma_h = 2 \Delta_{\text{仪}} / C = 2 \times 0.02 / \sqrt{3} = 0.0231 \text{ (mm)}$$

由于圆柱体的体积函数是以积商形式出现的，所以先求相对不确定度 E 。

$$E = \sqrt{\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2U_D}{D}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.0231}{30.24}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 5.06 \times 10^{-3}}{8.2254}\right)^2} = 0.15\%$$

$$U_V = \bar{V} E = 1606.9 \times 0.15\% = 2.5 \text{ (mm}^3\text{)}$$

实验结果表示为 $V = \bar{V} \pm U_V = (1607 \pm 3) \text{mm}^3$ ， $E = 0.15\%$ ($P = 95.5\%$)。

1.4 有效数字及其运算规则

由于物理测量中总存在误差，因而测量误差决定了测量值的位数只能是有限位数，测量结果数字最后一位应与误差相对应，不能随意取舍。因此，在物理测量中必须按照一定的表示方法和运算规则来正确表达和计算测量结果。

1.4.1 有效数字的概念

测量结果中所有可靠数字加上末位有误差（一位）的数字统称为测量结果的有效数字。虽然最后一位数字是有误差的，但是它还是能够反映测量的客观实际。

有效数字的位数与测量仪器的最小分度值有密切关系，一般必须读到仪器最小分度值的

下一位上。

有效数字的单位换算规则是改变有效数字单位时，只能改变有效数字中的小数点位置，而有效数字的位数应保持不变。

非零数字之前的“0”不算有效数字，而在非零数字之间或之后的“0”都是有效数字，0.010 50 的有效位数为4位。

1.4.2 有效数字的修约规则

不确定度的有效数字取1位或者2位。相对不确定度的有效数字取2位。二者的收尾原则都是：只入不舍。平均值保留的末位必须与不确定度所在的位对齐。对于最佳估计值，5下舍去5上入，整5前位凑偶数；对不确定度，只入不舍。

1.4.3 有效数字的运算规则

(1) 可靠数字与可靠数字相运算，其结果仍为可靠数字。

(2) 可靠数字与可疑数字或可疑数字之间相运算，其结果均为可疑数字。

(3) 运算的结果只保留一位可疑数字，末尾多余的可疑数字取舍时，应根据有效数字修约规则进行。

(4) 在运算中，常数、无理数、 π 、 $\sqrt{2}$ 以及常系数，如2.1/2等的位数可以认为是无限多的。

(5) 函数的有效数字运算。

例 1-3 四则运算。

(1) 加减运算。

尾数对齐——在小数点后所应保留的位数与诸量中小数点后位数最少的一个相同。例如， $11.4+2.56=14.0$ ， $75-10.356=65$ 。

(2) 乘除运算。

位数对齐——结果有效数字的位数，一般与诸量中有效数字位数最少的一个相同。例如， $4\ 000\times 9.0=3.6\times 10^4$ ， $2.000\div 0.10=20$ 。

1.5 数据处理的常用方法

通常进行实验的最终目的是通过数据的获得和处理，从中揭示出有关物理量的关系，或找出事物的内在规律性，或验证某种理论的正确性，或为以后的实验准备依据。因而，需要对所获得的数据进行正确的处理，数据处理贯穿于从获得原始数据到得出结论的整个实验过程，包括数据记录、整理、计算、作图、分析等方面，涉及数据运算的处理方法。常用的数据处理方法有列表法、图示法、图解法、逐差法和最小二乘线性拟合法等，下面分别予以简单讨论。

一般来讲，一个物理规律可以用3种方式来表述，即文字表述、解析函数关系表述、图像表示。

1.5.1 列表法

列表法是将实验所获得的数据用表格的形式进行排列的数据处理方法。列表法的作用有

两种：一是记录实验数据；二是能显示出物理量间的对应关系。其优点是能对大量杂乱无章的数据进行归纳整理，使之既有条不紊又简明醒目；既有助于表现物理量之间的关系，又便于及时地检查和发现实验数据是否合理，减少或避免测量错误；同时，也为作图法等处理数据奠定了基础。

1.5.2 作图法

图示法和图解法统称为作图法，图示法就是用图像来表示物理规律的一种实验数据处理方法。图解法是在图示法的基础上，利用已经作好的图线，定量地求出待测量或某些参数或经验公式的方法。

图示法处理实验数据的优点是能够直观、形象地显示各个物理量之间的数量关系，便于比较分析。一条图线上可以有无数组数据，可以方便地进行内插和外推，特别是对那些尚未找到解析函数表达式的实验结果，可以依据图示法所画出的图线寻找到相应的经验公式。有时需要将“曲线化直”，然后再使用图解法。

1.5.3 逐差法

当自变量与因变量成线性关系时，对于自变量等间距变化的多次测量，如果用求差平均的方法计算因变量的平均增量，就会使中间测量数据两两抵消，失去利用多次测量求平均的意义。

逐差法是物理实验中常用的一种数据处理方法，特别是当自变量与因变量成线性关系，而且自变量为等间距变化时，更有其独特的特点。

逐差法是将测量得到的数据按自变量的大小顺序排列后平分为前后两组，先求出两组中对应项的差值（即求逐差），然后取其平均值。

例如，用共振干涉法（ $\Delta L = L_{i+1} - L_i = \lambda / 2$ ）测量声音的波长，测 12 个振幅最大点，将用逐差法处理的数据记录于表 1-2 中。

表 1-2 处理数据

i	L_i	$i+6$	L_{i+6}	$\lambda_i = (L_{i+6} - L_i) / 3$
1		7		
2		8		
3		9		
4		10		
5		11		
6		12		

1.5.4 最小二乘线性拟合法

最小二乘法认为，若最佳拟合的直线 $y=f(x)$ ，则所测各 y_i 值与拟合直线上相应的各估计值 $\hat{y}_i = f(x_i)$ 之间偏差的平方和为最小 Q ，即

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \text{最小}$$

最小二乘法思想的几何意义：利用已知的测量数据点来确定一条最佳曲线，这条曲线离所有的测量点的距离平方之和为最小。

设一元线性关系为 $y = kx + b$ ，实验获得的 n 对数据为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$)。由于误差的存在，当把测量数据代入所设函数关系式时，等式两端一般并不严格相等，而是存在一定的偏差。为了讨论方便起见，设自变量 x 的误差远小于因变量 y 的误差，则这种偏差就归结为因变量 y 的偏差，即

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2$$

而要使 Q 达到极小，则必须同时满足以下关系，即

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \end{cases}$$

整理后得

$$k = \frac{\overline{\bar{x} \cdot \bar{y}} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{\bar{x}^2} - \bar{x}^2}, \quad b = \bar{y} - k\bar{x}$$

其中：

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

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\overline{\bar{x}^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$$

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

为了判断测量点与拟合直线符合的程度，需要计算相关系数 γ ，相关系数用来判断一组实验点与所求拟合最佳直线的靠近程度。其定义为

$$\gamma = \frac{\overline{\bar{x}y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{\bar{x}^2} - \bar{x}^2)(\overline{\bar{y}^2} - \bar{y}^2)}}$$

相关系数 γ 介于 $+1 \sim -1$ 之间，当 $\gamma \approx 1$ 时，说明实验点非常接近最佳直线，实验数据很准确。

$k > 0$ 时， $\gamma > 0$ ，说明回归直线斜率为正时相关系数为正，叫正相关。

$k < 0$ 时， $\gamma < 0$ ，说明回归直线斜率为负时相关系数为负，叫负相关。

第 2 章

常用仪器的使用

2.1 游标卡尺及螺旋测微仪读数

游标卡尺可以方便地测量外径、内径、深度。其结构如图 2-1 所示。

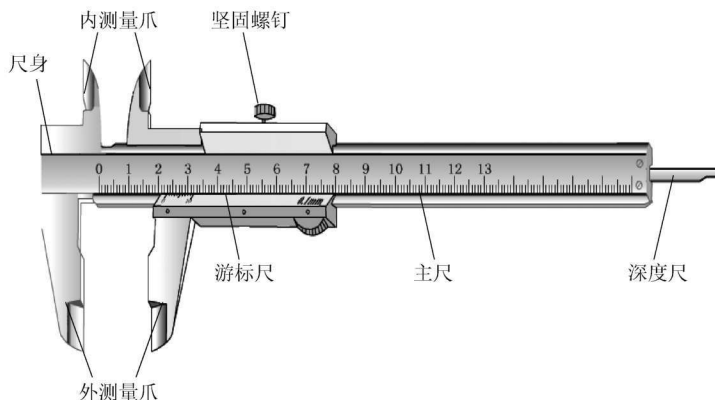


图 2-1 游标卡尺的结构

读数方法如下。

第一步：根据游标尺等分度确定精确度（精确度见表 2-1）。

第二步：读出游标尺零刻度线左侧的主尺整毫米数 x 。

第三步：找出游标尺与主尺刻度线“正对”的位置，并在游标尺上读出对齐线到零刻度线的小格数 n （不要估读）。

第四步：按读数公式读出测量值 L ，即

$$\text{测量值 } (L) = \text{主尺读数 } (x) + \text{游标尺读数 } (n \times \text{精确度})$$

表 2-1 游标卡尺的类型及相关参数

卡尺分类	主尺最小刻度/mm	游标刻度总长/mm	精确度/mm
10 分度	1	9	0.1
20 分度	1	19	0.05
50 分度	1	49	0.02

螺旋测微仪又名千分尺，是一种比游标卡尺精度更高的长度测量仪器，可以精确到