高等学校公共基础课“十二五”规划教材

大学物理实验(一)

UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENT

主编　周恒智　张哲皇
主审　赵改清

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

高等学校公共基础课"十二五"规划教材

大学物理实验(一)

主　编　周恒智　张哲皇

副主编　邱云明　江石寿　王喜省

主　审　赵改清

西安电子科技大学出版社

内容简介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》、《高等学校物理学、应用物理学本科指导性专业规范》、《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合深圳大学物理实验教学中心教师的教学实践经验和教学研究成果编写而成。

全书分基本技术技能介绍(测量的不确定度和测量数据处理)和包含长度、位移、速度、振动、转动、光常量、光器件参数、电常量、电器件特性、热常量等基本测量及相关测试技术与方法的实验20个。

本书各实验内容循序渐进、相互独立,形成较为清晰的层级体系，从而全面提高实验者的动手动脑能力。本书可作为高等学校工科各专业物理实验课程的教材和参考书,也可供相关实验技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验(一)/周恒智，张哲皇主编. —西安：西安电子科技大学出版社，2013.2

高等学校公共基础课“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3018-2

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①周… ②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(2013)第 023851 号

策划编辑 毛红兵

责任编辑 刘玉芳 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电　　话 (029)88242885 88201467 邮　　编 710071

网　　址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经　　销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版　　次 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

开　　本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 8

字　　数 181千字

印　　数 1～3000册

定　　价 14.00元

ISBN 978-7-5606-3018-2/O

XDUP 3310001-1

＊＊＊如有印装问题可调换＊＊＊

前　　言

自改革开放以来，全国高校大学物理实验教学改革方兴未艾。深圳大学践行“有教无类、因材施教、厚积薄发、经世致用”的办学理念，以培养“素质好、基础好、上手快、转型快的事业骨干和创新创业型人才”为目标，形成了“视野开阔、注重实际、热衷创新、崇尚竞争”的人才培养特色。学校建立了学术主导的内部管理体制，国际交往密切，教学科研设施不断完善，正为实现“高校之林、后来居上”的宏大心愿而努力奋进。实干兴邦，我校物理实验教学中心努力推进与时俱进的教学改革，充分体现时代性，把握规律性，富于创造性，按照博识一劳心一突进三个阶段，努力培养实验者的阅读能力、数学能力、科学能力，实现通识博学一创新意识一创新方法的提高。

深圳大学大学物理教学的改革理念为：

第一，把实验教学的目标定位于科学能力的培养上是一个变革性创新。提高实验者科学能力是实验教学的唯一目的，使物理实验作为一门单独设立的、不可替代的完整体系课程，改变原来实验教学依附于理论教学的不足，修正物理实验只是物理理论的验证或补充的错误思想，回归物理学发展的历史本源，适应近年来物理实验教学创新大发展的时代要求，把握物理实验教学与新时期人才培养的规律性，突显其独立而非依附的地位，突破了制约实验教学发展的瓶颈。

第二，建立完整的层次性科学能力体系是一个根本性创新。使阅读能力和数学能力与科学能力融为一体，使基础科学能力、高级科学能力和专业科学能力分层又相互交织在一起。同时，实验者可以明确自己的目标，遴选规划，清楚地知道社会需要的能力，有针对性地、阶段性地注重培养自己各方面的能力，看到自己能力的提高，正视自己的未来。物理实验教学自成体系，更加具有包容性、开放性，教学目的更加明确，教学项目亦有了纲领。

第三，把能力体系系统性、捆绑性地建立在课程体系上是一个标志性创新。让能力培养形成牢固的根基，落到实验教学项目的实处。依照分级实验要求体现不同层次的科学能力培养阶梯，形成一个从低到高的、全面完整的科学能力培养的课程体系，以发挥实验者的能动作用，让能力提高得到具体化、阶段化、层次化，更加具有可操作性，摆脱理论知识点面的简单束缚，使实验教学课程体系设置有了保持自身完整、独立的切实保障。

第四，仓储式、基地式、开放式实验教学模式是一个基石性创新。使实验者逐步过渡到自主、自行管理、集体合作，实验过程中重热点、重实战、重系统，便于走向社会、科研横向合作；便于广博古今、通灵产业、捕获创新灵感。网络上有预习课程，仪器设备可申领，实验者可自己设计动手搭建实验系统、独立分析处理系统问题，把原来摆放式、现存式的实验彻底改掉。经典的实验也只是重复当时过程，结论需自己去做，让实验者深入了解现代科学技术的发展，开拓全新视野，增长科学才干。

第五，把教师与教学管理置于服务的地位是一个制度性创新。教学服务体系为课程体

系的能力培养目标服务，提高了服务的要求、难度、效率与系统运转效益。建设一支作风顽强、实验教学能力过硬的教师队伍成为必要，既要备课、备实验、备仪器，同时要备实验者、备知识点结合、备具体能力提高，全面构造新型的、现代化的、和谐生动持久的、良好的师生关系。实验教学的工作会大量放大，教学难度显著提高，必须任劳任怨，不辞劳苦，创造性地开展工作。

第六，实现大学物理实验 0～6 级大分级，专注过程教学，创建实验者创新基地，建设计算机实测平台，开展基科班教学是一个设计性创新。实验项目的设置必须是对实验者、设备、科学能力培养的全方位设计过程。实验者对实验过程的设计、执行、调整、结束等在教师指导下由实验者独立完成，在实验过程中允许失败、重做，鼓励探索、创新。

第七，突显实验文化的张力是一个经久性创新。在实验意识形态上改变被动坐等的局面。对物理发展史的深刻剖析，有益于释放学习的压力、恐惧与彷徨，展现物理实验的神奇魅力；有益于提高实验的吸引力、影响力。网站建设带来网络实验文化的普及和推广，在建设良好的物理实验文化氛围，形成实验室文化，吸引实验者建立学习兴趣，实验者相互影响、互相促进并在管理方面发挥作用。从物理学历史典故、发明趣闻、实验教学研究，包括把最新装备用于本科教学等方面影响实验者行为，建立科学思想意识和科学作风，使实验者具有严谨的学风、合作精神，以及勇于追求真理、热爱真理、实事求是的科学作风。

第八，把大型设备推向本科教学、提高三性实验比重和项目基金模式是一个措施性创新。强调了实验内容开放、实验时间开放、实验空间开放的实验室全面开放，要求实验项目更多地转变为三性实验。实验室开放基金、自制设备基金和实验室管理基金是三性实验出成果的保证。让实验者更加接近社会，参与社会热点课题，并使之产品化、工艺流程化，接触到顾客、市场、价格和经济以及项目资金的筹措，也接触到生产设计、生产工艺、工程改良等方面，形成竞争意识、效益意识、法律意识、国际意识等，经历改良、改造、首创、突破、发现、发明和技术革新，从而全面提高实验者的综合素质。

本套新编教材共分 0～6 级，涵盖原来的演示物理实验、大学物理实验(一、二)、普通物理实验(一、二、三)、近代物理实验(一、二)、物理基础专业实验的相关内容。

本套新编教材是在我校李学金主编的《大学物理实验教程》的基础上进行综合改革的成果反映。我校物理实验教学中心的同仁艰苦努力、奋发图强，响应深圳特区和深圳大学的要求，走出去、请进来，力争适应教学规律，切实改变物理实验教学模式，与世界一流大学的教育教学方法接轨。我们根据自身情况，几经改革，终于有了初步的成果，确立了实验的终极目的在于对实验者科学创新能力的培养，并建立了具有自身特色的完整的歙山式教学综合体系(2009 年获深圳大学第五届优秀教学成果二等奖)。

本套新编教材的特点有四：一是强调实验者的自主地位，由实验者自己明确兴趣所在，确定实验的具体内容与步骤；二是强调能力的提高，把实验目的明确到具体能力的培养上，实验过程就是能力提高的过程；三是强调实验条件的自行配套，服务体系提供实验设备设施、实验室开放、个案教学指导、实验评价的最优保证；四是强调技能运用，与生产科研实际相结合，把知识、技术、方法、技巧的运用贯穿于实验始终。

大学物理实验教学就是要培养具有一定能力水平的、适应当前社会需要的骨干建设者。本书为实验者提供了基本的实验资料，个性化的实验方案，也希望实验者在整个实验

阶段快乐进行、扎实收获。进行教学改革以后，不但把实验完全独立成为一门课程，没有了它的验证性、辅助性、可有可无性，发挥了它独特而无可替代的作用。而且随着实验教学要求的不断提高，实验者本身需要更加认真、主动、积极、踏实，指导教师需投入大量心血设计过程和全程关注，工作会更加辛苦。也许实验教学会变成一门很难教的课程，但相信人们将发现它的珍贵。

好入名山游，自在风流辈。朝看东海云，晚听西江雨，沾露还同星月处。自从恋得西湖水，珠峰失色，茅酒无香，闽音乏趣，三朋五友，馋涎尽说痴狂语。缘来彩蝶偶随引，小径通幽府，一览风光无数。洗足散发而去，登仙化羽。

聊以能力提高、科学发现和人生实践的三重境界与诸君共勉。

参加本书编写工作的有周恒智（介绍、实验 1、7、10、13、15、17、19、20）、江石寿（实验 3、9、11、12）、王喜省（实验 4、8、16、18）、邱云明（实验 2、5、6、14）。全书由张哲皇、周恒智统稿，赵改清主审。

智者千虑，必有一失。希大方赐教，尤盼实验者指正。同时，对本套教材编写人员的辛勤工作表示感谢。

编　者

2012 年 11 月 18 日

目　　录

大学物理实验基本技术技能介绍

——测量的不确定度和测量数据处理

测量是利用合适的工具(Instrument)，确定某个给定对象(Object)在某个给定属性(Attribute)上的量(Magnitude)的程序或过程(Procedure)。测量包含四个要素：测量对象、计量单位、测量方法、测量的准确度。

测量在物理实验中是极为重要的基本操作，它是将待测的某物理量与相应的标准作定量比较。测量结果包括数值(即度量的倍数由测量方法和数据处理后获得)、单位(即所选定的物体或物理量)以及可信赖程度(用不确定度来表示)。

由此，可以看出，测量的不确定度和测量数据处理成为物理实验的首要内容。

一、不确定度的概念及计算

测量的不确定度是与测量结果相关联的参数，用以表征测量值可信赖的程度，或者说它是被测量值在某一范围内的一个评定。

例如，用普通直尺测量某物体的长度是 22.5 mm，若用游标卡尺测则会是 22.58 mm，用千分尺测就会是 22.584 mm，若用精确度更高的测量长度仪器就会得到数字位数更多的测量结果，到底哪个是真实值呢？答案是都不是。这说明真实值是不可知的，精确度更高的测量结果只是更接近真实值，可信赖程度更好些而已。

测量的不确定度分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度，前者由观测列统计分析评定，也称为统计不确定度；后者不按统计分析评定，也叫非统计不确定度。

1. A 类标准不确定度

1）测量列的标准差和正态分布

从理论上说，对物理量 X 作 n 次等精度测量，得到包含 n 个测量值 x_1，x_2，…，x_n 的一个测量列。由于是等精度测量，我们无法断定哪个值更可靠，但概率论可以证明，其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (0-1)$$

结果即为最佳值，也称期望值，是最可以信赖的。

通常认为 n 次等精度测量值符合正态分布，则定义该测量列的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2/(n-1)} \qquad (0-2)$$

其统计意义是指，当测量次数足够多时(比如大于 10 次)，测量列中任一测量值与平均值的偏离落在 $(-\sigma,\sigma)$ 区间的概率为 0.683，这一公式称为贝塞尔公式。

当 n 趋于∞时，物理量 x 的质量指标(测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差)将成为连续型随机变量，其概率密度分布为正态函数，形式为

$$y(x_i - \bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} e^{-(x_i-\bar{x})^2/2\zeta^2} \tag{0-3}$$

或

$$\sigma = y(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} e^{-(\delta)^2/2\zeta^2} \tag{0-4}$$

其分布为一连续曲线，像一个倒扣的钟罩，如图 0-1 所示。δ 为绝对误差，$\delta = x_i - \bar{x}\zeta$ 为一个与具体测量条件有关的正参数，这种分布叫做高斯分布或正态分布。正态分布具有以下特点：

(1) 对称性：无论比平均值大或小，其差值的绝对值相等时出现的概率相等；

(2) 单峰性：与平均值相差越大，出现的概率越小；

(3) 有界性：在一定条件下，标准差的绝对值有一定限度；

(4) 抵偿性：标准差的算术平均值随着 $n \to \infty$ 而趋于零。

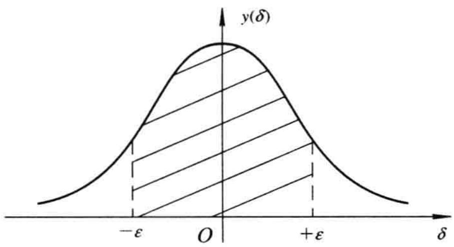

图 0-1 概率密度分布函数

当 $n \to \infty$ 时，用式(0-2)中的 σ 代替式(0-4)中的 ζ，得到

$$y(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\delta)^2/2\sigma^2} \tag{0-5}$$

从正态函数积分表得到

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(\delta)\mathrm{d}\delta = 1$$

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} y(\delta)\mathrm{d}\delta = P(\sigma) = 0.683$$

$$\int_{-2\sigma}^{2\sigma} y(\delta)\mathrm{d}\delta = P(2\sigma) = 0.954$$

$$\int_{-3\sigma}^{3\sigma} y(\delta)\mathrm{d}\delta = P(3\sigma) = 0.997$$

以上各式表明，当 $n \to \infty$ 时，任何一次测量值与平均值之差落在 $(-\infty,\infty)$ 区间上的概率为 1，满足归一化条件；而落在 $(-\sigma,\sigma)$ 区间上的概率为 0.683，即表示置信概率为 68.3%，记为 $p=0.683$；落在 $(-2\sigma,2\sigma)$ 区间上的概率为 0.954，即置信概率 $p=0.954$；落在 $(-3\sigma,3\sigma)$ 区间上的概率为 0.997，即 $p=0.997$,这就是标准差 σ 的统计意义。次数无限多时，测量偏差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%，对于有限次测量，这种可能性是微乎其微的，因此可以认为是测量失误，该测量值是“坏值”，应予以剔除。在分析多次测量的数据时，这是很有用的 3σ 判据。

正态分布是连续型随机变量中最重要、最常用的分布。一般而言，若某个数量指标 X

是很多随机因素之和，而每个因素所起的作用均匀微小，则 X 为服从随机分布的变量，如上述多次等精度独立测量的情况。实际上，大量生产的同类产品，当设备、技术、原料、工艺、操作等可控制的生产条件都相对稳定，不存在明显的系统误差影响时，产品的质量指标近似服从正态分布。

2）测量列的 A 类标准不确定度

在实际工作中，人们往往关心的不是测量列的数据散布特性，而是测量结果，即算术平均值的离散程度。我们设想进行了有限的 n 次（n 仍然足够大）测量后，得到一个最佳值 $\bar{x}$，这一测量列中任一次测量值 x_i 的误差落在$(-\sigma_x, \sigma_x)$区间上的概率为 68.3%。如果我们增加测量次数，例如$(n+m)$次，则可得到另一个最佳值$\bar{x}'$相应的标准差 $\sigma_{x'}$，$\bar{x}$ 与$\bar{x}'$、σ_x 与 $\sigma_{x'}$ 一般不会相同。继续增加测量次数，可以发现 $\bar{x}$ 也是一个随机变量。那么，随着测量次数的增加，算术平均值 $\bar{x}$ 本身的可靠性如何呢？算术平均值的标准差用 u_A 表示，它具有什么样的性质呢？显然，$\bar{x}$ 肯定要比测量列中的任一测量值更可靠。由概率论可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准差 u_A 为

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (0-6)$$

当测量次数趋于无限大时，算术平均值将无限接近待测物理量的客观值，即为最佳值。u_A 的统计意义为：待测物理量落在$(\bar{x}-u_A, \bar{x}+u_A)$区间上的概率为 68.3%，落在$(\bar{x}-2u_A, \bar{x}+2u_A)$区间上的概率为 95.4%，落在$(\bar{x}-3u_A, \bar{x}+3u_A)$区间上的概率为 99.7%。$u_A$ 叫做该测量列的 A 类标准不确定度，即该测量列的平均值 $\bar{x}$ 的标准差。

3）有限次测量的情况和 t 因子

测量次数趋于无穷只是一种理论情况，这时物理量的概率密度服从正态分布。当次数减少时，概率密度曲线变得平坦，成为 t 分布，也叫学生分布。当测量次数趋于无限时，t 分布过渡到正态分布。

对于有限次测量的结果，要保持同样的置信概率，显然就要扩大置信区间，把 u_A 乘以一个大于 1 的因子 t_p。在 t 分布下，A 类不确定度为 $t_p u_A$，要使测量值落在平均值附近，具有与正态分布相同的置信概率，置信区间要扩大为$(-t_p u_A, t_p u_A)$，其中，t_p 与测量次数有关。不同置信概率下 t_p 因子与测量次数的关系如表 0-1 所示。

表 0-1　不同置信概率下 t_p 因子与测量次数的关系

p \ t_p \ n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1
0.90	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.86	1.83	1.76	1.73	1.71	1.65
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	2.15	2.09	1.95
0.99	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

2. B 类标准不确定度

测量中凡是不用统计规律分析的不确定度统称为 B 类标准不确定度，记为 u_B。在物理

实验中，经常遇到一些不能多次重复测量的情况，如热敏半导体电阻与温度关系的动态测量。有时，仪器的精度较低，多次测量的结果可能完全相同，反映不出随机性，多次测量便失去意义。事实上，在实际工作和生活中，绝大多数测量都是一次测量。对一般有刻度的量具和仪表，估计误差在最小分度格的 1/10～1/5 之间，通常小于仪器的最大允差 $\Delta_{仪}$，所以通常以 $\Delta_{仪}$ 可计算出 B 类标准不确定度。测量值与客观值(即所谓的真值)的误差在 $(-\Delta_{仪}, \Delta_{仪})$ 范围内的置信概率为 1。

实际上，仪器的误差在 $(-\Delta_{仪}, \Delta_{仪})$ 范围内是按一定概率分布的，为简化起见，一般认为服从平均分布，因此由概率论可得到

$$u_B = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \tag{0-7}$$

由此可见，单次测量只有 B 类标准不确定度。

常用仪器、量具的主要技术指标要求和最大允差 $\Delta_{仪}$ 如表 0-2 所示。

表 0-2　常用仪器、量具的主要技术指标要求和最大允差 $\Delta_{仪}$

量具	量程	最小分度值	最大允差 $\Delta_{仪}$
钢直尺	150 mm	1 mm	±0.10 mm
	500 mm	1 mm	±0.15 mm
	1000 mm	1 mm	±0.20 mm
钢尺	1 mm	1 mm	±0.8 mm
	2 mm	1 mm	±1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	±0. 02 mm
	300 mm	0.05 mm	±0. 05 mm
螺旋测微器	0～25 mm	0.01 mm	±0. 004 mm
七级天平	500 g	0.05 g	0.08 g(接近满量程)
			0.06 g(1/2 量程附近)
			0.04 g(1/3 量程附近)
普通温度计	0～100 ℃	1 ℃	±1 ℃
精密温度计	0～100 ℃	1 ℃	±0.2 ℃

3. 测量值的合成不确定度

对于一个测量量的有限次的测量，最后误差结果用合成不确定度表示，若不作特别说明，置信概率默认为 $p=0.68$，可得合成不确定度为

$$u = \sqrt{(t_p u_A)^2 + {u_B}^2} = \sqrt{(t_p u_A)^2 + \left(\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}\right)^2} \tag{0-8}$$

不确定度通常取 1～2 位数字，遵守不确定度最大化原则，即只进不舍原则。例如，算出 $u=0.03501\cdots$，最后结果应取 $u=0.036$。

4. 间接测量量的不确定度

1) 不确定度的传递与合成

对于间接测量的量，有

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{0-9}$$

其中，x_1，x_2，…，x_n如果为相互独立直接测量的量，则有

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \tag{0-10}$$

其中，$u(x_i)$为测量的量x_i的合成不确定度。由式 0-10 可得出简化的常用函数不确定度传递公式，如表 0-3 所示。

表 0-3　常用函数不确定度传递公式

函数表达式	传 递 公 式
$W=x\pm y$	$u_W=\sqrt{u_x^2+u_y^2}$
$W=x\times y$	$\frac{u_W}{W}=\sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2+\left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$
$W=x/y$	$\frac{u_W}{W}=\sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2+\left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$
$W=\frac{x^k y^n}{z^m}$	$\frac{u_W}{W}=\sqrt{k^2\left(\frac{u_x}{x}\right)^2+n^2\left(\frac{u_y}{y}\right)^2+m^2\left(\frac{u_z}{z}\right)^2}$
$W=kx$	$u_W=ku_x$，$\frac{u_W}{W}=\frac{u_x}{x}$
$W=k\sqrt{x}$	$\frac{u_W}{W}=\frac{1}{2}\frac{u_x}{x}$
$W=\sin x$	$u_W=\lvert\cos x\rvert u_x$
$W=\ln x$	$u_W=\frac{u_x}{x}$

2）测量结果的表示

测量结果的最终表达式为

$$X = \bar{x} \pm u \tag{0-11}$$

式中，$\bar{x}$ 为不含系统误差的测量结果，通常就是测量列的平均值。不确定度取 1～2 位数字，测量值 X 的最后一位与不确定度的最后一位对齐。

测量结果也可以采用相对不确定度的形式，即

$$X = \bar{x}(1 \pm u_r) \tag{0-12}$$

式中，$u_r=\frac{u}{\bar{x}}\times 100\%$为相对不确定度，取 1～2 位数字，用百分数来表示。

3）举例

求铜管体积 V，要求用不确定度表示最后结果。

用 50 分度格游标卡尺分别测铜管的高度 H、外径 D、内径 d 各 10 次，单位为 mm。以 H 为例计算 H 的σ、u_A、$t_p u_A$、u_B、u_H（合成不确定度），类似地分别计算 D、d 的 u_D、u_d。由 $V=\frac{\pi}{4}H(D^2-d^2)$根据不确定度传递可算出 u_V，计算过程如表 0-4 所示。

表 0－4　计算过程

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	49.82	49.86	50.12	50.16	50.20	50.30	50.16	50.10	50.12	50.24
算术平均值	$\overline{H}=\frac{49.82+49.86+50.12+50.16+50.20+50.30+50.16+50.10+50.12+50.24}{10}=50.11$									
每次测量绝对误差 $\Delta H_i=H_i-\overline{H}$	-0.29	-0.25	0.01	0.05	0.09	0.19	0.05	-0.01	0.01	0.13
每次测量标准差 σ	$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(H_i-\overline{H})^2}{(10-1)}}=0.16$									
A 类标准不确定度 u_A	$u_A=\frac{\sigma}{\sqrt{10}}=0.049$									
A 类不确定度 $t_p u_A$	查表当 $n=10$ 时，$t_p=1.06$ $t_p u_A=1.06u_A=0.052$									
B 类不确定度 u_B	$u_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=\frac{0.02}{\sqrt{3}}=0.012$									
H 合成不确定度 u_H	$u_H=\sqrt{(t_p u_A)^2+u_B^2}=\sqrt{(0.052)^2+(0.012)^2}=0.054$									
H 的结果	$H=(50.11\pm0.06)$									
类似分别计算 D，d	$D=(37.25\pm0.05)$，$d=(20.76\pm0.08)$									
计算 V 合成不确定度 u_V	由式(0－10)和 $V=\frac{\pi}{4}H(D^2-d^2)$ 可得 $u_V=\sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)^2u_H^2+\left(\frac{\partial V}{\partial D}\right)^2u_D^2+\left(\frac{\partial V}{\partial d}\right)^2u_d^2}$ $u_V=\frac{\pi}{4}\sqrt{(\overline{D}^2-\overline{d}^2)^2u_H^2+(2\,\overline{H}\,\overline{D})^2u_D^2+(-2\,\overline{H}\,\overline{d})^2u_d^2}$ $u_V=2.1\times10^2(\mathrm{mm}^3)$									
V 的结果	$V=(3.764\pm0.021)\times10^4(\mathrm{mm}^3)$									

二、实验数据处理常用方法

实验数据是分析和讨论实验结果的依据。物理实验离不开定量的测量和计算，经常要作大量的采用专门方法进行的数据处理工作，因此，数据处理是物理实验的一个重要组成部分。

在普通物理实验中，要求掌握的常用的实验数据处理方法有列表法、图示法与图解法、逐差法、最小二乘法等。

1. 列表法

在记录和处理数据时，将数据列成表。数据列表可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系，使数据有条不紊；便于随时检查，减少甚至避免错误；及时发现问题和

分析问题，有助于从中找出规律性的联系，求出经验公式。列表的要求有：

(1) 要简单明了，便于看出各物理量之间的关系。要根据具体情况决定需列哪些项目，每个表上方需标记名称。

(2) 要写明表中各符号所代表物理量的意义，并注明单位。单位写在标题栏中，不要重复记在各个数据上。

(3) 表中所列数据，要是能正确反映测量结果的有效数字。

(4) 可把每次测量的估读误差一并写在数据后，必要时给予附加说明，列表法是其他数据处理方法的基础。

2. 图示法与图解法

图示法是根据几何原理，将实验数据用图线来简明、直观、准确地揭示出物理量之间的关系。在一些复杂情况下，还无法确定物理量之间适当的函数关系时，只能用实验曲线来表示实验结果。

图解法是根据已作好的曲线，用解析方法进一步求得曲线所对应的函数关系、经验公式以及其他参数值。

1) 图示法规则

① 选用坐标纸的类别和大小：按实验参量要求选用毫米方格纸(直角坐标纸)或双对数坐标纸。根据实验数据的有效数字位数和数值范围，确定坐标纸的大小，原则上坐标纸的一小格代表可疑数字前面的一位数。

② 定坐标和坐标标度：一般横轴代表自变量，纵轴代表因变量。标出坐标轴代表的物理量和单位，在坐标轴上按选下的比例标出若干等距离的、整齐的数值标度，其数值位数应与实验数据的有效数字位数一致，其标度通常用1、2、5，而不用3、7、9。横轴和纵轴的标度可以不同。如数据特别大或特别小，可以提出乘积因子(如$\times 10^{2}$或$\times 10^{-2}$)写在坐标轴末端。

③ 标出实验点和画出图线：依据实验数据，用铅笔尖在坐标图上以小“+”标出各数据点的坐标，然后用直尺和曲线板将实验点连成直线或光滑曲线。连线时应使多数实验点在连线上，不在连线上的实验点大致均匀地分布在图线的两例。如校准曲线，则要通过校正点连成折线。如果同时画出几条曲线时，每条曲线数据点可以采用不同的标记如“X”、“A”、“O”等，使之区别开来。

④ 写出图线名称：一般在图纸下部位置写出简洁完整的图名，字形要端正。

2) 图解法求直线的斜率和截距

以 x 为横坐标轴，y 为纵坐标轴，设所作的 $y\sim x$ 图线为一直线，其函数形式为

$$y = ax + b \tag{0-13}$$

则该直线的斜率 a 可用“两点式”求解。方法是：在靠直线的两端选取两点$A_1(x_1, y_1)$、$A_2(x_2, y_2)$(一般不宜取测量点，因为测量点不一定在图线上)，将其分别代入式(0-13)，可得 $a=\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$。而截距 $b=y_3-ax_3$ (x_3, y_3)为在直线上选取的某点的坐标。当 x_3 为零时，则可从图线上与 y 坐标轴的交点读取该直线的截距 $b=y_3$。

3. 逐差法

当两个被测物理变量之间存在多项函数关系，且自变量为等间距变化时，常常用逐差

法处理测量数据。

逐差法就是把实验得到的偶数组数据分成前后两组，将对应项分别相减。这样做可以充分利用数据，具有对实验数据取平均和减少随机误差的效果。另外，还可以对实验数据进行逐次相减，这样可验证被测量之间的函数关系，及时发现数据差错或数据规律。逐差法相当于利用所有数据点连了 n 条直线，分别求出每条直线的斜率后再取平均值，所以，用逐差法求得的结果比图示法要准确些。用逐差法得到的结果，还可以估算它的随机误差。

4. 最小二乘法(实验数据的直线拟合)

图示法虽然在数据处理中是一个很便利的方法，但它不是建立在严格统计理论基础上的数据处理方法，在图纸上作人工拟合直线(或曲线)时有一定的主观随意性，往往会引入附加误差，尤其在根据图线确定常数时，这种误差有时会很明显。为了克服这一缺点，在数据统计中研究了直线拟合问题(或称一元线性回归问题)，常用的是一种以最小二乘法为基础的实验数据处理方法。

最小二乘法原理：若能找到一条最佳的拟合直线，那么这条拟合直线上各相应点的值与测量值之差的平方和在所有拟合直线中应是最小的。

设在某一实验中，可控物理量取 x_1，x_2，x_3，…，x_n值时，对应物理量依次取 y_1，y_2，y_3，…，y_n。我们讨论最简单的情况，即每个测量值都是等精度的，而且假定测量值 x_i的误差很小，主要误差都出现在 y_i的测量上。显然，如果从(x_i，y_i)中任取两个数据点，就可以得到一条直线，只不过这条直线的误差有可能很大。直线拟合的任务就是用数学分析的方法从这些观测量中求出一个误差最小的最佳经验公式 $y=mx+b$，按这一经验公式作出的图线虽然不一定通过每个实验点，但是它以最接近这些实验点的方式平滑地穿过它们。

显然，对应于每一个 x_i值，观测值 y_i和最佳经验式 y 的值之间存在一偏差 δy_i，我们称之为观测值 y_i的偏差，即

$$\delta y_i = y_i - y = y_i - (b + mx_i)(i = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

根据最小二乘法的原理，当 y_i偏差的平方和为最小时，由极值原理可求出常数 b 和 m，由此可得最佳拟合直线。

设 s 表示 δy_i的平方和，它应满足

$$s = \min\sum(\delta y_i)^2 = \min\sum[y_i - (b + mx_i)]^2 \tag{0-14}$$

式中，x_i和 y_i是测量值，均是已知量，而 b 和 m 是待求量。因此，s 实际上是 b 和 m 的函数。令 s 对 b 和 m 的偏导数为零，即可解出满足式(0-14)中的 b 和 m 值。

$$\frac{\partial s}{\partial b} = -2\sum(y_i - b - mx_i) = 0 \tag{0-15}$$

$$\frac{\partial s}{\partial m} = -2\sum(y_i - b - mx_i)x_i = 0 \tag{0-16}$$

解上述联立方程得

$$b = \frac{\sum x_i y_i \sum x_i - \sum y_i \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n\sum x_i^2}, \quad m = \frac{\sum x_i \sum y_i - n\sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n\sum x_i^2}$$

将 b 和 m 值代入 $y=b+mx$，即得最佳经验公式。

用最小二乘法求得的常数 b 和 m 是“最佳”的，但并不是没有误差，它们的误差估计比

较复杂。一般来说，如果一列测量值的 δy_i 大，那么，由这列数据求得的 b 和 m 值的误差也大，由此定出的经验公式可靠程度就低；如果一列测量值的 δy_i 小，那么，由这列数据求得的 b 和 m 值的误差也小，由此定出的经验公式可靠程度就高。

用回归法处理数据最困难的问题在于函数形式的选取。函数形式的选取主要靠理论分析，在理论还不清楚的场合，只能靠实验数据的变化趋势来推测。这样，对同一组实验数据来说，不同的人员可能采取不同的函数形式，得出不同的结果。为判明所得结果是否合理，在待定常数确定以后，还需要计算相关系数。对于一元线性回归问题，r 的定义为

$$r=\frac{\sum \Delta x_i \sum \Delta y_i}{\sqrt{\sum (\Delta x_i)^2 \cdot \sum (\Delta y_i)^2}} \tag{0-17}$$

其中，$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$；$\Delta y_i = y_i - \bar{y}$。

可以证明，r 值总是在 0 和 1 之间，r 值越接近于 1，说明实验数据点密集地分布在所求得的直线近旁，用线性函数进行回归是合适的；相反，如果 r 值远小于 1 而接近 0，说明实验数据对求得的直线很分散，即线性回归不妥，必须用其他函数重新试探。

方程的线性回归，用手工计算是很麻烦的。但是，不少袖珍型函数计算器上均有线性回归计算键，或用 Excel 线性拟合，计算起来非常方便，因而，线性回归的应用日益普及。

实验1 基本测量实验

【预习重点】

1. 米尺、游标卡尺、螺旋测微计原理以及不确定度的计算和表示。
2. 了解实验步骤的确定与实验表格的制订。

一、实验目的

长度是最基本的物理量之一，对它的测量是许多物理量测量的基础，也是科学实验的基础。长度测量常用的有米尺、游标卡尺、螺旋测微计等量具。长度测量中的长度包括距离、角度、表面粗糙度、圆度和直线度等以“米”为基本单位的几何量，所以长度测量也常称为几何量测量。长度测量是将被测长度与已知长度比较，以确定被测长度量值的过程。量值以数字和单位表示，例如用游标卡尺测量圆柱体直径，测得的数值 20.24 毫米就是量值。

实验要求掌握游标卡尺、千分尺的测量原理和使用方法，通过清晰地展现长度测量技术的进步过程，体会人类智慧的魅力；通过求出铜管的体积，让学生先期理解不确定度的计算方法和最后结果的科学表示方法，本实验着重培养和提高实验者的实验步骤与表格制订能力。

二、实验原理

1. 游标卡尺的基本原理

为了使米尺测得更准一些，在米尺上附加一个能够滑动的有刻度的小尺(称做游标)，这样就构成了游标卡尺，如图 1-1 所示。一般游标卡尺的刻度方法是：游标上有 n 个刻度，它的总长与主尺上$(n-1)$个刻度的总长相等。设主尺每个刻度的长为 y，游标每个刻度的长为 x，则有 $nx=(n-1)y$，由此求得主尺与游标每个刻度的差值 δ 为：$\delta=y-x=\dfrac{y}{n}$。

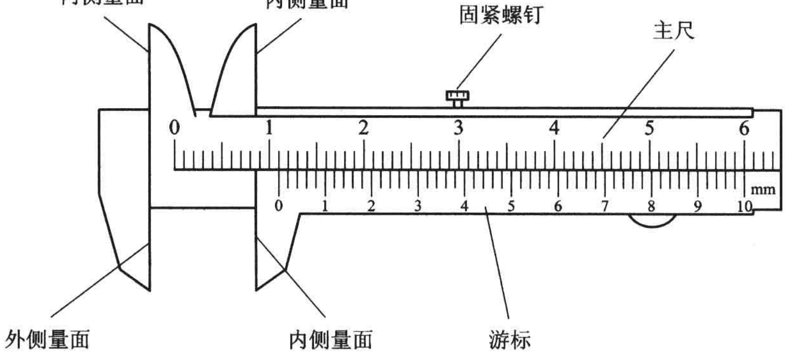

图 1-1 游标卡尺结构示意图