Daxue Wuli Shiyan Zhidao

大学物理实验指导

张旭 主 编
吴建海 李晓会 史晓丽 副主编

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

大学物理实验指导

张　旭　主　编
吴建海　李晓会　史晓丽　副主编

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容介绍

为了帮助学生解决在物理实验中经常遇到的一些问题,进一步提高学生的实验动手(操作)能力,鼓励学生勇于探索、创新,特编写了《大学物理实验指导》一书。

本书着重介绍实验仪器及其操作方法、技巧,仪器的使用注意事项,在数据记录与处理中给出每个实验的具体要求,并安排了一定的分析思考题和拓展提高题。希望本书能帮助读者高效率地获取和理解实验知识,较好地掌握大学物理实验这门课程。

《大学物理实验指导》是与河北工业大学使用多年的普通高等教育"十一五"国家级规划教材《大学物理实验》配套的教学辅助书,书中所列实验均是全国大学物理实验指导委员会在工科物理实验指导中所列的内容,其中部分实验作为设计性、特色研究性实验列入,可供理工科大学各专业物理实验教学参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验指导/张旭主编. —天津:天津大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-5618-3631-6

Ⅰ.①大… Ⅱ.①张… Ⅲ.①物理学-实验-高等学校-教学参考资料 Ⅳ.①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第147506号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地　　址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电　　话 发行部:022-27403647　邮购部:022-27402742
网　　址 www.tjup.com
印　　刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经　　销 全国各地新华书店
开　　本 185mm×260mm
印　　张 9.75
字　　数 244千
版　　次 2010年9月第1版
印　　次 2010年9月第1次
印　　数 1-6 000
定　　价 18.00元

序

对于工科院校的主要培养目标——工程师，本应具有力、热、电、光、传感器及物性学等多方面的物理实验技能基础，而工科的物理实验课程仅安排有60课时，只能选做20个左右实验，安排的难度受限自然很大。虽然我国高中物理教学大纲中，力学、电学实验安排有较好的基础，但因各地区师资条件、设备条件和教育水平的参差不齐，招来生源的相应基础必然各异。因而有些在高中大纲中已有的实验，仍需在略高的要求下列入本教材中（例如实验1、2、8、9、17等），这也是我国今后教改过程中将会逐步解决的问题。假以时日，相信在本教材再版时将会以更宽的覆盖面得以更新，这正是本人与编者们交流时获得的强烈信心。

实验教材切忌各校面孔同一，应当本着各校生源、学科设置、设备条件以及社会发展的需求等多方面因素而定。本教材在绪论中仅以一万字左右的篇幅，简明扼要地讲述了测量不确定度的概念，并在各个实验中贯彻了它。这对学生们今后在科技交流和生产实践中，贯彻“国际约定”的技术规范很有补益。虽然GUM目前在A类、B类不确定度的划分及统计理论的应用方面尚待完善，但“约定”就像语言，是国际交流所必需的，因而以尽早习用为佳。

本教材虽为多人合编，但其体例统一，行文顺畅，表述简明，协同较好。学生阅读本教材后，能较顺利地进行实验操作。在数据处理及测量不确定度表达上，各个实验之末均有较详指导，学生亦不难完成。因此，本教材当属一本很实用的教材。

笔者致力于物理实验教学五十多年，参与过中国物理学会实验教学研究，教学研究会——教学指导委员会，1980年至今一直在教育部（教委）“教学仪器研究所”和“教学仪器设备研究会”兼职，曾多次参加国际国内实验教学交流会，深知实验教学改革乃一“系统工程”，较之课堂讲授课程改革更为艰辛。河北工业大学的同人们所编此教材的样稿，我仔细通读过两遍，与作者进行过深入的交流和探讨。同人们嘱我为序，我谨祝贺他们的成功，并冒昧地写了上述一些话。

谭成章

于南开大学物理学院

2010年9月

前　言

物理实验作为高等院校公共基础课,是大学生系统地学习科学实验基础知识、实验方法、测量技术的入门课程,是高校基础教学中不可缺少的重要环节。为了帮助学生解决在物理实验中经常遇到的一些问题,进一步提高学生的实验动手(操作)能力,鼓励学生勇于探索、创新,特编写了《大学物理实验指导》一书,本书是河北工业大学物理实验中心全体教师多年来教学经验的总结。

《大学物理实验指导》是与河北工业大学使用多年的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《大学物理实验》配套的教学辅助书,书中所列实验均是全国大学物理实验指导委员会在工科物理实验指导中所列的内容,其中部分实验作为设计性、特色研究性实验列入,可供理工科大学各专业物理实验教学参考使用。

本书着重介绍实验仪器及其操作方法、技巧以及仪器的使用注意事项,每个实验的具体要求在数据记录与处理中给出,并安排了一定的分析思考和拓展提高题。希望本书能帮助读者高效率地获取和理解实验知识,较好地掌握大学物理实验这门课程。

全书共有30个实验选题,对于60学时的物理实验课,不同专业的学生,可根据自己的需要、兴趣和时间在两学期内选作书中的19个实验。

参加本书编写工作的有:张旭(实验1、5、7、27),吴建海(绪论),李晓会(实验10、18、19),史晓丽(实验3、4、15),段雪松(实验11、17、23、24、26),孔祥明(实验12、13、14、28),曹天光(实验8、9、16),刘铭(实验20、21、22),李佳(实验2、25),任树喜(实验6),叶文江(实验29、30)。张旭教授负责全书的统稿和定稿。

南开大学谭成章教授对全书进行了仔细的审阅并提出许多宝贵的修改意见,谭先生还在百忙之中为本书作序,在此表示衷心的感谢。

在编写过程中我们参考了许多兄弟院校的实验教材,在此也向他们深表谢意。

由于时间仓促,编者水平有限,书中错误和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2010年6月

目　　录

绪　论

一、要求

①理解测量、误差、测量不确定度、有效数字的概念。

②掌握直接测量结果（包括单次测量、有限次测量）、间接测量结果的不确定度的计算，并合理、正确地保留有效数字。

③初步了解各种测量方法及数据处理方法。

二、背景

自高斯研究误差分布以来，不同国家和不同学科之间对于测量数据的处理、测量结果的表达有着不同的看法与规定，有关术语的定义也不尽统一，从而影响了国际间的交流和对各种成果的相互利用。

1980 年 10 月，国际计量局（BIPM）综述了来自 21 个国家的意见，提出《实验不确定度的规定建议书》，在 1981 年 10 月召开的 BIPM 第 70 届会议上修改通过，编号为 INC—1(1980)，并建议将 INC—1(1980)作为国际性指导文件。1993 年，国际计量局（BIPM）、国际电工委员会（IEC）、国际标准化组织（ISO）、国际法制计量组织（OIML）、国际临床医学联合会（IFCC）、国际理论与应用化学联合会（IUPAC）、国际理论与应用物理联合会（IUPAP）等七个国际组织协调一致正式发布了《测量不确定度表述指南》（简称 GUM），为计量标准的国际比对和测量不确定度的表述奠定了基础。GUM 中的一些概念是国际、国内各界表达测量不确定度最具权威性和指导性的论述。我国为了贯彻实施 GUM，制定了一系列技术标准，特别是国家质量技术监督局于 1999 年 1 月 11 日发布了新的计量技术规范《JJG 1059—1999 测量不确定度评定与表示》，并于 1999 年 5 月 1 日起实行。

本书采用测量不确定度来表述实验结果。

三、误差理论基础

1. 测量

(1)定义

将预定的标准和未知量进行定量比较的一组操作称为测量。在测量过程中必须具备两个条件：预定的标准必须是精确的已知量，并为人们所公认；用于进行定量比较的仪器、设备和过程，必须能被证明是正确的。观测者、测量对象、测量仪器、测量方法、测量条件统称为测量要素。

(2)分类

物理量的测量分为直接测量和间接测量。直接测量就是将待测量与标准直接比较而直接读出待测量是标准单位的多少倍。间接测量，对于一些没有提供直读仪器的物理量，可以利用

它与另外一些可以直接测量的物理量之间的函数关系间接计算出来。例如，用米尺测量长度、用天平称质量、用电流表测量电流、用温度计测温度等都是直接测量；用单摆测量重力加速度，则需要直接测出周期 T 与摆长 l，而依据单摆周期公式计算出 $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$，这种测量为间接测量。

为进行统一的定量比较，国际计量组织对基本物理量的计算单位做出了明确的规定，人们依据这些标准制成按一定单位刻度的量具、仪器、仪表等。

(3) 读数规则

一切物理量的测量终将转化为某些物理量的直接测量，测量必须读数。不同的仪器，读数方法不同。

①一般线性刻度的仪器仪表(连续式的)应估读至十分之一。

②下列几种类型仪表，一般不进行估读：a. 非线性刻度的仪器仪表；b. 仪器误差与分度值非常接近的仪器；c. 示值跳变的仪表(不连续式的)，如数显仪器、机械秒表等。

2. 误差

(1) 定义

测量值与被测量的真值之差表示为

$$\delta = x - N$$

注：真值是一个理想化的概念，一般不可知。实际处理时真值用约定真值代替，约定真值是约定采取的。(常用的约定真值有：国际计量会议约定的值或公认值，如基本物理常数、基本单位标准、经过高一级仪器校验过的计量标准器的量值、修正过的算术平均值等。)

(2) 误差公理

误差存在于一切测量过程的始终，这一事实已为一切从事科学实验的人们所公认。

(3) 误差的分类

1) 系统误差　在相同条件下多次测量同一物理量时，误差的绝对值和符号恒定，或在条件改变时按某一确定规律变化的误差。系统误差的来源主要有：仪器误差；理论方法误差；环境误差；人为误差。

由系统误差的来源可以看出，相同条件下进行多次测量并不能减小或消除系统误差。也不可能帮助人们发现那些由于外界因素影响而导致的系统误差。改变实验条件、测量仪器或实验方法进行反复测量，然后根据测量结果进行分析，可以发现系统误差的存在，找到产生这种误差的原因，尽量减弱以致消除某些系统误差对测量结果的影响。

2) 随机误差　在相同条件下多次测量同一量时，误差时大时小、时正时负，无规则涨落，但对大量的测量数据而言，随机误差遵循统计规律。

随机误差主要来源于不稳定或不可控制的因素。相同条件下多次测量的平均值比单次测量值的随机误差要小，增加测量次数可以减小随机误差。

随机误差的概率密度曲线见图 1，其特点如下：

①单峰性，表现为绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多；

②有界性，表现为在一定条件下的有限次测量中，随机误差的绝对值不会超过一定的界限；

③对称性，表现为绝对值相等的正误差和负误差出现的次数大致相同；

④抵偿性，表现为当测量次数 $n\to\infty$ 时，正负误差相互抵消，误差的代数和将趋于零，即

$$\lim_{n\to\infty}\sum_{i=1}^{n}\delta_i=0$$

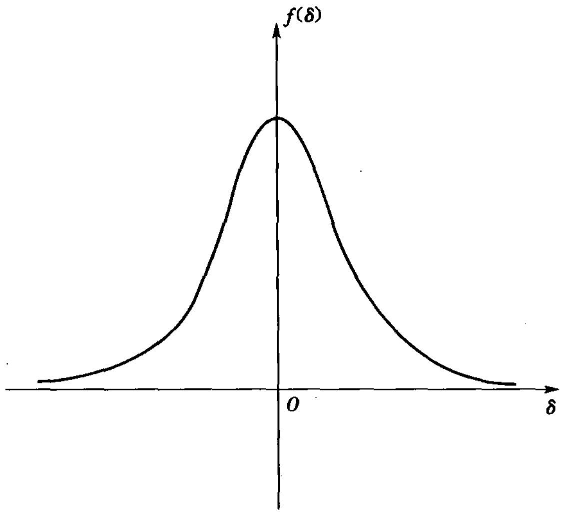

图 1　随机误差的概率密度曲线

抵偿性是随机误差最本质的特征。由随机误差的抵偿性可以证明:在相同条件、等精度、消除系统误差的情况下,有限次测量的平均值最接近客观真值,因此在有限次测量中,用 $\bar{x}$ 表示待测物理量的结果。

由各种物理因素的微小变化所引起测量的随机误差通常遵循正态分布,它是 1874 年高斯用统计方法得出的。其概率密度函数为

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma(2\pi)^{\frac{1}{2}}}\exp(-\delta^2/2\sigma^2)$$

其中:δ 为随机误差;σ 为标准误差。

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

式中:N 为真值;x_i 为测量值,σ 与 δ 的关系见图 2。

σ 不是一个具体的误差,用 σ 表示无穷多次测量中任一个单次测量值的标准误差,它能准确反映出该测量中随机误差出现的概率密度情况。

3. 测量不确定度

(1)定义

测量不确定度是表征被测量的真值所处量值范围的评定,是用以表述测量结果分散性的参数,是对测量结果的质量的定量评定。

(2)分类

A 类不确定度是指等精度多次重复测量中,可以用统计方法估算出来的不确定度分量 u_A。随机误差是最典型的 A 类分量。B 类不确定度是用其他非统计方法估算出的不确定度分量 u_B。如仪器误差是典型的 B 类分量。合成不确定度是指实验结果的不确定度,是 A 类分量和 B 类分量的合成,表示为

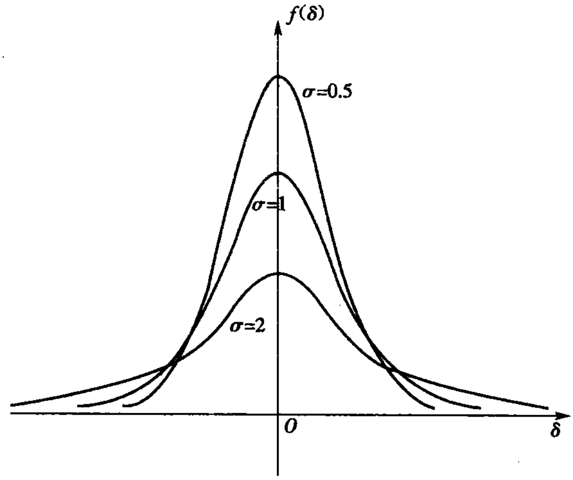

图2　σ 与 δ 的离散性关系

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

4. 有效数字及运算法则

(1) 有效数字

正确有效地表示测量和运算结果的数字称为有效数字。有效数字由可靠数字和一位存疑数字(一般取一位)组成。如图3所示,用米尺测量物体长度,待测物一端与尺零点对齐,另一端落在5.3~5.4 cm。根据读数规则,对超出整刻度的部分要估读,超出部分大约为4/10格,故可将物体长度记为5.34 cm。5.3是可靠数字,4是存疑数字。

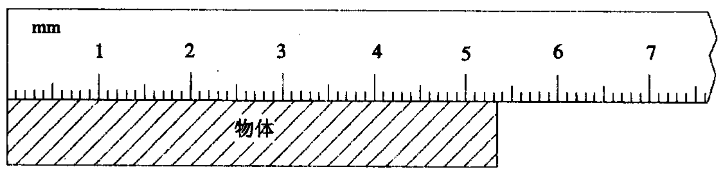

图3　有效数字的读取

(2) 运算法则

1) 尾数合成法则　四舍六入五凑偶。小于5舍,大于5入,等于5时则把尾数凑成偶数。如4.186 8取四位有效数字4.187;1.635取三位有效数字1.64;1.635取两位有效数字1.6。

2) 四则运算法则　加减法运算采用尾数取齐法则,以末位最高的那个数据的尾数为准。

例如 $N=A+B+C-D$,其中 $A=38.206$,$B=13.248$,$C=161.2$,$D=1.324$,求 $N=?$

解:因 C 的末位在十分位,所以其他保留至百分位即可

$$N=38.21+13.25+161.2-1.32=211.3$$

结果保留到十分位。

乘除法运算结果的有效数字位数应与参与运算的分量中有效数字位数最少的测量值相同。

对于三角函数、开方、对数、指数等函数运算,一般先计算出其标准不确定度,然后由其不

确定度的大小决定运算结果的有效数字的位数。

例如 $N=\sin x, x=18°30'\pm 10'$，求 $N=?$

解：$u_N=\left(\dfrac{\partial N}{\partial x}\right)\cdot u_x=\cos x\cdot u_x=0.948\,3\times 0.002\,9=0.002\,8=0.003$

所以 $N=\sin 18°30'=0.317\,3=0.317$

由标准不确定度估算可知，N 取三位有效数字。

注：$u_x=10'$ 换算成弧度 $u_x=\dfrac{10\pi}{60\times 180}=0.002\,9$。

(3)测量结果不确定度的估算方法

一个测量列 $x_1,x_2,\cdots,x_n(n\to\infty)$，对于任意一个测量值 x_i，其标准误差为

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

如果测量结果的不确定度用 σ 表示，则称为标准不确定度。其含义是真值出现在 $[x_i-\sigma,x_i+\sigma]$ 区间内的概率为68.3%，即置信概率是68.3%(0.683)。

同样可计算出真值出现在 $[x_i-2\sigma,x_i+2\sigma]$ 区间内的概率是95.4%，出现在 $[x_i-3\sigma,x_i+3\sigma]$ 区间内的概率为99.7%。习惯上常以 σ 来表示测量结果的不确定度，其置信概率是68.3%。

当希望以较高的置信概率表述测量结果时，需要将标准不确定度 σ 乘上一个系数，即 $u_p=C_p\cdot\sigma$，将 u_p 称为扩展不确定度，它具有比标准不确定度更高的置信概率。例如 $u_p=2\sigma(p=0.954)$，$u_p=3\sigma(p=0.997)$。

1)直接测量结果不确定度的估算　在实际测量过程中，测量次数是有限的，因而随机量误差的分布与无穷多次测量的正态分布有偏离，称为 t 分布，如图4所示。

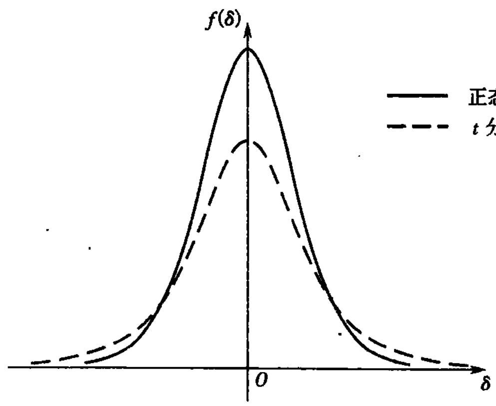

图4　正态分布与 t 分布

t 分布曲线偏离正态分布曲线。t 分布函数的分布系数用 $t_p(n)$ 表示，它是一个与置信概率和测量次数有关的量值，其数值如表1。

表 1　不同的置信概率 p 和测量次数 n 的分布系数 $t_p(n)$

$t_p(n)$ \ n / p	3	4	5	6	7	8	9	10
0.683	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06
0.954	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.23
0.997	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	3.17

可以证明,有限次测量的算术平均值是真值的最佳估计值。因此,在实际测量中通常用测量值的算术平均值代替真值。测量值与平均值之差称为偏差。对一组有限次测量的数据进行统计时,对应无穷多次测量的标准误差是标准偏差。

对于一组测量数据 $x_1,x_2,\cdots,x_n$(有限次测量),测量值的标准偏差为

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

标准偏差 S_x 的意义为待测量的真值出现在($x_i\pm S_x$)区间内的概率为 68.3%(x_i为任一测量值)。

某一物理量的有限次测量的平均值也是一个随机变量,也就是说对该物理量进行不同组次的有限次测量,各组的算术平均值也不相同,彼此也会有差异。因此算术平均值的标准偏差为

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

由此可知,在 n 次等精度的测量中,算术平均值的标准偏差要小于某一次测量值的标准偏差。其概率意义仍然是待测量的真值出现在($\bar{x}\pm S_{\bar{x}}$),($\bar{x}\pm 2S_{\bar{x}}$),($\bar{x}\pm 3S_{\bar{x}}$)区间的概率分别为 68.3%,95.4%, 99.7%。

A 类标准不确定度是对一系列测量值进行统计分析所得到的标准偏差的估计值,用 u_A 表示。

对于有限次测量,在等精度测量的条件下,对一个物理量进行 n 次测量,用 $\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n}$ 作为测量结果。其 A 类标准不确定度用平均值的标准偏差表示,即

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

对于单次测量,可以简化地认为别人测量过无穷多次了,则 $u_A=0$,其测量结果就是本次测量值 x。

在实验数学中,对于其他不能用统计规律处理的不确定度分量 B,只考虑由仪器误差造成的分量 B。本课程均假定仪器误差为均匀分布。所以 B 类标准不确定度可估算为

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$$

Δ 为仪器误差。合成不确定度为

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

对于单次测量结果,$u = u_B$。本课程中,不确定度 u 用 σ 代替,$\sigma_A = u_A$,$\sigma_B = u_B$,则有限次测量结果表示为

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm \sigma_x & (\sigma_x = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}, p = 0.683) \\ E_x = \dfrac{\sigma_x}{\bar{x}} = \quad \% \end{cases}$$

单次测量结果表示为

$$\begin{cases} x = x \pm \sigma_x & (\sigma_x = \sigma_B, p = 0.683) \\ E_x = \dfrac{\sigma_x}{x} = \quad \% \end{cases}$$

2)间接测量结果标准不确定度的估算　在实际测量中,多数物理量是通过间接测量得到的。间接测量结果不确定度的计算与直接测量结果的不确定度相关。表达间接测量结果不确定度与直接测量结果不确定度的关系式称为不确定度的传递公式。

设物理量 W 是多个直接测量量的函数,表示为

$$W = f(x, y, z, \cdots)$$

为处理问题简便,认为各直接测量量是相互独立的,各直接测量结果的不确定度为 σ_x,σ_y,σ_z,…,则 W 的不确定度为

$$\sigma_W = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \cdots}$$

间接测量结果函数关系以和差运算为主。利用上式计算比较简便。对于其他的函数关系,可以计算相对不确定度 E_W,再计算不确定度 $\sigma_W = W \cdot E_W$。

例如,某空心有机玻璃圆柱,外径为 D_1,内径为 D_2,高为 H,用物理天平(仪器误差为 0.02 g)称量一次质量为 14.828 g,用 50 分度游标卡尺($\Delta = 0.02$ mm)测得其几何尺寸如表 2,计算其密度。

表 2　空心玻璃圆柱的测量数据

D_1(mm)	29.98	30.12	29.90
D_2(mm)	10.06	9.92	10.02
H(mm)	20.06	19.98	19.96

解:①D_1,D_2,H 是有限次直接测量量,表 3 计算了 D_1,D_2,H 的 A 类不确定度、合成不确定度,并给出了计算结果。

D_1,D_2,H 的 B 类不确定度相同,即

$$\sigma_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012\ \text{mm} = 0.02\ \text{mm}$$

表3 有限次直接测量量的不确定度计算及计算结果

	D_1(mm)	D_2(mm)	H(mm)
1	29.98	10.06	20.06
2	30.12	9.92	19.98
3	29.90	10.02	19.96
平均值	30.00	10.00	20.00
$S_x=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$	0.11	0.07	0.05
$S_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}$	0.06	0.04	0.03
$\sigma_A=t_p\cdot S_{\bar{x}}$ $n=3\quad t_p=1.32$	0.08	0.06	0.04
$\sigma=\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}$	$\sqrt{0.08^2+0.02^2}=0.08$	$\sqrt{0.06^2+0.02^2}=0.06$	$\sqrt{0.04^2+0.02^2}=0.05$
$x=\bar{x}\pm\sigma$ $E_x=\frac{\sigma}{x}$	$D_1=\bar{D}_1\pm\sigma_{D_1}$ $=(30.00\pm0.08)$mm $E_{D_1}=0.03\%$	$D_2=\bar{D}_2\pm\sigma_{D_2}$ $=(10.00\pm0.06)$mm $E_{D_2}=0.06\%$	$H=\bar{H}\pm\sigma_H$ $=(20.00\pm0.05)$mm $E_H=0.25\%$

②单次测量结果 m。物理天平的仪器误差 $\Delta=0.02$ g，m 的标准不确定度

$$\sigma_m=\sigma_B=\frac{\Delta}{\sqrt{3}}=0.012\text{ g}$$

结果表示为：$m=m\pm\sigma_m=(14.828\pm0.012)$g

③间接测量结果 ρ 表示为

$$\rho=\frac{4m}{\pi(D_1^2-D_2^2)\cdot H}=\frac{4m}{\pi(\bar{D}_1^2-\bar{D}_2^2)\cdot\bar{H}}=\frac{4\times14.828\times10^{-3}}{\pi(30.00^2-10.00^2)\times20.00\times10^{-9}}$$
$$=1.180\times10^3\text{ kg/m}^3$$

ρ 的合成不确定度的传递公式为

$$E_\rho=\frac{\sigma_\rho}{\rho}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2+4\frac{D_1^2\sigma_{D_1}^2+D_2^2\sigma_{D_2}^2}{(D_1^2-D_2^2)^2}+\left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2}$$
$$=\sqrt{\left(\frac{0.012}{14.828}\right)^2+4\times\frac{30.00^2\times0.08^2+10.00^2\times0.06^2}{(30.00^2-10.00^2)^2}+\left(\frac{0.05}{20.00}\right)^2}$$
$$=0.7\%$$

$$\sigma_\rho=\rho\cdot E_\rho=1.180\times10^3\times0.7\%=8\text{ kg/m}^3$$

结果表示为

$$\begin{cases}\rho=\rho\pm\sigma_\rho=(1.180\pm0.008)\times10^3\text{ kg/m}^3\\E_\rho=0.7\%\end{cases}$$

本书中不确定度一般取一位有效数字，实验结果的有效数字与不确定度对齐，如上例。数据处理方法及实验方法参考相关教材。

实验1　力学基本测量——长度、质量和物体密度的测定

一、背景与应用

长度测量是最基本的物理测量之一，也是人类最早接触的测量。18 世纪以前，世界各国各自规定长度单位，很不统一。长度单位经历了多次演变后，到了 18 世纪末，法国科学院提出“米制”概念，将通过巴黎天文台的地球子午线的四千万分之一定义为“米”。1983 年，第十七届国际计量大会通过了现行“米”的定义：“米”是光在真空中 1/299 792 458 s 的时间间隔内所行进路程的长度。

常用长度测量仪器有米尺、游标卡尺（1631 年由法国数学家维尼尔·皮尔发明）、螺旋测微计、读数显微镜和测微目镜等。

常用质量测量仪器有物理天平、工业天平、电子天平等。

物质的密度是指物质的质量和其体积的比值，即单位体积的某种物质的质量。密度是反映物质特性的物理量，每种物质都有一定的密度。

密度的应用有：计算物体中所含各种物质成分；计算某些很难称量的物体质量；计算形状比较复杂的物体体积；判定物体是实心还是空心；计算液体内部压强及浮力等。因此，密度在科学研究和生产生活中有着广泛的应用。对于鉴别未知物质，密度是一个重要的依据。“氩”就是通过计算未知气体的密度发现的，后来又经光谱分析，确认空气中含有一种以前不知道的新气体，把它命名为“氩”。又如，工厂在铸造金属物之前，需要估计熔化多少金属，可根据铸模的体积和金属的密度算出所需的金属量。

二、原理简述

1. 游标原理

如用 a 表示主尺上最小分度的长度，用 b 表示游标上一个分度的长度，用 n 表示游标的分度数。设计游标卡尺的方法之一是使游标 n 个分度的长度与主尺 $(n-1)$ 个最小分度的长度相等，即

$$nb=(n-1)a \tag{1-1}$$

主尺最小分度与游标分度的长度差，称为游标卡尺的分度值，表示为

$$\delta=a-b=\frac{a}{n} \tag{1-2}$$

常用游标卡尺有 10 分度游标、20 分度游标和 50 分度游标三种。10 分度游标和 50 分度游标就是按以上方法设计的。

对于 10 分度游标，$n=10$，主尺最小分度的长度是 1 mm，游标上 10 个分度的总长等于 9 mm，游标上一个分度的长度是 0.9 mm，10 分度游标卡尺的分度值 $\delta=1-0.9=1/10=0.1$ mm。

当两测量爪合拢时，游标上的“0”刻度线和主尺上的“0”刻度线重合，如图 1-1 所示。这时，游标上第一条刻度线在主尺第一条刻度线的左边 0.1 mm 处，游标上第二条刻度线在主尺第二条刻度线的左边 0.2 mm 处……依此类推，如果两测量爪间放一张厚度为 0.1 mm 的纸片，游标上第一条刻度线就与主尺的第一条刻度线重合，如图 1-2 所示，而游标上所有其他各条线都不与主尺上任一条刻度线重合。反过来讲，如果游标上第一条刻度线与主尺的第一条刻度线重合，那么纸片的厚度 $l=0.1$ mm。如果游标上第 n 条线与主尺的某条刻度线重合，那么纸片的厚度就是 $n\delta$。

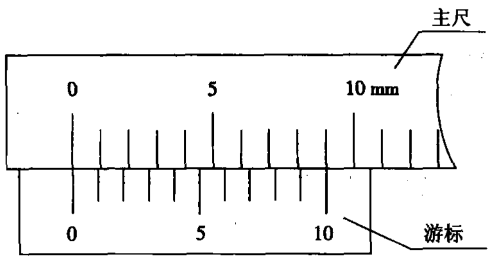

图 1-1　10 分度游标

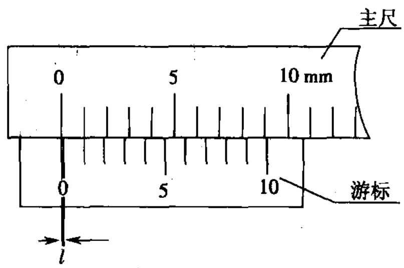

图 1-2　游标卡尺读数示例

对于 50 分度游标，$n=50$，即游标上 50 个分度的总长等于 49 mm，这样游标上一个分度的长度是 0.98 mm，如图 1-3 所示。50 分度游标卡尺的分度值 $\delta=1-0.98=1/50=0.02$ mm。为了便于读数，在游标的第 5、10、15、20、25、30、35、40、45 条刻度线上刻有 1、2、3、4、5、6、7、8、9 等字样，表示游标的这些线与主尺的某条刻度线对齐时，读数的小数部分分别为 0.10 mm，0.20 mm，0.30 mm，…，0.90 mm。

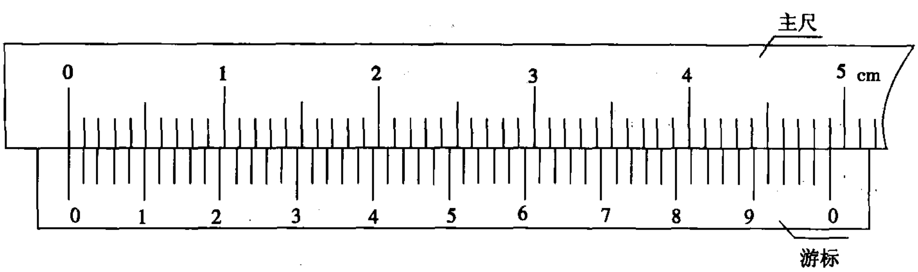

图 1-3　50 分度游标

注意，游标只给出毫米以下的读数，毫米以上的读数要从主尺上读出。

综上所述，用游标卡尺测量物体长度 l 时，读数方法如下：

①读毫米以上的整数，读游标“0”刻度线左边主尺上刻度线的数值 m；

②读毫米以下的小数，若游标上第 n 条线与主尺的某条刻度线重合，则小数值为 $n\delta$；

③两次读数相加就是待测物体的长度，即

$$l=m+n\delta \tag{1-3}$$

2. 螺旋测微原理

螺旋测微计是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。其主要部分是一个测微螺杆和套在螺杆上的固定套筒及紧固在螺杆上的微分筒。固定套筒上刻有毫米刻线和半毫米刻线，微分筒

上刻有50个等分格。当微分筒相对于固定套筒旋转一周时，测微螺杆沿轴线方向前进或后退0.5 mm(一个螺距)，所以螺旋测微计的分度值为$0.5/50=0.01$ mm，当微分筒转过一格时，测微螺杆沿轴线方向前进或后退0.01 mm。

读数时先以微分筒的棱边为准线，从固定套管上读出整毫米数和半毫米数，再以固定套管的水平线为准线，从微分筒上读出半毫米以内的小数部分(估读一位)，两者相加就是测量值。

3. 规则物体密度的测定

设质量为m的物体体积为V，该物体的密度$\rho=\frac{m}{V}$。质量m可由天平测得，规则物体的体积可以通过测量其外部尺寸计算求出。如圆柱体，设其高度为h，直径为d，质量为m，则

$$V=\frac{1}{4}\pi d^2 h \tag{1-4}$$

$$\rho=\frac{4m}{\pi d^2 h} \tag{1-5}$$

可见，只要测出圆柱体的质量m、直径d和高度h，就可算出圆柱体的密度。

三、仪器介绍

1. 游标卡尺

游标卡尺简称卡尺，外形和结构如图1-4所示。游标卡尺主要由主尺和可以沿主尺滑动的游标尺(副尺)组成。钳口1、2用来测量物体的外部尺寸，钳口1′、2′可用来测量管的内径或槽宽；尾尺4可用来测量槽或小孔的深度。

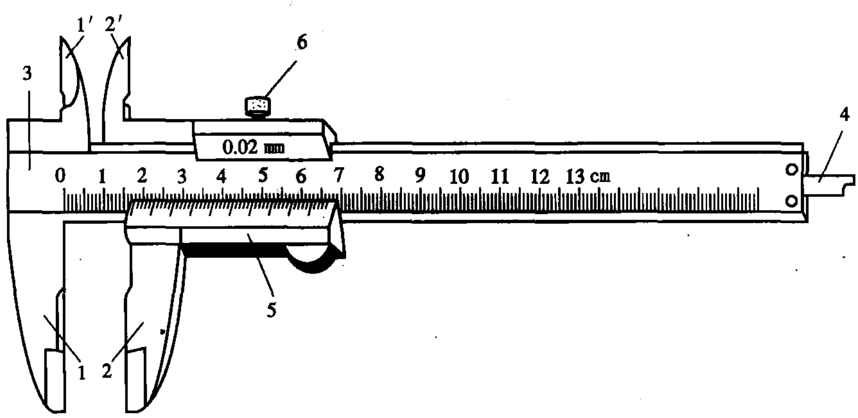

图1-4 游标卡尺

1,2(1′,2′)—钳口 3—主尺 4—尾尺 5—游标尺 6—固定螺丝

2. 螺旋测微计

螺旋测微计又称千分尺，常用于测量细丝和小球的直径以及薄片的厚度等。螺旋测微计的外形与结构如图1-5所示。螺母套管、固定套管和测砧都固定在尺架上。固定套管上刻有主尺，主尺上有一条轴向横线称作读数准线，横线上方刻有表示毫米数的刻线，横线下方刻有表示半毫米数的刻线。