21世纪独立学院应用型创新人才培养系列规划教材

工科物理实验

■ 主编 赵海军 潘多荣 李 宁
■ 主审 戴剑锋

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

21世纪独立学院应用型创新人才培养系列规划教材

工科物理实验

主编 赵海军 潘多荣 李 宁
主审 戴剑锋

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工科物理实验/赵海军,潘多荣,李宁主编;戴剑锋主审. —武汉:武汉大学出版社,2012.1
21世纪独立学院应用型创新人才培养系列规划教材
ISBN 978-7-307-09419-2

Ⅰ.工… Ⅱ.①赵… ②潘… ③李… ④戴… Ⅲ.物理学—实验—高等学校—教材 Ⅳ.O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第282880号

责任编辑:谢文涛　　责任校对:黄添生　　版式设计:马　佳

出版:武汉大学出版社　(430072　武昌　珞珈山)
　(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)
印刷:湖北金海印务有限公司
开本:787×1092　1/16　印张:12.25　字数:309千字　插页:1
版次:2012年1月第1版　　2012年1月第1次印刷
ISBN 978-7-307-09419-2/O·468　　定价:25.00元

前　言

大学物理实验是理工科大学生必修的一门基础实验课程，与大学物理独立设课。其教学目的在于使学生学习物理实验基础知识的同时，受到严格的实践训练，掌握初步的实验能力，养成良好的实验习惯和严谨的科学作风。

作为培养应用型工程技术人才的独立院校，不仅要培养学生具有比较深广的理论知识，更要培养学生具有较强的从事科学实验的能力。物理实验是学生进入大学后接受系统的实验方法、实验技能训练的开始，也是后续实验课的基础。

本书是作者根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会于2010年颁布的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》和国内工科物理教材改革动态，面向独立学院应用型本科人才培养规划，并结合编者多年在独立学院教学的经验编写而成。编写过程中参考了国内同类的大学物理实验优秀教材，特别强调实验能力、创新意识的培养和实验原理在现代工程技术中的应用，从而使内容体系安排更趋合理和丰富。

本书内容安排科学、合理，富于启发性和实用性。编者力求使物理实验原理阐述清楚，简洁得当；实验内容条理清晰，层次分明；深入浅出，通俗易懂；删减验证性实验，增加综合性、研究性实验项目；减少传统实验测量方法，加强现代化实验测量技术项目；以阅读材料的形式介绍实验原理在现代工程技术中的应用。单独设置“预习提纲”板块，引导学生实验前有针对性地做好预习，实验项目分基础、提高和研究三个层次编写，循序渐进。

本书由赵海军、潘多荣、李宁、许幸芬、徐莺歌老师共同执笔完成。全书由戴剑锋审核，赵海军负责统稿和定稿。

在本书的编写过程中，得到了兰州理工大学技术工程学院的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

2011年9月

目　　录

第1章 测量误差与数据处理

1.1　测量与误差

物理实验以测量为主，而测量必然会带来误差。通过改善测量方法和提高测量手段可以减少误差，但不能完全消除。而选择恰当的测量方法和手段的前提是对误差的来源、性质及规律进行深入的研究。

1. 测量的基本概念

测量是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与仪器相比较的实验过程。例如，为了测定一个钢球的直径，用千分尺与钢球相比较而得出其量值的过程等。

测量分为直接测量与间接测量。直接测量是指将被测物与标准仪器直接进行比较，得出被测物量值的测量过程。例如，用米尺测桌子的长度，用秒表测时间等都是直接测量。间接测量是由若干个直接测量量经已知函数关系或计算出被测物量值的测量过程。例如，用单摆法测重力加速度 g 时，由直接测量量 T 和 l，依据关系式 $g=4\pi^2 l/T^2$ 计算出重力加速度 g 值的方法就是间接测量。

2. 误差的定义

在测量中，被测量的真实大小是客观存在的。这个值称为真值。而在测量时，由于受到仪器本身准确程度的限制，环境条件和实验者认为因素的影响等，使得测量值和真值总是存在一定的偏差，即误差，常用下式表示：

$$\text{误差}(\varepsilon)=\text{测量值}(x)-\text{真值}(a)$$

上式表示的测量结果的实际误差值，又称绝对误差，而通常用相对误差来确切地反映测量效果。相对误差 E_x 是测量值的绝对误差 ε 的绝对值与其真值 a 之比。常用百分数表示，即

$$E_x=\frac{|\varepsilon|}{a}\times 100\%=\frac{|x-a|}{a}\times 100\%$$

例如，测量长度为1000mm时，其绝对误差为5mm，而测量长度为10mm时，其绝对误差为1mm。前者测量的绝对误差为后者的5倍。但根据相对误差的概念，前者的测量效果要比后者好。

3. 误差的分类

根据误差的性质及来源，将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。以下就各类误差的来源及其消除措施作简单介绍。

(1)系统误差。

在同一条件下多次测量同一物理量时，误差的符号和绝对值保持恒定或按一定规律变化，称为系统误差。系统误差决定测量的“准确”程度，与测量次数无关，不能用增加测量次数的方法使其消除或减小。

一般而言，系统误差可根据误差的来源而加以修正。其来源主要有实验所依据的理论方法、测量仪器、环境及人为因素等。

理论方法误差是由于实验所依据的理论公式本身带有近似性，或对测量原理的探讨不充分等。例如，用单摆测重力加速度时，当摆角 $\theta<5°$，摆球的半径远小于摆线长度，则 $\theta\approx\sin\theta$。从而得到单摆的周期公式。

仪器误差是因为测量仪器本身的精确度不高或存在缺陷，例如，螺旋测微器的零刻度线未对齐，读数显微镜调节鼓轮的回程差等。

环境误差是由于实验进行中各种环境因素（如温度、气压、振动等）与要求的标准状态不一致，引起测量设备的量值变化而产生的误差。

人为因素误差是由于测量者自身的生理或心理特点造成的，例如估计读数时，有些人始终偏大，有些人始终偏小。

由于引起系统误差的因素较多，因此研究系统误差主要是探索系统误差的来源，设计实验方案消除或减少此项误差，并估计残存误差的可能范围。

(2)随机误差。

在同一条件下，多次测量同一物理量，各测量值的误差或大或小，符号或正或负，呈随机变化的误差称为随机误差，它决定了测量结果的“精密”程度。

随机误差是由多项随机因素综合作用的结果。在测量前不能得知其大小，而是在测量中随机发现的。因此不能完全消除，只能根据其固有的规律用多次测量的方式来减少，这就涉及数理统计和概率论的知识。实践表明，绝大多数随机误差分布都服从正态分布，由随机误差的特性，随机误差 δ 的统计规律可由分布密度函数 $f(\delta)$ 给出，从理论上可得

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

式中，参数 δ 称为标准偏差。

分布密度函数给出了随机误差 δ 取值的概率分布，在一般测量的数据处理中，并不需要给出随机误差的分布密度，而是给出几个特征参数，如标准偏差等，下面给出其基本概念。

①算术平均值。设对于同一量的 n 次测量值 x_1，x_2，…，x_n，每次测量的误差分别为 ε_1，ε_2，…，ε_n，真值为 a，则

$$(x_1-a)+(x_2-a)+\cdots+(x_n-a)=\varepsilon_1+\varepsilon_2+\cdots+\varepsilon_n$$

将上式展开整理后。两侧除以 n，得

$$\frac{1}{n}(x_1+x_2+\cdots+x_n)-a=\frac{1}{n}(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\cdots+\varepsilon_n)$$

它表示算术平均值的误差，亦即各测量值误差的平均。假如各测量值的误差只是偶然误差，而偶然误差有正有负，相加时可抵消一些，所以 n 越大，算术平均值越接近真值，因此可以用算术平均值作为被测量真值的最佳估计值。表示为

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

②标准偏差。具有随机误差的测量值是分散的，对分散情况的定量表示用标准偏差，它的定义式为

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

标准偏差小的测量值，表示分散范围较集中，即测量值偏离真值的可能性较小，测量值的可靠性较高，其意义是：测量值分布在$(\bar{x}-\delta,\ \bar{x}+\delta)$区间内的概率为 68.3%，分布在区间$(\bar{x}-2\delta,\ \bar{x}+2\delta)$内的概率为 95%，分布在区间$(\bar{x}-3\delta,\ \bar{x}+3\delta)$内的概率为 99.7%。

③算术平均值的标准偏差。

由于测量值的随机性，使得算术平均值也必然存在随机误差，其大小程度用算术平均值的标准偏差 $\bar{\sigma}$ 表示：

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

(3)粗大误差。

由于实验中可能使用了错误的公式、仪器操作失误或读数出错等原因，导致测量数据超出了正常的误差分布范围，是错误的数据，就应将其剔除。杜绝粗大误差的关键是熟悉实验理论和条件，明确要观察的现象，懂得正确使用仪器，通过数据分析来发现它。

1.2 测量不确定度

在工程技术方面，对测量结果的评定，目前国际上形成了较为统一的测量不确定度的表述方式。本节主要讨论直接测量的不确定度的计算。

1. 不确定度

在不确定度的概念产生之前，测量结果的评定都用误差大小来表示，但是由于误差的定义及计算方法不完善，真值不能确切得到误差也就无法知道，而标准误差、极限误差是可以估算的，但它们表示的是测量结果的不确定性，与误差定义不一致，测量不确定度是指由于误差存在而产生的测量结果不确定性，表征被测量的真值所处的量值范围的评定。显然，从定义上看，不确定度比误差更合理一些。

2. 不确定度的两类分量

传统上把误差分为随机误差和系统误差，但在实际测量中，有相当多的情形很难区分误差的性质是随机的还是系统的，况且有时两者都存在，无法将系统误差和随机误差严格分开计算。而不确定度取消了系统误差和随机误差的分类方法，不确定度按计算方法的不同分为 A 类评价和 B 类评价。

(1)不确定度的 A 类评价。

由于偶然效应，被测量的多次重复测量值 x_1，x_2，…，x_n 将是分散的测量值，用统计的方法评价不确定度，即为 A 类不确定度，这类不确定度被认为服从正态分布规律，因此，可以用测量平均值的标准偏差计算：

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

(2)不确定度的 B 类评价。

当误差的影响仅使测量值向某方向有恒定的偏离时，不能用统计的方法评价不确定度，而用不确定度的 B 类评定，这类评定有的依据仪器说明书，有的依据仪器的标准度等级，有的则粗略的依据仪器最小分度值。一般假定这类误差均匀分布，则 B 类评定为

$$\Delta_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}$$

式中，$\Delta_{仪}$ 为仪器基本误差或允许误差，或者根据准确度等级确定。

(3)合成不确定度。

对一物理量测定之后，要计算测得值的不确定度，由于其不确定度的来源不止一个，所以要合成某标准不确定度：

$$\Delta_C=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}$$

此时，测量结果表述为

$$X=\bar{x}\pm\Delta_C(x)(单位)$$

例：用毫米刻度的米尺，测量物体长度(单位：cm)，其测量值分别为53.27，53.25，53.23，53.29，53.28，53.26，53.20.53.24，53.21，试计算不确定度，并写出测量结果。

解：①计算平均值。

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i=\frac{1}{10}\times(53.27+53.25+\cdots+53.21)=53.24\mathrm{cm}$$

②计算A类不确定度。

$$\Delta_A=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}=\sqrt{\frac{(53.27-53.24)^2+\cdots+(53.21-53.24)^2}{10\times(10-1)}}=0.01\mathrm{cm}$$

③计算B类不确定度。

米尺的仪器误差：

$$\Delta_{仪}=0.05\mathrm{cm}$$

$$\Delta_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}=0.03\mathrm{cm}$$

④总不确定度。

$$\Delta_C=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}=0.04\mathrm{cm}$$

⑤测量结果。

$$x=(53.24\pm0.04)\mathrm{cm}$$

3. 间接测量结果的不确定度合成

间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学公式计算而来，直接测量结果的不确定度必然会影响到间接测量结果，这种影响的大小也可由相应的数学公式来反映。

设间接量 Y 与各相互独立的直接量 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 间的函数关系为

$$Y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

根据微分推导，各直接量 x_i 的不确定度对 Δ_Y 的贡献为$\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}$，对$\frac{\Delta_Y}{Y}$的贡献为$\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}$。

考虑不确定度合成的统计性质，各个量的贡献按方和根形式合成间接量的不确定度，则间接量 Y 的总不确定度 Δ_Y 或相对不确定度可由以下方程求得

$$\Delta_Y=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}\right)^2}\qquad(主要适用于和差形式的函数)$$

$$\frac{\Delta_Y}{Y}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}\right)^2}\qquad（主要适用于积商形式的函数）$$

表 1-1 列出一些常用函数不确定度传递的公式。

表 1-1　　常用函数不确定传递的公式

函数表达式	不确定度传递（合成）公式
$\varphi=x+y$	$\Delta\varphi=\sqrt{(\Delta_x)^2+(\Delta_y)^2}$
$\varphi=x-y$	
$\varphi=x'y$	$\frac{\Delta\varphi}{\varphi}=\sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2+\left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2}$
$\varphi=\frac{x}{y}$	
$\varphi=x^m\cdot y^n$	$\frac{\Delta_\varphi}{\varphi}=\sqrt{\left(m\frac{\Delta_x}{x}\right)^2+\left(n\frac{\Delta_y}{y}\right)^2}$

间接测量量的不确定度合成步骤如下：

①求出各直接测量量 x_i 的不确定度 Δ_{x_1}；

②依据 $Y=f(x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n)$ 关系求出 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 或 $\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}$；

③用 $\Delta_Y=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}\right)^2}$ 或 $\frac{\Delta_Y}{Y}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\Delta_{x_1}\right)^2}$ 求出 Δ_Y 或 $\frac{\Delta_Y}{Y}$；

④ 结果表示：$Y=y\ \pm\Delta$。

1.3　有效数字

实验中总要记录和计算很多数值，每个数值保留几位数字不是随意的，实验测得数据应能反映出被测量的实际大小的数值，即记录与运算后的保留值是能传递出被测量实际大小信息的全部数字，这样的数字称为有效数字。一般来讲，仪器上显示的数字，由可靠数字和一位可疑数字构成。均为有效数字，均应读出并记录。

有效数字的位数由测量仪器的精确度决定，不能多记，也不能少记，即使估计是 0，也必须记上。

1. 实验后计算不确定度，根据不确定度确定有效数字是正确确定有效数字的基本依据，不确定度只取一位或两位有效数字，测量值的数值的有效数字是到不确定度末位为止，即测量值有效数字的末位和不确定度末位看齐。

2. 有效数字的运算规律

可靠数字间的运算结果为可靠数字，可靠数字与可疑数字或可疑数字之间的运算结果为可疑数字，运算结果只保留一位可疑数字。

(1)加减运算后的有效数字。

加减运算的末位，应当和参加运算各数中最先出现的可疑数字位数一致。

例如：

$$
\begin{array}{r}
14.6\mathit{1} \\
+\quad 2.25\mathit{6} \\
\hline
16.8\mathit{66}
\end{array}
$$

结果为16.87(斜体数字为可疑数，仍算有效数字)。

(2)乘除运算后的有效数字。

乘除运算后的有效数字，应当和参加运算各数中有效位数最少的相同。例如：

$$
\begin{array}{r}
4.17\mathit{8} \\
\times\quad 10.\mathit{1}\quad \\
\hline
\mathit{4178} \\
417\mathit{8}\quad \\
\hline
42.\mathit{1978}
\end{array}
$$

结果为42.*2*。

3. 数值的舍入规则

在有效数字运算和测量结果的表示中，存在数据位数的舍入规则，根据国家标准规定，采用“四舍六入五凑偶”的规则，即：数字中要舍去的第一位数小于4(含4)舍。大于6(含6)入。为5时则看5后，若为非零的数则入；若为零时要看前一位，为奇数则入，为偶数则舍。

1.4 数据处理的基本方法

实验中获得了大量的测量数据，要通过这些数据得到准确可靠的实验结果或实验规律，则需要学会正确的数据处理方法，下面简单介绍几种常用的数据处理方法。

1. 列表法

列表法是记录数据的基本方法，是将实验中的测量数据、中间计算数据和最终结果等按一定的形式和顺序列成表格记录的方法。列表法可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系，便于随时检查测量结果是否正确合理，及时发现问题，利于计算和分析误差。

列表时应注意，根据实验内容和目的合理地设计表格，要便于记录、计算和检查；在表格中应标明物理量的名称和单位，表格中数据要正确反映出有效数字，重要数据和测量结果要突出表示，还应有必要的说明和备注。

2. 作图法

物理实验中所得到的一系列测量数据，也可以用图形直观地表示出来，作图法就是在坐标纸上描绘出一系列数据对应关系曲线的方法。它是研究物理量之间变化规律，找出对应的函数关系，求经验公式的常用方法之一。作图的基本步骤如下：

(1)选取坐标纸。

作图一定要使用坐标纸，应根据不同实验内容和函数形式来选取不同的坐标纸，如直角坐标纸、对数坐标纸和极坐标纸等，物理实验中常用直角坐标纸(方格纸)。根据测得数据的有效数字和对测量结果的要求来定坐标纸和大小，原则上以不损失实验数据的有效数字和包括所有实验作为选择，一般图上的最小分格至少应是有效数字的最后一位可靠数字。

(2)定坐标。

通常以横坐标表示自变量，纵坐标表示因变量，坐标轴旁应标明其代表的物理量的名称和单位。为了使图形在坐标纸上的布局合理和充分利用坐标纸，坐标的原点不一定和变量的零点一致，若变量的变化范围是从 a 到 b，则将坐标原点取在 a 的附近即可。

(3)描点。

根据测量数据，找出每个实验测量点在坐标纸上的位置，并用铅笔以“×”标出。

(4)连线。

根据不同函数关系对应的实验数据点分布，把点连成直线或光滑曲线。因为实验测量值有一定误差，所以曲线不一定要通过所有的实验测量点，只要求实验测量点均匀分布在曲线的两侧且离曲线较近，对个别偏离较大的点，要进行分析后决定取舍。

(5)写出图纸名称。

在图纸下方或空有位置上，写上图的名称，并将图纸贴在实验报告的指定位置。

(6)图解。

根据已画出的曲线，用解析法求曲线上各种参数与物理量之间的关系式，即经验公式。

若为直线关系，在直线上取两点 P_1 和 P_2，分别标出它们的坐标读数 (x_1, y_1)，(x_2, y_2)，一般不取原实验测量点，也不允许超出实验范围以外，而且相隔不能太近。设直线方程为 $y=a+bx$，则可计算斜率为

$$b=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$$

截距为

$$a=\frac{x_2y_1-x_1y_2}{x_2-x_1}$$

若为曲线关系，可通过适当的变换使它们呈线性关系，即把曲线改为直线，曲线改直线以后，对实验数据的处理会很方便，也容易求得有关参数。

例如：$PV=C$，可作 $P\sim 1/V$ 图得直线；$S=V_0t+\frac{1}{2}at^2$ 可做 $\frac{S}{t}\sim t$ 图得直线。

作图法虽然能直观形象地表示出物理量之间的关系，并由图求得经验公式，但因连线的随意性较大，由作图法得到的实验结果误差较大。在精确度要求较高的测量中，常用最小二乘法。

3. 最小二乘法

求经验公式除采用上述图解法外，还可用最小二乘法。通常称为方程的回归问题。方程的回归首先要确定函数的形式，一般要根据理论推导或从实验数据的变化趋势来推测。下面讨论一元线性回归。

设所研究的两个物理量为 x 和 y，它们之间存在线性关系为

$$y=ax+b$$

设在 x_1，x_2，…，x_n 条件下分别测得 y_1，y_2，…，y_n 共有 n 个结果，可以列出方程组：

$$\left.\begin{array}{l} y_1=a+bx_1 \\ y_2=a+bx_2 \\ \cdots\cdots \\ y_n=a+bx_n \end{array}\right\}$$

但由于方程式的数目 n 多于待求量的数目，所以无法直接利用代数法求解上述方程组，可以用最小二乘法来求解。其原理是在所求得直线上，各相应点的值与测量值误差的平方和比其他直线上都要小。即

$$Q=\sum_{\lambda\geqslant 1}^{n}[y_i-(a+bx_i)]^2=\text{最小值}$$

选取 a 与 b 为变量使 Q 取最小值的必要条件是

$$\begin{cases}\dfrac{2Q}{2a}=-2\sum\limits_{\lambda\geqslant 1}^{n}[y_i-(a+bx_i)]=0\\ \dfrac{2Q}{2b}=-2\sum\limits_{\lambda\geqslant 1}^{n}[y_i-(a+bx_i)]x_i=0\end{cases}$$

由上式可得

$$\overline{y}-a-b\,\overline{x}=0$$

$$\overline{xy}-a\,\overline{x}-b\,\overline{x^2}=0$$

解方程得

$$b=\frac{\overline{x}\,\overline{y}-\overline{xy}}{\overline{x}^2-\overline{x^2}}$$

$$a=\overline{y}-b\,\overline{x}$$

式中，$\overline{x}=\dfrac{1}{n}\sum x_i$，$\overline{y}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}y_i$，$\overline{x^2}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}x_i^2$，$\overline{xy}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}x_iy_i$

4. 逐差法

实验中经常遇到等间隔地测量线性连续变化的物理量，求其间隔平均值的问题。如何来计算呢？一般认为将测得的每个间隔值相加，再除以间隔数是好的办法。但是，实际上并不尽然。例如，测量弹簧的劲度系数 k 时，在弹簧下每次加一定且相同质量的砝码来测出每次加砝码时弹簧的平均伸长量。

$$\begin{aligned}\overline{x}&=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(r_{i+1}-r_i)\\&=\frac{1}{n}[(r_n-r_{n-1})+\cdots+(r_3-r_2)+(r_2-r_1)]\\&=\frac{1}{n}(r_n-r_1)\end{aligned}$$

由此看出，只有首末两次的测量值才对单次测量的平均值起作用，而一切中间的测量值都失去意义。这就是说，多次测量和单次测量没有差别，失去了多次测量减少误差的优越性。

为了避免上述情况，平等地运用所有测量值，我们把它们按顺序分成相等数量的两组 $(r_1,r_2,\cdots,r_m)$ 及 $(r_{m+1},r_{m+2},\cdots,r_{2m})$，取两组对应项之差为：$x_i=(r_{m+i}-r_i)$，$(i=1,2,\cdots,m)$ 再求其平均值：

$$\overline{x}=\frac{1}{m}\sum_{i\geqslant 1}^{m}x_i=\frac{1}{m}[(r_{m+1}-r_1)+\cdots+(r_{2m}-r_m)]$$

这样的方法称为逐差法，上式所求的 $\overline{x}$ 是 m 个间隔差值的平均值。因此，它保持了多次测量的优越性。在逐差法计算中，应当仔细作好表格，逐项计算。

第 2 章　基础性物理实验

2.1　物体密度的测量

密度是表示物体本身特性的一个重要物理量，它是指在一定的物理条件下，物质单位体积的质量。各种物质具有确定的密度值，它只与物质的种类有关，与质量、体积等因素无关，故同种物质的密度是相同的，而不同的物质，密度一般是不相同的。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。

测量物体密度的方法，可归纳为利用密度定义的直接测量法和利用密度与某些物理量之间特定关系的间接测量法。直接测量法又分为绝对测量法和相对测量法两大类。绝对测量法是通过对基本量(比如质量和长度)的测定，来确定物体的密度，利用这种方法时，必须把物质加工成规则的形状，如立方体、圆柱体、球体等；相对测量法是通过与已知密度的标准物质相比较，来确定物质的密度，如比重瓶法和悬浮法等。间接测量法的种类很多，有浮子法、静压法、介电常数法、射电法、声学法、振动法等，主要用于工业生产过程中的密度测量。

一、预习提纲

(1)读数显微镜由哪几部分组成？各部分的作用分别是什么？

(2)使用读数显微镜如何进行测量？如何读数？

(3)物理天平的构造和测量原理分别是什么？

(4)物理天平在测量中需要注意哪些事项？

二、实验目的

(1)了解读数显微镜和物理天平的读数原理及使用方法；

(2)学会测量小钢珠的密度。

三、实验仪器

读数显微镜、物理天平、待测小钢珠。

四、实验原理

若一物体的质量为 m，体积为 V，则密度 ρ 为

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{2-1}$$

密度为一间接测量量，测定出上式中的质量 m 及体积 V 就可以求得物体的密度 ρ。

（一）固体密度的测量

对于形状规则的固体，可先用天平测出固体的质量，用长度测量工具测量出物体的体积，从而求出物体的密度；对于形状不规则的固体，可以根据阿基米德原理，利用水的密度，只使用天平就可以测量其他物体的密度，这种方法称为流体静力称衡法。

不计空气浮力，物体在空气中受到的重力 mg 与它浸没在液体中的视重 m_1g 的差值就是它在液体中所受的浮力的值：

$$F=mg-m_1g \tag{2-2}$$

根据阿基米德原理，液体的浮力应为

$$F=\rho_0 gV \tag{2-3}$$

式中，ρ_0 是液体的密度；V 是物体全部浸没在液体中时排开液体的体积也就是物体的体积。由(2-1)、(2-2)和(2-3)式可得

$$\rho=\frac{m}{m-m_1}\rho_0 \tag{2-4}$$

如果待测物体的密度小于液体的密度，可采用如图 2-1 所示的方法进行测量。将一重物系在待测物体上，先将物体提升在液面之上，而重物浸没在液体中，测得此时的视质量 m_2，再使物体下降到液面下方，并且重物仍然浸没在液体中，测得此时的视重为 m_3g，则待测物体在液体中所受到的浮力应该为

$$F=m_2g-m_3g \tag{2-5}$$

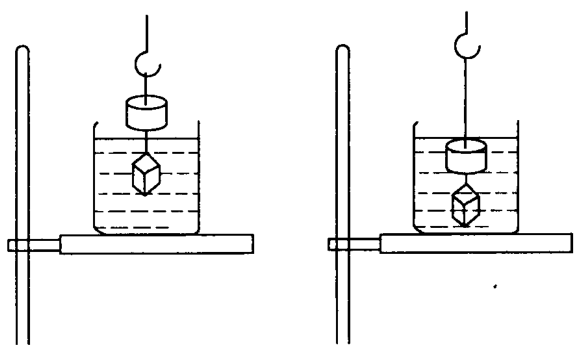

图 2-1

于是可得物体的密度为

$$\rho=\frac{m}{m_2-m_3}\rho_0 \tag{2-6}$$

对于不规则的颗粒状固体，不可能用流体静力“称衡法”来逐一称其质量。因此，可采用“比重瓶法”。实验时，在比重瓶内盛满蒸馏水，用天平测量出比重瓶中水的质量 m_1，并且测量出颗粒状固体的质量为 m_2，然后测量在装满水的瓶内投入颗粒状固体后的总质量 m_3，则被测颗粒状固体排出比重瓶内水的质量是 $m=m_1+m_2-m_3$，而排出水的体积即是质量为 m_2 的粒状固体的体积，所以待测粒状固体的密度为

$$\rho=\frac{m_2}{m_1+m_2-m_3}\cdot\rho_0 \tag{2-7}$$

注意，所测颗粒状固体必须不溶于水，并且所测物体的大小应保证能投入比重瓶内。

（二）液体密度的测量

对液体密度的测定可用流体静力“称衡法”，也可用“比重瓶法”。在温度一定的条件下，比重瓶的容积是一定的。如果把液体盛入比重瓶内，将毛玻璃塞由上而下自由塞上，多余的液体将从毛玻璃塞的中心毛细管中溢出，瓶中液体的体积保持一定。

可通过注入蒸馏水，由天平测量出其质量，即可计算出比重瓶的体积，若称量出空比重瓶的质量为 m_1，充满蒸馏水时的质量为 m_2，则 $m_2=m_1+\rho V$，因此，可以得出：

$$V=\frac{m_2-m_1}{\rho} \tag{2-8}$$

如果再将待测密度为 ρ' 的液体注入此比重瓶，再称量出被测液体和比重瓶的质量为 m_3，则 $\rho'=\frac{m_3-m_1}{V}$。将公式（2-8）代入此公式得

$$\rho'=\rho\frac{m_3-m_1}{m_2-m_1} \tag{2-9}$$

实验中可以用物理天平直接测量出固体质量 m，体积的测量要先完成直径的测量，而钢珠直径可以用读数显微镜来测量。

（三）仪器简介

1. 读数显微镜

长度是最基本的物理量之一，长度测量是一切测量的基础。除数字显示仪表以外，所有测量仪表最终将转化为按一定的长度来划分标度，科学实验中的测量，大多数可以转化为对长度的测量。因此，它不仅可以用来测量物体的尺寸、大小、距离等，还可以用来量度其他许多物理量。本实验主要介绍在生产和科学研究中常用到的读数显微镜的构造、测量原理和使用方法。

一般显微镜只有放大作用，不能测量物体的大小。读数显微镜是将显微镜和螺旋测微计组合起来的，它主要用来测量微小的或者不能用夹具测量的物体的尺寸，如毛细管内径、金属杆的线膨胀量、狭缝或干涉条纹宽度、微小钢球的直径等。读数显微镜有多种型号，图 2-2 所示为常用的一种。

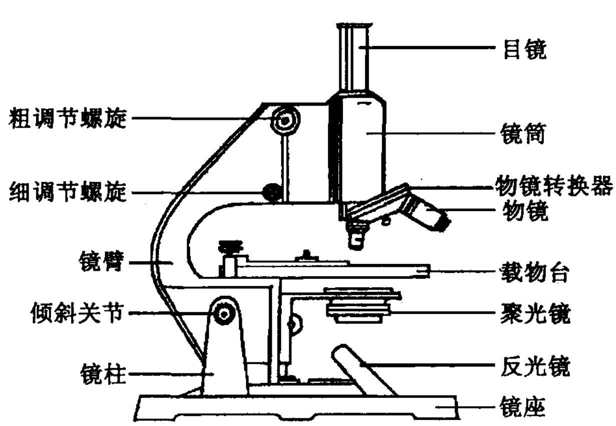

图 2-2　显微镜的构造图

图中显微镜由目镜、物镜和十字叉丝组成，读数装置、毫米标尺是固定装在支架上的，