

普通高等教育“十二五”规划教材

材料工程基础实验

Experiment on Fundamentals of Materials Engineering

廖其龙 吕淑珍 张礼华 编著

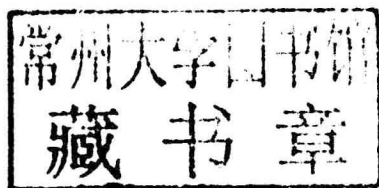


化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

材料工程基础实验

廖其龙 吕淑珍 张礼华 编著



化学工业出版社

·北京·

本书首先简单介绍实验误差与数据处理方法,实验内容包括材料工程基础的流体力学实验、热工基础实验、燃烧实验、单元操作实验和综合实验共37个实验,使学生掌握材料工程基础实验的基本方法和基本技能;加深对材料工程基础理论的理解;培养学生严肃认真的科学工作作风,以及分析问题和解决问题的能力。每个实验后面都附思考题,以帮助学生掌握重点内容,巩固所学知识。

可作为材料专业的本专科学生的实验课程教材,也可供材料专业的教师和研究生以及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料工程基础实验/廖其龙,吕淑珍,张礼华编著.
北京:化学工业出版社,2013.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-15610-5

I. ①材… II. ①廖… ②吕… ③张… III. ①工程
材料-实验-高等学校-教材 IV. ①TB3-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第244174号

责任编辑:刘俊之
责任校对:徐贞珍

文字编辑:杨欣欣
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张12¼ 字数319千字 2013年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:32.00元

版权所有 违者必究

前 言

材料工程基础是一门基础科学，既有理论又有实验知识。随着时代的发展，实验教学越来越显示出它的重要地位，很多高校已经将实验部分单独作为一门课程去教授。为了配合教学，我们特编写《材料工程基础实验》一书，以供工科院校有关专业学生、研究生作为实验教学用书，亦可供从事材料工程实验的人员参考。

本书内容包括材料工程基础的 37 个实验，其目的在于使学生掌握材料工程基础实验的基本方法和基本技能；验证材料工程基础的理论，加深对材料工程基础理论的理解；培养学生严肃认真的科学工作作风，以及分析问题和解决问题的能力。每个实验后面都附思考题，以帮助学生掌握重点内容，巩固所学知识，培养归纳总结、综合分析问题和解决问题的能力。

本书是以编写人员多年来材料工程基础及实验教学的经验为基础，并收集国内有关实验的资料编写而成。参加本书编写的有：廖其龙编写第一章，徐迅编写第二章，张礼华编写第三章，霍冀川、李娴编写第四章实验 21~24，谢长琼编写第四章实验 25~27，周永生编写第五章实验 28~31，陈雅斓编写第五章实验 32~34，吕淑珍编写第六章，王军霞编写附录 1~8，刘来宝编写附录 9~15，书中的图由张礼华绘制。感谢西南科技大学对本书的出版提供经费支持。

编写本教材的过程中得到化学工业出版社和各位编者的大力支持，同时，参考了有关的文献资料，在此，我们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者不吝指正。

编者
2013 年 2 月

目 录

第一章 实验误差与数据处理方法	1
第二章 流体力学实验	11
实验 1 流体黏度的测定	11
实验 2 流体静力学基本方程式	12
实验 3 伯努利方程实验	14
实验 4 流速与流量测量	17
实验 5 雷诺实验	20
实验 6 管道沿程阻力	22
实验 7 管道湍流速度分布和局部阻力系数测定	28
实验 8 绕圆柱体压力分布	32
实验 9 平板附面层速度分布	35
实验 10 附面层对绕流物体阻力的影响	40
实验 11 烟风洞中流体可视化演示	45
实验 12 风机性能测定	47
实验 13 离心泵	50
第三章 热工基础实验	55
实验 14 材料热导率实验	55
(I) 稳态平板法测定非金属固体材料热导率	55
(II) 圆球法测固体材料热导率	58
(III) 正常情况法测绝热材料的热扩散率	61
(IV) 常功率平面热源法测材料的热扩散率及热导率	66
实验 15 流体传热系数测定实验	69
(I) 空气横掠单圆管传热系数的测定	69
(II) 空气自由流动传热系数的测定	72
(III) 蒸气沿竖壁凝结时传热系数的测定	75
(IV) 水蒸气冷凝时传热系数测定实验	77
(V) 流体在长圆管内湍流流动时传热系数的测定	80
实验 16 卡计法测材料表面半球向总发射率	83
(I) 稳态卡计法	83
(II) 非稳态卡计法	85
实验 17 辐射测量法测材料法向总发射率及反射率	87
(I) 热空腔辐射法测法向总发射率	87
(II) 积分球反射法测反射率	89
实验 18 导电纸电热模拟二维稳态温度场	91
实验 19 热电偶的制作与校正	93
实验 20 顺流逆流传热温差实验	96

第四章 燃烧实验	100
实验 21 煤的工业分析	100
实验 22 煤的元素分析	103
实验 23 煤的发热量的测定	108
实验 24 烟气成分分析	112
实验 25 氧指数测定	115
实验 26 水平垂直燃烧测定	123
实验 27 建筑材料烟密度测试	127
第五章 单元操作实验	130
实验 28 固体流态化的流动特性实验	130
实验 29 旋风除尘器性能实验	134
实验 30 流化干燥实验	136
实验 31 过滤实验	140
实验 32 精馏实验	143
实验 33 填料吸收塔的操作和吸收系数的测定	149
实验 34 洞道干燥实验	154
第六章 综合实验	160
实验 35 流体力学综合阻力实验 A	160
(I) 沿程阻力实验	161
(II) 局部阻力实验	162
实验 36 流体力学综合阻力实验 B	163
实验 37 综合传热性能实验	165
附录	167
附录 1 法定计量单位制的单位	167
附录 2 单位换算表	168
附录 3 基本物理量	169
附录 4 干空气的热物理参数	169
附录 5 烟气的物理参数	170
附录 6 饱和水的热物理参数	171
附录 7 干饱和水蒸气的热物理参数	172
附录 8 空气的相对湿度表	173
附录 9 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	175
附录 10 常用材料表面的法向发射率 ϵ_n	175
附录 11 铂铑 ₁₀ -铂热电偶电动势分度表	176
附录 12 铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶电动势分度表	179
附录 13 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝) 热电偶电动势分度表	183
附录 14 镍铬-考铜热电偶电动势分度表	186
附录 15 铜-康铜热电偶电动势分度表	188
参考文献	190

第一章 实验误差与数据处理方法

在材料的生产与加工中，需要对过程工艺参数（如温度、流量、压力等）进行测量，并根据测量结果，对生产过程参数进行调整和控制，以达到稳定生产过程、提高生产产量和质量的目的。实验测量的结果是要得到相应的实验数据，但由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制，测量结果不可能绝对准确，还需要对测量数据的可靠性做出评价，并对其误差范围作出合理评估，正确地表达出实验结果。测量方法是否科学，测量数据是否准确，数据处理方法是否正确，将直接影响材料工程研究与材料生产。因此，有必要掌握实验误差与数据处理方法。

一、测量方法

测量是指使用一定的工具和恰当的方法，将待测物理量直接或间接地与另一个同类的已知量相比较，把后者作为计量单位，从而确定被测量与该计量单位之间的数值比值的物理过程，即借助仪器用某一计量单位把被测量的大小表示出来。由测量所得的赋予被测量的值称为测量结果。测量结果是由数值和测量单位两部分构成，一般都具有单位，如温度的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。但也有某些物理量其单位为1，一般不表示出来，故测量结果只有数值，如相对密度。

在测量过程中，为满足各种被测对象的不同测量要求，根据不同的测量条件有着不同的测量方法。常见的测量方法有以下几种：根据测得结果的方式，可将测量分为直接测量和间接测量；根据被测量在测量过程中的状态，可将测量分为静态测量与动态测量；按获得被测量的精度要求不同，可将测量分为工程测量与精密测量。

1. 直接测量与间接测量

直接测量是指用一定的测量仪器或设备就可以直接地确定未知量的测量。例如，用米尺测量物体的长度，用秒表测量一段时间，用天平称量物质的质量，用温度计测量物体的温度等。

间接测量是指所测的未知量不仅要由若干个直接测定的数据来确定，而且必须通过某种函数关系式的计算，或者通过图形的计算方能求得测量结果的测量。如测量某物体的运动速率，就是直接测量路程和通过这段路程所用的时间，然后计算得到的；用伏安法测电阻，是先测出电阻两端的电压和流过电阻的电流，再依据欧姆定律求出待测电阻的大小；用膨胀仪测量材料的热膨胀系数，测出材料的原始长度及在对应温度范围的伸长值，再通过公式计算出材料的平均热膨胀系数。

大多数测量属于间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

2. 静态测量与动态测量

静态测量是指在测量过程中，被测量的量值随时间固定不变的测量。在日常测量中，多数测量为静态测量。

动态测量是指在测量过程中，被测量的量值随时间的变化而变化，是时间的函数。如环境噪声的测量等。对这类被测量的测量，需要当作一种随机过程的问题来处理。

材料的某些性质可以用动态法测量，也可以用静态法测量。如材料弹性模量的测定方法

就有动态法和静态法两种，其性质的定义和测量数值是不同的，因此，在材料测量方法的选择和性质的解释时应当注意。

3. 工程测量与精密测量

工程测量是指对测量误差要求不高的测量。用于这种测量的设备或仪器的灵敏度和准确度比较低，对测量环境要求不高。

精密测量是指对测量误差要求比较高的测量。用于这种测量的设备和仪器应具有一定的灵敏度和准确度，其示值误差的大小需经计量检定或校准。精密测量一般是在符合一定测量条件的实验室内进行，其对测量的环境和其他条件的要求均要比工程测量严格，所以也称为实验室测量。

二、测量误差的类型

实验数据的获得，是通过人使用一定的测试仪器，在适当的环境下根据一定的理论，使用某种测量方法和程序进行测试而得。但在实验过程中，由于所选用的测试仪器、试验方法、试验环境及人的观察等方面的限制，无法得到被测参数的真值，即实验数据总是存在一定的误差。随着科学技术的不断发展，测量仪表会不断地得到改进和完善，使测量值不断逼近真值。

了解误差基本知识的目的在于分析这些误差产生的原因，以便采取一定的措施，最大限度地加以消除，同时科学地处理测量数据，使测量结果最大限度地反映真值。因此，由各测量值的误差积累，计算出测量结果的精确度，可以鉴定测量结果的可靠程度和测量者的实验水平；根据生产、科研的实际需要，预先定出测量结果的允许误差，可以选择合理的测量方法和适当的仪器设备；规定必要的测量条件，可以保证测量工作的顺利完成。因此，不论是测量操作或数据处理，树立正确的误差概念是很有必要的。

将被测量在一定客观条件下的真实大小，称为该量的真值，而把某次对它测量得到的值称为测量值，那么测量值与真值之差就称为测量误差。即：

$$\text{测量误差} = \text{测得值} - \text{真值} \quad (1.1)$$

真值又称为理论值或定义值。显然，特定量的真值一般是不能确定的，但在实际应用时，在统计学上，当测量的次数 n 足够大时，测得值的算术平均值（数学期望）接近于真值。故常以测量次数足够大时的测得值的算术平均值近似代替真值。

根据对测量结果影响的性质，可以把测量误差分为系统误差、随机误差和过失误差。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时，测量结果出现固定的偏差，即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，这种误差就称为系统误差，有时称之为恒定误差。系统误差按产生原因的不同可分为：

(1) 仪器误差 由于测量工具、设备、仪器结构上不完善；电路的安装、布置、调整不当；仪器刻度不准或刻度的零点发生变动；样品不符合要求等原因所引起的误差。

(2) 人为误差 由观察者感官的最小分辨力和某些固有习惯引起的误差。例如，由于观察者感官的最小分辨力不同，在测量玻璃软化点和玻璃内应力消除时，不同人观测就有不同的误差。某些人的固有习惯，例如在读取仪表读数时总是把头偏向一边等，也会引起误差。这种误差往往因人而异并与测量者当时的心理状态有关。

(3) 环境条件误差 由于外界环境因素（如温度、湿度等）发生变化，或者测量仪器规定的适用条件没有满足等所造成的误差。

(4) 方法误差 由于实验所依据的原理不够完善, 或者测量所依据的理论公式带有近似性, 或者实验条件达不到理论公式规定的要求所造成的误差。

系统误差产生的原因往往是可知的, 它的出现一般也是有规律的。因此, 在实验前应该对测量中可能产生的系统误差作充分的分析和估计, 并采取必要的措施尽量消除其影响。测量后应该设法估计未能消除的系统误差之值, 以便对测量结果加以修正, 或估计测量结果的准确程度。

系统误差经常是一些实验测量误差的主要来源。依靠多次重复测量一般都不能发现系统误差的存在, 若处理不妥往往对测量结果的准确度带来很大影响。因此, 实验工作者必须经常总结经验, 掌握各种不同的测量仪器、各种不同的实验方法以及各种环境因素引起的系统误差的变化规律, 以提高实验技术水平。

2. 随机误差

在相同测量条件下, 多次测量同一参量时, 误差的绝对值符号的变化时大时小、时正时负, 这种以不可预定方式变化着的误差称为随机误差, 有时也叫偶然误差。这类误差是由不能预料、不能控制的原因造成的。例如电源电压的波动、外界电磁场的干扰、气流的扰动或无规则的振动以及测量者个人感官功能的随机起伏等; 实验者对仪器最小分度值的估读, 很难每次严格相同; 测量仪器的某些活动部件所指示的测量结果, 在重复测量时很难每次完全相同, 尤其是使用年久的或质量较差的仪器时更为明显。所以, 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。

3. 过失误差 (粗大误差)

过失误差是一种明显超出统计规律预期值的误差, 又称疏忽误差、粗大误差, 简称粗差。这类误差具有异常值, 其出现通常是由测量仪器的故障、测量条件的失常及测量者的失误而引起的。例如: 仪器放置不稳, 受外力冲击产生毛病; 测量时读错数据、记错数据; 数据处理时单位搞错、计算出错等。显然, 过失误差在实验过程中是不允许的。一旦发现测量数据中可能有过失误差数据存在, 应进行重测。如条件不允许重新测量, 应在能够确定的情况下, 剔除含有过失误差的数据。

三、测量误差表示方法

误差可用绝对误差、相对误差和引用误差来表示。

1. 绝对误差

绝对误差是指测量值 x 与被测量真值 A_0 之差, 由于真值一般是未知的, 所以在实际应用时, 常用实际值 A (通常用高一标准仪器的示值作为实际值) 来代表真值。绝对误差用 Δx 表示, 即:

$$\Delta x = x - A \quad (1.2)$$

绝对误差是具有大小、正负和单位的数值。

绝对误差的表示方法可以体现出测量值与被测量实际值之间的偏离程度和方向, 但不能确切地反映出测量的准确程度。例如, 测量两个温度, 其中 $T_1 = 10^\circ\text{C}$, 误差 $\Delta T_1 = 0.1^\circ\text{C}$; $T_2 = 1000^\circ\text{C}$, 误差 $\Delta T_2 = 1^\circ\text{C}$, 尽管 $\Delta T_1 < \Delta T_2$, 但由于 $\Delta T_1 = 0.1^\circ\text{C}$, 相对于 10°C 来讲是 1% , 而 $\Delta T_2 = 1^\circ\text{C}$, 相对于 1000°C 来讲是 0.1% , 所以结论是 T_2 的测量比 T_1 的测量更准, 因此要引出相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差 γ 是绝对误差 Δx 与被测量真值 A_0 的比值, 因测量值与真值接近, 所以也可

以近似用绝对误差和测量值 x 的比值作为相对误差，通常用百分数表示：

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3)$$

由于绝对误差可能为正值或负值，所以相对误差也可能出现正或负值。

绝对误差和相对误差是误差理论的基础，在测量中已广泛应用，但在具体使用时要注意它们之间的差别与使用范围。在某些实验测量及数据处理中，不能单纯从误差的绝对值来衡量数据的精确程度，因为精确度与测量数据本身的大小也很有关系。例如，在称量材料的质量时，如果质量接近 10t，准确到 100kg 就够了，这时的绝对误差虽然是 100kg，但相对误差只有 1%；如果称量的量总共不超过 20kg，即使准确到 0.5kg 也不能算精确，因为这时的绝对误差虽然是 0.5kg，相对误差却有 5%。经对比可见，后者的绝对误差虽然是前者的 1/200，相对误差却是前者的 5 倍。相对误差是测量单位所产生的误差，因此，不论是比较各测量值的精度或是评定测量结果的质量，采用相对误差更为合理。

在实验测量中应当注意到，虽然用同一仪表对同一物质进行重复测量时，测量的可重复性越高就越精密，但不能肯定准确度一定高，还要考虑到是否有系统误差存在（如仪表未经校正等），否则虽然测量很精密也可能不准确。因此，在实验测量中要获得很高的精确度，必须有高的精密度和高的准确度来保证。

3. 引用误差与基本误差

通常在多挡和连续刻度的仪器仪表表中，可测范围不是一个点，而是一个量程，若按式 (1.3) 计算很麻烦，而且在仪表标尺的不同部位，其相对误差是不相同的。所以为了计算和划分准确度等级方便，通常采用引用误差。引用误差是一种简化和实用方便的相对误差，其分母为常数，取仪器仪表中的满刻度值 x_m ，因此引用误差 γ_m 为：

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.4)$$

为了表征仪表的准确度，采用了仪表基本误差的概念。仪表的准确度是按仪表的最大引用误差 $|\gamma_m|_{\max}$ 来划分等级的。

如果某仪表为 S 级，则说明该仪表的最大引用误差不会超过 S%，即 $|\gamma_m|_{\max} \leq S\%$ ，但不能认为它在各刻度上的示值误差都具有 S% 的准确度。由式 (1.3) 和式 (1.4) 可知，如果某电表为 S 级，满刻度值为 x_m ，测量点为 x ，则仪表在该测量点的最大相对误差 γ 可表示为：

$$\gamma = \frac{|x - x_m|}{x_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

因 $x \leq x_m$ ，所以当 x 越接近 x_m 时，其测量准确度越高。在使用这类仪表测量时，应选作使指针尽可能接近于满度值的量程，一般最好能工作在不小于满度值 2/3 的区域。

四、随机误差及其分布

1. 随机误差的正态分布规律

对某一物理量在相同条件下进行多次重复测量，由于随机误差的存在，测量结果 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 一般都存在着一定的差异。如果该物理量的真值为 A_0 ，则根据误差的定义，各次测量的误差为：

$$x_i = A_i - A_0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.6)$$

大量实践证明, 随机误差 x_i 的出现是服从一定的统计分布——正态分布 (高斯分布) 规律的, 亦即对于大多数物理测量, 随机误差 x_i 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, 绝对值为零的误差出现的概率最大。

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近于零。

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, 各误差的代数和趋近于零。

随机误差正态分布的这些性质在图 1.1 所示的正态分布曲线上可以看得非常清楚。该曲线横坐标 x 为误差, 纵坐标 $f(x)$ 即为误差的概率密度分布函数。它的意义是, 误差出现在 x 处单位误差范围内的概率。 $f(x)dx$ 是误差出现在 x 至 $x+dx$ 区间内的概率, 就是图 1.1 中阴影包含的面积元。整个误差分布曲线下的面积为单位 1, 这是由概率密度函数的归一化性质决定的。

根据统计理论可以证明, 函数 $f(x)$ 的具体形式为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1.7)$$

式中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数, 称为标准误差。

由概率论可知, 在某一次测量中, 随机误差出现在 a 至 b 区间的概率应为:

$$P = \int_a^b f(x) dx \quad (1.8)$$

而某一次测量中, 随机误差出现在 $-\infty$ 至 ∞ 区间的概率应为:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.9)$$

由误差的正态分布规律可证明, $x = \pm\sigma$ 是曲线的两个拐点处的横坐标值。当 $x=0$ 时, 由式(1.7) 得:

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1.10)$$

由上式可见, 某次测量若标准误差 σ 较小, 则必有 $f(0)$ 较大, 误差分布曲线中部将较高, 两边下降就较快。总之, 分布曲线较窄, 表示测量的离散性小, 精密度高。相反, 如果 σ 较大, 则 $f(0)$ 就较小, 误差分布曲线的范围就较宽, 说明测量的离散性大, 精密度低, 如图 1.2 所示。

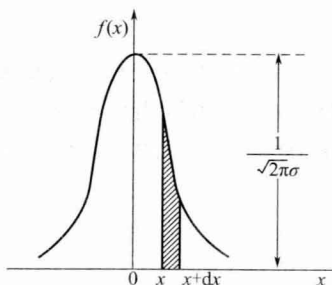


图 1.1 随机误差的正态分布曲线

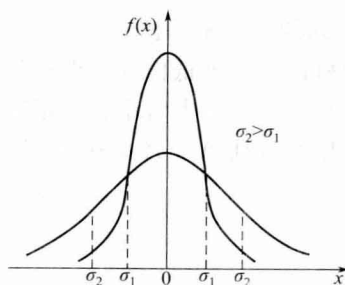


图 1.2 σ 对正态分布曲线的影响

2. 标准误差 σ 的统计意义

可以证明, 标准误差 σ 可由下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - A_0)^2} \quad (1.11)$$

式中, n 代表测量次数。该式成立的条件是要求测量次数 $n \rightarrow \infty$ 。下面对统计特征量 σ 做进一步的研究。

由概率密度分布函数的定义式(1.7), 可计算出某次测量随机误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为:

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(x) dx = 0.683 \quad (1.12)$$

同样可以计算出某次测量随机误差出现在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为:

$$P_2 = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(x) dx = 0.955 \quad (1.13)$$

$$P_3 = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(x) dx = 0.997 \quad (1.14)$$

与以上三个积分式所对应的面积如图 1.3 所示。

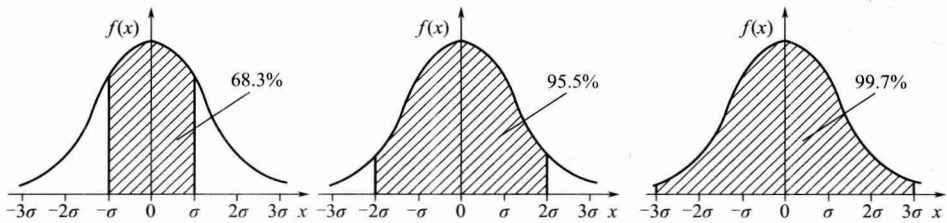


图 1.3 式(1.12)~式(1.14) 积分式所对应的面积

通过以上分析可以得出标准误差 σ 所表示的统计意义。对物理量 A 任做一次测量时, 测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的可能性为 68.3%, 落在 -2σ 到 $+2\sigma$ 之间的可能性为 95.5%, 而落在 -3σ 到 $+3\sigma$ 之间的可能性为 99.7%。由于标准误差 σ 具有这样明确的概率含义, 因此, 国内外已普遍采用标准误差作为评价测量质量优劣的指标。

实际测量的次数 n 是不可能达到无穷多的, 而且真值 A_0 也是未知的, 因此, 计算标准误差 σ 的公式(1.11) 只具有理论上的意义而没有实际应用价值。那么, 在对物理量 A 进行了有限次测量而真值 A_0 又不知道的情况下, 如何确定 σ 呢? 为了回答这个问题, 先介绍一下测量列的算术平均值 \bar{A} 。

3. 测量列的算术平均值

由于随机误差的可抵偿性, 即在相同的测量条件下对同一物理量进行多次重复测量, 由于每一次测量的误差时大时小、时正时负, 所以误差的代数平均值随着测量次数的增加而逐渐趋于零。用测量列 A_1, A_2, \dots, A_n 表示对物理量进行 n 次测量所得的测量值, 那么每次测量的误差为:

$$x_1 = A_1 - A_0$$

$$x_2 = A_2 - A_0$$

...

$$x_n = A_n - A_0$$

将以上各式相加得：

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n A_i - nA_0$$

由此可得：

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

因此有

$$A_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \right)$$

而

$$\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \right) = \bar{A}$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{A} = A_0$$

可见，测量次数越多，算术平均值 \bar{A} 越接近真值 A_0 。因此，可以用有限次重复测量的算术平均值 \bar{A} 作为真值 A_0 的最佳估计值。

由于测量列的算术平均值只是最接近真值但不是真值，因此，误差 $x_i = A_i - A_0$ 也是无法得到的。在实际测量的数据处理中，用偏差来估算每次测量对真值的偏离。偏差的定义为：

$$v_i = A_i - \bar{A} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.15)$$

4. 有限次测量的标准偏差

由于在有限次测量的情况下被测量的真值是不可知的，故由式(1.11)定义的标准误差 σ 也是无法计算的。但可以证明，当测量次数为有限时，可以用标准偏差 S 作为标准误差 σ 的最佳估计值。 S 的计算公式为：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (1.16)$$

有时也简称 S 为标准差，它具有与标准误差 σ 相同的概率含义。式(1.16)在实际测量中非常有用，称其为贝塞尔 (Bessel) 公式。

5. 有限次测量算术平均值的标准偏差

对 A 的有限次测量的算术平均值 \bar{A} 也是一个随机变量。当对 A 进行多组的有限次测量时，各个测量列的算术平均值彼此总会有所差异。因此，也存在标准偏差，这个标准偏差用 $S_{\bar{A}}$ 表示。为了将测量列的标准偏差 S 与平均值的标准偏差 $S_{\bar{A}}$ 加以区别，我们用 S_A 来表示式(1.16)定义的 S ，即特指测量列的标准偏差。可以证明， $S_{\bar{A}}$ 与 S_A 具有下列关系：

$$S_{\bar{A}} = \frac{S_A}{\sqrt{n}} \quad (1.17)$$

$S_{\bar{A}}$ 的统计意义也是很清楚的。可以这样说，被测量的真值 A_0 落在 $\bar{A} - S_{\bar{A}}$ 到 $\bar{A} + S_{\bar{A}}$ 范围内的可能性为 68.3%，落在 $\bar{A} - 2S_{\bar{A}}$ 到 $\bar{A} + 2S_{\bar{A}}$ 范围内的可能性为 95.5%，而落在 $\bar{A} - 3S_{\bar{A}}$ 到 $\bar{A} + 3S_{\bar{A}}$ 范围内的可能性为 99.7%。另外，在实际测量中，测量次数 n 不应太少，也没有必要太多，一般取 5 至 10 多次即可。

可以用计算器来计算测量列的算术平均值和标准偏差。函数计算器一般都具有统计功能，使用计算器的统计功能计算算术平均值和标准偏差可以避免烦琐的计算，减少计算过程

中的错误。统计功能可以对输入的多个数据直接给出平均值与测量列的标准偏差。

五、减小系统误差的方法

系统误差较之随机误差的处理要复杂得多。这主要是由于在一个测量过程中，系统误差与随机误差是同时存在的，而且实验条件一经确定，系统误差的大小和方向也就随之确定了。在此条件下，进行多次重复测量并不能发现系统误差的存在。可见，发现系统误差的存在就已不是一件容易的事，再进一步寻找其原因和规律以至消除或减弱它，就更为困难了。因此，在实验过程中，就没有像处理随机误差那样的简单数学过程来处理系统误差，而只能靠实验工作者坚实的理论基础、丰富的实践经验及娴熟的实验技术，遇到具体的问题要进行具体的分析和处理。

设法减小系统误差也并不是就束手无策。可以先从一些简单、明显的情况出发，一方面对系统误差加深认识，同时，也学习一些简单的处理方法。随着知识的增加、经验的丰富，处理系统误差的能力就会得到不断的提高。

常见的系统误差分为两种：一种是可定系统误差，另一种是未定系统误差。

1. 可定系统误差的处理

可定系统误差的特点是，它的大小和方向是确定的。如实验方法和理论的不完善以及实验仪器零点发生偏移等引起的系统误差，都属于这种类型。

可定系统误差是可以消除、减弱或修正的。如在用天平测质量时，往往认为天平是等臂的。但使用不太精密的天平时，总有微小的不等臂的因素存在。如果不考虑不等臂的影响，测量结果中就有系统误差存在。对这样的系统误差，可以通过一些灵活的实验方法或技巧加以消除。可以采取交换砝码与待测物体的左右位置后再称量一次的方法，然后用取其几何平均值的办法来消除因天平不等臂所带来的系统误差。

2. 未定系统误差的处理

实验中使用的各种仪器、仪表、各种量具，在制造时都有一个反映准确程度的极限误差指标，习惯上称之为仪器误差。该指标在仪器说明书中有明确的说明。例如 50g 的三等砝码，计量部门规定其极限误差为 2mg，即仪器误差为 2mg。仪器误差是构成测量过程中未定系统误差的重要成分。

随机误差与系统误差之间在一定条件下可以相互转化。此外，随机误差与系统误差之间的区分有时也与时间因素有关。在短时间内基本上不变的误差显然可以视为系统误差。但随着时间的推移，很难避免受外界的随机因素影响，故上述误差有可能出现随机的变化，而使本来为恒定的误差转化为随机误差。

六、实验数据的整理方法

实验除了对物理量进行测量外，有时还要研究几个物理量之间的相互关系、变化规律，以便从中找出它们之间的内在联系和确定的关系。这样，对实验数据正确记录、合理分类、画出简单的图线以及由图线上求出一些有用的参数将是非常必要的。为了这个目的，下面介绍一下实验数据处理的列表法、图示法及图解法。

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，能对大量的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,也为作图法等数据处理奠定了基础。用列表的方法记录和处理数据是一种良好的科学工作习惯,要设计出一个栏目清楚、行列分明的表格,也需要在实验中不断训练,逐步掌握、熟练,并形成习惯。

在用列表法处理数据时,应遵从如下原则:

① 栏目条理清楚,简单明了,便于显示有关物理量的关系。在表格的上方应写出表格的标题,原始数据记录表格上方要列出实验装置的几何参数以及平均水温等常数项。

② 表头栏目中,应给出有关物理量的符号,并标明单位,符号与计量单位之间用斜线“/”隔开。斜线不能重叠使用。计量单位不宜混在数字之中,造成分辨不清。

③ 填入表中的数字应是有效数字,记录的数字应与测量仪表的准确度相匹配。

④ 填入表中的主要是原始数据或处理过程中的一些重要的中间运算结果;物理量的数值较大或较小时,要用科学记数法表示。以“物理量的符号 $\times 10^{\pm n}$ /计量单位”的形式记入表头。注意表头中的 $10^{\pm n}$ 与表中的数据应服从下式:

$$\text{物理量的实际值} \times 10^{\pm n} = \text{表中数据}$$

⑤ 必要时需要加以注释说明。各种实验条件及作记录者的姓名可作为“表注”,写在表的下方。

2. 图示法

利用曲线表示被测物理量以及它们之间的变化规律,这种方法称为图示法。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。因此,图示法是处理实验数据的好方法。

实验曲线的作图程序及注意事项:

(1) 选择合适的坐标系。作图一定要用坐标系,常用的坐标系有直角坐标系、对数坐标系、极坐标系等。选用的原则是尽量让所作图线呈直线,有时还可采用变量代换的方法将图线作成直线。

(2) 确定坐标的分度和标记 一般用横轴表示自变量,纵轴表示因变量,并标明各坐标轴所代表的物理量及其单位(可用相应的符号表示)。坐标轴的分度要根据实验数据的有效数字及对结果的要求来确定。原则上,数据中的可靠数字在图中也应是可靠的,即不能因作图而引进额外的误差。在坐标轴上应每隔一定间距均匀地标出分度值,标记所用有效数字的位数应与原始数据的有效数字的位数相同,单位应与原始数据一致。要恰当选取坐标轴比例和分度值,使图线充分占有图纸空间,不要缩在一边或一角。除特殊需要外,分度值起点可以不从零开始,横、纵坐标可采用不同比例。

(3) 描点 根据测量获得的数据,用一定的符号在坐标纸上描出坐标点。一张图纸上画几条实验曲线时,每条曲线应用不同的标记,以免混淆。常用的标记符号有:※、+、×、△、□等。

(4) 连线 要绘制一条与标出的实验点基本相符的图线,图线应尽可能多地通过实验点。由于测量误差,某些实验点可能不在图线上,应尽量使其均匀地分布在图线的两侧。图线应是直线或光滑的曲线或折线。

(5) 注解和说明 应在图纸上标出图的名称,有关符号的意义和特定实验条件。如,在绘制的热导率-温度关系的坐标图上应标明“热导率-温度曲线”、“实验材料:玻璃纤

维”等。

3. 函数表示法

用一定的数学方法将实验数据进行处理,可得出实验参数的函数关系式,这种关系式也称经验公式,对研究材料性能的变化规律很有意义,所以被普遍应用。

当通过实验得出一组数据之后,可用该组数据在坐标纸上粗略地描述一下,看其变化趋势是否接近直线。如果接近直线,则可认为其函数关系是线性的,就可用线性函数关系公式进行拟合,用最小二乘法求出线性函数关系的系数。无机非金属材料有些性质有线性关系,可以用这种方法进行处理。例如,在中低温(在室温至 600°C)下,普通玻璃的线膨胀与温度呈线性关系,就可根据线性函数关系式用手工进行拟合。当然,手工拟合十分麻烦,若将拟合方法编成计算程序,将实验数据输入计算机,就可迅速得到实验结果。

对于非线性关系的数据,可将粗描的曲线与标准图形对照,再确定用何种曲线的关系式进行拟合。当然,曲线拟合要复杂得多。为了简化,在可能的条件下,可通过数学处理将数据转化为线性关系。例如,在处理测量玻璃软化点温度的数据时,将实验数据在直角坐标纸上描绘时是明显的非线性关系,但在半对数坐标纸上描绘时则呈现出线性关系,可以用最小二乘法方便地进行处理,用计算机进行快速计算。

用函数形式表达实验结果,不仅给微分、积分、外推或内插等运算带来极大的方便,而且便于进行科学讨论和科技交流。随着计算机的普及,用函数形式来表达实验结果将会得到更普遍的应用。

4. 图解法

利用图示法得到的测量量之间的关系曲线,求出有物理意义的参数,这一实验数据的处理方法称为图解法。在物理实验中遇到最多的图解法的例子是通过图示的直线关系确定该直线的参数——截距和斜率。由于有一些非线性方程,可以通过一定的数学变换化为直线方程,再由图解法确定出有用的参数,所以,研究直线关系的图解过程就显得尤为重要。

(1) 确定直线图形的斜率和截距 从数学的角度看,只要从直线上任取两点,由此两点的坐标便能确定该直线的斜率与截距。应注意的是,为了减小误差,应使这两点相距远一些。

(2) 曲线的改直 上面已经提到,当函数关系不是直线关系时,有的函数可以通过数学变换变为直线关系,然后再求出直线的截距和斜率,这一过程称为曲线的改直。

由于手工作图受到人的影响明显,故对于同一组数据,不同的人来做,结果会有明显的差异。即使是同一个人,利用同一组数据,每次作图的结果也不会完全相同。这就限制了图解法的精度。但随着计算机制图技术的发展与普及,用计算机画实验曲线已很普遍。目前流行的作图软件有很多种,常用的应用软件,如 Excel、Origin、FoxPro 等都带有作图程序。利用计算机来处理实验数据和作图,既可大大节约时间,又可提高作图的精度。

第二章 流体力学实验

实验 1 流体黏度的测定

一、实验目的

1. 掌握旋转法测定液体黏度的影响因素。
2. 了解影响牛顿型流体和非牛顿型流体黏度的因素。

二、实验原理

实验原理见图 2.1。同步电机以稳定的速度旋转，连接刻度圆盘，再通过游丝和转轴带动转子旋转。如果转子未受到液体的阻力，则游丝、指针与刻度圆盘同速旋转，指针在刻度盘上指出的读数为“0”。反之，如果转子受到液体的黏滞阻力，则游丝产生扭矩，与黏滞阻力抗衡最后达到平衡，这时与游丝连接的指针在刻度圆盘上指示一定的读数（即游丝的扭转角）。将读数乘上特定的系数即得到液体的黏度（ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ）。

三、主要仪器与试剂

J-1 型旋转式黏度计、ZWQ1 型晶体管直流电源、烧杯、温度计、聚乙烯醇。

四、实验步骤

1. 准备被测液体。将被测液体置于直径不小于 70 mm 的烧杯或直筒形容器中，准确地控制被测液体温度。

2. 将保护架装在仪器上（顺时针方向旋入装上，逆时针方向旋出卸下）。

3. 将选配好的转子旋入连接螺杆（逆时针方向旋入装上，顺时针方向旋出卸下）。旋转升降旋钮，使仪器缓慢地下降，转子逐渐浸入被测液体中，直至转子液面标志和液面相平为止，调正仪器水平。按下指针控制杆，开启电机开关，转动变速旋钮，使所需转速数向上对准速度指示点，放松指针控制杆，使转子在液体中旋转。经过多次旋转（一般 20~30s）待指针趋于稳定（或按规定时间进行读数），按下指针控制杆（注意：①不得用力过猛；②转速慢时可不利用控制杆直接读数）使读数固定下来，再关闭电机，使指针停在读数窗内，读取读数。当电机关停后如指针不处于读数窗内时，可继续按住指针控制杆，反复开启和关闭电机，经几次练习即能熟练掌握，使指针停于读数窗内，读取读数。

五、数据记录及处理

根据记录的指针读数，乘以相应的转子系数，计算出聚乙烯醇的黏度。各转速下的修正系数见表 2.1。

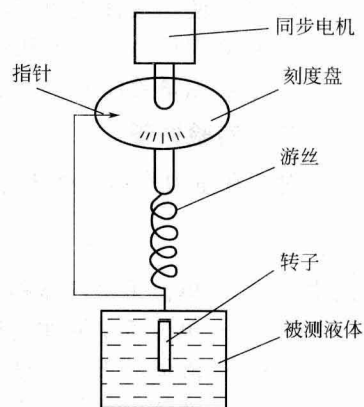


图 2.1 旋转法测定流体黏度原理