



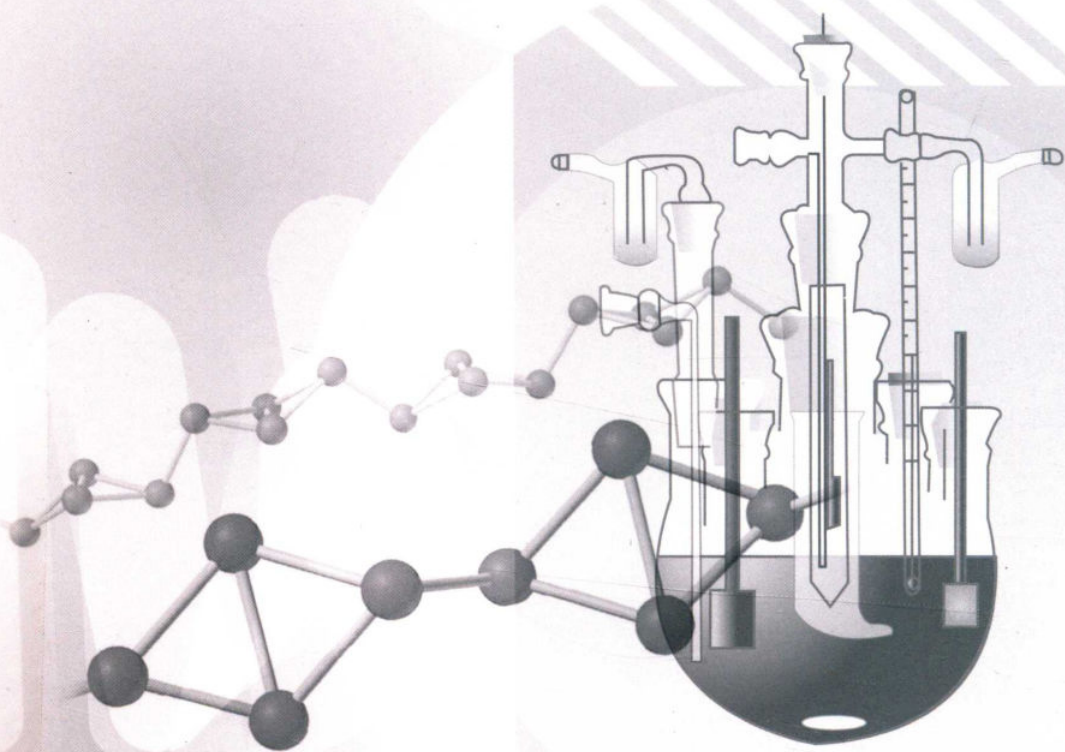
高等学校实验教材

高等学校“十三五”规划教材

物理化学实验

WULI HUAXUE SHIYAN

赵军 李国祥 主编



化学工业出版社



高等学校实验教材

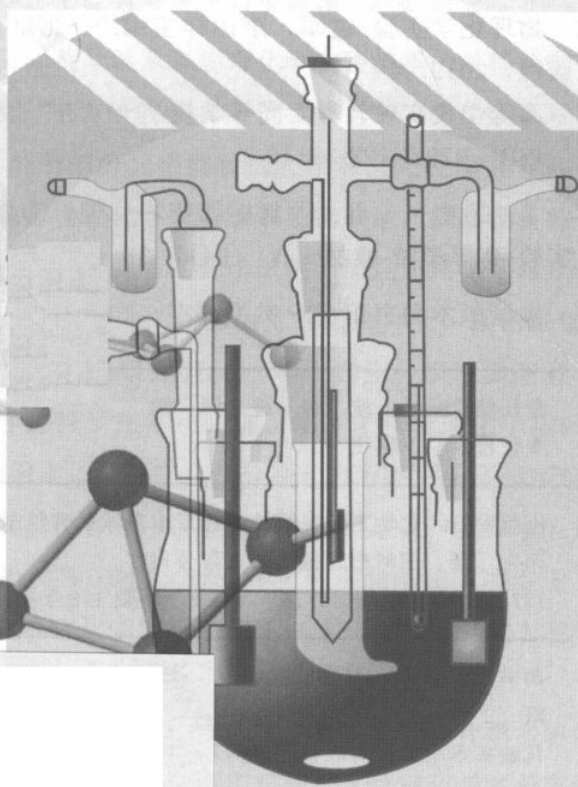
高等学校“十三五”规划教材

物理化学实验

WULI HUAXUE SHIYAN

赵军 李国祥 主编

郝占忠 谷中明 陈晓霞 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《物理化学实验》共分两部分，第一部分物理化学实验概述介绍了实验目的和要求、误差分析和数据处理、实验室安全与防护；第二部分物理化学基础实验包括化学热力学、电化学、化学动力学、胶体及表面化学、结构化学等共 15 个实验。有关物理化学实验技术，如温度测量技术、压力及真空测量技术、电化学测量技术和光学测量技术等，其相关仪器的使用方法和注意事项在各实验内容中进行介绍。附录部分为物理化学实验常用数据表。

本书可作为高等院校化学化工类各专业和其他相关专业物理化学实验课程的教材和参考书，也可供相关专业技术人员使用和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

物理化学实验/赵军, 李国祥主编. —北京: 化学工业出版社, 2019. 10

高等学校实验教材 高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-35146-3

I. ①物… II. ①赵…②李… III. ①物理化学-化学实验-高等学校-教材 IV. ①O64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 192975 号

责任编辑: 马波 杨菁 闫敏

文字编辑: 向东

责任校对: 王鹏飞

装帧设计: 张辉

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 8 字数 192 千字 2019 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

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: 26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着社会的进步、科技的发展,越来越多的新型仪器设备不断引进实验室,物理化学实验传统教材中存在仪器设备与实际应用的仪器设备不匹配的问题,给学生预习和教师授课带来诸多不便。同时,物理化学的实验内容和实验方法也发生了很大变化。

为了适应实际情况,内蒙古科技大学包头师范学院从事物理化学实验教学的教师根据长期教学实践及教改项目的研究成果,结合教学方案和教学大纲的要求,在2011年编写了《物理化学实验》讲义。该讲义在包头师范学院及部分兄弟院校的化学和应用化学等专业的几届学生中进行了试用。讲义讲解的实验原理与物理化学理论课程紧密联系,仪器设备的使用方法与实际应用的仪器设备相匹配,药品选用了无毒害的化学试剂,而且还突出了对学生基本操作、基本技能和独立实验能力的培养和锻炼。讲义内容编排上图文并茂,通俗易懂,使学生预习、操作和教师指导都非常方便,使用效果很好。2013年,在充分汲取最新教学成果和科研成果的基础上,我们对该讲义内容进行了充实和完善,编写了《物理化学实验》讲义(第二版)。随着高等院校课程改革不断深入,高校完全学分制和过程性评价逐步实施,根据最新版化学化工类专业人才培养方案,我们接着对《物理化学实验》讲义(第二版)进行了再次修订,编写了《物理化学实验》讲义(第三版)。近几年,许多化学化工类专业又添置了不少新型的物理化学实验仪器,故在《物理化学实验》讲义(第三版)的基础上我们编写了这本《物理化学实验》教材,以满足实验教学的需要。

本书由物理化学实验概述、物理化学基础实验和附录构成,概述介绍了物理化学实验的目的和要求,误差分析和数据处理,实验室安全与防护;基础实验涵盖了物理化学各分支学科的实验内容。有关物理化学实验技术,如温度测量技术、压力及真空测量技术等,其相关

仪器的使用方法和注意事项均在各实验项目中进行说明。附录列出了物理化学实验常用数据表。

本书可作为高等院校化学化工类各专业和其他相关专业物理化学实验课程的教材和参考书，也可供相关专业技术人员使用和参考。

本书由赵军、李国祥担任主编，郝占忠、谷中明、陈晓霞担任副主编。参加编写人员及分工如下：包头师范学院赵军负责全书的绘图、审核、统稿和定稿，并编写实验 2~5、7~11、13、14；郝占忠编写实验 1、6、12、15；谷中明编写第一部分的第二节、附录；王连连编写第一部分的第三节，并整理附录；张立娜编写实验 4 说明 II 中 1，实验 6 说明，实验 10 说明 II。内蒙古科技大学李国祥负责全书的内容筹划，并编写实验 2 说明，实验 4 说明 II 中 2，整理第一部分的第一节和第二节；陈晓霞编写第一部分的第一节，实验 7 说明 I 中 1；王丽编写实验 7 说明 II 中 1。

本书的编写工作得到了包头师范学院和内蒙古科技大学各级领导和物理化学课程团队的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不妥或疏漏之处在所难免，敬请读者指正。

编者

目 录

第一部分 物理化学实验概述

1

- 第一节 实验目的和要求 1
- 第二节 误差分析和数据处理 2
- 第三节 实验室安全与防护 17

第二部分 物理化学基础实验

20

- 实验 1 恒温槽的性能测试 20
- 实验 2 燃烧热的测定 24
- 实验 3 溶解热的测定 32
- 实验 4 凝固点降低法测定物质的摩尔质量 38
- 实验 5 液体饱和蒸气压的测定 45
- 实验 6 异丙醇-环己烷双液系相图的绘制 50
- 实验 7 甲基红的酸解离平衡常数的测定 55
- 实验 8 电导法测定弱电解质解离平衡常数 65
- 实验 9 电极制备及电池电动势的测定 70
- 实验 10 蔗糖水解反应速率常数的测定 76
- 实验 11 乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定 82
- 实验 12 丙酮碘化反应速率常数的测定 88
- 实验 13 溶液中的吸附作用和表面张力的测定 93
- 实验 14 黏度法测定高聚物分子量 98
- 实验 15 磁化率的测定 103

附表 1	SI 基本单位	109
附表 2	常用的 SI 导出单位	109
附表 3	一些物理和化学的基本常数	110
附表 4	单位换算表	110
附表 5	有机化合物的蒸气压	111
附表 6	部分有机化合物的密度	112
附表 7	不同温度下水的密度	112
附表 8	水在不同温度下的折射率、黏度和介电常数	113
附表 9	25℃下某些液体的折射率	114
附表 10	不同温度下水的表面张力	114
附表 11	几种溶剂的凝固点下降常数	114
附表 12	常压下某些共沸物的沸点和组成	115
附表 13	不同温度下 KCl 在水中的溶解焓	115
附表 14	某些有机化合物的标准摩尔燃烧焓	115
附表 15	25℃下乙酸在水溶液中的电离度和解离常数	116
附表 16	KCl 溶液的电导率	116
附表 17	无限稀释离子的摩尔电导率	117
附表 18	25℃下标准电极电位及温度系数	117
附表 19	高聚物溶剂体系的 $[\eta]$ - M 关系式	118
附表 20	几种化合物的磁化率	118



第一部分 物理化学实验概述

第一节 实验目的和要求

一、实验目的

- ① 使学生了解物理化学实验的基本实验方法和实验技术，学会通用仪器的操作，培养学生的动手能力。
- ② 通过实验操作、现象观察和数据处理，锻炼学生分析问题、解决问题的能力。
- ③ 加深对物理化学基本原理的理解，给学生提供理论联系实际和应用于实践的机会。
- ④ 培养学生勤奋学习、求真、求实、勤俭节约的优良品德和科学精神。

二、实验要求

1. 实验预习

学生在进实验室之前必须仔细阅读实验教材中有关的实验及基础知识，明确本次实验中测定什么量，最终求算什么量，用什么实验方法，使用什么仪器，控制什么实验条件，在此基础上，将实验目的、实验步骤、实验数据记录表和实验时应注意的事项写在预习笔记本上。

进入实验室后不要急于动手做实验，首先要查对仪器，看是否完好，发现问题及时向指导教师提出，然后对照仪器进一步预习，并接受教师的提问、讲解，在教师指导下做好实验准备工作。

2. 实验操作及注意事项

经指导教师同意方可接通仪器电源进行实验。仪器的使用要严格按照仪器操作规程进行，不可盲动。对于实验步骤，通过预习应做到心中有数，严禁“抓中药”式的操作，看一本书，动一动手。实验过程中要仔细观察实验现象，发现异常现象应仔细查明原因，或请指

指导教师帮助分析处理。实验结果必须经教师检查，数据不合格的应及时返工重做，直至获得满意结果，实验数据应随时记录在预习笔记本上，记录数据要实事求是，详细准确，且注意整洁清楚，不得任意涂改。尽量采用表格形式。要养成良好的记录习惯。实验完毕后，经指导教师签字同意后，方可离开实验室。

3. 实验报告

学生应独立完成实验报告，并在下次实验前及时送指导教师批阅。实验报告的内容包括实验目的、实验原理、实验装置简图（有时可用方块图表示）、实验步骤、数据处理、结果讨论和思考题。数据处理应有原始数据记录表和计算结果表（有时二者可合二为一），需要计算的数据必须列出算式，对于多组数据，可列出其中一组数据的算式。作图时必须按下节中数据处理部分所要求的去做，实验报告的数据处理中不仅包括表格、作图和计算，还应有必要的文字叙述。例如：“所得数据列入 $\times\times$ 表”，“由表中数据作 $\times\times-\times\times$ 图”等，以便使写出的报告更加清晰、明了、逻辑性强，便于批阅和留作以后参考。结果讨论应包括对实验现象的分析解释，查阅文献的情况，对实验结果误差的定性分析或定量计算，对实验的改进意见和做实验的心得体会等，这是锻炼学生分析问题的重要一环，应予以重视。

4. 实验室规则

- ① 实验时应遵守操作规则，遵守一切安全制度，保证实验安全进行。
 - ② 遵守纪律，不迟到，不早退，保持室内安静，不大声谈笑，不到处乱走，不许在实验室内嬉闹及恶作剧。
 - ③ 使用水、电、煤气、药品试剂等都应本着节约原则。
 - ④ 未经指导教师允许不得乱动精密仪器，使用时要爱护仪器，如发现仪器损坏，立即报告指导教师并追查原因。
 - ⑤ 随时注意室内整洁卫生，火柴杆、纸张等废物只能丢入废物缸内，不能随地乱丢，更不能丢入水槽，以免堵塞。实验完毕将玻璃仪器洗净，把实验桌打扫干净，公用仪器、试剂药品等都整理整齐。
 - ⑥ 实验时要集中注意力，认真操作，仔细观察，积极思考，实验数据要及时如实详细记在预习笔记本上，不得涂改和伪造，如有记错可在原数据上画一杠，再在旁边记下正确值。
 - ⑦ 实验结束后，由同学轮流值日，负责打扫整理实验室，检查水、气瓶、门窗是否关好，电闸是否拉掉，以保证实验室的安全。
- 实验室规则是人们长期从事化学实验工作的总结，它是保持良好环境和工作秩序，防止意外事故，做好实验的重要前提，也是培养学生优良素质的重要措施。

第二节 误差分析和数据处理

由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响、人的观察力、测量程序等限制，实验观测值和真值之间总是存在一定的差异，在数值上即表现为误差。为了提高实验的精度，缩小实验观测值和真值之间的差值，需要对实验数据误差进行分析和讨论。

通过误差分析，可以认清误差的来源及影响，使我们有可能预先确定导致实验总误差的最大组成因素，并设法排除数据中所包含的无效成分，进一步改进实验方案。实验数据误差分析也提醒我们注意主要误差来源，精心操作，使研究的准确度得以提高。下面首先简要介绍有关误差的几个基本概念。

一、基本概念

1. 真值与平均值

(1) 真值 真值是指某物理量客观存在的确定值，它通常是未知的。虽然真值是一个理想的概念，但对某一物理量经过无限多次的测量，出现的误差有正、有负，而正负误差出现的概率是相同的。因此，若不存在系统误差，它们的平均值相当接近于这一物理量的真值。故真值等于测量次数无限多时得到的算术平均值。由于实验工作中观测的次数是有限的，由此得出的平均值只能近似于真值，故称这个平均值为最佳值。

(2) 平均值 设 x_1, x_2, \dots, x_n 为各次测量值， n 为测量次数，则化学、化工中常用的平均值有：

① 算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

② 均方根平均值

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

③ 几何平均值

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$$

④ 对数平均值

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}}$$

对数平均值多用于热量和质量传递中，当 $x_1/x_2 < 2$ 时，可用算术平均值代替对数平均值，引起的误差不超过 4.4%。

以上介绍的各类平均值，目的是要从一组测量值当中找出最接近真值的量值。从上可知，平均值的选择主要取决于一组测量值分布的类型。在化学、化工实验和科学研究中，数据的分布多属于正态分布，故多采用算术平均值，可以证明算术平均值即为一组等精度测量的最佳值或最可信赖值。

2. 误差的分类

误差是实验观测值（包括间接测量值）与真值（客观存在的准确值）之差，偏差是指实验观测值与平均值之差，但习惯上常将两者混用而不加区别。误差分为下面三类。

(1) 系统误差 在相同条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时，按某一确定规律变化的误差，其产生的原因有：

① 方法误差：如使用近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。

② 装置和试剂误差：如仪器设计上的缺点，未经校准，零件制造不标准，安装不正确，温度计刻度不准。对于化学实验还包括由药品纯度、产地及批次等所产生的误差。

③ 主观误差：操作者的习惯偏向引起的误差，如观察视线偏高或偏低，或动态测量时的滞后现象等。

④ 环境误差：外界温度、湿度及压力变化引起的误差。如温度的变化将影响物体的长

度和导线的电阻；大气压的变化将影响溶液的沸点；温度的变化将影响测量仪器而产生系统误差等。

对于系统误差，单纯增加实验次数是无法减少的，因为它在反复测定的情况下常保持同一数值与同一符号，故也称为常差。系统误差有固定的偏向和确定的规律，通过改变实验条件可以发现系统误差的存在，可按原因采取相应的措施给予校正或用公式消除。

(2) 过失误差（或粗差）这是一种明显歪曲实验结果的误差。它无规律可循，是由实验人员粗心大意如读数错误、记录错误或操作失误所引起。这类误差与正常值相差较大，应在整理数据时加以剔除。

(3) 偶然误差（随机误差）由一些不易控制的因素引起，如测量值的波动（如大气压、温度的波动），肉眼观察误差（例如对仪器最小分度以内的读数难以读准确等）等。偶然误差与系统误差不同，其误差的数值和符号不确定，不能从实验中消除，但它服从统计规律，其误差与测量次数有关。随着测量次数的增加，出现的正负误差可以相互抵消，故多次测量的算术平均值接近于真值。

① 偶然误差的统计特征。经过了大量的测量和分析，发现偶然误差具有如下的特点。

对称性：绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。

单峰性：绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小，即绝对值小的误差较绝对值大的误差出现的次数多。

有界性：绝对值很大的误差出现的概率趋近于零，也就是误差值有一定的实际极限。

抵偿性：当测量的次数趋于无穷时，误差的算术平均值趋于零，这是由于正负误差相互抵消的结果。

互斥性：每次测量中只能有一个偶然误差存在，不可能在一次测量中有两个偶然误差，所以误差是互不相容的事件。

独立性：在一次测量中偶然误差的出现并不会影响另一次测量所产生的偶然误差，它们之间相互独立，没有关联。

② 偶然误差的分布规律——正态分布曲线。在经过大量测量数据的分析后，发现它是服从正态分布的，即

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

式中， x 为实测值与真值之差； σ 为标准误差； $f(x^2)$ 为误差函数，是高斯于 1795 年发现的函数形式，称为高斯误差分布定律，其误差正态分布曲线如图 1-1 所示。

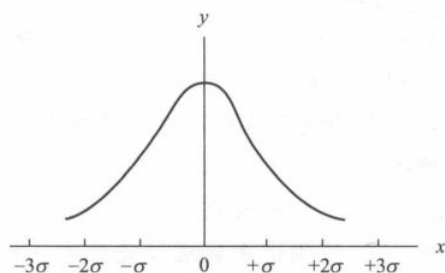


图 1-1 误差正态分布曲线

由数理统计的方法可知：误差在 $\pm\sigma$ 内的测量值出现的概率为 68.3%，在 $\pm 2\sigma$ 内的测量值出现的概率为 95.5%，在 $\pm 3\sigma$ 内的测量值出现的概率为 99.7%，由此可见误差超过 $\pm 3\sigma$ 的出现概率只有 0.3%。因此如果多次重复测量中个别数据的误差之绝对值大于 3σ ，则这个极端值可以舍去。严格地说，这是指测量达到一百次以上时方可如此处理，但可粗略地用于 15 次以上的测量。对于 10~15 次时可用 2σ ，若测量次数再少，应酌情递减。

上式也可写为：

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \exp(-h^2 x^2)$$

式中， h 为精密度指数， $h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}$ 。

此式代表的物理含义是：标准误差 σ 的数值越大，则精密度指数 h 越小，一组测量的数据越分散；反之 σ 越小则 h 越大，数据越集中。也就是说真值的大小不影响曲线的形状，它主要由总体的标准偏差 σ 决定，如图 1-2 所示。

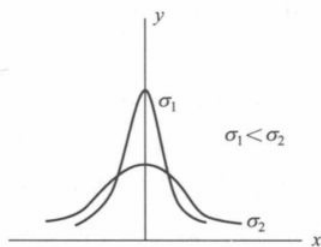


图 1-2 真值相同时，标准偏差对分布的影响

例：相同条件下对某温度测量 15 次，测量值列入表 1-1。试问第 8 次测量值是否应予剔除。

表 1-1 相同条件下某温度测量值

i	x_i	d_i	d_i^2
1	20.42	0.02	0.0004
2	20.43	0.03	0.0009
3	20.40	0.00	0.0000
4	20.43	0.03	0.0009
5	20.42	0.02	0.0004
6	20.43	0.03	0.0009
7	20.39	-0.01	0.0001
8	20.30	-0.10	0.0100
9	20.40	0.00	0.0000
10	20.43	0.03	0.0009
11	20.42	0.02	0.0004
12	20.41	0.01	0.0001
13	20.39	-0.01	0.0001
14	20.39	-0.01	0.0001
15	20.40	0.00	0.0000
	$\bar{x} = 20.40$		$\sum_{i=1}^{15} d_i^2 = 0.0152$

由表中数据计算：

$$3\sigma = 3 \times \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} = 3 \times \sqrt{\frac{0.0152}{14}} = 3 \times 0.033 = 0.099$$

第 8 点的偏差为： $|d_8| = |x_8 - \bar{x}| = |20.30 - 20.40| = 0.10 > 0.099$

所以第 8 点应予剔除。剔除后， $\sum_{i=1}^{15} d_i^2 = 0.0052$

$$3\sigma = 3 \times \sqrt{\frac{0.0052}{13}} = 3 \times 0.02 = 0.06$$

所剩 14 个点的偏差均不超过 0.06, 故不必再剔除。

3. 准确度、精密度和精确度

(1) 准确度 表示观测值和真值接近的程度。在一组测量中如果系统误差很小, 可以说测量结果是相当准确的。测量(或加工制造或计算)的准确度是由系统误差来表征和描述。系统误差越小则表示测量的准确度越高。如果实验的相对误差为 0.01% 且误差由系统误差引起, 则可以认为准确度为 10^{-4} 。

(2) 精密度 表示各观测值相互接近的程度。在一组测量中如果数据比较稳定, 分散性小, 我们就称测量结果是精密的。测量(或加工制造或计算)的精密度是由偶然误差来表征和描述的。偶然误差越小则表示测量的精密度越高, 表明测量的重复性就越好。如果实验的相对误差为 0.01% 且误差由偶然误差引起, 则可以认为精密度的精度为 10^{-4} 。

(3) 精确度 在测量(或加工制造或计算)中, 如果系统误差小, 偶然误差也小, 则这组测量的准确度和精密度也越好。这时我们称这组测量的精确度高。所以精确度是由系统误差和偶然误差两个共同来表征和描述的。若实验的相对误差为 0.01% 且误差由系统误差和偶然误差共同引起, 则可以认为精确度为 10^{-4} 。

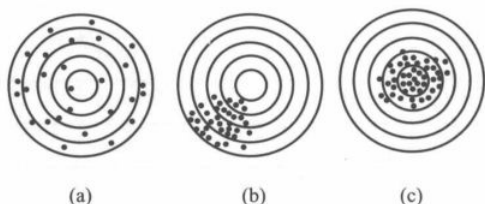


图 1-3 准确度、精密度、精确度之间的关系

图 1-3(c) 精密度、准确度和精确度皆高。

4. 误差的表示方法

(1) 算术平均误差 算术平均误差的定义为:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

式中 n ——测量次数;

x_i ——测量值, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

\bar{x} ——测量值的算术平均值, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$;

d_i ——测量值与算术平均值之差的绝对值(偏差), $d_i = |x_i - \bar{x}|$ 。

算术平均误差的缺点是无法表示出各次观测之间彼此符合的程度。若有两组测量, 尽管它们计算的算术平均误差相等, 但它们的偏差 $d_i = |x_i - \bar{x}|$ 可以不一样, 即一组的偏差 d_i 比较接近, 而另一组的偏差 d_i 则可能比较分散。

(2) 标准误差(均方误差) 对有限测量次数, 标准误差表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

标准误差是目前最常用的一种表示精确度的方法, 它不但与一系列测量值中的每个数据有关, 而且对其中较大的误差或较小的误差敏感性很强, 能较好地反映实验数据的精确度。

实验愈精确，其标准误差愈小。在误差理论的研究中已被广泛运用。

(3) 绝对误差 它表示了测量值与真值的接近程度，即测量的准确度。其定义是：测量值与真值之差的绝对值。在实际工作中常以最佳值代替真值，测量值与最佳值之差称为残余误差，习惯上也称为绝对误差。

设测量值用 x 表示，真值用 X 表示，则绝对误差 D 为

$$D = |X - x|$$

式中，真值 X 一般为未知，用平均值代替。

如在实验中对物理量的测量只进行了一次，可根据测量仪器出厂鉴定书注明的误差，或取测量仪器最小刻度值的一半作为单次测量的误差。如某压力表精（确）度为 1.5 级，即表明该仪表最大误差为相当挡次最大量程的 1.5%，若最大量程为 0.4MPa，该压力表的 最大误差为： $0.4 \times 1.5\% = 0.006\text{MPa}$ 。

化学化工实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒等仪表原则上均取其最小刻度值为最大误差，而取其最小刻度值的一半作为绝对误差计算值。

(4) 相对误差 它表示测量值的精密度，即各次测量值相互靠近的程度。其定义是：绝对误差 D 与真值的绝对值之比，称为相对误差：

$$\epsilon = \frac{D}{|X|}$$

二、误差分析

测量分为直接测量和间接测量两种，一切简单易得的量均可直接测得，如用米尺量物体的长度，用温度计测量体系的温度等。对于较复杂不易直接测得的量，可直接测定简单量，而后按照一定的函数关系将它们计算出来。

例如：测量热计温度变化 ΔT 和样品质量 W ，代入公式 $\Delta H = C\Delta T \frac{M}{W}$ ，就可求出溶解热 ΔH ，于是直接测量的 ΔT 、 W 的误差，就会传递给 ΔH 。下面给出了误差传递的定量公式。通过间接测量结果误差的求算，可以知道哪个直接测量值的误差对间接测量结果影响最大，从而可以有针对性地提高测量仪器的精度，获得好的结果。

1. 系统误差的计算

设有函数 $y = F(x_1, x_2)$ ，其中 x_1, x_2 为可以直接测量的量。则

$$dy = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)_{x_2} dx_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)_{x_1} dx_2$$

此为误差传递的基本公式。若 Δy 、 Δx_1 、 Δx_2 为 y 、 x_1 、 x_2 的测量误差，且设它们足够小，可以代替 dy 、 dx_1 、 dx_2 ，则得到具体的简单函数及其误差的计算公式，见表 1-2。

表 1-2 某些函数的误差传递公式

函数关系	最大绝对误差 Δy	最大相对误差 δ_r
$y = x_1 + x_2$	$\pm(\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm\left(\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 + x_2}\right)$
$y = x_1 - x_2$	$\pm(\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm\left(\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 - x_2}\right)$

函数关系	最大绝对误差 Δy	最大相对误差 δ_r
$y = x_1 x_2$	$\pm (x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 }{x_1} + \frac{ \Delta x_2 }{x_2} \right)$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\pm \left(\frac{x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 }{x_2^2} \right)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 }{x_1} + \frac{ \Delta x_2 }{x_2} \right)$
$y = x^n$	$\pm (n x^{n-1} \Delta x)$	$\pm \left(n \frac{\Delta x}{x} \right)$
$y = \ln x$	$\pm \left(\frac{\Delta x}{x} \right)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x }{x \ln x} \right)$

2. 标准误差计算

若 $y = f(x_1, x_2)$, x_1 、 x_2 的标准误差分别为 σ_{x_1} 、 σ_{x_2} , 则函数 y 的标准误差为

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2}$$

部分函数的标准误差传递公式如表 1-3 所示。

表 1-3 部分函数的标准误差传递公式

函数关系	绝对误差	相对误差
$y = x_1 \pm x_2$	$\pm \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$	$\pm \frac{1}{ x_1 \pm x_2 } \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$
$y = x_1 x_2$	$\pm \sqrt{x_2^2 \sigma_{x_1}^2 + x_1^2 \sigma_{x_2}^2}$	$\pm \sqrt{\frac{\sigma_{x_1}^2}{x_1^2} + \frac{\sigma_{x_2}^2}{x_2^2}}$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\pm \frac{1}{x_2} \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \frac{x_1^2}{x_2^2} \sigma_{x_2}^2}$	$\pm \sqrt{\frac{\sigma_{x_1}^2}{x_1^2} + \frac{\sigma_{x_2}^2}{x_2^2}}$
$y = x^n$	$\pm n x^{n-1} \sigma_x$	$\pm \frac{n}{x} \sigma_x$
$y = \ln x$	$\pm \frac{\sigma_x}{x}$	$\pm \frac{\sigma_x}{x \ln x}$

三、有效数字及科学计数法

1. 有效数字

在科学与工程中,任何测量结果或计算的量,总是表现为数字,而这些数字就代表了所测量物理量的近似值。究竟对这些近似值应该取多少位数合适呢?应根据测量仪表的精度来确定,一般应记录到仪表最小刻度的十分之一位。该位数值为仪器最小刻度以内的估计值,称为可疑值,其他几位为准确值,这样一个数字称为有效数字,它的位数不可随意增减。

例如:普通 50mL 的滴定管,最小刻度为 0.1mL,则记录 26.55mL 是合理的;记录 26.5mL 和 26.556mL 都是错误的,因为它们分别缩小和夸大了仪器的精确度。

例如:某液面计标尺的最小分度为 1mm,则读数可以到 0.1mm。如在测定时液位高在刻度 524mm 与 525mm 的中间,则应记液面高为 524.5mm,其中前三位是直接读出的,是

准确的，最后一位是估计的，是欠准的，该数据为4位有效数。如液位恰在524mm刻度上，该数据应记为524.0mm，若记为524mm，则失去一位（末位）欠准数字。当液位高度为524.5mm时，最大误差为±0.5mm，也就是说误差为末位的一半。

总之，有效数字中有且仅有一位（末位）欠准数字。

2. 科学记数法

为了方便地表达有效数字位数，一般用科学记数法记录数字，即将有效数字写出并在第一位数后加小数点，而数值的数量级由10的整数幂来确定，这种以10的整数幂来记数的方法称科学记数法。

例如0.000567可写为 5.67×10^{-4} ，有效数字为三位；10680可写为 1.0680×10^4 ，有效数字是五位，如此等等。紧接小数点后用来表达小数点位置的零不计入有效数字位数。

3. 有效数字的运算

在间接测量中，需通过一定公式将直接测量值进行运算，运算中对有效数字位数的取舍应遵循如下规则：

① 误差一般只取一位有效数字，最多两位。

② 有效数字的位数越多，数值的精确度也越大，相对误差越小。

例如： $(1.35 \pm 0.01)\text{m}$ ，三位有效数字，相对误差0.7%。

例如： $(1.3500 \pm 0.0001)\text{m}$ ，五位有效数字，相对误差0.007%。

③ 若第一位的数值等于或大于8，则有效数字的总位数可多算一位，如9.23虽然只有三位，但在运算时，可以看作四位。

④ 运算中舍弃过多不定数字时，应用“4舍6入，逢5尾留双”的法则，如有下列两个数值：9.435、4.685，整化为三位数，根据上述法则，整化后的数值为9.44与4.68。

⑤ 在加减运算中，各数值小数点后所取的位数，以其中小数点后位数最少者为准。

例如： $56.38 + 17.889 + 21.6 = 56.4 + 17.9 + 21.6 = 95.9$

⑥ 在乘除运算中，各数值保留的有效数字，应以其中有效数字最少者为准。例如：

$$1.436 \times 0.020568 \div 85$$

其中85的有效数字最少，由于首位是8，所以可以看成三位有效数字，其余两个数值也应保留三位，最后结果也只保留三位有效数字。即：

$$\frac{1.44 \times 0.0206}{85} = 3.49 \times 10^{-4}$$

⑦ 在乘方或开方运算中，结果可多保留一位。

⑧ 对数运算时，对数中的首数不是有效数字，对数的尾数的位数，应与各数值的有效数字相当。例如：

$$[\text{H}^+] = 7.6 \times 10^{-4} \quad \text{pH} = 3.12 \quad (2 \text{ 位有效数字})$$

$$K = 3.4 \times 10^9 \quad \lg K = 9.35 \quad (2 \text{ 位有效数字})$$

⑨ 算式中，常数 π 、 e 及某些取自手册的常数，如阿伏伽德罗常数、普朗克常数等，不受上述规则限制，其位数按实际需要取舍。

四、数据处理

物理化学实验数据的表示法主要有如下三种方法：列表法、作图法和数学方程式法。

1. 列表法

将实验数据列成表格，排列整齐，使人一目了然。它显示了各变量之间的对应关系，反映变量之间的变化规律，是描绘曲线的基础。这是数据处理中最为简单的方法，列表时应注意以下几点。

① 表格要有简明而又完备的名称。

② 每行（或列）的开头一栏都要列出物理量的名称和单位，并把二者表示为相除的形式。因为物理量的符号本身是带有单位的，除以它的单位，即等于表中的纯数字。

③ 数字要排列整齐，小数点要对齐，公共的乘方因子应写在开头一栏与物理量符号相乘的形式，并为异号。

④ 表格中表达的数据顺序为：由左到右，由自变量到因变量，可以将原始数据和处理结果列在同一表中，但应以一组数据为例，在表格下面列出算式，写出计算过程。

2. 作图法

作图法可更形象地表达出数据的特点，如极大值、极小值、拐点等，并可进一步用图求解积分、微商、外推值、内插值。作图应注意如下几点。

① 图要有图名。

② 要用市售的正规坐标纸，并根据需要选用坐标纸种类：直角坐标纸、三角坐标纸、半对数坐标纸、对数坐标纸等。物理化学实验中一般用直角坐标纸，只有三组分相图使用三角坐标纸。

③ 在直角坐标中，一般以横轴代表自变量，纵轴代表因变量，在轴旁需注明变量的名称和单位（二者表示为相除的形式），10的幂次以相乘的形式写在变量旁，并为异号。

④ 适当选择坐标比例，以表达出全部有效数字为准，即最小的毫米格内表示有效数字的最后一位。每厘米格代表1、2、5为宜，切忌3、7、9。如果作直线，应正确选择比例，使直线呈45°倾斜为好。

⑤ 坐标原点不一定选在零，应使所作直线与曲线匀称地分布于图面中。在两条坐标轴上每隔1cm或2cm均匀地标上所代表的数值，而图中所描各点的具体坐标值不必标出。

⑥ 描点时，应用细铅笔将所描的点准确而清晰地标在其位置上，可用○、△、□、×等符号表示，符号总面积表示了实验数据误差的大小，所以不应超过1mm格。同一图中表示不同曲线时，要用不同的符号描点，以示区别。

⑦ 作曲线时，应尽量多地通过所描的点，但不要强行通过每一个点。对于不能通过的点，应使其等量地分布于曲线两边，且两边各点到曲线的距离之平方和要尽可能相等。描出的曲线应平滑均匀。

⑧ 图解微商。图解微商的关键是作曲线的切线，而后求出切线的斜率值，即图解微商值。作曲线的切线可用如下两种方法。

a. 镜像法。取一平面镜，使其垂直于图面，并通过曲线上待作切线的点 P （图1-4），然后让镜子绕 P 点转动，注意观察镜中曲线的影像，当镜子转到某一位置，使得曲线与其影像刚好平滑地连为一条曲线时，过 P 点沿镜子作一直线即为 P 点的法线，过 P 点再作法线的垂线，就是曲线上 P 点的切线。若无镜子，可用玻璃棒代替，方法相同。

b. 平行线段法。如图1-5所示，在选择的一段曲线上作两条平行线 AB 及 CD ，然后连接 AB 和 CD 的中点 PQ 并延长相交曲线于 O 点，过 O 点作 AB 、 CD 的平行线 EF ，则 EF 就是曲线上 O 点的切线。